

结构健康监测传感器优化布置的混合算法

谢 强, 薛松涛

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 提出了一种基于模型减缩和线性模型估计理论的、用于建筑结构健康监测中传感器布置的新算法。根据选定的主、从自由度, 用改进减缩系统方法来减少初始结构的自由度数目。然后, 基于线性模型估计, 以所选定的目标模态为线性模型的设计矩阵, 用奇异值分解处理设计矩阵。用分解后的前几个左奇异向量计算每一个自由度对于结构模态的贡献。最后用迭代算法来确定所需的传感器数量和位置。算例表明, 此种混合算法适用于建筑结构监测的传感器布置计算。

关键词: 结构健康监测; 最优传感器布置; 模型减缩; 线性模型估计; 混合算法

中图分类号: TU 973.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2006)06-0726-06

A Hybrid Algorithm for Optimal Sensor Placement of Structural Health Monitoring

XIE Qiang, XUE Songtao

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper presents a new hybrid algorithm based on both model reduction and linear model estimation for searching optimal number and locations of sensors for building structural health monitoring. According to the chosen master and slaver degrees of freedom (DOFs), a model reduction method named Improved Reduced System is used to reduce the DOFs of the original model. Then, based on linear model estimation, the target modes are treated as a design matrix of linear model and singular value decomposition is used to decompose the target modes. The first several left singular vectors of the decomposed matrix are used to calculate contribution of each sensor candidate. Iterative method is used to choose the last set of sensor locations. Illustrations clearly show that the hybrid method is applicable to optimal sensor placement for building structural health monitoring.

Key words: structural health monitoring; optimal sensor location; model reduction; linear model estimation; hybrid algorithm

对于结构健康监测和损伤检测, 目前主要依赖对结构动力特性的测试分析, 因此, 模态测试技术就成为损伤检测的主要手段。在测试模态时, 需要确定

测点的布置, 这既需要测点数目, 也需要知道布点位置。近 20 年来, 人们对于大型柔性结构(主要为航空、航天中的空间结构)中传感器、作动器的最优布

收稿日期: 2004-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50508026)

作者简介: 谢 强(1971-), 男, 陕西西安人, 讲师, 工学博士, E-mail: qxie@mail.tongji.edu.cn

置问题进行了广泛的研究,提出了许多测点优化的计算方法^[1~3]。

最简单的传感器布置方法就是依据工程师们的工程经验.通常选择一些感兴趣的振型,同时将传感器布置在结构反应值较大的测点.这种方法只对一些简单的结构有效,需要结构工程师有丰富的先验知识以及对结构特性的深刻分析.还有一种是模态动能法^[4],是针对每一个目标振型绘出各自的模态动能分布图,然后将传感器布置在模态动能较大的位置.其原理就是模态动能分布图中较高的位置由于运动能较大而成为较好的传感器测点.Kammer对大型空间结构传感器布置提出了一种有效独立法^[5].该法首先根据对目标模态分量线性独立性的贡献进行传感器位置排序,贡献小的首先剔除,依次迭代,从而在实验数据中采集到最大的模态反应信息.Udwadia^[1]基于 Fisher 信息阵,提出了一种适合线性和非线性系统的传感器最优布置的算法,讨论在已有传感器系统基础上增设传感器的最优布置方法.Guyan 减缩法也是一种常用的测点选择方法^[6],它将包含有主次坐标关系的约束方程代入系统的动能或应变能表达式,产生减缩的质量或刚度矩阵,逐次迭代,把那些对模态反应起主要作用的主坐标保留下来作为测点布置.Penny^[7]等利用模型减缩,计算刚度矩阵对角元素与质量矩阵对角元素的比值,比值最大的自由度被删去.Papadopoulos M 等^[8]首先计算所有候选自由度的冲击响应,然后根据测量的独立性进行传感器布点排序.虽然已经有许多的方法,但是对于适用于土木工程监测和检测的传感器布置方法的研究还不多(崔飞等对桥梁结构健康监测的传感器优化布置有一些研究^[9]).

笔者研究适用于建筑结构健康监测的传感器布置方法.根据选定的主、从自由度,利用改进减缩系统减少目标模态的自由度数目.然后将新的目标模态振型视为线性模型的设计矩阵;利用奇异值分解的算法,将设计矩阵分解;然后根据各自由度对于目标模态振型的贡献,设计传感器优化布置方案.

