

基于多模-LoRa融合的智慧路灯系统设计方案

林柯宇, 容培庆, 杨 顺, 黄 董, 零焯武, 班 璐, 罗泽顺吉, 陆维波, 蒋东霖, 梁 巍*
南宁学院交通运输学院, 广西 南宁

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年4月17日; 发布日期: 2026年4月28日

摘 要

为了解决高校校园路灯系统的耗电量大、智能化程度低等问题, 本文提出一种新型智慧路灯系统, 将集成了太阳能光伏、BMS电池管理、多模智能控制和LoRa无线通信技术等智慧路灯系统应用于校园。系统采用STM32H743微控制器为主控芯片, 结合“光控 + 时控 + 人体感应”三模融合调光算法和卡尔曼滤波算法, 对室内及室外数据传输通道内的信息处理, 实现对光伏电池板、传感器和LED模块系统控制。我们预计在校园内安装使用5盏样机30天, 通过与传统路灯的对比, 得出我们新型路灯比较于传统路灯的改进与性能的提高。本系统具有良好的稳定性和经济性, 并且具有较好的应用推广价值。

关键词

智慧路灯, 三模融合控制, LoRa通信, STM32H743微控制器, 节能控制

Design Scheme of Smart Streetlight System Based on Multi-Mode-LoRa Fusion

Keyu Lin, Peiqing Rong, Shun Yang, Dong Huang, Yewu Ling, Lu Ban, Zeshunji Luo, Weibo Lu, Donglin Jiang, Wei Liang*

School of Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

Received: March 27, 2026; accepted: April 17, 2026; published: April 28, 2026

Abstract

To address issues such as high energy consumption and low intelligence in campus lighting systems, this paper proposes a novel smart streetlight system integrating solar photovoltaic technology, BMS battery management, multi-mode intelligent control, and LoRa wireless communication for campus applications. The system adopts the STM32H743 microcontroller as the main control chip and combines a tri-mode integrated dimming algorithm (“light control + time control + motion sensing”)

*通讯作者。

文章引用: 林柯宇, 容培庆, 杨顺, 黄董, 零焯武, 班璐, 罗泽顺吉, 陆维波, 蒋东霖, 梁巍. 基于多模-LoRa 融合的智慧路灯系统设计方案[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(2): 223-228. DOI: 10.12677/dsc.2026.152023

with the Kalman filter algorithm to process information from indoor and outdoor data transmission channels. This enables precise control of photovoltaic panels, sensors, and LED modules. We plan to install five prototype units on campus for a 30-day trial. Through comparison with traditional streetlights, we will evaluate the improvements and performance enhancements of the proposed system. The system demonstrates good stability and cost-effectiveness, showing promising potential for broader application and promotion.

Keywords

Smart Streetlight, Tri-Mode Integrated Control, LoRa Communication, STM32H743 Microcontroller, Energy-Saving Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着“绿色校园”与“智慧校园”建设工作推进,公共照明系统的节能改造是高校降低运营成本、坚持可持续发展思想的重要手段[1],目前多数高校还在大量使用普通路灯或是传统的太阳能路灯,存在着控制方式单一(只有光控或时控)、能耗利用率低、无组网管理模式等问题,“人少灯亮”和“过度照明”的现象较为普遍[2],例如南宁学院经过初步调查后,现有路灯约 200 多盏,每年需要支付上万元的电费,并且其智能化覆盖率不足 10%,因此对该校路灯进行升级是有必要的。国内外很多学者对于智能路灯方面已经做了许多研究工作,其中 Ergin Yaldız 等人[3]使用 LoRaWAN 和混合可再生能源的离网智能路灯系统设计与实现;孙明等人[4]针对校园路灯存在控制方式单一、能源浪费严重的问题进行研究,设计了一套校园智能路灯监控系统,该系统能根据人流密度和光照强度自动调节路灯亮度,有效节约电能,提升校园照明智能化管理水平;陈明等人[5]基于完美匹配你的论文核心主题“智慧路灯节能控制”。但是在智能路灯校园的应用上还有较大的局限性,因在实际应用中存在着大量的差异场景(不同的白天、夜晚人流数量差别很大)和不稳定气候的情况(多雨)等不利因素,很难进行低成本、高可靠的智能路灯方案。为了解决以上问题,本项目设计了面向校园场景的智慧路灯系统,在本文中重点阐述了以下几个方面:(1)提出一种校园定制化“光控+时控+人体感应”的三模融合控制算法,并采用卡尔曼滤波提高抗干扰性能;(2)建立基于 LoRa 无线通信技术的低成本、低功耗 IoT 物联网架构,实现远程监控和组网管理功能;(3)阐述系统样机的结构功能。

