

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.02.15

军用装备环境试验设备倾斜摇摆 试验台校准方法

张毅文

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 倾斜或摇摆的力学环境会对军用武器装备各部件产生附加的离心力, 极易引发各部件工作状态失常, 发生性能故障或结构失效, 甚至引发装备整体事故。本文对倾斜摇摆试验台的相关校准方法、校准设备、校准要求进行研究, 达到保证倾斜摇摆试验结果的准确可靠, 满足舰船、潜艇、航母等装备上仪器设备试验过程中量值溯源需求的目的。

关键词: 倾角; 角速度; 失真度

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)02-0076-04

Calibration Method of Incline and Swing Test Bench for Military Environmental Test Equipment

ZHANG Yiwen

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Each component has additional mechanical environmental impact such as centrifugal force, which is very easy to cause abnormal working state of each component, performance failure or structural failure, and even lead to overall equipment accident. This situation can lead to an accident caused by abnormal equipment. This paper mainly studies the calibration method of tilting and rocking test bench to ensure the accuracy and reliability of experiment results and to meet the experimental requirements of ships, submarines, aircraft carriers and other equipment.

Key words: angle of inclination; angular velocity; distortion

0 引言

安装在舰船、潜艇、水上飞机、坦克等军用装备上的各类光电、导航等设备及陀螺仪、平台罗经等仪器, 其所处海上或陆地的工作状态常为频率较低的倾斜或摇摆力学环境, 这类特殊的力学环境会对各部件产生附加的离心力极易引发各部件工作状态失常。为了保证在倾斜和摇摆状态下设备的可靠性、稳定性和结构的完好性, 对性能易受到影响的电工电子产品或具有旋转运动和重力不平衡运动系统的产品, 要求按照国军标等相应环境试验标准进行倾斜和摇摆环境试验, 从而评估武器装备在此类力学环境下的实际性能指标。

倾斜摇摆试验台是供摇摆或倾斜与摇摆综合试验用的试验设备。主要通过模拟海上环境条件下的运动状态, 使试件在其最大试验载荷下稳定地保持在所规定的位置上, 不发生明显的晃动和漂移, 并能模拟国家标准和国家军用标准规定的严酷度, 实现舰船仪器

仪表的环境模拟试验、惯性导航设备的动态性能测试、光电跟踪稳定精度测试和 GPS 导航系统的精度试验, 光学系统等仪器、设备的动态环境模拟试验, 也可以用于减摇水舱等设备的工作维修。

目前, 国标、国军标以及海军标都有相应的倾斜摇摆试验标准, 如 GB/T2423、GJB150 等。虽然从上世纪 80 年代开始, 各个标准即对倾斜摇摆试验的严酷等级和试验设备的性能指标有详细要求, 但受到校准方法和校准仪器限制, 国内开展倾斜摇摆试验台校准设备的研制、校准方法的研究相对较晚。为进行倾斜摇摆试验的摇摆试验台制定相应的校准方法, 既可以保证试验结果的准确可靠, 又可以满足舰船、潜艇、水上飞机等装备上的各类设备的生产、维护和试验的需求^[1]。

1 总体技术方案

倾斜摇摆试验台多是模拟安置在舰船、潜艇、水上飞机、航母等平台上的机械、电工电子产品经受风

浪环境的试验装置,产生包括纵倾、横倾、纵摇、横摇、首摇、纵荡、横荡、垂荡 6 个自由度运动及其相互耦合运动。试验台可以做单一方向运动,也可以做复合运动,考虑到目前复合运动测量用的传感器的量值溯源无法实现,所以本文针对单一方向进行研究。由于国内目前试验台模拟产生的风浪试验波形多为不同幅度和不同周期的正弦波,因此倾斜摇摆试验台的标定方法为通过测试单一自由度的正弦角运动/线运动的分项指标来体现试验台的精度指标。

