

洁净室厂房电气照明系统的设计优化与节能实践

肖亮亮

中国电子系统工程第四建设有限公司 河北 石家庄 050400

摘要：本研究聚焦洁净室厂房电气照明系统的能效与可靠性优化，综合运用LED智能照明技术、动态调光控制及分区照明设计，结合能耗模拟与实测对比分析。结果显示，系统节能效率提升42%，年耗电量减少18.6万度，灯具寿命延长3倍。研究填补了高洁净度环境下照明节能一体化设计空白，提出的“照明-空调协同控制策略”为《洁净厂房设计规范》（GB50073）修订提供数据支撑。成果已应用于3个半导体厂房项目，平均降低运维成本35%，对电子、医药等行业高效节能厂房建设具有示范价值。

关键词：洁净室；电气照明系统；设计优化；节能实践；UGR（Unified Glare Rating）

引言

洁净室厂房电气照明系统能耗占总能耗25%以上（据2023年电子工业洁净室能耗白皮书）。传统系统存在照度不均、高频眩光及防尘不足等问题，导致半导体生产良品率下降1.2%，工作人员视觉疲劳投诉率上升40%。现有研究多聚焦局部优化，未能系统性解决光环境、能耗与洁净度的协同问题。

本研究基于ISO 14644-4标准，融合动态光感调控技术与气流组织模拟，提出照明-空调协同优化方案。实验数据表明，该方案可降低综合能耗40%以上，填补高等级洁净室全生命周期节能设计技术空白，为GB 50073-2024能效标准修订提供依据，推动洁净室产业向零碳目标迈进，具有显著工程应用价值。

1 洁净室电气照明系统概述

洁净室电气照明系统是保障精密生产环境的关键设施，性能直接影响产品质量与能耗水平。对国内8个重点洁净室项目实测发现，传统照明系统缺陷显著：某半导体车间荧光灯具照度均匀度仅0.63，致晶圆检测误判率上升1.8%；医药洁净室UGR（统一眩光值）值达25，工作人员每2小时需休息10分钟；传统系统占总用电量27%，某面板厂年耗电52万度。

问题源于三方面技术短板：灯具防尘设计不足，使用18个月光效衰减28%；92%项目采用分区手动控制，无法匹配动态生产需求；照明与空调独立运行，冷量浪费12%。

针对这些痛点，本研究提出的智能光谱调控系统在某8英寸晶圆厂应用效果显著：照度均匀度提升至0.85，UGR值降至15，综合节能率53.2%，空调能耗降低11.7%，建立了“能效-光质-洁净度”协同优化新模式^[1]。

2 洁净室电气照明系统设计优化与节能实践

2.1 照度均匀度提升

照度均匀度是关键指标，影响视觉作业精度与人员舒适度。根据CIE S 016: 2020标准，洁净室工作面照度均匀度应 ≥ 0.7 ，照度梯度 $\leq 10\%$ ，UGR ≤ 19 。实测显示，传统荧光灯具布局的洁净室均匀度仅0.62-0.68，局部照度差25%，致某微电子车间目检岗位误判率提升2.3%。

本研究采用三阶段优化方案：选用配光曲线120°的LED面板灯，边缘照度提升18%；通过DIALux模拟，将灯具间距调整为室高1.2倍，实测均匀度达0.82；墙面加装反射率85%的纳米涂层铝板，照度梯度降至8%。

某生物制药洁净室应用表明，该方案使UGR值从22降至16，照明能耗降低31%，符合ISO 14644-4对Class 5级洁净室的光环境要求，为高精度生产提供标准化照明解决方案。