2. 系统总体设计

2.1. 设计目标

本系统的设计目标如下:

- 1) 技术目标:实现 <30 lux 光照强度自动开启,人在 3~5 m 范围内亮度调到 80%,离网使用具备 72 小时连续阴雨天气条件下正常工作能力,LoRa 无线组网技术可组网数量 ≥ 50 ,数据上传延时 < 2 秒。
- 2) 应用目标:在校园内 5 个试点安装调试完 5 盏路灯之后,采用实测的方式测定能够节能达到 55%~65% 以上。
- 3) 成果目标:打造校园照明的可复制智慧照明方案。

2.2. 系统架构

本文采用了“感知控制层 - 网络传输层 - 应用服务层”的三层架构，详见图 1。

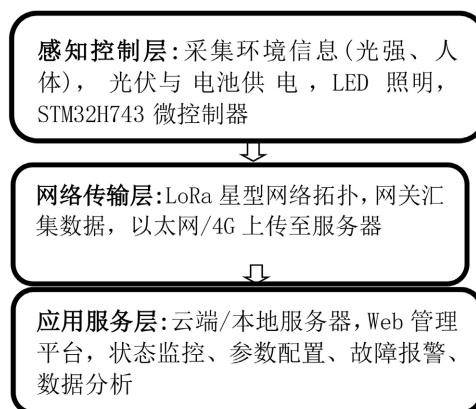


Figure 1. Three-layer architecture of the system

图 1. 智慧路灯系统架构图

感知控制层：作为终端节点用于采集环境信息(光强、人体)电能由光伏与电池储存，照明灯具采用 LED；控制器选用 STM32H743 微控制器。

网络传输层：利用 LoRa 无线通信技术组建星型网络拓扑，将采集到的数据汇集于网关，然后将数据通过以太网或 4G 网络上传至服务器[6]。

应用服务层：部署在云端或者本地的服务器上面，并且带有一个 web 管理平台，可以做到路灯的状态监控、参数远程配置、故障报警及数据的分析。

2.3. 工作原理

白天，由光伏板给锂电池组充电，通过 BMS 系统对其进行管理；晚上，傍晚光敏传感器检测到环境光低于设定的阈值后唤醒系统，路灯自动按照基础亮度(比如 30%)点亮，晚高峰(比如 18:00~23:00)全亮灯、低谷期(比如 23:00~6:00)依靠人体感应控制开启部分路灯，等到进入深夜(比如 23:00~06:00)，就进入人体感应为主模式，没有人的时候处于极暗状态，只要有人进入感应区域，则路灯会瞬间全屏亮起达到 80%，并且会保持这个亮度预设的时间长度内(比如 60 s)再恢复到原来的基础亮度；到了天亮阳光射入强度大于光敏传感器内定的阈值以后，路灯熄灭并将状态变为待机状态。此间，系统中的各个节点状态数据都将通过 LoRa 和 STM32，研究对象就是路灯自动监控系统，等待查看或进行处理和执行相应的动作 [7]。

3. 系统硬件设计

3.1. 主控制器模块

主控芯片选用了意法半导体的 STM32H743VIT6 型号，主控采用的 Cortex-M7 内核最高工作频率为 480 MHz，拥有众多 I/O 端口和较强的计算力，可以较好运行复杂度高的多模融合控制算法并且也可以同时控制多个外设模块，在智能照明场景下得到了实际使用[3]。

3.2. 能源供应与管理系统

能源系统为路灯稳定工作提供保障。

光伏发电单元：应用转换效率 $\geq 23\%$ 的半柔性单晶硅光伏板(规格：50 W、18 V)，采用的半柔性单晶硅光伏板柔性基底与灯杆结合紧密，能适用于不同的使用环境。

