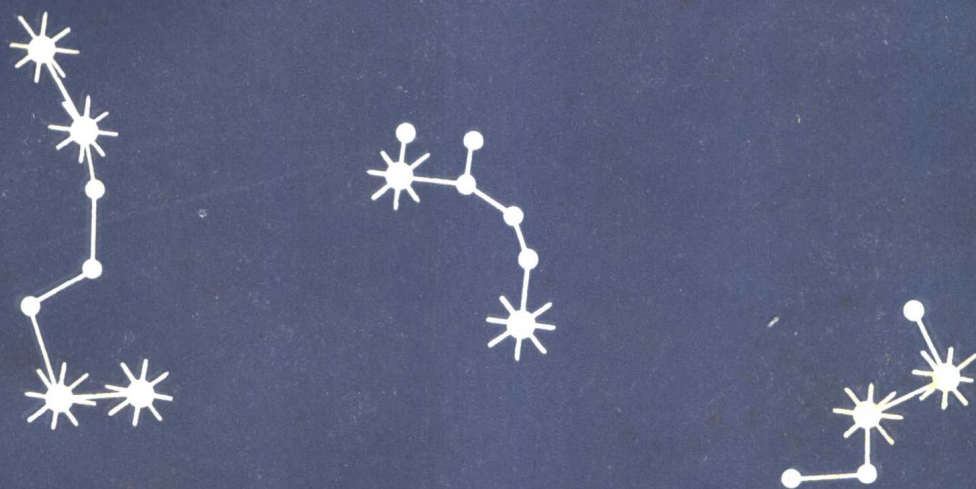


高等学校试用教材

大地天文学

陆锴书 吴家让 主编



测绘出版社

大地天文学
陆锴书 吴家让 主编

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 20.75·插页 1·字数 463 千字

1987 年 6 月第一版·1987 年 6 月第一次印刷

印数 0.001—2,000 册·定价 3.50 元

统一书号: 15039·新 605

前 言

本书是根据大地测量专业“大地天文学”教学大纲编写的。同时，对近几年来在时间系统方面的新的提法以及国际天文协会要求采用新的岁差常数并推荐向量/矩阵法计算天体视位置等内容，本书也作了较多的阐述。

全书共十七章。第一章主要介绍学习本书所应掌握的一些基本知识。第二章至第八章为球面天文学部分，主要讨论天球坐标、时间的度量、各种客观因素对天体坐标的影响和天体视位置的计算。第九章介绍无线电时号和对比时号的几种方法。第十章介绍我国常用的一等天文测量仪器及其常数的测定。第十一章至第十七章对我国采用的天文测量方法及成果处理作了较详细的叙述。

参加本书编写的还有刘彩璋、董挹英、徐德宝和金标仁等同志。

本书承张儒杰、俞世清两同志审阅了部分初稿，在此向他们致以谢意。

由于水平所限，本书错误和不妥之处在所难免，诚恳地希望读者指正。

编 者

九八五年十月

目 录

第一章 绪 论	(1)
§1-1 大地天文学的任务与作用.....	(1)
§1-2 地理坐标.....	(2)
§1-3 地球的形状.....	(5)
§1-4 地球的自转与公转.....	(6)
§1-5 恒星的辨认.....	(9)
第二章 天球 天球上的坐标系	(12)
§2-1 天球 天球上的主要点、线、圈.....	(12)
§2-2 天球坐标系.....	(14)
§2-3 天文经、纬度与天球坐标间的关系.....	(19)
§2-4 定位三角形.....	(20)
§2-5 坐标转换.....	(20)
第三章 天体的周日视运动	(25)
§3-1 周日视运动的概念.....	(25)
§3-2 天体过子午圈、卯酉圈和大距时的天顶距、方位角和时角.....	(27)
第四章 时间系统	(33)
§4-1 时间测量的基本方程和确定时间测量基准的要求.....	(33)
§4-2 世界时系统.....	(34)
§4-3 力学时系统.....	(36)
§4-4 原子时系统.....	(38)
第五章 时间测量	(41)
§5-1 恒星日、恒星时.....	(41)
§5-2 太阳日、太阳时.....	(42)
§5-3 地方时及其与经度的关系、区时、世界时.....	(46)
§5-4 地方平时与地方恒星时的相互化算.....	(50)
§5-5 年、月、历法.....	(54)
第六章 大气折射、光行差、视差和光线弯曲改正	(58)
§6-1 大气折射.....	(58)
§6-2 视差.....	(62)
§6-3 光行差.....	(70)
§6-4 光线弯曲改正.....	(81)

