

基于单回路AC380V的轨道交通车辆司机室PTC加热器设计

纪文超

中车株洲电力机车有限公司 湖南 株洲 412000

摘要：针对现有轨道交通车辆司机室加热设备存在加热元件落后、供电系统复杂等问题，研发一种基于单回路AC380V的PTC加热器。该加热器采用PTC陶瓷电热元件作为发热源，创新设计单回路AC380V统一供电架构，集成多级冗余温度保护系统。实验验证表明，该加热器热效率高、安全性优异，可实现不同车型平台的高效适配，显著简化车辆供电布线与维护流程，降低全生命周期成本，为轨道交通车辆加热系统的升级优化提供新方案。

关键词：轨道交通车辆；司机室；PTC加热器；单回路供电；AC380V

引言：在轨道交通运营过程中，司机室的温度环境直接影响驾驶员的操作舒适度与行车安全性。目前主流的司机室加热设备存在一定的技术局限：其一，采用电阻丝作为发热元件，存在温度不可自控、过热风险高、热效率低等问题；其二，供电系统设计复杂，主加热回路与风机、控制电路需多种电压等级供电，导致车辆布线繁琐、制造成本增加，同时增多故障隐患点；其三，多电压设计使得加热器在不同车型间的通用性差，不利于备件统一管理与维护成本控制。为解决上述问题，本文提出一种基于单回路AC380V统型设计的PTC加热器，通过采用PTC陶瓷发热技术与创新的供电架构，实现加热效率、安全性与兼容性的协同优化。

1 加热器总体设计方案

1.1 核心设计目标

本加热器的核心设计目标为：（1）提升加热安全性与能效，从本源上解决过热问题；（2）简化供电系统结构，采用统一电压等级实现全功能供电；（3）优化保护机制，确保设备在复杂工况下的可靠运行。

1.2 总体结构组成

加热器主要由壳体、PTC电热元件、AC380V交流风机、温度保护系统及控制开关组成，如图1所示。壳体采用不锈钢材料，内部优化设计风道结构，确保气流顺畅流通；PTC电热元件与风机并联接入同一供电回路，温度保护系统串联于PTC供电回路中，实现对出风温度的实时监测与异常保护；控制开关设置全档与半档调节功能，满足不同加热需求。控制电路图如图1、图2所示：



图1 加热器总体结构组成

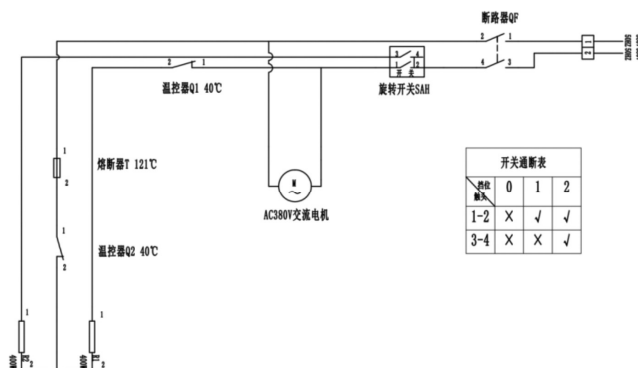


图2 加热器控制电路图

1.3 核心技术创新点

1.3.1 PTC陶瓷发热元件应用

电热元件的类型较多，若按照元件的质材分析，可分为两大类，即金属与非金属类。金属类电热元件常用的材质有贵金属、重金属及其合金，以及镍基合金、铁基合金、铜基合金等。非金属电热元件常采用钛酸钡(PTC材料)、碳化硅、石墨等^[1]。摒弃传统金属电阻丝加热方案，选用额定工作电压AC380V的PTC陶瓷电热元件作为发热源。PTC材料是一种温度敏感性的导电材料，PTC (Positive Temperature Coefficient) 即正温度系数，是指材料电阻率随自身温度升高而增大的一种特性^[2]，当PTC元件温度超过居里点时，其电阻值几乎可达无穷大，元件能自动切断电路工作，具备温度自限自控能力，元件两面接通电源即获得额定的发热温度。它的一大突出特点还在于安全性能上，即遇风机故障停转时，PTC加热器因得不到充分散热，其功率会自动急剧下降，天然具备自动恒温 and 防干烧功能，从根本上解决了电阻丝加热的过热安全隐患，同时PTC元件的热转换效率可达95%以上，相比传统电阻丝加热器节能效果显著。

