DONGFANG ELECTRIC REVIEW

公开 ISSN 1001-9006 第38卷第5期(总第153期) 国内邮发代号：62-187
发行 CN 51-1333/TM 出版日期:2024年9月25日 国 内 定 价：8.00 元

东方电气评论 第三十八卷 第五期 二〇二四年九月

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

5

2024

第38卷 总第153期

東方電氣評論

DONG FANG DIAN QI PING LUN

- 中国发电设备专业技术期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源
- 《万方数据-数字化期刊群》全文收录
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源
- 《中文科技期刊数据库》（维普网）全文收录
- 《中国期刊全文数据库(CJFD)》全文收录
- 《超星期刊域出版平台》全文收录

打造能源装备领域的新质生产力专刊

ISSN 1001-9006
09>
9 771001 900248

中国东方电气集团有限公司
四 川 省 动 力 工 程 学 会 主办

5
2024
第38卷第5期 总第153期
（双月刊，1987年创刊）

東方電氣評論

目 次

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*b*A4*88*zh*p¥8.00*750*16*2024-05

主管：中国东方电气集团有限公司
主办：中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会
主编：胡修奎
副主编：董娜 唐健
本期责任编辑：张媛
英文编辑：李宏
编辑出版：《东方电气评论》编辑部
地址：成都市高新西区西芯大道18号
邮编：611731
电话：028-87898263
传真：028-87898267
电子信箱：dfdqpl@dongfang.com
印刷单位：成都金恒信印务有限公司
国内发行：四川省报刊发行局
国外发行：中国出版对外贸易总公司北京782信箱

DONGFANG ELECTRIC REVIEW

5
2024
2024-9-25 Vol.38 No.5
(Bimonthly, since 1987)

CONTENTS

Sponsor: Dongfang Electric Corporation
Chief Editor: HU Xiukui
Vice Chief Editors: DONG Na, TANG Jian
Executive Editor:ZHANG Yuan
English Editor: LI Hong
Edited and Published by:
Editorial Department of Dongfang Electric Review
No. 18 Xi Xin Avenue, Gao Xin Xi District, Chengdu, Sichuan, P. R. China

Postal Code: 611731

Tel: 028-87898263 **Fax:** 028-87898267

E-mail: dfdqpl@dongfang.com

Overseas Distrbution by:
China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C.)

主编寄语

新质生产力是创新起主导作用，具有高科技、高效能、高质量特征，符合新发展理念的先进生产力质态。构建能源领域新质生产力，加快新型能源体系建设不仅是能源高质量发展的内在要求，也是能源绿色低碳转型的核心任务。当前，伴随大批新能源项目集中开工，储能、氢能、虚拟电厂等新业态布局力度加大，新型能源体系正在加快建设步伐，能源新质生产力在实践中加速形成。

为此，《东方电气评论》特别策划了“打造能源装备领域的新质生产力”专刊，并得到了能源制造装备与应用领域各专家学者、科技工作者的大力支持。本期专刊内容涵盖“碳达峰”“碳中和”的基础理论、可再生能源发电、能源装备制造与优化及电力电子与控制等四大方面主题，为能源领域技术开发、研究设计、生产制造等提供关于生产力技术创新的理论知识、工程实践及制造优化的应用发展信息，为推动我国新质生产力发展，积极培育战略性新兴产业和未来产业，提供有益参考与技术理论支撑。

感谢参与本次专刊出版的作者、评审专家以及《东方电气评论》编辑部所有工作人员的鼎力支持和辛勤付出！

新型电力系统发展背景下碳捕集与利用技术的挑战及策略

张彤昀[1] 杜文韬[1] 庄原发[1,2]

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001；2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731

摘要：构建低碳环保、安全高效的新型电力系统是实现“30·60”伟大目标的重要举措。电力行业作为我国国民能源经济的支柱产业，煤消耗量占全国总量的一半以上，是碳减排行动的主战场。目前，我国电力供应体系仍以火电为主导，短期内对煤炭能源的依赖性依然显著。因此，推进煤炭发电过程与碳捕集及利用（CCU）技术的有效耦合具有重要现实意义。首先对新型电力系统的核心内涵与构建方向展开讨论，并在此基础上，分析碳中和背景下新型电力系统所面临的机遇与挑战，以期为 CCU 技术进步及新型电力系统的未来发展提供建议。从战略上看，新型电力系统以“清洁低碳”为核心目标，结合新能源技术发展现状，深化 CCU 技术特别是实现二氧化碳捕集与大规模经济性利用一体化对于推动社会经济发展和“双碳”目标实现均具有长远意义，其关键在于加强能源与化工领域现代工程技术及前沿/颠覆性技术的系统性认识与创新发展。

关键词：新型电力系统；新质生产力；新能源；碳捕集及利用（CCU）；清洁高效

中图分类号：X701 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）05-0002-11

Challenges and Strategies of Carbon Capture and Utilization Technology in the Context of the New Power Systems Development

ZHANG Tongyun[1], *DU Wentao*[1], *ZHUANG Yuanfa*[1,2]

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China;

2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: Constructing a low-carbon, environmentally friendly, safe, and efficient new power system is the important measure to realize the great goal of ‘30·60’. The power industry, as the pillar industry of China's national energy economy, consumes over half of the total coal resource, and is the primary field of carbon emission reduction. Currently, the thermal power still dominates China’s electric power supply, and will maintain a high dependence on coal energy in short term. Therefore, it is of great practical significance to promote the effective coupling of coal power generation process and carbon capture and utilization (CCU) technology. In this work, the core connotation and construction direction of the new power system are discussed, and based on which, the opportunities and challenges faced by the new power system under the background of carbon neutrality are expounded, aiming to provide suggestions for the future development of CCU technology and new power system. From a strategic point of view, for the new power system with "clean and low carbon" as the core goal, combined with the current development of new energy technologies, promoting the CCU technology, especially the integration of CO_2 capture and large-scale economic carbon utilization, is of great significance for social economic development and the achievement of the "dual carbon" goals. The key lies in strengthening the systematic understanding and innovative development of modern engineering technologies and cutting-edge/disruptive technologies in the fields of energy and chemical engineering.

Key words: new power systems; new quality productive forces; new energy; carbon capture and utilization (CCU); clean and efficient

收稿日期：2024-06-21

作者简介：张彤昀 (1995－)，男，2023 年毕业于西北大学化学工程专业，博士，工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术创新中心，主要从事大气治理研究方向污染物脱除及碳捕集利用工作。

能源是工业的粮食，能源保障和安全事关国计民生。自工业革命以来，全球能源结构经历了持续、深刻的调整与变革，但化石能源在世界能源结构中仍占相当比例（图 1）。

2022 年，全球一次能源消费 206 亿 t 标准煤，化石能源占比约 81.8 %。2023 年，全球能源相关的二氧化碳排放再创新高，达 374 亿 t，同比增长 1.1 %，煤炭燃烧排放占同期碳排放增量的 65 %以上。[2]

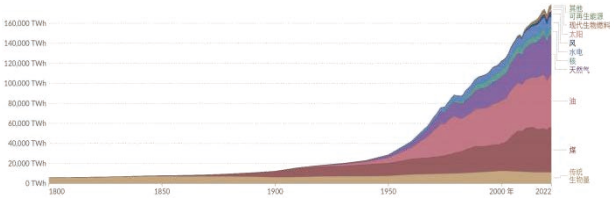


图 1　1800~2022 年全球一次能源消费来源结构趋势[1]

我国 2022 年能源消费总量 54.1 亿 t 标准煤，其中煤炭占比 56.2 %[3]，煤炭消费产生的 CO_2 排放约 86 亿，占全国碳排放总量的 70 %。[4]截至 2023 年底，我国能源消费量达 57.2 亿 t 标准煤（同比增长 5.7 %），其中清洁能源消费量约占 26.4 %，可再生能源发展迅速。但是，同期我国煤炭消费量占能源消费总量的比重仍达到 55.3 %，短期内煤炭产业的高需求量依然是保障我国能源安全和经济平稳发展的主体因素。

在“双碳”目标和能源转型的压力下，能源结构由高碳向低碳转型成为关键，这一过程中电力领域扮演着至关重要的角色。2023 年，国务院印发的《空气质量持续改善行动计划》提出，到 2025 年电能占终端能源消费比重达 30 %左右。[5]能源系统电气化进程显著，电力需求仍在持续强力增长。当前我国火电仍保持装机容量占比高、发电量占比大的主导作用，这导致电力行业碳减排面临的挑战日益严峻。

因此，推进电力系统的清洁高效运转、提前实现零碳甚至负碳的排放水平对于能源结构转型尤为重要。本文首先对新型电力系统的核心理念与发展趋势展开讨论，进而对电力系统深度脱碳与产业发展现状进行阐述和分析，并就适应新型电力系统的二氧化碳捕集与高效转化策略进行深入思考与探讨。

1　新型电力系统发展与内涵

1.1 我国电力系统发展现状及挑战

我国是当前世界上新能源装机规模最大、发展速度最快的国家。2021 年 10 月，习近平总书记在讲话中提出，“中国将持续推进产业结构和能源结构调整，大力发展可再生能源”。根据国际可再生能源署（IRENA）报告[6]，2023 年全球可再生能源新增装机量达 473.4 GW，在新增电力总装机中占比 86 %，其中太阳能光伏新增 345.5 GW；中国贡献 297.6 GW，占全球新增的 62.9 %。

我国电力低碳转型的核心是构建可再生能源主导的新型电力系统。但新能源出力的随机性及波动性导致新能源消纳困难、调节备用压力大、系统匹配的调节和安全成本高等问题突出，安全–经济–环境的“矛盾三角形”将持续存在。因此，充分协调源荷储可调度资源实现新能源消纳对电力系统低碳化运行尤为重要。[7]

源侧方面，传统火电机组碳排放显著。碳捕集机组作为能源转型的过渡选择，能显著减少当前场景下源侧碳排放量。其灵活运行模式不仅低碳，还具备宽调节范围的优势，在负荷低谷时期能以低净输出功率运行，促进新能源消纳。[8]“碳中和、碳达峰”目标已成为我国中长期发展的重要理论方针，构建清洁低碳安全高效的能源体系是我国当前能源革命的内核。碳捕集与利用（CCU）技术在赋能深度脱碳方面将发挥核心作用。

1.2 新型电力系统内涵与展望

2021 年，习近平总书记首次提出“深化电力体制改革，构建以新能源为主体的‘新型电力系统”，极大地促进了电力行业对构建新型电力系统的探索。

国家电网公司阐述了以新能源为主体的新型电力系统内涵，即以“清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动”为基本特征，低碳是

演进路径，零碳是最终目标。[9]国家能源局提出，新型电力系统的四大重要特征在于“安全高效、清洁低碳、柔性灵活、智慧融合”，共建“四位一体”框架体系。其中，“清洁低碳”是新型电力系统构建的核心目标。[10]

新型电力系统是现代中国能源安全保障与实现双碳发展目标的重要载体，是清洁低碳、安全高效能源体系的重要组成。能源安全与双碳目标对新型电力系统提出更明确要求，即以多元化稳定供能、全面系统的灵活调节能力有序应对需求端能源供应。电力系统的安全稳定运行，需要以对冲可再生能源风险为核心，精准规划电源配置。“绿电+储能”和“煤电+CCU”是当前新型电力系统保障能源稳定供应的有效方案。储能是电力系统的“充电宝”，当前世界上储能市场以抽水蓄能为主（超过 70 %），但受地理条件等影响，难以大规模建设。新型储能（除抽水蓄能外）技术中，锂离子电池储能技术最成熟、最具应用前景，然而其经济性不容乐观，与满足大规模商业化布局的水平尚有差距。采用“煤电+CCU”技术为新能源储能减轻压力被认为是“未来清洁电力系统实现碳中和不可或缺的角色”。[11]考虑到未来煤电将逐步退出历史舞台的背景下（届时，煤炭产业的设备建设、配置等相关固定成本将逐渐失去价值，趋于零化），煤电耦合 CCU 技术将实现低成本、灵活性煤电系统改造与再利用，有效助力新型电力系统建设。[12]

BP 能源展望报告显示[13]，低碳能源和 CCUS（碳捕集利用与存储）技术的使用将推动电力行业在“快速转型情景”下，到 2035 年碳减排约 55 %，到 2050 年基本零碳。当前，这一转变主要由美国、英国、加拿大等欧美发达国家及澳大利亚、中国等引领，而未来新兴经济体将迎头赶上，生物能源应用增多，配合 CCUS 技术，有望使电力行业在 2050 年实现负排放。

2 碳中和背景下新型电力系统带来新机遇与挑战

2.1 电力系统创新与新质生产力

新型电力系统要求多种能源应用实现融合，为节能环保技术的整合开辟了新道路。以电力和交通运输为例，东方电气集团东方锅炉股份有限公司（以下简称“东锅”）氢能全产业链科技创新应用实现了燃料电池在氢能重卡、氢能公交等的实践。同时，与电力市场密切相关的新兴商业模式正在崭露头角，包括储能储热及储氢等为主的低碳综合能源产业、智慧赋能的现代服务产业等。目前，东锅中标华北电力大学熔盐—蒸汽发生系统试验平台 EPC 项目，成功拓展了熔盐储热在新型能源体系中的应用场景。

新质生产力源于技术革命、生产要素创新配置和产业深度转型升级。电力系统产业创新需要与新的市场因素相衔接，实现精准的产业定位，引入新的运营实践和智能电网技术。目前，已确认的电力系统创新类型约有 30 种（图 2），涉及数百个独立案例。[14]然而，成功范例通常需要多种创新策略并举实现。

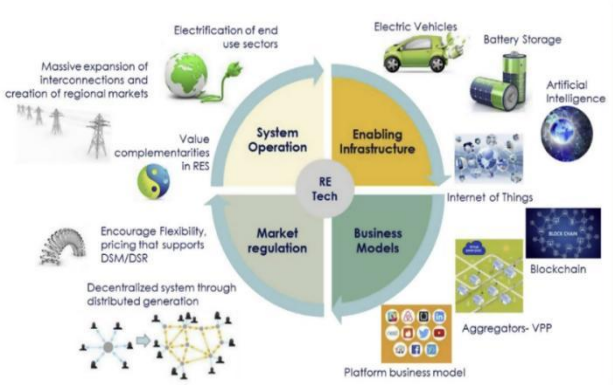


图 2　电力系统创新应用

新型电力系统中，光伏、风电、储能、新型输配电等成为了新的劳动资料，这些本身就是电力技术不断创新的产物。这些变化使得电力系统更侧重于提供新型的绿色电力。新型电力系统和新质生产力都强调科技创新的引领性。新型电力系统聚焦数字技术、绿色技术等原创性引领性技术突破，以技术变革为牵引，推动传统电力系统向新型电力系统形态转变，也促进节能环保等产业转型升级。对比而言，新质生产力本身就是绿色生产力，新型电力

系统建设以构建高比例新能源消纳体系为主线，推动能源生产和消费革命，是能源电力领域绿色发展的集中体现。

2.2 碳足迹与碳捕集

欧盟“Fit for 55”行动计划于 2023 年 5 月 17 日正式生效，设立碳边境调节机制，对高碳产品进出口实行征税或配额，碳足迹涵盖产品全生命周期。目前电网在电力系统碳核算和评估中的潜在价值尚未得到充分开发，碳足迹及碳排放管理体系亟需完善。

CCUS（碳捕集、利用与封存）技术作为我国化石能源近零排放的唯一技术选择，是新型电力系统实现清洁低碳核心目标的必然路径。当前电力系统碳减排技术还很欠缺。别朝红等[15]提出，清洁用能的低碳技术研发尚不健全是我国电力系统结构调整与优化发展面临的挑战之一，在能源供给侧，需要加强保障火电机组低碳发电的CCUS技术突破，助力碳中和。

CCUS 技术中，CO_2 捕集成本占整个技术成本的 60 %~80 %。碳捕集技术作为减少化石能源燃烧和工业过程中二氧化碳排放的高效减排技术，已在实际工程应用中取得了良好的减排效果。根据 CO_2 捕集与燃烧过程的先后顺序，碳捕集技术分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链燃烧等：

（1）燃烧前碳捕集技术能耗较低，但会改动常规电厂发电流程，限制现有电厂技改。[16]

（2）燃烧后捕集技术原理简单、技术成熟，适应大多数火电厂；其中，化学吸收法吸收量大、吸收效果好、吸收效率高，且具备更加广泛的应用和商业化场景，是现阶段最具规模化应用的燃烧后捕集技术，已初步达到商业应用水平。[17]膜法方面，作为第二代碳捕集技术，其能耗和成本可比第一代技术降低 30 %以上，具有投资少、占地省、环保节能等显著特点，但相关技术尚处于实验室研究或示范阶段，需重点解决低成本、高渗透速率、适应复杂性气源的高性能膜材料和组件研发，推动技术实现大规模应用。

（3）富氧燃烧技术是以富氧空气进行燃烧的高效节能技术，碳捕集能力较强。富氧燃烧是具有大规模推广和商业应用潜能的 CO_2 捕集技术之一，但其导致较高的制氧成本，同时对燃料本身的清洁性有较高要求。[18]

（4）化学链燃烧技术通过氧载体在两个反应器之间的循环，实现氧和热量由空气反应器向燃料反应器的传递，具有内分离高浓度二氧化碳的特性，其碳捕集成本低至传统技术的 1/3。2023 年，全球最大化学链中试示范装置在东锅德阳试验基地建成，为高碳排放行业碳捕集提供了全新方案。[19]化学链燃烧适用于煤、石油焦、天然气及生物质等不同燃料燃烧，可适应新建燃煤电厂。未来需着力关注高效低成本的载氧体研发、化学链燃烧反应器设计等技术。

碳捕集系统不仅能够降低碳排放，还可以参与系统的调峰和备用，提高低碳综合能源系统运行的灵活性，促进清洁能源的消纳。我国煤电碳捕捉技术日趋成熟。至 2023 年，中国 CCUS 示范项目的 CO_2 捕集源涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁等多个行业。其中，电力行业示范项目超过 20 个。继锦界电厂 15 万 t/a 化学吸收法 CO_2 捕集示范项目后，国家能源集团泰州电厂建成投运了亚洲最大的煤电 CCUS 项目—50 万吨/年 CCUS 项目。2021 年底，浙江公司宁海电厂依托 1 000 MW 超超临界机组平台开展低压低能耗吸附碳捕集万吨级示范项目。

综上，碳捕集技术应用仍面临成本较高、新技术成熟度不高等挑战，制定激励措施和灵活运行机制，实现碳捕集系统协同规划与低碳运行，是低碳能源系统亟待解决的问题。表 1 对现有碳捕集技术原理、特点及我国典型应用案例进行汇总分析，以期对现有技术改进及新技术创新提供一定借鉴。

表 1 碳捕集技术现状对比[20]

碳捕集技术		原理	技术优势	技术不足	我国典型案例
燃烧前	整体煤气化联合循环（IGCC）	化石燃料气化得合成气（主要为 H_2 和 CO），经水煤气变换反应将 CO 转化为 CO_2 和 H_2，随后通过溶剂吸收、吸附等技术将 H_2 与 CO_2 分离，收集 CO_2	a) IGCC 通过燃气轮机和蒸汽轮机联合循环实现高效发电； b) CO_2浓度较高	投资高，系统复杂，关键技术尚不成熟。采用该技术导致燃煤电厂发电效率平均降低 7 %～10 %	2016 年，华能集团依托 250 MW 级 IGCC 示范工程，建成世界最大规模的 10 万 t 级燃烧前 CO_2捕集装置，单位能耗达到 2.2 GJ/t CO_2，CO_2回收率超过 90 %
燃烧后为主	物理吸收法	利用 CO_2 在溶剂中的溶解度性质进行吸收。溶解度特性遵循亨利定律，受压力和温度条件影响	a) CO_2 分离效率 90 %； b) 吸收剂再生能耗低； c) 工艺温度低于化学吸收法； d) 低腐蚀、低污染、低毒性	吸附容量小，选择性低，对水分敏感，存在动力学限制，材料制备及规模化困难	/
燃烧后为主	化学吸收法	用碱性吸收剂（如胺类）与烟气中 CO_2 反应形成不稳定盐；加热或减压不稳定盐可分解释放 CO_2，实现吸收剂再生	a) 技术成熟，当前最具规模化应用前景； b) 工艺简单，适应性强，适用于低浓度 CO_2 捕集； c) 高效快速，碳捕集率高于 90 %，CO_2 纯度高于 99 %	存在高能耗、高成本、设备腐蚀、吸收剂损耗快等问题	2021 年 1 月，国华电力锦界电厂成功投运国内最大规模 15 万 t/年 CCS 示范工程， CO_2 捕集率>90 %、CO_2 浓度>99 %、吸收剂再生热耗低于 2.4 GJ/tCO_2，整体性能国际领先
燃烧后为主	吸附法	利用固体吸附剂（通常为碱性或多孔碳基、金属材料等）通过物理或化学吸附作用从混合气中分离 CO_2，变压吸附（PSA）是主要技术。经温度/压力调节可解吸吸附剂中的 CO_2	a) CO_2 分离效率 85 %； b) 工艺简单易维护，腐蚀小； c) 吸附剂物理再生，能耗低，固废少； d) 操作范围广，适用于电厂、水泥窑、合成氨等场景	吸附速率较慢、成本较高，需优化吸附材料性能、降低成本；PSA 技术受限于高压气源条件，应用场景有限	2012 年东南大学研发双鼓泡流化床，碳捕集率超 90 %； 2019 年首钢京唐钢铁实现年产 5 万吨 CO_2 生产线，碳纯度达 99.8 %； 2023 年国家能源集团宁海电厂启动万吨级低压低能耗吸附碳捕集示范项目，采用“低压吸附真空再生”低能耗碳工艺；已完成高容量碳基吸附材料开发
燃烧后为主	膜法	利用气体在膜中的溶解扩散速度差异，通过压力差使高渗透率气体透过膜至低压侧，而渗透率低的气体被截留在高压侧，实现高效 CO_2 分离	a) CO_2 分离效率 80 %； b) 模块化系统简单经济，投资少、占地省； c) 高效节能； d) 环保，不涉及其他化学品，无废物产生	高性能膜材料对成分复杂的气源适配性较差，多处于实验室研究和中试示范阶段	2021 年，中石化南京化工研究院联合天津大学等建成首套 5 万 Nm^3/d 膜分离烟气 CO_2 捕集示范装置，CO_2 浓度>96 %，捕集率达 81 %
燃烧后	低温蒸馏	利用组分间相对挥发度差异，通过气体透平膨胀制冷冷凝各组分，再经精馏按蒸发温度差异分离各物质	a) CO_2 纯度高； b)分离效率高（可达 99.9 % vol. CO_2）； c)无需化学试剂； d)易于规模化应用	适用于高 CO_2 浓度（>90 %）、组分沸点差异大的混合气体 CO_2 回收。工艺复杂、设备多、能耗高	/
燃烧中	富氧燃烧	采用纯氧或富氧代替空气，与化石燃料以及燃烧后返回的部分高浓度 CO_2 进行燃烧，主要产物为 CO_2、水和一些惰性组分；分为常压（AOC）和增压富氧燃烧（POC）两种	冷凝水蒸气后，通过低温闪蒸提纯 CO_2，浓度可达 80 %～98 % vol. CO_2，捕集率高，相对成本低、易基于现有机组改造、烟气中无氮氧化合物	该技术要求高纯氧投入，需配套空分设备增加投资成本；单体规模小，推广应用受限	华中科技大学联合“东锅”等单位实施中国富氧燃烧技术放大路线（0.3MWth-3MWth-35MWth-200Mwe），2015 年建成湖北应城 35 MWth 煤粉富氧燃烧示范装置，年捕集 CO_2约 10 万 t，烟气 CO_2浓度达 82.7 %
	化学链燃烧	利用载氧体在空气反应器中氧化，再在燃料反应器中与燃料发生还原，生成高浓度 CO_2 并捕集。该技术通过两步反应，避免空气与燃料直接接触，有效降低能耗和污染	a) 工艺简单，适用于低 CO_2 分压场景； b) 燃烧稳定高效； c) 废气低 NO_x，易分离，腐蚀性小； d) 无需空分制氧，捕集能耗和成本低； e) 系统净效率高	国内尚处于实验室研究与中试示范阶段	2023 年，全球最大 4MWth 化学链燃烧示范装置在“东锅”德阳基地建成，碳捕集成本低至传统技术的三分之一，为高排放行业碳捕集提供了新方案

2.3 二氧化碳大规模消纳利用

CCUS 技术在全球应用的主要问题与捕获的二氧化碳市场价值低有关，因此需深化探索 CO_2 增值与利用的新途径。在达成碳中和目标的进程中，CO_2 大规模脱除与利用技术预计将贡献 20 %~25 %的减排份额。[21]

二氧化碳的利用可分为直接（物理）利用和间接（化学）转化两种。其中，二氧化碳物理应用包括干冰、制冷剂、惰性介质（如灭火器）、饮料碳酸剂、超临界溶剂、焊接介质和超临界二氧化碳循环发电、以及石油提高采收率（EOR）、提高天然气采收率（EGR）、通过增强型地热系统（EGS）供热、增强型煤层气（ECBM）等领域用途。[22]其中，CO_2-EOR 技术已在美国等地实现大规模应用，但该技术受地理因素限制大，在我国商业化推广中阻力较大。简言之，二氧化碳的物理应用规模化困难，对我国二氧化碳减排的贡献和影响有限。

二氧化碳转化为高附加值化学品及燃料可以是一步或多步反应，主要涉及加氢反应、逆水气变换反应（RWGS）、甲烷化反应、重整反应、电化学还原等。CO_2 是一种热/动力学性质稳定的惰性分子，碳处于最高价态[23]，在高温下 C=O 键断裂需要 750 kJ/mol 能量。从热力学来看，CO_2 易与高吉布斯自由能物质（甲烷、氢气等）发生反应，其自身直接转化则需要更高的能量。[24]催化二氧化碳转化为增值燃料和化学品已成为一种极为实用的二氧化碳减排策略，特别是在与可再生能源相结合的情景下。研究表明，通过 CO_2 转化可制备的产品（特别是精细化学品）超过 150 多种[25]，包括碳酸钙、碳酸聚丙烯、甲酸、合成气、尿素、环碳酸盐、水杨酸和乙酰水杨酸等，其间接应用包括聚氨酯、藻类生物燃料、费托产品、二甲醚（DME）和碳酸二甲酯（DMC）等（图 3）。CO_2 化学利用技术面临的核心挑战在于多数合成路径尚不成熟且能耗较高，但其净零排放潜力仍吸引着多方关注与支持。

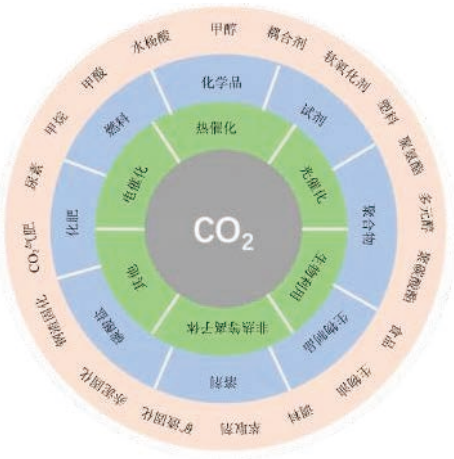


图 3　CO_2 转化利用途径

Turakulov 等[26]对系列二氧化碳转化利用技术进行对比，结果见图 4。研究认为，二氧化碳合成甲醇技术接近成熟，尤其绿色甲醇市场前景广阔。然而，高能耗、高成本的绿氢需求制约了其大规模产业化进程。CO_2矿化方面，矿化养护混凝土技术已接近成熟，CO_2 碳酸盐矿化技术更是实现成熟应用。就 CO_2 吸收潜力而言，EOR 技术、CO_2 基甲烷及 F-T 产品等比其他任何利用技术都更有效，但这些方法的碳减排效果与其实际应用场景息息相关。微藻光合作用技术虽具较大碳减排潜力，但受空间、杂质敏感性和高成本限制，最适用于低 CO_2 浓度烟气（如天然气联合循环发电厂的烟气）条件。对于高浓度 CO_2 的燃煤、水泥和钢铁行业，二氧化碳矿化制备建筑骨材是非常合适的选择，但其规模较小，每吨产品仅可吸收 80 kg 二氧化碳。基于此，本文进一步对具有较高产业化潜力的二氧化碳转化利用技术现状及未来挑战进行对比分析，详见表 2。

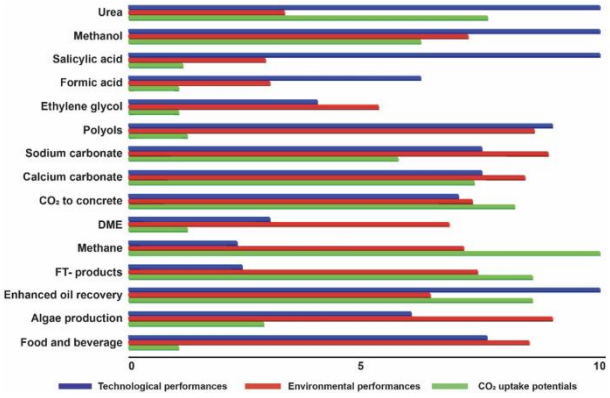


图 4　基于技术、环境和 CO_2 吸收性能的 CO_2 利用途径比较[26-27]

表 2　二氧化碳转化利用主要技术现状对比

碳利用技术		基本原理	主要技术路线	我国典型案例	未来挑战与主要方向
生物利用	林业碳汇	通过植树造林、森林管理和保护等，利用植物光合作用吸收 CO_2，并转化为有机物	a) 无机碳的固定； b) 土壤有机碳的周转与固定； c) 林产品碳的固持	贵州单株林业碳汇项目、广东碳普惠核证自愿减排量项目、福建林业碳汇项目等	项目开发成本高、周期长，市场有效需求不足；需加强减排增汇技术研究，提高碳汇监测能力，完善碳汇评估、碳金融政策与激励制度等
	微藻利用	微藻是海洋中含有叶绿体的植物，具有光合效率高、环境适应性强等特点，用于高效吸收转化 CO_2 为自身所需的有机物，进而转化为生物燃料、生物肥料、食品添加剂及其他化学品等，方程式： $6CO_2+6H_2O$（光照、叶绿体） $\rightarrow C_6H_{12}O_6[(CH_2O)_n]+6H_2O$	a) 制备生物燃料（生物柴油等）和化学品； b) 制备生物肥料（含有机氮）； c) 制备食品和饲料添加剂	a) 浙江大学与广东能源集团合作建成国内首个生物质电厂烟气微藻固碳工程； b) 2022 年，浙江大学与华润集团合作建成国内首个立柱式微藻光合反应器减排转化利用燃煤电厂烟气 CO_2 的工程示范	a) 生物固碳转化技术能耗低，转化效率不高，需强化叶绿体的光合作用； b) 部分技术初投及高性能催化剂成本高
矿化利用		CO_2与富含钙、镁、铁等金属离子的碱性物质（如固废中的钢渣、矿渣、炉渣等）发生化学反应，形成稳定碳酸盐，实现 CO_2固定和矿化	CO_2矿化技术可以应用于多个领域，包括建筑材料（混凝土、玻璃等）、环保（固废利用）和能源存储等	2022 年底，国电大同电厂牵头的国内首套 CO_2 化学矿化捕集利用示范项目试运行成功，连续产出碳酸钙浆液	CO_2 矿化转化技术推动废物利用是绿色发展的关键，其关键在于降低转化过程的能耗，提高利用效率并探索碳酸盐产物的大规模应用与处理，以实现深度减排
化学转化	氢化	加氢反应（合成甲醇）： $CO_2+3H_2\rightarrow CH_3OH+H_2O$, $\triangle H=-49.9$ kJ/mol	Cu 基催化剂是最为常见的 CO_2 加氢催化剂；贵/稀有金属催化剂（如 In_2O_3 基）、MoS_2 等新型催化剂表现出较高甲醇选择性	2020 年中科院大连化物所于兰州新区绿色化工园区建成全球首个千吨级液态太阳燃料合成示范工程，开车成功	$Cu/ZnO/Al_2O_3$ 催化剂由于 RWGS 和反应中水产生等因素导致活性及选择性受限
		甲烷化反应（合成甲烷）： $CO_2+4H_2\rightarrow CH_4+2H_2O$, $\triangle H=-164.9$ kJ/mol	催化合成，以金属（贵金属、过渡金属）及碳材料（石墨烯、碳纳米管等）基催化剂为主	/	开发高效稳定的催化剂降低活化势垒；提高甲烷选择性，尽可能抑制逆水煤气反应
		合成低碳烯烃： **途径 1**: MeOH 路线 + MTO a) MeOH 路线: $CO_2+3H_2\rightarrow CH_3OH+H_2O$, $\triangle H=-49.9$ kJ/mol b) MTO（甲醇制烯烃）: $2CH_3OH\rightarrow C_2H_4+2H_2O$, $\triangle H=-29.3$ kJ/mol $3CH_3OH\rightarrow C_3H_6+3H_2O$, $\triangle H=-102.3$ kJ/mol **途径 2**: RWGS + FTS a) RWGS: $CO_2+H_2\rightarrow CO+H_2O$, $\triangle H=+41.1$ kJ/mol b) FTS: $2CO+4H_2\rightarrow C_2H_4+2H_2O$, $\triangle H=-210.2$ kJ/mol $3CO+6H_2\rightarrow C_3H_6+3H_2O$, $\triangle H=-373.6$ kJ/mol	**途径 1**: CO_2 先加氢制备甲醇，再由甲醇通过 MTO/MTA 反应合成相应的低碳烯烃/芳烃；In_2O_3/ZrO_2 是该反应最广泛研究的催化剂之一。 **途径 2**: Fe 基催化剂对 RWGS 与 FTS 均有较高活性，Fe_3O_4 是 RWGS 催化活性相	2014 年，陕西延长中煤榆林能源化工有限公司煤油气资源综合利用项目一期建成投产，主要装置包括 360 万 t/a 甲醇、120 万 t/a 甲醇制烯烃（DMTO）	a) 在 FTS 反应平衡下，产物遵循 ASF 分布； b) 需着重简化反应体系，并通过 DFT、原位表征等方法深入研究反应过程中间体物质生成途径，明确催化机制
	甲烷干重整	$CO_2+CH_4\rightarrow 2CO+2H_2$, $\triangle H=+247$ kJ/mol	研究最广泛的催化剂为镍基催化剂	中科院联合山西潞安矿业等单位，采用甲烷自热重整技术进行甲烷二氧化碳重整制合成气中式示范；采用镍基催化剂，合成气成本约 500~600 元/t	甲烷干重整催化剂性能受金属特性、颗粒大小、载体类型及金属与载体间相互作用等影响。大多数镍基催化剂在应用时面临易失活问题，原因包括积炭、活性金属被覆盖、中毒、颗粒烧结等

3 适应新型电力系统的二氧化碳高效转化策略

3.1 二氧化碳耦合低碳氢实现深度储能利用

根据 BP 能源展望报告，全球能源领域将迎来四大显著发展趋势：油气作用下降、可再生能源快速扩张、电气化程度提高、低碳氢使用增多。[13]

在双碳目标的指引下，电力系统正积极探索新能源发电与制氢技术的深度融合，推动绿氢技术在电力领域的创新应用。关键在于，通过降低新能源的发电成本，改善电解水技术的成本构成（目前电费为主导），从而减轻绿氢技术的经济性压力。新型电力系统的逐步建立，将有效完善新能源消纳的中长期市场与现货市场，这将进一步促进新能源发电成本及电价显著降低，预示着绿氢在未来能源结构中的占比也将不断提升。

此外，利用绿氢作为储能介质存储过剩的新能源发电，将为建筑业、需要长距离运输且难以再电气化改造的工业领域提供新的能源消纳解决方案，也代表了未来氢能发展与新型电力系统相结合的重要方向。

3.1.1 绿氢产业发展

以甲醇为例，目前，化石源甲醇、生物源甲醇、绿色合成甲醇的生产成本分别为 100~250、320~770、1 200~2 400 美元/t。当前绿色甲醇成本中，绿氢占比高达 87 %。作为本世纪战新产业重点发展方向，我国氢能源发展迅速，已基本涵盖制储加运用全产业链条。目前，氢气的生产方法主要包含三种途径：一是通过化石能源重整制取，二是利用工业副产氢气提取回收，三是电解水制氢。目前，我国约 80 % 的氢气来自煤制氢或工业副产氢，而电解水等清洁氢源占比较小。从低碳环保角度来看，制氢侧实现净零排放至关重要。氢作为化石燃料的可替代品，燃烧仅生成水，具备实现负碳排放的潜力。

因此，在制氢侧通过电力成本与设备成本的协同降低，在传统制氢工业基础上耦合生物质制氢等现代工程技术，实现绿氢的经济利用是当前的主要任务。

3.1.2 二氧化碳的加氢及产业化研究

二氧化碳加氢反应是高效转化二氧化碳的有效手段，可催化生成甲醇、甲烷等能源物质。该技术不仅成功降低 CO_2排放，更促进能源循环再利用，实现了环保与能源的双重效益。氢还原二氧化碳可通过直接（双功能催化剂上直接转化）和间接（以甲醇或 CO 为中间体）两种途径进行。[28]

对于二氧化碳合成高附加值烃，需要依托煤制油、煤制甲醇、MTO、MTA、MTG 等现有化工产业基础，向二氧化碳制甲醇、制二甲醚、制低碳烯烃、芳烃、制汽油及柴油等延伸，拓展行业发展空间。此外，二氧化碳基功能化聚合材料已在研究中表现出优异性能，如二氧化碳与烯烃、炔烃等共聚材料，可广泛应用于泡沫材料、胶粘剂、工程塑料等领域，并拓展至生物成像、医疗、锂离子电池等。其中，具有聚集发光等特性的系列二氧化碳基聚合物，在化学传感器、光捕获、LED 以及纳米催化剂、自修复材料等新兴领域展现出巨大潜力（图 5）。[29]因此，亟需强化发展以二氧化碳为原料，延伸传统及新兴炭基功能材料等产业链。具体可采取以下行动项加快产业推进：

（1）发展顶层设计，优化政策引导

统筹发展策略，制定二氧化碳基新材料及化学品的发展路线图。实施高效政策优惠，鼓励可再生能源发电企业增加并网规模、参与碳交易等。优化碳足迹及碳管理评价与认证体系，完善补贴等利益机制，把握好技术激励的尺度与时机，激活碳减排产业。加强产业链高端引育，推动产业链向下游延伸，促进二氧化碳转化利用产业健康发展。

（2）强化区域联合，打造“专精特新”集群

依托新型电力系统，建立二氧化碳捕集与转化利用产业联盟，关联政府与“专精特新”企业等单位合作，加强碳减排相关各领域技术优势协同，共同推动二氧化碳大规模消纳技术的发展。拓展下游应用领域，优化产业结构和生产策略，提高产品附加值与市场竞争力。

（3）协同产学研用融合，驱动创新发展

积极投入研发资源，开发高效、环保的二氧化碳捕集利用技术，如研究新型催化剂，使反应条件更加温和、高效、环保。深化产学研合作，联合科研院所、高新企业开展技术攻关，推进首台套产业化示范工程建设，落实成果转化。

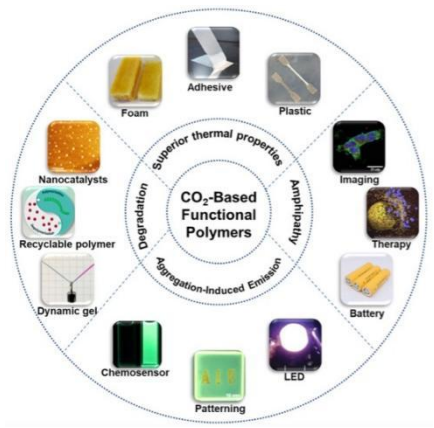


图 5　二氧化碳基聚合物的性质和应用

3.2 多能耦合的低碳综合能源系统

聚焦现代煤化工与新能源的协同耦合，是当前低碳转型的优先路径。构建低碳综合能源系统，利用可再生能源赋能绿氢及电力，然后将氢气与煤气化过程、可再生燃料（氨、甲醇[30]等）耦合，实现经济性、大规模消纳二氧化碳。林光平等[31]提出煤与可再生能源耦合的零碳综合能源系统，基于IGCC 技术联产甲醇/氨耦合光伏制氢、富氧燃烧耦合光伏制氢等典型的煤基零碳能源中心，可同时实现低碳与能源稳定的双重目标。

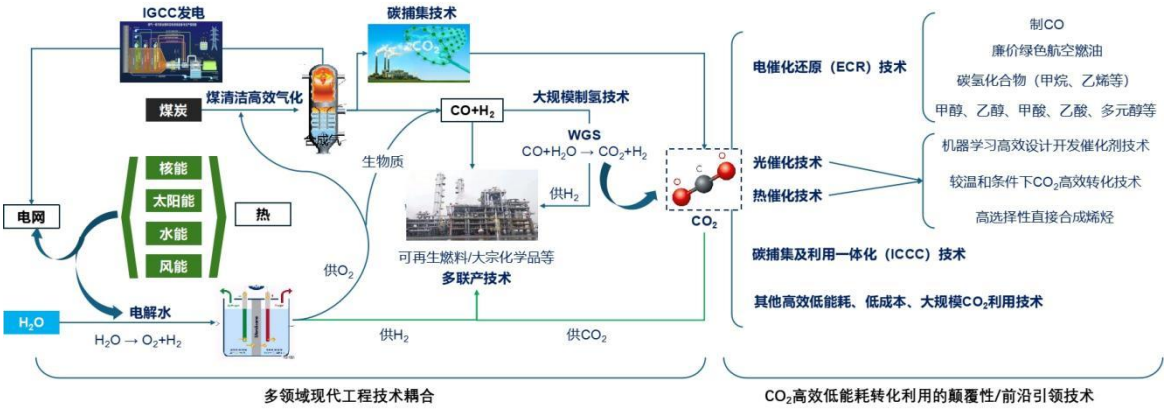


图 6　多能耦合的低碳综合能源系统及 CO2 高效清洁转化利用前沿技术展望[31]

实现以低碳综合能源系统为核心的新型电力系统，关键在于共建多领域现代工程技术的耦合以及前沿技术的革新与发展：

（1）推动耦合 CCU 技术的新型电力系统构建

我国新型电力系统将是集中式与分布式并举的清洁发展模式，强化区域资源互补，同时聚焦负荷中心，以综合能源系统的形式开发清洁电力，逐步满足新增用电需求，减少对当地火电及跨区输电的依赖。从技术可行性角度来看，高比例可再生能源与化石能源脱碳是低碳转型的关键，也是我国构建低碳环保新型电力系统的有效策略。[32]

2023 年末，我国可再生能源装机超 14.5 亿 kW，占全国发电总装机比重的一半以上，新能源利用率总体保持较高水平，但其系统调节能力及消纳基础仍面临严峻挑战。煤电以其灵活调节和稳定供应优势，将继续在支撑可再生能源发电的快速发展中扮演关键角色。[31]然而，在现代工程技术路线下构建以新能源为主体的新型电力系统需要尽快获得大规模电氢转换、新型储能、高效 CCUS 等颠覆性技术的支持。[33]CCU 技术的成熟是双碳背景下煤电存续的前提，有利于消除化石能源的高碳属性，建立化石能源与可再生能源同步运行的新型电力体系。

（2）发挥碳捕集技术的重要支撑作用

储能与碳捕集，作为电力系统转型的两项核心技术，正趋向发展成熟，但均伴随系统性风险。两者既共生也互竞，我国应深化产学研用合作，集合政府、科研、高校、企业与金融之力，合理激励技术发展，提前布局新型电力系统的多元服务及负碳电力产业链。同时，综合考量多种因素，选择有效降碳的技术路径与策略，发挥技术创新的协同效应，推动碳中和目标下的技术革命性突破。

（3）深化 CO_2 大规模经济性利用技术研究

当前 CO_2 转化利用效率低、成本高、能耗高等问题限制了其大规模商业应用，需加大技术研发力度，深挖应用潜能，推动跨系统循环碳经济发展。王笑楠等[34]探究了低碳发电与化工生产协调过程

中的多领域智能耦合发展，预测结果显示，电力系统减碳将优先于化工行业，为化工生产提供丰富的低碳电力资源；同时，电解槽的灵活应用可有效调节负荷曲线、消纳可再生电力。可再生燃料及化学品作为易运输的优良长时储能介质，通过跨季节生产规划、跨区域分配利用可缓解我国可再生能源时空分布不均的问题。

在碳中和目标下，CCU 技术的定位发生了明显的变化，一些前沿/颠覆性的碳利用技术的应用场景得到了极大的拓展，有望构成能源和工业体系不可或缺的减碳解决方案。图 6 对二氧化碳转化利用领域的前沿技术进行汇总。深度脱碳需要对当前的能源和工业基础设施进行相当大的革命，尖端的颠覆性 CCU 技术正变得越来越重要和有影响力。

二氧化碳转化利用的前沿引领性技术相对于传统工艺技术增强了多维度设计及技术耦合。随着新型大规模 CCU 技术和生物质气化等技术推广，能源化工产品的生产水平在高效清洁化方面将得到显著提高。对于光催化及热催化研究，需要重点关注高催化性能、高稳定性的新型催化剂开发，具体可通过从分子及原子等层面研究明确其催化转化机制，分析不同中间体结构间的演化规律和构效关系，为催化剂设计提供指导；从过程层面强化反应工程及分离过程耦合等清洁化高效技术；从系统层面采用人工智能技术研究、机器学习、数据库建立等手段实现多领域技术产业链整合。其次，需要依托合成气制甲醇、F-T 合成等现有能源化工基础，向温和条件下的低能耗、低成本、大规模 CO_2 转化利用技术（如高选择性直接合成烯烃）等领域拓展。[35]

二氧化碳电催化还原（Electrocatalytic CO_2 reduction, ECR）技术已成为催化领域中最引人注目的技术之一。由可再生电力驱动的 ECR 技术可以在温和条件下促进 CO_2 转化，更值得注意的是，该技术允许通过储存低品位可再生能源来使燃料和化学品的碳循环闭环。因此，ECR 的大规模部署可以有效避免化石燃料的消耗，从而间接地为碳减排做出贡献。ECR 主要技术难点在于高活性、高选择性催化剂的设计和制备，以及与低品位可再生能源耦合的工程挑战。

