

文章编号:1673-9469(2012)04-0016-04

环境温湿度与组合梁频率变化的回归分析

张金霖

(福建船政交通职业学院,福建 福州 350007)

摘要:在对户外一片两跨连续组合梁进行近一年的环境振动监测和分析的基础上,基于数理统计回归方法对环境温湿度与组合梁的频率进行线性和非线性回归分析,建立三种回归模型,对比分析表明,运用考虑温度不均匀性情况的四元线性回归模型既可以使环境温湿度与频率得到较理想的回归效果又有良好的预测性,同时也具有普遍适用性。

关键词:环境温湿度;组合梁频率;数理统计回归

中图分类号:TU317

文献标识码:A

Regression analysis of environmental temperature and humidity and the natural frequencies of composite beam

ZHANG Jin - lin

(Fujian Chuazheng Communications College, Fujian Fuzhou 350007, China)

Abstract: According to environment vibration monitoring nearly a year and analysis of a piece of two span continuous composite beams, the paper builds three regression model basing on the mathematical statistics method of the environmental temperature and humidity and the combined beam frequency linear and nonlinear regression analysis. The comparative analysis indicates that the four element linear regression model considering the temperature uniformity can not only make the environment temperature and humidity and the frequency be more ideal regression effect and good prediction, but also has universal applicability.

Key words: environmental temperature and humidity; the natural frequencies of composite beam; mathematical statistics regression method

桥梁健康监测系统也被称为风和结构健康监测系统,它利用在桥梁建设时期预埋在桥梁内部关键部位的各种应变计、测力计、温湿度计、风速仪以及疲劳计等传感器来对桥梁的使用寿命期间的结构健康状况和性能进行在线监测^[1]。通过近几年在结构健康监测中的研究表明,环境改变对结构动力特性的影响在很多情况下表现显著,有时甚至可以淹没许多结构损伤所引起的变化,足以让决策者做出相反的结论。通过对环境改变中非荷载因素的研究表明,温度、风力、降雨和湿度都对特征频率有影响^[2-3]。其中,温度是最主要的影响因素,环境温湿度与桥梁动力特性的关系并不是确定的函数关系,但是它们之间又确实存在着某种相关关系。要得到它们之间确切的相关

关系就必须借助数理统计回归分析方法^[4]。本文以两跨钢-混凝土组合梁模型为背景,实测了它们的动力特性及环境温湿度,应用数理统计回归分析的方法初步考察了环境温度变化与桥梁动力特性变化之间的相关性。

1 钢-混凝土组合梁环境振动试验

如图1所示:两跨钢-混凝土组合梁跨度各为5 m,钢梁为10号工字钢,上翼缘焊接一排栓钉后现浇一层200 mm×80 mm的普通钢筋混凝土板。组合梁直接安放在支座的滚轴上,支承均为简支。在支座与跨中的混凝土板内预埋了5个基康温度传感器,用以测量混凝土内部温度以及温度分布情况。该组合梁模型直接位于实验室外

侧,受到阳光和风雨的直接作用,除自重外,梁上没有任何附加荷载,可以很好地模拟桥梁所处的环境情况。采用环境振动测试模型梁的动力特性,竖向、横向和纵向的采样频率均为 600 Hz,滤波 400 Hz,每次采样时间为 10 min。组合梁具体尺寸、预埋件位置及测点布置如图 2 所示。

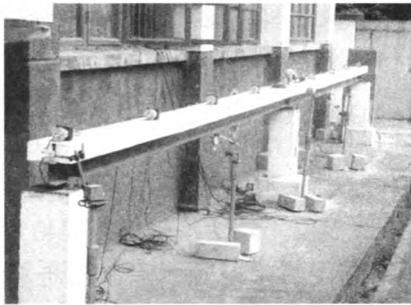
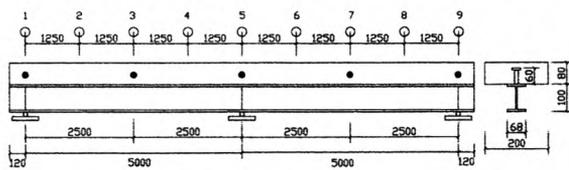


