

输电铁塔双轴加速度传感器优化布置*

王璋奇^{1,2}, 王 剑^{1,2}

(1. 华北电力大学机械工程系 保定 071003; 2. 河北省输变电设备安全防御重点实验室 保定 071003)

摘 要:研究输电铁塔结构振动测量用双轴加速度传感器的优化布置问题。以三维模态置信准则(TMAC)为基础,提出一种新的考虑减小冗余度的二维模态置信准则法(RRBMAC法),以实现双轴加速度传感器优化布置,该方法基于改进的二维列主元QR分解获得传感器初始布点,再结合BMAC矩阵非对角元最大值和测点冗余度建立目标函数进行寻优。采用EFI2法和RRBMAC法对钢管塔进行传感器优化布置,采用两个水平方向的模态置信准则和最大奇异值比值对布点方案进行评价,结果显示两种方法的优化效果均首先随传感器数量增加而增强,而后趋于平稳,RRBMAC法较EFI2法能够获得更好的布置效果,且在传感器数目较少的情况下,RRBMAC法即表现出较好的优化能力。另外,采用EFI2法和RRBMAC法对一基格构式输电铁塔进行传感器优化布置,对比分析结果显示RRBMAC法能够获得较好的布置方案。采用优化的传感器布置方式对铁塔进行风振响应实测,并采用NExT-ERA方法识别铁塔固有频率和阻尼系数,与模态分析结果对比显示NExT-ERA方法能够提取得到较精确的频率结果。

关键词:传感器优化布置;双轴加速度传感器;输电铁塔;有效独立法;模态置信准则

中图分类号: TH825 TM726.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 560.20

Optimal placement of biaxial acceleration sensor for transmission towers

Wang Zhangqi^{1,2}, Wang Jian^{1,2}

(1. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper studies the optimal placement problem of biaxial acceleration sensor used for structural vibration measurement of transmission tower. On the basis of TMAC method, a novel method called Redundancy Reduced Biaxial Modal Assurance Criterion (RRBMAC) method is proposed to realize the optimal placement of biaxial acceleration sensor. The method uses improved two-dimension column pivot QR factorization to gain initial sensor positions. The objective function is established based on the maximum value of non-diagonal element in BMAC matrix and measurement point redundancy, and optimization is carried out. EFI2 method and RRBMAC method were adopted to conduct the optimal sensor placement of a steel tube tower. Modal Assurance Criterion and Maximum Singular Value Decomposition Ratio along two horizontal directions were adopted to evaluate the achieved sensor placement scheme. The results show that the optimization effects of the two methods both firstly increase with the number of the sensors, and then tend to stable. RRBMAC method has better placement effects than EFI2 method and RRBMAC method can obtain pretty good optimization capability even when the number of sensors is few. In addition, the two methods were used to carry out the optimal sensor placement of a lattice transmission tower, and the comparison and analysis results show that the RRBMAC method can obtain better placement scheme. The optimal method should be chosen according to the number of sensors together with the focal point of the test. For different number of sensors, the optimal sensor placement method and some sensor placement schemes are presented. Wind-induced vibration response experiment on the tower was carried out using the optimized sensor placement scheme, and NExT-ERA method is adopted to identify the natural frequencies and damping coefficients. Compared with the modal analysis results, the results show that the NExT-ERA method can extract accurate frequency results.

Keywords: optimal sensor placement; biaxial acceleration sensor; transmission tower; effective independence method; modal assurance criterion

0 引言

通过加装振动加速度传感器对结构进行振动测量可以有效分析结构动力学特性,实际结构本身往往具有极大的自由度,对每个自由度节点安装传感器是不现实的,因此进行传感器优化布置以选出有限个能最大限度反映结构整体特性的测点非常必要。

在结构特性的实验研究方面,学者们针对传感器优化布置方法开展了许多的研究工作。Kammer D. C.^[1]于1991年提出有效独立法(effective independence method, EFI),该方法是目前应用最为广泛的一种传感器优化布置方法,其通过对 Fisher 信息阵的优化而使得布点处的模态向量尽可能保持线性无关,进而从实验数据中获得更多的结构模态信息。文献[2]的模态动能法以测得的模态动能最大为目标进行传感器位置选择,可以大大增强测量信号的信噪比,但该方法高度依赖于网格划分。有效独立驱动点残差法(effective independence-drive point residue, EFI-DPR)^[3]考虑了模态动能的影响作用,该方法结合 EFI 法和模态动能法的优点,利用单位刚度的模态运动能作为驱动点残差系数 C_{DPR} 来对 EFI 法进行修正,能够在尽量保持布点最大线性无关的同时选择具有较高模态动能的测点。针对三轴加速度传感器, Kammer D. C. 等人^[4]在 EFI 的基础上提出了一种三维有效独立法 EFI3, 该法将三轴加速度传感器各方向加速度值统一成为一个目标函数,进而对空间结构进行传感器的优化布置。

三轴加速度传感器可以同时测量单一测点处3个方向的加速度值^[5],而对于诸如输电铁塔和通信铁塔这类高耸结构,在自然风雨的作用下可以忽略其垂直于地面方向的振动,同时采用模型缩聚技术可将其扭转自由度缩聚^[6],从而只需采用双轴加速度传感器对两个水平方向的振动进行监测即可实现对这类结构的有效动特性测试。基于此,伊廷华等人^[7]在三维有效独立法 EFI3 的基础上提出一种考虑双向测点优化布置的二维有效独立法 EFI2;杨溥等人^[8]将之应用到输电铁塔传感器优化布置应用上,但其所选测点为铁塔主材节点,忽略了输电铁塔的空间结构特性;王剑等人^[9]综合了模态置信准则、最大奇异比值以及模态动能等多项指标,建立一多目标优化函数,采用结合非支配遗传算法的改进粒子群优化算法对该多目标问题寻优,对一基猫头输电铁塔进行传感器布置与实测分析,取得了较好的测量效果。与传感器优化布置问题类似,作动器的优化布置问题也可以应用粒子群优化算法进行分析^[10]。另有相关研究将一些新颖的优化算法如狼群算法、人工免疫算法等应用到传感

