

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

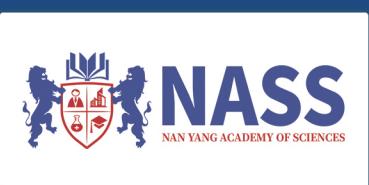
Volume 2 · Issue 8 · August 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)

工程研究前沿 Frontiers of Engineering Research



Volume 2 · Issue 8 · August 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(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: 工程研究前沿
ISSN: 3060-9054 (纸质) 3060-9062 (网络)
出版语言: 华文
期刊网址: <http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
出版社名称: 新加坡南洋科学院

Serial Title: Frontiers of Engineering Research
ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
Language: Chinese
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《工程研究前沿》征稿函

期刊概况:

中文刊名: 工程研究前沿
ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
出版语言: 华文刊
期刊网址: <http://journals.nassg.org/index.php/foer-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。

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 Issue 8 August 2025
ISSN 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

主 编

虞 斌

Bin Yu

编 委

王振波 zhenbo Wang

赵希强 Xiqiang Zhao

刘永军 Yongjun Liu

张新儒 Xinru Zhang

1	基于 PLC 的剧场灯光控制系统抗干扰技术研究 / 杜岳阳	/ 颜斌
4	电梯门系统安全触点检验的关键问题分析 / 廖宗霖	31 双碳视角下的高层住宅绿色低碳施工方法分析 / 杜育升
7	管道完整性管理中第三方破坏风险评估模型构建与 应用 / 宫研科	34 边坡智能锚杆 FBG 传感监测的技术应用综述与发展 / 王勤博
10	自动化检测系统在材料检测中的应用研究 / 杨青萍 郭进波	37 工业自控系统可靠性设计与优化探索 / 侯卫民
13	化工装置安全完整性等级评估技术 / 王清君	40 基于动圈与中心磁极优化的长冲程驱动系统设计 / 吕言言
16	煤矿回采过程中围岩控制与安全高效生产协同研究 / 刘学化	43 建筑工程 EPC 总承包模式下的风险管控与效益优化 / 汤敏忠
19	EPC 总承包模式下建筑工程管理的协同机制与效率 提升 / 黄能升	46 天然气站场可燃气体在线检测可靠性评估研究 / 刘程 刘超
22	智能配电台区全景状态感知与协同优化系统开发及 应用 / 赵聪 蘭超群 吴俊	49 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放研究 / 桑政军
25	面向 5G 时代的数据存储中心装修设计适应性研究 / 鲁旭东	52 发动机异响故障根源识别及结构优化解决方案研究 / 申展 潘海朝 魏娜
28	建筑工程质量检测中第三方检测机构监管机制的构建 与完善	55 危险化学品存储与运输安全技术探讨 / 李志仁
		58 工业企业节能降碳技术创新与应用研究 / 刘晓英
		61 面向低碳经济的智能制造节能技术研究 / 张林

1 Research on Anti-interference Technology of Theater Lighting Control System Based on PLC / Yueyang Du

4 Analysis of Key Issues in Safety Contact Inspection of Elevator Door Systems / Zonglin Liao

7 Construction and application of third-party damage risk assessment model in pipeline integrity management / Yanke Gong

10 Application research of automatic testing system in material testing / Qingping Yang Jinbo Guo

13 Safety integrity level assessment technology for chemical equipment / Qingjun Wang

16 Coordinated Research on Surrounding Rock Control and Safe-Efficient Production in Coal Mine Mining / Xuehua Liu

19 Synergistic Mechanism and Efficiency Enhancement in Construction Project Management under EPC General Contracting Model / Nengsheng Huang

22 Development and application of panoramic state perception and collaborative optimization system in intelligent distribution station area / Cong Zhao Chaoqun Lin Jun Wu

25 Research on Adaptability of Data Storage Center Decoration Design in 5G Era / Xudong Lu

28 The construction and improvement of the supervision mechanism of third-party testing institutions in construction project quality inspection / Bin Yan

31 Analysis of Green and Low-carbon Construction Method of High-rise Residential Building from the Perspective of Dual Carbon / Yusheng Du

34 A Review and Development of the Technical Application of Intelligent Slope Anchor FBG Sensor Monitoring / Qinbo Wang

37 Exploration on Reliability Design and Optimization of Industrial Automatic Control Systems / Weimin Hou

40 Design of a Long-stroke Driving System Based on Optimization of Moving-Coil and Central Pole / Yanyan Lv

43 Risk Management and Benefit Optimization in EPC General Contracting for Construction Projects / Minzhong Tang

46 Research on reliability evaluation of combustible gas online detection in natural gas station / Cheng Liu Chao Liu

49 Research on Carbon Emission of Thermal Power Plant under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality / Zhengjun Sang

52 Research on Root Cause Identification and Structural Optimization Solution of Engine Noise Fault / Zhan Shen Haichao Pan Na Wei

55 Discussion on Safety Technology for Storage and Transportation of Hazardous Chemicals / Zhiren Li

58 Research on Technological Innovation and Application of Energy Conservation and Carbon Reduction in Industrial Enterprises / Xiaoying Liu

61 Research on Energy-Saving Technologies for Intelligent Manufacturing in the Context of a Low-Carbon Economy / Lin Zhang

Research on Anti-interference Technology of Theater Lighting Control System Based on PLC

Yueyang Du

Tianjin Beichen District Workers' Service Center, Tianjin, 300402, China

Abstract

This paper focuses on the anti-interference technology of the theater lighting control system based on PLC and conducts research on the complex interference problems in the theater environment. First, analyze the composition structure of the system, and clarify the functions and collaborative mechanisms of the control layer, execution layer, sensing layer and communication layer; Furthermore, identify internal power sources, signals, equipment interference, as well as external interference sources such as electromagnetic radiation, static electricity, and lightning strikes, and analyze their influence mechanisms on data transmission, logical operations, signal integrity, and equipment safety. Anti-interference solutions are proposed from three aspects: hardware design such as power processing, signal isolation and filtering, electromagnetic shielding, software optimization such as data verification and error correction, instruction redundancy and delay filtering, self-diagnosis and handling of faults, and grounding and wiring design, providing a practical and feasible technical path for improving the stability and reliability of the theater lighting control system.

Keywords

PLC Theater lighting control Anti-interference technology; Electromagnetic compatibility

基于 PLC 的剧场灯光控制系统抗干扰技术研究

杜岳阳

天津市北辰区职工服务中心, 中国 · 天津 300402

摘要

本文聚焦基于PLC的剧场灯光控制系统抗干扰技术, 针对剧场环境中复杂的干扰问题展开研究。首先剖析系统的组成结构, 明确控制层、执行层、传感层和通信层的功能与协同机制; 进而识别内部的电源、信号、设备干扰及外部的电磁辐射、静电、雷击等干扰源, 分析其对数据传输、逻辑运算、信号完整性及设备安全的影响机制。从硬件设计如电源处理、信号隔离与滤波、电磁屏蔽、软件优化如数据校验与纠错、指令冗余与延时滤波、故障自诊断与处理、接地与布线设计三方面提出抗干扰方案, 为提升剧场灯光控制系统的稳定性与可靠性提供了切实可行的技术路径。

关键词

PLC; 剧场灯光控制; 抗干扰技术; 电磁兼容

1 引言

剧场灯光作为演艺呈现的核心要素, 其控制系统的稳定运行直接关乎演出效果与质量。随着 PLC 技术在工业控制领域的成熟应用, 其凭借高可靠性与灵活性成为剧场灯光控制的核心设备。然而, 剧场环境的特殊性使其面临多重干扰挑战: 大功率灯光设备引发的电源波动、舞台机械运转产生的电磁辐射、信号传输中的耦合干扰等, 均可能导致系统指令失真、设备误动作, 甚至引发演出中断。目前, 工业领域的抗干扰方案虽有借鉴价值, 但针对剧场场景的针对性研究不足, 难以完全适配其复杂的干扰环境。因此, 深入探究基于 PLC 的剧场灯光控制系统抗干扰技术, 构建兼顾硬件、

软件及布线接地的综合防护体系, 对保障剧场演艺活动的顺利开展具有重要的实践意义。

2 基于 PLC 的剧场灯光控制系统组成与干扰源分析

2.1 系统组成结构

基于 PLC 的剧场灯光控制系统主要由控制层、执行层、传感层和通信层组成。控制层以 PLC 为核心, 负责接收上位机的控制指令, 进行逻辑运算和控制决策, 并向执行层发送控制信号^[1]。执行层由灯光驱动设备组成, 负责将 PLC 输出的控制信号转换为灯光设备的动作, 实现灯光的亮度调节、开关控制等功能。传感层包括亮度传感器、温度传感器等, 用于采集现场环境参数, 为 PLC 的控制决策提供依据。通信层实现各设备之间的数据传输, 常用的通信方式包括以太网、RS485、DMX512 等。

【作者简介】杜岳阳 (1987-), 男, 中国天津人, 本科, 工程师, 从事剧场内电气工程研究。

2.2 主要干扰源类型

剧场灯光控制系统中的干扰源可分为内部干扰和外部干扰两类。内部干扰主要源于系统内部设备的运行，电源干扰是其中一个重要方面，系统中存在大量大功率灯光设备，这些设备的启停会导致电源电压波动，产生浪涌、尖峰等干扰信号，影响 PLC 及其他控制设备的供电稳定性。信号干扰不容忽视，控制信号在传输过程中，由于导线间的电磁耦合、接地不良等原因，可能受到串模干扰和共模干扰。设备干扰也是内部干扰的一部分，PLC、调光器等设备内部的电子元件在工作时会产生电磁辐射，若设备布局不合理，可能相互干扰。外部干扰主要来自剧场环境及周边设备，电磁辐射干扰是常见的一种，舞台机械的电机运转、无线麦克风、对讲机等无线通信设备的信号发射，会产生较强的电磁辐射，干扰 PLC 的正常工作。静电干扰在特定环境下也会产生影响，剧场内空气干燥时，人体、衣物与设备之间的摩擦会产生静电，静电放电可能损坏 PLC 的集成电路芯片或导致数据错误。同时，雷击干扰也需警惕，剧场建筑若未做好防雷措施，雷击产生的过电压可能通过电源线、信号线等路径侵入系统，造成设备损坏。

2.3 干扰对系统的影响机制

干扰对基于 PLC 的剧场灯光控制系统的影响主要体现在多个方面。在数据传输方面，干扰信号可能导致 PLC 与上位机、执行层设备之间的通信数据发生错误，如指令丢失、数据篡改等，使系统无法正确接收或发送控制信息。在逻辑运算上，PLC 的中央处理器 (CPU) 在处理数据时，若受到强电磁干扰，可能出现运算错误，导致控制逻辑混乱，引发灯光设备误动作。输入输出信号也会因干扰而失真，干扰信号叠加在 PLC 的输入输出信号上，可能导致信号失真，如模拟量信号精度下降，数字量信号误触发等，强干扰可能击穿 PLC 的电源模块、I/O 模块等元件，导致设备永久性损坏。

3 硬件抗干扰技术设计

硬件抗干扰是提高 PLC 控制系统可靠性的基础，通过合理的硬件设计可以有效抑制干扰源的产生、阻断干扰的传播路径。针对剧场灯光控制系统的特，从电源处理、信号隔离、电磁屏蔽等方面设计硬件抗干扰措施。

3.1 电源抗干扰设计

电源系统是 PLC 控制系统最易受干扰的环节之一，剧场灯光设备产生的电源波动会直接影响 PLC 的稳定运行。因此，可在 PLC 控制系统的电源输入端设置隔离变压器，利用其电磁隔离特性，阻断电网中的共模干扰和部分串模干扰，同时隔离变压器的初次级绕组采用屏蔽层接地处理，进一步增强抗干扰效果^[2]。在隔离变压器的输出端串联电源滤波器，用于抑制电源线上的高频干扰信号，应选择具有差模和共模滤波能力的复合型滤波器，其截止频率根据系统中干扰信号的频率特性确定。为 PLC 控制系统配置 UPS，当电网电压突然中断或大幅波动时，UPS 能快速切换至蓄电池

供电，保证系统在短时间内正常运行，避免因断电导致的数据丢失或设备损坏，同时，UPS 的稳压功能可有效抑制电源电压波动。将剧场灯光系统的动力电源与 PLC 控制系统的控制电源分开布线，采用独立的配电箱供电，避免大功率设备的启停对控制电源产生干扰，控制电源的容量应留有一定余量，防止过载。

3.2 信号隔离与滤波

PLC 的输入输出信号在传输过程中易受干扰，通过信号隔离和滤波技术可有效提高信号的抗干扰能力。在 PLC 的输入输出回路中采用光电耦合器进行信号隔离，使 PLC 内部电路与外部信号回路实现电气隔离，阻断共模干扰的传播，对于模拟量信号，可选用带光电隔离的模拟量输入输出模块；对于数字量信号，可在信号输入端串联光电耦合器。在 PLC 的数字量输入回路中并联 RC 滤波电路，用于吸收高频干扰脉冲，RC 电路的参数根据干扰信号的频率确定，通常电阻取值为 $1\text{k}\Omega\sim10\text{k}\Omega$ ，电容取值为 $0.1\text{\mu F}\sim1\text{\mu F}$ 。PLC 的信号传输线缆采用双绞线，利用双绞线的绞合结构抵消电磁耦合产生的干扰，对于模拟量信号和高频数字信号，应选用屏蔽双绞线，屏蔽层单端接地。

3.3 电磁屏蔽设计

电磁屏蔽是抑制电磁辐射干扰的有效手段，通过设置屏蔽体将干扰源与受干扰设备隔离^[3]。PLC、调光器等核心设备应安装在金属屏蔽柜内，屏蔽柜的外壳应采用厚度不小于 1mm 的冷轧钢板制作，并保证良好的电气连续性，同时屏蔽柜需进行接地处理，接地电阻不大于 4Ω 。信号线缆和动力线缆均采用屏蔽线缆，屏蔽层应与屏蔽柜或接地端子可靠连接，不同类型的线缆应分开敷设，若必须交叉，应采用垂直交叉方式，并在交叉点处增加屏蔽隔板。在舞台灯光设备与 PLC 控制柜之间设置金属屏蔽隔板，减少灯光设备产生的电磁辐射对 PLC 的干扰，屏蔽隔板的高度应高于设备顶部，宽度覆盖干扰源与受干扰设备之间的空间。

4 软件抗干扰技术优化

软件抗干扰技术通过编程手段提高系统对干扰的容错能力，弥补硬件抗干扰措施的不足。针对剧场灯光控制系统的特，从数据校验、指令冗余、故障自诊断等方面设计软件抗干扰算法。

4.1 数据校验与纠错

为防止干扰导致的数据传输错误，在 PLC 与上位机、执行层设备的通信过程中需采用数据校验机制。在传输的数据帧中加入校验码，接收方通过校验码判断数据是否出错，若校验出错，则请求发送方重发数据。PLC 接收传感器数据或上位机指令后，对数据的合理性进行判断，若数据超出合理范围，则视为无效数据，忽略该数据并记录错误信息。

4.2 指令冗余与延时滤波

针对干扰导致的 PLC 指令执行异常，需采用指令冗余和延时滤波技术。在关键控制指令的程序中，重复执行多次

相同的指令，提高指令被正确执行的概率。对于 PLC 的数字量输入信号，采用延时滤波算法消除干扰脉冲。当检测到输入信号状态变化时，启动定时器，若在设定的延时时间（通常为 10ms~100ms）内信号状态保持不变，则确认信号有效；否则，视为干扰信号，不予响应。在灯光设备进行场景切换或亮度调节时，若 PLC 检测到干扰信号，则立即锁定当前输出状态，避免设备出现异常动作，待干扰排除后，再根据控制指令恢复正常输出。

4.3 故障自诊断与处理

设计故障自诊断程序，使 PLC 能够实时监测系统的运行状态，及时发现并处理故障。PLC 通过通信接口实时读取执行层设备的运行状态信息，若发现设备异常，立即记录故障信息并发出报警信号。定期检测 PLC 与上位机、执行层设备之间的通信连接状态，若检测到通信中断，则启动备用通信路径，并尝试重新建立连接。在 PLC 程序中设置 watchdog 定时器，定时器的溢出时间大于程序正常运行的周期，程序正常运行时，定期刷新 watchdog 定时器；若程序因干扰陷入死循环，watchdog 定时器溢出，触发 PLC 复位，使系统恢复初始状态。

5 接地与布线抗干扰设计

合理的接地与布线是减少干扰耦合的关键，通过优化接地系统和线缆敷设方式，可有效降低干扰对系统的影响。

5.1 接地系统设计

剧场灯光控制系统的接地系统应根据设备类型和干扰特性进行分类设计，避免不同接地系统之间的干扰耦合。PLC 控制柜、屏蔽柜、灯光设备的金属外壳均应进行保护接地，将设备外壳与大地可靠连接，防止设备漏电时对人体造成伤害，同时抑制电磁干扰，保护接地电阻应不大于 4Ω ，接地体采用镀锌角钢（ $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ ），埋深不小于 0.8m。PLC 的信号地、模拟量输入输出模块的参考地应连接至专用的信号接地端子，形成独立的信号接地系统，信号接地采用单点接地方式，避免多点接地导致的地电位差干扰，信号接地电阻应不大于 1Ω ，接地体与保护接地体之间的距离不小于 5m。设备屏蔽柜、线缆屏蔽层的接地应与信号接地系统连接，形成统一的屏蔽接地网络，屏蔽接地采用单端接地方式，对于长度小于 30m 的线缆，屏蔽层在 PLC 侧接地；对于长度大于 30m 的线缆，屏蔽层在两

端接地，但需通过接地隔离器避免地电位差。剧场建筑的防雷接地系统应与控制系统的接地系统分开设置，两者之间的距离不小于 10m，若无法满足距离要求，应采用接地均压带将防雷接地体与控制系统接地体连接，降低雷击时的地电位差。

5.2 布线设计

线缆的敷设方式直接影响干扰的耦合程度，合理的布线设计可有效减少干扰。将系统中的线缆分为动力线缆、控制线缆、通信线缆三类，分别敷设在不同的桥架或穿线管中，避免交叉干扰，桥架之间应保持不小于 30cm 的距离，穿线管采用金属管并接地。线缆的敷设路径应远离强干扰源，避免平行敷设，若必须平行敷设，两者之间的距离应不小于 1m，且平行长度不超过 10m。对于关键的控制信号和通信信号，采用冗余布线方式，敷设两根独立的线缆，当一根线缆受干扰时，可自动切换至另一根线缆，冗余线缆应采用不同的敷设路径，降低同时受干扰的概率。线缆的终端接头应牢固可靠，避免虚接产生的接触干扰，对于屏蔽线缆，屏蔽层应与接头的屏蔽壳可靠连接，确保屏蔽的连续性。

6 结语

综上所述，针对基于 PLC 的剧场灯光控制系统的抗干扰研究，通过系统梳理干扰源类型与影响机制，从硬件、软件及接地布线三个维度构建的抗干扰方案，能够有效抑制剧场环境中的各类干扰。硬件层面的电源处理与电磁屏蔽阻断了干扰传播路径，软件层面的数据校验与故障诊断提升了系统容错能力，科学的接地与布线设计则减少了干扰耦合。这些技术措施的协同应用，为剧场灯光控制系统的稳定运行提供了全面保障。未来，可进一步结合智能化技术实现干扰的动态监测与自适应调控，探索新型材料在屏蔽与传输中的应用，持续优化抗干扰方案，以适应剧场演艺对灯光控制日益严苛的可靠性要求。

参考文献

- [1] 王亚军.PLC控制系统抗干扰技术设计策略[J].内蒙古石油化工,2018,44(10):103-105.
- [2] 邱志顺.PLC抗干扰技术在工业控制系统中的应用[J].集成电路应用,2020,37(1):88-89.
- [3] 曲国权.PLC控制系统抗干扰技术与应用研究[J].山东工业技术,2016(22):275-275.

Analysis of Key Issues in Safety Contact Inspection of Elevator Door Systems

Zonglin Liao

Luzhou Market Inspection and Testing Center, Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract

With the acceleration of urbanization, elevators have become indispensable vertical transportation tools in modern buildings. As a key link in the safe operation of elevators, the reliability of the safety contacts of the elevator door system directly affects the life safety of passengers. Based on the requirements of standards such as GB7588-2003 “Safety Code for the Manufacture and Installation of Elevators”, this paper systematically analyzes the key technical issues in the safety contact inspection of elevator door systems, including contact structure design, material selection, installation process, aging failure mechanism, and optimization of inspection methods. By combining typical fault cases, the generation mechanisms of common defects such as poor contact, mechanical wear and insulation failure of contacts were discussed, and targeted inspection points and improvement measures were proposed, providing theoretical and practical references for improving the inspection efficiency and reliability of safety contacts in elevator door systems.

Keywords

Elevator door system Safety contact inspection Analysis of Key Issues

电梯门系统安全触点检验的关键问题分析

廖宗霖

泸州市市场检验检测中心, 中国·四川泸州 646000

摘要

随着城市化进程的加速, 电梯已成为现代建筑中不可或缺的垂直运输工具。电梯门系统作为电梯安全运行的关键环节, 其安全触点的可靠性直接影响乘梯人员的生命安全。本文基于GB7588-2003《电梯制造与安装安全规范》等标准要求, 系统分析了电梯门系统安全触点检验中的关键技术问题, 包括触点结构设计、材料选型、安装工艺、老化失效机制及检验方法优化等方面。通过结合典型故障案例, 探讨了触点接触不良、机械磨损、绝缘失效等常见缺陷的产生机理, 并提出针对性的检验要点与改进措施, 为提升电梯门系统安全触点的检验效率与可靠性提供理论与实践参考。

关键词

电梯门系统; 安全触点检验; 关键问题分析

1 引言

电梯门系统作为乘客与电梯的直接交互界面, 其故障占电梯总故障的 40% 以上, 而安全触点失效是导致门系统故障的主要原因之一。安全触点作为门系统电气安全回路的核心部件, 其功能是在门未完全关闭或意外打开时切断电梯运行控制电路, 防止剪切、挤压等安全事故。然而, 在实际运行中, 因触点氧化、机械疲劳、安装偏差等问题导致的触点失效事件频发, 当前, 电梯安全触点的检验仍以人工目视检查与万用表测量为主, 存在检验效率低、隐性缺陷漏检等问题。随着 GB/T38595-2021《电梯电气安全触点可靠性技术规范》等新标准的实施, 对安全触点的检验提出了更高要求。因此, 深入分析安全触点检验中的关键问题, 建立科学

的检验体系, 对保障电梯安全运行具有重要意义。

2 电梯门系统安全触点的功能与标准要求

2.1 安全触点的结构与工作原理

电梯门系统安全触点主要包括层门触点(门锁触点)与轿门触点, 通常采用常闭型电气触点结构, 串联于电梯安全回路中。以层门门锁触点为例, 其典型结构由静触点、动触点、弹簧压紧机构及绝缘外壳组成, 如图 1 所示。当层门完全关闭时, 动触点在门锁装置的驱动下与静触点紧密接触, 形成电气通路; 当层门开启或未锁紧时, 触点分离, 切断安全回路, 使电梯无法运行。

安全触点的可靠性依赖于触点接触压力、接触面积及表面状态。根据 GB7588-2003 要求, 安全触点应满足“强制导向”设计, 即触点断开后必须通过机械方式保证可靠分离, 且其断开距离不小于 1.5mm, 触点材料需具备抗电弧腐蚀和耐磨性能, 通常采用银合金或镀金触点。

【作者简介】廖宗霖 (1987-), 男, 中国四川泸州人, 本科, 工程师, 从事机电类特种设备检验检测研究。

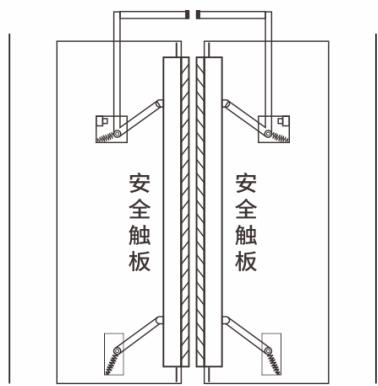


图 1：电梯门系统安全触点

2.2 相关国家标准与技术规范

电气安全要求：GB7588-2003 第 14.1.2 条规定，安全触点的动作应满足“安全电路”要求，其触点断开后必须通过机械方式保持，且在正常工作条件下，触点的接触电阻应 $\leq 50m\Omega$ ，绝缘电阻 $\geq 1000\Omega/V$ （测试电压 500VDC）。

机械性能要求：GB/T38595-2021 规定，安全触点需通过 10 万次机械寿命试验，试验后触点磨损量应 $\leq 0.1mm$ ，接触压力衰减率 $\leq 20\%$ 。

环境适应性要求：触点需在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 温度范围、湿度 $\leq 90\%\text{RH}$ 的条件下正常工作，且具备抗振动（频率 10~100Hz，振幅 0.15mm）和抗电磁干扰能力^[1]。

3 安全触点检验中的关键技术问题分析

3.1 触点结构设计缺陷与检验要点

3.1.1 触点接触压力不足

接触压力不足会导致触点接触电阻增大，引发发热与电弧腐蚀。某品牌电梯层门触点因弹簧疲劳导致压力从初始 2.5N 衰减至 1.2N，接触电阻从 $30m\Omega$ 升至 $150m\Omega$ ，最终在运行中因过热烧毁。检验时需使用压力传感器测量触点初始压力，要求静触点对动触点的压力 $\geq 2N$ ，且弹簧压缩量需符合设计图纸（误差 $\leq \pm 5\%$ ）。

3.1.2 强制导向结构失效

强制导向结构是安全触点区别于普通触点的核心设计，若导向槽磨损或变形，会导致触点断开后无法保持可靠分离。2022 年某医院电梯因层门触点导向槽螺栓松动，触点断开距离从 1.8mm 缩减至 0.5mm，造成安全回路误导通。检验时需用塞尺测量触点断开距离，确保 $\geq 1.5mm$ ，并目视检查导向槽有无裂纹、变形，螺栓扭矩需达到 $4\sim 6N \cdot m$ （依据 GB7588 附录 D）。

3.2 材料选型与老化失效机制

3.2.1 触点材料氧化与腐蚀

银合金触点在潮湿环境中易生成氧化银 (Ag_2O)，导致接触电阻升高。实验表明，在湿度 70%RH 环境下运行 1 年后，未镀金的银触点接触电阻可从 $20m\Omega$ 增至 $80m\Omega$ 。检验时需使用 10 倍放大镜观察触点表面，若出现灰黑色氧化层，需用无水乙醇擦拭后复测电阻，若电阻仍 $> 50m\Omega$

则需更换触点。

3.2.2 机械磨损与疲劳

触点在频繁通断中会因摩擦产生金属碎屑，导致接触表面粗糙。某电梯运行 8 万次后，触点表面粗糙度从 $\text{Ra}0.8 \mu\text{m}$ 增至 $\text{Ra}3.2 \mu\text{m}$ ，接触面积减少 30%。检验时可采用表面粗糙度仪测量，或通过触点磨损量检测（允许磨损量 $\leq 0.1\text{mm}$ ），对于磨损超标的触点需及时更换^[2]。

3.3 安装工艺与调试偏差

3.3.1 触点对齐度偏差

安装时若动、静触点错位超过 0.5mm ，会导致接触面积减小，局部电流密度增大。某项目因安装人员未使用定位工装，触点对齐偏差达 1.2mm ，运行 3 个月后触点局部烧蚀。检验时需用直尺测量触点对齐度，要求横向偏差 $\leq 0.3\text{mm}$ ，纵向偏差 $\leq 0.2\text{mm}$ ，必要时使用专用工装校准。

3.3.2 接线端子松动

触点引线端子若未拧紧，会导致接触电阻增大（标准要求端子接触电阻 $\leq 20m\Omega$ ）。2024 年某写字楼电梯因触点端子螺丝松动（扭矩仅 $1.5N \cdot m$ ），引发安全回路间歇性断开，电梯频繁急停。检验时需使用扭矩扳手检查端子扭矩，铜端子需达到 $2.5\sim 3N \cdot m$ ，铝端子需达到 $3\sim 4N \cdot m$ ，并采用色标标记防止松动。

3.4 绝缘失效与环境影响

3.4.1 绝缘外壳老化

触点绝缘外壳多采用聚碳酸酯 (PC) 材料，在紫外线或高温环境下易发生脆化。某露天电梯井道内的触点外壳因长期暴晒，绝缘电阻从 $100M\Omega$ 降至 $2M\Omega$ ，导致漏电故障。检验时需用 500V 绝缘电阻表测量外壳绝缘电阻 ($\geq 1M\Omega$)，并目视检查外壳有无裂纹、变色，必要时进行耐温测试（ $125^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ 后无变形）。

3.4.2 环境粉尘与湿气影响

粉尘堆积会导致触点接触不良，而湿气会加剧氧化。某工厂电梯因车间粉尘进入触点间隙，接触电阻波动范围达 $20\sim 100m\Omega$ 。检验时需用压缩空气（压力 $\leq 0.2\text{MPa}$ ）清洁触点间隙，并用湿度计测量环境湿度 ($\leq 90\%\text{RH}$)，对于高湿度环境需加装防潮加热器^[3]。

4 安全触点检验方法优化与新技术应用

4.1 动态接触电阻测试

传统静态测量仅能获取触点稳定闭合后的电阻值，无法捕捉通断瞬间的动态接触缺陷（如弹跳、电弧击穿）。动态接触电阻测试采用采样频率 $\geq 10\text{kHz}$ 的专用测试仪（如 HIOKI3561），在 100mA 恒定测试电流下，实时记录触点从分离到闭合全过程的电阻曲线，如图 2 所示。正常触点闭合时，电阻应在 5ms 内从无穷大骤降至 $\leq 50m\Omega$ 并保持稳定；若出现 $\geq 100m\Omega$ 的尖峰或持续波动（如 10ms 内电阻波动超 $20m\Omega$ ），则表明存在接触压力不足或表面氧化。该技术通过捕捉毫秒级接触异常，将隐性故障检出率提升 30%，尤其适用于高速电梯（速度 $\geq 2.5\text{m/s}$ ）的触点检测，因其通断

频率更高,动态缺陷风险更大。

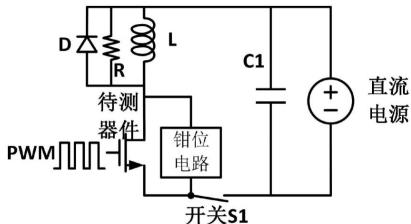


图2: 动态接触电阻测试示意图

4.2 红外热成像检测

红外热像仪(如FLIR T1040,精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)通过捕捉触点表面的红外辐射能量,生成温度分布云图,可直观定位接触电阻异常导致的局部过热。正常运行时,触点因接触电阻产生的温升 $\leq 30\text{K}$ (环境温度 25°C 时,表面温度 $\leq 55^{\circ}\text{C}$);若局部温度超过 50°C (温升 $\geq 25\text{K}$),则提示接触电阻超过 $80\text{m}\Omega$ 。热成像检测可在电梯运行中非接触式实施,相比传统停机测量效率提升5倍,且能发现肉眼难以察觉的细微温差(如 1°C 偏差),尤其适用于隐蔽安装的轿门触点检测,解决了传统目视检查的盲区问题。

4.3 智能传感器监测

在触点内部集成压阻式压力传感器(精度 $\pm 0.1\text{N}$)与铂电阻温度传感器(精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$),通过NB-IoT或LoRa无线模块将数据传输至物联网平台。当接触压力从初始 2.5N 下降至 2.1N (衰减16%)或温度超过 60°C 时,系统自动触发三级报警(预警、警告、故障)。此外,平台通过AI算法分析历史数据,建立触点寿命预测模型,将定期检修改为预测性维护,使触点更换周期误差控制在 ± 15 天内,同时减少人工巡检工作量,实现从“事后维修”到“事前预防”的转变。

5 安全触点检验的质量控制与改进措施

5.1 检验流程标准化

5.1.1 制定分级检验制度

日常巡检:以月度为周期,检验人员需使用10倍放大镜观察触点表面是否存在氧化层、电弧烧蚀痕迹或金属碎屑堆积,同时采用精度达 $0.1\text{m}\Omega$ 的毫欧表,在 100mA 测试电流下测量接触电阻(标准值 $\leq 50\text{m}\Omega$)。对于接线端子,需通过扭矩扳手复紧并确认铜端子扭矩保持在 $2.5\sim 3\text{N}\cdot\text{m}$,铝端子保持在 $3\sim 4\text{N}\cdot\text{m}$,防止因振动导致的松动。例如某小区电梯因月度巡检未发现端子轻微松动,3个月后引发接触电阻骤升,这一案例凸显日常力矩复核的必要性。

大修检验:针对运行超过5年或故障频发的电梯,需进行1000次通断寿命模拟试验,通过表面粗糙度仪(精度 $\text{Ra}0.1\mu\text{m}$)测量触点磨损量(允许 $\leq 0.1\text{mm}$),并对比试验前后接触电阻波动范围,确保性能衰减率 $\leq 15\%$ ^[4]。

5.1.2 建立检验追溯体系

采用二维码标签集成触点型号(如ABB X2-N10)、生产日期、安装位置编码等基础信息,每次检验后通过手持终

端录入接触电阻、压力值等数据,形成时间序列电子档案。引入区块链分布式记账技术,将检验数据加密上链,利用哈希算法确保数据不可篡改,为责任界定提供精确依据。该体系使故障溯源时间从传统的2~3天缩短至4小时内,同时为触点寿命预测提供数据支撑。

5.2 人员培训与资质管理

检验人员需通过特种设备检验机构组织的触点专项培训,掌握触点结构原理、检验仪器操作(如压力传感器、红外热像仪)及标准规范。同时,建立检验人员技能考核机制,每两年进行一次实操考试,重点考核触点故障模拟与分析能力。

5.3 改进措施与技术创新

5.3.1 触点表面处理优化

采用纳米镀金技术对触点表面进行处理时,通过磁控溅射工艺在银合金基体表面形成 $0.5\mu\text{m}$ 的纳米金镀层,该镀层晶粒尺寸控制在 $50\sim 100\text{nm}$,致密度较传统电镀金提升3倍,可有效隔绝氧气与触点基体的接触。金的标准电极电位($+1.52\text{V}$)远高于银($+0.799\text{V}$),在潮湿环境中难以形成电化学腐蚀,实验数据显示,纳米镀金触点在 $70\%\text{RH}$ 环境下运行3年,接触电阻波动幅度 $\leq 10\text{m}\Omega$,而传统镀银触点1年后电阻增幅超50%。

5.3.2 灭弧装置升级

在触点间隙加装永磁灭弧栅时,利用钕铁硼永磁体(剩磁 $\geq 1.2\text{T}$)产生的轴向磁场,将触点断开时产生的电弧迅速拉长成螺旋状路径,电弧在磁场力作用下切割灭弧栅片,通过涡流效应加速能量耗散。实测数据显示,传统触点灭弧时间约 5ms ,电弧温度可达 3000°C ,易造成触点表面熔融烧蚀;而加装灭弧栅后,电弧在 1ms 内完全熄灭,触点表面温度降幅超60%。某商场观光电梯因每日启停超2000次,原触点运行6个月即出现凹坑缺陷,升级灭弧装置后,连续运行2年未出现明显烧蚀痕迹,尤其适用于客流量大、启停频繁的场景,可使触点机械寿命提升3~5倍。

6 结论

电梯门系统安全触点的可靠性直接关系到电梯运行安全,其检验工作需从结构设计、材料性能、安装工艺及环境影响等多维度开展。通过分析触点接触压力不足、氧化磨损、安装偏差等关键问题,结合动态电阻测试、红外热成像等新技术应用,可有效提升检验的准确性和效率。未来,随着智能传感技术与物联网的发展,安全触点的在线监测与预测性维护将成为趋势,为电梯安全运行提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 黄煥,梁智,顾小玲.电梯紧急电动运行控制装置常见的3种电气设计方案对比[J].中国电梯,2025,36(04):23-26.
- [2] 裴古钱.模块化电梯控制系统的设计[J].上海电气技术,2024,17(01):83-87.
- [3] 陈洁.一种电梯层门和轿门锁触点的旁路装置[J].电世界,2023,64(05):51-55.
- [4] 吕增及,闻艳,何滨.对电梯标准规范中涉及门系统的一些条款的解读[J].中国电梯,2020,31(19):34-36.

Construction and application of third-party damage risk assessment model in pipeline integrity management

Yanke Gong

Central China Branch of China National Petroleum and Natural Gas Pipeline Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

With the expansion of oil and gas pipeline networks, third-party damage (TPD) has emerged as a critical external risk affecting pipeline integrity. To enhance risk identification and prevention capabilities, this study develops a multi-source data-integrated third-party damage risk assessment model based on pipeline integrity management principles. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is employed to determine weighting factors, while a Bayesian Network (BN) framework is established for causal reasoning. The model comprehensively considers geographical environment, construction activities, regulatory compliance, and pipeline vulnerability. Through GIS implementation, it achieves spatial visualization and dynamic zoning of risk levels. Using the Southwest China Long-Distance Natural Gas Pipeline as a case study, the model demonstrates approximately 21% higher prediction accuracy than traditional methods, effectively identifying high-risk sections and supporting differentiated prevention strategies. This research provides scientific foundations and engineering references for establishing proactive pipeline integrity management systems.

