

# 一种适用于 POP 工艺 GNC 模块的测试系统设计

程瑞楚, 柴波, 郭刚强  
(西安微电子技术研究所, 西安 710065)

**摘要:** 高可靠性 POP 工艺的 GNC 模块, 采用了无框架结构, 以三维互连为层规划准则, 集成了信息处理组件和多种传感器, 通过三维堆叠实现了立体互连, 形成具有多种外设接口的正交立体集成结构的导航制导通信模块; 然而, 由于其高集成度和小型化的特点, 导致其存在测试难度大、测试耗时长等问题。针对以上问题, 文章采用主从协同系统设计方法, 构建了一种针对小型化航天电子产品的新型测试系统, 测试系统硬件部分采用小型化、嵌入式设计, 实现对产品在特殊环境条件下的测试; 软件架构采用分层构件化设计, 将单元测试和专项测试相结合, 对产品各项功能和性能实行独立测试; 经实际应用证明满足对 GNC 产品的测试需求, 该测试系统功能齐全, 操作简单, 利于总体维护及系统级调试, 功能测试时间仅需 8~10 秒, 将工作效率提升了 50%, 是对 GNC 模块可测性、可算性的巨大提升。

**关键词:** POP; 三维堆叠; GNC 技术; 主从协同; 测试系统

## Design of Test System for the GNC Module Base on POP Process

CHENG Ruichu, CHAI Bo, GUO Gangqiang  
(Xi'an Microelectronics Technology, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The guidance navigation and control (GNC) module for the highly reliable Package on Package (POP) process innovatively adopts frameless structure, takes the three-dimensional interconnection as the level planning criterion, integrates the information processing components and a variety of sensors, realizes the three-dimensional interconnection through the three-dimensional stacking, and forms a module for guidance and navigation communication with an orthogonal three-dimensional structure and multiple external interfaces. However, due to the characteristics of its high integration and miniaturization, it has the problems such as difficult testing and long testing time. In view of the above problems, the master-slave collaborative system design method is adopted to construct a new test system for the miniaturized aerospace electronic products. The software architecture adopts the layered component design, combines the unit testing with the special testing, and implements the independent testing of function and performance of the product. The actual application meets the testing requirements of the GNC products. The test system has complete the function and simple operation, which are conducive to overall maintenance and system-level debugging. The functional test time is only 8~10 seconds, and the work efficiency is improved by 50%, which is great improvement in the testability and computability of the GNC module.

**Keywords:** package on package; 3D stacking; GNC technology; master-slave cooperation; test system

## 0 引言

制导、导航与控制系统 (GNC, guidance navigation and control system) 是导弹/火箭的大脑和神经中枢, 是支撑导弹/火箭各个系统正常运转、实现目标的核心, 是航天飞行任务成功与否的关键<sup>[1-3]</sup>。随着导弹武器系统不断向小型化、智能化、低成本等方向发展, 弹上系统逐步向集各功能模块于一体的综合电子系统过渡<sup>[4]</sup>。综合电子系统具有缩小系统体积、减少弹上资源的浪费、提高系统可靠性、降低产品成本等优势, 是目前弹上控制系统的发展趋势。

传统的导航制导控制产品由大量 PCB 单板及各种功能模块组成, 体积大、质量重、功耗高、成本高等问题严重限制了它们的应用范围。随着我国在智能弹药、小型化精

确制导弹、微小型无人机和微纳卫星等领域研究的逐步深入, 对弹上系统小型化、轻量化、高集成、低成本、低功耗等方面提出了更高的要求。

堆叠封装 (POP, package on package) 也称为叠层封装, 是一种新兴的、低廉的、集成逻辑和存储器件的 3D 封装解决方案, 通过堆叠工艺实现小型化和多功能<sup>[5-6]</sup>。GNC 模块就是针对弹上系统上述需求研发的一款产品, 以传感器技术、信息处理技术、微电子技术为基础的 GNC 模块, 是支撑其小型化发展的核心之一。基于 POP 工艺的 GNC 模块是一个以多核处理器为核心, 集成 MEMS 惯性传感器、地磁传感器、卫星导航模块等多个组件, 具有多种外设接口的正交立体集成结构的导航制导通信模块<sup>[7]</sup>。

基于 POP 工艺的 GNC 模块其集成功能多、体积小、

收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-02-28。

作者简介: 程瑞楚 (1997-), 女, 陕西安康人, 硕士研究生, 主要从事计算机科学与技术方向的研究。

柴波 (1963-), 男, 陕西西安人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事空间计算机及容错技术方向的研究。

引用格式: 程瑞楚, 柴波, 郭刚强. 一种适用于 POP 工艺 GNC 模块的测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 35-40, 90.

