

商用冷柜智能节能照明系统设计与实现

黄海桦

广东星星制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2026080035

摘 要 : 商用冷柜现有照明装置普遍能耗较高, 据此设计一款智能节能照明系统。系统搭配环境光、热释电红外及超声波三类传感器, 分别采集环境亮度、人员活动相关数据, 同步检测照明配套电池组的剩余电量。依托分级控制逻辑, 设备可自动切换昼夜运行模式。结合人员通行、驻足等不同场景, 系统还能分档位调节 LED 灯亮度。该方案可兼顾使用体验, 减少无用功耗, 进一步提高能源利用率。

关 键 词 : 商用冷柜; 智能照明; 节能控制

Design and Implementation of Intelligent Energy saving Lighting System for Commercial Refrigerators

Huang Haihua

Guangdong Xingxing Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : The existing lighting devices in commercial refrigerators generally have high energy consumption. Based on this, an intelligent energy-saving lighting system is designed. The system is equipped with three types of sensors: ambient light, pyroelectric infrared, and ultrasonic, which respectively collect data on environmental brightness and personnel activities, and synchronously detect the remaining power of the lighting supporting battery pack. Based on the hierarchical control logic, the equipment can automatically switch between day and night operation modes. Combining different scenarios such as personnel passing and stopping, the system can also adjust the brightness of LED lights in different levels. This solution can balance user experience, reduce unnecessary power consumption, and further improve energy utilization efficiency.

Keywords : commercial refrigerators; intelligent lighting; energy-saving control

引言

玻璃门商用冷柜多用于酒店、便利店, 透明柜门便于顾客选购商品。设备照明常以固定高亮度运行, 无人时依旧工作, 造成电能浪费, 照明能耗占总能耗 5%~15%。灯具散热还会削弱制冷效果, 当下也缺少低功耗、高稳定性的智能调光方案。据此设计节能照明系统, 可感知环境与人员状态, 精准调节亮度, 整体分为环境感知、人员检测、电池管理三大模块。

一、项目概述

(一) 项目背景与需求

商用冷柜多应用于酒店大堂、全天候零售门店等场景。这类场所营业时长久, 人流量起伏较大, 深夜时段仅有少量顾客短暂逗留。冷柜灯具长期保持高亮度常亮运行, 会产生不必要的电能损耗。同时, 灯具工作产生的热量会加大冷柜制冷负荷, 导致整体能耗进一步上升。

针对这一问题, 需设计一套可感应环境状态的智能照明控制系统。系统要精准识别无人通行、人员路过、人员停留等不同场景, 在不影响顾客使用体验的基础上, 有效降低照明能耗。部分

冷柜搭配独立电池或太阳能辅助供电, 因此控制系统还可结合电池剩余电量自主调节工作模式, 以此提升设备续航能力^[1]。

(二) 项目核心特点

项目运用多传感器融合检测技术, 集成亮度、热释电红外与超声波三类传感器。亮度传感器区分昼夜, 红外传感器低功耗捕捉移动热源, 超声波传感器精准测距、识别静止物体。三者协同工作, 兼顾低功耗运行, 有效减少误触发。系统采用分级动态控光模式, 结合昼夜环境、人员活动状态划分多档亮度, 亮度区间覆盖 5% 微光至 100% 全亮, 照明调控更为精细。系统可实时监测电池电量, 电量低于阈值时, 自动降低照明上限、关停高功耗设备, 保障基础功能稳定运行。同时系统可统计各时段人员活动

频次，自主调整传感器参数，进一步优化能耗。

二、系统总体架构与硬件组成

（一）系统总体逻辑架构

智能照明系统采用分层架构完成整体运行。第一层为数据采集层，主要完成现场环境信息的采集工作。第二层为决策控制层，对采集数据进行运算处理，运行核心控制算法。第三层为执行与反馈层，下发控制指令，同时展示系统运行状态。

数据采集层搭载亮度传感器、热释电红外传感器、超声波传感器与电池库仑计芯片。各类设备可将环境亮度、人员活动、距离数据及电池电量转化为电信号。

决策控制层以微控制器作为核心部件。设备接收全部传感数据，按照预设规则实现节能控制。系统先依据环境亮度区分昼夜工作模式，再结合人员活动情况，判定现场无人、人员路过或人员停留等状态，最后结合电池电量，输出照明调节指令。

执行与反馈层由 LED 驱动电路、照明灯具和状态指示灯组成。控制指令会改变驱动电路输出电流，以此调节灯光亮度。指示灯可根据电池状态切换闪烁方式，方便工作人员查看设备情况^[2]。

