

# 磁致伸缩导波技术在桥梁缆索 腐蚀检测的研究进展

邹易清<sup>1</sup> 武新军<sup>2</sup> 徐江<sup>2</sup> 龙跃<sup>1</sup>  
谢正元<sup>1</sup> 王叔叔<sup>1</sup> 植磊<sup>1</sup> 袁友<sup>1</sup>

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006 2 华中科技大学机械学院 武汉 430074)

**摘要:** 缆索体系作为现代土木建设广泛应用结构之一, 作为主要承载部件对整体结构的安全性和使用寿命至关重要。目前可用于缆索体系检测方法主要有视觉检测、索力测量法、声发射、射线、磁性、超声、磁致伸缩导波检测等; 本文对上述检测方法进行简要论述和对比的基础上, 指出磁致伸缩导波无损检测技术由于具有检测长度大, 覆盖结构区域广, 可检测远离检测仪器难以到达的区域, 无需开挖或拆除包覆层、防腐层等独特的优势, 逐渐成为应用广泛的缆索新型无损检测方法。本文对磁致伸缩导波检测原理、传感器、检测实验研究和仪器开发及其应用进行了总结回顾, 并对该技术现阶段研究难点和热点以及未来研究趋势进行了归纳总结。

**关键词:** 磁致伸缩导波检测 桥梁缆索 腐蚀 无损检测 研究进展

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.04.002

## 1 前言

缆索体系具有高强、质轻、防腐耐久性好以及操作简便等优点, 广泛应用于现代土木工程结构领域, 包括悬索桥主缆、吊索, 斜拉桥拉索, 拱桥吊杆和系杆, 大型场馆、展厅悬索及拉索等; 尤其是在桥梁结构领域。随着桥梁结构的不断发展, 国内外建设了越来越多的缆索体系桥梁, 如悬索桥、斜拉桥、吊杆或系杆拱桥<sup>[1]</sup>。缆索体系作为结构的主要承载部件, 对整体结构安全性和使用寿命至关重要; 一旦出现损伤, 将降低结构的使用性和耐久性, 并且可能造成桥梁结构发生灾难性的突破坏事故, 造成极为恶劣的社会影响和惨重的经济损失; 因此对缆索体系进行定期检测非常必要。

## 2 常用缆索检测方法

缆索体系常规检测方法主要有视觉检测、索力测量法等, 随着科学技术发展, 一大批无损检测技术应运而生, 包括声发射、射线、磁性、超声、超声导波等。

(1) 视觉检测法通过人工目视和机器视觉两种方式来观察拉索护套完好状态, 进而判断损伤状况。人工目视法是检测人员在地面搭载相关

设备爬升到拉索区域对缆索护套开裂或受损情况进行检测; 机器视觉法是检测人员在桥面或桥梁附近空地使用长焦距高分辨率望远镜对拉索护套进行检测<sup>[2]</sup>, 或者利用可沿拉索爬升的机器人搭载摄像头对拉索表面进行扫描检测<sup>[3]</sup>。视觉检测法的目的是通过检测及时发现和修复缆索护套的开裂和受损问题。视觉检测对缆索内部钢丝和锚固系统缺陷检测无能为力, 一般作为桥梁检测维护的常用手段和初步判断措施。

(2) 索力测量法是通过测量或监测缆索索力变化来反映缆索整体使用状态, 从而判断缆索体系是否完好; 索力测量方法包括液压表读数, 压力传感器法, 频率振动法, 磁通量法, 光纤光栅传感器法等。索力数据能够在一定程度上判断缆索是否完好, 但是无法判断缆索缺陷类型和缺陷位置等具体情况。

(3) 声发射技术利用材料在受力条件下产生缺陷时以弹性波形式释放出应变能的现象实现构件缺陷检测。国内外专家在实验室和在役桥梁上对缆索损伤及断丝情况进行了检测, 获得了良好的效果。声发射技术可以对缆索实现动态实时检测, 并且可以对损伤发生发展过程动态监测。

