

文章编号:1000-582X(2010)01-0088-06

特高压输电塔双向动态监测传感器的优化布置

杨 溥,刘 遥,刘 纲,黄宗明

(重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘 要:结合三维动态测点优化布置的有效独立法(EFI3)和改进的一维有效独立法,提出同时考虑双向测点优化布置的有效独立法(EFI2)。采用二维空间相互正交方向的节点振型作为输入,根据模态振型最大线性无关性和较大能量分布原则,EFI2 法将同时优化双向的测点布置。以某大跨越特高压输电塔为工程背景,运用 EFI2 法优化其顺导线和横导线向加速度测点布置,并选用两种评估标准分析测点布置的优化效果。结果表明:对同时考虑空间二维振动的大跨越特高压输电塔结构,EFI2 法能得到较为理想的测点布置方案。

关键词:传感器优化布置;特高压输电塔;有效独立法;健康监测

中图分类号: TU297.7

文献标志码:A

Optimal placement of bidirectional sensor for extra high-voltage transmission towers

YANG Pu, LIU Yao, LIU Gang, HUANG Zong-ming

(College of Civil Engineering Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Combined the optimal placement method of triaxial accelerometers based upon the effective independence algorithm(EFI3) and the improved one-dimensional effective independence algorithm, the optimal placement method of bidirectional accelerometers for the tower (EFI2) is proposed. The modal matrix on x -direction and y -direction are used as input instead of the uniaxial data. And according to the most linear independence and greater energy distribution of modal shape, EFI2 can optimize the sensor placement of accelerometers on both directions at the same time. On a long span extra high-voltage transmission tower as a case study, the sensor placement in the direction of transversal and longitudinal wires is optimized by the EFI2 method. And with assessment by two methods, it is found that the EFI2 method can optimize the sensor placement of accelerometers on both directions effectively.

Key words: optimal sensor placement; extra high-voltage transmission tower; effective independence algorithm; health monitoring

在长期健康监测中,考虑到经济性和可行性,只能在结构上布置较少的传感器测点,所以有必要对传感器的数目及其布置进行优化,使传感器在有噪音的测试环境中获取尽量可靠和全面的动态信

息^[1-3]。Kammer 在对大型空间结构传感器布置研究中提出有效独立法^[4-6],它是基于各传感器布点对所监测模态线性无关的贡献大小,通过迭代使得初始候选测点迅速减少到可行的数目。Hemez 和

收稿日期:2009-09-05

基金项目:国家 863 计划资助项目(2006AA04Z433)

作者简介:杨溥(1969-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事重大工程健康监测以及防灾减灾工程方面的研究,
(E-mail)yang pu@cqu.edu.cn。

Farhat 根据测点对结构应变能的贡献发展了有效独立算法^[7]。Guyan 模型缩减法^[8]也是一种常用的测点选择方法,通过刚度或质量子矩阵构成的转换矩阵,可以把那些对模态反应起主要作用的自由度保留下来作为测点的位置。Shi 等提出了一种基于测点对结构损伤定位能力的算法^[9]。Heo 等则认为使测取的运动能矩阵最优是选择传感器布点的一种良好手段^[10]。

由于目前的结构状态监测对象以桥梁为主,而桥梁的主要振动表现为随机环境和车辆荷载激励下的竖向振动,故以上绝大多数方法仅针对一维单向的传感器优化布点进行研究。但对于大跨越特高压输电塔结构,顺导线向和横导线向的振动水平基本处于同一个量级^[11],需同时监测其双向的振动,而目前尚未见对双向传感器进行优化布置的报道。

虽然目前对一维测点优化布置可用的方法较多,但在文献[12-13]中,认为有效独立法较适合解决大型复杂空间结构的最优测点布置问题,这是因为与其它彻底搜索算法相比,有效独立法的计算量较小;同时,有效独立法从物理学的角度确定所有可能测点的排序和最终选择,与其它方法相比,具有一定的优越性。

