

球面天文学

苗永宽 编著

科学出版社

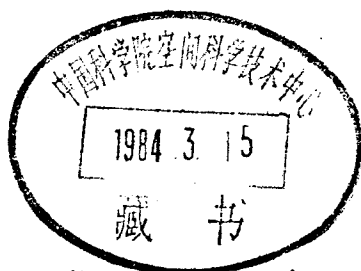
P121

MYK

球面天文学

苗永宽 编著

TW28/19



科学出版社

1983

002744

内 容 简 介

本书根据在南京大学天文系授课的讲义编写。全书共分十章,主要内容包括时间计量系统,天球坐标系,影响天体坐标的各种因素——大气折射、视差、光行差、岁差、章动等,以及恒星位置的计算。

本书可作为高等学校天文系的教材,也可供天文学、大地测量学方面的科技工作者参考。

球 面 天 文 学

苗永宽 编著

责任编辑 方开文

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 12 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1983 年 12 月 第一次印刷 印张: 6 1/4

印数: 0001—2,450 字数: 139,000

统一书号: 13031·2445

本社书号: 3350·13—5

定 价: 1.00 元

前 言

天文学研究的对象是天体——星系、星云、星团、恒星、行星、太阳、月亮等等。地球也是一个天体，所以地球的某些特性也属于天文学讨论的范围。人类认识天体是从天体的力学运动开始的。不难理解，要探讨一个物体的力学运动，首先要知道它在不同时刻的位置，即它位于什么方向，距离多远，但对天体而言，在绝大多数情况下，只要知道方向就够了。因此在天文学中，天体的位置都是指天体的方向。

大家都有这样的感觉，天空好象是一个巨大的半球覆盖着大地，太阳、月亮、恒星等各种天体似乎都离我们一样远，它们分布在这个半球的内表面上，而且，不管走到那里，总感到自己正好位于球心。我们通常用天球这个概念代表这一直观感觉。天球以观测者为球心，任意距离为半径。当然，天球并不反映宇宙的本质，客观上也不存在这样一个圆球，但在天文学中可以把它作为一个辅助工具。天体在天球面上的投影，即观测者和天体的连线与天球面相交的一点，叫做天体在天球上的位置。球面天文学的首要任务就是在天球上建立一些坐标系(统称天球坐标系)来确定天体的位置。

运动着的天体时时刻刻改变位置，因此，只给定一个天体的位置，而不说明它所对应的瞬间是毫无意义的。对于瞬间需要用一个数量来标志它，为此建立了好几种时间计量系统。同一瞬间在不同的时间计量系统内所对应的时刻值是不同的，这正如一个点在不同坐标系中的坐标值不同是一个道理。时间计量系统主要有恒星时、真太阳时、平太阳时、历书

时、原子时和协调时等。本书着重介绍前三种,后三种只作一些简介。

天体的位置或者它在某一坐标系中的坐标是天文工作最基本的数据。这些数据的获得是一件很不容易的事。因为,用天文仪器测定的天体位置,即使已消除了观测误差和仪器误差,仍然不是所要求的最后结果,这是由于天体的方向还被某些客观因素所歪曲,必须研究这些因素并设法消除其影响。这些因素主要是:

1.大气折射。地球周围环绕着一层厚厚的大气。星光从大气外的真空射入大气层时必然产生折射,因此,我们观测到的是折射后的天体方向,而不是天体的真方向。两者的差值因天体的高度不同而异。

2.视差。在不同地点观测同一天体,所见天体的方向是不同的。由于地球的自转和公转,观测者在空间的位置连续地变化着,因而,他所见同一天体的方向也随时不同,这就是视差现象。不过,大多数天体离地球十分遥远,我们根本察觉不到视差的影响,只对于少数较近的天体才需要考虑改正视差。

3.光行差。观测者因地球的自转和公转而以一定的速度运动,按一定速度运动着的观测者所见天体的方向和静止时所见的方向是不同的。这种影响不仅与观测者的速度大小有关,还因天体在天球上的位置而不同。

上述诸因素都没有涉及到天球坐标系。由于岁差、章动现象,天球坐标系恰恰是不固定的。坐标系的基本圈和基本点如天赤道、黄道、北天极,北黄极和春分点等在空间缓慢而连续地运动着。坐标系的变动,必然导致坐标值的变化。不同时刻的天体坐标就有一个互不相等需要换算的问题。

