

子午天文方法

冒 蔚 李志明 范 瑜 著
胡晓淳 杜明辉

科学出版社

P 124

405

子午天文方法

冒 蔚 李志明 范 瑜 著
胡晓淳 杜明辉

科 学 出 版 社

1 9 8 7

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了绝对测定天体位置的传统子午方法、子午仪器的结构及仪器误差理论,还分析了传统方法的局限性及其对基本星表系统的影响;详细论述了卯酉-子午交替观测的子午绝对测定新方法,介绍了用于实施新方法的大型反射子午环的结构以及仪器误差的测定和消除;最后讨论了绝对测定大气折射的原理和新方法对基本天球参考系将能作出的贡献。

本书可供天文、大地测量和地球物理等方面的科技人员以及高等院校有关专业的师生阅读、参考。

子 午 天 文 方 法

李志明 范 瑜 著
胡晓淳 杜明辉

责任编辑 夏墨英

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

1987年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/32
1987年7月第一次印刷 印张: 9 1/8
印数: 0001—1,700 字数: 205,000

统一书号: 13031·3562

本社书号: 5227·13—5

定价: 2.20元

序 言

精确测定恒星的位置,是建立基本天球参考系的基础,而子午天文方法是测定恒星位置的最基本的方法。长期积累观测资料,逐步改善基本天球参考系,这对于提高天体位置的精度,特别是对于测定比较精确的自行以及研究银河系结构和恒星动力学是极其重要的,其中测定精确的自行的目的在于以更高的精度编制基本星表、太阳表、月历表和行星星历表,以便满足天文学各领域及有关学科发展的需要。不断地探讨新的观测方法和研制新的观测仪器,旨在尽可能消除误差来源、压缩测定值的误差,这是提高恒星位置精度,改善基本天球参考系的重要手段。

自十七世纪末期第一架子午仪器的雏形问世,十九世纪中叶普尔科沃天文台创立子午绝对测定方法以来,子午天文学发展的历史,就是不断地采用新技术新工艺改造旧的仪器和研制新型仪器,逐步压缩恒星位置测定误差的历史。这期间,恒星位置的测定精度提高了2—3个数量级。但是,观测方法依据的基本原理并没有得到改变。由于传统的测定方法不适用于中、低纬度地区,采用了一些在不利条件下的观测资料,加之仪器的某些主要误差也无法精确测定和消除,故现有的基本参考系存在一定的缺陷。此外,传统方法本身也限制了测定精度的进一步提高。

在我国,由于地处中、低纬度带以及其它一些原因,子午绝对测定方法的实施和研究基本上处于空白状态。我们在最近几年进行了这项研究,探索了一种从低纬度到高纬度地区

都适用的子午绝对测定新方法。本书的目的在于系统地阐述这种新方法,以期对改善基本天球参考系起到有益的作用,并希望能推动我国开展子午天文研究和恒星位置精确测定工作。

全书共十章。第一章为绪论。第二、四、五、六章评论性地叙述了传统子午绝对测定方法及其相应的误差理论,同时还介绍了近廿几年来国际上在子午绝对测定方面的新进展。第三、七、八、九章论述了我们的研究成果,包括子午绝对测定新方法、新型的仪器结构原理和仪器误差理论,绝对测定大气折射的新方法。第十章论述了新方法对建立基本天球参考系将能起到的作用。

由于我们的水平有限,在这一领域工作仅几年时间,书中难免会有错误和缺点,希望读者批评指正。

著 者

1986年6月于云南天文台

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 子午天文的贡献	1
§ 1.2 子午观测方法的一般原理	3
1.2.1 几种子午仪器	3
1.2.2 子午方法的一般原理	4
1.2.3 绝对测定和相对测定	9
第二章 传统的子午绝对测定方法	12
§ 2.1 拱极星上、下中天观测绝对测定方位角	12
2.1.1 基本原理	12
2.1.2 方位标和相对方位角的测定	14
2.1.3 方位标方位角的测定	15
§ 2.2 绝对测定观测点纬度的传统方法	20
2.2.1 基本原理	20
2.2.2 同时测定纬度值和大气折射常数改正值	20
2.2.3 主要误差来源	22
§ 2.3 传统方法的局限性及其影响	24
2.3.1 地理位置的局限性和影响	24
2.3.2 采集数据量的限制	26
第三章 卯酉-子午交替观测的子午绝对测定方法	30
§ 3.1 卯酉-子午交替观测方法的几何原理	30
§ 3.2 卯酉-子午交替观测绝对测定方位角	32
3.2.1 解算方位角的公式	32
3.2.2 绝对测定 σ 值	38

3.2.3 绝对测定方位角的实验结果	40
§ 3.3 卯酉-子午交替观测绝对测定瞬时纬度	43
§ 3.4 卯酉-子午交替观测中的二次项改正	49
3.4.1 方位角测定值中的二次项改正	50
3.4.2 纬度测定值中的二次项改正	54
3.4.3 周日光行差的影响	59
3.4.4 大气折射的影响	64
§ 3.5 卯酉-子午交替观测法的主要误差来源 和适用范围	67
3.5.1 测定方位角的主要误差来源	67
3.5.2 测定纬度值的主要误差来源	69
3.5.3 适用的地理纬度范围	71
3.5.4 卯酉-子午交替观测方法与传统方法的比较	73
3.5.5 全夜方位角变化曲线的构成	75
§ 3.6 赤道区子午绝对测定方法——等方位 角方法	77
附录 A 卯酉方向记录时刻的星径曲率改正	85
附录 B 纬度近周日变化项的影响	91
第四章 测定和改善星位系统的其它方法	94
§ 4.1 改善星位置系统的几种经典方法	94
4.1.1 用近极星测定极点	94
4.1.2 子午环和天顶仪平行观测绝对测定赤纬	97
4.1.3 从方位测量测定赤纬	99
§ 4.2 等高观测测定星位置改正	101
4.2.1 误差方程的建立	102
4.2.2 确定星位改正的公式	104
4.2.3 关于 D 值的测定	106
4.2.4 关于 K 值的测定和赤纬测定的绝对性	107

4.2.5 等高仪与子午环配合测定 D 和 K	108
4.2.6 等高方法的主要特点	109
§ 4.3 测定天体位置的新方法	111
4.3.1 射电天体测量	111
4.3.2 空间天体测量	116
第五章 子午仪器的结构	120
§ 5.1 传统子午环的结构	120
5.1.1 一般描述	120
5.1.2 仪器水平轴	123
5.1.3 仪器镜筒	124
5.1.4 度盘和读数显微镜	127
§ 5.2 两种水平式子午环	129
5.2.1 水平子午环 (HMC)	129
5.2.2 玻璃子午环 (GMC)	133
§ 5.3 其它几种子午仪器	136
5.3.1 大中星仪	137
5.3.2 垂直环	138
5.3.3 天顶仪	142
§ 5.4 测微器	144
5.4.1 目视动丝测微器	145
5.4.2 中星仪采用的两种光电测微器	147
5.4.3 波尔多测微器	149
5.4.4 多狭缝测微器	151
5.4.5 棱镜狭缝测微器	153
第六章 测定仪器误差的传统方法	157
§ 6.1 水平差和准直差的测定	157
6.1.1 用跨水准测定水平差	157
6.1.2 枢轴不规则的影响及其测定	158

6.1.3	用水平准直管测定准直差	161
6.1.4	用天底镜同时测定准直差和水平差	162
§ 6.2	仪器弯曲的测定	162
6.2.1	仪器弯曲的起因及处理的途径	162
6.2.2	用准直管测定弯曲系数	164
6.2.3	比较直接星象和反射星象测定弯曲	165
6.2.4	交换物镜和目镜位置观测	166
6.2.5	存在的问题	166
§ 6.3	度盘分划改正的测定	167
6.3.1	度盘分划误差和测量原理	168
6.3.2	系列法	171
6.3.3	组合系列法	173
6.3.4	分组测量组合法	175
§ 6.4	度盘天顶点读数的测定	179
6.4.1	利用天底镜测定天底点	179
6.4.2	利用反射星象观测测定天顶点	180
6.4.3	近极星观测测定天顶点	180
6.4.4	利用反射镜测定度盘水平点	181

第七章 大型反射子午环的结构183

§ 7.1	仪器概述	183
7.1.1	观测原理对仪器的要求	183
7.1.2	仪器的一般概述	185
§ 7.2	大型反射子午环的光机结构	186
7.2.1	主光路和镜筒	186
7.2.2	赤纬驱动装置	189
7.2.3	度盘和读数显微镜	191
7.2.4	转台的旋转定位机构	193
7.2.5	自动置平装置	195

