

高等学校通用教材

天文导航原理及应用

房建成 宁晓琳 编著

TIANWEN DAOHANG YUANLI JI YINGYONG

 北京航空航天大学出版社

高等学校通用教材

天文导航原理及应用

房建成 宁晓琳 编著

附录3 修正项表

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本教材是作者在近几年研究成果的基础上,结合北京航空航天大学天文导航的教学经验编写而成。全书共分5部分,20章。第1部分为第1~5章,介绍天文导航的基础知识,包括天文导航的相关基础知识和基本理论;第2部分为第6~9章,介绍舰船航海中的天文导航技术,包括舰船天文导航的基本原理和主要方法;第3部分为第10~16章,介绍空间飞行器的自主天文导航技术,系统论述了包括地球卫星和深空探测器在内的空间飞行器的自主天文导航原理、方法及系统分析等;第4部分为第17~19章,介绍导弹和飞机中的惯性/天文组合导航技术,主要阐述了作者课题组将惯性/天文组合导航应用在弹道导弹和飞机上取得的部分研究成果;第5部分即第20章,对天文导航未来的发展趋势进行了展望。

本教材既可作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的天文导航课程教材,也可供从事导航技术研究和应用领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

天文导航原理及应用/房建成等编著. —北京:北京
航空航天大学出版社,2006.10
ISBN 7-81077-799-8

I. 天… II. 房… III. 天文导航:航海导航
IV. U666.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 100976 号

天文导航原理及应用

房建成 宁晓琳 编著
责任编辑 韩文礼

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:23 字数:515千字

2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 7-81077-799-8 定价:30.00元

前言

天文导航技术是一门既古老又年轻的技术,起源于航海,发展于航空,辉煌于航天。天文航海技术是指在海上通过观测天体来决定船舶位置的各种方法。世界古代远洋航海史也是天文航海的发展历史。在现代无线电导航技术出现之前,天文导航一直是舰船远洋航海中唯一的导航技术,即便是在今天,其导航地位依然不容动摇。在 STCW 78/95 公约(海事国际公约)中仍要求航海人员必须具有利用天体确定船位和判断最终获得船位精度以及利用天体确定罗经差的能力。天文导航系统由于受地面大气的影响较大,因而其应用平台更适合于包括飞机、导弹在内的各种高空、远程飞行器。

随着人类航空技术的发展,天文导航的应用领域也从航海发展到航空,第二次世界大战中,飞机就采用天文导航作为主要导航方式,以无线电导航作为辅助手段,当时以六分仪为基础的天文导航技术在航海和航空中得到了广泛应用,不仅对舰船和飞机上六分仪的设计进行了改进,也促进了导航方法的发展。

航天事业的发展迎来了天文导航技术的辉煌,天基平台是天文导航技术的最佳应用环境。20 世纪中叶,载人航天技术极大地促进了天文导航技术在航天领域的发展,阿波罗登月和苏联空间站都使用了天文导航技术。20 世纪 80 年代以来,美、德、英、丹麦等国均致力于空间飞行器天文导航技术的研究,至今已有多种天文导航系统在卫星、飞船、空间站上得到应用。近年来,随着新一轮月球和火星探测等一系列深空探测活动的开展,天文导航以其自主性强、精度高、成本低廉等特点在深空探测领域也得到了越来越广泛的应用。

天文导航技术在航海、航天和航空各方面得到蓬勃发展,目前已成为舰船、卫星和深空探测器必不可少的关键技术,同时还是中远程弹道导弹、运载火箭和高空远程侦察机等的重要辅助导航手段,而在未来人类探索宇宙的星际航行中也必将发挥重要的作用。

本教材系统地介绍了舰船、空间飞行器(地球卫星、深空探测器)的天文导航基本原理和方法,以及惯性/天文组合导航技术在弹道导弹和飞机上的应用技术。全书共分 5 部分,20 章。第 1 部分包括 1~5 章,主要介绍了天文导航的相关基础知识和基本理论。第 1 章绪论,主要综述了天文导航技术的发展过程,简要介绍了天体、常用坐标系和时间系统等天文导航的基础知识;第 2 章简要介绍了天文导航中需要用到的球面几何和球面三角知识;第 3 章和第 4 章详细介绍了各种导航坐标系和时间系统,这分别是天文导航的空间和时间基准;第 5 章介绍了导航天文学方面的知识。天文导航起源于航海,因此本书在第 2 部分系统地介绍了舰船航海中的天文导航技术,包括第 6~9 章。第 6 章介绍了天文航海中用到的各种测量仪器,包括六分

仪和天文钟;第7章则从天体高度和天体投影点等概念出发,介绍了天文航海的基本原理,并给出了航海天文历的组成和使用方法;第8和第9章则重点介绍了高度差法等求舰位的基本方法。第3部分包括第10~16章,介绍了天体敏感器、航天器轨道动力学方程及航天器自主天文导航基本原理、自主天文导航系统滤波方法等天文导航的重要理论知识,并对地球卫星和深空探测器的自主天文导航原理、数学模型和计算机仿真结果以及相应的系统分析进行了全面、深入的研究;由于天文导航研究中进行空间飞行实验的难度较大,本教材还专门介绍了一种天文导航半物理仿真系统的设计实现方法以及星图匹配和星体识别等关键技术。第4部分包括第17~19章,该部分首先介绍了惯性/天文组合导航的原理与方法,并在此基础上介绍了惯性/天文组合导航半物理仿真系统和惯性/天文组合导航系统的应用。最后在第20章对天文导航未来的发展趋势进行了展望。

自“十五”以来,随着我国国防技术的发展,天文导航技术在航天、航空、航海领域的需求日益强烈,技术发展十分迅速。作者在多年从事天文导航技术研究的基础上,从2000年起为北京航空航天大学精密仪器及机械和导航、制导与控制专业本科生和硕士研究生开设了“天文导航原理与应用”课程,几年来该课程受到校内本科生、研究生和校外有关技术人员的欢迎。本教材是作者及课题组在近几年研究成果的基础上,结合天文导航的教学经验编写而成,以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。课题组博士后杨照华、博士生全伟、徐帆参加了本教材的部分编写工作,博士生吴琳,硕士生宋婷婷、王晨、王科、高翌春等参加了本教材的整理工作。此外,本教材部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果,在此向他们致以诚挚的谢意!

由于天文导航内容涉及多门学科前沿,其理论和应用也还在不断发展中,加之作者水平时间有限,书中不妥和错误之处恳请广大同行、读者批评指正。

感谢国家自然科学基金委、国家“863”计划办公室、国防科工委民用航天预研项目管理办公室、总装备部预研项目管理办公室以及北京航空航天大学在科研工作中给予的支持和帮助,感谢北京航空航天大学出版社在本教材出版过程中给予的大力支持,最后感谢在本教材撰写过程中所有给予关心、支持和帮助的人们!

作者

2006年6月

目 录

第 1 部分 天文导航的基础知识

第 1 章 绪 论

1.1 引 言	3
1.2 天文导航技术的特点和应用	3
1.3 天文导航的历史和发展现状	4
1.3.1 天文导航的历史	4
1.3.2 天文导航发展现状	6
思考题与习题	9

第 2 章 球面几何和球面三角

2.1 引 言	10
2.2 球面三角	10
2.2.1 球面几何	10
2.2.2 球面三角形	12
2.3 导航三角形	16
2.3.1 导航三角形	16
2.3.2 分割导航三角形	17
思考题与习题	19

第 3 章 导航坐标系

3.1 引 言	20
3.2 天球坐标系	20
3.2.1 天球上基本点、线、圆	20
3.2.2 赤道坐标系	21
3.2.3 地平坐标系	22
3.2.4 黄道坐标系	23
3.3 空间坐标系	24
3.3.1 惯性坐标系	24

3.3.2	地球固联坐标系	24
3.3.3	地理坐标系	25
3.3.4	载体坐标系	25
	思考题与习题	26
第4章 时间系统		
4.1	引言	27
4.2	时间的基本概念	27
4.2.1	时间在物理学上的解释	27
4.2.2	时间在哲学上的解释	28
4.2.3	时间计量工具的发展	28
4.3	恒星日、太阳日和平阳日	29
4.3.1	恒星日和太阳日	29
4.3.2	平阳日	29
4.3.3	时差	30
4.4	地方时和区时	30
4.4.1	地方时、世界时及其相互关系	30
4.4.2	区时	31
4.4.3	日界线	31
4.5	各种时间系统	32
4.5.1	世界时系统	32
4.5.2	历书时系统	33
4.5.3	原子时系统	34
4.6	历法的基本概念	34
4.6.1	太阴历	34
4.6.2	太阳历	35
4.6.3	阴阳历	35
	思考题与习题	35
第5章 导航天文学		
5.1	引言	36
5.2	宇宙和天体	36
5.2.1	宇宙	36
5.2.2	天体	38
5.2.3	太阳系	39