工艺过程复杂且不可逆，如果测试不到位会导致最终产品的成品率低，低成本控制目标难以实现。为了解决该问题，本文设计了一款测试系统，可以满足整个工艺过程的测试需求，实现对制导导航控制系统的部件测试、综合测试，验证制导导航控制系统的功能和性能，解决了该产品大量生产的测试需求难题，提高了产品的可测试性和可靠性<sup>[8]</sup>。

### 1 基于 POP 工艺的 GNC 模块功能结构特征

GNC 模块采用双核处理器，可使飞行控制计算与导航解算相互独立运行，一个处理器负责飞行控制计算，另一个处理器负责导航解算。为了充分发挥双核处理器在算法解算和信息处理方面的优势，GNC 模块采用 DSP+FPGA 的架构实现数据运算及多种通讯协议，FPGA 实现逻辑译码及其它功能扩展。另外，由于 FPGA 本身的可配置、修改容易和调试方便等特点，使系统具备重构性强、升级容易等特点。GNC 模块采用单 5 V 供电，经过供电单元转化成 3.3 V 和 1.2 V，两路电压都可以保证最大 3 A 的电流输出能力，给整个系统供电，方便用户使用。传感器包含单轴陀螺仪、单轴加速度计、三轴地磁模块，组成 IMU (Inertial Measurement Unit, 惯性测量单元)，可实现对弹体 X、Y、Z 三个方向的角速度、加速度及地磁信息的采集和处理<sup>[9]</sup>。卫导部分集成了射频前端和基带处理部分，与 IMU 组成组合导航系统，实现对弹体姿态和位置的测量。其原理框图如图 1 所示。

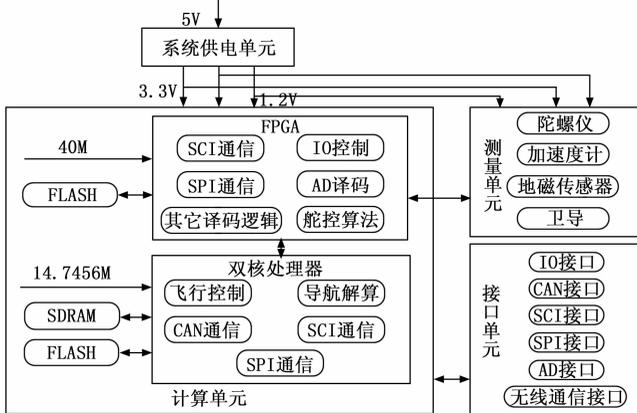


图 1 GNC 功能原理框图

GNC 模组叠层设计中，充分考虑了体积、重心、散热、供电和信号线互连等方面。按照功能将 GNC 模组划分为信息处理、AD/地磁测量、卫导、惯性采集、电源等组件，其结构示意图如图 2 所示。从上往下依次为信息处理组件、AD/地磁组件、卫导、惯导组件（正交结构）、电源组件和对外接口组件。

GNC 模块采用高可靠 POP 封装技术，该封装兼容裸芯片和成品器件三维叠层，可实现传感器和数字系统的一体化集成。采用的工艺技术路线为有机基板型叠层方式，将器件以尽量少的三维互连为层规划准则，按功能进行分块规划，分别组装到数个有机基板上，形成单层封装结构，

再将基板进行三维堆叠，实现立体互连，对外形成 PGA 引出封装，这也使 GNC 模块的测试难度大大增加<sup>[10]</sup>。

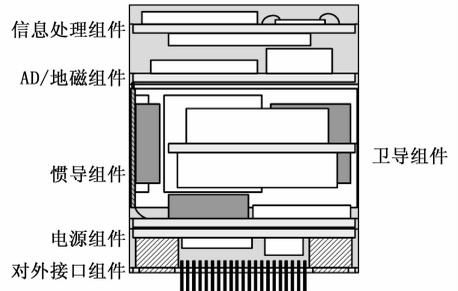


图 2 GNC 模块叠层规划图

利用 POP 工艺实体封装的特点，GNC 模块创新采用了无框架结构，在没有支架的情况下，保证了惯导组件敏感轴的互相正交，在保证传感器安装精度的同时，大大减小了体积，减轻了重量，简化了模块组装的难度，减少了内部材料的类型，提高了封装结构的可靠性。GNC 封装产品外形图如图 3 所示。

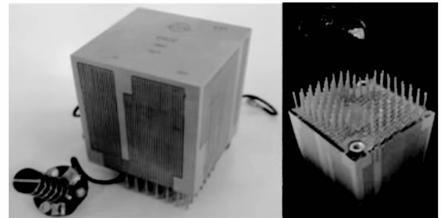


图 3 GNC 封装产品外形图

### 2 GNC 模块测试需求分析

根据 GNC 产品功能和封装成品的工艺特点，结合 GNC 模块生产调试与试验的实际流程需要，可以将 GNC 产品的测试分为：静态测试、单项功能测试和专项性能测试。

