

光纤陀螺非线性误差的温度特性研究

陈静¹, 董钧²

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;

2. 中国航天科工集团第二研究院, 北京 100854)

摘要: 在不同调制深度下, 光纤陀螺反馈通道的非线性误差对陀螺输出精度会有不同的影响。在此研究的基础上, 通过实验与仿真分析相结合的方式, 对光纤陀螺反馈通道非线性误差的温度特性也做了进一步的研究。研究表明, 随着温度的降低, 非线性误差对输出的影响也随之增加。仿真采用光纤陀螺单轴板在温箱中测得的数据, 并利用 Simulink 建模分析。

关键词: 光纤陀螺; 非线性误差; 温度特性; 反馈通道; 自检技术

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5558(2014)02-00833

doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2014.01.008

Research about Nonlinear Error of Fibre Optic Gyroscope under Different Temperature

CHEN Jing¹, DONG Jun²

(1. School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083;

2. Chinese second aerospace institute, Beijing 100854)

Abstract: It is known that square wave modulation of different phase will affect output accuracy of fibre optic gyroscope. Above that, the research on temperature feature of fibre optic gyroscope has been done by analyzing experiment and simulation. Research shows that, the lower temperature is, the more severe affect output have. And the expression of nonlinear error was given. The simulation use data which from circuit board in incubator, and use simulink for further analyse.

Key words: fibre optic gyroscope; nonlinear error; temperature feature; feedback channel; self-test technique

0 引言

相关研究表明, 反馈通道的非线性误差会对光纤陀螺的输出精度造成影响, 这种误差随着调制方式与调制深度的不同而不同。方波的调制深度越深, 非线性误差对输出的影响就越大。当输入角速率很小时, 非线性误差的影响就会变得比较明显。通过理论、实验与仿真的结合验证了结论的正确性。

1 非线性误差分析

我们首先介绍一下光纤陀螺输出的基本原理, 以及反馈通道非线性误差对输出特性的影响。由光纤陀螺的原理可知, 当陀螺输入的相位差为 $\Delta\varphi_R$

时, 输出的光功率是 $\Delta\varphi_R$ 的一个余弦函数, 即:

$$P(\Delta\varphi_R) = P_0(1 + \cos\Delta\varphi_R) \quad (1)$$

为了获得高灵敏度, 给该信号施加一个偏置相位为 φ_b 的方波, 则有:

$$P(\Delta\varphi_R) = P_0[1 + \cos(\Delta\varphi_R + \varphi_b)] \quad (2)$$

由陀螺的互易性偏置调制解调原理可知, 调制延时带来了一个时间差 $\Delta\tau$, 因此形成了偏置调制, 最终可以得到两种调制态之差为:

$$\begin{aligned} \Delta P(\Delta\varphi_R, \varphi_b) &= P_0[\cos(\Delta\varphi_R - \varphi_b) - \cos(\Delta\varphi_R + \varphi_b)] \\ \Delta P(\Delta\varphi_R, \varphi_b) &= 2P_0\sin\varphi_b\sin\Delta\varphi_R \end{aligned} \quad (3)$$

由于调制中存在回路的非线性误差, 使得调制

相位中引入误差项,记作 φ' 与 φ'' ,则有:

$$\Delta P(\Delta\varphi_R, \varphi_b) = P_0 [\cos(\Delta\varphi_R - \varphi_b + \varphi'') - \cos(\Delta\varphi_R + \varphi_b + \varphi')] \quad (4)$$

我们可以设存在 φ_1 与 φ_2 , 有:

$$\begin{aligned} \varphi_1 + \varphi_2 &= \varphi' \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= \varphi'' \end{aligned} \quad (5)$$

即:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 1/2(\varphi' + \varphi'') \\ \varphi_2 &= 1/2(\varphi' - \varphi'') \end{aligned} \quad (6)$$

实际的相位检测中,设回路整个的增益为 G , 则有:

$$V_{dem} = GP_0 \sin(\varphi_b - \varphi_2) \sin(\Delta\varphi_R + \Delta\varphi_F + \varphi_1)$$

