

基于 ARM+DSP 索力检测技术的研究与应用

王 浩, 周 宇*, 王晓东, 叶庆卫

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对斜拉索的基频检测系统进行了研究, 提出基于 ARM+DSP 的拉索振动信号分析检测技术. 首先分析了前端振动信号的采集方法和信号处理技术, 然后在 ARM+DSP 平台中进行基频分析算法的实现与优化, 最终选取 SEED-DEC138 工业参考设计平台, 并利用双核芯片进行关键模态分析算法的移植优化以及预处理算法的开发, 实现了一种新的斜拉索振动信号处理系统. 试验结果表明: 新系统既能保证较高的检测精度, 同时也能保证很好的实时性.

关键词: 基频; 索力检测; 双核; 模态分析

中图分类号: TP207

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 02-0054-05

近年来, 斜拉桥在国内取得空前发展. 它作为一种拉索体系, 其跨越能力比梁式桥更大, 同时由于拉索代替支墩, 使得梁体内弯矩减小, 降低了建筑高度, 减轻了结构重量, 节省了材料. 斜拉桥主要是由梁、索、塔三大受力构件组成的组合结构, 其主要特点是结构体系确定后, 结构的内力和线形完全由斜拉索索力决定. 因此, 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. 因此, 拉索索力监测已成为国内外的研究热点.

传统的索力检测主要应用嵌入式系统, 考虑到索力检测要进行拉索振动信号的采集及后期的算法处理, 运算量很大, 且要求系统要有良好的实时性. 笔者最终选取了 ARM+DSP 双核架构, 并应用时域模态分析算法来测算拉索自振频率, 开发了基于 ARM+DSP 的索力检测系统.

1 索力检测技术

目前, 国内外常用的索力检测技术主要有以

下 5 种: 液压表法、压力传感器法、电磁场法、频率法以及时域模态分析等^[1-5]. 液压表法和压力传感器法仅适用于斜拉索施工阶段张拉过程的索力测定; 电磁场法需预先测定拉索材料性能并制作感应线圈, 成本很高; 而频率法和时域法因其具有简单、快速且价格低廉等优点, 在桥梁投入运营后的索力测量中得到广泛应用. 频率法基本原理是根据弦振动理论推导出的斜拉索自振频率与索力之间如下的关系式:

$$T = 4ml^2(f_n/n)^2, \quad (1)$$

其中, m 为拉索的单位长度质量; n 为拉索自振频率阶数, $n=1, 2, 3, \dots$; f_n 为拉索的第 n 阶自振频率; l 为拉索的计算索长. 通过测算出拉索的自振频率, 可根据频率索力换算公式间接计算出索力.

传统的频域模态分析技术虽然能够完成拉索自振频率的检测, 但其计算精度不高, 由于必须同时采集到系统的激励信号和响应信号, 且一般需通过人工激励的方式来采集激励及响应信号. 对于实际工程应用来说, 采用人工激励的方式对大型结构实施激振来采集振动响应信号和激励信号是不符合实际情况的, 不利于及时、实时地对大型

收稿日期: 2012-10-12.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://nbdxlg.paperopen.com/>

基金项目: 国家自然科学基金(61141015, 61071198); 浙江省自然科学基金(Y1110161); 浙江省教育厅高校科技计划项目(Z201019260); 宁波市自然科学基金(2011A610181); 宁波大学大学生科技创新项目(SRIP).

第一作者: 王 浩(1988-), 男, 山东威海人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式及振动信号处理. E-mail: wh880328@163.com

*通讯作者: 周 宇(1960-), 男, 山东威海人, 教授, 主要研究方向: 网络通信及计算机软件. E-mail: zhouyu@nbu.edu.cn

结构进行监测。

笔者应用时域模态分析技术^[6-7]来测算拉索自振频率,主要是从时域的角度对拉索振动信号进行分析处理,其原理相对于频谱分析法具有一定的复杂性,但能有效提高拉索自振频率的计算精度。拉索在环境激励下发生振动,经过前端传感器采集以及信号采集模块的A/D转换过程,转换为可供处理器处理的数字信号,最后通过对振动信号的分析处理,计算出基频和索力。目前,常用的基于模态分析的振动信号处理过程如图1所示。

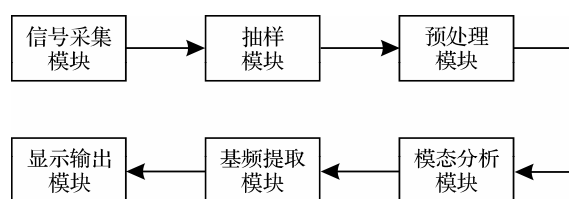


图1 振动信号处理过程

2 基于ARM+DSP的索力检测技术

一般情况下,基于时域模态分析的拉索索力检测系统不仅包含前端数据采集及滤波等信号处理,同时包括后续信号的算法处理及传输,系统所要完成的任务计算量很大,这就要求所设计的系统不仅具有高速的处理能力,还要具有良好的外设扩展和实时调度能力,并且还要考虑成本问题。而传统的索力检测系统主要应用单片机、DSP和ARM嵌入式系统进行检测,考虑到单片机和ARM的计算能力限制,无法进行复杂大量的数据处理,并且其计算精度也不高;而DSP虽然计算能力满足系统要求,但由于缺少足够的外设接口,并且不能满足对斜拉索的实时监测和远程控制,因此也不能很好地满足系统设计的需要。

目前,基于ARM+DSP双核架构的信号处理技术已经在许多领域得到了应用。笔者提出选取ARM+DSP双核架构进行索力检测技术的开发,一方面可以利用DSP在FFT、IFFT等振动信号处理方面运算速度快、精度高的优点,另一方面则是利用芯片的ARM部分能进行信号采集的调度管理以及输出显示、远程传输方面的优势,以期实现较好的人机交互效果和丰富的系统功能。

系统整体设计方案如图2所示。整体设计主要分为信号采集、抽样、预处理、模态分析、基频提

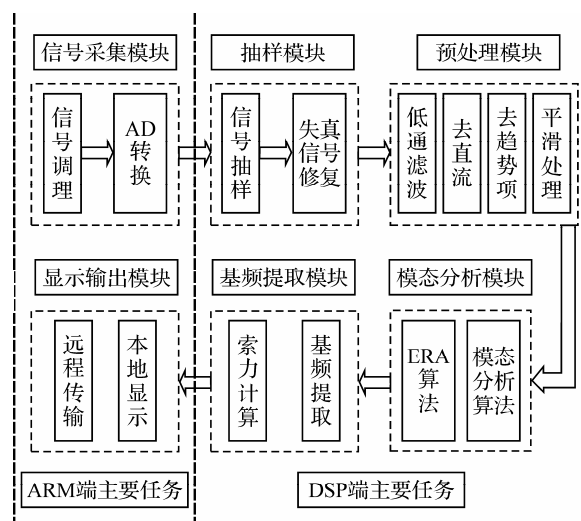


图2 系统整体设计方案

取、显示输出等6个模块。其中,信号采集模块主要完成环境激励下的振动信号采集,并进行信号调理、A/D转换;抽样模块按照预先设置的采样频率对信号进行重新采样,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;在预处理模块中,采样得到的信号包含直流分量、趋势项及噪声信号等,为防止这些信号成分给后续模态分析处理带来不利影响,本系统模块采用低通滤波、去直流、去趋势项等方法得到振动响应信号;模态分析和基频提取模块应用随机减量算法和时域模态分析算法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;最后显示输出模块完成测试数据的本地显示和远程传输。

系统中信号的采集、抽样以及最后的显示输出和远程传输是由系统ARM端控制,而对采集到的信号进行预处理和模态分析是由DSP端控制,这样就充分发挥了双核的优势,使得整个系统与单核相比处理效率更高,精度更好。

3 系统设计与开发

应用ARM+DSP双核架构可方便地开发各种模态分析算法,以实现斜拉索索力检测功能,此检测系统主要分析和实现索力检测系统监测数据的预处理算法和后续处理的模态分析算法。

在模态分析部分,笔者对比了常见的基于环

境激励的时域模态分析算法^[8-9], 并根据时间序列法、ERA 法、随机子空间法和 ITD 法等算法基于计算精度、适用情况、计算复杂度等各方面的均衡考虑, 选取了经典的 ERA 算法来识别基频, 但由于 ERA 算法直接分析随机振动信号后得到的模态参数精度不高; 为此, 在应用 ERA 算法前, 笔者采用随机减量技术将振动信号转换为系统的自由振动信号, 再应用 ERA 算法即可取得较好的模态参数精度。

ERA 模态参数识别方法由于使用现代控制理论中的最小实现原理, 使得计算量大大减小, 是目前最完善、最先进的模态参数识别方法之一, 其相关原理如下。

n 自由度黏性阻尼系统的振动微分方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t), \quad (2)$$

其中, $f(t)$ 为外部激励向量, A 为系统矩阵, B 为控制矩阵, y 为状态空间矢量, 其时间离散状态方程可表示为:

$$y(k+1) = A_1 y(k) + B_1 f(k), \quad (3a)$$

$$z(k+1) = G y(k+1), \quad (3b)$$

上式中, G 为观测矩阵, z 为输出向量, 可以是位移、速度、加速度。矩阵 A_1 、 B_1 、 G 构成了离散时间系统的最小实现。ERA 算法的关键点在于如何由输出响应构造系统的最小实现^[A₁B₁G]。

通过对已测得的脉冲响应函数组成的 Hankel 矩阵进行奇异值分解(SVD), 从而得到系统的最小实现, 关系式如下:

$$A_1 = \Sigma^{-1} U^T H(1) V, \quad (4)$$

式中, Σ 为奇异值分解以后的对角矩阵, 即 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{2n})$, 其中, 元素 σ_i 为 hankel 矩阵 $H(0)$ 的奇异值。对 A_1 进行特征值分解, 可得到特

征值矩阵 λ_i 和特征向量 ψ' , 从而可以辨识出各种模态参数, 包含固有频率、阻尼比、模态振型, 具体换算方法如下:

无阻尼固有频率:

$$\omega_i = \sqrt{(\lambda_i^{\text{Re}})^2 + (\lambda_i^{\text{Im}})^2} / 2\pi, \quad (5a)$$

阻尼比:

$$\xi_i = \text{Re}(\lambda_i) / \omega_i, \quad (5b)$$

其中, 通过计算所求得的无阻尼固有频率 ω_i 即为 (1) 式中所需要的拉索自振频率 f_n 。同时, 为了使模态分析算法运行更加准确可靠, 系统在前期对采集到的信号做了初步加工处理, 以修正波形畸变, 剔除混杂在信号中的噪声和干扰, 使初步处理的结果尽可能真实地还原成实际振动状况。在信号预处理部分, 根据实际采样信号的特点及噪声分布情况, 设计了一系列适合嵌入式系统的预处理算法, 包括采样信号的标定变换、低通滤波、去直流和趋势项、信号平滑等, 从而有效地抵制了噪声的干扰, 保证了采样信号的准确性。

4 硬件设计

目前, ARM+DSP 双核架构体系主要有 TI 的 OMAP 系列和 DAVINCI 系列。考虑到系统检测信号为拉索振动信号, 并且要实现复杂的时域模态分析算法, 信号处理运算量较大, 且要求系统实时性要好。通过对现有的双核系统进行对比, 笔者最终选取了适合工业控制的高性能芯片 OMAP-L138 作为系统的核心。同时, 系统具有存储、LCD 显示、在线调试等功能, 整体硬件结构如图 3 所示。

硬件主处理器采用德州仪器(TI)的高性能芯片 OMAP-L138^[10], 作为整系统的核心。OMAP-L138 不仅处理器性能十分强大, 片上资源也十分丰富,

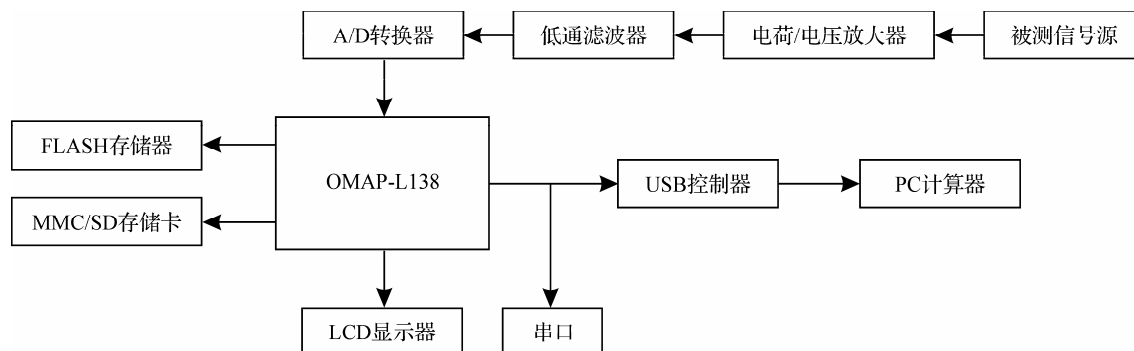


图3 整体硬件结构

它自带了2套外部存储器扩展接口,可以直接连接SDRAM、FLASH、DDR2等诸多类型的外部存储器,片上还提供通用定时器、LCD控制器等控制单元,芯片集成度非常高。本系统所涉及的各个模块均是直接从OMAPL138的片上接口引出,系统设计难度降低,编程也更为方便,缩短了研发周期。

由于拉索振动信号的基频通常处于0.3~10 Hz的低频段,并且采集拉索振动信号要受到大桥外界环境及传感器的灵敏度干扰,因此,最终选取在低频段有良好特性的美国朗斯测试技术有限公司的LC0136M型内装IC压电式加速度传感器来拾取斜拉索振动信号。A/D转换采用SEED-DEC138平台自带的ADS8556模数转换器,通过对转换器驱动模块编写,能很好地进行模数转换器的加载,并能将采集到的数据存储存储在板卡自带的FLASH存储器上。与核心处理器相连的LCD显示器选用通用4.3寸液晶触摸屏,通过OMAP-L138的LCD控制器以及视频接口VPIF上的16bit数据总线与液晶屏相连,通过核心处理器对采集到的振动信号进行处理,并经过后期算法处理,能在液晶屏上实时的显示最终索力的大小。

5 系统应用测试

本系统选用OMAP-L138双核芯片,系统设计开发选用在不同的开发环境下进行,ARM端采用linux操作系统,DSP端采用CCS集成开发环境。采用C语言实现模态分析算法,并运用TI自带的算法处理工具codec-engine对模态分析算法进行封装,在ARM端进行远程调用处理,并可通过系统自带的液晶触摸屏进行实时的在线显示。

选择宁波市招宝山大桥作为测试对象,直接采集到的振动信号如图4所示。

在斜拉索正常工作的情况下,利用构建的双核系统进行测试,得到系统的自由响应信号。将采样的随机振动信号使用随机减量法处理,得到的自由振动响应信号如图5所示。

最后,通过ERA算法从自由响应中计算出模态参数。通过与理论值对比并经过多次测试分析,在选择ERA算法中Hankel矩阵阶数较小的情况下,进行测试系统实测,结果见表1。由表1数据可见,基频值误差能控制在4%左右,并且能保证很好的

