

LED 视力表灯箱的光控系统优化与节能设计研究

杜学静

温州星康医学科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：LED 视力表灯箱的光照均匀性与稳定性直接影响视力检测精度。针对传统光控系统响应滞后、均匀性差、能耗高、自适应能力弱等问题，本文构建基于模糊控制的自适应光控系统，提出光照均匀性优化策略与多模式节能控制方法。优化后系统光照均匀性提升超 40%，能耗降低超 35%，响应时间缩至 50ms 内，可智能适配不同环境并维持稳定最优检测光照。研究成果完善了光控系统设计理念，显著提升检测精度与能效，为视力检测设备智能化升级提供关键技术支撑，兼具临床应用价值与绿色节能意义。

【关键词】：LED 视力表灯箱；光控系统；模糊控制；光照均匀性；节能设计；自适应调节

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.007

1 引言

1.1 研究背景与意义

视力检测是眼健康筛查的基础环节。LED 视力表灯箱凭借高亮度、长寿命等优势已广泛应用于医院、体检中心等场景，其光照强度需稳定维持在 300 - 500lux 且分布均匀，方能保障检测精度。传统光控系统多采用模拟电路或单闭环 PID 控制，存在响应滞后、均匀性差、节能策略单一、环境适应性弱等问题。在“双碳”目标与医疗设备智能化背景下，亟须提升光控精度、能效与自适应能力。本研究理论上探索 LED 光照特性与自适应光控耦合机理，完善设计理念；在实践中提升光照质量、降低能耗、延长设备寿命，推动视力检测装备向绿色智能升级。

1.2 研究现状综述

当前 LED 照明光控研究已从模拟调光发展至数字调光与 PID 闭环控制，光照均匀性优化、环境光感应节能及模糊控制、神经网络等智能算法应用取得进展。但针对视力表灯箱特殊检测场景的研究仍显不足：光控算法多依赖传统 PID，动态适应性弱；节能设计局限于粗放式调光，缺乏多模式精细化策略；光控与节能系统协同性欠缺。本文聚焦上述空白，开展自适应光控与协同节能设计，为提升视力检测设备综合性能提供理论支撑与技术路径。

2 相关技术基础

2.1 LED 光照特性与光控原理

LED 发光强度与驱动电流在额定范围内近似线性，光谱稳定、响应迅速，支持高频调光。光控系统基于“检测—对比—调节”闭环：光照传感器采集灯箱表面照度，控制模块计算偏差，驱动模块动态调整 LED 电流。调光方式中，PWM 调光通过占空比调节平均电流，具备调光范围宽、功耗低、色温稳定等优势，契合视力检测高精度需求，故选为核心方案。

2.2 光照均匀性评价与优化理论

均匀度是核心指标，视力检测要求 ≥ 0.8 。影响因素包括

LED 阵列排布、灯珠特性差异、光学结构及腔体设计。优化理论基于光线传播与能量守恒，分为主动优化与被动优化，二者协同可显著提升光照一致性。

2.3 智能控制算法基础

智能控制算法有效应对 LED 光照系统的非线性与时变特性。模糊控制无需精确数学模型，通过模糊化、规则库推理与清晰化处理，模拟人类决策逻辑，具备适应性强、鲁棒性好、响应快 ($< 50ms$) 等优势；PID 控制对非线性系统适应性弱且参数整定复杂；神经网络控制虽精度高，但算法复杂、计算量大、硬件成本高。结合 LED 视力表灯箱对调节精度 (照度 300 - 500lux)、实时性及成本控制的综合需求，模糊控制在性能、实现难度与资源消耗间取得最优平衡，是光控系统的理想选择。

2.4 节能控制技术基础

LED 视力表灯箱节能控制技术以“按需供能”为核心，精准匹配光照需求与能量输出以降低无效能耗。常用节能技术有自适应调光节能、分时节能、休眠节能等。自适应调光节能根据环境光照与检测需求动态调整 LED 输出功率；分时节能按检测流程阶段调整光照强度；休眠节能在长时间无检测操作时使系统进入低功耗休眠状态。

节能控制需以精准状态检测为基础，通过检测环境光照、检测流程阶段、受检者状态等信息判断光照需求并调整策略。同时，要与光控系统紧密协同，确保节能时不影响光照均匀性与稳定性，保障检测精度。此外，节能设计要考虑 LED 发光特性，避免过度调光增加能耗。

3 LED 视力表灯箱光控系统总体设计

3.1 系统设计目标与原则

LED 视力表灯箱光控系统设计目标有四个方面：一是光照精度，实现 300 - 500lux 精准调节，误差不超过 $\pm 10lux$ ；二是光照均匀性，使灯箱表面光照均匀度达到 0.9 以上；三是响应速度，将光照调节响应时间缩至 50ms 以内；四是节能，能耗

