

高等学校试用教材 张承志 夏一非 编著

天体测量学

55.1
ZCZ
55.1
ZCZ



高等教育出版社

高等学校试用教材

天体测量学

高等教育出版社

内 容 提 要

本书系作者根据其在南京大学天文系讲授天体测量学课程的讲义编写修改而成。全书共分为八章，内容包括恒星赤道坐标的测定、基本坐标系和惯性坐标系的建立、天文点的测定、纬度变化和极移、时间的测定和地球自转不均匀性、形变地球自转理论初步、基本天文常数系统和月球的天体测量观测。

本书可作为天文专业学生的教材，亦可供空间物理、地球物理、测绘等专业的学生及有关科技人员参考。

本书责任编辑 杨 祥

高等学校试用教材

天体测量学

张承志 夏一飞 编著

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

二二〇七工厂印装

开本850×1168 1/32 印张8.5 字数200,000

1986年11月第1版 1986年11月第1次印刷

印数00,001— 1,470

书号13010·01285 定价1.50元

前 言

本书是根据高等学校理科物理教材编委会天文教材编审小组通过的编写大纲编写的，可作为综合性大学和师范大学天文专业的专业基础课教学用书。

本教材按计划，课堂讲授56学时，连同现场教学、课堂讨论等教学环节，共需72学时。

在本教材编写过程中，主要借鉴了苏联1975年出版的莫斯科大学采用的《普通天体测量学》(Общая астрометрия)一书的体系，结合我们近年来的教学实践以及国内天体测量工作的实际，对有关素材作了取舍。

本书的绪论，第一章，第三—四章，第六章，第八章以及附录和附表等由张承志编写；第二章，第五章以及第七章由夏一飞编写。全部初稿由张承志做了文字上的加工。

南京大学天文系天体测量教研室的陈子雄、凌兆芬、丁月蓉、肖耐园、任江平、许邦信等同志为本书提供过素材；刘桂霞同志为本书抄清了部分初稿。作者在此一并致谢。

由于作者水平所限，书中难免有错漏之处，恳请读者指正。

作 者

1984年4月于南京

目 录

绪 论	1
§1 天体测量学的研究课题	1
§2 天体测量学与相邻学科的关系	3
§3 天体测量学发展简史	5
第一章 恒星赤道坐标的测定	9
§4 基本坐标系及其旋转运动	9
§5 子午测定赤道坐标的原理 子午天体测量仪器	11
§6 子午仪器误差理论	15
§7 测定赤道坐标的目视方法	22
§8 照相天体测量学原理	28
§9 测定赤道坐标的照相方法	33
§10 恒星自行的测定	36
第二章 基本坐标系和惯性坐标系的建立	39
§11 初始星表及其误差	39
§12 基本坐标系的建立	44
§13 基本坐标系定向改正值的测定	49
§14 从基本坐标系向惯性坐标系过渡的问题	59
§15 各类星表系统简介	64
§16 实现惯性坐标系的几种可能的途径	70
第三章 天文点的测定	75
§17 测定天文点的原理和仪器	76
§18 测量恒星的天顶距天文点	79
§19 经度和方位角的测定	82
§20 等高法测天文点的原理	84
§21 地球形状的研究	88

第四章	纬度变化和极移	95
§22	极移和地理坐标的变化.....	95
§23	太尔各特法测纬原理.....	98
§24	处理观测结果的连锁法.....	104
§25	纬度变化曲线和平均纬度.....	107
§26	国际极移服务和地极坐标推算.....	109
§27	非极性纬度变化.....	113
§28	测定地极坐标的新技术.....	115
第五章	时间的测定和地球自转不均匀性	121
§29	时间计量系统.....	121
§30	世界时的测定.....	127
§31	世界时服务.....	132
§32	地球自转的不均匀性.....	137
§33	国际时间局的研究工作概况.....	141
第六章	形变地球自转理论初步	150
§34	地球引力场的位函数.....	150
§35	地球的弹性与洛夫数.....	157
§36	固体潮.....	163
§37	刘维方程.....	169
§38	激发函数.....	173
§39	刘维方程的求解和应用.....	179
第七章	基本天文常数系统	186
§40	天文常数的用途和分类.....	186
§41	建立天文常数系统的概念及其发展.....	188
§42	1976年国际天文学联合会(IAU)天文常数系统.....	195
§43	描述地球大小和形状的常数.....	203
§44	确定赤道面和黄道面位置及其运动的常数.....	208
§45	天文学的长度(距离)单位	
	太阳视差.....	213

