

面向低碳机场建设的助航灯光电气施工节能优化与可靠性控制研究

黄哲

四川双龙机场建设有限公司, 四川 成都 610094

DOI:10.61369/ERA.2025120032

摘要： 本文以机场助航灯光电气施工为研究对象，针对施工阶段的高能耗、设备效率低和系统可靠性差等问题，提出了一种基于综合绩效指数（CPI）模型的节能与可靠性协同优化策略。通过优化线路设计、选用高效设备、调整施工工艺以及精细化管理，结合 BIM 技术与物联网平台，成功实现了施工阶段的能耗降低与设备效率提升。研究表明，该策略有效提高了系统的可靠性，减少了故障率和后期维护成本，推动了低碳机场建设的进程。本文为机场助航灯光系统的节能与可靠性管理提供了新的思路与实践依据，具有较强的应用价值和推广意义。

关键词： 机场助航灯光；节能优化；可靠性控制；低碳施工；绿色机场

Research on Energy Efficiency Optimization and Reliability Control in Airport Approach Lighting Electrical Construction for Low-Carbon Airport Development

Huang Zhe

Sichuan Shuanglong Airport Construction Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610094

Abstract： This paper focuses on the electrical construction of airport approach lighting systems, addressing issues such as high energy consumption, low equipment efficiency, and poor system reliability during the construction phase. A collaborative optimization strategy for energy efficiency and reliability based on the Comprehensive Performance Index (CPI) model is proposed. By optimizing circuit design, selecting efficient equipment, adjusting construction processes, and implementing refined management, combined with BIM technology and the IoT platform, energy consumption reduction and equipment efficiency improvement during the construction phase were successfully achieved. The study shows that this strategy effectively improves system reliability, reduces failure rates and subsequent maintenance costs, and promotes the progress of low-carbon airport construction. This paper provides new ideas and practical basis for energy efficiency and reliability management in airport approach lighting systems, offering significant application value and potential for wider implementation.

Keywords： airport approach lighting; energy efficiency optimization; reliability control; low-carbon construction; green airport

引言

随着全球“双碳”战略的推进，低碳绿色发展成为各行各业的目标，民航行业亦面临着碳排放和能源消耗问题。机场助航灯光系统作为保障飞行安全的重要组成部分，其施工和运行常伴随高能耗、设备效率低和运维成本高等问题，尤其是在施工阶段，传统方法导致电力消耗大、设备可靠性差，影响了机场的节能减排和长期运营^[1]。为解决这些问题，本文提出了一种节能优化与可靠性控制的多维方法，结合高效 LED 灯具、智能恒流源（CCR）和能效调度策略，在施工阶段降低能耗、提高设备效率，并确保系统可靠性，减少故障和后期维护成本。该研究为低碳机场建设提供了可行路径，并为电气施工管理提供了新的思路与实践依据。

一、助航灯光电气施工的能耗机理与可靠性分析

（一）施工阶段能耗特征

机场助航灯光电气施工阶段的能耗主要来源于临时用电、线

路铺设、系统调试与试灯老化等环节，其中试灯与老化阶段是耗能最高的部分。传统施工往往采用全功率连续试灯方式，导致能耗集中、发热量大、效率低，同时增加了设备损耗与碳排放^[2]。电缆敷设路径不合理、回路压降过大、接头工艺不规范也会造成额

外能量损失。此外，夜间连续作业、重复上电调试等因素进一步加剧施工能耗。由此可见，优化施工工艺、采用分区分时调试及能效监测手段，是实现节能降耗的关键途径。

（二）可靠性风险要素

助航灯光电气系统运行环境复杂，施工质量直接影响系统的长期可靠性^[9]。主要风险包括电缆接头渗水、接地不良、绝缘退化及恒流源（CCR）配置不当等问题，这些故障不仅可能导致局部短路、接地异常，还可能造成整个回路失效^[10]。由于机场飞行区施工受气候和时间窗口限制，赶工现象普遍，容易导致工序交叉、检验不到位，从而埋下潜在隐患。可靠性问题的根源在于材料选型、施工工艺与检测标准的控制不足，因此必须通过全过程质量管理和在线监测手段，确保系统在复杂环境下的稳定运行。

