

基于I/F模块的加计量化技术研究

王粉娟, 周璇, 何依泽, 江亭薇

陕西华燕航空仪表有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月25日; 录用日期: 2025年9月3日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

针对惯性元件加速度计信号采集, 通常采用A/D、量化器及I/F模块进行转换, 通过对比分析, 在不损失加速度计原有精度的情况下, 最终确定以I/F变换为基本原理的数据转换方案, 首先开展了I/F模块技术研究, 再经过软、硬件设计, 实现I/F模块的加计量化技术研究, 最终通过I/F模块单板以及系统动态测试验证, 验证该方案可行, 满足单板及系统指标要求。

关键词

I/F变换, 信号采集, 量化技术, 加速度计

Research on Accelerometer Quantization Technology Based on I/F Module

Fenjuan Wang, Xuan Zhou, Yize He, Tingwei Jiang

Shaanxi Huayan Aviation Instrument Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 25th, 2025; accepted: Sep. 3rd, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

For the signal acquisition of inertial components such as accelerometers, A/D, Quantizers and I/F module are typically used for conversion. Through comparative analysis, a data conversion scheme based on I/F transformation was ultimately determined without sacrificing the original accuracy of the accelerometers. Firstly, the I/F module technology was studied, followed by software and hardware design to realize the quantization technology of the I/F module for accelerometers. Finally, the feasibility of the scheme was verified through dynamic testing of the I/F module single board and the system, meeting the requirements of single board and system indicators.

Keywords

I/F Transformation, Signal Acquisition, Quantization Technology, Accelerometer



1. 引言

加速度计是捷联惯导系统的重要测量器件之一,主要是用来测量载体沿一定方向的线加速度信息[1]。随着加速度计分辨率的提高,对采集系统的精度要求也越来越高,加速度计采集电路的信号输出质量对捷联惯导系统的性能有着直接的影响[2]。加速度计信号采集的作用是将加速度计输出的模拟信号转化成可用于惯导解算的数字信号。高精度数据采集可以减轻惯导对复杂惯性元件信号的处理工作,更好地完成惯导解算的参数补偿工作,满足系统更高的实时性要求[3]。

捷联惯性导航系统中其加速度输出范围通常在 10^{-5} g 到几十个 g 之间,且捷联惯导系统最终导航精度很大程度上取决于加速度计的采集精度和数据处理精度。加速度计作为主要的惯性传感器,其输出表现为微弱模拟电流信号[4]。然而如此微小以及宽动态范围的微弱电流信号既不利于高精度的测量,也不利于信号的无损传输,另外后期导航解算计算机无法直接利用该信号进行数字解算并进行补偿[5][6]。

传统通常使用 AD7608 和 AD7734 进行加计信号转换,其中 AD7608 为 SPI 接口,转换精度为 18 位,其芯片自身转换精度不会高于 50 ppm; AD7734 为 SPI 接口,转换精度最高为 24 位,但是转换时间较长,且在实际工程应用中,采集的脉冲数稳定性不高,易出现跳变,噪声大,抗干扰能力差。

文献[7]中采用 AD7693 作为 A/D 数据采集系统的核心控制器件,该器件是 16 位、电荷再分配、差分输入、逐次逼近型的 A/D 模数转换器件[7]。可看出以 A/D 采集的数据变化范围小,精度较低。

I/F 模块一般采用 RS422 通信串口,为电流积分型电流转换,是对输入模拟电流的连续测量,因而并不会产生数据的丢失,且能很好地圆滑噪声,因而具有较强的抗干扰能力,模块转换精度一般可达 20 ppm 之内。

本论文围绕加速度计的信息处理及转换展开研究,在不损失加速度计原有精度的情况下,通过较强抗干扰能力的 I/F 变换器将加速度计输出的微弱电流模拟信号转换为导航解算板能够识别的数字信号,以便于信号的后续处理。

2. 技术原理

2.1. I/F 模块

I/F 变换又称之为电流积分型电流转换,电流积分型电路是通过积分电路将电流信号转换为一个与门限电压比较的信号,得到有效的逻辑控制信号,控制极性开关反馈恒定的电流到输入端[8]。

如图 1 所示,加速度 I/F 转换电路按照各个模块的功能划分为积分器模块,电压比较器模块,逻辑控制模块,极性开关模块,高精度恒流源模块。

当模拟电流自积分器输入时,积分器不断积分,其积分电压不断增大,当积分电压超过比较器门限值时,比较器输出电压发生翻转,逻辑控制模块接收比较器的输出信号,并通过极性开关开启与输入电流极性相反的恒流源通入积分器输入端,由于恒流源电流绝对值大于输入模拟输入电流,积分电压呈现反积分态势,当积分电压降至比较器另一门限值时,比较器输出电平再次翻转,恒流源断开。如此往复,并最终实现电流到频率的转换[9]。

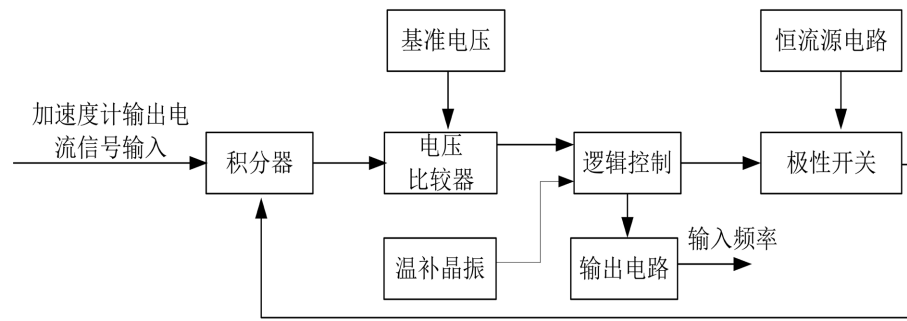


Figure 1. Block diagram of I/F transformation
图 1. I/F 变换原理框图

电流积分型 I/F 变换主要是在反馈回路中通过接入积分电容, 先将模拟电流信号转换为锯齿波电压信号后, 再转换为频率信号。积分电容的温度系数变化相比于 A/D 变换中高阻值电阻低一到两个数量级。且由于是对输入模拟电流的连续测量, 因而并不会产生数据的丢失, 且能很好地圆滑噪声, 因而具有较强的抗干扰能力[10] [11]。因此选用 I/F 变换作为基本变换方案。

