

基于随机子空间法的桥梁动载试验研究^{*}

刘云帅¹, 魏大伟², 谢强², 耿江玮³

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省建筑设计研究院, 甘肃 兰州 730030;
3. 甘肃省桥梁隧道健康监测与安全评估技术重点实验室, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 首先总结了随机子空间法识别状态空间方程的分析计算的原理, 然后以某一工程为例对其进行了有限元模拟, 得出其前三阶频率, 并进行了基于环境激励的结构动力测试, 得到了测点加速度时程曲线, 利用随机子空间法对测试数据进行了分析, 得到其稳定图 and 前三阶模态频率。通过有限元模拟和随机子空间分析的结果对比, 得到桥梁结构的整体刚度评价结论。

关键词: 桥梁; 随机子空间; 动载试验; 频率; 整体刚度

中图分类号: U441+2

桥梁结构在其服役期间, 不可避免的要遭受到各种外部环境不利因素的干扰^[1], 尤其是车辆荷载的反复作用^[2], 会使桥梁结构发生一定的结构性缺陷, 诱发结构性能的退化。持续的桥梁结构性能退化会造成结构损伤得累积^[3], 当这种损伤累积到一定程度后, 如果遇到超载、地震等强烈外部激励时很容易导致桥梁结构的突然倒塌或破坏。因此如何及早发现桥梁结构的内部损伤并及时对其采取相应的加固措施, 对于减少由于桥梁的结构破坏所造成经济损失和社会不良影响具有重要意义。桥梁养护人员对桥梁的日常检查主要指桥梁的外观检查, 包括支座的稳定性, 主梁的混凝土裂缝、漏筋和腐蚀以及伸缩缝的工作状况等^[4]。但这些检查只能发现桥梁结构构件的外在损伤和功能性退化, 而无法对其承载能力做出一个综合的评价。如果要对桥梁做出详细的承载能力的评估, 一般需要结构的动静载实验。但由于静载实验的周期长, 费用高, 不适于大批量桥梁的普查。而通过环境激励下的动载实验测试桥梁结构频率, 然后对其整体刚度作出综合评价不失为一个相对简单易行的方法。该方法不需要特殊的激励形式, 只需测试桥梁结构在地脉动或风荷载作用下的振动响应即可得到结构频率, 这种方法最大的优势是不中断交通^[5], 比较适用于桥梁结构的普查。

1 随机子空间分析方法的原理^[6,7]

对于线性多自由度系统, 结构系统的控制方程如式(1)。

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (1)$$

其状态方程可以表示为式(2)的形式。

$$\dot{U}(t) = AU(t) + Bu(t) \quad (2)$$

式中: $U(t)$ 表示外输入;

$$U(t) = \begin{Bmatrix} X \\ \dot{X} \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B_1 \end{pmatrix}, \quad F(t) = B_1u(t)$$

如果将系统的不确定性分成过程噪声 $W(k)$ 和测量噪声 $V(k)$, 则经离散采样后, 可得到如下的随机状态空间系统:

$$\begin{aligned} U(k+1) &= FU(k) + Gu(k) + w(k) \\ V(k+1) &= HU(k) + Ju(k) + v(k) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $U(k)$ 、 $V(k)$ 分别为在离散采样时间 k 的 n 维和 m 维状态矢量, n 是系统模型阶数, m 是测站数。过程噪声 $W(k)$ 和测量噪声 $V(k)$ 均为零均值的白噪声。

在环境激励时, 输入 $U(t)$ 是未被测到的, 因此(3)式中应该不包含这一项, 则(3)式可转化为:

* 基金项目: 甘肃省自然科学基金(148RJZA026)资助项目。

△ 通讯作者: 刘云帅, E-mail: 57375089@qq.com

$$\begin{aligned}
 U(k+1) &= FU(k) + u(k) \\
 V(k+1) &= HU(k) + v(k)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

式中 F 、 H 分别为状态矩阵和观测矩阵，方程 (4) 即为环境振动时域内系统识别的基本方程，其中 $F=e^{df}$ ， f 为数据的采样频率。然后由各测点的响应数据构造 Hanker 矩阵 H_{pp} 和 Toeplitz 矩阵，再对 Toeplitz 矩阵进行 QR 分解得到权重矩阵 W_1 和 W_2 ，然后对加权的 Hanker 矩阵 $W_1^{-1}H_{pp}(W_2^{-1})$ 进行奇异值分解，最后得到系统的状态矩阵 F 。

假定 F 的特征值为 λ_2 ，特征向量为 Φ ，则系统的特征值和特征向量分别为：

$$\begin{aligned}
 U_i &= f \ln(\lambda_i) \\
 \Phi &= H\phi
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

