

无 线 电 导 航 原 理

魏 光 顺 主 编

东南大学出版社

内 容 简 介

本书系高等学校工科电子类无线电导航专业的全国统编教材。

全书共分八章,第一、二章着重讨论有关无线电导航的基本概念,包括坐标变换,位置线及几何放大因子,定位误差分析方法与等概率误差椭圆的概念,以及导航工作区的确定等;第三至七章,分别讨论振幅、频率、时间(脉冲)、相位以及复合无线电导航系统的构成原则及其工作原理,并对它们各自的定位准确度进行了分析;第八章对无线电导航的发展作了综述,并介绍了一些将要付诸使用的新型无线电导航系统。

本书是无线电导航专业本科生与研究生的专业理论教材,亦可供从事无线电导航工作的工程技术人员参考。

无线电导航原理

魏光顺 主编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 南京人民印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 $\frac{1}{16}$ 印张 $20\frac{10}{16}$ 字数476千字

1989年7月第1版 1989年7月第1次印刷

印数: 1—3000册

ISBN 7—31023—174—10

TN·20

定价: 4.15元

责任编辑 雷家煜

前 言

本教材系电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会雷达编审小组征稿评选审定,推荐出版。责任编委为清华大学电子系冯一云副教授。

本教材由北京航空航天大学电子工程系魏光顺担任主编;桂林电子工业学院方惠钧副教授和大连海运学院无线电系张润泽教授担任主审。

遵照编审小组审定的编写大纲要求,本课程的参考教学时数为80学时,其主要内容共分四部份八章。第一部分,第一、二章为基本概念,着重讨论导航所用到的坐标系及其相互关系;位置线与几何误差因子;定位准确度与等概率误差椭圆;并给出了确定导航工作区的方法。第二部份,第三至第六章分别讨论了振幅、频率、时间(脉冲)、相位无线电导航系统的组成及其工作原理,同时也分析了它们各自的准确度。第三部份,第七章主要阐述了以太康(TACAN)与劳兰C(LORAN-C)为代表的复合无线电导航系统。最后第八章是对今后无线电导航发展的展望与综述,对一些新型无线电导航系统也作了相应的介绍。除第八章外,其余每章后面均附有复习题。

本教材的第一、二章由郑玉篪编写;第三、五、六、七章由魏光顺编写;第四、八章由张欲敬和王盾编写。本书适宜作为无线电导航专业本科生和研究生的专业理论教科书,亦可作为从事无线电导航专业工程技术人员的参考书。

在编写过程中,丁子明教授在内容的选择与安排等方面给予了精心指导与热情帮助,全书插图由朱桂芳同志描绘,在此一并表示诚挚的谢意。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点或错误,殷切希望广大读者不吝指教。

编者于北京航空航天大学

1988年5月

目 录

第一章 无线电导航技术基础

第一节 无线电导航系统的任务及分类	(1)
第二节 坐标系及其变换	(3)
第三节 电波传播的一般知识	(17)
第四节 导航发射机	(36)
第五节 导航接收机	(40)
复习题	(52)

第二章 无线电导航系统的工作区

第一节 无线电导航系统的准确度	(53)
第二节 无线电导航系统的工作区	(68)
复习题	(85)

第三章 振幅无线电导航系统

第一节 一般特性	(87)
第二节 无线电罗盘的工作原理	(92)
第三节 振幅无线电信标	(98)
第四节 振幅无线电导航系统误差分析	(103)
复习题	(118)

第四章 频率无线电导航系统

第一节 频率测距导航系统——无线电高度表	(119)
第二节 跟踪式无线电高度表	(132)
第三节 频率测速无线电导航系统——多普勒导航系统	(148)
第四节 频率式无线电导航系统的准确度	(158)
复习题	(163)

第五章 时间无线电导航系统

第一节 一般特性	(164)
第二节 时间无线电导航测距系统	(165)
第三节 时间测距差系统	(179)
第四节 脉冲无线电导航系统测量时间间隔的准确度	(194)
复习题	(207)

第六章 相位无线电导航系统

第一节 相位无线电导航系统的一般特性	(208)
第二节 相位测距差系统	(212)
第三节 相位测角系统	(234)
第四节 相位无线电导航系统测量相位差的准确度	(242)
复习题	(249)

第七章 复合无线电导航系统

第一节 复合无线电导航系统的基本特性	(250)
第二节 相位—时间复合的测角—测距系统	(255)
第三节 相位—时间测距差系统	(266)
复习题	(278)