大范围应用到缆索检测,需要进一步研究传感器的固定安装、缆索钢丝之间的摩擦引起的声信号造成的信号信噪比低、长期监测过程中的能源供给、仅能给出相对检测结果等难题<sup>[4]</sup>。

(4) 射线检测法利用X、 $\gamma$ 等射线在穿透物体过程中,因材质不同而衰减不同的现象检测构件内部缺陷。射线检测法应用到缆索及其锚固区检测时遇到了检测效率低,图像解释困难,造价高,尤其是存在辐射污染等问题,未能大规模应用于缆索检测<sup>[5]</sup>。

(5) 磁性检测法主要包括漏磁检测法和磁通量检测法,当缆索存在断丝、腐蚀等局部缺陷时,会引起缆索内部磁场变化,通过检测相应的漏磁信号或磁通量信号,可判断出缆索缺陷的情况。磁性检测法是对钢丝束类产品进行无损检测最可靠、最成熟的方法之一,已在钢丝绳、钢缆等方面得到了广泛应用;缆索结构类似,同样可以采用该方法。为使传感器能够覆盖缆索各个部位,国内外开发出可携带传感器沿缆索自动爬升的机器人,极大丰富了磁性检测法的应用。不过磁性检测无法覆盖缆索锚固区域,对于缆索锚固区腐蚀情况无法进行检测<sup>[6]</sup>。

(6) 超声波检测法利用超声波在材料中传播遇到缺陷会发生反射的原理进行缆索断丝检测。其设备轻便,操作安全,无污染,能够检测缆索钢丝以及锚固区域。不足是被检测表面需要有一定的光洁度且用耦合剂充满探头和被检查表面之间的空隙;超声波随着传播距离的增加而衰减,远离超声波入射端部位检测相对困难。另外用反射法检测芯线腐蚀也比较困难。

(7) 超声导波检测技术由于其快速、高效、长距离的检测特点,非常适用于桥梁缆索、输油管道、交通轨道等体型较长构件的检测,倍受科研机构 and 工程检测人员的关注<sup>[7]</sup>。

超声导波的激励方式主要有:电磁超声、压电超声、激光超声以及磁致伸缩法。电磁超声激励频率较高,因此检测精度高,但衰减

大,传播距离较短;压电式超声导波属于接触式检测,对超声探头和被测构件表面的耦合性能有很高的要求,对检测具有包覆层或者表面较为粗糙的构件无能为力;激光超声成本昂贵,并且需将激光直接作用到被测构件表面,同样也不适用于带有包覆层构件的检测;磁致伸缩法能够在传感器提高较大的条件下对构件进行检测,且激励频率低于电磁超声,运用该方法所激励出的导波能量大、传播远、检测距离长。

近年来开始兴起通过磁致伸缩效应原理来检测钢索损伤的检测方法,传感器无需通过缺陷部位,远距离即可检测出缺陷,导波检测精度与缺陷和传感器之间距离有关,在导波检测范围内,传感器越靠近缺陷,检测精度越高,可较好的同时进行缆索中多处缺陷的检测并实现损伤定位。磁致伸缩导波无损检测技术在桥梁缆索腐蚀检测方面具有检测长度大,覆盖结构区域广,可接近位置远离检测仪器难以到达的区域,无需开挖或拆除包覆层、防腐层等独特的优势<sup>[8,9]</sup>。

### 3 磁致伸缩导波无损检测方法

磁致伸缩是铁磁性材料受外磁场作用时,其尺寸、形状发生变化的现象。逆磁致伸缩是铁磁性材料受到轴向外力时,其内部磁场状态发生变化的现象。磁致伸缩导波检测方法是利用磁致伸缩效应在构件中超声导波,实施检测的一种方法。

