

基于 MSP430 的微弱信号检测系统设计与实现

屈正庚¹, 杨 川², 周川云²

(1. 商洛学院 数学与计算机应用学院, 陕西 商洛 726000;

2. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054)

摘 要: 为了克服微弱信号检测难度大、精确度低, 实现强噪声环境下微弱信号的准确、快速检测, 根据锁相环检测原理, 设计了基于 TI 公司超低功耗微控制器 MSP430G2553 的微弱信号检测系统。该系统由加法器、纯电阻分压网络、微弱信号检测电路、显示电路组成, 用来检测在强噪声背景下已知频率的微弱正弦波信号的幅度值, 并数字显示出该幅度值。微弱信号检测电路分为测量放大电路、滤波电路、乘法检波电路和低通滤波电路, 将微弱的小信号提取出并检测其幅值。整个系统功耗低、检测精度高、成本低。电路结构简单, 利于在便携设备中使用。通过实验表明, 设计的微弱信号检测系统扩大了噪声信号幅度的范围, 提高了检测精度, 整体性能提高了 5% 以上, 同时保持使误差在 5% 以下。

关键词: 微弱信号; 信号处理; MSP430G2553; 幅值采集; 乘法检波

中图分类号: TM937

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2019)09-0146-06

doi: 10. 3969/j. issn. 1673-629X. 2019. 09. 028

Design and Implementation of Weak Signal Detection System Based on MSP430

QU Zheng-geng¹, YANG Chuan², ZHOU Chuan-yun²

(1. School of Mathematics and Computer Application, Shangluo University, Shangluo 726000, China;

2. School of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to overcome the difficulty and low accuracy of weak signal detection and realize the accurate and fast detection of weak signal in the environment of strong noise, we design a weak signal detection system based on TI company's ultra-low power consumption microcontroller MSP430G2553 according to the phase-locked loop detection principle. This system is composed of adder, pure resistance divider network, weak signal detection circuit and display circuit, which is used to detect the amplitude value of weak sine wave signal with known frequency under the background of strong noise, and display the amplitude value digitally. Weak signal detection circuit is divided into measuring amplifier circuit, filtering circuit, multiplicative detection circuit and low-pass filtering circuit. Weak small signal is extracted and its amplitude is detected. The whole system is of low power consumption, high precision and low cost with simple circuit structure, which is convenient in portable devices. Experiment shows that the designed weak signal detection system expands the range of the noise signal amplitude, improves the detection accuracy and the overall performance by more than 5%, while keeping the error below 5%.

Key words: weak signal; signal processing; MSP430G2553; amplitude acquisition; multiplication detection

0 引言

在现代一些常见的自然现象以及一些具有规律变化的科学研究和工程实践中, 常常会遇到需要检测非常小的毫微伏量级信号的问题。因此, 产生了微弱信号检测这一门新兴的分支科学技术, 同时微弱信号检测在各个领域中也得到广泛的应用。它利用电子学、信息论和物理学等常用的方法, 分析噪声产生的原因

和规律, 研究被测微弱信号的特征和相关性, 检测并恢复被噪声掩盖的微弱信号^[1]。

目前现有的微信号检测方法有多种, 各有优缺点, 有各自的应用领域。在实际检测中, 检测强噪声信号下的弱信号检测方法、检测技术已经逐渐成为一种发展趋势^[2-3]。

文中设计了一种基于 TI 公司 MSP430G2553 单片

收稿日期: 2018-11-14

修回日期: 2019-03-11

网络出版时间: 2019-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61173190); 陕西省教育科研计划项目(16JK1236); 商洛市科学技术研究发展计划项目(SK2016-33)

作者简介: 屈正庚(1982-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为协同设计与网络控制、信号处理。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190424.1055.078.html>

机的微弱信号检测系统。该系统在强噪声信号下能够精确地检测到所需要的原始信号,能够在强噪声下检测到微弱信号,如微弱光、微温差、弱电流等。在实际应用中具有一定的参考价值。

1 系统方案及原理

检测微弱信号不仅需要强噪声中检测出目标信号,而且某些检测信号频率较高,还要求检测系统必须有足够快的检测速度。目前的众多检测方法仍存在许多局限性。为了克服微弱信号检测难度大,精确度低,

