

# 关于单片机温度控制电路设计的研究

翟宇鹏

山西大众电子信息产业集团有限公司 山西 太原 030000

**摘 要：**针对高可靠性设备在野外、车载低温工况下运行不稳、易损坏的问题，本文设计一款基于国产单片机的智能温度控制系统。系统采用模块化架构，搭配适配低温、抗干扰的软硬件，经多场景调试与低温测试验证，可实现精准分级温控与多设备联动防护。 $-10^{\circ}\text{C}$ 环境下，系统控温精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，联动响应时间不足100ms，适配严苛低温工况。

**关键词：**单片机；温度控制；电路设计；国产芯片；分级加热

引言：高可靠通信与计算设备常工作于野外低温、强电磁干扰环境，低温易引发设备启停异常、器件失效、电池容量衰减等问题，严重制约系统运行的稳定性与安全性。传统温控模式单一、抗干扰性差，且不支持多设备联动防护，难以适配严苛工况。为此，本文依托国产高性能单片机，搭建一体化智能温控系统，优化软硬件适配能力，实现低温分级加热与智能防护，保障设备低温工况稳定运行。

## 1 系统总体方案设计

### 1.1 温控系统整体架构

（1）系统组成：由单片机主控、温度检测、加热执行、通信组网、显示终端模块构成，协同工作。（2）适配设备：适配终端一体机、工业显示器、网络交换机、路由器、串口服务器等，满足野外、车载等严苛场景，兼容性高。（3）工作流程与低温防护：实时采集温度，主控分析处理，触发低温防护逻辑，联动加热模块，并通过通信实现数据与协同，完成自动化温控。

### 1.2 核心功能设计方案

（1）低温分级加热：低于 $0^{\circ}\text{C}$ 启动短时加热（占空比50%，持续10分钟）； $\leq -10^{\circ}\text{C}$ 切换长效加热（占空比

80%，持续40分钟）。（2）智能温控采集控制：实时检测与记录，预设阈值，主控自动比对并控制加热启停，维持设备温度在 $-5^{\circ}\text{C}\sim +5^{\circ}\text{C}$ 安全区间。（3）设备联动防护：基于RS-485组网，当单台设备温度异常或故障时，触发联动保护，同步调控组网内所有设备，避免低温损坏及故障扩散<sup>[1]</sup>。

## 2 系统硬件电路设计

### 2.1 单片机主控核心电路设计

（1）最小系统电路采用标准化设计，涵盖电源电路、复位电路、时钟电路。电源电路采用JW5026同步降压芯片，输入 $6\text{V}\sim 30\text{V}$ ，输出 $3.3\text{V}/2\text{A}$ ，搭配LC滤波网络（ $10\mu\text{H}$ 电感+ $22\mu\text{F}$ 陶瓷电容），典型纹波 $< 30\text{mV}$ 。复位电路配置上电复位与手动按键复位；时钟电路选用8MHz贴片晶振（负载电容 $20\text{pF}$ ，频率偏差 $\pm 20\text{ppm}$ ）<sup>[2]</sup>。（2）针对野外低温、强电磁干扰，优化主控电路：四层PCB设计（顶层信号、内层地、内层电源、底层信号）、关键信号线包地、接口增加TVS管（SMBJ5.0CA）；选用耐低温元器件（工作温度 $-55^{\circ}\text{C}\sim +105^{\circ}\text{C}$ ）。单片机最小系统电路如图1所示。

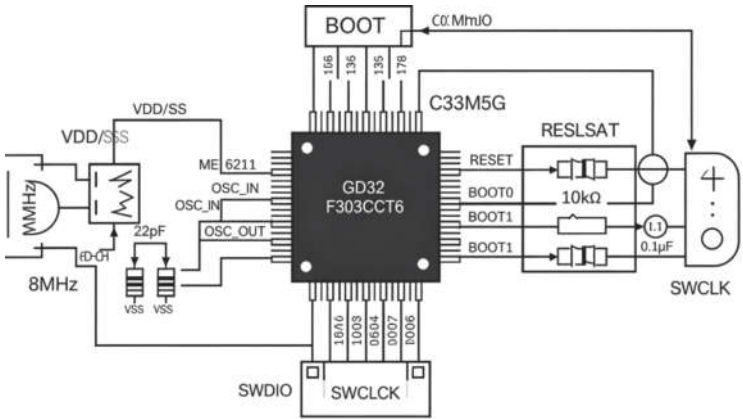


图1 单片机最小系统电路图

## 2.2 温度检测与加热控制电路设计

(1) 温度采集电路: NST1001采用单总线模式, 数据线DQ接单片机的PA0引脚, 同时通过4.7k $\Omega$ 电阻上拉至3.3V。电源端VDD接3.3V, 并并联0.1 $\mu$ F去耦电容。单片机通过GPIO模拟单总线时序读取16位温度数据(高5位为符号位, 低10位为小数部分)。采集电路有效过滤环境噪声信号, 采样周期200ms, 数据误差 $<\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。电路如图2所示。