二氧化碳捕集和利用一体化技术（Integrated CO_2 capture and conversion, ICCC）是一种新兴的碳循环工艺，能够减少 CO_2 排放并原位制备合成气等高附加值产品，完全避免了碳捕集—碳利用工艺中压缩、液化、储运等流程。与现有 CCUS 技术相比，ICCC 在降低成本、源汇匹配等方面具有明显的优势，有效降低碳捕集能耗并提高碳利用效率。目前，ICCC 技术仍处于实验室验证阶段，它颠覆了传统 CO_2 捕集以及利用技术的生产方式，但是关于 ICCC 技术的设计理论以及反应的调控策略尚不明晰，如何实现碳捕集与利用技术耦合、如何高效低能耗生产高价值产品、如何调整工艺以匹配实际应用场景等问题仍需明确。

4 结语

构建以能源为主体、“清洁低碳”为核心目标的新型电力系统是新时代保障国家能源安全的重要举措。科学认识新型电力系统发展，要立足于我国能源资源禀赋及安全可靠的新能源模式，多元发展能源供给与碳减排利用技术一体化，在“清洁低碳、安全高效”的能源体系蓝图下推动能源结构转型和优化。

新型电力系统要求以确保能源电力安全为基本前提，在未来的一段时间内，煤电仍然是我国主要的基础保障性和系统调节性电源。对于煤炭产业链，通过耦合煤清洁转化技术与高效低成本的大规模碳捕集技术，可实现更加稳定的清洁能源供应，实现产业链低碳环保。其次，持续加大力度推进大规模、经济性的二氧化碳转化利用途径开发，因地制宜推动二氧化碳制取可再生燃料（甲醇、氨等）、烯烃、芳烃等产业化发展，重点攻关二氧化碳电催化还原技术、碳捕集与利用一体化技术、高稳定性的新型二氧化碳催化剂等前沿及颠覆性技术领域，构建面向大规模二氧化碳消纳的现代工程及前沿技术一体化解决方案。最后，构建新型低碳甚至零碳的综合能源系统，建立传统能源、电网、储能、CCU(S)技术的耦合体系，促进新型能源与系统性能源调节机制完善，推动源网荷储一体化与多能源联合调度，积极探索碳市场、绿证市场的健全机制，实现多能互补保障国家能源安全。

参考文献：

[1] Ritchie H, Rosado P, Roser M. Energy Production and Consumption

[R/OL].(2024-05-09).https://ourworldindata.org/energy-production-consumption

[2] IEA, CO_2 Emissions in 2023, March 2024[EB/OL]. (2024-05-09). https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023

[3] 能研智库. 中国能源发展现状 2023[R]. (2024-05-09)

[4] IEA. World Energy Outlook 2023[R]. International Energy Agency (IEA), 2023

[5] 国务院. 国务院关于印发《空气质量持续改善行动计划》的通知[EB/OL]. (2024-05-09). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6919001.htm

[6] IRENA (2024), Renewable capacity statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi[OL]. (2024-05-10). https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf?rev=a587503ac9a2435c8d13e40081d2ec34

[7] 崔杨, 管彦琦, 李佳宇, 等. 考虑碳捕集机组与氢储能系统协调运行的源荷储低碳经济调度[J]. 电网技术 2024,48(6):2307-2316

[8] 崔杨, 曾鹏, 惠鑫欣, 等. 考虑碳捕集电厂综合灵活运行方式的低碳经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1877-1886

[9] 国家电网. 构建以新能源为主体的新型电力系统行动方案(2021-2030 年)[R]. 北京: 国家电网有限公司, 2021

[10] 国家能源局综合司. 国家能源局综合司关于公开征求《新型电力系统发展蓝皮书(征求意见稿)》意见的通知[EB/OL]. (2024-05-09).http://www.nea.gov.cn/2023-01/06/c_1310688702.htm

[11] 林伯强, 杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报（社会科学版）, 2022, 42(5): 1-10

[12] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究, 2022(1): 56-71

[13] BP. BP 世界能源展望（2023 年版）[R/OL]. (2024-05-09). https://www.bp.com.cn/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/news/2023/pdf/bp-energy-outlook-2023-CN-.pdf

[14] Gielen D, Boshella F, Saygin D, et al. The role of renewable energy in the global energy transformation[J]. Energy Strategy Reviews, 2019, 24: 38-50

[15] 别朝红, 王则凯, 肖遥, 等. 双碳目标下新型电力系统发展展望[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2): 116-131

[16] 程耀华, 杜尔顺, 田旭, 等. 电力系统中的碳捕集电厂：研究综述及发展新动向[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 339-350

[17] 中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2023）. 2023

[18] 袁越, 苗安康, 吴涵, 等. 低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述[J/OL].高电压技术,1-18[2024-09-03]. https://doi.org/ 10. 13336/j. 1003-6520.hve.20232247

[19] 新华网. 全球最大 4MWth 化学链燃烧示范装置在东方锅炉建成 [EB/OL].(2023-03-28).http://www.xinhuanet.com/energy/20230328/c372659fad5444f4b42d5d72b784716a/c.html,2024-05-09

[20] Leonzio G, Shah N. Recent advancements and challenges in carbon capture, utilization and storage[J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2024, 46:100895

[21] 高慧, 杨艳, 刘知鑫. 二氧化碳大规模脱除与利用技术综述[J]. 世界石油工业, 2021, 28(6): 42-52

[22] Rafiee A, Khalilpour K R, Milani D. CO_2 conversion and utilization pathways, in Polygeneration with Polystorage[J]. For Chemical and Energy Hubs, Elsevier, Amsterdam, pp. 2019, 213-245

[23] De S, Dokania A, Ramirez A, et al. Advances in the Design of Heterogeneous Catalysts and Thermocatalytic Processes for CO_2 utilization[J]. ACS Catalysis, 2020, 10: 14147-14185

[24] Song C. Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO_2 for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing[J]. Catalysis Today, 2006, 115(2006): 2-32

[25] Chauvy R, De Weireld G. CO_2 utilization Technologies in Europe: ashort review[J]. Energ Technol, 2020, 8: 2000627. b) Sharma P, Sebastian J, Ghosh S, et al. Recent advances in hydrogenation of CO_2 into hydrocarbons via methanol intermediate over heterogeneous catalysts[J]. Catalysis Science & Technology, 2021, 11(5): 1665-1697

[26] Turakulov Z, Kamolov A, Norkobiloy A, et al. Assessing various CO_2 utilization technologies: a brief comparative review[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2024, 99(6): 1259-1471

[27] Wang D, Xie Z H, Porosoff M D, Chen J G. Recent advances in carbon dioxide hydrogenation to produce olefins and aromatics[J]. Chem, 2021, 7: 1-35

[28] Liu M, Yi Y, Wang L, et al. Hydrogenation of carbon dioxide to value-added chemicals by heterogeneous catalysis and plasma catalysis[J]. Catalysts, 2019, 9: 275

[29] Song B, Qin A, Tang B Z. Cell Reports Physical Science[J]. Cell Reports Physical Science, 2022, 3: 100719

[30] 中国化学工程集团有限公司. 全球首套 5000 吨/年二氧化碳加氢制甲醇工业试验装置通过考核评估[EB/OL]. (2024-05-10). http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c15642769/content.html

[31] 林光平, 刘兆川, 聂立, 等. 煤与可再生能源深度耦合的典型零碳综合能源系统构建[J/OL].洁净煤技术, https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.RE22022201

[32] 张浩楠. 面向碳中和的电力低碳转型规划与决策研究[D]. 北京: 华北电力大学

[33] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69

[34] Li Y, Li L, Zhang C, et al. Sector coupling leading to low-carbon production of power and chemicals in China[J]. Sustainable Energy Fuels, 2023, 7: 2130-2145

[35] 谢克昌. 新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转化的挑战及途径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 47-56

气体扩散层压缩对膜电极性能的影响探究

孔禹[1,2*] 王晨松[1,2] 刘鹏[1,2] 李婷[1,2]

1.东方电气(成都) 氢能科技有限公司，成都 611731；2.四川省长寿命燃料电池重点实验室，成都 611731

摘要：质子交换膜燃料电池膜电极中，气体扩散层压缩率同时影响着电荷传导和水、气传输，进而对膜电极性能产生重要影响。本文通过对不同气体扩散层压缩率（17.5 %~35.5 %）下膜电极欧姆电阻、质子电阻及氧传输阻抗等电化学特性和极化性能的研究，同时基于弛豫时间分布法对不同压缩率下电化学阻抗数据进行拆解分析。结果表明气体扩散层压缩对膜电极性能的影响主要集中在接触电阻和氧扩散阻力两方面。GDL 的压缩，使其内部结构趋于致密，孔隙率和孔道尺寸减小，并增强了与催化层的接触，进而使接触电阻减小而氧扩散阻力增大。GDL 压缩率设计应兼顾界面接触电阻与气体扩散阻力。

关键词：气体扩散层；压缩；膜电极性能

中图分类号：TM911.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）05-0013-06

Study on the Influence of Gas Diffusion Layer Compression on the Performance of Membrane Electrode Assembly

KONG Yu[1, 2], WANG Chensong[1, 2], LIU Peng[1, 2], LI Ting[1, 2]*

(1. Dongfang Electric (Chengdu) Hydrogen Energy Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Sichuan Key Laboratory of Long-life Fuel Cells, 611731, Chengdu, China)

Abstract: In the membrane electrode of the proton exchange membrane fuel cell, the compression rate of the gas diffusion layer simultaneously affects the charge conduction and the water and gas transmission, and then has an important impact on the membrane electrode assembly performance. In this paper, we studied the electrochemical properties of ohmic resistance, proton resistance and oxygen transmission impedance and polarization properties of different gas diffusion layers (17.5%~35.5%), and analyzed the electrochemical impedance data at different compressive rates based on the relaxation time distribution method. The results show that the influence of gas diffusion layer compression on membrane electrode assembly performance mainly focuses on contact resistance and oxygen diffusion resistance. The compression of GDL makes its internal structure tends to be compact, the porosity and pore size decrease, and enhances the contact with the catalytic layer, so that the contact resistance decreases and the oxygen diffusion resistance increases. The design of GDL compression rate should take into account the interface contact resistance and the gas diffusion resistance.

Key words: gas diffusion layer; compression; membrane electrode assembly performance

近年来，随着化石能源的不断消耗，全球能源短缺和环境污染问题日益严重，发展绿色低碳的能源和清洁高效的能源利用技术已成为全球能源领域的重要课题。[1]质子交换膜燃料电池（PEMFC）作为一种高效能量转化装置，因其清洁高效、低碳环保、应用场景广泛等优势而成为研究热点，被认为是 21 世纪最具发展前景的新型发电技术。[2]

在 PEMFC 中，膜电极（MEA）作为核心组件之一，为电化学反应的发生提供了场所，也承担着质子/电子传导、气体传输和水/热管理等关键功能，对 PEMFC 的效率和寿命具有重要影响。[3]膜电极主要由催化层、质子交换膜和气体扩散层（GDL）构成。其

收稿日期： 2024-05-20

作者简介：孔禹 (1994—)，男，2020 年毕业于哈尔滨工业大学化学工程与技术专业，工学博士，工程师。现任职于东方电气（成都）氢能科技有限公司，主要从事燃料电池研究方向研发工作。邮箱：kongy8832@dongfang.com。

中，GDL 不仅为气体和液态水的传输提供通道，而且还起到传导电荷和传递热量的作用。[4]GDL 主要由大孔隙的基底层和小孔隙的微孔层组成，基底层可支撑催化层并为水/气传输提供通道，微孔层可改善接触界面和水的管理。

在对 PEMFC 进行装配时，GDL 的压缩一方面增强了其与催化层的接触，另一方面也使其内部孔隙率和孔隙尺寸减小，进而对反应过程中电荷传导和水、气传输产生耦合影响。[5-6]因此，设计适宜的 GDL 压缩率，有利于膜电极各组件贴合紧密，防止反应气体泄露和降低接触电阻，同时保证水、气传输通畅，为膜电极发电性能发挥提供有力保障。

通常，GDL 在流场和催化层之间适宜的厚度压缩率约 20 %~25 %，对应的面压力约 1~2 MPa（具体取决于 GDL 的力学性能）。[7]Atkinson 等[8]研究了不同压缩率下 GDL 形态变化以及对 PEMFC 性能的影响，发现随压缩率的增大，GDL 中微孔层（MPL）表面裂纹的表面积和深度减小，孔隙尺寸及孔隙率亦呈降低趋势，在高温高湿条件下，PEMFC 性能先增大后降低，GDL 压缩与 PEMFC 性能呈现非线性关系。N. K. Shrivastava 等[9]提出了电池压缩对非热压 PEMFC 膜电极性能的影响，发现随着压缩率的逐渐增加，电池性能逐渐提升至最佳值，然后恶化。电池的压缩对其欧姆电阻、电荷转移电阻、气体传质电阻以及整体性能均会产生显著影响。

1 实验过程

1.1 CCM 制备

催化剂浆料由催化剂（20 wt% Pt/C，TEC10V 20E，TKK）、PFSA 分散液（D2020，20 wt%固含量，DuPont）、正丙醇（色谱纯，沃凯，40049886），H_2O（阻抗>10 MΩ）等成分组成。

浆料制备方式为：依次将一定比例的催化剂、纯水、正丙醇和 PFSA 分散液倒入烧杯中，通过磁力搅拌混匀后进行球磨或细胞破碎分散，制得均匀且稳定的催化剂浆料。

将分散后的阴阳两极催化剂浆料使用超声喷涂机（Prism 500，USI）喷涂涂覆至质子交换膜（Gore，M788.12）两侧，后经烘干制得 CCM（反应区尺寸 5 cm×5 cm），完成样品制备。样品阴极铂载量 0.25 mg/cm^2，阳极铂载量 0.05 mg/cm^2。

1.2 单电池组装与活化

将制备好的 CCM 与 GDL（SGL-22BB）放入夹具（上海群羿能源设备有限公司）中组装成单电池。通过控制密封垫片的厚度来调整 GDL 压缩率，GDL 压缩率范围为 17.5 %~35.5 %，装配力矩 3.5~4.0 N·m。使用 100 W 燃料电池测试平台（850 G，美国 Scribner）对单电池进行活化及测试。活化流程：电池升温至 70 ℃，阴阳极相对湿度均为 100 %，背压 0 kPa，氢气/空气气量设置为 0.3 slpm/1.0 slpm，25 A 电流运行，膜电极性能达 0.66 V 时视为活化完毕。

1.3 循环伏安测试

采用外接电化学工作站（Gamry Reference 3 000）进行循环伏安测试。测试条件: 电池温度 70 ℃，阴阳极气体湿度 100 RH%，阴极通入氮气直至电压下降至 0.2 V 后停止通气，阳极通入氢气（0.2 slpm），压力 0 kPa。电压扫描范围 0.05～0.9 V，扫描速率 50 mV/s。对循环伏安曲线中的氢脱附峰进行积分得到氢脱附峰面积，通过式（1）计算得到电化学活性面积（ECSA）：

$$\mathrm{ECSA}=\frac{Q_{\mathrm{H}}}{Q_0[\mathrm{Pt}]},\ Q_{\mathrm{H}}=\frac{A}{V} \tag{1}$$

其中：ECSA 为所测电极的电化学活性面积，单位为：m^2/g$_{Pt}$；[Pt]为单位面积工作电极上的 Pt 质量；A 为单位面积电极的氢脱附峰面积，单位为：mA·V/cm^2；v 为扫描速率，单位为：mV/s；Q_0 为吸附电量常数 0.21 mC/cm^2。

1.4 极化性能测试

测试条件：电池温度 75 ℃，阴阳极气体湿度 80 RH%，氢气/空气计量比 1.5/2.0，气体背压 30 kPa。极化测试采用升电流模式，每个电流密度下稳定运行 3 min，取其输出电压平均值，得到所测膜电极电压随电流的变化趋势线，即极化曲线。

1.5 交流阻抗测试

1.5.1 电化学阻抗谱

交流阻抗测试（EIS）由电化学工作站进行测试，随极化曲线测试同步进行。测试条件：电池温度 75 ℃，阴阳极气体湿度 80 RH%，氢气/空气计量比 1.5/2.0，气体背压 30 kPa。测试时，在恒定电密下，由电化学工作站对单电池施加 5 %的正弦波

扰动，得到交流阻抗曲线（Nyquist 图）。

1.5.2 弛豫时间分布

弛豫时间分布（DRT）方法是基于电化学阻抗谱的进阶分析方法，可以不基于等效电路模型，而是基于损耗过程的时间常数来实现损耗拆解；传质、电荷转移、质子传输等损耗过程具有不同的时间常数，将 EIS 信号通过 DRT 方法处理就能将不同时间常数的损耗过程对应到具有不同特征频率 DRT 峰上，因此实现损耗拆解。实验中使用开源软件进行 DRT 分析。

1.6 氧还原反应活性测试

测试条件：电池温度 80 ℃，阴阳极气体湿度 100 RH%，气体压力 0 kPa。在气量充足的条件下，以恒流的形式按电流从大到小进行测试，每个电流密度下稳定运行 10 min，取其输出电压平均值，得到所测膜电极电压随电流的变化趋势线。在 iR-free 数据中选择 0.01~0.06 A/cm^2 区域进行线性拟合，回归线与 Y 轴交点即截距为 1.0 A/cm^2 电密下的理想电位，即可表征膜电极的氧还原反应活性。根据线性回归公式计算出电压 0.9 V 下的电流密度，将其除以阴极的铂载量，求出每 1 g 铂的电流值，作为质量活性的值。

1.7 氧扩散测试

1.7.1 稳态极限电流方法

测试条件：电池温度 80 ℃，阴阳极气体湿度 80 RH%，反应区域面积 25 cm^2，阳极为氢气，阴极为氮气和 4 %氧气的混合气，气体计量比 1/1，流道类型为 3 蛇道。分别在 0 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa 和 200 kPa 气体背压下，利用稳态极限电流法（SLC）在相同流道及 GDL 的情况下测得不同电位下的极限电流，将其值做线性回归，所得方程的斜率即为催化层中与压力相关的部分（CL_{bulk}），截距即为与压力无关的部分(CL_{local})。该方法可表征膜电极阴极催化层氧气扩散阻力。

1.7.2 瞬态极限电流方法

测试条件：电池温度 70 ℃，阴阳极气体湿度 100 RH%，反应区域面积 4.5 cm^2，阳极为氢气，气量设置为 1 slpm，阴极为空气，气量设置为 2 slpm，夹具流道类型为 5 蛇道。当电池在某一电压运行时，突然切换至低电压（0.2 V）并保持 10 s，由于传质的滞后性，此时的瞬间高电密会形成一个短暂的接近极限电流的状态，称为瞬态极限电流（TLC）。设定电池依次在不同电位恒压运行，并在不同的电位间插入并保持 10 s 的 0.2 V 电位，取 10 s 内的瞬态极限电流平均值，即可通过式（2）计算得到对应电位状态下的氧传输阻力，该方法可评估膜电极，尤其是气体扩散层传气、排水能力强弱。

$$R_{O_2}=\frac{p-p_w}{RT}\cdot\frac{4F\cdot x_{O2}^{dry-in}}{i_{lim}} \quad (2)$$

其中：p 为进口压力，p_w 为水蒸气压，R 为气体常数，T 为温度，F 为法拉第常数，$x_{O2}^{dry\text{-}in}$ 为氧气干百分比。

1.8 质子传输阻抗测试

采用外接电化学工作站（Gamry Reference 3 000）进行质子传输阻抗测试。测试条件：电池温度 80 ℃，阴阳极气体湿度分别为 40 RH %、60 RH %、80 RH %和 100 RH %，反应区域面积 25 cm^2，阳极为氢气，阴极为氮气，气体计量比 1/1，开路测试，流道类型为 3 蛇道。在氢氮环境下进行测试，没有法拉第反应，所以电荷转移阻抗 R_k=0，低频时容抗极大，此时可测得 R_i，即催化层的质子传输阻抗。

2 结果与讨论

在 PEMFC 组装过程中，GDL 的压缩情况对膜电极电子、质子传导以及传气、排水等方面特性具有耦合影响，进而影响其性能输出。本文通过控制密封垫片的厚度来调整 GDL 压缩率，对不同压缩率下膜电极电化学活性面积、欧姆阻抗、质子传输电阻、氧传输阻抗及极化性能进行测试，并通过弛豫时间分布法（DRT）对不同压缩率下电化学阻抗谱数据进行拆解，系统地分析 GDL 压缩对膜电极性能及不同电化学特性的影响规律。

2.1 不同 GDL 压缩率对电化学活性面积的影响

随着 GDL 压缩率的增大，膜电极阴极和阳极催化层的电化学面积变化较小。在 17.5 %、23.5 %、29.5 %和 35.5 %四种 GDL 压缩率下，分别通过循环伏安法对膜电极阴极和阳极的电化学活性面积进行了测试，结果如图 1 所示。可以看出，在四种不同 GDL 压缩率下，膜电极阴极和阳极催化层的电流-电压（CV）曲线中峰形及峰面积大小基本不

变，表明 GDL 的压缩基本不会对催化层活性位点造成影响。

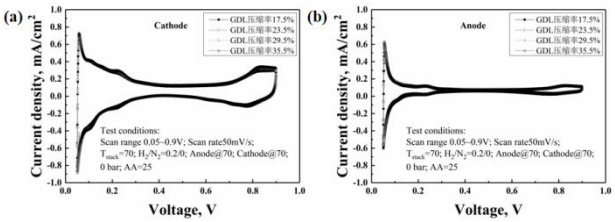


图 1　不同 GDL 压缩率下

（a）阴极和（b）阳极电化学活性面积

2.2 不同 GDL 压缩率对极化性能的影响

随着 GDL 压缩率的增大，膜电极极化性能逐渐增大，且增大幅度逐渐减小。在 17.5 %、23.5 %、29.5 %和 35.5 %四种 GDL 压缩率下，分别对膜电极的极化曲线进行了测试，结果如图 2 所示。可以看出，在 GDL 压缩率从 17.5 %增大到 23.5 %，极化性能显著提升；压缩率从 23.5 %增大到 29.5 %，极化性能进一步提升，但提升幅度较小；压缩率从 29.5 %增大到 35.5 %，极化性能基本无明显变化。随着压缩率的增大，GDL 更为致密且与催化层接触更为紧密，膜电极电阻降低、极化性能提升；但当压缩率过大时，GDL 内孔道过于致密，不利于水、气两相传输，尽管电阻降低，但整体的极化性能不再提升。

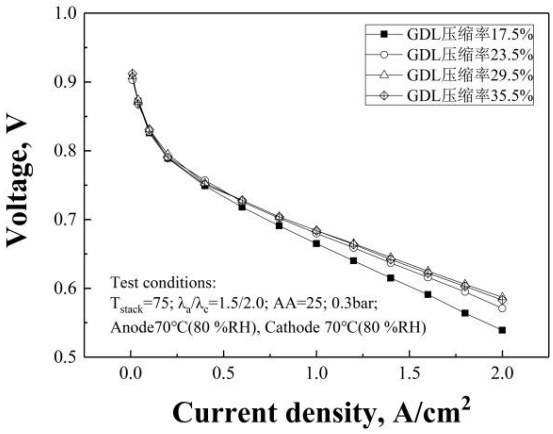


图 2　不同 GDL 压缩率下膜电极极化曲线

2.3 不同 GDL 压缩率对膜电极交流阻抗的影响

在不同的 GDL 压缩率下，对膜电极交流阻抗进行测试（1.0 A/cm²），如图 3 所示。在交流阻抗谱中，随着 GDL 压缩率的增大，欧姆阻抗、中频的电荷转移阻抗及低频的传质阻抗均呈现出逐渐减小的趋势，且随着压缩率的增大，各部分阻抗减小幅度逐渐降低。

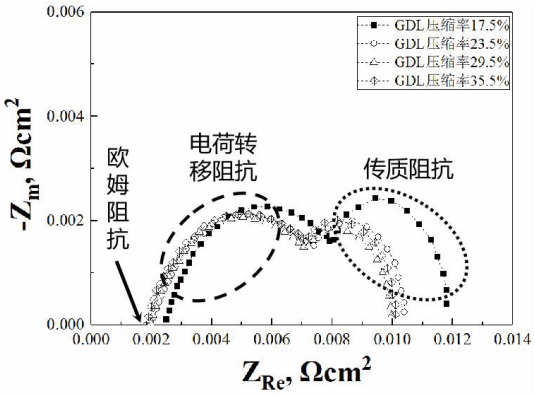


图 3 不同 GDL 压缩率下膜电极交流阻抗曲线

对交流阻抗谱进一步拆解，得到弛豫时间分布（DRT）曲线，如图 4 所示。不同特征频率的 DRT 峰可对应于不同时间常数的损耗过程，高频区、中频区和低频区可分别对应于欧姆阻抗、电荷转移阻抗和传质阻抗。对比可知，随着 GDL 压缩率的增大，三种阻抗对应的 DRT 峰面积均出现减小的趋势，当压缩率由 17.5 %增大到 23.5 %的过程中减小最为明显，而在 29.5 %增大到 35.5 %过程中，各部分阻抗变化较小。上述结果表明，经过一定的压缩，GDL 更为致密，与催化层接触更好，有利于膜电极中质子/电子传导和气体传输，但压缩率较高时其对膜电极阻抗的影响减小。

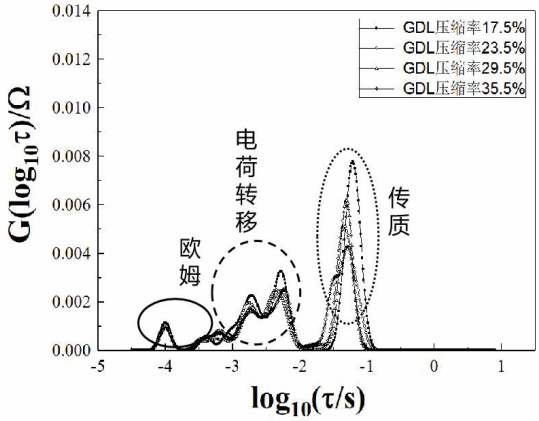


图 4 不同 GDL 压缩率下膜电极弛豫时间分布曲线

2.4 不同 GDL 压缩率对催化层活性的影响

如图 5 所示，随着 GDL 压缩率的增大，膜电极的氧还原反应（ORR）活性变化幅度较小，波动范围在 1 %以内；随 GDL 压缩率的增大，膜电极的

质量活性（MA）基本保持不变，均处于 25 A/g_{Pt}@0.9 V 左右，波动范围在 5 %以内。以上结果表明，GDL 压缩对膜电极催化层本身活性影响较小。

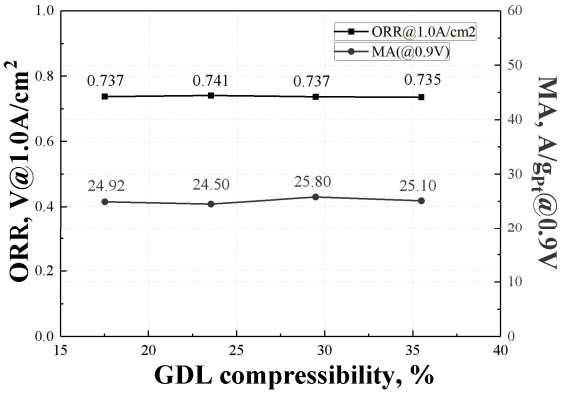
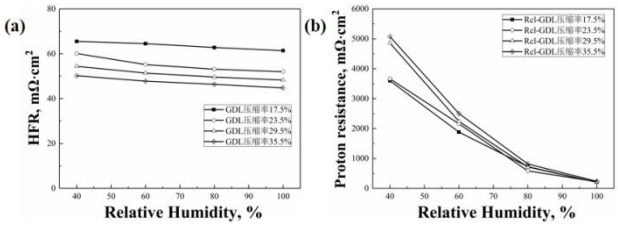


图 5　不同 GDL 压缩率下膜电极 ORR 活性及 MA 活性

2.5 不同 GDL 压缩率对膜电极电阻的影响

随着 GDL 压缩率的增大，膜电极高频（1 000 Hz）欧姆电阻呈逐渐降低的趋势，如图 6（a）所示。在压缩率从 17.5 %增大到 23.5 %时，欧姆电阻下降最为显著，且在相对湿度越高时下降幅度越大，原因在于 GDL 压缩后更致密的结构使电子传输路径变短、阻抗降低；而在压缩率从 23.5 %增大到 29.5 %、从 29.5 %增大到 35.5 %时，电阻降低相对较少，且下降幅度基本一致。随着 GDL 压缩率的增大，催化层质子电阻（R_{cl}）呈逐渐增大的趋势（GDL 压缩率从 17.5 %增大到 23.5 %时变化不大，而进一步增大到 29.5 %后显著提高），且随着相对湿度的增加，质子电阻受压缩率的影响逐渐减小，如图 5（b）所示。以上结果表明，GDL 压缩率的增大，促进了质子膜与催化层界面的接触，进而使膜电极的欧姆电阻降低，但不利于催化层本身的质子传导（GDL 压缩率较高时，碳纸变薄、孔道减小，水的传输受限，催化层中水合氢离子不足），而当膜电极湿度较高、水的供给充分时，GDL 压缩率对催化层中质子传导影响较小。



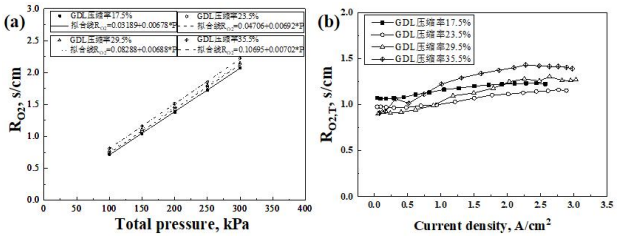
（a）高频欧姆电阻；（b）催化层质子电阻

图 6　不同 GDL 压缩率下膜电极电阻变化曲线：

2.6 不同 GDL 压缩率对膜电极氧扩散性能的影响

如图 7（a）所示，随着 GDL 压缩率的增大，膜电极 SLC 氧传输阻抗与压力相关部分以及与压力无关部分均呈逐渐增大的趋势，具体数据如表 1 所示。其中，与压力相关的部分由流道和 GDL 贡献，与压力无关的部分由催化层贡献。随着压缩率增大，GDL 中孔径和孔隙率降低，接触界面上部分孔道堵塞，氧气传输通道减少，氧传输阻力增大。

GDL 的压缩同时也会对膜电极的排水能力产生影响，SLC 方法规避了水分布对氧传输的影响，而 TLC 方法中存在水分布重置的过程，可表征排水能力对氧传输的影响。如图 7（b）所示，随着 GDL 压缩率的增大，膜电极 TLC 氧传输阻力先减小后增大，在 23.5 %左右的压缩率下氧传输阻力最小。由此可知，GDL 在压缩不足时，与催化层界面间接触不佳，未形成良好的水、气传输通道，氧扩散性能较差；当压缩率过高时，GDL 太过致密，孔径和孔隙率降低，膜电极排水不畅，氧传输阻力增大；只有在适中的压缩率下，GDL 中传输路径变短，同时与催化层间接触良好，可保证水、气传输通道畅通。



（a）稳态极限电流法；（b）瞬态极限电流法

图 7　不同 GDL 压缩率下膜电极氧扩散性能：

表 1 不同 GDL 压缩率下膜电极 SLC 氧传输阻抗（100 kPa）

GDL 压缩率	17.5 %	23.5 %	29.5 %	35.5 %
CL_{bulk}（s/m）	0.678	0.692	0.688	0.702
CL_{local}（s/m）	0.032	0.047	0.083	0.107

3　结语

本文通过对不同 GDL 压缩率下膜电极电化学特性和极化性能进行测试，并通过弛豫时间分布法对不同压缩率下膜电极阻抗谱数据进行拆解分析，明确了 GDL 压缩对膜电极性能的影响规律。GDL

的压缩，使其内部结构趋于致密，孔隙率和孔道尺寸减小，并增强了与催化层间的接触，进而影响膜电极接触电阻和氧扩散阻力。一方面缩短了 GDL 内部电荷传输路径，减小了接触电阻；但同时孔径和孔隙率降低，也会导致膜电极排水不畅和氧扩散阻力增大。因此，在 GDL 压缩率设计时，需兼顾界面接触电阻及气体扩散阻力，保证各组件界面接触良好和水、气传输通道畅通，使膜电极性能得以充分发挥。

该项工作系统地研究和分析了 GDL 压缩对膜电极多种电化学特性的影响规律，为今后膜电极装配及运行条件优化提供了有力的数据支持。

参考文献：

[1] Aminudin M A, Kamarudin S K, Lim B H, et al. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(11): 4371-4388

[2] Tian N, Lu B A, Yang X D, et al. Rational design and synthesis of low-temperature fuel cell electrocatalysts[J]. Electrochemical Energy Reviews, 2018, 1: 54-83

[3] Sassin M B, Garsany Y, Gould B D, et al. Fabrication method for laboratory-scale high-performance membrane electrode assemblies for fuel cells[J]. Analytical Chemistry, 2017, 89(1): 511-518

[4] Candusso D, Harel F, De Bernardinis A, et al. Characterisation and modelling of a 5 kW PEMFC for transportation applications[J]. International journal of hydrogen energy, 2006, 31(8): 1019-1030

[5] Kulkarni N, Kok M D R, Jervis R, et al. The effect of non-uniform compression and flow-field arrangements on membrane electrode assemblies-X-ray computed tomography characterisation and effective parameter determination[J]. Journal of Power Sources, 2019, 426: 97-110

[6] Carcadea E, Varlam M, Ingham D B, et al. Effect of Gdl (+MPL) compression on the PEM fuel cell performance[J]. ECS Transactions, 2016, 75(14): 167

[7] Simon C, Hasché F, Gasteiger H A. Influence of the gas diffusion layer compression on the oxygen transport in PEM fuel cells at high water saturation levels[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164(6): F591

[8] Atkinson III R W, Garsany Y, Gould B D, et al. The role of compressive stress on gas diffusion media morphology and fuel cell performance[J]. ACS Applied Energy Materials, 2017, 1(1): 191-201

[9] Shrivastava N K, Chatterjee A, Harris T A L. Effect of cell compression on the performance of a non–hot-pressed MEA for PEMFC[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(1): 370-387

集团要闻

东方电气获电力行业专业设计最高资质

7 月 29 日，中华人民共和国住房和城乡建设部公布了 2024 年度第七批建设工程企业资质名单，东方电气集团国际合作有限公司下属企业东方设计成功获取电力行业（火力发电（含核电站常规岛设计））专业甲级工程设计资质。这是电力行业含金量最高的专业甲级工程设计资质之一，也是国家住建部近三年唯一批准的电力行业火电专业甲级工程设计资质，标志着东方电气集团正式拥有电力工程甲级设计院，可承接各类煤电、气电、核电（常规岛）以及电站升级改造等工程的总设计和总承包业务。

成功获取电力行业专业甲级工程设计资质，标志着东方电气集团在电力工程领域一体化集成全产业链、全生命周期的工程服务能力再上新台阶，对进一步开拓电力工程高端市场，积极践行发展新质生产力、大力推进战新产业发展具有积极和深远意义。

来源：东方电气网

碳中和园区综合能源系统发展路径研究

唐昌龙　张媛

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

摘要：园区级综合能源系统具有源-网-荷-储一体化、多能互补、节能高效的特点，是实现园区减碳的重要手段，然而园区级综合能源系统如何实现碳中和的发展路径并不清晰。本文基于碳中和园区综合能源系统的基本概念，从清洁能源技术、资源高效利用技术、固碳技术、系统规划技术和系统运营技术的角度出发提出了碳中和园区综合能源系统的发展路径，系统的阐述了碳中和园区综合能源系统关键技术的研究现状，并且通过两个实际案例验证了本文所提出的发展路径的可行性。本研究旨在为园区向碳中和园区转型提供理论指导。

关键词：碳中和;工商业园区;综合能源系统;发展路径

中图分类号：X322　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0019-09

Research on the Development Path of Comprehensive Energy Systems in Carbon Neutral Parks

TANG Changlong , *ZHANG Yuan*

（DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China）

Abstract: Park-level integrated energy systems, characterized by integration of sources, networks, loads, and storage, multi-energy complementarity, and high efficiency in energy saving, are crucial for achieving carbon reduction in parks. However, the development pathway for achieving carbon neutrality in such systems remains unclear. This paper, based on the basic concepts of a carbon-neutral park integrated energy system, proposes development pathways from the perspectives of clean energy technology, efficient resource utilization technology, carbon capture technology, system planning technology, and system operation technology. It systematically elaborates on the research status of key technologies for carbon-neutral park integrated energy systems and verifies the feasibility of the proposed development pathways through two practical cases. This study aims to provide theoretical guidance for the transformation of parks towards carbon neutrality.

Key words: carbon neutrality; industrial and commercial parks; integrated energy systems; development pathways

面对全球气候变化这一严峻挑战，国际社会已经采取了一系列措施来应对温室气体排放问题。我国也采取了积极行动，于2020年明确提出，力争在2030年达到“碳达峰”，并朝着2060年实现“碳中和”的宏伟目标迈进。在此背景下，落实“双碳”发展战略，积极探索各种场景的绿色化，低碳化发展模式十分重要。

1 碳中和（零碳）园区

在我国经济高速发展的背景下，工商业园区作为集聚产业和企业的重要载体，不仅极大推动了社会生产力的提升，也带来了资源和能源的集中消耗，成为碳排放的重要来源。据统计，园区直接贡献了超过80 %的国内生产总值和90 %的创

收稿日期： 2024-07-11

作者简介：唐昌龙（1999－），男，2023年毕业于华南理工大学化学工程与技术专业，硕士，助理工程师。现任职于东方研究院，主要从事战略技术研究方向双碳技术研究工作。

新成果，同时也产生了 69 %的全国能源消耗和 31 %的碳排放。[1]面对这一现状，我国已经从国家层面上制定了一系列政策文件，鼓励园区能源系统优化和循环化改造，推动园区向零碳园区转型。

作为园区发展的最终目标，零碳园区的概念实际上并非是指该园区完全无碳排放，而是通过碳排放与碳吸收的平衡，达到净碳排放为零的状态。

2 碳中和园区综合能源系统

能源系统是贯穿于园区生产生活各项经济社会活动的核心要素，因此零碳目标的实现需要整个能源系统的配合。从供给侧到消费端，不论是能源结构优化还是用能模式升级，各个环节和主体都需要根据碳中和理念进行调整和创新。

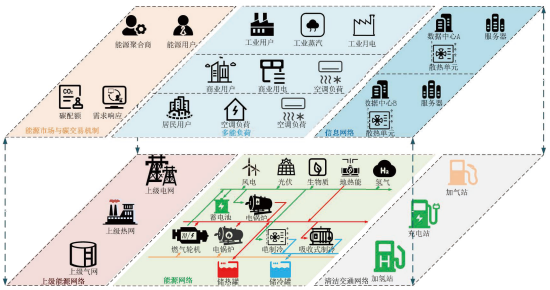


图 1 区域低碳综合能源系统示意图

综合能源系统（Integrated energy system，IES）是基于园区终端需求和减排目标优化提出的能源系统规划，集技术创新、量化指标为一体，强调“源网荷储”的相互协同，注重多种能源的互联互济，旨在构筑与区域协调的高效、清洁、安全的能源体系。[2]综合能源系统的示意图 1 所示。对于产业园区来说，综合能源系统提供了一个实现园区碳中和的有效方式。[3]从“能源利用”角度，综合能源系统通过源侧、网侧以及用户侧的高效互动，能够实现能源的梯级与综合利用，以及多能互补与联动。这种系统设计优化了能源的配置，发挥了各类能源的综合优势，显著提升了能源使用效率，有效减少了资源浪费。从“系统减碳”角度，综合能源系统能够通过优化配置和运行调度，显著降低园区的碳排放。也可以通过引入碳交易、需求响应等机制，实现低碳经济运行。

3 碳中和园区综合能源系统发展路径

碳中和园区综合能源系统的构建是一个系统工程，需从能源结构、资源利用、碳吸收技术、园区规划、低碳运营几个方面入手为碳中和园区综合能源系统的构建提供支持，具体如图 2 所示。

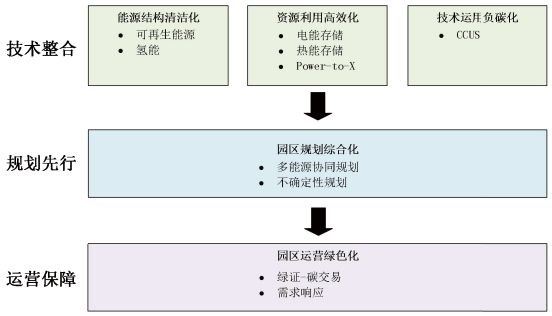


图 2 碳中和园区综合能源系统发展路径

（1）在能源结构方面，需要结合园区的自然资源禀赋，合理部署和利用绿色能源，从而实现源头减碳；

（2）在资源利用方面，需要采用高效资源利用技术和储能技术，以提高资源利用的效率，同时减少系统不确定性对园区运行的影响；

（3）在碳吸收技术方面，需合理考虑园区产业和 CCUS 技术耦合的可能性，通过碳汇实现碳排放的抵消；

（4）在园区规划方面，需要根据园区的能源和资源结构，考虑风光等可再生能源的不确定性，和电、气、冷、热、氢等多种异质能源的耦合和协同，合理配置相关设备，保证系统的低碳性和经济性；

（5）在低碳运营方面，则需通过参与市场化交易等手段对园区碳减排进行激励，通过数字化管理提高系统运行效率。

本文从以上五个方面对碳中和园区综合能源系统发展路径和相应关键技术的发展现状进行了详细的论述。

3.1 能源结构清洁化

在构筑碳中和目标的园区综合能源系统中，清洁化与低碳化的能源结构显得尤为关键，这要求深入探索如何有效整合可再生能源、氢能等清洁技术于园区能源系统之中。

3.1.1 可再生能源

可再生能源包括太阳能、风能、水电、生物能、海洋能和地热能，其中风能、太阳能、生物质能、地热能是区域范围内最常用的可再生能源。相关研究表明，与传统或单一来源能源供应系统相比，园区综合能源系统集成可再生能源系统能够将碳排放量减少 10 %至 50 %，并降低运营成本40%左右。[4]为构建碳中和能源系统，需要尽量提高可再生能源在园区能源系统中的渗透率。但是，随着风光等灵活性可再生能源的比例的增加，会对电网的安全稳定运行带来冲击，从而产生消纳成本。[5]因此，园区能源系统如何应对高比例可再生能源的消纳，减少对园区电网的冲击、减少消纳成本，是未来园区综合能源系统构建的重点。

不同可再生能源具有不同的特性，例如风光出力具有随机性和波动性，且风光出力在时间上具有一定的互补性[6]；生物质能和地热能不受气候条件的影响，能源供应的稳定，不需要储能设备来管理电力需求的波动。因此，园区的可再生能源配置方式最好采用混合模式，通过规划、调度和其他技术的协调，探索多种可再生能源的组合利用方式，以最大限度地整合本地的能源潜力。

3.1.2 氢能

氢能是一种优质的储能载体，具有低自放电率和高充放电效率的特点，能够缓冲各能流之间的转换过程，平衡系统中电、热、冷等能源供应，让系统更好地利用可再生能源，避免各能源生产与耦合设备不合理运行造成额外的运行成本。[7]梁涛等人提出了一种氢耦合电-热综合能源系统，氢能的加入能够有效实现能源灵活利用，提高综合能源系统的经济性和低碳性。[8]He 等人利用提出的优化框架优化了一个利用可再生能源和传统火电满足系统的电力、供热和制冷需求，并扩展氢存储子系统以用于重载燃料电池汽车加油的系统，结果发现氢气对系统减排效果明显。[9]

目前来说，尽管氢气具有很大的潜力，但是由于制取成本依旧较高，储存和运输难度较大，基础设施并没有广泛普及等原因，氢气并没有广泛运用于园区的能源系统，需要进一步的技术突破、成本降低和基础设施建设。同时，政策支持和市场培育也是关键，以提高氢气在能源系统中的应用可行性和经济性。

3.2 资源利用高效化

对于园区资源利用来说，高效的资源利用方式是减少资源浪费、降低系统排放的重要方式。为了实现这一目标，需要研究储能技术和各种跨部门的能源转化技术。

3.2.1 储能

储能作为一种高效的资源利用技术，能够通过削峰填谷，减少因供需不平衡造成的能源浪费，提高能源的利用效率，对于碳中和园区综合能源系统的构建，发挥着至关重要的作用。

（1）电能储存

电能存储系统作为一种灵活性可调节资源，在源侧可以平抑间歇性可再生能源的出力波动；在网侧能够参与电压和频率调节，改善潮流分布，提高系统的稳定性；在负荷侧可以保障供能的质量和可靠性，降低供能成本；同时也能通过峰谷套利和提高系统运行效率产生经济和环境效益。[10]因此，电能存储是构建园区综合能源系统的不可或缺的组成部分。电池储能（Battery Energy Storage System，BES）和电动汽车（Electric vehicle，EV）存储是最适合园区使用的电能存储技术。

BES 具有较高的能量密度和快速响应能力，是最为广泛使用的电能储存技术，高可再生能源渗透系统中最佳储能电池容量和能源管理策略的方法的研究是目前的研究重点。Yang 等人指出为了保证 BES 系统调度的经济性，需要解决可再生能源发电和 BES 交互的不确定问题。[11]此外，随着我国电动汽车的逐步普及，电动汽车的负荷规模逐渐扩大，其储能特性逐渐被人们所认知。车辆到电网（V2G）技术将车辆作为一种储能单元，通过协调车辆和电网之间能量和信息的传递，能够做到电动汽车充电的灵活性与可再生能源的同步，更大程度的发挥电动汽车的储能特性。[12]

（2）热能储存

热能储存（Thermal Energy Storage，TES）是一种成熟的概念，用于能源系统中平衡电力、供暖和制冷的需求。对于园区而言，TES 提供了一种可行的可再生能源节约解决方案，可以与电转热（Power to Heat，P2H）和热电联产系统（Combined Heat and Power，CHP）进行集成，以提高能源利用效率，并

提高能源系统的可靠性。但是各种储热技术结合到能源系统中的可行性、成本和实际有效性仍然没有达成共识，不同热源（包括太阳能、工业废热和发动机废热）的匹配和储能容量配置是保证储热系统运行效率的重要方式。[13]