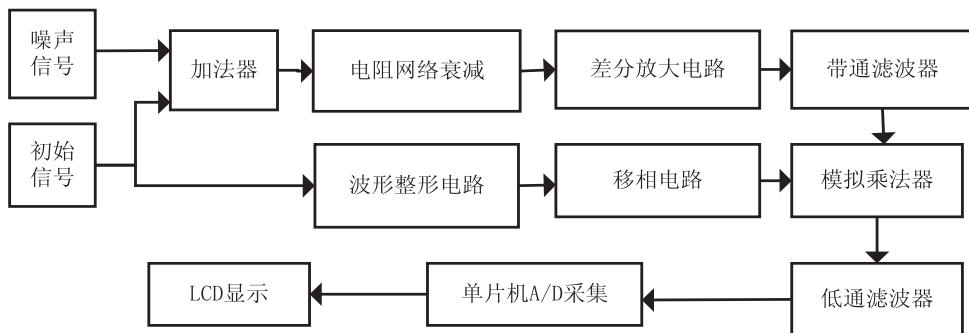


图1 系统流程

通过加法器和电阻网络衰减电路模拟得到一个逼真的混有待检测信号的强噪声信号,经过差分放大电路对该信号进行初步放大处理,抑制共模信号,放大差模信号;放大后的信号进入带通滤波器,带通滤波器的通带为检测信号的频率范围,滤除绝大部分通带外的噪声,获得滤波信号;滤波信号经过整形处理得到的信号与滤波信号经过移相处理得到的信号通过模拟乘法器相乘,得到锁相放大信号;使用低通滤波器对该信号进行处理获得该信号的有效值;并通过AD转换,将该有效值转换为数字信号;单片机通过该数字信号进行处理,就得到了原始信号的幅值,并通过LCD进行显示^[5-6]。

CPU采用TI公司的MSP430G2553,其主要优点是小巧灵活、成本低、易于产品化,能方便地组装成各种智能式控制设备以及各种智能仪器仪表。同时,抗干扰能力强,适应温度范围宽,在各种恶劣环境下都能可靠地工作。这是其他机型无法比拟的^[7]。

2 硬件电路设计

2.1 加法器与电阻网络衰减电路

为了得到系统所需要的混合信号,同时为了更逼真模拟在噪声情况下检测微弱信号,特地加了一个加法器,同时还需要考虑加法器的速度,因此选用了单运放OP27,该运放是低噪声精密运放^[8]。

通过加法器后的混合信号经过电阻网络衰减,因为在信号幅值比较大的时候就必须通过衰减再经过后

实现强噪声环境下微弱信号的准确、快速检测,根据锁相环检测原理,文中设计了一种能够准确、快速、方便地检测微弱信号的装置。主要采用锁相环检测原理,对微弱信号进行检测提取,计算检测信号有效值,并通过单片机处理后进行显示^[4]。

系统主要分为10个部分,分别是加法器、电阻网络衰减、差分放大电路、带通滤波器、波形整形电路、移相电路、模拟乘法器、低通滤波器、单片机A/D采集部分、LCD显示部分,系统流程如图1所示。

面的处理,模拟一个理想的环境。该系统主要进行了100倍衰减,根据三个纯电阻分压原理进行衰减,以达到所要求的效果。图2是加法器和电阻网络衰减电路^[9]。

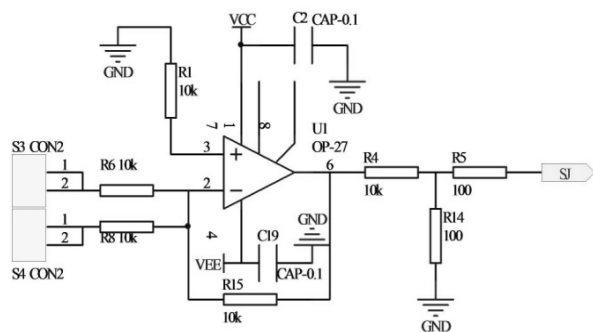


图2 加法器和电阻网络衰减电路

2.2 放大与滤波电路

在通过加法器和衰减器后,得到一个微小的信号,这时就需要进行放大。由于是在音频信号下进行测试,要求输入阻抗特别高,同时要求电路有很高的共模抑制比。因此,该系统采用差分放大电路(仪表放大器)进行小信号放大^[10]。

差分放大对共模抑制信号有很强的抑制作用,而对差模信号影响不大,所以,差分放大电路可以抑制由外界条件的变化带给电路的影响。其中,共模抑制比CMRR用来衡量差分放大电路抑制共模信号的能力。共模信号是作用在差分放大器上的两个输入端的相同信号,一般是由于线路传导或者空间磁场干扰产生的,

