

文章编号:1673-2049(2014)01-0120-10

基于桥梁健康监测的传感器优化布置 研究现状与发展趋势

梁 鹏^{1,2}, 李 斌^{1,3}, 王晓光¹, 吴向男¹, 陈文强¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 桥梁结构安全技术国家工程实验室,
陕西 西安 710064; 3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要:从传感器监测项目优化、数量优化和位置优化3个方面综述传感器优化布置的研究现状。重点探讨传感器位置优化,系统介绍了基于模态可观测性和基于损伤可识别性的传感器优化布置准则、布置方法和布置评价准则,对比分析各种布置方法之间的脉络关系、技术演变及其优缺点,最后指出传感器优化布置研究存在的几点不足及其技术发展趋势。

关键词:桥梁工程;健康监测;传感器优化布置;模态保证准则;有效独立法

中图分类号:U445.71 **文献标志码:**A

Research Status and Development Trend of Optimal Sensor Placement Based on Bridge Health Monitoring

LIANG Peng^{1,2}, LI Bin^{1,3}, WANG Xiao-guang¹, WU Xiang-nan¹, CHEN Wen-qiang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. National Engineering
Laboratory for Bridge Structure Safety Technology, Chang'an University, Xi'an 710064,
Shaanxi, China; 3. China Harbour Engineering Company Ltd, Beijing 100027, China)

Abstract: By monitoring items, the number of optimization and location optimization from three aspects of the optimal sensor placement, the research status of optimal sensor placement was summarized. The sensor location optimization was emphatically discussed based on modal observability and the injury identifiable criterion, and the sensor placement rule, layout methods and evaluation criteria were systematically introduced. Meanwhile, the relations of different layout methods and technology evolutions were compared, and the advantages and disadvantages were also analyzed. Finally, the deficiencies of methods of the optimal sensor placement were pointed out, the technology trends of optimal sensor placement were prospected.

Key words: bridge engineering; health monitoring; optimal sensor placement; modal assurance criterion; effective independence

0 引言

在桥梁健康监测系统中,传感器系统是整个系统的“眼睛”。通过传感器系统,桥梁健康监测系统

可以实时地对结构进行监测,为后续工作打下基础^[1]。传感器系统的主要任务包括实时采集结构的运营环境、结构承受的荷载以及结构动力特性3个部分的内容,其中结构动力特性的测量主要包括外

收稿日期:2013-09-12

基金项目:广东省交通运输厅科技计划重大工程专项项目(2011-01-001);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC077);
长安大学基础研究支持计划专项资金项目

作者简介:梁 鹏(1977-),男,江西高安人,教授,工学博士,E-mail:bridgedoctor@126.com。

部激励的选取和布置、传感器的选取及配置、结构在线试验数据采集等几个主要的环节。如果这几个环节处理不当,将直接影响到后期的数据分析和损伤检测的可靠程度。因而传感器优化布置作为设计结构健康监测系统的的核心问题之一,对数据采集的有效性有着至关重要的影响。而传感器系统本身是一个“矛盾体”:一方面,为了对结构的健康状况做出合理的、科学的评价,需要使用尽量多的传感器,监测尽量多的项目;另一方面,为了保证监测系统本身的可靠性和经济性,要求使用的监测设备不能过多。在已实施的桥梁健康监测系统中,有些系统规模过于庞大,系统本身的可靠性可能都无法保证;而有些结构监测系统则相反,规模过于精简,以至于无法对结构的健康状态做出科学的评估。因此,需要找到合适的方法寻求两者最佳的平衡点。

一般来说,健康监测系统中传感器的布置应满足以下 2 个目标:①安装传感器的测点能够最大程度地反映空间结构的信息;②测点信息对空间结构状态的变化足够敏感。Carne 等^[2]强调了传感器的配置应使试验模态结果具有良好的可视性和鲁棒性。由于投资和结构运行管理等方面的原因,传感器不可能取得桥梁结构完整的结构状态数据,而只是取得相对于有限元模型总自由度的部分数据。如何将有限的传感器配置在最优位置,从而实现对结构状态信息的最优采集并合理判别采集位置的结构状态,即如何实现 m 个自由度上布置 n 个传感器($n < m$),达到经济和技术的最优组合,是目前桥梁监测及评估行业研究的热点问题。

传感器优化布置包括传感器监测项目优化、数量优化和位置优化 3 个方面内容。为探讨传感器优化布置在桥梁健康监测系统的应用,本文中笔者通过系统梳理各国相关文献,从传感器监测项目优化、数量优化和位置优化 3 个方面探讨传感器优化布置的起源和发展,总结归纳现有的传感器优化布置方法及其应用,并总结分析各种方法的优缺点和发展趋势。

1 传感器监测项目优化

一个大型桥梁健康系统监测项目往往种类繁多,一般可按输入与输出、静力与动力、整体与局部、研究方向划分,如图 1 所示。目前实际应用和研究中,桥梁健康监测项目多根据经验确定,如文献^[3]中通过对多座运营中的斜拉桥进行大量病害调查与监测分析,总结了用于斜拉桥状态监控与评估的颇

