

岳阳洞庭湖大桥动力特性试验研究

陈玉冰¹, 蒋田勇², 郭棋武¹

(1.湖南中大检测技术集团有限公司, 湖南 长沙 410006; 2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 动载试验是评定桥梁结构动力稳定性和运营状况的重要方式。文中介绍了国内首座不等高三塔双斜面索全漂浮体系斜拉桥——岳阳洞庭湖大桥动载试验方法和过程, 通过对该桥固有模态参数和冲击系数的测试与分析, 得出该桥在运营 20 年后, 其动力特性和动力响应能满足设计和相关规范要求、桥梁结构整体动力性能良好。

关键词: 桥梁; 斜拉桥; 动载试验; 动力特性; 动力响应

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0137-04

现役大部分砼斜拉桥由于过度超载、环境侵蚀及材料老化等原因出现了严重的功能衰退, 其中以桥跨结构的自振特性及车辆荷载的冲击振动等动力学问题最为突出。引起桥梁结构振动响应的动力荷载主要分为振动荷载、冲击荷载及两者的联合动力荷载。桥梁结构的自振特性通过动力荷载试验测得, 所测得的桥梁结构动力特性参数(如自振频率、冲击系数等)只与结构本身固有性质(如结构的组织形式、刚度、质量分布和材料性质等)有关, 是桥梁结构运营管理的重要参数。该文对国内首座预应力砼结构三塔连续主梁的双索面斜拉桥进行动力特性试验及动力响应试验, 通过采集桥梁结构在动载试验作用下的强迫振动反应, 评价其运营 20 年后的动力特性是否满足设计和规范要求, 综合评判其动力稳定性, 为其运营提供理论支撑和安全保障。

1 工程概况

岳阳洞庭湖大桥位于湖南岳阳市北门渡口下游 1.35 km 处, 是 S306 线上跨越洞庭湖口的一座特大桥, 全长 5 747.82 m, 是目前国内最长的内河公路桥, 也是第一座预应力砼(PC)多塔斜拉桥。主桥设计为不等高三塔双斜面索全漂浮体系预应力砼连续主梁斜拉桥, 全长 880 m, 孔径布置为(130+2×310+130) m, 桥面宽 23 m。该双索面斜拉桥的主梁为漂浮体系, 是中国第一次利用预应力砼技术的三塔主梁结构。主梁为高性能砼肋板式断面(见图 1), 其中 2×1.5 m 为拉索锚固区; 3 个塔墩基础均为桩基础; 拉索采用 PES7 热挤聚乙烯拉索、PESM7 冷铸锚头锚固体体系, 全桥共 111 对斜拉索。主桥总体布置见图 2。

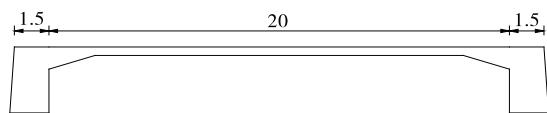


图 1 岳阳洞庭湖大桥标准横断面(单位: m)

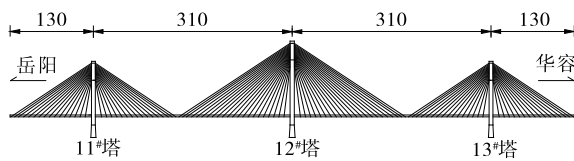


图 2 岳阳洞庭湖大桥主桥总体布置(单位: m)

该桥于 1996 年 12 月开始修建, 2000 年 12 月正式通车运营。为了解其在现场试验荷载作用下的工作性能, 检验桥梁结构的运营状况, 判断其承载能力能否满足设计荷载等级要求, 并为桥梁养护计划制定提供依据, 2018 年对该桥进行定期检查及荷载试验检测。由于斜拉桥结构动力特性(频率、振型及阻尼比等)是进行桥梁结构动力反应分析和抗震分析的前提、识别桥梁结构损伤和检验桥梁结构质量的理论依据, 着重以动力特性测试结果进行分析。

2 动力特性试验分析

2.1 固有模态参数分析理论

由有限元法可得全桥三维自由振动方程为:

$$[M]\{Y\} + [K]\{Y\} = 0 \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为桥梁整体质量矩阵; $\{Y\}$ 为已知位移向量; $[K]$ 为桥梁整体刚度矩阵。

