

军队“2110工程”三期建设教材

导弹惯性导航技术

DAODAN GUANXING DAOHANG JISHU

刘洁瑜 徐军辉 熊陶 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军队“2110 工程”三期建设教材

导弹惯性导航技术

刘洁瑜 徐军辉 熊 陶 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

惯性导航技术是导弹控制专业领域的一门重要专业基础课程。本书介绍了惯性导航的基本原理和相关技术,包括陀螺仪的基本理论、惯性仪表陀螺仪、惯性仪表加速度计、惯性仪表误差建模及标定测试、捷联惯导系统、平台式惯导系统以及惯性导航技术在导弹武器上的应用等。

本书在理论联系实际的基础上,注重基本理论的阐述与分析,可作为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

导弹惯性导航技术/刘洁瑜,徐军辉,熊陶编著. —北京:
国防工业出版社,2016.2
ISBN 978-7-118-10653-4

I. ①导… II. ①刘… ②徐… ③熊… III. ①导
弹—惯性导航—技术 IV. ①TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 038378 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 372 千字

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 41.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

惯性导航技术是一门涉及精密机械、计算机技术、微电子、光学、自动控制、材料等多种学科和领域的综合技术。惯性导航的最大优点是其完全自主性,它不依赖于任何外部信息,隐蔽性好,不会被干扰,可在空中、地面、甚至水下环境使用。目前尽管可以采用的导航方法有很多,如无线电导航、天文导航、卫星导航、地磁导航等,但是惯性导航仍是高精度制导武器必不可少的基本的和主要的导航设备。尤其是在战时各种信息安全无法保证的情况下,基于惯性导航的导弹武器系统是进行作战的最有效、最可靠的方式。因此,惯性导航技术被广泛应用于航空、航天、航海和国防工业等诸多领域。

全书共分8章,系统地介绍了惯性导航技术的基本理论、基本原理及应用:第1章介绍了惯性导航技术的基本概念、特点、应用及常用坐标系;第2章讨论了陀螺仪的基本理论、基本特性及运动分析方面的内容;第3章介绍了典型和新型惯性仪表陀螺仪的结构特点及工作原理;第4章重点研究了常用加速度计的基本原理、基本特性;第5章在惯性仪表运动特性分析的基础上介绍了惯性仪表误差建模及分析方法;第6章、第7章分别讨论了捷联式惯导系统、平台式惯导系统的工作原理和力学编排;第8章介绍了惯性导航技术在导弹上的应用。为了方便读者学习,还在附录中介绍惯性导航技术中常用的力学基础知识。

由于作者水平有限,对于书中存在的错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2015年9月

目 录

第1章 概述	1
1.1 基本概念	1
1.2 惯性导航的特点	2
1.3 惯性导航技术的发展史	2
1.4 惯性导航技术中的常用坐标系	9
1.4.1 惯性参考坐标系	9
1.4.2 地球坐标系	10
1.4.3 地理坐标系	10
1.4.4 地平坐标系	12
1.4.5 运载体坐标系	14
思考题	16
第2章 陀螺仪基本理论	18
2.1 陀螺仪的定义及分类	18
2.1.1 陀螺仪的定义	18
2.1.2 陀螺仪的分类	18
2.2 刚体转子陀螺仪的基本理论	19
2.2.1 刚体转子陀螺仪的原理结构	19
2.2.2 二自由度陀螺仪的运动现象	20
2.2.3 二自由度陀螺仪的基本特性	20
2.2.4 单自由度陀螺仪的基本特性	28
2.2.5 二自由度陀螺仪的运动方程	31
2.2.6 单自由度陀螺仪的运动方程	37
2.2.7 二自由度陀螺仪的基本运动特性分析	40
2.2.8 单自由度陀螺仪的基本运动特性分析	47
思考题	50
第3章 惯性仪表陀螺仪	52
3.1 典型刚体转子陀螺仪	52
3.1.1 三浮陀螺仪	52
3.1.2 静电陀螺仪	58

3.1.3	动力调谐陀螺仪	65
3.2	新型陀螺仪	71
3.2.1	光学陀螺仪	71
3.2.2	振动陀螺仪	82
3.2.3	原子陀螺仪	87
	思考题	88
第4章	惯性仪表加速度计	90
4.1	加速度的测量原理	90
4.1.1	比力与比力方程	90
4.1.2	加速度计的基本结构	94
4.2	液浮摆式加速度计	97
4.2.1	液浮摆式加速度计的工作原理	97
4.2.2	浮子摆的静平衡问题	99
4.2.3	摆性 ML 的选择	101
4.3	挠性加速度计	102
4.3.1	挠性加速度计的结构组成和工作原理	102
4.3.2	石英挠性加速度计的结构组成和工作原理	104
4.4	硅微加速度计	107
4.5	振梁式加速度计	109
4.6	陀螺积分加速度计	111
4.6.1	陀螺积分加速度计的组成及工作原理	112
4.6.2	形成摆性 mL 的几种方法	114
	思考题	114
第5章	惯性仪表误差建模及标定	115
5.1	基本概念	115
5.2	陀螺仪误差模型	115
5.2.1	单自由度陀螺仪的静态误差数学模型	115
5.2.2	单自由度陀螺仪的动态误差数学模型	118
5.3	加速度计误差模型	119
5.3.1	加速度计的静态误差数学模型	119
5.3.2	加速度计的动态误差数学模型	123
5.4	惯性仪表误差的标定测试	123
5.4.1	陀螺仪静态漂移误差系数标定	123
5.4.2	加速度计误差系数标定	126
	思考题	126

