

高旋弹药飞行姿态测量用 半捷联 MEMS 惯性测量装置研究

李杰^{1,2}, 赵诣¹, 刘俊^{1,2}, 陈伟³

(1. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 山西北方惠丰机电有限公司 科研设计二所, 山西 长治 046012)

摘要: 针对高速旋转弹药姿态测量中, 传统的 MEMS 捷联惯性测量系统由于角速率传感器在量程和精度上不能同时满足测试要求而存在姿态测量精度低的问题, 提出了半捷联 MEMS 惯性测量的概念、原理和半捷联 MEMS 惯性测量的实现方法; 同时针对半捷联 MEMS 惯性测量系统的组成结构, 对半捷联 MEMS 惯性测量装置进行了介绍。通过对动力输出仓、控制-驱动电路安装仓、惯性信息敏感仓和惯性信息采集仓的结构和功能说明, 阐述了半捷联 MEMS 惯性测量的实现方法。该装置可在弹药高速旋转情况下为微惯性测量单元提供稳定测试环境, 有效抑制高旋弹药对惯性系统姿态测量精度的影响, 为高旋弹药姿态测量和常规弹药制导化提供了新的思路, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 兵器科学与技术; 高旋弹药; 半捷联; 主动控制; 惯性测量

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2013)11-1398-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.11.009

Research on Semi-strapdown MEMS Inertial Measurement Device for Flight Attitude Measurement of High-speed Rotating Ammunition

LI Jie^{1,2}, ZHAO Yi¹, LIU Jun^{1,2}, CHEN Wei³

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

3. No. 2 Academic Institution, Shanxi North Huifeng Mechanical & Electronic Co. Ltd, Changzhi 046012, Shanxi, China)

Abstract: For attitude measurement of high-speed rotating ammunition, the traditional MEMS strapdown inertial measurement system has low measurement accuracy. Angular rate sensor cannot meet the test requirements in both range and accuracy. This paper proposes the concept and principle of semi-strapdown inertial measurement and the realization method of MEMS semi-strapdown inertial measurement, at the same time a semi-strapdown MEMS inertial measurement device is introduced on the foundation of composition structure of semi-strapdown. Through structural and functional description of power output bin, control-drive circuit installation bin, inertial information sensitivity bin and inertial information collection bin, this paper comprehensively expounds the realization method of semi-strapdown MEMS inertial measurement. The device can provide stable test environment for MIMU and effectively inhibit influence in at-

收稿日期: 2013-03-26

作者简介: 李杰(1976—), 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: lijie@nuc.edu.cn;

赵诣(1987—), 男, 硕士研究生。E-mail: zhaoyi161033@163.com

itude measurement accuracy when measured vector is in high-speed rotating environment. The system provides a new idea for high-speed rotating ammunition attitude measurement and conventional ammunition guidance. It is valuable for engineering implementation.

Key words: ordnance science and technology; high-speed rotating ammunition; semi-strapdown; active control; inertial measurement

0 引言

高速旋转弹药飞行姿态等关键弹道参数的测试,是旋转弹药制导化研制、定型与鉴定阶段的重点试验项目。它不仅可以为评定旋转弹药的准确度、机动性和抗干扰能力等主要性能指标提供决策依据,而且也是进行故障分析与诊断的可靠资料,更为重要的是,所测得的姿态参数还能被用于旋转弹药的弹道修正与控制系统中,从而极大地提高弹药的打击精度,对增强弹药的打击效果和常规弹药制导化具有重要的实际意义^[1-2]。

捷联式惯导系统以其自身的优势正逐步取代平台式惯导系统,成为主要的惯性导航系统。然而由于制造工艺等原因的限制,高精度的惯性器件研制难度很大,同时会使捷联惯导系统的成本提高^[3]。基于 MEMS 的惯性测量系统由于具有自主性强、可靠性高、体积小、质量轻、成本低、功耗小、启动时间短、抗高过载以及易于安装和维护等一系列的优势,尤其是在空间狭窄、环境恶劣、飞行时间较短的旋转弹药制导化应用中,被国内外普遍认为是不可或缺的重要导航制导组件。但能够测量高转速的大量程 MEMS 陀螺仪自身精度相对较低,而且存在严重影响姿态解算精度的极大角速率和极小角速率并存现象,在这种情况下捷联式 MEMS 惯性测量方法已不能达到较高的测试精度,遇到了极大的挑战^[4]。