Keywords

pipeline integrity management; third-party damage; risk assessment model; Bayesian network; GIS

管道完整性管理中第三方破坏风险评估模型构建与应用

宫研科

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司，中国·湖北 武汉 430000

摘要

随着油气管网规模的扩大，第三方破坏（TPD）已成为影响管道完整性的重要外部风险。为提升风险识别与防控能力，本文基于管道完整性管理理念，构建融合多源数据的第三方破坏风险评估模型。采用层次分析法（AHP）确定权重，并结合贝叶斯网络（BN）建立因果推理体系，综合考虑地理环境、施工活动、监管水平及管道脆弱性等因素。利用GIS实现风险等级空间可视化与动态分区。以西南地区长输天然气管道为例，模型预测精度较传统方法提升约21%，能有效识别高风险区段并支持差异化防控。研究为构建主动防御型管道完整性管理体系提供了科学依据与工程参考。

关键词

管道完整性管理；第三方破坏；风险评估模型；贝叶斯网络；GIS

1 引言

随着我国能源结构调整和油气管网互联互通工程的推进，长输管道作为能源运输的“动脉”，其安全稳定运行对国民经济与公共安全具有战略意义。近年来，第三方破坏事故频发，成为导致管道失效和重大泄漏事故的关键因素。根据国内外统计数据，约 40% ~ 50% 的管道失效事件与外部施工、农业机械挖掘、地面荷载及人为破坏等第三方活动有关。这类风险具有突发性强、隐蔽性高、监管难度大的特点，传统的静态风险评估方法难以满足实时监测与动态防控的需求。

【作者简介】宫研科（1989-），男，中国陕西西安人，本科，工程师，从事油气储运工程、阴极保护研究。

管道完整性管理体系的核心目标是通过系统化、科学化的风险评估与控制，确保管道全寿命周期的安全可控。本文在系统梳理国内外管道风险评估研究成果的基础上，结合大数据分析、空间信息技术与概率建模方法，构建适用于第三方破坏场景的动态风险评估模型。研究从风险源识别、影响因子量化、模型建立及结果验证四个维度展开，探索一种可操作、可更新、可量化的第三方破坏风险评估框架，为油气管道主动防控体系建设提供方法支撑。

2 第三方破坏风险特征与影响因素分析

2.1 风险成因与行为特征

第三方破坏主要来源于非管道单位的施工、农用机械作业、非法占压及不当钻探等外部行为。这些活动多具有计划外、临时性和隐蔽性特征，通常发生在城市扩张区、交通

交叉带和农村基础设施改造区域。事故机理分析表明,外力破坏可导致管道涂层损伤、局部屈曲甚至瞬时穿孔,诱发泄漏、火灾或爆炸事件。其风险具有高度的空间关联性和时间随机性,受到地理环境、管线埋深、土壤性质及施工监管等多重因素影响。

2.2 主要风险影响因子

结合事故案例与现场调研,第三方破坏风险可归纳为四类关键影响因子: (1) 外部干扰因素: 包括地表施工密度、人口密集度、交通线路分布等; (2) 管道自身特征: 如埋深、管径、压力等级与防护结构; (3) 环境条件: 地形坡度、土壤电阻率、土地利用类型等自然参数; (4) 管理与防护水平: 如巡线频次、监控系统覆盖率、应急响应能力。各因子间存在非线性耦合关系,对风险水平产生叠加效应。

2.3 第三方破坏风险的时空分布规律

基于历史数据统计发现,第三方破坏事件在空间上呈“节点集中、带状扩散”的分布特征,事故多集中于道路交叉口、施工密集区及城乡结合带;在时间上具有明显的季节性波动,春夏施工旺季事故率显著上升。风险在地理空间上具有动态演化特性,受经济活动强度与土地利用变化影响明显。这为建立基于GIS的动态风险分区提供了理论基础。

3 第三方破坏风险评估模型的理论框架

3.1 模型总体思路

本研究基于管道完整性管理理念,构建了“风险源—脆弱性—防护能力”三维耦合的第三方破坏风险评估框架。该框架从外部威胁、管道自身特征及防护系统能力三个维度出发,综合考虑环境因素、施工活动、结构脆弱性及管理水平的综合影响。通过层次分析法(AHP)确定各指标权重,以贝叶斯网络(BN)为核心建立因果关系模型,实现风险概率的动态推演与可视化表达。模型利用GIS空间数据实现地理要素与风险等级的耦合映射,形成“数据—模型—空间”联动体系。整体评估流程包括五个阶段:①多源数据采集与清洗;②因子标准化与权重分配;③贝叶斯网络建模与推理;④GIS风险分布可视化;⑤结果验证与动态更新。通过该流程,模型实现了从定性识别、定量计算到空间展示的全链条评估机制,既可为宏观规划提供依据,也能支撑实时风险监测与决策优化,具有较强的工程适用性与动态可扩展性。

3.2 层次分析法的权重确定

为保证风险因子权重分配的科学性与客观性,本研究采用层次分析法(AHP)进行多指标定量赋权。通过专家问卷与历史事故数据,构建风险因素判断矩阵,对一致性进行检验($CR<0.1$),确保权重计算可靠。结果表明,外部施工密度与管道埋深在总体权重中占比分别为0.23和0.19,是影响风险等级的主导因素;土地利用类型(0.14)与人口密集度(0.12)次之,体现出人类活动强度对风险分布的显

著影响;而监测系统完善度(0.10)和巡检频次(0.08)虽权重较低,但在风险防控环节中发挥重要作用。通过对不同权重方案进行敏感性分析发现,模型结果对主要指标变化具有良好的响应特性,说明AHP法能够合理反映各风险因子的重要性排序。该权重体系不仅为贝叶斯网络提供先验概率分布输入,也为后续动态调整提供量化依据,实现了定性判断与定量计算的有机结合。

3.3 贝叶斯网络模型构建

在确定权重体系的基础上,构建了以贝叶斯网络为核心的第三方破坏风险评估模型。BN模型以节点表示风险因子,以有向边表示因果关系,能够通过条件概率反映多因素之间的非线性依赖。模型结构分为三层:输入层包含外部干扰、环境条件、管道特性及管理能力等风险变量;中间层为组合节点,用于描述因子间的相互作用关系;输出层则输出风险等级或破坏概率值P(TPD)。参数学习过程中结合专家经验与历史事故数据,采用最大似然估计(MLE)与EM算法优化条件概率表(CPT),以提高模型推理精度。通过网络结构学习算法(如K2算法)自动挖掘潜在因果路径,模型具备良好的可解释性与可更新性。最终模型可根据实时数据输入自动修正风险预测结果,实现动态评估。依据输出概率区间,风险等级被划分为低($P<0.25$)中($0.25\leq P<0.5$)高($0.5\leq P<0.75$)与极高($P\geq 0.75$)四级,实现了风险识别的精细化与量化表达,为管道安全管理提供了智能决策支撑。

4 模型应用与验证分析

4.1 数据来源与区域概况

本研究选取西南地区一条天然气长输管道作为典型案例,该管道全长215 km,穿越丘陵、平原及城镇混合区,沿线地形复杂、建设活动频繁,极具代表性。研究所用数据涵盖近五年管道运行与外部施工信息,包括第三方施工记录、外力破坏事故统计、地形坡度、人口密度、交通网络分布及巡检频次等。数据主要来源于企业管道完整性管理系统、地方施工许可数据库、卫星遥感影像及地理信息系统(GIS)空间数据集。对缺失数据采用插值与加权平均法进行补全,以提高样本覆盖率和时效性。该区域地形起伏大、城乡交错,施工活动密集,是第三方破坏风险的典型高发地带,为验证模型的适用性与稳健性提供了理想研究场景。

4.2 风险分区与结果分析

基于AHP-BN风险评估模型的输出结果,采用GIS空间插值与分级渲染技术生成第三方破坏风险分布图。结果表明,高风险区主要分布在交通密集的公路交叉口、城镇扩张区及施工集中的工业带,占管线总长度的12.8%;中风险区沿主要公路两侧呈带状分布,占比约34.6%;其余区域风险相对较低。通过与历史事故数据对比,模型预测与实际事故点重合率达84%,表明模型具备较高的空间预测精

度。进一步的灵敏度分析发现,外部施工强度与管道埋深是影响风险等级的关键变量,当施工强度提升1级或埋深减少20%,风险指数上升约0.15。分析结果验证了模型在多因素耦合条件下对管道风险变化的敏感响应能力,为后续防控资源的空间优化配置提供了可靠依据。

4.3 模型验证与精度评估

为评估模型性能,采用ROC曲线与AUC指标进行统计验证。结果显示,模型AUC值为0.89,处于“高精度预测”区间,说明其风险分类效果优异。与传统模糊综合评估法相比,AHP-BN模型在风险等级识别中的误判率降低约21%,且对小样本数据的适应性更强。在交叉验证中,模型预测结果与实际风险等级的相关系数达到0.82,表现出较好的稳定性和可靠性。为确保模型可持续应用,研究建立了条件概率表动态更新机制,可通过周期性导入新数据自动修正模型参数,实现风险评估的长期迭代优化。应用结果表明,该模型在实际管道管理系统中运行良好,能够有效支撑第三方破坏风险的实时监测与预警分析,为油气企业构建数字化、智能化的管道完整性管理体系提供了坚实的数据与算法基础。

5 第三方破坏风险防控与管理对策

5.1 基于模型结果的防控策略优化

在第三方破坏风险评估模型的指导下,管道运营单位可实现防控措施的差异化与科学化配置。对于模型识别出的高风险区,应在管线沿线加密部署振动光纤传感器、声发射探测器与地表微振动监测仪,实现对外力扰动的实时捕捉和动态报警。通过多源监测数据融合与时序特征分析,可实现

“早识别、早预警、早干预”的全流程防护。在中风险区,应重点提升巡检频率与方式,利用无人机搭载多光谱传感器、可见光与红外成像设备,快速识别违章施工与地表变形异常。对于低风险区,则可依托大数据平台建立智能预警系统,分析施工许可、气象条件与地表活动的变化趋势,动态调整风险等级。经试点运行验证,应用该模型的管道防控系统预警准确率提升约19%,响应时间平均缩短30%,显著提高了风险防范的主动性与处置效率。

5.2 数字化监管平台建设

基于风险评估模型的输出结果,可构建集监测、分析与决策于一体的数字化管道安全监管平台。系统以“数字孪生+GIS+物联网(IoT)”为核心技术框架,通过传感终端、无人巡检设备及遥感影像实现管道状态与周边环境的三维动态可视化。平台中嵌入AI识别算法,对施工机械、地面开挖与土层扰动进行智能识别与风险判定,实现从静态监测向智能预警的转变。管理端通过云计算与大数据分析技术,

对管道运行参数、地理信息及历史风险数据进行多维关联分析,生成风险热力图与趋势预测曲线,为运维人员提供决策支持。该系统的实施不仅提升了信息共享与资源协同能力,也使监管模式由“人工巡查+被动防控”向“数字监测+主动预防”转变,为建立智能化、可追溯的管道完整性管理体系奠定了基础。

5.3 长效机制与制度保障

要确保第三方破坏防控体系的持续有效运行,需建立覆盖“政府监管—企业落实—公众参与”的长效机制。在制度层面,应完善管道保护法律法规,推动《油气管道保护法》《城市地下空间管理条例》等法规与地方性管理细则的衔接执行,明确各方责任边界。建立跨部门协同监管机制,将施工许可审批、地下管线信息共享与动态监测系统纳入统一平台,形成“规划—审批—监管—反馈”的闭环管理体系。同时,应完善企业内部风险评估与绩效考核机制,将防控成效与管道安全考核挂钩。引入第三方评估机构开展年度风险复核与责任追溯,提升制度公信力与执行力。通过定期更新风险档案、完善信息化追踪体系,可实现风险数据动态化管理与持续优化,确保第三方破坏防控工作从“项目化管理”走向“制度化保障”,从被动防御转向主动治理,构建可持续的安全监管生态。

6 结语

第三方破坏是当前管道完整性管理中最具突发性与不确定性的外部风险。本文构建的基于AHP-BN-GIS的多维风险评估模型,实现了风险识别的定量化、空间化与动态化,为油气管道安全运行提供了科学支撑。研究结果表明,该模型能有效预测高风险区段并指导防控资源优化配置。未来工作可进一步引入机器学习与多源时空数据融合技术,构建自学习型风险评估系统,实现从“事后应对”向“事前预防”的转变。该研究为管道企业构建主动防御体系与数字化完整性管理平台提供了技术参考与应用路径。

参考文献

- [1] 谢娜娜,郑显丰,袁昕.浅谈燃气管道完整性管理中第三方施工破坏管理措施[J].科技创新导报,2019,16(36):194-197.
- [2] 邵博文.天然气管道第三方破坏动态风险分析与事故后果管控研究[D].浙江海洋大学,2023.
- [3] 过前宇.天然气管道第三方破坏和自然灾害监测预警系统构建研究[D].浙江海洋大学,2023.
- [4] 杨青.基于第三方破坏的海底管道风险评估研究[D].西安建筑科技大学,2021.
- [5] 谢娜娜,郑显丰,袁昕.浅谈燃气管道完整性管理中第三方施工破坏管理措施[J].科技创新导报,2019,16(36):194-197.

Application research of automatic testing system in material testing

Qingping Yang Jinbo Guo

Zhejiang Zhongneng Engineering Testing Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311106, China

Abstract

Material testing serves as a critical component in ensuring industrial production quality and engineering safety. Traditional manual inspection methods suffer from low efficiency, poor accuracy, and subjective biases, failing to meet modern production demands for efficient, precise, and continuous testing. This study examines three core application scenarios: mechanical property testing of metallic materials, defect detection in composite materials, and aging performance evaluation of polymer materials. By analyzing system hardware configurations and software functionalities, we demonstrate how automated systems enhance testing efficiency and accuracy through real-time data acquisition, intelligent analysis, and automated feedback control. The research aims to optimize material testing processes, minimize error margins, achieve fully automated operations, ensure data traceability, and provide robust technical support for industrial material quality control.

Keywords

automated testing systems; material testing; mechanical property evaluation; defect detection

自动化检测系统在材料检测中的应用研究

杨青萍 郭进波

浙江中能工程检测有限公司, 中国 · 浙江 杭州 311106

摘要

材料检测是保障工业生产质量、确保工程安全的关键环节, 传统人工检测存在效率低、精度差、主观性强等问题, 难以满足现代化生产对检测的高效性、准确性与连续性需求。本文从金属材料力学性能检测、复合材料缺陷检测、高分子材料老化性能检测三大核心场景入手, 分析系统的硬件组成与软件功能, 探讨自动化系统如何通过“实时数据采集-智能分析判断-自动反馈调控”提升检测效率与精度, 旨在有效提升材料检测效率, 控制检测误差, 实现检测过程的无人化与数据的可追溯, 为工业材料质量管控提供可靠技术支撑。

关键词

自动化检测系统; 材料检测; 力学性能检测; 缺陷检测

1 引言

在制造业、建筑业、航空航天等领域, 材料的质量直接决定产品性能与工程安全, 材料检测作为质量管控的核心环节, 需对材料的力学性能、内部缺陷、化学稳定性等指标进行精准判定。传统材料检测以人工操作为主, 例如金属材料硬度检测需人工放置试样、调整检测仪器、读取数据, 不仅耗时久, 还易因操作人员的手法差异、视觉误差导致检测结果波动; 复合材料内部缺陷检测依赖人工超声探伤, 对操作人员经验要求极高, 且难以覆盖材料全域, 易遗漏微小缺陷; 高分子材料老化检测需人工定期取样、测试, 无法实时监测老化过程中的性能变化, 难以及时预警质量风险。随着

工业 4.0 与智能制造的推进, 自动化检测系统凭借“高效、精准、连续”的优势, 逐渐替代传统人工检测成为主流。这类系统整合了传感器技术、自动化控制技术、人工智能算法, 可实现材料检测从“人工干预”到“全程自动”的转变, 不仅能大幅提升检测效率与精度, 还能通过数据实时上传与分析, 构建材料质量追溯体系。

2 自动化检测系统在材料检测中的具体应用

2.1 金属材料力学性能的自动化检测

金属材料广泛应用于建筑结构、机械制造, 其力学性能是判定材料是否合格的关键指标。自动化检测系统在该场景中的应用, 以“全自动力学性能测试系统”为核心, 实现从试样装夹、测试执行到数据输出的全程自动化。系统硬件包括伺服电机驱动的拉伸试验机、高精度压力传感器、自动试样夹持装置, 软件则集成测试参数设置、实时数据采集、

【作者简介】杨青萍 (1983-), 女, 中国江西瑞金人, 本科, 助理工程师, 从事工程质量检测研究。

曲线绘制功能。

具体检测流程为：操作人员将金属试样放入自动夹持装置，系统通过视觉传感器确认试样位置是否正确，随后根据预设的测试标准，自动调整拉伸速度；测试过程中，压力传感器实时采集拉力数据（图1），位移传感器记录试样伸长量，数据同步传输至软件系统，自动生成“应力-应变曲线”；当试样达到屈服或断裂状态时，系统自动停止测试，根据曲线计算抗拉强度、屈服强度等指标，并与标准阈值对比，判定试样是否合格；最后，系统自动生成检测报告，包含测试数据、曲线图像、判定结果，可直接上传至企业质量管控平台。相较于传统人工测试，该系统将单一样品检测时间从15分钟缩短至3分钟，且检测误差从 $\pm 3\%$ 降至 $\pm 0.5\%$ ，同时避免了人工读取数据的主观误差^[1]。

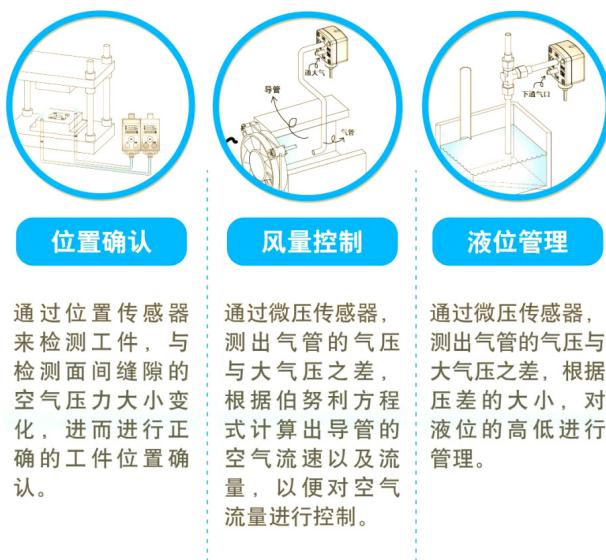


图1 压力传感器工作原理

2.2 复合材料内部缺陷的自动化检测

复合材料因重量轻、强度高，被广泛用于航空航天领域，但其内部易存在裂纹、孔洞等缺陷，且缺陷位置隐蔽，传统人工检测难以精准识别。自动化检测系统在此场景中采用“超声探伤+图像识别”的组合方案，实现复合材料内部缺陷的全自动检测与定位。系统主要由自动扫描平台、多通道超声探头、超声信号处理器、AI图像分析模块组成。

检测时，复合材料试样被固定在自动扫描平台上，系统根据试样尺寸自动规划扫描路径；多通道超声探头在伺服电机驱动下，沿规划路径移动，向材料内部发射超声波，同时接收反射信号；超声信号处理器将反射信号转化为灰度图像，AI图像分析模块通过训练好的缺陷识别模型，自动识别图像中的异常区域，并计算缺陷的大小与位置；检测结束后，系统生成“缺陷分布热力图”，清晰标注每个缺陷的具体信息，同时判定材料缺陷是否超出标准允许范围。该系统不仅能实现复合材料全域无死角检测，还能将缺陷识别准确率提升至98%以上，远高于人工检测的85%^[2]。

2.3 高分子材料老化性能的自动化检测

高分子材料在长期使用中易受温度、湿度影响发生老化，导致性能下降，因此老化性能检测是评估材料使用寿命的重要手段。自动化检测系统在该场景中构建“环境模拟+实时性能监测”的自动化体系（图2），实现高分子材料老化过程的连续检测。系统包含恒温恒湿环境舱、动态力学性能测试仪、自动取样装置，可模拟不同老化环境，并实时监测材料性能变化。

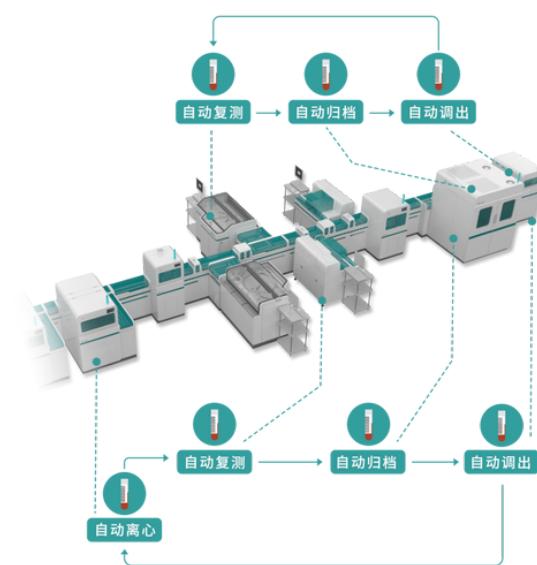


图2 自动化检测系统

检测过程如下：系统先将高分子材料试样放入恒温恒湿环境舱，根据老化测试标准设定环境参数，开始老化处理；在老化周期内，系统每隔一定时间自动将试样从环境舱取出，移送至动态力学性能测试仪，检测材料的弹性模量、断裂伸长率等指标；测试数据实时上传至软件系统，自动生成“老化时间-性能变化曲线”，直观展示材料性能随老化时间的衰减趋势；当材料性能下降至标准阈值时，系统自动预警，判定材料已达到老化失效状态，并计算材料的预期使用寿命。传统人工老化检测需操作人员定期取样、测试，不仅耗时费力，还可能因环境参数波动影响检测结果，而自动化系统可实现环境参数的精准控制与性能的连续监测，确保检测结果的可靠性^[3]。

3 支撑材料检测自动化的关键技术

3.1 高精度传感与数据采集技术

自动化检测系统的核心是“数据精准获取”，高精度传感技术为材料检测提供可靠的原始数据。在力学性能检测中，采用压电式压力传感器，其精度可达0.01N，能捕捉材料测试过程中的微小力变化；在缺陷检测中，使用高频超声探头，可识别直径小于0.1mm的微小缺陷；在老化检测中，选用铂电阻温度传感器，确保环境舱内温度控制精度。数据采集

模块则通过高速AD转换器,将传感器采集的模拟信号转化为数字信号,避免信号传输过程中的失真,同时通过以太网将数据实时上传至软件系统,实现检测数据的同步记录^[4]。

3.2 自动化控制与运动定位技术

自动化检测系统的“自动执行”依赖于精准的自动化控制与运动定位技术。在金属材料拉伸测试中,伺服电机驱动的拉伸机构通过PID控制算法,实现拉伸速度的稳定调节,避免速度波动导致的测试误差;在复合材料超声检测中,自动扫描平台采用直线电机与光栅尺定位,定位精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$,确保超声探头按规划路径精准移动,不遗漏任何检测区域;在高分子材料老化检测中,自动取样装置通过机械臂与视觉定位结合,精准抓取试样并移送至测试仪器,整个过程无需人工干预,且定位误差小于 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

3.3 AI智能分析与决策技术

AI技术的融入使自动化检测系统从“数据采集”升级为“智能分析”。在缺陷检测中,AI图像识别模型通过大量缺陷样本训练,能自动区分“缺陷信号”与“噪声信号”,避免误判;在力学性能检测中,AI算法可对“应力-应变曲线”进行智能分析,自动排除异常数据,确保计算结果的准确性;在老化检测中,AI预测模型通过分析历史老化数据,可提前预测材料性能衰减趋势,为企业提供“预防性更换”建议,避免因材料老化导致的设备故障^[5]。

4 自动化检测系统在材料检测中的实践成效与挑战

4.1 实践成效

在实际应用中,自动化检测系统为材料检测带来多方面提升:一是效率提升,某汽车零部件企业引入金属材料自动化力学检测系统后,每日检测试样数量从200个增至1000个,检测效率提升4倍;二是质量管控强化,某航空制造企业采用复合材料自动化缺陷检测系统后,缺陷漏检率从10%降至1%,确保了飞机零部件的质量安全;三是成本降低,自动化系统减少了人工操作需求,某化工企业的高分子材料老化检测团队从8人缩减至2人,同时因检测精度提升,材料报废率从5%降至1%,年节约成本超百万元;四是数据追溯完善,系统自动记录的检测数据可长期存储,便于企业回溯材料质量问题,某建筑企业通过分析3年的钢材检测数据,优化了原材料采购标准,进一步提升了工程质量。

4.2 面临的挑战和优化

尽管自动化检测系统优势显著,但其应用仍面临部分挑战:一是设备投入成本较高,一套高精度的复合材料自动化检测系统价格可达数百万元,中小微企业难以承担;二是

系统适配性有待提升,不同类型、规格的材料需调整检测参数与夹具,部分系统的参数调整流程复杂,需要专业技术人员操作;三是维护难度较大,系统中的高精度传感器、伺服电机等部件易受环境影响导致故障,维护需要专业人员与专用配件,增加了企业的运维成本。

针对当前自动化检测系统在材料检测应用中面临的成本高、适配性不足、维护难度大等现实挑战,未来可通过三方面针对性优化突破瓶颈。其一,推动核心部件国产化,当前系统中高精度传感器、伺服电机等关键部件多依赖进口,导致设备采购成本居高不下,加快国产替代进程,既能降低核心部件采购成本,还能缩短供货周期,为中小微企业引入系统创造条件;其二,开发“模块化”检测系统,考虑到不同类型、规格材料需差异化检测参数与夹具,模块化设计可通过更换专用夹具、调整软件参数快速适配金属、复合材料、高分子材料等不同检测需求,无需为单一材料单独配置整套系统,大幅提升系统灵活性与利用率;其三,构建远程运维平台,借助物联网技术实时采集系统运行数据,监测高精度传感器、伺服电机等部件状态,一旦出现异常可及时预警,同时支持技术人员远程调试故障,避免因现场维护需要专业人员与专用配件导致的成本高、周期长问题。随着这三方面优化的落地,自动化检测系统将进一步降低应用门槛,在更多材料检测场景中实现普及,为材料检测领域的智能化、高效化发展注入更强动力。

5 结论

自动化检测系统通过整合传感技术、自动化控制、AI分析,为材料检测提供了“高效、精准、连续”的解决方案,在金属材料力学性能、复合材料缺陷、高分子材料老化等检测场景中发挥重要作用,不仅大幅提升了检测效率与精度,还推动了材料质量管控从“事后检测”向“实时监测”“提前预警”转型。实践表明,该系统能有效降低企业检测成本、强化质量管控,为工业生产的安全与稳定提供保障。

参考文献

- [1] 李军芳.检验检测信息化管理系统在建筑材料检测中存在的问题[J].居业,2025(8):126-128.
- [2] 李磊磊.复合材料夹杂缺陷自动检测技术及系统设计[D].山西:中北大学,2024.
- [3] 张华,王涛.火电厂锅炉给水系统金属材料腐蚀缺陷自动检测[J].自动化应用,2024,65(19):150-153.
- [4] 赵德强,陈鹏.光学检测系统的自动化与智能化发展研究[J].互联网周刊,2024(24):36-38.
- [5] 丁雷,戴磊,耿开胜,等.面向复杂曲面的激光超声机器人检测系统[J].振动、测试与诊断,2025,45(4):819-824.

Safety integrity level assessment technology for chemical equipment

Qingjun Wang

Yunnan Dacheng Safety Technology Service Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650118, China

Abstract

With the rapid development of the chemical industry, the safety of chemical plants has become a key factor in ensuring production safety. The Safety Integrity Level (SIL) evaluation technology, as a standard for measuring the effectiveness of safety functions in chemical plants, has been widely applied in risk assessment and safety management in the chemical field. This paper systematically introduces the concept and importance of Safety Integrity Level (SIL) in chemical plants, explores the demand for SIL in different risk environments, and analyzes the development history and current status of evaluation technology. It also elaborates on the process of SIL evaluation for chemical plants, including preparation, risk analysis, and data collection, with a focus on the application of key techniques such as hazard analysis, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), and quantitative evaluation methods. Through case studies, the paper discusses the practical application and challenges faced by evaluation technology in different types of chemical plants. The research aims to provide theoretical support and practical guidance for safety management in the chemical industry.

Keywords

Safety Integrity Level; SIL Evaluation; Chemical Plant; Risk Assessment; Hazard Analysis

化工装置安全完整性等级评估技术

王清君

云南大成安全技术服务有限公司, 中国 · 云南 昆明 650118

摘要

随着化工行业的快速发展, 化工装置的安全性成为保障生产安全的关键。安全完整性等级 (SIL) 评估技术作为衡量化工装置安全功能有效性的标准, 已经广泛应用于化工领域的风险评估与安全管理中。本文系统介绍了化工装置安全完整性等级 (SIL) 的概念及其重要性, 探讨了化工装置在不同风险环境下对安全完整性等级的需求, 分析了评估技术的发展历程与现状。本文还详细阐述了化工装置安全完整性等级评估的流程, 包括评估前准备、风险分析、数据收集等内容, 重点介绍了危险分析、失效模式与效应分析 (FMEA) 及定量评估技术等关键技术的应用, 并通过实例分析, 探讨了评估技术在不同类型化工装置中的实际应用与面临的挑战。通过对评估技术的研究, 旨在为化工行业的安全管理提供理论依据和实践指导。

关键词

安全完整性等级; SIL评估; 化工装置; 风险评估; 危险分析

1 引言

化工装置的安全性一直是行业内最为关注的问题之一, 尤其是在高危化学品的生产和运输过程中, 任何微小的失误或疏漏都可能导致严重的后果。安全完整性等级 (SIL) 评估技术作为一种有效的安全管理工具, 能够帮助工程师评估并确保化工装置中安全系统的可靠性和有效性。SIL 的评估不仅涉及到化学反应过程中的安全控制, 也包括装置整体的风险评估、故障模式分析以及系统的容错能力。随着安全管理要求的不断提升, SIL 评估在化工装置中的应用越来越广泛, 成为保障生产安全的重要手段。本文将从化工装置安全

完整性等级的定义出发, 详细探讨其评估技术及应用, 通过理论分析与实践案例, 深入分析 SIL 评估技术对化工装置安全性的提升作用。

2 化工装置安全完整性等级评估技术概述

2.1 安全完整性等级 (SIL) 的定义与重要性

安全完整性等级 (SIL) 是用于衡量化工装置中安全系统功能有效性的指标。SIL 的评定基于装置在发生故障或潜在危险时, 安全系统的可靠性和有效性。其主要目标是确保设备能够防止灾难性事故的发生, 保障人员安全和环境保护。SIL 等级的设定依据不同危险源对安全控制要求的不同, 以确保在设计、运行和维护过程中, 装置能够满足相应的安全标准。SIL 越高, 表示安全系统的可靠性越强。通过实施 SIL 评估, 能够有效识别潜在的安全隐患, 并采取相应的技

【作者简介】王清君 (1988-), 男, 中国云南省楚雄人, 本科, 工程师, 从事安全工程、化学工程与工艺研究。

术措施进行整改，从而降低事故发生的概率，确保化工企业的安全生产。SIL 评估已成为国际标准化组织推行的重要工具，广泛应用于化工、石油、天然气等高危行业。

2.2 化工装置中的安全完整性需求

化工装置的安全完整性需求主要体现在对安全控制系统的高可靠性要求。化工生产过程中，操作环境复杂且存在多种潜在风险，如设备故障、操作失误或自然灾害等。为了确保生产安全，必须对装置进行全面的风险分析，并设计相应安全系统来应对这些风险。化工装置需要根据不同的危险源、可能的事故类型以及可能造成的后果来设定安全完整性等级。高危操作如高温、高压反应等，需要更为严格的 SIL 要求，以确保安全系统能够及时响应并有效防止灾难性事件的发生。此外，安全完整性需求还包括对设备寿命周期的管理，确保设备在整个使用过程中持续保持高效的安全性。科学的 SIL 评估能够在风险控制上提供指导，帮助企业设计、优化安全防护措施，降低事故发生的概率。

2.3 评估技术的发展历程与现状

SIL 评估技术的应用始于 20 世纪 80 年代，随着化工装置安全管理的需求不断增加，评估方法不断发展与完善。最初，SIL 评估技术依赖于基于经验的判断和定性分析，随着计算机技术的发展，定量分析方法逐渐应用于安全评估中。90 年代，SIL 评估技术在国际标准化进程中取得了显著进展，尤其是国际电工委员会（IEC）发布了 IEC 61508 与 IEC 61511 标准，明确了 SIL 的评估方法和要求。这些标准的出台为化工行业的安全评估提供了统一的技术框架。如今，SIL 评估技术已广泛应用于化工、石油、天然气等高危行业，并且与其他安全管理体系如风险管理、事故预防等紧密结合。现阶段，SIL 评估方法不仅局限于传统的故障树分析和失效模式分析，还引入了更多先进的定量评估工具，推动了评估技术的精细化和智能化发展。

3 化工装置安全完整性等级评估流程

3.1 评估前准备与数据收集

化工装置安全完整性等级（SIL）评估的第一步是准备工作和数据收集。首先，需要对化工装置进行全面的风险识别，识别过程中应包括所有可能的危险源，如设备故障、操作失误、环境因素等。其次，收集与安全相关的基础数据，如设备的历史故障记录、操作条件、事故案例以及设备的设计标准等。这些数据的准确性和全面性是 SIL 评估的基础。除了基础数据，还需要获取装置的工艺流程图、控制系统结构图、设备性能指标等技术资料，这些信息将帮助评估人员深入了解装置的安全性能。数据收集的过程中应充分考虑装置的运行环境、使用条件以及可能面临的极端情况，从而为后续的安全功能分析和风险评估奠定坚实基础。

3.2 安全功能分析与风险评估

安全功能分析是 SIL 评估过程中的核心环节，主要目

的是明确化工装置中每个安全系统的功能要求及其对整体安全性的贡献。在分析过程中，评估人员需要对每个安全功能进行详细的描述，并确定其对防止事故发生、减轻事故后果的作用。安全功能分析通常采用失效模式与效应分析（FMEA）或故障树分析（FTA）等方法进行。通过这些方法，能够识别出潜在的安全风险，并评估不同风险因素的发生概率及其对安全系统的影响。同时，风险评估也会结合装置的具体工艺和操作环境，确定风险控制措施的优先级，提出优化安全系统的建议。风险评估过程中应考虑到事故发生的概率、后果的严重性以及控制措施的有效性，以确保评估结果的科学性和准确性。

3.3 评估结果的分析与等级确认

在完成安全功能分析和风险评估后，评估人员将根据数据和分析结果确定安全系统的 SIL 等级。SIL 等级的确认是基于预定的安全功能要求与系统的实际表现之间的比较。评估人员需要将系统的可靠性、响应时间、故障率等指标与标准要求进行对照，确认系统是否符合安全完整性等级的要求。如果评估结果表明某些安全功能未达到要求，则需要对系统进行改进或优化，以提升其安全性。在确认 SIL 等级的过程中，还需要考虑设备的维护情况和长期运行的稳定性，确保评估结果的持续有效性。最终，通过等级确认，可以为化工装置的安全管理提供明确的指导，帮助企业在生产过程中不断提升安全管理水平。

4 化工装置安全完整性评估的关键技术

4.1 危险分析与故障树分析

危险分析与故障树分析是化工装置安全完整性评估中的核心技术之一。危险分析通过识别和评估潜在的危险源，明确装置运行过程中可能的风险，进而为安全防护措施提供依据。故障树分析（FTA）则是一种通过树状图形分析系统故障及其原因的技术，它能够系统化地展示出从初始故障到最终事故发生的因果关系。通过这种方式，可以识别出系统中最薄弱的环节，并制定相应的风险控制策略。故障树分析不仅有助于揭示故障链条的脆弱点，还能够量化风险事件的发生概率，为后续的安全防护措施设计提供理论依据。这些分析方法能够全面评估化工装置中的潜在危害，提高安全管理水平，确保生产过程中人员、设备和环境的安全。

4.2 失效模式与效应分析（FMEA）

失效模式与效应分析（FMEA）是另一种广泛应用于化工装置安全评估的技术。FMEA 通过识别每个组件或系统的失效模式，分析这些失效对装置安全运行的影响及其后果。每一种潜在的失效模式都会被详细记录，并根据其可能导致的后果进行优先级排序，从而确定最关键的安全隐患。FMEA 的核心在于通过评估不同失效模式的发生频率、严重程度和可检测性，计算出每个失效模式的风险优先级数（RPN），从而为制定合理的安全措施提供依据。该技术能

够帮助工程师在设计和维护阶段预见并消除潜在风险，提前采取行动进行改进，大幅度降低化工装置在运行过程中发生重大事故的风险。

4.3 定量评估技术与工具的应用

定量评估技术是化工装置安全完整性等级评估中的关键环节之一，旨在通过数值化的方式对系统的安全性进行量化分析。这些技术通常基于概率论、统计学以及可靠性工程等理论，对安全系统的各个组件进行精确的风险评估和可靠性分析。常见的定量评估方法包括故障树分析（FTA）、事件树分析（ETA）等。这些方法能够通过计算组件故障的概率、系统故障的连锁反应以及整个安全系统的可靠性，得出系统的整体安全完整性指标。为了提高评估的准确性，定量评估工具通常会结合现代计算机技术进行仿真分析，以应对复杂系统中多重变量和动态变化的挑战。通过应用定量评估工具，化工装置的安全性得到了全面的量化分析，为安全系统的设计、运行与维护提供了科学依据。

5 化工装置安全完整性评估的实际应用

5.1 某化工装置 SIL 评估分析

某化工装置的 SIL 评估分析通过全面的危险分析和安全功能评估，确定了装置在不同运行状态下的安全完整性要求。评估过程中，首先对装置的各个关键安全功能进行了详细分析，识别出可能引发重大事故的危险源。然后，通过故障树分析（FTA）和失效模式与效应分析（FMEA），评估了各安全子系统的可靠性和潜在故障风险，最终得出了装置应达到的安全完整性等级（SIL）。评估结果显示，部分关键控制系统未能满足所要求的 SIL 等级，针对这一问题，提出了改进建议，包括增加冗余设计和提升故障检测能力。通过该评估，装置的安全性得到了有效提升，为后续的操作和维护提供了明确的指导。

5.2 评估技术在不同类型化工装置中的应用

评估技术在不同类型化工装置中的应用表现出明显的差异性。在石油化工领域，由于其生产过程中涉及的高温、高压以及有毒化学品等特殊因素，对安全系统的要求极高，因此需要采用更为严格的 SIL 评估标准和技术。而在其他如制药、食品加工等行业，虽然同样需要保障安全，但由于生产环境相对较为温和，其评估技术可以相对简化。不同装置的 SIL 评估标准和技术应用，需结合其工艺特点、风险源特

性以及安全需求进行量体裁衣。无论是传统的化工装置还是现代化的自动化装置，评估技术都能够为各类装置提供针对性的安全评估方案，确保设备和人员的安全。

5.3 评估技术应用中的问题与解决方案

尽管化工装置安全完整性等级评估技术得到了广泛应用，但在实际应用中仍然存在一些问题。首先，部分装置的数据采集不完整，导致评估结果的准确性受到影响。其次，评估方法和工具的选择有时未能完全考虑装置的复杂性和运行环境，致使评估结果无法充分反映实际风险。为了解决这些问题，可以通过完善数据采集体系，确保数据的全面性和准确性，进一步提高评估模型的可信度。此外，评估人员还应根据装置的特殊性和发展趋势，不断更新评估方法与工具，增强评估技术的适应性和前瞻性。通过这些改进措施，可以有效提升 SIL 评估技术的应用效果，为化工装置的安全运行提供更为坚实的保障。

6 结语

化工装置安全完整性等级（SIL）评估技术在确保化工生产安全中发挥着至关重要的作用。通过全面的风险识别、系统的功能分析和严格的评估流程，SIL 技术能够有效地识别潜在的安全隐患，帮助企业在设计、运行和维护过程中优化安全防护措施。随着化工装置技术的不断发展和安全管理要求的提升，SIL 评估技术也在不断进化，越来越多的定量分析工具和智能化方法被引入评估体系中，提升了评估的准确性和可靠性。然而，在实际应用过程中，仍然存在数据不足、方法适用性不足等问题，需要进一步完善和优化。未来，随着技术的进步和行业标准的更新，SIL 评估技术将在化工行业中得到更加广泛和深入的应用，为保障生产安全、保护员工生命安全和环境安全提供坚实保障。

参考文献

- [1] 马龙,杜亚君.化工储罐区氮封装置失效模式识别及安全联锁控制参数优化[J].流程工业,2025,(09):16-19.
- [2] 杨培瑞,王青峰,郭遵广,李磊,孙彦平.化工装置大型高塔设备模块化安装的研究[J].化工管理,2025,(26):153-158.
- [3] 范华兵.化工生产装置控制系统整合改造研究[J].现代工程科技,2025,4(15):137-140.
- [4] 田佳.化工工艺设计与安全评价对化工安全生产的影响分析[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(14):25-27.

