

智能环保百叶窗帘的优化设计研究

郭文静 任磊 彭瑞琳 李茁卓 王雪

西安建筑科技大学华清学院, 中国·陕西 西安 710000

摘要: 随着智能家居与绿色建筑理念的普及, 百叶窗帘作为建筑遮阳与光环境调节的核心组件, 逐渐从传统功能向智能化、个性化、环保化方向升级。传统百叶窗帘存在隐私保护不足、清洁维护困难、能耗控制缺失等缺陷, 难以满足现代建筑对“低干预、高适配、可持续”的需求。本文以光感控制、雨量感应控制及自洁净技术为核心, 结合嵌入式系统与物联网技术, 从硬件选型、程序逻辑、材料工艺三方面, 系统探讨智能环保百叶窗帘的优化路径。通过构建“多传感协同控制 + 功能涂层防护”的一体化方案, 实现光线自适应调节、降雨智能防护、表面自洁净三大核心功能, 旨在通过技术创新提升产品节能性、便捷性与用户体验, 为绿色建筑遮阳系统的发展提供技术参考。

关键词: 智能百叶窗帘; 自动控制; 传感器技术; 自洁净涂层

Research on the Optimal Design of Intelligent and Environmentally Friendly Louvered Blinds

Guo Wenjing, Ren Lei, Peng Ruilin, Li Zhuozhuo, Wang Xue

Xi'an University of Architecture and Technology Huaqing College, China Shaanxi Xi'an 710000

Abstract: With the popularization of smart home and green building concepts, louvered blinds, as a core component for shading and light environment regulation in buildings, are gradually upgrading from traditional functions to intelligent, personalized, and environmentally friendly directions. Traditional louvered blinds have deficiencies such as insufficient privacy protection, difficult cleaning and maintenance, and lack of energy consumption control, which are difficult to meet the modern building's demands for "low intervention, high adaptability, and sustainability". This paper takes light sensing control, rain sensing control, and self-cleaning technology as the core, combines embedded systems and Internet of Things technology, and systematically explores the optimization path of intelligent and environmentally friendly louvered blinds from three aspects: hardware selection, program logic, and material process. By constructing an integrated solution of "multi-sensor collaborative control + functional coating protection", it realizes three core functions: light adaptive adjustment, intelligent rain protection, and surface self-cleaning. The aim is to enhance the product's energy efficiency, convenience, and user experience through technological innovation, providing technical references for the development of green building shading systems.

Keywords: Intelligent louvered blinds; Automatic control; Sensor technology; Self-cleaning coating

0 引言

在“双碳”目标与智慧城市建设的背景下, 建筑能耗优化成为绿色发展的重要环节。据《中国建筑节能年度发展研究报告》数据显示, 建筑门窗及遮阳系统的能耗占建筑总能耗的 25%–30%, 其中传统百叶窗帘因依赖人工调节, 存在“调节不及时、能耗浪费、维护成本高”等问题, 如强光时段若未及时闭合, 会导致室内空调负荷增加 15%–20%; 潮湿多雨季节, 若防护不当, 易造成墙体受潮、家具霉变; 长期积尘不仅影响美观, 还会滋生细菌, 危害室内空气质量。

随着消费者对居住舒适度与智能化需求的提升, 智能

百叶窗帘市场呈现快速增长趋势。据市场研究机构 Statista 数据, 2024 年全球智能遮阳系统市场规模已达 87 亿美元, 其中具备环境自适应功能的产品占比超 40%。然而, 当前多数智能百叶仅实现单一光感控制或远程操控, 缺乏“多场景协同响应”与“全生命周期维护”的一体化设计, 例如, 仅依赖光感控制易在阴天降雨时误判, 导致雨水渗入; 未配备自洁净功能则需定期人工清洁, 增加用户负担。

为此, 本文提出一种集成“光感自适应调节、雨量分级防护、纳米自洁净涂层”的智能环保百叶窗帘优化方案。通过选用高精度传感器与低成本嵌入式芯片, 构建多参数协同控制逻辑; 结合环保型纳米涂层技术, 解决清洁维护

难题，最终实现“无需人工干预、适配多场景需求、低能耗长寿命”的产品目标，为现代建筑遮阳系统的智能化升级提供可行路径。

1 光感控制模块设计

光感控制是智能百叶的核心功能之一，其本质是“感知 - 判断 - 执行”的闭环控制系统。通过实时监测环境光强（自然光、室内补光）与预设阈值对比，自动调整百叶角度或开合度，既满足用户对光线的个性化需求（如阅读时防眩光、休息时遮光），又能减少室内照明与空调能耗。

