

物联网环境下智能安全设计的评估体系构建与实践

赵康¹, 张亮¹, 屈煦通¹, 刘亚平¹, 鲁斌², 米超², 任卫华²

¹陕西新能选煤技术有限公司 陕西西安

²山西汇永青峰选煤工程技术有限公司 山西朔州

【摘要】为评价物联网环境下智能安全系统, 构建由目标层、准则层和指标层组成的“三层六维双判据”体系, 从安全性、可靠性、智能性、环境适应性、运行效率、经济与绿色性 6 个维度设置指标, 采用“安全门槛+绩效改进”方法, 并以选煤厂智能安全供配电系统验证。结果表明: 身份识别精度 100%, 系统无故障运行时间 $\geq 99.9\%$, 数据查询响应 ≤ 1.5 s, 非计划停电识别准确率 92.5%、平均响应 ≤ 4.2 min; 应用后停送电耗时缩短 40%以上, 故障停机减少 50%, 维护效率提高 30%, 吨煤电耗由 2.96 kW·h/t 降至 2.51 kW·h/t。该体系可同时表征安全底线与运行绩效, 为燃气、供热等能源物联网系统安全评价提供参考。

【关键词】物联网; 智能安全; 评估体系; 安全联锁; 风险评价; 能源系统

【收稿日期】2026 年 3 月 6 日

【出刊日期】2026 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260040

Construction and practice of an evaluation system for intelligent safety design in an IoT environment

Kang Zhao¹, Liang Zhang¹, Xutong Qu¹, Yaping Liu¹, Bin Lu², Chao Mi², Weihua Ren²

¹Shaanxi Xinneng Coal Preparation Technology Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi

²Shanxi Huiyong Qingfeng Coal Preparation Engineering Technology Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi

【Abstract】To scientifically evaluate the design and operation level of intelligent safety systems in an industrial Internet of Things (IIoT) environment, a three-layer, six-dimension and dual-criterion evaluation system is established to overcome the limitations of single accuracy indices or subjective composite scores. The system consists of target, criterion and indicator layers, covering safety, reliability, intelligence, environmental adaptability, operational efficiency, and economic/green performance. A dual method combining mandatory safety thresholds with performance-improvement evaluation is adopted and verified using an intelligent safe power-distribution system in a coal preparation plant. The identity-recognition accuracy was 100%, system uptime was at least 99.9%, data-query response time was within 1.5 s, and unplanned-outage identification accuracy reached 92.5% with an average response time within 4.2 min. After application, power-switching operation time decreased by more than 40%, equipment-failure downtime decreased by 50%, maintenance efficiency increased by 30%, and specific electricity consumption decreased from 2.96 to 2.51 kW·h/t. The proposed system integrates safety bottom-line requirements with intelligent operating performance and can provide a reference for safety evaluation of gas, heating and other energy IIoT systems.

【Keywords】Internet of Things; Intelligent safety; Evaluation system; Safety interlock; Risk assessment; Energy system

引言

物联网、边缘计算和智能控制在燃气厂站、供热热力站、矿山及工业配电等能源基础设施中的应用不断深入, 系统运行方式由局部自动化逐步向全面感知、远程控制和智能决策演进。智能化提高了状态透明度和运维效率, 但也使安全链条从传统的“设备—人员”

扩展为“设备—人员—环境—网络—数据—算法”耦合系统。当传感器失真、通信异常、权限越界或算法误判进入控制链时, 信息域问题可能转化为物理域风险, 因此仅以设备完好率或单一算法准确率评价智能安全水平已难以满足工程需要^[1-3]。

《煤气与热力》近期关于绿色供热系统评价指标体

系的研究将安全可靠、清洁低碳、高效节能和智慧运营作为一级评价指标,表明能源基础设施评价正在由单一技术指标向多维综合绩效转变^[1]。在燃气、LNG (Liquefied Natural Gas) 及供热系统中,远程切断、联锁控制、备用切换和异常恢复同样是智能安全的重要组成部分^[4]。

