

文章编号 1004-924X(2014)01-0092-07

数字闭环加速度计的带宽测试

张 晞¹, 李德燕^{1*}, 王洪波², 李立京¹

(1. 北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京, 100191;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海, 200233)

摘要:为了测试数字闭环加速度计系统的带宽,对国军标 1037A—2004 中的电模拟法进行了改进。首先,讨论了用国军标 1037A—2004 中的电模拟法测试数字闭环加速度计带宽存在的不足,然后,对加入激励信号的数字闭环加速度计系统的检测电路及闭环控制模型进行分析。分析显示,在系统的反馈回路加入激励信号最终可以在输入端等效为外界输入加速度,且该系统的动态模型与传统机械激励测试法系统的动态模型一致。最后,提出一种在数字闭环加速度计的反馈回路外加激励信号来测试该系统带宽的方法。实验表明:数字闭环加速度计系统的实测 -3 dB 带宽值为 320 Hz 左右,与理论值(345 Hz)基本吻合。该方法具有精度高、误差源少、便于在线测试等特点,可满足大多数数字闭环加速度计的带宽测试要求。

关键词:数字闭环加速度计;带宽测试;反馈回路;加速度

中图分类号:TH824.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0092

Bandwidth measurement of digital closed-loop accelerometer

ZHANG Xi¹, LI De-yan^{1*}, WANG Hong-bo², LI Li-jing¹

(1. *Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China;*

2. *Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 200233, China)*

** Corresponding author, E-mail: lidexian1123@126.com*

Abstract: To measure the bandwidth of a digital closed-loop accelerometer, the electricity simulation method in GJB1037A—2004 was investigated. First, some drawbacks of measuring the bandwidth of the digital closed-loop accelerometer by using the electricity simulation method in GJB1037A—2004 were discussed. Then, the detection circuit and the closed-loop control system of the digital closed-loop accelerometer with an excitation signal were analyzed. The analysis shows that the effect of excitation signal added into a feedback circuit is equivalent to an input analog acceleration in the input end and the dynamic model of the digital closed-loop accelerometer is consistent with the dynamic model of the traditional mechanical system. Finally, a method which adds the excitation signal at the feedback circuit of the digital closed-loop accelerometer to measure the bandwidth of the accelerometer was proposed. Experimental results indicate that the -3 dB bandwidth data of the digital closed-loop accelerometer is about 320 Hz, which is close to theoretic data (345 Hz). The proposed method has the fea-

收稿日期:2013-08-09;修订日期:2013-09-30.

基金项目:“教育部新世纪优秀人才”基金资助项目

tures of higher accurate, less error sources and convenient to test in online ,and can satisfy the bandwidth testing requirement of most digital closed-loop accelerometers.

Key words: digital closed-loop accelerometer; bandwidth testing; feedback loop; acceleration

1 引 言

石英挠性加速度计具有结构简单、灵敏度高、长期稳定性好、功耗低及易于小型化等优点,被广泛应用于航空航天、武器装备等领域,是惯性导航系统中使用的高精度主流加速度计之一。石英挠性加速度计的带宽表征了其正常工作的频带范围,是衡量加速度计动态性能好坏的重要指标^[1-3]。传统的加速度计带宽测试方法是在超低频标准振动台上进行加速度计的动态频率响应试验,进而得出加速度计的频率特性。然而,由于振动台受机械部分及功率放大器等的限制,加速度计在超低频标准振动台上的超低频段和高频段的动态误差较大,导致测试精度很难进一步提高^[4]。

国军标 1037A-2004 中电模拟法假定传感器的摆性和力矩器的力矩系数为常数、电激励作用对加速度计动态特性的附加影响在允许的误差范围内、加速度计的伺服电路为恒流型的条件下,可代替传统振动台测试方法进行加速度计带宽测试并具有以下优势:(一)可避免超低频和低频时的非线性;(二)可降低机械振动引起的噪声影响。此外,与传统振动台测试方法相比,电模拟法的精度更高、频带范围更宽。然而实际测试时,作用于力矩器前端的外加激励信号的串联支路内阻及输出级等效内阻会对流过加速度计力矩线圈的电流分流。此外,该方法输出的模拟信号需经模数转换才能与导航计算机建立联系,增加了系统的复杂性,降低了测试精度。因此,该方法并不适合于数字闭环加速度计的带宽测试。

