



卫星导航

P 原理与系统

principle and system
of satellite navigation

皮亦鸣 曹宗杰 闵 锐 编著

卫星导航

原理与系统

P

principle and system
of satellite navigation

皮亦鸣 曹宗林 闵锐 编著

常州大学图书馆
藏书章



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航原理与系统 / 皮亦鸣编著. —成都: 电子科技大学出版社, 2011.5

ISBN 978-7-5647-0808-5

I. ①卫… II. ①皮… III. ①卫星导航 IV.

①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 060441 号

内容简介

卫星导航是一项多学科交叉的新兴技术,已被广泛应用于交通、测绘、航空、航天、航海等领域,在国民经济和国防安全中发挥了重要作用。

本书根据卫星导航领域的基本理论和最新技术成果编写,在介绍卫星导航基本原理的基础上,侧重于导航信号接收系统与信号处理方法的介绍。全书共分为八章,第一章为绪论,介绍了卫星导航的基本概念和全球几大卫星导航系统的概况;第二章至第五章介绍了卫星导航基本理论知识,包括坐标系与时间系统、卫星星历、GPS 卫星信号、GPS 定位方法;第六章至第七章重点介绍了卫星导航信号接收系统与信号处理方法;第八章结合目前最新科研成果介绍了卫星导航系统的应用及前沿技术。

本书可以作为通信、雷达、导航等专业学生学习课程“遥测遥控技术”的教材,也可以作为导航专业技术人员的参考书。

卫星导航原理与系统

皮亦鸣 曹宗杰 闵 锐 编著

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 谢晓辉
责任编辑: 谢晓辉
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 12.25 字数 320 千字
版 次: 2011 年 5 月第一版
印 次: 2011 年 5 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-0808-5
定 价: 32.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

序 言

随着我国国民经济和国防技术的发展,卫星导航技术在交通、测绘、航天、航空、航海等领域的需求日益强烈,技术发展十分迅速。为了满足相关专业高年级本科生、研究生及广大科研人员对这一新兴交叉学科领域知识的迫切需求,从2002年起,电子科技大学电子信息工程专业面向本科生和硕士研究生开设了“导航原理”和“遥测遥控技术”课程。在2002年至2009年的课程中,结合卫星导航系统的科学研究和教学经验编写了相关讲义,在教学中发挥了良好作用。

《卫星导航原理与系统》是在对多年课程讲义的整理、归纳、总结基础上编写而成的,可以作为通信、雷达、导航等专业课程“遥测遥控技术”教材,能够帮助学生迅速掌握导航领域的基础知识,了解导航技术发展趋势与先进成果,也可以作为导航或相关专业人员的技术参考书。

本教材共分八章,包括:绪论、空间坐标与时间系统、卫星运动与星历、导航卫星信号、卫星定位计算、卫星定位接收机、卫星信号的捕获与跟踪、卫星导航系统的应用等。内容涵盖整个卫星导航定位技术领域,跟踪国内外导航定位技术领域最新科学研究方向,能够反映当前导航定位技术领域的最新知识和最新成就。

本教材依据电子信息工程专业的本科生培养需要,遵循培养方案和教学大纲的基本要求,吸收国内外同类教材的优秀成果,既有深入的理论分析,也有浅显的物理概念和基本原理,重点突出,概念清楚,易于学习。同时该教材可以推广应用于通信、导航等学科。

本教材力求兼顾理论性、实用性、系统性和方向性,密切结合当前电子信息工程专业教学和导航、通信领域技术人员的需要,特别强调与工程背景和科学研究的紧密结合,有助于读者快速掌握导航定位的基本理论,达到较高的技术水平。

本教材主编为皮亦鸣,完成了全书大纲的制定及第一章的编写,曹宗杰完成了第六章、第七章、第八章内容的编写,闵锐完成了第二章、第三章、第四章、第五章内容的编写。

本教材的出版得到了电子科技大学电子信息工程专业课程建设项目的资助,在编写过程中,得到了电子科技大学电子工程学院的大力支持,吕明副教授、何子述教授、钟洪声教授给予了关心和指导。博士生黄鹏达、硕士生王本君、胡雅婷、刘玉景、赵建华、郑家良、郑超、袁慧、王璇、廖家祥等同学完成了本书的资料整理、绘图、校对工作。在此表示衷心感谢。

本书涉及内容广泛,加之作者水平有限,书中错误疏漏在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2010年12月于成都

