

文章编号: 0451-0712(2006)04-0108-09

中图分类号: U446.2

文献标识码: B

桥梁健康监测中的关键性问题和损伤识别方法

郭 健, 孙炳楠

(浙江大学土木工程系 杭州市 310027)

摘 要: 针对大型桥梁结构健康监测的特点, 分析了桥梁健康监测中的关键性问题。阐述了几种传统的损伤识别方法, 并介绍了一些新兴理论在损伤识别中的应用, 分析了不同损伤识别方法的特点。最后提出基于多传感器信息融合的桥梁结构损伤识别策略, 并对桥梁健康监测中损伤识别的发展进行了展望。

关键词: 桥梁工程; 健康监测; 损伤识别方法

大型桥梁的使用期长达几十年、甚至上百年, 在环境侵蚀、材料老化、荷载的长期效应和疲劳效应、灾害因素的突变效应等共同作用下将不可避免地导致结构系统的损伤积累和抗力衰减, 极端情况下可能引发灾难性的突发事件。因此, 为了保障结构的安全性、完整性和耐久性, 已建成使用的大型桥梁急需采用有效的手段来监测和评估其损伤程度及安全状态。

随着测试手段和分析技术的提高, 国内外都开始在一些已建和在建的大型桥梁中设置结构健康监测系统, 对结构的损伤和安全状态进行监测和评估^[1,2]。本文通过分析目前桥梁健康监测中面临的关键性问题, 并结合近年来结构损伤识别发展的最新进展来探讨桥梁健康监测系统和损伤识别方法。

1 桥梁健康监测和损伤识别的重要性

虽然很早以来, 人们就意识到对桥梁进行安全监测的重要性, 但由于早期的监测手段比较落后, 所

以在应用上一直受到限制, 以致在过去发生了一些惨痛的工程事故^[3]。桥梁结构出现损伤和破坏主要有三方面的因素。

第一, 结构先天不足。在设计和施工中结构本身具有缺陷, 在后期的运营和使用中, 结构受力不合理而出现损伤和破坏。

第二, 桥梁设计荷载标准偏低, 使得在后期使用中, 实际荷载大于设计荷载, 并超龄服役使得结构发生损伤和破坏。

一个桥梁结构的安全水平不仅取决于工程设计、施工技术和管理人员的水平与素质, 而且取决于工程法规、规范所规定的安全设置水准。公路桥梁结构安全设置水准以最常用车辆(我国为汽车—超 20 级系列)作用于 30 m 跨径的简支梁桥需承受的活载效应(标准值)为例, 美国和英国规范分别比我国规范大 12% 和 29%; 对于活载安全系数, 我国为 1.40, 而美国为 1.75, 英国为 1.73; 对于桥梁需承受活载效应设计值, 美国和英国规范分别比我国规范大 40% 和 59%。对于车辆活载, 我国桥梁的设计承载能力为

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2005037821)

收稿日期: 2005-10-17

under different damage degree of $L/2$ across, $L/4$ across of the rib arch and bumped No. 8 suspension rod are analyzed, the changing regularization of the dynamic characteristics of whole structure is concluded and the damage identification to the rib arch is realized according to the dynamic characteristic changing and strain modal. The damage identification to the suspension rod is realized according to the dynamic characteristic changing and curvature modal.

Key words: bridge; dynamic characteristics; damage identification; finite element method; modal analysis; numerical simulation

美国、英国的68%和60%。可以看出我国公路桥梁设计规范在安全设置水准上的低要求非常突出。日本、德国的设计规范总体上比英美更保守,多数发展中国家一般参照发达国家规范。台湾和香港地区,分别参考或依据美国和英国规范。由于规范的低要求使得我国的桥梁结构在使用耐久性和极限承载能力方面有所欠缺,随着经济的发展和交通量的增加,桥梁结构上的实际承受荷载都有很大提高,使得结构安全可靠性和降低,结构局部构件出现损伤和破坏的机率增加。

第三,桥梁结构受到超出设计预料的突加荷载作用,使结构在短时间内承受的荷载超过了设计所考虑的最大承载能力,从而使结构发生损伤和破坏。在突加荷载中,地震荷载及风荷载是主要的破坏性荷载,以我国为例,20世纪大约平均每3年发生2次7级以上地震,在2次地震中几乎就有一次酿成重灾。风荷载也是桥梁结构长期以来需要面对的破坏性荷载,在桥梁使用过程中,遇到超出设计考虑的较大风荷载突然作用时,结构将经受一次破坏性荷载的考验,使得结构可能出现局部或整体的损伤和破坏,美国的Tacoma大桥、德国的Nassau桥、英国的Union桥等都是由于风振发生破坏^[5]。

据报道,美国联邦公司管理局(FHWA)曾对全美国近60万座桥梁进行了统计,结果表明:约有1/3的桥梁功能陈旧或有结构缺陷,且估计每年有150~200座桥会倒塌;在英国,据报道也有1/3的桥梁需要修复;在加拿大,估计需耗费5 000亿美元对大量的桥梁损伤进行修复;在我国,交通量与日俱增,车辆载重不断提升,缺乏例行维修,不少桥梁处于带病超负荷工作状态,尽管新桥不断建成投入使用,但同时更多的旧桥梁到达或即将到达其设计服役期,截止2000年底,我国的公路危桥为9 597座。可见桥梁工程结构的损伤和破坏并不是个别现象,即使一个设计和施工都非常完美的结构,随着服役时间的延长和荷载的增加,桥梁出现损伤和破坏的概率也将不断增加。

大跨桥梁结构的安全性对国民经济、社会稳定和人民的生命财产具有直接的重大影响。随着对工程结构的安全性、耐久性及正常使用的日益关注,人们希望能够在桥梁的服役期,即使出现一些如地震、台风、爆炸等灾害性事件后,能充分了解结构的健康状况,以决定是否需要对结构进行维修和养护,以及何时进行维修和养护。

2 桥梁健康监测和损伤识别的发展

对处于自然环境中的桥梁结构,从服役开始就面临着一个损伤积累的问题。严格地讲结构的健康状态是不断地发生着变化,损伤积累到一定程度将导致结构的突发性失效破坏。为了保证结构的安全,人们很早就意识到应在桥梁服役期充分了解结构的损伤状态及承载能力的变化,使损伤积累尚未达到威胁结构安全的程度之前就能够被检测出来。而准确地识别出结构的损伤及对结构工作状态的正确评估,不仅关系到桥梁使用的安全,而且决定了桥梁维修的对策。除了这个目的,桥梁结构探伤工作的发展主要是围绕着结构损伤检测、结构损伤识别、结构健康监测来进行的。

