

一种应用于IEPE传感器数据采集系统的调理电路设计

关静, 全超, 任亚莉

引用本文:

关静, 全超, 任亚莉. 一种应用于IEPE传感器数据采集系统的调理电路设计[J]. 液晶与显示, 2020, 35(2): 143–150.

GUAN Jing, QUAN Chao, REN Ya-li. Design of a conditioning circuit applied to IEPE sensor data acquisition system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(2): 143–150.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203502.0143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于物联网的室内数据采集监控系统

Indoor data acquisition and monitoring system based on Internet of things

液晶与显示. 2020, 35(2): 136–142 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203502.0136>

一种可穿戴人体运动轨迹测评装置的液晶显示设计

LCD display design in wearable motion track device

液晶与显示. 2016, 31(5): 464–469 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163105.0464>

基于物联网的温湿度与风速信息采集系统设计与实现

Design and implementation of temperature, humidity and wind speed information acquisition system based on the internet of things

液晶与显示. 2016, 31(10): 936–942 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163110.0936>

基于FPGA的大面阵CMOS相机高速率电子学系统设计

Design of large area array CMOS of high speed electronics camera system based on FPGA

液晶与显示. 2016, 31(2): 173–178 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163102.0173>

多传感器动态参数实时采集与存储方法研究

Real-time collection and storage of multi-sensor dynamic parameters

液晶与显示. 2017, 32(5): 372–379 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173205.0372>

文章编号:1007-2780(2020)02-0143-08

一种应用于 IEPE 传感器数据采集系统的调理电路设计

关 静^{1*}, 全 超², 任亚莉³

(1. 中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300;

2. 天津航空机电有限公司, 天津 300300;

3. 陇东学院 电气工程学院, 甘肃 庆阳 745000)

摘要:为解决压电集成电路(Integral Electronic Piezoelectric, IEPE)传感器数据采集系统中采集的输出信号波动较大、不适合直接采集的问题,设计了一种应用于 IEPE 传感器数据采集系统的调理电路。在调理电路的设计中运用了微功耗电源电路、低功耗可编程前端信号调理电路以及高精度模数转换电路,并将 FPGA(Field-Programmable Gate Array)运用到整个 IEPE 传感器数据采集系统设计当中,增进了其操作的便利性以及工作的稳定性。实验结果显示,IEPE 传感器数据采集系统具有更高的数据采集精度以及更低电功率耗损值,该数据采集系统具有较强的实践可行性。

关 键 词:压电集成电路;数据采集系统;调理电路

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20203502.0143

Design of a conditioning circuit applied to IEPE sensor data acquisition system

GUAN Jing^{1*}, QUAN Chao², REN Ya-li³

(1. Sino-European Institute of Aviation Engineers,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Aviation Electromechanical Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

3. College of Electrical Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the output signal collected in the IEPE sensor data acquisition system fluctuates greatly and is not suitable for direct acquisition, a conditioning circuit for IEPE sensor data acquisition system is designed. In the design of conditioning circuit, the micro-power supply circuit, low-power programmable front-end signal conditioning circuit and high-precision analog-to-digital conversion circuit are used, and FPGA is applied to the whole in the design of IEPE sensor data acquisition system, the convenience of operation and the stability of work are enhanced. The

收稿日期: 2019-07-11; **修订日期:** 2019-11-02.

基金项目: 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(No.3122016U007)

Supported by Central University Basic Research Business fee Civil Aviation University of China Special (No.3122016U007)

* 通信联系人, E-mail: rdlr78@163.com

test results show that the IEPE sensor data acquisition system has higher data acquisition accuracy and lower electric power loss value. The data acquisition system has strong practical feasibility.