据此即可得到结构的振动频率。

3 工程测试

3.1 工程概况

甘肃省某单跨箱型简支梁桥，桥面宽度为 15.75m，上部结构采用 5 片装配式预应力混凝土箱梁，箱梁上设 8cm 现浇混凝土连接层、三涂 FYT-1 改进型防水层，桥面铺装采用 6cm 中粒式沥青混凝土 (AC-20)，4cm 沥青玛蹄脂碎石混合料 (SMA-16)。下部结构桥台采用钢筋混凝土桩接盖梁式桥台，每个桥台设 3 根钻孔灌注桩，桩径为 150cm。桥梁设计荷载为公路- 级。桥梁立面图如图 1 所示。

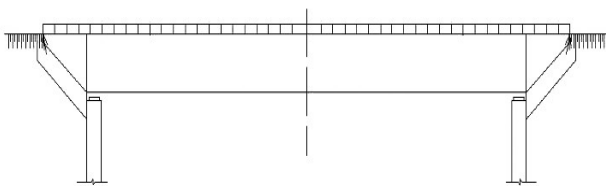


图 1 桥梁立面图

3.2 测点布置

本次测试采用桥面两侧布置加速度传感器，共设置 14 个测点，要求传感器尽量布置在所关心振型峰、谷点^[8]，具体传感器布置如图 2 所示。为测试其前三阶振动频率，要求参考点应避开前三阶不振动的驻点，经分析后最终选择 3# 测点为参考点。

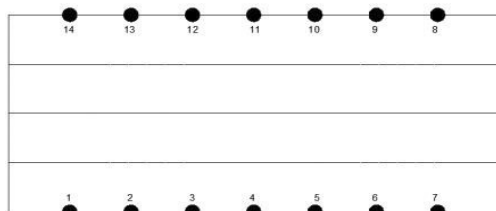


图 2 加速度测点布置图

3.3 桥梁动力模型理论计算

利用 Midas 桥梁分析软件对该桥梁进行建模，模型共计 270 个节点，380 个单元，建立有限元模型进行特征值计算，采用一致质量法计算的前三阶模态振型如图 3~5 所示。前三阶频率分别为：第一阶频率为： $f_1=2.40\text{Hz}$ ；第二阶频率为： $f_2=4.60\text{Hz}$ ；第三阶频率为： $f_3=9.50\text{Hz}$ 。

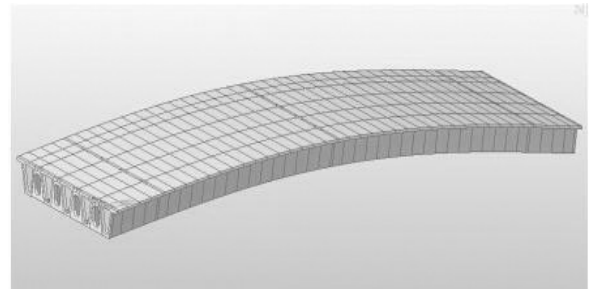


图 3 一阶模态振型

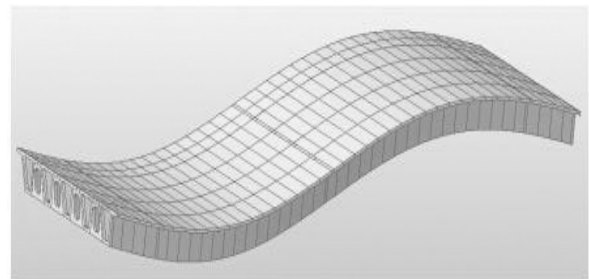


图 4 二阶模态振型

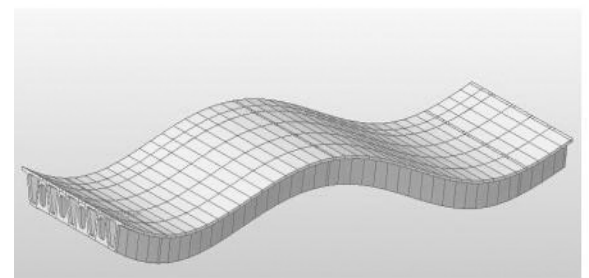


图 5 三阶模态振型

3.4 实测动载数据分析

本次测试采用 DASP2006 采集及分析系统对模型进行采样分析，采用 INVLf-8 型低通滤波放大器。桥梁自振特性的测试利用环境激励如风荷载等随机荷载使桥梁结构产生微小的振动，结构振动的加速度信号由布置在桥面两侧人行道内侧行车道处的传感器拾振，并通过放大器放大再由采集仪采集大量的加速度信号。信号采样频率为 51.2Hz，每一组采样时间为 30min。试验分 2 组进行，部分测点的部分实测加速度时程曲线如图 6 所示。

