

一种液浮陀螺干态自动测试系统设计与实现

张孝贤¹, 李晨光², 李兴军¹, 苗天雷¹, 贺宏宇¹

(1. 北京轩宇空间科技有限公司, 北京 100086; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100086)

摘要: 液浮陀螺仪在干态时需要测试浮子回零特性、浮子与其他零件间摩擦特性、导电游丝力矩特性等; 传统使用标准仪表进行手动测试存在效率低和测试结果一致性差等问题, 严重影响产品研制和生产; 针对上述问题, 提出采用计算机控制技术和力矩反馈控制的方法实现液浮陀螺干态自动化测试; 测试计算机控制该测试系统内激励模块和采集模块工作, 运行软件算法实现闭环控制; 试验表明自动测试系统可将浮子稳定时间从大于 10 s 缩短至 2 s 内, 浮子调零时间由不确定收敛至 30 s 内, 大幅提升了测试效率, 同时计算机执行测试流程和时序稳定可靠, 测试数据一致性好; 测试系统整体上有助于提升我国液浮陀螺的产品性能和研制生产效率。

关键词: 液浮陀螺; 干态; 自动测试; 零位输出; 浮子

Design and Implementation of Automatic Testing System for Liquid Floated Gyroscope in Dry State

ZHANG Xiaoxian¹, LI Chenguang², LI Xingjun¹, MIAO Tianlei¹, HE Hongyu¹

(1. Beijing Sunwise Space Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100086, China)

Abstract: As a liquid floating gyroscope is in a dry state, it is necessary to test the characteristics of a float returning zero, the friction between the float and other parts, and the torque of a balance spring wire; The traditional manual testing by standard instruments has problems such as low efficiency and poor consistency of testing results, which seriously affects product development and production; To address the above issues, a method for using computer control technology and torque feedback control is proposed, which achieves the automatic dry state testing of liquid floating gyroscopes; The testing computer controls the excitation module and acquisition module of the testing system, then running software algorithms to achieve its closed-loop control; Experimental results show that the automatic testing system can shorten the stabilization time of the float from more than 10 s to within 2 s, with a converge from uncertainty to within 30 s, greatly improving the testing efficiency; Meanwhile, the computer runs the testing process and timing stably and reliably, with a good consistency of testing data; The testing system can help to improve the performance and efficiency of liquid floating gyroscopes in China.

Keywords: liquid floating gyroscopes; dry state; automatic testing system; zero position output; floats

0 引言

近年来, 随着惯导技术的发展, 光纤陀螺、激光陀螺、静电陀螺、振动陀螺和微型固态惯性器件等新技术、新产品已经有了广泛的应用^[1], 但是传统的液浮陀螺在精度上依然占有绝对优势。目前, 在航空、航天及兵器等领域, 高精度、高可靠及长寿命的惯导系统依然大量使用液浮陀螺, 世界各国都竞相研究出更高精度的液浮陀螺产品^[2]。

液浮陀螺是一种精密复杂的惯性敏感设备, 由陀螺马达、浮子、导电游丝、宝石轴承、角度传感器、力矩发生器及浮液等组成^[3]。陀螺马达提供陀螺动量矩; 浮子组件其内装有电机, 外部充满悬浮液体; 导电游丝用来传递电信号, 其一端焊在浮子上, 另一端焊在壳体的接线柱上^[4]; 宝石轴承将浮子定位于支承中心; 角度传感器将浮子组件相对于壳体的机械转角转化为电信号; 力矩发生器利用电磁原理产生力矩; 浮液用来使浮子所受的浮力与该组件的重力完全平衡。

收稿日期:2024-09-03; 修回日期:2024-10-16。

作者简介:张孝贤(1983-),男,大学本科,工程师。

引用格式:张孝贤,李晨光,李兴军,等.一种液浮陀螺干态自动测试系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2025,33(10):7-14.

液浮陀螺生产工艺非常复杂,如果灌封后测试发现问题,则需要经过拆卸、清洗、维修、重新组装等过程,这将会带来损坏其他零件的风险;同时人工、材料等成本也会大幅上升。由此可见,灌封前测试是液浮陀螺研制生产过程中的一个重要环节。

文献[5]系统介绍了液浮陀螺等惯性器件生产过程中的关键检测点和检测方法,文章指出生产过程中的检测的重要性,文章侧重于生产加工过程中机械尺寸、马达动态力矩、密封性等方面检测。这些方法为陀螺成品率提供了重要支撑,但是在干态电性能测试方面未覆盖全面。

文献[6]指出导电游丝焊接后的干扰力矩通常采用监测角度传感器输出来判断,该方法受限于传感器的灵敏度,测量误差大。文章提出了力反馈控制回路的方案测试导电游丝干扰力矩,该方案具有易于工程实现、测试一致性好的特点。

目前,液浮陀螺生产厂家在干态测试手段也不多,测试方式大多是采用标准仪表进行人工测试、记录,判读基本靠经验,测试周期长、测试结果一致性差、测试覆盖率低,对长周期或偶发问题无法跟踪定位,严重影响陀螺产品的交付进度和技术升级^[7]。

实践中,液浮陀螺干态出现的问题主要集中在以下几点:

- 1) 导电游丝装配对称性差,或受外力变形,导致浮子无法回零^[8-9];
- 2) 轴承等零件间摩擦力过大,导致干扰力矩过大,影响陀螺性能;
- 3) 壳体内有多余物,导致浮子等活动机构卡死或力矩不正常^[10-11];
- 4) 手动测试效率低,测试数据一致性差。

为解决上述面临的问题,经过分析,在液浮陀螺内零件组装完毕灌充液体前这个关键节点进行比较全面的干态测试,可以提前发现零件本身、组装、多余物等方面的问题。

1 系统结构及原理

液浮陀螺干态自动测试系统主要由测试计算机、激励电源、高精度电流表、可变电容箱、可变电阻箱、测试电缆、测试软件等组成。系统整体采用标准化、模块化、通用化的思想进行方案设计,测试系统总体结构如图1所示。

测试计算机是系统的大脑,运行测试软件控制串口模块、高精度恒流源模块、电压采集模块等硬件模块工作,同时对测试数据进行存储、处理、分析并出具测试报告。

激励电源模块可以输出固定频率的正弦波电压,为

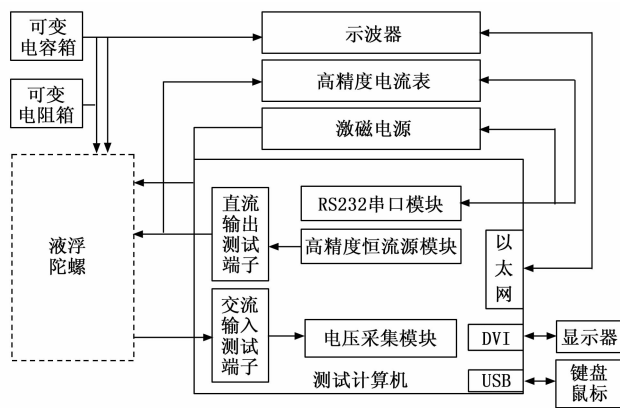


图1 测试系统总体结构框图

被测陀螺传感器提供交流激励信号,由测试计算机通过RS232 串口控制。

可变电容箱和可变电阻箱用来对陀螺传感器零位进行补偿。包括传感器输入端的电阻补偿和传感器输出端的电容补偿。补偿为测试前一次性补偿,并且为了避免不必要的干扰,补偿装置采用机械旋钮开关控制。

高精度电流表用来校准测试系统输出的小电流信号,通过RS232 串口传送给测试计算机。

示波器用于采集陀螺仪输出信号波形,采集结果通过以太网接口传送到测试计算机。

测试电缆用于测试系统与被测液浮陀螺之间电源和信号连接。

测试系统主要采用力矩反馈的闭环控制方法^[12],原理如下:

测试时,激励电源给陀螺提供激励信号后,陀螺本体上的位置传感器输出陀螺浮子转动角度信号,输出信号与激励电源同频率,相位相同或相反,幅值与转动角度成正比^[13]。在理想情况下,即无摩擦力且导电游丝力矩对称的情况下,浮子将处于中心位置,传感器输出应该为0。实际状态下,浮子会在干扰力矩(摩擦力、游丝力矩等)的作用下偏离中心位置,传感器输出也会偏离0,浮子偏离中心点越远,传感器输出信号幅值越大^[14-15]。

测试计算机运行测试软件控制电压采集模块采集激励电源和陀螺传感器输出信号,通过信号幅值和相位关系计算浮子当前的位置。将浮子当前位置和目标位置信息导入算法控制模块后,算法控制模块计算出对应的力矩控制参数,计算机根据控制参数再控制高精度恒流源模块输出力矩电流,驱动陀螺内的力矩器输出反馈力矩从而控制陀螺浮子转动,从而实现闭环控制。

根据实际需要,陀螺干态测试重点围绕陀螺回零特性、浮子与其他零件间摩擦特性、导电游丝力矩特性等方面开展^[16]。具体采取如下测试项实现:

1) 回零测试:浮子位置如果不在零位,通过外加激励的方式使浮子回到零位。通过此测试项可以评估游丝力矩是否平衡,间接判断出是否有焊接、多余物等异常。

2) 最大输出测试:浮子从零位开始,逐渐增大力矩电流,测试浮子正向或反向输出能够达到的最大值。通过该测试项可以评估陀螺浮子及游丝的运动行程范围是否正常,以及游丝力矩特性。

3) 最小止档电流测试:浮子从零位开始,施加固定大小脉冲力矩电流,测试能够使浮子达到正向或反向最大值的最小力矩电流值。该项主要用来评估浮子最大位置处的摩擦力矩及游丝力矩的特性。

4) 开环测试:浮子从零位开始,施加固定大小力矩电流,浮子稳定后使力矩电流为零;然后重新调零,施加反向固定大小力矩电流,浮子稳定后使力矩电流为零。记录施加力矩电流前后陀螺输出值。该项主要用来评估零位附近的摩擦力矩及游丝力矩的特性。

