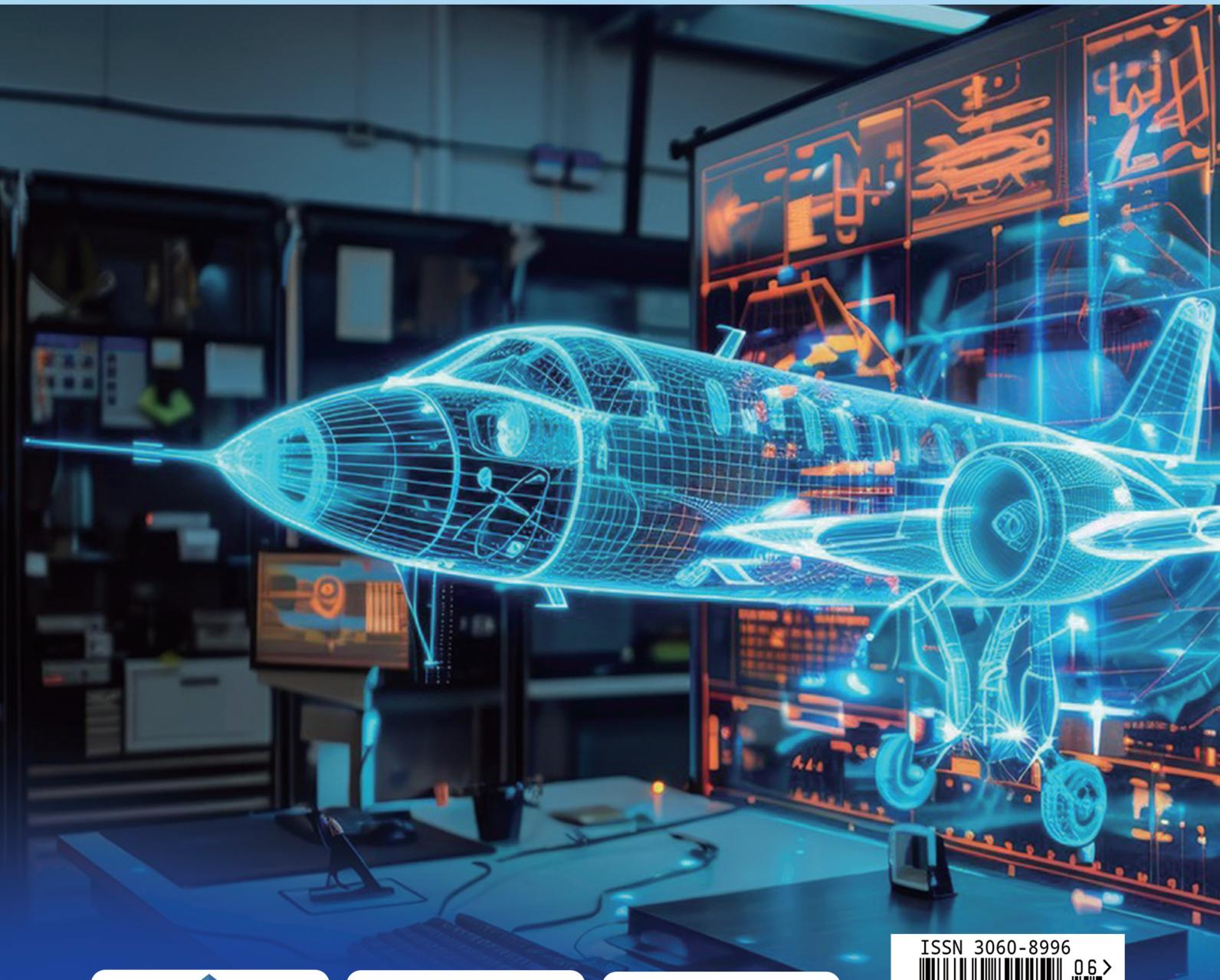


科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 6 June 2025 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839
E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：科技创新与工程
ISSN：3060-8996（纸质）3060-8988（网络）
出版语言：华文
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Technological Innovation and Engineering
ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)
Language: Chinese
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《科技创新与工程》征稿函

期刊概况：

中文刊名：科技创新与工程
ISSN：3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)
出版语言：华文刊
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: <http://www.nassg.org>



出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 6 June 2025
ISSN 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

主 编

康继军

Jijun Kang

编 委

刘 敏 Min Liu

龚勤林 Qinlin Gong

陈 升 Sheng Chen

包 艳 Yan Bao

夏旭东 Xudong Xia

- 1 智能电表安装中的防窃电技术与系统研究
/ 曹秋林
- 4 智能电网环境下装表接电技术防窃电与安全可靠性提升研究
/ 齐兵
- 7 新形势下消防员灭火救援实战能力提升路径研究
/ 陈银浩
- 10 消防监督检查工作中物联网技术的应用探究
/ 王振
- 13 食品用塑料包装材料的检验检测技术与质量控制探讨
/ 武洪强
- 16 国产化伺服驱动器的产业化分析与研究
/ 李甜
- 19 变工况条件下汽液两相机械密封端面压力计算分析
/ 徐红果 陈婕
- 22 头戴式青少年视力检测装置设计与实现
/ 陈竹
- 26 核电厂冷源网兜更换、在线清洗机械化一体作业平台的研制
/ 吴侨军 田新华 杨少锋 方中权
- 29 计及分布式能源波动的配电台区过载主动防御与重配可视化策略研究
/ 赵聪 薛超群 吴俊
- 32 基于 BIM 与点云扫描技术的既有建筑改造协同设计方法研究
/ 刘洋 谭荔
- 35 KTM690 发动机的排气设计
/ 杨旭辉 朱静芝 彭弘焯 吴峻霖 黎安淇
- 38 铁路货车海外维保模式探索
/ 罗万华
- 41 保健食品功效成分解析与作用机制研究
/ 李青
- 44 风机直流改造路线差异与优选方法研究
/ 王超
- 47 基于机器学习的计算机网络安全防护技术研究
/ 马振超
- 50 电磁设计中磁悬浮电机耦合多物理场仿真的研究进展
/ 吴亚军 曹振东 王鸿儒 张凤鑫 赵春龙
- 53 智能推土机在平原水库土方施工中的应用效能分析
/ 王瑞樟 李维汉 马延青 曹航瑞 张潇

- 1 Research on Anti theft Technology and System in Smart Meter Installation / Qiulin Cao
- 4 Research on Anti theft and Safety Reliability Enhancement of Meter Connection Technology in Smart Grid Environment / Bing Qi
- 7 Research on the Path to Enhance Firefighters' Fire Suppression and Rescue Practical Skills under the New Situation / Yinhao Chen
- 10 Exploration of the application of Internet of Things technology in fire supervision and inspection / Zhen Wang
- 13 Discussion on inspection technology and quality control of plastic packaging materials for food / Hongqiang Wu
- 16 Industrialization analysis and research of production servo driver / Tian Li
- 19 Calculation and analysis of end face pressure of gas-liquid two-phase mechanical seals under variable operating conditions / Hongguo Xu Jie Chen
- 22 Design & Implementation of Head-mounted Myopia Detection Device for Teenagers / Zhu Chen
- 26 Development of a Mechanized Integrated Operation Platform for Cold Source Mesh Replacement and Online Cleaning in Nuclear Power Plants / Qiaojun Wu Xinhua Tian Shaofeng Yang Zhongquan Fang
- 29 Active defense and reconfiguration visualization of overload in distribution area considering distributed energy fluctuations operational research / Cong Zhao Chaoqun Lin jun Wu
- 32 Research on Collaborative Design Method for Renovation of Existing Buildings Based on BIM and Point Cloud Scanning Technology / Yang Liu Li Tan
- 35 Exhaust System Design of the KTM 690 Engine / Xuhui Yang Jingzhi Zhu Hongzhuo Peng Junlin Wu Anqi Li
- 38 Exploration of overseas maintenance mode for railway freight cars / Wanhua Luo
- 41 Analysis of Functional Components in Health Foods and Research on Their Action Mechanisms / Qing Li
- 44 Research on Differences in DC Conversion Routes and Optimization Methods for Wind Turbines / Chao Wang
- 47 Research on computer network security protection technology based on machine learning / Zhen chao Ma
- 50 Research Progress on Coupled Multi-Physics Simulation of Magnetically Levitated Motors in Electromagnetic Design. / Yajun Wu Zhendong Cao Hongru Wang Fengxin Zhang Chunlong Zhao
- 53 Application efficiency analysis of intelligent bulldozer in earthwork construction of plain reservoir / Ruizhang Wang Weihan Li Yanqing Ma Hangrui Cao Xiao Zhang

Research on Anti theft Technology and System in Smart Meter Installation

Qiulin Cao

Beijing Huashang Electric Light Company, Beijing, 101400, China

Abstract

With the advancement of science and technology, the application of smart meters has become increasingly widespread and is an important equipment for power measurement and management. However, its application is also accompanied by the occurrence of electricity theft, which has caused losses to the economic benefits of power enterprises and seriously disrupted the order of the electricity market. To this end, it is necessary to have a clear understanding of the working principle, characteristics, and anti-theft work involved in smart meters, and form an effective anti-theft system to ensure the safe operation of smart meters and the full utilization of power resources. This article elaborates on the current status and trends of anti electricity theft technology in the application process of smart meters, its impact on power enterprises, technical solutions, and system construction analysis, in order to provide anti electricity theft measures for the development of power supply enterprises and ensure the safe and efficient operation of smart meters through this technology.

Keywords

smart meter; Anti electricity theft technology; System research; Electric light company; Safety Management

智能电表安装中的防窃电技术与系统研究

曹秋林

北京市华商电灯公司，中国·北京 101400

摘要

随着科学技术的进步，智能电表的应用愈发广泛，是电力测量及管理的重要设备。然而，其应用的同时也伴随着窃电行为的发生，这对电力企业的经济效益造成了损失，严重破坏了电力市场的秩序。为此，要清晰把握智能电表工作原理、特征及所涉及的防盗工作，形成一套有效的防盗体系，从而保障智能电表的安全运转，保证电力资源的充分利用。该文从智能电表应用过程中反窃电技术发展现状和趋势及其对电力企业的影响以及技术方案、系统构建分析几个方面来阐述窃电方式及防范窃电方式，以期通过该技术为供电企业发展提供防止窃电手段，确保智能电表的运行安全高效。

关键词

智能电表；防窃电技术；系统研究；电灯公司；安全管理

1 引言

随着智能电表广泛应用，电表不仅在计量精度和效益经营方面取得进步，同时给窃电行为带来了麻烦。本文主要对相关情况进行描述，联系实际案例及效益反馈向电力企业提供有效的建议方案，从而保障智能电表工作的顺利进行。

2 研究背景

2.1 智能电表的发展趋势

智能电表作为一种新兴的电气计量方式，其越来越在全世界对智能化电网及可再生能源的重视和需求下被大众认可和使用。传统的机械式电表在面对如今多样且复杂化的

用电需求下已显得过于滞后，而智能电表却有着实时数据的监测能力，并且有远程通信及数据分析的功能，据国际能源组织预测，在 2030 年全球将会安装多达数十亿的智能电表来实现智能电网的建立。这就促进智能电表技术的发展不断革新，诸如更加前沿的传感设备和通信设备，像低功率无线网络 (LPWAN)、蓝牙、Zigbee 等都为智能电表带来了数据的即时传递和保密性需求。再加上不少国家和地区政府纷纷出台政策来刺激电力企业及其客户，充分将智能电表应用于能源使用，以提高电表的使用效益。这不单能给供电者带来新颖的管理对策和契机，而且能带给电力消费者更加贴心的服务。

2.2 电力窃盗现状及其影响

电力偷窃现象在世界各国都非常普遍，在影响到供电公司经济效益的同时，也严重影响着供电市场的公平公正和可持续发展。据统计，有部分国家由电力偷窃造成的损失竟

【作者简介】曹秋林（1971—）男，工程师，从事装表接电研究。

占其总发电量的 10%-30%。电力偷窃行为削弱了供电公司效益，增加正常合法用电的成本，提高电价，最终影响广大群众的生活质量。电力偷窃的手段越发先进和多元化，越来越多的高科技手段代替传统手段使用，这增加了防范难度。电力公司必须以智能电表等新设备来辅助开展对用电情况的监管与管理工作，降低电力偷窃发生可能性。此外，也应该有政府和社会各界的参与，如加强法律法规监管，提高群众的节能意识和遵纪守法意识等。

3 智能电表的基本原理与特点

3.1 智能电表的工作原理

智能电表使用了高级电子测量方法进行工作。这种应用的电子部件与机械测量相比，使用了内部电子器件来进行电流传送、接收等电流及电压等不断监测及记录等电力测量，并转化成数码形式信息。这种方法除了能精确地衡量电能使用率，还能及时把数据送至电力供应商来支援其遥距监视及数据分析。一般地说，智能电表均配有双向通讯系统，即毋须人工巡查即可让电力供应商可作出他们的电表账单或解决问题。这样，便使得用电客户随时了解他们的能源使用情况，让他们也明白他们在产生多少钱的账单；而电力供应商也可提供其客户更准确的负载控制及处理故障。另外，可连接至互联网云端平台来处理智能电表的数据。通过大数据分析工具来进一步处理数据，并支援电力供应商做更佳的决策和处理业务流程。

3.2 智能电表的主要特点

智能电表拥有诸多独特优势，是现代化的电力管理必备工具。它能够实时收集并传送给用电器数据资料，能够让用户立即掌握用电器自身的能源消耗情况，进而对其生活作息模式进行改变和调整以减少浪费。其次，它具有双向通讯功能，能够让电力企业对电网环境进行实时的监控控制，在紧急情况下对供电系统进行调节控制。此外它还能够存储以前的能源消耗情况，这能够帮助电力企业对长期的时间消耗研究和长期的供应需求预测，这有利于对电力进行调节和优化使用。并且大都拥有了较为突出的抗干扰能力以及安全性能，这能够很好地阻止电力盗窃或者其他非法操作行为的发生，有效地保障了电力市场的安全运作。最后，由于有了智能电表，电力的费用就能够计算得更加精确定位，并且还比较透明化，这有利于电力使用者的信赖与满意程度的提升。^[1]

3.3 智能电表在电力管理中的应用

智能电表的运用在电力管理方面比较普遍，电力企业的运行效益提升以及客户满意度的改进发挥着显著的作用。首先，电力企业能够通过智能电表所获得的数据做供电的预估以及供电量的安排，实现供需之间的动态平衡，避免电力资源的无谓浪费。其次，消费者能够通过智能电表获得的信息网络系统，实时了解自身的用能情况以及掌握各种家用电器设备的工作状态，方便自身合理地选择用能。再次，智能电表的需求响应控制发挥着越来越突出的作用，电力企业能

够通过这一功能实行差异化的价格政策拉动消费者在负荷高峰时期以外使用电力，从而使供荷达成平衡、电网保持稳固。智能电表也能够促进电力市场的不断开放，让消费者拥有更多的选择，那么就有竞争力，就能提升服务质素。因此，智能电表一方面推动电力管理实现科学化与智能化，另一方面有助于未来可再生能源和分散供能的发展。

4 防窃电技术的分类与分析

4.1 物理防窃电技术

4.1.1 机械防盗结构

物理防窃电器就是基于硬体设备来对窃电行为进行预防。最常见的就是机械防窃电手段。在对电表设计时，可以采用一些比较坚硬的材料，比如钢铁或者是特殊合金材料，用来提高电表本身的硬度，也可以采取安装锁定装置的方式，在电表及相关装置上安装这些锁定装置，使非相关人员难以进入电表。这样一来，对电表的物理防范就有了所依托的材料，这种硬体结构对于外部的强行突破具有很好的抵抗力，自然也就降低了偷电发生的几率。同时，还可以定期检查电表外观是否良好，避免偷电漏洞的存在。

4.1.2 安装位置优化

其次，另外一种比较常见的物理性的窃电方法是改变电器设备的位置，将计量器设备及其部件放在无法进行触碰的位置上，这样就可以大大降低窃电概率，例如可以将电度表安装在室内空间或者密闭型的机房内，使其不会被直接触碰或是改变；再加上窃电人员也会考虑到外部的环境，在其他公共场所选择尽可能不引人注意或者接触不到的区域安装电度表，例如在人流量密集的商业区等。合理的位置选择可以在物理方面降低窃电的概率，同时也能增强电器设备的安全性，方便对电器设备的保修。^[2]

4.2 数据监测与分析技术

4.2.1 远程监测系统

随着科技的进步，信息监控与分析技术在电力窃电防范中的作用越来越大，利用通讯技术可以将电表数据实时传输到监管中心，这一系统可以实时远程监控所有电表的用电情况，而且可以实时掌握用户用能情况，尤其可以快速地掌握客户的用能特征的变化，如果系统发现用电客户的用能情况发生很剧烈的变化，甚至与以往很明显的不同，就会自动生成报警信号，通知维修班组巡检人员进行实地分析判断，及时发现和解决偷窃电问题。并且通过使用这一远程监控系统，也能节省人力巡检成本，提高工作效率。^[3]

4.2.2 异常数据检测算法

在反窃电方面，异常数据监测也是一种至关重要的手段。基于大量历史数据的分析建立常态用电模型，并且作为基准去对比实时的数据从而找出可能存在窃电事件的情况。例如，利用机器学习和数据分析技术帮助分析和区分正常用电器与异常用电器的不同之处，当系统的监控发现某一客户用电情况与预设模型相差比较大时，系统就会发出警报，并

告知相关部门进行介入调查，同时也可以实时学习和更新以提高探测异常的速度和效率，为电力公司执行反窃电措施提供了科技保障。^[4]

5 防窃电系统的设计与实施

5.1 防窃电系统的架构

5.1.1 系统组件介绍

普通防盗电装置的组成中主要包括监测接入口、信号传输器、核心控制台与客户端互动终端等。其中监测接入口的作用是对数据的监测，例如电流表、探测器等；信号传输器用于实现远程数据的实时传输，信号传输器通常情况下选用无线传输；核心控制台充当着整个装置的“大脑”，用于分析数据、判断与决策；客户端互动终端为运营商提供实时观察窗，以便他们更好地进行日常维护与故障处理。各模块化的设定能够保证信息的流通，在相互衔接处不留空隙，优化防盗电装置。^[5]

5.1.2 系统运行流程

一般来说，反窃电系统的运行过程主要分为四个阶段：在线数据采集、数据传输、数据分析和反馈处理。第一阶段通过监测设备使用传感器测量在线用电情况，并传输到集中管理系统。第二阶段通过数据处理技术，对比现场数据和历史数据，判断是否出现异常行为。如果存在异常行为，系统会及时发出告警，并通过客户服务端通知维护人员采取相应检查和应对措施。同时还可以详细记录每个步骤的操作信息，便于后期分析追踪。这种整体运作方式能够让反窃电系统第一时间有效、快捷应对所有窃电行为。^[6]

5.2 系统实施的关键步骤

5.2.1 现场评估与方案设计

防盗电系统开始执行之前对现场进行充分的调研并规划策略是实施的重要步骤。现场调研的重点是深入了解用户的用电情况、已有的资源和周围环境等情况。通过对客户沟通，获取用户的用电信息和记录情况，了解存在的窃电隐患。根据调研结果，建立有针对性的反窃电措施。如根据不同服务类型、不同的地理环境，选取合适的检测设备与安装的位置，建设合理的信息采集网络。策略规划要兼顾技术和经济的适宜性与顾客需求，系统的建设与运维得以最佳表现。^[7]

5.2.2 技术培训与人员素质提升

最后，为了有效地发挥防窃电系统的功能，必须要提

升人员的技能以及素养。电力企业需要定期给工作人员进行培训，保证他们熟悉并熟练掌握防窃电系统，能够针对出现的问题进行有效应对。同时，要加强工作人员甄别非法用电行为的能力、保护电力设施的意识培养。经过培训之后，每个工作人员在防窃电工作中才具备积极性和责任感，才能够实现一个单位职工齐努力的局面。这样不仅能够提升防窃电体系的作用，而且还能够实现电力行业内崇尚合法用电的社会氛围。

综上所述，防盗电技术的划分剖析可以给供电企业带来多种解决方案，设计和完善防盗电系统才是将解决手段落到实处的关键。通过系统化整合和管理制度，供电企业便可以在防盗技术使用方面取得更大的效果，从而保证了电力能源的稳定供应。

6 结语

就智能电表的推广和应用而言，防范窃电的技术水平直接关系到供电企业和财务业绩的稳定发展情况。深入分析防范窃电的技术措施和系统发现，优化物理防护装置的设计，结合数据分析手段可以提升对窃电识别的精确率和时效性，从现实事例和研究发现可优化多方面防范窃电措施的应用，从而在一定范围内杜绝电能窃取的问题。长远来看，供电企业需要强化相关防范窃电体系建设，并且重视科学技术的培养以及人的培养，提升防范窃电体系的系统性，促进高安全水平和高效率的电力管理体系格局的构建。

参考文献

- [1] 刘建华; 陈星锐. 智能电表防窃电技术研究及应用探讨[J]. 电力系统自动化, 2023(5): 58-64.
- [2] 王晓楠; 朱飞; 高明亮. 基于智能电表的电力窃盗监测系统设计[J]. 电气与能源, 2024(1): 12-17.
- [3] 张晓彤; 李志华; 孙宇辉. 关于电力公司智能电表防窃电管理的思考[J]. 现代电力, 2023(10): 44-49.
- [4] 周子琳; 胡文杰. 电力窃盗行为分析及智能电表防范措施研究[J]. 电力科技, 2024(3): 27-32.
- [5] 黄海鹏; 刘志远; 陈婉婷. 智能电表技术在电力反窃电中的应用研究[J]. 经济与管理, 2023(8): 77-81.
- [6] 陈京翊,石亮缘. 智能图像识别技术在电力设备安装中的应用[J]. 光源与照明, 2024, (12): 174-176.
- [7] 赵强. 智能电表技术在电力计量采集系统中的应用与优化 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (36): 135-137.

Research on Anti theft and Safety Reliability Enhancement of Meter Connection Technology in Smart Grid Environment

Bing Qi

Beijing Huashang Electric Light Company, Beijing, 101400, China

Abstract

With the continuous promotion of intelligent construction of the power grid, traditional metering and power connection technology can no longer meet the needs of refined development of the power grid in terms of anti-theft performance and stability performance. At the same time, electricity theft technology is showing a trend towards concealment and intelligence, which not only increases the economic costs of power grid enterprises, but also poses a threat to power grid safety; In addition, the equipment failures and operational errors inherent in the technology of installing meters and connecting electricity have led to low power supply reliability. This article is based on the current development status of smart grid technology, and analyzes and studies the existing problems of meter installation and power connection technology from three dimensions: optimization of anti-theft technology, improvement of control links, and construction of power supply reliability. From the three levels of intelligent terminal upgrade, data analysis application, and linkage control construction, countermeasures are proposed to improve the reliability and safety of meter installation and power connection in the power grid, providing reference for improving the reliability of power supply in the power grid.

Keywords

smart grid; Meter installation and electrical connection technology; Preventing electricity theft; Security control; Power supply reliability

智能电网环境下装表接电技术防窃电与安全可靠性提升研究

齐兵

北京市华商电灯公司，中国·北京 怀柔 101400

摘要

随着电网智能化建设的不断推进，传统装表接电技术在防窃电性能、稳定性能等方面已无法满足电网精细化发展需求。与此同时，窃电技术呈现隐蔽化、智能化趋势，不仅增加电网企业经济成本，还对电网安全构成威胁；此外，装表接电技术自身存在的装备故障、操作失误等问题，导致供电可靠性偏低。本文立足于智能电网技术发展现状，针对装表接电技术现存问题，从防窃电技术优化、控制环节完善、供电可靠性构建三个维度展开分析研究，并从智能终端升级、数据分析应用、联动控制构建三个层面，提出提升电网装表接电环节可靠性与安全性的对策措施，为电网供电可靠性提升提供参考。

关键词

智能电网；装表接电技术；防窃电；安全管理；供电可靠性

1 引言

智能电网凭借高效、智能、可靠的特征，已成为电力系统发展的核心方向。装表接电作为电网与用户连接的最后一环，其技术水平直接影响电网的安全与高效运行。随着用户用电量持续增长，用电环境日趋复杂，传统装表接电技术面临诸多挑战：一方面，不法分子的窃电手段已从传统的改变线路连接方式，升级为篡改智能电表数据，窃电手法更趋隐蔽，难以查处；另一方面，装表接电过程中存在选型不当、接线不规范、维护不到位等问题，易引发线路过载、设备损坏，既影响用户用电体验，也威胁电网稳定运行。因此，在智能电网环境下对装表接电技术进行改造，强化防窃电能

力、提升安全可靠性，是当前电网建设与发展中迫切需要解决的关键问题。

2 智能电网环境下装表接电技术的现存问题

智能电网的数字化、信息化特征，虽为装表接电技术升级提供了支撑，但在实际应用中，仍存在防窃电能力不足、安全管理薄弱、可靠性保障缺失等问题，制约了电网运营效能的提升。

2.1 防窃电技术与手段滞后

当前部分地区装表接电现场，仍采用铅封式接电、人工巡检等传统方式开展工作，难以应对当前智能化窃电行为。一方面，由于智能电表本身具备数据采集、传输等功能，部分智能电表未设置加密保护机制，给恶意窃电行为提供可乘之机，如破解电表通信协议、篡改计量芯片数据等，且此

【作者简介】齐兵（1982—）男，本科，从事装表接电研究。

类窃电行为难以被电网系统察觉，也不会留下明显痕迹^[1]；另一方面，装表接电现场存在线路接线混乱等问题，部分用户通过私接电表外侧线路，采用“飞线”“绕表”等方式规避现场监测系统；且当前现场监测系统多聚焦电表数据异常，未能监测现场线路接线状态，导致无法及时发现窃电行为，给电网企业造成一定经济损失。

2.2 安全管控流程存在漏洞

装表接电环节的安全管控主要涵盖设备选取、现场实施、后期运维等环节，任一环节出现问题均可能引发安全风险。在电表选取方面，部分地区为压缩成本，选用不符合智能电网标准的电表及接线设备，此类设备绝缘性能、承载能力较差，运行一段时间后，易出现绝缘老化、线路短路等安全隐患；现场实施方面，部分操作人员未按操作规程接线，存在接线顺序错乱、螺栓紧固不到位等问题，导致表线接触不良，易产生电弧、过热等现象，进而引发火灾事故；在维护方面，对智能电表安全运行状态的检查仍依赖定期巡视，无法提前对设备故障前兆发出预警，易导致事故扩大，给用户用电埋下安全隐患。

2.3 可靠性保障机制不健全

供电可靠性是电网质量的重要表现，装表接电环节的可靠性保障是确保电网用户用电质量的重要环节。装表接电后，电路设备运行维护缺乏全面性覆盖，部分地区用户用电分布较为分散，工作人员难以实现全方位巡检，导致故障排查耗时较长、处理不及时；智能电网“源网荷储”机制尚未完全融入装表接电工作，当用户负荷波动较大时，装表接电设备无法根据负荷变化自适应调整工作参数，易出现设备超载情况，导致电网跳闸概率显著升高，造成供电中断^[2]。

3 智能电网环境下装表接电技术防窃电优化策略

3.1 升级智能电表防窃电功能

智能电表是防范窃电的核心设备，从技术层面确保智能电表的抗干扰能力与数据不可篡改性：硬件上采用符合国家电网安全标准的加密计量芯片及多重防拆结构，加密计量芯片将数据进行加密储存、传输，防止数据被更改；防拆结构多方位布置，只要打开电表外壳，传感器即告警，同时向电网监控平台上传报警信息，及时发现窃电行为。软件上采用窃电甄别算法，根据电表电压、电流、功率等参数的动态变化特征，甄别发现“电压缺相”“电流反转”“功率突变”等特征，发现异常及时自动标记可疑用户，形成包含可疑时间段、可疑参数变化幅度的窃电预警信息，为工作人员查处提供精准参考，有效避免人工排查的盲目性。

3.2 构建多维度实时监测系统

依托物联网技术与智能电网架构，建立“表-线-用户”多维度实时监测体系，实现装表接电侧的全方位监测。在电表与线路监测维度，通过用电信息采集系统实时采集电表

计量数据、线路用电量、电压电流曲线、通信状态等信息，并对实时数据进行比对分析；若出现用电量骤减、电流曲线中断等疑似窃电的异常情况，系统将自动发出预警并推送至运维终端^[3]。在线路监测维度，在线路接电侧的接线端子、分支节点等关键部位安装智能传感器，实时采集线路温度、负载电流、绝缘状态等数据，重点监控线路温度超标、“飞线”“绕表接线”等异常情况，传感器实时采集数据并推送至监控平台，助力工作人员精准定位线路私接窃电行为。在用户用电监测维度，结合用户历史用电量、行业用电规律（如工业用户生产用电规律、居民用户生活用电规律）等数据，构建用户用电特征模型；当用户实际用电量与模型计算值的偏差超过设定阈值时，系统自动提示异常，帮助工作人员判断是否存在私接窃电情况。

3.3 建立防窃电联动管控机制

防窃电应跳出单一主体局限，实现“网-变-户”三方协同管控，构建权责明确、流程畅通、齐抓共管的防窃电工作机制，凝聚防窃电工作合力。电网公司需建立统一的防窃电工作制度，明确市场、运维、稽查等相关部门的职责，形成“窃电预警-现场核查-查处处置”的全链条查办流程；同时与公安部门加强执法联动，对于经核查确认恶意窃电且涉案金额巨大的用户，将移交公安机关追究其法律责任，充分发挥法律震慑作用。供电所需将装表接电现场排查纳入日常检查范畴，重点检查辖区内电表封印完整性、线路接线规范性，优先核查电表使用年限较长且电能计量异常的用户，以及有窃电前科的用户；此外，需加强对工作人员的防窃电知识培训，以及新型防窃电技术实操指导，提升工作人员专业能力。在用户层面，通过营业厅公告、公众号推送、社区讲座等线上线下渠道开展宣传，让用户充分了解窃电行为的法律后果（如追缴电费、处以罚款）与安全风险（如引发线路火灾、造成触电伤亡）；同时制定窃电举报有奖制度，对实名举报且核查属实的用户，给予一定额度的电费减免或物质奖励，切实提升用户参与防窃电行动的积极性，营造“人人知晓窃电危害，人人参与防窃电”的良好氛围。^[4]

4 智能电网环境下装表接电技术安全可靠性提升路径

4.1 强化装表接电设备全生命周期管控

设备质量是装表接电安全可靠运行的核心保障，需建立装表接电“选型-采购-安装-报废”全流程质量控制体系，强化设备选型、采购、安装、报废各环节管控。选型阶段，需严格依据智能电网相关标准及用户用电负荷特征（如工业用户负荷量大、居民用户负荷波动大），选用耐高压、高稳定性的智能电表及智能接线设备，且所选设备需具备国家3C认证证书，并与电网系统保持良好兼容性，避免因设备不匹配引发安全事故；采购阶段，优先选择资质完备、信誉良好的供应单位，实行公开招标采购；对中标设备进行抽

样检测，核查设备量程精度、电表计量性能、抗干扰能力等关键指标，确保产品质量符合相关规范要求；安装阶段，需由专业安装人员负责设备安装，并依据设备说明书开展规范的接线与调试工作；接线调试完成后进行通电试验，检查装表量程匹配性、电表接线规范性及设备通电状态，确认无异常后方可投入运行；报废阶段，需对报废及老旧智能设备进行集中回收，严防其再次流入市场流通环节；同时建立智能电表使用期限管理台账，对超出使用年限的智能电表及时更换，避免因设备老化故障引发绝缘失效、电气短路等问题。^[5]

4.2 规范装表接电现场操作流程

现场操作的规范性直接关系装表接电作业安全，需制定并严格执行标准化操作流程，避免因现场操作不规范引发安全事故。其一，需制定《智能电网装表接电操作规程》，对装表接电全流程进行规范：操作前需确认现场已断电，操作人员穿戴绝缘手套、绝缘鞋，并清理现场无关人员及障碍物；操作过程中，按照“先接线后通电、先接零线后接火线、先低压后高压”的顺序开展装表接线工作，确保接线端子紧固、线排布置规范，杜绝错接线、漏接线问题；操作完成后，先检查接线无松动、电表状态正常，再用万用表检测线路通断状态及绝缘电阻值；对现场进行复检，确认无异常后执行复电操作。其二，实施“操作+监督”作业模式，每套装表接电现场配置1名操作人员与1名监督人员，监督人员实时监督操作人员是否严格遵循规范操作，若发现未断电操作、绝缘手套及绝缘鞋穿戴不到位等违章行为，需及时制止，防范操作事故发生。其三，通过具备定位与录像功能的智能终端操作平板记录作业全过程，对接线痕迹进行拍照录像，并同步记录测试结果，为后续质量追溯、操作考核提供依据，确保操作规程严格落实。^[6]

4.3 升级装表接电运维管理技术

依托智能电网大数据、人工智能、GIS（地理信息系统）等信息技术，升级装表接电设备运维管控手段，实现运维模式由“事后维修”向“事前预防”转变，保障电网持续供电能力。一是构建装表接电设备状态评价模型，利用用电信息采集系统实时采集装表接电设备运行数据（如电表电压电流、线路温度等），结合装表接电设备维护记录及历史运行数据，运用大数据算法评估装表接电设备健康状态，提前识别设备老化、损耗等故障特征，预判设备故障发生概率及可

能发生时间，提前制定维护计划，例如针对线路温度持续异常偏高的设备，提前制定检修计划，实现“主动维修”，降低故障发生率；二是优化运维人员调度机制，通过整合GIS地理信息系统与用户故障报修平台，实现对运维人员的实时定位；根据运维人员实时位置及专业能力信息，自动筛选最优运维人员，生成派单信息，派单信息包含最优行驶路线、故障初步判断等内容，缩短人员到场时间；同时通过远程监控辅助运维人员提前掌握设备故障特征，进一步缩短故障处理时长；三是优化运维人员激励机制，将设备故障处理时长、故障排查效率、用户满意度及故障预防性维修率等作为核心考核指标，设置阶梯式奖励标准，激励运维人员提升工作效率与应急响应速度，保障装表接电设备持续稳定供电，减少因运维不及时造成的停电事件。^[7]

5 结语

智能电网建设给装表接电技术带来挑战，也对其防窃电能力、安全水平提出新要求。装表接电是电网企业与用户的连接桥梁，技术性能关乎企业收益与用户用电安全。优化其防窃电策略、管控设备全生命周期等，可遏制窃电、降损耗、提供电可靠性。未来需深化装表接电技术与数字化融合，强化防窃电与安全性，为智能电网高质量发展、能源系统高效运行护航。

参考文献

- [1] 张弘强.电力营销中装表接电及防窃电管理分析[J].电气技术与经济,2023,(09):270-272.
- [2] 冯睿,马志鹏.装表接电反窃电技术和反窃电措施分析[J].光源与照明,2022,(02):243-245.
- [3] 李庆全.装表接电中错误接线及防窃电的管理[J].科技资讯,2020,18(15):37-38.
- [4] 张雅欣.电力企业装表接电工作中的反窃电技术与应用[J].中国新技术新产品,2019,(22):146-147.
- [5] 顾捷.电力装表接电的反窃电技术分析[J].集成电路应用,2021,38(04):118-119.
- [6] 冯睿,马志鹏.装表接电反窃电技术和反窃电措施分析[J].光源与照明,2022,(02):243-245.
- [7] 王涛.论装表接电在电力营销工作中的重要性 [J].低碳世界,2020, 10 (07): 142+144.

