

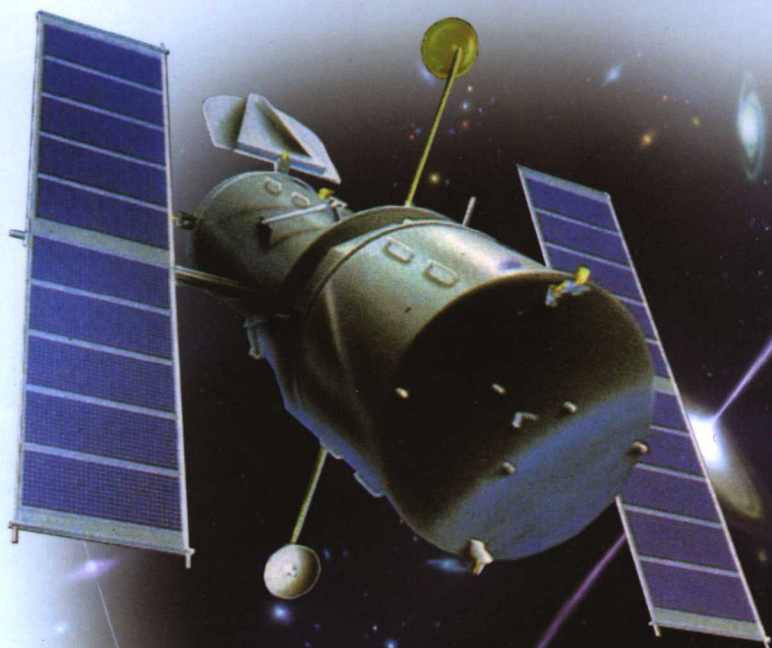
中国科学院国家天文台


李东明 金文敬 夏一飞等 著

基本天文学及其应用系列丛书

天体测量方法

——历史、现状和未来



 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

天体测量方法

——历史、现状和未来

李东明 金文敬 夏一飞 等著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

天体测量方法: 历史、现状和未来/李东明等著. —北京: 中国科学技术出版社, 2006. 8

(中国科学院国家基本天文学及其应用系列丛书)

ISBN 7-5046-4276-2

I.天... II.李... III.天体测量—测量方法 IV.P12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 005104 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: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

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 彩插: 4 页 字数: 420 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定价: 56.00 元



作者简介

李东明 男，1935年生，江西省南昌市人。1957年7月毕业于南京大学天文系。1958~1984年在中国科学院北京天文台，1984年底起在中科院紫金山天文台工作。研究员，博士生导师。曾任职实用天文研究室主任。中国天文学会第七届理事会理事及星表与天文常数专业委员会主任；国家自然科学基金委员会第三、第四、第七、第八届学天文科评审组成员。光电等高仪的研制（项目提出人及主要完成者）获得了1978年全国科学大会奖。中国光电等高仪总星表的编制（项目提出人及一般参加者）获得1989年中国科学院自然科学一等奖。中国光电等高仪的现代化（项目主持人）获得1992年中科院科技进步二等奖。主要科研成果表现在：成功地研制了中国光电等高仪，并为基本天体测量方面作出了贡献。发表论文近40篇及专著两本。

主 编：叶叔华

副主编：韩延本

编 委：（按姓氏拼音排列）

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，按原来的分类：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。

二十世纪以来，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、视线速度等的测定，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库，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

前 言

近 20 年来, 由于天体测量新技术的发展, 天体测量的观测精度由百分之几角秒提高到毫角秒, 天体测量仪器的极限星等由 11、12 等扩展到 16、17 等, 观测波段由单一的光学波段发展到光学、射电、红外多个波段。高精度的 Tycho-2 星表和 UCAC 星表的问世使得原来只做天体物理观测的米级反光望远镜也介入了天体测量工作。极限星等的提高导致高密度、高精度的天体测量星表的问世, 使得原来只做天体物理观测的米级反射望远镜也可以介入天体测量工作。依巴谷星表的发表、新参考系的引入、时间尺度的完善和 CCD 天体测量成为地面天体测量的最活跃、最重要的一个领域, 使天体测量进入一个新时代。新技术、新方法、新成果大大地拓展了天体测量学的范围。这一切使经典天体测量学的内容、方法和实践发生了许多重大变化, 并有了惊人的发展。