用户提供的项目资料以选煤厂供配电系统为对象,通过物联网、PLC (Programmable Logic Controller) 控制、往复式电能隔离、人员身份识别、巡检机器人和故障预警等技术,形成从状态感知到远程执行、从安全联锁到运行反馈的完整链条。项目最终在 7 个配电室开展工业性应用,积累了控制日志、设备状态、巡检数据、故障响应以及能耗与运维绩效等多类型证据。基于这些资料,本文构建适用于物联网智能安全系统的“三层六维双判据”评估体系,并以该工程开展实践验证。

与此前偏重智能安全设计理论的研究不同,本文重点解决“如何评价已经建成并运行的智能安全系统”这一问题:一方面设置不可被综合分值抵消的安全门槛,另一方面对智能化、可靠性、环境适应性和运行绩效进行量化评价,从而使评估结果能够直接用于验收、运行改进和后续系统迭代。

1 评估体系总体框架

1.1 评估对象与边界

物联网智能安全系统的评价对象不应局限于单一传感器或软件平台,而应覆盖感知、通信、决策、控制、

执行和管理全过程。本文将评估边界划分为设备侧、人员侧、环境侧、网络与数据侧以及管理侧。设备侧关注执行机构、断路器、保护与状态反馈;人员侧关注身份、资质与权限;环境侧关注温湿度、粉尘等对设备可靠性的影响;网络与数据侧关注通信、响应、数据完整性和算法识别;管理侧关注操作票、电子挂牌、报警处置和全程追溯。

上述边界具有较强的能源基础设施通用性。对于燃气厂站,可将设备侧对象替换为阀门、调压器、压缩机和泄漏检测装置;对于供热热力站,可替换为泵、换热器、阀门和压力温度测点,而权限、通信、联锁、环境适应及运维评价逻辑保持一致。本文的工程数据仅来源于选煤厂供配电系统,燃气与供热场景属于方法层面的可迁移对象,并非本文已完成的现场验证。

1.2 体系构建原则

评估体系遵循 4 项原则。第一,安全底线优先。身份、联锁、隔离和误动作等指标属于强制门槛,不能因其他绩效指标较好而被抵消。第二,可测量与可追溯。指标尽量对应 PLC 日志、平台记录、传感数据和现场试验,避免仅以专家印象评价。第三,分层评价。安全性与可靠性用于判断系统是否具备可运行条件,智能性、环境适应性、效率和经济性用于评价应用质量。第四,评价与改进闭环。指标不达标时应能够追溯到硬件、算法、通信或流程环节,并形成复测要求,评估体系总体框架如图 1 所示。