以上的介绍都是球面天文学所包含的内容,将分别在本

书各章中论述。球面天文学各章的独立性很大，学习时会感到前后缺乏联系，只是在讨论恒星平位置和视位置的换算时，才把全书的大部分内容贯串起来。通过本书的学习，我们期望还能较好地掌握天球这一辅助工具，学会把一些天文现象正确地在天球上表达出来。只要我们认真思考、反复实践，这一点是不难做到的。

本书根据编者在南京大学天文系授课的讲义写成，内容主要按后行课的需要而定，力求少而精。为照顾各方面读者的需要，凡能用初等数学解决的问题，尽量少用或不用高等数学。

本书由苗永宽负责编写，夏一飞、肖耐园、许邦信参加了部份章节的编写工作，编写过程中曾参阅了易照华所写的“用旋转矩阵计算恒星位置”的资料，最后定稿时，由夏一飞校阅。限于编者水平，本书错误不当之处在所难免，希读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 球面三角学和其它预备数学	1
§ 1.1 球面三角学基本知识	1
§ 1.2 球面三角形	7
§ 1.3 球面三角形的基本公式	10
§ 1.4 几种特殊的球面三角形	14
§ 1.5 内插法	16
§ 1.6 矩阵	24
第二章 天球坐标系	29
§ 2.1 天球	29
§ 2.2 天球坐标系	33
§ 2.3 直角坐标系	37
§ 2.4 天球坐标系的变换	41
第三章 时间计量系统 (I)	46
§ 3.1 计量时间的基本原则和时间计量系统	46
§ 3.2 恒星时	47
§ 3.3 真太阳时和平太阳时	49
§ 3.4 地方时和区时	53
§ 3.5 恒星时单位和平时单位的换算	59
§ 3.6 恒星时时刻次序的判别	62
§ 3.7 恒星时和平时时刻的换算	66
§ 3.8 历法	73
第四章 天体的周日视运动现象	79
§ 4.1 天体的周日视运动	79
§ 4.2 天体的中天和出没	82
§ 4.3 天体过卯酉圈和天体大距	85

§ 4.4	天顶距和地平经度随时间的变化	87
第五章	大气折射	91
§ 5.1	大气折射	91
§ 5.2	大气折射微分方程及其积分	94
§ 5.3	大气折射表(蒙气差表)	99
第六章	视差	100
§ 6.1	视差的概念	100
§ 6.2	地球的形状和大小	102
§ 6.3	周日视差	107
§ 6.4	周日视差对天体赤道坐标的影响	111
§ 6.5	周年视差和地球向径	115
§ 6.6	周年视差对赤道坐标的影响	119
第七章	光行差	124
§ 7.1	光行差	124
§ 7.2	光行差对恒星坐标的影响	127
§ 7.3	地球的绕日运动	130
§ 7.4	光行差对恒星赤经、赤纬的影响	137
§ 7.5	太阳系天体的光行差	142
§ 7.6	周日光行差	145
第八章	岁差、章动	148
§ 8.1	岁差、章动	148
§ 8.2	日月岁差、行星岁差	150
§ 8.3	岁差对天体赤道坐标的影响	155
§ 8.4	章动对天体赤道坐标的影响	158
§ 8.5	计算岁差和章动的准确公式	161
第九章	恒星位置的计算	165
§ 9.1	恒星的视位置、真位置和平位置	165
§ 9.2	根据星表历元平位置计算年首平位置	167
§ 9.3	根据年首平位置计算视位置	168
§ 9.4	用直角坐标方法精确计算恒星视位置	175

第十章 时间计量系统(11).....	181
§ 10.1 平恒星时和真恒星时	181
§ 10.2 世界时	182
§ 10.3 回归年、恒星年	185
§ 10.4 历书时	187
§ 10.5 原子时和协调时	190

第一章 球面三角学和其它预备数学

§ 1.1 球面三角学基本知识

一、球面上的圆

一个平面和球面相截，所得的截面是一个圆。如果这个平面通过球心，则此球心就是所得圆的圆心。这种以球心为圆心的圆称为大圆。假如这个平面不通过球心，所得圆的圆心就不可能是球心。这种不以球心为圆心的圆称为小圆。