§46	光行差常数与光速	219
第八章	月球的天体测量观测	224
§47	月球天体测量学的研究课题	224
§48	月球方位观测原理	225
§49	月球的自转理论	227
§50	月面测量学的有关问题	232
§51	月球激光测距观测原理	235
附录 I	误差理论的基本概念与最小二乘法	239
附录 II	经纬仪的仪器误差对测角的影响	244
附录 III	刚体地球绕质心自转理论简介	247
附表 I	常用经纬仪主要技术参数	257
附表 II	发播短波无线电时号的几个台站	258
附表 III	我国的主要天体测量光学仪器	259
主要参考书目		260
人名索引		261

绪 论

§1 天体测量学的研究课题

天体测量学是天文学中最早发展起来的一个分支。远古时代人类在日常生活和生产活动中，为了适应自然界的昼夜交替和季节变迁，就已经开始了对某些天象的观测和记录。起先用肉眼观测太阳、月亮、行星以及较亮的恒星，记录一些特殊天象出现的时刻和方位；进而编制历法，推算天体出没的规律，并编制星表和绘制星图；后来发明了望远镜，相继建立起装备望远镜的天文台，系统地从事恒星位置和运动的测定工作，从而大大提高了编制历法、星表和星图的精度。这些任务就构成了方位天文学——早期的天体测量学的研究内容，这也是初期天文学的主要研究课题。因此，从这个意义上来说，天文学是在天体测量学的基础上发展起来的。

随着科学技术的进步，天体测量学的研究课题日益扩展。到今天，天体测量学已发展成一个完整的学科，它的研究课题可归纳为下述三个方面：

第一、测定恒星的位置(赤经和赤纬)、自行和视差，建立基本恒星坐标系；测定太阳系天体的位置和运动，建立动力学坐标系；测定河外星系的位置，建立准惯性坐标系。

第二、测定地球自转的参数——地极坐标和自转速率，揭示地球自转运动的规律。

第三、利用对天然和人造天体进行测量观测所获得的资料，确定基本天文常数系统。

这三个方面的课题是彼此关连，相互渗透的。在天体测量学发展的第一阶段(方位天文学阶段)，主要任务是测定恒星的位置。随着观测精度的提高，就需要考虑地球在空间的复杂运动对恒星位置的影响了，而只有掌握了地球在空间的位置和运动规律，以及有关地球的大小、形状和内部构造等知识，才有可能在地面的天文观测中消除地球运动的效应。有关地球运动的各种数据包括在基本天文常数系统中，而天文常数系统中的若干个常数又需通过方位观测来确定。

大家知道，为了研究天体的运动规律，必需建立某种统一的天球参考坐标系，提供这样的参考坐标系正是天体测量学的任务。显然，最适用的天球坐标系应该是一个惯性坐标系，即只有匀速直线运动而没有旋转的坐标系。但是，由于观测者在空间随着地球一起运动，而观测对象——恒星又有自行，因此目前实际上只能建立基本恒星坐标系，即具有岁差旋转的太阳系质心平赤道坐标系，只有当消除了岁差旋转以后，基本坐标系才有可能过渡到惯性坐标系。在本书的第一和第二章中，将讨论这方面的有关问题。

通过地面上的天体测量观测所获得的是地面坐标系，其原点位于观测地点。为了将坐标系的原点移到地球质心，进而移到太阳系质心，就必需通晓地球运动的规律。地球的运动相当复杂，它包括地球自转轴在空间的岁差和章动，地极的自由摆动和受迫摆动，绕轴自转速率的不均匀性(日长增量)，以及地球质心的轨道运动(平动)等。当前，地球自转参数的测定与基本坐标系的建立具有同样的重要意义。本书的第四至第六章将讨论与地球自转有关的问题。

确定基本天文常数系统的课题将天体测量学的各个研究领域串通起来。天文常数数值的改进依赖于天体测量观测资料精度的

提高，以及建立天文常数系统理论的完善。反过来，随着天文常数的精确化，基本坐标系的精度也将随之提高。本书的第七章将论述这一问题。

天体测量学的另一重要任务是测定地面点的地理坐标(纬度、经度和方位角)，并为研究地球的大小和形状提供观测数据。这个研究领域形成了一个独立的分支——实用天文学，其原理和方法都建立在天体测量学的有关理论的基础上。本书的第三章将简要论述这方面的问题。

