

球面天文学

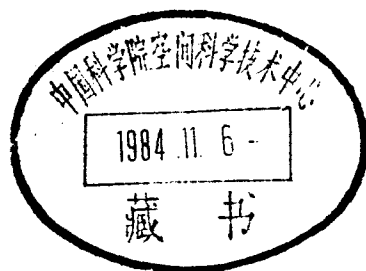
[美] F. W. 伍拉德

[加] G. M. 克雷斯

0421
N. E. 11
[美] E.W.伍拉德斯 著
G.M.克莱门斯

球面天文学

全和钧 赵君亮 译
朱圣源
任江平 校



测绘出版社
003151

内 容 简 介

本书是国际上球面天文学方面重要的经典著作之一。全书共二十章。从天球和坐标系的基本概念出发，讨论了视差、大气折射、光行差、岁差、章动等引起的天体坐标变化，论述了时间的定义，并讨论了星表和参考系，最后回顾了球面天文学术语的历史演变。

本书内容完整，推导严密，具有相当的深度。适合于天文和测绘部门有关工作者，尤其是教师和研究人員阅读参考，也可作为有关研究生的教材或参考书。

球面天文学

[美] E.W.伍拉德 著
G.M.克莱门斯

全和钧 赵君亮 朱圣源 译
任江平 校

*

测绘出版社出版

海洋出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 15⁷/₈·字数 412 千字

1984 年 9 月第一版·1984 年 9 月第一次印刷

印数 1—2300 册·定价 2.90 元

统一书号：15039·新 318

译者的话

12/105
本书作者 E.W. 伍拉德 曾任美国海军天文台编历室主任，G.M. 克莱门斯 曾任该台业务台长和耶鲁大学天文台台长。两人在国际天文界声望都很高，在天体力学、球面天文和方位天文方面造诣很深。本书基本概念清晰，逻辑推导严谨，不愧为球面天文学的一本经典著作。

全书共二十章。前三章论述天球和坐标系的基本概念。第四章至第十三章论述恒星位置(坐标)的变化。其中有由物理效应引起的变化，如视差、大气折射、光行差；还有由坐标系运动引起的变化，如岁差、章动等等。第十四章至第十六章论述时间和有关的概念。第十七章至第十九章论述星表和参考系。最后一章是关于球面天文学术语的历史演变。

国内、国际球面天文学经典著作甚多，新著也不断问世，各有特色。有的通俗易懂，适合初读者入门。有的简明扼要，适合于实际应用中快速查阅。而本书特点则是推理深入，叙述严密，概念清晰，内容完整，用词考究。对天体测量和天文大地测量的研究工作以及教育工作，尤其是师资的提高，研究生的培养等方面具有重要的参考价值。我们深感国内需要这样一本有权威性的球面天文学经典著作，因此特向读者推荐。由于我们译者水平有限，难免有错误及疏漏之处，敬望读者批评指正。

序

本书打算为读者提供一本关于基本方位天文学原理及其最新进展的综合著作。由于这门学科的发展,使布吕诺夫(Brünnow)、昌维纳特(Chauvenet)、德巴尔(de Ball)、奥波尔策(Oppolzer)和纽康(Newcomb)的一些球面天文学经典著作已显得过时了,但自此以后,没有再出过一本比较完整和严密的著作,而更新的资料则都是散见在浩瀚的文献中。

由于观测资料的长期累积,观测精度的不断提高,以及新的科学问题和技术应用对天文数据提出了更高的精度要求,使得以前使用的许多方法和概念不再适应。特别是数学公式的推导,过去使用第一阶近似已足够,而现在则经常需要到第二阶、第三阶近似,并且还要考虑到平太阳时的不均匀性。

我们在美国海军天文台当前所从事的工作,也促使我们感到十分需要有一本这方面的权威性著作。我们把本书内容局限于球面天文学原理和基本天文观测的理论范围内。对于特殊天文仪器的实际操作细节则不包括在内,而仅概要地提到在航海、测绘及工程天文学中所应用的方法。有些内容在某些经典著作中已被广泛论述,这里就略去了,因为这些内容放在另外的书中更为合适,而且现在已收在一些通俗的出版物中,特别是关于食、中天和掩星这样一些特殊天象的理论;最小二乘法原理及对观测数据进行平差的其它方法;数值方法以及计算技术等。

