



惯性导航 与组合导航基础

Fundamentals of Inertial
Navigation and Integrated
Navigation

刘智平 毕开波 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

西安工业大学专著出版基金赞助

惯性导航与组合导航基础

**Fundamentals of Inertial Navigation and
Integrated Navigation**

刘智平 毕开波 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书的内容针对惯性导航以及以惯性导航为主的组合导航,具体涵盖惯性导航的理论基础、惯性传感器、稳定平台、平台惯导系统、捷联惯导系统和组合导航系统。其中,理论基础部分包括了力学基础、数学基础、地球模型和地磁场模型。在惯性传感器部分,主要介绍了正在广泛应用的动力调谐陀螺、激光陀螺、光纤陀螺、摆式加速度计的原理和测试,同时介绍了新型的硅微传感器的原理、测试。在稳定平台部分,主要介绍了三轴平台和四环三轴平台的原理、控制机理。在平台惯导系统部分,主要介绍了平台惯导的原理、对准技术、数学模型的推导。捷联惯导部分以数学模型和解算算法为主。组合导航部分以各种滤波方程的推导和组合系统的结构设计为主。

书中内容既有必要的基础,亦有新颖的理论和新技术,图文并茂,力求理论和实践紧密结合。本书可供从事导航、制导与控制领域的科研、设计、试验、生产的工程技术人员参考,也可供导航、制导与控制专业的硕士研究生和博士研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

惯性导航与组合导航基础 / 刘智平, 毕开波著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 6
ISBN 978 - 7 - 118 - 08761 - 1

I. ①惯... II. ①刘...②毕... III. ①惯性导航②组合导航 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 106128 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15½ 字数 353 千字

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2200 册 定价 66.00 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

惯性技术是一种既古老又不断地在快速发展的技术,惯性技术包括惯性传感器技术、惯性测量技术、惯性导航技术、惯性制导技术。以惯性导航和卫星导航、地磁导航为基础的组合导航技术在近几年的发展形势可谓突飞猛进,基于微机电器件的组合导航系统已经商品化,基于纳机电器件、原子陀螺等新型传感器的组合导航系统正在逐步走出实验室。惯性技术毋庸置疑地已成为现在和未来的国防武器系统的关键支撑技术之一,而且越来越明显地成为一个国家的工业水平高低的标志,其不可替代性以及日新月异的发展势头,已使强国无一例外地将其列为重点发展的国防高技术之一。正是基于这样的背景,本着促进技术进步和学科发展的目的,本书应运而生。

全书共分7章,第1章概论主要介绍导航的概念、导航的发展历程和导航系统的分类;第2章介绍导航的力学基础、数学基础、地球的模型、地磁场的模型;第3章介绍各种经典的惯性传感器和现代的惯性传感器,以原理、数学模型、测量方法为主;第4章介绍惯性平台,以三轴三环平台和四环三轴平台为主;第5章介绍平台式惯导系统的原理、结构、工作过程;第6章主要介绍捷联惯性导航系统,以姿态计算、误差补偿、测试为主;第7章介绍了组合导航系统的原理、辅助导航的传感器、数据融合、数学仿真、组合结构和具体的实例。

本书以导航系统中用到的数学基础、力学基础和物理基础作为理论基础,以国内外在惯性技术领域的发展历程、发展趋势、技术现状为技术基础,注重基础概念、各部分内容的内在联系和相互衔接。

本书由西安工业大学的刘智平和大连海军舰艇学院的毕开波共同完成,其中第7章的第4节、第1章的第7节由毕开波执笔,其余章节皆由刘智平撰写。该书是在作者多年从事惯性导航、制导研究工作的基础上,参阅了国内外许多大家的著作、著名的惯性技术实验室的研究报告和年度总结报告,结合作者在惯性导航教学方面的拓展资料之后写成。既可供导航、制导与控制专业的研究生参考,也可供GNC领域的工程技术人员参考。

本书承蒙西北工业大学的李四海教授、中航飞行自动控制研究所的韩宗虎研究员、第一作者的导师周凤岐教授审阅,提出了许多极有价值的修改建议和批评意见,作者在此表示诚挚的谢意。

