

态生成处置流程，引导相关人员按照标准化步骤开展救援，显著提升应急事件的处置效率与协同能力。

4 景区安全标准化体系实施效果分析

4.1 安全标准化体系对景区风险防控能力的综合提升

安全标准化体系的实施，使景区的风险防控由过去依赖个体经验、碎片化管理的模式，转型为结构化、制度化和技术化相结合的系统工程，其提升作用体现在多个层面的协同增强。首先，在风险识别方面，标准化体系通过风险分级管控、危险源清单制度和动态监测机制，将原本以人工巡查为主的“点状识别”升级为覆盖景区空间结构、游客行为模式和设施运行特征的“面状识别—纵深识别”体系，实现了从静态规则到动态识别的转换。其次，风险预警能力显著增强。在智慧巡查、AI 视频分析和客流预测模型的联合驱动下，景区能够提前识别越界、聚集、逆行等不安全行为，并通过语音广播、动态分流等手段进行介入，实现由事后处置向事前干预的转型，有效降低风险演化概率。

在隐患治理方面，标准化体系通过责任链条绑定、流程闭环管理和数字化台账，实现从“发现依赖人工、整改进度不可控”到“隐患数据化、整改流程即时化”的治理升级。同时，体系实施有效增强了应急响应能力，尤其是在高峰期、多点触发、极端天气等复杂情景下，智慧应急平台能够通过“一屏统筹”，实现对人员位置、视频图像、设备状态及应急资源的统一调度，使应急指挥由“多线分散”升级为“协同集中”。通过情景化演练与智能辅助决策，应急处理时间普遍缩短 30% 以上，处置链条更加紧凑。

4.2 标准化体系对景区运营效率、组织能力与游客体验的综合影响

旅游景区安全标准化体系的实施不仅作用于风险治理层面，也深刻影响了景区的运营效率、组织治理结构、员工行为模式与游客体验，推动景区整体运行由传统管理向现代化治理模式演进。首先，在运营效率方面，标准化体系通过将复杂、多样且易随意性的管理流程重构为可视化、可执行和可审计的流程体系，大幅降低了管理不确定性，提高了资

源使用效率。在组织能力方面，安全标准化体系强化了管理结构的协调性与响应速度。体系实施后，各部门基于统一的数据平台和制度框架开展协同治理，原本“部门壁垒”“责任模糊”等问题得到显著改善。员工管理方面，标准化体系通过岗前培训、岗位技能等级认证和绩效考核机制，让员工对自身的安全职责和行为规范有更加明确的认知，促使员工从“被动执行制度”转变为“主动识别风险、主动报告隐患、主动协助游客”的价值导向，从而推动组织安全文化的内生化。

5 结语

旅游景区安全标准化体系是提升景区安全治理能力、降低安全事故发生率、提升游客满意度和增强品牌竞争力的重要途径。本文通过分析景区安全风险特征、体系构建框架、实施路径与效果评估，证明了标准化体系在风险治理、组织管理、运营效率和游客体验方面的显著价值。随着智慧景区建设的不断深入，安全标准化体系将与数字化、智能化工具深度融合，逐步形成“数字底座 + 风险治理 + 智能预警 + 应急协同”的现代化安全治理新模式。景区应持续推进标准化与数字化协同发展，不断强化全员参与、全过程管理、全要素控制的安全治理理念，推动旅游行业向更高质量、更可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 覃晓丽,罗红磊,贺敏,等. 广西旅游景区气象灾害防御规范编制策略与展望[J]. 中国标准化,2025(16):148-152. DOI:10.3969/j.issn.1002-5944.2025.16.021.
- [2] 林建忠,余田花,周哲. DB33/T 1306-2023《旅游景区气象防灾减灾指南》地方标准解读[J]. 中国标准化,2024(4):140-144. DOI:10.3969/j.issn.1002-5944.2024.04.025.
- [3] 董楠,白长虹,周琪. 数字技术应用背景下景区安全管理系统升级及其治理机制[J]. 旅游论坛,2024,17(5):13-26. DOI:10.15962/j.cnki.tourismforum.202405033.
- [4] 董楠,白长虹,周琪. 数字技术应用背景下景区安全管理系统升级及其治理机制——基于云台山景区的案例研究[J]. 旅游论坛,2024(5):13-26.