假设向量 $\{Y\}$ 为如下简谐振动方程:

$$\{Y\} = \{A\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

把式(2)代入式(1), 得:

$$\{[K] - \omega^2 [M]\}\{A\} = 0 \quad (3)$$

已知系数行列式为零,得:

$$[K] - \omega^2 [M] = 0 \quad (4)$$

据此可得桥梁结构振动的特征值 ω_j^2 ($j=1, 2, \dots, n$) 及与其对应的特征向量 A_j ($j=1, 2, \dots, n$), 即第 j 阶振型。

相较于其他方法,子空间迭代法的计算精度高、结果可靠,故求解桥梁固有频率和振型时均采用该方法。

2.2 测试系统及测点布置

根据规范要求,桥梁动载试验的测试截面应根据桥梁结构振型特征和行车动力响应最大的原则确定。一般根据桥梁结构规模按跨径八等分或十六等分简化布置,桥塔或高墩按高度分 3~4 个节段分段布置。根据该桥特点,测点分别布置在桥面和索塔内,主桥脉动试验传感器以中塔(12# 塔)为对称轴布置,图 3 为左半部分传感器布置;桥面测点边跨按 1/8 点布置、中跨按 1/16 点布置,均距离桥面左、右边缘线 1.5 m;索塔内测点分别布置在下塔柱、中塔柱和塔顶位置。

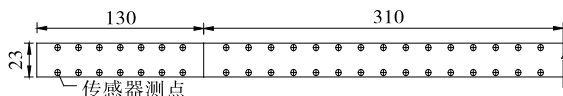


图 3 主桥脉动试验传感器布置示意图(单位:m)

2.3 测试结果与分析

根据试验结果,主桥实测模态参数见表 1,实测前九阶模态见图 4。

由表 1 和图 4 可知:洞庭湖大桥主桥的前九阶自振频率均在 1 Hz 内,频率低,为柔性结构;前九阶实测频率都大于理论值,全桥结构刚度满足设计要求;实测前九阶振型与理论计算振型吻合,一阶振型为纵向漂浮,符合漂浮体系斜拉桥的振动特性;实测阻尼比为 0.8%~2.9%,相对较小,结构耗散外部能

表 1 主桥实测模态参数

阶次	阵型描述	自振频率/Hz		实测阻尼比/%
		理论值	实测值	
1	纵向漂移	0.131	0.200	2.9
2	反对称竖弯	0.230	0.244	1.7
3	对称竖弯	0.422	0.439	2.5
4	反对称竖弯	0.480	0.508	2.0
5	反对称侧弯	0.577	0.615	1.5
6	对称竖弯	0.632	0.674	0.9
7	对称侧弯	0.761	0.859	1.2
8	反对称竖弯	0.772	0.859	1.4
9	正对称竖弯	0.792	0.967	0.8