Research on the Path to Enhance Firefighters' Fire Suppression and Rescue Practical Skills under the New Situation

Yinhao Chen

Cangzhou Fire Rescue Station, Cangzhou Fire Rescue Detachment Hebei Provincial Fire Rescue General Corps Building Street, Cangzhou, Hebei, 061000, China

Abstract

With the rapid development of the times and the rapid expansion of cities, the number and difficulty of fires are increasing, which is a new challenge to the established manual rescue method. This article first discusses the problem of strengthening the combat effectiveness of firefighters in the new situation, and then explores the core problems existing in the process of their tasks in the new situation. Provide targeted suggestions to improve the practical skills of firefighters, strengthen the construction of training platforms, introduce new technologies and equipment to enhance their combat capabilities. The purpose is to help the fire department formulate more effective countermeasures, so as to further improve the combat effectiveness level of fire fighters and move towards high efficiency and scientific direction.

Keywords

firefighter; Firefighting and rescue; Practical ability; Training system; New technology; New equipment; Psychological quality

新形势下消防员灭火救援实战能力提升路径研究

陈银浩

河北省消防救援总队沧州市消防救援支队建设大街消防救援站，中国·河北沧州 061000

摘要

随着时代迅速发展和城市快速扩张，火灾数量及难度不断加大，这是对既成的手工方式救援的新挑战。本文首先论述了新形势消防员战斗力的加强问题，然后探究新形势下他们执行任务过程存在的核心问题，提出针对性的建议，增加消防员实操技能、加强训练平台的建设、引进新科技、新器材，以加强他们的作战能力。目的是帮助消防部门制订出更加行之有效的对策，让其进一步提高消防员建设发展的战斗力水平，朝高效及科学化方向前行。

关键词

消防员；灭火救援；实战能力；训练体系；新技术；新装备；心理素质

1 引言

随着社会发展高速推进及城市化程度不断加深，火灾频繁发生且呈现更加复杂化，导致救援消防的扑救、救援的压力越来越大。针对新时代，传统的灭火救援形式及培训模式都存在诸多局限性，消防人员所提出的要求越来越高。消防人员作为灭火战斗、抢险救援的重要支撑，我们需要通过对科技技术、装备手段、心理观念等各方面的改革创新，提升消防人员在扑救和救援中的实际操作水平。尤其是受到高科技的智能技术以及先进装备的影响，如何能够尽快地适应全新的救援环境，并不断提高灭火作业安全系数，已经被视为是培训消防人员、提升消防人员战斗力的关键任务。因此，该研究主要旨在研究消防人员实质性发展手段的路向，阐述

存在的主要问题及提出针对性的解决策略，从而为消防工作提出更多合理性的科学发展建议，提高救援整体水平^[1]。

2 社会发展与消防救援需求变化

2.1 传统灭火救援模式的挑战与不足

随着社会的快速发展及城市化的扩展，城市规模不断扩大，人员流动性越来越高，导致城市火灾发生的频次增加及火灾更趋复杂化。曾经的火警处理模式基本通过经验丰富的消防人员来下判断及实施，还大量运用着手工机械以及最基础的灭火方法。但是当前的火灾形式愈发多元化、复杂化，如高层建筑火灾、化工产品火灾、因自然灾害引起的火灾等等，使以往的方式面临很大的挑战。以往的方式是消防人员扑救能力和消防行动基于手动技能和经验判断上，未能充分发挥技术优势对火灾进行处理，也导致当前的消防人员在面对突发的火灾面前一片茫然，不能在第一时间快速做出决断从而降低消防效果，放慢救援速度，还加大了消防人员的自

【作者简介】陈银浩（1989—），男，中国河北沧州人，本科，从事消防灭火救援研究。

危因素。

2.2 提升消防员实战能力的紧迫性与必要性

伴随城市化进程加速发展，消防官兵面对越来越复杂的严峻火情，如何应对瞬息万变的火警抢救环境，提升消防官兵的实战能力愈发显得迫切而必要。首先，现在的消防官兵在突发灾害事故时，往往缺乏及时有效的应对办法，导致其救助行为的效果受到时间因素制约。其次，如今的火灾出现类型及规模逐渐多样化，原有方法无法跟得上新时代扑火需求。例如智能化的居民楼、大体量公共场所、储存化学品仓库等一旦发生火情，其扑救方法和灭火设备技术要求相对提高，因此消防官兵除掌握基本的灭火技能外，还需要掌握先进灭火器材的使用，要知道高层高温等情况下的作战方法^[2]。

3 消防员实战能力的现状分析

3.1 当前消防员灭火救援能力的现状

3.1.1 专业技能水平

目前各个地区和各个部门消防人员的灭火技能相差巨大，很多都是通过大众化消防知识了解到简单的灭火知识，也只能在小火场内起到很好的灭火效果。但是面对情况越来越复杂的火场，一般的灭火知识慢慢显得力不从心，面对一些特殊环境下，例如高楼层、地下车库、危化品仓库等，单一灭火技巧渐渐不够用。不少消防人员对于一些比较复杂的火情不了解如何应对，例如电线火灾、化学物质火灾以及他们引发建筑破坏等内容。因此提高消防人员的能力既需增强理论知识的掌握也需重视应急能力和新型器材的使用，让他们更加适应复杂的突发的火灾。

3.1.2 装备使用能力

提高消防人员对装备的应用技术水平是一项重要而关键的任务，尤其是随着科学技术的不断进步和新式防火装备的加入火灾救援工作之中，如高压喷雾器、无人机以及热成像红外摄像机等。但不少消防人员并未对新式技术装备有全面的认识，并且对新式技术装备的应用技能没有全面掌握，其中有的甚至根本还未学会，这就导致许多先进的装备会随着先进技术的变化造成消防人员一时难以熟练把握，在关键时刻无法起到较好的应用作用。例如，虽然无人机及机器人具有很大的应用价值及应用优势，但如果并未熟悉其性能并学习好其工作方式，其在实际过程中将会导致其作用效果大打折扣。因此加强对消防员装备的使用水平，尤其是对新技术装备和新型器材的了解就显得至关重要，只有如此才能使消防人员在实际开展灭火工作时最大程度发挥出新型装备的作用^[3]。

3.2 消防员灭火救援面临的主要问题

3.2.1 技术水平与训练资源不均衡

在一些地区或机构，消防队员的技能与训练资源分布出现不平衡的情况。大城市消防队由于有充足的资金和资源提供可以进行更广泛更高级的训练如假想警情训练、特

殊环境下被困人员救援的演习训练等，而小型的城镇的或者偏远地区的消防队伍会缺乏训练场地、设施设备及专门训练的教练人员，导致他们的技能有待提高，遇到高难度的火警状况时无法很好的处理。再者培训频次缺乏且没有形成优质的高水准训练课程体系也会影响消防队员技能素质。因此，如何弥补区域和组织间技能能力和训练资源的差距来提升总体灭火能力成为头号难题。

3.2.2 装备更新与技术应用滞后

随着科学技术的发展，各类新型消防器材和技能不断进步，但是某些消防队伍在这方面的进步不够。如面对特殊情况下，旧有的消防器材和救生装备可能无法适应不同场景下消防人员面对复杂火灾救援状况；以及新科技的应用没有能够大规模的引入消防队伍的一线，且由于旧设备的使用寿命到期未能及时更新换代，导致消防员不得不使用过时的消防装备进行救援，减缓工作效率。再就是装备和技术支持没有跟上去，有的装备没有能够得到足够的训练和专业技术的支持，在火场上发挥不理想。为了改进火灾的救援结果，需要加大消防器材装备的投入，加快新技术的发展实施，保证消防员使用最先进装备进行火灾的救援^[4]。

4 消防员灭火救援实战能力提升路径

4.1 提升专业技能与实战训练

4.1.1 加强基础理论与实际操作相结合的训练

在加强消防员战斗能力方面，我们要加强消防员基础知识与实战的关联性。首先，以往消防员的培训重在基础技术的培训，如如何进行灭火救援等，一旦面对一些突发的火灾事故，没有一定的基础知识做基础，消防员就不能作出合理的判断、快速而准确的抉择。因此，应该在强调基础性的理论知识学习之余，将其落实在实践训练之中。例如，消防员的灭火能力是必需的，但是除了了解掌握灭火器的使用技术外，还需要对整个燃烧过程的理论知识进行学习，了解不同燃烧的特点（石油燃烧、电器线路起火等），并且能够根据实际情况选用相应的灭火剂及投射方式，在整体理论与实际应用的配合之下，消防队员就能在火灾突发的情况下做到反应快速且决策准确，在火灾的实际救援过程中提高灭火能力。其次，应根据灭火救援的需求，进一步提高消防员的火灾现场环境分析能力，如针对建筑物的构造、火灾的蔓延途径，从而实现理论知识、实践技能的有效结合，利用于现实灭火救援的过程。

4.1.2 实战演练的多样化与情景模拟

为有效提升消防员的实战能力，以往的传统模式已经难以满足需求，消防员的实际操作训练要加强，增加训练难度和数量，设立不同类型的训练内容适应不同的情形。我们可以用情境教学法培养消防员解决复杂问题的能力，采用不同类型的火灾情景让消防员在训练场感受到火场的紧张气氛和压力，我们可以设立不同类别的火情类型如高层建筑

类、电器火灾类、野外火灾类等设立解决此类问题相应的对策、行动过程，通过这些动态性训练方法让消防员充分掌握应对不同类型火灾的扑救方法，也让消防员在训练过程中具备较强的反应速度和应变智慧，可将一些突发状况（火势蔓延快慢程度、气象条件等）作为情境教学法中的部分让消防员在较短的时间内保持较高的情绪状态和团队精神，在紧张的氛围中增强他们的应变智慧和应急处理能力。

4.2 引入新技术与新装备

4.2.1 智能装备与无人机技术的应用

科学技术的高度发展使得智能化装备和无人驾驶飞机在消防救灾领域也发挥着重要作用。而传统的手动灭火装备一般由消防员人工操作，由于受周围环境以及技术制约影响，其实现的功效并不高。通过智能化装备和无人机的应用能够提升灭火效率以及安全指数。智能化装备能够通过传感器对发生火灾现场的变化状况进行实时观测分析，为消防人员提供有效的数据支持，以辅助消防人员作出更加合理的决策。例如，智能火灾探测仪能够第一时间发现着火点的位置，将相关信息通过无线发送到指挥部，形成了早期预警机制。同时无人机对于消防救灾也有一定的积极作用，能够在较短时间内获取火灾区域的高空影像，有利于指挥部宏观掌握火灾面积范围大小、火灾起源点和火势蔓延程度，进一步明确救援物质点的分布。同时还能将灭火装置或者灭火药剂投放到一些人员无法到达的地点或区域，能够有效降低消防人员的热辐射危害并缩短他们在高温状态下的持续时间，从而增加消防的成功率^[5]。

4.2.2 高效灭火技术与设备更新

先进灭火技术的引进对于提升消防官兵战斗力的意义重大，现代消防工作中的常规用水灭火与干粉灭火正逐渐被新型灭火技术所取代，例如，泡沫灭火技术可解决传统灭火装置不能消灭石油类、电器类等火灾的火灾隐患。高压水雾灭火技术能够使在灭火救援工作中的灭火损耗时间在最小、耗水量少的同时快速扑灭火灾，且可减少火场余水损失，加强救援效率。而气体灭火系统目前已被广泛应用于高层建筑、电脑房等专用灭火场所。在没有水资源的条件下进行灭火，能够最大限度地避免因消防灭火装置而产生的水和火的危害性进一步加大，且能够阻止存在电器类火灾安全隐患的

防火装置发生短路情况，引发二次火灾的风险。

4.3 心理素质培养的必要性

在火灾救援中，人本身心理状况就会对其行为和帮助人们脱离险境起很大作用，由于工作的性质十分紧张和危险，消防人员都承受着巨大心理压力，在危险的关键时刻，良好的心理素质才是正确的决策作出与否和采取行为的关键。因此，消防人员心理素质培养成了提升消防员战斗力的重要因素之一，除了要加强身体力量的锻炼和技术的训练以外，心理训练也是提升个人调控能力的一个关键因素。例如，可以模拟火灾场景让消防员体验在高压情况下做到冷静处理的突发状况。情绪的控制也是心理素质塑造的重要关键，需要教会消防员合理控制负面情绪如焦虑和惊慌失措等，避免因为自身负面情绪带来工作的阻碍。

5 结语

针对新时代下消防人员火灾扑救及应急救援工作中面临的若干问题及难题，本文就此展开了研究并给出对策建议：一是加强专业技能训练，尤其是复杂灾害下的实际模拟训练，提高消防救援人员应对突发事件的处置能力；二是运用一些新技术工具，例如无人机以及智能化火灾监测工具等，提升救援效果；三是从消防队员自身来讲，应加强心理素质的训练，要有临危不乱、科学判断及配合的能力。总的来说，提升消防队员战斗力需要各方的共同努力，涉及政府、消防队以及各行各业人员，从各方面发力来提升消防人员整体的战斗力，保障社会安居乐业。

参考文献

- [1] 王文杰; 李晓华. 基于大数据的消防救援决策支持系统研究[J]. 消防技术, 2023(8): 45-50.
- [2] 张志远; 刘锦龙; 陈国强. 消防员灭火救援训练体系优化的研究与实践[J]. 安全生产科学与技术, 2022(12): 99-104.
- [3] 李俊飞; 齐锋; 陈建国. 现代消防技术在实战救援中的应用分析[J]. 消防与安全, 2024(5): 70-73.
- [4] 张大鹏; 王志坚; 高晓莉. 高危环境下消防员心理素质提升路径研究[J]. 心理学与行为研究, 2023(7): 112-118.
- [5] 李华荣; 王庆生; 许文杰. 新型智能消防装备对灭火救援效果的影响[J]. 现代消防技术与装备, 2024(3): 55-60.

Exploration of the application of Internet of Things technology in fire supervision and inspection

Zhen Wang

Changzhi High-tech Industrial Development Zone Fire Rescue Brigade, Changzhi, Shanxi, 046000, China

Abstract

With the acceleration of urban modernization, the growing number of buildings and their increasingly complex internal structures have raised higher requirements for fire protection system construction and fire prevention. The Internet of Things (IoT), which connects various objects through internet technology, shows significant potential in fire safety inspections and supervision. This paper analyzes the application value of IoT technology in fire safety inspection work, proposes specific implementation strategies, and provides practical references for future fire safety supervision efforts.

Keywords

fire control supervision and inspection; Internet of things technology; technology application

消防监督检查工作中物联网技术的应用探究

王振

山西省长治市高新技术产业开发区消防救援大队，中国·山西长治 046000

摘要

随着城市现代化建设进程加快，建筑物数量增多，内部结构较为复杂，对于消防系统的建设和火灾防控都提出了更高的要求。物联网是通过互联网技术将不同物品连接起来，在消防监督检查工作中具有较高的应用前景，可以进一步提升消防监督检查工作水平。本文主要通过分析消防监督检查工作中物联网技术的应用意义，提出物联网技术的具体应用策略，为之后的消防监督检查工作提供一些参考。

关键词

消防监督检查；物联网技术；技术应用

1 引言

根据建筑工程施工设计要求，都会在建筑内部进行消防系统的设计，并配有相应的防火基础设施，可以有效预防建筑物的火灾，为消防监督检查工作提供便利。但是目前消防监督检查工作在开展的过程中仍物联网技术的应用，物联网技术的应用可以对建筑结构以及消防设备进行实时监控，并在信息系统的帮助下建立完善的火灾防控管理体系，有效提升消防监督检查工作的质量。

2 物联网技术概述

物联网技术是在电子信息技术的基础上发展而来的，随着信息技术的成熟与发展，物联网技术被广泛用在各个行业中，可以有效提升工作效率。物联网技术在消防监督检查工作中的应用，可以帮助消防队伍和检查人员做好日常的监督

检查工作，进而实现公共消防安全的强化，在建设火灾预警系统的过程中，可以有效发现建筑物存在的火灾安全隐患，进而减少火灾事故的发生。

目前在消防领域中，常见的物联网技术包括网络传感、射频识别系统以及智能系统等多种技术，其中网络传感技术可以对一定范围内的消防设施进行动态监测，并将该地区的消防信息数据进行整合，进而构建出消防监督区域性监管系统。射频识别系统目前是针对消防安全监督检查的核心技术，主要是由电子标签、阅读器以及计算机网络工程，消防监督检查工作人员可以在消防设施中安装物联网电子标签，并利用阅读器对于设备以及周围环境所产生的数据信息进行统一处理，进而实现对消防设备的远程实时监控。物联网技术的应用实现了消防监督系统的信息化与智能化，利用信息化技术收集消防设施的使用数据，并通过对数据分析，相比于人工采集数据更加可靠，可以充分保证数据内容的精准性，消防物联网可以实现火灾防控工作效率的提升，同时可以减少在消防监督工作中，人力和物力的投入，及时发现建筑结构中存在的安全消防隐患，进而降低火灾的发生几率^[1]。

【作者简介】王振（1985—），男，中国山西长治人，在职研究生，从事防火监督研究。

3 消防监督检查工作中物联网技术应用的必要性

由于消防监督检查工作具有长期性、持续性的特点，在开展工作的过程中，多是以抽查、抽检的形式展开，由于工作内容较为复杂繁琐，检查人员无法针对检查区域的所有消防设备和消防点位进行系统化的排查，在实际工作中，无法针对建筑物中存在的所有火灾隐患进行排除，因此消防监督检查人员不仅需要具备丰富的专业知识，同时还需要做好持久战的心理准备，在工作实践中不断提升自身能力。在传统的监督检查工作模式中，监督检查人员所承担的工作负荷较高，并长期处于高度集中的工作状态中，即使具备较强的职业素质，也有可能因为客观因素对监督检查工作产生负面影响，可能无法及时发现建筑物中的消防安全隐患。与此同时，消防监督检查工作不仅涉及消防专业知识，监督检查人员还需要丰富知识体系，加强多领域知识的学习，为了进一步强化消防队伍监督检查工作质量，可以更加全面的把控管理区域消防安全工作，需要将物联网技术应用在消防监督检查工作中，推动消防系统的信息化建设^[2]。监督检查工作人员可以利用物联网技术突破传统工作模式带来的制约，不需要亲自到达检查点就可以开展监管检查工作，只需要利用物联网终端设备就可以对监督检查区域进行消防问题排查。可以使得监督检查工作在高效执行的基础上落实到位，可以有效降低潜藏在建筑物或社会空间中存在的消防安全隐患，实现城市消防水平的提升^[3]。

4 消防系统物联网架构

为保证消防监督检查工作的有效落实，需要多部门的协同推进，同时重点提升各部门之间的协调性和沟通能力，建立消防系统物联网架构。

消防系统物联网架构可以分成：决策辅助、应急救援、火灾防控三部分，互联网技术的应用可以实现动态感知、精确防控以及智能判断。首先，决策辅助需要消防监督检查工作人员通过消防大数据分析系统，对采集的数据信息进行消防隐患分析，并结合社会数据以及空间位置，并对目前的消防设施以及人员岗位进行优化，物联网技术具有多样功能，可以实现灵活搭配以及深度应用，通过信息技术可以实现对火灾隐患进行挖掘并全面分析，通过加强消防资源的优化配置，例如，对于具有较高消防安全风险的地区，可以加强消防设备以及消防人员的配置，一旦出现火情，可以实现大量消防资源的调费调配；其次，在展应急救援工作的过程中，需要实战指挥调度系统的进一步完善，消防人员可以利用物联网技术对出现火情的地区进行定位，并通过信息技术对火灾信息进行核实，可以利用视频监控提高数据信息的真实性，例如，消防人员可以直接通过城市信息系统对发生火情的区域进行综合信息调查，包括资源查询、视频调入、预案调入等，并通过信息系统直接实现电子派单，并对赶往现场

的消防人员进行远程导航；最后，在开展火灾防控工作时，消防人员需要依靠物联网技术，对建筑物以及消防设备进行远程监控，通过建立物联网远程监控系统和安全隐患巡查系统，对可能存在的消防群隐患进行追踪监控，可以利用射消防设备和在消防设备和重点防范区域安装烟感火灾报警、烟雾泄漏报警、电气火灾报警、消防视频监控以及消防控，水联网等系统，消防人员则需要对消防设备进行定期巡查，并针对可能存在较多安全风险的地区进行抽查，将存在的火灾安全隐患进行上报，为保证监督检查工作的有效落实，需要对负责监督检查的工作人员进行绩效考核，将工作质量和工作效果作为绩效一部分，以此增加工作人员对于该项工作的重视程度。在建设数字化网络管理系统的过程中，需要重点加强对消防单位、消防人员、消防设施、消防装备进行统一管理，并对监督检查工作中发现的消防安全隐患及时进行处理。消防队伍需要通过物联网系统对隐患信息进行上报，对开展的消防工作进行审核，保证各项工作有序开展^[4]。

5 消防监督检查工作中物联网技术的应用

5.1 消防数据信息处理

在针对公共消防设备进行管理，维护消防群体系正常运行的过程中，会产生大量的数据信息，而这些信息内容往往具备较高的分析价值，但是仍有一部分信息属于无效信息，需要进行识别。物联网技术在消防数据信息处理中的应用，可以实现对数据资源的高效采集、集成以及分析，可以为后续的消防监督检查工作提供较为真实的数据内容，进而提升监督检查工作的水平，满足消防管理信息数据的现实需求。物联网技术目前已经成为消防一体化平台的构成中心，合理、正确、的运用可保证消防数据资源的完整收集、及时处理、客观分析、深度应用^[5]。在应用物联网技术的过程中，可以及时发现数据信息中的异常情况，并进行精准性挖，其实获取消防系统中的火灾隐患，并制定与其相匹配的预防措施，进而降低火灾威胁，与此同时，物联网技术的应用可以对火情的真实性进行判断，可以有效规避现实生活中报假警的问题发生。消防救援人员则可以根据数据内容对目前的火情，火势进行分析，并制定紧急出警方案，对各项消防资源进行合理分配。

在传统的工作模式中，各种消防数据信息都需要人工进行采集整合，导致工作人员的整体工作量相对较高，采集效果无法保障，经常会出现数据信息收集不全面、分析不到位的情况。而物联网技术可以有效避免上述问题，在保证数据信息真实可靠的前提下，可以实现智能化分析^[6]。

5.2 消防设备实时监测

消防设施和相关设备是社会公共消防安全体系中的重要组成部分，灭火救援工作是否可以顺利实施在一定程度上取决于消防设备的应用。因此消防队伍可以在管理区域之内对公共消防设施安装电子标签，通过物联网技术对消防设备的运行情况进行实时监督。直接通过对标签信息的深度解读

获取设备的运行状态。利用电子标签对消防设备进行检测，不需要检查人员进行实地走访对消防设备进行抽查，只需要利用物联网的终端装置对各种消防设备进行阅读，就可以及时获取设备的运行情况，一旦发现消防设备出现故障、老化等问题，可以立即进行处理，实现对消防装置和设备的面保护，不仅可以有效降低监督检查人员的日常工作负荷，同时可以进一步加强消防设置监督检查工作的结果精度^[7]。

利用物联网技术对消防设备进行实时监测的过程中，可以不受空间时、时间的限制，检查人员可以随时随地进行检查工作，可以有效避免在检查消防设备的过程中出现错检、漏检的情况，充分发挥消防设备在火灾发生时的积极作用。消防队伍所以将搭载物联网的公共消防安全检查装备安装在系统控制设施中，可以实现数据信息的实时共享，并在信息内容的基础上优化工作方案^[8]。

5.3 智慧消防

智慧消防是我国消防工作开展的主要趋势，人工智能技术、无线网络技术等在消防系统中的应用目前仍处于研究阶段，消防安全控制系统的建立可以保证消防人员在第一时间发现火灾隐患，并做到及时处理，可以有效提升城市消防水平，智慧消防平台的建设目前是消防主管部门的重点关注、支持的工作对象之一，为进一步提升消防监督检查工作的有效落实，需要加强物联网技术的应用。随着高层建筑的不断出现，多数建筑结构复杂，存在的火灾隐患相对较多，不同部位的火灾风险可，因此在设计消防，因此在进行消防设计时，需要根据建筑工程建设的实际情况以及火灾的基本特征采取对应的防范措施，自动喷水系统的设需要建筑内部具备预警系统，可以对建筑内部发生的火灾进行有效的监控和感知，可以通过物联网技术进入内部的消防设备上安装传感器，如果传感器在高温的环境下进行工作，则会自动发出警报，并通过与自动喷水系统的连接，实现自动灭火^[9]。

6 消防监督检查工作中物联网技术的应用前景

6.1 消防监督

物联网技术在防监督检查工作方面的应用，可以帮助工作人员及时获取火灾安全隐患，并将收集的数据信息集中反馈到主控制器中，工作人员，只需要通过控制终端的操作就可以对风险数据进行分析，并针对建筑物或公共区域存在的安全隐患进行及时处理。例如，可以利用智能传感器对建筑物中的消防装备进行监测，通过物联网技术的不断发展，传感器的应用效果也会不断提升。

6.2 物联网技术

物联网技术是在互联网的背景之下产生的，目前我国

消防系统和公安全网络的建设工作已经取得了一定的效果，在专用网络的作用下可以实现快速数据处理，能够及时进行数据存储和数据计算，如果专用网络中的所有存储空间都被充分利用，传输和处理大规模数据时，也可以通过公用网络进行调整^[10]。

6.3 用户层

从用户层的层面分析，互联网技术的应用可以使用更多的数据类型，也可以在此技术的基础上对数据进行分析。随着消防监督检查工作的开展，多数地区都在建立消防一体化平台，而在此过程中，平台的基本数据都是利用物联网技术进行获取，可以有效降低监督检查工作人员的工作总量，提升工作效率。

7 结语

总而言之，物联网技术在消防监督检查工作中的应用，可以帮助工作人员快速获取建筑物或管理区域内的火灾安全隐患，并通过信息化设备对数据信息进行采集，利用智能化分析系统进行分析，可以全面保障数据内容的真实有效，并根据数据内容对下一步的监督检查工作和火灾预防工作提供支持，进而实现对消防监督检查工作的科学部署，提升城市消防水平。

参考文献

- [1] 马小晨. 物联网技术在消防监督检查业务中的应用前景[J]. 中国民商,2020(12):83.
- [2] 杨钊. 物联网技术在消防监督检查业务中的应用[J]. 中国新技术新产品,2020(23):146-148.
- [3] 李超. 消防监督检查业务中物联网技术的应用[J]. 国际援助,2020(11):114.
- [4] 张吉伟. 消防监督检查中物联网的运用探究[J]. 建筑工程技术与设计,2020(31):3676.
- [5] 孙金阳. 浅析物联网技术在智慧消防中的应用[J]. 中国新通信,2019,21(15):127-128.
- [6] 徐毅. 论人员密集场所消防监督检查要点[J]. 中外交流,2020,27(32):100.
- [7] 宋东臣. 消防监督检查的现状及发展[J]. 科技创新与应用,2020(20):62-63.
- [8] 方超. 新时期有效开展消防监督检查工作的思考[J]. 百科论坛电子杂志,2020(13):433.
- [9] 杨相坤. 关于新时期有效开展消防监督检查工作的相关研究[J]. 文存阅刊,2020(52):182.
- [10] 张滢. 新形势下消防监督检查工作存在的问题及对策分析[J]. 智能城市,2019,5(7):163-164.

Discussion on inspection technology and quality control of plastic packaging materials for food

Hongqiang Wu

Hefei Product Quality Supervision and Inspection Institute, Hefei, 234000, China,

Abstract

Based on the analysis of the inspection and testing technology of plastic packaging materials for food, this paper further puts forward specific quality control measures, aiming at giving full play to the role of inspection and testing technology and quality control measures, ensuring the quality and safety of plastic packaging materials for food, and promoting the healthy and stable development of related industries.

