

基于附加质量的试验模态振型质量归一化*

林贤坤^{1,2}, 覃柏英³, 张令弥², 郭勤涛⁴

(1. 广西工学院汽车与交通学院 柳州, 545006) (2. 南京航空航天大学振动工程研究所 南京, 210016)

(3. 广西工学院理学院 柳州, 545006) (4. 南京航空航天大学机电学院 南京, 210016)

摘要 针对桥梁结构试验模态振型的质量归一化,探讨了基于附加质量的试验模态振型质量归一化法,给出它的4种方法。以通扬运河大桥和张家港河大桥的有限元模型为对象,对4种方法计算质量归一化因子的精度,以及质量块的数量和质量、传感器数量、模态振型误差、质量块质量的误差对精度的影响进行了仿真研究。仿真结果说明了基于附加质量的试验模态振型质量归一化法的可行性和可靠性,在实际工程应用中可实现桥梁各阶试验模态振型较高精度的质量归一化。

关键词 桥梁结构;运行模态分析;试验模态振型;附加质量;质量归一化;状态评估

中图分类号 U447

引言

随着传感器、采集系统和计算机等技术的发展,试验模态分析技术也得到了快速发展。在20世纪90年代,出现了仅有输出响应的运行模态分析技术,该技术仅用多点响应测量数据即可识别出桥梁的模态参数^[1-4]。虽然该技术得到了快速的发展,但还存在许多问题,其中之一是试验模态振型的质量归一化问题^[5]。采用运行模态分析技术对桥梁实施环境激励或交通激励的运行模态分析时,激励力的信息未知,模态参数的识别是仅有输出的系统识别;因此,获悉的各阶试验模态振型未质量归一化。

近年来,研究人员提出了一些桥梁试验模态振型的质量归一化方法^[5-7],通过对桥梁实施运行模态分析获得其试验模态参数后,再在一些已知试验振型的点上添加质量块实施运行模态分析,从而实现试验模态振型质量的归一化。这类方法可称为基于附加质量的试验模态振型质量归一化法。

笔者提出了基于运行模态分析的模态挠度法,并将其应用于桥梁状态评估,提出了基于有限元模型的质量归一化法,即借助桥梁精确的有限元模型对试验模态振型质量归一化^[8]。虽然该方法在实际应用中可行和有效,但是建立和修正桥梁的精确有

限元模型还受人为因素的影响;因此,所求的质量归一化因子受桥梁的有限元模型影响较大。随着运行模态分析技术及试验模态参数在桥梁结构的健康监测、状态评估和损伤识别中日益广泛的应用^[9-13],针对桥梁结构试验模态振型的质量归一化问题,寻找一种较精确的方法具有重要意义和价值。

1 方法的推导

设桥梁的质量阵 M 、刚度阵 K 、模态频率 λ_1 和振型 ϕ_1 满足 $K\phi_1 = \lambda_1^2 M\phi_1$,若质量阵 M 有微小的改变量 ΔM ,对应的模态频率 λ_2 和振型 ϕ_2 满足 $K\phi_2 = \lambda_2^2 M + \Delta M\phi_2$,从而有

$$M(\lambda_1^2 \phi_1 - \lambda_2^2 \phi_2) = \lambda_2^2 \Delta M \phi_2 + K(\phi_1 - \phi_2) \quad (1)$$

设 ϕ_2 相对 ϕ_1 有改变量 $\Delta\phi$,即 $\phi_2 = \phi_1 + \Delta\phi$,则

$$(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \phi_1^T M \phi_1 = \lambda_2^2 \phi_1^T \Delta M \phi_2 - \phi_1^T (K - \lambda_2^2 M) \Delta \phi \quad (2)$$

若 ϕ_1 的质量归一化振型为 ψ ,可设 $\psi = \alpha \phi_1$,则 $\psi^T M \psi = 1$ 。根据式(2),有

$$\lambda_1^2 - \lambda_2^2 = \lambda_2^2 \alpha^2 \phi_1^T \Delta M \phi_2 - \alpha^2 \phi_1^T (K - \lambda_2^2 M) \Delta \phi \quad (3)$$

