

高精度倾斜仪探头信号采集处理电路的设计

高利鑫¹ 周玮琳² 陈 团¹ 李亚楠¹

(1. 北京航天控制仪器研究所 北京 100854; 2. 第二炮兵工程设计研究院 北京 100011)

摘要:为实现倾斜仪探头高线性度、高分辨率和高稳定度的角度测量要求,以石英挠性加速度计作为传感器,设计了一种以STM32为主控制器的倾斜仪探头信号采集处理电路,详细阐述了硬件设计和软件设计。加速度计感应到的重力加速度信号完成信号调理和A/D转换,对转换得到的数字信号进行倾斜角度解算、数字滤波和温度补偿后,通过D/A转换得到倾斜角度值(模拟电压信号)。经试验验证,该倾斜仪探头测量角度值的非线性偏差小于 0.001° ,分辨率达 0.0003° ,最大温度漂移为 0.0109° 。

关键词:倾斜仪探头;石英挠性加速度计;分辨率;温度补偿

中图分类号: TP216 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 460.60

Design of signal acquisition and processing circuit for high precision inclinometer probe

Gao Lixin¹ Zhou Weilin² Chen Tuan¹ Li Yanan¹

(Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China;

The Second Artillery Engineering Design & Research Institute Beijing 100011, China)

Abstract: To achieve excellent linearity, high resolution and superior stability of Inclinometer Probe, this paper designed a signal acquisition and processing circuit which used STM32 as MCU for Inclinometer Probe, while the silicon flextwre accelerometer was used as a sensor. In this article, hardware design and software design were introduced in detail. Signal conditioning and AD conversion were implemented for the acceleration of gravity signal from accelerometer. After calculation of the inclination, digital filtering, temperature compensation were used for the transformed data, DA conversion made the digital signal to be the value of inclination which was a voltage. In experiments, the nonlinearity error is less than 0.001° , resolution reaches to 0.0003° and maximum temperature drift is 0.0109° about the measured angle value of the Inclinometer Probe.

Keywords: inclinometer probe; silicon flextwre accelerometer; resolution; temperature compensation

1 引言

近年来,各种倾斜仪已经被广泛的应用在地壳运动监测、石油钻井、地质钻孔等领域,在测量精度、灵敏度和稳定性等方面取得了一定进展^[1-2]。

在核电站停堆换料的过程中,装卸料桥架倾斜角度的测量起着至关重要的作用,所需倾斜仪探头应该具备分辨率高、温度稳定性好、体积小和抗核辐射等特点。石英挠性加速度计作为倾斜角度传感器,输出的是特别微弱的电流信号,该电流信号经过合理的处理,才能反映出装卸料桥架更加真实的倾斜角度。设计了一种高精度倾斜仪探头信号采集处理电路,能够实现核电站中对倾斜仪探头的特殊

要求。

2 倾斜仪探头系统概述

2.1 倾斜仪探头系统工作原理

倾斜仪探头系统工作原理如图1所示。石英挠性加速度计能够敏感到重力加速度在其敏感轴方向的重力分量,该分量由石英挠性加速度计将其转换为模拟电流值I。该电流值I经过信号调理后,由控制器进行算法处理,再经过D/A转换,输出用户所需的角度值(用电压值表示);同时使用温度传感器采集到的温度信号对石英挠性加速度计输出信号进行温度补偿,以提高倾斜仪探头的测量精度和温度稳定性。

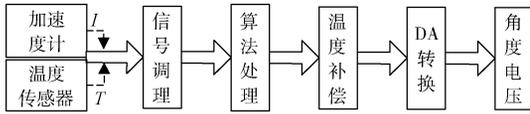


图 1 倾斜仪探头工作原理

2.2 倾斜仪探头倾斜角度解算模型

图 2 为建立的倾斜仪探头坐标系模型,倾斜仪探头敏感轴(即石英挠性加速度计敏感轴)延 Y 轴方向并绕 X 轴旋转,系统最终需要得到倾斜仪探头敏感轴与 Y 轴之间的角度值 θ 。重力加速度在石英挠性加速度计敏感轴方向的分量可由式(1)计算得到^[3]。

