



航空无线电导航技术与系统

Aeronautical Radio Navigation Technology and Systems

唐金元 黄聚义 王思臣 王翠珍 编著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书阐述了导航与无线电导航系统概念、无线电导航系统分类、导航中常用坐标系及其坐标变换方法、无线电导航定位基本原理、机载导航系统导航参数的计算方法以及无线电导航系统技术性能指标，分析了无方向性信标—无线电罗盘测角系统、无线电高度表测高系统、塔康系统、着陆（舰）引导系统、卫星导航系统等现用主要航空无线电导航系统的系统组成、工作原理以及机载设备工作过程等内容。

本书可以作为高等院校电子信息工程、导航工程、航空电子设备维修、综合航电设备维修等专业的教材，也可作为航空电子工程相关专业技术人员的参考用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

航空无线电导航技术与系统 / 唐金元等编著. —北京：电子工业出版社，2022.12

ISBN 978-7-121-44501-9

I. ①航… II. ①唐… III. ①航空导航—无线电导航系统 IV. ①V249.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2022）第 209013 号

责任编辑：管晓伟

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：720×1 000 1/16 印张：18.5 字数：342.2 千字

版 次：2022 年 12 月第 1 版

印 次：2022 年 12 月第 1 次印刷

定 价：100.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010) 88254460, guanxw@phei.com.cn。



前言

无线电导航是指利用无线电技术测量载体的位置及其他航行参数，对载体航行的全部（或部分）过程实施导航的技术和方法。无线电导航技术是自 20 世纪初期以来（特别是从第二次世界大战至今），在无线电技术和其他导航技术发展的基础上而逐步发展、完善起来的一门重要导航技术。目前，无线电导航技术门类齐全，是航空、航天、航海和陆地导航用户的重要导航技术手段。航空无线电导航系统采用无线电导航技术，对飞机出航、巡航、归航、进近、着陆等整个飞行过程实施航行引导。航空无线电导航系统有无方向性信标—无线电罗盘测角系统、无线电高度表测高系统、塔康系统（军用航空应用）、着陆（舰）引导系统（包括仪表着陆系统、微波着陆系统、精密进近引导雷达等）和卫星导航系统（包括全球定位系统、全球导航卫星系统、北斗卫星导航系统、伽利略卫星导航系统等），以及伏尔—地美依测角测距系统（民用航空应用）、多普勒导航系统、罗兰—C 系统等。航空无线电导航系统在航空电子系统中占有十分重要的地位。

本书选取航空无线电导航技术的基础知识、基本理论和现用主要军、民用航空无线电导航系统（无方向性信标—无线电罗盘测角系统、无线电高度表测高系统、塔康系统、着陆（舰）引导系统和卫星导航系统）的系统组成、工作原理以及应用特性等内容进行讨论、分析。

全书分 7 章：第 1 章概述了导航与无线电导航系统概念、无线电导航系



统分类和航空无线电导航系统的发展应用简况；第2章阐述了无线电波的传播特性与传播方式、无线电收发机主要性能指标、导航中常用坐标系及其坐标变换方法、无线电导航基本定位原理、机载导航系统导航参数的计算方法和无线电导航系统技术性能指标；第3章～第7章依次分析了无方向性信标—无线电罗盘测角系统、无线电高度表测高系统、塔康系统、着陆（舰）引导系统（仪表着陆系统、微波着陆系统）、卫星导航系统（导航星全球定位系统、全球导航卫星系统、北斗卫星导航系统）的系统组成、工作原理以及机载设备工作过程等内容。

全书在编写过程中，贯彻创新精神，以高等教育教学内容改革思想为指导，理论适度，注重应用，兼顾发展，重点对内容体系结构进行了改革探索。本书在内容组织和选取上有以下主要特点。

（1）“技术”“系统”有机融合。本书基于“技术是基础，系统是应用”这一理念，将无线电波的传播特性与传播方式、导航中常用坐标系及其坐标变换方法、无线电导航基本定位原理、机载导航系统导航参数的计算方法等航空无线电导航技术与现用主要的航空无线电导航系统的相关内容进行了深层次有机融合。

（2）“系统”选取典型、全面。现用航空无线电导航系统主要有测角型、测距（测高）型、陆基型、星基型和近程型、远程型之分，本书所讨论的无方向性信标—无线电罗盘测角系统、无线电高度表测高系统、塔康系统、着陆（舰）引导系统和卫星导航系统，代表了现用航空无线电导航系统的上述全部类型。本书选取的航空无线电导航系统典型、全面。

（3）“技术”内容新颖、适度。航空无线电导航技术仍处在快速发展过程中。本书广泛吸取航空无线电导航技术发展的新理论、新方法和新成果，对舰载机自动着舰引导技术、卫星导航组合应用技术和机载导航系统导航参数的计算方法等军、民用航空无线电导航新技术与新方法内容进行了适度的介绍。