本文在国军标 1037A-2004 中电模拟法的基础上,结合数字闭环加速度计数字化输出的特点,设计了一种适合于数字闭环加速度计系统的带宽测试方法。该方法通过在数字闭环加速度计的反馈回路 $V-I$ 转换之前外加激励信号来模拟外界输入加速度,消除了激励信号的串联支路内阻及输出级等效内阻对加速度计反馈电流的影响,并使系统的带宽以数字量的形式在上位机显示。

2 数字闭环加速度计系统

数字闭环加速度计系统主要由石英挠性加速度计机械表头和数字闭环检测电路两部分组成,其结构如图 1 所示。

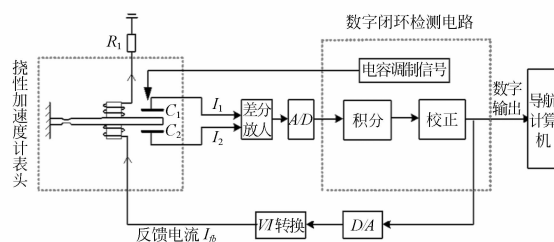


图 1 数字闭环加速度计系统结构框图

Fig. 1 Structure frame of digital closed-loop accelerometer system

当外界有输入加速度 a 沿加速度计的输入轴作用在石英挠性摆上时,摆片发生偏转,使石英摆片上下两面镀金层和磁轭表面构成的差动电容传感器产生差动电容的变化,在调制信号的作用下,将电容的变化转换为电流的变化 ΔI 输出。数字闭环检测电路首先把模拟信号 ΔI 数字化,然后通过 FPGA 进一步处理,最后将反映加速度的处理结果一方面直接传输给导航计算机进行导航解算,另一方面通过 D/A 转换电路还原为模拟量,反馈到加速度计表头的力矩器线圈上。力矩器在反馈电流的作用下产生反馈力矩,使偏转的摆片回到平衡位置,从而平衡外界输入加速度^[5]。

3 国军标中的电模拟测试法

国军标 1037A-2004 中电模拟法测试原理如图 2 所示。在假定加速度计摆性为常数、激励信号串联支路内阻远大于力矩线圈阻抗、伺服电路输出级内阻无限大及力矩线圈为纯电阻等的条件下,从闭环(校正)系统的 $V-I$ 转换环节后加入正弦激励信号。保持信号的幅值不变,将频率由低频到高频逐步提高,在输出端 V 。测量信号的幅值

得到系统频率特性曲线,进而计算系统带宽^[11]。在上述假定条件中,加速度计的摆性为常数和力矩线圈为纯电阻通常可以满足,但激励信号串联支路内阻远大于力矩线圈阻抗、伺服电路输出级内阻无限大这些条件能否满足通常需根据具体的加速度计结构而定。此外,该方法输出的模拟信号需经模数转换才能与导航计算机建立联系,这不仅会增加系统的复杂性,同时降低了测试精度。因此,国军标中的电模拟测试方法并不适合于数字闭环加速度计的带宽测试。

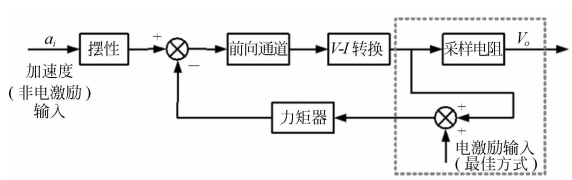


图 2 国军标 1037A-2004 中的电模拟测试方法原理图
Fig. 2 Schematic diagram of the electricity simulation test in GJB1037A-2004