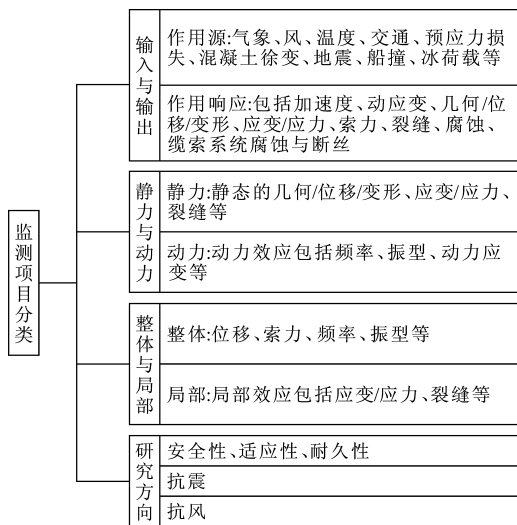


图 1 监测项目分类

Fig. 1 Monitoring Item Classifications

具代表性的监测项目。文献^[4]中总结了多座斜拉桥病害特点,调查典型桥梁健康监测方法的适用性,对传感器监测项目的设计具有重要的指导意义。

监测项目的确定依据从来源上来说主要包括病害数据库、风险分析^[5]、易损性分析^[6] 3 个方面,具体考虑的内容包括局部与整体的关系、动力与静力分析的需要、健康监测与人工巡检如何相结合等方面。理论分析数据如何与习惯经验数据融合是监测项目中健康监测系统与人工巡检是否可以良好衔接的关键性问题。

设计大型桥梁结构监测系统首先要综合考虑桥梁的结构特点和各个方面对系统功能的要求,确定系统需要获取哪些信息以及系统的实施目的;其次应当结合监测费用,从效益最大化和科学经济实用的角度确定监测项目。通过分析,明确哪些项目需要进行长期连续监测,哪些作为周期监测或日常监测项目,哪些项目需要通过专门的检测设备获取需要的数据等^[7]。健康监测系统的实际应用中,由于与理论研究相关的监测项目可以根据待研究问题的性质来确定,具有较大的随意性,实施效果难以保证。因此,一些学者认为,监测系统的设计必须遵循功能要求和效益-成本分析两大准则^[8-9]。首先,监测系统的设计应考虑建立该系统的目的和功能。对于特定的桥梁,建立健康监测系统的目的可以是桥梁监控与评估,或是设计的验证,甚至是以研究发展为目的。因此,一旦系统的目的和功能确定,系统的监测项目也就能确定。其次,监测系统中各监测项目的规模以及所采用的传感器种类^[10],需要与采集传输系统等综合考虑,再根据目的、功能要求和效

益-成本分析将监测项目和测点数设计到所需范围之内。

2 传感器数量优化

确定监测项目之后,接下来的工作是确定传感器数量。对传感器数量及传感器位置进行优化理论研究不但可以有效地降低监测成本,而且可以提高监测系统处理信息的效率,因而具有重要的研究意义^[11]。目前实际应用中传感器的数量大多以经验和经济等方面因素来考虑和确定,具有较大的随意性和不确定性,单独针对传感器数量优化的研究并不多^[12-14]。

在设计监测系统模态监测时,传感器的初始优化数量多由经验确定,或是按照振动理论,根据所测试的模态数确定,也有学者依据弹性波传播原理确定特定结构的传感器布置极限间距并初步确定检测所需传感器数量。传感器初始优化数量确定之后,通常的做法是按照优化布置准则,在确定布置测点的同时,结合经济要求考虑传感器最终数量。部分学者针对模态可观测性和损伤识别性的不同要求对最小化传感器数目进行了研究,该方面的研究多局限于理论分析和数值模拟。

3 传感器位置优化

建立桥梁健康监测系统的主要目的是进行损伤识别和状态评估,其中损伤识别是基础性环节,也是健康监测系统的最重要的功能之一。损伤识别主要包括局部损伤识别和整体损伤识别,这要求传感器系统能够同时进行局部损伤监测和整体损伤监测 2 个方面的任务。局部监测主要依靠布设在局部位置的传感器采集的信息得到,这方面的研究多以监测项目确定监测目的,并以有限元应力分析和监测系统设计经验因素来确定布设方案,测点往往选择在有限元分析和结构实际运营中容易发生损伤的关键部位。局部损伤监测技术具有实时性和可靠性的优点,缺点是只能监测传感器安装部位的损伤情况,对于未安装传感器的部位的实际情况却无法得知。整体损伤识别理论主要依靠由模态理论衍生出的损伤识别理论进行分析和确定,因而实时、准确地采集结构模态信息是传感器的另一项主要任务。目前传感器位置优化的研究多集中于该领域。

Shah 等^[15]最早进行了传感器优化布置方面的研究工作。经过 40 多年的发展,出现了大量传感器优化布置的方法。传感器的优化布置首先要确定优

化配置准则即优化的目标函数,其次必须选用适当的优化计算方法。根据测试的目的可以将传感器优化准则分为基于模态可观测性和基于损伤可识别性 2 类。

3.1 基于模态可观测性的传感器优化布置方法

传感器优化布置最重要的性质是系统可观测性,它反映了传感器测点提供结构性态监测、健康评估或系统控制中重要的状态参数信息的能力。学者们在研究不同模态参数的基础上,提出了不同的优化准则和计算方法。基于模态可观测性常用的优化准则主要有传递误差最小准则、系统能量准则、模型缩减准则、模态保证准则等。