本书可以作为高等院校电子信息工程、导航工程、航空电子设备维修、综合航电设备维修等专业的教材，也可作为航空电子工程相关专业技术人员的参考用书。



本书是在唐金元教授的主持下编写而成的。第1、7章由唐金元编写，第2、3章由黄聚义编写，第4、5章由王思臣编写，第6章由王翠珍、唐金元共同编写。全书由王翠珍统稿并完成文字校对，由唐金元整体修改、定稿。

海军航空大学青岛校区李淑华教授主审了本书。航空工业第637所王克先高工审阅了全书，并提出了许多宝贵意见。海军航空大学青岛校区教科处等单位对本书出版给予了大力支持和帮助。电子工业出版社管晓伟、孙丽明、张正梅等编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

由于编著者水平有限，加之多人编写和时间仓促，书中难免存在不当和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编著者

2021年8月于青岛



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导航概念与无线电导航系统分类	1
1.1.1 导航概念	1
1.1.2 无线电导航系统分类	4
1.2 无线电导航系统发展简况	6
1.2.1 早期阶段——测向设备发展时期	6
1.2.2 发展阶段——陆基、空基导航系统全面发展时期	8
1.2.3 成熟阶段——卫星导航系统发展时期	11
1.3 无线电导航的发展前景及军事应用	13
1.3.1 无线电导航的发展前景	13
1.3.2 无线电导航军事应用	14
复习题	14
第 2 章 无线电导航基础知识	15
2.1 无线电波的传播特性与传播方式	15
2.1.1 无线电波的频段划分和传播特性	15
2.1.2 无线电波的传播方式	20
2.1.3 主要频段无线电波的传播特性分析	26
2.2 无线电收发机	28
2.2.1 发射机的基本组成与主要性能	28
2.2.2 接收机的基本组成与主要性能	30
2.3 导航中常用坐标系及其坐标变换方法	34



2.3.1 导航中常用坐标系简介	34
2.1.2 常用坐标系坐标变换方法	41
2.4 无线电导航定位基本原理	44
2.4.1 平面几何定位原理	44
2.4.2 推算定位原理	46
2.5 机载导航系统导航参数的计算方法	47
2.5.1 机载导航系统概述	47
2.5.2 机载导航系统导航参数的概念	50
2.5.3 机载导航系统制导参数的计算方法	56
2.6 无线电导航系统技术性能指标	60
复习题	64
第3章 无方向性信标—无线电罗盘测角系统	66
3.1 概述	66
3.1.1 系统组成及简要工作原理	67
3.1.2 系统导航功能	71
3.2 无线电罗盘	72
3.2.1 无线电罗盘天线方向特性分析	72
3.2.2 无线电罗盘基本工作原理、机件组成与工作方式	80
3.3 系统应用特性分析	84
3.3.1 系统简单评价	84
3.3.2 系统定向误差分析	85
复习题	90
第4章 无线电高度表测高系统	92
4.1 概述	92
4.1.1 无线电高度表功用与分类	92
4.1.2 无线电高度表机件组成与基本测高原理	93
4.2 频率调制式无线电高度表	95
4.2.1 直接调频式无线电高度表	95
4.2.2 跟踪调频式无线电高度表	101
4.3 脉冲调制式无线电高度表	104
4.3.1 功能模块组成与工作原理简介	104
4.3.2 纳秒级脉冲调制式无线电高度表特点	108



复习题	109
第 5 章 塔康系统	110
5.1 概述	110
5.1.1 塔康系统组成与功用	110
5.1.2 塔康系统应用特点和主要战技指标	115
5.2 塔康系统工作原理	120
5.2.1 塔康系统测位原理	120
5.2.2 塔康系统测距原理	123
5.2.3 塔康机载设备简介	128
5.3 塔康系统应用分析	133
5.3.1 塔康系统应用简评	133
5.3.2 塔康系统发展前景	133
复习题	136
第 6 章 着陆（舰）引导系统	138
6.1 概述	138
6.1.1 着陆引导系统分类	138
6.1.2 飞机仪表着陆标准及着陆基本过程	140
6.1.3 着陆引导系统技术指标	143
6.2 仪表着陆系统（ILS）	144
6.2.1 ILS 基本组成	144
6.2.2 下滑信标和下滑接收机	147
6.2.3 航向信标和航向接收机	151
6.2.4 指点信标和指点信标接收机	152
6.2.5 ILS 航向、下滑偏离指示	153
6.3 微波着陆系统（MLS）	156
6.3.1 MLS 基本组成	157
6.3.2 MLS 测角、测高原理	161
6.3.3 MLS 机载设备简介	164
6.3.4 MLS 应用特性分析	167
6.4 舰载机着舰引导系统	170
6.4.1 舰载机着舰基本过程及主要影响因素	170
6.4.2 舰载机着舰引导技术	172



6.4.3 舰载机自动着舰系统简介	176
复习题	181
第7章 卫星导航系统	182
7.1 概述	182
7.1.1 卫星导航系统概念与发展简况	182
7.1.2 卫星导航系统分类和主要特点	193
7.2 导航星全球定位系统（GPS）	195
7.2.1 GPS 组成与定位原理	195
7.2.2 GPS 接收设备工作原理	214
7.2.3 GPS 定位误差	221
7.2.4 GPS 现代化计划简介	226
7.3 全球导航卫星系统（GLONASS）	230
7.3.1 GLONASS 组成和导航电文	230
7.3.2 GPS、GLONASS 组合应用技术	240
7.4 北斗卫星导航系统（BDS）	246
7.4.1 北斗一号系统	247
7.4.2 北斗二号系统	253
7.4.3 北斗三号系统	259
7.4.4 北斗卫星导航系统短报文通信技术简介	280
复习题	284
参考文献	285



1.1 导航概念与无线电导航系统分类

1.1.1 导航概念

1. 导航及其任务

导航是“引导航行”的意思，即引导载体（或称为航行体，如飞机、舰船、车辆等）从一地（出发地）航行到另一地（目的地）。载体从一地航行到另一地通常是按预先设定的航行路线（航线）来进行的。所以，引导载体按预定航线航行的整个引导过程称为导航。导航是保证载体沿着预定航线安全、准时到达目的地的一种重要技术手段。

导航的任务主要如下。

- (1) 确定载体当前所处的位置及其他航行参数（如航向、速度、距离、时间等）。
- (2) 引导载体沿预定航线航行。
- (3) 引导载体在夜间或复杂气象条件下安全着陆（或进港）。
- (4) 保证载体完成航行任务所需要的其他引导任务。

在上述各项任务中，第一项任务是导航的基本任务，它是完成其他各项导航任务的基础。

需要说明的是，载体（特别是军用载体）并非都是按预定航线航行的。如果在某些特殊情况下载体临时改变航行路线或处于机动航行状态，就更离不开可靠的引导。这种引导也属于导航的范畴。



2. 航空导航功能

航空导航是研究各种军、民用飞行器导航装置、设备，以及导航技术、方法的科学。对飞机的航行引导，应贯穿于飞机“滑行→起飞→爬升→巡航→进场→进近→着陆→滑行”的整个飞行过程，如图 1-1-1 所示。

- (1) 引导飞机从起飞机场滑行、起飞、爬升，进入预定航线。
- (2) 引导飞机沿预定航线巡航飞行。
- (3) 引导飞机降低高度，在降落机场按指定路径进行进场、进近、着陆和滑行。
- (4) 对机场区域和航路上的飞机实行空中交通管制。

需要指出的是，在飞机不同的飞行阶段，通常采用不同的导航系统进行引导。例如，在航线飞行阶段（巡航阶段）通过航路导航系统〔区域导航系统，如全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）、惯性导航系统（Intertial Navigation System，INS）、惯性/卫星组合导航系统（INS/GNSS）等〕进行引导；在进近、着陆飞行阶段通过着陆引导系统〔如仪表着陆系统（Instrument Landing System，ILS）、微波着陆系统（Microwave Landing System，MLS）、精密进近雷达（Precision Approach Radar，PAR）等〕进行引导。对飞机实行空中交通管制是通过专门的空中交通管制系统（Air Traffic Control System，ATCS）来完成的。

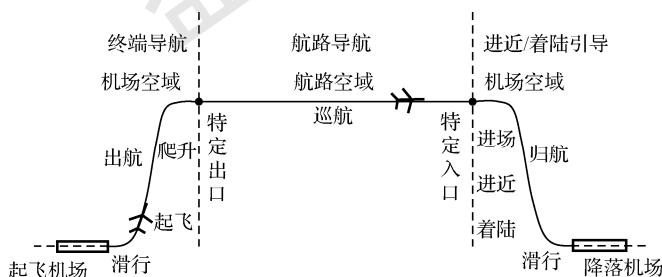


图 1-1-1 飞机飞行过程阶段图解

3. 常用导航技术方法

导航是一门综合性的应用学科。实现导航功能的技术方法有很多。导航按其工作原理或主要应用技术的不同，可分为地标导航、地磁导航、天文导航、惯性导航、无线电导航等类别。



1) 地标导航

地标导航是依赖经验通过目视观察周围地面或海面的固定地物标志（如山川、河流、湖泊、森林、铁路、公路、岛屿及建筑物等）进行定位并引导载体航行的。近代，利用电视、雷达等观测周围环境图像进行的导航是地标导航手段的发展。

