

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905231

核燃料组件自适应柔性检测装置及其误差补偿方法^{*}

李满宏¹, 周文林¹, 吴 玉², 陈嘉杰², 王经天¹

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300130; 2. 中广核研究院有限公司 深圳 518031)

摘 要:定期对核燃料组件变形状态及其表面氧化膜厚度开展高精度检测已成为保障核电站安全运营的重要举措。针对现有核燃料组件检测装置普遍存在的被动自适应性能欠佳、接触与测量柔性不足、检测精度与效率亟待提升等突出问题,通过设计引入基于变异虎克铰的自适应对中机构、融合接触力动态反馈的主/被动柔性检测单元和基于串并混联的高精度检测机构,创新研制出一款集变形与膜厚高精度检测功能于一体的核燃料组件被动自适应柔性检测装置。在此基础上,通过深入分析装置变形与膜厚检测机理,基于构建的串并混联闭环检测回路,融合制定的概率化传感误差协同补偿策略,提出了一种基于参数动态整合的测量误差补偿方法。样机测试实验结果表明研制装置能够自适应对中各向异性随机变形下的核燃料组件,满足检测过程中的柔性接触与柔性测量要求,配合提出的测量误差补偿方法,可实现核燃料组件变形及氧化膜厚度的高精度检测,有效提升了核燃料组件的检测精度、检测效率与检测安全。

关键词:核燃料组件;检测装置;补偿方法;变形检测;膜厚测量

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 490.25

Adaptive flexible detection device for nuclear fuel assembly and its error compensation method

Li Manhong¹, Zhou Wenlin¹, Wu Yu², Chen Jiajie², Wang Jingtian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518031, China)

Abstract: Regular high precision detection of the deformation and surface oxide film thickness of nuclear fuel assemblies has become an important measure to ensure safe operation of nuclear power plant (NPP). Aiming at the generally existed serious problems of poor passive adaption performance, insufficient contact and measurement flexibility, and urgent improvement of detection accuracy and efficiency of existing detection devices for nuclear fuel assembly, a passive adaptive flexible detection device for nuclear fuel assemblies that combines deformation and film thickness high precision detection functions together is developed through designing the adaptive aligning mechanism based on mutated hook joint, the active/passive flexible detection unit with dynamic feedback of contact force and the high precision detection mechanism based on serial-parallel hybrid connection. On this basis, a measurement error compensation method based on parameter dynamic integration is proposed through deeply analyzing the deformation and film thickness detection mechanism of the device, based on the constructed serial-parallel hybrid connection closed-loop detection loop and integrating the probabilistic sensing error cooperative compensation strategy. The prototype experiment results show the developed device can adaptively align the nuclear fuel assembly under anisotropic random deformation, meet the requirements of flexible contact and flexible measurement in detection process. Combining the proposed measurement error compensation method, the developed device can realize the high precision detection of deformation and oxide film thickness of nuclear fuel assembly, effectively enhances the detection accuracy, efficiency and safety of nuclear fuel assemblies.

Keywords: nuclear fuel assembly; detection device; compensation method; deformation inspection; film thickness measurement

0 引言

以清洁、高效为突出特征的核能已被公认为解决全球性能源短缺窘境的有效途径^[1-3]。近年来,在能源市场迫切需求与国家政策大力支持下,我国核电装机容量急剧攀升,现已达4 463.6万千瓦,跃居世界第3位。核燃料组件作为能量的直接来源,通常由数百根直径约8 mm、长达4 m的纤细核燃料棒集束而成,因工作于反应堆核心部位,长期承受高温、高压、高辐照、硼酸介质等多变环境因子耦合交互作用,以致其内部应力分布极度失衡、表面腐蚀作用异常强烈,自身局部随机变形与表面锆合金氧化膜破损现象时有发生^[4],直接威胁着核电站的安全运营。因此,定期开展核燃料组件变形与氧化膜厚度检测已成为保障核电站运营安全的重要举措,研究适用其高精度检测的装置与方法具有重要意义,始终是核电检修领域研究的重点与难点。

目前,国内外在核燃料组件变形及氧化膜厚度检测装置与方法研究方面已取得初步进展,普遍采用LVDT传感器通过逐点测量方式重构其三维形貌来提取变形情况^[5-8],利用电涡流传感器基于其提离效应以检测氧化膜厚度^[9-12]。如陈嘉杰等^[13]基于LVDT传感器创新研制出核燃料组件变形检测机器人,初步实现了核燃料组件基本变形指标的有效检测;ARJUN等^[14]在深度剖析涡流检测基本原理基础上,系统验证了其在金属表面薄膜厚度测量领域存在的独特优势;文献[15]基于涡流检测原理,面向复杂环境约束与严苛检测要求,创新研制出一套高精度检测装置,有效提升了核燃料组件表面氧化膜厚度检测精度。

然而,面临核燃料组件微米级膜厚检测精度、各向异性微小随机变形精确测量、高危核环境下安全检测约束等诸多难题,现有核燃料组件变形及氧化膜厚度检测装置与方法普遍存在如下突出问题:1)检测机构被动自适应性能欠佳,难以自适应对中随机变形下的核燃料组件,满足电涡流传感器与待检核燃料棒垂直对中检测要求,根源制约着氧化膜厚度检测精度的提升;2)装置接触柔性与测量柔性不足,国内外虽广泛采用接触测量方式,但少有检测装置设置高柔性部件,以致测量过程中装置与高危核燃料棒多为刚性接触,且难以实现测量接触力动态监测,存在严重的潜在安全隐患;3)检测精度与检测效率亟待提升,目前仍相对缺乏高效的误差补偿机制与方法,以致难以有效消除检测装置固有的系统误差以及外界环境因子诱发的随机误差,同时受限于传统功能分立检测装置与逐点测量检测模式,检测效率亦存在明显瓶颈。因此,如何面向高危核环境约束与严苛检测要求,创新研发自适应柔性检测装置,探索安全高效的检测方法,建立高精度误差动态补偿机制与方法,系统解决检测机

构、测量方法、误差补偿中存在的瓶颈问题,以多维度提升核燃料组件检测精度、效率与安全,已成为当前核电检修领域亟待解决的关键问题。

针对上述问题,本文通过设计引入基于变异虎克铰的自适应对中机构、融合接触力动态反馈的主/被动柔性检测单元和基于串并混联的高精度检测机构,创新设计出一款集变形与膜厚高精度检测功能于一体的核燃料组件被动自适应柔性检测装置。通过深入分析装置变形与膜厚检测机理,基于构建的串并混联闭环检测回路,融合制定的概率化传感误差协同补偿策略,提出了一种基于参数动态整合的测量误差补偿方法。针对装置检测性能及其误差补偿效果,利用搭建的模拟实验平台开展了系列测试验证实验。

