


C.A. 默里 著

科学出版社



矢量天体
测量学

矢量天体测量学

C. A. 默里 著

童 傅 等 译

赵君亮 校

科 学 出 版 社

1 9 9 0

内 容 简 介

本书利用矢量和矩阵代数研究天体测量的基本理论,这种方法比传统的球面三角方法简明扼要,并便于应用电子计算机运算。本书首次系统地介绍相对论在天体测量学中的应用,还系统地介绍天体测量观测理论,时间系统和天体的定向,书中应用了 IAU 新天文常数系统,并介绍了把天体测量观测引入全天参考系的方法,以及惯性参考标架等。

本书适合作天体测量、天体力学专业研究生教材,也可供天文、地理学、空间科学等领域的工作者参考。

C.A. Murray
Vectorial Astrometry
Adam Hilger Ltd, Bristol, 1983

矢量天体测量学

C. A. 默里 著

童 傅 等 译

赵君亮 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

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

*

1990年3月第一版 开本:787×1092 1/32

1990年3月第一次印刷 印张:13 1/2

印数:0001—550.00 字数:300,000

ISBN 7-03-000396-9/P·68

定价:11.30元

译 者 的 话

一本好的教科书，它的作用与影响常常超过书名本身的含意。英国格林尼治天文台 C. A. 默里教授所著《矢量天体测量学》就是这样一本好书，它把读者带到了当代天体测量学的前沿，改变了人们对天体测量学的陈旧观念。

观测技术的发展和计算方式的进步是近年来推动天体测量学发展的两个主要因素。快速电子计算机的利用使人们有可能运用含意清晰、表述简便的矢量运算来代替繁琐的三角关系式。同时，亦可使观测资料中的各种信息得到充分的利用。近代观测技术的发展，特别是射电干涉测量和无线电、激光雷达的应用，不仅大大提高了传统的测角资料的精度，而且扩大了观测资料的类型，增加了观测的机会。雷达观测可直接给出行星或月球与观测者之间的距离，射电干涉测量大大提高了测角的精度。为了测定光线在引力场中的弯曲，经典的力学方法只能在日全食时进行，如果用射电观测，则只要射电源接近太阳即可测量，观测机会就多了。

天体测量学研究天体和天体系统的几何关系和构形，也可称之为天体几何学。过去由于观测精度比较低，我们把广大的星际空间看成是真空的平直空间，天体之间的几何关系看成是欧几里德几何，天体的运动遵循牛顿定律。显然，这是一种理想的简化。随着观测精度的提高，这种简化就不再适合，人们必须按照星际空间的本来面目来进行描述。它并不是真空，处处有引力存在。因此，我们得用广义相对论来描述它的特性。在当前的天体测量学中，主要的相对论效应有下列四方面：

(1) 时间不再是均匀的长流水,时间的描述与坐标系有关。当前常用的有以太阳系质心为参考的质心力学时(TDB)和以地球为参考的地球力学时(TDT),它们之间的转换关系遵循相对论理论。

(2) 与经典的几何光学不同,光线将沿零测地线传播,光行时亦必须按相对论计算。

(3) 坐标的转换不能再简单的平移和转动,必须按照相对论的原则。

(4) 天体的运动和转动必须考虑相对论效应,对于当前的测量精度,后牛顿近似已足够。

本书系统地介绍了相对论在天体测量中的应用,C.A.默里堪称是一位先驱者。

此外,本书还系统地介绍天体测量观测理论,时间系统和天体的定向,并为此给出了一个以IAU新天文常数系统为依据的自洽的数据系列。

最后几章叙述把天体测量观测引入全天参考系的方法,并为研究天体的空间运动导出一个惯性参考标架。

1983年秋,中国科学院紫金山天文台实用天文研究室和南京大学天文系天体测量教研室联合举办以研读《矢量天体测量学》为内容的学术讨论班,两单位的人员分章讲解。后来,译稿由各人加以整理,经上海天文台赵君亮校核,交付出版。本书序言和第二章由童傅翻译,第一章由陕西天文台漆贯荣翻译,第三至第十各章分别由肖耐园、夏一飞、张承志、任江平、黄坤仪、鲁春林、施广成和许邦信翻译,后记和三个附录是由肖耐园翻译的。南京大学天测室承担了具体事宜的联系安排和技术上的校订。由于译者水平有限且文辞各异,译稿虽经校者仔细审订加工,讹误及诘屈之处仍在所难免,这些都应该由译者负责。恳切希望读者批评指正。