1 动力模型减缩技术

1.1 Guyan 减缩法

动力模型减缩最早是为了适应计算机容量小而提出的,主要是用一种缩聚后的模型来代替原有的模型,而在计算时要保持较高的精度.Guyan 减缩法最初是用来减少大型有限元结构的自由度数目,以

使计算和求解特征值更加容易.这种减缩方法是通过删除那些相对于弹性力而言可以忽略的惯性力的自由度,这样就产生一组联系主自由度(需保留)和从自由度(需删除)的联系方程.将这组联系方程代入系统的动能和应变能表达式,就得到以主坐标所表示的减缩后的模型刚度和质量矩阵.

问题的关键是如何选取主自由度.Guyan 减缩的一个隐含假设须注意:在从自由度中,相对于弹性力而言,惯性力可忽略.因此,从自由度的选取原则是惯量小而刚度大,以保证质量与结构系统联系完好.相反,主自由度要选取那些惯量大而刚度小的.

利用 Guyan 减缩,设特征方程为

$$\mathbf{K}\mathbf{X} = \lambda\mathbf{M}\mathbf{X} = \mathbf{f} \quad (1)$$

其中: λ 为特征值; \mathbf{f} 为惯性力; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{X} 为位移向量.

将 \mathbf{X} 分解为主坐标 \mathbf{X}_m 和从坐标 \mathbf{X}_s , 式(1)为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_m \\ \mathbf{f}_s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Guyan 减缩的思想即是令 $\mathbf{f}_s = 0$, 即忽略从坐标上的惯性力.则由式(2)第二行可得

$$\mathbf{X}_s = -\mathbf{K}_{ss}^{-1}\mathbf{K}_{sm}\mathbf{X}_m = \mathbf{D}_G\mathbf{X}_m \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{D}_G = -\mathbf{K}_{ss}^{-1}\mathbf{K}_{sm} \quad (4)$$

称为 Guyan 减缩阵.从而可建立 Guyan 坐标减缩式

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{D}_G \end{bmatrix} \mathbf{X}_m = \mathbf{T}_G\mathbf{X}_m \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 表示单位阵, \mathbf{T}_G 为减缩转换矩阵.

1.2 改进减缩系统

从上面的 Guyan 减缩过程可以看出:经典的 Guyan 减缩法是静态的,因为减缩阵中只包含刚度信息.到了 20 世纪 90 年代初,模型减缩技术才取得重要进展,主要表现在建立减缩关系时计入质量效应.改进减缩系统(improved reduced system, IRS)方法就是其中重要的一种.它的突破性进展是在减缩过程中考虑了从自由度的惯性力,且将 Guyan 减缩作为一级近似去逼近惯性力^[10].

在 Guyan 减缩中,已经得到如下关系:

$$\mathbf{K}_G\mathbf{X}_m = \lambda_a\mathbf{M}_G\mathbf{X}_m \quad (6)$$

由模型缩减的近似性,又有

$$\lambda\mathbf{X}_m \approx \lambda_a\mathbf{X}_m \quad (7)$$

由式(6)可得

$$\lambda_a\mathbf{X}_m = \mathbf{M}_G^{-1}\mathbf{K}_G\mathbf{X}_m \quad (8)$$

从而有

$$KX = MT_G M_G^{-1} K_G X_m \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} K_{mm} & K_{ms} \\ K_{sm} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_m \\ X_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{mm} & M_{ms} \\ M_{sm} & M_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I \\ D_G \end{Bmatrix} M_G^{-1} K_G X_m \quad (10)$$

由式(10)中第二式可得

$$X_s = [K_{ss}^{-1}(M_{sm} + M_{ss}D_G) \cdot M_G^{-1}K_G - K_{ss}^{-1}K_{sm}] X_m \quad (11)$$

从而有

$$X_s = [D_G + K_{ss}^{-1}(M_{sm} + M_{ss}D_G) \cdot M_G^{-1}K_G] X_m = D_l X_m \quad (12)$$

其中, IRS 减缩阵为

$$D_l = D_G + K_{ss}^{-1}(M_{sm} + M_{ss}D_G) M_G^{-1}K_G \quad (13)$$

由减缩变换矩阵可见, 在 IRS 的减缩阵中, 不仅包含刚度信息, 且含有质量信息. 即 IRS 法不仅将原系统的应变能转换到了减缩系统中, 还将原系统的动能更好地转换到减缩后的系统中.