电子邮件: ympi@uestc.edu.cn

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 导航的基本概念.....	1
1.1.1 导航实例.....	1
1.1.2 导航的功能.....	4
1.1.3 导航的应用.....	4
1.2 导航的分类及技术指标.....	5
1.2.1 导航的分类.....	5
1.2.2 导航系统的技术指标.....	7
1.3 无线电导航定位.....	9
1.3.1 电磁波.....	9
1.3.2 无线电导航定位方法.....	17
1.4 GPS 的特点、组成与应用.....	21
1.4.1 导航的发展.....	21
1.4.2 GPS 的概念及其发展.....	22
1.4.3 GPS 的组成.....	23
1.4.4 GPS 的特点.....	25
1.4.5 GPS 的应用.....	25
1.5 北斗卫星导航系统和其他导航卫星系统.....	26
1.5.1 GLONASS 系统.....	26
1.5.2 Galileo 系统.....	27
1.5.3 北斗卫星导航定位系统.....	28
第二章 空间坐标与时间系统.....	33
2.1 地球的运动.....	33
2.1.1 地球自转.....	34
2.1.2 地球公转.....	35
2.1.3 地球自转角速度和线速度.....	36
2.1.4 地球公转特性.....	36
2.1.5 地球自转的意义.....	38
2.1.6 地球公转的意义.....	38
2.2 坐标系统.....	40
2.2.1 坐标系统的定义与分类.....	40
2.2.2 天球坐标系.....	41

2.2.3 地球坐标系	45
2.2.4 GPS 坐标系统	49
2.3 时间系统	53
2.3.1 时间的基本概念	53
2.3.2 世界时系统	53
2.3.3 原子时系统	54
第三章 卫星的运动与星历	57
3.1 开普勒三定律	57
3.1.1 开普勒第一定律	58
3.1.2 开普勒第二定律	59
3.1.3 开普勒第三定律	60
3.2 卫星运动的轨道参数	61
3.3 二体问题	62
3.3.1 卫星的无摄运动和受摄运动	62
3.3.2 二体问题	63
3.4 卫星的位置和速度计算	72
3.4.1 卫星位置的计算	72
3.4.2 卫星运行速度的计算	74
3.5 GPS 卫星星历	76
3.5.1 GPS 卫星的广播星历	76
3.5.2 GPS 卫星的精密星历	79
3.5.3 由广播星历计算 GPS 卫星坐标	84
3.5.4 由精密星历计算 GPS 卫星坐标	86
第四章 导航卫星信号	87
4.1 GPS 卫星的测距码	87
4.1.1 随机码与伪随机码	87
4.1.2 C/A 码	89
4.1.3 P 码	90
4.2 GPS 导航电文	91
4.3 载波信号	93
4.3.1 GPS 卫星的载波信号	93
4.3.2 GPS 卫星信号的调制	94
4.3.3 GPS 卫星信号的解调	95
4.4 GPS 卫星的信号强度与覆盖	96
4.4.1 GPS 卫星的信号强度	96
4.4.2 GPS 卫星对地面的覆盖	97

第五章 GPS 定位计算	100
5.1 GPS 定位类型	100
5.1.1 静态定位	101
5.1.2 动态定位	101
5.1.3 绝对定位	102
5.1.4 相对定位	102
5.1.5 差分定位	103
5.2 伪距法测量	104
5.2.1 伪距的概念	104
5.2.2 伪距测量	104
5.3 伪距观测方程及定位计算	105
5.3.1 伪距观测方程的建立	105
5.3.2 定位计算	106
5.4 GPS 载波相位测量	110
5.4.1 载波相位测量原理	111
5.4.2 载波相位观测方程	111
5.4.3 载波相位观测的主要问题	112
5.5 观测卫星的精度	112
5.5.1 GPS 测量误差	112
5.5.2 精度因子	113
5.5.3 卫星的几何分布	115
5.6 GPS 相对定位	115
5.6.1 静态相对定位	116
5.6.2 动态相对定位	116
5.7 差分 GPS	116
5.7.1 差分 GPS 的原理	116
5.7.2 差分 GPS 的分类	117
5.7.3 位置差分	117
5.7.4 距离差分	118
5.7.5 载波相位差分	119
第六章 卫星定位接收机	120
6.1 GPS 接收机的功能及分类	120
6.1.1 GPS 接收机的组成与功能	120
6.1.2 GPS 接收机的分类	122
6.1.3 GPS 接收机的主要技术指标	124
6.2 GPS 接收机的天线	125
6.2.1 GPS 接收机天线简介	125

6.2.2 微带天线	126
6.3 GPS 接收机的前端	129
6.3.1 GPS 接收机射频前端系统结构	129
6.3.2 GPS 接收机射频前端集成芯片简介	133
6.4 GPS 接收机的信号采集	137
6.4.1 模拟正交解调	137
6.4.2 数字正交解调	138
第七章 GPS 信号的捕获与跟踪	141
7.1 GPS 软件接收机	141
7.2 GPS 信号的捕获	143
7.2.1 GPS 信号捕获原理	143
7.2.2 捕获关键参数分析	145
7.3 捕获方法	148
7.3.1 串行搜索捕获算法	148
7.3.2 FFT 频域捕获算法	149
7.3.3 基于循环相关的快速捕获算法	150
7.3.4 捕获算法性能对比	153
7.4 GPS 信号的跟踪	154
7.5 载波跟踪环	159
7.6 码跟踪环	161
7.7 GPS 接收机中的跟踪环	164
第八章 卫星导航系统的应用与前沿技术	168
8.1 GIS 技术	168
8.2 基于 GPS 和 GSM 的无线定位系统	172
8.3 气压高度表增强 GPS 的组合导航系统	175
8.4 高灵敏度 GPS 接收机	178
8.5 物联网、GPS 与智能交通	182
参考文献	186

第一章 绪 论

1.1 导航的基本概念

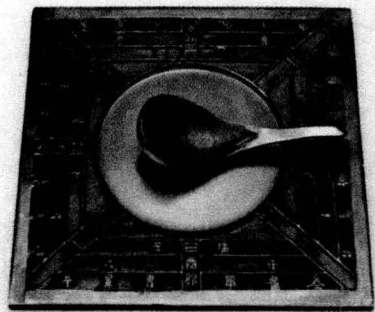
导航是一个技术门类的总称,它是引导飞机、船舶、车辆以及个人(总称为运载体)安全、准确地沿着选定的路线,准时到达目的地的一种手段。因此导航的基本功能是回答“我现在在哪里?我要去哪里?如何去?”这类基本定位和引导问题。

1.1.1 导航实例

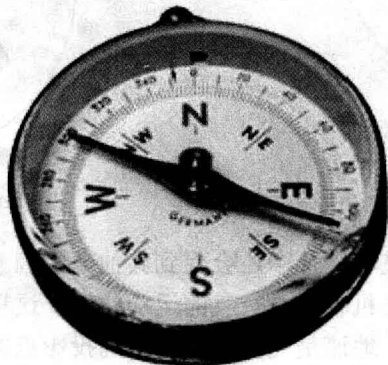
1. 指南针导航

导航是一门古老的学科。中国很早就发明了利用地球磁场指明方向的工具——司南。司南大约出现在战国时期,它是用天然磁石制成的,样子像一把汤勺,圆底,可以放在平滑的“地盘”上并保持平衡,且可以自由旋转。当它静止的时候,勺柄就会指向南方。古人称它为“司南”,当时的著作《韩非子》中就有:“先王立司南以端朝夕。”“端朝夕”就是正四方、定方位的意思。《鬼谷子》中记载了司南的应用,郑国人采玉时就带了司南以确保不迷失方向。

司南是指南针的始祖。指南针发明于北宋时期,其主要组成部分是一根装在轴上可以自由转动的磁针。磁针在地磁场作用下能保持在磁子午线的切线方向上,磁针的北极指向地理的南极。沈括在《梦溪笔谈》中谈到指南针不全指南,常微偏东,指出了磁偏角的存在。磁偏角和磁倾角的发现使指南针的指向更加准确。指南针一经发明很快就被应用到军事、生产、日常生活、地形测量等方面,特别是航海上。成书年代略晚于《梦溪笔谈》的《萍洲可谈》中记有:“舟师识地理,夜则观星,昼则观日,阴晦则观指南针。”这是世界航海史上最早使用指南针的记载。南宋时期,人们根据指南针的原理又研制出了罗盘,使罗盘上的指针永远指向某一特定的方向,后来广泛用于航海中。司南、指南针导航如图 1-1 所示。



司南



指南针

图 1-1 指南针导航

随着科学的进步,电子指南针将替代传统的针式指南针或罗盘指南针。因为电子指南针全部采用固态的元件,可以简单地和其他电子系统接口。

2. 地图导航

在日常生活中,我们从某地出发使用地图到达另一地点(如商场)实际上就是一种导航。可以通过两种方式实现:步行、公交车。

步行:用眼睛以及积累的常识,根据地图和路标找到自己所在的位置以及目的地,寻找一条路线,沿着该路线最终到达目的地。

公交车:根据地图及所处位置公交站牌,找到需要乘坐的线路和换乘站点以及到站站点,最终到达目的地。

其实它们都是很简单的导航,对导航精度要求不高。

3. 出租车导航

如果手上没有地图,又不知道如何到达目的地,这时乘坐出租车是另一种导航方式。我们只需要告诉司机要去哪里,司机就会带领我们到达目的地。出租车上的里程表显示了两地之间的距离,计价器可以反映出租车行驶的时间,从而可以得到速度参量。

