

智能无烟艾灸仪结构与控制系统设计

孙 汉*, 郑 菲#

辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年7月8日; 发布日期: 2026年7月17日

摘 要

针对传统艾灸烟雾控制、温度稳定及方便使用的问题, 针对智能无烟艾灸仪进行机械结构与定时控制系统的设计研究。机械部分包含万向轴支架、磁吸模块化结构, 用以提升对颈、肩等曲面的贴合性; 控制部分包含STM32L431微控制器及DS3231实时时钟模块, 用于PID温控及温度联动及理疗时长之间的联系, 通过结构仿真、系统调试来检验产品的温控精度、定时误差和佩戴稳定性, 以获得较好的无烟化、温度控制及方便使用, 为中医理疗设备的智能化提供思路, 实现传统技术与现代技术的融合。

关键词

智能艾灸仪, 机械结构设计, 定时控制系统, 无烟艾灸, PID温控算法

Design of Structure and Control System for Intelligent Smokeless Moxibustion Device

Han Sun*, Fei Zheng#

School of Mechanical Engineering & Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: June 16, 2026; accepted: July 8, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

To address challenges in smoke control, temperature stability, and user convenience for traditional moxibustion devices, this study focuses on designing the mechanical structure and timing control system for intelligent smokeless moxibustion instruments. The mechanical components include a universal joint bracket and a magnetic modular structure to enhance adhesion to curved surfaces such as the neck and shoulders. The control system incorporates an STM32L431 microcontroller

*第一作者。

#通讯作者。

and a DS3231 real-time clock module for PID temperature regulation and temperature linkage, as well as correlation analysis between temperature and therapeutic duration. Through structural simulation and system debugging, the product's temperature control accuracy, timing precision, and wearing stability were evaluated to achieve optimal smoke-free operation, temperature regulation, and user-friendliness. This research provides insights for intelligentizing traditional Chinese medicine therapeutic equipment and facilitates the integration of conventional and modern technologies.

Keywords

Intelligent Moxibustion Device, Structural Design, Timing Control System, Smoke-Free Moxibustion, PID Temperature Control Algorithm

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

1.1. 研究背景与意义

艾灸起源于先秦,经过几千年的临床验证,艾灸温热刺激能够改善颈椎病、慢性关节炎等疾病,对慢性疼痛、肌肉疲劳等场景具有一定价值[1]。《2024 年中国医疗大健康产业宏观环境分析报告》¹显示,近年来中国理疗市场持续增长。传统艾灸经过火焰炙烤艾条,排出的烟雾中 PM2.5 值超过了国家标准(75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),可导致呼吸道疾病,人工控温难度较大,每年由于艾灸烫伤引起的中医理疗不良事件占中医理疗不良事件的 32% [2],传统艾灸需要专业人员操作,无法满足居家理疗需求。

随着人们健康生活方式的改变,使年轻人更加注重设备的便携性、智能化和个性化等方面的功能需求,《2024 年中国医疗大健康产业宏观环境分析报告》显示大多数用户更愿意采用无烟智能理疗设备,设计一款传统治疗与现代技术相结合的智能艾灸仪,解决传统艾灸烟尘污染、温度失控、操作繁琐等问题,同时实现中医理疗现代化具有一定的社会经济意义。

1.2. 国内外研究现状

国外可穿戴热疗设备由于便携化、智能控制等方面的优势发展早,已经有部分设备支持蓝牙控制及定时,其结构设计主要考虑一般的热疗场景,对于中医艾灸贴合穴位方面较少考虑[3]。国内便携式艾灸设备近年来发展较快,但在多部位曲面贴合、定时及温控联动以及模块化拆装等方面存在一定的不足。

从国内外已有产品来看,以上方案缺少对颈、肩等曲面的贴合式机械结构,无法联动定时系统与温控模块,无法保障理疗安全性和完整性[4]。

综合上述,传统艾灸对安全性、环境友好性和使用便捷性方面依然存在不足,虽然近年来出现了部分智能化热疗或艾灸设备,但多部位曲面贴合结构设计、定时与温控联动、便携性方面还有很大的提升空间,本文依据此,针对智能无烟艾灸仪进行机械结构及定时温控系统设计研究。

1.3. 研究内容与目标

本文主要研究内容:

¹https://m.sohu.com/coo/sg/811379054_121964487

- (1) 贴合式机械结构：设计多部位的模块化艾灸头，可多角度旋转、快速拆装；
- (2) 高精度定时控制系统：设计支持 App 联动的定时模块，计时误差 $\leq 0.5 \text{ min}$ ，温控精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ；
- (3) 原型验证与性能优化：通过仿真及用户测试验证稳定性、可用性。

本研究目标：完成智能无烟艾灸仪的机械结构和定时温控系统设计，并验证其在无烟化、温度控制与使用便携性方面的可行性，为相关中医理疗设备现代化设计提供参考[5]。

2. 总体方案与技术基础

2.1. 产品定位与需求分析

2.1.1. 目标用户

- (1) 25~45 岁久坐上班族，由于工作需要长期富安，颈椎患病率约 76%，年长者慢性疼痛患者，如关节炎患者约 1.2 亿人；
- (2) 次要用户：养生人群、产后康复女性。

2.1.2. 功能需求

- (1) 基础功能：无烟艾灸、精准控温($35^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$)、多模式定时(1~90 min)；
- (2) 进阶功能：App 联动、按摩辅助、便携收纳、无线充电；
- (3) 安全需求：防烫保护、超时报警、绝缘防护。

2.1.3. 性能指标

智能无烟艾灸仪设计的性能指标，见表 1。

Table 1. Performance indicators

表 1. 性能指标

序号	指标	目标值
1	温度控制精度	$\pm 1^\circ\text{C}$
2	定时误差	$\leq 0.5 \text{ min}$
3	续航时间	$\geq 4 \text{ 小时}$
4	艾灸头重量	$\leq 100 \text{ g}$
5	磁吸插拔寿命	$\geq 1000 \text{ 次}$

2.2. 系统架构设计

智能无烟艾灸仪的系统架构设计如图 1 所示。

研究采用硬件 - 软件 - 交互三层结构构成[5]：

- (1) 硬件：机械结构包括艾灸头和充电仓，电子模块包括主控、温控、定时和蓝牙控制；
- (2) 软件：嵌入式程序包括定时逻辑和温控算法，APP 应用包括参数设置和数据记录；
- (3) 交互：OLED 触控屏与蓝牙远程控制。

2.3. 设计原则

在系统设计过程中，遵循以下基本原则：

- (1) 安全性原则：采用电力陶瓷加热元件替代明火，并设置超温自动断电机制($\geq 60^\circ\text{C}$)，外壳选用 V-0 级阻燃材料，以确保使用安全；

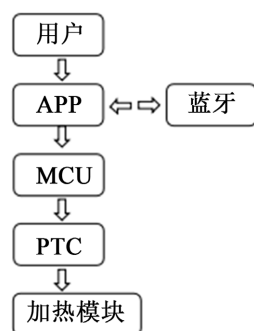


Figure 1. System architecture

图 1. 系统架构

(2) 易用性原则: 通过磁吸式结构实现快速拆装(≤ 3 s), 并采用简洁的人机交互界面, 降低用户操作难度;

(3) 可靠性原则: 通过插拔寿命测试(≥ 1000 次)及长时间运行测试(≥ 72 h), 保证系统稳定性与耐久性。

上述原则为后续结构设计与控制系统实现提供指导依据。

2.4. 技术基础

2.4.1. 艾灸疗法的医学原理

艾灸通过温热刺激作用于人体某一特定穴位, 使局部的血液循环得到改善并缓解肌肉紧张[1]。目前研究发现: 艾灸疗效与艾灸的温度、持续时间等因素相关联, 如果温度太低, 则不能达到理疗效果, 反之可能导致皮肤损伤, 所以在智能艾灸设备设计中需要对温度和时间进行把控, 在安全范围内达到更好的理疗效果[3]。

2.4.2. 人机工程学理论

颈部、肩部等人体表面具有曲率变化, 需要艾灸头和支撑结构有一定的角度调节才能更贴合[3] [4]。本文基于此设计了支持多角度调节的万向轴支架。

2.4.3. 模块化设计理论

为了便于拆装及连接稳定性, 本文选择磁吸式连接。相比卡扣式方案, 可节约拆装时间, 降低重复拆装引起的结构磨损风险。根据连接强度要求最终采用 4 颗磁铁对称布置。磁吸式连接采用钕铁硼磁铁, 磁能积 $\geq 35\text{MGOe}$ 插拔力 $\geq 5\text{N}$, 分层设计将按摩、过滤、加热分开, 维护方便。HEPA 过滤垫效率 99.7% 可去除艾烟残留。