根据平台式和捷联式惯性测量系统的特点,本文提出了半捷联惯性测量系统的概念。半捷联惯性测量系统与被测载体只在部分轴向捷联安装,而在空间 3 个正交轴向的其余轴上不捷联(即弹体轴向上不捷联),通过特殊的装置使惯性测量系统在弹轴方向实际所敏感到的角速率远小于弹药轴向的高转速,从而有效抑制弹药轴向高转速对惯性测量系统姿态测量精度的影响。

本文针对半捷联惯性测量系统的特点,在介绍整个系统工作原理的基础上,介绍了半捷联惯性测量装置,并对装置的每个部分进行了说明,给出了模拟高旋环境下得到的减旋后数据。

1 系统工作原理

半捷联惯性测量系统的工作原理如图 1 所示。

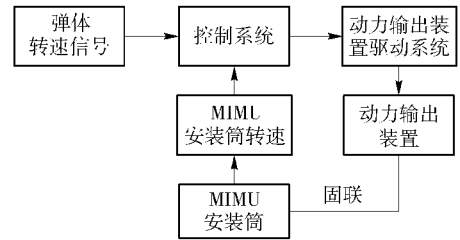


图 1 半捷联惯性测量系统工作原理图

Fig. 1 Functional diagram of semi-strapdown inertial measurement system

其中,半捷联惯性测量系统采用无刷直流伺服电机作为动力输出装置,根据目前系统采用的方案,采用大量程 MEMS 陀螺仪作为转速测量的传感器,16 位高速同步模数转换芯片 ADS8365 对陀螺仪输出电压进行采集并转换,高速数字信号处理器 TMS320F2812 作为控制器对转换后的数据进行处理,以此得到弹体的转速,该转速信息用于提供电机反向旋转的控制信号。之后由控制系统将采集得到的转速信号实时转化为电机的控制信号,控制电机轴以与弹体大小相等方向相反的转速进行旋转。由于电机本体与弹体捷联,此时用于敏感载体姿态信息的微惯性测量单元(MIMU)处于相对平稳的“减旋”环境中,这样就可以将低量程高精度的 MEMS 陀螺仪应用于惯性测量,提高惯性测量的精度。

2 系统的组成结构

半捷联惯性测量装置结构如图 2 所示。整个结构主要分为 4 个部分:动力输出仓、控制-驱动电路安装仓、惯性信息敏感仓和惯性信息采集仓。4 个仓中还包括一些系统中所特有的组部件,这些组部件的共同作用保证系统内部的同轴性和结构使用的可靠性与稳定性。其分解示意图如图 3 所示。

2.1 动力输出仓

该部分结构由电机保护后盖、电机保护壳体、无刷直流伺服电机和电机安装法兰构成。电机前端由

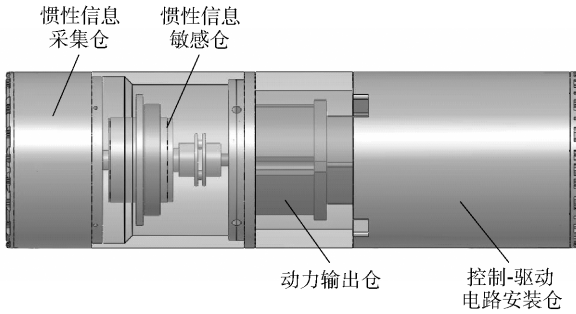


图 2 半捷联惯性测量装置组成结构图

Fig. 2 Structure diagram of semi-strapdown inertial measurement device

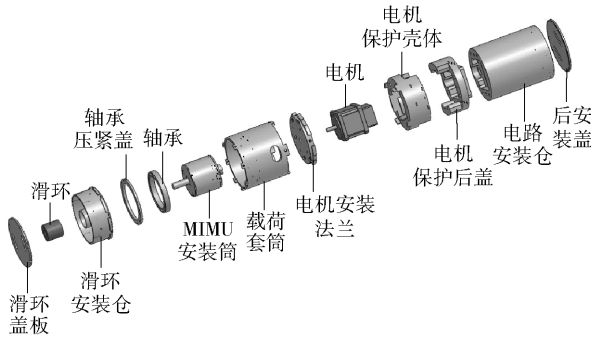


图 3 半捷联惯性测量装置分解示意图

Fig. 3 Decomposition schematic diagram of semi-strapdown inertial measurement device

