

注：国家科技重大专项课题（No. 2019ZX06002020）；中国机械工业集团重大科技专项项目（No. SINOMAST-ZDZX-2019-03）

摘要：1E级铂电阻温度计用于监测核电站主泵轴承水温度，参与停泵指令，触发反应堆停堆，对核电站的安全运行起着至关重要的作用，是电站安全运行的关键仪控设备。该温度传感器安全等级为1E级，质保等级为QA1级，需满足高精度、长寿命、耐辐照以及抗地震等要求，技术要求极高<sup>[1-2]</sup>。文章从温度计的技术要求、研制重点以及质量鉴定等方面介绍了1E级铂电阻温度计的研发进展，为我国该类产品的自主化研制提供了重要参考。

关键词：1E级铂电阻温度计；压水堆核电站；质量鉴定

中图分类号：TH811 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2022)03-0006-06

收稿日期：2021-12-28

## 核电站主泵监测用 1E 级 铂电阻温度计研制进展

鞠华<sup>1, 2</sup> 严俐<sup>1, 2</sup> 吴雪琼<sup>3</sup> 蔡惟<sup>3</sup> 王胜光<sup>3</sup> 郑雅文<sup>1, 2</sup> 赵彦<sup>1, 2</sup> 王华<sup>1, 2</sup> 陈洁<sup>1, 2\*</sup>

1. 重庆材料研究院有限公司，重庆 400707；

2. 国家仪表功能材料工程技术研究中心，重庆 400707；

3. 上海核工程研究设计院，上海 200030

### 0 前言

反应堆冷却剂泵（以下简称主泵）是确保核电站安全和可靠运行的最关键动力设备，属于核安全一级，也是一回路的压力边界之一。主泵作为一回路中唯一的能动设备，为反应堆冷却剂提供驱动压头，保证足够的强迫循环流量通过堆芯，把反应堆产生的热量送至蒸汽发生器，因而需要连续运行在高温、高压和带放射性的环境中。主泵长期稳定安全的运行，对冷却堆芯以及防止核电站事故的发生尤为重要，主泵常被喻为核电站的心脏，其稳定运行关系到整个核电运行的安全<sup>[3]</sup>。

核电站主泵一般有2种类型：一是屏蔽电机泵；二是湿绕组泵。虽然这2类泵都是立式无轴封泵，但是其设计理念和内部结构特点都存在着较大的差异，从而导致电机冷却性能和惰转飞轮机械特性等方面各有不同<sup>[4]</sup>。

核电站主泵监测用1E级铂电阻温度计用于指示、

控制以及报警主泵轴承水温，是保证主泵安全运行的关键仪表。任意一台主泵的温度通道经过四取二逻辑选择后，如果产生反应堆冷却剂泵轴承温度高信号，会停止所有主泵，并触发反应堆停堆。因此，监测主泵的运行状态意义重大<sup>[5]</sup>。

国内核电厂中，主泵用1E级温度传感器全部采用进口，长期受制于国外供应商，采购及维护成本高，给电厂的运维带来诸多不便及不利影响。随着核电站设计的固化，主泵为重新设计研发设备，国外也难以直接采购到与主泵完全匹配的1E级温度计，而且，对于不同类型主泵，监测仪表的机械套管设计、套管内环境和电气接口等参数均有不同程度的差异。

针对国内主流核电技术功能需求，结合“屏蔽主泵”和“湿绕组主泵”2种主泵结构设计要求，参照ASME、IEEE、IEC等国际标

蔽主泵”和“湿绕组主泵”2种主泵温度监测功能需求研究,进而突破关键材料遴选及制备、高可靠结构设计及安装设计、制备工艺、核级质量鉴定等关键技术瓶颈,开展核环境条件下质量鉴定性能评价技术研究,解决分析检测与试验验证等产业化关键评价技术,研制了“屏蔽主泵”和“湿绕组主泵”监测用1E级铂电阻温度计2种型号的产品,开展应用试验,考核质量,鉴定试验验证。试验结果达到国外同类产品先进水平,可以满足核电机组关键传感器与仪表国产化需求。

