

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106508

某小型水下航行体深度传感信号处理方法改进^{*}

张庆国

(昆明船舶设备研究试验中心 昆明 650051)

摘要:针对某小型水下航行体深度传感信号受环境影响,产生的零位、线性度漂移,以及现场校准困难等问题,提出一种集成软硬件加纯软件的传感信号处理改进方法。该方法以嵌入式处理器和数字电位器为主,利用高阶低阻值的数字电位器进行仪表运算放大器增益和零位调整。结合相应处理算法,不仅可自动实现个体差异较大的深度传感器输出信号自适应调理,使其线性放大输出区间稳定,亦具备可扩展的数字输出,实时内部记录及便捷现场校准等功能。该方法搭载某小型水下航行体联调测试,可将其不同批次深度传感器输出信号调整至1~5 V范围内线性输出,解决不同深度传感器个体差异带来的后置处理输出线性区间不一致问题。同时,采用的硬件调零方式,也避免了常规软件调零方式带来的调整范围受限,甚至超出传感器线性区带来更大误差等问题。经实航测试,该方法在某内陆湖约100 m水深下,其实航深度测量精度可提高约2.2 m。

关键词:水下航行体;航行深度;压力传感器;信号处理;方法改进;硬件调零;自动校准

中图分类号: TP368.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Improvement of depth sensing signal processing method for a small underwater vehicle

Zhang Qingguo

(Kunming Shipborne Equipment Research & Test Center, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to solve the problems of zero position, linearity drift and field calibration difficulty caused by the environmental impact of the depth sensing signal of a small underwater vehicle, an improved sensing signal processing method integrating software and hardware with pure software is proposed. This method is mainly based on embedded processor and digital potentiometer, and uses high-order low resistance digital potentiometer to adjust the gain and zero position of operational amplifier. Combined with the corresponding algorithm, it can not only automatically realize the adaptive adjustment of the output signal of the depth sensor with large individual differences, making its linear amplification output range stable, but also has the functions of scalable digital output, real-time internal recording and convenient on-site calibration. The output signals of different batches of depth sensors can be adjusted to linear output in the range of 1~5 V, so as to solve the problem of inconsistent linear interval of post-processing output caused by individual differences of different depth sensors. At the same time, the hardware zeroing method also avoids the limitation of the adjustment range caused by the conventional software zeroing method, and even greater error caused by exceeding the linear region of the sensor. The actual navigation test shows that the accuracy of the method can be improved by about 2.2 m under the water depth of about 100 m in an inland lake.

Keywords: underwater vehicle; navigation depth; pressure sensor; signal processing; method improvement; hardware zeroing; auto calibration

0 引 言

某小型水下航行体为保证实航安全和综合控制需要,除了对自身航行状态进行实时操控外,还需对当前位置与

水面之间的垂直距离(简称“航行深度”),以及与水底的垂直距离进行实时测量。航行体当前位置与水底垂直距离信息,通常采用回声测距原理计算测量,如单/双频单波束声呐、多波束声呐等^[1]。航行体当前航行深度信息,常利用压

收稿日期:2021-04-25

^{*} 基金项目:国防基础性科研院所稳定支持项目(110042019003)资助

力传感方式,通过水压折算获得实际航行深度^[2]。

压力传感器件,主要是利用敏感元件,将外界压力的变化有效地转化为电信号变化,从而实现当前压力值计算。之后,通过水压折算即可获得航行体当前航行深度,因此亦可称为深度传感器。压力/深度传感按照基本工作原理,可分为压阻式、压电式、谐振式、电感式、电容式,以及光纤式等多种类型^[3]。某小型水下航行体在实际航行过程中,深度变化较慢,但需整体长期稳定可靠工作。综合考虑安装尺寸、重量,以及长时可靠性和经济性等因素,在某小型水下航行体上采用基于压阻式应变原理的小尺寸深度传感器进行航行深度测量。该压力传感器的敏感元件为固态压阻敏感芯片^[4],敏感芯片与波纹膜片之间充有少量硅油。波纹膜片将水压通过硅油传递到敏感芯片上,利用压阻效应实现压力与电信号的转换。后续利用惠斯通电桥输出线性电压信号^[5],以实现当前航行深度的实时测量。

