

一种传感器信号调理的补偿系统的设计及实现

邵刚,田泽,刘敏侠,蔡叶芳

(中航工业西安航空计算技术研究所,陕西 西安 710065)

摘要:压阻型传感器存在温度漂移误差和输出信号非线性等问题,当使用压阻传感器构建精密传感系统时,压阻型传感器的非线性特性影响系统的测量精度。通常情况下,为解决传统传感器的精度,往往采取板级补偿的方法,补偿算法开发复杂,造成传感系统体积大、功耗较大。文中通过研究电阻型传感器的非线性产生原理和补偿方法,设计并实现了一种工作范围达到 $-65 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高精度传感器信号调理的单芯片,在此基础上实现了信号调理的校准软件的补偿算法及校准使用软件。基于上述研究,构建了以信号调理芯片为核心的单片传感器信号调理补偿系统,并对单芯片补偿后的传感器系统进行了实际测试。测试结果表明在 $-55 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内输出的信号与压力呈良好的线性关系,误差小于 6% ,满足系统的测量精度需求;高集成度的单芯片设计也满足工程小型化、低功耗、高精度的要求,为信号调理补偿提供了新的技术手段。

关键词:压阻传感器;信号调理芯片;温度补偿;补偿算法

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)06-0189-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.06.042

Design and Implementation of Sensor Signal Conditioner and Compensation System

SHAO Gang, TIAN Ze, LIU Min-xia, CAI Ye-fang

(Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute of AVIC,
Xi'an 710065, China)

Abstract: The intrinsic error of non-linearity output and temperature drift for pressure sensor has a strong impact to the entire system accuracy when using pressure sensor to build precision sensor system. Under normal circumstances, in order to solve the precision of the traditional sensor, often take the board compensation method, the compensation algorithm is complex for development, causing large volume and big power consumption for sensor system. Through the study of nonlinear principle and compensation method of resistance type sensor, design and realize a single chip disposed by high precision sensor with work scope of $-65 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, on this basis, realize the calibration software compensation algorithm of signal disposal and software of calibration. Based on the above research, the single sensor signal conditioning compensation system with signal conditioning chip as the core is constructed, and the sensor system of single chip compensation is tested. The measurement shows that a good linearity performance of output versus the measured pressure is observed at temperature range from $-55 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, the total error is less than 6% , meeting the requirements of measurement precision. High integration of the single chip design also meets the requirements of miniaturization, low power consumption, high precision, and provides a new technical means for signal disposal compensation.

Key words: piezoresistive sensor; signal conditioner chip; temperature compensation; compensation algorithm

0 引言

压阻传感器具有灵敏度高,稳定性好,频率响应范围宽,易于小型化,便于批量生产与使用方便等特点,是一种发展迅速、应用广泛的新型传感器,多用于航空

恶劣环境中进行飞行气动参数、液压、油压等系统测量。但是由于传感器材料的温度特性,压阻传感器会发生温度漂移,且存在非线性,在很大程度上限制了压阻传感器的测量精度^[1-2]。

收稿日期:2014-07-17

修回日期:2014-10-23

网络出版时间:2015-05-20

基金项目:“十二五”微电子预研(51308010601,51308010711);总装预研基金(9140A08010712HK6101)

作者简介:邵刚(1978-),男,硕士,研究方向为高速数模混合集成电路设计;田泽,博士,研究员,研究方向为SoC设计、嵌入式系统设计、VLSI设计。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150520.1513.005.html>

为改善压阻传感器的温度漂移,一般采用补偿措施进行系统补偿,以提高压阻传感器的精度。传统的补偿方法可分为软件补偿^[3-4]和硬件补偿^[5-6]两类。硬件补偿方法通常是针对核心压敏电阻或惠斯通电桥内部,采用串并联电阻的方式进行桥内或器件内部补偿,但这种方式电阻的确定需通过很多测量和计算,阻值获取甚为繁琐,并且随着温度的变化电阻呈现一个非线性的变化,补偿中存在较大的误差,难以满足系统的测试精度要求^[5]。软件补偿方法主要是针对压阻传感器的输出信号,对传感器的标定数据进行处理的技术方法,主要有二维回归分析法、二维插值法和神经网络方法。虽然软件补偿的方法较为灵活,不需要进行复杂的电路设计,但是软件补偿需要求解大规模的矩阵方程,精度要求较高时,方程的维数很多,计算的数据量极其庞大,制约了系统的实时性处理等需求。

针对传统压阻传感器补偿方法的缺陷,提出了一种新的单芯片智能化的压阻传感器补偿思路 and 方案。该方法利用现代信号调理技术,以高精度传感器信号调理芯片为核心,通过校准流程和拟合算法确定工作温度范围内的所有温度补偿参数,从而实现了对于压阻传感器温度漂移和非线性的高精度补偿,满足航空电子传感器系统高集成度、低功耗、小型化、高精度的发展需求。

1 架构设计

现代信号调理技术是一种软件与硬件相结合的信号调理技术,利用适当的补偿算法与专用集成信号调理芯片相结合是一种很有效的对压阻传感器进行温度补偿的方法。系统设计的核心是高精度信号调理芯片的设计实现,围绕传感器温度漂移和输出非线性等缺点,在芯片内部采用一阶零点漂移和满量程的补偿及高阶非线性补偿相结合的架构。

高精度传感器信号调理芯片,为适应系统的应用需求,减少外围接口数,采用单线异步串行通信模式,通过 FPGA 通信模块转换为 RS232 协议的数据格式,使用通用串口即可实现通信。在工作环境温度 and 压力下进行预校准和主校准,确定零点偏移和满量程补偿值,使用软件按照曲线拟合或折线拟合两种方式生成整个温度下的零点偏移和满量程的校准数据,最后将数据写入芯片内部的 FLASH 存储器中。

整体的系统架构如图 1 所示。整体的系统架构包括了上位机、RS232 通信接口、FPGA 通信模块、信号调理补偿芯片以及压阻传感器,其中右半部分为信号调理补偿芯片的功能原理框图。该系统可同时对多路传感器进行校准和测试,极大地提高了应用效率。

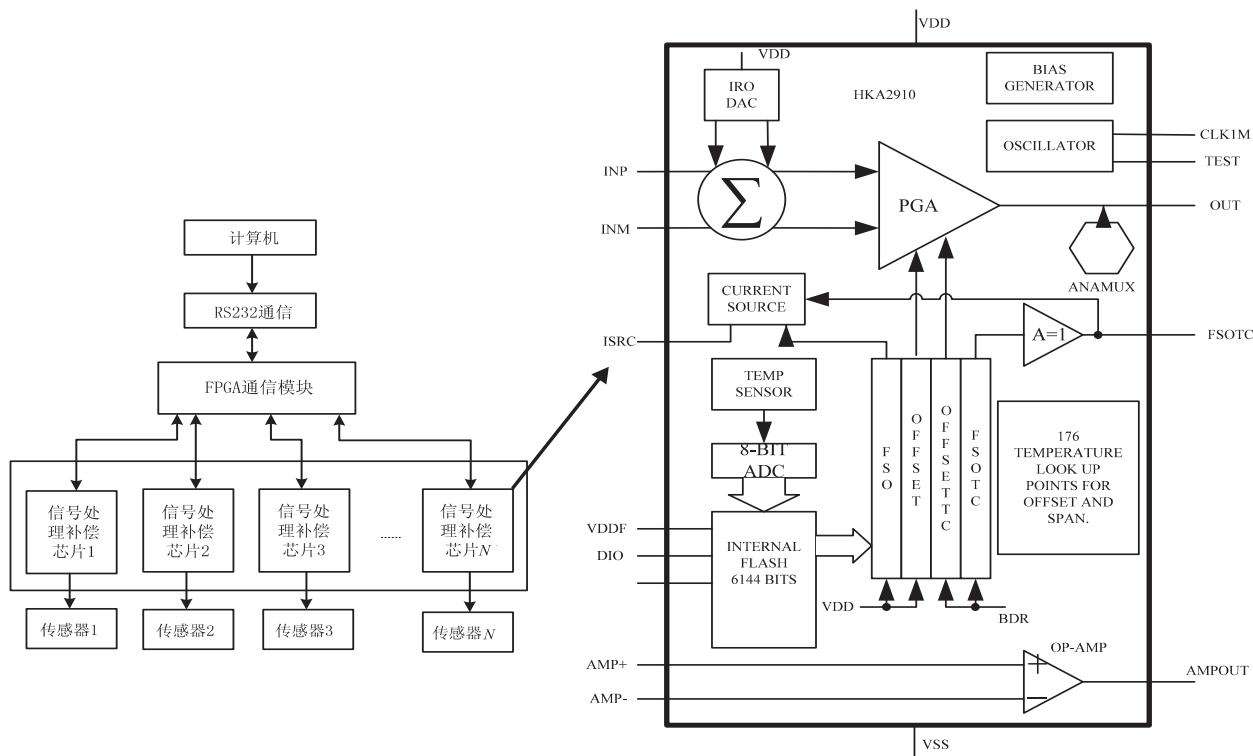


图 1 补偿系统结构图

(1) 压阻传感器特性。

由于压阻传感器具有抗振性、耐冲击性、耐腐蚀性以及抗干扰能力强等特点,加上采用集成电路的加工

方法体积小等特点,对于航空领域的压力测量显得尤其重要。鉴于此,其广泛应用于航空领域测量系统中。

压阻传感器等效电路为惠斯通电桥,此类传感器

在测量过程中要和被测物接触或者处在测量环境中才能得到测量结果,所以传感器会受到环境温度等影响^[7-8],导致输出信号产生零点漂移和灵敏度漂移。该特性主要是由于半导体物理性质对温度的敏感性所决定的。零点漂移是因为扩散电阻阻值随着温度的改变不一致而产生的;温度升高时,压阻系数减小,反之增大,故当温度升高时,传感器的灵敏度会降低。通过以上分析可得:用半导体材料作为敏感元件的压阻传感器的温度特性不稳定,温度漂移现象明显,而且它特殊的加工工艺又使其非线性误差也具有随机性^[9-10]。因此,压阻传感器温度漂移特性和非线性误差等技术瓶颈,使得传感器的应用受到了制约。

鉴于系统对通信接口的单线程要求,调理芯片采用双向单端口异步通信模式,需要设计与之配套的FPGA通信模块,将单端口通信转换为较为通用的RS232串口通信模式,可直接与计算机进行通信。校准通信模块包括FPGA芯片、RS232驱动器、电源模块、晶振、配置FLASH、JTAG接口以及驱动器模块。主要电路设计实现如图2所示。

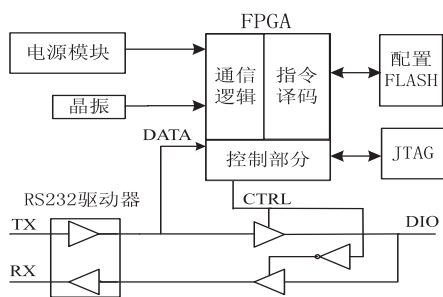


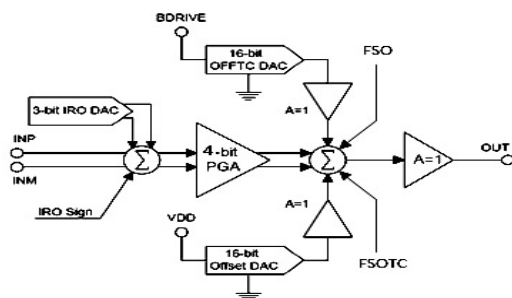
图2 FPGA通信模块电路图

(2) 校准通信模块。

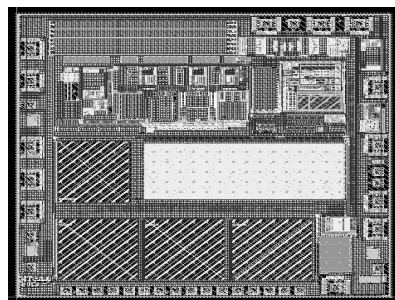
为解决此问题,设计了一款大规模数模混合信号集成电路。其电路功能复杂、模块较多,主要组成为:可编程的传感器激励、16级可编程增益放大器(PGA)、多个高精度的16位SIGMA-DELTA DAC、高性能通用运算放大器、内嵌的CMOS温度传感器以及单端口通信和数字控制逻辑,并将FLASH存储器集成在芯片内部。芯片提供两种工作模式:测试模式和环路模式。环路模式下,数字控制逻辑每1 ms刷新温度索引值,作为FLASH的地址查询四个高精度DAC的补偿值,利用零点偏移的温度系数(OTC)和满量程温度系数(FSOTC)提供一阶温度补偿,并利用多个温度点的零点偏移(OFFSET)和满量程(FSO)提供高阶非线性温度补偿。

芯片的内部主通路为模拟主通路,进行信号放大的同时可对零点漂移和满量程进行补偿,其电路结构和版图如图3所示。主要过程为:首先,信号进行零点漂移的粗调(3位IRO调整);然后,进行16个STEP的可编程增益放大;最后进行PGA输出与零点漂移

DAC信号叠加。满量程补偿则通过桥电压调节传感器的供电,直接调整FSODAC和FSOTCDAC的值实现,输出信号与各个DAC的关系如式1所示。



(a) 结构图



(b) 版图

图3 高精度传感器调理芯片

$$V_{OUT} = V_{DD} \times \left\{ \frac{FSODAC \left(\frac{1}{RISRC} + \frac{1}{RFTC} \right)}{\frac{65}{AA} \times \frac{535}{R_b} + \frac{FSOTCDAC}{RFTC}} \right\} \times \left[V_s \times PGA + \frac{OFFTC DAC}{65 \ 535} \right] + \frac{IROCODE}{560} \times PGA + \frac{OFFTC DAC}{65 \ 535} \quad (1)$$

式中,FSODAC为存储在FSO DAC中的16位数字量;FSOTCDAC为存储在FSOTC DAC中的16位数字量;OFFTC DAC为存储在OTC DAC中的16位数字量乘以符号位;OFFSETDAC为存储在OFFSET DAC中的16位数字量乘以符号位;IROCODE为存储在IRO DAC中的3位数字量乘以符号位;RISRC、RFTC、 R_b 为电路内部的调节电阻;AA为传感器激励电流源的比例系数; V_{DD} 和 V_s 分别为电路的电源地。

芯片设计中采用了大规模数模混合信号的设计和仿真验证方法,开关电容电路失调消除技术,高精度过采样16位SIGMA-DELTA模数和数模转换器电路设计技术,恒温压阻传感器的行为级建模技术,全定制高精度电路的版图优化设计等多项关键技术。全芯片采用低功耗设计技术,信号调理芯片电流仅为2 mA,管芯尺寸2 mm×2 mm,工作温度范围-65 ~ 125 ℃。

(3) 软件设计。

由于不同的压阻传感器桥路电阻、灵敏度及输出电压范围等参数存在很大差异,所以每个传感器在使

用前均需要进行校准补偿^[11-12],因此根据经验数据制定了校准流程和补偿算法,基于此编写了校准软件。对于补偿过程所需要进行的人机对话、数据输入输出、数据处理、校准流程和算法等功能均通过软件实现。

在进行校准前,首先要设定传感器所要达到的精度、零点偏移、满量程输出电压,然后开始校准流程。预校准在常温下进行,传感器分别施加最小压力和最大压力,测量桥电压和 PGA 的模拟输出值,计算 PGA 的增益,零点偏移的粗调补偿 IRO、FSOTC 以及 OFF-SETTC 的初始值^[13]。主校准则选择几个典型的温度点,施加最小和最大压力测量 PGA 的模拟输出,使用数值逼近法反复调整寄存器参数使输出等于设定值,最终确定每个温度点下的 OFFSET 和 FSO 值。

实验过程中,在-55 ~ 125 ℃ 的范围内,若测量各个温度下的补偿系数,将是一项非常巨大且重复性的工作,甚至难以实现。所以选择有限离散点对压力传感器进行校正,记录这些点上的补偿系数,并采用数据拟合方法得到在各个温度下的补偿系数。软件提供了基于最小二乘法的曲线拟合和线性插值两种算法^[14],用户可根据所采用的传感器特性选择方法之一进行数据处理。数据处理的软件界面显性化的拟合曲线使用户更加直观地了解补偿数据,操作方便。最终计算的数据可通过软件写入芯片内部的 FLASH 存储单元中,

表 1 传感器补偿后测试数据

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
-55	0.5	0.859	1.223	1.587	1.952	2.316	2.680	3.045	3.409	3.772	4.137	4.5
-40	0.5	0.860	1.224	1.588	1.952	2.316	2.680	3.045	3.409	3.774	4.137	4.5
0	0.5	0.861	1.226	1.590	1.954	2.318	2.682	3.046	3.410	3.773	4.138	4.5
25	0.5	0.864	1.229	1.593	1.957	2.320	2.684	3.048	3.411	3.774	4.137	4.5
80	0.5	0.864	1.228	1.593	1.957	2.320	2.684	3.048	3.411	3.775	4.138	4.5
125	0.5	0.864	1.228	1.593	1.957	2.320	2.684	3.048	3.411	3.775	4.138	4.5

测试结果表明:

- (1)高精度传感器信号调理芯片工作稳定,性能良好,可在-55 ~ 125 ℃ 的温度范围内实现对压阻传感器的温度补偿,智能化程度高。
- (2)补偿系统体积小、功耗低、响应速度快。在-55 ~ 125 ℃ 的温度范围内,不同温度下的压力与输出电压关系基本一致,线性度良好,补偿精度优于 6‰。
- (3)校准软件界面清晰、美观,操作流程简单方便,提供的拟合算法精度高、运用灵活,极大提高了系统的精度和传感器的适用范围。
- (4)实验室环境下测量了 150 ℃ 下传感器的输出结果,补偿效果与 125 ℃ 下的结果相当,补偿精度也优于 6‰,但考虑到芯片的可靠性及寿命,建议工作温度不超过 125 ℃。

完成芯片校准补偿过程。

2 实验结果与分析

实验中共设置了 6 个温度补偿点,依次为-55 ℃、-40 ℃、0 ℃、25 ℃、80 ℃ 和 125 ℃。

首先,设置芯片为校准模式,将高精度传感器信号调理芯片连同压阻传感器一同放入恒温试验箱中,当箱中温度达到设定的温度点,根据软件流程施加不同的压力值,计算各个温度点下的补偿值,然后,选择曲线拟合算法确定以 1.5 ℃ 为间隔的所有补偿参数,并将拟合的数据写入芯片内部的 FLASH 存储器中。

校准完后,使芯片工作在环路模式下,智能补偿系统就可以在规定温度范围内对此传感器进行全自动补偿。信号调理芯片在进行补偿时会利用片内温度传感器检测当前环境温度,每 1 ms 将当前的温度转换为一个 8 位数传输到温度寄存器,该温度索引作为 FLASH 存储器的地址,自动搜寻存储在内部 FLASH 中的对应温度点的 4 个 DAC 的补偿系数,加载到相应的 16 bit DAC 中,并转换成模拟量修正传感器输出信号中的温度误差。

补偿之后的传感器在不同温度下,从最小压力 10 kPa 到最大压力 120 kPa 输出电压值详细测试结果见表 1。

3 结束语

采用高精度传感器信号调理芯片的温度误差补偿系统,能够精确地校正压阻传感器的温度漂移误差和输出信号的非线性,经过补偿后传感器的输入与输出之间呈现良好的线性关系,精度可达到 6‰。同时,采用信号调理芯片可简化外围电路设计,缩小电路体积,功耗低,对压力传感器更好地应用于测量领域有着重要的意义,可广泛应用于飞行器气动参数测试、液压、油压等系统中。

该系统在用户单位已进行了测试和试验,系统性能稳定、补偿精度高、温度范围广,能够满足航空恶劣环境下的系统需求,用户单位给予了很高的评价。

者下一步需要着重解决的重点内容。在下一步的工作中,笔者希望增加对以下方面的研究:

(1)研究分布式检索机制,解决单服务器下服务器负载均衡较重的问题;

(2)加强对文档检索处理机制的研究。对文档和查询构建检索模型,提升系统检索处理能力,从而促进和改善在文本信息检索和模型构建方面的研究。

参考文献:

[1] 申展,江宝林,陈伟,等.全文检索模型综述[J].计算机科学,2004,31(5):61-64.

[2] 曾海泉,刘永丹,宋扬,等.基于互关联后继树的多时间序列关联模式挖掘[J].计算机研究与发展,2003,40(7):934-940.

[3] 邓攀,刘功申.一种高效的倒排索引存储结构[J].计算机工程与应用,2008,44(31):149-152.

[4] 王冬,左万利,赫枫龄,等.一种增量倒排索引结构的设计与实现[J].吉林大学学报:理学版,2007,45(6):953-958.