Key words: piezoelectric integrated circuit; data acquisition system; conditioning circuit

1 引言

IEPE 是一种集成电路式压电传感器,由于具备优异的性能,在近几年的发展当中,常常被人们用来测量航天及建筑等领域的振动冲击数值^[1],但 IEPE 不适合运用直接采集的方式来获取信号^[2]。为了使 IEPE 传感器能够获得精确度较高的信号采集数据值,相关研究人员根据其信号输出的特点,有针对性地设计了具备参数可编程性的调理电路和转换电路^[3]。此外,一些手持式设备仪器往往需要具备便携功能,在长时间使用状态中利用蓄电池来为电源提供能量^[4]。为了使这类便携式设备仪器具备高精度信号采集数值,需要对其续航能力进行提升,以便其在使用过程当中呈现低能耗状态^[5],从而延长使用时间。经相关调查,目前市面上的这类数据采集系统大多数都运用单片机作为主控芯片,因而数据采集系统普遍在数据处理的速度方面不具备实效性及连续性,在设备的续航能力以及数据采集精度上也无法满足实际需求^[6]。为了实现上述目标,采用 FPGA^[7-10] 作为系统主控芯片,这种设计方式能使数据采集系统在续航能力以及数据采集精度方面得到大幅性能提升,同时由于 I/O 口数量的增加,在复杂情形下系统能够通过连接更多外设来解决问题,具备较高的可靠性。

2 系统方案设计

本研究的系统设计方案包括 3 个方面:前端信号调理电路设计;高精度模数转换电路设计;低能耗电源电路设计。详细设计体系如图 1 所示。

在本系统的主控器选择方面,为了使其具备较好的续航能力^[11],采用了能耗数值较低的微型器件 AGLN250。在系统运行时,上位机会对系统下发相应的指令,此时作为主控芯片的 FPGA 会接收此指令,并以此来调配前段调理电路各模块的配置,其中具体的设定信息包括接口通断、采样率、放大倍数以及截止频率。当完成上述配置

设定以后^[12],模数转换电路会将以上信息转换为数字信号。在经过相应的处理和储存措施以后,为下一步的数据上传提供便利。

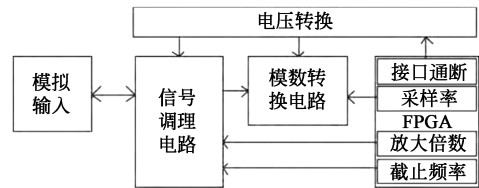


图 1 系统总体框图

Fig.1 Overall block diagram of the system

3 硬件电路设计

3.1 前端信号调理电路硬件设计

前端调理电路的模块构成,共分为以下 4 个部分:恒流源接口模块;程控衰减放大模块;低通滤波模块;电压跟随模块。

其中接口模块会在传感器与数据采集系统之间起到连接作用^[13],不仅能够为传感器提供符合其需求的电流数值,还能够将其输出的模拟电压值与数据采集系统进行连接。程控衰减放大模块会对振动信号进行衰减调整,将其从原始数值(0.5~23.5 V)调整到适宜输出的数值范围(0~2.5 V)内。为了实现系统的低能耗性,衰减模块在电路设计方面采用了低功率的同相比拟电路。此外,由于此种电路类型在带负载能力上也具备较优异性能^[14],保证了信号传输过程中的稳定性及相位一致性。本研究在设计中运用的双路运算放大器 LT1638,其中一路用来进行衰减作用实现,另外一路用来进行跟随作用实现,各部分的外围电阻精度均保持一致数值 0.1%。其中衰减模块的具体硬件电路情况如图 2 所示。

当系统中的电压信号经过衰减模块的处理之后,会接着进入到程控放大模块进行调配处理。当信号状态调配到能够与 A/D 采集匹配时,可作为有效信号进行输入。为了能够使此模块具备较强的抗干扰能力,提升信号精确值,在此模块采用低通滤波器 MAX7424。此外,为了能够有效实

