

惯导系统级间动态对准测试系统设计与应用

汤佳骏, 汪浩洋, 董昕阳, 何子路, 孙士捷

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 多级航天装备的惯导系统级间相对安装误差标定精度与补偿效果对其导航精度有着直接影响, 实际工程应用时相对安装误差的标定往往是非重复性流程, 且缺少快速评估相对安装误差准确性的测试手段; 为了提高测试覆盖性, 在系统级测试阶段提出一种惯导系统级间动态对准测试的总体方案, 设计了一套检测惯导系统级间相对安装误差的自动化设备; 测试设备以基于PXI总线的控制系统为核心, 配置摇摆转台提供动态激励, 搭载基于LabVIEW开发平台的上位机测试软件, 配合上传至产品端的测试软件实现测试流程; 通过试验测试验证了测试系统的应用价值, 进一步分析测试结果发现了惯导系统级间通信时延问题并改进了测试方法, 提高了相对安装误差检测的准确性。

关键词: 惯导系统; 级间相对安装误差; 系统级测试; PXI总线; 级间通信时延

Design and Application of Interstage Dynamic Alignment Test System for Inertial Navigation System

TANG Jiajun, WANG Haoyang, DONG Xinyang, HE Zilu, SUN Shijie

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In inertial navigation systems for multistage space equipment, there are the calibration accuracy and compensation of interstage relative installation error, it has direct influence on its navigation accuracy. In practical engineering application, the calibration of relative installation error is often a non-repetitive process, and there is a lack of testing means to quickly evaluate the accuracy of installation error. In order to improve the test coverage, an overall scheme of interstage dynamic alignment test is proposed in the system-level testing phase, and a set of automatic equipment for detecting the interstage installation error is designed. The test equipment is based on the control system of PXI bus as the core, and a swinging turntable is used to provide dynamic excitation. The upper computer test software based on LabVIEW development platform is equipped, and the test software is uploaded to the product side, realizing the test process. Through experimental testing, the application of the testing system is verified. The further analysis of the test results reveals the interstage communication delay of inertial navigation system, which improves the test method and provides the accuracy of installation error detection.

Keywords: inertial navigation system; interstage installation error; system-level test; PXI bus; interstage communication delay

0 引言

随着一体化防空协同组网作战的需求发展, 实现防空反导作战的任务分配, 要求最大限度地发挥各传感器的有效性^[1]。目前, 多源组合导航技术已在航空航天领域得到广泛应用, 多级航天武器装备在设计时往往在前后级会采用不同精度的惯性系统^[2-4], 以应对不同飞行段和飞行任务的指标要求, 然而不同惯性测量组件的安装位置与安装基准通常不一致, 测量出的姿态无法直接融合, 需要对不同惯性测量组件的相对安装误差进行标定和补偿。相对安装误差的标定精度与补偿效果将直接影响测量导航信息的优劣, 进而关系到武器装备的命中精度^[5], 随着现代高精度精确打击作战的需求日益增长, 许多研究重点关注了优化安装误差的标定与补偿方法^[6-12], 但在实际工程应用时少有对相对安装误差标定结果的检测过程, 而误差标定往往又是非重复性流程, 在产品经历试验、运输等振动环境后缺

少快速评估相对安装误差是否发生大幅偏差的测试手段。因此, 从提高测试覆盖性的角度, 在产品系统级测试阶段对相对安装误差标定结果及补偿效果进行检验测试具有极其重要的意义。针对上述需求, 本文提出一种惯导系统级间动态对准测试的总体方案, 设计了一套检测惯导系统级间相对安装误差的自动化设备, 通过试验测试验证了系统的应用价值。

1 惯导系统级间动态对准测试总体方案设计

初始对准是惯导系统启动工作的必要过程, 而对于相互独立的惯导系统通常采用装订对准或传递对准技术^[13], 利用高精度的惯导系统作为主惯导向低精度的子惯导初始装订基准导航信息, 待子惯导开始导航解算之后, 匹配对比主、子惯导的输出信息, 通过算法估计或直接补偿的方式对子惯导的误差进行修正^[14-17]。这类对准方式不仅相较于子惯导采用自主式初始对准的精度要高, 还大幅缩短了

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-05-12。

作者简介: 汤佳骏(1995-), 男, 硕士研究生, 工程师。

引用格式: 汤佳骏, 汪浩洋, 董昕阳, 等. 惯导系统级间动态对准测试系统设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 98-103, 110.