[5] 吐尔洪·吾司曼,维尼拉·木沙江.维、哈、柯多语种搜索

(上接第192页)

参考文献:

[1] 薛军,纪敦,李猛,等.飞机结构应变信号的采集与预处理系统[J].数据采集与处理,2009,24(S):315-318.

[2] 周鸣争,楚宁,周涛,等.一种基于能量约束的传感器网络动态数据融合算法[J].仪器仪表学报,2007,28(1):172-175.

[3] 刘慧,唐胜武,简荣坤.基于软件补偿算法的温度压力场测试系统设计[J].仪表技术,2011(6):39-42.

[4] 张有凤,王钦若,张慧.基于压力检测的高精度数据采集系统[J].陕西理工学院学报:自然科学版,2006,22(3):55-58.

[5] 凌振宝,王君,张瑞鹏.基于非晶态合金感应式传感器补偿电路的设计[J].传感技术学报,2003,16(2):207-209.

[6] 朱旭,张世中,胡哲.感应式磁传感器的补偿电路[J].物探与化探,2012,36(6):970-974.

[7] 张宏涛,薛军晓.FPGA在温度补偿气压测量系统设计中的应用[J].电子技术应用,2013,39(4):65-67.

[8] 曹建荣,刘辉.人工神经网络在电容式压力传感器设计

引擎中索引器的研究[J].新疆大学学报:自然科学版,2011,28(2):132-135.

[6] 李晶皎,何敬禹,郑牧野,等.文件系统索引结构的研究[J].东北大学学报:自然科学版,2004,25(4):318-321.

[7] 陈立.全文检索引擎的设计研究[J].现代情报,2007,27(10):223-225.

[8] 杨安生.基于倒排表的中文全文检索研究[J].情报探索,2009(7):77-80.

[9] 郑榕增,林世平.基于Lucene的中文倒排索引技术的研究[J].计算机技术与发展,2010,20(3):80-83.

[10] 苏潭英,郭宪勇,金鑫.一种基于Lucene的中文全文检索系统[J].计算机工程,2007,33(23):94-96.

[11] 熊回香,夏立新.基于词索引的中文全文检索关键技术及其发展方向[J].中国图书馆学报,2007,33(4):45-49.

[12] 陈慧杰,李建伟.动态散列目录扩展算法的研究[J].太原科技大学学报,2013,34(5):321-324.

[13] 李蔚,陈亚峰,王艳军.动态散列算法及其改进[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2011,26(3):92-95.

[14] 郑德舜.一种高效的散列查询算法[J].南京邮电大学学报:自然科学版,2006,26(2):92-96.

上的应用[J].自动化仪表,2002,23(8):14-16.

[9] Lefevvre E,Badel A,Richard C,et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems[J].Sensors and Actuators A,2006,126:405-416.

[10] Fang H B,Liu J Q,Xu Z Y,et al. Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting[J].Microelectronics Journal,2006,37(11):1280-1284.

[11] 郑国良.传感器非线性处理方法[J].传感器技术,1991(1):40-43.

[12] 孙慧卿,郭志友.压力传感器及误差补偿[J].传感器世界,2002,8(3):14-16.


[13] 徐军.用单片机软件实现传感器温度误差补偿[J].现代电子技术,2002(10):97-99.

[14] Williams S,Thompson H,Hufford M,et al. An improved CMOS ring oscillator PLL with less than 4ps accumulated jitter[C]//Proceedings of IEEE custom integrated circuits conference. [s.l.]:IEEE,2004:151-154.

一种传感器信号调理的补偿系统的设计及实现

作者：[邵刚](#)，[田泽](#)，[刘敏侠](#)，[蔡叶芳](#)，[SHAO Gang](#)，[TIAN Ze](#)，[LIU Min-xia](#)，[CAI Ye-fang](#)

作者单位：[中航工业西安航空计算技术研究所, 陕西 西安, 710065](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015(6)

引用本文格式：[邵刚](#).[田泽](#).[刘敏侠](#).[蔡叶芳](#).[SHAO Gang](#).[TIAN Ze](#).[LIU Min-xia](#).[CAI Ye-fang](#) 一种传感器信号调理的补偿系统的设计及实现[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(6)