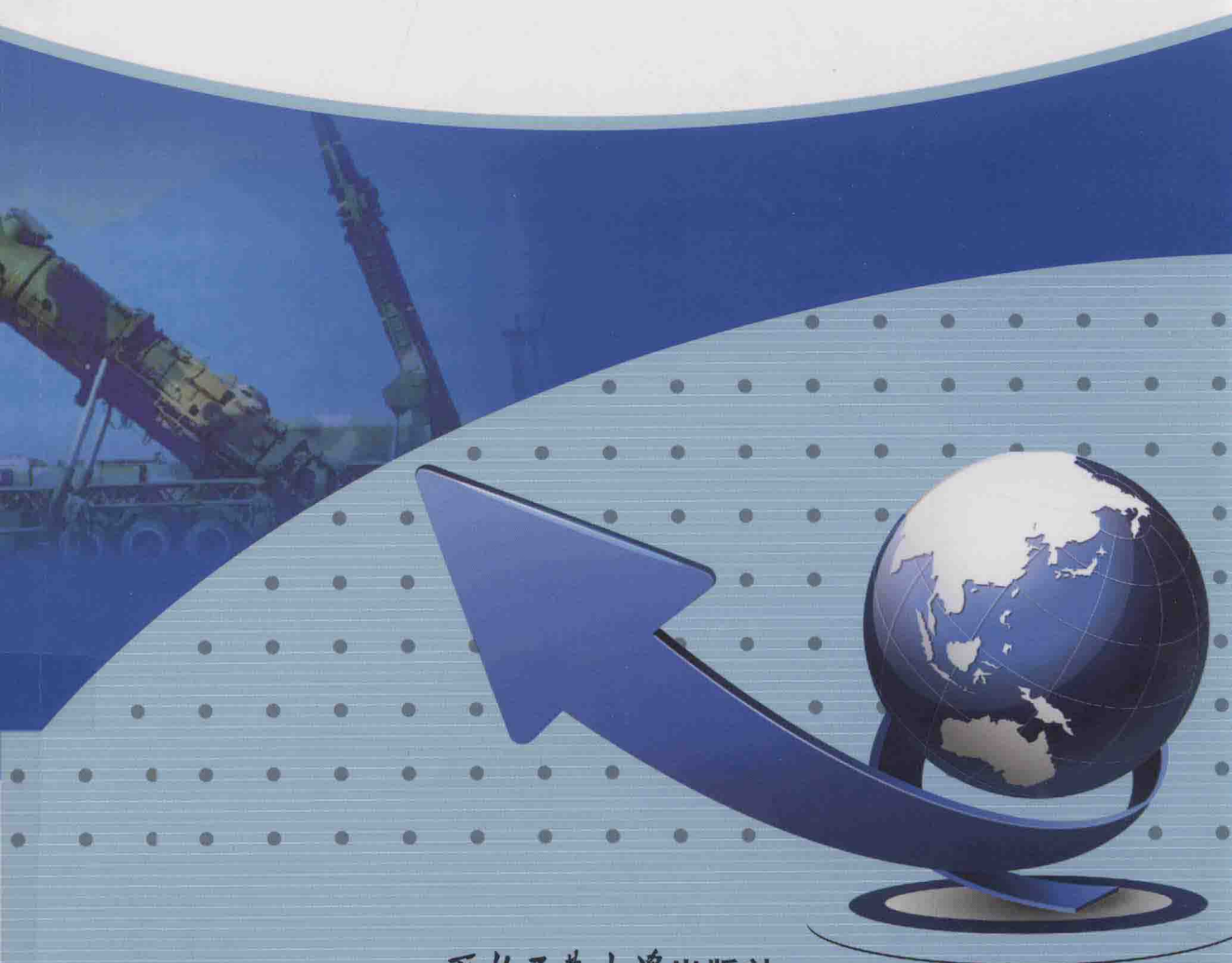


导弹惯性仪器及系统测试技术

徐军辉 单斌 杨波 周小刚 郭志斌◎编著



西北工业大学出版社

DAODAN GUANXING YIQI JI XITONG CESHI JISHU

导弹惯性仪器及 系统测试技术

徐军辉 单 斌 杨 波 编著
周小刚 郭志斌

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 惯性仪器及系统测试是导弹控制专业领域的一门重要专业课程。本书介绍了惯性仪器及系统测试的基本原理和相关技术,包括陀螺惯性仪器及系统、惯性仪器的误差数学模型、惯性仪器测试原理、惯性仪器测试设备、惯性仪器测试数据处理等。在理论联系实际的基础上,注重基本理论的阐述与分析。