2.4.4. 定时与温控关键技术

RTC 实时时钟: DS3231 内置温度补偿晶体振荡器, 精度 ± 2 ppm (年误差 ≤ 1 min), I2C 通信, 支持断电续时[6]。

PID 温控算法: 通过比例(K_p)、积分(K_i)、微分(K_d)参数调节, 设定 $K_p = 2.5$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.05$, 采样周期 100 ms, 实现 $\pm 1^\circ\text{C}$ 控制[7]。

蓝牙通信: 蓝牙 5.0 模块, 透传速率 ≥ 1 Mbps, 双向通信, 指令同步延迟 ≤ 2 s。

2.5. 本章小结

本章围绕智能无烟艾灸仪的总体设计方案, 对产品定位、功能需求及系统架构进行了分析, 并从医学原理、人机工程学及控制技术等方面阐述了设计基础, 为后续机械结构设计与控制系统实现提供了理

论依据。

3. 机械结构设计

3.1. 机械结构方案

智能无烟艾灸仪的结构设计及部件连接关系, 如图 2 所示。

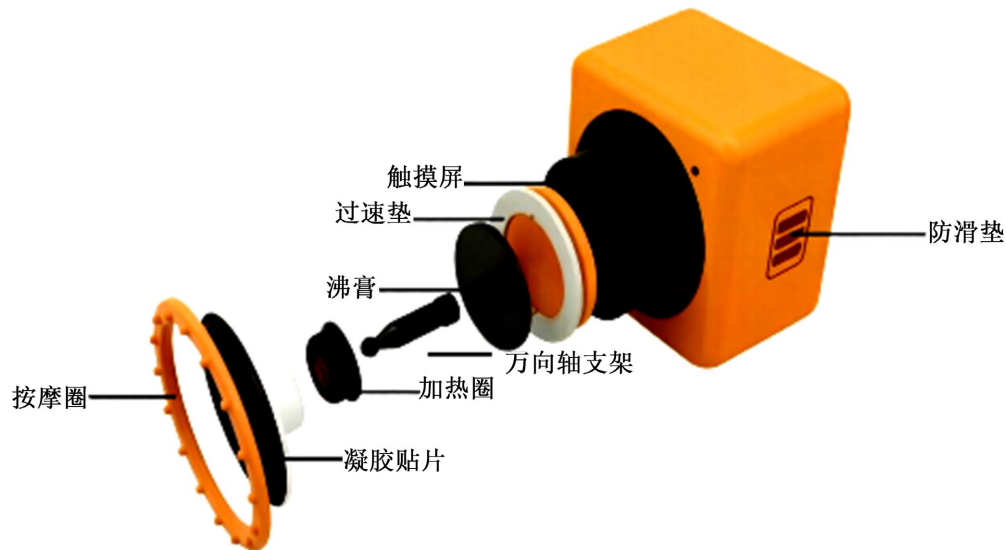


Figure 2. Explosion diagram of the overall mechanical structure
图 2. 整体机械结构爆炸图

3.1.1. 艾灸头主体结构

- (1) 万向轴支架: 球铰式, 不锈钢材质, 支持 $\pm 30^\circ$ 旋转, 可配合颈部、肩部等曲面部位, 支架内部设有弹簧缓冲结构, 缓冲系数 $0.2 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$ 可降低佩戴时产生的异物感[4];
- (2) 硅胶防滑垫: 表面设计为波浪形纹理, 厚度 2 mm , 静摩擦系数 ≥ 0.6 , 适配人体皮肤, 2 小时 移位率 $\leq 5\%$;
- (3) 凝胶贴片: 医用级硅胶材质, 粘性持久无残留, 固定缓冲, 贴片直径 40 mm , 贴合艾灸头。

3.1.2. 模块化拆装结构

- (1) 磁吸式连接: 艾灸头和加热仓由 4 颗磁铁吸附, 单颗磁力 $\geq 1.25 \text{ N}$, 总插拔力 $\geq 5 \text{ N}$, 拆装时间 $\leq 3 \text{ 秒}$ 。磁铁外包合金外壳, 磁铁外覆保护层, 以提高结构耐久性并减少外界环境对连接性能的影响;
- (2) 分层设计: 上层为硅胶按摩圈, 振动频率 50 Hz , 振幅 0.5 mm ; 下层为 HEPA 过滤垫, 效率 99.7% ; 电力陶瓷加热层升温速率 $1^\circ\text{C}/\text{s}$, 热效率 $\geq 85\%$, 实现无烟加热。

