

HANGKONGWUXIANDIANDAOHANGXITONG

航空无线电导航系统

主编/高宪军



 吉林科学技术出版社

航空无线电导航系统

主 编	高宪军
副主编	刘 红
	李 娜
主 审	高 鹰

吉林科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

航空无线电导航系统 / 高宪军主编. — 长春: 吉林科学技术出版社, 2007.4

ISBN 978-7-5384-3476-7

I. 航... II. 高... III. 航空导航: 无线电导航—高等学校—教材 IV. U675.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 042299 号

航空无线电导航系统

高宪军 主编

责任编辑: 吴文凯 封面设计: 创意广告

*

吉林科学技术出版社出版、发行
长春理工大学印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 396 240 字

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

定价: 38.00 元

ISBN 978-7-5384-3476-7

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换。

社址 长春市人民大街 4646 号 邮编 130021

编辑部电话 0431-85635173

电子信箱 JLKJCBS@public.cc.jl.cn

传真 0431-85635173

网址 www.jkcbs.com

前 言

《航空无线电导航系统》一书是根据导航工程专业本科教学计划和教学大纲编写而成，在结构安排及内容上包括无线电导航系统概论、无线电导航设备共性系统电路模型、不同制式和不同类型无线电导航系统的工作原理等。主要使用对象为导航工程本科学生，同时也可供各类相关专业工程技术人员参考。

本书由空军航空大学航空电子工程系高宪军副教授担任主编，并负责编写第 1、3、5、8、10 章。参加本书编写工作的还有刘红同志负责编写第 6、9 章，谭忠吉同志负责编写第 4 章，石宇同志负责编写第 7 章，李娜同志负责编写第 2 章并绘制全书插图，空军航空大学高鹰教授担任主审。

本书编写时参考了相关院校教材及各机型的导航设备，注意贯彻了系统性、先进性、科学性、针对性和通用性的原则，其主要特点为知识系统完整、全面，内容精炼，突出系统模型化和通用性。由于作者水平所限，错讹之处望批评指正。

主编 高宪军

2007 年 3 月

目 录

第1章 概 述	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 导航 (Navigation)	1
1.1.2 导航系统 (Navigation System)	1
1.1.3 导航装置 (Navigation Equipment)	1
1.1.4 航空导航 (Aviation Navigation)	2
1.2 导航方法	2
1.2.1 地标导航	2
1.2.2 地磁导航	2
1.2.3 天文导航	3
1.2.4 惯性导航	3
1.2.5 无线电导航	3
1.3 无线电导航系统的分类	3
1.3.1 按用户使用时相对依从关系分类	4
1.3.2 按无线电导航台站安装地点分类	4
1.3.3 按无线电导航系统最大有效作用距离分类 (参考数据以航空导航为主)	4
1.3.4 按系统提供的导航参量 (或位置线形状) 分类	4
1.3.5 按系统中主要观测的电信号参量分类	4
1.4 无线电测向系统分类	5
1.4.1 按角度信号 (或信息) 产生源 (或部位) 分类	5
1.4.2 按电信号参量测量原理分类	5
1.5 航空无线电导航的基本任务	8
1.6 地球及其坐标	9
1.6.1 地球准线	9
1.6.2 大圆和小圆	9
1.6.3 地球坐标	10
1.6.4 地球及其磁场	12
1.7 导航基本参量和专用术语	12
1.7.1 实时位置	12
1.7.2 导航要素	13
1.8 无线电导航实现的基础	15
1.8.1 无线电导航实现的基本条件	15
1.8.2 无线电导航系统的信号体制	16