（二）核心硬件选型与功能

为实现上述功能，系统对核心硬件有特定要求。主控单元选用低功耗微控制器，负责协调所有外设并执行控制逻辑。照明光源采用可调光的 LED 灯组，配合支持脉宽调制输入的 LED 恒流驱动器，实现亮度的平滑无级调节。环境光检测使用数字型环境光传感器，能够输出精确的照度值。人员检测部分采用组合方案。热释电红外传感器负责大范围、低功耗的移动侦测，其典型工作电流可低于 0.1 毫安。超声波传感器则用于精确测距和静止物体确认。为应对冷柜附近可能出现的较大温差对热释电红外传感器灵敏度的影响，系统可增加温度传感器，用于实时补偿检测阈值。电池管理方面，选用库仑计芯片对照明电池组的电压、电流和温度进行实时监测，精确计算充电状态，将误差控制在较小范围内。对于配备太阳能充电功能的系统，可采用钙钛矿板与硅太阳能板并联，并配置最大功率点追踪控制器，以提高不同光照条件下的充电效率。电池组的充电管理采用三段式策略，即恒流、恒压和浮充，以延长电池寿命^[3]。

（三）传感器工作协同机制

系统想要达到理想的节能效果，离不开各类传感器之间的相互配合与联动工作。整套设备会根据运行状态切换各部件的工作模式。当设备处于待机状态时，系统会做出功耗优化调整。此时只有热释电红外传感器保持通电值守，超声波传感器与主控模块同步切换至休眠模式，以此减少整体电量消耗。

红外传感器实时监测周边环境，一旦捕捉到移动信号，会立即触发中断指令。该指令能够唤醒处于休眠状态的主控单元，设备正式进入工作模式。随后主控单元驱动超声波传感器运行，通过发射与接收脉冲回波的方式，测算出前方目标的实际距离。系统会同步汇总红外、超声波采集到的两组数据，并结合预设标准

综合分析。若实测距离处于 1.5 米到 3 米之间，系统便可确认现场出现人员靠近的情况。

双重检测能够屏蔽气流、小型动物等外界干扰，避免系统误触发。人员离开后，超声波模块与主控进入休眠状态，仅红外传感器保持工作，以此降低设备整体功耗。

三、智能节能控制策略与核心算法

（一）基于环境亮度的双模式切换

系统以环境光照强度划分基础工作模式。微控制器实时采集光传感器数据，将数值与 300 勒克斯的亮度阈值对比。亮度高于阈值时，系统切换为日间模式。此时自然光充足，冷柜灯光仅作补光与商品展示使用，无需高亮度输出。

亮度小于或等于阈值，则启用夜间模式。夜间环境光线不足，灯光是顾客视物与引流的主要光源，控制逻辑也需更加精细，减少空耗。模式判定是后续亮度调节的前提，可适配自然光的昼夜变化规律。

两种模式的照明策略存在差异。日间有人时提供适度补光，无人时仅保留微弱指示灯光；夜间无人时以微光待机，检测到人员活动后，再依据行为状态逐级调整灯光亮度。

（二）基于人员行为的状态机控制

在确定日间或夜间模式后，系统会结合人员流量信息，进入更细粒度的状态机控制。人员流量信息被划分为“周边不存在人员”“人员经过”和“人员停留”三种状态。系统利用超声波传感器连续测距，并分析距离值的变化。当传感器前方探测范围内有物体，但未满足“意图开门”的空间条件（例如，仅在水平方向有物体，而垂直下方无物体）时，系统判定为“人员经过”。当两个超声波传感器同时检测到前方近距离有物体且下方（相当于伸手开门的区域）也有物体时，系统判定为“人员停留”。基于不同的状态组合，系统生成对应的照明亮度控制指令。在日间工作模式下，若有人存在，系统将亮度调整至最大亮度的 70%；若无人，则降至 10%。在夜间工作模式下，若无人，亮度降至 5% 的基础微光；若判定为“人员经过”，亮度提升至 30% 作为引导照明；若判定为“人员停留”即意图开门，亮度则提升至 100%，为顾客提供最佳的视线条件。这种精细化的状态机控制避免了传统“一开全开，一关全关”的粗放模式，使得照明亮度始终与场景需求精确匹配。

（三）基于电池电量的节能管理

部分设备搭配电池或太阳能辅助供电，因此系统可根据剩余电量动态调整运行状态。库仑计芯片实时采集电池电量，并参照额定电量划分不同节能等级。

电量高于 20% 时，设备全功能运行，灯光亮度不受限制。电量处于 10%~20% 区间，系统开启节能模式，灯光最大亮度降至原有一半，且仅在红外传感器触发后，才启动超声波传感器完成二次检测。