以汉江大跨越特高压输电塔为背景,基于改进的有效独立法^[14],结合三向传感器测点优化布置方法(EFI3)^[15],考虑到输电塔结构动态监测的特殊需求,提出双向传感器测点优化布置方法(EFI2)。采用EFI2法对输电塔双向动态传感器进行优化布置,并采用两种评估标准对测点的优化效果进行分析。

1 布点优化算法

1.1 有效独立法(EFI)

有效独立算法(EFI)的核心思想是尽可能保留对目标模态向量线性无关贡献最大的测点,从而在传感器有限的情况下尽可能地得到更多的模态信息。

根据 Ewins^[14]的研究可知,不论是在时域中还是在频域中,弹性结构各点的响应可以看作各阶模态的线性叠加。据此,传感器的输出信息 y_s 可表示为

$$y_s = \Phi q + \omega = \sum_{i=1}^N q_i \Phi_i + \omega, \quad (1)$$

式中: Φ 为模态列向量组成的模态矩阵; q 为模态广义坐标; N 是传感器候选位置数; ω 是方差为 σ^2 的静态高斯白噪声; Φ_i 是 Φ 的第 i 个列向量, q_i 是振型参与系数。

假如用测试的有限点得到的模态来估计结构的真实模态是一个无偏有效估计,估计偏差的协方差矩阵 J 为

$$J = E[(q - \hat{q})(q - \hat{q})^T] = \left[\frac{1}{\sigma^2} \Phi^T \Phi \right]^{-1} = Q^{-1}, \quad (2)$$

式中: Φ 为模态列向量组成的模态矩阵; Q 为 Fisher 信息矩阵,信息阵的最大化(使矩阵的某种标准取得最大,如行列式,迹标准等),将会得到参数 q 估计偏差的协方差最小,也就是得到了 \hat{q} 的最佳估计。定义有效独立分配向量 E_D

$$E_D = [\Phi \Psi]^{-2} \lambda^{-1} \{1\}_k, \quad (3)$$

式中: Ψ 表示 Q 的特征向量矩阵; λ 表示 Q 的特征值矩阵; $\{1\}_k$ 表示矩阵 $[\Phi \Psi]^{-2} \lambda^{-1}$ 第 k 行所有系数的总和。不断去掉具有最小 E_D 的候选测点,即可得最终的测点布置。文献[12]通过考虑测点的能量因素—驱动点残差(driving point residue)DPR 来克服测点有可能布设在能量较小的自由度上,从而对测试噪音较为敏感这一不足,将 E_D 乘上权重 DPR:

$$E_{D_i} = E_D \times \text{DPR}_i = [\Phi \Psi]^{-2} \lambda^{-1} \{1\}_k \sum_{j=1}^N \frac{\Phi_{ij}^2}{f_j}, \quad (4)$$

式中: f_j 为与模态振型相对应的频率; Φ_{ij} 为模态矩阵中的元素; N 为振型的个数。将乘上驱动点残差的有效独立法称为改进的有效独立法。

1.2 二维有效独立法(EFI2)

文献[13]通过将模态矩阵 Φ 改变为 $\Phi_3 = [\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z]$,提出了三向传感器测点优化布置方法(EFI3),用来考虑结构的三维空间三向振型,即将公式(1)改变为

$$J_3 = E_3[(q - \hat{q})(q - \hat{q})^T] = \left[\frac{1}{\sigma^2} \Phi_3^T \Phi_3 \right]^{-1} = Q^{-1}, \quad (5)$$

其中 Φ_3 为空间三向振型。

$$\left[\frac{1}{\sigma^2} \Phi_3^T \Phi_3 \right]^{-1} = \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} \Phi_x^T \Phi_x & \Phi_x^T \Phi_y & \Phi_x^T \Phi_z \\ \Phi_y^T \Phi_x & \Phi_y^T \Phi_y & \Phi_y^T \Phi_z \\ \Phi_z^T \Phi_x & \Phi_z^T \Phi_y & \Phi_z^T \Phi_z \end{bmatrix} \right\}^{-1}, \quad (6)$$