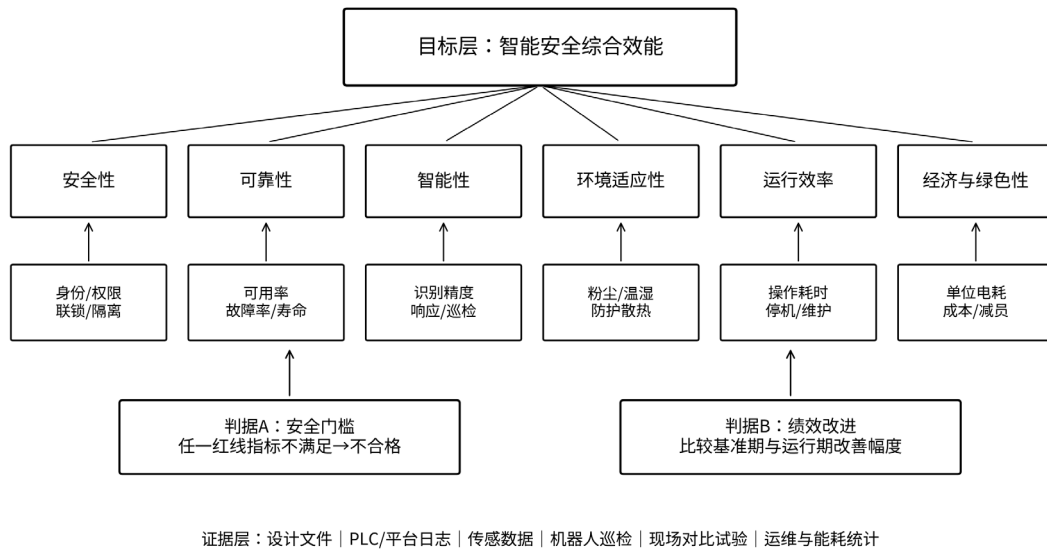


图 1 物联网环境下智能安全“三层六维双判据”评估体系

1.3 “安全门槛+绩效改进”双判据

对于安全红线指标,采用门槛函数进行判定。设第

j 个强制安全指标的达标状态为 g_j , 达到规定要求时 $g_j=1$, 否则 $g_j=0$, 则系统安全门槛 G 为:

$$G = \prod g_j$$

当 $G=0$ 时, 系统总体评价不得判定为合格, 必须完成整改并重新验证。本文将身份与权限有效性、联锁逻辑、物理隔离确认、远程控制误动/拒动等列为门槛类指标。

对运行绩效类指标采用改造前后变化率评价。对于操作耗时、故障停机时间、单位电耗等“越低越优”的指标, 其改善率 R 可表示为:

$$R = (X_0 - X_1) / X_0 \times 100\%$$

式中 X_0 为基准期指标, X_1 为系统运行期指标。对于维护效率等“越高越优”的指标采用相反方向计算。考虑不同指标量纲、风险重要度和统计周期差异, 本文不在缺乏统一权重依据的情况下强行计算单一综合分值, 而采用门槛达标、单项绩效和问题清单并列输出。

2 六维评估指标体系

2.1 安全性指标

安全性评价重点回答系统是否能够阻止不安全操作进入物理执行链。指标包括身份识别与权限校验、电子挂牌、软件闭锁、硬件联锁、抽屜/阀门等物理隔离状态确认、远程控制误动拒动以及高风险操作的人工复核。项目采用人脸识别门禁、权限管理、电子挂牌和双重限位位置反馈, 并在远程停送电中形成“权限校验—自动执行—结果回传”的闭环; 停送电作业遵循 GB 26860—2011^[5]和 AQ 1010—2005^[6]的要求, 安全相关功能设计参照 IEC 61508:2010^[7]。

对于这类指标, 评价不宜只看平均准确率。身份或联锁一旦失效即可直接引发高后果风险, 因此本文将身份识别、联锁逻辑和物理隔离设为门槛项; 对于故障预警、图像识别等概率型功能则进入智能性评价。

2.2 可靠性指标

可靠性反映系统在长期运行中持续提供安全功能的能力。主要指标包括系统无故障运行时间、控制器故障概率、执行机构机械寿命、动作成功率、状态反馈一致性和通信稳定性。低压成套智能设备的技术要求参照 GB/T 7251.8-2020^[8]。对于频繁停送电的工业场景, 机械执行机构和控制链的可重复性与单次性能同等重要。

项目最终结果显示, 电动操作机构寿命不低于 2 万次, 低压配电柜智能控制器故障概率低于 0.1%, 系统无故障运行时间不低于 99.9%。这些数据可作为同类系统招标、验收和全生命周期管理的重要量化依据。

2.3 智能性指标

智能性并非功能数量, 而是系统感知、识别、响应与闭环处置能力。本文选取数据响应时间、身份识别精度、巡检机器人识别精度、故障识别准确率、故障定位与响应时间以及模型持续迭代能力等指标。

研究报告中的非计划停电识别采用计划停电数据库过滤、规则引擎初筛和随机森林模型复验, 试运行识别准确率达到 92.5%, 平均响应时间不超过 4.2 min; 机器人联动使疑似故障点定位由人工约 30 min 缩短至 5 min 以内。该类指标反映的是智能算法和移动感知对传统报警体系的增强作用。

2.4 环境适应性指标

燃气、供热、矿山和工业配电系统均可能处于高湿、粉尘、温度波动或电磁干扰环境。若智能设备在环境变化下出现漂移、失联或散热异常, 安全功能将失去基础。因此环境适应性评价包括防护结构、温湿度与粉尘监测、设备温升、告警次数、长期稳定性以及异常环境下的降级策略。