5) 滞回特性测试:浮子从零位开始,逐渐增大力矩电流,到陀螺输出最大值,然后逐渐减小力矩电流,到零位后继续往负值方向,直到反向陀螺输出达到最大值,然后逐渐增大力矩电流,直到浮子再回到零位。在这个过程中力矩电流从一个值变到另一个值后,需要等陀螺输出稳定后,再记录力矩电流和陀螺输出的值,把过程中全部值记录下来绘成曲线即为滞回曲线。该测试项综合评估陀螺干态下的功能及性能指标^[17]。

由上可知,在进行陀螺干态特性测试过程中,浮子回零是项基础工作,其他测试项都需要频繁地使浮子回到零位,并且是外部施加的力矩为零时保持在零位。浮子位置调零也是液浮陀螺干态测试中一个难点,主要有以下原因:

1) 由于陀螺未充入浮液,浮子没有阻尼,而摩擦力矩非常小,浮子很难停止在零位;

2) 由于浮子回到零位后力矩电流要求为零,往往通过力反馈法使浮子回到零位时撤掉控制力矩,浮子会往原来的位置回归,再次偏离零点;

3) 由于浮子受到给陀螺马达供电的游丝力矩作用,游丝力矩不平衡会导致浮子偏离零点位置。

以往手动使浮子位置回零的方法为:给陀螺施加一次微小震动使得浮子发生位移,浮子震动在游丝力矩的作用下会围绕零点进行摆动,在摩擦力矩的作用下摆动幅值会逐渐减小,浮子逐渐稳定。如果一次震动后最终浮子仍然偏离零点,则再次施加一次微小震动,直到浮子回到零点。手动方法存在明显的缺点:

1) 调零效果全凭操作者的经验,震动力度、时机、位置、频率等非常难以把握,完成调零所需时间通常需要几分钟时间;

2) 外加震动可能会影响浮子、宝石轴承寿命,甚至损害这些零件;

3) 无法用量化指标评价调零效果,零点位置一致性难以保证^[18]。

为解决上述问题,对陀螺干态下调零原理建立了理论模型,分析了浮子受力情况;搭建基于 PCI 工控机的自动化测试系统,由测试计算机控制信号液浮陀螺测试时所需要的激励信号输出,并实时采集陀螺的输出信号;采用互相关算法进行激励电源和传感器信号的相位计算,用于识别浮子正反向,代替了高精度相位计;采用峰值识别算法计算传感器输出幅值,用于识别浮子位置偏差,代替了交流毫伏计;创新性地提出了一种自动控制算法,代替了手动外加震动调零方法,采用预测、阻尼、自适应等算法,实现浮子的快速、稳定调零,调零速度可达 30 s 以内,并能够保证调零效果的一致性,调零后位置传感器输出值在 3 mV 以内。

2 系统硬件设计

系统核心硬件主要包括激励电源、恒流源模块、可变电阻箱、可变电容箱、电压采集模块及高精度电流表等。为兼容多款液浮陀螺的测试,测试系统的技术指标进行了兼容性和冗余设计,硬件实现功能和性能指标如下:

1) 交流激励电源输出:测试系统需要为被测陀螺传感器提供 3 路交流激励信号,输出频率 7~12 kHz 可调,频率稳定性 1×10^{-5} ;输出电压 3~20 V 可调,电压稳定性 1‰。

2) 控制力矩电流输出:测试系统采用力矩反馈控制方法进行陀螺浮子位置的调整,所以测试系统需要为陀螺内的力矩器提供控制电流,该电流精度越高,控制效果就越好。根据实际需要,测试系统提供的电流输出范围为 $-20 \sim +20$ mA,输出精度优于 1 μ A。

3) 传感器输出信号采集:根据测试原理可知,测试系统需要采集陀螺传感器的输出信号,采集范围为 $-1 \sim 1$ V,精度 ± 2 mV。

4) 零位补偿功能:测试过程中,测试系统与陀螺是通过测试电缆进行连接,测试电缆的分布电容会对陀螺传感器的输入、输出端信号带来噪声、幅值、相位等方面的影响,造成浮子位置的误判。为降低这种干扰,测试系统采取阻容网络匹配方式来抵消或抑制分布电容的影响,在传感器信号输入端串接匹配电阻,削弱干扰信号对传感器的噪声影响;在传感器信号输出端增加阻容网络进行匹配,调节输出信号相位、幅值、噪声等。根据实际需要,测试系统需提供可变电容箱,量程 0.001~1 μ F,分辨率为 0.001 μ F;提供可变电阻箱,量程为 0.1 Ω ~100 k Ω ,分辨率为 0.1 Ω 。

5) 信号校准功能: 为保证测试系统的精度, 需要对力矩电流输出信号和传感器输出信号采集功能进行校准。

2.1 测试计算机

测试计算机采用研华公司标准产品 IPC-610L 实现。机箱内有 4 个 PCI 扩展槽, 可安装 RS232 串口、高精度恒流源、电压采集等模块。

2.2 RS232 串口模块

RS232 串口模块用来扩展计算机的串口资源, 通过测试电缆与高精度电流表、激磁电源等连接, 实现计算机与他们的信息交互。该模块采用 MOXA 公司标准产品 CP-104UL, 该板卡提供 4 路 RS232/RS422 标准串口, 波特率、数据格式等可配, 可以满足测试系统使用要求。