第 6 章 捷联惯导系统	128
6.1 概述	128
6.2 基于四元数法的姿态更新	129
6.2.1 四元数的基本理论	129
6.2.2 基于四元数的姿态矩阵求解	132
6.3 捷联惯导系统的导航计算	136
6.3.1 捷联惯组输出误差模型	136
6.3.2 质心运动方程	139
思考题	140
第 7 章 陀螺稳定平台惯导系统	141
7.1 陀螺稳定平台组成及工作原理	143
7.1.1 基本组成	143
7.1.2 单轴陀螺稳定平台	147
7.1.3 三轴陀螺稳定平台	150
7.1.4 四环三轴陀螺稳定平台	152
7.2 平台式惯导系统的基本原理	156
7.2.1 惯导系统中的几个概念	159
7.2.2 指北方位惯导系统	171
7.2.3 自由方位惯导系统	174
7.2.4 游移方位惯导系统	179
7.2.5 解析式惯导系统	182
思考题	186
第 8 章 惯性导航在导弹武器上的应用	187
8.1 陀螺仪的应用	187
8.1.1 角位移的测量	187
8.1.2 角速度与角加速度的测量	196
8.2 加速度计的应用	203
8.3 平台式惯导系统的初始对准及误差分析	206
8.3.1 概述	206
8.3.2 静基座惯导系统误差方程	207
8.3.3 单回路的初始对准	208
8.4 捷联式惯导系统的初始对准及误差分析	215
8.5 惯性定位/定向系统	218
8.5.1 惯性定位定向系统	218
8.5.2 垂直陀螺仪	218

8.5.3 方向陀螺仪 219

8.5.4 陀螺寻北仪 219

8.5.5 惯性倾斜仪 220

附录 221

附录1 定点转动刚体角位置的表示方法 221

附录2 动量矩、动量矩定理及欧拉动力学方程 225

附录3 科里奥利加速度、绝对加速度与比力方程 232

附录4 地球参考椭球及地球重力场特性 236

附录5 二自由度陀螺仪的静态误差数学模型 242

参考文献 244

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,我们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。

导航,就是通过测量并输出载体运动速度和位置,引导载体按要求的速度和轨迹运动。运载体通常包括飞机、舰船、导弹及宇宙飞行器等。用于完成导航任务的手段很多。按有无地面设备分为他备式导航与自主式导航;按获得导航信息的技术措施不同,可分为无线电导航、惯性导航、天文导航、多普勒导航等;按作用距离的不同分为近程导航、中程导航、远程导航、超远程导航等。

惯性导航,是指利用惯性元件测量载体相对于惯性空间的运动参数,并在给定运动初始条件下,由导航计算机算出载体的速度、距离、位置及姿态方位等导航参数,以便引导载体顺利完成预定的航行任务。惯性导航是一门综合了机电、光学、数学、力学、控制及计算机等学科的尖端技术,是现代科学技术发展到一定阶段的产物。由于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,这种同时具备自主性、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,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。

惯性制导是利用载体上惯性测量装置,测量载体相对惯性空间的运动参数,并在给定初始条件下,在完全自主的基础上,由制导计算机给出惯性导航参数,进而形成制导和控制信号,控制载体按预定轨道飞行。

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。

惯性导航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,简称惯导系统。惯导系统的功能,简单地说,是在飞行过程中为导弹建立基准坐标系、测量导弹的角速度、测量导弹的加速度、为导弹发射前进行初始对准提供方向基准、确定发射点的地理位置和坐标方向等。目前,惯导系统的主要实现方案有两种,即平台式惯导系统和捷联式惯导系统。平台式惯导系统,其核心部分是一个实际的陀螺稳定平台,平台上3个实体轴重现了所要求的东、北、天地理坐标系3个轴向。它为加速度计提供了精确的测量基准,保证3个加速度计测量值正好是导航计算需要的3个加速度分量。平台完全隔离了导弹的角运动,保证了加速度计的良好工作环境。捷联式惯导系统,与平台式惯导系统的主要区别是:它没有实体的陀螺稳定平台,而是通过导航计算机的运算,建立一个“数学平台”。它将陀螺仪绕弹体坐