随着空间科学的开发和进展，月球的天体测量观测和理论研究已日益受到重视，本书在第八章中将综述有关这方面的问题，作为学习月球天体测量学的入门知识。

§2 天体测量学与相邻学科的关系

恒星天文学、天体力学、地球物理学以及大地测量学是天体测量学的主要相邻学科，天体测量学三个研究课题的成果对相邻学科的发展具有重要意义；这些相邻学科的研究工作需要天体测量学提供基本数据，并在很大程度上依赖于天体测量学的发展水平。当然，这些学科的研究成果反过来又推动着天体测量学的发展。

(1) 恒星天文学

恒星的自行可用于研究太阳系所属的星系内天体的运动规律，包括银河系的自转以及太阳系和恒星的本动。每一本新的基本星表都能提供改进这些运动参数的数据。

在绝大多数情况下，宇宙间距离的测定需利用恒星天文学方法。但是，宇宙间距离的绝对尺度是通过恒星的三角视差提供的，而三角视差的测定正是照相天体测量学的研究内容之一。

在银河系结构、星团和星协动力学演化以及宇宙学的研究工

作中，均需天体测量观测提供关于恒星分布和运动的实测资料。

反过来，恒星天文学中建立起来的银河系自转理论，使我们能更精确地掌握地球在空间运动的规律，并对有关天文常数的数值加以改进。

(2) 天体力学

天体力学的进展在一定程度上取决于天体测量学的成果，因为天体运动理论的改进依赖于天体测量观测的精度。天文常数采用值的精确化也是很重要的，在建立某些天体力学理论时需要利用一部分天文常数。另外，随着宇宙航行的开发，对太阳系内天体位置的预报精度的要求越来越高。没有大量的地面和空间天体测量观测资料，就难以编算出高精度的行星历表来。

另一方面，基于天体力学理论并用行星历表体现的动力学坐标系，可直接用于测定地球自转参数，进而可改进基本星表，同时还可以改善测定天文常数的理论。

(3) 地球物理学

在天体测量观测结果中检测出的地极移动和地球自转速度的不均匀性，为地球物理学的研究提供了有价值的信息。地球的内部结构及其力学特性对地极的自由摆动周期有影响，在天文观测资料中检测出这种效应，就可以验证地球内部结构模型的正确与否。在这方面，由地球液核所产生的近周日自由摆动的检测和理论研究是一个很好的例证。

地极的周年受迫摆动以及地球自转速度的季节性变化是地球的大气和海洋中的周期性过程造成的。通过天体测量观测结果与地球物理资料的比较，就有可能揭示出这些因素如何影响地球自转的机制。而对各种地球物理因素的测定和研究，反过来又可能对测定地球自转参数精度的提高作出贡献。

尽管目前还无法依靠地球自转参数的精确测定结果来推断长

期的地球物理过程，但随着激光测距、射电干涉测量以及空间技术等新观测手段的采用，在不久的将来，有可能检测到大陆漂移，板块运动等地球动力学现象。

(4) 大地测量学

大地测量学与天体测量学的关系是十分密切的，地面点地理坐标的测定精度取决于基本恒星坐标系的精度；天文-大地测量仪器几乎与天体测量仪器所依据的理论完全相同；实用天文学的方法大部分借鉴于天体测量学的方法。

测定地面点的经度时，需要时间服务提供的精确时间，而纬度、经度和方位角的测定则需要极移服务提供的地极坐标。

反过来，有关地球的大小和形状，以及地心引力常数等天文常数又需用大地测量学的方法来测定。

由上述的几个方面可以看到，天体测量学的研究成果在相当大程度上影响着上述主要相邻学科的发展。总而言之，基本坐标系的建立，为天文学中的几何测量以及天文大地测量提供了基准；天文常数系统的确定，为地球运动学和动力学研究提供了依据。毫无疑问，在科学技术的发展进程中，天体测量学的研究课题将具有越来越广泛的学术意义。