作者在此特别感谢西安工业大学的出版基金的大力资助,同时感谢西安工业大

学计算机学院、西安工业大学科技处和西北工业大学航天学院的诸多同仁的帮助、指点。

惯性技术的发展可谓日新月异,新原理、新技术正在实现过程中,作者的所知、所识不及沧海之一粟,加之水平有限,书中难免疏漏和错误,欢迎各位同仁不吝赐教。

作者

2013年2月26日

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 导航的概念	1
1.2 导航的发展历程	2
1.3 导航的分类	4
1.4 惯性技术	6
1.5 惯性导航简介	7
1.6 国内外主要的惯性技术研究单位	9
1.7 惯性导航的发展趋势	10
第 2 章 惯性导航基础	13
2.1 惯性导航的数学基础	13
2.1.1 状态空间矢量	13
2.1.2 矩阵	13
2.1.3 矢量的点乘和叉乘运算	15
2.1.4 常微分方程	16
2.1.5 四元数	17
2.1.6 球面三角形	18
2.1.7 随机变量和随机过程	19
2.1.8 最小二乘估计	23
2.2 惯性导航的力学基础	24
2.2.1 Coriolis 定理	24
2.2.2 绝对加速度的分解	25
2.2.3 动量矩守恒定律	25
2.2.4 比力	26
2.3 惯性导航中的坐标系及其变换	27
2.3.1 常用的坐标系	28
2.3.2 坐标系之间的变换	30
2.3.3 体轴角速度和姿态角速度的关系	31
2.3.4 姿态矩阵微分方程	32
2.4 地球模型	33
2.4.1 地球的形状描述	33
2.4.2 垂线和纬度的定义	36

2.4.3	地球的引力场	37
2.5	估计和滤波	37
2.5.1	数学基础	38
2.5.2	连续过程的卡尔曼滤波	40
2.5.3	离散过程的卡尔曼滤波	44
2.6	地磁场的模型	45
第3章	惯性传感器	50
3.1	机电陀螺	50
3.1.1	机电陀螺仪的原理	50
3.1.2	动力调谐陀螺的数学模型	52
3.1.3	机电陀螺仪的指标体系	55
3.1.4	机电陀螺仪的测试	55
3.1.5	动力调谐陀螺对线振动和角振动的响应	56
3.2	激光陀螺	58
3.2.1	激光陀螺简介	59
3.2.2	环形激光陀螺的构成	62
3.2.3	环形激光陀螺的基本误差	64
3.2.4	激光陀螺的测试	65
3.3	光纤陀螺	66
3.3.1	光纤陀螺简介	67
3.3.2	光纤陀螺的类型	69
3.3.3	光纤陀螺的测试	69
3.4	MEMS陀螺	69
3.4.1	MEMS陀螺的原理	70
3.4.2	MEMS陀螺的简化模型及误差分类	73
3.4.3	Allan方差简介	76
3.4.4	MEMS陀螺的测试	77
3.5	新型陀螺	78
3.5.1	静电陀螺	78
3.5.2	半球谐振陀螺	82
3.5.3	原子陀螺	83
3.6	通用的加速度计	84
3.6.1	挠性摆式加速度计	85
3.6.2	液浮摆式加速度计	86
3.7	MEMS加速度计	88
3.8	声表面波加速度计	89
3.9	角加速度计	90