在某小型水下航行体的总体设计中,压力传感测量信息直接用于航行体的安全深度控制,同时亦为航行总体控制算法的输入参数之一,其测量功能及性能直接影响航行体的总体功能及性能指标实现^[6]。另外,该航行体属于大批量交付使用产品,还需充分考虑生产制造时的组部件互换性、生产调试便捷性,以及后续维护保养与维修过程的现场可实施性。因此,必须针对性设计,使其压力传感信息涉及组部件具备良好的一致性,以保证互换性和现场便捷维修性。同时,亦需充分考虑不同使用环境参数(如温度、海拔高度等)下的便捷式现场校正与测试等问题,以提高现场校准效率。在某小型水下航行体上基于深度传感器方式进行航行深度测量时,需要相应的后置处理,如调零、放大、采集与传输等。结合实际应用及大批量生产制造,后续维护保养与维修等方面综合考虑,其后置处理设计过程中主要要求如下。

1) 具备高精度的信号调理功能。如低噪声仪表级运算放大^[7],高精度模数转换采集传输等^[8]。

2) 便捷高效的生产装配调试手段。在大批量声场制造环节,可便捷实现深度传感器相关组部件功能及性能校准。

3) 具备良好的环境适应性和长期工作可靠性。设计中应满足不同温度、不同海拔等环境下使用的一致性。如温度、海拔引起的深度传感器零点漂移,或线性度偏差等^[9]。

4) 深度传感相关组部件具备良好一致性。可在相同产品之间进行直接互换,并且具备现场维修时的便捷可实施性。

5) 具备良好的可扩展性。为后续产品(航行体)升级预留相关接口和数据处理能力,在一定程度上兼容已出现的模拟输出与数字输出等需求。

由于某小型水下航行体需要在不同地区使用,其深度测量的压力敏感元件受不同环境参数(如温度、海拔等)影

响^[10],很难保证多年长期稳定性。同时考虑到大批量生产、调试,以及现场维护保养、维修的可操作性,需着重对深度传感信号处理方法进行深入研究,以期更好解决上述问题。

文献[11-12]采用常规方案,以仪表运算放大器为基础进行模拟信号放大调理,无法保证海拔等环境变化后的准确度。文献[13]采用数字电位器进行增益放大调理,但不具备硬件调零,且增益调整精度有限。文献[14]采用专用检测设备进行闭环自动校准,与本文应用场景不同。文献[15-16]采用纯软件方式对数字化的深度传感器信息校准,由于深度传感器个体差异影响,该方式无法快速批量生产,且不具备良好互换性和环境适应性。

综上所述,受某小型航行体内部安装尺寸和当时技术条件等因素限制,其深度信号处理方面存在测量精度较差、批量生产调试效率低、可靠性不高,以及环境适应性差等问题。针对上述问题,计划在原内部结构和安装尺寸等约束条件下,改进设计原深度信号处理方法。拟利用低功耗集成处理器、低噪声仪表运算放大器、高精度数字电位器和集成存储器等,构建一种可高精度放大深度传感器信号并实时数字采集解算的处理系统。该系统需具备自动硬件零位校准、程控自动增益调整,以及快捷维修等功能,以提高深度测量精度和环境适应性,从而达到提高产品质量的目的。系统实施后需进行实验室测量校准,并结合某小型航行体进行实航试验测试,获得相应测试数据。实施完成后可解决上述问题,满足不同区域(经纬度、温度、海拔高度等参数不同)使用时自动零位校准等实际需求,同时亦可提高批量生产研制效率,提高产品可靠性。

1 常规方法分析

深度传感信号处理主要目的是提取传感器敏感元件变化信号,将相对微弱的模拟信号进行适应性放大、滤波、数模转换等处理,根据一定的函数关系计算获得当前点位航行深度信息。以往常规处理方式主要是以仪表放大器为主,经过相应模拟信号处理后,进入模数转化及数字信号处理后输出给相应的后置控制部分使用。典型处理方式是在仪表放大器的调零和增益端分别采用可调电位器等进行手动初始校准^[11],根据传感器输出确定准确增益及零位。由于深度传感器受外界环境影响,在长期使用过程中,上述常规处理方法弊端也逐渐显现。在某小型水下航行体大批量研制生产、交付使用,以及后续保障维护过程中,深度传感信号处理相关主要问题如下。

1) 生产过程效率较低,批量自动化生产困难。需单个深度传感器针对性进行后置处理电路的调试,确定增益和调零所对应的电阻值,无法自动流程化操作,导致生产调试过程效率低下,且人为操作风险较高。

2) 实际使用中故障情况较多,顾客满意度较差。航行体在长期使用过程中,受温度、海拔及气压等因素影响较

大,导致深度传感信号的零位、线性度等参数漂移,甚至影响航行体主要功能及性能指标实现。

3) 标准化与模块化程度较低,常规现场调试校准困难。深度传感器布置在航行体外部,相关处理部分安装在航行体内,且与内部控制组部件级联。现场不拆解航行体的情况,无法对其深度信号进行校正处理。

针对上述问题,如能将深度传感器与后置处理部分进行自动一体化设计,在无需拆解航行体的情况下,简单操作即可自动调零、校准,将大幅提高生产效率,满足实际使用需求,亦可降低用户长期使用过程中的维护保养难度。

通常情况下,深度传感信号处理有纯硬件、纯软件,以及硬软结合方式进行校准设置。纯硬件方式结构简单,如仪表运算放大器加外接可调电位器,即可实现深度传感信号的线性校准。该方法简单且可调范围连续,但通常需要根据现场情况进行手动调节,调准误差较大,容易受环境因素影响^[12];硬软结合方式结构略复杂,典型方法是利用数模转换或数字电位器来代替纯硬件的可调电阻,程序控制仪表运算放大器的增益和零位^[13]。该方法速度快,不易受外界环境影响,但增益调整精度通常是离散的,其最小分辨率受数模转换或数字电位器阶数限制;纯软件方式精度较高,主要是利用事先测量的大量数据作为比较基础,形成数据表/库,之后实际工作中进行查询方式进行比对^[14-15]。该方法不需要增加硬件,精度较高,但需要事先进行大量数据测试统计形成数据表/库,且对环境适应性较差。文献^[16]提出一种深度传感器自动校准系统及校准方法,主要是采用同步控制技术,将标准输入与输出电压的同步采集,通过计算机建立电压-深度校准查找表,并实时下载到深度测量单片机中,完成深度传感信号的自动化校准。该方法可在当前环境条件下建立较为精确的深度测量校准表,但环境因素产生较大变化时,上述校准将无法实现精确校准。

众所周知,任何传感器器件均存在一定的误差,大体可分为线性误差和非线性误差。随着技术和工艺不断发展及应用,压力传感器自身非线性误差已能控制在一定范围内,但线性误差个体表现差异较大。在压力传感器内部进行温度补偿处理,以及初始校准等方法对其初始零点、灵敏度、线性度等指标控制在一定范围内^[17]。因此,针对某小型水下航行体实际应用情况,主要对深度传感器的初始零位及线性度进行调理控制,即可满足当前实际需求。某小型水下航行体选用压力/深度传感器敏感元件的主要指标如下:1) 测量范围:0~3 MPa;2) 过载:150%;3) 准确度等级:0.5%FS(非线性、重复性、迟滞);4) 零位:1~4 mV,零点稳定性为0.3%;5) 满位:大于60 mV;6) 供电电压:±6±0.2 V;7) 温度范围:-30℃~+60℃。

深度传感器的压力敏感元件,具有较强的环境敏感性,在不同环境下受温度、湿度和海拔等条件影响。如温湿度影响其线性度,海拔影响其输出零位等。通常深度传感器的零位输出是个区间范围,如1~4 mV,且存在一定的稳定

度区间。同理,满位输出亦为一个较大区间的范围值,从零位和满量程之间的线性系数同样属于变化量。因此,很难用固定处理方式来保证整个深度传感处理数据的稳定可靠。

通过对大量深度传感器独立测量可知,传感器个体输出之间存在一定的分散性。虽然单个传感器线性度符合技术指标要求,但不同个体之间的输出有一定的离散性。比如深度传感器指标中的零位范围均为1~4 mV,假设放大倍数为250(假设增益放大无误差),则放大调整后的零位范围变为250~1 000 mV,显然这差距是无法实际测量使用的。深度传感器(敏感元件)原始测试曲线如图1所示。

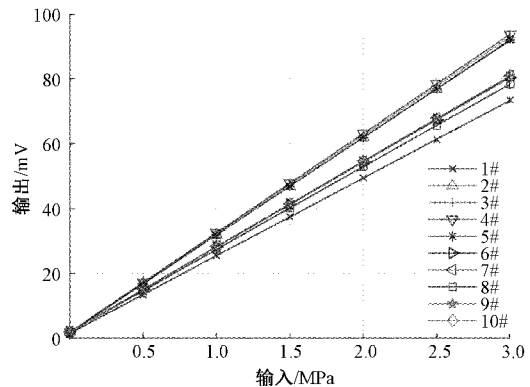


图1 深度传感器原始输出对比图

如图1所示,同一批次的深度传感器原始测试数据表明,整体线性度可通过补偿技术和改进工艺进行基础保障,但输出的零位和满位均为一定范围,非固定区间。如1#和4#在3 MPa输入点,输出电压相差约20.4 mV。如按照简化方式计算,1 MPa对应100 m水深,90 mV电压的对应范围,则20.4 mV输出偏差折算深度差约为68 m。由此可见,这样的深度偏差远超出一般水下航行体控制所需精度要求。再加上温度、海拔及气压等外界条件变化引起的深度传感器敏感元件变化,则总体偏差将更大。根据公开测试数据绘制海拔高度对应气压曲线如图2所示。

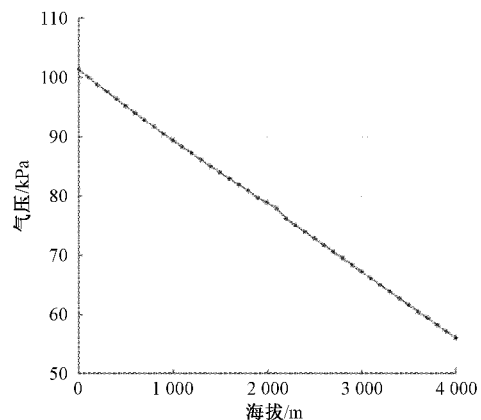


图2 零位气压随海拔变化曲线图

现有处理方式是初始进行零位和满位的校正,根据实际情况调整后处理电路增益和零点偏移,并将区间内测量数据存储在后端控制处理器内,实时计算时根据上述试前测量获得信息进行修正处理。虽能在一定程度上满足使用精度,但长期稳定性必须以周期性的校正为基础,并且无法具备基本的互换性,即无法两个航行体的组部件进行互换,甚至外置的深度传感器亦无法直接更换使用。

2 改进方法

根据实际应用环境需求,以及某小型水下航行体内部结构和现有处理方法,采用硬软处理方式进行方案设计,提出一种基于嵌入式处理器的深度传感信号处理方法。利用仪表放大器进行深度传感模拟信号的基础性低噪声放大,同时嵌入式处理器控制多个数字电位器和模拟开关进行仪表放大器零点、增益放大量的自动化控制。在具备信号硬件调零、数字增益控制基础上,增加深度传感器个体线性度自动测试校正,以及多种数字接口输出和参数记录等功能。因此,改进方案相当于传统常规方法中的软硬件加纯软件方式。改进方法总体方案如图 3 所示。

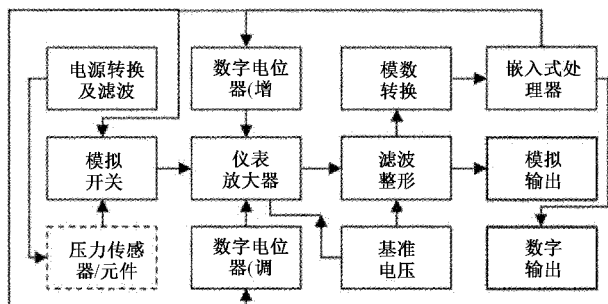


图 3 总体方案框图

如图 3 所示,改进方法主要依据某小型水下航行体现有结构,以原有压力传感器为输入源,利用嵌入式处理控制仪表放大器的调零和增益端,根据实时模数转换采集的信号计算当前控制量,形成闭环自动控制。其中模拟开关是为了单独调整仪表放大器的零点,数字电位器(调零)负责压力传感器/元件输出差分信号的偏置电压硬件调零,而数字电位器(增益)负责对应压力传感器/元件输出信号大量控制。另外,基准电压是分别提供给仪表放大器和模数转换基准,可利用基准电压数据对深度信号调理软件校准。

上述改进方法的主要工作原理是采用高精度、低零漂的仪表放大器对深度传感器弱信号进行线性放大输出,利用嵌入式处理器进行数字化处理和闭环控制,可在一定范围内对深度传感器输出信号进行硬件调零和线性放大输出。主要解决深度传感器输出线性区不固定,零位受气压等外界环境影响较大等问题。同时,在一定程度上降低装调和维护保养难度,提高工作效率的同时,提高产品的互换性和可靠性。由于该设计中主要设计输出电压信号精度问题,针对输出精度进行仿真分析。以上述仪表放大器结合