## 1 铂电阻温度计的研制重点

### 1.1 感温元件

铂电阻元件作为温度计的感温元件,直接决定温度计的基本性能。常见的有云母铂热电阻元件、陶瓷铂热电阻元件、玻璃铂热电阻元件,如今,厚膜铂热电阻元件和薄膜铂热电阻元件也渐渐发展起来,厚膜电阻频响速度快,也得到了广泛的应用<sup>[6]</sup>。

国内现用于核级RTD的铂电阻元件全部依赖进口,且没有公开在核场应用相关技术性能资料。国内主要生产铂电阻元件厂家均执行国标,没有通过辐照、抗震、温度循环分析、高温稳定性分析考核。国内曾经对进口铂电阻元件进行设计寿命40年、B级允差要求的加速寿命试验,但缺少温度循环分析、高温稳定性等研究。

### 1.2 温度计结构设计

针对湿绕组主泵、屏蔽主泵不同的温度监测功能要求,分别研制了2种型号的1E级铂电阻温度计。1E级铂电阻温度计由温度计(铠装体)、保护套管、安装螺丝、接插件及信号电缆等组成。其通过保护管M22螺纹与主泵法兰装配在一起,并通过固定支架固定温度计体及接插件。

屏蔽主泵用温度计(见图1)要求响应时间 $\tau_{0.632} \leq 7$  s。响应时间 $\tau$ 主要由3个因素决定:一是感温元件自身物理特性,影响因素有导热系数、自加热效应、热容及热滞

后等;二是陶瓷铂电阻敏感元件在封装成铂电阻温度计时引入附加的响应时间,因封装结构及封装材料的不同会产生很大的差异<sup>[3]</sup>;三是制成温度计后, $\tau$ 主要取决于温度计保护管结构设计,与保护管壁厚呈反比。实际工况中,测量流体对保护管产生弯曲应力、受迫振动的简谐力,以及静压力,其中,受迫振动的简谐力影响力最大。由于这种高速流质将产生较大无阻尼受迫振动,因此,保护管的套管设计需平衡强度与快速响应的要求。