由于特高压输电塔结构的竖向振动水平相于顺导线向和横导线向很小,如采用式(6)直接进行计算,将可能得不到理想的布点方案,故提出将上式中的 Φ_3 改变为空间二维模态矩阵,即 $\Phi_2 = [\Phi_x, \Phi_y]$,则式(5)变为

$$J_2 = E_2[(q - \hat{q})(q - \hat{q})^T] = \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} \Phi_x^T \Phi_x & \Phi_x^T \Phi_y \\ \Phi_y^T \Phi_x & \Phi_y^T \Phi_y \end{bmatrix} \right\}^{-1} = \left[\frac{1}{\sigma^2} \Phi_2^T \Phi_2 \right]^{-1} = Q^{-1}, \quad (7)$$

式中 Φ_x 和 Φ_y 分别为结构 x 向振型和 y 向振型模态列向量组成的模态矩阵。考虑到仅采用式(7)计算仍有可能将测点布置在振动水平较小的测点,导致所测信号信噪比较小的缺点,将式(7)计算结果乘以驱动点残差

$$E_{2Di} = E_{2D}^* \times DPR_i = [\Phi_2 \Psi]^{-2} \lambda^{-1} \{1\}_k \sum_{j=1}^N \frac{\Phi_{2ij}^2}{f_j}, \quad (8)$$

将这种同时考虑空间二维振型测点优化和能量分布的方法称为二维有效独立法(EFI2)。

2 传感器的优化布设对比分析

2.1 工程概况及分析模型

工程为拟建的 1 000 kV 汉江大跨越特高压输电塔体系,输电塔为空间钢管组合塔。主材和大部分辅材均使用钢管材料,少数辅材使用角钢材料。塔腿、塔身以及酒杯形塔头高度分别为 45、84.5 和 52.3 m,总高度为 181.8 m。输电塔的立面布置见图 1。采用商用分析软件 ANSYS10.0 建立的体系的空间有限元模型如图 2 所示,其中所有钢杆件采用梁单元,导、地线采用杆单元,塔脚边界采用固结,导、地线端点简化为铰支座。

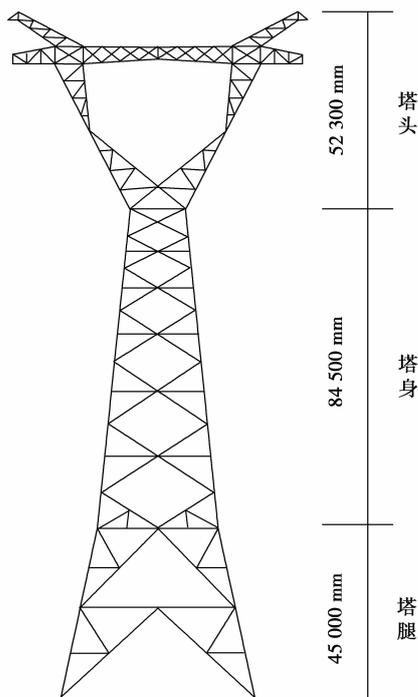


图 1 塔立面图

根据建立的计算模型,首先进行自重荷载下的静力分析,以静力终态的位形和应力作为模态分析的初始态,利用子空间迭代法,求解出结构的自振周期和对应的振型。由于在实测过程中无法准确的获

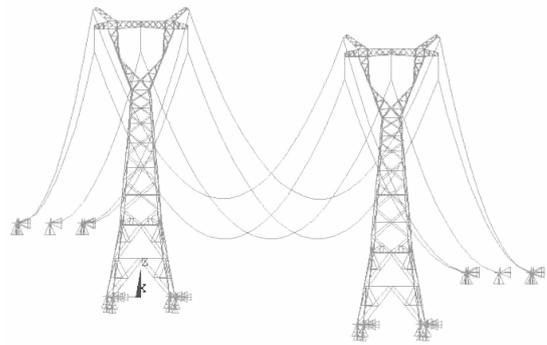


图 2 整体空间模型图

取结构的质量信息,因此将结构的 y 向前三阶振型和 x 向前三阶振型在塔顶处进行归一化处理,结果分别如图 3 和 4 所示。需要说明的是,该输电塔沿高度有 27 个主弦杆节点,故结构每阶振型均包含 27 个节点的相对位移。如果每个主节点布置传感器,则体系传感器最多数量为 27 个,即最多有 27 种布置方案。