地标导航简单、可靠，但精度不高。在能见度低（目视时）或在海洋、沙漠中无熟悉地标可观察时，用此手段无法进行导航。

2) 地磁导航

地磁导航是利用地球的磁效应进行导航的。磁罗盘就是利用地球磁效应的仪表。这种导航手段设备简单、可靠，但精度不高。

3) 天文导航

天文导航是指用测量自然天体（日、月、星等）相对地平面的高度角和相对地球正北向的方位角来计算用户位置和航向的导航手段。

这种导航手段的优点是无须地面台站协同，不利用电磁波，因而不受人工或自然形成的电磁干扰影响，且保密性好。其缺点是受气象条件限制，遇阴、雾等天气无法进行天文导航。

4) 惯性导航

用加速度计测量载体运动的加速度数据，经积分运算得到载体速度、位置等信息，用陀螺仪测量载体运动的角速率数据，经转换、处理得到载体航向、姿态等信息的导航手段称为惯性导航。

惯性导航的优点如下。

（1）工作自主性强：仅依靠自身的机载（舰载）设备就能独立地完成导航任务。

（2）提供导航参数多：可以为机上用户提供位置、速度、航向和姿态等导航参数。

（3）抗干扰能力强，隐蔽性好：对电、磁、光、热及核辐射等形成的波、场的影响不敏感，具有极强的抗干扰能力，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、全球范围导航的要求。

上述优点使惯性导航成为一种在航空、航天、航海等领域中获得广泛应用的导航手段。

惯性导航的缺点是存在积累误差。它的核心部件——陀螺仪存在漂移误差，致使稳定平台随飞行时间的不断增长偏离基准位置的角度不断增大，使



加速度的测量和即时位置的计算误差不断增加，导航精度不断降低。这时，必须使用其他高精度导航系统对其时间积累误差进行校正。在应用中，惯性导航系统往往与其他导航系统组成组合导航系统。例如，惯性导航—卫星导航组合导航系统，以惯性导航为主，用卫星导航系统定期校正惯性导航的定位积累误差。

5) 无线电导航

利用无线电技术测量载体的位置及其他航行参数，对载体航行的全部（或部分）过程实施导航，称为无线电导航。无线电导航主要是利用无线电波在均匀介质中直线传播特性（可以确定辐射源的方位）和等速传播特性（可以确定辐射源的距离），以及在介质不连续界面上将产生反射的特性（可以发现目标）对载体实施导航的。

无线电导航与上述导航技术方法相比，有以下优点。

- (1) 不受时间、地点和气象条件限制，基本可以实现全天候工作。
- (2) 测量的精度高，定位精度可以达到几米甚至1m以内。
- (3) 工作可靠，测量迅速，基本可实时给出导航参数。

无线电导航是能够完成引导飞机起飞、航线巡航飞行、进近、着陆（舰）和实施空中交通管制的唯一有效的导航手段，是目前航空领域各种导航手段中应用最广泛、最普遍的一种核心导航手段，在航空导航技术中占据特殊的地位。

无线电导航的缺点如下。

- (1) 工作时通常要辐射或接收无线电波，易被敌方发现和干扰，在强干扰下甚至无法工作。
- (2) 一般情况下，无线电导航系统需要地面设备或空间卫星配合，且其配合设备在战时容易受到破坏。另外，此时系统的工作区域往往受到限制。

需要说明的是，除上述五种导航手段外，还有利用灯塔、指示灯的灯光导航，利用波束很窄、能量高度集中的激光导航，利用声波或超声波的声呐导航等。

1.1.2 无线电导航系统分类

无线电导航系统是利用无线电导航技术对载体航行实施引导的专用设备组合的统称。

当今，无线电导航技术已经形成了比较完备的理论体系和十分广泛的应



用领域，且实用的无线电导航系统很多。

无线电导航系统按不同的原则，大体有以下几种分类。

1. 按所测量的电气参量分类

- (1) 振幅式无线电导航系统。
- (2) 相位式无线电导航系统。
- (3) 频率式无线电导航系统。
- (4) 脉冲(时间)式无线电导航系统。

2. 按所测量的几何参量(或位置线的几何形状)分类

- (1) 测角(测向)无线电导航系统(直线无线电导航系统)。
- (2) 测距无线电导航系统(圆周无线电导航系统)。
- (3) 测距差无线电导航系统(双曲线无线电导航系统)。

3. 按独立性(自体化程度)分类

- (1) 自主式(自备式)无线电导航系统：仅包括载体上的无线电导航设备；测定导航参数时无须载体以外的设备协同工作。
- (2) 非自主式(它备式)无线电导航系统：包括载体上的无线电导航设备和载体外的无线电导航台(站)；两者利用无线电波配合工作得到导航信息。

4. 对非自主式无线电导航系统按导航台(站)所在位置分类

- (1) 陆基无线电导航系统：导航台(站)安装在地面上(或海上、舰船上)的无线电导航系统。
- (2) 星基无线电导航系统：导航台(站)安装在人造卫星上的无线电导航系统。

5. 按作用距离分类

- (1) 近程导航系统：作用距离在500km以内。
- (2) 中程导航系统：作用距离在500~2 000km范围内。
- (3) 远程导航系统：作用距离在2 000~10 000km范围内。
- (4) 超远程导航系统：作用距离大于10 000km。