1 被动自适应柔性检测装置

核燃料组件通常由数百根超高长径比、低强度纤细核燃料棒集束而成,因长期承受多变环境因子耦合交互作用,其表面将产生微米级锆合金氧化膜及局部随机变形,如何实现其高精度安全检测对检测装置提出了严苛要求。受限于电涡流传感器与待检核燃料棒垂直对中检测要求,检测装置需能够自适应对中各向异性随机变形下的核燃料组件;因核燃料组件固有的易变形与高危属性,接触测量中检测装置需具备柔性接触与柔性测量性能;鉴于微米级待检对象与检测精度约束,检测装置需配置低间隙、高刚度、超高精度检测机构。为此,本文在深度剖析现有检测装置检测机构与测量原理的基础上,通过逐项解决检测装置自适应对中、柔性测量、检测机构等系列关键问题,创新设计出一款集变形与膜厚高精度检测功能于一体的被动自适应柔性检测装置,旨在进一步提升核燃料组件检测精度、检测效率与检测安全。

本文设计的被动自适应柔性检测装置整体结构如图1所示,主要包括A-基于变异虎克铰的自适应对中部件、B-融合接触力动态反馈的主/被动柔性检测部件和C-基于串并混联的高精度检测机构。

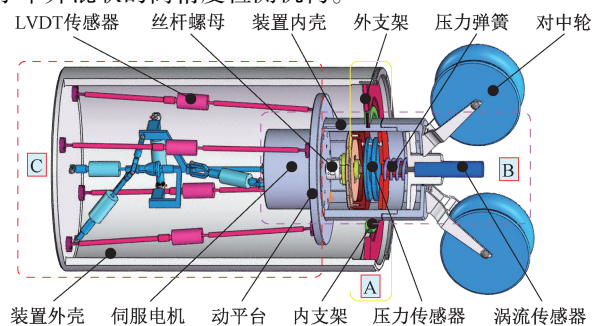


图1 装置整体结构

Fig.1 Overall structure of the device

基于变异虎克铰的自适应对中部件同轴布置于检测装置前端,利用内壳、外支架与内支架间的两两配合形成两正交转动副,构成变异虎克铰,同时辅以外壳与外支架间的同轴转动与轴向移动,可实现对中部件四自由度(1T3R)被动自适应调整,以满足电涡流传感器与变形核燃料棒垂直对中检测要求,其具体工作原理如图 2 所示。

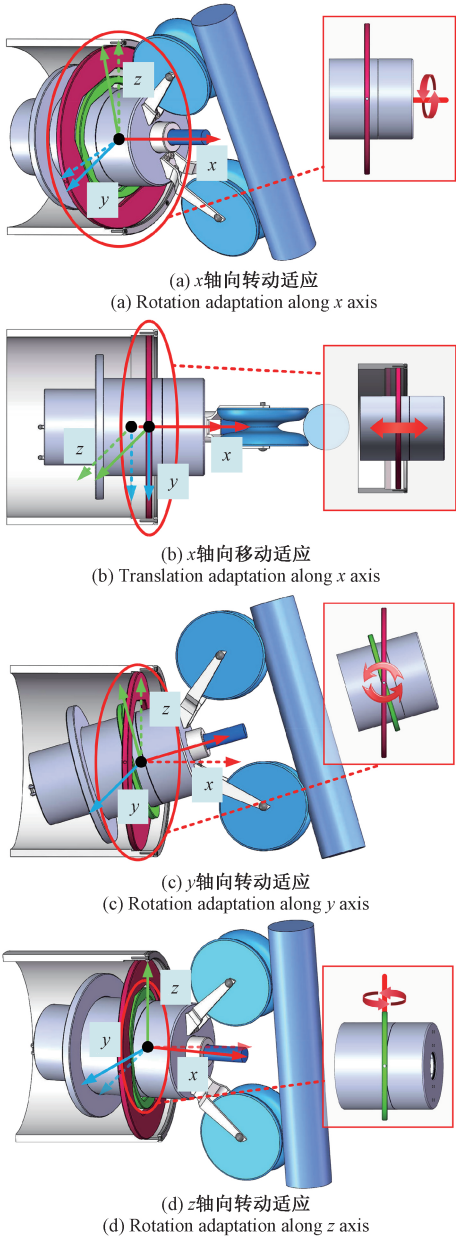


图 2 装置四自由度被动自适应原理

Fig.2 4-DOF passive adaption principle of the device

自适应对中部件前端对称布置两对中轮,检测过程中利用两对中轮自对正变曲率轮廓与核燃料棒圆弧面间的滑移配合,实现其与核燃料棒间的紧密贴合;配合外壳与外支架间的同轴转动与轴向移动,实现对中部件随变形核燃料棒的 x 轴方向转动与移动,如图 2(a)、(b) 所

示。利用内支架与外支架间的相对转动,辅以两对中轮基于双点定线的 z 轴方向定位作用,实现对中部件随变形核燃料棒的 y 轴方向转动,如图 2(c) 所示。同理,利用内支架与内壳间的相对转动,配合对中轮变曲率轮廓 y 轴方向的自对正性能,实现对中部件随变形核燃料棒的 z 轴方向转动,如图 2(d) 所示。

融合接触力动态反馈的主/被动柔性检测部件同轴布置于自适应对中部件内部,利用与其固联的 LVDT 传感器自身弹性阻尼特性,结合压力弹簧柔性特征,可实现检测部件柔性的被动调整;利用其内部设置的压力传感器,动态监测及伺服控制部件与核燃料棒间接触作用力,可实现部件柔性的主动控制;通过融合部件主被动柔性特性,以同步解决检测过程中接触柔性性与测量柔性性问题,具体检测过程如图 3 所示。检测装置在移载平台的进给作用下,利用其自适应对中部件实现与核燃料棒的接触对中,自适应对中部件进给过程中借助与其固联的检测机构内多个 LVDT 传感器弹性阻尼的耦合作用,可实现对中部件与核燃料棒间的柔性接触,此时涡流传感器处于待进给状态,如图 3(a) 所示。涡流传感器同轴嵌套安装于检测部件内部,且与内壳通过花键连接构成一移动副,能够利用丝杆螺母驱动机构实现其轴向进给,在进给过程中可利用设置于其与压力传感器间压力弹簧的柔性特征,实现涡流传感器与待检核燃料棒间的柔性接触,如图 3(b) 所示。为满足涡流传感器与待检对象间检测压力要求,待涡流传感器与核燃料棒柔性接触后,利用安装于其与丝杆螺母驱动机构间的压力传感器,动态监测涡流传感器与核燃料棒间的测量接触力,并通过实时反馈精确控制驱动机构微量进给,以实现检测部件与核燃料棒间的柔性测量,如图 3(c) 所示。