本次选用的 I/F 模块实物如图 2 所示。

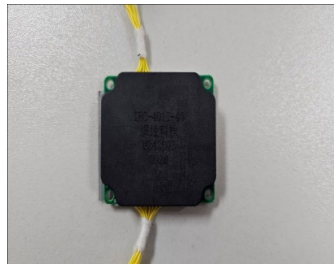


Figure 2. Diagram of I/F module
图 2. I/F 模块图

I/F 模块电流频率转换电路用于将加速度计输出的电流信号转换为脉冲信号, 具有以下功能。

- 1) 电流频率转换功能: 每只转换电路包含 3 路电流频率转换功能;
- 2) 同步信号接收功能: 接收差分同步信号输入, 并锁存脉冲计数值, 以实现同步采集与同步通讯;
- 3) 串行协议通信功能: 可根据同步信号触发, 使用标准 RS422 协议周期发送脉冲计数值。

2.2. 主要技术指标

- 1) 输出零位
-20~20 ug;
- 2) 零位稳定性
小于等于 10 ug;
- 3) 非线性
小于等于 50 ppm。

3. 技术实现方案

3.1. 硬件实现

基于中/低精度航姿产品设计 I/F 模块转接电路板, 更换现有 A/D 转换电路模块。

该电流频率转换电路设计如图 3 所示, 将加速度计的电流信号输出引脚接至转换电路的电流引脚, 加速度计参考地接至转换电路的模拟地, RS422 接口、同步输入接口连接至导航主机板。加速度计的电流信号转换为数字信号后, 根据同步输入的触发信号, 产品通过 RS422 通讯协议将采集结果发送至导航主机板。

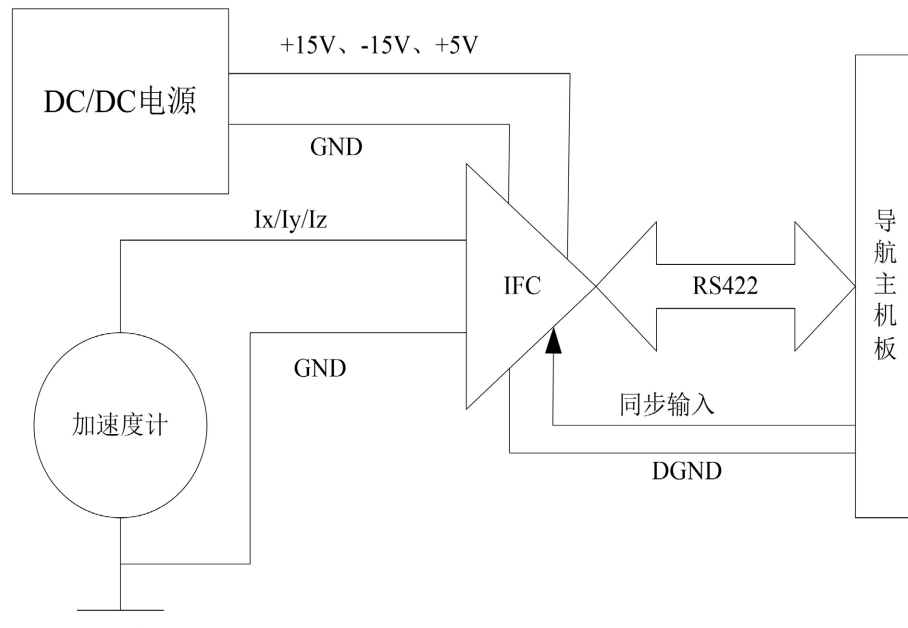


Figure 3. Circuit design diagram
图 3. 电路设计图

通过 FPGA 产生同步信号使用 RS422 差分电平信号, 如图 4 所示, 采用边沿触发模式, 下降沿触发。为避免毛刺引起误触发, 输入的触发信号低电平 t_L 必须大于 $0.5 \mu s$ 。

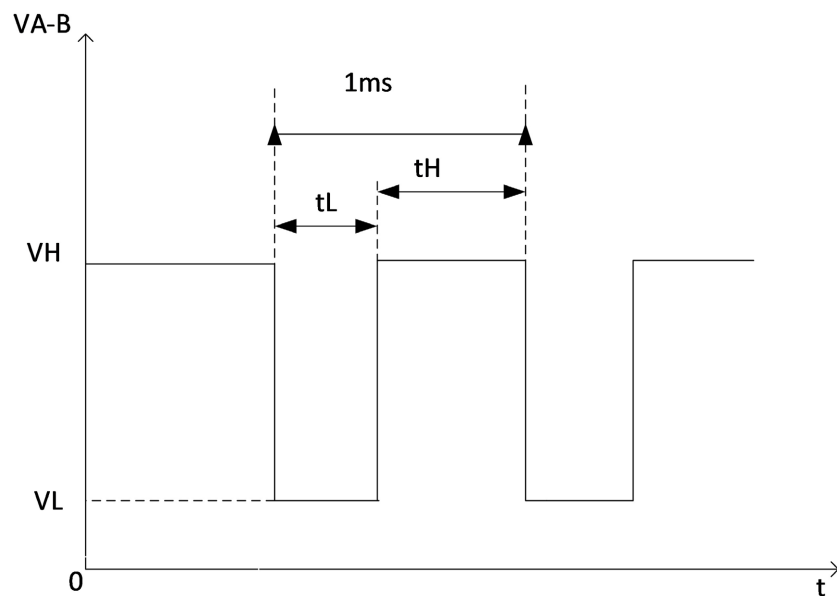


Figure 4. Timing diagram of synchronous trigger signal
图 4. 同步触发信号时序图

3.2. 软件实现

软件通过 RS422 接口进行加计数据采集, 通信连接如图 5 所示。波特率默认 921600 bps, 无校验, 数据更新率可设置 300 Hz~4.5 KHZ, 可根据 FPGA 将同步信号设置为 400 HZ 外触发模式数据包格式中, 加速度信息以正负向脉冲累计个数的形式输出, 对两者求差值即可得到当前帧脉冲计数值, 需要将当前帧脉冲计数值减去上帧脉冲计数值即可得到输入模拟信号的数字化值, 采集得到本通道加速度计数据, 即同步信号 400 HZ 间隔内加计增量。

