

一款基于手机 APP 控制的 PID 温控智能仪器保温装置的设计

房崇峰, 于开彬*, 孙必欣, 张钊, 于水, 贾轶男, 张野, 赵凯尧

国网四平供电公司变电检修中心, 吉林四平, 中国

*通讯作者

【摘要】本设计以“精准温控+远程智能+户外适配”为核心, 研发一款手机 APP 控制的 PID 温控智能仪器保温装置。该设计以石墨烯透明电加热薄膜为核心加热部件, 结合单片机 PID 温控电路与手机 APP 远程交互系统, 实现“温度实时监测-APP 远程设定-PID 智能调节-异常自动报警”的全流程闭环控制。其不仅具备加热均匀、透光性好、低功耗的优势, 还能通过 APP 突破户外操作限制, 为各类户外仪器提供稳定、高效的低温防护解决方案。

【关键词】仪器保温; PID 温控电路; 石墨烯发热元件; APP 远程控制; 智能保温

1.背景和意义

红外测温仪作为一种非接触式测温设备, 具有测量精度高、安全性稳定、使用方便等特点。在实际应用中, 红外测温仪的性能受极寒温度影响较大, 低温天气易导致仪器光学镜头结霜、传感器灵敏度衰减、电池性能下降, 甚至引发设备宕机, 严重影响测温精度与设备使用寿命, 因此, 研制一种有效的仪器保温装置,

对于提高仪器的稳定性和精度具有重要意义。

2.总体设计方案

本设计采用“分层架构+模块协同”思路, 实现石墨烯透明电加热薄膜、温控电路、手机 APP 的无缝联动。

2.1 系统功能需求分析

基于红外测温仪的实际使用场景, 系统需满足以下核心功能(见表 1) :

表 1.PID 温控智能仪器保温装置核心功能分析

功能类别	具体需求描述	技术指标
精准温控	1.支持-30°C~80°C温度设定; 2.温度波动≤±0.1°C; 3.加热功率根据温差自动调节。	控温精度±0.1°C, 功率调节步长 0.1W
远程交互	1.APP 实时显示当前温度、设定温度、加热状态; 2.支持 APP 下发温度设定; 3.历史温度数据存储与曲线查看。	指令响应时间≤1s, 数据采样频率 1 次/秒
户外适配	1.防水防尘, 适应雨雪、沙尘环境; 2.抗电磁干扰, 避免户外电磁辐射影响; 3.宽电压供电, 适配不同户外电源。	防护等级 IP65, 供电电压 9V~36V, 抗干扰等级 3 级
安全保护	1.过温保护; 2.过流保护; 3.断连保护。	保护响应时间≤100ms, 故障报警准确率 100%
低功耗运行	1.待机状态(保温时)功耗≤100mW; 2.支持太阳能充电与锂电池供电切换;	电池续航≥48 小时
外部保温材料绝缘保温性能好	1.考虑面料的耐热性, 面料能在温度较高的环境下保持其物理和化学性能, 能够提供隔热和保护作用。 2.保温材料应柔软、防水、隔热材质, 具有较长的使用寿命。	面料极限氧指数在 28%-32%, 保温材料使用寿命≥8 年

2.2 关键部件选型与参数确定

1.核心加热部件: 石墨烯透明电加热薄膜, 耐候性好(-40°C~120°C), 柔韧性强, 适配户外仪器曲面安装[1,2]。

2.控制核心: AT89S51 单片机, 满足 PID 算法、通信协议、控制逻辑的程序存储需求[3],

可扩展连接 A/D 转换器、蓝牙模块、继电器驱动电路, 支持低功耗设计, 延长电池续航。

3.温度传感器: PT100 铂电阻, 覆盖户外低温环境(-20°C)与加热上限(80°C), 满足±0.1°C的控温精度需求[4]。

4.通信模块: 蓝牙 5.0, 通信距离≤100m,

速率 2Mbps，功耗 \leq 5mA[5]。

5.电源模块：宽电压稳压与充电管理，宽电压稳压（型号 LM2596-12）输入 9V~36V，输出 12V/3A，锂电池管理（型号 TP4056），为锂电池充电，支持过充、过放保护，太阳能充电接口（型号 MC4 防水接头），适配户外太阳能电池板接入。

6.外部保温材料：气垫隔热布料由两层不同密度的聚乙烯材料组成，极限氧指数在 28% 左右，中间以气泡为隔热层，使用寿命 \geq 8 年，是最佳外部保温材料。

3.硬件设计

3.1 温控电路详细设计

温控电路以 AT89S51 单片机为核心，分为五大子电路，各子电路通过 PCB 板集成：

1.温度采集电路组成：PT100 传感器、恒流源、线性校正网络、滤波电容；

2.A/D 转换电路组成：ADC0808 转换器、地址锁存器、时钟电路；

3.PID 控制输出电路组成：固态继电器、驱动三极管、续流二极管、电流检测电阻；

4.通信接口电路蓝牙接口：HC-08 模块通过 UART 接口与单片机 P3.0、P3.1 引脚连接，电路中串联 $1k\Omega$ 限流电阻与 $0.1\mu F$ 滤波电容，增强抗干扰能力；

