

空军装备系列丛书

AIR NAVIGATION EQUIPMENT

导航定位装备

《空军装备系列丛书》编审委员会 编

总主编 张伟



00

航空工业出版社

空军装备系列丛书

导航定位装备

《空军装备系列丛书》编审委员会 编

总主编 张 伟

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书概要地介绍了导航定位装备的发展历史和分类, 比较详细地介绍了世界上各种导航定位装备的工作原理, 并对导航定位装备的发展趋势进行了展望。

本书可供航空部门飞行、调度、导航及其他专业人员、各级业务部门阅读参考, 也可作为航空爱好者的参考资料。

图书在版编目 (C I P) 数据

导航定位装备/《空军装备系列丛书》编审委员会
编. --北京: 航空工业出版社, 2010. 6

(空军装备系列丛书)

ISBN 978 - 7 - 80243 - 547 - 6

I. ①导… II. ①空… III. ①航空导航—定位设备
IV. ①V249. 32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 097084 号

导航定位装备

Daohang Dingwei Zhuangbei

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2010 年 6 月第 1 版

2010 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 9

字数: 210 千字

印数: 1—3000

定价: 28.00 元

《空军装备系列丛书》 编审委员会

主任：吕刚 胡秀堂

副主任：张伟

成员：熊笑非 甘晓华 涂剑刚 朱林

张列刚 武维新 朱祝华 刘永坚

费爱国 施明利 刘健文 胡瑜

张勋

《空军装备系列丛书》
编审办公室

主任：王军良

副主任：李廷立

成员：李海亮 韩 枫 梅文华 孙亚力

赵 琼 王子刚 海建和 张国杰

序

空军武器装备是空军诸兵种用于实施和保障战斗行动的武器、武器系统以及与之配套的其他军事技术装备的统称，包括各种战斗装备和保障装备。

空军武器装备的历史不过百年，却谱写了武器装备历史上发展速度最快的篇章。人类翱翔天空的梦想可以追溯到远古时代，但直到1903年才由美国的莱特兄弟首次实现有动力自主飞行，1907年才开始用于军事。不论是在两次世界大战还是冷战时期，飞机及相关技术都显示了突出优势，得到快速发展。空军从辅助兵种发展成独立的战略军种，从从属其他军兵种作战发展到能够担当战略战役主要任务，成为诸军兵种一体化联合作战的主力。空军武器装备也形成了歼击机、强击机、轰炸机、侦察机、运输机、特种飞机、雷达、高炮、地空导弹、空投空降、通信导航等多个装备系列。随着科学技术的发展，精确制导弹药、预警飞机、无人驾驶飞机、电子战装备、数据链、综合电子信息系统、空天防御系统等众多新类别武器装备还在源源不断地加入到空军武器装备行列中来。空军武器装备仍将保持高速发展的势头。

百年之间，空军从无到有，从弱到强。人类社会也从工业时代进入信息时代。战争形态由机械化战争向信息化条件下的高技术战争转变，军队面临着深刻的转型和军事变革。在这个深刻变革的时代，空中力量成为高技术战争的关键因素，空中力量的运用成为影响战争结局的重要环节，空中战争形态仍在以高速率发生变化，空军仍是世界各国军队发展建设的重点。空军在保卫国家安全、维护国家主权、抵御外来侵略、支撑不断拓展的国家利益等方面，都将发挥越来越重要的作用。

纵观世界空军武器装备发展历史，可以看出，战争需求是空军装备发展

的强大牵引力，科学技术进步是空军装备发展的不竭推动力。当今空军武器装备的作战使用，已不是传统概念的单个武器平台对抗，而是敌对双方整个武器装备体系的对抗。按照体系配套思想发展建设武器装备已经成为基本趋势。更加强调空天一体、攻防兼备、平战结合，更加重视发展具有威慑与实战双重功能的武器装备，信息装备由从属地位上升为主战装备，常规武器弹药向精确打击转变，支援保障装备成为联合作战的重要支撑。