Research on Microgrid Technology Integration Optimization and Energy Management Strategy in Rotary Hearth Furnace System

Yuanling Zhang¹ Cheng Peng¹ Yun Qiao²

1. Baowu Group Environmental Resources Technology Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

2. Shanghai Qianjian Automobile Technology Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

Abstract

Aiming at the problems of high energy consumption and serious carbon emissions in traditional rotary hearth furnace systems, this paper proposes a system integration optimization scheme based on microgrid technology. Firstly, the basic principles and architectural characteristics of microgrid technology are analyzed, and a four-layer architecture model including renewable energy generation, energy storage systems, energy conversion devices and intelligent control platforms is established. Then, the energy characteristics of the rotary hearth furnace system are studied in depth, and the system energy consumption patterns and optimization potential are revealed through the analysis of relevant data from 2019 to 2024. On this basis, an integration scheme of microgrid and rotary hearth furnace system is designed, and a dynamic energy management strategy based on artificial intelligence is proposed to realize the optimal control of multi-energy coordination and real-time scheduling. Simulation results show that the scheme can improve the comprehensive energy efficiency of the system by 15.3%, reduce carbon emissions by 23.7%, and save annual operating costs by 18.5%. The research results provide important theoretical basis and technical support for the promotion and application of industrial microgrids.

Keywords

microgrid; rotary hearth furnace; energy management; system integration; optimization strategy; energy conservation and emission reduction

微电网技术在转底炉系统优化与能源管理策略研究

张元玲¹ 彭程¹ 乔贊²

1. 宝武集团环境资源科技有限公司, 中国 · 上海 201900

2. 上海擎剑汽车技术有限公司, 中国 · 上海 201900

摘要

针对传统转底炉系统能耗高、碳排放严重的问题, 本文提出了基于微电网技术的系统集成优化方案。首先分析了微电网技术的基本原理与架构特点, 建立了包含可再生能源发电、储能系统、能源转换装置和智能控制平台的四层架构模型。然后深入研究了转底炉系统的能源特性, 通过对2019-2024年相关数据的分析, 揭示了系统能耗规律和优化潜力。在此基础上, 设计了微电网与转底炉系统的集成方案, 提出了基于人工智能的动态能源管理策略, 实现了多能源协同与实时调度的优化控制。仿真结果表明, 该方案可使系统综合能效提升15.3%, 碳排放降低23.7%, 年运行成本节约18.5%。研究成果为工业微电网的推广应用提供了重要的理论依据和技术支撑。

关键词

微电网; 转底炉; 能源管理; 系统集成; 优化策略; 节能减排

1 引言

微电网技术作为新兴的分布式能源解决方案, 通过整

合可再生能源、储能系统和智能控制技术, 为工业系统的能源优化提供了新的思路 [1-2]。近年来, 国内外学者在微电网技术应用方面开展了大量研究工作。针对传统转底炉系统能耗高、碳排放严重的问题, 本文提出了工业园区微电网的优化配置方法 [3]。重点是研究了微电网在转底炉冶金固废处理中的应用模式 [4], 分析了储能系统在工业微电网中的作用机制 [5]。然而, 现有研究主要集中在微电网的一般性应用, 针对转底炉系统的专门研究相对较少, 特别是在系统集成优化和能源管理策略方面还存在不足。因此, 本文结合

【基金项目】国家重点研发计划资助项目（项目编号: 2022YFC3901404）。

【作者简介】张元玲 (1980-), 男, 中国上海人, 本科, 高级工程师, 从事电气自动化、智能化研究。

【通讯作者】彭程 (1968-), 男, 硕士, 高级工程师。

转底炉系统的工艺特点和能源需求特性，提出了基于微电网技术的集成优化方案，为推动工业领域的绿色转型提供技术支撑。

2 微电网技术基本原理与架构

2.1 微电网基本原理

微电网是一种小型的分布式供电系统，能够实现自我控制、保护和管理的自治系统 [6]。其基本原理是通过先进的电力电子技术、信息通信技术和控制技术，将分布式电源、储能装置、负荷和监控保护装置等组成一个单一可控的单元，既可以与外部电网并网运行，也可以孤岛运行 [7]。在这个架构中，每个控制区域及其相关的可再生能源发电系统都需要建设一个策略控制系统，该系统负责计算控制区域和可再生能源发电系统的运行设定点。同时，整个系统中集成了一个实时通信网络，控制区域、可再生能源发电系统和控制系统在特定的采样时刻通过该网络进行通信。

2.2 系统架构设计

本文设计的微电网系统采用四层架构模型：

物理层：包括光伏发电系统、风力发电系统、储能系统、电力电子变换器等硬件设备；通信层：负责各设备间的信息传输和数据交换，采用工业以太网和无线通信相结合的方式；控制层：实现对各分布式电源和储能系统的协调控制，包括功率分配、电压频率调节等功能；应用层：提供能源管理、经济调度、故障诊断等高级应用功能。

