

基于多策略判决的斜拉索参数识别系统研究

章联军, 王晓东, 周 宇, 赵兴奎, 占 晴

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 鉴于传统斜拉索监测系统中采用的模态参数识别方法对信号处理误差较大、系统的鲁棒性较差的问题, 通过对多种模态分析算法的比较并结合综合的判决条件得出较准确的模态参数, 设计并实现了基于多策略判决的斜拉索参数识别系统实现信号管理及分析处理, 并将结果以 GUI 界面予以显示. 进行了实际工程的应用测试, 测试表明该系统的分析处理能使基频值更加精确, 并具有很好的时效性和可操作性.

关键词: 多策略判决; 模态分析; 基频

中图分类号: TP207

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 04-0040-04

斜拉索是斜拉桥的主要承重构件之一, 斜拉桥桥跨结构的重力和桥上活动载荷几乎全部通过斜拉索传递到塔柱上, 斜拉索的索力是反映上述结构极其的重要参数之一, 其大小直接控制着整个桥面系统的内力分布和线型, 关系到斜拉桥主梁及塔柱的受力状况, 影响着斜拉桥的使用寿命. 因此, 索力监测成为斜拉桥健康状态监测的关键技术, 它决定了桥梁监测系统的可扩展性、通用性、稳定性和可靠性等质量指标.

传统的斜拉索监测系统主要是采用模态参数识别方法中的时域法或者频域法中的一种来识别斜拉索的模态参数, 并根据提取出来的基频计算斜拉索索力. 此类监测方法对采样信号的要求较高, 在拉索监测环境比较恶劣的情况下, 得到的采样信号往往噪声比较大, 甚至会出现噪声信号将拉索振动模态信号淹没的情况^[1]. 因此在这种情况下, 传统斜拉索参数识别系统的输出结果误差就比较大, 系统的鲁棒性较差.

为了在采样信号较差的情况下得到较为理想的自由响应信号以及增强斜拉索监测系统的鲁棒性, 笔者设计开发并实现了基于多策略判决的斜拉索参数识别系统.

1 多策略基频识别分析技术

模态参数辨识方法主要有频域和时域两种方法, 其中频域法是目前主流的模态分析方法, 其最大优点是在利用频域平均技术的情况下, 可以最大限度地抑制噪声影响, 从而可以更加方便地解决系统模态定阶的问题. 但是, 频域法同样存在如功率泄漏、频率混叠、离线分析等问题. 另外, 在利用频域模态法识别系统参数时, 必须已知系统的激励信号, 因此在进行系统模态分析时, 就需要增加比较复杂的激励设备. 但是对于如斜拉桥大型建筑来说, 一般情况下激励信号是无法测得的, 往往只能测得结构系统在自然力(环境激励)或工作动力激励下的响应信号^[2]. 因为拉索的激励信号往往是环境激励, 很难获得其激励信号值, 因此频域法不适合拉索的模态参数识别.

在多策略提取算法中主要采用了经典的 AR 谱估计算法、Music 谱估计、Burg 功率谱、SSI 估计、Mcov 算法以及 ERA 算法等. 每种算法均可以独立地运行, 并计算出斜拉索振动系统的基频值, 但在某些环境恶劣的情况下, 得到的斜拉索随机响应信号较差, 会导致某种或者某几种算法无法准确

收稿日期: 2012-07-31.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(61141015); 浙江省自然科学基金(Y1110161); 宁波市自然科学基金(2011A610181);

宁波大学科研项目(XYL09008).

第一作者: 章联军(1980-), 男, 浙江兰溪人, 助理研究员, 主要研究方向: 信号传输与处理及网络通信. E-mail: zhanglianjun@nbu.edu.cn

地得到斜拉索基频值。在此情况下,文中提供的多策略分析方法可以在多种算法对信号分析处理后,选取最优的基频值。这样不仅增加了系统的抗噪声性能,同时也增加了系统的鲁棒性和可靠性。另外,还可以通过修改系统的配置文件选择不同的算法进行组合,适用各种工程需求选择最优组合方案求出的最优基频值^[3]。

2 多策略基频提取分析系统功能与实现

多策略基频提取分析系统主要包含了以下几方面的内容:斜拉索振动信号的采集、振动信号的预处理、多策略的参数识别以及经过综合判决得到斜拉索的基本模态参数,其系统的具体控制结构如图1所示。

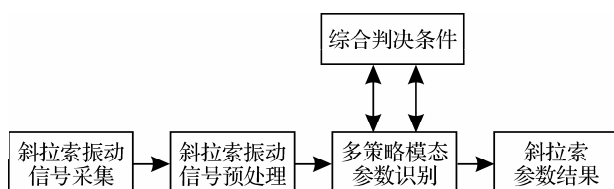


图1 系统参数辨识控制结构

其中信号管理模块主要负责斜拉索振动信号的添加与删除,并且可以在添加斜拉索振动信号的过程中,保存斜拉索的各种理论参数及采集数据的现场测试环境等属性,并将保存的采样数据传递供给信号预处理模块作进一步的处理。

依据信号预处理的基本原理可知,直接采集到的斜拉索振动信号包含了较多的毛刺噪声、随机噪声和测量噪声等,这样的数据不适合直接进行模态参数的识别。为了获得较为理想且适合后期模态处理的自由响应信号,需要对原始采样信号进行适当的预处理。为此,笔者引入了信号预处理模块,其中预处理模块主要有以下几种算法分模块组成:去直流、小波去噪、多割线的随机减量法、prony 去多项式、重采样、去除毛刺噪声、五三平滑等于处理模块。经过这些预处理后的信号就可直接送至多策略参数识别模块,然后由其计算系统的模态参数并做后期处理^[4]。

利用 Matlab 中的 GUI 工具开发预处理模块,其主要设计思路如下所示:

- (1) 首先定义各种预处理算法;
- (2) 在执行信号预处理时,从定义的预处理算

法中选取将要执行的算法,按照读取到的算法进行处理;如果读取到的执行算法为空,则系统报错。

(3) 进行预处理时,分别对每种预处理算法进行分别处理。

(4) 对预处理之后的结果进行保存。

图2即为该系统信号预处理设计界面。

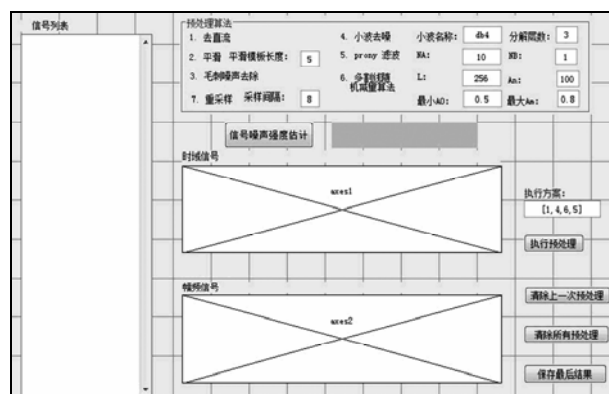


图2 信号预处理界面设计

根据多策略基频识别的设计原理,从预处理模块接收的数据进行模态参数识别,从而确定出斜拉索的振动基频。在该过程中,此模块不仅可以对预处理之后的数据进行分析识别,还可以对原始采样信号进行分析识别。但是由于单一的基频识别方法存在一定程度上的误差,为此笔者采用多策略模态参数辨识方法进行斜拉索的模态参数的识别,充分发挥其组合优势。系统运行的界面如图3所示。