第八章 无线电导航系统综述

第一节 无线电导航系统综述	(279)
第二节 无线电导航系统性能比较	(282)
第三节 通信、导航、识别综合系统	(286)
第四节 时基波束扫描微波着陆系统	(298)
第五节 卫星导航系统	(314)

参考文献	(325)
------	-------

第一章 无线电导航技术基础

第一节 无线电导航系统的任务及分类

一 无线电导航的定义及任务

引导运载体(飞机或舰船)按既定航线航行的过程称为导航。利用无线电技术对运载体航行的全部(或部分)过程实现导航,就称为无线电导航。能够完成一定的无线电导航任务的技术装置组合,称为无线电导航系统。

无线电导航的任务大致包括:

- 1 导引运载体沿既定航线航行;
- 2 确定运载体当前所处的位置及其航行参数;
- 3 导引运载体在夜间和复杂气象条件下安全着陆(或进港);
- 4 为运载体准确、安全地完成航行任务所需要的其它导引任务。

上述各项任务中,第二项是无线电导航的基本任务,它也是完成其它各项无线电导航任务的基础。

二 无线电导航技术发展简史

从本世纪二十年代初,无线电技术开始用于导航到现在,由于它和其他导航技术(如惯性导航、天文导航等)相比,具有下列特点:

- 1 受外界条件(如昼夜、季节、气象条件等)的限制较小。
- 2 测量导航参数的精度较高,测量速度快。
- 3 可靠性高,经济效益好。

因此,无线电导航技术得到迅速的发展,广泛运用于航空、航海及航天事业中。

无线电导航技术的发展过程大致经历了三个阶段。

在第二次世界大战前的早期阶段,首先出现的是给运载体提供无线电台方位的无线电罗盘。接着又出现了定向器、四航道信标、扇形无线电信标(多区无线电信标)等无线电测向设备。这些设备主要用来引导运载体出航、归航和按预定航线航行,而不是直接用于定位。

从第二次世界大战开始至六十年代初是无线电导航技术的发展阶段。在这一阶段中,世界各国研制了名目繁多的各种无线电导航系统。其中迄今仍得到广泛应用的有四十年代出现的甚高频全向信标(VOR),距离测量设备(DME),这两者结合在一起,构成了近程导航的极坐标定位系统(VOR/DME),它能同时向飞机提供相对地面导航台的方位和距离信息。另一种双曲线定位的近程导航系统台卡(DECCA)也得到了广泛的应用。为了在夜间和复杂气象条件下,保证飞机安全准确地着陆,研制生产了仪表着陆系(ILS)和调频无航线高度表。

五十年代初，美国为空军研制出用同一设备同时完成测向和测距功能的战术空中导航系统，简称为“太康”(TACAN)系统。

随着飞机与航船航程的增加，相应出现了远程导航系统。其中广泛得到使用的有“劳兰(LORAN)”系统和“奥米加(OMEGA)”系统。此外，多卜勒导航雷达也作为自主式远程导航系统的主要部件得到使用。

六十年代以来，无线电导航技术进入了更加成熟的新阶段。在此阶段，由于新型电子器件的不断涌现和计算技术的发展，使各类原有无线电导航系统的性能得到很大的改善，主要表现在：

- 1 导航定位精度明显提高；
- 2 导航设备的自动化程度与可靠性显著增加，使用与维修更为方便；
- 3 体积与重量大大减小，标准化程度提高。

除了原有系统性能的改善外，还出现了许多与现代航空、航海及航天事业相适应的，新的性能更好，服务范围更广，更能适应各种复杂条件的新型无线电导航系统。

六十年代出现了第一代的卫星导航系统——“子午仪”系统，可在全球范围内对舰船进行定位导航，目前正在研制和布置的导航星全球定位系统(NAVSTAR/GPS)，将可以对包括航天飞机在内的各种航行体提供全球范围的精密导航定位。

随着交通运输量的加大，在机场(港口)区域的交通管制任务日趋繁重，飞机、舰船的引进着陆或进港的定位精度要求越来越高。为了满足这些要求，相应地出现了各种自动化的航管系统和微波着陆系统。

随着电子技术的发展，运载体上电子设备的数量急剧增加。为减少设备数量，避免相互间的电磁干扰，开始出现多功能的电子系统，使同一设备兼备多种功能，如通讯、导航、识别等。

新阶段的另一显著特点是广泛采用数字技术及电子计算机。这些技术的应用提高了原有导航系统的测量精度与自动化程度，也提高了设备的自检能力。

三 无线电导航系统的分类

无线电导航系统的分类可按不同的原则进行，大体上有下列几种分类方法：

1) 按有效作用距离划分：

- (1) 近程导航系统，其有效作用距离在500公里之内。
- (2) 远程导航系统，其有效作用距离大于500公里。

2) 按所测量的电气参量划分：

- (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。

3) 按所测量的几何参量或位置线的几何形状划分：

- (1) 测角无线电导航系统(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)。

4) 按无线电导航系统的组成情况划分:

