

高等学校教材

# 导弹惯性制导技术

DAODAN GUANXING ZHIDAO JISHU

刘洁瑜 余志勇 汪立新 刘春卓 编著

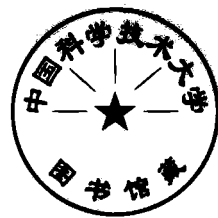


西北工业大学出版社

高等学校教材

# 导弹惯性制导技术

刘洁瑜 余志勇 汪立新 刘春卓 编著



西北工业大学出版社

**【内容提要】** 惯性技术与制导原理是弹道导弹控制领域的一门重要专业基础课程。本书按照惯性制导基础知识、惯性仪表(陀螺仪与加速度计)、陀螺稳定平台、惯性制导原理、精度分析、惯性系统的测试的顺序,重点介绍了惯性制导的基本原理、惯性制导系统及其测试技术。本书注重物理概念的介绍,以及各部分内容的内在联系和相互衔接。

本书可作为高等院校弹道导弹控制工程专业本科生和研究生的教材,也可供有关惯性导航技术方面工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

导弹惯性制导技术/刘洁瑜等编著. —西安:西北工业大学出版社,2010.4  
ISBN 978-7-5612-2764-0

I. ①导… II. ①刘… III. ①导弹制导—惯性制导 IV. ①TJ765.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第055473号

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:陕西天元印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.125

字 数:343千字

版 次:2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷

定 价:26.00元

# 前 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、惯性仪表及系统测试技术的总称,涉及机电、电子、计算机、自动控制、光学、精密仪器等多个技术学科。尤其是惯性导航与自动控制相结合而发展起来的惯性制导技术,因其具有完全自主性而在弹道导弹、人造卫星、运载火箭等飞行器的飞行控制中具有不可替代的作用,已成为世界各国争相发展的高新技术之一。同时,为了保证惯性制导系统工作的可靠性和制导精度,对惯性系统的性能参数和环境适应性测试已成为应用惯性技术的关键环节。

本书是作者在多年教学工作的基础上,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。基础知识、制导原理、惯性仪表和系统部分主要参考了国内现有同类著作的相关内容,惯性系统的测试技术则是作者与其他同志合作进行的教学和科研成果的总结。

全书共分三部分:第一部分为基础部分(第1~5章),介绍惯性制导基础知识以及基本的惯性仪表——陀螺仪、加速度计和陀螺稳定平台;第二部分(第6~8章)介绍惯性制导系统,内容包括平台式惯性导航原理、精度分析;第三部分(第9章)介绍惯性系统的测试技术,包括各种测试原理、测试设备和系统。其中,对惯导系统自标定、惯性制导系统抗电磁干扰性能测试的内容是首次公开发表。

第二炮兵工程学院副院长刘光斌教授和空军工程大学张宗麟教授等各位同仁对本书的编著给予了极大的支持,提出了许多宝贵意见和建议;第二炮兵工程学院钱培贤教授对全书进行了认真细致的审阅和修改,在此一并表示衷心的感谢,同时对书中引用文献的作者表示感谢!

限于作者水平,对书中存在的缺点和错误,恳请专家和广大读者批评指正。

编 者

2010年1月

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 基本概念	1
1.2 惯性技术的发展及应用	1
1.3 导弹武器惯性制导系统	8
第 2 章 惯性制导的基础理论	13
2.1 定点转动刚体角位置的表示方法	13
2.2 惯性技术中的常用坐标系	19
2.3 地球参考椭球及地球重力场特性	26
第 3 章 惯性仪表陀螺仪	33
3.1 陀螺仪的定义及分类	33
3.2 刚体转子陀螺仪的基本理论	35
3.3 典型刚体转子陀螺仪	65
3.4 新型陀螺仪	81
第 4 章 惯性仪表加速度计	102
4.1 加速度计的测量原理	102
4.2 液浮摆式加速度计	108
4.3 挠性加速度计	112
4.4 硅加速度计	118
4.5 陀螺积分加速度计	119
第 5 章 陀螺稳定平台	123
5.1 陀螺稳定平台概述	123
5.2 用单自由度积分陀螺仪组成的单轴稳定平台	125
第 6 章 惯性制导方法	129
6.1 摄动制导	129
6.2 显式制导	143

<b>第 7 章 导弹制导系统</b> .....	162
7.1 平台式制导系统 .....	162
7.2 捷联惯性制导系统 .....	173
<b>第 8 章 导弹惯性制导系统误差分析</b> .....	179
8.1 导弹圆概率偏差 .....	179
8.2 导弹射击误差分类 .....	180
8.3 误差源影响简析 .....	182
8.4 惯性仪表的误差模型 .....	185
<b>第 9 章 导弹惯性系统自标定及电磁环境适应性测试</b> .....	193
9.1 惯导系统误差标定模型及其传统标定方法 .....	193
9.2 平台惯导系统射前自标定技术 .....	201
9.3 惯导系统电磁环境适应性测试 .....	214
<b>参考文献</b> .....	219

# 第 1 章 概 述

## 1.1 基 本 概 念

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。目前所说的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的测试技术的总称。

惯性导航是利用惯性仪表测量载体相对惯性空间的线运动和角运动参数,在给定的初始条件下,输出载体的姿态参数和导航定位参数。惯性导航系统主要用于能人工操纵的载体上,如飞机、舰船等,其作用相当于一个测量装置,它将导航定位参数提供给驾驶员,使载体按一定的航线航行。它还可以将导航定位参数提供给自动驾驶仪,自动引导载体沿预定的航线到达目的地,这时驾驶员只起监控作用。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,能全天候工作。