又由于:

$$V_{out}(t) - V_{out}(t - \tau) = K_{DA} D_{out}(t)$$

而当调制系数为 K_{fp} 时,反馈相移与阶梯波信号的关系为:

$$\Delta\varphi_F + \varphi_1 = K_{fp} [V_{out}(t) - V_{out}(t - \tau)]$$

经过计算,最后输出的的台阶量应该为:

$$D_{out} = \frac{2^N}{V_{pp}K_{fp}} \cdot \left[-\frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega(t) - \varphi_1 \right] \quad (7)$$

对于开环光纤陀螺,有:

$$D_{out} = \frac{2^N}{V_{pp}K_{fp}} \cdot \left[\frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega(t) + \varphi_1 \right] \quad (8)$$

我们以开环方波调制实验为例,假设相邻两时刻的台阶量分别为 $N(i) + INL(i)$ 与 $N(i-1) + INL(i-1)$, 其与相位的对应关系为:

$$\varphi_b + \varphi' = \frac{N(i) + INL(i)}{2^N} \times 2\pi$$

$$\varphi_b - \varphi'' = \frac{N(i-1) + INL(i-1)}{2^N} \times 2\pi$$

即:

$$D_{out} = \frac{2^N}{V_{pp}K_{fp}} \cdot \left[\frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega(t) + \frac{N(i) + INL(i) - N(i-1) - INL(i-1)}{2^N} \pi \right] \quad (9)$$

当采用方波调制时,可知 $N(i) = N(i-1)$, 故上述公式可以简化为:

$$D_{out} = \frac{2^N}{V_{pp}K_{fp}} \cdot \left[\frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega(t) + \frac{INL(i) - INL(i-1)}{2^N} \pi \right] \quad (10)$$

从中可以看出非线性误差将叠加到角速度信号

与调制信号中,最终对输出结果产生影响,当输入角速率较小时,非线性误差的影响就会比较明显。

2 仿真验证

理想 DAC 将接收到的数字信号按照一定的比例转换为模拟信号,由于制造上的缺陷和非对称性,实际 DAC 在不同条件下的数模转换比例不是常数,这个误差就是非线性误差。DAC 的非线性误差体现在 2 个方面:固定输出点在不同环境温度下的非线性误差;同一环境温度下不同输出点的非线性误差。

有关文献对不同温度下的 DAC 输出数据的非线性特性进行测定,使用最小二乘法计算得到 DAC 在测量点的非线性误差,实验结果表明:DAC 的非线性误差大于 10^{-4} ,将会对输出结果产生较大的影响因此分析这种误差对陀螺输出的影响是十分必要的。

为了验证上述分析,我们利用不同温度下测得的陀螺积分非线性误差值做了仿真分析。实验设置 -40°C 、 -20°C 、 0°C 、 20°C 、 40°C 、 60°C 这几个温度点后,对每个温度点下的非线性数据进行测量,可得到不同温度下的非线性误差特性的数据与变化曲线,进而将采集的数据用之前所述的模型进行 simulink 仿真,仿真中采取的方波调制深度为 $\pm\pi/2$ 。

simulink 模型采用开环方波调制,由于是在不断上升的阶梯中加入了一个方波调制,因此我们将 $INL(i+1)$ 的值减去 $INL(i)$ 的值,便能够得到方波调制过程中的差值。其中 N 是一个随着调制深度变化的值,由于满量程 4096 对应的是 2π 电压,因此在 $\pm\pi/2$ 时 N 取 1024。