中文版前言

我很高兴借助本书中文版出版的机会表示我对赵君亮、任江平、童傅等先生的谢意，感谢他们为《矢量天体测量学》中文版所做的工作。同时，也借此向全中国天体测量界的同行表达我的亲切问候。

C. A. 默里

序 言

天体测量学的任务在于建立一个时空坐标系，以用来描述光信号从遥远天体上发射和被观测者接收等一类的事件。在这一定义下，这门学科不仅包括方向观测以及借助三角法推导出线坐标，而且还包括了测定信号在天体和观测者之间所经历的时间。

在空间时代以前，天体测量只与方向测定有关。因为方向可以通过天球上的点来表示，这样，天体测量学一词实质上就成了球面天文学的同义语。关于这门学科，所有现今流行的教科书，例如 Chauvenet (1891)，Newcomb (1906)，Smart (1931)，Woolard & Clemence (1966)，van de Kamp (1967) 以及 McNally (1974) 等的著作，都以球面三角学作为主要数学工具。由于对球面三角学的这种依赖关系，为了便于计算，过去还引用了若干近似，这种办法现在就不适合了。

现代数字计算机出现后，许多象坐标转换这类天体测量计算，使用矢量和矩阵代数方法进行就更为有效，而不必再做任何近似；这已是公认的事实。当然，在靠手算的时代，这种方法对于日常工作显然是难以实行的。我认为矢量方法不仅提供了一种便利的计算工具，并且在理论推导中也给出一种清晰的物理见解。在形成自己这一观点时，深受已故 E. A. Milne 教授所著《矢量力学》一书的影响。

我原先的打算是用矢量方法来研究传统的天体测量学。但是，不久就发现，由于空间望远镜以及月球、行星的雷达和激光测距的发展，测量精度随之提高，以牛顿力学为基础的纯

粹传统的方法就不再适用了。

对广义相对论第一次成功的观测验证，是格林尼治和剑桥日食观测队于 1919 年进行的光线偏转测量。这是一次纯粹的天体测量观测；可是，在这之后出版的天体测量书籍一般还是不考虑相对论。鉴于此，我试图在广义相对论的基础上来建立一种天体测量观测的理论。为此目的，我们原封不动地采用了爱因斯坦的理论，而认为没有必要引进更复杂的参数化后牛顿（PPN）公式以期对该理论作可能的修正。作为一个光学天体测量学家，我倘若打算写一部关于相对论本身的教科书，那是十分冒昧的。本书肯定不是这样的一种书；然而我相信，在现代天体测量的理论或实践中，不应再对相对论忽略不顾了。

在本书的头两章中，我从相对论的观点出发，建立了质点轨道运动的基本理论，特别是史瓦西度规中的光子运动理论。这两章共同为解释天体测量的一些可观测量、方向和钟面时提供了总体框架。天体测量学中所用的坐标标架与地球重力场、地球的轨道运动和转动密切相关，这些问题将在第三、四、五章中加以讨论。第一章中对开普勒运动的处理和第三章中对刚体转动的处理，完全遵循 Milne 的方式。

尽管用世界时和极移来量度的地球自转轴系的取向对天体测量观测具有基本重要性，但现在由于原子时尺度的普遍使用，已经能够把由地球自转变化引起的问题同守时系统的问题分离开来。我们将在第六章中讨论各种时间尺度，并且导出相对论坐标时与理想的“地球时”之间的关系，后者是指以铯原子标准为基础的 IAU (1976) 时间尺度。

