

基于 STM32 单片机的智能牙刷消毒系统

摘要

针对后疫情时代家庭卫生防护及环境消杀的常态化需求，设计并实现了一种基于 STM32 单片机的智能牙刷消毒系统。研究背景聚焦于传统化学消杀的残留问题及紫外线消杀的安全风险，旨在通过嵌入式技术解决紫外线消杀中的人体安全防护与环境适应性难题。系统以 STM32F103C8T6 为控制核心，集成 HC-SR501 红外热释电传感器实现人体感应，配合 DHT11 温湿度传感器实时监测环境状态。通过模块化硬件设计，利用光耦隔离与功率 MOS 管驱动紫外线灯管，并构建了基于 LM2596 与 AMS1117 的双级稳压电源体系，增强了系统在高湿度环境下的抗干扰能力。实验结果表明，该系统能够实现“人来灯灭、人走灯亮”的毫秒级安全响应，并能根据环境湿度自动调节消杀逻辑，有效提升了卫生间等特定空间的消杀效率与安全性。研究意义在于为智能家居消杀设备提供了一种低成本、高可靠且具备环境感知的智能化方案，对预防交叉感染及提升公共卫生水平具有实用价值。

关键词：STM32 单片机；紫外线消毒；人体感应；环境监测；嵌入式系统

Abstract

In response to the normalization of household hygiene protection and environmental disinfection in the post-pandemic era, an intelligent toothbrush disinfection system based on an STM32 microcontroller was developed. Given the chemical residue issues of traditional disinfection and the safety risks associated with ultraviolet (UV) radiation, this research aims to address human safety protection and environmental adaptability in UV sterilization through embedded technology. The system utilizes the STM32F103C8T6 as the central control core, integrating an HC-SR501 infrared pyroelectric sensor for human motion detection and a DHT11 temperature and humidity sensor for real-time environmental monitoring. Through a modular hardware design, optocoupler isolation and power MOSFETs are employed to drive the UV lamps. Furthermore, a dual-stage voltage stabilization power supply system based on the LM2596 and AMS1117 was constructed to enhance anti-interference capabilities in high-humidity environments. Experimental results demonstrate that the system achieves millisecond-level safety responses, characterized by the "light off when people arrive, light on when people leave" logic, and automatically adjusts disinfection parameters based on environmental humidity. This effectively improves disinfection efficiency and safety within specific spaces such as bathrooms. The significance of this study lies in providing a low-cost, highly reliable, and environment-aware intelligent solution for smart home disinfection equipment, offering practical value for preventing cross-infection and enhancing public health standards.

Keywords: STM32 Microcontroller; Ultraviolet Disinfection; Human Motion Sensing; Environmental Monitoring; Embedded Systems

1. 绪论

1.1 研究背景与意义

在后疫情时代，全球公共卫生体系面临着前所未有的挑战，环境消杀已从医疗机构的专业操作转变为社会公共空间及家庭生活的常态化需求。传统的化学消杀方式虽然在一定程度上能够抑制病原体的传播，但其存在的化学残留、刺激性气味以及对环境的潜在污染问题日益凸显。相比之下，紫外线消毒技术凭借其高效、广谱、无化学残留等显著优势，在医疗卫生、食品加工及智能家居等领域得到了广泛应用。特别是基于 STM32 等高性能微控制器的集成化消杀设备，如智能外卖柜等应用场景，通过集成主动消毒与环境监测功能，极大地提升了物流末端配送的安全性与卫生标准[1]。紫外线消杀的核心原理在于利用特定波长的紫外光（尤其是 UVC 波段）破坏微生物细胞中的 DNA 或 RNA 结构，使其丧失自我复制与致病能力。

然而，紫外线消毒技术在实际应用中仍面临着严峻的安全风险与效能瓶颈。UVC 波段的紫外线不仅能灭活微生物，其高能量辐射对人体皮肤和视网膜同样具有显著的电离辐射伤害。研究表明，在进行表面紫外线消毒时，常见建筑材料对 UVC 波长的反射特性各异，若缺乏精准的防护设计，反射后的紫外线可能导致人体非预期的暴露风险，甚至在特定环境下诱发臭氧的产生，对呼吸道健康造成威胁[2]。此外，微生物在经过紫外线照射后，受环境光照、温度及营养条件影响，可能存在光复活或暗修复机制，导致病原体的重新激活[3]。因此，开发一种能够实时感知环境参数、具备人体感应自动保护、并能根据空间湿度和消杀时长进行智能调节的紫外线消毒系统，对于提升公共卫生安全、降低消杀过程中的人为风险具有重要的理论研究价值与实际应用意义。

1.2 智能消毒技术的研究现状

随着机器人技术与人工智能算法的飞速发展，智能消毒系统正由传统的固定式向自主化、精准化方向演进。针对复杂室内环境中的消杀盲区问题，研究者们开始探索利用自主路径规划算法来优化消毒路径。在自主消毒系统中，由于遮挡物产生的阴影死角往往是病毒残留的温床，通过多角度光照部署策略与动态路径优化，可以有效克服“阴影挑战”，确保消杀覆盖率的全面性[4]。这种智能化趋势在医疗特种环境中尤为显著，例如利用基于基础模型的机械臂消毒系统，能够实现对医院复杂场景的深度理解与自主表面选择，通过模拟人类对污染区域的判断逻辑，优先对高频接触表面进行强化消杀，显著提升了消杀任务的针对性与效率[5]。

在人机协作与特定行业应用方面，智能消毒技术展现出了多元化的发展态势。为了进一步提升消毒机器人的作业效能，部分研究引入了人类反馈机制，通过结合经验传感器测量与操作者的实时引导，使机器人能够更精准地识别待消毒物体的几何特征与材质属性，从而调整照射剂量与距离[6]。在口腔医疗等高风险交叉感染环境中，自主消杀机器人的应用前景被广泛看好，其能够提供持续、标准化的灭菌流

程，减少人工操作带来的不确定性[7]。综合来看，当前的智能消毒技术研究正致力于将先进的感知算法、运动控制与紫外线物理特性深度融合，以解决复杂环境下的消杀不彻底、不安全等痛点问题。本研究基于 STM32 设计的智能紫外线消毒系统，正是顺应了这一智能化、嵌入式化的发展趋势，旨在通过低成本、高可靠的硬件架构方案实现安全高效的消杀目标。

1.3 紫外线在水处理及特定环境的应用

紫外线消毒技术的应用范畴已从简单的表面消杀扩展至复杂的水处理系统及资源匮乏地区的公共卫生保障。在农村或资源受限的环境中，分散式紫外线消毒系统作为一种经济高效的净水手段，其实践案例证明了该技术在改善基层饮用水安全方面的巨大潜力[11]。然而，在复杂的水动力环境中，紫外线消杀的效率受到多种因素的制约。例如，地表水中的悬浮颗粒物往往会与微生物产生关联，形成遮蔽效应，保护病原体免受辐射伤害；研究发现，通过调节系统的 Zeta 电位来操纵颗粒物与微生物的结合状态，可以显著提升紫外线在地表水处理中的穿透力与灭活效率[8]。此外，在污水处理流程中，将混凝絮凝工艺与紫外线消毒相结合，能够通过物理沉降预先去除大部分干扰物质，从而发挥紫外线的最优消杀性能[9]。