成品的陶瓷PTC电阻材料需要经过封装后才可以成为能应用的产品，具体结构如图3所示：

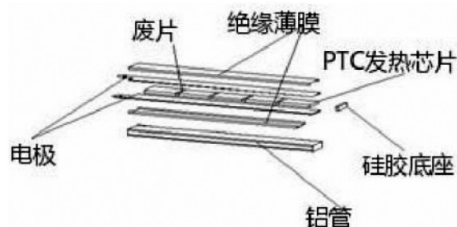


图3 陶瓷PTC产品结构图

从图3中可知，从外向内依次是铝制外壳、绝缘膜、电极条和陶瓷PTC发热单元。其中成型后的陶瓷PTC电阻材料一般烧结成长而薄的矩形，通电后，因为焦耳效应充当发热源。陶瓷PTC电阻材料的厚度影响耐电压等级。电极条起接触通电的作用，正负直流电压通过电极条加到陶瓷PTC电阻两端，流过电流继而发热。绝缘膜起到绝缘作用，对系统的安全工作具有不可替代的作用。铝制外壳起到固定作用，固定内部陶瓷PTC电阻材料、电极条和绝缘膜，提供结构强度。在颠簸和撞击时使内部元器件不会发生相对位移，保持结构稳定^[3]。

1.3.2 单回路AC380V统型供电架构

创新设计单回路统一供电方案，将PTC电热元件与风机（额定工作电压AC380V）并联接入同一AC380V交流电源。该设计无需额外引入DC110V、AC220V等低压电源，仅通过一根AC380V电源线即可完成加热、通风全功

能供电，彻底简化了车辆端的电源配置与布线工程。

1.3.3 多级冗余温度保护系统

在PTC电热元件供电回路中串联设置多级温度保护装置，包括2个可恢复式温度保护器（双金属片温控器）和1个不可恢复式温度保护器（温度熔断器），形成冗余安全保护机制。可恢复式温控器用于实时监测出风温度，实现过热时的自动断电与温度恢复后的复位；不可恢复式温度熔断器在出现极端超温情况时熔断，确保加热回路彻底断电，避免安全事故发生。

2 PTC 加热器工作原理

2.1 核心元件工作机制

PTC陶瓷电热元件的工作核心依赖其正温度系数特性：在室温状态下，元件电阻值较低，通电后电流通过产生大量焦耳热，实现快速升温；当温度升高至元件自身居里温度附近时，电阻值呈指数级增长，根据功率公式 $P = U^2/R$ （ U 为供电电压， R 为元件电阻），加热功率会自动急剧下降，最终稳定在低功率状态，形成天然的“自动恒温”效果，从材料本质上避免了干烧与过热风险。

2.2 整体工作流程

当车辆为加热器接入AC380V电源后，电流通过单回路同时为并联连接的风机和PTC电热元件供电，具体工作流程如下：

风机启动：AC380V横流风机立即通电运转，通过壳体进风口吸入司机室内的冷空气，形成稳定的强制对流气流；

加热过程：PTC电热元件同步通电发热，冷空气在风机驱动力作用下流经PTC元件表面及散热器，与高温元件进行高效热交换，快速升温为暖风；

暖风输出：经热交换后的暖风通过壳体出风口排出，定向输送至司机室目标区域（如足部），实现环境温度提升；

温度调节：加热器支持全档与半档手动调节，旋钮开关旋至“1”档时，仅1组PTC加热模块工作，以400W半功率运行；旋至“2”档时，2组加热模块同时工作，以800W全功率运行，适配不同温度需求；

安全保护：温度保护系统实时监测出风温度，当温度达到一级可恢复式温控器设定值（40℃）时，温控器断开对应相加热回路，加热功率降低；当温度降至复位温度（30℃）时，温控器自动闭合，加热回路恢复工作；若出现极端超温（120℃），二级不可恢复式温度熔断器熔断，加热回路彻底断电，避免安全事故。