在第七章中，我们研究了大气对光线传播的方向和速度的系统影响。我们采用常用的球对称近似，但试图以比通常更为严密的方法来考虑水蒸气的有关修正，认为标高与干燥

成分的标高无关。此外，还估计了电离层折射效应的数量级。

许多地面光学天体测量，特别是对暗弱天体的观测，是借助照相技术对一小块天区进行相对测量来完成的，通常使用大望远镜。这不仅包含了在定标星之间通过内插来推算位置，同时也要确定相对视差和自行；我们将在第八章中讨论这些问题。随着大型自动底片量度仪的出现，以及诸如底片重叠法等计算技术的发展，天体测量学的这一分支近年来已经取得了长足的进步。

在第九章中我们将要讨论天体测量学中的一个重要问题，即以建立惯性参考标架为最终目标的全球规模的方向测量。在光学天体测量中，传统方法是对明亮天体、恒星和太阳系大行星进行子午观测，这要求在仪器定标和对量度结果进行解释时都必须十分小心。此外，还需要观测地方垂线的变动；因此，我们必须介绍当前用来测量时间和纬度变化的天文方法。在这个领域内，天体测量与大地测量学和地球物理学是密切相关的；现在，人造卫星多普勒测量、卫星和月球激光测距等近代技术，则对研究地球表面层的运动有着十分重要的贡献。可是，这些测量不能对垂线的方向提供直接的信息，天体测量则需要这些信息，所以我们不准备对这些近代技术作详细的讨论。

全球坐标系亦可用射电干涉测量来加以建立，但仍然需要通过观测致密射电源的光学对应体，把这种坐标系与光学天体测量的参考标架联系起来。

在足够长的时间间隔内，把对任何一个动力学系统所作的观测与理论进行比较，就可以把观测参考标架与惯性标架联系起来。原则上说，通过对太阳系天体的观测就可做到这一点，因为这些天体的运动理论已发展得相当精确。但是在

实践上,由于太阳、月球和大行星方向的观测精度有限,现在已认识到利用恒星更令人满意。因此,这就需要有一个恒星运动的模型,以便与观测相比较。第十章中,我们将对目前所知的银河系主要运动特征作一介绍,这些特征是确定惯性标架的基础。最后,我们还要对通过河外天体的观测来建立惯性架的观测方案作简要的说明。

我的目的完全在于给出一种自洽的数学表示,以解释和分析天体测量的观测结果,而不是去描述特定的仪器或计算技术。天文常数的数值取自国际天文学联合会 1977 年格勒诺布尔 (Grenoble) 大会通过的 IAU 1976 系统。附录 A 给出了有关本书中广泛使用的矢量和张量公式的推导。要特别提请注意的是,撇号(\cdot)仅用来表示矩阵的转置。由于两个矢量的标量积是矩阵转置相乘的特例,我们也采用撇号来表示标量积,而不采用通常用的点号。这样一些与常用记号不同的细微区别,在附录 A 中均有交代。

目 录

译者的话

中文版前言

序言

第一章 天体测量的动力学基础	1
§ 1.1 时空度规.....	2
§ 1.1.1 光的速度	4
§ 1.1.2 史瓦西坐标	5
§ 1.1.3 各向同性坐标	6
§ 1.2 测地线方程.....	6
§ 1.2.1 能量方程	8
§ 1.2.2 时间尺度	9
§ 1.3 牛顿近似.....	9
§ 1.4 开普勒运动.....	12
§ 1.4.1 真近点角和平近点角	13
§ 1.4.2 偏近点角;开普勒方程	14
§ 1.4.3 力学要素的微分改正	16
§ 1.5 近日点的相对论进动.....	18
§ 1.6 测地岁差.....	20
§ 1.7 坐标时与原时之间的转换.....	22
§ 1.7.1 太阳系中的时间转换	23
§ 1.8 开普勒第三定律.....	25
§ 1.8.1 平方反比引力	27
§ 1.9 天文学的一些单位和常数.....	27
§ 1.9.1 太阳的引力半径	30