3.2.2 Power-to-X

随着园区可再生能源比例的逐渐增加，急需灵活性技术来实现能源系统的稳定运行，避免可再生能源波动对整个能源系统的冲击。传统的吸收式制冷、CHP 设备已经在很大程度上实现了不同能源形式的转化。2010 年以后，随着可再生能源发电成本显著下降，通过相关技术实现可再生电力大规模的向其他能源或者资源的转化，以深入耦合各个能源部门，则提供了园区能源转化的另一个解决办法。这个概念被称作 Power-to-X，其中 X 表示利用可再生能源技术转化和制取的能量和合成物（即燃料、化学品、热能等最终产品）。

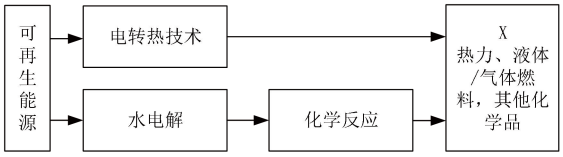


图 3 Power-to-X 路径

由于电解水制氢装置具有较为快速的调节能力（电解槽可以在几分钟甚至几秒钟内达到满负荷运行）[14]、氢能远高于其他能源载体的能量密度和相对较低的存储成本，电转气(Power to Gas，PtG)制氢技术可以作为避免弃风、弃光的措施，以平衡负载或提供其他电网服务。在 PtG 价值链的更下游，氢可以作为中间材料来合成其他产品，称为“氢到 X”（HtX）。HtX 的可能应用路径包括：生产合成燃料，例如甲醇或生物燃料（HtF-S）；通过甲烷化生产“绿色”气体（PtG-M）。因此，氢可以将电力部门与其他能源密集型部门（热力、运输、工业）联系起来，以提高能源的利用效率。

然而 PtG 的应用成本高昂，电解效率的提高有限，因此 PtG 利用的经济性往往取决于与其他转换器的集成，需要研究电转气技术与多类型储能设备的联合配置优化问题，以提高系统风电消纳，提高系统的经济性。[15]

3.3 技术运用负碳化

在零碳园区的建设过程中，除了在能源结构和资源利用方面进行减碳外，还需要在生产和工艺过程中部署相应的碳捕集和利用技术，以保证系统能够容纳一定的碳排放量。

一种有效尝试是将碳捕获、利用和封存（Carbon Capture,Utilization，and Storage，CCUS）与综合能源系统相结合。[16]通过 CCUS 捕获燃料燃烧之前、期间或之后产生的二氧化碳，捕获的二氧化碳可以作为相关化学反应的原料，或者与大气隔离进行封存。[17]CCUS 技术尽管潜力巨大，但目前面临技术和经济等方面的限制。技术层面，不同来源的二氧化碳纯度不一，如燃煤电厂排放的二氧化碳含 SO_x、NO_x 等杂质，需严格纯化处理，增加了复杂性和成本。利用方面，将二氧化碳转化为化学品或能源产品需新技术开发和市场培育，涉及大规模资金投入和技术创新。未来需通过技术革新降低成本，并探索政策和市场机制支持，以保证技术在园区综合能源系统建设的经济可持续性。

3.4 园区规划综合化

在碳中和园区综合能源系统的建设过程中，能源结构、资源利用技术和负碳技术构成园区减碳的物理基础。在此之上，需要针对各种可再生能源和低碳技术的相应特点，采用不同的规划方法，以保证园区的技术、经济和环境相适应。

3.4.1 不确定性规划

碳中和园区综合能源系统的不确定性因素大致可分为可再生能源发电的不确定性、用户负荷的不确定性、能源价格和市场规则的不确定性。[18]可再生能源发电方面，可再生能源输出的日前预测误差高达装机容量的 25 %~40 %。[19]负荷侧，碳中和综合能源系统涵盖了电、气、热、冷等多种形式的能源，其影响因素众多。但是相较于可再生能源系统的出力，负荷一般有规律可循，因此负荷预测的准确率往往远高于可再生能源。[20]除此之外，在综合能源市场中，电价、热价、冷价、碳价等充满不确定性，交易价格受多种能源供需、网络拥堵程度等影响，也与交易模式的不

同发展阶段有关。[21]最后，在多能源交易市场中，不同能源的交易周期在时间尺度上不同，容易出现信息延迟，同时用户对不同能源价格的敏感度也不同，参与响应具有随机性和滞后性，因此都会产生一定的不确定性。

为了解决园区不确定性对系统的影响，需要在综合能源系统的规划阶段对系统的不确定性进行建模，以此分析不确定性对运行的影响，从而能够构建最佳能源利用效率的综合能源系统。目前考虑不确定因素的综合能源系统优化运行方法主要分为随机优化法、鲁棒优化法、区间优化法、模糊优化、信息间隙决策理论（IGDT）等。优化目标可分为：经济性、环保性、可靠性、灵活性或其组合。

3.4.2 多能源协同规划

碳中和园区综合能源系统的另一个特点是具有风、光、水、热、电、冷、气等多种能源。在能源系统的规划阶段，需要基于各能源子系统特性及其相互作用研究多能系统的耦合互补特性，各能流特征参数间的耦合关系及不同能量品质的梯级利用机制，开展多能源的联合优化研究，建立多源异质能源系统的统一模型。

吕佳炜等人从互联和互动两个维度，分别分析多能流耦合、多系统融合、多区域联合的互联形态和多环节、多主体、多时间尺度的互动机制对 DIES 的影响，并在此基础上建立考虑互联互动的 DIES 规划基础模型。[22]孙秋野团队深入研究了 IES 中“三网一体”的网络结构——多能源耦合、全域信息共享及价值发现创造体系，并探讨了其协同管控的技术架构。[23]Guo 等人构建了包括 CHP、HP 和 ES 的电热气联产园区综合能源系统的典型架构，并在此基础上建立了考虑运行成本、能源利用效率和可再生能源消纳率的多目标协同优化模型，并采用多目标粒子群优化算法（MOPSO）对问题进行求解。[24]

3.5 园区运营绿色化

探索绿色化的运营方式，通过引入绿电与绿证机制、应用碳交易机制、利用需求响应技术以及推进数字化管理，降低园区的碳排放，提高可再生能源消纳率，能够为园区的可持续发展奠定坚实的基础。

3.5.1 绿电-绿证-碳交易

低碳电力市场是碳中和园区综合能源系统绿证交易-碳交易的基本背景。电力行业是碳排放的主要来源之一，因此自《京都议定书》生效以来，世界许多国家和地区采取了不同的策略和措施推动低碳电力市场改革。英国政府提出了重大电力市场改革（EMR），以拓展现有电力市场交易机制，实现安全性、可持续性和负担能力三个目标。[25]我国的低碳电力市场由辅助市场、绿电市场、绿证市场、碳市场四大部分组成，如表 2 所示。

表 2 我国低碳电力市场概况[26]

市场类型	市场交易平台	交易周期	标的物
辅助服务市场	电力交易平台	现货	调频、调峰、备用、无功调节及黑启动等服务
绿电市场	电力市场统一服务平台	中长期	绿色电力
绿证市场	绿证认购平台	RPS 履约有效时间	绿色电力证书
碳市场	碳交易系统	配额可无限期存续	碳排放配额

近年来，我国低碳电力市场得到了较快发展，无论是交易规模还是参与人数都显著增加。在此背景下，考虑低碳电力市场的园区综合能源系统研究越来越受到学术界的关注。在辅助服务市场方面，为了解决高渗透率下可再生能源间歇性和波动性导致系统出现不可忽略的频率偏移的问题，需要额外的监管能力来提供辅助服务。目前综合能源系统与电能存储系统（ESS）常被用作解决该问题的有效技术。[27]通过控制综合能源系统 ESS 的充放电过程，可以调节系统的频率和进行系统调峰[28]，以此来获得额外的园区运营经济性激励。

在绿电、绿证市场和碳市场方面，研究通过交易机制确定碳配额设定、碳交易价格和交易产品，以保证园区常态化低碳运行。黄家辉等人提出一种基于绿电指数的园区低碳运行机制，该机

制的核心在于构建绿电指数的评价指标，以对园区楼宇负荷和新能源的动态出力进行评价，研究结果表明该低碳运行机制能够实现园区节能减碳，有效促进新能源消纳。[29]Liu 等人提出了一种考虑碳排放权交易（CET）机制和绿色证书交易（GCT）机制的多区综合能源系统调度模型，分析了将碳-绿色证书交易机制引入 IES 的可行性，并建立了碳-绿色证书联合交易市场框架，其中采用组合双重拍卖（CDA）机制对绿色证书进行投标，以确定绿色证书的最佳交易价格。[30]

表 3 碳交易市场机制[31]

方面	类型	描述
碳配额的确定方式	基准线法	按行业统一碳排放配额分配强度，目前应用最广泛
	历史排放法	根据历史排放水平分配配额
	拍卖法	企业根据自身需求通过拍卖方式获得配额
碳交易价格设定	单一碳价	代表中长期供应量的不变的碳交易价格
	阶梯式价格	价格随碳排放量动态变化
	基于市场的碳价格	代表市场实时供需的碳交易价格
碳交易商品类型	碳排放商品	碳排放许可，鼓励企业减碳减排排放成本
	碳抵消商品	碳排放抵消或参与市场交易，鼓励利用可再生能源和 CCUS 系统等减排技术

3.5.2 需求响应技术

在系统能源管理领域，供给侧和需求侧能源管理是能源控制和调节的主要重点领域。供给侧能源管理涉及能源生产和分配的调节和控制，而需求侧能源管理指用户通过价格或激励措施暂时有计划地调整能源需求，以改善系统用能结构，又被称作需求响应技术。[32]园区需求响应的主要流程分为两步：首先，对园区的各类型负荷的负载曲线进行分析，确定灵活性调节资源，如办公建筑的空调负荷、企业制造过程中的热负荷、园区储能和电动汽车负荷，并且根据相关指标对灵活性性调节资源进行评估。

表 4 灵活性调节资源评价指标[33]

指标	计算公式	参数描述
调节深度	$C_1 = \max\lvert Q_{b,i}^{'t} - Q_{a,i}^{'t}\rvert$	$Q_{b,i}^{'t}$指工业园区负荷调节过程中第 i 个负荷响应前 t 时刻的负荷量，$Q_{a,i}^{'t}$表示调节过程中第 i 个负荷响应后 t 时刻的负荷量。
响应偏差率	$C_2 = \frac{\int_{t_{off,i}}^{t_{on,i}} (P_{i,need} - P_{i,sj})\,d}{\int_{t_{off,i}}^{t_{on,}} P_{i,need}\,dt}$	$P_{i,need}$为工业园区负荷需求响应过程中第 i 个负荷所需的响应量，$P_{i,sj}$为第 i 个负荷的实际响应量。
最大可调节率	$P_{i,max}$	工业园区负荷调节过程中第 i 个负荷的单位时间功率响应的最大值，反映了单位时间功率调节的速度。
最大可调节时间	$\max(t_{off,i} - t_{on,i})$	$t_{off,i}$是第 i 个负载响应后的时间，$t_{on,i}$是第 i 次负载响应之前的时间。
参与调节次数	$N_{i,week}$	工业园区负荷在调节过程中第 i 种负荷每周可接受响应任务的次数。
最小响应补偿	$C_{i,min}$	工业园区负荷需求响应过程中，综合能源中心对第 i 个参与响应的负荷给予的最小补偿。

其次，通过价格机制和激励机制建立园区的需求响应机制，同时建立起园区基于物理过程的能源系统仿真模型，进行系统仿真。Zhang 等人构建了考虑综合需求响应的双层优化模型，结果表明考虑需求响应可以降低系统购电成本，并有助于储能调峰。[34]Hamed 等人的研究表明积极实施需求响应计划，配电网对上游网络的依赖性降低，负载曲线变得更加平滑。[35]

总的来说，对于碳中和园区综合能源系统，采用需求响应技术可以将源-荷波动性的影响控制在可控范围内，来提高能源系统的调节能力，缓解供需错配问题，并且降低系统的运营成本。[36]除此之外，需求响应和“碳交易”市场具有天然的耦合性。需求响应能够响应“碳价格”信号，有助于减轻需求高峰期间的能源价格波动，可以提高效率、

增强能源价格稳定性，从而形成更加可预测和可控的能源定价体系，最终使消费者受益。[37]

3.5.3 数字化管理

低碳技术实现了可再生能源系统中电力、天然气和热能的灵活使用。然而，只有在园区能源网络和提供相关数据的工具之间充分互连的情况下，才能真正保证能源系统的综合能源利用效率。数字技术的发展使得基于物联网的智能解决方案的应用能够解决园区环境中的挑战。[38]首先，园区中的所有参与者，例如制造企业、数据中心、能源中心等都可以连接起来，存储和分析其能源消耗数据。在一天中的某些时段，在当前需要更多能源的各方和其他需要较少能源的各方之间进行平衡，可以实现最低的系统成本并减少拥塞或停电的风险。其次，数字技术还可以在产业价值链的多个阶段发挥优势并优化生产流程。例如，可以预先预测故障，持续筛查机器操作中的任何变化，避免生产和能源使用浪费。最后，园区可以通过数字技术来整合可再生能源，并实现新能源相关的增值服务。对于 Farmanbar 等人来说，通过数字技术构建的智能电网具有兼容性、灵活性和效率的特点，是分布式能源、大规模可再生能源和需求侧管理（DSM）应用系统集成的重要驱动力。[39]

4 案例分析

本节以 EUREF Campus 零碳园区和鄂尔多斯零碳产业园区为研究案例，详细论证了碳中和园区综合能源系统的发展路径和关键技术实际运用的可行性。

（1）鄂尔多斯零碳产业园区综合能源实践

鄂尔多斯零碳产业园位于鄂尔多斯市伊金霍洛旗蒙苏经济开发区，园区以“风光氢储车”五大产业集群为主导，集聚了动力电池与储能、电动重卡、电池材料、绿色制氢等上下游产业。园区构建了融合风、光、储、余热回收以及电网支撑调节的多种能源供应系统，实现源网荷储协同管理、可再生能源高比例消纳。鄂尔多斯零碳产业园的综合能源实践包含以下几个方面的内容。

能源结构方面，鄂尔多斯零碳产业园基于当地丰富的可再生能源资源，园区建设了 30 MW 风电、0.7 MW 光伏、3.7 MW/7.4 MWh 电化学储能，确立了 80 %直供园区、20 %上网回购的绿电供应模式，实现了 100 %的清洁能源供应；在资源利用方面，园区构建了工业余热回收系统，回收工业余热并提升蒸汽冷凝水回收效率，实现工业余能利用率达到 70 %以上，每年节约用电 303 万 kWh，减少化石能源消费 372 吨标煤，减少二氧化碳排放 1 728 吨；在园区规划方面，园区对可再生资源总量和用户负荷进行了合理的评估，对储能、光伏、风电、余热回收系统的装机容量进行了优化设计，以保证园区能源系统建成以后的经济性、稳定性和可靠性；在园区运营方面，园区构建基于 EnOS 系统的智慧物联能源调度平台和方舟碳管理系统。其中智慧物联能源调度平台通过源网荷储协同管理，更好的匹配出力和负荷，实现可再生能源的高效利用、风光储一体化的稳定运行、工业园区负荷的精准管控，余热余能的充分回收；方舟碳管理系统追踪碳足迹，实现实时能碳核算、及时预警告警、能碳数据分析、节能降碳服务四大功能，并通过“电碳一张图”方便政府和企业进行可视化分析。

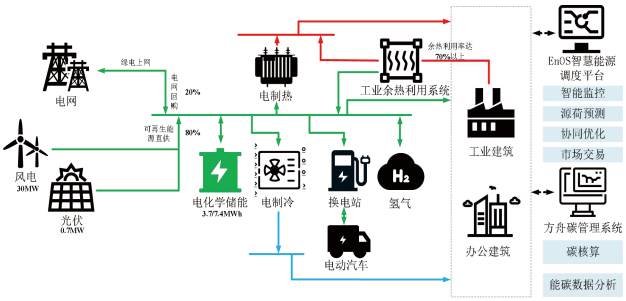


图 4 鄂尔多斯零碳产业园综合能源实践

（2）EUREF Campus 零碳园区综合能源实践

德国 EUREF-Campus 零碳科技园位于柏林市区西南方，占地 5.5 公顷，涵盖 25 栋建筑，约有 150 家创新型企业、近 3 500 人入驻。EUREF-Campus 作为欧洲首个零碳智慧园区，以能源转型赋能零碳智慧园区建设，实现了从百年前的煤气厂向零碳智慧园区的蜕变。该园区具体综合能源实践包含以下几个方面的内容。

能源结构方面，大规模的使用可再生能源，包括光伏、风电、地热，同时购买生物甲烷并入管网，在园区实现生物甲烷的热电联产，并通过热电站对园区进行供暖、制冷和供电；资源利用方面，园区能源中心配备热水、冷水储存设备和电池储能系统，实现能源的大规模储存。园区采用电制热和电制冷技术，能够提高绿电消纳和园区多源化的能源供应。同时园区内交通、清洁打扫全部应用电动汽车来完，采用 V2G 技术，将电动车队集成到智能电网中，利用公交的时间安排固定和电池容量大的特点，探究电动公交车用于储能的可能性；园区运营方面，大规模运用数字化和智能化技术，建立零碳智慧能源体系，涵盖设备监测和采集系统，PME 电能管理系统、能耗监控系统。基于园区内各类能源数据进行综合调度和能耗管理优化，利用相关碳数据管理、碳核算模型、碳足迹溯源等指标助力决策者完成智慧决策。

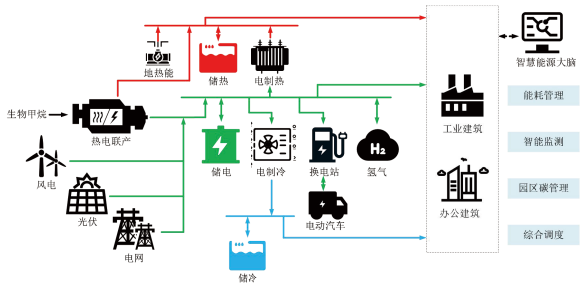


图 5　EUREF Campus 零碳科技园综合能源实践

5 结语

在低碳发展背景下，碳中和园区代表了园区发展的未来方向，其建设具备深远的实践意义和研究价值，有助于深化低碳技术的研究与应用。本文深入探讨了碳中和园区综合能源系统的发展路径，从能源结构、资源利用、固碳技术、规划技术和运营技术等方面详细阐述了碳中和园区综合能源系统的研究框架。在园区能源结构方面，通过整合光伏、生物质等可再生能源和氢能等清洁能源，提升园区产业的能源自给能力；在资源利用方面，通过构建高效的储能设施、应用能源转化技术，保障能源供应的连续性和稳定性，提高能源使用效率；在规划技术方面，针对不同可再生能源和低碳技术特点，采用灵活多样的规划方法，确保技术、经济和环境的协调发展；在运营技术方面，通过绿电与绿证机制、碳交易机制的引入，以及需求响应技术的应用和数字化管理的推进，提升园区的经济效益，为可持续发展提供坚实支撑。最后，我们通过两个案例的分析，论证了本文所提出的碳中和园区综合能源系统发展路径的可行性。总的来说，希望本文所提的研究框架能为未来碳中和园区综合能源系统的发展和实践提供一定的参考。

参考文献：

[1] 陈艳波, 张宁, 李嘉祺, 等. 零碳园区研究综述及展望[J/OL].中国电机工程学报, 1-21[2024-06-06]

[2] Song D, Meng W, Dong M, et al. A critical survey of integrated energy system: Summaries, methodologies and analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 266: 115863

[3] 葛磊蛟, 李京京, 李昌禄, 等. 面向零碳园区的综合能源系统优化运行技术综述[J]. 电网技术,2024,48(5):1821-1835

[4] Zhu Y, Wu S, Li J, et al. Towards a carbon-neutral community: Integrated renewable energy systems (IRES)–sources, storage, optimization, challenges, strategies and opportunities[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 83: 110663

[5] Heptonstall P J , Gross R J K. A systematic review of the costs and impacts of integrating variable renewables into power grids. Nature Energy, 2020:1-12

[6] 胡宏彬, 景志滨, 郭琦, 等. 考虑出力波动性及间歇性的风能太阳能互补性评估方法[J/OL].现代电力,1-8[2024-06-24]

[7] 郭扬, 吕一铮, 严坤, 等. 中国工业园区低碳发展路径研究[J].中国环境管理,2021,13(1):49-58

[8] 梁涛, 柴露露, 谭建鑫, 等. 基于深度强化学习算法的氢耦合电热综合能源系统优化调度[J/OL]. 电力自动化设备:1-16[2024-06-24]

[9] He J, Wu Y, Wu M, et al. Two-stage configuration optimization of a novel standalone renewable integrated energy system coupled with hydrogen refueling[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251: 114953

[10] Dallinger D, Gerda S, Wietschel M. Integration of intermittent renewable power supply using grid-connected vehicles–A 2030 case study for California and Germany[J]. Applied Energy, 2013, 104: 666-682

[11] Yang Y, Bremner S, Menictas C, et al. Modelling and optimal energy management for battery energy storage systems in renewable energy systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112671

[12] Zou W, Sun Y, Gao D, et al. A review on integration of surging plug-in electric vehicles charging in energy-flexible buildings: Impacts analysis, collaborative management technologies, and future perspective[J]. Applied Energy, 2023, 331: 120393

[13] Li Z, Lu Y, Huang R, et al. Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116277

[14] Godula-Jopek A. Hydrogen production: by electrolysis[M]. John Wiley & Sons, 2015

[15] Thema M, Bauer F, Sterner M. Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112: 775-787

[16] Shi Z, Yang Y, Xu Q, et al. A low-carbon economic dispatch for integrated energy systems with CCUS considering multi-time-scale allocation of carbon allowance[J]. Applied Energy, 2023, 351: 121841

[17] Zhang X, Zhang Y. Environment-friendly and economical scheduling optimization for integrated energy system considering power-to-gas technology and carbon capture power plant[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123348

[18] Fan H, Wang C, Liu L, et al. Review of Uncertainty Modeling for Optimal Operation of Integrated Energy System[J]. Frontiers in Energy Research, Frontiers Media SA, 2022, 9

[19] Zhang L, Tang W, Liang J, et al. Coordinated day-ahead reactive power dispatch in distribution network based on real power forecast errors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(3): 2472-2480

[20] Al Mamun A, Sohel M, Mohammad N, et al. A comprehensive review of the load forecasting techniques using single and hybrid predictive models[J]. IEEE access, 2020, 8: 134911-134939

[21] 卢炳文, 魏震波, 魏平桉, 等. 考虑多重区间不确定性的用户侧综合能源系统双层优化配置[J]. 中国电力,2022,55(3):193-202

[22] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4021

[23] 孙秋野, 胡杰, 胡旌伟, 等. 中国特色能源互联网三网融合及其“自–互–群”协同管控技术框架[J]．中国电机工程学报，2021，41(1)：40-51

[24] Guo W, Wang Q, Liu H, et al. Multi-energy collaborative optimization of park integrated energy system considering carbon emission and demand response[J]. Energy Reports, 2023, 9: 3683-3694

[25] Newbery D M. Reforming competitive electricity markets to meet environmental targets[J]. Economics of Energy & Environmental Policy, 2012, 1(1): 69-82

[26] 王家豪, 马恒瑞, 王波, 等. 面向综合能源系统的辅助服务市场与多类型市场耦合关系分析[J].综合智慧能源,2023,45(10):82-92

[27] Ma H, Wang B, Gao W, et al. Optimal Scheduling of an Regional Integrated Energy System with Energy Storage Systems for Service Regulation[J]. Energies, MDPI AG, 2018, 11(1): 195

[28] 陈大宇, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):9-13

[29] 黄家晖, 次仁欧珠, 周欢, 等. 基于绿电指数的园区常态化低碳运行机制[J]. 高电压技术,2022,48(7):2554-2562

[30] Liu D, Luo Z, Qin J, et al. Low-carbon dispatch of multi-district integrated energy systems considering carbon emission trading and green certificate trading[J]. Renewable Energy, 2023, 218: 119312

[31] Sun D, Liu Z, Shao J, et al. Review on low carbon planning and operation of integrated energy systems[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(8): 3201-3215

[32] Lu Q, Guo Q, Zeng W. Optimization scheduling of integrated energy service system in community: A bi-layer optimization model considering multi-energy demand response and user satisfaction[J]. Energy, 2022, 252: 124063

[33] Cui J, Duan C, Wang H, et al. Quantitative evaluation method of load side flexibility for industrial park[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2247(1): 012038

[34] Zhang H, Chen Y, Liu K, et al. A novel power system scheduling based on hydrogen-based micro energy hub[J]. Energy, 2022, 251: 123623

[35] Hosseinnia H, Modarresi J, Nazarpour D. Optimal eco-emission scheduling of distribution network operator and distributed generator owner under employing demand response program[J]. Energy, 2020, 191: 116553

[36] Su Y, Zhou Y, Tan M. An interval optimization strategy of household multi-energy system considering tolerance degree and integrated demand response[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114144.

[37] Alabi T M, Agbajor F D, Yang Z, et al. Strategic potential of multi-energy system towards carbon neutrality: A forward-looking overview[J]. Energy and Built Environment, 2023, 4(6): 689-708

[38] Mohanty S P, Choppali U, Kougianos E. Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone[J]. IEEE consumer electronics magazine, 2016, 5(3): 60-70

[39] Farmanbar M, Parham K, Arild Ø, et al. A widespread review of smart grids towards smart cities[J]. Energies, 2019, 12(23): 4484

基于 CFD 模拟的四川省凉山州典型区域风能资源及风机排布最优间距研究

叶瑶[1] 袁熹[2]

1.四川省气象服务中心，成都 610072；2.东方电气（成都）工程设计咨询有限公司，成都 611731

摘要：本文利用四川省凉山州会东县、美姑县以及盐源县三个典型区域内测风塔数据，通过 CFD 技术对典型区域进行风能资源微尺度模拟，并进行详细风资源分析以及风机排布最优间距分析。结果表明：区域内年平均风速大值区基本位于山脊；山区环境湍流大于平地，湍流高值区出现在地形变化复杂地带；风切变的极大值区一般位于山坡处。其中，美姑地区山脊 100 m 高度年平均风速在 7 m/s 以上，湍流值位于 0.09~0.34 之间，山脊处的平均风切变指数为 0.19；盐源地区山脊 100 m 高度年平均风速在 5 m/s 以上，平均湍流值位于 0.13~0.45 之间，山脊处平均风切变指数为 0.14；会东地区 100 m 高度年平均风速在 8 m/s 以上，平均湍流值位于 0.11~0.38 之间，山脊处平均风切变指数为 0.21。通过综合考虑主风向上下游风机间尾流效应以及工程量，以度电成本为最优，得出凉山州会东县某区域的风力发电机组最优间距为 5.7D（D 为风轮直径）。

关键词：CFD 模拟；凉山州；风资源；风机排布

中图分类号：TK81　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0028-06

Study on Wind Energy Resources and Optimal Spacing of Wind Turbine Arrangement in a Typical Region of Liangshan Prefecture, Sichuan Province Based on CFD Simulation

YE Yao[1], YUAN Xi[2]

(1.Sichuan Meteorological Service Center, 610072, Chengdu , China; 2.Dongfang Electric Engineering & Consulting Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: Based on the data of wind mast in three typical regions of Huidong County, Meigu County and Yanyuan County, Liangshan Prefecture, Sichuan Province, this paper uses CFD technology to conduct micro-scale simulation of wind energy resources in typical regions, and conducts detailed wind resource analysis and optimal wind turbine arrangement spacing analysis. The results show that the maximum value area of annual mean wind speed in the region is basically located in the ridge; The environmental turbulence in mountain area is greater than that in flat area, and the high turbulence value area appears in the terrain with complex changes. The maximum value area of wind shear is generally located on the hillside. In Meigu area, the average annual wind speed of mountain ridge at the height of 100m is over 7m/s, the turbulence value is between 0.09 and 0.34, and the average wind shear index at the mountain ridge is 0.19. In Yanyuan area, the average annual wind speed of mountain ridge at the height of 100m is above 5m/s, the average turbulence value is between 0.13 and 0.45, and the average wind shear index at the mountain ridge is 0.14. The average annual wind speed at the height of 100m in Huidong area is over 8m/s, the average turbulence value is between 0.11-0.38, and the average wind shear index at the mountain ridge is 0.21. Based on the comprehensive consideration of the wake effect between the upstream and downstream wind turbines of the main wind direction and the amount of engineering, the optimal distance of wind turbines in Huidong County of Liangshan Prefecture is 5.7D (D is the diameter of the wheel of wind turbine).

Key words: CFD simulation; liangshan prefecture; wind resources; wind turbine arrangement

收稿日期：2024-01-22

基金项目：四川省气象局-青年专项（SCQXKJQN202219）；气象服务创新发展专项（FWCX202301）

作者简介：叶瑶(1989一)，女，2016 年毕业于成都信息工程大学气象学专业，研究生，工程师。现任职于四川省气象服务中心，主要从事新能源研究工作。

随着全球气候变化的加剧，可再生能源的开发和利用已经成为全球范围内的热门话题。[1-3]四川省凉山州地区受地形效应及西南季风影响，是四川省范围内风能资源的极大值区[4]，其风能资源的开发和利用备受关注。对于凉山州而言，风能资源的开发不仅可以为当地经济发展注入新的动力，还可以促进全社会向可持续能源的转型。

目前关于凉山州风能资源的研究，主要集中气象资料统计、区域中尺度气象数据模拟以及水风光互补层面，对于区域内风资源精细化模拟分析却鲜有研究。莫芳等[5]利用凉山州地区气象站10 m高度风塔资料，统计出凉山州风能资源可利用区及贫乏区。张展硕和段炼[6]利用WRF模式，对西南地区近地面风速进行模拟，得出西南地区风资源分布特征。陈汉雄[7]针对凉山州地区丰、平、枯水期的风、水电出力特性，探讨风、水电季节性互补，以增加清洁能源的外送能力。

关于风机排布的尾流研究，目前主要集中于风场尾流模拟研究以及对风机发电量的影响，并未从风场整机经济考虑，对风机布置优化提出解决方案。李林敏等[8]运用LBM-LES方法，对复杂地形的风电场流场进行多尺度仿真，计算出尾流效应对风资源的影响。高晓清等[9]针对甘肃酒泉桥东第一风电场，分析风机的尾流效应影响，表明风电机组不仅受尾流影响，自由大气的动能补偿作用也十分关键。张翔等[10]利用Wind PRO仿真软件，并基于Jensen尾流模型，对风电场布置进行尾流优化处理，使发电量提高10.5 %。刘晴晴等[11]利用Wasp10.0风资源评估软件，对风电场流场进行仿真，结果表明在主风向上不断提高前后排风机轮毂高度差值，即增加后排风机塔筒高度可减小尾流损失。

因此基于目前研究成果，本文利用测风塔数据，对四川凉山州部分典型山地地区进行微尺度风资源模拟，并对该区域进行风资源分析。根据该区域风机排布尾流影响，探究主风向上风机排布间距的最优距离，对指导风电场风机排布提供参考。

1 典型区域风资源分析

根据凉山州风能资源图谱，定义风能最为集中的会东县、风能资源中等水平的美姑县以及风能资源一般的盐源县为凉山州三个典型区域[12]，并对典型区域风资源进行详细分析。

利用凉山州盐源、美姑以及会东三个典型山地风场区域测风塔数据，选用测风塔基本信息如表1所示。采用2012年1月1日至2021年1月1日近10年的MERRA2再分析数据[13-14]，将三塔数据订正成同一时间段，并通过CFD技术进行风能资源微尺度模拟[15-16]，其模拟水平分辨率为70 m×70 m，得出凉山州三个典型区域范围内的100 m高度的风能资源概况。

本文采用的CFD模拟器为Meteodyn WT，地形数据采用SRTM90m，粗糙度采用ESA300 m，最小垂直分辨率为6 m，湍流模型采用Frandsen2007，并将莫宁-奥布霍夫长度引入该湍流模型中。

表 1 凉山州典型地区测风塔基本信息

典型区域测风塔编号	选取测风塔测风时段	测风塔位置	测风塔高度
盐源 01#	2018-4-1 至 2019-3-31	27.7142°N 101.6031°E	100
美姑 02#	2015-9-1 至 2016-8-31	28.4382°N 103.2547°E	100
会东 03#	2015-1-1 至 2015-12-31	26.4394°N 102.8909°E	100

图1为凉山州三个典型区域范围内100 m高度年平均风速分布图。可以看出：模拟区域范围内风速大值区基本位于山脊。其中美姑区域内，山脊100 m高度年平均风速在7 m/s以上，其中高值区域主要集中在与马边县交界的瓦候乡杜觉拉达地区、与峨边县交界的瓦候乡瓦侯能和地区、与雷波县交界的合姑洛乡地区以及洪溪镇山脊地区，这些地区100 m高度年平均风速可达10 m/s以上。盐源区域内，山脊100 m高度年平均风速在5 m/s以上，其中高值区主要集中在卫城镇部分山脊、沃底乡部分山脊、与盐边县交界的润盐镇山脊以及与冕宁县交界梅子坪镇山脊处，其100 m高度年平均风速可达7 m/s以上。会东区域内，大部分地区100 m高度年平均风

速在8 m/s以上，但高值区风速低于美姑地区，其中铅锌镇大部分山脊、县野租乡部分山脊以及鲁吉镇部分山脊100 m高度年平均风速在9 m/s以上。

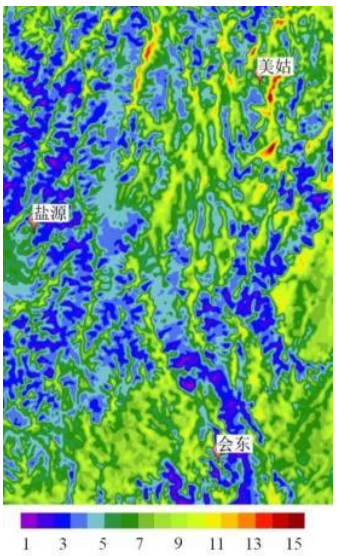


图1　凉山州典型地区100 m高度年平均风速分布（单位：m/s）

环境湍流强度是影响风力发电机组疲劳荷载的重要因素之一[17]，湍流强度不仅与地形有关，其环境下垫面粗糙度以及平均风速也会对湍流强度产生影响。[18-20]因此，本文利用CFD技术模拟出凉山州典型区域100 m高度处平均湍流强度，如图2。可以看出：整个区域内受地形影响，山区环境湍流大于平地；湍流高值区基本位于地形变化复杂区域；在山区，山脊处湍流强度弱于山坡处。其中美姑区域山脊处，湍流值位于0.09~0.34之间；盐源区域山脊处，平均湍流值位于0.13~0.45之间；会东区域山脊处，平均湍流值位于0.11~0.38之间。根据IEC61400-1风机等级标准（表2），IEC A+类风电机组湍流强度（Iref）限值为0.18，因此风电机组应布置在湍流强度（Iref）小于0.18的区域中。

表2　IEC61400-1风机等级标准

风机等级		I	II	III	S
Vave	(m/s)	10	8.5	7.5	
Vref	(m/s)	50	42.5	37.5	
A+	Iref(-)		0.18		风机厂家自定义
A	Iref(-)		0.16		
B	Iref(-)		0.14		
C	Iref(-)		0.12		

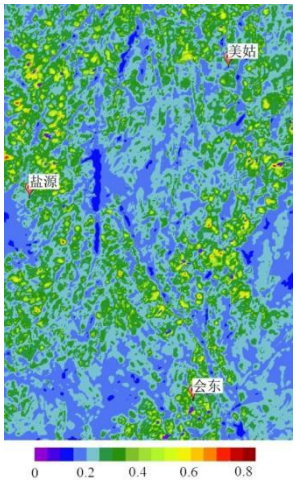


图2　凉山州典型地区100 m高度平均湍流强度分布

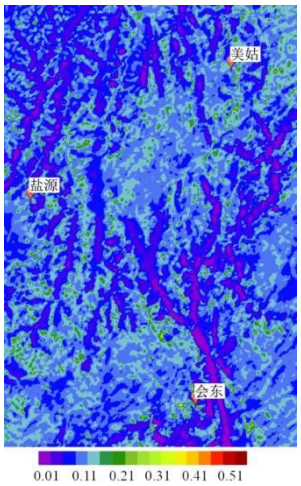


图3　凉山州典型地区80 m~140 m高度整层平均风切变分布

风切变值的变化与风电机组塔筒高度的选择密切相关。一般情况下，风切变值越高，选择高塔筒风机带来的发电量的提升量越大。根据四川区域实际经验，当风切变值位于0.07~0.12时，风机最宜轮毂高度为90 m；当风切变值位于0.13~0.16时，风机最宜轮毂高度为125 m；当风切变值大于0.17时，风机最宜轮毂高度为140 m。[21]为了探究凉山州典型区域内风力发电机组轮毂的最佳高度，本文给出了区域内80~140 m高度之间整层平均风切变分布，如图3。可以看出：区域内随着海拔高度的增加，风切变值增高，但到了山脊处，由于下垫面作用影响减小，风切变值又呈减小趋势，切变的极大值区一般位于山坡处。风力发电机组一般布置于山脊处，因此在美姑地区，山脊处的平均风切变指数为0.19；盐源地区，山脊处平均风切变指数为0.14；会东地

区，山脊处平均风切变指数为0.21。由此可见，会东及美姑地区，大部分山脊适宜布置高塔筒风机；盐源地区，大部分山脊的风机轮毂高度选择以120 m以下为宜。

2 风机排布最优间距分析

主风向下游风电机组与上游风电机组的排布间距的选择不仅受上游风电机组尾流效应造成的风能损失，又受到建设成本影响。[22-23]若无限制扩大风机间距，尾流效应影响虽然减小，但会导致连接风机间的集电线路以及道路成本增加。为此，《风电场工程微观选址技术规范》（NB/T 10103-2018）要求，平行于主风向的上下游风机间距不宜小于5倍风轮直径，但此规范中并未给出风机间的最优间距选择。本文以凉山州会东县某区域风场为例，从风机间尾流效应以及工程量两方面着手，以度电成本为最优，探讨风机间的最优布置距离。

本文利用Jensen尾流线性模型进行计算研究。该模型假设：1.初始尾流损失区域范围与上游风力发电机组的直径大小相同；2.上游风力发电机组的尾流影响范围在下游区域呈线性扩张；3.下游区域尾流的速度损失沿来风方向呈线性传播，并与来风距离成正比。Jensen尾流扩散形式如图4所示，其中U_0为计算高度处初始环境风速；U_1为上游风力发电机组风轮后风速；U_2为上游风力发电机组尾流在下游与机位距离x处的风速，即下游第二台风力发电机组的入流风速；r_0为环境风速经过风力发电机组后的尾流区域内初始尾流半径；r_2为距离上游风力发电机组x处的尾流半径；D为风力发电机组叶轮直径。

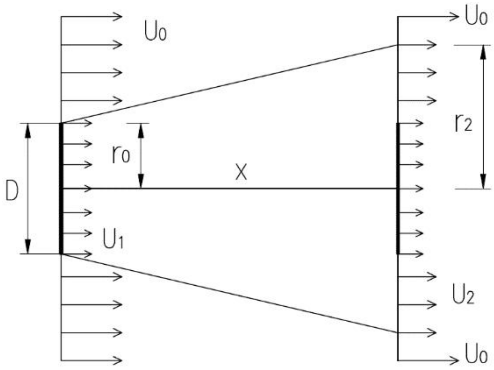


图4 Jensen尾流线性模型示意图

根据Jensen单风机尾流模型计算公式，下游处第二台风力发电机组的入流风速U_2为：

$$U_2=\left[1-(1-\sqrt{1-C_T})\left(\frac{D}{D+2k_w x}\right)^2\right]U_0 \quad (1)$$

其中，C_T为风机推力系数，k_w为尾流坡度常数，根据实际经验，绝大多数陆上风电场，k_w为0.075。[1]再令x=αD，U_2=βU_0，则可得：

$$\beta=\left[1-(1-\sqrt{1-C_T})\left(\frac{1}{1+0.15\alpha}\right)^2\right] \quad (2)$$

以凉山州会东县某区域为例，该区域年平均风速为8.29 m/s，并以WTG-5MW-195型风力发电机组为计算目标，得出该平均风速下的风电机组C_T值为0.593 5。根据公式（2），得出β与α的关系，如下图所示：

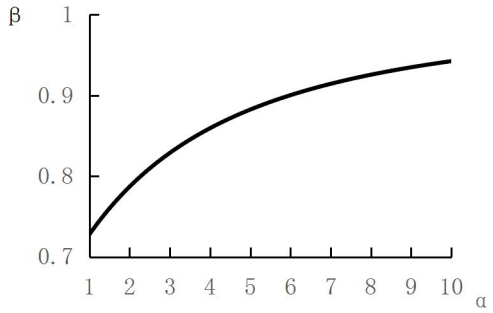


图5 α与β关系图

可以看出：随α值增大，β增大趋势逐渐放缓。即随着风力发电机组间距的增大，上游风机尾流作用对下游风机影响逐渐减小，U_2和U_0间差距逐渐减小，直至趋于平和。

根据风力发电机组发电功率的计算公式：

$$P=\frac{1}{2}C_p\rho AU^3 \quad (3)$$

其中C_p值为风力发电机组风能利用系数，A为风电机组扫风面积，ρ为空气密度，U为叶轮中心处的风速。

利用（3）式以及β值，在上、下游风机威布尔分布不变的前提下，可求出上游风力发电机组和下游风力发电机组之间的理论年发电量差值，即：

$$\Delta Q=\frac{8\,760}{2}\mu C_p\rho A\,(1-\beta^3)\,U_0^3 \quad (4)$$

其中μ为风力发电机组实际折减系数。

根据贝兹理论可知：C_p max=0.593，利用WTG-5MW-195型风力发电机组实际功率曲线可得出在8.29 m/s风速条件下该款风机的C_p值为0.44。根据凉山州会东县实际项目经验，μ暂定为0.78。因此

上下游风力发电机组年发电量差值与α的关系如图6所示，可以看出：与上下游风速差值变化类似，随着α增大，上下游风机发电量差值也呈现逐渐减小趋势，且变化曲率逐渐减小。

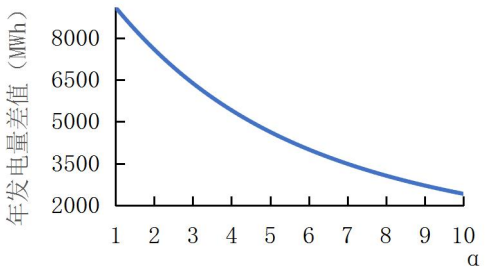


图6　上下游风机年发电量差值与α关系图

增加上下游风力发电机组间距离可减小尾流影响带来的发电量损失，但连接风电机组之间的道路和集电线路里程数增加，造成投资成本增加。因此，本文通过比较发电量增加带来的收益与项目工程投资成本（包括集电线路和道路）增加之间的关系，得出凉山州会东县某区域的上下游风力发电机组间的最佳间距。

根据凉山州会东县某区域实际工程造价：风机间35 kV集电线路平均造价为75万/公里；风机间新建山地道路为50万/公里。根据《四川省发展和改革委员会关于2022年新建风电、光伏发电项目上网电价政策有关事项的通知》（川发改价格[2022]194号），风电上网电价为0.401 2元/kWh。可以计算得出下上游风机道路、集电线路工程投资增加费用和风机生命周期内发电收益差值与α值之间关系（图7）。

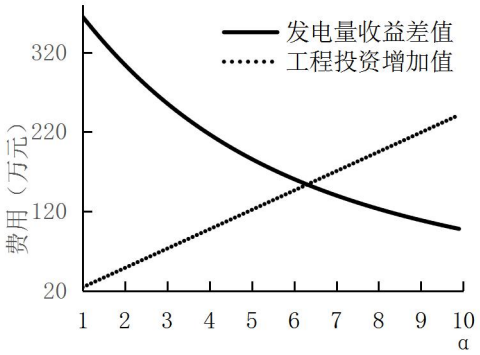


图7　上下游风机工程量投资增加值以及年发电收益差值与α关系图

可以看出：随着上下游风电机组距离增加，道路、集电线路等工程投资呈线性增加，且增长率η=$\Delta W_1/\Delta\alpha$=24.37万元/α（W_1为工程投资变化费用），为一恒定值；而上下游风机生命周期内发电量收益的差值随着距离增加逐渐减小，且减小率λ（λ=$|\Delta W_2/\Delta\alpha|$，$W_2$为发电量收益变化）呈递减趋势。为了判断上下游风机间最优间距，本文给出η与λ之间的关系（图8）。

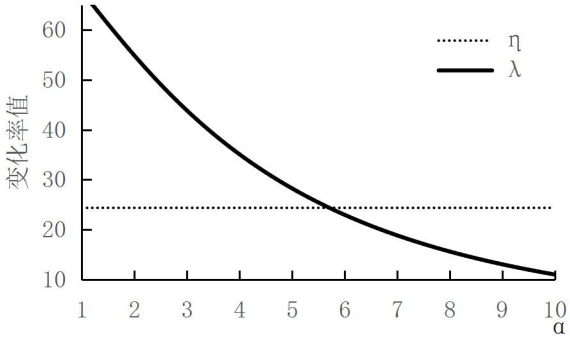


图8　η与λ关系图

通过分析η与λ的变化趋势：1.当λ大于η时，即随着风机间间距增加，此时尾流减小带来的发电量收益的增加变化率是大于由于风机间距增大造成道路和集电线路工程投资增加的变化率，因此继续增大风机间距（即扩大α值）有利于项目整体收益提高；2.当λ小于η时，即随着风机间间距增加，此时尾流减小带来的发电量收益增加的变化率减小，此变化值小于受风机间距增大带来的工程投资增长的变化率，因此继续增大风机间距不利于项目收益率提高；3.当λ等于η时，发电量收益率增加的变化率与投资成本增加的变化率相等，项目整体收益率最高，此时，α=5.7，λ=η=24.37万元/α，即凉山州会东县某区域的风力发电机组最优间距为5.7D（D为风轮直径）。

3　结语

本文对四川省凉山州会东县、美姑县以及盐源县三个典型区域内风资源进行CFD模拟分析以及风机排布最优间距研究，结论如下：

（1）区域内年平均风速分布：风速大值区基本位于山脊。其中美姑地区山脊100 m高度年平均风速在7 m/s以上，高值区主要集中在与马边县交界的瓦候乡杜觉拉达地区、与峨边县交界的瓦候乡瓦

侯能和地区、与雷波县交界的合姑洛乡地区以及洪溪镇山脊地区；盐源地区山脊100 m高度年平均风速在5 m/s以上，高值区主要集中在卫城镇部分山脊、沃底乡部分山脊、与盐边县交界的润盐镇山脊以及与冕宁县交界梅子坪镇山脊处；会东大部分地区100 m高度年平均风速在8 m/s以上，但高值区风速低于美姑地区。

（2）区域内平均湍流分布：山区环境湍流大于平地，湍流高值区基本位于地形变化复杂区域，山脊处湍流强度弱于山坡处。其中美姑区域山脊处，湍流值位于0.09~0.34之间；盐源区域山脊处，平均湍流值位于0.13~0.45之间；会东区域山脊处，平均湍流值位于0.11~0.38之间。

（3）区域内风切变值分布：风切变值随海拔高度增加而增高，到了山脊处，风切变值又呈减小趋势，切变的极大值区一般位于山坡处。美姑地区，山脊处的平均风切变指数为0.19；盐源地区，山脊处平均风切变指数为0.14；会东地区，山脊处平均风切变指数为0.21。

（4）以凉山州会东县某区域风场为例，以度电成本为最优为原则，在上下游风机威布尔分布不变的前提下，计算出平行于主风向上下游风机的最优间距为5.7D（D为风轮直径）。

本文基于度电成本，从尾流对发电量影响以及工程成本两方面考虑，计算出风机间的最优间距。由于暂未考虑垂直于主方向风机的影响，本计算结果仅适用于平行于主方向单排风机的布置方案，但计算方法可复制于其他风电场项目中，为风电场风机优化布置提供了一种全新思路。

参考文献：

[1] veers P, Dykes K, Lantz E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): eaau2027

[2] Ayotte K W, Hughes D E. Observations of boundary-layer windtunnel flow over isolated ridges of varying steepness and roughness[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 112(3): 525－556

[3] Zhang Y, Wang J X, Wang X F. Review on probabilistic forecasting of wind power generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 255-270

[4] 陆鸿彬, 张渝杰, 孙俊, 等. 四川省风能资源详查和评估[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(3): 61-65

[5] 莫芳, 晏惠芬, 郑自君, 等. 凉山州风资源分布特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(2): 57-62

[6] 张展硕,段炼. WRF 模式不同边界层参数对西南地区风资源模拟[J]. 价值工程, 2022, 41(14): 158-160

[7] 陈汉雄. 水风互补四川清洁能源外送优化[J]. 中国电力, 2017, 50(9): 37-43

[8] 李林敏, 杨青, 潘航平. 动态风工况下复杂地形风电场流场多尺度仿真[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 179-185

[9] 高晓清, 陈伯龙, 杨丽薇, 等. 风电场理论与实际出力的比较研究——以甘肃酒泉桥东第一风电场为例[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 431-436

[10] 张翔, 张永刚, 尉孟涛. 基于尾流效应影响的风电场选址规划研究[J]. 工程技术研究, 2018, 28(12): 26-28.