1.8.3 无线电导航系统的基本构成基础	16
1.9 无线电导航的地位和发展动态	18
小 结	17
复习思考题	18
第2章 近距离导航系统	19
2.1 概 述	19
2.2 塔康系统	20
2.2.1 概 述	20
2.2.2 塔康系统设备构成及主要功用	26
2.2.3 塔康系统的工作原理	28
2.2.4 塔康系统设备一致性校准或标定	32
2.2.5 塔康系统的设备安装(或架设)	35
2.3 勒斯波恩系统	38
2.3.1 概述	38
2.3.2 P C B H系统的组成	40
2.3.3 P C B H系统的工作原理	41
2.3.4 P C B H系统实际应用中有关问题的说明	44
小 结	44
复习思考题	44
第3章 振幅无线电测向系统	45
3.1 概 述	45
3.2 无线电罗盘系统	45
3.2.1 功 用	45
3.2.2 工作方式	45
3.2.3 系统模型	46
3.2.4 系统基本原理	47
3.2.5 天线系统	49
3.2.6 环形天线信号电路	53
3.2.7 接收机电路	54
3.2.8 自动定向电路	55
小 结	56
复习思考题	57
第4章 无线电测距系统	58
4.1 概 述	58
4.1.1 无线电测距在航空导航中的作用	58
4.1.2 无线电测距的依据	58
4.1.3 无线电测距系统结构模型	58
4.2 低空高度表系统	65
4.2.1 概 述	65

4.2.2	测高方法	65
4.2.3	基本结构模型	65
4.2.4	调频高度表系统	65
4.2.5	脉冲高度表系统	71
4.3	高空高度表系统	74
4.3.1	概 述	74
4.3.2	测高方法	74
4.3.3	调频高度表系统	74
4.3.4	脉冲高度表系统	76
4.4	测距器系统	80
4.4.1	概 述	80
4.4.2	结构模型	80
4.4.3	基本工作原理	80
小 结		81
复习思考题		82
第 5 章	伏尔系统	83
5.1	概 述	83
5.1.1	术 语	84
5.1.2	伏尔系统功能	84
5.1.3	伏尔系统测方位原理	84
5.2	普通伏尔地面台简单原理	87
5.2.1	旋转心脏形方向性图的实现	87
5.2.2	基准信息的辐射	89
5.2.3	识别信号	90
5.3	伏尔机载设备	90
5.3.1	伏尔信号的频谱	90
5.3.2	伏尔机载设备的基本原理	90
5.4	伏尔系统的误差和作用范围	97
5.5	多卜勒伏尔	98
5.5.1	多卜勒伏尔基本原理	98
5.5.2	机载设备的兼容	101
5.6	无线电磁指示器	102
5.6.1	无线电磁指示器面板及控制关系	102
5.6.2	RMI 认读及飞行中的指示	103
5.6.3	差同步器的作用	104
小 结		105
复习思考题		106
第 6 章	远距导航系统	107
6.1	概 述	107

6.1.1	远距导航系统的作用	107
6.1.2	远距导航定位的基本方法	108
6.2	罗兰系统	113
6.2.1	系统功能	116
6.2.2	系统基本结构	117
6.2.3	系统基本原理	114
6.2.4	波形和信号格式	118
6.2.5	包周差概念	120
6.3	奥米加导航系统	120
6.3.1	概 述	120
6.3.2	奥米加地面台站	126
6.3.3	奥米加定位方法	128
6.3.4	奥米加信号误差	141
6.3.5	机载奥米加导航系统	145
小 结		146
复习思考题		146
第 7 章	航行着陆系统	147
7.1	概 述	147
7.1.1	着陆标准	148
7.1.2	着陆过程	148
7.1.3	着陆系统的种类	149
7.2	双信标着陆系统	150
7.2.1	系统功能	150
7.2.2	系统基本原理	150
7.2.3	信标接收机	151
7.3	仪表着陆系统 (ILS)	153
7.3.1	系统功能	153
7.3.2	主要战术指标	154
7.3.3	基本结构及原理	158
7.4	微波着陆系统 (MLS)	165
7.4.1	系统功能	165
7.4.2	系统结构及原理	166
7.4.3	系统特性	171
7.5	K V P C 航行着陆系统	172
7.5.1	概 述	172
7.5.2	甚高频全向信标系统 (VOR)	173
7.5.3	仪表着陆系统 (ILS)	174
7.5.4	C II-50 系统	177
7.6	VIR-32 型导航系统	178