图 1.1 画出一个以 O 点为球心的球，圆 OAB 是通过球心的大圆；而以 O' 为圆心的 $O'CD$ 是小圆。

从地球仪可以看出，地球的赤道是以地心为圆心的大圆；而地理纬圈则是小圆。

我们知道，通过不在同一直线上的三个点可作并且只能作一个平面。由此可以证明，通过球面上不在同一直径上的二点和球心可作并且只能作一个大圆。

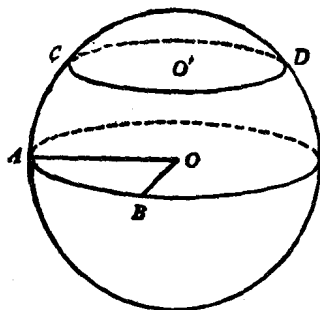


图 1.1

二、球面上两点的距离

设在球面上有两点 A, B ，如何计量它们之间的距离呢？在平面几何学里，我们知道圆周上两点的距离可以用它们之

间的圆弧的线长度来计量;也可以用角度来计量,它等于此圆弧所对的中心角 $\angle AOB$ 。由此,我们可以很自然地想到,球面上 A, B 两点间的距离,可以用通过 A, B 两点所作的截面截得的圆上的圆弧来计量。但是通过 A, B 两点可以作无数个截面,其中除一个截面通过球心截得大圆外,其余截得的均为小圆。由于通过 A, B 的大圆只有一个,因此 A, B 间的大圆弧可以唯一确定;而且还可以证明 A, B 间的大圆弧与 A, B 间的一切小圆弧相比,其长度为最短,所以球面上两点间的距离用这两点间的大圆弧来计量。以后,凡是我们提到球面上两点间的距离(或角距),总是指这两点间的大圆弧,其数值等于这两点在球心所对的中心角。若 A, B 是直径的两个端点,过 A, B 可作无数个大圆,但 A, B 两点之间的大圆弧所对的中心角都是 180° ,因此,上述计量球面上两点距离的原则仍适用。

三、球面上圆的极

大家都熟悉地球仪的装置: 一根轴穿过球面上二个点,并通边球心,整个球体绕此轴旋转。当球体旋转时,赤道上任意一点画出一个大圆,其它的任意一点画出一个圆。我们可以看到,这根轴与这些大圆和小圆所在的平面是垂直的,而且轴与球面的交点到其中任一圆上的各点的角距都相等。

由此得出结论: 对球面上任何一个圆(无论是大圆或小圆),只要通过它的圆心 O' 作一条垂直于平面 $O'ABC$ 的垂线,这条垂线一定经过球心 O ,并与球面交于直径的两端 P 和 P' 。 P 和 P' 两点叫作圆 ABC 的极(图1.2a)。

球面上某一圆的极到这个圆上任一点的角距如 $PA, PB, PC, \dots$ 叫作 $A, B, C, \dots$ 各点的极距,这些极距都相等。如果所讨论的圆 ABC 是一个大圆,则 P 到大圆上任一点的角

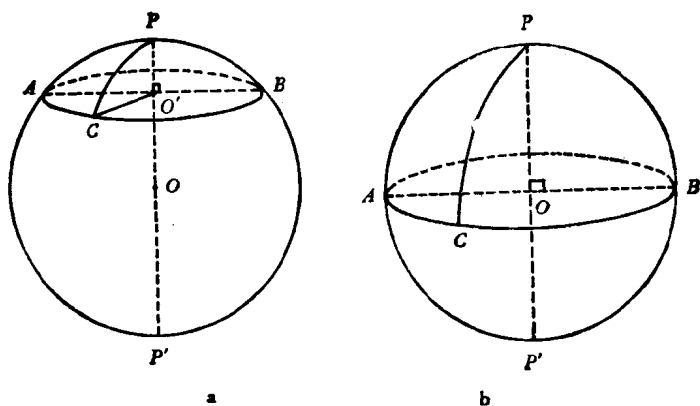


图 1.2

距都是 90° (图 1.2 b)。

四、球面角

两个大圆弧相交成的角叫作球面角，它们的交点叫作球面角的顶点，大圆弧本身叫作球面角的边。图 1.3 画出了两个相交的大圆弧 PA 和 PB ； PA ， PB 所在的平面分别是 POA 和 POB ，二平面的交线为 OP 。

