

工业风道电加热器超温保护电路设计

彭超

重庆川仪十七厂有限公司 重庆 400707

【摘要】：针对传统工业电加热器控制系统存在超温保护模式单一、加热芯和介质超温监测脱节、故障响应滞后、电控单元失效后保护兜底能力不足等缺陷，本文从电加热器本体安全控制出发，设计出一套专门的过温保护电路控制系统。系统采用 STM8 单片机作为核心，搭建加热芯本体超温、加热介质超温双监测结构，结合电子分级闭环保护和机械冗余兜底保护，改善了硬件电路和软件判定逻辑，克服了传统温控系统只对环境温度进行监测、加热器本体过热防护缺失、电控失效容易造成干烧烧毁、起火等行业的痛点。经过实际测量验证，优化后的保护系统测温精度高、故障响应快、冗余防护可靠性好，可以很好地适应各种功率等级的工业电加热器，设备运行的安全性和稳定性得到明显提高，具有很高的工程应用和推广价值。

【关键词】：工业电加热器；控制系统；过温保护；加热芯；介质测温

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.013

1 电加热器超温故障机理与优化设计需求

1.1 加热芯空载/欠流干烧超温故障

该故障是电加热器最严重的一种原发性超温故障，也是电加热器最高发的故障。电加热器正常工作时，加热芯产生的焦耳热可以不断传递到周围的介质上，达到热量平衡散热的目的。当介质流通中断、管路堵塞、介质流量不足或者设备空载启停等工况出现的时候，加热芯的热量不能正常传导耗散，热能会不断聚集在电热管管壁和加热芯内部，温度瞬间升高。短时间内会因为加热芯表面高温碳化、绝缘层熔融破损，严重的时候会导致电热管熔断、腔体起火，是造成设备损坏和安全事故的主要原因。

1.2 电控系统失效失控超温故障

该故障属于系统性的被动超温故障，是由于控制层面的失效所造成的持续性过热。传统的电加热器控制系统大多使用单一的继电器通断控制方式，并没有分级调节和冗余保护的功能。长时间高频启停、电磁干扰冲击，很容易造成主控程序紊乱、驱动电路击穿、功率继电器触点粘连等故障。该类故障发生之后，控制系统不能发出断电、降功率保护信号，加热芯一直保持通电加热状态，不受温度阈值控制，从而导致加热芯超温、介质超限升温，形成不可逆的系统性过热故障。

1.3 元件老化衍生继发性超温故障

该故障是由于长时间运行而造成的渐进式的超温故障，具有隐蔽性、恶性循环性的特点。一方面加热芯长期处在高温的工作环境中，电热材料会发生老化衰减，局部电阻分布不均，发热功率失衡，局部点位持续高温过热，逐渐扩散到整个设备超温；另一方面长期高温工况会加快温度传感器的老化、参数漂移，使温度采集精度降低、测温滞后、数据失真，造成控制系统误判设备运行状态，保护动作延迟或者失效。因此形成了一个由元件老化、局部超温、监测失效、整体过热所组成的恶性循环，最终导致设备永久性故障。

2 电加热器过温保护控制系统硬件优化设计

2.1 系统整体结构架构

本文优化的过温保护控制系统以电加热器本体安全为根本，整体结构分为感知层、控制层、执行层和报警显示层，主要实现加热芯、加热介质双参数同步监测和分级保护控制。系统整体结构根据工业电加热器本体结构设计，去掉风道风机监测的冗余模块，只保留加热器电控和测温保护模块。