(1) 自主式(自备式)无线电导航系统, 它仅包括运载体上的无线电导航设备;

(2) 非自主式(他备式)无线电导航系统, 它的组成包括运载体上的无线电导航设备和运载体外的无线电导航台(站)。

5) 按无线电导航台(站)的安装地点划分:

(1) 陆基无线电导航系统: 导航台(站)安装在地面(包括海上)的无线电导航系统;

(2) 空基无线电导航系统: 导航台(站)安装在飞机上的无线电导航系统;

(3) 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。

本书从电子技术的角度分析无线电导航系统的工作原理, 因此主要采用按所测量的电气参量划分的分类方法, 同时兼顾其它分类方法的特点。

无线电导航技术是综合应用电子技术对航行体进行导航定位的技术。本章将首先介绍定位的几何问题, 然后介绍与无线电导航有关的电波传播、导航发射机、导航接收机的一般知识。以后的各章将介绍无线电导航系统的工作区及各种导航系统。

第二节 坐标系及其变换

无线电导航的基本任务之一是确定被导引的运载体在运动过程中的运动参数(位置、速度、加速度等), 而这些参数只能在一定的坐标系内得以确定。因此首先要建立适当的参考坐标系。所选择的参考坐标系应考虑到两方面的因素: 1. 作为用户的运载体在使用上要方便、直观。2. 对所使用的无线电导航系统可以很容易建立起坐标参数与电参数之间的联系。

上述两方面的要求在某些情况下是一致的, 例如采用测距——测角无线电导航系统作为运载体的归航台时, 运载体往往需要确定自身与港口或机场的相对方位和距离, 而这两者与测距——测角无线电导航系统所测量的电参数之间可以建立起某种简单的联系。在此情况下, 建立一个以归航点的港口或机场为中心的极坐标参考系是很自然的。这一参考坐标系不论对运载体, 还是对无线电导航系统来说都是适宜的。

在无线电导航系统的实际工程应用中, 类似于上面的例子是比较少见的。在大多数情况下, 上述两方面的要求往往不能统一, 对于使用无线电导航系统的运载体来说, 它们主要是在地球表面及其周围大气层内运动, 因此通常采用地理坐标系来表征其运动参数。而无线电导航系统则为其所测量的电参数与参考坐标系的几何参数之间能够建立起简单的对应关系, 常使用以后将要进一步说明的位置线(或位置面)坐标系。因此, 运载体在使用无线电导航系统时, 首先要确立两者所使用的不同参考坐标系之间的变换关系。

一 地理坐标系

运载体在地球表面及其周围大气层中运动时, 其空间位置常可用它在地球表面上的铅锤投影点的经纬度和运载体的海拔高度来表示。经度、纬度、海拔高度就是用来描述运载体空间位置的地理坐标系的三个参量, 它们是以地球表面作为基准面的。为此, 我们首先

要确定地球表面的形状。

地球的重力作用由地球的牛顿重力场 G 和由地球自转所引起的离心场合成。合成重力场在任意点的合成矢量 g_0 可由上式确定

$$g_0 = G - \Omega_0 \times (\Omega_0 \times R) \quad (1-2-1)$$

式中 Ω_0 是地球的惯性角速度(15.04107°/小时)， R 是从该点到地球质量中心的径向矢量，而地球表面是一个与矢量 g_0 处处垂直的等位面。由于地球质量分布的不均匀，因此实际等位面具有不规则的形状。从导航角度来说，地球表面近似地可以看成是绕地球自转轴旋转面成的椭球面。椭球的中心就是地球的质量中心，而椭球面的选择应保证椭球面上的任意点的法线方向和合成重力场矢量 g_0 的方向均方偏差在全部表面上的积分值最小。

椭球面几何物质由其长半轴即赤道半径 a 和短半轴即极半径 b 确定。椭球的扁率用 ζ 表示

$$\zeta = \frac{a - b}{a} \quad (1-2-2)$$

或

$$\frac{b^2}{a^2} = (1 - \zeta)^2 \quad (1-2-3)$$

椭球的偏心率 q 通常以平方形式表示

$$q^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = (2 - \zeta)\zeta \quad (1-2-4)$$