2.3 高精度恒流源模块

高精度恒流源模块用来实现力矩电流输出功能, 计算机通过 PCI 总线直接控制其输出状态。采用公司自主研发的产品 PCI-3601, 该产品提供 1 路 $-20 \sim +20$ mA 电流信号, 输出精度优于 $1 \mu\text{A}$ 。该产品的原理如图 2 所示。

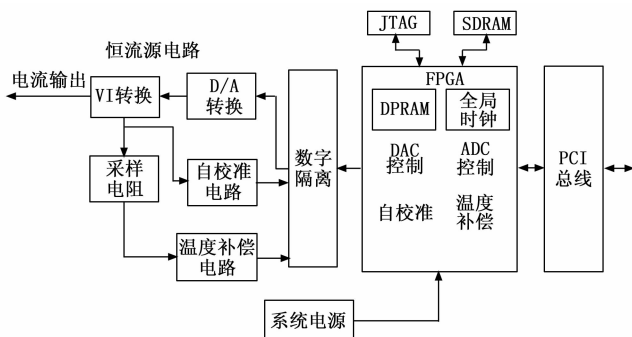


图 2 恒流源电路原理框图

为实现恒流源高精度的输出和自校准信号采集, 特采用 18 位分辨率的高精度 AD 芯片 AD7960 和 18 位分辨率的高精度 DA 芯片 AD760 来实现。电压基准、运放和阻容等模拟电路部分器件均采用低温漂、高线性度的器件。器件布局也进行了特殊处理, 保证温度敏感器件与高热量器件保持较远距。散热方面采用导热和风冷相结合的手段, 保证良好的散热环境, 避免温度剧烈变化。

2.4 电压采集模块

电压采集模块用来采集陀螺传感器的输出信号, 计算机通过 PCI 总线与其进行通信。该模块采用研华公司标准产品 PCI-1714U, 该板卡可提供 4 通道单端/差分采集通道, 采样率可达 9.6 MSps (每通道), 采集范围 ± 0.5 、 ± 1 、 ± 2.5 、 ± 5 V 可配置, 采集精度 0.4% (± 0.5 V)、0.2% (± 1 V)、0.2% (± 2.5 V)、0.1%

(± 5 V), 可以满足测试系统 0.2% (± 1 V) 的指标要求。

2.5 示波器模块

示波器用于在测试系统和陀螺产品调试时输出信号波形观察与记录, 方便排查。选用泰克 TBS1152B 数字存储示波器实现, 该示波器提供 2 个采集通道, 带宽 150 MHz, 采样率 2.0 Gbps, 记录长度 2.5 k 点。

2.6 高精度电流表

高精度电流表用于力矩电流输出的校准。测试系统输出的电流信号经高精度电流表采集后即可判断高精度恒流源的精度。选用 FLuke-8845A 六位半数字多用表来实现精密电流测量。该表电流测量量程为 $0 \sim 10$ A, 最小分辨率为 100 pA, 满足使用要求。

2.7 激磁电源

激磁电源为被测陀螺传感器提供激励信号, 从而使得传感器能正常工作, 感知浮子位置状态的变化。激磁电源采用上海航裕电源科技公司生产的 HY-AE 系列交流激磁电源, 频率范围 $100 \sim 30\,000$ Hz, 调节分辨率 0.01 Hz, 频率稳定性 1×10^{-5} ; 电压有效值 $0 \sim 30$ Vrms, 调节分辨率 0.01 V, 最大输出电流 2.5 A。可以满足测试系统使用要求。

2.8 可变电阻箱、电容箱

可变电阻箱和可变电容箱主要用来进行测试系统和被测陀螺间的阻容匹配, 抑制干扰信号对陀螺传感器输出信号的幅值、噪声、相位等方面的影响。选用富阳精密仪器厂生产的 ZX21B 型旋钮式电阻箱, 调节范围: $(0 \sim 9) \times (0.1 \sim 10\text{ k}) \Omega$ 。可以满足测试系统使用要求。

选用富阳精密仪器厂的 RX7-0 型精密旋钮式十进制电容箱。电容量: $0 \sim 1.111 \mu\text{F}$; 最小步进: $0.0001 \mu\text{F}$; 可变范围: $(0 \sim 10) \times (0.0001 + 0.001 + 0.01 + 0.1)$ 。可以满足测试系统使用要求。

3 系统软件设计

测试系统软件运行于 Win7 64 位操作系统, 使用 NI 公司的 Labview 开发工具进行开发。

3.1 软件系统架构

测试软件的功能架构如图 3 所示。

从整体功能结构上看, 该架构分为 3 层: 人机交互层、中间层和驱动层。人机交互层用于操作员对整个测试过程的控制、测试数据及图像的显示以及后期的数据处理; 驱动层用于完成对各类硬件及底层文件的控制 and 操作; 中间层主要实现将人机交互层的各类操作转化为驱动层的相关动作, 并将硬件采集到的各类数据处理后传递至人机交互层的界面。

3.2 软件流程设计

整体上软件流程拟采用基于 JKI 状态机架构来实

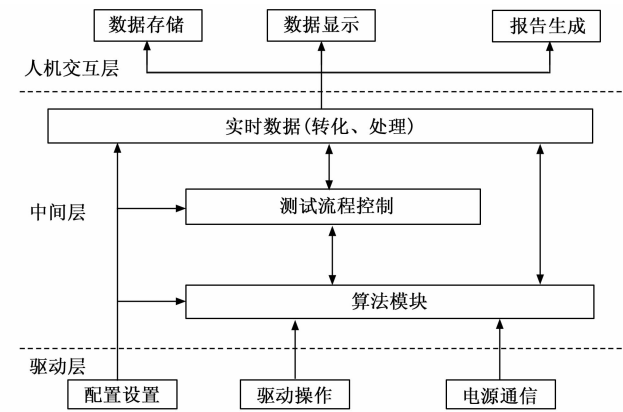


图 3 测试软件功能架构图

现，该架构具有稳定性好，性能稳定，修改容易，调试方便，易于扩展等优点。该软件架构提供了如下功能：

- 1) 基于字符串型的状态机结构；
- 2) 单线程的生产者、消费者模式；
- 3) 基于事件结构，便于捕捉各类事件。

从运行流程上看，软件消息在各个任务引擎，公共消息存储区，消息服务器之间传输，软件总体流程如图 4 所示。

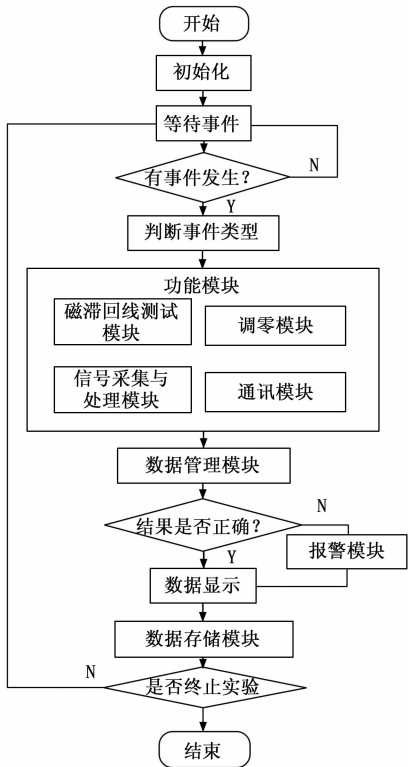


图 4 测试软件总体流程图

测试系统软件的主要业务模块包括信号采集与处理模块、调零控制模块、滞回曲线测试模块等。

3.2.1 信号采集与处理模块

信号采集和处理线程每 50 ms 采集 600 μ s 的励磁

电源和陀螺输出信号，两个被测信号都为 12 kHz 的交流信号，所以可以采集到约 7 个周期的信号。

信号采集与处理模块的流程如图 5 所示。

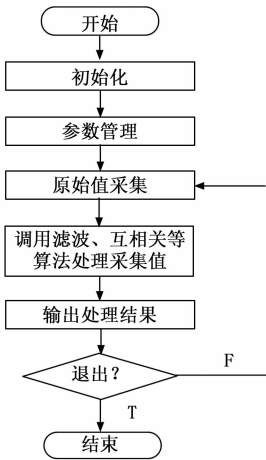


图 5 信号采集与处理流程图

两个信号分别经过低通滤波器滤除高频噪声，截止频率为 2.4 kHz。为了减少界面显示占用内存和对性能的影响，数据经过降采样后再由界面显示。

把互相关算法的输出转换为陀螺输出与励磁电源的相位差值，相位差在 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 之间为同向，相位差在 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 之外为反向。然后给陀螺输出的幅值加上符号，同相位正，反向为负。正向信号波形和反向信号波形分别如图 6、7 所示。

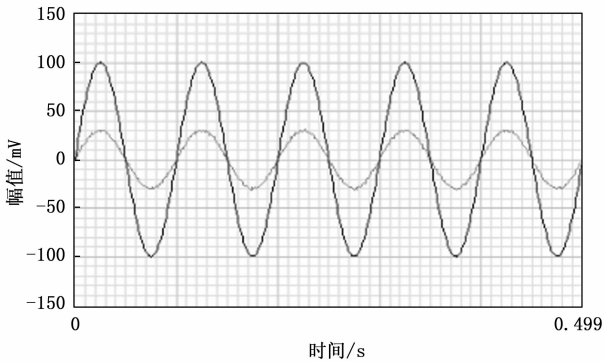


图 6 正向信号波形图

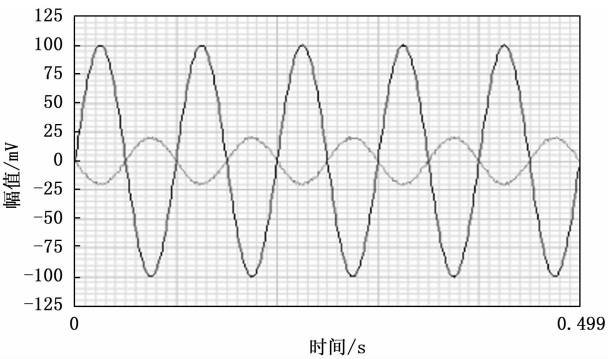


图 7 反向信号波形图

最后把幅值信号放入一个队列中,队列中的数据间隔为 50 ms,数据个数为 60,总共记录 3 s 的幅值数据。

3.2.2 调零控制模块

浮子处于零位是液浮陀螺测试的一个基础状态,所以调零控制就是陀螺测试中最重要最常用的一种操作。由于浮子很容易受到导电游丝力矩的拉扯做振荡运动^[19],自我稳定时间很长(一般需要几分钟),影响整体试验效率,所以快速调零就显得很有必要实现。