4 数字闭环电路带宽测试方法

数字闭环加速度计系统通过闭环方式完成对加速度的检测和对系统的控制,参考航天三院三十三所顾英的石英挠性加速度计模型,该数字闭环加速度计系统等效模型如图 3 所示^[6-9]。

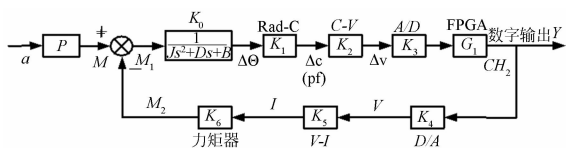


图 3 数字闭环加速度计系统模型
Fig. 3 Model of digital closed-loop accelerometer system

当外界有一输入加速度 a 时,数字闭环加速度计系统的输入加速度 a 与数字输出 Y 之间的对应关系为:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{a(s)} = \frac{PG_1K_3K_2K_1K_0}{1 + G_1K_6K_5K_4K_3K_2K_1K_0}, \quad (1)$$

同时有:

$$M(s) = Pa(s) = mL a(s), \quad (2)$$

也即:

$$\frac{M(s)}{a(s)} = P = mL, \quad (3)$$

其中: M 为加速度计系统的惯性力矩, P 为系统表头摆性, m 为系统摆组件的质量, L 为摆组件的质心到挠性梁根部的距离。

通常情况下,在前向通道放大倍数足够高的情况下,加速度计的动、静态特性只取决于反馈环节^[13]。数字闭环加速度计系统前向通道放大倍数远大于反馈回路,故数字闭环加速度计带宽测试方法是通过在系统反馈回路 $V-I$ 转换环节之前外加激励信号来模拟外界输入加速度,消除激励信号的串联支路内阻及输出级等效内阻对加速度计反馈电流的影响。

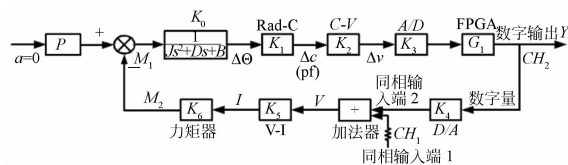


图 4 加速度计外加激励模型框图
Fig. 4 Excitation model of accelerometer

设初始时刻数字闭环加速度计系统处于静止或平衡状态,信号发生器产生一定频率的正弦激励信号通过加法器加入加速度计系统反馈通道,如图 4 所示。此正弦激励信号经后续 $V-I$ 转换电路变为相应的电流量加到力矩线圈上,产生一反馈力矩 M_2 ;表头中石英摆片受到反馈力矩作用发生偏转从而造成差动电容的变化,最后经数字信号处理部分转换和处理,在加速度计的输出端可得到一对应的按正弦变化的输出量。

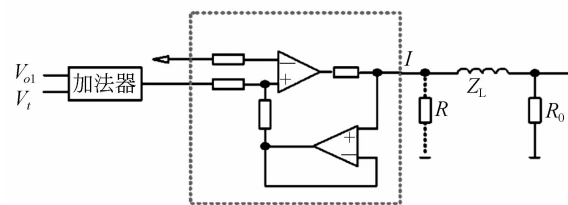


图 5 数字闭环加速度计实际测试电路分析图
Fig. 5 Actual measurement circuit of digital closed-loop accelerometer

在检测电路中外加激励信号位于 $V-I$ 转换环节之前,可得如图 5 所示的等效电路图,外加激励信号与力矩电流经运算放大器这一级相互隔离,因此激励信号串联支路对传感器反馈电流不会产生分流现象。

但是,外加激励信号频率的增加会导致力矩

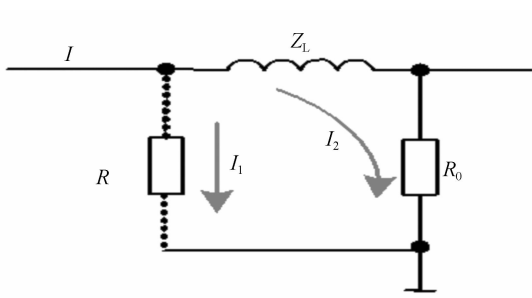


图 6 数字闭环加速度计检测电路力矩线圈分流等效图
Fig. 6 Equivalent moment coil divergence of digital closed-loop accelerometer circuit