螺丝安装于电机安装法兰,电机保护后盖和电机保护壳体组装在一起,共同起到保护电机本体和电机后端磁编码器的作用。电机保护壳体与电机安装法兰用螺丝紧固,构成的封闭空间通过灌封实现对电机和用于位置反馈的磁编码器的防护。动力输出仓提供 MIMU 安装筒与弹体反向旋转的动力,该动力输出系统由具有高响应速度、精确定位的伺服电机与高精度的编码器组合而成,具有以下特性:快速响应特性,90°位置调整仅需 8 ms;精确定位特性,位置控制精度小于 0.088°;较高精度的速度和转矩控制特性,速度控制精度小于 0.1%,转矩控制精度小于 5%。该系统中的无刷直流伺服电机安装有 14 线非接触式、高可靠性、360°绝对对磁编码器,可有效准确反馈电机的位置,即磁编码器每一位对应的角度为 $360^\circ/2^{14}$ 。在进行转速控制时,每输入 $2^{14} = 16\,384$ 个 PWM 波脉冲到电机的驱动电路,电机旋转一周,即 16.384 kHz 等同于 $360^\circ/\text{s}$,这样就可以通过改变输入到驱动器的脉冲频率来改变电机的转速。现有的很多控制器都自带 PWM 波产生模块,可以方便准确地产生所要求方波的频率和占空比。

2.2 控制-驱动电路安装仓

该部分结构主要由控制-驱动电路安装仓和后安装盖组成。其中主要放置了整套系统的控制电路、电机驱动电路、升压电路、电池等。控制电路实时采集测量外部弹体转速的大量程陀螺仪模拟电压输出,采集得到的数据进入控制器后,通过相关的算法转换成为不同频率的 PWM 波,将此不同频率的 PWM 波输入到电机驱动器中控制电机以不同速率进行旋转。为提高整套系统的执行速度,控制器选用 TI 公司的高速 DSP TMS320F2812。鉴于安装仓空间限制和电机驱动器输入电压的要求,升压电路将电池的 14 V 电压抬升至 24 V 来满足电源要求。由于大量程陀螺分辨率和控制芯片定点计算的限制,电机输出的转速不能完全等于弹体的转速,在这种情况下 MIMU 安装筒仍然以很小的角速率转动,此时需要安装在 MIMU 安装筒内的小量程陀螺的输出数据进行复合测量并进行转速误差补偿,通过对小量程陀螺数据与大量程陀螺数据的共同处理,最终达到使 MIMU 安装筒处于静止的状态。其工作的流程图如图 4 所示。

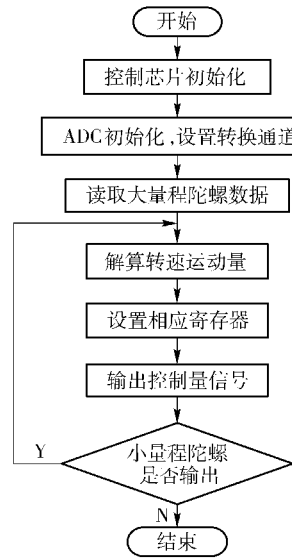


图 4 大量程陀螺-小量程陀螺复合测量流程图

Fig. 4 Flow chart of speed composite measure by large and small scale gyro

由采集电路采集得到的电压值转化到输出频率的公式,即控制器应该输出的 PWM 波的频率如(1)式所示:

$$f = (2^{14} \times U_1 \times data1) / (360 \times K_B), \quad (1)$$

式中: $data1$ 为 ADC 电路采集陀螺输出电压值转化后的数值; U_1 为每一位 $data1$ 代表的电压值; K_B 为

大量程陀螺的标度因数。

(1)式是对应大量程陀螺数据的输出频率。对于用于复合测量和转速误差补偿的小量程陀螺数据,不能直接套用(1)式进行输出,需要根据比例关系转化才可以使用,其转化公式如下:

$$data3 = (K_B \times data2) / K_S, \quad (2)$$

式中: K_S 为小量程陀螺的标度因数; $data2$ 为小量程陀螺的输出数据; $data3$ 为经过转化后的数据,其相当于(1)式中的 $data1$ 。通过(1)式中 $data1$ 对 $data3$ 的加减实现对转速误差的补偿。