3.1.3. 便携收纳结构

- (1) 充电仓一体化设计: $180 \times 120 \times 80 \text{ mm}$, 可装 3 个艾灸头和 12 片凝胶贴片无线充电功率 15 W 充满电 $\leq 2 \text{ 小时}$;
- (2) 轻量化设计: 每个艾灸头重量 $\leq 100 \text{ g}$, 整机 $\leq 500 \text{ g}$, 外壳强度高、易携带使用。

3.2. 关键材料选型

智能无烟艾灸仪的关键材料选型, 参见表 2。

Table 2. Selection of key materials
表 2. 关键材料选型

部件	材料	特性
加热元件	电力陶瓷	热效率 85%，耐温 200℃
外壳	ABS + PC 合金	阻燃 V-0，绝缘 ≥ 10 kV/mm
密封圈	氟橡胶	耐高温 ≥ 200 ℃，IPX4 防水

3.3. 仿真分析

3.3.1. 力学仿真

为验证结构在典型佩戴压力(5N)下不会产生影响内部组件或用户体验的过大形变，进行 ANSYS 力学仿真。边界条件为颈部佩戴压力 5N，最大形变 ≤ 0.2 mm，满足稳定性要求。

3.3.2. 热学仿真

为验证加热层温度分布均匀性、避免局部烫伤，采用 COMSOL 进行热学仿真。加热片表面热点温差 ≤ 2 ℃，均匀传导至皮肤，安全性满足设计要求。

贴合式机械结构实现了多部位适配、快速拆装与便携收纳，仿真验证了结构的稳定性与热分布均匀性。

4. 定时控制系统设计

4.1. 定时系统功能需求

- (1) 多模式定时需求：单次定时(1~90 min)、循环定时(每日/每周预约)、应急暂停(长按 2 秒触发)；
- (2) 误差控制设计需求：RTC 时钟日误差 ≤ 1 s，APP 指令同步延迟 ≤ 2 s [6]；
- (3) 联动保护设计需求：定时结束自动触发温控模块断电降温，温度降至 35℃以下再停止运行防止余热烫伤。

4.2. 定时控制系统硬件设计

4.2.1. 主控与定时模块

STM32L431 微控制器：Cortex-M4 内核，主频 80 MHz，集成 RTC 外设及低功耗模式[8]。

DS3231 实时时钟：I2C 接口，内置温度补偿晶体振荡器，精度 ± 2 ppm，备用电池续航 ≥ 1 年，支持断电续时[6]。

4.2.2. 无线通信与显示

蓝牙 5.0 模块(HC-08)：透传速率 ≥ 1 Mbps，APP 双向通信。

OLED 触控屏：1.3 英寸，128 × 64，显示温度、剩余时长，触控响应 ≤ 0.1 s。

4.3. 软件设计

4.3.1. 嵌入式程序逻辑

定时中断：每 1 s 触发时钟更新，定时结束后自动触发温控模块断电降温，温度降至 35℃以下再停止运转。采用 FreeRTOS，优先级：定时中断 > 温控算法 > 蓝牙通信[5]。

异常报警：温度 ≥ 60 ℃或定时超时 10 min 时，蜂鸣器 2 Hz 报警并推送 APP。

4.3.2. APP 功能

基于 Flutter 开发，支持 iOS/Android，主要功能：

- (1) 定时设置: 滑动选择时长, 可视化剩余时间;
- (2) 历史记录: 存储近 30 天理疗数据, 生成温度 - 时间曲线;
- (3) 个性化推荐: 基于用户习惯推送方案。

4.4. 定时控制系统测试验证

(1) 定时精度测试: 为了测试设备的定时精度, 在室温 25℃ 环境下开机 72 h, 与标准时钟做比较, 每 30 min 记录一次计时误差, 测试结果为平均定时误差在 0.3 min 以内[6];