Keywords

plastic packaging materials for food ; inspection and testing technology ; quality control measures ; role

食品用塑料包装材料的检验检测技术与质量控制探讨

武洪强

合肥产品质量监督检验研究院，中国·安徽 合肥 234000

摘要

食品安全是当前民众普遍关注的一大民生问题，作为国家质检中心单位工作人员，有必要做好食品相关质量监督检验工作。其中，食品用塑料包装材料检验检测是尤为重要的一个环节，其包括材质鉴别、物理性能测试、化学安全评估等检验检测细节要点。从食品用塑料包装材料的检验检测质量效果提升角度考虑，需采取行之有效的检验检测技术，并加强食品用塑料包装材料质量控制，因此，本文在分析食品用塑料包装材料的检验检测技术的基础上，进一步提出具体质量控制措施，旨在发挥检验检测技术及质量控制措施的作用，保障食品用塑料包装材料的质量及安全性，并促进相关产业健康、稳定发展。

关键词

食品用塑料包装材料；检验检测技术；质量控制措施；作用

1 引言

食品用塑料包装材料将塑料作为原材料，广泛应用于日常生活与工业生产当中。基于食品安全角度考虑，产品质检单位工作人员有必要做好食品用塑料包装材料的质量检验检测工作。结合实践经验可知，食品用塑料包装材料的检验检测技术较多，包括材质检测技术、物理性能检测技术、化学安全检测技术等，需结合具体检验检测工作需求合理选用^[1]。此外，为确保食品用塑料包装材料的质量，还需采取有效质量控制措施。总体而言，为做好食品用塑料包装材料的检验检测及质量控制工作，本文围绕“食品用塑料包装材料的检验检测技术与质量控制”展开分析探讨价值意义深远。

【作者简介】武洪强（1980—），男，中国安徽宿州人，本科，工程师。

2 食品用塑料包装材料的检验检测技术分析

2.1 材质检测技术

食品用塑料包装材料在检验检测过程中，材质检测技术是常用的一种技术方法。其一，可采取红外光谱法，分析食品塑料包装的红外光谱特征，然后对样品的红外吸收谱进行检测，明确其中的成分与结构，进而鉴别塑料包装的材质与食品安全标准是否相符。其二，采取热分析法，如热重分析法（TGA）、差示扫描量热法（DSC）等，然后对样品处于不同温度下的质量变化或者热量释放，对其热性能与成分进行评估，进而判别材质是否真实。其三，采取核磁共振（NMR）技术，借助核磁共振仪器对样品当中的核磁共振信号进行检测，如氢、碳、氧等，并明确其化学成分与结构，使材质检测具备准确可靠的数据支撑。其四，采取X射线衍射（XRD）分析法，对食品包装材料的晶体结构与结晶度加以明确，进而辅助鉴别材质的具体类型。

具体情况具体分析，例如相关质检单位考虑到食品用塑料包装的毒性风险主要来源树脂基材和添加剂，因此选择

了等离子发射光谱仪 (ICP-OES) 和液相色谱 - 质谱联用仪 (LC-MS)，能够对包装材料当中的铅、镉、汞等重金属，还有邻苯二甲酸酯类增塑剂、双酚 A 等内分泌干扰物的含量进行同时检测^[2]。尤其是在聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 瓶片检测过程中，采取气相色谱 - 质谱联用法 (GC-MS)，能够将再生树脂当中残留的乙醛、苯乙烯等挥发性有机物精准测定出来，保证再生材料与《食品安全国家标准 食品接触用塑料材料及制品》中的相关标准相符。

2.2 物理性能检测技术

食品用塑料包装材料采取物理性能检测技术过程中，需检测的项目较多，主要包括外观检验、尺寸检验、机械性能测试、跌落实验等^[3]。具体而言，对食品用塑料包装材料进行检验检测，主要是为了保证食品用塑料包装的功能性。相关质检单位考虑到食品包装的密封性、抗冲击性会使食品质量受到影响，因此采取了多项物理性能检测技术，具体如下：

热封强度测试。通过万能材料试验机的应用，用每分钟 300mm 的拉伸速度对热封边抗拉强度进行测试，保证复合膜热封强度 $\geq 15\text{N}/15\text{mm}$ ，进而使运输过程中破袋问题避免发生。

抗跌落性能测试。通过对 1.8 米高度自由落体进行模拟，对瓶装饮料、调味品等包装的抗冲击性进行检测，要求跌落之后没有破裂、泄漏等质量隐患问题。

阻隔性能测试。利用氧气透过率测试仪和水蒸气透过率测试仪，对包装材料对氧气、水蒸气的阻隔效果进行检测。比如，在对高阻隔性乙烯 - 乙烯醇共聚物 (EVOH) 共挤膜进行检测过程中，规定氧气透过率需 $\leq 0.5\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot 0.1\text{MPa})$ ，水蒸气透过率 $\leq 0.5\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ ，以此使相关易氧化食品的保质期得到有效保障，如咖啡、坚果等。

2.3 化学安全检测技术

食品用塑料包装材料的化学安全检测技术方法较多，包括重金属、总迁移量、塑料剂、溶剂残留、脱色试验检测等。其中，在重金属检测过程中，可采取电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS 法)，对塑料包装当中铅、镉、汞、铬等重金属含量进行检测，保证各项重金属含量与国家标准限值相符。在总迁移量检测过程中，可采取全迁移池法，对塑料包装处于特定条件下向食品中迁移的非挥性物质总量进行评估，保证不高于规定值，如水基食品的非挥性物质总量不能 $\geq 10\text{mg}/\text{dm}^2$ 。在塑化剂检测过程中，可利用气相质谱联用法 (GC-MS 法) 对邻苯二甲酸酯类等塑化剂含量进行检测，特定物质限制控制在 $\leq 0.01\%$ 。在溶剂残留检测过程中，可采取顶空气相色谱法 (HS-GC) 法对塑料包装中的溶剂残留量进行检测，总量控制在 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^2$ ，单一溶剂残留控制在 $\leq 3\text{mg}/\text{m}^2$ 。在脱色试验检测过程中，可采取沾有植物油 / 乙醇的棉布对塑料包装表面进行擦拭，观察有无脱色，保证印

刷油墨避免迁移到食品当中。

以其中的迁移测试技术为例，国内相关企业生产的一次性塑料餐盒，通过市场抽检显示总迁移量超标，标准限值为 $\leq 10\text{mg}/\text{dm}^2$ ，但实测结果为 $15\text{mg}/\text{dm}^2$ 。实际检测期间，首先选择模拟物，即结合餐盒用途，比如盛装热汤，将 10% 乙醇当作模拟物。其次，进行迁移测试，处于 70℃ 温度条件下浸泡 2 小时之后，利用 GC-MS 法对模拟物当中的有机物迁移量进行检测。此外，通过成分分析，结果显示餐盒当中回收料含量偏高，致使低分子量聚合物析出。针对检测结果，该企业采取降低回收料比例至 $< 30\%$ ，同时增加热稳定剂添加量，通过复检之后总迁移率下降到 $8\text{mg}/\text{dm}^2$ ，与标准限值相符。

2.4 微生物检测技术

除上述检验检测技术以外，针对食品用塑料包装材料还可以采取微生物检测技术。其一，可进行细菌总数检测，用于对塑料包装表面的微生物污染程度评估。其二，可对大肠菌群进行检测，即检测塑料包装表面有无大肠菌群等致病菌。其三，可对霉菌与酵母菌进行检测，主要对塑料包装处于潮湿环境下的微生物稳定性情况进行客观科学评估。

以国内某企业生产的一次性饮料杯市场抽检为例，抽检结果显示有微生物污染风险存在，容易引发食品安全问题。检验检测工作人员在实际检测期间，首先，进行样品采集，基于生产线将 30 个代表性样品抽取出来，覆盖各批次与生产时间。其次，进行细菌总数检测，利用平板计数法，检测结果为 $15\text{CFU}/\text{cm}^2$ ，高于标准限值的 $\leq 10\text{ CFU}/\text{cm}^2$ ，超标 50%。再则，进行大肠菌群检测，选择使用多管发酵法，检测结果显示“呈阳性”，而标准要求明确“不得检出”，说明材料受粪便污染。最后，进行沙门氏菌检测，利用聚合酶链式反应 (PCR) 技术，检测结果显示“呈阳性”，标准要求明确“不得检出”，进一步明确有致病菌污染存在。针对上述检测结果，该企业采取了一系列的整改方案，即：

(1) 优化改善生产环境，通过对生产车间全面消毒处理，并增加适量的空气净化设备，使菌落总数从原本的 $500\text{CFU}/\text{m}^3$ 下降到 $100\text{CFU}/\text{m}^3$ 。(2) 优化工艺，通过对热封温度从 180℃ 调整到 200℃，并将热封时间从 0.5 秒延长到 0.8 秒，保证封口强度 $\geq 15\text{N}/15\text{mm}$ 。(3) 控制原料质量，通过对供应商的更换，选择符合质量标准的食品级聚乙烯 (PE) 原料，保证重金属含量控制在标准限值以下，如铅含量控制在 $\leq 1\text{mg}/\text{kg}$ 。整改之后结果显示，细菌总数检测值为 $8\text{CFU}/\text{cm}^2$ (达标)，未检出大肠菌群与沙门氏菌，说明本次整改效果显著。

3 食品用塑料包装材料的质量控制措施分析

3.1 原材料采购与验收质控

为控制食品用塑料包装材料的质量，在采取上述各项技术严格检测材料质量的基础上，还有必要采取有效措施，

做好原材料采购与验收质量控制^[4]。

一方面，严格审核供应商资质，即在严格筛选供应商的基础上，要求供应商提供相应的资质，比如生产许可证、ISO 9001 以及 ISO 22000 等质量管理体系认证，还包括第三方检测报告等。同时，对供应商定期进行现场审核，评估其生产环境、工艺稳定性以及原料溯源能力等，确保各项要求均达标。比如，相关企业在采购 PE 原料过程中，需要求合作供应商提供 SGS 检测报告，确保铅、汞、镉等重金属含量≤1mg/kg，并通过 FDA 21 CFR 177.1520 认证，保证原料与美国食品接触材料标准相符。

另一方面，在原材料采购过程中，需对原料各项性能质量进行检测。通过对各批原料厚度、拉伸强度、断裂伸长率等测试，保证原料物理性能与产品标准相符。并采取红外光谱、GC-MS 等技术方法，对原料的重金属、塑化剂、溶剂残留等有害物质含量进行检测，保证比法规限值低。并进行微生物检测，比如针对直接接触食品的原料，可对细菌总数、大肠菌群等微生物指标进行检测，避免出现污染等情况。

此外，在原材料验收后，需加强储存管理。可以根据材质进行分类储存，预防不同原料出现交叉污染情况。同时，对仓库温湿度合理控制。比如对 PE 材料，储存温度控制在 30℃以下，相对湿度控制在 60% 以下，表面原料受潮、老化、变质。并遵循“先进先出”原则，对原料库存定期进行判断，预防出现超有效期使用原料情况的发生。

3.2 生产过程质控

要想控制食品用塑料包装材料的质量，还需加强材料生产过程质量控制。结合实践工作经验来看，其材料生产过程质控要点如下：

材料工艺参数标准化控制。将详尽完善的工艺操作规程（SOP）制定出来，对包装材料挤出、吹塑、印刷、复合等工序的温度、压力、速度等关键参数逐一明确。同时，采取自动化控制系统（PLC），对各项工艺参数实时监控，使人为操作误差减少。

加强在线质量检测。在包装材料厚度均匀性检测中，可利用在线测厚仪对薄膜厚度进行实时监测，将偏差控制在±5% 范围内。在外观缺陷检测方面，可采取机器视觉系统，对包装材料的褶皱、黑点、穿孔等缺陷自动识别，然后将不良品及时剔除。对于热封强度检测，主要基于热封工序之后，合理设置抽样检测点，采取热封强度测试仪对封口质量进行验证。

做好设备维护及清洁处理。将设备预防性维护计划制定好，并对磨损部件低谷期更换，比如螺杆、模头等，保证

设备处于安全可靠的运行环境当中。并基于生产前后对设备展开完全清洁处理，避免出现交叉污染情况，比如采取食品级清洗剂对印刷辊筒进行清洗处理。

3.3 成品检验质控

为确保食品用塑料包装材料的质量，需对包装材料成品进行质量检验，包括全项目检测、批次管理与追溯、型式检验以及定期抽检等。

在全项目检测过程中，需对成品的物理性能进行测试，如拉伸强度、断裂伸长率、耐穿刺性以及跌落性能等，保证包装符合运输、使用等需求。同时，做好化学安全评估，采取总迁移量测试以及高锰酸钾消耗量测试，使材料的安全性得到有效保证。并进行微生物限值检测，即检测成品的细菌总数、霉菌酵母菌等相关指标，保证与相关质量标准要求相符。

在批次管理及追溯过程中，针对各批成品给予唯一追溯码，并详细记录生产日期、原料批次、检测数据等相关信息。同时，构建质量档案，方便问题的追溯，针对出现问题的产品及时召回处理。

在型式检验及定期抽检过程中，一方面基于新产品投产之前，或者当工艺发生变更情况下，需展开型式检验，以此检验产品是否与质量表相符。另一方面，对留样产品定期进行加速老化试验，以评估材料质量、安全性是否长期稳定。

4 结语

综上所述，从食品安全及食品用塑料包装材料质量提升等角度考虑，做好食品用塑料包装材料的检验检测工作至关重要。在实际检验检测过程中，需合理应用材质检测技术、物理性能检测技术、化学安全检测技术以及微生物检测技术。此外，还有必要加强原材料采购与验收、生产过程、成品检验质控，以此全面保障食品用塑料包装材料质量，进一步推动我国食品包装行业高质量、稳定可持续发展。

参考文献

- [1] 田陆川,姜红.食品塑料包装材料的检验研究进展[J].安徽化工,2021,47(01):4-7.
- [2] 邵卫卫,姜方方,周敏.食品用塑料包装材料中邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯测量结果不确定度评定[J].塑料包装,2025,35(01):58-62.
- [3] 朱金红,张欣涛.食品接触用塑料包装材料构成及有害物质检测技术浅析[J].山东化工,2024,53(23):147-149.
- [4] 王凤,胡力主,王妍力,赵潭.食品用塑料包装、容器、工具等制品生产企业的常见问题分析及对策——基于江西省食品相关产品质量提升行动[J].现代食品,2023,29(19):42-45.

Industrialization analysis and research of production servo driver

Tian Li

Zhongchuan Haiwei High-tech Co., Ltd., Zhengzhou , Henan, 450015, China

Abstract

As a core component of automation equipment, servo drives play a vital role in China's industrial manufacturing sector. With the continuous advancement of localization efforts, this paper conducts a systematic analysis and research on the industrialization process of domestically produced servo drives. First, by examining market demands and technological development trends of servo drives both domestically and internationally, the background and necessity of industrializing domestic servo drives are clarified. Second, employing supply chain analysis methods, the study thoroughly explores key factors including supply chain structure, core technologies, production processes, and cost control for domestic servo drives. The research reveals that through optimized design, improved manufacturing techniques, and strengthened quality control, domestic servo drives have gradually approached international advanced levels in performance. However, brand influence and market trust remain primary challenges. Finally, the paper proposes several strategies to promote industrialization of domestic servo drives, including enhancing core technology R&D, expanding domestic and international markets, improving brand building, and strengthening policy support. This study aims to provide theoretical support and practical guidance for technological advancement and market expansion of domestic servo drives.

Keywords

domestic servo driver; industrialization; supply chain structure; core technology; market expansion

国产化伺服驱动器的产业化分析与研究

李甜

中船海为高科技有限公司，中国·河南郑州 450015

摘要

伺服驱动器作为自动化设备的核心部件，在我国工业制造中扮演着至关重要的角色。随着国产化趋势的不断推进，本文对国产伺服驱动器的产业化进程进行了系统的分析和研究。首先，通过分析国内外伺服驱动器的市场需求和技术发展状态，明确了国产伺服驱动器产业化的背景和必要性。其次，论文采用产业链分析方法，详细探讨了国产伺服驱动器的供应链结构、核心技术、生产工艺及成本控制等关键因素。研究发现，通过优化设计、提升制造工艺和强化质量控制，国产伺服驱动器在性能上已逐渐接近国际先进水平。然而，品牌影响力和市场信任度仍是其面临的主要挑战。最后，文章提出了几点推动国产伺服驱动器产业化发展的策略，包括加强核心技术研发、拓展国内外市场、提升品牌建设和政策支持等。研究意在为国产伺服驱动器的技术进步和市场拓展提供理论支持和实践指导。

关键词

国产伺服驱动器；产业化；供应链结构；核心技术；市场拓展

1 引言

在我国的工业自动化领域中，伺服驱动器扮演着枢纽的角色，其性能直接关系到整个生产线的效率及精准度。伴随着工业 4.0 的全球化浪潮，以及“中国制造 2025”计划的实施，国产伺服驱动器的研发及产业化不断受到政府和市场的重视。为了降低依赖进口的成本和风险，提高国内制造业的自给自足能力，本文着重分析了国产伺服驱动器产业化的实际路径和所面临的关键挑战。首先，通过对当前国内外伺

服驱动器市场需求和技术发展状况的对比分析，可以看出，尽管国产伺服驱动器在技术和性能上已展现出强劲的追赶势头，但在品牌建设、市场认可度等方面仍需突破。其次，我们通过产业链的分析，进一步探讨了国产伺服驱动器的供应链结构、核心技术梯队、生产工艺革新以及成本效益管理等方面的优化策略。研究指出，通过技术创新和生产过程的优化，国产伺服驱动器能够有效提升产品的市场竞争力。研究重点在于揭示国产伺服驱动器产业化的现状与问题，并提出相应的发展策略，为相关企业和政策制定者提供决策参考。本文旨在推动国产伺服驱动器向技术成熟、市场广泛的方向发展，以支持国内外市场需求的持续扩张。最终，通过系统的分析和研究，希望为国产伺服驱动器在全球自动化设

【作者简介】李甜（1984-），中国内蒙古额尔古纳人，女，本科，助理工程师，从事人力资源、产业化发展研究。

备市场中的持续竞争和成长提供坚实的理论和策略支持。

2 国产伺服驱动器市场与技术概况

2.1 市场需求分析

伺服驱动器作为工业自动化领域的重要组成部分，其市场需求受到多种因素的驱动^[1]。在现代制造业中，自动化水平的提升直接推动了高性能伺服驱动器的需求增长^[2]。国内经济结构逐步转型升级，对精密制造、智能装备等领域的技术依赖逐渐增加，使得伺服驱动器在数控机床、工业机器人等设备中的应用愈发广泛。在全球范围内，绿色制造理念的普及进一步扩大了高效节能伺服驱动器的市场空间。国内政策推动工业智能化发展，“工业互联网”及“智能制造2025”等战略的实施，加速了对国产伺服驱动器的市场依赖。尽管国际品牌在高端领域占据较大优势，但国产伺服驱动器在中低端市场已具备较强竞争力，市场需求呈现持续增长的态势，为产业化发展提供了有力支持。

2.2 技术发展趋势

随着工业自动化技术的快速发展，伺服驱动器在精确运动控制领域持续突破，驱动技术正向高精度、高效率方向演进。目前，数字化、智能化已成为伺服驱动器技术升级的核心趋势，尤其是在高速、高动态性能等方面取得显著进展。基于嵌入式技术的伺服驱动器逐步取代传统模拟驱动器，凭借更高的控制精度和灵活性，在复杂工业环境中展现出卓越的适应性。融合工业物联网和人工智能的伺服驱动技术加速发展，进一步推动系统数据交互、高效运行及远程诊断等功能的实现。在技术迭代推动下，国产伺服驱动器正逐渐缩小与国际先进水平的差距。

2.3 国产与国际品牌比较

国产伺服驱动器与国际品牌在技术性能、市场影响力及品牌认知度方面存在显著差距。国际品牌通常在技术创新、产品稳定性及市场规模上占据优势，且在高端制造领域具有较强的市场主导地位。而国产品牌通过不断提高核心技术水平，在中低端市场取得了一定的竞争优势，但在品牌信任度和全球化市场布局方面仍需改进。这种差距促使国产品牌加快技术突破与品牌建设，以缩小与国际品牌的竞争差距。

3 国产伺服驱动器的供应链与核心技术

3.1 供应链结构详解

国产伺服驱动器的供应链结构由多个关键环节组成，与产业链的完整性和技术水平密切相关。其供应链通常覆盖元器件供应、驱动器组装、检测调试和售后的多个阶段^[3]。元器件供应作为供应链的起点，包括芯片、电源模块、传感器等核心部件，在质量保证和性能稳定方面具有决定性作用。目前国内部分企业已实现部分关键元器件的自主生产，但高端元器件仍依赖进口。驱动器组装环节涉及精密加工与集成技术，要求生产设备和工艺具有较高可靠性，以确保驱动器性能。检测调试环节对供应链效率和产品质量发挥重要

作用，先进的检测手段有助于发现潜在问题并提升合格率。售后服务涵盖维修与升级，构成供应链的价值延伸部分，直接影响用户体验与市场反馈。构建完整、高效的供应链结构是推动国产伺服驱动器产业化的重要基础。

3.2 核心技术探索

国产伺服驱动器的核心技术主要集中于高性能伺服算法、电机控制技术及关键硬件设计领域^[4]。高性能伺服算法是伺服驱动器的技术核心，包含速度环、位置环及电流环的精确控制算法，其优化直接影响驱动器的动态响应和控制精度。在电机控制方面，先进的矢量控制和磁场定向控制技术已被广泛应用，以提升系统效率和稳定性。硬件设计方面，功率模块的可靠性优化、高密度集成设计及多核处理器的应用显著增强了国产伺服驱动器的计算能力和转换效率。这些技术的推进在一定程度上缩小了与国际先进水平的差距，为国产品牌的市场拓展提供了坚实的技术基础。

3.3 制造工艺与成本控制

制造工艺的提升在国产伺服驱动器产业化中至关重要，通过高精度零部件加工、智能化生产线应用和严格的质量检测手段，有效提高产品性能与一致性。成本控制则依赖于优化供应链管理、批量化生产降低单件成本以及国产化零部件替代进口元件，实现经济性与品质的平衡。

4 国产伺服驱动器的市场表现与挑战

4.1 性能评估与国际接轨

国产伺服驱动器在性能方面的进步显著，其与国际先进水平的接轨表现为多个维度的逐步提升。功能性方面，国产品牌已具备较高的精准度和响应速度，能够满足复杂工业场景中对伺服驱动的应用需求。一些国产品牌在位置控制、速度控制及力矩控制等关键技术上取得突破，为其核心性能增添了竞争力。通过研发高效率模块和优化驱动算法，国产伺服驱动器的能耗水平和运行稳定性有所提升，为智能化和绿色化制造提供了支持。

与国际领先品牌相比，国产伺服驱动器在长期使用的可靠性、极端环境适应能力以及高端领域的应用效果上仍显不足。这些差距在一定程度上限制了国产品牌进入更广泛的国际市场。性能的全面提升仍需围绕质量管控、材料优化和技术迭代等方面的持续探索^[5]。产业资源的集中和技术标准化也将成为推动国产伺服驱动器接轨国际的重要手段。

4.2 品牌与市场信任度分析

国产伺服驱动器在品牌与市场信任度方面面临一定挑战。尽管其性能逐步接近国际先进水平，但品牌影响力较弱制约了其市场认可度。消费者对国产品牌在技术稳定性、长期可靠性以及售后服务方面存在顾虑，导致市场接受度偏低。国际品牌凭借长期积累的市场信誉，依然占据主导地位，形成一定竞争壁垒。国产品牌在品牌建设和用户认知方面仍需发力，通过提升产品质量、强化技术支持并塑造良好的市

场口碑，以逐步提高用户信任度和市场占有率为。这不仅需要企业内部改进，也依赖于行业整体的协同努力。

4.3 现存问题与挑战

国产伺服驱动器在市场拓展中面临品牌影响力不足和市场信任度较低的问题，部分用户对其质量稳定性和长期可靠性存疑。核心零部件供应链仍存在瓶颈，技术自主化程度有待提高。行业标准化建设滞后，企业间缺乏协同机制，限制了产品的进一步推广与产业化发展。

5 推动国产伺服驱动器产业化的战略方案

5.1 加强技术创新与研发

加强技术创新与研发是推动国产伺服驱动器产业化的关键路径。优先集中资源攻克高性能伺服驱动技术中的核心难题，如高精度控制算法、高效能功率模块及自适应动态控制技术。通过加大研发投入，鼓励产学研用深度合作，可实现技术创新的链条式贯通，提高技术攻关的成功率。在优化现有技术的面向未来工业需求，加强对智能化、模块化及绿色化伺服驱动技术的前瞻性研究，推动技术能力的持续提升。

建立开放式技术平台，促进国产厂商间的协同创新，通过资源共享与联合攻关降低独立研发成本并缩短研发周期。加强知识产权的保护与布局，提高技术研发成果的市场转化效率，为国产伺服驱动器构建技术差异化和竞争优势。

5.2 市场扩展策略

市场扩展策略在推动国产伺服驱动器产业化过程中具有重要意义。针对国内市场，应充分挖掘智能制造、机器人产业、新能源设备等领域的潜力，制定精确的市场推广计划，结合本土需求优化产品功能与服务，以抢占市场份额。对于国际市场，则需积极参与国际展会及技术交流活动，提高产品曝光率与竞争力，加强出口管理以满足不同国家和地区的技术标准与认证要求。通过构建多元化的销售渠道，与海外经销商建立长期合作关系，提升国产伺服驱动器在全球市场中的认知度与市场地位，从而实现规模化发展。

5.3 政策支持与品牌建设

政策支持与品牌建设是推动国产伺服驱动器产业化的的重要策略。加强政策支持有助于优化产业发展环境，通过税

收优惠、专项补贴和技术研发基金等措施，可有效降低企业研发和生产成本。在品牌建设方面，应注重提高品牌知名度和用户认可度，通过参与国内外展会、加强市场宣传及提供优质售后服务，树立国产伺服驱动器的良好口碑。鼓励国内企业与高校、科研机构合作，共同建立技术标准，提升国产品牌的国际竞争力。

6 结语

本文系统地分析了国产伺服驱动器产业化的进程，并针对国内外市场需求及技术发展状况提出了一系列的策略和建议。通过产业链分析，本研究揭示了国产伺服驱动器在供应链结构、核心技术、生产工艺及成本控制等方面的关键问题和优势。尽管国产伺服驱动器在性能上已显著提升，并逐步接近国际领先水平，但品牌影响力和市场信任度的不足仍旧是限制其进一步发展的重要因素。为了推动国产伺服驱动器的产业化发展，提升其在国内外市场的竞争力，研究建议加强核心技术的研发投入，优化制造工艺，同时，加大品牌建设和市场推广力度，以改善市场接受度和信任问题。政策层面的支持也是不容忽视的推动力，应积极争取更多政策倾斜与资金支持，为产业化营造良好的外部环境。尽管本文对国产伺服驱动器产业化的多个方面进行了深入研究，但由于数据和实地调研的局限性，部分分析可能存在偏差。未来的研究可进一步探讨国产伺服驱动器在特定应用场景下的性能表现及用户满意度，以提供更加具体和针对性的改进措施。同时，随着国内外市场环境的变化，对策略的持续更新和调整也是确保国产伺服驱动器长远发展的关键。

参考文献

- [1] 万春燕,贾向锋,王定亚,刘文霄,王小静,李娜.水下采油树闸阀及驱动器国产化关键技术分析[J].石油机械,2021,49(09):73-78.
- [2] 尚斌,莫冰,王春川,杨剑锋,李小兵,刘文威.伺服驱动器热仿真分析方法研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2022,40(02):1-5.
- [3] 区均灌.伺服驱动器转速控制技术探讨[J].写真地理,2020,0(16):0215-0216.
- [4] 曲建华.伺服驱动器控制方式的研究分析[J].中国科技期刊数据库 工业A,2023,(07):0175-0178.
- [5] 马宇,吴庆勋,李如飞,刘昊,张利剑.外骨骼伺服驱动器效率提升研究[J].载人航天,2022,28(02):223-229.

Calculation and analysis of end face pressure of gas-liquid two-phase mechanical seals under variable operating conditions

Hongguo Xu¹ Jie Chen²

1. Sichuan Kehong Petroleum and Natural Gas Engineering Co., Ltd., Chongqing, 404100, China

2. Southwest Oil and Gas Field Cost Center Luzhou Cost Station, Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract

Based on the theory of variable operating conditions mechanical seals, mechanical seals can be divided into three working states according to the difference in phase transition radius during normal operation: liquid phase seal, vapor phase seal, and gas-liquid mixed phase seal. This article presents a numerical simulation of the end face pressure distribution of mechanical seals under both conventional and variable operating conditions, and explores in depth the influence of external pressure on the phase transition radius. Research has shown that pressure fluctuations in the boiling zone are the key factor causing the sealing end face to open under variable operating conditions, while the liquid film flash caused by changes in phase transition radius is the main cause of sealing failure. When the pressure in the sealed chamber drops sharply, the pressure distribution on the end face changes, and the phase transition radius changes accordingly, causing flash evaporation and pushing the moving ring to move axially. If the dynamic ring fails to reset in time after the chamber pressure is restored, the seal will not be able to close, resulting in failure.