第七章 岁差、章动和恒星自行	(83)
§7-1 岁差的概念.....	(83)
§7-2 岁差对天体赤道坐标的影响.....	(88)
§7-3 章动的概念.....	(92)
§7-4 章动对天体赤道坐标的影响.....	(94)
§7-5 恒星自行的概念.....	(99)
§7-6 恒星自行对恒星位置的影响.....	(100)
§7-7 白塞耳法计算恒星视位置的自行改正.....	(101)
第八章 天体视坐标的计算	(102)
§8-1 计算恒星视位置的向量矩阵法.....	(102)
§8-2 白塞耳法计算恒星视位置.....	(106)
§8-3 根据我国“天文年历”计算天体视坐标.....	(110)
第九章 时间比对	(114)
§9-1 钟差、钟速、钟差化算至另一时刻.....	(114)
§9-2 用短波无线电时号进行时间比对.....	(116)
§9-3 收时计算中的几项改正.....	(120)
§9-4 时间比对的其它方法.....	(124)
第十章 天文测量仪器和常数测定	(127)
§10-1 全能经纬仪威特 T ₄	(127)
§10-2 J ₀₅ 一等天文经纬仪.....	(139)
§10-3 全能经纬仪 克恩 DKM3-A.....	(142)
§10-4 天文钟.....	(145)
§10-5 仪器检验和常数测定.....	(147)
§10-6 水准器格值和质量的检定(利用水准器检验仪).....	(148)
§10-7 目镜测微鼓周值的测定.....	(160)
§10-8 目镜测微器丝距的测定.....	(166)
§10-9 目镜测微器齿隙差的测定.....	(168)
第十一章 I、IV等天文测量	(169)
§11-1 测定天文方位角、天文经度和天文纬度的原理.....	(169)
§11-2 最有利观测条件的分析.....	(174)
§11-3 北极星任意时角法测定方位角.....	(176)
§11-4 无线电时号法测定经度(天顶距法测定表差).....	(183)
§11-5 北极星天顶距法测定纬度.....	(187)
§11-6 太阳天顶距法测定方位角和表差.....	(192)
§11-7 太阳天顶距法测定纬度.....	(198)
§11-8 南、北星法同时测定经、纬度和方位角.....	(203)
第十二章 太尔各特法测定纬度	(209)

§12-1	太尔各特法测定纬度的原理和基本公式	(209)
§12-2	星表的编制	(210)
§12-3	观测	(211)
§12-4	计算纬度的公式	(212)
§12-5	观测结果的改正	(216)
§12-6	算例	(220)
§12-7	误差分析	(223)
第十三章	无线电时号法测定经度 东西星等高法测定表差	(226)
§13-1	东西星等高法测定表差的原理	(226)
§13-2	作业星表的编制	(228)
§13-3	计算表差的公式	(229)
§13-4	观测结果的改正	(236)
§13-5	移动丝不水平的影响及其解决办法	(239)
§13-6	经度的外业计算	(242)
§13-7	经度的内业计算	(246)
§13-8	误差分析	(251)
第十四章	北极星任意时角法测定方位角	(253)
§14-1	概论	(253)
§14-2	观测结果的改正	(253)
§14-3	地面目标方位角的计算	(259)
§14-4	算例	(261)
§14-5	正反方位角的检验	(265)
§14-6	误差分析	(266)
第十五章	多星等高法同时测定经、纬度	(272)
§15-1	多星等高法同时测定经、纬度的基本原理	(272)
§15-2	解析法计算经、纬度	(272)
§15-3	最佳观测条件的分析及作业星表的编制	(276)
§15-4	威特 60°等高棱镜的校正	(279)
§15-5	影响等高观测的几种因素及观测中的注意事项	(282)
§15-6	用图解法计算经、纬度	(286)
§15-7	算例	(290)
第十六章	T₄ 经纬仪自动跟星光电装置	(287)
§16-1	基本结构和工作原理	(287)
§16-2	光电装置的主要组件和功能	(298)
§16-3	应用	(303)
第十七章	天文测量成果归算	(307)
§17-1	概述	(307)

§17-2 观测成果归算至标石中心	(307)
§17-3 纬度和方位角归算至平均海水面的改正	(310)
§17-4 纬度、经度和方位角归算至平北极	(313)
主要符号说明	(319)
参考书目	(322)

第一章 绪 论

§ 1-1 大地天文学的任务与作用

大地天文学的任务是研究如何使用天文测量仪器观测天体^{*}，确定地面点的地理坐标——天文经度、天文纬度和地面某一方向的天文方位角。

这门学科与大地测量学有着密切的关系。众所周知，大地测量的目的是：(1)确定地球的形状、大小和物理性质；(2)在广阔的土地上建立基本测量控制网，作为各种测量工作的基础。在经典的大地测量中，为了达到上述第一个目的，总是首先选择一个能表示地球形状和大小的几何体，并确定它的旋转角速度和质量，然后再研究地球的实际形状对这个几何体的差别。为了第二个目的，把在地面上建立的基本控制网点投影到这个几何体面上进行数学处理。由于地球形状非常接近于一个椭球，所以就采用旋转椭球作为地球的近似模型。为了确定这个椭球的形状和大小，可以用大地测量方法测定两条在不同地方的子午弧段的长度 s_1 和 s_2 ，同时测定弧段两端点的天文纬度 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 、 φ_4 。因为子午线弧长是弧段两端点的天文纬度 φ 、椭球体长半轴 a 和扁率 α 的函数，即

$$s_1 = f(\varphi_1, \varphi_2, \alpha, a)$$

$$s_2 = f(\varphi_3, \varphi_4, \alpha, a)$$

解上面的方程组就可求得未知数 a 和 α 。这种既要用大地测量，又要用天文测量测定椭球形状和大小的方法，叫做弧度测量。当然，以上所讲的只是一些基本思想，但由此可以看出，在确定椭球形状和大小的弧度测量中，进行大地天文测量是必不可少的。