[11] 刘晴晴, 王华君, 何昌国, 等. 基于尾流效应的低风速地区风电场布局优化方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 34-39

[12] 叶瑶, 袁熹, 王逸奇. 基于 WRF 模式的四川省凉山州地区风能资源可开发区域研究[J]. 太阳能学报, 2023, 43(11): 179-185

[13] 任律, 李丽平. 国家自然科学基金委员会地球科学部南京信息工程大学大气资料服务中心资料通讯——MERRA卫星分析资料介绍[J]. 大气科学学报, 2010(2): 253-256

[14] 张双益, 王益群, 吕宙安, 等. 利用MERRA数据对测风数据进行代表年订正的研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(1): 58-62

[15] Schulz C, Klein L, Weihing P, et al. CFD studies on wind turbines in complex terrain under atmospheric inflow conditions[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 524: 012134

[16] Makridis A, Chick J. Validation of a CFD model of wind turbine wakes with terrain effects[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 12－29

[17] 邓英, 周峰, 田德, 等. 不同风湍流模型的风电机组载荷计算研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2395-2400.

[18] 蒋红武, 巫发明, 王磊, 等. 风电场湍流强度对机组结构疲劳安全性的研究[J]. 应用能源技术, 2020, 266(2): 45-50

[19] 程雪玲. 风能模型的发展及 CFD 在风资源开发利用中的应用[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(6): 1-15

[20] Meneveau C. Big wind power: seven questions for turbulence research[J]. Journal of Turbulence, 2019, 20(1): 2－20

[21] 岳俊, 谯刚, 李文龙, 等. 风切变指数对风电机组轮毂高度选取的影响分析[J]. 太阳能, 2023, 346(2): 74-80.

[22] Guo N Z, Zhang M M, Li B. A data-driven analytical model for wind turbine wakes using machine learning method[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115130

[23] Wang Q, Luo K, Yuan R Y, et al. Wake and performance interference between adjacent wind farms: Case study of Xinjiang in China by means of mesoscale simulations[J]. Energy, 2019, 166: 1168-1180

风力发电机组叶片扫塔原因分析及预防

资卢雄　周正强　兰杰　费波　李凡　王辉

东方电气集团东方风电股份有限公司，四川 德阳 618000

摘要：在风电行业竞争激烈的态势下，整机厂商不约而同的选择了叶片轻量化的降本路线，叶片轻量化后，长柔叶片抵御变形的能力不断下降，在极端风况等影响下，行业不同程度的发生叶片扫塔的问题，通过系统的原因分析，发现安装激光雷达和优化控制策略能有效的降低叶片扫塔的风险。

关键词：叶片扫塔；激光雷达；控制策略

中图分类号：TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0034-04

Cause Analysis and Preventive Measures of Wind Turbine Blade Tower Sweeping

ZI Luxiong, ZHOU Zhengqiang, LAN Jie, FEI Bo, LI Fan, WANG Hui

(Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract：In the situation of fierce competition in the wind power industry, the whole machine manufacturers invariably choose the cost-reducing route of lightweight blades. After lightweight blades, the ability of long and flexible blades to resist deformation continues to decline, and the problem of blade tower sweeping occurs in different degrees in the industry. Through systematic cause analysis, the risk of blade tower sweeping can be effectively reduced by installing laser radar and optimizing control strategy.

Keywords：blade sweeping tower; laser radar; control policy

风电作为一种清洁、可再生的能源，是实现我国碳达峰、碳中和的重要支撑。风电行业经历了2020年的陆上风电抢装、2021年的海上风电抢装，现在已经进入了平价上网、市场化运作的新阶段，截止2023年底，我国累计装机容量已超过3.771亿千瓦。随着我国风电行业的高歌猛进，风电机组迭代不断加快，海上机组叶片长度已超143 m，陆上叶片长度已超112 m，叶片大型化带来叶片质量的增加及载荷的增大；同时受行业价格压降的影响，叶片轻量化已成为常规降本手段，叶片轻量化导致叶片的刚度不断下降。叶片轻量化和大型化导致叶片抵抗变形的能力不断下降，叶片净空距离变化较大，叶片扫塔问题频发，严重时可能导致机组倒塌，严重影响机组安全运行，对叶片扫塔问题进行系统的原因分析，制定有效的改善措施能有效的降低机组风险，避免产生较大的经济损失。

1　叶片扫塔问题描述

风力发电机组叶片净空是指风电机组风轮转动叶片扫过塔筒时，叶尖部位距离塔筒的最小几何距离，如下图1：

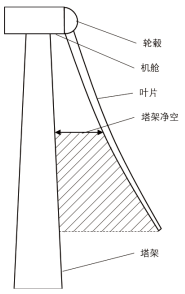


图1　叶片净空距离

收稿日期：2024-06-26

作者简介：资卢雄（1994—），男，2017年毕业于内蒙古科技大学符合材料与工程专业，本科，助理工程师。现在东方风电股份有限公司，主要从事风场叶片质量质量管理工作。

风轮扫过塔筒时，叶片净空距离达到最小，若叶片净空小于 0，叶片叶尖往往会扫到塔筒，导致叶片叶尖损伤或叶片断裂，以及塔筒凹陷等，甚至导致机组倒塌，如图 2。

图 2　某风场叶片扫塔图

2　叶片扫塔原因分析

导致叶片扫塔的原因较为复杂，为查明叶片扫塔的原因，从叶片设计、制造、运输、吊装、运行等环节全生命周期进行原因分析，同时叶片扫塔还与整机控制逻辑等存在一定的联系，对可能导致叶片扫塔的原因进行梳理，如图 3。

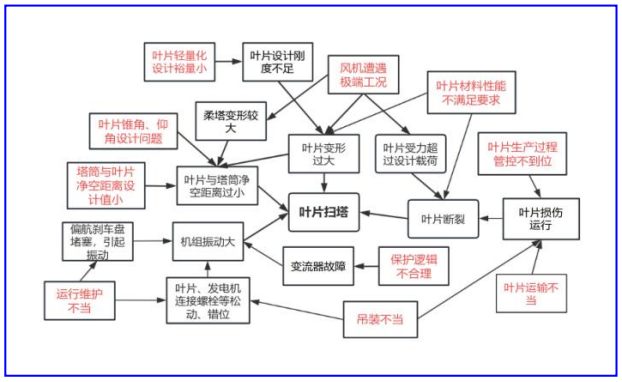


图 3　叶片扫塔可能因子梳理

2.1 叶片设计阶段分析

最小净空距离主要受叶片相对变形量、锥角、仰角等相关因素影响，叶片轻量化设计后，叶片刚度急剧下降，叶片相对变形量随叶片长度变大，可能导致叶片发生扫塔的问题，但可通过叶片锥角和仰角（图 4）的最佳匹配调整最小净空距离，同时最小净空距离一直是整机设计重点考虑的因素，符合 IEC 61400－1－2019 标准。

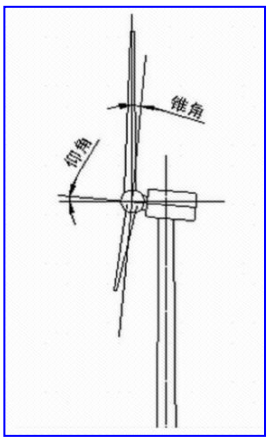


图 4　机组锥角和仰角

2.2 叶片制造阶段分析

叶片生产主要依靠人工，实物质量容易出现一定的波动，存在叶片带着“隐伤”（生产阶段原始缺陷）运行的可能性。根据叶片生产制造过程质量问题统计，对目前发生过扫塔的叶片生产制造过程追溯，未发现与叶片扫塔存在关联的相关损伤，如图 5。

序号	车上检查内容	序号	车下检查内容
1	人孔板及人孔盖外观	14	前缘到货车最低距离位置，叶片内部检查
2	PS 面尖部支架（根部至尖部） 注：斜姿或立姿执行	15	铭牌信息
3	PS 面尖部支架（尖部至根部） 注：斜姿或立姿执行	16	防雨环与叶根端面距离
4	根部 PS 面，外部照含支架位	17	避雷卡槽，绑带固定，绑带数量符合要求。
5	根部 SS 面，外部照含支架位	18	接闪器（SS/PS/铝叶尖）
6	叶片 PS 面大面情况 注：斜姿或立姿执行	19	PS 面尖部航标漆（根部至尖部）
7	叶片 SS 面大面情况	20	叶根内圆全景照
8	SS 面叶片中部（SS 面重心、吊点标识）	21	PS 面叶片中部（PS 面重心、吊点标识）
9	SS 面尖部支架（根部至尖部）	22	隔板距叶根法兰端面距离
10	SS 面尖部支架（尖部至根部）	23	0 刻度条（实际项目配置要求安装个数）
11	叶片工装位置内腔检查（68 米以上）	24	根部 SS 面，内部照含硅胶槽
12	防雨环接口内外照片	25	SS 面尖部航标漆（尖部至根部）
13	叶尖包覆排水孔位置漏出；	26	与叶根工装接触的螺杆垂直度，1 处 1 张，共三张
		27	前缘到货车最低距离位置，叶片外部检查

叶片发货照片-车上
※以上数据均已登录。
QC：[illegible]

4/4

叶片发货照片-车下
※以上数据均已登录。
QC：[illegible]

图 5　叶片发货检查图

2.3 叶片运输阶段分析

叶片运输过程中的损伤，主要集中在运输增强位置及叶尖剐蹭。一方面，根据叶片缺陷机理分析，随着该位置叶片潜在损伤的进一步扩展，运输增强位置周围的结构件（主梁、腹板等）的强度因受损而降低，最终可能导致叶片断裂，但不会导致叶片扫塔；另一方面，叶片运输剐蹭后，叶片的整体强度并未受到影响，叶片的运行姿态仍然正常，一般

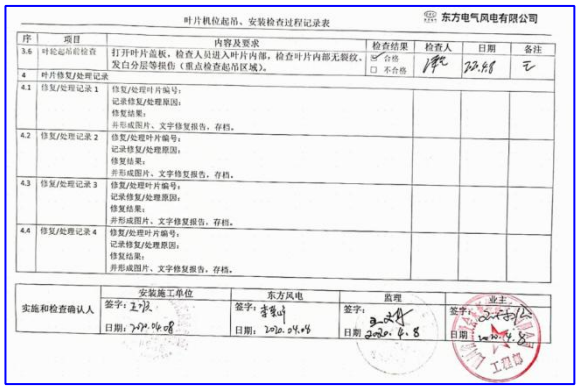
也不会导致叶片扫塔，同时过程追溯也未发现运输异常，详见图 6。

维护内容	维护结果	维护记录 检查结果异常描述及处理方式 螺栓标记线变动数量	检查人员	日期
4.1 变桨减速器与轮毂联接螺栓力矩检查抽检 20%	✓		刘[illegible]	6.10
4.2 变桨电机与齿轮箱联接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
★ 4.3 变桨电气柜与轮毂连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
轮毂清洁，清除杂物	✓	有脱落集油和机[illegible]		
5.0 发电机				
★5.1 发电机与轮毂连接螺栓 100%力矩全检	✓		蔡大学	6.11
★5.2 发电机与主机架连接螺栓 100%力矩全检	✓			
★5.3 发电机轴承压圈螺栓 100%力矩全检	✓			
5.4 发电机刹车钳把合螺栓力矩抽检 20%	✓			
清空油脂集油盘，轴腔及发电机内部油脂	✓	已清理		
6.0 滑环				
6.1 检查滑环系统所有安装螺栓	✓		蔡大学	6.11
7.0 机舱罩				
7.1 机舱罩把合连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓		蔡大学	6.11
7.2 机舱拉杆连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
7.3 气象架与机舱罩连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
8.0 机舱				
8.1 辅助机架与主机架连接螺栓力矩抽检 20%	✓		蔡大学	6.11
8.2 主机架安装平台和各零部件等把合螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
8.3 电葫芦安装固定螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
8.4 柜体安装固定螺栓力矩检查抽检 20%	✓			

图 6　叶片运输检查记录图

2.4 叶片吊装阶段分析

吊装过程安装不当一般容易造成叶片损伤和叶片螺栓预紧不足。根据调查分析，叶片受到损伤后，随着叶片的损伤不断扩展，将会导致叶片气动性能不平衡，机组振动加剧；叶片螺栓如果出现松动或错位，可能会导致叶根法兰与轮毂出现非正常接触，以上因素叠加后，叶片会发生扫塔。通过过程追溯，叶片吊装过程未发现异常，如图 7。



东方电气风电有限公司

叶片机位起吊、安装检查过程记录表

序	项目	内容及要求	检查结果	检查人	日期	备注
3.6	叶轮起吊前检查	打开叶片盖板，检查人员进入叶片内部，检查叶片内部无裂纹、发白分层等损伤（重点检查起吊区域）。	☑合格 □不合格	[illegible]	22.8.8	[illegible]
4	叶片修复/处理记录					
4.1	修复/处理记录 1	修复/处理叶片编号； 记录修复/处理原因； 修复结果； 并形成图片、文字修复报告，存档。				
4.2	修复/处理记录 2	修复/处理叶片编号； 记录修复/处理原因； 修复结果； 并形成图片、文字修复报告，存档。				
4.3	修复/处理记录 3	修复/处理叶片编号； 记录修复/处理原因； 修复结果； 并形成图片、文字修复报告，存档。				
4.4	修复/处理记录 4	修复/处理叶片编号； 记录修复/处理原因； 修复结果； 并形成图片、文字修复报告，存档。				

实施和检查确认人	安装施工单位	东方风电	监理	业主
	签字：[illegible] 日期：2022.08.08	签字：[illegible] 日期：2022.08.08	签字：[illegible] 日期 2022.8.8	签字：[illegible] 日期 2022.8.8

图 7　叶片吊装验收记录

2.5 机组运行阶段分析

2.5.1 机组运行维护分析

维护内容	维护结果	维护记录 检查结果异常描述及处理方式 螺栓标记线变动数量	检查人员	日期
4.1 变桨减速器与轮毂联接螺栓力矩检查抽检 20%	✓		刘[illegible]	6.10
4.2 变桨电机与齿轮箱联接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
★ 4.3 变桨电气柜与轮毂连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
轮毂清洁，清除杂物	✓	有脱落集油和机[illegible]		
5.0 发电机				
★5.1 发电机与轮毂连接螺栓 100%力矩全检	✓		蔡大学	6.11
★5.2 发电机与主机架连接螺栓 100%力矩全检	✓			
★5.3 发电机轴承压圈螺栓 100%力矩全检	✓			
5.4 发电机刹车钳把合螺栓力矩抽检 20%	✓			
清空油脂集油盘，轴腔及发电机内部油脂	✓	已清理		
6.0 滑环				
6.1 检查滑环系统所有安装螺栓	✓		蔡大学	6.11
7.0 机舱罩				
7.1 机舱罩把合连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓		蔡大学	6.11
7.2 机舱拉杆连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
7.3 气象架与机舱罩连接螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
8.0 机舱				
8.1 辅助机架与主机架连接螺栓力矩抽检 20%	✓		蔡大学	6.11
8.2 主机架安装平台和各零部件等把合螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
8.3 电葫芦安装固定螺栓力矩检查抽检 20%	✓			
8.4 柜体安装固定螺栓力矩检查抽检 20%	✓			

图 8　机组维护记录

机组定检维护主要造成螺栓松动和叶片损伤扩展，通过过程追溯，未发现明显的异常，如图 8。

2.5.2 机组运行数据分析

通过机组后台 SCAD 数据分析，发现机组在第一次停机前 1 小时，湍流强度明显增大，并在第一次和第 2 次停机之前，湍流远超 IEC A+标准，详见图 9 和图 10。

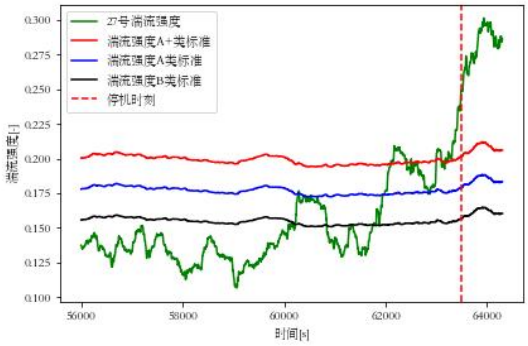


图 9　第一次停机前湍流变化趋势

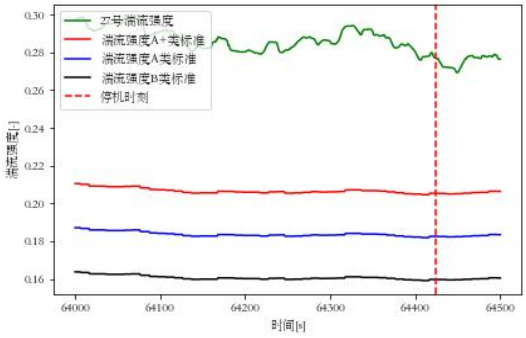


图 10　第二次停机前湍流变化趋势

基于上述的 SCAD 数据，进行风速风向时序分布如图 11 所示，通过仿真计算验证，从风速风向曲线中可以看到各极端工况均存在风速风向突变的特点，按照 IEC 标准中的瞬态风况的特征提取风速风向突变工况，仿真发现风速风向的突变叠加负切变和高湍流会产生负净空的情况，如图 12~14 和表 1。

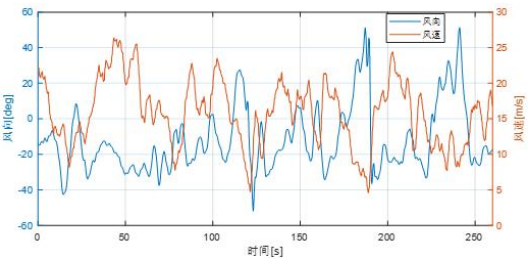


图 11　快照风速风向时序分布

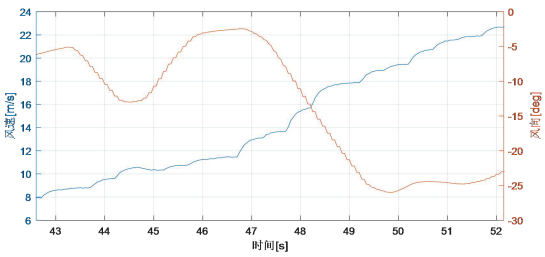


图 12 风速风向图

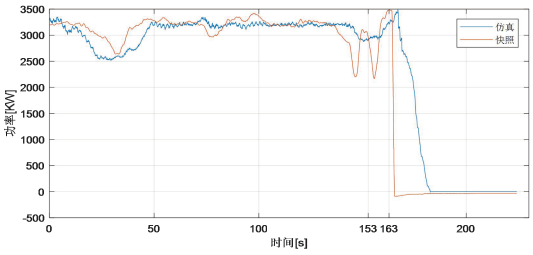


图 13 功率对比图

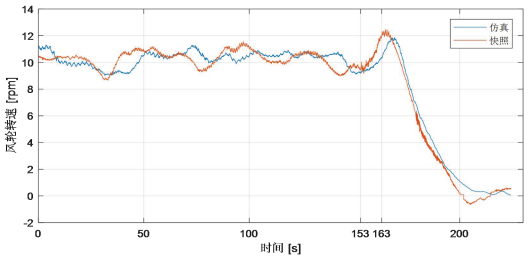


图 14 转速对比图

表 1 最小桨角与净空值

最小桨角（deg）	净空值（m）
-1	-0.16
1	0.72
2	1.01
3	1.14
4	0.89
5	1.04

3 叶片扫塔问题预防

根据上述分析可知，风速风向的突变叠加负切变和高湍流是导致叶片扫塔的根本原因，针对风速风向的突变叠加负切变和高湍流可通过以下措施进行预防：

（1）安装激光雷达：可安装于机舱，进行实时监测叶片净空。结合激光雷达测风，通过主控系统预防出现净空距离为负的情况，在检测到即将产生负净空时提前启用机组保护机制，可有效降低扫塔风险。[1]

（2）控制策略优化：通过增加提前变桨角度，降低提前变桨开启功率，提前变桨功率计算，增加转速输入延迟以及单独设计了依据风轮方位角的独立变桨控制策略，通过仿真分析，优化控制算法控制能够增加净空距离。

4 结语

通过叶片全生命周期分析（叶片设计、生产制造、运输、吊装、运维、运行）可能导致叶片扫塔的因素，对可能造成叶片扫塔的因素按阶段进行详细分析，最终锁定风速风向的突变叠加负切变和高湍流是导致叶片扫塔的原因，通过安装激光雷达和控制策略优化可避免叶片扫塔。

参考文献：

［1］杨翀，王瑞良，孙勇，等．一种风力发电机组主动净空控制策略研究［J］．机电信息，2022 (17) :1-5

风电机组辅助用电容量测试与分析

张春红　王斌　任华彬　罗婧

东方电气集团东方风电股份有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本文主要针对风力发电机组辅助用电设备目前行业尚没有对应的设计规范的情况，通过风机控制器记录辅助设备的运行情况，通过对风力发电机组辅助用电设备的测试数据进行分析，掌握风力发电机组辅助用电的主要运行设备的启动和运行情况，不同设备之间的错峰运行规律，总结风力发电机组辅助用电选型经验系数，为风力发电机组辅助变压器容量计算提供依据。

关键词：风力发电机组；辅助用电；需求系数

中图分类号：TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0038-04

Testing and Analysis of Auxiliary Power Consumption for Wind Turbines

ZHANG Chunhong, WANG Bin, REN Huabin, LUO Jing

(Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: This article mainly focuses on the situation where there is currently no corresponding design specification for the auxiliary electrical equipment of wind turbines in the industry. The operation of the auxiliary equipment is recorded by the wind turbine controller, and the test data of the auxiliary electrical equipment of wind turbines is analyzed to grasp the starting and operating conditions of the main operating equipment of the auxiliary electrical equipment of wind turbines, as well as the staggered operation rules between different equipment, Summarize the experience coefficients for selecting auxiliary electricity for wind turbines, providing a basis for calculating the capacity of auxiliary transformers for wind turbines.

Key words: wind turbine;auxiliary power consumption;demand coefficient

为加快发展新质生产力，推动绿色发展实现电力行业的高质量发展，实现双碳目标，风力发电势必成为绿色能源的主力军。风力发电机组本身的能耗水平越来越重要，风电机组的能耗水平主要取决于内部自用电的设计，这部分的研究行业一直沿用工业建筑的相关设计，可参考性不强且存在资源浪费。

现阶段风电机组自用电的设计主要来源于经验和理论计算。理论计算多参照工业用电设备的需要系数和功率因数，这与风机实际工况并不完全一致；工业负荷一般是根据工作制来决定的，风力发电机组主要根据风速风向等环境条件制定控制策略，工况完全不同，这种计算方法的参考意义有待商榷。检索发现，关于风力发电机组辅助用电或自用电的文献和研究较少，在没有计算方法的情况下，为了保证机组并网出口的发电量，机组自用电一般设计偏于保守。而自用电的多少直接影响电机和变频器主回路的功率，直接影响主回路的成本。在保证机组发电量的前提下，尽量精准的确定机组自用电，对提高整机主回路的经济性，计算功率曲线都非常重要。同时，若机组自用电估算过小，可能存在机组不能满发的尴尬境地，因此自用电的准确设计至关重要。

平价上网时代来临，风机的成本是决定厂家存

收稿日期：2024-06-26

作者简介：张春红（1987—），女，2010 年毕业于哈尔滨理工大学电气工程及其自动化，工程师。现在东方电气风电股份有限公司从事控制技术开发工作。

活与否的关键，自用电设备的成本虽然不高，但是其影响到发电机、变频器、动力电缆的选型。在同种功率等级的竞技中，这点差异也可能影响到产品的竞争力。

未来风机会朝着更精细化的设计发展，随着对机组相关数据的不断研究，风机设计水平将显著提高。尽快掌握各机型辅助用电的实际需求、研制适用于风机的辅助用电经验模型，为机组高效开发和降本提供了空间，为提高机组可靠性设计提供支撑。

1 整体数据分析

在风力发电机组运行中，辅助用电设备往往不是在满负荷状态下运行，实际运行中的负荷容量一般小于其额定容量。另外，同类用电设备组因环境和控制策略不同，其最大负荷出现的时间也可能各不相同。因此，所有用电设备的实际最大负荷总容量总是小于其额定容量的总和。由此可见，电力负荷的正确计算非常重要。如果电力负荷计算过小，就会引起供电线路过热，加速其绝缘的老化，引发重大事故。如果电力负荷计算过大，将会引起变压器容量过剩，以及供电线路截面过大，增加了投资，降低了工程的经济性。正确地选择计算负荷方法，对电气设计具有特别重要的意义。

一般选用需要系数法进行辅助供电计算负荷的确定。需要系数法计算公式如下：

（1）用电设备组的计算负荷

有功功率 P_C　　$P_C = K_d P_e$

无功功率 Q_C　　$Q_C = P_C \tan\varphi$

（2）配电干线或变压器的计算负荷

有功功率 P_C　　$P_C = K_{\Sigma p} \sum (K_d P_e)$

无功功率 Q_C　　$Q_C = K_{\Sigma q} \sum (K_d P_e \tan\varphi)$

视在功率 S_C　　$S_C = \sqrt{P_C^2 + Q_C^2}$

计算电流 I_C　　$I_C = \frac{S_C}{\sqrt{3} U_n}$

以上各式中：

P_C—计算有功功率，kW；Q_C—计算无功功率，kvar；S_C—计算视在功率，kVA；

I_C—计算电流，A；P_e—用电设备组的设备功率，kW；K_d—需要系数；

$\tan\varphi$—计算负荷功率因数角的正切值；$K_{\Sigma p}$—有功功率同时系数；

$K_{\Sigma q}$—无功功率同时系数；U_n—系统标称电压（线电压），kV。

$K_{\Sigma p}$可取 0.95~1，$K_{\Sigma q}$可取 0.97~1。通常，辅助用电设备数量越多，同时系数越小。对于较大的多级配电系统，可逐级取同时系数。

根据《工业与民用配电设计手册》，结合风机内用电设备的特点，对照统计查出泵站、通风风扇、电机、起重机的K_d数值见表 1。

表 1 风力发电机组的需要系数

用电设备名称	需要系数K_d
冷却设备（离心风机、水冷风扇、水冷泵、塔筒散热风扇）	0.9
变桨电机	0.9
偏航电机	0.9
主控系统、变频器控制	1

本文测试方法为在风力发电机组辅助用电总供电位置和机舱总供电位置增加电压电流测试设备，通过电网测量模块运算后传给风力发电机控制器记录数据，具体见图 1。

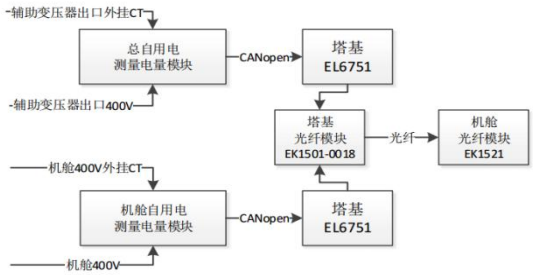


图 1　测试设备和控制通讯设备

在电压稳定和频率正常的情况下分析发现，辅助用电设备在不同季节呈现差异，主要与风电机组随风而动的特性相关。冬季呈现低温风大的特点，夏季呈现高温风小的特点，另外由于风电场分布遍布全国乃至世界，每个风场的环境特点也有特性不同的情况。但是风电机组本身有一些普遍通用的运行特点，本文致力于寻找辅助用电相似的运行特性，特殊情况还需额外分析。

以测试机型为例，按照传统计算方法加经验的方式计算辅助变压器容量为 120 kVA。根据测试结果发现，机组辅助用电 10 分钟功率平均值在 50 kVA 以下，如图 2。虽然风力发电机组很多辅助设备受特殊的控制策略影响，经常有短时运行的情况，

但仍然能够说明传统方法加经验设计的局限性。根据不同设备的实际运行特点设置合理的需求系数十分必要。

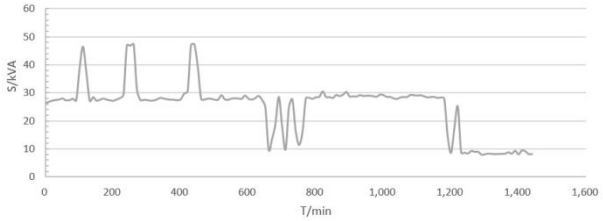


图 2　总辅助用电统计

2　各种设备测试数据分析

（1）冷却设备运行分析

风电机组运行环境恶劣，处于户外低温、高温、高原、高湿度等环境，一般风电机组配置各种加热设备、冷却设备、除湿设备和散热设备。以冷却风扇为例，环境温度高时，机组内部的冷却风扇启动个数较多，见图 3；环境温度低时，冷却风扇启动个数较少，见图 4。

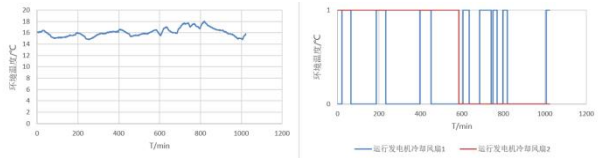


图 3　机组相对高温时段冷却风扇启动情况

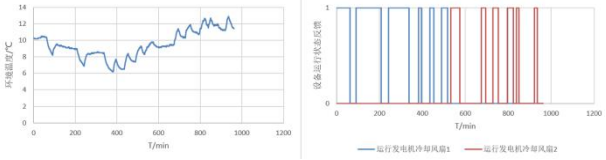


图 4　机组相对低温时段冷却风扇启动情况

图 3 和图 4 中的冷却风扇以对应冷却部件的温度进行启停控制，取决于环境温度和设备本身的运行情况。假设设备运行情况良好，可以满足长期稳定正常运行，那么冷却风扇的启停则和外部环境温度存在一定的关联性。图中两种工况机组均为满功率运行，冷却风扇启动和停止状态通过开关量反馈统计后发现，温度较低时两个风扇分别启动，温度较高时两个冷却风扇存在两个风扇同时启动的情况，从这一点可以看到，极限工况存在于高温环境，虽然高温环境实际在整个运行周期的占比并不高，一般认为夏季满功率运行的可能性是必然存在的。

为了确定冷却风扇的实际运行需求，抓取单独启动冷却风扇的工况来确定其需求系数。这里不得不说风力发电机组的重要耗电设备，目前不管是直驱、双馈、半直驱机组的主要耗电设备为冷却设备、加热设备、偏航设备、变桨设备、控制设备、液压设备等，其中冷却设备和加热设备由于运行工况存在互斥性，一般不同时考虑。冷却设备有不同种类的形式，有冷却风扇，有水冷设备，有离心风机和轴流风机等多种形式。从耗电量大小来讲，液压设备由于不需要长期运行，且功率不大，一般计算的时候不同时考虑。基于以上情况，主要统计偏航、变桨、冷却设备启动停止情况，通过研究设备启动时的功率需求尝试寻找共性的特征。

目前冷却设备分为机舱冷却设备和塔基冷却设备，为了区分机舱和塔基的区别，本测试分别在机舱和塔基安装了电量测量设备，分别对机舱和塔基的用电情况进行分析。

以图 5 为例，当机组机舱主要设备未启动时，机舱用电量极低，通过运行工况分析主要为控制设备用电。机舱冷却风扇运行逻辑简单，以机舱冷却风扇为例说明，实际运行功率约为 16.5 kW(扣除机舱控制系统用电 1 kW 左右)，从各种机型和长期运行看具有相似的规律，单个冷却风扇的系数可以按照 0.9 考虑。

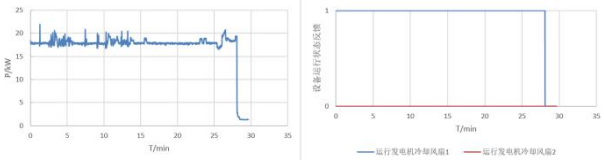


图 5　冷却风扇设备运行的功率统计

（2）设备启动冲击分析

通过详细分析各种设备的启动特性发现，偏航、冷却风扇启动过程的启动电流不容忽略，见图 6。为了确保风机可靠运行，提高机组全生命周期的安全稳定，大功率的电动机设备启动要考虑增加软启或通过控制逻辑依次启动，避免启动冲击过大。

直接启动大功率电机类设备的冲击比较大，和电机的特性有较大关系，这里不再赘述。但是要注意的是，启动冲击不仅会影响开关器件选型、变压器选型，还会影响设备的运行电压，过大的启动冲击影响辅助用电设备的电压，电压的下降会影响其他用电设备的正常运行。随着风力发电机机组功率越来越大，启动冲击的问题也会越来越突出，设计

过程中要重点考虑。

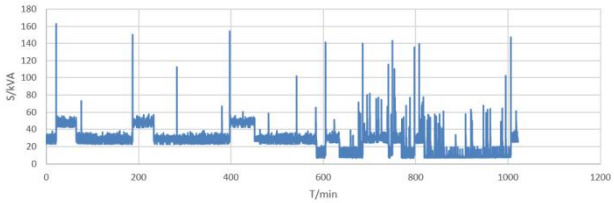


图 6　辅助用电视在功率统计

（3）偏航系统运行分析

风的变化变幻莫测，但是从长时间的观察发现，大多数情况下大风时刻伴随稳定的风向。因此，从下图某一天的数据发现，机组满发过程中偏航系统动作较少，见图 7。

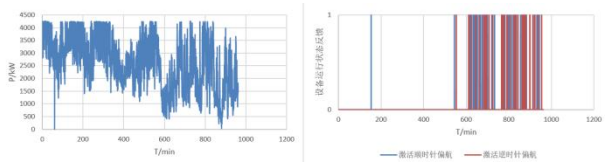


图 7　满发时偏航动作情况统计

机组满功率运行的时候，一般风速比较大，对应偏航动作次数较少，也可以说明图 2 中平均功率较低的问题。由于偏航的动作取决于风向的偏差，偏航速率一般是恒定的，偏航动作的时间取决于偏航角度偏差的大小及风向变化的情况。由于偏航系统动作的不连续性以及满功率运行的时候一般具有稳定风向，偏航系统的功率应按照相应考虑系数折减。由于偏航运行的不确定性，研究采用计算和实际相结合的方式，考虑全生命周期内偏航功率需求的正态分布，偏航电机自用电需求系数改为 0.7，可以覆盖 95 %以上的工况需求；从实测情况看，当只有偏航动作的时候，偏航负载差异较大，至少在 16 kW 以下（见图 8，不考虑启动冲击），负载率小于 0.67。结合以上情况，偏航系统的需求系统按照 0.7 考虑可以满足大部分工况需求，还可以通过其他未运行设备的余量互为补充。

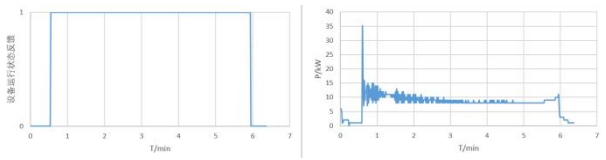


图 8　偏航电机运行的功率统计

（4）变桨系统运行分析

根据统计发现偏航和变桨一般不同时动作，见图 9；当然，某些特定工况，也存在偏航和变桨同时动作的情况。

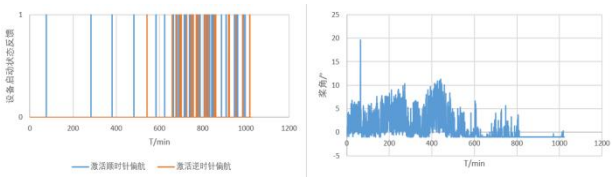


图 9　偏航和变桨桨角动作情况对比统计

通过统计偏航状态激活情况和桨叶动作情况可以了解偏航和变桨动作情况。从图 9 可以看出，前半段呈现大风风向稳定的情况，为了限制功率变桨调桨次数增多；后半段呈偏航对风状态，桨叶基本处于开桨状态。

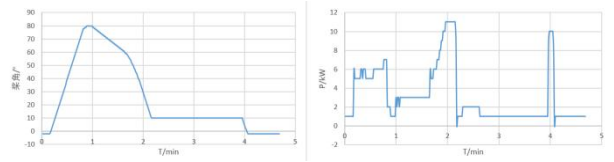


图 10　变桨系统运行功率统计

不考虑极端工况，常规运行情况下，变桨系统功率用电较大的时候在开桨和收桨过程中（图 10），变桨系统的功率在 12 kW 以下，需求系数约为 0.24。两个系统的运行情况存在互补情况，在计算容量的时候可以酌情考虑其中较大的用电需求。

3　结论

本文通过测试和数据分析的方法，可以得出如下结论：

（1）风力发电机组主要辅助用电中偏航和变桨同时动作瞬间不多，大多数情况下机组满发过程中基本不会偏航。

（2）机组辅助设备与季节具有相关性；低温情况下，冷却风扇全部投入的情况不多，高温的时候机组冷却风扇在机组满发时投入运行。

（3）偏航电机自用电需求系数较大，受限于风况的原因，偏航动作的次数可能比较频繁，且功率需求较大。

（4）变桨系统自用电需求系数可以降低，由于偏航和变桨同时动作的情况不多，功率可以互为补充；另外机组大风满发阶段一般温度不高，对应冷却风扇的功率也可以互为补充。

（5）优化后的风电机组需求系数见表 2，辅助变压器计算容量可以节约 40 %以上。

（下转第 45 页）

一种风力发电机组叶片扭转变形监测方法的研究

李亚妮　李玉霞　宁琨　曾一鸣　王淋

东方电气集团东方风电股份有限公司，四川 德阳 618000

摘要：分别在风电机组三支叶片内安装 3 支 GPS 定位天线，风电机组叶片叶尖前后缘分别对称安装 1 个，叶片叶根桨 0° 标定位置安装 1 个。经过叶片叶根 GPS 定位天线位置，并根据风电机组当前提供的桨距角，实时绘制出 1 条动态直线。叶尖对称安装的 2 个 GPS 定位天线，通过两点成为一条直线，实时绘制出 1 条动态直线。实时判断当前两条动态直线是否处于同一平面、两条动态直线投影到同一平面内的夹角，并实时传送给风电机组控制系统。一旦两条动态直线不处于同一平面，集合风电机组状态数据，判断当前是否处于扭转形变情况，并将判断结果实时传送至风电机组控制系统。风电机组控制系统一旦收到叶片扭转状态，启动安全保护控制策略，并根据两条动态直线的夹角变化，判断控制情况，保证及时减弱机组叶片扭转情况，从而保证叶片安全。

关键词：GPS 定位天线；动态直线；叶片扭转；叶片安全

中图分类号：TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0042-04

Research on a Method for Monitoring the Twisting Deformation of Wind Turbine Blades

LI Yani, LI Yuxia, NING Kun, ZENG Yiming, WANG Lin

(Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: Three GPS positioning antennas are installed inside each of the three blades of a wind turbine assembly. At the blade tips, one antenna is symmetrically installed at the leading and trailing edges, respectively, and another at the 0° calibration position of the blade root. The position of the GPS antenna at the blade root is used along with the current pitch angle provided by the wind turbine to dynamically draw a straight line in real time. The two GPS antennas installed symmetrically at the blade tips form a straight line, which is also dynamically drawn in real time. The system continuously checks whether these two dynamic lines lie in the same plane and evaluates the angle between their projections onto the same plane. This information is then transmitted in real time to the wind turbine control system. If the dynamic lines are not in the same plane, the system, integrating the state data of the wind turbine, determines whether there is a twisting deformation and relays the results in real time to the control system. Upon receiving an alert about blade twist, the control system initiates a safety protection strategy. Based on the changes in the angle between the two dynamic lines, the control situation is evaluated to promptly mitigate the blade twisting, thereby ensuring blade safety.

