第 18 卷 第 2 期 2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0105-06

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018

引用格式:陈 妮, 何华光, 谢开仲. 多路振弦传感器同步测频系统设计[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 105—110
Chen Ni, He Huaguang, Xie Kaizhong. Design of multi-channel synchronous frequency measurement system for vibrating wire sensor[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 105—110

自动化技术、计算机技术

多路振弦传感器同步测频系统设计

陈 妮[1,2] 何华光[3] 谢开仲[4*]
(广西大学电气工程学院[1],南宁 530004;广西医科大学电子学教研室[2],南宁 530021;
广西大学计算机与电子信息学院[3],土木工程学院[4],南宁 530004)

摘 要 针对多路振弦传感器测频系统多采用分时异步的测量方式,无法满足桥梁等大型建筑动态响应的测量需求,提出一种同时激振 - 分时测量的同步测量方案;根据该方案设计了一套多路振弦传感器同步测频系统。系统以 Cortex-M4 处理器为核心,采用 Rife-Quinn 算法进行频率计算。对系统进行实验测试,测试结果表明:系统能完成 4 通道振弦传感器的同步测量,无噪声条件下的测频相对误差小于 0.007%;输入 1 kHz、峰值为 2 μV ~ 3.4 mV 范围的正弦信号,系统测频相对误差小于 0.005%,标准差小于 0.04 Hz;加入白噪声干扰,信噪比在 -9 ~ 9 dB 范围内,系统的测频相对误差小于或等于 0.2%。

关键词 振弦传感器 同步测量 Cortex-M4 Rife 与 Quinn 算法
中图法分类号 TP212.1; **文献标志码** B

应变力是一种常用的动态响应信号,可用于桥梁等大型建筑的结构完整性评估和损伤诊断中。振弦传感器的测量精度高、稳定性好,是应变力测量的常用传感器之一。其内部钢弦的谐振频率会随着张力的变化而变化,通过测量钢弦振动的频率可进一步计算出传感器受力的大小[1]。

数据同步采集是建筑物整体动态响应测量的关键技术之一[2]。现有的多路振弦传感器频率测量系统大多采用分时异步的方式[3,4],即:先激振一个传感器,测量数据,然后再到下一个传感器,依次轮流重复。这种方式下,不同传感器采集到的数据存在较大的时间差,难以满足实际工程应用的需求。文献[5,6]采用多通道同时激振-同时测量的同步测频方案。在该方案中,每个通道需要配备独立的激振电路、信号调理电路。这使得系统的硬件电路复杂,功耗增加,可靠性降低。

因此,本文提出了一种同时激振-分时测量的同步测频方案,根据该方案设计了一套多路振弦传感器同步测频系统。对系统进行实验测试,结果表明:系统能实现 4 路振弦传感器输出信号频率的同步测量,测频精度高,抗干扰能力强,稳定性好,可满足实际应用中多通道同步动态测量的需求。

2017 年 6 月 20 日收到 国家自然科学基金(51368005)资助
第一作者简介:陈 妮(1982—),博士研究生。研究方向:信号采集与处理。E-mail:lizi0908@163.com。
*通信作者简介:谢开仲(1974—),男,教授。研究方向:道路与桥梁工程。E-mail:xiekaizhong@163.com。

1 同时激振-分时测量的原理

多路同步测频需要检测多个传感器在同一时刻输出信号的频率值。本文提出的同时激振 - 分时测量原理是在同一时刻激振多个传感器,此时每个传感器都将输出一个幅度不断衰减的正弦信号;再轮流对不同通道的正弦信号进行采样计算。只要在本次激振输出的正弦信号消失前测量出该通道信号的频率值,就可获知传感器在同一时刻的受力情况,从而实现多路信号的同步测量。

以 4 路振弦传感器的同步测量为例。设 t_0 时刻同时激振 4 路传感器,每一路传感器的输出波形均如图 1 所示。在正弦信号的持续时间 T 内,划分 4 个时间段 T_1 ~ T_4。系统在 T_1 时间段检测第 1 个传感器的信号频率,T_2 时间段检测第 2 个传感器的