为了研究区域性地球形状以及满足在某一区域建立测量控制网的要求而选择的旋转椭球体，叫做参考椭球。参考椭球的形状和大小一旦确定以后，还须把它在地球体内的位置固定下来，这项工作叫做参考椭球定位、定向。只有在参考椭球定位、定向后，才能把在地面上测设的控制网点转换到参考椭球面上去。在大地测量学中，参考椭球定位、定向的一般方法是选择一个合适的点——大地原点，精确测定该点的天文经度(λ_0)、天文纬度(φ_0)，令大地原点的大地坐标等于天文坐标，并使这一点的大地高等于正高，即

$$B_0 = \varphi_0$$

$$L_0 = \lambda_0$$

$$N = 0$$

式中 B_0 、 L_0 分别为大地原点的大地纬度、经度，

* 天体——太阳、月亮和恒星等统称为天体。

N 为大地水准面*与参考椭球面间的差距。在国家天文大地测量工作基本完成以后，利用已取得的成果，再按

$$\sum N^2 = \text{最小}$$

重新进行定位、定向。因此，为了进行参考椭球体定位，必须进行大地天文测量。大地原点的天文数据还为大地测量计算提供精确的起始数据。

为了控制三角锁段角度观测的误差累积以及削弱其系统误差的影响，必须在每一锁段的起始两端上进行大地天文测量，测定起始边的天文方位角和端点的天文纬度、经度。测定天文纬度、经度和方位角的三角点叫做拉伯拉斯点。为了检核三角锁段的角度观测和它的方位，必须将拉伯拉斯点上的天文方位角改化为参考椭球上的大地方位角，这种大地方位角叫拉伯拉斯方位角。其计算公式如下：

$$A = a - (\lambda - L) \sin \varphi + (\eta \cos A - \xi \sin A) \operatorname{ctg} z$$

式中 A 是改算至参考椭球面上的大地方位角；

a 是天文方位角；

λ 是天文经度；

L 是大地经度；

φ 是天文纬度；

η 是垂线偏差的卯酉圈分量；

ξ 是垂线偏差的子午圈分量；

z 是地面目标方向线的天顶距。

由于 η 和 ξ 都是微小量，而一等三角测量的观测方向线几乎都是水平的，故 $z \approx 90^\circ$ ，即 $\operatorname{ctg} z \approx 0$ ，于是可由下式计算拉伯拉斯方位角：

$$A = a - (\lambda - L) \sin \varphi \quad (1-1)$$

上式叫做拉伯拉斯方程，等式右边第二项叫做拉伯拉斯改正。由拉伯拉斯方程可以看出，拉伯拉斯方位角的误差既取决于大地测量的误差，又取决于天文测量的误差。不过，大地测量的误差只与大地经度有关，由于它的影响非常小，可以认为拉伯拉斯方位角的误差主要取决于天文测量的误差，而大地测量的误差对它没有什么影响。因为各点天文测量成果的误差是彼此独立的，根据目前大地天文测量所能达到的精度可使拉伯拉斯方位角的中误差小于 $\pm 0.7''$ ，所以拉伯拉斯方位角能对三角锁段起控制作用。

因为地球表面是一个非常复杂的面，在大地测量中总是先把在地面上观测的方向和边长归算到椭球面上，然后进行大地位置的计算。为了进行归算，必须知道测站点的大地高与各三角点的天文大地垂线偏差分量 ξ 、 η 。为了求出大地高，必须进行天文水准或天文重力水准测量以决定大地水准面与参考椭球面间的差距，此时也需要垂线偏差的两个分量。某一点垂线偏差的两个分量可按下式计算：

* 大地水准面是一个与静止海水面相重合的重力等位面，这个面也叫做地球重力位水准面。在这个面上任一点的法线与铅垂线重合。被这个面所围成的几何形体叫做大地体。虽然它和地球的真正形状不同，但我们经常将大地水准面的形状作为地球形状。

$$\begin{aligned}\xi &= \varphi - B \\ \eta \sec \varphi &= \lambda - L\end{aligned}\quad (1-2)$$

式中 φ 、 λ 分别为天文纬度、经度；

B 、 L 分别为大地纬度、经度。

由上式可知，为了将大地测量的地面观测值归算到参考椭球面上，必须进行天文纬度、经度的测定工作。测定天文经、纬度同时也为天文水准和天文重力水准测量提供垂线偏差资料。根据这些资料也可进行地球形状和大小的研究。

在还没有建立基本测量控制网的地区进行十万分之一或更小比例尺测图时，可以用天文点作为测图控制点。另外，在许多工程和国防建设中也需测定精度很高的天文经、纬度和天文方位角。

