

南京长江第二大桥结构安全监测系统

黄 腾¹, 郑玉华¹, 武焕陵², 王承江²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京长江第二大桥管理局, 江苏 南京 210038)

摘要:以南京长江第二大桥在各种环境状态下的结构受力响应为数据源,建立反演结构状态演变过程的分析模型.在监测内容上,该系统以高精度的结构静态响应监测为主,兼顾对结构动态响应特征的识别和环境干扰因素的监测.监测系统在对影响结构检测置信度的各种因素进行归纳的基础上,采取随机过程理论和统计方法科学地分析了南京长江第二大桥在环境状态下的结构行为和变化规律.结果表明该桥的结构状态是稳定安全的.

关键词:斜拉桥; 钢箱梁; 结构安全监测系统; 结构响应

中图分类号: TU311.2; U44

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2003)04-0411-04

南京长江第二大桥位于南京长江大桥下游 11 km 处,由“两桥一路”组成,即南汊大桥、北汊大桥和连接两桥的八卦洲引线,全长 12.517 km.处于主航道的南汊桥主桥为双塔双索三跨式连续钢箱梁斜拉桥(以下简称二桥),主跨 628 m,该跨径目前在同类桥型中属国内第一、世界第三.大桥全线按双向 6 车道高速公路标准建设,设计速度 100 km/h.

大型斜拉桥主要由塔、梁、索 3 大部分组成,是一种塔墩高、主梁跨度大的高次超静定结构体系.这种超静定结构体系对每个节点的要求十分严格,节点坐标的变化都将影响结构内力的分配和桥梁线形.二桥主梁跨度大,主塔高达 195.41 m,自身荷载巨大,风、温度等影响显著,桥梁主体受力情况复杂.因此,对二桥在营运和环境状态下的结构行为及变化规律进行监测是一项重要的工作.建立“二桥结构安全监测系统”的意义在于:分析二桥在营运和环境状态下的结构行为,建立二桥在各种环境状况下健康响应的指纹数据库,为二桥异常状况的评判提供预警机制.

1 结构检测方法及二桥结构安全监测系统的构成

桥梁结构使用期内,结构构件的材质退化、构件内在的缺陷或外来的不利因素等都会引起桥梁承载能力的衰减,即结构损伤,会影响到结构强度和刚度的变化.监测系统对结构的检测,采用的是无损检测方法,主要指以下两类:

一是采用物理、电化学或其他的检测方法对结构材质或微观缺陷的程度进行检测.包括核探伤、放射线照相、X 射线、声发射和超声波等技术.此类方法可以获得小范围、简单结构构件的缺陷状况,但相对于桥梁巨大的结构体量,其检测区域偏小,而且要在未知具体的受损部位之前做出相应的测点布置,经济上也不适宜.监测系统中,这种方法作为辅助方法,用于检测明确的部位,如斜拉索的腐蚀、索股截面的损失、主梁钢板的锈蚀等.

二是对结构在外来荷载下的受力响应进行检测^[1].在能反映二桥结构强度或变形的的位置布置监测点,并设立测点的结构响应物理量,包括监测点的静态和动态位移、应变、应力,或其他相关的物理量,通过结构分析模型与设计模型结构参数的对比,反演结构的状态变化,最终对斜拉桥整体结构状态进行评估.结构响应检测包含两个内容,即结构的静态响应检测和结构动态响应检测.这两种响应检测均会受到环境因素的影响,检测时要同时记录周围的环境参数.

综合考虑监测目标和监测费用,南京二桥结构安全监测系统的集成原则是:对结构损伤的评估主要采用

结构响应检测的方法,并以高精度的结构静态(或准静态)响应监测为主,兼顾对结构动态响应特征的识别和环境干扰因素的监测.监测系统的构成及相应的处理流程如图 1 所示.