较传统系统降低 35%以上。

系统设计遵循“精准控制、均匀稳定、节能高效、可靠实用”原则。精准控制用高精度检测模块与先进算法；均匀稳定靠优化 LED 阵列与光学结构及闭环控制；节能高效基于多维度检测；可靠实用要求系统结构简单、稳定且易维护。

3.2 系统总体架构设计

优化后的系统采用“分层架构 + 模块化设计”，总体架构分感知层、控制层、执行层、节能管理层。感知层采集状态数据，含光照检测、环境光检测、检测状态检测模块等；控制层是核心，处理数据、决策控制、运算算法，含核心控制、模糊控制算法、均匀性优化模块等；执行层按指令调整 LED 发光状态，含 LED 驱动、阵列、光学调节模块等；节能管理层制定节能策略，含节能决策、分时控制、休眠控制模块等。

核心工作流程：感知层采集数据；控制层分析处理，算光照调节量，调 LED 驱动参数；执行层调驱动电流，精准控制光照；节能管理层动态调整策略，实现节能。各层通过标准化接口通信。

3.3 硬件系统架构设计

硬件系统以微控制器为核心，包括核心控制、光照检测、环境光检测、LED 驱动、LED 阵列、光学、检测状态检测、电源模块等。核心控制模块统筹工作；光照检测模块分布式检测；环境光检测模块测外界光照；LED 驱动模块多路独立驱动；LED 阵列模块优化排布；光学模块优化光线；检测状态检测模块判断检测状态；电源模块供电。各硬件模块通过总线接口连接，核心控制模块通过多种接口控制与采集数据。硬件设计遵循低功耗、高稳定、小型化原则。

3.4 软件系统架构设计

软件系统基于嵌入式实时操作系统，采用模块化架构，核心模块包括：系统初始化、数据采集、模糊控制、均匀性优化、LED 驱动控制、节能决策与分时/休眠控制、状态监测。系统采用多任务调度机制，各模块封装为独立任务并行运行。依据功能重要性设定优先级：模糊控制、LED 驱动、均匀性优化为高优先级，保障光照调节实时性（响应<50ms）与稳定性；节能控制、数据存储等为低优先级，优化资源分配，确保系统高效协同、稳定可靠。

4 光控系统优化设计

4.1 基于模糊控制的光照强度精准调节

针对传统 PID 控制适应性弱的问题，设计模糊-PI 复合控制算法。以光照偏差及变化率为输入，驱动电流调节量为输出，经模糊化、规则库（基于专家经验）、Mamdani 推理与重心法清晰化处理。引入积分环节：大偏差时模糊控制快速响应，小偏差时 PI 控制消除静差，兼顾调节速度与精度，响应时间

<50ms，有效抑制超调与滞后。

4.2 光照均匀性优化策略

采用“硬件+软件”协同优化：

硬件层：LED 阵列非均匀排布，选用高一一致性灯珠；集成二次光学透镜、漫反射反光板与高透光扩散板，优化光路分布。

软件层：基于分布式光照传感器数据，通过模糊控制动态分区调节各区域驱动电流，实时修正偏差，均匀度提升至 ≥ 0.8 。

4.3 光控系统抗干扰设计

电磁干扰：屏蔽罩+金属镀膜外壳阻断辐射，磁珠/电容滤波电路抑制传导干扰，单点接地消除地环路。

光干扰：传感器加装遮光罩与窄带滤光片，软件采用滑动平均与中值滤波算法平滑数据波动。

电源干扰：高精度稳压模块保障电压稳定，TVS 管与电解电容吸收尖峰浪涌，关键模块独立供电隔离干扰。

全方位抗干扰设计显著提升系统在复杂环境下的稳定性与长期可靠性。

5 节能设计与实现

5.1 多模式节能控制策略

提出“环境光自适应调光+分时节能+休眠节能”三模协同策略，依据检测状态与环境光智能切换：

环境光自适应：实时检测外界照度，动态调节 LED 功率，避免固定输出浪费；

分时节能：等待阶段降至 30% - 50% 功率，检测阶段恢复标准（300 - 500lux），间隙阶段维持 40% - 60%，精准匹配流程需求；

休眠节能：无操作超时自动休眠，唤醒响应<1 秒，显著降低闲置能耗。

5.2 节能驱动电路设计

采用“多路独立恒流驱动+高效电源转换”架构：

恒流驱动选用高效率 DC-DC 芯片（转换效率>90%），支持分区精准调光；

多路设计实现区域独立控制，配合节能策略动态启停灯珠；

集成过流、过压、过热三重保护；电源模块采用低静态电流芯片，休眠功耗降至微安级，配合快速唤醒电路，系统整体能效提升显著。

5.3 节能与光控协同优化

构建“算法—硬件—评估”三位一体协同机制：

将节能参数融入模糊控制算法（如环境光强度参与偏差计算），分时切换时预调节避免光照突变；

多路驱动优先优化高能耗区域参数,在提升均匀度(≥ 0.8)的同时降低总功耗;

