

文章编号 10258-2724(2000)02-0126-03

大跨径桥梁自振特性试验的环境随机激振法

唐怀平，王凤勤

(西南交通大学应用力学与工程系，四川成都 610031)

摘要：采用快速可靠的环境随机振动激振法，基于结构上各测点的脉动时域响应信号，应用 ITD 时域模态参数识别理论，分析大跨径桥梁实桥的结构固有模态并列举了工程应用实例。
关键词：模态分析；参数识别；大跨径桥梁；环境随机激励
中图分类号：O327 文献标识码：A

Self-Vibration Characteristic Test of Long-Span Bridges
by Means of Environment Random Excitation

TANG Huai-ping，WANG Feng-qin

(Dept. of Appl. Mechanics and Eng.，Southwest Jiaotong University，Chengdu 610031，China)

Abstract：Structural self-vibration characteristic test is one of the most important contents of long-span bridge quality evaluation. In this paper，a quick and reliable method of environment random excitation is proposed for self-vibration characteristic test. Based on the theory of IDT modal parameter identification in time domain，and using the impulse response signals acquired from each structural measuring point，the method is used to analyze the self-characteristics of a long-span bridge.
Key words：modal analysis；parameter identification；long-span bridge；environment random excitation

对于新建的桥梁，尤其是大跨径桥梁，通过现场桥梁静、动载试验，可评定其设计与施工质量，确定工程的可靠度，检验和完善桥梁设计理论。而桥梁结构自振特性试验是大跨径桥梁试验核心内容之一。传统的通过测定结构的频率响应函数(FRF)来识别模态参数的频域法，由于试验所需设备复杂，且激振信号难以实施和测定，因此受到一定的限制。而普通的信号谱分析只能得到结构的低级频率特性，无法确定结构全部频率成份及阻尼特性，其精度更受到怀疑。环境随机激振法也称脉动法，结构在环境扰动作用下，例如自然风、地脉动、机器或车辆引起的扰动等，虽然引起结构振动的振幅极为微小，但脉动响应所包含的频率成份相当丰富，它不需要任何激振设备，又不受结构形式和大小的限制，特别适用于测量结构整体的自振特性^[1]。在大跨径桥梁动力特性试验中，虽然可借助一定的测试手段测量输入载荷谱，但相当不稳定且没有代表性，因此很难精确测定结构的频率响应函数。而时域 ITD 识别技术无需知道输入激励力，从脉动响应信号直接识别结构的模态参数，保证识别精度，有实际应用价值。

1 ITD 时域模态参数识别法的基本理论

设一个 N 自由度粘性阻尼系统，其运动微分方程

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = 0 \tag{1}$$

其中： M 、 C 、 K 均为 $N \times N$ 阶方阵， \ddot{X} 、 \dot{X} 、 X 均为 N 维列向量。

系统的状态方程

$$\begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \ddot{X} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \dot{X} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

其中 $0, I$ 分别为 $N \times N$ 阶零阵和单位阵。状态向量

$$Y = \begin{Bmatrix} X \\ \dot{X} \end{Bmatrix}$$

状态系数矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2N \times 2N}$$

根据复模态理论 ,方程 (1) 对应的系统具有 $2N$ 个共轭复特征值 $\lambda_i = a_i + j b_i$ 及相应的复特征向量 $P_i (i = 1, 2, \dots, 2N)$; λ_i 为系统第 i 阶频率 ; P_i 为第 i 阶复振型。系统的自由响应 $X(t)$ 可按复模态分解为

$$X(t) = \sum_{i=1}^{2N} P_i e^{\lambda_i t} \tag{3}$$

可见系统的响应信号含有全部模态信息 ,ITD 法的本质就是根据响应信号 $X(t)$ 确定系统的状态系数矩阵 A ,求解状态系数矩阵 A 的特征值 ,计算系统所有的模态参数^[2]。ITD 法是一种仅仅根据输出信息识别系统模态参数的方法。

2 环境随机激振法测量大跨径桥梁结构自振特性的试验设计

(1) 传感器选择。大跨径桥梁结构的固有振动属低频振动 ,在环境随机激励下其脉动响应的幅值很小 ,因此需选用低频特性好、灵敏度高的传感器。如美国 PCB 公司研制的地震 ICP 型 393C 加速度传感器 ,下限频率为 0.01 Hz ,电压灵敏度高达 1 000 mV/g ,国产如清华大学研制的 DPS/DPV 超低频位移或速度传感器 ,其下限频率也达到 0.1 Hz ,电压灵敏度达到 20 mV/ μ m。

(2) 传感器安装。对于混凝土结构桥梁可选用橡皮泥直接安装 ;对于钢结构桥梁可选用胶接或附加安装支座 ,安装过程中注意安装刚度 ,同时不能损坏传感器结构及表面。

(3) 测点布置。测点位置和测量方向因能反映结构全部振动特征 ,同时考虑测量系统的紧凑性 ,所有测点宜集中在各结构的跨中。

(4) 测点数量。视桥梁跨度和结构形式而定。理论上根据 ITD 法识别原理 ,即使测点数目很少 ,只要增加响应信号延时 ,在每一个测点上增加数据 ,同样可得到特征矩阵 A 。在极端情况下 ,只要一个测点的信息 ,有足够的延时 ,也可以识别出全部模态参数 ,这就时单点时域法 SSTD。