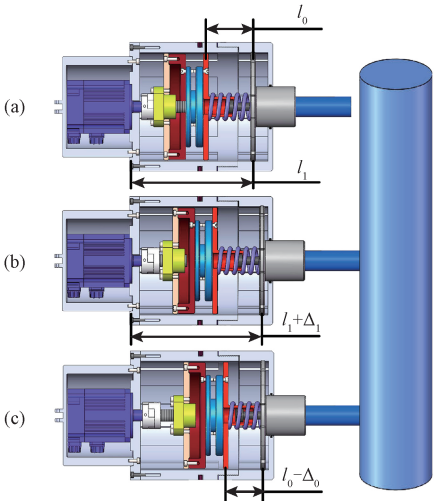


图 3 装置柔性接触与柔性测量原理

Fig.3 Flexible contact and flexible measurement principle of the device

区别于传统单一基于串联或并联构型的检测机构^[16-20],创新融合串联与并联检测机构固有优势,本文提出了基于串并混联的高精度检测机构。事实上,核燃料组件高精度检测的关键在于精确解算检测部件所处动平台(检测基准面)与移载平台所固联静平台(固定基准面)间的相对位姿。鉴于此,设计出的检测机构如图4所示。检测机构动平台与静平台间设置一四自由度串联检测机构,提出采用融合异型杆件与LVDT滑移副的三角构型方案,基于运动解耦分析,优化机构构型参数,以便利用4路LVDT传感信息程式化高效解算检测基准面与固定基准面间的相对位姿。针对单一串联检测机构测量误差难以校正问题,提出在动静平台之间均匀设置4条融合LVDT滑移副的支链构型方式,构成一典型4-SPS并联检测机构,以在提升装置检测机构整体刚度等机械性能的同时利用其支链LVDT传感信息精确校正补偿串联检测机构测量误差。通过借鉴串基于串并混联的检测机构将构成一闭环检测回路,以有效提升核燃料组件检测精度。

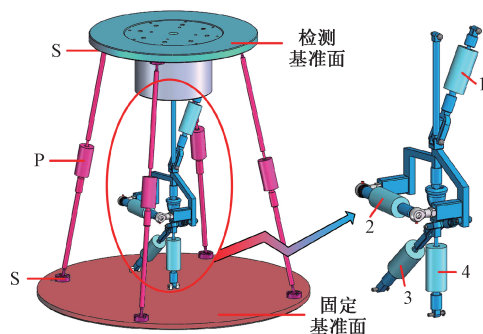


图4 装置串并混联检测机构

Fig.4 Serial-parallel hybrid connection detection mechanism of the device

综上所述,自适应柔性检测装置利用基于变异虎克铰的四自由度被动自适应对中部件,可实现其与各向异性随机变形下核燃料组件的自适应对中;通过设置融合接触力动态反馈的主/被动柔性检测部件,能够有效解决高危核燃料组件检测过程中的柔性接触与柔性测量问题;创新引入基于串并混联的高精度检测机构,可大幅提升核燃料组件变形及氧化膜厚度检测精度;通过系统提升检测精度、检测效率及检测安全等关键性能指标,能够有效满足复杂核环境约束下核燃料组件检测严苛要求。

2 串并混联检测机构测量原理

核燃料组件高精度检测的关键在于精确获取其表面待检测点在移载平台固联坐标空间内的位置状态,而其

核心则在于精确解算检测基准面与固定基准面间的相对位姿。然而,受限于检测机构固有的机械间隙、微量形变以及传感误差等多重因素制约,传统基于单一串联或并联构型的检测机构及其测量原理难以有效提升其检测精度。为此,本文创新融合串联与并联检测机构固有优势,提出了基于串并混联的高精度检测机构,旨在利用串联机构程式化高效解算检测基准面与固定基准面间相对位姿,利用并联机构提升检测机构整体机械性能的同时精确校正补偿串联机构测量误差,通过构建串并混联闭环检测回路,应用反馈修正测量原理,以有效提升核燃料组件变形及氧化膜检测精度。

基于串并混联检测机构实现核燃料组件的高精度检测须重点解决机构正解与逆解两大关键问题。所谓正解即已知串联机构各杆件长度,通过高效求解检测基准面与固定基准面间相对位姿,进而精确获取待检测点在移载平台固联坐标空间内的位置状态;而逆解则为已知检测基准面相对于固定基准面的位置姿态,精确解算并联机构各支链理论杆长,以用于与实测杆长对比,校正补偿串联机构测量误差。

针对检测机构正解,可借助便于解算的串联机构求解,为便于阐述其求解过程,构建了如图5所示的运动学坐标系,其中 ΣO_c 为设置于固定基准面中心的参考坐标系, ΣO_d 为固联于检测基准面中心的检测坐标系,串联机构各杆件长度及其间夹角如图5所示。

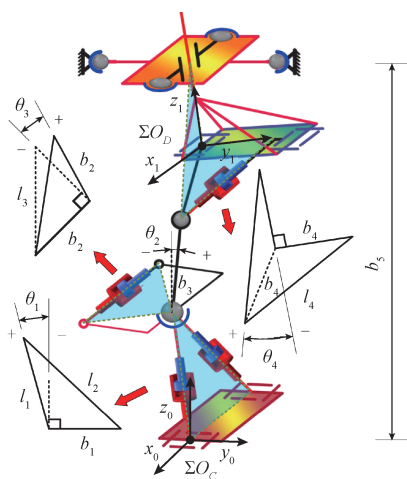


图5 串联机构运动学坐标系

Fig.5 Kinematic coordinate system of serial mechanism

鉴于检测基准面位姿直接取决于各LVDT所处杆件长度,基于各杆件间存在的三角约束关系,可获取LVDT杆件长度(l_1, l_2, l_3, l_4)与串联机构等效转角($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$)间的变换关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos(l_2^2 - l_1^2 - b_1^2/2l_1b_1) - \pi/2 \\ \theta_2 = \arcsin\sqrt{l_1^2 \sin^2\theta_1/l_1^2 + b_5^2 - 2l_1b_5\cos\theta_1} \\ \theta_3 = \arccos(l_3^2/2b_2^2 - 1) - \pi/2 \\ \theta_4 = \arcsin(b_4\sin(\tau)/\sqrt{b_5^2 - l_1^2 - 2b_5l_1\cos\theta_1} - b_3) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\tau = \pi/2 - \theta_4 + \arccos(l_4^2/2b_4^2 - 1)$ 。