本书特别注意到对精确和细致的定义进行系统的阐述,并推导同时适用于地球南北半球的公式。通常,在推出近似的实用计算公式以前,先明确地导出完全严密的数学关系式。在应用数学中使用近似公式是重要的,但并不因此需要牺牲思路的严密性,也没有忽视去论证对直接应用而言由于采用近似所引起的误差情况。实际应用中所需的精度经常随着技术的进展和附加要求的增

加而提高,但隐含在所采用的标准方法中的近似性却往往被忽视或遗忘。公式都保持着原来的基本形式。计算机的发展使得经典著作中的对数转换式过时了,而高速电子计算机的发展则全然改变了实际的数值计算方法以及在任何特定条件下所需的变换形式。

1964年在汉堡举行的国际天文协会大会上,对于一些天文常数决定采用新的修正值^①,且即将用于美国及国际天文历书中。修正后的天文数值将略微改变一些公式中的数值系数。本书118~120页中给出由新常数导出的系数。从新的天文单位和光速值得到单位距离的光行时为 $499.012''$,以此值代替由旧的光行差常数导出的 $498.38''$ 及由旧的光速和太阳视差值导出的 $498.58''$ 。

第19章在讨论惯性参考系时,我们故意避开不提马赫原理,虽则对这个原理已有过许多讨论,但似乎这个原理到目前还不能得到任何运算公式。

本书原稿经美国海军天文台航海历书办公室的R.R.罗林斯(Robert R. Rawlings)全文校阅,R.L.邓库姆(Raynor L. Duncombe)、阿.托马斯(Armstrong Tomas)和丹.帕斯库(Dan Pascu)作了部分校阅。他们的校阅使我们得以对本书作出若干改进。

E.W.伍拉德(Edgar W. Woolard)

G.M.克莱门斯(Gerald M. Clemence)

1966年1月

● 1964年国际天文协会通过了新的天文常数系统,并规定在1968年开始正式应用。在这个系统中包括:(1)定义常数(用定义规定的常数,它们没有误差);(2)基础常数(直接测定的最精确的常数);(3)导出常数(根据它们与定义常数和基础常数的理论关系式计算的常数);(4)行星质量系统(专门在行星运动理论中所采用的一组常数)。

1976年国际天文协会又通过一个新的天文常数系统,并规定在1984年开始正式

使用。这个新系统除了根据新的观测资料对 1964 年系统中的各常数作进一步修改外,还作了下面几点改变: (1)对天文学的基本单位给出了定义,在定义了天文学的时间单位和质量单位后,用高斯引力常数 $k=0.01720209895$ 定义天文学的长变单位 A, 又称天文单位距离; (2) 根据以上对天文学时间单位的新定义 (1 日 $\equiv 86400$ 原子时秒), 取消了关于历书时的定义常数; (3) 把计算天文常数的标准历元由 1900 年改为 2000 年。新的标准历元是公元 2000 年 1 月 1.5 日, 即儒略日 2451545.0; (4) 把天文单位距离的光行时由导出常数改为基础常数。另外, 把引力常数 G 作为新的基础常数。——译者注

目 录

方位天文学	1
第一章 天球及天文学参考系的性质	4
第二章 天球坐标系	18
地方地平坐标系.....	(18)
在旋转天球上的坐标系.....	(21)
相对坐标.....	(28)
空间坐标系.....	(31)
第三章 天球的几何形象与地理位置的关系	35
地理坐标系.....	(36)
地心坐标.....	(47)
天球上各参考圈的形象.....	(55)
天体位置的表示法.....	(64)
第四章 视差	67
地心视差.....	(68)
周年视差.....	(81)
第五章 大气折射	85
近似折射.....	(88)
大气折射理论.....	(90)
天文观测的大气折射改正.....	(95)
第六章 光行差	103
光行差.....	(104)
恒星光行差.....	(113)
行星光行差.....	(139)
第七章 周日视运动	152
天球的旋转.....	(152)
视周日路径.....	(161)