本书较全面系统地阐述了当代天体测量学方法的基本知识。全书包含八章, 第一章论述天体测量学的任务、经典方法及其与现代天体测量的联系; 第二章给出天体测量学中关于球面天文的基础知识, 以备非天体测量专业人士查阅; 第三章、第四章、第七章介绍现代光学天体测量的方法、技术和进展; 第五章介绍射电天体测量原理; 第六章介绍空间天体测量技术; 第八章描述天体测量学的未来发展。全书内容出新, 反映了近十多年来天体测量学的新进展。本书可作为天体测量工作者的基本参考书, 亦可供天文、地学、空间科学等领域的科技人员参考。

本书的第一章、第三章、第四章由李东明负责撰写, 第二章、第五章由夏一飞撰写, 第六章至第八章由金文敬撰写。第四章部分章节邀请了有关的专家或一线的年轻工作者参加编写。4.2 ~ 4.4 节由王传晋, 4.7 节由李东明和鲁春林, 4.5 节由唐正宏和李东明、4.6 节由彭青玉和赵海撰写。谨向他们致以谢意。另外金文敬还撰写了 3.4.4 和 3.5.3 小节。全书已由作者相互审校, 并经李东明通校。李东明主持了全书的编写工作。

宋国玄先生审阅了第八章部分章节和其他有关天体物理的章节, 王家骥先生审阅了第一章、第三章中视差部分的章节; 姚保安先生为 4.4.4 节之 2 提供了资料及初稿; 陈翘先生、舒似竹和平惠娟女士在第六章至

第八章的插图制作, 排版和文字录入方面给予了帮助)。完稿后国家天文台天体测学、天体力学与天文地球动力学著作丛书编委会邀请了肖耐园、沈凯先两位先生审阅。本书得到了中国科学院国家天文台的资助以及国家自然科学基金会重点课题 10333050 和 10133010 的协助, 作者在此一并致谢。

本书内容广泛, 涉及天体测量众多领域, 由于作者学术水平有限, 加上天体测量学科发展迅速, 书中不当和错漏之处在所难免, 恳请读者批评指正。

目 录

第一章 天体测量学引论及经典方法(1)	
1.1 关于天体测量学的任务和历史演变(1)	
1.1.1 天体测量学的内容和科学目标(1)	
1.1.2 天体测量发展简史及最新进展(2)	
1.1.3 历史演变和必要说明(3)	
1.2 经典天体测量方法和仪器的回顾(4)	
1.2.1 历史和现状.....(4)	
1.2.2 照相天体仪.....(5)	
1.2.3 子午测定星位的一般原理和绝对测定方法.....(7)	
1.2.4 子午环、垂直环和大中星仪.....(8)	
1.2.5 中国光电等高仪(12)	
1.2.6 照相天顶筒和天顶仪(13)	
1.3 基本星表的编制和我国的贡献(16)	
1.3.1 概况(16)	
1.3.2 第五基本星表(FK5).....(18)	
1.3.3 编制 FK5 的新资料 and 中国的贡献.....(18)	
1.4 经典仪器的重要成果和工作现状的评述(19)	
1.4.1 综合星表和照相星表.....(19)	
1.4.2 对依巴谷参考架的加密和扩充的贡献.....(21)	
1.4.3 恒星三角视差的测定.....(22)	
1.4.4 其他.....(24)	
1.5 关于中国天体测量事业的发展(26)	
参考文献.....(30)	
第二章 时间、参考架、恒星的位置和运动(31)	
2.1 时间系统(31)	
2.1.1 世界时系统.....(31)	
2.1.2 历书时系统.....(33)	
2.1.3 原子时系统.....(35)	