2.3 惯性信息敏感仓

半捷联惯性测量装置的惯性信息敏感仓由 MIMU、载荷套筒、MIMU 安装筒、轴承和轴承压紧盖构成。MIMU 安装在 MIMU 安装筒内,MIMU 安装筒一端由弹性联轴器与电机轴固联,另一端与高速滑环转子咬合,实现在旋转环境下数据的传输。MIMU 安装筒的空间除了安放连接传输信号的导线与接插件外,其余的空间用来灌封,灌封后的 MIMU 安装筒可以保证放置在其中的 MIMU 在高过载环境下不被损坏。在实际使用过程中,电机轴工作在高速旋转环境,由于弹性联轴器的弹性膜片在安装筒重力作用下在径向上存在形变,加之 MIMU 安装筒内由于灌封等原因造成质量不均匀,这样会使 MIMU 安装筒在高速旋转时作类似“圆锥”运动,导致安装筒内 MIMU 敏感到错误的信息。为避免这种情况发生,在结构中添加轴承和轴承压紧盖,二者的配合使用可以使 MIMU 安装筒在高速旋转情况下保证与外部结构较好的同轴性,提高系统的测试精度。载荷套筒作为外部的支撑结构,起到支撑轴承和保护 MIMU 安装筒的作用。

惯性测量的核心是 MIMU,由其完成对载体姿态位置信息的敏感。MIMU 主要由敏感表头和专用信号调理电路组成。图 5 为 MIMU 敏感表头的组合示意图,基于 MEMS 的惯性器件以体积小、成本低、抗高过载、环境适应性强等一系列优点,被选作本系统 MIMU 中的传感器。采用 3 个正交的微型 MEMS 加速度计和 3 个正交的微型 MEMS 陀螺仪进行 2 次集成构成一个正交 3 轴组合测量系统,分别测量沿这 3 个方向的加速度及角速率^[5]。MEMS 陀螺仪用来测量角速度信息,可通过坐标转换矩阵,进而得到被测载体的姿态角信息;MEMS 加速度计用来测量加速度信息,通过坐标变换矩阵,得到被测载体的加速度信息,进而通过一次积分、二次积分分别得到载体的速度和位移。加速度计输出信息和陀螺仪输出

信息通过算法的综合运用就可以得到载体的位置和姿态信息。

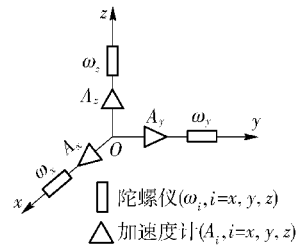


图 5 MIMU 表头示意图

Fig. 5 Schematic diagram of MIMU

图 6 中的 MIMU 是实验室自主研发的微惯性测量单元,其中已经集成了 3 个正交的 MEMS 加速度计、3 个正交的 MEMS 陀螺仪和信号调理电路。通过接插件的连接就可以输出相关传感器敏感到的惯性信息所对应电压值。本系统采用的 MEMS 惯性器件输出的是模拟电压值,通过后续模数转换电路和采集存储电路将传感器的输出记录下来。

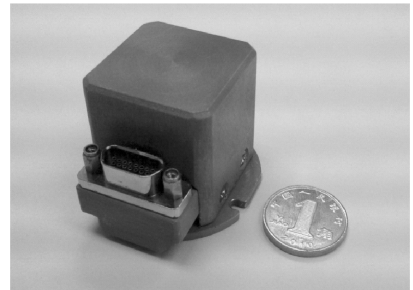


图 6 MIMU 实物图

Fig. 6 Real graph of MIMU

2.4 惯性信息采集仓

半捷联惯性测量装置的惯性信息采集仓由滑环安装仓、采集存储电路、高速导电滑环和滑环盖板组成。

该部分结构主要实现将 MIMU 所敏感到的减旋后惯性信息通过高速导电滑环传输至采集存储电路进行存储,便于事后解算。MIMU 安装筒上安装盖结构上有两个通孔,将导电滑环转子上的导线通过通孔引入 MIMU 安装筒,与 MIMU 的接插件相连接即可在旋转环境下在滑环定子一端得到 MIMU 的输出信息。采集存储电路安装在滑环安装仓内,通过对惯性测量单元输出信息的滤波,调理和采集,最终将 MIMU 敏感到的加速度信息和角速度信息存储在存储器芯片当中。