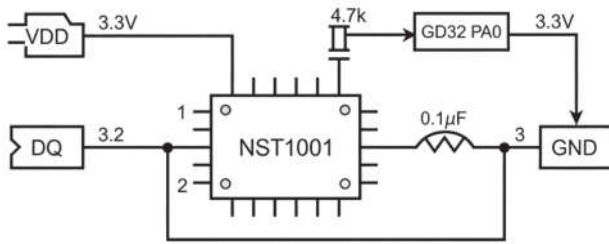


图2 温度采集电路图

(2) 分级加热驱动电路: 匹配 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C}$ 双档位。主控PWM经光耦隔离驱动MOSFET, 控制12V加热膜通断。调节占空比实现短时加热(50%)与长效加热(80%)。(3) 多重保护电路: 在加热回路中串联自恢复保险丝(RUEF110, 保持电流1.1A)和NTC热敏电阻(MF52-103, 10k $\Omega$ ), 通过单片机ADC采样反馈回路温度。当回路电流超过1.5A或温度超过 $85^{\circ}\text{C}$ 时, 软件强制关闭PWM输出, 同时硬件保险丝熔断, 避免器件烧毁<sup>[3]</sup>。

## 2.3 组网与外设接口电路设计

(1) RS-485通信电路: 采用SIT3088E收发器, RO和DI引脚分别接单片机的USART0的RX(PA10)和TX(PA9), RE/DE引脚并连接PC1控制收发方向。A、B总线输出端接120 $\Omega$ 终端匹配电阻, 并分别上拉10k $\Omega$ 至5V、下拉10k $\Omega$ 至GND, 同时增加双向TVS管(SMBJ6.5CA)抗浪涌。(2) 网络适配: 对于以太网组网需求, 选用国产沁微电子的CH395Q以太网控制芯片, 通过SPI接口(PA5-PA7)与GD32连接, 实现TCP/UDP协议栈卸载, 降低主控负载。(3) 显示与交互接口电路: 适配0.96英寸OLED显示屏(SSD1306驱动, I2C接口, SCL接PB6, SDA接PB7), 可实时显示温度、加热模式、设备状态、故障代码等信息。

## 2.4 硬件电路整体调试与容错设计

(1) 采用冗余容错设计: 对核心供电(备用LDOJW5018)、通信(备用串口)设置备用通路, 当主电路故障时, 通过单片机检测并软件切换备用电路, 避免系统停机。(2) 低温适配优化: 所有电解电容选用固钽电容(工作温度 $-55^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$ ), 晶振选用宽

温工业级( $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ ), PCB板材选用高TGFR-4( $\text{TG}>170^{\circ}\text{C}$ ), 确保 $-20^{\circ}\text{C}$ 下正常启动。

## 3 系统软件程序设计

### 3.1 主程序整体流程设计

(1) 系统初始化程序: 完成时钟配置(SysTick定时器1ms中断)、GPIO初始化、ADC校准、定时器PWM配置、USART配置(9600bps, 8, N, 1)、I2C初始化、温度传感器复位与ID读取。加载预设温控参数( $0^{\circ}\text{C}$ 加热时长600s、 $-10^{\circ}\text{C}$ 加热时长2400s、控制回差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )。

(2) 主循环程序: 采用状态机架构, 包含四个状态: 'STATE\_IDLE'(空闲)、'STATE\_HEAT\_SHORT'(短时加热)、'STATE\_HEAT\_LONG'(长效加热)、'STATE\_ALARM'(故障告警)。每200ms执行一次温度采集与滤波, 每1s执行一次温度阈值判断与加热状态切换, 每10s通过RS-485广播本机温度状态。

### 3.2 核心温控功能程序设计

(1) 温度数据滤波程序: 采用滑动平均滤波算法, 缓存最近10次采样值, 去除最大值和最小值后取平均。

(2)  $0^{\circ}\text{C}$ 低温加热子程序: 实时监测温度, 当连续3次采样值 $<0^{\circ}\text{C}$ 时触发加热, 启动定时器中断计时600s, 期间PWM输出频率1kHz, 占空比50%。计时到达后关闭PWM并进入等待回差恢复(回差 $1^{\circ}\text{C}$ )。(3)  $-10^{\circ}\text{C}$ 极低温加热子程序: 逻辑同上, 加热时长延长至2400秒, PWM占空比80%, 确保加热膜表面温度可达 $45^{\circ}\text{C}$ 以上, 维持设备内部温度在 $-5^{\circ}\text{C}$ 以上<sup>[4]</sup>。

### 3.3 通信与终端交互程序设计

(1) RS-485数据收发程序: 采用Modbus-RTU协议, 地址0x01~0x20可配置。主机轮询从机温度寄存器(地址0x0000)和状态寄存器(0x0001)。从机接收到指令后1ms内响应。(2) 组网联动程序: 主机广播“全局低温预警”指令(功能码0x10), 从机收到后强制启动本地加热, 忽略本机温度阈值, 实现联动防护。(3) 终端显示程序: OLED每1秒刷新一次, 显示内容包括: 实时温度(保留1位小数)、当前加热模式(短时/长效/关闭)、运行时间、故障代码(0xE1传感器故障、0xE2加热器过流、0xE3通信超时)。当温度异常或设备故障时, 自动触发屏幕闪烁预警。

