文章编号:1671-4598(2026)09-0290-07 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.09.036 中图分类号:TP212 文献标识码:A

高温耐辐射振动位移传感器研制

蒋兆翔，周成宁，陈雪莹，刘才学，陈祖洋，胡建荣
（中国核动力研究设计院，成都 610213）

摘要：针对核反应堆高温、强辐射环境及控制棒驱动机构、泵类等设备在强运行背景噪声下的振动特性探测需求，开展了振动位移传感器的研制；通过振动位移传感器原理分析、高温耐辐照材料筛选、理论建模、核心器件性能仿真优化及结构与电路设计，研制出适用于该环境的高温耐辐射振动位移传感器；型式试验及三方检定结果表明，传感器各项性能指标与国外同类型产品技术水平相当，能够有效满足核反应堆关键设备故障检测的工程应用需求。

关键词：高温；耐辐射；振动位移；传感器

Development of a Vibration Displacement Sensor with High-Temperature and Radiation Resistance

JIANG Zhaoxiang, ZHOU Chengning, CHEN Xueying, LIU Caixue,
CHEN Zuyang, HU Jianrong
(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: In response to the detection requirements of high temperature, high-radiation environments in nuclear reactors and the vibration characteristics of equipment such as control rod drive mechanisms and pumps under strong operational background noises, a vibration displacement sensor was developed. By analyzing the principle of vibration displacement sensors, screening high-temperature and radiation-resistant materials, theoretical modeling, performance simulation and optimization of core components, as well as structural and circuit design, a high-temperature and radiation-resistant vibration displacement sensor suitable for such these environments was developed. The results of model testing and third-party verification indicate that the performance indicators of the sensor are close to those of similar foreign products, effectively meeting the engineering application requirements for fault detection of key equipment in nuclear reactors.

Keywords: high-temperature; radiation-resistant; vibration displacement; sensor

0 引言

核反应堆主泵、驱动机构风机等旋转机械设备在长期运行下不可避免会发生磨损、卡滞、不平衡等一系列故障[1-4]，导致系统安全性下降、反应堆调节效能降低等后果，因此，健康监测是安全性、可靠性的重要保障[5]，这些设备的故障检测都需要使用工作在高温、高辐射等环境下的振动位移传感器，从而可以对响应信号进行特征提取，最终实现故障诊断[6-10]。

核电站主泵在线监测与智能诊断系统已应用于福清、田湾等核电站[11-13]。目前，振动位移传感器仍然普遍依赖欧美国家进口，其价格不仅昂贵，还有禁售禁运风险。国内厂家主要采用仿制进口产品的方式，缺乏正向设计导致了中高端应用环境下的可靠性不足。为了解决卡脖子问题，就必须实现振动位移传感器的自主可控研制。

朱万旭等[14]提出了压杆式光纤光栅位移传感器，解决了光纤应变传递与温度补偿问题，但未涉及长期稳定性与量程扩展的研究；郭振等[15]研制了圆环结构高灵敏度光纤光栅传感器，通过非胶封装与双光栅解决了温漂与胶粘蠕变问题，但未明确大变形下的线性度表现；刘国卫等[16]开发了适用于混凝土裂缝监测的光纤位移传感器，克服了传统传感器在远传与抗电磁干扰方面的不足，但缺乏长期埋入存活率的验证；陈芳芳[17]针对人造板压机研制了新型位移传感器，实现了小型化与低成本，但未给出具体性能指标与环境适应性数据；

收稿日期:2026-01-05； **修回日期**:2026-05-26。
作者简介:蒋兆翔(1991-),男,硕士,高级工程师。
通讯作者:周成宁(1989-),男,博士,副研究员。
引用格式:蒋兆翔,周成宁,陈雪莹,等.高温耐辐射振动位移传感器研制[J].计算机测量与控制,2026,34(9):290-296.

蒋晓彤等[18]设计了耐低温 LVDT 位移传感器，通过结构优化解决了振动与低温环境下的稳定性问题，但未提供耦合工况下的精度保持数据；李沛剑等[19]采用内置复位弹簧改进了 LVDT 传感器，消除了机械间隙导致的零位误差，但未分析弹簧疲劳对长期可靠性的影响；蒋善超等[20]研制了微型 FBG 位移传感器并应用于模型试验，实现了温度自补偿与微小位移测量，但未涉及实际工程埋设的长期稳定性；尹成竹等[21]基于 AD598 芯片提升了 LVDT 传感器的精度与温度特性，但未验证其在强电磁干扰环境下的抗干扰能力。综上所述，现有位移传感器在常温、常规力学环境下的性能标定已较为成熟，但针对高温、强辐射[22]、强振动等多因素耦合的极端工况，仍缺乏系统的长期可靠性验证与专用结构设计，因此开展面向极端环境的高温耐辐射振动位移传感器研制具有迫切的应用需求。

