

高等院校测绘工程系列教材

天文与重力测量

Astronomy and Gravity Measurement

吴向阳 高成发 刘义志 王洪光·编著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

高等院校测绘工程系列教材

天文与重力测量

吴向阳 高成发 刘义志 王洪光 编著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 提 要

本书为高等院校测绘工程系列教材,全书1~6章为天文测量篇,主要讲述通过观测天体(恒星)确定测站点的天文经纬度和某一方向的天文方位角,内容包括天文测量简介、时间系统框架及其换算、天文观测误差分析、无线电时号与时间比对以及实用天文测量方法;全书7~12章为重力测量篇,主要讲述利用重力测量仪器确定地面点的绝对重力(相对重力),进而推求地球形状及其外部重力场,内容包括概述、重力测量原理、位理论基础、正常重力场、确定大地水准面及地球形状的基本理论、地球重力场的应用。同时附录中还对卫星重力、航空重力等新发展进行了简要介绍。

全书首次将天文学与重力学进行综合,简化烦琐公式推导,力求讲清基本概念,把握脉络通俗易懂,注重实用适当拓展,可作为高等院校测绘类或相关专业本科生的教学用书,也可作为测绘导航、地质矿产、地球物理等相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

天文与重力测量/吴向阳等编著. —南京:东南大学出版社,2018.10

高等院校测绘工程系列教材

ISBN 978-7-5641-8022-5

I. ①天… II. ①吴… III. ①天文-高等学校-教材 ②重力测量-高等学校-教材 IV. ①P1
②P223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 221608 号

书 名:天文与重力测量

编 著:吴向阳 高成发 刘义志 王洪光

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼2号

邮 编:210096

网 址:<http://www.seupress.com>

出 版 人:江建中

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:12.75 字数:310 千

版 次:2018 年 10 月第 1 版

印 次:2018 年 10 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-8022-5

定 价:52.00 元

经 销:全国各地新华书店

发行热线:025-83790519 83791830

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买东大版图书如有印装质量问题,请直接与营销部
联系(电话或传真:025-83791830)

前 言

浩瀚的宇宙给人以无限遐想,其中蕴藏着无数奥秘等待着人类去探索。天文学正是人类发现、认识并解释宇宙奥秘的一门科学,而重力学则是通过探测行星表面重力及其变化,来研究地球形状与外部重力场、探测地球内部构造及板块运动的一门科学。天文测量与重力测量分别是当今空间大地测量和物理大地测量的技术基础,也是人类研究探索地球家园乃至更广阔的宇宙奥秘的重要手段。

测绘类本科专业 2015 年新开设《天文与重力测量》研讨课程,让大学生了解和掌握天文学与重力学的基本知识,有利于拓宽学生的宇宙视野,激发学生上知天文、下知地理的求知欲望和对科学的探索精神,增强学生对谣言、迷信和伪科学的辨别能力;同时也可促使他们思考人类自身在宇宙中的地位,树立正确的宇宙观,培养他们科学、理性的思维。另外,学习本课程在拓宽知识面的同时,也可增加对本专业相关知识的理解,促进学科间的交叉与融合,更好地把握现代测绘科技的发展前沿。正因如此,东南大学测绘学科一直把本课程作为一门重要的选修课程,在三年级上学期专业基础课相对集中阶段开设。

本教材是为高等院校测绘工程专业的学生选修《天文与重力测量》课程编写的。天文学、重力学的内容十分广泛,作为非天文与地球物理学专业的一门选修课程,讲授的内容不可能面面俱到,必须结合本专业的特点对内容进行取舍。在此背景下,编者根据测绘工程专业教学计划和教学大纲的要求,总结多年的教学经验,在原讲义的基础上编写了本教材。

