

计算球面天文学

L. G. 塔夫 著

科学出版社

计算球面天文学

L. G. 塔夫 著

凌兆芬 毛昌鉴 译

肖耐园 校

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书论述球面天文学中的应用数学问题,主要介绍恒星、行星和人造卫星观测位置的归算,讨论各项改正和数学处理,内容包括总岁差、章动、自行、光行差、视差、地球形状、大气折射和时间系统,书中还介绍了照相天体测量、天体力学以及天文星表。对每个课题,先简要地阐述理论基础,然后全面地探讨严格的计算方法和各种近似方法,每章包含有完整的数值计算例子。书后附有天文学名词,供读者迅速方便地查检,以便理解天文学和天体测量的一些主要术语。

阅读本书并不要求具有天文学的专门知识,因此本书适用于初涉上述领域的读者。本书也可供在天文学和大地测量学部门工作或学习的科技人员、教师和大学生学习参考。

Laurence G. Taff

COMPUTATIONAL SPHERICAL ASTRONOMY

John Wiley & Sons Inc., 1981

计 算 球 面 天 文 学

L. G. 塔夫 著

凌兆芬 毛昌鉴 译

肖耐园 校

责任编辑 方开文

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

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

1992年9月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1992年9月第一次印刷 印张:8 1/4

印数:1—700 字数:177 000

ISBN 7-03-002962-3/P·582

定价:7.60 元

前 言

本书论述球面天文学中的应用数学问题，旨在帮助那些没有受过天体测量训练的科学家和工程师迅速掌握方位天文学中的计算方法。虽然书中重点强调了算法本身，但并未忽视计算的理论基础。不过，这毕竟不是一部球面天文学教程，读者倘若不参阅这类著作，那将会有所不足。

本书阐述的都是一些经典问题，即总岁差、章动、自行、光行差、视差和地球形状、大气折射以及时间系统。此外也讨论了天文星表、照相天体测量(用于更现代化的设备)的原理和天体力学基础。对于每一个论题，先简要地阐明其理论基础，然后详尽地探讨严格的和各种近似的计算方法，每一章都含有完整的数值计算实例，并给出中间结果，以便于读者检验自己对有关内容的掌握程度。无论什么时候，对于同一类型的问题，用几种等价的分析方法或者数值方法求解，看来是可取的。读者可能会料到自己的计算结果在最后一位上或许有所差异。本书还包括了一份内容丰富的天体测量学、天文学以及天体物理学的术语汇编。对于天体物理学而言，所列出的乃是读者最有可能遇到的词汇，对于天体测量学而言，则包括了它的全部基本概念。

在别的书中已介绍得很详细的某些论题，本书皆已从略。它们包括光学仪器及其误差、恒星星表的编制、双星系统、大地测量问题、钟及其误差、轨道决定和改进、非光学资料处理、日月食、掩星和凌日等等。书中亦未给出对于利用对数表和

三角函数表计算时非常有用的许多专用公式。全书侧重于对北半球的叙述和公式推导，但是也给出了南北两个半球的公式。

我虽然受过天体物理学的专业训练，但并不是一位天体测量学专家。然而，却为一个配备有微光电视照相机并用计算机控制的天文台负责确定、设计、完成及检验观测程序和资料归算程序。在着手上述工作时，旧的教科书（尤其是对 Chauvenet, 1891; Doolittle, 1895; Newcomb, 1906 和 Smart, 1931）显然已不够完备，或陈旧过时了。新的著作（例如 Woolard 和 Clemence, 1966; Van de Kamp, 1967; Mueller, 1969; McNally, 1974; 英国和美国航海历表局, 1974）有时也有同样的缺陷，或者在离题甚远的问题上花费许多篇幅，或者是为已具备天体测量学知识的读者撰写的。鉴于这些著作已经问世（特别是 Woolard 和 Clemence 的杰出著作），并设想读者只是一个初学者，我尝试在读者和这些权威性著作之间架起一座桥梁。特别是我只要求读者具备微积分、矩阵代数学、初等统计学和其他一些数学技能，而不具备天文知识。本书使用的符号是标准的，天文常数值则是国际天文学联合会于 1976 年建议采用的，精通这一领域的读者将会发现，选取这些常数可能会在结果数值上引起十分细微的差异。

Woolard 和 Clemence (1966) 的著作对我的影响很深。同时，我也要感谢 J. M. Sorvari 博士的帮助，他仔细阅读了我的手稿。与 J. L. Russell, G. D. Gatewood, H. K. Eichhorn 诸位博士的讨论也使我受益匪浅。表 2, 3, 4 (经许可) 取自 5268 颗标准恒星表(历元 1950.0, 以 N30 标准系统为基础)、第四基本星表、以及史密松天体物理台星表。我也

要感谢麻省理工学院的林肯实验室给我的支持，特别是感谢 Marie Grey 出色的打字技能。尽管我得到了种种帮助，但书中的错误仍在所难免，这应由我本人负责。

L. G. 塔夫

1980 年 11 月

马萨诸塞州 列克星敦

目 录

第一章 引论	1
§ 1.1 数学准备	1
§ 1.1.1 球面几何学	2
§ 1.2 补充读物	4
第二章 天球坐标系	6
§ 2.1 天球坐标系的性质	6
§ 2.1.1 天球	7
§ 2.2 地平坐标系	8
§ 2.3 赤道坐标系	10
§ 2.4 黄道坐标系	13
§ 2.5 天球坐标的旋转变换	13
§ 2.5.1 天文三角形	16
§ 2.6 位置角和距离	16
§ 2.7 特殊的恒星位置	18
§ 2.7.1 季节	19
§ 2.7.2 晨昏蒙影	21
第三章 总岁差和自行	22
§ 3.1 岁差和章动的起因	23
§ 3.2 总岁差的严格处理方法	24
§ 3.2.1 按 θ 的级数展开	28
§ 3.2.2 迭代法	30
§ 3.3 幂级数法	32
§ 3.3.1 方法比较	36

§ 3.3.2	IAU (1976) 新岁差量	37
§ 3.4	恒星的固有运动	40
§ 3.5	自行的严格处理	40
§ 3.5.1	处理自行的级数方法	43
§ 3.5.2	自行的近似矩阵公式	45
§ 3.6	岁差对自行的影响	46
§ 3.7	处理总岁差和自行的综合效应的严格方法...	48
§ 3.8	处理总岁差和自行的综合效应的幂级数方法	49
§ 3.8.1	椭圆光行差和星表平位置	54
§ 3.9	黄道坐标的总岁差	56
§ 3.9.1	IAU (1976) 新黄赤交角	57
第四章	视差	58
§ 4.1	三维坐标系	58
§ 4.2	地理坐标系	58
§ 4.3	天文地理坐标系	59
§ 4.4	测地地理坐标系	60
§ 4.5	地心坐标	61
§ 4.6	地理坐标的变化	66
§ 4.7	坐标的三维转换	67
§ 4.8	地平系统的周日视差	68
§ 4.9	赤道系统的周日视差	70
§ 4.10	日心坐标和地心坐标的转换	74
§ 4.11	恒星的周年视差	75
§ 4.12	行面坐标	77
第五章	计算站心位置	79
§ 5.1	恒星的位置	79
§ 5.1.1	视位置的计算	80

§ 5.1.2 站心位置计算	86
§ 5.2 真位置和章动	88
§ 5.3 光行差	95
§ 5.3.1 长期光行差	96
§ 5.3.2 行星光行差	97
§ 5.3.3 恒星光行差	97
§ 5.4 大气折射	101
§ 5.4.1 视差折射	103
§ 5.5 视位置的一阶归算	103
§ 5.5.1 视位置的二阶归算	104
§ 5.6 矩阵归算	107
§ 5.6.1 短周期章动	108
§ 5.6.2 历史和现状	108
第六章 时间	110
§ 6.1 恒星时	110
§ 6.2 世界时	111
§ 6.2.1 世界时的变化	117
§ 6.3 历书时	118
§ 6.4 原子时	121
§ 6.5 年	122
§ 6.6 儒略日期	123
第七章 照相天体测量	125
§ 7.1 概述	125
§ 7.2 标准坐型	126
§ 7.2.1 标准坐标的作用	133
§ 7.3 线性底片模型	137
§ 7.3.1 四常数底片模型	138
§ 7.3.2 六常数底片模型	140

§ 7.3.3 望远镜导向模式	141
§ 7.4 较差归算	142
§ 7.4.1 恒星常数和贝塞尔日数	143
§ 7.4.2 独立日数	144
§ 7.5 运动天体的模拟	145
§ 7.6 底片重叠技术	149
§ 7.6.1 目的	149
§ 7.6.2 底片重叠方法的公式表示	151
第八章 天体力学	158
§ 8.1 引力	158
§ 8.1.1 势函数的展开	160
§ 8.1.2 N 体问题	163
§ 8.1.3 二体问题	165
§ 8.1.4 按偏心率幕次的级数展开	169
§ 8.1.5 太阳系问题	172
§ 8.2 摄动理论	174
§ 8.2.1 扁率摄动	176
§ 8.2.2 第三天体产生的摄动	178
§ 8.2.3 大气阻尼	178
第九章 天文星表	180
§ 9.1 天文学概述	180
§ 9.2 太阳系天体	181
§ 9.2.1 大行星	181
§ 9.2.2 彗星	182
§ 9.2.3 小行星	182
§ 9.3 恒星	182
§ 9.3.1 视差	182
§ 9.3.2 视向速度	183
§ 9.3.3 星位和自行	183