本书可作为高等院校以及导弹控制工程专业本科生和研究生的教材,也可供涉及惯性测试技术方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

导弹惯性仪器及系统测试技术/徐军辉等编著. —西安:
西北工业大学出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-5612-5847-7

I. ①导… II. ①徐… III. ①惯性元件—教材
IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 330020 号

策划编辑: 杨 军

责任编辑: 张 潼

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编: 710072

电 话: (029)88493844 88491757

网 址: www.nwpup.com

印 刷 者: 陕西金德佳印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 13.75

字 数: 327 千字

版 次: 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

前 言

惯性技术是以牛顿惯性定律为基础的、用以实现运动物体姿态和航迹控制的一项工程技术。一般而言,惯性技术是惯性导航技术、惯性制导技术、惯性测量技术、惯性仪表技术及相应测试技术的总称。

惯性导航是利用惯性仪表测量载体相对于惯性空间的运动参数,在给定的运动初始条件下,输出载体的姿态参数和导航参数,引导载体顺利完成预定的航行任务。惯性是所有质量体的基本属性,所以建立在惯性原理基础上的惯性导航系统不需要任何外部信息,也不会向外部辐射任何信息,仅靠惯性导航系统本身就能在全天候条件下,在全球范围内和任何介质环境里自主地、隐蔽地进行连续的三维定位和三维定向,这种同时具有自主性、隐蔽性和能获取运载体完备运动信息的独特优点是其他导航方式无法比拟的,惯性导航系统的工作不依赖于任何外界信息,是一种完全自主的导航方法,因此惯性导航系统是导弹、飞机、舰船以及航天器等运载体不可缺少的核心导航设备。

惯性制导系统与惯性导航系统的工作状态不同,它是惯性导航与自动控制的结合。它利用导航参数,产生控制载体运动所需的信号,直接控制载体的航迹。惯性制导系统用于无人操纵的运载器上,如弹道式导弹、人造地球卫星、宇宙探测器及运载火箭等。制导系统比导航系统的工作时间短得多,一般只有几分钟。制导系统实际上是为无人驾驶的载体发射进入轨道建立一组精确的轨道初始条件,特别是发动机熄火时的速度及方位是最为关键的制导参数。

惯性仪表是指陀螺仪和加速度计,陀螺仪用于敏感模拟坐标系相对理想坐标系的偏角、角速度,加速度计敏感载体沿某一方向的比力,它们是各类惯性系统中的核心部件。陀螺仪和加速度计的工作原理、结构及工艺等是惯性仪表技术的主要内容。

惯性系统是应用惯性仪表构成的惯性测量装置或惯性测量系统。惯性测量装置可以直接安装在载体上,测量相对于载体坐标系的运动参数,再经过必要的运算和坐标变换求得载体相对于某给定坐标系(如惯性坐标系)的运动参数,这样的系统称为捷联惯性测量系统。惯性测量装置也可以作为台体通过框架安装在载体上,测量装置中由陀螺仪所建立的稳定回路,使台体在载体运动中始终保持与惯性坐标系(或某一给定坐标系)重合,这样就构成了惯性稳定平台系统。

惯性仪表和惯性系统的测试技术主要包括各种测试原理和测试设备,其作用是测试和检验惯性仪表与系统的各种性能。惯性系统及仪表的性能、质量对其所服务载体的性能、质量有重要的甚至是决定性的影响。惯性系统及仪表构造上的特点使其性能参数较易发生变化,因此在其研究、设计、制造、储存以及使用前的各个阶段都要对其进行测试,以确保它们在工作中具有所需的性能和质量。通过建立惯性仪器及系统的误差模型,准确评价其性能,通过误差补偿措施来进一步提高其使用性能。

本书是笔者在多年教学工作的基础上,紧跟惯性技术发展,参考国内外相关资料,结合有关教学和科研成果整理、编著而成的,系统全面地对惯性仪表和系统的基础理论进行梳理和介绍,在此基础上,重点介绍惯性仪器及系统的测试技术,引入一些新的思想,使得本书内容能够紧跟惯性技术的发展。