87	5.3 天体视运动	40
87	5.3.1 天体周日视运动	40
87	5.3.2 太阳周年视运动	43
08	5.3.3 月球视运动	46
08	5.3.4 行星视运动	48
18	5.3.5 岁差和章动	50
18	5.3.6 光行差	51
28	5.4 天体的辨认和识别	51
38	5.4.1 星座、星名	51
	5.4.2 星图、星表	51
38	5.4.3 常用恒星的识别	53
38	思考题与习题	57
38	参考文献	58

第 2 部分 舰船航海中的天文导航技术

第 6 章 天文航海中的测量仪器

60	6.1 引言	61
60	6.2 航海六分仪	61
60	6.2.1 千分尺鼓轮六分仪	61
60	6.2.2 游标尺六分仪	65
70	6.2.3 人造地平六分仪	66
70	6.3 天文钟	67
80	6.3.1 机械天文钟	67
80	6.3.2 石英天文钟	67
80	6.4 本章小结	67
101	思考题与习题	68

第 7 章 舰船天文定位的基本原理

801	7.1 引言	69
801	7.2 航海中的天文导航基本原理	69
	7.3 精确天体高度的获得	71
	7.3.1 一般天体的高度修正	71
	7.3.2 月球的高度修正	75

01	7.4	天体投影点的位置和时间	76
01	7.4.1	天体投影点的坐标	76
21	7.4.2	导航和天文学中的时间测量	78
31	7.5	航海天文历	80
31	7.5.1	天文历简介	80
02	7.5.2	航海天文历的组成	81
12	7.5.3	航海天文历的使用	81
12	7.6	本章小结	82
12		思考题与习题	82
	第8章	高度差法求舰位	
22	8.1	引言	83
32	8.2	直接画天文位置圆求舰位法	83
32	8.3	萨姆纳法	85
	8.4	高度差法	86
	8.4.1	高度差法的理论基础	86
	8.4.2	高度差法	90
	8.5	解析高度差法	92
12	8.6	移动舰位的确定	93
12	8.7	组合不同性质位置线求舰位法	95
12	8.8	本章小结	95
22		思考题与习题	96
	第9章	其他舰船天文定位方法	
22	9.1	引言	97
22	9.2	利用北极星高度确定纬度	97
22	9.3	利用天体中天高度确定纬度	98
22	9.4	利用两个天体的观测高度确定纬度	99
22	9.5	利用天体的中天高度确定经度	101
22	9.6	本章小结	103
22		思考题与习题	103
22		参考文献	103

第 3 部分 空间飞行器的自主天文导航技术

第 10 章 天文导航的天体敏感器

10.1	引 言	107
10.2	天体敏感器分类	107
10.3	恒星敏感器	107
10.3.1	恒星敏感器简介	107
10.3.2	恒星敏感器分类	108
10.3.3	恒星敏感器结构	109
10.4	太阳敏感器	111
10.4.1	太阳敏感器简介	111
10.4.2	太阳敏感器分类	111
10.4.3	太阳敏感器结构	112
10.5	地球敏感器	113
10.5.1	地球敏感器简介	113
10.5.2	地球敏感器分类	113
10.5.3	地球敏感器结构	115
10.6	其他天体敏感器	115
10.7	空间六分仪自主天文定位系统(SS-ANARS)	116
10.8	MANS 自主天文导航系统	117
10.8.1	MANS 自主导航系统原理	118
10.8.2	MANS 自主导航系统结构	119
10.8.3	MANS 自主导航系统特点	120
10.9	本章小结	120
	思考题与习题	120

第 11 章 航天器轨道动力学方程及自主天文导航基本原理

11.1	引 言	121
11.2	航天器二体轨道和轨道要素	121
11.2.1	二体问题	121
11.2.2	6 个积分和轨道要素	122
11.3	航天器轨道摄动	126
11.3.1	航天器轨道摄动方程	126