根据任务和要求的不同，天文测量可分为四个等级，其精度要求如下表所示：

表 1-1

天文点等级	中 误 差		
	经 度	纬 度	方 位 角
一	$\pm 0.02''$	$\pm 0.30''$	$\pm 0.50''$
二	± 0.05	± 0.50	± 1.00
三	± 0.10	± 1.00	± 5.00
四	± 0.50	± 5.00	± 10.00

其中一、二等属于大地天文测量，对大地原点上天文测量成果的精度要求，比一等的还要高。

§1-2 地理坐标

所谓地理坐标，就是地面点在地球上的地理位置。它们是以某一参考面为基准的位置，通常以曲线坐标表示(如纬度、经度)。由于最常使用的一些参考面有重力等位面 and 旋转椭球面等，因此曲线坐标也相应地分为天文坐标和大地坐标。所以，“地理坐标”是上述两种坐标的总称。

(一) 天文坐标

以重力等位面为参考面，地面点 A 以该点重力线的切线为根据，在这个参考面上的位置就叫做 A 点的天文坐标。如图 1-1(a) 所示， MM' 为一簇重力等位面。根据重力等位面的性质可知，重力线方向就是重力等位面的法线方向。由于重力等位面是不平行的，重力线就不是一条直线。过 A 点的参考面是一个垂直于 A 点的重力线切线的重力等位面。图 1-1(b) 表示包含 A 点的重力线切线的等位面横截面图。图中，横线为地球瞬时赤道面和这个横截面的交线。通过 A 点重力线的切线叫做 A 点的天文法线，通常叫做 A 点的铅垂线。 A 点的铅垂线与地球瞬时赤道面之间的夹角叫做 A 点的天文纬度，用符号 φ 表示。其值由

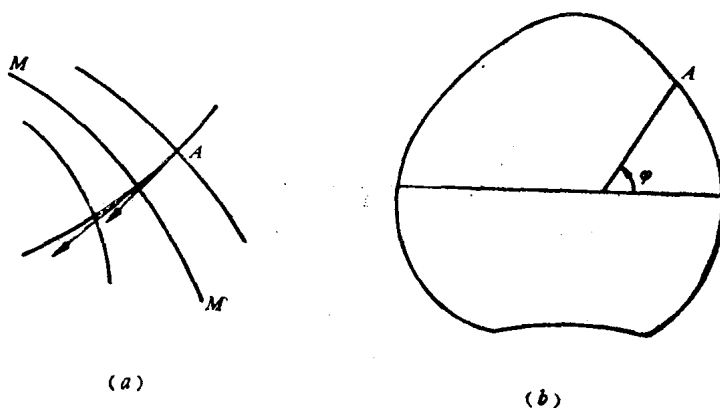


图 1-1

0° 至 $\pm 90^\circ$ ，北半球为正，南半球为负。

在地球上含有 A 点的铅垂线，且平行于地球瞬时旋转轴的平面是 A 点的天文子午面，以“平格林尼治天文子午面”为本初子午面*。本初子午面和 A 点的天文子午面之间的夹角叫做 A 点的天文经度，以符号 λ 表示。其值由本初子午面起算，在瞬时赤道面内量度，由 0° 至 360° ，向东为正。

(二) 大地坐标

以参考椭球为参考面，地面点 A 向参考椭球体作法线，则该法线与参考椭球的交点位置 A' 就叫 A 点的大地位置。参考椭球经过定位、定向后，椭球体的短轴与地球的平自转轴相平行，起始大地子午圈与“平格林尼治首子午圈”相平行。如图 1-2 所示， pp' 为参考椭球的短轴， qgq' 是过参考椭球中心且垂直于短轴的平面，叫做大地赤道面。含有短轴的平面与参考椭球相交的那些椭圆叫做大地子午圈。设 A 为地面任一点，自 A 点向参考椭球表面作法线 $AA'N$ ，这条法线叫做 A 点的大地法线。大地法线与大地赤道面之间的夹角叫做 A 点的大地纬度，用符号 B 表示，其值由 0° 至 $\pm 90^\circ$ ，北半球为正，南半球为负。

起始大地子午圈为大地经度的起算子午圈。起始大地子午圈所在平面与 A' 点的大地子午面之间的夹角为 A 点的大地经度，用符号 L 表示，其值自起始大地子午圈起算，在大地赤道面内量度，由 0° 至 360° ，向东为正。

关于天文坐标和大地坐标之间的关系式，在 §1-1 内已经给出。

(三) 地心坐标

地心坐标也是以参考椭球为参考面。地心坐标与大地坐标不同之处是，地面点 A 的纬度是以 A' 的向径 $A'O$ 与大地赤道面的交角 B' 表示的。 B' 叫做地心纬度，如图 1-2 所

* 本初子午面又叫首子午圈，是计算经度的起始子午圈。为了协调时间的计量和确定地理经度，1884 年在华盛顿举行的国际子午线会议决定，采用英国伦敦格林尼治天文台（旧址）埃里中星仪所在的子午线，作为时间和经度计量的标准参考子午线，称为本初子午线或零子午线。