武器装备是军队履行使命任务的基本物质基础，是军队现代化水平的主要标志。军事领域的革命性变化，通常始于武器装备的突破性进步。空军武器装备集现代科学技术尖端成果之大成，与国家的政治、经济、文化、社会紧密关联，与百姓生活紧密关联，一向引发人们的广泛兴趣和关注。空军装备研究院组织编写的《空军装备系列丛书》，作者都是空军相关学科的专家学者，不少是本学科的领军人物。该丛书全面系统地介绍了空军装备及相关技术，是一套了解空军装备、学习高科技知识的好读本，对于认识空军在国防和军队建设中的地位与作用，了解空军武器装备的历史、现状和发展趋势，研究探讨空军武器装备发展的特点、规律，引发更多的人把目光投向空军武器装备建设，会起到积极的作用。我曾任空军装备研究院第一任院长，有幸参与了《空军装备系列丛书》的编撰策划工作。衷心希望在中国空军武器装备高速发展的进程中，《空军装备系列丛书》能够发挥其应有的作用。

预祝《空军装备系列丛书》出版发行获得圆满成功！

魏 钢

2007年11月16日

前 言

本书是根据《空军装备系列丛书》的统一要求而编写的，全书概略地介绍了导航定位装备的发展历史和分类，比较详细地介绍了导航系统出现以来世界上各种导航定位装备的工作原理，并对导航定位装备的发展趋势进行了展望。

全书共分五章：第一章对导航定位系统进行了概述，并对导航系统进行了分类；第二章介绍了自主式导航系统的简要工作原理，包括多普勒导航系统、高度表、惯性导航系统、天文导航系统和地形辅助导航系统；第三章介绍了非自主式导航系统，包括远程、近程、进场着陆导航系统的组成和简要工作原理；第四章介绍了当今世界上的卫星导航系统，比较详细地介绍了GPS的工作原理；第五章介绍了组合导航系统，对多种组合导航系统的特点及工作过程进行了分析。

本书可供航空部门飞行、调度、导航以及其他专业人员阅读参考，也可作为航空爱好者的参考资料。

在本书的编写过程中，编者参阅了国内外许多专家学者的文章和书籍，在此向撰写、整理这些技术资料的专家致敬。

本书由空军装备研究院具体组织编写，李辉、高志刚负责本书的编写组织、结构安排和内容审阅工作。参加各章节编写的人员是：高志刚（第一章）；朱长征、谢勇（第二章）；邱致和、李晓明、李辉、史鹏亮、郭京京、吕鹏（第三章）；姜苗苗（第四章）；邱致和、杜晓辉（第五章）。

由于导航定位技术发展迅速，编者学识和水平有限，书中的缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2010年1月

目 录

第一章 导航定位系统概述	(1)
一、导航定位概念	(1)
二、导航系统分类	(1)
三、航空导航发展简史	(2)
四、发展趋势	(2)
第二章 自主式导航系统	(3)
第一节 多普勒导航系统	(4)
一、工作原理	(4)
二、系统误差	(10)
三、设备配置	(11)
四、功能与应用	(12)
第二节 高度表	(13)
一、工作原理	(13)
二、脉冲制雷达高度表	(14)
三、FM - CW 雷达高度表	(15)
四、相位编码脉冲式雷达高度表	(16)
五、未来趋势	(16)
第三节 惯性导航系统	(16)
一、简介	(16)
二、平台式惯性制导系统	(18)
三、捷联式惯性制导系统	(21)
第四节 天文导航系统	(24)
一、概述	(24)
二、技术的发展	(25)
三、应用	(28)
第五节 地形辅助导航系统	(30)
一、概述	(30)
二、系统类型	(31)

第三章 非自主式导航系统	(37)
第一节 无线电远程、超远程导航系统	(37)
一、罗兰 - C 系统	(37)
二、甚低频导航系统	(42)
第二节 无线电近程导航系统	(47)
一、中波导航系统	(47)
二、伏尔/测距系统	(55)
三、俄制近程导航系统	(65)
四、塔康系统	(72)
第三节 进场着陆系统	(84)
一、双信标着陆系统	(84)
二、雷达着陆系统	(85)
三、仪表着陆系统	(91)
四、微波着陆系统	(94)
第四章 卫星导航系统	(98)
第一节 简介	(98)
一、美国的卫星导航系统	(98)
二、俄罗斯的 GLONASS	(99)
三、中国的“北斗一号”卫星导航定位系统	(100)
四、欧洲的“伽利略”系统	(100)
第二节 GPS 工作原理	(101)
一、GPS 的组成	(101)
二、GPS 的信号结构	(101)
三、GPS 的信号生成	(104)
四、GPS 的基本定位原理	(105)
五、接收机	(107)
六、GPS 测量误差的来源和影响	(108)
七、差分 GPS	(110)
八、导航战	(111)
第五章 组合导航系统	(116)
第一节 组合导航技术	(116)
第二节 GPS/INS 组合系统	(117)
一、性能特点	(117)
二、组合结构和算法	(118)
第三节 GPS/DNS 组合系统	(122)
第四节 GPS/罗兰 - C 组合系统	(124)