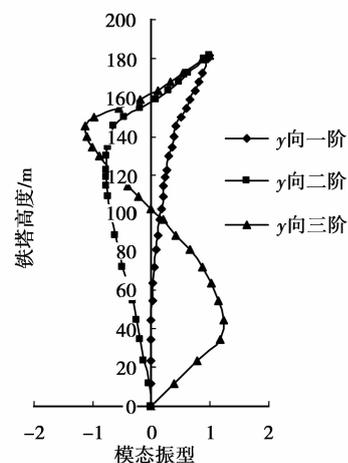


图 3 y 向前三阶振型

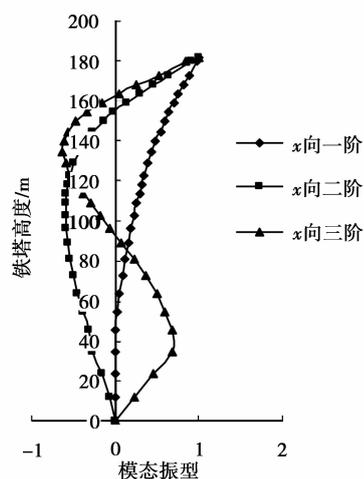


图 4 x 向前三阶振型

2.2 传感器的布设方案

为了得到合理可行的传感器布点方案,将传感器测点数 N 假定为 $1 \sim 27$,依据 ANSYS 分析得到的结构前三阶振型,采用二维有效独立法(EFI2)进

行传感器的优化布置,从而得到 27 种传感器布点方案。图 5 为其中 3 种(对应测点数为 5、8 和 12)传感器布点方案的示意图。

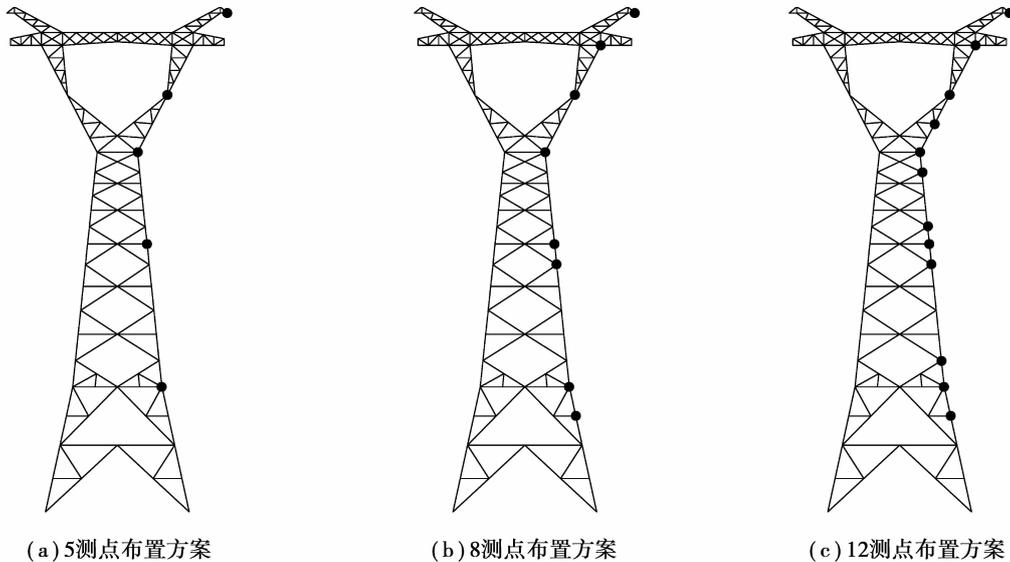


图 5 测点布置方案(EFI2)

