

# 无线电导航

# 原理及应用

Principles and Applications of Radio Navigation

吴 苗 朱 涛 李方能 许江宁 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 无线电导航原理及应用

吴 苗 朱 涛 李方能 许江宁 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书主要阐述了无线电导航的基本理论,系统定位误差理论,多种不同导航系统的工作原理、组成及信号设计与处理的关键技术和无线电导航系统的其他应用潜力。全书分为9章,第1章和第2章阐述了导航的基本概念和技术基础;第3章深入研究系统定位的一系列误差理论;第4章至第8章结合导航原理,有针对性地对直线、圆和双曲线等无线电导航系统的原理、相关技术及具体应用进行讲解;第9章介绍了组合导航系统的基本原理。

本书可以作为导航及导航相关专业本科的专业理论教材,也可以作为导航及导航相关专业的研究生的自学教材,以及从事导航专业的技术人员和技术管理人员的技术培训教材与工作参考书籍。

### 图书在版编目(CIP)数据

无线电导航原理及应用/吴苗等编著. —北京:国防工业出版社,2008. 12

ISBN 978-7-118-05935-9

I. 无... II. 吴... III. 无线电导航—研究 IV. TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 136291 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 12¼ 字数 285 千字

2008 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

随着无线电的发明,以及无线电导航技术的广泛应用,无线电导航已实现了向海、陆、空、天用户提供全天候连续、可靠、精确的位置、速度和时间等信息的功效。2004年,针对无线电导航系统杰出代表的GPS,美国提出了天基定位、导航和授时(PNT)的多功能、全方位服务体系。生活中,导航已无处不在,而很多人也习惯将GPS作为导航的代名词。但在实际过程中,GPS的形成是有很多渊源的,它是经历过无数系统的“进化”和“演变”而成的,并且就GPS自身而言也需要不断地完善、更新。因此,我们需要从根本上去全面分析和研究无线电导航的基本理论、相关技术以及系统演变、发展的全过程。这些重要的情况都促成了本书的编写。

本书主要阐述了无线电导航基本理论,系统定位误差理论,多种不同导航系统的工作原理、组成及信号设计与处理的关键技术和无线电导航系统的其他应用潜力。全书分为9章。第1章和第2章主要阐述了导航的基本概念和技术基础。通过该部分的学习,首先使读者建立导航及无线电导航的基本概念,在此基础上,着重介绍了无线电导航的基本需求、物理基础、一般过程、定位几何原理和系统技术指标。第3章对导航系统定位误差理论进行了详细的分析。本部分首先阐述误差及误差处理的基本概念,着重介绍由测量误差到位置线误差、再到定位误差传递的全过程,并最终形成了定位几何因子和工作区的重要概念。第4章至第8章全面研究了几类导航系统的基本原理及实际应用。本部分以导航的发展历史为索引,按照定位几何原理的分类分别讨论了直线无线电导航系统、圆无线电导航系统和双曲线无线电导航系统的一般特点、工作原理和关键技术,重点介绍双曲线无线电导航系统,并按测量电信号的不同参量分成脉冲、相位和脉冲—相位三种体制的系统分别阐述,并以代表性的系统作为典型应用实例进行介绍。第9章简要介绍了组合导航系统。

本书可以作为导航及导航相关专业本科的专业理论教材,也可以作为导航及导航相关专业的研究生的自学教材,以及从事导航专业的技术人员和技术管理人员的技术培训教材与工作参考书籍。

本书在编写过程中得到了海军工程大学导航工程系边少锋、周永余、卞鸿巍、胡柏青、刘睿等同志的帮助和支持,在此表示真诚感谢!