是不希望出现的信号。差模信号是两个输入端信号的相位相差 180° 。如果共模信号被放大很多,会影响真正需要放大的差模信号。放大电路如图 3 所示。

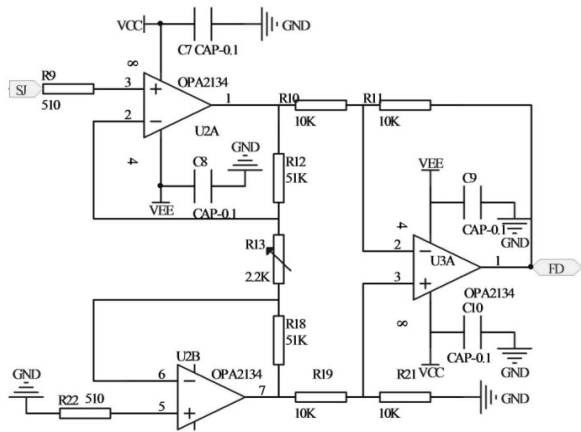


图 3 仪表放大电路

带通滤波器是为了将混合信号中的噪声信号初步滤除,得到一个接近于原始信号的信号,为后面模拟乘法器做准备。电路主要是一个二阶低通和一个二阶高通组成的四阶带通滤波器,能够更好、更有效地滤除噪声信号。通过计算得到带通滤波器中的上截止频率和下截止频率,这样就得到一个较好的带宽,该系统设置的带宽为 $500 \text{ Hz} \sim 2 \text{ kHz}$ 。

2.3 波形整形与移相电路

由于后一级的模拟乘法器需要一个与初始信号同相位、同频率的参考信号,才能得到一个半波信号,因此,系统需要一个波形整形电路,将初始信号经过处理得到一个同相位、同频率的方波。该系统采用运放进行电压比较得到一个方波,运放比较法比较出来的波形比施密特触发器产生的波形效果更好,更能满足系统所需要的效果^[11]。

由于信号通过波形整形电路后有一定的相位差,同时为了和通过带通滤波器的信号同相位,因此必须要加一个移相电路,让两路信号在同相位同频率的情况下进入乘法器。移向电路主要是因为电路中的电阻、电容具有移相的功能,电容的端电压落后于电流 90° ,电阻的端电压超前于电流 90° ,电路中用两个运放做了一个 RC 滞后电路和一个 RC 超前电路,如图 4 所示。

前一级的 OP27 组成了一个 RC 超前移相电路,后级运放 U7 组成了一个 RC 滞后移相电路,前级电路电容接在前,电阻接在后的状态下,电阻上的电压与电容同相位,这个电压比起输入端的电压相位就要超前。后级电路的输入信号从电阻进入,信号经过电容 C27。由于电容要充电,所以电压要比电流滞后 90° ,等电容充满电后才有电压。因为输出电路是与电容并联电压

相等,所以输出电路的电压也滞后电流^[12]。

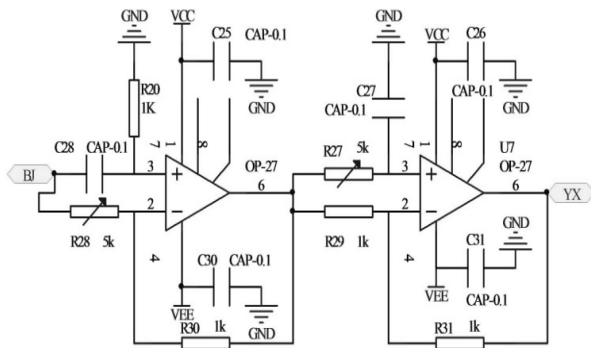


图 4 移相电路

2.4 模拟乘法电路

在之前将初始信号和参考信号处理后,得到同相位同频率的两个信号,最后通过乘法器得到一个半波信号。系统主要采用 AD633 组成模拟乘法器,可以在不断改变初始信号的幅值和频率时,精确地测出初始信号的幅值^[13]。

电路如图 5 所示。X、Y 两个通道有负面节点接地,也就是将 AD33 的 2、4 脚接地,两个输入信号通过 1、3 脚输入 AD633 通过内部的电流电压转换器将输入电压转换为电流,其内部齐纳二极管提供了一个 10 V 的参考电压,因此最后乘法器输出的电压是:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + Z \quad (1)$$

其中, Z 是 AD633 内部的放大器的高阻抗求和节点,因此整个乘法器输出的电压值就是 W。

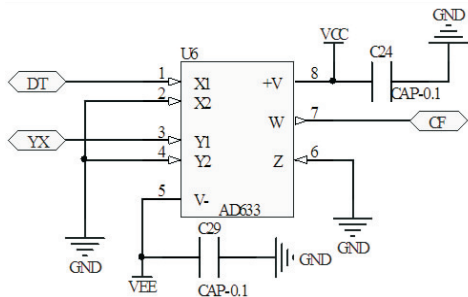


图 5 模拟乘法器

2.5 后级信号处理—低通滤波器

在初始信号和参考信号通过模拟乘法器后得到一个半波信号,为了得到一个直流分量,通过一个低通滤波器将一些在带通中没有滤掉的高频信号进行进一步滤出,得到一个较为精准的直流分量,然后将这个直流分量送入单片机中进行检测,通过程序的处理就可以得到初始信号的幅值^[14]。

3 软件设计

3.1 程序流程

根据系统的需要,在检测中必须实现峰值为 20

mV ~ 2 V 的信号测量,并且其误差必须不小 5%,即误差要在 1 mV 以内。MSP430G2553 完全满足采样要求,采样分辨率可达到 0.002 4 V。

整个程序的流程如图 6 所示。通过整个硬件电路

后得到一个幅值,然后用 MSP430G2553 自带的 AD 进行电压采集。由于得到的信号带有一些干扰,因此在 AD 采集的过程中电压值不稳定,这时,需要多次采集电压值最后取平均值^[15]。

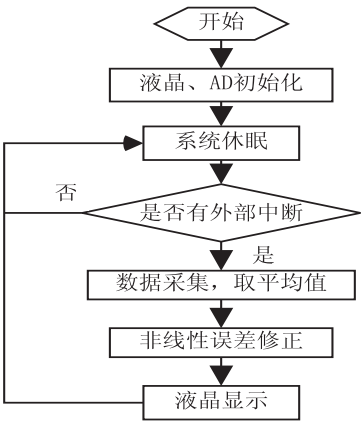


图 6 系统总流程

3.2 非线性误差校准

在一些非线性数据中,要得到线性的直线,就需要将非线性的图形分别取出一段采样点的值,通过每一段采样点的值将相邻之间直线相连就可以近似得到一条近似线性的直线。因此,系统校正的目的之一就是得到一条线性的 AD 转换值-实际电压值线性直线^[16]。

非线性校正示意如图 7 所示。

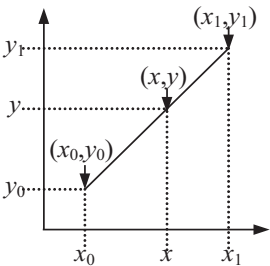


图 7 非线性校正示意

假设已经测得了 N 个标准电压值,如 y_1, y_2, \cdots, y_n , 以及 AD 对应采样的值,如 x_1, x_2, \cdots, x_n 。在 N 值足够大的情况下,可以假设相邻两点是线性关系,因此,具体某测量点对应的电压值可用以下方法获得^[9]。当知道了未知值 x 那两个 x 值的中间值,根据已知的坐标 (x_0, y_0) 与 (x_1, y_1) , 就可以得到 $[x_0, x_1]$ 区间内某一位置 x 在直线上的电压值^[17]。

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

(2)

假设方程两边的值为 α , 那么这个值就是插值系数—从 x_0 到 x 的距离与从 x_0 到 x_1 距离的比值。由于 x 值已知,所以可以从式 3 得到 α 的值:

$$\alpha = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

(3)

4 数据测试与分析

4.1 测试环境、仪器与测试内容

环境温度为 35°。仪器为 Agilent DSO-X2012A 双通道示波器;DS1022 双通道信号发生器;直流稳压电源;测试内容为不同幅值以及不同频率下系统检测到的数据;系统检测的数据误差是否在 5% 以内。

4.2 测试结果与误差分析

(1) 当初始信号的频率为 1 kHz、幅值在 100 mV ~ 2 V 范围内时,其测试结果如表 1 所示。

表 1 频率为 1 kHz 时的测试结果

输入正弦波幅度/V	LCD 显示的幅度/V	误差/%
0.100	0.103	3.000
0.200	0.205	2.500
0.300	0.306	2.000
0.400	0.408	2.000
0.500	0.501	0.200
0.600	0.605	0.830
0.700	0.710	1.400
0.800	0.808	0.100
0.900	0.904	4.440
1.000	1.042	4.200
1.100	1.112	1.200
1.200	1.230	2.500
1.300	1.332	2.461
1.400	1.413	1.000
1.500	1.525	1.667
1.600	1.615	0.910
1.800	1.823	1.270
2.000	2.023	1.150

(2)当初始信号的频率为 500 Hz、幅值在 100 mV ~ 2 V 范围内时,其测试结果如表 2 所示。

表 2 频率为 500 Hz 时的测试结果

输入正弦波幅度/V	LCD 显示的幅度/V	误差/%
0.100	0.104	4.000
0.200	0.201	0.500
0.300	0.298	1.000
0.400	0.395	1.200
0.500	0.496	0.800
0.600	0.591	1.500
0.700	0.698	0.285
0.800	0.796	0.500
0.900	0.896	0.556
1.000	0.995	0.500
1.100	1.095	0.450
1.200	1.192	0.667
1.300	1.295	0.385
1.400	1.392	0.571
1.500	1.483	0.113
1.600	1.590	0.625
1.800	1.790	0.556
2.000	1.990	0.500

(3)当初始信号的频率为 1.5 kHz、幅值在 100 mV ~ 2 V 范围内时,其测试结果如表 3 所示。

表 3 频率为 1.5 kHz 时的测试结果

输入正弦波幅度/V	LCD 显示的幅度/V	误差/%
0.100	0.104	4.000
0.200	0.205	2.500
0.300	0.306	2.000
0.400	0.408	2.000
0.500	0.510	2.000
0.600	0.610	1.667
0.700	0.720	2.856
0.800	0.825	3.125
0.900	0.921	2.333
1.000	1.046	4.600
1.100	1.112	1.090
1.200	1.234	2.833
1.300	1.342	2.615
1.400	1.410	0.714
1.500	1.508	0.533
1.600	1.613	0.812
1.800	1.823	1.278
2.000	2.014	0.700

(4)当初始信号的频率为 2 kHz、幅值在 100 mV ~ 2 V 范围内时,其测试结果如表 4 所示。

表 4 频率为 2 kHz 时的测试结果

输入正弦波幅度/V	LCD 显示的幅度/V	误差/%
0.100	0.103	3.000
0.200	0.198	1.000
0.300	0.295	1.667
0.400	0.394	1.500
0.500	0.495	1.000
0.600	0.589	1.833
0.700	0.690	1.428
0.800	0.789	1.375
0.900	0.890	1.111
1.000	0.992	0.800
1.100	1.092	0.727
1.200	1.190	0.833
1.300	1.289	0.846
1.400	1.389	0.786
1.500	1.495	0.333
1.600	1.588	7.500
1.800	1.790	0.556
2.000	1.980	1.000

通过测试的结果和数据可以看出,当噪声源输出电压值固定时,由于系统每级电路都运用了低噪声音频运放并且输入阻抗比较大;当初始信号的频率为 500 Hz ~ 2 kHz、幅度峰值在 100 mV ~ 2 V 范围内时,随着初始信号幅度的增加,精确度总体越来越高,而且误差都在 5% 以内,测出的整个幅值变化都是呈线性变化的^[18]。

该系统较好完成了所要求,同时,更进一步扩大了噪声信号幅度的范围,测出的结果也都比较准确。因此,该系统在原来的基础上提高了检测精度,使误差都保持在 5% 以内。

其中,误差来自多方面,甚至包括单片机内浮点误差,当然更大的来源于系统的内外噪声以及硬件电路中存在一些干扰,虽然所选器件均为低噪声器件,但难免引入噪声,这在小信号测量时便会体现出来,而系统外噪声较难控制^[19]。

5 结束语

文中设计了一种基于 MSP430 的微弱信号检测系统。系统的硬件部分主要运用了一系列的常用电路来实现信号的处理,将微弱的小信号提取出并检测其幅值。整个硬件系统具有简单实用、精度较好、抗干扰性较好的特点。

对于强噪声背景下的微弱特征信号检测一直是各个工程应用领域的一个难题,目前主要有基于线性理论的时域、频域、时频域,以及基于非线性理论的微弱信号检测方法^[11]。近年来,随着信号检测与处理中引入基于非线性动力学系统的数学理论,如混沌理论、随机共振原理等,在微弱信号检测研究领域中,利用非线性动力学系统特有的性质来检测微弱信号的方法逐渐显现出优势。因此,随着信号检测与处理中非线性理论和方法的广泛应用,非线性的分析方法也会是未来微弱信号检测研究的主要方向之一。

参考文献:

[1] 章圣意,黄咏梅. 基于耦合随机共振的涡街信号检测方法研究[J]. 自动化仪表,2018,39(7):65-69.