储能与管理单元：采用标称电压为 12.8 V、容量为 50 Ah 的锂磷酸铁锂(LiFePO₄)电池组。由电池管理系统(BMS)完成对电池的电压、电流、温度的实时检测，并实现对电池的过充、过放及短路保护功能，在不同的电池健康状态下按需调节充电模式(恒流/恒压/浮充)，以保证对电池的科学管理[8]。

3.3. 信息感知与照明执行模块

光照传感器：使用 BH1750FVI 数字光照度传感器，检测范围 1~65,535 lux，精度 $\pm 5\%$ ，I2C 通信方式，向光控提供正确的数据。

人体感应传感器：选用 HC-SR501 热释电红外传感器，探测距离为可调范围(0~7 米)，感应角度 $\leq 120^\circ$ ，用于感应行人的存在。

照明执行单元：使用高于 120 lm/W 光效的 LED 模组，并用 PWM (脉冲宽度调制)信号实现无极调光，以适应不同的亮度需要。

3.4. 无线通信模块

无线通信模块用的是基于 SX1278 射频芯片的 LoRa 无线通信技术模块(例如 E22-400T30S)，工作于 410~441 MHz 频率范围，接收灵敏度高达-148 dBm，0.5 kb/s 低速传输时有 8 km 以上的理论视距传输距离，在城市环境下能够获得大于 500 m 的可靠通信距离；在待机状态下的休眠电流小于 2 μ A，特别适合太阳能供电物联网设备的使用要求[7]。

4. 系统软件设计与核心算法

4.1. 主程序流程

图 2 所示为主程序流程图，上电后对系统(时钟、GPIO、ADC、串口和 LoRa 等)进行初始化操作，然后进入低功耗休眠状态。当通过定时器中断或者外部中断(传感器触发)唤醒后，采集传感器数据，然后执行控制算法，并驱动 LED，通过 LoRa 无线通信方式把状态数据发送出去，最后再次进入到休眠的状态。

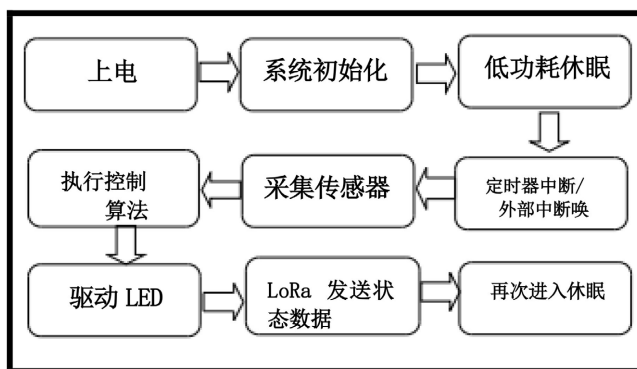


Figure 2. Main program flow chart
图 2. 主程序流程图

4.2. 多模融合控制算法

多模融合控制算法作为该系统软件的核心模块，其逻辑决策流程如图 3 所示。当判断为现在的时间处于光控开灯时间段(即夜间)时，则根据当前高精度时钟模块时间判断是否为“人流高峰模式”或“深夜