书中难免有不妥与错误之处,请读者指教。

编著者

2008年7月于武汉

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第1章 导航系统概述             | 1  |
| 1.1 导航的基本概述            | 1  |
| 1.1.1 导航的起源            | 1  |
| 1.1.2 导航的基本概念          | 1  |
| 1.1.3 导航的基本任务          | 1  |
| 1.2 导航的基本元素            | 2  |
| 1.2.1 航向               | 2  |
| 1.2.2 航迹               | 3  |
| 1.2.3 方位               | 3  |
| 1.2.4 航向角              | 3  |
| 1.2.5 真航向、真方位与航向角之间的关系 | 3  |
| 1.2.6 航速               | 4  |
| 1.3 导航的基本需求            | 5  |
| 1.3.1 航空导航需求           | 5  |
| 1.3.2 航海导航需求           | 6  |
| 1.3.3 陆地导航需求           | 7  |
| 1.3.4 航天导航应用           | 8  |
| 1.3.5 非导航应用需求          | 9  |
| 1.4 导航的分类              | 10 |
| 1.4.1 观测导航             | 10 |
| 1.4.2 天文导航             | 10 |
| 1.4.3 地磁导航             | 11 |
| 1.4.4 推算导航             | 12 |
| 1.4.5 无线电导航            | 12 |
| 1.4.6 激光导航             | 13 |
| 1.4.7 组合导航             | 14 |
| 1.5 无线电导航的发展历史         | 14 |
| 1.5.1 早期阶段             | 14 |
| 1.5.2 发展阶段             | 15 |
| 1.5.3 成熟阶段             | 15 |
| 1.5.4 未来发展趋势           | 16 |
| 第2章 无线电导航的定位原理与技术基础    | 17 |

|            |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------|
| 2.1        | 无线电导航的基本原理和分类         | 17        |
| 2.1.1      | 无线电导航的一般过程            | 17        |
| 2.1.2      | 无线电导航的物理基础            | 17        |
| 2.1.3      | 无线电导航的定位几何原理          | 18        |
| 2.1.4      | 无线电导航的分类              | 21        |
| 2.2        | 无线电导航系统的主要技术指标        | 22        |
| 2.3        | 无线电导航信号传播的一般知识        | 26        |
| 2.3.1      | 电波传播的基本概念             | 26        |
| 2.3.2      | 地面波传播                 | 28        |
| 2.3.3      | 天波传播                  | 29        |
| 2.3.4      | 视距传播                  | 30        |
| 2.3.5      | 波导模传播                 | 30        |
| 2.4        | 坐标系及其变换               | 31        |
| 2.4.1      | 地球的形体                 | 31        |
| 2.4.2      | 大地坐标系                 | 34        |
| 2.4.3      | 空间直角坐标系               | 35        |
| 2.4.4      | 空间直角坐标系与大地坐标系的关系      | 35        |
| <b>第3章</b> | <b>无线电导航系统的误差原理</b>   | <b>39</b> |
| 3.1        | 系统误差概述                | 39        |
| 3.2        | 无线电导航系统测量误差           | 39        |
| 3.2.1      | 无线电导航测量误差的基本概念        | 39        |
| 3.2.2      | 观测精度的评定标准             | 43        |
| 3.2.3      | 观测值函数的均方误差            | 44        |
| 3.3        | 位置线误差                 | 46        |
| 3.3.1      | 位置线的基本概念              | 46        |
| 3.3.2      | 位置线梯度                 | 47        |
| 3.3.3      | 无线电测向系统的位置线           | 48        |
| 3.3.4      | 无线电测距系统的位置线           | 49        |
| 3.3.5      | 无线电测距差系统的位置线          | 49        |
| 3.4        | 定位误差                  | 52        |
| 3.4.1      | 等概率误差椭圆               | 52        |
| 3.4.2      | 均方误差圆                 | 58        |
| 3.5        | 工作区                   | 61        |
| 3.5.1      | 无线电测向系统的工作区           | 62        |
| 3.5.2      | 无线电测距系统的工作区           | 63        |
| 3.5.3      | 无线电测距差系统的工作区          | 64        |
| 3.5.4      | 导航台配置情况对测距差导航系统工作区的影响 | 67        |
| 3.5.5      | 测距差导航系统的覆盖区           | 68        |
| <b>第4章</b> | <b>无线电测向导航系统</b>      | <b>69</b> |