或

$$(1 - q^2) = \frac{b^2}{a^2} = (1 - \zeta)^2 \quad (1-2-5)$$

有时采用第二偏心率 q_0

$$q_0^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (1-2-6)$$

或

$$(1 + q_0^2) = \frac{a^2}{b^2} \quad (1-2-7)$$

由此可得

$$q_0^2 = \frac{a^2}{b^2} - 1 = \frac{1}{1 - q^2} - 1 = \frac{q^2}{1 - q^2} \quad (1-2-8)$$

旋转椭球面有两条不同长度的轴，因此椭球上某一点的曲率半径随方向的不同而不

同，其中第一基本曲率半径是该点上子午线弧的半径 ρ_M

$$\rho_M = \frac{a(1 - q^2)}{W_0^3} \quad (1-2-9)$$

式中

$$W_0 = (1 - q^2 \sin^2 \phi_T)^{\frac{1}{2}} \quad (1-2-10)$$

ϕ_T 是进行计算的位置点的地理纬度，它是该点椭球法线与赤道平面的交角，如图 1-1 所示。而半径向量 R 与赤道平面的交角则称为地心纬度，由图中的 ϕ_c 表示。

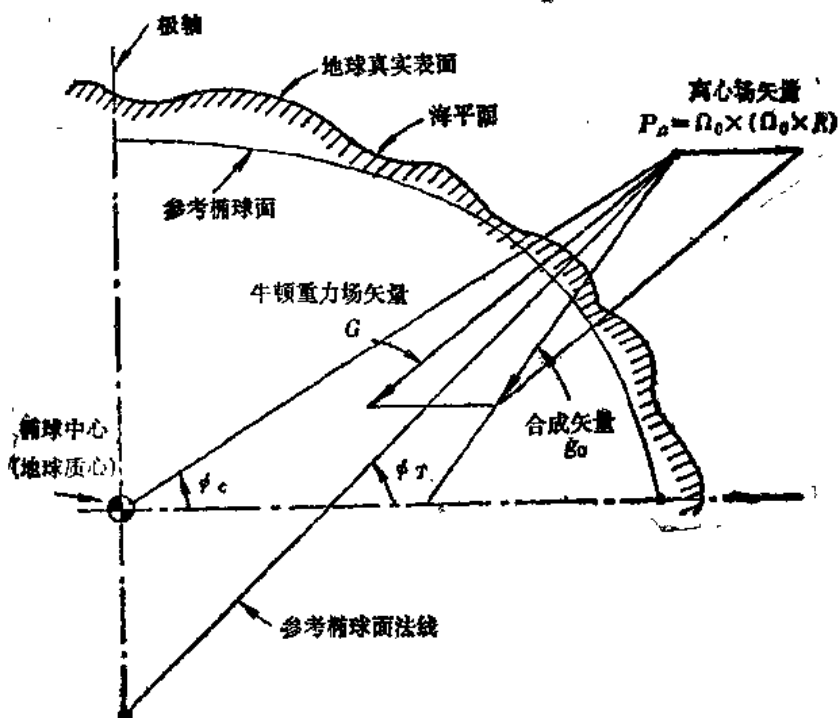


图 1-1 地球的参考椭球面

第二节基本曲率半径是指椭球表面和一个平面的相交曲率半径，该平面包含进行计算的位置点的椭球法线，并与子午面垂直。第二基本曲率半径用 ρ_N 表示

$$\rho_N = \frac{a}{W_0} \quad (1-2-11)$$

ρ_N 长度总是终止在椭球极轴上，因此它与极轴和纬圆半径构成闭合三角形。

椭球表面上任一点给定方位角 θ 上的曲率半径 ρ_A 是指椭球表面和一个平面的相交曲线的曲率半径，该平面包含进行计算的位置点的椭球法线，并与子午面形成夹角 θ 。

$$\rho_A = \frac{\rho_M \rho_N}{\rho_M \sin^2 \theta + \rho_N \cos^2 \theta} \quad (1-2-12)$$

使 θ 在 $0 \sim 2\pi$ 内变化, 可以求出 ρ_A 的平均值即平均曲率半径 ρ

$$\rho = \sqrt{\rho_M \rho_N} \quad (1-2-13)$$

在极点上所有曲率半径都相等, 称为极曲率半径 ρ_C

$$\rho_C = \frac{a^2}{b} \quad (1-2-14)$$

赤道上的 ρ_M 、 ρ_N 和 ρ_C 值分别为

$$\rho_{M_0} = \frac{b^2}{a}, \quad \rho_{N_0} = a, \quad \rho_0 = b \quad (1-2-15)$$

1924年, 国际大地测量协会规定的“国际椭球”的参数值如下:

$$a = 6378388.0000 \text{ m}$$

$$b = 6356911.9462 \text{ m}$$

$$\xi = 0.00336700336$$

$$1/\xi = 297.0$$

$$q = 0.0819918898$$

$$q^2 = 0.006722670$$

$$q_0 = 0.0822688896$$

$$q_0^2 = 0.0067681702$$

$$L = 10002288 \text{ m}$$

$$R_0 = 6371288 \text{ m}$$

其中 L 是子午线长度的 $1/4$, R_0 是国际球体半径。国际球体是一个假想球体, 其表面积与国际椭球的表面积相等。

运载体沿椭球面法线方向到椭球面的距离称为运载体的海拔高度。所谓地球坐标系就是用地理纬度、经度和海拔高度表示物体在三维空间位置的参考坐标系。

二 空间直角坐标系

在无线电导航技术中, 经常通过空间的线段来确定运载体的位置。这些空间线段直接用地理坐标系的参量表示时往往很不方便, 因此常需先在宇宙空间直角坐标系简称空间直角坐标系内确定运载体的位置, 然后再把它换算成地理坐标。另外航天器的位置也常直接用空间直角坐标表示, 而不采用地理坐标。

在宇宙空间直角坐标系中有三条相互垂直的轴, 其位置为: 坐标系原点在椭球的球心,

Z轴与短半轴即椭球极轴一致，X轴和Y轴位于赤道平面，两轴互相垂直，Y轴通过零子午线。有时将X轴和Y轴旋转90°，使X轴通过零子午线。

下面推导空间直角坐标与地理坐标之间的变换关系。

地球椭球面上的P点所在东西圈的曲率半径 ρ_N 投影在XOY平面为

$$\rho_N' = \rho_N \cos \phi_T \quad (1-2-16)$$

式中 ϕ_T 是P点的地理纬度。 ρ_N' 在X轴和Y轴上的分量分别为

$$\begin{aligned} x &= \rho_N' \sin \lambda_T \\ y &= \rho_N' \cos \lambda_T \end{aligned} \quad (1-2-17)$$

式中 λ_T 是P点的经度。将式(1-2-16)代入式(1-2-17)可得

$$\begin{aligned} x &= \rho_N \cos \phi_T \sin \lambda_T \\ y &= \rho_N \cos \phi_T \cos \lambda_T \end{aligned} \quad (1-2-18)$$

求 $z = P''O$ 时，先令 ρ_N 在Z轴的投影 $P''Q = z'$ ，曲率半径 ρ_N 被XOY平分为 a' 和 b' ，根据解析几何原理可得

$$\frac{a'}{a' + b'} = \frac{b^2}{a^2} \quad (1-2-19)$$

而在三角形QPP''中，有

$$\frac{z}{z'} = \frac{a'}{a' + b'} \quad (1-2-20)$$

因此

$$z = z' \frac{a'}{a' + b'} = z' \frac{b^2}{a^2} = z' (1 - q^2) \quad (1-2-21)$$

由图1—2可知

$$z' = \rho_N \sin \phi_T \quad (1-2-22)$$

代入式(1-2-21)，得

$$z = \rho_N (1 - q^2) \sin \phi_T \quad (1-2-23)$$

如果P点不在椭球面上，其海拔高度为H，式(1-2-18)和(1-2-23)可以写成：

$$\begin{aligned} x &= (\rho_N + H) \cos \phi_T \sin \lambda_T \\ y &= (\rho_N + H) \cos \phi_T \cos \lambda_T \end{aligned}$$

$$z = [\rho_N(1 - q^2) + H] \sin \phi_T \quad (1-2-24)$$

根据式(1-2-24), 也可以把宇宙空间直角坐标 X, Y 换算成地理经度 λ_T

$$\lambda_T = \arctg \frac{X}{Y} \quad (1-2-25)$$

当 $H = 0$ 时, 由图 1-2 可知

$$\operatorname{tg} \phi_T = \frac{z'}{\rho_N'} = \frac{z'}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (1-2-26)$$

考虑到式(1-2-21), 式(1-2-26)可改写成

$$\operatorname{tg} \phi_T = \frac{a^2}{b^2} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (1-2-27)$$

因此

$$\phi_T = \arctg \left(\frac{a^2}{b^2} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (1-2-28)$$

当 P 点在海平面亦即地球椭球面上时, 可以根据其空间直角坐标 x, y 和 z 按式(1-2-28)换算出地理纬度 ϕ_T 。如果 P 点的海拔高度 $H \neq 0$, 则不能用式(1-2-28)计算地理纬度。但当 H 不太大时, 可以把 H 加到椭球的长短半轴, 求出地理纬度 ϕ_T 的近似值, 此时有

$$\phi_T \approx \arctg^{-1} \left[\left(\frac{a+H}{b+H} \right)^2 \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \quad (1-2-29)$$

