

大跨桥梁安全监测的技术方法分析

摘要：首先介绍了现代大跨桥梁的安全监测的意义，通过比较目前几种测试位移仪器的优缺点，提出用 GPS 进行大桥位移监测的新方法，并阐述了其原理和特点；指出目前用于系统识别的时域和频域法的各自不足，探讨结合时频的参数识别的新方法，最后提到目前用于大跨桥梁损伤检测方法的困难。

关键词：大跨桥梁 GPS 系统识别 损伤检测

一、桥梁安全监测的意义

随着科学技术的进步以及交通运输的需求，许多大跨度桥梁应运而生，尤其是悬索桥以其跨度大，造型优美，节省材料而备受人们的青睐，成为大跨度桥梁的首选。但随着跨度的增大，从几百 m 到 3000m；加劲梁的高跨比越来越小，（ $1/40 \sim 1/300$ ）；安全系数也随之下降，由以前的 4~5 下降为 2~3。另外，由于其柔性大，频率低，对风的作用很敏感。由于缺乏必要的监测和相应的养护，世界各地出现了大量桥梁损坏事故，给国民经济和生命财产造成了巨大损失。

1994 年 10 月韩国汉城发生了横跨汉江的圣水大桥中央断场 50m，其中 15m 掉入江中，造成死亡 32 人、重伤 17 人的重大事故。据称造成桥梁在行车高峰期突然断裂的原因是长期超负荷运营，钢梁螺栓及杆件疲劳破坏所致。

1940 年完工的主跨 853m 的塔可马大桥（Tacoma Narrows），只使用了三个月，便在 19m/s 的风速下造成了塌桥事故；1951 年主跨 1280m 的金门大桥于风速 $15 \sim 1520\text{m/s}$ 时因振动而造成桥体部分损坏，等等。

美国现有的约 50 万座公路桥中，20 万座以上存在不同程度的损伤。1967 年 2 月横跨美国俄亥俄河上的银桥突然倒塌，造成 46 人死于非命。

我国早期建造的斜拉桥，由于拉索的防护不合理而引起的斜拉索的严重锈蚀，如济南黄河桥、广州海印桥的斜拉索在远未达到他们的设计寿命下，被迫全部更换，造成很大的经济损失和不良的社会过去十几年里，我国已建成一批大跨度桥梁，仅上海就有南浦、杨浦和徐浦大桥等具有世界先进水平的桥梁，另外，香港的青马大桥和虎门的虎门大桥又是我国首次建立的悬索桥，近年来我国特别是沿海地区交通发展迅速，迫切要建立一大批大跨度桥梁。为了确保这些耗资巨大，与国计民生密切相关的大桥的安全耐久，必须对这些大桥进行连续的监测。

目前，桥梁的监测越来越受到重视，许多研究人员都在致力于桥梁的监测研究，桥梁的安全监测正日益成为土木工程学科中的一个非常活跃的研究方向[1, 2, 3]。

二、桥梁位移监测仪器的现状

大跨度桥梁受风荷载，车载，温度和地震影响较大，而在沿海地区一般无地震，主要受台风，车载和温度的影响，为保证其在上述条件下的安全运营，必须研究桥梁在上述条件下的实际位移曲线，而目前对风的研究仅局限于理论和模型实验，对实桥在风作用下的研究还不充分，对车载的研究也只是在特定时间和空间下进行。主要原因是测试仪器的不合理，对大桥不能连续实时监测。目前用于结构监测的仪器主要有：经纬仪、位移传感器、加速度传感器和激光测试方法。

天津海河桥就采用的是全站仪自动扫描法，对各个测点进行 7s 一周的连续扫描，其缺点是各测点不同步以及大变形时不可测。

位移传感器是一种接触型传感器，必须与测点相接触，其缺点是对于难以接近点无法测量以及对横向位移测量有困难。

加速度传感器，对于低频静态位移鉴别效果差，为获得位移必须对它进行两次积分，精度不高，也无法实时。而大型悬索桥的频率一般都较低。

激光法测试精度较高，但在桥梁晃动大时由于无法捕捉光点也无法测量。

除上述不足外，对桥梁的扭角测试也力不从心，为对桥梁进行安全监测，必须寻找更好的测试方法。目前出现了利用 GPS 进行测试的新手段，在桥梁高层结构上进行实地测试[4~6]，过静君与 1996 年对深圳帝王大厦，1998 年对香港的青马大桥进行了实验研究，特别是 1999 年在广州虎门大桥进行了实桥测试，目前已正常工作。国外的 dodson, A. H, 1997; brown, G. J, 1999 也利用 GPS 对结构进行监测，获得了成功，但在国内利用 GPS 对桥梁的测试还无先例，在国外也仅限于位移监测，利用 GPS 进行动力 GPS 位移监测原理：大桥位移监测系统是采用卫星定位系统。它是利用接收导航卫星载波相位进行实时相位差分即 RTK 技术 (Real Time Kinematic)，实时测定大桥位移。原理见图 1。