对准时间, 有效提升航天装备的快速反应能力。然而, 受传感器精度、安装误差、杆臂效应、挠曲变形、时间延迟等因素的影响, 主、子惯导系统之间存在一定的失准角, 而安装误差作为系统误差中较大的固定分量, 在初始对准阶段就需要进行补偿^[18]。

惯导系统级间动态对准测试的总体方案正是参考了高精度惯导系统对低精度惯导系统的修正过程进行设计, 通过自动化测试设备与多级惯导系统建立通信, 模拟实际工况下的对准过程, 同时采集各惯导系统输出的导航信息验证相对安装误差补偿后的导航误差满足测试指标要求。下面结合一型两级航天产品具体阐述惯导系统级间动态对准测试流程设计及系统原理方案。

1.1 面向飞行时序的测试流程设计

为了保证测试结果的有效性, 惯导系统级间动态对准测试的流程基于产品的飞行任务时序进行精简, 简化了除惯导系统工作流程外的其他时序, 尽可能地模拟产品的实际工况, 同时降低测试设计的复杂度^[19]。

结合飞行任务时序, 简化后的产品工作流程如下: 两级惯导系统先完成上电后的自检, 后级舱内的主惯导系统接收外部装订的地理位置信息进行静态的自对准, 对准完成后等待指令开始导航解算。此时, 产品按时序已进入发射后流程, 主惯导系统持续输出后级姿态角参与控制, 同时将后级姿态角通过级间通信传递给子惯导系统, 随后子惯导系统将修正后的主惯导系统姿态四元数和位置、速度进行有效性判别后结合外部装订的相对安装误差对姿态角进行补偿, 补偿状态矩阵如下:

$$C_n^{o_1} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta\cos\Delta\psi & \sin\Delta\theta & \\ -\cos\Delta\varphi\sin\Delta\theta\cos\Delta\psi + \sin\Delta\varphi\sin\Delta\psi & \cos\Delta\theta\cos\Delta\varphi & \\ \sin\Delta\varphi\sin\Delta\theta\cos\Delta\psi + \cos\Delta\varphi\sin\Delta\psi & -\cos\Delta\theta\sin\Delta\varphi & \\ -\cos\Delta\theta\sin\Delta\psi & & \\ \cos\Delta\varphi\sin\Delta\theta\sin\Delta\psi + \sin\Delta\varphi\cos\Delta\psi & & \\ -\sin\Delta\varphi\sin\Delta\theta\sin\Delta\psi + \cos\Delta\varphi\cos\Delta\psi & & \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\Delta\psi$ 为相对安装偏航角, $\Delta\theta$ 为相对安装俯仰角, $\Delta\varphi$ 为相对安装滚转角。主惯导系统姿态阵 C_n^o 补偿相对安装误差后姿态阵 $C_n^{o_1} = C_n^o \cdot C_n^e$ 进行四元数解算直接作为子惯导系统姿态初始四元数完成初始对准开始独立导航解算, 输出前级姿态角。考虑实际工况下主惯导向子惯导装订是在持续运动的环境下进行, 在测试环节中向两级舱体引入运动激励, 模拟动态条件下的导航信息装订过程, 进一步验证相对安装误差的补偿效果。由于子惯导系统直接采用主惯导的装订姿态角作为初始对准结果, 直接通过一段时间内子惯导静态导航的位置误差累计作为指标评估初始装订姿态的精度, 即反映相对安装误差的补偿效果。故而在子惯导系统开始导航解算的同时停止舱体运动, 采集主、子惯导静态导航输出的姿态角剔除相对安装误差即得到子惯导相对于惯导的姿态角误差, 结合子惯导静态导航位置漂移量为测试指标进行判读。综上整理可得惯导系统级间动态对准测试的流程如图 1 所示。

