

# 无线电导航原理与设备

徐长玉 编

1995年2月

# 前 言

本教材是为电子工程专业编写的,是电子工程专业的主要专业课程教材。本教材是根据“导航原理与设备”教学大纲的要求而编写的。

全书共分九章。第一、二、三章为基本概念,基本理论,主要介绍了导航技术的发展史,发展方向,导航的基本原理与方法;导航定位误差及工作区;电波传播条件对导航定位精度的影响。第四~八章为本书的主要内容,对现行船舶无线电导航系统作分章介绍。第四章为测向系统;第五章为脉冲测距差系统;第六章为相位测距差系统;第七章为卫星导航系统,本章中 GPS 卫星导航系统在现代导航技术中占据重要地位,是未来组合导航系统的主要组成部分,因此,对本章在理论和设备原理上都作为了较详细的论述。第九章为组合导航系统,主要论述了系统组合原理和卡尔曼滤波技术在导航中的应用。

编者根据多年的教学经验和实践,力求将现代导航的新技术、新理论、新体制、新工艺和新设备汇集于本教材之中,但由于编者水平所限,不妥和缺点错误在所难免,殷切希望指教。

本教材由徐长玉编写,袁安存教授主审。

1995 年元月

# 目 录

<b>第一章 无线电导航概论</b> .....	(1)
1.1 船舶导航 .....	(1)
1.2 用无线电方法测定船舶位置的基本原理 .....	(2)
1.3 无线电导航系统分类 .....	(6)
1.4 对无线电导航系统的基本技术要求 .....	(7)
1.5 船舶无线电导航的发展方法 .....	(9)
<b>第二章 定位精度与工作区</b> .....	(12)
2.1 导航测量误差的一般特性.....	(12)
2.2 随机误差基本理论.....	(12)
2.3 位置线误差.....	(16)
2.4 定位误差.....	(19)
2.5 无线电导航系统工作区.....	(25)
<b>第三章 无线电波传播条件对无线电导航测量精度的影响</b> .....	(49)
3.1 无线电波传播条件影响的一般特性.....	(49)
3.2 土壤和地形不均匀性的影响.....	(51)
3.3 电离层的影响.....	(54)
3.4 空间波对接收场相位的影响.....	(58)
<b>第四章 无线电测向系统</b> .....	(60)
4.1 概述.....	(60)
4.2 测向方法.....	(61)
4.3 测向仪天线系统.....	(62)
4.4 无线电测向仪.....	(70)
4.5 无线电指向标.....	(79)
4.6 无线电测向仪误差.....	(82)
<b>第五章 脉冲测距差导航系统</b> .....	(90)
5.1 工作原理.....	(90)
5.2 时间差的测量方法.....	(92)
5.3 信道组成与台对选择.....	(94)
5.4 罗兰接收机原理.....	(95)
5.5 罗兰接收机的几种自动化电路 .....	(107)
5.6 罗兰信号参数的选择 .....	(118)
<b>第六章 相位测距差导航系统</b> .....	(121)
6.1 概述 .....	(121)
6.2 相位测距差导航系统的基本工作原理 .....	(122)

6.3	典型电路 .....	(125)
6.4	按频率分隔制工作的相位系统 .....	(132)
6.5	按时间分隔制工作的相位系统 .....	(141)
<b>第七章</b>	<b>脉冲——相位测距差系统</b> .....	<b>(163)</b>
7.1	概述 .....	(163)
7.2	工作原理 .....	(163)
7.3	工作频率的选择 .....	(168)
7.4	罗兰 C 信号特性 .....	(169)
7.5	罗兰 C 接收机 .....	(176)
<b>第八章</b>	<b>卫星导航</b> .....	<b>(189)</b>
8.1	卫星导航系统概况 .....	(189)
8.2	卫星导航基本原理 .....	(194)
8.3	子午仪卫星导航系统 .....	(203)
8.4	GPS 全球定位系统 .....	(230)
8.4.1	系统的组成 .....	(230)
8.4.2	工作原理 .....	(233)
8.4.3	信号结构和信号接收处理 .....	(243)
8.4.4	GPS 卫星导航仪 .....	(257)
8.4.5	差分 GPS 系统 .....	(282)
<b>第九章</b>	<b>组合导航系统</b> .....	<b>(300)</b>
9.1	概述 .....	(300)
9.2	系统组合原理 .....	(301)
9.3	导航信息的组合处理——卡尔曼滤波在导航中的应用 .....	(303)
9.4	卡尔曼滤波器的构成 .....	(309)
9.5	卡尔曼滤波理论在导航中的应用 .....	(315)
<b>附录 1</b>	<b>推算船位计算公式</b> .....	<b>(327)</b>

# 第一章 无线电导航概论

## 1.1 船舶导航

### 1.1.1 无线电导航在船舶中的地位

导航的基本含义是引导运载体(船舶、飞机、车辆等)航行,即以有效的方法,引导运载体以给定的精度,按计划航线安全可靠地到达目的。利用无线电技术对运载体的航行过程实现导航,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备总体,称为无线电导航系统。

