

促进无损检测技术向智能化发展

——走进北京理工大学检测与控制研究所

Promoting Non-Destructive Testing Technology Intelligentization

[编者按] 高端装备是工业现代化的重要标志,是国家强盛的先决条件。北京理工大学检测与控制研究所针对我国高端装备构件材料新颖化、结构复杂化和尺度大型化等带来的构件材料性能分布检测不精、复杂结构内部微小缺陷检测不准和大尺度复材构件内部缺陷检测不清等重大装备工程迫切需要解决的关键核心技术问题,在国家重大科技专项、国家自然科学基金重点和国防基础科研等多个项目支持下,实现了从原理方法创新到多项国家重大工程的应用,使传统超声检测跃升为智能检测。其研究成果已成功用于长征5号运载火箭、高速飞行器、大尺度风洞、军用大飞机、航空发动机叶片、北京大兴机场等多个国家及国防重大装备和工程的科研生产,社会经济效益显著。

研究所概况

北京理工大学检测与控制研究所是北京理工大学一级国家重点学科(机械工程)和部级重点实验室(先进加工技术国防重点学科实验室)为依托,多年来一直从事无损检测和控制理论与技术的教学和科研工作。研究所主要面向国防科技工业和国民经济发展的前沿及生产需求,重点开展残余应力超声无损检测与调控技术、(单双)机械手超声检测技术、超声显微扫查检测技术、复杂回转类零件激光测量技术、材料弹性参数与涂层厚度测量技术等研究工作。

研究所现有教职工7人,其中博导教授1人、副教授5人、高级实验师1人,在读博士研究生12名,在读硕士研究生30多名。实验室面积400多 m^2 ,拥有残余应力超声检测与高能声束调控系统、高频超声显微

镜、(单双)机械手超声自动检测系统、螺栓紧固应力检测系统等多种检测条件,总价值约2000余万元。研究所承担和完成了国家自然科学基金重点项目、国家科技重大专项、国家国际合作专项、装备预先研究、国防基础科研、企业横向等多项科研项目,取得了多项科研成果。获得国防技术发明二等奖1项、国防科学技术三等奖1项、军队科技进步三等奖1项、省部级科学技术进步奖1项。获得国际授权发明专利3项、国家授权发明专利60多项、软件著作权2项。已立项国际标准1项、制定和颁布国家标准6项、企业标准3项、行业标准2项、已立项国家标准20项。正式出版3部学术专著,发表学术论文300余篇,其中SCI收录40余篇。

研究特色与创新成果

(1) 材料性能时频孪生检测理

论和技术。提出的三维残余应力临界折射纵波变频检测方法和超声体波检测方法,实现了构件内部切向应力梯度和法向应力的检测;微损伤非线性频域检测理论和技术,解决了构件材料内部微观织构和微损伤原位定量检测难题;材料性能检测仪器精度校准技术,解决了服役应力检测的现场校准问题。

(2) 微小缺陷高频超声层析理论和技术。提出的高频超声全时域波形分析方法,实现了复杂精密构件内部微小缺陷层析检测和三维可视;高频换能器噪声散射吸收与抑制方法,提高了微小缺陷检测精度和分辨能力;微缺陷量化超声检测校准技术解决了微缺陷超声层析与材料涂层粘接强度检测精度校准难题。

(3) 复杂构件的声束位姿扫查理论和技术。提出的多层介质超声偏转与衰减模型和声束偏转与探头

空间位姿同步控制方法,解决了大型复杂复材整体构件无损检测难题;多维超声检测校准技术,不仅解决了国内外大型复杂构件超声检测系统性能与检测精度现场校准难题,同时还创造性地解决了高速飞行器大型复杂复合材料整体构件和航空发动机整体叶片内部缺陷无损检测的技术难题。