由于多数情况下首先采用参数识别方法处理模态试验的结果,因此,很多文献以识别参数的误差最小来优化传感器布置,其基本思想是利用系统参数识别误差的无偏估计,当 Fisher 信息矩阵获得最大值时,系统参数识别误差最小。影响最广泛的一种配置方法是 Kammer 提出的有效独立(EI)法,其基本思想是按照各候选传感器布点对目标模态分量线性独立性的贡献进行传感器位置排序,优化 Fisher 信息阵^[16-18],用迭代的方法得到一组传感器优化测点。但该方法并不考虑结构质量分布的不均匀性,可能会出现所选择传感器的位置能量低导致信息丢失的情况。基于此,Hemez 等^[19]将有效独立法的概念延伸到根据结构应变能量分布实现传感器位置算法中。有效独立法在计算过程中需要对信息阵进行特征值分解或计算逆矩阵,计算量较大。李东生等^[20]在分析有效独立法与模态动能法关系的基础之上,提出先通过对模态矩阵进行正交三角分解(QR),通过比较其行范数得到有效独立法的系数,进而采用对各待选传感器位置进行排序并迭代依次删除的方法提高有效独立算法的计算效率。

由于传感器易采集布置在能量较大测点上的信息,基于系统能量指标的能量准则得到了重视。比较常见的能量法^[21-22]是从结构某自由度的模态动能或单元应变能出发,选择较大的模态动能或单元应变能的自由度来反映结构的动力特性和损伤信息,从而选择传感器的位置。由于有效独立法可能会选择能量低的传感器位置,一些学者研究了有效独立法和能量法的关系,并在此基础上进行传感器优化布置^[23-24]。1998 年 Papadopoulos 等^[25]提出了模态动能法,对模态动能较大的点进行观测,该方法也是能量法的一种,其衍生出了另外 2 种方法,分别是平均模态动能法和特征向量乘积法,平均模态动能法

计算各可能测点的平均动能,选择较大点作为测点。特征向量乘积法通过计算有限元的模态振型在可能测点的乘积,选择较大点作为测点。能量法高度依赖有限元网格的划,并且在设置传感器时不考虑结构的对称性,为了避免有效独立法和能量法的局限性,Imamovic^[26]提出了有效独立-驱动点残差(Drive-Point Residue, DPR)法,它是单位刚度的模态应变能作为驱动点残差系数来修正有效独立法的传感器布置方案, Jin 等^[27]也进行了 EI 法的改进研究。

模型缩减准则^[28-29]是一种常用的测点选择方法,它将包含主次关系的坐标方程代入系统的动能或应变能中,从而产生缩减的质量或刚度矩阵,逐次迭代,通过缩减后的模型把那些模态反应起主要作用的自由度保留下来作为测点位置。Guyan 缩减法(Guyan Reduction)^[30]、改进缩减聚法(Improved Reduced System, IRS)^[31]、近似循环法(Successive Approximate Redution, SAR)^[32]等都可以用于传感器优化布置^[33]。谢强等^[34]提出了一种基于模型缩减和线性模型估计理论,通过改进缩减系统减少目标模态的自由度数量,将转角自由度通过模型缩减,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影响的新算法。该方法计算比较简单,能够较好地保留低阶模态,但保留的未必是待测模态,存在丢失待测模态的问题。同时模型缩减的过程不可避免地引入了相应的误差,这将增加状态识别的难度。

上述介绍的方法主要基于考虑模态振型向量或模态能量等因素,未考虑模态向量空间交角的情况,模态保证准则(Modal Assurance Criterion, MAC)法可以在选择测点时使量测的模态向量保持较大的空间交角,从而尽可能地保留原模型的特性^[35]。模态置信度 C_{MAC} 的计算公式为

$$C_{MAC_{ij}} = \frac{(\Phi_i^T \Phi_j)^2}{\Phi_i^T \Phi_i \Phi_j^T \Phi_j} \quad (1)$$

式中: Φ_i, Φ_j 分别为第 i 阶和第 j 阶模态向量。

如果 $C_{MAC} = 1$, 则分析结构模型与实测的损伤结构模型模态完全相关,这说明 2 个模型完全相同;如果 $C_{MAC} = 0$, 则两者的模态完全不相关。 C_{MAC} 值越接近 1, 则两者的模态相关性越好。Breitfeld^[36]首先提出了基于 MAC 的传感器优化布置方法,其目标是测点的布置应使 MAC 的非对角元向最小化发展,崔飞等^[37]探讨了这种思路在结构健康状态中的应用。随后,一些学者^[38-40]提出了相应的优化计

算方法,如文献[39]中提出 MAC 非对角元为目标函数,基于列主元正交三角分解(QR)的传感器配置方法。这些方法的基本思想均是使 MAC 的非对角元向最小化发展,最大化各阶模态向量之间的夹角,方便各阶模态信息的识别。由于 MAC 法不需要结构的质量矩阵和刚度矩阵,因而非常容易实施,如序列法(逐步累积法、逐步消减法^[41])、EI 法以及 MAC 混合算法。