电量降至 5%~10%，设备进入深度节能状态，亮度上限设为原值 30%，同时关停超声波模块，仅依靠红外传感器工作。电量

低于 5% 时切换为应急模式，亮度限制至 10%，不再自动触发照明，仅响应柜门开关信号。

系统通过指示灯区分电量状态，绿灯慢闪代表电量偏低，快闪则提示需及时充电。这套分级管控方式，可优先保障设备基础运转，有效延长电池续航时长^[4]。

四、系统优化与辅助功能实现

（一）降低误触发与环境自适应

为有效提升人体检测的可靠性，同时进一步削减设备运行能耗，本系统搭配了多项针对性优化设计。热释电红外传感器的检测效果容易受到环境温度干扰，为解决这一问题，系统内置温度传感器，不间断采集现场环境温度数据。微控制器结合实时温度数值，调取提前标定完成的温度 - 灵敏度补偿对照表，动态修改红外传感器的信号放大倍率与比较器阈值。经过参数补偿后，设备在夏季高温、冬季低温等不同工况下，都可以维持稳定、均衡的检测能力，大幅降低温度带来的检测偏差。

除此之外，系统引入自适应灵敏度调节算法。设备设置十分钟为一个滑动统计周期，持续记录周期内人体检测的有效触发次数，再换算出单位时间内的平均触发频率。系统依托该数据，自主调节热释电红外传感器的灵敏度档位，同时更改超声波传感器的工作间隔。当现场人流量偏少、环境较为安静时，适当降低传感器灵敏度，延长元件休眠时间，以此降低整体功耗；在客流密集、人员活动频繁的时段，则调高检测灵敏度，保障设备可以快速感知人员动作并及时响应。这套调控机制能够实时感知周边人流状态，根据实际场景灵活优化运行方案。

（二）区分通过行为与开门意图

精准辨别人员单纯路过、准备开门两种行为，是完成精细化照明调控的核心前提。这套控制系统依靠两组超声波传感器采集的距离数据，完成行为识别工作。冷柜顶端竖向装设传感器，监测柜体前侧下方区域，该区域对应人员抬手开门的活动范围。冷柜正面横向加装另一组传感器，主要探测远处路过的行人。

设备会同步采集两组传感器的监测数据。若仅横向传感器产生信号、竖向传感器无反馈，系统判定为人员正常通行，灯具短

时间保持低亮度运行。当两组传感器同时触发，且实测距离均符合设定标准，即水平距离不足 1 米、垂直距离不足 0.8 米时，系统判定人员存在开门取物的想法。

此时照明设备会直接调至满亮度，保障顾客取货时有充足光照。依托简易的空间位置判定方式，整套系统运算负荷小，还可以精准识别人体行为，有效减少行人途经时高亮度照明带来的电能损耗。

（三）预测性调节与状态指示

该系统增设预测性调节模块，依托历史运行数据完成智能调控，改变传统设备被动运行的模式，实现运行状态的主动预判与适配。设备搭载的微控制器，可自动采集冷柜使用场景下的日常运营数据，并完成规律学习。系统以一周作为完整学习周期，再把每日时间拆分为若干单元，单元时长设置为 15 分钟。

设备会实时统计各个时间段内的触发频率，核算单分钟平均触发数值。结合数周内同时间段的数据，计算得出稳定的历史均值。结合数据预判使用高峰到来前，系统会提前数分钟完成参数调整。传感器灵敏度、检测距离同步调高，保障设备响应速度稳定。进入使用低谷时段后，系统自动切换运行模式，降低能耗，达到节能效果。

设备同时配备完善的状态指示功能，方便现场人员掌握运行情况。指示灯可直观展示电池剩余电量，也能实时反馈充电进度。接入充电设备后，指示灯保持常亮状态，电量完全充满后灯光自动熄灭。直观的灯光提示，能够简化日常巡检工作，也可降低设备故障排查的难度^[5]。

五、结束语

该系统结合环境光传感器与多种人体感应设备，搭配分级调光方式，可让商用冷柜照明实现智能节能运转。投入使用后，设备可保障顾客正常取货，同时在客流稀少或无人时段削减照明多余能耗。此外，照明产生的热量减少，也能降低对制冷设备运行的影响。整套装置架构简单，控制逻辑直观，还可依据电池电量完成动态调控。该设计可用于商用展示设备的节能升级，落地性较强，具备实际应用与推广意义。

参考文献

[1] 王雅博, 郑洋, 李雪强, 等. 工况参数对冷藏陈列柜性能影响的研究 [J]. 家电科技, 2022, 6(6): 103-109.
[2] 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): 196-205.
[3] 曹植. 基于智能照明系统的节能控制策略研究 [J]. 光源与照明, 2024(1): 71-73.
[4] 周迅, 孟令锋, 赵辰. 电池管理系统 SoC 估计与均衡策略优化研究 [J]. 通信电源技术, 2022, 39(23): 23-26.
[5] 冯聪健. 基于电气设计的商用冰箱高效节能控制策略研究 [J]. 消费电子, 2025(19): 95-97.