6. 按用途分类

(1) 航路导航系统(区域导航系统):用以引导飞机沿预定航线中航路点的顺序飞行。

(2) 着陆引导系统:用以引导飞机在夜间或其他各种复杂气象条件下安全进近、着陆。

(3) 空中交通管制及机场调度指挥系统:用以保证飞机在空中安全飞行,指挥调度飞机在机场上空飞行,并使之有序地进行着陆。

(4) 辅助航行导航设备:不能单独完成导航引导任务,但能给出某个导航参数。

在后续第3章中讨论的“无方向性信标—无线电罗盘测角系统”,就是一种陆基、非自主式、近程、振幅式无线电测角系统;第4章讨论的“无线电高度表测高系统”,是一种自主式、频率式(或脉冲式)无线电测距(测高)系统;第5章讨论的“塔康系统”,是一种陆基、非自主式、近程、相位/时间式军用测角测距系统;第6章讨论的“着陆(舰)引导系统”,是一种陆(舰)基、非自主式、近程着陆(舰)引导系统;第7章讨论的“卫星导航系统”,是一种星基、非自主式、超远程航路导航系统。

1.2 无线电导航系统发展简况

无线电导航是自20世纪初期以来,在无线电技术和其他导航技术发展的基础上逐步发展、完善起来的一门重要导航技术。目前,无线电导航技术门类齐全,无线电导航系统种类繁多,能够满足航空、航天、航海和陆地导航用户的引导需求。

无线电导航的发展经历了三个典型阶段:从以测向为主的早期阶段,到全面发展、日趋完善的发展阶段,再到现在卫星导航应用普及、多导航手段并举的成熟阶段。无线电导航的应用也经历了从单功能引导到全方位引导、从单领域应用到多领域普及的发展过程。

1.2.1 早期阶段——测向设备发展时期

早期阶段又称第一阶段,时间从20世纪初至第二次世界大战前。该阶段以发展无线电测向(定向)技术为主。该阶段首先出现了给载体提供导航



台方位的无线电测向仪，接着定向器、四航道信标、航空无线电信标等振幅式无线电测向设备相继问世。

1907年，无线电测向技术逐步进入实用阶段。1912年，世界上第一个无线电导航设备，即振幅式无线电测向仪被研制出来。无线电测向仪在第一次世界大战期间被广泛应用，在海岸上安装可发射375kHz连续无线电波的信标台（不同信标台采用不同的莫尔斯电码作为识别信号），在船上通过可旋转的环形天线接收无线电波，用定向接收机测出信标台的方位，或进一步测出两个不同信标台的方位，再通过θ-θ定位方式对船只进行定位。

这一阶段还出现了通过将舰载或机载的无线电测向仪与测速仪相结合推算出舰船或飞机位置的方法，这是最早采用无线电导航方式进行的推算定位（航位推算）。

1922年，声呐被发明，用于避开水下暗礁、发现水下障碍物和潜艇等，也可用于测绘海底地图。

20世纪20年代末期，陆续出现了航空导航用的四航道信标（1929年出现，目前已退出服务）、无方向性信标（Non-Directional Beacon, NDB，首先在欧洲开始使用，然后才传到美国）及垂直指点信标（Marker Beacon, MB, 75MHz信标），用于给飞机提供航道指引和飞过某固定点时的指示信息。

1935年，法国首先在船上开始装备VHF频段的导航雷达，用于近岸导航以避免船只的碰撞。

1940年，无方向性信标（NDB）导航系统的机载型自动定向仪——无线电罗盘（Automatic Direction Finder, ADF）正式投入使用。

测向是最早采用的一种无线电导航手段。20世纪初至第二次世界大战前，载体主要依靠无线电测向、定向设备的引导来出航、归航和按预定航线航行，从而使近海航海和发达地区的航空有了较为可靠和精确的保障。

这个阶段无线电导航技术的应用特点：航海导航应用领先于航空导航应用；无线电测向能力优于定位能力。

目前，无方向性信标测向（测角）系统仍活跃在世界范围航空导航的舞台上。近一个世纪，无方向性信标—无线电罗盘测角系统在世界航空史上谱写了光辉的一页。

关于无方向性信标—无线电罗盘测角系统的系统组成和工作原理的分析，详见第3章。



1.2.2 发展阶段——陆基、空基导航系统全面发展时期

发展阶段又称第二阶段，时间从第二次世界大战开始至 20 世纪 60 年代初。在这一阶段，名目繁多的各种陆基、空基无线电导航系统因为需要而被发明和研制出来。其中，大多数系统得到应用并逐步完善，个别系统因种种原因未能普及而退出了历史舞台。

1) 台卡 (Decca) 导航系统

台卡导航系统于 1937 年被提出。1944 年，英国伦敦台卡导航仪公司成功研制出台卡导航系统。它属于低频 (70~130kHz) 连续波相位式无线电导航系统，采用测距差的双曲线定位方式工作，主要用于海上船只的近程高精度定位，也可为覆盖范围内的直升机提供导航服务。