静态测试：由于 GNC 模块体积小，集成度高，采用 PGA 封装，采用侧面互连工艺，模块间连线是在外表面，互联线条细、密度高，在加电测试前必须进行模块的互联、导通及绝缘测试，这些测试不能在模块本体上实现，必须通过转接关系变成万用表、示波器等可以直接测量。静态测试既要满足封装过程中的测试，也要满足成品的测试。

单项功能测试：由于 GNC 模块集成的功能非常多，各个功能模块都具有自身的功能与性能指标，这些功能性能指标必须满足产品指南规定的要求，因此，测试系统必须能够实现对组成 GNC 模块产品的各项功能性能指标进行单项测试。单项测试既要满足封装过程中的测试，也要满足最终成品的各种测试需求。

专项性能测试：由于 GNC 模块集成了 MEMS、卫导和地磁等功能，这些功能的性能测试必须在转台、卫星模拟转发器和跑车等特殊环境条件下才能完成，因此测试系统应该满足这些特殊环境测试的安装要求。专项性能测试只适应于最终成品的测试。

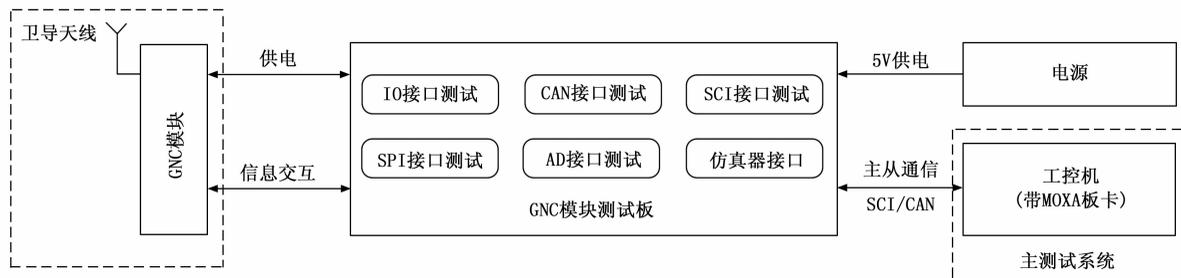


图 4 GNC 主从协同测试系统图

### 3 主从协同测试系统硬件架构设计

根据上述 GNC 模块测试需求分析结果, 对于一个高度集成封装的小型化综合电子模块产品, 构筑了一套主从协同测试系统, 测试系统硬件设计图 4 所示。

其中 GNC 模块硬件测试主系统包括工控机、测试用电缆、GNC 模块供电电源、万用表、示波器等。主要功能是实现对 GNC 模块测试从系统的供电和通过通信接口进行的命令传输以及测试结果信息传递。

为解决高集成度封装的 GNC 模块测试不便的问题, 将协同测试从系统设计为一块多功能印制板, 把 GNC 模块作为被测对象, 在该测试板上安装测试插座, 用于可重复封装封装好的 GNC 模块, 使得多个 GNC 模块可共用同一块测试板, 测试过程中可直接插拔替换, 大大节省了资源, 提高了工作效率。GNC 模块的对外接口单元主要由可配置 IO 接口、CAN 接口、SCI 接口、SPI 接口、AD 接口等部分组成, 这些对外接口的辅助测试逻辑都通过对此印制板的合理布局来实现。

1) 为了实现静态测试, 在测试板的原理设计中, 将 GNC 模块功能接口引出, 同时将 GNC 模块的全部引脚引出, 并在测试板上设计独立测试点, 可以用于万用表、示波器等测量仪器的直接测试。

2) 为了实现单项功能测试, 将测试主机工控机通过 MOXA 卡与测试板连接, 通过 422 通信接口将主从协同系统之间进行互联, 由测试系统主机通过工控机向 GNC 协同测试系统发送指令, 由 GNC 模块接收指令并执行, 进而实现对 GNC 模块的各项功能测试。

①GNC 模块的 4 路 IO 采用自环方式测试接口的功能, 随机选择 2 个 IO 接口进行自环测试, 任意一个输出、另一个输入, 对比输入和输出的数值, 结果一致则表示测试正确;

②SPI 通信接口的测试, 将 CS、CLK、SDIN、SDOUT 信号分别接入 4 路 IO, 在 IO 上观测 SPI 接口的数据状态, SPI 接口和 IO 接口之间相互发送、接收的数据一致则表示测试正确;

③SCI 接口和 CAN 接口通过各自的接口转换芯片, 与对外插座相连, 与工控机实现 422 通信和 CAN 通信;