数字电位器为基本方案,假设采用常规 256 阶的 10 k Ω 数字电位器进行增益控制,对其仪表放大器输出精度仿真结果如图 4 所示。

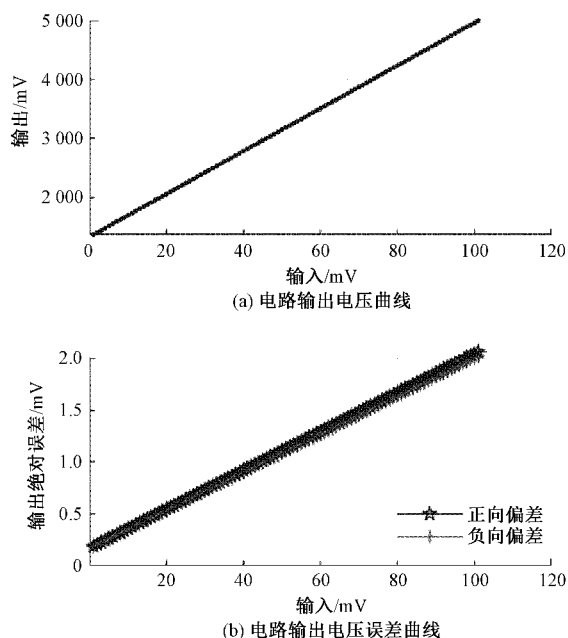


图 4 输出误差仿真图

如图 4 所示,在现有深度传感器基础指标基础上,仿真经处理输出的模拟信号最大偏差在 2.5 mV 以内,综合考虑电磁干扰及元器件偏差,输出可满足 ± 5 mV 的技术指标要求。按照 ± 5 mV 输出误差理论计算,对应其深度偏差约为 ± 0.375 m,可提航行深度的测量精度,满足某小型水下航行体实际使用需求。

3 技术设计与实现

3.1 硬件设计

改进的某小型水下航行体深度传感信号处理方法,目的是改进深度传感器桥接输入模拟信号的线性放大输出,并具备传感器零点漂移大范围硬件调零,以及测量范围漂移和线性误差的参数校准等功能。利用嵌入式处理器进行闭环处理和闭环控制,可单独进行模拟输入硬件调零和精细化增益调整,其调试参数可存储在内部非易失存储器中,并具备防错更改功能。另外,考虑到后续升级和更好兼容性,预留数字输出功能,并利用数字接口,实现便捷的自动零点校正和精度校准等功能。其核心处理电路如图 5 所示。

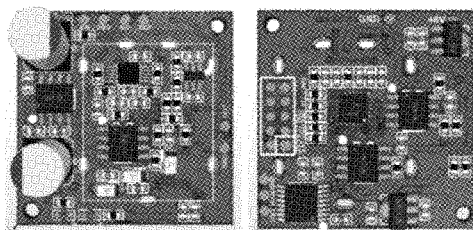


图 5 核心处理电路三维图

如图 5 所示,对应白色线框为金属屏蔽罩,提高电磁兼容性。核心处理部分主要由低功耗集成处理器(C8051F330)、低噪声仪表运算放大器(AD623)、高精度数字电位器(MCP41010/MCP410501)、电压基准芯片(ADR130),以及模拟开关(CH442E)等部分组成。处理电路板整体尺寸约为 30 mm×30 mm×8 mm,与对应的深度传感器一体化结构设计,可利用某小型航行体内现有空间进行固定安装。

3.2 软件设计

软件主要是指嵌入式处理内部的数字信号处理及闭环控制软件,主要功能是采集模拟输入、运算放大器输出、基准电压源输出、温度信号,根据相应算法进行计算和估算,根据计算或估算值进行闭环控制。另外,将传统手动调整变阻器的调零和调增益工艺调整为利用数字指令方式进行校准。增加了深度传感器数字输出接口,为后续扩展应用提供设计基础。软件操控主要步骤如下。