因此，为攻克核电站高温、强辐照恶劣工况下健康监测传感器易失效的难题，本研究提出高温耐辐射振动位移传感器研制新思路。通过极端环境材料选型、开展热－辐照－应力多物理场耦合仿真，创新地设计高可靠性一体密封结构，研制出高温耐辐射振动位移传感器。最后，通过模拟实际工况的型式试验与第三方权威鉴定，全面验证了传感器在极端条件下的性能与可靠性，为解决该领域长期存在的可靠性瓶颈提供了新方案。

1　原理分析

高温耐辐射振动位移传感器测量原理和等效电路图如图 1 所示。

当将交变电流输入到探头内部的线圈中时，线圈会产生相应的交变磁场。随着金属导体靠近线圈并进入交变磁场范围内，根据法拉第电磁感应定律可知，交变磁场会产生感应电动势进而产生交变电场，因此在金属体的表面会产生相应的感应电涡流[23]。此感生电涡流进而会产生一个与原交变磁场方向相反的磁场，两磁场之间的抵消作用会导致线圈所通过的磁通量减少，最终导致振动位移传感器探头线圈的电感值降低、线圈等效电阻值变大等变化。

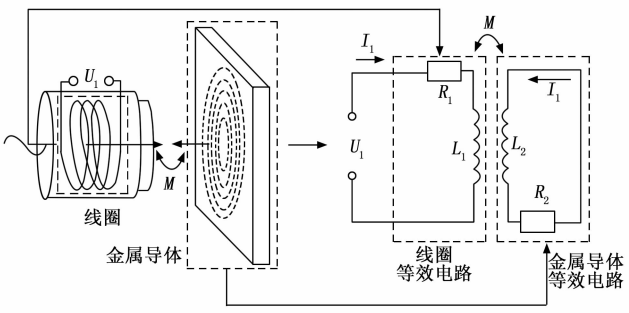


图 1　振动位移传感器等效电路原理图

振动位移传感器实现测量功能的实质是建立相对位移大小和传感器中线圈的等效阻抗之间的关系。通过推导，线圈等效电阻 R，等效电感 L 可表示为：

$$R = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2 \tag{1}$$

$$L = L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \tag{2}$$

其中：M 为互感系数，R_1 和 L_1 为振动位移传感器线圈的等效电阻和电感，R_2 和 L_2 为被测金属产生的感生电涡流的等效电阻和电感，ω 为角频率，有 $\omega=2\pi f$，f 代表激励频率。

因此，通过测量后端电路的电压变化，进而测量 R 和 L 的变化，就可以实现间接测量位移。

2　高温耐辐射振动位移传感器设计

2.1　材料选型

高温耐辐射振动位移传感器最高工作温度为 120 ℃、辐照剂量技术指标为 4.4×10^6 rad，振动位移传感器材料选型如表 1 所示。基于高温耐辐射传感器敏感材料和封装材料的辐照损伤与辐照效应的成果，这些材料无明显影响性能的辐照损伤与性能变化。

表 1　材料及用途明细表

序号	材料名称	功能及用途	选型主要依据
1	316L	外壳、支撑结构件、螺母、铠装连接部分	优异的耐高温抗氧化性，良好的耐腐蚀性与高强度，能提供稳固的机械支撑与保护。
2	铜	漆包线内芯，电缆内芯、航空插头的插针	极佳的导电性与导热性，保证信号低损耗传输并辅助散热。纯铜在指定温辐条件下电学性能稳定，耐热性良好，且加工工艺成熟。
3	聚酰亚胺	漆包线外皮、探头测量部分、电缆外皮	长期使用温度超过 200 ℃，短期可达 300 ℃以上。具有出色的电气绝缘性能、机械强度及耐化学稳定性。其分子结构对辐射具有一定的耐受性，在给定辐照剂量下能保持绝缘性能稳定。
4	漆包线	线圈	聚酰亚胺为外皮、铜为内芯的复合线材兼顾了内芯的高导电性与外皮的高温绝缘性，其耐热等级与耐辐射性满足传感器线圈在高温辐射场中的工作需求，保证电磁感应信号的稳定产生。
5	环氧树脂	灌封固化材料	该材料在 120 ℃下具有低热膨胀系数、高粘结强度与优良的密封性，可有效固定内部元件、防潮、防震。经辐照试验验证，在指定剂量下其固化体机械性能与绝缘性能保持稳定，无明显裂化。