④AD 接口测试配合测试板上的拨码开关设计, 其中前 3 路采集的是三轴地磁传感器的输出信息, 将后 5 路引出, 在测试板上分别采样 5 V、3.3 V、1.2 V、GND 和悬空,

每次拨动一位拨码开关, 可观察 5 路采样值的变化。

3) 为了实现专项功能测试, 协同测试从系统设计为一块小型化的印制板, 该板除了可以插拔不同的 GNC 模块以外, 还可以通过螺钉被固定在转台或跑车台上, 以便能够满足 MEMS、地磁以及卫星导航定位功能等特殊环境下的测试。

### 4 主从协同测试系统软件架构设计

GNC 模块测试系统软件分为两类, 测试系统主机软件和协同测试系统软件。测试系统软件采用分层构件化设计, 在软件体系结构层次上与综合电子软件的设计理念一一对应, 分为测试应用层、测试核心层、测试硬件支持层, 从设计上保证了测试环境的有效性<sup>[11]</sup>。通过分层并制定每一层的标准业务及接口, 如其中一层发生变化, 则不会影响到其它层, 便于在以后技术的升级换代中可以快速适应。同时, 在软件设计中, 制定设备驱动程序框架, 使得软件能够适应不同的设备控制需求, 并对上层提供统一的接口。将测试系统中的标准业务采用构件实现, 在后续新任务软件的开发中可以通过组装标准化的构件以及任务的特殊需求构件, 达到加快软件开发速度的目的, 进而缩短软件的研制周期<sup>[12]</sup>。

测试系统主机软件和协同测试系统软件共同实现对 GNC 模块的单元测试和专项测试。单元测试是软件测试的第一步, 单元测试通过对每个最小的软件模块进行测试, 对源代码的每一个程序单元实行测试, 来检查各个程序模块是否正确地实现了规定的功能, 确保其能正常工作; 而专项功能测试根据某一复杂功能验证需求而专项开展测试。此测试系统的单元测试部分用于测试 GNC 模块的各项基本功能是否正常工作, 专项测试部分用于 GNC 成品状态下, 采集各传感器的输出数据, 然后采取一些数据处理与补偿方法, 测试 GNC 模块的性能<sup>[13]</sup>。测试系统主机软件的开发环境为 C++ Builder; 协同测试系统软件的运行环境为 TI 公司 TMS320f28377D, 开发环境为 CCS6.1; CAN 通信使用广州致远电子生产的 USB CAN-II 智能接口卡实现。

#### 4.1 单元测试

单元测试中, 协同测试系统软件负责接收测试系统主机软件发出的单元测试命令, 并返回测试结果消息给测试系统主机软件, 完成对被测设备所有硬件单元的单项功能测试, GNC 模块的单项功能测试项目表如表 1 所示。当测

测试结果错误时,单元测试软件应下发错误记录,用于故障原因的分析,测试系统主机软件对测试过程中的所有错误数据以测试日志的形式进行记录,测试日志显示测试的开始时间、已运行时间、结束时间等与测试过程相关的信息,便于测试实验状态的查找<sup>[14]</sup>。

表 1 单项功能测试项目表

测试项目	测试方法	测试结果
CPU 测试	进行写入和读出;加、减、乘、除运算测试	正确
定时器测试	设置定时值 0.5 ms/1 ms/2 ms/5 ms,启动定时器,定时时间到,CPU 会产生中断	正确
存储器测试	内部 RAM、SD RAM 测试	写入、读出
	SPI FLASH、内部 FLASH 测试	擦除、写入
IMU 测试	发送 IMU 测试指令,收到指令后,陀螺仪开始测量角速度和温度,加速度计开始测量加速度和温度,然后将采集数据发送给测试系统主机软件	陀螺 X、Y、Z;加计 X、Y、Z;温度
GPS 测试	发送卫星测试指令,接收指令,计算单元会向卫星发送指令,搜星定位	经纬高、参与定位星数等信息
AD 测试	CPU 将读取到的 8 路 AD 采样值,发送给测试系统主机软件,测试过程中可适当改变 GNC 模块的位置和姿态,观察前 3 路地磁输出的变化情况。	5 路 AD 输出电压信号、3 路地磁