线圈的感抗增加, 因此激励电流存在被 $V-I$ 转换电路输出级内阻 R 分流的可能^[14]。然而如图 6 所示, 数字闭环加速度计检测回路 $V-I$ 转换级输出内阻 R 远大于力矩线圈的阻抗, 因此加速度计正常工作状态下这一影响可被忽略不计。将图 4 等效为图 7:

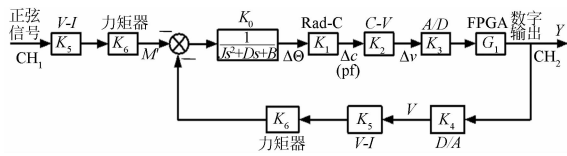


图 7 加速度计外加激励等效框图
Fig. 7 Equivalent excitation model of accelerometer

此时将模拟产生的正弦激励信号记为 a' , 有:

$$\frac{M'(s)}{a'(s)} = K_5 K_6. \quad (4)$$

记 $P' = K_5 K_6$, 比较图 3 和图 7, 二者之间只有摆性不同, 且 P 和 P' 均为比例环节。所以, 在数字闭环加速度计系统反馈回路加入正弦激励信号等效到输入端的作用与输入端有加速度时的作用机理类似, 可认为此正弦激励信号在表头的作用相当于一个模拟输入加速度。该加速度通过一个比例的摆性环节, 产生一个相应的力矩, 从而使系统脱离平衡位置, 最终数字闭环加速度计系统输出端产生与之对应成比例的数字量输出并进行反馈。

记外加激励信号时数字闭环加速度计的输入与输出关系为 $H_d(s)$, 由图 8 得:

$$H_d(s) = \frac{CH_2}{CH_1} = \frac{-G_1 K_6 K_5 K_3 K_2 K_1 K_0}{1 + G_1 K_6 K_5 K_4 K_3 K_2 K_1 K_0}, \quad (5)$$

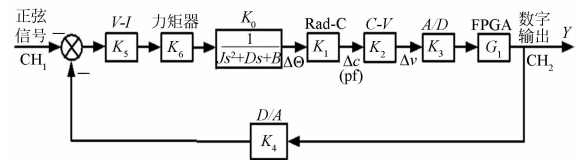


图 8 加速度计外加激励进一步等效框图
Fig. 8 Further equivalent excitation model of the accelerometer

由于 $P' = K_5 K_6$, 与式(1)相比得:

$$H(s) = H_d(s) \times K', \quad (6)$$

其中: $K' = -P/P'$, 为比例系数项。

由式(6)得, 外加激励信号的数字闭环加速度计系统输入输出关系 $H_d(s)$ 和理论所得的数字闭环加速度计系统输入输出关系 $H(s)$ 具有一致性^[10,12], 即二者动态模型只相差一个比例系数 K' 。因此, 该数字闭环加速度计带宽测试方法动态模型与机械激励测试法的动态模型等效。

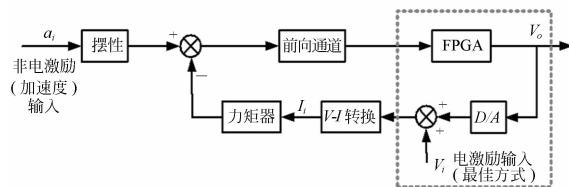


图 9 数字闭环石英挠性加速度计带宽测试方法原理图
Fig. 9 Bandwidth test principle of digital closed-loop Quartz Flex accelerometer