从图中可以看出,从 5 测点方案到 12 测点方案,二维有效独立法(EFI2)测点布设的关键部位基本不变,仅对较为敏感部位进行加密布设。因为有效独立法主要关心捕获结构的动能,测点均主要布置在振幅较大处。

2.3 最优监测方案的确定

一种好的传感器布置方案应做到测得的时程记录对参数的变化最为敏感,并且能对结构潜在的损伤提供可靠的信息。为了分析文中的双向传感器测点优化布置方法(EFI2)捕获结构动态响应的能力,这里采用以下 2 种评价准则来确定体系的最佳测点数。由于监测系统尚未运行,目前没有实测的数据,以有限测点的模态位移假想为传感器得到的监测数据,采用三次样条插值得到结构体系所有自由度上的模态振型。

评价准则 1:均方差最小准则^[16]。即以有限元计算得到的理论振型为真实值,计算各阶监测振型与真实振型的均方差之和,如均方差之和越小,则测点布置得越理想。优化布置方案的总均方差 σ_{TMSE} 计算公式如下

$$\sigma_{\text{TMSE}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{j=1}^n (\Phi_{ij}^{\text{CS}} - \Phi_{ij}^{\text{FE}})^2}{n}, \quad (9)$$

式中: σ_i 为各阶模态的标准差, Φ_{ij}^{CS} 、 Φ_{ij}^{FE} 分别为监测

振型(CS)和真实振型(FE)矩阵中的元素。

评价准则 2:模态保证准则^[12]。模态置信因子 MAC 是评价模态向量交角的很好工具,MAC 实际上就是表示 2 个向量相关特性的量,公式如下

$$\text{MAC}_{ij} = \frac{(\Phi_i^{\text{T}} \Phi_j)^2}{(\Phi_i^{\text{T}} \Phi_i)(\Phi_j^{\text{T}} \Phi_j)}, \quad (10)$$

式中: Φ_i 和 Φ_j 分别表示空间二维振型的第 i 阶和第 j 阶模态向量。当 $\text{MAC}_{ij} = 0 (i \neq j)$ 时,则表明第 i 向量与第 j 向量相互正交,两向量可以轻易识别。故测点的布置应力求使 $\text{MAC}_{ij} (i \neq j)$ 向最小化发展。

图 6 和 7 分别为使用 2 种评价准则对双向传感器测点优化布置方法(EFI2)进行评价的结果。其中图 6(b)和图 7(b)分别为图 6(a)和图 7(a)的局部放大图。

从图 6 中可以看出,随着传感器数的增加,按三次样条曲线拟合的振型将更加精确。但当传感器的数量大于 5 以后,基本不能依靠增加传感器的数量来提高拟合精度。特别是当传感器数量大于 12 以后,拟合精度基本不变并保持在一个较小的数值。从图 7 中也可看出,当传感器数量大于 5 后,非对角元最大值的减小不如之前迅速,并且当传感器数量大于 12 之后,非对角元最大值也趋于稳定并且值也较小。由此可见,对于特高压输电塔的健康监测,位移传感器数至少需要 5 个,要获得较稳定的监测数