传感器位置优化各准则对应的布置方法关系如图 2 所示。

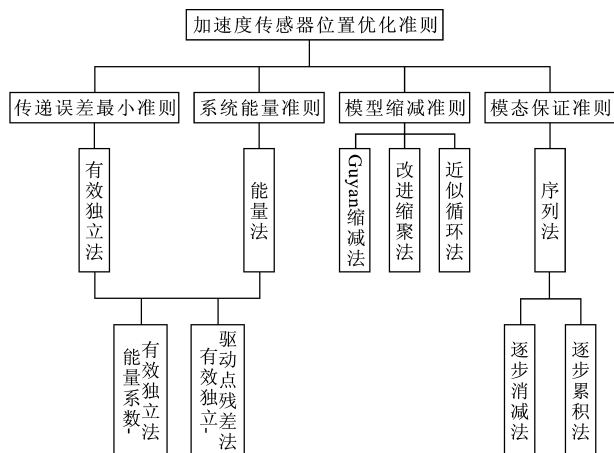


图2 各准则对应布置方法的关系

Fig. 2 Relations of Layout Methods According to Different Criteria

上述的传感器位置优化准则主要针对加速度传感器位置优化布置,并不完全适用于静力应变传感器的优化布置,目前关于静力应变传感器优化布置的研究并不多^[42],这类传感器通常按常规经验布置,而实际应用中桥梁的监测截面位置并不相同。上述准则中,传递误差最小准则和模型缩减准则也适用于静力应变传感器的优化布置,如谭冬莲等^[43-44]研究了基于传递误差最小准则的静力传感器优化配置方法。由于静力传感器优化配置的另一个目的是为了利用有限测点的响应来构造未测量点的响应,Baruh 等^[45]在利用有限测点的响应提取模态滤波器时,采用样条函数插值的方法得到其余各点的响应,以插值拟合的误差最小来配置传感器,得到了简支梁传感器应均匀分布的结论。Pape^[46]将传感器布置于 Chebychev 多项式的零点,使振型的插值误差最小。这些研究局限在数值模拟和简单结构上,未能在实际工程中得到应用。在损伤识别方面,应变模态比位移模态对损伤具有更大的敏感性,而基于应变模态的传感器优化布置的研究却很少,是值得引起重视的发展方向。

3.2 基于损伤可识别性的传感器优化布置方法

基于损伤识别的传感器优化布置要求有限个测点所测的数据能够尽可能地识别出结构的损伤情况,即传感器必须放置在那些对结构损伤最为敏感的位置,得到的结构反应的性能矩阵必须包含尽可能多的结构损伤信息。目前以损伤识别为目标的传感器优化研究较少^[47]。

Cobb 等^[48]最早进行了以结构损伤识别为目的的传感器优化布置研究,在对结构特征灵敏度进行分析的基础上,研究模态变化和结构损伤之间的关系,认为损伤程度受限于模态信息量。随后,一些研究者在灵敏度分析和易损性分析的基础之上进行了相应的研究^[49-52]。基于模态可观测性与基于损伤可识别性的传感器优化布置结果并不一致,适用于模态可观测性准则的方法并不完全适用于基于损伤可识别性的传感器优化布置准则,灵敏度分析法(SAM)和易损性分析在以损伤可识别性的传感器优化布置中具有良好的效果。李毅谦等^[53]研究了基于模态数据的损伤识别问题,开发了一种基于结构振动模态和 Gauss-Newton 算法的结构损伤识别方法。

以结构损伤识别为目的的传感器优化布置研究本质上是由于结构损伤对频率、模态曲率、位移模态、应变模态、柔度矩阵、模态应变能等损伤参量的影响范围不同,根据其影响范围寻求各损伤参量与单元刚度即结构损伤的灵敏度关系,在此基础之上进行的传感器优化布置。易损性分析法与灵敏度分析思路相似,通过找到结构最易破坏的点及其失效路径,进而布设传感器。

目前基于损伤可识别性的传感器优化模型仅包含了振型的损伤灵敏度信息,并且假定对于所有的自由度均可以得到最优的目标振型,然而对于大多数的结构而言,这一假定并不能够成立^[54]。

3.3 其他传感器优化布置方法

传感器常配置在结构系统与有限元分析所对应的表面节点上,是一个组合优化问题,即整数规划问题。基于不同优化准则出现了多种布置方法,传感器位置优化的方法有:EI 法、序列法(逐步累积法、逐步消减法)、WOBI 法、ESPS 法等,应用比较广泛的方法是 EI 法、序列法(逐步累积法、逐步消减法)。这些方法虽容易实施,但也容易产生局部最优解。其他方法有:奇异值分解法、MAC 法、随机类算法、模态动能(MKE)法、神经网络法、蚁群算法、模拟退火算法、Guyan 缩减法。以上综述了基于不同优化准则的计算方法,以下主要介绍近年来快速发展的

随机类优化算法。

虽然随机类优化算法不是传感器优化布置的方法,并且存在着如收敛速度慢、迭代次数多等缺点,但是随机类优化算法具有较好的并行性和搜索全局性的优点,可以取得比较好的配置效果。随机类优化算法主要有遗传算法(GA)和模拟退火算法。Yao 等^[55]最早在有效独立法的基础上,把信息阵行列式的值作为适应值,尝试应用遗传算法改进了以往的迭代算法。Frauchi 等^[56]在传感器优化布置研究中应用了遗传算法。这些研究验证了遗传算法在传感器优化布置中的可行性。随后遗传算法被陆续应用到工程实例中^[57-60],文献[57]中对比了改进遗传算法和传统序列法的配置效果,发现遗传算法能够用较少的传感器获得桥梁的整体性态,在实际应用中具有更高的识别精度。由于遗传算法本身存在早熟问题,为克服早熟问题,一些研究者^[60-62]尝试将有较强局部搜索能力的模拟退火算法引入遗传算法,利用模拟退火算法对遗传算法的个体进行最优选择,从而达到快速搜索收敛的目的。不过这方面的研究目前并不多,但混合遗传算法具有较大的发展潜力。