2.2 核心传感单元仿真分析

磁场发射感应线圈是振动位移传感器的核心传感单元，是反映传感器量程和灵敏度的主要元件，使用有限元仿真建立线圈模型如图 2 所示。

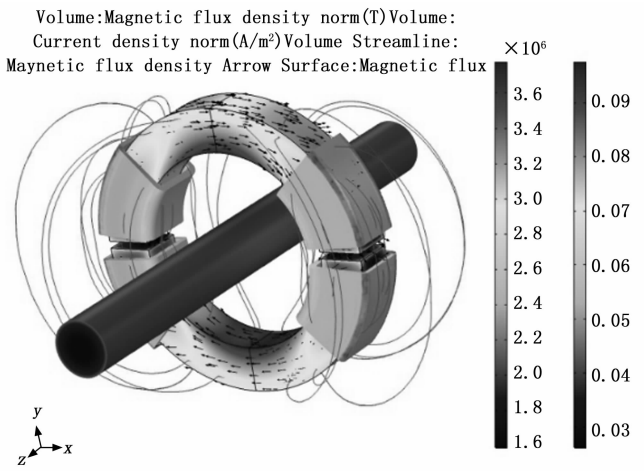


图 2 振动位移传感器线圈模型

线圈外径决定了电涡流的分布范围，同时外径的选择对灵敏度也具有一定程度的影响。仿真实验中目标导体厚度为 1 mm，激励信号幅值为 1 V，线圈和目标导体的距离设置为 0.8 mm，线圈的外径由 4 mm 开始增加至 14 mm 结束，步长 1 mm，线圈外径对输出影响如图 3 所示。

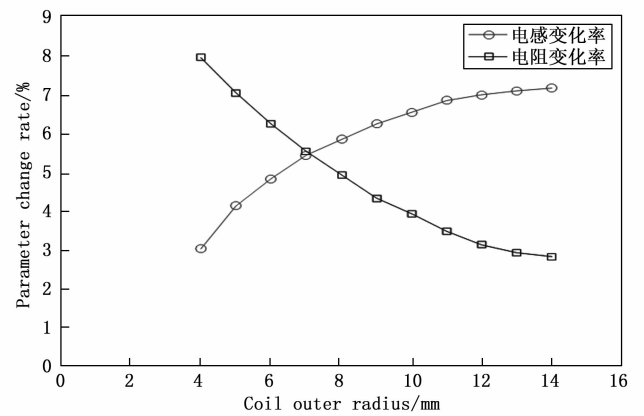


图 3 线圈外径对线圈输出影响仿真

由图 3 可以得出线圈外径越大电感灵敏度越高、电阻灵敏度越低，灵敏度越高有利于提高传感器的分辨率，该规律可以进一步推广到更广的线圈外径范围内适用。其次，通常过大的外径会造成电感过大，此外，对外径的选取还需要考虑的一个因素是目标导体的面积，通常目标导体外径应大于线圈外径的 1.5 倍，因此选取线圈外径是一个综合考虑的过程。

线圈的内径主要影响线圈的灵敏度，以外径 14 mm，激励频率 1 MHz 作为输入条件，目标导体的位移从 0 mm到 2.0 mm 变化，获得不同线圈内径下线圈电感与目标导体关系如图 4 所示。

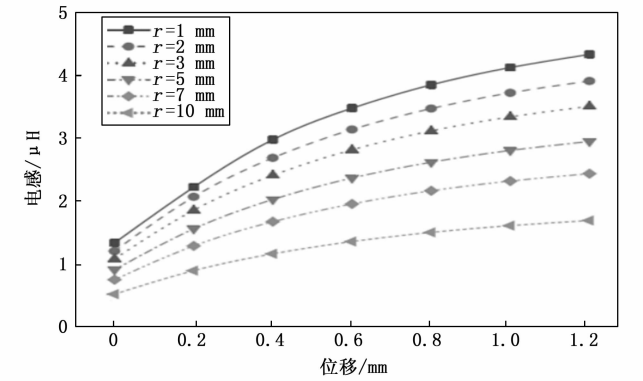


图 4 不同内径下线圈电感与目标导体位移的关系

随着目标导体位移的变化，线圈内半径越小，其电感变化曲线斜率越大，即线圈的电感变化率越大，说明线圈的灵敏度越高。为了保证线圈具有较高的电感电阻比值和灵敏度，当线圈外半径固定时，根据仿真结果，应当选择内半径小的线圈。