1957 年后，格林尼治天文台迁址，国际上改用由若干天文测时结果长期稳定性较好的天文台组成的平均天文台作为参考。由这些天文台原来的经度采用值，利用天文测时资料反求各自的经度原点，再对这些经度原点进行统一处理，最后求得平均天文台的经度原点。1968 年国际上以国际习用原点（CIO）作为地极原点，并把通过国际习用原点和平均天文台经度原点的子午线称为本初子午线。

示。它与大地纬度 B 有下述的近似关系：

$$(B - B')'' = 692.62'' \sin 2B - 1.16'' \sin 4B \quad (1-3)$$

由图 1-2 可以看出，地心经度与大地经度是一致的。

§ 1-3 地球的形状

地球是一个很不规则的球体。几千年来，人们对地球形状的认识随着科学技术的发展而逐步深化。在古代有“天圆地方”之说，说明当时人们把地球看成一块大的平板。以后当人们站在大海边观看远方驶来的船只时，总是首先见到航桅、后见船身；月食时，看到的地影边缘是圆弧形的，才逐渐证明地球是一个圆球。我国唐朝开元年间，即公元七世纪初，僧一行、南宫说等人测得子午线一度的弧长为 351 里 80 步。约等于 132.3 公里。十七世纪末，英国科学家牛顿（1642—1727）提出地球是一个两极扁平的椭球体的理论，到十八世纪前半期进行了弧度测量，由测量结果证明牛顿的理论是正确的。

由于地球绕轴自转，地球上每一质点绕轴作圆周运动时受到惯性离心力的作用，它的大小等于物体的质量与向心加速度的乘积。图 1-3 中质量为 1 的单位质点 M 的惯性离心力为：

$$f = R_1 \omega^2 = R \omega^2 \cos \varphi \quad (1-4)$$

式中 R_1 为 M 离旋转轴的距离；

R 为地球半径；

ω 为地球自转角速度；

φ 为 M 点的纬度。

惯性离心力的方向由转动中心向外。若将 f 分解成沿着地心连线 OM 方向的力 f_1 和垂直于 OM 方向的力 f_2 。由图 1-3 可知， f_1 与地心引力方向相反，

f_2 垂直于地心引力方向且指向低纬度地区。由于 f_2 的作用使地球两极扁而赤道隆起。

几个世纪以来，各国的大地测量工作者曾多次进行弧度测量，并利用天文、大地和重力测量的资料推算这个椭球体的形状和大小。表 1-2 是几个主要椭球的参数。

进一步的研究结果表明，地球形状更接近于一个三轴椭球体，赤道长轴方向在西经 35 度左右。

直至二十世纪五十年代末，有关椭球的研究工作还是以地面上天文大地测量和重力测量资料为依据。由于资料稀少且分布不均匀，所以上述各椭球只能代表某一区域的地球形状。由于人造地球卫星的发射成功以及卫星大地测量学的发展，使研究整个地球形状成为可能。如果只考虑地球与卫星的关系，并设地球是一个均质圆球，卫星与地球相比可以当

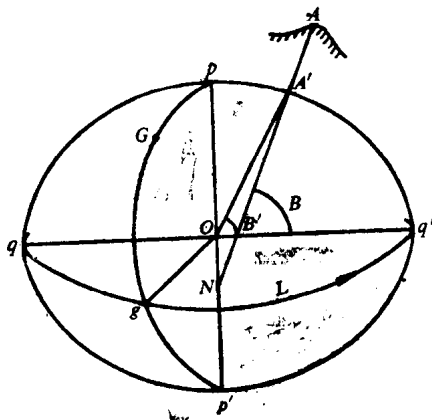


图 1-2

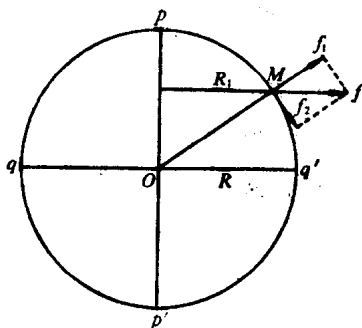


图 1-3

表 1-2

年代	推算者	长半径 $a(\text{km})$	扁率 α
1800	埃弗瑞斯 (Everest)	6377.276	1:300.80
1841	白塞耳 (Bessel)	6377.397	1:299.15
1880	克拉克 (Clarke)	6378.249	1:293.46
1910	海福特 (Hayford)	6378.388	1:297.00
1940	克拉索夫斯基 (Красовский)	6378.245	1:298.30

作一个质点, 在万有引力的作用下, 卫星围绕地球运动的轨道面是一个通过地球质心的平面, 其轨道为一椭圆。实际上地球不是一个圆球, 它的质量分布也是不均匀的, 因而卫星的轨道将不会是一个闭合的椭圆 (当然, 还有其它因素, 如地球周围的大气, 日、月、行星的引力…等对卫星的绕地球运动都有影响), 因此, 可以根据观测所得的卫星绕地运动的资料求出地球形状。如果用大地水准面所包的球体表示地球形状, 则经过研究证明地球是椭球形状, 但略呈“梨形”, 如图 1-4 所示。

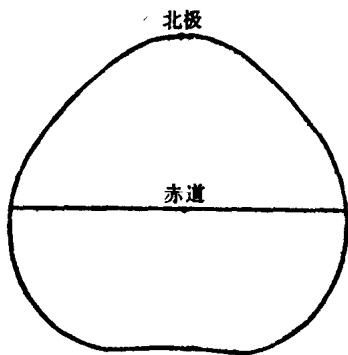


图 1-4

虽然地球形状是更接近于三轴椭球并略呈“梨形”的几何体, 但是为了便于计算, 在大地测量工作中仍采用旋转椭球。1964年第七届国际天文协会曾推荐了以下椭球参数:

$$a = 6378140 \text{ m}$$

$$1/\alpha = 298.247$$

长期以来, 大地测量工作者只重视了椭球体的几何特征。近来, 由于空间科学的蓬勃发展, 不仅要求确定地球的几何特征, 还要知道它的物理特征。为此, 1980年国际大地测量与地球联合会第十七届

大会根据最新研究成果, 推荐了以下四个量为新的基本大地参数——“80年大地参考系”:

$\omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, ω 为地球自转角速度;

$GM = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$, G 为引力常数, M 为地球质量;

$J_2 = 1082.63 \times 10^{-6}$, J_2 为地球引力场二阶球函数导数;

$a = 6378137 \text{ m}$, a 为地球椭球长半径。与 J_2 相应的扁率倒数为:

$$1/\alpha = 298.257$$

§ 1-4 地球的自转与公转

(一) 地球的自转

由观察天体可知, 天空中的日、月、星辰每天绕地球旋转一周。事实上, 这是地球自转的反映。地球有一根自转轴, 自转轴与地球表面的两个交点叫做北极 p 和南极 p' 。通过地球中心并与自转轴相垂直的平面, 这个平面与地球表面相交的一个圆就叫做地球赤道 qq' , 如图 1-5 所示。

如果在北极上空看地球自转，所见地球自转的方向是反时针向的。地球自转一周也就是我们通常所说的一日。

地球自转的角速度与测站纬度无关。但在地球上不同纬度处的自转线速度是不一样的。设地球赤道的半径为 R ， n 为地球自转一周的时间，则赤道上任一点的线速度 V_0 为

$$V_0 = \frac{2\pi R}{n}$$

不在赤道上的测站，其纬度为 φ ，则该点的线速度为

$$V = \frac{2\pi R \cos \varphi}{n} \quad (1-5)$$

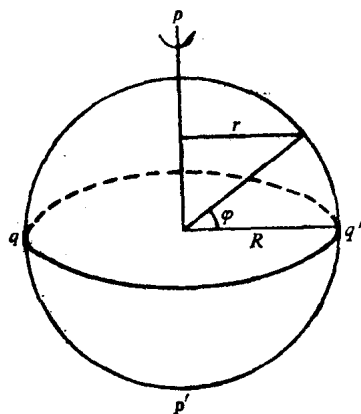


图 1-5

地球自转产生了昼夜交替的现象，并使我们看到天体位置发生周期性的变化。由于地球的自转速度比较稳定，所以长期以来人们都把它作为计量时间的标准。几个世纪以来，天文工作者对地球自转作了许多精密的观测和深入的研究。研究结果表明地球自转速度是不均匀的，日稳定度约为 1×10^{-7} 。同时地球的自转轴不但在空间的方位发生变化，而且在地球体内的方向也在变化。这些问题与大地天文测量有着密切的关系。这在后面的有关章节内还要讨论。

(二) 地球的公转

地球除自转外，还像其它行星一样绕太阳公转，其公转的规律遵循开普勒定律。

德国天文学家开普勒 (1571—1630) 根据丹麦天文学家第谷 (1546—1601) 对行星运动的长期观测数据，经过分析研究而归纳出行星绕日运动的三条定律叫做开普勒定律。这三条定律为：

第一定律：各行星的轨道都是椭圆，太阳位于椭圆轨道的一个焦点上。

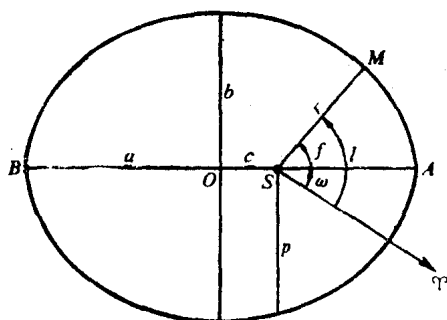


图 1-6

在图 1-6 中， AMB 为行星绕日运动的椭圆轨道， AB 为椭圆的长直径； ω 是近日点 A 的日心黄经； l 是行星 M 的日心黄经；太阳位于焦点 S 上。行星在椭圆轨道上按反时针方向运行。行星在位置 A 时，离太阳的距离最近，所以称 A 为近日点。行星在位置 B 时，离太阳的距离最远，称 B 点为远日点。根据本定律，如取太阳为坐标原点，则行星轨道（椭圆）方程为：

$$r = \frac{p}{1 + e \cos f} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (1-6)$$