第八章 天文坐标系的动力学基础	182
黄道的长期运动.....	(185)
地球相对于它的质心的运动.....	(190)
天文垂线.....	(199)
第九章 地方参考系的变化	207
地方地平坐标系.....	(207)
地理坐标系的变化.....	(212)
第十章 地方参考系中位置的确定	217
地平坐标系中观测结果的归算.....	(218)
地理参考坐标系.....	(237)
第十一章 岁差和章动	254
总岁差运动.....	(254)
章动.....	(287)
第十二章 岁差和章动引起的黄道坐标和赤道坐标的变化	291
第十三章 星历表	325
岁差和章动引起的天球形象的变化.....	(326)
视位置计算与观测中的岁差和章动的归算.....	(331)
第十四章 时间的计量	364
第十五章 以地球自转为基础的时间计量系统	373
恒星时.....	(373)
由观测确定恒星时.....	(378)
平太阳时.....	(384)
时差.....	(399)
第十六章 历书时	400
将平太阳时归算到均匀时计量系统.....	(404)
历书时.....	(409)
第十七章 观测星表的编制	417
用子午观测方法确定恒星基本位置.....	(421)

较差星表.....	(463)
第十八章 基本星系统.....	464
基本参考系的建立.....	(464)
主要的基本系统.....	(469)
第十九章 惯性参考系.....	473
观测的参考系.....	(474)
行星理论的参考系.....	(477)
惯性系的确定.....	(481)
天文常数系统.....	(487)
第二十章 球面天文学术语的历史演变.....	491

方位天文学

天文学，如同所有的自然科学一样，需要依赖于观测所得的事实作为它的基础。天文学需要进行两种类型的天文观测：(1)对于投影在天球上的主要天体的视位置和运动作系统的、连续的观测，以求得它们在空间实际的相互间的位置和运动，并且确定行星系和恒星世界的结构及基本动力学定律；(2)用望远镜、分光仪和其它仪器观测单个的天体，以确定它们的物理性质和获得在每一天体上所发生的现象和物理条件的详细资料。

从第一种类型的观测所得的数据，是全部天文科学的必不可少的基础和骨架。它们是理论天文学和引力天文学的直接基础，是解决星系结构和恒星动力学的基本问题及天体物理学中许多问题所必需的，是天文学应用于航海、测绘和精确测时的直接基础。这些观测和对其解释所依据的原理，以及它们应用于实际问题中的理论就是**球面天文学**的主题，本书正是致力于这个主题。

从天文的技术意义来说，**观测**不仅是通过望远镜来监视所发生的天文现象或观察一个天体，而且是为了某种专门目的对特定的数据进行精确的测定和仔细的记录——无论是为某种直接的实际需要或是为了解决那些尚未解决的问题而获取资料。天文台的常规工作就是为上述目的进行观测。对于专门目的所进行累积的观测资料的校核和处理，以及对结果的解释，通常称为对这些观测的讨论。

特别重要的是要维持对太阳、月球、行星及主要恒星的赤经和赤纬视位置进行连续测定的纲要，还要跟从前的测定无关，并且具有尽量高的精度和在长时期中保持不间断的测定。在把方位天文学作为常规工作的天文台内，实际工作是为对此目的进行连续

不断的每天的子午观测。这种观测是为在天球上精确建立赤经、赤纬坐标系、建立精确的测时系统和确定主要的天文常数所必需的。应用这些观测建立的位置和时间参考系以及由之导出的基本天文常数、行星表和基本星表是整个天文学及其实际应用中所必需的。

在许多不同的天文台中安排长期的均匀观测，是为了在一段相当长时间内精确确定太阳、月球和行星的运动所需要的，也是为了确定恒星自行对恒星位置进行重复测量所需要的。为了得到不断改进的基本天文常数和行星系的诸要素，以及确定精度逐渐提高的恒星位置和自行值，必需连续维持这些观测纲要。在天文学、航海和其它应用中所需的恒星和其它天体的星历表的计算，实质上仍是一种外插过程，因为大量的常数和数值参数必须根据观测来经验地估算它们的数值，因此不可避免地带有偶然误差和系统误差，这是根本不能用科学的测量方法完全消除的。连续地外插到将来所需的自行和基本天文常数值，这将导致误差逐渐累积。而在恒星动力学和星系结构的许多问题中，则需要比已知的数量更多和系统误差更小的自行值。目前暗星的自行的精度却被它们所依据的恒星位置的偶然误差大大地淹没了。