为了便于教学与参考,本教材分为上、下两篇各六章共计十二章,每一篇都具有独立的完整性。上篇为天文测量篇,内容分别为:第 1 章为天文测量简介,第 2 章为天球坐标及各坐标系间关系,第 3 章为时间系统及其换算,第 4 章为天文观测误差分析,第 5 章为无线电时号与时间比对,第 6 章为实用天文测量;下篇为重力测量篇,内容分别为:第 7 章为重力测量概述,第 8 章为重力测量原理,第 9 章为位理论基础,第 10 章为正常重力场,第 11 章为确定大地水准面及地球形状的基本理论,第 12 章为地球重力场的应用。

为了便于读者阅读和适当拓宽知识面,本书最后还安排了四个附录内容,其中附录 1 为球面三角基本公式,附录 2 为重力控制网实施概要,附录 3 为卫星重力测量基本知

识,附录4为航空重力测量简介。

本教材由吴向阳、高成发、刘义志、王洪光编著,东南大学测绘工程213131班部分学生参与了大量的录入编辑工作,最后由吴向阳统一修改定稿。在编写过程中,编写组参考并引用了天文学及重力学相关方面的书籍和教材,我们对前人所做的工作深表敬意;在定稿过程中,东南大学胡伍生教授对本教材提出了许多宝贵意见;本教材的出版得到了东南大学交通学院的大力支持,并提供了教材建设专项基金;东南大学出版社也给予了大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

书中部分图片等资料取自互联网,笔者一般都注明了出处,但部分资料出处难以追溯,可能未标明,还请读者谅解。由于编者水平有限,虽然我们尽了很大努力,书中难免存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正,以利今后改进与提高。

编 者

2018年6月于南京

目 录

上篇 天文测量

第 1 章 天文测量简介	2
1.1 天文学发展简史	2
1.1.1 天文学的定义	2
1.1.2 天文学的研究对象	2
1.1.3 天文学的分类	4
1.1.4 天文学的发展	4
1.1.5 天文学的研究意义	6
1.2 宇宙、地球与恒星	7
1.2.1 宇宙的概念	7
1.2.2 地球的运动	8
1.2.3 恒星的辨认	10
1.3 天球的概念与表示方法	11
1.3.1 天球的概念	11
1.3.2 基本点、线(轴)、面	12
1.4 天文测量的任务与作用	14
1.4.1 天文测量的主要任务	14
1.4.2 天文测量的主要作用	14
第 2 章 天球坐标系及各坐标系间关系	17
2.1 天球坐标系	17
2.1.1 天球上的参考点、圈	17
2.1.2 天球上的坐标系	18
2.1.3 不同坐标系统之间的关系	19
2.1.4 天球坐标系统的类型	19
2.2 地球坐标系	20
2.2.1 地球坐标系的形式	20
2.2.2 地球坐标系的其他形式	22
2.2.3 站心坐标系内的转换关系	22
2.3 岁差与章动	23

2.3.1 岁差的概念	23
2.3.2 章动的概念	24
2.3.3 岁差与章动的影响	24
2.3.4 协议天球坐标系及由来	24
2.3.5 极移的概念	25
2.4 坐标系统间的关系及转换	26
2.4.1 天球坐标系统之间的转换	26
2.4.2 地球坐标系统之间的转换	28
2.4.3 天球与地球之间坐标系统的转换	30
第3章 时间系统及其换算	33
3.1 时间及其度量的基本概念	33
3.1.1 时间的重要意义	33
3.1.2 时间的含义	33
3.1.3 量度时间的基本方法	34
3.1.4 时间系统的建立	34
3.1.5 时间的基本单位	34
3.2 世界时系统	34
3.2.1 恒星时	34
3.2.2 太阳时	35
3.2.3 民用时	36
3.2.4 世界时	36
3.2.5 区时、北京时	36
3.3 力学时系统	37
3.3.1 历书时	37
3.3.2 地球力学时	38
3.3.3 太阳系质心力学时	38
3.4 原子时系统	38
3.4.1 原子时	39
3.4.2 国际原子时	39
3.4.3 协调世界时	39
3.4.4 GPS 时间系统	39
3.5 常用的时间系统换算	40
3.5.1 平时与恒星时	40
3.5.2 国际原子时与 GPS 时	41
3.5.3 国际原子时与地球力学时	41
3.5.4 区时、世界时与地方时	41