|            |                  |           |
|------------|------------------|-----------|
| 4.1        | 测向定位方法           | 69        |
| 4.1.1      | 两台测向定位法          | 69        |
| 4.1.2      | 单台测向定位法          | 69        |
| 4.1.3      | 归航法              | 70        |
| 4.2        | 测定电波来向方法         | 71        |
| 4.2.1      | 天线的方向性           | 71        |
| 4.2.2      | 最小值测向法           | 74        |
| 4.2.3      | 最大值测向法           | 74        |
| 4.2.4      | 比较测向法            | 75        |
| 4.3        | 无线电测向仪           | 75        |
| 4.3.1      | 测角系统的组成          | 76        |
| 4.3.2      | 无线电测角器的测角原理      | 76        |
| 4.3.3      | 阴极射线管目测试无线电测向仪   | 78        |
| 4.4        | 无线电测向仪的测向误差      | 82        |
| 4.4.1      | 设备本身误差           | 82        |
| 4.4.2      | 电波传播误差           | 82        |
| 4.4.3      | 无线电自差            | 83        |
| <b>第5章</b> | <b>无线电测距导航系统</b> | <b>84</b> |
| 5.1        | 概述               | 84        |
| 5.2        | 无线电测距系统          | 84        |
| 5.2.1      | 系统特性             | 84        |
| 5.2.2      | 系统的构成与特点         | 86        |
| 5.3        | 频率测距导航系统——无线电高度表 | 88        |
| 5.3.1      | 系统特性             | 88        |
| 5.3.2      | 调频式高度表测距(测高)原理   | 88        |
| 5.4        | 相位测距系统定位系统——GPS  | 89        |
| 5.4.1      | 系统特点             | 89        |
| 5.4.2      | 系统组成             | 90        |
| 5.4.3      | 定位原理             | 91        |
| 5.4.4      | 信号格式             | 92        |
| 5.4.5      | 测量方法             | 93        |
| <b>第6章</b> | <b>脉冲测距差导航系统</b> | <b>95</b> |
| 6.1        | 概述               | 95        |
| 6.2        | 脉冲测距差定位原理        | 96        |
| 6.2.1      | 脉冲法测距差几何定位原理     | 96        |
| 6.2.2      | 发射台的配置           | 96        |
| 6.2.3      | 位置线双值性的消除        | 97        |
| 6.2.4      | 主、副台信号的识别        | 99        |
| 6.2.5      | 系统定位             | 100       |

|        |                                |     |
|--------|--------------------------------|-----|
| 6.3    | 系统信号格式与接收组成 .....              | 102 |
| 6.3.1  | 信号格式 .....                     | 102 |
| 6.3.2  | 接收组成 .....                     | 105 |
| 6.3.3  | 信号的接收部分 .....                  | 105 |
| 6.3.4  | 控制分机 .....                     | 107 |
| 6.3.5  | 分频分机 .....                     | 107 |
| 6.3.6  | 门控分机 .....                     | 108 |
| 6.3.7  | 计数 .....                       | 108 |
| 6.3.8  | 电源 .....                       | 108 |
| 6.3.9  | 扫描、显示与时差测量 .....               | 108 |
| 6.3.10 | 扫描同步 .....                     | 111 |
| 6.3.11 | 自动时差测量 .....                   | 111 |
| 第7章    | 相位测距差导航系统 .....                | 112 |
| 7.1    | 概述 .....                       | 112 |
| 7.2    | 相位测距差系统定位原理 .....              | 113 |
| 7.2.1  | 相位测距差原理 .....                  | 113 |
| 7.2.2  | 相位差测量系统中存在的问题 .....            | 114 |
| 7.2.3  | 信号同步 .....                     | 115 |
| 7.2.4  | 信号区分 .....                     | 115 |
| 7.2.5  | 多值性的消除 .....                   | 117 |
| 7.2.6  | 巷识别 .....                      | 118 |
| 7.3    | 按时间分割制工作的相位测距差系统——“长河”三号 ..... | 120 |
| 7.3.1  | 系统特点 .....                     | 120 |
| 7.3.2  | 定位原理 .....                     | 120 |
| 7.3.3  | 信号格式 .....                     | 122 |
| 7.4    | 按频率分割制工作的相位测距差系统——台卡系统 .....   | 123 |
| 7.4.1  | 系统特点 .....                     | 123 |
| 7.4.2  | 定位原理 .....                     | 123 |
| 7.4.3  | 信号格式 .....                     | 124 |
| 7.4.4  | 接收原理 .....                     | 125 |
| 7.5    | 奥米加导航系统 .....                  | 128 |
| 7.5.1  | 系统特点 .....                     | 128 |
| 7.5.2  | 奥米加电波传播原理 .....                | 129 |
| 7.5.3  | 信号格式 .....                     | 131 |
| 7.5.4  | 奥米加接收机 .....                   | 131 |
| 第8章    | 脉冲—相位测距差导航系统 .....             | 136 |
| 8.1    | 概述 .....                       | 136 |
| 8.2    | 脉冲—相位测距差系统定位原理 .....           | 136 |
| 8.2.1  | 脉冲—相位测距差原理 .....               | 136 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 8.2.2 消除多值性的必要条件 .....            | 138 |
| 8.3 电波传播对系统的影响 .....              | 138 |
| 8.3.1 工作频率的选择 .....               | 138 |
| 8.3.2 100kHz 地波传播特性对系统工作的影响 ..... | 139 |
| 8.3.3 100kHz 传播特性及其利用 .....       | 144 |
| 8.4 信号设计 .....                    | 146 |
| 8.4.1 信号设计原则 .....                | 146 |
| 8.4.2 单个脉冲波形设计分析及参数选择 .....       | 147 |
| 8.4.3 系统信号设计分析 .....              | 151 |
| 8.5 相位编码与相关检测 .....               | 153 |
| 8.5.1 相位编码 .....                  | 153 |
| 8.5.2 相关检测 .....                  | 154 |
| 8.5.3 多脉冲—相位互补码的基本概念 .....        | 157 |
| 8.5.4 国际常用码分析 .....               | 159 |
| 8.6 自动搜索 .....                    | 165 |
| 8.6.1 基本概念 .....                  | 165 |
| 8.6.2 信号检测问题 .....                | 166 |
| 8.6.3 采样脉冲的结构形式 .....             | 166 |
| 8.6.4 搜索方法 .....                  | 168 |
| 8.7 天波和地波识别 .....                 | 170 |
| 8.7.1 基本概念 .....                  | 170 |
| 8.7.2 天波、地波识别方法 .....             | 171 |
| 8.7.3 天波、地波识别的工作过程 .....          | 173 |
| 8.8 相位跟踪 .....                    | 174 |
| 8.9 周期识别 .....                    | 175 |
| 8.9.1 基本概念 .....                  | 175 |
| 8.9.2 射频采样法 .....                 | 175 |
| 8.9.3 包络识别法 .....                 | 178 |
| 8.10 “罗兰”C 系统 .....               | 179 |
| 8.10.1 系统的特点 .....                | 179 |
| 8.10.2 系统的组成 .....                | 180 |
| 8.10.3 “罗兰”C 接收机 .....            | 181 |
| <b>第9章 组合导航系统</b> .....           | 183 |
| 9.1 概述 .....                      | 183 |
| 9.1.1 问题的提出 .....                 | 183 |
| 9.1.2 组合导航系统的特点 .....             | 185 |
| 9.1.3 组合导航系统的组成 .....             | 186 |
| 9.2 组合导航系统的组成模式及发展现状 .....        | 186 |
| 9.2.1 组合导航系统的基本类型 .....           | 186 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 9.2.2 推算航行的导航方法 .....      | 187 |
| 9.2.3 组合导航系统的组合模式 .....    | 188 |
| 9.2.4 国内外组合导航系统的研究现状 ..... | 190 |
| 9.2.5 组合导航系统的最新发展动态 .....  | 190 |
| 参考文献 .....                 | 192 |

