

文章编号: 1001-4888(2010)01-0047-08

残余力向量法在结构损伤识别中的应用研究进展^{*}

王博¹, 何伟^{1,2}, 李静斌³

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 450001; 2. 华北水利水电学院 土木与交通学院, 河南郑州 450011;

3. 郑州大学 土木工程学院, 河南 450001)

摘要: 工程结构的损伤识别技术对于把握结构工作状态及评估结构的安全性及正常使用性能具有重要的意义。近年来基于残余力向量法的损伤识别技术受到了关注并取得了一定的研究成果。文章从基于残余力向量法的损伤识别技术、残余力向量法和灵敏度分析方法相结合、残余力向量法的改进、残余力向量法和人工神经网络技术的结合、残余力向量法和智能算法的融合等 5 个方面综述了目前国内外基于残余力向量法进行结构损伤识别研究的成果。并根据残余力向量法应用上存在的问题展望了应用残余力向量法进行结构损伤识别时在如何减小误差; 如何克服测试信息不完备的影响; 如何进行实际工程损伤识别的研究以及残余力向量法的改进以及残余力向量法和智能算法结合等方面的发展趋势。

关键词: 损伤识别; 残余力向量法; 研究进展

中图分类号: TU311.4

文献标识码: A

0 引言

在结构损伤识别技术中, 基于结构动力学特性的损伤识别方法由于能够较全面地反映结构的刚度、阻尼和惯性特征, 并且识别效率较高, 经济成本相对较低, 现场的工作量小而被人们关注, 特别随着目前高效模块化、数字化的结构动力响应量测技术设备的研制, 基于结构动力学特性的损伤识别方法得到了进一步的应用。

基于动力学特性的结构损伤识别方法主要以模态分析理论为基础, 利用结构的动力响应进行结构性态识别, 它融合了系统识别、振动理论、振动测试技术、信号采集等学科的知识, 目前已经广泛应用在航空航天、机械工程等领域, 它可以不受规模和隐蔽的限制, 只要在结构的在不同位置布置传感器, 通过捕捉结构动力响应参数的变化, 利用结构的模态参数和物理参数的关系, 构成相应的损伤识别指标来判别结构的损伤。在各种损伤识别指标中, 残余力向量法自提出来以后, 以其概念明确, 计算简单, 得到了国内外学者的关注, 取得了较为丰富的研究成果, 下面进行简述。

1 基于残余力向量法的损伤识别技术

当结构有损伤时, 对损伤结构进行振动特性分析, 可获得多阶模态参数, 对于第 s 阶特征值和振型 λ_s, Φ_s , 应满足损伤结构的特征值方程:

$$[(K + \Delta K) - \lambda_{ds}(M + \Delta M)]\Phi_{ds} = 0 \quad (1)$$

^{*} 收稿日期: 2009-05-14; 修订日期: 2009-10-28

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(200804590006); 河南省杰出人才计划项目(084200510003); 河南省陶行知研究会“十一五”规划 2009 年度重点课题(HNTY090049)

通讯作者: 王博(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震等方面的研究工作。E-mail: wangbo@zzu.edu.cn

式中, K, M 分别为结构损伤前的整体刚度矩阵和质量矩阵; $\Delta K, \Delta M$ 分别为损伤所引起的结构整体刚度矩阵和质量矩阵的变化; λ_{ds}, Φ_{ds} 分别为结构损伤后的第 s 阶特征值和振型。

定义第 s 阶残余力向量为:

$$R_s = -(\Delta K - \lambda_{ds} \Delta M) \Phi_{ds} = (K - \lambda_{ds} M) \Phi_{ds} \quad (2)$$

对于损伤结构, 即使 $\Delta K, \Delta M$ 未知, 但由于 λ_{ds}, Φ_{ds} 可测, 同时 K, M 已知, 因此由 (2) 式右边可知, R_s 可求, 结构中可能损伤区域是与对 R_s 有较大贡献的自由度相对应, 对不同的振型可分别计算残余力向量。

