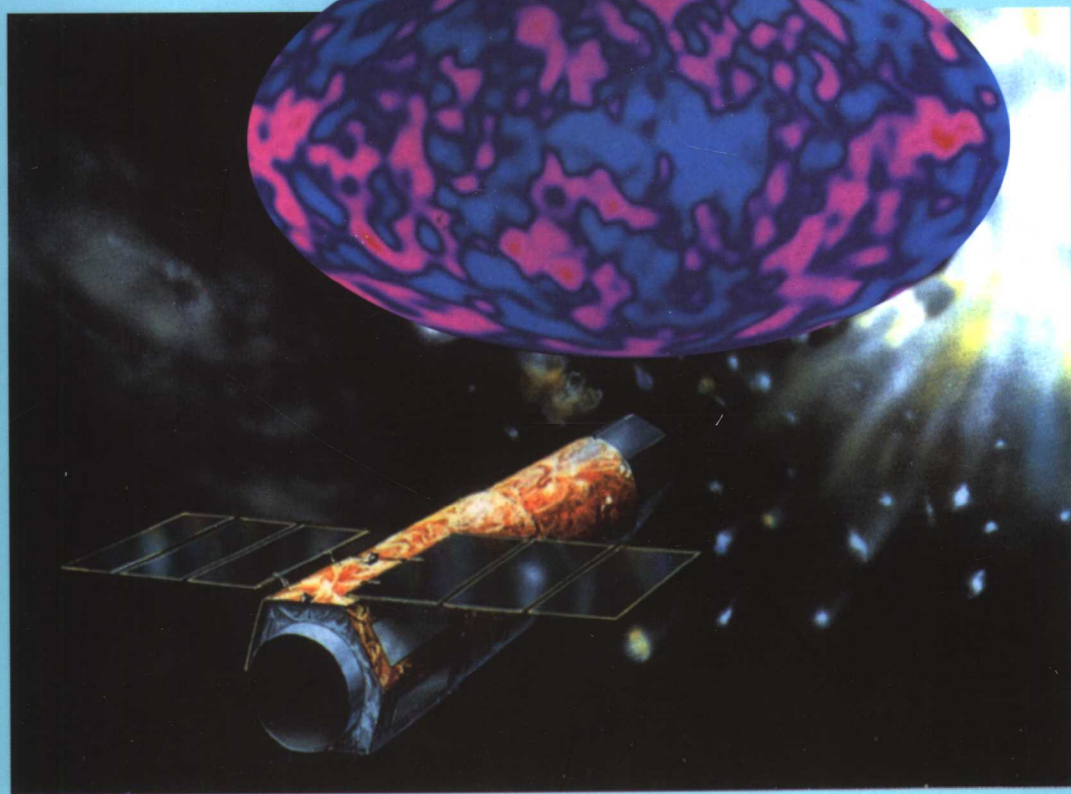


中国科学院国家天文台

赵铭 著

基本天文学及其应用系列丛书

天体测量学导论



中国科学技术出版社



中国科学院国家天文台

基本天文学及其应用系列丛书

天体测量学导论

赵 铭 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

天体测量学导论/赵铭著. —北京: 中国科学技术出版社,
2006.9

(中国科学院国家天文台基本天文学及其应用系列丛书)

ISBN 7-5046-4448-X

I. 天... II. 赵... III. 天体测量学-研究 IV. P12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 082681 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志, 未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 010-62103210 传真: 010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 26.75 字数: 450 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

定价: 58.00 元



作者简介

赵铭 男，中国科学院上海天文台研究员，博士生导师。1941年生，江苏连云港人。1964年毕业于南京大学天文学系，1968年上海天文台研究生毕业。长期从事天体测量学的实测、数据处理、基础理论研究、天文地球动力学研究，以及研究生的指导和教学工作。

主 编：叶叔华

副主编：韩延本

编 委：（按姓氏拼音顺序排列）

韩天芑 李志安 冒 蔚 吴连大

萧耐园 徐家岩 杨福民

《中国科学院国家天文台基本天文学 及其应用系列丛书》序

由中国科学院国家天文台支持的天文专业书出版工作，将改变当前天文专业书籍非常缺乏的局面。天文专业门类颇多，按原采的分类：天体物理、天体力学、天体测量已不太合适。近年来，国际天文学联合会已将其专业委员会分属 11 个分部，其中的历表、天体力学与动力天文学天体测量、地球自转、时间五个专业委员会归属于基本天文学分部。在天文专业书出版工作中，我们把以上领域归总为“基本天文学及其应用”系列。