第 4 章 天文测量误差分析	42
4.1 天文测量误差来源	42
4.1.1 天文测量方法思路	42
4.1.2 天文测量中的主要误差	42
4.1.3 恒星各种位置的含义	43
4.2 蒙气差与误差改正	44
4.2.1 蒙气差及其影响	44
4.2.2 计算蒙气差的近似公式和实用公式	45
4.3 视差与误差改正	46
4.3.1 视差概念	46
4.3.2 视差的误差改正	46
4.4 光行差与误差影响	48
4.4.1 光行差概念	48
4.4.2 光行差的类型	49
4.4.3 光行差的误差影响	49
第 5 章 无线电时号与时间比对	50
5.1 无线电时号的型式	50
5.1.1 无线电时号的定义	50
5.1.2 无线电时号的型式	51
5.1.3 传统天文计时系统的工作原理	52
5.2 我国 UT_1 和 UTC 短波时号的发播程序	52
5.2.1 国家授时中心建设回顾	52
5.2.2 陕西天文台 UT 和 UTC 短波时号的发播程序	53
5.2.3 台湾地区台北 BSF 授时台发播的短波 BSF 短波时号	53
5.2.4 两种时号的对比分析	53
5.3 时号收录与时间比对	54
5.3.1 基本概念	54
5.3.2 收时方法	54
5.4 钟差与钟速	55
5.4.1 钟差	55
5.4.2 钟速	56
5.4.3 钟差的化算	56
5.4.4 钟漂	56
第 6 章 实用天文测量	58
6.1 天体的视运动	58
6.1.1 天体的周日视运动	58
6.1.2 天体的周年视运动	61

6.2 天文经度测量的原理与方法	61
6.2.1 天文经度测量的原理	62
6.2.2 天文经度测量的方法	62
6.2.3 评定天文经度测量的精度	66
6.3 天文纬度测量的原理与方法	67
6.3.1 天顶距法测定天文纬度	67
6.3.2 中天法测定天文纬度	69
6.3.3 双星等高法测定天文纬度	70
6.4 天文方位角测量的原理与方法	71
6.4.1 天文方位角测定的原理	71
6.4.2 北极星任意时角法测定方位角	72
6.4.3 太阳天顶距法测定方位角	72
6.4.4 仪器定向	72
6.5 同时测定经纬度及方位角的原理与方法	73
6.5.1 等时角法测定经纬度、方位角的原理	73
6.5.2 等时角法测定经纬度、方位角的方法	74
6.5.3 等时角法测定经纬度、方位角的特点	74
上篇 天文测量复习思考题	76

下篇 重力测量

第7章 重力测量概述	82
7.1 重力测量学的内容及任务	82
7.1.1 重力测量学的研究对象	82
7.1.2 重力测量学的任务	83
7.1.3 重力测量学的研究内容	83
7.2 重力测量学的形成与发展	85
7.2.1 重力测量学的发展简史	85
7.2.2 重力测量学的发展趋势	86
7.3 重力测量与相关学科的关系	87
7.3.1 与测绘学科的关系	88
7.3.2 与地球学科的关系	88
7.3.3 与国防和军事学科的关系	89
7.4 重力测量的地位和作用	89
7.4.1 重力测量的地位	90
7.4.2 重力测量的作用	90
第8章 重力测量原理	93
8.1 重力与重力测量	93