该数字闭环加速度计的带宽测试方法原理如图 9 所示。

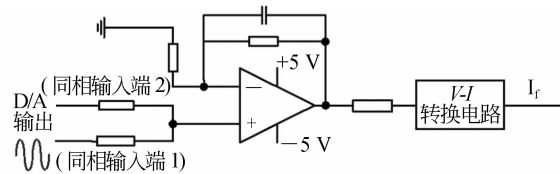


图 10 加法器电路
Fig. 10 Adder circuit

其中外加激励信号作用方式如图 10 所示。设加法器放大倍数为 1, 正弦激励信号与测试通道 CH_1 加在加法器的同相输入端 1 处, 反馈通道 D/A 输出模拟量送到加法器的同相输入端 2, 数字闭环加速度计系统的输出直接由导航计算机采集得到。

同其他模拟加速度计力矩线圈一样, 数字闭

环加速度计力矩线圈也存在电感分量受激励信号频率影响。在加速度计正常工作状态(低频范围)下,电感较小,激励信号与输入加速度计呈线性关系,力矩线圈电感量的影响同样可忽略不计。

5 基于试验样机的带宽测试实验

带宽测试如图 11 所示,将加速度计通过安装夹具固定在加速度计测试平台上。调节数字闭环加速度计表头所在的光学分度头,使数字闭环加速度计系统处于门态零位,此时系统处于静止或平衡状态,作用于挠性摆上的只有力矩器产生的电磁力矩而没有惯性力产生的惯性力矩,挠性摆摆动的频率即为外加正弦激励信号的频率^[13]。保持电路中的其他参数不变,将从 1 Hz 开始,以 10 Hz 为增量的不同频率的正弦激励信号从数字闭环加速度计系统反馈通道的同相输入端 1 加入到系统中。由图 5 可知,此时整个数字闭环加速度计系统处于闭合状态,挠性摆片始终工作于零位附近,导航计算机借助于采集系统不断采集、记录对应的数字量并绘制出其频率特性曲线,结果如图 12 所示。

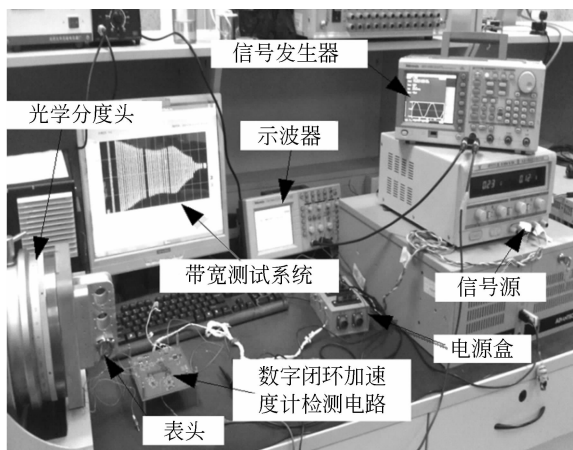


图 11 数字闭环加速度计带宽测试图

Fig. 11 Bandwidth test system of digital closed-loop accelerometer

由于数据采集系统所采用的坐标系标度含有偏置,将所采集到的数据使用 Matlab 进行处理。从图 13 中可以看出,数字闭环加速度计系统频率选在 326 Hz 时,输出信号的幅值衰减为起始值的

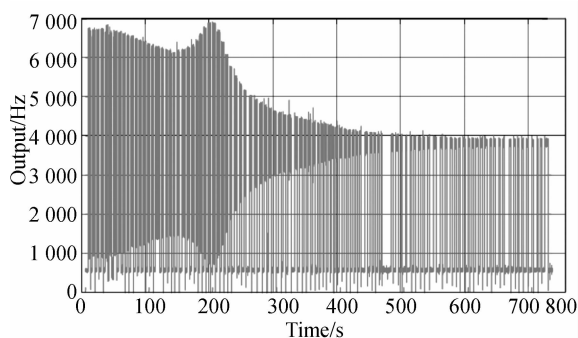


图 12 采集系统输出

Fig. 12 Output of the collection system

0.707 倍,此时系统的输出准确地跟踪输入进行变化。但是,当系统外加激励信号的频率超过 326 Hz 时,系统输出信号的幅值急剧下降,系统的输出不再准确地跟踪输入进行变化,由此得出数字闭环加速度计系统的闭环带宽约为 326 Hz 左右。