实时性,因此具有很好的使用价值。

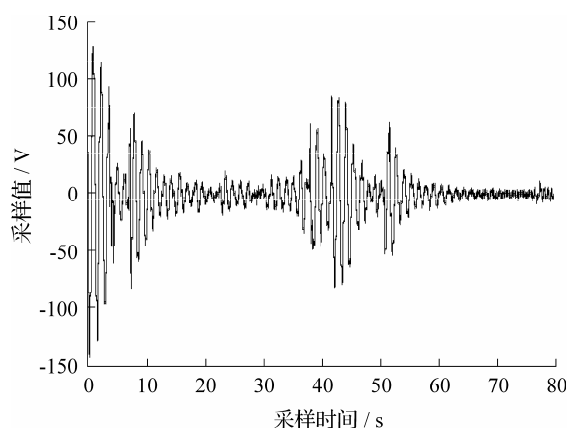


图4 采集的振动信号

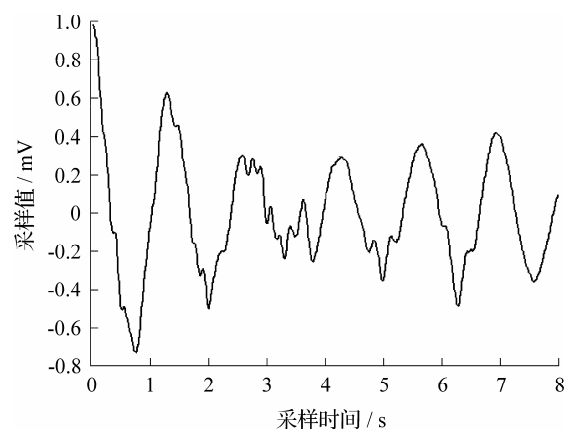


图5 自由振动响应信号

表1 系统实测结果

随机减量样本 长度取值	模态分析计算 结果(基频)/Hz	与理论基频值(0.789 Hz)的误差/%
$L = 512$	0.756 9	4.07
$L = 1024$	0.757 0	4.06
$L = 2048$	0.757 6	3.98
$L = 4096$	0.757 8	3.95

6 总结

运用OMAP-L138双核DSP系统的6个主要模块实现了振动信号检测处理,并采用随机减量算法和模态分析算法进行振动信号分析处理,整个系统实时性好,准确率高,完全满足工程应用的需要。

参考文献:

- [1] Chetan R, Kundra T K, Modak S V. Harmonics elimination algorithm for operational modal analysis using

- random decrement technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(4):922-944.
- [2] Chen C H, Ou C I. Experimental modal test and time-domain aerodynamic analysis of a cable-stayed bridge[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamic, 2011, 11(1):101-125.
- [3] 章联军, 王晓东, 周宇. 基于多策略判决的斜拉索参数识别系统研究[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2012, 25(4): 40-43.
- [4] 姜建山, 陈伟民, 黄尚廉. 基于逆磁致伸缩的索力传感器磁路分析与参数设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4): 738-743.
- [5] 刘志军, 陈国平, 党志杰. 检测斜拉索张力的振动法及其应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(5):609-612.
- [6] 李蕾红, 陆秋海, 任革学. 特征系统实现算法的识别特性研究及算法的推广[J]. 工程力学, 2002, 19(1):109-114.
- [7] 周先雁, 王智丰, 冯新. 基于频率法的斜拉索索力测试研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(2):102-106.
- [8] 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.
- [9] 占晴, 周宇, 叶庆卫. 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.
- [10] Texas Instruments. OMAP-L138 DSP+ARM processor technical reference manual[EB/OL]. [2012-08-06]. <http://www.ti.com/lit/ug/spruh77a/spruh77a.pdf>.

ARM+DSP Based Cable Force Detection Technology: Research and Application

WANG Hao, ZHOU Yu^{*}, WANG Xiao-dong, YE Qing-wei

(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the research results of the cable-stayed bridges of base frequency detection system, we propose the method of detection of bridge cable force using ARM + DSP. Applying the vibration signal sampling method and processing technology, the base frequency analysis algorithm is formed and optimized on the ARM + DSP platform. Eventually we select SEED-DEC138 industry-designed platform to take advantage of dual-core chips in the transplantation and optimization to improve the modal analysis algorithm, by which a new cable vibration signal processing system is developed. The real-world tests show that the proposed new system can guarantee a high precision and a good real-time performance.

Key words: base frequency; cable force; dual-core; modal analysis

(责任编辑 章践立)