Keywords

mechanical seal; Variable operating conditions; End face pressure; Phase transition radius; flash evaporation

变工况条件下汽液两相机械密封端面压力计算分析

徐红果¹ 陈婕²

1. 四川科宏石油天然气工程有限公司, 中国·重庆 404100

2. 西南油气田造价中心泸州造价站, 中国·四川泸州 646000

摘要

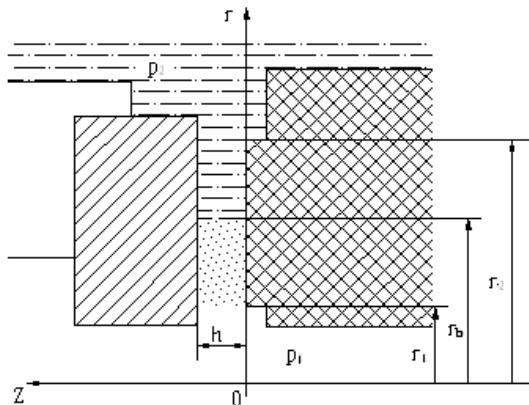
基于变工况机械密封理论, 机械密封在正常运行过程中, 依据相变半径的差异, 可分为三种工作状态: 液相密封、汽相密封及汽液混相密封。本文通过数值模拟, 绘制了机械密封在常规与变工况条件下的端面压力分布图, 并深入探讨了外部压力对相变半径的影响。研究表明, 沸腾区压力波动是导致密封端面在变工况下开启的关键因素, 而相变半径变化引发的液膜闪蒸则是密封失效的主要原因。当密封腔压力骤降时, 端面压力分布发生改变, 相变半径随之变化, 引发闪蒸现象, 推动动环沿轴向位移。若腔压恢复后动环未能及时复位, 则密封将无法闭合, 导致失效。

关键词

机械密封; 变工况; 端面压力; 相变半径; 闪蒸

1 引言

机械密封在常规运行下的工作状态, 可根据变工况理论中的相变半径不同进行划分, 主要存在液相、汽相和汽液混相三种。其中, 汽液混相状态可进一步细分为似液相和似汽相。图 1 展示了所对应的基本结构:



【作者简介】徐红果(1986—),男,中国重庆人,硕士,

工程师,从事油气储运研究。

P₁-大气压侧压力 P₂-介质压力 h-端面液膜厚度
r₁-密封环内径 r₂-密封环外径 r_b-汽化半径

图 1 机械密封端面结构模型

2 变工况机械密封端面压力计算的理论依据

在机械密封的工作参数确定后，可通过数值分析获取其端面的相变半径、温度场与膜压场，据此进一步评估变工况下动环的受力与运动响应。

初始假设：为相变半径 r_c 设定一个初始值。

参数计算：根据公式(1)计算该半径下的相变温度 T_c ，并据此通过流体物性参数确定饱和蒸汽压力 p_c 。

泄漏量核算：利用公式(2)与(3)，分别计算得出液相泄漏量 m_l 与汽相泄漏量 m_v 。

收敛性判断：比对 m_l 与 m_v 的数值。若二者相等，则当前 r_c 即为真实解；否则，返回步骤 1 调整 r_c 值，并循环迭代直至收敛。

同时，对于本实验中的外侧密封情况，其端面温度变化规律可由公式(4)予以表达。：

$$T(r)-T=\frac{\mu_f \omega^2 r^3}{2kh} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left[1 - \left(\frac{r_b}{r_2} \right)^{2n-3} \right] \right\} \quad (1)$$

$$q_1 = q = -\frac{\pi \rho h^3}{6\mu} \cdot \frac{p_2 - p_b + \frac{3\rho \omega^2}{20} (r_2 - r_b)}{\ln r_2 - \ln r_b} \quad (2)$$

$$q_2 = q = -\frac{\pi h^3 (p_b^2 - p_1^2)}{12\mu R T \ln(r_b / r_1)} \quad (3)$$

$$T(r)-T=\frac{\mu \omega^2 r^3}{2kh} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left[1 - \left(\frac{r_1}{r} \right)^{2n+4} \right] - \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left[1 - \left(\frac{r}{r_2} \right)^{2n-3} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\text{其中: } A_n = \frac{1}{2(n+4)} \cdot \frac{[(2n)!]^2}{(n!)^4 \cdot 2^{4n}}, \quad B_n = \frac{1}{2(n-4)} \cdot \frac{[(2n)!]^2}{(n!)^4 \cdot 2^{4n}}$$

式中 T ——被密封液体进入密封面前的体积平均温度(℃)；

k ——两固体表面导热率的平均值；

ω ——动环转动角速度(rad/s)；

h ——端面间液膜厚度(m)；

μ ——粘度(kg·s/m²)。

在计算中，由克拉普朗方程可以得出温度 T_b 与 p_b 的关系：

$$\frac{p_b}{p} = \exp \left[-\frac{h_{fg}}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

$$p = p_2 + \frac{(p_2 - p_b) + \frac{3\rho \omega^2}{20} (r_2 - r_b)}{\ln(r_2 / r_b)} \cdot \ln(r / r_2) - \frac{3\rho \omega^2}{20} (r - r_2) \quad (6)$$

$$p = \left[p_1^2 + \frac{p_b^2 - p_1^2}{\ln(r_b / r_1)} \ln(r / r_1) \right]^{1/2} \quad (7)$$

此种方法确定饱和蒸汽压力同实际压力很为接近。其

中 p, T, h_{fg} 分别为饱和蒸汽压力、饱和温度和汽化潜热。当 p, T, h_{fg} 为常数时，由(1)式得出相变处饱和温度 T_b 后，既可得出相应的饱和压力 p_b 。由(6)、(7)式既可得出密封端面间压力分布。其计算解法流程图如图2所示。

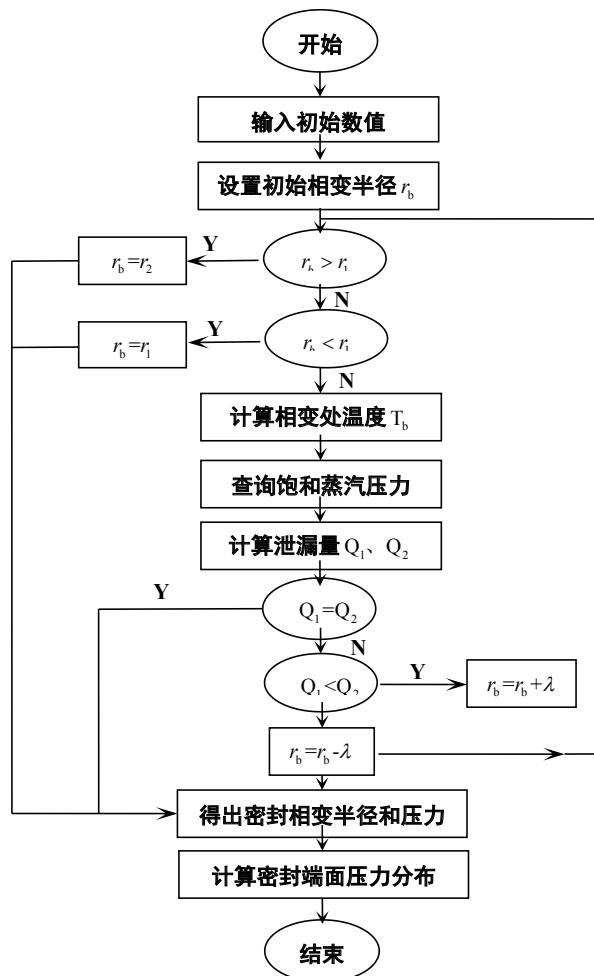


图 2 机械密封端面压力计算流程

3 变工况机械密封端面状况的实验及稳定性分析

3.1 实验条件

本实验以水为介质，研究对象为一套非平衡型机械密封装置，其核心结构参数如下：轴径 60mm，密封端面内径 30mm，外径 40mm。其中，动环由碳化钨制成，静环则采用浸呋喃树脂碳石墨材料。通过数值模拟，计算了在压力 $p_i=0.5 \text{ MPa}$ 、 $p_2=0.1 \text{ MPa}$ ，温度 $T=100^\circ\text{C}$ 时的端面压力分布，以及变工况瞬时($t=0^+$)的压力分布，进一步分析了外部压力对相变半径的影响。相变处参数为， $p_c=0.2 \text{ MPa}$ 。

3.2 实验结果及对比分析

3.2.1 正常工作情况下机械密封端面压力分布

在常规工况下，通过数值计算得出相变半径 $r_c=35 \text{ mm}$ 饱和压力 $p_c=0.15 \text{ MPa}$ 。结合公式(3)与(6)，得到端面压力

分布如图 3 和图 4 所示。

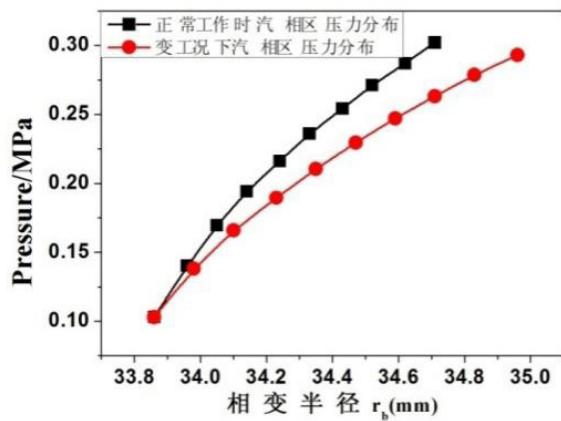


图 3 正常工作时、变工况下机械密封端面汽相区压力分布

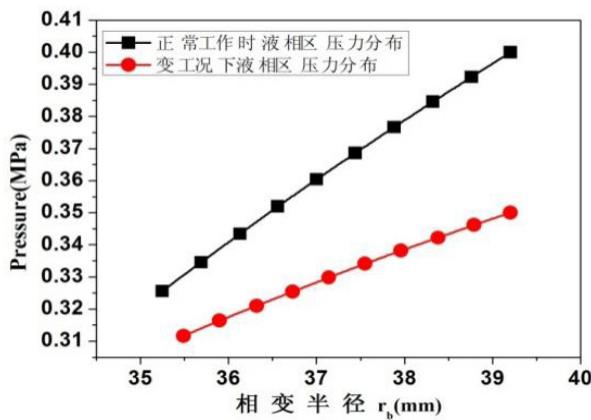


图 4 正常工作时、变工况下机械密封端面液相区压力分布

3.2.2 变工况下机械密封端面压力分布

当密封腔压力骤降 $\Delta p=0.3 \text{ MPa}$ 时, 端面压力分布发生变化, 相变半径与饱和压力分别变为 $r_c=33 \text{ mm}$ 、 $p_c=0.12 \text{ MPa}$ 。在闪蒸瞬间:

$$\Delta h = h_f - h_g$$

其中 Δh 为液体由不饱和至饱和状态的瞬时焓变 (kJ/kg) , h_f 和 h_g 分别为饱和液体与蒸汽的焓值。

设沸腾区压力为 p_b , 抽空瞬间饱和温度为 T_s , 假设端面体积不变, 由公式(8)可得沸腾区平均压力 p_b' , 其值约为其他区域的 20 倍, 表明沸腾区压力是导致密封端面开启

的主要因素。

3.2.3 正常工况下密封端面压力分布与变工况下密封端面压力分布及其失效分析

常规工况下, 液相区膜压近似线性变化, 汽相区则呈对数规律。变工况发生时, 液相区压力变化较小, 汽相区变化显著但仍在可控范围。若密封处于似液相状态, 端面压力波动对密封性能影响有限。由此可见, 液相密封稳定性优于混相密封, 而在混相密封中, 似液相状态又优于似汽相状态。

变工况下, 若密封处于混相状态, 相变半径变化导致沸腾区液膜压力低于饱和压力, 引发剧烈闪蒸, 瞬时压力增幅达 20 倍。此时, 沸腾区压力急剧上升成为推动动环轴向位移的主导因素, 而汽相区与液相区的影响相对较小。

综上, 变工况下密封腔压力变化引起端面压力重分布: 液相区变化平缓, 汽相区呈抛物线型变化, 沸腾区则因闪蒸而压力剧增。沸腾区压力波动是导致密封动环开启力变化并引发失效的核心原因。因此, 抗变工况密封的设计重点在于控制相变半径, 使其尽量处于液相状态, 或最小化混相状态下的半径变化, 从而抑制沸腾区扩展, 降低对动环开启力的影响。根据公式(9):

$$\rho \cdot \frac{p_2 - p_b + \frac{3\rho w^2}{20} (r_2 - r_b)}{\ln r_2 - \ln r_b} = \frac{(p_b^2 - p_i^2)}{2RT \ln(r_b / r_i)} \quad (9)$$

相变半径 r_c 受密封腔压力 p_i 、外侧压力 p_o 、相变温度 T_c 、相变压力 p_c 、端面内径 r_i 、外径 r_o 及角速度 ω 共同影响。其中 p_i 与 ω 由工况决定, 不可调整; 而 r_i 、 r_o 确定后, T_c 与 p_c 也随之确定。此时, 调节外侧压力(p_o)是控制相变半径、增强密封抗变工况性能的关键。

参考文献

- [1] 变工况下密封腔压力骤降导致端面压力重分布, 相变半径变化引发闪蒸, 推动动轴向位移。若腔压恢复后动环未能复位, 则密封失效。
- [2] 液相密封稳定性最高, 混相密封中似液相状态优于似汽相状态。
- [3] 相变半径变化导致的端面闪蒸是机械密封在变工况下失效的主要原因。
- [4] 通过调节外侧压力控制相变半径, 或采用辅助螺旋密封, 可显著提升密封系统的抗变工况能力。

Design & Implementation of Head-mounted Myopia Detection Device for Teenagers

Zhu Chen

Shanghai Kongjiang Senior High School, Shanghai, 200093, China

Abstract

Excessive exposure to electronic screens, insufficient outdoor activity time, improper eye usage habits and failure to timely grasp vision conditions among teenagers have become the main factors leading to their myopia. This study designs a head-mounted myopia detection device. Utilizing ultrasonic sensors for distance detection, the system converts measured distances into myopia levels through Arduino-based algorithms. Bluetooth-enabled signal transmission delivers real-time results via display and voice announcements, allowing users to monitor their visual acuity in real time. This portable device enables accurate myopia assessment at school or home, offering rapid testing speeds that not only facilitate vision tests every academic year but also help users track myopia changes, facilitating proper glasses prescription. With its compact design, user-friendly operation, and quick measurement capabilities, the device provides instant visual status updates, effectively preventing myopia progression among teenagers.

Keywords

Myopia Detection; Prevention; Ultrasonic Ranging; Bluetooth; Voice Broadcast; Vision Chart Calculation Principle

头戴式青少年视力检测装置设计与实现

陈竹

上海市控江中学，中国·上海 200093

摘要

青少年过度接触电子屏幕、户外活动时间不足、用眼习惯不当及视力情况未能及时掌握，已成为导致其近视的主要因素。针对青少年视力缺乏及时检测的问题，本研究设计一款头戴式近视度数检测装置。该装置借助超声波传感器完成距离检测，通过ARDUINO主控板依据特定算法将测得距离转化为近视度数，再利用蓝牙实现信号传输，最终在显示屏上呈现结果并进行语音播报，方便用户实时查看当前近视度数。此装置可助力近视人群在学校或家中随时获取较为准确的近视度数，且检测速度快，不仅便于学校每学年开展视力检测工作，还能帮助用户掌握自身近视度数变化情况，为配镜提供便利。该装置具有便携、易操作、检测迅速的特点，能让用户及时了解视力状况，有效预防青少年近视度数加深。

关键词

近视检测；预防；超声波测距；蓝牙；语音播报；视力表计算原理

1 研究背景与现状

据世界卫生组织研究报告显示，全球近视患者约 25 亿，中国近视人数达 6 亿，青少年近视率高居世界第一，且呈现出发病年龄小、发病率高、近视度数深的特点。国家卫健委《中国眼健康白皮书》披露，我国大学生近视总体发生率超 90%，儿童青少年总体近视发生率为 53.6%，其中小学生 47.2%、初中生 75.8%^[1]。

眼睛健康影响就业、学习与身心健康，《“十四五”全国眼健康规划(2021-2025 年)》强调眼健康是国民健康重要组成部分，需聚焦儿童青少年近视防治。《儿童青少年近视防控适宜技术指南》要求每学年开展不少于一次视力不良

检查，建立定期筛查制度，以及时发现问题、调整干预或验证配镜参数。

当前视力检测存在诸多痛点：市面筛查仪多基于“偏心摄影验光”原理，售价超 20 万元，成本高且需专业操作；非正规场所检测不规范致数据不准；医院检测集中在周末，常人满为患。而青少年视力定期筛查是近视预防的关键干预手段，需日常开展。因此，优化流程、减少人工、自动分析数据、呈现直观结果成为迫切需求。^[2]

本研究以单人自助检测为目标，通过硬件搭建与软件编程，构建头戴式自助视力检测仪器，实现近视检测居家化与校园化。

2 视力表检测原理

视力检测以视标为注视目标，视标多为 E 形、数字、汉字等图形，其可见清晰度与视标大小、观察距离相关，核

【作者简介】陈竹（2009-），女，中国山东济南人，从事视力检测研究。

心取决于视角——视标两端对眼节点的张角，视角越大，影像越大，视物越清。视力以最小视角衡量，视角越小视力越好，人类正常视力的最小视角公认为 1 分视角（1/60 度）。

以我国的视力表常用的 E 形视标（如图 1 所示，其每一笔画和空隙均等长）为例说明：视角与视标大小成正比，与观察距离成反比。如图 2 所示，把视标“E”某一笔画抽象成线段 AB=x 毫米，把眼节点抽象为点 N，则观察这一笔画的视角为 $\angle ANB$ ，N 到 AB 的距离（即观察距离）为 d 米， $\angle ANB=a$ 分。因为 AB 通常远小于 N 到 AB 的距离，所以可以近似地把 AB 看作弧长，把 N 到 AB 的距离看作相应的半径，则 $\angle ANB$ 就是相应的圆心角。根据角度与弧长、半径的关系以及单位的换算，可得 $a = \frac{60 \times 180x}{1000\pi d}$ （记为公式 *） ≈ 3.4377 （取 $\pi=3.14159$ ）^[3]。

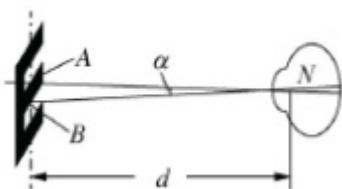


图 1

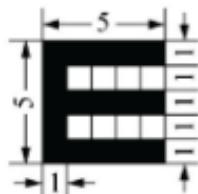


图 2

国际上主流视力记录方法对应不同数学模型：分数制：1862 年 Snellen 首创，公式 $V=d/D$ ，d 为检测距离，D 为正常人看清该视标的最远距离（设计距离），常见于英美国家^[4]。由视角公式可推得 $D=ad$ ，即视力值与视标大小成反比。小数制：1875 年 Monoyer 提出，用最小视角的倒数来表达视力，即 $V=1/a$ （a 为最小视角）。小数制视力表符合日常生活经验及小数使用习惯，但是，临幊上并不能直接以二者之差来表示或比较处理前后的视力变化。

对数制：1956 年我国缪天荣提出，基于视力与最小视角对数的正比例关系，定义 $V=5-\lg a$ （a 为最小视角），形成五分记录法，对应“标准对数视力表”，规定标准检测距离，为我国主流使用方法。

3 头戴式视力检测装置系统设计

本眼镜课题是设计一款适用人群广、结构简单、用材轻便、不受场景限制、易操作、无需专业人员、便携、检测快、准确率高、价格低的近视度数检测装置，帮助青少年在家或学校随时测近视度数，掌握度数变化，方便近视防控。

3.1 需求分析

使用场景主要为学校教室和家庭，检测逻辑为：被检者站于特定距离，确定能清晰读取的最佳视标行，通过检测距离与视标设计距离的关系，结合视角原理计算度数。

装置设定测量范围为 5 米以内（符合国际标准检测距离），采用头戴式眼镜作为数据采集端以提升操作效率。系统分为信息采集与接收两个终端，避免移动限制；数据传输采用蓝牙通信，保障稳定性与及时性。接收端配备显示与语音播报功能，实现结果即时反馈。

3.2 系统设计

本装置以国际标准视力表视角原理为基础，通过超声波测距模块获取视标实际检测距离 d，结合分数制视力公式 $V=d/D$ （D 为视标设计距离）计算视力值。

3.2.1 视力计算的理论依据

标准视力表中，不同视力值对应的视标在 5 米标准检测距离下的设计距离 D 固定。结合 $D=ad$ ，可计算各视标在标准检测距离 5 米下的设计距离，如表 1 所示。例如，视力 1.0 对应的视标设计距离为 5 米，视力 0.5 对应的视标设计距离约 9.98 米。

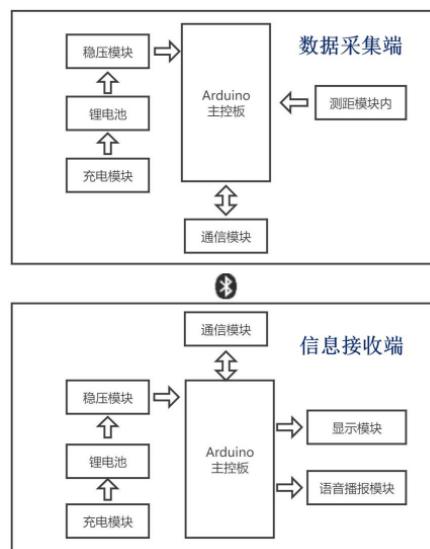


图 3

表 1 视力值与视标设计距离对应关系

视角 / 分	视角对数	对数制视力	小数制视力	设计距离(m)	标准检测距离(m)	分数制视力
$10.0000(10^{10})$	1.00	4.00	0.10	50.00	5.00	5/50
$7.9433(10^{9.9})$	0.90	4.10	0.12	39.72	5.00	5/40
$6.3096(10^{9.8})$	0.80	4.20	0.15	31.55	5.00	5/32
$5.0119(10^{9.7})$	0.70	4.30	0.20	26.06	5.00	5/26
$3.9811(10^{9.6})$	0.60	4.40	0.25	19.91	5.00	5/20
$3.1623(10^{9.5})$	0.50	4.50	0.30	15.81	5.00	5/16
$2.5119(10^{9.4})$	0.40	4.60	0.40	12.56	5.00	5/12
$1.9953(10^{9.3})$	0.30	4.70	0.50	9.98	5.00	5/10
$1.5849(10^{9.2})$	0.20	4.80	0.60	7.93	5.00	5/8
$1.2589(10^{9.1})$	0.10	4.90	0.80	6.30	5.00	5/6
$1.0000(10^{9.0})$	0.00	5.00	1.00	5.00	5.00	5/5
$0.7943(10^{8.9})$	-0.10	5.10	1.20	3.97	5.00	5/4
$0.6310(10^{8.8})$	-0.20	5.20	1.50	3.15	5.00	5/3
$0.5012(10^{8.7})$	-0.30	5.30	2.00	2.51	5.00	5/2

3.2.2 系统设计

传统的视力视力筛查仪多采用“偏心摄影验光”原理，并辅以人工检测的手段进行，本文研究并实现了一种头戴式简易视力检测装置，如图 3 所示，分为数据采集端和信息接收端：

数据采集端：通过超声波测距模块检测实际距离 d ，调用预存的视标设计距离 D ，经 ARDUINO 主控板按 $V=d/D$ 计算视力值，再通过蓝牙发送至接收端。^[2]

信息接收端：接收蓝牙传输的视力数据，通过显示模块呈现数值，并借助语音模块进行播报。

3.2.3 硬件设计

主控模块：选用 ARDUINO 主控板，其开发难度低、价格便宜、资源丰富、体积小巧，具备充足 I/O 接口，适配各模块集成需求。

测距模块：采用 HC-SR04 超声波模块，测量范围 2cm-400cm，精度达 3mm，满足 5 米内测量需求。由发射器、接收器和控制回路组成，Trig（触发）与 Echo（回声）引脚连接 ARDUINO 实现距离读取。

通信模块：采用 HC-05 蓝牙模块，传输稳定、功耗低、成本低，支持透传功能，通过 TX、RX 交叉连接主控板，简化程序设计，默认从机模式可通过 AT 指令配置参数。

显示与语音模块：显示选用 OLED 屏幕，尺寸小、分辨率高、功耗低；语音采用 JQ8900-16P 模块，音质清、控制灵活，通过串口指令驱动扬声器播报。

电源模块：采用锂电池供电，输出稳定 4.8V 电压，自带充电模块与过充保护，保障安全与寿命，配合稳压模块节省空间。

3.2.4 软件设计

软件的设计主要依靠主控模组 ARDUINO 来实现控制超声波测距模块采集检测距离，通过调节按钮调用存储的设计距离，视力运算，经蓝牙发送并播报视力数据等功能。软件功能流程图如图 4 所示。

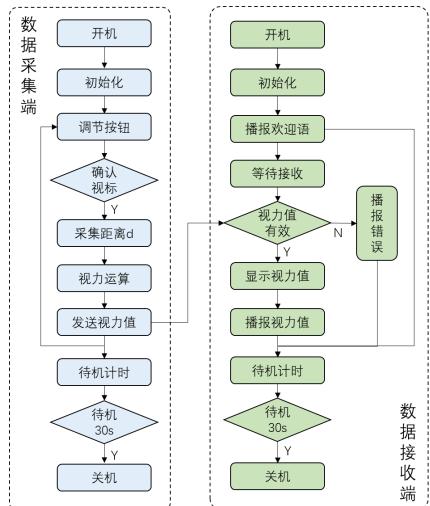


图 4

初始化配置采集端 ARDUINO 主控板 I/O 引脚模式：设超声波模块引脚模式，配置按钮引脚为输入并启用内部上拉电阻，初始化蓝牙模块参数。

调节按钮：默认设计距离 50 米，按按钮依次切换标准视力表上的视标设计距离 (D) 并存储。确认视标时，发 10uS 以上高电平触发超声波模块，测 Echo 引脚高电平时间，按 “测试距离 $d = (\text{高电平时间} \times 340\text{M/S}) / 2$ ” 计算得 d ，进一步根据分数制视力公式 $V=d/D$ 运算得小数制视力值。视力值保留一位小数后经蓝牙发送至数据接收端。

初始化配置数据接收端 ARDUINO 主控板 I/O 引脚：设蓝牙、显示、语音模块引脚模式，初始化模块参数，并设置播报欢迎语。接收数据时，检测串口数据，读数据并校验，有效则存视力值，无效则播报错误。

系统设置了待机模式，待机 30s 后检测装置自动关机。

4 制作与调试

按电路连接图连供电、传感器、执行器、通信等模块后进行整体组装，含头戴式框架与接收端外壳。

头戴式框架使用轻质耐用材料，固定超声波模块、主控板、锂电池、蓝牙模块（采集端）；使用连杆机构调节超声波模块角度位置，确保对准视标；合理布线并预留长度，确保使用时灵活无卡顿。^[3]接收端外壳按器件尺寸与安装要求制作，并预留显示窗口、喇叭孔、按钮孔等，安装各器件和外壳后成为独立的接收装置。

组装后的成品外观如图 5 所示。



图 5

分如下步骤进行测试：

模块测试：单独测试各电子模块功能，确保超声波测距准确、蓝牙传输稳定、显示与语音反馈正常。超声模块调试时，发 10uS 以上高电平触发模块，测 Echo 引脚高电平时间，按公式算距离，可用定时器输入捕获功能提高测时精度。蓝牙数据传输测试时：将模块装到采集端与接收端，连主控板，上电配对，发测试数据，检测出蓝牙正常工作的最远和最佳距离。

整体调试：开机检查模块启动状态，头戴采集端选取不同视标检测，验证接收端显示与播报准确性；多次改变检测距离，优化精度与稳定性。

场景验证：在家庭、教室等不同环境下开展多人多次

测试，通过校准与滤波优化，使装置性能达标。

5 结语

本检测装置具有显著优势：操作简便，头戴式设计配合按钮操作，无需专业人员指导，学生可自主完成；适配场景广，可利用课间或居家时间随时检测，助力及时干预近视；成本低廉，采用经济型电子器件，远低于商用筛查仪，便于中小学与家庭推广；精度可靠，基于超声波测距与视角原理计算，结合软硬件优化，结果可作为配镜参考。

后续可进一步优化视标显示方式，集成动态视标生成功能，减少对外部视标的依赖，同时提升蓝牙传输距离与抗干扰能力，增强装置的实用性与适应性。

参考文献

- [1] 卫健委:2018年全国儿童青少年总体近视率为53.6% [J]. 现代养生 (下半月版),2019(5):1-2.
- [2] 金若男,贺伟罡,孙克英,等. 儿童青少年视力筛查设备相关技术及应用问题探讨[J]. 中国医刊,2020,55(6):594-595.
- [3] 胡晋宾,胡开越,刘洪璐. 基于视力表研制的"数学建模"及其开展建议[J]. 教育研究与评论,2024(35):16-22..
- [4] 张明宣. 自助式多功能智能视力检测仪[J]. 电子技术与软件工程, 2021(15):72-73.
- [5] 周志龙. 基于智能设备的视力实时监测保健技术及其应用[J]. 中国高新科技, 2019(3):80-84.
DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2019.03.14.
- [6] 尹世通, 包伟华. 基于ZigBee和蓝牙的无线视力测试系统设计 [J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(6):568-574.
- [7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 十四五全国眼健康规划 (2021-2025年)[Z]. 2022.
- [8] 国际标准化组织. ISO 12836-2019 眼科仪器 视力表[S]. 2019.
- [9] 王利华. 儿童青少年近视防控研究进展[J]. 中华眼科杂志, 2020, 56(6):401-405.

Development of a Mechanized Integrated Operation Platform for Cold Source Mesh Replacement and Online Cleaning in Nuclear Power Plants

Qiaojun Wu¹ Xinhua Tian¹ Shaofeng Yang² Zhongquan Fang³

1. Guanghe Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518038, China

2. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong, 529500, China

3. Lianyungang Wuzhou Shipbuilding Heavy Industry Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222228, China

Abstract

In response to the shortcomings of the traditional “net bag interception+manual offshore fishing boat barge cleaning” method for intercepting the net bag in the cold source water intake channel of a nuclear power plant, the hull of the platform was designed under the required sea conditions and environmental conditions of the cold source water intake channel of the nuclear power plant, as well as the requirements for the platform’s function and performance. At the same time, the turbine part of the platform, the online cleaning and auxiliary replacement device part of the net bag were designed. Based on this, the platform was built and tested to meet the requirements of the technical specifications for the platform’s operating environment and function and downstream performance. The interception net bag of the nuclear power plant was mechanically cleaned online, and the pile foundation net bag could be replaced on the platform without diving operations. The floating net bag was assisted in diving operations. Implement efficient operations, with efficiency increased by over 30% compared to current operation and maintenance methods.