当 $H = 10 \text{ km}$, $\phi_T = 45^\circ$ 时, 上述近似公式所产生的误差为 $\Delta \phi_T = 0''.0035$, 相当于在子午线方向上有 10 cm 的误差。由此可见, 对大气层内的运载体的导航而言, 式(1-2-29)已足够精确。

附带需要指出的是, 某些运载体的导航过程中, 常需要在地图上标出运载体的位置。当运载体在低纬度地区航行时, 所使用的航行地图通常采用麦卡托投影坐标系。在采用这种坐标系的地图上, 所有的东西圆的圆周都相同, 而且都等于赤道圆圆周的长度。因此, 导航设备测量得到的东西方向的距离(或距离差)折合成地图上的距离(或距离差)时, 需要乘以一定的折合系数 K , 显然 $K \geq 1$ 。 K 的计算方法读者可参看 S. H. Laurila 著 "ELECTRONIC SURVEYING & NAVIGATION" 一书的第十六章。

三 位置面和位置线

应用无线电方法可以确定运载体到无线电辐射源的方向或距离, 或者是运载体到两个无线电辐射源的距离差。通过对不同辐射源的测量, 就可以直接测定运载体的位置。

1 确定方向

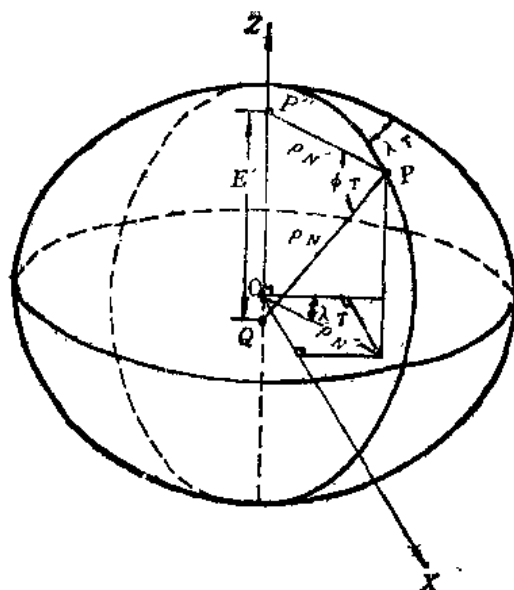


图 1-2 空间直角坐标 X 、 Y 、 Z 的推导

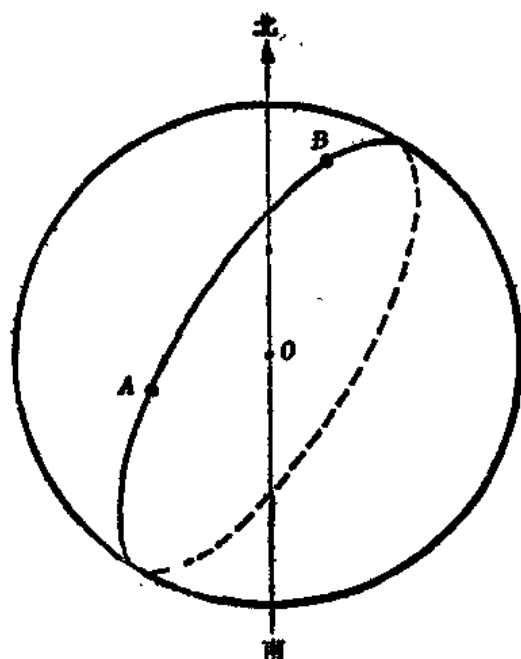


图 1-3 运载体沿等方位线航行的轨迹

空间任意点到无线电辐射源的方向，都可以表示为给定坐标中的角度值。用无线电方法来测定空间方向的过程叫做无线电定向(测向)，假若以观察者本地的磁子午线作为读数起点的参考方向，则所测得的角度叫做磁无线电方位。若以地理子午线作为读数起点的参考方向，则所测得的角度叫做真无线电方位，或简称方位角。

当作地面导航台测量运载体相对于导航台所在位置的北向子午线的夹角(运载体方位)，并利用这种测量结果，保持方位角不变，可使运载体沿 A 点子午线成 θ 角的 AB 方向运动到 B 点。因为无线电波的传播平面是与大圆弧面重合的，所以在地面恒定高度上由 A 点到 B 点运动时，运动轨迹与大圆弧线重合，所经过的距离是最短距离。