2.1.4	IAU 的时间尺度	(36)
2.2	天球参考系	(40)
2.2.1	惯性参考系	(41)
2.2.2	协议的天球参考系	(41)
2.2.3	国际天球参考系	(44)
2.2.4	运动的瞬时参考架	(46)
2.2.5	天文常数	(48)
2.3	恒星的位置	(51)
2.3.1	恒星位置	(51)
2.3.2	影响恒星位置的各种因素	(52)
2.3.3	恒星视位置的计算	(56)
2.4	恒星的运动	(58)
2.4.1	恒星的空間运动	(58)
2.4.2	自行和视向速度中的系统影响	(61)
2.4.3	利用恒星的空間运动研究太阳运动和银河系自转	(65)
	参考文献	(68)
第三章	照相天体测量原理	(70)
3.1	概述	(70)
3.2	理想坐标与计量坐标	(75)
3.2.1	坐标系原点、坐标轴方向和比例尺不同的影响	(75)
3.2.2	光心误差和底片倾斜	(77)
3.2.3	畸变	(78)
3.2.4	彗差和星等差	(78)
3.3	若干天文因素对理想坐标的影响	(79)
3.3.1	讨论和恒星小位移的一般公式	(79)
3.3.2	周年光行差和周日光行差	(80)
3.3.3	大气折射较差	(82)
3.4	底片模型和归算技术的讨论	(85)
3.4.1	底片常数与一般归算原理	(85)
3.4.2	大视场的归算	(86)
3.4.3	行星和人造卫星的归算	(87)
3.4.4	整体平差方法的应用	(87)
3.5	恒星自行和视差的测定	(91)

3.5.1	自行的测定	(91)
3.5.2	相对视差 π 的测定	(93)
3.5.3	绝对视差的改正	(94)
3.6	照相天体测量的重要成果述评	(97)
	参考文献	(101)
第四章	CCD 地面天体测量	(102)
4.1	引言	(102)
4.1.1	小视场 CCD 天体测量	(102)
4.1.2	全球 CCD 天体测量	(103)
4.1.3	其他类型的观测	(105)
4.2	CCD 器件综述	(106)
4.2.1	历史回顾	(106)
4.2.2	CCD 的工作原理	(107)
4.2.3	CCD 的结构	(110)
4.2.4	CCD 的读出方法	(111)
4.3	天文 CCD 探测系统	(115)
4.3.1	CCD 工作系统	(115)
4.3.2	CCD 系统的特性	(119)
4.3.3	信噪比和极限星等的估算	(127)
4.3.4	增益和噪声的测定	(130)
4.3.5	CCD 的优缺点和选购	(132)
4.4	CCD 图像的处理	(135)
4.4.1	数字图像	(135)
4.4.2	CCD 图像的预处理	(135)
4.4.3	CCD 图像上的星像	(138)
4.4.4	星等的测定	(140)
4.4.5	星像的二维高斯拟合	(144)
4.4.6	重心定位法	(145)
4.4.7	图像复原	(148)
4.5	CCD 天体测量的(恒星)观测和归算的一般方法	(151)
4.5.1	概述	(151)
4.5.2	CCD 常数模型的确定	(154)
4.5.3	CCD 整体平差	(155)

4.6	太阳系小天体的观测和归算	(156)
4.6.1	引言	(156)
4.6.2	天然卫星的精确定位观测	(157)
4.6.3	小行星的定位观测及数据处理	(159)
4.7	人造卫星的 CCD 观测和归算方法	(163)
4.7.1	通过仪器参数测定卫星位置	(163)
4.7.2	相对恒星背景测定卫星位置	(164)
4.7.3	人造卫星观测资料的处理	(165)
	参考文献	(169)
第五章	射电天体测量	(172)
5.1	引言	(172)
5.2	射电干涉的基本原理和观测量	(174)
5.2.1	天体测量的射电干涉技术	(174)
5.2.2	射电干涉仪的信号分析	(178)
5.2.3	观测量	(180)
5.3	VLBI 的时间延迟和延迟率	(181)
5.3.1	VLBI 的基本几何原理	(181)
5.3.2	理论时间延迟模型	(185)
5.3.3	基线定向模型	(188)
5.4	VLBI 的物理模型和归算技术	(190)
5.4.1	涉及的物理模型	(190)
5.4.2	VLBI 的参数解算	(195)
5.5	射电天体测量的应用和研究	(198)
5.5.1	射电天体测量的主要用途	(198)
5.5.2	较差 VLBI 测量	(201)
5.5.3	空间 VLBI	(203)
	参考文献	(205)
第六章	空间天体测量	(207)
6.1	历史的回顾	(207)
6.2	依巴谷卫星	(208)
6.2.1	仪器和观测原理	(208)
6.2.2	观测方法	(211)
6.2.3	输入星表	(212)