目 录

第五节 惯性/天文组合导航系统.....	(125)
第六节 INS/DNS 组合系统	(126)
第七节 多传感器组合导航系统	(127)
第八节 组合导航系统的应用	(129)
参考文献	(130)

第一章 导航定位系统概述

一、导航定位概念

导航作为一种技术门类，它研究如何确定运载体的实时位置信息以及以何种方式确定运载体的航线或航向等问题。由此可见，导航的功能主要有两个：一是确定运载体的实时位置信息，即定位，回答“在哪里”的问题；二是确定运载体的航线或航向，回答“朝哪里走”的问题。导航随人类政治、经济和军事活动的产生而产生，随人类政治、经济和军事活动的发展而发展，目前导航的功能主要集中在如何提供运载体的实时位置信息，即回答“在哪里”的问题。

导航不同于制导，导航并不具体研究如何对运载体进行控制，而制导除研究以何种方式确定运载体的航线或航向外，还包括如何控制运载体使其沿着确定的航线或航向运动。

导航系统是完成导航功能的设备的统称，除目视导航系统外，任何导航系统中通常包括装在运载体上的导航设备以及设在陆地上、舰船上、太空上的相应导航设备，用于产生指导飞行员或自动驾驶仪操纵运载体正确地向目的地前进的仪表指示或信号（统称导航信息）。

二、导航系统分类

导航系统按运载体能否单独产生导航信息，可以分为自主式导航系统和非自主式导航系统。对于一套导航系统，如果装在运载体上的导航设备可以单独产生导航信息，称之为自主式导航系统；如果除了要求在运载体上装有导航设备外，还需要在其他地方设有一套设备（称为导航台），两者相互配合才能产生导航信息，则称之为非自主式导航系统。自主式导航系统按工作原理或应用的主要技术手段可分为多普勒导航系统（DNS）、高度表、惯性导航系统（INS）、天文导航系统、地形辅助导航系统、目视导航系统、地磁导航系统等。非自主式导航系统目前主要指无线电导航系统，其分类方法比较多：按无线电导航台安装地点，可分为地基无线电导航系统、星基无线电导航系统（又称卫星导航系统）和空基无线电导航系统；按有效作用距离，可分为进场着陆系统、近程导航系统、远程导航系统和全球导航系统；按系统提供的导航参量（或位置线形状），可分为无线电测角导航系统（直线位置线）、无线电测距导航系统（圆位置线）、无线电测距差导航系统（双曲线位置线）、无线电测距和测位导航系统（椭圆位置线）等；按系统主要观测的电信号参量，可分为振幅式无线电导航系统、频率式无线电导航系统、相位式无线电导航系统、脉冲式无线电导航系统和复合式无线电导航系

统。另外，若将几种导航系统所测量的数据信息进行融合处理构成一套新的导航系统，则称之为组合导航系统。

三、航空导航发展简史

在莱特兄弟发明飞机时，目视导航是航空飞行唯一的导航手段。不过这种局面很快就发生了改变，各种航空导航系统陆续被研制出来。20世纪20年代末出现了无线电信标以及垂直指点信标。第二次世界大战中，由于军事上的需要，无线电导航系统飞速发展，出现了许多新的导航系统，战后在此基础上继续发展，形成了今天的导航体制格局。30年代出现了连续波调频无线电高度表；40年代出现了用于飞机进场着陆的仪表着陆系统（ILS）和雷达着陆系统（RLS），同时也出现了用于近程导航的伏尔/测距器（VOR/DME）导航系统，作为自主式导航的多普勒导航系统也在这一时期出现；50年代美国研制了用于军事导航的战术近程导航系统即塔康（TACAN）系统和用于远程导航的罗兰-C系统；60年代美国研制成功了超远程导航系统即奥米伽系统，美国海军在这一时期发射了子午仪（Transit）导航卫星，开创了卫星导航的先河，这一时期还出现了惯性导航系统；70年代，微波着陆系统、地形辅助导航系统研制成功并投入使用；80年代研制成功了联合战术信息分发系统（JTIDS）和定位报告系统（PLRS）；90年代美国和俄罗斯分别研制成功了各自的卫星导航系统，即全球定位系统（GPS）和全球导航卫星系统（GLONASS）；我国于21世纪初研制成功并建立了“北斗一号”卫星导航定位系统。