器优化布置问题中^[11]。

原始结构振型为一组正交向量,但经过安装于局部测点的传感器测量后,得到的模态正交性能下降,即各模态向量之间的空间交角变小,进而导致模态信息丢失等问题。实测时选择的测点所得模态向量交角较大情况,可以尽可能地保留原模型特性,提高实验结果精度。基于这种原理,Carne T. G. 等人^[12]提出模态置信准则(modal assurance criterion, MAC)法,通过筛选能够使得 MAC 矩阵非主对角元素最大值最小化的测点集,来确定传感优化布置方案。MAC 法简单直观,但当应用于空间结构时,只能一维一维地分别优化,而不能确保在各维都实现优化,可能会出现偏废一方的现象。针对三轴传感器优化布置问题,伊廷华等人^[13-14]提出了一种三维模态置信准则(triaxial modal assurance criterion, TMAC),将三轴加速度传感器各方向的 MAC 优化问题等效为 TMAC 矩阵非对角元素最大值最小化问题,并采用狼群算法对该目标函数进行优化,取得了较好的优化效果。模态置信准则具有优良的传感器优化布置能力,如何将模态置信准则应用到双轴传感器优化布置上需要进一步研究。

借鉴将三维有效独立法 EFI3 改进为 EFI2 法的思路,本文将应用于三轴加速度传感器的 TMAC 准则改进为适用于双轴传感器的二维模态置信(biaxial modal assurance criterion, BMAC)准则,并在此基础上加入测点冗余度影响,改进为考虑减小测点冗余的减小冗余度 BMAC(redundancy reduced BMAC, RRBMAC)法,采用 EFI2 法和 RRBMAC 对一基钢管塔进行传感器优化布置,并将这两种方法推广到格构式输电铁塔这种空间结构的传感器布置问题上,获得了较好的传感器布点效果。

1 双轴传感器优化布置方法

1.1 二维有效独立法(EFI2)

EFI2 的基本原理与有效独立法 EFI 一致,其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,进而能够利用有限数量的传感器获得更多的模态信息^[6]。EFI2 法由 EFI3 法改进而来,EFI3 法对三轴加速度传感器的每个轴向进行综合优化,EFI2 法则是优化双轴传感器的两个轴向。

不论在时域或频域中,弹性结构各点的响应可以看作各阶模态线性叠加^[15]。传感器输出信息可以表示为:

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

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 为传感器候选位置数, φ_i 为 Φ 的第 i 列向量, ω 为方差为 σ^2 的静态高斯白噪声, q_i 为振型参与系数。

为尽可能多地保持结构线性无关信息,获得模态参数的最佳估计,用有限测点得到的模态信息对结构真实模态进行无偏估计,其偏差的协方差矩阵 $\mathbf{J}_2$ 为:

$$\mathbf{J}_2 = E[(q - \hat{q})(q - \hat{q})^T] = \left[\frac{1}{\sigma^2} \Phi_2^T \Phi_2 \right]^{-1} = \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \begin{pmatrix} \Phi_x^T \Phi_x & \Phi_x^T \Phi_y \\ \Phi_y^T \Phi_x & \Phi_y^T \Phi_y \end{pmatrix} \right\}^{-1} = \mathbf{Q}^{-1} \quad (2)$$

式中: Φ_2 为空间二维模态矩阵,即 $\Phi_2 = [\Phi_x \ \Phi_y]$, 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; $\mathbf{Q}$ 为 Fisher 信息矩阵,该矩阵的行列式取为最大值时,可以使参数 q 的估计偏差协方差最小,即得到参数 $\hat{q}$ 的最佳估计。

定义有效独立分配矩阵 $\mathbf{E}_{2D}$:

$$\mathbf{E}_{2D} = [\Phi_2 \psi]^2 \lambda^{-1} \{1\}_k \quad (3)$$

式中: ψ 表示 $\mathbf{Q}$ 的特征向量矩阵, λ 表示 $\mathbf{Q}$ 的特征值矩阵, $\{1\}_k$ 表示第 k 行所有系数的总和。 $\mathbf{E}_{2D}$ 主对角元越小,其候选测点越不可取,因此通过剔除具有最小 $\mathbf{E}_{2D}$ 主对角元的候选测点来进行测点筛选。

有效独立法没有考虑振动点能量分布,加入以单位刚度的模态运动能作为驱动点残差系数对二维有效独立法 EFI2 进行修正,修正后的有效独立分配矩阵如式(4)所示。

$$\mathbf{E}_{2Di} = \mathbf{E}_{2D} \times C_{DPR} = [\Phi_2 \psi]^2 \lambda^{-1} \{1\}_k \sum_{j=1}^N \frac{\Phi_{2ij}^2}{f_j} \quad (4)$$

式中: f_i 为与模态振型相对应的频率值, Φ_{2ij} 为二维模态矩阵中的元素, N 为振型的个数。

对 EFI2 进行修正后,逐次去除修正后有效独立分配矩阵中最小值对应的传感器位置,而后重新组成 Fisher 信息阵进行计算,直到剩余测点数等于目标传感器数目,此时剩下的测点即为优化所得的传感器布置方案。

1.2 RRBMAC 法

借鉴 EFI2 法的改进思路,并基于 MAC 和三维模态置信准则 TMAC,本文提出一种 BMAC,再在 BMAC 基础上加入冗余度因素,提出 RRBMAC 法。