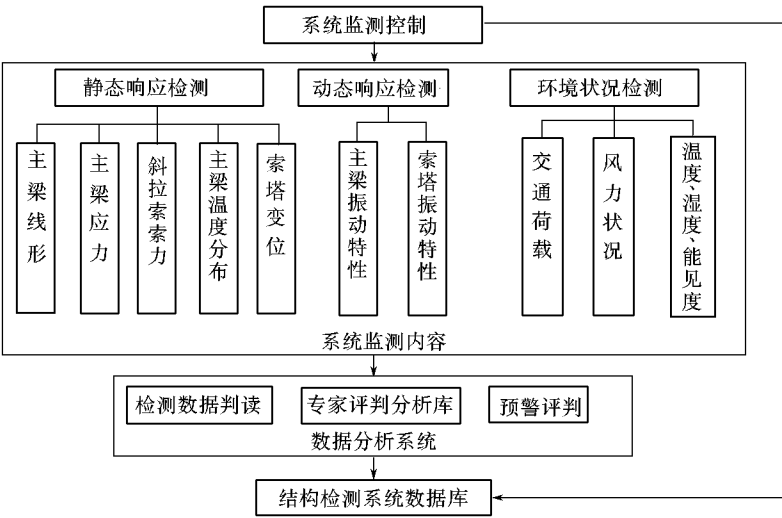


图 1 监测系统的构成
Fig.1 Composition of safety monitoring system

2 系统的监测内容

2.1 静态响应检测

2.1.1 主梁线形

记录、分析主梁线形的长期变化趋势,对主梁的安全状况评估具有很重要的意义.测点位置选择在主跨八分点和边跨三分点,形成 11 个主梁截面,每个截面在上、下游各设一个供观测的照准棱镜.主梁线形每隔 6h 观测一次,测量仪器采用测距精度为 $(1+10^{-6}D)$ mm、测角精度为 0.5"自动目标识别的 TCA2003 全站仪.

2.1.2 主梁应力

斜拉桥的索、塔、梁基本形成一个自锚体系,主梁承受由斜拉索产生的巨大轴向内力,索力的变化将直接引起主梁应力的变化,因此,在主梁内力的控制区段布置测点,采用无零点漂移、测试误差小于 0.1% 的振弦式应变仪对主梁应力进行监测.系统从监测数据中分析斜拉索索力分布的变化和主梁强度、刚度的变化.

2.1.3 斜拉索索力

考虑到斜拉索在斜拉桥结构安全中的突出地位,为确保检测的可靠性,采用磁弹性仪直接测定索力.

2.1.4 钢箱梁温度分布

监测钢箱梁面板的温度变化,分析温差对钢箱梁结构内力和主梁线形的影响,同时研究温差变化对钢箱梁桥面路基的损害程度.

2.1.5 索塔变位

索塔变位监测包括塔基础位移(三维)监测和塔顶水平变化(二维)监测.二桥南北塔布置的监测点为 16 个.索塔变位观测每 3 个月观测一次,仪器使用瑞士 Leica 高精度 TC2003 全站仪,以三维前方交会法进行角度观测 4 测回,经平差计算获得 X, Y, H 三维坐标.系统根据坐标变化量分析塔柱变位的方向.

2.2 动态响应检测

动态检测的结构响应是:外载激励下结构按自身固有频率的振动和外来荷载下结构的振动响应,由此获得结构自身状态与外来荷载特性的信息.检测的具体内容为主梁振动特性和索塔振动特性.主梁振动特性主要检测结构的响应频率、响应功率谱值和一阶对称竖向弯曲、一阶对称横向弯曲和一阶对称扭转 3 种振动的基本模态;索塔振动特性主要检测横向振动和纵向振动 2 种模态.检测传感器采用超低频加速度传感器,灵敏度为万分之一 g (相应的低频振幅检测值与静态位移检测精度相近).系统通过动态响应检测识别结构的动态特性参数,并记录结构在环境载荷下的振动历程,进一步评估结构抵御不利环境的能力.