对于建筑结构而言, 水平位移自由度是选定的主自由度, 通过以上的结构自由度的减缩, 结构的有限元模型自由度减少了 2/3, 而结构计算的精度并未降低多少. 减缩后采用主自由度表示的结构模型中, 包括了竖向位移自由度和转角自由度的影响, 比原来的 Guyan 减缩法更能反映结构的特性.

经过减缩的结构模型, 只包含水平位移自由度. 通过计算结构的特征值, 可以求得结构的自振频率和振型. 对于目标模态振型, 可用线性模型估计算法计算传感器测点, 以得到最优的传感器位置.

2 线性模型参数估计理论

一般地, 称模型

$$\begin{cases} Y = X\beta + e \\ Ee = \mathbf{0}, \text{Var } e = E[e \cdot e^T] = \sigma^2 I_n \end{cases} \quad (14)$$

为线性统计模型, 简称为线性模型. 其中: n 维向量 Y 为观测向量; 已知矩阵 $X_{n \times p}$ 为模型的设计矩阵; β 为 p 维未知参数向量; e 为 n 维随机误差向量, 其均值为 $Ee = 0$; 协方差阵为 $\sigma^2 I_n$.

2.1 线性高斯量测模型与 Fisher 信息阵

设未知量 β 与数据 Y 之间的关系, 用线性高斯量测模型表示

$$Y = X\beta + e \quad (15)$$

式中: $\beta \sim N(E\beta, P_\beta)$; $e \sim N(\mathbf{0}, R)$, 为零均值量测噪声; R 为协方差矩阵. β 的最佳估计为^[11]

$$\hat{\beta} = (X^T R^{-1} X)^{-1} X^T R^{-1} Y \quad (16)$$

取估计误差的期望

$$E(\tilde{\beta}) = - (X^T R^{-1} X)^{-1} X^T R^{-1} E(e) = \mathbf{0} \quad (17)$$

因此, 对于线性高斯情况来说, 极大似然估计是无偏的. 即有 β 估计的误差协方差

$$P_{\tilde{\beta}} = (X^T R^{-1} X)^{-1} \quad (18)$$

可以看出, 误差协方差 $P_{\tilde{\beta}}$ 与量测量 Y 无关, 因此, 可在未取到任何 Y 时, 检验模型精度是否满足要求.

为了检查极大似然估计的性能, 可以利用任意无偏估计方差的下界.

如果 $\hat{\beta}$ 是基于 Y 的确定性变量 β 的任意无偏估计, 则估计误差 $\tilde{\beta} = \beta - \hat{\beta}$ 的协方差是有下界的, 即

$$P_{\tilde{\beta}} \geq M_0^{-1} \quad (19)$$

式(19)即为 Cramer-Rao 界式, 其中 M_0 即为 Fisher 信息阵. 如果 $\hat{\beta}$ 满足 Cramer-Rao 界式中的等号关系, 则估计 $\hat{\beta}$ 是有效的.

对于线性高斯量测模型, 可以证明^[12]

$$M_0 = X^T R^{-1} X = P_{\tilde{\beta}}^{-1} \quad (20)$$

这表明, Fisher 信息阵是误差协方差矩阵的逆矩阵.

由以上分析可得出: 如 $\hat{\beta}$ 是 β 的有效无偏估计, 则误差协方差达到最小, 从而是 β 的最佳估计.

2.2 关于设计矩阵 X 的讨论^[11]

设计矩阵 X 为正交矩阵, 是“最优选择”. 如果 X 不是列满秩, 即 $\text{rank}(X) = r < p$, 此时, 通常的 β 的最小二乘估计不存在. 但是存在 β 的线性函数 $L\beta$, L 为 $r \times p$ 矩阵. 可以使 $L\beta$ 的最小二乘估计是存在的, 这就需对原线性模型重新参数化. 重新参数化可以通过对 X 的奇异值分解来实现.