（三）节能与可靠性耦合关系

节能与可靠性在助航灯光系统中相互关联又相互制约。提高能效往往意味着降低功率损耗、优化线路与设备配置，但过度压缩能耗可能削弱冗余设计，影响运行稳定性；而盲目提升可靠性，如采用过大截面或双冗余设计，又会造成材料浪费和能效下降。因此，节能与可靠性的优化必须协同考虑，通过精确负载分析、经济电流密度控制及智能调度算法实现平衡，使系统既具备低碳节能特性，又能保持高可用度与运行安全性。

（四）综合绩效指数模型

为了实现节能与可靠性之间的平衡，本文提出了一种综合绩效指数（CPI）模型。该模型通过对系统的能效、碳排放、可用度和故障率进行综合评估，量化节能与可靠性提升的综合效益。

$$CPI = w_e \frac{E_0 - E}{E_0} + w_c \frac{CO2_0 - CO2}{CO2_0} + w_a \frac{A - A_0}{A_0} - w_f \frac{F - F_0}{F_0} \quad \text{式 (1)}$$

其中：

E_0 , $CO2_0$, A_0 , F_0 为优化前的基准值， E 、 CO_2 、 A 、 F 分别为优化后的能耗、碳排放、可用度和故障率； w_e , w_c , w_a , w_f 为相应指标的权重，且 $\sum w_i = 1$ 。

该公式通过将节能、电力消耗的碳排放、系统可用度与故障率四个关键指标的相对改善进行加权求和，综合评价助航灯光电气施工的整体优化效果。CPI 值越大，表明系统的节能效果与可靠性提升越显著。

通过对 CPI 模型的应用与分析，可以清晰地量化在不同施工阶段、不同优化方案下，节能与可靠性之间的平衡与改进，最终为施工管理提供科学的决策依据。

二、节能优化与可靠性控制策略体系

（一）线路与设备节能优化

在助航灯光电气系统中，线路设计与设备选型是影响能效的关键环节。针对传统设计中电缆过长、敷设路径冗余、压降过大的问题，可通过 BIM 三维建模优化线路布局，缩短电缆长度并减少无效弯折，从源头降低电阻损耗^[11]。在设备方面，应采用高光效 LED 灯具与高效率恒流源（CCR）配套，确保系统在最佳负载区间内运行，以提升整体能效。对于不同的灯具类型和运行环

境，合理配置回路数量和功率等级，可避免过度冗余引发的能源浪费。同时，通过引入功率因数校正、谐波抑制装置及电缆截面经济电流密度计算，实现线路与设备的同步节能，达到“系统效率最大化”的目标。

（二）工艺与施工流程优化

施工工艺与管理流程的优化对节能降耗具有直接影响。传统的全功率连续试灯方式能耗高、风险大，而采用“分区分时、脉冲老化、夜间抽检”的策略，可在保证测试效果的同时显著降低能耗。通过 4D BIM 技术实现进度与能耗的动态可视化管理，可避免重复上电和无效作业。施工阶段应推广“精益化施工”理念，实行多专业并行协同，减少临电系统待机损耗与设备空载时间^[11]。此外，临电系统应配置能耗监测终端，实时统计各分区功率与电流，便于及时调整施工计划与负载分配。通过标准化工序、优化排程与数据化能管控，可有效实现“过程节能、行为节能与管理节能”的统一。

（三）可靠性提升措施

为确保助航灯光系统的长期稳定运行，需从结构冗余、质量控制与智能监测三方面提升可靠性。在电气结构上，应采用环网供电与分段旁路设计，保证任一回路失效时系统可快速切换，提升供电连续性^[10]。在施工质量方面，应严格执行接头预制、密封灌封与耐压检测工艺，确保绝缘性能与防水等级达到标准要求；同时，通过红外测温与局部放电测试及时发现潜在隐患。在智能化监测层面，可布设 IoT 传感器实时采集电流、电压、接地电阻等参数，结合历史趋势进行预测性维护^[12]。通过“事前预警—事中监控—事后评估”的闭环控制体系，不仅能降低设备故障率，还能减少因停机维修带来的能源浪费，实现安全性与经济性的同步提升。

