

文章编号: 0451-0712(2006)06-0105-04

中图分类号: TU317.9

文献标识码: B

桥梁监测系统中复杂结构的 静力应变传感器优化配置方法

谭冬莲¹, 肖汝诚²

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 同济大学桥梁系 上海市 200092)

摘 要: 在桥梁结构状态监测评估系统中, 传感器优化配置问题是监测信息经济可靠的关键, 也是业内广泛关注的热点问题之一。本文以复杂桥梁结构为研究对象, 提出了一套基于关心截面插值拟合误差最小准则的传感器优化配置方法, 并通过实例介绍了该方法的优化步骤及验证了其有效性。

关键词: 桥梁结构; 监测系统; 传感器; 优化配置; 插值拟合误差

桥梁结构状态监测评估的第一步即是在结构中布设传感器, 由于经济和结构运行状态等方面的原因, 在整座桥梁所有自由度上安置传感器是不可能也是不现实的, 因此, 就出现了在 n 个自由度上如何布置 m ($m < n$) 个传感器的优化问题, 即依据有限的传感器来获取最可靠和最全面的桥梁健康状况信息, 这就是优化配置的目的。

目前传感器优化配置研究大多是针对动力监测项目传感器的优化, 对于静力监测项目的传感器优化的研究较少, 常常是按常规布置, 而实际上每一座具体桥梁的关心截面位置是不一样的。

1 优化方法

复杂桥梁结构在车辆荷载作用下受有轴力、弯矩、剪力、扭矩等作用, 其截面应力处于复杂应力状态, 很难像梁桥将其应力用一个数学表达式表示。因此, 本文根据插值拟合的误差最小准则来配置复杂结构静力应变传感器, 采用曲线拟合的方法, 即通过采集结构上的传感器的输出值(关键位置的应力值), 通过曲线拟合, 拟合出结构上任一点的应力值, 然后与计算值比较, 得到插值误差。根据调整传感器位置拟合不同的效应(应力)曲线, 取拟合误差最小的传感器布置方案。该优化方法的步骤如下。

(1) 在结构的关键位置(如拱顶、 $L/4$ 、 $3L/4$)布置传感器, 在桥面上作用额定荷载, 可以测量得到结构关键位置的效应值 y , 通过多项式插值拟合——

拉格朗日插值拟合出结构的效应值曲线方程:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \left(\frac{x - x_i}{x_k - x_i} \right) \cdot y_k \quad (1)$$

式中: n 为已知插值点的个数; y_k 为插值点相应的效应测量值; $f(x)$ 为拟合效应值曲线方程。

(2) 利用拟合曲线方程计算出结构上任一点效应值, 为了分析传感器的位置、数量以及拟合方法的精度, 利用结构分析软件(如 ANSYS 或其他结构计算软件)计算出上述额定荷载作用下结构的实际效应值, 再与拟合曲线方程计算值进行比较, 得到拟合误差, 根据拟合误差最小准则, 选取优化的传感器位置和数量。

2 优化实例

昆山市玉峰大桥是斜靠式拱梁组合体系, 在车辆荷载作用下主拱受有轴力、弯矩、剪力作用, 其截面应力处于复杂应力状态, 很难建立其应力—内力关系表达式。因此, 采用本文所述插值拟合的误差最小准则来配置主拱应变传感器。

2.1 玉峰大桥主拱应变关心截面位置

确定结构的关心截面位置, 通常采用的方法是通过有限元模型计算得到效应曲线图, 曲线突变、效应值较大的位置即是关心截面位置。通过对玉峰大桥的有限元计算, 得到如图 1 所示的主拱应力包络图。

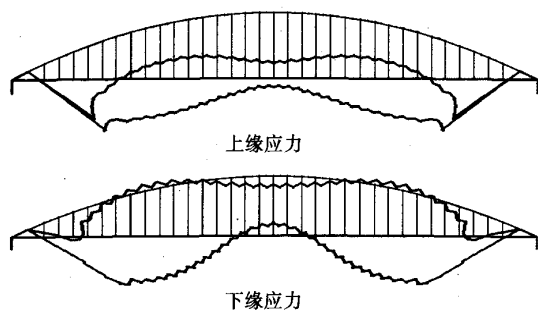


图 1 主拱拱肋运营工况下应力包络图

由图 1 可知,关心截面是 $x=0$ m、13 m、28 m、41.5 m、55 m、68.5 m、82 m、97 m、110 m。

要选取优化的传感器位置和数量,先拟定几种布置方案作为备选方案,考虑到对称布置的优越性,本文拟定传感器数量设置为 5 个和 7 个两种情况;上缘和下缘的位置布置分别处理,根据上述有限元计