4. 飞机导航

如果两地距离较远,飞机导航是另一种方式。这种方式较前面几种要复杂一些,要求的精度也更高。同样的,需要首先确定所在地与目的地,然后选择航线、确定距离并安排时间表。导航任务就是:使飞机遵照事先安排的时间表,沿着所选定的航线,在某一方向上(航向)以一定的速度飞行。

由飞机所在位置的经线北端顺时针旋转到航向线的角度称为航向角,用符号 HX 来表示。如图 1-2 所示。

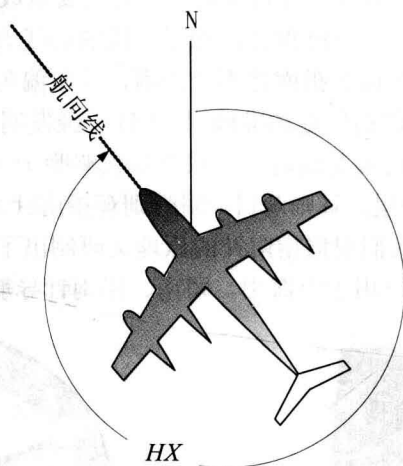


图 1-2 航向角示意图

飞机飞行中还会受到其他一些因素的影响:空速、风速、地速等。所谓空速是指发动机推动飞机相对于空气的运动速度,这里用符号 V 来表示;风速是指空气流动速度,用 U 来表示;地速是飞机在地面上的投影点的移动速度,用 W 来表示。

在无侧风即风速方向与飞行方向相同(或相反)时,飞机飞行路线示意图如图 1-3 所示,此时地速方向与机头朝向一致。

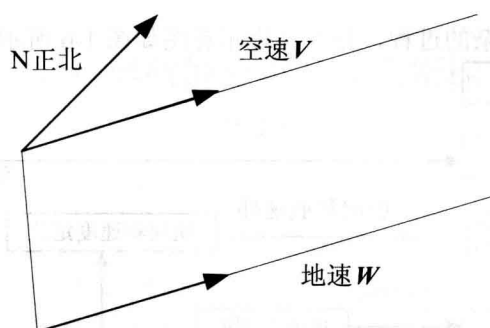


图 1-3 无侧风时飞机飞行路线示意图

然而在实际情况下，侧风通常是存在的。有侧风时，情况要复杂一些，飞机飞行路线示意图如图 1-4 所示（其中航迹角是指从经线北端顺时针量到航迹去向的角度，用符号 HJ 表示；偏流角指航向线与航迹线之间的夹角，用 PL 表示）。

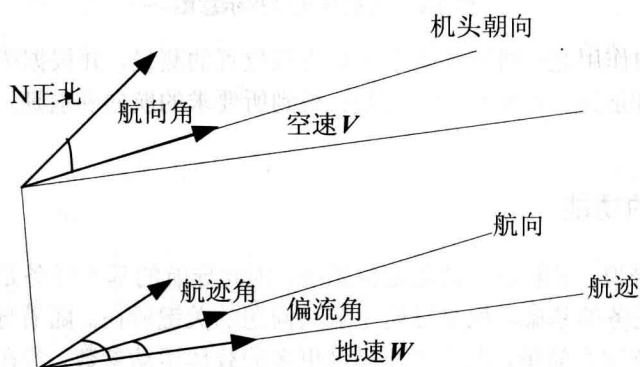


图 1-4 有侧风时飞机飞行路线示意图

风速、地速、空速之间的关系以及航迹角、偏流角、航向角之间的关系如图 1-5 所示。其中航迹角是指从经线北端顺时针量到航迹去向的角度，用符号 HJ 表示；偏流角指航向线与航迹线之间的，用 PL 表示。它们分别满足下面的三角形关系：