1992 年 Zimmerman 和 Kaouk^[1,2] 提出了“子空间转角法”, 即为后来所称的残余力向量法。基于未损伤结构的刚度和质量矩阵、以及实验测得的模态参数(固有频率和振型), 可以计算出各阶模态的残余力向量。此后由 Kahl 和 Sirkis 等学者进行了一系列的研究^[3-5]。1993 年 Baruh 和 Ratan^[6] 用残余力向量法检测了桁架和梁式结构损伤的存在和位置, 结果表明: 如果模型单个单元的误差大于 10%, 损伤检测的结果就不是很准确, 如果不确定因素只发生在部分桁架单元上, 检测方法能容忍更大的误差, 损伤检测的可信度随着损伤程度的减少而降低。

2000 年 G. Ma 与 Lui^[7] 等通过计算损伤结构的残余力向量来确定损伤单元位置, 再通过结构的质量或刚度矩阵的改变来确定损伤。该方法在进行损伤程度的计算中采用了矩阵凝聚方法, 易增大损伤识别结果的误差。

2001 年 Fukunaga^[8] 研究了基于残余力向量法的损伤识别方法。该方法首先利用残余力向量确定损伤单元的大致范围, 再根据残余力向量误差最小来确定损伤的实际位置和程度, 并通过数值算例说明了该方法在对称叠合板结构损伤识别中的应用。该方法的识别结果与有限元模型的精度和测量结果的准确性密切相关。

2007 年 Lopez^[9] 通过计算损伤结构的残余力向量来确定可能损伤单元集合, 通过子空间法来改进有限元模型自由度与实际测试自由度不匹配的问题。

可以看出当模型精确且模态参数测量精度较高时, 基于残余力向量法的损伤识别技术是可行的。但是由于未考虑测试信息不完备性使其应用受到了限制, 此外, 当模型或测试误差较大时, 会出现损伤的误判。

2 残余力向量法和灵敏度分析方法相结合

应用残余力向量法进行结构损伤识别, 是一个逆过程, 其方程欠定次数较高, 因而在方程求解时效率较低, 因此有学者致力于损伤识别效率的提高, 一般作法是先运用残余力向量法进行损伤定位, 再运用灵敏度估计结构的损伤程度。

Ricles 和 Kosmatka^[10] 在 1992 年联合应用测得的模态数据和相关的结构解析模型, 先用残余力向量确定可能存在的损伤区位置, 然后用灵敏度估计质量和刚度的变化程度, 以此识别损伤。

1995 年后, 周先雁、沈蒲生等采用残余力向量法识别了结构的损伤部位, 然后再用加权灵敏度分析的方法识别结构的物理参数, 由此识别结构损伤的严重程度。通过理论分析和混凝土平面框架试验结果表明, 采用损伤结构的残余力向量可以准确地判定框架结构的损伤部位, 并且可由各损伤单元的节点残余力判别该单元的损伤程度, 残余力向量越大, 损伤越严重^[11,12]。

2000 年王中要、郭秀文等^[13] 利用结构损伤后残余力向量, 对连续梁进行了损伤诊断研究, 并根据灵敏度分析来考虑结构物理参数误差对诊断结果的影响, 计算结果表明, 结构存在一定损伤时, 基于残余力向量法对连续梁结构的损伤诊断非常有效, 当结构物理参数有一定的噪声污染时, 仍能给出比较准确的诊断结果, 但是当误差超过 10% 时, 由残余力向量法给出的误差比较大, 结果不能用于实际工程结构的损伤诊断。

残余力向量和灵敏度分析相结合方法在模型精度较高且损伤程度较小时, 可以明显地提高损伤识别效率, 得到较好的识别结果。但是该类方法的缺陷在于未考虑模型误差和测试误差, 也未考虑测试自由度小于模型自由度时的情形, 随着结构损伤程度的增大, 其识别结果误差加大。