本模块从传感器选型、主控芯片确定、程序逻辑设计三方面展开优化，确保控制精度与稳定性。

1.1 光照传感器的选型与性能分析

光传感器是“感知环节”的关键，需具备高灵敏度、低功耗、抗干扰性，同时兼顾成本与兼容性。当前市场上的光传感器主要分为光敏电阻（LDR）、光敏二极管或三极管、数字光传感器三类，其性能差异如表 1 所示。

综合考虑精度、功耗与成本，本设计选用 BH1750 数字光传感器。该传感器具备以下优势：

1.1.1 高精度与宽量程

支持 1-65535Lux 的检测范围，覆盖夜间微光 - 正午强光全场景，误差仅 ±15%，可精准区分弱光、正常光、强光等不同工况。

1.1.2 便捷的通信方式

采用 I2C 通信协议，仅需 SDA、SCL 两根信号线即可与单片机连接，简化硬件电路设计。

1.1.3 低功耗特性

正常工作时功耗仅 120 μA，休眠模式下功耗 < 1 μA，适合长期待机的智能设备。

1.1.4 抗干扰能力强

内置滤波电路，可减少瞬间强光如汽车灯光、闪电，对检测结果的干扰，避免百叶频繁误动作。

BH1750 的实物图如图 1 所示，其封装尺寸仅 3.0mm × 3.0mm × 1.7mm，可轻松集成于百叶窗帘的框架内部，避免占用过多空间；传感器表面配备透明亚克力窗口，

确保光线无遮挡，检测数据准确。

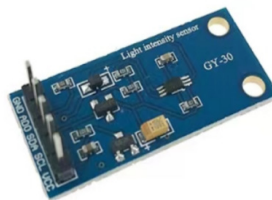


图1 数字光照强度传感器BH1750实物图

1.2 单片机型号确定与硬件电路设计

主控单片机需具备多传感器数据处理、执行器驱动、低功耗运行的能力，同时考虑扩展性。当前主流的嵌入式芯片中，ESP32 系列因集成 Wi-Fi 与蓝牙功能、性价比高，成为智能家居产品的首选。

本设计选用 ESP32-WROOM-32 单片机，实物图如图 2 所示。其核心参数与优势如下：

1.2.1 性能参数

采用双核 Tensilica Xtensa LX6 处理器，主频最高 240MHz，具备 520KB SRAM 与 4MB Flash，可存储复杂控制程序与用户配置参数；

1.2.2 接口兼容性

提供 34 个 GPIO 引脚、2 个 I2C 接口、4 个 SPI 接口，可同时连接 BH1750 光传感器、雨量传感器、舵机或步进电机等外设；

1.2.3 网络与功耗

集成 802.11 b/g/n WiFi 与蓝牙 4.2，支持 MQTT 协议，可接入智能家居网关，深度休眠模式下功耗仅 5 μA，满足长期待机需求；

1.2.4 成本优势

单芯片价格约 30 元，相较于 STM32+WiFi 模块的组合方案成本约 50 元，性价比更高，适合批量生产。



图2 ESP32-WROOM-32单片机实物图

表1 光传感器性能参数表

传感器类型	精度（误差）	响应速度	功耗	成本	适用场景
光敏电阻（LDR）	± 30%	100-200ms	低	0.5-2元	低成本入门级产品，仅区分强光/弱光
光敏二极管	± 20%	5-10ms	中	1-3元	对响应速度有要求，但无需精准数值的场景
数字光传感器（BH1750）	± 15%	120ms	低	3-5元	需精准光强检测的智能产品

1.3 光感程序控制逻辑与流程图

程序设计需以“用户需求为导向”，结合不同场景的光强特点，设置合理的阈值区间，避免百叶频繁动作如短时间内光强波动导致角度反复调整。本设计基于 Arduino IDE 开发环境，采用 C++ 语言编写程序，核心逻辑包括传感器数据读取、阈值判断、执行器驱动、状态反馈四部分。