项目配套低压电气设备防护装置采用过滤与智能散热设计, 研究报告记录设备内部积尘量降低 95% 以上, 高温告警次数减少 80%。这些结果表明, 环境适应性应作为智能安全评价的独立维度, 而不能只在设备选型时一次性确认。

2.5 运行效率指标

运行效率主要评价智能安全系统是否在不削弱安全性的前提下减少人员暴露、等待和故障停机。指标包括单次操作耗时、停送电总体耗时、巡检人工需求、设备故障停机时间和维护效率。

项目工业对比试验表明, MNS 抽屜柜 (MNS 型低压抽出式开关柜) 单次推拉由人工约 90 s 缩短至远程自动 15 s 以内, 操作成功率达到 100%; 系统级停送电操作耗时缩短 40% 以上, 设备故障停机时间减少 50%, 维护效率提高 30%。

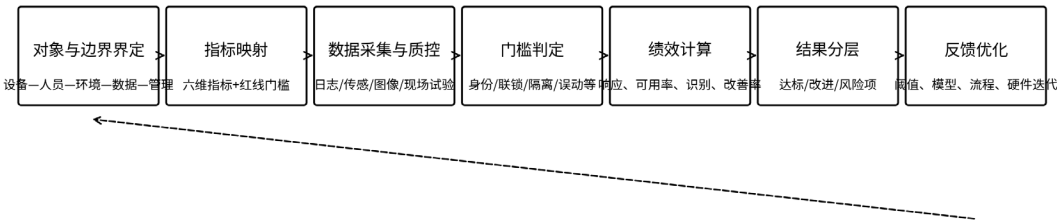
2.6 经济与绿色性指标

智能安全项目往往同时具有安全、效率和节能价值。经济与绿色性指标包括单位产品能耗、年节约电费、人工成本、运行维护成本和设备寿命变化。项目最终应用口径中, 吨煤电耗由 2.96 kW·h/t 降至 2.51 kW·h/t, 年节约电费 184.25 万元; 减少岗位工 4 人, 年节约人工成本 48 万元, 直接年经济效益合计 232.25 万元。

需要说明的是, 这类经济指标高度依赖产量、电价和组织模式, 只适合用作项目自身前后对比, 不宜直接作为跨企业排序依据, 六维评估指标体系见表 1。

表 1 物联网智能安全六维评估指标体系

一级维度	典型二级指标	指标属性	主要证据	判定方式
安全性	身份/权限、联锁、挂牌、物理隔离、误动拒动	门槛型	操作记录、联锁试验、现场验证	全部满足
可靠性	可用率、控制器故障概率、机械寿命、动作成功率	门槛+绩效	运行日志、寿命试验	达标/趋势
智能性	响应时间、识别精度、故障诊断、机器人巡检	绩效型	平台、模型、巡检记录	目标值+实测
环境适应性	粉尘、温湿度、温升、告警、环境联动	绩效型	环境/设备监测	前后对比
运行效率	操作耗时、停机时间、维护效率、现场作业频次	绩效型	工单、操作日志	改善率
经济与绿色性	单位能耗、电费、人工、运维、寿命	绩效型	能耗与财务统计	项目内对比



核心原则：先判断安全红线是否满足，再讨论智能化程度与运行绩效；评价结果直接关联整改和再验证。

适用对象可扩展至燃气厂站、供热热力站、能源配电及其他工业物联网安全系统。

图 2 智能安全评估实施流程

3 评估数据与实施方法

3.1 证据链构建

评估实施流程如图 2 所示。为降低“只看平台展示、不看底层证据”的评价偏差，本文将评价数据划分为 5 类：设计与配置文件、PLC 和平台操作日志、传感器时序数据、机器人图像/红外数据、现场对比与运维统计。关键结论至少应有一类直接运行证据，门槛类指标宜采用“配置核查+功能试验”双重验证。