20 世纪以来，基本天文学的各个分支都在观测精度上有了数量级的提高，与天体物理、地球科学和空间科学的有关研究形成学科交叉，并且拓展了多种应用。

以地球自转为例，当前采用的射电、激光、GPS、卫星测高等技术，已经可以监测到地球上厘米甚至毫米级的运动，包括地壳形态变化和海平面变化。地球自转变化是地球整体角动量变化的体现，自必牵涉到地球的核、幔、地壳、海洋、大气各圈层的物质运动及其相互作用，与地球科学和空间科学关系十分密切，其技术与研究方法，适用于对月球和行星的探测。高精度的观测，既对天空和地面的参考系以及有关的天文常数、历表和时间系统提出更高的要求，又为它们的改进提供了前所未有的高精度观测数据。在人造卫星和飞船的精密定轨以及其在有关的对地观测的应用上，都少不了天体力学的工作，从而推进了高精度的天体力学发展。

新兴的天文地球动力学是从地球自转研究发展而来的分支，是用空间技术对地观测，研究地球的整体运动以及其各圈层的相互作用，是基本天文学与地球科学，空间科学的交叉。

同样，时间原来全属天文学范畴，原子频率标准出现之后，时间已成为计量科学与基本天文学的交叉学科。地面上的导航定位，原来是整个基本天文学各个分支(即历表、天体力学、天体测量、地球自转、时间)的综合应用。采用卫星技术之后，空基导航定位系统，如 GPS 和欧盟即将投入的伽利略系统，各方面使用很广泛而且很成功的技术集成，是基本天文学与空基技术的结合。

正在酝酿中的天基导航定位系统，将采用脉冲星作为天然的高精度空间钟，从而把导航定位的精度和安全性提得更高。这就需要有脉冲星的结构和物理性质等的天体物理研究，以及更精确的太阳系行星历表来提供脉冲到达地球的时刻。总之，一项新技术的实现往往要求学科交叉并从而推动它的发展。

天体测量是为天文的各项研究提供天体位置、距离速度等基本数据的分支，并且为地球科学、空间科学提供应用。近年来，空间和地面的观测设备，往往同时提供天体的位置、距离、光度、光谱、视向速度等的测定，成为天文学研究的更为完备的基本数据。天体测量就在恒星、银河系、星系以及太阳系外的行星系统搜索研究中，与有关的天体物理研究交叉发展。已经工作多年的天体测量卫星依巴谷以及哈勃望远镜中的天体测量设备，给天文学提供了前所未有的基本数据。今后的天体测量卫星 Gaia，还将提供上亿颗恒星的庞大数据源，空间天体测量为天文学研究开阔了新的境界。

“基本天文学及其应用”系列的第一本书，是《天体测量方法——历史、现状和未来》。它将为天文学、地球科学、空间科学领域的读者(研究生和专业人员)提供详尽的参考。本系列还有其他书籍将陆续出版，将为读者提供有关学科的阐述和最新的资料。

叶叔华

2006年2月

内 容 提 要

本书用三维空间中的矢量表达方式，探讨历史上的和现代的各类不同的天体测量理论、方法和技术间的共性与差异，归纳成具有普遍性的理论框架。在此基础上剖析具体的天体测量方法和技术，总结出面对天体测量问题时的思考方法。本书是作为天体测量和天体力学分支学科研究生的专业基础教材而撰写的，对本学科以及测绘、航天、地球科学等相关领域的科研、教学人员，也可作为参考。

本书中也提出一些有待讨论和思考的问题，并不局限于已成定论的内容，希望有助于启发学生的自主创新思维。

谨以此书

敬献给我的导师叶叔华
院士八十华诞！并向开拓新
中国天体测量事业的各位前
辈们致以诚挚的敬意！

前 言

天文学是一门古老的学科，其发展历史几乎和人类文明史同步。在天文学漫长的发展历史中，逐渐形成三个主要的学科分支：天体测量学、天体力学和天体物理学。对于它们的研究领域，作者将其归纳为：