结构探伤最早被应用于机械、航空领域。对于由连杆、轴承、齿轮等一系列零件组成的大型机械,人们很早就开始对它们进行结构故障诊断。后来在20世纪60年代初期,由于航空、军工的需要,结构的损伤检测发展起来,并发展了一系列的无损检测技术^[6],这一时期的损伤检测主要是以各种物理和化学的方法在现场观测结构中的损伤。80年代以后,随着计算机技术、信息技术的发展,人们不仅应用各种检测手段和检测工具在现场对结构进行测试,还应用各种理论方法在计算机上结合有限元计算对结构的损伤状态进行分析,来识别在现场无法察觉的结构损伤,后来发展出了一门专门的技术——损伤识别。

从国外来看,20世纪40年代到50年代,土木结构的损伤检测主要是对结构缺陷原因的分析 and 修补方法的研究,检测工作大多采用以目测为主的传统方法;60年代到70年代,开始注重对结构检测技术和评估方法的研究,多种现代检测技术被应用到土木结构中。80年代以来,土木结构的损伤检测进入了逐步完善的阶段,结构损伤检测与基于有限元分析和智能评估的损伤识别相结合得到了迅速的发展。我国的土木工程结构损伤检测发展较晚,主要的研究也是在80年代以后,随着结构抗震、抗风研究的发展,才逐步开始结合可靠性评估和安全维修鉴定进行结构损伤检测的研究^[6]。

一般来讲,结构损伤检测是在某一时刻对桥梁结构性能进行的检测与评估。对于大型桥梁,为了能够及时地获得结构的健康状况信息,靠对桥梁偶尔进行的测量是无法满足要求的。因此,国际上出现了针对重要桥梁的长期健康监测系统。长期健康监测

系统是由永久性安装在桥梁上的传感器和数据采集输出等软硬件设备组成的系统,它以结构的荷载、环境、响应等为监测对象,为及时地评价桥梁的健康状态提供了丰富的资料,可实时地通过现场安装的损伤检测仪器和计算机辅助完成的损伤识别技术对结构的健康状态做出评价。长期在线桥梁健康监测对硬件和软件都提出了更高的要求,大大推动了损伤检测和损伤识别技术的发展。

美国在20世纪80年代中后期开始,在多座桥梁上布设传感器,监测环境荷载、结构振动和局部应力状态,用以验证设计假定、监视施工质量和实时评定服役安全状态,另外丹麦、挪威、日本、泰国等国家都在已建的大型桥梁中安装了健康监测系统^[2]。我国香港的几座大桥以及内地的虎门大桥、徐浦大桥、江阴长江大桥、苏通大桥、钱江四桥等也在施工阶段安装传感设备,在运营期间对结构进行实时监测。其中,由我们完成的钱江四桥长期结构健康监测系统^[7]包括传感器系统,信息收集系统,信息处理和分析系统。传感器系统由风速仪、温度传感器、全站仪、应变计、磁弹测力仪、加速度传感器等共102个各类传感器及相关附件组成。信息收集系统为桥内的2台电脑控制的信息采集站。信息处理和分析系统为桥监室中的2台电脑工作站,负责分析由光纤网络传至的信息。总的来讲,越来越多的大型桥梁中开始采用一定的实时监测手段和损伤识别技术来诊断和评估结构的服役状态。

3 桥梁健康监测系统的构成和关键性问题

桥梁健康监测是集结构监测、系统识别及结构评估于一体的综合监测系统,从系统结构来看,桥梁健康监测系统一般可划分为^[8]:(1)数据采集子系统,主要包括各类信号采集存储和传送的硬件系统;(2)数据信号处理子系统,主要包括各类数字信号的处理,如A/D转换及数字滤波去噪等;(3)系统识别子系统,通过计算机模拟仿真计算,结构有限元模型分析,识别出结构系统的静、动力特性参数,即系统特征识别;(4)损伤识别子系统,即通过一定的分析技术,对已获得的数据进行处理,与结构系统特征联合,应用各种有效的手段识别结构损伤,完成损伤预警、损伤定位、损伤定量;(5)结构状态评估子系统,对结构的健康状态做出评价,分析结构的强度储备,评价结构的可靠度,计算分析结构投资—寿命关系,提出桥梁健康维护策略;(6)数据管理子系

统,完成大量的现场采集数据和后续分析数据的存储,并实现结构相关信息的可视化和决策数据库的智能化,为决策管理人员提供信息支持。

整个结构健康监测系统就像一个医生,对结构健康状态进行诊断。首先对桥梁结构系统输入荷载能量,激励结构体系产生反应,并通过各种测试仪器对结构反应进行监测,得到测试数据后,先完成数据处理,再结合数值模型的先验知识对结构进行诊断,分析结构可能发生的损伤,最后对结构的健康状态进行评估,确定维修、养护对策。一个完善的结构健康监测系统如图1所示。