1) BMAC

根据 MAC 和 TMAC 研究结论, Fisher 信息阵 (fisher information matrix, FIM) 等价于待估参数估计误差的最小协方差矩阵, FIM 可以表示为各个自由度贡献之和^[4], 即:

$$\mathbf{F} = \sum_{k=1}^{n_c} \Phi_{k,*}^T \Phi_{k,*} = \sum_{k=1}^{n_c} \mathbf{F}_k \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为全部自由度的 FIM, $\mathbf{F}_k$ 为第 k 个自由度的 FIM, $\Phi_{k,*}$ 为 Φ 的第 k 行, n_c 为结构的自由度个数。

关注自由度主要体现在两个平动方向上的情形,此时其 FIM 可以表示为:

$$\mathbf{F}_n = \sum_{k=1}^n \Phi_{2k,*}^T \Phi_{2k,*} = \sum_{k=1}^n \mathbf{F}_{2k} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{F}_n$ 为全部节点的二维 FIM, $\mathbf{F}_{2k}$ 为第 k 个节点的二维 FIM, $\Phi_{2k,*}$ 为 Φ 中第 k 个节点的两个平动自由度所对应的模态向量组成的矩阵, n 为节点数。

根据式(6)可得到待布置传感器 Fisher 信息阵 $\mathbf{Q}$, 表示为:

$$\mathbf{Q} = \sum_{k=1}^N \Phi_{2k,*}^T \Phi_{2k,*} = \sum_{k=1}^N \mathbf{Q}_{2k} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{Q}_{2k}$ 为第 k 个双轴传感器位置所对应测点的二维 FIM, N 为待布置的双轴传感器数量。

借鉴 MAC 方法来衡量信息阵 $\mathbf{Q}$ 的优劣, 定义 BMAC, 即:

$$BMAC_{ij} = \frac{Q_{ij}^2}{Q_{ii}Q_{jj}} \quad (8)$$

式中: Q_{ij} 为待布置传感器的 FIM 中第 i 行第 j 列元素, $BMAC_{ij}$ 为 BMAC 矩阵中第 i 行第 j 列元素, 且 $BMAC_{ij} \in [0, 1]$ 。

2) 测点冗余度

与三维模态置信准则 TMAC 类似^[14], 二维模态置信准则没有考虑两个节点可能存在冗余度情况, 此时测点会由于空间位置过于接近而造成所得信息相似程度很高, 浪费有限的传感器资源。本文引入一种相似性因数^[11]:

$$R_{k,l} = 1 - \frac{\|\Phi_{2k,*} - \Phi_{2l,*}\|_F}{\|\Phi_{2k,*}\|_F + \|\Phi_{2l,*}\|_F} \quad (9)$$

式中: $R_{k,l}$ 为第 k 个节点与第 l 个节点的相似性因数, 且 $0 \leq R_{k,l} \leq 1$, 同时 $R_{k,l}$ 也是相似性因数矩阵 $\mathbf{R}$ 的第 k 行第 l 列元素; $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的 F 范数。

相似性因数矩阵 $\mathbf{R}$ 为主对角元素为 1 的方阵, 其对非主对角元的大小反映了测点之间的冗余程度, 定义测点冗余度衡量指标为:

$$\beta = \|\mathbf{R} - \mathbf{I}\|_F \quad (10)$$

式中: $\mathbf{I}$ 表示单位阵。当 β 较大时, 传感器所布置测点之间冗余度较大, 布点效果较差, 反之则冗余度较小, 布点效果较好。

3) RRBMAC 法目标函数

BMAC 矩阵非对角元素的值越小, 则测点所得各阶振型之间相互的独立性越好, 传感器布设方案也就越优; 反之, 传感器布设方案不佳。BMAC 矩阵中非对角元均为小于 1 的非负数, 建立考虑减小冗余度衡量指标 β 的优化目标函数 f 定义为:

$$f = \min[M] = \min[(1 + \max_{i \neq j} BMAC_{ij})^\beta] \quad (11)$$

目标函数中对 BMAC 非主对角元进行加 1 以保证 f 在正实数域内单调递增, 此时通过对目标值 M 进行最小化处理便可求得较小的 BMAC 非主对角元和冗余度指标 β , 可获得较好的传感器布置方案。

4) RRBMAC 法计算步骤

依据 MAC 法的计算步骤, 首先需要采用列 QR 分解

技术^[16-17]提供初始测点。本文涉及双轴传感器的优化布置,需对传统列主元QR分解技术进行改进后才能应用。利用EFI2法对二维模态矩阵的处理方法,将 Φ_x 和 Φ_y 进行组合形成 $\Phi_2 = [\Phi_x \ \Phi_y]$,再对 Φ_2 进行列主元QR分解,得到一对角元素按照绝对值递减次序排列的上三角矩阵,取其前几个测点作为初始候选测点集 P ,具体选取的数目根据布置传感器总数决定。

设所有测点集为 A ,从中选择好初始测点集 P 后,将剩下的可选测点作为候选测点集 T ,并从中选择新的测点进行添加,形成新的测点集 G ,当且仅当新增测点可以使得目标值 M 变小时,才将该点纳入测点集。对 T 中所有候选测点都遍历一次后才能最终确定本轮添加测点,该测点保证本轮中的 $BMAC$ 矩阵非主对角元最大值和测点之间的冗余度都相对较小。当还可以添加测点时,则重复这一过程,直到测点数目满足要求。 $RRBMAC$ 法计算流程如图1所示。