5.电源管理电路

(1) 宽电压输入电路：输入端串联自恢复保险丝(5A)与 TVS 瞬态抑制二极管(15V)，防止过流与浪涌电压；

(2) 稳压电路：采用 LM2596-12 芯片将 9V~36V 输入电压稳压至 12V，为加热膜供电；采用 AMS1117-5.0 芯片将 12V 转换为 5V，为单片机、传感器供电；采用 RT9193-3.3 芯片将 5V 转换为 3.3V，为通信模块供电。

(3) 低功耗控制：单片机通过 P2.4 口控制 AMS1117-5.0 芯片的使能端，当系统进入待机模式时，关闭 5V 输出，仅保留 3.3V 供电（通信模块待机），功耗降至 \leq 100mW。

4.软件设计

4.1 主程序流程设计

1.单片机主程序流程

系统初始化：配置 I/O 口：P0 口（A/D 数据输入）、P2 口、P3 口为相应方向；初始化外设：ADC0808、蓝牙模块、定时器 0；加载参数：从单片机 EEPROM 中读取上次保存的设定温度、PID 参数，初始化 PID 控制器的偏差值、输出值。

通信连接：蓝牙模块进入配对模式，APP

搜索并连接后，发送“连接成功”指令。

循环运行：温度采集：启动 ADC0808 转换，读取 PT100 的温度数据，经数字滤波后得到当前温度；PID 运算：计算设定温度与当前温度的偏差，代入 PD 算法，得到 PWM 占空比；加热控制：根据 PWM 占空比输出控制信号，驱动固态继电器，调节加热功率；若当前温度 \geq 设定温度，关闭加热；数据上传：将当前温度、设定温度、加热状态打包为数据包，通过蓝牙发送至 APP；异常检测：检测温度是否超上限 (85°C)、电流是否超额定值 (6A)、通信是否断连，若异常则触发保护机制；指令接收：检测是否收到 APP 下发的指令，若收到则解析指令并更新相应参数，同时保存至 EEPROM。

异常处理：过温保护：温度 \geq 85°C 时，立即拉低 PWM 输出，切断加热，发送报警指令；过流保护：电流 \geq 6A 时，切断固态继电器，发送报警指令；断连保护：通信断连超 10s 时，保持当前温控状态，直至重新连接。

2.手机 APP 主程序流程

初始化：权限申请：申请蓝牙连接权限、位置权限；界面加载：显示实时监测页、参数设定页；通信初始化：初始化蓝牙适配器[5]。

设备连接：蓝牙连接：用户选择目标设备，输入配对码（默认 1234），连接成功后更新界面状态为“已连接”；

功能交互：实时监测：接收单片机发送的温度数据，更新界面显示（当前温度、设定温度、加热状态），绘制温度曲线；温度设定：用户在参数设定页输入目标温度 (-20°C~80°C)，点击“确认”后发送温度设定指令；PID 参数调整：高级用户在“参数设置-高级模式”中调整 Kp、Kd 值，发送参数调整指令；历史数据：从本地数据库读取近 7 天的温度数据，支持按日期查询、导出 Excel 表格；报警提示：收到单片机的报警指令后，弹出弹窗（显示故障类型），同时触发手机铃声与振动。

4.2 PID 温控算法设计

1.算法选型与优化

针对户外加热系统“大惯性、纯滞后”的特性，传统 PID 算法的积分环节 (I) 易导致超调量增大（温度超过设定值后持续加热），因此本设计采用 PD 控制算法（舍弃积分环节），并引入两项优化[6-8,3]：

(1) 微分先行：将微分环节仅作用于当

前温度，而非偏差，避免设定温度突变时微分环节输出剧烈波动；

(2) 输出限幅：将 PD 运算结果限制在 0~100 之间，防止加热功率过大导致温度超调。

4.3 APP 界面与交互设计

1.界面布局（以安卓版为例）

实时监测页：顶部状态栏：显示设备名称、连接状态、电池电量；核心显示区：左侧大数字显示当前温度，右侧显示设定温度，中间标注加热状态；温度曲线区：下方显示近 1 小时温度变化曲线。

参数设定页：温度设定：滑动条 (-20°C~80°C) + 数字输入框，支持手动输入与滑动调整；PID 参数调整：默认隐藏，点击“高级模式”后显示 Kp、Kd 滑动条，实时显示当前值；预设模式：提供“防冻模式”(5°C)、“保温模式”(25°C)、“高温模式”(60°C) 三个快捷选项，点击后自动填充温度值。