磁致伸缩导波方法检测缆索原理如图1所示。信号发生器产生的脉冲信号经放大器放大后,驱动激励线圈在缆索中产生瞬态磁场。根据磁致伸缩效应,该瞬态磁场在线圈包围的缆索中产生弹性形变,成为超声波的振源,在构件中产生弹性波。当遇到缺陷时,会产生反射回波。反射回波通过检测线圈时,基于逆磁致伸缩效应,在检测线圈中会感应到应变引起的电信号。该信号经预处理、A/D转换后进入计算机,通过对该信号进行分析,即可获缆索状态信息,另外为提高磁致伸缩的能量转换效率,须在磁致伸缩效应产生区域通过磁化器施加偏置磁场<sup>[10]</sup>。

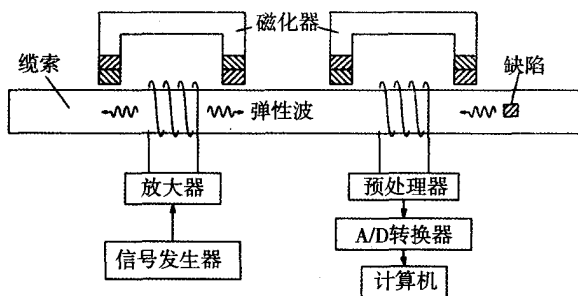


图1 磁致伸缩导波检测原理示意图

#### 4 国内外研究现状

磁致伸缩效应是指处于外加磁场下的铁磁性物质，其结构尺寸会发生变化的现象。该现象是由英国物理学家焦耳于1842年首先发现的，因此又被称为焦耳效应<sup>[11]</sup>。磁致伸缩逆效应是指当铁磁性物质的结构尺寸发生变化时，其内部的磁化状态也会发生改变的现象，该现象是由意大利物理学家维拉里于1865年发现的，因此又被称作维拉里效应（Villari effect）<sup>[12]</sup>。

20世纪50年代末，英国学者Kaule首先提出磁致伸缩导波技术能够检测钢索的断丝和腐蚀<sup>[13]</sup>。1990<sup>[14]</sup>年，美国西南研究院的研究人员成功利用磁致伸缩导波技术对斜拉索的缺陷进行了检测，人们的视线才重新回到这种即便捷又高效的检测方法上。随后，磁致伸缩导波检测技术得到了快速发展。

国内外对磁致伸缩导波技术在缆索检测的研究主要集中在检测传感器技术研究、检测实验研究和仪器开发及其应用等。

Kwun<sup>[15]</sup>和Laguere<sup>[16]</sup>分别利用永磁体和直流线圈作为偏置磁化器研制出纵向导波传感器。Kwun<sup>[17]</sup>等利用预磁化的镍带粘接在圆管表面，成功激励出扭转模态的导波；Kim<sup>[18]</sup>在此基础上提出了一种改进型的磁化器，通过改变镍带的粘贴角度从而改善了传感器的性能。Kim<sup>[19]</sup>通过设计偏置磁化器的磁轭结构，优化了弯曲模态导波的磁致伸缩传感器。S.H.Cho等将传感器的优化设计问题转化为拓扑优化问题，优化设计后的偏置磁场性能得到显著改善<sup>[20]</sup>。

磁致伸缩导波主要用于检测桥梁缆索、预应力钢绞线、管道等较长构件的检测。Kwun<sup>[21; 22]</sup>

等分析了磁致伸缩导波具有只需定点激励即可实现长距离检测的特点，并设计相应的磁致伸缩传感器对钢绞线、管道上的缺陷进行了检测。Lu<sup>[23]</sup>利用具有长度相同深度不同的刻槽模拟钢管上的裂纹缺陷，对其缺陷进行了检测。Di Scalea<sup>[24]</sup>等利用磁致伸缩导波技术对钢绞线进行了应力测量和缺陷检测。近年来，国内学者在磁致伸缩导波缺陷检测上取得了一定的成果。