2.3 设计矩阵的奇异值分解

将设计矩阵 X 进行奇异值分解

$$X = H\Lambda^{1/2} G^T \quad (21)$$

将原设计矩阵 X 的奇异值分解代入原线性模型 $Y = X\beta + e$

$$Y = H\Lambda^{1/2} G^T \beta + e \quad (22)$$

令 $\Lambda^{1/2} G^T \beta = \alpha$, 则有新的线性模型

$$Y = H\alpha + e \quad (23)$$

其中, 新的设计矩阵 H 为列满秩. 由于 $H^T H = I$,

其各列 (h_1, \dots, h_p) 正交. 以 h_1, \dots, h_p 为 X 的主坐标, 则 Y 与 X 的第 i 个主坐标之间的相关系数为

$$R_{Yh_i} = h_i Y / (Y^T Y)^{1/2} \quad (24)$$

其中, $(Y^T Y)^{1/2} = \|Y\|$, 为 Y 的欧氏长度. 记基于回归的平方和为 R_{ss} , 整体平方和为 T_{ss} , 有

$$R_{ss} = Y^T X \hat{\beta}_{ls} = Y^T H H^T Y \quad (25)$$

其中, $H H^T$ 为 $n \times n$ 阵. 它并非单位阵, 故有

$$R^2 = \frac{R_{ss}}{T_{ss}} = \frac{Y^T H H^T Y}{Y^T Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y^T h_i h_i^T Y}{\|Y\|^2} \quad (26)$$

此处, h_i 为 H 的第 i 行向量.

由此可知, X 的奇异值分解导致了 R^2 分解为几个分量之和, 每个分量代表 H 矩阵的行对于总体 R 的贡献. 根据 $H H^T$ 的对角元素的大小, 可以衡量每个行向量对复相关系数 R^2 的贡献. 如果某一值很小, 表示对应的行贡献很小, 可以首先删除^[13].

3 传感器优化布置算法步骤

通过改进减缩系统方法, 对不可测的转角自由度和竖向平动自由度减缩处理, 然后计算系统的模态频率和振型; 然后对所得到的目标模态振型应用线形模型估计理论和奇异值分解算法, 计算每个传感器对整体模态的贡献大小, 通过迭代算法最终确定最优的传感器位置和数量. 具体计算步骤^[13]为:

(1) 首先分析结构的模态, 确定需要监测的 p

个振型所组成的目标模态矩阵 $\phi_{r \times p}$.

(2) 将目标模态矩阵进行自由度分组处理, 即分为主自由度和从自由度. 将不可测的转角自由度和竖向的平动自由度作为从自由度, 利用改进减缩系统方法, 将从自由度去除, 只保留主自由度, 得到新的目标模态矩阵 $\phi_{n \times p}$.

(3) 用奇异值分解对目标模态 $\phi_{n \times p}$ 处理, 提取非零奇异值所对应的 n 个左奇异向量加以分析. 这 n 个向量组成的矩阵 H 的每一行, 代表每一个候选的传感器位置对于总体目标模态振型的贡献.

(4) 计算左奇异向量的 $H H^T$, 根据对角线元素的大小, 将最小对角元素所在的行删除. 删除的行代表该自由度所对应的传感器位置对于整体目标模态的贡献最小.

(5) 重复步骤(4), 直到需要保留的传感器数目为止. 根据已有的传感器数目, 确定最终的传感器的布置位置.

4 传感器优化布置的算例分析

15 层 2 跨钢结构框架, 柱刚度沿楼层高度均匀无变化, 层高均为 3.9 m, 跨度 6.1 m, 梁上荷载为 $3\ 120\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$. 梁柱参数见表 1.

选取前 6 阶模态为目标模态, 分别使用没有减缩的计算方法和改进减缩系统的混合算法, 根据前述计算步骤, 计算所得结果分别如表 2 和表 3 所示. 传感器布置如图 1 所示.

表 1 15 层 2 跨等刚度分布钢框架的柱参数

Tab. 1 Column parameters of 15-story 2-bay steel frame

构件	型号	截面面积/ m^2	惯性矩/ m^4	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa
梁	W27×84	0.016 000	0.001 186 00	7 800	210
柱	W24×192	0.036 445	0.002 477 41	7 800	210

表 2 选取前 6 阶模态的无减缩模型的传感器优化布置计算结果

Tab. 2 Sensor location results using the first 6 mode shapes as target modal

测点优化布置的选择方向(自左向右)

14	32	44	62	74	92	26	80	50	93	15	61	45	31	81	91	13	63	75	43
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

表 3 选取前 6 阶模态时的混合算法的传感器布置计算结果

Tab. 3 Sensor location results using the first 6 mode shapes as target modal

测点优化布置的选择方向(自左向右)

15	32	45	63	74	91	26	80	49	93	13	61	43	33	81	92	14	62	73	44
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

以无减缩的算法所得的结果如表 2, 从左向右依次给出了传感器位置的选择顺序. 如果只有 6 个

传感器, 则应该布置在第 14, 32, 44, 62, 74, 92 位置. 如果有更多的传感器可用, 则根据选定的顺序选择

位置. 比如, 有 12 个传感器, 对于后续的位置选择顺序, 依照计算结果, 分别为 45, 31, 81, 等等.