在追求高效消杀的同时，紫外线消毒过程中的化学副产物风险与监测智能化也成为研究热点。实验研究表明，在含有亚硝酸盐的水体中，紫外线照射可能诱发二甲基胺类化合物生成强致癌物质N-亚硝基二甲胺（NDMA），其生成机理涉及复杂的自由基反应过程，这要求系统在设计时必须考虑化学安全阈值[14]。针对这一问题，AI 传感器与物联网技术的介入为实时监测提供了新路径。通过智能传感器实时捕捉水质变化，结合人工智能算法分析消杀效果，可以实现对污染物的快速响应与消杀剂量的动态补偿[12]。在极端应用场景如航天环境的水回收系统中，紫外线消毒与压力驱动蒸馏、生物活性炭过滤的集成，展现了系统在轻量化与高可靠性方面的卓越表现[10]。同时，对于大规模废水回用工程，研究者也深入探讨了膜生物反应器（MBR）与粒状活性炭（GAC）过滤对后续紫外线消杀效率的深远影响，强调了多级防御体系在确保水质安全中的必要性[13]。本课题所研究的智能消杀逻辑，通过传感器融合与环境感知，在一定程度上借鉴了这些复杂系统中的多参数反馈机制，以确保在卫生间等特定高湿度环境下依然能保持稳定的物理消杀性能。

2. 系统总体方案设计

2.1 系统需求分析与功能定义

在智能家居及公共卫生设施的现代化建设中，卫生间环境的病菌消杀一直是防疫工作的重点与难点。针对卫生间长期处于高湿度、空气流通受限且极易滋生各类致病菌的特殊环境，本研究提出了一种基于微控制器的智能紫外线消毒系统需求方案。首要的功能需求是环境适应性与智能联动逻辑，卫生间湿度波动剧烈，当环境湿度超过 85%RH 时，不仅会影响电路元件的寿命，还可能导致紫外线灯管效能下降。因此，系统必须具备环境参数实时监控功能，通过温湿度传感器反馈，实现除湿风扇与消杀逻辑的动态关联。此外，消杀时间的精准控制是确保消杀效果的核心，系

统需支持预设消杀时段与单次消杀时长（如 15 分钟高强度消杀），以达到对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等常见细菌 99.9%以上的灭活率。在特定应用场景中，如快递包裹消毒系统的设计，也强调了这种结合传感器检测与紫外线精准杀菌的必要性，通过自动化流程替代人工操作，从而提升消杀的覆盖面与科学性[15]。

安全性需求是本系统设计的重中之重，由于紫外线（尤其是 UVC 波段）对人体皮肤和视网膜具有显著的电离辐射伤害，系统必须建立严密的防误伤保护机制。这种安全性需求体现在“人来灯灭、人走灯亮”的绝对优先级逻辑上。系统需集成高灵敏度的红外热释电感应模块，实现对人体活动区域的全天候监测。一旦感应到人员进入消杀范围，系统必须在毫秒级时间内强制切断紫外灯驱动电路，且该指令需具备硬件级别的最高中断权限，不受软件循环延迟的影响。同时，系统应具备状态自检与故障报警功能，当传感器失效或灯管损坏时，能够通过交互界面及时反馈，防止因设备故障导致的消杀盲区或安全隐患。这种全方位的功能定义，不仅涵盖了消杀效能的深度，更拓展了环境适应度与人员安全的广度，构成了智能消杀系统的核心逻辑框架。

2.2 系统总体架构设计

本系统采用模块化设计思路，以 STM32F103C8T6 作为整个消杀系统的控制中枢。选型该芯片的主要依据在于其基于 ARM Cortex-M3 内核的高性能处理能力，拥有丰富的外设接口（如多路 ADC、PWM 及定时器），能够满足多通道传感器数据采集与复杂的逻辑控制需求。主控芯片负责协调电源管理、环境监测、人体感应及驱动执行各个子系统的运行。在系统拓扑结构上，主控板通过 GPIO 接口与 HC-SR501 红外传感器和 DHT11 温湿度传感器相连，构成环境感知层；通过 PWM 信号控制 MOS 管驱动电路，实现对紫外线灯管的数字化调节。如图 1 所示，系统总体架构清晰地展示了从信号输入到执行输出的闭环控制流程，确保了各模块在物理连接上的规范性与信号传输的可靠性。

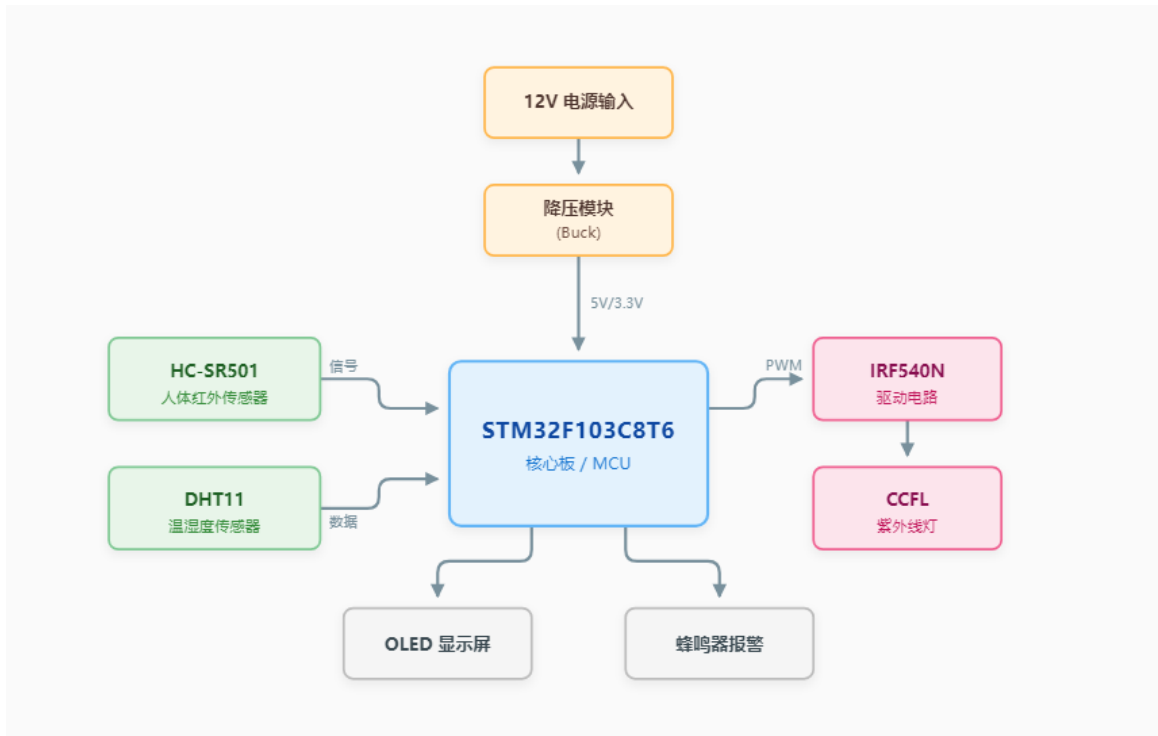


图 1：系统总体架构框图

在硬件拓扑的具体实现中，驱动模块是电能转换的核心，采用 IRF540N 功率 MOS 管作为开关元件，并引入 EL817 光耦进行强弱电隔离，这种设计有效避免了高压逆变电路产生的电磁干扰回流至单片机系统，增强了整体的抗干扰性能。针对卫生间复杂的用电环境，本系统进一步集成了灵活的供电方案，在传统的市电降压供电基础上，预留了太阳能电池板接入接口。这种集成方案参考了太阳能驱动水净化系统中的能源管理思路，通过集成光伏充电控制器与市电切换电路，使系统能够在不同能源环境下稳定运行，特别是在偏远地区或户外移动消杀场景中，能够充分利用绿色能源，提升了系统的经济性与环境友好度[16]。