(2) 通信稳定性测试: 10 米内蓝牙连接成功率 100%, 无丢包。

定时系统实现了高精度计时、多模式设置与 APP 联动, 测试验证了其稳定性。

5. 温度控制系统设计

5.1. 温控系统需求

- (1) 控温范围: 35℃~60℃, 精度±1℃;
- (2) 升温速率: ≥1℃/s, 温度波动小;
- (3) 安全保护: 超温自动断电, 防烫伤。

5.2. 温度控制系统硬件设计

5.2.1. 温度传感器

采用 NTC 热敏电阻, 精度±0.1℃, ADC 采样周期 100 ms。

5.2.2. 加热元件驱动

电力陶瓷加热片, PWM 控制, 频率 1 kHz, 占空比调节加热功率。

5.3. PID 温控算法

5.3.1. 算法原理

PID 控制器根据设定温度与实测温度的偏差, 计算 PWM 占空比[7]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

参数: $K_p = 2.5$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.05$, 采样周期 100 ms。

5.3.2. 软件实现

定时器触发 ADC 采集, 计算偏差, 调用 PID 函数, 更新 PWM 占空比。

防积分饱和处理, 输出限幅 0%~100%。

5.4. 温度控制系统测试验证

(1) 温度波动测试: 室温 25℃, 将系统设定温度设为 50℃, 采用标准测温仪对加热面温度进行测试, 每 30 s 记录一次, 连续测试 1 h, 测试结果为控制在 ±0.8℃ 内[7];

(2) 温控联动测试: 定时结束后, 温度从 50℃ 降至 35℃ 的时间 ≤ 2 min。

PID 温控算法实现了高精度温度调节, 测试结果表明控温精度优于设计指标。

6. 结论与展望

智能艾灸仪的设计, 具有结构创新特点, 万向轴支架 + 磁吸连接, 解决多部位曲面贴合; 具有系统

创新特点，定时联动温控，形成闭环安全保护；具有体验创新特点，模块化设计、APP 联动，提升易用性和个性化[3] [4]。将传统艾灸与智能艾灸仪进行对比，参见表 3。

Table 3. Comparison between traditional moxibustion and intelligent moxibustion devices
表 3. 传统艾灸与智能艾灸仪对比

对比维度	传统艾灸	智能无烟艾灸仪
烟雾产生	明火燃烧，PM2.5 达 1200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	无明火加热，HEPA 过滤，无烟
温度控制	人工经验判断，误差大	PID 算法控制，精度 $\pm 0.8^\circ\text{C}$
操作方式	需专业人员手持操作	磁吸佩戴 + APP 远程控制
定时功能	人工计时，易超时	RTC 模块，误差 $\leq 0.5\text{ min}$
适用部位	局限性大，多为平坦部位	万向轴支架，适配颈部、肩部等多曲面
安全性	烫伤风险高	超温自动断电，防烫保护

对比表明，智能艾灸仪在控温、定时、安全等方面显著优于传统艾灸[1] [2]。

6.1. 研究结论

完成了智能无烟艾灸仪的机械结构及定时控制系统，包括了：

- (1) 机械结构：万向轴支架 + 磁吸设计实现多部位贴合及拆装，易于收纳；
- (2) 定时系统：RTC + PID 联动，理疗精准，APP 交互；
- (3) 应用价值：解决传统艾灸烟、烫、操作难题，为中医理疗设备的智能化升级提供了实践工具。

6.2. 不足与展望

目前产品按摩模式单一、无 AI 健康监测等不足。将从以下方向完善：

- (1) 功能提升：基于心率、压力传感器 AI 健康监测，开发自适应理疗方案；
- (2) 性能优化：增加石墨烯电池续航至 8 小时，提升加热元件热效率 90%；
- (3) 生态拓展：搭建中医理疗数据平台，实现对用户健康数据的长期管理与分析。

参考文献

[1] 王富春. 针灸推拿学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.

[2] 国家中医药管理局. 中医诊疗设备标准汇编[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2020.

[3] Wang, L.H., Zhang, P.C., Wang, Z.Q., *et al.* (2026) Portable Moxibustion Robot with Intelligent Acupoint Positioning Guided by Visual Sensing. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **22**, e70177. <https://doi.org/10.1002/rcs.70177>

[4] 周思宇. 基于人机工程学的中医康复器械设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

[5] 王田苗, 胡天亮. 嵌入式系统设计与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.

[6] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS3231.pdf>

[7] 刘畅, 李刚. 基于 STM32 的高精度温度控制系统设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(5): 102-106.

[8] https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0394-stm32l41xxx42xxx43xxx44xxx45xxx46xxx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf