

基于特征系统实现算法的嵌入式桥梁远程索力检测系统

周红琼, 闵捷, 周宇*, 王晓东

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 设计了一个基于模态分析技术的嵌入式索力检测系统。其选择使用具有较好性能及计算精度的特征系统实现算法识别拉索的各阶模态频率, 并利用基于频域平滑的重采样技术和随机减量技术对振动信号预处理以得到自由响应信号; 基于 ARM 芯片和 Linux 平台, 使用嵌入式 J2SE 技术开发实现了监测系统, 并进行了实际工程应用测试。结果表明: 在嵌入式系统中实现的预处理算法和特征系统实现算法能够较精确地识别出大多数情况下拉索振动信号的基频值, 并据此计算出索力值, 设计的嵌入式索力检测系统具有有效性和实用性。

关键词: 模态分析; 嵌入式系统; 特征系统实现算法; 索力

中图分类号: U447; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 01-0113-06

近年来, 桥梁损伤诊断与健康监测已成为国内外的研究热点^[1]。桥梁结构具有不同于其他结构的特征, 其一, 桥梁结构所承受的力学环境非常复杂, 不同时刻的载荷也在发生变化; 其二, 桥梁所处的环境极为恶劣, 常年受到化学物质腐蚀、风雨侵蚀及其他不利的气候环境影响; 另外, 桥梁结构由于设计上的考虑不周、施工质量低劣、使用不当、维修失常等都会使导致桥梁结构发生健康事故, 因此, 把握桥梁结构在营运期间的承载能力、营运状态、安全性和耐久性, 建立桥梁结构健康监测系统是保障社会公共安全的迫切需要^[2-3]。

嵌入式技术是远程监控系统开发的主流技术, 可以在一个片上系统中实现信号采集、预处理、模态分析、数据传输等功能, 可以解决桥梁远程监控中前端系统的安装空间和长期供电等问题。在嵌入式监控的实现平台上, 目前主流上采用的是 32 位 RISC(精简指令集)嵌入式 ARM 芯片^[4], 具有体积小、功耗低、低成本、高性能的特点, 在远程监控、工业控制等领域深受商业开发和科研用户的青睐。大量的工程应用需求和实践使得嵌入式 ARM 远程监控技术取得了长足的进步, 但是目前世界

上尚没有建立一个完全满足监控需求的长期嵌入式远程监控系统。

准确获知斜拉索索力是进行斜拉桥受力和健康状态评估的基础, 无论对于斜拉桥结构施工过程还是运营阶段均至关重要, 是斜拉桥施工控制和健康监测的核心内容之一^[5-6]。笔者设计实现了一个基于模态分析技术的嵌入式索力检测系统, 该系统居桥梁拉索远程监控系统的下位机部分, 主要负责振动信号的采集、预处理和模态分析、索力计算等, 通过无线 GPRS 模块发送经过计算的索力数据到数据中心管理系统。

1 整体系统设计

1.1 系统总体结构

笔者设计的嵌入式索力检测系统是桥梁拉索远程监控系统的下位机部分, 即现场监测点子系统; 此外, 考虑到嵌入式系统的便携性和外围设备的易扩展性, 本嵌入式索力检测系统可同时作为便携式现场检测装置, 方便特殊情况下人工进行现场检测。本系统可扩展 LCD 液晶显示器, 作为现场检测的显示设备, 也可直接通过串口接入 PC

收稿日期: 2011-09-03.

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

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1110161); 宁波市自然科学基金(2011A610181); 浙江省大学生创新孵化项目(2010R405064, 2010R405066).

第一作者: 周红琼(1986-), 女, 安徽黄山人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式通信. E-mail: zhouhq1212@sohu.com

*通讯作者: 周宇(1960-), 男, 江苏扬州人, 副教授, 主要研究方向: 网络多媒体通信及信息安全. E-mail: zhouyu@nbu.edu.cn

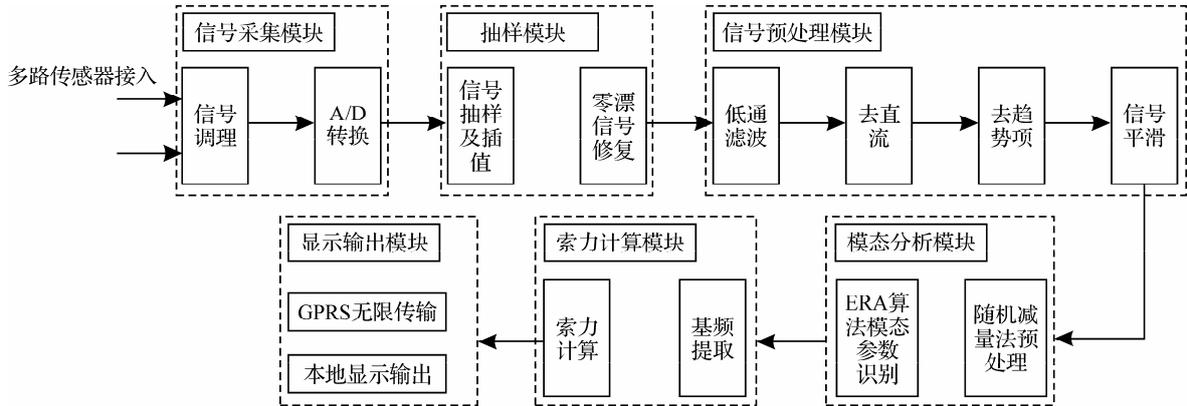


图1 嵌入式索力检测系统功能框图

显示输出, 给现场检测提供了极大的方便. 嵌入式索力检测系统主要包括的功能模块如图1所示.

在图1中, 本系统前端传感器采集拉索在环境激励下的振动信号, 通过信号采集模块进行信号调理、A/D转换之后, 以数字信号形式进入核心处理单元, 核心处理单元可按照预先设置的采样频率对信号进行重新采样, 同时为保证采样信号的准确性, 对于少部分丢失的采样点可进行插值处理, 确保信号为等间隔采样信号; 对于采集模块硬件造成的少数信号发生零点漂移的现象, 可采用软件处理修复. 经过上述处理, 可采集得到比较接近真实情况的信号, 保证后续分析处理的有效性. 预处理之后的振动响应信号, 通过随机减量法处理得到自由振动响应信号, 再使用时域模态分析算法处理, 可计算出各阶模态频率, 分析得到基频后即可根据基频-索力换算公式计算出拉索索力.

1.2 系统硬件平台

笔者在选择处理器时, 考虑的主要因素包括处理器性能、功耗、软件开发便利性、硬件产品成熟度等方面, 综合这几方面因素, 选取ARM系列嵌入式处理器. ARM/Strong ARM是专为手持设备开发的嵌入式微处理器, 非常适用于小的电源供电系统, 属于中档的价位, 近年来应用十分广泛. 考虑本系统功能需求和成本, 以及软件开发的便利性, 选用带有MMU处理器的ARM芯片, 由于本系统软件部分计算量较大, 需选择时钟频率较高的处理器, 另外, 网卡、串口、存储器(Nand Flash、Nor Flash、SDRAM等)、LCD等外设也是本系统开发需要的. 根据以上条件考虑, 选用ARM920T内核的三星公司的S3C2410芯片.

1.3 系统软件平台

(1) 考虑到嵌入式系统的硬件平台, 软件系统平台以及开发语言的研究状况, 以及作为研究项目所必须的创新性、探索性, 同时兼顾系统开发的可行性和现实性. 因此, 笔者基于JAL(Java、ARM、Linux)的开发体系, 硬件选择了ARM920T处理器, 软件系统平台为Linux 2.6版, 选取了基于开源Java虚拟机的Jam VM、GNU的classpath类库, 以及jikes编译器构建的嵌入式J2SE开发语言环境进行研究和开发工作.

(2) 选择美国朗斯测试技术有限公司生产的LC0136M型内装IC压电式加速度传感器来拾取斜拉索的振动信号.

(3) 选择北京中泰研创科技有限公司的以太网接口数据采集模块EM9130N.

(4) 本系统软件功能模块主要分为4个模块: 信号抽样模块、预处理模块、模态分析模块以及索力计算模块(图2).

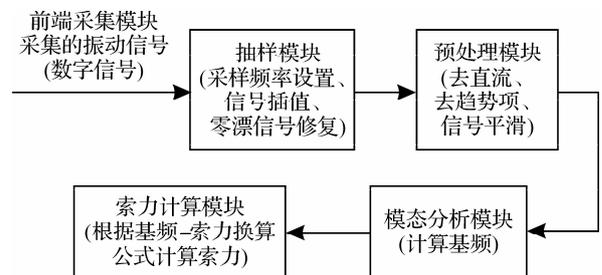


图2 软件功能模块框图

(5) 本系统采用实验室自主设计的一个基于层次式架构的混合通信协议, 该协议定义了通信接口层、数据交换层、功能应用层等各层的功能和层间接口, 并对数据的CRC校验、对称加密、非

对称加密、安全摘要等可靠性和安全性方面进行了详细的设计, 能够较好地保证远程传输的稳定性与可靠性.

2 嵌入式系统的索力检测方法

2.1 特征系统实现算法的基本原理^[7-8]

特征系统实现模态参数识别方法由于使用了现代控制理论中的最小实现原理, 计算量大大减小. 该方法理论推导严密、技术先进、计算量小, 是目前最完善、最先进的模态参数识别方法之一. ERA 算法适合于实时监测、在线识别, 抗噪声能力较强, 且对低频、密频甚至是重频的大型复杂结构均有较强的识别能力.

n 维线性系统有 m 个输入 $U(k)$, p 个输出 $Y(k)$, 离散时间状态方程为:

$$\begin{cases} X(k+1) = GX(k) + BU(k), \\ Y(k) = CX(k), \end{cases} \quad (1)$$

其中, $X(k)$ 为状态变量, G, B, C 分别为系统矩阵、控制矩阵和观测矩阵. 系统响应数据的结构为:

$$Y(k) = CG^k B. \quad (2)$$

对初始状态问题, $B = [\bar{X}_0 | \bar{X}_1 | \dots | \bar{X}_{m-1}]$, \bar{X}_i ($i = 0, 1, \dots, m-1$) 为系统的 m 个初始状态. ERA 算法可利用多个初始状态的响应数据识别密频和重频模态. 构造 Hankel 矩阵如下:

$$H_{rs}(k) = \begin{bmatrix} Y(k) & Y(k+1) & \dots & Y(k+s-1) \\ Y(k+1) & Y(k+2) & \dots & Y(k+s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(k+r-1) & Y(k+r) & \dots & Y(k+r+s-2) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对 $H_{rs}(0)$ 奇异值分解, P, V 分别为左右奇异向量矩阵, D 为对角阵, 对角元从大到小排列,

$$H_{rs}(0) = PDV^T, \quad (4)$$

其中, $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n, d_{n+1}, \dots, d_l)$, $l = \min(rp, ms)$.

设:

$$E_p^T = [I_p \ O_p \ \dots \ O_p],$$

$$E_m^T = [I_m \ O_m \ \dots \ O_m],$$

$$D_p = \text{diag}(d_1, \dots, d_n),$$

n 由奇异值截断阈值确定, 最小实现矩阵由下式得

到:

$$G = D_n^{1/2} P^T H_{rs}(1) V D_n^{1/2}, \quad (5)$$

$$B = D_n^{1/2} V^T E_m, \quad (6)$$

$$C = E_p^T P D_n^{1/2}. \quad (7)$$

最后对矩阵 G 特征值分解, 并求取系统的模态参数. 此处以自由响应为例, 脉冲响应的有关公式与此类似, 详见文献[9].

2.2 拉索振动信号的基频提取算法

直接使用环境激励下的采集数据往往精度较差, 因此必须对采集到的数据进行处理. 提高环境激励下的识别精度处理方法很多, 而随机减量技术是其中得到广泛使用的一种. 笔者将随机减量法/ERA 算法应用于桥梁拉索索力检测中.

算法的整体思路如图 3 所示.

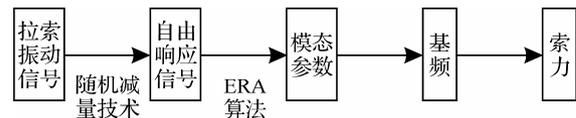


图 3 整体算法思路

上述的整体算法思路中, 在获取了自由响应信号后, 可以采用 ERA 算法方便快速地提取各阶模态参数, 而对于随机激励下的拉索振动响应信号而言, 笔者首先需要采用随机减量技术获取拉索的自由响应信号(随机减量技术消除了随机激励带来的影响), ERA 算法能够提取稳定精确的模态参数, 然后在模态参数中获取基频, 最后根据基频计算出拉索当前状态下的索力.

3 工程应用测试

研究中, 笔者对系统各模块进行了一系列的功能和性能测试, 验证了基于模态分析技术的嵌入式索力检测系统各功能模块的正确性及有效性. 限于文章篇幅, 不列举出来.

选择宁波招宝山大桥上游 16 号拉索作为主要测试对象, 目标拉索主要信息见表 1.

3.1 不同条件下性能测试对比

在斜拉索正常工作的情况下, 分别采集其在不同激励情况下(环境激励、人工激励)的响应信号,

表 1 重点测试拉索参数

编号	索长/m	索外径/m	弹性模量/MPa	单位质量/(kg·m ⁻¹)	初始张力/kN	倾角/°	基频/Hz
16	154.7	0.15	2.1×10 ¹⁰	84.1	4.4×10 ³	27.1	0.789

并进行信号分析、模态识别、基频提取,由此可以判断本系统在各种不同环境下的处理效果.同时,为判断本系统功能是否达到要求,采用北京东方振动与噪声研究所的检测处理设备进行比对分析.另外,在测试的过程中,需要测试当前情况下的环境噪声,以方便后期信号分析及算法改进研究.测

试时,选用的采样频率为 80 Hz,数据采样长度为 3000 点.

图 4~图 6 为不同条件下,测试信号时频域图及算法分析结果(人工激励本身振幅较大,因此无需进行信号放大).

不同条件下,多次测试的平均结果见表 2.

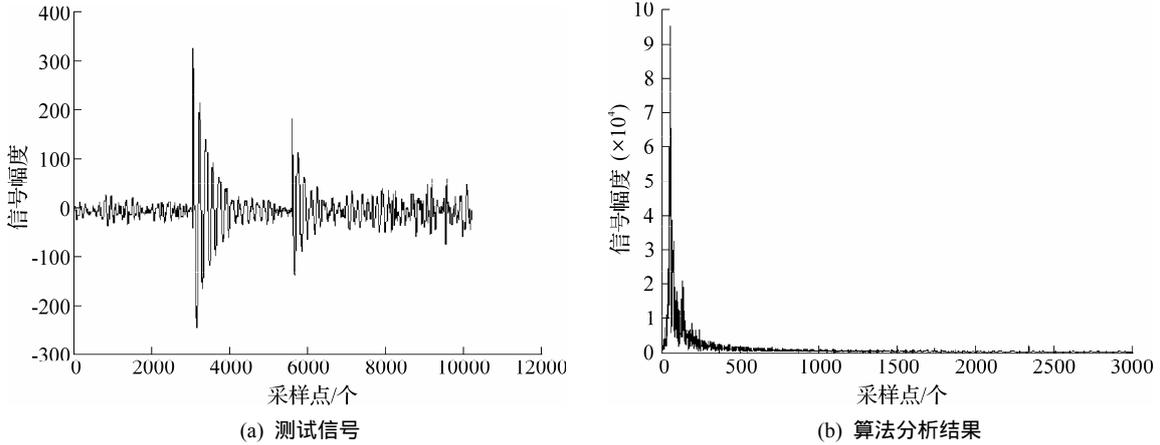


图 4 人工激励下无放大测试信号

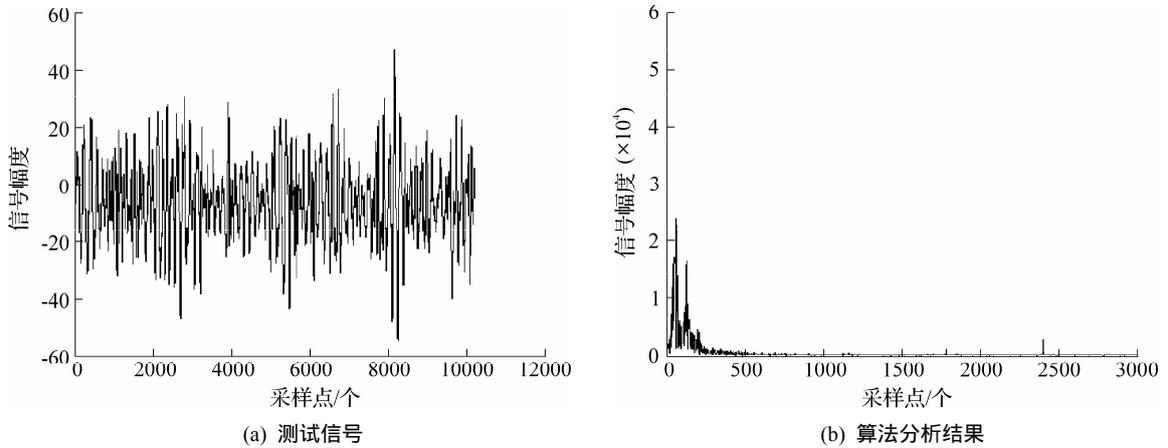


图 5 自然激励下无放大测试信号

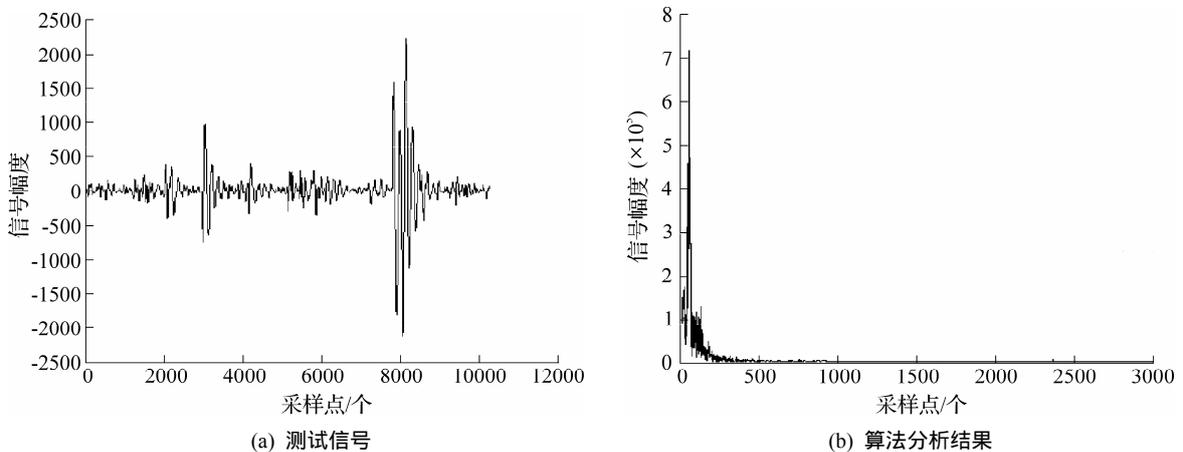


图 6 自然激励下 5 倍放大测试信号

表 2 不同条件下多次测试平均结果

测试环境	放大倍数	传感器安装位置/m	理论基频值/Hz	实测值/Hz	误差/%
自然	无放大	5	0.789	0.813	3.04
激励	5 倍放大	5	0.789	0.804	1.90
人工	无放大	5	0.789	0.781	1.01
激励	5 倍放大	5	0.789	0.788	0.13

通过对上述数据进行对比研究分析, 可以看出, 在自然激励无放大的情况下, 计算得到的基频值误差与其他条件下的测试误差相比是较大的, 但是本系统利用 ERA 算法进行基频提取, 仍然能满足工程误差 5% 以内的要求, 得到较为精确的基频值, 可见本系统的抗噪性能是较强的。

3.2 不同条件下 ERA 算法与其他算法结果对比

从表 3 中可以明显看出相比于其他算法, ERA 算法具有较好的基频提取能力, 能够满足工程中误差在 5% 以内的要求, 具有良好的工程应用价值。

3.3 多根拉索测试结果

选取同一拉索桥上其他几根拉索进行基频检测与索力计算, 测试结果见表 4。

通过实测和比对分析, 验证了文中数据采集系统的可靠性、有效性和稳定性, 验证了基于嵌入式系统的桥梁拉索振动检测技术中算法部分的正确性和系统的整体可用性。

4 结论与展望

将时域模态分析算法应用于检测拉索各阶模态频率, 以提高模态频率、索力的检测精度。在此基础上设计了一个嵌入式索力检测系统, 采用环

表 3 不同条件下 ERA 算法与其他算法识别结果对比

处理信号	基频提取算法	理论值/Hz	实测值/Hz	误差/%
人工激励下无放大	AR 谱估计	0.789	0.758	3.93
	Burg 功率谱估计	0.789	0.750	4.94
	Mcov 谱估计	0.789	0.758	3.93
	Music 谱估计	0.789	0.766	2.92
	ERA 算法	0.789	0.797	1.01
人工激励下 5 倍放大	SSI 算法	0.789	0.781	1.01
	AR 谱估计	0.789	0.820	3.92
	Burg 功率谱估计	0.789	0.813	3.04
	Mcov 谱估计	0.789	0.820	3.93
	Music 谱估计	0.789	0.801	1.52
自然激励下 5 倍放大	ERA 算法	0.789	0.787	0.25
	SSI 算法	0.789	0.783	0.76
	AR 谱估计	0.789	0.781	1.01
	Burg 功率谱估计	0.789	0.781	1.01
	Mcov 谱估计	0.789	0.781	1.01
自然激励下无放大	Music 谱估计	0.789	0.766	2.92
	ERA 算法	0.789	0.779	1.68
	SSI 算法	0.789	0.793	0.51
	AR 谱估计	0.789	0.813	3.04
	Burg 功率谱估计	0.789	0.961	21.80
人工激励下 5 倍放大	Mcov 谱估计	0.789	0.961	21.80
	Music 谱估计	0.789	0.742	5.96
	ERA 算法	0.789	0.761	3.55
	SSI 算法	0.789	0.838	6.21

境激励振动测试法对宁波招宝山大桥进行了现场的工程应用测试, 证明了笔者提出的基于模态分析算法的索力检测技术思路的正确性, 以及在此

表 4 其他拉索测试结果

索号	基频理论值/Hz	索力理论值/kN	测试基频/Hz	测试索力/kN	基频误差/%	索力误差/%
C15	0.86	3 922	0.85	3 831	1	2
C17	0.80	3 765	0.78	3 579	2	4
C18	0.78	3 821	0.76	3 627	2	4
C19	0.76	4 317	0.75	4 204	1	2
C20	0.72	4 281	0.71	4 163	2	3
C16'	0.89	4 342	0.88	4 245	1	2
C17'	0.84	4 172	0.83	4 073	1	2
C18'	0.79	4 167	0.77	3 958	2	4
C19'	0.76	4 186	0.75	4 076	1	2
C20'	0.71	3 951	0.69	3 731	3	5

基础上开发的嵌入式索力检测系统在工程上的可行性和可用性,有很好的工程推广价值。

在今后的研究中,如果能将无线传感网络结合入系统,在下位机中实现无线传感网络化,仅仅以 WSN 算法选举出的节点进行与上位机的数据交换,而其他下位机只以网络形式在下位机群间进行命令的传达,可以减少混合通信协议性能上的浪费。

参考文献:

- [1] 唐亚鸣,张河. 大型桥梁拉索损伤与健康监测[J]. 桥梁建设, 2002(5):79-82.
- [2] 孙宗光,伍雪南,苏健. 基于斜拉索张力测定的斜拉桥健康诊断[J]. 公路交通科技, 2008, 5(8):57-71.
- [3] 谢晓尧,严新平. 基于大跨度桥梁健康监测方法研究[J]. 贵州科学, 2007, 25(2):9-12.
- [4] 黄卫平. 浅析 ARM 微处理器嵌入式系统的应用[J]. 时代经贸, 2008, 6(7):230-234.
- [5] 张戎社,宁辰校. 应变模态在斜拉索损伤诊断中的应用[J]. 机械设计与制造, 2008(1):75-76.
- [6] 梁柱,李娜,郑春. 基于桥梁健康监测系统的斜拉索损伤识别[J]. 铁道建筑, 2008, 12:1-4.
- [7] 杨金凤,欧阳衡. 桥梁在役拉索索力检测介绍[J]. 水运工程, 2005, 7(7):23-24.
- [8] 王学敏,黄方林,刘建军. 大型桥梁模态参数识别的一种方法[J]. 工程力学, 2007, 24(2):110-114.
- [9] Ni Y Q, Ko J M, Zheng G. Dynamic analysis of large-diameter sagged cables taking in account flexural rigidity [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 8(5):620-627.

The Embedded Remote Detection System for Bridge Cable Force Based on ERA

ZHOU Hong-qiong, MIN Jie, ZHOU Yu*, WANG Xiao-dong

(Faculty Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: An embedded cable force detection system based on the modal analysis technology is designed in this paper. In view of the characteristics of the embedded system, we select the ERA owing to its better performance and computational accuracy to identify the modal harmonic frequency of cable, and obtain the free response signal using the random decrement technique to preprocess the vibration signal. The detection system is engineered on the basis of the ARM9 chips, Linux operating system and embedded J2SE technology development. The test results from the field engineering measurement show that the improved random decrement technique and ERA implemented on the designated embedded system can quickly identify base frequency of most cable vibration signal from which the cable force values can be calculated for. The proposed approach has demonstrated the efficiency and practicability of embedded cable force detection system based on modal analysis techniques.

Key words: modal analysis; embedded system; ERA; cable force

(责任编辑 章践立)