图1 钢-混凝土组合梁模型试验

Fig.1 Steel-concrete composite beam Model test



注: ○—表示加速度传感器的位置;
●—表示温度传感器和钢尺的位置

图2 组合梁尺寸, 传感器、钢尺布置/mm

Fig. 2 Sensors layout on the composite beam and size of composite beam

选择典型天气条件对组合梁进行测试,重点研究环境温度与湿度对组合梁动力特性的影响。经过近一年的跟踪监测,可以得到近 500 次有效数据。这些数据包含组合梁前 8 阶(横向共 4 阶、竖向共 3 阶、纵向共 1 阶)的动力特性(频率、振型、阻尼比),以及同时间采集的环境温度、环境湿度、梁内各测点的温度和组合梁的跨中挠度、长度伸缩量。

2 环境温湿度与组合梁频率的回归模型

环境温湿度与桥梁动力特性之间存在着某种相关关系,要得到它们之间确切的相关关系就必须借助数理统计回归分析方法^[4]。

2.1 二元一次回归模型

二元正态线性回归模型的回归函数的估计为 $\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x_1 + \hat{a}_2x_2$ (1)

称为 η 对 x 的二元正态线性经验回归方程。其中 $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2$ 是 a_0, a_1, a_2 的最小二乘估计值。为了书写方便,习惯上把经验回归方程中的 $\hat{y}, \hat{a}_0, \hat{a}_1$ 与 \hat{a}_2 分别写成 y, a_0, a_1 与 a_2 。

现在分析环境温湿度与频率的回归关系,即式(1)中, y 表示频率(ω); x_1 表示温度(t), x_2 表示湿度自然对数值($\ln RH$)。结果如表 1 所示。二元一次回归中,环境温湿度都能与各阶频率显著回归。其中,横向和纵向的相关系数比较高,可以达到 0.75 以上,但是竖向的回归相关系数普遍偏低,最高仅 0.52。这个结果还不能令人满意,于是本文进行了进一步的非线性回归。

2.2 二元二次回归模型

由于预先并不知道确切的环境温度和湿度度的关系,以及它们与频率的关系,所以优先选择运用多项式进行回归。如表 2 所示,二元二次回归已经可以使各阶频率与环境温湿度的回归达到较好的效果。

二元二次正态回归模型的回归函数的估计为 $\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x_1 + \hat{a}_2x_2 + \hat{a}_3x_1^2 + \hat{a}_4x_2^2 + \hat{a}_5x_1x_2$ (2)

其中公式中各参数的意义同前所述。现在分析环境温湿度与频率的二元二次非线性回归关系,

表 1 环境温湿度对频率的二元一次线性回归

Tab.1 The dual linear regression of the environmental temperature and humidity on the frequency

模态	方程检验(水平 $\alpha = 0.05$)				相关参数		检验结论	
	数据量	因子数	F 统计量	F 临界值	复决定系数 R	是否显著线性	标准回归系数	
							a'_1	a'_2
横向一阶	77	2	112.3	3.12	0.898	是	0.927	0.281
横向二阶	72	2	43.06	3.12	0.745	是	0.730	0.412
横向三阶	75	2	64.16	3.12	0.800	是	0.855	0.509
横向四阶	69	2	80.00	3.13	0.841	是	0.758	0.578
竖向一阶	101	2	8.80	3.09	0.397	是	0.666	0.435
竖向二阶	100	2	13.31	3.09	0.474	是	0.807	0.253
竖向三阶	98	2	19.58	3.09	0.516	是	0.596	0.183
纵向一阶	68	2	100.1	3.13	0.904	是	0.039	0.903

数据分析结果如表2所示。

可以看到,各阶模态的相关系数均有较显著的提高,其中提高幅度最大的是竖向各阶振动,最低相关系数已从二元一次线性回归的0.397达到0.54,因此利用二元二次回归模型可以反映环境温湿度与组合梁频率的关系。二元二次的回归效果之所以显著提高,主要由于考虑了环境温湿度各自的非线性因素以及它们的耦合效应对频率的影响。由此可见,各阶频率特别是竖向频率与环境温湿度之间确实存在显著的非线性关系。