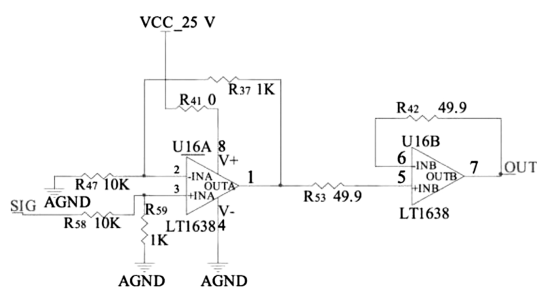


图 2 衰减电路硬件原理图

Fig.2 Attenuation circuit hardware schematic

现程控衰减模块与转换电路模块的阻抗匹配,在模块进行 A/D 采集之前还运用了基于精准运算放大器 OPA365 的电压跟随模块。其具体原理情况如图 3 所示。

图 3 硬件电路原理框图

Fig.3 Principle block diagram of hardware circuit

3.2 电源电路硬件设计

在续航能力环节,电源电路部分的设计是实现能耗性能优异的关键。其中供电数值范围采用 9~15 V,并依据各模块电路的实际需求,在低能耗前提下设计相应的电压转换电路。其中各电路的电压供给均由具备低能耗以及微小封装优势的电压基准芯片 LT6660 提供^[15]。这种基准芯片有利于缩减 PC 板所占用的实际空间。同时为了兼顾能耗性以及空间性,在基准芯片 LT6660 导向下为系统提供了一种具备可行性的电流设计方案,其具体原理情况如图 4 所示。

Fig.4 Infinite current supply based on LT6660

为了解决 IEPE 传感器输出电压信号幅值较高的问题^[16],在进行输入电压数值设定时进行了相应调整,运用了具备纤巧型封装的 LT3494 使其供电电压数值提高到 25 V。LT3494 不仅在电压供给方面具备较强的稳定性,还能保证系统运行的低能耗性以及系统数据采集的精确性^[13]。本研究以电压数值需求为导向,进行相应的外围电阻值计算,其具体硬件电路情况如图 5 所示。

Fig.5 25 V power supply based on LT3494

3.3 模数转换电路硬件设计

在本文设计的模数转换电路当中,为了使数据采集具备较高精确性,采用了 16 位高精度模数转换器 ADS8329,同时为了使系统运用具备较强的续航能力,采用了低能耗微型控制器 AGLN250。其硬件具体原理情况如图 6 所示。

Fig.6 Analog-to-digital conversion hardware

为了避免输入信号当中存在干扰因素,对模数转换器产生影响效应,在此部分充分运用了 A/D 有效位的功能^[17]。首先在信号输入端纳入一阶无源低通 RC 滤波器进行使用,其次在构成方面采用电阻数值相同的两个 $20\ \Omega$ 电阻以及一个电容数值为 $470\ \text{pF}$ 的电容器。在本电路的供电电压数值选取方面,采取能够提高系统精确度的模拟电压数值 $+5\ \text{V}$ 。在参考电压

数值设定方面,采用具有稳定性且能耗性较低的 LM4040。

当系统处于非自动运行模式时,主控芯片 FPGA 会进行配置实施,其后在 EOC 反馈信号导向下,通过 CONVEST 引脚控制对 A/D 采样率进行配置设定。当以上设定步骤实施完毕后,转换数据会在触发作用下通过 SDO 引脚串行将数据传送给主控芯片 FPGA。

4 仿真与测试分析

4.1 滤波仿真结果分析

为了对设计的系统数据采集精确度进行精准评估,运用仿真软件 FilterCAD 对系统的幅频特性进行检测。经过数据的详细分析,再将其与计算数据对比,发现其数值结果误差性几乎为 0,仿真效果较好,能够满足数据采集的高精度需求。