由于水平有限,对于书中存在的不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2018年3月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 惯性器件在导弹与运载火箭中的地位	2
第二节 惯性器件构成原理	2
第三节 惯性器件在导弹(火箭)控制系统中的功用、特点和要求	4
第四节 惯性仪器的性能指标	6
第五节 惯性仪器的测试问题	9
第六节 惯性仪器测试中常用坐标系	10
第二章 惯性仪器及系统	12
第一节 概述	12
第二节 陀螺仪	13
第三节 加速度计	69
第四节 捷联式惯导系统	93
第五节 平台式惯导系统	105
第三章 惯性仪器的误差数学模型	119
第一节 概述	119
第二节 单自由度陀螺仪误差数学模型	119
第三节 光学陀螺仪误差数学模型	127
第四节 半球谐振陀螺仪误差数学模型	136
第五节 挠性加速度计误差数学模型	143
第六节 陀螺加速度计误差数学模型	154
第四章 惯性仪器测试原理	155
第一节 转子陀螺仪测试原理	155
第二节 光学陀螺测试原理	159
第三节 加速度计测试原理	162
第四节 平台式惯导系统测试原理	165
第五节 捷联式惯导系统测试原理	172
第五章 惯性仪器的测试设备	182
第一节 专用测试设备	182
第二节 其他辅助的测试设备	191

第六章 惯性仪器测试数据处理.....	196
第一节 测试数据处理的目的.....	196
第二节 惯性仪器测试数据的分类.....	197
第三节 测试数据的采集与预处理.....	197
第四节 测试数据的分析方法.....	206
参考文献.....	214

第一章 绪 论

惯性系统(inertial system)是以惯性器件为核心构成的具有某种特定功能的系统和仪器。这些功能包括导航、制导、姿态测量、姿态稳定、定位、定向、大地测量、重力测量、振动测量、冲击测量、变形测量等等。惯性器件(inertial device)是基于惯性定律工作的装置,分为惯性敏感器和惯性稳定器两类。惯性敏感器(inertial sensor)用于测量物体在惯性空间(inertial space)中的运动参数,即绝对运动参数。其中测量物体角运动的,称为陀螺仪(gyroscope);测量物体线运动的,称为加速度计(accelerometer)。它们也统称为惯性敏感元件(inertial sensing element)或惯性仪表(inertial instrument)。将数个陀螺仪和加速度计组合在一起构成的具有综合测量功能的惯性敏感器称为惯性测量装置(inertial measurement unit, IMU),或惯性测量部件、惯性测量单元。

惯性敏感器按其工作原理和结构特点分为机电(electromechanical)、光学(optical)、微机电(micro electromechanical)、粒子(particle)等类型。机电式和微机电式惯性敏感器的理论基础是经典力学,光学和粒子惯性敏感器的理论基础是光学、波动力学和量子力学。

各类惯性敏感器虽然具有不同的结构特点和工作原理,但其所依据的基本物理规律都是惯性定律。惯性(inertia)是指宇宙中物体(包括固体和流体)运动状态(运动速度和方向)的守恒特性,即在没有外部作用时保持其运动速度和方向不变的特性。量子(包括有质量的如原子,以及无质量的如光子)运动状态也具有守恒特性,即在没有外部作用时也保持其运动速度和方向不变。利用量子这种特性制成的具有测量物体相对惯性空间运动参数功能的运动敏感器也因此被归入惯性敏感器。惯性敏感器可以在整个宇宙空间工作,它以自然存在的惯性参考系作为基准,不需要任何人工参照基准或信息源,是一种完全自由,不受时间、地域限制,可以连续、实时提供完整运动信息的运动敏感器。

惯性稳定器(inertial stabilizer)是一种机械式储能和换能装置,利用其转子的惯性力矩或陀螺力矩作用于被控运动体,使之保持相对稳定的空间角位置或以所需角速度转动。惯性稳定器以物体天然存在的惯性力矩为执行力矩,不需要任何外部控制和相对支承,是空间运动体稳定与控制的较理想方式,目前主要在航天器中应用。

惯性系统装入并为之服务的对象称为运载体(vehicle),简称载体。航空器、航天器、舰船、潜艇、陆地车辆、移动机器人等运载工具,及导弹、制导弹药等制导武器,以及诸如车轮、机械手、钻探头等运动部件都可以是惯性系统的载体。包括地球在内的各种天体,也可以是惯性系统的载体,在地球上任何固定地点工作的惯性系统,其载体就是地球。

惯性敏感器的应用领域十分广阔,遍及各种载体的运动测量、姿态稳定、导航、制导、控制,以及大地测量、重力测量、振动测量、冲击测量、变形测量、地矿勘探、隧道挖掘、水下施工等众多领域。