通过二元二次回归的各变量系数可以发现,这些变量的系数比较凌乱、各变量系数均有正值与负值出现,找不出明显的规律性。由此,可以更清楚地了解多项式等非线性回归的一个特点:这类回归完全为了拟和出更吻合数据的曲线而回归,不注重实际的物理意义,不考虑各项变量所表示的具体意义。同时,这样拟和的曲线确实虽然可以使回归模型与实测数据很好地吻合,但由于多项式等非线性曲线的特点一振动较大、很不稳定,因此较难运用它们来进行结果预测,使用起来并不很方便。

2.3 四元线性回归模型

选用怎样的参数变量既可以较全面地反映试验组合梁内外温度的不均匀性对其动力特性的影响,同时又能方便试验测量采集。是一个比较困难的问题。通过文献[5-6]比较后本文精心选用两个新的参数变量加入回归分析:一个是环境温度与梁内的平均温度之差,它反映了随环境温度变化,梁内温度分布的总体情况;另一个是梁内各测点之间温度不均匀性产生的方差,它反映了梁

内温度分布差异的大小。对于环境湿度的不均匀性影响,考虑到环境湿度与温度相比对组合梁频率的影响相对较小,同时在实测时组合梁各位置环境湿度的差异也十分微小,故本文忽略湿度不均匀性的影响,最终采用四元正态线性回归模型进行环境温湿度与组合梁频率关系的分析。

$$\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_1 + \hat{a}_2 x_2 + \hat{a}_3 x_3 + \hat{a}_4 x_4 \quad (3)$$

利用式(3)就可以进行环境温湿度与频率的四元线性回归关系分析,令 y 表示频率(ω); x_1 表示温度(t), x_2 表示湿度自然对数值($\ln RH$), x_3 表示梁内各测点温度不均衡产生的方差值($D(t)$), x_4 表示环境温度与梁内各测点温度平均值之差($t_{\text{环境温度}} - t_{\text{梁内均温}}$)。很明显,考虑这两个参数后回归效果大大提高,除了能通过假设检验外,最低的相关系数也已达到0.62。如表3所示,各参数变量的系数变得更有规律。

表3中,F检验的统计量明显比它的临界值大,因此所有显著性检验的结果均为“是”。对于相关系数 R ,纵向振动为0.92,横向均在0.7以上,最小为竖向,但也达到0.62以上,这样的回归模型已经可以较好反映环境温湿度对频率的影响关系。标准回归系数反映的是各因素在回归曲线中的影响地位高低。横向的各阶振动中,温度和相对湿度的自然对数值均处在同一个数量级的影响下,但如果换算为温度和相对湿度的影响,很明显,温度的影响则要比湿度高出40倍左右。温度不均匀性的影响即 $a'_3 + a'_4$ 值,与温度的影响基本处在同一个数量级上,可见,温度的不均匀性对横向频率的影响确实很显著。再看竖向各阶振动,温度的影响处于最显著地位,随后是温度不均匀

表2 环境温湿度对频率的二元二次线性回归

Tab.2 The dual unlinear regression of the environmental temperature and humidity on the frequency

模态	方程检验(水平 $\alpha=0.05$)				相关参数		检验结论	
	数据量	因子数	F统计量	F临界值	复决定系数 R	是否显著线性	标准回归系数	
							$a'_1 + a'_2$	$a'_3 + a'_4 + a'_5$
横向一阶	77	5	51.08	2.34	0.913	是	2.184	4.040
横向二阶	72	5	26.12	2.35	0.815	是	7.314	12.399
横向三阶	75	5	48.01	2.35	0.881	是	9.758	14.481
横向四阶	69	5	51.60	2.36	0.897	是	3.141	3.286
竖向一阶	101	5	9.63	2.31	0.540	是	0.086	8.971
竖向二阶	100	5	11.93	2.31	0.623	是	0.302	28.482
竖向三阶	98	5	11.99	2.31	0.610	是	1.910	11.859
纵向一阶	68	5	47.38	2.36	0.922	是	2.297	2.529