§3 天体测量学发展简史

公元前三千年，在中国、埃及、巴比伦和印度这些文明古国已有了关于太阳、月亮、行星和日、月食等天象的记录。当时用肉眼直接观测天象，其准确性是很低的。

公元前4世纪，中国战国时期的天文学家石申编著了世界上第一部星表，后世称为《石氏星经》，共载有121颗恒星的位置。

古希腊人继承了埃及和巴比伦的文化遗产，对天体测量学的发展做出了贡献。古希腊天文学家利用较完善的观测仪器——浑

仪来测定天体的位置，使定位精度达到了 $\pm 15'$ 。

公元前二世纪，古希腊天文学家喜帕恰斯编制了一本1025颗恒星的星表。喜帕恰斯将他测定的星位与150多年前阿里斯提留斯和提莫恰里斯的观测结果比较时，发现了春分点的进动现象，即岁差。

公元140年左右，希腊天文学家托勒玫撰写了《天文学大成》，这是希腊天文学的结晶，也是中世纪欧洲和阿拉伯天文学家的经典读物。在这部天文学巨著中，托勒玫论证了地心体系的宇宙模型，叙述了月球运动中的出差，给出了1022颗恒星的黄道坐标等等。

托勒玫星表沿用了若干个世纪，并多次被重新测定过，其中较著名的有1601年的第谷星表，1661年和1701年的赫韦吕斯星表等。在这些星表中，观测精度已达 $\pm 2'$ 。同时由黄道坐标系过渡到更方便的赤道坐标系。

16世纪下半叶，丹麦天文学家第谷毕生从事天文观测，积累了大量实测资料，为天体测量学的发展做出了贡献。他曾发现了行星岁差，月球运动中的二均差，并重新测定过岁差常数。

望远镜于17世纪初发明后，很快被用于方位天文学的观测。到17世纪60年代，拥有望远镜的天文台，如巴黎天文台和格林尼治天文台相继建成。1689年丹麦天文学家罗默制成了现代子午仪器的雏形。随着方位观测精度的提高（ $\pm 50''$ 至 $\pm 10''$ ），方位天文学蓬勃发展，各种新发现接踵而来。

1718年哈雷发现了恒星的自行，1725~1726年布拉德雷发现了周年光行差现象；1748年布拉德雷又发现了章动。1756年德国天文学家梅耶建立了子午天体测量仪器的理论，使测定恒星位置的精度提高到 $\pm 2''$ 。

18世纪末到19世纪初奠定了近代天体测量工作的基础，做出

杰出贡献的有德国天文学家贝塞耳和俄国天文学家斯特鲁维等。

19世纪30年代，天文学家们自哥白尼时代以来不断探索的恒星三角视差的测定终于成功，第一批测定成果就出自斯特鲁维和贝塞耳之手。

1857年美国测地学家太尔各特提出了精确测定纬度的太尔各特法；1863年出版了波恩巡天星表(简称BD)，载有赤纬从 -2° 至 $+90^{\circ}$ 亮于9.5等的所有恒星的位置。

19世纪70年代以后，德国天文学家奥韦斯，美国天文学家纽康、博斯父子致力于利用大量的恒星方位观测建立基本恒星坐标系——编制基本星表的方法和理论研究。其中奥韦斯基本星表系统得到了不断地改进，现在已发展到第五基本星表——FK5系统。

19世纪末，照相测定方法开始用于方位天文学，编制成照相天图星表(简称AC或CdC)等照相星表。

纽康的研究成果导致了在1896年通过第一个国际通用的天文常数系统，并沿用到1967年底。

1891年美国天文学家强德勒从纬度测定结果中分析出地极移动的周期性规律，证实了早在1765年欧拉预言过的极移现象。为了系统地开展纬度变化的研究工作，1899年建立了国际纬度服务机构，按期提供地极坐标。

20世纪以来，随着科学技术的巨大进步，电子技术、石英钟、光电记录、观测自动化和数据处理自动化等相继用于天体测量观测，使观测精度提高到 $\pm 0''.1 \sim 0''.01$ 。在20年代发现了地球自转的不均匀性。随着石英钟的采用，发现了地球自转的季节性变化；1956年开始采用修正的世界时 UT_1 和 UT_2 。1960年起改用更均匀的历书时。1967年又定义出原子时，取代历书时。

1957年苏联的第一颗人造地球卫星发射成功，人类进入了空

间时代，也给天体测量学带来了深远影响。

首先，许多天文常数的测定值更加准确，使得改进纽康天文常数系统的时机成熟，1964年国际天文学联合会(IAU)通过了新的天文常数系统，并决定从1968年起采用。1976年IAU又通过了第三个天文常数系统，从1984年起采用。