定义 α, β, γ 分别为检测基准面相对于固定基准面的内旋泰特 - 布莱恩角, P_x, P_y, P_z 分别为其中心在参考坐标系内的相应坐标分量, 则检测基准面相对于固定基准面间的位姿可用位姿向量 $T(\alpha\beta\gamma P_x P_y P_z)$ 描述。基于经典的串联机构正解求取方法, 利用固有的杆长参数及等效转角, 可便捷求解出如式 (2) 所示的位姿向量。

$$T = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_2 \\ b_3\cos\theta_2 + b_4\cos\tau + l_1\cos\theta_1 \\ l_1\sin\theta_1 - b_3\cos\theta_3\sin\theta_3 - b_4\sin\theta_3\sin\tau \\ b_4\cos\theta_3\sin\tau - b_3\sin^2\theta_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于自适应对中部件固联于检测基准平面, 且其结构参数为一定值, 因此装置测量接触点位置相对于检测基准面将呈现确定关系, 即其在检测坐标系下的坐标应为一已知量。待利用 LVDT 杆件长度求取出检测基准面位姿向量后, 基于测量接触点的空间变换关系 M , 即可获取其在参考坐标空间内的精确坐标, 以程式化高效解算出机构正解。

针对检测机构逆解, 可利用易于解算的并联机构求取, 其具体结构参数如图 6 所示。根据典型的 4-SPS 并联机构解算方法, 基于机构固有参数, 利用检测基准面相对于固定基准面的位姿向量 T , 可便捷解算出如式 (3) 所示的各支链理论杆长 (L_1, L_2, L_3, L_4), 以完成机构逆解的求解。

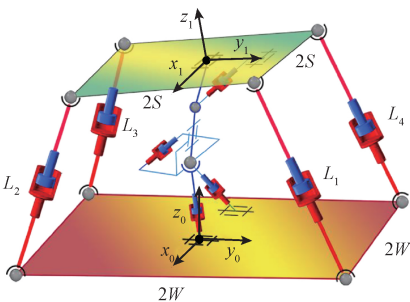


图 6 并联机构结构参数

Fig.6 Structural parameters of parallel mechanism

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{G_1^2 + G_3^2 + G_5^2} \\ L_2 = \sqrt{G_2^2 + G_4^2 + G_6^2} \\ L_3 = \sqrt{G_1^2 + G_4^2 + G_5^2} \\ L_4 = \sqrt{G_2^2 + G_3^2 + G_6^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} G_1 = P_x + \sin\beta - \cos\beta\sin\gamma \\ G_2 = P_x + \sin\beta + \cos\beta\sin\gamma \\ G_3 = P_y + W(\cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha(\sin\beta\sin\gamma - \cos\beta)) + S \\ G_4 = P_y + W(\cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha(\sin\beta\sin\gamma + \cos\beta)) - S \\ G_5 = P_z + W(\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha(\sin\beta\sin\gamma + \cos\beta)) - S \\ G_6 = P_z + W(\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha(\sin\beta\sin\gamma - \cos\beta)) + S \end{cases}$$

至此, 充分利用串联机构正解与并联机构逆解易于解算特性, 通过构建混联机构内多元耦合传感信息与待检对象位姿间的映射关系, 有效解决了串并混联检测机构测量原理核心问题。基于串联机构正解可利用 LVDT 传感信息程式化高效解算检测基准面与固定基准面间相对位姿及测量接触点精确坐标, 利用并联机构逆解可准确获取各支链理论杆长以用于串联机构测量误差的校正补偿, 通过构建串并混联闭环检测回路, 从测量原理层面有效保障了核燃料组件检测精度的提升。

3 基于参数动态整合的误差补偿方法

核燃料组件表面氧化膜厚度及其自身局部随机变形仅数微米。受限于微米级待检对象与检测精度要求, 检测装置存在的微小测量误差亦将严重影响其检测结果。因此, 如何探索有效的高精度误差补偿机制与方法对提升核燃料组件检测精度至关重要。

综合分析检测装置固有的机械间隙、微量形变以及传感误差等诸多误差影响因素, 多变环境因子耦合作用下 LVDT 传感器产生的随机误差系造成装置检测误差的主导因素。鉴于传统基于单一串联或并联构型的检测机构及其测量原理难以有效校正补偿 LVDT 传感误差, 以致严重制约着装置检测精度的提升, 为此本文创新提出基于串并混联的高精度检测机构, 旨在通过构建串并混联闭环检测回路, 以精确校正补偿检测装置固有的系统误差以及外界环境因子诱发的随机误差, 其具体补偿原理如图 7 所示。

由于检测装置存在的各类误差终将反映于检测基准面与固定基准面间的相对位姿, 因此对检测装置测量误差进行高精度补偿的关键在于如何有效校正检测基准面位置姿态。鉴于 LVDT 传感误差同步存在于串、并联检测机构, 为此可基于机构正、逆解程式化解算出含有串联机构 LVDT 传感误差的并联机构各支链理论杆长, 通过

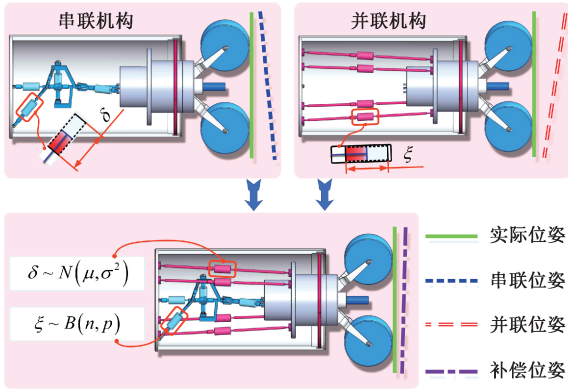


图7 检测机构误差补偿原理

Fig.7 Error compensation principle of detection mechanism

与含有并联机构 LVDT 传感误差的各支链实测杆长对比分析,协同补偿串、并联机构内各 LVDT 传感误差,以使理论杆长与实测杆长逐次逼近,通过参数动态整合,精确校正检测基准面位置姿态,从而有效提升装置检测精度。