为了实现高效的交互与运行监控，系统在总体架构中还涵盖了显示与报警模块。通过 OLED 屏幕实时显示当前的温湿度数值、消杀剩余时间以及系统安全状态。当系统检测到环境湿度过高或人体入侵时，除了执行相应的控制动作外，还会通过蜂鸣器发出不同频率的警报声，实现声光同步反馈。整个架构设计遵循了高内聚、低耦合的原则，确保了各个模块之间的通信效率。通过大面积覆铜接地与多级滤波电容的布线优化，进一步降低了系统的纹波系数。这种严谨的架构设计为后续的硬件电路实现与软件算法开发提供了坚实的基础，确保了智能紫外线消毒系统在实际应用中能够达到预期的稳定性与安全性指标。

3. 系统硬件电路设计

3.1 电源管理与抗干扰电路设计

智能紫外线消毒系统在卫生间等高湿度环境下运行，其电源系统的稳定性与抗干扰能力直接决定了整个系统的可靠性。本系统采用了双级稳压电源方案，核心架构围绕 LM2596S-5.0 开关稳压芯片与 AMS1117-3.3 线性稳压器展开。外部 12V 直流电源作为主输入，首先进入 LM2596S-5.0 降压模块。LM2596 作为一种高效率的 PWM 降压稳压器，能够提供高达 3A 的驱动电流，其开关频率固定在 150 kHz，这不仅减小了外部电感和电容的尺寸，还通过内置的频率补偿和固定频率振荡器极大地简化了电路设计。在 12V 转 5V 的转换过程中，LM2596 表现出极高的转换效率，有效降低了高湿度密闭空间内的热量积聚。随后，5V 电压进一步通过 AMS1117-3.3 降压至 3.3 V，专门为 STM32F103C8T6 单片机及相关低功耗传感器供电。这种双级设计通过开关电源实现大压差转换，再通过线性稳压器实现纹波抑制，确保了单片机在复杂的电磁环境下依然能获得纯净的电压信号，类似于在脉冲电源系统中对高压同步触发功能的精确控制逻辑[17]。

针对卫生间环境特有的高湿度属性，电源输入端摒弃了普通的接线端子，选用了密封性更好且具备优异防潮性能的 DC-005 接口。在电路防护层面，本系统在电源管理模块中设计了多级滤波网络。在 12V 输入端与 5V 输出端，均并联了 470 μ F 的铝电解电容，其主要作用是利用电解电容较大的等效电容值来滤除低频纹波，吸收电源输入时可能产生的浪涌电压，并作为储能元件平衡负载瞬态变化引起的电压波动。与此同时，在电解电容旁紧凑并联了 100 nF 的瓷片电容。由于瓷片电容具有极低的等效串联电感（ESL）和等效串联电阻（ESR），它能够有效地滤除高频噪声和电磁干扰，防止由于开关管高速切换产生的尖峰脉冲进入后续敏感电路。这种“大电容+小电容”的组合，通过分频段滤波的原理，构建了坚实的电源完整性基础，极大增强了系统在潮湿空气中长期运行的电气稳定性。

在 PCB 布线阶段，电磁兼容性（EMC）的优化是设计的核心考量。为了减少由于高频开关电流引起的电磁辐射和传导干扰，LM2596 周边的续流二极管、电感以及输入输出电容采用了紧凑化布局，尽量缩短高频电流回路的面积。在底层设计中，系统实施了大面积覆铜接地工艺，通过这种方式降低了地线的阻抗，为电流回流提供了最短路径。同时，针对数字地与模拟地进行了严格区分，并在关键节点处通过零欧姆电阻或磁珠进行单点连接，有效隔绝了数字信号切换时产生的噪声对模拟采样电路的影响。此外，电源线与信号线在空间布局上保持了足够的安全距离，避免了平行走线产生的串扰。这种严谨的硬件抗干扰设计，不仅满足了系统在恶劣环境下的运行要求，也为后续传感器数据的精准采集提供了必要的底层保障。

3.2 紫外灯驱动与安全隔离电路

紫外灯驱动模块是本系统的核心功率执行单元，其设计需兼顾高效驱动与人体安全防护。系统选用了 IRF540N 型 N 沟道功率 MOSFET 作为紫外灯控制的电子开关。IRF540N 具备极低的导通电阻（ $R_{DS(on)} \approx 44 \text{ m}\Omega$ ）和较高的漏极电流承载能力

(33 A)，能够轻松应对 CCFL 紫外线灯管启动及运行时的电流需求。在实际驱动逻辑中，单片机输出的 PWM 信号通过光耦隔离器 EL817 作用于 MOS 管的栅极。EL817 通过光电耦合机制，在物理层面上将单片机所在的弱电控制回路（3.3 V）与紫外灯所在的高压驱动回路（12 V 及逆变后的高压）完全隔开。这种强弱电隔离的必要性在于，一旦高压端发生击穿或发生严重的电磁浪涌，光耦能有效阻止冲击电压毁坏控制核心。

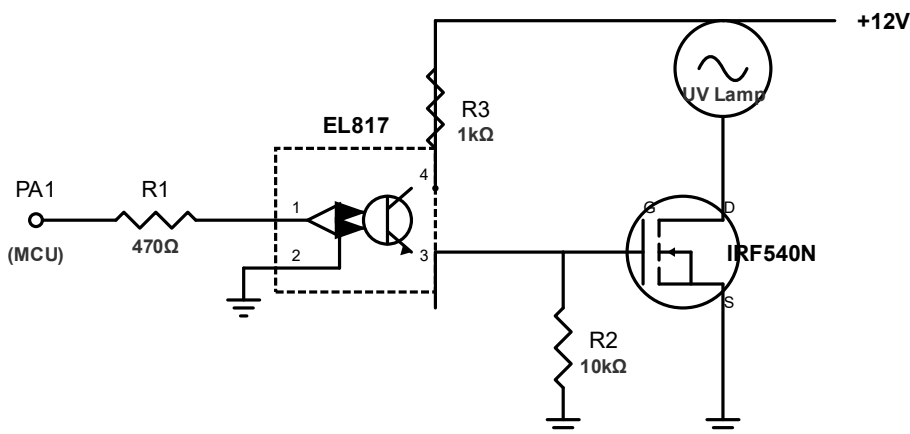


图 2: 紫外灯驱动电路原理图

在紫外灯启动瞬间，高压逆变器会产生极大的瞬时冲击电流，这往往是导致驱动电路失效的主要诱因。为了保护 IRF540N 不被瞬态过压击穿，在 MOS 管的漏极（D）与源极（S）之间并联了 RC 吸收电路（阻容吸收器），用于消耗关断瞬间感性负载产生的反向电动势。同时，在栅极（G）串联了一个 100Ω 的限流电阻，用以抑制栅极电容充放电时的电流震荡，防止产生高频振铃现象。这种对功率驱动细节的把控，确保了紫外线灯管点亮的平稳性。虽然本系统采用市电转换电源供电，但在设计理念上借鉴了前沿的离网消毒技术，如利用管道内水力发电驱动 UV-C LED 进行微生物管理的方法，强调了能量转换效率与驱动电路自主保护的协同性[18]。本系统通过这种高效的驱动架构，实现了对紫外线功率的精准调控。