1.3.1 阈值区间设置与场景适配

通过调研不同场景下的用户光线需求，结合《建筑采光设计标准》(GB 50033-2013)，设置 4 级光强阈值，具体如下表 2 所示。

注：百叶角度定义为“0° = 完全打开（叶片平行于地面），90° = 完全闭合（叶片垂直于地面），角度调节精度为 1°，满足用户对光线的精细控制需求。

1.3.2 程序核心功能与代码解析

程序采用模块化设计，主要包括初始化函数、传感器数据读取函数、控制逻辑函数、执行器驱动函数，核心代码如下（简化版），部分程序：

```

1 #include <Arduino.h>
2 #include <Servo.h>
3
4 // 全局变量定义
5 int currentLightLevel = 0; // 当前光强（需在其他地方更新，如通过传感器读取）
6 int currentBlindAngle = 0; // 当前百叶角度
7 Servo blindServo; // 舵机对象
8
9 void controlBlindByLight() {
10     int targetAngle = 0; // 目标角度（0°=完全打开，90°=完全闭合）
11
12     // 阈值区间判断（对应需求中的光强范围）
13     if (currentLightLevel < 50) {
14         // 夜间/昏暗环境：完全打开（0°）
15         targetAngle = 0;
16         Serial.println("状态：夜间模式 - 百叶完全打开");
17     } else if (currentLightLevel >= 50 && currentLightLevel < 200) {
18         // 弱光环境：打开70%（约27°闭合）
19         targetAngle = 27; // 90°*30%闭合 = 27°
20         Serial.println("状态：弱光模式 - 百叶打开70%");
21     } else if (currentLightLevel >= 200 && currentLightLevel < 800) {
22         // 正常光环境：打开50%（约45°闭合）
23         targetAngle = 45; // 90°*50%闭合 = 45°
24         Serial.println("状态：正常光模式 - 百叶打开50%");
25     } else {
26         // 强光环境：闭合80%（约72°闭合）
27         targetAngle = 72; // 90°*80%闭合 = 72°
28         Serial.println("状态：强光模式 - 百叶闭合80%");
29     }
30
31     // 控制百叶转动到目标角度（仅当角度变化时执行，减少机械损耗）
32     if (abs(targetAngle - currentBlindAngle) > 5) {
33         blindServo.write(targetAngle);
34         currentBlindAngle = targetAngle;
35         delay(1000); // 等待百叶转动到位
36     }
37 }

```

1.3.3 控制流程图

光感控制的完整流程包括“初始化、数据读取、阈值判断、执行动作、循环检测”，具体如图 3 所示。流程图中增加了“故障检测”与“状态反馈”环节，确保系统稳定运行，若传感器初始化失败，立即通过串口输出故障信息，便于调试；若百叶角度无需调整，则直接进入下一轮检测，减少不必要的机械动作。

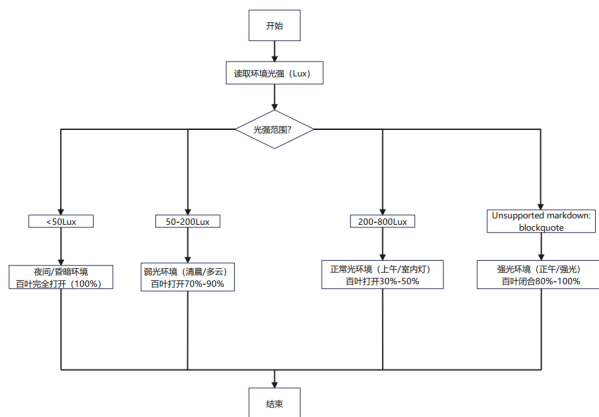


图3 光感控制流程图

2 雨量感应控制模块设计

降雨天气下，传统百叶若未及时闭合，易导致雨水渗入室内，损坏墙面、地板与家具；而人工闭合不仅不便，还可能因外出遗漏导致损失。雨量感应控制模块通过实时检测降雨量，结合光感数据实现“分级防护”，既避免雨水侵入，又兼顾通风与采光需求。本模块从传感器选型、程序逻辑、协同控制三方面展开设计，确保响应速度与防护精度。