11.3.2	地球非球形引力摄动	129
11.3.3	日、月摄动	130
11.3.4	大气阻力摄动	131
11.3.5	太阳光压摄动	132
11.3.6	潮汐摄动	132
11.4	深空探测器的轨道运动	133
11.4.1	多体问题和限制性三体问题	133
11.4.2	地月飞行的轨道运动	135
11.5	航天器自主天文导航基本原理	137
11.5.1	航天器基于轨道动力学方程的天文导航基本原理	137
11.5.2	航天器纯天文几何解析方法基本原理	138
11.6	本章小结	139
	思考题与习题	139
第 12 章 自主天文导航系统滤波方法		
12.1	引言	141
12.2	最优估计方法 ^[13,14]	141
12.2.1	估计和最优估计方法	141
12.2.2	最小方差估计	142
12.2.3	极大似然估计	143
12.2.4	极大验后估计	144
12.2.5	贝叶斯估计	145
12.2.6	线性最小方差估计	146
12.2.7	最小二乘估计	148
12.2.8	几种最优估计方法的比较及其关系	150
12.3	卡尔曼滤波	151
12.3.1	线性系统卡尔曼滤波方法	151
12.3.2	扩展卡尔曼滤波方法	156
12.3.3	Unscented 卡尔曼滤波方法	160
12.4	粒子滤波 ^[15]	162
12.4.1	先进的粒子滤波方法	162
12.4.2	粒子滤波的采样方法	162
12.4.3	标准粒子滤波算法	164
12.4.4	Unscented 粒子滤波算法	166
	思考题与习题	167

第 13 章 地球卫星直接敏感地平的自主天文导航方法	168
13.1 引 言	168
13.2 航天器自主天文导航技术	168
13.2.1 航天器自主导航的意义	168
13.2.2 地球卫星自主天文导航技术概述	169
13.3 地球卫星直接敏感地平自主天文导航原理	169
13.4 地球卫星直接敏感地平自主天文导航系统的数学模型	170
13.4.1 系统的状态方程	170
13.4.2 系统的量测方程	172
13.5 地球卫星直接敏感地平天文导航方法性能分析	176
13.5.1 不同轨道动力学方程对导航性能的影响	177
13.5.2 滤波周期对导航性能的影响	179
13.5.3 观测量对导航性能的影响	181
13.5.4 星敏感器安装方位对导航性能的影响	183
13.6 本章小结	184
思考题与习题	184
第 14 章 地球卫星间接敏感地平的自主天文导航方法	185
14.1 引 言	185
14.2 星光折射间接敏感地平天文导航原理	185
14.2.1 星光大气折射原理	185
14.2.2 星光折射高度与折射角、大气密度之间的关系	188
14.3 地球卫星间接敏感地平的自主天文导航系统	190
14.3.1 系统的状态方程	190
14.3.2 系统的量测方程	191
14.3.3 计算机仿真	192
14.4 基于信息融合的直接敏感地平 and 间接敏感地平相结合的自主天文导航方法	193
14.4.1 基于信息融合的自主天文导航方法原理	193
14.4.2 基于信息融合的自适应 Unscented 卡尔曼滤波方法	194
14.4.3 计算机仿真	195
14.5 星光折射间接敏感地平的自主天文导航精度分析	197
14.5.1 量测信息对导航精度的影响分析	197
14.5.2 轨道参数对导航精度的影响分析	200
14.6 本章小结	203

思考题与习题	204
第 15 章 深空探测器的自主天文导航原理与方法	
15.1 引言	205
15.1.1 深空探测的发展	205
15.1.2 天文导航对深空探测的重要性 ^[44]	207
15.2 月球探测器在转移轨道上的天文导航方法	208
15.2.1 月球探测器在转移轨道上的轨道动力学方程	209
15.2.2 基于星光角距的自主天文导航方法	209
15.2.3 基于太阳、地球矢量方向的自主天文导航方法	211
15.2.4 月球探测器组合导航方法	213
15.3 月球卫星的自主天文导航方法	215
15.3.1 月球卫星的轨道动力学方程	216
15.3.2 月球卫星的量测方程	217
15.4 深空探测器纯天文几何解析定位方法	219
15.4.1 纯天文定位的基本原理	219
15.4.2 纯天文自主定位的观测量及量测方程	219
15.4.3 纯天文自主定位的几何解析法	222
15.5 本章小结	227
思考题与习题	227
第 16 章 天文导航半物理仿真系统	
16.1 引言	228
16.2 天文导航半物理仿真系统的总体设计	228
16.2.1 系统组成	228
16.2.2 系统工作流程	229
16.3 系统各模块的设计	229
16.3.1 轨道发生器的设计	229
16.3.2 星模拟器的设计	231
16.3.3 星敏感器模拟器的设计	231
16.3.4 导航计算机的设计	232
16.4 星图模拟系统实现	233
16.4.1 星图模拟的原理	233
16.4.2 随机视场中观测星的选取及其验证方法	236
16.4.3 星图的模拟及软件实现	240