球面角 APB 以二个平面 POA ， POB 所构成的两面角来度量。

在图 1.3 中，作以 P 为极的大圆 QQ' ， PA 与 QQ' 交于 A' 点， PB 延长后与 QQ' 交于 B' 。由于 P 为 QQ' 的极，所以 OA' ， OB' 都和 PO 正交，于是 $\angle A'OB'$ 等于平面 POA 和 POB 所构成的两面角。即球面角 APB 可以用 $\angle A'OB'$ 度量，又因 $\angle A'OB' = \widehat{A'B'}$ ，所以球面角 APB 是以 $\widehat{A'B'}$ 来度量的。

从上述讨论可以概括出以下结论：以球面角的顶点为极

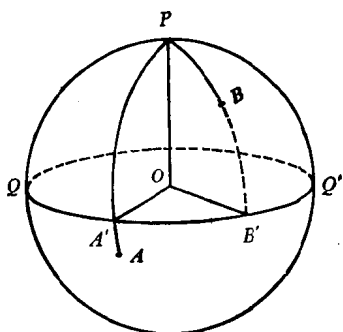


图 1.3

作大圆，则球面角的边或其延长线在这个大圆上所截取的弧段便是球面角的数值。

五、圆弧和角的度量

度量圆弧和角的大小，常用的单位有角度和弧度两种。这里，对弧度作一些复习和补充。

长度等于半径的圆弧的弧长叫作 1 弧度，当然这段圆弧所对的圆心角的大小也是 1 弧度。某一段圆弧的长可用弧度及其小数来表示。通常，在表示一段弧长或角度时，单位“弧度”常省略不写，如果弧长为 1.3325，其单位就是弧度。

由于一周的长度等于 2π 个半径，所以一周等于 2π 个弧度。

角度和弧度两种单位之间的关系为

$$2\pi \text{ 弧度} = 360^\circ,$$

因此

$$1 \text{ 弧度} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57^\circ.3 = 3438' = 206265'',$$

或者

$$1^\circ = \frac{1}{57.3} \text{ 弧度},$$

$$1' = \frac{1}{3438} \text{ 弧度},$$

$$1'' = \frac{1}{206265} \text{ 弧度}.$$

通常以希腊字母 ρ 表示弧度和角秒的关系: 1 弧度 = ρ'' , 即 $\rho'' = 206265''$.

若一角的大小为 θ 弧度, 那么以度表示时, 其值为 57.3θ ; 以角分表示时, 其值为 $3438'\theta$; 以角秒表示时为 $206265''\theta$.

以 $\theta, \theta^\circ, \theta', \theta''$ 分别表示同一角的弧度数、度数、角分数、角秒数, 则有

$$\theta^\circ = 57.3\theta,$$

$$\theta' = 3438'\theta,$$

$$\theta'' = 206265''\theta = \rho''\theta,$$

$$\theta = \frac{\theta^\circ}{57.3} = \frac{\theta'}{3438'} = \frac{\theta''}{\rho''}.$$

注意: 上述 $\theta, \theta^\circ, \theta', \theta''$ 是同一角用不同单位度量时的数值, 它们在数值上当然互不相等.

在数学分析公式中, 弧和角一律用弧度为单位. 比如, 下述常用公式中, 都取以弧度为单位的值,

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \dots,$$

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \dots,$$

$$\tan \theta = \theta + \frac{\theta^3}{3} + \frac{2\theta^5}{15} + \dots.$$

若 θ 很小, 在忽略二级以上小量时, 可取如下近似:

$$\sin \theta = \theta, \quad \tan \theta = \theta, \quad \cos \theta = 1.$$

在忽略三级以上小量时, 有

$$\sin \theta = \theta, \quad \tan \theta = \theta, \quad \cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2}.$$

设 $\theta = 1''$, 则有

$$\sin 1'' = \frac{1}{206265},$$

$$\tan 1'' = \frac{1}{206265},$$

$$\cos 1'' = 1 - \frac{1}{2 \times 206265^2}.$$

一般可写成

$$\sin \theta'' = \frac{\theta''}{206265} = \frac{\theta''}{\rho},$$

$$\tan \theta'' = \frac{\theta''}{206265} = \frac{\theta''}{\rho},$$

$$\cos \theta'' = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\theta''}{206265} \right)^2 = 1 - \frac{\theta''^2}{2\rho^2}.$$