为了得到航海及天文学的其它应用所需的精度，对于计算天文历书所用数据需要相应更高的精度，而在建立基本理论和有关用表、测时及对一些基本天文问题的研究中还需要更高的精度。如果没有对恒星、太阳、月球和行星的连续观测作为改进行星表和基本恒星表的基础，那么所用的各种标准就不能够长期维持下去。同时，观测也可对现有的各种表和历书的精度进行不断的校核。另外，观测还为精确计时和其它天文应用所必须的不能预计的不规则的地极移动和地球自转的变化提供连续的记录。

如果天文学继续以它的不懈发展了二千年的并作为自然科学完美典型的严密性和精确性作为特点的话，如果天文学的实际应用和测时不断对所需的技术提出越来越高的精度标准要求的话，

以及如果天体测量的观测纲要对解决天文学和天体物理学的许多问题还有用的话，那么，持续不断地进行这些基本天文方位观测则是非常重要的事。

第一章 天球及天文学参考系的性质

如果在地面上直接观测地球，那么看上去除了不规则的地形起伏外，就是一片辽阔的平原，上面笼罩着巨大的半球形穹顶，天空则与地球相交于圆形的地平线。不管观测者在地面上什么地方，他似乎总是处于这个半球形的中心，而所有的天体仿佛点缀在这个半球上。

天体位在圆球表面上，这是观测者产生的一种表象，因为人的视力不能够分辨出这些天体的相对距离，所以看来它们似乎都一样远。人们所能直接辨别的只是天体的**方向**，任意两个天体总是好像出现在同一球面上，而它们之间在这个球面上的弧长就等于从观测者到这两个天体的视线所夹的角度。地球本体使我们无法观测到地平线以下所有的外部物体，我们所能看到的只是整个地球表面的很小一部分，它的弯曲程度之小与平面简直看不出什么差别。

这个看上去笼罩着地球，且以观测者为中心的表观圆球面便称为**天球**。要是天体确实位于以地球为中心的一个球面上，那么这时天空的形象就同我们现在所直接观测到的情况一模一样。由于在球面上处理点和弧段比在空间处理视线和角度要简单，方便得多，因而尽管直接观测到的种种现象同它们的物理意义并不相同，但是我们在处理实际问题时可以把天球**当作**是真实的而不仅仅是假想的一个球面来加以考虑。系统的描述天体投影在这个天球上的视位置和视运动情况便是**球面天文学**的研究课题，它与**理论天文学**不同，后者所考虑的是天体在宇宙空间中的实际位置 and 实际运动以及它们的物理解释。根据球面天文学原理，用天文观测确定天体在天球上的视位置的学科称**天体测量学**，有关天体测量学所应用的测量仪器的原理和使用方法的学科称**实用天文学**。

天球上的视圆弧对应于观测者视线方向之间的夹角。大圆是通过观测者的平面与天球的交线，而小圆则相应于以观测者为顶点的圆锥与天球的交线。

天球的半径是任意的，它没有具体的数值，因为我们关心的只是以天球中心为顶点的角度在天球表面上所张的圆弧。不论在什么地方，任何一名观测者好象都是处在天球的中心，因此，为了正确地反映这种情况，我们可以把天球半径当作无限大或**数学上的无穷大**。这时可以认为任何观测者总是位于天球的中心，而与他所处的位置和运动情况没有任何关系。通过处于空间不同位置观测者的所有平行线和平行平面都与天球相交于相同的点和同样的大圆，但如果观测者在天体之间所处的位置发生了变化，那么在观测者看来这些天体的方向就有所改变，因而它们在天球上的位置也就不同了。

如把天球想象为一个有限大的球体，这时如要描述观测者所看到的天空形象，必须设想一旦观测者改变了它的空间位置，天球的中心也将随着观测者而移动，通过观测者的直线和平面随着观测者平行移动，始终保持在球面上交出相同的点和相同的大圆，就同无限大天球中的情况完全一样。

观测者看到的天空形象，在这两种情况下是相同的，但是把天球半径当作无穷大更方便些。然而无论哪一种情况，天球的形象总可以通过作图的方法表示在一个任意长半径的有限大的球面上，而观测者则位于这一有限球体的中心，同时，通过不同位置的观测者的所有平行线和平行平面就用经过球心的一根直线和一个平面来表示。

