

文章编号:1003-4722(2009)S2-0101-05

# 大跨度悬索桥变形与振动监测系统设计与实施

田启贤,钟继卫,李星新

(中铁大桥局集团桥科院有限公司,湖北 武汉 430034)

**摘要:**概述武汉阳逻长江大桥健康监测系统设计,分析其实施过程中变形和振动在线监测系统在运营过程中的监测成果,为充分利用大跨度悬索桥健康监测系统设计积累经验。分析该桥在实测温度作用下,主缆和加劲梁竖向变形效应、主塔和加劲梁顺桥向变形效应,为大桥后续运营中整体温度变形评估、支座和伸缩缝的工作状态评估积累“指纹档案”;对汶川地震作用下的大桥实测振动响应进行分析,结果表明大桥地震响应在设计范围之内,震后大桥工作状态未发生改变。

**关键词:** 阳逻长江大桥;悬索桥;健康监测;温度变形效应;地震响应

**中图分类号:** U448.25

**文献标志码:** A

## Design and Implementation of Deformation and Vibration Monitoring System for Long Span Suspension Bridge

TIAN Qi-xian, ZHONG Ji-wei, LI Xing-xin

(Bridge Science Research Institute Ltd., China Zhongtie Major Bridge Engineering Group, Wuhan 430034, China)

**Abstract:** The design of the health monitoring system (HMS) for Wuhan Yangluo Changjiang River Bridge is outlined and the monitoring results yielded from the deformation and vibration on-line monitoring system used in operation of the Bridge in the implementation of the HMS are analyzed to accumulate experiences for taking the full advantage of the HMS for long span suspension bridges. The vertical deformation effect of the main cables and stiffening girder and the longitudinal deformation effect of the towers and stiffening girder of the Bridge under the action of the measured temperatures are analyzed to provide the “fingerprint files” for future assessment of the global temperature deformation and working conditions of the bearings and expansion joints in the follow-up operation of the Bridge. The measured vibration response of the Bridge subjected to the seismic waves from the Wenchuan Earthquake are also analyzed and the results of the analysis indicate that the seismic response of the Bridge is still within the designed range and the working conditions of the Bridge after the Earthquake remain unchanged.

**Key words:** Yangluo Changjiang River Bridge; suspension bridge; health monitoring; temperature deformation effect; seismic response

### 1 前言

悬索桥以其跨越能力大等优点已逐渐成为特大跨度桥梁的首选桥型,研究与建立大跨度悬索桥健康监测成为当今的一个流行趋势。通过桥梁健

康监测系统的建立,实时监测大桥所受环境与荷载作用状况,通过结构响应评估大桥工作性能、诊断结构损伤并为后续维修提供指导,避免大桥出现灾难性破坏和高额维修加固费用<sup>[1]</sup>。目前,国内外许多

收稿日期:2009-07-01

作者简介:田启贤(1964-),男,教授级高工,1985年毕业于石家庄铁道学院桥梁专业,工学学士,1988年毕业于西南交通大学桥梁及结构工程专业,工学硕士(tianqx@vip.sina.com)。

大跨度悬索桥建立了健康监测系统,如何充分利用桥梁健康监测系统,更好地为桥梁运营工作服务成为相关领域学者研究的重点课题。本文介绍武汉阳逻长江大桥健康监测系统(YLBHMS)的设计与实施,重点对其中的变形和振动在线监测系统监测成果进行分析,为桥梁运营服务提供基本依据。

## 2 项目背景

武汉阳逻长江大桥(图 1)是京珠国道主干线及沪蓉国道主干线的重要组成部分。主桥为钢箱梁悬索桥,跨度布置为(250+1 280+440) m,矢跨比为 1/10.5。采用分离式 H 形空间索塔。为保证大桥运营期间的安全,并为大桥的维护提供及时指导,建立和研究该桥的健康监测系统。



图 1 武汉阳逻长江大桥

## 3 系统设计简介

### 3.1 监测范围和目标

监测两大类参数:① 环境条件参数,包括风速、温度、车辆;② 结构响应参数,包跨位移、应变、索力以及振动响应等。系统的设计目标<sup>[2]</sup>如下:

(1) 通过运营期间监测和评估,保证其有好的结构性能和可维修性,判断其是否适应局部和全局的环境条件,及时改善安全性能以抵抗不利的荷载作用。

(2) 通过预测潜在的局部破坏,正确评估桥梁的强度和安全性,避免即将发生的破坏和推动维护工作的进行,为桥梁安全运营和安全性定期测量提供正确的决策信息。

(3) 通过比较监测和计算数据,更新、改善计算评估模型,研究可靠的方法应用于桥梁健康监测。

(4) 检验设计假定参数,为大跨度悬索桥今后的设计提供参考数据。

### 3.2 系统布置

YLBHMS 由传感器系统、数据采集及传输系统、数据处理与分析系统、计算机控制和管理系统组成。传感器包括风速计、温度传感器、称重传感器、应变计、GPS、位移计、挠度计以及加速度计等。图 2 为传感器在桥梁中的总体布局。

在主跨跨中和两端引桥处设置 3 个采集子站,将传感器获取的信息转化为数字信号,并通过铺设的光纤网络系统传输到桥梁控制中心。控制中心有 1 个服务器用于数据处理与分析。计算机控制和管理系统用于进行后数据处理和工程结构健康评价。

## 4 系统实施

子系统安装完成后在 2008 年 5 月开始相继使用,获得了一些有意义的的数据。以下重点对其中的变形和振动在线监测系统监测成果进行分析。

### 4.1 温度及其变形效应监测

由于太阳辐射和环境温度的影响,大跨度悬索桥受不断变化的温度荷载作用,导致大桥顺桥向伸缩和竖向弯曲。大桥在温度荷载作用下的伸缩或弯曲往往与支座和梁端伸缩缝的工作状态密切相关,如果支座或梁端伸缩缝损坏,额外的约束可能会产生较大的内力导致结构损伤<sup>[3]</sup>。根据长时间在线监测数据,分析温度作用下的武汉阳逻长江大桥实测变形效应,通过结构温度、结构竖向和顺桥向变形长期监测数据,分析确定温度与变形的关系式。

#### 4.1.1 温度传感器与位移监测系统

武汉阳逻长江大桥结构温度监测采用数字化温度传感器。该温度测试系统由于采用数字信号采集传输,数据不会失真,提高了系统的稳定性和抗干扰性,同时大大减少了系统的电缆数,保证了温度测量的同步性。在主缆跨中布置了 3 个温度传感器,箱梁跨中布置了 5 个温度传感器。

大跨度悬索桥在温度荷载作用下变形较大,变

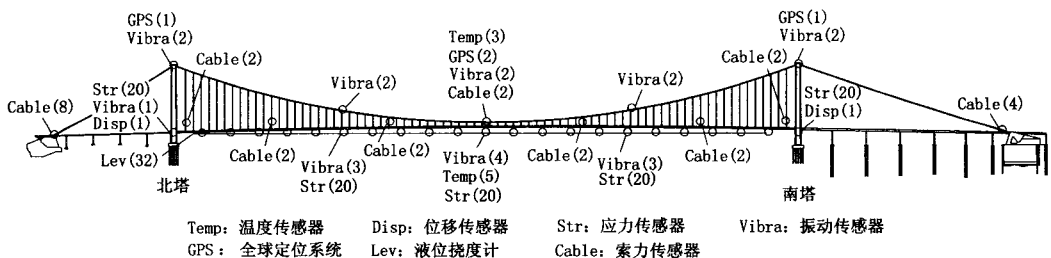


图 2 系统测点布设

形与大桥的正常使用状态相关,且与支座、伸缩缝的工作状态有关。大桥共布设 4 个 GPS 测点和 1 个基准测点。其中南、北塔塔顶各 1 个,主要用于监测桥塔顺桥向和横向动态变形;上、下游主缆跨中各 1 个,主要用于监测主缆跨中的竖向、横向动态变形。加劲梁两端各布设 1 个磁致伸缩仪,监测梁端顺桥向位移。由于该桥柔度大,当大桥的变形过大或超过允许值时,将造成行车不平顺,导致桥面铺装层开裂等问题。因此除了要监测个别关键测点的变形外,整个加劲梁的变形状况也需要监测。

### 4.1.2 温度效应分析

武汉阳逻长江大桥索塔下横梁处各设置 3 个竖向支座和 2 个顺桥向阻尼缓冲支座,横向设置限位装置。温度荷载作用下允许加劲梁纵向变形。为掌握温度作用下大桥的位移响应,长时间实测桥梁结构温度和位移。