设 $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$, $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$,有 $2\lambda_1 = 2\lambda + \Delta\lambda$, $2\lambda_2 = 2\lambda - \Delta\lambda$,则

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50575101);广西自然科学基金资助项目(编号:2012GXNSFAA053208);江苏省交通科学研究计划资助项目(编号:06Y20);广西教育厅科研资助项目(编号:200103YB105);广西工学院博士基金资助项目(编号:院科博1005)

收稿日期:2011-01-01;修改稿收到日期:2011-04-25

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda} = \alpha^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_2 - \frac{\alpha^2}{\lambda_2^2} \phi_1^T (\mathbf{K} - \lambda_2^2 \mathbf{M}) \Delta \phi - \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_2}\right)^2 \quad (4)$$

因为 $2\lambda_2 = 2\lambda - \Delta\lambda$, $\frac{1}{1-x} = 1 + x + o(x^2)$, 由式(4)有

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda} = \alpha^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_2 - \frac{\alpha^2}{\lambda_2^2} \phi_1^T (\mathbf{K} - \lambda_2^2 \mathbf{M}) \Delta \phi - \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_2}\right)^2 - \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 + o\left[\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^3\right] \quad (5)$$

当质量阵 \mathbf{M} 的改变量 $\Delta \mathbf{M}$ 很小时,可假定结构的振型没有改变,即 $\Delta \phi = 0$, 即 $\phi_1 \cong \phi_2 = \phi$, 从而由式(3)和式(5)可获得如下计算桥梁结构试验模态振型质量归一化因子 α 的4种方法。

1.1 方法1

假定 $\Delta \phi = 0$, 由式(3)得 $\lambda_1^2 - \lambda_2^2 = \lambda_2^2 \alpha^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_2$, 从而质量归一化因子为

$$\alpha_1 \approx \sqrt{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) / \lambda_2^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_2} \quad (6)$$

1.2 方法2

假定 $\Delta \phi = 0$, $\phi_1 \cong \phi_2$, 由式(3)可得 $\lambda_1^2 - \lambda_2^2 = \lambda_2^2 \alpha^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_1$, 从而质量归一化因子为

$$\alpha_2 \approx \sqrt{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) / \lambda_2^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_1} \quad (7)$$

1.3 方法3

假定 $\Delta \phi = 0$, 由式(5)可得 $2\Delta\lambda/\lambda = \alpha^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_2$, 从而质量归一化因子为

$$\alpha_3 \approx \sqrt{\frac{4(\lambda_1 - \lambda_2)}{(\lambda_1 + \lambda_2) \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_2}} \quad (8)$$

1.4 方法4

假定 $\Delta \phi = 0$, $\phi_1 \cong \phi_2$, 由式(5)可得 $2\Delta\lambda/\lambda = \alpha^2 \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_1$, 从而质量归一化因子为

$$\alpha_4 \approx \sqrt{\frac{4(\lambda_1 - \lambda_2)}{(\lambda_1 + \lambda_2) \phi_1^T \Delta \mathbf{M} \phi_1}} \quad (9)$$

以上是计算桥梁试验模态振型的质量归一化因子的4种近似方法。由上述4种方法可知,通过在桥梁施加质量块实现质量阵的改变,再利用施加与未施加质量块的各阶试验模态频率、振型和质量阵的改变量,可求出未施加质量块时各阶试验模态振型的质量归一化因子,从而实现桥梁各阶试验模态振型的质量归一化。

2 仿真研究

基于运行模态分析的模态挠度法应用于桥梁状态评估时,只需桥梁的前几阶竖向振型对应的模态参数即可^[8];因此,模态试验只需布置竖向的传感器来测量竖向振型。在实际工程应用中,桥梁的运行模态分析只能获得前几阶模态参数,所以笔者只针对桥梁未施加质量时的前6阶竖向振型,利用通扬运河大桥和张家港河大桥的有限元模型,对4种方法计算其质量归一化因子的精度,仿真研究了质量块的数量和质量、传感器的数量、模态振型的误差和质量块质量的误差对4种方法计算精度的影响。利用MSC. Nastran 软件对有限元模型进行模态分析,桥梁未施加质量块时,其对应的各阶模态振型都已质量归一化,其质量归一化因子的准确值都为1。