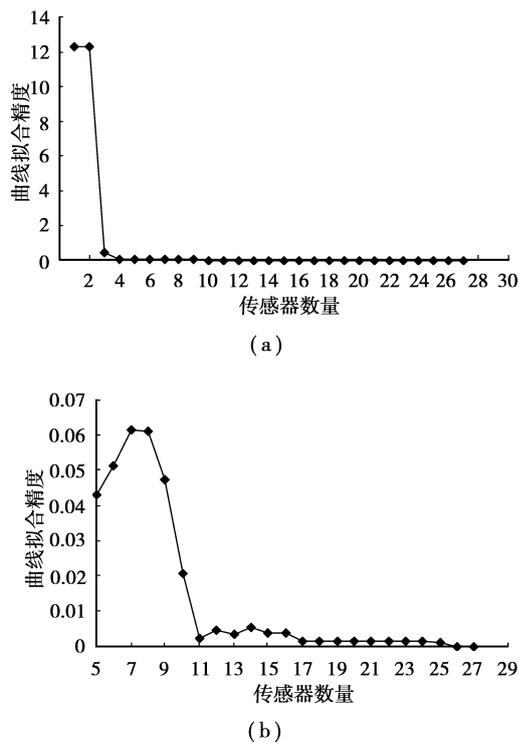


图 6 均方差评价准则

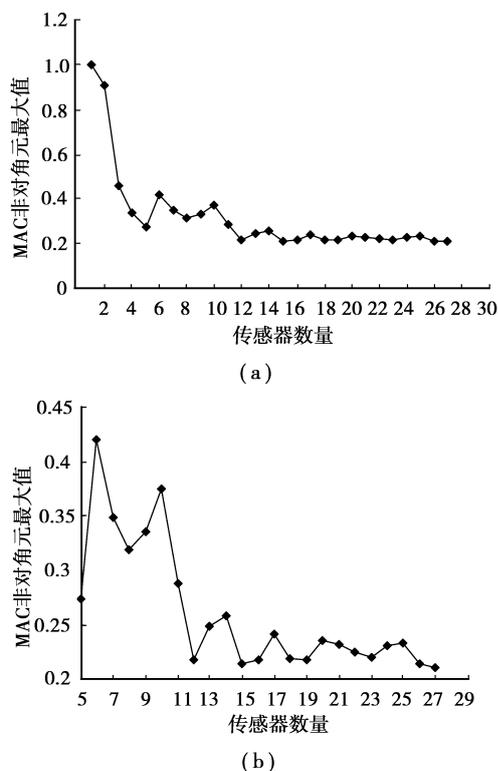


图 7 MAC 矩阵非对角元的最大值

据,需要 12 个传感器,但再增加传感器数,对提高监测精度没有太大的意义。

3 结 语

对特高压输电塔的结构动态响应传感器的优化布置方法进行了研究,从减少成本、提高精度的角度出发,提出了测点优化布置方案,并通过两个比较标准来评价这种方案的有效性。从实例计算结果来看该方法比较简单、有比较高的精度。该方法还有许多问题需要进一步的研究,比如如何将用于测点优化布置的评价标准和健康监测中的损伤识别方法结合起来以便更好的运用于实际工程。

参考文献:

- [1] 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(1): 165-169.
CUI FEI, YUAN WAN-CHENG, SHI JIA-JUN. Application of optimization of sensor layout bridge health monitoring[J]. Tongji University, 1999, 27(1): 165-169.
- [2] 刘斌,姚永丁,叶贵如. 斜拉桥传感器优化布点的研究[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 171-175.
LIU BIN, YAO YONG-DING, YE GUI-RU. Study of optimal sensor placement for cable stayed bridge[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 171-175.
- [3] 王山山,任青文. 结构模态参数测试的传感器优化布置研究[J]. 动力学与控制学报, 2005, 3(1): 67-71.
WANG SHAN-SHAN, REN QING-WEN. A study of optimal sensor placement for structural modal parameters testing [J]. Journal of Dynamics and Control, 2005, 3(1): 67-71.
- [4] KAMMER D C. Sensor placements for on orbit modal identification of large space structures [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1991, 14 (2): 252-259.
- [5] KAMMER D C. Sensor set expansion for modal vibration testing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4): 700-713.
- [6] KAMMER D C, BRILLHART R D. Optimal sensor placement for modal identification using system-realization methods [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(3): 729-731.
- [7] HEMEZ F M, FARHART C. An energy based optimum sensor placement criteria and its application to structural damage detection [C]// Proceedings of 12th International Modal Analysis Conference, Jan 31- Feb 3, 1994, Honolulu, Hawaii. Honolulu: Society of Experimental Mechanics, 1994: 1569-1575.
- [8] GUYAN R J. Reduction of stiffness and mass matrices [J]. AIAA Journal, 1965, 3(2): 380.