Key words：GPS positioning antennas; dynamic lines; blade twist; blade safety

风电机组的单机容量已经从最初容量很少发展到现在的兆瓦级，甚至在向十兆瓦级、几十兆瓦级努力，促进了提高风能捕获，降低了度电成本。叶片是风电发电机实现风能和机械能转化的重要部件，整机的性能和发电效率在很大程度上受叶片状态好坏的影响，而叶片承受较大的载荷，在恶劣的环境中运行，风雨的腐蚀等等都会影响叶片的寿命，因此随着风电叶片常年的运转，不知道什么时

收稿日期：2024-06-25

作者简介：李亚妮（1985－），女，2008 年毕业于西安第二炮兵工程大学，电气工程及自动化专业，本科，工程师。现任职东方电气风电股份有限公司，主要从事质量监督与管理工作。

候就会发生意外事故，对风电场的经济效益造成危害。

风电叶片在设计时一般能使用 20 年，但是风电机组由于载荷不是常量，这种运行特性使其很容易发生疲劳破坏，这就使得风电机组运行安全性出现问题，也许达不到那么高的使用寿命。近年来国内外经常出现风电叶片因为扭转载荷过大引起的断裂事故，一旦叶片受到损害，修复过程非常复杂，而且会使得风力发电机的工作效率降低。

1 研究现状

目前，风电行业内均无实时在线监测叶片扭转变形系统。目前行业整机商均在实验室内建立了风电机组叶片扭转疲劳实验装置及测试方法，通过实验室测试掌握叶片扭转的相关参数。由于风电机组叶片在实际运行过程中需要经历各种复杂风况、各种运行情况，仅凭实验室相关测试，无法完全有效降低叶片运行载荷或则疲劳程度，从而无法有效提高叶片使用寿命。

2 叶片扭转变形监测方法

2.1 传感器部署方法

针对风电机组每一支叶片，分别在风力发电机组叶片 1/4 靠近叶尖位置前沿和后缘两个对称位置分别安装 1 个 GPS 定位天线，在叶片叶根 0°桨角标定并尽量靠近轮毂位置安装 1 个 GPS 定位天线。每支叶片传感器安装示意图如下：

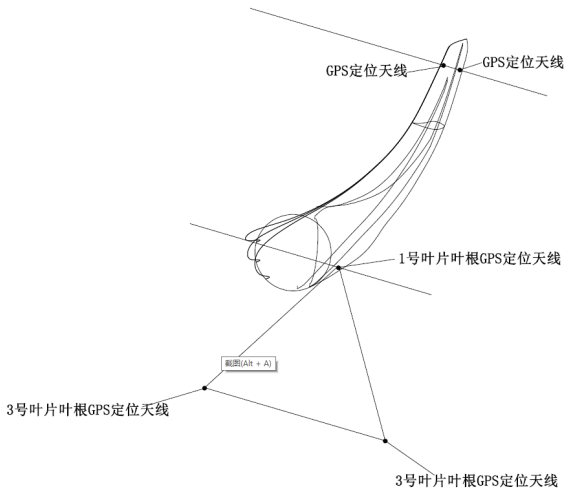


图 1 传感器安装示意图

2.2 叶片扭转变形监测方法

由于目前所有风电机组三支叶片均属于同步变桨，根据风电机组三支叶片叶根部的 GPS 定位天线的三个定位坐标，依次连接三个定位坐标，构成一个等边三角形。针对单支叶片，根据当前风电机组桨距角，绘制出以叶片根部 GPS 定位天线坐标为起点，朝向当前桨距角角度所在位置，平行等边三角形对边的动态直线。其他两支叶片也需要实时完成相同工作。假设当前桨距角为：θ，GPS 定位天线换算后坐标为：x_0、y_0。则该条动态直线方程为：

$$y = \tan\theta\,(x - x_0) + y_0 \tag{1}$$

叶尖对称安装的 2 个 GPS 定位天线，通过两点成为一条直线，实时绘制出 1 条动态直线。根据叶尖安装的 2 个 GPS 定位天线，实时测量的位置坐标数据。同时根据两点一条直线原理，连接两个坐标位置，并通过是否平行等边三角形对边进行修正。由于 2 个 GPS 定位天线坐标点会根据风电机组相关运行变化，比如偏航、变桨等状态，两个坐标点连接的直线为一条动态直线。假设两个 GPS 定位天线换算后的坐标分别为：x_0、y_0和x_1、y_1。根据这两点计算出经过该两个点动态方程如下：

$$\frac{y - y_0}{y_{1-}\,y_0} = \frac{x - x_0}{x_{1-}\,x_0} \tag{2}$$

实时判断当前两条动态直线是否处于同一平面，风电机组叶片未处于扭转情况下，已绘制的 2 条动态直线在任何情况下都应该保持平行，即处于同一平面。实时判断两条动态直线是否平行，如果相交，需要及时计算出两条直线的夹角，夹角便是当前叶片扭转角度。判断两条动态直线是否平行，可通过两条动态直线是否同平行三支叶片叶根 GPS 定位天线构成等边三角形排除本支叶片相连两边的那条边即可。

实时判断当前风电机组 3 支叶片扭转形变情况和扭转程度（即扭转角度），根据两条动态直线之间的夹角大小判断风电机组叶片当前扭转形变程度。集合风电机组当前状态情况，判断叶片扭转程度是否属于风电机组当前状态下的正常情况。比如：颤振带来的扭转、变桨带来的扭转等。集合风电机组叶片本身材质情况，判断叶片扭转是否超过当前叶片的扭转阈值，一旦超过，给出叶片扭转预警信号。

叶片扭转变形在线监测方法步骤图如图 2：

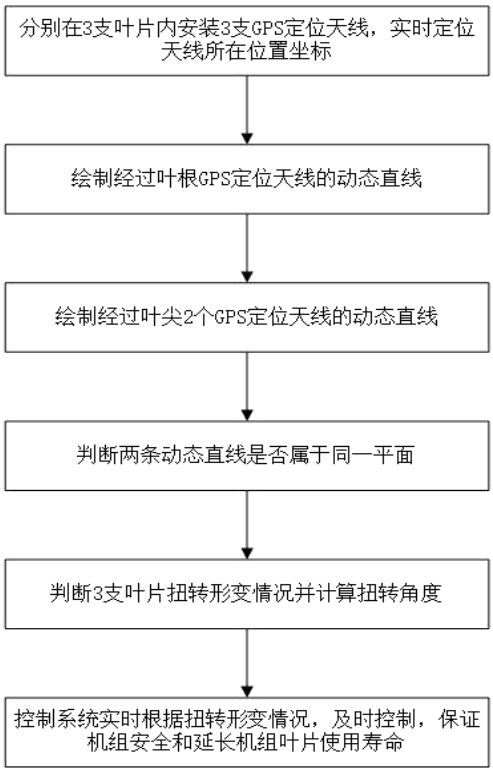


图 2　扭转变形在线监测方法步骤图

2.3 系统数据可用性论证

为了论证 GPS 定位技术在风电机组叶片扭转变形监测系统上应用的可行性，通过搭建最小系统，完成数据采集和分析，主要从数据采集精度、定位精度方面进行验证。最小系统方案通过 GPS 卫星接收天线实时搜星，完成当前位置信号获取，解算出当前的经纬度和海拔。同时通过 4G 网络，接收 Cros 发送的差分定位信息，对当前定位的数据进行差分修正。使用 NI 处理器通过串口记录 GPS 卫星接收机处理后数据。采用漫反射信号天线定位目标位置，使用 NI 处理器编程，实现 GPS 天线和漫反射信号的同步采集。

2.3.1 数据采集精度

此次测试选择产品为华测导航生产的高精度定位卫星接收机，GPS 卫星接收机提供以太网、串口和 CAN 通讯接口。具体设置接口如图 3。

（1）以太网通讯接口

测试采用 1、5、10、20、50、100 Hz 采集通讯频率，分别选择 20 Hz\50 Hz\100 Hz，完成数据采集，测试轨迹图如图 4：

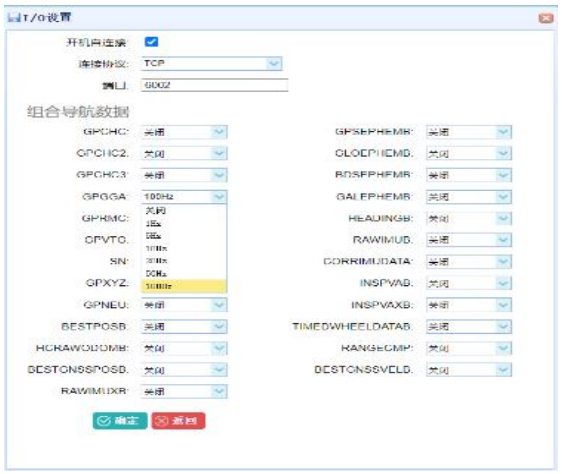


图 3　通讯接口参数设置

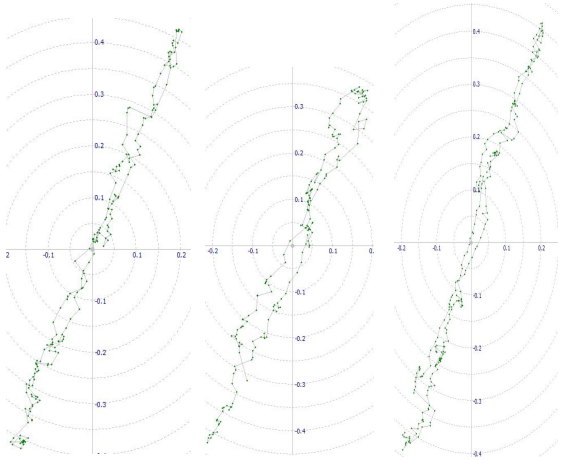


图 4　不同频率下测试轨迹

结果分析：当前市场已有产品系统可满足数据采集精度要求，以太网最大可实现 100 Hz 采集频率，串口可实现 20 Hz 采集频率。同时在不同采集频率下，数据采集数量不同，该频率设置有效。将测试数据绘制成运行轨迹，同模拟轨迹一样，能够得到数据跟踪。

结论：当前行业 GPS 卫星接收机采用以太网方式情况下的数据采集精度已能满足当前风电使用场景。

（2）串口通讯接口

串口提供 9 600、19 200、38 400、57 600、115 200、230 400、460 800 波特率更新的数据。

本次测试使用已有 NI 设备完成串口数据采集，由于当前 NI 串口芯片性能决定最大只支持 115 200 bps，所以本次选用 115 200 bps 的波特率，完成数据采集。数据采集频率为 20 Hz，能够较好的完成数据轨迹跟踪，如图 5。

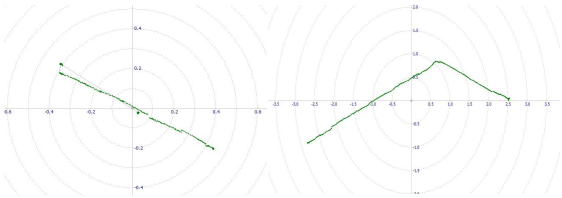


图 5　最大波特率下的测试轨迹

结果分析：通过使用 115 200 波特率，可实现数据轨迹同模拟轨迹一致。

结论：目前市场现有 GPS 卫星接收机产品串口波特率已能满足风电行业使用，同时目前已有产品可做到 50 Hz 采集频率。

2.3.2 定位精度

多次针对同一点数据测量其经纬度，数据误差达到毫米级。同时使用串口采集数据绘制轨迹，轨迹同真实路过轨迹一致。具体如图 6。

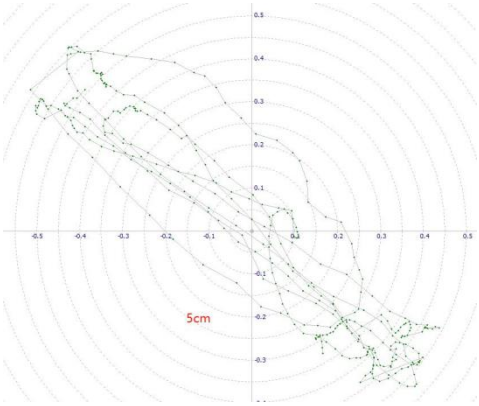


图 6　精度测试测试轨迹

结果分析：多次采集数据绘制运行轨迹同实际天线运行轨迹重合，通过偏差点数据分析误差可达到 10 cm 以内。

结论：定位精度达到厘米级，满足风电叶片扭转识别需求。

2.3.3 数据可用性测试结论

通过测试分析，当前测试产品数据采集精度、定位精度均能满足风电机组使用需求。

3　结语

近年来，随着风电机组技术的进步，大型风力发电机组得到快速发展，特别是海上机组。随着大型发电机组的技术进步，使用叶片越来越长，塔架越来越高，机组的整体载荷越来越大。而叶片随着长度增加，发生扭转的概率越来越大，因为扭转变形，叶片更容易发生折断、损伤等情况。另一方面，会进一步增加整机载荷，可能引起更大的事故，例如倒塔、飞车等事故。本文对叶片扭转变形的监测方法进行了论证，按照目前项目状态，理论上能够利用本文使用的叶片扭转变形监测的方法，实时识别叶片扭转变形情况以及变形程度。同步集合风力发电机组状态、控制系统，及时通过相关控制策略，降低机组的整体载荷，从而提升机组的运行安全，此方法将在后期通过试验进行充分验证，进一步探索其实用性。

（上接第 41 页）

表 2 优化后风力发电机组的需要系数

用电设备名称	需要系数 K_d
冷却设备（离心风机、水冷风扇、水冷泵、塔筒散热风扇）	0.9
变桨电机	0
偏航电机	0.7
主控系统、变频器控制	1

4　结语

从长期效果分析，辅助用电长期运行负荷实际不高，辅助用电计算值与实际运行过程中的差异在于，计算过程中考虑各部件可能存在同时运行的情况，但是实际同时动作的时间与环境和工况相关性很大，大多数情况下不同时运行。根据风电机组特殊的应用环境，单台辅助设备选型可以更加经济，对应的电缆选型和开关保护器件选型也可以继续优化。

本文的研究只针对风力发电机的主要辅助用电设备进行了简单的分析，更多特性情况和机型种类，设备种类的相关性还需要进一步研究和分析。风力发电机组内部设备种类繁多，加之风力发电整体起步较传统行业较晚，各种经验和设计细节都在不断摸索中。同时由于平价上网的需要，风力发电的成本压力巨大，这些要求都需要我们不断深入研究器件的内在规律，设计更加具有经济性的产品。

参考文献：

[1] 中国航空规划设计研究总院有限公司组编.工业与民用供配电设计手册.4 版.北京：中国电力出版社，2016

提高风电机组发电量的措施

王明军

四川工业科技学院，四川 德阳 618000

摘要：提高风电机组发电量是风电企业不变的主题。本文从风电场微观选址、机位的选定、机组阵风控制参数优化以及主控对提高机组发电量的重要意义等方面对提高机组发电量的几项关键措施进行了分析和阐述。

关键词：提高发电量；机位选定；阵风控制参数的优化；主控软硬件质量

中图分类号：TM615,TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0046-04

Power Generation of WTG Increasing Measures

WANG Mingjun

(Sichuan Institute of Industrial Science and Technology, 618000, Deyang, Sichuan,China)

Abstract: Power generation increasing of WTG is very important for wind power companies. This article analyzes and explains several key measures to increase the power generation from the aspects of the wind field micro-site selection, the selection of WTG site, the optimization of the gust control parameter, and the WTG control system of great significance for power generation.

Key words: increase power generation; selection of WTG site; optimization of gust control parameter; software and hardware quality of WTG control system

风能是重要的清洁、绿色、低碳能源，资源丰富、分布广泛。风电技术成熟、有经济竞争力，除可提供电能量外，其全天候发电特性还可提供一定的电容量支撑，是构建新型电力系统不可或缺的电源。到 2060 年，我国非化石能源在能源消费中的比例将超 80 %，按此目标，国内一些未来能源发展情景研究的结果显示，2060 年我国风电装机有望超 30 亿千瓦，届时在所有电源品种中，风电贡献的发电量将最大，将成为推进碳中和及能源革命的主体电源。

多年来，我国风电技术取得了巨大进步。通过与国外合作消化吸收、自主研发方式，我国风电设备的国产化程度大幅提高，新技术应用大量涌现，大容量机组不断推陈出新，长叶片、高塔架应用等处于国际领先水平。充分挖潜，发挥风电机组性能，以提高发电量是风电企业不变的追求。风电场微观选址对机组安全及发电量有着重要的影响，需要做得更加细致才能避免微观选址的失误；在利用阵风提高发电量以及通过提高主控性能增加发电量也还有很多工作要做。在如何提高机组发电量的问题上，本文从微观选址、阵风控制参数优化方法以及主控对发电量中重要作用等方面进行阐述。

1　风电场微观选址

风电场微观选址是在宏观选址选定的小区域中确定风电机组的分布位置，以便使整个风电场具有更好的经济效益的过程。场址选择对机组安全及发电量影响最大，选址不正确，可直接导致机组及部件的损坏。[1]例如，某风电场1.5 MW双馈风电机组因机组微观选址不当，机组运行不到3年就有2个主齿轮箱损坏。[2]在风电场宏观选址合理的条件下，

收稿日期：2024-06-17

作者简介：王明军（1967—），男，高级工程师，1991 年毕业于沈阳工业学院机械工程系机制工艺与设备专业，工学学士；2006 年获得西安交通大学热能与动力工程专业工程硕士学位，2007 年至今，主要从事风电技术及教学工作。

还需对风电机组进行合理地布置，方能取得最佳经济效益。[3]

湍流强度是风电场的重要特性指标，湍流强度等级一般有A、B、C三种。[4]应根据风电场区域内风电机组轮毂高度处50年一遇10分钟最大风速以及轮毂高度处湍流强度大小来判断其安全等级，再依据安全级来选择机组的机型。按照IEC61400-1要求，每一个风速区间下，机组所承受的有效湍流强度（机组之间尾流产生的湍流强度与环境湍流强度叠加）均不能超过机组设计的湍流强度。[5]湍流强度不仅会加大机组的疲劳载荷，会损坏机组及部件，还会对机组发电量产生不利影响。[6]

应根据不同的地形进行微观选址。类似山区和山丘的复杂地形，需依据实际地形对各点的风力情况进行测算后，再综合考虑机组的运输、吊装状况以及地形、地质条件来进行机位选择。[7]

当风经过机组叶轮之后，会使风的湍动能增大，气流产生畸变，形成湍流，风速会产生突变减小的尾流效应。随后，在周围流场的作用下，风速又会随着与风轮距离的增加而逐渐恢复。当风电场机组布置过于紧密时，则会因上游机组的尾流效应，风速来不及恢复，使机组发电出力降低。为了充分利用风能资源，在保证机组及部件（如：叶片断裂、主轴轴承及齿轮箱部件等的损坏）安全的前提下，寻求风电场机组出力最大化的机组排布方案。[8]

充分利用气象资料的风速、风向数据进行微观选址，但仅此作为依据是不够的，还要在装机地点附近，并具有代表性的位置上，采用一个或多个测风塔一年以上的观测数据，包括风向、风速、温度以及湍流强度等。通常情况下，年平均风速的误差为10 %，其发电量预测的误差可达20 %。如果采用3年的测风数据，平均风速和年发电量的误差就会大大将低，通常只有3 %和4 %。采用较为准确的测风数据，再用软件对风资源的分布状况进行评估。如遇复杂地形，需要布置多个测风塔，这样可使风资源评估误差控制在5 %以内。[9]

因此，复杂地形条件下,为使资源评估达到精细化，避免微观选址失误，在选址和机位布置上达到更加精准程度，则测风塔需要增多一点，测风时间应更长一些，使用激光雷达测风，配以优秀的风资源评估软件，在评估分析时做得更专业一些，可使风资源评估更加精准。

国内外的经验、教训表明，因风电场选址的失误所造成发电量损失，以及因微观选址不当增加维修费用将会远远超过对风电场测风等详细调查的费用。由此可见，风电场选址及机位选择的机组安全及发电收益的重要意义。[10]

2 优化阵风控制参数及控制策略提高发电量

在风电机组运行范围内保证其长期稳定运行，这是机组设计的基本要求。而阵风因其在短时间内迅速变化，则会严重影响机组的运行稳定。[11]阵风期间对机组的控制，国内外控制策略普遍是以避免阵风停机为主，而没有考虑对阵风能量的利用。[12-14]如果能通过现场试验获得最佳阵风控制参数，同时配之以适当地阵风控制策略，则充分发挥叶轮的储能作用，既能保证机组的稳定运行，又能利用阵风使发电量得到进一步的提升。

为保证在极端风况下稳定运行，有的机组设计是把机组的最高并网运行转速长期控制在远低于机组及部件承受能力的转速之下，即使在极端阵风条件下，最高运行转速与机组的最高并网转速也有相当大的差距，从而导致风轮储能受阻，机组性能不能得到充分发挥，影响了发电量的提高；有的机组设计，则是当机组达到额定转速以后，就把转速稳定当成控制目标，没有考虑阵风时的风轮储能等问题。这样不仅不能利用阵风提高发电量，还会导致顺桨频繁，这既损失了风能，又增加了阵风对机组带来的冲击，减少了变桨休眠时间，增加了变桨耗电和变桨故障等；有的机组设计，在确定转速控制参数时，主要是通过系统仿真软件获得，而不是现场试验得到，当极端风况来临，要么机组很难运行稳定，造成停机，要么不能充分利用阵风提高发电量。

以上分析可知，在充分利用阵风能量方面，还有很多工作要做。对于老机组而言，有必要依据现场试验获得最佳转速控制参数，对其进行优化改造，以提高发电量；对于即将投入市场的新设计机组，可通过下面方案获得最佳转速控制参数，提高机组

的发电量。如图 1 所示，为在风电机组的最高并网转速范围内的最佳控制转速 V_K r/min 寻优现场试验方案。

在通常情况下，阵风控制参数 V_K r/min 在满负荷风速及以上起控制作用的概率较高，而在小风条件下，起控制作用的概率较低。在通常情况下，兆瓦级风电机组运行范围内的最高并网转速主要受到发电机和变频器等部件的限制。在最高并网转速以内，机组并网运行转速越高，越有利于风轮储能、减少变桨次数、减小部件的疲劳载荷等，有利于最大限度地发挥机组优势，充分利用阵风带来的能量。因此，并网风电机组存在最大并网转速范围内的最佳控制转速 V_K r/min。其试验过程和方法如图 1 所示。

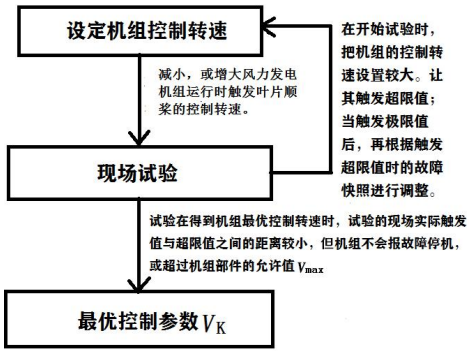


图 1　最佳控制转速 V_K 的现场试验方法

机组运行范围内的最高并网转速为 V_{max} r/min，该转速也是触发机组停机的最高风轮并网转速值。只要机组运行转速等于到或超过转速值 V_{max} r/min 就要触发机组停机。V_K r/min 为触发叶轮顺桨的转速触发值，通过 V_K r/min 触发顺桨以降低转速。该参数在保证机组运行稳定的同时，最大限度地保证叶片储能，减少了阵风对机组带来的冲击等。

当阵风来临，触发 V_K r/min 转速后，叶轮开始顺桨，机组转速还会上升，上升的最大限度应很接近但低于机组的最高并网运行转速 V_{max} r/min。V_K r/min 是在多种风况条件下通过现场试验获得，从根本上解决了极端风况下机组运行范围内的转速超限问题。V_K r/min 是否为最佳，直接关系到机组在极端风况条件下的长期稳定运行，关系到风轮储能、对电网冲击、部件承受的疲劳强度以及部件损坏状况等。

其阵风控制逻辑如下：在机组最高并网转速范围内，因极限阵风，而转速过高，触发 V_K r/min，触发后叶片以正常停机顺桨速率进行顺桨。机组的额定转速为 V r/min，风轮转速降低，并以（V-1）r/min 为极端风况下机组的额定风轮转速进行运行转速的控制，该控制保持的时间为 t（可根据极端风况条件在 0～600 秒之间调整），在这之后，再以每分钟增加 0.1 r/min 风轮转速的速率上升，恢复到机组正常的额定风轮转速 V r/min 对机组进行转速控制。

该试验方法是通过现场试验得到最佳转速控制参数 V_K r/min，从而“预估”出极端阵风实际给机组带来的飞升转速，再配之以阵风控制策略，达到了既避免极端阵风带来的不利因素，又兼顾了风轮储能，利用一般阵风来提高发电量，当一般阵风来临（非极限阵风）时，叶轮仅通过转速上升储能，而不会触及极限阵风控制转速 V_K r/min，这样，只要机组运行在额定功率以下时，通常就不会因阵风而顺桨，减少了阵风带来的顺桨次数，从而减少了阵风对机组的冲击及机组和部件的疲劳载荷。

因此，主要通过现场试验方法得到最佳转速控制参数 V_K r/min 来控制机组的最高运行转速，而不是简单地使用机组额定转速来控制机组运行转速的稳定，并控制其最高运行转速。所以，通过 V_K r/min 的转速控制，既能保证阵风条件下机组的运行稳定，又能充分利用阵风带来的能量。

3　主控质量与发电量

风电机组由主控软件控制，在无人干预状况下自动完成等风检测、启机并网、正常发电和保护停机等功能。在小风或无风时，自动停机进入等风状态；当风速达到启动风速以上，自动启机并网。因此，风电机组的停机分为正常停机和保护性停机（故障停机）两种情况，除无风停机和人为手动停机外，大多属于保护性停机。[15]

在保护性停机中，一种是可自动复位的保护性停机。这种故障通常由外界条件或故障引起，当外界故障消除后，机组自动启机，如：高风切除、电网故障等；另一种需人为干预的保护性停机。这类故障通常是由于机组部件、传感器损坏或线路故障引起的停机，也可能由外界因素对传感器、主控或线路干扰引起，需要人为干预才能复位启机。有的可直接手动复位启机；有的则排除故障后，方能启机。

机组报故障停机是因触发了主控软件程序设置的停机条件，主控发出指令变桨系统顺桨，变频器脱网的停机形式。因此，主控的优劣直接关系到报故障是否准确，对机组发电量有着重要的影响。如果主控质量较差，例如：主控软件的控制逻辑不够合理或硬件、软件抗干扰能力低，都会增加机组报故障停机次数，从而对发电量产生不利影响。

主控还在现场调试、运维、远程故障诊断与处理以及“集中监控，区域维修”起着重要作用。

在机组调试阶段，优秀的主控可能为现场调试人员设置有专门调试界面及主控调试软件等。为方便调试人员对机组各部件状况及整机性能的检查，还设置有各种供调试人员可修改的参数、端口（温度、输入、输出）状态及故障状态，极大地方便现场人员对机组和部件的性能测试，这也是远程故障诊断的重要工具；为方便现场人员及时准确地对机组的满负荷功率进行调节，主控的功率曲线数据设置有 1 秒、30 秒和 10 分钟采样。在调试阶段需把采样周期设置 1 秒，这样在一次大风就可以形成众多的功率曲线数据，因此可以迅速地把机组调整到满负荷工作状态。这样可大大缩短准确调整机组功率的时间，减少因功率曲线问题给风电企业带来的发电量损失。相反如果主控没有存储功率曲线数据，或没有 1 秒采样，这将大大增加功率曲线调整的难度，造成不必要的发电量损失。在机组进入正常运行阶段后，通常把形成功率曲线的采样数据调整为 30 秒，这样，将有利于根据功率曲线数据检查机组故障，如：风速仪，风向标故障等。

在处理故障时，优秀的主控可方便机组故障的试验和故障查寻。例如，在检查机组并网后，频繁报振动停机，往往需要检查振动故障是否与所带负荷有关，这时需要把机组设置空转状态，并且可设置为在机组运行转速范围内任意转速的空转状态，如主控不能进行这样的设置，这将大大增加现场检查故障的难度。

在机组维护时，需根据机组运行状况进行有重点地维护，以提高维护质量，需要对其历史记录进行查询。例如：双馈机组的高级别刹车故障停机，不仅影响发电量，还对变桨电机、叶片螺栓及塔筒等多个部件有着重要的影响。因此，在维护时，一方面机组上要检测刹车片的厚度、联轴器开裆尺寸、主轴的径向轴向跳动以及发电机对中状况等。另一方面还需查看各种高级别刹车动作次数与时间，以及主轴刹车动作次数等。如果这些数据在主控里保存不完善，或者在主控设计时就没有考虑主控软硬件更换时的数据保存问题，就可能因更换主控硬件，或者上传软件（更新软件）造成机组的数据丢失，维护时就不能准确地判断机组状态，给机组维护带来不便，可能因维护不到位而带来发电量损失。

优秀的主控还会充分考虑远程故障诊断手段和完善远程故障处理手段，能方便实现远程指挥。要实现远程故障诊断和机组容错运行，需建立在完善的主控权限管理基础之上。[16]通过开发专用的主控基础软件，给后台 SCADA 软件增加加密狗等安全措施，以便通过 VPN 登陆，保证网络安全，避免黑客攻击，符合相关标准和规定。[17]以期在保证机组及电网安全性的前提下尽量多地发电。

在国内风电市场竞争激烈，如今，我国风电机组的主控普遍是风电生产厂家“自主”开发，而这些主控有一个共同特点：普遍采用国外通用控制器硬件，再通过 PLC 编程而来，其硬件及基础软件均由国外公司开发。“东方自控”曾经开发过一款硬件及基础软件均为自主研发的主控，可惜，由于各种干扰因素，该主控还没来得及完善就退出了市场。

国内机组主控品牌众多，质量参差不齐。硬件及基础软件均来自通用工业控制器，这些主控难以完全适应风电机组现场调试、运行、维护及远程故障处理的需要，难以成为专业的优秀的风电机组主控。只有其硬件及基础软件均能按照风电机组要求“量身定做”，并且在机组长期运行过程中不断对其软件及硬件进行完善，方能成为真正专业的优秀的风电机组主控。因此，通过采用软硬件俱佳主控来提高风电机组的整机性能及发电量还大有潜力可挖。

4 结语

随着我国风电技术的不断进步，机组性能不断成熟，提高机组发电量仍然是风电企业一致地追求。我们还需要不断挖潜，通过对风电场微观选址的进一步认识最大限度地减少机组及部件损坏，提高发电量；在机组控制上，需改变思维方式，不只是把阵风看作是不利因素，还应从利用阵风的角度思考，使机组发电量得到进一步的提升；从现场角度出发，把提高主控软硬件质量落到实处，为从机组调试、运维以及远程故障处理、区域维修方面打下坚实的基础，提高机组性能及发电量。

（下转第 74 页）

风电叶片轻木供方质量管控研究

陈阳　闫传辉　杜秋　胥俊伟

东方电气（天津）风电叶片工程有限公司，天津 300480

摘要：夹芯材料是风电叶片的主要材料之一，目前风电行业常用的芯材有 PVC、PET 和 Balsa 木。其中 Balsa 木又称轻木，其质量的好坏，一方面影响叶片制造商的生产效率，另一方面也影响叶片的质量。近年来随着 APQP4WIND 在风电行业的深化应用，如何将该工具与轻木供方质量管理相结合，以提高轻木质量的可靠性，在当下非常有必要。

关键词：风电叶片；夹芯材料；供方管理；质量工具

中图分类号：TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0050-05

Research on Quality Control of Wind Turbine Blade Core Material Suppliers

CHEN Yang, YAN Chuanhui, DU Qiu, XU Junwei

（Dongfang electric (Tianjin) wind turbine blades engineering co., Ltd., 300480, Tianjin, China）

Abstract: Core material is one of the main materials for wind turbine blades, and currently the commonly used core materials in the wind power industry include PVC, PET, and Balsa wood. The quality of the core material not only affects the production efficiency of blade manufacturers, but also affects the quality of the blades. In recent years, with the deepening application of APQP4WIND in the wind power industry, it is very necessary to combine this tool with the quality management of balsa suppliers to improve the reliability of balsa quality.

Key words: wind turbine blade; core material; supplier management; quality tools

风能是重要的清洁能源来源，风力发电设备可以将风能转化为机械能，然后通过发电机将机械能转化为电能。风电叶片作为风力发电设备的核心部件之一，在设计时需要考虑多种因素，如风力的大小、方向和变化、叶片的材料、形状和尺寸等。

叶片的材料一般采用复合材料，如玻璃纤维、树脂、夹芯材料等，其中轻木作为夹芯材料的一种，具有轻质、高强的特点。同时它也是一种天然材料，受生长地理环境及气候的影响，具有木材的一些天然缺陷，如因潮湿出现的霉变、虫蚁出现的虫洞、生长过快导致的木质疏松、中空树结、疏松节等。[1]不良的轻木会导致叶片的刚度降低，从而影响叶片的稳定性和承载能力。从供应商质量管理角度来看，如何借鉴汽车行业的质量管理工具，打造新质生产力，提升轻木质量可靠性，是非常有必要的。

1　风电行业供应商质量管理现状

在我国大力推动绿色能源发展的背景下，风力发电行业迎来了高速发展期。在这个行业中，企业与供应商之间的关系相较于传统产业而言，有着显著的区别。这种关系不仅仅是简单的买卖交易，而是一种长期、稳定的合作伙伴关系。通过紧密合作，企业可以获得稳定、高质量的供应商支持，降低项目风险，提高项目成功率；供应商则可以通过与企业合作，拓展市场空间，提高产品质量，增强竞争力。这种双赢的关系有助于推动整个行业的繁荣发展。

1.1　轻木质量管理形势

轻木供应商的质量管理现状呈现出多元化和动态化的趋势。在全球市场的推动下，这些供应商

收稿日期：2024-07-01

作者简介：陈阳（1988－），男，2009 年毕业于华东理工大学复合材料与工程专业，本科，高级工程师。现任职于东方电气（天津）风电叶片工程有限公司，主要从事质量监督与管理方面的工作。

面临着不断提高的质量标准和客户期望，促使他们积极寻求改进和创新。

大多数轻木供应商现在都建立了较为完善的质量管理体系，通过明确的质量目标和指标，确保产品在生产过程中达到既定的质量标准。然而，由于轻木材料的特殊性，导致轻木的质量并不稳定，经常有不合格的材料逃逸至客户工厂，影响了双方的高质量合作发展。

1.2 轻木供应商质量管理难点

轻木加工过程，涉及到原材料选择、工艺流程、设备参数、人员操作等多个环节。对于叶片生产制造单位的 SQE（供应商质量工程师）而言，这些过程若都进行细致的关注和全面的把控，在实际管控中往往是浮于形式，效果有限。

为了研究如何提升轻木供货质量，我们以现有供应商质量管理体系为基础，融合 APQP4WIND 中相关质量管理工具，识别并定义轻木的 CTQ（关键产品特性）和 CTP（关键过程特性），结合加工过程流程图，梳理汇总轻木供方质量管控要点，以期提高供应商质量管理水平。

2 轻木的关键控制点识别

2.1 轻木常见缺陷及其影响

轻木的质量缺陷相对较多，但是影响叶片生产制造效率和质量的缺陷却相对集中。根据某叶片生产基地 2023 年轻木缺陷数据的分析，常见的轻木质量问题主要为尺寸偏差、朽木、含水率超差和外观类问题，如图 1。

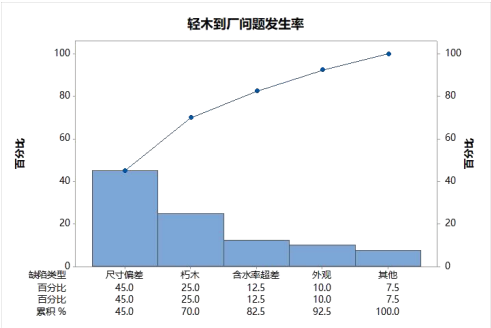


图 1　轻木问题 Pareto 图

2.1.1 尺寸偏差

尺寸问题往往出现在新叶片试制、小批量阶段以及型线发生变更时。这类缺陷往往会造成大量的修补，增加了异物缺陷的发生概率，同时也增加了工时，极大的延缓了叶片制造商的爬坡效率。

图 2　轻木尺寸偏差

2.1.2 朽木

朽木的问题，材料供应商在原材料验收和芯材加工过程中，都会进行筛选和替补，但若质量控制出现漏洞，这些问题也会逃逸至叶片制造商，造成不必要的修补和质量损失。

图 3　朽木导致的灌注缺陷

2.1.3 含水率超差

水分含量过高会导致叶片灌注后出现发白的问题[2]，同时水份的吸收或释放也会引起芯材尺寸发生变化，进而产生芯材间隙超差等问题。这些问题虽然生产过程中能够发现并修复，但会严重影响产能，同时导致不良质量损失的增加。

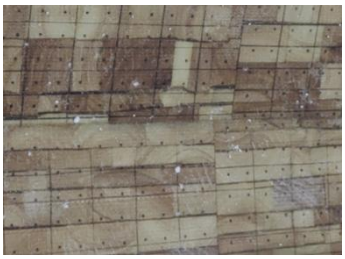


图 4　含水率超差导致的灌注气泡

2.2 轻木的 CTQ（关键产品特性）

根据轻木常见缺陷分析以及材料验收技术要求，我们可以将轻木的 CTQ（关键产品特性）归类定义如下：

2.2.1 力学特性

主要包括压缩强度、压缩模量、剪切强度和剪切模量等，这些特性直接决定该材料能否满足叶片的生产制造。

2.2.2 物理特性

主要包括外观、密度、含水率等。其中，含水率会影响叶片成型效率和不良成本，密度超差会引起叶片的重量偏差。

2.2.3 加工特性

为了适应叶片的生产制造，轻木供应商会通过一系列的工艺，加工出符合叶片生产制造所需的套材，其主要包括芯材厚度、开槽方式、倒角比例和打孔尺寸等。优质的加工特性能极大的提高叶片生产制造商的交付和质量。

2.3 轻木的 CTP（关键过程特性）

通常而言，对关键产品特性起重要影响的过程可称之为关键过程特性。了解并准确识别关键过程特性，对于提高产品质量、优化生产流程等具有重大意义。此次我们选用因果矩阵来识别关键过程特性,表格截选如表 1。

表 1 关键过程特性识别

CTQ 工序	选料	切片	修补	… …	除湿	包装
强度	√					
尺寸		√				
朽木	√		√			
……						
含水率	√				√	√

经过筛选，轻木加工的 CTP（关键过程特性）可定义为选料、切片、开槽、除湿和包装等。值得一提的是，此次对 CTP 的筛选只停留在工序级别，后期随着供方质量管理的深入和推进，可以在工序的基础上，进一步细化至工步，这样能让供方质量管理重心更突出。

3 轻木关键控制点的应用

3.1 准入审核

要控制外部供应产品或服务的质量水平，就要从“根基”进行把控，而供应商的准入就是这个“根基”。因此，从供应商管理这一过程来看，要实现预期目标，从过程的前端就要进行研判、策划和开展管理，即准入的管理。[3]

为了确保轻木的质量和稳定性，轻木供方同样需要经过严格的准入审核流程。以往我们均是围绕轻木生产加工的 5M1E 全面进行，即人（Man）、机（Machine）、料（Material）、法（Method）、测（Measurement）和环境（Environment）。这种审核覆盖范围广，但重点不突出。在识别定义了轻木的关键特性后，以关键特性为基础，优化审核清单，可以做到有的放矢，充分识别供方的潜在风险。

表 2 准入审核清单（截选）

序号	项目	审核内容	扣分	不符合项
1	原材料入厂检测	有无进料检验管制系统，检验记录是否齐全？ 是否建立原材料检测标准？检测项目/标准是否包含 CTQ？ 是否建立不合格原材料的处置流程，并按流程对不合格原材料进行记录、隔离等？		
2	文件管理	是否建立受控文件清单？包含文件发行和作废文件回收的流程？ 现场所用图纸、技术文件、质量文件是否有对应的版本号且为最新版？是否加盖受控章？ 是否对来自客户的标准、图纸等技术文件进行控制，并确保其规格最新？		
3	制造过程	是否实行首样检验和巡检制度 工艺文件里的关键控制点（CTQ、CTP）现场是否有执行并监控，关键控制点的测量设备是否有做 MSA 分析		
4	成品控制	是否有成品检测指导书？指导书中是否包含成品抽样方法？检查现场成品检测项目、检测标准、检测频次是否与文件要求一致 产品成品检验项目标准是否符合客户要求？检查产品的关键质量特性管控情况		

3.2 过程管控

3.2.1 原材料质量控制

轻木原料质量作为关键特性之一，我们与轻木供应商共同制定一系列的质量标准和验收流程，这不仅包括对轻木源地的限制，以确保原材料来自于经过认证和审核的林场，还包括对轻木供方原材料进行不定期的审核和检验。这些审核和检验通常涵盖轻木的力学性能、含水量、密度等多个方面，以确保其满足制造叶片所需的各项性能指标。通过这种源头控制的方式，叶片制造商能够最大限度地确保轻木原材料的质量。

原料来源受控后，在进行加工前，还需要进行物理性能和力学性能方面的检查。物理性能入厂检验项目见表 3。

表 3 物理性能验收清单

检测项目	单位	检验方法	检验批次	抽样数量
密度	kg/m³	电子秤称重，按照 ρ=m/v 计算	每批次	1 套
含水率	%	含水率测试仪	每批次	1 套
外观	——	目视	全检	全检

力学性能入厂检验项目见表 4：

表 4 力学性能验收清单

检测项目	实验方法	评估方式
压缩强度（平行）Mpa	ASTM D1621	最小值
压缩强度（垂直）Mpa	ASTM D1621	最小值
压缩模量（平行）Mpa	ASTM D1621	平均值
压缩模量（垂直）Mpa	ASTM D1621	平均值
0°~90°方向剪切强度 Mpa	ASTM C273	最小值
0°~90°方向剪切模量 Mpa	ASTM C273	平均值
剪切应变（%）	ASTM C273	平均值

为确保测试结果的准确性和可靠性，测试必须在具备相应资质的实验室进行。因此在做供方质量管理的过程中，还需要对实验室的资质和运行进行监控，内容包含不局限于实验室检验人员资质与能力、实验室检测设备的校验与维护、检验标准化流程执行情况等。

3.2.2 加工过程监控

行业内比较成熟的供应商一般都有完善的体系架构和过程标准化流程，然而还是有很多缺陷会逃逸进入叶片制造商工厂。从供方管理角度，为了实现自身产能最大化、减少不良成本，最终实现共赢，应不定期的对轻木供方进行预防性稽查审核，用于识别轻木供方在加工过程中存在的系统性风险，及时整改，把缺陷控制在前端。利用 CTQ 和 CTP，结合实践，我们汇总了稽查审核要点，如表 5。

表 5 自控与稽查审核要点对比

序号	生产要素	供方自控要点	供方稽查审核要点
1	人员	关键岗位人员定岗定责，人员上岗或变更岗位前进行培训与考核。	检查定岗定责清单、培训考核记录等是否齐全。
2	设备	所有设备均有标准化操作指导书，落实日常点检和定期维护制度，备品备件充足。	检查关键过程特性涉及的设备，作业是否文实一致、日常点检和维护保养是否执行、维修记录等是否齐全。
3	原料	按标准进行材料验收和存储。	检查源地记录、入厂验收记录，不合格品处置记录等是否齐全；检查库房环境和温湿度记录是否符合要求。
4	方法	体系文件齐全，文件收发合规，工艺和检验标准化、可视化。	检查 CTQ 与 CTP 所涉及的工序文文和文实是否一致，变更记录，不合格品处置记录，叶片制造商反馈问题闭环情况等是否齐全。
5	环境	作业和存储环境符合文件要求。	检查现场实际温湿度；检查是否有调整温湿度的设备；检查过往环境温湿度记录。

在供方加工监督过程中，我们除了文实一致性检查外，还应当深入和全面地从自身使用的角度出发，为供方提供更加具有针对性和实效性的建议。只有深度融入轻木供方的日常管控过程中，才能及时有效的让我们自己关切的问题在供方的日常管理中得到落地。

3.3 供方质量评价

采购过程中，对于供方的质量评价也是一项至关重要的工作。这种评价不仅有助于确保采购的产

品或服务满足既定的质量标准和要求，还能为双方的长远合作提供有力的参考依据。为了确保评价的准确性和及时性，原则上，对供方的质量评价应每半年进行一次。

在进行质量评价时，可以从多个维度进行综合考量，包含不局限于技术、交付和质量等方面，通过实践我们建立了评价模型和评分细则，详见表 6。

表 6 供方质量评价模型

技术方面		采购方面			质量方面				
					质量问题				
技术标准达成	技术服务响应及时性	准时交付	到货完整性	采购服务响应及时性	交付缺陷品	一般问题	重大问题	管理行动项	质量服务响应及时性
良好，权重*100 %；一般，权重*60 %；较差，权重*20 %；	发生一次响应不及时事件，扣若干分	权重×（1-迟交批次数/交付总批次数）×100 %	发生一次交付不完整扣若干分	发生一次响应不及时事件，扣若干分	权重×（1-缺陷品数量/合格数量）×100 %	每发生一次扣若干分	每发生一次扣若干分	每发生一次扣若干分	发生一次响应不及时事件，扣若干分

4 案例分析

含水率是轻木的 CTQ 之一，为了分析供应商质量管理优化后的效果，我们以某轻木供方所提供产品的含水率缺陷进行比对。经统计 2023 年该供方轻木含水率超差的缺陷发生率约为 10.9 %，在经过了一段时间的供方管理动作后，我们对其 2024 年第一季度所供的轻木的含水率进行统计。

表 7 一季度轻木含水率实测数据

样品	含水率实测值（入厂验收）				
批次一	6.1	5.6	6.1	4.7	5.1
批次二	3.6	3.7	4.2	4.2	5.0
批次三	3.7	4.2	4.8	5.1	5.1
批次四	4.6	6.4	5.0	6.0	3.5
批次五	4.3	4.0	4.9	4.8	4.4
批次六	5.3	5.4	5.8	6.3	5.4
批次七	4.4	4.9	3.8	4.7	3.6
批次八	6.1	5.8	6	5.7	5.6
批次九	5.7	5.5	4.5	4.9	3.4
批次十	5.7	5.6	4.1	3.5	3.9

由数据可知，该供方第一季度连续十个批次的轻木含水率均符合最新的控制要求≤7 %，基本符合预期。然而，进行深入分析后可以发现，这批轻木含水率的过程能力指数 Cpk 值仅为 0.77。这明显低于通常认为的较理想值 1.33，表明我们在轻木供应商的质量管理方面还存在很大的提升空间。这意味着，为了实现更高的质量标准，我们还需要在轻木供方的质量管理上付出更多的努力，继续深入地融合汽车行业质量管理工具，识别关键控制点，优化供方管理行动，以确保来料质量能达到更高的标准。

5 结语

针对叶片制造商对轻木的具体需求，我们梳理出了关键产品特性和关键过程特性，这些特性是评估轻木质量的重要依据。通过紧密围绕这些特性，与供方共同审视了轻木从生产加工到最终产品形成的全过程，深入探讨了其中可能存在的系统和操作风险。在此基础上，我们积极采取靠前监控和预防措施，力求将不合格的轻木控制在供方工厂内部，避免其对叶片的生产造成不良影响。从过去一段时间的实施情况来看，措施已经取得了一定的成效，但距离达到理想状态还有一段距离。因此，我们还需继续深化与供方的合作，持续优化质量管控措施，以 PDCA 的管理思路不断提升轻木供货质量。

参考文献：

[1] 武赛娟, 乔小亮, 朱晨华, 等. 巴沙木在风机叶片应用中的缺陷分析[J].纤维复合材料,2021, 38(4):74-77

[2] 刘靖宇, 袁炜, 宋厚利, 等. 厚轻木芯材造成的风电叶片质量缺陷研究[J]. 复合材料科学与工程, 2023, (5):80-85

[3] 王晓黎, 高厚坤. 简谈质量体系下的供应商管理[J]. 中国质量, 2024, (1): 57-59

核电厂一回路水压试验策略变更的风险研究

姚刚　段永强

中国核动力研究设计院，成都 610213

摘要：国家核安全局发布技术政策，推动国内执行 RES-M 在役检查要求的核电机组实施一回路水压试验策略调整。本文通过对比研究一回路水压试验与替代试验的差别，提出了一种定量评估一回路水压试验策略调整的风险分析方法，并以某执行 RES-M 体系要求的核电机组一回路水压试验策略调整为例，分析该核电机组一回路水压试验策略调整的风险。分析结果表明，该核电机组一回路水压试验策略调整后的风险增量较小，满足风险可接受准则。本文研究成果对国内执行 RES-M 体系的核电机组一回路水压试验策略调整的安全风险分析具有重要借鉴意义。

关键词：水压试验；策略变更；泄漏试验；概率安全分析

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0055-05

Research on the Risk Analysis for Hydraulic Test Modification on Primary Coolant System in Nuclear Power Plant

YAO Gang, DUAN Yongqiang

(Nuclear Power Instituted of China, 610213, Chengdu, China)

Abstract: The technical policy on hydraulic test modification of primary coolant system in nuclear power plants is issued by National Nuclear Safety Administration in 2023 to promote the adjustment of the hydraulic test strategy for domestic nuclear power units implementing the RES-M in-service inspection rule. Firstly, this paper compares the differences between the current primary hydraulic test strategy and alternative test. And then,based on the identified difference, a risk analysis method for quantitative evaluation of primary hydraulic test strategy adjustment is developed. Finally, taking the adjustment of primary hydraulic test strategy of a nuclear power plant that implements the RES-M in-service inspection rules as an example, this paper briefly analyzes the risk of the adjustment of primary hydraulic test strategy based on mentioned risk analysis methods. The research results show that the risk increment caused by the adjustment of the primary hydraulic test strategy is small and acceptable,and which can provide an important reference on the risk analysis for the hydraulic test modification of primary coolant systems in nuclear power plants with RES-M system in China.