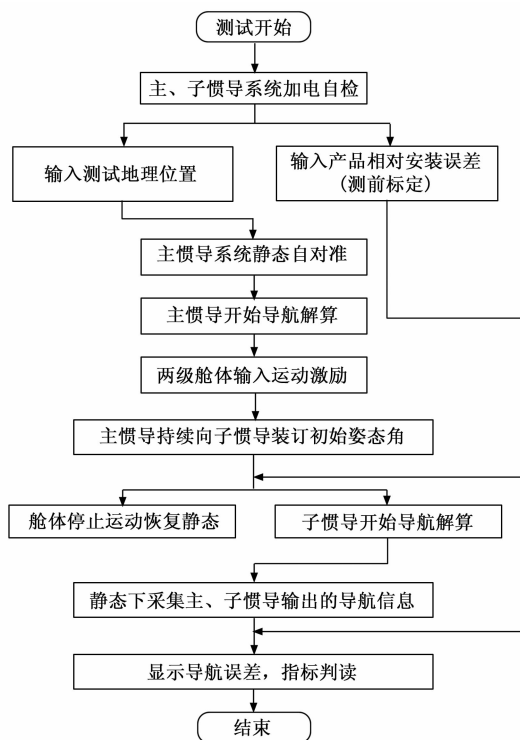


图 1 惯导系统级间动态对准测试流程图

1.2 系统原理方案设计

为实现惯导系统级间动态对准测试全流程, 测试设备需要具备对两级产品供电、同两级惯导系统建立通信、提供产品舱体支撑与运动激励等功能, 两级惯导系统需要设计独立的测试软件完成设计的测试时序, 同时测试设备还要具备上位机软件, 配合产品端测试软件进行数据交互与显示^[20]。

惯导系统级间动态对准测试系统原理方案如图 1 所示。测试设备以基于 PXI 总线的控制系统为核心, 搭载基于 LabVIEW 开发平台的上位机测试软件^[21-23]。两级产品前后舱体结构连接完整置于摇摆转台上, 测试设备通过测试电缆与两级产品形成电气连接, 供电模块采用继电器开关控制实现产品加断电, 通信模块根据产品特征选用适合的通信总线与惯导系统实现双向交互, 完成测试代码上传、导航指令下达、导航信息接收等^[24-25]。此外, 测试设备还借助通信模块对提供产品支撑与运动激励的摇摆转台发送控制指令、监测执行反馈, 实现远程控制。实际测试时, 测试人员在上位机端测试软件输入地理位置信息及标定好的相对安装误差开始测试, 软件配合 PXI 控制系统自动完成一系列测试流程后, 将输出的导航信息进行处理判别, 在上位机界面显示测试结果。

2 测试设备硬件设计

2.1 PXI 控制系统设计

测试设备的主控制系统基于 PXI 总线搭建, 根据测试需求在零槽控制器基础上配置了具备通信功能、继电器控

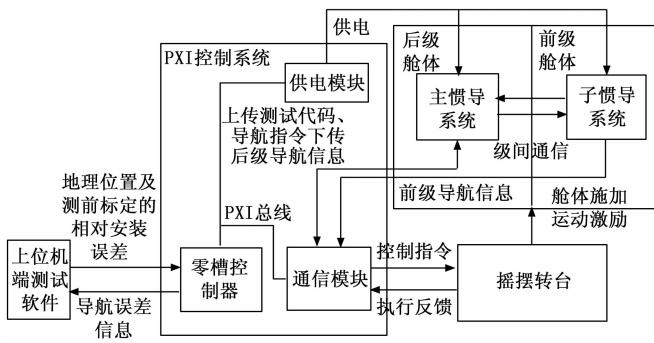


图 2 惯导系统级间动态对准测试系统原理方案图

制功能及信号采集功能的各类测控板卡，搭载 LabVIEW 软件开发平台，良好的驱动适配可以方便的地成板卡功能的调用；基于平台开发设计的惯导系统级间动态对准测试软件提供了人机交互界面，实现测试流程中必要的信息显示与状态监控。

PXI 控制系统采用集成化设计，零槽控制器作为计算中心与总线中枢，提供了多个板卡槽位以便功能拓展。槽位之间分配独立的物理地址，上位机端测试软件通过访问指定的物理地址完成对相应板卡的驱动控制。本设计选用的 PXI 控制系统组成如图 3 所示，所选零槽控制器型号共有 8 个槽位，配置了一块 2 通道 1553B 总线通信板卡和一块 8 通道 422 总线通信板卡覆盖测试所需通信需求；配置一块 16 通道继电器控制板卡，满足产品供电线路的控制需求；配置一块 2 通道示波器测量板卡，实现对摇摆转台执行反馈信号的采集监测。剩余槽位考虑冗余设计，可根据被测产品的特性与要求新增功能板卡，增强硬件设计的灵活性和兼容性。

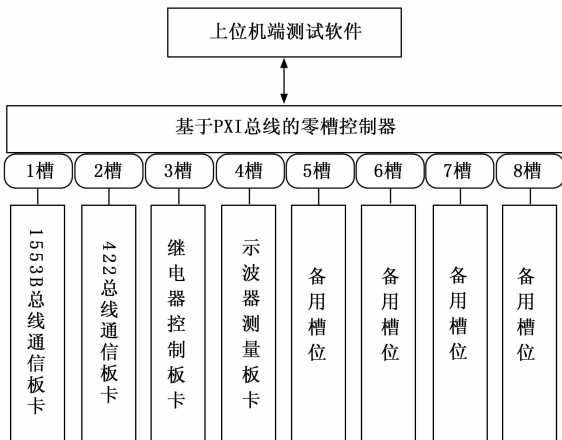


图 3 PXI 控制系统组成示意图

2.2 供电模块设计

考虑对产品提供功率电源的安全性，测试设备内部配备的直流电源选用成熟可靠的货架产品，满足两级惯导系统的供电需求，同时保证充分的冗余设计。两级惯导系统同时工作功率较大，测试设备的供电模块设计采用三级输