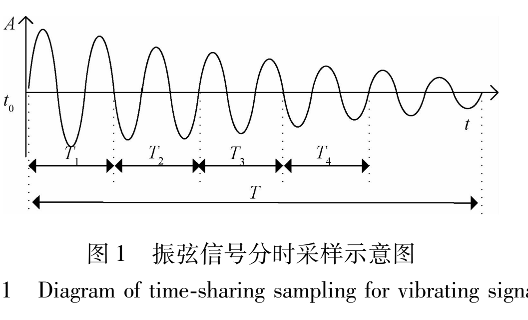

图 1 振弦信号分时采样示意图
Fig. 1 Diagram of time-sharing sampling for vibrating signal

信号频率,以此类推至第 4 个传感器。尽管 4 路正弦信号的测量是分时测出的,但测量到的都是 t_0 时刻激振输出的正弦信号的频率值。

同时激振-分时测量的测频方案要求系统在同一时刻激振输出的正弦信号消失前,就完成多路信号的采集计算。而且从图 1 可以看到采样时间越往后正弦信号越微弱。要满足多路同步测量及对微弱信号测量的要求,系统需具备测频速度快、测频精度高及抗噪声干扰能力强的特点。传统的测频测周法由于存在 ±1 个脉冲计数误差[7],无法满足上述方案的要求。因此,本文通过采用 STM32 微处理器和 Rife-Quinn 算法实现了该测频方案。

2　系统硬件设计

2.1　系统结构框图

根据上述分析,设计的多路振弦传感器同步测频系统硬件结构如图 2 所示,包括主微处理器 STM32F407、信号调理电路、激振电路、温度测量模块等。

主微处理器 STM32F407 是 ST 公司推出的基于 ARM Cortex—M4 核心的 32 位微控制器,具有 1 MB 的 Flash,192 KB 的 SARM,168 MHz 的主频以及浮点运算单元,具备较强的数据运算能力。系统的 ADC 使用 4.096 V 参考电压,电压分辨达 0.062 5 mV,适合于对微弱信号的采集。

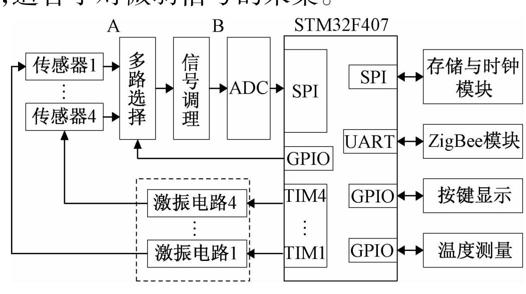

图 2　系统硬件结构框图

Fig. 2　Structure diagram of hardware system

4 个传感器配备有独立的激振电路,通过多路选择器共用一组信号调理电路及 ADC 电路。系统的数据采集过程如下:主微处理器输出信号控制激振电路产生低压脉冲;低压脉冲信号激振传感器,4 路传感器将同时输出正弦信号;多路选择器分时切换 4 路通道,传感器输出的正弦信号经放大、滤波及 A/D 采样后,由微处理器完成频率值的计算。

2.2　信号调理电路设计

信号调理电路包括放大和滤波功能。具体电路如图 3 所示。

仪表放大器 AD620 采用单端输入方式,增益为

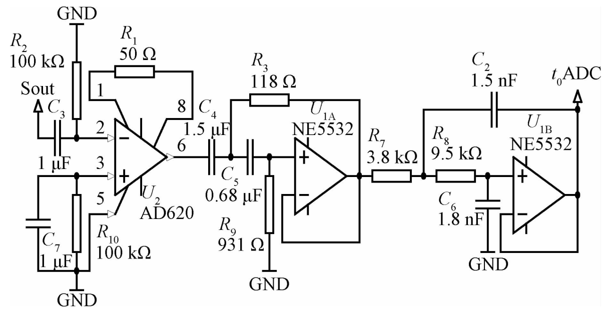

图 3　信号调理电路

Fig. 3　Signal conditioning circuit

60 dB。滤波器采用 Sallen-Key 结构的切比雪夫 2 阶高通滤波器和 2 阶低通滤波器串联构成。高通滤波器截止频率为 400 Hz,低通滤波器截止频率为 6 kHz。传感器输出的信号经过调理后,可以输出波形良好的正弦波。