3.4 优化布置评价准则

Penny 等提出了评价各种传感器布置方法优劣的 5 个量化准则:模态保证准则、修正模态保证准则、振型矩阵的条件数准则、模态动能准则和 Fisher 信息阵准则^[33]。前 3 个准则在保证试验模态向量的正交性方面起到了基本的作用,并且比较容易实施,其中模态保证准则应用最为广泛。但缺点是这些准则仅考虑了各模态空间夹角,不能保证测点对结构待识别参数的敏感性达到最优。模态动能准则能保证传感器布设在反应的幅值点,有利于数据的采集及提高测量的抗噪能力;Fisher 信息阵准则能够保证试验测量信号的估计偏差最小,可以用来评价测量模态与有限元分析模态的一致程度,即噪声对测量模态参数的影响。因此,在实际应用中,应根据具体结构的形式、传感器的数量和测量需求来综合选择优化配置准则和配置方法。

传感器监测项目、传感器数量和传感器安装位置之间的相关性很强,如监测项目的类别从基础上决定了使用的传感器数量、传感器类别以及可能安装的位置。传感器的使用数量除了经济上的考虑外,在一定程度上又受到安装位置的限制。因此在设计传感器系统时,需要综合考虑各种因素。

4 存在的不足

对于桥梁健康监测系统来说,如何使传感器优化布置更好地服务整个系统仍是需要深入研究的领域。虽然传感器优化布置方法很多,但是仍然存在很多缺点,主要体现在以下几个方面:

(1)各类传感器优化方法只是在局部问题中有效,且尚缺乏有效统一的传感器优化布置评估标准。各种算法依据各自评估目标,尽管在形式和理论上有所联系,但对于同一结构,在相同条件下,不同算法得出的结论往往并不相同。对于大型空间结构,不仅存在着许多结构上的不确定性因素,而且工作在复杂的自然环境下,这些不利的条件给结构的监测带来了一定的困难,因此在传感器布置上需要在综合多种方法的基础上,考虑具体的结构特点和测量的条件定出最佳的布置方案。

(2)监测项目的研究应用主要基于先验知识,这使理论研究应用滞后于实际建设的需求。

(3)虽然关于传感器位置的优化已经提出了很多方法和准则,但确定传感器的合适数量依然是传感器优化布置的难点,这方面的研究还比较少。

(4)传感器优化是一种多目标优化,目前传感器布置方法大多是基于最大化系统的可控性或客观性,而不是基于损伤检测,以损伤识别为目标的传感器优化亟待解决。

5 发展趋势

桥梁健康监测系统中传感器系统的主要任务是为损伤识别和状态评估系统提供可靠的桥梁实时结构响应信息。由于具有整体损伤识别能力的模态监测是目前损伤识别领域的研究热点问题,因而基于模态可观测性准则的加速度传感器优化布置研究仍是目前学术界研究的热点领域。传感器优化布置仍存在一些问題,这些方面还有待于研究者在以后的研究中进一步完善。此外,对以下 4 个方面的热点问题的研究对于推进传感器优化布置的发展具有重要意义:

(1)将不同方法相互融合形成新的混合算法,往往具备两者的优点,如 EI 法和 MAC 法结合形成混合算法,同时基于随机类算法、基于损伤敏感度的传感器优化布置方法的研究,也被越来越多的研究者所关注和研究。

(2)对于结构来说,当损伤发生时,损伤部位的应力、应变模态信息或是曲率信息的变化往往比位

移模态更为敏感。各国关于应变模态、曲率模态的研究多集中于损伤识别领域,对传感器关于应变模态、曲率模态信息的采集却未给予重视。因而静力应变传感器优化布置具有很大的发展潜力。

(3)将传感器优化理论方法转化为软件,是理论对实践最有效的指导方式,也是实践对理论最直接的检验。有不少学者开始关注如何提高传感器优化布置中优化算法的计算效率、减少迭代计算量、进行传感器优化工具包开发等^[63-66]。

(4)一个性能良好的传感器系统,能够将经济效益和技术效果很好地结合起来,发挥健康监测系统的预期技术目标,为桥梁状态评估提供可靠的分析数据。从目前已建的桥梁健康监测系统来看,传感器系统的研究设计和安装往往在桥梁建成之后,同时桥梁建设过程中,用于施工监控的传感器和成桥荷载试验传感器的安装往往独立于健康监测系统之外,这些做法既错过了整合获取桥梁原始关键信息的时机,又造成了资源的浪费。因此,健康监测系统的设计应该与桥梁设计相结合、相同步,在桥梁施工过程中结合考虑施工监控、荷载试验设计传感器系统。传感器系统的设计要依据具体桥梁结构的形式、系统监测目的来综合考虑。

6 结 语

传感器优化布置是桥梁结构健康监测系统合理性、准确性、长期性和经济性的关键步骤,本文中通过介绍传感器优化布置问题的由来,从 3 个方面探讨了各种传感器优化布置算法的起源和发展,对传感器优化布置研究工作提供了一定的借鉴。

参考文献:

References:

- [1] 秦 权. 桥梁结构的健康监测[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 37-42.
QIN Quan. Health Monitoring of Long-span Bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 37-42.
- [2] CARNE T G, DOHMANN C R. A Modal Test Design Strategy for Modal Correlation [C]//DEMICHELE D J. Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference. Nashville: Society for Experimental Mechanics, 1995: 927-933.
- [3] 史家钧, 项海帆, 许 俊. 确保大型桥梁安全性与耐久性的综合监测系统[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1997, 25(增): 71-75.