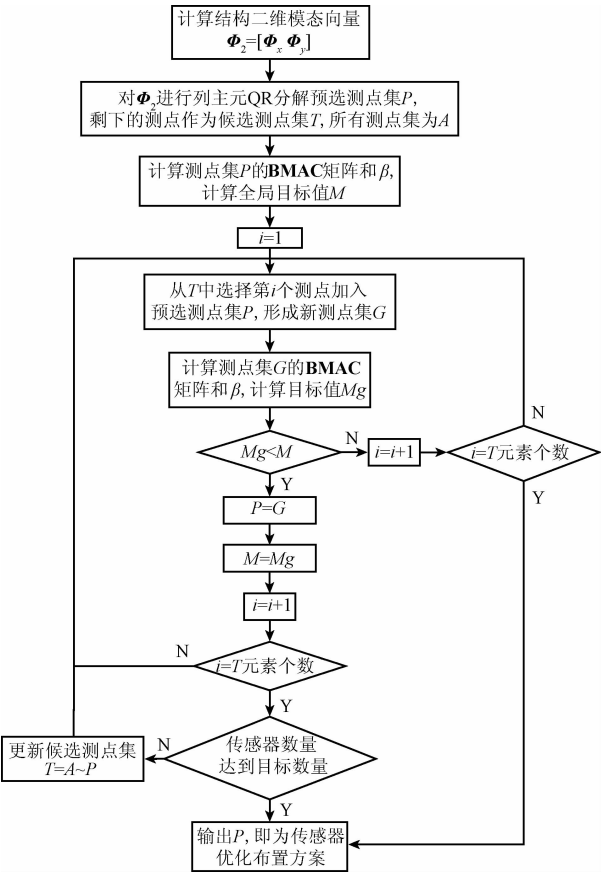


图1 RRBMAC法计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart of RRBMAC method

当对候选测点集 T 中的所有元素都遍历后未能找到使得目标值 M 更小的测点时,当前的测点集 P 即为传感器最优布置方案。

2 钢管塔双轴传感器布置

2.1 钢管塔模型

采用EFI2法和RRBMAC法对一基双回MC52A直线输电钢管塔进行双轴传感器布置。铁塔总高度为72.144 m,呼高为40.844 m,地线横担长度为6.13 m,上、中、下导线横担长度分别为7.8、9.5、8 m。在有限元分析软件ANSYS中建立钢管塔模型,实际钢管塔根径较稍径大,且下端钢管壁厚大,上端壁厚小,因此本文采用变截面梁建立模型。输电钢管塔结构相对简单,可以将所有节点都建立在同一平面内。铁塔共有110个节点,为方便传感器布点,建立模型时设置塔身从下往上依次为1~70号节点,从下往上4根横担每根有10个节点并顺序排列。为方便标记,本文将输电钢管塔横线路方向记作 x 方向,顺线路方向记作 y 方向。钢管塔在自然环境激励作用下其低阶频率较为明显,模态分析后提取各节点 x 方向和 y 方向模态振型分量,并组成铁塔整体二维模态矩阵,其 x 方向前3阶模态频率分别为0.278 56、1.298 3和3.445 8 Hz, y 方向前3阶模态频率分别为:0.350 76、1.561 0和3.907 9 Hz。实测时采用双轴传感器测取 x 方向和 y 方向加速度值。

2.2 钢管塔双轴传感器布置

采用EFI2法和RRBMAC法对钢管塔进行双轴传感器优化布置。根据模态分析基本原则,最少应采用3个双轴加速度传感器进行测试。为对比不同传感器数量情况下的传感器优化布置效果,分别采用两种方法对3~8个传感器的布置方案进行优化,其结果如表1所示。

为评价传感器优化布置算法的优劣,对所得布置方案的 MAC 矩阵进行求解,分别采用 $\max MAC_x$ 和 $\max MAC_y$ 表示 x 方向和 y 方向 MAC 矩阵非主对角元素的最大值,其值越小能够反映该方向测点振型的相关性越小,相应模态可分辨性越好^[9],即传感器布置效果越好,反之则效果越差。

另外,为更好地评价布置效果,还对所得布置方案的最大奇异值比值(maximum singular value decomposition ratio,MSVDR)进行对比,其计算方法为模态矩阵奇异值的最大值与最小值之比,该比值的下限为1,此时为最理想布点情况,传感器测得的结构模态矩阵完全规则正交^[18]。以MSVDR作为评价布点好坏的指标时,该值越接近于1,则越满足模态扩阶要求,结构模态可识别性越强^[17],测点位置越好。同样为表征两个方向上的MSVDR大小,分别采用 $MSVDR_x$ 和 $MSVDR_y$ 表示测点 x 方向和 y 方向的最大奇异值比值。

表 1 钢管塔双轴传感器布置对比
Table 1 Comparison of biaxial sensor placement for steel tube tower

传感器数目	传感器优化布置方法	选择的测点	$\max MAC_x$	$\max MAC_y$	$MSVDR_x$	$MSVDR_y$
3 个	EFI2	56,71,90	0.696 4	0.638 7	29.207 9	7.540 5
	RRBMAC	48,70,81	0.858 5	0.481 9	5.441 1	4.155 8
4 个	EFI2	56,57,71,90	0.770 2	0.620 3	21.641 4	5.889 2
	RRBMAC	36,70,80,81	0.167 9	0.150 1	1.724 0	2.056 5
5 个	EFI2	38,56,57,71,90	0.605 4	0.526 4	18.693 8	5.669 2
	RRBMAC	32,36,57,70,81	0.049 9	0.126 9	1.369 5	2.196 0
6 个	EFI2	38,56,57,70,71,90	0.173 0	0.205 0	1.599 3	2.150 3
	RRBMAC	31,36,57,70,80,81	0.016 3	0.080 9	1.229 9	1.794 7
7 个	EFI2	38,56,57,70,71,90,100	0.177 0	0.210 3	1.638 4	2.158 8
	RRBMAC	36,57,70,71,80,81,91	0.055 6	0.121 9	1.412 2	1.719 5
8 个	EFI2	38,56,57,70,71,81,90,100	0.225 8	0.251 9	1.794 9	2.766 3
	RRBMAC	31,36,57,70,71,80,81,91	0.030 9	0.063 1	1.255 3	1.550 1