其次，60年代以来，随着人造卫星多普勒观测，射电干涉测量，月球和人卫激光测距等新技术的采用，传统的天文测角观测正向测距观测过渡，光学观测开始向射电观测过渡，而观测精度预期将提高到 $\pm 0''.001$ 。从1983年9月起，全世界各国(包括中国)的天体测量台站开始了对地球自转的新、老技术的联合观测(简称为MERIT计划)。

再次，欧洲和美国都拟订了将望远镜发送到地球外层空间进行天体测量(空间天体测量)、观测的计划，预计在1986年后实现。空间天体测量观测将完全摆脱地球大气和重力的影响，预期能改进现有的基本坐标系，并过渡到惯性坐标系；测定出更大量恒星的视差和自行；测定暗星的角直径等。不言而喻，空间天体测量学的前景肯定是非常宽阔的。

从上面的简单回顾可以看到，正如其他的古老学科一样，在天体测量学的发展过程中，它经历了一次又一次地推陈出新；同时，它也仍然存在着许多未知的研究领域，等待着人们一步一步地探本溯源。

第一章 恒星赤道坐标的测定

§4 基本坐标系及其旋转运动

正如在绪论中已着重提到的，在天球上建立基本坐标系是天体测量学的主要任务之一。

在天球图上用数学方法画出的基本点和圈实际上都是不存在的，当然也无法直接观测到它们。因此，基本坐标系只能通过间接方法来实现。在全天球上选取一定数量的均匀分布的恒星（常称为基本星），利用这些基本星的星位（赤经和赤纬）就能提供基本坐标系。

目前采用的基本坐标系是平赤道坐标系，与它相应的直角坐标系的原点位于太阳系质心，X轴指向平春分点，Y轴与X轴正交并位于平赤道面内，而Z轴垂直于平赤道面并指向北天极。

基本星的星位是由地面观测站的天文观测确定的，也就是说，直接由天文观测得出的是观测坐标系。它包含着地球自转和公转运动的效应。为了实现基本坐标系并过渡到惯性坐标系，可将地球的复杂运动划分为三类：

(1) 地面观测站相对于地球质心和太阳系质心的运动。对应的天文现象包括：地极移动和地球自转速率不均匀性，周日和周年光行差，周日和周年视差等。

(2) 地球自转轴在空间的短周期运动，即章动。

(3) 地球自转轴的长期运动，即日月岁差和行星岁差。

消除了(1)和(2)这两项运动的影响后的观测坐标系就是基本坐标系，理论上它仅有岁差旋转运动。因此，如能进一步消除基

本坐标系的旋转运动的影响，就可以过渡到惯性坐标系了。

基本坐标系的岁差旋转将引起恒星赤道坐标随时间的变化；另外，恒星的自行同样也使恒星赤道坐标随时间而变化。通过不同历元的恒星星位的相互比较，得到的是赤道坐标的总变化量。无法从数学上将互不相同的两种影响分离开来，这就给过渡到惯性坐标系的问题带来了极大的困难。

为了更清楚地说明这一困难，我们具体讨论一下基本坐标系的岁差旋转造成的赤道坐标的变化，以及恒星自行所引起的赤道坐标的改变。

岁差包括赤道面位移而产生的日月岁差 p_1 ，以及黄道面旋转所造成的行星岁差 q_1 。 p_1 的值由观测给出，而 q_1 的值需由天体力学的理论关系式计算出来。

岁差可用反映春分点运动的三个关系式来表示，即

$$\text{赤经总岁差} \quad m = p_1 \cos \varepsilon_1 - q_1$$

$$\text{赤纬岁差} \quad n = p_1 \sin \varepsilon_1$$

$$\text{黄经总岁差} \quad \rho = p_1 - q_1 \cos \varepsilon_1$$

式中 ε_1 为黄赤交角。

根据球面天文学的公式，岁差所引起的赤道坐标的变化量 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\delta$ 为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= (m + n \sin \alpha \operatorname{tg} \delta) \Delta t \\ \Delta\delta &= n \cos \alpha \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

恒星在天球上每年的视角位移，称为恒星自行 μ （单位是角秒/年）。 μ 可分解为沿赤纬圈的 μ_0 以及垂直于它的 μ' 。为得出由 μ' 所引起的赤经变化，需化为 $\mu_a = \mu' \sec \delta$ 。这样，由于 μ_a 和 μ_0 所产生的赤道坐标的变化量 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\delta$ 为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \mu_a \Delta t \\ \Delta\delta &= \mu_0 \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$