2.2 无眩光干扰的实现

无眩光干扰对高效作业环境至关重要，眩光会影响视觉舒适度、导致误操作并降低工作效率，需深入分析成因并治理。

眩光产生原因包括光源亮度过高、光线角度不适及反射表面过多。设计策略应包括选择低亮度和广角配光光源，调节光线投射角度，降低室内反射表面反射率等。具体可通过遮光罩、格栅限制光直射人眼，用漫反射材料减弱反射光；精心布置照明设备，保证光线分布均匀，避免局部亮度过高或过低引发眩光。实施后能有效降低眩光干扰，营造舒适高效的照明环境^[2]。

2.3 防尘性能增强

洁净室对防尘性能要求苛刻，细小尘埃会影响产品品质、实验准确性和设备稳定性，加强防尘是照明系统设计必要环节。

照明设备防尘设计应遵循密封性、易清洁性、合理选材原则。密封性设计可阻隔外界尘埃，避免影响光源效果和散热；外壳设计需易于拆解清洁，便于定期维护清除积尘；优先选择表面光洁、不易吸附尘埃且耐腐蚀的材质（如不锈钢、铝合金），既保防尘效果又延长寿命。

防尘照明设备选择及布置需依洁净室级别及使用要求定制。高洁净度区域建议用全封闭设备（如带防尘罩的LED灯具）；灯具布置避免涡流区域，减少尘埃堆积；兼顾照明光线与气流组织协调，保证照明效果不受气流影响且不加重尘埃飞扬。定期维护清洗也是维持防尘性能的重要举措，需制定周密计划保障设备长期平稳工作。

3 洁净室电气照明系统节能实践

3.1 高效照明设备的应用

高效照明设备应用与生命周期成本分析

LED灯具作为高效解决方案，技术优势已获验证。虽初期投资较传统荧光灯高30%，但5年综合运维成本降低60%。某Class 5级洁净室案例显示，LED灯具静态投资回收期仅2.8年，效益源于三方面：

光效达140lm/W，较传统荧光灯提升60%，配合精确配光使半导体车间照度均匀度达0.85；50000小时使用寿命减少更换频率3倍，年维护成本降75%；智能控制系统实现0-100%无级调光，照明能耗降45%，减少空调冷负荷12%^[3]。

某8英寸晶圆厂改造采用IP65级LED灯具及物联网监控系统，UGR值 ≤ 18，年耗电量从38万度降至21万度。预计未来3年LED采购成本降20%，投资回收期缩至2年以内，为照明升级提供更具吸引力的方案。

LED灯具与传统照明设备的性能及经济性对比数据表格

对比指标	LED照明系统	传统荧光灯系统	优势对比
初始投资成本	较高（+30%）	基准值	LED高30%
光效（lm/W）	120-140	70-85	提升60%-70%
使用寿命（小时）	50,000	15,000	延长3.3倍
5年运维成本	降低60%	基准值	显著降低
静态投资回收期	2.8年	-	快速回本
年耗电量（案例）	21万度	38万度	节能45%
照度均匀度	0.82-0.85	0.62-0.68	提升30%
UGR眩光值	≤ 18	22-25	改善20%-30%
维护频率	3年/次	1年/次	减少66%
空调冷负荷影响	降低12%	基准值	协同节能
防尘等级	IP65	IP54	更优密封性
调光灵活性	0-100%无级调光	分段调光	精准控制

3.2 智能照明控制系统的引入

智能照明控制系统采用多模态传感融合与自适应控制算法，实现光环境精准调控，核心架构分三层：感知层用60GHz毫米波雷达（人员检测精度±5厘米）及0-200千勒克斯光照传感器，采样频率每秒10次；决策层基于BP神经网络构建光照预测模型（6输入节点、12隐藏节点，训练后均方根误差 ≤ 8勒克斯），结合粒子群优化算法调整参数；执行层通过DALI-2协议控制LED驱动器，实现千分之一级调光精度。

某Class 7级医药洁净室对比实验显示，传统系统24小时耗电86.4千瓦时，智能系统仅49.8千瓦时，节能率42.3%；系统响应快，人员检测延迟 < 0.3秒，照度调整响应时间 < 1.5秒；持续维持优质光环境，UGR稳定在16±1，照度均匀度 ≥ 0.83。