3 性能测试与验证

3.1 测试条件

测试环境温度：18℃~20℃；供电电压：AC380V±10%；测试对象：足部取暖器样机；测试项目包括功率试验、温度控制精度、安全保护性能及连续运行可靠性。

3.2 测试结果

3.2.1 功率试验

在环境温度为18℃~20℃下，样品输入额定工作电压，工作1h后，测量样品功率。公式见下式： $P=U \cdot I \cdot \cos\phi$ 式中：

P—功率，单位为瓦(W)；

U—额定工作电压有效值，单位为伏(V)；

I—额定工作电压下的电流有效值，单位为安(A)；

$\cos\phi$ —额定工况下的功率因数，对电阻型发热元件 $\cos\phi$ 可取为1。

实测功率为855W，在额定功率的95%~110%范围内。

3.2.2 温度测试

在环境温度为18℃~20℃、正常通风条件下，模拟样品的安装状态；样品在额定电压及正常工作状态下通电1h后，用温度传感器测量出风口及加热元件表面温度。测量时，将被测物体分成边长不超过100mm的矩形区域，每个区域设置一个测点；用温度计或温度传感器测量距离出风口50mm处的温度。

加热元件任意点最高温度不应高于180℃，距离出风口50mm处温度不应高于45℃。

测量结果：加热元件表面最高温度128.4℃；出风口平均温度为35.6℃。

3.2.3 超温保护性能测试

在样品外罩顶部及四周用保温良好的物品覆盖，同时将工作电压提高到额定电压的1.1倍，在增加样品发热量，并且不能对流散热的情况下，使加热元件温度升高，在样品内温度达到一级保护设计温度时，检查一级超温保护器是否动作，动作时超温保护器所在加热回路工作电流为零，同时要求一级超温保护器动作后，样品内的温升不得导致二级保护器动作。

短接级超温保护器，继续将样品升温，在样品内温度达到二级保护设计温度时，检查二级超温保护器是否动作，动作时样品超温保护器所在加热回路工作电流为零，去除覆盖物，将工作电压调至额定电压，10分钟后超温保护器所在加热回路电流仍为零，表示二级超温保护器不可自动恢复。

判定要求：一级超温保护试验：一级超温保护器为可自动恢复式，断路温度为(40±5)℃，恢复温度为(30±5)℃；一级温度保护器工作正常的情况下，二级超温保护器不应动作；二级超温保护试验：二级超温保护器为不可自动恢复式，断路温度为(120±5)℃，且超温保护器应不可自动恢复。

表1 超温保护性能测试结果

序号	检查项目	一级超温保护试验		二级超温保护试验
		保护器1	保护器2	
1	超温保护器是否动作	是	是	是
2	超温保护器动作温度(℃)	42.6	43.7	124.0
3	超温保护器动作温度(℃)	29.3	30.3	不可自动恢复
4	二级超温保护器动作后，加热元件表面最高温度(℃)	/	/	222.7
5	保护器动作时，超温保护器所在加热回路工作电流(A)	0	0	0
6	一级保护器动作后，二级是否动作	否	否	/

4 结论与展望

本文研发的基于单回路AC380V统型设计的轨道交通车辆司机室PTC加热器，通过三大核心创新实现了技术突破：（1）PTC陶瓷元件的应用从本源上提升了加热安全性与能效，解决了传统电阻丝加热器的过热难题；（2）单回路AC380V统型供电架构大幅简化了车辆供电布线与电源配置，降低了制造成本与故障风险；（3）多级冗余保护系统确保了设备在复杂工况下的高可靠性。测试结果表明，该加热器在加热效率、安全性等方面均优于传统加热设备，具有显著的实用价值。下一步产品将融合智能温控算法，结合司机室多点温度监测数据自动调节功率，解决电加热器“响应滞后、温差大”的问题。

参考文献

- [1]汪克强. 电力机车司机室电加热器的设计选型[J]. 电力机车与城轨车辆,2008,31(5):9-11,15.
- [2]席军,刘廷华. PTC热敏电阻的开发应用现状[J]. 塑料,2005,34(4):79-84.
- [3]谷勇炜. 车载陶瓷PTC电阻加热器设计与实现[D]. 湖北:华中科技大学,2021.