第一节* 惯性器件在导弹与运载火箭中的地位

在导弹和运载火箭飞行过程中,装在内部的陀螺仪为运动中的导弹(火箭)建立不变的基准,据此测量出姿态角和角速度。同时由加速度计测出其线加速度,经过必要的积分运算和坐标变换,确定导弹(火箭)相对基准坐标系的瞬时速度和位置。控制和制导系统根据这些参数对导弹(火箭)进行控制。使其保持在预定轨道上,并按规定条件发出关机信号,保证它按预定要求命中目标(或准确入轨)。由此可见,惯性器件是控制系统中的关键部件。其性能的优劣直接影响导弹(火箭)的命中精度(或入轨精度)。对于纯惯性制导导弹而言,惯性器件所引起的误差通常占整个制导误差的70%以上。

第二节 惯性器件构成原理

按照牛顿定律,高速旋转的刚体具有在惯性空间保持其转动轴指向不变的特性,称为定轴性;当该刚体受到垂直于转动轴方向的外力矩时,将绕垂直于转动轴和外力矩轴方向的第三轴转动,称为进动性。常规陀螺仪具有一个高速旋转的转子,利用其定轴性,可以在导弹(火箭)内部建立一个惯性基准;利用其进动性,可以测量导弹(火箭)的运动角速度,这就是陀螺仪的两种基本功能。

当陀螺仪的转子通过内、外两个框架安装在仪表壳体内时,其转子除绕自转轴转动外还有两个可以相对于壳体进动的自由度,这种陀螺仪称为二自由度框架式陀螺仪。一般用以测量导弹(火箭)相对于由陀螺仪转子所建立的基准方向的姿态角,因此也称为位置陀螺仪。也可以用球形轴承代替内、外框架把转子支承起来,这样便构成了自由转子式陀螺仪,如动压气浮陀螺仪、静电陀螺仪、超导陀螺仪等。如果用特制的挠性支承代替框架式陀螺仪中的滚珠轴承,则构成挠性陀螺仪。当转子转速满足调谐条件时,挠性支承将处于无弹性约束的动力平衡状态,这样的挠性陀螺仪称为动力调谐陀螺仪,其性能与自由转子式陀螺仪相似。如果将二自由度框架式陀螺仪的外框架与壳体锁住,相当于只有内框架,其转子轴相对壳体只有一个进动自由度,称为单自由度陀螺仪。按输入与输出之间的关系可以把单自由度陀螺仪分为二重积分陀螺仪、积分陀螺仪和速率陀螺仪三类。为了提高陀螺仪的精度,降低干扰力矩的影响,陀螺仪的框架轴可以采用不同的支承方式,并可以根据支承方式的不同对陀螺仪进行分类,例如:液浮陀螺仪、静压气浮陀螺仪、静压液浮陀螺仪等。某些仪表没有高速旋转转子,但因其能完成常规陀螺仪的功能,也称之为陀螺仪,例如:音叉振动式陀螺仪、压电晶体陀螺仪、激光陀螺仪、光纤陀螺仪等。

摆式加速度计都有一个检测质量。当加速度计装在导弹(火箭)内部一起作加速运动时,依据牛顿力学原理,检测质量将承受与加速度成正比而方向相反的惯性力(力矩),从而使检测质量相对于壳体运动。当惯性力(力矩)被反馈力(力矩)所平衡时,这种运动便停止。因此通

过测量反馈力(力矩)的大小也确定了检测质量上承受惯性力(力矩)的大小,从而可以求得导弹(火箭)的加速度。加速度计的种类很多,可按不同的方式进行分类。按检测质量运动状态区分,可分为转动运动的摆式加速度计和作直线运动的线性加速度计;按支承方式区分,可分为宝石轴承加速度计、静压气浮或静压液浮加速度计、液浮加速度计、挠性加速度计等;按工作原理区分,除摆式加速度计外还有振弦式加速度计、振梁式加速度计和摆式积分陀螺加速度计等。

导弹在空间运动有6个自由度——3个角运动和3个线运动。利用3个单自由度陀螺仪或2个二自由度陀螺仪可以建立3个互相正交的基准方向,相对此基准方向可以测出导弹(火箭)的3个姿态角。利用3个加速度计,可以测出导弹(火箭)沿3个基准方向的加速度。3个陀螺仪和3个加速度计一般是以输入轴互相正交的方式安装在同一基座上,构成惯性测量装置。惯性测量装置可以直接安装在导弹(火箭)上,测量相对于弹体坐标系的运动参数,再经过必要的运算和坐标变换求得导弹(火箭)相对于某给定坐标系(如惯性坐标系)的运动参数,为导弹(火箭)控制、制导系统提供必要的控制信息。这样的系统称为捷联惯性测量系统。当惯性测量装置中的陀螺仪为速率陀螺仪时,则所组成的系统称为速率捷联惯性测量系统;而当采用二自由度位置陀螺仪时,则称为位置捷联惯性测量系统。如果进一步利用计算机对重力加速度、哥氏加速度以及系统工具误差进行补偿,并经过必要的积分运算,可以获得载体在运动中的速度、位置信息,就构成了捷联式惯性制导(导航)系统。

惯性测量装置也可以作为台体通过框架安装在导弹(火箭)上。测量装置中由陀螺仪所建立的基准轴系通过稳定回路控制框架运动,使台体在导弹(火箭)运动中始终保持与惯性坐标系(或某一给定坐标系)重合,这样就构成了陀螺稳定平台。平台各框架轴上的传感器可以分别提供导弹(火箭)在运动中的姿态角信息。台体上的加速度计可以测出导弹(火箭)在运动中相对于惯性坐标系(或某一给定坐标系)的线加速度、线速度,为控制、制导系统提供必要地控制信息。如果将惯性测量装置做成球体,通过浮液悬浮在一个球形壳体内,代替框架结构的作用,这样就构成了浮球平台。如果进一步利用计算机对重力加速度、哥氏加速度以及系统工具误差进行补偿,同时作必要的积分运算,便可以获得导弹(火箭)的速度和位置信息,这样就构成了平台式惯性制导(导航)系统。根据台体的取向,平台式惯性制导(导航)系统可以分为当地水平系统和空间稳定系统,前者主要用于飞机、舰船以及巡航导弹等作等速航行的载体上,而后者多用于弹道式导弹和运载火箭上。

陀螺稳定平台依靠框架隔离了导弹(火箭)角运动对惯性测量装置的影响,为惯性仪表提供了良好的工作条件,使得对输出信号的补偿和修正都比较简单,计算量小,但其机械结构复杂,体积较大。捷联式惯性测量系统与此相反,它们依靠计算机来实现数学平台的功能,故计算量大,但机械结构比较简单,体积也小得多。两种系统除外形差别很大外,其本质的区别是相对不同坐标系对载体运动参数进行测量。两种系统的功能,静态、动态特性以及误差传播等都是相同的。但由于两种系统中惯性仪表所处的工作环境不同,干扰源及干扰的大小都有明显的差异。某一种干扰对一种系统来说是常值干扰,但是对另一种系统来说,可能变成交变干扰。干扰性质变了,引起的误差也就不同了。

第三节 惯性器件在导弹(火箭)控制系统中的功用、特点和要求

一、导弹控制系统的组成与功能

就研制任务而言,导弹(火箭)控制系统是导航、制导、姿态控制、系统综合和测试-发射控制各部分的总称。导航是确定导弹在初始条件下和飞行中的状态参数。制导是选择使导弹从某一飞行状态达到要求状态的机动规律。姿态控制是执行制导所要求的机动和保证飞行姿态稳定。控制系统综合是保证飞行控制功能的工程实现,进行信息传输,变换、作动和电源配电。测试-发射控制是对飞行控制系统进行检测、监视和操纵导弹点火发射。控制系统的装置和设备分别装在弹上和地面。

弹(箭)上控制系统一般由测量装置、解算装置、中间装置、执行机构等部分组成,与飞行控制软件一起完成测算导弹运动状态参数;根据确定的飞行状态参量产生制导信号,控制导弹(火箭)靠近预定轨道飞行,达到期望最佳终端条件时关闭发动机,结束主动段飞行;在飞行过程中,根据状态参量及事先规定的程序控制要求产生操纵导弹姿态的控制信号,进行姿态控制和保证稳定飞行;产生时序指令和进行信号传输、综合、电信号操纵,实现各部件动作。为了保证上述系统工作的安全性,导弹(火箭)弹(箭)上控制系统还设有安全自毁系统。

(1)测量装置:又叫敏感装置,是接收命令或感受干扰所造成的偏差并形成信号的装置。例如惯性仪器陀螺仪、加速度计等。

(2)解算装置:是将来自测量装置的各种信号进行适时的、迅速的、准确的比较和计算,发出相应的控制导弹(火箭)飞行的指令信号的装置。

(3)中间装置:又叫变换放大装置,是对测量装置所测得的微弱信号进行综合、变化、放大,使其成为可操纵执行机构动作的信号的装置。

(4)执行机构:是将控制信号变成操纵导弹(火箭)运动的力或力矩的装置。

(5)时序、电源配电系统:发出导弹(火箭)飞行的时序指令,提供导弹(火箭)上各种电子仪器、设备所需的各种交、直流电源,并且能够自动地向导弹(火箭)上各用电部位供电。