湿绕组主泵用温度计(见图2)要求响应时间 $\tau_{0.632} \leq 30$  s。保护套管采用柱状直形结构,通过保护套管与主泵法兰焊接装配在主泵上。

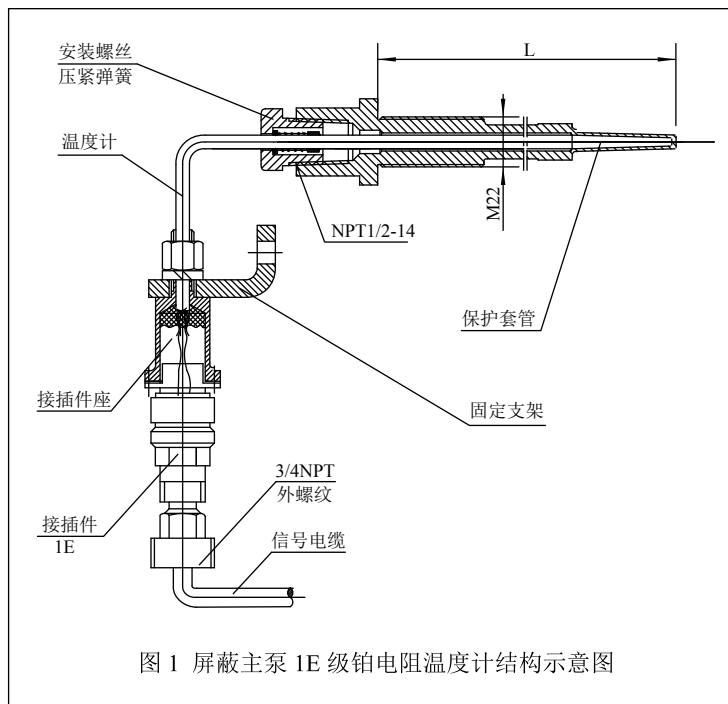


图1 屏蔽主泵 1E 级铂电阻温度计结构示意图

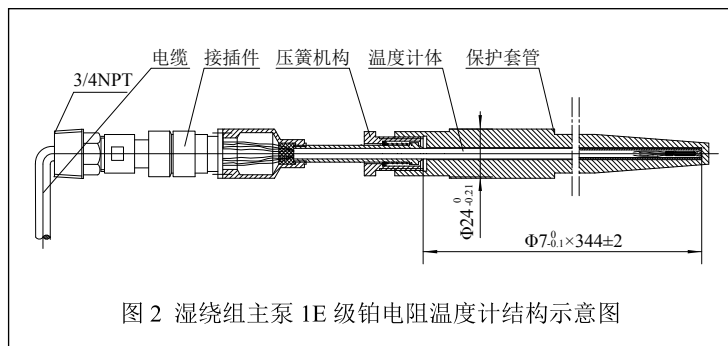


图2 湿绕组主泵 1E 级铂电阻温度计结构示意图

## 1.3 1E级铂电阻温度计的质量鉴定

对于新开发的核电装备，根据功能和使用地点的不同，在应用到核电工程以前，都必须按照装备鉴定标准在装备鉴定试验台上进行一系列事故鉴定或标准鉴定，以验证其在核电站事故期间和事故后，在经过高温、辐照、腐蚀等恶劣环境长时间考验后，装备的能动性 and 可操作性。国外非常重视基础鉴定试验设施的发展，在核电标准和鉴定规范方面的研究也遥遥领先。经过多年的发展，国外核电装备制造已经建立起一套完善的制造、鉴定体系和标准，装备设计、制造、试验的各环节都有专业的公司或科研机构来承担，可以保证最终产品完全符合核电站的设计要求。核电站用工程样机鉴定试验过程是否规范，决定了以后成批生产的装备质量能否满足核电机组的要求。

IEEE 系列标准由国际核能工程委员会主办，是 CAP1400 核电技术质量鉴定时参考的主要标准。其中，IEEE 323 规定了核电站 1E 级设备的质量鉴定，涵盖了电气设备的一般规定、质量保证、鉴定和认可、功能系统设计、安装等方面内容。依据该标准，铂电阻在开展合理而适用的质量鉴定评价时，应进行热老化、辐照、振动老化、地震、LOCA 等试验，以证明其在正常运行及事故条件下满足预定功能要求。

## 2 监测用 1E 级铂电阻温度传感器研发现状

重庆材料研究院有限公司联合上海核工程研究院设计院有限公司，承担了国家科技重大专项课题“核级传感器用特种功能材料及元件的自主化研制”、“监测主泵的 1E 级温度传感器研制”的研究和开发任务。参照美国 IEC、ASME 等发达国家最新标准要求，在前期研发基础上，开展并突破了系列材料和元件设计（材料成分设计、元件结构设计）-制备工艺-分析检测-试验验证等全流程关键技术，成功研发出了“核级铠装铂电阻用微细铂丝”、“核级铠装铂电阻丝绕元件”。针对我国 CAP1400 核电技术功能需求，结合“屏蔽主泵”和“湿绕组主泵”2 种主泵结构设计要求，采用自主开发的铂电阻感温元件，与同类进口元件一起制作了主泵监测用 1E 级温度传感器工程样机，进行了质量鉴定试验验证、应用试验考核，包括分度、响应时间、

绝缘电阻等基本性能的试验，及防护试验、EMC 试验、热老化试验、热循环试验、磨损老化试验辐照老化试验、机械振动试验、地震试验、安全壳压力试验，其中有有机材料活化能取 0.5 eV，热老化试验时间按 EJ/T 1197 中的方法 1 阿伦纽斯公式，计算出相应等效寿命的老化时间为 1,463 h，且为了应用的广泛性，热循环试验包络了 AP1000 核电站寿命期内的异常工况要求。