采集存储硬件电路的高效设计与实现是最终完

成高速旋转弹药飞行姿态精确解算的平台和基础,为使所设计的系统小型化,本系统采用以 FPGA 为核心的硬件架构方案来设计,充分利用 FPGA 在时序控制上和执行速度上的优势。该电路的基本组成模块框图如图 7 所示。

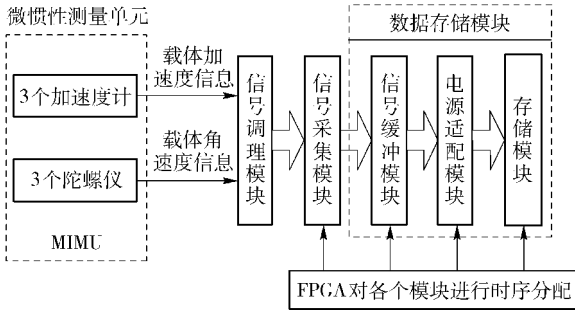


图 7 小型化采集存储电路组成模块框图

Fig. 7 Block diagram of miniaturization acquisition and storage circuit

MIMU 输出的是 6 路模拟电压信号,在处理之前需要对信号进行调理。图 7 中,MIMU 输出信号依次经过信号调理、信号采集、信号缓存和电压适配等模块,被送入数据存储模块,整个系统工作的时序逻辑由 FPGA 进行控制。系统选用的 A/D 转换芯片为 TI 公司的 16 位 6 通道高速同步模数转换芯片 ADS8365,每经过一次转换,FPGA 将 6 路数据通过固定的帧格式存入 FLASH 芯片中。设计过程中,前向通道中的各模块可根据具体情况进行适当调整。图 8 是半捷联姿态测量的小型化采集存储电路实物图。

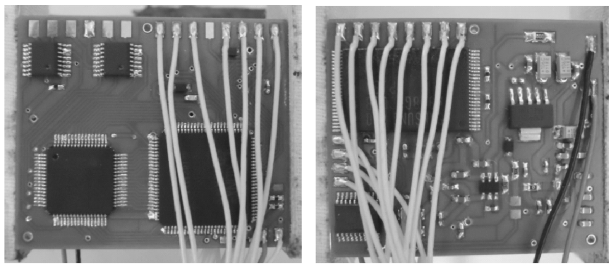


图 8 小型化采集存储电路实物图

Fig. 8 Real graph of miniaturization acquisition and storage circuit

3 实验验证

按照上述功能的介绍,系统集成后的实物如图 9 所示。

为验证半捷联惯性测量装置工作的可靠性和减旋的有效性,将整个系统安装于高精度数控车床,在

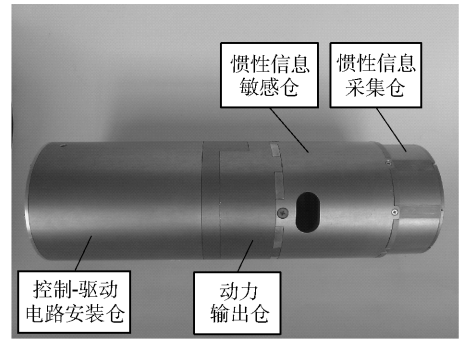


图 9 半捷联惯性测量装置实物图

Fig. 9 Real graph of semi-strapdown inertial measurement device

车床提供不同转速的情况下检验半捷联惯性测量系统的工作情况,试验现场如图 10 所示。通过 MIMU 中陀螺仪在 X 轴向上的输出验证系统工作的有效性。如果 X 轴向上陀螺输出在零点附近或是有微小电压输出,证明系统工作正常,达到预期的设计要求。

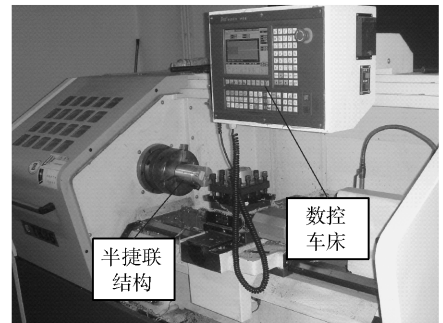


图 10 高精度数控车床试验现场

Fig. 10 Experiment on high precision numerically controlled lathe

试验过程中,将数控车床设置 12 个转速: 44 r/min, 63 r/min, 91 r/min, 120 r/min, 173 r/min, 248 r/min, 350 r/min, 503 r/min, 723 r/min, 958 r/min, 1 380 r/min, 1 980 r/min. 确认各部分连接无误后,将系统各部分上电,稳定 1 min 后开始计时,每个转速保持 30 s, MIMU 中 X 轴向上陀螺的输出数据如图 11 所示。