$$g_{\theta} = g \times \sin\theta \quad (1)$$

式中: g_{θ} 为重力加速度在加速度计敏感轴方向的分量, g 为重力加速度, θ 为倾斜仪探头倾斜角度。

石英挠性加速度计的输出电流可由式(2)计算得到。

$$I_{\theta}/K_1 = g_{\theta} + K_0 \quad (2)$$

式中: I_{θ} 为石英挠性加速度计的输出电流值, K_1 为石英挠性加速度计的标度因数, K_0 为石英挠性加速度计的零偏。

将式(1)代入到式(2),可以得到倾斜角度 θ 的计算式(3)^[3],其中 I_{θ} 可以由倾斜仪探头系统的信号采集处理电路处理得到。

$$\theta = \arcsin((I_{\theta}/K_1 - K_0) \times 1/g) \quad (3)$$

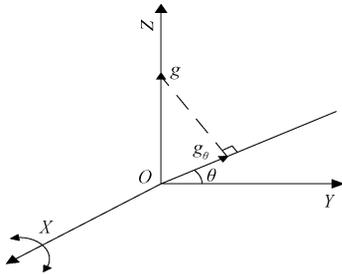


图 2 倾斜仪探头坐标系模型

3 信号采集处理电路方案设计

3.1 硬件设计

倾斜仪探头系统的信号采集处理电路以 STM32 为控制核心,由电源管理模块、信号采集模块、控制输出模块 3 部分组成。信号采集处理电路组成如图 3 所示。

3.1.1 电源管理模块设计

倾斜仪探头由外部提供 $\pm 15\text{ V}$ 的电压,采用 TVS 瞬态抑制二极管构成的 ESD 保护电路,消除瞬态脉冲对电源转换芯片输入端的损坏。使用稳压芯片 78M05 和 LM1117-3.3 分别将 $+15\text{ V}$ 电压换为 $+5$ 和 $+3.3\text{ V}$ 。 $+5\text{ V}$ 电压供给模数转换芯片的模拟电源端口, $+3.3\text{ V}$ 电压为单片机供电,同时为模数转换芯片和数模转换芯片的数字电源端口供电。倾斜仪探头系统处理的是石英挠性加速度计输出的微弱电流信号,模数转换芯片需要高稳定性

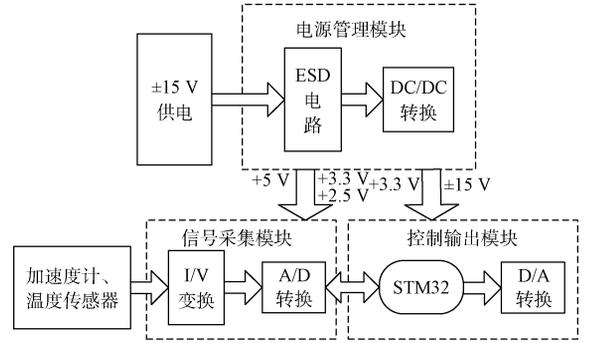


图 3 信号采集处理电路组成

的基准电压,本设计选用 ADI 公司的基准电压芯片 AD780,该芯片可输出 $+2.5$ 或者 $+3\text{ V}$ 电压,最高精度可达到 $\pm 1\text{ mV}$,温漂最大为 $3 \times 10^{-6}/\text{C}$ 。电源管理模块电路原理如图 4 所示。

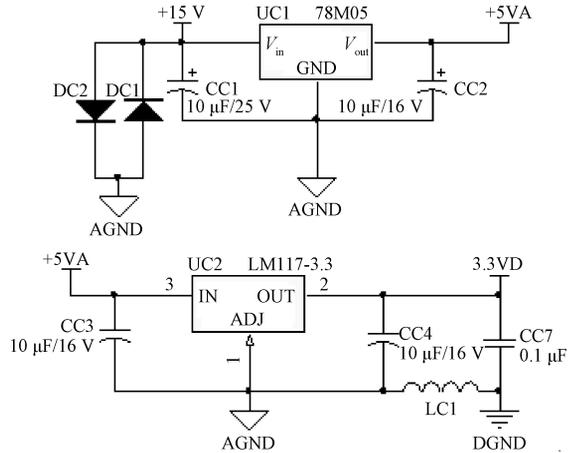


图 4 电源管理模块电路原理

3.1.2 信号采集模块设计

石英挠性加速度计输出的是模拟电流值,需要转换为数字信号后由主控制器处理。故首先进行 I/V 转换,通过精密电阻将电流信号转换为电压信号,再经高精度仪表放大器 AD620 对采样得到的电压信号进行放大^[4-5]。使用模数转换芯片对放大得到的电压信号进行 A/D 采集。信号采集模块电路原理如图 5 所示。