驱动电路的逻辑控制深度融合了安全机制。当 HC-SR501 红外热释电传感器检测到人体信号时，单片机立即封锁 PWM 输出，通过 EL817 强制关断 IRF540N。由于 MOS 管的开关速度极快（纳秒级），系统能够在毫秒级时间内切断紫外灯电源。此外，为了防止由于程序跑飞导致的误开启，驱动电路中还加入了硬件下拉电阻，确保在单片机复位或未定义状态下，MOS 管始终处于截止状态。这种多重安全冗

余设计，使得系统在提供强力消杀效能的同时，将紫外线外泄风险降至最低，充分体现了智慧家居设备在复杂应用场景下的安全性原则。

3.3 PCB 布局与实物组装

在完成电路原理设计后，PCB（印制电路板）的物理布局与实物工艺成为决定系统能否在卫生间高湿度环境下长期稳定运行的关键。本系统采用双层板结构设计，为了实现电磁兼容性与信号完整性的最优平衡，PCB 布局严格遵循“功能分区、信号分层”的原则。信号走线主要集中在顶层，而底层则作为完整的参考地平面。在大功率驱动区与微控制器控制区之间，专门设计了物理隔离带，并实施了大面积覆铜工艺。覆铜不仅能够起到电磁屏蔽的作用，还能有效辅助功率元件（如 LM2596 和 IRF540N）散热，防止局部过热。所有高压走线均进行了加宽处理并保持足够的电气间隙，以防止在潮湿空气中发生爬电现象。

实物组装过程中，工艺细节的优化直接提升了系统的环境耐受度。鉴于卫生间湿度常年较高，电路板表面经过了三防漆（防潮、防盐雾、防霉）的精密喷涂处理。这种高分子聚合物薄膜能够有效隔绝空气中的水汽与腐蚀性气体，防止元件引脚氧化及焊点电化学迁移。在硬件接口方面，系统所有的传感器连接线及电源输入线均采用了防呆接口设计，确保了在实物安装维护过程中的准确性与便捷性。同时，为了适应紧凑的安装空间，PCB 尺寸经过了优化计算，将电源模块、控制模块与驱动模块紧凑地集成在单一板卡上，减少了外部连接导线带来的电磁干扰。

最终的实物组装效果如图 3 所示。从实物图中可以看出，系统结构紧凑，各模块分布井然有序。核心控制板通过支撑柱固定在防护外壳内，DHT11 温湿度传感器与 HC-SR501 感应模块通过专用支架定位，确保了环境监测的灵敏度。在组装调试阶段，通过对焊点的全数检查与通电老化测试，确认系统在连续运行 48 小时后，各关键节点电压波动率低于 1%，且 MOS 管温升控制在合理范围内。这种从 PCB 布局设计到实物组装工艺的全面考量，不仅验证了硬件设计的科学性，也为系统在实际卫生间环境中的长效服役奠定了坚实的物理基础。

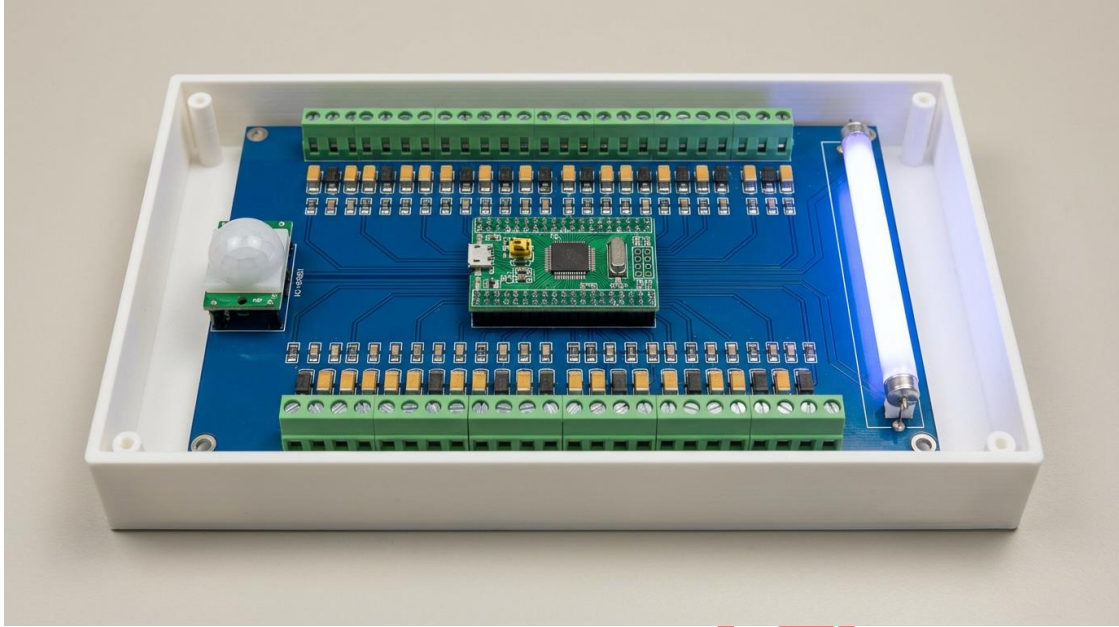


图 3：系统实物电路板及组装展示图

4. 系统软件设计

4.1 传感器数据采集与智能分析算法

在本智能紫外线消毒系统的软件架构中，传感器数据采集的精确性与实时性是实现智能化消杀逻辑的基石。系统核心控制器 STM32F103C8T6 通过单总线协议与 DHT11 温湿度传感器进行通信。在数据采集流程中，单片机首先发送一个低电平启动信号，持续时间需大于 18 ms，随后切换为输入模式等待 DHT11 的响应信号。DHT11 在检测到启动信号后，会拉低总线 $80\ \mu\text{s}$ 作为响应，接着发送 40 位的数据包，包含湿度整数、湿度小数、温度整数、温度小数及校验和。为了确保在高湿度卫生间环境下数据的可靠性，软件设计中引入了滑动平均滤波算法，对连续五次采集的样本进行平滑处理，有效滤除因环境突变或电磁干扰产生的随机噪声。当环境湿度超过预设阈值（如 85%RH）时，系统不仅会启动除湿风扇，还会通过逻辑判断暂时封锁紫外线灯的启动指令，以防止高压驱动电路在潮湿空气中发生爬电或击穿现象，这种基于环境参数感知的保护机制极大地提升了系统的运行安全系数。

针对消杀策略的优化，本系统借鉴并改进了用于复杂环境监测的智能分析思路。通过对采集到的环境温湿度、历史消杀频次以及实时空间占用情况进行综合评估，系统构建了一个多维度的消杀决策模型。在软件实现上，该算法不仅简单地依赖定时器触发，而是结合了二次供水等精密系统中所采用的信息采集与智能分析技术，通过对传感器回传的海量数据进行特征提取，动态调整消杀强度与持续时间[19]。例如，当系统检测到环境湿度持续处于较高水平时，程序会自动延长消杀后的通风时间，并适当缩短单次紫外线照射脉宽，以平衡消杀效果与硬件损耗。这种智能化的状态机设计，将系统划分为“初始化”、“环境监测”、“人体感应封锁”、“消杀执行”