出控制，独立于产品供电的设备电源提供 12 V、24 V 以驱动控制电路，原理如图 4 所示。由继电器板卡控制 12 V 控制电源通断，驱动 K1 继电器开合；而 K1 控制 24 V 控制电源通断，驱动 K2 接触器开合，实现直流电源向产品输出。通过三级输出控制，K1 工作电流不大于 50 mA，K2 工作电流不大于 5 A，测试设备各器件和板卡均达到了降额要求。此外，基于直流电源的 LAN 通信功能，在上位机端通过软件程控电源完成电压限流参数设置与输出，降低人为误操作的风险。

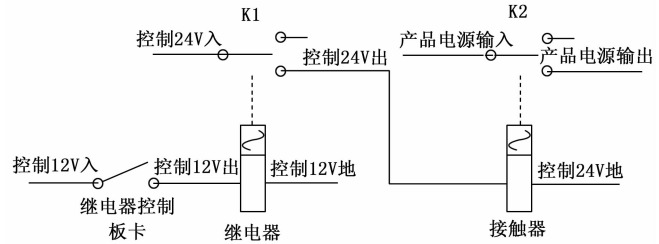


图 4 三级输出控制原理示意图

2.3 通信模块设计

测试设备的通信模块由通信板卡配合测试电缆连接产品舱外电气接口实现，依据两级惯导系统及外围设备的实际需求进行板卡通道资源的分配，后级主惯导系统中高精度惯组单元的对外接口采用 1553B 总线通信，用于接收测试装订的地理位置信息进行自对准；而前后级惯导系统中计算机单元的对外接口采用多路 422 总线通信，涉及测试代码上传、导航和控制信息交互等多项用途。此外，测试设备与摇摆转台之间也采用 422 总线通信，实现远程控制。

2.4 摇摆转台设计

为了对两级产品提供有效支撑和运动激励，摇摆转台配套设计了测试工装与产品机械接口进行适配，并通过前后抱箍与工装、前后级实现稳定的机械连接。摇摆转台的主体由台体组合和控制箱组成，如图 5 所示。控制箱内集成控制电路与电源变换电路，可驱动台体实现 4°/1 Hz 滚动、1°/1 Hz 水平面内摇摆以及 ±45°、±90°等固定角度的滚转。

测试设备通过线缆连接控制箱，除了远程控制采用的 422 总线之外，还将台体后箱体内电机驱动器的 DA 输出引入示波器测量板卡，实时采集输出波形作为对摇摆转台的状态监测。

3 测试软件设计

3.1 软件方案设计

惯导系统级间动态对准测试软件方案设计分为产品端与设备端两部分^[26]。设备端测试软件基于 LabVIEW 软件平台开发，软件功能层级如图 6 所示，接口层按照设备内部的电气接口设计和底层通信协议封装接口函数，便于驱动层开发实现底层逻辑调用。驱动层软件根据测试时序流程进行设计，对测试流程中的典型测试环节按所需功能模块进行划分封装。驱动层的调用采用顺序结构便于实现自