表3 考虑温度不均匀性时温湿度与频率的线性回归

Tab.3 The quaternary linear regression model based on the temperature ununiformity and frequency

模态	方程检验(水平 $\alpha=0.05$)				相关参数		检验结论		
	数据量	因子数	F 统计量	F 临界值	复决定系数 R	是否显著 线性	标准回归系数		
							a'_1	a'_2	$a'_3 + a'_4$
横向一阶	77	4	74.42	2.50	0.923	是	0.910	0.363	0.283
横向二阶	72	4	46.28	2.51	0.844	是	0.736	0.616	0.704
横向三阶	75	4	23.06	2.50	0.738	是	0.711	0.586	0.316
横向四阶	69	4	23.12	2.52	0.750	是	0.678	0.632	0.495
竖向一阶	101	4	12.14	2.47	0.620	是	1.013	0.588	0.429
竖向二阶	100	4	13.39	2.47	0.667	是	0.823	1.200	0.297
竖向三阶	98	4	22.06	2.47	0.724	是	0.830	0.233	0.479
纵向一阶	68	4	56.90	2.52	0.917	是	0.043	0.625	0.344

性的影响,湿度的影响则最小。有趣的是纵向的规律恰好与竖向相反,湿度自然对数的影响最为显著,其次是温度不均匀性,最后才是温度的影响,但换算成环境相对湿度的影响后,很明显,湿度对频率的影响仍低于温度不均匀性的影响,这再次说明了温度不均匀性影响的显著性。

表4为三种线性回归复决定系数值 R 的比较,可以很清晰的看到,考虑温度不均匀性时四元线性回归的复决定系数值 R 在各个模态情况下较二元一次线性回归和二元二次线性回归得到的复决定系数值 R 都大,表明考虑温度不均匀性时四元线性回归结果较好。

表4 三种线性回归复决定系数比较

Tab.4 Comparison among three kinds of linear regression of complex decision coefficient

模态	二元一次	二元二次	考虑温度不均匀性时四元线性回归
	线性回归 R	线性回归 R	
横向一阶	0.898	0.913	0.923
横向二阶	0.745	0.815	0.844
横向三阶	0.8	0.881	0.738
横向四阶	0.841	0.897	0.75
竖向一阶	0.397	0.54	0.62
竖向二阶	0.474	0.623	0.667
竖向三阶	0.516	0.61	0.724
纵向一阶	0.904	0.922	0.917

3 结论

1) 环境温湿度对组合梁频率的影响很显著,但它们之间的关系不是简单的线性关系,也存在

着非线性关系;其中环境温度变化与组合梁频率变化呈正相关关系。

2) 运用环境温度与湿度分别及同时与组合梁频率进行一元及二元线性回归,无法得到理想回归效果;进行二元二次非线性回归,可以得到较理想的回归效果,但此回归模型缺乏良好的预测性。

3) 温度不均匀性影响在环境温湿度与频率的回归关系中不能忽略,特别在环境改变剧烈(如温度骤升或骤降)的情况下将更加显著。与环境温度、湿度变量一起与组合梁频率建立四元线性回归模型进行回归分析,此模型较二元二次非线性回归模型同样具有良好的回归效果,同时还拥有良好的预测性。

参考文献:

- [1] 于重重,王竞燕,谭励,等.基于时频分析方法的桥梁结构健康监测[J].数据采集与处理,2011,26(5):585-591.
- [2] 张通.温度对大型桥梁模态频率的影响研究[J].武汉理工大学学报,2011.33(7):94-100.
- [3] 闵志华,孙利民,仲政.环境温度对斜拉桥动力特性的影响分析[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(4):488-494.
- [4] 庄楚强,吴亚森.应用数理统计基础[M].广州:华南理工大学出版社,2004.
- [5] 于艳玲.温度对结构模态频率影响研究[D].大连:大连交通大学,2010.
- [6] 王立宪.考虑温度影响下的钢筋混凝土梁桥的模态参数识别研究[D].兰州:兰州理工大学,2009.

(责任编辑 刘存英)