系统要求倾斜仪探头的测量角度 θ 的分辨率为 $1''$,假设石英挠性加速度计的标度因数 K_1 为 1 mA/g ,零偏 K_0 为 0 , θ 、 K_1 和 K_0 的值代入到式(3)中,可以得到石英挠性加速度计输出电流 I_{θ} 的采集精度需要达到 $5.589 \times 10^{-9}\text{ A}$,经 I/V 转换后为 0.338 mV (放大倍数为 $6.04 \times 10^4\ \Omega$)。同时系统要求倾斜仪探头的测量角度 θ 的范围为 $-2^{\circ} \sim +2^{\circ}$,根据式(3)可以得到石英挠性加速度计输出电流 I_{θ} 采集范围为 $-0.0349 \sim +0.0349\text{ mA}$ (经 I/V 转换后为 $-2.11 \sim +2.11\text{ V}$),所以系统要求 AD 转换芯片的分辨率 $> \log_2(2.11/0.338 \times 10^3) + 1 \approx 17$,同时要求 AD 转换芯片

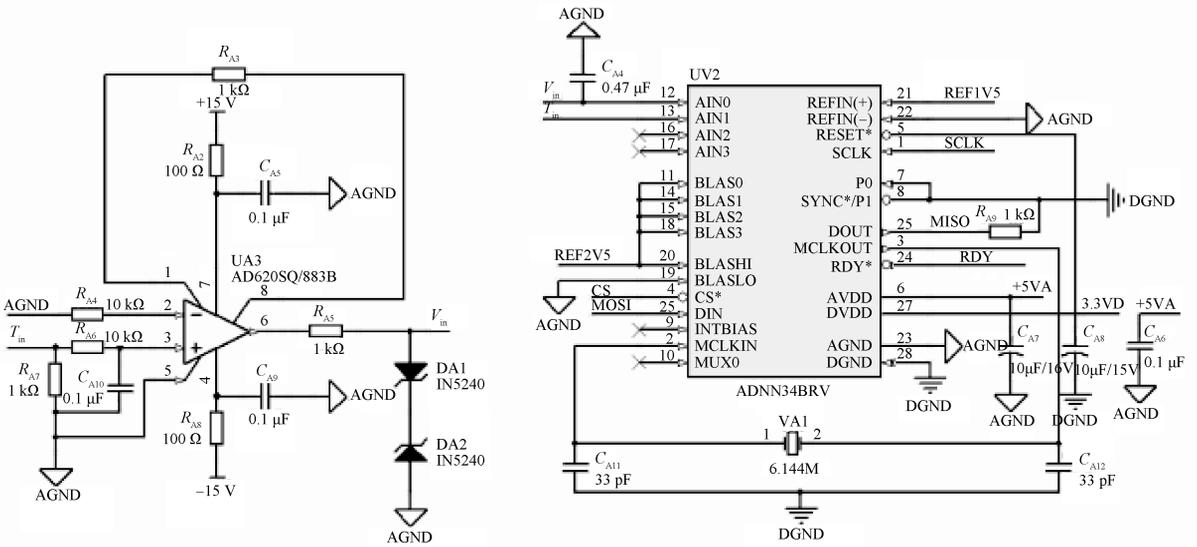


图5 信号采集模块电路原理

的输入范围要大于 $-2.11 \sim +2.11$ V。

基于以上分析,选用 ADI 公司的一款高采样率、高分辨率、高信噪比、多通道的 24 位的 Σ - Δ 型 AD 转换芯片 AD7734, AD7734 在采样率为 2 kHz 的条件下有效分辨可达到 18 位,同时 AD7734 为双极性输入,通过软件可将其配置为 $-5 \sim +5$ V 输入范围^[6],满足系统要求。使用 STM32 单片机的 SPI1 接口和 AD7734 进行读写时序通信^[7]。

3.1.3 控制输出模块设计

主控制器对模数转换芯片 AD7734 采集到的数字信号进行算法处理后转换为倾斜角度 θ 。系统要求用模拟电压信号来反映倾斜仪探头的倾斜角度 ($-2^\circ \sim +2^\circ$ 对应 $-2 \sim$