$$W = V + U \quad (1-1)$$

$$HJ = HX + PL$$

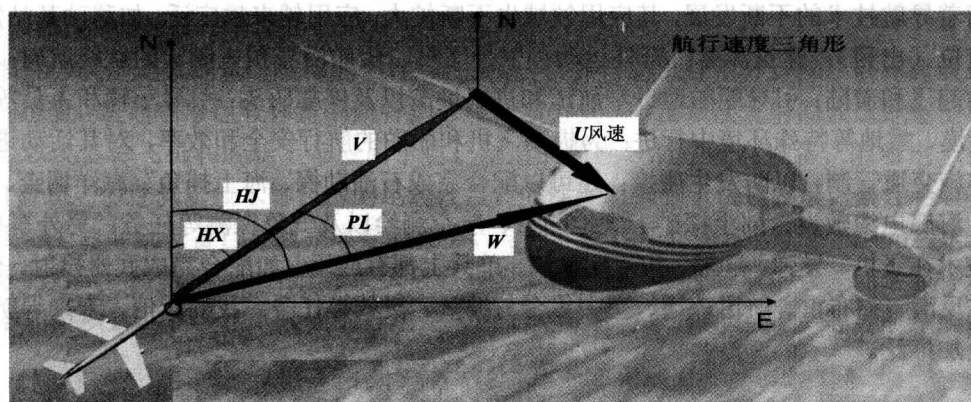
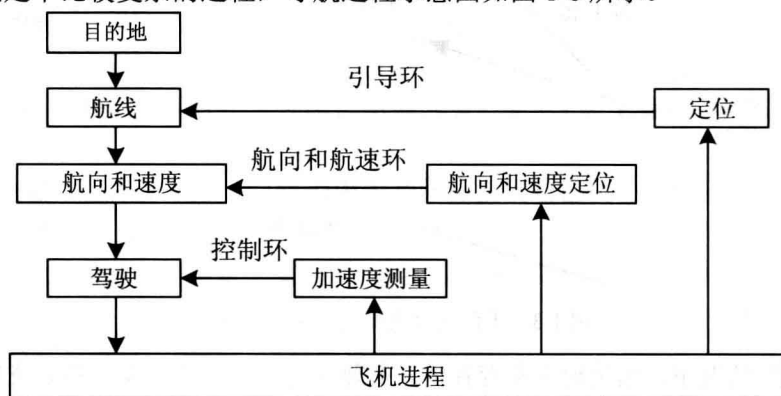


图 1-5 航行速度三角形

飞机导航是个比较复杂的过程，导航过程示意图如图 1-6 所示。



驾驶：飞机飞行加速度的控制

图 1-6 飞机导航过程示意图

图中，引导环的作用是：通过导航系统对飞机位置的测量，并根据所规定的航线来确定飞机进程中的航向和航速；控制环的作用是：得到所要求的航向和航速；航向和航速环是导航过程中的纽带。

1.1.2 导航的功能

按传统的观点来说，导航系统就是定位系统。因此导航的基本任务是提供实时的位置信息，这是完成导航任务的基础，也是导航中解决问题的关键所在。随着导航技术的发展，现代导航不单单是定位这么简单，而且需要提供更多的载体运动参数。若在航行中可以连续地获得确切的位置，则可以通过微型计算机计算出航向、航速、偏航情况以及到达前方目标点所需时间等航行参数，这些是现代导航所要完成的任务。我们对于导航的研究就是要研究导航参量的测量和运用；导航的实践，就是运用导航参量来保证载体安全而有效地航行。另外，随着导航技术的发展，对导航的准确性、安全性和有效性等要求也越来越高。

1.1.3 导航的应用

随着导航技术的不断发展，其应用领域也不断扩大，应用越来越广泛，如移动基站定时；车辆定位（出租）；建筑测量；野外运动；引导飞机、船舶沿着预先制定的航线航向；引导飞机的起飞和着陆；引导船舶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；为提高飞机和船舶的航行安全和效率，对其活动进行调度，实施交通管制，以防发生碰撞；还可以配合完成石油勘探、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。另外军事中，导航技术在飞机、导弹、舰船、坦克、车辆、单兵上都有应用，如配合完成武器投射、侦查、巡逻、反潜、扫布雷、航道疏通、空中集合与编队、援救等任务。我们相信，未来导航的应用会更加广泛。

1.2 导航的分类及技术指标

1.2.1 导航的分类

导航是利用电学、磁学、声学、光学、力学等方法,通过测量与运载体位置有关的参数来实现对运载体的定位,并从出发点沿预定的路线,安全、准确、经济地引导运载体到达目的地的一门技术。根据导航信息获取原理,例如航标方法、航位推算、惯性原理、无线电传播特性、天体运动规律、人造地球卫星技术、地球表面地形、地貌特征等,可分为观测导航、推算导航、惯性导航、无线电导航、卫星导航、天文导航、地形辅助导航等。如果导航定位的数据完全依靠装在运载体上的导航设备获取,采用航位推算原理工作,称自备式导航。如果依靠接收地面或空中导航台发播的导航信息,才能定出运载体位置,称他备式导航。对完成一定导航任务的设备组台,称导航系统。目前导航系统有无线电导航系统、惯性导航系统、卫星导航系统、天文导航系统、组合导航系统、综合导航系统、地形辅助导航系统以及着陆引导与河港导航系统等。

1. 观测导航

观测导航即航标方法,过去人们常称之为目视方法,就是借助信标或参照物实现导航。这种方法实现简单且可靠性高,目前在飞机进场着陆时仍在使用。航标法飞行即目视飞行,就是使用航标方法,以地面参照物作为路标的导航飞行方式,是飞行员的入门课程,这种方法的缺点是:没有导航器,飞得慢且飞得低;受环境、天气的影响很大,在能见度低的情况下,信标或参照物难以辨认,因而难以实现导航;在海洋、沙漠中等无航标地区无法导航。