天体测量学：测定和研究天体的**几何特征**（如天体方向、距离、张角、姿态等）。

天体力学：测定和研究天体的**动力学特征**（如天体间的相互作用力以及在该作用力下的天体的加速度、运动轨迹或运动参数等）。

天体物理学：测定和研究天体的**物理特征**（如天体的物质状态、元素构成、温度、各波段的辐射等特征以及它们的演化等）。

天体测量学是天文学中最早发展起来的分支。为了农业生产的需要，在人类文明的初期已经开始了早期的天体测量活动。早在公元前 4 世纪，我国战国时期的天文学家石申已编制了最早的恒星星表；公元前 2 世纪，古希腊天文学家伊巴谷（Hipparchus）建立了早期的方位天文学；约在 2000 年前，以张衡为代表的浑天说已经具备了球面天文学的雏形，浑仪已经是一种用肉眼观测天体的赤道坐标和地平坐标的仪器。古代的人类用原始的仪器测定恒星的位置、太阳和行星的运动、太阳和月亮的角直径等数值，并发现了岁差，测定了岁差值。以现在的眼光看，那时的测量精度当然很低，只能达到角分级的水平。自从发明了望远镜，观测精度大大提高，达到角秒级水平。近百余年来，人们设计了各种专门的望远镜开展天体测量工作，精度进一步提高，达到十分之一角秒级水平。自 20 世纪 60 年代，现代天体测量技术开始出现，射电干涉、激光测距、无线电测距与测速、光干涉等技术的应用，使天体测量精度提高到毫角秒级甚至亚毫角秒级水平。计划中的第二代天体测量卫星 Gaia 可望将天体测量精度提高到 10 微角秒水平。这中间，从最初的古代天体测量技术到现代的天体测量技术，观测精度提高了 7~8 个量级。就观测仪器来说，无论是外形还是技术原理，现代的仪器已完全没有早期仪器的任何痕迹了。此外，当初的天体测量观测只限于可见光波段，现代已扩展到无线电波以及红外线、紫外线等各种波段。

2000 多年来, 一种又一种天体测量方法出现了又消失了; 一种又一种仪器发明了又淘汰了; 一个个新常数取代了前面的, 又被后面的所取代。一个个新的概念被提出, 一种种新的误差被探讨……。这就是天体测量学的历史。本书希望从天体测量学的历史进程中总结出具有共同性的、简明的理论框架, 归纳出对今后的思维有借鉴价值的认识。基于这种考虑, 本书不是以观测技术为线条展开叙述, 也不是按照通常的天体测量理论结构逐条阐述。作者的目的是不是试图将本书变成涵盖各种最新方法和技术详细原理的天体测量学“大全”, 更不是要使它成为天体测量学领域的最新公式和数据的“使用手册”。本书的基本撰写思想是从各种天体测量技术之间的共性出发, 探讨超越具体技术的普遍性的理论, 并用一个统一的理论框架和数学表达形式作出阐述。这也是本书和现有的许多天体测量方面的著作的主要区别。它特别注重从天体测量学科的整体高度俯瞰整个学科领域, 力图勾画出天体测量学各部分之间的内在联系, 用统一的概念剖析具体的天体测量技术和方法。在本书中具体的测量技术和方法仅作为基本理论的应用实例出现。所以, 本书是天体测量、天体力学和其他相关专业的大学生、研究生以及研究工作者在漫游天体测量学科领域广阔天地时的一份有益的“导游图”。它不仅有益于读者更好掌握各种现有的天体测量技术的基本理论基础, 而且也为他们在这个领域中不断创新提供一种新的思考方式。作为一门成熟的学科和应用性突出的学科, 天体测量学的基本特点是: 有待解决的理论难点虽不多, 但需要掌握的理论结构并不简单, 尤其是概念性的问题不少。而且, 由于现代天体测量技术已经达到非常高的测量精度, 一些理论和概念之间的差异细微。因此, 要深刻掌握天体测量学科的理论体系, 并能自如地应用于实际问题的研究中去却相当不容易。如果把许多门类的科学研究比喻为演杂技的话, 天体测量学则好比走迷宫。演杂技要不断追求高精尖, 不断有所突破。走迷宫则看似平常, 实则不易。如果没有对全局的准确把握, 很容易长久陷入迷宫而找不到解决问题的出路。所以掌握全局概念对天体测量学具有特殊重要性。能否尽快建立起清晰的、整体的基本概念, 是决定当今年轻的天体测量工作者能否尽快在这个领域中取得自由的关键。我们力求使本书成为引导读者进入天体测量领域的通道, 成为连接天体测量各种技术和方法的接口, 有助于读者形成从天体测量学整体概念的高度去思考具体的天体测量问题的一种思考方式。作者认为, 这种思考方式对于推动我国天体测量学科研究的自主创新是有益的。这是撰写本书的主要目的之一。