调零控制是当检测到浮子不在零位的情况下,通过测试系统的高精度恒流源控制力矩反馈回路产生力矩,从而使浮子产生位移并调整到零位的过程。通过调零测试可以计算出游丝力矩偏差,供装配者调整机械结构,直至满足要求。

调零控制模块的工作流程如图 8 所示,可分解为判断调零是否完成、判断是否输出、计算输出电流大小、电流输出控制算法。

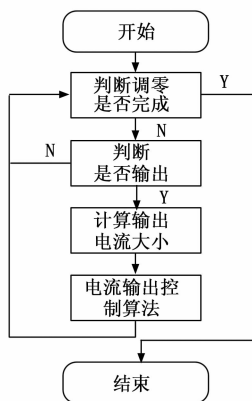


图 8 调零控制流程图

1) 判断调零是否完成:

同时满足以下两个条件,则判断调零完成,此时陀螺浮子已经可以稳定在零点附近,否则需要继续进行调零控制。

条件 1: $V_a < 5 \times V_0$, 表示浮子已经基本稳定 [$V_a = (\text{波峰} - \text{波谷}) \div 2$, V_0 为零点阈值,软件可设,该值越小代表越靠近零点,调节难度也越大];

条件 2: $|V_m| \leq 0.8 \times V_0$, 表示浮子已经达到零位 [$V_m = (\text{波峰} + \text{波谷}) \div 2$].

满足条件 1 时浮子虽然还未完全稳定,但是结合条件 2 可以判断浮子最终可以稳定在零位,所以可以提前预判此时调零结束,从而缩短调零算法的运行时间。

2) 判断是否输出:

同时满足以下两个条件,则判断需要施加力矩电流,进行一次调零控制,否则认为陀螺状态不稳或已达零点附近,不需施加力矩电流。

条件 3: $V_a < 3 \times |V_m|$, 表示浮子波动减小,即将

稳定;

条件 4: $|V_m| > 0.8 \times V_0$, 表示浮子偏离零位。

输出一次力矩电流后,浮子开始振荡,当满足条件 3 时浮子虽然还未稳定,但是波动幅值已经接近波动均值,可以提前预判还需要进行一次力矩电流输出,从而缩短调零算法的运行时间。

3.2.3 滞回特性测试模块

滞回特性是指通过力矩反馈回路对浮子施加等量力矩,测量并记录浮子位置的来回变化情况,从而判断陀螺内是否有问题。一个完整滞回试验控制周期为:施加正向力矩并按步进逐步增大将浮子从零位拖到正向止档(止档就是浮子能移动到的最远位置);再从正向止档按步进逐步减小施加的正向力矩,正向力矩为 0 后再按步进逐步增加反向力矩,直至浮子移动到反向止档;再从反向止档按步进逐步减小施加的反向力矩,反向力矩为 0 后结束控制。每次调整力矩前要等浮子位置稳定。

滞回特性测试流程如图 9 所示。

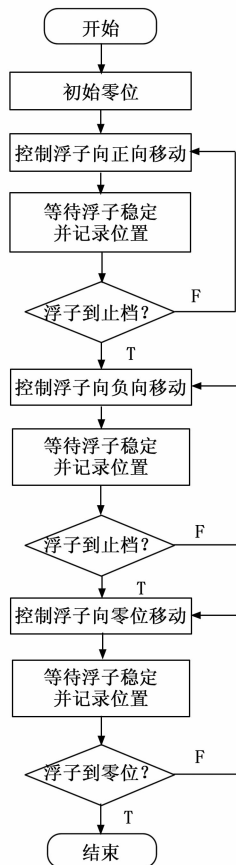


图 9 滞回特性测试流程图

4 实验结果与分析

4.1 基础技术指标测试

基础技术指标测试主要针对硬件产品的功能性能进行测试和校准,包括标准仪器和信号处理模块两类。

示波器、高精度电流表、激磁电源等仪表类标准产

品在出厂时均进行了出厂检验，公司也到有资质的校准机构按照出厂指标进行了校准，均合格。

信号处理模块主要包括恒流源、电压采集等，为确认其指标，特进行了相应的专项测试。恒流源测试通过软件设置恒流源输出，串接高精度电流表采集恒流源输出值，判断是否合格。测试结果如表 1 所示。

表 1 恒流源测试结果

序号	设置值/mA	采集值/mA
1	0	0.000 6
2	1	1.000 4
3	5	5.000 3
4	10	10.000 2
5	20	20.000 2
6	−1	−1.000 1
7	−2	−2.000 1
8	−5	−5.000 2
9	−10	−10.000 4
10	−20	−20.000 5