8.1.1 重力的定义	93
8.1.2 重力测量的方式	94
8.1.3 重力测量的原理	95
8.2 动力法测定绝对重力	95
8.2.1 自由落体测绝对重力	95
8.2.2 振摆测定绝对重力	98
8.3 静力法测定相对重力	99
8.3.1 基本原理	99
8.3.2 几种重力仪测量原理	99
8.3.3 外界因素对重力仪的影响	100
8.3.4 重力仪的零点飘移	102
8.3.5 重力测量数据处理	102
8.4 重力测量仪器简介	103
8.4.1 重力测量仪的分类	103
8.4.2 绝对重力仪	104
8.4.3 相对重力仪	104
8.5 重力基准	107
8.5.1 国际重力基准	107
8.5.2 我国的重力基准	108
第9章 位理论基础	110
9.1 引力及引力位	110
9.1.1 场与引力场	110
9.1.2 引力与引力位	111
9.2 典型形体的引力及引力位	112
9.2.1 均质球面的引力位和引力	112
9.2.2 均质球体的引力位和引力	113
9.2.3 均质圆平面的引力位和引力	114
9.2.4 均质圆柱体的引力位和引力	115
9.3 引力位的基本性质	116
9.3.1 引力位是无穷远处的正则函数	116
9.3.2 质面引力位的连续性及其一阶导数的不连续性	117
9.3.3 质体引力位及一阶导数是处处连续的	118
9.3.4 引力位在吸引质体外部满足拉普拉斯方程	118
9.3.5 质体引力位在质体内部满足泊松方程	119
9.4 离心力位和重力位	119
9.4.1 离心力及离心力位	119
9.4.2 重力位	120
9.5 位理论边值问题	121

9.5.1	边值问题的引入	121
9.5.2	位理论边值问题的定义	122
9.5.3	位理论边值问题的分类	122
第10章	正常重力场	123
10.1	正常重力场的概念	123
10.1.1	正常重力场	123
10.1.2	确定正常重力场的方法	123
10.2	地球重力位的球函数展开式	125
10.2.1	矩相关概念	125
10.2.2	重力位展开式	125
10.3	确定正常重力场的 Laplace 方法和 Stokes 方法	127
10.3.1	Laplace 方法	128
10.3.2	Stokes 方法	131
10.4	正常重力公式	132
10.4.1	基本公式	133
10.4.2	卡西尼公式	133
10.4.3	赫尔默特公式	133
10.4.4	基于 1980 年国家大地坐标系的正常重力公式	133
10.4.5	基于 WGS 84 世界大地坐标系的正常重力公式	134
10.5	正常重力场的性质	134
10.5.1	重力等位面及其性质	134
10.5.2	正常重力场性质	135
10.5.3	正常大地位的球函数展开	136
第11章	确定大地水准面及地球形状的基本理论	137
11.1	概述	137
11.1.1	大地水准面及研究意义	137
11.1.2	斯托克司定理及问题	138
11.1.3	重力归算及含义	139
11.1.4	莫洛金斯基方法研究地球形状	139
11.2	扰动位的作用及重力测量基本微分方程	139
11.2.1	扰动位	139
11.2.2	大地水准面差距	139
11.2.3	垂线偏差	140
11.2.4	重力测量基本微分方程	140
11.2.5	斯托克司边值问题	141
11.3	大地水准面上扰动位及扰动重力的求解	141
11.3.1	扰动位的求解	142

11.3.2 大地水准面差距的求解	143
11.3.3 垂线偏差的求解	144
11.3.4 扰动重力的求解	145
11.4 重力归算及重力异常	147
11.4.1 重力归算的目的及基本要求	147
11.4.2 空间改正及空间重力异常	147
11.4.3 布格改正及布格重力异常	148
11.4.4 地形改正及经地形改正后的重力异常	150
11.4.5 地壳均衡改正及均衡重力异常	151
11.4.6 各种重力归算方法的比较原则	152
11.5 Molodensky 方法确定地球形状	153
11.5.1 几个基本概念	153
11.5.2 Molodensky 边值问题	154
第 12 章 地球重力场的应用	156
12.1 地球重力场与测绘科学	156
12.1.1 在经典大地测量中的作用	156
12.1.2 在现代大地测量中的作用	157
12.2 地球重力场与地球科学	160
12.2.1 在研究地球内部密度分布与结构中的作用	160
12.2.2 在研究地球物理与地球动力学中的作用	161
12.3 地球重力场与军事科学	161
12.3.1 在空间飞行器的轨道设计与轨道确定方面的作用	161
12.3.2 在提高陆基远程战略武器与水下流动战略武器的打击精度方面的作用	162
下篇 重力测量复习思考题	164
附录 1:球面三角基本公式	167
附录 2:重力控制网实施概要	175
附录 3:卫星重力测量基本知识	179
附录 4:航空重力测量简介	186
参考文献	190