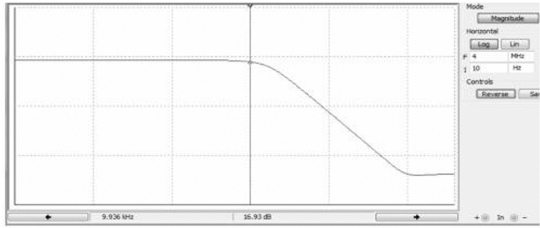


图 7 幅频特性分析

Fig.7 Amplitude frequency characteristic analysis

经过上述数据的精确度测试之后,还需要对设计系统的信号抗干扰能力进行分析验证,采用仿真软件 LTspice 对其进行验证实施。首先在选定频率为 40 kHz 的有用信号中加入 160 kHz 的干扰信号,再比较经过滤波作用前后的信号数值,其具体数值情况如图 8 所示。

从图 8 仿真频谱图可以看到,有信号的数值误差范围在可接受范围内,纳入的干扰信号在经过滤波作用以后,也明显实现了衰减作用和幅度分量的数值要求。将其与计算数据进行比对,其数值结果误差性几乎为 0,仿真效果较好,同样能够满足数据采集的高精度需求。

4.2 滤波电路的测试及校准

在滤波电路传输带宽的测试环节中,采用两种仪器对其进行测试,分别是扫频仪和频谱仪。

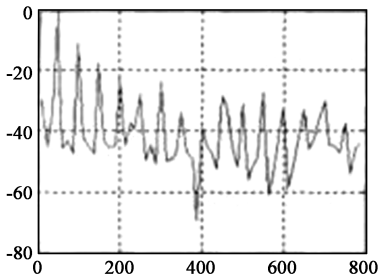


图 8 利用 LTspice 工具仿真 FFT 频谱图

Fig.8 Simulation of FFT spectrum with LTspice

首先设定扫频仪的输入信号条件,使其信号范围在 1~80 kHz 之间,其后需要利用频谱仪对输出信号进行幅频特性测试。根据测试结果得知,信号幅值与频率之间存在负相关关系。为了验证滤波器截止频率是否存在理论值和实际数值之间的误差,利用频谱仪对上述电路进行了实际数值方面的检测,其具体数据如表 1 所示。

表 1 滤波器的参数测量

Tab.1 Measurement parameters of the filter

理论值/kHz	实际值/kHz	误差率/%
1	1.02	0.02
5	5.03	0.03
10	10.08	0.005
20	20.13	0.008
30	30.28	0.012
40	40.42	0.011

由表 1 数据可知,滤波器截止频率在实际值与理论值之间的误差范围满足本文设计方案的需求。按照系统设计方案的需求,将系统运行的截止频率调节到最大数值 40 kHz,使用高精度万用表对滤波电路的直流信号进行幅值初次校准,其误差范围数值没达到理想状态。为了对数据精确性进行提升处理,采取数据拟合的方式对其进行相应标定。在拟合处理步骤当中进行直线拟合,并设定其拟合方程式为 $y = kx + b$,在软件的运行下进行直流偏置消除,利用 MATLAB^[18-19] 对数据进行线性拟合处理,如图 9 所示,并将结果导入表 2。

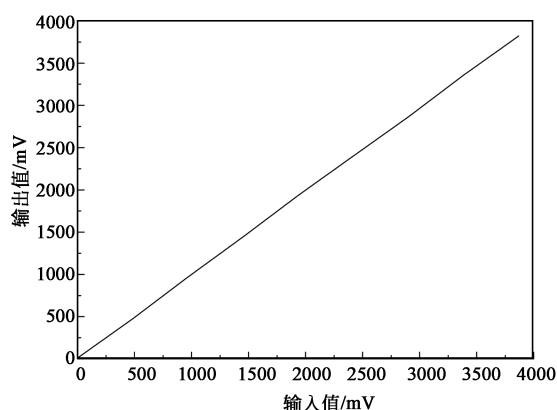


图9 MATLAB拟合直线

Fig.9 Fitting line with MATLAB

表2 滤波器的测试校准

Tab.2 Measurement calibration of the filter

输入 值/mV	输出 值/mV	实际 精度/%	拟合后 输出/mV	校准后 精度/%
49.8	61.6	235	49.88	0.46
99.8	112.0	123	99.56	0.69
149.7	163.4	86	149.86	0.21
200	2142	68	200.01	0.23
299.8	313.8	48.9	300.13	0.08
500.0	517.3	32	500.20	0.17
600.2	620.1	30	601.12	0.93
901.1	923.7	25	902.06	0.94
2 001.5	2 037.91	18	2 001.78	0.09
3 002.5	3 051.2	15.8	3 003.29	0.25