技术成果转化与社会效益

研究所提出了多种超声无损检测方法、研制了多套无损检测装置,制定了多个技术规范和国家标准体系,满足了我国航空、航天、油气管道、轨道交通等国防和工业领域对复杂形廓、非接触、高精度、快速超声无损检测技术和设备的需求,填补了我国超声无损检测领域多项技术空白,并得到了广泛应用,取得了显著的军事与社会效益,彻底改变了我国自动超声无损检测技术和设备长期受制于人、技术落后的局面,对我国武器和工业装备的质量提升和安全服役起到了重要的促进作用。

(1) 保障了多个国家重大武器装备型号工程顺利进行。实现了对长征5号B运载火箭燃料舱体、大型风洞钢结构厚板、导弹铝合金壳体、军用大飞机大型钛合金框梁等构件的加工和焊接残余应力的现场原位定量无损检测。实现了高超音速飞行器多层粘接绝热复合材料整体结构、大尺度固体火箭发动机复合材料壳体及裙部粘接状态的超声透射无损检测,以及航空发动机叶片和风力发电叶片等叶身的全范围超声无损检测;解决了我国对复杂复合材料构件或复杂形廓构件缺陷漏检率高甚至无法检测的技术瓶颈问题,实现了传统超声检测向智能超声检测的跨越。

(2) 针对服役构件材料性能(残余应力、弹性模量和微损伤等)随外界载荷和环境而发生退化的特点,提



双机械手超声无损检测系统

出了超声波精准时域匹配方法以精确获得材料声速变化,实现了材料内部残余应力和弹性模量等性能分布及其变化的无损检测。提出了超声波频散识别方法以获取非线性超声特性,实现了材料性能内部微损伤分布及其变化的无损检测。通过对材料内部超声信号的时频信息分析孪生映射出构件内部材料性能分布及其变化。分别研制和提出了多台/套检测仪器系统及其校准方法,解决了机械构件内部残余应力、弹性模量和微损伤分布状态的量化无损检测问题。残余应力超声无损检测技术已成功应用于北京大兴机场C3反支撑柱和中俄友谊大桥黑河段桥墩与立柱之间钢结构的焊接服役应力的检测和质量评估,为重大工程和重大设备安全提供了技术保障。

(3) 针对高集成度电子封装内部微缺陷、层状结构与涂层粘接强度无损检测的迫切需求,建立了高频超声波频率衰减模型和显微检测理论,发明了高频超声换能器的设计与制备方法、数据深度可动态调整的全时域波形层析分析方法、数据层间的短时频谱与相位反转等对不同类型缺陷敏感的多种成像方法、高频超声显微检测仪器系统与校准方法,解决了大规模集成电路电子封装缺陷及层状粘接结构粘接强度的无损检测与评估问题。

(4) 针对新型武器装备大量采用的大型复杂形廓复合材料构件和金属构件内部缺陷难以准确无损检测的技术瓶颈,提出了声束在跨尺度介质中和界面上的线性和非线性传播模型,发明了针对各向异性质复杂型面构件内部缺陷超声扫查检测的声束位姿的空间控制方法和技术、多维柔性超声无损检测仪器系统和校准方法,解决了多个型号武器装备中复杂形廓复材和金属构件内部缺陷的超声透射和反射的高速高精度自动无损检测难题,奠定了我国自动超声无损检测与超声显微检测的工业技术基础,并引领了国际发展趋势。

国内外交流与合作

研究所注重国内外学术交流与合作,与国内外著名相关研究单位建立了广泛而长期的学术合作关系,先后与美国物理声学公司、中国航天五院、汕头超声仪器研究所等研究单位成立了无损检测技术联合实验室,与美国宾州州立大学和西北大学、英国纽卡斯尔大学、布里斯托大学和帝国理工大学、韩国国立釜山大学、日本东京工业大学和香川大学等建立了长期的国际合作与交流关系。研究所以为国家培养无损检测技术人才,促进无损检测技术进步为己任,愿与业界同仁开展各种交流与协作!

(采访 雷松)