Coordinated Research on Surrounding Rock Control and Safe-Efficient Production in Coal Mine Mining

Xuehua Liu

Pingliang Xin'an Coal Industry Co., Ltd., Pingliang, Gansu, 744201, China

Abstract

The stability control of surrounding rock during coal mining directly affects both workface safety and production efficiency. With increasing mining depth, elevated geostress levels, and intensified mining activities, the challenges of surrounding rock control have significantly intensified. Traditional empirical support methods struggle to adapt to deep, high-stress conditions. This study utilizes field monitoring, theoretical analysis, and numerical simulations to reveal the mechanical mechanisms of surrounding rock instability and their synergistic relationship with mining-induced disturbances. A systematic control model integrating “zoned management, dynamic support, and information-based management” is proposed. Research demonstrates that surrounding rock deformation exhibits spatiotemporal variations and dynamic nonlinear characteristics. Scientific zoning combined with real-time monitoring and feedback can effectively reduce roadway deformation rates and roof delamination risks. Engineering validation shows that this coordinated system significantly reduces support costs, improves mining efficiency, and enhances safety factors, providing theoretical support and practical evidence for safe and efficient deep coal mining.

Keywords

coal mine recovery; rock control; dynamic support; safe production

煤矿回采过程中围岩控制与安全高效生产协同研究

刘学化

平凉新安煤业有限责任公司, 中国·甘肃平凉 744201

摘要

煤矿回采过程中围岩稳定控制直接关系到工作面安全与生产效率。随着开采深度增加、地应力水平提高及采动强度加大, 围岩控制难度显著提升, 传统经验支护方式难以适应深部高应力条件。本文基于现场监测、理论分析与数值模拟, 揭示围岩失稳的力学机理及其与采动扰动的协同关系, 提出“分区控制—动态支护—信息化管理”系统化控制模式。研究表明, 围岩变形具有时空分异与动力非线性特征, 科学分区与实时监测反馈可有效降低巷道变形速率与顶板离层风险。工程验证显示, 该协同体系在降低支护成本、提升回采率和安全系数方面效果显著, 为深部煤矿安全高效开采提供理论支持与实践依据。

关键词

煤矿回采; 围岩控制; 动态支护; 安全生产

1 引言

如何在动态应力环境中实现围岩稳定与安全生产的协同优化, 成为当前煤矿工程领域的研究热点。近年来, 国内外学者在采动应力分布规律、围岩变形机制及支护系统响应特征方面取得诸多成果, 提出了多种分区支护与监测反馈方法。然而, 这些研究多集中于局部力学分析或静态支护参数优化, 缺乏对围岩控制与安全生产全过程耦合关系的系统探讨。本文从围岩—支护—采动三者协同作用的视角出发, 构建动态控制体系, 分析回采过程中的多场耦合特征及协同机

制, 提出以信息化为支撑的高效安全协同策略, 以期为煤矿回采工程提供系统化技术支撑与实践路径。

2 煤矿回采围岩力学特征与变形规律

2.1 采动应力场特征与分布规律

煤矿回采过程中, 采动扰动打破原岩的力学平衡, 使得应力重新分布并形成明显的应力集中与卸压区。工作面前方 20~60 m 范围通常形成采动应力集中带, 后方形成卸压松动区, 而其间的过渡带应力梯度大, 围岩结构最为复杂。随着工作面推进, 应力集中峰值呈前移趋势, 并逐渐向深部传递, 形成“应力前缘效应”。理论计算与 FLAC3D 数值模拟结果表明, 应力集中系数一般为 2.0~3.5, 局部在硬岩夹层区域可达 5.0 以上。受采动应力作用, 围岩破碎带、裂隙带及松动带相继发育, 形成典型的“多带结构”^[1]。

【作者简介】刘学化 (1969-), 男, 中国江苏徐州人, 本科, 高级工程师, 从事煤矿安全生产管理研究。

拱顶和两帮是应力集中最明显的部位,底板则易受剪应力与渗流叠加影响而发生鼓起或剪切错动。精确掌握应力分布规律,可为支护参数设计及支护时机优化提供关键依据。

2.2 围岩变形特征与失稳机理

受采动应力扰动与地质条件共同作用,围岩表现出明显的阶段性与非线性变形特征。初采阶段为弹性压缩期,应力迅速释放;进入稳定阶段后,塑性区范围扩大,变形速率趋缓;在持续采动与蠕变作用下,巷道最终进入加速失稳阶段。现场监测表明,采动期间拱顶下沉速率约为 $10 \sim 15 \text{ mm/d}$,帮壁收敛速率 $15 \sim 20 \text{ mm/d}$ 。围岩破坏机理主要包括三类:一是高应力诱发的剪切破坏,使拱肩区域产生塑性滑移;二是层理弱化导致的分层剥落与滑移破坏;三是地下水作用下岩体水化软化引起的强度衰减与体积膨胀。

2.3 地质构造与应力耦合影响

地质构造对围岩稳定性具有决定性影响。断层、褶皱、节理密集区是应力重分布与集中峰值形成的主要地段,其应力方向变化复杂,常导致顶板离层及局部破坏。构造应力与采动应力叠加后,会在构造两侧或交汇处形成“叠加峰值区”,使围岩受力体系失衡,极易引发局部坍塌等。断层滑移面及节理裂隙不仅提供了潜在的变形通道,也削弱了围岩整体刚度与粘聚力。现场监测数据表明,距断层 30m 范围内拱顶下沉量较非构造区增大约 40%,裂隙张开度提升近 50%。因此,地质构造信息应纳入回采设计的前期勘查与模型预测环节,通过地质力学分区、应力场反演及构造避让,实现“构造识别—风险分区—区域化控制”的全过程管理,从源头上降低构造应力叠加带来的失稳风险。

3 回采围岩失稳模式与动力灾害耦合机理

3.1 顶板垮落与分层离层机制

回采扰动使原岩应力体系破坏,顶板承载结构由连续受力转为多层分布受力体系。随着采空区的形成,上覆岩层在自重与卸压双重作用下弯曲下垂,形成裂隙带、离层带及垮落带三级结构。当离层厚度超过极限拉伸位移时,岩层块体沿层面失稳垮落。微震与钻孔监测结果表明,离层厚度多在 $0.8 \sim 1.2\text{m}$ 之间,与采高及推进速度呈正相关^[2]。推进速度大于 6m/d 时,顶板下沉速率成倍增长,支架载荷突增 $30\% \sim 40\%$,易导致液压支架失稳或顶板冒落。防控关键在于采动早期局部实施高强锚索和注浆分层加固,通过及时支护限制离层向深部发展,并在采空区边界布置能量释放孔,实现卸压与稳控并举。

3.2 煤岩动力灾害的应力诱发特征

在深部高应力与高采动强度条件下,煤岩体内积聚的弹性能量不断增长,当卸载速率超过能量释放速率时,发生能量突释现象,形成冲击地压或冒顶等动力灾害。煤岩体能量演化可分为积聚、临界、突释三阶段。监测结果显示,当应力集中系数超过 3.0、弹性能密度大于 15 kJ/m^3 时,冲击

事件概率显著上升。岩体结构越完整、煤层越厚,越易形成高能储存区;而支护延迟、采高过大、推进不均均会强化能量积聚。防控策略需通过区域卸压、预裂爆破及充填采矿等方式分散应力集中,同时利用微震监测与能量分布反演动态调整推进节奏,实现应力的分阶段释放与能量耗散。

3.3 底板变形与渗流影响

底板在采动作用下承受剪切应力、拉张应力的综合影响,其主要破坏形式包括鼓起、滑移及剪切错动。采动后应力重新分布使底板应力集中于煤壁脚部,当软弱夹层存在时,剪切变形沿层面扩展,形成隆起破坏。工程控制需采取综合措施:采用高强灌浆加固软弱夹层,提高抗剪强度;在应力集中区增设底鼓锚索,形成“约束—卸压—防渗”联合体系,从而有效防止渗流诱发的次生失稳。

4 围岩控制的动态支护与分区策略

4.1 分区支护理念与可调参数体系

针对深部回采工作面围岩在高静载与采动扰动叠加条件下呈现的非均匀应力重分布与变形阶段突变特征,本研究重新构建“扰动前缘区—能量缓释区—稳定承载区”三分区动态支护体系,实现围岩控制由静态设计向响应式调节转变。在扰动前缘区内,巷道围岩裂隙扩展速率与能量积聚速率显著增大,采用可让压型高强锚杆与高预应力锚索组成的复合支护结构,通过在锚杆体中引入屈服段(屈服荷载 $120 \sim 180\text{kN}$)和传力段($\geq 300\text{kN}$),使围岩在采前应力扰动阶段能够进行受控让压与有限塑性变形,避免因过早锁固导致的后期脆性应力集中破坏;锚索预紧力提升至 $220 \sim 260\text{kN}$,确保承压拱提前形成并具备力链连续性。能量缓释区则强调支护体系的延性吸能能力,通过屈服型托盘、可滑移钢带与能量吸收装置构建“可让压—耗能—再约束”调控机制,使围岩在 $50 \sim 90 \text{ mm}$ 的弹塑性收敛范围内完成能量释放和应力转移,形成受控变形稳定区。为实现参数可变与支护响应优化,引入围岩响应指数 RCI(由变形速率 ε 、微震能级 E_s 、裂隙扩展系数 C_f 加权构成)作为支护参数动态修正依据,支护体系可根据 RCI 变化进行预应力调节、屈服段启用与喷层补强,实现“可调整、可反馈、可预判”的智能化分区支护调控模式,从而更好适应深部采动下围岩应力—变形的时空差异性。

4.2 可让压与高强支护的协同应用

传统高强度刚性锁固型支护在深部高地应力条件下常因约束过强而诱发围岩脆性破断、顶部岩层断裂贯通或两帮加速收敛等失稳模式。为解决“早期变形不可控”与“后期刚性过约束”之间的矛盾,本研究构建“可让压—高强承载—整体壳化”三阶段协同支护体系。工程应用中,在围岩变形敏感阶段保持支护体系具备一定延性,使能量释放过程平稳而非突发;在可控收敛稳定后再施加高强度二次张拉,并辅以高强喷层增强封闭效应,从而建立完整的稳定承载拱

结构。现场试验结果显示,在拱顶和两帮布置可让压锚杆与高承载锚索,并配合吸能装置及同步收敛监测控制后,围岩塑性区扩展速度明显降低,顶板下沉减少约51%,侧帮收敛降低约43%,支护构件破损率减少超过75%。巷道变形曲线由扰动初期的“突峰型加速收敛”转变为“缓增—平台型渐稳”,表明围岩与支护体系之间应力与位移关系实现了动态匹配,避免了强约束条件下的破断失稳,显著提升了支护体系的耐久性与动力灾害抑制能力,体现出“柔性耗能—刚性锁固—整体承载”的协同优势。

4.3 支护优化与监测验证

为验证分区支护参数的合理性与其在不同地质条件下的适应性,本研究采用多场耦合数值模型与现场多参量监测反演相结合的验证体系。数值模拟采用基于GeoFEM的弹塑性-能量耦合模型,并引入结构面相对位移与裂隙扩展动态演化参数,以真实反映高地应力围岩裂隙萌生、扩展及失稳转化过程。模型在关键应力集中区域进行网格局部加密,分辨率控制至0.20~0.25 m,准确捕捉围岩塑性演化边界。通过参数灵敏度分析与强度折减法得到优化支护参数组合:锚索间距0.8~1.0 m、可让压锚杆屈服段长度0.6~0.8 m时,围岩塑性区体积减少约55%,巷道整体安全系数提升至2.1。现场监测采用光纤FBG锚索轴力监测、分布式声发射裂隙扩展监测与微震能量定位联合系统,监测结果与模型反演误差控制在±8%以内,验证参数配置的稳定性与支护体系的应力—变形协调特征。巷道运行三个月后,变形速率长期稳定低于2.0 mm/d,支护构件始终处于弹性工作区,证明该支护体系在深部复杂地质条件下具有良好的推广价值。

5 安全高效协同控制与信息化管理体系

5.1 采动扰动的实时感知与预警

为实现对采动扰动的连续可视化感知,构建“多源异构—边缘融合—云端建模”的监测体系:在工作面前方、拱肩与底角布设应力计、收敛计、孔压计、微震与声发射阵列,并以分布式光纤(DAS/FBG)构建米级分辨率的连续监测带;边缘网关完成去噪、时钟同步与特征压缩,上传至平台后由小波包分解、扩展卡尔曼滤波与变点检测识别异常;结合LSTM与GBDT建立“离层—变形—载荷”耦合判识模型,并以ROC曲线与F1值优化阈值与提前量。系统将预警分级与处置清单绑定,实现对离层扩展、支护超载与动力事件的48 h级前瞻预警与闭环追踪,贯通“采动—响应—控制”全流程。

5.2 信息反馈驱动的动态支护调整

建立“监测—判识—决策—执行—评估”的五环闭环,将关键监测量与支护参数建立可追溯映射:当拱顶下沉速率、侧帮收敛增量、锚索轴力或微震能量密度超阈值时,触发规则库与模型预测控制(MPC)协同决策,按“先稳控、后加固、再优化”的序列自动下发锚索再张拉、局部二次喷层、选择性注浆、定向卸压孔与让压构件启用等动作,并可联动调整支架初撑力与推进节奏。处置后以贝叶斯更新修正参数先验,评估指标覆盖变形速率回落幅度、载荷峰值抑制、稳定时滞与材料单耗。实证表明,该反馈机制有效抑制突变性变形,维持围岩—支护的受控协同区间。

5.3 安全高效生产协同机制构建

以“控制—协调—优化”为主线,构建围岩稳定与生产组织一体化框架:采前以地质—力学分区匹配支护型式与推进策略;采中在数字孪生体内实时耦合应力演化、设备工况与人员节拍,按预警等级实施差异化推进与班组作业窗口管理,兼顾安全冗余与产能目标;采后以事故率、停工时长、材料单耗与单进尺产量为双域指标闭环改进。调度系统与监测平台互联互通,形成“计划—执行—验证—重构”的滚动迭代。典型矿区试验显示,协同机制实施后支护工效提升约25%,单进尺生产率提高约18%,事故率下降约40%,在安全约束下实现稳定高效回采与成本优化。

6 结语

煤矿回采过程中围岩控制与安全生产具有高度耦合性,必须实现从静态设计向动态协同的理念转变。研究表明,围岩失稳源于采动应力、构造作用及支护响应的综合影响,其控制需依托分区支护、可让压技术及信息化反馈系统。通过建立“分区—动态—智能”一体化控制体系,可实现围岩与支护的协调变形,降低灾害风险,提高生产效率。未来应在深部强扰动环境下进一步完善多场耦合模型,推动智能感知与自动化调控技术融合,为煤矿开采的高效、安全与可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 赵泽博.高阳煤矿3203工作面回采巷道超前支护段围岩控制策略[J].煤,2024,33(12):78-80+88.
- [2] 任超.麦捷煤矿回采巷道围岩控制技术研究与应用[J].煤矿现代化,2023,32(04):42-46+51.
- [3] 李玉朋.试析煤矿回采巷道围岩控制理论[J].能源与节能,2021,(02):25-26.

Synergistic Mechanism and Efficiency Enhancement in Construction Project Management under EPC General Contracting Model

Nengsheng Huang

Zhejiang Dacheng Project Management Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

Abstract

As the core model of integrated management in the construction engineering field, the EPC general contracting model's full utilization of core competitiveness relies on effective collaboration among multiple stakeholders and throughout the entire process. Professionals should ground their work in collaborative theory and engineering management principles, focusing on four key dimensions—organization, information, processes, and interests—to establish a collaborative mechanism for construction project management under the EPC model, clarifying the connotations and operational logic of different mechanisms. Simultaneously, through five dimensions—organizational structure optimization, technological empowerment, process standardization, incentive constraint improvement, and personnel competency enhancement—this study explores targeted approaches to enhance project performance. The ultimate goal is to address collaboration barriers in EPC projects, reduce internal management inefficiencies, and improve both the quality and efficiency of construction engineering.

Keywords

EPC general contracting model; construction project management; collaborative mechanism

EPC 总承包模式下建筑工程管理的协同机制与效率提升

黃能升

浙江大成工程项目管理有限公司，中国·浙江温州 325000

摘要

EPC总承包模式作为建筑工程领域一体化管理的核心模式，其核心竞争力的充分发挥有赖于多方主体和全过程的有效协作。工作人员需要立足协同理论与工程管理理论，聚焦组织、信息、流程、利益四大核心维度，进而构建EPC模式下建筑工程管理协同机制，明晰不同机理的内涵和运作逻辑。同时，从组织架构优化、技术赋能、流程规范、激励约束完善、人员素养提升五个层面，研究有针对性地提升工程绩效的途径，目的是为解决EPC工程协同壁垒，降低管理内耗，提高工程建设的品质和效益。

关键词

EPC总承包模式；建筑工程管理；协同机制

1 引言

在建筑工程规模不断扩大和技术复杂程度不断提高的背景下，传统的分散式管理模式已经很难满足高品质工程的要求，EPC 工程因其在设计、采购和施工等方面的综合管控能力而逐渐被业界所接受。但是，这种方式的参与主体众多，存在不同的利益诉求，且复杂的流程，很可能会造成组织分割、信息不流通、流程脱节等问题，从而限制了相关企业的高效运行。协同机制是解决多方矛盾和资源整合的重要途径，其运行机理的科学与否，将直接影响 EPC 模式的执

行结果。完备的协作机理在工程管理中的深入运用，可弥补已有研究“机理建构、效能增强”之间的联系。在现实中，有效的工程管理协作可以突破工程参与主体之间的壁垒，进而优化资源配置，降低管理风险，促进工程管理走向协同高效^[1]。

2 EPC 模式下建筑工程管理协同机制构建

2.1 组织协同机制：建立一体化管控架构沟通体系

EPC 工程项目的整体特征决定了其“统一管控、高效沟通”的组织协调机理，突破了以往分散式、多主体参与的结构。在建设集成管控框架时，必须以项目经理为中心，建立多个主体的共同治理小组，对设计、采购、施工、监理等方面资源进行整合，建立“顶层统筹、层级分明、权责分明”

【作者简介】黃能升（1975-），男，中国江西上饶人，本科，高级工程师，从事建筑专业工程施工及管理研究。

的组织结构。在该框架下,需要明确各方的核心责任和合作界限,防止权力和权利的重叠和真空,保证政策指示的有效传达和实施。与此同时,需要构建一个规范的沟通系统作为组织协作的重要支持,可以通过构建包含高层决策沟通、中层协调沟通和基层执行沟通等多个层次的沟通通道,达到信息传达的及时性和精确性。另外,还将通过定期召开协调会议和设立特殊问题协调工作组等方式,加强跨部门和跨单位的协同和联系,消除因组织屏障而造成的交流屏障,为实现全程协同管理打下坚实的组织基础。

2.2 信息协同机制: 搭建全周期的数字化共享平台

工程管理中,信息协同是消除项目数据孤岛,实现高效管理的重要保证,其关键是建立涵盖项目整个寿命周期的数据共享平台。这个平台需要对整个过程中的信息进行集成,如设计阶段的图纸信息、采购阶段的材料信息、施工阶段的质量信息、竣工阶段的验收数据,建立一个规范的数据规范和储存系统,保证各个参与者获得的信息的连贯性和及时性。该系统具有实时数据更新,在线协同编辑,分级权限管理等多种能力,支持设计人员、采购人员、施工人员等各方面的需求,能够及时地分享设计变更、材料供应、施工进度等重要信息。同时,结合大数据、云计算等技术,对项目进度控制、风险预警和决策提供基础数据支持,降低由于信息不对称和传递滞后而造成的工期延误和资源浪费。建立了一个数据共享平台,使数据由分散存储转向集中共享使用模式,且数据能由被动传递到主动推送,这样能为各个部门之间的协作提供了有力的支持^[2]。

2.3 流程协同机制: 优化设计采购施工一体化流程

其关键在于突破设计、采购、施工环节的割裂状态,建立一体化的流程系统。在设计环节,要加强设计、采购和施工的前置协调,在设计中要兼顾采购的可行性和施工的方便性,并在早期进行交流和对接,将设计的变化降到最低。采购和设计要同时进行,按照设计图进行材料询价和招标,对采购时间进行适当的规划,保证物资的供给和建设的准确配合。在建设阶段,要严格遵循设计和采购的要求,在建设进度和设计和采购之间形成联动反馈的体系,在建设中遇到的问题要反馈给设计和采购部门,共同调节。同时要制定规范化的过程连接节点和控制标准,对各个阶段的交接内容、责任主体和时限进行了详细地说明,以规范的过程来降低连接的缺陷。而且要加强对全过程的全程动态控制,聚焦关键衔接节点,及时解决过程阻塞问题,使各个部分之间能够达到无缝对接和高效率的协调^[3]。

2.4 利益协同机制: 风险共担与利益共享分配体系

利益协同是解决 EPC 工程中多方利益冲突和凝聚合力的关键环节,要建立“风险共担,利益共享”的配置机制。根据工程各方的投资比例、承担的责任和风险程度,构建一套科学、合理的收益分配体系,保证收益分配与贡献度和风险分担相适应,使各方的合作热情得到最大程度地发挥。在

收益分配方面,可以将“超额收入分享”的概念纳入到工程中,为工程主体提供更多的回报,以激发工程主体的积极性。在此基础上,构建全面的风险分担机制,揭示设计错误、采购延迟、施工质量问题等多种风险情景下,各方的责任分担和分担,以防止风险向单个主体聚集。同时要通过签署合作协议,对利益共享和风险分担进行详细的界定,从而建立起利益共同体,降低由于利益要求不同而产生的内部损耗,进而实现总体利益最大化,从而为合作机制的高效运作提供利益保证。

3 基于协同机制的工程管理效率提升路径

3.1 优化组织架构: 明确层级权责强化跨部门协作

优化组织架构是基于组织协同机制提升管理效率的核心路径,要通过权力划分和跨界合作来突破组织屏障。为此要构建一个扁平化的组织控制框架,缩减管理层次,缩小政策制定和实施之间的差距,提升命令传达和反馈的有效性,消除因分层而造成的信息扭曲和决策延迟。而且要明确各个层级和部门的核心权力和责任,并在此基础上,对决策权限、执行责任和监管责任进行界定,从而减少权力和责任的重叠和不明确,保证各方面工作的顺利开展。同时要加强跨部门合作,突破行业界限,建立由设计、采购、施工等多个相关单位参与的跨功能合作团队,解决工程施工过程中存在的主要问题,达到迅速集成和有效分配的目的。要制定跨部门合作的沟通和协作制度,明确各单位之间的工作流程、职责划分和时限,防止各单位之间互相推卸责任。为此还要通过宣传引导和培训教育等手段,培养企业的协作精神,形成“分工协作、互助共赢”的工作环境,让企业间的协作成为企业的正常运作,并在企业层次上支持提高企业的绩效^[4]。

3.2 强化技术赋能: BIM 等先进技术在协同中的应用

通过对 BIM、大数据等先进技术的深入运用,对企业协作过程进行优化,是提高企业绩效的重要途径。BIM 是建设工程管理的关键,其可以建立一个完整的工程的三维数字化模型,并在设计、采购和施工过程中形成可视化的协作关系。在设计过程中,运用 BIM 进行事故探测,及时地识别出存在的问题和冲突,从而降低了工程变更的风险。在采购过程中,利用 BIM 技术建立物料列表,实现对需要的精确匹配,提升了采购的有效性和精确性。在施工期间,利用 BIM 技术对施工进行仿真、进度控制和质量监控,达到对施工全流程进行动态优化。然后利用大数据采集、分析和挖掘工程施工过程中的各种数据,精确辨识工程合作过程中信息传递瓶颈、过程连接漏洞等方面不足,为工程合作战略的最优选择提供数据支持。通过对施工现场的设备、材料和人员进行实时监测和收集,保证了实时、全面的信息分享。将高科技和协作机理的深入结合,使企业的管理向数字化和智能化转变,大大提高了企业的管理效能和决策的科学性。

3.3 规范协同流程: 建立标准化衔接流程节点管控

规范协同流程是基于流程协同机制提升效率的核心举

措,核心在于通过规范化的构建和节点的控制,使各个部分之间达到无缝衔接。这就需要建立标准化的全过程协作工作程序,明确设计、采购、施工等各个阶段的工作内容、操作规范、交接标准和时限,以保证工作的有序进行。在工程实施过程中,要围绕设计、采购、施工三个重要阶段,建立专门的衔接程序,确定各衔接节点的责任主体、交接内容和验收准则,防止由于不规范而造成的衔接延迟。而且要构建工程施工过程中的重要节点控制机制,包括设计方案评审、材料进场验收、施工进度确定等,并对各节点进行实时监测,确定各节点的完工时间和质量指标。随后通过构建节点管控台账,对各节点的进度进行实时追踪,并对超过时限的节点进行警告和监督,以保证工程的顺利进行。与此同时,构建过程优化的动态调节机制,对其运作结果进行周期性的评价,并根据工程的具体状况和产业发展的方向,对过程系统进行适时地进行优化和改进,以减少过程中的多余和阻塞,使协作过程不断地得到最优,从而在过程层次上提高管理效能^[5]。

3.4 完善激励约束: 实现协同效果与绩效评价挂钩

完善激励约束机制是基于利益协同机制提升效率的重要保障,其关键是要通过业绩评估和奖励制度,促使企业主体积极地投入到企业的治理中来。为此要构建以协同效应为中心的企业业绩评估系统,将企业的协同沟通效率、信息共享及时性、过程衔接顺畅、风险分担积极性等作为衡量标准,对企业的协同绩效进行定量评估。而且要确定考评指标和考评时间,采取经常性和非经常性的检查,以保证考评的客观和公正。然后要将业绩考核成果和奖励制度相结合,对协作业绩突出的企业给予物质奖励、荣誉表彰或后续协作等多种鼓励措施。对于协作不力,影响工程总体进度和质量的各方,要采取通报批评和经济处罚等手段。同时,构建将协同业绩和各方长远利益联系起来的长效激励机制,使各个主体的合作热情和积极性得到最大程度地发挥,从而促进协作的高效实施,进而有效提高企业的总体管理效能^[6]。

3.5 提升人员素养: 重视培育协同思维与专业能力

员工素养的提高是协作机制高效运作和提高效能的人力保证,其关键是培养员工的协作思想和职业技能。首先,要加强合作思想的培养,通过专题培训和案例分享等形式,对工程经理和技术人员进行培训,使员工形成“全局观”和“协作观”,克服个人利益优先的思想,充分意识到团队合

作对于工程总体收益的重要性。在平时的工作中,通过团队建设活动,跨部门轮岗,加强不同岗位和不同部门员工的交流和理解,培育合作精神。其次,提高员工的职业素养和协调技巧,结合工程总承包工程的特征,通过对设计、采购、施工等多个方面的专门知识进行训练,扩大员工的知识面,为员工提供多学科的交流和合作打下良好的职业素养。而且要强化员工的协作能力训练,如沟通技巧、解决冲突、使用数码工具等,以提升员工的实践能力。还要构建一个长期的人才开发机制,让企业的员工能够积极地进行协作管理方面的知识和技术,并通过考核评估和职称晋升等手段对其进行激励,从而形成一支具有协作思想和专业能力的复合型人才队伍^[7]。

4 结语

综上所述,EPC总承包的协作机理是实现多方资源整合和管理冲突的关键支持,其构建与完善对工程管理效率提升具有决定性作用。相关工作人员需要思考构建效能提升途径,从而建立完善的机理建构联合路径实现的理论分析体系。而且,本工程研究成果可突破EPC工程管理中各参与方之间的壁垒、信息孤岛和过程阻塞,促进工程管理向一体化和高效方向发展,既可在工程管理中完善协作理论,又可为实际管理中的管理优化提供指导。在今后的建设过程中,建筑行业的数字化和智能化程度不断提高,协作机理也会越来越智能化和效率化。

参考文献

- [1] 杨春亮.EPC总承包模式下建筑工程管理的优化方法分析[J].居业,2024,(05):165-167.
- [2] 江丽.EPC总承包模式下建筑工程管理的优化对策[J].中国招标,2023,(09):173-175.
- [3] 肖斌.EPC总承包模式下建筑工程管理的优化对策分析[J].中国建筑装饰装修,2022,(20):122-124.
- [4] 梁汉成.EPC总承包模式下建筑工程管理优化探讨[J].城市住宅,2021,28(12):253-254.
- [5] 邵博.基于绿色施工理念的建筑工程管理创新研究——以斜柱设计为例[J].住宅与房地产,2024(29):35-37.
- [6] 黄永强.EPC总承包模式下建筑工程管理的优化对策探究[J].中国科技期刊数据库 工业 A, 2024(003):000.
- [7] 岳立祥.装配式建筑智能化技术在建筑工程管理中的应用关键思路分析[J]. 2025(5):182-184.

Development and application of panoramic state perception and collaborative optimization system in intelligent distribution station area

Cong Zhao Chaoqun Lin Jun Wu

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

Abstract

with the rapid access of distributed energy, high proportion of electric vehicles and multiple energy loads, the traditional distribution station area is facing significant pressure in operation monitoring, condition assessment, load forecasting and optimal scheduling. The operation status of the station area shows the characteristics of high dynamic, strong coupling and frequent disturbance, which makes the traditional management mode relying on manual inspection and off-line analysis difficult to identify potential risks and abnormal operation in time. Based on the development trend of the deep integration of digitization, electrification and intelligence, the construction of an intelligent distribution area system integrating “panoramic state perception - intelligent diagnosis and evaluation - Collaborative Optimization Control” has become an important technical direction to improve the reliability of distribution and support the construction of new power systems. The research results can provide systematic reference for the intelligent upgrading of the new distribution system.