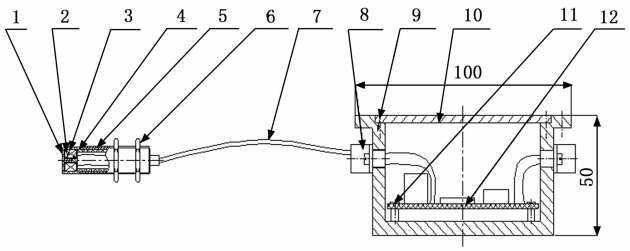
依据仿真结果，基于设计量程为 2 mm 的要求，结合线圈内外径之比通常在 0～0.3 之间等工程经验，探头线圈具体参数设计见表 2。

表 2 探头线圈设计参数

序号	参数名称	参数设计值
1	外径	8.00 mm
2	内径	2.00 mm
3	线径	0.12 mm
4	激励频率	1 MHz
5	匝数	400

2.3 总体设计

传感器总体结构设计如图 5 所示，主要有振动位移传感器、延伸线缆、前置放大器三部分组成。头部安装有骨架、线圈，保护帽和外壳采用螺纹紧固结构。具体连接方式如下：（1）头部结构连接。保护帽与传感器腔体采用细牙螺纹连接，螺纹处涂覆螺纹锁固剂，确保密封与防松。传感器骨架通过其尾部凸缘压接在传感器腔体内台阶处，由锁紧螺母从后方旋入并压紧固定，确保敏感线圈在腔体内无轴向窜动；（2）电气连接。敏感线圈引出线为镀银铜线，通过微型电阻点焊与线缆内芯连接，焊点后套绝缘热缩管保护。连接线缆末端压接镀金插针，插入连接器芯体后，采用环氧胶灌封固定与密封。电连接器从壳体侧面孔插入，通过锁紧螺母在壳体内侧紧固，并加装硅橡胶密封圈实现 IP67 防护；（3）前置器内部固定。电路板通过塑料支柱悬空固定在壳体底座上，螺钉从壳体底部拧入支柱。前置器电路壳盖与壳体四周通过不锈钢螺钉紧固，结合面设有矩形截面硅胶密封圈，确保电磁屏蔽与环境密封。



1. 传感器密封腔 2. 敏感线圈 3. 传感器骨架 4. 传感器铁芯
5. 传感器腔体 6. 锁紧螺母 7. 连接线缆 8. 电连接器
9. 前置器电路壳体 10. 前置器电路壳盖 11. 螺钉 12. 电路组件

图 5　传感器总体结构设计

设同轴电缆的电阻约为 0.02 Ω/m，电缆电阻与传感器线圈为串联关系，常温线圈阻抗约为 14 Ω（1 MHz 激励条件下），由此可知若传感器传输电缆长度为 L，则传感器线圈输出信号的衰减率为：

$$\rho = \frac{2 \times 0.02L}{14 + 2 \times 0.02L} \times 100\% \tag{3}$$

式中，ρ 为传感器输出信号的衰减系数。

由此可知传感器输出信号随传输电缆长度增加衰减增大，电缆长度为 1 m 时，传感器输出信号衰减率为 0.28%，电缆长度为 10 m 时，传感器输出信号衰减率为 2.7%。

传感器的电路设计框图如图 6 所示。

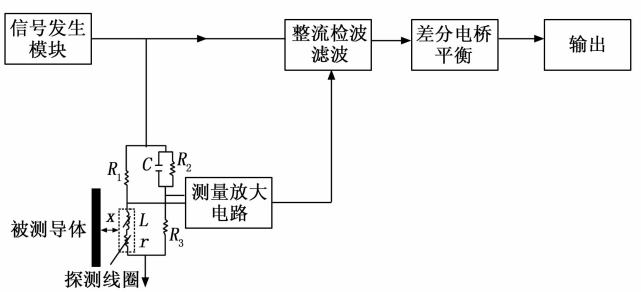


图 6　电路设计框图

该电路的核心功能是将探测线圈与被测导体之间的微小位移变化，转换为易于测量和传输的电压或电流信号。主要包括信号发生模块、探测线圈与被测导体、测量放大电路、整流检波滤波、差分电桥平衡和输出等六部分。各部分主要功能原理具体如下。

1）信号发生模块：

该模块包含一个高频振荡器（如 LC 振荡器）。它向探测线圈提供稳定的正弦波或高频交流电流，使线圈周围产生交变磁场。当被测导体靠近时，导体表面会因电磁感应产生电涡流，从而改变线圈的等效阻抗。主要功能是产生高频振荡信号，为探测线圈提供激励。