四、发展趋势

随着科学技术的不断进步，军事战略和战术的变化，导航系统也在日新月异地发展，其趋势大致可归纳为下述几个方面。

（1）应用范围越来越广。

（2）组合导航系统将得到快速发展。不同类型的无线电导航系统可以进行组合，无线电导航系统和非无线电导航系统之间也可进行组合。惯性导航与卫星导航的组合以及惯性导航与地形辅助导航的组合等具有很大的发展潜力。组合导航系统可使不同系统取长补短，显著提高导航系统的整体性能。

（3）导航系统功能越来越强，自动化程度及精度越来越高。

（4）将采用先进的信号处理方法，卡尔曼滤波和数据融合技术将被应用于卫星导航、组合导航和地形辅助导航系统等新型导航系统中。

（5）机载设备向多模式化发展，一物多用。例如，仪表着陆系统和微波着陆系统可组成一个多模式接收机，GPS和GLONASS也可组合在一个接收机中，俄制的近程导航功能和仪表着陆功能可由同一个机载设备完成等。这些多模式机载设备既方便了装机又增加了用途。

第二章 自主式导航系统

自主式导航系统在 20 世纪初开始使用，自主式导航系统不依赖地面导航台，使用舰载或机载测速与测向仪推算出舰船或飞机的当前位置。由于它是利用推算的方法得出当前位置的，因此也叫推算导航系统。非自主式导航系统的优点是整个系统的复杂性大部分集中在导航台上，机载或舰载用户设备比较简单，因此价格低廉、可靠性高、易于推广应用。但从作战使用的角度看，由于它要有导航台并依赖于导航台与运载体之间的空间通信，所以系统的生存能力、抗干扰能力、反利用能力、抗欺骗能力与自主式导航系统相比稍逊。

早期的机载推算导航系统，利用陀螺或磁航向将测出的飞机的空速分解成东向和北向分量，然后分别积分，算出各个方向上所经过的距离，然后在此基础上算出所经过的直线距离与方向。尽管空速测量仪不断改进，但由于航向基准和风速预报的误差，使系统误差大于航向距离的 10%。

20 世纪 60 年代开始，惯性导航系统开始在航海和航空中大量投入使用。早期的惯性导航系统都是平台式的，后来发展为捷联式。

另一种比较主要的空用自主式导航系统是 1945 年左右开始发展的多普勒导航系统，多普勒导航系统由多普勒雷达和导航计算机组成。利用多普勒效应，根据从飞机斜下方发射的 2~4 个波束的回波，检测出飞机相对于地面的地速和偏流角，或者在机体坐标系中的三维速度分量。在导航计算机中，以来自航姿基准系统（AHRS）的飞机航向和姿态角数据为基础，将多普勒雷达产生的信息进行坐标变换，求出飞机在大地坐标系中的三维速度分量（即北向、东向和垂直速度），然后进一步经积分解算得出飞机当前的地理坐标位置和到达目的地的应飞航向、应飞距离和应飞时间等导航信息。

以上所述的自主式导航系统都是推算导航系统，位置信息由积分导出，因此都有一个共同的问题，就是其误差随时间而积累。而无线电导航系统则没有这个问题，因此需要较长时间工作的推算导航系统一般要由无线电导航系统定期进行校准。

天文导航系统也是一种自主式导航系统。当前，天文导航系统在航海、航空及航天中均有使用，具有抗干扰能力强、可靠性高、隐藏性好、信息源不可摧毁、导航误差不随时间积累等特点，但天文导航系统在航海、航空领域的使用易受天气影响。

第一节 多普勒导航系统

多普勒导航系统是指利用电磁波的多普勒效应测量、解算飞机地速和偏流角，并推算飞机位置及其他导航参数的自主式导航系统。多普勒导航系统无须地面设备配合，近、远程导航均可使用，一般不受气象条件限制。测量的地速、偏流角平均值精度较高，但在飞机俯仰、倾斜过大或在沙漠、平静水面上空飞行时，雷达可能丢失回波信号。定位误差随飞行距离增大而积累，在海面上飞行时还会产生海洋误差。