Keywords

Nuclear power plant; Cold source; Net bag; Online cleaning; Mechanized integrated operation platform

核电厂冷源网兜更换、在线清洗机械化一体作业平台的研制

吴侨军¹ 田新华¹ 杨少锋^{*2} 方中权³

1. 中广核核电运营有限公司, 中国·广东深圳 518038

2. 阳江核电有限公司, 中国·广东阳江 529500

3. 连云港五洲船舶重工有限公司, 中国·江苏连云港 222228

摘要

针对核电厂冷源取水明渠拦截网兜传统的“网兜拦截+人工海上渔船驳运清理”方式的缺陷, 在要求的核电厂冷源取水明渠海况环境条件及对平台功能及性能要求情况下, 对该平台的船体进行了设计, 同时对平台轮机部分、网兜在线清理和辅助更换装置部分进行了设计, 在此基础上建造了平台并进行了试验, 达到了技术规范书中对平台运行环境及功能与下哦那个能的要求, 通过机械化的方式对核电厂拦截网兜进行在线清洗, 能对桩基网兜在平台上进行更换, 无须潜水作业, 对浮式网兜在潜水作业辅助下实现高效作业, 效率比现有运维方式提升 30% 以上^[1]。

关键词

核电厂; 冷源; 网兜; 在线清洗; 机械化一体作业平台

1 引言

核电厂多临海建厂, 用海水冷却, 取水明渠设拦截网兜防海生物入侵。但网兜易堵塞需维护更换, 目前“网兜拦截 + 人工渔船驳运清理”方式受天气影响大, 海生物爆发期难有效实施, 影响核电安全。为解决清理更换需求, 需研制网兜在线更换、清洗机械化一体作业平台装置, 减少潜水作业, 改变低效人工作业。实施该项目, 可在平台机械化在线清洗桩基网兜并更换, 浮式网兜在潜水辅助下高效作业, 效率比现有提升 30% 以上^[2]。

【作者简介】吴侨军 (1983-), 男, 中国广东茂名人, 本科, 高级工程师, 从事核电厂冷源研究。

【通讯作者】杨少锋 (1990-), 男, 中国广西平南人, 本科, 工程师, 从事核电冷源运维管理研究。

2 平台功能要求和设计参考标准

2.1 基本功能和环境要求

使用环境条件

平台的结构材料需要具备较高的强度和抗疲劳性能，具有良好的抗腐蚀性，抗海生物附着性能，以减少生物附着对作业平台性能的影响。

平台设计应考虑现场网兜布设情况，工作移动过程中不会对网兜造成损坏。

作业平台具备足够照明条件，夜间也能进行作业。

平台具备电力供应，发电机和柴油机负载能保证足够电力供应平台上设备工作要求。

平台需配置相应救生与消防设备。

平台四周设置围栏、平台表面防滑等，保证作业人员防护安全。

平台及设备应能够适应 6 级风以下的日常工作条件，且在 12 级台风环境下保持稳定性和牢固性。

平台上变频器设置防护措施，保证可靠性。

表 1

序号	环境内容	环境要求
1	海域类型	核电厂取水口海域海面
2	浪高要求	s;l 米
3	海水流速	0.8 米 / 秒流速以下能安全作业
4	海水温度	- 2° c ~ 40° c
5	海水盐度	15 ~ 40ppt
6	日常工作风力	不低于 6 级风力下安全作业
7	网兜清洗和更换水深	10-12 米
8	工作平台抗风浪能力	满足在 12 级台风，保持稳定性和牢固性

2.2 拦截网工作平台要求

2.2.1 平台设计

需预留设备安装及网兜清洗空间，合理布局绞车移动装置、网兜起吊 / 卷扬装置、冲洗装置及电源等设备，减少对网兜冲洗、更换作业空间的占用，便于网兜摊开在线清洗^[3]。

2.2.2 网兜在线冲洗

水上部分：将网兜尾部至根部至少 2/3 长度拉至平台，通过高压水流在线冲洗，提升效率。

水下部分：通过平台操控机械杆升降，调整冲洗水角度及摄像头监控，实现水下部分在线冲洗。

2.2.3 网兜在线更换

可在平台上完成桩基网兜在线更换，无需潜水员参与，降低作业风险与成本。

2.3 平台设计标准

2.3.1 本平台的设计和建造参考以下标准执行：

中国工业标准（GB）；中国造船标准（CB）；中国造船质量标准（CSQS）；中国冶金标准（YB）。

2.3.2 建造厂标准

工作平台稳定性满足中华人民共和国海事局《沿海小型船舶检验技术规则》(2024) 的要求；工作平台干舷满足中华人民共和国海事局《沿海小型船舶检验技术规则》(2024) 的要求；本平台的材料、结构强度及抗疲劳性能均高于《沿

海小型船舶检验技术规则》(2024) 的相关要求，并参考《游艇法定检验暂行规定》(2013)；平台设计建造过程中既要满足以上标准规范的最新版本，同时借鉴参考《国内航行海船法定检验技术规则》(2020)、《国内航行海船建造规范 (2024)》进行设计。

3 平台研制

3.1 船体研制

3.1.1 平台结构形式

整个平台为双体结构，每个单体为独立体，之间采用活动连接。甲板为铰链连接，铰链销轴为直径 40 的锻钢件。平台底部及首尾封板采用连接板和螺栓连接，形成一个固定的整体。两个单体骨架形式相同，单体采用横骨架式，利于铰链处加强的设置。肋骨间距 500mm，纵骨间距 1.45mm。平台设有 2 个甲板房，甲板房也采用横骨架式。

3.1.2 系泊设备

工作平台配备了左右片体的尾部及中部各设置两台电动绞盘，每台电动绞盘拉力 30kN，绞盘下方为卷筒，设有刹车装置型号 Type: 20kN 轻型电动绞盘。

3.1.3 推进装置

工作平台无推进装置，移动主要通过锚和绞车执行。

3.1.4 燃油自持力

工作平台内设置两个燃油储存舱，供发电机日常工作使用，左右燃油储存舱容积均为 3.4m³，燃油自持力为 15 天。

3.1.5 栏杆布置

甲板四周布置栏杆，栏杆高度 1050mm，栏杆立柱间距不大于 1.5m，每三根立柱至少设置一个斜撑。栏杆横挡间距分别为 230、380、380mm。栏杆设计满足规范要求，甲板左侧栏杆留有缺口，供工作人员上下，此位置布置两道链条。

3.1.6 照明系统

工作平台的照明系统由直流 24V 蓄电池供电，充分满足日常照明及信号灯需求。甲板室和片体舱内均安装有照明灯，确保夜间作业的顺利进行，同时配备有探照灯以增强夜间作业能力。此外，在棚顶中间还设有一盏白环照灯，兼具照明和信号功能，保障平台的夜间可见性。

3.1.7 救生消防设备

救生设备配置：平台配备了两只救生圈，每只附带 18 米长的救生浮索，这些救生圈被固定在不锈钢挂钩上，位于便于迅速使用的栏杆位置，同时不影响日常工作。另外，平台还备有四件救生衣，存放在舱内搁物架的便捷存取位置，确保满足规定对工作人员的救生设备要求。

消防设备配置：平台配备了一个带绳的消防水桶，以及一把消防斧，以备不时之需。为应对火灾，平台配备了五具容量为 5.0kg 的手提式 CO₂ 灭火器，特别放置在距离发电机舱室 1.5 米范围内的位置。此外，还有六具容量为 3.0kg 的干粉灭火器，增强了平台的火灾应急能力。为发出求救信

号，平台还配备了四支降落伞火箭信号。平台四周安装了消防水管，并至少设有两个消防栓接口，配备了长度不小于 15 米的消防水龙带，确保消防水源的及时供应。

舱内结构及布置：左右片体对称，单片体舱内在 FR11 设置防火门，将其分隔为泵舱和发电机舱两部分。4 个火灾报警分别布置其中。燃油舱、溢流舱、发电机、配电柜、充放电柜、蓄电池等位于发电机舱。

3.2 轮机部分

3.2.1 电力系统

平台配置两台 300kW 发电机，分置于左右片体舱内，左侧发电机发电，通过左侧片体舱内主配电板为左侧用电设备供电，右侧设备的布置和左侧对称布置，供电原理相同。

平台左右片体之间增加了联络开关，在特殊情况下，打开联络开关，左侧发电机发电可通过右侧主配电柜供电向右侧片体上用电设备供电。右侧供电原理相同。如此设计可满足互为备用，增加平台的可靠性。

平台选用经典斯太尔型柴油机，性能可靠，经久耐用，电子调速，防泄漏高压油管。

3.2.2 高压冲洗系统

工作平台高压冲洗系统用于网兜在线机械化清洗，配备四组高压柱塞泵：两组 90kW 泵（流量 170L/min、压力 25MPa）和两组 110kW 泵（流量 350L/min、压力 16MPa），均配变频电机以调节流量。平台左右中后部设两个高压水管接口，可快速连接手持式高压水枪，提升清洗质量和效率。

3.2.3 液压系统

液压泵站集成于舱内，为水下门架清洗装置供能，含电机泵组、油箱、过滤及控温组件等，满足单一设备满负荷作业（两者不同时运行）。泵站配 IP44 电控箱（室内）和 IP56 启停按钮盒（机旁），保障操作便捷安全。

3.2.4 通风透气系统

平台燃油舱设置透气管在甲板中部穿出甲板，末端为鹅颈弯头形式。透气管截面积为柴油注入管 1.25 倍以上，透气管下方设有集油槽。平台左右片体均设有抽风分风机，每台风机每小时抽风换气 6000 立方米。甲板面设置 8 个带有自闭装置的鹅颈通风头，如果发电机全负荷工作时，还可以将快开人孔盖打开，用于自然通风。

3.2.5 疏排水系统

平台不设置排水泵，片体内部积水通过船上的水瓢排除舱外。甲板面设有梁拱，两片体之间设有压浪条，避免海浪通过缝隙涌上甲板，且方便甲板积水流出。

3.3 网兜在线清理和辅助更换装置

3.3.1 网兜水上部分清洗

工作平台通过设置于首部的冲洗机构，利用绞车和导缆孔将网具绕过水平滚轮牵引至网兜冲洗区域，牵引过程将网兜展开便于冲洗。冲洗区域设置三道冲洗横管，第一道

冲洗横管由上往下冲洗网兜上表面，第二道冲洗横管由下往上冲洗网兜下表面，此冲洗横管位于水平滚轮后方，可避免网兜挂住喷水横管。前两道冲水横管冲水压力相对小，主要冲洗常规附着物，第三道喷水横管设置在冲洗区后部，喷枪出水口压力远大于第一第二冲洗横管，可以冲洗掉网兜上最顽固的附着物。正常情况下前两道喷水横管即可清洗干净网兜上的附着物。三根喷水横管均可自由调整冲水角度，确保从最佳的距离和角度对网兜进行全面冲洗^[4]。

3.3.2 网兜水下冲洗装置

水下门架冲洗系统由可转动式水下门架，高压供水系统、高压冲洗横管、液压系统组成。该门架设计为上下转动式，转动半径可达 8.5 米，能够深入水下 7 米进行作业。水下门架抵靠网兜表面，利用绞车绷紧网兜，使的冲水横管可以抵近网兜进行高压冲洗。为了确保压力足够，水下喷水横管分为左右两部分，通过开启单侧，降低流量来增加冲洗压力。如果网兜水下部分没有顽固附着物，可以同时开启左右喷水横管进行高压冲洗。

3.3.3 网兜辅助更换

平台的网兜在线辅助更换功能通过与潜水员协同作业提升效率：平台运输 2-3 个新网兜至更换点，利用绞车和不锈钢钩头将网兜尾部拉上斜向下甲板（前端距水面 0.5 米）储存；潜水员下水解开固定绳索，平台绞车牵引旧网兜移至平台。放网时，平台移动至指定点，潜水员系固网兜口与水下钢缆。该流程减少在线换网及潜水作业时间 30%，降低清洗频率，延长网兜寿命，使更换需求减少 70% 以上。

4 结语

本项目历经一年研发建造已完工验收。作为研发项目，设备及功能预留余量并设多套备用方案，功能性指标超任务书要求。平台设计为两个独立单体，可组合成更大工作平台且互为备用，单个平台能独立漂浮，能够在水下拼装拆解。

质量可靠是最大亮点，从选材到试验全程严控质量，高压冲洗系统、柱塞泵等关键部件均采用高标准耐腐蚀材质，设备选型预留 2 倍以上裕度，可抵御超级台风并兼顾额外需求。

但过度冗余导致平台超重，给吊装下水及上岸带来不便。建议后续类似项目合理控制裕度，在确保可靠前提下减少冗余、降低设备功率与数量，选用高可靠设备以减轻重量。

参考文献

- [1] 李汉光;徐万平;付建明;王涛;闫俊 滨海核电冷源取水口海生物拦截体系的改进设计[J] 科技与创新2022, 第19期P164-168.
- [2] 徐川;胡正春 滨海核电站冷源拦截体系建设与研究[J]科技与创新2019-09-021.
- [3] 熊碧露;许波涛;郑早华;祝奇超 基于冷源安全的滨海核电厂取水拦污网设计[J]中国港湾建设2022, 第42卷第9期P45-48.
- [4] 徐维; 核电厂拦截网兜抽吸清理装置 CN 202411492139.2[P].2024-10-23.

Active defense and reconfiguration visualization of overload in distribution area considering distributed energy fluctuations operational research

Cong Zhao Chaoqun Lin jun Wu

State Grid Henan Electric Power Company Xuchang Power Supply Company, Xuchang, Henan, 461000, China

Abstract

the application of distributed energy in the distribution area has improved the penetration rate. Due to its volatility, it is prone to some problems, such as overload, voltage out of limit and three-phase imbalance. The establishment of an overload active defense system can coordinate large-scale loads under the weak model and respond quickly to contradictions. The DC hierarchical design is optimized, and the single exchange iteration algorithm is adopted to decouple the power flow of AC and DC subsystems, which can effectively cope with the fluctuations of distributed energy. Through the visual reconfiguration platform, the functions of voltage fluctuation prediction, overload risk warning and real-time topology adjustment are integrated, which plays an important supporting role in decision visualization. This paper studies the strategy of overload active defense and reconfiguration visualization in the distribution area considering the fluctuation of distributed energy.

Keywords

Distribution Station area; Considering the fluctuation of distributed energy; Overload; Active defense; Reconfiguration visualization strategy

计及分布式能源波动的配电台区过载主动防御与重配可视化策略研究

赵聪 薛超群 吴俊

国网河南省电力公司许昌供电公司，中国·河南许昌 461000

摘要

配电台区应用分布式能源，提升了渗透率。由于其存在波动性，容易出现一些问题，诸如过载、电压越限以及三相不平衡等。建立过载的主动防御体系，能够将弱模型下的大规模载荷以协调，对于矛盾快速响应。对直流层级设计以优化，采用通过单次交换迭代算法能够对交直流子系统潮流进行解耦，当分布式能源出现波动的时候能够有效应对。通过可视化重配平台，将电压波动预测、过载风险预警以及实时拓扑调整功能集成，对决策可视化起到重要支撑作用，本论文针对计及分布式能源波动的配电台区过载主动防御与重配可视化策略展开研究。

关键词

配电台区；计及分布式能源波动；过载；主动防御；重配可视化策略

1 引言

目前一些地区为实现双碳目标，启动光伏试点，使得更多的分布式能源接入配电台区。但是，电源不稳定的问题难以解决，主要原因在于波动性和不确定性，因此造成台区电压超过规定局限，线路过载且存在反向潮流。如果采用传统调度系统，对于分布式能源变化不能实时响应，导致台

区之间无法协同。本文提出“主动防御+可视化重配”一体化框架，通过分布式优化算法使得源荷群控群调得以实现，波动性得到平抑。同时构建数字孪生平台，以实时生成过载风险动态推演与重配策略。

2 分布式能源波动对配电台区的主要影响

2.1 反向重过载风险

如果某一区域内的用户数量比较多，同时安装大容量光伏设备，当日照充足的时候，进行集中发电的时候，会有很多富余电力产生，以低压线路为载体，就会反向输送到配电变压器。如果这个台区原有的负荷比较低，导致光伏出力非常高，因此导致净发电量超过净用电量。使得变压器长

【作者简介】赵聪（1984-），男，中国河南禹州人，本科，工程师，从事配网运维、配变及低压分布式光伏管控等研究。

期处于反向重载状态，甚至达到过载状态。如此非设计工况下维持运行，容易导致铁芯磁通饱和，甚至绕组温度快速升高，严重的情况下，容易造成绝缘老化速度加快，出现局部放电，甚至毁坏变压器。

2.2 电压质量问题

直流发电单元与交流电网连接的重要装置是光伏逆变器，其输出电压是否得到有效控制，对台区电压水平有直接影响。但是，现实中的部分用户为了高效率发电或者规避监控，对逆变器的电压设定值以调整，使其在较高的电压区间运行，甚至有用户使用质量比较低的逆变器，电压调节能力不高，缺乏精准度，预防孤岛保护功能。这些行为叠加起来，很容易导致电压超越局限，台区末端电压已经超过国家标准规定的上限，即 $400V \pm 7\%$ ，已经达到 $430V$ ，甚至会更高。电器处于长期过电压状态，其寿命缩短，还会导致敏感电子设备损坏，因此导致用户投诉。更严重的是，电压的提升还会造成线路损耗过大或者无功分布，因此导致恶性循环。

2.3 超容发电隐患

部分用户为了获得更高的上网电量收益，在没有进行电气校核的情况下对光伏装机容量盲目扩容，使得实际发电能力已经超过了低压线路和计量装置所能够承载的极限。比如，某台区的原设计，负荷最大值为 $80kW$ ，但是，个别用户甚至私自将光伏装机从 $5kW$ 提升到 $15kW$ ，而且多个用户的类似操作经过叠加之后，总潜在出力甚至已经达到 $120kW$ 。天气晴朗的情况下，如果集中出力，低压主干线路就会超过安全阈值，导线严重发热，接头氧化速度加快，因此导致火灾隐患存在。更为复杂的是，这种类型的超容行为，现有采集系统运行过程中不能及时发现，主要的表现是间歇性超标，如果采用常规巡视手段，很难捕捉到，加之部分区域的线路老化，不能很好地发挥绝缘性能，当出现短路或者发生弧光故障的时候，就会导致严重后果。

2.4 功率因数异常

传统工业用户会由于感性负载非常多而造成功率因数比较低，需要加装电容器补偿。但是，在大量接入分布式光伏的情况下，就会更加复杂化：白天眼光充足，光伏发电非常旺盛，如果本地负荷非常小，大量的有功功率就会向外传输，而逆变器如果仅仅发出有功功率而不参与无功调节，系统就会呈现出轻载高电压和低无功需求的状态，整体功率因数不能达到理想范围。比如，部分地区的考核标准要求每个月的平均功率因数要超过 0.9 ，否则就要收取功率调整电费。当地的多家企业由于光伏出力频繁波动而触发力调罚款，单月累计损失量非常大，已经达到数万元，因此导致用户承受巨大的经济负担，也反映出现在光伏系统只发有功功率，不管无功功率。采用这种粗放式的运行模式，难以解决实质性问题。

3 配电台区过载主动防御策略

分布式光伏能源的应用，导致运行风险非常复杂，

仅仅依赖于事后抢修方式，结合人工干预，已经无法满足现代智能电网的安全需求。这就需要从原有的“被动响应”向“主动预防”转变，将多层次、多维度的过载防御机制建立起来。具体如下：

3.1 基于逆变器控制的无功调节技术

现在的光伏逆变器所发挥的功能多样化，已经不再局限于简单的直交转换。现代智能逆变器的能力非常强，普遍能够四象限运行，即可独立调节有功功率和无功功率的输出，成为潜在的分布式无功源。这一优质特性为解决台区功率因数异常提供了新的选择。通过远程通信协议，调度中心或者本地控制器能够实时下发无功指令，引导逆变器在发电的同时提供容性或感性无功支持，从而使得系统无功需求达到动态平衡状态^[1]。例如，在傍晚光伏出力下降但居民负荷上升阶段，系统可能出现无功缺口，此时可通过集中控制系统自动调用台区内各光伏逆变器释放储备无功容量，避免因功率因数降低而导致的线路过载与电费惩罚。相比较于传统的固定式电容器组，这种方法的特点是响应速度快（毫秒级）、调节精度高、使得实现软资源发挥硬作用，可谓是创新应用。以江苏某地试点项目为例，其通过逆变器无功协同控制，台区日均功率因数由 0.82 提升至 0.94 以上，力调电费支出减少幅度达到 67% ，成效显著。

3.2 优化无功补偿与协调控制

虽然逆变器可以发挥调节作用，但是在大范围电压波动或者长距离输电场景中，依然有不足之处。所以，将更强大的专用补偿装置引入是非常必要的，可以形成“分布式+集中式”相结合的综合治理体系。目前，主流方案包括智能无功补偿柜（SVG/SVC）、串联电压调节器以及分层投切的电容器组。这些设备能够根据台区实时电气参数进行自动投入或者切除，对电压闪变起到抑制作用，三相不平衡状态得以改善，线损得到控制。尤其是在中压 $10kV$ 馈线上部署串联补偿装置，可在源头缓解下游多个台区的电压抬升压力。与此同时，还需要构建三级协调控制，即“变电站—中压线路—配电台区”一体化。该系统依托广域测量系统（WAMS）和配电自动化终端（DTU/FTU），可在全网范围内采集电气量并联合优化。当检测到某台区即将出现过载现象的时候，系统可优先启动最近的无功补偿单元，如果依然存不足，就会向上游请求调节压力，必要的情况下，还可通过主站下达光伏限功率指令，形成自下而上、逐级联动的防御链条。比如，某个市级电网已经建成这种类型的协调平台，覆盖台区超过 1000 个，成功将重过载发生率降低 41% 。

3.3 小生境粒子群优化算法的有功无功协调优化

为进一步提升优化精度以及鲁棒性，将人工智能算法开始融入到配电网控制领域，发挥智能控制作用。小生境粒子群优化算法（NPSO）的应用，其具备全局搜索能力，且具备多解保留特性，当存在光伏出力不确定性、目标函数非线性的复杂优化问题的时候，可以采用这种方法处理^[2]。

NPSO 通过对种群进行子群划分，可防止早熟收敛，能够在多个局部最优之间跳跃探索，最终获得一组帕累托前沿解集。将这种方法应用于配电网的时候，能够构建数学模型，涵盖最小网损、最低电压偏差、最少开关动作次数等多个目标，对光伏预测产生的误差、负荷变化趋势以及设备容量约束等综合考虑，求解出最优的有功削减与无功分配方案。比如，一个台区中有 20 个光伏用户，NPSO 可在 5 秒内完成一次优化计算，推荐各逆变器应发出的无功功率值以及是否需要轻微限电，保证整体运行良好，提高安全且降低成本，发挥经济价值。运行 Matlab/Simulink 平台，使用可视化仿真工具，可在不同气候条件、负荷模式下的多情景下进行推演，所获得的结果为现场运行维护的重要依据。广东某科研团队采用这种算法将实验系统搭建起来，经过一个季度的试运行，成功预警并规避了 7 次潜在过载事件，验证了其工程可行性。具体操作如下：

气候条件集成：使用 Simulink.LookupTable 模块或 MATLAB 函数块，将气候数据映射到系统参数。外部导入历史气候数据（如 CSV 文件），通过 From Workspace 模块注入模型。在负荷模块属性中，将 ActivePower、InductivePower 等设为变量（如 P_load, Q_load），而非固定值。用 Signal Builder 或 Timetable 模块生成不同时段的负荷曲线（如高峰/低谷模式）。

多情景批处理推演中，使用 parfor 循环或 Simulink. SimulationInput 对象加速多情景仿真。通过 Dataset 或 Scope 模块记录关键信号，使用 MATLAB 脚本绘制多情景结果对比图³。生成敏感性报告，计算气候/负荷变化对性能指标的影响系数，生成表格输出。

4 分布式光伏可视化监测与重配策略

为了保证防控的精准度，就要对系统的运行状态看得清，判断准确且管控得当。为达到如此效果，就要将全面、实时、智能的可视化监测体系建立起来。

4.1 可视化监测场景构建

依托企业数据中台建立“一户一档”的光伏用户数字画像。通过大数据分析引擎，对每户的最大发电功率、日均出力曲线、超容发电频次、电压越限持续时间等指标进行标签化处理，形成可量化评估的风险指数。在此基础上，开发 Web 端与移动端一体化的可视化监控平台，采用 GIS 地图叠加热力图的方式直观展示各台区光伏渗透率、反向功率占比、电压合格率等关键指标^[4]。运维人员可通过点击任意台区查看详细运行报告，包括历史重过载记录、典型日功率曲线对比、逆变器健康状态评分等。

应用组件级监测则借助智能关断器或者系统界面以热力图形式呈现整个阵列的工作状态：正常组件所呈现出来的是绿色，轻微衰减所呈现出来的是黄色，严重失配则会转变为红色并不断闪烁。运维人员可据此精准锁定不能正

常发挥功能的组件，避免消耗大量的时间盲目排查。比如，某渔光互补项目曾通过此功能可以发现部分组件由于海水飞溅而造成光伏器件中的电势诱导衰减（Potential Induced Degradation）效应，及时采取接地修复措施，挽回潜在年损失电量达 8 万千瓦时。

系统还可计算每个支路的 IV 曲线拟合偏差，结合红外成像数据判断是否存在热斑风险，提前预警火灾隐患。

4.2 台区重配优化措施

首先应合理规划并网方式，减少对外部电网依赖；其次，加强网络结构优化，针对负荷增长较快区域，适时增设新台区、拆分原有大台区，或将部分高压用户直供，减轻低压侧压力^[5]。同时，在 10kV 线路上合理布点串并联补偿装置，提升线路传输能力。通过动态负荷率评估模型，定期生成台区承载力评级，指导新建光伏项目的审批准入。

在供电可靠性要求极高的场所，政策上严禁光伏发电反向传输到公共电网。为此，系统配置储能电池组与双向变流器（PCS），配合使用智能控制器，可以有效实施防逆流控制。

控制器所发挥的作用是实时监测并网点电流方向，一旦检测到即将发生倒送的现象，立即启动储能充电，优先消纳多余光伏电量。如果储能已达满充状态，则平滑降低逆变器输出功率，确保净流入为零。该策略不仅能规避罚款风险，还能延长设备寿命——避免频繁启停造成的机械应力。

5 结语

通过研究明确，分布式能源接入配电台区会存在过载风险，采取主动防御措施结合可视化重配，可以起到抑制作用。应用分布式优化算法，实施交直流解耦控制，结合三相不平衡治理方式，使得系统韧性提升。通过运行可视化平台，可对波动影响进行预判，过载前防御结合过载中重配的动态响应得以实现，对新型电力系统建设起到重要支撑作用。

参考文献

- [1] 格日勒图, 张立辉, 柴剑雪.计及微电网群合作博弈的主动配电网能量优化调度二层规划模型[J].可再生能源, 2020, 38(2):205-211.
- [2] 杨小龙, 姚陶, 孙辰军, 等.计及分布式能源时序不确定性的短期负荷预测技术[J].可再生能源, 2024, 42(1):96-103.
- [3] 张欣王楷裴立耕朱明辉.计及分布式能源配电网多时间尺度优化控制[J].信息技术, 2022, 46(11):172-176.
- [4] 李庆生, 李震, 孙斌, 等.计及不确定性的主动配电网分布式能源多时间尺度消纳方法[J].Renewable Energy (1671-5292), 2023, 41(5):692-698.
- [5] 李庆生, 李震, 孙斌, 等.计及不确定性的主动配电网分布式能源多时间尺度消纳方法[J].可再生能源, 2023, 41(5):692-698.

Research on Collaborative Design Method for Renovation of Existing Buildings Based on BIM and Point Cloud Scanning Technology

Yang Liu Li Tan

1. China Power Construction Corporation Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing, 400060, China
2. Zhongji Zhonglian Engineering Co., Ltd., JChongqing, 400039, China

Abstract

With the acceleration of urbanization and the advent of the era of existing buildings, the renovation and upgrading of existing buildings have become an important direction in the construction industry. The integration of BIM and point cloud scanning technology provides an innovative path for information collection, digital modeling and collaborative design of existing buildings. This article reviews the current development status and theoretical basis of BIM and point cloud technology, and systematically analyzes the integration methods and collaborative mechanisms of the two throughout the entire renovation process, including key links such as point cloud data collection and processing, BIM model reconstruction and optimization, and the construction of a multi-disciplinary collaborative platform. Through practical cases, the advantages of collaborative design in terms of surveying and mapping efficiency, design accuracy and multi-disciplinary collaboration have been summarized. Research suggests that the integration of BIM and point cloud not only enhances the scientificity and efficiency of existing building renovations but also provides support for the digital management of the entire building life cycle. The article finally looks forward to the trends and challenges of the intelligent and automated development of this technology.

Keywords

BIM; Point cloud scanning; Renovation of existing buildings; Collaborative design; Digital modeling; Building informatization

基于 BIM 与点云扫描技术的既有建筑改造协同设计方法研究

刘洋 谭荔

1. 中国电建集团重庆工程有限公司，中国·重庆 400060
2. 中机中联工程有限公司，中国·重庆 400039

摘要

随着城市化进程加快和存量建筑时代的到来，既有建筑改造升级成为建筑行业的重要方向。BIM与点云扫描技术的融合，为既有建筑的信息采集、数字建模和协同设计提供了创新路径。本文梳理了BIM与点云技术的发展现状及理论基础，系统分析两者在改造全流程中的集成方法与协同机制，包括点云数据采集处理、BIM模型重建与优化、多专业协同平台搭建等关键环节。通过实际案例，总结了协同设计在测绘效率、设计精度与多专业协作方面的优势。研究认为，BIM与点云融合不仅提升了既有建筑改造的科学性和效率，也为建筑全生命周期数字化管理提供了支撑。文章最后展望了该技术智能化、自动化的趋势与面临的挑战。

关键词

BIM; 点云扫描; 既有建筑改造; 协同设计; 数字建模; 建筑信息化

1 引言

当前，随着新建建筑规模趋于饱和，城市更新和既有建筑改造已成为建筑行业转型升级的主阵地。大量老旧建筑由于结构功能落后、空间利用效率低、能源消耗高等问题，亟须通过改造提升其使用价值与生态性能。既有建筑改造项目普遍面临原始资料匮乏、空间结构复杂、设计变更频繁、

【作者简介】刘洋（1987-），男，中国河南叶县人，本科，工程师，从事建筑工程研究。

跨专业协作难度大等诸多挑战。传统测绘与设计方法已难以满足改造项目对高效率、高精度和全流程协同的需求。随着三维激光扫描和建筑信息模型（BIM）等新一代数字技术的快速发展，点云扫描与 BIM 的深度集成，为既有建筑改造提供了数字化、智能化的技术平台。点云扫描能够快速、全面、精准地获取建筑现状空间数据，而 BIM 则为建筑改造设计、分析与管理提供了数据化、可视化、协同化的工作环境。两者的协同应用不仅推动了建筑改造测绘、建模与设计一体化创新，也促进了多专业、多阶段的深度协作。本文聚焦于 BIM 与点云扫描在既有建筑改造中的协同设计方法，

系统梳理理论基础、技术流程、协同机制与典型应用，旨在为我国既有建筑数字化改造与城市更新高质量发展提供理论依据和技术参考。

2 BIM 与点云扫描技术的理论基础与发展现状

2.1 BIM 技术的原理与建筑改造价值

建筑信息模型（BIM）是一种以三维数字模型为载体，集成建筑几何信息、物理属性、功能逻辑和运营数据的综合性信息平台。BIM 不仅具备建筑构件级的精细化表达和空间关系管理能力，还支持多专业协同设计、工程量自动统计、虚拟施工模拟与全生命周期管理等功能。在既有建筑改造中，BIM 能够实现复杂空间的数字建模、原有结构的精准分析、设计变更的快速响应及多方案可视化比选，为改造决策和后续运营提供数据支撑。BIM 模型作为“数字孪生”载体，促进了建筑从测绘、设计、施工到运维各阶段的信息流畅与协同优化。

2.2 点云扫描技术及其在建筑测绘中的优势

点云扫描技术主要指利用三维激光扫描仪等设备，通过高密度激光束扫描物体表面，获得建筑空间几何形态的高精度三维点位数据集合。点云数据具备高分辨率、非接触、实时采集的优势，可高效还原既有建筑的复杂空间结构与细节信息。相比传统人工测量与二维图纸，点云技术在大型、异形、复杂建筑空间的现状调查中展现出极强的适应性和测绘效率。其成果不仅为后续 BIM 建模与设计提供了真实、完整、可量化的数据基础，还显著提升了改造项目的空间认知与数字化管理能力。

2.3 BIM 与点云技术集成发展的行业趋势

随着数字建筑理念的普及和城市存量建筑改造需求的增加，BIM 与点云技术的集成应用日益成为行业主流。当前，点云数据自动化处理、BIM 模型与点云数据互操作、点云驱动的逆向建模、智能化缺陷识别与设计变更联动等新技术不断涌现。BIM 与点云协同不仅为既有建筑改造提供高效、精准、全流程的数字化手段，也推动了建筑设计、施工、运维等多阶段的信息集成和价值链重构。行业标准、软件工具和人才培养等方面也逐步向 BIM- 点云一体化转型，为建筑数字化升级奠定了基础。

3 点云数据采集与 BIM 建模的协同流程

3.1 点云数据的高效采集与智能处理

既有建筑改造的首要环节是对现状空间、结构和构件的全面数据采集。现代三维激光扫描和摄影测量技术为点云数据的高效获取提供了有力支撑。根据建筑物体量、结构复杂度和改造目标，科学制定采集方案，包括站点布设、扫描分辨率、覆盖范围等，确保关键部位无遗漏、细部信息高还原。采集完成后，原始点云数据常因测量环境、仪器精度等原因存在冗余、噪声和误差。通过空间配准、数据清洗和误差校正等处理流程，对多站点点云进行拼接融合，实现对大

体量空间的连续还原。智能点云算法能够自动识别墙体、门窗、梁柱、楼板等主要构件，大幅提升数据处理与后续建模的效率与准确性。针对大型或复杂空间，可采用多源点云融合及自适应降噪技术，既保证数据完整性，又避免冗余存储和处理压力。高质量点云数据不仅为 BIM 逆向建模和精细化设计提供坚实基础，也为后续多专业协同、碰撞检测和运维管理奠定了坚实的数据平台。

3.2 基于点云的 BIM 模型重建与信息补全

将点云数据转化为可参数化的 BIM 模型，是既有建筑数字化改造的核心步骤。基于经过智能处理的高质量点云，利用逆向建模软件和自动化建模插件，高效还原建筑物的空间布局、结构构件和外部轮廓。点云特征可自动匹配至 BIM 构件库，实现墙体、门窗、梁柱、楼梯等元素的快速生成。对于老旧建筑、无图纸资料或空间变形显著的项目，点云数据成为结构检测、空间分析和加固改造方案设计的关键依据。建模过程中，对不可见或隐蔽工程如管线、设备等信息，需要结合现场补测、施工档案和历史资料进行模型补全。对于复杂空间和异形构件，点云与 BIM 的深度融合可实现高度真实的空间还原和属性标注。最终，BIM 模型不仅具备三维可视化功能，还集成空间参数、构件属性、历史变更等多维度信息，成为多专业团队协同设计、方案比选、运维管理和工程全过程数字化的共享基础。高效的点云到 BIM 流程，极大提升了既有建筑改造的数据支撑能力和工程决策的科学性。

4 协同设计平台构建与多专业协作机制

4.1 基于 BIM 的协同设计平台与数据共享

在既有建筑改造项目中，BIM 协同设计平台为各专业团队提供了统一的数据环境和高效协作接口。平台集成点云与 BIM 模型，实现建筑、结构、机电、造价等多专业的信息同步与资源共享。设计团队可在同一数字空间内浏览模型、开展方案比选、执行冲突检测与变更管理，显著提升了跨专业沟通效率和决策科学性。平台具备细致的权限分级、版本控制及变更追溯功能，确保数据信息的安全性与一致性。云端 BIM 协作环境突破了地域和时间的限制，支持异地多团队的协同作业与实时互动，推动项目管理模式由传统的线下分散管理向数字化集成化转型。通过平台的标准化数据接口与信息集成，各参与方可实现流程透明、协作高效和动态响应，极大促进了既有建筑改造项目的科学管理与高质量推进。