3　系统软件设计

3.1　系统的数据采集流程

系统采用反馈式复激振的工作方式[8],软件设计主要包括以下五部分:A/D 采样、频率计算、激振控制、应力计算及结果输出。具体工作流程如图 4 所示。

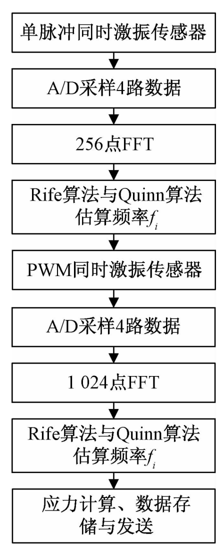

图 4　系统数据采集流程图

Fig. 4　Flow chart of the system data collection

首先,由微处理器输出单脉冲电压同时激振 4 个传感器,传感器输出的 4 路正弦信号在不同时间点分别被采样后,利用 Rife 和 Quinn 算法计算出各路的频率值 f_i ($i = 1,2,3,4$)。第一次激振得到的正弦信号持续时间短,为提高测频速度,每个通道传感器信号的采样点设置为 256 个。接着,使用频率为 f_i 的脉宽调制(pulse width modulation,PWM)信号对第 i 个传感器进行同时激振。第二次激振信号的频

率 f_i 与传感器谐振频率非常接近,传感器发生共振,此次输出的信号持续时间长,为提高系统的测频精度,每一路信号的采样点设置为 1 024 个。最后,采用 Rife 和 Quinn 算法计算得到最终的频率值 f_j ($j = 1,2,3,4$)。

3.2　基于 Rife-Quinn 算法的测频流程

3.2.1　Rife 算法与 Quinn 算法的基本原理

傅里叶变换是一种传统的振动信号分析方法。传统快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT)由于存在栅栏效应,在信号频率估计中存在较大误差。为解决上述问题,出现了不少频率估计校正算法[9,10]。其中插值校正算法具有计算公式简单、运算量少的特点,易于在嵌入式微处理器中实现。

Rife 算法是典型的插值校正算法,其正弦信号频率估算可由式(1)表示:

$$\hat{f}_o = \frac{f_s}{N}\left[k_0 + r\frac{|X(k_0 + r)|}{|X(k_0)| + |X(k_0 + r)|}\right] \tag{1}$$

式(1)中,N 为采样点数,f_s 为采样频率; k_0 为 FFT 变换后最大谱线离散频率索引值; $|X(k_0)|$ 为最大谱线的幅度; $|X(k_0 + r)|$ 为 k_0 相邻的次大谱线幅度。Rife 算法在信号较低信噪比的情况下,会出现插值方向错误而导致误差增加的弊端。而 Quinn 算法可以利用信号的相位信息正确判断插值方向[11]。因此,将 Rife 算法与 Quinn 算法结合,可以实现在低信噪比的情况下,对信号频率的精确估计。

3.2.2　Rife-Quinn 算法的测频流程

采用 Rife-Quinn 算法实现的频率测量流程如图 5所示。

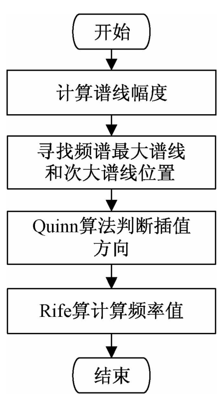

图 5　频率测量流程图

Fig. 5　Flow chart of frequency measurement

程序设定 A/D 采样频率为 20 kHz, 通过 ADS8332 模数转换器连续采样信号,使用 ST 公司针对 STM32 微处理器提供的 DSP 库函数实现 FFT。FFT 变换后得到的是以复数形式表示的正弦信号功率谱,计算所有谱线幅度后寻找最大谱线和次大谱线。Quinn 算法利用谱线相位信息判断插值方向,最后通过 Rife 算法估算待测信号的频率。

3.3　测频过程的时序分析

同时激振-分时测量方案的关键是具备较快的频率测量速度,以便能在正弦信号消失前完成多路信号的采集计算。传感器输出正弦信号的持续时间与激振方式、激振电压和电缆长度等因素有关。对振弦传感器在单脉冲激振电压为 12 V,电缆长度为 20 m 时进行测试,正弦信号的持续时间在 400 ms 以上。以 400 ms 作为后续分析的参考值。下面对本系统测频所需的时间进行分析。

在 20 kHz 采样频率下,第一次单脉冲激振采样时,每路信号分别采样 256 个点,4 路信号分时采样共 1 024 个点,系统完成 4 路信号的采样需要 51.2 ms。第二次 PWM 激振采样时,每路信号采样 1 024 个点,系统需 204.8 ms 即可完成 4 路信号的采样。两次激振、采样所需的时间均小于 400 ms,满足系统采样的时间要求。