§ 7.3 组合视栅测微器.....	198
7.3.1 人字形狭缝及其倾斜的影响.....	198
7.3.2 卯酉方向观测对视栅的要求.....	201
§ 7.4 大型反射子午环的电控原理.....	207
7.4.1 观测数据的采集和处理.....	208
7.4.2 仪器误差信息的采集和调节.....	209
7.4.3 观测过程的自动化.....	210
第八章 大型反射子午环误差的测定和消除	211
§ 8.1 转轴观测的优缺点.....	211
8.1.1 反射望远镜的采用.....	211
8.1.2 几种仪器误差的消除.....	212
8.1.3 有利于自动置平.....	214
8.1.4 有利于提高观测精度.....	215
8.1.5 转轴观测的不足之处.....	216
§ 8.2 镜筒弯曲的检测和消除	216
8.2.1 镜筒弯曲、主副镜位移和旋转的影响	216
8.2.2 用自准直系统消除弯曲效应.....	219
8.2.3 用准直方法测定弯曲.....	221
§ 8.3 固定角距法测定度盘对径改正.....	223
8.3.1 测定对径改正应满足的条件.....	223
8.3.2 读数显微镜的配置.....	225
8.3.3 固定角距测定法.....	227
8.3.4 度盘倾斜和弯曲的影响.....	233
第九章 测定大气折射.....	237
§ 9.1 大气折射理论和大气折射表	237
9.1.1 大气折射理论.....	237
9.1.2 普尔科沃折射表.....	243
9.1.3 我国采用的大气折射表.....	245

9.1.4	大气抖动和反常折射	247
9.1.5	大气折射的光谱型效应	249
§ 9.2	卯酉方向观测测定大气折射	251
9.2.1	测定大气折射的必要性和应具备的条件	251
9.2.2	真天顶距的测定	253
9.2.3	视天顶距的测定	256
9.2.4	大气折射值的获得	257
9.2.5	卯酉方向观测测定大气折射的优点	260
附录A 卯酉方向测定的视天顶距的星径曲率改正		261
第十章 新的绝对测定方法的贡献		268
§ 10.1	基本天球坐标系	268
§ 10.2	新的绝对测定方法应起的作用	273
10.2.1	空间天体测量时代地面子午观测的任务	273
10.2.2	连接南北半球的观测	275
10.2.3	基本系统定向的动力学测定	278
10.2.4	测定大气折射	280
参考文献		281

第一章 绪 论

§ 1.1 子午天文的贡献

子午天文学的主要任务是测定天体的位置及其运动,建立一个基本天球参考系,它与天文学其他领域以及大地测量、地球物理和航天科学等领域的研究有着密切的联系。子午天文学是一门古老的学科,是天体测量学的基础。从第一次把望远镜用作瞄准器算起,人类精确测量天体的位置已有近三百年的历史。这期间,人们对天体位置的测量工作仅限于用子午仪器作基本天体测量和用大望远镜作照相天体测量。随着新方法新技术的不断问世,从本世纪七十年代开始,天体测量技术得到逐步的更新,又发展了射电天体测量和空间天体测量。但是,近代一个比一个更精确的基本天球参考系的建立,都是基本天体测量作出的贡献。

基本天球参考系是固定在天球上的一个参考系,通常以基本星表的形式给出。基本星表包含了一定数量的恒星在某一给定历元的尽可能准确的赤经、赤纬、自行和岁差影响等值,这些以赤道坐标形式给出的星位置,在天球上定义了给定历元的参考架,用其自行和岁差影响值可以归算到任何历元。

由恒星位置的绝对测定或准绝对测定,编制成初始星表;如果同时对太阳系天体进行观测,则可以编制成基本初始星表。利用尽可能多的天文台在不同历元观测得到的初始星表,并结合太阳系天体的观测资料,就可以编制成基本星表,构成一个基本天球参考系。现在应用的FK₄星表或即将问世

的FK₅星表,都是公认的基本天球参考系。

用子午观测得到的星表,是编制基本星表的第一手资料。实践证明,子午天文长期研究的恒星位置的测定理论和研制的新型观测仪器,使得观测精度逐步得到提高,它是天体测量发展的一个重要组成部分。测量理论的完善程度和观测仪器设计的合理性,都直接影响了恒星位置的测定精度,最终影响着天体测量学及其他有关领域的发展。子午天文方法理论的建立和应用,开始旨在实现高纬度地区天文台对恒星位置的绝对测定,其最大缺陷是不适用于中、低纬度地区的天文台。随着各种新技术新工艺在子午仪器上应用,近百年来用子午方法测定天体位置的精度提高了2—3个数量级,但是由于观测方法没有从原理上得到改进,致使现在的基本星表仍然存在一些问题,不能满足现代许多研究和应用部门的高精度要求。