Xu Jiang, Wu Xinjun<sup>[25]</sup>等利用磁致伸缩导波传感器对七丝预应力钢绞线进行了不同程度的缺陷实验，可以测出半根断丝时的缺陷信号，并且证明缺陷信号的幅值大小与缺陷的截面积成正比。邹珺,武新军等针对磁致伸缩导波检测信号在钢绞线中传播频散现象，提出了一套基于混沌杜芬振子的导波信号识别方法，从而提高导波检测精度<sup>[26]</sup>。Xu Jiang, Wu Xinjun等通过钢绞线多处缺陷的检测，对钢绞线在不同载荷应力下，提出使用不同频率的检测信号取得了一定的效果<sup>[27]</sup>。

王良云等使用磁致伸缩导波检测技术对单根钢丝，以及平行钢丝拉索进行实验研究，证明了平行钢丝与单股钢丝的导波传播状态类似，为缆索的检测提供了实验依据<sup>[28]</sup>。徐江研究了纵向模态导波的检测方法以及检测斜拉索锚固区的有效方法，并将其应用到了军山长江大桥现场检测<sup>[29]</sup>。Xu Jiang, Wu Xinjun等将磁致伸缩导波无损检测技术应用的桥梁缆索和大型游乐设施摩天轮缆索的无损检测中，取得了良好的效果<sup>[30; 31]</sup>。

刘增华、张易农、张慧昕等研制，研制一种专用磁致伸缩传感器，用于七丝钢绞线的超声导波检测。该传感器的主要结构包括轴对称三磁路励磁结构和正反正绕向的三段式螺线管。为基于磁致伸缩效应的钢绞线超声导波检测奠定了一定基础<sup>[32]</sup>。刘增华等对该专用磁致伸缩传感器结构进行了模拟分析和优化设计，使得传感器中永磁励磁结构和线圈能够高效地对钢绞线进行检测<sup>[33]</sup>。刘秀成、刘增华、吴斌和何存富等为了提高传感器线圈的对被测构件的适应性和拓展检测

系统的工作频率范围,设计出一款柔性印刷感应线圈,实验结果表明,柔性线圈式磁致伸缩传感器中心频率达1.30MHz,有望进一步提高缺陷检测灵敏度<sup>[34; 35]</sup>。

钟恒利用磁致伸缩导波检测实验系统,设计了桥梁锚固系统检测的相关实验,对导波系统检测不同断丝情况下的桥梁缆索锚固系统进行实验模拟,实验结果表示,磁致伸缩导波检测系统可以很好的测量缆索索体和锚固端的内部断丝缺陷<sup>[36]</sup>。林阳子,游棉州等磁致伸缩导波无损检测技术应用到桥梁缆索内部索体和锚固区锈蚀断丝等现场检测之中,对检测缺陷信号的幅值与腐蚀状态的评价标准进行了探讨,为缆索养护管理及其维修决策提供依据<sup>[37]</sup>。段鸿杰,林鸣,李文波等将磁致伸缩导波检测方法应用于西湖大桥被车辆碰撞后吊杆杆体和锚固区的损伤情况的检测,对损伤情况进行了有效的识别<sup>[38]</sup>。Donglai Zhang, Zhihui Zhou, Jinping Sun等针对导波信号在管道和缆索检测过程中随着检测长度不断衰减的问题,提出了采用多频率激励信号可以提高磁致伸缩导波无损检测的准确性<sup>[39]</sup>。

在磁致伸缩导波无损检测仪器开发方面,基于H. Kwun等的研究成果,美国西南研究院开发了MsSR系列检测系统,如图2所示的MsSR3030R长距离管道磁致伸缩导波检测系统。主要包括主机、MsS传感器、PC机及连接电缆等。被广泛应用于各种工业及领域中,如:管道、热交换器、棒材、钢索和板盘件等<sup>[17]</sup>。