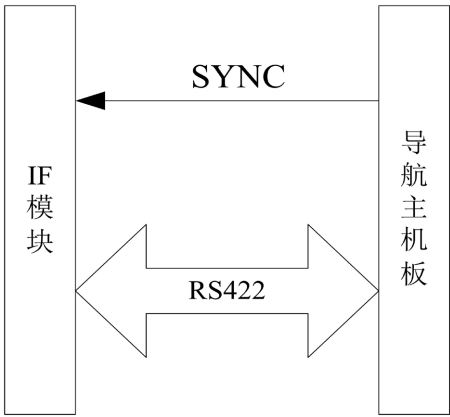


Figure 5. Connection diagram of synchronous RS422 communication

图 5. 同步 RS422 通信连接图

软件中增加加速度数据接收及解算模块。

4. 技术验证

4.1. 单板验证

对研制所得 I/F 模块转换板先进行单板验证, 将各项测试数据与原有量化器模块的输出数据进行对比分析, 测试项目主要有:

零位: 输入电流为零时, 产品单位时间内输出脉冲数除以标度因数;

零位稳定性: 常温, 输入电流为 0 mA 或悬空时, 定时 1 s 采样得到 $N1s(n)$, 测试时间持续 1 小时; 由数据序列 $N100s(n)$ 的标准差除以常温标度因数;

非线性: 测量范围中各测试电流对应的标度因数的标准差除以 1 mA 对应标度因数。

4.2. 系统验证

基于中低精度航姿产品, 陀螺和加速度精度指标见表 1 所示, 更换 I/F 模块电路后进行系统软硬件调试、测试及验证; 替换研制 I/F 模块电路转接板后, 重新进行温度标定和三轴标定, 在常温下通电测试, 分别进行两次 0.5 h 转机头纯惯性导航测试和跑车试验。产品跑车安装如图 6 所示。