3 残余力向量法的改进方法

针对残余力向量法的缺点,1996年 Sheinman^[14]使用改进的残余力向量法来进行结构的损伤检测,取得了较好的效果。

2002年张向东^[15]通过数值模拟证明了改进的残余力向量法可准确地识别结构的损伤部位,且计算工作量小,方法简单,即损伤单元对应的节点残余力明显大于其余非破损单元对应节点的残余力,并采用节点残余力的相对变化率作为判别损伤的依据。设某节点损伤前后的残余力分别为 F_{iu} , F_{id} , 定义残余力的变化率为:

$$v_i = \frac{F_{id} - F_{iu}}{F_{iu}} \quad (3)$$

他认为该方法可大大消除累积误差,还可消除由于数学建模带来的不准确性,并通过实验证明这种方法是可行的。

2004年以来,刘济科、杨秋伟对残余力向量法进行了一系列的研究,2006年提出了一种采用残余力向量法进行结构损伤识别的两步法:通过计算各单元体的损伤定位标准(DLAC)值来判定可能出现损伤的单元;采用刚度联系向量来代表单元体,利用最佳逼近向量法来精确定位并计算损伤程度^[16]。该方法同样未考虑模型误差以及测试信息的不完备性;同时当结构复杂、模型单元较多且为多单元损伤时将会有较大的困难。此外由于该方法只用到一阶模态参数,因此当损伤单元位于振型结点位置及附近时,该方法将不能识别损伤。2006年刘济科、杨秋伟等考虑了模态参数测量不完整性问题,提出了结构损伤识别中的模型缩聚法,将逐级近似模型缩聚法用于工程结构损伤识别,并比较了残余力向量法在各级缩聚模型下的损伤识别结果^[17],但是该方法同样未考虑模型中的测试误差问题。针对直接采用自由度缩聚后的残余力方程进行损伤识别会有较大的误差,2006年杨秋伟、刘济科在分析了模型缩聚给残余力向量法造成的误差原因后,提出了一种改进的残余力向量法,通过一个平面桁架数值仿真分析,表明改进的残余力向量法能够有效地提高识别精度^[18],其改进方式为:

$$F_i^R = F_{id}^R - F_{iu}^R \quad (4)$$

其中, F_i^R , F_{id}^R , F_{iu}^R 分别表示缩聚模型的残余力向量差、损伤后的缩聚模型的残余力向量、损伤前的缩聚模型的残余力向量。

这种通过构建残余力向量差的改进方法可以减小模型误差和模态参数测量误差带来的影响,提高识别的精度,但是当采用模型凝聚时会带来新的计算误差。

4 残余力向量法和人工神经网络技术的结合

1999年于德介、雷慧^[19]提出了一种基于神经网络的结构参数识别方法。该方法以残余力向量作为结构参数识别的网络输入,针对训练样本在数据空间分布不均匀,采用正交空间格点法变换对训练样本数据进行预处理,从而提高了网络收敛速度及参数识别精度,通过算例说明了方法的有效性。

2003年瞿伟廉、黄东梅^[20-22]提出了两种损伤诊断的两步法:分层神经网络两步法和指标分析与反分析两步法。分层神经网络两步法用残余力作为损伤标识量,第一步,将子区域残余力和相应的子区域等级阈值信息输入神经网络进行训练,然后把通过实测得到的损伤子区域残余力向量输入训练好的第一层神经网络进行结构损伤区域的判定;第二步,对损伤区域,将杆端应变模态差信息和相应的杆端节点损伤程度信息输入神经网络进行训练,然后把通过实测得到的损伤杆端应变模态差向量输入训练好的第二层神经网络进行损伤区域内的具体损伤杆端的位置和程度评定。指标分析与反分析两步法中通过对节点残余力向量进行分析来确定结构含有可能损伤杆端的杆件位置,再把可能损伤杆件的杆端损伤因子作为设计变量,以可能损伤杆件的损伤前后的杆端应变模态差向量的2-范数作为目标函数,应用改进的混合遗传算法进行反分析运算,最终得到具体的损伤杆端位置及其损伤程度。该论文通过数值仿真分析说明这两种方法都能得到令人满意的结果,认为由于残余力是一个非直接测量量,它是由损伤结构的频率和位移模态对原结构的刚度矩阵和质量矩阵修正得来的,它对所测量的位移模态的准确