$+2$ V),所以还需要进行数模转换。

倾斜仪探头测量角度分辨率为 $1''$,即需要倾斜仪探头的输出精度要达到 0.2778 mV(DA 转换芯片的输出精度)。若 DA 转换芯片的输出量程为 $-5 \sim +5$ V,则需要 DA 转换芯片的分辨率位数 $> \log_2(5/0.2778 \times 10^3) + 1 \approx 15$ 。本设计选用 TI 公司的一款 16 位数模转换器 DAC7731,通过硬件配置,DAC7731 的输出量程可以被配置为 ± 5 、 ± 10 、 $+10$ V,同时 DAC7731 拥有内部 $+10$ V 参考电压。在倾斜仪探头系统中,将 DAC7731 的输出量程配置为 $-5 \sim +5$ V,工作读写时序由 STM32 的 SPI2 接口控制,控制输出模块电路原理如图 6 所示。

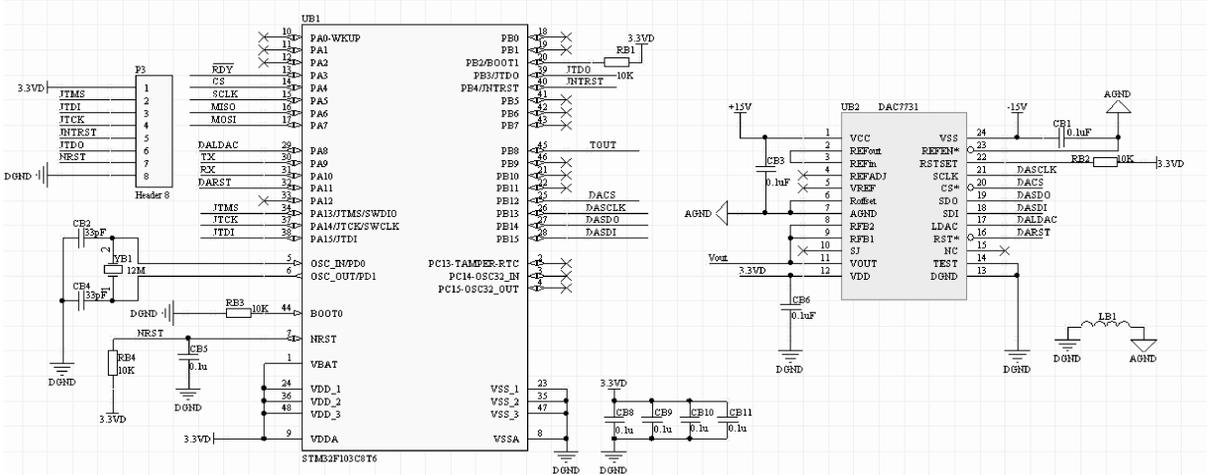


图6 控制输出模块电路原理

主控制器选用 ST 公司的一款高性能、低功耗微控制

器 STM32F103C8T6, STM32F103C8T6 的主频可以达到

72 MHz,具有 3 个 SPI 接口,满足系统运算速度和接口数量的要求^[8-9]。

3.2 软件设计

信号采集处理电路软件流程如图 7 所示。首先进行各外设模块初始化,包括 GPIO、UART、SPI、定时器等外设。初始化完成以后,开始 AD 定时采样,并读取加速度数据和温度数据。对读取到的数据经过数字滤波处理后,对加速度数据进行温度补偿算法处理。最后通过倾斜角度计算式(3)解算出倾斜角度,DA 转换后输出角度电压值。