惯性制导系统和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、人造地球卫星和宇宙探测器的运载火箭等。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,这样的系统称为速率捷联惯性测量系统。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基准轴系通过回路控制框架运动,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。

## 1.2 惯性技术的发展及应用

惯性系统技术的发展和惯性仪表技术的发展和相辅相成的,惯性技术的历史始于对陀螺仪应用的探索。1852年,法国科学家傅科(Foucault)在一次关于“叙述地球运动的学术报告

会”上指出：“轴水平放置的陀螺，在自转的地球上力求使其自转轴与地球子午线保持一致。”利用这一原理，傅科将一个主轴水平放置的陀螺转子支撑在两个平衡环中，再配上简单的修正装置和阻尼装置，试图使陀螺主轴保持在真北方向上，从而制成了世界上第一台实验用陀螺罗经。从那时到现在，惯性技术的发展经历了几个有代表性的阶段。

最早的能够实用的陀螺仪表是用于海上导航的陀螺罗经。1908年安休茨(Anschutz)在德国、1909年斯伯利(Sperry)在美国，先后制成了用于舰船导航的陀螺罗经。这可以作为陀螺仪应用技术形成和发展的开端。

早期的陀螺罗经在舰船摇摆和机动航行时产生很大的机动误差。1923年德国青年科学家舒拉(Schuler)提出，固有振荡周期为84.4 min的机械装置不受其在地球表面运动加速度的影响，即“舒拉调谐原理”，从理论上和技术上完善了陀螺罗经的设计和结构。利用这一原理制成的陀螺罗经的导航精度得到很大提高。20世纪50年代以后，陀螺罗经的修正方法已由重力摆式发展为电磁摆式，出现了电控罗经，并在此基础上发展成为平台罗经。

陀螺仪在航空上的应用比航海稍晚些。从20世纪20年代起，在飞机上相继出现了陀螺转弯仪、陀螺地平仪和陀螺方向仪作为指示仪表。30年代中期，在飞机驾驶仪中开始使用陀螺仪表作为敏感元件。到了40年代，航空陀螺仪表趋向组合式，相继出现了陀螺磁罗盘、全姿态组合陀螺仪和陀螺稳定平台。

第二次世界大战末期，在德国的V-2火箭上，第一次装上了初级的惯性制导系统。利用陀螺仪稳定火箭的水平和航向姿态，沿着火箭的纵轴方向安装了陀螺积分加速度计，用以提供火箭入轨的初始速度。虽然V-2火箭是德国法西斯战争的产物，并且当时受到自动控制、电子、计算机等技术水平的限制，它的导航定位精度还比较低，结构也很不完善，但是这一创举引起人们极大的重视，把惯性系统的研制推进到了一个新的水平。

第二次世界大战后，美国和苏联都投入了大量的人力和物力开展惯性导航/制导系统(以下简称惯导系统)的研制工作。20世纪50年代，由于技术和工艺的进步，以及电子计算机的发展，为完善惯导系统的工程实现提供了较好的物质条件。美国首先在陀螺精度上取得突破，麻省理工学院仪表实验室和北美航空公司，先后研制出惯性级精度的液浮陀螺仪和惯性导航平台；特别是北美航空公司研制的XN-T型平台式惯性导航系统，实现了比较完善的具有三轴陀螺平台的惯导系统方案。1954年惯导系统在飞机上试验成功；1958年“肛鱼”号潜艇从珍珠港附近潜入深海，依靠惯导系统穿过北极到达英国波特兰港，历时21天，航程8146 n mile。这表明惯性导航技术在20世纪50年代已趋于成熟。

20世纪60年代初期，出现了比液浮陀螺仪结构简单、成本较低的动力调谐陀螺仪。从20世纪50年代末至60年代初，用液浮陀螺仪、气浮陀螺仪和动力调谐陀螺仪构成的平台式惯导系统得到迅速发展，并大量装备于各种飞机、舰船、导弹和航天飞行器上。

20世纪70年代，以静电陀螺仪构成的高精度平台式惯导系统进入实用阶段。由于科技的进步，使激光陀螺仪也达到惯性级精度，还相继出现了光纤陀螺仪和半球谐振陀螺仪。在此期间，还大力开展了捷联式惯导系统的研制工作。

20世纪80年代，以激光陀螺仪构成的捷联式惯导系统获得了工程应用，这是惯导技术发展的又一重大进步。捷联式惯导系统将惯性传感器直接固联于载体，用“数学平台”取代了复杂的陀螺机械稳定平台，因此它具有结构简单、成本低等许多优点。当代计算机技术，尤其是微型计算机的优良性能，为捷联式系统提供了实时高效的运算工具，而光学陀螺仪的出现，又



为它提供了比较理想的敏感元件。因此,捷联式惯导系统具有十分广阔的发展和前景。

20世纪90年代以来,继微米/纳米技术成功应用于大规模集成电路制作后,采用微电子机械加工技术(MEMT)制造的各种微传感器和微机电系统(MEMS)脱颖而出,平均年增长速度达到30%。微机电系统是一项实用技术,其真正价值在于,有可能将简单的微结构技术同微电子技术相结合,产生一种既能搜集和传送信息,又能按照信息采取行动的机器。微结构传感器是微机电系统的重要组成部分,而微结构惯性传感器又是微传感器中目前发展最快、最具有实用性的产品之一。