为简化书写, 常用 $\sin 1''$ 来代替 $\frac{1}{206265}$. 比如,

$$\theta = \frac{\theta''}{206265} = \theta'' \sin 1''.$$

下面列出几个小于 1° 的小角的弧度值以及它们的正弦、正切和余弦:

$1''$	0.00000 48481 36811 10
$\sin 1''$	0.00000 48481 36811 08
$\tan 1''$	0.00000 48481 36811 13
$1'$	0.00029 08882 1
$\sin 1'$	0.00029 08882 0
$\tan 1'$	0.00029 08882 2
$5'$	0.00145 44410
$\sin 5'$	0.00145 44405

$\tan 5'$	0.00145 44421
1°	0.01745 33
$\sin 1^\circ$	0.01745 24
$\tan 1^\circ$	0.01745 51
$\cos 1''$	0.99999 99999 88
$\cos 1'05''$	0.99999 9950
$\cos 10'$	0.99999 58
$\cos 30'$	0.99996 2
$\cos 1^\circ$	0.99984 8

球面天文学讨论的对象经常是小于 1° 的小角, 由上列数值可以看出, 取 $\sin \theta = \tan \theta = \theta$, $\cos \theta = 1$ 是完全可以的. 比如对于一个等于 1° 的角, 取 $\cos 1^\circ = 1$, 误差不过 0.00015, 这样小的误差完全可以忽略.

§ 1.2 球面三角形

一、球面三角形

把球面上的三个点用三个大圆弧联结起来, 所围成的图形叫作球面三角形(图 1.4). 这三个大圆弧叫作球面三角形

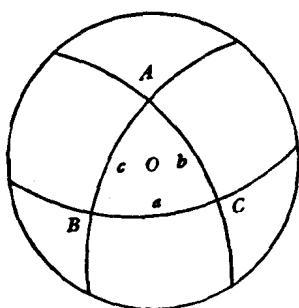


图 1.4

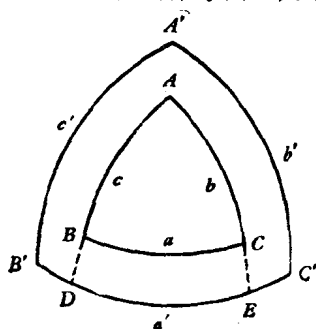


图 1.5

的边,通常用小写拉丁字母 a, b, c 表示;三个大圆弧所构成的角叫作球面三角形的角,通常用大写拉丁字母 A, B, C 表示. 球面三角形的边、角一般取为小于 180° .

二、极三角形

设球面三角形 ABC 各边 a, b, c 的极分别为 A', B', C' (图 1.5), 并设 $\widehat{AA'}, \widehat{BB'}, \widehat{CC'}$ 都小于 90° , 则由通过 A', B', C' 的大圆弧所构成的球面三角形 $A'B'C'$ 叫作原球面三角形的极三角形.

极三角形和原三角形有非常密切的关系, 关于这种关系存在着两条定理.

定理 I 如果一球面三角形为另一球面三角形的极三角形, 则另一球面三角形也是这一球面三角形的极三角形. 这条定理很容易证明, 请读者自证.

定理 II 极三角形的边和原三角形的对应角互补; 极三角形的角和原三角形的对应边互补.

证明如下: B' 是 b 的极(图 1.5), C' 是 c 的极, 所以有 $\widehat{B'E} = \widehat{C'D} = 90^\circ$, $\widehat{B'E} + \widehat{C'D} = 180^\circ$. 因此, $\widehat{B'C'} + \widehat{DE} = 180^\circ$.

由定理 I, A 是 $\widehat{B'C'}$ 的极, 故有 $\widehat{DE} = A$, 又因 $\widehat{B'C'} = a'$, 所以

$$a' + A = 180^\circ. \quad (1.1)$$

上式即定理 II 前半部的证明. 定理 II 的后半部不需证明, 因它实际上是定理 I 和定理 II 的前半部的一个推论.

三、球面三角形的边和角的基本性质

1. 球面三角形两边之和大于第三边.

• • •