结合软件的实现流程进一步分析,得到系统完成整个同步测频过程的时序如图 6 所示。

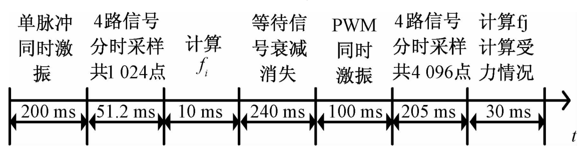

图 6　同步测频时序图

Fig. 6　Sequence diagram of synchronous frequency measurement

从图 6 可以看到,系统完成一次 4 路传感器同步测量的时间约为 836 ms。

4　系统测试

一般情况下,振弦传感器输出信号的频率范围为 400 Hz ~ 5 kHz,幅度在 300 μV ~ 1 mV 之间。以下测试实验中,通过信号发生器输出正弦信号来模拟振弦传感器的输出;系统的误差分析中,每个数据点测量 10 次,取平均值进行相对误差及标准差的计算。

4.1　系统的同步性能测试

从信号发生器输出峰峰值为 2 mV、频率分别为 400 Hz 和 4 900 Hz 的正弦波,在图 2 的 A 点处接入系统的 4 个通道。测量结果如表 1 所示。

表 1　4 通道的频率测量结果

Table 1　Results of 4 channel frequency measurement/Hz

传感器通道	输入(400 Hz)	输入(4 900 Hz)
1	400.037	4 900.207
2	400.04	4 900.208
3	400.042	4 900.210
4	400.042	4 900.209

从表 1 可以看到,系统能对 4 个通道实现频率的同步测量。

4.2 有效频率范围内的测频误差测试

在 400 ~ 5 000 Hz 之间均匀间隔地取 16 个频率点。从信号发生器输出 16 个频率点、峰峰值为 100 mV 的正弦波信号,在图 2 的 B 点接入系统的第一通道中。测量结果如图 7 所示(其余通道的测量结果相近)。

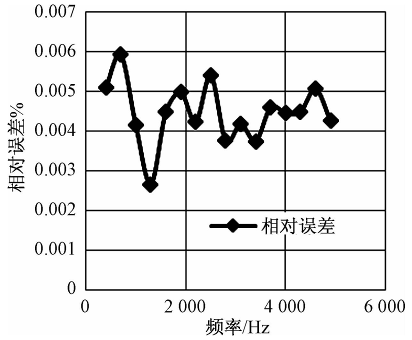

图 7 有效频率范围内的测频误差

Fig. 7 Frequency measurement error in effective frequency range

从图 7 可以看到,在传感器输出信号的有效频率范围内,系统测频相对误差小于 0.007%。

4.3 对微弱信号的测频性能测试

从信号发生器输出频率为 1 kHz,峰值分别为 2 mV、20 mV、100 mV、600 mV、1 V、1.4 V、1.8 V、2.2 V、2.6 V、3.0 V、3.4 V 的正弦波信号,在图 2 的 B 点处接入系统。

通常微弱电信号的幅度在毫伏级以下。由于系统的信号调理电路增益为 60 dB,在 B 点处输入 2 mV ~ 3.4 V 的信号则相当于 A 点(未经调理的传感器信号输出点)信号峰峰值为 2μV ~ 3.4 mV,即给系统输入了微弱正弦信号。系统测量结果如图 8 所示。

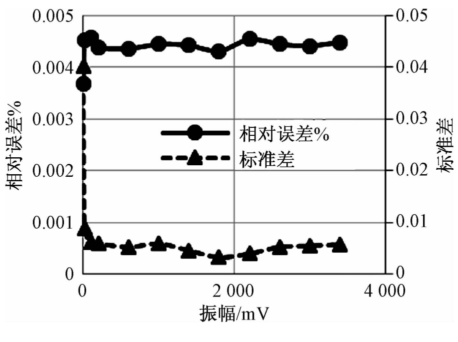

图 8 不同幅度下的测频误差及标准差

Fig. 8 Frequency measurement error and standard deviation under different amplitude

从图 8 可以看到,在此幅度变化范围内,系统的测频相对误差小于 0.005%,标准差小于 0.04 Hz。系统对微伏级的信号仍具有较高的测频精度,在幅度动态范围为 64.6 dB 时,测频数据波动小。说明系统的稳定性好。