Keywords

intelligent distribution station area; Panoramic state perception; Data fusion; Collaborative optimization

智能配电台区全景状态感知与协同优化系统开发及应用

赵聪 蔺超群 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

随着分布式能源、高比例电动汽车以及多元用能负荷的快速接入，传统配电台区在运行监测、状态评估、负荷预测与优化调度等方面面临显著压力。台区运行状态呈现出高度动态化、耦合性强、扰动频繁等特点，使得依赖人工巡检与离线分析的传统管理模式难以及时识别潜在风险与运行异常。基于数字化、电气化及智能化深度融合的发展趋势，构建集“全景状态感知—智能诊断评估—协同优化控制”于一体的智能配电台区系统，已成为提升配电可靠性、支撑新型电力系统建设的重要技术方向。研究成果可为新型配电系统的智能化升级提供系统化参考。

关键词

智能配电台区；全景状态感知；数据融合；协同优化

1 引言

配电台区作为电力系统中最靠近用户侧的关键节点，承担着低压配电网的电能分配、计量与状态监测等基础任务，其运行状态直接影响电能质量、供电可靠性乃至分布式能源并网稳定性。但在传统配电网结构下，台区管理长期依靠低密度监测、单点量测数据以及人工经验判读等方式，缺乏对运行数据的连续追踪和系统化分析。本文面向台区运行痛点，从体系架构、感知技术、数据治理、状态诊断与协

同优化机制五个维度展开研究，形成可工程化、可复制的智能配电台区技术体系，并在典型台区进行了实证验证，展示了系统在能效提升、线损治理与分布式资源利用方面的显著成效。

2 感知架构设计与多维数据采集逻辑

智能配电台区的全景感知体系旨在实现从传统“单点量测—周期采集—人工判断”向“多源融合—连续感知—在线判识”的系统性跃迁，其核心在于形成对电压、电流、功率流、温升、谐波、拓扑状态以及分布式资源运行行为的多维感知，从而建立数字化底层运行画像，如图 1。该体系在空间维度上以“台区变压器—馈线分支—用户节点”三层结构布设智能终端，在时间维度上由基础计量周期采样扩展至

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

秒级事件捕获，并依托 NB-IoT、5G 与低功耗自组网形成混合链路通信结构。在典型场景中，台区变压器作为能量转换中心部署高精度电参量采集模块与油温传感单元，用于捕捉绕组热点、负载率峰值与磁通密度变化；馈线层部署多点电压互感器与电流互感器，结合智能断路器或开关柜监测分支功率流动与瞬态冲击，从而实现拓扑状态的动态可视化；用户侧通过智能电表、逆变器通信接口或柔性负荷控制终端实现电能质量事件记录与异常用能行为识别，能够捕捉热泵启动、电动汽车快速充电以及光伏逆变器主动脱网等事件数据^[1]。

上述数据通过边缘节点完成预处理，包括量测噪声削弱、时间戳统一、数据压缩与异常剔除，并以“原始量—统

计量—特征量”的多层结构向中心侧传输，保证数据在传输过程中具有抗干扰能力且可扩展。为增强系统对复杂扰动场景的敏感性，感知体系必须引入事件驱动采样机制，其触发条件不以固定采样频率为约束，而以功率梯度变化、节点电压偏移率、谐波含量上升速率和温升梯度为判据，使系统在瞬时冲击、短时反潮、突发性负荷接入等工况下保持高响应性。在工程实践中，通过对大量典型数据进行时间窗口化与多尺度特征构造，可以重构台区在不同季节、气候与用能结构下的运行模式，从而为后续状态诊断与协同调控提供稳定的知识基础。

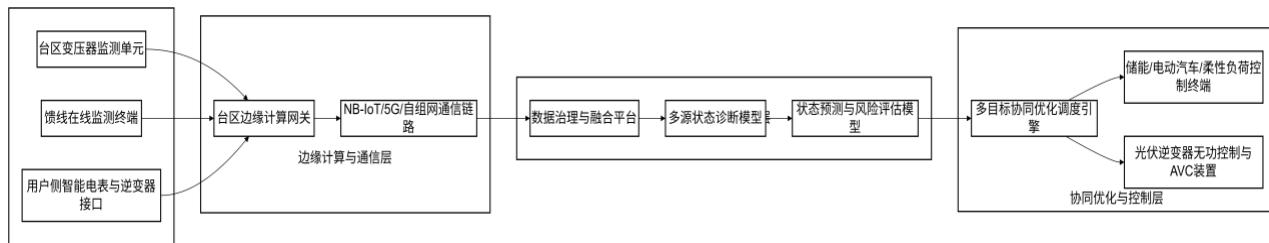


图 1 智能配电台区全景状态感知与协同优化系统逻辑结构示意图

3 智能配电台区状态诊断与预测模型

3.1 多源数据驱动的状态诊断方法体系

智能配电台区的状态诊断本质是对电压、电流、功率、谐波、温升与拓扑状态在时间与空间维度的变化规律进行解析，从而识别关键运行事件、隐性故障与潜在系统风险。状态诊断需突破传统单变量阈值判断模式，通过对多源数据的高维特征构建与动态关联分析揭示运行机理。其技术核心在于构建一套融合统计特征、时序特征与拓扑特征的诊断体系，在状态空间中形成可判别的异常模式。系统首先基于拓扑映射与电气一致性原则建立功率平衡模型，通过变压器计量数据、分支节点采样数据与用户端智能表数据间的功率闭合关系，实现对线损来源、计量偏差及潜在窃电行为的初判，再结合电能质量参数如总谐波失真率、电压偏差率与短时电流冲击幅值构造特征组，使数据具备反映异常事件强度与持续性的能力。在状态诊断算法层面，系统以二维时序卷积网络或长短期记忆网络构建电参量时序演化模型，用于捕捉日内峰谷迁移、季节性负荷变化与高频扰动对台区运行的综合影响；再结合基于图神经网络的拓扑约束模型，将台区馈线结构作为空间图，将节点电压与功率流值映射至图节点属性，通过图卷积传播捕捉不同节点间的潜在关联，使诊断结果不再依赖单节点特征而表现为拓扑一致性。

对于复杂异常，如用户端电器启动导致的瞬态冲击、光伏逆变器保护脱网、储能设备脉冲充电等事件，系统引入时间序列回归残差与电流不平衡因子构建异动序列，并通过 One-Class SVM 或变分自编码器进行异常模式检测，实现对无标注异常数据的自动识别。实验表明，与传统基于单点阈值的诊断方式相比，该体系在多样场景下对电压越限识别率

提升 27%–39%，对瞬态冲击事件误判率下降超过 40%，对三相不平衡的定位精确度提升至馈线分支级，仅依赖边缘节点即可完成预警，从而实现从经验判断到模型认知的系统跃迁。

3.2 面向运行风险的状态预测模型

状态预测旨在在未来不同时间尺度上推断台区运行趋势，为主动调控与协同优化提供先验依据。预测模型构建需要同时刻画短时随机扰动与长周期负荷演变，使预测结果能够对设备热态、电能质量与可再生能源出力形成稳定解释。为此，系统采用“机理约束的深度时序预测”结构，以多物理场模型为边界条件，以神经网络为拟合核心^[2]。

对于变压器热态预测，系统首先以 IEC 标准模型建立油温与绕组热点温升的热平衡方程，并引入热容量与散热因子构造瞬态温度响应，使模型具备对不同负载水平下的物理解释能力；随后利用 GRU 或 Transformer 架构对历史负荷序列进行建模，将电流幅值、负荷率、环境温度、风冷强度等变量嵌入时序特征空间，通过注意力机制区分季节性趋势与突发负荷，得到未来 30–120 分钟的温升预测区间。在电压预测中，系统以潮流计算结果作为先验，通过节点导纳矩阵和拓扑约束构建稳态模型，随后引入分布式光伏出力预测与储能策略，将电压序列转化为具有物理一致性的状态轨迹，再由时间卷积网络建模节点电压在不同出力组合下的动态分布。对于线损与负荷预测，系统以混合模型实现短期与中长期预测的协同，其中短期模型依托高频负荷波动特征捕捉集中充电与用能事件对线路损耗的影响，中长期模型通过用户画像、历史功率分布与季节性温度指数构建趋势项，使预测结果不受单日扰动影响。在系统部署过程中，预测结果

通过概率区间而非单值输出, 以对冲模型不确定性并向调度器提供鲁棒输入, 预测风险水平通过贝叶斯后验估计得到更新, 使模型长期运行不依赖人工调参^[3]。

4 台区协同优化与智能控制策略

4.1 多目标优化模型与运行调度逻辑

台区协同优化的核心任务在于综合处理电能传输效率、分布式发电并网稳定性、设备负载安全边界与用户侧行为灵活性之间的多维矛盾, 使配电网络在不确定性与耦合性高度增强的环境下仍保持稳定、高效与经济的运行状态。在优化目标构建上, 系统不再局限于单一指标, 而是形成以线损最小化、电压偏差约束、变压器寿命延长、分布式光伏消纳率提升与储能经济效用最大化为核心的多目标集合, 通过动态权重映射反映运行阶段与场景差异。在模型层面, 优化问题通过建立状态空间 S 、决策变量 x 与约束集合 Ω 构成分层求解框架, 其中状态空间由负荷曲线、节点电压、潮流分布、设备温升与分布式发电功率共同表征, 决策变量包含储能充放策略、逆变器无功调节、柔性负荷移峰幅度及台区调压设备动作逻辑,

约束集合则由热稳态极限、电压允许区间、节点功率平衡和用户舒适性需求组成。模型采用加权和与 Pareto 前沿联合表达方式, 其求解采用多目标遗传算法与模型预测控制耦合结构, 遗传算法用于对较长时间尺度进行策略寻优, 避免陷入局部极值, 而 MPC 在滚动窗口内依据短时预测结果进行策略修正, 使系统在光伏输出骤升、用户突发负荷或电动汽车集中充电等场景下具备即时修复能力。为提高调度指令可实施性, 系统引入调控成本与设备动作惩罚因子, 通过将挡位切换次数、储能循环次数与逆变器无功注入幅度映射为代价函数的一部分, 避免短时间高频控制导致设备疲劳与寿命降低, 并保障调度策略在工程层面具有可持续性。在调度执行路径上, 端—边—云协同结构形成自适应控制链路, 边缘节点通过本地特征分析完成快速动作判断, 云端系统通过策略回溯与趋势分析校正或冻结边缘指令, 避免在通信延迟或异常情况下形成分布式震荡, 从而实现台区层面的多尺度协同调控。

4.2 分布式资源协同控制策略与运行自适应机制

在源网荷储复杂耦合的台区场景中, 单一资源的独立调节无法有效缓解运行压力, 必须以分布式资源协同控制为核心, 使光伏、储能、电动汽车与柔性负荷形成动态互补。

在光伏侧, 逆变器不再仅承担直流—交流能量转换, 而被纳入节点电压调节环节, 通过设定功率因数下限与动态无功注入策略, 使其在高出力时段以吸收无功方式抵消电压抬升; 当负荷大幅增加导致节点电压下降时, 逆变器在限定范围内提供无功支撑, 从而形成与低压补偿设备协同的电压稳定机制。

储能系统则按照“削峰—吸光—应急”的运行序列工作, 在日间光伏尖峰时段通过吸纳分布式发电减少反向潮流, 在夜间负荷高峰通过放电降低变压器链路热应力, 并在节点电压突降或故障隔离时提供短时支撑。在电动汽车负荷调节中, 通过充电行为模型将用户充电需求映射为可变形负荷, 不采用强制直控, 而以价格信号、时间窗口与电网状态约束共同形成柔性引导, 使充电行为在台区尺度内展现群体协同性并避免集中冲击。柔性负荷调控则针对空调、热泵与热水器等热容量负荷, 通过滞后响应机制与温度容忍区控制实现不影响用户体验前提下的移峰与错峰。协同控制策略必须与系统状态诊断与预测模型形成闭环, 预测模型输出的温升风险、节点电压偏移趋势与线损增幅信息被转化为调控触发条件, 并在边缘节点执行之前通过集中校核将调度结果限制在设备安全区间, 避免“虚假调节”造成局部震荡。在实际运行中, 该体系形成自适应能力, 能够在新能源波动剧烈或用户行为突变情况下保持稳定, 通过短时控制策略与长期调度策略的耦合, 实现配电台区在能源结构高度分散的背景下持续处于电压合格、设备可承受与供能高效的运行区域。

5 结语

智能配电台区建设是新型电力系统的重要基础工程, 其核心在于通过全景感知、智能诊断与协同优化构建台区级智能自治能力。本文提出的系统围绕数据采集、多源融合、状态诊断与资源协同调控构建了完整技术链条, 并通过工程试点验证了系统在供电可靠性、能效提升与线损治理方面的显著成效。

参考文献

- [1] 金鹏, 李森, 张雨琳. 配电台区全景信息采集及智能组网技术[J]. 电子技术与软件工程, 2020, (2):234-235.
- [2] 阮祥勇, 荣建, 邵军. 面向新型电力系统的低压智能配电台区快速复电研究[J]. 电力设备管理, 2023, (8):11-13.
- [3] 王成亮, 李澄, 葛永高, 等. 基于多智能体的配电台区智能决策系统研究[J]. 信息技术, 2020, 44(10):49-55.

Research on Adaptability of Data Storage Center Decoration Design in 5G Era

Xudong Lu

Jietong Smart Technology Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

As 5G infrastructure development accelerates, data storage centers—critical hubs for network operations and computing tasks—now demand rigorous standards in spatial planning, power distribution systems, cooling solutions, construction materials, and physical containment. These evolving requirements increasingly challenge traditional interior design approaches. This paper first examines the fundamental characteristics of data storage centers and their 5G-era requirements, then proposes adaptive design strategies. The findings aim to provide actionable insights for future data center construction and retrofitting projects.

Keywords

5G era; data storage center; interior design; adaptability; measures; research

面向 5G 时代的数据存储中心装修设计适应性研究

鲁旭东

捷通智慧科技股份有限公司，中国 · 北京 100000

摘要

在5G基础设施建设加速推进背景下，数据存储中心作为承载网络核心信息和计算任务的关键场所，其对于空间布局、供配电系统、散热体系、装修材料以及物理隔离等方面都提出了更为严格的要求，这使得传统装修设计逐渐难以适应。有鉴于此，文章将结合研究及实践先就数据存储中心概述以及5G时代下对其需求展开分析，随后从装修设计的角度给出相关适应性措施，希望给将来数据存储中心的建设以及改造提供一定参考。

关键词

5G时代；数据存储中心；装修设计；适应性；措施；研究

1 引言

信息技术的发展为各行业数字化转型提供关键技术保障，随着5G、人工智能、工业互联网等新一代信息技术的试点应用落地，信息世界飞速扩张。而数据存储中心作为信息时代的核心基础设施，其装修设计如何适应5G时代下高效且大规模数据处理需求成为了一项值得深入研究的议题。

2 数据存储中心概述

所谓数据存储中心是指信息资源集中存放、处理以及管理的物理空间，主要作用在于保障海量数据能够安全存储、稳定运行并被高效调用。数据存储中心区别于一般建筑空间，除充分考量承载荷载、耐火等级以及结构安全等外，包括机柜排布、电力供应、环境控制以及安防系统等多维度综合要求也应满足。数据存储中心建设里装修设计占据重要

地位，它不但对5G时代下中心各项需求的满足起着决定性作用，而且机房运行环境的稳定性以及安全性也会受其直接影响。

3 5G 时代对数据存储中心的功能需求分析

3.1 高带宽与低时延特性对机房空间布局的影响

5G网络具备高带宽以及低时延的特性，数据存储中心的内部机柜和网络交换设备二者间互联密度有了显著提升，进而对空间布局提出了更为严苛的要求。传统机房设计里机柜的排布一般着重于整齐对称以及固定走线，但在5G场景当中要确保高速数据流的低延迟传输，布线系统得拥有更短的链路路径、走向合理性以及线缆承载能力更强^[1]。这一情况会直接对机房的走线架空层高度、通道宽度还有机柜排列方式产生影响。此外，更多的接入端口与设备冗余空间需要在机房内预留，以方便后期能够快速进行扩容与调整。另外，布局过程中由于高密度互联所引发的电磁干扰风险，要求对机柜间距以及线缆分区予以严格把控以此来防止信号串扰。由此可见，5G时代下数据存储中心机房布局并非单纯的线

【作者简介】鲁旭东（1984-），中国天津人，本科，工程师，从事装饰装修设计研究。

性或者矩阵化分布，更侧重于灵活性、模块化以及对高速互联的适配性。

3.2 大规模数据处理与高密度机柜对供配电与散热系统的挑战

数据存储中心在 5G 业务场景对计算与存储能力的不断提升下，为承担更大规模的数据处理任务开始逐渐采用高密度机柜，这不仅使得供配电系统的负荷强度大幅提升，同时也对散热系统带来了挑战。在传统的机房设计体系里，每个机柜所具备的电力容量以及散热能力较为固定。高密度机柜内部设备的功耗在 5G 业务场景下显著提升，这不但让电力分配面临高冗余以及高可靠性的要求，而且致使机柜内热量大量集聚易出现局部热点。因而 5G 时代下数据存储中心装修设计阶段就得提前把电力分配路径的均衡性与冗余性考虑好，机柜前后通风与整体气流组织都要被散热系统兼顾，同时建筑装修方面要预留充足的吊顶与地板空间。

3.3 边缘计算节点分布化对装修灵活性与扩展性的要求

在 5G 时代中边缘计算已然成为提升网络响应速度以及业务实时性的重要技术措施，其主要特点便是计算节点呈现出分布化的部署状态，这要求数据存储中心的装修设计中具备较高灵活性与扩展性。以集中化模式为主的传统数据存储中心，其机柜布局以及装修结构相对固定。而边缘计算模式当中有部分节点得依据区域化业务需求临时增设或者扩展，这就要求机房装修应具备模块化可快速组装以及可移动的特性^[2]。此外，空间分区装修设计还应给不同功能区提供灵活的隔断方式，对小规模机柜的快速布置予以支持，同时做供电与制冷接口的预留，让边缘节点随时接入的需求得以满足。此外，装修设计中包括吊顶高度、地板承载以及走线冗余等环节需拥有可扩展能力，以此防止因后期作出调整而带来大规模改造成本。

3.4 网络与信息安全环境对物理隔离和装修材料的特殊要求

5G 时代下，信息安全风险随着数据传输规模与业务复杂性提高而大幅增加，这就要求数据存储中心于物理隔离以及装修材料选择方面施行更为严格的标准。机房里不同等级业务区域要借助装修设计达成有效的物理隔离，比如墙体厚度、防火等级、门禁系统的集成等方面都要考虑。而装修材料须具备阻燃、防静电以及低释放性这些特性，以防止静电对设备运行产生干扰以及有害气体对精密部件造成损伤。对数据安全而言防止电磁泄漏十分关键，这就给数据存储中心墙面、地面以及吊顶材料的导电性与电磁屏蔽性提出了较高的要求。另外，对于通风口、管道、孔洞这类隐蔽之处，密封性和防护性也必须纳入设计的考虑范围，防止出现潜在的泄漏通道，同时人员通行与维护便利性在物理隔离时也必须兼顾保证，在不影响日常运维的情况下强化安全性。

4 面向 5G 时代的数据存储中心装修设计适应性策略

4.1 机房空间布局设计的优化策略

5G 时代下，数据存储中心机房空间布局优化应以高密度设备承载、布线规范化与维护便捷性为重点，其装修设计可由结构、材料、空间组织三个环节采取针对性措施。机柜布局适宜采用模块化组团式的排布方式，把机柜依据功能属性划分成若干独立的子单元，每个单元内部维持等距紧凑的排列状态。同时，单元彼此之间采取集中式主干走线槽以及纵向维护通道达成互连，这不仅缩短布线路径，且可避免交叉干扰进而提高整体的空间利用率。针对布线系统的装修设计需构建双层架构，将地板下敷设和吊顶上走线相结合，借助物理隔离实现数据线缆与电力线缆的分区布置，同时线槽高度要依据检修空间以及气流组织来精确调控，采用阻燃抗干扰护套材料以确保长期运行的安全性与稳定性。通道规划上须严格落实冷热通道分离这一设计原则，借助于冷热气流的物理隔断以降低能量损耗，同时通道宽度需要按照机柜功率密度以及设备进出需求予以差异化设计，而且要在端部安装可拆卸端板，从而确保后续扩展具备灵活性^[3]。此外，针对初始施工中墙体及隔断的装修设计处理，除要预留扩展通道口和可拆卸面板外，面板材质得选用轻质高强度复合材料，这样在扩容或者调整的时候能够快速拆装且不会对主体结构的完整性造成影响。设计上还须采用金属框架与抗震地坪结合的复合结构作为机柜承载基础与支撑系统，金属框架须具备高承载和优异的防震性能，该复合结构表面要覆以耐磨抗静电涂层，如此一来既能保证设备运行的稳定性，又能够承受因集中化部署所带来的高频荷载作用。

4.2 供配电与散热系统设计的强化路径

针对 5G 时代下高密度数据存储中心装修设计，为满足高功率机柜持续运行的环境要求，其供配电与散热系统的适配性构造应在整体布局以及细部施工环节都要同步强化。供配电环节，装修设计上需构建双回路和环路相融合的供电架构，而且要在机柜划分区域专门预留独立的电源通道，以此来保障回路的独立性以及负荷的均衡性。针对电缆敷设环节，设计上统一选用低烟无卤阻燃型护套材料，在抗压活动地板下方设置多层分隔式的电缆沟槽，以物理隔离动力电缆与弱电信号电缆，同时沟槽内部必须配置阻燃隔板以及防静电涂层，以此提升运行的安全性。在端接区域为实现灵活扩展，设计时可利用冗余母线槽以及可插拔式配电单元，增强抗干扰性能在接地系统里引入双层接地铜排结构。散热系统环节，装修设计要在地板下构建均压送风腔体，借助吊顶内的回风管道搭建垂直气流组织，机柜排列必须严格遵循冷热通道隔离原则，隔板与密封条要用阻燃级复合材料防止冷热气流出现短路情况^[4]。在高功率机柜集中的区域，设计时应当增设行级精密空调，再借助密闭冷通道模块化的构造形

式，达成局部强化冷却的效果。

4.3 灵活可扩展的边缘节点支撑方案

在数据存储中心的建设进程里，鉴于边缘节点呈现出的分布化部署特点，装修设计上应采取具备灵活性及扩展性的空间支撑策略。机房空间分区设计时应采用高密度模块化活动隔板与可调式隔断墙体，且隔断材料宜选用具有高声学隔离能力及防火性能的复合板材。如此一来可针对不同规模边缘节点扩展迅速形成独立功能区，并且可以有效控制机房运行过程中噪声与气流的干扰。地板系统的设计应基于活动地板方案，且此方案须具备高承载能力。支撑脚要采用不锈钢或铝合金材质，且高度应设计为可调节并搭配抗震垫层，该设计一方面可满足大型设备荷载的需求，另一方面则适应后期线路管网布设时的灵活性要求。在板块的接口位置设计时必须预留可以重复开启的检修口，以此提高扩容施工的操作效率。墙体与吊顶结构须设计嵌入如高电流负载备用电源接入人口、制冷管路接口等标准化接口模块和双层隔离式布线通道，同时设计中确保全部接口均统一运用模块化插拔式结构，如此一来当设备有新增或者更替情况时能够在局部操作条件下达成扩展，防止因整体性拆改而引发的结构风险。装修方案要实现小规模节点的多点布置，因而设计时需考虑边缘节点的分散布局需求在不同功能区配置微型机柜基础设施平台，其采用可快速锁紧的组装式结构与钢制框架，具有单人操作就能完成搭建与拆卸的特性，并且预设了底部滚轮与固定装置兼顾灵活性与稳固性。最后，装修材料的选用上，墙体表层适宜采用耐磨、抗冲击的环氧树脂涂层或者使用钢化防刮覆膜板材，至于地板表面应当铺设抗压强度高以及防滑性能优的复合耐磨层。

4.4 物理安全与装修材料设计保障措施

针对数据存储中心装修设计中物理安全以及装修材料两方面必须基于高标准的防护作前提条件，以此来保证基础环境即使处于极端条件之下中心也依旧能够维持稳定运行状态。就空间分区以及物理隔离而言，装修设计对核心控制区和关键机柜区要采用厚度不小于 240 毫米的高强度钢筋混凝土防护墙体且配备双层抗冲击防爆门。门体需设置生物识别与密码双重门禁系统，以此构建多重屏障。而玻璃隔断设计时选用夹层防窥玻璃，并且在其表层附上微纳遮光膜以此

来避免外部视觉渗透。在装修材料选用上，数据存储中心装修设计过程中全部墙体饰面板材、吊顶模块以及地板基层都必须严格选用符合国标 A 级且具备低烟无卤特性的不燃材料。对于电缆桥架及穿线管槽设计时需加覆阻燃隔热层，如若出现火灾时能够有效避免产生腐蚀性气体，继而危及机房设备。静电防护设计环节，地面需采用高密度防静电全钢活动地板，以静电耗散型 HPL 层压板贴附在表层，保证其表面电阻维持在 $10^6-10^9 \Omega$ 范围。对于墙体与支撑立柱表面设计中要为其喷涂导电涂层，并连接到等电位接地网络，这样能让静电荷有效释放以减少敏感存储器件受损的风险^[5]。在电磁屏蔽控制环节，设计上机柜区外围墙体采用镀锌钢板内衬，辅以连续焊接的金属网格嵌层，门窗部位要安装电磁密封条，以此形成完整的屏蔽腔体。吊顶与地板的收口处需填充多层导电橡胶与金属阻隔片，从而保证外部高频电磁波难以侵入而且内部电磁信号，且不会出现外泄情况。

5 结语

综上所述，在推进新基建与数字化转型的背景下，5G 时代的数据存储中心功能需求出现了较大的变化，这就要求装修设计在满足现有业务的运行需要的同时，也要为未来网络演进和业务拓展预留充分空间。对此，上文在充分考虑 5G 环境的特性与挑战情况下提出了包括空间布局优化、供配电与散热系统强化，到边缘节点支撑的灵活性与物理安全防护等面向 5G 时代的数据存储中心装修设计适应性策略，以此确保数据中心实现高效、安全以及长期可持续运行目标。

参考文献

- [1] 朱麦玲.参观型数据中心的装饰设计[J].现代装饰, 2022(14): 49-51.
- [2] 刘彩霞.数据中心装饰装修工业化设计[J].绿色建造与智能建筑, 2022.
- [3] 李峰.数据中心建筑设计探究[J].中国建筑装饰装修, 2022(3): 56-57.
- [4] 李彦.数据中心装饰设计节能探究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2021.
- [5] 钟伟兰.室内装饰装修材料在指挥中心物理空间环境设计中的运用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022.

The construction and improvement of the supervision mechanism of third-party testing institutions in construction project quality inspection

Bin Yan

Yangzhou Jianwei Construction Engineering Testing Center Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

Abstract

With the rapid development of China's construction industry, third-party testing, as a key link in ensuring engineering quality, has increasingly attracted high attention from the whole society regarding its fairness and accuracy. However, current supervision of third-party testing institutions faces numerous issues such as incomplete laws and regulations, lenient market access, weak process supervision, and a lack of credit system, which seriously restrict the effective performance of their 'impartial adjudication' function. Based on this practical need, this paper, by analyzing the defects in the existing regulatory mechanism, aims to propose a set of forward-looking and operable construction and improvement plan, with the goal of consolidating the last line of defense for engineering quality and safety, and promoting the standardization and modern governance of the construction market.

Keywords

Construction Engineering Quality Testing; Third-party Testing Institution; Supervision Mechanism

建筑工程质量检测中第三方检测机构监管机制的构建与完善

颜斌

扬州市建伟建设工程检测中心有限公司，中国·江苏扬州 225000

摘要

随着中国建筑行业的飞速发展，第三方检测作为保障工程质量的关键环节，其公正性与准确性日益受到全社会的高度关注。然而，当前对第三方检测机构的监管存在法律法规不健全、市场准入宽松、过程监管乏力及诚信体系缺失等诸多问题，严重制约了其“公正裁判”职能的有效发挥。本文立足于这一现实需求，在剖析现行监管机制缺陷的基础上，力求提出一套兼具前瞻性与可操作性的构建与完善方案，旨在筑牢工程质量安全的最后一道防线，推动建筑市场的规范化和现代化治理。

关键词

建筑工程质量检测；第三方检测机构；监管机制

1 引言

建筑工程质量事关人民生命财产安全、社会公共利益与国民经济的高质量发展。作为客观评价工程质量的核心手段，工程质量检测是保障工程安全的重要防线。近年来，随着“放管服”改革的深化，独立于建设、施工、监理等各方的第三方检测机构凭借其理论上独立的地位与专业的技能，在工程质量控制体系中扮演着愈发重要的“守门人”角色。因此，如何构建一套科学、高效、严密的监管机制，以确保第三方检测机构的独立性与公正性，使其回归质量本源，已成为行业主管部门与学术界亟待解决的重大课题。

【作者简介】颜斌（1979-），男，中国江苏扬州人，本科，高级工程师，研究方向：建筑工程质量检测。

2 建筑工程质量检测第三方检测机构监管现状与问题

2.1 监管法规体系不完善，责任界定与惩戒力度不足

现有法规多侧重宏观原则性规定，缺乏针对第三方检测机构的细化条款。一方面，对“检测数据造假”“样品替换”等违规行为的界定模糊，未明确“故意造假”与“操作失误”的区分标准，导致监管部门查处时面临“取证难、定性难”的困境。例如某机构因检测人员操作失误导致数据偏差，与另一机构故意编造数据的处罚结果差异不大，难以体现惩戒的针对性。另一方面，处罚力度与违法收益严重不匹配：现行法规对违规机构的罚款金额多为“5万-20万元”，而机构通过造假承接的项目收益往往超百万元，低额罚款难以形成震慑。

2.2 关键技术环节监管失控，质量风险隐患突出

从实验室技术管理“人员、设备、样品、方法、环境”五大核心要素来看，第三方检测机构关键技术环节监管普遍失控，滋生大量质量风险：人员方面，检测人员上岗证要求放宽甚至取消，导致大量非专业或未经有效培训的人员上岗；设备方面，虽有文件要求采用自动化设备并保留自动采集数据备查，但大量机构仍使用人工测读，既无法保证数据准确性也难以保障真实性；样品方面，大量存在小样导则检测样品与实际样品不符的情况，检测结果无法反映工地现场真实状况；方法方面，部分检测方法已无法满足建筑业发展需求，如地下室现场混凝土抗渗试验等，还有些检测方法与实际不对应，如预制柱对接焊缝检测，现有验收标准要求使用金属超声检测，但预制柱对接焊缝根本无法进行金属超声探伤；环境方面，检测机构被要求市场化，而市场化与检测机构所需的公平公正严重相悖，市场化下机构易受利益驱动，难以坚守数据真实公正，近几年出现事故的检测机构均是为了利益无视检测数据真实性，若严格保证公平公正反而难以获得市场。

2.3 监管手段滞后，动态管控能力不足

当前监管仍以“定期检查+书面审核”的传统模式为主，难以适应建筑工程检测的现场性、动态性特点。一方面，“通知式检查”存在明显弊端：机构可提前整理合规材料，掩盖日常违规行为，监管部门难以掌握真实运营情况；另一方面，部分未采用自动化设备检测的监管缺失，部分机构在现场检测中“简化流程”“编造数据”，而监管部门无法实时跟踪，只能依赖事后报告审核，导致问题发现滞后。

2.4 信用监管机制不健全，协同效应缺失

信用监管是规范市场行为的核心手段，但当前体系存在三大短板：一是信用评价指标单一，多数地区仅以“是否受行政处罚”作为核心指标，未将“设备检定率”“检测报告合格率”“客户投诉处理率”等细化指标纳入，导致评价结果缺乏全面性；二是信用信息“孤岛化”，各地区、各部门的信用数据未互联互通，机构在一地失信后，可通过变更名称、迁移地址等方式在其他地区继续经营；三是惩戒措施乏力，对失信机构的处罚多停留在“公示警告”层面，未与招投标资格、资质等级评定挂钩，无法形成“一处失信、处处受限”的效应^[1]。

3 建筑工程质量检测第三方检测机构监管机制构建的核心维度

3.1 人员监管维度

监管部门建立“全国建筑工程检测人员资质数据库”，对机构提交的人员资格证书进行备案审核，确保“人证相符”“证岗相符”。例如从事“钢结构无损检测”的人员，必须持有对应的UT/MT二级及以上证书，严禁跨领域从业。同时，通过“现场巡查+视频监控”双手段，监督检测人

员操作规范性。例如在混凝土试块压力检测现场安装摄像头，实时记录加载速度、数据读取过程，对“提前终止加载”“篡改数据”的人员，依法吊销资格证书并纳入行业黑名单，5年内不得重新从业。

3.2 设备与计量监管维度

在设备与计量监管维度，应优先采用自动化设备开展检测工作，检测机构需主动上报名未采用自动化设备的试验项目，明确设备选型标准与上报时限，监管部门则按采用自动化与非自动化设备实施分类管理并强化核查频次。其中采用自动化设备的需完整保留检测数据及相关图表以备核查，未采用自动化设备的则必须加装高清摄像头进行全程监控，并规范保存视频资料3个月备查，对未按要求执行的机构设定整改期限与对应处罚措施，通过细化流程与强化问责确保数据真实可追溯，规避人工操作风险。

3.3 样品全流程监管维度

样品真实性是检测结果有效的前提，监管部门应统一制定样品编码规则，机构在接收样品时立即赋予唯一编码，并粘贴带芯片的RFID标签，记录样品规格、生产单位、运输信息等；编码信息同步录入监管平台，建设、监理单位可通过平台查询样品状态，实现“来源可查、去向可追”。同时，严格执行“委托方与检测人员隔离”制度——委托方填写的《检测委托书》仅包含样品技术参数，隐去建设、施工单位信息；检测人员仅能获取样品编码及检测要求，无法知晓委托方身份；委托方与检测人员的沟通需通过监管平台留言，禁止私下接触^[2]。

3.4 检测方法合规性监管维度

检测方法的合规性决定结果的可比性与权威性，监管需要求机构优先采用现行有效的国家标准、行业标准，严禁使用已废止的方法。监管平台建立“标准更新提醒”功能，及时推送新标准信息，机构需在3个月内完成方法更新并向监管部门备案，逾期未更新的暂停相关检测项目。因工程特殊需求需采用非标准方法的，机构需提交《方法确认报告》，内容包括方法原理、操作流程、精度验证、不确定度评估等，经监管部门组织专家评审通过后方可使用；方法发生改动的，需重新提交确认报告，擅自修改的按“数据造假”论处。

3.5 检测环境与市场适应监管维度

参考实验室环境管理的双维度要求，需兼顾“内部检测环境”与“外部市场环境”：针对环境敏感项目，要求机构安装温湿度记录仪、空气质量传感器，实时记录环境数据并上传至监管平台；数据超标的，平台自动预警，监管部门立即核查，期间检测数据视为无效，需重新检测。同时，严禁机构以“低价竞争”、“承诺合格”等方式争夺市场，监管部门定期发布检测项目成本指导价，对报价低于指导价80%的机构进行重点核查；每个行政区应保留必要的检测机构为管理单位，对该地区的检测机构进行留样复测、日常检查、对工地现场的质量进行管控。

3.6 法规与信用协同监管维度

一方面，需完善《建设工程质量检测管理办法》等核心法规，明确检测机构在人员资质、设备校准、样品管理等环节的违规情形及对应处罚标准，将“人证不符”“样品调包”等行为纳入法条刚性约束，避免“处罚模糊”导致监管乏力；另一方面，建立法规与信用的联动转化机制，将法规处罚结果同步至信用评价体系，如单次违法违规记为信用负面指标、多次整改不到位直接降为 D 级信用，实现“违法即失信”的精准关联。

4 建筑工程质量检测第三方检测机构监管机制的完善策略

4.1 健全法律法规体系，强化监管执行刚性

针对当前《建设工程质量检测管理办法》等法规中存在的责任界定模糊问题，尤其是检测造假行为中第三方机构、检测人员与委托方的权责划分不清晰，易出现“多头追责”或“追责空白”的情况，需进一步修订核心法律条款，明确各方主体的责任边界与处罚标准；同时结合不同地区工程类型差异，如超高层建筑、轨道交通工程等的特殊检测需求，制定差异化的检测频次、抽样比例实施细则，避免“一刀切”式监管导致的监管过度或监管缺位。

4.2 推进监管信息化建设，实现“全流程智慧监管”

通过搭建统一的建筑工程质量检测监管平台，整合“委托下单 - 样品流转 - 检测实验 - 报告出具”全环节数据，要求检测机构的核心检测设备实时上传原始检测数据，杜绝人工篡改数据、编造报告的情况；同时推动该监管平台与住建、交通、水利等行业主管部门的业务系统，以及“信用中国”、企业信用信息公示系统的数据互通，实现检测机构违法违规信息的跨领域共享，做到“一次违法，多领域受限”；在此基础上，引入 AI 智能分析算法，对检测数据中的异常情况，如同一批次混凝土试块强度偏差过大、钢筋力学性能检测结果波动异常等，进行自动识别与分析，及时向监管人员推送预警信息，推动监管模式从“事后查处”向“事前干预”转变，真正实现全流程智慧监管^[3]。

4.3 完善信用监管体系，提升失信成本

应构建涵盖检测报告合格率、设备定期校准率、检测

人员持证上岗率、违法违规记录等维度的多维度信用评价指标体系，定期对第三方检测机构进行信用评级，并将评级结果向社会公开，接受市场与公众监督；依据信用评级结果实施分级分类监管，对 A 级信用机构减少抽查频次，对 D 级信用机构实施“月度常规检查 + 不定期飞行检查”，同时限制其参与政府投资项目、重大工程项目的检测投标资格。

4.4 加强行业自律与能力建设，引导主动合规

充分发挥建筑工程质量检测行业协会的桥梁与监督作用，由协会牵头制定《第三方检测机构自律公约》，明确检测流程规范、检测人员行为准则、行业道德标准等内容，定期组织行业内“检测技能比武”“典型案例警示教育”“合规管理培训”等活动，强化机构与从业人员的合规意识；强化检测人员资质管理，要求所有从事核心检测工作的人员必须通过全国统一的建设工程质量检测工程师考试，取得相应资质证书，且每两年参加一次继续教育，未通过继续教育或考核不合格的人员直接注销资质，杜绝“无证上岗”“资质过期上岗”等问题^[4]。

5 结论

综上所述，监管机制的完善不仅是政府部门的责任，更需要检测机构、行业协会、建设单位等多方主体的共同参与和协同共治。未来，随着“放管服”改革的持续深化和建筑行业的高质量发展，第三方检测机构的监管必将朝着更加法治化、精细化、智能化的方向演进。只有构建起政府监管、行业自律、机构自治、社会监督的多元共治格局，才能真正筑牢工程质量的安全防线，推动建筑行业持续健康发展，为社会主义现代化建设提供坚实的质量保障。

参考文献

- [1] 王晗.建筑工程质量管理中大数据分析的应用思考[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(28):43-45.
- [2] 刘远文.建筑工程主体结构质量检测方法的探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(28):70-72.
- [3] 潘玉平.建筑工程质量检测中的混凝土检测技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(28):85-87.
- [4] 沙云.建筑工程材料质量检测与结果分析[J].实验室检测,2025,3(18):77-79.

Analysis of Green and Low-carbon Construction Method of High-rise Residential Building from the Perspective of Dual Carbon

Yusheng Du

Ningxia Chengzhixin Electric Power Construction Consulting Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750011, China

Abstract

From the perspective of dual-carbon goals, to further enhance carbon emission reduction in the construction industry, it is essential to analyze the factors affecting carbon emissions in high-rise residential buildings in accordance with the requirements of dual-carbon targets. This paper proposes feasible and scientifically sound green and low-carbon construction technologies, such as energy-saving, material-saving, water-saving, environmental protection, and intelligent technologies, to effectively control energy consumption and pollution emissions during construction. These measures aim to improve resource utilization efficiency, promote the recycling and reuse of construction waste, and achieve an organic integration of aesthetically pleasing designs, efficient construction, low energy consumption, and environmental friendliness in high-rise residential buildings. The article primarily analyzes green and low-carbon construction methods for high-rise residential buildings under the dual-carbon perspective, driving the low-carbon, green, and sustainable development of the construction industry.