在本书中，所有有关天球的图形，除了明确说明的以外，都以从**天球外**所看到的形象来表示。因此，它和通常用来表示地球表面的绘图方法是很类似的。

天体的视运动及由此所定义的天球上的图

由于地球的自转，天球就好像以同地球实际自转相反的方向

向，带着所有的天体每天围绕地球转动一周。由此所产生的天体在天空中的周日运动轨迹好象是一些同轴圆的圆弧，这些同轴圆的轴线与天球相交于直径相对的两个端点。一般来说一个在地平线之上，一个在地平线之下，而这条直径便是天球的视周日自转轴，这两个端点称为**天极**。天球上与两个天极距离相等的大圆称为**天赤道**。

天极是通过地轴的直线与天球的交点，为了与数学上无穷大球的概念取得一致，观测者所看到的天球上的这两个点，同通过他本身所处位置而且和地轴平行的直线与天球的两个交点相重合。因为观测者好象是固定的，而且总是在天球中心，他可以把天体的相对周日运动解释为天球带着这些天体一起绕着通过他本身所处位置的一根轴线进行实际的转动。

只是由于天体离开观测者很远，上述设想才能成立。除极少数情况外，天体的距离都极其遥远，所以它们的视运动几乎完全是由观测者随着地球的自转所引起的，而且对所有的天体来说，它们的视运动都是非常相似的。因此，这些天体在天空中作视运动时，它们在天球上的相对位置实质上始终保持不变，就好象固定在天球上，由天球带着它们一起旋转。

实际上，相对于观测者的周日运动都是绕着位于地轴上的一个中心在转动，观测者自己同样被带着绕这个中心转动，因此他在天体之间的位置是变化着的。而对于特别靠近我们的天体来说，它们在视线方向上的变化多了一项微小的运动，它叠加在围绕平行轴的圆周运动上。但是对于这种微小的运动，不仔细地用仪器测量是觉察不到的。在所有天体的周日运动中，还存在着由于其它因素所造成的更小的不规则变化，但是用普通的直接观测同样也觉察不到。

因此，从周日运动觉察不到天体相对位置的变化，但有极少数天体，特别是月球，由于它本身在空间相对于地球的实际运动，我们很容易觉察到它们在恒星间位置的逐渐变化。因而，看

起来这些天体除了随着天球的旋转与恒星一起转动外，本身也还在天球表面上移动。恒星非常遥远，甚至使用高精度的仪器，也需很长时期才能发现它们本身在空间相对于地球运动的任何效应。在一般人的感觉中，它们好象永远固定在天球上，所以过去通常称为**固定的星**，但这个名词现在几乎已经不用了。行星这个名词的起源原来系指徘徊的星，最早人们把所有在旋转的天球上不断移动的天体一概称为行星。

行星在空间相对于地球的运动，造成它们在旋转天球上相对于恒星的视运动，其中一部分原因是地球绕太阳公转造成的。具体来说，因为地球的这种周年轨道运动，太阳一方面参与天球的周日旋转，同时又在天球上向东缓慢地移动，每年在天球上绕过完整的一周。太阳在恒星之间的周年视运动轨迹称为**黄道**。在古代，人们认为这种周年运动就是太阳绕着静止的地球的实际运动；现在，在许多实际应用中，上述观点常常从形式上保留了下来，这一点同对于周日运动的处理是一样的。

黄道、天赤道和地平圈都是在天球上建立几何坐标系的有利的基础，应用这些坐标系可以把在空中看到的天体的视位置，以它们相对于天球上这些主要圈的位置精确地表示出来。

位置和时间的参考系

把天球分成为看得见和看不见两部分的地平圈，以及由天球的周日运动所确定的地平圈上的一些基点，组成了一个可以用来系统地描述天空形象的天然参考系。一个天体在任何特定时刻和地点的视位置，可以定量地用下列两个坐标严格地表示：（1）这天体在天空中，自地平竖直向上的高度角；（2）在地平圈上位于天体正下方的那一点对于东南西北这些基点的角距。为此，就需要用一条更精确的参考线来代替受到局部地形不规则起伏所影响的可见的地平线，这参考线称为**天文地平圈**，它是一个严格的大圆，这大圆离我们头顶上方铅垂线指向的那个点为 90° ，而头顶上那个点称为**天文天顶**。