2.1 雨量传感器的选型与性能对比

雨量传感器需具备“高精度、快速响应、抗干扰”的特点，当前市场上的主流产品分为翻斗式雨量传感器与光学雨量传感器两类，其性能差异如表 3 所示。

综合考虑安装空间、维护成本与响应速度，本设计选用 RS485 光学雨量传感器，其实物图如图 4 所示。



图4 RS485光学雨量传感器实物图

RS485 光学雨量传感器，传感器具备以下优势：

2.1.1 高精度与快速响应

测量范围 0-4mm/min 覆盖小雨至暴雨，精度 ±0.2mm，响应时间仅 0.5 秒，可快速检测降雨开始；

2.1.2 抗干扰与低维护

采用密闭式光学结构，避免灰尘、昆虫进入，无需定期清理；工作温度范围 - 20℃-60℃，适应不同气候环境；

表2 4级光强阈值及百叶控制

环境光强范围 (Lux)	场景描述	预设百叶动作	设计目的
<50	夜间/昏暗环境	百叶完全打开 (角度 0°)	最大化透光, 利用自然光, 减少室内照明能耗
50-200	弱光环境	百叶打开 70%-90% (角度 18° -27°)	平衡透光与隐私, 避免室外直视室内, 同时保证室内亮度
200-800	正常光环境	百叶打开 30%-50% (角度 45° -54°)	防眩光, 避免阳光直射屏幕或桌面, 提升视觉舒适度
>800	强光环境	百叶闭合 80%-100% (角度 72° -90°)	减少太阳辐射热进入室内, 降低空调负荷, 同时保护家具免受紫外线照射

表3 雨量传感器的类型对比

传感器类型	测量精度	抗干扰性	维护需求	成本 (元)	适用场景
翻斗式雨量传感器	±0.1mm	易受灰尘、昆虫堵塞	需定期清理翻斗	80-150	气象站、户外高精度测量
光学雨量传感器	±0.2mm	密闭结构, 防灰尘	无机械部件	50-80	智能家居、车载设备

2.1.3 便捷的通信与供电

支持 RS485 通信协议, 传输距离可达 100 米, 适合大户型或多层建筑; 采用 5V/12V 宽电压供电, 可与 ESP32 共用电源;

2.1.4 分级检测能力

可输出 小雨、中雨、暴雨 三级信号, 便于程序实现分级防护逻辑。

2.2 雨量感应程序控制

```

92 // 判断雨量大小
93 if (rainValue < RAIN_THRESHOLD * 0.5) {
94     Serial.println("雨量: 小雨");
95     // 小雨时根据光线决定
96     if (lightLevel > LIGHT_DAY_THRESHOLD) {
97         // 白天小雨, 百叶半开
98         targetAngle = 45;
99         Serial.println("控制策略: 百叶半开(45°)");
100     } else {
101         // 夜间小雨, 百叶关闭
102         targetAngle = 90;
103         Serial.println("控制策略: 百叶关闭(90°)");
104     }
105 } else {
106     Serial.println("雨量: 中到大雨");
107     // 中到大雨, 无论白天黑夜都关闭
108     targetAngle = 90;
109     Serial.println("控制策略: 百叶关闭(90°)");
110 }
111 } else {
112     Serial.println("未检测到降雨, 按光照控制");
113     // 无雨时按光照控制
114     if (lightLevel < 50) {
115         targetAngle = 0; // 夜间: 完全打开
116         Serial.println("控制策略: 夜间模式, 完全打开(0°)");
117     } else if (lightLevel < 200) {
118         targetAngle = 27; // 弱光: 打开70%
119         Serial.println("控制策略: 弱光模式, 打开70%(27°)");
120     } else if (lightLevel < 800) {
121         targetAngle = 45; // 正常光: 打开50%
122         Serial.println("控制策略: 正常光模式, 打开50%(45°)");
123     } else {
124         targetAngle = 72; // 强光: 打开20%
125         Serial.println("控制策略: 强光模式, 打开20%(72°)");
126     }
127 }
128 }
    
```

通过雨量传感器实时监测降雨量大小, 如果无降雨情况, 根据光照情况进行调整百叶状态。如果有降雨, 则根

据雨量强度进行分级响应。如果雨量在 0-5 mm/h, 确认为小雨, 可采用部分闭合 50%-70%, 用来平衡防水与通风; 如果降雨量在 5-15 mm/h, 确认为中雨, 可采用部分闭合 80%-90%, 防止雨水渗入室内; 如果降雨量大于 15 mm/h, 确认为大雨或暴雨, 可采用完全闭合, 确保最大程度防水 (其程序如上图所示)。

3 自洁净功能

传统百叶窗帘在日常使用中, 清洁难题一直困扰着用户。由于其叶片数量繁多且间隙狭窄, 灰尘极易在其中积聚。清洁时, 需对每一片叶片逐一擦拭, 过程耗时费力。尤其是对于安装位置较高的百叶窗帘, 清洁工作不仅繁琐, 还存在一定的安全风险。此外, 在清洁过程中, 若操作不当, 如用力过猛或使用不合适的清洁工具, 极易导致叶片变形, 进而影响窗帘的整体质量与美观度。