图1为工业电加热器本体结构示意图，设备核心由加热芯、介质腔体、测温安装点位、接线端子组成，为本系统测温传感器、保护元件的安装载体。

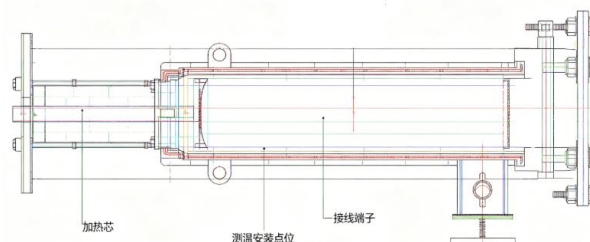


图1 工业电加热器本体结构示意图

图2为电加热器过温保护电气原理总图，硬件电路主要以单片机为核心控制单元，搭建双路温度采集电路、主控驱动电路、双层冗余保护电路、声光报警和显示电路。

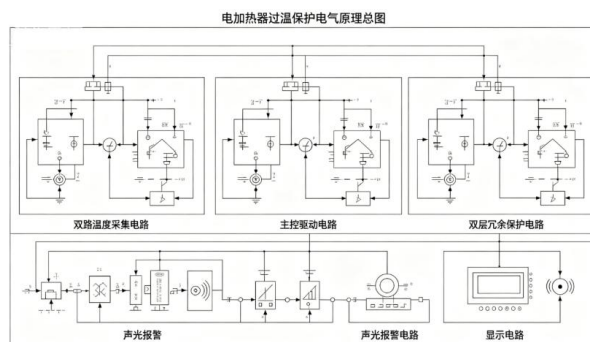


图2 电加热器过温保护电气原理总图

2.2 核心元器件选型

主控芯片使用 STM8S103F3P6 工业级单片机，具有抗干扰能力强、功耗低、运算速度快的特点，可以同时完成双路温度数据采集、故障逻辑判断、分级控制输出，适合加热器长时间连续工作；测温元件用 MF58-103NTC 高精度热敏电阻，分别布置在加热芯表面和介质腔体内部，响应速度快、测温精度高，满足双维度超温监测的要求；冗余保护元件用常闭型双金属机械温度开关串联在加热器总供电回路中，作为电控失效的兜底防护；执行元件用大功率电磁继电器，对应各个功率等级的加热器通断控制；外设模块包含三位数码管、红绿警示 LED、有源蜂鸣器，实现设备状态显示和故障分级报警。

2.3 核心功能模块电路优化设计

2.3.1 双维度温度采集电路

为了克服传统加热器只监测一个温度而不能分辨出加热芯干烧和介质超温的缺点，对双独立温度采集电路进行了改进，实现了加热芯本体温度采集和加热介质温度采集。两路电路均使用 5V 供电、精密电阻分压采集结构，热敏电阻和固定精密电阻串联起来，温度变化引起热敏电阻阻值线性波动，分压电压信号通过单片机 ADC 接口转换成准确的温度数值。

在电路中增加高频滤波电容来消除工业工况下加热器启动、停止以及电磁干扰引起的信号抖动，保证采集到的数据是稳定的。双路数据实时交叉校验，当单路传感器失效或者数据异常的时候，系统可以自动识别出故障，并且锁定保护状态，防止监测失效。图 3 为双维度温度采集电路原理图。

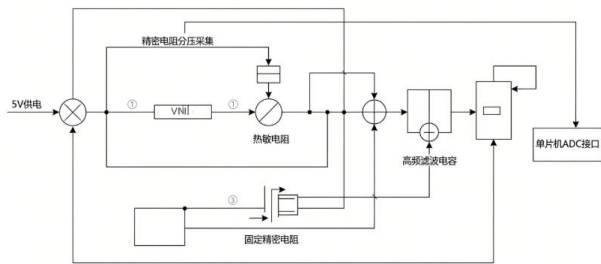


图 3 加热芯与介质双路温度采集电路原理图

2.3.2 双层冗余过温保护主电路

双层冗余保护电路是本次过温保护功能优化的重点，完全克服了传统加热器单电子保护的不足，形成了电子分级主动保护和机械兜底被动保护相结合的纵深防护体系，把电子分级主动保护和机械兜底被动保护串联到加热器主供电回路中。

电子分级保护是常态化的主保护，设两级专用加热器超温阈值，第一级轻度超温预警阈值为 180℃（加热芯）和 150℃（介质），当温度持续 10ms 没有下降趋势的时候，单片机启动 PWM 调功控制，减小加热器的加热功率，并点亮黄色预警灯，在避免超温加重的同时保证生产连续；第二级重度超温断

电阈值为 220℃（加热芯）和 180℃（介质），触发后立刻切断加热器加热支路供电，停止加热。

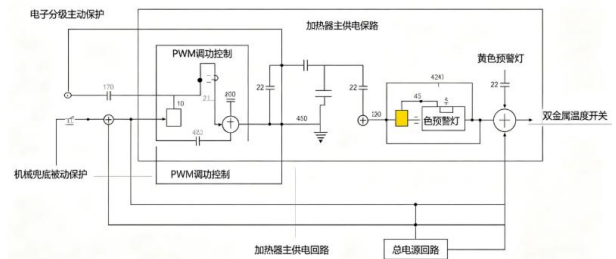


图 4 双层冗余过温保护主电路原理图

3 系统软件程序优化设计

3.1 主程序运行流程

优化后的系统主程序把加热器超温防护当作主要工作内容，用循环扫描的方式进行工作，减少无关的逻辑，集中于核心的控制功能上。设备上电之后先做单片机端口初始化、ADC 接口校准、超温阈值参数加载、故障缓存清零等初始化工作，然后开始采集加热芯、介质双路温度信号，用软件滤波算法剔除干扰异常数据，把实测温度和预设阈值、温升速率参数进行比较，判断加热器运行状态，正常状态连续监测，异常状态立即执行分级保护动作，同时刷新显示和报警信号，自动保存故障数据，方便后期运维追溯。