图 3 为主泵监测用 1E 级温度传感器抗震试验安装图。

表 1 为根据 CAP1400 核电技术要求制定的鉴定试验验证项目、要求及试验结果，试验结果全部满足验收准则的要求，表明研制的鉴定试验样机达到了工程化产品应用的水平。图 4 为提供给“国和一号”示范工程反应堆冷却剂泵 1E 级温度传感器，即湿绕组主泵用 1E 级温度传感器工程应用产品。

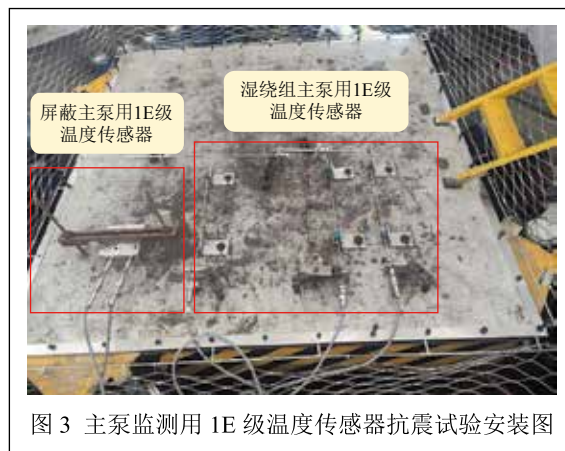


图 3 主泵监测用 1E 级温度传感器抗震试验安装图



图 4 湿绕组主泵用 1E 级铂电阻温度计工程应用产品

表 1 鉴定试验项目及试验结果

| 试验项目         | 试验目的   | 验收准则  | 鉴定试验样品性能  |   |
|--------------|--|---|---|---|
| 基准试验         | 外观、尺寸及电连续性                                   | 基本性能检测  | 外观、尺寸满足设计要求，电连续性正常。   | 满足技术要求  |
|              | 绝缘电阻   | 检验 1E 级温度传感器的物理绝缘性能。  | 室温： $\geq 100\text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>330 °C： $\geq 20\text{ M}\Omega$ (100 VDC)   | 室温绝缘全部 $500\text{ M}\Omega$ (100 VDC)，330 °C 高温时绝缘电阻最小值为 $40\text{ M}\Omega$ (100 VDC)。 |
|              | 分度   | 验证 1E 级温度传感器敏感元件的静态特性符合规定的要求。   | 0 °C、100 °C、182 °C、260 °C、290 °C、330 °C、400 °C 循环测试后，各温度点线性校准精度不大于 $\pm 0.17\text{ }^\circ\text{C}$ 。   | 所有温度点的最大校准精度偏差 $-0.068\text{ }^\circ\text{C}$ 。   |
|              | 响应时间   | 验证铂电阻元件的动态热响应符合技术要求。  | 湿绕： $\tau_{0.632} \leq 30\text{ s}$<br>屏蔽： $\tau_{0.632} \leq 8\text{ s}$   | 湿绕：最大为 29.5 s<br>屏蔽：最大为 7 s   |
| 防护 (IP55)    | 检验 1E 级温度传感器防尘及防止喷射的水浸入之特性。                  | GB/T4208-2008 外壳防护等级 IP55。  | (1) 样品绝缘电阻均大于 $10^{12}\text{ }\Omega$ ；<br>(2) 未进尘，未影响设备的正常操作；<br>(3) 电缆及接插件未进水。  |   |
| 电磁兼容         | 检验 1E 级温度传感器受到电磁场干扰度时的性能。                    | 室温： $\geq 100\text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>0 °C、100 °C 与基准值的校准偏差，不大于 $\pm 0.28\text{ }^\circ\text{C}$ 。 | 试验期间温度信号显示正常，没有出现断路现象。<br>试验后：<br>(1) 室温下，绝缘电阻均大于 $10^{12}\text{ }\Omega$ ；<br>(2) 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差最大为 $-0.067\text{ }^\circ\text{C}$ 。 |   |
| 热老化          | 模拟热 (环境) 老化对温度计的影响。                          | 室温： $\geq 100\text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>0 °C、100 °C 与基准值的校准偏差，不大于 $\pm 0.28\text{ }^\circ\text{C}$ 。 | 试验期间温度信号显示正常，没有出现断路现象。<br>试验后：<br>(1) 室温下绝缘电阻均大于 $10^{12}\text{ }\Omega$ ；<br>(2) 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差最大为 $-0.062\text{ }^\circ\text{C}$ 。  |   |
| 热循环 (异常极端试验) | 模拟异常工况热 (环境) 老化对 1E 级温度传感器的影响。               | 室温： $\geq 100\text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>0 °C、100 °C 与基准值的校准偏差，不大于 $\pm 0.28\text{ }^\circ\text{C}$ 。 | (1) 室温下样品绝缘电阻均大于等于 $3.5 \times 10^{11}\text{ }\Omega$ ；<br>(2) 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差最大为 $-0.079\text{ }^\circ\text{C}$ 。                     |   |
| 磨损老化         | 验证接插件循环或频繁操作对温度计散热影响。                        | 室温： $\geq 100\text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>0 °C、100 °C 与基准值的校准偏差，不大于 $\pm 0.28\text{ }^\circ\text{C}$ 。 | (1) 室温下样品绝缘电阻均大于等于 $2.0 \times 10^{11}\text{ }\Omega$ ；<br>(2) 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差最大为 $-0.064\text{ }^\circ\text{C}$ 。                     |   |
| 辐照老化         | 累积表示反应堆正常运行期间安全壳内辐射环境及安全壳内事故环境对温度计组件的累积辐射效应。 | 室温： $\geq 100\text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>0 °C、100 °C 测量误差，不大于 $\pm 0.28\text{ }^\circ\text{C}$ 。      | (1) 室温下样品绝缘电阻均大于等于 $2.9 \times 10^{10}\text{ }\Omega$ ；<br>(2) 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差最大为 $-0.067\text{ }^\circ\text{C}$ 。                     |   |
| 机械振动         | 模拟机械振动 (温度计本身诱发或外部原因产生) 老化对试验样品的影响。          | 室温： $\geq 100\text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>0 °C、100 °C 与基准值的校准偏差，不大于 $\pm 0.28\text{ }^\circ\text{C}$ 。 | (1) 室温下样品绝缘电阻均大于等于 $1.8 \times 10^{10}\text{ }\Omega$ ；<br>(2) 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差为 $-0.094\text{ }^\circ\text{C}$ 。                       |   |