(5) 环境激励。直接测量在自然风作用下结构脉动响应或车辆强迫激励后的余振响应 ,试验中应尽可能提高结构振动的信噪比。

(6) 数据采集与分析系统。计算机辅助的多通道动态信号采集系统及 ITD 模态分析软件。

(7) 参数选择。必须保证足够的频率分辨率 ,至少要求小于主要模态最小半功率带宽的一半 ;采样周期不宜过长 ,同时要确定结构分析频率范围。

3 工程应用实例

丰都长江大桥位于丰都县城上游的观音滩 ,是三峡库区移民工程重点项目之一。该桥主跨为 1 跨 450 m 的浅加劲钢桁梁悬索桥 ,塔柱为矩形薄壁空心甘情愿结构 ,设有上下两道横梁 ,主缆采用空间曲线 ,吊杆外张角为 $4^{\circ}09'27''$,大桥全长 596.14 m。在大跨径悬索桥的风致振动中 ,作为动力设计的主要内容有涡激振动和颤振动 ,而悬索桥的固有频率和阻尼比是其中最主要的控制参数 ,试验课题组于 1997 年 12 月分别对大缆、索塔和加劲梁进行现场自振特性试验。悬索桥结构示意图如图 1 ,加劲梁桥面上共布置测点 10 个 ,索塔顶布置 2 个 ,大缆上布置 2 个 ,总计 14 个。测试系统如图 2。采用一辆重车以 $v = 10$ km/h 的车速过桥激振 ,记录结构各测点的余振信号(见图 3) ,分析结果见表 1。试验结果与理论计算基本一致 ,表明此桥各结构有很好的动力特性。

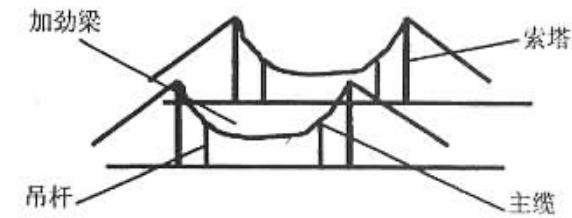


图 1 结构示意图



图 2 测试系统框图

表 1 结构自振频率的分析结果

		Hz							
振型阶段		竖 向			横 向			扭 转	纵 向
		1	2	3	1	2	3	1	2
频率/Hz	加劲梁	0.192	0.364	0.432	0.088	0.328	0.439	1.010	0.488
	主 缆	0.500	-	-	0.630	-	-	-	-
	索 塔	-	-	-	0.900	-	-	1.710	-
阻尼比	加劲梁	0.051	0.083	-	0.069	-	-	0.028	0.019
	主 缆	0.048	-	-	0.022	-	-	-	-
	索 塔	-	-	-	0.024	-	-	0.011	-

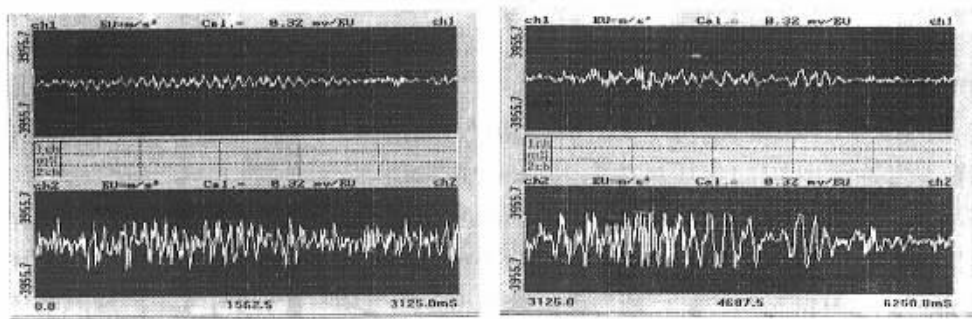


图 3 车辆以 10 km/h 行驶时结构实测余振信号

4 结 论

(1) 在大跨径桥梁结构自振特性试验中,采用环境随机振动激振法,无须测定输入信号,只通过对结构的脉动时域响应信号进行识别分析就能得到结构的主要模态参数。此方法对于大跨径桥梁质量评定的现场试验中有较大的实际应用价值。

(2) 脉动响应信号包含较丰富的结构振动各频率成份,采用 ITD 时域模态参数识别法至少能保证前十阶模态参数的识别精度。

(3) 此方法也适用于其它大型复杂结构,如高层建筑等。

参考文献：

[1] 张令弥,刘福强.大跨径斜拉桥相似模型结构动态特性试验的分离模态法[J].振动、测度与诊断,1999;19(2):128~132.

[2] 姚振纲,刘祖华.建筑结构试验[M].上海:同济大学出版社,1996:153~170.