利用随机子空间的分析计算方法，得到桥梁结构的稳定图如图 7 所示。

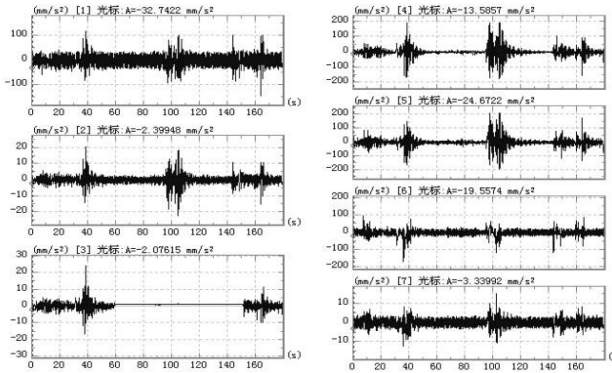


图 6 实测各测点加速度时程曲线

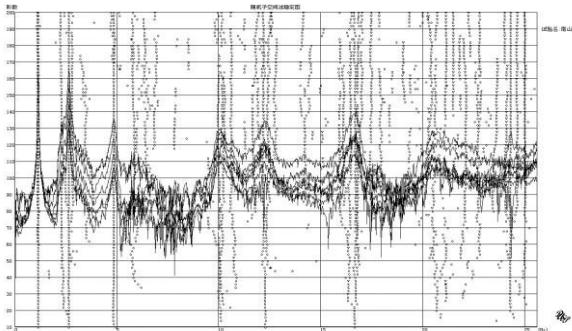


图 7 随机子空间法计算的稳定图

通过理论分析计算和现场实测,该桥的理论与实际自振频率汇总见表 1。

表 1 理论计算频率与实测频率统计表

模态阶数	理论计算频率 f_d (Hz)	实测频率 f_m (Hz)	f_m/f_d	评定标度
1 阶	2.4	2.61	1.09	2
2 阶	4.6	4.82	1.05	2
3 阶	9.5	10.03	1.06	2

通过表 1 数据比较发现,前三阶实测频率均大于理论计算频率,根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》计算其自振频率评定标度均处于 2 级。根据动荷载试验所测数据,可以看出桥梁整体结构的

(上接第 68 页)

最终形成一个完整的理论集合体。我国财务管理理论结构必须从 2 个纬度来构建:一为纵向,二为横向。坚持市场效率假设和财务管理理论为主线,从整个企业的发展出发,财务管理须严格执行规章制度,才能从根本上实现我国财务管理理论走上一个新的台阶。

2)坚持财务管理目标为根本落脚点。企业的发展始终须将财务管理放到第一位,将管理目标与财务管理理论框架研究相结合,围绕企业的经营状况制定合理的财务管理理论框架,将企业发展过程中零散、孤立的研究理论整合成一个有机整体,为实

动力性能较好,整体刚度较强。

4 结论

1)环境激励为地脉动或风荷载等,该激励不需要专门的激振设备,为现场测试提供了便利。

2)环境激励下桥梁结构振动响应的测试不需要中断交通,只是要求选择车流量尽量少的时段进行测试,如果外界干扰较大,可以通过增大采样时间的方法来减小干扰造成的误差,因此该方法比较适用于桥梁的前期普查。

3)随机子空间法能够较精确的识别到结构的频率参数,并以此与理论数据进行对比得到桥梁结构的综合性评价。

参考文献:

- [1] 杜永峰,刘云帅,王晓琴.基于挠度差值影响线曲率的简支梁桥损伤识别[J].桥梁建设,2009(4):80-83.
- [2] 李鸣,王和泰.某箱形连续梁桥静动载试验与分析[J].甘肃科技,2014,30(10):87-90.
- [3] 王和泰,王立宪.某简支空心板桥荷载试验与结构动力分析[J].甘肃科技,2012,28(4):112-114.
- [4] 周奇,李莉华.公路桥梁检查与养护工作研究[J].华东公路,2016(4):19-20.
- [5] 刘宇飞,辛克贵,樊健生,等.环境激励下结构模态参数识别方法综述[J].工程力学,2014,31(4):46-53.
- [6] 任伟新.环境振动系统识别方法的比较分析[J].福州大学学报,2001,29(6):80-86.
- [7] 徐良,江见鲸,过静珺.随机子空间识别在悬索桥实验模态分析中的应用[J].工程力学,2002,19(4):46-49.
- [8] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011/交通运输部公路科学研究院主编.[M].人民交通出版社,2011.

现企业价值最大化做好财务管理工作。

3)按照财务管理理论结构开展框架构建工作。建立适合企业发展的财务决策方案,在财务管理过程中须依靠好的方法指导,通过合理分析选择出好的研究思路,从而构建适合我国经济社会的新财务管理理论结构框架体系。

参考文献:

- [1] 段伟宇.中西方财务管理理论的比较研究[J].经济研究导刊,2011,7(9):21-24.
- [2] 陈妍.浅谈企业财务管理及财务管理的方法[J].科技展望,2014,10(4):45-46.
- [3] 言慧.论知识经济条件下财务管理创新[J].经济研究导刊,2012,2(6):71-73.