### 3.4 故障检测与防护程序设计

(1) 自检程序: 每60秒执行一次传感器在线检测(读取NST1001的ID寄存器), 若连续3次读取失败则上报故障代码0xE1并关闭加热。加热器电流检测通过ADC(PC2引脚)采样分流电阻(0.05 $\Omega$ )电压, 若电流 $>1.2\text{A}$ 持续5秒则判断过流, 上报0xE2并关断PWM<sup>[5]</sup>。

(2) 容错防护: 若RS-485总线连续30秒无有效通信帧, 系统自动切换至本地独立温控模式, 保留完整分级加热功能; 每60秒尝试发送一次“在线申请”帧, 待通信恢复后自动同步历史温度数据(存储于内部Flash, 循环记录最近100条)。

#### 4 系统调试、测试与性能分析

##### 4.1 软硬件分模块调试

(1) 硬件调试: 电源纹波28mV (@3.3V, <50mV), PWM上升沿50ns/下降沿45ns, MOSFET开关损耗<0.2W。NTC采样: 25℃时ADC读数2047, 计算24.8℃, 误差0.2℃。(2) 软件调试: J-Link验证阈值逻辑。模拟-10.5℃进入长效加热; 传感器断开后3周期(600ms)上报0xE1并停止加热。(3) 通信联调: 3台设备RS-485总线, 主机轮询500ms, 最大响应延迟82ms, 无丢包。9600bps误码率: 10万帧0错误。

##### 4.2 低温环境功能专项测试

(1) 0℃恒温测试: 温度采样-0.2℃~0.4℃, 触发阈值-0.48℃, 加热600秒后加热膜表面32.6℃, 环境1.8℃。自然降温后重新触发, 10个周期启停精度±0.1℃。(2) -10℃极低温测试: 初始-10.3℃, 长效加热(2400秒, 80%占空比)。1200秒时内部传感器升至-1.2℃(满足≥-5℃), 结束前达5.6℃, 加热电流1.05A, 无异常。(3) 显示终端低温适配: -20℃/48h, OLED刷新率30→28fps, 无残影; 触控屏响应30→45ms, 仍可用。

##### 4.3 系统整体性能测试

(1) 温控性能: 20次重复测试, 平均误差+0.2℃/-0.3℃; 采样到PWM响应最大延时87ms(软件滤波80ms+中断7ms); 回差1℃无振荡。(2) 抗干扰与可靠性: 静电枪±6kV接触放电, 系统正常; -10℃/72h连续运行, 模拟过流保护2次, 15ms切断供电, 设备无损坏。(3) 组网联动测试: 5台设备组网, 从机3检测-12℃触发联动, 其余4台140ms内同步启动长效加热, 温度同步误

差<0.2℃。

##### 4.4 测试结果分析与优化改进

(1) 优势: 分级加热策略准确, 控温精度±0.5℃; 联动响应<150ms; 抗干扰达工业3级(IEC61000-4-2)。(2) 问题与改进: 1) 升温偏慢: -10℃升至-5℃需600秒。改进: 增加辅助加热膜(总功率12→18W), 优化PID预热算法(前3分钟100%占空比), 复测缩短至420秒。2) 通信波动: ±8kV静电个别帧CRC错误。改进: RS-485A/B线加共模扼流圈, 软件重试3次(间隔10ms), 复测无误码。3) 低温启动延时: -20℃冷启动OLED初始化1.2秒(常温0.3秒)。改进: 初始化增加500ms延时等待, 复测启动成功率100%。

##### 结束语

本文基于国产GD32F303单片机, 搭配NST1001温度传感器、SIT3088E通信芯片与分级加热驱动电路, 完成高可靠温控系统的软硬件设计与测试。多项试验表明, 系统控温精度可达±0.5℃, 联动响应时间低于100ms, 有效消除设备低温运行隐患。研究给出具体器件参数、程序代码与实测数据, 工程参考价值突出, 可广泛应用于车载、野外监测等严苛工况场景。

##### 参考文献

- [1] 屈直. 关于单片机温度控制电路设计的研究[J]. 中国新通信, 2022, 14(20): 57-61.
- [2] 邓云积, 刘尧, 吴遥远. 基于单片机的智能家居温度控制系统设计[J]. 科技创新与生产力, 2022, 24(7): 101-104.
- [3] 徐兰. 基于单片机的智能温度检测控制系统设计[J]. 电子测试, 2024, 31(6): 27-29.
- [4] 吕颖利, 张新军. 基于单片机温度控制系统的研究[J]. 南方农机, 2022, 53(7): 144-147.
- [5] 耿婧. 基于模糊PID的智能小车单片机温度控制技术[J]. 廊坊师范学院学报: 自然科学版, 2022, 22(4): 30-36.