2）探测线圈与被测导体：

探测线圈是传感器的敏感元件，通常封装在探头内部。被测导体（金属物体）在交变磁场中的距离变化，会导致线圈阻抗（电感量、电阻）发生非线性变化。这种变化是后续电路需要检测的物理基础。

3）测量放大电路：

由于探测线圈的阻抗变化通常比较微弱，且容易受到干扰，该模块通过谐振放大或阻抗匹配网络，将线圈的阻抗变化转化为电压幅值或频率的变化，并进行初级放大，以提高信噪比。主要功能是将探测线圈阻抗的变化转换为电压信号的变化并进行初步放大。

4）整流检波滤波：

探测线圈载波信号上的幅值变化包含了位移信息。整流检波模块提取出幅值包络线，随后通过低通滤波器滤除高频载波成分，留下与位移相关的缓慢变化的直流电压。主要功能是将交流信号转换为平滑的直流信号。

5）差分电桥平衡：

通常采用桥式电路（如惠斯通电桥），将检波后的信号与基准信号进行比较。通过调节电桥平衡，可以消除初始间隙带来的背景信号，使电路只输出由实际位移变化引起的差值信号。这种差分结构还能有效抑制温度变化引起的共模干扰，是电路中的关键调理环节。主要功能是消除零点漂移，提高测量精度。

6）输出：

经过处理后的信号通常需要经过 V/I 转换或电压放大，使其具有良好的线性度和带负载能力，以便后续的数据采集系统进行读取和处理。主要功能是输出标准化的电信号。

3　型式试验与三方鉴定

3.1　型式试验

型式试验包括温湿度、电磁兼容、辐照、振动、冲击、热老化共 6 项试验。具体如下。

1）温湿度试验。通过将传感器置于可控的温度与湿度循环环境中，考核其在极端气候条件下的电气性能稳定性、绝缘性能、密封性以及材料老化情况，以验证传感器在实际工况中是否具备耐受环境温湿度变化的能力。主要步骤如下。

（1）试验前：将传感器在标准试验室环境（23±5 ℃，50%RH）下放置至少 24 小时。在试验箱外进行电气与功能性能测试，记录基准值；

（2）试验中：将传感器置于高低温湿热试验箱内，按表 3 规定的温湿度进行若干次温度－湿度循环，并在极端温度点进行功能监测。试验后在标准环境下恢复 1～2 小时；

（3）试验后：再次进行全面的电气与功能性能测试，与初始数据对比，判断是否合格。

采用的设备为高低温湿热试验箱，温度偏差≤1 ℃，湿度偏差≤2.5%RH。

2）电磁兼容试验。用于评估传感器在复杂电磁环境下的抗干扰能力以及自身对外界的电磁发射水平，主要包括静电放电、射频电磁场辐射、电快速瞬变脉冲群、浪涌等抗扰度项目，确保传感器在强电磁干扰源附近仍能保持信号的准确传输，且不对其他设备造成干扰。主要步骤如下。

（1）发射试验：将传感器置于电波暗室或屏蔽室内，通过天线和接收机测量其工作时产生的传导骚扰（CE）和辐射骚扰（RE），看是否超过标准限值线；

（2）抗扰度试验：在暗室或屏蔽室中，使用各类干扰源（如信号发生器、功率放大器、天线、耦合夹）对传感器施加标准规定的干扰（如射频场、静电放电、浪涌、脉冲群），监测其功能是否降级或中断。

电磁兼容试验依据 GB/T 17626－2016 开展射频电磁场辐射抗扰度、工频磁场抗扰度试验，委托具有资质的广电计量检测有限公司开展。

3）辐照试验。模拟核辐射环境（如 γ 射线、中子等）对传感器材料及电子元器件造成的电离损伤，考核传感器在累积剂量下的绝缘材料老化、半导体器件参数漂移、光电器件性能退化等现象，对于应用于核电站辐射环境中的传感器尤为关键。主要步骤如下。

（1）试验前：同温湿度试验；

（2）试验中：将传感器置于^{60}Co 辐照装置的均匀场中，以规定的剂量率持续照射，直至达到预设的总剂量。辐照结束后，短时静置恢复；

（3）试验后：在规定时间内完成所有性能测试，评估参数退化程度。

辐照采用工业用^{60}Co γ 射线辐照源。辐照前，需对试验位置的剂量场进行精确标定，不确定度通常优于 ±5％。

4）振动试验。通过将传感器固定在振动台上，施加正弦扫频振动或随机振动载荷，模拟其在运输、机械运行或发动机工作等场景中所受的持续振动应力，以检验传感器的机械结构牢固性、连接件可靠性以及输出信号的稳定性，防止因振动导致松动、断裂或信号失真。主要步骤如下。