在船舶导航技术发展的初期,人们只是凭借视力观测岸上和岛上的目标和天体中的星球来确定船舶的位置。后来发明了指南针、计程仪、天文钟和六分仪等普通船舶导航设备,使航海事业向前发展了一大步。有了指南针,就可以在茫茫的大海中,不管日、夜、阴、晴,总能辨别方向,这样就大大的扩大了人们海上的活动范围。但这些普通的导航设备,只有地面和天空能见度良好的情况下,或者不存在磁干扰的情况下才适用,而且用这些普通导航设备进行测量,比较费时间,速度慢。

无线电导航系统是利用无线电波传播特性测量目标,一般来说,它的工作与天气条件无关,因而它是在复杂气象条件及能见度不良情况下一种很好有效的导航方法,可以在近、中、远距离上顺利完成各项导航任务。

由于无线电导航设备的工作与无线电波传播条件有关,因而在某种程度上会受人工干扰,设备也比较复杂,这是它的缺点。但随着社会生产和科学技术的发展,人类在海上的活动范围与内容日益扩大与丰富,当前,船舶航行的范围已遍及世界各个海域,不但在水面上航行,还发展到水下航行,在海上的活动也不仅仅是海上交通运输,还有海洋调查、资源勘探、海道测量、远洋渔业、海上采油、气象探测及海上军事活动等。随着超音速飞机、核动力潜艇、远洋运输船队和人造地球卫星的出现,国内、国际航运事业的发展,对导航提出了更高的要求。从概念上讲,导航的含义已不仅仅只限于引导运载体安全可靠地到达目地的这一狭小的范畴,根据不同的导航任务,进一步提出了高精度、全天候、全球覆盖、连续实时定位,自动驾驶、自动引导进出港、交通管理以及一些特殊应用(营救、识别、侦察等)方面的要求。电子技术的迅速发展,电子计算机技术、集成电路、新型电子元器件、电波传播的研究、信息论、自动控制理论、系统工程理论、多媒体技术等导航中的应用,促进了无线电导航技术的迅速发展,无线电导航设备及系统也日新月异,不断地满足导航提出的多方面要求。但应该指出,无线导航方法并不排除其它船舶导航方法,而是相辅相成,取长补短,从而大大提高了船舶导航的可靠性、安全性和定位精度。

### 1.1.2 无线电导航技术发展简史

从本世纪初,无线电技术应用于船舶导航以来,由于它和其它导航技术(如惯性导航、天文导航等)相比,具有以下特点:

1. 受外界条件(如昼夜、季节、气象等)限制小;

2. 测量导航参数的精度高,测量速度快;
3. 可靠性高。

因此,无线电导航技术得到迅速发展,广泛用于航海、航空和航天事业中。

无线电导航技术的发展过程大致经历了三个阶段。

第二次世界大战前的早期阶段,首先出现的是无线电测向系统。1902年,斯通(J. Stone)发明了无线电测向技术,1907年发明了测角器,使无线电测向仪进入了实用阶段,接着又出现了四航道信标,扇形无线电信标等无线电测向设备。这些设备主要用来引导船舶进出港,归航和按计划航线航行。

1919年,国际电信会议决定分配1000m波长供无线电信标使用,1927年,国际电信会议指定950~1050m波长作为无线电信标专用波段,1929年召开的海上人命安全国际会议制定了条约,规定5000吨位以上的客船必须安装无线电测向仪;1948年召开的海上人命安全国际会议又规定,从事国际航运的1600吨以上的船舶必须安装测向仪。现在差不多所有的远洋船舶都强制安装无线电测向仪。

我国于1927年首先在长江口花鸟山建立了一座无线电信标,1930年开始正式投入使用;1933年在大戢山和佘山二灯塔建立了无线电信标,以保证长江口的航行安全。1941年在山东成山头建立了一座无线电信标,为海上航行服务。

从第二次世界大战开始至60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。其中迄今仍在广泛使用的有四十年代出现的台卡(Decca)系统与罗兰(Loran)系统,随着船舶航程的增加,相应出现了远程导航系统,其中广泛使用的罗兰C(Loran-C)系统和奥米加(Omega)系统。

六十年代以来,无线电导航技术进入了更加成熟的阶段。在此阶段,由于新型电子器件的不断涌现和电子计算机技术的发展,使各类无线电导航系统的性能得到很大的改善,主要表现为:

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,使用和维修更为方便;
3. 体积与重量大大减小,标准化程度提高。

除了原有系统的性能改善外,还出了许多与现代航海、航空事业相适应的、性能更好的、能适应各种复杂条件的新型无线电导航系统,如第一代卫星导航系统——“子午仪”系统(Transit system),和能够提供三维位置、三维速度、精密时间的高精度、全球覆盖、连续实时定位的导航星全球定位系统(NAVSTAR/GPS)。

## 1.2 用无线电方法测定船舶位置的基本原理

### 1.2.1 物理基础

导航技术所要解决的最根本的问题是在任何时刻以一定的精度确定运载体的位置。用无线电方法测定运载体位置的基本原理是建立在电磁波传播特性的基础之上的。电磁波传播有三个基本特性:

1. 在理想均匀媒质中,电磁波传播速度恒定,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

2. 在理想均匀媒质中,电磁波直线传播;

3. 电磁波在两种媒质的界面上必然产生反射。反射场强与两种媒质的电气性能的差异程度有关,当垂直于边界面上投射时,反射系数是:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

式中  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  是媒质介电常数。对于导电媒质,  $\epsilon$  是可以是复数。