2.1 仿真对象简介

通扬运河大桥全长为429.892 m。大桥分成左右两幅,每幅由一个主桥和两个副桥组成,其中右幅主桥由77.03 m+100 m+59.3 m的预应力砼连续梁构成,如图1所示。采用MSC. Patran 软件建立其有限元模型,如图2所示。该模型的前10阶模态振型中有6阶竖向振型。

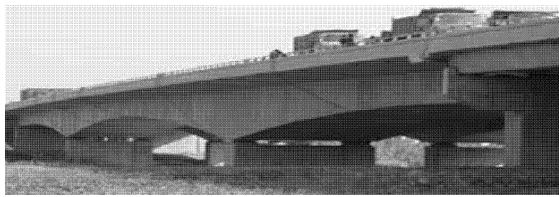


图1 通扬运河大桥的总体图

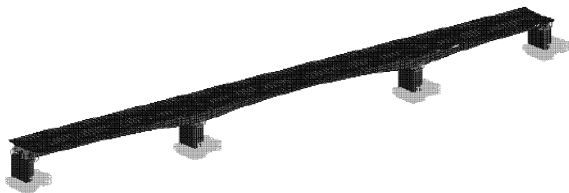


图2 通扬运河大桥的有限元模型

张家港河大桥总长为890.131 m,其上部采用49 m+82 m+49 m三跨预应力混凝土单箱双室直腹板连续箱梁,如图3所示。采用MSC. Patran 软件建立其有限元模型,如图4所示。该模型的前10阶模态振型中有6阶竖向振型。

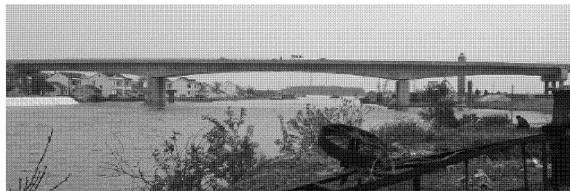


图3 张家港河大桥的总体图

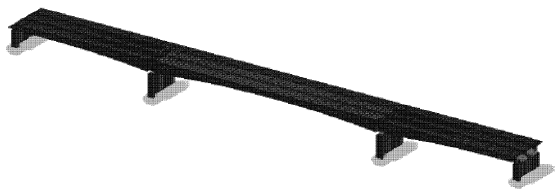


图4 张家港河大桥的有限元模型

2.2 质量块数量对精度的影响

对于试验模态振型质量归一化因子的4种近似计算方法,为了研究质量块数量对其精度的影响,考虑在两大桥的有限元模型内外两侧分别施加14,18,

22等3种数量的质量块,其中质量块的施加位置都位于桥梁各跨两侧的均分点上,如图5所示。其中1,2,3,4代表桥梁结构的4个桥墩。3种数量的质量块质量分别为31.43,24.44,20 t,总重量都为440 t。

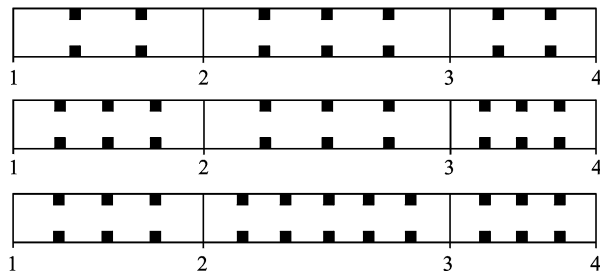


图5 3种数量质量块的施加位置图

对两大桥未施加和施加以上3种数量质量块的有限元模型分别进行模态分析,将相应的模态频率、振型和质量阵改变量代入4种计算公式,可获得前6阶竖向振型的质量归一化因子,与准确值1的百分比误差如表1和表2所示。