Table 1. Component specifications

表 1. 元器件指标

名称	主要技术指标
加计	零位重复性: ≤ 100 ppm
光纤陀螺	随机漂移: $\leq 0.1^\circ/h$

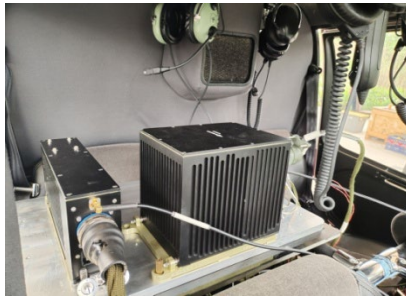


Figure 6. Sports car installation diagram
图 6. 跑车安装图

4.3. 试验实施效果

4.3.1. 单板测试

a) 单板测试曲线

1) 零位及稳定性测试如图 7、图 8 和图 9 所示。

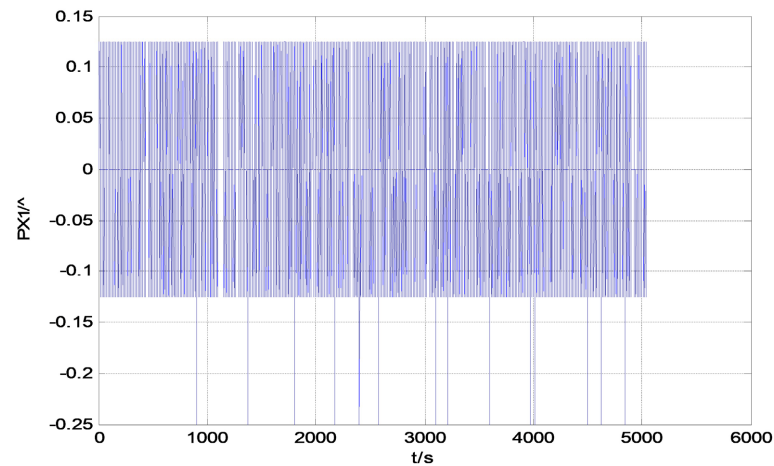


Figure 7. Diagram of X-axis zero position output
图 7. X 通道零位输出图

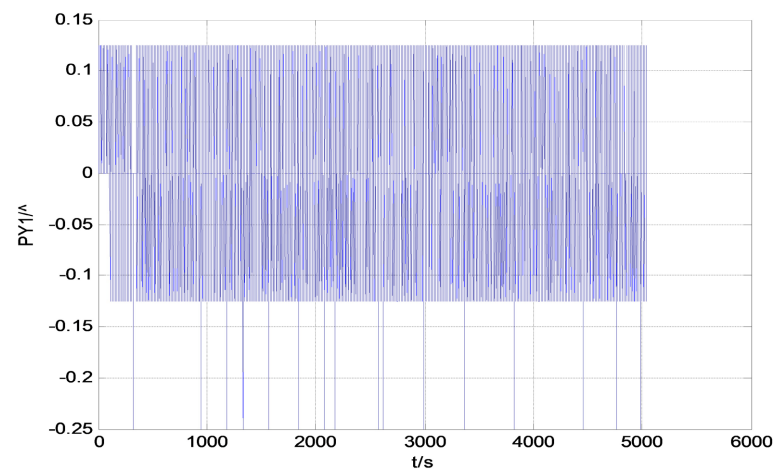


Figure 8. Diagram of Y-axis zero position output
图 8. Y 通道零位输出图

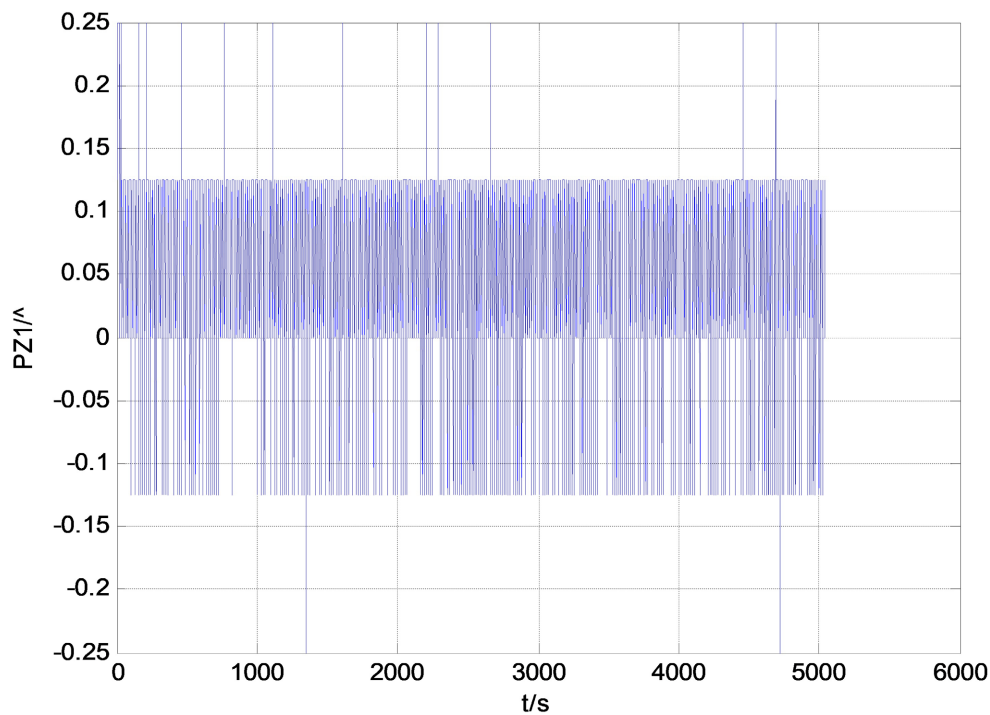


Figure 9. Diagram of Z-axis zero position output
图 9. Z 通道零位输出图

2) 一次通电稳定性测试如图 10、图 11 和图 12 所示。

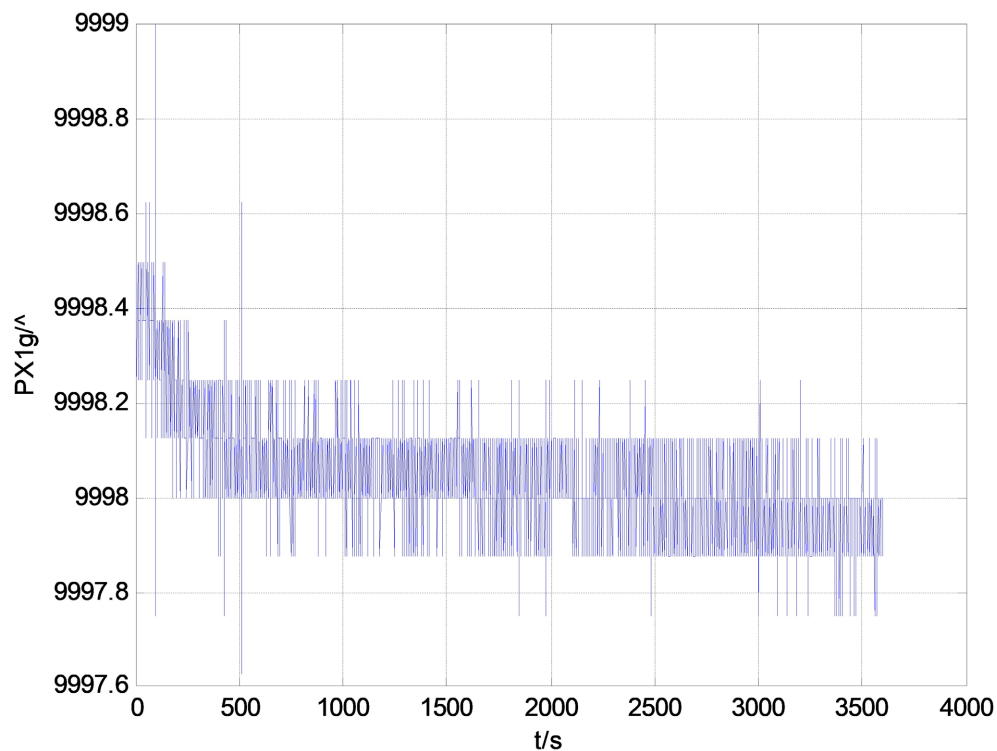


Figure 10. Stability output diagram of X-axis with one-time power-on
图 10. X 通道一次通电稳定性输出图