如前所述,用于通过对比分析以校正补偿装置测量误差的并联机构各支链理论杆长与实测杆长可分别利用机构正逆解和基于 LVDT 传感信息换算获取,然而受限于串并混联机构中各 LVDT 传感误差的随机特征以及正逆解解算过程中的截断误差影响,难以通过协同调整各 LVDT 误差补偿量以确保二者杆长参数完全一致。为此,构建了如式(4)所示的误差评价函数,旨在基于并联机构各支链理论杆长与实测杆长间的差值,利用误差评价指标 K 量化表征各组 LVDT 误差补偿量对检测基准面位姿的校正效果。

$$K = \sum_{i=1}^4 \omega_i |L_i^* - L_i^{\#}| (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中: L_i^* 为并联机构各支链理论杆长; $L_i^{\#}$ 为其实测杆长; ω_i 为因各支链承受差异化载荷而附加的权重。

鉴于串并混联机构各杆长间存在极强的耦合约束,如何构建各 LVDT 传感误差协同补偿机制,以确保误差评价指标 K 快速有序收敛,是实现装置测量误差高精度补偿须解决的又一关键问题。经模拟工况下装置各 LVDT 传感器大量误差标定数据统计分析可知,串联机构内各 LVDT 传感器可能得益于近乎各向同性的受力状态其传感误差 δ 普遍服从正态分布,而并联机构内各 LVDT 传感器或因各支链承受差异化载荷其传感误差 ξ 通常服从二项分布。为此,基于各 LVDT 传感误差分布特性,结合其标定实验统计数据,制定了基于方差离散微量补偿以逐次趋近期望的 LVDT 传感误差动态补偿策略,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \delta_i^{(n+1)} := \delta_i^{(n)} + \sigma(\delta_i)(E(\delta_i) - \delta_i^{(n)})/E(\delta_i) \\ \xi_i^{(n+1)} := \xi_i^{(n)} + \sigma(\xi_i)(E(\xi_i) - \xi_i^{(n)})/E(\xi_i) \end{cases} \quad (5)$$

式中: ξ_i 和 δ_i 分别为串联机构和并联机构内各 LVDT 传感误差统计变量; $\delta_i^{(0)}$ 和 $\xi_i^{(0)}$ 分别为串联机构和并联机构内各 LVDT 初始传感误差。

由于检测机构内各 LVDT 传感误差采用概率化补偿模式,以致其测量误差补偿将呈现一动态迭代过程,同时可能存在补偿精度波动收敛现象。为此,基于误差评价指标 K , 综合补偿精度与效率,提出了如式(6)所示的迭代终止条件,以期尽可能快速合理的有效达到理想的误差补偿精度。

$$\Delta = \sum_{j=1}^m K_j/m - \min\{K_j\} / \sum_{j=1}^m K_j/m \leq \eta \quad (6)$$

式中: K_j 为第 j 次协同补偿各 LVDT 传感误差所对应的误差评价指标; m 为迭代补偿次数; η 为预期的误差补偿精度。

基于上述分析,本文提出了基于 LVDT 传感误差协同补偿的测量误差动态补偿方法,其主要流程如图(8)所示,具体如下。

1) 基于检测机构正解,利用串联机构实测杆长程式化解算出检测基准面位置姿态,而后基于逆解获取该位姿所对应的并联机构各支链理论杆长,此时理论杆长将含有串联机构各 LVDT 传感误差。

2) 获取含有并联机构 LVDT 传感误差的各支链实测杆长,基于误差评价函数,利用并联机构各支链理论杆长与实测杆长,计算误差评价指标 K 。

3) 判断是否满足迭代终止条件,如满足则利用最小 K 值所对应的各 LVDT 传感误差补偿量计算出校正后的检测基准面位姿 T^* , 否则基于制定的 LVDT 传感误差动态补偿策略协同调整各 LVDT 传感误差补偿量,利用补偿后的串、并联机构实测杆长重复上述计算过程,直至满足迭代终止条件。

4) 基于待检测点位置状态与检测基准面间固有映射关系 M , 利用校正后的检测基准面位姿,精确获取待检测点在移载平台固联坐标空间内的位置状态。

基于参数动态整合的测量误差补偿方法其核心在于利用串并混联机构杆长间固有的耦合约束关系,通过概率化协同补偿各 LVDT 传感误差,以动态修正杆长参数,基于并联机构各支链理论杆长与实测杆长的迭代校正,动态整合闭环检测回路补偿参数,以有效抑制传感误差对检测基准面位姿的影响,进而通过精确校正补偿检测基准面位姿以有效提升装置检测精度。鉴于检测装置存在的各类误差终将反映于检测基准面与固定基准面间的相对位姿,同时各 LVDT 传感误差补偿量中亦含有机件间隙、微量形变等误差补偿成分,因此上述方法也可在一定程度上实现对装置测量误差的综合补偿。

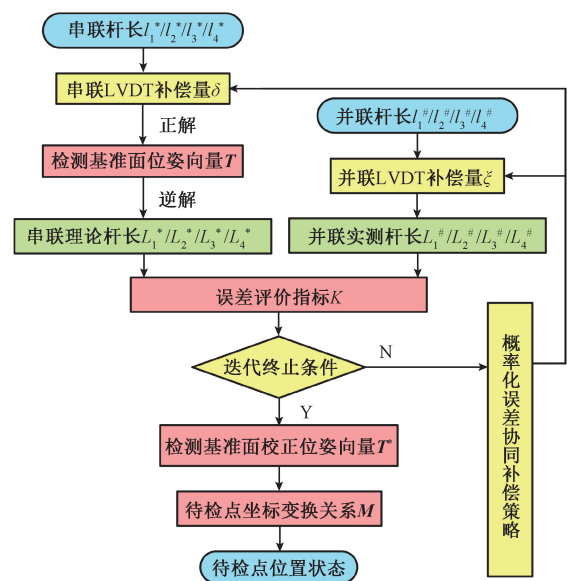


图 8 误差动态补偿方法流程
Fig.8 Dynamic error compensation method flow

4 检测装置测试实验

面向核燃料组件变形及氧化膜高精度检测需求,创新研制出的自适应柔性检测装置如图 9 所示,其主要技术参数如表 1 所示。针对高危核环境下难以有效开展装置现场测试问题,搭建了图 9 所示的模拟测试平台,利用高精度滑台替代装置移载平台,采用微量变形的铬镀层金属棒等效待检核燃料棒,通过模拟装置变形及氧化膜现场检测过程,以系统验证装置主要性能及其误差补偿方法。