本卷主要介绍天文测量的基本知识，包括天体的位置、运动、观测方法等。本卷共分五章，第一章介绍天体的位置，第二章介绍天体的运动，第三章介绍天文观测方法，第四章介绍天文仪器的原理，第五章介绍天文测量的应用。

第一章 天体的位置

天体的位置是指天体在宇宙中的位置。天体的位置可以用天球坐标系来描述。天球坐标系是一个以地球为中心，以天赤道为基准的坐标系。天球坐标系的主要参数包括：赤经、赤纬、黄经、黄纬、地平经、地平纬等。

上篇 天文测量

天文测量是指对天体的位置、运动、物理性质等进行观测和测量的活动。天文测量的主要内容包括：天体的位置测量、天体的运动测量、天体的物理性质测量等。

天文测量的主要方法包括：直接观测法、间接观测法、光谱分析法、干涉测量法等。直接观测法是指通过望远镜直接观测天体的位置、运动等。间接观测法是指通过观测天体的光谱、干涉图等来推断天体的位置、运动等。

天文测量的主要仪器包括：望远镜、光谱仪、干涉仪、射电望远镜等。望远镜是天文测量的主要工具，它可以将天体的光线收集起来，放大成像。光谱仪是天文测量的重要工具，它可以分析天体的光谱，从而推断天体的物理性质。

天文测量的主要应用包括：天体的位置测定、天体的运动测定、天体的物理性质测定等。天体的位置测定是指通过天文测量来确定天体在宇宙中的位置。天体的运动测定是指通过天文测量来确定天体的运动速度和方向。天体的物理性质测定是指通过天文测量来确定天体的温度、密度、化学成分等。

天文测量的主要意义包括：了解宇宙的奥秘、探索宇宙的起源和演化、寻找外星生命等。天文测量是人类探索宇宙的重要手段，它可以帮助我们了解宇宙的奥秘，探索宇宙的起源和演化，寻找外星生命。

天文测量的主要挑战包括：观测条件的限制、仪器设备的限制、数据处理能力的限制等。天文测量的观测条件受到天气、地理位置、观测时间等因素的限制。天文测量的仪器设备受到技术水平的限制。天文测量的数据处理能力受到计算机技术水平的限制。

天文测量的主要发展趋势包括：观测条件的改善、仪器设备的更新、数据处理能力的提高等。随着观测条件的改善，天文测量的精度将不断提高。随着仪器设备的更新，天文测量的范围将不断扩大。随着数据处理能力的提高，天文测量的效率将不断提高。

天文测量的主要研究成果包括：天体的位置测定、天体的运动测定、天体的物理性质测定等。天体的位置测定方面，已经测定了数千颗恒星的位置。天体的运动测定方面，已经测定了数千颗恒星的运动速度和方向。天体的物理性质测定方面，已经测定了数千颗恒星的温度、密度、化学成分等。

天文测量的主要未来展望包括：进一步提高观测精度、进一步扩展观测范围、进一步提高数据处理能力等。随着观测精度的提高，我们将能够更准确地测定天体的位置、运动等。随着观测范围的扩展，我们将能够观测到更多的天体。随着数据处理能力的提高，我们将能够更高效地处理天文测量的数据。