由表2的数据结果可知,经过软件拟合作用后的数据,在测量精度上确实得到了有效提升,因此,利用拟合作用的数据精度提升方案具备实践可行性。

4.3 高精度前端调理电路测试

在主控芯片对系统各模块数值进行相应的配

置设定后,随即进行正弦输入信号的数值调节处理,将其幅值调节为4 V,偏置调节为2.5 V,并在不同的输入频率数值下进行输入环节与输出环节间时域关系的测试,具体情况如图10所示。

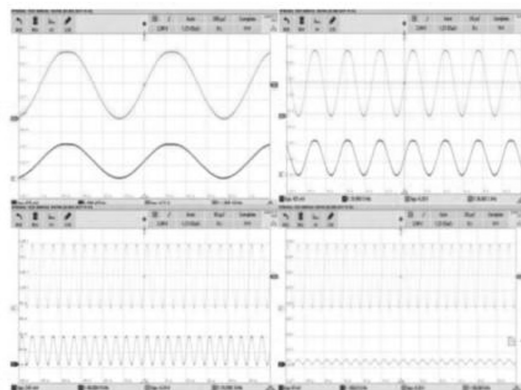


图10 不同输入频率下的输入输出时域图

Fig.10 Input and output time domain diagrams at different input frequencies

对图10的时域图数据结果分析可知,此系统的前段调理电路部分在不同信号频率下,无论是在衰减模块的减值测试中,还是在滤波器的抗干扰能力测试中,其数据结果都同时呈现出较为优异的精确性能,各项数据在理论数值与实际数值的比对分析中误差范围程度都较小。因此,可以判定本文在调理电路设计部分实现了高精度的数据采集功能。

4.4 系统整体精度测试

通过主控芯片FPGA将A/D采样率数值调节为最低数值200 kHz,并将系统运行模式设定为非自动模式。为了对位于0~23.5 V输入幅值范围内的直流信号采集精确度做出分析验证,在信号源方面采用电源PAN-35,利用chipscope工具对输出信号A/D的采样数值进行即时获取,并将获取的实际数值进行平均化处理,最终数据结果如表3所示。

表3 A/D直流信号采集精度测试结果

Tab.3 Results of A/D DC acquisition accuracy

传感器输出/V	调理电路输出/V	转换后数字量	转换后模拟量/V	标定后输出/V	标定后误差/%
1.454	0.152 6	4.062	0.156	0.145 2	0.15
2.966 5	0.303 66	8.041	0.306 6	0.298	0.12
4.915	0.498 5	13 132	0.502	0.491 4	0.07

续 表

传感器输出/V	调理电路输出/V	转换后数字量	转换后模拟量/V	标定后输出/V	标定后误差/%
7.088 1	0.7158 1	18 842	0.718 9	0.709 2	0.05
9.953	1.002 3	26 346	1.006	0.995 4	0.02
12.413	1.248 3	3 280	1.251 5	1.241 8	0.03
15.618	1.568 8	41 184	1.572	1.561 4	0.05
17.496 1	1.756 61	46 129	1.759 7	1.749 8	0.03
20.164	2.023 4	53 111	2.02 7	2.016 2	0.02
23.612	2.368 2	62 155	2.372	2.361 4	0.02

根据表 3 显示的数据结果可知,系统调理和转换模块的数据结果均与传感器的实际输出数值存在差异,为了实现对上述两模块数据精度的提升,依旧采用标定拟合方法对数据进行精确性能提升,根据表 3 记载的标定后数据情况,可知数据误差范围已经达到精度要求范围(0.15%以下)。