Keywords

Dual Carbon; High-rise Residential Building; Green and Low-carbon Construction

双碳视角下的高层住宅绿色低碳施工方法分析

杜育升

宁夏诚智信电力建设咨询有限公司，中国·宁夏 银川 750011

摘要

双碳视角下，为了进一步提升建筑行业的碳减排控制效果，需要结合双碳目标要求，对高层住宅建筑碳排放的影响因素进行分析，并提出可行性、科学性的绿色低碳施工技术，如节能技术、节材技术、节水技术、环保技术、智能技术等，有效控制建筑施工过程中的能源消耗和污染排放，提高建筑资源利用率，对建筑废弃物回收利用，促进高层住宅建筑外形美观、高效建设、能耗较少、环境友好等的有机统一。文章主要对双碳视角下的高层住宅绿色低碳施工方法进行分析，推动建筑行业的低碳化、绿色化、可持续化发展。

关键词

双碳；高层住宅；绿色低碳施工

1 引言

随着社会经济的发展，全球气候日益变暖，对人类生存环境造成严重威胁。在此背景下，我国提出双碳目标，要求在建筑工程施工中引入绿色低碳施工技术，降低施工过程中的能耗，提高资源利用率，有效控制碳排放，推动建筑行业的可持续发展。

2 双碳视角下高层住宅绿色低碳施工必要性

在高层住宅工程施工过程中引进绿色低碳施工技术，可以以低碳为目标，引进节能技术、节水技术、节材技术、

环保技术等，进而减少高层住宅建筑施工、运行过程中的能耗，降低污染物排放，推动建筑工程行业的绿色化、可持续化发展。在双碳目标视域下，高层住宅施工中进入低能耗、可再生建筑材料，减少室内采暖、制冷的能耗，强化节能环保效果；引进现代化的节能施工技术，有效控制施工过程中的能源消耗；在施工设计中引入高效节能系统，如合理布置遮阳板、设计绿色屋顶等，减少高层住宅日常运行中的能耗^[1]。其中，高层住宅建筑的绿色低碳设计目标如表1所示。在高层住宅建筑施工中引进绿色低碳施工技术，能够减少建筑能耗，提高企业经济效益；优化居民生活环境，提高居住舒适度；建筑与环境相统一，实现建筑美学与低碳节能，推动建筑行业的可持续发展。

【作者简介】杜育升（1968-），男，中国山东济南人，工程师，从事工程建设新能源技术研究。

表1 高层住宅建筑碳排放强度表 (kgCO₂/m²a)

太阳辐射着照 量等级气候区	温和	冬暖夏热	冬冷夏热	寒冷	严寒
I	-	-	-	13	14
II	12	16	-	14	15
III	13	17	16	16	16
IV	14	-	17	-	-

3 高层住宅施工中绿色低碳施工技术的影响因素

3.1 产业链问题

建筑行业产业链较为复杂,为了对绿色低碳施工技术进行全面剃光,需要深入研究中间环节。当前我国绿色住宅建筑行业刚刚起步,属于新兴产业,对新兴材料生产、建筑技术应用还不成熟,难以形成完整的产业链,且缺乏低碳绿色施工方面的实践经验,严重显著整体行业的发展速度,不能实现整体产业链上中下游的协调发展^[2]。

3.2 制度不完善

双碳背景下,建筑行业逐渐加大了对绿色住宅施工技术的重视程度,切为了完成双碳目标,制定了一系列的制度规范,为低碳绿色施工技术的推广应用提供标准依据。但是由于建筑行业变化较快,再加上政策变化、社会要求的改变,没有对现有制度规范进行及时调整,建筑行业绿色环保方面的监管不到位,难以保障低碳施工技术的贯彻执行。

3.3 企业环保意识不足

当前,部分建筑施工企业缺乏环保意识,对绿色建筑施工技术的重要性认识不足,甚至为了追求较高的经济效益,在施工过程中使用高能耗、高污染的建筑材料,导致双碳目标难以实现,因此需要强化市场监管和社会舆论引导,为建筑行业的绿色发展创建良好条件^[3]。

3.4 绿色施工技术研发不足

我国在绿色低碳施工行业的起步较晚,在技术研发和推广方面还存在一定的问题,如对新型清洁能源利用不到位、绿色建筑施工技术应用缺陷等,尤其是在装配式建筑施工中还不能解决抗震性能差这一问题,严重限制绿色施工技术的全面推广,因此要加大技术研发力度,促进跨学科技术融合,有效推动建筑行业绿色低碳发展。

4 双碳视角下的高层住宅绿色低碳施工方法要点

4.1 节材技术

在双碳视角下,高层住宅工程施工中需要选择低碳材料,实现碳排放的源头控制。尽量选择本地化材料,如混凝土骨料、墙体砌块等大宗材料,这样能够降低运输过程中的能耗和碳排放;引进高性能绿色建材,如再生骨料混凝土代替天然骨料,既可以减少固废占地,且还能够提高废物回收率,有效控制混凝土施工中的碳排放强度;利用高强度钢筋,控制钢筋用量;引进新型节能保温材料,降低导热系数,减少墙体保温层厚度,既可以提升建筑保温性能,且还能够降低材料消耗总量^[4]。在施工过程中引进铝合金模板等新型绿色材料,其质量较轻、结构紧密、安装便捷且周转次数多,可以减少现场木材资源、减少建筑垃圾的产生,有效提升建筑施工的经济效益和环保效益。引进附着式升降脚手架材料,该材料坚固且耐久性较强,能够回收再利用,能够保障施工安全,且还能够实时监测架体高度,保障施工稳定性。

4.2 节能技术

在绿色低碳住宅施工作业中引入节能技术,能够减少建筑运行过程中的能源消耗。在建筑设计环节,需要优化设计建筑朝向和布局,适当扩大窗户尺寸,优选窗户位置,尽可能的利用自然光,保持室内良好采光条件;同时优化通风系统设计,通过自然风对室内温度、空气质量进行调节,进而减少空调运行时间降低能源消耗。在建筑围护结构设计中,要选择保温隔热材料,这样能够减少室内外热量传递,尤其要选择低碳环保窗体材料,如保温性能较好的双层玻璃、选择断桥铝等窗体材料、贴密封条减少冷空气渗入、利用弹性松软材料密封窗框和墙体缝隙,进而降低采暖、制冷能耗。在屋面节能设计中,选择导热系数小、吸水性低的保温材料,如聚苯乙烯板、沥青珍珠岩板等;在屋面蓄水设计中选择钢性石混凝土构件等保温、蓄温性能较好的节能材料。引进可再生能源,如太阳能光伏发电系统,在屋顶安装太阳能电池板,把太阳能转化为电能,节约电力供应;引进地源热泵系统,开发地下浅层地热资源,冬季供暖、夏季制冷。此外还可以优化应用空气能,减少碳排放,其中配套热泵设施参数如表2所示。

表2 空气能热泵参数表

热泵型号	2P	3P	4P	5P	10P
额定制热量	6.79KW	8.87KW	8.87KW	14.97KW	30KW
环境温度要求			-5~40℃		
运行噪音	≤50dB (A)	≤55dB (A)	≤55dB (A)	≤60dB (A)	≤60dB (A)
热水循环量	3.6m ³ /H	8m ³ /H	9m ³ /H	11.3m ³ /H	19.2m ³ /H

4.3 节水技术

在建筑工程施工中引进节水技术,需要优化用水计划,严控施工过程中的用水量,如利用高压水枪、节水型喷头,

避免水资源浪费;要引进雨水收集系统,这样能够对雨水进行回收利用,用于车辆清洗、现场降尘、混凝土养护等,提高水资源利用率;安装中水回用技术,把处理后的生活污

水回收应用到绿色灌溉、厕所清洗等方面；引进节水型卫生器具，如安装感应式水龙头、节水型马桶、淋雨喷头等，这样可以降低用水量；在绿色设计中引进滴灌、喷灌技术，提高水资源利用率。此外，在基坑开挖过程中布置降水井，利用三级沉淀池对水进行沉淀、过滤等处理环节后，引流到集水池，实现水资源回收再利用。同时还需要安装变频加压泵，以便实现水资源的循环利用，降低能耗。

4.4 环保技术

在现场施工中，往往会产生大量扬尘，对空气环境造成危害。因此要引进扬尘控制技术，如安装塔吊自动喷淋系统、可移动式雾炮系统、车辆自动冲洗系统等，这样能够冷却空气且抑制现场粉尘，减少空气中的漂浮的颗粒物，有效净化空气质量。引进施工现场噪声控制措施，减少噪声污染。引进固废处理技术，对施工现场废弃物分为可回收物、有害垃圾、其他垃圾等类型，然后进行分类堆放。针对不能直接回收利用的固废物，需要通过粉碎、再利用技术进行处理，如把混凝土、砖块粉碎成再生骨料，应用于建筑施工中。

4.5 绿色施工技术创新

联合应用 BIM 技术、物联网技术、大数据分析技术等，构建数字化监测平台，以便对施工过程中的碳排放情况进行动态监测和管理，如在现场材料堆场、能源供应点、施工设备安装传感器，以便全面采集能耗、材料用量、运输距离等数据，并利用平台自动换算碳排放量，绘制动态曲线，一旦发现超过标准值，就会自动发出预警信。引进 BIM、VR 技术，利用数字化建模、三维可视化手段，优化设计结构吊装施工、装饰装修等工程，及时纠偏；引进 VR 技术，强化现场安全管理。

4.6 建筑绿化设计

在现代化房屋设计中，需要优化应用绿化技术，进而减少噪音污染，平衡生态结构。如引进垂直绿化方法，如在房屋墙壁、窗台等地方栽种攀援植物，这样降低房屋能耗，通过利用绿色植物净化空气、调节室内空气；在房屋周围种植高大树木制造绿荫，既可以遮挡太阳辐射，且还能够减少

地面、墙体反射热量，同时还可以减少噪音影响。

4.7 完善绿色施工管理体系

结合双碳目标要求，明确绿色施工目标，对绿色低碳施工提供指引；明确绿色施工原则，引进新技术、新工艺、新材料、新设备，进而优化绿色施工基础条件；绘制施工现场用水布置图，明确水资源控制部位；强化生活用水定额指标计量，建立用水台账；针对浪费水资源的行为进行一定的奖罚；设置自动加压供水系统和砌体喷淋湿水技术；明确施工现场用电控制指标，按月计量、核算，构建用电节能统计台账；选择节能型设备，减少施工现场生产、生活能耗；优化施工顺序安排，减少基土开挖、基坑防护等场地占用；严控施工内外场临设面积，减少废弃地、使用死角。政府部门要强化政策支持，把施工碳排放指标纳入建筑市场信用评价体系，组建专项管理小组，明确各部门碳减排职责，做好绿色施工技术交底工作，强化施工人员的低碳意识，贯彻落实节材技术、节能技术、节水技术、环保技术等，推动建筑施工的低碳化发展。

5 结论

综上所述，新时期，为了实现高层住宅建筑行业的长远发展，需要积极推广和应用低碳绿色施工技术，优化施工设备和技术，引进低碳环保材料，优化施工现场环保管理，有效控制建筑施工、运行中的能源消耗和碳排放，提高资源利用率，真正推动双碳目标的实现。

参考文献

- [1] 刘世刚,桂涛. 绿色低碳住宅中新型生态墙体材料的保温隔热性能研究 [J]. 居舍, 2025, (20): 48-50.
- [2] 王紫艳,宫祥. 绿色低碳住宅的节能施工技术应用 [J]. 住宅与房地产, 2025, (05): 43-45.
- [3] 王露. “双碳”视域下乡村居住建筑绿色低碳设计路径研究 [J]. 住宅与房地产, 2024, (26): 25-27.
- [4] 牛伟蕊. 绿色低碳住宅发展的实践经验和未来展望 [J]. 住宅产业, 2021, (12): 25-28.

A Review and Development of the Technical Application of Intelligent Slope Anchor FBG Sensor Monitoring

Qinbo Wang

School of Civil Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning, Guangxi, 450036, China

Abstract

Slope stability monitoring is critical for disaster prevention and mitigation. Traditional electrical sensors face limitations such as poor anti-interference capability and insufficient stability, making it difficult to meet the demands for accurate long-term monitoring in complex environments. Fiber Bragg Grating (FBG) sensors, with advantages such as immunity to electromagnetic interference and corrosion resistance, provide an ideal solution for in-situ distributed monitoring of intelligent anchor slopes. This paper reviews the current application status and technical challenges: it first explains the sensing mechanism and technical characteristics of FBG sensors, then discusses the integration process of sensors with anchors and their engineering applicability, analyzes key bottlenecks such as integration reliability and temperature-strain cross-sensitivity, and finally looks forward to future research directions, aiming to promote the large-scale engineering application of this technology.

Keywords

Fiber Bragg Grating sensor; intelligent anchor; slope monitoring; structural health monitoring; integration process

边坡智能锚杆 FBG 传感监测的技术应用综述与发展

王勤博

广西民族大学建筑工程学院, 中国 · 广西 南宁 450036

摘要

边坡稳定性监测是防灾减灾关键, 传统电学传感器因抗干扰差、稳定性不足, 难以满足复杂环境下精准长期监测需求。光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器凭借抗电磁干扰、耐腐蚀等优势, 为智能锚杆边坡原位分布式监测提供了理想方案。本文综述其应用现状与技术挑战: 先阐述FBG传感机理与技术特点, 再探讨传感器与锚杆的集成工艺及工程适用性, 剖析集成可靠性、温-应变交叉敏感等核心瓶颈, 最后展望未来研究方向, 以期推动该技术规模化工程应用。

关键词

光纤光栅传感器; 智能锚杆; 边坡监测; 结构健康监测; 集成工艺

1 FBG 传感器的技术原理与应用现状

1.1 光纤光栅传感器的技术原理与特点

光纤光栅传感器是一种基于光纤内周期性折射率调制的光学传感器。其核心原理是布拉格 (Bragg) 反射: 当宽带光信号通过光纤光栅时, 只有满足布拉格条件的特定波长光会被反射回来, 而其他波长则透射通过。布拉格波长 λ_B 由以下公式决定:

$$\lambda_B = 2N_{eff}\Lambda$$

其中, n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率, Λ 是光栅的周期。当环境温度或应变发生变化时, n_{eff} 和 Λ 会随之改变, 导致 λ_B 发生漂移, 通过测量这种波长漂移即可实现对物理量的传感。

【作者简介】王勤博 (2006-), 中国安徽合肥人。本科, 从事土木工程研究。

FBG 传感器具有以下显著特点和优势:

抗电磁干扰能力强: 与传统的电学传感器不同, FBG 传感器基于光信号传输, 不受电磁场干扰, 使其在强电磁环境或雷电多发区域具有独特优势。

高灵敏度和精度: 通过优化设计参数, FBG 传感器的灵敏度可以达到很高水平, 例如在边坡监测中, 倾斜传感器灵敏度可达 400 pm/deg。

复用性强 (分布式和点式监测): FBG 传感器可以通过波分复用 (WDM) 技术在单根光纤上串联多个传感器, 实现多点甚至分布式监测, 大大简化了布线和系统复杂性。例如, 在智能电池监测中, FBG 可用于单点温度和应变监测, 而瑞利散射则可实现分布式监测。

耐腐蚀、寿命长: 光纤本身由石英材料制成, 具有良好的化学惰性, 能够抵抗恶劣环境下的腐蚀, 延长传感器在地下或潮湿环境中的使用寿命。

尺寸小、重量轻: 光纤的纤细特性使得 FBG 传感器可

以集成到各种结构中，如嵌入到锚杆内部进行应力监测。

本征安全性：光纤不导电，无电火花风险，适用于易燃易爆环境。

1.2 FBG 传感器在智能锚杆边坡监测中的应用现状与性能表现

在边坡监测中，FBG 传感器被广泛应用于监测边坡的内部变形、锚杆受力、地层沉降和倾斜等关键参数，以评估边坡的稳定性并预测潜在的滑坡风险。

锚杆力监测：锚杆是边坡支护结构中的关键组成部分。将 FBG 传感器嵌入锚杆中，可以实时监测锚杆内部的轴向应力变化。研究表明，通过特殊设计的 FBG 应变传感器，可以实现高精度的锚杆力测量。例如，M20 螺栓中嵌入的 FBG 传感器在扭矩监测中获得了 $0.00298 \text{ nm/N}\cdot\text{m}$ 的高灵敏度， R^2 值为 0.9984。这种嵌入式监测能够有效评估锚杆的工作状态和支护效果，为边坡的长期安全提供数据支持。

边坡变形监测：FBG 传感器可用于监测边坡的整体或局部变形。通过布置在边坡不同深度的 FBG 应变传感器阵列，可以获取边坡土体的多点应变分布，揭示边坡内部的变形模式。离心模型试验结合 FBG 传感器可以实时监测边坡变形过程，为滑坡机制研究提供重要数据。

隧道衬砌稳定性评估：在隧道工程中，FBG 传感器与结构变形监测技术相结合，可以实现对隧道衬砌结构稳定性的实时监测。通过监测衬砌的应变变化，可以及时发现裂缝发展等安全隐患，保障隧道整体施工安全。

铁路焊轨接头应变监测：FBG 传感器也可用于监测铁路焊轨接头的应变 - 应力行为，这对于铁路运输安全至关重要，因为焊轨接头在火车冲击下最易受损且刚度最低。

2 FBG 传感器集成方式

FBG 传感器在智能锚杆中的嵌入方式直接影响其监测性能、耐久性及工程适用性。目前，针对 FBG 传感器的集成主要可分为以下几类，每种方法均有其独特的工艺细节与应用考量。

2.1 现有嵌入工程技术与不足

2.1.1 表面粘贴法：实验室友好，但工程中“脆弱”

具体工艺：表面粘贴法是将 FBG 传感器通过环氧树脂胶等粘合剂直接粘贴在锚杆表面。这种方法操作简便，成本较低，在实验室环境下常用于验证 FBG 传感器的基本性能和灵敏度。例如，通过在锚杆表面粘贴 FBG，可以监测锚杆受力后的应变变化，其原理是粘合剂将锚杆的应变传递给光纤，引起 FBG 布拉格波长的漂移。

现有工艺的不足或缺陷：尽管表面粘贴法易于实施，但在实际工程应用中存在显著缺陷。首先，环氧树脂胶的固化过程会引入额外的残余应力，影响测量精度。其次，粘合剂的老化、剥离以及外部环境（如温度变化、湿气侵蚀、化学腐蚀）的影响，都会导致 FBG 传感器与锚杆表面耦合不

稳定，从而降低监测的长期可靠性和准确性。此外，锚杆在实际服役过程中，可能会受到机械冲击、磨损等作用，粘贴在表面的 FBG 传感器极易损坏，使其在复杂恶劣的边坡工程环境中显得尤为“脆弱”，难以满足长期、可靠监测的需求。

2.1.2 编织法：将 FBG 传感器通过纺织编织的方式集成到结构中

具体工艺：编织法是一种将 FBG 传感器巧妙地融入结构材料中的方法，特别适用于需要高精度和准确测量的柔性结构或复合材料。该方法通过纺织编织工艺，将 FBG 传感器作为一根或多根纤维，与其他高性能纤维（如碳纤维、玻璃纤维）一同编织成三维（3D）织物或二维（2D）布料。这种集成方式可以实现传感器在结构内部的分布式布局，并确保传感器与基体材料之间的良好耦合。例如，通过三维编织技术，可以设计出具有自感知功能的复合材料，FBG 传感器可以沿编织路径精确分布，从而实现对结构内部应变场的细致监测。

现有工艺的不足或缺陷：编织法虽然能够实现 FBG 传感器与材料的紧密集成，但其主要挑战在于工艺的复杂性和成本。首先，编织设备和工艺需要高度的专业化，以避免在编织过程中对脆弱的光纤造成损伤。其次，对于金属锚杆这类刚性结构，直接采用纺织编织方式集成 FBG 传感器存在技术难度，因为金属材料的熔点和加工方式与纤维材料截然不同。此外，编织过程中传感器位置的精确控制和固定也是一个难题，一旦传感器在编织过程中发生位移或受损，将直接影响其监测性能。目前，编织法更适用于复合材料或柔性结构，而对于高强度、高刚性的智能锚杆的应用仍处于探索阶段。

2.2 未来可能大规模应用的嵌入工程——超声波嵌入

此工艺将预处理好的 FBG 传感器精确放置到锚杆表面的定位槽中。超声波压头与频率控制：使用定制的超声波压头（Sonotrode），对传感器上方的金属表面施加垂直压力，并通过超声波发生器产生高频（如 $20 \text{ kHz} - 40 \text{ kHz}$ ）振动。超声波能量在传感器与锚杆接触界面处产生剧烈摩擦，导致局部温度升高和金属材料的塑性流动。局部塑性变形包覆：在超声波作用下，锚杆金属槽边缘的材料会发生塑性变形，向内流动，逐步包覆并固定 FBG 传感器。由于超声波作用的局部性，锚杆整体温度升高不明显，避免了对 FBG 传感器的整体热损伤。参数优化：超声波功率、振动时间、压力以及压头几何形状等参数的优化至关重要，旨在实现传感器牢固嵌入的同时，最小化对光纤性能的影响。优势与挑战：超声波嵌入法的核心优势在于其“冷加工”特性，即在不使锚杆整体高温熔化的前提下实现局部键合，从而有效保护 FBG 传感器不受热损伤。此外，该方法具有快速、高效、无额外填充材料的优点，有望实现传感器与锚杆之间的良好力学耦合。然而，挑战在于如何精确控制超声波能量，避免过度振动对光纤结构造成微损伤，以及如何确保超声波作用

区域的均匀性,防止传感器局部应力集中。同时,需要开发针对光纤材料的超声波嵌入专用设备和工艺参数。

3 有关 FBG 技术发展及应用的未来展望

3.1 未解决的问题与技术挑战

尽管 FBG 传感器在智能锚杆边坡监测中取得了显著进展,但仍存在一些未解决的问题和技术挑战:

温度交叉敏感性: FBG 传感器对温度和应变都敏感。在实际工程中,温度变化会引起布拉格波长的漂移,这可能与应变引起的漂移混淆,导致测量误差。虽然已有多种温度补偿方法被提出,如使用独立的温度传感器或双光栅结构,但如何在复杂多变的边坡环境中实现精确且鲁棒的温度解耦仍是挑战。

长期稳定性与可靠性: 锚杆边坡通常处于恶劣的地下环境中,传感器可能面临潮湿、腐蚀、压实等问题。尽管光纤本身具有耐腐蚀性,但传感器的封装、引线以及与锚杆本体的界面在长期服役下的可靠性和稳定性仍需深入研究和验证。例如,在螺栓中嵌入 FBG 传感器,其封装技术需要保证传感器在受力过程中不受损坏,并能长期稳定工作。

安装与保护: FBG 传感器的安装,特别是在既有锚杆或复杂地质条件下的锚杆中,仍然是一个技术难题。如何在保证传感灵敏度的同时,确保传感器在安装和后续使用过程中不受损伤,并有效抵抗外部环境的侵蚀,是工程应用中的关键。

数据处理与分析: 随着监测点数量的增加,如何高效、准确地处理和分析海量的 FBG 监测数据,提取有价值的形变信息,并与边坡失稳机制相结合,进行预警和评估,仍需进一步研究。目前的研究多集中于传感器本身的设计和性能优化,而对大数据分析和智能诊断方面的深入探讨相对较少。

成本与标准化: 相较于传统监测手段,FBG 传感器系统的前期投入成本可能较高。此外,缺乏统一的行业标准和规范,也限制了其大规模推广应用。

3.2 未来的研究建议

为了克服上述挑战,推动 FBG 传感器在智能锚杆边坡监测中的进一步发展,未来的研究应聚焦以下几个方向:

多参数集成与解耦技术: 开发新型 FBG 传感器结构,实现应变、温度、倾斜、渗流等多物理量的集成测量,并创新性地提出多参数交叉敏感性的高效解耦算法,提高测量的精度和可靠性。例如,可以探索基于机器学习或深度学习的数据解耦方法,从复杂多变的监测数据中有效分离不同物理量的影响。

高可靠性封装与长期服役性能: 针对恶劣工程环境,

研发新型高强度、耐腐蚀、抗压的 FBG 传感器封装材料和结构,确保传感器在锚杆内部的长期稳定运行。开展加速老化试验和长期现场监测,评估传感器在真实工况下的服役寿命和性能衰减规律。

智能化安装与自动化监测: 研究适用于复杂工况的 FBG 传感器自动化安装技术,例如结合机器人或无人机技术进行传感器布设。同时,开发基于物联网 (IoT) 和云计算的智能监测平台,实现数据的实时传输、远程监控和自动化预警。

数据驱动的边坡稳定性评估模型: 将 FBG 监测数据与地力学模型、数值模拟、机器学习算法相结合,构建数据驱动的边坡稳定性评估和预测模型。例如,利用历史监测数据训练模型,识别边坡失稳前的特征信号,提高预警的准确性和时效性。离心模型试验等方法可用于加速研究边坡失稳过程,并结合 FBG 传感器实时监测变形过程。

低成本制造与标准化推广: 通过新材料、新工艺的研发,降低 FBG 传感器的制造成本,使其更具市场竞争力。同时,积极推动行业标准的制定,规范 FBG 传感器在边坡工程中的设计、安装、测试和应用,促进其大规模产业化发展。

4 结语

光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器技术与智能锚杆的融合,为边坡工程监测带来革命性突破,其抗电磁干扰、稳定性好等优势,使其在复杂岩土环境中具备不可替代的应用价值。该技术经表面粘贴、内部植入等工艺实现了从实验室到工程实践的落地,可精准感知岩体应变、定位滑移面、评估支护结构健康状态。

但该技术规模化、标准化应用仍面临诸多瓶颈:传感器集成工艺存在存活率、耐久性等缺陷,温变与应变交叉敏感影响精度,低成本高鲁棒性解调技术缺失推高应用门槛,且监测数据的深度挖掘与智能预警能力不足。突破这些挑战,方能推动其成为边坡工程安全保障的核心技术。

参考文献

- [1] 李宏男,伊廷华,李东升.光纤光栅传感技术在土木工程中的研究与应用进展[J].土木工程学报,2020,53(02): 1-20.
- [2] 张顶立,王涛,刘胜春.智能锚杆技术及在岩土工程监测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S1): 2601-2615.
- [3] 姜德生,何伟,陈益峰.光纤光栅传感器温度-应变交叉敏感解耦方法研究[J].光学学报,2022,42(11): 1106002.
- [4] 朱鸿鹄,周国庆,龚辉.边坡工程中FBG智能监测技术的应用现状与关键问题[J].岩土工程学报,2023,45(05): 801-812.
- [5] 王兴国,李丽,张旭辉.光纤光栅传感器嵌入式集成工艺及长期稳定性研究[J].仪器仪表学报,2024,45(03): 128-137.

Exploration on Reliability Design and Optimization of Industrial Automatic Control Systems

Weimin Hou

Shaanxi Guoneng Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

With the in-depth advancement of Industry 4.0 and intelligent manufacturing, industrial automatic control systems have become the core support for modern production. Their reliability directly impacts production efficiency, product quality, and safety and stability. Especially in industries such as chemicals, pharmaceuticals, and automobile manufacturing, which have high precision and high continuity requirements, system failures can lead to significant economic losses and even safety accidents. However, factors such as complex electromagnetic environments, equipment aging, software vulnerabilities, and human operational errors pose severe challenges to system reliability. This paper explores key strategies for enhancing the reliability of industrial automatic control systems from five dimensions: hardware redundancy design, software fault-tolerance mechanisms, anti-interference technologies, intelligent operation and maintenance management, and system integration optimization. It also verifies their effectiveness through typical industry practices, providing theoretical references and practical guidance for improving reliability in the field of industrial automation.

Keywords

Industrial automatic control system; Reliability design; Redundancy technology; Anti-interference; Intelligent operation and maintenance

工业自控系统可靠性设计与优化探索

侯卫民

陕西省国能榆林化工有限公司, 中国 · 陕西 榆林 719000

摘要

随着工业4.0与智能制造的深入推进, 工业自动化控制系统已成为现代生产的核心支撑。其可靠性直接影响生产效率、产品质量及安全稳定性, 尤其在化工、制药、汽车制造等高精度、高连续性要求的领域, 系统故障可能导致重大经济损失甚至安全事故。然而, 复杂电磁环境、设备老化、软件漏洞及人为操作失误等因素, 导致系统可靠性面临严峻挑战。本文从硬件冗余设计、软件容错机制、抗干扰技术、智能运维管理及系统集成优化五个维度, 探讨提升工业自控系统可靠性的关键策略, 并结合典型行业实践验证其有效性, 为工业自动化领域的可靠性提升提供理论参考与实践指导。

关键词

工业自控系统; 可靠性设计; 冗余技术; 抗干扰; 智能运维

1 引言

工业自动化控制系统通过传感器、控制器与执行机构的协同, 实现生产过程的精准控制与高效运行。其可靠性不仅关乎设备寿命, 更决定着生产连续性与产品一致性。然而, 现代工业环境日益复杂, 系统规模扩大、设备互联需求增加, 导致故障概率上升。例如, 电磁干扰可能引发信号失真, 硬件老化可能导致控制失灵, 软件漏洞可能引发系统崩溃。因此, 如何通过系统性设计优化提升系统可靠性, 成为工业自动化领域的关键课题。

2 硬件冗余设计: 构建多重安全屏障

硬件冗余是提升系统可靠性的基础手段, 通过增加备用设备或模块, 确保单一故障不导致系统瘫痪。

2.1 硬件冗余

硬件冗余作为提升工业自控系统可靠性的核心手段, 其本质是通过增加备用设备或模块, 构建多重安全屏障, 确保单一故障不会引发系统整体瘫痪。在工业生产中, 关键设备如控制器、电源模块的稳定性直接决定生产连续性。^[1]

硬件冗余通过双机热备或并行冗余设计, 使备用设备在主设备故障时自动接管任务, 实现零中断切换。这种设计不仅提升了系统可用性, 更通过冗余资源的预留, 为故障修复争取时间, 避免因单点故障导致的连锁反应。

【作者简介】侯卫民(1982-), 男, 中国河南许昌人, 本科, 工程师, 从事仪表自动化研究。

2.2 模块化设计

模块化设计是硬件冗余的重要延伸，其核心在于将系统划分为独立功能模块，如过程控制、数据采集、人机界面等，每个模块具备独立运行能力且通过标准化接口连接。这种设计显著提升了故障隔离效率——当某一模块出现故障时，系统可快速定位问题源头，仅需对故障模块进行维修或更换，无需停机整体系统。同时，模块化设计降低了维护复杂度，不同模块可由专业团队独立维护，减少对整体系统知识的依赖。

2.3 标准化接口

标准化接口是硬件冗余设计的关键支撑，其通过统一硬件接口协议，消除不同供应商设备间的兼容性障碍，确保多品牌设备无缝集成。在工业自动化领域，设备来源多样、协议差异大是普遍问题，若接口不统一，可能导致信号传输错误、数据丢失或设备无法协同工作，进而引发系统故障。标准化接口通过强制规范通信协议、电气参数与机械尺寸，使不同设备能够“即插即用”，降低集成难度与故障风险。

3 软件容错机制：增强系统自适应能力

3.1 自适应控制算法

自适应控制算法通过引入机器学习技术，使工业自控系统能够基于实时数据动态调整控制参数，从而提升对复杂工况的适应能力。传统控制算法如 PID 控制，其参数固定且依赖人工调试，在面对负载变化、环境干扰或设备老化时，易出现响应滞后或超调现象。而自适应算法通过持续监测系统输入输出数据，利用机器学习模型识别工况特征，并自动优化控制参数。^[2] 例如，在机械臂运动控制中，系统可根据当前速度与位置偏差，实时调整比例、积分、微分系数，使运动轨迹更平滑、定位更精准。这种动态调整能力不仅解决了传统算法在非线性系统中的局限性，更通过减少人工干预降低了操作风险。

3.2 程序容错设计

程序容错设计通过嵌入自诊断与错误恢复逻辑，使软件在遭遇异常时能够主动识别问题并采取补救措施，从而避免系统崩溃或数据丢失。传统软件设计往往缺乏异常处理机制，一旦出现输入信号抖动、数据越界或硬件故障，可能导致程序中断或错误传播。程序容错设计通过多层次防护构建安全屏障：在输入层，数字滤波模块可消除高频噪声干扰，确保信号稳定性；在逻辑层，自诊断模块能实时监测程序运行状态；在输出层，错误恢复逻辑可根据故障类型触发报警、切换备用通道或回滚操作。

3.3 信息冗余存储

信息冗余存储通过多副本存储与定期备份策略，确保关键数据在硬件故障、网络攻击或人为误操作时仍可恢复，从而避免生产中断或决策失误。工业自控系统中，生产数据、配置参数与运行日志等关键信息是系统运行的核心资产，其

丢失或损坏可能导致不可逆损失。信息冗余存储采用“分散存储 + 同步更新”机制，将数据同时保存至多个物理介质，如本地服务器、云端存储或分布式节点，确保单一存储设备故障时数据仍可访问。定期备份策略则通过设定时间间隔或触发条件，将数据保存至离线介质，如磁带或光盘，防范网络攻击或病毒破坏。信息冗余存储的设计需兼顾可用性与一致性：可用性要求数据在任何时刻均可快速读取，一致性要求多副本数据保持同步更新。为平衡两者，系统可采用分布式存储技术，通过数据分片与冗余编码，在保证数据可靠性的同时提升访问效率。

4 抗干扰技术：保障信号传输稳定性

工业环境中的电磁干扰、温度波动等因素易导致信号失真，需通过硬件隔离与软件滤波综合应对。

4.1 硬件隔离技术

硬件隔离是抗干扰技术的物理基础，其核心是通过物理手段切断电磁干扰、温度波动等外部因素对信号传输的影响路径。在工业环境中，设备密集、线路复杂，电磁干扰易通过空间辐射或导线耦合进入信号传输通道，导致信号失真或设备误动作。硬件隔离技术通过屏蔽电缆、隔离变压器、光电耦合器等组件，构建多层次防护屏障。屏蔽电缆利用金属外壳对电磁场形成反射与吸收，将干扰信号隔离在传输介质外部；隔离变压器通过电磁感应原理，在初级与次级线圈间形成电气隔离，阻断共模干扰传导；光电耦合器则利用光信号传输特性，彻底切断电气连接，避免地环路干扰。^[3] 硬件隔离技术的优势在于其直接性与可靠性——通过物理隔离，干扰信号无法直接作用于敏感元件，从而从源头消除风险。

4.2 软件滤波算法

软件滤波是抗干扰技术的逻辑延伸，其通过在控制程序中嵌入数字滤波算法，对采集到的原始信号进行预处理，消除高频噪声与异常波动，提升信号质量。工业信号传输中，传感器采集的原始数据常包含因环境干扰或设备振动产生的高频噪声，若直接用于控制决策，可能导致系统误动作或调节过度。软件滤波算法通过数学运算对信号进行平滑处理，例如均值滤波通过计算一定时间窗口内数据的平均值，削弱随机噪声影响；中值滤波则选取窗口内数据的中位数作为输出，有效抑制脉冲干扰；卡尔曼滤波则结合系统模型与观测数据，对信号状态进行最优估计，适用于动态系统。软件滤波的核心优势在于其灵活性与适应性——算法参数可根据实际工况动态调整，例如在温度控制系统中，可根据温度变化速率选择滤波窗口大小，平衡响应速度与滤波效果。

4.3 接地与屏蔽设计

接地与屏蔽设计是抗干扰技术的系统级解决方案，其通过规范系统接地方式与屏蔽布局，减少地环路干扰与电磁耦合效应，提升整体信号传输稳定性。地环路干扰是工业环

境中常见的干扰形式，当多个设备共用接地线时，电流流经接地电阻产生的压降会形成环路，导致信号线上出现共模干扰电压，影响设备正常工作。接地设计通过单点接地、多点接地或混合接地策略，打破地环路路径——单点接地将所有设备接地线连接至同一物理点，避免电流环流；多点接地则通过低阻抗接地网络，将干扰电流快速导入大地；混合接地则根据设备频率特性选择接地方式，兼顾高频与低频干扰抑制。屏蔽设计则通过金属外壳或屏蔽层对设备或线路进行包裹，阻断电磁场耦合——例如控制柜采用金属外壳并可靠接地，可屏蔽外部电磁干扰；信号线采用双绞线或同轴电缆，通过线对扭绞或同轴结构抵消电磁感应。接地与屏蔽设计的关键在于系统性——接地电阻需控制在毫欧级以降低压降，屏蔽层需360度无缝隙覆盖以避免泄漏，同时需确保屏蔽层单端接地以防止形成新环路。

5 智能运维管理：实现预防性维护与快速响应

运维管理是系统可靠性保障的关键环节，需通过智能化手段提升故障预测与处理效率。

5.1 实时监测与预警

实时监测与预警是智能运维管理的核心基础，其通过部署传感器网络与边缘计算设备，构建覆盖设备状态、环境参数的全方位感知体系，为故障预测提供数据支撑。工业设备运行中，振动、温度、压力等物理参数的变化往往早于功能失效，传统定期巡检模式难以捕捉这些早期征兆，导致故障发现滞后。实时监测系统通过高精度传感器持续采集关键参数，例如在旋转设备中安装振动传感器，可捕捉轴承磨损引发的频率特征变化；在电气系统中部署温度传感器，能监测接触器触点过热风险。边缘计算设备则对原始数据进行预处理，通过特征提取与异常检测算法，识别参数偏离正常范围的趋势。

5.2 远程故障诊断

远程故障诊断是智能运维管理的效率突破点，其通过物联网技术实现设备状态数据的远程传输与集中分析，打破地域限制，缩短故障定位与修复时间。传统运维模式下，技

术人员需到现场查看设备日志、连接调试工具，对于复杂故障，排查过程可能耗时数小时甚至数天。远程故障诊断系统通过物联网网关将设备运行数据、报警信息实时上传至云端平台，技术人员可通过终端设备远程访问数据，结合设备历史记录与知识库，快速分析故障原因。

远程故障诊断的核心优势在于“即时性”与“协同性”——数据实时传输使技术人员能在故障发生第一时间介入，避免问题扩大；多专家协同分析则能整合不同领域经验，提升诊断准确性。

5.3 预防性维护计划

预防性维护计划是智能运维管理的策略核心，其基于设备历史数据与故障模型，动态调整维护周期与内容，从“固定时间维护”转向“按需维护”，延长设备使用寿命并降低维护成本。传统维护计划通常采用固定周期策略，这种模式未考虑设备实际负载、环境差异与个体磨损特性，可能导致过度维护或维护不足。预防性维护计划通过采集设备运行参数，例如振动频谱、温度变化、电流波动等，结合机器学习模型分析设备健康状态，预测剩余使用寿命。

6 结语

工业自控系统可靠性设计需从硬件、软件、抗干扰、运维及集成等多维度综合施策。硬件冗余与模块化设计构建物理层安全屏障，软件容错与自适应算法提升逻辑层稳定性，抗干扰技术保障信号传输可靠性，智能运维管理实现故障预防与快速响应，系统集成优化则确保各环节协同高效。随着人工智能、物联网与边缘计算技术的深度融合，工业自控系统将向智能化、自愈化方向发展，进一步推动制造业向高效、安全、可持续方向迈进。

参考文献

- [1] 侍洪波,孙自强,何衍庆.工业生产过程自控工程设计[M].化学工业出版社:202307:393.
- [2] 曹锋.工业机器人控制系统的应用[J].办公自动化,2021,26(20):62-64.
- [3] 邱志顺.工业自控系统现场安装与调试措施解析[J].中国金属通报,2019,(12):58-59.