|         |   |   |   |
|---------|---|---|---|
| 地震      | 验证试验样品在运行基准地震 (OBE) 和安全停堆地震 (SSE) 期间和试验之后在规定的试验条件下完成其安全功能的能力。 | 室温: $\geq 100 \text{ M}\Omega$ (100 VDC)<br>0 °C、100 °C 与基准值的校准偏差, 不大于 $\pm 0.28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。                    | (1) 室温下, 样品绝缘电阻均大于等于 $4.4 \times 10^{11} \Omega$<br>(2) 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差最大为 $-0.144 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 |
| 安全壳压力   | 验证位于安全壳内设备能够经受定期的安全壳泄露率试验。                                    | 室温: $\geq 100 \text{ M}\Omega$ (100 VDC)  | (1) 目测观察电缆及接头、保护管、铠装体表面无异常; 目测观察保护管、铠装体焊缝处无异常;<br>(2) 室温下, 样品绝缘电阻均大于等于 $4.5 \times 10^{11} \Omega$ 。                  |
| 功能性试验检测 | 验证样品在核环境条件下各项试验之后, 仍能在测温区间内具有其规定的温度测量功能。                      | 0、100、182、260、290、330、400 °C<br>7 个温度点循环测试后, 0 °C、100 °C 与基准值的校准偏差, 不大于 $\pm 0.28 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其他点的误差仅供研究, 不作要求。 | 0 °C、100 °C 测量值与基准值的校准偏差最大为 $-0.033 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其他各温度点的测量值与基准值的校准偏差最大 $0.185 \text{ }^\circ\text{C}$ 。  |