3 转底炉系统能源特性分析

3.1 转底炉工艺流程与能耗特点

转底炉系统作为冶金固废处理的核心装备 [7]，其能源消耗特性直接关系到生产经济性和环境友好性 [6]。通过对系统热工参数和能量结构的深入分析，可识别出三个关键能耗环节：燃料消耗环节中，转底炉系统采用钢铁厂转炉煤气、焦炉煤气等燃料提供还原反应所需热能。研究表明，通过构建炉膛燃烧 - 流动 - 传热模型，优化空气预热温度、煤气流量及燃烧器分布等参数，可使吨产品综合能耗控制在 140kg 标煤以内。其中，开发的富氧燃烧装置显著提升了燃烧效率，配合“均匀布料 - 控氧燃烧 - 梯级还原”工艺路线，实现了金属化率 75% 和脱锌率 90% 的技术指标。

电能消耗方面，物料传输与除尘风机设备占系统总电耗的 35 ~ 40%。能源管理系统（EMS）的智能化升级对此产生显著影响，从基础阶段的单一电能计量发展到集成阶段的多能源管理，直至智能化阶段的预测分析功能。电气工程项目评估数据显示，通过老旧设备升级改造可实现能效提升 10 ~ 15%，而部署实时监控系统则使数据采集效率提升 90%。特别是开发的转底炉系统能量分析软件，通过热 - 质 - 烟三流耦合模型，实现了物质流与能量流的化学成分及物性参数的有效连接。

冷却水系统能耗占比较为突出，主要服务于炉体降温

与球团冷却。系统界面划分研究表明，采用膜式强化换热技术的内冷式冷却机可降低冷却水用量 12 ~ 15%。能源管理系统的计量平衡报表功能，通过可视化计量拓扑识别出冷却系统的“跑冒滴漏”现象，配合用能异常报警功能，可减少能源浪费 5% ~ 10%。

在产品单耗管理方面，自动计算单耗指标功能为优化冷却工艺提供了数据支撑。值得注意的是，转底炉系统的能源结构优化面临较高实施难度。评估数据显示，将清洁能源比例提升至 30% 可降低碳排放 15% ~ 20%，但需要配套开发适应多种原料特性的预处理技术。研究证实，铁锌尘泥的均质混匀、消解及成球等预处理工序对最终能耗具有决定性影响，这要求系统具备多维度统计能源用量的能力，以实现精准掌握能源消耗结构的目标。

转底炉是一种用于处理含铁尘泥的回转窑设备，主要用于钢铁企业的固废资源化利用。其工艺流程包括原料准备、成球、干燥、预热、还原、冷却等环节，整个过程需要消耗大量的电能和热能 [8]。

根据实际运行数据统计，典型转底炉系统的能耗构成如下：

电能消耗：占总能耗的 35-40%，主要用于设备驱动、风机、泵类等；

燃料消耗：占总能耗的 50-55%，主要用于加热和还原反应；

其他能耗：占总能耗的 5-10%，包括压缩空气、冷却水等。

3.2 金属回收过程中的节能降碳需求

转底炉系统作为多金属回收的核心装备 [6]，其能源需求与生产过程中的碳排放问题已成为行业技术升级的关键制约因素。2023 年至 2024 年季度数据显示，可再生能源发电装机容量呈现阶梯式扩张特征，2023 年第三季度累计装机容量达 17200 万千瓦，2024 年第四季度跃升至 37300 万千瓦，装机规模在 18 个月内实现 116.9% 的扩容。这种能源结构转型为转底炉系统优化提供了新的技术路径，这种量化关系为转底炉系统设计提供了能源配置基准。

3.3 能源需求波动特性

转底炉系统的能源需求具有明显的时变性和波动性特征。通过对某钢铁企业转底炉系统连续一年的运行数据分析发现：

日内波动：系统负荷在 8:00-18:00 期间较高，夜间相对较低，峰谷差约为 30%；季节性变化：夏季由于冷却需求增加，总能耗比冬季高约 15%；工艺相关性：不同生产阶段的能耗差异显著，还原阶段能耗最高。

4 微电网与转底炉系统集成方案

4.1 集成架构设计

基于转底炉系统的能源特性分析，本文设计了微电网与转底炉系统的集成架构。该架构采用交直流混合结构，