随着导航技术的发展，单一多普勒导航已经不能满足要求，导航系统正在向组合导航系统过渡，其构成的典型组合导航系统有多普勒/惯性导航和多普勒/惯性/无线电导航等。

一、工作原理

(一) 多普勒效应

多普勒导航系统的工作原理是建立在多普勒效应的基础上的。所谓多普勒效应，就是当发射天线与接收天线之间存在相对运动时，接收天线上感应电动势的频率就不再等于发射天线电流的频率了，这种现象就称为多普勒效应。该效应由奥地利科学家 C. J. 多普勒于 1842 年发现。多普勒效应可以用来描述发射机与接收机之间有相对运动时的频率变化。这种频率变化，称为多普勒频移并与发射机和接收机之间的相对速度成正比。对于电磁波，不管是发射机、接收机或者是两者都在运动，其结果在比例关系方面没有什么不同。如果发射机与接收机之间的相对速度远小于光速的话，则多普勒频移可表示为：

$$f_d = \frac{v_R f}{c} = \frac{v_R}{\lambda} \quad (2-1)$$

式中： f_d 是多普勒频移； c 是光速； f 是发射频率； v_R 是发射机与接收机之间的相对速度； $\lambda = c/f$ 是发射波长。由此可见，如果 λ 已知，那么相对速度就能计算出来。为了测量飞机的速度，发射机、接收机安装在飞机上，并且向地面辐射电磁波能量，如图 2-1 所示。多普勒导航系统波束几何图形参见图 2-2。

一些能量被地面反射回来，并被飞机上的多普勒导航系统接收机接收。如果飞机的运动速度是 v ，则通过波束测得 $v_R = 2v \cos\varphi = 2vb$ 。式中： φ 是速度 v 与波束中心线之间的夹角； b 是沿着波束中心线的单元矢量，因为发射机和接收机都是相对于地面运动的，所以这里的系数是 2，由此可得

$$f_d = \frac{2vf}{c} \cos\varphi = \frac{2v}{\lambda} \cos\varphi \quad (2-2)$$

个多普勒频移。此外，上倾的地带不会产生误差，因为反向散射信号来自单个物体，单个固定目标会产生一个正确的多普勒频率。

单波束多普勒导航系统是没有实用价值的，因为利用单波束导航系统无法得知偏流角的大小；多普勒频移不仅与地速有关，而且与飞行姿态有关，而单波束多普勒导航系统无法得知飞机姿态信息。

双波束系统可以用来测量地速和偏流角，但是到目前为止，我们假设飞机只是具有水平速度和保持正常的姿态。如果飞机在垂直方向上有相对运动，要求出地速，就得知垂直速度，以便消除多普勒信息中这一分量的影响。另外，当飞机姿态发生变化时，还要求提供机上本地垂直基准，以便补偿波束俯角的实际变化。但以上这些问题，双波束系统无法解决。在实际运用中，双波束系统所要求的这些数据可以从其他传感器得到，而典型的多普勒导航系统都是左右侧、前后指向的三波束或四波束系统。这种扩展的多波束系统不仅能够有效地引出3个速度分量，而且能对飞机的姿态变化进行补偿。三波束多普勒导航系统的波束结构如图2-3所示。这种波束结构从俯视平面图看起来，很像希腊字母“λ”，所以也常被称为三波束“λ”型多普勒导航系统；也有用“雅露斯(Janus)”来命名的，Janus是罗马神话中的两面神，头上长有两个面孔，一个向前，一个向后，这里是指多普勒导航系统既有前视又有后视的波束配置。

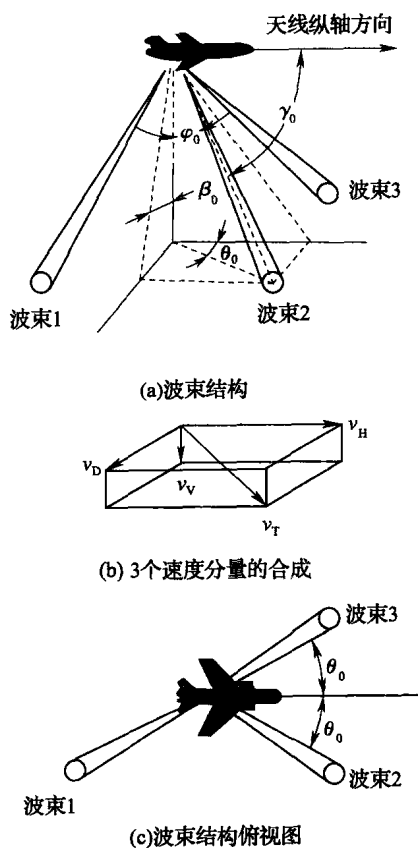


图2-3 三波束“λ”型多普勒导航系统波束结构