为更直观地显示 EFI2 法和 RRBMAC 法应用于钢管塔双轴传感器优化布置效果,图 2 所示为在不同的传感器数量情况下的 $\max MAC_x$, $\max MAC_y$, $MSVDR_x$ 和 $MSVDR_y$ 变化趋势。

由图 2 结合表 1 可知,对钢管塔的传感器布置问题,当采用 3 个传感器时,两种方法的布置效果均较差,不建议采用。当传感器数量为 4 个时,RRBMAC 法所得布置效果提升明显,MAC 非主对角元均降低到 0.17 以下,最大奇异值比值也均降低到 2.06 以下,而此时 EFI2 法效果并不好,直到传感器数量上升至 6 个时,EFI2 法布置效果才得到明显改善。单对 MAC 非主对角元指标进行对比,由图 2(a) 可知,RRBMAC 法优于 EFI2 法。由图 2(b) 比较最大奇异值比值可见,当传感器数量为 4 或 5 个时 RRBMAC 法优于 EFI2 法,而当传感器数量超过 5 个时,两种方法布置效果趋于稳定,均表现较好。

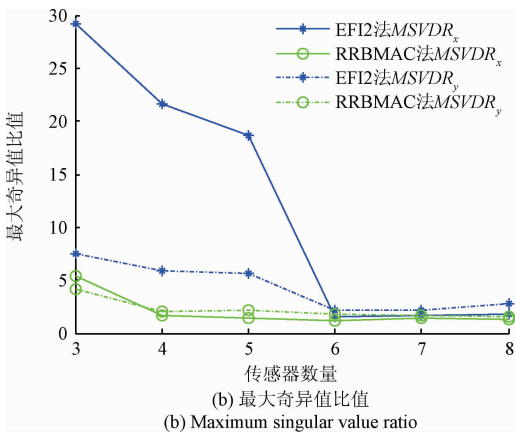
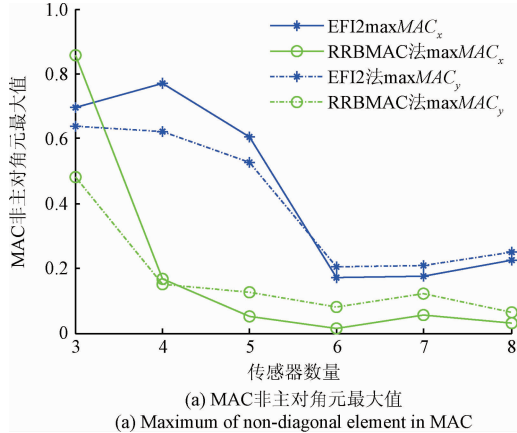


图 2 钢管塔传感器布置效果指标
Fig. 2 Index diagram of sensor placement effect for the steel tube tower

总体考虑传感器布置效果,优先采用 6 个传感器对钢管塔进行测点布置。此时,EFI2 法与 RRBMAC 法优化效果均较好,为进一步比较两种方法布置结果,采用 6 个双轴传感器对钢管塔进行测点布置,具体布置位置如图 3 所示。

由图 3 并结合表 1 可见,当采用 6 个双轴加速度传感器时,EFI2 法总体布置效果较好,但出现 56 和 57 两个相邻节点布置情况,冗余度较高,相比较而言,RRBMAC 法则布置测点较为分散,具有更好的布置效果,应优先选择 RRBMAC 法。

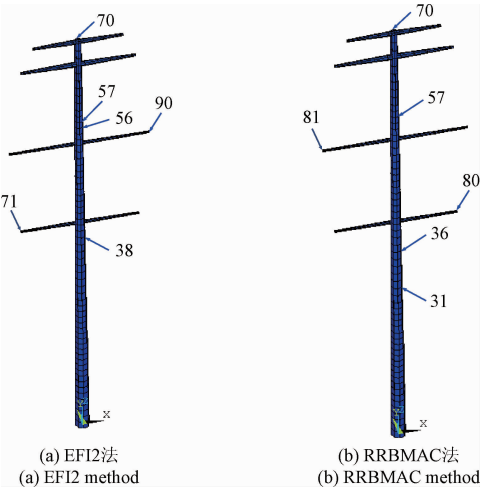


图3 钢管塔6个双轴传感器优化布置方案
Fig.3 Optimal sensor placement scheme of the steel tube tower with 6 biaxial sensors

在实际测试过程中,需要综合考虑传感器优化布置效果、目标模态、传感器成本和安装工作量等因素,当安装传感器数量受到限制时,则需按照能使用的传感器数量进行传感器布置,由表1和图2可知,在传感器为4或5个时,EFI2法所得传感器布置效果不佳,而RRBMAC法仍能获相对较好的传感器布置方式,如图4所示。

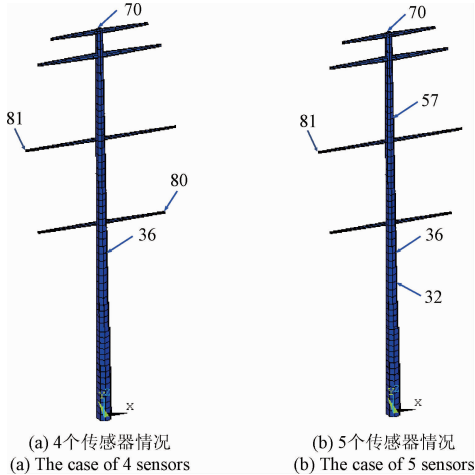


图4 RRBMAC法钢管塔双轴传感器优化布置方案
Fig.4 Optimal placement scheme of biaxial sensor for steel tube tower with RRBMAC method