根据传播速度恒定的特性,可以确定运载体至辐射源的距离;根据电磁波直线传播特性,可以测定辐射源的方向;根据电波传播的反射特性,可以搜索和发现目标。利用这些观测及其组合,可以建立起各种无线电导航系统。

### 1.2.2 定位的几何原理

船舶在地球表面上的位置一般是用地理坐标——经度与纬度表示的。确定船舶的地理坐标,即确定船舶相对于某些参考点的位置,是船舶导航所要解决的根本问题,它是通过测量某些已知地理位置的导航参考点的几何参量来实现的。可以测量的几何参量有方位、距离、距离差和距离和等。根据所测几何参数的不同,有以下几种定位方法。

#### 1. 测向法

空间任意点到辐射源的方向,都可以为给定坐标系中的角度值。用无线电方法测定空间方向的过程叫做无线电测向,假若以观测者本地的地理子午线做为读数起点的参考方向,所测得的角度称为真方位。如图 1.1 所示, A 点为已知地理坐标的固定导航台,运载体 M 测得导航台 A 的真方位为  $\alpha_A$ ,则通过 A 点作直线 AM,它与通过导航台的地理子午线的夹角为  $180^\circ + \alpha_A$ ,在 AM 上任何一点测得 A 点的真方位均等于  $\alpha_A$ 。我们将几何参数值相等的点的轨迹称为运载体的位置线。两条位置线相交,其交点就是运载体在地球表面上的位置。在测向法中所测量的几何参量是方位。

另外,也可以由运载体测量两个导航台的方位线和夹角  $\varphi$ ,得到等方位夹角位置线,其位置线是以两个导航台连线 AB 为弦,圆周角等于  $\varphi$  的圆弧,如图 1.2 所示。

#### 2. 测距法

通过对电磁波传播时间或相位的测量,可以确定运载体到导航台的距离。如图 1.3 所示,假定电磁波由 A 点沿直线以恒定速度 C 传播到 M 点,则传播时间  $t_{AM}$  与经过的距离  $r_{AM}$  成正比。

$$r_{AM} = C \cdot t_{AM}$$

式中 C 为电磁波的传播速度,在真空中等于光速  $C_0$ ,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  $t_{AM}$ ,就可以确定距离  $r_{AM}$ 。由于电磁波由 A 点传播到 M 点的相位差

$$\Delta\varphi_{AM} = \omega t_{AM}$$

式中  $\omega$  是振荡角频率,因此,也可以通过测量相位差角

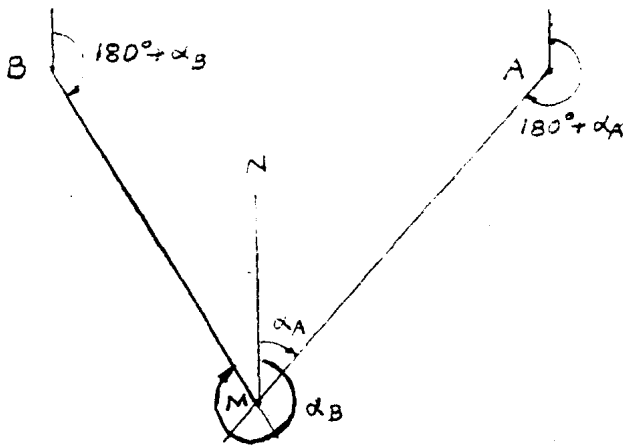


图 1.1 测向导航系统位置线

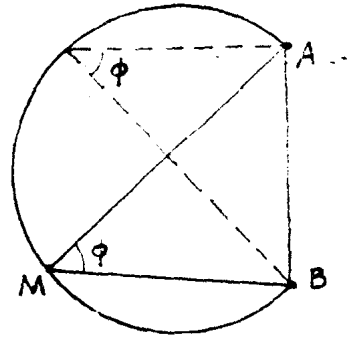


图 1.2 测方位夹角的位置线

$$\Delta\varphi_{AM} = \frac{2\pi}{\lambda} C \cdot \frac{r_{AM}}{C} = \frac{2\pi}{\lambda} r_{AM}$$

$$r_{AM} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\varphi_{AM}$$

的方法来确定  $r_{AM}$ 。

设 A 为已知地理坐标的固定导航台, M 点为运载体, 保持  $r_{AM}$  不变时, 地面上的运载体 M 的位置线是以 A 点为圆心的一族同心圆周。运载体 M 测量地面上两个已知点 A 与 B 的距离  $r_{AM}$  和  $r_{BM}$ , 所得的两条等距离位置线的交点 M 或 M', 就是运载体的位置。因为用这种方法测得的  $r_{AM} = \text{常数}$ ,  $r_{BM} = \text{常数}$  的两个圆周的相交于两点 M 和 M', 所以确定的位置有多值性, 需要用其它方法消除多值性。