性和完备性、模型的精确程度和模态扩阶技术的要求较高,因而将该方法运用到实际工程中会受到限制。

2007 年 Soonyoung Hong^[23,24]提出将损伤结构残余力向量输入已训练好的 BP 网络,以确定损伤位置,再运用神经网络确定损伤程度的方法,并通过模型算例说明了残余力向量定位是有效和准确的。

以上基于残余力向量法和与人工神经网络技术结合的方法同样未考虑模型和测试的误差及测试信息的不完备性,因而在应用中仍存在许多未解决的问题。

5 残余力向量法和其他智能算法的融合

随着智能计算技术的发展,近几年基于残余力向量法和智能算法相结合的损伤识别法研究取得了一定的进展,主要成果有遗传算法和蚁群算法。

自 1996 年起,Mares C, Surace C 等采用残余力向量和遗传算法相结合的办法来进行损伤的定位和定量研究^[25-29]。

2002 年王爱文^[30]根据模态反问题理论,利用实测模态数据识别结构的物理参数,通过有限元分析并引进遗传算法,反演了结构的基本参数(刚度,阻尼等),提出了通过残余力向量识别结构的损伤部位和损伤程度,但是他没有考虑测试误差和结构分析模型与实际结构之间的差异,在利用人工神经网络识别结构损伤时,输入参数的选择也是值得研究的。

2006 年 He Rongsong, Huang Shunfa^[31]等在识别损伤时同时引进了模拟退火遗传算法。

2006 年孔凡^[32]给出了建立目标函数的残余力向量法,首先从 FEM 工具箱得到结构整体质量矩阵、损伤前单元刚度矩阵、损伤后的频率和振型,然后利用这些参数得到了遗传算法所要优化的目标函数,利用 GA 工具箱实现了遗传算法的运行。为了模拟实际情况,模拟计算时添加了噪声,计算结果表明,在理想情况下,遗传算法能精确地指出损伤的存在、定位与定量;在添加噪声情况下,遗传算法也能够精确地实现损伤诊断的 3 个要求,可满足工程实际要求。但是作者在计算中没有考虑多个振型组合的影响,只应用了单独的一个振型来进行计算,当损伤单元处于振型节点及附近位置时,将可能难以识别损伤;在噪音添加上,作者仅考虑了频率噪声,而未考虑振型噪音,这与实际情况有较大的差异;此外在遗传算法上,作者把初始种群全部设为 1,这也是不合理的,遗传算法的参数选择也存在一定的问题。

2007 年袁颖等提出了一种基于残余力向量法和改进遗传算法相结合的结构损伤识别方法,他以节点的残余力向量构造用于遗传搜索优化的目标函数形式,利用改进的遗传算法进行了噪声条件下的结构损伤定位和定量研究,得出了在无噪声的情况下,使用任意一阶模态数据,残余力向量法都能够对损伤进行准确定位;由于振动测试数据中往往包含噪声,导致运用残余力向量法进行损伤识别完全不可行的结论^[33-35]。

2008 年于繁华^[36]研究了利用残余力向量和灰色粒子群算法结合进行损伤识别的方法,结果表明,在无噪声的情况下,识别效果很好,悬臂梁发生比较小的损伤时,也能很好地识别结构的损伤;在频率噪声低于 5%、振型噪声低于 10% 的情况下,利用该方法进行损伤识别,也能得到比较好的结果;在频率噪声 10%、振型噪声 15% 的情况下,利用该方法,识别效果不能令人满意,如果单元损伤比较小时,将不能正确识别出损伤单元,这说明该方法在抗噪声方面具有一定的局限性。此外作者通过对悬臂梁和桁架进行损伤识别比较,得出利用该方法对简单结构进行损伤识别将能得出比较好的结果,而对复杂结构的识别效果相对比较差的结论。