3.10	加速度计的性能指标体系和测试	91
第4章	陀螺稳定平台	93
4.1	陀螺稳定平台概述	93
4.2	单轴陀螺稳定平台	95
4.3	双轴陀螺稳定平台	98
4.3.1	双轴平台的原理结构	98
4.3.2	平台的稳定、跟踪过程	99
4.3.3	平台的动力学方程和传递函数	100
4.4	三轴陀螺稳定平台	102
4.4.1	三轴台体的结构	102
4.4.2	坐标系及坐标变换	104
4.4.3	三轴平台的构成原理	105
4.4.4	环架的转动到台体的传递	106
4.4.5	三轴平台的几何稳定	108
4.4.6	三轴平台的修正	110
4.4.7	三环三轴平台的动力学模型	111
4.5	四环三轴平台	119
4.5.1	四环三轴平台的运动学分析	120
4.5.2	外横滚环伺服回路的正割补偿	121
4.5.3	四环三轴平台的反自转	122
4.6	陀螺稳定平台的控制策略及误差补偿	122
第5章	平台式惯性导航系统	125
5.1	组成	125
5.2	原理	126
5.2.1	基本原理	126
5.2.2	舒拉调谐	127
5.3	指北式惯导系统	129
5.3.1	台体的稳定	130
5.3.2	台体的修正	131
5.4	自由方位式惯导系统	135
5.4.1	自由方位式的基本原理	136
5.4.2	自由方位惯导系统的力学编排	137
5.5	游移方位式惯导系统	141
5.5.1	游移方位式的原理	141
5.5.2	游移方位式的力学编排	141
5.6	指北式惯导系统的对准	143
5.7	实用的指北式惯导系统	149

5.7.1	水平阻尼	149
5.7.2	方位阻尼	153
5.7.3	指北式惯导系统的统一方程	155
第6章	捷联式惯性导航系统	158
6.1	SINS 系统的力学编排	159
6.1.1	在惯性坐标系中的力学编排	160
6.1.2	在地球坐标系中的力学编排	162
6.1.3	在地理坐标系中的力学编排	163
6.2	姿态计算方法	164
6.2.1	四元数法	164
6.2.2	方向余弦矩阵法	168
6.2.3	等效旋转矢量法	172
6.2.4	罗德里格参数法	175
6.3	对准	180
6.3.1	静基座上 SINS 的对准	181
6.3.2	动基座上 SINS 的对准	184
6.4	SINS 中的系统误差简介	185
6.4.1	圆锥误差	186
6.4.2	划船误差	187
6.4.3	涡卷误差	189
6.5	惯导系统的测试	191
6.5.1	实验室测试	191
6.5.2	车载实验	191
6.5.3	飞行试验	192
第7章	组合导航系统	194
7.1	组合导航的分类	194
7.1.1	GNSS 和 INS 的组合	195
7.1.2	辅助导航设备	198
7.2	组合导航系统的数据融合	205
7.2.1	扩展卡尔曼滤波	205
7.2.2	无味卡尔曼滤波	207
7.2.3	粒子滤波	211
7.2.4	针对卡尔曼滤波的改进	214
7.2.5	容积卡尔曼滤波	220
7.3	组合导航系统的数学建模与仿真	221
7.3.1	组合导航系统的数学建模	221
7.3.2	卡尔曼滤波器的设计	224

7.3.3 组合导航系统的数学仿真	225
7.4 组合导航系统的集成结构	227
7.4.1 最小二乘结构	227
7.4.2 阶梯式结构	229
7.4.3 中心化结构	230
7.4.4 联邦结构	231
7.4.5 混合结构	233
7.5 组合导航系统实例	233
参考文献	237

在伸手不见五指的夜晚,飞机如何才能准确地到达预定的机场?

在狂风肆虐、波涛汹涌的大海上,潜艇如何才能确认到达指定的作战区域?

这些问题所包含的核心技术只有一个,那就是惯性导航!

第 1 章 概 论

在概论之中,主要讲述导航的概念、导航的发展历程、导航的分类、惯性技术简介以及惯性导航简介。

1.1 导航的概念

导航(Navigation)的现代含义是在运载体从甲地到乙地的过程中,运载体自身相对于一个固定的参考坐标系的位置、速度、姿态和时间的确定。与此对应的技术、过程和方法就谓之导航技术、导航过程和导航方法,与此功能相匹配的传感器系统或者仪器设备就称为导航系统。

导航的通俗含义是导引航行,即按照既定的目的地和路径,确定运载体现在身处何地的问题。只有确定了现在的位置,才能知道下一时刻往什么方向运动。

作者认为导航可分为广义导航和狭义导航两种。

广义导航:针对某一具体任务,从开始到结束的整个导引过程,其本质是信息的流动过程和信息处理过程。

狭义导航:将运载体从甲地导引到乙地的过程。

与此对应的问题包括以下几方面。

(1) 甲地和乙地的位置,它们既可在地球上的陆地、海洋和空中,也可在月球、火星和其它星球上。

(2) 固定的参考坐标系的选取,可供导航用的坐标系的选取受到许多物理条件的限制。

(3) 如何导航,这个问题涉及到导航的原理、技术手段。

(4) 导航精度的高低问题。

现有的 Navigation 一词除了具有导航的含义外,其引申、拓展的含义可在现在的各种大型软件菜单上见到,具有浏览目录和帮助的含义。

从上述定义中,即可看到狭义导航的如下特点。

(1) 导航的作用是知道自身的位置、速度、姿态、时间。

(2) 自身的位置、速度和姿态是在选定的参考坐标系中表示的。

(3) 导航要有一个位置参考基准和姿态参考基准,位置参考基准和姿态参考基准的选取具有多样性。

(4) 导航的过程受到时间和空间的限制,亦即具有时空受限性。

导航技术的应用领域包括航空、航天、航海、陆地交通、农业生产、矿产勘探等,特别是水下核潜艇的导航、空间开发和和平利用中的航天器的导航以及日常生活中民航机的导航都是极具现实意义的导航技术的例证。

1.2 导航的发展历程

从文献资料来看,人类的导航历史起始于生活、生产活动,首先是在陆地上学会了导航,掌握了一定的导航技术,进而学会了在海上导航,最后是在空中导航。

陆地上的导航历史起源于生活,比如外出狩猎时,在沿途放置一些标记,以免回来时迷路。所以,最先出现了以物体、河流、山峰、树木为标记的相对于地面基本固定不动的地标信息,前辈在顺路归来后,一般总会把所见所闻传授给后来者,这些逐代传授的信息包括路径、图标、地标、地图、河流、山脉、岩礁等。伴随着陆地导航技术的发展,特别是指南针、罗盘的应用,加上对一年四季的观测和记录、对天上星体的观测和记录以及生产力水平的提高,人们逐步发明了日晷、钟表、望远镜等设备,随着天文观测技术的进步和观测数据的积累,人类终于认识到地球的自转和公转的周期性,于是就出现了历法、地图,并将其应用于陆地航行和工农业生产中。地图制造者设计了一种统一的用经度和纬度表示物体在地球上的位置的全球坐标系统,由此开始了地图应用于陆地和海上航行的时代。

浮标和灯塔为近海航行者提供了方位标志,但当航行者进入深海远洋后,要想寻找自己的位置和航向就变得异常困难了。虽然指南针(Compass)在公元前 5000 年就应用于指示南北方向了,但是它不够精确。人们从 14 世纪开始利用星体测量来确定航行者所在处的纬度,在 18 世纪时,就出现了六分仪这样的精密仪器,通过测量星体的位置来确定舰体的位置,但是这样测量定位还需要知道时间。

确定经度是一件比较困难的事情,因为它涉及到地球和星体之间的相对转动和时间的测量。经度的测量的初始位置选在了伦敦附近的格林尼治,为了确定舰体所在处的经度,必须精确知道伦敦的时间和舰体所在处的时间。航行者所在处的时间是通过观察太阳得到的,因此,必须要有一个精密的计时装置,于是在 18 世纪中期,就出现了机械钟,虽然其精度无法和现在的石英钟相比。现在的格林尼治时间是通过无线电信号向全世界播报的。

在航海史上,沿着一条预先确定了经度和纬度的航线的航行就叫导航,它类似于现在的路径规划。指导舰船沿着一条预先选定的线路航行叫做制导。在海上航行时所用的导航是一种基于航位推算方法的导航,即 Deduced Reckoning,或者 Dead Reckoning。