4.2 多专业数据集成与设计冲突协同解决

既有建筑改造往往需要建筑、结构、机电、节能、造价、运维等多专业深度融合。基于点云数据构建的 BIM 模型，真实反映了物理空间的边界和建筑构件的详细属性，为多专业协同设计提供了坚实数据基础。各专业设计成果在 BIM 平台上进行模型集成，实现了建筑空间、结构构件、机电管

线、节能设备等信息的高度统一和参数化管理。BIM 平台的冲突检测、碰撞分析和参数关联工具，能够自动识别机电管线与结构的空间冲突、功能区布局与设备布置的矛盾、节能系统与建筑结构的耦合问题等。

4.3 协同设计流程的智能化与自动化发展

随着人工智能、自动化与数据挖掘等新技术的应用，既有建筑改造的协同设计流程逐步向智能化和自动化方向演进。点云驱动的自动建模技术实现了从实地扫描到数字模型的高效转换，大大缩短了建模周期。AI 算法应用于缺陷检测、空间优化与参数推演，能够自动识别结构隐患、设备干扰、空间不足等问题，为设计优化提供智能建议。BIM 平台通过开放 API 和插件体系，集成各类智能分析工具，实现参数自适应调整、设计优化方案自动生成以及施工工艺智能匹配。未来，点云采集、BIM 建模、冲突检测、设计优化到施工出图、工艺指导等环节有望实现全流程自动化与智能决策。

5 既有建筑改造协同设计的应用实践与成效分析

5.1 典型项目的应用案例与技术成效

在当前既有建筑改造领域，BIM 与点云协同设计模式已成为提升项目精度与效率的重要技术支撑。例如，某大型公共建筑改造项目，采用高密度点云扫描实现建筑现状的全方位数字化采集，准确还原了老旧建筑的空间结构与构件细节。在点云数据基础上，各专业团队基于统一 BIM 平台协同建模，快速开展结构复核、功能分区、机电排布等设计工作。通过 BIM- 点云一体化模型，设计团队能够在三维视图下进行空间碰撞检查、数据共享与意见交互，极大提高了问题发现与解决效率。平台支持下，设计周期较传统模式缩短 30% 以上，方案变更、冲突调整更加便捷。最终形成的点云 -BIM 综合模型贯穿方案设计、施工图深化、工程量统计及运维规划等全流程，为项目的精细化管控和全生命周期管理提供了坚实基础，显著提升了建筑改造的科学性、可控性与经济性。

5.2 复杂空间与特殊构件改造的创新实践

对于形态复杂、结构特殊的既有建筑改造，如异形空间、历史文物建筑和地下工程等场景，BIM 与点云的协同应用价值尤为突出。点云扫描能够高精度捕捉曲面、斜面及

复杂装饰构件的几何特征，真实反映建筑的历史细节与现状状态。BIM 建模则在此基础上实现参数化表达，便于多专业协同分析和性能模拟。以某文物保护修缮工程为例，项目团队利用点云数据高保真重建历史空间形态，结合 BIM 对结构安全性、材料选型及工艺流程进行模拟与优化。

5.3 改造项目管理与运维一体化探索

BIM 与点云协同不仅局限于前期测绘和设计环节，还贯穿改造项目的全过程管理与后期运维。借助 BIM 平台，项目各参与方能够在统一数字环境中协同管理进度、质量、安全和成本，实现多目标、全周期精细化管控。点云扫描可定期应用于改造区域变形监测、施工偏差检测，为工程管理提供动态数据支持。BIM 模型则实时更新反映施工进展，集成设备信息、管线布局、维修记录等运维数据，为管理者实时掌握工程状态和优化决策提供直观依据。

6 结语

基于 BIM 与点云扫描技术的既有建筑改造协同设计方法，是实现建筑数字化、智能化升级的重要途径。两者协同应用不仅解决了传统改造中信息采集难、建模慢、协作低效等瓶颈，还促进了多专业深度融合与数据全生命周期管理。未来，随着人工智能、物联网等新兴技术的不断嵌入，BIM 与点云协同设计将进一步向智能化、自动化、平台化发展，成为推动城市更新与既有建筑高质量改造的核心动力。为实现建筑行业的绿色转型和可持续发展，应持续完善标准体系、提升软硬件能力、强化人才培养，不断拓展协同设计的应用深度与广度。

参考文献

- [1] 王浩.基于三维扫描技术的建筑物点云数据处理方法研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(06):188-191.
- [2] 王智,薛慧艳,薛晓.SLAM 扫描点云用于异形建筑房产面积计算的方法[J].测绘通报,2025,(01):180-184.
- [3] 周波阳,莫少杰,郑育文.基于三维激光扫描点云数据的建筑物外立面 BIM 建模[J].广东建材,2024,40(11):160-164.
- [4] 龚巧艳.基于三维激光扫描与倾斜摄影测量点云数据的古桥 BIM 模型构建及应用研究[J].广东土木与建筑,2025,32(04):18-21.
- [5] 宋洪英,曹坤.结合三维激光扫描点云生成 BIM 模型技术在建筑中的应用[J].粉煤灰综合利用,2021,35(02):136-140.

Exhaust System Design of the KTM 690 Engine

Xuhui Yang Jingzhi Zhu Hongzhuo Peng Junlin Wu Anqi Li

School of Automotive and Transportation Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510800, China

Abstract

This paper takes the exhaust system of the KTM 690 single-cylinder engine as the research object, and explores its structural design and performance optimization under the premise that the 2025 Formula Student China Competition (FSCC) rules impose restrictions on noise and air inlet size. The acoustic characteristics and fluid mechanics performance of the KTM 690 exhaust design were analyzed using ANSYS. In addition, GT-SUITE was employed to analyze the exhaust system's impact on engine power, torque, noise, and temperature. Combined with practical noise testing using a C-weighted sound level meter, the final conclusion shows that this design significantly improves the control of engine power, torque, and noise, further enhancing the engine's fuel economy and efficiency. Moreover, the application of this design can promote the development of the competition, control the impact of noise on residents while ensuring vehicle performance, and play a positive role in cultivating more innovative talents. The research of this article is as follows:

Keywords

FSCC; KTM690; Exhaust system; noise

KTM690发动机的排气设计

杨旭辉 朱静芝^{*} 彭弘焯 吴峻霖 黎安淇

广州城市理工学院汽车与交通工程学院，中国·广东广州 510800

摘要

本文以KTM690单缸发动机排气系统作为研究对象，在2025年中国大学生方程式大赛规则对噪音和进气口大小有限制的前提下，探究其结构设计和性能优化。通过ANSYS分析KTM690排气设计的声学特性，流体力学表现。以及GT-SUITE分析其对发动机功率，扭矩，噪音和温度的影响。结合实际使用C加权分贝仪对噪音测试。最终得出结论该设计对发动机的功率，扭矩和噪音的控制有明显的提升，使得发动机的燃油经济型和效率进一步提升。此外本项设计的应用可以推动该赛事的发展及其保证车辆性能的前提下控制噪音对居民的影响，以培养更多创新型人才做出积极作用。

关键词

FSCC; KTM690; 排气系统；噪音

1 引言

中国大学生方程式汽车大赛（FSCC）培养大学生自主创新，实事求是设计制造力的实验平台。规则限制发动机排量 710cc 下，大学生车队可选发动机为 KTM690, CBR600, Spring breeze700, Spring breeze650,

HuangLong600, Victory 675，本文所选对象为 KTM690 发动机。原厂排气系统根据原厂车架设计，大学生车队车架与其匹配度低，选用同排量其他车型消音器与该机器匹配度低，以至排气阻力大，废气流速迟缓，通过自主研发排气系统，针对 KTM690 排气脉冲规律，实现轻量化，及提高发动机经济性。

2 排气系统

2.1 设计目的

24 年采用回旋盒式中鼓及 VTF800 消音器组合，结构复杂导致头端积温严重，虽噪音控制方面表现优异但扫气效率低，导致发动机怠速达 2200 转，高转区间动力输出迟滞，影响整体加速性能，并且该款消音器体积大，影响整车布局及重量分布。因此本文设计主要针对该问题做出改变如下，改变中鼓结构，避免回旋弯带来的积温、排阻，选用 U 型结构消音器设计。

【项目名称】基于 FSCCKTM690 的排气设计（项目编号：51108009）。

【作者简介】杨旭辉（2004-），男，中国湖南永州人，在读本科，从事车辆工程研究。

【通讯作者】朱静芝（1993-），女，中国陕西渭南人，硕士，助理讲师，从事汽车结构设计、轻量化设计及创新设计等相关的教学和研究。

2.2 排气头段

头段直接连接发动机排风口，管径大小，长短和弯头决定排气阻力大小，直接影响排气脉冲利用率、废气速度、低转扭矩和高转功率。24 年采用与原厂头段相同管径，由于进气具有限流阀导致进气受限，所以需要更改头段管径以提升排气流速。通过 GT-SUITE 仿真进行不同管径排气模型分析。

2.3 头段仿真分析

方案一分别选用使管径为 45mm-48mm、50mm。对比发现三个管径仿真数据 48mm 和 50mm 管径均可以对发动机高转扭矩有提升同时存在发动机低扭损失，方案二采取 45mm-48mm、45mm-50mm 和 48mm-50mm 变径管的方式来解决低扭损失问题。变径管设计可在低转速时利用较小管径提高排气流速，增强脉冲能量利用率，改善低扭输出；高转速时大管径段降低排气背压，提升容积效率。仿真结果显示，45mm-48mm 变径管方案在 2000rpm 以下扭矩优于等径 45mm 头段，4000rpm 以上功率接近 50mm 等径管水平，综合性能最优，确定为最终头段结构方案。

2.4 中鼓优化

中鼓设计原为回旋盒式结构，气流从发动机排风口流出需经过 360° 转弯再流向消音器。对于比赛调教发动机排气应以减少排气阻力为主，为废气可以顺畅排出。KTM690 单缸机中鼓与歧管保持同一条线上为最优设计，因此将原回旋盒式结构改为直线型中鼓，有效避免头段积温并降低排气背压，提升扫气效率。该结构可缩短排气路径，减少气流滞留与能量损耗，有效改善发动机高转动力输出迟滞问题。同时中鼓容积可作为变径管过度腔，减少气流突变带来的扰流。由于该 FSCC 赛事赛道转弯中低转是我们的常用区间。我们参考美国 Nelson 消声器公司推荐公式 $V = \frac{Q \times n \times Vst}{1000 \times (\tau \times i)^{0.5}}$ 。式中，V 代表消声容积；n 为发动机转数 (r/min)；i 是缸数； τ 是冲程数；Vst 是发动机排量 (L)；Q 是与消声效果有关的修正系数，取值范围通常在 2 - 6 之间”算出来的容积约为 0.55L。中鼓内部设计为半径 45mm 长度 135mm 不锈钢管多孔管，孔径为 4mm，开孔率为 75%。使用 GT-SUITE 进行 0.55L 的模型离散化，仿真结果显示该区间低扭并不理想。通过多次更改发现中鼓的容积最总决定为 0.4L，并且中鼓中心和发动机排风口中心真线距离 115mm 可以达到预估的扭矩曲线。分别如图 1 图 2

2.5 消音器

发动机在运行过程中排出的废气伴随高温高压气流，会产生噪音。消音器通过内部结构使以及吸音材料使气体在腔内反射、摩擦和干涉以达到减少噪音的目的。消音器结构选型分为阻抗消音器、抗性消音器、阻抗复合式消音器、微穿孔板消音器、小孔消音器和有源消音器。基于 FSCC 规则规定“在包含发动机、传动系统、排气系统和燃油系统的舱室内，禁止使用吸附性材料 / 纤维质 材料和开放式收集装

置（不论材料如何）”限制。选择抗性消音器，通过内部结构使噪音达到规定分贝。消音器内部气流路径设计为“U型”和“Z型”双结合回绕通道。如图 3 所示

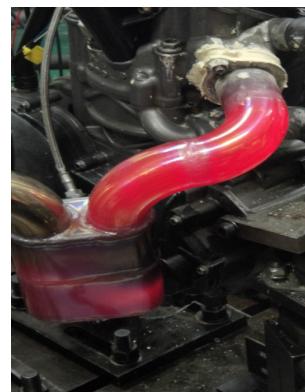


图 1 回旋盒式中鼓结构示意图



图 2 直线型中鼓

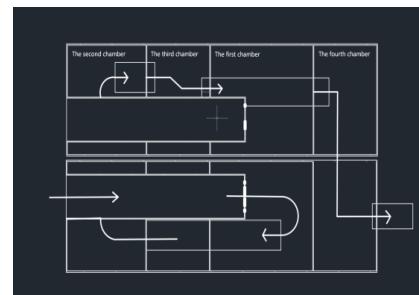


图 3 排气气流走向图

消音器外壳材料选择分别为钛合金和不锈钢，材料密度钛合金为 4.51 g/cm^3 不锈钢为 7.93 g/cm^3 ，钛合金做外壳可以使用壁厚 0.8-1.0mm，304 不锈钢则需要 1.2mm-1.5mm，两种材料在消音方面存在差别。选用钛合金做外壳会因壁薄导致高频噪音外泄；选用 304 不锈钢外壳厚、结构刚性强，对低频噪音有抑制作用且对发动机与车架的振动也有抑制作用。

依托 GT-power 这款软件进行 KTM690 发动机的整机建模仿真和对排气进行一维建模仿真，通过 DOE 的方式和结合实车的可用空间在初期对排气歧管的长度，直径和消音器

的各项数据进行了筛选和确定,为排气的设计研发节省了大量的时间。结合 KTM690 单缸发动机排气特性,最终选择 304 不锈钢。如图 4

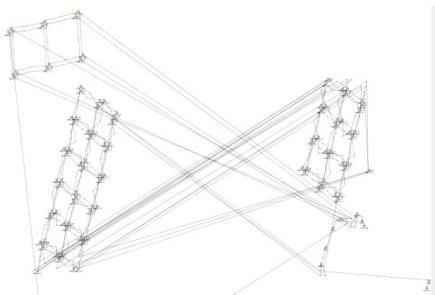


图 4 GT-SUITE 消音器离散化模型

消音器容积为 4.4L 分为 4 个腔室:入口膨胀腔 2.3L、中间扩张腔 1.1L、过度腔 1.0L 及出口扩张腔 1.0L。入口膨胀腔;KTM690 发动机废气以脉冲形式,压力大,速度快,初次进入突然扩大的腔室大部分低频噪音在腔体里面发生反射并与后面进入噪音发生干涉并抵消,2.3L 的容积可以抑制低转速时排气爆鸣声。中间间扩张腔;承接第一腔膨胀过后的气流,进一步扩张,降低流速,让压力降低容积较小对高频噪音抑制,让发动机在 4000-6000 转获得更好的动力响应。过度腔;第二腔气流平顺过度到第三腔,两给腔室之间管并不是对流,圆中心相差 97°。减少对流带来的噪音及减少气流在腔体与腔体之间流动时的阻力。出口膨胀腔;容积大会进一步减小低频噪音的抑制,但会影响高转区间的动力使排出气体流速变慢,小容积高转速更加顺畅,功率输出更强。选取 1L 容积可以缓解未充分燃烧汽油被高温气流二次点燃的爆鸣声。通过 ANSYS 流体仿真知道废气的速度以及压力通过多次数据对比发现连接管在不同腔室的长度会对消音器的压降及管口的速度均会有影响。

如图 5 图 6 所示

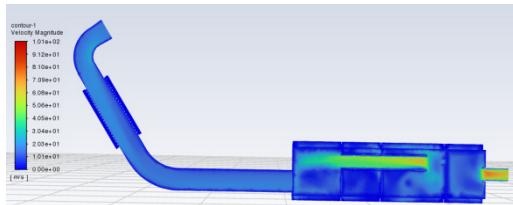


图 5 废气部分速度云图

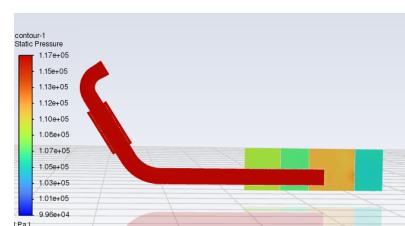


图 6 废气压力云图

2.6 台架测试

在完成排气的设计和焊接后,依托湘仪动力的 FC3000 发动机控制系统和电涡流测功机对发动机的性能进行了测试,数据如下图 7 所示:

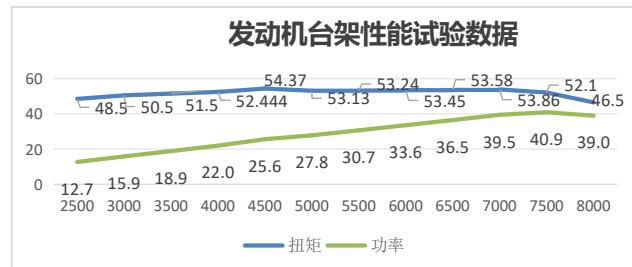


图 7

通过良好的排气设计,在确保符合赛事噪音规则的前提下,发动机拥有宽泛的扭矩输出平台,同时在进气有 20mm 的限流阀的状态下,发动机功率恢复到了原车功率 75% (原车功率为 54KW),动力性能优秀。24 赛季整套排气系统重 6.1kg (头段 1.15kg、消音器 4.95kg);本赛季消音器均用 304 不锈钢,较 24 赛季减重 1kg,通过氩弧焊工艺焊接而成。分贝仪放置赛车的噪音等级将使用静态方法测定。使用 FAST C 加权的分贝仪探头将位于尾气出口后方 0.5m (19.68 英寸) 处,与排风口水平,并与气流流动方向夹角 45°。变速箱处于空挡且发动机处于指定转速。检测将测量排风口的噪音等级,取最高读数为最终测量值 102 分贝。

3 结语

本文设计 690 发动机排气系统针对发动机排气特性进行排气系统设计。首先改变回旋盒式中鼓,减少排气头段弯头使发动机废气更加顺畅排出;其次使用头端变径管合理使用不同管径,提升高转动力同时低转扭矩不会损失严重;最后消音器依据 KTM690 发动机排气脉冲特性针对性设计消音器每一个腔体容积,在减少废气压力,速度同时不会增加回压,可以提升发动机经济性,保证发动机怠速稳定,高转省油。

参考文献

- [1] 中国汽车工程学会.2025中国大学生方程式汽车大赛规则 [J]. 2025.
- [2] 谢田峰.汽车排气系统声学分析及消音器设计 [D].武汉:华中科技大学, 2003.
- [3] 陈永光.消声器容积计算公式分析研究 [J].小型内燃机与摩托车, 2008, 37 (5) : 71-74.
- [4] 郑殿民, 仍越光, 李向雷, 等.汽车排气消音器的设计 [J].现代机械, 2006 (5) : 80-82.
- [5] 季振林.消声器声学理论与设计 [M].北京:科学出版社, 2015.

Exploration of overseas maintenance mode for railway freight cars

Wanhua Luo

Zhongcar Changjiang Transportation Equipment Group Co., Ltd., Science and Technology Development Branch, Wuhan, Hubei, 430212, China

Abstract

This paper examines the current status of China's railway freight car exports overseas. It analyzes key challenges in overseas maintenance, including technical consistency issues, weak technical foundations for operation and maintenance systems, complex conditions for maintenance base construction, lack of basic data on track conditions and operational practices, and substantial workloads in research and standard adoption. The study establishes design principles and objectives for overseas maintenance models, incorporating domestic railway freight car maintenance classification systems while drawing on international practices. Four maintenance levels (A, B, C, D) are proposed with tailored procedures. Additionally, the paper investigates an overseas maintenance information management system, providing technical foundations for establishing China's overseas railway freight car maintenance centers.

Keywords

overseas maintenance; repair process; information system

铁路货车海外维保模式探索

罗万华

中车长江运输设备集团有限公司科技开发分公司，中国·湖北 武汉 430212

摘要

本文介绍了我国铁路货车海外出口现状，分析了技术状态一致性好、运用和维护体系技术基础薄弱、维保基地建设条件复杂、线路和运用基础数据缺乏、调研及标准的消化吸收工作量大等铁路货车海外维保^[1]特点，明确了铁路货车海外维保模式设计原则及目标，并结合国内铁路货车检修修程等级划分，充分借鉴国外类似铁路货车维保实践经验，设置了A、B、C、D四个等级的修程，并针对性设置了修程^[2]，研究了海外维保信息管理系统，为我国铁路货车海外维保中心的建设提供技术基础。

关键词

海外维保；修程；信息系统

1 引言

近年来，我国铁路货车已向东南亚、南亚、西亚、澳洲、南美、北美、非洲等三十多个国家和地区出口，涵盖了敞车、棚车、罐车、漏斗车、平车、自翻车等多种车型。为满足我国出口铁路货车产品的运用维护需求，更好为海外客户提供系统性服务，本文通过对海外维保特点进行分析，提出合理可行的铁路货车海外模式设计方案。

2 铁路货车海外维保特点分析

技术状态一致性好。由于同一编组车辆具有车型一致、编组固定，车辆装卸方式、运行线路、运用环境等工况条件

相对固定等特点，同一列车技术状态基本一致。

运用和维护体系技术基础薄弱。目前非洲等相关国家和地区的铁路货车全部依靠进口，没有建立完整的产品应用和维护体系，修程修制、技术标准、管理制度等基本处于空白状态，无法提供定制化需求和技术支持，需进行深入的调研和需求分析。

维保基地建设条件复杂。维保基地建设的地理环境、法律法规、人文环境、人员素质等与我国存在很大差异，很多重要零部件采用 AAR、ASTM、UIC 等不同标准体系设计制造，既有成熟技术难以移植，必须进行深度融合研究。

线路和运用基础数据缺乏。海外相关国家和地区的线路等级低，运用工况复杂，难以提供基础数据。修程修制制订缺乏科学准确的数据支撑，需要大量数据采集、持续研判和深入分析。

【作者简介】罗万华（1984—），男，本科，中国四川宜宾人，工程师，从事工艺制造技术研究。

调研及标准的消化吸收工作量大。对海外各国家、各地区的调研工作量大，对海外各种标准需要系统的消化吸收。

信息化系统的适应性难度大。海外维保信息化系统须适应不同国家、不同地区、不同标准、不同运用工况的需求，适应性难度大。

3 铁路货车海外维保模式设计原则及目标

3.1 维保模式设计基本原则

安全性原则。对车辆状态进行实时监控，将故障消除在萌芽状态，降低车辆使用过程中的突发性故障，确保列车运行安全。

经济性原则。维保基地机构及人员精简、高效配置，

工艺布局统筹兼顾各级修程一体化设计，工艺装备可靠、经济、实用、柔性化，尽量“一机多能、一人多岗”。

高效性原则。减少在修时长，提高车辆使用效率。

3.2 维保目标

保障铁路运营安全和运营效率，维持车辆性能，确保车辆备用和上线率在 95% 以上。

4 铁路货车海外维保模式设计方案

4.1 修程设置

结合国内铁路货车检修修程等级划分，并充分借鉴国外类似铁路货车维保实践经验，修程设置为 A、B、C、D 四个等级，检修内容融入状态修理念。修程基本情况见表 1。

表 1 修程基本情况

本方案等级	A 级	B 级	C 级	D 级
检修周期	一个往返一次卸后	随机性故障处理	2 年或 40 万 km (先到为准)	8 年或 160 万 km (先到为准)
检修内容	日常检查、维护	摘车故障处置	全面检查、重点检修	全面分解、全面检修
检修地点	卸货点停车线	检修基地	检修基地	检修基地
作业时间	1 小时 / 列	4 小时 / 辆	8 小时 / 辆	3 天 / 辆
质量保证	保证一次装卸循环的车辆运行安全	修理部位质量保证到下一次 C 级修，非修理部位质量保证一个首次运行期	整车及配件质量保证至下一次 C 级修	整车质量保证至下一次 D 级修，其他零部件质量保证至下一次 C 级修

各修程主要作业内容：

A 级修。该修程为车辆日常检查维护，机检故障确认，列车每运行一个往返后，进行一次卸货后列车检查，主要采取人工检查方式，进行一次目视状态检查和列车制动机试验，更换磨耗过限闸瓦，补充圆销和紧固螺栓等易丢失小配件，每列作业时间控制在 1 小时内。

B 级修。为临时故障修，该修程为车辆临时故障维修，对 A 级修发现的危及行车安全且在列检线路上不能快速处置或无法检修的车辆，摘车送检修基地后，进行临时故障修理，该修理主要采用换件修，每辆车检修作业时间约为 4 小时。

C 级修。为车辆定期小修，该修程为车辆定期修，对达到检修周期的车辆进行检修，该修程为中级修。对车辆整车进行全面检查，重点对转向架、车钩缓冲装置、制动阀分解下车检修，其它配件不做分解，在原位外观检查。主要内容是车轮踏面加工、轴承状态判断或更换，轮轴、钩舌及尾框裂纹探伤，制动阀检修等，落成后进行单车制动试验。每辆车检修作业时间约 8 小时。

D 级修。该修程为车辆定期大修，对达到检修周期的车辆及各部件进行全面分解、除锈、检测、检修、组装、试验和油漆涂装。每辆车检修作业时间 3 个工作日。

4.2 主要作业内容

4.2.1 A 级修主要作业内容

对每次卸货后列车，进行一次目视状态检查和机车制

动试验，主要通过观察列车制动、缓解试验检查车辆制动装置是否存在明显泄露及制动是否作用良好；对整车进行全面检查，对 TFDS、TADS 预报故障进行人工检查和确认；检查闸瓦磨耗、车轮踏面擦伤及配件丢失情况等，摇枕、侧架、车钩、钩舌是否具有明显裂纹，车辆是否存在异常震动及摇晃；补充丢失零配件、紧固件；更换磨耗超限的闸瓦，紧固松动的螺栓等。对于重车到站使用翻车机卸货后的车辆进行检查，检查配件是否正位、是否脱落，对于较大故障车辆在列检所实施边线换件修。对停车现场无法处理的故障车辆，及时扣修，进入 B 级修场地实行临时故障维修。

4.2.2 B 级修主要作业内容

对 A 级修发现无法处理的临时故障进行维修，对列检人员无法进行故障处理的车辆，摘车后送维修基地检修。临时故障检修采用换件修方式，并对故障车辆进行全面检查，更换故障零配件及部分易损易耗件，组装后全面检查及试验。

4.2.3 C 级修主要作业内容

对车辆进行全面的外观检查，对整车车体、转向架、钩缓、制动部分采用高压水冲洗，将转向架与车体分离，对转向架及其轮轴进行检查检修和更换。分解钩缓装置，并对制动装置进行检测，更换制动阀及不良配件。将车体架起后检查、消除车体各处裂纹或焊缝开裂，对车体各处变形进行调修，更换有缺陷的配件。转向架检修，轮轴与转向架分离，更换破损或变形的心盘磨耗盘和弹性旁承，制动梁等配

件分解检查检修，目视检查摇枕、侧架是否有裂纹、磨耗、变形等缺陷，并检查减振装置作用良好。更换到达寿命周期的所有尼龙橡胶件和易耗件。轮轴检修，检查轴承外观技术状态，状态不良时须退卸，轴承退卸后送专业厂家检修；对轮对进行清洗除锈，检查轮对外观技术状态及各部位尺寸；对轮对进行磁粉探伤和超声波探伤检查；轮对状态不良时更换轮对；轮对踏面和轮缘磨耗过限时进行旋修加工，轮对各部位尺寸支出检测；轮对检测合格后与轴承同温，轴承与轴颈选配及压装，并进行轴承磨合试验。

4.2.4 D 级修主要作业内容

对整车各部件进行全面分解、除锈、检测、检修、组装、试验和油漆涂装。冲洗与清理后，对车辆进行全面的外观检查，将转向架、钩缓装置与车体分离，拆卸制动装置，车体换为假台车进行手工喷砂除锈。将车体架起后检查，对车体各裂损、腐蚀、变质、变形、松动、焊缝开裂等配件进行修理或更换，补装各丢失配件。阀类、闸调器、制动软管换件修。制动缸、风缸、管件、杠杆、拉杆、手制动机等配件分解除锈检测检修。制动系统组装后进行单车试验，检查整车泄漏、制动和缓解等性能。

4.3 海外维保信息系统

4.3.1 信息系统建设目标

以铁路货车海外维保业务为基础，对车辆检修业务流程进行梳理、优化，形成以“铁路货车台帐”为基础、“检修工单”为核心、“检修业务”为向导、“资源调配”为支持的铁路货车海外维保管理模式。建设目标如下：

实现铁路货车维保台帐管理，建立起车辆及可追溯性配件的检修档案；

实现配件需求、采购、库存管理，为检修业务配件保障提供基础；

建立起数据分析、查询平台，为铁路货车产品质量持续改进提供数据支撑。

4.3.2 信息系统功能架构

铁路货车海外维保管理系统的功能架构主要由五大模块组成：台帐管理、工作管理、物资管理、采购管理、系统管理。

根据各个业务模块的功能特性来划分，可将主要业务分为五大模块，如图 1 所示。



图 1 系统功能模块图

台帐管理。包括车辆台帐、关键零配件台帐等。

工作管理。包括工单管理、检修记录、故障知识库、检修计划、标准作业程序、质检记录等。

物资管理。包括物料名册、库存管理、出库/转移、仓库管理等。

采购管理。包括采购申请单、采购订单、采购验收、供应商管理等。

系统管理。包括用户权限管理、报表管理等。

4.3.3 主要业务流程

梳理、优化车辆检修业务流程，形成以“铁路货车台帐”为基础、“检修工单”为核心、“检修业务”为向导、“资源调配”为支持的铁路货车海外维保管理模式。在运营初期，该系统实现的功能包括：实现铁路货车维保台帐管理，建立起车辆及可追溯性配件的检修档案；实现配件需求、采购、库存管理，为检修业务配件保障提供基础；建立起数据分析、查询平台，为铁路货车产品质量持续改进提供数据支撑。

5 结语

本文针对铁路货车海外维保技术特点，探索合理可行的海外维保模式，实施建设后可推进我国“一带一路”战略，深化“产品+维保”的业务模式，扩大我国铁路货车国际市场规模，提升市场竞争力。同时，海外维保基地也保证了车辆的正常和安全运行，为客户创造良好的经济和社会效益，促进当地的经济发展。

参考文献

- [1] 刘圣佳.阿布贾城铁内燃动车组系统专业化维保方案[D].综合运输, 2024年, 第7期: 188-192.
- [2] 仇建军, 赵孝俊, 管昊, 王刚强, 邹文.出口巴基斯坦内燃机车维保项目[D].铁道机车与动车, 2021年, 第3期: 43-46.
- [3] 蔡帆. 铁路货车海外维保管理信息系统 [J]. 中外企业家, 2015, (17): 94+97.

Analysis of Functional Components in Health Foods and Research on Their Action Mechanisms

Qing Li

Jinan Administrative Approval Service Bureau, Jinan, Shandong, 250001, China

Abstract

With the upgrading of health consumption concepts, health foods have gradually become an important choice for public health management due to their characteristics of regulating bodily functions and preventing chronic diseases. The core lies in the precise actions of their functional components, which directly influence human physiological functions through mechanisms such as antioxidation, immune regulation, and metabolic intervention. Currently, the industry faces issues such as unclear action mechanisms of components and severe product homogenization, necessitating the use of modern scientific technologies to elucidate the action pathways of functional components and provide a scientific basis for product development. This paper systematically reviews the biological activities of typical functional components in health foods, including polysaccharides, proteins, vitamins, etc. It combines research progress on action mechanisms such as immune regulation, antioxidation, and lipid-lowering to explore their potential applications in preventing cardiovascular diseases, delaying aging, enhancing immunity, and other aspects, providing theoretical support for the functional optimization and industrial upgrading of health foods.