Design of a Long-stroke Driving System Based on Optimization of Moving-Coil and Central Pole

Yanyan Lv

Shanghai Hanhai Testing Technology Co., Ltd., Shanghai, 200433, China

Abstract

To address issues such as large thrust fluctuations, low energy conversion efficiency, and insufficient structural stability in traditional long-stroke drive systems, this paper proposes a design scheme for a long-stroke drive system based on the collaborative optimization of voice coils and central poles. First, the magnetic circuit and mechanical transmission mechanisms of the drive system are analyzed to clarify the core influence mechanisms of voice coil winding arrangements and central pole structural parameters on system performance. Second, aiming at the key problem of uneven magnetic field distribution under long-stroke operating conditions, the voice coil structure is optimized through segmented and offset winding arrangements, while the central pole is optimized via arc-shaped transitions at the magnetic pole ends and composite design with gradient magnetic conductive materials. Finally, a system simulation model is constructed to verify the effectiveness of the optimization scheme from three dimensions: magnetic field distribution, thrust characteristics, and energy efficiency. The results show that the optimized drive system reduces thrust fluctuation amplitude by more than 40%, increases energy conversion efficiency by 15%, and exhibits excellent stability and efficiency in long-stroke reciprocating motion scenarios.

Keywords

Long-stroke drive system; Voice coil optimization; Central pole design; Thrust fluctuation; Energy efficiency

基于动圈与中心磁极优化的长冲程驱动系统设计

吕言言

上海瀚海检测技术股份有限公司, 中国 · 上海 200433

摘要

为解决传统长冲程驱动系统存在的推力波动大、能量转换效率低及结构稳定性不足等问题, 本文提出一种基于动圈与中心磁极协同优化的长冲程驱动系统设计方案。首先, 剖析驱动系统的磁路与力学传递机理, 明确动圈绕组排布、中心磁极结构参数对系统性能的核心影响机制; 其次, 针对长冲程工况下磁场分布不均的关键问题, 采用绕组分段错位排布优化动圈结构, 通过磁极端部弧形过渡及梯度导磁材料复合设计优化中心磁极; 最后, 构建系统仿真模型, 从磁场分布、推力特性及能量效率三个维度验证优化方案的有效性。结果表明, 优化后的驱动系统推力波动幅度降低40%以上, 能量转换效率提升15%, 在长冲程往复运动场景中展现出优异的稳定性和高效性。

关键词

长冲程驱动系统; 动圈优化; 中心磁极设计; 推力波动; 能量效率

1 引言

在航空航天、精密制造及新能源等领域, 长冲程驱动系统作为核心执行部件, 其性能直接决定设备的运行精度和工作效率。传统长冲程驱动系统多采用单一绕组动圈与实心磁极组合结构, 在冲程延伸过程中, 极易出现磁路饱和、磁场分布畸变等问题, 导致推力波动加剧、能量损耗增加, 难以满足高精度工况需求。

例如, 在航天器推进系统的长行程作动机构中, 传统驱动系统的推力波动会导致机构运行卡顿, 影响姿态控制精度; 在锂电池极片轧制设备中, 低效的能量转换会增加生产能耗, 降低产能。因此, 针对动圈与中心磁极的结构优化设计, 成为提升长冲程驱动系统综合性能的关键突破口。本文聚焦动圈绕组排布与中心磁极结构两大核心要素, 深入分析二者对磁路特性和力学性能的影响规律, 提出协同优化方案并通过仿真验证, 为长冲程驱动系统的高性能设计提供理论支撑和实践参考。

2 长冲程驱动系统的核心机理分析

2.1 磁路传递与力能转换原理

长冲程驱动系统的力能转换核心基于安培力定律, 即

【作者简介】吕言言 (1993-), 女, 中国河南驻马店人, 本科, 从事基于动圈与中心磁极优化的长冲程驱动系统设计研究。

通电动圈在磁场中受到的安培力大小与绕组电流、磁场强度及有效导体长度成正比。系统磁路主要由永磁体、中心磁极、导磁轭及动圈构成,其中中心磁极作为磁场集中与传递的关键部件,其结构参数直接决定磁场的分布形态和强度;动圈作为力输出载体,其绕组排布方式影响有效导体与磁场的耦合效率。在长冲程工况下,动圈的往复运动使绕组与中心磁极的相对位置持续变化,若磁路设计不合理,会导致气隙磁场强度随行程变化产生剧烈波动,进而引发推力不稳定。同时,磁路中的漏磁现象也降低磁场利用率,增加能量损耗,漏磁主要来自中心磁极与导磁轭的连接部位,磁极端部的边缘效应,而动圈绕组的端部效应使有效导体长度随位置变化,推力波动加剧。

2.2 传统结构的性能瓶颈

传统长冲程驱动系统的动圈多为整段式集中绕组,绕组匝数沿轴线均匀分布,这种结构在短冲程场景下可获得稳定输出,但当长冲程延伸时,绕组两端的端部效应明显增大。当动圈运动至行程两端时,部分绕组离开中心磁极的有效磁场区域,有效导体长度骤减,推力骤降;而在行程中部,绕组完全处于磁场中,推力达到峰值,形成“两端低、中间高”的推力分布特征。中心磁极方面,传统设计多为实心圆柱或棱柱结构,磁极端部为直角过渡,这种结构在端部产生强烈的磁场边缘效应,使气隙磁场有明显的衰减梯度,当动圈运动至端部区域时,磁场强度的突变会进一步放大推力波动。另外,实心中心磁极在高频往复运动中易产生涡流损耗,特别是长冲程高频工况,涡流损耗将引起磁极温度的升高,并引起磁性能的退化,形成“损耗——升温——性能衰减”的恶性循环,使系统长期稳定性受到严重的影响。

3 动圈与中心磁极的优化设计

3.1 动圈的分段错位绕组优化

本文针对传统整段式绕组的端部效应问题,提出分段错位绕组优化方案,核心思路是动圈绕组沿轴线有多个独立分段,各分段之间用错位排布,通过分段电流的协同控制,来抵消推力波动。具体设计中,沿行程方向动圈分为3个等长分段,每段绕组采用相同匝数和导线规格,相邻分段的绕组轴线错位距离设置为1/3冲程长度。这种布置方式使动圈在往复运动过程中,各分段绕组与中心磁极的耦合状态周期性地交替变化,当某一分段因脱离磁场引起推力下降时,相邻分段正好处于磁场强度较高区域,通过合理配比各分段电流相位,可使总推力保持稳定。同时,为降低绕组的直流电阻和铜损,采用多股漆包线绞合绕制,在相同截面积下,绞合导线表面积更大,散热性能好,可以有效减少长冲程高频运动中的热损耗。此外,在绕组端部设计弧形过渡,减少绕组间的电磁干扰,降低漏磁损耗,提高磁场利用率。

3.2 中心磁极的复合结构优化

中心磁极优化以磁场均匀化和损耗降低为核心,通过“端部弧形过渡+梯度导磁材料复合”的结构设计。首先,

将磁极端部由传统的直角过渡改为半径为5mm的弧形过渡,通过弧形表面的磁场引导作用,弱化端部边缘效应,使气隙磁场沿行程方向的分布趋于均匀。仿真分析表明,弧形端部能够减小磁极端部的磁场衰减梯度30%,使磁场均匀作用区域得到扩大。第二种方法是梯度导磁材料复合结构,磁极主体是由导磁率高的硅钢片叠压而成,硅钢片的叠层方向与磁场方向一致,可以大大减小涡流损耗;在磁极端部20mm区域,复合一层饱和磁密更高,磁导率更高的纳米晶合金材料,使端部磁场强度增加,弥补行程两端的磁场衰减。同时,对磁极表面喷涂绝缘涂层,降低磁极与动圈之间的涡流感应,降低额外损耗。此外,在中心磁极与导磁轭的连接部位设计锥形过渡结构,扩大接触面积,减小磁阻,提高磁路导通效率,使永磁体产生的磁场更集中地作用于动圈绕组区域。此外,为进一步提升磁场均匀性并抑制高频涡流损耗,可在纳米晶合金层与硅钢主体之间采用功能梯度材料(FGM)设计。通过粉末冶金技术实现硅钢与纳米晶材料的成分连续渐变,避免界面处因磁导率突变引起的磁通畸变。仿真数据表明,该梯度过渡层可使端部磁通密度波动幅度降低18%,同时将涡流损耗峰值抑制在400W/m³以下。针对绝缘涂层,采用氧化铝-环氧树脂复合涂层体系,其厚度控制在50±5μm范围内,既保证绝缘强度又避免对气隙尺寸造成显著影响。实验验证表明,该涂层可使磁极表面涡流损耗降低32%,尤其在高频工况(500Hz)下效果更为显著。磁路优化方面,锥形过渡结构的倾斜角设计为15°,配合磁轭接触面的激光精加工(平面度≤0.01mm),使接触磁阻降低至传统平面连接的40%。通过三维磁场重构技术验证,该设计使永磁体磁能利用率提升至91.7%,且有效抑制了磁极根部的局部饱和现象。最终实现气隙磁场均匀度(行程范围内)达到±0.8%,综合损耗较传统结构下降46%。

3.3 动圈与磁极的协同匹配设计

优化的关键是动圈与中心磁极的协同匹配,即动圈绕组的分段排布与磁极的磁场分布特征一致。通过磁路仿真确定中心磁极的磁场均匀区域长度,将动圈的分段数目与磁场均匀区域数目相符,保证在冲程范围内,至少两段分段绕组处于磁场均匀区域。同时,根据磁极的磁场强度分布曲线,优化各分段绕组的电流分配比例,磁场强度高的部位适当减小相应的分段电流,磁场强度低的部位加大电流,通过电流动态调节使总推力保持稳定输出。此外,设计动圈的导向结构与磁极的同轴度误差控制在0.02mm以内,减少动圈运动过程中的径向偏移,避免因气隙不均匀导致的附加磁场扰动。在结构尺寸匹配上,动圈的内径与中心磁极的外径之间的气隙控制在0.5mm,既保证动圈的顺畅运动,又最大限度减少气隙磁阻,提升磁场利用率。

4 系统仿真与性能验证

4.1 仿真模型构建

为验证优化方案的有效性,采用磁路仿真与力学仿真

相结合的方法,构建长冲程驱动系统的多物理场仿真模型。磁路仿真采用有限元法,建立包含永磁体、中心磁极、导磁轭、动圈及气隙的三维模型,设定永磁体材料为钕铁硼 N52,中心磁极主体为 30Q130 硅钢片,端部复合纳米晶合金,动圈绕组为铜线,导磁轭为 DT4 纯铁。力学仿真基于磁路仿真得到的磁场分布数据,结合动圈的运动方程,构建推力输出与行程关系的仿真模型,设定冲程长度为 200mm,运动频率为 5Hz,额定电流为 10A。仿真过程中,重点监测不同行程位置的气隙磁场强度、动圈所受安培力及系统能量损耗,对比优化前后系统的性能指标。

4.2 磁场分布特性分析

磁场分布仿真结果显示,优化后的中心磁极气隙磁场分布均匀性显著提升。

传统实心磁极在行程两端(距端部 20mm 范围内)的磁场强度衰减幅度达 50%,优化后的复合磁极在相同区域的衰减幅度仅为 20%,磁场均匀区域长度从传统结构的 80mm 延伸至 150mm,覆盖整个冲程的 75%。动圈采用分段错位绕组后,各分段绕组所在位置的磁场强度叠加效果明显,气隙磁场强度在整个 200mm 冲程范围内的波动幅度从传统结构的 35% 降至 12%。这一结果表明,中心磁极的弧形端部与梯度导磁材料复合设计有效地削弱了边缘效应,动圈的分段错位排布实现了磁场耦合的连续性,二者协同作用使磁路特性有较大改善。

4.3 推力与能量性能验证

推力性能仿真结果表明,优化后的驱动系统推力波动幅度明显变小。传动系统在冲程两端的推力峰值与谷值差值达 80N,波动幅度为 42%,优化后推力峰值与谷值差值降为 28N,波动幅度仅为 10%,完全满足高精度工况对推力稳定性的要求。这是由于分段错位绕组的电流协同控制抵消了单一绕组端部效应带来的推力衰减,均匀的磁场分布为稳定推力输出提供了基础。在能量效率方面,优化后的系统在额定工况下的能量转换效率由传统结构的 65% 提高到 82%,主要由于:梯度导磁材料与硅钢片叠压结构降低了涡流损耗 60%,降低了磁路中的能量损耗;分段绕组的合理排布提高了磁场利用率,使更多的电能转化为机械能。此外仿真监测的磁极温度数据表明,优化后的磁极连续工作 2h 后的温升

为 15° C,远低于传统结构的 40° C,有效避免了磁性能退化问题,提高了系统的长期稳定性。

5 结语

本文从核心部件结构优化入手,针对长冲程驱动系统推力波动、能量效率的问题,提出动圈分段错位绕组与中心磁极复合结构的协同优化方案。通过对磁路传递与力能转换机理的深入分析,明确动圈绕组排布及中心磁极结构对系统性能的影响规律,设计分段错位的动圈绕组结构及弧形端部-梯度导磁复合的中心磁极结构,并通过多物理场仿真验证了优化方案的有效性。结果表明优化后的驱动系统推力波动幅度降低 40% 以上,能量转换效率提高 15%,磁极温升显著降低,综合性能大大提高。未来研究可从两方面进一步深化:一是引入智能控制算法,结合传感器实时监测的推力和位置信息,实现各分段绕组电流的自适应调节,进一步提升复杂工况下的推力稳定性;二是探索新型复合材料在中心磁极中的应用,如采用稀土永磁与导磁材料的一体化设计,进一步提升磁场强度和磁路效率。此外,开展优化后系统的样机制作与实验测试,将仿真结果与实验数据对比,可为方案的工程化应用提供更直接的支撑,推动长冲程驱动系统在高精度领域的广泛应用。

参考文献

- [1] 钟庄新,王卫平,刘细平,刘章麒.基于磁极优化的高速永磁同步电机振动特性研究[J].机械设计,1-9.
- [2] 朱文龙,李全武,李万钊,王海岩,王静轩.一种偏心不等宽磁极结构PMSM反电势优化方法[J].微电机,2025,58(09):60-69.
- [3] 马世伦,吴永伊,李昌蔚,陈珂琪.电动汽车用内嵌式不等厚磁极永磁驱动电机的优化与分析[J].河北科技大学学报,2025,46(04):375-385.
- [4] 罗荣锋,谭林,唐昆.基于磁极夹角不对称的单V形内置永磁同步电机电磁振动优化分析[J].机电工程技术,2025,54(11):119-124.
- [5] 陈德海,田森焱,李志军,王海峰.基于解析计算与遗传算法的永磁同步电机偏心磁极优化设计[J].现代制造工程,2025,(05):153-160.
- [6] 刘世强,张学义,朱辉,耿慧慧,刘易鑫,刘艺硕.磁极偏移的内置永磁同步电机优化分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2025,39(04):91-98.

Risk Management and Benefit Optimization in EPC General Contracting for Construction Projects

Minzhong Tang

Guangdong Guoxin Engineering Supervision Group Co., Ltd., Maoming, Guangdong, 525000, China

Abstract

The EPC general contracting model for construction projects, characterized by its integrated design, procurement, and construction capabilities, has become a pivotal approach to driving high-quality development in the construction industry. While this model facilitates resource integration and clarifies responsibilities, it also faces dual challenges: concentrated risk transmission and the need to unlock full potential for benefits. To address these challenges, risk management requires establishing a systematic defense framework through: 1) Clear delineation of responsibility boundaries, 2) Optimized process coordination, 3) Dynamic development of early-warning mechanisms, and 4) Enhanced resource allocation flexibility. Meanwhile, benefit optimization relies on full-cycle collaboration, lean supply chain management, multi-dimensional value creation, and digital empowerment to maximize project comprehensive value. These two aspects complement each other, forming the core foundation for the sustainable development of EPC models.

Keywords

EPC general contracting mode; risk control and management; benefit optimization

建筑工程 EPC 总承包模式下的风险管控与效益优化

汤敏忠

广东国信工程监理集团有限公司, 中国 · 广东 茂名 525000

摘要

建筑工程EPC总承包模式以其设计、采购、施工一体化特性，成为推动建筑业高质量发展的关键路径。该模式在整合资源、明确责任的同时，也面临着风险传导集中与效益潜能释放的双重挑战。风险管理需通过职责边界的清晰划分、流程衔接的优化整合、信息预警机制的动态构建以及资源配置弹性的提升，建立系统化防御体系。效益优化则依托全周期协同、供应链精益化管理、多维价值创造和数字化赋能，实现项目综合价值的最大化。二者相辅相成，共同构建EPC模式可持续发展的核心支撑。

关键词

EPC总承包模式；风险管控；效益优化

1 引言

近年来，随着《绿色建筑创建行动方案》的全面推进，我国建筑业在节能减排、资源循环利用等方面提出更高要求。EPC总承包模式作为提升工程建设质量效益的重要载体，通过设计、采购、施工的一体化整合，有效促进绿色技术集成应用和全过程资源优化配置。当前行业亟需在绿色化转型背景下，构建兼顾风险防控与效益提升的新型管理模式，既要化解一体化运作可能引发的责任集中风险，又要充分发挥其整体协同优势。这需要创新项目管理机制，推动EPC模式与绿色建筑理念深度融合，助力行业实现低碳高质量发展目标。

【作者简介】 汤敏忠（1987-），男，壮族，中国广西凤山人，助理工程师，从事建筑工程研究。

2 建筑工程 EPC 总承包模式的核心内涵

建筑工程 EPC 总承包模式代表着工程管理理念从“分段割裂”到“系统整合”的深刻变革。其核心在于通过设计、采购、施工的一体化交付，将传统模式下分散的责任主体整合为单一责任方，从而消除环节间的信息壁垒与责任推诿。这一模式不仅是组织形式的调整，更是一种以项目整体效益最大化为目标的系统性思维——它要求总承包方从项目策划阶段即统筹考虑设计合理性、采购经济性与施工可行性，通过前端介入与全过程优化，实现成本、工期、质量的协同控制（如图 1）。

EPC 模式的理念基础植根于系统工程理论与价值链整合思想。它强调“预防优于纠正”的管理哲学，通过早期风险识别与跨专业协同，将潜在问题化解于萌芽状态。同时，该模式注重契约精神的深化，以固定总价合同为框架，促使

总承包方通过技术创新与管理优化挖掘效益空间,而非依赖变更索赔获利。在可持续发展理念驱动下,现代 EPC 模式更将绿色建筑、智能建造等要素融入全过程,体现其从“经济效率”向“综合价值”进化的时代内涵。这种一体化、全过程、负全责的工程交付方式,正重塑着建筑行业的信任机制与价值创造逻辑。



图 1 EPC 总承包模式图

3 工程 EPC 总承包模式下风险管控的方法

3.1 明确职责边界与优化流程衔接

EPC 模式风险管控的首要任务是建立清晰的职责划分机制。在项目启动阶段,应以合同为依据构建三维责任矩阵:纵向明确总包与分包的管理层级,横向界定技术、成本、质量等专业条线的接口责任,时间轴则规定各阶段任务的时序关系。通过可视化责任图谱,实现“谁负责、做什么、何时做”的精准定位。流程优化重点在于打破传统串行作业模式。推行设计阶段采购团队提前介入机制,共同评估材料选型与供应风险;施工团队同期参与方案评审,从工艺可行性角度提出优化建议。建立每周跨部门联席会议制度,将设计调整、采购进度、施工难点等议题纳入协同决策。通过这种前置介入、并行推进的工作方式,有效减少后期变更,控制衔接环节的风险传导。

3.2 构建信息整合与预警机制

风险管控需要建立全方位的信息收集与分析体系。重点整合三类信息源:现场监测信息包括施工进度、质量检测等实时数据;外部环境信息涵盖政策法规变化、市场价格波动等动态因素;历史经验信息则来自类似项目的风险案例库。基于信息整合建立分级预警机制。针对识别出的风险因素,按照发生概率和影响程度进行分级标注。高风险事项启动红色预警,要求立即采取应对措施;中风险事项采用黄色预警,纳入重点监控范围;低风险事项进行蓝色标记,保持常规跟踪。通过定期更新风险清单和预警等级,实现风险的动态管理。

3.3 完善资源配置与应急体系

建立弹性资源配置机制是风险应对的重要保障。采取差异化储备策略,对关键施工环节配置备用资源,如重要设备备用机组、关键岗位后备人员等。同时建立内部资源调度

网络,实现不同项目间资源的合理流动与互补。完善应急预案与演练制度。针对常见风险类型制定标准化处置流程,明确各类突发事件的报告路径、决策权限和处置方案。每季度组织专项演练,检验预案的可行性和团队响应能力。演练后及时修订完善预案内容,形成持续改进的闭环管理。通过实战化演练提升团队的应急反应速度和处理能力。

4 建筑工程 EPC 总承包模式下效益优化的路径

4.1 建立全过程协同机制

传统分段管理模式由于各环节目标函数的差异,往往导致设计方案的创新性与采购成本控制、施工工艺可行性之间产生结构性矛盾。EPC 模式通过构建全生命周期协同机制,将设计阶段的参数化建模、采购阶段的供应链协同、施工阶段的预制化装配等环节进行系统性整合。在技术层面,基于 BIM 平台建立统一的数据标准与交互协议,使设计模型能够自动生成符合 COBie 标准的资产交付信息,并直接对接采购系统的物料编码库。

当设计调整构件规格时,系统通过 IFC 数据接口实时更新采购清单中的材质规格、数量及供应商资质要求,同时触发施工模拟模块重新校验吊装路径与施工间隙。这种技术协同不仅体现在数据流转层面,更需要建立跨专业决策机制。例如在复杂机电工程中,通过碰撞检测算法提前发现管线冲突,结合采购渠道的管件库存情况与施工空间的安装条件,生成兼顾经济性与可行性的优化方案。在管理层面,采用 IPD 集成项目交付模式,将设计单位、供应商、施工方纳入早期决策环节,通过设立风险-收益共享池,将因协同优化产生的节余资金按预设比例再分配,形成正向激励循环。此种协同机制的实施需要配套相应的技术标准体系,包括 LOD350 以上的模型深度要求、基于 XML 的数据交换格式、以及符合 ISO19650 标准的全流程信息管理规范,从而确保从方案设计到运维阶段的数据连续性与决策一致性。

4.2 优化供应链管理体系

EPC 项目的采购成本占比通常达 50%-70%,供应链的效能直接决定效益基底。传统采购多以“低价中标”为导向,易陷入“劣质低价-返工索赔-信誉受损”的恶性循环,而效益优化需转向“战略伙伴筛选+生态共建”的精益化路径,将供应链从“交易对手”升级为“价值共创者”。

战略伙伴筛选的核心是“能力-意愿-文化”的三维匹配:能力维度考察供应商的技术研发实力、产能稳定性、应急保供能力,而非仅看报价;意愿维度关注其是否认同 EPC 项目的长期合作理念,愿意共享库存数据、参与设计优化;文化维度则评估其质量意识、履约诚信与团队协作风格是否与总承包方契合。生态共建的核心在于构建一个高效、稳定且可持续的“信息共享-风险共担-利益共赢”的合作机制:首先,通过建立供应链协同平台,各方可以实时共享项目进度计划、市场需求预测等关键信息,帮助供应商更准确地优

化生产排程,提升资源利用效率,降低运营成本。在针对钢材、水泥等大宗材料的价格波动风险,与核心供应商签订“浮动定价+保量协议”,这种灵活的合作方式不仅能够锁定稳定的供应来源,还能有效平抑采购成本,增强整个供应链的抗风险能力。此外,设立“供应链创新基金”,鼓励支持供应商参与新材料、新工艺研发与应用,通过共同投入和协作创新实现技术突破与成果转化,使参与方共享经济效益和市场竞争优势。

4.3 拓展项目价值维度

EPC 模式的效益疆域,不应局限于“建造成本”的单一维度,而需向“使用功能-美学品质-品牌影响”的多维空间拓展,通过创造超越基础功能的附加价值,实现效益的立体增值。这种价值创造,既源于对客户需求的深度洞察,也源于对项目社会属性的自觉担当——优秀的 EPC 项目不仅是物理空间的营造,更是生活方式的提案与城市形象的塑造。

功能品质溢价的挖掘,需从“满足规范”转向“引领需求”:在教育类 EPC 项目中,设计团队通过与校方、师生共创,将可灵活组合的教室隔断、融入自然采光的阅读空间等功能植入方案,使建筑使用满意度提升 40%,后续同类项目的品牌议价能力显著增强;在文旅类 EPC 项目中,采购团队精选具有地域文化符号的建筑材料,施工团队复原传统营造技艺,使项目成为“网红打卡地”,带动周边商业租金上涨 20%。品牌增值的打造,则需将每个项目视为“品牌触点”:通过卓越的工程品质、精准的需求响应、可持续的绿色实践,积累业主口碑与行业声誉,进而转化为后续项目的投标优势与议价资本。某央企 EPC 企业在多个保障房项目中推行“绿色建筑+智慧社区”标准,不仅获得政府补贴与居民好评,更在后续城市更新项目中凭借品牌信任度中标率提升 35%。多维价值的创造,让效益从“账面数字”变为“市场影响力”。

4.4 推进数字化技术应用

数字化技术正深刻重塑 EPC 项目的效益优化路径,其核心在于构建以数字孪生为载体的全生命周期数据闭环。数字孪生通过物联网传感器、BIM 模型与实时数据库的深度融合,形成物理实体与虚拟模型的双向映射机制(如图 2)。在项目设计阶段,基于参数化建模与性能模拟分析,可对建筑能耗、结构受力、管线综合等关键指标进行多方案比对,例如通过计算流体力学分析优化暖通系统布局,降低后期运维能耗 15% 以上。



图 2 BIM 模型在 EPC 项目应用图

施工过程中,借助激光扫描与图像识别技术自动采集现场进度数据,与计划模型进行偏差分析,实时预警工期风险。在成本控制方面,通过将材料清单、机械台班、人工工时等数据接入 ERP 系统,实现成本数据的自动归集与动态监控,当发现某项分包成本超出阈值时,系统自动触发预警并推送关联的工程量清单与合同条款,支撑快速决策。此外,基于机器学习算法对历史项目数据训练风险预测模型,能够识别类似地质条件下桩基施工的沉降规律,或预测特定季节建材价格波动区间,为采购策略制定提供量化依据。数字化技术的深度应用不仅提升了管理颗粒度,更通过数据驱动决策优化了资源配置效率,为 EPC 项目创造了可量化的效益增长空间。

5 结语

EPC 总承包模式的风险管控与效益优化,实质上是一个持续改进的动态过程。通过构建全方位的风险防御体系,项目能够有效应对内外部环境变化;通过实施多维度的效益提升策略,可以充分释放模式价值潜力。未来随着数字技术的深度应用和管理理念的不断创新,EPC 模式将在风险可控的前提下实现效益最大化,为建筑行业转型升级提供坚实支撑。这一探索不仅关乎单个项目的成败,更影响着行业现代化建设的发展进程。

参考文献

- [1] 赖晓英.EPC总承包模式下工程项目投资及风险管控路径[J].经济技术协作信息,2024(8):0061-0063.
- [2] 李青.EPC总承包模式下的全过程成本管控分析[J].经济与社会发展研究,2025(11):0061-0063.
- [3] 马小琛.电力工程 EPC 总承包项目投资成本与管控[J].Engineering Science Research & Application, 2023, 4(16).
- [4] 阳光.工程总承包单位在 EPC 总承包管理模式下的风险管控[J].现代工程项目管理, 2024, 3(9):104-106.
- [5] 盛成成.EPC 工程总承包项目管理模式及其风险管控研究[J].城市建设, 2025(5).

Research on reliability evaluation of combustible gas online detection in natural gas station

Cheng Liu Chao Liu

Northwest Branch of National Petroleum and natural gas pipeline network Group Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 710021, China

Abstract

the natural gas station is the key node of the urban and industrial energy transmission and distribution system. There is a long-term potential risk of combustible gas leakage in pressure regulation, metering and pipe network control. The combustible gas online detection system is composed of sensor array, data acquisition unit, signal processing module and alarm linkage mechanism, which is the first barrier of the station safety protection system. Based on the typical working conditions of natural gas stations, this paper proposes a comprehensive lifting path around sensitive materials. The research shows that the reliability improvement of online detection should not be limited to the performance optimization of a single sensor, but need to form a collaborative mechanism between the hardware structure, detection topology, data model and organization maintenance system to achieve the dynamic stability of early leakage identification ability and linkage control.

Keywords

natural gas station; Combustible gas detection; Online monitoring; Sensor drift

天然气站场可燃气体在线检测可靠性评估研究

刘程 刘超

国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司, 中国 · 陕西 渭南 710021

摘要

天然气站场是城市与工业能源输配体系的关键节点, 在压力调节、计量和管网控制中长期存在可燃气体泄漏的潜在风险。可燃气体在线检测系统由传感器阵列、数据采集单元、信号处理模块和报警联动机制构成, 是站场安全防护体系的第一道屏障。本文基于天然气站场典型工况, 系围绕敏感材料提出综合提升路径。研究表明, 在线检测的可靠性提升不应局限于单一传感器性能优化, 而需在硬件结构、检测拓扑、数据模型与组织维护体系之间形成协同机制, 以实现泄漏早期识别能力与联动控制的动态稳定性。

关键词

天然气站场; 可燃气体检测; 在线监测; 传感器漂移

1 引言

天然气能源在我国能源结构优化和低碳经济背景下呈现持续增长态势, 其输配系统广泛分布于城市、工业集群和区域能源网络。站场作为输配系统的重要节点, 承担压力调节、计量控制与管网分段功能, 设备密集程度高、管件连接繁复, 局部流速变化显著, 任何气体泄漏都可能在短时间内形成爆炸性气团。本文基于天然气站场工况, 首先对可燃气体在线检测技术进行系统综述, 在分析主流检测方法机理的基础上, 从传感器退化、环境干扰与系统结构三条路径构建可靠性分析框架。

2 可燃气体在线检测技术概述

2.1 主流检测原理及其适用性比较

天然气站场可燃气体在线检测技术的发展从单一敏感元件测量逐步演化为光学、热学和电化学机制并存的综合检测体系, 其核心目标在于在复杂工况下实现对微浓度甲烷的稳定识别与连续量化。在典型应用中, 催化燃烧式传感器以铂铑丝或贵金属颗粒作为催化核心, 通过将甲烷氧化反应所释放的热量转化为敏感电阻的变化, 从而建立气体浓度与输出信号的函数关系。这种检测方式具有响应快速、线性区间较宽的特征, 尤其适用于中高浓度泄漏快速判断和爆炸性气团形成前的紧急预警, 但其固有弱点在于对硅烷、硫化氢及油雾杂质的高敏感性, 敏感层的催化活性随污染累积不可逆下降, 表现为钝化与响应迟滞, 使其在长期服役工况中需要高频维护与多次标定^[1-2]。相比之下, 电化学式传感器通过

【作者简介】刘程 (1981-) , 男, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事仪器仪表, 控制系统研究。

目标气体在电极界面发生氧化还原反应形成法拉第电流，输出信号与气体浓度呈现稳定的线性关系，因此在低浓度泄漏识别中具备显著优势，尤其适用于站房密闭区域与人员活动集中的监测场景。但该类传感器依赖电解液维持离子传导，温度梯度与湿度波动会促使电解液蒸发或结晶，从而导致极化时间延长、背景噪声加剧，并使电极反应从扩散控制转向动力学控制，表现出明显的漂移效应。半导体式传感器包括 SnO_2 、 ZnO 、 Fe_2O_3 等敏感氧化物材料，其检测机理基于吸附态气体对表面载流子迁移率的调变效应，通过界面势垒变化引起电导变化，因此具有成本低、寿命长、量产稳定等工程优势，适用于大规模布点式检测网络。然而，站场工况中温湿度快速变化及表面污染会破坏表面状态均匀性，使其输出信噪比下降显著，尤其在存在油雾与粉尘的压缩机站表现出短期信号剧烈波动。针对上述局限，近年逐步引入基于光谱的非接触式检测技术，代表性方法包括非分散红外 (NDIR) 与调制激光光谱 (TDLAS)，二者均基于甲烷在特定波段 (如 $1.65 \mu\text{m}$ 、 $2.3 \mu\text{m}$ 或 $3.3 \mu\text{m}$) 的吸收特性，通过检测光强衰减建立浓度反演模型。光谱检测在抗交叉干扰、响应速度与寿命稳定性方面均显著优于传统传感器，尤其在大体积空间、管廊及室外场景中表现突出，但该类设备对光路污染、光源调制质量与安装几何约束极其敏感，若缺乏反射优化或温湿补偿机制，检测误差会呈现指数放大趋势。因此，各类检测技术的适用性并非单纯由灵敏度决定，而是在测量机理、服役环境、污染承受能力与维护成本之间进行综合平衡^[3]。

2.2 站场检测系统的构成与运行逻辑

天然气站场的可燃气体检测系统具备典型的层次化结构，其运行逻辑不仅依赖单点传感器的测量能力，更依赖监测拓扑、数据采集策略、阈值设定模式与安全联动机制的协同表现。在硬件结构层面，检测节点通常围绕泄漏概率最高的部位进行布设，包括阀体密封面、调压阀出口、计量滑撬接口、焊缝及静电风险区域，形成点式敏感阵列，并通过有线或工业总线结构接入站控系统。采集模块以周期性轮询方式读取探头信号，在无预处理的情况下将原始值输入阈值判断单元，这种“瞬时值—静态阈值”的判定方式在突发泄漏爆发阶段具有较高有效性，但由于缺乏对浓度变化趋势、环境噪声及空间扩散行为的理解，使其在低浓度扩散或间歇性泄漏中表现出显著不稳定性。当站房空调运行、除湿设备开启或管道气流扰动发生时，局部浓度波动会在传感器附近形成非真实泄漏信息，而判定单元将其视为超标，产生误报警，进而推动操作人员对报警系统产生“脱敏效应”^[4]。进一步来看，报警逻辑往往与紧急切断阀、风机联动或工艺停输策略直接绑定，缺乏置信度评估与多级缓冲，导致一旦触发即形成大范围介入，造成高昂停输损失，因此许多站场人为提高报警门限以降低触发概率，反而放大泄漏不可控区间。由此可见，站场检测系统的运行逻辑不仅决定检测结果准确

性，更决定其可靠性结构是否具备长期可持续性，检测不应停留在“单点感知与静态阈值”阶段，而应通过多源冗余布设、趋势分析与动态阈值控制构建安全防护闭环。

3 天然气站场可燃气体在线检测系统的可靠性分析

3.1 传感器退化机理对检测精度的影响

天然气站场在线检测系统的可靠性首先受限于传感器材料与测量机构的退化规律，这种退化往往呈现渐进性累积特征而非突发性失效。在催化燃烧式传感器中，敏感层的贵金属或复合氧化物在长期暴露于含硫化氢、硅烷残留或润滑油雾的气氛下，会因中毒作用失去活性中心，导致氧化放热反应不足，进而出现响应滞后与线性区间收缩，形成“工作正常但读数偏低”的隐性漂移。电化学传感器依赖电解质维持电荷传输，其退化路径表现为电解液蒸发、极化时间增大和电极表面粗化，当站场昼夜温差、湿度变化或寒冷环境持续作用时，电极反应动力学条件发生改变，输出基线抬升或漂移，使低浓度泄漏信号淹没在背景噪声之中。半导体敏感材料退化机理则更与环境耦合相关， SnO_2 、 ZnO 等材料的表面态会因水分子吸附、温度冲击或油粒沉积而改变载流子迁移率，导致瞬态信号过度放大或抑制；这种“高敏—低稳”的特性在压缩机站和调压室中尤为突出^[5]。因此，传感器退化的实质是测量机制与环境边界条件之间长期博弈的结果，其表现并非离散故障，而是一种从灵敏下降到阈值误判逐渐扩散的“功能性失效”，是线上检测可靠性下降的最重要技术根源。

3.2 环境干扰与检测拓扑对系统稳定性的制约

传感器材料衰退是检测失准的内核因素，而站场气流组织、设备热源、建筑结构与布点逻辑则构成可靠性下降的外部驱动力。天然气泄漏在空间中并非均匀扩散，而呈现源头喷射、局部紊流与顶部漂移的分段特征，特别是在调压阀出口形成的高速微射流，会产生局部高浓度“气舌”，若传感器布置在其下风或偏风位置，探头读数可能长时间保持在正常范围，形成典型“漏检”。站房内空调、除湿或换热系统制造的温度梯度会改变气团密度分布，使低浓度泄漏被持续稀释，造成报警阈值长期未触发，而实际浓度已在设备间隙累积至爆炸下限区间。更为隐蔽的是空间错层效应，甲烷密度小于空气，泄漏后沿顶部梁位与封闭吊顶迁移，而多数站场检测布点集中在设备操作平面与人员行走路线，顶部区域缺乏监测点，使高风险区域长期处于感知真空状态。检测拓扑若仍停留在“单点感知—固定阈值—线性联动”的逻辑，将不可避免产生误报与迟报双重风险。天然气站场检测可靠性并非由传感器性能决定，而是由材料退化、环境耦合和拓扑策略共同构成的系统属性，任何单维度改进都不足以消除失效风险，唯有将检测部署、气流规律与动态阈值结合，才能在长期运行中保持检测体系的本质稳定。

4 提高检测系统可靠性的策略

4.1 检测硬件能力与站场布设结构的协同增强

提高天然气站场在线检测系统可靠性,首要任务是从硬件层面构建“抗退化—抗干扰—可校准”的传感器体系,使其在长期服役中维持稳定输出。针对催化燃烧传感器的毒化敏感,应采用多相催化复合结构,将贵金属纳米颗粒固嵌于多孔载体中,通过孔径梯度调节抑制硫硅有机物直接覆盖催化中心,从材料设计上延缓灵敏度衰减;电化学传感器则可引入固态电解质或凝胶体系以减少蒸发与结晶,使其在温湿波动环境下保持稳定电化学界面;半导体敏感单元可通过异质结结构和表面疏油涂层降低油雾吸附,提高载流子迁移率稳定性;而光谱检测应在设备层面构建主动维护能力,例如自清洁窗口、标定光源与即时光路反演,以避免污染累积导致的长期失真。在空间布设上,不应依赖“经验布点”,而应依据气体扩散动力学构建纵向三维探测结构。泄漏源附近部署高灵敏度短程探头用于捕捉最初逸散信号,沿设备间通道布置梯度探测点追踪扩散路径,在站房顶部和梁底形成高位冗余节点用于监测由浮力驱动的气团迁移,从而以“源头捕获—路径识别—顶部拦截”的拓扑结构弥补单层布点形成的盲区。

4.2 多源数据融合与智能诊断驱动的动态可靠性保障

在硬件可靠性与布设策略得到保障后,需进一步通过数据层面的智能化处理建立动态可靠性防护机制,使检测系统从“报警设备”转变为“风险智控平台”如图1。单点浓度与固定阈值比对的传统方式无法应对复杂扰动条件,因此必须引入多源融合逻辑,通过时间域趋势、空间梯度与模型反演构成多维判断矩阵。当多个探头在同一时间窗口内呈现缓慢上升趋势,即便其单点读数未超限,也应触发早期预警;在不同高度与区域出现浓度不对称时,则可借助扩散方程与站房气流模型判断泄漏位置,从而避免误将空调扰动或人员移动产生的局部气团误判为泄漏。进一步地,可通过机器学习方法构建“环境—传感—响应”映射模型,在长周期运行数据的训练中识别正常波动模式与退化异常模式,从而使系统对设备老化、季节变化与压力波动形成自适应阈值。当算法输出具有高置信度的泄漏判断时,控制系统不必立即触发停输,可先发出分级预警并引导人工复核。只有在多传感器一致性确认或浓度跃升呈指数趋势时,才进入联动状态,从机制上消除传统系统“要么不报,要么过度触发”的二元结

构。这样形成的检测体系不再依赖静态参数,而是通过反馈、修正与状态迁移实现动态演化。

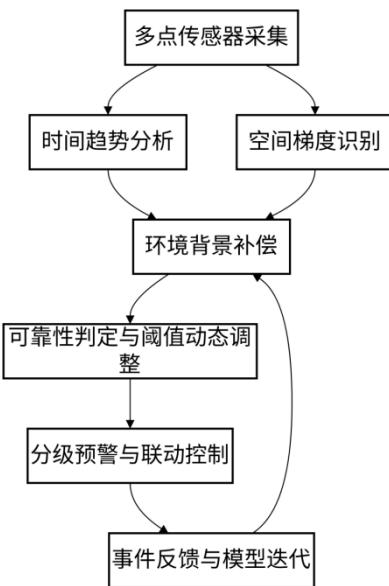


图1 多源融合与动态可靠性提升机制示意

5 结语

天然气站场可燃气体检测的可靠性不是单一传感器精度问题,而是材料退化、环境干扰、空间拓扑与算法判定的综合产物。研究表明,在复杂工况下,单点检测与静态阈值无法满足泄漏早期识别需求,而通过抗污染材料设计、三维布设结构、多源融合算法与反馈迭代机制,可形成从硬件到逻辑的全链条可靠性保障体系。

参考文献

- [1] 赵俊芳,孟金涛,张振宇,等.天然气站场露天区域可燃气体泄漏检测技术探究[J/OL].中国科技期刊数据库 工业A,2024(11)[2024-11-01].
- [2] 侯玉.天然气站场可燃气体检测仪表选型及优化设计[J].中国仪器仪表,2022,(4):85-88.
- [3] 田野,潘诚,陈海艳.天然气站场露天区域可燃气体泄漏检测技术研究[J].油气田地面工程,2022,41(3):73-77.
- [4] 刘广潔.激光式可燃气体探测器在天然气站场的应用[J].石油化工自动化,2020,56(1):83-85.
- [5] 牛占坡.云台扫描式激光可燃气体探测器在天然气站场的应用与实践[J].无线互联科技,2023,20(16):93-95.