若已知 A 、 B 两点的纬度分别为 ϕ_A 和 ϕ_B ，经度分别为 λ_A 和 λ_B ，则所需的方位角应满足下列方程。

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \alpha_0 &= \cos \phi_A \operatorname{tg} \phi_B \operatorname{csc}(\lambda_B - \lambda_A) \\ &\quad - \sin \phi_A \operatorname{ctg}(\lambda_B - \lambda_A) \end{aligned} \quad (1-2-30)$$

大圆弧上 A 、 B 两点的距离为

$$\begin{aligned} d' &= \arccos[\sin \phi_A \sin \phi_B \\ &\quad + \cos \phi_A \cos \phi_B \cos(\lambda_B - \lambda_A)] \end{aligned} \quad (1-2-31)$$

d' 是以角度表示的弧长。若 d' 以角分为单位，则可按下式转换成以 km 为单位的距离 d

$$d = 1.852 d' \quad (1-2-32)$$

当运载体运动时,如果高度有某种变化,而仍保持方位角 θ 不变,则其运动轨迹应在与本地子午线圈平面成 θ 夹角的大圆弧平面内。这种被测导航坐标恒定不变的表面称为运载体的位置面。两个不重合位置面相交可得运载体的位置线。位置线表示两个导航坐标取固定值的点的轨迹。三个位置面相交,就可以确定运载体在空间的位置(图1-4)。

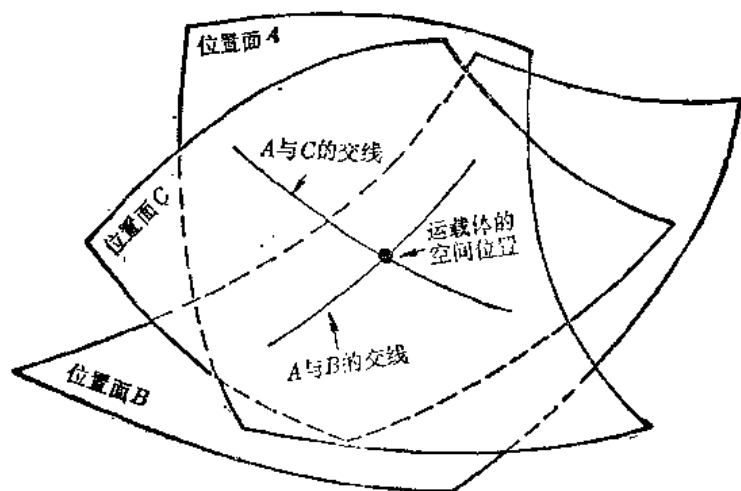


图1-4 用位置面确定运载体位置的方法

将位置面延伸到与地球表面相交可得地球表面的运载体位置线。在地球上空高度不太高的范围内,空间位置线与地表面位置的差别常可忽略不计,而用后者代替前者。

无线电测向导航设备的地表面位置线为大圆弧线,

2 距离测量

通过对无线电波传播时间或相位的测量可以确定运载体到导航台之间的距离。假定无线电波由A点沿直线以恒定速度 c 传播到B点,则传播的时间 t_{AB} 与经过的距离 r_{AB} 成正比

$$r_{AB} = c t_{AB}$$

式中 c 为无线电波的传播速度,在真空中它等于光速 c_0 。根据国际米定义咨询委员会1974年提出的数据为

$$c_0 = 299792458 \text{ m/s}$$

测量出传播时间 t_{AB} ,就可以确定距离 r_{AB} 。由于无线电波由A点传播到B点的相位差

$$\Delta \varphi_{AB} = \omega t_{AB} \quad (1-2-33)$$

式中 ω 和振荡角频率,因此也可以通过测量相角

$$\Delta \varphi_{AB} = \frac{2\pi c}{\lambda} \times \frac{r_{AB}}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} r_{AB} \quad (1-2-34)$$

$$r_{AB} = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta \varphi_{AB} \quad (1-2-35)$$

的方法来确定 r_{AB} 。

设 A 为已知地理坐标的固定导航台, B 为运载体, 则保持 r_{AB} 不变时, 地表面上的运载体 B 所在的位置线将是以 A 为圆心的一族同心圆周。

运载体 B 测量到地面两个已知点 A 和 C 的距离 r_{AB} 和 r_{BC} , 所得两条等距离线的交点, 就是运载体的位置 (图 1-5)。因为用这种方法得到的 $r_{AB} = \text{常数}$, $r_{BC} = \text{常数}$ 的两个圆周相交于两点 B 和 B' , 所以确定出的位置是非单值的。需要用其它方法消除非单值性。