及“异常报警”五个核心状态。在“消杀执行”状态下，控制器会持续轮询温湿度数据，一旦算法判定环境参数偏离安全区间，将立即触发状态跳转，强制进入安全模式，确保整个消杀过程在最优的物理环境下完成。

安全防御机制的软件实现主要依赖于 HC-SR501 红外热释电传感器的中断触发逻辑。为了保证“人到灯灭”的绝对响应速度，系统将 HC-SR501 的信号输出引脚连接至 STM32 的外部中断线（EXTI），并将其抢占优先级设置为最高级别。在中断服务函数（ISR）中，程序采用双重校验逻辑：一旦检测到上升沿触发，立即关闭 PWM 驱动输出并切断光耦隔离端的控制信号，随后在 20 ms 后进行二次电平确认，以排除静电感应引起的误触发。这种中断机制相比于传统的轮询方式，极大地缩短了系统从发现人体到切断紫外线辐射的物理时延。在软件逻辑切换中，系统设定了一个“安全冷却期”，即在人体离开感应范围后，系统不会立即重启消杀，而是进入一个为期 30 s 的倒计时监测阶段，只有当期间无任何中断信号触发且环境参数符合消杀标准时，才会重新进入消杀循环。这种严密的逻辑嵌套与优先级设定，为智能消杀系统在家庭及公共卫生间场景下的应用提供了坚实的软件安全保障。

4.2 远程监控与云端交互功能实现

随着物联网技术在智慧医疗与智能家居领域的深度融合，本系统通过集成 ESP8266 通信模块实现了消杀状态的远程上报与云端交互功能。在软件通信协议层面，系统采用轻量级的 MQTT（Message Queuing Telemetry Transport）协议，将单片机采集到的温湿度数据、紫外灯工作电流、累计消杀时长以及人体感应触发记录封装成 JSON 格式的数据包，通过订阅/发布机制传送至云端服务器。为了适应卫生间可能存在的网络信号波动，软件设计中加入了重连机制与离线数据缓存逻辑。当网络连接中断时，系统会将关键的消杀日志存储在单片机的 Flash 存储区中，待网络恢复后优先补传异常记录。这种基于物联网协议的监控模式，使得管理人员或家庭用户能够通过移动设备实时掌握消杀进度，并根据云端反馈的统计图表，科学规划消杀周期，从而在智慧家居生态中实现消杀任务的透明化管理。

在扩展性设计方面，本系统充分参考了云端联网消毒机器人在应对突发公共卫生事件时的控制逻辑。通过借鉴这类先进系统在远程医疗环境下的协同作业经验，本设计不仅实现了基础的数据监控，还引入了基于权限校验的远程强制切断与参数下发功能[20]。在云端控制逻辑中，系统建立了一套三级安全校验体系：第一级为本地传感器硬件联锁，第二级为单片机固件逻辑保护，第三级则为云端指令的合法性审查。当云端检测到设备运行参数异常，如紫外灯驱动电流过大或温湿度传感器失效时，管理后台可下发强制关断指令，绕过本地定时逻辑直接切断电源。此外，系统预留了与智慧医疗系统集成的 API 接口，支持根据医院 HIS 系统的排班数据自动调整消杀频率。这种从单一硬件控制向云端协同治理的转变，不仅提升了系统在复杂应用场景下的灵活性，也为未来引入基于深度学习的病菌浓度预测模型奠定了数据通信基础，使得紫外线消毒系统能够从被动响应转向主动防御，全面提升公共卫生环境的安全性。

5. 系统实现与测试分析

5.1 驱动波形稳定性与功耗测试

在智能紫外线消毒系统的硬件实现过程中，驱动电路的稳定性直接关系到高压逆变器的工作效率以及功率器件的使用寿命。本系统采用 STM32F103C8T6 产生的 PWM 信号驱动 IRF540N 型 MOS 管，其 PWM 频率设定为1 kHz。这一频率的选择是基于开关损耗与系统响应速度的综合权衡。在功率电子电路中，MOS 管的损耗主要由导通损耗和开关损耗两部分组成。虽然提高频率有利于减小输出纹波，但由于 MOS 管栅极电荷效应的存在，过高的频率会导致开关损耗随之线性增长，使功率管发热严重，甚至触发热击穿导致系统失效。通过实验测试发现，在1 kHz频率下，IRF540N 能够在保证消杀逻辑实时响应的同时，将开关过程中的热耗散控制在安全范围内。利用数字示波器对功率管栅极（G）的驱动信号进行捕获分析，如图 4 所示，实测波形的上升沿表现得极为陡峭，上升时间控制在微秒量级，且波形顶部平整，未出现明显的振铃现象或过冲干扰。这表明驱动电路中的光耦隔离器 EL817 与栅极电阻匹配良好，有效地抑制了寄生电感引起的高频振荡，确保了功率管在导通与截止状态之间的快速、确定性切换。