在 1908 年,磁罗盘被陀螺罗经所代替,陀螺罗经是海上航行时的重要设备,但在飞机、宇宙飞船和导弹上不实用。

军用飞机在战时是不能完全依靠无线电导航和通讯的,除了很容易被干扰外,还很容易暴露自己。能在任何气象条件下实时地提供载体的位置、速度和姿态信息的导航技术就是惯性导航,虽然地磁导航也可提供较为精确的位置、姿态信息,但无法提供载体的速度信息。惯性导航可应用在太空、空中、陆地和水下的载体上。之所以将其称之为惯性导航,是因为陀螺和加速度计就是利用物质的惯性原理来测量角速度、线加速度的。

惯性技术史上的里程碑事件大致如下。

(1) 公元前 5000 年, 中国人就发明了陶土陀螺和木质陀螺。

(2) 古罗马人利用北极星和太阳作为方位参考横渡了地中海。

(3) 1492 年, 意大利人哥伦布利用指南针横渡大西洋到达美洲。

(4) 公元前 3000 年左右, 黄帝和蚩尤在作战时就用上了司南。

(5) 1687 年, 英国科学家牛顿提出了力学三大定律, 为惯性导航奠定了坚实的理论基础。

(6) 1765 年, 俄罗斯科学院院士欧拉出版了《刚体绕定点运动的理论》, 创立了转子陀螺仪的力学基本理论。

(7) 1778 年, 法国科学家拉格朗日在《分析力学》一书中建立了在重力力矩的作用下定点转动刚体的运动微分方程组。

(8) 1851 年, 法国物理学家 Leon Foucault 在巴黎圣母院的大教堂里悬挂了一根 67m 长的绳索, 绳索末端挂有一个 28kg 重的铁饼, 后人称之为傅科摆。在 1852 年, 傅科将其命名为陀螺, 用以测量地球的自转。

(9) 1853 年, 英国科学家哈密尔顿提出了四元数理论。

(10) 1890 年, 英国科学家 G. H. Bryan 提出了半球谐振陀螺仪的理论。1978 年美国泰尔科公司研制出了第一套实用的半球谐振陀螺仪。

(11) 1908 年, 德国科学家安修兹制造出了世界上第一台摆式陀螺罗经, 被认为是陀螺技术中最巧妙的设计。

(12) 1910 年, 德国科学家休拉提出了休拉调谐原理。

(13) 1913 年, 法国科学家萨格奈克 (G. Saganac) 研制了一种光学干涉仪, 1925 年迈科尔逊 (A. H. Michelson) 根据干涉仪研制了一种测量地球自转的光学陀螺测量装置, 1960 年发明了激光, 1982 年激光陀螺在 Honeywell 公司开始批量生产, 精度达到 $0.001^\circ/\text{h} \sim 0.01^\circ/\text{h}$ 。

(14) 1923 年, 德国科学家休拉发表了论文《运载工具的加速度对摆和陀螺的干扰》, 为惯性导航系统的设计奠定了理论基础。

(15) 1942 年, 德国的 V-2 火箭上首次使用了惯性制导系统。

(16) 1952 年, 美国麻省理工学院 Draper 实验室研制出了有史以来的第一套基于液浮陀螺的惯导系统, 并完成了飞行试验, 该套系统重达 2700lb, 直径 5ft。

(17) 1952 年, 美国伊利诺伊大学诺特西克教授首先提出了静电支承的原理, 1970 年, Honeywell 公司研制出了第一套静电陀螺, 漂移在 $10^{-6}^\circ/\text{h} \sim 10^{-4}^\circ/\text{h}$, 同时推出了静电惯导系统, 用于战略核潜艇和战略轰炸机。

(18) 1957 年, 苏联发射了人类历史上的第一颗人造地球卫星, 运载火箭上的惯性制导系统为准确入轨提供了技术保证。

(19) 1958 年, 美国的核潜艇从冰下穿越北极, 首次验证了惯性导航系统对核打击力量的重要性。

(20) 1960 年, 美国学者 T. H. Mainman 研制出了第一台红宝石激光器, 同年贝尔实验室研制出了波长 $1.5\mu\text{m}$ 的氦氖气体激光器。1963 年美国 Sperry 公司研制出了人类历史上的第一套激光陀螺。