7.6.1 组 成	178
7.6.2 功 能	178
7.6.3 基本工作原理	178
7.6.4 CTL-32 型控制盒	179
7.6.5 EHSI-74 型电子水平位置指示器	180
小 结	181
复习思考题	181
第 8 章 全球卫星导航系统	183
8.1 概 述	183
8.1.1 GPS 系统的定义	183
8.1.2 GPS 系统的构成	184
8.1.3 GPS 系统的特点	188
8.2 GPS 系统的定位原理	189
8.2.1 卫星位置的描述	189
8.2.2 GPS 信号结构和导航电文	197
8.2.3 GPS 接收机基本原理	199
8.2.4 GPS 接收机类型	208
8.3 GLONASS 系统	208
8.3.1 系统简介	208
8.3.2 系统基本结构	210
8.3.3 系统导航电文内容及格式	213
8.3.4 系统的用户设备	216
8.4 欧洲的全球卫星导航系统 (Galileo)	217
8.4.1 概 述	217
8.4.2 系统组成	217
8.4.3 伽利略计划在行动中	217
8.4.4 “伽利略”与 GPS 相比有何不同和优越性	218
8.5 其他卫星导航定位系统	218
8.5.1 欧洲的星基增强系统 EGNOS	218
8.5.2 中国的导航定位卫星	218
8.5.3 国际海事卫星 (Inmarsat)	219
8.5.4 日本全球导航卫星系统	219
8.5.5 高通、洛克威尔国际、美国移动卫星的服务	219
8.5.6 私人基金的 GPS 增强服务	219
8.5.7 其它导航手段	219
小 结	219
复习思考题	220
第 9 章 组合导航系统	221
9.1 概 述	221

9.2	GPS/INS 组合导航系统	222
9.2.1	INS 和 GPS 间存在着良好的性能互补特性	222
9.2.2	组合结构和算法	222
9.3	GPS+GLONASS 组合系统	225
9.3.1	GPS 与 GLONASS 的比较	225
9.3.2	GPS+GLONASS 的组合	227
9.4	全球定位系统/多普勒导航雷达组合系统	230
9.4.1	多普勒导航雷达	230
9.4.2	GPS 与 DNS 组合	231
9.4.3	卡尔曼滤波方案的选取	231
9.5	全球定位系统/罗兰-C 组合系统	231
9.5.1	用 GPS 校正 Loran-C 的传播误差	232
9.5.2	用 GPS 实现 Loran-C 的链间同步	232
9.5.3	GPS 与 Loran-C 的组合方式	232
9.6	惯性/多普勒导航雷达组合系统	233
9.6.1	惯导与多普勒雷达相组合的特点	233
9.6.2	INS/DNS 的组合方式	233
9.6.3	INS/DNS 组合系统的实现	233
9.7	多传感器组合导航系统	234
9.8	组合导航系统的应用	235
	小 结	236
	复习思考题	237
第 10 章	地形辅助导航系统	238
10.1	概 述	238
10.2	利用地形高度数据的地形匹配系统	239
10.3	景象匹配地形辅助导航系统	239
10.4	地形辅助导航的两种常用方法	240
10.4.1	地形轮廓匹配导航	240
10.4.2	桑地亚惯性地形辅助导航 (SITAN) 系统	243
10.5	地形辅助导航系统的关键技术	245
10.5.1	数字地图	245
10.5.2	存储技术	247
10.5.3	地形随机化线性技术	247
10.5.4	多模卡尔曼滤波技术	249
10.5.5	数字相关器	249
10.6	地形辅助导航系统发展	249
10.6.1	惯性/合成孔径雷达组合导航系统	250
10.6.2	ISS 联合地形参考导航系统	251
	小 结	252

复习思考题 253

参考文献 254

第1章 概述

1.1 基本概念

1.1.1 导航 (Navigation)

导航的基本含意是引导运载体从一地到另一地安全航行的整个引导过程。一般来说,运载体从一地到另一地航行是要人们事先选定具体的航行路线,所以导航也可以解释为引导运载体按既定(或预定)航线航行的整个引导过程。但是应当知道,运载体的航行(特别是军用运载体)并非都是按照事先确定的既定航线,某些特殊情况下的临时改变航行路线或机动航行更离不开可靠的引导,这种引导也属于导航的范畴。

导航中涉及的“引导”一般是通过专用的导航系统或设备及时为运载体的操纵者(或控制者)提供必要的导航参量(如实时位置、运动方向、运动姿态、运动速度等),操纵者便根据这些参量酌情实施对运载体的航行控制,可见整个航行过程中,引导和控制是两个必不可少的环节,引导是为控制提供必要的信息,是控制的先导,但它本身并不包含控制。如果把引导和控制自动地结合起来便产生一个新的概念即“制导”,可见导航和制导是两个不同的概念,它们之间既有联系,又有明显区别。概要的说,导航强调的是引导,制导则是引导和控制的结合。