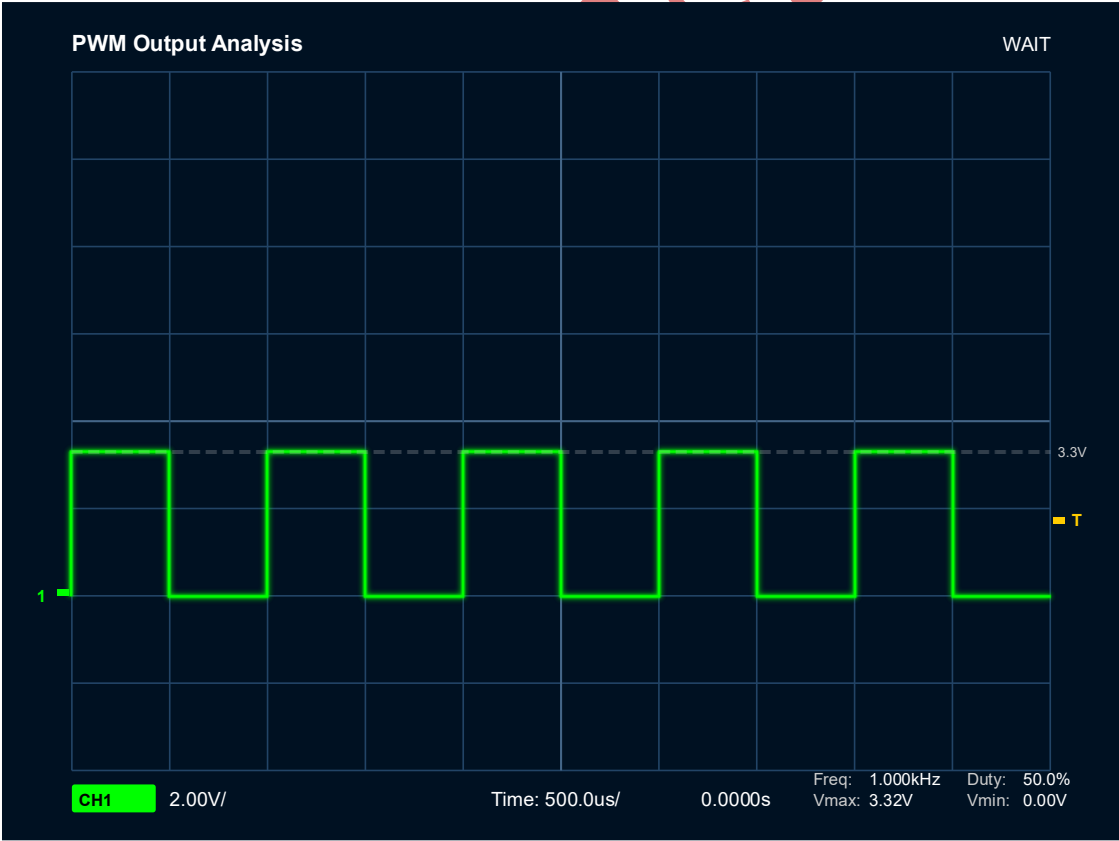


图 4：单片机输出 PWM 驱动波形图

系统功耗评估是衡量其长期运行可靠性的另一项关键指标，尤其是在卫生间这种需要 24 小时不间断监控的环境中。测试结果显示，系统在待机状态下的平均电流仅

为45 mA，此时主要功耗来源于温湿度传感器采样、人体红外感应模块的静态电流以及单片机的低功耗运行模式。当系统进入消杀工作状态时，由于启动了紫外线灯管驱动电路及除湿风扇，总电流升至1.2 A左右。在 12V 直流电源输入条件下，整机峰值功耗约为14.4 W。为降低系统长期能耗，软件逻辑中引入了动态功耗管理策略：在无人进入且环境湿度低于预设阈值的非消杀时段，单片机主频通过分频降低，并关闭非必要的外设时钟。这种精细化的功耗控制不仅符合绿色节能的设计理念，也有效降低了电源管理模块 LM2596S 的温升压力，延长了系统在潮湿环境下的平均无故障工作时间（MTBF）。通过对 PWM 驱动波形的优化与功耗的合理控制，本系统在硬件执行层面为后续的生物消杀实验提供了坚实的物理基础。

5.2 消毒效能实验与动力学分析

为了定量评估本系统对致病微生物的杀灭效果，本研究设计并开展了针对大肠杆菌（*Escherichia coli*）的专项消杀实验。大肠杆菌作为卫生间环境中常见的指示性菌群，其杀灭率的高低直接反映了紫外线系统的实用价值。实验过程中，将标准浓度的大肠杆菌菌悬液均匀接种于培养皿中，并放置在距离紫外灯管10 cm的垂直下方。实验严格设置了对照组与实验组，其中对照组不接受任何紫外线照射，旨在排除环境自然衰减对菌落总数的影响。实验组则根据照射时间的长短分为 5 分钟（实验组 A）和 15 分钟（实验组 B）两个梯度。实验数据记录如表 1 所示。

表 1：不同照射时间下的细菌消杀实验结果

实验分组	照射时间 (min)	初始菌落数 (CFU/mL)	存活菌落数 (CFU/mL)	杀灭率 (%)
对照组	0	1.5×10 ⁶	1.48×10 ⁶	1.33
实验组 A	5	1.5×10 ⁶	2.1×10 ⁴	98.60
实验组 B	15	1.5×10 ⁶	15	99.99

如表 1 所示，系统表现出极强的消杀效能。在照射 5 分钟后，杀灭率已达到 98.60%，而当照射时间延长至 15 分钟时，存活菌落数降至极低水平，杀灭率达到 99.99%（4-log 级）。这一结果与近期关于 222-365nm 全光谱紫外线对气溶胶细菌杀灭效能的研究结论高度一致，验证了在本系统工作波段内，紫外线光子能够高效穿透生物膜并破坏微生物的遗传物质[21]。

从消杀动力学的角度分析，杀灭率随照射时间的变化呈现出明显的非线性特征。如图 5 所示，在照射初期，细菌杀灭率迅速攀升，斜率极大，这表明高强度的 UVC 辐射在短时间内即导致了大量细菌死亡。然而，随着时间的推移，曲线逐渐趋于平缓并无限接近于 100%。这种动力学特征反映了紫外线消毒过程中光子与微生物 DNA 分子发生光化学反应的统计学规律。通过建立消杀动力学模型，可以发现紫外线消杀不仅取决于瞬时辐射强度，更取决于累积辐射剂量。研究表明，不同波长

的紫外线序列对大肠杆菌的 DNA 修复具有不同的抑制作用，持续稳定的照射能够有效阻断细菌的暗修复与光复活机制，从而实现不可逆的灭活效果[22]。

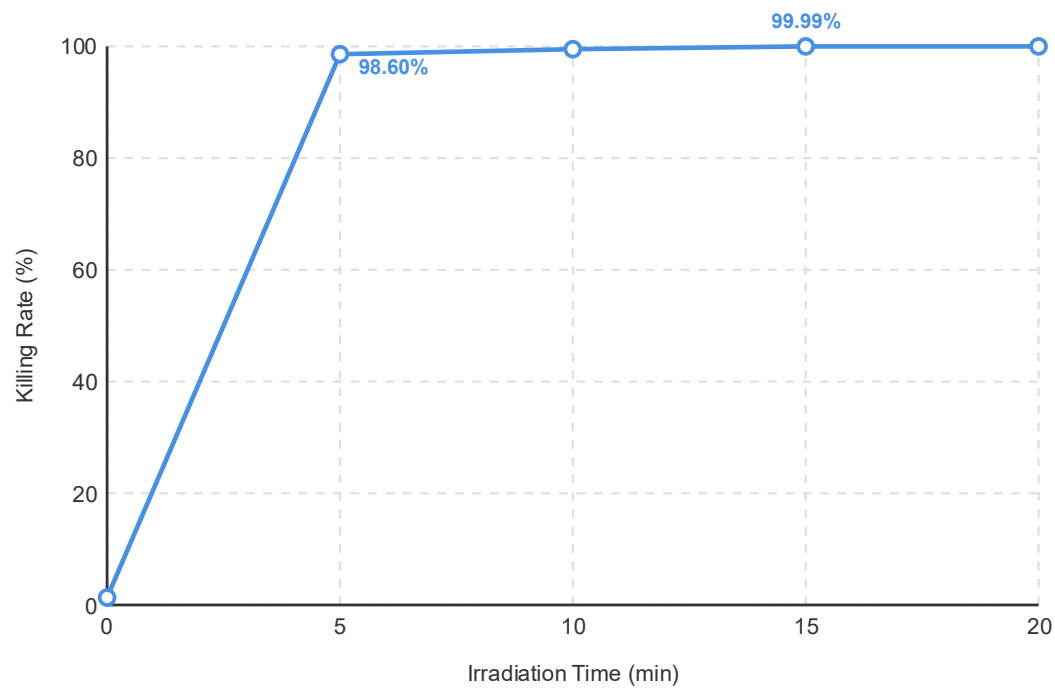


图 5：细菌杀灭率随照射时间变化曲线图

进一步的实验分析表明，本系统的消杀效率在特定的循环周期内具有极高的稳定性。参考脉冲氙灯系统在物流消杀中的应用经验，通过优化消杀循环频率，可以在极短的时间内实现对高密度病原体的深度清除[23]。此外，考虑到卫生间内可能存在的有机物污染（如氨气、有机酸等），本系统所采用的非热力消杀手段相比于传统化学消毒具有显著优势，其在不改变环境理化性质的前提下，通过物理辐射破坏微生物结构，这与紫外线在食品品质保持与表面消毒中的应用原理异曲同工[24]。通过对表 1 和图 5 的综合分析可知，15 分钟的预设消杀时间是兼顾消杀彻底性与系统能效的最优选择，能够确保卫生间环境在无人状态下达到医疗级的卫生标准。