- SHI Jia-jun, XIANG Hai-fan, XU Jun. To Ensure the Safety and Durability of Large Bridge Integrated Monitoring System[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1997, 25(S): 71-75.
- [4] 张启伟, 周 艳. 桥梁健康监测技术的适用性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 54-58.
- ZHANG Qi-wei, ZHOU Yan. Applicability of Bridge Health Monitoring Technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 54-58.
- [5] 丁 峰, 赵 健. 风险分析在特大型桥梁工程上的应用[J]. 桥梁建设, 2005(3): 73-76.
- DING Feng, ZHAO Jian. Application of Risk Analysis to Major Bridge Construction Projects[J]. Bridge Construction, 2005(3): 73-76.
- [6] 于 刚, 孙利民. 断索导致的斜拉桥结构易损性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 323-328.
- YU Gang, SUN Li-min. Vulnerability Analysis of Cable-stayed Bridge Due to Cable Failures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(3): 323-328.
- [7] 缪长青, 李爱群, 韩晓林, 等. 润扬大桥结构健康监测策略[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(5): 780-785.
- MIAO Chang-qing, LI Ai-qun, HAN Xiao-lin, et al. Monitor Strategy for the Structural Health Monitoring System of Runyang Bridge[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(5): 780-785.
- [8] 邬晓光, 徐祖恩. 大型桥梁健康监测动态及发展趋势[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(1): 39-42.
- WU Xiao-guang, XU Zu-en. Development of Long-span Bridge Health Monitoring [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(1): 39-42.
- [9] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(1): 65-69.
- ZHANG Qi-wei. Conception of Long-span Bridge Health Monitoring and Monitoring System Design [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(1): 65-69.
- [10] 邓长根, 吴建华, 甘东华. 钢结构失稳监测方法和失稳监控部件研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(3): 21-25.
- DENG Chang-gen, WU Jian-hua, GAN Dong-hua. Research on Instability Monitoring Methods and Instability Monitoring Components for Steel Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 21-25.
- [11] 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): 506-516.
- LIU Fu-qiang, ZHANG Ling-mi. Advances in Optimal Placement of Actuators and Sensors [J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(4): 506-516.
- [12] 何浩祥, 闫维明, 张爱林. 面向结构健康监测的传感器数量及位置优化研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9): 131-134, 188.
- HE Hao-xiang, YAN Wei-ming, ZHANG Ai-lin. Optimization of Number and Placement of Sensors for Structural Health Monitoring [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 131-134, 188.
- [13] 孙晓丹, 欧进萍. 结构损伤参量灵敏度分析的传感器数量位置优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10): 1530-1535.
- SUN Xiao-dan, OU Jin-ping. Optimal Sensor Placement Based on Sensitivity of Damage Parameters [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(10): 1530-1535.
- [14] 吴 丹, 吴子燕, 杨海峰, 等. 基于两步有效配置法的传感器优化布置[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2008, 27(2): 48-51, 3.
- WU Dan, WU Zi-yan, YANG Hai-feng, et al. Optimal Sensor Placement Base on Effective Two-step Arrangement Approaches [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2008, 27(2): 48-51, 3.
- [15] SHAH P C, UDWADIA F E. A Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Systems [J]. Journal of Applied Mechanics, 1978, 45(1): 188-196.
- [16] KAMMER D C. Sensor Placement for On-orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures [C]//IEEE. Proceedings of the 1990 American Control Conference. San Diego: IEEE, 1990: 251-259.
- [17] KAMMER D C. Effect of Model Error on Sensor Placement for On-orbit Modal Identification of Large Space Structures [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1992, 15(2): 334-341.
- [18] KAMMER D C. Effects of Noise on Sensor Placement for On-orbit Modal Identification of Large Space Structures [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1992, 114(3): 436-443.
- [19] HEMEZ F M, FARHAT C. An Energy Based Optimum Sensor Placement Criterion and Its Application to the Structural Damage Detection [C]//DEMICHELE D J. Proceedings of the 12th International