标系的3个角速度,通过计算机实时计算,形成由弹体坐标系向类似实际平台坐标系的“平台”坐标系转换,即解算出姿态矩阵。并利用这个姿态矩阵,进一步求出导弹的姿态和航向信息。由于平台式惯导系统依靠框架隔离了导弹角运动对惯性测量装置的影响,为惯性仪表提高了良好的工作条件,使其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。而捷联式惯导系统取消了结构复杂的机电式平台,减少了大量机械零件、电子元件、电气电路,不仅减少了体积、重量、功耗和成本,而且大大提高了系统可靠性和可维修性。但是,由于陀螺仪和加速度计直接与弹体相连,弹体运动将直接传递到惯性元件,恶劣的工作环境将引起惯性元件一系列动态误差,所以误差补偿复杂,导航精度一般低于平台式惯导系统。目前,捷联式惯导系统主要用于近程和常规战术导弹武器,而中远程和洲际导弹主要还是采用平台式惯导系统。

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 惯性导航的特点

惯导系统是目前唯一能够对弹道导弹提供多种精确导航参数信息的自主导航设备,它利用惯性敏感元件(陀螺仪和加速度计)测量载体相对惯性空间的线运动和角运动参数,经过不同的机械编排得到载体的姿态参数和导航定位参数。惯导系统利用载体本身信息以及牛顿运动定律进行工作,它具有自己独特的优势:

(1) 工作自主性强。它不依靠外界信息,在不与外界发生联系的条件下独立完成导航或制导任务,因此惯导系统可以使载体扩大活动范围,并且它与外界无任何信息交换,可以避免被敌方发现而受攻击或干扰,这在当前信息化战争条件下尤为重要。

(2) 提供导航参数多。惯导系统可以实时提供加速度、速度、位置、姿态和航向等最全面的导航信息。

(3) 抗干扰能力强,使用条件宽。惯导系统对磁、电、光、热及核辐射等形成的波、场、线的影响不敏感,具有极强的抗干扰性能,既不易被敌方发现,也不易被敌方干扰。同时不受气象条件限制,能满足全天候导航的要求;也不受地面地形、沙漠或海面影响,能满足全球范围导航的要求。

惯导系统的最大优点是其完全自主性,它不依赖于任何外部信息,隐蔽性好,不会被干扰,可在空中、地面、甚至水下环境使用。目前,尽管可以采用的导航方法有很多,如无线电导航、天文导航、卫星导航、组合导航等,但是惯导系统仍是高精度制导武器必不可少的基本的和主要的导航设备。尤其是在战时各种信息安全无法保证的情况下,基于惯性导航的导弹武器系统是进行作战的最有效、最可靠的方式。

惯导系统的缺点是惯性仪表测量误差随着时间的增长而不断累加,不适合长时间连续导航,需要其他导航方式辅助使用。

1.3 惯性导航技术的发展史

惯性系统技术的发展和惯性仪表技术的发展是相辅相成的,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承在两个平衡环中,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。滚珠轴承陀螺仪算作是第一代;液浮、气浮陀螺仪算作是第二代;静电、挠性、激光陀螺仪作为第三代;目前惯性技术正处于第四代,比较有代表性的是微机械惯性器件。

最早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。

总之,第一代惯性系统的主要特征是用来测量载体的姿态角,它们是机械式的二自由度陀螺仪,按位置捷联方式使用。摆只是用来建立地垂线,作为测量载体对地垂线的偏差的器件,还没有利用加速度计的信号测量载体运动的速度和位置。

第二代惯性系统开始于20世纪40年代火箭发展的初期,它以测量载体相对于地球的位置为目的。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、电子技术、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“鲑鱼”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8146n mile。这表明惯性导航技术在20世纪50年代已趋于成熟。惯性技术在这个发展阶段有以下特点:

(1) 为了减小惯性仪表支撑的摩擦与干扰,提高仪表的精度,采用了支撑悬浮技术,出现了液浮、气浮、磁悬浮等技术。

(2) 除陀螺仪以外,还出现了另一种惯性仪表——加速度计,从而在载体上可以不依赖

外部信息而测量其质心的运动轨迹。

(3) 普遍采用单自由度陀螺仪与反馈控制回路所组成的系统——框架式稳定瓶体。用平台上安装的加速度计来测量载体的运动加速度,经两次积分就可求得运动的轨道。这种惯性导航系统已经是一种自主式的轨道测量系统。

(4) 采用新材料与新型元器件(如动压马达),并不断改进设计和工艺等,以减少仪表及系统的随机误差。

(5) 为了提高系统及仪表的精度,还设计了高精度测试设备,改善测试方法,建立误差模型,并采用了各种类型的误差补偿技术,如平台旋转技术、壳体旋转技术、陀螺反转技术、陀螺角动量调制技术、陀螺监控技术以及软件补偿技术等。