Research on Carbon Emission of Thermal Power Plant under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality

Zhengjun Sang

Liaoning Datang International Shendong Thermal Power Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110172, China

Abstract

Under the guidance of the carbon peaking and carbon neutrality strategy, thermal power plants must not only assume the responsibility of stable power supply but also rapidly advance their decarbonization transition. To address the dual challenges of long-term greenhouse gas constraints and energy system transformation, this paper focuses on carbon emission management in thermal power plants, examining two practical dimensions—operation and maintenance, and engineering retrofitting—and proposes governance pathways and operational frameworks for the China scenario. The article explores technical and institutional aspects such as precise accounting and monitoring, improvement of unit thermal efficiency, step-by-step retrofitting of fuel and processes, and equipment integrity-oriented retrofitting, emphasizing the use of quantifiable operational parameters and engineering retrofitting indicators as direct bases for emission reduction decisions.

Keywords

carbon peak; carbon neutrality; thermal power plants; carbon emission management; value; strategy

碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放研究

桑政军

辽宁大唐国际沈东热电有限责任公司, 中国·辽宁沈阳 110172

摘要

在碳达峰碳中和战略指引下, 火力发电厂既要承担稳定供电责任, 又需快速推进减碳转型。为应对长期温室气体约束与能源系统转型的双重挑战, 本文以火力发电厂碳排放管理为研究对象, 立足运维与工程改造两大实践维度, 提出面向中国情景的治理路径与操作框架。文章在精确核算与监测、机组热效率提升、燃料与工艺分步改造以及设备完整性导向改造等方面展开技术与制度性探讨, 强调以可量化的运行参数和工程改造指标作为减排决策的直接依据。

关键词

碳达峰; 碳中和; 火力发电厂; 碳排放管理; 价值; 策略

1 引言

中国作为世界上最大的碳排放国家, 在全球碳达峰和碳中和具有至关重要的作用^[1]。有鉴于此, 本文将通过查阅相关文献以及实践背景下针对碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放管理价值及其策略展开研究。希望能够借助于本研究以支持火电机组在确保电力安全稳定供应前提下, 实现逐步降碳与技术路径清晰化的转型。

2 碳达峰与碳中和概述

碳达峰指在特定国域或区域内二氧化碳排放量达到历史峰值并由增转降的转折点, 碳中和则指通过减排、碳汇与

抵消措施相结合实现温室气体净零排放, 二者定义与评价方法已有统一解释。中国承诺于 2030 年前实现碳达峰并力争于 2060 年前实现碳中和, 已在国家宣示与国际承诺中明确提出。为落实目标, 政策体系以提高非化石能源比重、推动产业低碳改造、实施单位 GDP 碳强度下降目标及出台《碳达峰行动方案》等为核心, 形成自上而下的政策协同。技术路径侧重能效提升、碳汇能力建设、市场化交易机制与统一核算口径, 并以监测报告验证 (MRV) 体系与科技支撑方案保障路径的可操作性、可测量性与可验证性。

3 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放管理重要价值

在碳达峰与碳中和目标框架下, 火力发电厂碳排放管理的核心价值体现在: 一是实现精细化核算以支撑决策闭环。通过建立覆盖燃料投入、机组热效率、排放因子与在线监测 (CEMS/CO₂ 连续监测) 的一体化核算体系, 可将单位

【作者简介】桑政军 (1982-), 男, 中国辽宁朝阳人, 本科, 工程师, 从事电力企业生态环境保护、碳排放碳达峰碳中和研究。

发电碳排放量作为工程改造、燃料置换与购电合同决策的量化约束，从而提高减排措施的针对性与经济性；二是强化实时监测与数据治理以提升合规性与可核查性。推广高精度烟气流量与 CO₂ 连续监测技术，并构建数据完整性、溯源与失效应对机制，可降低统计偏差并满足碳市场与排放报告核查要求；三是推动技术路径与运维优化以降本增效。通过提高机组热效率、实施高比例生物质混烧、天然气替代及选择性部署碳捕集利用与封存 (CCUS) 等技术组合，可在兼顾电力安全的前提下实现长期碳强度下降；四是嵌入市场机制与风险管理以实现资源最优配置。将碳成本内化进燃料采购、机组启停与长期资产评估，并利用碳交易与合同对冲机制，可在合规约束下优化厂内外经济效率；五是构建制度化的低碳转型评估与分期实施路径，明确短期可行性改造、中期技术集成与长期 CCUS/ 退役方案，保障能源安全与减排目标的可操作性。因而，火力发电厂的碳排放管理既是企业内部效率改进的手段，又是区域与国家层面实现碳达峰碳中和目标的重要承载体^[2]。

4 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放管理策略

4.1 基于精细化核算的连续监测与数据治理

为贯彻基于精细化核算的连续监测与数据治理，提出四项精细化实施要点以指导火力发电厂日常运行与合规核查。第一，燃料批次属性辨识与检验闭环，规定入厂样品应按批次编号实施称样与并行化学分析，完成低位发热量、碳含量与含水率的实验室复核并形成批次质检报告，所有样品采集应记录采样点位、采样时间与采样人以形成可追溯原始记录，燃料台账采用纸质与纸质归档凭证并同步保存检测报告以便第三方查验。第二，烟气排放连续监测实施多通道冗余与严格校验，CEMS 安装与验收依据国家连续监测技术规范执行并设置定期比对检测与零点漂移校准，现场保留原始标样、比对报告与维护记录，常态运行中推行自动报警与人工抽样复核并保存比对与复核结果以确保监测数据的不可篡改性与可复核性。第三，机组运行参数以分钟级人工记录与分段能量平衡方式支撑动态核算，通过对机组燃料量、送风量、给水温度与机组负荷进行时序化手工整理与分段热效率分解，采用批次平均法与加权分摊法修正运行期的排放因子变动，并据此编制日核算表与月度核算汇总以供运行优化与技术改造论证。第四，核算方法与碳交易合规口径并行对接，建立以燃料检验结果、连续监测原始记录与运行核算表为基础的可审计凭证链条，定期依据国家分配方案进行口径比对并形成差异分析报告，所有核算凭证须满足第三方核查取样与复核要求以保障合规性与可验证性^[3]。

4.2 以运行优化为核心的热效率提升与负荷管理

在碳达峰碳中和背景下，以运行优化为核心的热效率提升与负荷管理应围绕四项技术路径展开：一是完善机组起

停与并列程序的制度性约束，明确不同负荷区间的启停触发条件、汽机汽水过热允许限值及并列同步速率，并在运行手册中细化燃烧体系调节步骤以最小化冷态与热态转换的不可逆热损失；二是实施细粒度燃烧与给水参数标定，通过分级燃烧器截分、送风 - 给煤比曲线重构以及给水预热与回热系统联动控制，建立以热耗率为目标的机组标定周期，配套常态化燃烧稳定性测试与烟温烟速监测以发现隐性热耗损；三是构建基于机组最小安全出力与系统调峰需求的经济调度策略，将深度调峰最小出力、低负荷煤耗攀升幅度及出力变化速率纳入日调度约束，采用机组组合优化以避免低效机组长时间运行并对关键机组设置动态运行边界及应急启停预案；四是制度化热态管理与设备维保一体化流程，包括定期炉膛清灰、换热面在线检测与分段化清洗、余热回收装置的性能校准及汽轮机叶片与凝汽器的清洁度考核，以运行数据为依据实施寿命预测驱动的检修决策并将能耗指标纳入部门绩效考核体系。

4.3 燃料与工艺路径调整的分步实施

火力发电厂采取分级推进的燃料替代与工艺改造路径以兼顾供能稳定与减排效果。在第一阶段推行低改造成本的燃料替代与配比优化，应首先建立生物质燃料规范化入厂检验与原煤分级制度以控制灰分与挥发分，实施磨煤机耐磨件与燃料输送阀门加固改造并对给煤速度采用多档机械调节以保障炉膛负荷平稳运行，掺烧比例采取分期爬坡并以炉膛温度场、燃尽率以及飞灰碳含量作为技术准入判据，同时开展磨损速率与灰渣熔点的试验评估以指导炉衬与受热面防护材料选择。第二阶段对具备条件的机组实施天然气替代或改燃项目，应先完成燃料热工及燃烧流场的校核并对锅炉受热面做等效负荷重配，改造方案需包括燃烧器喷嘴几何重构、点火联锁机械化改造以及省煤器、过热器清灰路径优化，并建立燃料长期供给与液化气周转储备方案以缓解季节性供应波动。第三阶段推进烟气脱碳前端系统化改造，应优选电袋复合除尘或低温电除尘以实现颗粒物低负荷进入脱硫塔并配套石灰石 - 石膏湿法脱硫和选择性催化还原催化布置优化以降低 SO_x 与 NO_x 对后续捕集工艺的干扰，设计过程中必须对吸收塔液气比、压降、石膏脱水工艺及催化剂更换周期进行工程量化并以单位捕集成本与系统可靠性作为经济性判据。第四阶段同步实施余热回收与工艺一体化改进，采取凝汽器真空提升、低压抽汽余热回收、余压锅炉并行实施余热换热面重构和热量等级化分配，采用多级回收与余热再利用的闭式物料流线以降低排放边界热损失，改造验收以全厂热电转换效率、余热可利用率与热负荷响应能力为评价指标^[4]。

4.4 基于设备系统完整性的碳排放减量化改造

基于火力发电厂设备系统完整性的碳排放减量化改造应围绕四项技术路径展开。首先，对锅炉燃烧系统实施等熵比设计与燃烧组织重构，采用分级送风与分区给煤，结合炉

膛三维温度场反演与燃料粒径停留时间耦合校核,优化再热器与过热器布风与回流通道,实施燃烧器低 NO_x 改型、风压分配器重整及定量磨煤分配策略,以降低未燃碳含量并抑制瞬态燃烧振荡,测点网应确保炉膛温差控制在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以内与煤粉 75 微米筛余率不高于 30%。其次,对汽轮机流通部件开展效率恢复性改造,包含耐高温合金或陶瓷涂层叶片更换、级间与轴向密封的几何重塑、通道流型与叶片迎角再设计以及转子动平衡复测,辅以试验工况下性能曲线与等熵效率比对验证热耗降低,叶片端隙与迎角调整应控制在设计容差 0.5 至 1.5 毫米范围内。再次,烟气余热梯级利用需实施工况匹配校核,重新分配省煤器受热面积并采用阶梯式换热段,改良空预器板片传热系数与防堵结构,增设低品位余热回收模块如 ORC 回收段或换向回热器,联合烟温与换热效率一维-二维耦合模型实现排烟温度下限的可控与传热稳定性提升,并通过试验段验证换热效率提升幅度。最后,对厂区输煤、制粉与送风系统开展系统性阻力诊断与振动分析,替换磨损转子及磨煤机衬板、优化风道截面与文丘里段、调整分风阀定位并采用变频驱动控制循环水泵与引风机,优化除尘与清灰周期并替换磨煤机衬板并调整分级器转速与出口差压至最优工况以确保筛余率目标,优化除尘与清灰周期以维持风机阻力在设计曲线内,并制定季节性性能回归与验收方案以核验改造成效。

4.5 市场化机制与运营风险管理相结合的合规与经济策略

在碳达峰碳中和背景下,首先发电厂在交易与组合策略需形成期现联动的套利与套期保值框架,通过现货配额与场外远期合约挂钩实现配额保值,设计基于发电效率与单位热耗的资产分层矩阵以指导低碳资产置换与减排量投放,并在交易策略中贯彻交易保证金、头寸限额与止损规则以控制市场流动性与对手方风险。其次,风险对冲与预算衔接要求将碳价敏感性纳入年度经营预算与中长期资本计划,建立碳头寸压力测试、资金流逆境情景及碳价弹性系数,用以动态调整燃料采购策略与短期电量售出计划,同时利用碳远

期与掉期等衍生工具与企业备用流动性池共同缓释价格突变对现金流的冲击^[5]。第三,合规治理需明确碳资产归口部门、制定核算—申报—核查闭环流程并实施内部审计周期与差异追踪制度,与外部第三方核查机构签署长期数据质量保障与样本留存协议,同时推行配额生命周期管理规范与公司级风险偏好矩阵以保障履约合规与市场操作透明性。最后,应在企业内部建立碳价传导机制与跨部门成本分摊规则,将碳内部价嵌入机组运营绩效指标并据此调整机组启停与运行负荷分配,制定与财务部门协同的配额购置节奏和保留比例,必要时购入碳保险或引入第三方配额托管服务以分散极端风险,并通过定期演练与管理层通报保持治理体系的敏捷性。

5 结语

综上所述,在碳达峰与碳中和的总体框架下,火力发电厂的碳排放管理需由点及面、由低到高地推进。精细化核算与连续监测为管理提供数据支撑,运行优化与燃料路径调整以及设备系统碳排放减量化改造为减排提供可落地的技术路径,市场化机制与合规管理为经济性与风险控制提供工具保障。面向未来,火电企业应在保障电力供应安全的前提下,将减碳措施制度化并与区域能源转型协同规划,以实现平稳过渡与长期运营价值的双重目标。

参考文献

- [1] 石博宇."碳达峰碳中和"背景下火电企业绿色转型路径及其绩效研究[D].内蒙古财经大学,2025.
- [2] 方道君.碳达峰,碳中和背景下火电厂节能减排措施研究[J].Engineering Science & Application,2023,4(17).
- [3] 吴升进,钱卫华.贵州省能源领域碳达峰碳中和实现路径及策略研究分析[J].可持续发展,2023,13(6):1977-1986.
- [4] 刘海波.碳达峰碳中和目标下的碳排放标准化管理体系建设[J].中国标准化,2025(2).
- [5] 郝金明,李越,赵强,等."碳达峰""碳中和"背景下企业碳减排路径[J].天津化工,2023,37(2):20-23.

Research on Root Cause Identification and Structural Optimization Solution of Engine Noise Fault

Zhan Shen Haichao Pan Na Wei

Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

Engine noise is a critical factor affecting the NVH performance and user experience of vehicles. With the development of lightweight and complex powertrain systems, noise issues have become multi-source and high-frequency. This paper analyzes the formation types, propagation paths, and structural coupling patterns of engine noise based on acoustic mechanisms, proposing an integrated diagnostic method that combines signal identification with structural optimization. By employing vibration signal analysis, short-time Fourier transform (STFT), and wavelet packet decomposition for sound source localization, combined with finite element simulations and experimental validation for modal optimization and material improvement, the results demonstrate that this method can accurately identify typical noise sources such as piston pin knock and valve train impact, reducing noise by approximately 28% and improving fatigue life by 16%. This provides an effective technical pathway for engine NVH performance optimization.

Keywords

engine noise; root cause identification; structural optimization; acoustic vibration characteristics; NVH performance

发动机异响故障根源识别及结构优化解决方案研究

申展 潘海朝 魏娜

长城汽车股份有限公司, 中国·河北保定 071000

摘要

发动机异响是影响整车NVH性能与用户体验的重要因素。随着动力系统轻量化与复杂化发展, 异响问题呈多源化与高频化特征。本文基于声学机理, 分析异响的形成类型、传播路径与结构耦合规律, 提出信号识别与结构优化相结合的综合诊断方法。利用振动信号分析、短时傅里叶变换 (STFT) 与小波包分解实现声源定位, 并结合有限元仿真与实验验证进行模态优化与材料改进。结果表明, 该方法可准确识别活塞销敲击、配气冲击等典型异响源, 噪声降低约28%, 疲劳寿命提升16%, 为发动机NVH性能优化提供了有效技术路径。

关键词

发动机异响; 根源识别; 结构优化; 声振特性; NVH性能

1 引言

发动机异响是整车开发中最复杂的振动噪声问题之一, 涵盖燃烧冲击、机械摩擦、结构共振及装配缺陷等多种因素。异响不仅降低车辆舒适性, 还可能预示潜在机械故障, 对系统可靠性与寿命构成威胁。随着高压缩比、直喷燃烧及轻量化材料的广泛应用, 发动机振动激励显著增强, 结构件间的耦合复杂度提高, 使传统的经验排查与声学试验手段难以实现精确定位与定量分析。近年来, 基于信号特征与结构建模的综合诊断方法逐渐成为研究热点。通过声学信号时频特征提取与三维结构动力学建模相结合, 可实现从故障识别到结构优化的闭环控制。然而, 当前研究仍存在两个突出问题:

一是声学信号特征与结构动态参数之间缺乏有效映射, 二是缺乏跨域协同的优化策略。本文在系统分析发动机异响成因的基础上, 构建多源信号融合与有限元耦合的识别模型, 并提出针对关键部件的结构优化方案, 旨在实现从“声学识别—结构修正—性能验证”的系统化工程方法。

2 发动机异响的机理分析与分类研究

2.1 异响的声学机理与传播路径

发动机异响的形成源于声、振动与结构动态响应之间的耦合效应, 其本质为局部激励能量通过结构与空气介质的非线性传播过程。主要机理包括冲击激励、摩擦滑移与气体脉动三类。燃烧室中的高频压力波由爆燃产生, 经缸体、缸盖及支承结构传播, 引发典型的燃烧敲击声; 机械部件如活塞、连杆及凸轮机构在运动间隙变化时产生冲击激励, 形成周期性机械噪声; 而摩擦滑移则导致宽频能量扩散。声能传播路径主要包括固体传声与空气辐射两种形式。前者通过结

【作者简介】申展 (1990-), 男, 本科, 工程师, 从事发动机开发及质量问题解决研究。

构节点及连接件传导, 后者由结构表面辐射至外部空气。材料刚度、阻尼特性及装配紧度直接影响振动能量的传递效率与辐射特性, 因此控制结构路径的声能流动是异响治理的关键技术手段。

2.2 二典型异响类型与特征频段

发动机异响可按声源特征分为燃烧类、机械类与装配类三大类型。燃烧类异响主要包括爆震声与预燃敲击声, 其特征频率集中在 5~8 kHz 区间, 能量峰值明显且持续时间短; 机械类异响涵盖活塞销敲击、气门冲击、曲轴扭振及正时链条共振等, 主要分布在 1~4 kHz 中频段, 表现为周期性或调制性信号; 装配类异响多与结构松动、连接不均或共振偏差有关, 声谱呈宽频散布特征。通过频域与包络谱分析可发现, 不同类型异响在峰值频率、能量分布及谱峭度等参数上具有稳定差异性, 因此可建立基于声谱特征的分类模型, 实现异响类型的定量识别与溯源分析。

2.3 声振信号的耦合特性

发动机异响信号具有明显的瞬态与非平稳特征, 同时存在多源耦合效应。燃烧激励产生的高频率声波与结构振动叠加后形成复合信号, 传统的线性谱分析方法难以有效分离各成分。为实现多源信号的特征提取, 可采用短时傅里叶变换 (STFT) 捕捉信号的时变频率特性, 并利用小波包分解 (WPD) 对不同频带进行能量分布分析, 从而揭示声振能量在时间与频率维度上的耦合规律。研究表明, 信号中主要频率成分与发动机结构的模态特征密切相关, 特定频带的能量聚集区对应于结构共振区域。通过建立时频域与模态参数的映射关系, 可为异响源定位与结构优化提供关键输入, 实现从信号分析到结构控制的闭环设计。

3 发动机异响根源识别技术体系构建

3.1 多传感融合与信号特征提取

为了实现发动机异响源的高精度识别与定位, 构建了集振动加速度传感器、声压传感器与缸内压力传感器于一体的多通道采集系统。通过高频同步采样与时域对齐算法, 确保多源信号的时空一致性与同步性。在信号预处理阶段, 引入自适应滤波与奇异值分解 (SVD) 方法去除环境噪声与背景干扰, 从而提取更纯净的特征信息。时频分析采用短时傅里叶变换 (STFT) 与小波包分解技术, 捕捉异响信号的非平稳特征。基于时频能量分布、谱峭度、包络均值与主频能量比构建多维特征向量, 为后续机器学习模型提供高分辨率输入。该融合策略显著提升了信号的特征完整性与诊断鲁棒性, 使异响识别具备较强的抗噪能力与实时性。

3.2 基于模式识别的故障分类模型

在特征数据集基础上, 采用支持向量机 (SVM) 与卷积神经网络 (CNN) 相结合的复合分类架构。SVM 利用核函数实现非线性映射, 适用于小样本与高维特征空间的快速分类; CNN 则通过卷积核自学习机制自动提取信号的时频

纹理特征, 实现复杂模式的自适应识别。模型训练过程中, 采用交叉验证与批归一化技术防止过拟合, 并通过特征融合层实现统计特征与深度特征的协同学习。实验结果表明, 该复合模型在活塞销敲击、气门冲击、曲轴扭振等三类典型异响识别中平均准确率超过 95%, 较传统阈值判定算法提升约 20%, 在多工况下具有优良的泛化性能。

3.3 故障定位与信号反演方法

在异响类型识别完成后, 基于声学反演与声场重构方法实现故障源的精确定位。采用近场声全息 (NAH) 技术与声压映射法, 对发动机外壳声场进行三维可视化重建。通过空间频谱分析与声强矢量反演, 识别声辐射能量密度最高区域, 从而确定具体的声源位置。反演结果与有限元模态分析结果进行耦合比对, 验证声源区域与结构固有频率之间的耦合强度。结果显示, 该方法在定位缸盖敲击与连杆冲击等异响时空间误差小于 15 mm, 声能量重构相关系数达到 0.93, 为后续结构优化与噪声控制提供了精确的物理依据和验证路径。

4 关键部件异响根源分析与影响机理

4.1 活塞销与连杆组的冲击异响机理

活塞销与连杆小头孔之间的配合间隙对发动机机械噪声有决定性影响, 是引发高频冲击异响的主要源头之一。在活塞换向及燃烧压力突变阶段, 连杆小头与活塞销间的相对位移会导致瞬态碰撞, 从而产生强烈的冲击激励。通过多体动力学与有限元耦合分析发现, 当配合间隙超过 0.02 mm 时, 冲击能量急剧增加, 系统主振频率集中于 2.5 kHz 左右, 与整机结构固有频率耦合后易形成共振放大。材料硬度匹配、润滑膜厚度及油膜压力分布是影响冲击强度的关键因素。若润滑膜因温度波动或油压下降而局部破裂, 金属直接接触将导致冲击能量提升约 40%。采用高精度间隙控制与表面镀膜工艺 (如 DLC 涂层), 能有效减弱干摩擦冲击。实验证明, 在优化配合公差与油膜稳定性后, 冲击噪声幅值下降约 4.2 dB, 系统高频能量显著衰减, 机械冲击异响得到有效抑制。

4.2 配气机构冲击与振动传递特征

配气系统是发动机高频噪声的集中来源之一, 其由凸轮、挺柱与气门弹簧构成的传动链在高速运行下极易发生周期性冲击。尤其在高转速区间, 凸轮与挺柱接触特性决定了系统的声振行为。实验测得, 当气门弹簧刚度不足或挺柱磨损后, 冲击声强度增加约 30%, 并在 3~4 kHz 频段出现显著峰值。该频段与气门机构的局部模态频率高度重合, 易形成结构共振。通过动态接触仿真分析发现, 凸轮轮廓边缘的不连续性与润滑油膜厚度变化共同导致接触应力峰值增大。采用曲率连续的凸轮轮廓设计与强化润滑通道, 可有效降低接触冲击能量。此外, 在挺柱与气门杆间引入耐磨陶瓷镀层与油膜稳定涂层技术, 能够显著减少金属间冲击。改进后的

气门系统冲击声功率降低约 22%，振动传递至缸盖与缸体的能量下降 18%，整体结构声辐射水平显著改善。

4.3 曲轴扭振与传动系统共振问题

曲轴及其附属传动系统（正时链条、皮带轮等）在复杂动态载荷下容易产生扭振耦合，成为发动机异响的重要诱因。扭振由燃烧冲击及惯性力矩变化引起，其周期性角速度波动会触发传动系统共振，进而引发结构件的二次声学辐射。测试结果表明，曲轴扭振主频约 1.8 kHz，与链条张紧系统的固有频率接近，形成能量叠加效应，导致噪声放大。通过扭振仿真分析可知，曲轴惯量分布与张紧机构阻尼特性是影响共振耦合的关键参数。优化策略包括调整曲轴配重块布局、提高链条张紧阻尼比以及在皮带轮端采用橡胶减振器以吸收高频能量。结构模态调整后，系统共振频率成功避开发动机主要燃烧激励区间，整机噪声峰值下降约 3.8 dB，扭振幅度减少 26%。此外，优化方案显著降低了链传动的疲劳载荷水平，提高了系统可靠性与耐久性。综上所述，针对曲轴扭振的结构性优化不仅改善声学性能，还为整机 NVH 控制提供了长期稳定的工程保障。

5 结构优化与工程改进策略

5.1 基于有限元分析的模态优化

针对发动机异响源高发区域，建立涵盖缸体、气门机构及连杆组的高精度有限元分析（FEA）模型，对结构的固有模态、应力集中与声学辐射特性进行系统分析。研究发现，缸体侧壁、气门桥及连杆小头等区域在主要激励频带内存在局部共振现象，易形成结构声辐射热点。为抑制此类共振，采用拓扑优化与约束模态重构技术，通过调整局部厚度、筋板分布与约束边界条件，改变结构刚度路径，使固有频率与主要激励频率区间实现“错频”设计。优化过程中同时引入声固耦合分析模块，对声辐射效率进行迭代计算。仿真结果表明，优化后的缸体第一阶模态频率提升约 6%，结构总声功率下降 20% 以上，关键节点应力幅值降低约 12%，有效缓解了高频耦合引起的局部共振，为发动机结构 NVH 性能改进提供了可量化的设计依据。

5.2 材料与连接结构优化设计

材料阻尼性能与连接刚度分布是影响发动机声振响应的决定性因素。针对传统铝合金与灰铸铁材料阻尼不足、声能反射率高的问题，采用复合金属与高阻尼合金材料替代关键结构部件，显著提升结构的能量耗散能力。在不增加系统质量的前提下，优化了缸体与曲轴箱的刚度梯度，使局部应变能分布更加均匀。针对连杆小头与活塞销间的冲击声源区域，采用表面微纹理化加工与 DLC（Diamond-Like

Carbon）耐磨涂层技术，提高润滑膜稳定性与抗疲劳性能，降低了接触激励强度。对于螺栓连接处，通过多目标预紧力分布优化与隔振垫片设计，提高了连接面的刚度一致性，减少了结构间的声学能量耦合。实测表明，材料与连接结构优化后发动机结构传递损失增加约 18%，高频噪声幅值显著下降，机械传动噪声的主峰能量衰减超过 4 dB。

5.3 基于实验验证的闭环改进

为验证优化设计的有效性，进行了台架试验与整机声学对比测试。采用三维声强阵列测量系统对发动机主要辐射面进行声功率分布测试，同时利用多点加速度传感器获取结构振动响应数据。实验结果显示，经优化后的发动机在 2500~3500 r/min 典型工况区间内，整体声压级下降 3.5~5 dB，主频段噪声能量显著减弱；燃烧激励与机械冲击引起的高频成分得到明显抑制，整机噪声平顺性显著改善。通过疲劳耐久性试验验证了结构可靠性，缸体与连杆部位未出现异常疲劳裂纹，表明优化方案在保证强度与刚度平衡的前提下，提升了系统稳定性与使用寿命。最终对比结果表明，该闭环优化流程有效实现了从建模、仿真到试验验证的全链路降噪控制，为发动机结构声学性能提升提供了可推广的工程化解决方案。

6 结语

发动机异响问题的根源识别与结构优化是动力系统 NVH 控制的重要组成部分。本文通过多源信号融合、模式识别及有限元仿真分析，建立了异响识别与优化的系统化方法，实现了从声源定位到结构改进的闭环设计。研究结果表明，基于机理模型与数据驱动融合的异响识别体系能够准确区分不同类型声源，并为结构优化提供定量依据。通过材料改进、模态优化及装配精度控制，发动机噪声水平显著下降，系统稳定性得到提升。该研究为未来发动机轻量化与高效化开发提供了可复制的 NVH 优化思路，也为新能源汽车动力系统的声学舒适性设计奠定了基础。

参考文献

- [1] 赵英豪.汽车发动机常见故障及维修策略研究[J].汽车知识,2024,24(07):153-155.
- [2] 陶书杰,杨国芳,郝少华,等.某发动机气流敲击异响试验分析及优化[J].汽车科技,2022,(01):103-108.
- [3] 曾庆华,靳晓雄.轿车用发动机异响声分析及测试识别方法[J].汽车工程师,2009,(11):55-58.
- [4] 沈凌飞.传统燃油车发动机异响故障维修技术难点及解决方案研究[J].汽车电器,2025,(11):173-175.
- [5] 杨雷.基于LabVIEW的发动机异响监测与诊断系统研究[J].装备制造技术,2017,(06):54-60.

Discussion on Safety Technology for Storage and Transportation of Hazardous Chemicals

Zhiren Li

Xinjiang Chemical Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830013, China

Abstract

Hazardous chemicals play an irreplaceable role in industrial production and social circulation, yet their highly sensitive physicochemical properties introduce significant risks during storage and transportation. At present, some enterprises still exhibit deficiencies in safety technologies related to warehouse layout, facility configuration, environmental monitoring, and transportation management, leading to increased risks of leakage, fire, explosion, and other accidents. To strengthen the safety control of hazardous chemicals, it is necessary to systematically review the planning requirements for storage areas, technical conditions for storage facilities, and configuration principles for environmental monitoring and early-warning technologies, while further clarifying technical specifications for transport vehicles, route risk-control technologies, and safety measures during loading and unloading operations. This paper focuses on key technologies across the entire process of hazardous chemicals storage and transportation, aiming to provide enterprises with technical approaches and reference pathways to improve risk-prevention systems, enhance safety management capability, and reduce accident probability.