2008 年 Yun 和 Ogorzalek^[37]等提出首先确定可能损伤单元集合,再通过稳态遗传算法进行优化以得到损伤单元参数的损伤识别方法。在该方法中利用残余力向量对损伤的敏感性来确定可能损伤单元集合。

基于残余力向量法和其他方法相结合的研究也有文献报道。如 Li Cuiping, Kentucky 等^[38]研究了残余力向量定位,混合法定量的损伤识别方法。2005 年张祯^[39]结合测得的模态数据同相关的结构解析模型,采用由残余力向量确定可能损伤的位置和范围,再运用应变频响函数进行结构损伤识别,研

究表明如果可以获得连续的信息,使用个数少于或等于单元自由度数的实测模态可以确定损伤的程度。

2009年王博、何伟^[40,41]等研究了首先通过改进的残余力向量确定损伤单元大致位置,再通过频率摄动来确定损伤程度和位置的损伤识别方法。并通过数值模拟证明该方法可减小模型误差和测试误差的影响,有效地避免“伪损伤”和对称结构造成多种识别结果的现象,具有较强的噪声鲁棒性,识别结果准确。特别是对于复杂结构多单元损伤时,该方法可以显著减小损伤识别计算次数,提高识别效率和精度,具有较好的应用前景。

残余力向量法和智能算法的融合方法可以充分发挥智能算法计算效率较高的特点,而且由于利用了智能算法的抗噪性,对提高损伤识别结果的准确性有积极的作用,但是智能算法中相关参数的选取对结果的影响值得研究。

总的来看,残余力向量法的优势体现在其对损伤单元的敏感性,从理论上讲,极小的损伤也可产生较大的残余力向量,可据此判定损伤。但残余力向量法的缺陷在于其对模型的精度和测量精度依赖性强,当模型误差或振型测试误差较大时,有可能产生误判。此外当测试信息不完备时,单一地运用残余力向量进行损伤识别比较困难。

6 残余力向量法研究发展趋势

目前国内外对残余力向量法的研究已取得了一定的进展,但是研究成果与实际工程应用尚有一定距离,在未来的研究工作中,作者认为如下几点需要加强研究:

(1) 如何减小误差的研究。由于残余力向量不能直接测量得到,而是通过公式(2)计算得出,因此环境因素、数据处理误差、数值模型与实际结构的差异、测试的精度等对识别结果都会产生很大的影响,如何减小各因素产生误差对结果的影响是一个值得研究的课题。文献^[42,43]等采用了滤波及统计的方法进行降噪。

(2) 如何克服测试信息不完备的影响。目前运用残余力向量法进行结构损伤识别时,由于模型自由度大于可测试自由度而采用模型缩聚和振型扩展技术,但是模型缩聚会带来新的误差,且现有的振型扩展方法基本上都是基于完好结构的有限元模型而未考虑结构的损伤影响,当损伤位置位于测量区域时,用这些方法扩展的振型会有较好的精度,但当损伤位置位于测量区域外时,扩展的振型几乎不能用于损伤识别^[44],如何解决这些问题值得研究。

(3) 如何进行实际工程损伤识别的研究。纵观国内外相关研究文献,目前基于残余力向量的损伤识别方法基本上都是针对一些规模较小、结构形式简单的结构,对于实际工程,特别是一些体积较大、形式复杂和冗余度高的结构,该方法是否适用以及如何使用值得研究。

(4) 残余力向量法的改进研究。自残余力向量法提出来后,研究发现直接用残余力向量进行损伤识别,当考虑一定的误差时会产生结果误判,而对残余力向量法进行改进是发挥其优势和改善其缺陷的一个合理方法,但是如何改进也是值得研究的。

(5) 联合残余力向量法和智能算法的研究。损伤识别是一个逆过程,在识别方程的求解中一般会出现计算效率低,结果不唯一的问题,而智能算法具有效率较高和一定抗噪性的特点,因此如何联合残余力向量法和智能算法,如何建立合理的目标函数,如何设置智能算法中的相关参数也是需要研究的。