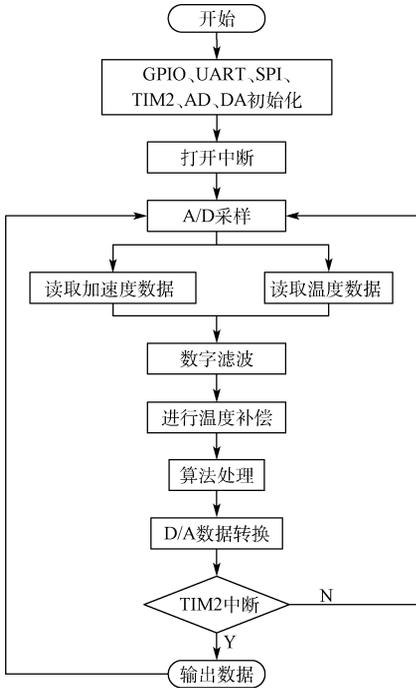


图 7 信号采集电路软件流程

3.2.1 数字滤波器算法设计

为了消除加速度信号和温度信号的高频噪声,采用 FIR 低通数字滤波算法进行处理。因加速度和温度的有用信号集中在 100 Hz 以下,设计了截止频率为 100 Hz 的 50 阶 Hanning 窗 FIR 低通滤波器,该滤波器有平稳的过渡带,很好的保留了 100 Hz 以下的低频成分,同时使 100 Hz 以上的频率迅速衰减到 -40 dB 以下,达到较好的滤波效果,FIR 数字滤波器幅频曲线如图 8 所示。

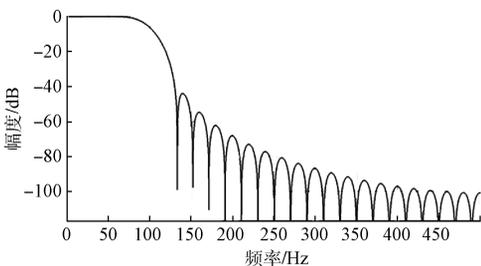


图 8 FIR 数字滤波器幅频曲线

3.2.2 温度补偿算法设计

倾斜仪探头系统的工作环境温度 为 20~60 ℃,为提高倾斜仪探头的温度稳定性,对石英挠性加速度计的输出采取温度补偿处理。在 20 ℃、30 ℃、40 ℃、50 ℃和 60 ℃各温度点下,对石英挠性加速度计保温 1 h 后,分别采集 0°、90°、180°和 270°位置处石英挠性加速度计的输出值。利用最小二乘法拟合出石英挠性加速度计的标度因数 K_1 和零偏 K_0 随温度 T 的变化关系,如式(4)、(5)^[10]。

$$K_1 = K_{12} \times T^2 + K_{11} \times T + K_{10} \quad (4)$$

$$K_0 = K_{02} \times T^2 + K_{01} \times T + K_{00} \quad (5)$$

式中: T 石英挠性加速度计环境温度, K_{12} 、 K_{11} 、 K_{10} 、 K_{02} 、 K_{01} 、 K_{00} 为拟合得到的各次项系数。

4 试验验证

4.1 非线性偏差

系统要求倾斜仪探头输出数据的非线性偏差 ≤ 0.001 V,使用双轴转台改变倾斜仪探头的倾斜角度,按照表 1 所示间隔使角度从 +2°变化到 -2°,分别记录每个角度下倾斜仪探头的输出值。

表 1 不同角度倾斜仪探头的输出值

角位置/ (°)	探头输 出/V	角位置/ (°)	探头输 出/V
2	1.999 93	-2	-2.000 15
1.8	1.800 04	-1.8	-1.800 16
1.6	1.599 95	-1.6	-1.600 09
1.4	1.400 01	-1.4	-1.400 03
1.2	1.200 03	-1.2	-1.200 04
1	1.000 02	-1	-0.999 95
0.8	0.800 04	-0.8	-0.799 99
0.6	0.600 02	-0.6	-0.599 96
0.4	0.400 03	-0.4	-0.399 93
0.2	0.200 10	-0.2	-0.199 89

根据表 1 的得到的数据,拟合倾斜仪探头的倾斜角度和输出电压值,可以得到拟合系数 K_A 和拟合常量 K_B 。将倾斜仪探头倾斜角度值带入式(6)中,计算拟合到的倾斜仪探头输出值 \bar{V}_i 。

$$\bar{V}_i = K_A \theta_i + K_B \quad (6)$$

式中: \bar{V}_i 为拟合得到的倾斜仪探头输出值; θ_i 为第 i 次倾斜仪探头的倾斜角度。

非线性偏差值由公式(7)计算得到值为 0.000 046 V,满足系统非线性偏差 0.001 V 的要求。

$$L = \max |V_i - \bar{V}_i| \quad (7)$$

式中:其中 V_i 为倾斜仪探头的实测值; \bar{V}_i 为拟合得到的倾斜仪探头输出值。

4.2 分辨率

系统要求倾斜仪探头输出值分辨率为 $1''$,使用双轴转台让倾斜仪探头倾斜角度发生微小变化,记录倾斜仪探头的输出值。将输出变化值与期望输出变化值的50%进行比较,如果实际变化值大于期望变化值的50%,则减小输入变化,反之增大输入变化。直到输出变化值很接近期望变化值的50%,得到的输出微小变化值即为倾斜仪探头的分辨率。表2为倾斜仪探头分辨率测试数据,分辨率为 $0.000\ 3\ \text{V}$,满足系统要求。