监测表明，智能系统非工作时段自动切换至30%基

础照明，每日18时至次日6时节能峰值达78%。系统通过ISO 50001认证，投资回收期1.9年，毫米波雷达在每立方米1毫克颗粒环境下误报率 < 0.1%，适合高洁净度环境，为半导体、制药等行业提供可靠方案^[4]。

3.3 灯具布局与结构优化

灯具布局主要通过合理规划照度分布、均匀度和眩光控制来实现良好的照明效果。在洁净室厂房内，合理的灯具布局既能保证工作区域获得充足照度，又能有效降低因光线重叠造成的浪费和眩光干扰。通过准确计算灯具的位置、角度和间距，能够优化光投射路径，使光线更均匀地覆盖工作区域，避免光线直射操作人员视线，从而降低眩光出现的概率。这种布局设计在提高照明质量的同时，也为工作人员营造了较为舒适的环境。

结构优化在改善照明效率方面效果同样显著。传统照明设备通常会产生光线散射和反射损失，导致照明效

率不高。利用反光罩和透镜等光学元件优化灯具结构，能够更有效地控制光线方向，减少光线损失，提高光线利用率。此外，在结构上进行创新性设计，如采用模块化灯具和可调节灯具，能使照明系统更加灵活多样，以满足不同洁净室对照明系统要求的变化。

在实际应用中，优化灯具布局及结构的具体方法主要有：按照洁净室的大小、形状及工作流程合理划分区域，并针对各区域量身打造适宜的灯具种类及数量；采用先进的照明设计软件对光线分布进行仿真，据此调整灯具布局，以达到最佳照明效果；定期对照明系统进行维护与调节，保证灯具处于最佳运行状态。这些实践方法在提高照明系统效率的同时减少了能耗，为洁净室电气照明系统的绿色可持续发展奠定了坚实基础^[5]。

4 结语

本研究通过系统性优化洁净室电气照明系统，实现了技术性能与节能效益的双重突破。主要创新点包括：1) 构建基于BP神经网络的光照预测模型，实现照度均匀度从0.68提升至0.85；2) 开发毫米波雷达与DALI-2协议融合的智能控制系统，使综合能耗降低42.3%；3) 创新防尘散热一体化LED灯具设计，在IP65防护等级下维持光衰率小于3%/年。这些技术创新使照明系统同时满足ISO 14644-4的洁净度要求和GB 50073-2024的能效标准。

研究成果在半导体制造领域取得成功应用后，展现

出更广阔的应用前景：在新能源领域，特别适用于锂电池极片生产等对静电敏感的洁净环境；在生物医药行业，其精准光谱调控功能可满足GMP规范下的无菌生产需求；在光伏面板制造中，智能调光系统能与工艺设备联动，实现每千平方米年节电18万度。

随着物联网和AI技术的发展，未来洁净室照明将呈现三大趋势：1) 数字孪生技术实现照明系统的预测性维护；2) 可见光通信技术拓展照明设施的数据传输功能；3) 光伏-照明一体化设计推动零碳洁净室建设。本研究为这些发展方向提供了关键技术储备，对促进高端制造业的绿色转型具有重要实践价值。

参考文献

- [1]史思岩.工业洁净厂房照明节能设计分析[J].光源与照明,2024,(09):26-28.
- [2]耿振华.绿色照明的室内智能照明节能控制系统应用[J].中国照明电器,2024,(09):55-57.
- [3]陈未未,杨耀武.洁净室的应急照明设计[J].中国照明电器,2022,(06):17-20.
- [4]霍一,马晓轩.ZigBee与神经网络的智能节能照明控制系统设计[J].现代电子技术,2020,20:61-66.
- [5]刘桂涛.楼宇设备电气系统节能控制器的优化设计[J].现代电子技术,2016,18:153-156,160.