GPS RTK 差分系统是由 GPS 基准站、GPS 监测站和通信系统组成。基准站将接收到的卫星差分信息经过光纤实时传递到监测站。监测站接收卫星信号及 GPS 基准站信息，进行实时差分后可实时测得站点的三维空

间坐标。此结果将送到 GPS 监控中心。监控中心对接收机的 GPS 差分信号结果进行桥梁桥面、桥塔的位移、转角计算，提供大桥管理部门进行安全分析。

GPS 监测大桥位移特点：

(1) 由于 GPS 是接收卫星运行定位，所以大桥上各点只要能接收到 6 颗以上 GPS 卫星及基准站传来的 GPS 差分信号，即可进行 GPS RTK 差分定位。各监测站之间无需通视，是相互独立的观测值。

(2) GPS 定位受外界大气影响小，可以在暴风雨中进行监测。

(3) GPS 测定位移自动化程度高。从接收信号，捕捉卫星，到完成 RTK 差分位移都可由仪器自动完成。所测三维坐标可自动存入监控中心服务器进行大桥安全性分析。

(4) GPS 定位速度快、精度高。GPS RTK 最快可达 10~20Hz 速率输出定位结果，定位精度平面为 10mm，高程为 20mm。

当然，GPS 进行桥梁的实时监测也存在着不足，目前仅能对变形相对较大的位移进行监测，对于小位移还需进一步提高 GPS 的定位精度，但不排除 GPS 对其他大型结构的应用前景。

三、桥架空全监测的理论研究现状

传统检测手段可以对桥梁的外观及某些结构特性进行监测。检测的结果一般也能部分地反映结构当前状态，但是却难以全面反映桥梁的健康状况，尤其是难以对桥梁的安全储备以及退化的途径作出系统的评估。此外常规的检测技术也难以发现隐秘构件的损伤。目前得到普遍认同的一种最有前途的方法就是结合系统识别，振动理论，振动测试技术，信号采集与分析等跨学科技术的实验模态分析法。

在系统参数识别方面目前普遍采用两种方法：频域法和时域法。频域法利用所施加的激励和由此得到的响应，经过 FFT 分析得到频响函数，然后采用诸如多项式拟和的方法得到模态参数，由于可以采用多次平均来消除随机误差对频响函数的影响，采用频域识别方法的精度有一定的保证，不过该法存在以下缺点：①基于振型不偶联，因此，只能识别具有经典阻尼的结构实模态。像大跨悬索桥这样的结构，具有明显的非经典阻尼性质。频域法应用受到限制。②需要经过 FFT 分析，由此带来了诸如泄漏等偏度误差对参数识别的影响。近来的环境脉动法可以无须知道激励而得到振型参数，又扩展了该法的应用范围[7, 8]。70 年代后期出现的时域识别方法，弥补了频域法的不足，可以用随机或自由响应数据来识别模态参数。它们不必进行 FFT

分析,从而消除了 FFT 分析所带来的误差。尤其是它还可以从未知随机激励的响应信号中得到随机减量特征,因此该方法成为能依据在线信号对系统进行识别的唯一方法。但也存在着一些缺陷:由于在参数识别时运用了所测信号的全部信息,而不是截取有效的频段,于是信号中包含的模态数目比较多,但由于实验测试环节及其他原因,使得其中的一些模态的信息并未被充分收集,以致只能将这些残缺的信息看作噪声,目前排除噪声的方法主要有扩阶识别和最小二乘法。当前利用 ITD 法对桥梁进行在线监测取得一定成果[9, 10]综上所述,时域法和频域法均有自己的缺陷,应寻找一种综合时频的方法以提高识别精度,近来出现的小波变换可以综合时频,可探讨其在桥梁参数识别方面的应用。在结构损伤检测定位方面,目前可分为模型修正法和指纹分析法两类。