(21) 1970年,出现了动力调谐陀螺,惯导系统的导航精度已经达到1海里/小时,其实这种陀螺的原理是由英国的皇家航空研究院在1946年最先提出的,而不是由美国学者E. E. Howe在1963年提出的。

(22) 1971年,美国科学家Bortz和Jordan提出了等效旋转矢量的概念和算法。

(23) 1976年,美国犹他大学的瓦利教授提出了光纤陀螺仪的设想,并成功地进行了光纤陀螺仪的演示实验。

(24) 1978年,美国麦道公司研制出了第一套工程实用的光纤陀螺仪。

(25) 1983年,美国科学家Miller探讨了锥运动条件下等效旋转矢量的三子样算法。

(26) 1991年,美国麻省理工学院Draper实验室研制除了基于MEMS的陀螺和加速度计,这个惯性组合的质量仅为5g,体积为 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0.5\text{cm}$,陀螺的漂移小于 $10^\circ/\text{h}$,具有体积小、重量轻、高可靠、耐冲击的特点,并在制导炮弹上做了试验。

(27) 1998年,美国人Savage系统地研究了捷联惯导的圆锥误差、划船误差和涡卷误差的原理和补偿算法。

(28) 2000年,美国完成了数字地球的绘制。

(29) 2008年,日本研制出了旋转型的MEMS陀螺。

现在服役的惯性导航系统基本上都是基于捷联惯性导航系统(SINS)的组合导航系统了,下面简单地对SINS的发展历程做一介绍。美国在1956年的时候就已有SINS的方案专利了,由于当时惯性器件的制造水平和导航计算机的研制水平的限制,直到1960年美国的联合飞机公司研制出了第一套SINS,紧接着霍尼韦尔公司研制成功了H-401捷联惯性制导系统,MIT还为阿婆罗工程专门研制了备用的SINS。从1969年开始,SINS已成为美国空军和海军的主要机载设备。