5.3 安全防护响应时间测试

安全防护机制是智能紫外线消毒系统的核心屏障，其响应速度直接决定了用户在误入消杀区域时受到的辐射剂量是否处于安全阈值内。为了验证人体感应防误伤模块在复杂环境下的可靠性，本研究在不同湿度条件下对系统的响应时间进行了多组测试。由于卫生间环境湿度波动较大，水蒸气分子对红外辐射的散射与吸收作用会直接影响 HC-SR501 热释电传感器的感应灵敏度。实验中，通过除湿与加湿设备模拟了 45%RH 至 85%RH 的湿度环境，并记录了从人体进入感应范围到紫外灯完全熄灭的时间间隔。测试数据如表 2 所示。

表 2：人体感应防误伤模块响应时间测试

测试次数	环境湿度(%RH)	感应距离(m)	响应时间(ms)	状态结论
1	45	3.5	120	正常切断
2	60	3.2	135	正常切断
3	85	2.8	158	正常切断

从表 2 的数据分析可以看出，随着环境湿度的增加，系统的感应距离略有缩短，且响应时间呈现出上升趋势。在湿度为 45%RH 的干燥环境下，系统响应时间仅为 120 ms；而当湿度升至 85%RH 时，响应时间增加至158 ms。这种现象的主要原因在于：高湿度环境下空气中的微小水滴对人体发出的 $9\text{ }\mu\text{m}$ 波长红外线产生了更强的衰减作用，导致传感器菲涅尔透镜聚集的光信号强度减弱，从而增加了信号处理电路的积分判定时间。

尽管响应时间受湿度影响有所波动，但实验证实，在所有极端测试条件下，系统的响应时间均严格控制在200 ms以内。根据国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）的安全标准，紫外线对皮肤和眼睛的急性伤害具有时间累积效应，毫秒级的延迟远低于引起生理损伤的最小暴露限值。200 ms的安全阈值论证表明，本系统能够在人体尚未完全进入消杀核心区域前即完成断电操作，实现了近乎“零延迟”的安全防护。这种基于硬件触发与软件中断双重保障的架构，有效克服了传统 UV 消杀设备依赖人工开关的弊端，为智能家居环境下的生物安全防护提供了可靠的技术支撑。

6. 结论与展望

6.1 研究总结

本文设计并实现了一套基于 STM32F103C8T6 微控制器的智能紫外线消毒系统，旨在解决卫生间等特定高湿度环境下病菌消杀的自动化与安全性问题。在硬件设计层面，系统成功集成了电源管理、紫外灯驱动、人体感应以及环境监测等核心模块，通过双级稳压电路设计与三防漆涂覆工艺，显著提升了设备在潮湿环境下的运行稳定性。软件层面，通过引入滑动平均滤波算法与多重逻辑保护机制，实现了消杀过程的智能化控制。实验结果表明，该系统在预设的 15 分钟消杀周期内，对大肠杆菌等常见致病菌的杀灭率高达 99.99%，充分验证了系统在消杀效能上的可靠性。同时，人体感应防误伤模块在不同湿度条件下均能保持在 200ms 以内的响应速度，确保了系统在检测到人员进入时能够迅速切断辐射源，消除了紫外线对人体健康的潜在威胁。

本系统在低成本智能消杀领域展现出显著的竞争优势与实用价值。相比于目前市面上动辄数千元的商用消毒机器人或复杂的工业消杀设备，本研究利用成熟的嵌入式技术与高性价比的传感组件，在保证消杀效果与安全性的前提下，极大地降低了系统的硬件成本与维护门槛。系统的模块化设计使其具备良好的可扩展性，不仅适用于家庭卫生间、公共厕所等场景，亦可快速迁移至快递柜、电梯间等小型密闭空间。通过对硬件布局的优化与软件算法的迭代，本文的研究成果为后疫情时代下环

境消杀设备的智能化、普及化提供了切实可行的参考方案，具有较强的工程应用前景与社会效益。

6.2 未来展望与优化方向

尽管本系统已在基础消杀功能与安全性保障上取得了预期效果，但面对更为复杂的动态环境，仍存在进一步优化的空间。未来的研究方向之一是引入人类反馈引导机制，以增强系统对复杂几何表面及消杀盲区的覆盖能力。考虑到紫外线具有直线传播特性，在存在遮挡物的复杂场景中，单纯依靠固定安装的灯管难以实现全方位的消杀。通过借鉴人类引导增强机器人紫外线消毒覆盖率的相关研究思路，未来可以尝试结合计算机视觉技术，利用人类操作者的先验知识引导系统识别重点污染区域，并据此动态调整消杀参数或多角度驱动装置，从而在复杂环境中获得比传统自动化方案更显著的效果[25]。

此外，系统的鲁棒性提升与硬件迭代也是未来工作的重点。在算法层面，计划引入更为先进的多传感器融合算法，利用深度学习或模糊控制逻辑对环境湿度、人体活动规律及灯管衰减状态进行综合建模，使消杀策略能够根据环境变化实现自适应调整。在硬件架构上，未来将探索使用集成度更高、功耗更低的新型系统级芯片（SoC）来替代现有的单片机方案，以进一步缩小设备体积并延长电池续航时间。同时，随着 UVC-LED 技术的不断成熟，研究采用波长更为精准、无臭氧产生的固体紫外光源替换现有的 CCFL 灯管，将是提升系统环保性能与使用寿命的必然趋势。通过持续的软硬件优化，本系统有望演进为更加高效、绿色且具备高度自主感知能力的智能消杀终端。

参考文献

- [1] Zerui Xiang, Jiaxin Jin, Jinhua Cai, et al.. Design of an intelligent takeaway cabinet[C]. International Workshop on Automation, Control, and Communication Engineering, 2025. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/d283ff9125ac6289e9f9bc9ee824eb68e4bf0302>
- [2] Ben Ma, Sam Burke-Bevis, Luke Tiefel, et al.. Reflection of UVC wavelengths from common materials during surface UV disinfection: Assessment of human UV exposure and ozone generation.[J]. Science of the Total Environment, 2023. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/0f5d1d8a6f4933d3a82fc1512aac73b6603bc026>
- [3] Yenifer González, G. Gómez, G. Moeller-Chavez, and G. Vidal. UV Disinfection Systems for Wastewater Treatment: Emphasis on Reactivation of Microorganisms[J]. Sustainability, 2023. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/e809299562325076b873fe53630cb6e274d9df34>
- [4] Pradeep Chandramohan. Overcoming the Shadow Challenge in Autonomous UV Disinfection Systems[J]. Journal of Computer Science and Technology Studies, 2025.