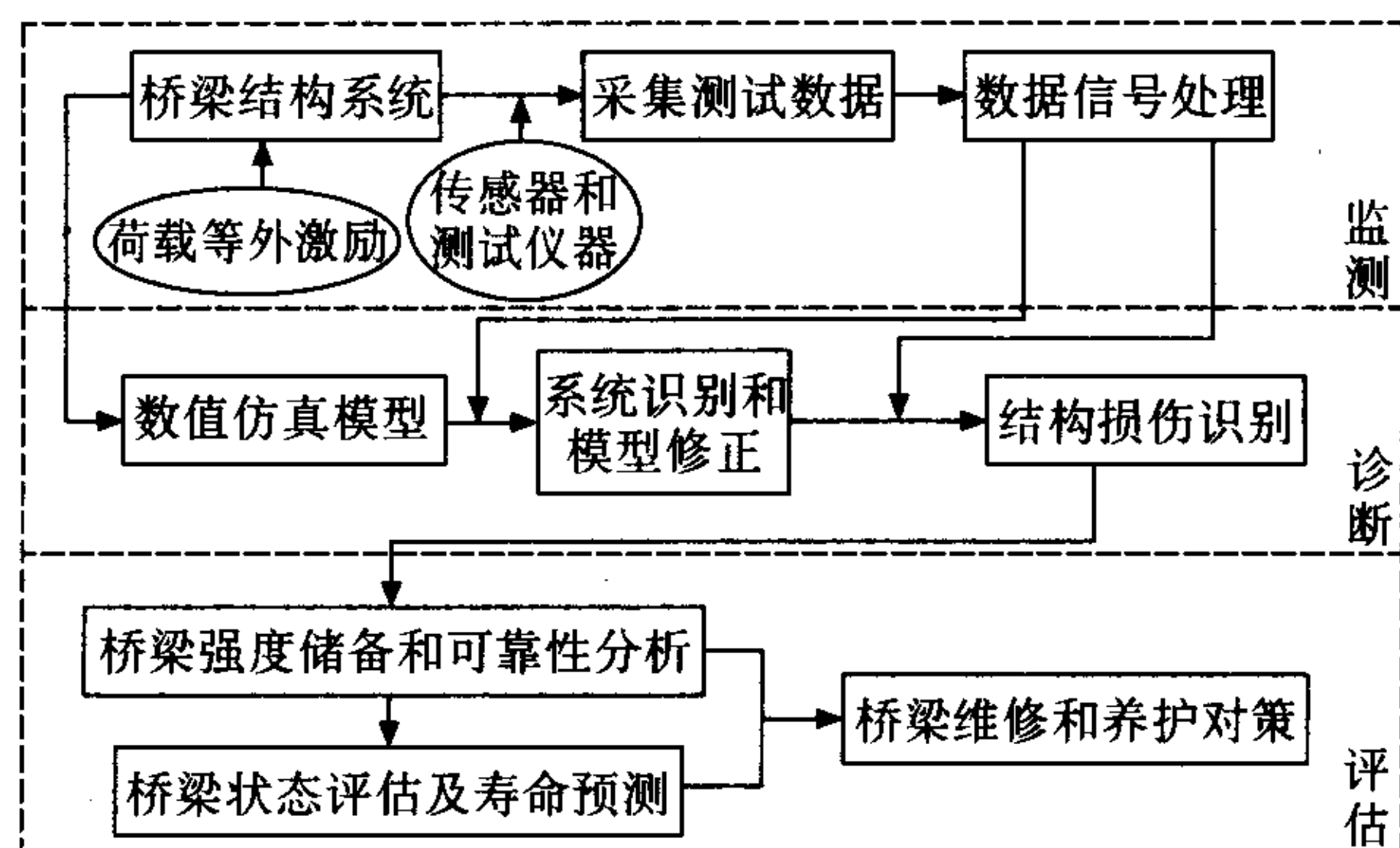


图1 桥梁健康监测系统的构成

从信息学角度来看,桥梁健康监测的过程就是通过测试从数据信号中提取有关信息,对结构进行认识的过程。测试是探测手段,信号是对物理量变化的描述,信息对应着结构状态的特征,信息以信号为物质载体。对于一座桥梁,它本身具有抵抗外力的能力,这是物质的固有特性,为了探测这一客观存在,可以对所研究的桥梁结构系统施加外力激励,测得结构反应信号,该信号中就包含了描述该系统损伤状态的信息,通过对测试信号进行分析,就可以了解桥梁结构的健康状况和承载能力。在桥梁健康监测系统中,从现场采集的数据包括结构不同测点处的位移、应变、加速度和环境激励等数据。如何从这些物质的数据中准确地获取与结构损伤特征密切相关的信息是我们所关心的问题。一个桥梁健康监测系统的优劣主要由以下3个因素决定^[9]:(1)传感器的灵敏性和精度,以及数据传输和采集设备的性能;(2)测点的空间分布,即传感器的最优布置问题;(3)测试数据的分析处理。

从目前的发展来看,用于结构健康监测的硬件设施越来越先进,高性能的智能传感器元件和信息采集装备越来越多地在工程中得到应用。从多次国

际结构健康监测会议的研究成果来看,当前的传感器技术已经达到较高的水平,在桥梁健康监测系统中传感器信号的获取已经不是一个至关重要的问题。传感器的优化布置决定了能否获得大型结构的整体信息和局部信息,也决定了测试数据对结构损伤变化的敏感性。如何安排有限数量的传感器实现对结构状态改变信息的最优采集,是大型桥梁健康监测需要解决的主要问题之一,目前在这一领域也有较多的研究成果。

测试数据的分析处理要完成结构损伤识别和桥梁整体健康状态的评估。因此在桥梁健康监测中最关键的就是测试数据的分析处理,一旦健康监测系统投入运营,主要的工作就是如何应用有效的损伤识别技术从测试信号中获取有关结构损伤状态的信息,其核心是桥梁结构的损伤识别。

4 桥梁结构损伤识别的传统方法

4.1 结构损伤识别的目标和动力系统模型分析

在桥梁健康监测系统中,基于振动测试的传感器数据含有更大的结构特征信息量,也是结构损伤识别的主要分析对象。桥梁损伤引起的结构参数变化会改变结构的动力特性,而动力特性的变化信息包含在桥梁动力测试数据中。本文以振动测试信息为基础来分析损伤识别方法。

在桥梁健康监测系统中,损伤识别要解决3个问题^[10]:(1)损伤指示,发生结构已经出现异常的报警,指示有损伤发生;(2)损伤定位,找出发生损伤的构件部位;(3)确定损伤程度,进一步量化分析出现的损伤程度,给出确定的指标。这3个问题对识别技术的要求逐步提高。针对这3个问题。国内外已经发展了多种损伤识别方法。

从动力系统认知的角度看,损伤识别问题是一个系统辨识过程。系统辨识是在一定输入下,在输出数据的基础上,从一类模型中确定一个与所测系统等价的模型,即确定系统模型参数的过程^[11]。损伤识别过程就是通过测试数据确定结构参数是否发生变化以及哪些参数发生了变化,变化量为多少。

在振动测试中,外激励荷载就是结构系统的输入,测试数据就是系统的输出,而所采用的模型是动力学微分方程。一个结构系统的动力学方程为:

$$[M(t)]\{\ddot{y}(t)\} + [C(t)]\{\dot{y}(t)\} + [K(t)]\{y(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M(t)]$ 、 $[C(t)]$ 、 $[K(t)]$ 分别是结构的质

量、阻尼和刚度矩阵,即系统参数,在桥梁服役过程中,它们可能是随时间变化的; $\{f(t)\}$ 为结构系统的激励荷载输入向量, $\{\ddot{y}(t)\}$ 、 $\{\dot{y}(t)\}$ 、 $\{y(t)\}$ 分别是结构系统的质点加速度、速度及位移输出向量。当在 t_d 时刻桥梁发生损伤时,结构中的系统参数会发生改变。对于桥梁结构来说,一般的损伤结果并不影响结构质量的变化,因此认为结构损伤后的质量 $[M_d]$ 等于损伤前的质量 $[M_0]$,而结构的刚度和阻尼在损伤前后发生了变化,由 $[K_0]$ 、 $[C_0]$ 分别降为 $[K_d]$ 、 $[C_d]$ 。而在大多数结构损伤中,损伤前后的阻尼变化很小,可近似认为 $[C_d] = [C_0]$ 。桥梁结构系统的损伤识别问题就是在给定系统输入 $\{f(t)\}$ 下,通过分析系统输出数据 $\{\ddot{y}(t)\}$ 、 $\{\dot{y}(t)\}$ 、 $\{y(t)\}$,来识别系统中刚度参数和阻尼参数的变化。

4.2 传统的结构损伤识别方法

针对桥梁结构动力系统方程(1),人们首先想到的是找到一种不随 $\{f(t)\}$ 变化的结构动力特征,能够反映结构损伤前后的系统参数变化。因此结构固有频率、振动模态等“动力指纹”被采用来进行损伤识别。

基于测试频率的方法被 Adams 等人和 Cawley 等人首次提出来进行损伤识别^[12,13]。他们根据结构固有频率的变化监测到损伤的存在,然后结合计算分析模型完成对损伤位置和损伤程度的识别。由于局部损伤引起的结构 i 阶固有频率改变可以用一个函数表示,它是损伤位置矢量 r 和由于损伤引起的刚度减小量 δ_k 的函数,即:

$$\delta\omega_i = f(\delta_k, r) \quad (2)$$

把函数在 $\delta_k = 0$ 处(无损伤状态)展开,忽略高阶项,得:

$$\delta\omega_i = f(\delta_k, r) = f(0, r) + \delta_k \frac{\partial f(0, r)}{\partial(\delta_k)} \quad (3)$$