利用混合算法计算所得的表 3 中所示的传感器的选择顺序的说明同表 2.

在图 1 中, 小黑点表示结构分析时的节点, 黑三角表示首先要选择的 9 个传感器的位置, 小圆圈表示第 10 到第 20 个传感器的位置, 圆圈内的数字表示后续的 12 个传感器依此布置的选择顺序.

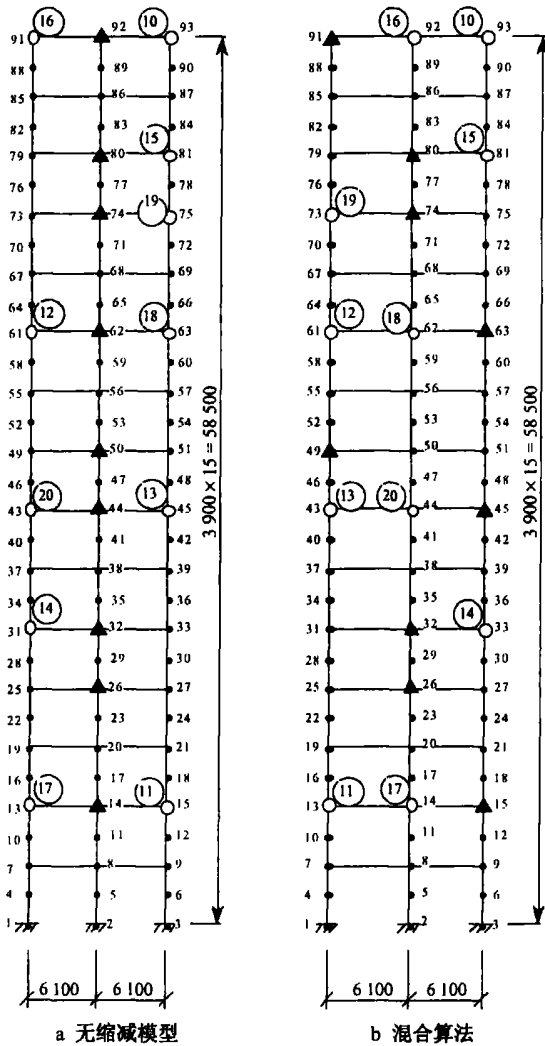


图 1 选用前 6 阶模式为目标模式时的传感器优化布置结果(单位: mm)

Fig. 1 Sensor placements sequence choosing first 6 mode shapes as the target(unit: mm)

图 2 为两种不同的测点布置计算结果的 Fisher 信息阵条件数随测点数量的变化. Fisher 信息阵条件数可衡量测点布置方案优劣^[13]. Fisher 信息阵的条件数越小, 越接近于 1, 说明该方案的参数识别越优^[13]. 图 2 中, 在有众多的测点可以布置时, 比如允许 25 个以上的测点时, 随着测点数增加, Fisher 信

息阵的条件数减少. 可以看出, 在测点比较少的情況下, 选择合理的测点数量以及位置很重要. Fisher 信息阵的条件数在测点较少时是振荡的, 存在一个合理的测点数量.

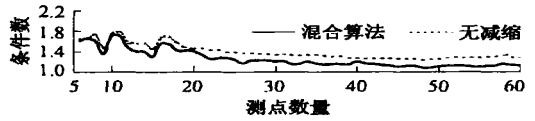


图 2 Fisher 信息阵条件数随测点变化

Fig. 2 Relationship of condition number of Fisher Information matrix and sensor numbers

两种算法的最后结果是相似的. 因为改进的减缩系统, 主坐标的选择很合理. 对于传感器优化布置, 两种算法的区别是测点的位置和顺序稍有差异. 如最优的 9 个测点, 分布的楼层是完全相同的, 只是在同一楼层的位置有差异. 如果考虑到楼层刚度无穷大的假设, 其同一层的测量结果是相同的. 布置 9 个测点时, 虽然结构刚度是自下而上均匀分布的, 但是测点的分布并非严格均匀. 因此, 即使对于刚度均匀分布的结构体系的健康监测系统而言, 测点的布置也应该通过严格的计算来获取. 以工程经验布置测点是存在漏洞的.