系统采用分层架构：基础设施层包括 PLC、往复式电能隔离机构、传感器、门禁和机器人；数据源层包括设备、作业、环境和人员数据；基础平台层提供数据存储、算法、安全联锁和通信服务；应用层实现停送电管理、设备健康、智能巡检、身份认证和故障预警；业务层完成可视化与追溯。上述架构同时构成评估证据链的来源，系统架构与证据链的对应关系如图 3 所示。

3.2 数据质量控制

物联网评估首先要确认数据本身是否可信。项目对设备数据进行统一编码与格式标准化，采用工业通信协议传输，并将操作人员、设备位置、故障、环境和时间戳进行关联。评价过程中需剔除测试数据、通信异常导致的空值和重复记录，并对重要指标进行日志与

现场记录交叉核验。

对于算法类指标，应区分研究目标值、模型验证值和最终工业运行值。本文只把项目报告明确给出的最终试运行/应用结果作为实践评价数据；例如研究报告中“故障预警准确率 $\geq 95\%$ ”属于模型性能要求，而非最终总结报告逐项确认的整机实测值，因此未将其写入最终达标表。

3.3 评价输出

评价结果由 3 部分组成：①门槛判定表，列出安全红线是否通过；②量化绩效表，列出可靠性、智能性、环境和效率等实测结果；③问题与改进清单，针对不达标项明确整改措施、责任模块和复测条件。

这种输出方式比单一总分更适合高风险工业系统。例如一个系统即使能耗和维护效率大幅改善，只要联锁或物理隔离存在缺陷，就不能因“综合得分较高”而被判为安全。

4 工程实践与评估结果

4.1 工程概况

项目面向选煤厂低压供配电系统，针对人工停送电、MNS 抽屉柜需现场摇出、配电室分散、巡检效率低和运行数据不透明等问题，研发往复式电能隔离机构、远程分合闸控制、身份识别、轨道式巡检机器人和

物联网平台。选煤厂智能低压供电系统设计已有相关工程实践^{[9][10]}, 项目依据《煤矿智能化建设指南(2021年版)》^[11]推进智能化改造; 最终技术在文家

坡选煤厂 7 个配电室开展工业性应用, 形成远程停电、物理隔离、智能识别、机器人巡检和故障预警五位一体解决方案, 工程实践场景如图 4 所示。

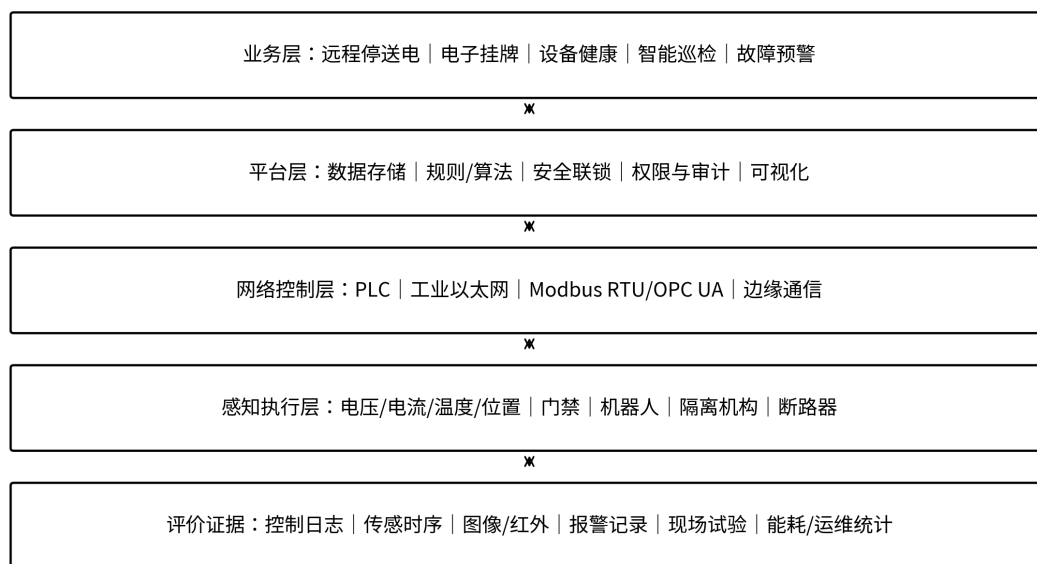
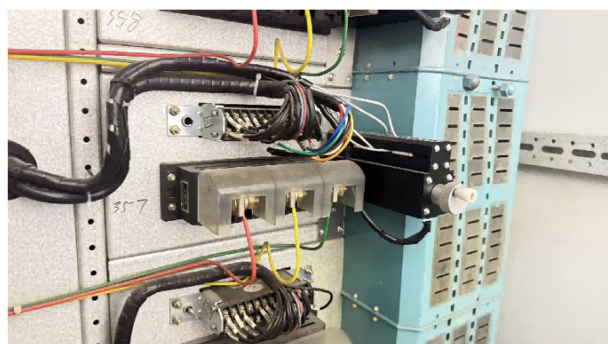