4.5 功耗测试

为了对本文设计系统的实际续航能力进行深度了解,需要对其能耗性能进行测试,具体测试内容主要包括对系统主电路模块以及各部分电路模块进行不同运行状态下的能耗测试。一是静态能耗测试,此时整个系统电路还没有经过主控芯片 FPGA 的配置设定环节,并且也没有相应的信号输入;二是动态能耗测试,此时系统电路正处于正常工作状态,各部分已经通过主控芯片 FPGA 的设定配置。整个测试环节的供电设施采用电源 PAN-35,供给电压数值为 12 V。

测试环节的流程顺序依据表 4 测试内容依次进行。首先对主电路模块两种运行状态下的能耗情况进行测试,随后进行调理电路运行状态下的能耗测试,再将上述能耗数值在对应状态下进行相减,得到单一模块运行状态下的能耗情况。在其后的测试环节中,也运用上述测试方法,将具体测试数据结果录入表 4。

据表 4 数据结果可知,整个系统在不同运行状态下的能耗数值均维持在较低范围内,本文设计的电路系统具备较强的续航能力。

表 4 各模块及整体功耗测试

Tab.4 Each module and the whole power consumption test

测试内容	静态 功耗/mW	工作 功耗 /mW
电源电路模块	35	55
调理电路模块	30	50
A/D 与 FPGA 主控模块	35	50
整体测试	95	155

5 结 论

本文设计的数据采集系统与传统数据采集系统相比,具有下列优势:(1)系统内各参数,如放大倍数、截止频率、采样率等均具备可调控性,这有利于系统进行数据采集活动,较强的灵活性也使得系统硬件设计的难度及成本降低。(2)采集系统在软件和硬件方面都提升了数据的测试精度。(3)具备较强的续航能力,无论处于何种运行状态下,都能够实现较低的能耗。

参 考 文 献:

[1] 李科,陈紫强,谢跃雷.基于 FPGA 的多通道实时地震勘探采集系统设计[J].现代电子技术,2018,41(9):24-30.
LI K, CHEN Z Q, XIE Y L. Design of multi-channel real-time seismic exploration acquisition system based on FP-
GA [J]. *Modern Electronics Technique*, 2018, 41(9): 24-30. (in Chinese)

[2] 卢振国,王红亮,胡晓峰.种通道可扩展的堆叠式数据采集系统设计[J].中国测试,2018,44(3):91-96.
LU Z G, WANG H L, HU X F. Design of channel scalable and stacked data acquisition system [J]. *China Meas-*