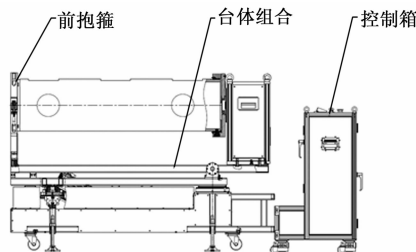


图 5 摇摆转台组成示意图

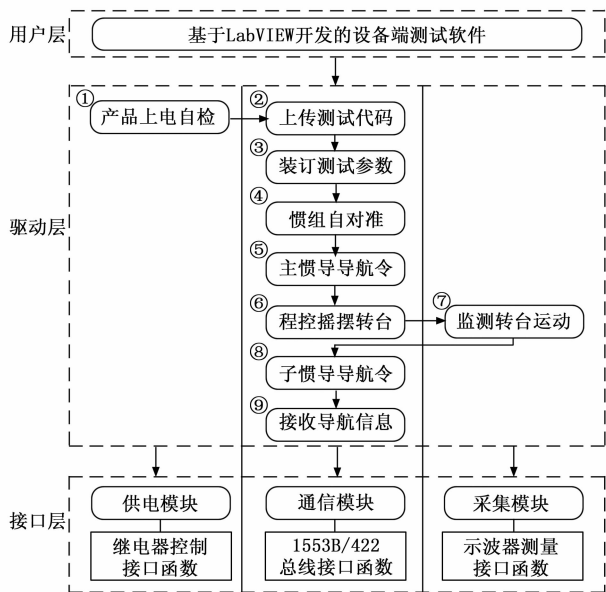


图 6 设备端测试软件功能层级示意图

自动化, 设备端与产品端测试软件的交互遵循规定的通信协议, 每个封装代表的测试环节都设计不同的指令字进行识别区分, 通过收发指令字与回告的方式可以稳定地配合运行。用户层搭建友好的人机界面完成与用户的交互操作, 同时全面地显示整个测试流程。

产品端测试软件是在主惯导系统的计算机单元运行的独立测试程序, 测试代码基于VxWorks操作系统的平台开发, 由串口通信上传至计算机单元暂存, 在主惯导系统上电自检之后自动运行。软件整体架构采用传统的事件触发结构, 设定接收参数装订、惯组自对准、开始导航令等流程子项为独立事件, 事件对应不同的指令字由通信协议规定, 接收到指令即触发事件, 软件根据指令字选项响应, 执行具体的测试活动。

3.2 测试用例的软件实现

设备端测试软件的实现按照图 7 中驱动层标示的 9 个测试环节顺序执行, 设备端测试软件界面如图 7 所示, 设计有“产品加

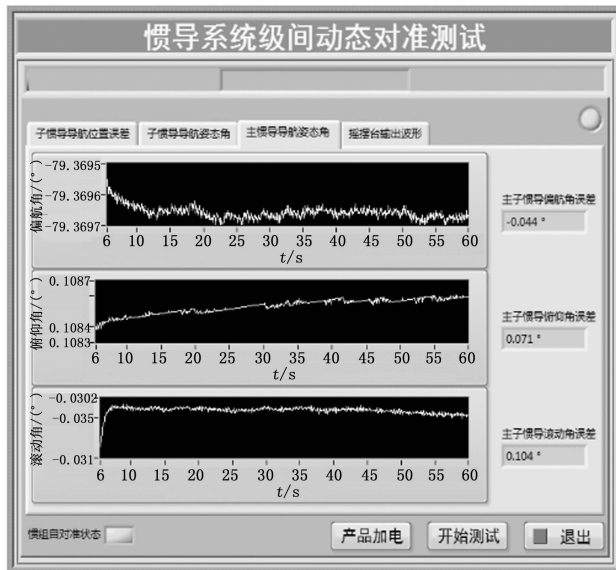


图 7 设备端测试软件界面

电”、“开始测试”及“退出”3个交互按钮, 点击“产品加电”软件自动执行序号①、②测试环节, 供电模块向两级产品同时输出, 主、子惯导系统分别完成上电自检, 随后设备端串口初始化向主惯导系统计算机单元指定位置上传产品端测试软件。上传完成后产品端测试软件自动运行, 产品端测试软件的实现如图 8 所示。此时, 产品端测试软件等待指令输入, 点击“开始测试”, 设备端测试软件自动执行序号③~⑨测试环节, 序号③④⑤⑧环节分别触发产品端测试软件对应的输入指令, 序号⑨环节产品端测试软件会下传缓存的导航数据, 由设备端测试软件接收, 测试结束点击“退出测试”, 软件退出。其中需要进

