

·学科进展·

# 土木工程结构健康监测的研究状况与进展

谢 强      薛松涛\*

(同济大学工程力学与技术系,上海 200092)

**[摘 要]** 介绍了土木工程结构健康监测的重要性及其概念设计,综述结构损伤检测的研究现状与进展,对于结构监测中的传感器优化布置问题作了介绍,最后对结构监测的几个重要问题作了展望。

**[关键词]** 健康监测,最优传感器布置,损伤检测

检测已有建筑物或桥梁等结构在一些灾害性事件(如:地震、台风、爆炸等)后的健康状况,通常是很费时的。因为关键性的结构构件或节点一般都在外覆物或建筑装饰物的下面。对于一些重要结构,如医院、电厂、军事指挥中心、救援指挥中心、水处理厂等,在经历了大的灾害性事件后,立即对它们的健康作出评估是很迫切的。同时,在这些突发事件后,需要将结构健康状态及时反映到相关的政府主管部门,这可以为迅速营救人民生命财产起很大的作用。例如,1994年1月17日,美国加州 Northridge 大地震时,一些建筑物在遭受主震后并未倒塌,但结构已经存在了损伤而未及时发现,在后来的一次较大的余震作用下倒塌了<sup>[1]</sup>。1999年我国台湾省台中大地震也有类似情况发生。因此,鉴定结构物的健康状态是一件迫切需要解决的工作。

结构健康监测指利用现场的无损传感技术和结构系统的特性分析(包括结构的响应),以达到检测结构损伤或退化的一些变化<sup>[2]</sup>。土木工程结构的健康监测已经成为土木工程学科研究和发展的一个重要领域。

## 1 土木工程结构长期健康监测系统的概念设计

结构长期健康监测系统应能够对结构从设计施工、竣工投入使用一直到结构的整个服役期的运行状态进行监测和评估。施工阶段是否是严格按照原

始的设计来完成的、投入使用后是否是在正常荷载情况下工作的、在一次偶然事件(如地震、台风或爆炸等)作用后结构是否有损伤、整体的工作状态如何等等,这些都是需要回答的问题。

理想的健康监测与损伤识别技术应能在结构损伤出现的较早时期发现损伤,在传感器精度允许的情况下确定损伤的位置,估计损伤的程度,并预测出结构的剩余有效寿命<sup>[3]</sup>。理想的损伤识别方法应该具备的另一重要性能是,能够区分结构建模误差引起的偏差与结构损伤引起的偏差间的区别。尽管近几年出现了一些运用较为成功的整体监测技术,但对于如何从量测得到的信息来解释结构的安全状态及损伤情况,却远未建立起完善的科学理论。对复杂结构的整体监测仍然是土木工程领域面临的一大挑战。

结构的长期健康监测是一种在线监测技术。该系统主要包括以下几方面:传感器、数据采集和处理设备、通讯系统、监控中心及报警设备。在这一系统中,传感器主要用于将待测的物理量转变为电信号输出。数据采集和处理设备一般是安装在待监测结构中的,负责传感系统数据的采集并进行初步的处理。通讯系统负责将这些采集到的数据传输到监控中心。由监控中心负责全面健康监测,将这些信息进行最终的处理并按照监测要求对结构的健康状况进行定期的评估。为了保证整个监测系统的运行不因外界环境突变(如断电)而中断工作,整个系统

\* 1999年国家杰出青年科学基金获得者。  
本文于2001年5月26日收到。

要有自己独立的能源供给系统。通讯系统除了利用有线通讯外,还应建立一套无线通讯体系,以保证现场与监控中心的联系。

## 2 结构损伤检测的研究现状

### 2.1 结构损伤检测基本方法分类

结构损伤检测基本上可以分为3大类<sup>[2]</sup>,即:动力指纹分析法、模型修正与系统识别法,神经网络法

#### (1) 动力指纹分析法

任何结构都可以看作是由刚度、质量、阻尼矩阵等结构参数组成的动力学系统。结构一旦出现损伤,其结构参数也将发生改变,从而导致系统的模态参数和频响函数的变化,因此,模态参数(频率和振型)的改变可视为结构损伤发生变化的标志,可以利用损伤出现前后结构动力特性“指纹”的变化来诊断结构的损伤。为了能够发现损伤并且确定损伤位置,首先应根据先验知识,假设一系列可能的损伤方案,建立各种指纹变化所对应的损伤的数据库,然后用结构出现损伤后的动力指纹的变化与损伤数据库中的指纹相比较,从而选择最接近的损伤方案作为实际的损伤状态。现在通常用到的动力指纹有:频率、振型、振型曲率/应变模态、柔度、功率谱、模态确信准则(MAC)和坐标模态确信准则(COMAC)。从这些动力指纹的变化来检测损伤还有待于进一步的研究,同时应该寻求对结构损伤更为敏感的新的动力指纹。

#### (2) 模型修正与系统识别法

在调查基于指纹分析的损伤识别方法的同时,更多的研究转向基于系统识别理论的方法。结构损伤检测中应用系统识别方法进行研究的一个热点就是模型修正法。模型修正法充分利用理论建模与试验建模的优点,首先用分析的方法建立具有先验性的有限元模型,然后依据试验测得的模态参数、加速度时程记录、频响函数等,通过条件优化约束,来不断修正模型中的刚度分布,从而由测得的模型刚度的退化,对结构损伤进行判别和定位。

这在概念上是很直观的,但是在实际应用中,由于测量噪声、建模误差等因素的影响,土木工程结构可测得的动力特性对局部刚度变化的敏感性很低等因素的影响,使这一方法的应用受到限制。测量得到的模态信息总是不完备的,因此,在特征方程的求解过程中出现了数学上的亚定问题,导致解的不唯一。为了获得一个可用的确定解,就得补充方程个

数或是减少未知量个数,由于“补充”或“减少”的方式不同,产生了各种各样的方法<sup>[4]</sup>。

近30年来,对于模型修正虽然提出了许多种方法,每种方法都各有优缺点,但迄今为止,还没有一个为广大科技人员公认的可用于工程实际的成熟方法。

#### (3) 神经网络法

基于非参数模型的结构损伤检测,由于不需要结构模型的先验信息,在难于选择合适的参数模型的情况下是有许多优点的。在非参数模型的识别方法中,神经网络法越来越受到人们的青睐。Masri等<sup>[5]</sup>已经证明神经网络是结构动力学系统识别的有力工具。

神经网络是模拟人脑或神经系统的功能发展而来的,随后广泛应用于众多的工程领域中。神经网络法不关注所研究结构的表观特性,而且具有一定的容错性,这使它成为代表未知模型系统的一个强有力的工具。神经网络也无需待识别系统的先验知识。无论所研究的结构是线性或非线性的,都可采用同样的识别方法。这对那些必须考虑非线性的土木工程领域越来越有吸引力。国内对神经网络在结构损伤检测中的应用也开展了一些研究<sup>[6]</sup>。

### 2.2 目前研究中存在的问题

近些年来,基于振动的损伤检测技术无论在学术上或在实际应用研究中都取得了长足的进步,但是对于高层建筑、桥梁等复杂土木工程结构的损伤检测,还有许多问题有待进一步的研究和解决。现有的土木工程健康监测和损伤检测的技术和方法,相当一部分是从航空、航天和机械结构“移植”而来的。必须注意的是它们与土木工程在实际中是不同的学科,相同的技术和方法在由一个学科引进另外一个学科领域要注意其适用性及学科的特点。目前,在土木工程结构损伤检测中主要存在以下几个问题:

(1) 模型误差:与航空、航天和机械结构不同,土木工程结构在设计、分析计算时允许有相对较大的模型误差。但是如果用于损伤检测的模型存在较大的误差,会使计算的动力特性产生与损伤引起的动力特性改变相当,甚至更大的偏差,这可能使那些基于动力特性改变的损伤检测方法变得误差很大,甚至失效。例如建筑物的一些非结构构件(外装饰、内隔墙、电梯井等)的变化或者结构体系中一些连接的松动,对小振幅时建筑物的动力响应影响较大,它们的变化很容易与结构的损伤混淆。

(2)测量噪声:由于诸多因素的影响,测量噪声是无法避免的。结构的长期健康监测过程中,从数据的采集到传输,每一步都有可能引入噪声,因此要求传感器要有足够的耐久性以保持其测量信息的稳定性和准确性。

(3)测量数据的不完整性:对于土木工程结构,一般是无法测得完整的结构模态信息的,即只能得到部分模态。这给那些利用完整模态进行损伤检测的方法带来了问题。虽然采用模态扩阶或矩阵缩聚法后仍能应用,但必然带来误差,影响损伤检测的能力和效果。

此外,结构损伤检测中存在的问题还有:环境的影响、损伤识别方法的不完整性、结构动力特性对局部损伤的敏感性较低等等。

### 3 传感器的优化布置技术

在结构模态试验中,传感器的布置对于参数识别和损伤检测有特别重要的意义。对于给定的 $n$ 个传感器,为了得到我们进行结构健康监测所需的最大信息,如何进行布设才能得到最好的结果;如果结构已经布置了 $p$ 个传感器,再要增加布置 $s$ 个传感器,如何布置可以使结果最优等等,这些都是需要通过传感器最优布置技术的研究去解决的问题。

一套完善的传感器布置系统应能够满足<sup>[7]</sup>:

(1)使传感器系统的设备、数据处理、传输、和数据通道等费用最小。

(2)从含有噪声的测量数据中得出较好的结构模型参数的估计。

(3)通过对大型结构模型的试验研究,改善结构控制。

(4)有效确定结构特性及其变化,改进结构整体性能评估系统。

(5)对于大型结构,提高结构早期损伤识别的能力。

较早研究传感器最优布置问题是在航天器的动态控制及系统识别领域。国内在桥梁健康监测领域也对传感器的最优布置展开了研究<sup>[8]</sup>。近年来人们比较熟悉的方法是 Kammer<sup>[9]</sup>在对大型空间结构传感器布置研究中提出的一种有效独立法(Effective Independence)。该法根据各候选传感器布点对目标模态分量线性独立性的贡献进行传感器位置排序。Udwadia<sup>[7]</sup>基于 Fisher 信息阵,提出了一种适合线性和非线性系统的传感器最优布置的快速算法,讨论了在已有传感器系统基础上增设传感器的最优布置

方法。Guyan 减缩法也是一种常用的测点选择方法<sup>[10]</sup>,它将包含有主次坐标关系的约束方程代入系统的动能或应变能表达式,产生减缩的质量或刚度矩阵,逐次迭代,把那些对模态反应起主要作用的主坐标保留下来作为测点的布置。

### 4 结论与展望

土木工程结构的健康监测和损伤检测技术是一门新兴的科学技术,目前正处于蓬勃的发展之中。虽然这种技术已被广泛应用于航空、航天、精密机械等领域之中,但是在土木工程领域的研究还处于起步阶段,绝大多数研究还仅仅局限于实验阶段。虽然国内外已有一些桥梁、建筑已经开始现场监测工作,但是整个研究工作和技术的成熟还有待时日。

从土木工程结构健康监测和损伤检测的研究动态来看,以下几个方面问题的研究在该技术的未来发展方向上有比较重要的意义和迫切性:

(1)结合土木工程各类结构本身的特点,利用振动模态测试分析技术和系统识别理论,探索适用于土木工程结构的模型修正方法。

(2)结构健康监测信息处理技术。损伤信息处理对于在线监测有极为重要的意义。此方面的研究可充分利用近些年来迅速发展的小波分析技术。由于小波分析具有刻划信号局部特征的“数学显微镜”作用,可以用其分析识别正常信号中夹带的含有损伤信息的瞬时反常现象;利用小波分析强大的数据压缩功能,实现在线数据的远距离传输。这些都需要开发用于结构监测系统信息处理的小波分析软件。

(3)传感器的最优布置技术。结构模型试验和在线监测都需要对传感器的最优布置技术进行研究。对于目前航空、航天等领域传感器布置研究的结果,结合土木工程的特点,开发适用于模型误差相对较大的土木结构的传感器最优布置技术。

### 参 考 文 献

- [1] Kiremidjian A S, Straser E G, Meng T et al. Structural damage monitoring for civil Structures. In: Proceedings of the International Workshop of Structural Health Monitoring. Technomic Publishing Company, 1997, 371—382.
- [2] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K et al. Structural control: past, present, and future. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, 123(9):897—971.
- [3] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B et al. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from

- Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. 1996, Los Alamos National Laboratory Report, No. LA-13070-VA5.
- [4] 张德文,魏卓旋. 模型修正与破损诊断. 北京: 科学出版社, 1999年.
- [5] Masri S F, Nakamura M, Chassiakos A G. A Neural network approach to the detection of changes in structural parameters. Journal of EM, ASCE, 1996, 122(5):350—359.
- [6] 王柏生,丁皓江,倪一清等. 模型参数误差对用神经网络进行结构损伤识别的影响. 土木工程学报, 2000, 33(1):50—55.
- [7] Udawadia F E. Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems. Journal of EM, ASCE, 1994, 120(2):368—390.
- [8] 崔飞,袁万城,史家均. 传感器优化布设在桥梁健康监测中的应用. 同济大学学报, 1999, 27(2):165—169.
- [9] Kammer D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1991, 14(2): 251—259.
- [10] Penny J E T, Friswell M I, Garvey S D. Automatic choice of measurement locations for dynamic testing. AIAA Journal, 1994, 32(2): 407—414.

## RESEARCH STATE AND ADVANCES ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING IN CIVIL ENGINEERING

Xie Qiang   Xue Songtao  
(Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** The importance and the conceptual design of structural health monitoring in civil engineering are introduced at first. The methods and advances of structural damage detection and the problem of optimal sensor placement in the structural health monitoring are reviewed and discussed. Some future research subjects in the area are forecasted.

**Key words** health monitoring, optimal sensor placement, damage detection

·资料·信息·

### 第四届管理国际会议在西安举行

由国家自然科学基金委员会管理科学部与西安交通大学管理学院联合主办的第四届管理国际会议于2001年5月5—7日在新落成的西安交通大学学术交流中心隆重举行,来自世界15个国家和地区的近300位专家、学者参加了本次盛会。

本次会议的主题是“新世纪管理新趋势”。包括世界银行、加拿大 McGill 大学、Alberta 大学、美国 Praxair 公司、海尔集团、青岛啤酒股份公司、西部证券股份有限公司、丰佳管理学院等国内外相关单位参与了会议的协办工作。

会议共收到国内外学者提交的论文和报告300多篇,其中157篇收入由高等教育出版社与德国施普林格出版公司联合出版的会议论文集,另外99篇收录在会议论文集第二卷中,安排在会议期间宣读和交流的论文和报告约260篇。会议交流的论文和报告中近半数是受到国家自然科学基金资助的研究成果。

担任本次大会主席的是全国人大常委会副秘书长、国家自然科学基金委员会管理科学部主任成思

危教授和西安交通大学管理学院名誉院长汪应洛教授,组织委员会主任是西安交通大学副校长席酉民教授。

会议组织了25个小组研讨会,安排了6场大会主题报告,成思危教授在大会上做了题为“中国管理科学的学科结构和发展战略”的报告。

此外,会议还组织了包括管理研究方法论、管理教育、证券投资和企业并购与战略等5场专题讨论会。

提交本次会议宣读和交流的论文涉及管理科学的各个主要领域,包括管理学发展史、运筹学、决策与对策理论、组织理论、管理心理与行为理论、管理系统工程、预测与评价技术、工业工程、信息技术与管理、战略管理、会计与财务管理、市场营销、生产管理、人力资源管理、公共政策与管理、金融管理、产业管理、研究与发展管理、资源与环境管理、区域经济发展等。

(管理科学部 供稿)