4.4 系统的噪声性能测试

从信号发生器输出频率为 1 kHz,叠加了白噪声的正弦信号,信号的信噪比在 −9 ~ 9 dB 范围内。将信号从图 2 的 B 点处接入系统。测频误差的测试结果如图 9 所示。

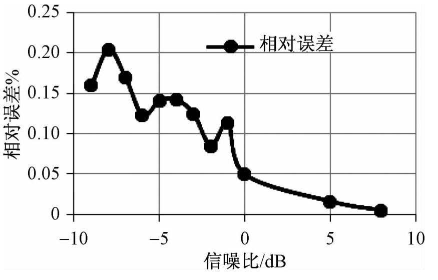

图 9 不同信噪比下的测频误差

Fig. 9 Frequency measurement error under different SNR

从图 9 可以看到,信噪比在 −9 ~ 9 dB 范围内,系统的测频相对误差小于或等于 0.2%。说明系统的抗噪声性能较好。

4.5 系统的工作波形图

图 10 为示波器上观察到的系统第 1 通道的工作波形(其余通道的波形类似)。

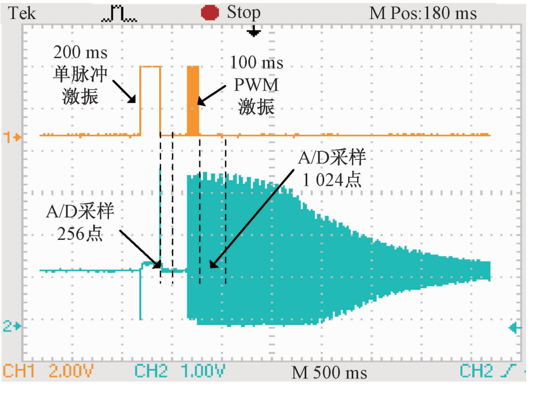

图 10 振弦式传感器工作波形

Fig. 10 The work waveform of vibrating wire sensor

图 10 中示波器通道 1 为微处理器输出的传感器激振信号波形,示波器通道 2 为经调理后的传感器输出信号波形。

对比示波器两通道的波形可看到:单脉冲激振后,传感器输出信号幅度小,持续时间短。系统对传感器输出信号进行 A/D 采样及频率计算后,得到的频率值 f_1 精度较低。以频率为 f_1 的 PWM 波再次激振,此时传感器输出信号的幅度增大,信噪比提高,再次测量计算将得到精度更高的频率值。

4.6　系统的应用测试

4 个振弦传感器分别固定在梁式结构上，施加不同的拉力。将本系统 HC—03G 和商用振弦式读数仪 BGK—408 对比测试，测量结果如表 2 所示。

表 2　测量结果对比

Table 2　Comparison of measurement results　/Hz

系统	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
HC—03G	1 666.20	1 698.11	1 701.40	1 730.25
BGK—408	1 666.20	1 698.12	1 701.40	1 730.25
HC—03G	1 735.14	1 769.40	1 875.62	1 885.49
BGK—408	1 735.14	1 769.40	1 875.62	1 885.50

从表 2 中可以看到，本系统的测量结果与商用仪表的测量结果基本相同，可用于桥梁健康监测等领域的多点动态同步测量场合，具有较高的工程应用价值。

5　结论

本文以 Cortex—M4 处理器为核心，采用 Rife-Quinn 测频算法，设计了一套采用同时激振-分时测量方案的多路振弦传感器同步测频系统。测试结果表明：系统实现了 4 路振弦传感器的同步测量，与现有的文献相比，无噪声条件下的测频误差降低了一个数量级；系统对微伏到毫伏范围的正弦信号的测频精度高且稳定性好。

参　考　文　献

1　沈　竞，吴舒辞，吴谨绎. 振弦式传感器压力测量系统的优化设计. 电子测量技术，2014；37(11)：80—85
Shen Jing, Wu Shuci, Wu Jinyi. Optimization design of pressure measuring system with vibrating wire sensor. Electronic Measurement Technology，2014；37(11)：80—85

2　彭韶辉，闫宗山，王子斌，等. 时钟同步技术在桥梁结构监测系统无线传感网络中的应用研究. 公路，2015；60 (5)：106—111
Peng Shaohui, Yan Zongshan, Wang Zibin, *et al.* Application of clock synchronization technology in the wireless sensor network of bridge structure monitoring system. Highway, 2015; 60 (5): 106—111