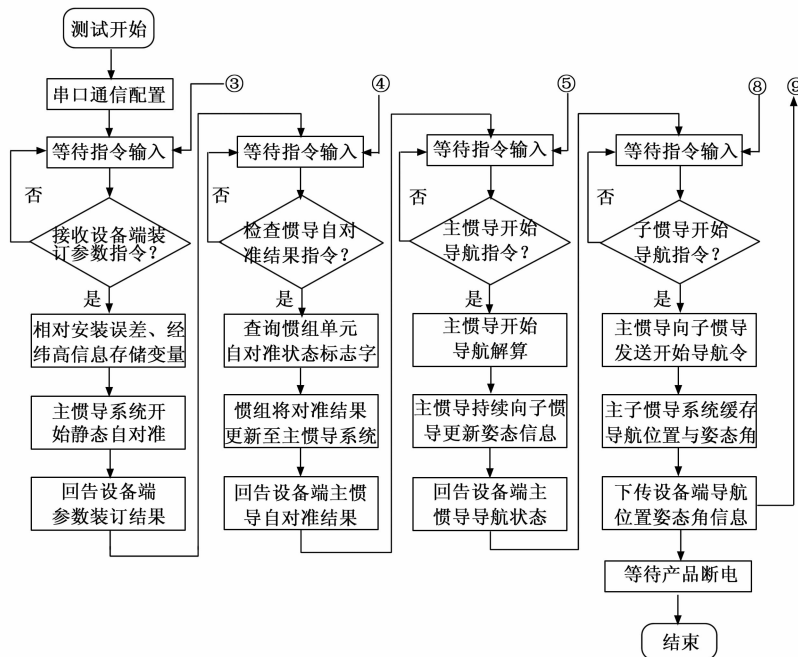


图 8 产品端测试软件实现流程图

一步说明的是,测试用户于软件弹窗输入经纬高、重力加速度及相对安装误差等测试信息,设备端测试软件调用通信模块通过 1553B 总线完成对惯组单元的装订,设备端测试软件调用通信模块通过 422 总线持续通信,查询惯组自对准状态;主惯导系统开始导航解算后,通过主、子惯导系统级间通信持续向子惯导系统更新姿态信息,此时设备端测试软件通过 422 总线程控摇摆转台开始 $4^\circ/1\text{ Hz}$ 滚动或 $1^\circ/1\text{ Hz}$ 摇摆,摇摆转台的运动方式由用户于软件弹窗确认,待两级舱体持续稳定运动一段时间下达停止运动的指令,同时向产品端发送子惯导导航令;子惯导系统以收到导航令时刻的姿态信息结合相对安装误差进行补偿,快速完成初始对准开始导航解算,并于主、子惯导系统同步缓存两者静态导航一定时间内的导航位置、姿态角等信息后续上传设备端。

设备端与产品端软件自动完成上述各项测试环节的交互配合,结合图 6 与图 8 展示的软件交互的逻辑,为保证测试安全性,产品端软件在每个指令输入环节都进行指令字回告,设备端软件以接收判读指令字回告设计故障处理措施,控制软件流程向下运行或中止,尤其在下载导航信息阶段,多个变量长时间缓存形成的数据包容量巨大,采用分包回传的方式,同步验证指令字回告与流水号,保证了测试数据的正确性和完整性;同时,软件设有互锁保护,防止通信异常下的流程错误。

此外,通过设备端测试软件界面的选项卡切换,可以实时监控摇摆转台的运动状态,最终软件接收的主、子惯导静态导航姿态角及导航位置误差作了图形化显示,测试结果由软件自动判读,指示灯显示,测试数据及结果也一并后台作存储,便于事后分析追溯。

4 测试系统的验证与应用

4.1 测试验证与分析

惯导系统级间动态对准测试以子惯导相对于主惯导的姿态角误差与子惯导静态导航的位置漂移量为测试指标,两指标之间满足关系式:

$$L_c = \frac{1}{2} g \sigma_c t^2 \quad (2)$$

其中: σ_c 为子惯导相对相对于导的姿态角误差指标,单位是弧度制, g 为重力加速度, t 为静态导航时间,根据两级产品导航精度要求,设定主、子惯导系统的三轴姿态角误差均小于 0.25° 为指标,由此可得子惯导静态导航的位置漂移量指标为 $L_c \leq 77\text{ m}$ 。

按摇摆转台对两级产品输入 $4^\circ/1\text{ Hz}$ 滚动和 $1^\circ/1\text{ Hz}$ 摇摆两种激励模式分别进行测试结果如图 9、图 10 所示,两次测试使用相同的装订参数,两级产品舱体初次装配后进行了测前标定,得到的相对安装误差分别为滚动角 -0.136° 、俯仰角 -0.209° 、偏航角 0.133° ,测试场地实测的经纬高及重力加速度分别为 30.972° 、 121.217° 、 10 m 和 9.794 m/s^2 。测试结果显示两种模式下的子惯导系统静态导航的位置漂移量及主、子惯导系统三轴姿态角误差均在指