5 结论

- (1) 利用改进减缩系统的模型减缩算法处理结构的不可测自由度, 将转角自由度通过模型减缩, 反映到平动自由度中, 使最后的测点位置计算结果包含一些转角自由度的影响. 既可大大降低后续计算中的自由度数目, 又保持计算结构模态振型的精度.
- (2) 在计算各传感器贡献时采用奇异值分解的算法, 矩阵运算时, 稳定性非常好, 避免了在振型接近线性相关情况下矩阵计算中的奇异性问题.
- (3) 对于建筑结构等惯量大且质量分布较集中的系统, 主自由度占据结构动能的绝对部分. 基于改进减缩系统的模型减缩算法是可行的. 由于建筑结构的刚度和质量的分布特点, 结构模态中, 水平分量比例很大, 因此, 以每个节点的水平自由度作为主自由度来减缩模型是完全合理的.

参考文献:

[1] Udwardia F.E. Methodology for optimum sensor locations for pa

- parameter identification in dynamic systems[J]. Journal of Engineering Mechanics; ASCE, 1994, 120(2): 368.
- [2] Lim K B. Method for optimal actuator and sensor placement for large flexible structures[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1992, 15(1): 49.
- [3] 刘福强, 张令弥. 作动器与传感器优化配置的逐步消减法[J]. 宇航学报, 2000, 21(3): 64.
LIU Fuqiang, ZHANG Lingmi. Successive method for optimal placement of actuators and sensors[J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(3): 64.
- [4] Lanson C B, Zimmernan D C, Marek E L. A comparison of modal test planning techniques: Excitation and sensor placement using the NASA 8-bay truss[C] //Proc of the 12th International Modal Analysis Conference, New York: Union College Press, 1994: 34—41.
- [5] Kammer D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1991, 14(2): 251.
- [6] Guyan R J. Reduction of stiffness and mass matrices[J]. AIAA Journal, 1965, 3(2): 23.
- [7] Penny J E, Friswell M I, Garvey S D. Automatic choice of measurement location for dynamic testing[J]. AIAA Journal, 1994, 32(2): 407.
- [8] Papadopoulos M, Garcia E. Sensor placement methodologies for dynamic testing[J]. AIAA Journal, 1998, 36(2): 256.
- [9] 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: 自然科学版, 1999, 27(2): 165.
CUI Fei, YUAN Wancheng, SHI Jiajun. Optimal sensor placement and its applications for bridge health monitoring[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(2): 165.
- [10] O'Callahan J, Avitabile P, Riemer R. System equivalent reduction expansion process[C] //Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference, New York: Union College Press, 1989: 29—37.
- [11] 张金槐. 线性模型参数估计及其改进[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992.
ZHANG Jinhui. Linear model parameter estimation and its improvement [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1992.
- [12] 卢伯英, 陈宗基. 线性估计与随机控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
LU Boying, CHEN Zongji. Linear estimation and random control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.
- [13] 谢强. 建筑结构健康监测若干基础问题的试验研究及分析[D]. 上海: 同济大学: 工程力学与技术系, 2001.
XIE Qiang. Test study and analysis on some fundamental issues of building structural health monitoring [D]. Shanghai: Department of Engineering Mechanics and Technology, Tongji University, 2001.

(编辑: 陶文文)

°下期文章摘要预报°

考虑层厚的路面弯沉修正系数研究

胡春华, 孙立军

路表弯沉实测值与计算值之间常常存在较大偏差, 需以弯沉综合修正系数调整. 现行沥青路面设计规范中, 弯沉综合修正系数 F 缺乏对路面结构层厚度的考虑, 且存在“反常现象”, 即随着土基模量的增大, 设计厚度增大的现象. 通过现场试验路的测试分析, 提出了新的 F 计算式, 以反映 F 随不同路面结构层厚的变化规律, 适应不同层厚的路面结构.

开挖路面结构修复有限元分析

凌建明, 罗志刚, 吕荔炫, 袁文平

建立开挖路面结构修复三维有限元模型, 运用通用有限元程序 ANSYS 分析论证了传统城市道路开挖路面原结构修复技术的缺陷, 并基于变形控制的敏感性分析, 讨论了修复区域回填土路基与基层模量、接触面摩阻力及路面结构修复方式等因素对路表弯沉的影响. 研究表明, 提高修复区域回填土路基模量或适当向两侧开挖台阶, 是保证开挖路面结构修复质量的有效措施.