在测距离无线电导航系统中, 要精确地测定时间间隔  $t_{AM}$ , 要求运载体的时钟与导航台的时钟在长时间内精确地保持严格的同步。当不能做到这一点时, 可以采用询问——应答的转发方式。采用这种方式工作时, 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, 测出所经历的时间间隔  $t_r$  或相位差  $\Delta\varphi_r$ 。在这种情况下, 由于电磁波两次经过所测距离, 因此  $t_r$  或  $\Delta\varphi_r$  与距离  $r$  之间的关系应为:

$$r = \frac{c \cdot t_r}{2}$$

或

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi_r$$

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, 由运载体测量一个地面台的方位和距离, 此时构成的位置线族为一组以导航台为圆心的同心圆和一组以导航台为中心的辐射线, 如图 1.4 所示。上述导航系统称为  $\rho-\theta$  导航系统。

### 3. 测距离差法

如果两个已知地理坐标的地面台发射的无线电信号在时间上或相位上保持严格同步, 则运载体就可以通过接收两个无线电信号确定运载体到两个发射台的距离差。由几何原理可知, 距离差为常数的点的轨迹为以两个导航台为焦点的双曲线。不同的距离差对应为一族双曲线。由图 1.5 可见, 运载体如果能够同时测得两对导航台 A、B 和 C、D 的两个距离差, 则可获得两



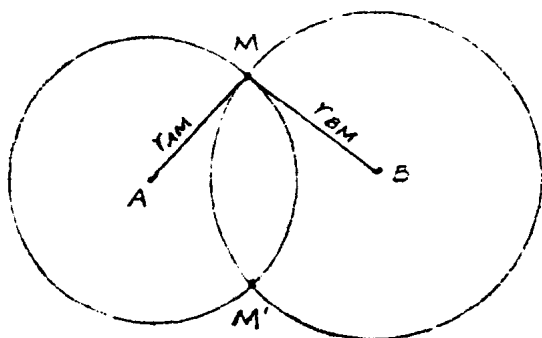


图 1.3 测距导航系统位置线

两条双曲线位置线,其交点 M 即为运载体的位置。

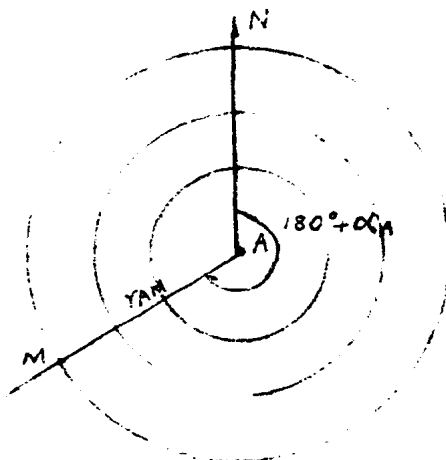


图 1.4 测角——测距导航系统位置线

### 1.2.3 导航的基本方法

导航方法与导航设备及导航参考点的选择有密切的关系,目前世界上船舶导航方法主要有如下几大类。

#### 1. 推算导航

推算导航是最基本最古老的船舶导航方法之一,它是一个从已知坐标点开始,根据船舶在该点航向航速和时间推算出下一个时刻船位的一种定位方法。通常所用的导航设备是磁罗经、电罗经、计程仪和船钟等。依靠人工进行海图作图实现定位。

现代惯性导航,也是建立在这一原理上,只是测量航向航速的手段不同,典型的惯性导航系统由稳定平台(陀螺平台)、加速度计、积分机构和随动系统四个部分组成。

推算导航方法所用的几何参量完全依靠运动体本身的设备来取得,不需要任何外界的设备,其工作是独立自主的,这种方式称为“自主式”导航。因为其作用距离是无限的,不受航行地域的限制,它不向外界发射无线电波,也不受外界电波的干扰,所以隐蔽性好,可靠性高。缺点是前一时刻的船位误差必然要引入到下一时刻的船位误差之中,即时差是随时间而积累的,这种积累误差必须靠其它方法定期校正,否则,随着时间的增加,将产生不能容许的定位误差。至于使用普通的磁罗经,计程仪等设备,定位精度还会受到海流,涨落潮等因素的影响。

#### 2. 陆标导航

以陆上特定的标志,如岛屿、航标、山头等作为导航参考点,测定其几何参量,求得船舶位

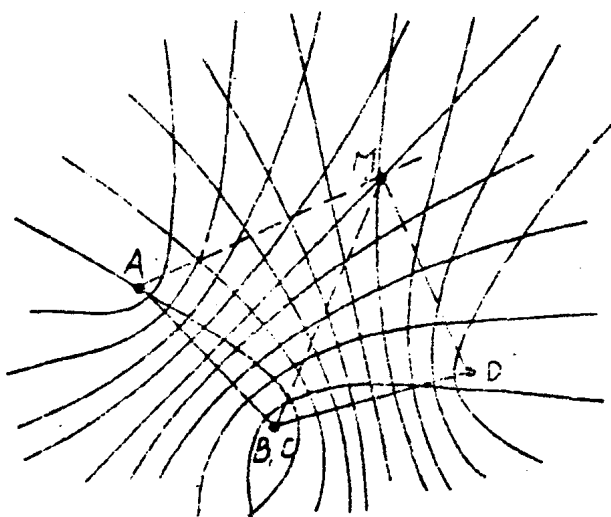


图 1.5 测距差导航系统位置线

置的方法称为陆标导航。常用的导航设备有罗经、六分仪、测距仪、望远镜等。这是一种比较可靠简便的导航方法,缺点是易受气候条件的限制和使用地域的限制。在一般能见度情况下,能见距离为 10 海里左右,只适于作近海导航。