表1 通扬运河大桥施加不同数量质量块的质量归一化因子百分比误差

n	14个均重31.43 t 质量块				18个均重24.44 t 质量块				22个均重20 t 质量块			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
1	4.78	3.76	3.19	1.82	4.51	3.48	2.92	2.37	4.66	3.40	3.38	2.03
2	2.66	1.92	1.12	0.47	2.67	1.78	0.99	0.29	2.61	2.14	1.03	0.30
4	6.25	6.71	5.00	5.19	6.09	6.86	4.22	4.85	6.65	7.08	4.40	5.21
5	4.06	4.02	5.22	2.11	2.73	6.92	0.87	2.20	6.98	3.98	2.24	5.16
8	8.15	10.67	5.86	9.15	7.39	8.86	5.46	8.98	7.53	11.15	6.50	7.16
9	3.46	7.83	1.46	8.33	3.94	6.68	1.36	5.62	3.23	11.09	1.35	4.85
平均	4.89	5.82	3.64	4.51	4.56	5.76	2.64	4.05	5.28	6.47	3.15	4.12

表2 张家港河大桥施加不同数量质量块的质量归一化因子百分比误差

n	14个均重31.43 t 质量块				18个均重24.44 t 质量块				22个均重20 t 质量块			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
1	6.38	5.00	4.32	2.96	6.02	5.80	4.36	4.07	6.52	5.02	4.55	3.07
2	6.98	7.67	4.76	5.44	7.21	8.82	4.58	5.68	9.65	9.36	7.59	7.30
3	7.39	7.03	5.17	4.83	7.14	7.07	5.00	4.96	9.30	8.50	7.28	6.49
4	4.05	4.96	1.43	2.31	3.93	4.07	1.38	1.52	3.69	3.66	1.49	1.46
6	3.18	7.92	0.80	5.42	2.81	5.86	0.78	3.77	2.82	5.21	0.57	2.90
10	6.19	15.56	2.28	10.93	5.01	8.17	1.50	4.21	3.97	9.01	1.08	5.84
平均	5.70	8.02	3.13	5.32	5.35	6.63	2.93	4.04	5.99	6.79	3.76	4.51

由表1和表2的结果可知,在施加的质量块总质量相同的情况下,质量块的数量对质量归一化因子的精度有影响。质量块的数量过多或过少都会导致4种方法计算的质量归一化因子的精度降低。当在各跨各侧的4分点上施加3个质量块时,4种方法计算的质量归一化因子的精度最高,达到工程实际应用的要求。从方法上看,4种方法计算的模态振型的质量归一化因子的精度,方法3的精度最高,方法4

次之,方法1更次之,方法2相对较差。

2.3 质量块质量对精度的影响

通过在桥梁内外侧施加质量块,导致质量阵和模态参数改变,从而实现各阶试验模态振型的质量归一化;因此,质量块的质量必然会影响质量归一化因子的精度。针对施加18个质量块的情形,每个质量块分别取20,25,30 t,研究质量块的质量对质量

归一化因子精度的影响。对有限元模型模态进行分析,将相应量代入4种计算公式,可获得前6阶竖向振型的质量归一化因子,与准确值1的百分比误差

如表3和表4所示。施加质量块前、后的有限元模型的频率百分比误差表示为 r_1, r_2 和 r_3 ,结果如表5和表6所示。

表3 通扬运河大桥施加不同质量的质量块的质量归一化因子百分比误差

n	18个均重20t质量块				18个均重25t质量块				18个均重30t质量块			
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
1	4.24	3.43	2.94	2.60	4.52	3.49	2.94	2.39	4.80	3.56	2.93	2.18
2	2.35	1.63	0.99	0.45	2.68	1.79	0.99	0.29	3.01	1.96	0.98	0.12
4	5.75	6.48	4.28	4.85	6.09	6.88	4.24	4.86	6.44	7.27	4.20	4.86
5	2.36	6.62	0.92	2.29	2.71	6.93	0.89	2.22	3.09	7.23	0.89	2.15
8	7.01	8.04	5.44	8.52	7.39	8.87	5.47	8.98	7.79	9.69	5.51	9.43
9	3.38	5.31	1.26	4.77	3.96	6.69	1.37	5.64	4.62	8.08	1.54	6.50
平均	4.18	5.25	2.64	3.91	4.56	5.78	2.65	4.06	4.96	6.30	2.67	4.21