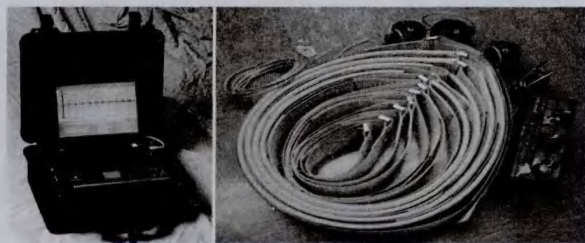


图2 MsSR系列磁致伸缩导波检测原理示意图

华中科技大学的武新军、徐江等自主研发了GWP-1型磁致伸缩导波检测仪器,由系统主机、导波传感器、放大器和系统软件等部分组成,其

制作的实用化传感器由磁化器和线圈组成<sup>[40]</sup>。该团队利用自主研发的检测仪器在实验室进行了大量的实验验证,并对在役的20多座桥梁进行了桥梁实地数据测试和分析研究,图3为所开发的最新磁致伸缩导波检测系统及典型现场应用。



图3 华中科技大学团队开发的磁致伸缩导波检测仪器及典型应用

北京工业大学的何存富,吴斌等根据磁致伸缩导波检测技术研制了MsTGW型超声导波管道检测系统,该系统中的传感器采用铁钴合金材料作为敏感元件,在管道中激励出扭转模态超声导波,实现对石油、天然气等长输管道的检测<sup>[41]</sup>。

浙江大学和杭州浙大精益根据磁致伸缩导波检测技术研制了MsGW型,应用在桥梁,锚杆及管道等无损检测领域<sup>[42]</sup>。



图4 MsTGW型磁致伸缩导波检测仪器



图5 MsGW型磁致伸缩导波检测仪器

## 5 近期研究热点和未来研究趋势

钢绞线随着载荷的变化,各丝之间的接触应力也是随着不断变化的,从而影响导波传播信号能力在空间的散播,增加了缺陷检测的难度。对于钢绞线缺陷检测依然是现阶段磁致伸缩导波无损检测的难点和热点<sup>[43-45]</sup>。另外常用钢绞线缆索体系由多根带有HDPE护套和油脂防腐保护的钢绞线组成,护套增加了传感器的提离距离,油脂造成了检测信号的衰减,降低了传感器的检测灵敏度。

磁致伸缩导波在非铁磁性构件或端部外露构件检测时面临难题。在磁致伸缩导波传感器检测原理的基础上利用磁致伸缩效应在铁磁性波导管中产生导波;然后通过端部将其传入构件实施检测,构建了开放磁路式磁致伸缩导波传感器原理的研究实验平台,为进一步应用于非铁磁性或端部外露构件检测提供了依据<sup>[46; 47]</sup>。

在磁致伸缩导波检测中,一般采用周向整体缠绕线圈实现导波的激励与接收,因此,该传感器接收到的信号是被检构件圆周上的整体信号,不具有周向分辨力。研究具有周向分辨力的磁致伸缩导波接收传感器的理论和研制方便可靠的传感器,可以提高检测定位的精度和扩展检测应用领域<sup>[48; 49]</sup>。

刘秀成、吴斌、何存富等开发了具有缺陷检

测与应力测量双功能的单体传感器,可工作于磁致伸缩与磁弹传感器两种模式,用于缆索的索力检测和断丝缺陷检测,融合了索力检测法和磁致伸缩导波检测法的优势<sup>[50; 51]</sup>。

徐江、武新军等研制了一种用于缆索无损检测的漏磁检测和磁致伸缩导波自动爬索机器人,结构由铝合金框架,电机链传动爬升机构和用于检测的混合换能器等组成。该换能器包括永磁磁化器和线圈,提供漏磁检测和磁致伸缩导波检测。实验结果表明该混合换能器可以应用于缆索钢丝和锚固区的全面检测,充分发挥漏磁法和磁致伸缩导波法检测的优势<sup>[30]</sup>。