因为在损伤之前频率没有发生改变,即对所有的 r , 有 $f(0, r) = 0$, 因此有:

$$\delta\omega_i = \delta_k \cdot g_i(r) \quad (4)$$

其中 $g_i(r) = \partial f(0, r) / \partial(\delta_k)$, 同样地有:

$$\delta\omega_j = \delta_k \cdot g_j(r) \quad (5)$$

这样得到了频率改变比 $\delta\omega_i / \delta\omega_j$ 是损伤位置的函数,与损伤程度无关,即:

$$\frac{\delta\omega_i}{\delta\omega_j} = \frac{g_i(r)}{g_j(r)} = h(r) \quad (6)$$

当实测的 $\delta\omega_i / \delta\omega_j$ 值与某个位置有损伤的计算比值相等时,该位置即是可能的损伤位置。最后通过计算

固定损伤位置上不同损伤程度的固有频率变化值,与测试的固有频率变化值相比较来估计损伤程度。

由于结构振动模态在桥梁测试中较易得到,基于测试模态的损伤识别方法也被较多地应用到结构损伤识别中来。比较典型的是 West, Wolff 和 Richardson 等人^[14,15]提出的应用 MAC (Model assurance criterion) 来进行结构损伤指示和损伤定位的方法。MAC 被定义为:

$$MAC(i, j) = \frac{(\{\phi^A\}_i^T \{\phi^B\}_j)^2}{(\{\phi^A\}_i^T \{\phi^A\}_i)(\{\phi^B\}_j^T \{\phi^B\}_j)} \quad (7)$$

式中: $\{\phi^A\}_i$ 、 $\{\phi^B\}_i$ 分别为结构损伤前后的第 i 阶模态向量; $\{\phi^A\}_j$ 、 $\{\phi^B\}_j$ 分别为结构损伤前后的第 j 阶模态向量。

MAC 是一个从 0 到 1 之间的标量,表示两组模态向量的相关程度。1 表示完全相关,0 表示完全不相干。接近于零的 MAC 值指示可能发生损伤。而在那些与损伤构件相邻接或靠近的自由度上模态向量的变化比远离损伤构件处的模态向量的变化大,可据此判断损伤位置。

由以上两种最初的基于频率和基于模态的损伤识别方法不断改进,目前已经发展出了多种不同的损伤识别方法,如基于模态曲率、模态应变、模态应变能等以及频率和模态组合的方法。大量的研究成果显示:频率和模态等“动力指纹”可判断损伤出现和损伤定位,但不足以准确确定损伤的程度。但这些方法计算简单,适合简单结构的损伤识别^[16]。

基于矩阵的损伤识别方法是把结构测试数据与结构模型矩阵相结合的方法,通过组集一个损伤结构的测试矩阵与未损结构的模型矩阵进行对比得到结构损伤信息,实际是求解一个约束优化问题。结构在无阻尼自由振动时的特征方程可以写为:

$$[K]\{\phi\}_i - \omega_i^2[M]\{\phi\}_i = 0 \quad (8)$$

式中: $[M]$ 和 $[K]$ 为结构的质量和刚度矩阵; ω_i 和 $\{\phi\}_i$ 为结构第 i 阶固有频率和振型。

假设损伤仅引起刚度损伤,而质量保持不变,即:

$$\begin{cases} [K] = [K_0] + [\Delta K] \\ [M] = [M_0] \end{cases} \quad (9)$$

这里 $[K_0]$ 和 $[M_0]$ 为未损结构的刚度和质量矩阵, $[\Delta K]$ 为损伤引起的刚度改变。基于矩阵分析的模型修正损伤识别方法就是用测试得到的 ω_i 和 $\{\phi\}_i$ 去估计 $[\Delta K]$ 的值,即在以 ω_i 和 $\{\phi\}_i$ 构成的残差目标函数最小的条件下,优化求解损伤引起的结构刚度参数变化。这种方法一般需要建立一个精确的有限元模型

且有一定的测点数据才能保证损伤识别的精度。从这个基本原理出发,已经发展出了许多改进的矩阵分析方法,如柔度矩阵方法、灵敏度矩阵方法、子结构模型方法、计算模型矩阵的缩减和测试模型矩阵的扩展等方法。对于大型桥梁结构的损伤识别来说,基于矩阵的方法计算量较大,且有可能由于优化求解的方程出现病态而难以得到理想的识别精度^[17]。

基于神经网络的方法,近年来在结构损伤识别研究中应用较多,也有一些成功的例子。神经网络方法以其强大的非线性映射能力,对于解决复杂结构的损伤识别有很大优势^[18]。它通过不断迭代的训练算法,使得样本测试数据和结构损伤状态匹配,实现与实测数据相对应的结构损伤事件的分类识别。神经网络的损伤识别方法流程如图 2 所示。在基于神经网络的结构损伤识别中,关键是如何选取能够代表结构损伤状态的特征参数,来作为网络的输入以提高网络对结构损伤的敏感性。另外,网络训练样本的代表性也是关系到损伤识别精度的重要因素。