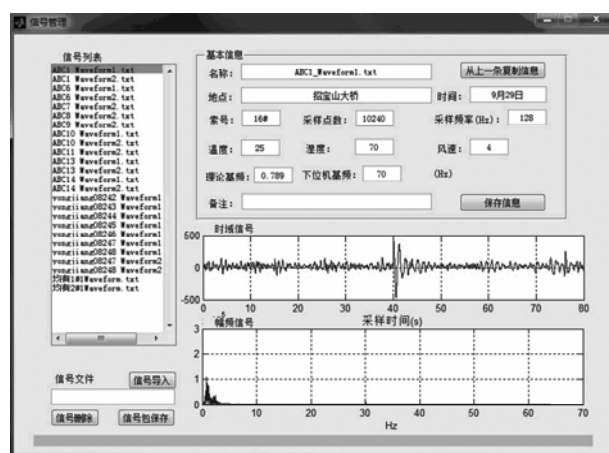


图3 信号管理界面

(1) 定义各种基频提取算法参数文件 alg Params.txt,在进行基频提取时,从该文件中读取

各种算法所需要的参数,如果该文件不存在,系统则提示错误;

(2) 选择需要进行基频提取的信号,此时有原始采集信号和预处理之后的信号可供选择;

(3) 选择进行基频提取的算法,此时可以选择一种算法单独进行处理,也可用以进行综合算法处理.综合算法是将所有算法进行提取之后选择最优解为系统的基频值,同时将基频值保存以供索力计算使用;

(4) 修改各种基频提取算法的参数值.

3 测试与应用

3.1 测试环境说明

宁波甬江大桥为独塔斜拉桥,由东西引桥和主桥组成跨度为(74.5+258+185+49.5)m,全长 567 m.梁高 2.5 m,桥面宽 29.5 m,塔高 148.4 m.梁体为预应力钢筋混凝土结构,截面形式为单室双箱,中间部分为开口,即只有上板而无下板.但两侧的闭口箱梁之间每隔 4 m 有一加劲竖板相连.斜拉索在梁上索距 8 m,塔上索距 4 m,全桥共 11 对,呈竖琴式布置.双面索的 2 个索面相互平行,相距 17.5 m,置于人行道内侧.考虑到斜拉索维护和更换方便及当时的张拉能力,将每索分为 4 束,根据受力需要每束中含 $\Phi 5$ 高强钢丝 163 丝(第 1 对)、211 丝(第 2~10 对)、265 丝(第 11 对),共 3 种规格.钢丝的标准强度为 1 570 MPa,设计安全系数 $K = 2.5$.

3.2 测试结果分析

以宁波甬江大桥的 11 号拉索为测试对象,测试所用到的数据处理主要包含两部分内容,即拉索信号预处理和基频计算.其中,采用的预处理方法主要是去直流、去多项式、小波去噪、去除毛刺噪声、平滑以及重采样和改进的随机减量等技术.基频计算主要有 AR 谱估计、Music 谱估计、Burg 功率谱、SSI 估计、Mcov 算法以及 ERA 估计等技术.

文中所采用的相对误差分析公式如下:

$$err = [(f_{cal} - f_{ther}) / f_{ther}] \times 100 \%,$$

式中, err 表示相对误差, f_{cal} , f_{ther} 分别表示斜拉索的计算机配置与理论基频值.

根据表 1 的实测结果,显示了不同的基频识别算法在不同信号中所取得结果误差.从中可以明

显地分析出 AR 谱估计、Burg 功率谱、Mcov 谱以及 Music 谱所到的结果误差较大,ERA 算法以及 SSI 算法在各种信号下所取得的结果误差较小.

表 1 测试数据处理算法对比分析

处理 信号	基频提取算法	理论值/ Hz	实测值/ Hz	相对误 差/%
人工 激励 5 倍 放大	AR 谱估计	1.207	0.766	36.54
	Burg 功率谱估计	1.207	0.766	36.54
	Mcov 谱估计	1.207	0.766	36.54
	Music 谱估计	1.207	1.156	4.23
	ERA 算法	1.207	1.196	0.91
	SSI 算法	1.207	1.205	0.17
人工 激励 无放 大	AR 谱估计	1.207	0.940	22.12
	Burg 功率谱估计	1.207	1.010	16.32
	Mcov 谱估计	1.207	0.940	22.12
	Music 谱估计	1.207	0.594	50.79
	ERA 算法	1.207	1.117	7.46
	SSI 算法	1.207	1.259	4.31
自然 激励 5 倍 放大	AR 谱估计	1.207	1.094	9.36
	Burg 功率谱估计	1.207	1.094	9.36
	Mcov 谱估计	1.207	1.094	9.36
	Music 谱估计	1.207	1.094	9.36
	ERA 算法	1.207	1.231	1.99
	SSI 算法	1.207	1.196	0.91
自然 激励 无放 大	AR 谱估计	1.207	0.828	31.40
	Burg 功率谱估计	1.207	0.836	30.74
	Mcov 谱估计	1.207	0.844	30.07
	Music 谱估计	1.207	1.125	6.79
	ERA 算法	1.207	1.094	9.36
	SSI 算法	1.207	1.195	0.99

由于频域模态参数辨识方法本身所固有的如功率泄漏、频率混叠、离线分析等问题,以及造成在信号基频提取过程中产生较大的误差.时域模态参数辨识方法克服了频域模态方法的缺点,具有较好的基频提取效果.从结果中也可明显地得出,属于时域模态参数辨识的 ERA 算法和 SSI 算法比属于频域模态方法的 AR 谱估计、Burg 功率谱、Mcov 谱以及 Music 谱更能够得到误差较差的

基频值,并且 ERA 算法与 SSI 算法所得到的结果误差均在工程要求的 5% 的误差范围以内,这更进一步地证明了文中算法的可行性与可靠性。

误差较大的情况主要出现在频域算法提取结果中。系统在激励信号强度较大的情况下,可以得到更为准确的基频值,同样在进行信号采集的过程中,对采集到的原始信号进行适当地放大,对信号后续处理是极为有利的,比如能更加有利于斜拉索响应信号的提取、减少了信号预处理的复杂性以及可以得到更加精确地基频值^[5]。

4 结论

将改进的随机减量技术与重采样技术等预处理算法和 ERA、SSI 等经典模态参数识别算法应用在拉索基频分析系统中,使系统具有较强的抗噪性和鲁棒性。同时利用 Matlab 的 GUI 工具箱,完成了信号预处理模块以及多策略基频识别模块的设计与实现,实现了斜拉索模态参数识别的基频检

测系统的开发。同时将该系统应用到宁波甬江大桥上进行实际工程测试,测试结果表明较之其他同类系统而言,本文设计的系统具有计算精度高、操作简单、鲁棒性强等优点,在斜拉桥索力检测的工程应用中具有较强的推广价值。

参考文献:

- [1] 高至飞,于向东,钱春阳. 随机减量法识别铁路桥模态参数的试验与研究[J]. 广东土木与建筑, 2006, 10(10): 38-40.
- [2] 孙伟,何小元,黄跃平等. 拉索模型模态参数识别的实验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(6):88-94.
- [3] 占晴,周宇,叶庆卫,等. 基于 ERA 算法的大桥斜拉索索力检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(8): 743-747.
- [4] 赵兴奎,周宇,李周至,等. 基于传感器的斜拉索基频提取的混合算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(2):380-382.
- [5] 叶庆卫,赵挺凯,周宇,等. 基于模态准小波的密频模态参数识别[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(2):195-201.

Cable-stayed Parameter Identification System Based on Multi-strategy Judgment

ZHANG Lian-jun, WANG Xiao-dong, ZHOU Yu, ZHAO Xing-kui, ZHAN Qing
(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Modal parameter identification methods used in the traditional cable-stayed monitoring system have produced significant errors in signal processing, resulting the poor system performance. In this paper, based on analyses and comparison of several modal analysis algorithms and accurate modal parameters obtained by comprehensive judgment conditions, a cable-stayed parameter identification system is designed using multi-strategy judgment, in which the signal management and processing programs are implemented, and the results are displayed via graphical user interface. The real-time test results show that more accurate base frequency value can be obtained using the proposed system with good timeliness and operability.

Key words: multi-strategy judgment; modal analysis; base frequency

(责任编辑 章践立)