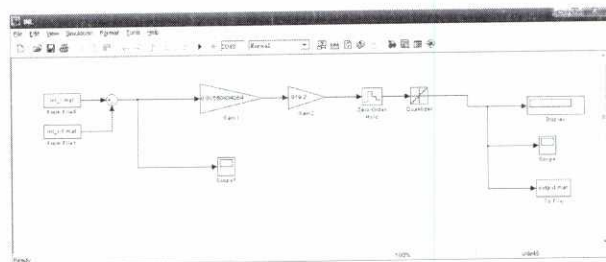


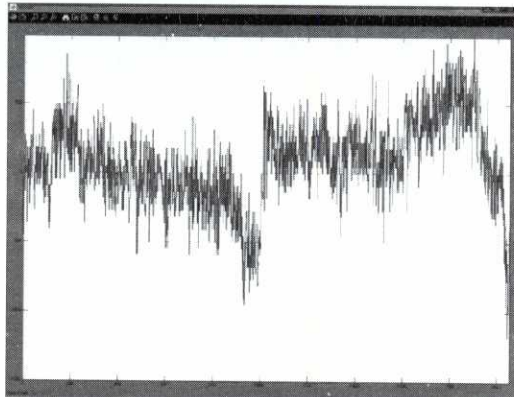
图 1 非线性误差对输出结果的仿真分析模型

Fig. 1 The simulation model of nonlinear error on the output results

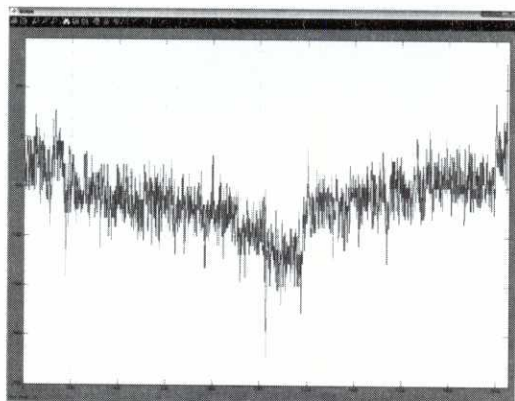
在 simulink 中,我们可以用 From File (来自文件) 模块将需要的 INL 数据导入,分别设置 $INL(i+1)$ 与 $INL(i)$ 两个 From File 模块,对其进行差值运算,则可得出积分非线性通过方波对输出特性造成

的影响。之后再用陀螺中的量化模块即可得出其开环调制的仿真曲线。其 Simulink 模型主要是将反馈阶梯波部分去掉, 而将非线性数据叠加在输出端一同作用到陀螺模型上, 建立的模型如图 1 所示。

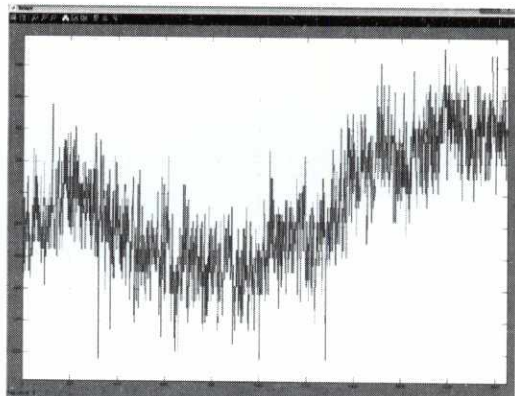
得到的结果如图 2 所示。



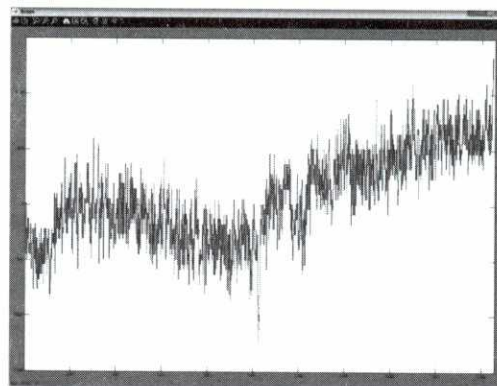
(a) 60°C 时的方波调制
(a) Square-wave modulation at 60°C



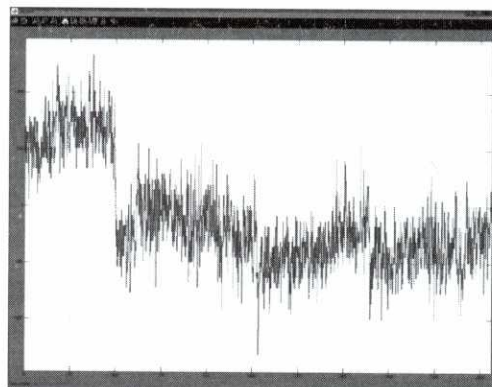
(b) 40°C 时的方波调制
(b) Square-wave modulation at 40°C



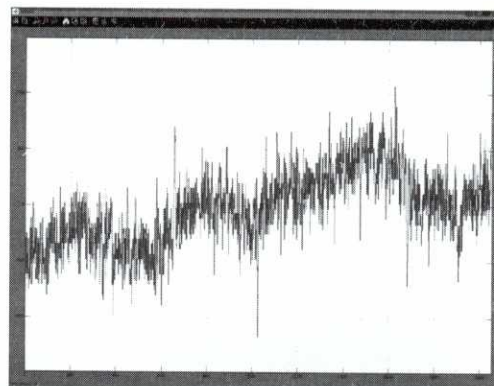
(c) 20°C 时的方波调制
(c) Square-wave modulation at 20°C



(d) 0°C 时的方波调制
(d) Square-wave modulation at 0°C



(e) -20°C 时的方波调制
(e) Square-wave modulation at -20°C



(f) -40°C 时的方波调制
(f) Square-wave modulation at -40°C

图 2 不同深度方波调制误差仿真

Fig. 2 The error simulation of square-wave modulation under different temperature

从仿真结果中可以看出, 随着温度的降低, 图形的波动性趋于剧烈。分析这几组数据的统计特征量, 如表 1 所示。

表 1 不同深度的方波调制误差仿真统计特征量

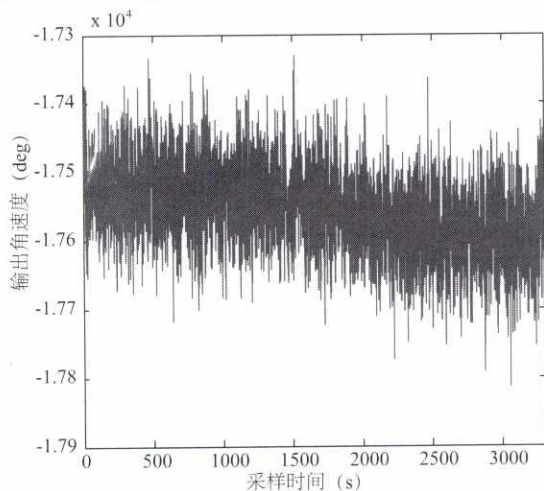
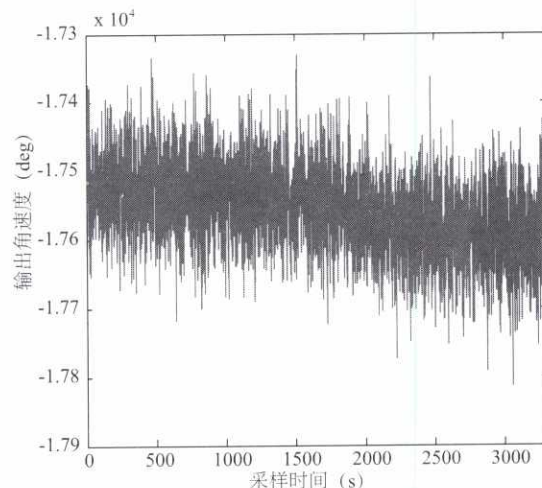
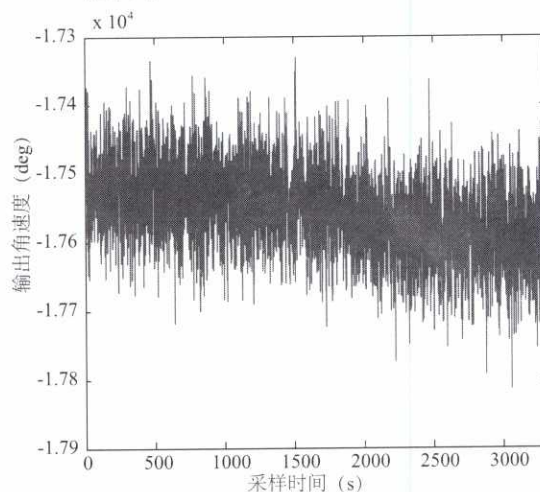
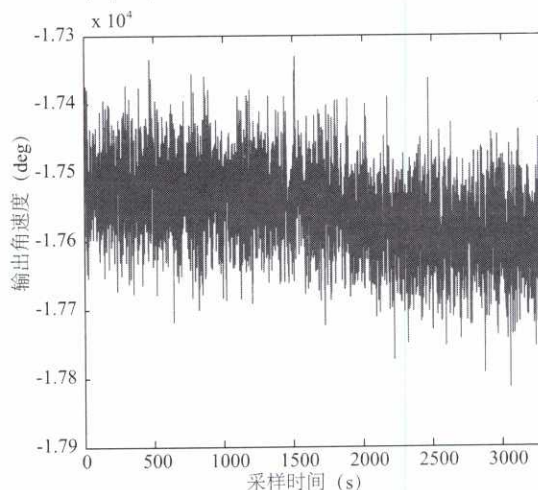
Table 1 The statistical features of the error simulation of square-wave modulation under different temperature