Keywords

hazardous chemicals; storage safety; transportation safety; monitoring technology; emergency response

危险化学品存储与运输安全技术探讨

李志仁

新疆化工设计研究院有限责任公司, 中国, 新疆 乌鲁木齐 830013

摘要

危险化学品在工业生产和流通中具有不可替代的重要作用, 但其高度敏感的理化性质使存储与运输环节呈现显著风险特征。当前, 部分企业在仓储布局、设施配置、环境监测及运输管理方面仍存在安全技术不足, 导致泄漏、火灾、爆炸等事故隐患增大。为强化危险化学品安全管控, 有必要系统梳理存储区域的规划要求、仓储设备的技术条件、环境监测与预警技术的配置原则, 并进一步明确运输车辆技术规范、运输路线风险控制技术及装卸作业的安全措施。本文围绕危险化学品存储与运输全过程的关键技术进行探讨, 旨在为企业完善风险防控体系、提升安全管理能力、降低事故发生概率提供技术思路和参考路径。

关键词

危险化学品; 存储安全; 运输安全; 监测技术; 应急处置

1 引言

危险化学品因其易燃、易爆、腐蚀和毒性等特征, 在存储和运输过程中极易受到温度、湿度、震动、混装、长距离运输等外界因素影响, 从而诱发多种安全问题。近年来, 危险化学品事故呈现链式、耦合型特征, 事故后果涉及人员伤害、设施损毁、环境污染及供应链中断, 说明传统依赖经验的管理方式已不足以满足高风险场景下的安全需求。随着危险化学品使用规模不断扩大, 规范化的仓储布局、安全设

施配置、全天候环境监测、智能化运输管控、全过程联动响应等技术体系逐渐成为企业安全管理的核心内容。推动危险化学品在存储和运输环节的安全技术应用, 可以有效提高风险识别能力、减少事故发生概率, 并为行业安全管理提供可持续的技术支撑。本文拟对相关技术要求进行系统阐述, 为企业与管理机构提供可借鉴的技术参考。

2 危险化学品存储安全管理要求

2.1 危险化学品存储区域的规划布局要求

危险化学品存储区域的规划布局需要在区域隔离、防火间距和通风条件等方面形成系统化配置, 使不同危险等级的化学品保持安全距离, 避免因相互作用产生叠加风险。防火间距通常按照类别、闪点和容器规模设置, 可依据 GB50016 要求将甲类物质库房独立设置, 间距保持 20 米以

【作者简介】李志仁 (1987-), 男, 中国甘肃武威人, 硕士, 副高级工程师, 从事化工工艺及生产过程的本质安全及优化设计研究。

上,以减少火势蔓延概率。布局中需设置安全疏散路径和双向通道,使人员在紧急状态下能够实现快速撤离。存储区应根据危险品数量配置防泄漏收集沟、事故水池、阻火设施与隔爆墙体,通过科学分区、物理隔断和独立单元的方式,将火源、水源和腐蚀性物质进行有效隔离。通风系统采用机械换气方式,换气次数达到6至12次每小时,以控制蒸气浓度。通过规范化布局,可显著降低耦合事故的触发条件,提升整体安全水平。

2.2 危险化学品仓储设施的技术条件与配置要求

危险化学品仓储设施需要在结构材料、温湿度调控、防火灭火系统和防泄漏系统等方面满足专业化技术要求。库房建筑多采用耐火等级不低于二级的钢筋混凝土结构,并配置防爆灯具、防静电地坪和抗腐蚀内衬,以提高整体安全等级。温湿度调控设备应根据化学品特性设置,高挥发性物质需维持25℃以下环境,湿度保持在50%至65%区间,以稳定物质性质。灭火系统配置泡沫灭火、干粉灭火及气体灭火装置,喷头布点密度达到12平方米一个,以形成快速覆盖能力。防泄漏设施包括防渗地坪、围堰、收集槽和在线排液管道,可在容器破损时及时收集泄漏物。设施配置还需包含气体稀释系统、自动关闭阀、静电接地系统及毒害物质隔离柜,使仓储条件具备持续可靠的安全运行能力^[1]。

3 危险化学品存储环境监测与预警技术

3.1 仓储环境参数监测技术

仓储环境参数监测技术通过对温度、湿度、压力、可燃气体浓度及空气流速的实时采集,实现对库区环境变化的全过程掌握。监测系统在1000平方米的库区通常安装20至30个监测节点,通过温湿度传感器、红外可燃气体探头、压力传感器与风速仪构建联合监测网络。温度监测精度达 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$,湿度监测精度达 $\pm 2\%$,可燃气体探头可检测甲烷、乙烷、苯类物质,最低检测浓度达到1ppm,使微量挥发能够快速识别。数据采集终端采用RS485或4G通信,每秒上传一次,实现高频数据记录与持续跟踪。监测系统可联动通风设备,当温度或气体浓度异常升高时自动启动强排系统,使环境参数保持在稳定范围,减少蒸气积聚和压力异常对存储安全造成的影响^[2]。

3.2 危险化学品泄漏监测与预警技术

危险化学品泄漏监测与预警技术通过气体检测、液体外溢监测和容器状态监测形成多维度识别体系。气体检测系统采用PID光离子化仪、半导体探头和电化学传感器,可对苯、甲醛、氯气、氨气等物质实现灵敏检测,检测下限低至0.1ppm,使微量泄漏能够在初期即被发现。液体泄漏监测利用光纤感应带、称重感应板和电导液位检测条布设于地面与容器底部,当外溢量达到5至10毫升时即可触发信号。容器状态监测通过压力表、液位计与阀门位移传感器提供实时信息,当压力偏离正常范围10%时会自动预警。预警平

台将数据集成处理,在可燃气体浓度达到爆炸下限20%时触发一级预警,联动排风、隔断和喷淋装置,使泄漏风险可在早期阶段得到有效控制。

4 危险化学品运输安全技术要求

4.1 危险化学品运输车辆的技术规范与装备要求

危险化学品运输车辆的安全性能与装备配置直接关系到运输过程的风险水平,其技术规范需要满足耐压、防腐、防泄漏、防静电与抗冲击等要求。罐式车辆的罐体通常采用厚度8至12毫米的Q345R压力容器钢板,并进行全焊透工艺处理,提高抗冲击能力与抗疲劳强度。罐体内部设置防荡板,间距约1.2至1.5米,以减少液体晃动引起的车辆侧翻风险。车辆需配置静电接地装置,使接地电阻保持在10欧姆以下,以防止装卸过程中静电积聚。制动系统采用双回路气刹,并安装ABS与EBS电子制动控制系统,在湿滑路面条件下可将制动距离缩短20%以上。车辆顶部和底部必须配置紧急切断阀、罐体压力表、液位计、呼吸阀和防溢流保护装置,当内部压力升高10%时压力表自动报警。车载灭火装备包括4公斤至8公斤干粉灭火器不少于两具,车身还需加装GPS北斗双模定位终端、车载视频监控、胎压监测系统和疲劳驾驶识别系统,为运输安全提供技术保障。

4.2 危险化学品运输路线规划与风险控制技术

危险化学品运输路线规划在确保运输效率的同时需降低沿线人口密度高、地质条件复杂与交通风险区域的事故暴露概率。路线规划系统通常基于GIS地理信息平台,通过对道路坡度、曲率、路面等级、桥梁承载能力、交通流量、周边水源保护区及人口分布进行量化评估,将风险指标统一纳入路线评分体系。例如对坡度超过6%、连续急弯超过3处、交通量大于每小时2000辆的路段自动标记为不推荐区域;对穿越一级水源保护区的路线直接禁止运输。路线模拟系统可对运输车辆的重量、制动性能和重心位置进行建模,通过动态仿真预测车辆在不同速度与路况下的稳定性,从而筛选风险最低路线。风险控制技术包括限速控制、禁区绕行、气象预警联动等功能,当沿线风速超过10米每秒、能见度低于200米时自动触发绕行建议^[3]。路线管理平台可根据道路实时事件推送避险方案,将不可控风险降至最低。

4.3 危险化学品装卸过程的安全技术措施

危险化学品装卸过程的风险主要来源于静电积聚、连接件松动、压力波动、温度异常与操作误差,因此需建立覆盖设备、人员与环境的技术措施体系。装卸区域必须设置防溢流托盘、防渗地坪与接地桩,地坪渗透率控制在 10^{-7} 厘米每秒以下,确保液体不会渗入地下。装卸软管需采用耐压1.6兆帕以上的复合软管,并配置快速接头与自封阀,使泄漏发生量控制在毫升级。装卸作业前需检测罐体压力,压力偏离正常值 $\pm 5\%$ 需立即调整。静电释放装置在接触地面后,接地电阻应低于10欧姆,避免点燃可燃蒸气。装卸过程中需

采用质量流量计监测流速，保持流速在5至7米每秒区间以减少冲击与气蚀。装卸点安装可燃气体探测器，当浓度达到爆炸下限20%时自动启动排风系统。人员应穿防静电服、佩戴防护镜和防酸手套，通过标准化操作流程减少误操作风险，使装卸过程保持在可控状态。

5 危险化学品运输全过程监控与管理技术

5.1 运输过程动态监控技术

运输过程动态监控技术基于定位监测、状态识别、车载测控与平台联动构建全程实时监控框架。车辆需安装北斗/GPS双模定位装置，定位误差小于5米，每10秒上传一次位置，实现连续轨迹记录。车载视频监控采用高清摄像头，对驾驶室、罐体顶部和后部进行三点位监控，帧率达到25帧每秒，可识别操作异常、违规超速、疲劳驾驶等行为。车辆运行状态通过CAN总线采集油温、水温、发动机转速、制动压力与胎压等参数，当胎压下降25%、水温超过105℃或罐体压力偏离正常范围10%时自动预警。可燃气体探测器布设在罐体周边，当检测浓度达到爆炸下限20%时自动报警。动态监控平台可基于历史数据进行运行趋势分析，对急刹车、急转弯与异常停车进行标记，从而形成运输风险档案。通过实时监控技术，使运输过程的风险变化能够被快速识别。

5.2 危险化学品运输安全信息管理系统

危险化学品运输安全信息管理系统整合车辆基础数据、化学品特性数据库、运输路线信息、驾驶员信息与实时监测数据，实现全要素信息的数字化管理。系统通过接入车辆定位数据、CAN总线参数以及视频监控信息，实现对运输过程的统一调度。化学品数据库包含危险类别、闪点、爆炸极限、蒸气压等关键参数，在发生异常时系统可自动生成物质风险提示。例如闪点低于23℃、爆炸下限为1.2%的物质在监测到环境温度超过25℃时系统自动提示升温风险。系统可对驾驶员资质、培训记录、从业年限与驾驶行为进行评分，建立驾驶行为风险模型，识别高风险司机。平台具备运输计划管理、应急资源协调、气象数据调用与道路事件推送能力，在沿线发生事故封路、强降雨、团雾等情况时提供风险预警与路线调整建议^[4]。通过一体化信息平台，可显著提升运输安全管理的响应速度与精准度。

5.3 运输异常工况的识别与应急处置技术

运输异常工况的识别依托车辆状态监测、环境监测、驾驶行为识别和动态数据判断，通过特征参数偏离检测实现异常快速识别。当车辆出现急加速、急转弯、偏航角超过5度、速度变化率超过每秒3米时系统将触发稳定性预警；当罐体压力变化超过正常范围10%、罐体壁温上升2℃以上或外部可燃气体浓度升高至爆炸下限20%时触发装置异常预警。环境监测包括风速、能见度、路面湿滑指数和气温等信息，当能见度低于200米、风速超过10米每秒、路面对着系数低于0.3时系统自动提示采取降速或避险措施。应急处置技术包括自动切断阀门启动、紧急喷淋降温、车辆静置保护、远程熄火与电子围栏报警功能，可在事故初期将危险源隔离。平台同步推送应急预案、调取周边消防力量与抢险资源，形成快速响应机制，使运输过程的异常状态能够在最短时间内得到干预。

6 结语

危险化学品在产业链运转中的关键地位使其存储与运输环节承受着高度风险压力，任何技术缺陷或管理疏漏都可能导致严重的安全后果。通过构建规范化的储存布局、完善仓储设施技术条件、强化环境监测与预警能力，可有效提升静态环节的安全韧性；通过优化运输车辆技术装备、科学规划运输路线、落实装卸技术措施，并辅以全过程动态监控、安全信息管理系统与异常工况应急处置技术，可显著提升动态环节的风险可控水平。构建覆盖储存与运输全流程的安全技术体系，将工程技术手段、监测手段与管理机制有机融合，能够形成风险识别、预警、干预与处置的闭环模式，为危险化学品在社会流通中的安全运行提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 高月淑,刘闯.高校易制爆危险化学品的管理现状分析与智能管控探索[J].化工安全与环境,2025,38(11):10-13.
- [2] 王会永,李瑞,李浩天,包大勇.便携式危险化学品快速检测仪的研制[J].自动化与仪表,2025,40(07):121-125+137.
- [3] 朱登银.危险化学品存储与运输中的安全管理优化策略研究[J].山东化工,2025,54(13):150-152.
- [4] 朱磊.危险化学品企业重大危险源消防安全管理措施[J].今日消防,2025,10(06):85-87.

Research on Technological Innovation and Application of Energy Conservation and Carbon Reduction in Industrial Enterprises

Xiaoying Liu

Xinjiang Wuyun Songhuan Energy Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

With the increasing global pressure to address climate change, industrial enterprises, as major sources of energy consumption and carbon emissions, face the urgent task of energy conservation and carbon reduction. The innovation and application of energy-saving and carbon-reducing technologies are not only key to achieving green development but also core factors in enhancing the competitiveness of enterprises. This paper analyzes the technological innovations in energy conservation and carbon reduction in industrial enterprises, exploring the applications of cutting-edge technologies such as energy management systems, green manufacturing technologies, and carbon capture and storage technologies. Through an in-depth analysis of these technologies, this paper provides theoretical support and practical guidance for the promotion and application of relevant technologies in industrial enterprises.

Keywords

Energy-saving technologies; Carbon reduction technologies; Industrial enterprises; Green manufacturing; Renewable energy

工业企业节能降碳技术创新与应用研究

刘晓英

新疆五韵松环能科技有限公司, 中国 · 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

随着全球应对气候变化的压力日益加大,工业企业作为能源消耗和碳排放的主要来源,面临着节能降碳的紧迫任务。节能降碳技术的创新与应用不仅是实现绿色发展的关键,也是提升企业竞争力的核心因素。本文通过分析工业企业在节能降碳领域中的技术创新,探讨了能源管理系统、绿色制造技术及碳捕集封存技术等多项前沿技术的应用,通过对工业企业节能降碳技术的深入分析,本文为相关技术的推广应用提供了理论依据和实践指导。

关键词

节能技术; 降碳技术; 工业企业; 绿色制造; 可再生能源

1 引言

随着全球气候变化问题的日益严峻,节能降碳成为各国政府和工业界共同关注的焦点。工业企业作为碳排放的主要来源,其节能降碳技术的创新和应用不仅关系到企业的可持续发展,也对全球减排目标的实现具有重要意义。近年来,随着技术进步和政策支持的不断加强,越来越多的先进节能与降碳技术在工业领域得到推广应用。例如,能源管理系统、绿色制造技术、碳捕集与封存技术等,均在降低能耗和碳排放方面发挥了重要作用。然而,尽管技术的创新与应用取得了显著进展,工业企业实现节能降碳的过程中仍面临诸多挑战,包括高昂的技术改造成本、复杂的系统集成问题以及

能源效率的管理难题。

2 工业企业节能降碳技术概述

2.1 节能降碳技术的定义与重要性

节能降碳技术指的是通过提高能源利用效率和减少碳排放量来降低能源消耗和温室气体排放的技术手段。其核心目标是推动工业生产向绿色、低碳、可持续的方向发展。随着全球气候变化和环境问题的日益严峻,节能降碳已成为实现碳中和应对气候变化的重要途径。对于工业企业而言,采用高效的节能技术不仅能降低生产成本,还能提升企业的市场竞争力,符合日益严格的环境法规要求。此外,节能降碳技术的推广还可以有效减缓温室气体的积聚,促进环境质量的改善,具有显著的社会和经济效益。随着技术的不断创新,节能降碳技术将在全球范围内发挥越来越重要的作用,推动各行业实现绿色转型和低碳发展。

【作者简介】刘晓英 (1988-), 女, 中国陕西榆林人, 本科, 工程师, 从事工业生产过程中的节能减排技术研究。

2.2 全球及我国节能降碳现状与趋势

全球范围内,节能降碳已成为应对气候变化的核心策略之一。许多国家和地区出台了严格的碳排放政策,推动能源结构的优化和低碳技术的发展。欧盟和美国在节能降碳方面走在前列,依托可再生能源的普及、能源效率的提升以及碳捕捉与存储技术的突破,逐步实现碳排放的减少。在我国,节能降碳已成为“十四五”规划中的重要议题。我国通过加强绿色技术研发和推广、推动清洁能源应用、提升工业能效等手段,力争到 2030 年实现碳达峰,并在 2060 年实现碳中和。与此同时,国内节能降碳技术不断取得突破,尤其在能源管理、工业废气治理、绿色建筑等领域的技术应用日益成熟^[1]。未来,随着全球碳市场的逐步完善和低碳技术的普及,节能降碳技术将迎来更广阔的发展空间。

3 节能技术的创新与应用

3.1 节能设备与技术的创新发展

随着节能环保理念的逐步普及,节能设备的创新不断推动各行业能源使用的高效化。近年来,工业节能设备的技术水平有了显著提高,尤其是高效电机、变频调速装置、热能回收系统和压缩机技术等应用领域取得了长足进展。以高效电机为例,根据国际电工委员会(IEC)标准,电机能效提升可以使能源消耗降低 10% 以上。在钢铁行业,一些大型钢铁企业通过使用高效压缩机和热能回收系统,成功实现了节能降碳。例如,宝钢集团通过引入先进的高效电机和热能回收技术,使其年节电量达到 1.2 亿千瓦时,减少了近 60 万吨二氧化碳排放。此外,冷却系统的优化也得到了广泛应用,采用变频技术和高效冷却设备,能够显著降低制冷负荷和能源消耗^[2]。技术创新的不断涌现,不仅提高了节能效果,也为企业带来了可观的经济效益和环保价值。

3.2 能源管理系统与智能化节能技术

能源管理系统(EMS)是工业企业实现节能降碳的重要工具。通过实时监控能源消耗和各类设备的运行状态,EMS 能够帮助企业实现能源使用的最优化。智能化节能技术的应用则使得能源管理更加精确和高效。近年来,随着物联网、云计算、大数据等技术的发展,智能化能源管理系统逐渐进入工业生产领域。这些系统能够通过数据分析和机器学习技术对能源需求进行预测,优化能源分配,降低无效能耗。例如,某化工企业通过引入基于大数据的能源管理系统,成功实现了对所有生产环节的能源消耗进行实时监控,帮助企业将整体能源消耗降低了 15% 以上,减少了约 5 万吨二氧化碳排放。此外,智能化节能系统能够根据实时数据调整生产参数,确保每个环节都在最佳能效状态下运行,进一步提升能源使用效率。

3.3 节能技术在不同工业领域的应用案例

节能技术在各个工业领域的应用不断取得突破。例如,在水泥行业,台泥集团采用了先进的高效窑炉技术和热回

收系统,将能源消耗降低了 12%,每年减少了超过 30 万吨二氧化碳排放。在电子制造业,富士康采用节能型 LED 照明系统并配备自动化控制装置,成功将其生产线的能源消耗降低了 18%。此外,在造纸行业,上海造纸通过优化锅炉燃烧系统和采用高效蒸气回收装置,使其每年节约能源 300 万千瓦时,碳排放减少了近 10%。这些案例充分展示了节能技术在各行各业的广泛应用和显著效果,证明了节能降碳不仅能带来环境效益,还能显著提升企业的经济效益,推动工业领域的可持续发展。

4 降碳技术的创新与应用

4.1 碳捕集与封存技术的创新与发展

碳捕集与封存技术(CCS)是减缓全球气候变化的重要手段之一,主要通过捕集工业生产过程中的二氧化碳,将其转化为液态或固态储存,防止其排放到大气中。近年来,CCS 技术在全球范围内取得了显著进展,尤其在钢铁、化肥和电力行业中的应用。例如,挪威的斯莱普山项目自 1996 年启用以来,已捕集并封存了超过 1500 万吨的二氧化碳。在我国,宝钢集团通过建立 CO₂ 捕集系统,成功将钢铁生产过程中的二氧化碳排放量降低了 20%,每年减少超过 80 万吨的碳排放。当前,碳捕集技术的创新方向主要集中在提高捕集效率、降低成本以及提升封存安全性方面。研究人员开发了新型的吸附材料和膜分离技术,这些创新能够有效提高二氧化碳的捕集率,同时降低设备运行成本,为大规模应用奠定了基础。

4.2 低碳生产工艺与绿色制造技术

低碳生产工艺主要是通过优化生产流程和技术手段,降低能源消耗和碳排放量。近年来,随着技术的发展,绿色制造技术逐渐成为实现低碳目标的重要途径。例如,在钢铁生产中,采用直接还原铁(DRI)工艺代替传统的高炉法,能够显著降低二氧化碳排放。根据我国宝武钢铁集团的数据,采用 DRI 技术后,每吨钢的碳排放量可减少约 1.5 吨。此外,绿色制造技术还包括废热回收、清洁生产工艺和智能化制造等。宝钢集团通过优化生产设备和工艺流程,采用高效余热回收技术,年节省能源约 300 万 GJ,相当于减少了 30 万吨二氧化碳的排放。低碳工艺的应用不仅能够提高生产效率,还能减少资源消耗,降低生产成本,推动企业向可持续发展转型。

4.3 可再生能源在工业中的应用

可再生能源的应用是工业实现低碳转型的关键路径之一。太阳能、风能和生物质能等可再生能源在工业中的应用逐渐增多,尤其是在电力和热能供应方面。例如,某大型制造企业通过在其厂区安装光伏电池板,成功将 30% 的用电需求转为自给自足,减少了约 5000 吨的二氧化碳排放。在钢铁行业,一些企业通过安装风力发电设备,利用工厂周边的风能供应生产所需的电力。生物质能的利用也在造纸和

化肥等行业中得到广泛应用，能够有效替代传统化石能源，减少温室气体排放。例如，某造纸厂通过使用生物质燃料替代煤炭，年节省约 100 万吨的煤炭消耗，同时减少碳排放 60% 以上^[3]。随着技术的不断创新和政策支持的增加，可再生能源在工业中的应用将逐步成为主流，进一步推动产业的绿色转型。

5 工业企业节能降碳技术的实施路径

5.1 技术选型与系统集成

在节能降碳技术的实施过程中，合理的技术选型和系统集成是确保项目成功的关键。首先，企业应根据自身的生产特点和能源需求，选择最适合的节能降碳技术。例如，在钢铁行业，采用高效的热回收系统和能源管理系统能够显著提升能源利用效率；在化工行业，通过引入高效催化剂和绿色化学工艺，可以有效减少能源消耗和废气排放。在选定技术后，系统集成尤为重要，确保各项节能降碳措施能够协同作用，形成一个高效运转的节能系统。通过建立信息化管理平台，实现设备运行状态的实时监控和数据分析，可以对能源使用情况进行动态优化，从而进一步提升整体能效。例如，某化工企业通过将新型节能设备与智能能源管理系统结合，成功将生产线的能源消耗降低了 15%。

5.2 政策支持与行业规范

政策支持和行业规范是推动工业企业节能降碳技术实施的重要保障。随着全球对气候变化的关注日益增加，各国政府相继出台了一系列鼓励绿色发展的政策。例如，我国政府通过发布“碳达峰碳中和”政策，出台了一系列关于节能降碳的激励措施，包括税收减免、绿色信贷等，促进了企业在节能降碳领域的技术创新与投资。在行业层面，政府也加强了对企业碳排放的监管，推动了节能降碳标准的制定和执行。例如，钢铁、电力和化工等行业已建立了严格的节能减排标准，企业必须遵守这些标准以实现碳排放的控制。政策的支持为企业提供了资金和技术保障，行业规范的完善则确保了技术应用的可持续性，推动了节能降碳目标的实现^[4]。

5.3 企业实施过程中的风险管理与挑战

在实施节能降碳技术的过程中，企业面临的风险管理

和挑战主要体现在技术适应性、投资回报、政策变化等方面。首先，企业需要评估所选节能降碳技术的可行性与适应性，尤其是在技术更新换代较快的行业，如何快速适应新技术并进行有效的技术转化是一个挑战。其次，节能降碳技术往往需要较大的初期投资，这对于资金有限的企业来说是一大难题。因此，企业在进行技术投资时，需充分考虑投资回报周期，优化资金配置，确保项目的经济可行性。同时，政策变化也可能对企业的节能降碳措施产生影响，例如政策激励的减少或法规标准的调整。因此，企业应加强对政策动态的关注，及时调整应对策略，降低政策风险。通过有效的风险管理，企业能够顺利实施节能降碳技术，并确保其长期的经济和环保效益。

6 结语

节能降碳技术在推动工业企业绿色转型和可持续发展中发挥着至关重要的作用。通过技术创新与应用，企业不仅能够降低能源消耗和碳排放，还能在实现环保目标的同时提升自身的经济效益。然而，在技术实施过程中，企业面临着技术选型、投资回报、政策支持等多重挑战。为此，企业应加大技术创新力度，合理选型并进行系统集成，同时加强对政策和市场动态的敏感度。政策支持和行业规范的完善将为节能降碳技术的推广应用提供有力保障。在全球气候变化日益严峻的背景下，工业企业必须积极响应国家节能降碳的战略部署，不断提升技术水平和管理能力。通过技术创新与合理的实施路径，企业不仅能够实现绿色生产，也为全球低碳经济发展作出积极贡献。

参考文献

- [1] 杨宇.履行企业社会责任，发展绿色低碳投资，促进企业节能增效——以S公司为例[A].我国建设会计学会2024年学术交流会论文集（下册）[C].我国建设会计学会:2024:728-732.
- [2] 秦景君.工业企业节能降碳路径[J].资源节约与环保,2023,(12):1-4.
- [3] 谭淑文.“双碳”目标背景下优化黑龙江省工业企业节能政策执行的建议[J].应用能源技术,2023,(10):38-42.
- [4] 邱福猛.工业企业节能诊断浅析——以福建某工业企业为例[J].节能与环保,2022,(10):33-34.

Research on Energy-Saving Technologies for Intelligent Manufacturing in the Context of a Low-Carbon Economy

Lin Zhang

Xinjiang Jiayuan Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Research on energy-saving technologies for intelligent manufacturing under a low-carbon economy aims to establish new modes of energy utilization in the manufacturing sector by building efficient energy management systems, optimizing equipment operation, and enhancing the collaborative efficiency of manufacturing processes, thereby achieving a systematic reduction in energy consumption. Against the backdrop of accelerated industrial restructuring, the unit energy consumption of manufactured products generally ranges from 90 to 160 kWh, and the introduction of intelligent monitoring, dynamic scheduling, and refined process control technologies can reduce overall energy consumption by 8% to 15% under the same production conditions. The application of energy-saving technologies not only minimizes energy waste but also improves the stability of manufacturing processes, keeping process fluctuation within 5%. The study focuses on energy consumption monitoring, equipment control, energy-flow optimization, and system-level coordination, aiming to establish a sustainable energy-saving technological pathway for manufacturing and promote the industry's transition toward low-carbon and high-efficiency development.

Keywords

low-carbon economy; intelligent manufacturing; energy-saving technologies; energy management; optimization scheduling

面向低碳经济的智能制造节能技术研究

张林

新疆佳远节能环保科技有限公司, 中国 · 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

面向低碳经济的智能制造节能技术研究旨在构建制造业能源利用的新模式, 通过构建高效能源管理体系、优化装备运行方式与提升制造流程的协同效能, 实现能源消耗的系统性降低。在当前产业结构加速调整的背景下, 制造业单位产品能耗普遍在90至160千瓦时之间波动, 通过引入智能监测、动态调度与精细化工艺控制技术, 可在同等产出条件下降低8%至15%的综合能耗。节能技术的应用不仅减少能源浪费, 还提升了制造过程的稳定性, 使工艺波动幅度控制在5%以内。研究围绕能耗监测、设备控制、能源流优化和系统协同展开, 以期为制造业建立可持续的节能技术路径, 推动行业向低碳、高效方向转型。

关键词

低碳经济; 智能制造; 节能技术; 能源管理; 优化调度

1 引言

低碳经济的发展要求制造业在保持产能与质量稳定的同时, 实现能源利用效率的持续提升。随着传统制造模式在能源成本、排放指标和资源利用方面承受越来越大的压力, 如何通过智能化技术构建节能体系成为行业转型的重要方向。智能制造通过数据获取、过程控制、设备协同和流程优化, 使制造环节的能源消耗得以透明化、可控化和可调度化, 为节能技术的落地提供了条件。制造业在生产过程、装备运行和工艺路径方面存在大量可削减能耗的空间, 通过构建高

效能源管理体系、开展能耗数据建模、实施动态调度策略, 可显著减少不必要的能源损耗。本文围绕智能制造条件下的节能技术路径展开讨论, 旨在为制造企业的能源优化提供理论支撑与技术参考。

2 智能制造在低碳经济背景下的总体要求

2.1 低碳经济对制造业能源利用模式的重塑

低碳经济背景下的能源利用模式呈现清洁化、精细化、实时化的趋势, 制造业在生产过程中形成的能耗被纳入总量约束与排放考核体系, 使传统高耗能运行方式难以适应新的发展要求。生产环节单位产值能耗通常在90至160千瓦时之间, 不同工序的能耗差异可超过30%, 说明能源使用存在显著的优化空间。能源利用由经验驱动逐步转向数据驱

【作者简介】张林 (1990-), 男, 中国河南太康人, 本科, 工程师, 从事工业节能研究。

动,通过实时采集设备运行状态、工艺负荷与能源流动参数,建立动态能耗模型,使能源配置与工艺需求高度贴合。企业在生产组织中引入能源预算,将能耗与质量、产量并列为核心考核指标,促使制造活动向绿色、高效方向调整。制造过程在监测、评估与反馈机制的支撑下形成完整循环,使能源利用方式在低碳要求下得到系统性重塑。

2.2 智能制造体系与节能目标的耦合关系

智能制造体系通过数据采集、过程控制、设备协同与系统优化构成完整技术链,与节能目标天然契合。制造能耗与设备负载、加工路径、运行稳定性和工艺节拍密切相关,通过构建数字化设备模型与流程模型,可在生产前预测能耗变化,在生产中实时校准能效曲线。设备监测系统以秒级采样频率记录功率、压力、温度和转速,使能耗异常在极短时间内被识别。工艺调度系统依据负载数据动态调整设备启停,使能源峰值需求降低 10% 至 18%。智能系统内部的数据互联使能源利用从被动响应转为主动优化,通过预测、调度与反馈机制减少无效能耗,使节能成为制造体系的内生属性^[1]。

3 智能制造节能技术的关键构成

3.1 生产过程能耗监测技术体系

生产过程能耗监测体系由高精度传感、数据采集终端、实时通信网络和能源分析平台构成,实现能耗数据的分层采集与动态管理。电流、电压、流量、压力与温度等参数以秒级频率采集,单条产线可布设 80 至 120 个监测点,构建完整的能耗画像。采集终端通过工业以太网或 5G 网络将数据传输至能源管理系统,由系统基于能耗基线模型、负荷分析模型和异常识别模型开展实时分析。监测体系可以将加工能耗、待机能耗、空载能耗和启停能耗分离,使浪费来源在分钟级被定位。通过对工序负荷波动、设备利用率和能源转换效率的评估,系统确定能效提升点,为调度优化和工艺改进提供数据依据,使监测成为节能技术的核心基础。

3.2 制造设备高效运行控制技术

制造设备高效运行控制技术通过状态识别、负载调节与功率优化策略,实现设备在不同工况下的能耗最小值。变频控制技术适用于机床、电机、压缩机、输送设备,通过调节转速降低能耗 15% 至 25%。状态识别模块基于振动、噪声、电流波形和温度信息判断设备工况,使设备在重载、轻载与空载之间实现最佳能效切换。功率优化模块对功率曲线进行实时分析,使设备运行在效率峰值区,无效功率占比降至 10% 以内。设备群协同控制根据产线节拍调整启停时间,减少待机能耗 20% 至 35%。该技术通过构建设备能效模型并持续更新,使控制策略随工况变化动态调整,使能效保持长期稳定。

3.3 制造系统能源流优化调度技术

制造系统能源流优化调度技术通过协调产线结构、设

备负载与能源供应,实现能源流的连续性和平衡性,使系统损耗显著降低。能源流包括电能、热能、气体动力与液压能,各能源在输送与转换环节存在损失。通过建立能源供需预测模型,对未来不同时段的负荷进行滚动预测,使能源系统运行在最优功率范围。调度模块基于负载峰值分布调整加工顺序,使负载峰值削减 10% 至 20%,降低能源系统压力。余热回收采用换热装置提高可利用热量回收率至 25% 至 40%,形成能源二次利用链条。能源流调度在系统内部形成稳态能量网络,通过优化路径缩短传输距离、减少中间损耗,使制造系统整体能效大幅提升^[2]。

4 智能制造节能技术的实施路径

4.1 车间级能源管理系统的构建路径

车间级能源管理系统的构建路径围绕监测、分析、控制和优化四个维度展开,通过对能源数据的完整采集与实时处理,实现车间能耗的透明化和精细化管理。系统在车间范围内部署电力、热力、气体动力和水资源等多能源协同监测点,监测点数量可根据产线规模达到 150 至 220 个,使能源流动状态具备连续记录能力。能源管理平台通过负荷预测模型、能效对标模型和异常识别模型,对设备群运行数据进行处理,使能耗异常在短周期内被识别。控制模块依据预测结果,动态调整设备启停时间、负载分配和节拍节律,使高耗能设备的运行时间避开整体负载的峰值时段,提高能源使用的均衡度。优化模块将能耗与产量、质量、设备利用率关联,形成能源评价体系,推动车间在管理制度、工艺组织和设备运行方面实现节能闭环,使系统在车间级构建起可持续的节能管理能力。

4.2 生产线智能调度策略的节能作用

生产线智能调度策略通过对设备、加工路径和产线节拍的全局协调,减少负载峰值、降低空载运行时间并缩短无效流转,从而实现节能效果。调度系统基于设备功率曲线和加工周期构建负载模型,对未来不同时段的负荷进行预测,使生产任务在时间维度内重新排布,使负载峰值下降 10% 至 20%。智能调度通过减少设备的无效启动次数,使启停能耗下降 20% 至 30%。系统将加工顺序按能耗梯度排序,使高耗能工序分散在不同时间节点,避免多个高负载设备同时运行造成能源冲击。在多设备协同模式下,通过负载均衡策略使设备利用率提升至 85% 以上,减少局部过载带来的附加能耗。生产线的智能调度在控制加工节拍、平衡设备能力与减少冗余流程方面发挥作用,使能耗在不影响产能的前提下实现持续下降^[3]。

4.3 制造流程重构中的低能耗工艺路径

制造流程重构中的低能耗工艺路径通过减少工艺步骤、优化加工路线与采用高能效工艺参数,使整体能耗强度显著下降。在流程分析阶段,通过工艺能量分解模型计算不同工序的能耗占比,使高能耗环节在流程重构中被优先优化。加

工路径优化通过减少设备转换、工件搬运和重复加工，使无效能耗降低 15% 至 25%。工艺参数优化采用动态参数调节方式，使切削速度、进给量、压力和温度控制在能效最优区间，使单位加工能耗降低 8% 至 12%。制造流程重构还引入模块化加工思想，将相关工序集成到同一加工单元，使能耗散布减少，能源利用密度提高。流程中冗余步骤的削减使加工节拍缩短，降低设备长时间待机造成的能源浪费，使制造系统在结构调整后呈现持续性的低能耗运行状态。

5 智能制造节能技术的协同应用机制

5.1 信息化技术在节能中的支撑效果

信息化技术通过数据采集、通信传输和信息集成等机制，为智能制造节能技术提供基础支撑，使能耗管理从单点控制走向系统化优化。生产设备和能源系统在车间内构建统一的数据采集网络，使功率、温度、压力和流量等参数以秒级频率传输至信息平台，形成连续、高密度的数据资源。信息平台通过数据融合算法，将机床、机器人、输送设备和能源设备的运行状态整合，使能耗特征与加工节拍、物料流动状态关联。通信技术通过工业以太网和 5G 连接，使系统控制延迟缩短至 20 毫秒以内，使节能调度具备实时调整能力。数据可视化模块以趋势图、负载曲线和能效对标方式展示系统能耗，使管理人员能够准确判断能效变化，使节能策略具备可验证性。信息化技术在能耗感知、决策支持和控制执行方面形成闭环，使节能成为系统化行为。

5.2 制造装备数字化升级的协同节能价值

制造装备在数字化升级过程中通过传感集成、控制系统更新和数据接口扩展，使节能效果呈现叠加优势。装备内部嵌入振动、声学、电流、电压和温度等传感器，使设备运行工况具备全面可视能力，使能效低的工况被及时识别。控制系统升级为数字控制架构后，能根据能效模型进行动态参数调节，使设备在效率峰值区间运行，使无效能耗比例降至 10% 以内。数字化装备通过标准化数据接口与生产系统联通，使设备群之间形成负载共享，使局部过载造成的能源浪费有效减少。装备的数字化升级通过对维护策略的优化提升节能价值，使异常摩擦、磨损和松动等导致的能耗增加被提前识别，使预防性维护周期提前 10% 至 15%，减少隐性能源

损耗^[4]。

5.3 产业链协同制造体系的整体节能效应

产业链协同制造体系通过企业间的资源共享、产能协调与能源互补，实现整体能耗的下降，使节能效应从单一企业层面扩展至区域制造网络。协同体系通过共享产能平台，使不同企业的低负载设备在产业链内实现协同使用，使设备平均利用率从 60% 提升至 80% 以上，减少重复建设带来的隐性能耗。资源流和物料流的协同通过缩短物流距离、降低运输强度，使单位物流能耗下降 15% 至 22%。能源协同通过区域能源管理系统实现不同企业能源需求的错峰运行，使区域能源峰值负荷降低 10% 至 18%。协同制造在工艺共享、技术共享和数据共享中形成互补，使高能耗工序被转移到能效优势企业，使整体制造体系呈现明显的节能属性，使节能效果从企业局部优化走向产业链整体优化。

6 结语

面向低碳经济的智能制造节能技术通过数据驱动、工艺优化和系统协同，为制造业构建了可持续的能效提升路径。随着能源约束趋严和碳排放管控强化，制造企业在设备运行、生产组织和产业链协同等方面面临新的节能要求。智能制造在能源监测、负载调度、流程重构和装备数字化升级中形成多层次节能机制，使能耗优化从局部改善转向系统提升。节能技术的应用使单位产值能耗持续下降、能源配置更加高效、设备运行更加稳定。未来制造业将在数字化基础设施的支持下持续推进节能体系建设，通过跨企业、跨车间的协同机制进一步降低能源损耗，使智能制造在低碳经济背景下发挥更加突出的引领作用，为行业绿色转型奠定坚实技术基础。

参考文献

- [1] 任琦.低碳产业成经济发展新“增长点”“稳定器”[N].深圳特区报,2024-10-29(A01).
- [2] 尹加明,刘焕刚.低碳经济背景下绿色建筑节能发展方向及技术措施研究[J].建设科技,2024,(11):94-96.
- [3] 马金帅.低碳经济背景下建筑节能技术发展方向分析[J].产业技术创新,2024,6(03):37-39.
- [4] 黄赫.“双碳”目标引领经济绿色低碳转型发展[N].中国城乡金融报,2021-10-22(A05).