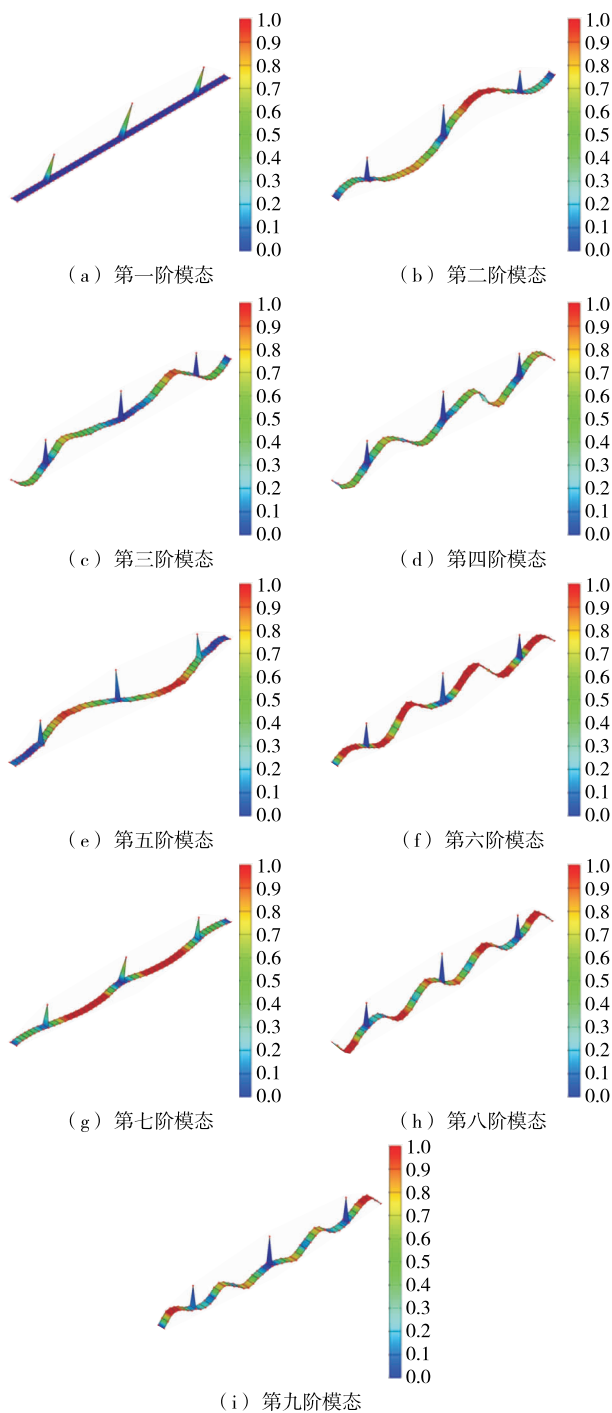


图 4 主桥实测前九阶模态

量输入的能力较好。

3 动力响应试验分析

3.1 试验原理

冲击系数为动应变与静应变之比,其中动应变反映桥梁结构在活载作用下的变形程度,是评价桥梁结构性能的重要依据。通过分析活载冲击系数 μ

可得到桥梁结构在动力荷载作用下的动力响应,其值由式(5)和式(6)计算(见图 5)。

$$1+\mu=\frac{y_{\max}}{y_{\text{mean}}} \quad (5)$$

$$y_{\text{mean}}=\frac{1}{2}\left(y_{\max}+y_{\min}\right) \quad (6)$$

式中: y_{\max} 为动力荷载作用下测点的最大应变(或挠度); y_{mean} 为对应静力荷载作用下测点的最大应变(或挠度),其值可由动应变(或动挠度)曲线求得; y_{\min} 为动力荷载作用下测点的最小应变(或挠度)。