# 第 1 章 导航系统概述

## 1.1 导航的基本概述

### 1.1.1 导航的起源

自古以来,人们都在不经意间地使用着导航来完成一些行为。经考古发现,我们的祖先在 17000 年前的古石器时代就发明了利用天上的星星进行导航的手段,特别是利用北极星来确定方向。当时为了进行狩猎活动,人们利用了恒星进行导航,这就是早期的天文导航方法。根据传说,大约公元前 2600 年,黄帝部落与蚩尤部落进行逐鹿大战时,黄帝的军队使用了指南车来指引方向,在大风雨的恶劣天气情况下的战斗中占据了优势,因此,取得了战争的最后胜利。在随后的历史发展中,人们一直都在不断地探索导航的技术,其用途也逐步延伸和扩散到了我们身边的各个领域。

随着科学技术的发展,现在的导航已发展成为一门专门研究导航原理方法和导航技术装置的学科。在舰船、飞机、导弹和宇宙飞行器等航行体上,导航系统已成为一种必不可少的重要设备。

### 1.1.2 导航的基本概念

导航的基本含义是引导运动物体航行。导航的基本目的就是利用有效的方法、以规定的精度、按预定的航线将运动体(舰船、飞机、宇宙飞船、地面车辆以及飞行武器等)安全、经济、快速地引导至目的地。

因此,导航的定义可以简要地归结为:引导运动体(也称运载体或航行体)按既定航线航行的过程。

### 1.1.3 导航的基本任务

为了实现导航的目的,必须完成下述几项任务:

- (1) 确定运动体当前所处的位置及其航行参数;
- (2) 引导运动体按规定航道航行;
- (3) 引导运动体安全着陆或进港;
- (4) 引导运动体接近目标。

上述各项任务中,第一项是导航技术最需根本解决的问题,它是完成其他各项无线电导航任务的基础,也是导航中解决问题的关键所在。若在航行中可以连续地获得确切的位置,则通过微型计算机就可以计算出航向、航速、偏航情况以及到达前方目标点所需时间等航行参数。