Keywords

health foods; functional components; action mechanisms; immune regulation; antioxidation; chronic disease prevention

保健食品功效成分解析与作用机制研究

李青

济南市行政审批服务局, 山东·济南 250001

摘要

随着健康消费观念的升级, 保健食品因其调节机体功能、预防慢性疾病的特性, 逐渐成为公众健康管理的重要选择。其核心在于功效成分的精准作用, 这些成分通过抗氧化、免疫调节、代谢干预等机制, 直接影响人体生理功能。当前, 行业面临成分作用机制不明确、产品同质化严重等问题, 亟需通过现代科学技术解析功效成分的作用路径, 为产品开发提供科学依据。本文系统梳理了保健食品中多糖类、蛋白质类、维生素类等典型功效成分的生物活性, 结合免疫调节、抗氧化、降血脂等作用机制的研究进展, 探讨其在预防心血管疾病、延缓衰老、增强免疫力等方面的应用潜力, 为保健食品的功能优化与产业升级提供理论支持。

关键词

保健食品; 功效成分; 作用机制; 免疫调节; 抗氧化; 慢性病预防

1 功效成分分类与作用机制

保健食品的功效成分涵盖天然植物提取物、动物提取物、矿物质、维生素及生物活性肽等, 其作用机制涉及多条生理通路。

1.1 多糖类成分

多糖类成分是保健食品中一类重要的生物活性物质, 以香菇多糖、枸杞多糖为代表, 其核心功能集中于免疫调节与代谢改善。香菇多糖通过激活巨噬细胞、T 细胞等免疫细胞, 显著增强机体非特异性免疫能力。^[1] 其作用机制涉及免

疫细胞表面受体的识别与结合, 触发信号转导通路, 促进干扰素、白细胞介素等细胞因子的分泌。这些细胞因子形成免疫防御网络, 抑制病原微生物增殖, 同时调节炎症反应的程度, 避免过度免疫损伤。枸杞多糖则通过干预胰岛素信号通路, 改善糖脂代谢异常。其活性分子可与胰岛素受体结合, 激活下游 PI3K/Akt 通路, 促进葡萄糖转运蛋白的表达, 增强细胞对葡萄糖的摄取能力。此外, 枸杞多糖还能抑制脂肪合成相关酶的活性, 减少甘油三酯积累, 对预防糖尿病及其并发症具有潜在价值。多糖类成分的免疫调节与代谢改善功能, 使其在慢性病预防与健康管理中占据重要地位。

1.2 蛋白质类成分

蛋白质类成分经酶解技术处理后, 生物利用率显著提升, 其中大豆肽与乳清蛋白是典型代表。大豆肽中的活性片

【作者简介】李青 (1978-), 女, 中国山东济南人, 本科, 工程师, 从事食品科学与工程研究。

段可通过抑制血管紧张素转换酶活性，减少血管紧张素Ⅱ的生成，从而辅助降低血压。其作用机制涉及酶活性中心的竞争性结合，阻断底物与酶的相互作用，降低血管收缩物质的水平。乳清蛋白富含亮氨酸等支链氨基酸，通过激活 mTOR 通路促进肌肉蛋白合成。亮氨酸作为信号分子，可与细胞膜上的 Sestrin 蛋白结合，解除对 mTORC1 复合物的抑制，启动蛋白质翻译过程。这一机制在延缓老年人肌肉衰减中尤为重要，因肌肉质量减少与代谢综合征、跌倒风险增加密切相关。蛋白质类成分的酶解改性技术，不仅提高了其消化吸收率，还通过结构优化增强了特定生理功能，为运动营养与老年保健提供了科学依据。

1.3 维生素与矿物质

维生素与矿物质构成抗氧化防御体系与酶活性调节网络，其中维生素 C、维生素 E 及硒的协同作用尤为关键。维生素 C 通过还原自由基中间体，终止链式氧化反应，其作用机制涉及电子供体功能，将氧化型物质还原为稳定状态，阻断自由基的传递。维生素 E 与硒则通过保护细胞膜免受脂质过氧化损伤发挥功能。维生素 E 作为脂溶性抗氧化剂，可嵌入细胞膜磷脂双层，捕获脂质过氧自由基；硒作为谷胱甘肽过氧化物酶的活性中心，催化过氧化氢与有机过氧化物的还原，减少氧化应激对细胞结构的破坏。矿物质方面，钙通过抑制甲状旁腺激素分泌，维持骨代谢平衡。其机制涉及钙受体对甲状旁腺细胞的负反馈调节，降低骨吸收相关酶的活性。铁作为血红蛋白核心成分，直接参与氧气运输，其缺乏会导致血红蛋白合成减少，引发贫血症状。维生素与矿物质的互补作用，使其在抗氧化、骨骼健康与血液生成中发挥不可替代的作用。

1.4 生物活性肽与植物提取物

生物活性肽与植物提取物通过小分子渗透与生物活性分子作用，实现快速吸收与生理功能调节。海参肽中的精氨酸残基可促进一氧化氮合成，其机制涉及精氨酸酶与一氧化氮合酶的竞争性代谢。^[2] 精氨酸在一氧化氮合酶催化下生成一氧化氮，后者通过扩散进入血管平滑肌细胞，激活可溶性鸟苷酸环化酶，提升环磷酸鸟苷水平，导致血管扩张。胶原蛋白肽通过刺激成纤维细胞增殖，提升皮肤弹性。其活性片段可与成纤维细胞表面受体结合，激活 MAPK 与 TGF-β 信号通路，促进胶原蛋白与弹性纤维的合成。植物提取物如茶多酚、五味子素，通过抑制炎症因子释放减轻慢性炎症反应。茶多酚中的表没食子儿茶素没食子酸酯可阻断 NF-κB 通路，减少肿瘤坏死因子 -α 与白细胞介素 -6 的表达；五味子素通过调节 PPAR γ 受体活性，抑制炎症信号的传递。生物活性肽与植物提取物的多靶点作用，使其在心血管保护、皮肤健康与抗炎治疗中具有广泛应用前景。

2 作用机制研究进展

2.1 免疫调节机制

免疫调节是保健食品功效成分发挥健康作用的核心领

域之一，其机制涉及肠道菌群平衡、细胞信号通路调控及炎症反应抑制。益生菌通过竞争性抑制病原菌定植，直接改变肠道微生物群落结构。其表面黏附素与病原菌的黏附位点结合，阻止后者在肠黏膜的附着，同时通过营养竞争限制病原菌增殖。^[3] 此外，益生菌代谢产生的短链脂肪酸如乙酸、丙酸、丁酸，可激活肠道上皮细胞表面的 G 蛋白偶联受体，触发细胞内信号转导，促进紧密连接蛋白合成，增强肠道屏障的物理与化学防御功能。这一过程不仅减少肠道通透性，防止病原菌及其毒素入血，还通过调节树突状细胞与 T 细胞的相互作用，诱导免疫耐受，避免过度炎症反应。

蜂胶中的咖啡酸苯乙酯则通过靶向抑制 NF-κB 通路，降低炎症因子表达。NF-κB 作为炎症反应的核心转录因子，其激活依赖 IκB 激酶的磷酸化与降解。咖啡酸苯乙酯可抑制 IκB 激酶的活性，阻止 NF-κB 核转位，从而减少肿瘤坏死因子 -α、白细胞介素 -6 等促炎因子的基因转录。这种抑制作用在慢性炎症疾病中尤为重要，因长期炎症反应与自身免疫病、代谢综合征的发生密切相关。

2.2 抗氧化与抗衰老机制

抗氧化与抗衰老机制的核心在于清除自由基、减少氧化损伤及维持细胞功能稳定性。原花青素、番茄红素等成分通过螯合金属离子、中断自由基链式反应，直接抑制氧化应激。金属离子如铁、铜是芬顿反应的催化剂，可加速过氧化氢转化为羟自由基。原花青素的多酚结构使其能与金属离子形成稳定络合物，降低其催化活性。同时，原花青素通过提供氢原子，终止自由基的链式传递，防止脂质过氧化与蛋白质羰基化。

研究显示，原花青素可上调超氧化物歧化酶活性，增强内源性抗氧化防御。超氧化物歧化酶将超氧阴离子转化为过氧化氢，后者再经谷胱甘肽过氧化物酶催化还原为水。这一过程降低线粒体氧化应激水平，保护线粒体 DNA 免受损伤。线粒体作为细胞能量工厂，其功能异常与细胞衰老密切相关。原花青素通过减少线粒体膜电位下降、抑制细胞色素 c 释放，延缓线粒体途径的细胞凋亡。此外，番茄红素通过嵌入细胞膜磷脂双层，直接猝灭单线态氧，减少膜流动性改变与信号转导异常。抗氧化成分的协同作用，不仅延缓细胞衰老进程，还通过抑制氧化应激诱导的端粒缩短，维持染色体稳定性，对预防年龄相关疾病具有重要意义。

2.3 代谢调节机制

代谢调节机制聚焦于脂质代谢、糖代谢及能量平衡的调控，其核心在于关键酶的活性抑制与信号通路的激活。鱼油中的 Omega-3 脂肪酸通过竞争性抑制花生四烯酸代谢，减少炎症介质生成。花生四烯酸在环氧化酶与脂氧合酶催化下，生成前列腺素与白三烯等促炎物质。Omega-3 脂肪酸与花生四烯酸结构相似，可竞争性结合酶活性中心，降低促炎介质的合成。其衍生物二十碳五烯酸进一步通过抑制甘油三酯合成酶的活性，减少肝脏脂质沉积，改善血脂谱。这一过程涉及 SREBP-1c 通路的下调，减少脂肪酸合成相关基因的

表达。

苦瓜素则通过激活 AMPK 通路，增强胰岛素敏感性。

AMPK 作为能量传感器，在低能量状态下被激活，促进葡萄糖摄取与脂肪酸氧化。苦瓜素可模拟能量缺乏信号，直接激活 AMPK α 亚基的苏氨酸 172 位点磷酸化，启动下游信号转导。这一过程不仅增加骨骼肌与脂肪组织对胰岛素的响应，还通过抑制肝脏糖异生相关酶的活性，减少血糖生成。此外，AMPK 激活可促进线粒体生物合成，提升细胞能量代谢效率。代谢调节机制的精准性，使保健食品在糖尿病、肥胖及心血管疾病的预防中具有科学依据，其作用靶点涵盖从分子到器官的多层次代谢网络。

3 保健食品市场监管法律

3.1 保健食品市场准入法律规范

保健食品市场准入法律规范的核心在于建立严格的注册与备案制度，确保产品安全性和功效宣称的科学性。我国《保健食品注册与备案管理办法》明确规定，保健食品需通过国家市场监督管理总局的注册或备案程序方可上市销售。注册制度适用于声称具有特定保健功能的产品，要求申请人提交安全性、保健功能和质量可控性等方面的研究报告及试验数据。这一过程涉及毒理学试验、人体试食试验和功效成分检测，确保产品不会对人体产生急性、亚急性或慢性危害，同时其宣称的保健功能需有充分的科学依据。备案制度则针对营养素补充剂类产品，要求申请人提交产品配方、生产工艺和标签说明书等材料，经形式审查后即可完成备案。^[4] 两种制度并行，既保证了高风险产品的严格监管，又提高了低风险产品的市场准入效率。

3.2 保健食品生产经营过程监管

保健食品生产经营过程监管涵盖原料采购、生产加工、包装储存和运输销售等全链条环节，旨在确保产品质量的一致性和稳定性。在原料采购环节，法律要求企业建立供应商审核制度，对原料供应商的资质、生产能力和质量管理体系进行评估，确保原料来源合法、质量可靠。企业需对每批原料进行检验，检验项目包括感官指标、理化指标和微生物指标等，不合格原料不得投入生产。生产加工环节是监管的重点，法律要求企业按照良好生产规范（GMP）组织生产，建立完善的生产记录和追溯体系。生产车间需符合洁净度要求，生产设备需定期清洗消毒，防止交叉污染。企业还需对关键控制点进行监控，如原料投料量、混合均匀度和灭菌效

果等，确保产品符合质量标准。

3.3 保健食品广告与宣传法律约束

保健食品广告与宣传法律约束的核心在于防止虚假宣传和误导消费者，维护市场秩序和公众健康。我国《广告法》和《保健食品广告审查暂行规定》明确规定，保健食品广告不得含有表示功效、安全性的断言或保证，不得涉及疾病预防、治疗功能，不得声称或暗示广告商品为保障健康所必需。这些规定有效遏制了企业通过夸大宣传吸引消费者的行为，保护了消费者的知情权和选择权。广告内容需经省级市场监督管理部门审查批准后方可发布，审查内容包括广告脚本、宣传用语和证明材料等。未经审查或审查不合格的广告不得发布，否则将面临行政处罚。

在宣传方式上，法律禁止企业通过会议、讲座和健康咨询等方式进行虚假宣传。这些场所往往成为非法营销的重灾区，企业通过赠送礼品、组织旅游等手段诱导消费者购买产品。法律要求企业在宣传活动中需如实介绍产品信息，不得夸大功效或贬低其他产品。此外，法律还禁止企业利用医疗机构、科研单位和学术机构的名义或形象作证明，防止消费者因信任权威机构而盲目购买产品。监管部门通过监测广告发布平台、受理消费者投诉和开展专项整治行动等方式，对违法广告和宣传行为进行打击。对于情节严重的违法行为，监管部门可吊销企业广告发布资格或产品批准文号，直至追究刑事责任。这些法律约束措施共同构建了保健食品广告与宣传的规范体系，促进了市场的健康发展。

4 结语

保健食品功效成分的研究正从单一成分向复合配方发展，如多糖与益生菌联用可协同增强免疫效果；纳米包裹技术提升成分稳定性，延长作用时间。然而，行业仍面临标准缺失、功效评价体系不完善等问题。未来需结合基因组学、代谢组学技术，建立个性化营养干预方案，推动保健食品向精准化、功能化方向转型。

参考文献

- [1] 李丹,谢林云. 保健食品中粗多糖功效项目的理化检测方法研究 [J]. 中外食品工业,2024,(14):90-92.
- [2] 史敏. 保健食品功效成分检测技术与方法 [J]. 食品安全导刊,2023,(32):166-168.
- [3] 闫文杰. 保健食品的研发与检测新动态 [J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(11):4400-4401.
- [4] 贾鸿莹. 保健食品市场监管法律问题研究 [D]. 黑龙江大学,2020.

Research on Differences in DC Conversion Routes and Optimization Methods for Wind Turbines

Chao Wang

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250100, China

Abstract

The production of green hydrogen through renewable energy is flourishing in the global energy transition, while the efficient utilization of wind power faces increasingly stringent demands. Consequently, the conversion of wind turbines to direct current systems has emerged as a critical research direction for integrating wind power with green hydrogen production. This paper focuses on comparing the principles, advantages, and limitations of three major technical approaches for conversion: full-power converters, DC parallel aggregation, and hybrid systems. It then establishes a comprehensive four-dimensional evaluation index system that integrates technical feasibility, economic efficiency, reliability, and site adaptability. Additionally, a hierarchical decision-making method combining qualitative and quantitative approaches is proposed, aiming to provide a theoretical framework and evaluation basis for decision-making on conversion solutions for wind farm stakeholders, thereby promoting standardized and efficient application of this technology.

Keywords

Fan retrofit; DC conversion; technical route; full-power converter; DC aggregation

风机直流改造路线差异与优选方法研究

王超

山东电力工程咨询院有限公司，中国·山东济南 250100

摘要

绿电制氢在全球能源转型中蓬勃发展，风电高效利用面临更高要求，风机直流改造随之成为衔接风电与绿电制氢的关键研究方向。本文重点对比全功率变流器、直流并联汇集、混合型三大改造技术路线的原理、优势与局限性，进而构建融合技术性、经济性、可靠性、场站适配性的四维度综合评价指标体系，并提出层次化、定性与定量结合的优选决策方法，旨在为风电场相关方的改造方案决策提供理论框架与评判依据，推动该技术规范化、高效化应用。

关键词

风机改造；直流化；技术路线；全功率变流器；直流汇集

1 引言

风力发电作为技术最成熟、规模化程度最高的可再生能源之一，在我国能源结构转型中扮演着举足轻重的角色。随着绿电制氢产业在全球能源转型浪潮中蓬勃发展，风电能源的高效利用面临更严苛且多元的要求，风机直流改造由此成为衔接风电与绿电制氢的关键且重要的研究方向，也遇到了很多问题：其一，其并网特性较弱，缺乏有效的功率与电压支撑能力，在直流电网发生故障时极易脱网，威胁电网安全稳定运行；其二，运行效率与电能质量有待提升，特别是在非额定风速下，能量捕获效率较低^[1]。

风机直流改造并非单一技术方案，而是根据原有机型、改造目标、预算约束和风电场具体情况的不同^[2]，衍生出多

种技术路线。这些路线在技术复杂度、改造深度、初始投资、长期收益等方面存在巨大差异。若选择不当，可能导致改造成本远超预期、性能提升不达目标，甚至引发新的技术问题。因此，系统性地梳理各技术路线的内在差异，并建立一套科学、普适的优选方法，对于指导工程实践、规避投资风险、确保改造效果具有至关重要的理论价值与现实意义^[3]。

2 风机直流改造主流技术路线及其差异分析

风机直流改造的本质是将原有的交流发电机、交流并网系统，通过电力电子变换装置，转变为以直流电形式输出并汇集的系统。根据改造的深度、拓扑结构及核心设备的不同，可将其归纳为以下三大主流技术路线。

2.1 路线一：基于全功率变流器的深度改造路线

技术原理与架构：该路线通常采用永磁同步发电机或电励磁同步发电机。在直流改造场景下，会针对性保留并优化 AC/DC 模块功能，不仅能高效将风机发电系统输出的三

【作者简介】王超（1984-），男，中国山东济南人，本科，工程师，从事工程管理研究。

相交流电整流为直流电，还可通过内置的滤波单元降低直流侧谐波干扰。后续再由高频隔离型 DC/DC 模块完成直流升压操作，将电压等级精准匹配绿电制氢电解槽的额定输入要求。整个改造过程直接省略了原有变流器中用于并网的网侧 DC/AC 环节，且无需对风机主轴、传动齿轮箱等核心机械部件进行大幅调整，从结构设计上实现了“最小改动量”，同时保障了电力变换的稳定性。

优势分析：结构简单，改动小：省去网侧 DC/AC 环节后，变流器整体体积缩减，设备布局更紧凑；改造仅涉及变流器内部模块替换与线路调整，无需拆解风机机舱外壳或调整传动系统，施工周期可缩短，尤其适合已投运风机的原位改造，降低对风电场所发电量的影响。效率较高：减少一次交直流变换后，可降低能量传递过程中的损耗。可靠性较好：设备故障点集中在变流器模块，相较于双馈风机的“定子+转子+变流器”多系统故障模式，其故障排查时间更短。且全功率变流器采用模块化设计，单个 AC/DC 模块故障时可快速更换，不影响整体运行，保障制氢系统日均运行时长稳定。

局限性分析：成本相对较高：永磁半直驱风机的永磁体成本占发电机总成本的比例高，且全功率变流器的 IGBT 模块数量比双馈变流器更多，导致单台改造初始投资比双馈方案高；同时，永磁体存在高温失磁风险，需额外配置温度监控系统，进一步增加运维成本。机型灵活性稍逊：其额定转速区间固定，在风速波动较大的区域，难以通过调整转速适配风能变化。当风速骤降时，无法快速降低转速以维持输出电压稳定，需依赖 DC/DC 模块频繁调节电压，导致电压波动幅度比双馈方案更高，可能影响电解槽的电极寿命。

2.2 路线二：基于交流侧改造与直流并联汇集的适度改造路线

技术原理与架构：保留原有的异步发电机或同步发电机及其励磁系统。在每一台或每一组风机的交流输出端，增设一台“AC/DC”变换器。该整流单元将风机发出的变频变压的交流电转换为稳定的直流电。多台风机输出的直流电通过直流电缆并联至一条公共的直流母线上，形成直流汇集网络。

优势分析：该改造方案针对性强，最大限度地保留了

风机原有的发电核心部件，从而有效降低了改造成本和工程实施的复杂度。改造后的风电场整体灵活性得到了显著提升，主要得益于直流汇集系统的采用，这一系统有效消除了风机之间的无功功率耦合和同步问题，使得每台风机都能够独立运行在其最佳功率点，从而提高整体发电效率。

局限性分析：该改造方案对于单机性能的提升具有一定的局限性，因为它并未改变发电机本体的控制特性。因此，单台风机的功率控制精度和低电压穿越能力等动态性能的改进，在很大程度上依赖于前端 AC/DC 变换器的容量和控制能力。需要精心设计控制策略以协调分散的整流单元与集中的逆变站之间的功率平衡，这进一步增加了系统的控制难度。

2.3 路线三：基于混合型改造的折中路线

技术原理与架构：该路线同样保留原有机组，但在 AC/DC 变换环节采用更先进、更具功能性的拓扑结构。例如，采用具备双向功率流动能力和自清除故障功能的模块化多电平换流器作为整流单元，或者在对拖式风电机组的转子侧和网侧同时进行改造，构建一个部分功率的直流化通道。其核心思想是通过提升关键节点的电力电子装备水平，来弥补路线二在动态性能上的不足。

优势分析：性价比可能更优：在不过度增加成本的前提下，相比路线二，能获得更接近路线一的动态性能，如更好的故障穿越能力和电能质量。技术灵活性高：可以根据具体的性能短板和预算，灵活选择改造的“深度”和“广度”，实施分阶段改造策略，为未来升级预留空间：模块化的设计便于未来技术升级或容量扩展。

局限性分析：技术复杂度最高：控制策略最为复杂，需要解决新旧系统之间、不同拓扑之间的电磁暂态协调问题。工程实践案例较少：相较于前两种路线，混合型路线仍处于探索和示范应用阶段，缺乏大规模应用的成熟经验和可靠性数据，潜在风险较高。方案设计非标化：难以形成标准化方案，通常需要“一机一策”或“一场一策”的定制化设计，对设计单位的技术能力要求极高。

2.4 三大技术路线的核心差异对比

为清晰展示差异，总结如下表所示：

对比维度	路线一：全功率变流器改造	路线二：直流并联汇集改造	路线三：混合型改造
改造核心	保留全功率变流器，省略 DC/AC 模块	增加 AC/DC 整流器，新建直流汇集网	采用先进拓扑，部分系统深度改造
改造深度	较少，不涉及核心部件	较高，主要改造并网环节	中等或可调，介于二者之间
性能提升	最全面，单机性能卓越	有限，主要提升场站级性能	较全面，可针对性提升短板
初始投资	较高	较低	中等，取决于方案
技术风险	较低（技术成熟）	中等	较高
适用场景	机组老旧需彻底更新，或对并网要求极高	机组状态良好，希望降低集电损耗、提升场站可控性	对成本和性能有平衡需求，具备较强技术能力的业主

3 风机直流改造路线的综合评价与优选方法

3.1 综合评价指标体系的构建

3.1.1 技术性维度

后端支持能力：评估方案能否满足绿电制氢的后端要求。能量捕获与效率：评估改造后风机在全风速范围内的运行效率，以及整个风电场集电系统的损耗降低程度。电能质量：评估电流的谐波畸变率、闪变等指标。控制系统复杂性与成熟度：评估控制策略的设计难度、系统稳定性以及该技术路线的工程应用成熟度。

3.1.2 经济性维度

初始投资成本：包括设备采购成本、安装施工成本、设计咨询费用等。运营与维护成本：改造后系统的预计故障率、维护周期、备品备件费用及人员技术要求。全生命周期成本：综合考虑初始投资和未来多年的运营维护成本，折现至当前的价值。投资回报率与投资回收期：基于发电量提升、运维费用节约、可能获得的电网辅助服务收益等，计算经济回报。

3.1.3 可靠性维度

系统可用率：预计改造后风机的年可发电时间。关键设备寿命与可靠性：核心电力电子器件、电容等的预计寿命和失效率。故障影响范围与可维护性：单一部件故障是仅影响单机，还是影响一个汇集回路？故障诊断和修复的便捷性如何？对原有设备的依赖性：方案对原有发电机、齿轮箱等设备状态的依赖程度，是否会加剧其磨损。

3.2 优选决策流程与方法

3.2.1 信息采集与约束筛选阶段

明确改造目标：首要任务是厘清改造的核心驱动力。是为了满足强制的并网新规？是为了提升发电量？还是为了解决绿电消纳？目标不同，决策的侧重点截然不同。全面评估现状：对风电场进行彻底“体检”，包括：机组类型、运行年限、健康状况、风资源状况、现有集电线路与升压站

容量、电网接入点的技术要求等。

3.2.2 定性分析与定量评价相结合的综合评价阶段

建立层次结构模型，将总目标分解为技术性、经济性、可靠性、适配性等准则层，并进一步细化为具体指标层。采用专家打分和层次分析法确定各层级指标的权重，例如，若电网薄弱，则“并网支持能力”的权重应提高。对通过初筛的方案进行评分，经济性指标定量计算，技术性、可靠性等指标则定性量化。最后，根据各指标的得分和权重计算方案的综合得分，以评估其优劣。

3.2.3 敏感性分析与最终决策阶段

进行敏感性分析：考察关键参数波动时，各方案综合得分的稳定性。找出影响决策结果的最敏感因素。

风险识别与预案：对得分最高的方案，进行全面的风险识别。特别是对于技术较新或可靠性数据不足的方案，必须评估其潜在风险并制定应对预案。

4 结语

风机直流改造是风电存量资产激活与风电场更新的关键技术，有全功率变流器、直流并联汇集、混合型三种改造路线，选适配路径很重要。

未来，电力电子等技术成熟、绿电制氢发展、风机工艺进步，将推动该技术升级；人工智能与大数据的应用，也能优化改造方案与方法。

参考文献

- [1] 贾利渊,李婷婷,包晶晶,等.《商用空调风机用直流无刷电动机技术规范》团体标准解读 [J]. 中国标准化, 2025, (15): 184-189.
- [2] 马骞,朱益华,谢惠藩,等.抑制风火打捆交直流外送系统暂态过电压的风机关键控制参数优化方法 [J]. 可再生能源, 2025, 43 (07): 970-978.
- [3] 魏博,吴斌,呼鹏伟,等.大规模新能源直流外送系统下的风机高电压穿越控制参数优化方法 [J]. 能源与环保, 2025, 47 (04): 238-247.

Research on computer network security protection technology based on machine learning

Zhen chao Ma

Wuhan First Commercial School, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

To address the limitations of traditional cybersecurity protection technologies in handling unknown and dynamic threats, this paper investigates machine learning-based defense techniques. It analyzes their applications across four key scenarios: Intrusion Detection and Prevention (including data processing, multi-paradigm detection, and dynamic response), Malicious Code Detection (static/dynamic feature extraction and anti-antivirus design), Traffic Anomaly Analysis (multi-dimensional features and anomaly attribution), and Identity Authentication and Access Control. The study constructs a hierarchical collaborative defense framework, clarifying objectives, functional hierarchies, and critical technologies such as data fusion and model updates. It examines challenges like data quality and attack resistance while outlining future research directions, providing insights for enhancing intelligent defense capabilities.

Keywords

machine learning; network security protection; intrusion detection; malicious code detection

基于机器学习的计算机网络安全防护技术研究

马振超

武汉市第一商业学校，中国·湖北 武汉 430000

摘要

为解决传统网络安全防护技术应对未知、动态威胁的局限，本文研究基于机器学习的防护技术：分析其在入侵检测与防御（含数据处理、多范式检测与动态响应）、恶意代码检测（静态/动态特征提取及抗“免杀”设计）、流量异常分析（多维度特征与异常归因）、身份认证与访问控制四大场景的应用；构建分层协同的防护系统框架，明确目标、层级功能及数据融合、模型更新等关键技术；剖析数据质量、对抗攻击等挑战并展望未来方向，为提升防护智能化提供参考。

关键词

机器学习；网络安全防护；入侵检测；恶意代码检测

1 引言

随着网络普及，恶意攻击、数据泄露等威胁常态化，传统依赖特征码、静态规则的防护技术因检测滞后、难以应对未知攻击显局限。机器学习凭借数据驱动、自适应学习优势为防护升级提供新路径，本文围绕其在四大核心防护场景的应用、防护系统框架设计、技术挑战与展望展开研究，旨在丰富理论体系，提升网络安全防护智能化水平，应对新型威胁。

2 机器学习在网络安全防护中的核心应用技术分析

2.1 基于机器学习的入侵检测与防御技术

在基于机器学习的入侵检测与防御技术中，数据处理是保障检测精度的基础前提，需通过多维度操作实现数据价值挖掘：网络流量特征提取需从传输层、应用层协议中捕捉端口使用频率、数据包大小分布、会话持续时间等关键信息，同时从系统日志、应用日志中筛选与访问行为、指令执行相关的有效数据；日志数据清洗与归一化则针对冗余日志、格式混乱数据进行过滤与标准化，消除符号差异、数值量级偏差对模型训练的干扰；冗余特征降维则借助主成分分析、线性判别分析等方法，剔除特征间的相关性冗余，降低模型计算复杂度。在此基础上，不同机器学习范式形成互补的入侵检测逻辑：监督学习依托已标注的攻击样本，通过支持向量机、随机森林等算法构建分类模型，实现对已知入侵类型的

【作者简介】马振超（1982—），男，回族，中国湖北武汉人，本科，讲师，从事计算机研究。

精准识别；无监督学习无需样本标注，通过 K-means、孤立森林等算法挖掘数据内在分布规律，定位偏离正常行为模式的未知入侵；半监督学习则结合少量标注样本与大量未标注样本，在标签稀缺场景下提升检测模型的泛化能力。而入侵防御的动态响应机制，需以检测结果为依据，通过机器学习模型对攻击趋势进行预测，自动调整防火墙规则、入侵防御系统策略，并生成威胁阻断决策，实现从“被动检测”到“主动防御”的转变^[1]，如图 1 所示。



图 1 入侵防御系统动态响应流程图

2.2 基于机器学习的恶意代码检测技术

恶意代码的特征提取需兼顾静态与动态维度：静态特征提取聚焦 PE 文件的结构信息，无需运行代码即可完成初步特征捕捉；动态特征提取则需在沙箱环境中执行代码，记录进程创建、线程操作、注册表修改、系统调用序列等行为数据，反映恶意代码的实际破坏意图。针对这些特征，机器学习形成差异化的检测应用路径：分类模型如逻辑回归、卷积神经网络，通过学习正常程序与恶意代码的特征差异，实现二者的高效区分；聚类模型如 DBSCAN、层次聚类，则通过挖掘恶意代码变种间的特征相似性，完成对未知恶意代码变种的归类识别。面对恶意代码的“免杀”技术，机器学习需通过特征鲁棒性设计，筛选不易被篡改的核心特征，并强化动态行为建模，避免仅依赖静态特征导致的检测失效，提升对变异恶意代码的识别能力^[2]。

2.3 基于机器学习的网络流量异常分析技术

网络流量的特征工程需覆盖多维度关键信息：时序特征反映流量在时间维度的变化规律，如单位时间内的数据包数量、流量峰值出现时刻；统计特征包括数据包大小均值、方差、协议分布占比等量化指标；协议特征聚焦 TCP、UDP、HTTP 等协议的字段异常，如异常的标志位组合、非标准端口的协议传输；流量分布特征则关注流量在不同 IP、端口间的分布均衡性。正常流量模型的构建，需依托历史正常流量数据，通过机器学习算法学习正常流量的分布模式，并建立动态更新机制，结合新增的正常流量数据迭代优化模型，适应网络拓扑、业务需求变化带来的流量模式调整。在异常检测与归因阶段，模型通过对实时流量与正常模型的偏差程度，结合自适应调整的异常阈值判断异常流量；同

时，基于流量特征与历史异常案例的关联分析，初步判断异常类型，为后续处理提供方向。

2.4 基于机器学习的身份认证与访问控制技术

行为生物特征的机器学习建模，需捕捉用户操作过程中的独特模式：键盘输入节奏包括按键间隔时间、按键持续时长、错误按键修正频率等，鼠标移动轨迹涵盖移动速度、加速度、点击间隔等特征，终端操作习惯则包括文件访问路径、应用启动顺序、操作频率等；通过机器学习算法对这些特征进行建模，形成用户独有的行为基线。基于该基线，异常登录检测可实时对比当前登录用户的行为数据与基线的偏差：若用户登录设备、地理位置无异常，但行为模式显著偏离基线，模型则判定为异常登录行为并触发告警。在动态访问控制层面，机器学习需根据用户的实时行为数据计算风险评分，如频繁访问敏感文件、在非工作时段进行高权限操作会提升风险评分，系统则依据风险评分动态调整用户权限，如降低高风险用户的操作权限、限制敏感资源访问，实现权限与用户行为风险的动态匹配，如图 2 所示。