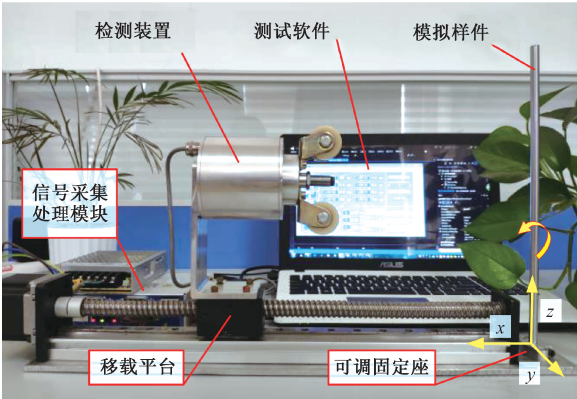


图 9 装置试验平台
Fig.9 Experiment platform of the device

1) 氧化膜检测测试实验

如前所述,从检测精度和检测安全角度出发,核燃料组件氧化膜检测过程中需装置具备优异的柔性测量与自适应对中性能。为此,利用模拟测试平台依次开展了氧

化膜单点柔性测量实验和多点自适应对中测试实验,以验证装置氧化膜检测性能。

表 1 装置主要技术参数	
Table 1 Main technical parameters of the device	
装置参数	数值
外形尺寸/mm	130×80×105
重量/kg	0.85
变形检测精度/μm	±15
膜厚检测精度/μm	±2
装置密封性能/Bar	5
耐辐照性能	≤10 ⁴ rad/h, 累计剂量<10 ⁶ rad

氧化膜单点柔性测量过程中装置各向受力状态如图 10 所示,其中 F_x 、 F_y 、 F_z 分别为相应轴向装置承受的接触作用力, F 为三者合力,利用 LVDT 固有弹性阻尼参数通过机构力学解算获取, $F^{\#}$ 为涡流传感器承受的测量接触力,由检测部件内压力传感器实测而得。由图 10 可知,装置自适应对中阶段,其承受的各向接触作用力由接触瞬间的初始值零逐渐波动上升,直至完成对中时趋于一定值;而测量接触力则在装置对中后缓慢提升,直至相对稳定在涡流传感器检测所需压力,与此同时受其扰动作用,装置各向接触作用力均呈现一定的下滑收敛趋势;整个测量过程中装置接触作用力最大合力为 11.88 N,测量接触力最大值为 2.52 N。实验结果表明装置通过引入融合接触力动态反馈的主/被动柔性检测部件,配合各 LVDT 固有弹性阻尼的耦合作用,可确保其检测过程中接触作用力和测量接触力均处于合理区间且稳定可控,能够满足核燃料组件氧化膜检测的柔性接触与柔性测量要求。

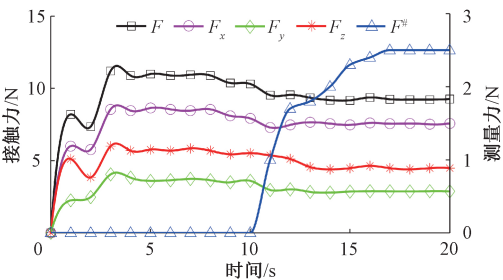


图 10 装置检测过程受力状态
Fig.10 Force state of the device in detection process

核燃料组件氧化膜高精度检测的关键在于装置能够自适应对中随机变形下的核燃料棒,为验证装置自适应对中性能,分别固定和解绑装置自适应对中部件,开展了氧化膜多点测量对比实验。如图 11(a) 所示为自适应对中部件固定,即限制其自适应对中性能前提下,采用轴向等距分层方式逐点测得的标定样件氧化膜厚度分布情况。如图 11(b) 所示为自适应对中部件解绑,即具备四自由度被

动自适应对中性能状态下,采用相同测量方法测得的样件同一区间的氧化膜厚度分布数据。对比分析两次实验结果可知,装置引入自适应对中部件调整功能后,其氧化膜厚度测量值始终位于标定值在叠加准许误差后所形成的测量许用区间之内,且最大测量误差仅 $1.9\text{ }\mu\text{m}$,大幅优于规定的 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 准许误差。实验结果表明装置通过设置基于变异虎克铰的自适应对中部件能够有效提升氧化膜厚度检测精度,间接证明其通过四自由度被动自适应调整可大幅改善与随机变形下核燃料组件的对中效果。

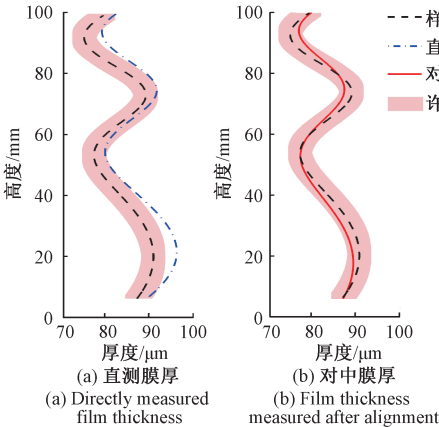


图 11 膜厚多点测量结果对比

Fig.11 Comparison of multi-point film thickness measurement results

2) 变形检测测试实验

核燃料组件变形检测的关键在于精确获取其表面待检测点相对于检测装置的位置状态,而后利用轴向等距分层测量数据拟合出两正交轴线截面内待检核燃料棒表面轮廓,进而采用特定算法重构其三维形貌以评估变形情况。为验证装置变形检测及其误差补偿方法性能,利用模拟实验平台,依次开展了装置单点变形检测、多点轮廓检测以及三维形貌重构实验。

待装置串并混联检测机构结构参数确定后,误差补偿方法将是影响其变形检测精度的关键因素。为验证装置变形检测及其误差补偿方法的有效性,设计开展了模拟样件单点变形检测实验,具体结果如图 12 所示。分析图 12 可知,基于检测机构正解,直接利用装置串联机构各 LVDT 实测值解算出的待检测点坐标与样件标定坐标各轴向误差 E_x 、 E_y 、 E_z 分别为 7.1 、 9.7 、 $-8.1\text{ }\mu\text{m}$,综合误差 $E=14.3\text{ }\mu\text{m}$;受限于概率化 LVDT 传感误差协同补偿策略,迭代补偿过程中不同组 LVDT 传感误差补偿量对应的误差评价指标 K 呈现波动下降收敛趋势,仅经 20 次动态调整后即满足迭代终止条件,此时依据最小 K 值所对应的误差补偿量计算出的待检测点坐标的轴向误差 E_x 、 E_y 、 E_z 分别减小至 2.5 、 3.3 、 $-4.6\text{ }\mu\text{m}$,综合误差 $E=6.3\text{ }\mu\text{m}$,大幅优于补偿前检测误差。实验结果表明装置