历史数据页：日期选择器：顶部下拉选择查询日期；数据列表：显示每小时平均温度、加热时长；曲线查看：点击“查看曲线”跳转至历史温度曲线页；数据导出：点击“导出”按钮，将数据以 Excel 格式保存至手机存储。

报警页：报警列表：按时间倒序显示报警记录；故障处理：点击某条报警，显示故障原因与处理建议；报警设置：支持开启/关闭铃声、振动提醒，设置报警阈值。

2.交互逻辑

温度调整：用户在实时监测页点击“升温”按钮，APP 发送温度设定指令，单片机接收后更新 SP 值，APP 同步更新界面设定温度显示；

参数同步：用户调整 PID 参数后，APP 发送参数调整指令，单片机接收后更新 Kp、Kd 值，并返回“参数已更新”确认指令，APP 更新界面显示；

报警交互：收到报警指令后，APP 立即弹出弹窗，用户点击“确认”后，弹窗消失，报警记录添加至历史列表；若 10 秒内未确认，触发手机铃声与振动；

断连处理：通信断连时，界面状态更新为“未连接”，顶部显示红色提示条（“设备已断开，正在重连...”），APP 自动尝试重连[9,10]。

5.外部保温外壳设计

精确测量红外测温仪器尺寸，保温装置外观尺寸应和红外测温仪贴合，手部可以灵活操作，不影响设备按键，仪保温装置连接口处使用魔法贴进行缝合，密闭性能也较好，拆卸方便，可以有效防止热量散失。

6.实现效果

经统计，常规状态下，利用红外测温仪对变电站设备进行一次测温的平均时长为 51 分钟，因低温天气导致设备发生闪屏和引发设备宕机故障概率为 31.1%。使用加装智能保温装置的红外仪器进行红外测温，将平均测温时间由原来的 51 分钟缩短至 44 分钟，因温度原因导致的红外测温仪发生闪屏和死机的故障概率由原来的 31.1% 降低至 1.5% 以下，仪器精准度和设备使用寿命得到进一步提高。

7.结论与展望

7.1 设计成果与亮点

性能达标：控温范围 -20°C~80°C，控温精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，温度响应时间 $\leq 30\text{s}$ ，满足户外精密仪器的温控需求；功能完整：实现手机 APP 远程温度设定、实时监测、PID 参数调整、历史数据导出、异常报警等功能，操作便捷；户外适配：防护等级 IP65，抗电磁干扰等级 3 级，-30°C~70°C 环境下稳定工作，适配复杂户外场景。

7.2 未来发展趋势

本设计成果在输、配、变电等专业红外巡检、故障排查、预防性维护等场景工作中具有广泛的应用前景和实用价值。研究成果在变电专业的红外测温仪产品上进行应用测试，在对变电站红外测温过程中，红外测温仪保温装置根据环境温度自动控温调节，确保红外测温仪趋于恒温状态，确保其性能和稳定性达到预期目标。因其功能实用性强，造价成本低，可以推广到电力系统内外更广泛的工业场景中应用。

参考文献

- [1]王菲, 陈召龙, 杨嘉炜.石墨烯玻璃透明薄膜加热特性, 《物理化学学报》2021 年 10 期: 2-5.
- [2]黄旭, 李双, 邢倩荷等.石墨烯薄膜的发热特性及在服装材料中的应用[J].服装学报.2017, (4) .
- [3]祖一康, 徐妙婧.基于单片机和 PID 算法的温度智能控制系统设计-《现代电子技术》2024 年 8 期: 86-89.
- [4]金顺安, 范彩兄, 徐嘉伟等. 铂电阻温度计测量精度和性能优化[J]. 《青海电力》2025 年 3 期: 51-55.
- [5]王静, 赵鹏飞, 林倩等.基于蓝牙技术的无线智能称重系统[J].现代电子技术, 2023, 46 (10) : 41.

- [6]韦宏利, 周建波, 王晴悦等.基于模糊 PID 的温度控制系统设计[J].国外电子测量技术, 2021, 40 (9) : 111-116.
- [7]雷翔霄, 唐春霞.基于自适应模糊 PID 算法的镀液温度控制[J].电镀与精饰, 2021, 43 (8) : 35-38.
- [8]李智珍, 邹陆华, 邓琪伟等.基于 PID 控制的温度控制器设计[J].船电技术, 2020, 40 (10) : 62-64.
- [9]王新秀, 杨黎黎, 吉曹翔等.基于手机 App 的自动站管理系统设计与应用[J].《计算机技术与发展》, 2021, 1: 218-220.
- [10]鹿峰.基于安卓系统的手机 APP 交互界面的设计研究-《电子世界》, 2020, 17, 63-64.