§ 9.3.4 基本星表	185
§ 9.3.5 非基本编纂星表	196
§ 9.3.6 测光资料	197
§ 9.3.7 恒星光谱	201
§ 9.3.8 特种类型的恒星	202
§ 9.3.9 星名	202
§ 9.4 非恒星天体	203
附录 A IAU (1976) 天文常数系统	204
附录 B 术语汇编	206
参考文献	250

第一章 引 论

§ 1.1 数 学 准 备

天体(恒星、行星、卫星、人造天体等)的光学观测与我们能立刻获得的信息有关,这种信息就是在观看、照相或用其他方法记录天体射来的光和光谱分布时,仪器必须指向的那个方向。方向,或者说方位,便是本书论述的内容,它完全由以观测仪器为中心的球面坐标系中的两个角来确定,也可以使用一组与之等价的其他数据。特别是若用 θ 表示纬度, ϕ 表示经度,则经常使用的方向余弦矢量为

$$\mathbf{I}(\phi, \theta) = \begin{Bmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi \\ \sin \theta \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

由于以仪器为中心的坐标系依赖于仪器所处的位置,它并不是一种惯性坐标系,所以它不适用于天体测量的种种目的。因此,本书的主旨是描述如何逐步逼近于某种惯性坐标系,并阐明为使望远镜指向某个特定天体而必需的种种修正。最后,书中有时用“位置”(place)这个词来替代“方位”(position)。

对太阳系天体和近距恒星的理论探讨,既涉及到它们的方向 $\mathbf{I}(\phi, \theta)$,也涉及到它们的距离 r ,这种天体的位置用 $\mathbf{r} = r\mathbf{I}(\phi, \theta)$ 表示。

修正到惯性位置(或反过来,改正到观测位置)大多可以用坐标系的变换或者旋转公式来表示,围绕 x, y 和 z 轴分别

旋转 α, β 和 γ 角(所有的角均以弧度表示, 除非另有特别说明), 这三种基本旋转等价于分别乘以如下的矩阵:

$$\begin{aligned} R_1(\alpha) &\equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ R_2(\beta) &\equiv \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\ R_3(\gamma) &\equiv \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.2)$$

§ 1.1.1 球面几何学

球面是与一个特殊的固定点(即这个球面的中心)等距离的所有点的空间轨迹。球心与球面上任一点之间的距离 R 称为半径。球的表面积为 $4\pi R^2$ 。任何一个平面与一个球面的交线都是一个圆。垂直于交线圆, 并通过圆心的直线, 称为该圆的轴。圆的轴与球面相交于该圆的两个极。如果这个圆的中心与球面中心重合, 那么这个圆就称为大圆; 否则便称为小圆。由于一个大圆的圆周为 $2\pi R = 360^\circ$, 因此整个球面包含有 $4\pi(360/2\pi)^2 \simeq 41253$ 平方度。每个大圆都平分这个球面。一般说来通过球面上两个不同的点, 只存在唯一的一个大圆, 除非这两个点是某个大圆的极。

当两个大圆相交时, 它们交于两点。在这两个交点处构成了四个球面角。球面角的大小, 用由构成该球面角的两个大圆所截的以该球面角的顶点为极的大圆上的那段圆弧来度量。图 1 中球面角 $AO'B = \angle A'O'B' = \widehat{AB}$, 由三个大圆

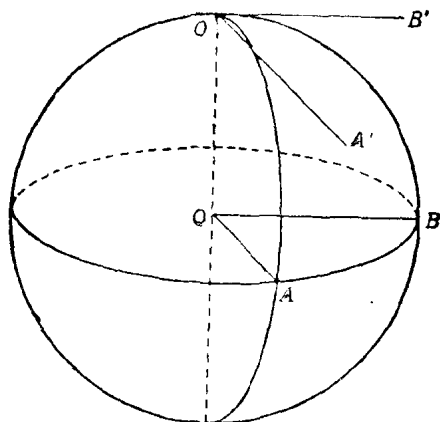


图1 球面角 $AO'B$, $O'A$ 和 $O'B$ 是大圆弧.