3.2 核心故障判定逻辑优化

3.2.1 双参数超温判定子程序

抛弃传统的单个温度阈值判定方式，改为用温度阈值和温升速率两个方面来判定。对加热芯和介质温度分别进行独立的判定。在设置好固定的预警和断电阈值的基础上，又加入了温升速率判定条件，即加热器正常工作时温升速率 $\leq 20^\circ\text{C}/\text{min}$ ，当加热芯温升速率 $> 40^\circ\text{C}/\text{min}$ 或者介质温升速率 $> 30^\circ\text{C}/\text{min}$ 的时候，就判定为极速超温故障，及时启动保护，避免故障滞后。同时用多周期数据验证机制，连续三个采集周期达到稳定超限的判定标准后才判定预警，连续五个采集周期达到判定重度故障的标准后才判定为判定。

3.2.2 加热芯干烧故障判定子程序

加热芯干烧属于加热器最危险的一种故障类型，本次优化把它定为最高优先级判定逻辑。不需要依靠风道风机信号，根据加热器本体参数来判断，加热芯温度快速上升、温升速率远高于正常工况，且介质温度没有同步上升的时候，直接判定为干烧故障，立即切断电源。该逻辑集中于加热器主要故障，克服了以往方案过于依靠风道工况、判定逻辑脱离设备本体的弊端，故障识别准确率和反应速度大大提高。

3.3 分级保护与数据存储逻辑

系统对加热器各种超温故障设置阶梯式保护策略，安全性

和生产性兼顾,轻度超温故障用降功率维稳模式,不直接停机,调节加热功率抑制温度上升,发出预警提示;重度超温、干烧故障立即切断加热电源,锁定设备运行状态,触发高频声光报警。同时对故障数据进行存储,可以自动记录故障类型、触发温度、故障时间等主要参数,数据断电不会丢失,运维人员可以通过按键调取以前的故障记录,给加热器老化排查、故障维修、定期保养提供数据支持。

4 系统性能测试与结果分析

4.1 测试方案

为了检验优化后的电加热器过温保护系统测温精度、响应速度、保护可靠性的优越性,搭建专用测试平台,用30kW工业常规电加热器做测试样机,在室温25℃、标准大气压下模拟加热器正常升温、超负荷升温、加热芯干烧、传感器失效、电控继电器粘连5种主要工况,全程记录测温误差、故障响应时间、保护动作状态,验证双层冗余保护的效果。

4.2 测试数据与结果分析

经过多次重复测试,得到有效的测试数据,系统各个工况的运行稳定,保护动作准确可靠,主要测试结果如下所示:加

热芯与介质温度的最大采集误差为1.2%,满足工业高精度测温的要求;各种超温故障响应时间均小于80ms,优于设计指标,可以迅速抑制超温故障的扩散;正常超负荷超温可以实现分级降功率、断电保护,干烧故障可以立即触发防护,在传感器失效、继电器粘连等电控极端故障场景下,机械兜底保护可以可靠动作,彻底杜绝加热器失控过热的风险。

测试结果表明,本次优化过的过温保护系统可以很好地解决传统电加热器控制保护精度低、响应慢、冗余性差的问题,双维度测温可以准确地识别出加热器本体和介质超温故障,分级保护逻辑符合工业生产实际需要,安全防护能力明显提高。

5 结论

本文针对传统工业电加热器超温保护系统行业痛点,从加热器加热芯、加热介质两个方面入手,对加热器加热温度进行过温保护。搭建双路精准测温电路、优化双层冗余保护架构、升级故障判定和分级控制逻辑,完全解决了传统设备保护模式单一、本体超温防护缺失、电控失效无兜底、故障响应滞后的问题。经过实际测量证明,改进后的系统测温精度高、故障响应快、运行稳定,可以对电加热器常规超温、干烧、电控失效等各种故障进行全方位的防护,提高设备运行的安全性。

参考文献:

- [1] 何章平,袁誉坤,杜颖哲,等.在模拟电加热器过热条件下316LN奥氏体钢缝隙腐蚀行为的研究[J/OL].中国腐蚀与防护学报,1-17[2026-06-01].
- [2] 徐青,姜一帆.给水加热器过热段的数值仿真[J].能源工程,2022,42(3):18-22.
- [3] 高秀志,胡勇,郑湘泉.低压加热器设置过热蒸汽冷却段的条件[J].东方汽轮机,2021,(4):1-4+18.
- [4] 高洁.降低高加过热段外包壳变形的工艺措施[J].化工管理,2021,(26):164-165.
- [5] 刘学.高压加热器过热段爆管分析[J].电站辅机,2015,36(1):10-12+22.