

基于改进PSO算法的连续梁桥健康监测传感器优化布置研究

白中华 陶天阳

中交路桥建设有限公司 北京 100000

摘要: 传感器优化布置是搭建桥梁健康监测系统的重要工作,通过尽可能少的传感器获取尽可能全面的结构模态信息是传感器优化布置的核心问题。目前常用的传感器布置方法往往只考虑采集信息的丰富度,当受到自然环境中的噪声干扰时,采集的信息就会变得不准确。本文将针对这一问题,在采用粒子群算法进行传感器布置的基础上,将多目标函数的概念引入算法,在模态置信度准则的基础上引入模态能量准则,将模态能量大小作为传感器优化布置点选择的标准之一,以达到提升布置方案的信噪比的目的。通过工程算例分析,并与传统布置方法和单目标函数PSO算法进行对比,结果表明引入多目标函数概念后,方案可以具备较好区分度,方案的信噪比得到明显改善。

关键词: 健康监测; 传感器优化; 粒子群算法; 多目标函数

引言

传感器布置是桥梁健康监测中比较关键的任务之一,传感器布置所追求的目标是通过尽量少的传感器得到尽量全面的模态信息。识别误差最小准则是传感器布置问题中的主流准则。由于该准则的广泛性,很多文献以及工程案例中都是以识别误差最小准则为基础来实现传感器的优化布置的,其中最为常用的方法就是由学者Kammer在发表的文献中提出的有效独立法(EI)^[1]。近些年来,随着智能优化算法的兴起,前人开始将优化算法应用到传感器布置中,在理论与实际工程中均起到重要的作用。粒子群优化算法由于其操作简单、寻优过程清晰等优点,在传感器布置中得到应用。但是多数布置方法只将采集桥梁结构模态信息的丰富度作为算法的唯一适应度指标,本文将在粒子群算法进行传感器优化布置的基础上,对算法进行一定的改进,使最后得到的布置方案可以令模态向量具有较好正交性的基础上,具备较强的信噪比。

1 多目标函数算法建立

1.1 粒子群算法

粒子群算法(PSO)是从鸟类寻找食物的习惯中得到灵感,进而提出的一种智能算法。粒子群算法出现的时间比较短,属于新型的优化算法。该算法在计算过程中,上一代粒子通过位置与速度来影响下一代粒子的位置更新。PSO算法相比于GA算法会对上代粒子的信息呈正反馈,具有一定方向性。该算法在操作方面以及参数设置方面都比较简单清晰。学者Marinaki运用三种PSO算法来求解传感器布置安装问题,并对比GA法的优化结果,表明粒子群算

法更适合用来解决传感器优化布置问题^[2]。

1.2 多目标函数

在多目标函数的处理方法中,该方法是求解Pareto最优解最常用的方法之一。基于聚合的方法就是将问题中涉及到所有的目标函数与准则以加权的形式组成一个整体的适应度函数,然后再通过算法求得该聚合后适应度函数的最优解,得到的最优解就可以视为Pareto最优解^{[3][4]}。

1.2.1 BHM函数

桥梁结构上处于运营状态的传感器都处于自然环境中,外部环境的噪声源一般会对传感器信号采集工作造成不利,因此在对桥梁结构进行传感器布置时就要将节点模态能量的大小作为考虑因素之一。学者Baryard^[58]研究出了模态能量准则(BHM),该准则通过将各阶次模态中各个测点位置模态能量的占比作为传感器优化布置的一个依据来影响布置方案的优化。

经推得到BHM函数表达式为:

$$f_{BHM} = \alpha \times [1 - \prod_{r=1}^n \sum_{i=1}^m \rho_{ir}] \quad (1)$$

α 为适应度函数地合理性调整系数。

1.2.2 MAC函数

根据结构动力学可知,结构各阶次的固有阵型的值为一组正交向量。但是由于传感器数量远远小于结构的自由度总数,而且受到现场测量精度与环境噪声等因素的影响,通过测量获取的模态信息已经不具备了正交的条件。当阵型向量之间的交角过小时,会出现信息重叠,所以要保证通过测量获取的各阶次模态振型具有较大的空间交角,从而保证获取结构尽可能多的模态信息。模态置信度