### 3. 天文导航

天文导航是一种古老的导航方法,最早应用于海上。它是利用在天球上具有一定运动规律的天体(日、月、星体)作为参考点,确定船舶位置。

利用六分仪,可以测量水平线和天体视线间的夹角,这一交角在天文学上称为天体高度。这样我们可以根据在某一时刻天体在天球上的已知位置求出观测天体的等高线,在等高线上任一点都能以同一高度  $\alpha$  观测天体,这条等高线称为天文定位的位置线。如果先后对两个不同的天体测定其高度,就可以得到两条等高线,根据其交点,就可以确定出船舶位置。天文导航是一种“自主式”导航系统,其优点是不易受干扰,可靠性较高,误差不随时间积累,适用于远距离长时间航行的导航。但对于光学六分仪跟踪测量天体的设备,易受气象条件的限制,白天看不见星体,晚间有云也无法观测。随着射电天文学的发展,也给天文导航技术开辟了新的前景,自 60 年代以来,已经制成了利用太阳和月亮无线电辐射进行对这些天体自动跟踪的无线电六分仪。由于无线电辐射较之光线能够更好地透过大气层,不易受大气气象条件的影响,因而可以在恶劣的气象条件下进行天文导航观测。目前已经查明在天球上有二千多个无线星球体,其中有的有极其强烈的无线电辐射,随着射电天文的进一步发展,利用这些无线星球体作为导航是完全可能的。

### 4. 无线电导航

无线电导航就是利用无线电方法确定船舶相对于导航参考点的位置来引导航行。由于导航任务的复杂性与多样化,在无线电导航中应用了多种电子技术,占用的频谱很宽,低至 10 千赫,高达数千兆赫以上。

无线电导航的最大优点是不受气象条件的限制,有高度的可靠性,测量迅速,易于实现导航自动化,因此无线电导航在整过导航领域中占有重要地位,发展迅速,使用广泛。但它也有不容忽视的缺点,就是容易受到自然和人为的干扰,多数系统的结构也比较复杂,在战争中,无线电导航台易为敌人干扰、破坏。无线电导航尽管有许多重大的优点,也并不排斥其它导航方法,而是取长补短,互为补充,以满足船舶导航的各种要求。

## 1.3 无线电导航系统分类

无线电导航系统的分类可按不同原则进行,通常有以下几种分类方法:

### 1. 按测量的无线电信号参量划分。

一个无线电信号可以表示为  $e = E \sin(\omega t - \varphi)$ , 信号中包含四个参数,即振幅  $E$ , 角频率  $\omega$ , 相位  $\varphi$  和时间  $t$ 。这几个电参量中的一个或几个可以与导航几何参量——方位角、距离或距离差发生关系。这就是说,运载体测得的无线电信号中包含有导航信息,存在着这样四种关系:  $E = E(X)$ ,  $\omega = \omega(x)$ ,  $\varphi = \varphi(x)$  和  $t = t(x)$ ,  $X$  为导航的几何参数。因此,在运载体上收到的无线电信号可以表示为:

$$e = E(x) \sin(\omega t - \varphi)$$

$$e = E \sin[\omega(x)t - \varphi]$$

$$e = E \sin[\omega t - \varphi(x)]$$

$$e = E \sin[\omega t(x) - \varphi]$$

当知道这些电参数与导航几何参数的关系时,测出电参数,就可以确定导航的几何参数和相应的位置线。这样,就可以按所测电参数将导航系统分为:

- (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(时间)式无线电导航系统。

2. 按有效作用距离划分:

- (1) 近程导航系统,其有效作用距离在 50 海里以内;
- (2) 中程导航系统,其有效作用距离在 500 海里以上;
- (3) 远程导航系统,其有效作用距离大于 1500 海里。

3. 按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) 非自备式(它备式)无线电导航系统,它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设备。

5. 按无线电导航台安装的地点划分:

- (1) 陆基无线电导航系统,无线电导航台安装在地面的无线电导航系统;
- (2) 空基无线电导航系统,导航台安装在飞机上的无线电导航系统;
- (3) 星基无线电导航系统,导航台安装在人造卫星上的无线电导航系统。

## 1.4 对无线电导航系统的基本要求

无线电导航系统的技术指标是衡量系统质量,表示系统特征的标志,是设计系统的依据。战术技术要求的提出,应根据导航任务和用途的不同而有所不同。如果对设备的精度要求不高,而在设计时对设备提出过高精度要求,则会造成浪费,同时带来使用、维护上的不方便和生产上的困难。

在提要求时,往往会遇到一些矛盾的情况。例如要求设备的精度高,结构简单,使用方便,工作可靠等,但往往在满足精度高这一要求时,设备结构就复杂起来,使用维护也麻烦。此时设计人员就应该在满足主要指标的情况下,适当地修改对其它指标的要求。

对无线电导航系统的基本要求有:作用距离、可靠性、精度、工作容量、隐蔽性、抗干扰性能和单值性等。

### 1. 作用距离

作用距离是指在保证既定精度下的最大距离。应该根据任务对作用距离提出不同要求,不当地要求增大作用距离,会带来许多不必要的困难,例如增加发射功率,增大设备的体积等。

在设计时应正确选择下列参数来保证所要求的作用距离:

(1)波长。近距离无线电测距系统多用超短波,测向系统多用中波。中距离用中短波或中波。远距离用中波和长波。超远程则采用超长波。全球覆盖的卫星用超短波和微波。

(2)天线型式。

(3)发射功率。

(4)接收机灵敏度。

### 2. 精度

作为一个测量系统,无线电导航系统和设备的精度是对其误差的量度。是指在规定的使用条件下,能够保持获得的导航参量的误差在给定范围内的能力。通常用随机误差的大小来表示系统和设备的精度(重复性)。不适当的提高精度会使系统和设备复杂化,因而可靠性会降低。航海导航定位的精度要求如表 1-1 所示。

表 1.1

航行区域	要求精度	允许定位时间
100~150m 狭水道	5~10m	瞬时
进港	50~100m	瞬时
沿海	0.1~0.2n mile	<1min
大洋	0.5~1.0n mile	<5min

### 3. 可靠性

可靠性是指在规定的使用条件下,能保持系统和设备的指标在给定范围的能力。可以用正常工作概率来定量地表示系统与设备的可靠性。正常工作概率指在一定使用条件下,在给定的时间间隔内保持技术指标不变,也就是在给定的时间间隔内不产生任何故障的概率。

系统工作的可靠性应包括电波传播的可靠性与设备本身的可靠性。

电波传播在超短波、短波、中波、长波各个波段具有不同的特点,因此在考虑系统工作可靠性时应正确选择工作波长。

设备本身的可靠性又包括电气与机械的可靠性两个方面。电气工作的可靠性指在给定的气候、温度、湿度范围内不发生故障的概率。机械工作的可靠性是指当承受规定的振动与冲击而不发生故障的概率。

设备的可靠性的数量特性应包括设计上的可靠性  $R_1$  和生产使用上的可靠性  $R_2$ ,  $R = R_1 + R_2$ ,  $R_1$  取决于设计过程中所选用的电路是否合理,元件与部件的数量和质量是否符合要求,设备的结构是否牢固,有无备份元件与部件,以及使用是否方便等。 $R_2$  取决于生产过程中元件与部件的质量,装配与安装质量,以及调整调谐质量。

在无线电导航中,确定船位要通过若干个设备,如果每一个设备的正常工作概率为  $P_i(t)$ ,那么系统工作的可靠性就可以表示为:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

在系统中,尽管只是其中一个设备发生故障,也就相当于整个系统发生了故障。

在考虑工作可靠性时,应正确考虑以下几个方面的问题:

(1)选用适当的工作波长,以保证电波传播的可靠性;  
(2)选用可靠的电路,使它能在电子器件和其它元件的参数变化较大时仍能稳定的工作。避免采用多功能电路和要求电源电压稳定性很高的电路。应力求采用简单的标准化电路,使使用者易于了解其工作原理,通过手册指导能够维护与调整设备,排除故障。

(3)选用可靠性好的元件。

(4)选用防震、防潮、防霉设备。

(5)主要元件、部件甚至整个设备都要采用双备份。

#### 4. 抗干扰性

抗干扰性是指在有干扰时,无线电导航设备能可靠工作的能力。

无线电干扰种类很多,有天电干扰,工业干扰(包括广播干扰),人工干扰等。

大气层中的放电有时产生非常强的无线电波干扰波,这种干扰称为“大气干扰”,又叫“天电干扰”。这种干扰在热带地区尤为严重。另一种天电干扰是雨滴静电干扰,猛然降落的雨滴、冰雹等在特殊情况下可能带电,若这些带粒子与接收天线接触,可能经过天线或接收机对地放电,因而产生严重干扰。

工业干扰是指开关和电机打火以及高频设备产生的干扰。这种干扰仅在距干扰源不远的距离上有影响。

#### 5. 工作容量

工作容量是指一个导航系统能同时供多少用户使用。它分为有限工作容量和无限工作容量两类。如果由船载接收设备接收导航台信号确定自身位置进行导航定位,那么这种导航系统可供无限数量用户使用,称为无限容量系统。若导航台只能在某一时间内确定有限数量的用户位置,则这种系统称为有限容量系统。

#### 6. 单值性

导航测量的一个结果只应该对一条位置线或一个位置,这就是所谓单值性。这是保证无线电导航系统能够获得实际应用的一个重要条件。一个测量结果对应多条位置线称为多值性。在实际导航中必须能够消除多值性,不然系统没有实际意义。

对无线电导航系统及设备提出的技术要求是多方面的,而且常常相互矛盾,应该对导航系统所要解决的主要任务作具体分析,抓住重点,提出合理的要求。

### 1.5 船舶无线电导航的发展方向

半个多世纪以来,无线电导航技术由简单的测向系统发展到全球、全天候、全自动、高精度、连续实时的全球卫星导航系统(GPS),其发展速度是十分惊人的。这一方面是由于越来越高的军需民用要求,另一方面是现代科学技术发展的必然结果。

目前世界上技术比较成熟,应用广泛的无线电导航系统有无线电测向系统,罗兰系统、台卡系统,奥米加系统,子午仪卫星导航系统,导航全球卫星导航系统。由于GPS能够提供高精度的三维位置、三速度和精确时间信息并能全球覆盖、连续实时定位,所以它的出现必将影响其无线电导航系统的发展。正是由于这一原因,美国联邦无线电导航计划(FRP)提出了本世纪末和下世纪初美国无线电导航的政策。停止任何一种现在正在运行的无线电导航系统的决定,