具体地说,导航的任务是在各种气象条件下,引导车辆、船只、飞机等用户沿预先规定的航线航行;为保证飞机和船只的航行安全和提高效率,对飞机和船只的活动进行调度和实施交通管制;引导车辆在丛林、沙漠等特殊环境中行驶。随着科学技术的发展,导航除上述任务外,在军事上还包括配合完成武器发射、侦察、巡逻、反潜、空中集合、空中编队、救援等任务;在国民经济中,为研究和开发大陆架、海洋调查、铺设海底电缆、捕鱼作业的重复撒网、农业林业中的撒药灭火等,提供高精度的位置信息和完成通信和识别等任务。

1.1.2 导航系统 (Navigation System)

导航系统是用于对运载体实施导航的专用设备组合或设备的统称。严格说来,在导航领域中,系统和设备是有区别的,“导航系统”侧重于实现特定导航功能的设备组合体,组合体内的各部分必须按约定的协同方式工作才能实现系统功能,而导航设备一般是指导航系统中某一相对独立部分或型号产品,或实现某一导航功能的单机。

近年来“系统”二字更加通用化,常常把某一单设备,甚至某一单设备中的功能单元也称之为“某某系统”,应当指出,这儿的“系统”二字,仍然强调的是在特定含义之下,其各个组成部分的相互依存和协同关系的。可见导航系统,导航设备,它们之间既有联系,又有区别,在某些特定条件下,有时把它们视为近义词,有时又确实需要把它们区别开。

1.1.3 导航装置 (Navigation Equipment)

用户用于实现导航的各种技术设备统称为导航装置。

1.1.4 航空导航 (Aviation Navigation)

航空导航是一门研究航空导航装置和导航方法的科学,它的基本任务更确切的应该这样来描述:在各种复杂气象条件下,采用可靠有效安全的方法,以规定的准确度,在规定的时间内把飞行器(飞机、导弹、火箭、宇宙飞船等)引导到规定的目标。它应完成以下基本任务:

(1) 引导飞机到达航线起点,进入并沿预定航线飞行。为此,航空导航设备应能随时给飞行员提供飞机和目标间的相对方位关系和距离,提供飞机位置的参数;

(2) 对机场区域和航路上飞机实行交通管制;

(3) 保证飞机在各种复杂气象条件下安全着陆。导航设备应能提供准确的航向、下滑、高度数据。

由于飞机速度快、机动性好,及受到机上空间、人员、重量之限制,对军用航空导航提出了更高的要求,即:

(1) 导航装置体积要小,重量要轻;

(2) 导航装置的自动化程度要高,以便给出连续和实时的导航参数;

(3) 要有高的准确度并不受环境之影响,这样才能保证歼击机能安全迅速地追击目标、空中加油机能较快地与被加油机会合、舰载机安全返回母舰、轰炸机对敌已知地理位置的军事目标实施轰炸、侦察等;

(4) 保密性强、有抗干扰的能力。

对航空导航的要求是多种多样的,任一种导航系统皆很难满足它的全部要求,目前飞机上采用了多种导航系统,并通过计算机,将某些导航设备组成一个总体,扬长避短,以提高组合系统的工作能力。

航空导航不仅涉及到许多导航手段、计算方法、测量原理的开发和利用,也离不开精密的仪表、设备的制造和熟练的操作,以及在使用中对所得到的信息的处理。航空导航是一门综合的技术,无线电导航技术只是其中的一个方面。

1.2 导航方法

导航方法十分广泛,且随着科学技术的进步而不断发展。现对几种常用导航方法作一简单介绍。

1.2.1 地标导航

地标导航是依赖经验用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、城镇、岛屿与建筑物等进行定位并引导航行的方法。近代利用电视、雷达等手段观测周围环境图象进行导航,是这种方法的发展。

这种方法简单、可靠,但在能见度低或在海洋、沙漠中无熟悉地标可供观测时,就无法进行导航了。

1.2.2 地磁导航

地磁导航是利用地球的磁效应进行导航的方法。磁罗盘就是利用磁效应的导航仪表。这种方法设备简单、可靠,但精度不高。

1.2.3 天文导航

天文导航是指用测量天体（日、月、星）相对地平面的高度角和相对地球正北方的方位角来计算用户位置和航向的导航方法。

这种方法的优点是可构成自主式导航系统，不需地面台站协同工作；不受人工或自然形成的电磁干扰影响；保密性好。其缺点是受气象条件限制，雾、阴、雨、雪天气无法工作。天文导航是潜艇、宇航器、弹道导弹等的重要导航手段。天文导航在航空中也有一定的运用。

