



# 大跨双幅桥梁新型同步气弹-测压风洞试验研究

赵智航<sup>1a</sup>, 刘元杰<sup>2</sup>, 陈增顺<sup>1a</sup>, 李小斌<sup>3,4</sup>, 张金保<sup>5</sup>, 许叶萌<sup>1a,1b</sup>, 仝亚刚<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 航空航天学院, 重庆 400045; 2. 重庆市交通运输委员会, 重庆 401147; 3. 青海省交通建设管理有限公司, 西宁 810021; 4. 青海省青海湖旅游发展集团有限公司, 西宁 810003; 5. 青海省交通控股集团有限公司, 西宁 810003)

## Novel synchronized aeroelastic-pressure measurement wind tunnel experimental analysis for long-span double-deck bridges

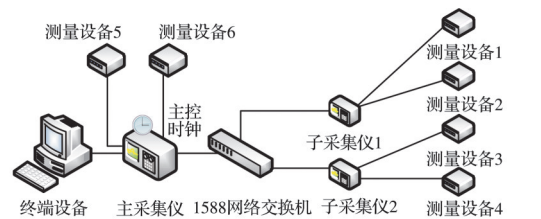
ZHAO Zhihang<sup>1a</sup>, LIU Yuanjie<sup>2</sup>, CHEN Zengshun<sup>1a</sup>, LI Xiaobin<sup>3,4</sup>,  
ZHANG Jinbao<sup>5</sup>, XU Yemeng<sup>1a,1b</sup>, TONG Yagang<sup>3</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Transport Commission, Chongqing 401147, P.R. China; 3. Qinghai Provincial Transportation Construction Management Co., Ltd., Xining 810021, P. R. China; 4. Qinghai Lake Tourism Development Group Co., Ltd., Xining 810003, P. R. China; 5. Qinghai Provincial Transportation Holding Group Co., Ltd., Xining 810003, P. R. China)

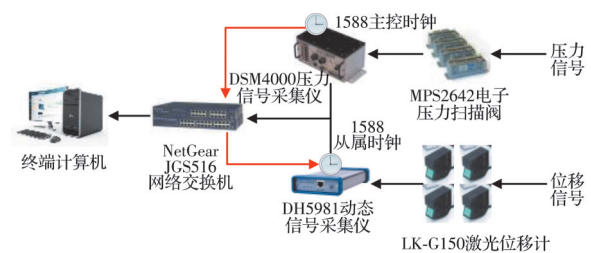
受气动干扰效应的影响,双幅桥梁可能出现大幅度涡振和软颤振<sup>[1]</sup>。由于涡振和软颤振的自激力具有复杂的非线性和非定常的“双非”特性,因此,通过风洞试验直接同步测量自激力和响应时程是建立结构振动与流场反馈(即振动反馈效应)规律数学模型的最佳方法<sup>[2]</sup>。笔者研发了一种新型同步气弹-测压风洞试验技术,并利用该技术系统研究双幅桥梁气动干扰效应的非线性气动作用机制,填补了该试验技术的空白。

新型气弹测压测量系统基于 IEEE 1588 时钟同步协议开发,系统架构和测量仪器组成如图 1 所示,可实现 ns 级精确多通道异构数据同步测量。与传统外部时钟源同步系统相比,新系统允许任意选择一台采集器的内部时钟作为主控时钟,通过网络交换机即可连接并同步多台采集器,极大地简化了系统架构,降低了开发成本和难度,并提高了不同设备间的兼容性和数据采集精度。

基于新型同步气弹-测压试验系统开展大跨度双幅桥气动干扰效应试验研究。节段模型基本尺



(a) IEEE1588 同步采集系统架构



(b) 同步气弹-测压试验测量系统

图 1 IEEE1588 同步气弹-测压试验系统

Fig. 1 Aeroelastic response and pressure synchronized measurement system using IEEE1588 protocol

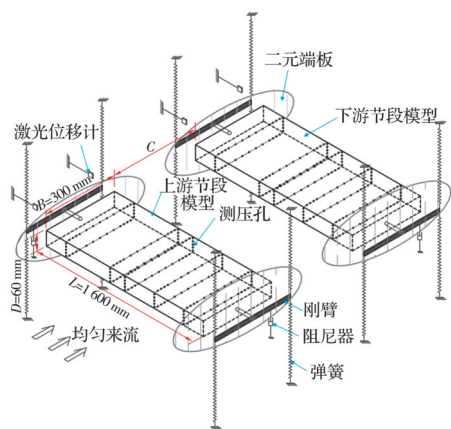
收稿日期:2024-11-18

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金(52221002);高等学校学科创新引智计划(111计划)(B18062);中央高校基础研究基金(2022CDJXY016、2023CDJXY030、2024CDJXY021);重庆市杰出青年科学基金(2022NSCQ-JQX2377);重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0145、CSTB2022TIADKPX0142、CSTB2024TIADKPX0157);国家外专项目(DL2023165002L)