表4 张家港河大桥施加不同质量的质量块的质量归一化因子百分比误差

n	18个均重20t质量块				18个均重25t质量块				18个均重30t质量块			
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
1	5.71	5.72	4.28	4.30	6.05	5.81	4.56	4.04	6.39	5.90	5.25	3.78
2	7.02	8.55	4.78	5.79	7.24	8.86	4.85	5.66	7.46	9.16	6.34	5.53
3	6.63	6.81	4.89	5.08	7.20	7.10	5.02	4.94	7.78	7.39	5.15	4.80
4	3.41	3.58	1.33	1.51	4.00	4.13	1.39	1.52	4.60	4.66	1.45	1.52
6	3.74	5.20	0.67	3.51	2.85	6.00	0.77	3.85	3.33	7.13	0.79	4.50
10	3.75	4.74	1.03	1.73	5.18	8.60	1.56	4.52	6.86	12.45	2.25	7.16
平均	5.04	5.77	2.83	3.65	5.42	6.75	3.02	4.09	6.07	7.78	3.54	4.55

表5 通扬运河大桥施加不同质量块前、后的有限元模型的频率误差

n	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_3/\%$	n	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_3/\%$	n	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_3/\%$
1	2.18	2.70	3.22	4	2.81	3.50	4.18	8	2.44	3.06	3.70
2	2.58	3.20	3.82	5	2.21	2.75	3.28	9	3.24	4.10	4.98

表6 张家港河大桥施加不同质量块前、后的有限元模型的频率误差

n	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_3/\%$	n	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_3/\%$	n	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_3/\%$
1	2.66	3.29	3.92	3	2.92	3.63	4.33	6	3.16	3.96	4.79
2	2.80	3.48	4.15	4	3.93	4.89	5.84	10	5.11	6.65	8.28

由表3和表4可知,在施加的质量块数量和位置相同的情况下,质量块的质量对质量归一化因子的精度有影响。随着质量块的质量增加,会导致质量归一化因子的精度降低。由表5和表6知,施加25t质量块可保证识别出模态频率的变化和所计算的质量归一化因子的精度。从方法上看,可知方法3的精度最高,方法4次之,方法1更次之,方法2相对较差。

2.4 传感器数量对精度的影响

针对施加18个均重25t质量块的情形,考虑如下3种数量的传感器:a.在施加质量块的点上布置18个传感器;b.再在4个桥墩两侧布置8个传感器,

共26个传感器;c.再在中跨2个传感器间增加1个传感器,共34个传感器。将相应的量分别代入4种计算公式,可获得前6阶竖向振型的质量归一化因子,与准确值1的百分比误差如表7和表8所示。

由表7和表8的分析结果可知,只要在施加有质量块的点上布置传感器,在此基础上再增加传感器,所获得的试验模态振型不会影响质量归一化因子的精度。这是因为随着传感器数量的增加,质量阵的变量 ΔM 中除施加质量块的点对应的元素不为0外,其他未施加质量块的点对应的元素都为0。因此, $\phi_1^T \Delta M \phi_1$ 和 $\phi_2^T \Delta M \phi_2$ 的数值不变。

表7 通扬运河大桥不同数量传感器下的质量归一化因子百分比误差

n	布置26个传感器				布置34个传感器				布置50个传感器			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
1	4.52	3.49	2.94	2.39	4.52	3.49	2.94	2.39	4.52	3.49	2.94	2.39
2	2.68	1.79	0.99	0.29	2.68	1.79	0.99	0.29	2.68	1.79	0.99	0.29
4	6.09	6.88	4.24	4.86	6.09	6.88	4.24	4.86	6.09	6.88	4.24	4.86
5	2.71	6.93	0.89	2.22	2.71	6.93	0.89	2.22	2.71	6.93	0.89	2.22
8	7.39	8.87	5.47	8.98	7.39	8.87	5.47	8.98	7.39	8.87	5.47	8.98
9	3.96	6.69	1.37	5.64	3.96	6.69	1.37	5.64	3.96	6.69	1.37	5.64
平均	4.56	5.78	2.65	4.06	4.56	5.78	2.65	4.06	4.56	5.78	2.65	4.06

