



压电智能传感-驱动器 力学性能及其应用

Mechanical Property and Application of
Piezoelectric Smart Sensor-actuator

蒙彦宇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

压电智能传感-驱动器力学性能及其应用
Mechanical Property and Application of
Piezoelectric Smart Sensor-actuator

蒙彦宇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

压电智能传感:驱动器力学性能及其应用/蒙彦宇著. —武汉:武汉大学出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-307-17519-8

I. 压… II. 蒙… III. 压电材料—智能传感器—研究
IV. ①TP212.6 ②TM22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 017677 号

责任编辑:刘小娟

责任校对:方竞男

装帧设计:张希玉

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:16 字数:299 千字

版次:2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17519-8 定价:56.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

随着工程建设项目逐渐扩大,现代重大工程项目及一些复杂异形结构不断增多,土木工程结构日益向大型化、复杂化、多样化、智能化方向发展。由于社会需求和建筑材料、施工技术的发展,现代大型土木工程结构正在应用于各种基础设施建设中,其建筑高度和跨度不断刷新纪录。这些工程结构的服役期往往长达几十年,甚至上百年。由于处于自然环境中,大型土木工程结构具有较多的冗余度,受到不确定的环境荷载、材料老化、动静荷载的长期效应、疲劳效应及各种突发性不利因素(如地震、台风、爆炸、冰雨等)等耦合作用,从服役开始就面临着结构损伤的问题。随着结构使用年限的增加,结构和系统不可避免地产生微小损伤,损伤不断积累、发展,会逐渐降低结构的强度和刚度。当损伤累积到一定程度时会造成结构抗力的衰减,严重降低结构的安全性、适用性和耐久性,极端情况下会导致整个结构的破坏,甚至危及人的生命安全,给国家造成巨大的财产损失。

同时,土木工程结构体型庞大、结构复杂,损伤的不确定因素分析困难。实测数据和结构模型具有强烈的本质不确定性,以确定性的方法处理具有本质不确定性的结构损伤问题,掩盖了损伤导致的结构响应的变化,测量信号随机性、变异可能性及噪音干扰的存在,以及测量信号的优化处理困难。对运营中的结构健康状况给予正确的评估,需对结构在荷载作用下进行长期、连续监测,结构的小损伤引起信号的变化可能被噪音信号所淹没。仅依靠偶尔的单次监测数据不能完全反映结构的健康状况,有时甚至会出现判别错误的现象。在结构健康监测中,引入统计理论来消除噪音等不确定性因素的影响,但大多局限在数值模拟和模型修正上,测量数据无法准确反映结构实际情况,试验研究和实际应用较少。这就导致了理论与实际应用的矛盾,阻碍了结构损伤识别方法在土木工程结构健康监测中的应用。

由于混凝土材料的复杂性能,传播介质的不均匀性等,压电智能传感-驱动器在混凝土健康监测与损伤识别中的应用,存在边界条件和应力状况复杂的问题。利用传统试验手段,即认为压电传感器所受的压力与电压成比例关系,而没有考虑粘贴层等阻尼效应影响,其研究结果具有很大的局限性;压电驱动器在实



际应用过程中很难确定输入信号与压电产生驱动力的关系,压电材料特性对驱动力的影响因素及粘贴层对压电驱动力的影响等;将压电应用于工程实际,开展混凝土结构等的健康监测与损伤识别研究,埋入结构内部的压电传感器和驱动器老化后难以直接进行替换,无法持续实时对结构进行监测,因此,耐久性(抗压、抗剪,耐腐蚀和冻融循环等)不足以成为其在结构健康监测与损伤识别应用中难以解决的瓶颈问题,给基于压电波动性的混凝土中的应力波传播机理的建立带来困难,定量分析困难。

近十几年来,智能材料结构在工程领域中的成功应用,为实现真正意义上的结构健康监测提供了有效的途径。以压电陶瓷为代表的压电智能材料具有传感和驱动一体化的优越特性,适合于结构健康监测领域。同时,压电材料具有响应速度快、线性关系好、能耗低、造价低且易加工成型等优点。因此,将压电材料作为基本元件,研发一套方便、实用的结构健康监测系统符合我国当前的国情。以压电智能材料为代表的土木工程结构健康监测与损伤识别技术也成为当前学术界的研究热点,其应用为重大工程结构和基础设施准确有效、快速便捷、经济适用的长期健康监测与定性、定量的整体状态损伤识别技术提供了全新思路。因此,对服役中的重大工程结构和基础设施急需研发一套准确有效、快速便捷、经济适用的压电智能传感器和驱动器,设计并安装长期的结构健康监测系统,以监测结构的服役状况,有效地处理来自健康监测系统海量不确定的测量数据与信息,对复杂结构的健康情况和定性、定量的整体状态损伤进行评价,保证结构的安全性、可靠性、完整性、适用性和耐久性,成为基于压电智能传感和驱动技术的重大工程结构健康监测与损伤识别关键技术研究的重要问题。

本书共分6章,以压电材料基本特性为主线,围绕压电材料基本性能、优越特征、技术应用等重点内容展开,并引入“压电智能骨料”概念。第1章绪论,介绍并综述了压电智能材料在结构健康监测与损伤识别技术中应用的国内外研究现状;第2章介绍了压电智能材料基本特性,详细论述了压电智能骨料封装技术及其制作工艺;第3章详细讨论了粘贴式和埋入式压电智能传感器力学模型、力学性能理论分析、数值模拟分析及试验结果;第4章详细讨论了粘贴式和埋入式压电智能驱动器力学模型、力学性能理论分析、数值模拟分析及试验结果;第5章详细讨论了压电智能骨料(传感器和驱动器)的力学模型、力学性能与试验结果分析;第6章论述了压电波动理论与统计理论及压电智能骨料(传感器和驱动器)在混凝土结构健康监测与损伤识别中的应用等相关技术,给出了基于小波分析的混凝土结构损伤统计指标和损伤程度、损伤概率及损伤位置判定方法,并建立了基于小波分析的压电智能骨料混凝土结构损伤统计识别算法。



本书总结了著者关于压电智能骨料传感-驱动器关键技术研究的阶段性成果,其中的一些论点和结论仅代表著者当前对这些问题的认识和理解,有待进一步补充、修正、完善、发展和提高。

感谢沈阳建筑大学土木工程学院结构实验室领导、老师给予试验帮助。感谢关海爽为本书的完成所做的收集资料、翻译文献、处理试验结果及绘制图表等工作,同时感谢引领和帮助著者进入这一研究领域的老师阎石教授及其团队真知灼见的指导,感谢孙威副教授多年的合作、交流与讨论,为本书完成提供了宝贵的实例材料。

本书可供从事土木工程和工程力学相关研究、从事结构健康监测与损伤识别相关技术的科研人员、工程应用单位的技术人员参考,也可作为高等院校土木、交通、机械等相关专业的高年级学生、研究生的学习参考书。

本书参考了一些结构健康监测、压电材料和工程结构损伤等方面的教材和著作,在此对这些教材和著作的作者表示衷心的感谢和敬意。

因著者水平有限,书中难免有错误、疏漏和不妥之处,衷心希望读者批评指正,以期完善。

著者

2016年1月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 结构健康监测与损伤识别技术研究和应用	(1)
1.1.1 结构健康监测与损伤识别技术的研究背景	(1)
1.1.2 结构健康监测与损伤识别技术的研究意义	(8)
1.2 结构健康监测与损伤识别技术的研究现状	(9)
1.2.1 结构健康监测技术的研究现状	(9)
1.2.2 结构损伤识别技术的研究现状	(16)
1.3 应用于结构健康监测与损伤识别技术中的智能材料与智能 结构	(21)
1.3.1 智能材料	(21)
1.3.2 智能结构	(22)
1.3.3 压电智能材料与压电智能结构	(24)
1.4 压电智能材料在土木工程结构健康监测与损伤识别技术中的 应用	(35)
1.4.1 基于压电智能材料的主动结构健康监测技术	(36)
1.4.2 基于压电智能材料的被动结构健康监测技术	(41)
1.5 目前需进一步研究的主要问题	(42)
2 压电智能材料基本特性及其本构关系	(45)
2.1 引言	(45)
2.2 压电效应的物理机制	(46)
2.2.1 压电陶瓷的微观机理	(46)
2.2.2 压电效应	(47)
2.3 压电智能材料的相关性能参数	(51)
2.3.1 压电常数	(51)
2.3.2 介电常数	(51)
2.3.3 弹性常数	(52)



2.3.4	机电耦合系数	(52)
2.3.5	频率常数	(53)
2.3.6	机械品质因数	(53)
2.3.7	介质损耗	(53)
2.4	压电智能材料的电学特性和力学特性	(54)
2.4.1	压电智能材料的电学特性	(54)
2.4.2	压电智能材料的力学特性	(54)
2.5	压电方程	(56)
2.5.1	四种边界条件	(56)
2.5.2	四种压电方程	(57)
2.5.3	线弹性压电本构关系	(59)
2.6	压电智能骨料	(61)
2.6.1	PZT 片的嵌入方式	(61)
2.6.2	PZT 片的选取	(62)
2.6.3	压电智能骨料的制作	(63)
2.6.4	压电智能骨料的应用	(71)
2.7	本章小结	(73)
3	粘贴式和埋入式压电智能传感器力学模型建立与试验研究	(75)
3.1	引言	(75)
3.2	基于压电智能传感器的建模理论及求解方法	(76)
3.3	PZT 智能传感器等效电路模型	(77)
3.3.1	PZT 智能传感器的结构形式	(77)
3.3.2	PZT 智能传感器的等效原理	(78)
3.3.3	PZT 智能传感器的等效电路	(79)
3.3.4	PZT 智能传感器与测量仪器连接的实际等效电路	(80)
3.4	压电智能传感器监测误差的影响因素	(85)
3.4.1	测量环境周围温度的影响	(85)
3.4.2	测量环境周围湿度的影响	(86)
3.4.3	测量环境周围场的影响	(86)
3.4.4	连接电缆噪音的影响	(86)
3.4.5	接地回路噪音的影响	(86)
3.5	PZT 智能传感器模型建立的基本假设	(87)



3.6 粘贴式 PZT 智能传感器压电方程与力学模型	(88)
3.6.1 粘贴式 PZT 智能传感器压电方程	(88)
3.6.2 不考虑粘贴层与自身阻尼时的 PZT 智能传感器力学模型 ...	(90)
3.6.3 考虑粘贴层与自身阻尼时的 PZT 智能传感器力学模型	(91)
3.6.4 考虑自身阻尼(电信号输出)影响时的 PZT 智能传感器 力学模型	(92)
3.7 埋入式 PZT 智能传感器压电方程与力学模型	(96)
3.7.1 埋入式 PZT 智能传感器压电方程	(96)
3.7.2 埋入式 PZT 智能传感器力学模型	(98)
3.8 PZT 智能传感器力学模型算例分析	(100)
3.8.1 PZT 智能传感器参数选择	(100)
3.8.2 粘贴式 PZT 智能传感器力学模型算例分析	(101)
3.8.3 埋入式 PZT 智能传感器力学模型算例分析	(106)
3.9 PZT 智能传感器力学模型试验验证	(107)
3.9.1 试验设备	(107)
3.9.2 试验方案及步骤	(111)
3.9.3 粘贴式 PZT 智能传感器力学模型试验研究	(112)
3.9.4 埋入式 PZT 智能传感器力学模型试验研究	(118)
3.10 本章小结	(124)
4 粘贴式和埋入式压电智能驱动器力学模型建立与试验研究	(126)
4.1 引言	(126)
4.2 PZT 智能驱动器模型建立的基本假设	(127)
4.3 自由振动和粘贴式 PZT 智能驱动器力学模型建立	(128)
4.3.1 自由振动 PZT 智能驱动器力学模型建立	(128)
4.3.2 粘贴式 PZT 智能驱动器力学模型建立	(130)
4.4 埋入式 PZT 智能驱动器压电方程与力学模型	(134)
4.4.1 埋入式 PZT 智能驱动器压电方程	(134)
4.4.2 埋入式 PZT 智能驱动器力学模型	(136)
4.5 PZT 智能驱动器力学模型算例分析	(139)
4.5.1 PZT 智能驱动器参数选择	(139)
4.5.2 粘贴式 PZT 智能驱动器力学模型算例分析	(140)
4.5.3 埋入式 PZT 智能驱动器力学模型算例分析	(149)



4.5.4	算例分析小结	(155)
4.6	PZT 智能驱动器力学模型试验研究	(156)
4.6.1	试验设备	(156)
4.6.2	试验方案及步骤	(157)
4.6.3	粘贴层对 PZT 智能驱动器的影响	(160)
4.7	本章小结	(163)
5	压电智能骨料传感-驱动器基本力学性能与试验研究	(165)
5.1	引言	(165)
5.2	压电智能骨料抗压和抗剪力性能分析与试验研究	(165)
5.2.1	试验目的	(165)
5.2.2	试验设备及压电智能骨料的前期制作	(166)
5.2.3	压电智能骨料抗压和抗剪试验方案	(167)
5.2.4	压电智能骨料抗压和抗剪试验数据采集及结果分析	(169)
5.2.5	试验小结	(175)
5.3	压电智能骨料冻融循环力学性能分析与试验研究	(176)
5.3.1	试验目的	(176)
5.3.2	试验设备及压电智能骨料的前期制作	(176)
5.3.3	压电智能骨料冻融循环试验方案	(178)
5.3.4	压电智能骨料冻融循环试验数据采集处理及结果分析	(181)
5.3.5	试验小结	(186)
5.4	本章小结	(186)
6	压电智能传感-驱动器在结构健康监测与损伤识别中的应用	(188)
6.1	引言	(188)
6.2	基于压电波动分析法的结构健康监测与损伤识别技术的 不确定性因素分析	(190)
6.2.1	结构损伤识别精度的不确定性因素分析	(191)
6.2.2	监测噪音等不确定性因素的消除分析	(192)
6.3	基于小波分析的监测信号降噪处理	(193)
6.3.1	小波分析的基本原理	(194)
6.3.2	基于小波分析的信号滤波降噪处理过程	(195)
6.4	基于压电智能骨料传感-驱动器的损伤识别技术原理	(200)
6.4.1	基于概率统计理论的结构损伤识别原理	(200)



6.4.2 基于概率统计理论的损伤识别理论模型	(201)
6.4.3 混凝土结构损伤概率统计识别方法的步骤	(213)
6.5 钢筋混凝土梁的损伤统计识别试验研究	(213)
6.5.1 试验目的	(213)
6.5.2 试验装置	(214)
6.5.3 试验步骤	(214)
6.5.4 试验结果分析	(216)
6.6 本章小结	(222)
参考文献	(223)

1 结 论

1.1 结构健康监测与损伤识别技术研究和应用

1.1.1 结构健康监测与损伤识别技术的研究背景

21 世纪是一个智能结构的时代,随着土木工程结构日益向大型化、复杂化、智能化方向发展,混凝土结构作为土木工程常见结构形式,被广泛应用于各个领域,如多层、小高层、高层、超高层建筑结构(图 1.1),大跨度桥梁结构、大跨度空间结构(图 1.2 和图 1.3),隧道、高速公路、城市高架公路、地铁、海上石油平台(图 1.4),水利工程(如水库、坝体,如图 1.5 所示),以及特种工程(如核电站安全壳、热电厂冷却塔、储水池、储气灌、电视塔、高压输电塔,如图 1.6 所示)。各种基础设施建设的高度和跨度因社会需求和建筑材料、施工技术等的发展而不断刷新纪录,不仅标志我国建筑水平的不断提高,还为保证国民经济持续稳定发展、人民物质文化生活条件改善发挥了强大的支柱作用。

随着我国三峡工程、西电东输、西气东输、南水北调、青藏铁路、五纵七横国家公路网、四纵四横铁路快速客运通道、三个城际快速客运系统及城乡一体化等工程项目的实施和建设,未来几十年我国将有一大批重大工程陆续兴建。而这些重大工程结构的服役期往往长达几十年,甚至上百年,由于处于自然环境中,大型结构具有较多的结构冗余度,结构将受到不确定的环境荷载和各种突发性自然因素(如地震、台风、爆炸、冰雨等)等耦合作用,从服役开始就面临一个可以预报但又无法避免的结构损伤问题。随着使用年限的增加,工程结构中经常存在的表面破损或缺陷,容易引起人们的重视,而对于不可避免的、不能直接看到的、内在的缺陷和微小损伤,往往容易被忽略,随着损伤不断积累和发展,会逐渐降低结构的强度和刚度,从而使其抵御自然灾害的能力甚至在正常环境下作用的能力下降。当损伤累积到一定程度时,结构抗力衰减,严重降低结构的安全



性、适用性和耐久性,极端情况下会导致整个结构的破坏,有可能危及人的生命安全,给国家造成巨大的财产损失。

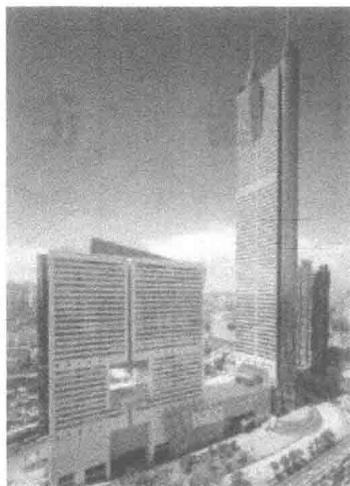


图 1.1 高层建筑结构

Fig. 1.1 High-rise building structure

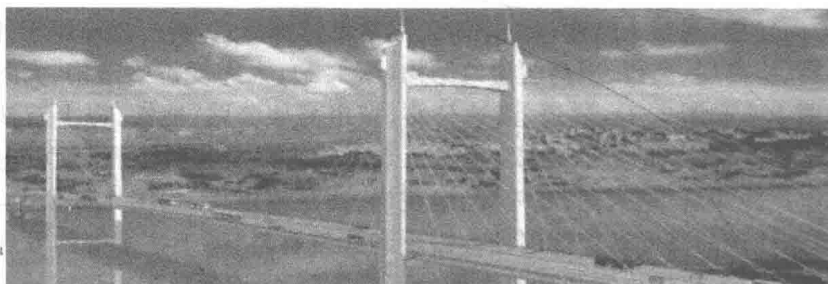


图 1.2 大跨度桥梁结构

Fig. 1.2 Large-span bridge structure

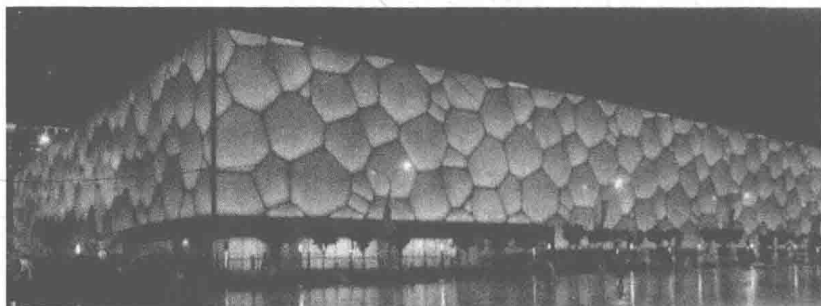


图 1.3 大跨度空间结构

Fig. 1.3 Large-span spatial structure



图 1.4 海上石油平台

Fig. 1.4 Offshore oil platform

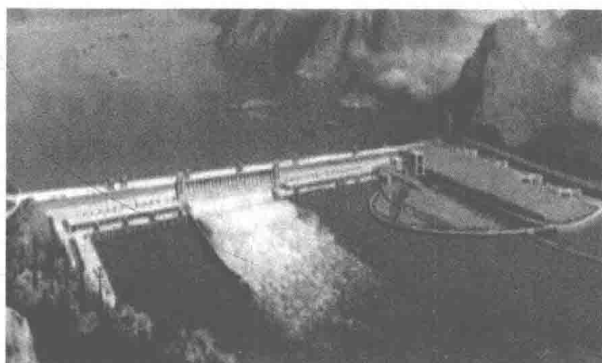


图 1.5 大型坝体结构

Fig. 1.5 Large dam structure

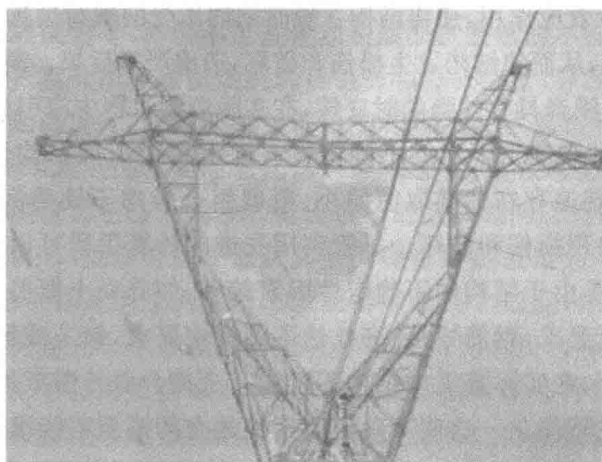


图 1.6 高压输电塔结构

Fig. 1.6 High voltage transmission tower structure

近些年,国内外类似的工程事故时有发生。如2007年8月13日,湖南湘西凤凰县的风凰公路桥,在竣工前夕轰然垮塌,造成64人死亡,22人重伤的严重事故,损失惨重。2008年5月12日,四川汶川县发生8.0级地震,大量房屋、桥梁倒塌,很多地方被夷为平地,倒塌房屋650余万间,人员死伤基本上都是因为房屋建筑倒塌被埋或被砸。2010年4月14日,青海玉树发生了7.5级地震,造成1.5万户居民房屋倒塌,2000多人遇难,教育、卫生、电力、通信、公路、水利等基础设施也受到严重破坏。2010年8月7日,甘肃舟曲县发生特大泥石流灾害,造成大量建筑物倒塌。1994年1月17日,美国加州北岭市的大地震中,一些建筑物在遭受主震后,由于本身残余性能的支撑并未立即倒塌,这种损伤未能及时发现,以至于在后来的救援中出现二次倒塌,造成了严重的次生灾害和损失。2004年5月23日,巴黎戴高乐机场候机厅发生屋顶坍塌事故,造成包括2名中国公民在内的6人不幸遇难,多名旅客和机场工作人员受伤。2011年3月11日,日本东部海域发生里氏9.0级大地震,并引发海啸,导致日本本州岛东部沿海的福岛第一核电站2号机组发生爆炸,反应堆混凝土外壳出现的“裂缝”,造成大量放射性污水泄漏,给周边环境带来巨大威胁。

研究表明,造成工程结构发生损伤和灾害的因素主要有以下几个方面。

① 测试环境等自然因素的不确定性。工程结构暴露在大气环境中,受到温度应力、冻融循环、水侵蚀等作用的影响,混凝土结构易发生风化而产生裂缝,钢筋易发生锈蚀,从而降低结构强度和刚度。同时,结构在长期服役期间可能遭受暴雨雪、地震、台风、洪峰、海啸、爆炸、车船碰撞、人为因素等不确定性的短时偶然的灾难性载荷效应作用,使得结构在短时间内承受的载荷远远超过设计所考虑的最大承载能力,从而使结构发生损伤和破坏,造成严重后果。测试环境的不确定性因素造成监测噪音具有较强的时变性,在实际监测过程中应引起足够的重视。

② 结构设计和施工因素的不确定性。许多在役工程结构设计是依据过去的规范完成的,普遍存在荷载取值偏小、荷载组合考虑不周等问题,在结构使用过程中会逐渐出现损伤和破坏。尽管利用先进的计算手段可以对结构进行详细的计算分析,但是由于结构的不确定性因素较多,如混凝土振捣不均匀、漏振,保护层达不到设计要求,钢筋焊接、绑扎达不到规定要求,偷工减料,施工和管理人员责任心不强等,在实际施工中结构不可能完全符合设计图纸的要求,同时在计算中要对结构进行简化。这些不确定因素使建立的模型不能准确模拟实际结构状态,建成结构内部原有裂缝可能随机扩展,而且会不断地出现新的裂缝,任意时刻裂缝的出现及扩展也是不确定的。由此得到的监测结果与真实结构状态有出入。

③ 结构建模和载荷因素的不确定性。结构健康监测与损伤识别过程中免不了要进行结构的建模,但是结构建模时选取结构计算模型不同,结构的整体损伤与局部细节损伤的差别悬殊等都会给理论计算和监测结果带来明显差异。在结构健康监测与损伤识别过程中,结构的损伤往往发生在局部构件的细节构造上,监测对象当然集中在这些关键构件、关键节点、连接细节等部位,其监测范围相对整个结构来说小得多。但整个结构所处的环境和工作载荷是整个结构范围,而载荷又是导致结构损伤出现、发展和破坏的最主要原因,由于规范的低要求使我国的工程结构在使用耐久性和极限承载能力方面有所欠缺,结构实际承受载荷往往较大,以及载荷的重复作用,致使结构构件出现损伤和疲劳破坏的几率增大。同时,由于组成结构的材料的离散特性、本构关系的不准确、建造过程的不确定、边界条件的简化不同、分布式结构系统误差的离散性、结构构件建模的不正确等,作用在结构上的外部载荷无论多均匀,可能都会导致已经存在的或正在生成的新的损伤的复杂性得以深化。大量文献和以往的试验研究表明,合理选择计算模型和计算参数,能够大大降低噪音在整体结构的损伤状态评定中的影响,通过局部构件的结构健康监测与损伤识别的结果来反映整体结构健康状况,反过来才能满足用整体识别局部细节损伤的要求。

④ 测试数据不完备及信号处理的不准确性。土木工程结构体积庞大、形式各异、自由度多,原则上对结构进行健康监测与损伤识别时,在每个自由度上都应布置传感器,使得最终测试数据更加完整,但一些部位由于人或仪器无法达到而无法监测,实际监测过程中也是没有必要监测的,造成实际监测得到的测试数据不完备。在结构的长期健康监测中,测试仪器的精度、现场条件及周围环境的干扰、人为的监测误差等,均会不可避免地造成测试数据的不确定性。即使处于正常状态的结构,也会由于测试数据转换丢失一部分信息,导致仪器本身的不稳定性;外界条件如温度、湿度等环境条件的变化以及荷载等运行状态的变化,造成测试数据在一个较宽的范围内变化。一般情况下,若仅考虑监测过程中所带来的噪音,即监测仪器的输入信号和输出信号的数值之间的差值,其噪音水平是比较低的,一般说来,仪器经过校正后其监测噪音可以假定为不变的高斯分布,而且感兴趣的信号都有确定的频率。然而实际上并非如此,感兴趣的信号频率范围很宽,而且只能在一个非理想的变化环境中得到。虽然噪音对频率识别结果影响较小,但对于结构损伤识别中识别参数(如信号幅值等)结果影响差异较大。因此,在试验数据不完备的情况下,如何进行有效的参数识别,如何从不完备的试验数据中有效地甄别和剔除噪音等不确定性因素影响,是结构健康监测与损伤识别过程中非常关键的内容。



⑤ 局部损伤的不敏感和随机性。损伤通常发生在结构的局部区域,对反映结构局部振动特性的高阶模态响应影响较为显著,对反映结构整体振动特性、能够观测的低阶模态响应影响较小。基于模态观测的结构模型修正或模式识别方法在实际应用中的最大问题是,结构损伤是典型的局部现象,对实际中容易观测的低频整体响应影响较小,不利于在早期阶段发现损伤。但即使结构状态并未发生退化,也会由于环境因素(温度、湿度等)和运行状态的改变使观测响应发生改变,在实际中难以区分观测数据的改变是由于结构损伤造成的还是由于环境因素和运行状态的改变造成的。土木工程结构中最常用的混凝土材料,是一种多相复合材料,虽然从宏观上看它似乎是均质性材料,但从微观上看,其具有明显的非均质性,内部可能存在诸多缺陷,这些缺陷以损伤的形式和随机分布的形式存在于结构内部,当结构承受荷载作用后,在宏观损伤出现前,局部缺陷造成的损伤已经影响到了混凝土的材料性能。所以混凝土结构的损伤是大量因素综合作用的结果。而这些大量损伤因素本身具有相互独立特性,是遵循某种统计规律的随机变量。

⑥ 监测仪器的不确定性。健康监测系统在实际的结构健康监测中最重要的特性之一就是要求一个结构健康监测系统必须是一个稳定的系统,不稳定的系统不能在工程中付诸实施。在结构健康监测系统中,稳定性是指监测系统能够妥善地保持预定的工作状态的能力。对于健康监测系统中的监测设备来说,系统内各个组成部分的稳定性能在出厂时就已经确定。在实际的结构健康监测中,组成系统的各种监测仪器(如传感器等)均要具有满足监测精度要求的各项性能指标。组成监测系统的监测设备各不相同,可以根据具体的监测要求及实际情况加以选择。在结构健康监测系统中,同样会利用各种各样的传感器,传感器作为最为实用的监测装置,能感受到被测结构的运行信息,并能将获得的信息按一定规律转换成电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。PZT(锆钛酸铅)作为智能材料结构中应用最为广泛的一种智能材料,既可以作为传感元件,又可以作为驱动元件,并且能与其他材料相互嵌入组成智能复合材料,可以应用于监测的各个领域中。虽然PZT在智能材料结构中应用具有许多优点,但是PZT传感-驱动器的稳定性、量程、精度、输出信号形式等指标易受温度场、湿度场、磁场等周围环境的影响。由传感器在一定采样频率下获得的监测数据是一系列离散数据,分析结构损伤时,要建立监测信号的参数化模型,但选取模型所识别的哪些参数作为特征参量来判别损伤具有随机性。当PZT传感器的工作频率超出或低于一定范围时,其稳定性将会受到影响。因此,应对结构健康监测系统最为关键的组成部分——PZT传感-驱动器的性能(如输入输出、使用范围、测试精度等)进行详细了解,针