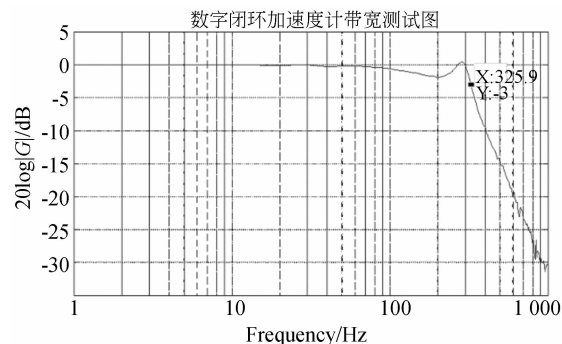


图 13 数字闭环加速度计带宽测试结果

Fig. 13 Bandwidth of digital closed-loop accelerometer

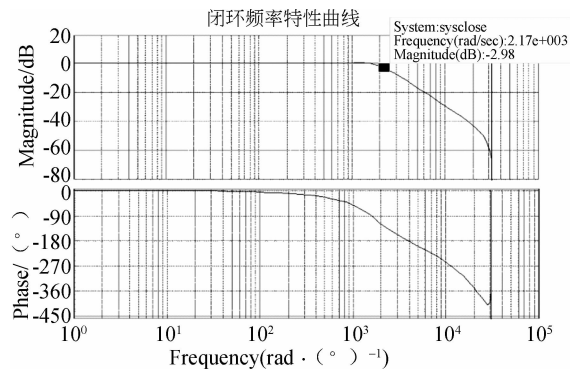


图 14 数字闭环加速度计理论带宽曲线

Fig. 14 Bandwidth theoretical data of digital closed-loop accelerometer

此外,根据数字闭环加速度计系统的闭环传递函数,使用 Matlab 对数字闭环加速度计系统的闭环频率特性进行编程仿真,得到的系统闭环幅频特性响应曲线(即机械激励测试的理想曲线)如图 14 所示。此时,数字闭环加速度计系统的理论带宽 $B=2170/2\pi=345$ Hz。

实验所得结果与系统理论仿真曲线(机械激励测试理想曲线)比较可得:在数字闭环加速度计系统的反馈回路外加激励信号测得的系统闭环带宽与直接外加输入加速度(机械激励测试理想情况下)所得系统的闭环带宽值基本吻合。该测试方法不但继承了国军标 1037A-2004 中电模拟测试法精度高,快速简单的特点,而且减少了误差源,可满足大多数数字闭环加速度计的带宽测试要求。

参考文献:

- [1] 何铁春,周世勤. 惯性导航加速度计[M]. 北京:国防工业出版社,1983:35-326.
HE T CH, ZHOU SH Q. *Inertial Navigation Accelerometer* [M]. Beijing: National Defense Industry Publish,1983:35-41,195-197,279-326.
- [2] 周海涛. 数字闭环加速度计检测电路研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2010.
ZHOU H T. *Research in the Detection Circuit of the Digital Closed-loop Accelerometer* [D]. Beijing: Beihang University, 2010.
- [3] LU Y J. *Inertia Apparatus (II)* [M]. Beijing: China Space Navigation Publish, 2009: 28.
- [4] 王平,赵新民,段尚枢,等. 加速度传感器电激励等价性测试方法的研究[J]. 计量学报,1994,15(3):188-192.
WANG P, ZHAO X M, DUAN SH SH, *et al.*. Study on electricity simulation equivalence test of accelerometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1994, 15(3): 188-192.
- [5] 张春熹,魏渊,张晞,等. 数字闭环加速度计系统模型分析与校正设计[J]. 仪器仪表学报,2012,33(12):2833-2839.
ZHANG CH X, WEI Y, ZHANG X, *et al.*. Model analysis and emendation design of the digital close-loop accelerometer system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(12): 2833-2839. (in Chinese)