根据上述单项功能测试项目,设计单元测试软件流程,如图 5 所示。

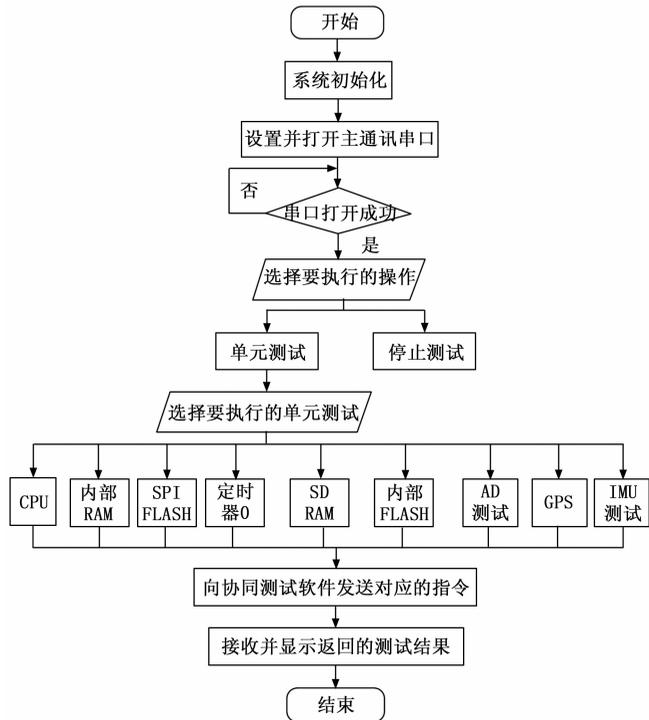


图 5 GNC 测试系统软件流程图

### 4.2 专项测试

专项测试软件主要完成对 GNC 模块的性能测试,采集 GNC 模块的地磁传感器、陀螺仪和加速度计的三轴原始数据以及温度信息,并通过对原始数据的补偿处理。输出地磁三轴磁场信息、陀螺仪三轴角速度和温度、加速度计三轴加速度和温度,然后对采集到的数据进行解算,将最终数据在测试系统主机软件的专项测试界面显示<sup>[15]</sup>。专项测试软件流程如图 6 所示。

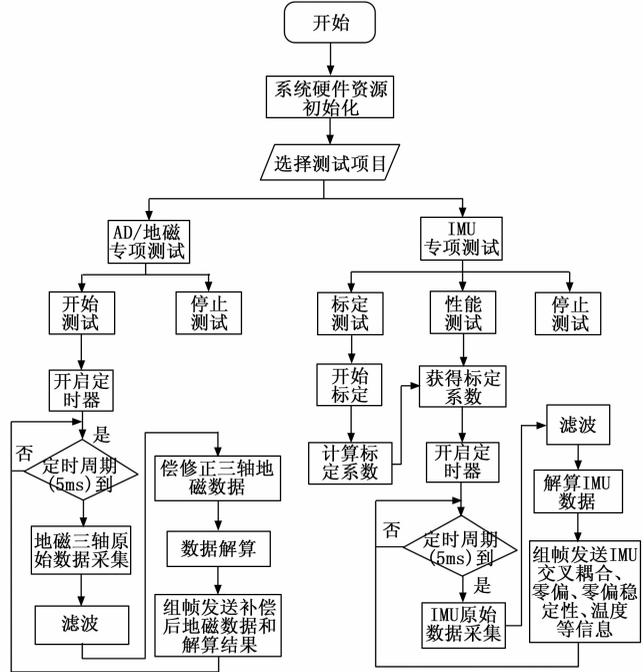


图 6 GNC 测试系统专项测试流程图

#### 1) IMU 专项测试:

IMU 的零偏及初始姿态误差是导航误差快速发散的主要误差源,因此,对 IMU 全部零偏的标定和补偿是减少初始姿态误差和提高导航精度的有效方法<sup>[16]</sup>。因此,在开始 IMU 性能测试前需完成 IMU 的标定工作。由于 MEMS 陀螺仪相比于加速度计对标定的精度要求更高,因此我们采取先标定加速度计后标定陀螺仪的方案<sup>[17]</sup>。

将 GNC 模块通过测试板固定安装在三轴转台上,保证 GNC 模块的轴向与转台轴向尽可能平行。首先,建立陀螺仪定温输出模型为:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{gx} & k_{gxy} & k_{gxz} \\ k_{gyx} & k_{gy} & k_{gyz} \\ k_{gzx} & k_{gzy} & k_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{Gx} \\ N_{Gy} \\ N_{Gz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

公式(1)中, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为补偿后的三轴陀螺仪输出(即理论输出真值), $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为3个轴向陀螺仪的常值零偏, $k_{gx}, k_{gy}, k_{gz}$ 为三轴陀螺仪的刻度系数;轴间安装偏差系数分别为 $k_{gxy}, k_{gyx}, k_{gxz}, k_{gzx}, k_{gzy}, k_{gzy}$ ;三轴陀螺仪输出的原始数据为 $N_{Gx}, N_{Gy}, N_{Gz}$ 。