- [9] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Optimizing sensor placement for structural damage detection[J]. Journal of Energy Mechanics, 2000,126(11):1173-1179.
- [10] HEO G, WANG M L, SATPATHI D. Optimal transducer placement for health monitoring of long span bridge [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 1997,16(7/8):495-502.
- [11] 曹枚根,徐忠根,刘智勇. 大跨越输电钢管组合塔结构动力特性的理论分析[J]. 电力建设,2005,26(12):51-54.
CAO MEI-YIN, XU ZHONG-GEN, LIU ZHI-YONG. Dynamic characteristics analysis of combo steel tube tower for large crossing transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2005,26(12):51-54.
- [12] 岳增国. 大跨度空间结构的损伤检测与诊断研究[D]. 天津大学, 硕士论文, 2005.
- [13] KAMMER D C. Effect of modal error on placement for on-orbit modal identification of large space structures [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1992, 15 (2):334-341.
- [14] EWINS D J. Modal testing: theory, practice and application[M]. 2nd ed. United Kingdom; Research Studies Press Ltd, 2000
- [15] KAMMER D C, TINKER M L. Optimal placement of triaxial accelerometers for modal vibration tests [C]// Conference on Structural Dynamics, Feb 4-7, 2002, Los Angeles CA. Bellingham, WA; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers: 29-41.
- [16] MEO M, ZUMPANO G. On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure [J]. Engineering Structures. 2005, 27(10):1488-1497.

(编辑 赵 静)

~~~~~

(上接第 82 页)

- [7] SAITOH A, KAMITANI A. GMRES with new preconditioning for solving BEM-type linear system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40 (2): 1084-1087.
- [8] XIAO H, CHEN Z. Numerical experiments of preconditioned Krylov subspace methods solving the dense non-symmetric systems arising from BEM [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2007, 31(12): 1013-1023.
- [9] AIELLO G, ALFONZETTI S. Efficient solution of skin-effect problems by means of the GMRES-accelerated FEM-BEM method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1274-1277.
- [10] 任登凤,谭俊杰,张军. GMRES 方法在含动边界流场中的应用[J]. 力学与实践,2005, 27(5): 25-28.  
REN DENG-FENG, TAN JUN-JIE, ZHANG JUN. Application of germs method in flow fields involving moving boundaries [J]. Mechanics and Engineering, 2005, 27(5): 25-28.
- [11] MITTAL R C, AL-KURDI A H. An efficient method for constructing an ILU preconditioner for solving large sparse nonsymmetric linear systems by the GMRES method[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2003, 45(10/11):1757-1772.
- [12] 胡博,周家启. 基于预条件处理 GMRES 的不精确牛顿法潮流计算. 电工技术学报,2007, 22(2): 93-102.  
HU BO, ZHOU JIA-QI. Inexact Newton flow computation based on preconditioned GMRES method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 93-102.
- [13] BARRETT R. Templates for the solution of linear systems: building Blocks for Iterative Methods [M]. Philadelphia , PA. [ s. n. ], 1994.
- [14] NAIAFI H S, GHAZVINI H. Weighted restarting method in the weighted Arnoldi algorithm for computing the eigenvalues of a nonsymmetric matrix [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 175 (2): 1276-1287.
- [15] BAKER A H, JESSUP E R, KOLEV T V. A simple strategy for varying the restart parameter in GMRES(m)[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2009, 230(2): 751-761.
- [16] 杨大地,刘仁达. 加速广义极小残余新算法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2006, 29(10): 120-124.  
YANG DA-DI, LIU REN-DA. Accelerated generalized minimal residual algorithm [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29 (10): 120-124.

(编辑 王维朗)