“横倾/纵倾”是指试验台绕纵轴/横轴旋转,并停止在一定角度位置静止不动,需要研究的参数是试验台从零位倾斜到一定位置后静止的静态倾斜角度;“横摇/纵摇”是指试验台绕纵轴/横轴以一定周期往复(正弦)摆动,需要研究的参数是往复(正弦)摆动时的试验台与铅垂线方向夹角的角度幅值、周期及波形失真度。此类动态/静态的倾斜角度测量需要使用倾角传感器实现,并输出角度-时间信号至数据采集处理系统。“艏摇”是指试验台绕铅垂轴的往复(正弦)摇首振荡,需要研究的参数有正弦转动角度的幅值、周期及波形失真度。此类动态转角的测量需要使用转动角速度传感器实现,并输出角速度-时间信号至数据采集处理系统,积分计算后得到转动角度信号(如图 1 所示)。

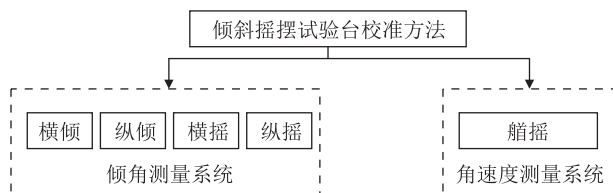


图1 总体技术方案框图

本文校准方法的研究主要基于我国国军标 GJB150. 23A-2009 中相关要求,同时参考我国国家标准 GB/T2423 中的要求。

2 倾角测量系统

试验台在进行横倾、纵倾、横摇、纵摇试验时,待测参数是平面的动/静态倾斜角度,需要用到角度传感器配合数据采集处理系统。本文根据倾斜摇摆试验台的相关技术指标及校准装置的技术指标,选取角度测量范围为 $\pm 1^\circ \sim \pm 70^\circ$ 的单轴倾角传感器配合数据采集处理系统进行测量。倾角测量系统方案框图如图 2。

考虑到本系统中测量的动态倾角周期最快为 3 s,即频率为 0.33 Hz,动态倾角频率较低,拟采用选择力

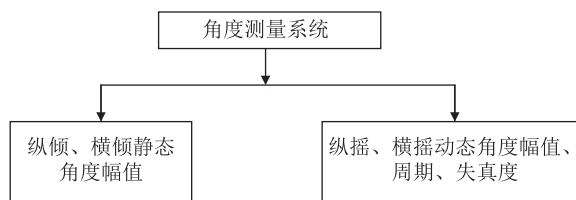


图2 角度测量系统方案框图

平衡伺服型倾角传感器,该传感器属于“固体摆”式传感器的一种。此类传感器测量范围、精度及抗过载能力较高,在武器系统中应用较为广泛,且传感器在非线性和重复性、迟滞、温度漂移和工作温度、抗冲击、振动等性能上具有非常优越的特点。该传感器体积较小,使用方便,能够在静态和低频动态测量时获得较高的准确度。

倾斜摇摆试验中需要提取的摇摆角度和振动加速度幅值是正负双方向的峰值,并不是常见的正弦信号峰值和峰峰值。通过分别提取采集的角度/角速度正弦波形的峰值和直流分量,然后经过数值计算得到正负峰值。试验台的正弦角度/角速度信号的偏置较为固定,通过分别提取采集的角度/角速度正弦波形的峰值和直流分量来计算正负峰值。

正弦逼近法采用最小二乘法来拟和出正弦信号的幅值,采样时间短,更适用于本研究。

使用正弦逼近法提取正弦信号的峰值。正弦信号可表示为

$$x[t] = A \sin(\omega t + \varphi_0) + x_0 = a \sin \omega t + x_0 \quad (1)$$

其中,角频率 $\omega = 2\pi f$, f 是已知的正弦信号频率。对 $x[t]$ 进行数字采样得到采样序列 $x[i]$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, N 表示采样序列中的采样点数)。由 $x[i]$ 通过最小二乘法拟合可估计参数 a, b, x_0 , 则可得信号的幅值^[2-3]。

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2)$$

失真度表征一个信号偏离纯正弦信号的程度,按照国家标准,计算方法为

$$\lambda_A = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}}{A_1} \quad (3)$$