1982年云南天文台冒蔚提出了卯酉-子午交替观测绝对测定天体位置的新方法,克服了传统子午方法的局限性,使得从低纬度到高纬度的天文台都能实现恒星位置的绝对测定。我们用改装的蔡司中星仪在云南天文台($\varphi=25^\circ$)检验了这种方法,证明了观测原理的正确性和实施的可能性。新方法的实施,对于建立高精度的基本天球参考系将有重要意义。根据新方法研制的大型反射子午环,与传统子午环有很大的区别,它不但能在子午方向进行转轴观测,也能在卯酉方向实现转轴观测。由于我们的大型反射子午环采用了完全不同的设计原理,用传统子午环进行测量无法避免的某些仪器误差,都将得以消除或可以得到修正。

自1689年O·Roemer制成第一架子午仪,子午天文的发展至今已有近三百年的历史,子午天文方法在建立基本天球参考系中作出了很大贡献,现在仍处主导地位。为了消除

造成现有天球参考系的坐标网格歪曲的观测系统差,建立更精确的均匀的天球参考系,实现向惯性参考系的过渡,继续探讨新的观测方法和研制新型的观测仪器,是子午天文学面临的一个主要任务。

详细论述不同的子午天文方法,不同子午仪器的结构及其误差理论,是本书的主要宗旨。此外,还讨论了与子午天文密切相关的大气折射等问题。书中所涉及到的球面天文学和实用天文学的知识,一般不作详细介绍,请读者参阅有关这方面的书籍。

§ 1.2 子午观测方法的一般原理

1.2.1 几种子午仪器

测定天体赤经和赤纬的子午仪器大体有以下几种:

子午环 这是近三百年来测定天体赤经和赤纬的最基本的仪器。它是一架以 90° 角固定在仪器水平轴上的望远镜,具有一个或两个精密刻度盘与水平轴固联着。在理想的状况下,水平轴应恒定地指向东西方向,而望远镜的视准线能指向子午圈上的任一点。由于子午环是仿效赤道系统的,视准线在天球坐标系中时角方向的旋转将由地球自转来实现,用恒星时来度量;视准线在赤纬方向的旋转,是以望远镜绕水平轴的旋转来完成的,用刻度盘进行度量。子午环可以同时获得恒星过子午圈的时刻和天顶距数值,所以可以测定恒星的赤经和赤纬。

大中星仪 与子午环的不同之处在于水平轴上没有精密刻度盘。因此,只能用于测定天体的赤经。它比现代的子午环稍小,采用直轴式结构,不能象轻便中星仪那样在每颗星观测时将仪器水平轴转置 180° (转轴观测)。

垂直环(亦称为垂直圈仪) 比子午环结构简单,仅用于

测定天体的赤纬。与子午环相同之处是有一个精密度盘,用来测量天顶距;不同的是仪器水平轴未进行过仔细定位和校正,能在一切方位使用。因为在仪器下部的支柱内安有圆锥形的垂直轴装置,所以可以方便地绕轴旋转,这就能对每颗星做转轴观测。

与其它的测量仪器一样,子午仪器的各部件和视准线的指向都不能看成是理想的,总存在有制造工艺、安装和调节的误差,以及重力变形和热变形引起的误差,表1.1中列出了子午仪器的各种误差。下面讨论子午观测的原理时将涉及到三项定向误差:水平轴的方位差(或称为方位角),水平差,以及视准线的准直差。其它的误差将在后面的各章中陆续介绍。

表1.1 子午仪器的误差

仪器部件		安装和调节误差		制造误差和仪器形变影响	
水平轴		方位差 水平差		枢轴不规则 两个枢轴直径不相等, 枢轴不同轴	
望远镜	物镜	准直差		镜筒重力弯曲 镜筒旁弯曲	物镜象差 物镜重力位移和旋转
	目镜或测微器		丝网倾斜 螺旋周值误差		测微器重力位移 测微螺旋不均匀
垂直度盘		度盘偏心 分度弧平面与水平轴不垂直		刻线位置误差 度盘弯曲和变形	
读数显微镜		显微镜倾斜 显微镜比例尺误差		显微镜位置变化	