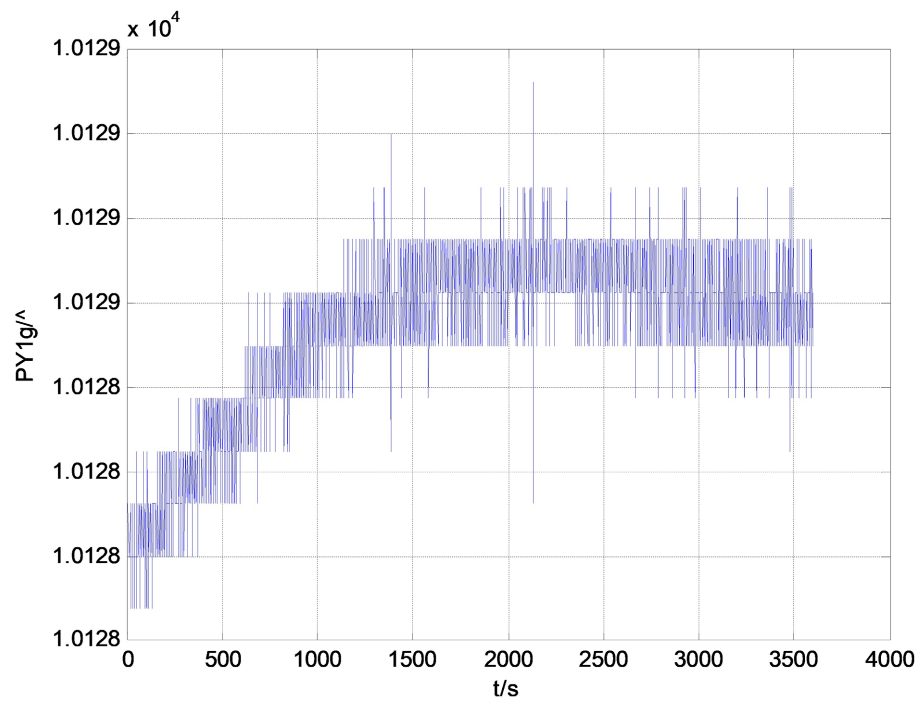


Figure 11. Stability output diagram of Y-axis with one-time power-on

图 11. Y 通道一次通电稳定性输出图

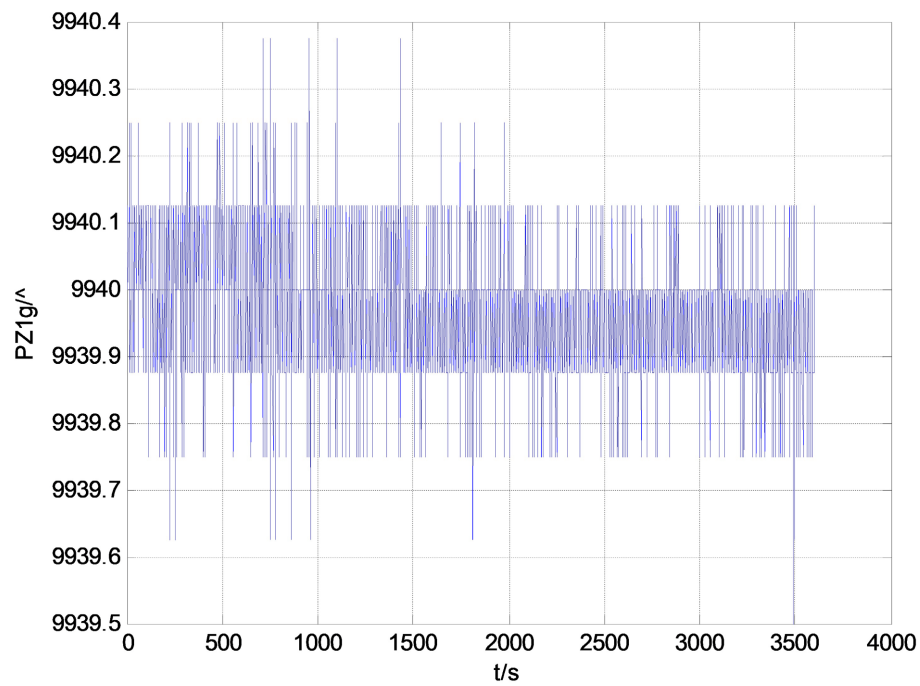


Figure 12. Stability output diagram of Z-axis with one-time power-on

图 12. Z 通道一次通电稳定性输出图

3) 非线性曲线如图 13、图 14 和图 15 所示。

b) 单板测试结果

单板测试结果见表 2 所示。

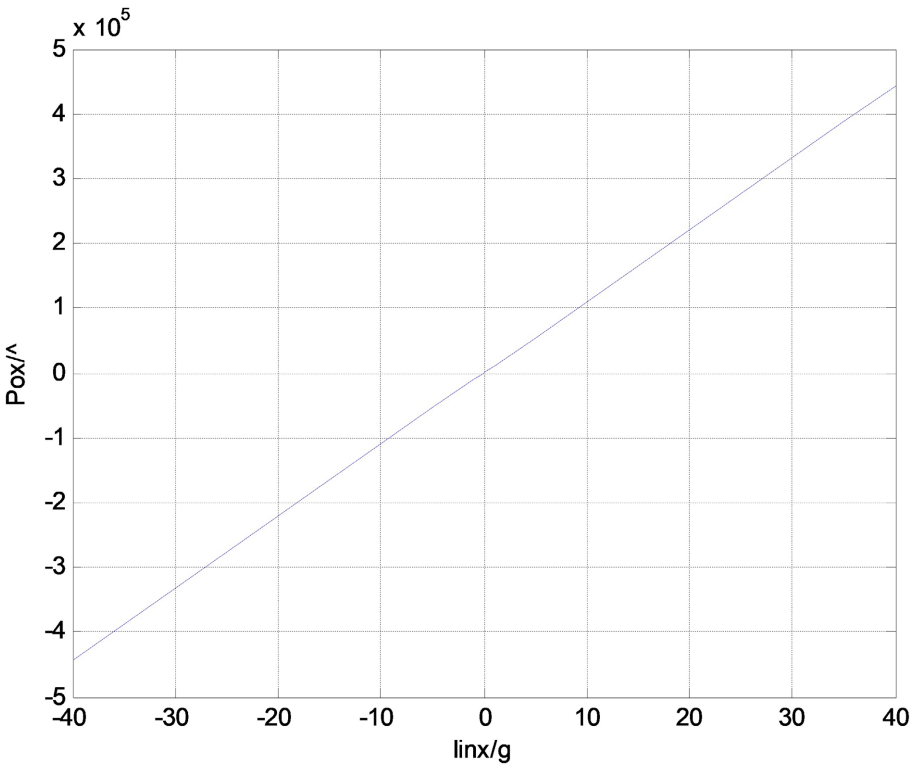


Figure 13. X-axis nonlinearity test diagram
图 13. X 通道非线性测试图

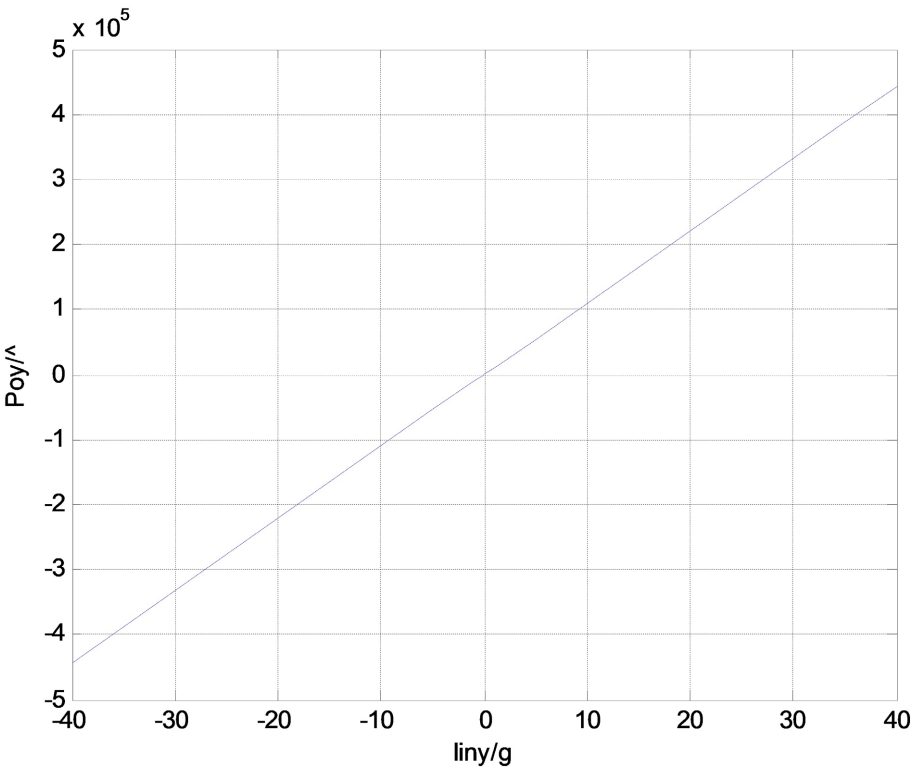


Figure 14. Y-axis nonlinearity test diagram
图 14. Y 通道非线性测试图

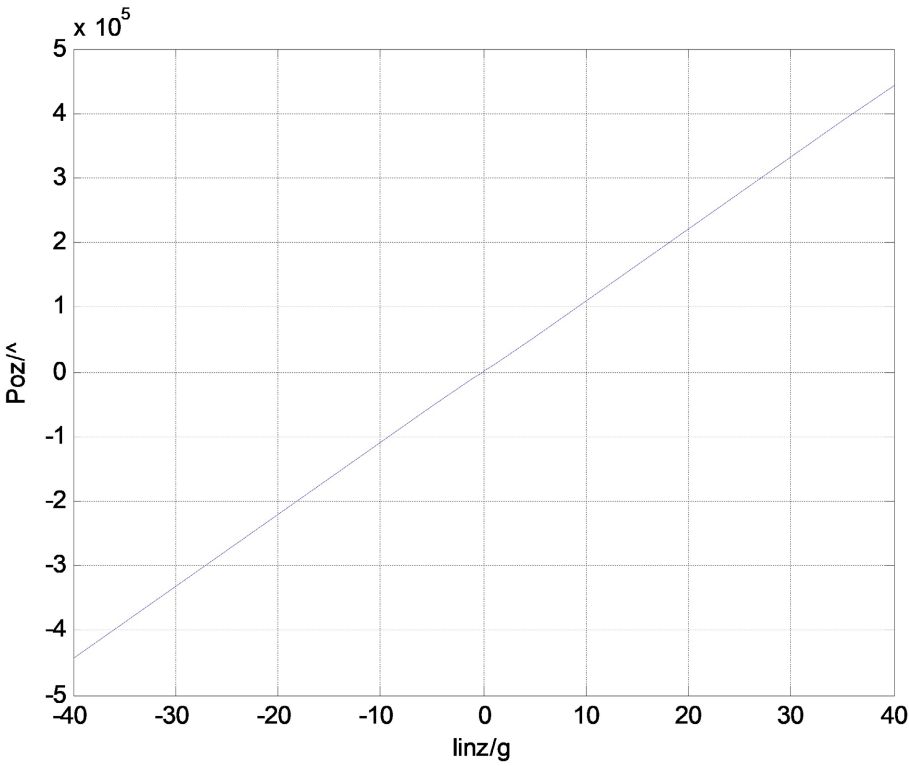


Figure 15. Z-axis nonlinearity test diagram
图 15. Z 通道非线性测试图

Table 2. Single board test results
表 2. 单板测试结果

项目	名称	零位(ug)	零位稳定性(ug)	非线性(ppm)
	指标要求	-20~20	≤10	≤50