第一个台卡链于 1946 年投入使用，1954 年开始普及。标准台卡链由一个主台和对称分布在主台四周的 3 个副台（红台、绿台、紫台）组成，并根据电波的相位差测定载体到主、副台间的距离差来实施双曲线定位。后来，随着罗兰—C 导航系统的建设和发展，台卡导航系统退出服务。

2) 无线电高度表 (RA) 测高系统

1938 年，调频体制的连续波调频无线电高度表 (Radio Altimeter, RA) 测高系统被研发出来；第二次世界大战后，又产生了基于雷达测距技术的脉冲调制体制的雷达高度表（又称脉冲高度表）测高系统。它们都得到了广泛应用直至现在。无线电高度表是一种自主式航空导航设备，用于测量飞机距离地球表面（或水面）的高度 (Above Ground Level, AGL)。基于测高范围的不同，一般将只可测 1 500m 以下高度的高度表称为低空高度表，可测 1 500m 以上的高度表称为高空高度表。低空无线电高度表对于保证飞机飞行安全至关重要，是飞机起飞、降落和特殊飞行（如超低空飞行）时的关键导航设备。

关于无线电高度表测高系统工作原理的分析，详见第 4 章。

3) 仪表着陆系统 (ILS) 和精密进近雷达 (PAR)

1939 年，仪表着陆系统开始被投入使用。1948 年，仪表着陆系统被国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 确定为飞机标准着陆引导系统。仪表着陆系统可为着陆飞机同时提供水平方向和垂直方向的引导，使飞机在云层低、能见度差的情况下也能高精度地完成着陆过程。到目前为止，仪表着陆系统还是主要的引导飞机着陆的手段。



在第二次世界大战期间，野战机场和航空母舰上开始使用一种安放在地面上或甲板上的精密进近雷达。它通过测量下滑中的飞机方位、仰角、距离等信息，指示飞机水平方向和垂直方向偏差调整量来实现着陆引导。其缺点是飞行员处于被动引导状态。因此，在有仪表着陆系统的地方，它多作为备用设备使用。

关于仪表着陆系统的组成和工作原理分析，详见第6章。

4) 航管系统

航管系统通常由一次监视雷达（Primary Surveillance Radar, PSR）、二次监视雷达（Secondary Surveillance Radar, SSR）、通信设备和地面控制中心等组成，用于监视、识别、引导其覆盖区域（航路或机场终端区）内的飞机，提供飞行安全保障。目前，采用较多的航管系统为空中交通管制雷达信标系统（Air Traffic Control Radar Beacon System, ATCRBS）。

5) 罗兰（LORAN）系统

罗兰（Long Range Navigation, 简称 LORAN）系统是一种脉冲波体制的双曲线型陆基中远程无线电导航系统。该系统一般沿海岸线布台，每个台链被编成一个主台、两个或两个以上副台的形式。罗兰接收机通过接收主、副台信号到达的时间差，得到以两个发射台为焦点的一条双曲线，再通过主台与另一副台组合得到另一条双曲线，其交点即为载体的位置。

罗兰—A 系统是 1940 年开始设计、1945 年投入使用的。罗兰—C 系统是罗兰—A 系统的改进型。世界上第一个罗兰—C 台链于 1957 年由美国海岸警卫队建成，1960 年以后得到大力发展，1975 年美国将其规定为标准航海导航系统，在航海、航空、海上交通等方面都有应用。罗兰—C 系统由一系列罗兰—C 台链（每个台链包括 3~5 个发射台）组成，能实现低空覆盖。其用户机价格低廉，目前还在使用。

6) 多普勒导航系统（Doppler Navigation System）

1945 年，多普勒导航系统开始发展，这是一种自主式无线电导航系统，通过测量出射向地面的回波信号的多普勒频移，得到飞机相对于地面的地速和偏流角，采用航位推算原理，对速度积分求出飞机的已飞距离，进而得到飞机的当前位置等导航信息。

多普勒导航系统目前仍在广泛应用。其缺点是用于定位时存在对时间的积累误差。



7) 伏尔 (VOR) 系统

伏尔 (VHF Omni-Directional Radio Range, 简称 VOR) 系统是第二次世界大战后期在美国首先发展起来的陆基相位式测角近程航空无线电导航系统，1949 年被 ICAO 采纳为国际标准的航空近程导航系统。伏尔系统可测出伏尔方位角，用于引导飞机在预选航线上飞行。

伏尔导航系统一般与测距器配合采用 ρ - θ 极坐标定位方式进行定位。

8) 测距器 (DME)

测距器 (Distance Measuring Equipment, DME) 是距离测量设备，简称地美依。它是在第二次世界大战中随着雷达的发展应用而出现的。它通过测量无线电脉冲的传播时间获得飞机到地面台的距离。它有普通测距器 (DME 或 DME/N) 和精密测距器 (PDME 或 DME/P) 两种。