此外将残余力向量法与其它交叉学科中的损伤识别技术结合的研究。由于工程结构的复杂性,采用单一的理论来完全解决其损伤识别技术具有极大的困难,将残余力向量法和信息技术、人工智能、控制理论和材料科学等多学科技术结合起来具有更多的优势,这也将是未来研究的一个前沿课题。

7 结语

损伤识别中的残余力向量法自提出后,在国内外取得了一定的研究成果。文章依据损伤识别中残余力向量法应用上的差异分别从残余力向量识别技术及其改进以及残余力向量法与灵敏度分析方法、人工神经网络和智能算法相结合等方面综述了国内外研究成果。根据目前残余力向量法应用上存在的问题对误差的减小、测试信息不完备的克服、残余力向量法的改进、残余力向量法和智能算法的联合等

方面展望了应用残余力向量法进行结构损伤识别研究的发展趋势。

参考文献:

- [1] Zimmerman D C, Kaouk M. Structural damage detection in beam structures using a subspace rotation algorithm [J]. AIAA Journal, 1992, 34(12): 2341—2350.
- [2] Zimmerman D C. Eigenstructure assignment approach for structural damage detection[J]. AIAA Journal, 1992, 30(7): 1848—1855.
- [3] Kahl K, Sirkis J S. Damage detection in beam structures using subspace rotation algorithm with strain data[J]. AIAA Journal, 1996, 34(12): 2609—2614.
- [4] John B K, James M R. Damage detection in structures by modal vibration characterization[J]. J. Struct. Engrg, 1999, 125(12), 1384—1392.
- [5] Lim, Tae W, Kashangaki, Thomas A L. Structural damage detection of space truss structures using best achievable eigenvectors[J]. AIAA Journal, 1994, 32(5): 1049—1057.
- [6] Baruh H, Ratan S. Damage detection in flexible structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 166: 21—30.
- [7] Ma G, Lui, Eric M. Structural damage identification using system dynamic properties[J]. Computers and Structures, 2005, 83(27): 2185—2196.
- [8] Fukunaga Hisao, Kameyama Masaki, Ogi Yoshiro. Damage identification of laminated composite structures based on dynamic residual forces[J]. Advanced Composite Materials, 2001, 10(2-3): 209—218.
- [9] Lopez, Frank P, Zimmerman, David C. Structural damage localization using element signature recognition[J]. AIAA Journal, 2007, 45(1): 71—78.
- [10] Ricles J M, Kosmatka J B. Damage detection in elastic structures using vibration residual forces and weighted sensitivity[J]. AIAA Journal, 1992, 30: 2310—2316.
- [11] 周先雁, 沈蒲生, 易伟建. 混凝土平面杆系结构破损评估理论及试验研究[J]. 湖南大学学报, 1995, 22(4): 104—109 (Zhou Xianyan, Shen Pusheng, Yi Weijian. Theory and test research on damage assessment of concrete plane framed structures[J]. Journal of Hunan University, 1995, 22(4): 104—109 (in Chinese))
- [12] 周先雁, 沈蒲生, 程翔云. 用振动参数识别技术对混凝土框架进行破损评估[J]. 土木工程学报, 1998, 31(2): 39—45 (Zhou Xianyan, Shen Pusheng, Cheng Xiangyun. Damage assessment of reinforced concrete structures by vibration parameter identification technique[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(2): 39—45 (in Chinese))
- [13] 王中要, 郭秀文, 王珂, 柴文广. 用残余力向量进行连续梁损伤诊断[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(5): 64—67 (Wang Zhongyao, Guo Xiuwen, Wang Ke, Chai Wengguang. Damage Diagnosis research for Continuous Beam Based on Residual Force Vector[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2000, 25(5): 64—67 (in Chinese))
- [14] Sheinman I. Damage detection and updating of stiffness and mass matrices using mode data[J]. Computers and Structures, 1996, 59(1): 149—156.
- [15] 张向东. 基于振动的损伤检测方法的理论和实验研究[D]. 太原: 太原理工大学硕士学位论文, 2002 (Zhang Xiangdong. Theoretical and experimental studies of the damage detection by the vibration method[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2002 (in Chinese))
- [16] 刘济科, 杨秋伟. 基于残余力向量的结构损伤识别两步法[J]. 中山大学学报, 2004, 43(4): 1—4 (Liu Jike, Yang Qiuwei. A Two-step method for structural damage identification based on residual force vector [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(4): 1—4 (in Chinese))
- [17] 刘济科, 杨秋伟, 邹铁方. 结构损伤识别中的模型缩聚问题[J]. 中山大学学报, 2006, 45(1): 1—4 (Liu Jike, Yang Qiuwei, Zou Tiefang. On the Model Reduction Techniques in Structural Damage Identification [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006, 45(1): 1—4 (in Chinese))
- [18] 杨秋伟, 刘济科. 损伤识别一种改进的残余力向量法[J]. 固体力学学报, 2006, 27(1): 83—85 (YANG Qiuwei, LIU Jike. An Improved Method for Structural Damage Identification Based on Residual Force Vector[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(1): 83—85 (in Chinese))
- [19] 于德介, 雷慧. 一种基于神经网络的结构参数识别方法[J]. 湖南大学学报, 1999, 26(4): 39—44 (Yu Dejie, Lei Hui.