电压采集模块的测试是通过外加电压信号源，测试软件显示采集到的结果，然后进行信号源设置值与采集值的比对，测试结果如表 2 所示。

表 2 电压采集测试结果

序号	设置值/mV	采集值/mV
1	0	−0.3
2	10	9.3
3	100	100.2
4	500	501.3
5	1 000	999.8
6	−10	−11.3
7	−100	−100.9
8	−200	−200.2
9	−500	−501.4
10	−1 000	−1 001.2

通过上述结果可以看出，测试系统内高精度恒流源指标和电压采集指标均能满足使用要求^[20]。

4.2 调零试验

被测液浮陀螺仪安装在水平支架中，支架放置在实验室稳定平台上，避免陀螺受到震动干扰。控制系统只需要连接陀螺仪的励磁电源、陀螺输出和反馈力矩 3 个信号，控制系统通过屏蔽电缆与陀螺仪的电接口连接，屏蔽皮两端接到陀螺仪外壳和控制系统接地端，尽量减小信号传输噪声。

首先使用控制软件手动输出力矩电流，然后撤掉力矩电流，使陀螺浮子偏离零点，最后运行调零控制算法，使浮子回到零点。

通过对多个陀螺进行测试，并且把浮子位置调整到正向或者反向多个位置进行多次测试，充分验证算法的

稳定性、适应性及健壮性。在算法设计的过程中曾经使用了多种方法，最终确定了一种效率最高、效果最好的控制方法，各控制方法测试结果对比如表 3 所示。

表 3 不同调零方法效果对比

序号	控制方法	效果
1	使用 PID 算法，施加持续力矩电流直接把浮子拉回零点	撤掉力矩电流后，浮子会偏离零点
2	使用 PID 算法，施加脉冲力矩电流，通过多次调整，使浮子回到零点	PID 参数受陀螺差异、环境影响很大，很难确定；调零时间长、不稳定，有时不收敛。
3	使用退磁算法施加持续力矩电流把浮子拉回零点	撤掉力矩电流后，浮子会偏离零点
4	自适应算法：预判、阻尼	调零效果稳定，时间短

实验中本文描述的预判、阻尼、自适应算法所使用的参数如下所示：

- 1) 零点阈值： $V_0 = 3\text{ mV}$ ；
- 2) 阻尼系数： $K = 30$ ；
- 3) 电流调节步长： $I_s = 0.5\text{ mA}$ ；
- 4) 正向最小止档电流： $I_f = 2\text{ mA}$ ；
- 5) 反向最小止档电流： $I_r = -3\text{ mA}$ 。

图 10、图 11 分别为浮子从正向偏离零点位置和反向偏离零点位置测试的结果，每个图中随机选取了 10 次测试，浮子偏离零点的位置基本覆盖了从最小到最大的整个范围，柱状图表示偏离零点的大小，散点图表示调零时间。

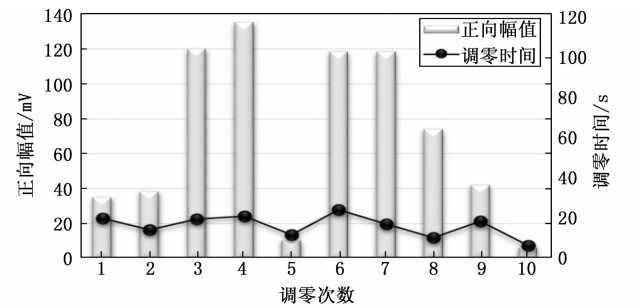


图 10 正向调零实验数据

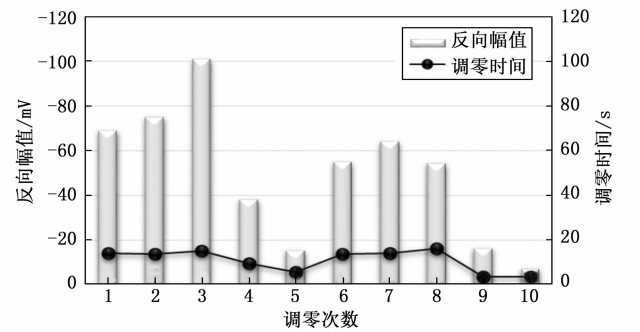


图 11 反向调零实验数据

上述实验结果表明，所设计的调零控制算法能够实现快速调零，不论是浮子从正向位置还是反向位置、不

论偏离大小都能够在 30 s 内调整到零点, 该控制算法有很好的稳定性、适应性。

4.3 滞回特性试验

首先将浮子调到零位, 将力矩控制电流的步进设置为 5 mA, 然后运行滞回特性测试程序进行测试, 正常的陀螺测试出来的滞回曲线如图 12 所示。

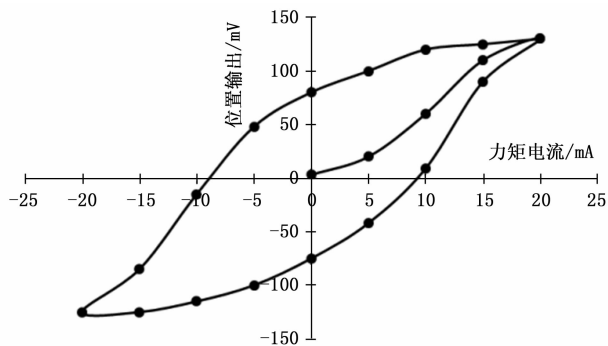


图 12 液浮陀螺干态滞回特性曲线

位置输出信号的幅值反映浮子偏离零点的位置大小, 滞回特性曲线有明显异常的陀螺往往是有问题的, 常见的问题包括:

- 1) 浮子移动过程中有异物阻挡, 导致曲线有波动;
- 2) 导电游丝本身力矩特性不一致, 导致曲线中输出信号范围过小或过大;
- 3) 导电游丝组装对称性差, 导致曲线畸形;
- 4) 浮子与壳体卡住或线路断路, 导致位置信号不变。

5 结束语

液浮陀螺干态自动测试系统采用计算机自动控制技术实现了测试过程自动化, 大幅提升了陀螺干态测试的效率。采集方面, 采用互相关算法、峰值识别算法等实现了浮子偏离方向、噪声中小信号相位差、浮子位置及运动趋势的快速识别与判断。控制方面, 采用阻尼算法控制力矩电流输出, 使浮子稳定过程加快, 由大于 10 s 缩短到 2 s 左右; 采用力矩反馈闭环控制方法使浮子调零时间由不可控调整到稳定在 30 s 以内。另外测试系统还提供测试报告自动生成等功能, 代替人工作业。

测试系统运行的采集和控制流程、时序相对稳定可靠, 从而可以保证控制效果及采集结果都保持很好的一致性, 为陀螺干态测试提供良好的测试手段和判断依据。

此外, 采用自动测试系统避免了手动外加震动可能对浮子宝石轴承造成的损伤, 有助于提高陀螺精度及延长使用寿命。

综上所述, 该测试系统及测试方法产生于液浮陀螺干态测试工程实践, 已应用于液浮陀螺研制、生产、调试过程中, 显著提升了陀螺研制效率和效果。后续我们

将根据实际工作需要继续优化硬件, 改进算法, 提升测试系统的整体性能, 进一步促进我国液浮陀螺研制和生产技术的进步和革新。

参考文献:

- [1] 张宗美. 液浮陀螺与气浮陀螺 [J]. 导弹与航天运载技术, 1982 (4): 48-67.
- [2] 梁阁亭, 惠俊军, 李玉平. 陀螺仪的发展及应用 [J]. 飞航导弹, 2006 (4): 38-40.
- [3] 刘付成, 刘汝滨. 卫星惯性姿态敏感器技术 [J]. 上海航天, 2003 (5): 33-37.
- [4] 颜明. 液浮陀螺导电游丝性能分析 [J]. 中国惯性技术学报, 1997 (4): 42-48.
- [5] 易维坤. 惯性仪表生产过程的检测 [J]. 航天工艺, 1995 (4): 46-57.
- [6] 徐静. 惯性仪表软导线干扰力矩测试技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [7] 熊振伦. 陀螺仪浮子不平衡量测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [8] 刘靖洁, 龙凤, 刘小方. 液浮陀螺精度影响分析 [J]. 航空科学技术, 2010 (2): 22-24.
- [9] 陈建峰, 张之敬, 金鑫. 某液浮陀螺仪浮子在不同偏心下启动时受力仿真 [J]. 兵工自动化, 2014, 33 (10): 44-48.
- [10] 李晓龙, 石永强, 高嘉忆, 等. 基于过机械应力导致液浮陀螺零位跳变的故障分析 [J]. 战术导弹技术, 2015 (3): 95-100.
- [11] 韦欣辰, 程浩, 张弛. 过机械应力导致液浮陀螺零位跳变的故障研究 [J]. 数字通信世界, 2017 (9): 183.
- [12] 尚蒙. 陀螺仪漂移检测系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [13] 田自耘. 陀螺测试技术的发展动态 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1985, A8: 55-61.
- [14] 苏德洋. 陀螺仪浮子静平衡分析——液浮摆动法的数学模型及其解 [J]. 东南大学学报, 1991 (6): 111-114.
- [15] 张琳, 杨涛, 王佳民. 半液浮陀螺浮子的静平衡方法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2007, 3: 74-76.
- [16] QJ1120A-2011, 静压液浮陀螺平台系统测试方法 [S]. 北京: 中国航天标准化研究所, 2011: 1-18.
- [17] 雷少林, 赵小明, 石慧, 等. 液浮陀螺仪浮子迟滞试验检测方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17 (2): 205-209.
- [18] 陈建峰. 制造特性对液浮陀螺仪组件应力状态影响研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [19] 袁利, 田自耘, 郭素云. 液浮陀螺仪浮子组合件动力学分析 [J]. 中国惯性技术学报, 2001 (1): 57-60.
- [20] 颜益安, 王建国, 姜南, 等. 液浮陀螺仪性能指标测试方法的误差分析 [J]. 航空精密制造技术, 2012, 48 (3): 16-18.