- urement & Testing Technology, 2018, 44(3): 91-96. (in Chinese)
- [3] 袁小康,焦新泉,储成群,等.振动传感器信号调理电路设计及分析[J].测试科学与仪器,2018,9(2):174-179. (in English)
YUAN X K, JIAO X Q, CHU C Q, et al. Design and analysis of singal conditioning circuit for vibration sensor [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2018, 9(2): 174-179.
- [4] ZHANG R L, GU F S, MANSFA H, et al. Gear wear monitoring by modulation signal bispectrum based on motor current signal analysis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 94: 202-213.
- [5] YAO Z, LIANG T, JIA P G, et al. A high-temperature piezoresistive pressure sensor with an integrated signal-conditioning circuit [J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 913.
- [6] BAO S, YAN H R, CHI Q P, et al. FPGA-based reconfigurable data acquisition system for industrial sensors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(4): 1503-1512.
- [7] 王向军,张继龙,阴雷. 光流法运动估计在 FPGA 上的实现与性能分析 [J]. 光学 精密工程, 2019, 27(1): 211-220.
WANG X J, ZHANG J L, YIN L. Implementation and performance analysis of optical flow based motion estimation on FPGA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 211-220. (in Chinese)
- [8] 张恒, 马庆军, 王淑荣. 紫外遥感仪器高速 CMOS 成像电子学系统 [J]. 光学 精密工程, 2018, 26(2): 471-479.
ZHANG H, MA Q J, WANG S R. High speed CMOS imaging electronics system for ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 471-479. (in Chinese)
- [9] 陈洋君, 吴志勇, 崔明, 等. 基于 MAX9259/MAX9260 的 CameraLink 图像数据光纤传输技术 [J]. 中国光学, 2018, 11(6): 1017-1023.
CHEN Y J, WU Z Y, CUI M, et al. CameraLink image data fiber transmission technology based on MAX9259/MAX9260. Editorial Committee of Chinese Optics, 2018, 11(6): 1017-1023. (in Chinese)
- [10] 刘明, 邓军, 冯献飞, 等. 高灵敏度空间点目标探测系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 115-122.
LIU M, DENG J, FENG X F, et al. Design of highly sensitive space point target detection system. [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 115-122. (in Chinese)
- [11] KHEDKAR AA, KHADE R H. High speed FPGA-based data acquisition system [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2017, 49: 87-94.
- [12] 张根苗,李斌,王群,等.基于 FPGA 的高精度数字程控直流变换器设计[J].电子技术应用,2017,43(11):139-142,146.
ZHANG G M, LI B, WANG Q, et al. Design of a high precision digital programmable DC converter based on FPGA [J]. *Application of Electronic Technique*, 2017, 43(11): 139-142, 146. (in Chinese)
- [13] 李尚斌,林永峰,樊枫.倾斜旋翼气动特性风洞试验与数值模拟研究[J].工程力学,2018,35(6):249-256.
LI S B, LIN Y F, FAN F. The research of aerodynamic characteristics of tilt rotor using wind tunnel test and numerical simulation methods [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(6): 249-256. (in Chinese)
- [14] 童一飞,王红亮.低功耗 IEPE 传感器数据采集系统的设计与实现[J].电测与仪表,2019,56(5):101-104,118.
TONG Y F, WANG H L. Design and implementation of low-power IEPE sensor data acquisition system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(5): 101-104, 118. (in Chinese)
- [15] 郭广阔,黄春跃,吴松,等.基于 HFSS 的埋入式电容串扰分析[J].电子元件与材料,2014,33(4):60-63.
GUO G K, HUANG C Y, WU S, et al. Analysis of crosstalk of the embedded capacitors based on HFSS [J]. *Electronic Components & Materials*, 2014, 33(4): 60-63. (in Chinese)
- [16] 曾贵伟,汤宝平,邓蕾,等.机械振动无线传感器网络节点高精度数据采集方法[J].振动与冲击,2016,35(16):59-63,71.
ZENG G W, TANG B P, DENG L, et al. A high precision method for mechanical vibration data acquisition based on wireless sensor networks node [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(16): 59-63, 71. (in Chinese)
- [17] CHANDANA M, MERVIN J, SELVAKUMAR D. Power integrity analysis for high performance design [C]// *Proceedings of 2015 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications*. Bandung, Indonesia: IEEE, 2015: 48-53.
- [18] 许燧赞,董科研,安岩,等.离焦对激光通信接收视场的影响分析[J].中国光学,2018,11(5):822-831.

- XU Y Y, DONG K Y, AN Y, *et al.* Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 822-831. (in Chinese)
- [19] 张家齐, 张立中, 董科研, 等. 二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术 [J]. *中国光学*, 2018, 11(4): 644-653.
- ZHANG J Q, ZHANG L Z, DONG K Y, *et al.* Coarse tracking technology of secondary imaging coude-type laser communication terminal [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(4): 644-653. (in Chinese)

作者简介:



关 静(1977—), 女, 辽宁锦州人, 博士, 副教授, 2008 年于东北大学获得博士学位, 主要从事传感器数据采集、电路设计、电路信号、数学模型与最优化研究。E-mail: rdlr78@163. com