- A method for structural parameters identification using neural networks [J]. Journal of Hunan University, 1999, 26(4): 39—44 (in Chinese))
- [20] 黄东梅. 高耸塔架结构节点损伤的两步诊断法[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2003 (Huang Dongmei. Two-step detection approach to joint damage in high-rise tower structures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003 (in Chinese))
- [21] 瞿伟廉, 黄东梅. 高耸塔架结构节点损伤基于神经网络的两步诊断法[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 143—149 (Qu Weilian, Huang Dongmei. Two-step detection approach to joint damage in high-rise tower structures by using artificial neural network [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(2): 143—149 (in Chinese))
- [22] 瞿伟廉, 黄东梅. 大型复杂结构的两阶段损伤诊断方法[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 72—78 (Qu Weilian, Huang Dongmei. Two-step damage diagnosis methods of large and complex structures [J]. World Information On Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 72—78 (in Chinese))
- [23] Soonyoung Hong. An effective data mining approach for structure damage identification [D]. The Ohio State University, 2007.
- [24] Soonyoung Hong, Herman Shen M H. A novel online structure damage identification using Principal Component Analysis [C]. Processing of 2007 ASME Power Conference, 2007: 367—374.
- [25] Mares C, Surace C. An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 195(2): 195—215.
- [26] Chou Junghuai, Ghaboussi J. Genetic algorithm in structural damage detection [J]. Computers & Structures, 2001, 79(14): 1335—1353.
- [27] Kaazem M, Ramin N. Structural damage detection by genetic algorithms. AIAA Journal, 2002, 40 (7): 1395—1401.
- [28] Ananda R M, Srinivas J, Murthy B S N. Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms [J]. Computers and Structures, 2004, 82(11-12): 963—968.
- [29] Ricardo P, Ronald T. Structural damage detection via modal data with genetic algorithms [J]. J. Struct. Engrg., 2006, 132(9): 1491—1501.
- [30] 王爱文. 建筑结构动力特性参数反演方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文, 2002 (Wang Aiwen. Methods and Research of Inverse Problems about Structural Parameters of Dynamic Behaviors [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002 (in Chinese))
- [31] He Rongsong, Huang Shunfa. Damage detection by an adaptive real-parameter simulated annealing genetic algorithm [J]. Computers & Structures, 2006, 84(31-32): 2231—2243.
- [32] 孔凡. 基于遗传算法的结构健康监测[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2006 (Kong Fan. Structure health monitoring using genetic algorithms [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2006 (in Chinese))
- [33] 袁颖, 林皋, 柳春光, 周爱红. 遗传算法在结构损伤识别中的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(4): 369—374 (Yuan Ying, Lin Gao, Liu Chunguang, Zhou Aihong. Study on an application of genetic algorithm to damage identification [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(4): 369—374 (in Chinese))
- [34] 袁颖, 林皋, 闫东明, 周爱红. 基于残余力向量法和改进遗传算法的结构损伤识别研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(2): 224—230 (Yuan Ying, Lin Gao, Yan Dongming, Zhou Aihong. Study on structural damage identification based on residual force method and improved genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(2): 224—230 (in Chinese))
- [35] 袁颖, 林皋, 周爱红, 闫东明. 基于改进遗传算法的桥梁结构损伤识别应用研究[J]. 应用力学学报, 2007, 24(2): 186—190 (YUAN Ying, LIN Gao, ZHOU Aihong, YAN Dongming. Improved Genetic Algorithm for Bridge Damage Detection [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(2): 186—190 (in Chinese))
- [36] 于繁华. 基于计算智能技术的桥梁结构损伤识别研究[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2008 (Yu Fanhua. Research on Detecting Damage of Bridge Structure Based on Computational Intelligence [D]. Changchun: Jilin University, 2008 (in Chinese))
- [37] Yun G J, Ogorzalek K A, Dyke S J, Song W. A structural damage detection method based on subset selection and evolutionary computation [C]. Proceedings of the 2008 Structures Congress, 2008: 24—26.