16.5	天文导航半物理仿真系统的标定及试验	243
16.5.1	系统硬件设备的标定	243
16.5.2	系统软件平台的实现	246
16.5.3	动静态试验及结果分析	247
16.6	基于半物理仿真系统的天文导航试验	249
16.7	本章小结	255
	思考题与习题	255
	参考文献	255

第 4 部分 弹道导弹和飞机中的惯性/天文组合导航技术

第 17 章 惯性/天文组合导航原理与方法

17.1	引言	261
17.2	惯性/天文组合导航系统的工作模式	262
17.3	惯性/天文组合导航系统的组合模式	263
17.4	惯性/天文组合导航基本原理	264
17.4.1	星敏感器的测姿原理	264
17.4.2	天文量测信息修正惯性器件误差原理	266
17.4.3	利用惯性/天文组合导航系统修正弹道导弹发射点位置误差的原理	267
17.4.4	利用误差状态转移矩阵估计弹道导弹主动段导航误差	267
17.5	惯性/天文组合导航系统的建模方法	269
17.5.1	状态方程	269
17.5.2	量测方程	274
17.6	本章小结	277
	思考题与习题	277

第 18 章 惯性/天文组合导航半物理仿真系统

18.1	引言	279
18.2	惯性/天文组合导航半物理仿真系统的子系统	279
18.2.1	惯性导航子系统	279
18.2.2	天文导航子系统	283
18.3	惯性/天文组合导航半物理仿真系统的总体设计	286
18.4	惯性/天文组合导航半物理仿真系统的软硬件实现	287
18.5	惯性/天文组合导航用轨迹发生器	290

18.5.1	弹道导弹轨迹发生器	290
18.5.2	飞机轨迹发生器	295
18.6	惯性/天文组合导航半物理仿真系统性能分析	299
18.6.1	星敏感器的精度对组合导航性能的影响	299
18.6.2	滤波周期对组合导航性能的影响	300
18.6.3	不同初始失准角对组合导航性能的影响	303
18.7	本章小结	305
	思考题与习题	305

第 19 章 惯性/天文组合导航系统的应用

19.1	引言	306
19.2	组合导航系统在弹道导弹中的应用	306
19.2.1	弹道导弹 SINS 子系统仿真试验	307
19.2.2	弹道导弹 SINS/CNS 组合导航系统半物理仿真	307
19.3	组合导航系统在飞机中的应用	308
19.3.1	机载 SINS 子系统仿真试验	309
19.3.2	机载 SINS/CNS 组合导航系统半物理仿真	310
19.4	组合导航应用中的关键技术	311
19.4.1	递归交互式多模型自适应卡尔曼滤波方法	311
19.4.2	重力异常对组合导航精度的分析与补偿方法	315
19.4.3	基于可观测度分析的降维滤波器设计方法	318
19.4.4	一种状态突变带渐消因子的 KF 方法	321
19.5	本章小结	322
	思考题与习题	323
	参考文献	323

第 5 部分 展 望

第 20 章 天文导航技术的展望

20.1	舰船天文导航的发展趋势	329
20.2	航天器天文导航的发展趋势	331
20.3	惯性/天文组合导航技术的发展趋势	337
20.4	结束语	338
	参考文献	339

附 录

附表 1	航海天文历	343
附表 2	北极星表	349
附表 3	修正项表	351

第 1 部分 天文导航的基础知识

天文导航技术是一门既古老又年轻的技术,起源于航海,发展于航空,辉煌于航天。天文导航是以已知准确空间位置的自然天体为基准,通过天体测量仪器被动探测天体位置,经解算确定测量点所在载体的导航信息。天文导航因其具有自主、误差不随时间积累和精度较高的特点,成为现代高科技战争中的一种重要导航手段,这也是美、俄等军事强国仍致力发展天文导航技术的重要原因。

本部分共 5 章。第 1 章概述了天文导航技术的特点、历史和发展现状;第 2 章从天文导航解算出发重点介绍了球面三角和导航三角形相关知识;由于天文导航中需要观测天体进行导航计算,而载体和天体的运动均与坐标系和时间系统密切相关,为此第 3 章和第 4 章分别介绍了与确定载体位置相关的导航坐标系和时间系统;第 5 章详细阐述了导航天文学等相关的基础知识,分别介绍了天体、天体视运动以及天体的辨认和识别,为学习舰船、卫星、导弹和飞机的天文导航技术打下基础。