经过近一个世纪的发展,惯性技术已经发展成为集经典的基础理论和近、现代的物理、自动控制、电子技术、精密工艺、精密测量、微电子及计算机于一体的多学科的综合性的尖端技术,形成了一门重要的学科。

当今,惯性技术已经成为一个国家科技水平和军事实力的重要标志之一。世界各工业技术强国都对此给予了极大的重视和大力投资。国外从事这方面研究、研制的公司、机构、生产厂家、试验中心及高等院校有200余个。

我国的惯性技术研究始于20世纪50年代,经历了从技术引进和对国外的惯性元件、仪表的仿制,到改型提高和创新开发的过程。经过多年艰苦不懈的努力,自行研制的惯性传感器和惯性系统已经成功地应用于现代的军事装备和国民经济领域中,如各种型号的卫星准确入轨、洲际导弹精确命中目标,以及核潜艇和测量船的精确导航定位均需要高新的惯性技术作保证。目前,从事惯性技术的科技机构和科技工作者,正在为缩短与国际水平的差距而积极努力。

在导航定位中,通过测量位置、速度或加速度都可求得载体的运动轨迹,但在运载体内能够测量的物理量只有加速度和角速度或角位移。因此,在各种导航定位手段中,惯性导航/制导系统的自主性比其他导航/制导设备所无法替代的。

随着现代战争向高技术方向发展,对武器系统的隐蔽性、机动性和生存性提出了越来越高的要求,其中自主性是军事应用的最大需求。在武器系统中,惯性装置作为中心信息源可以完全自主地向各个武器的分系统提供连续实时的信息,因而惯性技术已经成为现代武器系统中的一项关键的支撑技术。随着高新技术的发展,军用技术和民用技术的界限也日益模糊,军民两用技术所占防务技术开发的比例越来越大。目前,惯性技术的应用正在积极向其他经济领域拓宽。未来,惯性技术的发展将主要有以下几个方向。

### 1.2.1 战略武器系统将应用成熟的机电陀螺技术

液浮陀螺、静电陀螺和动力调谐陀螺是技术成熟的三种自旋质量的机电陀螺,具有目前惯性系统所要求的低噪声和低偏值误差特性,已经达到了精密仪表领域内成熟的高技术水平。国际上,其研制活动已经进入到一个平稳状态。由于采用了高度专业化的抗辐射设计,在承受瞬间干扰时精度损失极小,因此在今后一段时间内,只要对其需求保持不变,仍将继续生产,并在导航、制导和控制用的惯性系统市场中占据一定的位置。

### 1.2.2 新型的全固态惯性传感器将成为主导产品

激光陀螺、光纤陀螺和微机械惯性仪表都是广义上的惯性传感器,它们是根据近代物理学原理制成的具有惯性传感器(陀螺仪和加速度计)效应的传感器,因其无活动部件,故称为固态传感器。

近 10 年来,环形激光陀螺已经控制了全球的惯性导航市场,其中包括大部分军用和民用飞机、水面舰船、常规潜艇、先进战术导弹和地面战车等,近年来正在逐步用于运载火箭和卫星中。估计在今后 20 年内,环形激光陀螺的生产率将继续增长,技术进展不会停顿,并与光纤陀螺一起迅速取代自旋质量的机械陀螺,统治中等精度的惯性系统市场。激光陀螺性能可能达到的极限是量子极限  $3 \times 10^{-4}^\circ/\text{h}$ 。

光纤陀螺是一种真正的固态装置,从研制工作量和投入资源来看,当今最重要的新型陀螺技术是光纤陀螺技术。光纤陀螺与环形激光陀螺的许多特性相同,但其成本却比激光陀螺低得多。目前光纤陀螺的性能还不及激光陀螺,但是在战术导弹制导等短期应用方面已经可以取代机电陀螺,干涉型光纤陀螺已进入生产阶段并逐步投入应用。一种导航级的干涉型光纤陀螺正在为 GPS 制导组件计划(GGP)进行研制。此外,由于光纤陀螺中的许多光学功能可以用较低的净成本在多功能集成光学芯片上获得,故集成光学技术是进行大批生产紧凑而低成本的光纤陀螺必备的重要条件。一种采用集成光学玻璃-波导环型谐振器的微型光学陀螺已研制多年,并即将投入批量生产,将首先用于导弹制导中。

微机械惯性仪表是集精密仪表、精密机械、微电子学、半导体集成电路工艺等技术于一身的一项世界前沿性新技术,是惯性技术领域内近年来引起广泛重视的一个重要发展方向。它是利用微机电技术(微电子技术与微机械技术的结合)在硅、石英等晶体材料或某些光电材料上刻蚀制作微结构惯性传感器或仪表的。微机械惯性仪表具有体积小、质量轻、功耗小、启动快、成本低、可靠性高和易于实现数字化和智能化等优点,它的研制成功把人们从惯性仪表的宏观概念引向微观世界。属于低性能级的微机械惯性仪表最适于短时工作的战术武器,如战术导弹、精确制导炸弹和智能炮弹,在偏置稳定性大于  $15^\circ/\text{h}$  的低成本场合,硅和石英微机械陀螺的地位是无可争议的。微机械惯性仪表的出现将引起惯性传感器乃至整个惯性系统向各种各样的军事和商业领域扩展,它的高速发展将成为 21 世纪传感器领域内引人注目的成就。

### 1.2.3 战术导航定位系统的主要方向是捷联惯性系统与 GPS 的组合

尽管 GPS 的应用已经达到了空前广泛的程度,但其本质上是一种无线电导航系统,极易受到干扰,因此军用导航不能完全依赖于 GPS,而应该根据 INS 与 GPS 的互补性,将 GPS 与惯性技术组合。

目前采用红外/激光和其他主动射频制导技术的制导武器的成本很高,其主要原因是需要采用复杂而昂贵的导引头。为此,美国从 20 世纪 90 年代中期开始研制 GPS 制导组件,即 GGP 计划,其目的是通过将 INS/GPS 组合系统用于导弹制导,允许导弹在飞行过程中依靠 GPS 信号修正制导误差,不必依靠载机的位置信息而自主地导向目标区,并在预期目标的 3 m 范围内将导弹引爆,使导弹真正具有“发射后不管的能力”。智能武器也是美国军备研制的重要工作,即把 GPS/INS 制导组件安装到炸弹上,使非制导炸弹变为全天候的精确攻击武器。此外,将 GPS 接收机嵌入惯导系统的“GPS 惯性导航系统组件”,亦是美国航空电子设备改进中的一个重要组成部分。

舰船惯性导航系统与其他导航系统相结合是未来舰船导航系统的普遍方案。在舰船上可与惯性装置组合的外部传感器很多,其中 INS/GPS 组合系统将在水面舰船上逐步得到普及。GPS 还将用做潜艇惯导系统在接近水面时的修正。

### 1.2.4 惯性技术从军用领域向民用领域拓宽

随着经济建设对科学技术需要的提高,以及人们对惯性技术了解的不断普及和深入,惯性技术的应用领域已逐步从军用扩展到民用,从导航/制导扩展到稳定/控制,并正在努力开发具有市场竞争力的新技术和新产品。

惯性技术的民用领域主要是精密测量和定位。在 GPS 信号不能进入的水下、冰下、原始森林、隧道以及城市建筑物密集地区,惯性技术在精密导航、测量及定位方面仍较 GPS 具有优势。此外,采用高精度的航海和航空重力仪用于陆地和海洋资源的物理勘探,以及采用惯性系统测量勘探深埋在地下的各种管道的曲率半径等,都是惯性系统具有优势的应用领域。

总之,在应用惯性技术进行导航/制导、定位/定向、稳定、瞄准及测量/控制等领域,随着电子技术和计算机技术的迅速发展、高精度卫星导航 GPS 技术的成熟应用,一个新的时代正在到来,即惯性仪表向全固态型发展、惯性系统向以惯性为主的组合系统发展、惯性技术从军用向军民两用方向扩展。而无论军用或民用市场,减小尺寸和提高性能/价格比是惯性技术进入大规模应用的主要驱动力,因而目前各国正在积极研制低成本的惯性传感器。

### 1.2.5 惯性技术在航空上的应用

陀螺仪用来测量飞机的姿态角(俯仰角、横滚角、航向角)和角速度,这使它成为飞行驾驶的重要仪表。飞行控制系统(如自动驾驶仪和自动稳定器)则是在测量出这些参数的基础上,实现对飞机的自动控制或稳定,因而陀螺仪又是飞行控制系统的重要部件。飞机上的其他特种设备如机载雷达系统、武器投放系统和航空照相系统等,也需要陀螺仪提供这些信息。陀螺地平仪、陀螺方向仪、陀螺磁罗盘和速率陀螺仪等仪表,都是首先在航空上获得应用的。在现代先进的飞机上,一般使用全姿态组合陀螺仪或陀螺稳定平台或捷联航向姿态系统,作为飞机姿态和航向的测量中心,给座舱综合显示系统、飞行控制系统,以及其他机载特种设备提供飞机的姿态和航向测量。

惯性导航最先应用于飞机,20 世纪 50 年代初就已经演示了机载惯性导航装置。作为商业飞机和大多数军用航空器的惯性导航装置,要求固有位置误差增长为  $0.5\sim 2$  n mile/h,速度误差为  $2\sim 4$  m/s。70 年代初,以机电陀螺为基础的机载惯性导航装置,已经达到了这些性能指标。从那时起,机载惯性导航装置的发展目标,是减小体积、质量和降低成本,提高可靠性,降低维修费,从而减少寿命周期成本。正是这种需求,给激光陀螺、光纤陀螺等光电惯性器件的发展,及其在机载惯性导航装置中的应用提供了巨大的推动力。

光电惯性器件还具有机械结构简单、可靠性高、尺寸小等特点,因而光电惯性器件有可能满足机载惯性导航装置发展的需要。这种需要与可能相结合,使光电惯性器件迅速进入了机载惯性导航领域。

### 1.2.6 惯性技术在航海上的应用

陀螺仪早已成为航海的重要导航仪。各种舰船广泛应用的陀螺罗经(陀螺罗盘)就是一种能自动寻北的导航仪器,它不仅可为舰船导航提供精确可靠的航向基准,而且也能为舰船上的火炮控制、鱼雷、导弹、声呐、雷达及自动舵等装置提供方位基准。舰船的纵摇和横摇则使用陀螺稳定平台来测量。在现代先进的舰船上,一般使用平台罗经作为舰船姿态和航向的测量中

心,给舰位推算系统、武器发射系统,以及导弹指挥系统等提供精确的航向和纵、横摇信息。

20世纪80年代,激光陀螺开始用于水面战舰。1984年美国洛克威尔公司制造出第一台预生产型环形激光陀螺导航仪。而90年代,挪威皇家海军用环形激光陀螺惯性导航仪,改进其奥斯陆级护卫舰。

美国洛克威尔公司的环形激光陀螺导航仪,是供水面战舰使用的捷联式惯性导航系统,可不间断地按要求以数字或模拟形式提供有关战舰的地理位置、速度、姿态和姿态速率的精确数据,满足对下一代水面战舰惯性导航系统的性能和成本的严格要求。该导航仪的惯性测量装置由三个环形激光陀螺、一个三轴高精度加速度计和电子系统组成。

### 1.2.7 惯性技术在航天上的应用

陀螺仪是人造卫星、宇宙飞船等航天飞行器姿态控制系统重要的组成部件。例如在对地球定向的卫星中,采用地球敏感器和陀螺仪组成的装置测量卫星的俯仰角及横滚角,采用轨道陀螺盘测量卫星的偏航角。在航天飞行器的姿态控制系统中,还采用大动量矩转子的所谓控制力矩陀螺,直接作为控制飞行器转动的执行元件。在近、中程战术导弹的控制系统中,广泛采用水平自由陀螺仪和垂直自由陀螺仪测量导弹的俯仰角、横滚角及偏航角。在各种战术导弹的控制系统中,还广泛应用速率陀螺仪作为敏感元件。陀螺仪还用于鱼雷和反坦克导弹的定向及坦克火炮的控制系统。美国在“阿波罗—13”宇宙飞船上成功地应用了捷联技术。1969年,在“阿波罗—13”飞向月球的途中,服务舱的氧气系统爆炸,使指令舱的电源遭到破坏。在危急情况下,正是靠了德雷伯实验室设计的低功耗备份捷联惯导系统 LM/ASA,才将飞船从离地36万千米的空间引导到返回地球的轨道上,安全地降落在太平洋上。

### 1.2.8 惯性技术在地面导航中的应用

现代战争是立体战争,要求各军、兵种协同作战。对陆军而言,为在复杂的地理环境和各种外界干扰条件下迅速地调动地面部队,有效地发挥地面火力,也需要精确的定位和定向。于是,惯导系统被应用到陆军炮兵测位和地面战车导航。坦克、装甲战车等地面作战平台,不仅应具有高机动能力和运动中射击能力,而且应随时掌握自己、友军、敌军的位置,以便协同作战。自行火炮之类的作战车辆,则必须能频繁和随机地运动、停止、快速瞄准和射击,然后迅速转移到新的射击阵地。这种作战方式要求地面作战平台具有地面导航能力,即能不断测量位置的变化,准确确定当前的位置,精确保持动态姿态基准。

20世纪70年代初期美国就开始考察地面导航的方法和技术。1980年有人提出,考虑到无线电导航系统可能受到干扰,GPS卫星导航的空间飞行器易受攻击,因而地面导航应以自主、独立的惯性导航系统为基础。在军事部门的支持下,霍尼韦尔公司、利顿公司、辛格公司等,在80年代初开始研究将环形激光陀螺用于地面导航。霍尼韦尔公司将以GG1342型激光陀螺为基础的机载惯性基准系统装在M48坦克上进行试验,目的是评估捷联式惯性基准系统在地面战车环境中的性能,以及实验证明环形激光陀螺惯性系统可以在这种环境中提供所需的导航和姿态信息。结果,野外试验演示获得方位精度、位置精度、姿态误差、方位偏移等数据,均优于规范的要求,证明了环形激光陀螺在地面导航系统中应用的潜力。鉴于激光陀螺可靠性高,反应时间短,可直接提供数字输出;以激光陀螺为基础的动态基准装置结构简单、牢固,动态范围大,可直接提供角速率输出;激光陀螺捷联式惯性导航系统在精度、环境适应能力、可

靠性等方面可以满足严酷的地面战场使用要求,因而将激光陀螺地面导航系统作为实现地面导航的重要途径是理所当然的。

20 世纪 80 年代中期以后,采用激光陀螺和光纤陀螺的地面导航系统逐步发展起来。美国、英国、德国、法国、加拿大等国研制、生产了多种型号的地面导航系统,配用在自行榴弹炮、炮兵观察车、测地车、侦察车、机动导弹发射架等武器系统上。地面导航系统正逐渐成为各国地面作战平台配用的标准装置。

### 1.2.9 惯性技术在瞄准和姿态稳定中的应用

机载合成孔径雷达的运动补偿、红外传感器的稳定、舰载卫星通信天线的稳定等,需要精确的传感器平台姿态信息,这也是光电惯性器件的一个重要应用领域。传统的惯性导航系统的要求一般集中在长期位置和速度精度,而瞄准稳定系统的要求则集中于姿态性能,对长期和短期误差均很注意。例如,合成孔径雷达运动补偿要求极高的短期位置精度、高带宽、小于 1 s 的姿态噪声;红外传感器稳定则需要高达 500 Hz 的高带宽、实时数据处理、极精确的姿态信息。

20 世纪 90 年代以来,光电惯性器件已开始应用于瞄准和稳定领域。BEI 电子公司生产的 QRS-10 型石英音叉陀螺,已被美国海军用于 WSC-6 型卫星通信系统的舰载天线稳定,取代原有的普通机械陀螺,到 1994 年已安装了近 90 套。由于石英陀螺无活动部件,不存在磨损,因而工作 120 万小时以上尚未出现故障。霍尼韦尔公司的 H-764G 和利顿公司的 LN-100G 惯性测量装置,已在 F-4 飞机机载的 AN/APG-76 合成孔径雷达系统上用于获得精确的位置数据,帮助飞机在机动时稳定雷达的瞄准线,提高雷达系统的性能。霍尼韦尔公司以红外传感器平台稳定为应用背景,研制了以 GG1320 环形激光陀螺为基础的惯性姿态装置。惯性姿态装置由惯性传感器组件、高压电源、惯性传感器电子系统、处理机、处理机接口组成。其中,惯性传感器组件和高压电源装在红外传感器平台上,其余部分装在电子系统支架上。惯性传感器组件采用三个 GG1320 环形激光陀螺。试验证明,惯性姿态装置可以满足瞄准一跟踪的要求。