加速度计定温输出模型建立为:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ax} & k_{axy} & k_{axz} \\ k_{ayx} & k_{ay} & k_{ayz} \\ k_{azx} & k_{azy} & k_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{Ax} \\ N_{Ay} \\ N_{Az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nabla_x \\ \nabla_y \\ \nabla_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $a_x, a_y, a_z$  为补偿后的三轴加速度计输出 (即理论输出真值),  $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$  为 3 个轴向加速度计的常值零偏,  $k_{ax}, k_{ay}, k_{az}$  为三轴加速度计的刻度系数; 轴间安装偏差系数分别为  $k_{axy}, k_{axz}, k_{ayx}, k_{ayz}, k_{azx}, k_{azy}$ ; 三轴加速度计输出的原始数据为  $N_{Ax}, N_{Ay}, N_{Az}$ 。

① 加速度计标定方法:

将 IMU 的 X, Y, Z 轴分别朝天向和地向一次, 在转台静止情况下进行加速度计数据采集。每个位置保持时间不小于 5 分钟, 记录加速度计原始输出。记录每个位置下 GNC 模块加速度计的输出均值, 分别记为:  $\overline{N_{Aj}^T} = (\overline{N_{Axi}}, \overline{N_{Ayi}}, \overline{N_{Axi}})$ , ( $j = 1, 2, 3, \dots, 6$ )。记  $\overline{f_j^T} = (\overline{f_{xj}}, \overline{f_{yj}}, \overline{f_{zj}})$ , ( $j = 1, 2, 3, \dots, 6$ ) 为每个位置下的各轴向的比力激励值。由  $F = N_A K$ , 可得  $K$  的最小二乘解为  $K = (N_A^T N_A)^{-1} N_A^T F$ , 求得矩阵  $K$ , 即求出了加速度计标定的所有参数。

② 陀螺仪标定方法:

调整 X 轴平行于地球自转轴, 启动地面测试软件开始收数, 然后 5 s 内控制转台绕 X 轴分别正转和反转 1 080° (三圈)。待转动结束后, 继续采集 10 s 以上数据, 地面测试软件再停止收数, 命名接收文件为 “X+1 080” 和 “X-1 080”。Y、Z 两轴步骤同 X 轴。陀螺仪输出值为角速度, 累加和为角度增量, 进行累加前将每个角速率值乘以陀螺仪的输出周期。即  $\tilde{N}_{i(i=x,y,z)}^{j(j=x^\pm, y^\pm, z^\pm)} = \sum \Delta T \cdot N_{i(i=x,y,z)}^{j(j=x^\pm, y^\pm, z^\pm)} \cdot \Delta T$  为输出周期,  $N_{i(i=x,y,z)}^{j(j=x^\pm, y^\pm, z^\pm)}$  为陀螺仪的单帧输出值。计算前对采集值进行取舍, 保证所有的转动过程中的输出数据要包含在计算值内, 并且保证正转与反转数据等长。根据采集到的数据, 可计算相关补偿参数, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} k_{gx} &= \frac{\tilde{N}_x^{x^+} - \tilde{N}_x^{x^-}}{4\pi N}, k_{gxy} = \frac{\tilde{N}_y^{x^+} - \tilde{N}_y^{x^-}}{4\pi N}, k_{gxz} = \frac{\tilde{N}_z^{x^+} - \tilde{N}_z^{x^-}}{4\pi N} \\ k_{gyx} &= \frac{\tilde{N}_x^{y^+} - \tilde{N}_x^{y^-}}{4\pi N}, k_{gy} = \frac{\tilde{N}_y^{y^+} - \tilde{N}_y^{y^-}}{4\pi N}, k_{gyz} = \frac{\tilde{N}_z^{y^+} - \tilde{N}_z^{y^-}}{4\pi N} \\ k_{gzx} &= \frac{\tilde{N}_x^{z^+} - \tilde{N}_x^{z^-}}{4\pi N}, k_{gzy} = \frac{\tilde{N}_y^{z^+} - \tilde{N}_y^{z^-}}{4\pi N}, k_{gz} = \frac{\tilde{N}_z^{z^+} - \tilde{N}_z^{z^-}}{4\pi N} \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $N$  为转动圈数,  $N=3$ 。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{N_x^{y^+} + N_x^{y^-} + N_x^{z^+} + N_x^{z^-}}{8\pi N} \\ \epsilon_y &= \frac{N_y^{x^+} + N_y^{x^-} + N_y^{z^+} + N_y^{z^-}}{8\pi N} \\ \epsilon_z &= \frac{N_z^{x^+} + N_z^{x^-} + N_z^{y^+} + N_z^{y^-}}{8\pi N} \end{aligned} \quad (4)$$

IMU 标定测试完成后, 开始 IMU 性能测试, 获取 IMU 标定测试中的标定系数, 然后测试系统主机软件向协同测试软件发送数据采集指令, 开始 IMU 数据采集, 并将采集到的三轴陀螺和三轴加速度计数据进行解算, 最终将陀螺和加速度计的零偏、零偏稳定性、交叉耦合等数据在测试系统主机软件的专项测试界面显示。