式中: A_1 为基波信号的幅值; A_2, A_3, A_4 为二次、三次、四次谐波信号的幅值。

失真度的测量方法主要分为两种:基波剔除法和频谱分析法。模拟式失真度测量仪通常采用基波剔除法,通过具有频率选择性的无源网络(如:谐振电桥、文氏电桥等)抑制基波,利用总的电压有效值和抑制基

波后的谐波电压有效值计算失真度,计算方法为

$$\lambda_A = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}} \quad (4)$$

谐波分析法:用频谱分析仪或波形分析仪检测信号中的基波和各次谐波的电压,获得基波和各次谐波的电压,从而计算出失真度^[4-5]。

进行失真度测量时,信号处理方法包括模拟法和数字法。基于模拟法的失真度测量仪通常采用基波抑制方法,这种方式存在造价昂贵、寿命较短的弊病,且测量仪的输入级、桥前放大器以及有源滤波器中有源器件的非线性会产生机内引入失真,同时一旦硬件老化,测量精度将大打折扣^[4-5]。

数字法中,根据失真度的计算方法可分为频谱分析法和曲线拟合法。本文待测信号的失真度要大于 0.1%,且信号频率较低,选择数字法失真度测量方法是适用的^[6]。本文选用 HP 公司的动态信号分析仪,能够实现失真度的高精度、自动测量。

3 角速度测量系统

艏摇试验是指试验台面在水平位置绕铅垂轴所进行的周期往复运动,摇摆角度是动态转动角度。有些倾斜摇摆试验台没有实际的转轴,例如采用并联机构的 6 自由度运动平台,无法安装需要固定在转轴上的转角传感器。部分倾斜摇摆试验台虽然有转轴,例如三轴的摇摆台,但试验台类型不同,尺寸不同,生产厂家不同,转轴连接方式和大小也不同,在现场校准过程中,安装转角传感器极其困难,其安装方式的可操作性和通用性极差。因此无法采用转角传感器直接测量转角。本文拟采用角速度传感器进行转动角度的间接测量。陀螺仪是用来测量角位移和角速度的传感器,通过角速度传感器测量得到的角速度波形,间接计算得到转动角度幅值、周期及波形失真度。

在系统应用中,由于角速度传感器的带宽一般要比角位移传感器的带宽宽,因此系统转动过程中产生的较高频率的机械噪声,极易影响角速度传感器,造成角速度传感器的输出噪声较大,输出波形抖动现象较为严重。并且陀螺仪输出角速度是瞬时量,对其积分时,零漂等干扰会在积分过程中得到放大,其累积漂移误差随着积分时间的增长而迅速增加,导致输出角度与实际不符。本文中参照项目艏摇角度幅值及周期的技术指标,以及国军标、国标中摇摆试验对艏摇的试验要求,在艏摇试验过程中,典型试验量级为角度 4°,转动周期 20 s,角速度为 0.2(°)/s。需要选择

小角速度测量范围、低零漂的传感器,此类传感器灵敏度较大,可以增大传感器输出电压信号的信噪比,尽量减小角速度传感器输出噪声及零漂的影响。本文选择角速度传感器短期漂移稳定性小于 0.025(°)/s,灵敏度线性度误差小于 0.05% of F. R。

本文先从角速度信号中获取角速度幅值和周期信息,再通过正弦积分转换计算得到角度信号的幅值和周期信息,即进行频域上的积分,这样能够减小角速度时域信号中噪声和漂移干扰对积分的影响。

4 倾斜或摇摆角度测量结果的不确定度来源

4.1 由传感器测量误差引入

传感器角度测量误差主要由传感器灵敏度校准不确定度、温度变化对灵敏度的温漂影响、因垂直于传感器灵敏轴方向的加速度或者倾斜角度耦合到传感器的输出信号上所产生的横轴误差、因安装误差导致水平姿态传感器无法分辨加速度干扰信号和水平姿态信号以及不同角度幅值下传感器灵敏度非线性等因素产生。

4.2 由数据采集系统电压测量误差引入

数据采集系统电压测量误差主要包括量化误差——由于 A/D 转换器的有限分辨力产生的数字输入量与等效模拟输入量直接的偏差;增益误差——A/D 转换过程中的增益误差为 A/D 输出达到满量程时,时间模拟输入与理想输入之间的差值;偏置误差——A/D 转换过程中的偏置误差为使 A/D 转换器的输出最低位为 1,施加到数据采集卡 A/D 转换器模拟输入端的实际电压与理论电压(0.5 LSB 所对应的电压值)之差;噪声引起的误差等。