第 1 章 天文测量简介

天文测量是天文学的一个分支学科,也是大地测量的重要组成部分。它的主要任务是用天文方法观测天体来确定地面点的位置(天文经度和天文纬度)和某一方向的方位角,以供大地测量和其他有关的科技部门使用。本章将从天文学的发展、宇宙天体、天球以及天文测量的任务与作用方面,引导读者推开天文学的大门,领略天文学的古老神奇与现代魅力。

1.1 天文学发展简史

俗语道:“上知天文、下知地理”,经常用来形容一个人知识渊博,可见天文学在人们心中的地位。本节将从天文学定义、研究对象、分类、发展及研究意义等方面,介绍天文学的一些基本知识,为读者领略和探索宇宙奥秘,奠定天文学基础。

1.1.1 天文学的定义

早期,人们将天文学定义为一门研究宇宙和天体的构造与发展的自然科学,即一门研究天体在宇宙空间的位置分布、大小、物理状态、化学组成、运动和演化过程的学科。

随着近代科学的发展,人们将天文学更广泛地定义为一门研究宇宙,以及宇宙与人类关系的学科。这种关系中当然也包括人类自身在宇宙中的位置以及与自然界的联系。

天文学既是一门历史悠久的学科,同时又是一门蓬勃发展的学科,现代天文学已成为多学科交叉融合的前沿科学。

1.1.2 天文学的研究对象

天文学的研究内容十分广泛,可抽象为对宇宙及其与人类的相关性研究。它的研究对象是各种自然天体和天体系统,即研究天体的位置和运动,研究天体的化学组成、物理状态和演变过程,研究天体的结构和演化规律,研究如何利用天体的知识来造福人类,而这些研究都是从宏观或宇观的角度并在特定时空基准下进行的。

1. 宇宙

天文学研究宇宙,研究万物,但其尺度是有范围的,“原子”“纳米”等概念和微观事物显然不是天文学研究的尺度范围,而宏观和宇观才是天文学研究的对象尺度。

什么是宏观?宏观是研究宏观世界的尺度。“宏观世界”狭义的定义为“把质量在 10 g 以上、尺度在 5 cm 以上的物质客体及其现象的总和称为“宏观世界”,因此狭义的“宏观”是指 5 cm 以上的尺度。处于该尺度的物质一般而言都比较容易观察,往往通过肉眼就可以获得它们的一般特性。无机类包括地球上所有的物体,近地表面的大气层,太阳,太阳系内的行星、卫星、彗星和其他恒星、天体等;有机类包括生物特性的人、其他动物、植物种群、生物

群落、生态系统、生物圈以及人类社会等,都属于宏观的尺度。在宏观世界里,物质的运动一般都服从经典的牛顿力学规律,如行星围绕恒星的运动符合牛顿力学原理。但是不同性质的宏观世界种群有着其自身的内在运行机制,如生物的繁衍、生命的运动、人类社会的变迁等。广义的宏观则是抛开客观物质的自身属性,从人类认识自然的观点,即人类可以直接观测,且能够以物质手段加以改变的对象。那么,那些我们可以观测,但是人类不能够以物质手段加以改变的时间和空间区域又该如何划分呢?

1962 年,著名天文学家戴文赛(1911—1979)在《宇观的物质过程》中首次提出了“宇观”的概念——“大质量加大尺度,既是宇观过程的特征,又是它的条件”。“大”是宇观世界的特征,区别于广义的宏观世界,在宇观世界中,物质具有高密度、大质量、大尺度、高温等特征;运动速度快,甚至接近于光速;万有引力起主要作用,并服从相对论力学规律,如天文学中研究的星系、星系团、总星系以及距地球数百亿光年的宇宙部分。

2. 天体和天体系统

天体是宇宙各种物质个体的总称,包括恒星、行星、卫星、彗星、流星体、陨星、小行星、星团、星系、星际物质等。

一些天体的运动和特征密切相关而形成一个体系,被称为天体系统,如地月系、太阳系、银河系、河外星系、星系群/星系团、超星系团、总星系等。

3. 时间、长度、质量

时间,即中国古人所谓的“宙”。虽然人类很早就以自然界的周期性现象作为时间基准指导生产、生活活动,如“日出而作,日入而息”,但直到 19 世纪,高精度、系统化定义的时间概念才形成。