[2] 范 军,蒋见花,王海龙. 一种适用于信号检测的低失真低功耗 $\Sigma-\Delta$ A/D 转换器[J]. 微电子学,2011,41(4):488-491.

[3] 刘文静,王民慧,汪亚霖,等. 强磁场下微弱信号检测系统设计[J]. 传感技术学报,2013,26(6):865-870.

[4] 侯海平,曲长文,向迎春,等. LFM CW SAR 调频非线性的等效分析方法[J]. 电子科技大学学报,2012,41(2):198-202.

[5] 易 航,郝 研. 基于级联双稳随机共振的微弱信号检测方法研究[J]. 计算机测量与控制,2012,20(7):1821-1823.

[6] 武 丽,胡代弟. 无线网络通信噪声信号精准过滤仿真研究[J]. 计算机仿真,2018,35(5):266-269.

[7] 陈铖颖,黑 勇,胡晓宇. 一种适用于传感器信号检测的斩波运算放大器[J]. 微电子学,2012,42(1):17-20.

[8] 刘 磊,范铁生,王银斌,等. 基于信号包络分析的并行微弱信号检测算法[J], 计算机应用,2012,32(8):2133-2136.

[9] 葛益娴,杨 博,张加宏,等. 基于 MSP430 单片机的低功耗智能轮胎监测系统设计与实现[J]. 科学技术与工程,2013,13

(16):4529-4533.

[10] 兀旦晖,李秦君,杨 萍. 噪声对基于 Duffing 方程弱信号检测的影响研究[J]. 计算机测量与控制,2010,18(1):61-63.

[11] 樊养余,李利品,党瑞荣. 基于随机共振的任意大频率微弱信号检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(3):566-572.

[12] 董勇伟,梁兴东,丁赤飏. 调频连续波 SAR 非线性处理方法研究[J]. 电子与信息学报,2010,32(5):1034-1039.

[13] 张勇亮,李国林,张晓瑜. 基于并联自适应随机共振的微弱信号检测方法[J]. 计算机工程与设计,2017,38(5):1324-1330.

[14] 夏均忠,刘远宏,马宗坡,等. 基于调制随机共振的微弱信号检测研究[J]. 振动与冲击,2012,31(3):132-135.

[15] LEI Yaguo, QIAO Zijian, XU Xuefang, et al. An underdamped stochastic resonance method with stable-state matching for incipient fault diagnosis of rolling element bearings [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94: 148-164.

[16] XIA Ping, XU Hua, LEI Mohan, et al. An improved stochastic resonance method with arbitrary stable-state matching in underdamped nonlinear systems with a periodic potential for incipient bearing fault diagnosis [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8): 77-85.

[17] DANZIGER Z, GRILL W M. A neuron model of stochastic resonance using rectangular pulse trains[J]. Journal of Computational Neuroscience, 2015, 38(1): 53-66.

[18] ZHAO Jianxing, SANG Caili. A new S-type upper bound for the largest singular value of nonnegative rectangular tensors [J]. Journal of Inequalities and Applications, 2017, 63(1): 106-110.

[19] HU An, CHODAVARAPU V P. General-purpose high-speed integrated lock-in amplifier with 30 dB dynamic reserve at 20 MHz [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2013, 75(3): 369-382.

(上接第 204 页)

[9] CHARFI I, MITERAN J, DUBOIS J, et al. Definition and performance evaluation of a robust SVM based fall detection solution[C]//Eighth international conference on signal image technology and internet based systems. Naples, Italy: IEEE, 2012: 218-224.

[10] DEBARD G, MERTENS M, DESCHODT M, et al. Camera-based fall detection using real-world versus simulated data: how far are we from the solution? [J]. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 2016, 8(2): 149-168.

[11] FAN Yaxiang, LEVINE M D, WEN Gongjian, et al. A deep neural network for real-time detection of falling humans in naturally occurring scenes[J]. Neurocomputing, 2017, 260: 43-58.

[12] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only

look once: unified, real-time object detection [C]//2016 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Las Vegas: IEEE, 2016: 779-788.

[13] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger [C]//2017 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2017: 6517-6525.

[14] CAO Z, SIMON T, WEI S E, et al. Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields [C]//2017 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2017: 1302-1310.

[15] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [C]//International conference on learning representations. [s. l.]: [s. n.], 2015: 1150-1210.