撰写本书的另一个目的是,希望促进我国天体测量学研究工作中的理论表述方式尽快更新。自古以来,天体测量学理论都建立在天球概念的基础上,形成了球面天文学理论系统。该理论系统将三维空间的问题投影到二维的球面上,或者说是把空间三维问题转变成约束三维曲面上的问题。这是天体测量学的第一代表述理论。今天看来,这种表述方式不仅复杂不便,而且常常不得不引进近似。随着测量精度的提高,球面的表述方式越来越不能适应天体测量学发展的需要。特别是由于近距离天体的测量越来越重要,观测精度的快速提高,天体的距离参数越来越受到关注。而且许多应用性问题比过去更加复杂,要求更高的计算精度。所以,单用横向参数已经不足以精确描述天体的分布和运动特征,如果继续沿用球面的表述方式常常不能满足需要。从20世纪60年代开始,国际上逐渐将天体测量理论的表述方式从球面扩展到三维空间,用三维的矢量表达方式取代球面三角的表达方式。20世纪80年代, Merray 的经典专著——《矢量天体测量学》发表,标志着天体测量学的第二代表述理论系统已经基本完善。和第一代的理论系统相比,第二代理论系统的优点是显而易见的。它易于推导、易于应用,特别适合计算机计算。但是由于 Merray 的专著非常抽象化、数学化,使得许多读者感到阅读困难,以至于这本专著中的许多很好的表达方式至今还没有能在我国读者中得到很好推广应用。本书将《矢量天体测量学》的表达方式和我们的天体测量学的理念结合起来,和天体测量的具体问题结合起来,并且和传统的球面表达方式在比较中并行阐述,以期使读者更容易理解矢量的表述方式。作者希望本书能在推动我国天体测量学研究中的理论表达方式更快地更新方面作出一份贡献。

本书的内容框架分成两大部分:①天体几何特征的描述;②天体几何特征的测量。前者是对天体的坐标位置和坐标速度的描述,以及天体发出的信号在到达观测仪器之前的行为的描述。后者是对天体几何特征的测量方法的描述以及对信号进入仪器之后行为的应对措施。

在本书构思和撰写过程中,作者得到叶叔华院士、韩天芑研究员、赵刚研究员(国家天文台)、冒蔚研究员、韩延本研究员、杨福民研究员、黄城研究员等各位的多方面支持、推动和帮助。这些帮助,对本书书稿的最终完成和出版是至关重要的。南京大学夏一飞教授对本书稿作了认真负责的审阅,提出重要和中肯的修改意见。李金岭研究员、王广利副研究员、唐正宏副研究员在和作者多年共事过程中,对本书的有关内容

作过多次深入具体的讨论,对本书的撰写和出版作过多方面的支持帮助。作者谨对各位致以衷心的感谢。

书中许多方面是作者的个人见解,因此特别欢迎读者的批评指正和磋商讨论 (E-mail: mzhao@shao.ac.cn)。

目 录

第一章 概 论

- §1.1 天体测量学的内涵····· 1
- §1.2 地基天体测量的观测方程····· 3
- §1.3 误差方程的建立和解算····· 8
- §1.4 天体测量学的数学表述方式·····11

第二章 天体位置和方向的描述

- §2.1 天体的位置和方向·····13
- §2.2 几何位置和几何方向·····17
- §2.3 光程位置和光程方向·····37
- §2.4 光子的初始方向和到达方向·····39
- §2.5 观测方向·····50
- §2.6 天体位置和方向的计算·····64