1.2.4 惯性导航

惯性导航（简称惯导）方法是通过陀螺、加速度计等测得有关参数，然后通过计算得到航行体已航行的距离、当前位置、姿态等数据。

这种方法的优点是：可构成自主式导航系统，无需航行体外的设备配合工作，因而抗干扰性强、保密性好；它不受气象和地理条件的限制，特别适于远程航空、潜艇等运用。惯性导航的主要缺点是：导航精度随工作时间增长而下降，需要用其它系统对其误差校正，因而在实用中，往往与其它导航设备组成组合导航系统（例如惯导/奥米加、惯导/卫星导航组合系统等），以惯导工作为主，用奥米加或卫星导航系统定期地校准惯导误差。惯导系统出现于六十年代初，典型设备的定位精度为（1.7~3.5）km/h。近十年来，惯导发展特别迅速，其精度和可靠性进一步提高。

1.2.5 无线电导航

无线电导航是利用无线电技术测量航行体的方位、距离、速度等参数，引导其航行的导航方法。与上述各导航方法相比，有如下优点：受气象影响小，基本可实现全天候工作；测量精度高，几米的定位精度也可达到；工作可靠，测量迅速，基本上可实时地给出导航参数。无线电导航也有以下缺点：易受人为或自然干扰；大多需地面设备或卫星配合，工作区域往往受此因素限制，同时抗干扰性、保密性也差。

无线电导航是目前各种导航方法中最基本、最重要的一种导航方法，在导航技术中占有特殊的地位。

除上述五种导航方法外，还有利用灯塔、指示灯的灯光导航；利用红外辐射源的红外线导航；利用波束很窄、能量高度集中的激光导航；利用超声波的声纳导航等，这些方法在航空导航中也有一定的运用。

按照发射机或转发器所在的位置，无线电导航可分为地面基导航系统和空间基导航系统，地面基导航系统有 Loran、Omega、Tacan、Vor 和 DME，目前大约有 100 多种。

空间基导航系统主要即卫星导航系统，包括第一代卫星导航系统子午仪；1978 年由法国国家空间研究中心、NASA 及美国国家海洋和大气监督局发展起来的多普勒卫星系统 ARGOS；1983 年因商业需要而提出的世界上第一个能提供无线电测量、无线电导航、无线电定位、双向数字通信和救援服务的商用网络 GEOSTAR 系统；1985 年由欧洲空间局 ESA 开发的多用途卫星定位系统 NAVSAT；前苏联开发的卫星导航系统 GLONASS 以及美国的 GPS。

1.3 无线电导航系统的分类

无线电导航是导航中的一大分支，是当今应用最广，发展最快，在导航家族中占主导地位

的一类导航技术，因此当今实用的无线电导航系统很多。下面介绍几种常用的分类原则及其相应产生出来的类别。

1.3.1 按用户使用时相对依从关系分类

(1) 自备式（或自主式）无线电导航系统：这种导航系统仅靠装在运载体上的导航设备就能独立自主地为该运载体提供导航服务。

(2) 他备式（非自主式）无线电导航系统：这种导航系统仅靠在运载体上的导航设备不能实现导航服务，必须有运载体以外且安装位置已知的导航设备或设备组合相配合及协调工作才能实现对该运载体的导航，这些居于运载体之外配合实现导航功能的导航设备或设备组合通常称为导航台站或站组。装在运载体上的导航设备通常称为该导航系统的用户设备。可见，他备式导航系统是由台站和用户设备共同组成的，所以它的用户设备必须依赖于台站，它和自主式明显不同。