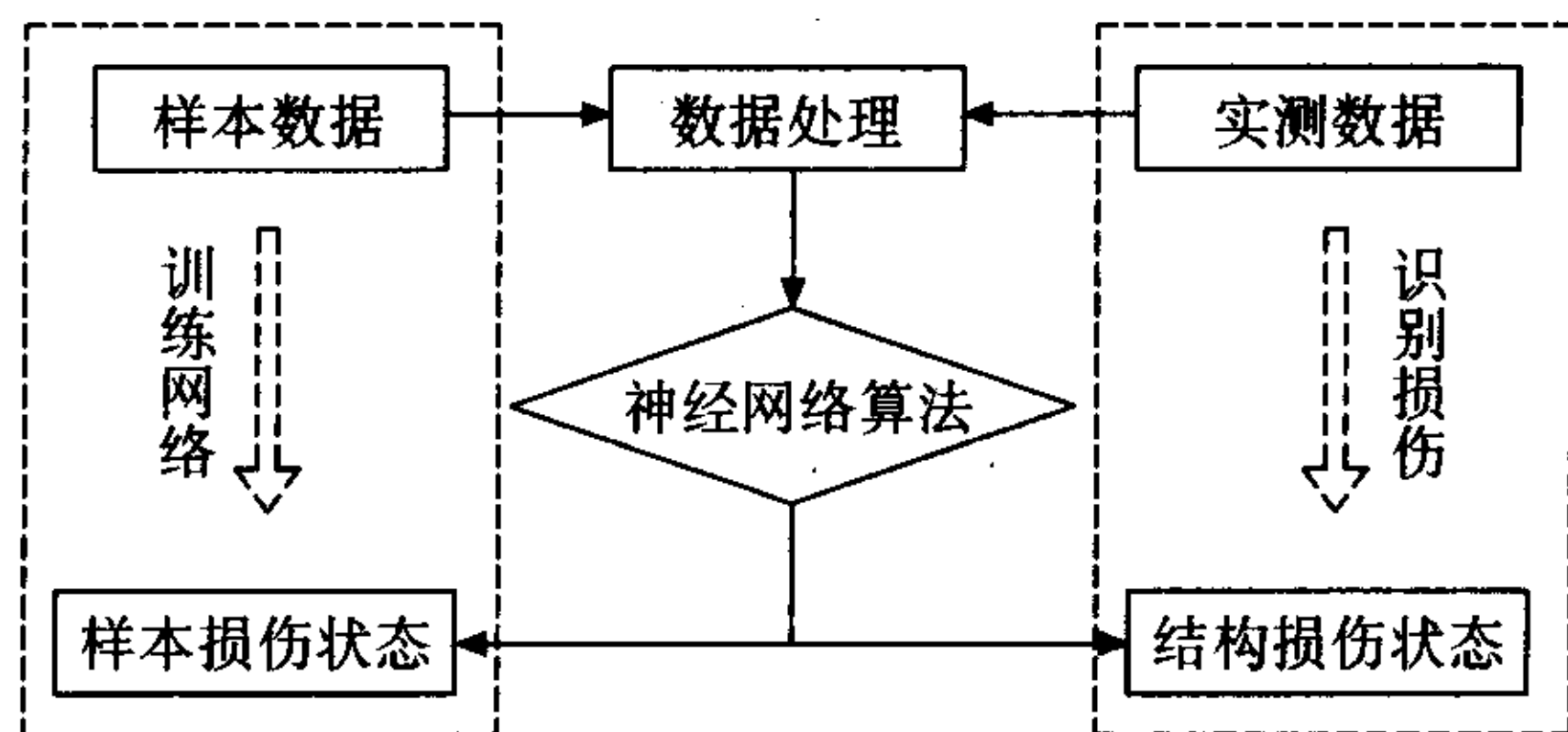


图 2 基于神经网络的损伤识别流程

5 基于多学科交叉的桥梁结构损伤识别方法

从系统参数辨识的角度看,桥梁结构损伤识别实际上是一个反分析问题,是通过结构表现出来的系统输出来确定系统构成参数。这就决定了损伤识别问题的复杂性和识别结果的不确定性。因此,为了提高这个反分析问题的识别精度,诸多其他学科的理论被应用到损伤识别分析中来。比较典型的有基于遗传算法的损伤识别和基于统计理论的损伤识别以及基于小波分析的损伤识别。

遗传算法和神经网络一样是人工智能发展的成果。与传统的优化算法有很大不同,遗传算法是以设计参数的编码(二进制数)进行操作,而不像传统的优化算法直接对设计参数进行操作。遗传算法的最优解的寻找是从一个设计的群体中产生的,而不同于传统的方法只寻找一个设计点。遗传算法只要求

客观的函数信息,而不需要梯度或其他附加信息,遗传算法能够用于具有连续和离散变量的优化问题的求解。Friswell 等人利用遗传算法确定结构中的损伤位置,并且对这些位置上损伤程度进行估计^[19]。结果表明,遗传算法应用于损伤识别分析,比传统的优化方法有优势,能得到与实际损伤位置很接近的识别结果。

统计分析方法作为数据处理的工具在损伤识别中一直得到很大的重视,其中自回归模型分析、时序分析、贝叶斯理论分析等在结构损伤识别中应用较多,总的来讲基于统计的分析方法是以大量具有先天不确定性的信号为基础的,统计模型的确定需要较多的实验验证和先验知识。如 Sohn 等人^[20]在结构健康监测中用一个统计过程控制技术来实现损伤识别,他们根据未损结构振动测试的时程数据建立一个自回归模型(AR model),拟合出模型系统,再结合新的测试数据来完成结构损伤识别。

小波分析作为传统 Fourier 分析的发展,近几年被应用到损伤识别中。自从 1984 年,法国地球物理学家 J. Morlet 提出真正意义上的小波以来,小波理论在各个工程学科中得到广泛的应用。小波分析作为信号处理的强有力数学工具,以其优秀的时频分析能力一经被应用到损伤识别中来,就展现出了极具前景的生命力^[3]。20 世纪 90 年代以来,利用小波分析检测机械结构中的故障有较多研究,Wang 等人^[21]应用小波分析对机械齿轮的早期损伤进行了损伤识别研究,通过应用多种小波对旋转机械齿轮损伤信号进行分析,总结了几个小波用来分析故障信号的敏感性和可应用性。Kasi 和 Amaravadi 等人^[22]应用正交小波分解和神经网络对飞机框架结构的复合材料粘贴强度进行了损伤定位和损伤定量识别,他们把复合粘贴材料结构的模态曲率构造的损伤指标与小波图谱和神经网络结合起来进行损伤识别,并应用数据模拟和光弹实验说明了该方法能得到满意的结果。

近年来,小波分析也被引入到土木工程结构的损伤识别中来,Hou 等人^[23]应用 Daubechies 小波对结构动力模型和 ASCE 的 Benchmark 模型进行了损伤指示和损伤定位研究,并给出了信噪比和损伤可检测性分析的对比图。证明了小波分析在结构损伤识别领域的巨大潜力,能够有效地监测到结构发生了损伤,而且认为基于小波的损伤识别方法非常适合在线的结构健康监测,同时还得出结论,认为该方

法在有较大信号噪声和较低损伤率的情况下,其识别能力受到限制。虽然其成果仅仅给出了应用小波分析可以进行结构损伤识别定时和简单定位的验证,但是给小波分析在结构健康监测和损伤识别中的应用带来了极大的希望。

Wang 等人^[24]把小波分析应用到结构空间域分解,推导了结构力学变量的小波方程,对结构破裂损伤识别进行了研究,通过对简支梁的数值模拟分析,得出结论认为基于小波分析的方法在沿外边的非扩散性结构破裂损伤识别比传统方法优越。但是他们的研究都是在一种假定的基础上来实现的,即沿构件上的位移等力学变量是可以连续获得的,至少要有足够的测点密度。这在目前实际的桥梁健康监测系统中是不可能得到的,因此该方法还只是处于理论和实验室研究阶段。

Sun 等人^[25]和 L. H. Yam 等人^[26]分别对连续梁和复合材料板进行了损伤识别数值模拟,他们应用小波包分解信号的能量来构造损伤信息,并通过神经网络对梁结构损伤进行了数值仿真识别,并分析了测量噪声对损伤识别结果的影响,取得较好的识别结果。他们的研究都把小波分析作为对测试信号进行特征提取的工具,从而大大提高了神经网络的损伤识别精度。