(6)安全自毁系统:在导弹(火箭)飞行过程中判断导弹(火箭)飞行是否正常,在导弹(火箭)出现故障的情况下,根据需要将故障立即或延时在空中自毁,减小导弹(火箭)坠地爆炸所带来的危害。

二、惯性仪器在导弹(火箭)中的功用

惯性仪器在导弹和火箭中的主要功用可以概括为以下几方面。

(一)在飞行过程中为导弹(火箭)建立基准坐标

弹道导弹通常采用惯性坐标系作为基准坐标系,根据所选用的惯性仪器类型,有多种建立

惯性坐标系的方法。

在早期,一般用两个位置陀螺仪作为姿态角测量基准。其中一个陀螺仪的自转轴处于射面内的水平位置,其外框架轴垂直于射面与弹体的俯仰轴重合,轴上装有姿态角传感器,能提供导弹的俯仰角信号,另一个陀螺仪的自转轴垂直于射面,其内、外框架轴分别保持与弹体的滚动轴、偏航轴重合,通过轴上的传感器分别提供滚动、偏航角信号。

也可以利用陀螺稳定平台为导弹(火箭)建立惯性坐标系。陀螺稳定平台的3个轴分别与弹体滚动轴、偏航轴、俯仰轴重合。利用台体上陀螺仪所构成的稳定回路控制平台框架,使台体稳定在惯性空间,作为测量导弹(火箭)体运动参数的基准坐标系。

利用速率捷联系统也可以建立惯性坐标系。这时陀螺仪测得的信息是瞬时角速度沿弹体坐标轴的分量,需经过积分和坐标变换后才能得到导弹(火箭)所需要的姿态角信息。

(二)测量导弹(火箭)的角速度

为了使导弹在飞行过程中保持姿态稳定,弹(箭)的控制系统要求惯性器件提供角速度信息。为了避免弹(箭)体弹性变形的影响,要严格选择速率陀螺仪的安装位置,通常在弹体上一次振型的波峰或波谷处,互相正交地安装3个速率陀螺仪来测量弹(箭)体绕3个相应轴的角速度。

(三)测量导弹(火箭)的加速度

为了确定导弹(火箭)在运动中的速度、位置,需要测量导弹(火箭)相对于惯性坐标系的3个运动加速度分量,通过积分求得速度和位置。在陀螺稳定平台中,3个加速度表输入轴分别重合台体坐标轴,由于台体稳定于惯性空间,测得的是相对于惯性坐标系的加速度分量。对于捷联系统,加速度表直接安装于弹体上,其输出量是相对于运动着的弹体坐标系的加速度分量,需经坐标转换才能求得相对惯性坐标系的信息。

(四)为导弹(火箭)发射前进行初始对准提供方向基准

导弹(火箭)发射前,陀螺稳定平台要进行初始对准,使台体坐标各轴与发射坐标系重合,通常用两个加速度表组成调平回路来建立当地水平基准。

(五)确定发射点的地理位置和坐标方向

机动发射的情况下,要求在发射前确定临时作为发射点的地理位置和坐标指向,可以利用弹上惯性仪器构成惯性导航系统,测量导弹在机动运动中的方向、位置,从而确定发射点的地理位置和瞄准目标的指向。

(六)其他用途

除了上述主要用途外,导弹(火箭)上的惯性器件还可以用来测量级间分离时的加速度,弹头再入时的姿态角和加速度,以及发动机的推力等,还可以用作弹道零 g 指示和弹体谐振研究等。

惯性器件安装在导弹(火箭)内部,其最大的特点就是在测量轨道参数时,不需要外界信息,也不向外界辐射能量,不受外界干扰。与其他制导、导航系统比较,它不容易被敌方发现、

破坏,具有很好的隐蔽性,是一种完全自主式的制导、导航手段。因此,在导弹、飞机、舰船等作战武器中得到了日益广泛的应用。

第四节 惯性仪器的性能指标

对于高精度惯性仪器,很难用一两个性能参数说明它的性能水平,通常还必须提供若干机械的、电气的数据以保证它的正确使用。为此,本节将对它们的性能指标作简要的介绍。显然,当加速度计是陀螺型加速度计时,对陀螺仪的要求同样也适用于这种加速度计。

一、陀螺仪的性能指标

从惯性系统的要求来说,陀螺仪性能指标中首先要考虑的是它的精度指标,然后才是电气性能、机械性能、环境条件及寿命等。现在将这些性能指标或性能参数项目列出如下,以供参考。当仪器的工作原理变化时,某些性能指标或参数会有变动。