温度数据通过布设于主缆和钢箱梁上的温度传感器获得,对通过磁致伸缩仪、GPS、液位挠度传感器长时间监测到的大量数据进行统计分析,获得结构变形,从而得到温度~变形的对应关系。从图 3~6 可以看出,图中时程数据体现了较好的规律性,温度变形效应随着温度变化而变化。某天监测数据表明,钢箱梁温度在凌晨 7 时左右温度最低,而在 15:30 左右达到峰值(图 3)。当温度降低时,梁端位移监测数据变大(图 4),主缆和加劲梁位移时程波形上凸,表明钢箱梁收缩,同时主缆和钢箱梁上挠(图 5、图 6)。反之温度升高则温度效应具有与之对应一致的规律。

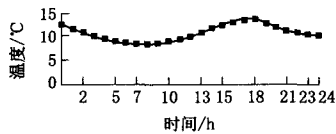


图 3 全天温度变化

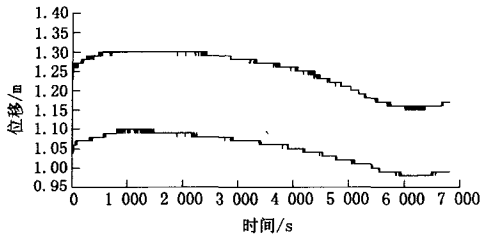


图 4 箱梁梁端伸缩缝顺桥向位移时程

温度~变形关系式可通过大量实测数据进行最小二乘法分析得到,拟合公式为:

$$D = aT + b$$

式中,  $D$  为测点实测位移;  $T$  为实测结构温度;  $a$  为

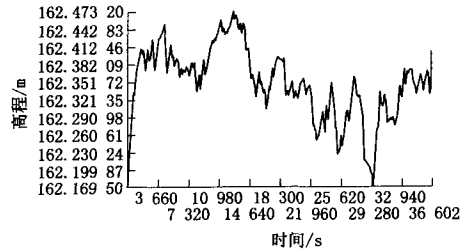


图 5 主缆跨中动位移时程(GPS)

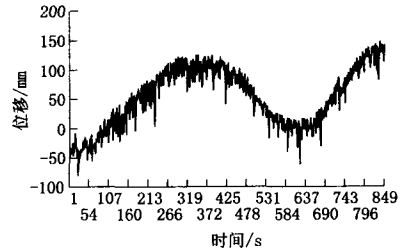


图 6 箱梁跨中挠度时程

温度效应系数,反映温度每变化 1 °C 结构变形的大小(mm);  $b$  为实常数。

图 7 为大桥温度作用下竖向、顺桥向位移变化率(每度对应的变形值),图中塔顶和梁端标示为顺桥向位移变化率,加劲梁处标示为竖向位移变化率。

从图 7 中可以看出:温度作用下主缆和钢箱梁跨中实测竖向位移变化率基本一致,因此可以认为温度作用下钢箱梁的变形效应主要受制于主缆的变形;1/4 跨与 3/4 跨温度效应较跨中小;桥塔顺桥向变位相近,北塔稍大;箱梁两端伸缩缝顺桥向变化率基本一致。

因此,通过前期一段时间的统计数据进行分析,可以建立温度~变形关系式。在后续实时监测过程中,通过及时分析获得的温度效应变化率,可以判断大桥整体变形是否在合理范围之内,支座、伸缩缝的工作状况是否正常,这对于大桥运营期间的安全状态评估具有重要意义。

### 4.2 振动监测

大桥结构的动力特性与桥梁结构刚度、质量、阻尼值及其分布有关。结构的刚度决定了结构的静挠度,质量是决定自振频率的重要因素<sup>[3]</sup>。这种影响涉及风振方面时,通常在旋风激荡下会产生很大影响,虽然反应(振幅振动)很小,但临界风速的风能导致振动变大。阻尼通常影响振动幅度,随着阻尼变大,振幅变小,但临界风速的风却使桥的振动变大。为了监测桥的动态特性和振动响应,振动传感器安装在桥面、桥塔以及主缆上。得到的结果用来确定桥梁的频率、振型以及模态阻尼,并监测桥梁振动。