相交构成的图形称为球面三角形。球面三角形浩繁的三角学关系可以用下述三个定律简单地概括,即正弦定律

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B}$$

边的余弦定律(基本关系)

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

角的余弦定律

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a$$

参看图 2, 容易理解, 角

$A = \angle BAC$, 边 $a = \widehat{BC}$.

此外, 在这些公式中任何

一对大、小写字母, 都可以用另一对大、小写字母来置换*。在

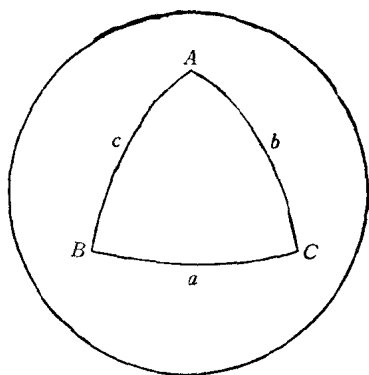


图2 球面三角形的六个元素.

* 即在公式中可以用 C 和 c 来置换 A 和 a 或 B 和 b . ——译者注

天文学中最重要的球面三角形是以北天极、天顶和所讨论的那一点作为三个顶点的三角形。它叫做天文三角形。

§ 1.2 补充读物

本书内容自成体系，但它并非球面天文学及其相关领域的全面概述。有两种补充书刊乃是必不可少的，第一种是《美国天文年历和航海历书》(The American Ephemeris and Nautical Almanac, 美国政府出版局, 华盛顿, 哥伦比亚特区, 年刊), 或者是与之相当的英国《天文年历》(The Astronomical Ephemeris, 英国皇家测绘局, 伦敦, 年刊)。前者以下简写成 AENA。数字实例可参阅 1979 年或 1980 年年历。第二种著作是《天文年历及美国天文年历和航海历书的补充说明》(The Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and The American Ephemeris and Nautical Almanac, 英国皇家测绘局, 伦敦, 1961 年; 1974 年第二版)。

现有的教科书中最好的是 Woolard 和 Clemence (1966) 的《球面天文学》(Spherical Astronomy)¹⁾。这本书在许多方面取代了 Smart 的《球面天文学教程》(Text-Book on Spherical Astronomy, 1931, 及以后的版本; 由 R. M. Green 修订的第六版, 1977)。但 Smart 的教程在一些方面仍是有用的, 我还推荐他的第四和第五版本。其他重要的有 Mueller (1969), Van de Kamp (1967), McNally (1974), Doolittle (1895), Chauvenet (1863), Newcomb (1906) 和 Nassau (1931) 等的著作。Woolard 和 Clemence 的专著以及美国

1) 这本书正文后面给出了完整的参考文献。

天文年历的《补充说明》总的来说是最权威的著作。

Eichhorn 在他自己的著作(1974)中透彻地论述了位置星表本身的问题。在 Mueller (1969)教科书的第六章中也有较简略的论述。天文学和天体物理学的总貌可到《恒星和恒星系统》(Stars and Stellar Systems, 芝加哥大学出版社)这部百科全书式的丛书中查找。

第二章 天球坐标系

§ 2.1 天球坐标系的性质

天文学中普遍应用的坐标系是直角坐标系和球面坐标系。后者是从天球的直觉形状和缺乏关于天体距离的知识自然产生出来的。前者更适合于解决理论天文学的问题及表示包含坐标系转换的计算公式。每种球面坐标系均以一个基本圈(有时称参考圈)、这个圈上的一个特殊点和这个圈的一个极点为标志。一种特定坐标系(地平、赤道、黄道)的名称就取自基本圈(即天文地平、天赤道、黄道)的名称。为了指明坐标系原点的位置,使用一个附加的修饰词。原点位于观测者的坐标系称为站心坐标系,位于地球中心的称为地心坐标系,位于太阳中心的称为日心坐标系。直角坐标系的命名惯例是类似的。通常 z 轴指向参考圈的选定极, x 轴指向参考圈上的特殊位置。右手和左手坐标系都普遍地使用。

人们总希望使用惯性坐标系,因为这便于将观测与理论作比较。虽然站心、地心和日心坐标系都不是惯性坐标系,但日心坐标系是惯性坐标系的很好的近似。使用非惯性坐标系必须指明坐标系的历元,这是因为一个在惯性空间固定的天体,其位置相对于非惯性坐标系是随时间而变化的。因此,我们会看到,在一个特定的坐标系的名称前必须添加一组精确定义的形容词短语。在第三、第四和第五章中介绍这些附加术语。

除了三个三维的球面和直角坐标系以外,我们还要讨论