总之,小波分析被应用到结构健康监测及损伤识别中仅仅几年时间,尤其是应用到土木工程中的研究更少。目前小波在健康监测系统中的具体应用及工程实现方面,还没有系统的理论研究和实现方法。作为一种新兴的时频分析手段,小波在处理结构测试数据时具有极大的优势,可以预见其在结构健康监测系统中中和结构损伤识别分析中有着广阔的发展空间和应用价值。

6 基于多传感器信息融合的损伤识别策略

多传感器信息融合(Multi-sensor information fusion, MSIF)是指多信息源的信息获取、处理、综合过程,通过 MSIF 可以更好地了解所观测的现象^[27]。在桥梁健康监测系统中,结构的不同位置分布着大量不同类型的传感器,这些传感器信源提供了有关桥梁状态的丰富信息,但同时也使得结构健康监测系统面临一个数据信息的综合处理问题。对于损伤识别来说,多传感器信号的综合分析显然比逐个分析单一传感器信号能更好地提高我们对结构损伤状态的认识能力,能更精确地确认结构是否发

生损伤。当一个结构中出现某一位置或某一类型的结构损伤时,往往只有部分传感器(I类传感器)很敏感,通过I类传感器能够以很高的概率识别出结构损伤;而一些传感器(II类传感器)对该损伤的中等敏感,II类传感器的反应与该损伤具有正相关性,能够在一定程度上识别结构损伤;还有另外一些传感器(III类传感器)对该损伤的反应则具有不确定性,即通过III类传感器识别结构损伤的概率很低,它们的反应与结构损伤可能还具有负相关性,有时会给出错误的识别信息。如果把这三类传感器信号都作为具有同等信息代价的信源进行结构损伤识别,必然影响损伤识别的效果,可能还会由于III类传感器的干扰,使分类器做出错误的判断。然而仅仅使用I类传感器的信息也存在着2个问题:一是损伤识别结果的可靠性降低,如果具有传感器故障或局部噪声干扰时,根本无法得出准确的损伤识别结果,且无法校对;二是大大降低了信息的利用率,失去了II类和III类传感器中的有用信息。而采取信息融合的技术,既可充分利用各传感器的信息,又可避免以同等信息代价来使用各传感器信息所带来的不良影响^[28]。

在桥梁健康监测系统中,多传感器信息融合的方式可以分为集中式和分布式两种。集中式是将结构上所有传感器的信号数据都送到一个总的融合中心,进行信息融合,直接给出结构状态的判断,如图3所示;分布式是将各传感器按结构特性分成多个区域,对应各区域建立多个子融合中心,不同区域内的传感器信号送入子融合中心,进行区域内信息融合,再把融合的结果送入总的融合中心,完成信息融合,得到结构状态的判断,不同的子融合中心和总融合中心对应不同的融合算法,如图4所示。可以看出集中式信息融合要求对所有传感器数据进行统一处理,一次处理的数据最大,对融合中心的算法要求高,且可靠性较低,当传感器数量巨大时,难于实现。分布式信息融合采用分散处理、集中决策的方法来完成多传感器的信息处理,不仅大大降低了总融合中心的工作量,且由于各子融合中心分散处理大量的传感器数据,使得计算速度快,可靠性和稳定性好。在大型桥梁的健康监测系统中应尽可能地使用分布式信息融合方法。

在结构损伤识别的分布式信息融合过程中,按传感器信息的抽象程度又可分为数据层融合和决策层融合。数据层融合是对某一结构区域内具有相同监测对象的每一个传感器测试信号进行特征提取,