	X	0.25	7.21	10.80
	Y	1.02	7.33	23.78
	Z	5.44	7.33	7.99

4.3.2. 系统测试

产品完成对准进入导航，掉头 180°后，进行两次 30 min 测试，导航精度见表 3；
将产品安装在我厂试验车上，产品对准进入导航后，30 min 导航精度见表 4；
产品两次跑车试验曲线分别为图 16~21。

Table 3. Product 30 minutes turnaround pure inertial navigation test accuracy (RMS)
表 3. 产品 30 min 掉头纯惯导航测试精度(RMS)

项目	名称	东向速度(m/s)	北向速度(m/s)	经度(RMS) (m)	纬度(RMS) (m)	位置误差(nmile/30 min)
	指标要求	4	4	/	/	3
	第一次测试	1.28	2.19	1073.11	3989.47	2.23
	第二次测试	0.98	3.61	1376.18	3691.54	2.12

Table 4. Product 30 minutes sports car pure inertial navigation test accuracy (RMS)
表 4. 产品 30 min 跑车纯惯导航测试精度(RMS)

项目	名称	东向速度(m/s)	北向速度(m/s)	经度(RMS) (m)	纬度(RMS) (m)	位置误差(nmile/30 min)
指标要求		4	4	/	/	3
第一次跑车		0.90	2.32	484.49	2642.57	1.43
第二次跑车		2.02	1.47	860.71	1110.92	0.76