(6) 平台、陀螺仪、加速度计都是运动物体的控制系统实现方位或轨道控制的主要部件。惯性技术与自动控制技术在发展中互相依赖、互相促进,使惯性技术和现代控制技术均能迅速发展。惯性系统在战略、战术导弹武器、飞机、舰船以及民用等领域获得广泛的应用。

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应用前景。

另外,还有超导体陀螺仪、粒子陀螺仪、音叉振动陀螺仪、流体转子陀螺仪以及固体陀螺仪等。

与此同时,加速度计的发展也取得了巨大进步。加速度计从原理上讲,有摆式加速度计和摆式积分陀螺加速度计两大类型。前者有多种支承方式,如机械轴承、液浮、气浮压电悬浮、电磁振动悬浮、静电、挠性、晶体谐振等形式,还有多功能的加速度计等。它的输出大都采用力平衡伺服回路,反馈方式有采用模拟量的,更多采用二元脉冲调宽、二元或三元脉冲调频式数字回路,目前应用较多的加速度计有液浮摆式加速度计、挠性加速度计以及静电加速度计等。摆式积分陀螺加速度计在弹道式导弹中应用较多,主要特点是动态范围宽、精度高,但结构比较复杂,重量与体积稍大。

总之,第三代惯性系统开始于 20 世纪 70 年代初期。从第二代到第三代,主要依靠精心设计以及材料、结构和工艺的改进,这是一个演变过程而没有革命性的变革。第三代惯导系统中有代表性的是惯性参考球。

硅微惯性器件将引起惯性技术彻底的革命性变革。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约有 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,但在运载体内部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,军民两用技术占据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,惯性技术的发展有以下几个主要方向:

(1) 战略武器系统将继续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 3 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的成熟的高技术水平,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。

(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,环形激光陀螺已经占据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 $3 \times 10^{-4} (^{\circ})/h$ 。

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。光纤陀螺可以提供环形激光陀螺的许多特性,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,故集成光学是进行大批生产的、紧凑而低成本的光纤陀螺的重要条件,一种采用集成光学玻璃——波导环形谐振器的微型光学陀螺已研制多年,并即将投入批量生产,首先将用于导弹制导中。

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。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 $15(^{\circ})/h$ 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。

(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 与惯性技术相组合。

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”,也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 还将用作潜艇惯导系统在接近水面时的修正。

(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,降低尺寸和性价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。

(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,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。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 $0.5 \sim 2 \text{ n mile/h}$,速度误差为 $2 \sim 4 \text{ m/s}$ 。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、重量和成本,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。

(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,而且也能舰船上的火炮控制、鱼雷、导弹、声纳、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3个环激光陀螺、1个三轴高精度加速度计和电子系统组成。

(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,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。

(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。

美国 20 世纪 70 年代初期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、辛格公司等人在 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,以及试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。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。

(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,也是光电惯性器件的一个重要应用领域。传统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" 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 h 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 3 个 GG1320 环形激光陀螺。试验证明,惯性姿态装置可以满足瞄准-跟踪的要求。

(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,为测量井筒偏斜角度和方位,使用了陀螺测斜仪。

随着成本的降低和技术的发展,陀螺仪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和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,导弹位置与车辆实际位置完全一致。

1.4 惯性导航技术中的常用坐标系

宇宙间的物体都在不断地运动,但对单个物体是无运动可言的,只有在相对的意义下才可以讲运动。一个物体在空间的位置只能相对于另一个物体而确定,或者说,一个坐标系在空间的位置只能相对于另一个物体而确定。在研究陀螺仪、平台或运动载体的运动时,也必须通过两套适当的坐标系之间的关系来实现。其中一套坐标系与被研究对象相联结,另一套坐标系与所选定的参考空间相联结,后者构成了前者运动的参考坐标系。下面介绍惯性制导技术中常用的一些坐标系。

1.4.1 惯性参考坐标系

在研究物体运动时,一般都是应用牛顿力学定律以及由它导出的各种定理。在牛顿第二定律 $F=ma$ 中, m 是物体的质量, F 是作用在物体上的外力, a 是物体的加速度。应该特别注意,这里的 a 是绝对加速度,因而在应用牛顿第二定律研究物体运动时,计算加速度 a 所选取的参考坐标系绝不能是任意的,它必须是某种特定的参考坐标系。

经典力学认为,要选取一个绝对静止或做匀速直线运动的参考坐标系来考察加速度 a ,牛顿第二定律才能成立。在研究惯性敏感器和惯性系统的力学问题时,通常将相对恒星所确定的参考系称为惯性空间,空间中静止或匀速直线运动的参考坐标系称为惯性参考坐标系。