Key words: hydraulic test; examination strategy modification; leakage test; probabilistic safety snalysis

在核电发展早期，因缺乏有效的定位、定量检验方法来管理一回路内部缺陷，便规定通过十年一次的水压试验来验证一回路的密封性。随着无损检验技术的发展和缺陷评价体系的完善，业界认识到十年一次的水压试验对验证一回路密封性的作用已逐渐降低，执行该试验增加了对一回路设备冲击的风险和占用 4~6 天大修关键路径，影响核电机组运营业绩的进一步提升，并且美国核电业界已于 1992 年逐步采用系统泄漏试验代替系统水压试验。因此，国家核安全局于 2023 年发布了《核电厂反应堆冷却剂系统定期水压试验与在役检查策略技术见解》的函[1]，推动国内执行 RES-M 在役检查体系的核电机组实施水压试验策略调整。由于传统的工程分析方法无法定量评估该变更引入的风险变化，因此本文将针对核电厂一回路水压试验策略变更的风险定量分析方法开展相关技术研究，以期直

收稿日期：2024-08-12

作者简介：姚刚 (1971—)，男，本科，高级工程师。现任职于中国核动力研究设计院，主要从事核电安全运行及总体研究工作。

观给出核电厂一回路水压试验策略变更后的风险变化水平。

1 水压试验策略变更描述

在核电机组全寿期内，执行 RES-M 在役检查体系的核电机组一回路水压试验策略变更主要内容为：将通过每次大修上行的一回路系统泄漏试验（PTx RCP002）和一回路一级部件目视检查，以及十年内实施一次主管道环焊缝超声检查和压力容器（RPV）内圆角超声检查来替代 RES-M 要求的十年一次的定期水压试验。

2 风险分析技术原理

一回路水压试验策略变更的风险研究将涉及三个方面：1）首先需要明确研究对象，即一回路水压试验策略变更前后的差别；2）研究变更后的安全影响，并将该影响转化成 PSA 技术要素；3）结合特定电厂 PSA 模型开展定量风险影响分析，并结合 NNSA-0147 风险判断准则判断本次变更的风险是否可接受，详细研究过程见图 1 所示。

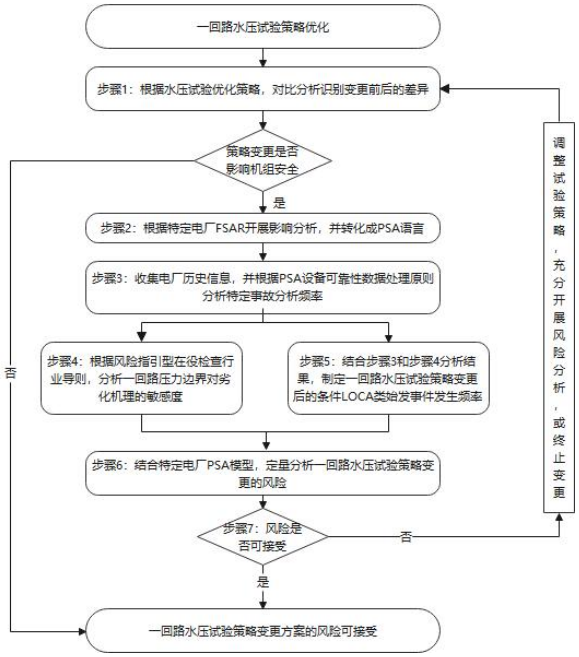


图 1 一回路水压试验策略变更的风险分析实施流程

3 一回路水压试验策略变更的风险分析

3.1 一回路水压试验策略变更的边界影响分析

按照 RSE-M 规范要求，在首轮大修和寿期内每十年大修期间执行 1.2 倍设计压力的一回路水压试验。一回路系统泄漏试验每个换料周期执行，试验压力不超过运行压力，通常为 154 bar。本文结合 RES-M 规范要求，对比分析在役机组一回路系统泄漏试验和一回路水压试验程序识别了两者的边界差异：一回路水压试验边界与密封试验边界均包含一回路内所有设备、内径大于 25 毫米的管道、阀门，二者的边界差异体现在一回路与其他系统连接部分。水压试验边界截止至边界第二个阀门（含），密封试验边界则截止至边界第一个阀门。也就是说，双道隔离阀中间一段管道及第二道阀门在密封试验时不能被验证到。

3.2 一回路水压试验策略变更的风险分析方法

一回路水压试验策略变更的风险可通过式（1）来表示：

$$\text{Risk} = \text{Consequence} \times \text{Frequency} \quad (1)$$

式中：

（1）Risk 指一回路水压试验策略变更后的风险；

（2）Consequence 指一回路水压试验策略变更后的后果；

（3）Frequency 指一回路水压试验策略变更后可能产生的后果的发生频率。

3.2.1 一回路水压试验策略变更的安全影响

一回路水压试验验证的是一回路压力边界潜在的缺陷，此类缺陷还未导致一回路泄漏，无法通过机组的日常监测发现，但随着机组运行时间的延长存在发生泄漏的可能。从 PSA 角度来看，该变更影响通常可分为两类：1）影响 LOCA 类始发事件发生频率；2）与安全相关系统的接口管道泄漏影响安全系统功能的实现。因此本文根据一回路水压试验边界范围将一回路水压试验边界分为三类区域来分析一回路水压试验策略变更的风险变化情况（见表 1）：

压力容器区域：压力容器如果发生裂纹或破裂将导致压力容器泄漏始发事件；

一回路冷却剂主管道区域：管道发生裂纹或破裂将导致一回路 LOCA 始发事件；

与安全相关系统的接口管道区域：管道发生裂纹或破裂将影响安全系统功能。

表 1　一回路水压试验策略变更的安全分析

影响区域	安全影响分析	分析结论
压力容器区域	业界采用线弹性断裂力学方法评估了水压试验条件下反应堆压力容器的极限失效缺陷。分析表明受辐照脆化效应最显著的堆芯筒体段和应力集中较明显的接管段区域在堆芯寿期末的临界失稳扩展压力和临界失稳扩展裂纹尺寸离机组设计压力和在役检查缺陷检验能力均具有较大的安全裕量。一回路水压试验策略优化后将增加压力容器内超声检查措施，进一步降低了压力容器发生缺陷进而发展为故障的可能。因此压力容器因本次变更导致的风险（界面 LOCA 始发事件发生频率的变化）是可以忽略的。	安全影响可接受，风险可忽略。
一回路冷却剂主管道区域	机组泄漏试验（包括日常泄漏试验和密封性试验）和一回路水压试验验证的一回路主回路边界相同，但验证的机组压力条件不同。通常核电机组设置多组不同开启阈值的稳压器安全阀组以保护一回路不超压，其中最高开启阈值约等于设计压力。因此只要一回路压力不高于设计基准压力，一回路压力边界完整性是有保障的，但对于高于设计压力的事故工况，则需根据最终事故安全分析报告进一步分析此类事故的影响。此类事故包括二回路排热减少事故类、反应堆冷却剂系统流量降低事故类和未能紧急停堆的预期瞬变等事故类。	需关注一回路冷却剂主管道区域的风险变化。
与安全相关系统的接口管道区域	在机组功率运行期间，与反应堆冷却剂系统相连的系统在第一道隔离阀和第二道隔离阀之间管段无法被泄漏试验所验证。此区域的管段和设备破裂将影响系统的安全功能，另外如果叠加第一道隔离阀内漏和此区域管道破裂则发展为潜在 LOCA 事故。根据核电行业 PSA 设备可靠性数据采集报告，此区域阀门发生内漏的概率为 1.0E-5 量级，因此叠加可能发生超设计压力事故频率以及该区域管道和设备破裂频率，可以预期其风险是较小的，可接受的。	安全影响可接受，风险可忽略。

3.2.2 一回路水压试验策略变更的风险分析

表 2　策略变更影响的事故与 PSA 始发事件对应关系

事故名称	PSA 始发事件	PSA 始发事件类
汽轮机跳闸	导致一回路温度上升的二回路瞬态	ST2A
正常给水流量丧失	主给水丧失	SW1A
反应堆冷却剂强迫流量全部丧失	其他瞬态	PT1A
丧失正常给水—ATWT	未能紧急停堆的预期瞬变	ATWT
-----	-----	-----

一回路水压试验策略变更后，在二回路排热减少事故类、反应堆冷却剂系统流量降低事故类和未能紧急停堆的预期瞬变等事故类发展过程中，一回路主冷却剂系统将出现超设计基准压力的情况。本文结合特定电厂 PSA 模型和 PSA 分析报告，将上述可能受影响的事故与 PSA 始发事件建立相应的对应关系（案例见表 2），并根据核电厂设备可靠性数据采集指导导则中的数据处理原则或行业通用原则确定相关始发事件事故的发生频率以获得转化后的 PSA 始发事件发生频率。

3.2.3 一回路水压试验策略变更对主回路破裂可能性的影响

当一回路压力超过设计基准压力时，如果一回路管道存在相关的缺陷，则可能导致主回路裂纹或管道破口，从而导致 LOCA 始发事件发生。相关的缺陷可能是管道制造导致或运行阶段因存在劣化机理而逐步发展而形成，其中前者与机组运行时间无关，并且较大尺寸的缺陷可在役前水压试验、主回路水压试验和在役阶段相关在役检查被检测出；后者则随着机组运行时间积累而逐步发展扩展。因此一回路水压试验策略变更的影响将重点关注随机组运行时间影响的劣化机理类缺陷，此类缺陷将随机组运行时间的延长而逐渐变严重。管道劣化机理的分析将参考风险指引型在役检查劣化机理分

析准则[2]，主要关注热疲劳（TF）、应力腐蚀开裂（SCC）、局部腐蚀（LC）和流动敏感性（FS）四类劣化机理。

根据 EPRI TR-112657[2]和 EPRI TR-111880[3]的研究，由某种降质机理引起的管道破裂频率与该降质机理类别的关系可根据不同的劣化机理将管道破裂可能性分为三种情况：高、中和低。一般而言，如果在管段上未发现已知的降质机理，则该管段破裂可能划分为类别“低”；而当某管段上发现一种或多种降质机理时，管段破裂可能性明显变高。具体的管段破裂可能性与已知的降质机理之间的关系见表 3 所示。

表 3　管段破裂可能性表

管段破裂可能性	预期的泄漏状况	管段可能遭受的降质机理	破裂频率（/焊缝年）
高	大	FAC	1.0E-04
中	小	TF SCC（IGSCC、TGSCC、ECSCC、PWSCC） LC（MIC、PIT、CC） E-C	1.0E-05
低	无	不存在已知的降质机理	1.0E-06

通过上述分析可获得对劣化机理敏感的一回路冷却剂系统管段（如稳压器波动管线等）。在电厂升温和降温阶段，稳压器和一回路热段存在较大的温差，最大接近 110 ℃，且在升降温阶段稳压器与一回路之间存在一定的波动；在机组功率稳定运行期间，稳压器波动管中流体速度较低，存在一回路热端与稳压器饱和水温差超 10 ℃以上的冷热流体混合；根据热疲劳劣化机理判断准则，认为稳压器波动管对热疲劳劣化机理敏感。喷淋和稳压器相连管道存在温度差超 40 ℃以上的汽液两相流，容易产生热分层，对热疲劳劣化机理敏感。

根据确定的劣化机理敏感区域，并根据反应堆冷却剂系统流程图和等轴图获得对劣化机理敏感区域的焊缝数量，并根据管道尺寸确定可能发生的 LOCA 始发事件类（见表 4）。

表 4　超设计基准压力后可能诱发的 LOCA 类型

一回路存在劣化机理区域	劣化机理	焊缝数量	管道直径（mm）	管段破裂对应始发事件
稳压器波动管区域	TAS CS TT	6 道	355.6 323.9 168.3	大、中、小破口失水事故
稳压器喷淋管线 RCP013	TAS CS	2 道	114.3	中、小破口失水事故
------	------	----	------	------

一回路水压试验策略变更仅仅影响超设计基准压力的事故类，此风险类型为一回路水压试验策略变更导致的条件 LOCA 发生频率变化引入的风险，条件 LOCA 频率变化计算方式如公式（2）。

$$F_{\mathrm{CLOCA}} = \lambda_{\mathrm{weld}} \times N_{\mathrm{weld}} \times F_{\mathrm{overpressure}} \qquad (2)$$

式（2）中：

F_{CLOCA} 指一回路水压试验策略优化后，一回路超压条件下发生 LOCA 始发事件频率；

λ_{weld} 指对劣化机理敏感的管段区域，焊缝发生破裂的频率；

N_{weld} 指对劣化机理敏感的管段区域，焊缝数量；

$F_{\mathrm{overpressure}}$ 指 FSAR 事故分析中，导致一回路压力超过设计基准压力的事故序列的发生频率。

3.2.4　风险验收准则

核电厂一回路水压试验策略变更引起的风险变化可接受准则将根据核安全译文 NNSA-0147 规定的风险接受准则确定。[4]通常风险存在三种情况（见图 2），在本文中认为只有风险增量处于风险III区才是可接受的。

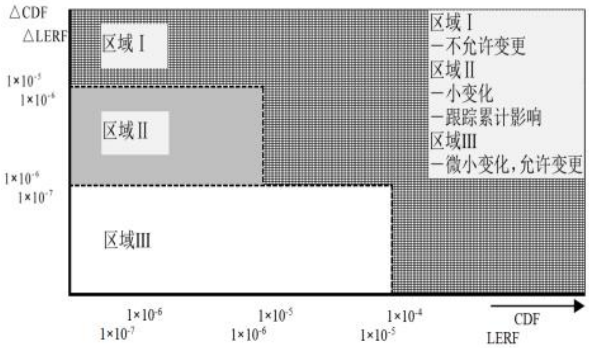


图 2　风险接受准则

3.3　一回路水压试验策略变更的风险定量分析

根据上述研究结果，将通过式（2）计算得到的大、中、小 LOCA 条件始发事件发生频率带入特定核电机组 PSA 模型中相应的 LOCA 类始发事件

树或建立事件序列树，并开展对应的定量计算分析，可获得执行 RES-M 体系要求的核电机组实施一回路水压试验策略变更后的风险变化情况。

4 某核电机组一回路水压试验策略变更后的风险分析

基于 3.2 节的风险分析方法，并根据某电厂 PSA 模型定量分析该核电机组一回路水压试验策略变更的风险，分析结果见表 5 所示。从分析结果可知：该核电机组一回路水压试验策略变更引入的风险远小于图 2 风险III区中的风险限值。因此该核电机组一回路水压试验策略变更引入的风险变化是可接受的。

表 5 某核电机组一回路水压试验策略变更的风险分析

条件LOCA类型	劣化机理	焊缝数量	破裂上限频率	事故频率	风险变化	
					△CDF	△LERF
大LOCA	TASCS、TT	37		2.07E-05	2.43E-08	1.97E-10
中LOCA	TASCS	45	1.0E-05	2.52E-05	2.74E-08	2.38E-10
小LOCA	TASCS	47		2.63E-05	1.74E-08	2.79E-10
合计					6.91E-08	7.13E-10

5 结语

本文首先分析了一回路水压试验与替代试验的差别，识别了两者验证一回路密封性边界和压力平台的不同；其次针对识别的差异提出了一种风险定量分析方法；最后以某执行 RES-M 体系要求的核电机组一回路水压试验策略变更为例，分析该核电机组一回路水压试验策略变更的风险。分析结果表明，该核电机组一回路水压试验策略变更后的风险增量处于 NNSA 0147 规定的风险III区，满足风险可接受原则。本文研究成果对国内执行 RES-M 体系的核电机组一回路水压试验策略变更的风险分析具有重要借鉴意义。

参考文献：

[1] 生态环境部核与辐射安全中心. 电厂反应堆冷却剂系统定期水压试验与在役检查策略技术见解)[S]. 2023

[2] Mitman J. EPRI TR-112657 Revised Risk-Informed In-service Inspection Evaluation Procedure [R], Final Report, Rev. B-A, December 1999, 138

[3] Mitman J. EPRI TR-111880 Piping System Reliability and Failure Rate Estimation Models for Use in Risk Informed Inservice Inspection Applications[R], Final Report, November 2000

[4] 国家核安全局. 核安全译文 NNSA-0147. 概率风险评价用于特定电厂许可证基础变更的风险指引决策方法(2011)[S]. 2011

集团要闻

哈密熔盐塔式 50 MW 光热发电项目入选电力行业重大技术装备及工程名录

8 月 30 日，中国电力企业联合会以“走近大国重器见证奋进电力”为主题，举办 2024 年“中国电力主题日”活动，集中展现电力工业取得的辉煌成就，现场发布电力行业重大技术装备及工程名录，由东方锅炉研制并提供核心设备的哈密熔盐塔式 50 MW 光热发电项目入选。

新疆哈密熔盐塔式 50 MW 光热发电项目作为我国首批光热示范项目之一，是新疆目前唯一建成投运的光热电站。该项目为新型储能电站，兼顾发电与储能，具有基础负荷和调峰负荷能力，对电力系统安全、稳定、高效运行具有重要作用，是高效的绿色电源，近半年累计发电量超 7 000 万千瓦时。

作为全球领先的电站设备研发制造商，东方锅炉为哈密光热发电项目研制了当今最先进的塔式熔盐发电技术，集中创新资源，攻克了多项“卡脖子”技术，最终掌握了高效利用太阳能的“绿色原理”，为我国优化能源结构，推动绿色发展，助力实现“双碳”目标做出了积极贡献。

来源：东方锅炉网

反应堆压力容器J型焊缝焊条电弧焊缺陷产生机理及防治措施研究

王苗苗[1] 张斌[2] 戴光明[1] 江国焱[1] 陈洪[2] 李浩然[1]

1.东方电气（广州)重型机器有限公司，广州 511455 ；2.中广核工程有限公司，深圳 518124

摘要：反应堆压力容器是反应堆冷却剂系统的重要承压设备。CRDM 贯穿件通过 J 型焊缝与顶盖连接，结构形式复杂、拘束度大、残余应力大，J 型焊缝的焊接技术是反应堆压力容器制造的关键。由于其结构特点，操作更为方便灵活的焊条电弧焊方法被广泛应用于该焊缝的焊接。因其特殊工况需要，耐腐蚀性能更优的 ENiCrFe-7 型镍基合金焊条作为其焊接填充材料。因其材料特性，焊接时容易出现热裂纹、气孔、夹杂等缺陷。尤其在 J 型焊缝这类拘束应力大的接头中，其制造难度进一步增大。本文对 J 型焊缝从结构特点、镍基合金材料的特性、工艺控制要点、过程管控措施等方面展开系统分析，并制定相应的控制措施，以达到提升 J 型焊缝焊接质量的目的。

关键词：J 型焊缝；ENiCrFe-7；缺陷；防治措施

中图分类号：TG441.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）05-0060-07

Research on the Mechanism and Prevention Measures of Defects in J-Weld of Reactor Pressure Vessel

WANG Miaomiao[1], ZHANG Bin[2], DAI Guangming[1], JIANG Guoyan[1], CHEN Hong[2], LI Haoran[1]

(1.Dongfang (Guang Zhou) Heavy Machinery Co., Ltd., 511455, Guangzhou, China;2.China Nuclear Power Engineering Co.,Ltd., 518124,Shenzhen, China)

Abstract: Reactor pressure vessel is an important pressure equipment of reactor coolant system. CRDM penetration is connected to the top cover through J-weld, which has complex structure, large constraint and large residual stress. The welding technology of J-weld is the key to the manufacture of reactor pressure vessel. Because of its structural characteristics, the electrode arc welding method, which is more convenient and flexible in operation, is widely used in the welding of this weld. Due to its special working conditions, ENiCrFe-7 nickel-based alloy electrode with better corrosion resistance is used as its welding filler material. Due to its material characteristics, it is easy to have defects such as hot cracks, pores and inclusions during welding. Especially in joints with high constraint stress such as J-welds, the manufacturing difficulty is further increased. In this paper, J-welds are systematically analyzed from the aspects of structural characteristics, characteristics of nickel-based alloy materials, process control points, process control measures, etc., and corresponding control measures are formulated to achieve the purpose of improving the welding quality of J-welds.

Key words: J-weld; ENiCrFe-7; defect; control measures

反应堆压力容器是反应堆冷却剂系统的重要承压边界设备，是核岛堆芯放射性安全防护的第二道重要屏障。CRDM 贯穿件与反应堆压力容器顶盖之间采用 J 型接头连接和密封，防止反应堆冷却剂通过贯穿件与顶盖之间泄漏。[1]CRDM 贯穿件遍布在封头上，顶盖内壁表面堆焊不锈钢耐蚀层，CRDM 管座与顶盖结构，如图 1 所示。CRDM 贯穿件通过 J 型焊缝与顶盖连接，结构形式复杂，拘束

收稿日期： 2024-07-19

作者简介：王苗苗（1984—），女，毕业于重庆大学材料成型及控制工程专业，本科学历，高级工程师，主要从事核能相关主设备的焊接及热处理工艺开发和技术管理工作。邮箱:wmm20031804@163.com。

度大，为多层多道焊，如图 2 所示。

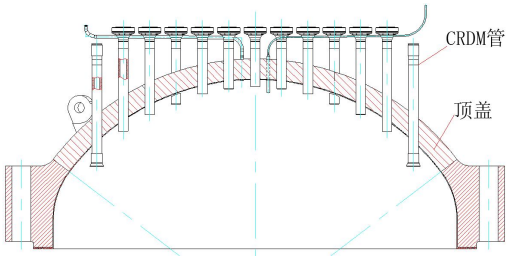


图 1　CRDM 管座与顶盖结构示意图

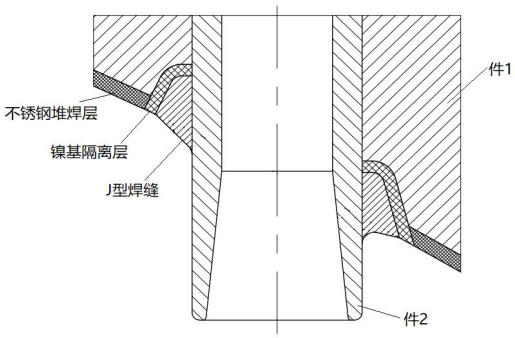


图 2　J 型坡口示意图

J 型焊缝的焊接技术是反应堆压力容器制造的关键。件 1 为 SA508Gr.3cl2 低合金钢，件 2 为 690 镍基合金，不锈钢堆焊层采用 EQ309L+EQ308L 堆焊，镍基隔离层和 J 型焊缝均采用 ENiCrFe-7 镍基合金焊条焊接。隔离层焊缝进行 VT、DT、PT、UT 检查，焊后进行消除应力热处理。J 型焊缝采用 ENiCrFe-7 镍基合金焊条焊接，焊缝进行首层及每 3 层 PT 检查、UT 检查，焊后不经历消除应力热处理，存在很大的焊接残余应力。[2]

J 型密封焊缝的结构形式复杂，坡口狭窄、空间曲面形式多样，焊接材料为 ENiCrFe-7 镍基合金，焊接难度大、可焊性差、焊接时容易出现热裂纹、气孔、夹杂等缺陷。[3]尤其在 J 型焊缝这类拘束应力大的接头中，其制造难度进一步增大。通常该焊缝的焊接周期在 4~6 个月时间不等，焊接周期长、焊接质量不稳定。尤其在最终水压试验后进行 PT 检查时常发现显示。

本文对 J 型焊缝从结构特点、镍基合金材料的特性、工艺控制要点、过程管控措施等方面展开系统分析，并制定相应的控制措施，并通过 1:1 模拟件验证质量提升措施的有效性。以达到提升 J 型焊缝产品焊接质量的目的。

1　原因分析

1.1　结构分析

J 型焊缝焊接坡口为自拘束型结构，如图 3 所示。拘束应力只能释放于填充金属。因此焊缝金属会经受焊接残余应力的作用，当焊缝金属中存在微小缺陷或填充金属自身强度不足不能抵抗释放的焊接残余应力时，焊缝金属会产生缺陷。对于不同的堆型，图 3 中的α1 角度会有所区别，通常α1 值在 5°~15°之间。α1 值越小焊接操作空间越小、焊接难度越大。α1 值越大焊接填充量越大，焊接变形及残余应力越大。

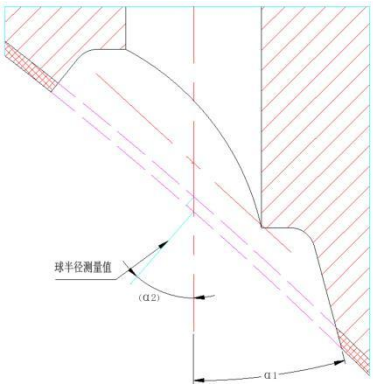


图 3　焊接接头示意图

α2 为 CRDM 贯穿件与顶盖的倾角。倾角对焊缝中心处的轴向应力和环向应力有明显的影响。在 6 点钟和 0 点钟位置，随着倾角的增加，焊缝中心残余应力平均水平越大[1]; J 型焊缝的焊缝表面为残余应力最大区域，是易产生 PT 显示的区域。

1.2　材料分析

反应堆压力容器与反应堆冷却介质直接接触，因此所使用材料需要较强的耐腐蚀性能。镍基合金具有优良的耐腐蚀性能，能耐各种腐蚀介质的侵蚀且在高温下（200 ℃~1 090 ℃）同样具有良好的耐腐蚀性能。同时具有良好的高温和低温力学性能，被广泛应用于核岛主设备的制造中。J 型焊缝的焊接也因工况需要而选择采用 INCONEL 690（焊材型号 ENiCrFe-7）型镍基合金进行焊接。由于其结构特点，操作更为方便灵活的手工焊条电弧焊方法被广泛应用于该焊缝的焊接。

目前核电常用 690 钢的化学成分详见表 1。常用镍基合金焊条（焊材型号 ENiCrFe-7）化学成分详见表 2。

表 1　母材 6 90 钢的化学成分（wt.%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
母材	0.05	0.5	0.5	inf	0.015	27.0-31.0	≥58	0.5
元素	Fe							
母材	7.0-11.0							

表 2　焊材 ENiCrFe-7 的化学成分（wt.%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr
标准	0.05	0.75	5.0	0.03	0.015	28.0~31.5
152	0.045	0.65	5.0	0.020	0.010	28.0~31.5
152M	0.045	0.65	5.0	0.010	0.010	28.0~31.5
元素	Ni	Nb+Ta	Fe	Al	Ti	Co
标准	REST	1.0~2.5	7.0~12.0	0.5	0.5	/
152	REST	1.20~2.20	8.0~12.0	inf	0.5	0.1
152M	REST	1.20~2.20	8.00~12.00	0.5	0.5	0.1
元素	Mo	Cu	N	B		
标准	0.5	0.5	/	/		
152	0.5	0.5	inf	0.004		
152M	0.5	0.5	0.03	0.004		

INCONEL690 镍基合金固溶态为面心立方的奥氏体组织（γ），其层错能较低，强度高、冶金稳定性好、加工制造性能优良。[4]镍基合金具有较高的热裂纹敏感性，尤其在收弧部位易产生裂纹。晶间腋膜是引发镍基合金单相组织凝固裂纹的最主要冶金因素。焊缝金属的热裂纹一般是由于低熔点夹杂物从表面沿晶间渗透而引起的。[5]热裂纹的因素可从冶金、力学两方面进行分析。

（1）冶金因素

690 合金中，影响其焊接结晶裂纹敏感性的主要化学元素包括：Mn、Nb、Mo、Al、Ti 等合金元素，S、P、Si 等杂质元素。[6]

S、P 在奥氏体冲的溶解度极低、偏析系数最大。S 可与 Ni 形成低熔点 NiS 或 NiS-Ni，其熔点分别为 920 ℃和 645 ℃有利于形成热裂纹，因此镍基合金的 S 含量需特别加以控制。还可形成各种低熔点的化合物和共晶。例如，FeS 和 Fe_3P（熔点为 1 190 ℃和 1 160 ℃）、FeS-Fe（熔点 9 85 ℃）Fe_3P-Fe（1 050℃）等。他们在结晶时极易形成液态薄膜，故对各种裂纹都很敏感。[7]

C 也是影响结晶裂纹的主要元素，并能加剧其他元素的有害作用。随着 C 含量的增加，初生相更多的转为γ相，而 S、P 在γ相中溶解度比在δ相中低很多，S 低 3 倍，P 低约 10 倍。加剧了 S 和 P 在晶界析出，使结晶裂纹倾向增大。

690 合金中添加少量的 Nb 没有害处。其可与 O、N 结合形成氧化物和氮化物。可以减少焊缝金属中的气孔，也有固溶强化的作用。但过量 Nb 对于抗裂性是不利的，其在镍中的溶解度仅为 6 %。Mn 的加入可通过抑制 Nb 在晶界的偏析，削弱 Nb 的这种不利作用，增强 690 合金抵抗晶间裂纹的能力。[8]

Ti、Zr 和镧、铈等稀土元素能形成高熔点的硫化物（TiS 熔点约 2 000~2 100 ℃，铈的硫化物 CeS 熔点 2 400 ℃。），可进一步净化焊缝金属中的 S 含量，从而避免了结晶裂纹的产生。

（2）力学因素

焊接结晶裂纹通常具有高温沿晶断裂的特性。发生高温沿晶断裂的条件是金属在高温阶段晶间塑性变形能力不足以承受当时所发生的的塑性应变量而产生断裂。[7]

当焊接接头上温度分布不均匀，温度梯度过大，或者冷却速度过快时，则产生更大的应变，因此便极易发生结晶裂纹；当焊件越厚或接头受到拘束越强时，引起的应变也越大，结晶裂纹也越易发生。[7]

综上，INCONEL690 镍基合金的焊接极易产生结晶裂纹等缺陷。反应堆压力容器 J 型焊缝的结构为自拘束型，所承受的应力应变较大，进一步增加了该类焊缝产生缺陷的机率。

1.3 工艺分析

（1）清洁度的影响

镍基合金的焊接对不溶于 Ni 的杂质元素敏感。这些元素在焊缝凝固时形成低熔点共晶体，具有较高的热裂纹敏感性。能与 Ni 形成低熔点共晶的元素有 S、P、Pb、Sn、Zn、Bi、Sb、As 等。生产制造过程中常用到的脂、油、漆、标记用蜡笔或墨水、成形润滑剂、切削冷却液等材料中均含有上述有害元素。

镍基耐蚀合金表面氧化皮的熔点比母材高得多。这类氧化物不连续特别细小，一般用射线探伤和液体渗透也难以发现。但会在焊缝金属中可能形成夹渣或细小的不连续氧化物。

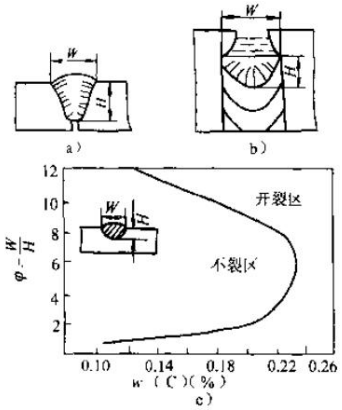
（2）焊缝形状的影响

焊接接头形式将影响到接头的结晶条件和受力状态以及热的分布，结晶裂纹与焊缝的成形系数 ψ=W/H（即宽深比）有关。可通过合理调整焊接工

艺参数控制成型系数，以达到控制结晶裂纹的作用。

（3）热输入的影响

高热输入会延长熔池在高温状态的停留时间，使得晶界低熔相的熔化加重，晶界在液态的停留时间加长。促使产生过度的偏析、碳化物的沉淀或其他的有害的冶金现象，液化裂纹的倾向就越大。因此，必须严格控制焊接热输入。



a)电弧焊缝；b)电渣焊缝；c)碳钢结晶裂纹与成形系数的关系

图 4　焊缝成型系数对焊缝结晶裂纹的影响[7]

（4）操作手法的影响

根据焊接凝固冶金原理，先结晶焊缝的部分比较纯，后结晶的杂质和合金化元素比较多。焊道的收弧处便是非常典型的结晶后期杂质富集的区域，极易形成结晶裂纹。收弧时的冷却速度比焊接过程中更大。在焊接操作时收弧区域可采用特殊的填满弧坑手法和衰减电流收弧的方式减少弧坑裂纹。

（5）工艺特性的影响

镍基合金焊缝金属润湿性差。增大焊接电流并不能改进焊缝金属的流动性，反而起着有害作用。焊缝金属熔深较浅是镍基耐蚀合金的固有特性，同样也不能通过增大焊接电流来增加熔深。如上所述，镍基合金的焊接电流过大并不能改变焊缝的成型和熔深。反而会产生裂纹和气孔等缺陷。

2　J 型焊缝常见缺陷分析

按照 RCC-M 标准要求，J 型焊缝在第一层和以后每焊三层进行渗透检验。该焊缝为密封焊缝，渗透检验的判定标准为：不得有任何缺陷显示。

在工程应用中，J 型焊缝常见的缺陷均在渗透检验时发现。缺陷类型有圆形和线性显示两种。典型的 J 型焊缝 PT 显示如图 5 所示。圆形显示大小为φ0.5～φ1.5 mm，线性显示长度为 2～3 mm，缺陷面积较小。

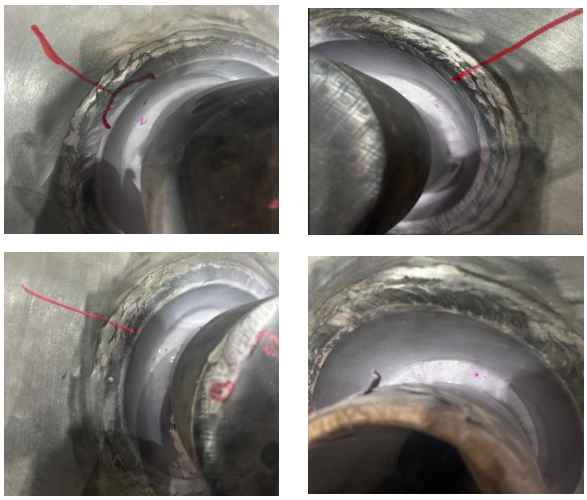
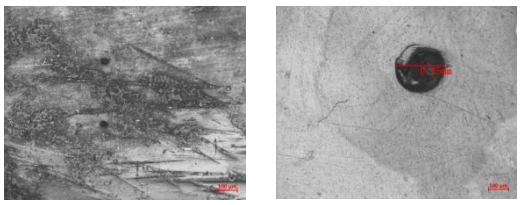
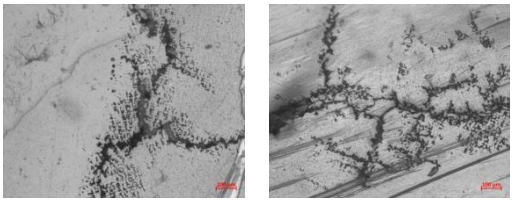


图 5　J 型焊缝典型 PT 显示

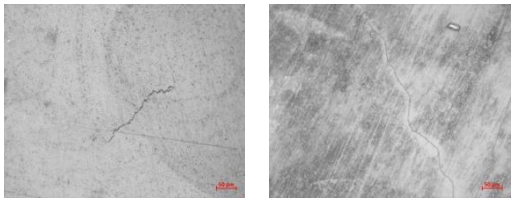
PT 显示在每个 J 型焊缝的不同方位均有出现，缺陷分布位置无明显的规律。但 PT 显示的位置大部分位于焊道收弧位置，具有明显的规律性。为判定 PT 显示的性质，在产品中随机对 PT 显示位置采用金相抛光后进行现场金相分析。详见图 6。



（a）夹渣　100X



（b）晶间裂纹　100X



（c）热裂纹　200X

图 6　J 型焊缝缺陷位置金相分析，其中（a）为夹渣缺陷，（b）为晶间裂纹，（c）为热裂纹

根据现场金相分析结果，PT 检查为圆形和线性

显示的缺陷中均能观察到图 6（a）中的夹渣缺陷。夹渣缺陷位置伴随着晶间裂纹和热裂纹。如图 6（c）的热裂纹占缺陷总量的少数。对缺陷位置进行扫描电镜和能谱分析，如图 7~9 所示。

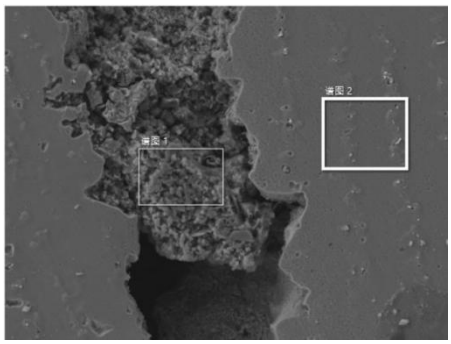


图 7　典型缺陷扫描电镜照片（900X）

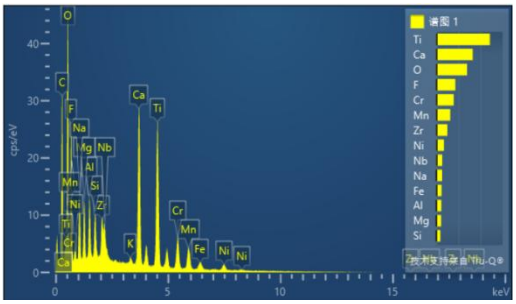


图 8　典型缺陷谱图 1（缺陷区域）

表 3　典型缺陷谱图 1 成分

谱图 1	线类型	wt.	wt.%Sigma	标准样品标签
C	K 线系	16.13	0.24	C Vit
O	K 线系	10.61	0.17	SiO_2
F	K 线系	7.85	0.14	CaF_2
Na	K 线系	2.53	0.06	Albite
Mg	K 线系	1.55	0.05	MgO
Al	K 线系	2.19	0.05	Al_2O_3
Si	K 线系	2.16	0.06	SiO_2
Cl	K 线系	0.13	0.04	NaCl
K	K 线系	0.51	0.05	KBr
Ca	K 线系	10.82	0.13	Wollastonite
Ti	K 线系	15.67	0.18	Ti
Cr	K 线系	6.95	0.16	Cr
Mn	K 线系	4.89	0.17	Mn
Fe	K 线系	5.75	0.19	Fe
Ni	K 线系	6.58	0.24	Ni
Zr	L 线系	3.60	0.18	Zr
Nb	K 线系	2.10	0.19	Nb
总量		100.00		

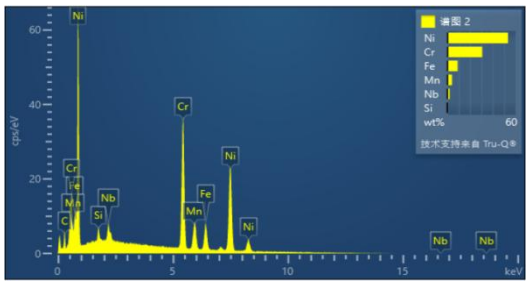


图 9　典型缺陷谱图 2（缺陷区域）

表 4　典型缺陷谱图 2 成分

谱图 2	线类型	wt.	wt.%Sigma	标准样品标签
Al	K 线系	0.40	0.04	Al_2O_3
Si	K 线系	0.37	0.04	SiO_2
Nb	K 线系	1.32	0.13	Nb
C	K 线系	3.79	0.10	C Vit
Mn	K 线系	3.91	0.17	Mn
Fe	K 线系	9.16	0.19	Fe
Cr	K 线系	28.70	0.25	Cr
Ni	K 线系	52.35	0.32	Ni
总量		100.00		

综上，J 型焊缝的 PT 缺陷集中在焊道收弧处，缺陷类型有圆形和线性显示两种。缺陷中常伴随有夹渣等杂质。缺陷位置含氧量高，主要成分为氧化物。提升 J 型焊缝的焊接质量应重点从提升焊道收弧处焊接质量和控制焊道清洁度方面入手。

3　镍基合金焊条收弧影响分析

为了了解镍基合金焊条收弧操作与弧坑裂纹的关系，开展以下试验。试验分为：异种材质和同种材质两组，每组分为弧坑回填操作和弧坑不回填操作。通过逐层打磨并 PT 的方法，了解收弧操作与弧坑裂纹深度之间的关系。焊接材料采用φ4.0 规格。试件信息详见表 5。分别采用不同的焊接操作人员进行焊接操作，详细焊接参数及检查结果详见表 6。

表 5　试件操作信息汇总表

操作方式	母材	焊材	规格	收弧操作方式
1	16MND5	ENiCrFe-7	Φ4.0	弧坑回填
2	16MND5	ENiCrFe-7	Φ4.0	弧坑不回填
3	690	ENiCrFe-7	Φ4.0	弧坑回填
4	690	ENiCrFe-7	Φ4.0	弧坑不回填
5	690	ENiCrFe-7	Φ3.2	弧坑回填
6	690	ENiCrFe-7	Φ3.2	弧坑不回填

表 6　收弧裂纹深度汇总表

	操作方式 2				操作方式 4		
参数	1 组	2 组	3 组	4 组	1 组	2 组	3 组
时间 s	43	52	53	54	25	28	32
电流 A	123	123	123	123	123	123	123
线能量 kJ/mm	1.021	1.233	1.257	1.288	0.83	0.929	1.062
PT 显像	收弧处裂纹显像至母材的高度 mm						
0 次	2	2	2	2	4	4	4
1 次	1	1.5	1.5	1	3	3.5	3.5
2 次	0.8	1.2	1	0.8	2.5	3.2	3
3 次	0.2	0.8	0.5	0.5	2.1 无	3	2.8
4 次	0.1	0.1	0.1	0.1	/	2.5	2.5
5 次	-1.5 无	-1.2 无	-1.0 无	/	/	0.5 无	-0.1 无
裂纹深	3.5	3.2	2.5	2.5	0.9	4	3.6
	操作方式 1				操作方式 3		
参数	1 组	2 组	3 组	4 组	1 组	2 组	3 组
时间 s	55	58	64	62	35	40	40
电流 A	123	123	123	123	123	123	123
线能量 kJ/mm	1.304	1.375	1.518	1.47	1.162	1.328	1.328
PT 显像	收弧处裂纹显像至母材的高度 mm						
0 次	4.2	4.2	4.2	4.2	5.5	5.5	5.5
1 次	3	2	3.5	3.5	3.0 无	3.1 无	4.8
2 次	2.8	1.6 无	3.0 无	/	/	/	4.3
3 次	2.5 无	/	/	/	/	/	4
4 次	/	/	/	/	/	/	3.5 无
裂纹深	1.7	2.6	1.2	1.2	2.5	2.4	2
	操作方式 5				操作方式 6		
参数	1	2	3	1	2	3	
时间 s	41	39	40	34	38	40	
电流 A	95	95	95	95	95	95	
线能量 kJ/mm	0.913	0.845	0.864	0.673	0.752	0.792	
PT 显像	收弧处裂纹显像至母材的高度 mm						
0	2	2.5	2.0	4.5	4.0	4.0	
1	1.5	2.1	1.5	4.1	3.5	3.4	
2	1.0	1.5 无	1.0	3.5	3.0	3.0	
3	0.8 无	/	0.5 无	2.9	2.0	2.4	
4	/	/	/	2.5 无	0.8 无	1.8 无	
裂纹深	1.2	1.0	1.5	2.0	3.2	2.2	

对试验数据进行分析可以确定以下结论：1）同种材料下的收弧处裂纹深度较异种材料深。2）无论是异种材质还是同种材质，在画圈方式填满弧坑后，裂纹的扩展深度较不填弧坑明显变浅。3）Φ3.2 规格焊材无论采用何种收弧方式，弧坑裂纹较Φ4.0 规格焊材浅。

4　质量提升措施

通过前文分析，可以确定镍基合金基于其自身特点，在焊接过程中极易出现热裂纹，尤其是弧坑裂纹。提高 J 型焊缝的焊接质量的控制措施应从如何减少裂纹的产生和如何发现并消除已产生的裂纹两个方面来考虑。重点在于：

（1）选用抗裂性能优良的焊接材料，控制焊接材料的 S、P、C、Nb 等元素；

（2）确定最佳的焊接参数并固化，生产中避免调整焊接参数；

（3）采用小规格焊材减少焊接热输入量有利于减少弧坑裂纹；

（4）INCONEL690 镍基合金的导热性差、液态焊缝金属的流动性差，焊接难度大。需提升焊工技能水平；

（5）收弧操作需采用回填操作的方式减少弧坑裂纹的深度；

（6）每道焊接完成后，对弧坑进行打磨，打磨深度应达到 1.5 mm；

（7）梳理筛选出影响焊缝清洁度的所有环节，制定有效的措施以保证作业过程中清洁度满足要求；

（8）在保证焊缝尺寸满足设计要求的前提下，减少焊接填充量。

5　结果验证

为进一步验证分析质量提升措施的合理性，采用φ2.5 mm、φ3.2 mm 规格焊材，按照产品结构进行 1:1 模拟件的焊接，如图 10 所示。对模拟件按照产品要求进行根部及每三层 PT 检验。检验结果满足设计要求，无 PT 显示。

图 10　J 型焊缝 1:1 模拟件 PT 结果

对 1:1 模拟件分别在 3 点、6 点、9 点、12 点位置切取试样进行 PT 检验、宏观检验和扫描电镜分析。典型结果如图 11~13 所示。

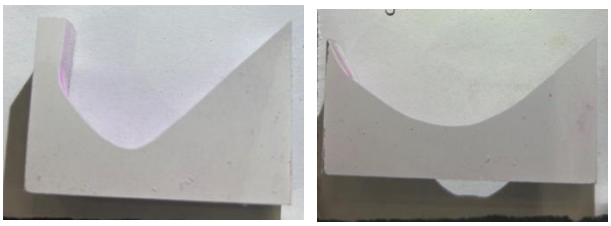


图 11　J 型焊缝 1:1 模拟件金相试样 PT 结果

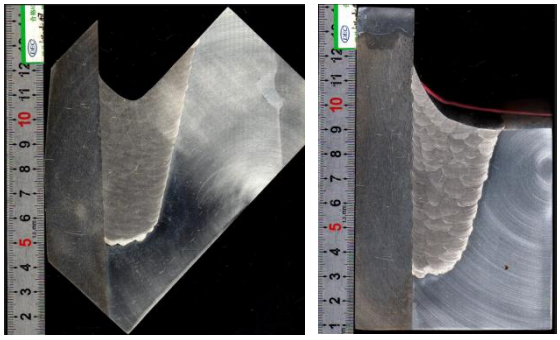


图 12　J 型焊缝 1:1 模拟件宏观检验结果（10X）

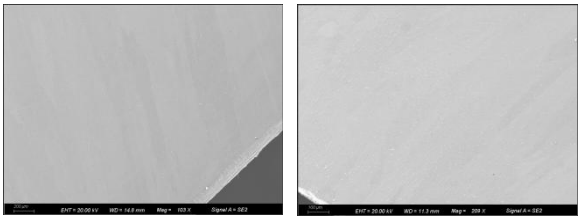


图 13　J 型焊缝 1:1 模拟件扫描电镜检验结果（200X）

从图 10 和 11 可以看出：按照质量提升措施焊接的 1:1 模拟件，焊缝表面 PT 无任何显示。对 J 型焊缝模拟件解剖后，焊缝截面 PT 无任何显示。从图 12 和图 13 可以看出：按照质量提升措施焊接的 1:1 模拟件，内部组织中的夹渣、晶间裂纹、热裂纹等缺陷大大减少。说明质量提升措施验证有效。

6　结语

本文以某项目反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 型焊缝为研究对象，从结构特点、镍基合金材料的特性、工艺控制要点、常见缺陷分析、收弧操作影响等方面展开系统分析，并制定相应的质量提升措施。通过制备 1:1 模拟件的方式验证质量提升措施的有效性。结论如下：

1）镍基合金焊接难度极大，在生产过程中不可避免的会产生焊接热裂纹、夹渣等缺陷。

2）及时发现缺陷并采取有效措施及时去除缺陷是提升焊接质量的有效措施。

3）镍基合金焊接缺陷主要在收弧区域产生。

4）采用小规格焊材减少焊接热输入量有利于减少弧坑裂纹。

5）生产环境及制造各环节的清洁度控制水平决定了镍基合金的焊接质量。

6）镍基合金的焊接操作工技能水平需进行专项培训，以保证其具备焊接合格焊缝的能力。

通过对某项目反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 型焊缝焊接过程跟踪，生产过程的有效管理影响 J 型焊缝焊接质量。主要管理措施如下：

1）焊接操作人员实行准入制度；焊接工位实施人员准入制度；配合工种（检查人员、打磨人员、技术人员）人员固定。

2）针对 J 型焊缝的焊接各部门确定一名负责人；J 型焊缝焊工确定一名责任人；对焊接区域分区并做好过程记录，工作内容明确、质量责任清晰。

3）在开展焊接前对需要的设备、工装、工具、辅料进行梳理并提前准备到位，保障正常有序的开展焊接作业。

4）焊接过程中及时跟踪监控，根据需要开展回炉培训和经验总结；焊接过程中随机开展工艺纪律检查，指导和督促操作人员全过程落实各项工艺和管理要求。

参考文献：

[1] 黄逸峰, 张俊宝, 梅乐, 等. 核电反应堆压力容器顶盖 J 型接头内壁残余应力[J]. 焊接, 2016, (1):23-27+69

[2] 付强, 罗英, 杨敏, 等. RPV 顶盖和 CRDM 管座焊接残余应力三维数值模拟[J].焊接学报,2015,36(11):105-108+118

[3] 李恩, 何冰, 江国焱, 等. 反应堆压力容器管座贯穿件与顶盖 J 型焊缝缺陷分析及改进[J]. 电焊机, 2024, 54(4):77-83

[4] 熊丽, 王晓南, 张郑辉. Inconel 690 镍基合金焊接研究进展[J]. 焊接技, 2022, 51(3):12-18+113

[5] 朱兴华. Inconel690 镍基合金材料焊接技术要点[J]. 电子世界, 2013, (14):189

[6] 张皓月. S、P 对 Inconel690 焊丝熔敷金属结晶裂纹敏感性影响的研究[D]. 机械科学研究总院, 2011

[7] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社,2022

[8] 薄春雨. 690 镍基合金焊带熔敷金属结晶裂纹敏感性研究[D].机械科学研究总院, 2006

水泵水轮机转轮止漏环结构优化研究

党鉴　邓鑫　凡家异　黄世海　刘辉

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：水轮机止漏环是设置在转轮与顶盖、底环间用于减小漏水并可更换的金属密封结构。本文以国内某抽蓄机组为研究对象，结合同水头段相似机组的结构型式和参数优化，旨在改善水泵水轮机止漏环处的机械性能和水力性能，并通过有限元方法，对优化前后的水力模型进行了深入对比分析。研究结果表明，本文提供的优化方案能明显降低转轮上、下腔过流面的压力值，并有效减少止漏环的漏水量。研究成果对提升水泵水轮机的水力效率及增强机组系统稳定性具有重要意义。

关键词：水泵水轮机；止漏环；结构优化；CFD

中图分类号：TV734.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0067-04

Research on Structure Optimization of Labyrinth Ring of Pump Turbine Runner

DANG Jian, DENG Xin, FAN Jiayi, HUANG Shihai, LIU Hui

（Dongfang Electric Group Dongfang Electric Co., Ltd.,618000, Deyang, Sichuan, China）

Abstract: The labyrinth ring is a metal sealing structure located between the turbine runner and the head cover as well as the bottom ring of a hydraulic turbine, designed to minimize water leakage and facilitate replacement. Focusing on a domestic pumped storage unit, this study aims to enhance the mechanical and hydraulic performance of the labyrinth ring in pump turbines by drawing on the structural designs and parameter optimizations of similar units operating at the same head. A comprehensive comparative analysis of the hydraulic models before and after optimization was conducted using the finite element method. The research findings indicate that the proposed optimization significantly reduces the pressure values on the upper and lower flow surfaces of the runner and effectively decreases water leakage through the labyrinth ring. These results are pivotal in improving the hydraulic efficiency and enhancing the overall system stability of pump turbines.