完成全部或部分导航任务的技术装置的组合,称为导航系统。在导航和定位学中所

涉及的导航与定位所采用的方法,就本质而言,两者基本相同;所采用的技术装置,有些也是相同的,因此,按传统的观点,导航系统从某种意义上讲也可以称为定位系统。

随着导航技术的不断发展,其应用领域也不断扩大,如引导飞机和舰船、飞船和运载火箭等沿预先指定的航线航行;引导飞机、飞船等起飞和着陆;引导舰船通过窄航道和进出港湾以及停靠码头;引导车辆和人员等在丛林、沙漠、雪地等特殊环境中行进;为提高飞机和舰船的航行安全和效率,对其活动进行调度,实施交通管制,以防发生碰撞。另外,在军事上还配合完成武器投射、侦察、巡逻、反潜、扫布雷、航道疏通、空中集合与编队、援救等任务;在国民经济中,由于导航具有高精度定位的能力,它还配合完成石油勘探、海上捕鱼、海洋调查、海道测量、海底电缆敷设、陆上探矿、大地测量、航空测绘以及气象探测等任务。

可见,现代导航对导航仪器或设备提出了更高的要求。现代导航仪器的用途不再是简单地保证运动体的航行安全,而且还要能够提供运动体的多达七维的导航信息,如运动体航行速度、航向、水深信息、航行姿态(纵摇、横摇)、航行时间及位置信息(经度、纬度)等。

## 1.2 导航的基本元素

导航元素是与运动体的引导和定位有关的最基本数据(或参数)。较重要的这类元素包括航向、航迹、方位、航向角和航速等。

### 1.2.1 航向

#### 1. 常用航向

运动体重心的子午线北向与其纵轴向之间顺时针方向的夹角称为真航向(True Course, TC)。真航向在水平面上的投影称为航向。由于地球的复杂形状及磁场等问题,航向可以从地理子午线、磁子午线、罗经(盘)子午线和陀螺子午线起算,相应地,可以有真航向、磁航向(Magnetic Course, MC)、罗航向(Compass Course, CC)和陀螺航向(Gyrocompass Course, GC)。它们分别是航向线与真北 $N_T$ 、磁北 $N_M$ 、罗北 $N_C$ 和陀螺北 $N_G$ 方向之间的夹角,如图1-1所示。航向的度量方法是从各自的北开始,顺时针由 $0^\circ \sim 360^\circ$ 量到航向线。航向一般用3位数来表示,如 $002^\circ$ 、 $095^\circ$ 等。

#### 2. 航向间的换算

由图1-1可直接得到如下几个关系式:

(1) 真航向(TC) = 磁航向(MC) + 磁差( $V_{ar}$ ) = 罗航向(CC) + 罗经差( $\Delta C$ ) = 陀螺航向(GC) + 陀螺差( $\Delta G$ );

(2) 磁航向(MC) = 真航向(TC) - 磁差( $V_{ar}$ ) = 罗航向(CC) + 自差( $D_{ev}$ );

(3) 罗航向(CC) = 真航向(TC) - 罗经差( $\Delta C$ ) = 磁航向(MC) - 自差( $D_{ev}$ );

(4) 陀螺航向(GC) = 真航向(TC) - 陀螺差( $\Delta G$ )。

在实际航行中,通常是由已知TC求CC,因此,可用磁航向代替罗航向查表求自差,再通过计算求罗航向。由于在正常时磁航向与罗航向之差不会大于 $3^\circ$ ,经内插求自差后,差值很小,因此用磁航向代替罗航向查表所求得自差值是能够满足航行需要的。