调制深度	均值 (LSB)	标准差 (LSB)
60	80.4573	9418
40	-330.68	10311
20	-88.9273	13455
0	74.8548	16542
-20	-107.156	20040
-40	-27.971	11146

从表 1 中可以看出随着温度的降低, 方差呈现增加的趋势, 这是因为随着温度的降低, $INL(i)$ 与 $INL(i-1)$ 的偏差程度会相应的增加, 因而其差值便会随着增加, 反映到陀螺输出数据中便是使输出数据的方差增大。

3 实验验证

采用同样的方法进行温箱实验, 在不同的温度点下对光纤陀螺进行开环方波调制, 比较其不同温度点下的输出特性。为了防止 Shupe 效应引起的非互易性误差, 我们将光纤陀螺在温箱中保持较长时间的恒定温度, 待 DS18B20 所显示的温度示数稳定后再进行读数。实验中我们仍然选取 -40°C 、 -20°C 、 0°C 、 20°C 、 40°C 、 60°C 这几个温度点, 每个温度点待陀螺恒温后再进行测量, 确保光纤不受温度应力的影响。得到的输出结果用 Matlab 处理可得到图 3 所示的结果。

(a) 60°C 时的方波调制(a) Square-wave modulation at 60°C (b) 40°C 时的方波调制(b) Square-wave modulation at 40°C (c) 20°C 时的方波调制(c) Square-wave modulation at 20°C (d) 0°C 时的方波调制(d) Square-wave modulation at 0°C

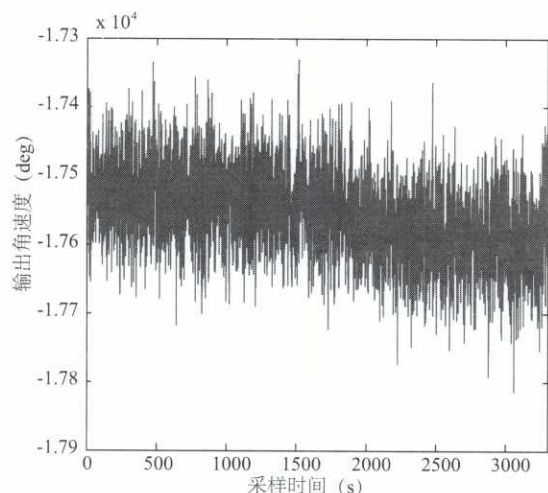
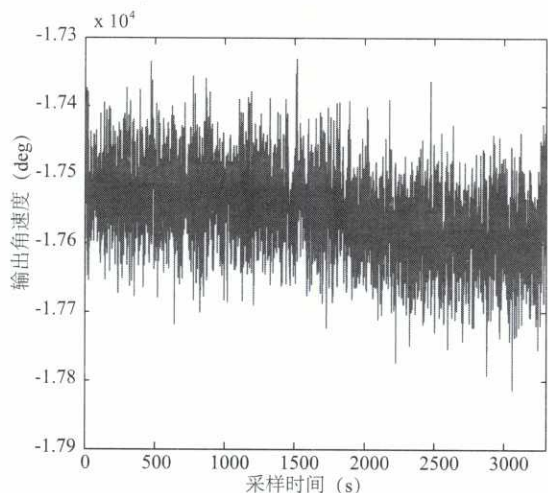
(e) -20°C 时的方波调制(e) Square-wave modulation at -20°C (f) -40°C 时的方波调制(f) Square-wave modulation at -40°C