2. 推算导航

推算导航是根据对运载体的运动方向和所航行距离(或速度、时间)的测量,从过去已知的位置来推算当前位置,或预测将来位置,从而得到其运动轨迹的一种导航方法。它克服了观测导航的缺点,不受天气、地理条件的限制,是一种自主式导航方法,保密性强。但是,随着航行时间和航行距离的增长,其位置积累误差越来越大,这就需要进行位置校准。当前大量使用的惯性导航系统就是用测量速度(加速度)对时间的积分和航向数据实现导航定位。自备式导航系统多数采用此方法进行导航定位,如多普勒雷达导航系统,声呐导航系统等。

3. 惯性导航

惯性导航是通过测量运载体的惯性(加速度),并自动进行积分运算,获得运载体瞬时速度与位置,进而引导运载体正确航行的一种导航方式。中国多次发射的人造地球卫星和运载火箭以及多种飞机和舰艇上都应用了自己制造的惯性导航系统与设备。随着电子科学技术、计算机、惯性测量技术等技术的迅速发展,惯性导航得到了快速发展。惯性导航完全依靠运载体上的导航设备自主地完成导航任务,与外界没有任何光、电联系,因此它是一种自主式导航方法,隐蔽性好,工作不受天气条件限制。但是,惯性导航的误差随运载体运行时间的增加而积累,克服这一缺点的办法是采用惯性导航与多普勒、GPS 等导航系统组合使用。

4. 无线电导航

无线电导航通过在地球表面或外层空间的人造地球卫星上建立若干个基准台,利用无线

电波传播特性,测出其传播时间、相位、频率、幅度等电气参数后,即可得出运载体相对导航台的角度、距离、距差等几何参数,从而建立运载体与导航台的相对位置关系,根据两条位置线的交点来确定运载体的位置,这种方法也称平面定位法。他备式导航系统大多采用无线电定位法。导航台位于地球表面的无线电导航称为陆基无线电导航,导航台设在卫星上的称为卫星无线电导航。无线电导航不受时间、天气的限制,设备简单、可靠,定位精度高,定位时间短,并且可以实现连续实时地定位,因此是所有导航手段中最重要的一种。

目前世界上正在使用的典型的无线电导航系统有:无线电信标(RODIO BEACON)、台卡(DECCA)、伏尔/测距器(VOR/DME)、塔康(TACAN)、罗兰-C(LORAN-C)、奥米加(OMEGA)、子午仪(TRANSIT)、全球卫星定位系统(GPS)、仪表着陆系统(ILS)、微波着陆系统(MLS)、雷达着陆系统(GCA)等。

5. 卫星导航

卫星导航是利用卫星播发的无线电信号进行导航定位的技术。卫星导航以卫星为空间基准点,向用户终端播发无线电信号,从而确定用户的位置、速度和时间。它不受气象条件、航行距离的限制,且导航精度高。

卫星导航定位系统的建立,最初完全是出于军事目的。例如:1964年投入使用的子午仪系统,就是为北极星导弹潜艇在远海中导航定位而研制的。随着冷战时代的结束,以及卫星导航定位系统的发展和完善,卫星导航定位越来越向商业化发展,这也是今后卫星导航定位技术的发展特点。目前全球主要有四大卫星导航系统:

(1) 全球定位系统(GPS):它是由美国国防部于1973年开始着手建立的,其定位精度可达1cm量级,是目前最成熟、应用最广泛的卫星导航系统;

(2) 俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统:该项目是苏联于20世纪70年代启动的,苏联解体后由俄罗斯继续该计划,其定位精度在10m左右;

(3) 欧洲伽利略(Galileo)卫星导航定位系统:1999年2月欧盟宣布要发展下一代GNSS(全球导航卫星系统),2002年3月欧盟首脑会议批准了伽利略卫星导航定位系统的实施计划;

(4) 中国的北斗卫星导航系统:2000年,我国首先建成北斗导航试验系统,使我国成为继美、俄之后的世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。

6. 天文导航

天空中的星体(太阳、月亮、其他行星、恒星等)相对于地球有一定的相对运动轨道和位置。天文导航就是通过观测多个星体的位置参数,来确定观测者在地球上的位置实现导航的,它广泛应用于航空、航天等领域。其缺点是积累误差受时间、气象条件的限制,定位时间长,操作计算比较复杂。天文导航同推算导航一样是不需要地面支撑设施,它可以用来校正推算导航的积累误差。

7. 地形辅助导航

地形辅助导航又称隐身导航,是一种非常适用于军事飞机作近空支援、低空突防、低空或超低空飞行的新型飞机导航方式。地形辅助导航预先将运载体所飞经地区的三维数字地形模型存储,在航行中将运载体的海拔高度和高度表测出的运载体正下方地表的相对高度相减,得出地面上的地形剖面图。将存储的模型与测得的地形剖面相比较,当达到匹配时便定出了运载体所处的位置。地形辅助导航不但具有良好的导航功能,而且在各种地形和不同