1.3.2 按无线电导航台站安装地点分类

(1) 地面基无线电导航系统：这种导航系统的导航台站在地球表面的某一确知位置上。

(2) 空间基无线电导航系统：这种导航系统的导航台站在空中某一特定载体上或人造地球卫星上（将来也可能装在自然星体上）。

1.3.3 按无线电导航系统最大有效作用距离分类（参考数据以航空导航为主）

(1) 近程导航系统：有效作用距离约 500km。

(2) 中程导航系统：有效作用距离约 1000km。

(3) 远程导航系统：有效作用距离约 3000km。

(4) 超远程或全球覆盖导航系统：有效作用距离大于 10,000km，或在地球上任何地方都是该系统的有效作用范围。

1.3.4 按系统提供的导航参量（或位置线形状）分类

(1) 无线电测角导航系统（直线位置线）。

(2) 无线电测距导航系统（圆位置线）。

(3) 无线电测距差导航系统（双曲线位置线）。

(4) 无线电测距和导航系统（椭圆位置线）。

(5) 复合式（测角/测距、测距/测距差，测距和/测距差）无线电导航系统（直线/圆、圆/双曲线、椭圆/双曲线）。

1.3.5 按系统中主要观测的电信号参量分类

(1) 振幅式无线电导航系统。

(2) 频率式无线电导航系统。

(3) 相位式无线电导航系统。

(4) 脉冲式无线电导航系统。

(5) 复合式无线电导航系统。

1.4 无线电测向系统分类

1.4.1 按角度信号（或信息）产生源（或部位）分类

无线电导航测向实质上是把方位角参量转换成电参量，通过对其电参量的测量达到测向目的。通常一个实用测向系统也有他备式和自主式之分，在系统中角度参量主要在哪个部位转换成电信号参量形成角度信号或角度信号产生的源在哪，这对于理解无线电导航测向原理是很重要的。由此出发，可以把无线电导航测向分为下列三类：

（1）方位信标式（或方向信标式）：这种测向方式其方位信号主要由发射信标（或台）产生。发射信标是一部特定的角度信号发射台，它具有特定的方向性天线，在信标台处直接把角参量转换成角度信号辐射到有效工作区域。用户端只要用与信标配套的测向接收设备接收此角度信号，并按照系统信号体制（或格式）规范约定进行信号处理和测量，便可获得相应的角度参量，这种测向接收设备一般都采用无方向性接收天线。方向信标还有全向信标和扇形信标之分，前者是在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内的所有方向上均发射角度信号，或称其为角度覆盖范围为全向，典型的系统有伏尔（VOR）、多普勒伏尔（DVOR）、塔康测角等；后者则是仅在某一特定扇形区内发射角度信号，其角度信号覆盖范围只限定在某一扇形区内，典型的系统有飞机着陆引导系统中的航向信标、下滑信标等。

（2）无方向信标（NDB）式：这种测向方式其信标发射机（或台）只发射一个无方向信号，作为测向系统中的一个被测信号源，角度信号是在用户接收设备端产生的。在这种系统中，信标发射机采用无方向性（或全向）天线发射，用户接收端则必须采用有方向性天线接收，并附加相应的角信号变换电路，通过用户接收设备测无方向信标的信号来向，达到测角目的。典型系统有无方向信标/无线电罗盘测向系统，超短波定向设备等。

方向信标式和无方向信标式都属于他备式测向，前者是在信标发射端进行角信号变换，后者是在用户接收端进行角信号变换，它们之间互为逆式。

（3）雷达式：雷达是一种既能测向又能测距的自主式极坐标定位系统，所以其测向属于自主式测向，它和前面介绍的两种不同，其收发均在用户设备一方，且收发共用一个有方向性的天线，利用方向性天线的波束扫描目标回波（或二次雷达应答信号）进行测向。这种测向方式的主要特点是既定向发射信号，又定向接收信号，它既不属于方向信标式，也不属于无方向信标式，而是一种兼有方向信标式和无方向信标式某些特征的综合体制。

1.4.2 按电信号参量测量原理分类

（1）E 型（或振幅式）测向

利用无线电信号振幅（E）和所测角参量 θ 的特定函数关系 $E(\theta)$ 进行测角的方法称为 E 型测角或振幅式测角。函数 $E(\theta)$ 的建立主要是通过天线的方向性函数，所以 E 型测角和天线的方向性图有密切关系。E 型测角，按照振幅值取值判定准则又分为三种类型，即最大值法、最小值法、比较法（等值信号法）。