## 6 总结

磁致伸缩导波无损检测技术在缆索损伤和腐蚀检测方面具有检测长度大,覆盖结构区域广,可接近位置远离检测仪器难以到达的区域,可较好的同时进行缆索中多处缺陷的检测并实现损伤定位可较好的同时进行缆索中多处缺陷的检测并实现损伤定位,无需开挖或拆除包覆层、防腐层等独特的优势,逐渐成为应用广泛的缆索新型无损检测方法。

该技术已经能够在缆索损伤和腐蚀检测中进行准确的定性判断,但是在定量判断方面还不是非常稳定;因此大面积推广应用仍然需要大量的实验进行研究和验证。另外准确判断缆索钢丝周向缺陷的分布情况仍是研究的难点和热点。在钢绞线及钢绞线索损伤和腐蚀检测中仍然需要进行大量的研究和实验来提高检测的灵敏度和精度。

磁致伸缩与磁弹一体化,磁致伸缩和漏磁结合等综合多种检测方法优势的缆索无损检测技术,通过不断完善检测传感器和检测仪器稳定性,通用性和易用性,将给缆索的无损检测带来更加全面细致的检测手段。

### 参考文献

- [1] 李平杰. 多支承索杆振动参数识别研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- [2] 高兴宇, 郁道银, 龙跃, et al. 高分辨率视频摄远物镜光学系统设计及成像实验[J]. 激光与光电子学进展, 2014,