§ 1.9.2 地-月轨道的力学要素	30
第二章 空间和时间的天体测量	32
§ 2.1 洛伦兹标架	32
§ 2.1.1 自然标架	33
§ 2.1.2 本征标架	34
§ 2.2 零测地线	35
§ 2.2.1 光线的偏转	39
§ 2.2.2 史瓦西坐标中的光线轨迹	40
§ 2.2.3 各向同性坐标中的光线轨迹	42
§ 2.3 光行时	43
§ 2.3.1 距离测量	45
§ 2.4 多普勒位移	47
§ 2.5 方向	49
§ 2.5.1 自然方向	50
§ 2.5.2 本征方向	51
§ 2.5.3 太阳系的质心	51
§ 2.5.4 经典的恒星光行差	52
§ 2.5.5 太阳系内的方向问题	54
§ 2.6 远距离辐射源	56
§ 2.6.1 远距离辐射源的光行时	57
§ 2.6.2 远距离辐射源的自然方向	58
§ 2.6.3 质心瞬时	59
§ 2.6.4 自行与视向速度	59
§ 2.7 微分时间延迟	62
第三章 地球	65
§ 3.1 刚体的角动量	65
§ 3.2 外部质量的引力作用	67
§ 3.2.1 外力偶	68
§ 3.3 运动方程	69

§ 3.3.1 轴对称性	70
§ 3.4 形状轴的运动	72
§ 3.5 地球的引力场	75
§ 3.5.1 高度	77
§ 3.5.2 地球引力势的调和表达式	77
§ 3.5.3 MacCullagh 定理	78
§ 3.5.4 地球的物理单位和常数	79
§ 3.6 参考椭球体	80
§ 3.6.1 地球表面的重力	83
§ 3.7 大地坐标	84
§ 3.7.1 地理坐标;垂线偏差	86
§ 3.8 地心坐标矢量	87
§ 3.8.1 观测者的地心速度	89
§ 3.8.2 周日光行差和视方向	89
§ 3.9 站心方向	90
§ 3.9.1 地平视差	92
§ 3.9.2 站心坐标方向	93
第四章 坐标三元基	94
§ 4.1 天极	95
§ 4.2 黄极	97
§ 4.3 分点;天球坐标三元基	97
§ 4.3.1 赤经和赤纬	98
§ 4.3.2 黄经和黄纬	100
§ 4.4 模型地球的取向	101
§ 4.4.1 历书时角	103
§ 4.5 地方天文坐标三元基	103
§ 4.5.1 相对于地方三元基的方向	106
§ 4.6 空间椭圆轨道	107
§ 4.6.1 对轨道椭圆的较差改正	109

§ 4.7	月球的自转	110
§ 4.7.1	月面坐标	112
§ 4.7.2	站心天平动	112
§ 4.7.3	月球轴的位置角	113
第五章	岁差和章动	115
§ 5.1	月球的轨道	115
§ 5.1.1	月球视差	116
§ 5.2	沿开普勒轨道的摄动体	117
§ 5.3	天极的运动方程	121
§ 5.4	平极的岁差	122
§ 5.4.1	日月岁差	123
§ 5.4.2	平赤道三元基的分量	124
§ 5.4.3	岁差	126
§ 5.4.4	平黄经	128
§ 5.5	章动	128
§ 5.5.1	章动的坐标变换	131
§ 5.5.2	非刚体地球模型	131
§ 5.6	平恒星时和二分差	132
§ 5.6.1	贝塞尔年	134
§ 5.7	有关天体方向的进一步说明	134
§ 5.7.1	恒星的平位置	135
§ 5.7.2	视位置	136
§ 5.7.3	本征位置	137
§ 5.7.4	天体测量位置	139
第六章	时间尺度	140
§ 6.1	地球自转	141
§ 6.1.1	格林尼治恒星时	142
§ 6.1.2	世界时	143
§ 6.1.3	格林尼治平时	144
§ 6.1.4	世界时的可变性	145