表8 张家港河大桥不同数量传感器下的质量归一化因子百分比误差

n	布置26个传感器				布置34个传感器				布置50个传感器			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
1	6.05	5.81	4.56	4.04	6.05	5.81	4.56	4.04	6.05	5.81	4.56	4.04
2	7.24	8.86	4.85	5.66	7.24	8.86	4.85	5.66	7.24	8.86	4.85	5.66
3	7.20	7.10	5.02	4.94	7.20	7.10	5.02	4.94	7.20	7.10	5.02	4.94
4	4.00	4.13	1.39	1.52	4.00	4.13	1.39	1.52	4.00	4.13	1.39	1.52
6	2.85	6.00	0.77	3.85	2.85	6.00	0.77	3.85	2.85	6.00	0.77	3.85
10	5.18	8.60	1.56	4.52	5.18	8.60	1.56	4.52	5.18	8.60	1.56	4.52
平均	5.42	6.75	3.02	4.09	5.42	6.75	3.02	4.09	5.42	6.75	3.02	4.09

2.5 模态振型误差对精度的影响

在模态试验测试中,受测试系统和模态识别方法等因素的影响,最终获得桥梁的试验模态参数与其真实值间必然存在一定的误差;因此,有必要研究振型的误差对质量归一化因子精度的影响。针对施加18个均重25 t质量块的情形,假定各测点的各阶振型数据存在它的 ϵ 内的随机误差,给定 $\epsilon=3\%$, 5% , 7% ,可获得前6阶竖向振型的质量归一化因

子,与准确值1的百分比误差如表9和表10所示。

比较表9与表3、表10与表4的结果可知,各阶模态振型的误差对其质量归一化因子的精度有影响,误差增大精度降低,但在5%的误差内,精度能达到实际应用的要求;因此,4种方法对模态振型的误差有一定的抗干扰性。为了提高质量归一化因子的精度,可采用高精度传感器等手段减少噪声,提高测试信号的精度,以减少试验模态参数误差对质量归一化因子精度的影响。

表9 通扬运河大桥不同模态振型误差下的质量归一化因子百分比误差

n	$\epsilon=3\%$				$\epsilon=5\%$				$\epsilon=7\%$			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
1	4.86	3.62	2.37	1.52	5.83	4.72	0.08	5.88	4.62	1.53	2.44	2.65
2	2.91	2.29	0.02	0.33	1.74	2.73	0.84	2.00	5.50	3.03	0.83	0.03
4	5.24	6.08	5.39	4.24	4.24	8.36	5.13	4.57	4.81	5.96	5.25	2.34
5	3.31	5.81	0.30	2.45	1.63	8.28	1.73	4.85	0.08	2.64	0.23	1.37
8	6.57	9.26	5.94	9.44	8.82	8.02	5.62	9.51	8.78	8.68	6.68	6.24
9	5.65	6.35	1.75	6.15	2.92	7.45	1.28	4.44	6.60	4.42	3.78	4.31
平均	4.76	5.57	2.63	4.02	4.20	6.59	2.45	5.21	5.07	4.38	3.20	2.82

表10 张家港河大桥模态振型误差下的质量归一化因子百分比误差

n	$\epsilon=3\%$				$\epsilon=5\%$				$\epsilon=7\%$			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
1	7.29	6.27	5.26	5.29	6.94	7.12	6.82	4.03	6.56	7.53	7.26	3.97
2	6.56	9.15	5.43	4.84	5.06	9.78	4.57	4.45	7.98	6.90	4.12	2.05
3	7.91	6.61	5.37	4.05	7.62	8.62	5.46	3.33	7.80	7.23	3.13	5.42
4	3.45	4.29	1.72	1.09	5.83	3.49	0.92	0.77	4.51	8.61	4.31	3.54
6	2.49	6.16	1.26	5.10	3.79	7.11	0.98	3.97	5.58	6.15	1.68	0.83
10	5.64	7.71	1.41	4.63	6.94	7.24	2.03	4.21	5.80	7.20	0.94	5.70
平均	5.56	6.70	3.41	4.17	6.03	7.23	3.46	3.46	6.37	7.27	3.57	3.58