1. 精度性能指标

- 阈值和分辨率;
- 标度因数(比例系数)及其误差;
- 输出非线性误差;
- 零位输出;
- 交叉耦合输出;
- g^0 漂移速率;
- g^1 漂移速率;
- g^2 漂移速率;
- 随机漂移速率;
- 与时间有关的性能稳定性;
- 与重复启动有关的性能稳定性。

2. 电气性能数据

- 陀螺仪电动机电源的相数、电压、频率、电流和功率;
- 信号器电源的电压、频率和标度因数;
- 力矩器的施矩电流、功率、阻抗和标度因数;
- 温度控制电源的电流和功率;
- 各电气参数的精度要求。

3. 机械性能数据

- 测量范围或转角自由度;
- 陀螺动量矩;
- 陀螺转子转动惯量;
- 陀螺转子转速;

- 时间常数;
- 阻尼系数;
- 固有频率;
- 启动、停转时间;
- 安装对准要求。

4. 环境条件

- 环境压力范围;
- 环境温度范围;
- 环境湿度范围;
- 振动;
- 冲击等。

5. 寿命和可靠性指标

- 工作寿命;
- 启动次数;
- 平均故障间隔时间等。

二、加速度计的性能指标

对非陀螺型加速度计,它的性能指标也可分为精度性能、电气参数、机械参数、环境条件和寿命等,列出如下。

1. 精度性能指标

- 阈值和分辨率;
- 零位偏差;
- 标度因数(比例系数)及其误差;
- 输出非线性误差;
- 交叉耦合误差;
- 随机误差;
- 与重复启动有关的性能稳定性等。

2. 电气性能数据

- 信号器电源的电压、频率和标度因数;
- 力矩器的施矩电流、阻抗和标度因数;
- 温度控制电源的电流和功率。

3. 机械性能数据

- 测量范围;
- 摆块质量;
- 支承结构及刚度;
- 阻尼系数;

- 固有频率;
- 安装对准要求等。

其他的环境条件、寿命和可靠性等与对陀螺仪的要求是一样的。

三、导弹对惯性仪器的要求

对用于导弹的惯性仪器有以下几点特殊要求。

(一)对精度指标要求很高

惯性仪器的精度直接影响导弹的命中精度。例如:对于飞行时间为 300 s 的远程弹道导弹来说,设加速度表有 2×10^{-5} 零偏误差, 4×10^{-5} 的比例系数误差,将引起导弹的射程分别为 200 m 和 100 m 的偏差,对于质量为 500 g 的陀螺仪转子如果有 0.5×10^{-6} mm 的质心偏移,将引起约 100 m 的射程偏差。从这些数字可以看出,惯性仪器是一种超高精度级机电产品,必须采用微米级或亚微米级的精密加工设备、条件和工艺措施。

(二)要求在恶劣的环境条件下保持惯性仪器的高可靠性

由于导弹在发射、飞行和再入的过程中会产生强烈的振动、冲击和大过载,环境温度可以从 $+50^{\circ}\text{C}$ 变到 -40°C 以下,气压可以从一个大气压变到接近于零。惯性仪器要在这样恶劣的环境条件下保持正常工作,应有足够的可靠性。因此,设计惯性仪器时,应保证其结构刚度、温度控制等。

(三)要求小型化、低功耗

惯性仪器是一种复杂的机电产品。以陀螺稳定平台为例,它包括集中安装在平台台体上的多个惯性仪表,台体、框架、壳体以及减振装置,温控设备和各种电源线路等,其质量可以高达数十千克。惯性仪器装在导弹内部,而导弹的负载有一定限量,对洲际导弹而言,惯性仪器的质量增加 1 kg,就要减少燃料 1 kg,相当于减少若干千米的射程。因此,使惯性仪器小型化的要求显得十分重要。

惯性仪器需要消耗能源,导弹上的能源有限,功耗大,对导弹同样是一个负担,并且台体上集中安装了许多惯性仪表,产生的热量很高,而框架结构又使平台的散热很困难,这对惯性仪器的性能稳定非常不利,因此在惯性仪器设计时也应考虑降低仪表的功率消耗。

(四)要求性能和参数保持长期稳定、高寿命

导弹是一种长期贮存,一次使用的武器。因此对惯性仪器也要求能在长期贮存条件下始终保持性能稳定,一旦任务需要,应保证能正常工作,不产生任何故障。导弹离开地面后,惯性仪器的工作时间很短,但在发射前为了保证万无一失,要进行长时间的标定试验,处于警戒待发状态后,惯性仪器通常是在长时间连续工作状态,因此对惯性仪器要求有较高的寿命,一般平均故障间隔时间在数百或上千小时以上。为此,惯性仪器设计时,应尽可能选用高稳定材料,长寿命轴承或采用动压气浮轴承等,对于电子元件应采取严格筛选和老化处理等措施,以保证达到规定要求。