图3 不同深度方波调制实验的输出波形

Fig.3 The output waveform of the square-wave modulation under different temperature

分析数据的统计特征量可以得到如下结果,如表2所示。

表2 不同深度的方波调制统计特征量

Table 2 The statistical features of the square-wave modulation under different temperature

调制深度	均值 (deg/h)	方差 (deg^2/h^2)
$\pm \pi/16$	-17323	4920
$\pm \pi/8$	-17401	4571
$\pm \pi/4$	-17522	4473
$\pm \pi/2$	-17582	5306
$\pm 3\pi/4$	-17270	20886
$\pm 7\pi/8$	-16684	36446

从中可以看出随着环境温度的降低,其方差呈现增加的趋势,可见反馈通道的非线性特性随着温度的降低而增加。这个结果与上述仿真的结果相一致,说明了光纤陀螺反馈通道的非线性误差确实明显的引起了其输出特性的变化。

4 结论

通过以上分析我们可以看出,反馈通道的非线性误差会对光纤陀螺的输出精度造成影响,这种误差随着温度的不同而不同。温度越低,非线性误差对输出的影响就越大。当输入角速率很小时,非线性误差的影响就会变得比较明显。通过理论、实验与仿真的结合验证了结论的正确性。

参考文献

- [1] Herve C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. Artech House Publishers, 1993.
- [2] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京:中国宇航出版社,2010.
WANG Wei. Interferometric fiber optic gyroscope Technology[M]. Beijing: China Astronautic Press, 2010.
- [3] 董钧,潘雄,章博,张春生. 光纤陀螺反馈通道非线性特性研究[J]. 导航与控制, 2012, 11(4): 52-56.
DONG Jun, PAN Xiong, ZHANG Bo, ZHANG Chun-sheng. Research About Nonlinear Feature of Fibre Optic Gyroscope Feedback Loop[J]. Navigation and Control, 2012, 11(4): 52-56.
- [4] 潘雄,张春熹,金靖,杨德伟,宋凝芳. 光纤陀螺“死区”测试分析与建模[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 61-65.
PAN Xiong, ZHANG Chun-xi, JIN Jing, YANG De-wei, SONG Ning-fang. Data Analysis and Modeling of Dead Zone in Close-loop Fiber Optic Gyros[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 61-65.
- [5] SONG Ning-fang, LI Li-jing, JIN Jing, et al. Study on dead band of fiber optic gyro[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(1): 22-24.
- [6] Wei Wang, Junlong Wang. Study of modulation phase drift in an interferometric fiber optic gyroscope[J]. Optical Engineering 49(11), 114401, 2010.
- [7] 王巍,付铁刚. 数字闭环光纤陀螺死区机理分析[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 105-107.
WANG Wei, FU Tie-gang. Analysis on dead-band mechanism of digital closed-loop FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 105-107.
- [8] YU Hai-cheng, WANG Wei, HUANG Lei. Improved performance of scale factory linearity in closed-loop IFOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(4): 449-451.
- [9] 伍泓屹,陈波,俞舟平. 基于温度传感器的DAC非线性补偿系统设计[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(9): 82-84.