1) 初始化。除集成控制器的基本初始化外,还需给数字电位器、通信模块,以及存储器进行初始设置。

2) 数据处理。根据设定参数进行数模转化及数字信号滤波处理,实时根据温度参数进行电压基准修正。

3) 信号输出。将处理完成的模拟信号及数字信号进行实时输出。同时,接收通信中断,根据通信指令进行相应操控,如查询回复、参数修改等。

基本软件流程如图 6 所示。

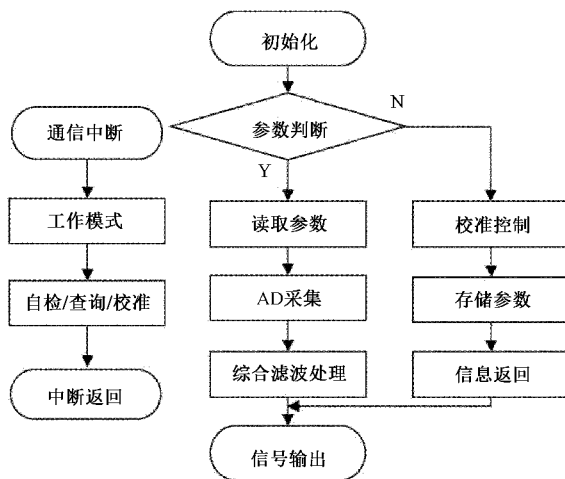


图 6 软件流程

如图 6 所示,程序初始化后进行参数判断,主要是防止参数未进行标校带来较大测量误差。工作模式主要用于生产调试、现场维修和保养等阶段使用,如内部记录参数查询,自检测试以及现场校准等。这里综合滤波处理涉及模拟信号滤波和数字滤波,分别对应深度传感器的模拟和数字输出。模拟信号滤波以可控低通滤波器为主,常规控制方法即可实现^[16]。数字滤波除了常规数字滤波器外,这里主要涉及环境参数的自动校正。如图 3 中的基准电压精度

直接影响仪表放大器、模数转换等元件的温漂^[19]。如能根据当前时刻温度等环境信息进行一定范围内的补偿式校正,则可进一步提高深度信息的测量精度和可靠性。

3.3 改进方法特点

某小型水下航行体深度传感信号处理方法改进实施,主要是在航行体内部增加控制处理电路。由于该电路与深度传感器一体化安装设计,可直接在航行外部互换操作,无需拆解航行体。在组装前,需要使用标准通信接口(如 RS232、CAN)发送指令,嵌入式处理器对其深度传感器/元件的零位、线性度等参数进行标校,确定工作参数。至于航行体在不同地区使用,可结合航行体试前调试检查方式,设定基础零位和满位即可完成相应现场校准,大幅提高现场航行体的适应性和可靠性。综合某小型水下航行体深度传感信号处理改进方法特点如下。

1) 满足标准化要求,具备良好互换和便捷现场校准功能。针对深度传感器/元件个体差异不同,采用一体化结构满足不拆解航行体条件下的更换与调试便利性要求。

2) 输出精度较高,可一定程度提高航行体控制精度。模拟及数字输出均进行适应性滤波处理,结合闭环校正算法,可进一步提高深度测量精度。

3) 规范模拟信号输出范围,便于后续控制使用。将不同深度传感器的模拟信号输出均固定处理输出为,便于高精度模数转换的幅度范围(如 1~5 V),利于降低控制复杂度,提高航行体操控精度。

4) 常规软件调零方式存在跨区域使用范围差异较大等问题,这里采用高阶数字电位器(256 阶)对运算放大器的输入端进行硬件调零,可进一步保证整个深度测量输出处于线性区域。

5) 增加数字输出口,使其具备数字化输出和调校功能,且具备自检和基本故障判断功能。

6) 具备一定范围的温漂补偿校准功能。利用当前温度测量数据对基准电压等温敏元件的进行实时修正,进一步降低温度参数对测量精度的影响,便于提高长时工作时输出精度的可靠性。

这里值得特别说明的是,内部温漂参数补偿性校正方法可进一步提高精度。具体是对基准电压、仪表放大器等主要元件的温漂参数进行实际测量,获得的测量数据作为实际工作中精细校准数据,直接根据温度等环境参数进行补偿修正。以基准电压元件为例,其温度与输出变化关系试前测量如图 7 所示。

如图 7 所示,对采用的电压基准元件理论温度与输出电压变化进行实际测量,通过测试数据可知,实际变化情况与理论变化相吻合,可采用电压基准元件理论数据进行实时补偿性修正。基本原理是模数转换后,利用采样的电压基准输出电压值,结合当前时刻温度信息,计算补偿修正参数。将上述计算并修正获得的参数应用到深度传感器输出模拟信号的仪表放大器调零及增益控制中,进一步提高控