Key words: pump turbine; labyrinth ring; structure optimization; CFD

近年来，为实现“碳达峰、碳中和”的战略目标，我国正积极推进以新能源为主体的新型电力系统建设。抽水蓄能作为当前技术成熟、经济高效且具备大规模开发潜力的电力系统调节方式，在绿色低碳清洁能源领域扮演着重要角色。[1-2]随着《抽水蓄能中长期发展规划》的出台及新型电力系统构建需求的迫切，我国抽水蓄能电站规划呈现出蓬勃发展的态势。当前，国内抽蓄电站建设已进入快速发展的第三波高峰期，与之安全稳定运行与高质量发展相关的基础技术研究也备受关注。[3]

水泵水轮机作为抽蓄电站的核心设备，其转轮止漏环结构对机组机械和水力性能均具有显著影响。[4-6]由于止漏环结构设计不当或结构参数不合理，当机组发生周期性偏心运动时，可能引发迷宫环前后压差较大，从而导致迷宫环间隙中产生较大压力脉动，进而可能诱发机组的自激励振动，这对机组的安全稳定运行构成潜在威胁。因此，在抽蓄电站的设计与运行中，对转轮迷宫环结构的优化和振动控制显得尤为重要。

1　优化方案

基于机组整体设计方案，水泵水轮机的上、下

收稿日期：2024-04-12

作者简介：党鉴（1992－），男，2015 年毕业于华中科技大学热能与动力工程专业，本科，工程师。现就职于东方电气集团东方电机有限公司，主要从事水轮机组结构研究方向水轮机结构设计,水力过渡过程研究及机组成本管理工作。

止漏环均设计为阶梯式结构，其结构尺寸借鉴了已成功投运的相似抽水蓄能电站的参数，如图 1 所示。为满足防水力激振的全过程管控要求，在方案制定阶段，必须对止漏环的结构进行细致的优化与改进，以确保其性能达到最佳状态。

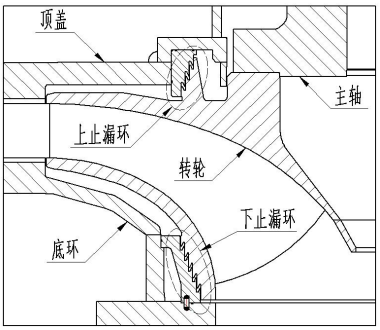


图 1　某抽蓄机组止漏环结构

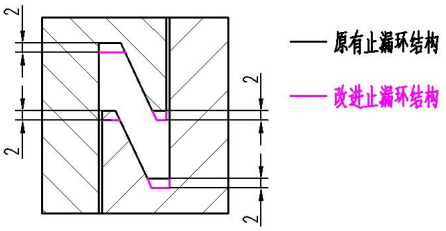


图 2 两组台阶式止漏环结构

经过综合评估与优选，本文研究的优化方案在上、下止漏环台阶处的结构型式维持了原方案的设计思路，但在结构参数方面进行了细致的调整。如图 2 所示，原有结构以黑色标识呈现，而改进后的结构则以红色标识突出显示，止漏环台阶处结构尺寸调整 2 mm。

2　数值计算方法

2.1 基本方程

当前，水泵水轮机水力设计与分析过程中，主要将流道内的水体几何形态确立为计算的核心区域。借助计算流体动力学的辅助工具，对 N－S 方程进行求解，并依据求解结果对水力模型进行系统的迭代优化，直至其内部关键流动参数达到预期目标。在水泵水轮机的流体力学研究中，$k-\varepsilon$模型因其广泛的适用性和高效性，已成为最常用湍流分析模型之一。湍流中单位质量流体湍流动能的耗散率ε为各向同性的小尺度涡的机械能转化为热能的速率，由量纲分析可知：

$$\frac{\mu_t}{\rho}\sim\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1}$$

则μ_t可表示为k和ε的函数，如式（2）所示：

$$\mu_t=\rho C_\mu k^2/\varepsilon \tag{2}$$

式（2）中C_μ为经验常数。在标准$k-\varepsilon$模型中，k和ε是两个基本的未知量，与之对应的计算方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\bar{u}_j k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{P\gamma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\bar{u}_j\varepsilon)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{P\gamma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right)\right]+c_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}(P_k+C_{\varepsilon3}G_b)-c_{\varepsilon2}f_2\rho\frac{\varepsilon_2}{k}+S_\varepsilon \tag{4}$$

式（3）、式（4）中，

$$P_k=-\frac{2}{3}\left(\rho k\sigma_{ij}+\mu_t\overline{S_{kk}}-3\mu_t\overline{S_{ij}}\right)\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_j} \tag{5}$$

$$S_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right),\ G_b=\beta_T\rho g_i\frac{\mu_t}{\rho_T}\frac{\partial\bar{T}}{\partial x_i} \tag{6}$$

$$Y_M=2\rho\varepsilon M\alpha_t^2,\ M\alpha_t=\sqrt{\frac{2k}{c^2}} \tag{7}$$

上式中，P_k由于平均速度梯度引起的湍流动能 k 的生成项；G_b为由于浮力引起的湍流动能 k 的生成项，对于不可压流体，$G_b=0$；$-\rho\varepsilon$ 为耗散项；Y_M为可压缩性修正项，是可压缩湍流中脉动扩张的贡献；$c_{\varepsilon1}\varepsilon P_k/k$为ε的生成项；$c_{\varepsilon1}\varepsilon C_{\varepsilon3}G_b/k$为浮力修正项；$S_k$和 S_ε分别为 k 方程和ε方程的源项；c为音速；β_T为热膨胀系数。

各常数经验值为：$C_\mu=0.09$，$P\gamma_k=1$，$P\gamma_\varepsilon$、$c_{\varepsilon1}=1.45$，$c_{\varepsilon2}=1.92$。$C_{\varepsilon3}$是可压流计算中于浮力相关的系数，当主流与重力方向平行时，$C_{\varepsilon3}=1$，当主流与重力方向垂直时，$C_{\varepsilon3}=0$。

2.2 计算模型

在数值计算过程中，严格参照了原型设计方案中的相关结构尺寸。考虑到流体域模型的圆周对称，为优化计算效率，我们在结构优化前后均采用了 1/10 模型进行计算，并对模型两侧对称面施加旋转耦合约束。为确保数值模拟的精确性，对流体域模型进行了细致的网格划分，全部采用六面体结构化网格，详细计算模型示意图见图 3。

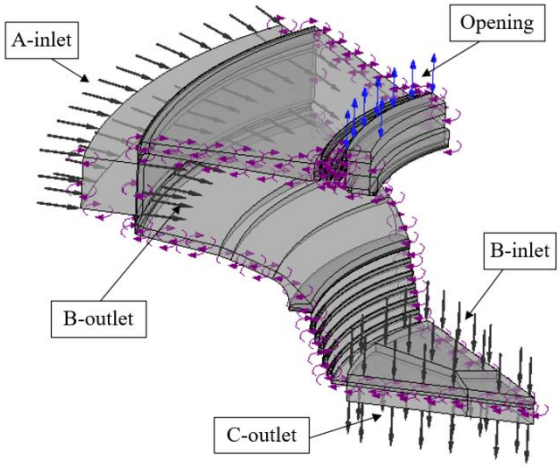


图 3　CFD 计算模型与边界条件示意图

2.3 边界条件

如图 3 所示，本研究的计算域包含两个进口和两个出口。具体而言，计算域 A 的进口位于导叶出口处，其边界条件设定为进口流量；计算域 B 的进口则位于尾水管进口处，其边界条件为该位置的水力静压；计算域 B 的出口位于转轮进口处，其边界条件为转轮进口的水力静压。计算域 C 的出口设置在下环间隙出口以下的锥管中，其边界条件为该处的流速。主轴密封处被设定为开放边界条件。本研究涵盖了 5 个不同的工况，包括最大水头水轮机工况（T_{max}）、额定水头水轮机工况（T_r）、最小水头水轮机工况（T_{min}）、最大扬程泵工况（P_{max}）和最小扬程泵工况（P_{min}）。各工况下对应的边界条件参数可由表 1 中数据求得。

表 1　各计算工况边界条件

	T_{max}	T_r	T_{min}	P_{max}	P_{min}
上库高程(m)	961	947	921	961	921
下库高程(m)	318	330	340	318	342
安装高程(m)	233	233	233	233	233
机组流量 (m^3/s)	54.5	57.6	55.8	33.6	46.1
机组转速 (r/min)	500	500	500	500	500

3　计算结果分析

经过深入的分析与计算，计算模型各项残差逐步收敛到10^{-5}，充分证明了该模型的收敛性良好，计算结果置信度高，完全满足工程应用需要。图 4~7 以额定水头水轮机工况为例，展示了水泵水轮机转轮上冠与下环过流面的压力分布情况，从图中可以明显看出，转轮周围腔体内结构的细微变化会对该处的压力分布产生影响。

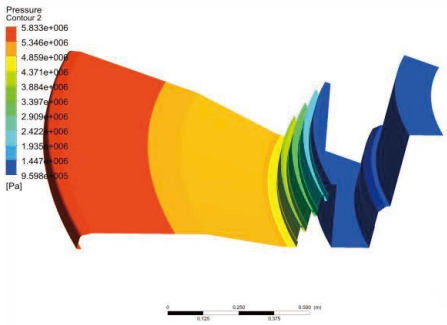


图 4　原有结构 T_r 上冠面压力分布

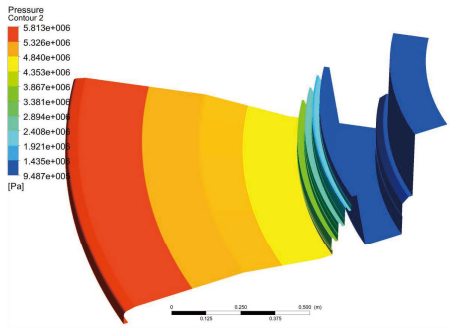


图 5　改进结构 T_r 上冠面压力分布

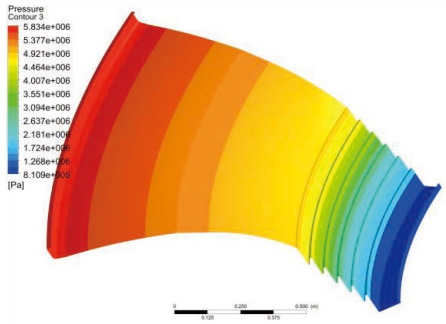


图 6　原有结构 T_r 下环面压力分布

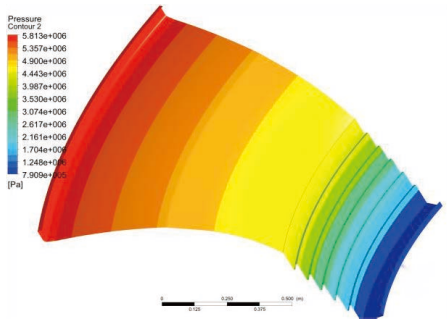


图 7　改进结构 T_r 下环面压力分布

如图 8 和图 9 所示，在对上、下止漏环的结构参数进行优化之后，上冠和下环的分项水推力均实现了明显的降低。这一变化对于确保机组的安全稳定运行以及有效预防自激振动具有积极意义。同时，图 10 的数据表明，优化后整个转轮的总水推力变化并不显著，这表明此次调整对机组整体系统设计的影响微乎其微，不会给发电电动机推力轴承的设计增加额外的负载。此外，从图 11 也可以看出，转轮止漏环结构参数的改变对内平压管的漏水量产生了较大的影响，经过详细的分析计算，结果表明优化后不同工况下的水泵水轮机漏水量降低了 2.0 %~3.5 %。这一改进对于提升水泵水轮机的水力效率具有积极作用，有助于进一步提高机组的整体性能。

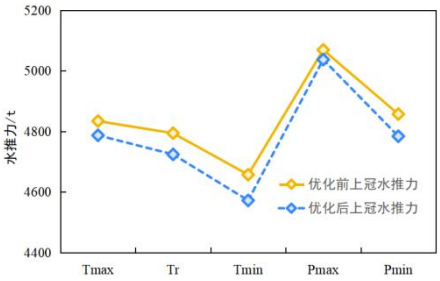


图 8　优化前后上冠水推力

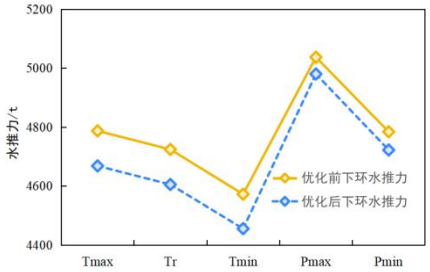


图 9　优化前后下环水推力

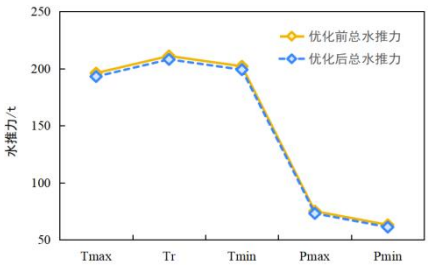


图 10　优化前后总水推力

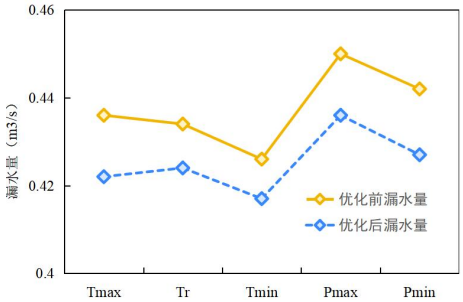


图 11　优化前后平压管漏水量

4　结语

本文提出了一种针对水泵水轮机止漏环的结构优化方法，并通过仿真计算深入研究了优化前后转轮上腔和下腔的水力特性。研究结果表明，该优化方案能够显著降低转轮上、下腔过流面的压力分布，并有效减少止漏环的漏水量。同时，该方案对转轮总水推力的影响极小，不会对发电电动机造成额外负载。这一研究成果对提升水泵水轮机的水力效率及增强机组整体稳定性具有重要意义。

参考文献：

[1] 国家能源局. 抽水蓄能中长期发展规划（2021~2035 年）［R］. 北京：国家能源局，2021.8

[2] 凡家异，梁权伟，党鉴，等. 抽水蓄能机组过速保护值整定原则的探讨［J］.水电与抽水蓄能，2024,10(1):12-18

[3] 周星，伍鹤皋，苏凯. 混流式水轮机轴向水推力研究综述和讨论［J］. 水利学报, 2019, 50(10):1242-1252

[4] 邓鑫，黄世海，李浩亮，等. 混流式水泵水轮机轴向水推力计算方法研究［J］. 第十九届中国 CAE 工程分析技术年会论文集，2023:102-105

[5] 黄世海，邓鑫，李浩亮，等. 某混流式水轮机转轮上腔压力优化设计［J］.东方电气评论，2021, 35(1):70-72

[6] 刘德有，游光华，王丰，等. 混流可逆式水轮机转轮轴向水推力计算分析［J］.河海大学学报(自然科学版), 2004(5):557-561

煤气发电领域汽轮机节能降碳技术浅析

王明杰[1] 张伟荣[1*] 陈新[1] 苏宏[2] 岳书培[1] 张鹏飞[1]

1.东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000；2.东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：提升进汽初参数是汽轮机节能提效的一种主要技术路径，本文针对当前在冶金煤气发电领域广泛应用的 100 MW 亚临界机组参数提升展开探讨。通过对比论证 16.7 MPa/600 ℃/600 ℃和 24.2 MPa/600 ℃/600 ℃两种升参数技术方案，对其可行性和技术经济性进行分析探讨，达到节能降碳的目的。结果表明：相比于 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机，两种升参数方案技术上均成熟可行。提升参数后每年可节约用煤 6 129~8 488 吨，减少碳排放 20 137~27 890 吨。

关键词：节能降碳；亚临界 100 MW；煤气发电；汽轮机；升参数

中图分类号：TM611.23　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0071-04

A Brief Technical Analysis on Energy Saving and Carbon Reduction of Steam Turbine in Gas-fired Power Plant

WANG Mingjie[1], ZHANG Weirong[1], CHEN Xin[1], SU Hong[2], YUE Shupei[1], ZHANG Pengfei[1]*

（1.Dongfang Turbine Co.,Ltd., 618000,Deyang, Sichuan, China; 2.Dongfang Electric Co., Ltd., 611731, Chengdu, China）

Abstract: Upgrading the initial parameters of steam Turbine is one of the main technical approaches for turbine energy saving and efficiency improvement. In this paper, upgrading the parameters of 100MW subcritical units, which are widely used in metallurgical gas-fired turbine generation, are discussed. By comparing and demonstrating the two technical schemes of upgrading parameters of 16.7MPa /600℃ /600℃ and 24.2MPa /600℃ /600℃, the feasibility and technical economy are analyzed and discussed，so as to achieve the purpose of energy saving and carbon reduction. The results show that: Compared with the 100MW subcritical gas-fired turbine, the two schemes of upgrading parameters are technically mature and feasible, and coal consumption can be saved 6 129~8 488 tons and carbon emissions can be reduced 20 137~27 890 tons every year

Key words：energy saving and carbon reduction; subcritical 100 MW; gas power generation; steam turbine; ascending parameter

2024 年 3 月国务院印发的《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》明确指出：推动工业领域大规模设备更新，有利于扩大有效投资，有利于推动先进产能比重持续提升，对加快建设现代化产业体系具有重要意义。工信部等七部委下发的《推动工业领域设备更新实施方案》中明确要求对钢铁等重点用能行业加快生产设备绿色化改造和能效升级。

钢铁企业的副产煤气，是重要的二次能源，占企业总能耗的 30 %～40 %，煤气通常应用于发电。煤气的有效利用，可降低企业能耗和外购电成本，还可以减少煤气放散造成的环境污染，具有良好的经济效益和社会效益。综上，应用当前先进、成熟的升参数技术，提高煤气发电机组效率，是目前钢铁企业提高市场竞争力并保持领先的重要方式。[1-2]

收稿日期：2024-06-20

作者简介：王明杰(1988－)，女，2011 年上海理工大学本科毕业，工程师，任职于东方电气集团东方汽轮机有限公司，主要从事工业透平工业汽轮机设计工作。

张伟荣(1988－)，男，2010 年西安交通大学本科毕业，高级工程师，任职于工作于东方电气集团东方汽轮机有限公司，主要从事工业透平工业汽轮机热力设计工作。

1 亚临界机组升参数技术成熟性评估

近年来，为进一步提高汽轮机组循环效率，我国发电机组的参数不断提升，在燃煤发电领域，新建机组参数已突破 35 MPa/630℃等级并得到示范应用。在煤气发电领域，新建机组参数已突破 24.2 MPa/600 ℃/600 ℃等级并得到广泛应用。“十三五”以来，亚临界机组升参数改造技术在燃煤发电领域已得到广泛应用，案例丰富。以东方电气为例，早在 2016 年就依托首创的“燃煤机组高效亚临界系统”技术对大唐安阳 300 MW 及托克托 600 MW 亚临界燃煤机组进行升参数（16.7 MPa/566 ℃/566 ℃）节能改造并取得圆满成功。2019 年由申能电力开发的“高温亚临界综合升级改造技术”在华润徐州 320 MW 机组上得到成功应用，机组改造后参数由亚临界升至 16.7 MPa/600 ℃/ 600 ℃。[3-5]2023 年东方电气与太钢不锈股份有限公司签订《太钢 2×300 MW 机组低碳节能综合利用升级改造项目》合同，将亚临界机组升参数（16.7 MPa/566 ℃/566 ℃）改造技术成功移植至钢铁行业，该项目计划 2024 年 6 月投运。在行业内，与高参数相匹配的热力发电系统、机炉电设备结构、高温材料、工艺技术均已成熟，亚临界机组升参数为移植现有技术，从技术成熟度上看不存在瓶颈。

结合案例及行业技术成熟度分析，升参数主要影响锅炉、汽机及系统，整套技术是成熟可行的。

2 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数方案

以亚临界 100 MW 汽轮机作为基准，从经济性、结构、投资回报角度对不同升参数方案进行对比论证。

2.1 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数经济性及节能降碳

从经济性角度看，提升汽轮机进汽参数将显著提升朗肯循环的热效率，尤其是进汽温度的提升，使汽轮机排汽湿度降低，低压部分的湿气损失减小，机组的相对内效率得以提高。表 1 列出了亚临界升 16.7 MPa/600 ℃/600 ℃和升 24.2 MPa/600℃/600 ℃两种升参数方案带来的汽轮机缸效率提升和经济性收益。

表 1 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数经济性对比

100 MW 等级	亚临界	升温度	升压力及温度
进汽参数：MPa.a/℃/℃	16.7/566/566	16.7/600/600	24.2/600/600
通流型式	冲动式和反动式结合		
回热系统配置	3GJ+4DJ+1CY+ZF		
排汽压力：kPa.a	4.9		
效率提升	基准	+2.6 %	+3.6 %
节约用煤：吨（注 1）	基准	6 129	8 488
二氧化碳减排：吨	基准	20 137	27 890

注：按汽轮机钢铁余热、余气利用领域工程项目年发电量 8 000h，标准煤热值 7 000 大卡考虑；

2.2 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数主机配置对比

从安全性角度看，汽轮机初参数的提高会对机组的进汽管道、阀门、叶片通流、结构等安全带来不利影响。因此，亚临界机组升参数后，需要对主机配置进行适应性优化升级。[6-7]应用东汽第四代通流技术，结合东汽超超临界机组成熟投运经验和钢厂实际应用场景需求，我们对升参数后的亚临界汽轮机结构进行了优化升级（表 2），确保机组的可靠高效灵活。

表 2 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数主机配置对比

配置	亚临界	升参数方案（16.7 MPa/600 ℃/600 ℃或 24.2 MPa/600 ℃/600 ℃）
高中压进汽管道	有	无
主汽调节阀	2 主+4 调（阀门管理）	1 主+1 调+1 补（节流配汽+补汽阀）
再热主汽调节阀	2 套	1 套
高压内缸	常规法兰结构	法兰缸/筒形缸
配汽方式	喷嘴配汽	节流配汽+旁通配汽
中低压转子	分段热处理	焊接转子
启动时间	–	缩短 30 %以上

需要说明的是，升 16.7 MPa/600 ℃/600 ℃和升 24.2 MPa/600 ℃/600 ℃方案，因区别仅在于主汽压力不同，对汽轮机而言，除结构壁厚、通流叶片、机组跨距有差异外，在大的主机结构配置和外

形上基本一致，亚临界机组升参数前后外形结构对比见图 1、2。

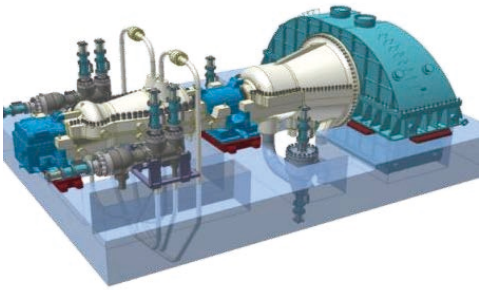


图 1　常规亚临界（16.7/566/566）100 MW 煤气发电汽轮机外形图

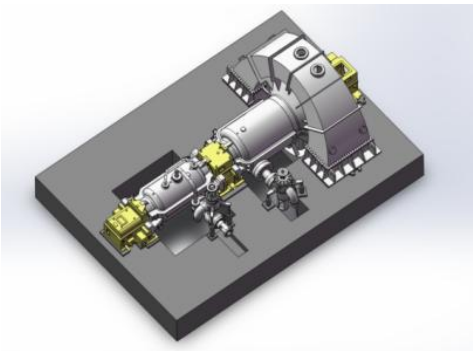


图 2　升参数（16.7 MPa/600 ℃/600 ℃或 24.2 MPa / 600 ℃/600 ℃）100 MW 煤气发电汽轮机外形图

2.3 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数主要部件材质对比

汽轮机主再热温度提升至 600 ℃后，为保证安全性，须对汽机本体主要部件的材质和工艺进行相应升级。[8]

表 3　100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数主要部件材质对比

配置	亚临界	升参数方案（16.7 MPa/600 ℃/600 ℃或 24.2 MPa/600 ℃/600 ℃）
高中压管道	P91	P92
高中压内缸	ZG15Cr-Mo-V	ZG12Cr-Mo-Ni-V
高中压外缸	ZG15Cr-Mo-V	ZG15Cr-Mo-V
高中压转子	30Cr-Mo-V	14Cr-Mo-Ni-V
低压转子	25Cr-Ni-Mo-V	30Cr-Ni-Mo-V
高中压阀壳	ZG15Cr-Mo-V	ZG12Cr-Mo-Ni-V
静叶片	2Cr-Mo-V-等	Co3W2 等
动叶片	2Cr-Mo-V 等	Co3W3 等

2.4 100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数投资回报率对比论证

鉴于升参数后汽机的主机结构、材质、通流级数及跨距、系统配置均发生了较大的变化，尽管机组效率大幅提升，但也必然会带来机组成本的增加。表 4 以亚临界 100 MW 机组为基准，仅从汽轮机角度（未考虑系统和锅炉），列出了两种升参数方案的初步静态投资回报对比。

表 4　100 MW 亚临界煤气发电汽轮机升参数投资回报率对比

配置	亚临界	16.7 MPa/600 ℃/600℃	24.2 MPa/600 ℃/600℃
效率	基准	+2.6 %	+3.6 %
汽机成本	基准	+900 万元	+2 240 万元
年发电量（注 1）	基准	+2 080 万 kWh	+2 880 万 kWh
年发电收益（注 2）	基准	+1 248 万元/年	+1 728 万元/年
静态投资回报周期（注 3）	/	＜1 年	～1.3 年
考虑项目土建及其他系统投资回报周期（注 4）	/	～2 年	～3 年

注 1：按汽轮机钢铁余热、余气利用领域工程项目年发电量 8 000 h 考虑；

注 2：上网电价按 0.6 元/kWh 考虑；

注 3：核算仅考虑汽轮机投资回报，未考虑锅炉、发电机、项目土建及其它系统投资以及资金利息；

注 4：核算依据笔者所在的东方电气近两年项目工程经验；未考虑资金利息。

3　结语

从安全性角度看，在行业内，与高参数相匹配的热力发电系统、机炉电设备结构、高温材料、工艺技术均已成熟并在煤电 300 MW 及以上功率机组上得到广泛投运验证，亚临界 100 MW 机组升参数的技术成熟可靠可行。升参数后，通过应用现有先进成熟技术对机组结构、通流、材料、主机配置进行适应性优化升级，可以确保机组运行的安全可靠、高效灵活。

从节能降碳角度看，亚临界 100 MW 机组升参

数后，16.7 MPa/600 ℃/600 ℃方案机组效率可提升2.6 %，年节约用煤6 129吨，二氧化碳减排20 137吨；24.2 MPa/600 ℃/600 ℃方案机组效率可提升3.6 %，年节约用煤8 488吨，二氧化碳减排27 890吨。

从投资回报周期看，亚临界100 MW机组升参数后，16.7 MPa/600 ℃/600 ℃方案静态投资回报周期小于1年，24.2 MPa/600 ℃/600 ℃方案静态投资回报周期约1.3年。

从运行维护角度看，压力仍维持在亚临界的16.7 MPa/600℃/600 ℃方案对于煤气发电的运行操作更熟练、更友好；同时配套的炉型业绩相对多，现阶段的技术成熟度相对更高。

因此，结合东汽丰富的钢铁行业机组投运经验综合评估，现阶段100 MW亚临界煤气发电汽轮机组升参数技术成熟可行，节能降碳效果显著。

参考文献：

[1] 国务院.《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》[Z]. 2024年3月

[2] 工业和信息化部等.《推动工业领域设备更新实施方案》[Z]. 2024年3月

[3] 范运涛, 李飞. 300 MW机组高效亚临界升参数节能改造探讨[C]//中国节能协会热电产业联盟.2016年第五届热电联产与煤电深度节能新技术研讨会论文集.安阳发电厂设备管理部,2016:9

[4] 郭惠斌, 高展羽, 刘雄, 等. 东方600 MW汽轮机改造技术探讨[J].东方电气评论, 2018, 32(1): 25-28

[5] 毛健雄. 亚临界煤电机组600 ℃升温改造技术及其示范[J].分布式能源, 2020,5(5):37-42

[6] 吕振家, 彭建强, 鞠红霞，等. 我国超超临界汽轮机高温转子锻件材料研发建议[J].东方汽轮机,2018,(4):56-60

[7] 张晓丹, 钟主海, 周帅. 基于某超超临界汽轮机组中压切向涡流冷却研究[J].东方汽轮机,2021,(2):17-22

[8] 魏先平, 范华, 杨明, 等. 600 ℃/620 ℃二次再热超超临界机组高温部件用材[J].东方汽轮机,2016,(1):50-54+62

（上接第49页）

参考文献：

[1] 都志杰, 马丽娜. 风力发电[M].北京. 化学工业出版社. 2009

[2] 王明军, 郭雅克, 梅国刚. 某风电场齿轮箱损坏及原因分析.风能[J].2016(4):70-74.

[3] 王志新. 现代风力发电技术及工程应用[M]. 北京:电子工业出版社. 2010

[4] 许移庆. 风电机组疲劳载荷影响因素分析(二)[J].风能, 2013, (9):90-92

[5] 蒋伟节, 王明军, 刘麒祥, 等. 风电场微观选址分析[J]. 东方电气评论, 2015, 29(3):65-71

[6] 叶杭冶. 风力发电系统的设计、运行与维护[M]. 北京. 电子工业出版社.2010

[7] 徐国宾, 彭秀芳, 王海军. 风电场复杂地形的微观选址.水电能源科学[J]. 2010(4):157-160

[8] 杨建设. 风电场微观选址的“顺向渐远"法.风能[J]. 2012(3):68-71

[9] 黎作武, 贺德馨. 风能工程中流体力学问题的研究现状与进展. 力学进展[J]. 2013, 43(5): 472-525

[10] 王明军, 高原生. 某风电场项目设计后评估分析. 东方电气评论[J].2019(4):42-46

[11] IEC. Wind turbine：part 1 design requirements：IEC61400-1-2005［S］. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2005

[12] Kanev S,Van engelen T G.Wind turbine extreme gust control［J］.Wind Energy,2010,13（1）：18-35

[13] Bossanyi E A.Un- freezing the turbulence：application to LiDAR-assisted wind turbine control[J].Renewable Power Generation, 2013, 7(4)：321-329

[14] 娄尧林, 叶杭冶, 蔡旭, 等. 变速变桨风电机组阵风控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12):24-28+62

[15] 姚兴佳, 潘建, 孟强, 等. 无人值守并网型30KW风力发电机组[J]. 农村能源, 1997, (5):26-30

[16] 杨学辉, 王明军, 杨晓涛. 浅谈主控系统对现场运维的重要性. 风能[J]. 2020(2):80-82

[17] 王明军. 风电机组远程故障处理及容错运行.风能[J]. 2018(9):68-71

基于RTDS的高压大容量双向变流器控制器硬件在环仿真研究

陈建国　肖文静*　王多平　田军

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

摘要：城市轨道交通系统中，地铁列车会频繁启停，在启动时会消耗大量电能，而在制动时产生的能量约占牵引能耗的40 %。为了充分利用地铁制动能量及稳定直流接触网电压，高压大容量双向变流器得到广泛应用。RTDS (Real-time Digital Simulator)仿真器是功能强大的实时数字仿真装置，通过建立高压大容量变流器的离散仿真模型、与实际控制设备连接形成半实物仿真系统，可实现系统动静态特性的实时模拟，从而大幅提高研发效率。本文建立了高压大容量双向变流器仿真模型，结合实际硬件控制器构建了硬件在环仿真系统，验证了控制器硬件及其搭载控制策略的有效性。

关键词：双向变流器；RTDS 仿真；硬件在环；能量回馈控制

中图分类号：TM46　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0075-04

Hardware in the Loop Simulation Study of High Voltage and Large Capacity Bidirectional Converter Controller Based on RTDS

CHEN Jianguo, XIAO Wenjing, WANG Duoping, TIAN Jun*

(DEC Academy of Science and Technology Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract：In urban rail transit systems, subway trains frequently start and stop, consuming a large amount of electrical energy during startup, and the energy generated during braking accounts for approximately 40% of the traction energy consumption. In order to fully utilize the braking energy of the subway and stabilize the DC contact network voltage, high-voltage and high-capacity bidirectional converters have been widely used. The RTDS (Real time Digital Simulator) system can build digital physical experimental circuits, test and experiment on actual control equipment, and greatly improve research and development efficiency. In this paper, a simulation model of a high-voltage high-capacity bidirectional converter was established, and a hardware in the loop simulation system was constructed based on actual hardware controllers to verify the effectiveness of the control strategy.

Key words：bidirectional converter; RTDS simulation; hardware in the loop; energy feedback control

城市轨道交通供电系统中，大容量双向变流器技术正逐步推广应用。与电阻储能、电容储能、飞轮储能等其他能量吸收形式相比，双向逆变器寿命长、运维简单、谐波低、节能效果好，适合直接应用于大功率场合，且随着电力电子产业发展成本不断降低，已在北京、天津、重庆、广州、成都、南京等城市地铁中应用。

双向变流器与供电系统的连接如图1所示，主要通过模式切换实现能量回馈。模式1：当双向变流器检测到列车处于再生制动状态时，自动

收稿日期：2024-08-13

基金项目：国家重点研发计划项目：亚临界煤电机组深度灵活调峰关键技术及工程示范；项目编号：2023YFB4102900。

作者简介：陈建国（1971－），男，硕士研究生，高级工程师，研究方向为能源电力技术等领域。

肖文静（1987－），女，2017年毕业于西安交通大学电气工程专业，工学硕士，高级工程师，主要从事智慧电厂、故障诊断工作。邮箱：xiaowj@dongfang.com。

启动逆变能量吸收过程，将能量送至交流电网，为轨道交通系统中的其他负载供电。模式 2：当双向变流器检测到列车处于牵引状态时，双向变流器自动将能量从交流侧传输到直流侧，为地铁启动提供部分能量。模式 3：当双向变流器检测到列车处于平稳运行状态时，双向变流器处于待机状态。

双向变流器通过协调变流控制，一方面实现能量双向传输和节能提效，同时起到稳定直流母线电压、提高供电质量和安全性的作用。[1]

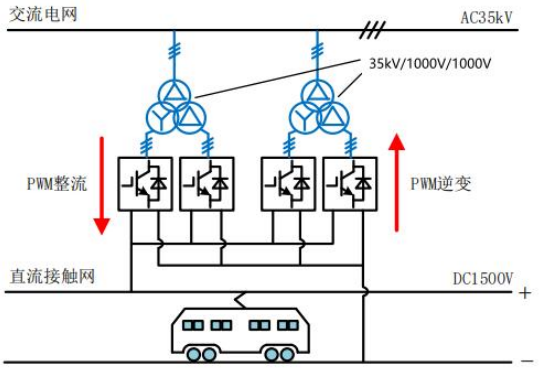


图 1　能量回馈系统图

加拿大 RTDS Technologies 公司的实时数字模拟系统（Real-time Digital Simulator，RTDS）结合了数字仿真技术、计算机技术和并行处理技术，既可在 50 μs 步长上实现较大规模电力系统实时仿真运行，又可在 2 μs 步长上实现控制系统仿真。通过建立高压大容量变流器的离散仿真模型、与实际控制设备连接形成半实物仿真系统，可实现系统动静态特性的实时模拟，从而大幅提高研发效率。[2]

本文建立了高压大容量双向变流器仿真模型，结合实际硬件控制器，构建了基于 RTDS 的 1 MW 地铁能量回馈系统-RTDS 硬件在环测试平台，验证了控制器硬件及其搭载控制策略的有效性。

1　双向变流器系统

1.1　双向变流器硬件拓扑

本文中双向变流器 DC/AC 模块采用 NPC 三电平结构，具体拓扑如图 2 所示。

其中，双向变流器直流母线电压为 1 500 V，交流侧额定电压为 1 000 V，交流侧额定频率为 50 Hz±0.5 %，通过变比为 35 kV/1 000 V/1 000 V 的三绕组变压器与 35 kV 交流母线连接；直流侧额定电压为 1 500 V，最高电压可达 1 950 V；变流器额定功率为 1 MW。直流母线通过直流正极柜和负极柜与直流接触网连接。

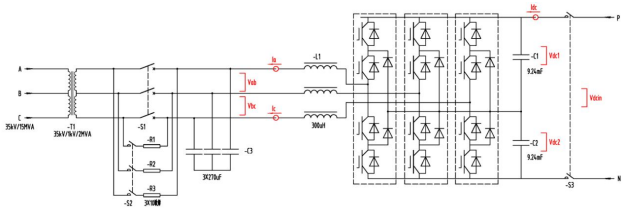


图 2　双向变流器结构拓扑图

1.2　双向变流器控制策略

列车制动时会产生大量再生制动能量，首先被临近列车吸收，但制动能量消纳不足时会导致直流母线电压异常升高；同样地，列车启动时会短时拉低直流母线电压，影响运行可靠性。根据《直流电力牵引额定电压》（GB/T 999-2021），直流标称电压 1 500 V 的系统允许的极限值为直流 1 000 V（≤2 min）至直流 1 800 V（≤5 min）。采用高压大容量双向变流器替代传统的 24 脉波不控整流器，可稳定直流母线电压、提高系统运行安全性。

双向变流器采用经典双环控制，其中外环为电压环，内环为电流环，同时叠加功率前馈控制，具体控制框图如图 3 所示。

双向变流器通过直流侧电压传感器、电流传感器检测值判断是否需要模式切换。直流电压设置二级阈值，达到第一级阈值时，双向变流器启动；达到第二级阈值时，投入电压环；设置多个控制目标值以实现软起动。如图 3 所示，电压外环采用 PI 控制，电压外环输出叠加功率值前馈后作为电流内环的指令值；电流内环采用 PI+PR 控制。功率值前馈可以提高系统动态响应速度，进而降低控制波动，但前馈值过大会降低控制系统的抗干扰能力，因此需要通过仿真模拟和实际调试结合确定最终的前馈系数。

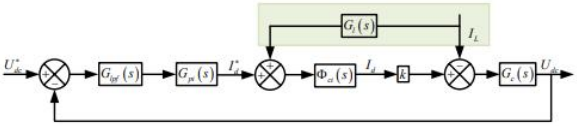


图 3　双向变流器控制策略

2　RTDS 硬件在环仿真

2.1 RTDS 建模

首先在 RTDS 软件中建立控制对象与控制器模型，完成系统离线仿真，以验证高压大容量双线变流器主电路与真实功率回路的相似性。在此基础上接入实物控制器开展硬件在环实时仿真，通过修改实物控制器的算法和具体参数值达到最优控制效果，以获取适用于本轨道牵引供电系统的双向变流器最优控制算法及其参数。

本文构建的 1 MW 能量回馈系统 RTDS 模型、双向变流器 RTDS 小步长模型分别如图 4、图 5 所示。

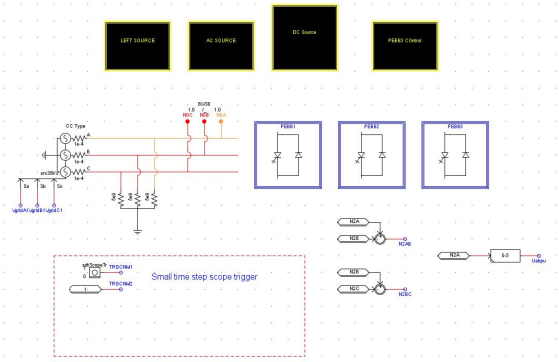


图 4　1 MW 能量回馈系统 RTDS 模型

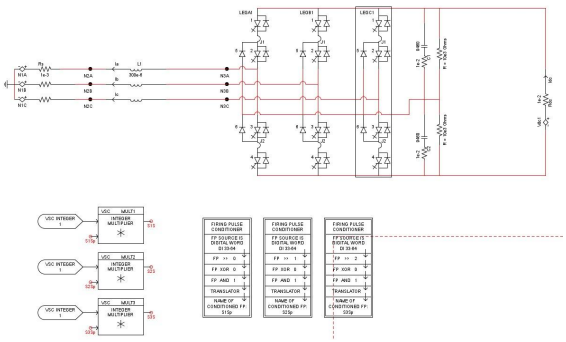


图 5　双向变流器 RTDS 小步长模型

2.2 半实物实时仿真平台

在离线仿真的基础上，将搭载了控制策略的变流器控制器实物与 RTDS 仿真器相连，进行硬件在环仿真实验，如图 6 所示。

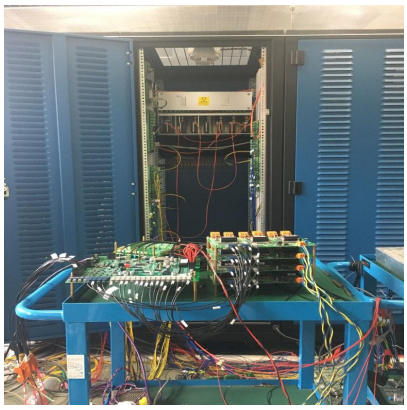


图 6　半实物仿真模型

2.3 半实物仿真结果

双向变流器交流侧额定电压为 1 000 V，交流侧额定频率为 50 Hz±0.5 %；交流母线电压为 35 kV；直流侧额定电压为 1 500~1 950 V；变流器额定功率为 1 MW。

功能测试主要包括两部分，一是逆变功能，即测试装置能否根据直流母线电压水平，自动将能量逆变器到电网上；二是软启动逻辑测试，即测试能量回馈系统软启动逻辑是否正常。

图 7 为启动响应测试结果。系统启动时功率指令为 0，直流电压稳定运行于 1.5 kV，在 1.0 s 时刻给定软启动功率指令（逐步爬升至 1 MW），可见：（1）合闸后直流电压迅速爬升，最高达到 1 880 V，未超过 1 950 V 的设计上限；（2）合闸 50 ms 后启动电压和功率控制环路，功率缓慢跟随，合闸后 20 ms 实现了功率跟踪、合闸后 60 ms 后功率达到 1 MW、合闸后 120 ms 直流电压达到稳定；（3）启动过程中未出现电压、电流冲击。从图 7 可见，启动过程实现了设计目标。

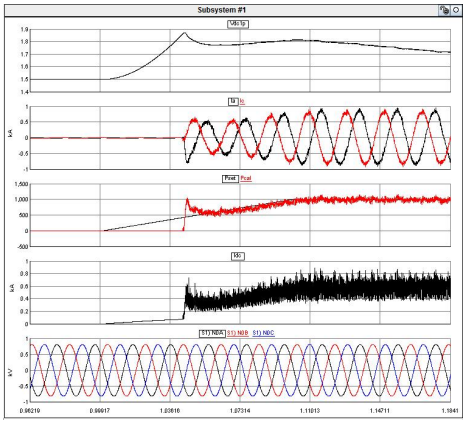


图 7　启动响应测试

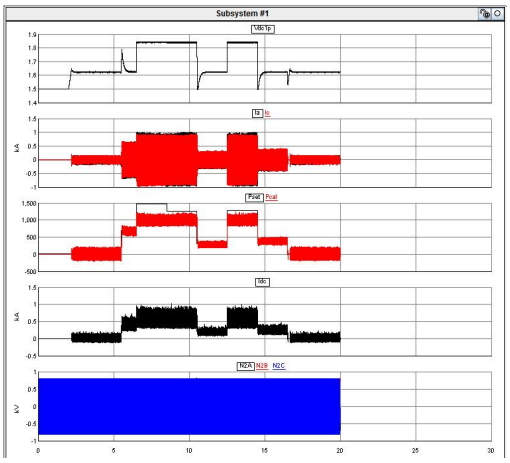


图 8　功率切换响应测试

图 8 为功率切换响应的测试结果。从图 8 可见，空载时电压切换控制过程中，直流电压跌落和冲击小；电流无冲击；功率可较好地跟随指令，实现了设计目标。

图 9、图 10 为稳态运行的测试结果。从图 9、图 10 可见，稳态运行时电压、功率波动小，电流均流度良好，实现了设计目标。

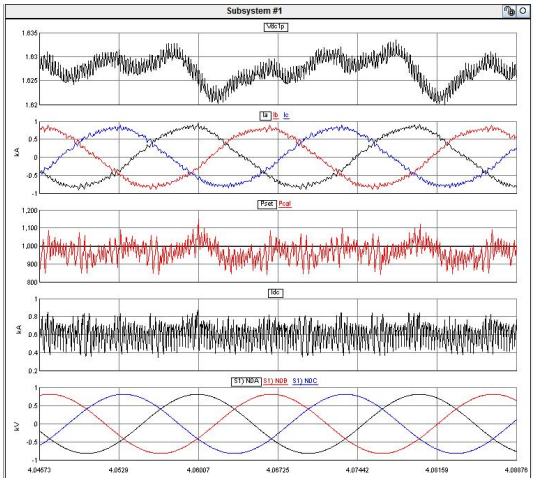


图 9　稳态运行 1

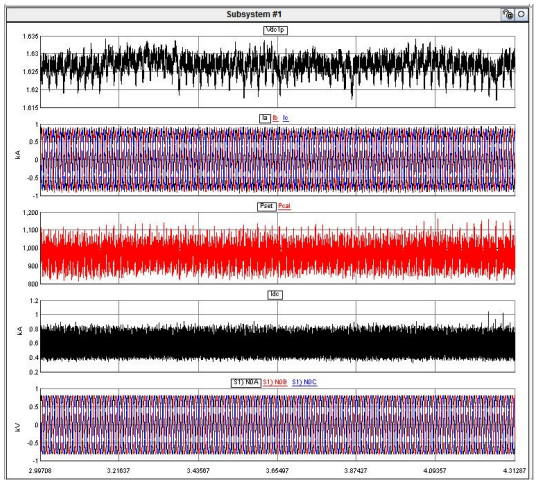


图 10　稳态运行 2

3　结语

通过应用 RTDS 仿真器对高压大容量双向变流器控制器的半实物仿真，验证了控制器硬件及其搭载控制策略的有效性，减少了控制器现场试验的次数和周期，提升了项目研发效率。设计的高压大容量双向变流器控制器启动响应速度快、冲击小；功率切换响应跟随快；稳态运行纹波小、均流度好；达到了设计目标。

参考文献：

[1] 崔杰. 逆变型地铁能量回馈系统控制策略研究[J]. 电工技术, 2023, 9:61-67.