1.2.2 子午方法的一般原理

用子午仪器测定恒星位置的原理,理论上很简单。设有一架不存在各种误差的子午仪器,望远镜的视准线指向子午圈。当恒星通过子午圈时,测量它的天顶距 Z ,并记录过子午

圈的地方恒星时时刻 T , 则有

$$\begin{aligned} \text{天顶以南上中天 } \delta &= \varphi - Z \\ \text{天顶以北上中天 } \delta &= \varphi + Z \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\text{天顶以北下中天(北半球) } \delta = 180^\circ - \varphi - Z, \quad (1.2)$$

$$\text{以及 上中天} \quad \alpha = T + u \quad (1.3)$$

$$\text{下中天} \quad \alpha = T + u \pm 12^h \quad (1.4)$$

由(1.1)式和(1.2)式, 只要知道观测点的纬度真值 φ , 就可以得到被测星的赤纬; 而在(1.3)式和(1.4)式中, 由于不知道钟差 u , 不能直接得到赤经的真值 α , 但只要有一只按恒星时准确运行的天文钟用于记录时刻, 就可以测量两颗恒星之间的赤经差——两颗恒星各自上中天(或下中天)之间的恒星时间隔。显然, 测量出春分点和恒星过子午圈的时间间隔, 就能得到恒星的赤经。

春分点过子午圈时刻理论上的测定最直接的方法是求出太阳赤纬 δ_0 。为零瞬间的钟面读数, 再通过记录太阳中天的时刻, δ_0 为零的瞬间可由测量太阳在近赤道时的赤纬求得。由于精确测定太阳圆面中心的位置比较困难, 现在一般已转为采用大行星和小行星的观测来确定春分点的位置。如果取

$$u = u_0 + \omega(T - T_0) \quad (1.5)$$

通过恒星连续两次上中天(或下中天)的观测确定钟速 ω , 再假设一个对应于 T_0 时刻的钟差 u_0 值, 于是从若干颗恒星通过子午圈的观测记录时刻 T 就能得到一个尚需待定零点的赤经系统, 从而得

$$\alpha_i = (\alpha_0)_i + A$$

$(\alpha_0)_i$ 是假设钟差为 u_0 按(1.5)式求得观测时刻钟差而得到的第 i 颗恒星的赤经测定值, α_i 为其真值, A 为 T_0 时刻钟差的真值与假设值 u_0 之差, 由太阳系天体在 $(\alpha_0)_i$ 系统中的赤经观测值与理论历表计算值作比较求得。

上述(1.1)一(1.4)式是针对一架理想仪器在理想状况下而言的,亦即仪器的水平轴应位于水平面内,并严格指向东西方向,而望远镜的视准线始终垂直于水平轴。但是,因为仪器各部件的加工误差,重力和热膨胀引起的变形,水平轴和视准线的指向,在实践中是无法达到理想状况的。实际情况是:水平轴与水平面之间有一个夹角 b (称为水平差,水平轴西端偏高时, $b>0$);水平轴在水平面上的投影与东西方向之间存在有一个夹角 a (称为方位差,水平轴的投影西端偏南时, $a>0$);望远镜的视准线与水平轴的夹角偏离于 90° 一个小量 c (称为准直差,视准线的物镜端偏东时, $c>0$)。由于这三个定向误差不为零,或者不同时为零,视准线的指向将不能保持在子午圈上,而当望远镜绕水平轴旋转时,视准线将描绘出一个与子午面成某一夹角的视准面,对天体中天的记录时刻 T 有直接的影响。按照子午观测原理,记录的中天时刻应对应于天体过

真子午圈的时刻,所以需要
对 T 加改正 ΔT 。

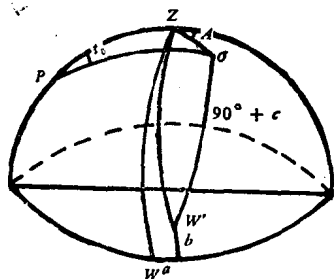


图1.1给出了三项定向误差对视准线在天球上指向的影响。(图中 $a>0$, $b>0$, $c<0$)。由于方位差和水平差的存在,仪器水平轴西端的延长线相交于天球上靠近西点(W)的 W' 点;此外,由于准直差 c 的影响,视准线指向天球上 σ 点。这样,天体将在子午圈外被观测,得到星过记录时刻 T 和天顶距测量值 Z 。

由球面三角形 ZW'_{σ} ,根据边的余弦公式,则有

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ + c) &= \cos(90^\circ - b) \cos Z \\ &+ \sin(90^\circ - b) \sin Z \cos(90^\circ - a - A), \end{aligned}$$

• • •