图 2 动态访问控制中机器学习风险评分机制

3 基于机器学习的网络安全防护系统设计框架

3.1 系统设计目标

基于机器学习的网络安全防护系统设计需先明确核心目标与关键性能指标，为系统构建提供方向指引。核心目标层面，实时威胁检测旨在缩短攻击发现周期，应对网络攻击“瞬时性”特点，避免攻击扩散造成更大损失；精准攻击识别聚焦降低对正常网络行为的误判，通过机器学习模型对攻击特征的深度学习，减少因误识别导致的业务中断；自适应防护响应要求系统根据攻击类型、强度动态调整防护策略，打破传统“静态规则”防护的局限性，提升对多变攻击手段的应对能力；可扩展性则需适配不同规模网络环境，无论是中小型企业局域网还是大型跨域网络，均能通过模块扩展满足防护需求。性能指标层面，检测准确率决定攻击识别效果，误报率需控制以避免干扰运维，漏报率需压低以防安全隐患，响应延迟需匹配实时防护需求，资源开销则平衡防护效果与硬件成本^[3]。

3.2 系统整体架构

系统整体架构采用分层协同设计。数据采集层作为“人

口”，汇聚网络流量、系统日志等多源数据，通过实时抓包、日志同步保障数据全面性；数据预处理层负责数据清洗、特征提取与格式标准化，为后续分析提供适配数据；机器学习分析层作为“核心”，依托入侵检测、恶意代码检测等模块，通过模型调度机制动态调用适配模型；决策响应层根据威胁等级生成流量阻断、策略调整等防护动作，优化响应逻辑；系统管理层则承担模型迭代、参数配置与日志审计，为系统运行提供支撑^[4]。

3.3 关键技术实现要点

系统的有效运行依赖三大关键技术实现要点，解决架构落地过程中的核心技术难题。多源异构数据的融合处理需突破数据格式差异与特征孤立的问题：数据格式统一通过制定标准化数据 schema，将结构化日志、半结构化日志、非结构化流量数据转换为统一格式，消除数据交互障碍；特征互补融合则挖掘不同数据源间的关联特征，如将终端行为数据中的“异常登录时间”与网络流量数据中的“异常 IP 访问”结合，形成更全面的攻击特征描述，提升模型对复杂攻击的识别能力。机器学习模型的动态更新机制是应对新型网络攻击的关键：基于新攻击数据的增量训练无需重新训练整个模型，仅利用新增攻击样本对已有模型进行微调，减少训练时间与算力消耗，同时避免模型“遗忘”历史攻击特征；模型性能监控通过实时跟踪检测准确率、误报率等指标，当指标低于预设阈值时触发模型迭代，确保模型始终保持较高防护能力。多模型融合策略则用于规避单一模型的局限性：不同机器学习模型在特定场景下各有优势，如支持向量机在小样本攻击检测中表现优异，随机森林在多特征攻击分类中精度更高，通过加权融合或投票融合，整合各模型优势，提升系统整体检测性能，尤其在面对“混合攻击”“变异攻击”时，能有效降低单一模型的漏报、误报风险。

4 基于机器学习的网络安全防护技术挑战与未来展望

4.1 当前技术面临的核心挑战

当前基于机器学习的网络安全防护技术面临多重核心挑战：数据质量是基础瓶颈，标签数据稀缺限制监督学习模型训练，数据不平衡易导致模型偏向多数类样本，噪声数据会干扰特征学习精度，而隐私保护要求又制约多源数据融合；对抗性攻击直接削弱模型有效性，对抗样本通过细微特征篡改欺骗模型，恶意代码的“对抗性变异”还会使静态检

测失效；模型可解释性不足让黑箱决策逻辑难以追溯，既无法精准定位误判原因，也不利于安全事件责任界定；实时性与资源开销存在矛盾，大规模网络流量下复杂模型推理延迟难以满足实时防护需求，高算力消耗也增加硬件成本；同时，5G/6G、物联网、边缘计算等新场景的特征差异显著，现有模型难以快速适配场景化防护需求^[5]。

4.2 未来研究与发展展望

未来研究需从技术融合、关键突破与场景拓展三方面推进：技术融合上，将深度学习的特征提取能力与传统机器学习的可解释性结合，使用联邦学习在保护隐私的同时实现多主体协同防护，通过强化学习让系统自主优化防护策略；在关键技术突破中，引入可解释 AI(XAI) 拆解黑箱决策过程，优化对抗攻击防御算法以增强模型鲁棒性，研发轻量级模型降低资源消耗适配边缘设备；在场景拓展层面，针对工业互联网的控制协议特性、车联网的实时传输需求设计专用防护方案，同时构建跨域协同防护的模型联动机制，实现威胁特征共享与策略协同，打破单域防护局限，应对跨域攻击扩散风险。

5 结语

综上所述，本文围绕基于机器学习的计算机网络安全防护技术展开全面研究，明确四大核心防护场景的应用价值（入侵防御实现主动防护、恶意代码检测抗“免杀”、流量分析精准识别异常、身份认证动态控权）；构建的分层防护系统通过多模块协同满足核心防护目标，关键技术保障系统实用性；同时指出数据质量、模型可解释性等挑战，提出未来研究方向。研究验证了机器学习对传统防护的补充价值，为后续技术深化与复杂网络防护提供路径参考。

参考文献

- [1] 李艳梅,陈汲清.智能时代计算机网络安全技术应用策略——评《计算机网络安全技术与应用研究》[J].安全与环境学报,2025,25(10):4114.
- [2] 邵晓宁.计算机网络安全与漏洞扫描技术的应用与研究[J].网络安全技术与应用,2025,(10):25-28.
- [3] 陈静.大数据时代的计算机网络安全技术及防范措施探讨[J].科技与创新,2025,(19):98-100+104.
- [4] 苏正香,曾晓莉.基于隐私保护的高职院校计算机网络信息安全研究[J].中国宽带,2025,21(11):58-60.
- [5] 孔维强.提高医院计算机网络安全管理工作有效性的方法探讨[J].中国宽带,2025,21(11):61-63.

Research Progress on Coupled Multi-Physics Simulation of Magnetically Levitated Motors in Electromagnetic Design.

Yajun Wu¹ Zhendong Cao¹ Hongru Wang¹ Fengxin Zhang¹ Chunlong Zhao¹

Inner Mongolia Huo Coal Hongjun Aluminum & Electricity Co. Ltd., Tongliao, Inner Mongolia, 029299, China

Abstract

As a novel class of highly efficient and energy-saving power device, magnetic levitation motors entail intricate multi-physics coupling involving electromagnetic fields, thermal dynamics, and structural mechanics. This paper presents a systematic review of recent research advancements in this domain, focusing on multi-physics coupling modeling methodologies and representative application cases. It further examines the critical roles of numerical simulation techniques and neural network-based data-driven approaches in electromagnetic design optimization, and explores future development trends in high-end equipment manufacturing propelled by the deep integration of Artificial Intelligence(AI) and multi-scale modeling technologies.

Keywords

Magnetic levitation motor; Multi-physics; Numerical Simulation; Data-driven; Electromagnetic design

电磁设计中磁悬浮电机耦合多物理场仿真的研究进展

吴亚军 曹振东 王鸿儒 张凤鑫 赵春龙

内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司，中国·内蒙古 通辽 029299

摘要

磁悬浮电动机作为高效节能的新型动力装置，其设计涉及电磁、热力学、结构力学等多物理场的复杂耦合。本文从多物理场耦合建模技术方法、典型应用案例等方面，系统综述了该领域的研究进展，探讨了数值模拟仿真分析、神经网络数据驱动在电磁设计中的关键作用，分析了AI技术与多尺度建模深度融合驱动高端装备制造的发展方向。

关键词

磁悬浮电动机；多物理场；数值模拟；数据驱动；电磁设计

1 引言

磁悬浮电动机通过电磁力实现转子的无接触悬浮与驱动，具有低摩擦、高效率、长寿命等优势，广泛应用于高速动力设备、新能源发电及工业节能领域^[1]。然而，其电磁设计需同时考虑电磁场、温度场、应力场等多物理场的动态耦合效应，传统单一物理场分析方法难以满足高精度设计要求^[2]。解析法通过直接求解麦克斯韦方程组的方式针对性地进行电磁场分析，针对几何结构简单的模型求解时呈现了计算速度快、计算精度高的优点，但是其面向复杂问题时一般依赖于模型的大幅度简化，从而造成实际求解过程与真实情况偏差较大的情形，造成了较低的求解精度^[3]。多物理场耦合仿真技术通过数值建模与算法优化，为复杂电磁系统的设计提供了高效工具。研究表明，基于多物理场仿真的优化设计可使转子损耗降低 15% 以上，显著提升电机综合性能^[4,5]。

【作者简介】吴亚军（1974-），男，中国吉林梨树人，本科，工程师，从事新材料在电力系统上的应用研究。

尽管数值仿真技术已成为分析磁悬浮电动机多物理场问题的基石，但其应用仍面临显著挑战。首先，高保真的三维瞬态多物理场耦合仿真对计算资源的需求极其庞大，尤其是在优化设计中需要进行大量参数扫描时，计算成本往往令人望而却步^[6]。其次，结构力学场（应力、形变）的引入进一步加剧了问题的复杂性。高速转子所受的巨大离心力与电磁径向力共同作用，直接影响系统的刚度和稳定性；定转子之间的电磁力波则可能引发振动噪声，这些都需要通过流固耦合等高级仿真手段才能准确评估^[7]。因此，如何在高计算精度与可接受的计算成本之间取得平衡，是多物理场耦合设计中的核心难题。

为应对上述挑战，研究者们发展了一系列先进的建模与求解策略。多物理场解耦与降阶模型（ROM）技术的应用提供了解决一个这些挑战的思路^[8]。通过敏感度分析，识别出耦合过程中的主导物理场与关键参数，从而在保证精度的前提下，将强耦合问题简化为弱耦合或顺序耦合问题，大幅提升计算效率^[9]。例如，可先通过参数化扫描建立电磁参数（如气隙磁场、推力密度）与关键性能指标的响应面模型，

再将该代理模型用于后续的热 - 应力耦合分析，避免了每次迭代都进行全阶有限元计算^[10]。

近年来，随着人工智能（AI）技术的迅猛发展，尤其是机器学习（ML）与深度学习（DL），为磁悬浮电动机的多物理场设计与优化开辟了革命性的新路径^[11]。传统的从模拟到分析，最后进行修改的设计范式正逐步向数据驱动的智能设计范式转变^[12]。神经网络作为一种强大的非线性函数逼近器，能够通过学习海量仿真或实验数据，构建从电机设计参数（如几何尺寸、材料属性、激励电流）到多物理场性能（如电磁力、温度分布、应力集中）的映射模型^[13]。一旦训练完成，此类数据驱动模型可在短时间内完成性能预测，效率远超传统数值仿真，为实时优化提供了可能。

然而，AI 技术与多物理场耦合的深度融合仍处于初级阶段，面临数据获取成本高、模型物理可解释性弱、以及融合模型泛化能力不足等挑战^[14]。物理机理与数据驱动的融合是一种前景广阔的方式，将控制方程（如麦克斯韦方程组、热传导方程）作为约束条件嵌入神经网络的损失函数中，使得模型的预测结果不仅符合数据，更严格遵循物理规律，从而显著提升其在训练数据稀缺区域的预测可靠性。此外，多尺度建模与 AI 技术结合，从而实现从材料微观特性到系统宏观性能的跨尺度协同设计与预测，是推动磁悬浮电动机等高端装备向著更高功率密度、更高可靠性及全生命周期智能化的方向演进的主流方法^[15]。

本文旨在系统综述磁悬浮电动机多物理场耦合设计与优化领域的研究进展。首先深入探讨多物理场耦合仿真的关键技术；其次，结合典型应用案例，剖析数值模拟仿真分析与神经网络数据驱动方法在解决实际工程问题中的关键作用；最后，展望多尺度建模与 AI 技术深度融合的未来趋势，以期为该领域的进一步研究提供有益参考。

2 多物理场耦合仿真关键技术

磁悬浮电动机的多物理场仿真需解决电磁场 - 热场 - 结构场之间的强耦合问题，此类耦合问题涉及能量在不同物理域之间的传递与转化，例如电磁损耗引起温升，温升影响材料属性，进而引起结构形变与应力重分布。有限元法作为当前主流的数值模拟技术，基于 ANSYS、COMSOL 等多物理场仿真平台，能够构建电磁 - 热 - 结构耦合求解模型，实现对麦克斯韦方程组与傅里叶热传导方程等的协同求解。该技术路线具有较高的数值精度与良好的模型适应性，不仅适用于电磁特性与温度分布的求解，还可扩展至应力场分析、转子动力学响应及振动噪声等多类物理问题的仿真研究，为电机综合性能评估与优化设计提供了可靠的数值实验平台。

尽管如此，有限元法等数值模拟方法在多物理场耦合分析中表现出计算效率与建模灵活性较低的特点。对于瞬态过程或参数优化研究，需要进行大量迭代计算，全阶有限元模型会带来难以承受的时间成本^[16]。此外，强非线性（如

材料饱和、温度相关的材料属性）及复杂几何形状的网格划分，也对其求解稳定性与精度构成挑战。近年来，基于多物理场数据进行数据驱动辅助建模逐渐成为热点，其核心思想是，利用有限元法等仿真生成的高保真数据或精确实测数据作为训练样本，构建一个从输入设计参数到输出场分布或关键性能指标的代理模型。比如结合深度学习方法预测电磁损耗与热应力分布，可以提升求解效率的有益效果^[17]。对此，引入神经网络数据驱动模型，以实现 AI 赋能优化求解路径。

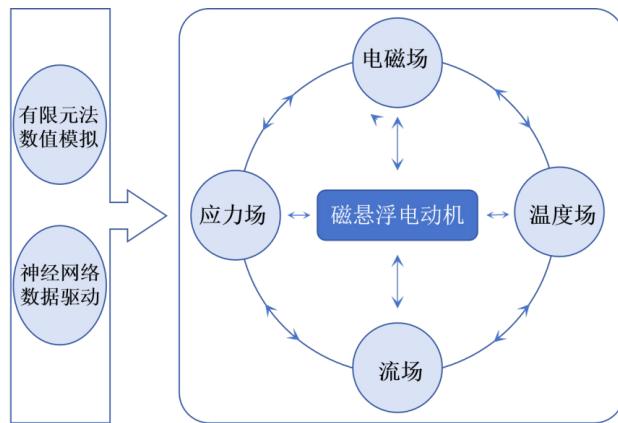


图 1 多场耦合建模技术路线

3 电磁设计优化中的典型应用

高速磁悬浮电动机的综合性能优化高度依赖于对电磁、热、力等多物理场的协同设计与精确控制。针对燃煤火力发电机组脱硫氧化风机应用场景，研究者通过 ANSYS 与 COMSOL 数值计算工具建立电磁场、温度场、转子动力学及强度等耦合模型，以转子损耗最小化为目标，优化设计了一款高速磁悬浮鼓风机，通过实验证明了仿真结果的可靠性。在上述优化设计过程中，为突破传统的基于有限元的优化过程因其计算成本高昂而面临效率瓶颈，使用了神经网络方法优化了流场预测、边界条件识别以及求解等数值模拟环节，不仅提供了更精确的热仿真环境，还深度参与了求解过程。



图 2 燃煤火力发电机组脱硫氧化风机应用

实验验证结果表明,经上述多物理场协同优化设计的高速磁悬浮鼓风机,在 25000 转 / 分的额定转速下稳定运行,其综合性能相较于传统驱动方案节能率超过 30%,运行噪音有效控制在 80 分贝以下,年节电量显著,经济效益与环保效益突出。这一引入神经网络模型案例的成功实施,凸显了多物理场耦合仿真与 AI 深度融合在电磁设计优化环节中的核心价值,提升数值模拟求解速度,加速了电磁设计优化的工作进程,为下一代高性能磁悬浮电机的设计提供了关键的技术路径与范例。

4 结语

多物理场耦合仿真技术已成为磁悬浮电动机电磁设计的核心手段,其在降低损耗、提升稳定性及推动节能技术革新方面展现出显著优势。随着人工智能技术与多尺度建模方法的不断融合,多物理场耦合仿真正朝着智能化与高精度方向演进。神经网络代理模型、深度强化学习等 AI 方法已被引入以替代传统迭代求解过程,在保证计算精度的同时将设计周期大幅度缩短,显著提升了复杂机电系统的优化效率。未来,该领域将加速向智能化、高精度方向发展,为高端装备制造与可持续发展提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 张欣悦.电励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的设计与分析 [D], 2024.
- [2] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 1.12MW 高速永磁电机多物理场综合设计 [J], 电工技术学报, 2015, 30(12): 171-80.
- [3] 刘豪.无槽永磁直线同步电动机的设计研究 [J], 微特电机, 2015, 43(08): 24-6+31.
- [4] 韩邦成,薛庆昊,刘旭.高速磁悬浮永磁电机多物理场分析及转子损耗优化 [J], 光学精密工程, 2017, 25(3): 680-8.
- [5] 秦雪飞.大功率高速永磁电机多物理场综合设计 [D]: 浙江大学, 2023.
- [6] 肖宏远,林定标,陈克平,等.高速电动机制动磁力透平的研制与应用[J].中国机械,2024,(18):23-27.
- [7] 鲍旭聪,王晓琳,彭旭衡,等.高速电机驱动关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6856-6871.
- [8] 陈亮亮.磁悬浮高速飞轮储能系统永磁电机转子强度分析及转子振动控制[D]: 浙江大学,2017.
- [9] 吴新振,王东,郭云珺,等.多相电机定子绕组组合模式对磁动势与参数的影响[J].中国电机工程学报,2014,34(18): 2944-2951
- [10] 杨思怡.基于有限元法的电磁—热耦合仿真及 CAE 技术研究[D].电子科技大学,2023.
- [11] 花为,顾佳磊.现代电机优化方法综述[J].导航与控制,2021,20(5): 13-25.
- [12] Gallardo-Romero E U, Ruiz-Aguilar D. High order edge-based finite elements for 3D magnetotelluric modeling with unstructured meshes[J]. Computers & Geosciences, 2022, 158: 104971.
- [13] 郑轩,彭天健,吴雄伟,等.高功率电磁学中的智能计算技术[J].电波科学学报,2024,39(05):885-904.
- [14] 杨淑媛,杨晨,冯志玺,等.电磁目标表征:知识-数据联合驱动新范式[J].航空兵器,2024,31(02):17-31.
- [15] LI C, WANG X, LIU F, et al. Analysis of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor based on equivalent reluctance network model[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems (TEMS), 2022, 6(2): 135-144.
- [16] 尹文禄.高阶矢量有限元方法在电磁领域中的研究及应用[D].长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [17] 王鑫宸.数据驱动 MOEA/D 及其在高性能电磁结构设计中的应用[D].中国科学技术大学,2023.

Application efficiency analysis of intelligent bulldozer in earthwork construction of plain reservoir

Ruihang Wang¹ Weihan Li¹ Yanqing Ma¹ Hangrui Cao² Xiao Zhang¹

1. China Construction Eighth Engineering Division Second Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

2. Southwest Construction Engineering Co., Ltd., of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

This study investigates the application efficiency of intelligent bulldozers. First, it defines core application scenarios for earthwork construction in plain reservoirs and outlines an optimized workflow through path planning optimization, equipment coordination, and dynamic parameter adjustments. Subsequently, the research analyzes the performance of intelligent bulldozers and corresponding improvement mechanisms across four dimensions: construction efficiency, quality, cost, and safety/environmental impact. Finally, it identifies challenges at technical, managerial, talent, standardization, and ecological levels, proposing optimization strategies including multi-system integration, promotion of leasing models, and establishment of unified data standards. The findings demonstrate that intelligent bulldozers can significantly enhance earthwork construction efficiency in plain reservoirs, providing support for intelligent engineering practices.

Keywords

intelligent bulldozer; plain reservoir; earthwork construction

智能推土机在平原水库土方施工中的应用效能分析

王瑞樟¹ 李维汉¹ 马延青¹ 曹航瑞² 张潇¹

1. 中建八局第二建设有限公司, 中国·山东 济南 250000

2. 中建八局西南建设工程有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

本文围绕智能推土机的应用效能展开研究。首先界定其在平原水库土方施工中的核心应用场景，并阐述基于路径规划优化、设备协同联动、动态参数调整的作业流程优化路径；进而从施工效率、施工质量、施工成本、施工安全与环境四个维度，分析智能推土机的效能表现及对应的提升机制；最后指出技术、管理与人才、标准与生态层面的挑战，并提出多系统融合定位、推广租赁模式、建立统一数据标准等优化策略。研究表明，智能推土机可显著提升平原水库土方施工效能，为工程智能化实践提供支撑。

关键词

智能推土机；平原水库；土方施工

1 引言

传统推土机存在超挖欠挖、成本高、安全风险大等问题，难以适配智能化需求。依托 GNSS 定位、实时传感等技术的智能推土机，成为突破传统局限的关键设备。本文以智能推土机在平原水库土方施工的应用效能为研究对象，梳理其场景与流程优化方法，分析效能、提出挑战对策，为工程智能化升级提供参考。

【作者简介】王瑞樟（1994-），男，中国黑龙江绥化人，本科，工程师，从事水利工程研究。

2 智能推土机在平原水库土方施工中的应用场景与作业流程优化

2.1 核心应用场景界定

在平原水库土方施工流程中，智能推土机的核心应用场景可围绕施工关键环节进行界定，其应用既贴合平原地形开阔、土方作业量大且施工精度要求高的特点，也与水库土方施工的核心需求深度适配。在平原水库土方开挖作业中，智能推土机可依托 GPS/ 北斗定位系统与地形感知技术，精准识别开挖区域边界与设计深度，避免传统开挖作业中易出现的超挖、欠挖问题，如图 1 所示，同时结合预设开挖路径自动调整作业参数，适配平原地区土层分布相对均匀但作业面广的特性，提升开挖作业的规范性与稳定性；在平原水库

土方填筑与场地平整作业中，智能推土机能够结合水库坝体、库盆等结构对土方压实度、场地平整度的严格要求，通过实时采集作业区域的土方密度、高程数据，动态调整推土力度与行走轨迹，尤其在大面积平整作业中，可依托智能系统实现多台设备的作业轨迹协同，减少人工操作导致的平整度偏差，保障填筑体的结构稳定性与场地的后续使用条件；在土方转运与协同作业中，智能推土机可作为土方流转的关键衔接设备，一方面通过智能调度系统规划最优转运路径，减少在平原开阔作业面内的空驶距离，另一方面与挖掘机、压路机等其他施工设备建立数据共享链路，根据前方开挖进度与后方填筑需求动态调整转运频次与土方量，实现土方开挖、转运、填筑环节的高效衔接，避免单一设备作业脱节导致的施工效率损耗^[1]。



图 1 智能推土机在平原水库土方开挖作业场景

2.2 作业流程优化路径

在平原水库土方施工的作业流程优化中，智能推土机可从路径规划、设备协同与动态调整三个核心方向推进，充分适配平原作业面开阔、土方流转环节多的特点。在施工路径规划优化上，其依托路径优化算法与实时定位，结合平原水库作业区域划分，自动生成最优行驶路线以减少空驶里程，同时通过预设作业循环逻辑提升动作衔接效率，避免单机作业中断；在与其他设备的协同优化方面，智能推土机可与挖掘机、压路机等通过数据共享联动，根据开挖量、填筑需求匹配作业频次与工程量，减少设备间等待时间，在大面积作业中还能实现多机集群化协同，优化整体施工节奏；在动态作业调整上，其借助土壤传感器、高程测量模块实时采集作业数据，若发现土层阻力异常或高程偏差，系统可自动调整推土铲角度、行走速度等参数，无需人工停机干预，减少因参数固定导致的返工或效率损耗，保障施工流程稳定^[2]。

3 智能推土机应用效能的多维度分析

3.1 施工效率效能分析

在平原水库土方施工的效率维度中，单位时间土方作业量、作业时长利用率与设备出勤率是核心评价指标，三者共同反映智能推土机对施工进度的推动作用。从提升机制来看，智能推土机的自动作业功能可大幅减少人工操作的反应

间隙，尤其在平原开阔作业面内，无需频繁依赖人工判断作业路径与动作衔接，能持续保持稳定作业节奏；其搭载的智能系统可实时规避人为操作中易出现的路径偏差、动作冗余等问题，避免因操作失误导致的作业中断或重复作业，间接提升单位时间内的有效作业量；同时，智能推土机的故障预警功能与低故障率特性，能降低设备因突发故障导致的停机时间，结合连续作业模式，进一步提高作业时长利用率与设备出勤率，适配平原水库土方工程量大、需快速推进的施工需求。

3.2 施工质量效能分析

施工质量效能的评价需聚焦土方平整度、压实度达标率与施工偏差率，这三项指标直接关系平原水库坝体稳定性、库盆蓄水能力等核心功能。智能推土机对质量的保障机制主要依托精准定位与实时监测调整实现：其集成的 GPS/北斗双模定位系统精度可达厘米级，能严格按照平原水库土方施工的设计标高与边界要求作业，有效控制施工偏差率，避免传统推土机因人工视线误差导致的超挖、欠填或边界偏移，如图 2 所示；同时，智能推土机配备的土壤压实传感器与高程测量模块，可实时采集作业区域的土方密度与地表高程数据，若发现压实度未达设计标准或平整度超出允许误差，系统会自动调整推土铲压力、行走速度等参数，动态修正作业行为，确保土方填筑区域的压实度达标率，为平原水库后续蓄水与长期运行提供质量保障^[3]。



图 2 智能推土机的设备细节与作业场景

3.3 施工成本效能分析

施工成本效能可通过单位土方施工成本、设备维护成本与人工成本三项指标衡量，智能推土机主要通过减少资源浪费与优化投入结构实现成本优化。在人工成本方面，智能推土机支持远程操控与半自主作业模式，单台设备仅需少量人员进行监控与应急操作，相比传统推土机需 1-2 名操作人员全程跟进，可大幅减少人工投入，尤其在多台设备集群作业时，人工成本节约效果更显著；在设备维护成本上，智能系统的实时状态监测功能可提前预警发动机、液压系统等关键部件的潜在故障，避免因故障扩大导致的高额维修费用，同时其作业动作的规范性可减少设备过度磨损，延长易损件使用寿命，降低维护频次与成本；此外，智能推土机对施工

质量的精准控制，能避免因质量不达标导致的返工重筑，减少土方、燃油等资源浪费，间接降低单位土方施工成本，契合平原水库土方工程规模大、成本控制需求高的特点^[4]。

3.4 施工安全与环境效能分析

施工安全与环境效能的评价需关注安全事故发生率、燃油消耗率及噪声/扬尘污染程度，智能推土机通过技术革新实现安全与环保双重提升。在安全层面，其远程操控功能可让操作人员远离平原水库土方施工中的高风险区域，减少人员直接暴露于机械碰撞、土方坍塌等风险的概率，显著降低安全事故发生率；部分智能推土机还配备碰撞预警系统，能识别作业范围内的人员、其他设备或障碍物，自动减速或停机，进一步强化安全防护。在环境层面，智能推土机的发动机采用电控节能技术，可根据作业负载自动调节动力输出，避免传统推土机“大油门空转”导致的燃油浪费，降低燃油消耗率；同时，其作业路径的优化与动作的精准性，能减少土方随意堆放与过度推运，降低施工过程中扬尘产生量，且部分机型配备的降噪装置可削弱作业噪声，减轻对平原水库周边生态环境与居民生活的影响。

4 智能推土机应用面临的挑战与优化策略

4.1 技术层面的挑战与对策

在技术层面，智能推土机在平原水库土方施工中面临的挑战与施工场景的特殊性深度关联。平原水库土方作业中可能出现的深坑开挖场景，易导致 GNSS 信号被遮挡或丢失，影响智能系统的定位精度；同时，长时间连续作业与复杂工况可能降低智能系统的运行稳定性，而平原地区局部存在的软基、夹层土等复杂地质条件，也会增加智能推土机作业参数匹配的难度。针对这些问题，可通过多系统融合定位技术弥补单一信号的不足，确保深坑等场景下的定位连续性；采用系统冗余设计，对核心控制模块、传感器等关键部件设置备份，提升系统抗干扰能力与故障容错性；此外，还需结合平原水库地质特点，加强设备硬件的耐候性与适应性改造，并优化作业算法，使其能根据土壤湿度、密实度变化自动调整推土力度与行走模式，适配复杂地质条件^[5]。

4.2 管理与人才层面的挑战与对策

在管理与人才层面，智能推土机的应用需突破传统模式的制约。智能推土机较高的初始采购成本，会增加项目前期投资压力，导致部分施工单位在决策时存在顾虑；同时，传统水利土方施工的管理模式更依赖人工调度与经验判断，与智能设备所需的数字化、精细化管理流程不匹配，易造成设备效能浪费；而既懂水利施工工艺、又掌握智能设备操作与维护技术的复合型人才短缺，也会限制智能推土机功能的

充分发挥。对此，可推广智能推土机租赁模式，降低项目前期资金投入门槛，灵活匹配施工周期内的设备需求；变革项目管理流程，引入智能调度平台，实现设备作业数据与施工进度、质量目标的联动管理，替代传统人工调度方式；同时，建立系统的培训与人才培养体系，联合设备厂商、高校与施工企业，开展“水利施工工艺+智能设备操作”的复合型培训，通过理论教学与现场实操结合，提升人员专业能力。

4.3 标准与生态层面的挑战与对策

在标准与生态层面，行业数据互通性与标准统一性不足的问题较为突出。目前水利工程智能施工领域尚未形成统一的数据标准，不同厂商生产的智能推土机，其作业数据的格式、接口存在差异，导致智能推土机与其他施工设备、项目管理平台之间的数据难以高效互通，形成“数据孤岛”；这种互通性差的问题，会阻碍平原水库土方施工中多设备协同作业与整体流程的智能化升级。为解决这一问题，需由行业主管部门或协会牵头，联合科研机构、设备厂商与施工企业，共同推动建立水利工程智能施工数据接口标准，明确数据采集范围、格式规范与传输协议；同时，构建开放、协同的产业生态，鼓励设备厂商开放数据接口，支持不同品牌、类型的智能设备与管理平台实现数据共享，促进智能推土机与水利施工全流程的深度融合，形成从设备研发到现场应用的完整生态链条。

5 结语

综上所述，在平原水库土方施工中，智能推土机适配性强且效能突出，可覆盖土方开挖、填筑平整、转运协同场景，通过路径优化、设备协同、动态调整优化传统流程；在效率、质量、成本、安全环保上均有显著提升，能解决传统施工痛点。针对应用中技术、管理人才、标准生态层面的挑战，也有可行优化策略。综上，智能推土机可推动平原水库土方施工向智能化转型，为水利工程智能装备应用提供借鉴。

参考文献

- [1] 胡帅,王宇向,尤轲,等.推土机铲运物料体积智能检测方法研究[J].土木工程与管理学报,2025,42(03):112-120.
- [2] 李腾.智慧赋能,山推大马力推土机征战云南矿山[J].今日工程机械,2023,(03):56-57.
- [3] 范旺霖.湖陂灌溉排洪闸及防汛道路施工分析[J].内蒙古水利,2023,(04):50-52.
- [4] 姬浩翔,李金妹,李昕洁.浅析小型水库除险加固技术与材料应用[J].中国设备工程,2025,(20):268-270.
- [5] 陈秋凤.影响新安水库除险加固工程造价的主要因素分析[J].广西水利水电,2025,(05):156-157+164.