- [38] Li C, Smith S W. Hybrid approach for damage detection in flexible structures[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1995, 18 (3): 419—425.
- [39] 张祯. 基于应变频响函数的结构损伤识别[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2005 (Zhang Zhen. Structural Damage Identification Using Strain Frequency Response Function (SFRF) Based Method[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2005(in Chinese))
- [40] Wang Bo, He Wei. A New Method Based on Matrix Perturbation and Improved Residual Force Vector for Structural Damage Detection[C]. Processings of 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009, 3: 61—64.
- [41] He Wei, He Rong, Li Yawei. Research on Damage Orientation by General Residual Force Vector and its Implementation[C]. Processing of 2009 I International Conference on Mechanical and Electrical Technology, 2009: 227—232.
- [42] Bahlous S E, Abdelghani M, Smaoui H. A modal filtering and statistical approach for damage detection and diagnosis in structures using ambient vibrations measurements[J]. Journal of Vibration and Control, 2007, 13(3): 281—308.
- [43] Paul Williams. Structural damage detection from transient responses using square-root unscented filtering[J]. Acta Astronautica, 2008, 63(11-12), 1259—1272.
- [44] 李晶. 结构损伤识别几种方法的比较[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2008 (Li Jing. Comparison of Several Methods for Detecting Damage of Structures[D]. Changchun: Jilin University, 2008(in Chinese))

Development and Application of Residual Force Vector Method in Structure Damage Identification

WANG Bo¹, HE Wei^{1,2}, LI Jing-bin³

(1. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Henan 450001, China; 2. School of Civil Engineering and Communication, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Henan 450011, China; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Henan 450001, China)

Abstract: In engineering the structure damage identification technology is of great significance to grasp structure working condition and to assess its safety and normal service performance. In recent years, the method based on residual force vector (RFV) and applied in structure damage identification has been concerned and some achievements were achieved. This paper summarized the achievements of RFV method and applications in structure damage identification from following 5 aspects, including RFV method, combined RFV with sensitivity analysis method, improved RFV method, combined RFV with artificial neural network technology, compromised RFV and intelligent algorithm. According to the problems emerged from the application of RFV used in structural damage identification, the development trend of RFV method was predicted, such as the error reduction, the overcoming of influences of incomplete measurements data, the application of RFV in actual project, the improvement of RFV, the combining of RFV method with other intelligence algorithms and so on.

Keywords: damage identification; RFV method; advance in research