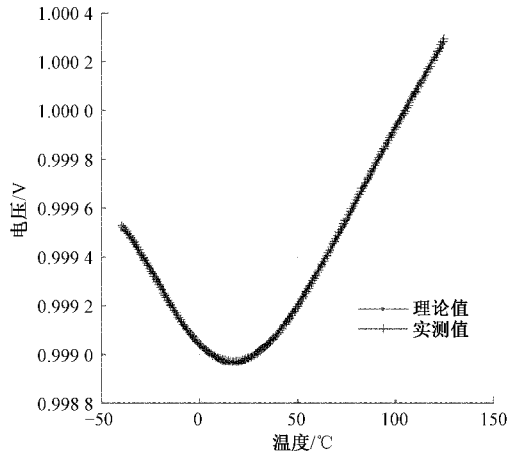


图 7 电压基准输出与温度变化曲线对比图

制和测量精度。同时,将修正参数带入数据处理算法中,实时修正当前数字输出数据,确保模拟输出与数字输出精度相同。

4 试验测试

某小型水下航行体深度传感信号处理方法改进,主要解决深度传感信号的零位和满位校正问题,而零位涉及深度传感器自身零位漂移,包括仪表运算放大器真身零位漂移;满位即深度传感信号的满量程输出信号幅度。由于个体差异,或者批次不同造成的深度传感器满位输出差异较大,需在信号处理端进行控制处理。为了验证本方法的可行性,采用标准压力源加实时数据采集与处理方式进行测试^[14,20],多测试数据统计分析该改进方法的可行性。具体测试装置为某国防计量站压力传感器计量校准系统。实际测试中,将多个不同批次的深度传感器加上改进方法对应的处理电路系统,输入为标准压力源,经处理后输入给测试校准装置获得测量结果数据。其测试方法如图 8 所示。

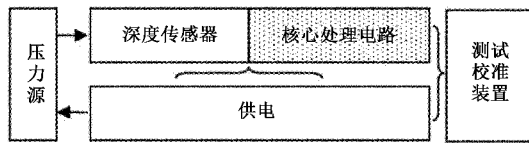


图 8 试验测试方案框图

针对某小型水下航行体批量生产中不同批次的深度传感器,在某国防计量站进行改进后试验测试。测试地点温度为 21℃,湿度为 40%,测试地点海拔高度为 1 891 m,抽样测试样本数量为 10(与图 1 样本相同),测试结果曲线如图 9 所示。

图 9(a)为 10 个原本差异较大的深度传感器调整后输出信号幅度值,由于一致性较好,10 条输出测量数据曲线基本重合。图 9(b)为折算 10 个样本测试深度的偏差值(与理论值相比)。由此可知,经过改进后的深度传感信号处理后,将个体差异明显的深度传感器处理输出信号基本

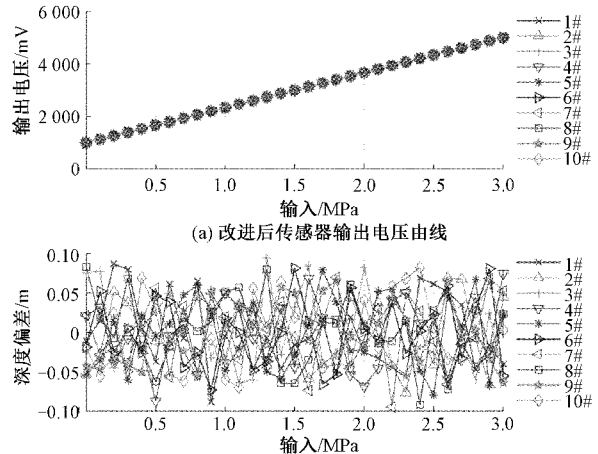


图 9 改进方法试验测试结果曲线

一致,其深度测量精度可提高至 0.15 m。

某小型水下航行体深度传感信号处理方法改进实施中,将深度传感器和后置处理电路一体化设计,无需拆解航行体即可进行安装或拆除,降低现场操作复杂度。这对大批量生产效率提高极为有利,同时解决了不同地区使用过程中,深度传感信号零位的便捷式校准问题。改进实施后,在某小型水下航行体实航过程中,设定相同参数进行实航,更改前后的深度测量结果比对情况如图 10 所示。