### 1.2.10 惯性技术在民用方面的应用

惯性技术的应用范围还扩展到众多民用领域。以惯导系统为基础发展起来的惯性测量和惯性定位系统,可以用于大地测量、地图绘制、海洋调查、地球物理勘探、管道铺设选线、石油钻井定位和机器人等需要大范围测量及精确定位的场合。

随着近代工业机械化、自动化程度的提高,对工程测量的效率和精度提出了新的要求。陀螺仪作为一种灵敏度高、稳定性好、不受磁性干扰、使用方便的测量仪器,已逐渐被广泛使用。目前使用时间最长、应用最广的是工程测量中用以确定子午线方位的陀螺经纬仪。在采矿、地质等钻井中,为测量井壁偏斜角度和方位,使用了陀螺测斜仪。

随着成本的降低和技术的发展,惯性技术在国民经济的其他部门也逐渐得到应用。美国汽车制造厂,考虑将石英音叉陀螺用于汽车防滑系统和动态驾驶控制。洛克威尔公司打算将小型综合全球定位系统 Z 惯性导航系统用于应急车辆,如救护车、救火车、警车等。惯性测量装置使车辆在高楼等阻塞 GPS 信号时继续保持预定的行车路线,克服了“都市峡谷”的影响。这家公司在 1994 年的一次展览会上,展示了装在货车上的导航系统。车辆的位置显示在轻便膝上计算机显示的地图上,导航位置与车辆实际位置完全一致。

### 1.3 导弹武器惯性制导系统

#### 1.3.1 弹道式导弹惯性制导系统

弹道导弹的飞行弹道分为三段:主动飞行段、自由飞行段和再入飞行段,如图 1-1 所示。

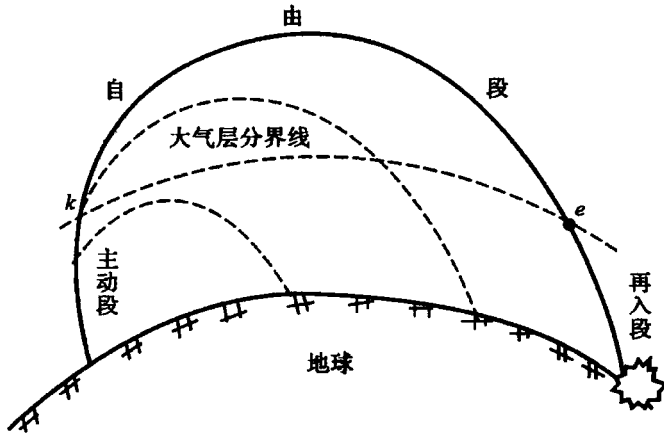


图 1-1 弹道导弹的飞行弹道

导弹的命中精度主要取决于主动飞行段结束时导弹的运动参数(位置和速度)。弹道导弹一般都采用惯性制导系统进行主动飞行段的制导。此外,在发射前要进行方位瞄准和水平修正,为制导系统建立初始基准,这要由地面方位瞄准系统和水平修正系统与导弹上的制导和控制系统共同完成。方位瞄准和水平修正的精度直接影响制导精度。有些弹道导弹还采用末制导来提高制导精度,例如美国“潘兴 II”型导弹就使用了地形匹配制导系统进行再入飞行段的末制导。

弹道导弹由惯性制导系统引导去攻击目标。因此,制导系统的精度直接影响导弹的命中精度,当然非制导误差也会影响命中精度,制导系统的精度在很大程度上取决于惯性仪表的精度。如表 1-1 所示,对于射程 10 000 km 的最小能量弹道的洲际弹道导弹,0.01 cm/s<sup>2</sup> 的加速度表零位偏差所引起的命中偏差,纵向约为 200 m,横向约为 30 m。陀螺的零位偏差 0.02°/h,引起命中偏差,纵向约为 400 m,横向约为 130 m。因此,为了提高导弹的命中精度,惯性仪表已经发展了四代,精度提高了 4 个数量级,陀螺从 0.01°/h 的漂移量减到了 10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup>°/h。加速度表从 10<sup>-3</sup>g 提高到了 10<sup>-7</sup>~10<sup>-9</sup>g,导弹的命中精度也由 1.6 km 提高到了 0.12 km。如 MK 导弹的命中精度达到 120 m,其主要措施是采用了高级惯性参考球面而不再用平台,改善了惯性器件的工作环境,同时采用了第三代高精度陀螺和加速度表。为了提高导弹的命中精度,在努力提高惯性仪表精度的同时,还积极地研究了许多其他提高命中精度的办法,比较实用的办法有如下几种。

#### 1. 建立误差模型,对误差进行分离补偿

美国从 20 世纪 60 年代起开始这方面的研究工作,建立了专门的惯性制导试验基地,研究惯性器件的误差模型及其测量与补偿方法;选定最佳定向,设法取得精确的大地测量和地球重

力场数据,研究重力异常的影响并在制导系统中进行补偿;精确计算风和大气密度对散布的影响并加以补偿;改进软件设计,采用更好的制导系统误差模型、精确的计算方法和瞄准与校准程序等。像民兵ⅢNS-S制导系统采取上述一些措施之后,尽管惯性仪表精度提高不多,但导弹的命中精度却得到明显提高。