- 51(10): 77-82.
- [3] Xu F, Wang X, Wu H. Inspection method of cable-stayed bridge using magnetic flux leakage detection: principle, sensor design, and signal processing[J]. *Journal of mechanical science and technology*, 2012, 26(3): 661-669.
- [4] 李冬生, 欧进萍. 声发射技术在拱桥吊杆损伤监测中的应用[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2007, 23(1): 6-10.
- [5] Tabatabai H. Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems[J]. *Nchrp Synthesis of Highway Practice*, 2005.
- [6] 袁建明, 武新军, 康宜华, et al. 可重构斜拉索磁性无损检测机器人技术研究[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2008, 32(3): 442-445.
- [7] 程丞. 磁致伸缩纵向导波偏置磁场作用实验研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [8] 魏争, 黄松岭, 赵伟, et al. 磁致伸缩管道缺陷超声导波检测系统研制[J]. *电测与仪表*, 2013, 50(9): 21-25.
- [9] 王悦民, 康宜华, 武新军. 磁致伸缩效应在圆管中激励纵向导波的理论 and 试验研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(10): 174-179.
- [10] 武新军, 贲安然, 徐江. 桥梁缆索金属损伤无损检测方法[J]. *无损检测*, 2012, 34(4): 12-16.
- [11] Joule J. On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars. *London*[J]. *Philadelphia Magazine & Journal of Science*.
- [12] Villari E. Change of magnetization by tension and by electric current[J]. *Ann. Phys. Chem*, 1865, 126: 87-122.
- [13] Kaule W. Magneto-strictive Ultrasonic Testing of Materials[M]. Defense Technical Information Center, 1963.
- [14] 柯岩. 基于磁致伸缩导波的钢管无损检测实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [15] Kwun H, Bartels K. Magnetostrictive sensor technology and its applications[J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(1): 171-178.
- [16] Laguerre L, Aime J-C, Brissaud M. Magnetostrictive pulse-echo device for non-destructive evaluation of cylindrical steel materials using longitudinal guided waves[J]. *Ultrasonics*, 2002, 39(7): 503-514.
- [17] Kwun H, Kim S-Y, Crane J F. Method and apparatus generating and detecting torsional wave inspection of pipes or tubes. Google Patents, 2002.
- [18] Kim Y Y, Park C I, Cho S H, et al. Torsional wave experiments with a new magnetostrictive transducer configuration[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(6): 3459-3468.
- [19] [Kim W, Kim Y Y. Design of a bias magnetic system of a magnetostrictive sensor for flexural wave measurement[J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2004, 40(5): 3331-3338.
- [20] Cho S H, Kim Y, Kim Y Y. The optimal design and experimental verification of the bias magnet configuration of a magnetostrictive sensor for bending wave measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 107(3): 225-232.
- [21] Kwun H, Hanley J J, Holt A. Detection of corrosion in pipe using the magnetostrictive sensor technique[C]. *Nondestructive Evaluation of Aging Infrastructure*, 1995: 140-148.
- [22] Kwun H, Hanley J J, Bartels K. Recent developments in nondestructive evaluation of steel strands and cables using magnetostrictive sensors[C]. *OCEANS'96. MTS/IEEE. Prospects for the 21st Century. Conference Proceedings*, 1996: 144-148.
- [23] Lu Y. Magnetostrictive characterization of notches in steel pipes[C]. *Nondestructive Evaluation Techniques for Aging Infrastructures & Manufacturing*, 1999: 48-56.
- [24] Lanza Di Scalea F, Rizzo P, Seible F. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves[J]. *Journal of materials in civil engineering*, 2003, 15(3): 219-227.
- [25] Jiang X, Xinjun W, Liangyun W, et al. Detecting the flaws in prestressing strands using guided waves based on the magnetostrictive effect[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, 49(11): 647-650.
- [26] 邹珺, 武新军, 徐江, et al. 基于杜芬混沌振子的磁致伸缩导波信号识别[J]. *无损检测*, 2008, (9).
- [27] Xu J, Wu X, Sun P. Detecting broken-wire flaws at multiple locations in the same wire of prestressing strands using guided waves[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(1): 150-156.
- [28] 王良云. 磁致伸缩导波检测技术实验研究[D]. 华中科技大学, 2008.
- [29] 徐江. 磁致伸缩导波无损检测理论及应用研究[D]. 华中科技大学, 2008.
- [30] Xu J, Wu X, Cheng C, et al. A magnetic flux leakage and magnetostrictive guided wave hybrid transducer for detecting bridge cables[J]. *Sensors*, 2012, 12(1): 518-533.
- [31] Wu X, Sun P, Shen G. Combination of magnetic flux leakage and magnetostrictive guided wave testing method for flaws of Ferris wheel cables[J], 2014.
- [32] 刘增华, 张易农, 张慧昕, et al. 基于磁致伸缩效应在钢绞线中激励接收纵向导波模式的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6): 71-76.
- [33] Liu Z, Zhao J, Wu B, et al. Configuration optimization of magnetostrictive transducers for longitudinal guided wave inspection in seven-wire steel strands[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(6): 484-492.
- [34] Tse P, Liu X, Liu Z, et al. An innovative design for using flexible printed coils for magnetostrictive-based longitudinal guided wave sensors in steel strand inspection[J]. *Smart Materials and*