图 3 物联网智能安全系统与评估证据链



往复式电能隔离/抽屉执行机构



配电室工业应用现场



物联网智能监控平台



供配电状态可视化

图 4 物联网智能安全系统工程实践场景

注：图片取自项目研究报告，包括往复式电能隔离机构、配电室现场及智能监控界面。

4.2 安全性与可靠性评价

身份识别精度达到 100%，远程停送电运行期间未发生因远程控制引起的误动、拒动事故。抽屉柜通过双限位与位置状态反馈确认退出状态，形成可靠物理断开点。根据双判据方法，上述门槛类指标满足项目安全运行要求。

可靠性方面，电动操作机构寿命不低于 2 万次，低压配电柜智能控制器故障概率低于 0.1%，系统无故障运行时间不低于 99.9%，数据查询响应时间不超过 1.5 s。说明机械执行、控制器与平台能够满足高频操作和持续在线要求。

4.3 智能性评价

巡检机器人可完成可见光巡检、红外测温和设备状态识别，项目总结报告给出的识别精度不低于 96%。非计划停电识别系统通过计划停电信息比对、规则引擎与随机森林复验实现分层判断，工业试运行识别准确率达到 92.5%，平均响应时间不超过 4.2 min。

在故障定位环节，机器人可自动规划路径到达疑似故障点并进行图像/温度核验，使定位时间由人工平均约 30 min 缩短至 5 min 以内。该结果说明智能化能力不仅表现为算法精度，还体现为从识别到处置的端到端响应效率。

4.4 环境适应性评价

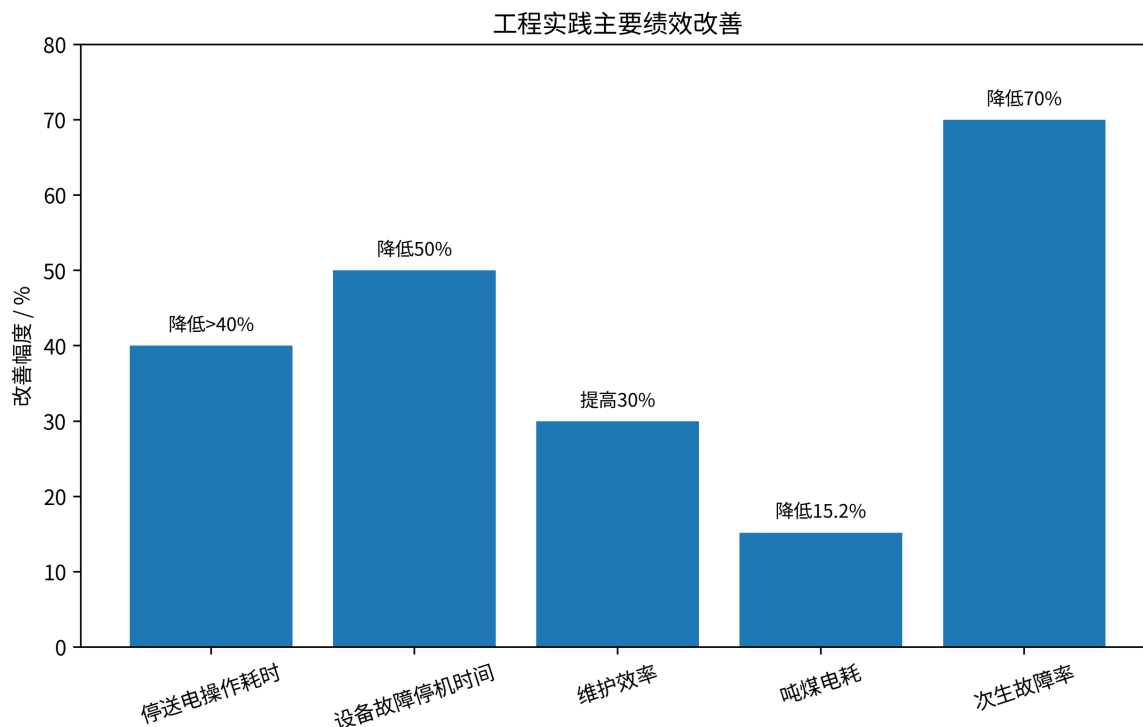
项目针对选煤厂高粉尘、高湿环境，在低压电气设备防护中采用过滤、防潮和温度联动散热措施。研究报告中的试点运行数据显示，设备内部积尘量降低 95% 以上，高温告警次数减少 80%，因粉尘引发的电气故障率降至趋近于零。