- Modal Analysis Conference. Honolulu; Society for Experimental Mechanics, 1994; 1568-1575.
- [20] 李东升, 李宏男, 王国新, 等. 传感器布设中有效独立法的简捷快速算法[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(1): 103-108.
- LI Dong-sheng, LI Hong-nan, WANG Guo-xin, et al. Simple and Fast Computation Algorithm of the Effective Independence for Sensor Placement[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(1): 103-108.
- [21] HEO G, WANG M L, SATPATHI D. Optimal Transducer Placement for Health Monitoring of Long Span Bridge[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1997, 16(7): 495-502.
- [22] WORDEN K, BURROWS A P. Optimal Sensor Placement for Fault Detection[J]. Engineering Structures, 2001, 23(8): 885-901.
- [23] LI D S, LI H N, FRITZEN C P. The Connection Between Effective Independence and Modal Kinetic Energy Methods for Sensor Placement[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305(4/5): 945-955.
- [24] 杨雅勋, 郝宪武, 孙磊. 基于能量系数-有效独立法的桥梁结构传感器优化布置[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11): 119-123, 134, 257.
- YANG Ya-xun, HAO Xian-wu, SUN Lei. Optimal Placement of Sensors for a Bridge Structure Based on Energy Coefficient-effective Independence Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11): 119-123, 134, 257.
- [25] PAPADOPOULOS M, GARCIA E. Sensor Placement Methodologies for Dynamic Testing[J]. AIAA Journal, 1998, 36(2): 256-263.
- [26] IMAMOVIC N. Model Validation of Large Finite Element Model Using Test Data[D]. London: Imperial College, 1998.
- [27] JIN H, SONG Y. Sensor Placement Optimization for Damage Detection[C]//BINIENDA W K. Earth & Space 2008: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. New York: ASCE, 2008; 1-7.
- [28] GUYAN R J. Reduction of Stiffness and Mass Matrices[J]. AIAA Journal, 1965, 3(2): 380.
- [29] FLANIGAN C C, BOTOS C D. Automated Selection of Accelerometer Locations for Modal Survey Tests[C]//DEMICHELE D J. Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference. San Diego: Society for Experimental Mechanics, 1992; 1205-1208.
- [30] GUYAN R. Reduction of Stiffness and Mass Matrices[J]. AIAA Journal, 1965, 3(2): 23.
- [31] OCALLAHAN J. A Procedure for an Improved Reduced System (IRS) Model[C]//SEM. Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference. Las Vegas: Society for Experimental Mechanics, 1992; 988-991.
- [32] ZHANG D Y, LI S Y. Succession Level Approximate Reducing (SAR) Technique for Structural Dynamic Model[C]//DEMICHELE D J. Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference. Nashville: Society for Experimental Mechanics, 1995; 435-441.
- [33] PENNY J, FRISWELL M I, GARVEY S D. Automatic Choice of Measurement Locations for Dynamic Testing[J]. AIAA Journal, 1994, 32(2): 407-414.
- [34] 谢强, 薛松涛. 结构健康监测传感器优化布置的混合算法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 726-731.
- XIE Qiang, XUE Song-tao. A Hybrid Algorithm for Optimal Sensor Placement of Structural Health Monitoring[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(6): 726-731.
- [35] PENNY J, FRISWELL M I, GARVEY S D. The Automatic Choice of Measurement Locations for Dynamic Testing[C]//DEMICHELE D J. Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference. San Diego: Society for Experimental Mechanics, 1992; 30-36.
- [36] BREITFELD T. A Method for Identification of a Set of Optimal Measurement Points for Experimental Modal Analysis[C]//DEMICHELE D J. Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference. Nashville: Society for Experimental Mechanics, 1995; 1029-1034.
- [37] 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): 165-169.
- CUI Fei, YUAN Wan-cheng, SHI Jia-jun. Application of Optimal Sensor Placement Applications for Health Monitoring of Bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(2): 165-169.
- [38] 刘娟, 黄维平. 传感器优化配置的修正逐步累积法[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2003, 33(3): 476-482.
- LIU Juan, HUANG Wei-ping. Application of a Cumulative Method of Sensor Placement for Offshore Platforms[J]. Journal of Ocean University of Qingd-

- ao; Natural Science Edition, 2003, 33(3): 476-482.
- [39] 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, 224.
- QIN Xian-rong, ZHANG Ling-mi. Successive Sensor Placement for Modal Paring Based-on QR-factorization[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2001, 21(3): 168-173, 224.
- [40] 袁爱民, 戴航, 孙大松. 基于 EI 及 MAC 混合算法的斜拉桥传感器优化布置[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1): 55-59, 117, 118.
- YUAN Ai-min, DAI Hang, SUN Da-song. Optimal Sensor Placement of Cable-stayed Bridge Using Mixed Algorithm Based on Effective Independence and Modal Assurance Criterion Methods[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 55-59, 117, 118.
- [41] 黄民水, 朱宏平, 宋金强. 传感器优化布置在桥梁结构模态参数测试中的应用[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2): 85-88, 100.
- HUANG Min-shui, ZHU Hong-ping, SONG Jin-qiang. Application of Optimal Sensor Placement in Modal Parameters Test of Bridge Structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 85-88, 100.
- [42] 董晓马. 智能结构的损伤诊断及传感器优化配置研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- DONG Xiao-ma. Research on Damage Self-diagnosing and Sensor Optimal Placement of Smart Structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [43] 谭冬莲, 肖汝诚. 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[J]. 公路, 2006(6): 105-108.
- TAN Dong-lian, XIAO Ru-cheng. Optimal Placement of Static Strain Sensors of Complicated Bridge Structure in Bridge Mmonitoring System [J]. Highway, 2006(6): 105-108.
- [44] 谭冬莲, 肖汝诚. 桥梁监测系统中梁桥静力应变传感器的优化配置[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(5): 66-69.
- TAN Dong-lian, XIAO Ru-cheng. Optimal Placement of Static Strain Sensors of Beam Bridge Structure in Bridge Monitoring System [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 66-69.
- [45] BARUH H, CHOE K. Sensor Failure Detection Method for Flexible Structures[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1987, 10(5): 474-482.
- [46] PAPE D A. Selection of Measurement Locations for Experimental Modal Analysis[C]//DEMICHELE D J. Proceedings of th 12th International Modal Analysis Conference. Honolulu: Society for Experimental Mechanics, 1994: 34-41.
- [47] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Optimum Sensor Placement for Structural Damage Detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(11): 1173-1179.
- [48] COBB R G, LIEBST B S. Sensor Location Prioritization and Structural Damage Localization Using Minimal Sensor Information[J]. AIAA Journal, 1997, 35(2): 369-374.
- [49] 孙小猛, 冯新, 周晶. 基于损伤可识别性的传感器优化布置方法[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(2): 264-270.
- SUN Xiao-meng, FENG Xin, ZHOU Jing. A Method for Optimum Sensor Placement Based on Damage Identifiability [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(2): 264-270.
- [50] 吴子燕, 何银, 简晓红. 基于损伤敏感性分析的传感器优化配置研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 239-244.
- WU Zi-yan, HE Yin, JIAN Xiao-hong. Optiomal Sensor Placement Based on Sensitivity Analysis of Structural Damage [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 239-244.
- [51] 姜绍飞, 杨博, 党永勤. 易损性分析在结构抗震及健康监测中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(2): 15-23.
- JIANG Shao-fei, YANG Bo, DANG Yong-qin. Application of Vulnerability Analysis in Structural Seism and Health Monitoring [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 15-23.
- [52] 徐廷学, 王杰, 顾钧元. 基于最小不可识别损伤模型的传感器优化布置[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(2): 177-180.
- XU Ting-xue, WANG Jie, GU Jun-yuan. Optimization of Sensor Layout Based on Minimum Non-identifiable Damage Models [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(2): 177-180.
- [53] 李毅谦, 向志海, 周马生, 等. 基于模态的损伤识别过程中的传感器优化布置[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(2): 312-315.
- LI Yi-qian, XIANG Zhi-hai, ZHOU Ma-sheng, et al. Optimal Sensor Placement for Mode-shape Based Damage Identification on Bridges [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(2): 312-315.