- Structures, 2011, 20(5): 055001.
- [35] 刘秀成, 吴斌, 何存富, et al. 兆赫兹磁致伸缩超声导波管道检测系统的研制[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(1): 1-5.
- [36] 钟恒. 基于磁致伸缩导波的桥梁拉索锚固系统无损检测试验[D]. 重庆交通大学, 2013.
- [37] 林阳子, 游棉州, 李春早, et al. 桥梁索杆内部锈蚀断丝无损检测技术运用[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2013, (9).
- [38] 段鸿杰, 林鸣, 李文波. 基于磁致伸缩技术的吊杆检测应用研究[J]. 湖南交通科技, 2014, (1).
- [39] Zhang D, Zhou Z, Sun J, et al. A Magnetostrictive Guided-Wave Nondestructive Testing Method With Multifrequency Excitation Pulse Signal[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2014, 63(12): 3058-3066.
- [40] 武新军, 徐江, 沈功田. 非接触式磁致伸缩导波管道无损检测系统的研制[J]. 无损检测, 2010: 166-170.
- [41] 何存富, 黄垚, 刘增华. 小型超声导波管道检测系统的研究和开发[J]. 测控技术, 2008, 27(1): 33-35.
- [42] 陈福梁. 基于磁致伸缩效应的导波管道缺陷检测系统设计研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [43] Kim Y Y, Kwon Y E. Review of Magnetostrictive Patch Transducers and Applications in Ultrasonic Nondestructive Testing of Waveguides[J]. Ultrasonics, 2015.
- [44] Kwon Y E, Kim H W, Kim Y Y. High-frequency lowest torsional wave mode ultrasonic inspection using a necked pipe waveguide unit[J]. Ultrasonics, 2015.
- [45] Kharrat M, Gaillet L. Non-destructive evaluation of anchorage zones by ultrasonics techniques[J]. Ultrasonics, 2015, 61: 52-61.
- [46] 丁秀莉, 武新军, 孙鹏飞. 开放磁路式磁致伸缩导波传感器原理的实验研究[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(12).
- [47] Xu J, Wu X, Zhang Y, et al. Research on one-direction receiving method of guided waves based on magnetostrictive effect[C]. 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15), 2015.
- [48] 孔东颖. 管道磁致伸缩导波检测周向传感方法研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [49] Kim H W, Lee J K, Kim Y Y. Circumferential phased array of shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducers for pipe inspection[J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 423-431.
- [50] 刘秀成, 吴斌, 何存富. 磁致伸缩与磁弹一体化传感器的研制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 46-52.
- [51] 刘秀成. 磁致伸缩与磁弹一体化传感技术及其钢索检测应用研究[D]. 北京工业大学, 2013.

## (上接第8页)

每个试件有A、B、C、D4个侧面。每个侧面上的二横一竖传感器, 在应变分析系统上的连线编成一组。图6为MG 12T15试件C侧面上的3个仪器的实测记录, 图中时间坐标与图4的荷载程序同步。Alga的三份试验报告共给出了12幅位移图。

按照欧标的要求, 试验中只需n次循环荷载上限( $0.8F_{pk}$ )时的位移值( $\Delta$ ), 就可以做出应变( $\varepsilon$ )稳定性的判定。三个试件的应变( $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_v$ )试验结果列于表6, 完全满足要求。

### (4) 破坏荷载

试件经n次循环荷载后, 应缓慢增加荷载, 直至破坏。欧标要求试件的破坏荷载( $F_u$ )不应小于预应力筋特征抗拉力的1.1倍, 并乘以修正系数, 即满足式(7):

$$F_u \geq 1.1F_{pk} \frac{f_{cm,e}}{f_{cm,0}} \quad (7)$$

式中的 $f_{cm,e}/f_{cm,0}$ 为修正系数, 它考虑了试验时试

件混凝土的实际强度影响, 此系数在数值1左右小幅度摆动。

三个试件的实测破坏值列于表5, 试件破坏后, 从照片可见锚垫板没有开裂破损。

## 9 结论

(1) 3个试件的破坏荷载都高于要求限值(见表5), 锚垫板没有断裂;

(2) 在3个荷载控制点时, 3个试件的裂缝宽度都未超过裂缝宽度限值(见表5): 荷载上限第一次达到 $0.08F_{pk}$ 时和荷载下限最后一次达到 $0.12F_{pk}$ 时, 裂缝宽度都没有超过 $0.15\text{mm}$ ; 荷载上限最后一次达到 $0.8F_{pk}$ 时, 裂缝宽度没有超过 $0.25\text{mm}$ ;

(3) 裂缝宽度的读数, 直到循环荷载的最后阶段都是稳定的;

(4) 混凝土试件的横向和竖向变形读数, 直到循环荷载之最后阶段都是稳定的。