### 3 结束语

目前, 国内核电站主泵监测用 1E 级铂电阻温度计均采购国外产品。通过本课题研究, 形成了具有自主知识产权的核电站主泵监测用 1E 级铂电阻温度计产品。该成果不仅填补国内在此领域的技术空白, 满足国内核电发展的需求, 同时还将打破国外垄断的局面, 形成较强的国际市场竞争力, 也可降低核电厂的采购成本, 提升核电站在国内以及国际市场上的竞争力。

### 参考文献

[1] 包燕青, 沈佳晨. 铂电阻传感器的检定和使用 [J]. 工程技术 (全文版), 2019(7): 126-127.  
 [2] 何瑾瑜, 杨浩. 核电站温度仪表的应用分析 [J]. 工程技术 (科技创新导报), 2018(18): 53, 55.  
 [3] 赵彦楼, 蒋义权, 侯宇驰, 等. 核级主泵转速传感器国产化研发 [J]. 仪器仪表用户, 2020(5): 90-93.  
 [4] 史海锋. 屏蔽主泵与湿绕组主泵的对比研究 [J]. 发电设备, 2015(9): 370-372.  
 [5] 孙立江. 浅谈核电站反应堆冷却剂泵发展及现状 [J]. 商品与质量, 2020(53): 3.  
 [6] 王魁汉. 温度测量实用技术 [M]. 机械工业出版社, 2020(1): 42-45.

### Development Progress of 1E Platinum Resistance Temperature Sensor for the Temperature Monitors of the Main Pump in Nuclear Station

JU Hua<sup>1,2</sup>, YAN Li<sup>1,2</sup>, WU Xueqiong<sup>3</sup>, CAI Wei<sup>3</sup>, WANG Shengguang<sup>3</sup>, ZHENG Yawen<sup>1,2</sup>, ZHAO Yan<sup>1,2</sup>, WANG Hua<sup>1,2</sup>, CHEN Jie<sup>1,2\*</sup>

(1. Chongqing Materials Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400707, China; 2. National Instrument Functional Materials Engineering Technology Research Center, Chongqing 400707, China; 3. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The 1E platinum resistance thermometer is used to monitor the water temperature of the main pump in nuclear power plant, participate in the pump shutdown instruction and trigger the reactor shutdown. It plays a vital role in the safe operation of nuclear power plants and is the key instrument control equipment for the safe operation of nuclear power plants. The safety level of the temperature sensor is 1E and the quality assurance level is QA1. The temperature sensor needs to meet the requirements of high precision, long life, radiation resistance and earthquake resistance, and has high technical requirements. The paper introduces the development progress of 1E platinum resistance thermometers from the aspects of technical requirements, development emphasis and quality appraisal, which provides important reference for the independent development of platinum resistance thermometers in China.

**Key words:** the 1E platinum resistance temperature sensor; pressurized water nuclear reactor; purification

## 作者简介

鞠华：重庆材料研究院有限公司，高级工程师，主要从事核级温度传感器、加热器设计研究及开发。

严俐：重庆材料研究院有限公司，助理工程师，主要从事温度传感器研究。

吴雪琼：上海核工程研究设计院，高级工程师，主要从事核电仪器仪表设计及研发。

蔡惟：上海核工程研究设计院，高级工程师，主要从事核电仪器仪表设计及研发。

王胜光：上海核工程研究设计院，高级工程师，主要从事核电仪器仪表设计及研发。

郑雅文：重庆材料研究院有限公司，工程师，主要从事核电传感器科技协调。

赵彦：重庆材料研究院有限公司，教授级高级工程师，主要从事航空、航天、核电等领域传感器研究及开发。

王华：重庆材料研究院有限公司，教授级高级工程师，主要从事航空、航天、核电等领域传感器研究及开发。

陈洁：重庆材料研究院有限公司，高级工程师，主要从事测温材料及应用研究，重点围绕我国自主三代核电“华龙一号”、CAP1400 等需求，开展特种温度传感器研发。

通信地址：重庆市北碚区嘉德大道 8 号

邮编：400707

邮箱：nmchen2@163.com