由于该数据对应配套防护装置的试点效果，而非 7 个配电室全部设备的统一统计，本文将其作为环境适应性“专项验证”，不与系统级可靠性指标混用。这种证据分级有助于避免评价结果过度外推。

4.5 效率、经济与绿色性评价

工业对比试验中，MNS 抽屉单次推拉操作由人工约 90 s 缩短至远程自动 15 s 以内，操作成功率为 100%。系统整体停送电操作耗时缩短 40% 以上，设备故障停机时间减少 50%，维护效率提高 30%，设备使用寿命延长 10% 以上。

吨煤电耗由 2.96 kW·h/t 降至 2.51 kW·h/t，按前后数据计算降幅约 15.2%；最终应用口径年节约电费 184.25 万元、人工成本 48 万元。以上数据表明，在安全门槛满足的前提下，物联网智能安全系统能够同时产生运行效率与节能效益，主要绩效改善如图 5 所示，工程实践主要评估指标结果见表 2。



注：吨煤电耗按 2.96→2.51 kW·h/t 计算；其余为项目试运行/最终应用统计。

图 5 工程实践主要绩效改善

表 2 工程实践主要评估指标结果

评价维度	指标	实践结果	评价
安全性	身份识别精度	100%	门槛满足
安全性	远程控制误动/拒动	未发生相关事故	门槛满足
可靠性	系统无故障运行时间	≥99.9%	满足持续运行
可靠性	控制器故障概率	<0.1%	可靠性较高
智能性	数据查询响应时间	≤1.5 s	满足实时交互
智能性	机器人识别精度	≥96%	满足自主巡检
智能性	非计划停电识别准确率	92.5%	具备实用识别能力
智能性	非计划停电平均响应	≤4.2 min	响应较快
环境适应性	设备内部积尘量	降低 95%以上	专项验证有效
环境适应性	高温告警次数	减少 80%	专项验证有效
运行效率	停送电操作耗时	缩短 40%以上	显著改善
运行效率	设备故障停机时间	减少 50%	显著改善
经济绿色	吨煤电耗	2.96→2.51 kW·h/t	降低约 15.2%

5 体系适用性与讨论

5.1 与单一综合评分法的差异

常见综合评价方法倾向于为指标赋权后形成总分,便于排序,但对高风险系统存在“安全短板被其他高分抵消”的问题。本文将安全门槛与绩效指标分离,先判断是否具备安全运行资格,再评价智能和经济绩效,适合燃气切断、供热联锁、工业配电等存在明确安全边界的系统。

对于需要项目横向比较的场景,可在门槛全部通过后再使用层次分析、熵权或组合赋权形成绩效分值,但权重应由实际样本和专家过程支持,不能直接从单个工程案例主观设定。

5.2 对燃气与供热物联网系统的借鉴

燃气和供热系统与项目案例在对象上不同,但评价逻辑具有共性。燃气厂站可将“物理隔离”映射为紧急切断阀状态与联锁确认,将“环境适应性”映射为可燃气体、压力、温度和防爆环境,将“非计划停电识别”替换为泄漏、压力越限或设备异常识别;供热热力站可将其映射为泵阀、换热设备、压力温度和水力异常。