6.2.4	依巴谷观测资料的处理	(213)
6.2.5	第谷观测资料的处理	(220)
6.2.6	依巴谷和第谷星表	(223)
6.3	哈勃空间望远镜	(224)
6.3.1	精密导星传感器的结构和观测原理	(225)
6.3.2	观测方式	(229)
6.3.3	观测资料的处理	(230)
6.3.4	FGS 天体测量的校正	(231)
6.4	空间天体测量成就的评述	(236)
6.4.1	依巴谷星表在参考架、距离和年龄尺度、星系 天文上的贡献	(236)
6.4.2	FGS 在参考架联系、双星等研究上的作用	(243)
	参考文献	(252)
第七章	光学参考架的建立和天体测量星表的编制	(254)
7.1	光学星表的编制方法	(254)
7.1.1	综合星表的编制	(255)
7.1.2	星表系统误差的分析方法	(257)
7.1.3	星表的精度估计	(262)
7.2	光学参考架与其他参考架之间的联系	(266)
7.2.1	参考架比较的基本方法	(266)
7.2.2	光学参考架与其他参考架之间的联系	(269)
7.3	天体测量的统计理论和应用	(275)
7.3.1	理论提出的背景	(275)
7.3.2	统计天体测量学中的相关函数	(277)
7.3.3	相关函数在星表自行比较、星表位置预测中的应用	(279)
7.4	高密度的天体测量星表	(285)
7.4.1	依巴谷星表的扩充	(285)
7.4.2	基于河外星系的的天体测量星表	(296)
7.4.3	深空的天体测量星表	(304)
7.5	数字巡天及其数据库	(311)
7.5.1	数字巡天(DSS)	(311)
7.5.2	SSS	(316)
7.5.3	斯隆数字巡天(SDSS)	(322)

参考文献	(330)
第八章 天体测量学的未来	(331)
8.1 多波段的天体测量	(332)
8.1.1 红外星表的编制.....	(332)
8.1.2 γ 暴和超新星遗迹的光学认证.....	(336)
8.2 空间天体测量计划.....	(338)
8.2.1 天体测量卫星 Gaia	(338)
8.2.2 SIM planet Quest 计划	(340)
8.2.3 其他空间天体测量计划	(342)
8.2.4 天体测量视向速度	(345)
8.3 地面天体测量的观测计划和展望.....	(351)
8.3.1 晚 M 型矮星、白矮星和棕矮星的观测.....	(351)
8.3.2 长周期双星和聚星的观测	(355)
8.3.3 星团的观测	(356)
8.3.4 地面台站联网观测太阳系天体	(360)
8.3.5 测定视向速度的 RAVE 计划	(362)
8.3.6 地面光干涉技术	(364)
8.4 天体测量资料在天体物理研究中的应用	(371)
8.4.1 银河系的翘曲现象	(371)
8.4.2 天琴 RR 型变星的研究.....	(379)
8.4.3 天体测量方法检测银河系的暗晕物质	(387)
8.4.4 天体测量方法检测地外行星	(389)
8.4.5 天体物理研究的感兴趣天区	(393)
参考文献	(397)
附录.....	(399)

第一章 天体测量学引论及经典方法

1.1 关于天体测量学的任务和历史演变

1.1.1 天体测量学的内容和科学目标

天体测量学是关于精确测量天体位置的学科，是天文学的一个分支。它的研究课题曾经是早期天文学的最主要任务。现代天文学许多重要问题的深入研究仍然需要精确知道天体的距离、方位及其变化，只是对测量精度的要求比 20 世纪初期高出了几个量级；研究的内容更为丰富。天体测量的首要任务仍然是根据天文学研究和空间科学发展的需要，以天体测量星表的形式，建立准惯性的参考架。其主要内容包括：恒星的位置、自行、视差和有关天文常数的精确测定；天体测量星表的编制；以及与上述内容有关的理论和方法的研究。天体测量工作者还常常参加星团和银河系的结构及运动学的研究。