通过构建串并混联闭环检测回路,采用基于参数动态整合的误差补偿方法,能够精确获取待检测点相对于检测装置的位置状态,实现样件单点变形的有效检测。

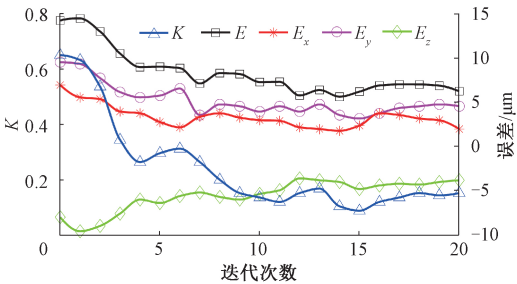


图 12 单点变形检测数据

Fig.12 Detection data of single point deformation

核燃料棒轴线截面内的表面轮廓曲线是其变形特征的微观体现,有效获取各截面轮廓曲线是量化分析变形状态的根本前提。为从轮廓检测层面测试评估装置变形检测精度及其误差补偿效果,设计开展了多点轮廓检测对比实验。实验中选取的样件检测区域长度为 100 mm ,依据轴向等距分层测量方法,以 5 mm 为轴向间隔从上至下依次对样件轴线截面 xoz 内的表面轮廓曲线展开多点检测。基于检测点解算坐标数据,通过曲线拟合获取的截面内表面轮廓曲线如图 13 所示,其中 C^* 为利用 LVDT 实测值通过解算直接拟合出的直测轮廓曲线, $C^\#$ 为基于误差补偿坐标数据拟合出的补偿轮廓曲线,而 C 则为依据样件标定坐标获取的标定轮廓曲线。直测轮廓曲线与补偿轮廓曲线各轴向误差 E_x 、 E_y 、 E_z 以及综合误差 E 对比情况如图 14 所示。

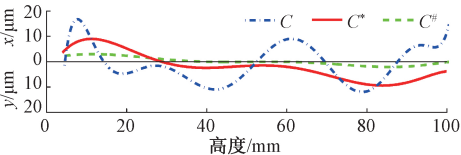


图 13 表面轮廓曲线对比

Fig.13 Comparison of surface contour curves

综合图 13 和 14 可知,装置直测轮廓曲线与标定轮廓曲线基本一致,受 LVDT 传感误差等因素影响其误差主要分布于 x 轴向,最大综合误差为 $14.6\text{ }\mu\text{m}$;采用基于参数动态整合的误差补偿方法,经 LVDT 传感误差概率化协同补偿后,拟合出的轮廓曲线各轴向误差均有所降低,其中 x 轴向补偿效果尤为显著,最大综合误差也仅为 $9.4\text{ }\mu\text{m}$ 。实验结果表明装置本身即具备一定的截面轮廓检测精度,辅以基于参数动态整合的误差补偿方法,能够精确检测核燃料棒轴向截面变形轮廓。

重构核燃料组件三维形貌是直观评价其变形状态的

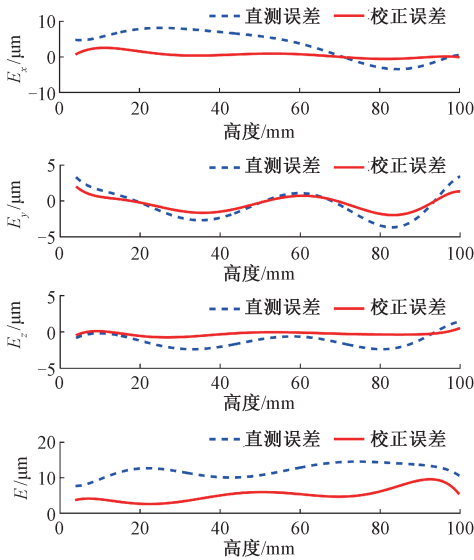


图 14 表面轮廓检测误差对比

Fig.14 Comparison of surface contour detection errors

重要依据,亦是衡量装置变形检测综合性能的有效途径。基于多点轮廓检测实验,通过获取样件同一区间内两正交轴线截面表面轮廓,设计开展了样件三维形貌重构对比实验,各重构局部形貌如图 15 所示,其中图 15(a)为利用两正交截面内装置直测轮廓曲线重构出的样件直测形貌,图 15(b)为基于补偿轮廓曲线解算获取的补偿形貌,而图 15(c)则为依据样件标定数据构建出的标定形貌。对比实验结果可知,补偿形貌更接近于样件实际变形情况,其柱面区域内最大变形检测误差仅为 $12.4\ \mu\text{m}$,远优于直测形貌的 $17.7\ \mu\text{m}$ 。实验结果表明配合基于参数动态整合的误差补偿方法,研制装置具备优异的变形检测综合性能,能够满足各向异性随机变形下核燃料组件高精度变形检测需求。

5 结 论

面向高危复杂核环境约束下核燃料组件高精度检测需求,本文创新研制出一款集变形与膜厚高精度检测功能于一体的核燃料组件被动自适应柔性检测装置,并提出一种基于参数动态整合的测量误差补偿方法。通过理论分析与实验验证可得出如下结论。

1) 装置通过设计引入基于变异虎克铰的自适应对中机构、融合接触力动态反馈的主/被动柔性检测单元和基于串并混联的高精度检测机构,针对性解决现有装置普遍存在的突出问题,可有效提升核燃料组件的检测精度、检测效率与检测安全。

2) 核燃料组件高精度检测的关键在于精确获取检测基准面与固定基准面间的相对位姿。基于构建的串并混联闭环检测回路,通过串联机构正解的程式化解算与并联机构逆解的校正补偿,可精确解算检测基准面位置姿态。

3) 基于参数动态整合的误差补偿方法其核心在于充分利用串并混联机构杆长间固有的耦合约束关系,通过概率化协同补偿各杆长实测误差,迭代校正检测基准面与固定基准面间的相对位姿,以综合补偿因装置存在机械间隙、微量形变、传感误差等而造成的各类测量误差。

4) 装置样机测试实验结果表明,研制装置能够自适应对中各向异性随机变形下的核燃料组件,满足检测过程中的柔性接触与柔性测量要求,配合提出的测量误差补偿方法,可实现核燃料组件变形及氧化膜厚度的高精度检测。