3　莫　琳，何华光，陈　妮，等. 多路振弦式传感器桥梁检测系统设计. 传感器与微系统，2014；33(4)：68—71
Mo Lin, He Huaguang, Chen Ni, *et al.* Design of bridge-detection system using multi-channel vibrating wire sensor. Transducer and Microsystem Technologies，2014；33(4)：68—71

4　袁广超，徐振宇，田旭东，等. 多路振弦传感器的扫频激振技术. 电子技术应用，2010；36(5)：26—28
Yuan Guangchao, Xu Zhenyu, Tian Xudong, *et al.* Technology of sweeping frequency to excite multi-channel of vibrating wire sensor. Application of Electronic Technology, 2010；36(5)：26—28

5　吕　燚，李文生，邓春健. 多通道振弦传感器同步测量系统. 传感技术学报，2013；26(3)：372—376
Lü Yi, Li Wensheng, Deng Chunjian. Synchronous measurement system of multichannel vibrating wire sensor. Journal of Sensing Technology，2013；26(3)：372—376

6　华　涛，李桂平，蓝　彦，等. 低功耗无线振弦式测量模块的研制与应用. 水电与抽水蓄能，2016；2(1)：78—84
Hua Tao, Li Guiping, Lan Yan, *et al.* Development and application of low power wireless vibrating wire measurement module. Hydropower and Pumped Storage，2016；2(1)：78—84

7　张志文，王　晴. 基于游标法的高精度测频系统设计. 科学技术与工程，2012；(31)：8229—8234，8264
Zhang Zhiwen，Wang Qing. Design of high precision frequency measurement system base on the vernier method. Science Technology and Engineering，2012；(31)：8229—8234，8264

8　贺　虎，王万顺，田冬成，等. 振弦式传感器激振策略优化. 传感技术学报，2010；23(1)：74—77
He Hu, Wang Wanshun, Tian Dongcheng, *et al.* Optimization of vibrating wire sensor excitation strategy. Journal of Sensing Technology，2010；23(1)：74—77

9　Fan L, Qi G. A new synthetic frequency estimation method of sinusoid based on interpolated FFT. International Conference on Instrumentation & Measurement. IEEE, 2015

10　陈　妮，何华光，谢开仲. 基于全相位 FFT 的振弦式传感器频率测量系统设计. 电子技术应用，2016；42(07)：53—56
Chen Ni，He Huaguang，Xie Kaizhong. Design of frequency measurement system for vibrating wire sensorbased on all phase FFT. Application of Electronic Technology, 2016；42(07)：53—56

11　Quinn B G. Recent advances in rapid frequency estimation. Digital Signal Processing, 2009, 19(6)：942—948

Design of Multi-channel Synchronous Frequency Measurement System for Vibrating Wire Sensor

CHEN Ni[1,2], HE Hua-guang[3], XIE Kai-zhong[4 *]

(College of Electrical Engineering, Guangxi University[1], Nanning 530004, China; Department of Electronics, Guangxi Medical University[2], Nanning 530021, China; College of Computer and Electronics and Information[3], College of Civil and Architecture Engineering[4], Guangxi University, Nanning 530004, China)

[**Abstract**] Multi-channel vibrating wire sensor frequency measurement system usually adopts the way of time-sharing asynchronous measurement, which can hardly meet the measurement needs of dynamic responses of bridges and other mega structures. In response to it, a set of multi-channel vibrating wire sensor synchronous frequency measurement system is developed on basis of a synchronous measurement method integrating simultaneous vibration and time-sharing measurement given in the chapter. Centering on Cortex-M4 processor, the system uses Rife-Quinn algorithm to figure out the frequency. Experimental test result of the system indicates that it can complete synchronous measurement of four-channel vibrating wire sensor, and its relative error of frequency measurement in noiseless condition is less than 0.007%; Input sinusoidal signal with a frequency of 1 kHz and a peak ranging from 2 μV to 3.4 mV, the system's relative error of frequency measurement is less than 0.005% and its standard deviation is less than 0.04 Hz; When white noise interference is imposed, the system's SNR ranges from −9 to 9 dB, and its relative error of frequency measurement is less than or equal to 0.2%.

[**Key words**] vibrating wire sensors synchronous measurement Cortex-M4 Rife and Quinn algorithm