（四）协同控制原理

节能优化与可靠性控制的关键在于建立动态平衡的协同机制。本文基于综合绩效指数（CPI）模型，通过能耗、碳排、可用度及故障率等指标的实时反馈，实现节能与可靠性的量化协调。在实际应用中，系统可通过数据采集与算法分析，对施工阶段的能耗趋势和运行状态进行动态评估，并根据 CPI 变化自动调整运行参数，如调节亮度等级、切换冗余回路或调整负载分配。该协同控制原理将传统静态管理转变为自适应优化，使系统在不同施工阶段都能保持最优运行状态。通过数据驱动的智能调控，不仅实现了能效与可靠性的双提升，也为后续机场运维阶段的智能化

三、工程案例验证与数据分析

（一）项目概况

本研究选取某国际机场新建助航灯光系统作为工程案例，项目包括跑道、滑行道和进近灯回路的建设与调试。施工过程中，

针对传统助航灯光施工中的高能耗、高故障率和低效率问题，实施了节能优化与可靠性控制措施。项目采用了 BIM 技术优化线路布置、智能化调度降低能源消耗，同时对设备进行了高效 LED 灯具与智能恒流源（CCR）的选型。在施工质量方面，加强了接头与接地系统的质量控制，并引入了实时监测系统，以确保系统的长期可靠性。施工期从 2023 年 3 月开始，到 2023 年 10 月结束，总体施工周期为 7 个月，旨在为机场后续运营提供一个节能、高效、低碳的助航灯光系统。

（二）数据采集与指标计算

在项目实施过程中，采用了多种数据采集手段，包括施工期间的电能监测、设备故障记录、系统可用度跟踪和环境数据分析。所有关键指标都通过智能化管理平台实时采集，具体包括：

- 1. 总电耗：所有施工用电，包括电缆铺设、试灯、老化、设备调试等环节；
- 2. 恒流源效率：优化前后恒流源的能效变化，反映了设备的工作效率；
- 3. 接头返工率：通过质量控制检测，记录接头处的返工情况，作为可靠性指标之一；
- 4. 故障率与系统可用度：通过现场数据记录，计算系统运行的可用度与故障发生的频率；
- 5.CO₂ 排放：基于电耗计算的二氧化碳排放量，体现节能效果。

数据计算基于优化前后的能耗、系统故障和设备效率变化，采用了标准化的性能评估方法，确保数据的可靠性和可比性。

（三）综合节能与可靠性提升效果

通过对优化前后的多个关键指标进行对比，本文展示了在实施节能优化与可靠性控制策略后，系统性能的显著改善。以表 1 展示了优化前后各项关键指标的变化情况。

表 1 工程案例关键指标对比			
指标	优化前	优化后	改善幅度
施工期总电耗（kWh）	62,300	51,080	-18.00%
试灯与老化电耗（kWh）	22,400	14,500	-35.30%
恒流源效率（%）	89	93.5	4.50%
电缆用量（吨）	32	28.5	-10.90%
接头返工率（%）	4.2	1.9	-2.30%
系统可用度	0.982	0.996	0.014
首年故障率（次 / 千灯时）	0.75	0.52	-30.70%
年 CO ₂ 排放（吨）	38.1	29.2	-23.40%
综合绩效指数 CPI	0	0.31	0.31

表 1 展示了机场助航灯光电气施工在节能与可靠性优化后取得的主要成效。施工期总电耗涵盖电缆铺设、设备调试、试灯与老化等环节，优化后整体能耗下降 18%，其中试灯与老化阶段的能耗减少 35.3%，节能效果显著。通过采用高效 LED 灯具与高效率恒流源（CCR），设备能效提升 4.5%，有效降低了系统运行损耗。线路设计优化与电缆截面调整减少了约 10% 的电缆用量，施工材料得到合理利用。严格的工艺质量管控使接头返工率从 4.2% 降至

1.9%，系统首年故障率降低 30.7%，可用度提升至 0.996，体现出可靠性显著增强。基于能耗下降，年 CO₂ 排放量减少 23.4%，进一步支撑了绿色施工目标。综合绩效指数（CPI）从 0.00 提升至 0.31，表明节能优化与可靠性控制的协同作用显著改善了系统整体性能，为低碳机场建设提供了可验证的工程依据与推广价值。