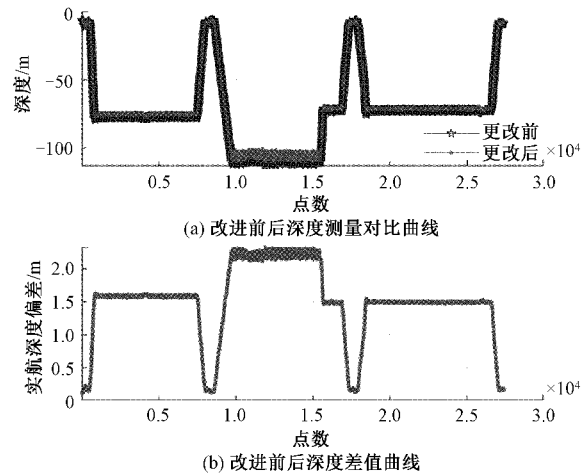


图 10 实航深度测量数据对比曲线图

图 10(a)为某小型水下航行体在相同参数设置情况下,实航内测记录深度数据曲线。图 10(b)为改进前后同时刻的深度差,其中包含了后续模数转换及处理记录误差。可见,改进后的深度内测值更接近设定值(试前已知),在 100 m 深度附近可提高约 2.2 m 的深度测量精度。

5 结 论

深度传感器在批次性生产制作过程中,受材料、工艺、环境等因素影响,在长期使用过程中存在一定的漂移,如深度传感器出现零位漂移及线性度变化等现象,导致整体深

度参数测量偏差过大。因此,某小型水下航行体的批量化生产中,必须充分考虑内部深度传感器信号处理的长期稳定性和可靠性,以及实际使用和维护中所需的现场便捷式校准等问题。

以嵌入式处理器为核心,结合软件高精度校准,实现某小型水下航行体深度传感信号的硬件调零和软硬件校准。完成实验室校准测试和实航试验对比分析,测量结果证明,该方法不仅可提高航行体深度测量精度,亦可实现硬件零位校准和自动全量程线性度校准,具有良好的工程实用价值。

参考文献

- [1] 马深. 依赖多波束合成孔径侧扫声纳图像的海底障碍物研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 102-106.
- [2] 侯萌强, 吕海涛, 谭鑫. 水下航行体深度测量电路设计与实现[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(10): 212-215.
- [3] 闫文吉, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 59-65.
- [4] 王淮阳, 胡珊珊, 刘正士, 等. 深海大压力及其微小波动压力的测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(11): 155-161.
- [5] 宁心怡. 压电式加速度传感器电路原理[J]. 科技创新与应用, 2019(32): 42-45.
- [6] 张庆国, 黄其培, 汤志峰, 等. 舰船尾流声学探测小型ROV系统技术研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 29-35.
- [7] 石苗, 吴永仁, 管德赛, 等. 10^{-4} V级微弱脉冲信号放大电路设计研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(2): 46-49.
- [8] 崔永俊, 张祥, 刘坤, 等. 分布式远程模拟量信号采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(2): 60-65.
- [9] 钱烈江, 李长云, 徐曦, 等. 间接零点漂移消除法的直流系统绝缘监测研究[J]. 自动化仪表, 2018, 39(12): 26-30.
- [10] 姚睿丰, 王妍, 高景晖, 等. 压电材料与器件在电气工程领域的应用[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1324-1337.
- [11] 雷武, 朱平. 一种微小型增益可调调理电路的设计及实现[J]. 电子设计工程, 2020, 28(2): 99-103.
- [12] 张学文, 司佑全. 差分比例运算电路增益调整与控制分析[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 77-81.
- [13] 谢瑞丰, 程磊, 杨李斌. 数字电位器万倍级调节精度的实现[J]. 电子技术与软件工程, 2019(24): 74-75.
- [14] 范青, 邓瑞娜, 李聪. 压力传感器自动化校准软件的设计[J]. 工业计量, 2021, 31(2): 4-7.
- [15] 杨耀雄. 船舶压力传感器输出数据实时校正算法[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(6): 121-123.
- [16] 姜立志, 刘曲, 刘文强. 一种深度传感器自动校准系统及校准方法: CN105675094B[P]. 2018-09-25.
- [17] 田青林, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 一种压阻式压力传感器全温区温度补偿方法[J]. 中国测试, 2021, 47(1): 49-53.
- [18] 楚洪祚, 詹洪陈, 王怀登. 基于嵌入式系统的自适应滤波器研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2018(1): 153-155.
- [19] 雷武, 朱平. 压力传感器温漂特性研究及补偿电路的设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(24): 174-177.
- [20] 王志超, 张志杰, 赵晨阳. 压力传感器的模型不确定度研究[J]. 测试技术学报, 2020, 34(1): 54-60.

作者简介

张庆国,工学学士,高级工程师,主要研究方向为水声工程系统研究、水下武器装备研制生产与技术支持等。
E-mail: ZQG750@126.com