式中 r 是行星向径；

f 是从近日点 A 起, 逆时针量度到 M 的角度, 叫真近点角;
 $p = a(1 - e^2)$, 称为半通径, 即 $f = 90^\circ$ 或 270° 时的行星向径;
 e 是椭圆偏心率。

第二定律: 行星的向径在相等的时间内扫过的面积相等。

根据这个定律, 即

$$\frac{dA}{dt} = \text{常数}$$

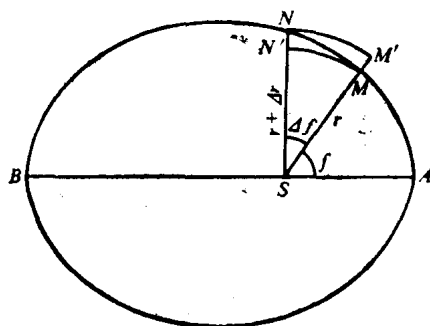


图 1-7

扇形面积 $SM'N$, 即

在图 1-7 中, 设 M 和 N 为行星在轨道上两个相邻的位置, 它们的向径分别为 r 和 $r + \Delta r$, 真近点角分别为 f 和 $f + \Delta f$ 。行星自 M 运动到 N 所需的时间段为 Δt 。在此时间段内, 行星向径所扫过的面积为 SMN , 用 ΔA 表示。 ΔA 应稍大于扇形面积 SMN' , 而稍小于

$$\frac{1}{2} (r + \Delta r)^2 \Delta f > \Delta A > \frac{1}{2} r^2 \Delta f$$

$$\frac{1}{2} (r + \Delta r)^2 \frac{\Delta f}{\Delta t} > \frac{\Delta A}{\Delta t} > \frac{1}{2} r^2 \frac{\Delta f}{\Delta t}$$

如取极限, 即令 $\Delta t \rightarrow 0$, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta r \rightarrow 0$, 得

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{df}{dt}$$

或

$$r^2 \frac{df}{dt} = h \quad (1-7)$$

h 是一个常数, 二倍于向径在单位时间内所扫过的面积。从这个公式可以看出, 行星沿轨道运行的速度是不均匀的, 在近日点时运行速度最快, 在远日点时最慢。

第三定律: 行星绕日运动周期的平方, 与其轨道半长轴的立方成正比。

设 T_1 和 T_2 为某两个行星绕日运动的周期, a_1 和 a_2 是两个行星的半长轴, 则按本定律可写出:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad (1-8)$$

开普勒定律只给出了行星运动的规律, 没有说明产生这个规律的原因, 牛顿运用运动基本定律分析了开普勒定律, 寻找出所有行星的运动都受太阳引力支配, 最后得出著名的万有引力定律。

按照开普勒第一定律, 地球的轨道为一椭圆, 太阳位于其焦点之一。地球距太阳最远的距离约 15187 万公里, 最近距离约 14703 万公里, 地球绕日公转一周的时间为 365 日 5

时 48 分 46 秒。

按照开普勒第二定律,地球公转的速度是不均匀的;在近日点附近快,日速约 $1^{\circ}01'$,在远日点附近慢,日速约 $57'$ 。地球每年约在 1 月 3 日或 4 日过近日点,在 7 月 3 日或 4 日过远日点。所以地球公转的速度冬天比夏天快,平均速度为 29.8 公里/秒。地球公转的方向与地球自转方向相同,即在地球的北极上空观察,所见地球按反时针方向绕日公转(参看图 1-8)。

地球公转的轨道平面叫做黄道平面。黄道平面与赤道平面的交角约为 $23^{\circ}27'$,叫做黄赤交角。由于地球公转以及黄赤交角而产生四季的变化。

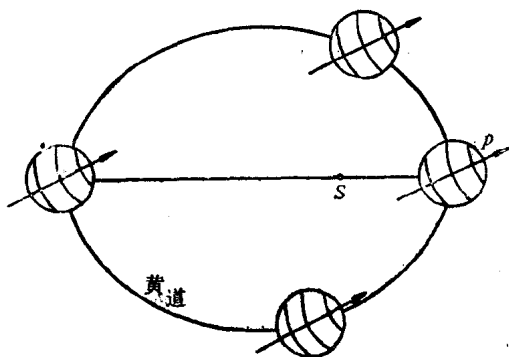


图 1-8

§ 1-5 恒星的辨认

天空中有无数恒星,势难一一辨认。

对于精密的大地天文测量来说,有专门的星表供观测使用,在观测前只要将望远镜对准欲观测的恒星在某一时刻的方位和高度,再参照星等,则不难在望远镜内辨认出该星,而不一定要认识该星在空中是哪一颗。但对于低精度的观测来说,观测者往往要用望远镜直接照准亮星,这就要求观测者能够正确无误地辨认空中的恒星。