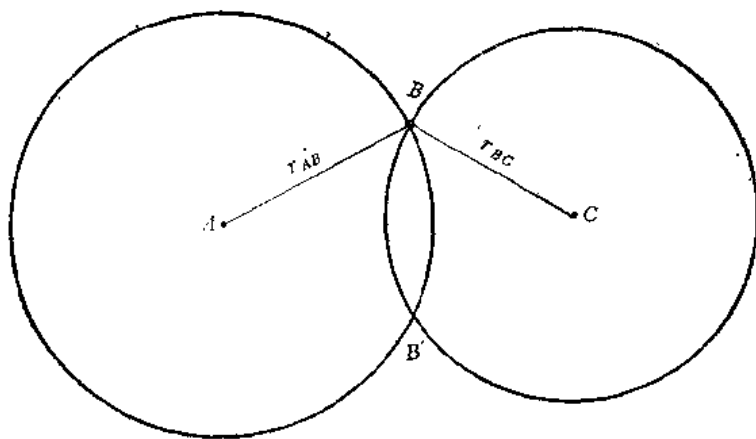


图 1-5 测距导航系统的位置线

在测距无线电导航系统中, 要精确地测定时间间隔 t_{AB} , 要求运载体时钟与导航台时钟在长时间内精确地保持严格同步。当不能做到这一点时, 可以采用询问—回答的转发方式。采作这种方式工作时, 运载体发出询问信号, 地面导航台接收这一信号, 并随即发出回答信号。运载体收到回答信号后与询问信号相比较, 并测量出所经过的时间间隔 t_r , 或相位差 $\Delta \varphi_r$ 。在此情况下, 由于无线电波两次传输经过所测距离, 使传播时间增大了一倍, 因此 t_r 或 $\Delta \varphi_r$ 与距离 r 之间的关系应为

$$r = \frac{c t_r}{2} \quad (1-2-36)$$

或

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta \varphi_r \quad (1-2-37)$$

实际使用的大多数测距无线电导航系统都工作在微波波段, 无线电波的主要传播方式为空间波, 由于大气折射的影响, 实际传播路径为一曲线 (参看第三节)。在需要高精度航定位时, 首先要把曲线距离 D_A (空间弧距) 转换成直线距离 D_C (空间弦距)。这种转换可通过引入修正值 ΔD 的方法得到

$$D_C = D_A - \Delta D \quad (1-2-38)$$

在标准大气折射条件下, ΔD 的值可由下式确定

$$\Delta D \approx \frac{D_A^3}{43R^2} \quad (1-2-39)$$

R 为地球曲率半径。

当运载体和导航台相对于地球参考椭球表面的高度不能忽略时, 还需要由空间弦距 D_C 转换成对应的椭球弦距 d_C 。如图 1-6 所示, 设 P_1 和 P_2 分别为导航台天线和运载体天线所在位置, 高度分别为 h_1 和 h_2 , 通过 P_1 和 P_2 分别作直线 L_1 和 L_2 平行于 d_C , 则 D_C 是梯形 $P_1P_3P_2P_4$ 的对角线, 因此有

$$D_C^2 = L_1L_2 + (h_2 - h_1)^2 \quad (1-2-40)$$

由相似三角形 OP_1P_3 、 OP_1P_4 和 OP_3P_2 可求出 L_1 和 L_2 的值

$$L_1 = \frac{R+h_1}{R} d_C \quad \text{和} \quad L_2 = \frac{R+h_2}{R} d_C \quad (1-2-41)$$

代入式 (1-2-40) 可得

$$D_C^2 = \frac{(R+h_1)(R+h_2)}{R^2} d_C^2 + (h_2 - h_1)^2 \quad (1-2-42)$$

解式 (1-2-42), 可求出椭球弦距 d_C

$$d_C = \left[\frac{(D_C^2 - (h_2 - h_1)^2) R^2}{(R+h_1)(R+h_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-2-43)$$

也可直接换算成椭球弧距为

$$d_A = \left[\frac{12R^2M}{12(R+h_2)(R+h_1) - M} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-2-44)$$

式中 $M = D_C^2 - (h_2 - h_1)^2$ 。

测距无线电导航系统通常用于近程导航。在较小的范围内, 椭球的扁率可以忽略不计, 椭球面可以近似地看成是球面, 通过求解球面三角形, 即可确定出运载体的地理坐标 ϕ_T 和 λ_T 。

实际使用的无线电导航系统还可以通过测量不同的导航参数来确定运载体的位置。例如运载体测量相对于一个地面导航台的方向和距离, 此时构成的位置线族为一组同心圆和一组以圆心为中心的幅射线。上述导航系统也称为 $\rho-\theta$ 导航系统。其位置线坐标与地理坐标的变换与上述方法相类似, 这里不再赘述。