6 结 论

本文对加入激励信号的数字闭环加速度计系统的检测电路及闭环控制模型进行了分析,并提出了一种数字闭环加速度计的反馈回路外加激励信号来测试数字闭环加速度计系统带宽的方法。该方法具有精度高、快速简单、误差源少、便于在线测试等优点,可满足大多数数字闭环加速度计的带宽测试要求。实验结果表明,该数字闭环加速度计系统的闭环带宽约为 326 Hz,与理论值 345 Hz 基本吻合。若考虑在高频情况下使用本文所设计的方法,需将数字闭环加速度计力矩线圈电感参量的影响考虑在内。

- [6] 姜劲栋,袁安萍,施芹,等. 硅微陀螺仪正交耦合系数的计算及验证[J]. 光学精密工程,2013,21(1):87-93.
JIANG S D, QIU A P, SHI Q, *et al.*. Calculation and verification of quadrature coupling coefficients of silicon micro-gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 87-93. (in Chinese)
- [7] 陈茂胜,金光,张涛,等. 积分反馈自抗扰控制力矩陀螺框架伺服系统设计[J]. 光学精密工程,2012,20(11):2424-2432.
CHEN M SH, JIN G, ZHANG T, *et al.*. Design of gimbal servo system of CMG using active disturbance rejection control with integral feedback [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2424-2432. (in Chinese)
- [8] 王耿,官春林,张小军,等. 应变式微型精密压电驱动器的一体化设计及其 PID 控制[J]. 光学精密工程,2013,21(3):709-716.
WANG G, GUAN CH L, ZHANG X J, *et al.*. Design and control of miniature piezoelectric actuator based on strain gauge sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 709-716. (in Chinese)
- [9] 陈茂胜,金光,安源,等. 采用自适应 PI 控制的单框架控制力矩陀螺角动量飞轮系统的设计[J]. 光学精密工程,2011,19(5):1075-1081.
CHEN M SH, JIN G, AN Y, *et al.*. Design of angular momentum wheel in SGCMG using adaptive compensation PI control strategy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1075-1081. (in Chinese)
- [10] 闵跃军,薛旭. 基于频域的挠性摆式加速度计表头

- 参数辨识方法[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(1): 94-99.
- MIN Y J, XUE X. Parameter identification method based on frequency domain of flexure hinged pendulum accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(1): 94-99. (in Chinese)
- [11] GJB 1037A-2004 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 2004.
- GJB 1037A-2004 *Test methods for single-axis pendulous servo linear accelerometers* [S]. Beijing: COSTIND, 2004.
- [12] 薛旭, 闵跃军, 郭晓芳, 等. 挠性摆式加速度计频率特性的电激励测试方法及参数辨识[J]. 导弹与航天运载技术, 2008, 4(1): 39-45.
- XUE X, MIN Y J, GUO X F, *et al.*. Method of electric stimulation test for frequency characteristic of flexible pendulum accelerometer [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2008, 4(1): 39-45. (in Chinese)
- [13] 顾欣怡, 张晞, 魏渊. 数字闭环加速度计控制器设计与仿真[J]. 箭弹与制导学报, 2012, 6(4): 170-173.
- GU X Y, ZHANG X, WEI Y. Design and simulation of digital closed-loop accelerometer controller [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2011, 6(4): 170-173. (in Chinese)
- [14] LI L, ZHANG CH X, ZHANG X, *et al.*. Investigation on noise of digital close-loop q-flex accelerometer [J]. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011: 614-619.

作者简介:



张 晞(1972—),女,吉林长春人,高级工程师,硕士生导师,2001年于北京航空航天大学获得博士学位。主要从事光纤陀螺和惯性器件的测试。E-mail: zhangxi@buaa.edu.cn

通讯作者:



李德燕(1988—),女,山东青岛人,硕士研究生,2011年于山东科技大学获得学士学位,主要从事探测与制导、惯性器件测量。E-mail: lideyan1123@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)