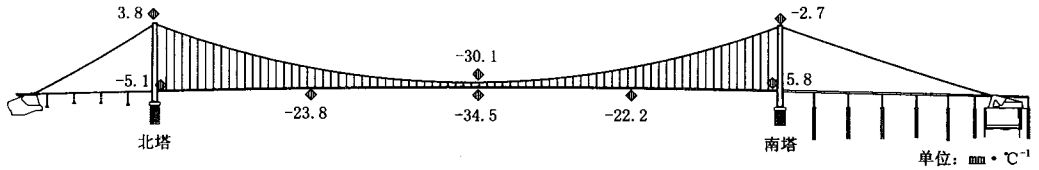


图7 温度作用下竖向和顺桥向位移变化率

与理论值进行比较,为今后结构的损害检查工作提供参考。

4.2.1 振动监测系统

武汉阳逻长江大桥建成后,在大桥上布置了振动监测系统,长时间记录桥梁结构在环境和车辆激励下引起的桥梁振动。根据大桥振动特点,在大桥多个部件共布置测点56个,测点位置包括主缆、桥塔以及加劲梁多个部位。主缆布置竖、横向共10个测点,加劲梁布置竖、横、顺桥向以及扭转共30个测点,南、北桥塔塔顶和塔2/3处布置横桥向及顺桥向4个测点,共8个测点,另外在桥面板上布置8个加速度传感器以监测正交异性板局部振动。

4.2.2 模态测试分析

从测试的振动响应信号中识别出全桥的振动模态。固有频率(表1)、振型(图8)以及阻尼(表2)对桥梁抗震抗风分析、健康监测以及损伤诊断至关重要。

表1 自振频率实测值与计算值

计算值 Hz	实测值 Hz	振型 描述	计算值 Hz	实测值 Hz	振型 描述
0.08	0.08	L1(对称)	0.56	0.55	V8(对称)
0.29	0.35	L2(反对称)	0.65	0.61	V9(反对称)
0.51	0.53	L3(对称)	0.72	0.68	V10(对称)
0.11	0.12	V1(反对称)	0.88	0.78	V11(反对称)
0.20	0.20	V2(对称)	1.08	0.94	V13(反对称)
0.29	0.27	V4(对称)	0.31	0.33	T1(反对称)
0.42	0.39	V6(对称)			

注:L表示侧弯;V表示竖弯;T表示扭转。

表2 实测阻尼比

振型特征	频率/Hz	阻尼比D/%
竖向一阶(V1)	0.12	2.67
横向一阶(L1)	0.08	2.31

由以上实测结果和理论计算结果可知,大桥竖向自振频率和横向自振频率实测值与计算值比较接近。环境激励下可获得大桥的多阶竖向振型和部分横向模态,纵向模态和部分低阶模态由于信号过弱

或者基准点位于振型节点的原因,信噪比较小而无法得出振型曲线。实测阻尼比在合理范围之内。

4.2.3 汶川地震响应分析

北京时间2008年5月12日14:28,在四川汶川县(北纬31.0°,东经103.4°)发生里氏8.0级地震,距武汉市约1040km。因本次地震衰减较慢,武汉地区普遍有感,传至武汉时的地震烈度在4~5度,为有感地震。武汉阳逻长江大桥振动监测系统成功捕获到地震下的桥梁振动响应。图9为地震前后部分测点振动响应时程曲线,表3为主要测点振动响应最值。

表3 汶川地震作用下大桥主要测点振动响应最值

方向	测点位置	位移 mm	速度 mm·s <sup>-1</sup>	加速度 mm·s <sup>-2</sup>
顺桥向	北塔塔顶	40.8	23.1	394.1
	北塔距塔顶48m处	38.9	21.1	377.4
	加劲梁跨中	9.7	5.8	62.2
横向	北塔塔顶	75.2	39.5	272.5
	北塔距塔顶48m处	75.0	39.3	270.7
	加劲梁1/4处	50.4	17.8	239.1
	加劲梁跨中	32.5	23.2	271.8
竖向	主缆跨中	44.8	42.6	329.2
	加劲梁1/4处	85.9	30.7	55.5
	加劲梁跨中	55.3	17.7	89.5

通过实测数据分析,可以得到如下结论:

- (1) 监测到的桥梁振动信号显示:从14:32开始大桥有比较大的振动响应,之后振动响应慢慢衰减。
- (2) 实测地震作用下大桥最大位移为85.9mm,为加劲梁1/4处竖向振动;最大速度为42.6mm/s,为主缆跨中横向振动;最大加速度为394.1mm/s<sup>2</sup>(约为0.04g),为北塔纵向振动。
- (3) 通过分析地震作用前后大桥振动频率和温度效应等变化,可以推断大桥整体结构未发生明显改变,支座和伸缩缝工作状态正常。
- (4) 从实测地震响应结果来看,大桥地震作用

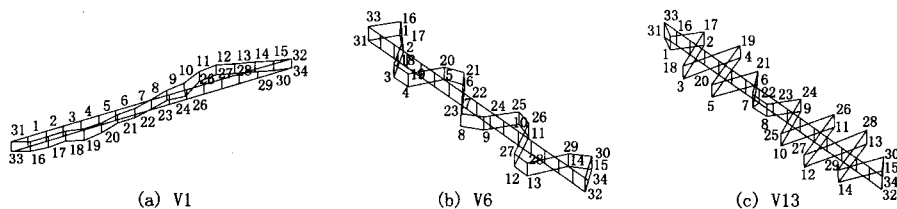


图8 部分实测振型

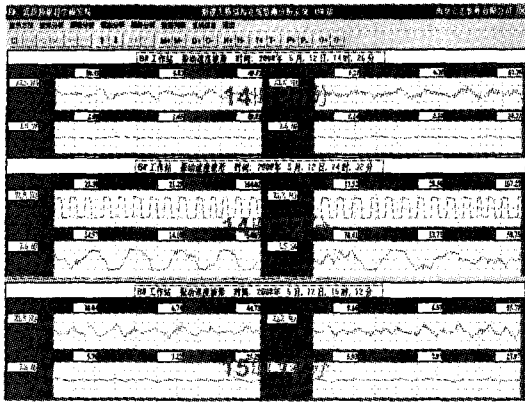


图9 汶川地震前后部分测点振动响应时程曲线响应在设计范围之内。

## 5 总结与展望

本文对武汉阳逻长江大桥健康监测系统进行了概述,并对其在运营过程中的监测成果进行了探讨。重点分析了大桥的实测温度变形效应,得到了结构重要部位静力特征参数——温度变形率,为大桥后期运营中整体温度变形评估、支座和伸缩缝的工作

状态评估积累了“指纹档案”;对汶川地震作用下的大桥实测振动响应进行了分析,结果表明大桥地震响应在设计范围之内,震后大桥工作状态未发生改变。

现代传感器技术、传输技术以及土木工程技术等迅速发展,给桥梁健康监测技术的研究创造了越来越多的发展机遇,随着该项技术的发展和该系统充分合理的使用,桥梁健康监测系统将会越来越广泛地发挥其重要作用。

## 参 考 文 献:

- (上接第92页)
- in Chinese)
- [2] 吴方明. 我国大跨度高速铁路桥梁行车性能研究[J]. 桥梁建设, 2004, (3): 9-11.  
(WU Fang-ming. Research of Train Operation Performance of Long-Span High-Speed Railway Bridges in China[J]. Bridge Construction, 2004, (3): 9-11. in Chinese)
- [3] 刘汉夫. 铁路桥梁横向振动加速度测试与分析中的技术问题[J]. 世界桥梁, 2005, (4): 65-67.  
(LIU Han-fu. Technical Issues Involved in Measurement and Analysis of Lateral Vibration Acceleration of Railway Bridges[J]. World Bridges, 2005, (4): 65-67. in Chinese)
- [4] 铁道科学研究院铁道建筑研究所. 桥梁动力性能综合试验研究报告[R]. 2003.
- [5] 曾庆元. 列车脱轨分析理论与应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007.
- [6] 中铁大桥局集团桥科院有限公司. 武汉天兴洲公铁两用长江大桥通车鉴定试验细则[Z]. 2009.
- [7] 李星新. 大跨度高速铁路桥梁测试与分析技术研究[C]//武汉桥科院青年学术论文集. 武汉:中铁大桥局集团桥科院有限公司, 2009: 5-12.  
(LI Xing-xin. Study of Testing and Analysis Techniques for Long Span High-Speed Railway Bridges [C]// Proceedings of BSRI Young Engineers' Academic Exchange. Wuhan: Bridge Science Research Institute Ltd (BSRI), China Zhongtie Major Bridge Engineering Group, 2009: 5-12. in Chinese)