4.3 由被校摇摆试验台产生摇摆波形的谐波分量引入^[2]

在正弦波拟合中,拟合幅度估计参数误差为

$$\max \left| \frac{\Delta A_1}{A_1} \right| = \frac{1.00}{(Nh)^{1.25}} \times \frac{A_h}{A_1} \quad (5)$$

式中: ΔA_1 为基波信号拟合幅度误差; A_1 为基波信号拟合幅度; N 为采集的信号周期个数; h 为谐波阶次; A_h 为第 h 次谐波信号的幅度。

4.4 由被校摇摆试验台产生摇摆波形的直流分量引入^[2]

在正弦波拟合中,拟合的直流分量的估计参数误差为

$$\max \left| \frac{\Delta d}{A_1} \right| = \frac{0.61}{(Nh)^{1.21} \times h^{1.1}} \times \frac{A_h}{A_1} \quad (6)$$

式中： Δd 为信号直流分量估计值误差。

5 结 论

本文利用倾斜摇摆试验台模拟海上环境条件下试件的运动状态,实现舰船仪器仪表的环境模拟试验。近年来,随着国内舰载机事业的发展,越来越多的航空仪器仪表设备被用于舰载机上,而航空母舰平台在海上是一个六自由度运动的平台,它不仅在海平面上作平面运动,而且在海浪的作用下还会产生纵向和横向的倾斜摇动,这些运动是舰船特有的运动状态,这种状态也反映了舰载设备的使用特点,所以对于起飞、降落,停放在航母平台上的舰载武器系统、舰船大型仪器设备、导航和光学系统等需使用倾斜摇摆试验台进行倾斜、摇摆试验,这已经成为一项舰载设备设计、制造、试验的基本环境条件之一,是保证产品正常工作性能的关键试验,同时倾斜摇摆试验台也是舰载仪器设备环境试验中的一项关键设备。因此本文的研究是具有极大的社会效益。

参 考 文 献

- [1] 黄国强. 舰载机武器系统倾斜及摇摆试验方法探讨[J]. 航空标准化与质量, 2012, 32(4): 12-13.
- [2] 梁志国, 孟晓风. 拟合测量正弦信号频率的不确定度[J]. 计量学报, 2009, 30(4): 358-362.
- [3] Deyst J P, Soulders T M, Solomon J M. Bounds on least-squares four-parameter sine-fit errors due to harmonic distortion and noise [J]. IEEE Trans on Instrumentation & Measurement, 1995, 44 (3): 637-6421.
- [4] 袁晓峰, 许化龙, 陈淑红, 等. 正弦信号失真度测量方法述评[J]. 航空计测技术, 2004, 24 (1): 1-3.
- [5] 陈俊凯. 基于 DSP 的数字失真度仪研究及实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2010.
- [6] 国家质量技术监督局. JJG 948-1999 数字式电动振动试验系统检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 1999.

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-03-05

作者简介

张毅文, 女, 助理工程师, 主要从事力学、温度计量测试技术等研究。



《宇航计测技术》2020 年第 1 期目录

中国早期原子钟的回顾
高稳定度低温蓝宝石微波频率源设计
采用铯束管荧光稳频技术的小型光抽运铯束原子频率标准
盒栅式电子倍增系统在不同路径下的模拟计算研究
原子时系统主备钟同步技术研究
基于北斗三号的长基线共视时间比对
GPS 多接收机组合的共视时间比对技术研究
高频高稳恒温晶体振荡器设计

多波段光谱辐亮度计量值溯源技术研究
无电压取样端直流稳定电源校准专用插头设计
基于机器视觉的万用表数字识别技术研究
基于混响室的电磁环境及自然环境综合试验箱设计和仿真技术
多通道隔离电压采集板设计及验证
基于 RLS 算法的阵列天线抗干扰性能研究
卫星互联网用空间行波管非线性特性模拟