算得到的关心截面位置,拟定 5 种布置方案。方案一,布置 5 个传感器在 $x=28$ m、41.5 m、55 m、68.5 m、82 m 处;方案二,布置 5 个传感器在 $x=13$ m、28 m、55 m、82 m、97 m 处;方案三,布置 5 个传感器在 $x=0$ m、28 m、55 m、82 m、110 m 处;方案四,布置 5 个传感器在 $x=0$ m、13 m、55 m、97 m、110 m 处;方案五,布置 7 个传感器在 $x=0$ m、13 m、28 m、55 m、82 m、97 m、110 m 处。

上缘应力和下缘应力分别按上述 5 种传感器布置方案布置,在额定荷载作用下测得布点截面应力,通过多项式插值——拉格朗日插值拟合,为了分析传感器的位置、数量以及拟合方法的精度,本文采用有限元计算结果与拟合结果进行比较,得到拟合误差。

2.2 上缘应变传感器位置、数量优化

各布置方案拟合误差比较如表 1 和图 2 所示。

表 1 上缘应变各方案拟合误差比较

坐标/m	方案一		方案二		方案三		方案四		方案五	
	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %
0	290	197	22	15	0	0	0	0	0	0
3	233	164	28	19	10	7	13	9	15	10
10	99	59	-2	-1	-11	-6	-5	-3	-4	-2
16	47	30	1	0	-3	-2	3	2	1	1
22	15	10	0	0	-1	-1	4	3	1	0
28	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0
34	-4	-3	0	0	1	1	4	3	0	0
40	-4	-3	0	0	1	0	2	2	0	0
46	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	-1	-1	1	0	1	1	2	2	0	0
70	-4	-3	0	0	1	0	3	2	-1	0
76	-4	-3	0	0	1	1	5	4	0	0
82	0	0	0	0	0	0	5	3	0	0
88	15	10	0	0	-1	-1	5	3	1	1
94	45	28	-1	0	-5	-3	2	1	0	0
100	99	59	-1	0	-11	-6	-4	-2	-3	-2
107	233	164	30	21	10	7	13	9	15	11
110	290	197	25	17	0	0	0	0	0	0