准则 (Modal Assurance Criterion, MAC) [5] 是测评模态阵型之间交角的一种有效的方式。它可以有效地对向量的相关性做出评价。MAC矩阵表达式如下:

$$f_{MAC} = \text{MAX}\{MAC_{ij}\}, (i \neq j) \quad (2)$$

φ_i 为第 i 阶阵型向量, φ_j 为第 j 阶阵型向量, MAC 矩阵的所有非对角元素范围为 [0,1] 内。当元素趋向于 1 时, 相对应的两个模态向量相关性越强, 所携带的信息重叠加重; 当元素趋向于 0 时, 表示相对应的两个模态向量独立性越强, 所携带的信息重叠减少, 两个向量记录的信息更加丰富。

2 算例分析

2.1 工程背景

该算例为特大连续梁桥结构, 该桥为 (70+110+

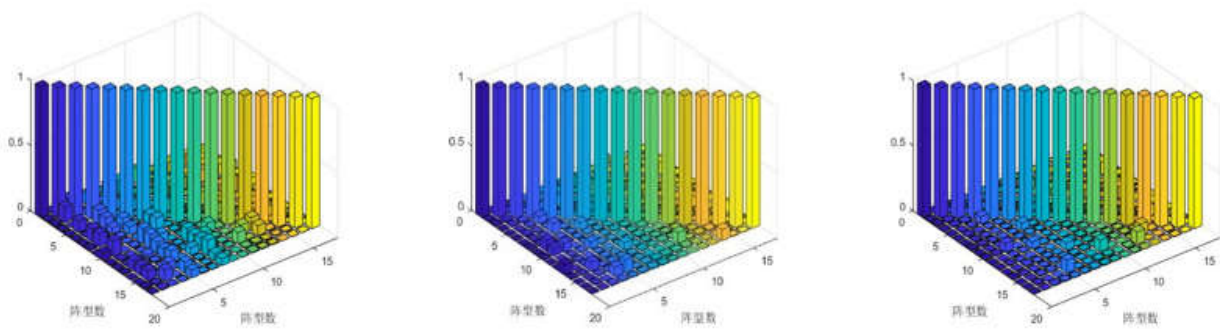
110+70) m 的四跨连续梁, 上部结构采用大跨径预应力混凝土变截面连续梁, 上部结构采用 C50 混凝土, 箱形截面, 单箱单室结构, 桥面 2% 横坡通过调整主梁腹板高度来形成。

2.2 布置结果评价

这里将对方案 1: 有效独立法布置结方案、方案 2: SLD-PSO-(MAC) 算法的布置方案、方案 3: SLD-PSO-(MAC-BHM) 算法的布置方案的布置结果进行对比分析。

(1) MAC 直方图

MAC 值可以表示对应两个向量之间的空间交角, 交角的大小与向量间的独立性呈正相关。如图 2 为三种方案的 MAC 直方图。



(a). 方案 1 MAC

(b). 方案 2 MAC

(c). 方案 3 MAC

图 2 各方案优化 MAC

从图 2 重可以看出, 方案 2、3 的 MAC 值中较大幅值的元素较少, 方案 3 的 MAC 值相对好一些, 反映出该方案测得的阵型向量交角状态较好。

(2) MAC 非对角均方根

MAC 的非对角均方根是评价传感器布置方案中测点区分程度的一个重要评价手段。该评价指标的大小与方案整体的区分程度呈负相关。通过计算得到方案 1 的 MAC 均方根为 0.0227, 方案 2 的 MAC 均方根为 0.0142, 方案 3 的 MAC 均方根为 0.0173, 如图 3 所示。

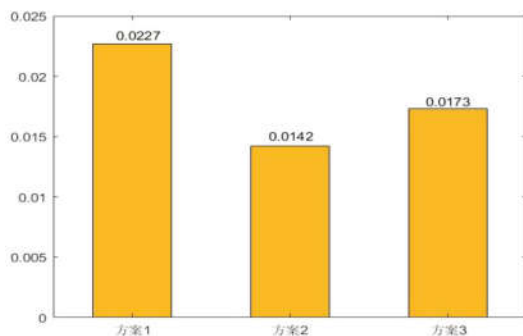


图 3 MAC 非对角均方根评价

图 3 中表明, 方案 1 的 MAC 均方根明显大于方案 2、3, 方案 3 的 MAC 均方根虽然大于方案 2 的 MAC 均方根, 但是差别不大。说明引入多目标函数 PSO 算法计算的布置方案所测得的阵型向量的空间交角优于传统的有效独立法, 相对于仅利用 MAC 准则的 PSO 算法算得的布置方案的正交性有小程度的损失, 但是影响不大, 两者均具备较好的区分度。