取确于下列因素：

- (1)GPS 的精度、覆盖率、完整性和财力等问题的解决；
- (2)确保组合系统能够满足现有系统的军需民用要求；
- (3)民用用户设备在经济上能够承的价格；
- (4)建立一个 10~15 年的系统转换期；
- (5)国际影响问题。

综合上述因素,FRP 对各种导航系统做如下规划：

- (1)无线电测向系统仍将是下世纪组合系统的一部分；
- (2)罗兰 C 系统仍将是下世纪组合系统的一部分；
- (3)奥米加系统,1994 年 12 月以前将逐步停止其在军用航空中的使用。
- (4)子午仪卫星导航系统,1996 年 12 月以前将逐步停止对该系统的使用。
- (5)GPS 系统,是下一世纪的主要导航系统。

由于美国经营的无线电导航系统大都由国际社会使用,所以 FRP 对国际无线电导航系统有很大的影响。

尽管无线电测向系统的定位精度不高,作用距离不远,但它以很低的成本向民用用户提供导航服务,加之其对海难救助的特殊功能,所以无线电测向系统仍将是世界各国下世纪初组合导航系统的组成部分。随着全球海上遇险与安全系统(GMDSS)的发展与完善,测向系统被取代也是可能的。目前世界很多国家都研究利用无线电信标台发射差分 GPS 基准台信号。

罗兰 C 系统在美国是作为沿岸汇流区的导航系统。美国的 FRP 计划表明在 1994 年以后对其国外的罗兰 C 台链将关闭或移交给罗兰 C 所在国。这意味着有 16 个罗兰 C 台将被关闭或移交别国。

面对美国政府的罗兰 C 政策,国际航标组织(IALA)于 1991 年 4 月通过一项陆基导航系统方针。其主要基点是确认一种陆基无线电导航系统辅助全球卫星导航系统;推荐罗兰 C 与恰卡系统(chayka 原苏联的一种类似罗兰 C 的远程导航系统)作为优先系统;支持鼓励 IALA 成员国间合作,发展改善罗兰 C 与恰卡系统在全球的覆盖区。在 IALA 的支持鼓励下和美国、独联体积极支持下,世界各国正在致力于罗兰 C 的发展及罗兰 C 与恰卡的国际合作,促成罗兰 C/恰卡成为世界一种标准陆基无线电导航系统。我国已成为世界上一个重要的拥有罗兰 C 台的国家,南海台链的三个台已在 1990 年正式使用,东海和北海的三个台也建成并正在试运行中。

罗兰 C 系统现已拥有 60 万用户,是陆基导航系统中用户数量最多的系统。

奥米加系统是除卫星导航系统外,唯一能够全球覆盖的无线电导航系统。现在世界上只有美国和独联体两国拥有该系统。美国将停止军用航空使用,但海上将继续用该系统。由于奥米加系统能水下传播,所以,在没有更好的为潜艇导航的无线电导航系统出现之前,奥米加系统是不会轻易停止使用的。

子午仪卫星导航系统被 GPS 取代已成定局,美国已决定现有的子午仪系统只支持到 1996 年底,独联的奇卡达系统也只维持到本世末。

GPS 卫星导航系统将是今后主要的导航系统。由于 GPS 系统 P 码仅限于军用,对 C/A 码又采用 SA 技术使其定位精度在 100 米左右,这对很多用户来说是不能满足定位精度要求的,因此,世界各国都在研制差分 GPS 系统。

如上所述,船舶导航发展至今,已有很多导航系统和设备,能否将许多导航设备组合一起,使之取长补短,相互补充,以增强其适应性、可靠性,卡尔曼滤波方法和数字计算技术的蓬勃发展,为组合导航系统的实现提供了技术条件,组合导航是今后导航领域的一个发展方向。

综合运用也是导航领域的一个发展方向。例如无线电通信、无线电导航、无线电广播、无线电授时等的综合运用,一颗卫星既用来通讯、电视转播,又用来导航定位就是典型综合运用的例子。移动通讯和导航定位的综合已在迅速发展。

无线电导航是一门综合性的应用科学。在导航系统和设备中,只有不断地应用新理论、新技术、新器件和新工艺,才能促进导航技术的不断完善与发展。与导航技术密切相关的技术有:原子频标、微电子技术、显示方法、锁相技术、信息论在编码方面的应用、数字计算技术、噪声过滤方法、水下传播规律的研究等。

## 第二章 定位精度与工作区

### 2.1 导航测量误差的一般特性

无线电导航系统的定位精度是衡量无线电导航系统性能的最主要的战术技术指标,定位误差的产生首先是由于在导航信号电参数(振幅、频率、相位、传播时间)的测量过程中,不可避免地存在着由导航设备和传播条件所引起的误差,由于信号的电参数和导航参数(角度、距离、距离差……)之间存在一定的对应关系,因此,电参数的测量误差必然会引起对应的导航参数误差,相应地产生位置线误差;另外,由于无线电导航系统在定位过程中至少需要测量两条位置线,因此,定位误差不仅与每条位置线本身的误差有关而且与两条(或几条)位置线的相互位置(夹角)也有关。