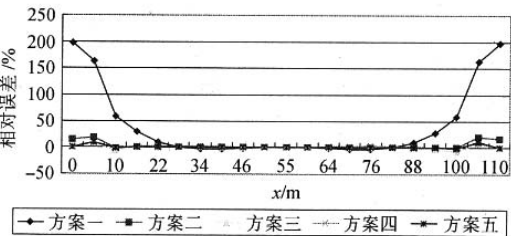


图2 各方案拟合误差比较

综合以上拟合分析结果,对于玉峰大桥主拱上缘应变传感器的布置按方案三布置为最优化,即传

感器数量为5个,布置位置为: $x=0\text{ m}$ 、 28 m 、 55 m 、 82 m 、 110 m 。如图3所示。

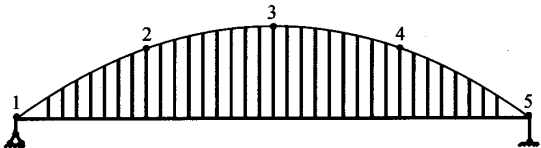


图3 主拱上缘应变传感器最优布置

2.3 下缘应变传感器位置、数量优化
各布置方案拟合误差比较如表2和图4所示。

表2 下缘应变各方案拟合误差比较

坐标/m	方案一		方案二		方案三		方案四		方案五	
	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %	误差	相对误差 %
0	-827	-631	-117	-90	0	0	0	0	0	0
3	-647	-479	-101	-75	-11	-8	-23	-17	-34	-25
10	-273	-375	-3	-5	41	57	13.3	18	6	8
16	-122	-140	2	2	22	25	-10.3	-12	-2	-3
22	-39	-39	2	2	9	9	-21	-21	-2	-2
28	0	0	0	0	0	0	-24	-22	0	0
34	11	10	-2	-2	-5	-4	-21	-18	0	0
40	8	7	-4	-3	-6	-5	-15	-13	-2	-1
46	3	3	-2	-2	-3	-3	-7	-6	-1	-1
52	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-1
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
64	2	2	-2	-2	-3	-3	-6	-5	-1	-1
70	7	6	-3	-3	-5	-4	-13	-11	-1	-1
76	10	9	-2	-2	-4	-4	-19	-16	0	0
82	0	0	0	0	0	0	-22	-20	0	0
88	-35	-35	2	2	9	9	-19	-19	-1	-1
94	-115	-127	2	2	21	23	-8.9	-10	-2	-2
100	-259	-342	-2	-3	40	53	13.3	18	6	8
107	-621	-460	-97	-72	-10	-7	-22	-16	-32	-24
110	-795	-607	-114	-87	0	0	0	0	0	0

综合以上拟合分析结果,对于玉峰大桥主拱下缘应变传感器的布置按方案五布置为最优化,即传

感器数量为7个,布置位置为: $x=0\text{ m}$ 、 13 m 、 28 m 、 55 m 、 82 m 、 97 m 、 110 m ,如图5所示。

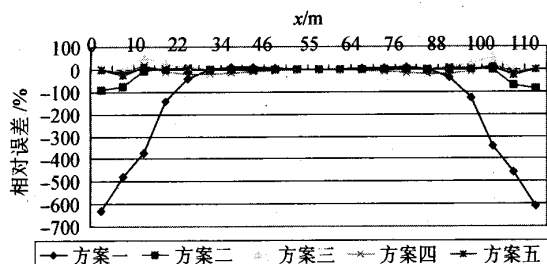


图 4 各方案拟合误差比较

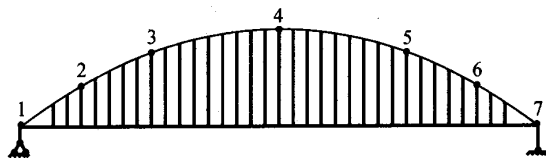


图 5 主拱下缘应变传感器最优布置

3 结语

本文提出了一套适合复杂桥梁结构的静力应变传感器优化配置方法,该方法旨在依据有限的传感器来获取最可靠而最全面的桥梁健康状况信息,即

根据关心截面的测量信息拟合出其他未安装传感器位置的信息,使得拟合结果最接近实际值,该方法原理简单,可操作性强,结论可靠。

参考文献:

- [1] 刘福强,张令弥. 作动器/传感器优化配置的研究进展[J]. 力学进展,2000, 30(4).
- [2] 崔飞,袁万城,史家钧. 传感器优化布设在桥梁健康监测中的应用[J]. 同济大学学报,1999, 27(2).
- [3] 唐亚鸣,张河. 信息传感器在桥梁健康监测中的应用[J]. 智能建筑与城市信息,2003,(5).
- [4] 谈丹辉,何广汉. 基于静态应变测量的桥梁结构传感器布置法[J]. 工程设计 CAD 与智能建筑,2002, 2(63).
- [5] 左云,陈明宪,赵跃宇. 桥梁健康监测及传感器的优化布置[J]. 公路,2004,(4).
- [6] Baruh H, Choe K. Sensor failure detection method for flexible structures. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1987,10(5).

Optimal Placement of Static Strain Sensors of Complicated Bridge Structure in Bridge Monitoring System

TAN Dong-lian¹, XIAO Ru-cheng²

(1. Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Bridge Engineering College,

Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In bridge condition monitoring and assessment system, optimal placement of sensors is key to ensure monitoring information being economic and effective. Moreover, it is one of the hot questions. In this paper, in allusion to the complicated bridge structure, the method about the optimal placement of static strain sensors is put forward. Taking the Yufeng Bridge as a engineering example, the steps of this method are introduced and the validity is validated.

Key words: bridge structure; monitoring system; sensors; optimal placement; error of interpolatory fitting