标范围内,验证标定的这组相对安装误差数据的补偿效果可以满足导航需求。

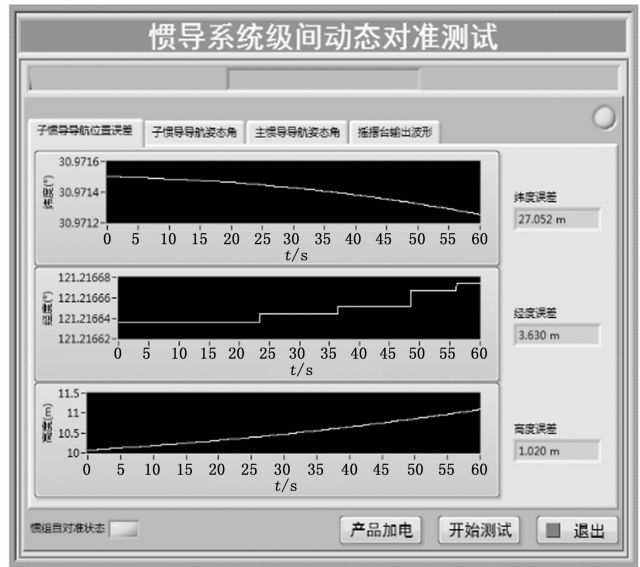


图 9 输入 $4^\circ/1\text{ Hz}$ 滚动激励下的测试结果

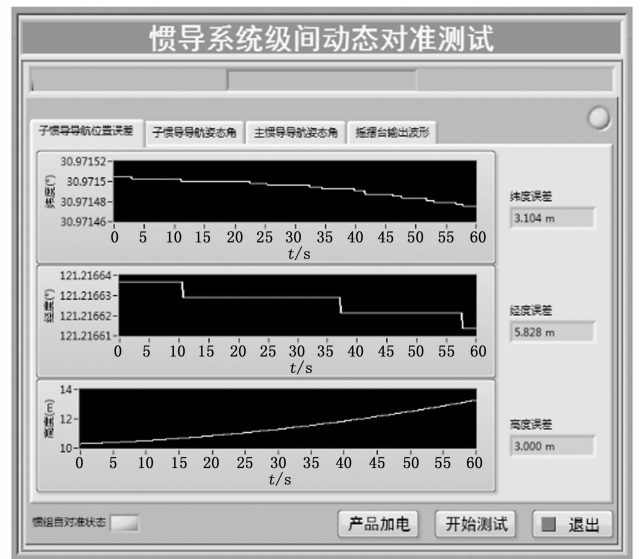


图 10 输入 $1^\circ/1\text{ Hz}$ 摇摆激励下的测试结果

在产品经历振动试验后及二次拆装后,使用相同的测试参数进行测试,对比结果如表 1 所示。通过图表对比可以发现振动试验之后,测试结果变化在指标范围内反映了产品在经历振动环境之后相对安装误差没有发生明显的变化,尚在要求的范围之内。然而在产品舱体经历拆装之后,输入滚动激励下的子惯导系统静态导航纬度误差超差,输入摇摆激励的主、子惯导系统俯仰角和滚动角误差大于 0.1° ,较之前明显偏大,说明产品拆装之后舱体结构状态改变,两级惯导系统相对安装误差发生了较大变化,原先标定的相对安装误差已无法使用,需要重新进行标定。

表 1 在不同产品状态下使用相同测试参数的结果对比

测试状态	测试指标	产品初装测试	振动试验后测试	产品拆装后测试
输入 4°/1 Hz 滚动激励	偏航角误差/(°)	-0.044	-0.037	-0.015
	俯仰角误差/(°)	0.071	0.052	0.044
	滚动角误差/(°)	0.104	-0.116	-0.237
	纬度误差/m	27.052	37.917	80.031
	经度误差/m	3.630	8.789	10.986
	高度误差/m	1.020	3.630	1.180
输入 1°/1 Hz 摇摆激励	偏航角误差/(°)	-0.019	-0.039	0.003
	俯仰角误差/(°)	0.077	0.045	0.132
	滚动角误差/(°)	0.038	-0.011	0.177
	纬度误差/m	3.104	2.550	1.552
	经度误差/m	5.828	0.764	3.630
	高度误差/m	3.000	1.570	5.140

4.2 级间通信时延问题改进

经过对两级产品多次测试结果的分析发现, 产品朝东向水平摆放时, 输入 4°/1 Hz 滚动激励下的子惯导系统静态导航纬度误差相较于输入 1°/1 Hz 摇摆激励下的结果明显偏大, 而产品朝北向水平摆放时, 输入 4°/1 Hz 滚动激励下的子惯导系统静态导航经度误差相较于输入 1°/1 Hz 摇摆激励下的结果明显偏大。对于这具有一致性规律的现象进行分析发现, 两级惯导系统之间的通信链路可能存在时延, 子惯导系统收到来自主惯导系统装订的最后一包初始姿态角数据时, 摇摆转台尚未能恢复静止, 到子惯导系统开始对准时刻实际产品姿态已经发生变化, 进而影响了子惯导系统初始对准的精度, 造成最终的导航误差较大, 而滚动激励下的角速度输入相较摇摆激励偏大进一步放大了时延对测试结果的影响。根据产品摆放从朝东变换到朝北, 测试结果纬度误差偏大变换到经度误差偏大, 也进一步印证了主、子惯导系统之间滚动角偏差较大。