1. 精确的有限元建模是大型桥梁风震响应预测的重要前提;也是结构安全监测,损伤检测以及实现最优振动控制的基础。但是,尽管有限元得到了高度的发展,实际复杂结构的有限元模型仍然是有误差的。有限元建模为结构飞行提供完整的理论模态参数集,但这些参数常常与结构模态实验得到的参数不一致。因此,必须对结构理论模型进行调整或修正,使得修正后的模态参数与实验相一致,这一过程即有限元模型修正。

模型修正法在桥梁监测中主要用于把实验结构的振动反应记录与原先的模型计算结果进行综合比较,利用直接或间接测知的模态参数,加速度时程记录,频响函数等,通过条件优化约束,不断地修正模型中的刚度和质量信息,从而得到结构变化的信息,实现结构的损伤判别与定位。其主要方法有:

(1) 矩阵型法,是发展最早,最成熟,修正计算模型的整个矩阵的一类方法,它具有精度高、执行容易的特点,主要缺点是所修正的模型的物理意义不明确,丧失了原有限元模型的带状特点,这方面的代表应属 Berman / Baruch 的最优法。

(2) 子矩阵修正法,通过对待修正的字矩阵或单元矩阵定义修正系数,通过对字矩阵修正系数的调整来修正结构刚度,该方法的优点是修正后的刚度矩阵仍保持者原矩阵的对称,稀疏性。

(3) 灵敏度法修正结构参数通过修正结构的设计参数弹性模量 E 截面面积 A 等来对有限元模型进行修正。

上述的前两种方法通过求解一个矩阵方程或带约束的最小化问题来修正刚度和质量矩阵,并假定刚度与质量的变化相互独立。因此,这类方法不适用于结构刚度矩阵和质量矩阵变化相关的有限元模型修正。而大跨度桥梁的质量变化通常会引愧结构刚度的变化,属于典型的非线性问题。只有第三种方法利用观测量对结

构参数的敏感性来修正结构参数。基于敏感性程度；并且，可直接解释结构物理量的修改，无须通过利用总纲阵的比较来反映修改情况。然而但待修正参数较多时，该方法常会得出违背物理意义的参数修正。

2. 指纹分析方法，寻找与结构动力特性有关的动力指纹，通过这些指纹的变化来判断结构的真实状况。

在线监测中，频率是最易获得的模态参数，而且精度很高，因此通过监测频率的变化来识别结构破损是否发生是最为简单的。此外，振型也可用于结构破损的发现，尽管振型的测试精度低于频率，但振型包含更多的破损信息。利用振型判断结构的破损是否发生的途径很多：MAC，COMAC，CMS，DI 和柔度矩阵法。

但大量的模型和实际结构实验表明结构损伤导致的固有频率变化很小，而振型形式变化明显[11, 12]，一般损伤使结构自振频率的变化都在 5% 以内[11, 12]，而 Askegaard 等在对桥梁的长期观测后发现，在一年期间里桥梁即使没有任何明显的变化，其振动频率的变化也可达 10% [63]，因此一般认为自振频率不能直接用来作为桥梁监测的指纹，而振型虽然对局部刚度比较敏感，但精确测量比较困难，MAC，COMAC，CMS 等依赖于振型的动力指纹都遇到同样的问题。对桥缺损状态的评价缺乏统一有效的指标，有人以模糊理论，结构可靠度理论等为理论框架建立了各种桥梁使用性能评估专家系统，但必须首先建立各种规范和专家数据库。

四、结论与展望

(1) 由于大跨桥梁受环境因素影响较大，安全系数低，必须对其进行连续实时监测。

(2) 由于 GPS 定位精度高，速度快，同其他几种位移监测仪器相比具有明显的优点，可用它对大跨度桥梁做连续实时监测，同时应进一步提高其精度，从而扩展其应用范围。目前 GPS 已在虎门大桥安装成功，实现了对大桥连续实时监测。

(3) 在系统识别方面，比较了时域和频域法的优劣，今后应进行结合时频的系统识别研究。

(4) 在模型修正方面，应在基于敏感性分析的基础上，研究适合于大跨桥梁的模型修正方法。

(5) 由于对桥梁缺损状态的评价缺乏统一有效的指标，应结合实验测试和有限元建模研究适合于大跨桥梁的指纹指标。