1.3 导航的分类

就狭义导航而言,按照导航所用信息来划分,可分为以下几类。

(1) 惯性导航:利用陀螺和加速度计测量到的相对惯性坐标系的信息进行导航。

(2) 无线电导航:利用电磁波测量到的相对距离信息进行导航。

(3) 天文导航:利用星敏传感器测量到的相对星体的信息进行导航。

麦哲伦就是利用六分仪(图1-1)完成了环球航行,天文导航的原理图如图1-2所示。

我国古代采用的牵星术,其实就是天文导航的具体实践,通过对两颗星体的测量,即可确定自己在地球上的位置。

(4) 声纳导航:利用机械波的测量信息进行导航。

按照运载体所在的位置划分,导航还可分为以下几类。

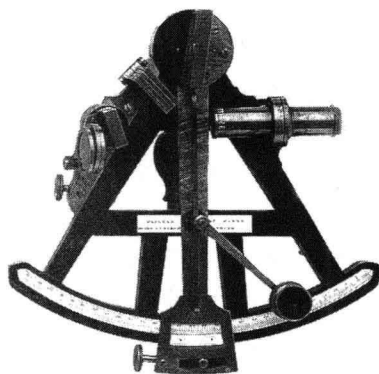


图1-1 天文导航中用到的六分仪

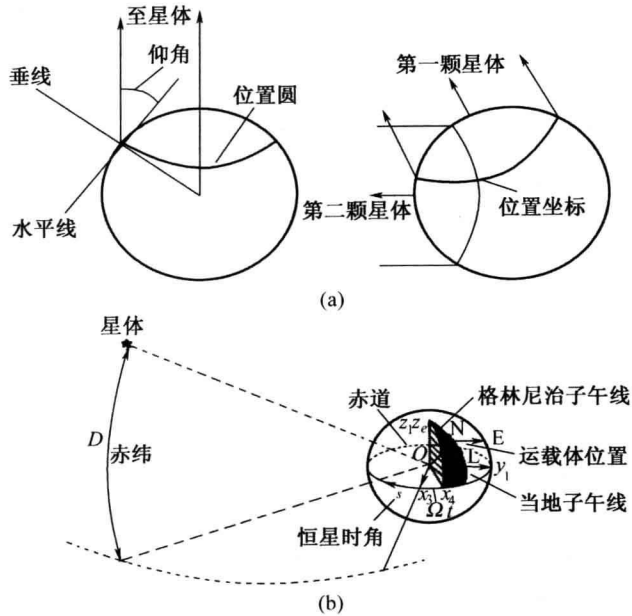


图 1-2 天文导航原理图

- (1) 陆上导航。
- (2) 海上导航。
- (3) 水下导航。
- (4) 星际导航。

按照运载体的类型划分,导航还可分为以下几类。

- (1) 飞机导航。
- (2) 舰艇导航。
- (3) 汽车导航。
- (4) 火箭导航。
- (5) 机器人导航。
- (6) 微创手术仪器导航。

按照导航时载体的轨迹类型划分,导航可分为以下几类。

- (1) 一维导航: 火车、有轨电车。
- (2) 平面导航: 汽车。
- (3) 三维导航: 飞机、导弹、舰船。

按照导航时对外部信息的依赖性来划分,导航可分为以下几类。

- (1) 自主导航: 不需要依靠外部信息就能完成导航任务。
- (2) 非自主导航: 必须依靠外部信息才能完成导航任务。

现在就目前国际上普遍采用的分类方法进行归纳,按照惯性导航精度的高低和惯性导航系统的成本将导航分为以下四类。

- (1) 航海用惯导系统: 主要指装备于潜艇上和大型水面舰艇上的惯导系统,其位置精度为 1.8 公里/天,成本在 100 万美元左右。

(2) 航空用惯导系统：主要指用于各类军用飞机和商业航班的惯性导航系统，它满足美国提出的标准导航单元 84 的要求，位置精度高于 $1.5\text{km}/(4\text{h})$ ，成本在 10 万美元左右。

(3) 战术级惯导系统：是指用于各类制导武器上的惯导系统，单独工作时间在 10min 之内，成本在 5000 美元到 2 万美元。

(4) 低成本惯性器件：以 MEMS 器件为主，单件成本在 10 美元左右，可以集成为 IMU、AHRS 等。

1.4 惯性技术

惯性技术是惯性仪表、惯性导航、惯性制导、惯性测量和稳定技术的总称。惯性仪表（陀螺和加速度计）的技术状态决定着惯性导航、惯性制导以及惯性测量和稳定技术的应用水平，而陀螺的技术状态是所有的惯性技术分支中最为重要的标志。

惯性技术是海、陆、空、天各种航行器的导航、制导与控制系统设计与实现的核心技术，是现有的所有武器系统的关键支撑技术，是唯一具有实时、自主、连续、隐蔽、不受干扰、可以全天候工作特点的运动信息感知技术，是现代精确打击武器的核心信息源。在实现“灵敏及时准确的侦察定位、快速反应和机动、中远程精确打击”和构建“海陆空天电五维一体作战体系”的建设中，惯性技术具有不可替代的作用和地位。

总之，惯性技术是一个大类，而惯性导航只是其中的一个分支。在这里既要看到苹果，更要看到苹果树。

当然，惯性技术属于信息感知技术的分支，具体的分支关系如图 1-3 所示。

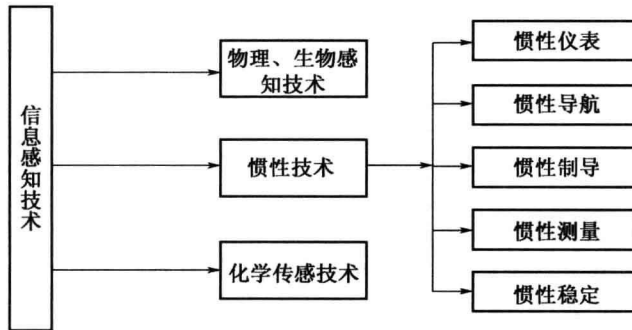


图 1-3 信息感知技术及其分类

惯性导航是一门综合了机电、光学、数学、力学、控制和计算机、材料等学科的尖端技术。它之所以被称作高技术或者尖端技术，是因为惯性导航是在科学理论和工程技术达到相当高的水平时才能实现的技术。我们经常提到的高技术有几个内涵：(1) 理论先进；(2) 技术难度大；(3) 对国防建设和经济建设极为重要。