覆盖层上空均显出了自由、可靠和隐蔽特性,特别是在目标截获、武器瞄准方面,不需要向前方发射任何信号就能给出目标的位置或距离。地形辅助导航是一种新型的高精度自由导航方式,具有很好的发展前景。

1.2.2 导航系统的技术指标

1. 精度

导航系统的精度是指导航系统为运载体所提供的位置与运载体当时的真实位置之间的重合度。通常以导航参量测量误差的大小来反映导航系统的精度,误差越小,精度越高。由于受各种因素的影响,如发射信号不稳定、接收设备的测量误差、气候及其他物理变化对电磁传播媒介的影响等,还有用户与导航台站的相对几何位置关系等,所产生的误差会时好时坏,因此导航参量测量误差是随机变量,通常采用定位误差不超过一个数值的概率来描述。

常用的表示精度的方法有三种:一是用方差表示,二是用距离误差均方根(DRMS)表示,三是用圆概率误差(CEP)表示。

根据导航误差分析理论,导航系统参量测量误差可以近似看成是一个正态分布的随机变量,我们知道正态分布随机变量的概率分布可由其均值和方差完全确定,又因为测量误差的均值也称为系统误差,它是一个常量,可以通过系统校正消除,因此导航系统的参量误差可以看成是均值为零、方差为 σ^2 的正态分布的随机变量。概率论中, σ 代表测量值与数学期望之差,或测量值偏离数学期望的程度。例如测距误差 1m (2σ)表示每次测量结果误差小于等于 1m 的概率为95%;若给出 1m (σ)、 1m (3σ),则表示测量误差小于等于 1m 的概率为68%和99%。一般用 2σ 来表示,采用这种方法表示的精度只为运载体提供一维信息,比如高度或方位。

上述以方差的形式描述系统距离误差是常用的方法,有些用于定位的导航系统能直接给出运行体的二维位置,常常是水平位置,此时定位的精度可用2DRMS(距离误差均方根)来描述。用导航系统为运载体提供位置时,这些位置与其真实位置不可避免会出现一定偏差,如果不考虑偏差的方向而只考虑偏差的径向距离,对距离求均方根就得到DRMS。在二维情况下,误差分布是一个椭圆,如果椭圆很扁,即向一条线收束,那么2DRMS的置信度趋于95%。如果椭圆很胖,向圆靠近,则置信度趋于98%。

此外还可以用圆概率误差(CEP)来表示二维定位误差。CEP表示一个以运载体真实位置为圆心的圆的半径,每次测量结果有50%的可能性其误差落在这个圆内,即相当于有50%的置信度。若给出的定位误差为 1m (CEP),表示实测位置偏离真实位置小于 1m 的概率为50%。一般来说2DRMS值是CEP的2.5倍左右。

2. 覆盖范围

覆盖范围是指在一个面积或立体空间内,导航系统能够以规定的精度确定运载体的位置。它受发射信号功率、接收机灵敏度、传播环境、几何关系等影响。值得注意的是,当运载体与导航台之间的相对几何关系(距离、方位等)变化时,导航系统的导航精度可能会发生变化,因此对于规定的精度,覆盖范围会随几何关系的变化而改变。北斗一代是覆盖我国本土的区域导航系统,覆盖范围东经约 $70^\circ\sim 140^\circ$,北纬 $5^\circ\sim 55^\circ$ 。而GPS系统则是覆盖全球的。

3. 连续性

连续性是指运载体在某特定的运行阶段,导航系统能够提供规定的定位引导功能而不发生中断的能力,该指标表明了导航系统可连续提供导航服务的能力。

4. 可用性与可靠性

系统的可用性是指导航系统为运载体提供可用的导航服务的时间的百分比。可用性是选定导航系统的指标之一,与之相连的另一项指标是系统的可靠性。系统的可靠性是指导航系统在给定的使用条件下在规定的时间内以规定的性能完成其功能的概率,它表明系统发生故障的频度,可以用平均无故障时间(MTBF)来描述。为了说明系统可用性与可靠性的差别,我们用两个在实际中不大可能发生的例子来说明。若某系统需要每年停机几天检修设备,则其可用性差,但除开这几天,它的服务很稳定,因此可靠性高;若某系统不需要停机,则其可用性高,但经常出现故障,即可靠性差,危害大。