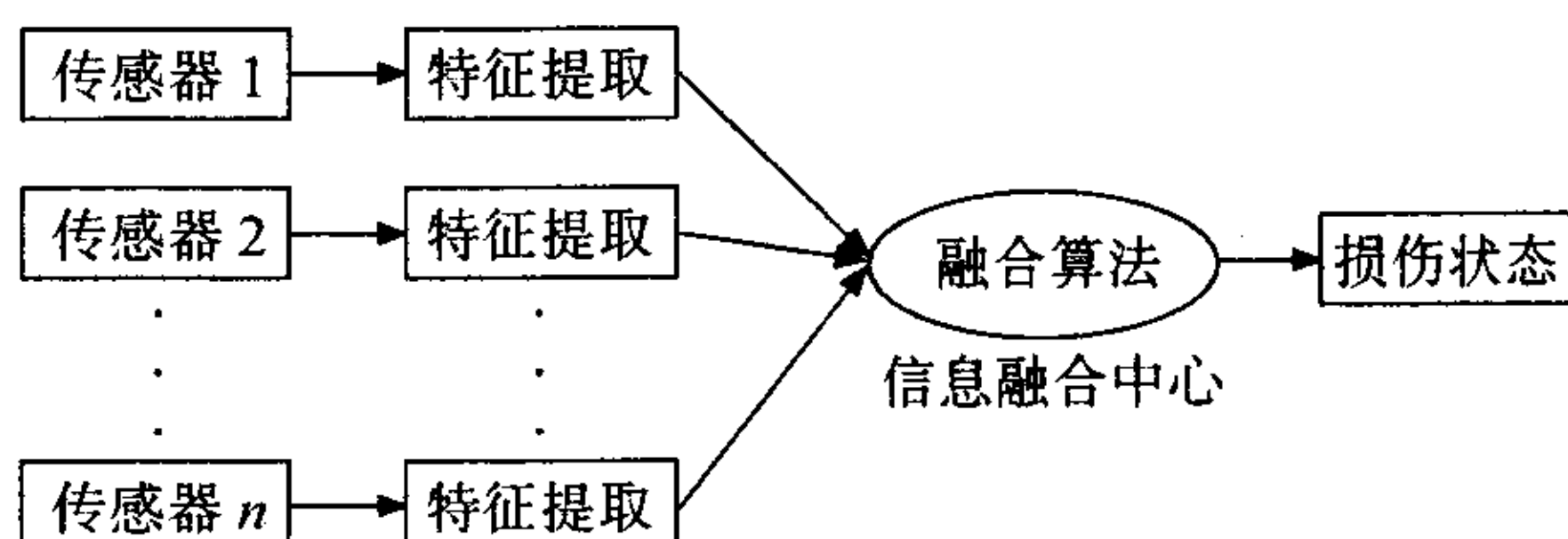


图3 集中式信息融合

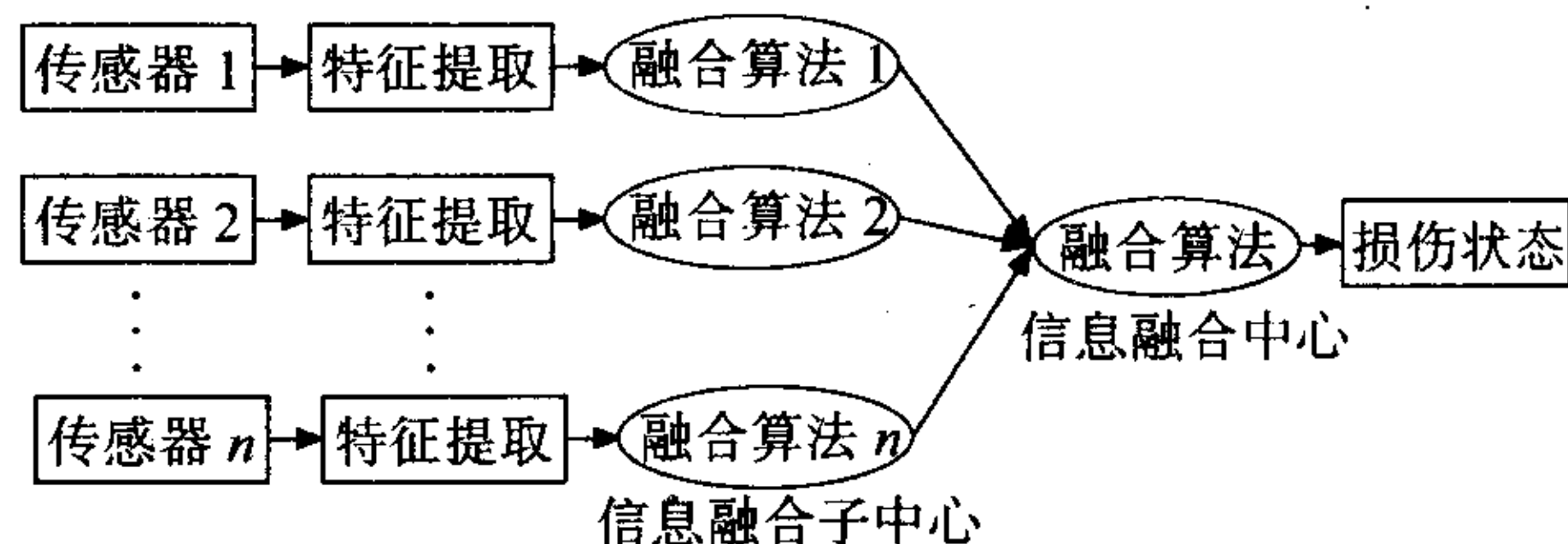


图4 分布式信息融合

然后将各传感器的特征参数融合在一起组成一个综合的特征向量,并完成局域损伤识别;决策层融合是根据不同结构区域内的传感器所给出的局域结构损伤决策,通过总融合中心进行整体的结构状态评价。包括数据层融合和决策层融合的多传感器信息分布式融合过程如图5所示。

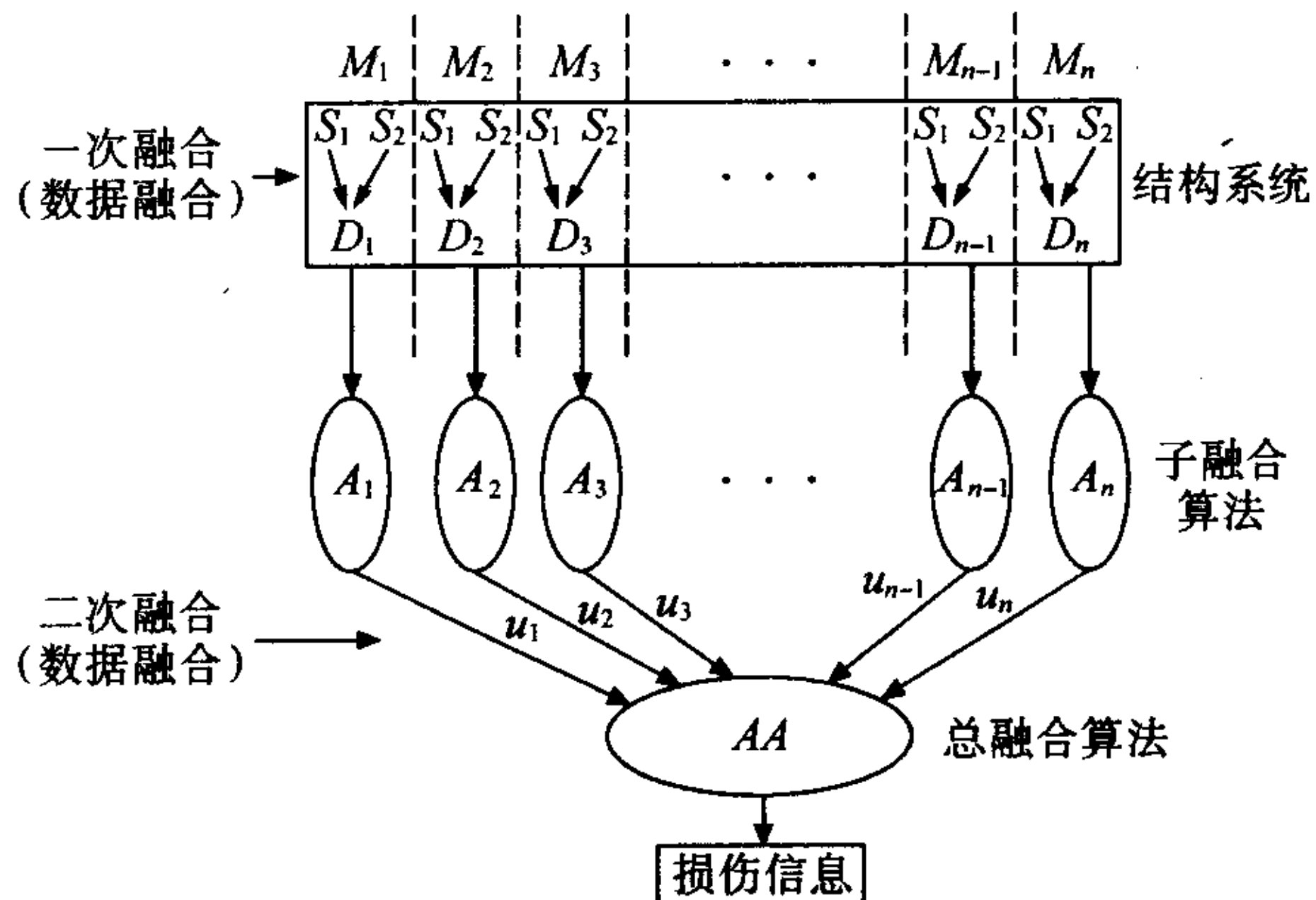


图5 多传感器分布式信息融合的桥梁损伤识别

在桥梁健康监测系统中,一般离损伤位置越近的传感器对损伤越敏感,这样可以把所有的传感器按其位置分为不同的区域类别,如图5所示,按结构系统的空间构成,把结构分为不同的区域 M_1, M_2, \dots, M_n ,每一区域内分布着不同类型的传感器 S_1 和 S_2 (当然还可以有其他类型的传感器 S_3, S_4, \dots)。多传感器信息融合的过程分为2次融合,第一次融合即数据层的融合,把同一区域内不同类型的传感器测试数据进行融合,即由 S_1 和 S_2 得到的测试信号经融合为一个测试特征向量 D_i ,再把 D_i 输入到各区域