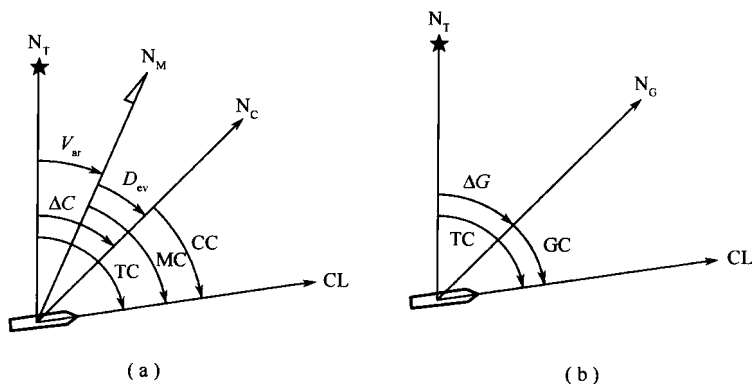


图 1-1 航向及其关系示意

### 1.2.2 航迹

运动体重心在空间运动时的理想轨迹称为航迹。航迹在地面上的投影称为航线。对舰船而言航迹即是航线。

舰船沿地面两点间最短圆弧线航行时的航线称为大圆航线。

航行中保持航向不变的航线称为恒向航线,它与所有的子午线(经线)交角相等,故又称为等角航线。

大圆航线距离最短,由于在航行过程中,航向在不停地变化,所以没有恒向航线操作方便。航海中较近距离采用恒向航线,航程远时,将大圆航线分为若干段,每段沿一条恒向航线航行,这样既做到尽可能地缩短航行距离,又可以提高操作性。

### 1.2.3 方位

#### 1. 方位线(Bearing Line, BL)

在测者真地平上,测者与物标的连线称为物标方位线。

#### 2. 方位(Bearing, B)

运动体重心子午线北向与向着指定目标方向(方位线)间夹角的水平投影称为相对于运动体的目标方位。由于基准方向的不同,方位又分为真方位(True Bearing, TB)、磁方位(Magnetic Bearing, MB)、罗方位(Compass Bearing, CB)和陀螺方位(Gyrocompass Bearing, GB),它们分别是物标方位线与真北、磁北、罗北和陀螺北之间的夹角(图 1-2)。方位的度量方法是从各自的北开始,顺时针旋转  $0^\circ \sim 360^\circ$  量到方位线。

### 1.2.4 航向角

运动体纵轴与向着目标方向射线(方位线)之间的顺时针夹角的水平投影称为航向角( $Q$ )。对于舰船又称舷角。

### 1.2.5 真航向、真方位与航向角之间的关系

真航向、真方位与航向角之间的关系如图 1-3 所示,可得下式:

$$\text{真方位(TB)} = \text{真航向(TC)} + \text{航向角}(Q)$$

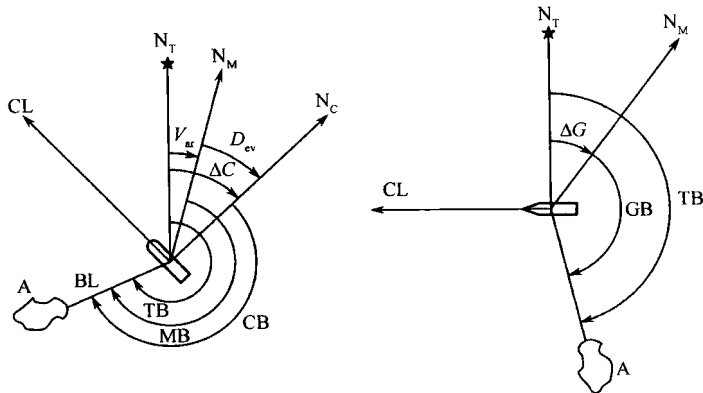


图 1-2 方位及其关系示意

或

$$\text{真方位(TB)} = \text{真航向(TC)} \pm \text{舷角(Q)} \quad (1-1)$$

在运算中,当被减数小于减数,则在被减数中加上  $360^\circ$ ;当相加结果大于  $360^\circ$  时,则减去  $360^\circ$ ,对结果并无影响。

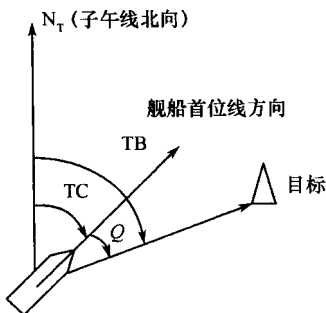


图 1-3 航向、方位和航向角之间的关系

例:某运动体  $TC = 230^\circ$ ,测得两物标的舷角  $Q_A = 68^\circ$ ,  $Q_B = 300^\circ$ ,求物标的 TB。

解:  $TB_A = TC + Q_A = 230^\circ + 68^\circ = 298^\circ$

$TB_B = TC + Q_B = 230^\circ + 300^\circ = 530^\circ$

因为  $TB_B = 530^\circ > 360^\circ$

所以  $TB_B = 530^\circ - 360^\circ = 170^\circ$

### 1.2.6 航速

运动体在航行时,实际上存在三种速度。下面以海上运动体为例进行介绍。

(1) 流速( $v_e$ ):海水对海底的运动速度矢量。方向:海水的流向。

(2) 对水速度  $v$ :海上运动体相对于海水的航行速度。其中舰船在无风无流的静水中的航行速度称为船速。新建或坞修后的舰船都要在船速校验线上进行船速的实际测定;舰船在航行中使用相对计程仪测定的舰船相对于海水的速度称为计程仪航速  $V_L$ 。计程仪能够测出有风影响下舰船相对于水的速度。通常所说的航速是指舰船相对于水的速度。