3 双轴传感器格构式输电铁塔空间布置

3.1 输电铁塔模型

为验证EFI2法和RRBMAC法对空间结构双轴传感器布点优化效果,对一基格构式耐张转角输电铁塔进行传感器布置,以实现动力学性能测定。铁塔呼高为

27.0 m,总高度为36.5 m,根开为8.44 m。在有限元分析软件中,输电铁塔采用桁梁混合模型建立,铁塔主材以及横隔材采用Beam188梁单元模拟,其角钢类型根据实际用材而定,斜材和辅材采用只承受拉压作用的Link10杆单元模拟,杆件截面面积根据实际截面尺寸等效计算。

输电铁塔有限元模型含有172个节点,节点号总体按照铁塔从下往上逐渐增大分布,但局部细节会由于建模方便而出现乱序排列,这可以进一步考验EFI2法和RRBMAC法的空间寻优有效性。通过模态分析可得,输电铁塔的前3阶固有频率为2.095、3.323和6.280 Hz。

第2节所述钢管塔模型各节点处于同一平面内,而对于空间三维的输电铁塔其节点呈空间分布状,其节点位置为空间量,对其进行传感器优化布置需要采用EFI2法和RRBMAC法的推广形式。其方法与钢管塔结构优化布置方法一致,只需将三维空间结构所有节点都设为测点集A中的元素即可。

3.2 格构式输电铁塔双轴传感器空间布置优化

采用推广的EFI2法和RRBMAC法对格构式输电铁塔进行三维空间双轴传感器布置点优化,相对于第2节钢管塔,本节所研究输电铁塔相对复杂,拟采用3~10个双轴传感器对铁塔进行测点布置,优化结果如表2所示,对比传感器布置效果指标图如图5所示。

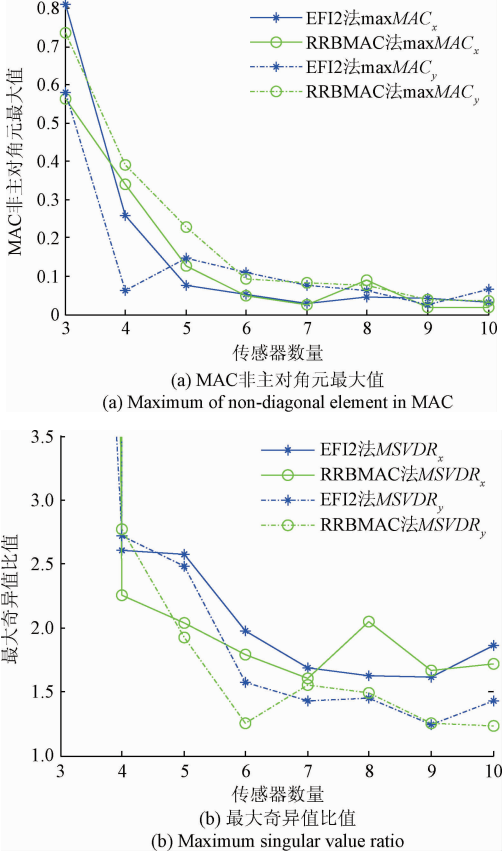


图5 格构式输电铁塔传感器布置效果指标
Fig.5 Index diagram of the sensor placement effect for the lattice transmission tower

表 2 输电铁塔双轴传感器布置对比

Table 2 Comparison of biaxial sensor placement for the transmission tower

传感器数目	传感器优化布置方法	选择的测点	$\max MAC_x$	$\max MAC_y$	$MSVDR_x$	$MSVDR_y$
3 个	EFI2	85、151、153	0.812 9	0.581 0	93.446 8	11.674 5
	RRBMAC	73、149、151	0.565 0	0.735 7	48.961 4	$1.197\ 0\times 10^{17}$
4 个	EFI2	74、105、124、151	0.260 4	0.061 1	2.602 7	2.715 8
	RRBMAC	73、117、149、151	0.339 2	0.390 7	2.253 8	2.767 8
5 个	EFI2	85、105、115、151、153	0.077 1	0.145 9	2.576 8	2.487 3
	RRBMAC	73、104、118、149、172	0.126 1	0.228 0	2.035 8	1.925 2
6 个	EFI2	74、85、105、115、151、153	0.053 8	0.108 9	1.976 0	1.568 4
	RRBMAC	73、104、118、119、149、172	0.048 8	0.091 9	1.787 8	1.252 5
7 个	EFI2	74、79、85、105、115、151、153	0.027 2	0.075 9	1.689 1	1.423 7
	RRBMAC	69、73、99、104、113、149、151	0.024 8	0.084 1	1.603 3	1.557 4
8 个	EFI2	74、79、85、105、107、115、151、153	0.047 3	0.064 1	1.628 8	1.454 0
	RRBMAC	73、104、113、116、118、117、119、149	0.090 0	0.076 8	2.046 3	1.493 0
9 个	EFI2	74、79、85、105、107、115、124、151、153	0.041 8	0.026 1	1.614 6	1.242 9
	RRBMAC	65、73、99、104、113、116、117、149、151	0.018 8	0.038 9	1.669 3	1.254 7
10 个	EFI2	74、79、85、105、107、115、124、145、151、153	0.032 8	0.066 3	1.858 1	1.428 8
	RRBMAC	65、73、99、104、113、116、117、118、149、151	0.018 3	0.036 8	1.715 8	1.227 3