§ 6.1.5 极移	147
§ 6.2 历书时	147
§ 6.2.1 历书时的数值定义	149
§ 6.3 SI 秒和原子时尺度	150
§ 6.3.1 地球附近的原时	151
§ 6.3.2 地球钟的同步问题	154
§ 6.3.3 国际原子时 (TAI)	155
§ 6.3.4 IAU (1976) 时间尺度	156
§ 6.4 国际上的时间和纬度服务	156
§ 6.5 质心坐标时	157
§ 6.5.1 $t-\tau$ 中的行星项	160
§ 6.5.2 $t-\tau$ 中的月球项	162
§ 6.5.3 $t-\tau$ 中的地面项	163
§ 6.5.4 坐标时尺度的定义	165
§ 6.6 地球长度单位和天文长度单位	166
第七章 大气对天体测量的影响	168
§ 7.1 大气中的光线轨迹	169
§ 7.1.1 球对称大气	170
§ 7.1.2 天顶距和天文折射	172
§ 7.1.3 本征方向	174
§ 7.1.4 真方向	174
§ 7.2 光程	175
§ 7.2.1 信号的速度	175
§ 7.2.2 轨线弯曲	176
§ 7.3 低层大气	177
§ 7.3.1 虚温和混合比	178
§ 7.3.2 流体静力学平衡下的大气模型	179
§ 7.3.3 平衡大气的微分方程	180
§ 7.3.4 多方模型	181
§ 7.3.5 水蒸气	182

§ 7.3.6	大气模型	183
§ 7.3.7	球对称重力场	186
§ 7.4	大气的折射率	187
§ 7.4.1	空气光学折射本领的数值表达式	189
§ 7.4.2	射电波段的折射本领	190
§ 7.5	大气质量	191
§ 7.5.1	大气质量积分	191
§ 7.5.2	中等天顶距的大气质量	194
§ 7.5.3	大气透射和大气消光	197
§ 7.5.4	大气消光和大气质量的数值	198
§ 7.6	天文折射	199
§ 7.6.1	中等天顶距的折射	200
§ 7.6.2	近似等效高度和真天顶距	204
§ 7.6.3	大气色散	205
§ 7.6.4	有效波长	207
§ 7.6.5	大气折射的计算	207
§ 7.6.6	普尔柯沃折射表	209
§ 7.7	大气延迟	210
§ 7.7.1	几何程	212
§ 7.7.2	微分延迟	213
§ 7.8	电离层	215
§ 7.8.1	多频率观测	216
§ 7.8.2	通过电离层模型的轨线	218
第八章	切平面上的天体测量学	221
§ 8.1	球心投影	221
§ 8.1.1	像方	223
§ 8.1.2	正切坐标三元基的微小旋转	224
§ 8.1.3	相对于正切坐标三元基的微小位移	225
§ 8.2	标准坐标	226
§ 8.2.1	标准坐标的计算	227

§ 8.3	底片模型	228
§ 8.3.1	线性底片模型	229
§ 8.3.2	底片倾斜	230
§ 8.3.3	径向畸变	231
§ 8.3.4	施密特望远镜投影	232
§ 8.3.5	星像缺陷	233
§ 8.4	用球心投影法归算底片	234
§ 8.5	广义最小二乘算法	238
§ 8.5.1	法方程的解	241
§ 8.5.2	恒星常数和底片常数的协方差矩阵	243
§ 8.6	从标准坐标推算坐标方向	244
§ 8.6.1	太阳系天体的坐标方向	245
§ 8.7	较差天体测量	246
§ 8.7.1	恒星常数模型	247
§ 8.7.2	视差位移	249
§ 8.7.3	相对视差和相对自行的中心重叠解	250
§ 8.7.4	经典的视差归算方法	253
§ 8.7.5	恒星常数的约束条件	254
§ 8.7.6	由一对底片求自行	255
第九章	球面天体测量学	257
§ 9.1	方向测量	258
§ 9.2	子午观测	259
§ 9.2.1	子午环	260
§ 9.2.2	子午环的取向	261
§ 9.2.3	子午环观测的归算	263
§ 9.2.4	准直仪观测	267
§ 9.2.5	天底点的观测	269
§ 9.2.6	焦距和视场旋转	269
§ 9.2.7	归算到天球三元基	271
§ 9.2.8	基本子午天体测量和相对子午天体测量	274