(3) Gramian 矩阵各元素和

Gramian 矩阵所有元素和是传感器布置问题中常用的一个评价指标 [6]。该指标与 MAC 均方根从不同的角度来对布置方案做出评价, 其主要是评价布置方案的信噪比强弱。Gramian 矩阵可以表示为式 (4)。

$$Gramian(i, j) = \left| \sum_{r \in m} \phi_{ir} \phi_{jr} \right| \quad (4)$$

式中, i 与 j 表示模态阶数; $r \in m$ 表示 r 属于测点内。由式 (4) 可以得出 Gramian 矩阵所有元素和可以表示为式 (5)。

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Gramian(i, j) \quad (5)$$

式中， n 为模态阶数。该指标可以对布点方案的振幅大小做出评价，该指标的大小与方案的信噪比呈正相关。通过计算这里得到了三种方案的指标值，方案1的指标值为3.2223，方案2的指标值为2.6312，方案3的指标值为4.1021，如图4所示。

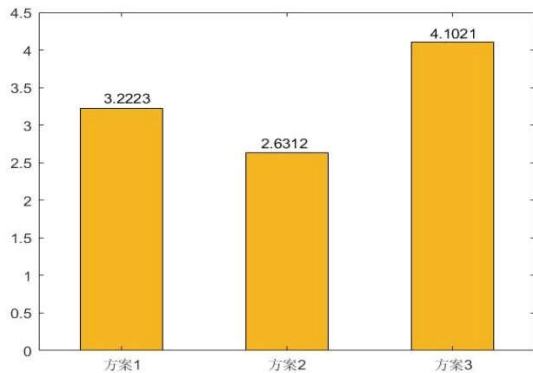


图4 Gramian矩阵元素和指标

从图4中可以看出，方案3的值最大，方案2的值最小。说明仅基于MAC准则通过改进PSO算法计算得到的布置方案信噪比要低于传统布置方法有效独立法；引入BHM函数与MAC准则共同构建多目标函数的改进PSO算法计算得到的方案的信噪比相比于有效独立法以及单目标函数的改进PSO算法得到的方案的信噪比明显较高，说明该方法使得布置方案的信噪比得到明显提升。

引入多目标函数的PSO算法进行传感器布置时，MAC直方图中大幅值元素少于单目标函数与传统布置方法方案；多目标函数、单目标函数、传统布置方法的MAC均方根分别为0.0173、0.0142、0.0227，MAC均方根指标明显小于传统布置方法，且与MAC单目标函数差异不大，证明了引入多目标概念的PSO算法得到的方案可以很大程度的继承MAC函数的方案具备较大空间交角，易于分辨的特点。多目标函数、单目标函数、传统布

置方法的Gramian矩阵各元素和分别为4.1201、2.6312、3.2223，多目标函数得到方案的值明显大于单目标函数和传统布置方法，证明了引入多目标函数后，方案的信噪比得到明显增强。验证了引入多目标函数后，传感器布置方案在对阵型向量分辨率牺牲较少的情况下，具备了较高的信噪比。可以很好的匹配传感器布置的要求。

结束语

通过三个指标对三种布置方案进行评价中可以看出，对改进PSO算法引入多目标函数的概念后，该方法在未明显损失测得的阵型向量之间的分辨度的基础上，提升了方案的信噪比。通过与传统布置方法的对比，说明了该方法不仅具有使用价值，而且得到的布置方案也较为理想。

参考文献

- [1]郑晨曦. 基于改进单亲遗传算法的桥梁监测传感器优化布置研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2015.
- [2]王海军, 宋协武, 曹德欣, 等. 求多目标优化问题Pareto最优解集的方法[J]. 大学数学, 2008, 24(5): 74-78.
- [3]Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [4]Knowles J, Corne D. The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Pareto Multiobjective Optimisation[C]// Proc Congress on Evolutionary Computation. 1999.
- [5]简小辉. 网格结构健康监测的传感器优化方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [6]范恒承, 余岭. 一种传感器优化布置的多能量参数改进有效独立法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 25-31.