节能模式”。

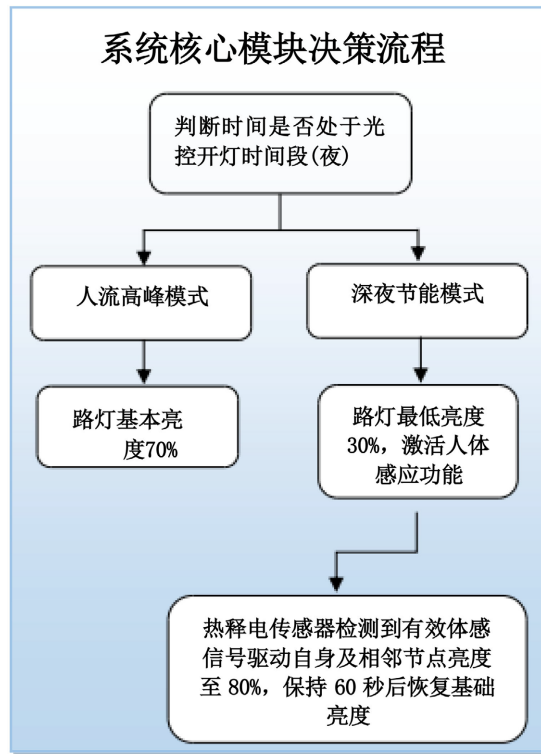


Figure 3. Logic decision flow chart of multi-mode integrated control algorithm

图 3. 多模融合控制算法逻辑决策流程图

人流高峰模式: 路灯尽量保证一定较高的基本亮度(比如 70%)。

深夜节能模式: 路灯处于最低亮度的状态(即, 如 30%), 并且这时人体感应的功能就会被激活。如果有热释电传感器检测到了有效的体感信号, 那么就驱动其自身和旁边的相邻节点亮起来到 80% 的亮度值, 并且保持一定的预设时间(比如 60 秒), 然后回到刚才的基础亮度状态。

为了对抗传感器的噪声以及一些偶然发生的干扰(比如月光或小动物跑过), 本文中所采用的算法是使用了卡尔曼滤波法对光照强度以及人体感应的数据进行了处理。卡尔曼滤波算法是一种递归式优化滤波估计方法, 以预测值和当前时刻观测值为基础, 利用上一时刻的状态估计来得到当前时刻状态的最佳估计值, 核心公式为:

预测步骤:

$$\hat{x}_k^- = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k$$

更新步骤:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

其中, \hat{x}_k 为状态最优估计, z_k 为观测值, K_k 为卡尔曼增益。通过调整过程噪声协方差 Q_k 和观测噪声协方差 R_k , 可以有效平滑传感器数据, 显著降低误触发率。实测表明, 该滤波算法使系统误触发率较传统单光控方案降低了约 40%。

5. 结论与展望

本方案以多模融合控制方式及 LoRa 组网作为技术支持, 对校园内的路灯组网进行改造。经验证明: 通过硬件集成、软件算法等技术创新手段, 在一定程度上可以解决校园内路灯高耗能问题, 可以增强校园路灯管理的智能化水平, 产生了巨大的社会效益与经济效益。在理论上具备更低的全生命周期成本、更优的能耗表现和更短的维护响应时间, 显著优于传统定时控制路灯与普通光控路灯。

未来继续研究工作可以从三个方面开展: (1) 引进机器学习算法让该系统可以学习到各区域人流的状态, 进而实现智能预测; (2) 将边缘计算引入网关中实现局域的数据分析与故障检测, 以此降低云服务器的压力; (3) 对于具备透镜的灯杆来说, 在其上部署环境监测(例如: PM2.5、温湿度)及信息发布等更多的功能, 真正意义上实现“智慧城市神经末梢”的“智慧城市神经末梢”。

基金项目

新型光敏路灯(S202511549151)。

参考文献

- [1] <https://www.chu.edu.cn/lxxy/2021/0910/c3402a122411/page.htm>, 2021-09-10.
- [2] 高杰欣, 张淼, 安中印. 中南民族大学: 高校智慧电控实现节能提效[J]. 中国教育网络, 2020(5): 69-70.
- [3] Yaldız, E. and Gökçen, A. (2025) Design and Implementation of an Off-Grid Smart Street Lighting System Using LoRaWAN and Hybrid Renewable Energy Sources. *Sensors*, **25**, Article No. 5579.
- [4] 孙明. 基于物联网的校园智能路灯监控系统设计[J]. 现代信息科技, 2020, 4(23): 29-31.
- [5] 陈明, 刘军. 智慧路灯节能控制系统设计与实现[J]. 照明工程学报, 2022, 33(2): 112-117.
- [6] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] 田旭飞, 姚凯学, 王凯鹏, 王运峰. 基于 LoRa 和 STM32 的路灯自动监控系统研究[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(8): 1470-1478.
- [8] 李刚, 王芳. 基于 STM32 的太阳能智能路灯控制系统设计[J]. 电源技术, 2020, 44(7): 986-989.