1959 年，ICAO 将测距器列为标准航空导航系统来使用，一般安装在机场和航路上。精密测距器是微波着陆系统 (MLS) 的配套组成设备，用于在飞机精密进近着陆引导中提供飞机距地面精密测距器应答器之间的精确斜距信息。

9) 塔康 (TACAN) 系统

战术空中导航系统——塔康系统是美国 1955 年投入装备的近程无线电导航系统，由地面设备 (也称塔康信标) 和机载设备组成。

塔康系统地面信标体积小，便于机动，在军事上得到了广泛应用。

关于塔康系统工作原理的分析，详见第 5 章。

10) 奥米加导航系统

美国的奥米加导航系统属于甚低频双曲线定位方式的超远程导航系统。该系统是 1947 年设计的，20 世纪 60 年代初期进入发展阶段，1982 年完成全部的建台工作。奥米加导航系统通过对甚低频连续波信号的相位比对来进行双曲线形式的定位。其发射装置由分布在世界各地的 8 个甚低频地面发射台组成。发射台用于向地面、海上和空中用户提供甚低频无线电导航信号，可实现导航信号对全球范围的覆盖。奥米加导航系统工作频率低，电波可深入水下十几 m。

随着 GPS 的广泛使用，1997 年 9 月 30 日，奥米加导航系统被宣布关闭。

从上述诸多导航系统的发展可以看出，这一阶段研制和应用了多种陆基无线电导航系统，导航信号覆盖了全球，形成了较为完备的陆基、空基无线电导航系统体系。



1.2.3 成熟阶段——卫星导航系统发展时期

成熟阶段又称第三阶段，时间从 20 世纪 60 年代中期至今。在此阶段，以卫星导航系统为代表的一系列新型无线电导航系统，包括微波着陆系统（MLS）、地形辅助导航系统、联合战术信息分发系统（Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS）、定位报告系统（Position Locating and Reporting System, PLRS）等陆续出现。其中，卫星导航系统体现了强大的生命力和应用价值。

1) 卫星导航系统

卫星导航系统是一种利用人造地球卫星（以人造地球卫星作为导航台）对载体进行定位、导航和授时的“星基无线电导航系统”。

从军事应用的角度看，卫星导航系统之前的陆基无线电导航系统覆盖能力和抗毁灭、抗干扰、抗欺骗能力较差。卫星导航系统的出现改变了这种状态。卫星导航系统把导航台设在了外层空间的人造卫星上，解决了导航信号大范围覆盖的问题，可以通过多颗卫星组成的导航星座覆盖全球。卫星导航系统所发射的导航信号采用伪码扩频调制方式，具有较好的抗干扰能力。卫星导航系统采取措施使用户接收设备可以实现高精度三维定位、测速、测时，具备全球导航能力。

关于卫星导航系统的系统组成和工作原理的分析，详见第 7 章。

2) 微波着陆系统

1978 年，国际民航组织批准将时间基准波束扫描（Time Reference Scanning Beam, TRSB）体制的微波着陆系统作为新型的飞机着陆引导的标准系统。该系统通过测量微波波束往返扫描时经过飞机的时间间隔，得到飞机相对于跑道中心线的方位角和相对于跑道平面的仰角，从而引导飞机精密进近着陆，并可以满足高等级的Ⅱ、Ⅲ类着陆引导标准。

微波着陆系统引导精度高，可用性和完善性强，可用于对各类飞机的着陆引导，便于实现曲线或折线进近。

关于微波着陆系统工作原理的分析，详见第 6 章。

3) 地形辅助导航系统

20 世纪 60 年代末，美军开始探索地形辅助导航的原理和应用。20 世纪 70 年代末，地形辅助导航系统开始作为低空作战飞机的辅助导航手段。这是一种自主式导航系统，主要利用与已有的地形信息进行匹配的方法去校正惯



性导航（简称惯导）的积累误差。

4) 联合战术信息分发系统

20世纪70年代中期，美国及欧洲几个国家开始研制联合战术信息分发系统。20世纪80年代初，该系统投入使用，在第一次海湾战争中发挥了突出的作用。联合战术信息分发系统作用范围大，用户数量多且无节点组网，可同时完成通信、导航和识别三大功能，是为区域性战争服务的重要信息化系统。

5) 定位报告系统

定位报告系统是美国20世纪70年代中期开始研制的一种新型作战系统，20世纪80年代初被美军开始在部队中推广使用，还在海湾战争中被投入使用并取得了实效。该系统是一种定位导航报告系统，具有电子地图和数据通信功能，可应用于陆军山地作战和登陆作战等场合。