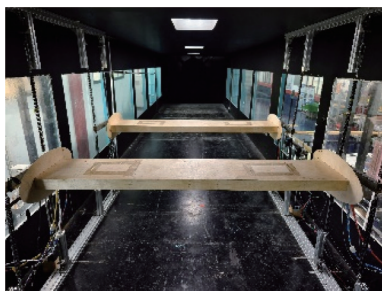
作者简介:赵智航(1995-),男,博士生,主要从事大跨桥梁抗风研究,E-mail:zhaozhihang@cqu.edu.cn。

陈增顺(通信作者),男,博士,教授,E-mail:zengshunchen@cqu.edu.cn。

寸:截面高度 $D$ 为0.06 m,宽度 $B$ 为0.3 m(矩形)、0.42 m(流线形),展向长度 $L$ 为1.6 m,如图2(a)所示,其中 $C$ 为上下游桥面之间的间距。流线形截面通过在矩形截面两端加装风嘴实现。气弹模型用弹簧固定在壁面导轨上,通过移动弹簧固定位置调整模型间距。单个模型总质量 $M$ 为11.13 kg(含扫描阀、测压管线及弹簧等效质量)。上下游桥面模型采用相同的机械参数,竖弯和扭转频率分别为3.15、6.05 Hz,阻尼比分别为0.32%和0.36%。模型表面布设压力测点以测量压力,电子压力扫描阀及测压管路通过限位装置固定在模型内部,扫描阀由两条数据线缆从模型两端连接到采集仪。风致振动响应则由刚臂两侧对称安装的激光位移计同步记录。同步测量系统采样频率为500 Hz,每次测量持续40 s。



(a) 试验模型示意图



(b) 风洞中的试验模型

图 2 双幅桥节段模型

Fig. 2 Schematic diagram of the double-deck sectional segment model

通过静风条件下的强迫振动-测压试验验证新测量系统的同步性能,测量结果如图3所示。结果表明,位移信号与压力信号同步振荡,表明结构振动与表面压力信号能精准同步采集。

同步气弹-测压试验考虑了截面形式、桥面间距 $C$ 、来流风速 $U_{\infty}$ 、风攻角 $\alpha$ 四个关键参数,试验参数如表1所示。

试验结果表明,气动干扰效应对双幅桥面风致振动的影响远超单幅桥梁。在气动干扰效应的影

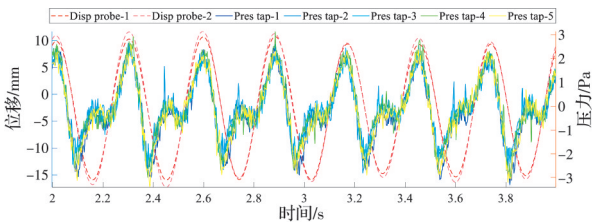


图 3 压力-位移同步测量验证结果

Fig. 3 Pressure-displacement synchronous measurement verification results

表 1 双幅桥气弹-测压试验工况参数

Table 1 Parameters of the aeroelastic-pressure synchronized measurement wind tunnel test

试验变量	参数取值
截面形式	
间距 $C$	1D、2D、3D、4D、5D、8D、10D
风速 $U_{\infty}$	0.5~12 m/s
攻角 $\alpha$	0°、3°、6°

响下,双幅桥梁上、下游桥面出现的涡振起振风速与颤振临界风速显著下降、涡激共振振幅及锁定区间增大、颤振形态改变等一系列风振现象,证实了气动干扰效应对双幅桥风振行为存在重大不利影响。

与传统试验方法相比,该同步气弹-测压测量系统具有高精度、良好数据同步性和强扩展性等优点,能高精度同步测量非定常压力和振动响应,适用于研究结构振动与气流的双向流固耦合规律,以构建非线性自激力模型。该系统为高层建筑和大跨桥梁等风敏感结构的气动弹性研究及抗风设计提供了先进的试验技术支持。

参考文献

[1] 谭彪,操金鑫,杨咏昕,等.大跨度平行双幅桥面颤振性能干扰效应[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(4):490-497.  
TAN B, CAO J X, YANG Y X, et al. Interference effect on flutter performance of long span bridges with parallel twin decks [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(4): 490-497. (in Chinese)  
[2] 朱乐东,庄万律,高广中.矩形断面非线性驰振自激力测量及间接验证中若干重要问题的讨论[J].实验流体力学,2017,31(3):16-31.  
ZHU L D, ZHUANG W L, GAO G Z. Discussion on several important issues in measurement and indirect verification of nonlinear galloping self-excited forces on rectangular cylinders [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(3): 16-31. (in Chinese)