智能百叶窗帘的自洁净功能, 通过“减少灰尘附着 + 易清洁”的特性, 直击传统百叶窗帘的清洁痛点。并且, 智能百叶窗帘内部集成了光感传感器、雨量传感器、电机以及线路板等精密组件, 灰尘与油污的堆积, 会对这些组件的性能产生直接影响, 严重时甚至可能引发故障。自洁净功能的存在, 能够有效防止灰尘和油污对内部组件的侵蚀, 为智能百叶窗帘的稳定运行提供坚实保障。

3.1 自洁净原理

通过材料表面处理技术, 喷涂含氟硅烷改性纳米材料, 通过模仿荷叶表面的微观结构和疏水特性, 开发出具有超疏水性能的涂层材料, 铝合金表面形成超疏水层, 使水滴能够在荷叶表面自由滚动, 并带走灰尘等污染物, 实现自清洁效果。

3.2 纳米二氧化硅涂层技术

在涂层制备过程中,采用空气喷枪将由纳米 SiO₂ 颗粒、丙烯酸树脂以及 1% 流平剂混合而成的涂料均匀喷涂在铝合金基体表面。纳米 SiO₂ 颗粒是实现超疏水性能的关键成分,其粒径处于纳米级,能够在表面形成微观的粗糙结构;丙烯酸树脂则起到粘结剂的作用,确保纳米 SiO₂ 颗粒牢固附着在基体表面,并赋予涂层一定的柔韧性和耐磨性;1% 流平剂的添加,能够有效改善涂料的流动性,使涂层在喷涂过程中更加均匀,避免出现桔皮纹等表面缺陷。

喷涂厚度精确控制在 30 - 50 μm,这一厚度既能保证涂层具备良好的超疏水性能,又不会对百叶窗帘的机械性能和外观造成不利影响。喷涂完成后,将百叶置于 80℃ 的环境下进行烘干固化,使涂层与铝合金基体之间形成牢固的化学键合,确保涂层的稳定性和耐久性。经过纳米二氧化硅涂层处理后的百叶窗帘,表面具有出色的自洁净性能,能够有效减少日常清洁维护的工作量,延长产品的使用寿命,为用户带来更加便捷、高效的使用体验。

4 结语

智能环保百叶窗帘的优化设计,通过融合光感控制、雨量感应控制以及自洁净等多项先进技术,以用户需求为核心导向,在功能性、环保性以及美观性等方面实现了显著提升。光感控制与雨量感应控制模块,赋予了百叶窗帘根据环境变化自动调节的能力,极大地提高了室内环境的舒适度和能源利用效率;自洁净功能则有效解决了传统百叶窗帘清洁维护困难的问题,不仅降低了用户的使用成本,

还延长了产品的使用寿命。

随着传感器技术、材料科学以及物联网技术的持续进步,智能环保百叶窗帘的性能将不断优化,功能将更加丰富多样。同时,在全球积极推动绿色建筑与智慧城市发展的政策支持下,智能环保百叶窗帘作为建筑节能与智能化的重要组成部分,其市场渗透率有望持续快速增长,为构建更加绿色、智能、宜居的城市环境提供关键支撑,在建筑遮阳领域发挥更为重要的作用。

参考文献:

- [1] 刘建国,赵丽. 基于 PLC 的自动灌溉控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018,34(12):102-108.
- [2] 王磊,张明. 智能传感器原理与应用[M]. 北京电子工业出版社, 2020.
- [3] ANSI/TIA/EIA-485-A-1998, 平衡电压数字接口电路的电气特性[S]. 美国电信行业协会, 1998.
- [4] 贾海云. 智能家居中智能窗帘的设计[J]. 电脑知识与技术, 2021,17(10):202-204.
- [5] 姚宁. 智能家居控制系统的设计与应用[J]. 集成电路应用, 2023,40(07):218-219.
- [6] ESP32-WROOM-32 在智慧农业中的应用研究[Z]. 农业工程学报, 2024, 40(12):189-196.

作者简介:郭文静(2006.08-),女,汉族,陕西汉中,本科,西安建筑科技大学华清学院,研究方向:机电工程学院,机械电子工程。