（1）试验前：将传感器按实际安装方式刚性固定在振动台的台面上；

（2）试验中：在规定的频率范围内，以规定的加速度幅值和扫频速率进行扫频，参数设置见表 3，寻找共振点。在规定的频率谱下，进行规定时长的振动，考核结构的疲劳强度；

（3）试验后：检查结构完整性，并进行功能测试。

振动试验主要采用振动试验台，台面加速度控制精度通常优于 ±1dB。

5）冲击试验。采用冲击台对传感器施加半正弦波、梯形波等瞬时高加速度脉冲，模拟其在跌落、碰撞、爆炸等极端工况下所承受的剧烈机械冲击，主要考核传感器外壳、内部元件及焊点能否经受住瞬时大应力的作用而不发生损坏或功能失效。主要步骤如下。

（1）试验前：同振动试验；

（2）试验中：在冲击试验台上，对传感器施加规定波形、峰值加速度和脉冲宽度的标准冲击脉冲，每个轴向正反各进行 3 次，参数设置见表 3；

（3）试验后：试验后检查机械结构有无损坏、松动，并进行全面的电气性能与功能测试。

冲击试验主要采用跌落式冲击台或气动冲击台，实际冲击波形与标称波形的容差需满足峰值 ±10％、持续时间 ±10％。

6）热老化试验。将传感器置于高温环境中，通过加速材料氧化等物理化学变化，考核绝缘材料、封装胶体、弹性元件等非金属部件的耐热寿命，进而推算出传感器在正常使用温度下的预期服役时间。主要步骤如下。

（1）试验前：同温湿度试验；

（2）试验中：将传感器置于高温试验箱中，在远高于其额定工作温度但低于材料极限的温度下，不通电或部分通电，持续规定长时间；

（3）试验后：充分恢复后，进行全面性能测试，评估关键参数的漂移是否在允许范围内。

热老化试验采用的是高温烘箱或热老化试验箱，温度均匀性满足 ±2℃。

温湿度和热老化试验依据 GB/T2423－2008 和 GB/T2423－2016，委托具有资质的信息产业传感器产品质量监督检验中心开展。辐照试验依据 GB 18871－2002，利用^{60}Co 辐照装置开展辐照性能考核试验，委托具有资质的四川省农业科学院开展。振动老化试验依据 GB/T2423－2008 开展扫频耐久和定频耐久试验，冲击试验依据 GB/T2423.5－2019 验证传感器耐受跌落冲击的能力，两项试验委托具有资质的核级设备鉴定中心开展。高温耐辐射振动位移传感器试验样品各项环境试验结果如表 3 所示。

通过型式试验结果分析可得，振动响应的最大偏差满足各类型式试验大纲中规定的合格判据，表明振动位移传感器具有良好的环境适应性、电磁兼容性、耐辐射性能、抗冲击性能及抗振动性能。

3.2 三方检定

采用振动台测试系统对频率响应和幅值线性度进行测试，位移静校尺对测量范围进行测试、横向灵敏度测控系统测试横向灵敏度，通过环境试验箱结合位移静校尺测试温度性能，并在北京长城计量测试技术研究所开展了三方计量检定，统计结果见表 4 所示。

表 3　高温耐辐射振动位移传感器样品各项环境试验结果

试验项	试验内容	样品编号	振动响应最大偏差，%	合格判据	达到情况
温湿度试验	高温 125 ℃/16 h、低温试验－60 ℃/16 h、温变－60 ℃/125 ℃/3 h＋3 h＋两个循环、恒定湿热 40 ℃/93%RH/24 h	#1	1.6%	10%	达到
		#2	6.6%		达到
		#3	6.1%		达到
		#4	4.1%		达到
电磁兼容试验	辐射发射试验、射频电磁场辐射抗扰度试验、工频磁场抗扰度试验	#1	0.098 dB	1 dB	达到
		#2	0.106 dB		达到
辐照试验	累积剂量 4.608×10^6 rad	#1	1.8%	5%	达到
		#2	1.0%		达到
热老化试验	热老化温度 125 ℃、老化时间 325 h	#1	1.91%	10%	达到
		#2	3.57%		达到
冲击试验	3 个互相垂直的主轴方向各施加 3 次加速度 500 g、持续时间 1 ms、波形半正弦的冲击	#1	2.2%	5%	达到
		#2	2.6%		达到
振动试验	3 个轴向扫频耐久试验，包括信号 1 频率 5～8.5 Hz、位移幅值 3.5 mm、扫频循环数 2、扫频速率 2 倍频程/分钟；信号 2 频率 8.5～200 Hz、加速度幅值 10 m/s^2、扫频循环数 2、扫频速率 2 倍频程/分钟	#1	1.6%	5%	达到
		#2	1.5%		达到

