

# 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℃~80℃温度设定； 2.温度波动 $\leq \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ； 3.加热功率根据温差自动调节。	控温精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，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 $\leq 1\text{s}$ ，数据采集频率 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 $\leq 100\text{ms}$ ，故障报警准确率 100%
低功耗运行	1.待机状态（保温时）功耗 $\leq 100\text{mW}$ ； 2.支持太阳能充电与锂电池供电切换；	电池续航 $\geq 48$ 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 $\geq 8$ 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℃~120℃），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℃）与加热上限（80℃），满足 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的控温精度需求[4]。

4.通信模块：蓝牙 5.0，通信距离 $\leq 100\text{m}$ ，

速率 2Mbps, 功耗 $\leq 5\text{mA}$ [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  $1\text{k}\Omega$  限流电阻与  $0.1\mu\text{F}$  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 $\leq 100\text{mW}$ 。

### 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( $85^\circ\text{C}$ )、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 $\geq 85^\circ\text{C}$ 时, 立即拉低 PWM 输出, 切断加热, 发送报警指令; 过流保护: 电流 $\geq 6\text{A}$ 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( $-20^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ ), 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  $K_p$ 、 $K_d$  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。

#### 4.2PID 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 ( $-20^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ) + 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  $K_p$ 、 $K_d$  滑动条,实时显示当前值;预设模式:提供“防冻模式” ( $5^{\circ}\text{C}$ )、 “保温模式” ( $25^{\circ}\text{C}$ )、 “高温模式” ( $60^{\circ}\text{C}$ ) 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  $K_p$ 、 $K_d$  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  $-20^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ,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,  $-30^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$  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,杨嘉伟.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.