由表 2 结合图 5 可见,当传感器数量为 3 时,EFI2 法和 RRBMAC 法所得结果均不好(图 5(b)中 3 个传感器时最大奇异值比值很大,并未显示,见表 2),不应采纳。随着传感器数量的增加,两种方法所得传感器优化布置效果均有所提高,但布置效果会随传感器数量出现较明显的波动,应根据具体指标确定传感器优化方法。如当限制传感器数量为 5 个时,根据模态置信准则评价指标,可以判断 EFI2 法效果更优;但根据最大奇异值比值评价指标,则应选择 RRBMAC 法。这是由于两种指标的侧重点不一样而造成的,具体需要根据实测要求而定,如重点要求各测点所得振型之间的线性无关性或模态可分辨性,则优先选择 EFI2 法;而若重点关注测点所得模态矩阵的正交性、模态可扩展性或模态的可识别性,则应选择 RRBMAC 法进行传感器布置。

当采用 4 个传感器时,判断模态置信准则评价指标应选择 EFI2 法,但此时两种方法的最大奇异值比值指标大小关系不明确,无法选择,当侧重于各测点所得振型之

间线性无关或模态可分辨性时,根据 MAC 非主对角元最大值指标,应选择 EFI2 法。

当传感器数量为 8 个时,采用 RRBMAC 法所得的布置方式中 x 方向最大奇异值比值较大,达到 2.046 3,不建议采用,而可以选择 EFI2 法所得的布置方案。

在实验过程中,应考虑实测要求、成本、安装等因素,根据可用传感器数量选择合适的方法进行传感器优化布置。

4 输电铁塔振动实测

依托于国家电网公司科技项目,在一基典型耐张转角输电铁塔安装 6 个 TS-4 型双轴加速度传感器,进行风振响应实测。参照表 2,选择 RRBMAC 法对铁塔进行传感器布置,即分别对 73、104、118、149、172 号节点布置双轴加速度传感器。实测铁塔如图 6(a)所示,第 73 号节点处传感器安装如图 6(b)所示,其余双轴加速度传感器安装位置如图 7 所示。



(a) 实验耐张转角塔
(a) Experiment tension resistance angle tower



(b) 双轴加速度传感器安装图
(b) Installation diagram of biaxial acceleration sensor

图6 输电铁塔实测

Fig.6 Field test of the transmission tower

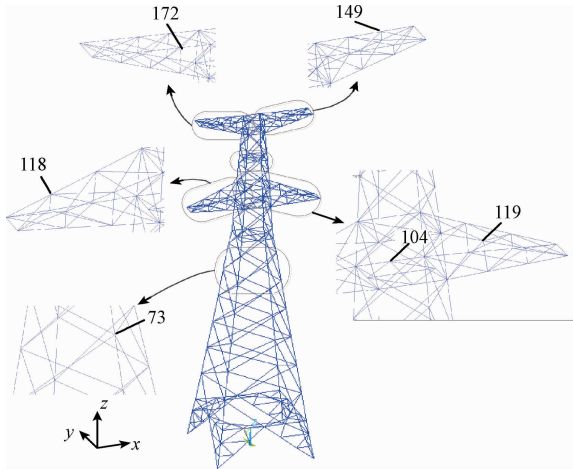


图7 双轴加速度传感器布置位置

Fig.7 Placement location of biaxial acceleration sensor

测得铁塔传感器测点处两个水平方向的振动加速度值,并采用基于自然激励的特征系统实现算法(natural excitation technique-eigensystem realization algorithm, NExT-ERA)^[19]对铁塔模态参数进行识别。以172号节点为参考点,采用奇异值分解法分析模型阶次为8,再利用稳定图筛选固有频率结果与有限元模态分析结果对比如表3所示。

表3 识别所得频率与模态分析结果对比
Table 3 Comparison of the recognized frequencies and modal analysis results

方法	第1阶		第2阶		第3阶	
	频率/Hz	误差/%	频率/Hz	误差/%	频率/Hz	误差/%
NExT-ERA	2.121		3.268		6.409	
模态分析	2.095	1.24	3.323	-1.66	6.280	2.05

由表3可见,在RRBMAC法优化所得传感器布置方式下,NExT-ERA算法能够识别铁塔前3阶固有频率,识别结果与有限元模态分析结果接近,误差较小。同时采用算法识别铁塔前3阶阻尼比系数分别为1.89%、2.03%和3.27%。

5 结 论

本文针对输电铁塔振动测量用双轴加速度传感器的优化布置问题进行了研究,对EFI2法和RRBMAC法进行了理论分析,并对一基双回直线钢管塔和一基格构式耐张转角铁塔这两种类型的输电铁塔进行传感布置,给出了采用不同数量传感器时的布置方法及其布置方式。具体研究内容与结论如下:

- 1) 提出了一种适用于双轴加速度传感器并考虑减小冗余度的RRBMAC传感器优化布置方法,且制定其计算流程;
- 2) 针对输电钢管塔采用EFI2法和RRBMAC法进行传感器优化布置,通过对两个方向上模态置信准则和最大奇异值比值的评价表明,RRBMAC法相对较好,建议采用4个及以上的传感器对铁塔进行测点布置,优先采用6个传感器;
- 3) 将EFI2法和RRBMAC法推广应用到空间格构式输电铁塔的传感器优化布置问题中,并对列主元QR分解改进,求解出双轴传感器初始空间布点;
- 4) 采用推广的EFI2法和RRBMAC法在初始布点的基础上对一基格构式耐张转角输电铁塔进行双轴传感器空间优化布置,两种方法均能获得较好的布置效果,为选