表 4　高温耐辐射振动位移传感器三方检定结果

指标名称	测试结果	合格判据
测量范围	2.20 mm	不低于 2 mm
	2.25 mm	
	2.35 mm	
	2.30 mm	
频率响应	5～1 280 Hz(－5.04%)	10～1 000 Hz (±10%)
	5～1 280 Hz(－4.88%)	
	5～1 280 Hz(－4.76%)	
	5～1 280 Hz(－7.90%)	
幅值线性度	0.74%	±10%
	0.26%	
	0.27%	
	－0.53%	
横向灵敏度	0.04%	≤3%
	0.09%	
	0.10%	
	0.08%	
工作温度	－60 ℃～120 ℃(0.73%)	－40～120 ℃ (±10%)
	－60 ℃～120 ℃(1.35%)	
	－60 ℃～120 ℃(1.81%)	
	－60 ℃～120 ℃(1.60%)	

测试和三方检定结果表明，试制的高温耐辐射振动位移传感器样品的灵敏度、频响范围、幅值线性度、工作温度等性能指标满足合格判据。

将研制的高温耐辐射振动位移传感器与国外进口产品进行对比，结果如表 5 所示。通过对比可得，研制样品的测量范围、频率范围、幅值线性度和耐辐射剂量等性能指标基本不亚于国外同类产品的技术指标，基本可以实现进口产品的替代。

表 5　高温耐辐射振动位移传感器与国外同类型产品对比

指标名称	研制的高温耐辐射振动位移传感器	Emerson PR6423
测量范围	2.2 mm	2 mm
频率响应	5～1 280 Hz(－7.9%)	10～1000 Hz,±5%
幅值线性度	0.74%	±1%
横向灵敏度	0.1%	无指标
工作温度	－60 ℃～120 ℃(1.8%)	－35 ℃～180 ℃(±5%)
累计辐照剂量	4.4×10^6 rad	无指标

4　结束语

针对高温耐辐射振动位移传感器的高温、核辐射环境条件和技术指标要求开展研究，开展了振动位移传感器的材料筛选，敏感元件理论建模与性能仿真分析，结构与线路设计，研制的样品工作温度、耐 γ 辐照剂量、灵敏度、频率响应等技术指标满足核反应堆故障检测的需求，技术水平基本达到国外同类型产品技术水平，研制的传感器具备在核反应堆主泵在线监测、驱动机构风机振动在线监测系统中应用的能力。

参考文献：

[1] 刘才学，罗　能，何　攀，等. 反应堆关键设备健康监测与故障诊断技术研究进展 [J]. 核动力工程，2023，44(3)：8－20.

[2] 罗　能，刘才学，朱　军，等. 深度学习在设备状态评估中的研究现状及其在核领域的应用展望 [J]. 核动力工程，2025，46 (5)：224－233.

[3] 姚源涛，者　娜，雍　诺，等. 反应堆冷却剂系统异常运行事件智能诊断与监测方法研究 [J]. 核动力工程，2025，46 (2)：248－254.

[4] 邓 强，王 航，彭敏俊，等. 基于时间卷积胶囊网络的核动力装置事故诊断技术研究 [J]. 原子能科学技术，2023，57 (2)：302－312.

[5] 钱白云，吕朝阳，张维宁，等. 基于多传感器信息融合与混合感受野残差卷积神经网络的调相机转子故障诊断 [J]. 计算机测量与控制，2023，31 (9)：29－35.

[6] 李艳萍，包长春，闫栋梁，等. 热辐射型光纤高温传感器的研究 [J]. 计算机测量与控制，2007 (3)：416－417.

[7] 周成宁，何 攀，陈雪莹，等. 压电传感器关键材料高温辐照耦合场下性能仿真分析 [J]. 计算机测量与控制，2025，33 (3)：330－337.

[8] 李 芬，侯晓娟，张 欣，等. 基于 d_{33} 模式的压电式多维力传感器性能研究 [J]. 仪器仪表学报，2025，46 (5)：32－39.