表 1-1 惯性仪表对命中精度的影响

误差源	命中偏差	
	纵向/m	横向/m
加速度表的零位偏差 $0.01\text{cm/s}^2$	200	30
加速度比例因数误差 $10^{-5}$	60	
加速度表的不正交性 $10\mu\text{rad}$	200	
平台伺服机构动态校准误差 $5\mu\text{rad}$	70	
陀螺的零位偏差 $0.02^\circ/\text{h}$	400	130
陀螺对加速度的敏感漂移 $0.02^\circ/(\text{h} \cdot g^{-1})$	700	200
振动所引起的陀螺顺从漂移	200	70
均方根和	1 050	270
相当的圆概率误差	780	780

## 2. 采用末助推控制系统

在再入飞行器上装末助推控制系统修正导弹飞行积累的速度与位置误差,并控制子弹头的瞄准与释放,这也是提高命中精度的有效方法,从民兵Ⅲ和海神导弹起,以后的导弹都安装了这样的系统。

## 3. 采用星光惯性制导系统

星光惯性制导系统主要用于对固体弹道导弹的中段飞行进行制导。在潜地导弹和陆基机动弹道导弹上,用以补偿由于发射点位置变化对命中精度的影响,美国1969年开始研制这种系统,现已用在三叉戟Ⅱ导弹制导系统中,使得它的命中精度在射程增加到7 400 km的情况下达到了460 m,比射程只有4 600 km的海神导弹还高100 m。三叉戟Ⅱ和侏儒导弹采用了这类制导系统,三叉戟采用其改进型MK-6。侏儒导弹用环形激光陀螺和星光惯性制导系统的组合型作为备选方案,在机动发射的情况下,其命中精度渴望达到MX导弹的水平。

## 4. 采用全球定位系统接收机

20世纪70年代,美国空军曾经委托法雷珀实验室和几家公司为MX导弹研制全球定位系统接收机并把它作为高级惯性参考球惯性制导系统的辅助系统。这是一种四通道接收机,可以接收四颗卫星发出的信号,信号经过处理后,用于修正导弹的飞行方向和速度,可以提高命中精度,1980年初,这套接收机被装在民兵Ⅲ导弹上做飞行试验,所测得的随机误差在0.6~0.003 m/s之间。但是,当时由于担心各种误差源均加到惯性参考球中去会给制导系统带来麻烦,另外考虑到接收机依赖外部信息,在战时,一旦全球定位系统遭到破坏,则接收机也就不起作用

用了;因此,1981年初决定停止此项研究工作。近年来经过多方面研究与分析,认为它仍是可以采用的系统。三叉戟Ⅱ潜地导弹,就采用了一种改进的星光跟踪辅助惯性制导系统 MK6 和导航星全球定位系统信号接收机辅助系统。采用这样的制导系统,在导弹射程增大到 11 000 km 的情况下,其命中精度还会提高到 122 m。

### 5. 采用末制导系统

采用末制导系统也是提高导弹命中精度的重要途径之一。多年来美国研制了多种末制导系统,包括惯性末制导系统,地形匹配末制导系统,景象匹配末制导系统(包括雷达区域相关装置,光学区域相关装置)和距离相关末制导系统等,惯性地形匹配制导系统已用于战斧巡航导弹,雷达区域相关装置已用于潘兴Ⅱ中程导弹。20世纪70年代中期研制的高级机动弹头(AMARV)采用了休眠型惯性导航系统(DINS)末制导,该系统由三个彼此正交的 EG1328 激光陀螺(精度为  $0.003^{\circ}/h$ ),三个  $X_i$  型加速度表,电子组件,一个 16 位并行微程序设计双极处理机和飞行软件组成。该系统的功能是在导弹发射前修正飞行参数,进行初始对准,在助推段执行导航功能,并和助推级的名义弹道进行位置-速度匹配,通过比较惯性导航系统测得的速度与助推级预计的名义速度,可以修正发射前的初始对准偏差;在头体分离后的自由飞行段,导航系统使弹头保持适当的姿态并能估出再入点;在再入段,导航系统继续对弹头导航,使弹头到达命中点。这套系统已经用民兵Ⅲ导弹做过三次飞行试验,试验证明,系统的性能良好。此外,从 1976 年开始,还执行了一项精确制导弹头(PGRV)计划,这是一种加末端定位传感器的高级机动弹头。在弹头飞近目标时,末端传感器给弹头的制导系统提供飞行位置与速度的新数据,对制导系统进行修正,命中精度可达 30 m。这种弹头被定名为 MK-600,已列为三叉戟Ⅱ的备选弹头。从实际应用看,采用末制导会大大提高命中精度,潘兴Ⅱ导弹射程 1 800 km,比潘兴ⅠA 远 1 200 km,采用惯导系统加雷达相关末制导系统后,命中精度由潘兴ⅠA 的 370 m 提高到 30 m。

### 1.3.2 巡航导弹惯性制导系统

巡航导弹是依靠空气喷气发动机的推力和弹翼的气动升力,主要以巡航状态在大气层内飞行的导弹。它可以从地面、空中、水面或水下发射,攻击固定目标或活动目标。

巡航导弹主要由弹体、制导系统、动力装置和战斗部组成。它的主要特征是,在飞行过程中大部分时间都处于巡航状态,即以千米耗油量最低的巡航速度作匀速直线水平飞行,所以它的推进效率要比地地弹道导弹高。加以它采用涡轮喷气、涡轮风扇或冲压式发动机,不必自带氧化剂,从而大幅度地减少了载油量。结果使得巡航导弹变得小而轻,成为目前寿命周期成本最低的弹头运载工具。同时巡航导弹还具有机动多变的弹道,即变高度、变速度、变方向,如图 1-2 所示。由于它能在低速(亚音速)、低空(30~60 m)远距离巡航飞行,不易被雷达发现,因而能钻过反导弹网。在 20 世纪七八十年代,美国、苏联两国曾以其作为核战略体制的支柱。