现用主要航空无线电导航系统概况如表1-2-1所示。

表1-2-1 现用主要航空无线电导航系统概况

系统名称	基本原理	开始使用时间	工作频率	作用距离 (覆盖范围)	精度
无方向性信标导航系统	最小信号法	1912年	100~1 800kHz	500km	3°~5°
伏尔系统	相位式测向	1946年	108~118MHz	500km	1°~2°
测距器	询问应答式脉冲测距	1959年	960~1 215MHz	500km	±(0.1%~1%) (距离)
塔康系统	测距-测向定位	1955年	960~1 215MHz	500km 300m(距离)	小于±1° (方位)
罗兰-C系统	脉冲/相位双曲线定位	1960年	90~110kHz	2 200km (地波) 4 000km (天波)	500m
多普勒导航系统	推算定位	1945年	8.8GHz 13.3GHz	全球	0.5%~1% (距离)
仪表着陆系统	航向下滑航道	1939年	108~112MHz 329~335MHz	46km	
微波着陆系统	扫描时间测量	1978年	5 031~5 091MHz	37km	0.2°(航向) 0.12°(下滑)



续表

系统名称	基本原理	开始使用时间	工作频率	作用距离(覆盖范围)	精度
联合战术信息分发系统	时分多址 脉冲测距	1991年	960~1 215MHz	500km	100m
全球定位系统	伪距测量无源定位/CDMA ^①	1990年	L1: 1 575.42MHz L2: 1 227.60MHz L5: 1 176.45MHz	全球	10m (民用)
全球导航系统	伪距测量无源定位/FDMA ^②	1996年	1 602.562 5~1 615.5MHz 1 246.437 5~1 256.5MHz	全球	10m (民用)
北斗二号系统	伪距测量无源定位/CDMA	2012年	B1: 1 561.098MHz B2: 1 207.140MHz B3: 1 268.520MHz	包括中国在内的大部分 亚太地区	10m (民用)
北斗三号系统	伪距测量无源定位/CDMA	2020年	B1: 1 561.098MHz B1C: 1 575.42MHz B2a: 1 176.45MHz B3: 1 268.520MHz	全球	10m (民用)

① CDMA 英文全称为 Code Division Multiple Access, 译为码分多址。

② FDMA 英文全称为 Frequency Division Multiple Access, 译为频分多址。

1.3 无线电导航的发展前景及军事应用

1.3.1 无线电导航的发展前景

卫星导航代表了未来无线电导航的发展方向, 有无比广阔和美好的发展前景。卫星导航系统能够在任何气候条件下, 实时、便捷地提供连续和高精度的位置、速度和时间信息。用户设备的小型化和低廉的价格, 使卫星导航系统在车辆导航领域得以普及, 用户数量呈指数级增长。卫星导航方式提供全球准确一致的导航信息, 将提高世界陆、海、空运输的经济性与安全性, 改变空中、海上和陆上交通管制与调度系统的体制, 对全球经济发展和一体化进程做出贡献。

无线电导航技术的应用正在迅速超越航空、航海等领域的范畴, 渗透到国民经济和人民生活的各个方面。无线电导航及其应用技术将发展成一个重要的高科技信息产业, 在促进国民经济发展的同时, 也在不断提高着人民的生活质量。

卫星导航、微波着陆等系统除广泛用于军、民用的航行引导外, 还具有



广泛的军事作战用途。地形辅助导航系统、联合战术信息分发系统及定位报告系统等在战场中具有高精度定位、抗干扰、抗毁灭、反利用、反欺骗等性能，成为发展现代高科技军事的关键环节，并发挥出越来越大的作用。

1.3.2 无线电导航军事应用

在当前的军事领域，新一代无线电导航系统除能够更好地满足执行军事任务的航行引导需求外，还提供了更为广泛的战略功能，成为军事战斗力的重要组成部分。无线电导航军事应用主要包括以下几个方面。

1) 提供精确的定位信息

为需要高精度引导的作战任务提供定位服务，如海上、陆上的布雷、扫雷，部队侦察，海上、陆上救援，火炮及雷达阵地布列，快速测绘等。

2) 用于各种打击武器的精确制导

现在各种弹道导弹、巡航导弹、炸弹和炮弹等均已开始装备卫星导航或卫星导航/惯导的组合系统，可大大提高命中率和命中精度，改变了传统的作战方式。

3) 为各种机动平台提供位置和姿态信息

例如，为预警机的传感器平台提供精确的姿态信息，能够计算出敌我目标的真正位置所在，从而产生通信指挥控制和情报(Communication Command Control and Intelligence, C³I)所需要的实时战场敌我态势分布。

4) 提供统一准确的时间信息

无线电导航系统所提供的准确时间信息，成为C³I各组成部分协调、高效工作的重要基础。作战部队可以按指挥部的命令在准确的时间出现在准确的地点，使快速、机动作战的思想得以贯彻实施。

复习题

- (1) 什么是导航？试结合飞机的飞行过程，说明航空导航的主要引导功能。
- (2) 试比较无线电导航和惯性导航应用的优缺点。
- (3) 现用航空无线电导航系统主要有哪几种？试按照无线电导航系统的分类方法，说明它们分别属于什么类型的无线电导航系统。
- (4) 请查阅相关资料，对无线电技术的最新发展及军事应用加以总结。