2) AD/地磁测试:

调整转台位置使得地磁 Z 轴方向平行于北向, 产品正常工作后启动转台, 设置转台的转速为 15 转/秒。等转台速率稳定后, 连续采样 3 min 数据。传感器的 X 轴和 Y 轴可以测量 OXY 平面上的磁场强度, 并且随着 GNC 模块旋转, X 轴和 Y 轴测量到的磁场强度周期性变化。

如果敏感轴上的磁场强度为 0, 而传感器的输出不为 0 时, 则会带来零点误差。X 轴和 Y 轴的零位为:

$$\Delta X = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2} \quad (5)$$

$$\Delta Y = \frac{Y_{\max} + Y_{\min}}{2} \quad (6)$$

修正零位之后的输出为:

$$x = x_{\text{out}} - \Delta X \quad (7)$$

$$y = y_{\text{out}} - \Delta Y \quad (8)$$

当地磁传感器的两条灵敏轴的灵敏度不一致时, 就会产生灵敏度误差, 假定以 X 轴的输出为基准, 通过给 Y 轴的输出乘一个比例系数  $K_y = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}$ , 就可以将 Y 轴的灵敏度为和 X 轴的灵敏度调整一致。

正交误差出现时, 采集到的数据所表现的现象是: Y 轴输出为最大时, X 轴输出不为 0, 此时 X 轴的实际输出为  $x = Y_{\max} \times \sin\alpha$ 。对此, 可以采用公式 4~5 进行补偿:

$$x = x_{\text{out}} - y_{\text{out}} \times \sin\alpha \quad (9)$$

由于地磁模块在测量过程中存在系统误差, 姿态解算出的滚转角误差较大, 不能满足弹道控制的要求。地磁模块协同测试软件功能主要包括对地磁模块的数据采集, 然后通过补偿修正模型对采集到的数据进行修正, 最终将滚转角数据和地磁修正数据以 422 通信形式发送给测试系统主机软件, 并在测试系统主机软件的专项测试界面中显示。

5 实验结果与分析

5.1 实验步骤和方法

为了验证本测试系统的准确性和可靠性, 选取 5 台 GNC 产品按照以下步骤进行测试, 根据 GNC 模块测试需求, 依次完成静态测试、单项功能测试和专项性能测试。

1) 静态及单项功能测试:

首先, 在上电之前对 GNC 模块进行人工目检、尺寸检测、原理检查以及阻抗测量, 确保产品阻抗测量没有问题并且不存在短路或接触不良后, 采用测试插座将封装好的 GNC 模块固定在测试板上, 并进行通电。如无异常, 记录供电电压和电流, 然后开始电路调试。功能测试时, 应将 GNC 模块静置在水平平面上。然后使用单元测试软件, 对 CNC 模块的所有功能逐一进行测试, 判断系统的各项功能是否正常。

2) IMU 标定:

将 GNC 模块安装在三轴转台上, 采用 6 位置法对加速度计进行标定, IMU 的 X、Y、Z 轴分别朝天向和地向一次, 在转台静止情况下进行加速度计数据采集, 每个位置

保持时间不小于 5 分钟<sup>[18-19]</sup>。然后对陀螺仪进行标定,调整 X 轴平行于地球自转轴,开始数据采集。在 5 s 内控制转台绕 X 轴正转 1 080° (三圈)。待转动结束后,继续采集 10 s 以上数据,命名接收文件为 X+1 080°。然后保持转台方向,控制转台绕 X 轴反转 1 080° (三圈),数据记为 X-1 080°。Y、Z 两轴步骤同 X 轴。

3) IMU 零偏:

调整转台位置,使得陀螺 Z 轴方向冲天,通电等待数据稳定后,测试 GNC 模块 X、Y 轴角速率的输出,共测试 3 min,然后求出 X、Y 轴陀螺仪输出信号的平均值即为陀螺仪的零偏。将 GNC 模块三轴角速率数据采集时间改为 1 h。对采集数据取 10 s 均植,共得到 n 组陀螺仪输出,根据计算公式得到陀螺仪的零偏稳定性。分别测试 GNC 模块三轴角速率 10 min 的零偏输出:测试 6 次,每次间隔 10 min 以上,6 次求标准差,得到陀螺仪的零偏重复性。测量 Y 轴加速度 Y1,采样 3 min 并求出平均值。改变转台方向,使 Z 轴指地,测量 Y 轴加速度输出 Y2,采样 3 min 并求出平均值。根据计算公式得到加速度计的零偏。记录加速度计输出,测试时间改为 1 h,对加速度计的输出取 10 s 均值,共得到 n 组加速度计输出,算得加速度计的零偏稳定性。分别测试 10 min 的零偏输出,测试 6 次,每次间隔 10 min 以上,算得加速度计的零偏重复性。