5. 信息更新率

信息更新率是指导航系统在单位时间内提供定位或其他导航数据的次数,单位是 Hz。例如某导航系统每秒提供数据的次数为 10 次,则该系统的信息更新率为 10Hz。一般来说对更新率的要求与运载体的航行速度和所执行的任务有关系。通常要求信息更新率与运载体操作速度相当,或者与运载体运动速度相当。对于高速运动的运载体,如果更新率不够,在两次为运载体提供定位数据之间的时段内,运载体的当前位置与上一次的指示位置可能已相差很远,这就会使导航范围的实际精度大大降低,这样就难以实现实时导航,甚至会影响到运载体的飞行安全。因此信息更新率是一个很重要的技术指标。

6. 系统容量

所谓系统容量是指导航系统可以同时供多少运载体使用的能力,分为无限系统容量和有限系统容量两种。对于那些导航台发射信号、运载体只需要有导航接收机就能获得导航信息的导航系统,理论上可以为无限多的用户提供服务,因此是无限系统容量的,这种系统中用户设备不需要发射信号,是一种无源的工作方式。与之相对应的采用有源工作方式的导航系统其系统容量会受到系统本身的结构体系、通道数量、通信速度、数据处理能力等因素的限制,只能与有限的用户设备配合工作,称为是有限系统容量的。例如 GPS 系统是无限容量,北斗一代是有限容量。

综合以上的技术指标,可以得到一个理想的导航系统需要满足以下要求:

- (1) 全球覆盖,容量无限;
- (2) 绝对准确度和相对准确度和都必须很高;
- (3) 准确度应不受环境影响;
- (4) 实时反应,可随运动而连续变动;
- (5) 无多值解;
- (6) 系统稳定无故障,体积、重量和电源消耗都要小。

1.3 无线电导航定位

1.3.1 电磁波

无线电导航是建立在无线电波传播的基础之上。变化的电场会产生磁场，变化的磁场也会产生电场，它们构成了一个不可分离的统一场，这就是电磁场（如图 1-7 所示）。当变化的电磁场进入空间进行传播时，则形成了电磁波，换句话说，电磁波是电磁场的一种运动形态。电磁的变动就如同微风轻拂水面产生水波一般，因此被称为电磁波，也常称为电波。

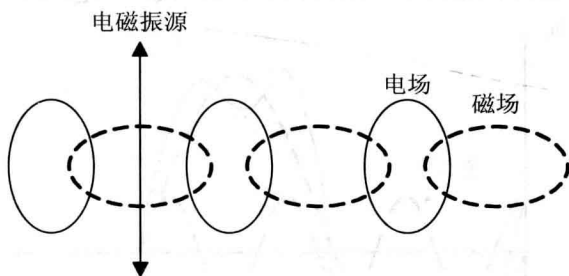


图 1-7 电磁场示意图

1. 电磁波的特性

在电磁波频率低时，要借助有形的导体才能传递。这是因为在低频的电磁振荡中，磁电之间的相互变化比较缓慢，其能量几乎全部返回原电路而没有能量辐射出去；在电磁波频率高时，既可以在自由空间内传递，也可以束缚在有形的导体内传递。电磁波能在自由空间内传递的原因是在高频率的电磁振荡中，磁电互变甚快，能量不可能全部返回原振荡电路，于是电能、磁能随着电场与磁场的周期变化以电磁波的形式向空间传播出去，不需要介质也能向外传递能量，这就是一种辐射。举例来说，太阳与地球之间的距离非常遥远，但在户外时，我们仍然能感受到和煦阳光的光与热，这就好比是“电磁辐射借由辐射现象传递能量”的原理。

电磁波是横波，即电磁波的磁场、电场及其行进方向三者互相垂直如图 1-8 所示。电场与磁场的振幅沿传播方向的垂直方向作周期性交变，其强度与距离的平方成反比，电磁波本身带有能量，任何位置的能量功率与振幅的平方成正比。

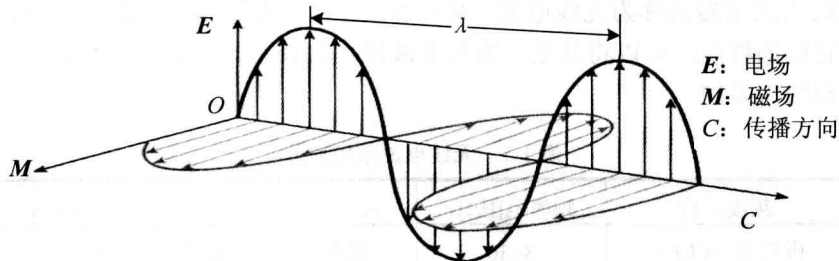


图 1-8 电磁波空间传播示意图

电磁波具有与光波相同的性质，其速度等于光速 c ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。在空间传播的电磁波，距离最近电场（磁场）强度方向相同、量值最大的两点之间的距离，就是电磁波的波长 λ ，