[2] 刘静波, 肖文静, 周宏林,等. 基于 RTDS 的风电网侧变流器半实物实验[J]. 电力电子技术, 2013,47(10):20-21

新型 DCS 系统控制站硬件架构设计

马劲松　张亚平　王刚　刘文渤　邵勤丰

东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

摘要：随着工业自动控制行业的快速发展，对 DCS(Distributed Control System）控制系统应用的新需求不断提出。为了适应 DCS 控制系统的高可靠、智能化、开放性的需求，本文通过应用工业以太网技术，结合以太网的带宽资源，提出了一种新型 DCS 系统控制站硬件架构设计。该设计打破了传统 DCS 控制现场总线的瓶颈，实现了自主研发 DCS 控制系统高速传输，高实时性、高开放性，并具有灵活拓展的 DCS 控制站新的硬件拓扑结构。

关键词：DCS 控制系统；工业以太网；控制站硬件拓扑架构

中图分类号：TM933.4;TQ172.6　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）05-0079-03

Hardware Architecture Design for the New DCS System Control Station

MA Jinsong, ZHANG Yaping, WANG Gang, LIU Wenbo, SHAO Qinfeng

(Dongfang Electric automatic control Engineering Co., Ltd.，618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: With the rapid development of the industrial automation control industry, new requirements for different application areas of DCS (Distributed Control System) control systems are continuously being proposed. In order to adapt to the high reliability, intelligence, and openness requirements of DCS control systems, this paper proposes a new hardware architecture design for DCS system control stations by applying industrial Ethernet technology and combining Ethernet bandwidth resources. This design breaks through the bottleneck of traditional DCS control fieldbus, achieves independent research and development of DCS control systems with high-speed transmission, high real-time performance, high openness, and flexible expansion of new hardware topology structure for DCS control stations.

Key words: DCS control system; industrial ethernet; control station hardware topology architecture

DCS(Distributed Control System）控制系统即分布式控制系统，是对各类生产过程自动化控制进行集中管理和分散控制的一种新型计算机控制系统。该系统由通信网络、分散控制系统和集中管理平台三大部分组成，集成了计算机、通讯、显示和控制等 4C 技术，具有分散控制、集中操作、分级管理、配置灵活以及组态方便的特点。目前集散控制系统越来越多的应用于化工、机械、电力及石油等生产领域，大大提高了工业生产效率，降低了人员劳动强度，并逐步向高可靠、智能化和精细化方向发展。[1]但由于控制系统的规模和要求不断发展，DCS 在不同的应用领域也面临新的需求。本文根据未来 DCS 控制系统的高可靠、智能化、开放性的需求，应用工业以太网技术，结合了以太网的带宽资源优势和现场总线的传输优势，打破了传统现场总线的瓶颈，实现了 DCS 控制系统高速传输，高实时性、高开放性，并可灵活拓展的 DCS 控制站新的硬件拓扑架构。

收稿日期：2024-05-08

基金项目：项目名称：全国产化分布式工业控制系统（DCS）；项目编号：2022JBZG005

作者简介：马劲松（1971—），男，1993 年毕业于四川大学自动控制专业，硕士，高级工程师。现任现任职于东方电气自动控制工程有限公司研发中心，从事控制系统开发工作。

1 传统 DCS 系统控制站硬件架构

传统的分布式控制系统 DCS(Distributed Control System)控制站的硬件架构如图 1 所示。每个控制站集成配置一对控制器(DPU)和多个 I/O 模块，现场层的工艺设备和测量仪表经硬接线或者通信连接的方式与控制站相连，控制器(DPU)模块与 I/O 模块之间通过总线扩展单元进行通信连接。控制站 I/O 通信总线主要采用 RS485 等串行总线，采用 MODBUS、Profibus、Profibus-DP 协议等对应的通信协议。它的数据传输速率为 6 Kbit / s～12 Mbit / s，可串联 64 个节点。[2]如本地 I/O 模块需要扩展，则需要对串行总线进行扩展。但是串行 RS485 总线通过扩展后，总线最大通信速率下降很快，导致传统 DCS 本地控制站设计最多可联网 120 个 I/O 模块。并且各种现场 I/O 模快采集到现场的数据通过串行 RS485 总线连接到控制站的控制器(DPU)，控制器(DPU)与现场 I/O 模块直接进行数据交换。在这种工作方式下，控制器(DPU)在执行自身的各种运算、控制、数据同步以及和服务器通讯等任务的同时，还要实现与各类现场 I/O 模块通讯报文的协议解析。因为 I/O 模块类型的多样性，使得报文协议种类增多的可能性大大增加，这样就在很大程度上增加了控制器(DPU)的工作负荷，使控制系统的工作效率以及数据交换的实时性下降。同时也不方便系统的扩展第三方控制应用。

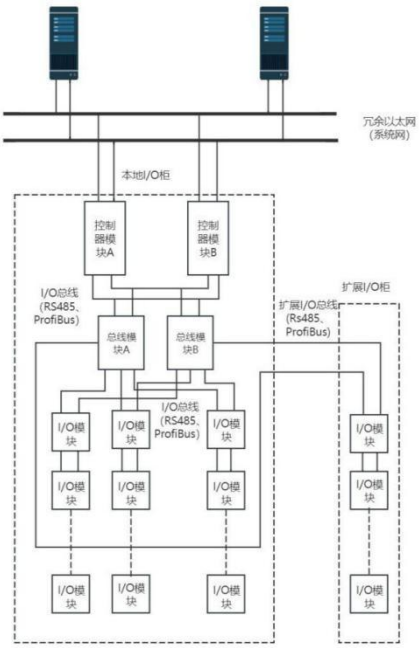


图 1 DCS 系统传统控制站硬件架构

2 新型 DCS 系统控制站硬件架构设计

2.1 DCS 系统控制站硬件架构设计考虑因素

传统 DCS 现场控制站控制器(DPU)需要在 200 ms 左右时间内完成所有的工作任务，包括自身的各种运算、控制、冗余控制站之间的数据同步和服务器之间的通讯，实现和现场 8 00 到 1 000 点的 I/O 模块实时数据的获取与交换。因此，衡量 DCS 系统控制网络性能的指标不光是网络的速率，还要综合考虑系统网络的实时性，即能在多长的时间内确保所需信息的传输完成。[3]同时 DCS 系统控制站网络还需要非常可靠，在任何情况下，网络通信都不能中断。另外，为了满足 DCS 系统控制站扩充性的要求，单个控制站 I/O 网络上实际使用的节点数量只应该占可接入的最大节点数量的 60%~80 %。这样，一方面可以随时增加新的节点，另一方面也可以使系统网络运行于较轻的通信负荷状态，以确保系统的实时性和可靠性。在控制站实际运行过程中，各个节点的上网和下网是随时可能发生的，特别是各种 I/O 模块，这样网络重构会经常进行，而这种操作也不能影响系统的正常运行，因此，控制站网络应该具有很强在线网络重构功能。

随着工业自动化应用的快速发展，DCS 系统还将具备强大的现场总线融合能力，和 FCS“无缝集成，和谐共存”，更好对接智能远程 I/O，搭建易于裁剪的系统结构。这也对控制站的硬件架构设计提出了更新的需求。而工业以太网应用于控制领域以来，它具有很大的优势，低成本、开放性好、技术支持广泛、实时性高等，成为目前工业控制应用最广泛的网络。[4]

2.2 新型 DCS 系统控制站硬件架构设计

综合考虑以上因素，设计全自主 DCS 控制系统时提出了一种新的 DCS 系统控制站硬件架构设计，不仅提升了控制站 I/O 网络的实时性和可靠性，提高了控制站控制器（DPU）利用效率。还赋予 DCS 系统具有易于扩展和收缩的特性，可以保证 DCS 系统的规模扩大时，不会增加卡件种类和其他辅助的模块，确保了 DCS 更具开放性。

新型 DCS 系统控制站硬件架构设计见图 2，通讯网络是 DCS 系统的一个重要组成部分，是保障系统各部分之间数据可靠交互的重要通道。新型 DCS 系统控制站 I/O 层网络设计了两层网络，一层是高速工业实时以态网，一层是基于 RS 485 的串行 I/O 总线网络，并设计了智能通讯模块实现网络联接及协议的转换。[6]

（1）控制站控制器（DPU）与智能通讯模块之间

设计通过高速工业以太网 PowerLink 或 EtherCAT 技术联接，可构建双环形冗余高速数据通讯链路。数据传输速率达 100 Mbit/s，最大传输距离 2 公里。双环形网络的可靠冗余使得即使该网络层同时出现 4 点故障，系统也能正常运行，这极大的提升了系统的性能和可靠性。

（2）智能通讯模块与各个 I/O 卡件之间的数据通讯采用传统 RS485 串行总线、Profibus-DP 协议进行数据交互，主要考虑串行总线在抗干扰、可扩展性方面具有优势，价格相对低廉。每个智能通讯模块设计有 6 个串行总线支路，每个支路可带 10 个 I/O 模块，一个智能通讯模块可带 60 个 I/O 模块。

（3）当 I/O 模块数量多于 60 个，可将多余的 I/O 模块部署在本地扩展机柜内。本地控制站中的 I/O 模块和本地扩展机柜中 I/O 模块，如果有远程 I/O 模块均可考虑通过各自柜中的冗余配置智能通讯模块来实现数据通讯；本地控制站控制器（DPU）与本地扩展机柜、远程 I/O 模块机柜中的智能通讯模块都采用高速工业以太网 PowerLink 或 EtherCAT 技术进行通讯，系统带 I/O 模块的能力大幅提升。

（4）智能通讯模块还可负责与控制系统中智能仪表、智能 I/O 模块、其他的控制器的通信及组网工作，实现 Modbus、ProfiBus、ProfiNet、Ethernet/IP 等多种工业现场总线的适配通讯，提升系统的开放性。[5]

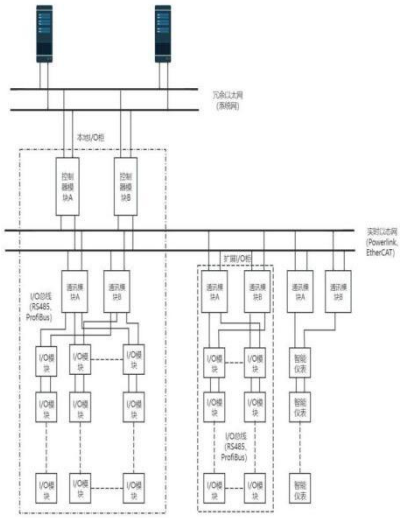


图 2　新型 DCS 系统控制站硬件架构

3　试验验证

自主研发的 DCS 控制系统原理样机完成后。参考(DL／T_659-2006)-《火力发电厂分散控制系统在线验收测试规程》规定的测试方法，对 DCS 与现场总线通信接口的负荷率、通信速率、数据正确性进行评估测试。控制器运算周期为 50 ms 时的结果：控制器负荷：<20 %，总线负荷：<20 %；模拟量输入-输出回路时间：<224 ms；开关量输入-输出回路时间：<100 ms;信号波形：完整、连续，满足设计要求。证明控制器负荷保持在较低水平，模拟量和开关量的输入-输出回路时间均较短，且信号波形完整、连续。

4　结语

新型 DCS 系统控制站硬件架构设计，结合了以太网的带宽资源优势和现场总线的传输优势，打破了传统 DCS 现场总线的瓶颈，具有以下优点：

（1）整个控制站具有两个可靠的冗余实时通讯环，每个实时通讯环不仅具有 100 Mbit/s 的超高速，而且具有自诊断、自恢复功能。两个实时通讯环之间的可靠冗余，进一步增加了控制站系统架构的鲁棒性输，高实时性、高同步性。

（2）突破了传统 DCS 控制站扩展 I/O 模块瓶颈，只要控制器（DPU）负荷能力满足，控制站可以方便扩展 I/O 模块，降低了系统的整体应用成本。

（3）整个控制站具有灵活的拓扑结构，开放式的网络架构。系统的扩展性和伸缩性不会使得交换机的数量、交换机的端口数目随着通讯节点的增加而急剧膨胀。不仅可以配置成简单的系统，如常规的 DCS 系统，也可配置成复杂的三重安全控制系统如 ESD、FSSS 等，还易于整合第三方系统，而不需要增加额外的硬件。

（4）智能通讯模块可实现多种工业总线协议的转化，可以极大降低控制器(DPU)工作负荷。

参考文献：

[1] 李万佰. 基于油田集输处理站的 DCS 控制系统设计研究[J]. 信息系统工程, 2019,(11):51-52

[2] 江明，王龙明，夏晓珍. Profibus 总线接口在智能仪表中的应用［J］. 安徽工程科技学院学报（自然科学版）, 2003(4):33-36

[3] 李振瑜，羡兰存. 浅谈集散控制系统（DS）及研发课题的应用实践［J］甘肃省成人教育协会 2008 年年会论文集,2008-12-01,1

[4] 朱津津. 基于工业以太网的远程监测系统的研究与设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2016, 2-3

[5] 钟朝勇，胡波. 工业互联网通信协议 Modbus 与 PowerLink 比较与应用，物联网技术 2095-1302（2022）04-0036-04, 36-37

[6] 王定明. 远程智能 I/O 及与 DCS 系统的互联通信技术探讨［J］. 青海电力, 2004(4):42-43

威胁 DCS 工业控制系统网络安全的病毒研究

梁海[1] 张宇[1] 刘炯[2] 赵东[1]

1.东方电气中能工控网络安全技术（成都）有限责任公司，成都 610000；2.东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

摘要：DCS 控制系统广泛应用在电力、冶金、石油、化工等工业现场，是工业自动化的重要控制系统。随着工业互联网技术的应用，远程控制、远程诊断、无人车间等一系列智慧工厂解决方案的实施，工业产业朝着数字化、网络化、智能化方向发展，越来越多的工业控制网络与互联网连接，成为网络攻击的重点目标。从 IT（Information Technology）/OT（Operational Technology）两个层面出发，整理威胁工业控制 DCS 系统网络安全的病毒分类、研究 DCS 控制系统的安全漏洞，设计一种模拟攻击该系统漏洞的病毒程序验证、研究关键基础设施的生产工艺，设计一种篡改该关键基础设施工艺指令的方法、简要讨论如何防御工控 DCS 系统 IT、OT 层网络攻击的方法,为工业生产者提供防护 DCS 网络安全的运行规程参考，以及网络安全设备研发者提供设计思路。

关键词：工业控制；DCS 控制系统；IT/OT 网络安全；操作系统病毒；工艺病毒

中图分类号：TP273;TM621 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）05-0082-07

Research on Virus Threatening DCS Industrial Control System Network Security

LIANG Hai[1],ZHANG Yu[1],LIU Jiong[2],ZHAO Dong[1]

（1. Dongfang Electric Zhongneng Industrial Cybersecurity (Chengdu) Co., Ltd.,610000, Chengdu, China;

（2. Dongfang Electric Autocontrol Engineering Co., Ltd.,618000, Deyang, Sichuan, China）

Abstract:DCS control system is widely used in industrial sites such as power, metallurgy, petroleum, and chemical industry, and is an important control system in industrial automation. With the application of industrial Internet technology and the implementation of a series of smart factory solutions such as remote control, remote diagnosis and unmanned workshop, the industrial industry is developing towards the direction of digitalization, networking and intelligence. More and more industrial control networks are connected to the Internet, becoming the key target of network attacks. Starting from the two levels of IT (Information Technology)/OT (Operational Technology), this paper categorizes viruses that threaten the network security of industrial control DCS systems, studies security vulnerabilities in DCS control systems, designs a virus program to simulate attacks on system vulnerabilities, researches the production process of critical infrastructure, designs a method to tamper with the process instructions of the critical infrastructure, briefly discusses how to defend against IT and OT layer network attacks in industrial control DCS systems, provides reference for operating procedures to protect DCS network security for industrial producers, and provides design ideas for network security equipment developers.

Key words:industrial control; DCS control system; IT/OT;network security;operating system virus;process virus

随着工业 4.0、中国制造 2025、国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要等实施制造强国战略的部署与推进，5G 技术、大数据技术以及人工智能技术推广与应用，IT/OT 技术融合，人们享受到科技带来的便利、社会的巨大发展，同时也面临着更加严峻的网络安全风险，尤其是工业领域。

当前，DCS 控制系统发展迅速，如文献[1]DCS 控制系统概述及其特点章节所述，广泛用于工业自动化。DCS 除实现传统的 PLC、SCADA 过程控制

收稿日期：2024-04-30

作者简介：梁海（1988－），男，四川，大学本科，工程师，主要研究方向为自动控制和工控网络安全。

外，还用作远程控制、远程诊断，除控制工业辅助设备外，例如给水泵汽轮机微机电液控制器（MEH），还用作控制工业核心设备，例如用作汽轮机数字电液控制器（DEH）、压缩机控制系统（UCP）、汽轮机危机遮断保护系统（ETS）、锅炉主燃料跳闸保护系统（MFT）等，“DCS 全厂一体化”的解决方案越来越受到用户青睐。然而，DCS 控制系统网络拓扑简单、网络节点之间无可信认证、通信协议简单且采用明文传输信息，很容易受到网络攻击，核心工业设备被恶意操控，酿成重大网络安全事故。

近年，各国工业网络安全事件频频爆发，如文献[2]震网病毒事件章节所述，伊朗爆发的震网病毒对攻击该国核设施事件、美国输油管道遭黑客攻击事件，又如文献[3]中，乌克兰和以色列国家电网遭受网络攻击事件分析章节所述，乌克兰电力系统遭受网络攻击事件。造成该国大面积停电以至社会混乱等，保障工业安全生产，确保工控系统网络安全，是摆在我们面前的一大课题。

1 病毒分类

DCS 控制系统通常运行在 Windows、Linux、嵌入式操作系统上，除受到传统的操作系统层面的病毒威胁外，还受到针对 DCS 所控制的设备生产工艺的病毒威胁。从 IT/OT 两个层面出发，文章将 DCS 控制系统病毒分为以下三类：

（1）系统病毒

如文献[4]计算机病毒定义、分类及特征章节所述，此类病毒主要是以感染操作系统、窃取用户数据、破坏系统文件、让用户无法正常使用操作系统为目的，文章将其定义为系统病毒。例如：前缀是 Script，使用系统的 Java Script、VB Script 等脚本解释器，执行非法脚本程序的脚本病毒；前缀为 Win32、PE、Win95、W32、W95 等，可以感染 Windows 操作系统的 exe、dll、ocx 文件，并通过这些文件进行传播的寄生病毒；前缀为 Worm，通过网络或者系统漏洞进行传播的蠕虫病毒；前缀为 Trojan，非法进入用户系统并隐藏，然后向外界泄露用户的信息以及接收非法远程控制指令的木马病毒；利用 Microsoft Office 可执行宏功能，感染 Word、Excel 文件，传播病毒的宏病毒等。

DCS 控制系统中，现场控制器（DPU）通常采用实时嵌入式操作系统，针对嵌入式操作系统的攻击病毒，主要是以瘫痪 DCS 硬件板卡为目的。例如：篡改主板 Flash 中 BIOS 开机顺序、U-BOOT/Bootloader 启动代码，使 DPU 无法正常启动的病毒；释放异常信号量、事件标志，让实时操作系统无法正常切换任务的病毒；更改通讯波特率，污染现场总线通信环境，造成 DPU 与 IO 卡件无法正常通信的病毒等。

（2）工艺病毒

如文献[5]工业控制系统模型分析与攻击建模章节所述，此类病毒寄生在工程师站、操作员站、历史站计算机内，其目的是篡改工艺组态文件，破坏生产工艺、篡改历史库数据文件，隐藏入侵过程、欺骗操作员站监控画面，让运行人员无法及时察觉现在设备异常情况、释放错误指令，让设备长期运行在极限工况，损毁设备。

攻击者根据关键基础设施的运行机理，设计了一套破坏设备的运行工艺，让 DPU 正常运行错误的工艺逻辑。例如，针对旋转设备在满负荷正常生产的工况下，切除设备的各种电气、机械保护装置，并让旋转设备所有输入能量的调节门全开，向旋转设备输入大量能量，此时立刻切断旋转设备的输出端负载，使得旋转设备的能量无法向外送出，此时旋转设备瞬间超速飞车，造成不可逆的严重损坏。

（3）伪协议病毒

不同于系统病毒和工艺病毒，此类病毒不以破坏、挟持宿主计算机为目的，可以是正常的应用程序，也可以是木马程序，可以运行在宿主计算机或网络其他非法接入设备中，如文献[6]工控协议安全威胁章节所述。通常此类病毒的目标是关键基础设施的核心控制器，如 DEH、ETS、MFT 等。伪协议病毒利用 DCS 控制系统无可信验证环节，通过破译 DCS 的通信协议，并伪装成合法的工程师、操作员站的网络 ID，与现场设备控制器（DPU）通信，篡改组态逻辑、清除入侵痕迹、释放破坏指令，使机组短期无法恢复。

普通的防火墙、杀毒软件很难防御此类病毒。

2 病毒设计

2.1 系统型

可移植的可执行文件（Portable Execute，PE）文件格式，是基于在 UNIX 和 VMS 上运行的对象文件和可执行文件的 COFF“Common Object File Format”格式上，由微软设计用于 WindwosNT，Windows95 和 Win32 子集中的可执行的二进制文件的格式，常见的 EXE、DLL、OCX、SYS、COM 都是 PE 文件。1993 经过 TIS(Tool Interface Standard)委员会(Microsoft、Intel、Borland、Watcom、IBM 等)标准化所批准。

针对 PE 文件设计的计算机病毒主要是寄生病毒，可以分为“头寄生”“尾寄生”“中间插入”和“空洞利用”四种，文章对系统型病毒主要研究尾寄生型病毒。

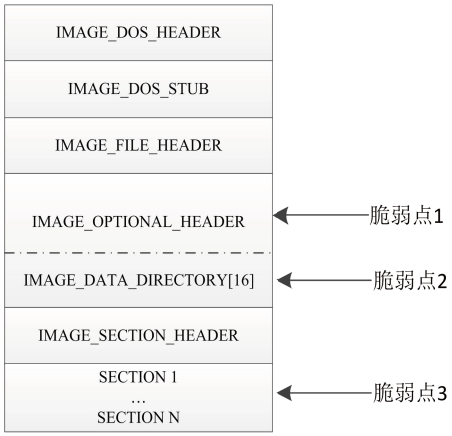


图 1 PE 文件结构及脆弱点

表 1　IMAGE OPTIONAL HEADER

偏移	类型	变量	注释	标记
4	dword	Size Of Code	The size of all the code sections	脆弱点
8	dword	Size Of Initialized Data	The total size of initialized data	脆弱点
12	dword	Size Of Uninitialized Data	The total size of uninitialized data	脆弱点
16	dword	Address Of EntryPoint	The address of the loader	脆弱点
64	dword	CheckSum	Supposedly a CRC checksum of the file	脆弱点

表 2　IMAGE SECTION HEADER

偏移	类型	变量	注释	标记
12	dword	Virtual Address	The RVA to the map the section	脆弱点
16	dword	Size Of RawData	The size of the raw data	脆弱点
20	dword	Pointer To Raw Data	The pointer to raw data	脆弱点
24	dword	Pointer To Relocations	The pointer to relocations	脆弱点

表 1、表 2 定义了 PE 头的关键数据结构及其脆弱项。

如文献[7]PE 文件病毒原理章节所述，图 1 是 PE 文件的头部数据结构定义，分别记录 PE 文件的标识、版本、代码入口地址、节数量等，为代码执行、数据加载提供重要信息。另外，PE 文件的代码、数据、资源等则是以节（Section）来记录，包括以下节(Section)：

（1）textbss/BSS

BSS 段（Block Started by Symbol）是指用来存放程序中未初始化的全局变量的一块内存区域，属于静态内存分配。

（2）text/CODE

代码段（text segment）是指用来存放程序执行代码的一块内存区域。这部分区域的大小在程序运行前就已经确定，并且内存区域属于只读。在代码段中，也有可能包含一些只读的常数变量，例如字符串常量等。

（3）rdata

只读数据段（read only data）是指用来存放程序中的常量。

（4）data

数据段（data segment）是指用来存放程序中已初始化的全局变量的一块内存区域。数据段属于静态内存分配。

（5）idata

导入段，包含程序需要的所有 DLL 文件信息。

（6）edata

导出段，包含所有提供给其他程序使用的函数和数据。

（7）rsrc

资源数据段，包含应用程序的界面、字符串、图标、对话框等资源。

（8）reloc

重定位段。如果加载 PE 文件失败，将基于此段进行重新调整。

寄生病毒利用宿主程序采用动态加载 DLL 文件、程序编译的代码/数据段页对齐机制等漏洞，通过改变宿主程序入口地址、嵌入木马程序，在用户执行宿主程序时自动加载木马 DLL 文件，设计流程如下：

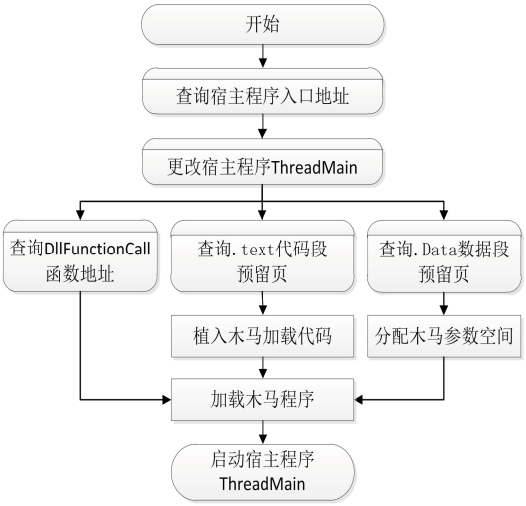


图 2　寄生病毒设计流程

在 DCS 某软件中植入 Plugins.dll，通过该动态链接文件，执行驻留在 Dll 文件中的的 DCS 系统工艺攻击程序，参考书籍[8]汇编语言程序设计章节，设计代码流程如下。

①查询程序入口地址

execution starts at　0xc2c8　　地址 1

Preferred load base is 0x400000　地址 2

由地址 1、地址 2 数据计算得到该宿主程序的入口地址是：

0x400000 + 0xC2C8= 0x40C2C8。

②更改宿主程序 ThreadMain 代码

原代码如下：

```
.text:0040C2C8      public start
.text:0040C2C8      push      offset aVb56 ; "VB5!6&*"
.text:0040C2CD call       ThunRTMain
```

更改后代码如下：

```
.text:0040C2C8      public start
.text:0040C2C8      jmp       sub_79908B
.text:0040C2CD      call      ThunRTMain
```

③植入木马加载代码

④分配木马参数空间

⑤封装感染程序

将上述（1）~（4）步骤中汇编代码封装到病毒程序中，并实现感染 DCS 可执行程序（exe）文件。

2.2 工艺型

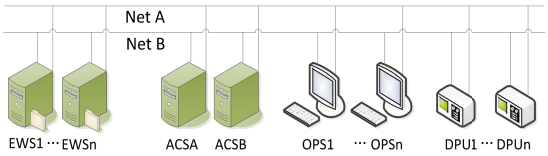


图 3 DCS 网络拓扑

如文献[8]DCS 的结构组成、DCS 的通讯网络章节所述，由图 3 所示，DCS 控制系统主要由 EWS（工程师站）、OPS（操作员站）、ACS（历史站）、DPU（控制器）组成，由 A/B 冗余网络组网。其中 ENG 的主要功能是设备控制工艺的逻辑组态、设备 IO 点组态、控制逻辑上传/下装、控制参数同步、网络节点组态等；ACS 的主要功能是存储生产过程的历史数据，为各站点的历史数据查询服务；OPS 的主要功能是对现场设备的实时监控，完成工业现场的日常生产；DPU 的主要功能是通过对现场设备数据的实时采集、执行工艺逻辑、实时控制现场设备，是 DCS 控制系统的核心设备。

大部分 DCS 通信采用明文、节点之间通信无可信认证环节、工艺文件采用解释性编译机制，存在脆弱性如下。

（1）逻辑组态

大部分 DCS 采用“静态编译，动态执行”的机制，即通过工程师站组态一个周期的控制逻辑，下装到控制器中，以一定扫描周期重复执行控制逻辑。“静态编译”通常由多台工程师站协同组态完成，工程师站之前采用 C/S 架构。

潜伏在工程师站的病毒可以伪装成网络中另一台合法的工程师站（Client），篡改服务器工程师站（Server）的某一页逻辑，以及直接对服务器工程师站的编译后的工艺执行文件篡改，破坏生产工艺。

（2）控制器操作

DPU 是 DCS 控制系统的大脑，是 DCS 控制系统的关键设备。对 DPU 的操作主要有逻辑下装、过程控制参数同步、执行操作员站下达的控制指令等。它的主要威胁源是潜伏在 DCS 网络中的工艺病毒以及伪协议病毒。此类病毒可以对控制器进行恶意操作，例如让控制器处理配置状态，停止控制逻辑的运行，使现场设备瘫痪或失控、让控制器反复切换，扰乱位于控制器下层的现场控制总线、恶意对控制器的固件升级，损坏控制器。

（3）历史数据读写

ACS 是 DCS 控制系统的历史数据的记录中心，采用 A/B 站互为备份的冗余结构部署。DPU 根据工程师站组态的点表的历史记录属性，通过广播或组播的方式，周期性将过程控制数据实时送到 ACS 数据中心存储，当 OPS 需要查询历史数据时，OPS 通过网络向 ACS 请求一定时间范围内的数据，并显示在历史趋势图中。

ACS 历史数据文件分两种方式，一种是采用第三方数据库存储（Oracle、Raima、AntDB），另一种是采用 DCS 厂家定义数据结构存储（开关量文件、模拟量文件、字符串文件、报警组文件等）。潜伏在历史站的工艺病毒通过篡改历史数据文件，影藏入侵痕迹。

（4）生产指令操作

集控室（CCR）由若干 OPS 组成，工业现场的生产操作指令均发自于 OPS。OPS 由若干控制画面组成，控制画面中绑定工艺点，保存在 OPS 站中的点表文件将控制画面中的点映射成 DPU 中相应工艺点的内存 ID，这样 OPS 与 DPU 正常交互数据。

潜伏在操作员站的病毒通过篡改点表文件的映射关系，使 OPS 下达错误的点表 ID，从而改变工艺指令，破坏工艺流程，危害机组安全。

（5）过程控制画面

OPS 是 DCS 控制系统的监控终端，实时监控现场设备的运行数据。OPS 与 DPU 通信采用 TCP、UPD、LLC 等方式，OPS 以一定周期定时轮询 DPU 的数据或 DPU 以一定周期广播/组播控制器内数据。针对轮询机制的 OPS，攻击者可采用 ARP 或 TCP 碎片攻击，切断 OPS 与 DPU 的通信链路，伪造一台 DPU 与被攻击的 OPS 通信，达到画面欺骗的目的。

工艺病毒利用 DCS 系统漏洞、结合关键基础设施运行机理、借助社会工程学等手段，全方位立体攻击关键基础设施，使工业设备短期内恢复，造成巨大经济损失。

由于工艺病毒危害性大、隐蔽性强，文章仅简要介绍一种简单、容易防护的工艺病毒设计方式，其设计流程如下：

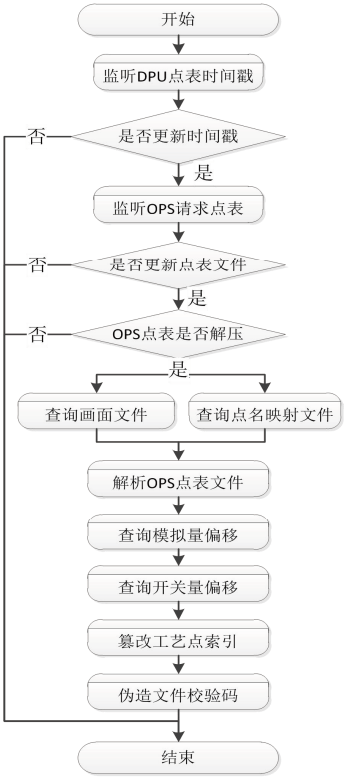


图 4　OPS 点表文件篡改流程

如文献[9]EDPF_NT-plus 仿真软件网络通信设计与实现章节所述，并根据某品牌 DCS 的操作员站（OPS）与控制器（DPU）通信原理，如图 4 所示，DPU 以一定周期广播其内存中的工艺点表版本时间戳，OPS 则实时监听 DPU 的广播数据与本地点表文件时间戳对比。当工程师更改工艺点并下装到 DPU 后，DPU 的点表时间戳发生变化，与 OPS 的本地点表时间戳不一致，此时，OPS 主动向 DPU 发出请求点表文件指令，DPU 收到指令后，向 OPS 传送最新的点表压缩文件，OPS 收到压缩文件并解压，同时更新内存中的点表以及点表版本时间戳，操作员站画面中的工艺参数与新点表自动完成绑定。

篡改点表文件的工艺病毒实时监听上述过程的以太网报文，当发现 OPS 完成点表文件解压动作后，自动触发篡改流程。首先，病毒会搜索 OPS 本地的工艺点表画面文件（*.mpg）,查找关键工艺名

称，根据关键工艺点名，在工艺点表映射文件(*.dat)中查找工艺逻辑引用的点名 KKS 码。然后，根据 KKS 码解析 OPS 点表文件，包括点表文件中模拟量总数、开关量总数、逻辑功能快总数，计算目标 KKS 码在点表文件中的逻辑地址。最后，篡改目标 KKS 码索引，以及伪造点表文件校验码。此后，工程师切换控制画面，并操作相关设备，就会下达错误的指令到 DPU，造成设备误动作。

3 病毒防护

由于网络安全防护技术的特殊性，本节仅基于前一节的病毒设计原理，简述系统型和工艺型病毒的防护，目的是探讨工业网络安全的防护思路。

3.1 系统型

寄生病毒主要目标是感染 DCS 组件，对其防护如下。

（1）构建 DCS 组件镜像

DCS 系统组件通常由逻辑组态、画面组态、工艺数据库、通信服务中间件、画面监控、逻辑在线监视、工艺点强制等软件组成，针对不同功能软件，划分镜像重点保护区域。基于行为特征的 PE 病毒检测章节所述，结合 DCS 系统软件特点，将 DCS 系统软件的 EXE、DLL、OCX、SYS 等文件打包，形成镜像文件 R0，定期将 DCS 组件与镜像文件对比，通过原始应用程序的 HASH 值、文件大小判断文件是否被篡改，通过检查具体执行程序的入口地址、bss 段、text 段、data 段、reloc 段等检查判断程序代码是否被篡改，通过线程数量判断软件动态运行参数，判断 DCS 组件是否被篡增加白名单机制。

通过白名单机制，工程师可以定义一份允许访问的名单，只有名单上的应用程序、文件、硬件设备才能够被授权访问系统资源或执行特定操作，防止未授权的实体进入或操作工业设备。系统安全防护章节所述，在工控系统中安装网络安全专用主机卫士，采用白名单策略对系统中的应用进行管理，将工程师站、操作员站、历史站的系统文件扫描录入白名单，审计后期增加的文件可以有效降低恶意程序在系统中的传播，加强管理计算机系统的 USB、PCI、以太网等硬件接口，防止非法设备接入、恶意操纵工业设备。

（2）预防 DLL 注入

保障网络安全，不仅需要在系统投运后增加系统补丁，更需要将安全功能设计到系统中。DLL Detector 的原理与设计章节所述，在 DCS 系统源代码中，开发者可加入防止非法 DLL 注入 DCS 进程的功能，提高 DCS 系统安全性。DLL（Dynamic Link Library）是一种在 Windows 操作系统中常用的动态链接库，它可以被多个程序共享并在运行时加载，分为系统 DLL、应用程序 DLL、COM 组件 DLL，DLL 文件加载地址多数是存放在注册表中，通过控制列表（ACL）来配置权限设置 Windows 系统注册表适当的权限，限制对注册表的访问权限，防止未经授权的修改，确保只有授权用户或组可以对注册表进行更改。定期备份注册表，在发生意外或错误的修改的情况下，通过还原备份来修复问题。禁用不必要的自动运行项减少系统注册表受到攻击，降低非法注入 DLL 的风险。

3.2 工艺型

工艺型病毒通常通过感染控制系统中的计算机或网络设备来实施攻击，一旦感染成功，可以对工业控制系统进行各种恶意操作，如修改参数、篡改数据、关闭设备或破坏物理设备等，隐蔽性强、破坏性大、社会危害度高，普通防毒软件无法检测这些恶意操作。这些攻击可能导致生产中断、设备损坏、环境污染甚至人身安全风险。变种攻击检测、隐蔽过程攻击检测章节、文献工业控制系统信息安全防护体系架构章节所述，工艺型病毒主要攻击目标是关键基础设施，对其防护是一个系统工程，需围绕 DCS 控制系统设计原理、关键基础设施的运行机理展开，建议采用措施如下。

（1）审计运维流量

获取 DCS 网络交换机的镜像流量，提取网络报文头部的 MAC、IP、端口等五元组信息，采用合法资产白名单机制，判断非法网络入侵节点。针对合法资产的通信报文，进一步分析报文数据区，解析 DCS 工控通信协议，审计工程师站的逻辑下装、

功能块强制、操作员参数设置等数据，结合方法（4）中的安全模型，判断各站点下达到 DPU 的指令的合法性。

（2）轮询 DPU 工艺参数

与被保护 DPU 实时通信，读取 DPU 内的状态参数，例如 DPU 负荷率、PID 参数、功能块状态、IO 输出状态，防止 DPU 受网络攻击处理瘫痪状态，识别 DPU 的可用性，结合机组运行工况，实时判断机组安全态势。

（3）增加安全测点

当发生网络攻击事件 DPU 被劫持时，方法（2）轮询 DPU 的数据不可信，因此，需要在机组本体增加安全测点，单独检测机组关键运行参数，接入与 DPU 网络隔离的专用网络安全设备，验证 DPU 内部工艺参数，确保 DPU 数据可信。

（4）构建安全模型

结合关键基础设施运行机理，构建机组各运行工况的安全模型，例如旋转机械转速临界区运行模型、PLU 保护稳定计算模型章节所述，功率负荷模型、阀门活动试验模型、机械超速模型等。

（5）构建超驰防护机制

超驰防护机制是一种用于当 DCS 工控控制系统受网络攻击造成原系统瘫痪，备用超驰控制系统自动接管原系统，避免关键基础设备处理失控状态的技术措施。在工业系统建设初期，建设者需对关键基础设备提前风险识别、评估，除了配置基本的 DCS 控制系统，还应增加冗余配置超驰控制系统，提高系统安全性、可用性，做好工控系统的最后一道防线。

（6）规范设备安全运行制度

加强设备管理，提高设备运行水平，健全设备运行制度，防范社会攻击学对设备造成的威胁。建议重点对以下方面进行防护：

a.定期对电子间网络设备巡检，防止非法网络设备接入；

b.定期上装制器组态逻辑，检查工艺逻辑的合法性；

c.加强运行人员管理，防止人为破坏；

d.加强 U 盘等传输介质非法接入 DCS 系统；

4 结语

本文通过对工业系统病毒分类，指出威胁 DCS 工业控制系统的病毒不仅是传统的以盗取用户信息，破坏用户操作系统为目的的 IT 病毒，更多的是对工业生产的关键基础设施的破坏而发起的有组织、有针对性、隐蔽性强的 OT 病毒，这类病毒超出了计算机软件设计原理，杀毒软件、防火墙很难防护；研究 PE 文件数据结构，分析 PE 文件头部的脆弱项，结合计算机软件设计原理，针对某进口品牌 DCS 软件，设计一款“尾寄生”病毒，实现 DCS 组件的感染；研究 DCS 控制系统的系统组成、网络拓扑、各站点之间的通信、工艺逻辑的组态及工艺逻辑运行以及操作员站获取现场数据的原理，结合旋转关基设备的运行机理，设计篡改设备工艺点表文件的工艺病毒流程。

参考文献：

[1] 蔡剑钢. DCS 控制系统在工业自动化中的应用[J].工程技术研究,2022,7(23):38-40

[2] 李东. 震网病毒事件浅析及工控安全防护能力提升启示[J].网络安全技术与应用, 2019(1):9-10+24

[3] 李中伟, 佟为明, 金显吉. 智能电网信息安全防御体系与信息安全测试系统构建 乌克兰和以色列国家电网遭受网络攻击事件的思考与启示[J].电力系统自动化,2016,40(8):147-151

[4] 康鉴. 计算机病毒的攻防研究[J]. 科技视界,2015(4):95-96

[5] 蔺俊豪, 冯冬芹. 基于逆向云算法模型的工业控制系统工艺稳定性建模与攻击防护[J].智能科学与技术学报,2020,2(1):53-61

[6] 方栋梁, 刘圃卓, 秦川.工业控制系统协议安全综述[J/OL].计算机研究与发展:1-16[2023-01-16] http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1777.TP.20220210.1040.007.html

[7] 尤菲菲, 王慧玲, 赵文熙. Windows 操作系统下 PE 文件病毒的分析与研究[J]. 绥化学院学报,2014,34(2):155-157

[8] 祝秋波, 雷升印. 集散控制系统的通讯网络[J].控制工程,2005(2):165-167

[9] 高瑜. EDPF NT-plus 操作员站仿真软件设计与实现[D].华北电力大学,2011