根据该桥现场测试条件,在桥面无其他车辆行驶的情况下,选用单台和双台载重汽车分别以 20、30、40 和 50 km/h 的速度匀速通过主桥的测试桥

跨,测定主桥主跨跨中断面的动应变和冲击系数。

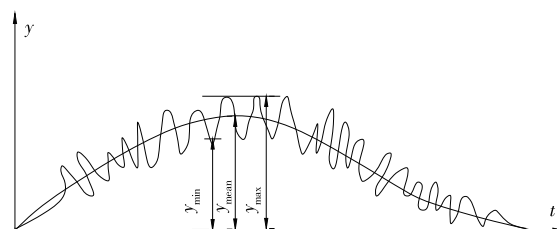


图 5 冲击系数计算示意图

3.2 测试结果与分析

单台、双台载重汽车以不同速度通过时主桥主跨跨中断面的动应变时程响应分别见图 6、图 7~8, 动应变和冲击系数见表 2。

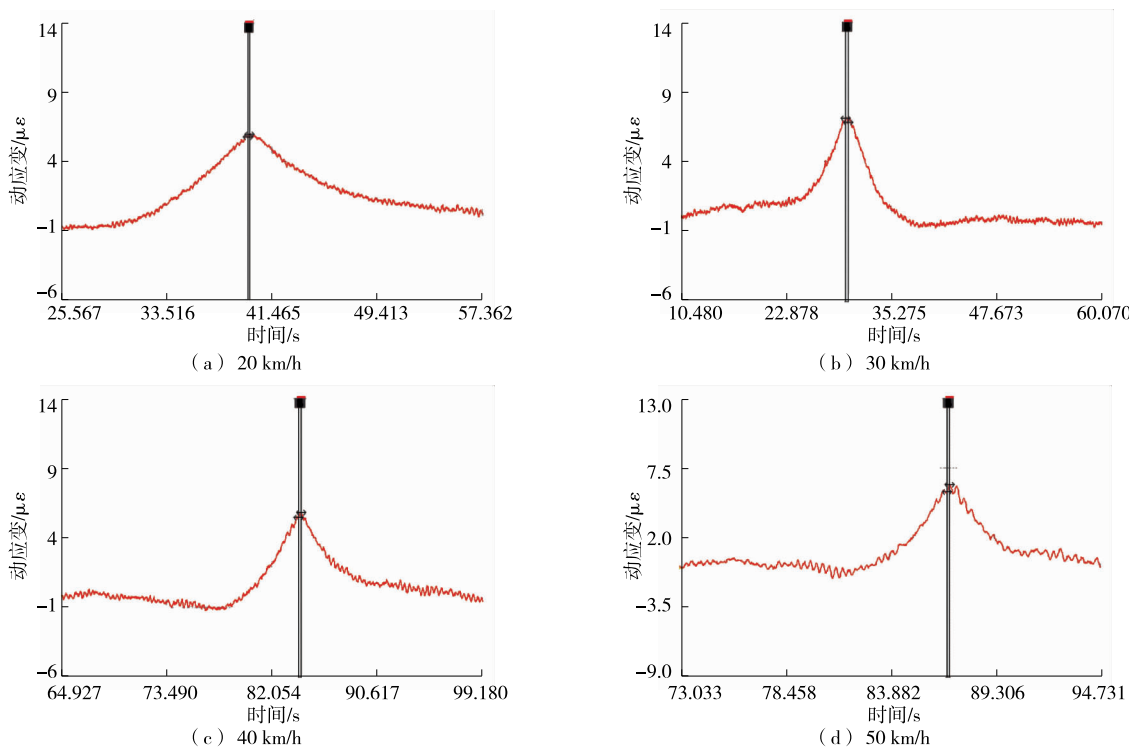


图 6 单台载重汽车以不同速度通过时测试截面的动应变时程响应曲线

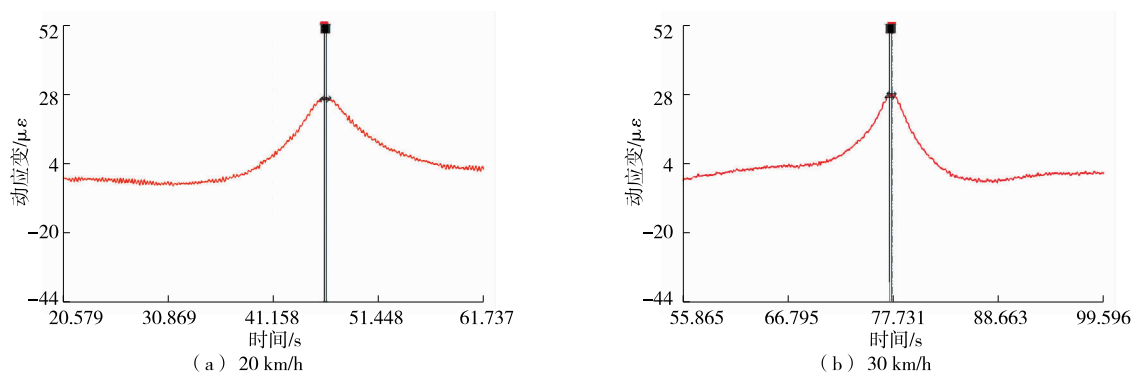


图 7 双台载重汽车以 20、30 km/h 的速度通过时测试截面的动应变时程响应曲线

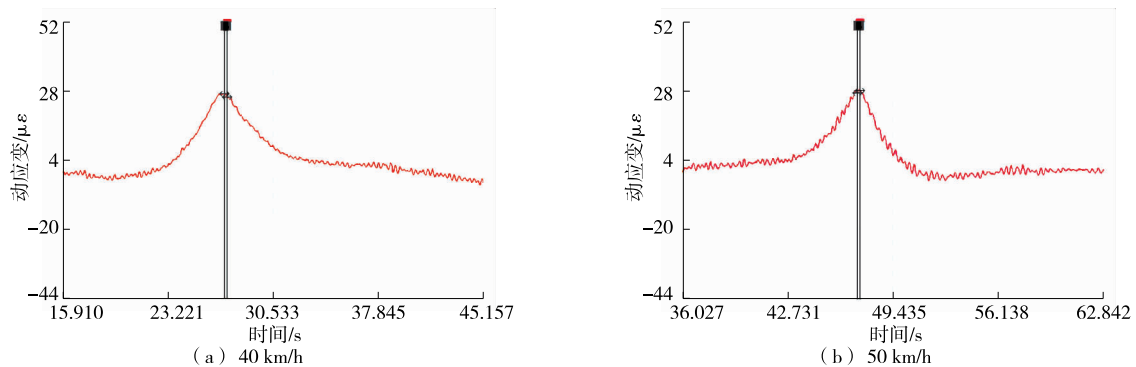


图 8 双台载重汽车以 40、50 km/h 的速度通过时测试截面的动应变时程响应曲线

表 2 实测动应变和冲击系数

行驶车速/ (km · h ⁻¹)	动应变/μ ε		冲击系数	
	单台车	双台车	单台车	双台车
20	5.96	26.14	1.016	1.014
30	7.08	27.68	1.032	1.025
40	5.80	26.72	1.036	1.023
50	6.18	27.91	1.050	1.021

由图 6、图 7~8 和表 2 可知:单台车和双台车无障碍行车试验所测冲击系数均小于规范要求的 1.05,表明该桥的行车舒适性和在设计荷载作用下结构动力响应较好;动应变和冲击系数的大小与行车速度无必然关系;双台车作用下的动应变比单台车的大,说明动应变大小与荷载重量有关,与静力受力情况一致。

4 结论

(1) 岳阳洞庭湖大桥前九阶实测自振频率均大于理论频率,其实际结构刚度较大,运营 20 年后仍能满足设计要求。

(2) 动应变和冲击系数的大小与行车速度无必然关系,该桥冲击系数满足规范要求,结构在设计荷载作用下的动力响应较好。

参考文献:

[1] 曾特新.大跨径斜拉桥荷载试验及静动力分析[J].湖南交通科技,2005,31(3).

[2] 谢志恒,张玉平,武娟.株洲湘江四桥部分斜拉桥静载试验研究[J].公路与汽运,2008(3).
[3] 曹少辉,田仲初,陈剑.马岭河大桥成桥荷载试验研究[J].中外公路,2012,32(5).
[4] 王凌波,贺拴海,蒋培文,等.大跨径桥梁荷载试验加载方案算法设计[J].武汉理工大学学报,2011,33(2).
[5] 曹少辉,谢勇.双塔斜拉桥的动力特性研究[J].公路与汽运,2014(2).
[6] 谢勇,曹少辉.思南乌江三桥成桥动载试验研究[J].交通世界:建养.机械,2013(11).
[7] 刘海.桥梁动荷载特性[J].交通世界,2014(7).
[8] 姚远,王旭东.基于动力荷载试验的某斜拉桥动力性能评估[J].建筑监督检测与造价,2009(8).
[9] 王雅俊.城市公路双索面斜拉桥荷载试验研究[D].济南:山东大学,2018.
[10] 肖阳剑,周建庭,黎小刚.轨道专用斜拉桥动力荷载试验与评价[J].科学技术与工程,2015,15(18).
[11] 张力文,曹文婷.贵州乌江三桥成桥动力特性试验研究[J].公路与汽运,2016(3).
[12] 杨茂华,黎东龙.某矮塔单索面斜拉桥荷载试验分析[J].公路与汽运,2019(4).
[13] JTG/T J21-01-2015,公路桥梁荷载试验规程[S].
[14] JTG D60-2015,公路桥涵设计通用规范[S].
[15] 苗峰,张哲,赵维贺,等.独塔双索面斜拉桥动力特性分析[J].公路交通科技:应用技术版,2009(7).
[16] 刘立红.双塔双索面斜拉桥动力特性分析[J].中外建筑,2012(6).

收稿日期:2019-04-13

(上接第 136 页)

[7] 刘芳亮,李宏哲,毛幸全,等.千米级悬索桥结构安全监测系统综述[J].公路交通科技:应用技术版,2018(7).
[8] 刘毅,李爱群,丁幼亮,等.大跨悬索桥面向结构健康监测

测的基准有限元模型[J].公路交通科技,2007,24(8).
[9] 郁胜.悬索桥有限元模型修正的响应面方法[D].大连:大连理工大学,2014.

收稿日期:2019-04-11