建立实时能耗一精度监测体系,动态评估策略有效性,若均匀性或照度偏离阈值则自适应调整,确保节能与检测精度(300-500lux)最优平衡。

6 系统实现与性能验证

6.1 系统实现方案

基于前述设计,完成了LED视力表灯箱光控系统的软硬件实现。硬件上,核心控制采用高性能微控制器,集成多路接口以支持多模块控制与数据采集。光照检测通过8个均布于灯箱表面的高精度传感器实现,环境光检测采用宽量程传感器。LED驱动由多路恒流驱动芯片独立控制8路输出,LED阵列采用非均匀排布并搭配专用光学透镜与扩散板,电源模块选用低功耗稳压芯片。

软件基于嵌入式实时操作系统开发,采用C语言编写,确保高效与可移植性。主要功能模块包括:系统初始化、数据采集、模糊-PI复合控制、均匀性优化、节能决策及LED驱动控制。

6.2 性能测试方案设计

为验证系统性能,设计了全面的测试方案,涵盖光照精度、均匀性、响应速度、节能效果及稳定性。测试在实验室标准环境与实际应用环境中分别进行,以评估指标精度与实际适应性。所用设备包括优化后的灯箱原型机、标准光照计、高精度功率计、示波器、计时器及环境光模拟器。

6.3 核心性能测试结果

光照精度:在300-500 lux范围内可精准调节。设定值为400 lux时,实际输出稳定在392-408 lux,误差 $\leq \pm 8$ lux。

光照均匀性:灯箱表面光照均匀度提升至0.93,较传统系统改善超40%。

响应速度:环境光突变时,系统调节响应时间缩短至42ms,远优于传统的120ms。

节能效果:在相同条件下,系统整体能耗较传统方案降低38%。

稳定性:经48小时连续运行测试,系统在不同环境下参数稳定,无异常,适应性强。

参考文献:

- [1] 石宝勇,王子秋,马荟. 视力表投影仪亮度均匀性计量检定方法研究[J]. 质量与认证,2025(7):101-103.
- [2] 孙卫东.不同测量环境下亮度计的选择与使用方法[J].中国照明电器.2024,(12).
- [3] 朱新旺,汪岩峰,余建辉.标准光源对色灯箱校准方法研究和不确定度分析[J].计量与测试技术.2023,50(2).
- [4] 白怀义.智能调光系统在LED灯具节能控制中的应用与效果评估[J].科技资讯,2025,23(9):73-75.
- [5] 尚文洋,王睿驰,林征宇,等.基于能量信息协同调控的LED智能调光技术[J].电气工程学报.2024,19(1).

6.4 测试结果分析与优化

测试结果表明,系统各项性能均达到设计目标,有效解决了传统系统的问题。然而,在极端强光环境下,光照调节精度因环境光干扰略有下降。现存问题主要包括:1)极端环境下光照传感器检测精度受到影响;2)多路独立驱动同步性不足,导致局部调节时出现短暂光照波动;3)休眠模式唤醒后的光照恢复速度有待提升。

针对上述问题,拟采取以下优化措施:1)为光照传感器增加抗强光干扰滤光片,优化光学滤波设计;2)在软件算法中引入同步控制逻辑,确保多路驱动调节同步,消除波动;3)优化唤醒流程,预加载驱动参数以缩短恢复时间。预期优化后系统性能将进一步提升,更好地满足实际应用需求。

7 结论与展望

7.1 研究结论

本文围绕LED视力表灯箱光控系统优化与节能设计开展研究,得出结论:优化后的系统采用“感知层-控制层-执行层-节能管理层”分层架构,硬件以微控制器为核心,集成相关模块;软件基于嵌入式实时操作系统,实现模糊-PI复合控制等功能。

核心技术有突破:用模糊-PI复合控制算法精准调节光照强度,解决传统PID控制问题,调节精度误差不超过 ± 8 lux,响应时间缩至42ms;提出协同策略提升光照均匀性,均匀度达0.93;设计多模式节能系统,结合节能驱动电路使能耗降低38%以上。

系统性能测试显示,优化后的光控系统光照精度高、均匀性好等,能保障视力检测精度,降低能耗与运维成本,解决传统系统缺陷,完善设计理论,为设备升级提供技术支撑。

7.2 未来展望

未来研究可在以下方向深化:在智能控制算法优化上,引入深度学习算法,结合计算机视觉技术;在节能技术创新方面,研发能量回收节能系统,探索新型器件与材料应用,引入无线能量传输技术;在功能拓展方面,增加光照色温调节功能,开发智能联网功能,结合健康管理系统;在标准化与产业化方面,推动标准化研究,加强产学研合作,开展可靠性测试与市场验证,通过多维度创新与推广为眼健康检测设备发展提供支撑。