- [54] 孙小猛. 基于模态观测的结构健康监测的传感器优化布置方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
SUN Xiao-meng. Study on Optimal Sensor Placement for Structural Health Monitoring with Modal Measurements[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [55] YAO L, SETHARES W A, KAMMER D C. Sensor Placement for On-orbit Modal Identification via a Genetic Algorithm[J]. AIAA Journal, 1993, 31(10): 1922-1928.
- [56] FRAUCHI C G, GALLIENI D. Pre-test Optimization by Genetic Algorithm[C]//ISMA. Proceedings of the 19th International Seminar on Modal Analysis, Leuven: ISMA, 1994: 1-6.
- [57] 黄民水, 朱宏平, 李炜明. 基于改进遗传算法的桥梁结构传感器优化布置[J]. 振动与冲击, 2008, 27(3): 82-86.
HUANG Min-shui, ZHU Hong-ping, LI Wei-ming. Optimal Sensor Placement on Bridge Structure Based on Genetic Algorithms[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(3): 82-86.
- [58] 李戈, 秦权, 董聪. 用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的最优布点[J]. 工程力学, 2000, 17(1): 25-34.
LI Ge, QIN Quan, DONG Cong. Optimal Placement of Sensors for Monitoring Systems on Suspension Bridges Using Genetic Algorithms[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(1): 25-34.
- [59] 刘宇, 毕丹, 李兆霞. 大跨斜拉桥基于遗传算法的传感器优化布置方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4): 825-829.
LIU Yu, BI Dan, LI Zhao-xia. Optimal Placement of Accelerometers in Long Cable-stayed Bridges Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(4): 825-829.
- [60] 马广, 黄方林, 王学敏. 基于混合遗传算法的桥梁监测传感器优化布置[J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 191-196.
MA Guang, HUANG Fang-lin, WANG Xue-min. Optimal Placement of Sensors in Monitoring for Bridge Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 191-196.
- [61] WANG L, ZHENG D Z. An Effective Hybrid Optimization Strategy for Job-shop Scheduling Problems[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(6): 585-596.
- [62] 李守巨, 刘迎曦, 冯颖. 基于混合遗传算法的动力系统阻尼参数识别方法[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 551-556.
LI Shou-ju, LIU Ying-xi, FENG Ying. Identification of the Damping Coefficients in Dynamic System Using Hybrid Genetic Algorithm[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(5): 551-556.
- [63] 吴向男, 徐岳, 梁鹏, 等. 桥梁结构损伤识别研究现状与展望[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(6): 49-58.
WU Xiang-nan, XU Yue, LIANG Peng, et al. Research Status and Prospect of Bridge Structure Damage Identification[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(6): 49-58.
- [64] 于金良, 杨东升. 高墩大跨连续刚构桥梁长期健康监测研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(8): 72-74.
YU Jin-liang, YANG Dong-sheng. Study on Healthy Monitoring of High-pier and Long-span Continuous Rigid Frame[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(8): 72-74.
- [65] 周江, 朱华军, 杜胜兵, 等. 斜拉桥施工阶段风险识别及易损性评估[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(9): 79-82.
ZHOU Jiang, ZHU Hua-jun, DU Sheng-bing, et al. Risk and Vulnerability Assessment of Cable-stayed Bridge in Construction Stage[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(9): 79-82.
- [66] 伊廷华, 李宏男, 顾明, 等. 基于 MATLAB 平台的传感器优化布置工具箱的开发及应用[J]. 土木工程学报, 2010, 43(12): 87-93.
YI Ting-hua, LI Hong-nan, GU Ming, et al. Development of MATLAB Based Optimal Sensor Placement Toolbox and Its Application[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 87-93.