通过进一步试验测算, 综合最终装订的初始滚转角、子惯导系统开始对准时刻的主惯导系统滚转角、装订时刻的摇摆转台角速度等信息推算整个两级惯导系统的通信延时在 10~20 ms 左右, 对此在测试软件上设计 15 ms 的时延补偿, 即以最后一包主惯导系统装订的姿态角和角速度数据, 结合子惯导系统自身敏感的姿态角速度计算 15 ms 之后的姿态角数据作为子惯导系统的对准初值。对测试软件增加时延补偿后以相同的测试状态对产品进行 3 次测试, 结果如表 2 所示。

表 2 软件增加 15 ms 时延补偿后的测试结果

测试状态	测试指标	测试序号 1	测试序号 2	测试序号 3
输入 4°/1 Hz 滚动激励	偏航角误差/(°)	-0.017	-0.016	-0.015
	俯仰角误差/(°)	0.047	0.046	0.043
	滚动角误差/(°)	0.007	-0.001	0.015
	纬度误差/m	9.424	6.985	13.526
	经度误差/m	3.630	2.197	8.693
	高度误差/m	4.670	4.470	6.290

由表 2 可以发现滚动激励下导航误差偏大的现象消除, 级间通信时延影响导航误差的问题得到显著改善。这一改进使得测试方法对相对安装误差的检测结果和补偿效果判别更加准确, 同时也反向对产品实际飞行工况下解决通信时延问题提高导航精度提出了设计参考。

5 结束语

针对多级航天装备需要快速检测和评估惯导系统级间相对安装误差标定结果及补偿效果的要求, 提出了一种惯导系统级间动态对准测试的总体方案, 设计了一套自动化检测惯导系统级间相对安装误差的测试设备, 通过对接产品测试, 验证了测试系统能够快速判别级间相对安装误差标定结果的有效性。通过对多组测试结果的分析发现了级间通信时延问题并改进了测试方法, 进一步提高级间相对安装误差检测的准确性。

参考文献:

- [1] 赖文星, 王创维, 顾村锋, 等. 一体化防空协同组网作战研究 [J]. 空天防御, 2022, 5 (4): 92-96.
- [2] 范晋祥, 刘益吉, 李 宁, 等. 精确打击体系智能化的发展 [J]. 空天防御, 2023, 6 (4): 1-11.
- [3] 李 杰, 梁玉琴, 李昞雯, 等. 一种基于联邦滤波的 SINS/GNSS/RA 弹载多源组合导航算法 [J]. 上海航天 (中英文), 2023, 40 (2): 106-111.
- [4] 李 杰, 陈安升, 陈 帅, 等. 多源组合导航系统故障检测技术研究 [J]. 导弹与航天运载技术 (中英文), 2020 (3): 86-91.
- [5] 吕维维, 程向红, 邱 伟, 等. 基于弹载捷联惯性导航系统精确导航的双欧拉全姿态方法 [J]. 上海航天, 2019, 36 (1): 34-42.
- [6] QU C Y, LI J L, ZHANG W. Improved integrated navigation method of micro position and orientation system based on installation error angle calibration [J]. Measurement Science & Technology, 2022, 33 (9): 1-9.
- [7] NIU M, MA H Y, SUN X L, et al. A new self-calibration and compensation method for installation errors of uniaxial rotation module inertial navigation system [J]. Sensors, 2022, 22 (10): 3812-3812.
- [8] 安克轲, 熊 智, 王 融, 等. 空天飞行器星敏感器安装误差在线标定方法 [J]. 导航定位与授时, 2022 (2): 82-90.
- [9] 张莺莺, 张晓明, 高丽珍, 等. 弹载磁测系统等效安装误差的在线标定与补偿 [J]. 计算机测量与控制, 2021 (8): 158-162.
- [10] 王 勇, 黄 龙, 潘树国. 舰载发射装置捷联惯组正交安装误差标定方法 [J]. 舰船科学技术, 2021 (9): 165-172.
- [11] ZHANG J, LI J, HUANG Y, et al. Analysis and compensation of installation errors for rotating semi-strapdown inertial navigation system [J]. IEEE Access, 2019, 7: 101019-101030.

(下转第 110 页)