2.6 质量块质量误差对精度的影响

在工程实际应用中,对于所施加的各种质量块,其质量难以完全等于设定值;因此,需研究附加质量块的质量误差对振型质量归一化因子精度的影响。针对施加18个均重25 t质量块的情形,假定各质量块的质量存在它的 ϵ 内的随机误差。给定 $\epsilon=1\%$, 3% , 5% ,可获得前6阶竖向振型的质量归一化因

子,与准确值1的百分比误差如表11和表12所示。

比较表11与表3、12与表4的结果可知,各质量块质量的误差对各阶振型的质量归一化因子的精度有一定的影响,但影响较小。在工程实际应用中,各质量块质量的误差容易控制在 5% 内,因此,质量块质量的误差对各阶振型的质量归一化因子精度的影响可忽略不计。

表11 通扬运河大桥不同质量块质量误差下的质量归一化因子百分比误差

n	$\epsilon=1\%$				$\epsilon=3\%$				$\epsilon=5\%$			
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
1	4.52	3.49	2.94	2.39	4.52	3.48	2.93	2.37	4.56	3.53	2.99	2.45
2	2.68	1.79	0.99	0.28	2.68	1.80	0.99	0.29	2.67	1.81	1.01	0.33
4	6.08	6.88	4.23	4.86	6.07	6.94	4.19	4.89	6.13	6.96	4.28	4.93
5	2.73	6.92	0.91	2.21	2.42	6.47	0.58	1.75	2.98	7.13	1.15	2.41
8	7.38	8.86	5.46	8.98	7.52	8.90	5.61	9.04	7.39	8.95	5.43	9.04
9	3.95	6.67	1.38	5.64	4.00	6.75	1.43	5.72	3.98	6.73	1.42	5.71
平均	4.56	5.77	2.65	4.06	4.54	5.72	2.62	4.01	4.62	5.85	2.71	4.15

表12 张家港河大桥质量块质量误差下的质量归一化因子百分比误差

n	$\epsilon=1\%$				$\epsilon=3\%$				$\epsilon=5\%$			
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
1	6.05	5.80	4.55	4.02	6.10	5.86	4.62	4.11	6.01	5.78	4.54	4.03
2	7.29	8.89	4.90	5.70	7.24	8.86	4.86	5.67	7.18	8.79	4.83	5.63
3	7.25	7.14	5.06	4.98	7.19	7.14	5.00	4.97	7.21	7.15	5.06	5.02
4	3.99	4.13	1.39	1.53	4.02	4.13	1.42	1.54	3.94	4.11	1.37	1.53
6	2.84	6.06	0.75	3.91	2.91	6.04	0.82	3.89	3.23	6.19	1.15	4.05
10	5.19	8.58	1.56	4.50	5.28	8.72	1.65	4.62	6.26	8.92	2.62	4.84
平均	5.43	6.77	3.03	4.11	5.46	6.79	3.06	4.13	5.64	6.82	3.26	4.18

3 结论

1) 对于4种计算试验模态振型质量归一化因子的方法,方法3的精度最高,方法4次之,方法1更次之,方法2相对较差。

2) 质量块的数量对质量归一化因子的精度有影响,质量块的数量过多或过少都会导致所计算的质量归一化因子的精度降低。当在桥梁结构两侧各跨的四分点上施加3个质量块时,4种方法计算的质量归一化因子的精度最高,且精度达到工程实际应用的要求。

3) 随着质量块的质量增加,所计算的质量归一化因子的精度会降低。实际工程应用中,施加的质量块总质量最好控制在桥梁主体结构总质量的 $4\% \sim 5\%$ 以内。各质量块质量的误差对各阶振型的质量归一化因子的精度有一定的影响,但影响很小。

4) 只要在施加有质量块的点上布置传感器,在此基础上再增加传感器,所获得的试验模态振型不会影响质量归一化因子的精度。

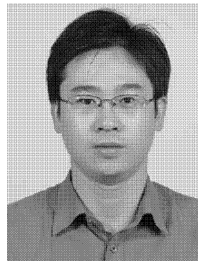
5) 各阶模态振型的误差对其质量归一化因子的精度有影响,误差增大精度降低,但 5% 的误差内,精度达到实际应用的要求;因此,4种方法对模态振型的误差有一定的抗干扰性。

6) 基于附加质量的试验模态振型质量归一化法,只需对桥梁施加一些质量块而进行重复模态试验,即可实现试验模态振型的质量归一化。

参 考 文 献

- [1] Zhang Lingmi, Wang Tong, Tamura Y. A frequency-spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24:1227-1239.