M_i 对应的子融合中心 A_i , 得到 M_i 内基于 S_1 和 S_2 局域测量信息独立完成的结构状态评价 u_i ; 第二次融合即决策层融合, 是把各子融合中心得到的输出向量 u_1, u_2, \dots, u_n 作为局域决策向量送入总融合中心进行二次信息融合, 最后得到关于结构损伤的精确信息。融合算法可采用神经网络、贝叶斯估计理论、卡尔曼滤波、证据决策等方法来实现。

可以看到经过 2 次融合, 各种类型和各个位置的传感器信息都被充分考虑, 并且对于不同的桥梁损伤状态, 各传感器的信息贡献也可在融合算法中充分考虑。这样, 在“局部控制, 整体参与”的多传感器信息融合思想下, 桥梁健康监测系统中的多传感器信息得到了充分的利用, 损伤识别的精度也大大提高。

6 结论和展望

(1) 近几年来, 桥梁健康监测的理论研究和试验研究取得了诸多进展, 主要是: 智能材料的出现和检测仪器性能的提高可以为健康监测提供了高精度的测量数据; 信息技术的发展和计算机硬件性能的提高使数据传输和在线分析成为可能; 在试验的基础上已经积累了大量的结构动力特性测试经验和计算模型分析技术。这些都为桥梁结构损伤识别技术的发展提供了硬件和软件条件, 同时也对损伤识别的精度和可靠性提出了更高的要求。

(2) 如前所述, 面对大型桥梁健康监测系统实时性和复杂性的特点, 健康监测中的关键问题是测试数据的分析处理, 其中心环节是结构损伤识别的分析技术。传统的几种损伤识别方法各有一定的适用范围, 也具有有一些缺陷。而近年来, 损伤识别成为学科交叉的热点研究课题, 小波分析以其优异的时频分析能力可很好地实现振动测试信号的去噪滤波、奇异性检测和信号中结构动力特征提取, 通过这个新兴的数学工具, 可大大挖掘出测试数据中的结构状态信息, 以信源为对象来提高损伤识别的精度。

(3) 目前的桥梁健康监测系统不同于对简单结构进行的损伤检测, 它规模庞大, 传感器数量众多, 以往以少数传感器为研究对象的结构损伤识别方法已不能满足要求, 因此开展基于多传感器信息融合的桥梁结构损伤识别研究是桥梁健康监测系统的客观要求, 也是今后大型桥梁结构损伤识别的主要研究方向。

(4) 在大型桥梁健康监测系统中, 试图通过一种

分析技术就很好地实现所有桥梁结构损伤的识别, 显然是不现实的, 因此, 把传统的损伤识别方法与系统辨识、模式识别、人工智能、小波分析、信息融合以及统计分析等理论相结合, 来解决桥梁健康监测中的损伤识别问题显得更有前途。

参考文献:

- [1] 欧进萍. 重大工程的智能监测与健康诊断[J]. 工程力学, 2002, (增刊).
- [2] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报, 2001, 29(1).
- [3] 郭健, 基于小波分析的结构损伤识别方法研究[D]. 浙江大学博士学位论文, 2004.
- [4] 陈肇元. 土建结构工程的安全性及耐久性——现状、问题与对策报告[R]. 2003.
- [5] 孙炳楠. 大跨径桥梁风振响应分析[R]. 2001.
- [6] 陈长征, 等. 结构损伤检测与智能诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] Sun B N, Wu X P, Lou W J, etc., The real-time health monitoring system of Qianjiang 4th bridge: Environmental Vibration Prediction, Monitoring and Evaluation[R]. Hangzhou, China, 2003.
- [8] Wang T L, Zong Z H. Improvement of evaluation method for existing highway bridges[R]. Research Report No. FL/DOT/RMC/6672-818, Department of Civil & Environmental Engineering, Florida International University, Miami, FL 33199.
- [9] 郭健, 孙炳楠. 基于小波变换的桥梁健康监测多尺度分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1).
- [10] Scott W, Doebling, etc. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2).
- [11] 冯培悌. 系统辨识[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [12] Adams R D, Cawley P, Pye C J, Stone B J. A vibration technique for nondestructively assessing the integrity of structures [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1978, 20.
- [13] Cawley P, Adams R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. Journal of Strain Analysis, 1979, 14.
- [14] West W M. Illustration of the use of model assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen [R]. Proceedings of the 4th International Modal Analysis Conference, 1986.
- [15] Wolff T, Richardson M. Fault detection in structures from changes in their modal parameters

- [R], Proceedings of the 7th International Model Analysis Conference, 1998.
- [16] Farrar C R, Jauregui D A. Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I Experiment [J]. Smart Material Structure, 1998,7.
- [17] Kim H M, Bartkowicz T J. Damage detection and health monitoring of large space structures [J]. Sound and Vibration, 1993,27(6).
- [18] Wu X, Ghaboussi J, Garrett J H. Use of neural networks in detection of structural damage [J]. Computer & Structures, 1992,42.
- [19] Firswell M I, Penny J E T, Lindfield G. The location of damage from vibration data using genetic algorithms[R]. Proceedings of the 13th International Model Analysis Conference, Nashville, Tennessee, 1995, II.
- [20] Sohn H, Czarnechi J A, Farrar C R. Structural health monitoring using statistical process control [J]. Journal of Structural Engineering, 2000,126.
- [21] Wang W J. Application of orthogonal wavelets to early gear damage detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1995,9(5).
- [22] Amaravadi K, Rao V, Derriso M. Structural integrity monitoring of bonded composite patch repairs of aging airframes using wavelet transforms [J]. Structural health monitoring, SHM, 2002,1 (2).
- [23] Hou Z K, etc. Wavelet-based approach for structural damage detection[J]. Journal of EM, ASCE, 2000, 126(7).
- [24] Wang Q, Deng X M. Damage detection with spatial wavelets[J]. Solids and Structures, 1999,36.
- [25] Sun Z, Chang C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform[J]. Journal of Structural Engineering, 2002,128(10).
- [26] Yam L H, Yan Y J, Jiang J S. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification [J]. Composite Structures, 2003,60.
- [27] 王会清, 韩艳玲. 基于多传感器与数据融合技术的研究[J]. 计算机与现代化, 2002,85(9).
- [28] Guo J, Chen Y, Sun B N. Experimental study of structural damage identification based on WPT and coupling NN [J]. Journey of Zhejiang University (Science), 2005, In press.

Key Problems and Methods of Damage Identification in Bridge Health Monitoring

GUO Jian, SUN Bing-nan

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To counter characteristics of health monitoring of long span bridge, the key problems are analyzed. Several traditional methods of damage identification are presented and some novelty theory applied to damage identification are introduced. Advantages and disadvantages are given. Strategy of damage identification based on multi-sensor information fusion is proposed to meet bridge health monitoring. The study prospect of damage identification is pointed out in bridge health monitoring.

Key words: bridge engineering; health monitoring; damage identification method