（2）M 型测向

利用无线电信号幅度调制指数 M 和所测角参量 θ 的特定函数关系 $M(\theta)$ 进行测向的方法称为 M 型测向。M 型测向是从 E 型测向通过信号变换演变过来的，它的基础是 E 型测向。这种测向方法和 E 型测向相比，测向精度受信号幅度的变化影响小，特别是在使用等值信号法时，

对接收机通道一致性要求低，便于实现。所以这种方法在现代测向系统中比 E 型应用广，这是因为 E 型测向其测角精度受信号幅度变化影响大，而 M 型测向则不然，只要信号幅度变化不影响调制指数 M 值的变化，则其测向精度不受信号幅度变化的影响。

(3) DDM 型测向

利用无线电信号复合调幅信号中的两个调幅指数 M_1 、 M_2 之差 ΔM (或 DDM) 与所测角参量的特定函数关系 $\Delta M(\theta)$ 进行测角的方法称为 DDM 型测向，又称调制度差测向法。这种方法是建立在 M 型测角基础之上，所不同的是前面介绍的 M 型测角是单音频调幅，利用 $M(\theta)$ 函数；DDM 型采用的是双音频复合调幅，利用 $\Delta M(\theta)$ 函数，这种方法的特点是在特定扇区内，不仅能测出目标相对基准线的偏离角大小，而且能直接确定相对基准线的偏离方向。其缺点是信号形式复杂，覆盖角度范围较小，通常只在着陆系统中使用。

(4) 相位式测向

利用无线电信号幅度调制信号的相位 Ψ 和所测角参量 θ 的特定函数关系 $\Psi(\theta)$ 进行测角的方法称为相位式测向。这种方法多用于全向信标式测角系统中，如伏尔 (VOR)、塔康系统测角功能等。相位式测向，一般是由方位信标台发射包含角度参量的角信号，它包括相位固定不变的测角基准信号 (相当于确定基准线方向) 和相位与所测角有特定函数关系的可变相位信号 (即相位随所测角变化而变化)，这两个信号之间的相位差就对应所测角。如前所述，采用这种方法的信标天线必须有方向性，对其全向信标而言，必须有一个水平方向性图周期性旋转的天线系统和相应的角信号产生环节。

(5) 多普勒效应测向

利用无线电信号载频多普勒频移 f_d 与所测角 θ 的特定函数关系 $f_d(\theta)$ 进行测角的方法称为多普勒效应测向。这种方法分两种情况：一种是多普勒雷达式，使用固定安装的定向天线；另一种是多普勒定向台或多普勒全向信标式的，采用特定运动形式的无方向性天线。这种运动的天线通常是沿某一特定圆周周期性旋转 (可为机械扫描也可电扫描)，使其和与之配合工作的远方设备天线之间具有相对径向运动，因而产生多普勒效应。该多普勒效应产生的多普勒频移 f_d 与运动天线和其基准线的夹角成函数关系，并通过适当转换获得所测角。

圆周运动天线产生多普勒效应示意图如图 1-1 所示。为说明方便，令天线 A 为接收天线，以 O 为圆心， Ω 为角频率，顺时针作匀速圆周运动。B 为发射天线，位于圆心 O 的正北方，发射信号频率为 f_t ，A 天线在运动中接收 B 天线发来的信号，其接收频率为 f_r ，多普勒频移为 $f_d = f_r - f_t$ 。当 A 天线运动到圆周上的 1 点瞬间，因为它和 B 天线间无径向速度，所以 $f_d = 0$ ，其后沿圆周向 2 点旋转，在 1、2 点之间任何点 $f_d > 0$ ，至 2 点时， $f_d = 0$ ，而后由 2 向 1 旋转，在 2、1 点间， $f_d < 0$ 。通常 O 与 B 的距离 $\overline{OB} \gg r$ (圆半径)，A 天线从 1 点开始旋转角为 θ ($\theta = \Omega t$ ， t 为从 1 点起计时间)，则：

$$f_d \approx f_{dm} \sin \theta \quad (\text{或 } f_d = f_{dm} \sin \Omega t) \quad (1-1)$$

其中 f_{dm} 为多普勒频移振幅值。

式 (1-1) 反映了在图 1-1 条件下，A 天线相对基准线两方位角与接收信号多普勒效应的函数关系。当然此表达式一般还不能直接用于实际测角，实际系统还要经过适当变换，但式 (1-1) 是多普勒测向的基础。