(3)对地速度  $v_G$ :海上运动体在风、流和波浪的影响下相对于海底的航行速度,又称实际航速。在航迹推算中,习惯上又把该速度作为推算航速或计划航速。

海上运动体在航行时,航速矢量加上水的流速矢量等于实际航速矢量(流中速度)。

WB 为航迹(航向),由三个速度矢量构成的三角形叫做速度三角形,如图 1-4 所示。由图 1-4 可知:

$$v_e + v = v_G \quad (1-2)$$

可见,航行中,知道了其中的两个量可以解算出第三个量,用于导航。

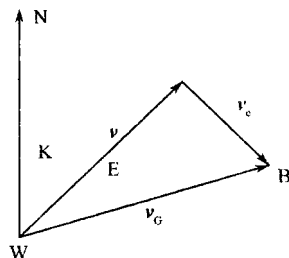


图 1-4 速度矢量三角形

## 1.3 导航的基本需求

无线电导航系统可以给用户提供一个安全、经济、信息可靠、连续、支持多用户的全方位导航需求。用户的需求领域主要包括航空导航、航海导航、陆地导航、航天应用和非导航应用等。

### 1.3.1 航空导航需求

航空导航是引导飞行体航行的过程,其主要任务是在不受时间、天气、地域和异常的情况下,为飞行体提供连续、安全、可靠和可用的位置、航线和距离的确定以及偏离预期航线的偏移量的测定。

对于一个飞行体,其在空中的航行要经历不同飞行阶段、不同地域,以及与其他飞行体和航空的交通管制等各个过程,在这些过程中,都分别对航空导航的性能提出了不同的需求。

航空导航通常分两个基本阶段:巡航/终止和进场/着陆。

#### 1. 巡航/终止阶段

巡航/终止阶段包含除进场/着陆阶段之外飞行的所有部分。根据不同的地理区域和运行环境,它又包含以下四个分阶段:

(1)海洋巡航:覆盖了海洋区域的运行,以低交通密度和没有独立的监视范围为特征。

(2)国内巡航:运行以高交通密度为特征。和海洋巡航分阶段航线相比航线宽度要求很窄,有独立的监视系统以便地面人员监视飞机的位置。

(3)终止区域:运行以高的交通密度、航线汇合、高度转换为典型特征。航线宽度较窄,有独立的监视系统以便于地面人员监视飞机的位置。

(4)远程区域:是特殊的以低交通量为特征的地理或环境的区域,以及那些很难实现低费用综合无线电导航覆盖的地域。典型的远程区域有多山的地域和远海区域。

#### 2. 进场/着陆阶段

进场/着陆阶段是飞机接触地面前面的一个飞行阶段。它通常在离跑道 20n mile 范围内。可以分成两个阶段:非精密进场和精密进场与着陆。

- (1)非精密进场:给着陆飞机提供水平位置信息(二维进场);
- (2)精密进场与着陆:给着陆飞机提供垂直和水平引导及位置信息(三维进场)。
- 航空导航需求指标如表 1-1 所列。

表 1-1 航空导航需求指标

| 运行阶段         | 精度(2σ)             | 可靠性     | 告警误差                |
|--------------|--------------------|---------|---------------------|
| 海洋巡航         | 4.0nm              | 99.999% | 4.0nm               |
| 国内巡航         | 2.0nm              | 99.999% | 2.0nm               |
| 终止区域         | 0.4nm              | 99.999% | 1.0nm               |
| 非精密进场        | 100m               | 99.999% | 0.3nm               |
| 精密进场 CAT I   | 18.2m (H)、7.6m (V) | 99.9%   | 40m (H)、10m~15m (V) |
| 精密进场 CAT II  | 6.5m (H)、2.0m (V)  | 99.9%   | 17.3m (H)、5.3m (V)  |
| 精密进场 CAT III | 6.2m (H)、2.0m (V)  | 99.9%   | 15.5m (H)、5.3m (V)  |

### 1.3.2 航海导航需求

航海导航是引导海上运动体航行的过程。航海导航的需求主要取决于舰船的类型和大小、舰船所从事的活动(如点对点运输,捕鱼)以及它所运行中的地理区域(如远海、近海)等多方面的因素。