国际上惯性技术的发展历程如图 1-4 所示，虽然图 1-4 上的时间点终止在公元 2000 年，近几年的技术进展和发展趋势可在 MIT 的 DRAPER 实验室的年度报告中略窥一斑。

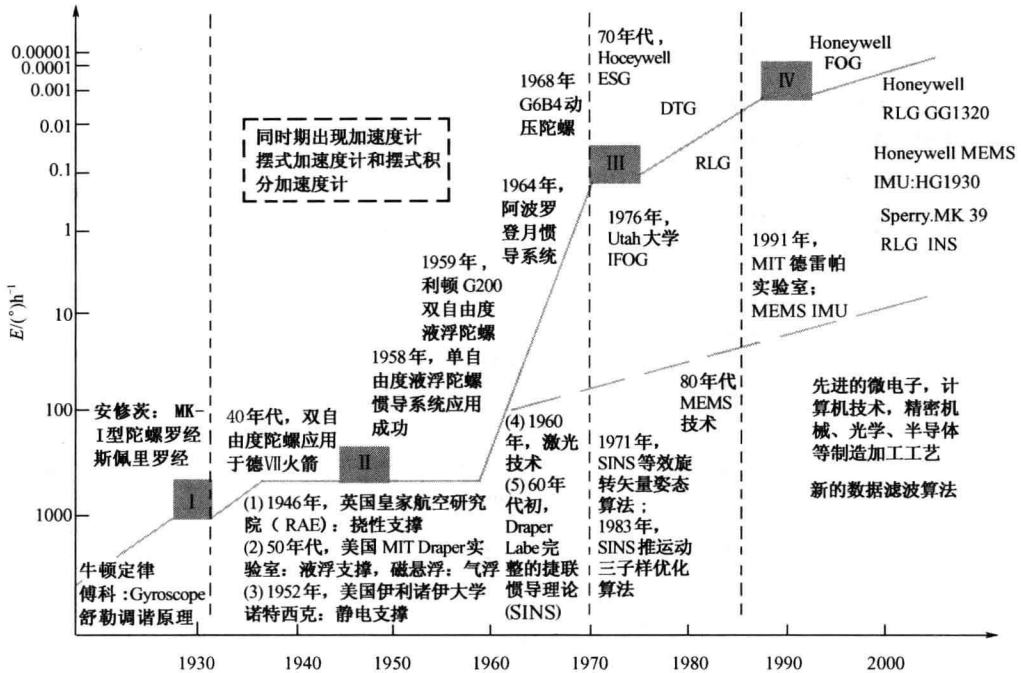


图 1-4 惯性技术的发展趋势

1.5 惯性导航简介

所谓惯性导航就是利用载体上安装的陀螺和加速度计测量到的载体相对惯性空间的角速度信息和比力信息，通过解算常微分方程组，得到载体在导航坐标系中的位置、速度、姿态和时间信息。

惯性导航的英文名称是 Inertial Navigation。

惯性导航的优点如下。

- (1) 自主性：仅依靠自身的陀螺和加速度计的测量信息。
- (2) 隐蔽性：不向外辐射能量。
- (3) 全天候：任何天气情况皆可工作。
- (4) 信息全：不仅能提供位置信息、速度信息、时间信息，还能提供姿态信息。

惯性导航的缺点主要有以下几方面。

- (1) 导航误差随工作时间的延长而不断增加。
- (2) 导航设备的成本较高。
- (3) 纯惯导系统的高度通道是发散的。

惯性导航的分类方法较多，现在列举如下。

根据惯性导航系统所装备的载体划分，惯性系统可分为以下几类。

- (1) 机载惯性导航。
- (2) 舰载惯性导航。