[9] 郑建忠. 电涡流振动位移传感器自动检定技术方案研究 [J]. 中国仪器仪表，2022 (8)：79－83.

[10] 姜佩贺，郭 刚，吴中杰，等. 基于 IIS2DH 的振动信号处理与传感器设计 [J]. 仪表技术与传感器，2021 (8)：116－121.

[11] 姚 刚. 田湾核电站多机组群堆运行的安全管理策略与实践 [J]. 核动力工程，2024，45 (5)：206－212.

[12] 徐仁义，王 岩，崔怀明，等. 核电厂主泵智能监测与诊断系统的设计与开发 [J]. 核动力工程，2025，46 (s1)：158－165.

[13] HUANG X Y，XIA H，LIU Y K，et al. Fault diagnosis of nuclear power plant electric gate valves based on acoustic emission signals [J]. Annals of Nuclear Energy，2025，221：111519.

[14] 朱万旭，宋天明，刘丰荣，等. 压杆式光纤光栅位移传感器的研制 [J]. 传感器与微系统，2024，43 (4)：83－87.

[15] 郭 振，张文华，杨 辉，等. 基于光纤光栅的高灵敏度位移传感器研制 [J]. 光纤与电缆及其应用技术，2019，4：17－19.

[16] 刘国卫，王军涛，凌 骐，等. 一种新型光纤光栅位移传感器的研制 [J]. 工业仪表与自动化装置，2018，5：119－121.

[17] 陈芳芳. 基于大型人造板压机的新型位移传感器的研制 [J]. 电子制作，2017，15：55－56.

[18] 蒋晓彤，熊 伟，任海燕. 一种耐低温新型位移传感器设计 [J]. 宇航计测技术，2016，36 (2)：4－7.

[19] 李沛剑，蒋晓彤，郑 浩. 一种内置复位弹簧式位移传感器的研制 [J]. 宇航计测技术，2014，34 (2)：9－12.

[20] 蒋善超，王 静，隋青美，等. 微型 FBG 位移传感器研制及其在模型试验中的应用 [J]. 防灾减灾工程学报，2013，33 (3)：348－353.

[21] 尹成竹，柏受军，黄 平，等. 一种基于 AD598 的精密位移传感器的研制 [J]. 传感器与微系统，2007，2：68－70.

[22] 宋 辉，张 勇，郭 峰，等. 一种智能化的 γ 辐照装置故障诊断系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2026，34 (2)：10－15.

[23] 钟剑锋，钟舜聪，彭志科. 位感条纹三维振动测量原理及试验研究 [J]. 机械工程学报，2019，55 (14)：19－29.

(上接第 256 页)

[24] 汪瀚洋，卢厚清，陈 亮，等. 结合 B 样条优化的 UAV 多区域路径规划融合算法 [J]. 计算机测量与控制，2022，30 (9)：193－200.

[25] PING Y，TONG W，JING Z，et al. Research on complex task oriented planning [C] //2014 IEEE 7th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. IEEE，2014：346－349.

[26] DUBOIS D，FARGIER H，FORTEMPS P. Fuzzy scheduling：Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge [J]. European Journal of Operational Research，2003，147 (2)：231－252.

[27] 曹亚浩，吕云飞，陈源宝，等. 基于改进粒子群算法的 UUV 集群回收任务规划 [J]. 舰船科学技术，2025，47 (23)：92－97.

[28] 张锐佳，曾 勇，夏 琛. 载运无人机山地行动物资保障任务分配 [J]. 军事交通学报，2022，1 (12)：31－36.

[29] 孔祥凤，王海红，李盛威，等. 基于改进粒子群算法的海上遇险目标搜寻方法 [J]. 计算机测量与控制，2025，33 (3)：183－189.

[30] 戴红伟，胡青怡，孙 靖，等. 采用改进多目标粒子群算法的海岛综合能源系统优化调度 [J]. 西安交通大学学报，2026，60 (6)：188－200.

[31] SHI Y，EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C] //Evolutionary Computation Proceedings，1998，890：69－73.

[32] SHI Y，EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C] //Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)，IEEE，1999，3：1945－1950.

[33] KENNEDY J，EBERHART R. Particle swarm optimization [C] //Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. IEEE，1995. DOI：10.1109/ICNN.1995.488968.

[34] SUGANTHAN P N. Particle swarm optimiser with neighbourhood operator [C] //Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)，IEEE，1999 (3)：1958－1962.

[35] 张 军，詹志辉，胡晓敏，等. 计算智能 [M]. 北京：清华大学出版社，2009.