天体测量学的发展与天文学中其他分支学科的发展以及相邻学科的发展紧密相联。地球科学和空间科学的需求极大的推动了天体测量的发展。天体测量的成果为天体物理、天体力学、地球科学和空间科学的研究工作提供了必需的基本参考架和丰富的天体测量参数的数据库。天体力学、天体物理等学科也为天体测量研究提供了不可缺少的知识和理论基础。目前，地球上亮于 11 星等恒星的精确位置由依巴谷卫星的资料得到。恒星的位置受到银河系自转及它们自身在银河系内随机运动的影响而不断变化。依巴谷星表给出了亮星相对河外源参考架在星表历元的位置、自行以及视差的精确数值。除了传统的光学波段和 20 世纪 70 年代兴起的射电波段的工作外，红外、X 射线、 γ 射线等波段的天体测量工作也越来越受到了天文学家的重视。天体的光度测量隶属天体物理工作。随着 CCD（电荷耦合器件）天体测量技术的普及，为了充分发挥天体测量资料在天文研究工作中的作用，天体测量工作者也经常将天体的光度测量包括在自己的工作计划中。

1.1.2 天体测量发展简史及最新进展

在 20 世纪 90 年代中期以前,天体测量学是以亮星作为基本星来建立基本参考架(如第五基本星表,FK5)。天体测量的主要观测仪器是子午环、等高仪、照相天体仪等。一百年来,几代人辛勤劳动推动了天文学、地球科学和空间科学的发展,给我们留下了宝贵财富。近 20 年来,由于空间科学和天文学的发展需求以及观测技术的进步,天体测量的观测精度由百分之几角秒改进到亚毫角秒;天体测量仪器的极限星等由 11mag、12 mag 扩展到 20mag;观测波段由单一的光学波段发展到光学、射电、红外等多个波段。标志上述发展的里程碑是 VLBI 技术的成熟,依巴谷星表的发表和 CCD 观测技术的广泛应用。现在是利用遥远的河外射电源作为参考架的基准点;以甚长基线干涉仪、空间天体测量卫星和 CCD 为终端设备的望远镜作为主要观测仪器。过去的观测局限于光学波段,现在的目标是建立从可见光波段到射电、红外、紫外、X 射线和 γ 射线等波段的基本参考架;过去一台仪器常局限于二维球面上的方位测量,现在已扩展到三维测量(包括距离);等等。尽管如此,天体测量学的科学目标、任务和实测的特点没有根本改变。

20 世纪 90 年代天体测量学的最大成就是河外射电参考架的建立和依巴谷星表的问世。目前,国际上采用的准惯性的基本参考架是 1997 年 23 届国际天文学联合会(IAU)大会发布的国际天球参考架(ICRF)。ICRF 是国际天球参考系(ICRS)的具体实现。ICRF 包括全天 608 颗射电源的位置:其中 212 颗射电源为定义源,294 颗射电源为候选源,102 颗射电源为其他源。坐标精度平均为 $\pm 0.25\text{mas}$,参考架的指向稳定在 $\pm 0.014\text{mas}$ 以内(Giontier A M *et al.*, 2001)。在天文、空间、测地研究诸领域中广泛应用的仍然是光学参考架。1989 年发射的依巴谷卫星开辟了空间天体测量的新纪元(参见 6.2 节)。依巴谷星表包括了近 12 万恒星的高精度的位置、自行和视差资料,从 1998 年起取代 FK5 星表作为新的基本星表。由依巴谷星(不包括双星、聚星等附有标记的星)定义的依巴谷参考架(HCRF)作为 ICRS 在光学波段的具体实现。由于依巴谷星的自行误差,HCRF 的精度将随着时间的推移而下降。维持光学参考架精度的传统方法是利用优秀的子午环和等高仪测定少数亮星的绝对位置,然后用较差方法改进其他参考星的位置。在依巴谷星表发表初期,某些作者曾表示了类似的意见(但主要寄希望于光干涉仪):测定约 1000 颗依巴谷星相对于 ICRF 的绝对位置来维持 HCRF。由于星等跨度大及其他不利因素,上述意见并未得到人