在半捷联惯性测量装置减旋后,由 MIMU 中陀螺仪的输出数据可以看出,整个系统能够实现减旋的作用。车床转速和减旋后转速的对应表如表 1 所示。由表中的数据可以看出,在车床即外部环境高旋的情况下,MIMU 最大的转速不超过 $50^\circ/s$,这样就可以使用低量程高精度的陀螺仪用于角速率的测量,提高最终的姿态精度。

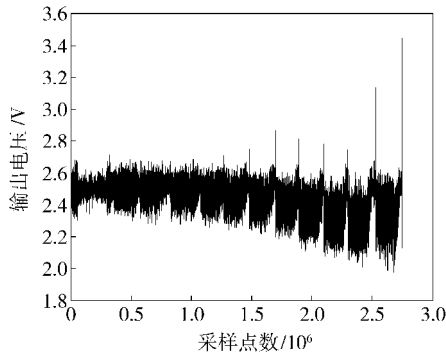


图 11 经过减旋后 MIMU 中 X 轴陀螺仪输出数据

Fig. 11 Gyro output data of X axis after experiment

表 1 车床转速与减旋后转速对应表

Tab. 1 Corresponding table of lathe speed and despinning

车床转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	车床转速/ ($(^\circ)\cdot\text{s}^{-1}$)	减旋后转速/ ($(^\circ)\cdot\text{s}^{-1}$)
44	264	0.915
63	378	1.967
91	546	3.365
120	720	5.204
173	1 038	7.138
248	1 488	11.547
350	2 100	16.843
503	3 018	23.865
723	4 338	31.688
958	5 748	38.780
1 380	8 280	47.196
1 980	11 880	33.209

4 结论

本文提出的半捷联惯性测量装置,采用主动控制的思路,通过测速陀螺获取外部弹体的转速,通过高速处理器 DSP 将测得的转速转化为对应频率的控制信号,控制电机以与外部弹体大小相等方向相反的方向进行旋转来使 MIMU 处于微旋或静止的环

境。通过对减旋后 MIMU 中 X 轴向陀螺仪输出数据的分析处理,该系统能够有效抵消外部弹体的高转速,达到在弹体高自旋运动环境下为 MIMU 提供稳定测试环境的目的,但存在高转速下减旋不彻底和减旋后 X 轴陀螺仪数据噪声较大的问题,需要后续的分析 and 解决。

该系统可广泛应用于高旋弹药飞行姿态的测量以及导航和制导方向,为高旋弹药姿态测量提供了新的思路,对试验过程中弹体飞行姿态、位置、速度等相关参数的准确分析具有重要的意义,具有较高的工程实用价值。

参考文献 (References)

- [1] 史金光,韩艳,刘世平,等. 制导炮弹飞行姿态角的一种组合测量方法[J]. 弹道学报,2011,23(3):37-42.
SHI Jin-guang, HAN Yan, LIU Shi-ping, et al. An approach of combination measurement for flight attitude angles of guided projectile[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(3):37-42. (in Chinese)
- [2] Jurman D, Jankovec M, Kamnik R, et al. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 138(2): 411-420.
- [3] 柴永利. 捷联惯导系统误差调制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
CHAI Yong-li. Research on error modulating technology of strap-down inertial navigation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [4] 赵诣,李杰,刘喆,等. 旋转弹用 MEMS 惯性测量组合数据硬回收系统设计[J]. 传感技术学报,2012,25(9): 1251-1256.
ZHAO Yi, LI Jie, LIU Zhe, et al. The design on data hard recovery system of MEMS micro inertial measurement unit used in spinning projectiles[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(9): 1251-1256. (in Chinese)
- [5] 李杰,刘俊,张文栋. 微型惯性测量装置[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1450-1451, 1462.
LI Jie, LIU Jun, ZHANG Wen-dong. Micro inertial measurement device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1450-1451, 1462. (in Chinese)