- [2] 王彤,张令弥. 运行模态分析的频域空间域分解法及其应用[J]. 航空学报,2006,27(1): 62-66.
Wang Tong, Zhang Lingmi. Frequency and spatial domain decomposition for operational modal analysis and its application[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 62-66. (in Chinese)
- [3] 刘宗政,陈恳,郭隆德,等. 基于环境激励的桥梁模态参数识别[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(3): 300-303.
Liu Zongzheng, Chen Ken, Guo Longde, et al. Parameter identification of a bridge under ambient excitation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3): 300-303. (in Chinese)
- [4] 吴子燕,易文迪,赵宇. 交通荷载作用下桥梁结构参数识别方法[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(4): 383-387.
Wu Ziyang, Yi Wendi, Zhao Yu. Structural parameter identification of bridge excited by traffic loads [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 383-387. (in Chinese)
- [5] Lopez-Aenlle M, Fernandez P, Brincker R, et al. Scaling-factor estimation using an optimized mass-change strategy [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24: 1260-1273.
- [6] Parlo E, Verboven P, Guillaume P, et al. Sensitivity-based operational mode shape normalisation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(5): 757-767.
- [7] Parlo E, Cauberghe B, Benedettini F. Sensitivity-based operational mode shape normalization: application to a bridge [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19: 43-55.
- [8] 林贤坤,张令弥,郭勤涛,等. 基于模态挠度法的预应力连续箱梁桥状态评估[J]. 土木工程学报,2010,43(10): 83-90.
Lin Xiankun, Zhang Lingmi, Guo Qintao, et al. Application of modal deflection method for condition assessment of prestressed concrete continuous box-girder bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 83-90. (in Chinese)
- [9] 彭翠玲,张开银,涂扬志. 实验模态分析技术应用于桥梁损伤检测[J]. 公路交通科技,2003,20(4): 44-46.
- [10] 李枝军,李爱群,缪长青. 刚架拱桥病害与损伤识别的动力学研究[J]. 振动、测试与诊断,2008,28(4): 387-389.
Li Zhijun, Li Aiqun, Miao Changqing. Damage identification of rigid-frame arch bridge based on dynamic tests [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(4): 387-389. (in Chinese)
- [11] 孙国,张洪武,蔡贤辉,等. 基于模态误差函数灵敏度分析的损伤识别方法[J]. 振动工程学报,2007,20(3): 303-308.
Sun Guo, Zhang Hongwu, Cai Xianhui, et al. A structural damage identification method based on sensitivity analysis of modal parameter error function [J]. Journal of Vibration Engineering. 2007, 20(3): 303-308. (in Chinese)
- [12] Zhang Q W. Statistical damage identification for bridges using ambient vibration data [J]. Computers and Structures, 2007, 85: 476-485.
- [13] 宋雨,项贻强,徐兴. 基于结构振动的桥梁损伤识别[J]. 振动、测试与诊断,2005,25(3): 222-226.
Song Yu, Xiang Yiqiang, Xu Xing. Mode sharp-based damage identification of bridges [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25(3): 222-226. (in Chinese)



第一作者简介:林贤坤,男,1976年1月生,副教授,博士。主要研究方向为桥梁状态评估和车辆动力学。曾发表《基于模态挠度法的预应力连续箱梁桥状态评估》(《土木工程学报》2010年第43卷第10期)等论文。

E-mail: Linxk0209@yahoo.cn

通信作者:覃柏英,女,1979年10月生,讲师。主要研究方向为运筹与控制、结构动态优化。

E-mail: qby5911@163.com