时间本身在天文学中具有非常重要的地位,不同应用领域对时间观测的精度有着多样化的要求。时间的典型应用与精度如表 1.1 所示。

表 1.1 时间的典型应用与精度

应用范围	时刻准确度(ns)	频率稳定度(Hz)
卫星精密定位和卫星精密定轨	优于±5	优于±1×10 ⁻¹³
卫星导航	±20	±2×10 ⁻¹³
电子侦察卫星	±10	±5×10 ⁻¹³
巡航导弹	±50	±5×10 ⁻¹³
卫星测轨	±50	±5×10 ⁻¹²
高速数字通信网	±500	±1×10 ⁻¹²
电力传输网	±1 000	±1×10 ⁻¹¹
电视校频	—	±5×10 ⁻¹²

长度的国际制基本单位是米(m)。1791 年,法国科学院采用在海平面上地球赤道到北极点距离的千万分之一作为 1 米。米的定义不断精化,直到 1983 年,将光在真空中 1/299 792 458 s 的时间间隔所经路程的长度定义为 1 米,并一直沿用至今。

由于 1 米表示的距离较短,如果用于天文学,许多数字的长度太大,形成所谓的“天文数

字”而不便阅读。所以,在天文学中,经常使用一些很大的长度单位。因为天文学最初的重要研究是从太阳系开始的,所以一个很自然的单位就是日地的平均距离。该距离被定义为一个天文单位(AU,Astronomical Unit),即

$$1 \text{ AU} = 1.495\,978\,7 \times 10^{11} \text{ m} \quad (1.1)$$

随着人类的目光涉及宇宙更遥远的部分,天文单位还是太小,所以又引入了更大的距离单位,以光在真空中一年传播的距离——光年(ly, Light Year)作为单位,1 光年约合 9.46 万亿千米。比如离太阳最近的恒星距太阳 4.22 光年。

$$1 \text{ ly} = 63\,240 \text{ AU} \quad (1.2)$$

质量的国际制标准单位是千克(kg)。天文学上经常会有天体质量的描述。显然,用千克作为单位,同样有“天文数字”的问题,所以天文学引入以太阳质量作为单位质量的表示方法。

1.1.3 天文学的分类

经典的天文学分类方法将天文学分为天体测量学、天体力学和天体物理学,但是随着观测手段的进步和天文学理论的发展,分类也趋于细化。

现代天文学可分为天体测量学、天体力学、太阳物理和行星物理学、恒星和星际介质物理学、星系物理和宇宙学、光学和红外天文学、射电天文学、空间天文学等。

天体测量学包括球面天文学、方位天文学、实用天文学、天文地球动力学等方面的内容;天体力学主要研究摄动理论、天体力学定性理论、天体力学数值方法、历书天文学等;天体物理学包括太阳物理学、恒星物理学等方面的内容。

1.1.4 天文学的发展

从人类文明发展的时代序列,我们看看天文学是从哪里来,如何发展的,这对我们把握和认识天文学又将往哪里去是非常有益的。

1. 古代天文学

古人在考虑地球有多大的同时,也在考虑地球在宇宙中的位置。这直接激发了古代宇宙理论和天体运动理论的蓬勃发展,涌现了许多种理论和学说,虽然这些学说由于分别受东西方不同时期思维模式的影响而在细节上有很多不同,但大致可以按照人类文明的发展进程分为天圆地方说、地圆(球)说及地心说、日心说。

(1) 天圆地方说

具有代表性的有中国的“盖天说”和古希腊泰勒斯的学说。《晋书·天文志》中记载:“天圆如张盖,地方如棋局。天旁转如推磨而左行,日月右行,随天左转,故实东行,而天牵之以西没。”后来,“盖天说”又进一步改进为:“天似盖笠,地法覆盘,天地各中高外下。”古希腊泰勒斯认为,大地是浮于水上的圆盘。