通常情况下,航海导航由四个主要阶段组成:内陆航路导航、港口进出港导航、沿海导航和海洋导航。可以围绕这四个阶段开发用于导航安全和合理的经济效益的标准或需求。

#### 1. 内陆航路导航

与港口入口与进港导航类似,内陆航路导航被规定在受限区域。然而,对内陆航路导航情况,主要集中在非远洋船舶和它们在受限水路内的远距离航行的需求之上。

在一些区域,处于导航的港口阶段的远洋船舶和处于内陆航路导航阶段的内陆船舶共享使用相同的受限制的航路。两个阶段的区别基本上取决于船舶的类型。因为远洋船舶和典型的内陆商业用的船舶在物理特性、人员和设备方面是有区别的,这些差别会对它们的导航需求具有很重要的影响。娱乐性的船舶和其他相对较小的船舶在远洋和内陆商业交通所使用的水域有较大的数量,通常这两类船舶都没有严格的需求。

#### 2. 港口进出港导航

港口进出港导航适用于比沿海阶段更内陆的水域。对于一艘从沿海来的船舶,其港口进港阶段通常开始于一个过渡区域,这个区域位于相对来说未受限的水域(在这里可以使用沿海导航需求)和窄窄地受限的进港和/或处于一个海湾、河流或港口入口的水域(在这里导航仪进行导航的港口阶段)两者之间。通常,港口入口需要为一个明确的通道导航,这个通道在航海的末端,如果为大型船舶所使用,典型宽度为 180m~600m,但也可以在进港内陆的地方窄至 120m。为小型船舶所用的通道可以窄至 30m。

从为导航安全和提高经济效益而建立标准或需求的角度来看,港口入口和进港具有一些通用的共性。在每种情形下,航路的特性、船舶的物理特性、船舶位置的不断调整以避免碰撞的要求和濒临搁浅危险的边缘提出了比沿海阶段更严格的精度和实时引导信息

需求。

因此,港口入口和进港阶段是围绕大型远洋船在过渡区和目的锚地之间的狭窄通道内的精确导航问题而被建立的。

### 3. 沿海导航

在沿海导航阶段,船舶处在接近陆地或群岛的水域,在这里越洋交通图案趋向于向进港目的区域汇聚;在这里,存在港口间交通,其图案本质上是与海岸线平行的;短途船舶通常限制它们的运行。在该阶段,必须考虑交通路径选择系统和在大陆架上的科学或工业活动。

沿海和海洋导航的界线由下面的距陆地最远的项所定义:

- (1) 离陆地 50n mile;
- (2) 海边浅滩外侧极限,或者大陆架其他危险区;
- (3) 其他海域,在那里交通分离规划是既定的,已制定比远海导航安全需求更严格的导航精度需求。

### 4. 海洋导航

在海洋导航阶段,船舶位于大陆架(200m 深)之外,离海岸 50n mile,已不能以看得见的陆地为参考或以固定的或浮动的导航协助物来确定位置。海洋导航远离陆地物质,这样搁浅和碰撞的危险已很小。

因此,根据航海的不同阶段提出的精度要求,表 1-2 给出了满足不同航海用户需求或获得特殊收益所需的系统性能。

表 1-2 航海导航需求指标

| 运行阶段    | 精度( $2\sigma$ ) | 可靠性   | 告警误差 |
|---------|-----------------|-------|------|
| 内陆航路导航  | 5m ~ 20m        | 99.9% | 25m  |
| 港口进出港导航 | 8m ~ 20m        | 99.7% | 25m  |
| 沿海导航    | 460m            | 99.0% |      |
| 海洋导航    | 2nm ~ 4nm       | 99.0% |      |

## 1.3.3 陆地导航需求

与航空和航海用户相比,陆地导航阶段的定义并不十分明确。陆地导航的应用可分三类:公路、运输和铁路应用。

### 1. 陆地运输的分类

#### 1) 公路

无线电导航技术在公路应用中是自治性的,或是与车辆、道路通信和地形匹配技术相结合来提供用户不同的服务。这些是用于集成 ITS 系统的公共区运行性测试的,而无线电导航是该系统的一部分。在今天的市场上,已有许多消费产品和用于大众的产品。这些系统以很快的速度在配置,用于紧急事件服务的车辆定位系统、救难信号服务的提供、私人汽车的路径导航、商业车辆的跟踪和行程安排等。开发的系统实例还包括通过无线通信提供 DGPS 修正信号来增强 GPS 车辆定位系统数据等。