根据产生误差的原因及其物理性质,无线电导航测量误差大致可以分为四类:

1. 方法误差。这种误差是由测量方法本身引起的误差。测量方法不完善,或者作为这种测量方法依据的理论或算法不完善,例如由于无线电波传播理论不够完善而引起的误差就属于无线电导航测量的方法误差;为系统选择的最佳算法也是有条件的,因为选择最佳化准则与转换测量数据的方法也是近似的,这种由算法带来的误差也属于方法误差。

2. 设备误差。这种误差又称仪器误差,是由于无线电导航设备不完善而引起的。它表现为指示器的灵敏度不够,指示器的惯性,计算精度限制不能准确实现测量算法等。

3. 状态误差。又称测量条件误差,它是由于测量环境的工作条件引起的。误差的来源是本地的电气干扰和音响干扰,冲击与振动,照明条件的变化,温度、湿度的变化,总之,是测量设备和使用人员所在环境介质参量的变化。

4. 主观误差。这类误差决定于操作人员的经验,熟练程度,感觉器官特性和注意力的敏锐程度。

根据误差在测量过程中出现的特性,可将所有误差分为系统误差与随机误差。通常将测量时数值和符号都按一定规律重复出现的误差称为系统误差。产生系统误差的原因是完全确定的,而且是可以估计出来的,因此,误差本身可以引入修正量或者消除引起误差的原因来消除掉。随机误差是由测量过程中许多偶然因素产生的,而这些因素中,单独就其中任何一个来说,其影响是十分微小的,因此,无法确定出每一次具体测量时产生随机误差的原因,因而也就不能计算出每一次具体测量时的误差,单独一次测量的随机误差是不能消除的,只能用统计的方法来估计它的特性。

### 2.2 随机误差基本理论

如果除去系统误差,则无线电导航参量测量误差是一个随机变量,该随机变量可以是离散的,也可以是连续的。在第一种情况下,测量结果是离散随机变量,可以表示为整数  $n$  的函数



$$u = f(n) \quad (2-1)$$

式中  $n$  是离散测量次数。

在第二种情况下,测量结果是连续随机变量,可以表示为变量  $t$  的函数

$$U = f(t) \quad (2-2)$$

图 2.1 表示随机变量  $u$  随测量次数  $n$  和时间  $t$  变化的例子。

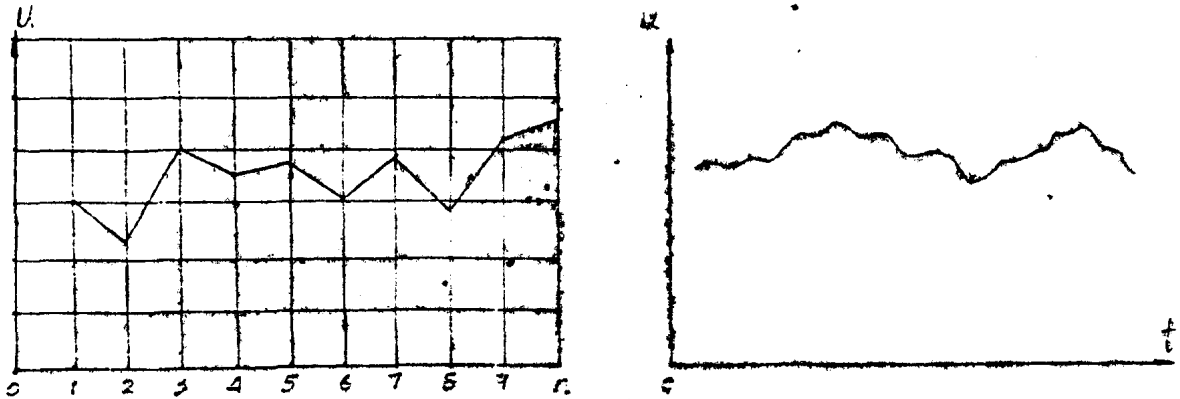


图 2.1 随机变量  $u$  的变化

对于个别独立的测量,我们不能精确预测,但是在相同的试验条件下作大量的测量,则可发现测量结果有一定的规律,这就是随机变量的统计性质。为了完善地表示随机变量的统计规律,必须要知道随机变量的范围与随机变量出现的概率,为此,在概率论中引入了随机变量概率分布的概念。

$$F(x) = P(u < x) \quad (2-3)$$

$F(x)$  称为概率分布函数,表示随机变量  $u$  值小于任意值  $x$  时的概率。

对于连续随机变量,可定义

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2-4)$$

$f(x)$  称为概率分布密度,因而,随机变量  $u$  出现在  $x$  与  $x+dx$  之间的概率为

$$P(x < u < x + dx) = f(x)dx$$

而随机变量不超过某值  $x$  的概率是

$$P(u < x) = F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx$$

概率分布函数或概率分布密度给出了随机变量最完整的描述,但在实用中,常采用一些数值特征来描述随机变量的特性。在概率论中常采用的特征数值是它的一阶原点矩与二阶中心矩——均值与方差,分布的一阶原点矩定义为

$$m = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$$

它代表了随机变量  $u$  的数学期望或称为均值。

分布的二阶中心矩的定义是

$$M = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m)^2 f(x)dx = \sigma^2$$