参考文献

- [1] OMRI A, MABROUK N B, SASSI-TMAR A. Modeling the causal linkages between nuclear energy, renewable energy and economic growth in developed and developing countries [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42:1012-1022.
- [2] JENKINS J, ZHOU Z. The benefits of nuclear flexibility in power system operations with renewable energy [J]. Applied Energy, 2018, 222: 872-884.
- [3] FORSBERG. Commentary: nuclear energy for economic variable electricity: replacing the role of fossil fuels [J]. Nuclear Technology, 2019, 205(3): 3-4.
- [4] HALABUK D. Thermomechanical assessment of fuel rod cladding made of zirconium alloy and silicon carbide

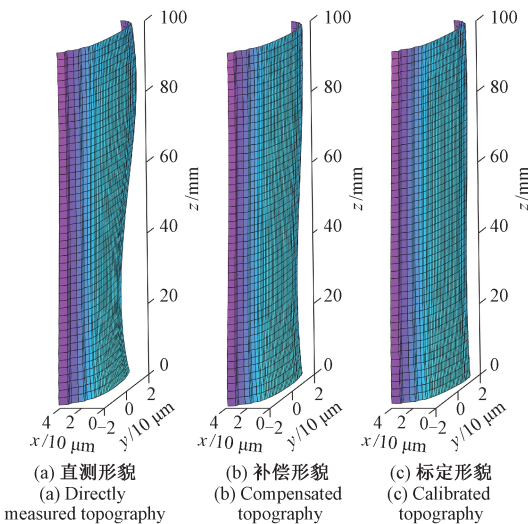


图 15 三维形貌重构对比

Fig.15 Comparison of reconstructed 3-D topographies

- material during reactivity-initiated accident [J]. Nuclear Science & Engineering the Journal of the American Nuclear Society, 2018, 189(1): 1-12.
- [5] GALLAIS L, BURLA R, MARTIN F, et al. An experimental platform for real-time measurement of the deformation of nuclear fuel rod claddings submitted to thermal transients [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(1): 1-10.
- [6] WASEEM, ELAHI N, MURTAZA G, et al. Structural integrity assessment and stress measurement of CHASNUPP-1 fuel assembly [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014: 130-136.
- [7] 徐琳, 王恒, 黄祯, 等. 基于 COMSOL 有限元法的电涡流传感器仿真[J]. 机械工程学报, 2015, 33(12): 1097-1104.
- XU L, WANG H, HAUNG ZH, et al. Simulation of eddy current sensor based on COMSOL finite element method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 33(12): 1097-1104.
- [8] MONTGOMERY R, LIU W, ALANKAR A, et al. Use of multiscale zirconium alloy deformation models in nuclear fuel behavior analysis [J]. Journal of Computational Physics, 2017, 328(C): 278-300.
- [9] 张荣华, 叶松, 马明, 等. 电涡流相位梯度及其在导电材料缺陷识别中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 134-141.
- ZHANG R H, YE S, MA M, et al. Eddy current phase gradient and its application in identification of conductive material defects [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 134-141.
- [10] 梁远远, 杨生胜, 文轩, 等. 脉冲涡流无损检测中缺陷量化技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 70-78.
- LIANG Y Y, YANG SH SH, WEN X, et al. Research on the quantification of defect in the nondestructive testing of pulse eddy current [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 70-78.
- [11] LEE K, HAO B. Multi-parameter eddy-current sensor design for conductivity estimation and simultaneous distance and thickness measurements [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1647-1657.
- [12] 徐志远, 肖奇. 基于脉冲远场涡流的管道缺陷外检测与定量评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 80-87.
- XU ZH Y, XIAO Q. Outside inspection and quantitative evaluation of pipe defects based on pulsed remote field eddy currents [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(2): 80-87.
- [13] 陈嘉杰, 孙飞翔, 董超群, 等. 核燃料组件变形检测机器人研究[J]. 机器人技术与应用, 2018(6): 40-42.
- CHEN J J, SUN F X, DONG CH Q, et al. Research on nuclear fuel assembly deformation detection robot [J]. Robot Technique and Application, 2018(6): 40-42.
- [14] ARJUN V, SASI B, RAO B P C, et al. Optimization of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 226: 69-75.
- [15] YOSHIMURA W, TANAKA R, SASAVAMA T, et al. Detection of slit defects on backside of steel plate using low-frequency eddy-current testing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 6202505.
- [16] 高峰, 李艳, 黄玉美, 等. 3-RPS 并联机构运动学标定方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 568-574.
- GAO F, LI Y, HUANG Y M, et al. Study on kinematic calibration method of 3-RPS parallel mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 568-574.
- [17] WANG Y, PEI X. Fast forward kinematics algorithm for real-time and high-precision control of the 3-RPS parallel mechanism [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13(3): 368-375.
- [18] PINSKIER J, SHIRINZADEH B. Development of a 4-DOF haptic micromanipulator utilizing a hybrid parallel-serial flexure mechanism [J]. Mechatronics, 2018, 50: 55-68.
- [19] 沈惠平, 许可, 杨廷力, 等. 一种零耦合度且运动解耦的新型 3T1R 并联操作手 2-(RPa3R)3R 的设计及其运动学[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 53-64.
- SHEN H P, XU K, YANG T L, et al. New 3T1R

parallel manipulator 2-(RPa3R) 3R with zero coupling degree and partial decoupling: design and kinematics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 53-64.

- [20] PINSKIER J, SHIRINZADEH B, CLARK L, et al. Development of a 4-DOF haptic micromanipulator utilizing a hybrid parallel-serial flexure mechanism [J]. Mechatronics, 2018, 50: 55-68.

作者简介



李满宏, 分别在 2010 年和 2015 年于河北工业大学获得学士学位和博士学位, 现为河北工业大学讲师, 主要研究方向为核电检测机器人与六足机器人。
E-mail: lmh9181219@163.com

Li Manhong received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Hebei University of Technology in 2010 and 2015, respectively. Now, he is a lecturer in Hebei University of Technology. His main research interest includes nuclear power detection robots and hexapod robots.



吴玉(通信作者), 2006 年于上海交通大学获学士学位, 现为中广核研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为特种机器人技术。

E-mail: wuyu@cgnpc.com.cn

Wu Yu (corresponding author) received his B. Sc. degree from Shanghai Jiaotong University in 2006; now, he is a senior engineer in China Nuclear Power Technology Research Institute. His main research interest includes special robot technology.