择相对较好的布置方式,需要考虑传感器数量以及测试的侧重点来进行方法选择;

5)采用RRBMAC法所布置的6个双轴加速度传感器方案对铁塔进行风振响应实测,并采用NExT-ERA法识别铁塔频率和阻尼系数,与有限元结果对比显示NExT-ERA法能够识别较高精度的频率值。

参考文献

- [1] 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):251-259.
- [2] PAPDOPOULOS M, GARICIA E. Sensor placement methodologies for dynamic testing[J]. *AIAA Journal*, 1998, 36(2):256-163.
- [3] 代凤娟. 支持故障预测的传感器优化布置研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
DAI F J. Research on the optimal sensor placement of supporting failure prediction[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2007.
- [4] KAMMER D C, TINKER M L. Optimal placement of triaxial accelerometers for modal vibration tests[J]. *Mechanical System and Signal Processing*, 2004, 18(1):29-41.
- [5] 许高斌,朱华铭,陈兴. 不等高梳齿电容式三轴MEMS加速度传感器[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(8):704-710.
XU G B, ZHU H M, CHEN X. Tri-Axis capacitive acceleration sensor with different height combs[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2011, 25(8):704-710.
- [6] 伊廷华,李宏男,顾明. 基于模型缩聚的广州新电视塔传感器优化布置研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(3):55-61.
YI T H, LI H N, GU M. Research on optimal sensor placement of Guangzhou new TV tower based on model reduction[J]. *Engineer Mechanics*, 2012, 29(3):55-61.
- [7] 伊廷华,王相,李宏男. 考虑敏感性和鲁棒性相协调的多维传感器优化布置方法[J]. *振动工程学报*, 2013, 26(4):467-476.
YI T H, WANG X, LI H N. Optimal multi-dimensional sensor placement in consideration of the coordination of sensitivity and robustness[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(4):467-476.
- [8] 杨溥,刘遥,刘纲,等. 特高压输电塔双向动态监测传感器的优化布置[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2010, 33(1):88-93.
- YANG P, LIU T, LIU G, et al. Optimal placement of bidirectional sensor for extra high voltage transmission towers[J]. *Journal of Chongqing University: Nature and Science*, 2010, 33(1):88-93.
- [9] 王剑,王璋奇. 输电铁塔双轴加速度传感器多目标优化布置[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(2):277-285.
WANG J, WANG ZH Q. Multi-objective optimization placement of the biaxial accelerometer for transmission towers[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(2):277-285.
- [10] 梁旋,张方. 振动主动控制模型及作动器位置优化仿真[J]. *国外电子测量技术*, 2016, 35(11):15-23.
LIANG X, ZHANG F. Optimal and simulation of active vibration control model and position of actuator[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, 35(11):15-23.
- [11] 王娇. 基于人工免疫算法的传感器节点布置策略[J]. *电子测量技术*, 2015, 38(6):97-99.
WANG J. Layout strategy based on artificial immune algorithm sensor nodes[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(6):97-99.
- [12] CAME T G, DOHRMANN CR. A modal test design strategy for model correlation[C]. *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1995:927.
- [13] 伊廷华,王传伟,李宏男. 利用分布式狼群算法进行三维传感器优化布置的方法研究[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(5):668-675.
YI T H, WANG CH W, LI H N. Optimal triaxial sensor placement using distributed wolf algorithm[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(5):668-675.
- [14] 伊廷华,王传伟,李宏男. 基于等级划分狼群算法的三维传感器优化布置方法研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(4):223-229.
YI T H, WANG CH W, LI H N. Hierarchic wolf algorithm for optimal triaxial sensor placement[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4):223-229.
- [15] EWINS D J. *Modal testing: Theory, practice and application*[M]. 2nd ed. United Kingdom: Research Studies Press Ltd,2000.
- [16] SCHEDLINSKI C, LINK M. An approach to optimal pick-up and exciter placement[C]. *Proceedings-Spie the International Society for Optical Engineering*, 1996:376-382.

[17] 秦仙蓉,张令弥. 一种基于 QR 分解的逐步累积法传感器配置[J]. 振动、测试与诊断,2001,21(3):168-173.
QIN X R, ZHANG L M. Successive sensor placement for modal paring based on QR factorization[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2001, 21(3): 168-173.

[18] 李东升,张莹,任亮,等. 结构健康监测中的传感器布置方法及评价准则[J]. 力学进展, 2011, 41(1): 39-50.
LI D SH, ZHANG Y, REN L, et al. Sensor deployment for structural health monitoring and their evaluation[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(1):39-50.

[19] JUANG J N, PAPPAS R S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 1985,8(5):620-627.

作者简介



王璋奇,1997 年于华北电力大学获得博士学位,现为华北电力大学机械工程系教授,主要研究方向为输电铁塔结构非线性动力学。
Email:wangzq2093@163.com

Wang Zhangqi received his Ph. D. degree from North China Electric Power University (NCEPU) in 1997. Now, he is a professor in Department of Mechanical Engineering, NCEPU. His main research interest includes nonlinear dynamics of transmission tower structure.



王剑(通讯作者),分别在 2011 年和 2013 年于华北电力大学获得学士学位和硕士学位,现为华北电力大学机械工程系在读博士研究生,主要研究方向为输电铁塔结构动力学及其状态监测。
Email:ncepu_wj@163.com

Wang Jian (Corresponding author) received his B. Sc. and M.Sc. degrees both from North China Electric Power University (NCEPU) in 2011 and 2013, respectively. Now, he is a doctoral candidate in Department of Mechanical Engineering, NCEPU. His main research interest includes dynamics of transmission tower structure and its condition monitoring.