一、恒星的亮度和星等

在晴朗的夜晚,仰望天空,可以见到散布着或明或暗的无数亮点。除少数行星、人造卫星等天体外,绝大多数的亮点是恒星。

我们所感觉到的星的亮度叫视亮度,它既与星本身发光的能力有关,又与星距离我们的远近有关。古代人把恒星的视亮度分成等级,即所谓星等(视星等),用符号 m 表示。星等数越大,表示星的亮度越小,即一等星比二等星亮,比一等星亮的则用零等甚至负数等来表示。连续各星等的星的亮度成几何级数,一等星的亮度正好为六等星的一百倍。所以级数公比等于 $\sqrt[6]{100} = 2.512$, 2.512 叫做星等比。

在晴朗的夜晚,肉眼看得见的最微弱的星是六等星。用照相方法目前可以看到廿三等的暗星。

二、星座、星名

为了辨认肉眼所能见到的繁星,自古以来就将天空中的恒星划分为若干区域。每一区域叫做一个星座。最初的星座名称大部分来自古代希腊神话,这些名称保持到现在。1928 年国际天文联合会决议将全天划分为 88 个星座,每个星座给以一个名称,用拉丁文字来表示,例如小熊座的拉丁文名称为 Ursa Minor,简称为 U Mi。每个星座中的每颗恒星给一个名字,用希腊字母、拉丁字母或数字加上星座的名称来表示。某些最亮的星还有它

们的专门名称,例如天琴座 α 星,在我国叫织女星,在阿拉伯国家叫 Vega 等。

三、星图和恒星的辨认

星图是表示星座在空中的相对位置的图。我们把星空与星图进行比较就可辨认出星座。

将星图与星空比较时,如果要辨认北方的星座,则观测者面向正北,高举北天星图(见本章图 1-10 北天星图)使星图的中心置于相当于北极星的高度,再根据观测时所在的月份,将星图中这一月份置于上方。如果在晚上九点钟左右认星,此时星图中的星座,其方位与高度就与星空中星座的方位和高度一一对应,这样就不难将星空中的恒星,根据它在星座中所在位置,在星图中找出该星的名字。如果在晚上八点钟认星,那么需要将星图顺时针方向旋转大约 15° ,七点钟认星则需顺时针旋转约 30° ,晚上十点钟认星,则逆时针方向旋转 15° ,余类推。

观测赤道附近的恒星时,观测者则面向正南,高举赤道带星座图(本章图 1-11 赤道带星座),所举高度等于所在地的纬度。由于天球赤道*在天球上是呈环形的,而在星图上是直线,故观测者在认星时将星图拿成弧状。然后像辨认北天星座一样,将星图中观测时所在的月份正对南方,这是对于在晚上九点钟时观测来说的。如果认星不是在这个时候,则要像辨认北天的恒星那样,将星图顺时针或逆时针旋转一个角度。

在北方星空的星座中,我们最熟悉的是大熊座(U Maj),该星座中有七颗亮星构成一勺形,即所谓北斗七星。将这七颗星中的 α U Maj 和 β U Maj 两星联结起来,并向勺口方向延长其距离的五倍左右,就可找到一颗亮星,这就是小熊座 α 星、即北极星。小熊座 α 星是属于小熊座中的一颗亮星,这一星座也是由七颗亮星构成一勺形,但它的勺柄却与大熊座中的勺柄方向相反,如图 1-9 所示。以北极星为中心,对称于大熊座的位置可以找到仙后座(Cass),这个星座中的五颗亮星的形状很像英文字母 W。

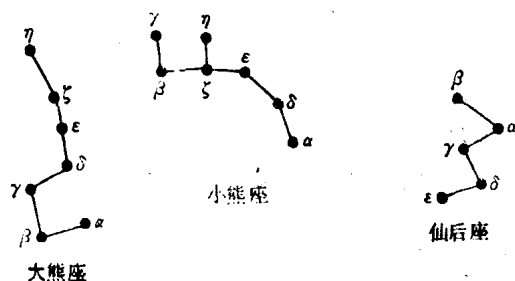


图 1-9

春季夜晚,以狮子座(Leo)最易辨认。因其几颗主要亮星所组成的形状很像狮子,故称狮子座。狮子座的右边是巨蟹座(Canc),左下方则是室女座(Virg),这三个星座都是属于黄道十二宫的。室女座的角宿一(α Vir),狮子座的五帝一(β Leo)以及牧夫座的大角(α Boo)这三颗亮星构成一个等腰三角形。

夏季赤道附近的星座以天蝎座(Scor)最为引人注目,它的头部由几颗不太亮的星组成,它的尾部有一颗亮星叫做心宿二(α Sco),又名“大火”。此外还有两颗亮星,即天琴座(Lyra)的织女一(α Lyra)和天鹰座(Aql)的河鼓二(α Aql),俗称牛郎星,隔着银河遥遥相对。在天琴座的东边,有几颗亮星,组成一个十字架形状,这便是天鹅座(Cygnus)。

* 天球赤道和天球详见 § 2-1