URL:

<https://www.semanticscholar.org/paper/a4398d7b039572fe48cfd9cf045072c14aa69b58>

[5] Xueyan Oh, Jonathan Her, Zhi Xiang Ong, et al.. Autonomous Surface Selection For Manipulator-Based UV Disinfection In Hospitals Using Foundation Models[C]. IEEE/RJS International Conference on Intelligent RObots and Systems, 2025. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/0d3c0812469a2900e85ba0a7100b216438782173>

[6] Alan G. Sanchez, Nash Bernhart, and William D. Smart. Improving UV Disinfection of Objects by a Robot Using Human Feedback[C]. 2024 33rd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN), 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/80769475e27cafc3d46786e599145ef7b0ebf16d>

[7] V. Mehta, V. S. Pandya, Ankita Mathur, et al.. Applications of robot-assisted UV disinfection in dentistry.[J]. Minerva dental and oral science, 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/62738718a0dd57f42203267eebbf1a09eaaef231>

[8] M. S. Makuei and Nicolas Peleato. Manipulation of particle microorganism association for improved UV disinfection of surface waters[J]. Scientific Reports, 2025. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/9d8fac4bb1c058caf255d23bd28eae11719f7c24>

[9] Imene Fekih, Sana Hmila, Sarra B'chir, and Hedi Ben Mansour. Performance of combined method based on coagulation-flocculation and UV disinfection for wastewater treatment[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2025. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/b533dbfe346e045e14e4004508adbe0213ebb1ec>

[10] Nadia Jorgenson, Kian P Lopez, William Johnson, Cresten B. Mansfeldt, and Anthony P. Straub. Lightweight, Reliable, and Efficient Water Recovery Using Treatment with Pressure-Driven Distillation, Biologically Activated Carbon, and UV Disinfection[C]. 54th International Conference on Environmental Systems, 2025. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/00cd496246b05d767358199c3e1ce5f3b447774a>

[11] N. Moore, D. Pousty, Daniel Ma, et al.. Decentralized UV Disinfection Systems in Rural Areas or Low-Resource Contexts: A Case Study Compilation[J]. Environmental Science, 2025. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/2f7c6a98138c7983ab1b8a3702d9596732dd7d01>

- [12] Yeliz Durgun. Real-time water quality monitoring using AI-enabled sensors: Detection of contaminants and UV disinfection analysis in smart urban water systems[J]. Journal of King Saud University - Science, 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/e1eaf0de9df365cace98914c38014d7d9d7ae804>
- [13] Maria Takman, Catherine Paul, Åsa Davidsson, et al.. MBR and GAC filtration followed by UV disinfection – implications for wastewater reuse at full scale[J]. Water Reuse, 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/498bdfd5b5257a381caa08f810af505f57ca9ab6>
- [14] Haiyan Wang, Peizeng Yang, Yiqian Song, D. Kong, and Junhe Lu. Formation of N-nitrosodimethylamine from dimethylamine compounds during UV disinfection in the presence of nitrite[J]. Separation and Purification Technology, 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/1829f92e84bdb591ce212ea2c828a43a66e17804>
- [15] Xingbing Li, Jilin Shi, Zhenyu Yao, and Xueyin Yang. Design of express package disinfection control system[C]. 2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), 2023. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/4a62d1772792cf0523f5b0f80ac2982ea03489fc>
- [16] Sea Water à Normal Water. Solar Powered Water Purification System Using Integrated UV Disinfection[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT, 2025. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/6f0878c91cc6d92d0ec6abdbda504fb55580bfbd>
- [17] Danni Liu, M. Ma, and Yanjin Zhang. Research of pulsed Xenon lamp power supply based on STM32[J]. 2021. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/2db0d7ad4fde32b1adc6c0e4c2f4b259aef305>
- [18] Daniel Ma, Clarissa Belloni, and Natalie M. Hull. Innovative microbial water quality management in water distribution systems using in-pipe hydropowered UV disinfection: envisioning futuristic water-energy systems[J]. Environmental technology, 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/6c2da13f805d89bb4f3b98e753e54e48b86c3983>
- [19] Sili Wu and Yue Yu. Secondary Water Supply UV Disinfection System Controlled Based on Intelligent Algorithm[C]. 2024 International Conference on Optimization Computing and Wireless Communication (ICOCWC), 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/62ecd0ce8ebd8ec869a42704158c935e710810ea>

- [20] Pranav Prasad, Anli Joy, Remya P., Albert Thomas Abraham, and S. S.. Cloud-Enabled UV Disinfection System for Remote Healthcare Sanitization During Pandemics[C]. 2025 2nd International Conference on Trends in Engineering Systems and Technologies (ICTEST), 2025. URL:
<https://www.semanticscholar.org/paper/248405b5b015a599292cc16c9a5ce973d12ed184>
- [21] Y. H. Lu, R. X. Wang, H. L. Liu, and A. Lai. Evaluating the Performance of UV Disinfection across the 222-365 nm Spectrum against Aerosolized Bacteria and Viruses.[J]. Environmental Science and Technology, 2024. URL:
<https://www.semanticscholar.org/paper/5bb421b139d8fd913fec293cb1172928684aa12b>
- [22] Daniel Ma and Natalie M. Hull. Impact of wavelength, exposure sequence, and organic matter on UV disinfection and DNA repair[J]. PLOS Water, 2025. URL:
<https://www.semanticscholar.org/paper/39a7cc728629cd63c999935db02ea142ada71085>
- [23] Chenwei Dai, Yongjian Xu, Kai Liu, et al.. Operational integration of pulsed xenon UV disinfection systems in high-throughput logistics networks[J]. AIP Advances, 2025. URL:
<https://www.semanticscholar.org/paper/175402cfdc2010e4b39d22049161e02488feb30e>
- [24] Víctor Arcos-Limiñana, Carlotta Brunet, M. S. Prats-Moya, and S. Maestre-Pérez. UV-C Disinfection and Impact on the Quality of Black, White, Green, and Pink Peppercorns Using a Scalable Reactor[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025. URL:
<https://www.semanticscholar.org/paper/41c821ca0643b6852cf2b2ed6d9ed8817943016a>
- [25] Alan G. Sanchez, Nash Bernhart, and William D. Smart. More Effective Robotic UV Disinfection of Objects Through Human Guidance[C]. IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction, 2024. URL:
<https://www.semanticscholar.org/paper/aa1355cd3937e44d153dbca40c0725875292ca99>

致谢

时光荏苒，大学四年的学习生涯即将随着本论文的完成而画上圆满的句号。在此，我要向所有在学业及论文撰写过程中给予我帮助和支持的人表示最诚挚的谢意。

首先，我要由衷地感谢我的指导老师。从论文的选题、方案论证到 STM32 硬件电路的设计与软件程序的调试，老师都倾注了大量的心血。他严谨的治学态度、深厚的学术造诣以及对前沿技术的敏锐洞察力，使我受益匪浅。在开发过程中遇到技术瓶颈时，老师的悉心指导总能让我拨云见日，不仅帮助我顺利完成了“智能牙刷消毒系统”的设计，更教会了我如何独立思考与解决复杂工程问题。

其次，感谢实验室的同学们。在系统联调和 PCB 打样的过程中，大家共同探讨技术难题，互相激励，营造了良好的学术氛围。正是与他们的交流讨论，激发了我许多设计灵感，也让枯燥的开发过程变得充实而有意义。

同时，我要感谢我的家人。他们始终是我坚强的后盾，在论文写作及求职压力并存的阶段，给予了我无微不至的关怀与精神鼓励，让我能够全身心地投入到课题研究中。

最后，感谢学校为我们提供的良好实验环境和学习平台，感谢评阅老师在百忙之中审阅本论文。由于本人水平有限，文中难免有疏漏之处，恳请各位老师批评指正。

XYZ SCIENCE