(五)要求启动后性能达到稳定的时间短

惯性仪器启动后,其性能达到稳定需要一个过程,其长短主要取决于陀螺马达的温升时间,液浮仪表的加温过程,某些电子线路的热平衡时间等。为了缩短这一过渡过程,通常在惯性仪器中选用高导热材料,采用大功率启动、加热等措施,以缩短预热时间。通过惯性仪器性能的快速达到稳定,也使发射前初始对准的时间缩短,从而缩短了整个导弹发射准备时间。

第五节 惯性仪器的测试问题

一、定义

惯性系统及仪表的性能、质量对其所服务的载体的性能、质量有重要的甚至是决定性的影响。惯性系统及仪表构造上的特点使其性能参数较易发生变化,因此在其研究、设计、制造、储存以及使用前的各个阶段都要对其进行测试,以确保其在工作中具有所需的性能和质量。本书主要研究惯性仪器使用前的测试问题。具体讲,就是对惯性仪表(加速度计和陀螺仪)和它们组成的系统进行的、确定其功能和性能的全部工作。

包括测试设备、测试方法、程序 and 数据处理技术三个方面内容。其关键是在预期的环境下,在变化幅度巨大的工作范围内按照预先设计的试验程序,精确地对惯性仪表或系统施加天然的或人工的输入,并精确测试、记录——对应的精确输出信息,然后按照预定的数学表达的性能方程式,经数据处理,精确确定描述输出与相应输入量之间的关系式。

二、目的

- (1)评价惯性仪器的性能、精度,考核是否满足设计规定及使用要求。
- (2)通过惯性仪器测试中出现的问题,进一步研究改进仪器性能的途径。
- (3)建立惯性仪器误差模型,利用计算机模拟使用条件,计算仪器的规律性误差,并予补偿,以提高仪器的实际使用精度。
- (4)确定惯性仪器误差的随机散布规律,作为制定导弹等系统实际使用(作战)规范的依据。

三、主要试验方法

- (1)重力场试验。
- (2)大过载试验。
- (3)线振动试验。
- (4)角振动试验。
- (5)环境应力试验。

(6)综合应力试验。

惯性仪器在技术领域进行的单元测试主要是重力场环境下的功能和性能测试,其目的是检查惯性仪器的功能是否正常,参数是否符合要求,即鉴定惯性仪器各种参数的精度。

第六节 惯性仪器的测试中常用坐标系

一、惯性坐标系($OX_2Y_2Z_2$)

OX_2, OY_2, OZ_2 的 3 个方向相对惯性空间始终保持不变。在导弹初始对准完成以后,惯性坐标系的坐标原点为平台 3 轴交点,轴线为平台三个单自由度陀螺仪的敏感轴线。 OZ_2 轴与 OX_2 轴和 OY_2 轴构成右手直角坐标系。

二、平台坐标系($OX_PY_PZ_P$)

不同型号导弹的平台坐标系定义有所不同,这里定义 OX_P 轴与平台外环轴向一致, OY_P 轴与平台内环轴一致, OZ_P 轴与平台台体轴向一致,它与 OX_P 轴和 OY_P 轴构成右手直角坐标系。坐标原点 O 为 3 个轴的交点,如图 1-1 所示。

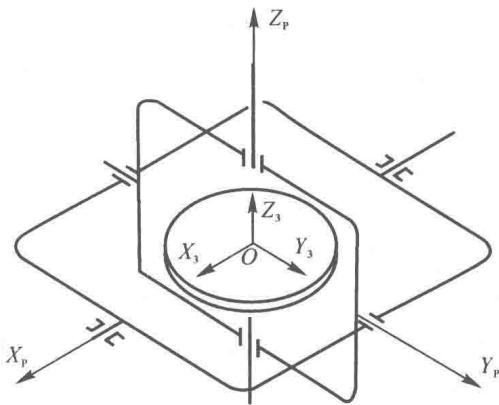


图 1-1 平台坐标系及平台台体坐标系

三、平台台体坐标系($OX_3Y_3Z_3$)

坐标原点 O 为平台三根稳定轴的交点。 OX_3 轴沿台体上 X 向加速度表的敏感轴向, OY_3 轴沿台体上 Y 向加速度表的敏感轴向, OZ_3 轴沿台体上 Z 向加速度表的敏感轴向,它与 OX_3 轴和 OY_3 轴构成右手直角坐标系,如图 1-1 所示。