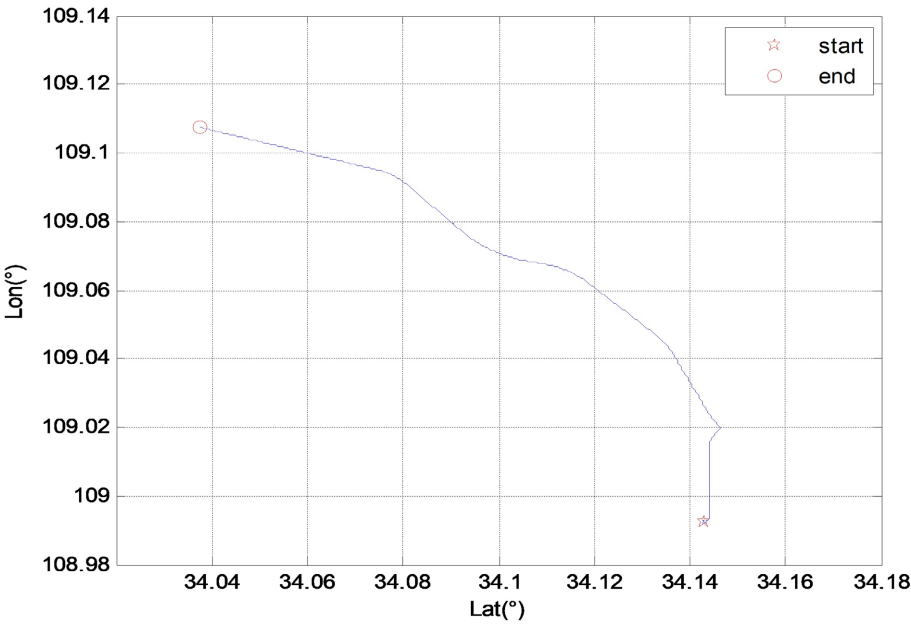


Figure 16. Trajectory diagram of first vehicle
图 16. 第一次跑车轨迹图

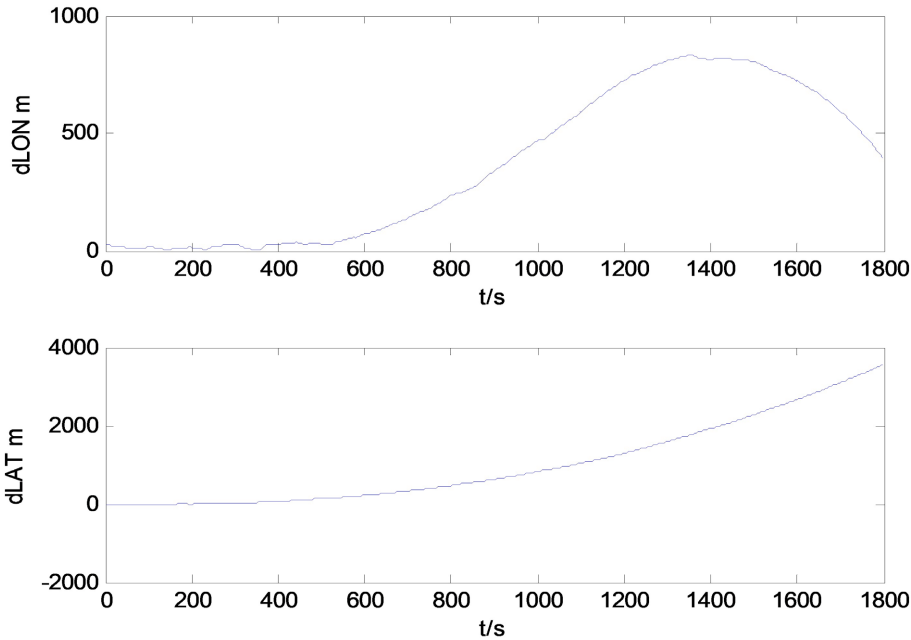


Figure 17. First position error curve
图 17. 第一次位置误差曲线图

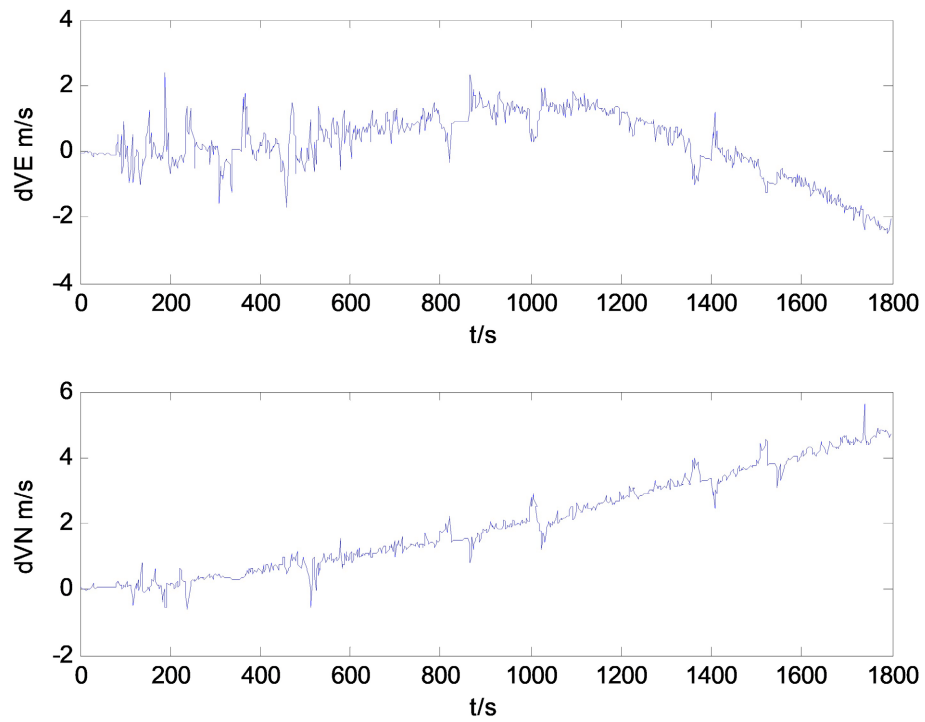


Figure 18. First speed error curve

图 18. 第一次速度误差曲线图

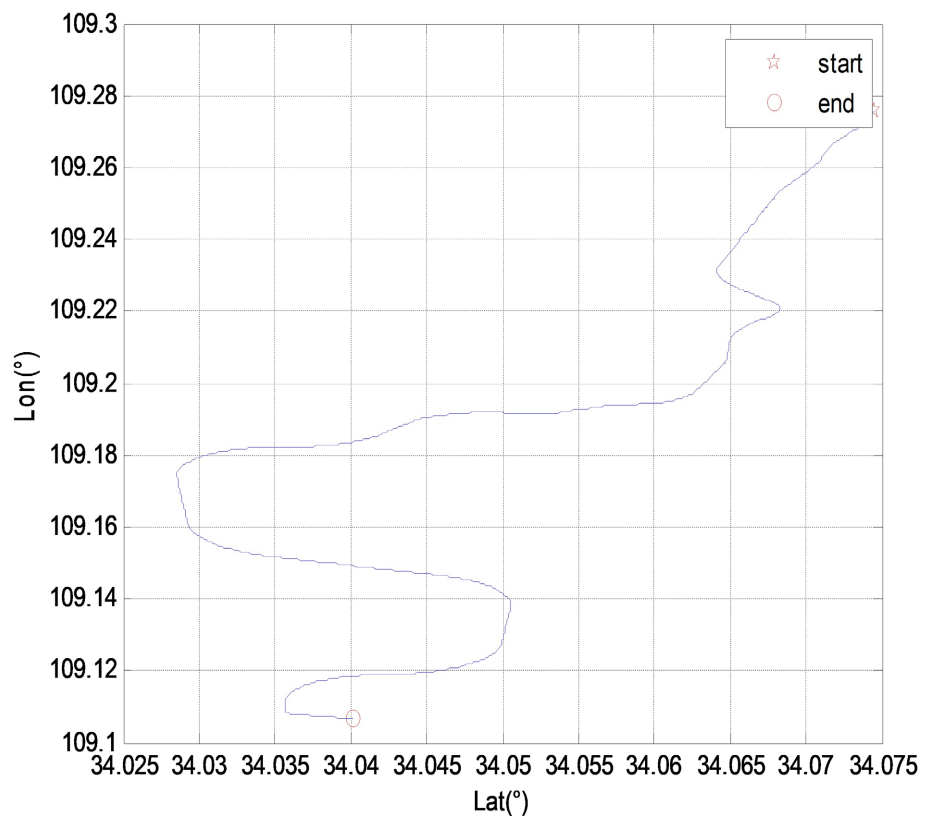


Figure 19. Trajectory diagram of second vehicle

图 19. 第二次跑车轨迹图

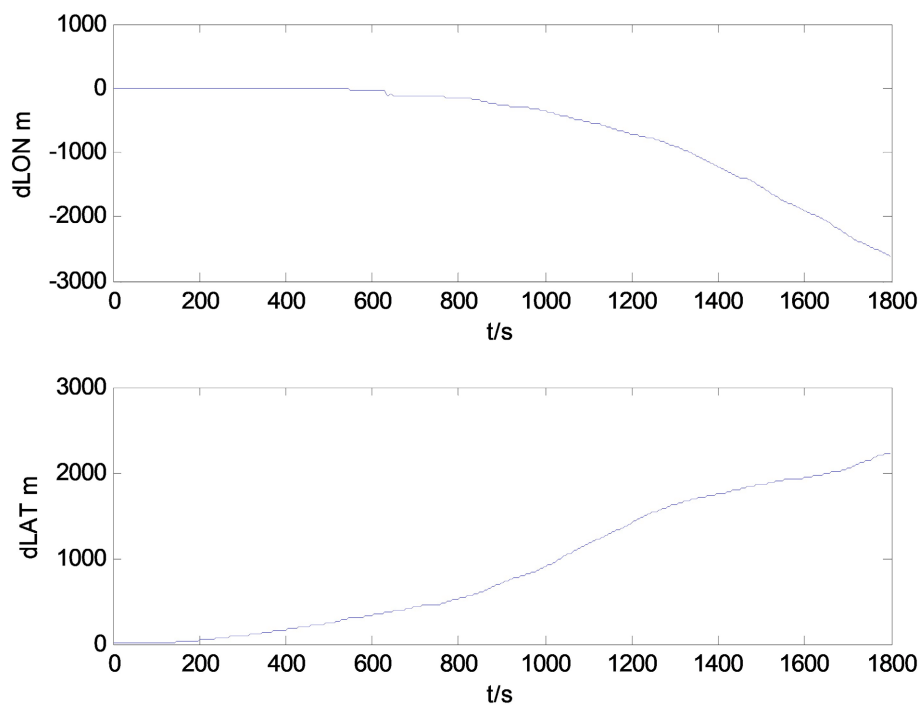


Figure 20. Second position error curve

图 20. 第二次位置误差曲线图

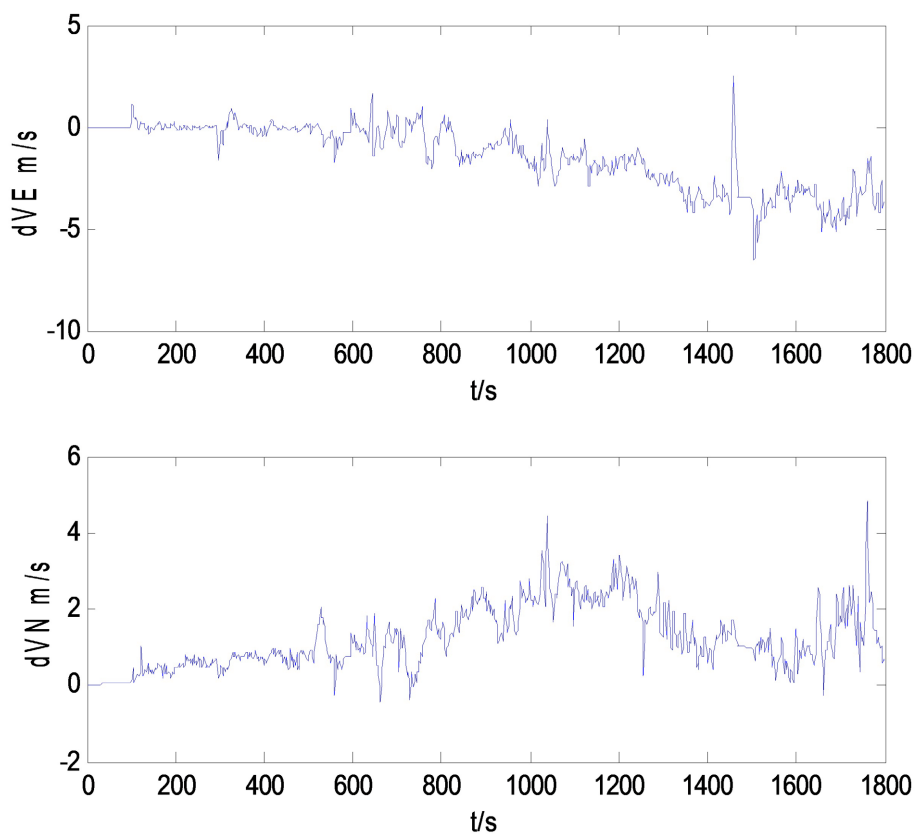


Figure 21. Second speed error curve

图 21. 第二次速度误差曲线图

5. 结论

本文研究了 I/F 模块量化技术, 通过软硬件实现了基于 I/F 模块转化的加速度信号采集, 分别进行了单板测试、掉头试验和跑车试验。试验结果表明, 使用 I/F 模块采集加速度信号可不损失其精度, 单板测试满足自身指标, 系统测试完全优于原方案中 A/D 转换采集加速度信号后系统指标, 满足了系统指标要求, 证明了该方案可行。

参考文献

- [1] 但剑晖. 高精度加速度计信号采集及温度补偿技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 工程大学, 2017.
- [2] 赵瑞琪. 石英挠性加速度计信号采集与误差补偿方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [3] 史凯峰, 董波, 徐兆北. 微弱电流检测技术分析[J]. 山东工业技术, 2014(15): 6.
- [4] 淮士杰. 高精度加速度计信息采集及噪声误差处理[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [5] 蒋冬初. 高速数字电路的信号传输及其噪声抑制[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [6] Venkatesh, C., Siva Sarma, D.V.S.S. and Sydulu, M. (2012) Detection of Power Quality Disturbances Using Phase Corrected Wavelet Transform. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*, **93**, 37-42.
<https://doi.org/10.1007/s40031-012-0006-z>
- [7] 张志豪, 李锦明. 基于石英挠性加速度计 A/D 与 I/F 数据采集系统的对比研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 179-183.
- [8] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] Nasri, M. and Nezamabadi-Pour, H. (2009) Image Denoising in the Wavelet Domain Using a New Adaptive Thresholding Function. *Neurocomputing*, **72**, 1012-1025. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2008.04.016>
- [10] 严恭敏. 捷联惯导算法与组合导航原理. [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
- [11] 严恭敏. 捷联惯导算法及车载组合导航系统研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2004.