2.3 环境状况检测

环境状况检测包括交通荷载检测、风状况检测和环境气温、湿度、能见度检测等,检测环境状况的目的是提供桥梁结构响应检测期间的环境状况,以评估外界环境对检测的干扰程度。

3 数据分析系统

系统要对结构响应的各项检测数据进行判读,在此基础上进行专家评判分析,对桥梁结构的安全状况做出评估,并决定是否预警提示。

检测数据的判读即检测数据的初步处理,它是专家评判分析系统处理的数据对象。数据判读要完成的内容为:对不同检测传感器传送的不同物理量进行检测数据的有效性判断;对主梁线形、索塔变位的全站仪检测结果进行统一坐标的转换;对振动响应的检测结果,先按快速富里埃变换(FFT)进行时—频域转换,再对频域的功率谱进行显著谱峰的识别,得出功率谱峰值、阻尼值和相应的频率值。

对判读后的响应检测数据,采用专家评判分析库建立的非线性有限元结构模型^[2]进行分析处理。模型将斜拉桥主体视为超静定的三维空间的杆、梁系,梁和塔作为空间受力构件,拉索作为仅有轴向刚度的空间直杆。计算中,索塔采用空间梁单元,主梁采用空间有限板元,将主梁沿纵向离散为多个梁段,每个梁段再离散为多块有限板元。专家评判分析库重点考察实测结果与模型理论推导值之间的差异,由差异的大小评估桥梁的整体状况。

二桥结构安全监测系统的最终目的是对监测数据运用专家分析软件进行分析,并对桥梁结构进行安全状况预警。系统综合考虑桥梁结构、材质、力学计算模型等众多影响因素,设定科学合理的预警值。另外,系统还区分各种性质的预警。桥梁荷载是一个动态结构^[3],偶发荷载(如台风风力荷载、起重车辆荷载等等)也会引发预警,这种预警与结构内损造成的预警在预警方式上是不同的。

4 系统分析结果

a. 从检测值变化曲线中可以看到:主梁位移、内力、温度和斜拉索索力结构检测值波动幅度较小,但有随昼夜和环境气温、气象状况的变化而呈现显著的循环变化的特征。

b. 为更好地认识主梁线形的变化情况,取具有代表性的主梁线形测点 1 和测点 6(测点 1 为边跨点,测点 6 为主跨中点),将其三维(纵向、横向、垂直)位移的监测值按统计方法处理后列成表 1。比较三维位移检测值得出:主梁横向位移检测值的均方根最小,检测稳定性最好,检测值均方根均小于 2 mm,表明检测精度较高。表 1 中数据也表明,在边跨,主梁纵向位移均方差大于垂向位移均方差,主梁位移的波动以纵向运动为主;在主跨,主梁垂向位移均方差大于纵向位移均方差,主梁位移的波动以垂直运动为主。均方根的量值表明:主梁存在着较大的自然飘动,这说明即使在小干扰的监测环境下,要获得高精度的准静态主梁线形特性,也需要采用多次检测、统计的方法。

表 1 主梁线形检测点 1 和 6 的三维(纵向、横向、垂直)位移统计值

Table 1 Statistical values of 3-D displacement at main-girder-linearity detecting points 1 and 6											
检测 点位	温度 /℃	监测 次数	纵向坐标 /m	纵向均方差 /mm	纵向均方根 /mm	横向坐标 /m	横向均方差 /mm	横向均方根 /mm	垂直坐标 /m	垂直均方差 /mm	垂直均方根 /mm
边跨 测点 1 下游	19	6	-159.903 2	0.28	0.5	3.579 7	0.65	0.8	5.444 4	0.66	0.8
	22	7	-159.930 4	56.22	7.5	3.581 3	2.36	1.5	5.445 8	6.36	2.5
	25	8	-159.949 8	60.73	7.8	3.581 5	0.30	0.5	5.450 1	22.29	4.7
主跨 中点 6 上游	19	6	315.774 6	2.20	1.5	29.326 6	0.77	0.9	14.561 5	130.22	11.4
	22	7	315.768 3	12.51	3.5	29.321 1	2.59	1.6	14.569 6	129.12	11.4
	25	7	315.767 2	0.83	0.9	29.319 2	1.42	1.2	14.570 0	207.70	14.4