2026 年《煤气与热力》关于 LNG 厂站氮气系统互联互通的研究通过远程切断、止回和压力调节等装置以及控制逻辑优化提高系统稳定性与安全性^[4],说明“状态感知—联锁控制—备用/恢复”也是燃气安全系统的重要评价链条。因此,本文体系可作为燃气与供热智能化项目验收指标设计的参考,但具体门槛值应依据相应标准和场站工艺重新确定。

5.3 局限性

本文实践数据来源于单一选煤厂供配电项目,尚不能代表不同能源行业的统计分布;部分环境指标来自配套防护装置试点,并非全系统统一测点;经济指标也受产量、电价和人员配置影响。

后续可在燃气厂站、热力站等场景开展跨项目验证,建立同类型设备的参考区间,并研究“安全门槛+数据驱动绩效评分”的二阶段评价模型。同时,应将网络安全、数据可信度和模型漂移监测进一步纳入指标体系,工业网络系统安全要求可参照 IEC 62443-3-3:2013^[12],形成覆盖建设、验收、运行和升级的全生命周期评价机制。

6 结论

(1) 构建了物联网环境下智能安全“三层六维双判据”评估体系,从安全性、可靠性、智能性、环境适应性、运行效率、经济与绿色性 6 个维度评价系统,并采用安全门槛与绩效改进分离的方法,避免关键安全短板被综合分数掩盖。

(2) 建立了由设计与配置文件、PLC/平台日志、传感数据、机器人巡检、现场对比试验和运维统计组成的评估证据链,明确研究目标值、专项试验值和最终工业运行值应分开使用。

(3) 工程实践中身份识别精度 100%,系统无故障运行时间≥99.9%,数据查询响应≤1.5 s,非计划停电识别准确率 92.5%、平均响应≤4.2 min;停送电操作耗时缩短 40%以上、故障停机减少 50%、维护效率提高 30%,验证了评估体系对安全底线和运行绩效的共同表征能力。

(4) 该体系可为燃气、供热及其他能源工业物联网系统的项目验收和运行评价提供方法参考, 但燃气泄漏、压力联锁、供热水力安全等具体指标及门槛值需依据相应行业标准和工程数据重新标定。

参考文献

- [1] 苗庆伟, 高文学, 杨林, 等. 绿色供热系统评价指标体系[J]. 煤气与热力, 2025, 45(8): 86-88.
- [2] KIZIROGLOU M E, et al. A robust end-to-end IoT system for supporting workers in mining industries[J]. Sensors, 2024, 24(11): 3317.
- [3] SUN Z, CHEN G, DING Y, et al. Joint safety and security risk analysis in industrial cyber-physical systems: a survey[J]. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2024, 9(4): 334-349.
- [4] 宋蒲阳, 曹炳峰, 杨颖. LNG 厂站液氮气化系统与制氮系统互联互通工艺[J/OL]. 煤气与热力, 2026.
- [5] GB 26860—2011 电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分[S].
- [6] AQ 1010—2005 选煤厂安全规程[S].
- [7] IEC 61508:2010 Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic safety-related systems[S].
- [8] GB/T 7251.8—2020 低压成套开关设备和控制设备 第 8 部分: 智能型成套设备通用技术要求[S].
- [9] 王宇涵. 基于工业现场总线的选煤厂智能低压供配电系统设计应用[J]. 选煤技术, 2024, 52(6): 74-78.
- [10] 李涛, 逯新保, 郎舒婷. 智能供配电系统在选煤厂的应用[J]. 选煤技术, 2021, 49(5): 92-95.
- [11] 国家能源局. 煤矿智能化建设指南(2021 年版)[S/OL]. 2021.
- [12] IEC 62443-3-3:2013 Industrial communication networks—Network and system security—System security requirements and security levels[S].

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS