

城市桥梁智能健康诊断研究与进展

Researches and Advances of the Intelligent Health Diagnosis for City Bridges

董 聪

(清华大学交通研究所, 副教授、博士 北京 100084)

杨培捷

(北京市市政专业设计院, 高级工程师 北京 100037)

20世纪80年代以来,在北美、欧洲和亚洲的一些国家和地区,相继发生了一些桥梁结构的突然性断裂事件,这些灾难性事故不仅引起了公众舆论的严重关注,也使各国政府和科研机构意识到,研究桥梁结构的健康诊断问题已刻不容缓。研究发现,导致桥梁结构发生破坏和功能退化的原因是多方面的,有些桥梁的破坏是人为原因造成的(劣质工程,如四川纂江虹桥工程等),但大多数桥梁的破坏和功能退化是自然原因造成的。自然原因中,循环荷载作用下的疲劳损伤累积,及有损结构在动力荷载作用下的裂纹失稳扩展是造成许多桥梁结构发生灾难性事故的主要原因。研究表明,成桥后的结构状态识别和确认,桥梁运营过程中的损伤检测、预警及适时维修制度的建立,有助于从根本上消除隐患及避免灾难性事故的发生。成桥后的结构状态识别和确认,桥梁运营过程中的损伤检测、预警及适时维修涉及两个关键问题:一是如何对结构状态及参数进行辨识,包括对结构系统中已经出现的损伤进行有效的识别、定位和标定;二是如何对有损结构的功能退化状况和使用风险进行定量评估。

一、城市桥梁健康诊断技术研究的必要性和紧迫性

桥梁建成之后,如何对桥梁的实际品质进行鉴定是业主最关心的问题。飞机、船舶、汽车等批量生产的机械设备,可以通过破坏性原型试验来检验设计目标的满足程度。桥梁等建筑结构属于单件生产,不可能进行破坏性原型试验,因此,非破坏性检验技术受到了特别的关注。巡回目检简单方便,但缺陷也是显而易见的。不仅目检结果因人而异,而且无法对桥梁的整体品质作出定量判断。液体着色、超声波、涡流、磁粉和X射线等无损探伤方法具有量化特征,但庞大的实验工作量和无法直接反映

结构整体功能状况的缺点限制了它们的应用。超声波和X射线探伤目前主要用来检验桥梁关键部位的焊接质量。由于对成桥质量目前尚缺乏严格系统的量化检验方法,结果使一些劣质工程得不到及时发现和处理。轻则增加了日后的桥梁维修保养成本,使国家和地方财政负担加重;重则很快便发生桥毁人亡的惨剧。

如果结构状态及参数辨识问题能够得到妥善解决的话,劣质工程在验收时就可以通过验收试验得到及时的发现。原因是,不合格建筑工程的结构状态及参数的实验辨识结果必然同设计的目标状态存在明显的差异。因此,结构状态及参数辨识问题的解决不仅具有重要的理论价值,而且具有广阔的应用前景。

桥梁运营期间,如何使桥梁的设计品质能够低成本地得以维持同样是业主最关心的问题。上世纪末和本世纪初,欧、美、日等发达国家建成了大批桥梁,这些桥梁目前已超过或者接近服役年限,如何对这些桥梁进行处理成为一项十分紧迫的问题。桥梁属于公共基础设施,其物主多为国家或地方政府。20世纪90年代以来,美、英、法、德、日等发达国家的各级政府及所属科研机构投入了大量的资金用于支持桥梁结构功能退化状况和使用风险定量评估方法和技术的研究与探索。研究表明,适时维修对于降低桥梁的生命周期成本十分关键。适时维修的依据是桥梁功能退化状况和使用风险的定量评估结论。因此,研究桥梁结构的功能退化状况和使用风险定量评估方法和技术不仅具有重要的理论价值,而且具有广阔的应用前景。20世纪90年代中后期,根据国际发展趋势和我国国情,国家自然科学基金委员会和攀登计划重大项目设置了一些子项用于支持大型桥梁结构健康诊断方法和技术的研究与探索,清华大学和同济大学等单位承担了此项任务,背景分别是香港青马大桥和上海徐浦大

桥的桥梁健康实时监测系统。

在我国，与新建的跨海和跨江大桥相比，城市中各类桥梁的检测、维修、加固和改造问题更为紧迫。事实上，北京等大城市在七八十年代建造的许多桥梁已出现明显的损伤，并且损伤的程度和速度远远超过了原先的预期。如何对这些桥梁及更早一些建成的桥梁的功能退化状况和使用风险进行定量评估与决策已经成为地方政府必须面对的紧迫问题。这一问题之所以紧迫，一方面是因为它和城市的交通安全密切相关，另一方面是因为它直接影响着新路网的规划和设计。

随着我国城市化进程的加快，城市桥梁的检测、维修、加固和改造问题将逐步成为各城市都会面临的一个共性问题。从国家和地方政府的长远利益考虑，国家和发达城市的地方政府有必要下大力气，积极支持城市桥梁健康诊断方法和技术的研究与探索，通过一两个示范工程，对其中的关键性理论和技术性问题进行系统的研究与探索，为将来在全国范围内的推广奠定坚实的技术基础。

二、城市桥梁健康诊断的内容与问题

城市桥梁健康诊断的主要内容可概括为 3 个方面：结构损伤状态的识别、定位与标定；有损桥梁结构的功能定量评估；有损桥梁结构的使用风险趋势预测。

1. 结构损伤状态的识别、定位与标定

损伤识别回答的是结构有无损伤这样一类定性问题，是进行结构健康诊断的基础。目前国际上关于结构健康诊断的研究比较多地集中在损伤识别的层次上。损伤定位是进行结构健康诊断的核心，也是问题的难点所在。长期以来，关于结构损伤定位的研究多采用对简单结构预制裂纹进行验证性仿真实验，不仅理论分析做得不够深入，而且仿真结果及其结论也不统一。结构损伤程度的标定是进行有损结构功能评估的基础。

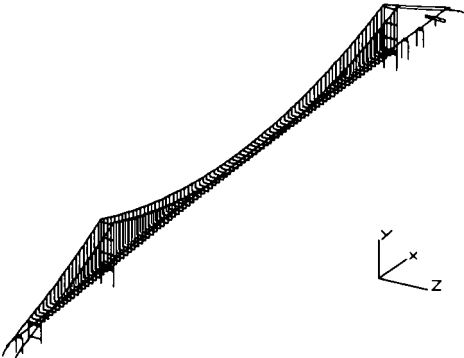


图 1A 青马大桥全桥有限元计算模型

损伤识别问题的核心是损伤标识量的选择及

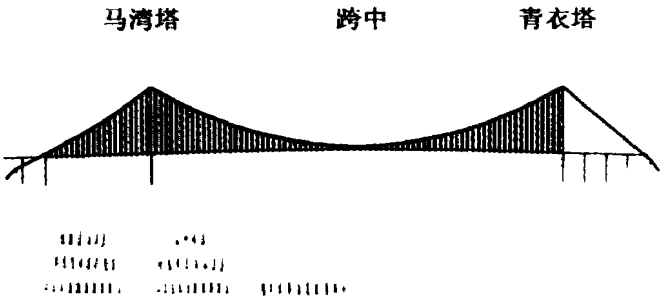


图 1B 基于横向振型的加速度传感器群最优测点布置

传感器群的最优布点设计。损伤标识量的选择应遵循 3 个原则：一是对局部损伤敏感；二是以此为基础能够进行损伤定位；三是可以直接测量或可以根据测量结果进行推算。目前国际上广泛采用的以结构自振频率或结构位移模态为基础的损伤识别指标体系不够理想，需研究和新的结构损伤识别指标体系。传感器群的最优布点设计有两个含义，一是在给定传感器数量的条件下，确保获得最高的辨识精度；二是在给定辨识精度的条件下，确保所需传感器的数量最少。由于在广义遗传算法研究方面的突破性进展，传感器群的最优布点设计问题目前已基本解决。图 1 给出了香港青马大桥传感器群的一组最优测点布置方案。

损伤定位问题的核心是如何将一类数学上不适应的问题在一定的约束条件或约束机制下合理地转化为适应问题。结构损伤通常不影响结构的质量特性，但对结构刚度和结构阻尼会产生一定程度的影响，因此，在假设结构质量特性不变时的结构模型修正技术可用来识别和定位损伤。目前，国际上解决结构损伤定位问题的流行作法是将其作为一类数学反演问题直接进行处理。由于相似矩阵具有相同的特征值（结构固有频率），因此，由结构固有频率反演结构总体刚度矩阵的结果是不唯一的，这就是结果反演中的所谓不适应（ill-defined）问题。为使反演结果唯一，通常需附加约束条件，如求待解参数的最小秩解或最小范数最小二乘解等。研究表明，加数学约束（最小秩解或最小范数最小二乘解）虽然可以使反演结果唯一，但很难保证预测结果和实际结果之间存在一致的相合关系。采用反演方式，目前国际上已做了比较多的模型实验和仿真实验，有人给出正例，有人给出反例。面对这种进退两难的局面，许多人悲观地作出推测，认为结构损伤定位问题不可能最终得到圆满的解决。我们的研究表明，将损伤定位问题作为一类单纯的数学反演问题进行处理是导致该问题长期以来悬而未决的根本所在。原因是，导致预测结果和实际结果之间缺乏一致相合关系的根源在于：附加的数学约束通常未能真实地表述结构损伤过程中系统物理状

态的演化规律。

20 世纪 80 年代中后期, 人工神经网络的研究取得了突破性的进展。研究表明, 采用多层前向网络可以比较精确地求解病态矩阵的逆和伪逆。病态矩阵逆和伪逆的求解事实上就是一种数学反演, 因此, 人们很自然地想到了可采用具有自学习功能的多层前向人工神经网络进行结构损伤识别和定位: 设 $\{X\}_d$ 为有损结构的结构参数矢量, $\{Y\}_d$ 为有损结构的计算或实验响应矢量, 则可以预先生成大量的数据对 $\{X\}_d \rightarrow \{Y\}_d$ 。由 $\{Y\}_d \rightarrow \{X\}_d$, 采用多层前向人工神经网络进行反向学习, 便可获得 $\{Y\}_d \rightarrow \{X\}_d$ 的逼近映射关系。由多层前向人工神经网络的学习规律可以推知, 我们对 $\{Y\}_d \rightarrow \{X\}_d$ 的映射关系的把握, 会随着数据的增加而强化。换句话说, 对于特定结构进行损伤识别和定位的能力, 会随着经验的增加而得到稳步增长。很明显, 如果测量是反复进行的 (如桥梁实时健康监测系统中的不间断序贯采样), 以人工神经网络为学习工具, 按照上述原理, 理论上我们可以设计一个智能型的结构故障诊断系统, 并且该系统的知识库是可以自主进化的。 $\{X\}_d \rightarrow \{Y\}_d$ 的逆映射 $\{Y\}_d \rightarrow \{X\}_d$ 通常是不唯一的, 因此, 采用人工神经网络学习获得的 $\{Y\}_d \rightarrow \{X\}_d$ 的映射关系理论上只可能是一个逼近解, 并且该逼近关系仅在已学习样本的有限邻域内成立。换句话说, 以人工神经网络为学习工具的智能型结构故障诊断系统的实现是有条件的, 首先应保证待识别的损伤状态在学习样本的邻域, 其次应保证所采用的网络结构具有适当的泛化能力。

从静态的角度看, 由于 $\{X\}_d \rightarrow \{Y\}_d$ 的逆映射 $\{Y\}_d \rightarrow \{X\}_d$ 通常是不唯一的, 因此无法直接由 $\{Y\}_d$ 反演出 $\{X\}_d$ 。在得出上述结论的时候, 我们忽略了一个重要的现象, 即 $\{X\}_d$ 的演化不是随意的。事实上, $\{X\}_d$ 的发展遵循一定的演化规律: 如结构的主要失效模式给出了结构系统的破坏轨迹, 因此, 损伤单元必然隶属于结构系统的某个主要失效模式; 裂纹的扩展是渐进的, 因此, 当前损伤状况必然在上一个损伤状况的邻域等。研究表明, 与自然界实际发生的一样, 在考虑结构损伤过程中的物理状态演化规律、考虑结构的可能破坏方式和途径的条件下, 存在一种有效的算法可以实现 $\{Y\}_d$ 到 $\{X\}_d$ 的直接反演, 并且该反演方式得出的结果在理论上是精确的。可以推知, 如果在一定条件下实现了由 $\{Y\}_d$ 到 $\{X\}_d$ 的直接精确反演, 则结构损伤识别和定位这一长期悬而未决的难题就从根本上得到了解决。

事实上, 由 $\{Y\}_d$ 到 $\{X\}_d$ 的直接精确反演不仅解决了结构损伤识别和定位问题, 而且也解决了结构损伤程度的标定问题。

2. 有损桥梁结构的功能定量评估

对有损桥梁结构的功能 (承载力、变形量、可靠

性等) 进行定性分析比较容易, 但进行定量评估则很困难。比如对桥梁结构进行振动测量, 我们发现它的低阶自振频率有所降低, 根据经验, 我们有理由推测, 桥梁结构出现了损伤, 但我们很难判定损伤造成的影响究竟有多大。但是, 如果得到了 $\{X\}_d$ 的精确估计, 则对有损桥梁结构的功能进行定量评估则不再是一件很困难的事情。在 $\{X\}_d$ 已知时的桥梁承载力和变形量的计算方法已很普及; 在 $\{X\}_d$ 已知时的桥梁结构可靠性分析算法我们也已解决。

3. 有损桥梁结构的使用风险趋势预测

城市桥梁的载荷环境变化很大, 车速、车重和车流密度等的变化都会对车载产生影响, 从而直接影响桥梁的疲劳断裂寿命。因此, 要对桥梁的健康状态进行准确的评估和决策, 建立准确的车速、车重和车流密度等的趋势预测模型及相关的桥梁疲劳寿命动态预测模型十分关键。

利用人工神经网络的自学习功能, 从布置于桥内的加速度传感器中自动提取有关车速、车重、车流密度等的趋势预测模型在理论上和技术上都是可以实现的。

由于我们已经解决了随机谱载作用下复杂结构系统疲劳断裂寿命可靠性分析和预测问题, 因此, 在给定车载模型的条件下, 有损桥梁结构的使用风险趋势预测问题是可以解决的。

4. 其它一些技术问题

自由度不匹配的问题在模型建立与模态分析中都存在, 前者是指有限元模型的自由度与实际结构的自由度不匹配, 后者是指测试自由度与有限元模型的自由度不匹配。在进行模式识别时, 实测模式只有与模式库中的模式的自由度匹配时才可进行比较, 因此, 建立模型自由度缩聚与扩阶的有效算法十分重要。模型自由度缩聚与扩阶算法的建立应遵循两个原则, 一是考虑惯性力的影响, 二是保持结构或结构单元原先的一些内秉属性 (如结构刚度矩阵的对称性等) 不变。

结构损伤会使结构的模型参数发生变化, 如何根据实测数据快速自适应地重构及修正结构模型对有实时性要求的结构健康诊断系统的设计十分重要。研究表明, 具有自学习功能的人工神经网络可自动完成这一任务。

三、城市桥梁健康诊断的智能化趋势

研究城市桥梁健康诊断问题的必要性和紧迫性已毋庸置疑。人们关心的可能是我们为什么要走智能化这样一条道路。事实上, 城市桥梁健康诊断系统的智能化主要是由下面 3 方面的原因决定的。

1. 计算技术的进步

由于计算技术的进步, 我们进行结构分析和优

日本社会学发展之评析

Review on the Development of Japanese Sociology

郁贝红

(福州大学人文社会科学系, 副教授、社会学博士 福州 350002)

我国为社会学正名、恢复、重建以来, 今年已是第 20 个年头。在回顾 20 年来我国社会学发展历程与现状的同时, 了解一下其他国家社会学的发展情况, 可以开阔我们的视野, 获得有益的启迪。

最近笔者得到一本 1998 年出版, 由伊藤公雄和桥本满编辑的《日本的社会学概论教科书》(日文名为《はじめて出会ふ社会学》), 觉得对我们回顾这 20 年历程, 思考将要跨越的下个世纪的社会学的发展有一定的启示。

从该书目标就可以清楚地看到, 它所介绍的理论, 与传统的社会学教科书的内容完全两样。传统社会学教科书通常介绍的是人的社会化、社会角色、社会互动、社会群体、家庭婚姻、社会组织、阶级与阶层、社会规范、社会制度、社区、社会变迁、社会

化的能力大大增强。仿真实验使原先一些无法看到的现象呈现出来, 人们开始习惯于数值解法, 并且意识到, 不存在解析解并不必然意味着无解。

2. 数字化仪器仪表的广泛使用

数字化仪器仪表的广泛使用使得信号处理变得十分方便。人们发现, 使用一些衍生参数有时比直接使用原始参数更易于发现问题和解决问题。数字化仪器仪表的使用使测量和分析之间的界限模糊起来, 而计算技术和实验技术的有机结合使一些原先无法求解的问题开始有了解决方案。

3. 智能技术本身的进步

人工神经网络的出现解决了智能系统从环境中自主学习的问题; 遗传算法的出现解决了混合变量的全局最优化问题。这两个问题的解决为结构损伤识别、定位和标定问题的最终解决提供了有效的求解手段, 同时也为建立一系列的预测模型提供了合适的工具。

如果说结构损伤识别和定位在一定程度是一个理论问题的话, 则桥梁结构的健康诊断在很大程度上是一个工程问题。理论上关心的是解的存在性和真实性, 而工程中还必须保证求解程序的有效性和通用性。实践证明, 对于故障诊断问题, 加速求解程序进程的一条有效途径就是利用专家的知识

问题、社会控制和社会现代化等从微观的个体行动到宏观的社会变迁等一系列社会学基本理论, 体现了从个人和社会群体等的互动性质的研究, 来揭示人类社会的构成条件及运行机制的一般规律性的社会学研究的传统视角, 属于认识与研究社会结构与社会过程的规律性的具普遍性意义的、系统性的、最基本的“巨型”理论; 而这本新教科书中介绍的却是分析当今日本社会发生的, 人们特别关注的那些如艾滋病、新宗教、旅日外国人、流行等相互之间似乎没有太大联系的、局部性的、人与人之间的实际感受和体验等具体的社会现象和社会问题的特征、性质和规律的理论。体现了以解决实际问题为目的的研究立场。似乎是某种具特殊性的、零散的、应用性的“小”理论。

经验, 人工神经网络在知识获取方面的优势有助于问题的合理解决。

人工智能的发展历史表明, 诊断系统始终是智能技术得到成功应用的一个领域。原因是, 诊断系统的内在框架十分有利于实现智能化。

参考文献

- [1] D. C. Zimmerman, M. Kaouk, Structural Damage Detection using A Minimum Rank Update Theory, J. Vibration and Acoustics, 1994, 116(4)
 - [2] S. Hassiotis, G. D. Jeong, Identification of Stiffness Reduction using Natural Frequencies, J. Eng. Mech., 1995, 121(10)
 - [3] L. H. Yam, Theoretical and Experimental Study of Modal Strain Analysis, Journal of Sound and Vibration, 1996, 191(2)
 - [4] O. S. Salawu, Detection of Structural Damage through Changes in Frequencies: A Review, Engineering Structures, 1997, 19(9)
 - [5] 董聪. 多层前向网络的逼近机理与拓扑结构学习方法. 通信学报, 1998, 19(3)
 - [6] 董聪. 复杂结构可靠性评定专家系统研究进展. 科技导报, 1998(6)
 - [7] 董聪, 郭晓华. 广义遗传算法的逻辑结构与全局收敛性的证明. 计算机科学, 1998, 25(5)
 - [8] 董聪, 郭晓华. 智能故障诊断. 计算机科学, 1999, 26(8)
- (责任编辑 王宏章)