4) 地磁输出测试:

将 GNC 模块安装在无磁转台上,调整转台位置,使得地磁 Z 轴方向平行于北向,产品正常工作后启动转台,设置转台的转速为 15 转/秒。等转台速率稳定后,连续采样 3 min 数据。地磁传感器的 X 轴和 Y 轴测量 OXY 平面上的磁场强度,并且随着 GNC 模块旋转,X 轴和 Y 轴测量到的磁场强度呈周期性变化。

5.2 实验结果分析

根据上述实验步骤,依次对 5 台 GNC 模块完成了静态测试和动态测试,其功能测试结果良好,各功能部分均正常工作。

选取三轴 IMU 数据进行性能对比,以 X 轴为例分析,测试结果如表 2 所示。在没有误差的情况下,如果将三轴正交地磁传感器在均匀磁场影响下绕原点进行三维空间旋转,地磁矢量的模值不随传感器的转动而变化<sup>[20]</sup>。理想正交三轴地磁传感器的输出信号在空间的轨迹是一个球,其半径为地磁矢量的模<sup>[21]</sup>。如果绕三轴磁传感器的一个轴旋转,另两个轴则形成一个平面上的圆。以 GNC 模块地磁 X 轴的输出为横坐标,以 Y 轴的输出为纵坐标作图,在坐标

表 2 IMU 测试 X 轴数据

X 轴采样数据	1	2	3	4	5
陀螺零偏稳定性/(°/h)	4.599 5	9.122 6	7.163 9	3.581 5	8.267 6
加计零偏稳定性/mg	0.242 3	0.076 9	0.098 4	0.124 1	0.089 1
陀螺零偏重复性/(°/h)	1.240 3	2.325 3	3.654 7	4.773 9	2.472 9
加计零偏重复性/mg	0.072 6	0.014 9	0.051 5	0.028 6	0.025 9

轴上映射出一个圆心在原点的近似圆<sup>[22]</sup>。地磁传感器 X、Y 轴输出的电压信号会形成正弦信号,双轴的相位差近似为 90°,5 台 GNC 模块地磁输出 X、Y' 轴对应关系均如图 7 所示。

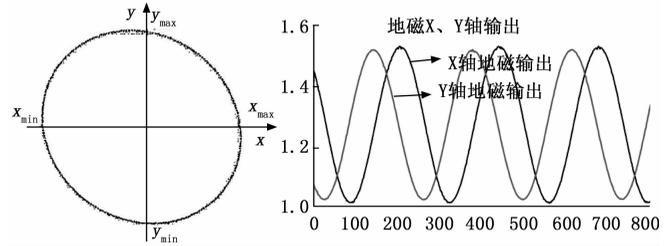


图 7 地磁输出及 X、Y 轴对应关系

GNC 模块具有的各项功能和性能指标如表 3 所示。5 台 GNC 产品静态测试结果正常,模块尺寸和初次上电电流、电压均符合指标要求,对测试软件设置对应参数,测试了 5 台 GNC 模块的功能和性能,测试结果均满足 GNC 模块技术指标要求。使用秒表计时测试时间并统计结果,除专项测试中需反复多次采集数据外,5 台 GNC 产品功能测试所需时间均为 8~10 s,与同类测试系统相比,将人工测量的难度和强度降低到 50% 以下,大大提高了测试效率。

表 3 GNC 模块技术指标

参数	指标	
模块尺寸	≤26 mm×26 mm×32 mm	
电源	电压:+5 V±5%;电流:0.49 A±5%	
卫导	单点位置精度(1σ)	水平误差:10 m;高程误差:15 m
	导航速度精度(1σ)	水平误差:0.1 m/s;高程误差:0.2 m/s;
	秒脉冲定时精度	10 ns
	过载指标	≥ 20 000 g
加速度范围	≤40 g	
加速度测量	测量范围	±50 g
	分辨率	≤1 mg
	零偏稳定性	≤2 mg (1σ)
	标度因数重复性	≤1×10 <sup>-3</sup> (1σ)
耦合误差	绝对值≤0.001	
角速度测量	量程	±400°/s
	分辨率	≤0.005°/s
	零偏稳定性	≤10°/h(1σ)
	标度因数重复性	≤1×10 <sup>-3</sup> (1σ)
耦合误差	≤0.001	
地磁测量	量程	±6 gauss
	分辨率	120 ugauss

测试系统软件界面设计简单,主要包含测试项目菜单栏和产品数据栏,测试项目通过勾选来执行,也可进行多次循环测试,具备独立性和统一性。完成对操作界面的参数设置后,整个测试过程在后台实现,测试结束后,测试结果和数据保存到对应测试项目的文件夹内,易于区分和查验<sup>[23]</sup>。

(下转第 90 页)