表2 倾斜仪探头分辨率测试数据

角位置/ (°)	探头输出/V	输出变化/ V	期望输出 变化50%
0	-0.003 32	/	/
0.000 3	-0.003 01	0.000 31	0.000 15
0	-0.003 22	-0.000 21	-0.000 15
-0.000 3	-0.003 47	-0.000 25	-0.000 15
0	-0.003 26	0.000 21	0.000 15

4.3 温度特性

系统要求倾斜仪探头在环境温度为 $20\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 的条件下,探头输出最大信号漂移 $\leq 0.02\ \text{V}$ 。将倾斜仪探头放置在高低温试验箱内,设置温度从 $20\ ^\circ\text{C}$ 升温至 $60\ ^\circ\text{C}$,并记录倾斜仪探头输出值;然后再使温度从 $60\ ^\circ\text{C}$ 降温至 $20\ ^\circ\text{C}$,并记录倾斜仪探头输出值。倾斜仪探头输出值随温度变化曲线如图8所示。该倾斜仪探头输出最大信号漂移为 $0.010\ 9\ \text{V}$,满足系统要求。

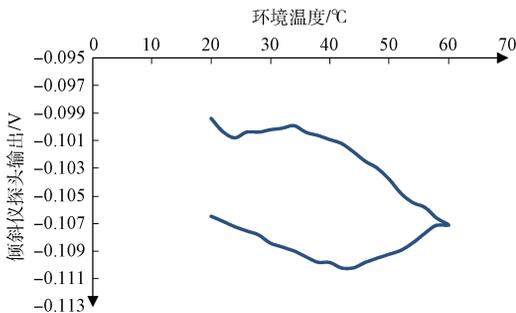


图8 倾斜仪探头输出值随温度变化曲线

5 结 论

本文以挠性石英加速度计为倾斜角度敏感传感器,采

用模拟-数字-模拟的信号处理方案,通过高精度信号采集处理电路实现了量程和分辨率的要求,基于STM32F103C8T6微控制器的算法运算提高了系统的精度,并通过软件补偿降低了系统误差。

通过试验验证,该倾斜仪探头在工作环境下各项指标均满足技术要求,目前产品已顺利通过某核电站的验收并已被投入使用。该倾斜仪探头以高线性度、高分辨率、高稳定性、小体积、重量轻和低功耗的特点在其它测量领域也有广阔的应该用前景。

参考文献

- [1] 施志龙. 地倾斜双轴垂直摆倾斜仪测量方法研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(2): 70-73.
- [2] 谢川. 一种基于磁强计和倾角传感器的钻井测斜仪[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2357-2361.
- [3] 郭敏, 尹光洪, 田曦等. 基于三轴加速度计的倾斜角传感器的研究与设计[J]. 现代电子技术, 2010(8): 173-177.
- [4] 李源, 祁欣. 高精度电导率远程在线监测系统的研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 139-143.
- [5] 李聪, 代后兆, 张亚宁, 等. 一种新型低成本高精度热电阻测温模块的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 577-583.
- [6] 王海渊, 张丽丽, 韩玉仲, 等. 高精度ADC AD7734在8通道数据采集系统中的应用[J]. 电子测量技术, 2010, 33(9): 18-20.
- [7] 孙伟超, 尹德强, 汪定国, 等. 基于C8051F040的环境数据采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(10): 91-94.
- [8] 苏鹏, 周凤余, 陈磊. 基于STM32的嵌入式语音识别模块设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011(2): 42-45.
- [9] 侯亚宾, 卜雄洙, 孙斌. 微小电容检测系统的设计及应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 87-90.
- [10] 张宇飞, 屈建龙, 宋超, 等. 石英挠性加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(3): 356-359.

作者简介

高利鑫, 助理工程师, 主要研究方向为精密机电技术、微系统开发。

陈团, 助理工程师, 主要研究方向为精密机电技术。
E-mail: chentuan1@163.com