注:检测环境为:测量期间车流量 0~9 辆、风力 0~3.5 级,监测系统启动时刻 0 00。

c. 索塔变位从 6 次观测的坐标变化量来看,塔顶最大变化量值 X 方向(南北向)为 -67.0 mm(向北),Y 方向(东西向)为 +60.2 mm(向下游)。文献[4]对二桥索塔的变位做过专门研究,用高精度 GPS 及 TC2003 全站仪对索塔柱周日变形进行了 24 h 连续观测,得出结论:塔顶变位量与环境因素有很大关系,受日照方向、热辐射、风力等因素影响,塔顶位置不断发生变化,变化量值达 ±50 mm 以上。6 次观测中塔顶的最大变化量与

文献中试验结果是一致的.文献中还在自然因素影响最小的时段对塔顶的偏移作了观测,测得南塔垂直度为 $1/9\,500$,北塔垂直度为 $1/13\,500$,远小于设计规范的索塔垂直度($1/3\,000$).鉴于6次观测中出现最大变化量的时间与文献中试验的时间相差不长,可以认为塔顶变位量较大是由索塔受环境因素影响产生的.

塔基础监测的6次坐标变化量均在 $\pm 4.7\text{ mm}$ 以内,最大变化量值 X 方向为 -3.5 mm (向北), Y 方向(东西向)为 $+4.7\text{ mm}$ (向上游), H 方向(垂直向)为 $+3.0\text{ mm}$ (向下).变化量均没有超过有关规范中规定的限值 5 mm ,而且6次观测中位移变化量有正有负,并且带有一定的随机性,说明南北索塔基础未出现明显变位.塔基础的变化量主要是由测量误差带来的,因为塔基础的监测采用变形监测中常规的三维前方交会法,虽然使用精度很高的仪器,交会角选择较优,但观测中还存在一些不利因素,如所监测的点均在江中,人无法直接到达,交会距离长、大气折光和水汽蒸发等,在一定程度上导致了数据的随机性波动.在以后的观测中,如果变化量的符号出现一致性的趋势,并超过限差,应采用假设检验的方法判断是否发生位移,并运用回归和拟合方法来分析观测数据,预测点位的变化趋势.

5 结 论

- a. 结构监测系统的分析结果表明二桥在1a的运营期中结构是安全稳定的.
- b. 二桥在较小的环境干扰和车流荷载下,结构承受的主要荷载基本上是桥体自身重量,结构的静态位移属于小变形,传感器及读数仪等相关设备要求具有相当高的灵敏度和检测精度.
- c. 二桥结构复杂,构件众多,而布置的监测点有限,而且检测采样也难以实现严格意义上的“同一时刻”,因此,应对检测点多次采样,并以随机过程的理论与统计的观点分析检测数据.
- d. 检测值的差异除了反映实际结构的变动外,还受到环境因素的影响,运用专家分析软件进行分析时应剔除异常数据,使检测有较高的置信度.

参考文献:

- [1] 袁万城,崔飞,张启伟.桥梁健康监测与状态评估的研究现状与发展[J].同济大学学报,1999,27(2):185—188.
- [2] 罗韧.桥梁工程导论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.125—127.
- [3] 赵阳,方有珍,孙静怡.荷载与结构设计方法[M].重庆:重庆大学出版社,2001.70—74.
- [4] 黄腾,岳东杰,赵刚.索塔周日变形特性研究及其应用[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(6):36—40.

Structural safety monitoring system for the Second Nanjing Yangtze River Bridge

HUANG Teng¹, ZHENG Yu-hua¹, WU Huan-ling², WANG Cheng-jiang²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Management Bureau of the Second Nanjing Yangtze River Bridge, Nanjing 210038, China)

Abstract: With the responses of structural stress of the Second Nanjing Yangtze River Bridge to various environmental states as data source of the system, an analytic model was developed for inversion of the variation process of the structural state. The system mainly implements high-precision monitoring of static structural responses of the bridge, and also identifies the characteristics of dynamic structural responses and monitors the environmental disturbance factors. Based on an induction of various factors affecting the reliability of structural monitoring, the system adopts the random process theory and statistical method to analyze the structural behavior and regularity of its variation of the bridge in various environmental states, and the result shows the stability and safety of the bridge.

Key words: cable-stayed bridge; steel box girder; structural safety monitoring system; structural response