制导系统是巡航导弹的关键,这种制导系统必须使导弹沿着低空迂回路线飞行,足以精确地到达目标,从而以其小型弹头达到最大可能的毁伤效应。常采用惯性、遥控、自寻的制导或组合制导。显然,它的制导必须是自主的,因为发射后与导弹的任何通信都会使导弹暴露其航行位置,从而受到防御者拦截,故惯性制导系统是明显的选择。但在几个小时巡航时间内,惯性仪表随时间积累的漂移会使命中精度降低,需要有其他类型的制导系统来定期修正惯性制导系统,这就构成了组合制导。为了进一步提高命中精度,正式发展和应用的有末制导技术,属于自主末制导系统的有,毫米波辐射计辐射图象匹配制导、电视摄像机地貌影像匹配制导、



红外成像地形匹配制导和微波雷达图像匹配制导等。由于巡航导弹飞行时间较长,因而有时还要有中制导,其中导航星全球定位系统可供选用。

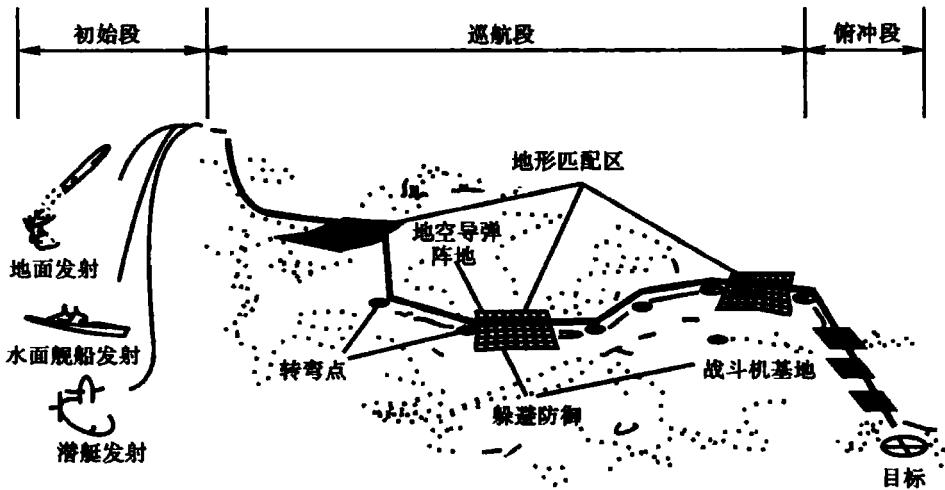


图 1-2 巡航导弹飞行轨迹

美国现有巡航导弹都采用惯性导航加地形匹配制导的组合制导系统,用地形匹配修正惯性导航的系统,使命中精度达到 30 m 左右。

从发射起到飞抵目标为止的整个时间段内对导弹实施全程连续制导,采取分段的惯性导航和地形匹配交替使用,进入目标域后采用区域相关的末制导,惯性导航是巡航导弹的基本方法。它根据惯性运动的原理,利用装在导弹上的惯性敏感组合(陀螺仪与加速度计)和解算装置(电子计算机),自行测算导弹每一瞬间的位置,再与程序装置中预先确定的导弹飞行航道相比较,计算出偏差量,然后通过执行机构,控制导弹回到预定航道而飞向目标。地形匹配制导是巡航导弹的最重要的辅助制导方法,它是从地面各点具有不同的海拔高度这一特点出发,对导弹进行定位的制导系统。为保证系统工作,须预先使用侦察卫星或战略侦察机获取导弹预定航线上的地貌情报,制作专用的标准地貌图。例如将长 10 km、宽 2 km 的区域,以定边长(如 100 m)划分成许多小正方形(如 2 000 个),然后在每一小方格内标出该处地面的平均标高,就得到一幅数字地图。只要格子分得足够小,测定时分辨力足够精确,就可以分辨出如房屋、水塔、公路之类的目标。这样的数字地图,能够很容易储存在电子计算机的记忆系统中,导弹在飞行过程中,连续测定所经过地区的地面海拔高度,把数据输入到电子计算机内,与程序设计时的标准弹道比较,算出修正量并给自动驾驶仪下达指令,就可以控制导弹回到预定的轨道上来。

如果从发射开始到飞抵目标都采用地形匹配制导,就需要相当大的记忆存储能力,既困难又麻烦,因此地形匹配制导系统通常用来定期地修正惯性制导的弹道误差。以美制 AGM—86B 巡航导弹为例,如果从海上距离第一定位区 1 000 km 到 1 500 km 发射导弹,考虑到惯导系统的精度,为保证导弹经 2 h 左右的飞行后,能进入第一个定位区,该区宽一般选为 10 km 左右,其余的定位区宽约 2 km,两区间距约 240 km。地形匹配制导能够全天候工作,不易受外界干扰,测高装置简单,制作标准数据地图也不复杂。采用这种系统后,远程巡航导弹的命中精度可以提高到 180 m 左右。

区域相关制导是巡航导弹的另一种辅助制导方式,它也是利用电子计算机识别数字地图