第三章 天体视向参数的描述

- §3.1 物理时延·····70
- §3.2 光行时的变率·····78
- §3.3 较差光行时·····80

第四章 地基天体测量参考系

- §4.1 相关的概念·····83
- §4.2 基本天球坐标系的实现·····86
- §4.3 基本地球坐标系的实现·····92
- §4.4 关于坐标系之间的联系·····102

第五章 地球的空间姿态

- § 5.1 地球空间姿态的描述 ·····110
- §5.2 地球动力学轴的空间长期运动 ·····112
- §5.3 地球动力学轴的空间周期性摆动 ·····126
- §5.4 地球动力学轴的本体运动 ·····139
- §5.5 地球的绕轴自转 ·····150
- §5.6 天体的周日视运动 ·····165
- §5.7 其他天体姿态描述举例 ·····176

第六章	天文历书系统	
§6.1	天文时间系统·····	184
§6.2	天文常数系统·····	197
§6.3	天文历书·····	205
第七章	天体观测方向的坐标测量	
§7.1	基本原理·····	209
§7.2	全天量度坐标系和理想坐标系·····	212
§7.3	全天量度坐标系中的方向测量·····	215
§7.4	有视面天体的方向测量·····	240
第八章	天体观测方向的较差测量	
§8.1	局部参考架中的较差测量·····	246
§8.2	部分重叠照相观测的整体平差·····	260
§8.3	照相观测的跟踪方法·····	272
§8.4	无量度坐标系的较差测量·····	275
第九章	天体方向测量数据的应用	
§9.1	编制恒星星表·····	277
§9.2	天文测地·····	298
§9.3	确定某些天文常数·····	303
§9.4	近距目标的定位和定轨·····	311
第十章	天体视向参数的测量和应用	
§10.1	基本原理·····	313
§10.2	测量方法·····	316
§10.3	光行时测量中系统误差的处理原则·····	325
§10.4	较差 VLBI 原理·····	327
§10.5	遥远天体的计时观测·····	328
§10.6	视向参数测量数据的应用·····	330
第十一章	某些天体测量问题的定性分析法	
§11.1	误差方程的解·····	340
§11.2	独立参量解的分析·····	343
§11.3	约束变量解的分析·····	353
§11.4	定性分析方法的归纳·····	356

附录 A	天球和球面坐标系	358
附录 B	坐标变换的矩阵表示法	368
附录 C	矢量的运算	380
附录 D	球面三角运算的矢量表达式	397
附录 E	几个章动序列表的表达格式	400
附录 F	轨道坐标系	403
附录 G	本书符号和术语约定	410
参考文献		411

第一章 概 论

§ 1.1 天体测量学的内涵

天体测量学的主要任务是精确测定和研究天体（包括地球）的几何特征。用于描述天体几何特征的参数，包括下面四类：

(1) 位置或方向参数

天体质心在空间中的坐标。至今任何测量方法和技术都不能直接完整地测定天体位置的三维坐标参数。有的技术只能测定天体相对于某参考方向的横向角度（如子午环、CCD照相机等），有的则只能测定天体到观测者的视向距离或视向速度。因此历来很自然地把天体的位置用球面坐标表示，并把空间的三维坐标参数分成两类：以角度表示的横向参数和以距离表示的视向参数。如果只有横向坐标参数，目标天体被表示在单位半径的球面上，这时的天体位置是**球面位置**。球面位置用经度和纬度两个球面坐标表示。如果同时具有天体的横向角度参数和视向距离参数，它们可以被表示在三维的空间内，这时的天体位置称为**空间位置**。为避免混淆，本书中将三维的空间位置称为“位置”，将球面位置称为“方向”。

(2) 速度参数

这是天体位置参数的变化率。由于和上面同样的原因，坐标速度也分成横向速度和视向速度。横向速度用角度的变化率表示，视向速度用距离的变化率表示。

(3) 姿态参数

对于一个不作为质点看待的天体（特别是观测者所在的中心天体），常需要研究其相对于空间背景的姿态。天体的姿态可以用一个固定于天体本体的轴线在空间的指向，以及天体对这个轴线的旋转角表示，总共三个自由度。但由于这些角度可能是时变的，为便于描述其变化规律，有时引进更多的参数。例如在地球空间姿态的描述中，就引进了参考轴在空间的指向参数（进动角、章动角），参考轴在地球本体的指向参数