天圆地方说或天圆地圆说提出后,人类很快发现了该理论与实际观测有许多矛盾之处,于是地圆(球)说及地心说渐渐建立起来。

(2) 地心说

有明确记载,最早提出地球是圆球形的是古希腊的毕达哥拉斯,他认为宇宙应该是一个

和谐的统一体,由此认为天体应该是球形,而天体的运行轨道应该是圆形。但是这一时期还主要是以思辨的方式研究宇宙,直到柏拉图开始用几何系统来表示天体的运动,西方天文学才进入了一个崭新的时期,而这一点也被大多数学者认为是中西方天文学的分水岭,也被认为是中国天文学后来落后于西方天文学的主要原因之一。柏拉图所提出的同心球宇宙结构模型认为地球位于同心球的中央,固定不动,向外依次是月、日、水星、金星、火星、木星和土星,它们都围绕地球转动。后来,亚里士多德将地心说系统化,认为宇宙的中心为不动的地球,其外包裹着 55 层透明同心球层,向外依次是月、日、水星、金星、火星、木星和土星,最外面是恒星所在的球层。在地心说的支持下,人类开展了大规模的观测,发现了一些难以解释的现象,如行星的顺行和逆行,于是阿波罗纽斯提出了本轮均轮说来解释行星的视运动。阿波罗纽斯认为,行星绕着称为本轮的较小圆周做匀速运动,而本轮的中心沿着称为均轮的大圆周做匀速运动,所有均轮的中心是地球。到了公元 2 世纪,托勒密在总结前人观测和研究的基础上,给出了比较严密的地球中心说理论(图 1.1)。

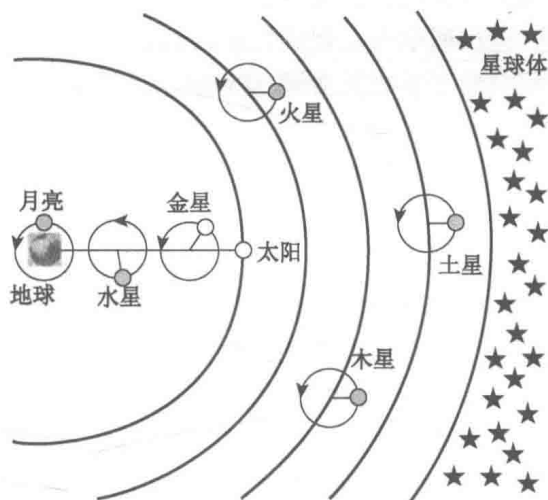


图 1.1 托勒密的地心说

(3) 日心说

波兰天文学家哥白尼经过近 40 年的潜心观测和研究,终于断定托勒密的地心体系是错误的。他认为居于宇宙中心的不是地球而是太阳,包括地球在内的行星都围着太阳运转。地球不仅绕太阳公转,而且还绕轴自转。哥白尼的不朽之作《天体运行论》解决了天文学中的基本问题,彻底改变了那个时代人们的宇宙观念。他的日心地动说开辟了经典天文学的道路,为近代天文学的发展奠定了基础。同时,也引起了罗马教廷的惶恐和仇恨,意大利学者布鲁诺因支持和宣传哥白尼的学说而被教廷活活烧死;伽利略由于用自己的新发现证明日心说的正确性而受到终身监禁。

2. 近、现代天文学

近代天文学最重要的发展是天体力学,其最重要的发现则是基于天体力学原理发现并测量了天王星和海王星。而天王星和海王星的发现,则强有力地验证了万有引力定律的正确性。在这一时期,天文学家们还通过精密的观测、演算和分析,于 1785 年获得一个比太阳系还大的扁平的银河系结构图,同时,开创了天文学的又一新分支——恒星天文学。