（四）结果讨论

通过工程案例数据分析，可以看出节能优化与可靠性提升措施的综合效果^{[3][9]}。在能效方面，优化方案有效降低了施工过程中不必要的电力消耗，特别是在试灯与老化阶段的能耗降低显著。恒流源效率的提升反映了设备性能的改善，且高效 LED 灯具的应用进一步减少了能量浪费。同时，电缆用量的减少和接头返工率的降低表明，施工过程中通过精细化管理和优化设计，有效降低了材料消耗和返工成本。

从可靠性角度看，优化后系统的可用度显著提高，首年故障率大幅下降，显示出质量控制措施的成功实施。此外，CO₂ 排放量的减少，不仅符合低碳建设要求，还对环境保护起到了积极作用。综合来看，CPI 的提升证明了节能与可靠性的协同优化在机场助航灯光施工中的可行性与有效性。通过本案例验证，所提出的节能与可靠性提升措施具备较高的工程应用价值，并为其他机场助航灯光系统的优化提供了重要参考。

四、推广与结论

（一）推广模式与应用路径

为推动节能优化与可靠性控制策略在更广范围的机场建设中落地，应建立统一的标准化施工与优化体系，将节能措施、质量控制及可靠性保障纳入民航电气工程技术规范与行业标准。建议在典型工程项目中先行试点，结合不同气候、地理及机场规模特征，形成可复制、可推广的应用模式。通过 BIM 技术与物联网平台实现施工进度、能耗与质量的实时监控，确保节能与可靠性策略精准执行。同时，鼓励主管部门出台相关政策支持，将绿色施工评价体系与节能认证制度融入机场建设管理流程，建立示范工程案例库，推动低碳技术在民航基础设施领域的系统化应用与推广。

（二）管理体系与绩效考核建议

在机场助航灯光施工中，节能与可靠性优化应纳入全过程管理与考核体系。建议采用综合绩效指数（CPI）作为量化评价工具，将能耗、系统可用度、设备故障率等指标纳入施工单位和设计单位的绩效考核范围。通过建立基于 CPI 的分级评价体系，可实现节能目标的动态监控与结果导向的精细管理。在项目执行过程中，应强化数据采集与分析能力，实时反馈施工能耗与设备状态信息，形成闭环管理机制。通过科学的考核标准、激励机制与风险分担制度，可有效提升施工企业的技术投入与管理水平，确保节能与可靠性措施在工程实践中得到持续贯彻与优化。

（三）综合结论与发展展望

本文以机场助航灯光电气施工为研究对象，提出了基于综合绩效指数（CPI）模型的节能与可靠性协同优化方法，并通过工程案例验证其有效性。研究表明，优化线路设计、采用高效设备、改进施工工艺与智能化监控管理，能够显著降低施工能耗、提升系统可靠性与运行安全性，为低碳机场建设提供了可行的技术路

径与实践依据。未来，随着人工智能、大数据与数字孪生技术在民航电气工程中的应用深化，节能优化与可靠性控制将进一步从经验型管理向智能化决策转变。通过构建面向全生命周期的智慧机场能源管理体系，可实现能效、可靠性与安全性的协同提升，推动绿色机场和智慧民航建设的高质量发展。

参考文献

[1] 吴良桂. 机场助航灯光工程绿色施工技术应用点探讨 [J]. 工程质量, 2025, 43(S1): 100-103.
[2] 任绪秋. 一种新型节能技术在机场助航灯光系统中的应用 [J]. 智能建筑电气技术, 2013, 7(03): 50-53.
[3] 康睿. 机场助航灯光系统技术及应用研究 [J]. 电子测试, 2021, (16): 27-28.
[4] 倪新建. 关于机场助航灯光施工的有效性研究 [J]. 中国新通信, 2019, 21(16): 229-230.
[5] 华俊峰. 机场助航灯光系统施工问题分析及质量控制研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (06): 164-166.
[6] 侯启真, 侯伟飞. 基于多态共因失效的助航灯光供电系统可靠性分析 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(08): 269-276.
[7] 李亮. 机场目视助航灯光系统的运行管理研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(01): 44-45.