- WU Hong-yi, CHEN Bo, YU Zhou-ping. Design of DAC nonlinear compensation system based on temperature sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30 (9): 82-84.
- [10] 童光球, 赵新民, 朱杰, 张秀增. 一种非均匀数字信号合成器和它的频谱分析[J]. 现代测量与实验室管理, 1993(6): 35-38.
- TONG Guang-qiu, ZHAO Xin-min, ZHU Jie, ZHANG Xiu-zeng. A Nonuniform Digit-Signal Synthesizer [J]. Advanced Measurement and Laboratory Management, 1993 (6): 35-38.
- [11] 童光球, 何强, 张秀增, 邹本霞, 李晓莉. ADC、DAC 静态特性测量标准[J]. 现代计量测试, 1998(2): 11-14.
- TONG Guang-qiu, HE Qiang, ZHANG Xiu-zeng, ZOU Ben-xia, LI Xiao-li. A Testing Standard for the Static Properties of ADC and DAC [J]. Modern Measurement and Test, 1998(2): 11-14.
- [12] 韩冰, 林玉荣, 邓正隆. 光纤陀螺温度漂移误差的建模与补偿综述[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2): 218-224.
- HAN Bing, LIN Yu-rong, DENG Zheng-long. Overview on modeling and compensation of FOG temperature drift [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17 (2): 218-224.
- [13] 于洪浮, 卫炎. 闭环光纤陀螺的温度补偿[J]. 上海航天, 2004(1): 62-64.
- YU Hong-fu, WEI Yan. Temperature Compensation of Closed-Loop I-FOG [J]. AEROSPACE SHANGHAI, 2004(1): 62-64.
- [14] 马明朗. A/D 转换器 INL、DNL 的一种快速测试方法[J]. 中国集成电路, 2003(9): 30-32.
- MA Ming-lang. A Quick Testing Method of INL and DNL of A/D Converters [J]. China Integrated Circuit, 2003 (9): 30-32.
- [15] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE Std. 1057-1994 (R2001) IEEE standard for digitizing waveform recorders [S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2001.
- [16] ZHANG Hong, CHEN Guican, CHENG Jun, et al. A low-power, high-speed open-loop residue amplifier for pipelined ADCs [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 38(4): 850-855.
- [17] 高光天, 徐振英. 数模转换器应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- GAO Guang-tian, XU Zhen-ying. Analog to Digital Converter Application Technology [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [18] 周益, 李勇, 张峰. 基于 AR 模型光纤陀螺温度建模方法研究[J]. 空间控制技术与应用, 2011, 37(5): 55-58.
- ZHOU Yi, LI Yong, ZHANG Feng. Modeling Method of Fiber Optic Gyro Based on AR Mode [J]. Aerospace Control and Application, 2011, 37(5): 55-58.

作者简介: 陈静, 女, 本科, 从事导航制导与控制方向研究。

(上接第 42 页)

- [2] Lin Zhao, Fengming Liu, Haijing Yuan. The design and analyse for accelerometer-based gravity gradiometer [C]. Mechatronics and Automation, ICMA 2009, International Conference, Page: 2409-2414.
- [3] John B, James B. Accelerometer and rate sensor package for gravity gradiometer instrument. WO/2006/073-946A1 [P]. 2006-07-13.
- [4] Jilian Li, Kaidong Zhang, Qi Zhang. A Performance Analysis and Precise Temperature Control of Accelerometer for Airborne Gravimetry [C]. Electronic Measurement & Instruments, ICEMI 2009, 9th International Conference, Page: 1-35-1-38.
- [5] Tian W, Wu S C, Zhou Z B. High resolution space quartz-flexure accelerometer base on capacitive sensing and electrostatic control technology [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(9): 095002-095006.
- [6] P Zwahlen, Y Dong, A-M Nguyen, F Rudolf. Breakthrough in high performance inertial navigation grade Sigma-Delta MEMS accelerometer [C]. Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE Conference, Page: 15-19.
- [7] Lin Li, Chunxi Zhang, Xi Zhang. Investigation on noise of Digital Close-Loop Q-Flex Accelerometer [C]. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference, Page: 614-619.
- [8] 刘润, 蔡体菁, 丁昊. 高精度石英挠性加速度计闭环系统的设计与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 311-315.
- LIU Run, CAI Ti-jing, DING Hao. Design and analysis of closed loop system of high resolution flexure pendulum accelerometer [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(2): 311-315.
- [9] 林其壬, 赵佑民. 磁路设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- LIN Qi-ren, ZHAO You-min. The principle of magnetic circuit [M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
- [10] 赵修科. 实用电源技术手册—磁性元器件分册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- ZHAO Xiu-ke. Applied electrical source technical manual (Magnetic element fascicule) [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2002.

作者简介: 刘润, 男, 硕士, 讲师, 研究方向为精密仪器及机械。