

现代气象辐射测量技术

王炳忠 莫月琴 杨 云 编著



 气象出版社
China Meteorological Press

现代气象辐射测量技术

王炳忠 莫月琴 杨 云 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书是作者在系统总结国内外大量文献资料的基础上,结合自己从事气象辐射测定和研究所取得的成果编写而成的。全书共 15 章,介绍了与气象辐射测量有关的基本概念和基础知识,国际上辐射基准站网所使用的、代表当前气象辐射测量最新技术成果的各类辐射仪器和相关附属设备的原理、应用、安装、操作,各种辐射量的测量方法以及对测量后所获数据的质量控制方法等方面的情况。本书可帮助读者对气象辐射测量的最新进展进行全面系统的了解,便于在实际工作中降低辐射测量中的不确定度。

本书可供具有中专以上文化程度,从事辐射测量的,太阳能利用研究、设计、制造和各类实际应用的各种专业的工程技术人员,气象部门的观测、计量检定和科研人员以及地理、建筑设计、材料老化、空间技术等方面的人员使用,亦可作为大专院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代气象辐射测量技术/王炳忠等编著. —北京:气象出版社,2008. 11

ISBN 978-7-5029-4596-1

I. 现… II. 王… III. 气象-辐射量-测量 IV. P422

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 147635 号

现代气象辐射测量技术

Xiandai Qixiang Fushe Celiang Jishu

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@263.net

电 话:总编室 010-68407112, 发行部 010-68409198

责任编辑:郭彩丽 王桂梅

终 审:黄润恒

封面设计:王 伟

责任技编:都 平

责任校对:王 一

印 刷 者:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:11.75

插 页:2

字 数:300 千字

版 次:2008 年 11 月第 1 版

印 次:2008 年 11 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

序

气候是人类生存环境中最活跃的组成部分，也是最重要的自然资源之一。气候变率和气候变化将导致人类生存条件的变化，影响社会经济活动和公众生活的方方面面。

为了认识和了解气候变化，1990年在日内瓦召开的第二次世界气候大会上，各国科学家提出了制订“全球气候观测系统（GCOS）计划”的建议。1992年，世界气象组织（WMO）、联合国教科文组织（UNESCO）的政府间海洋委员会（IOC）、国际科学联盟理事会（ICSU）、联合国环境规划署（UNEP），共同发起了“全球气候观测系统（GCOS）计划”。其基本思路是，在统一的发展计划和技术规范的指导下，对世界上现有的地球环境方面的观测系统进行必要的改进、补充和整合，以便为正确认识气候变化及其影响，以及气候变化中自然因子与人类活动的作用等提供所需的高质量、连续、均一的各类观测资料。这意味着，每一种观测资料都应有足够长的时间序列、覆盖足够大的地理区域、有足够高的准确度和代表性。正是这种状况决定着辐射测量方面的地面辐射基准站网（BSRN）的出现。自2004年起BSRN已正式纳入GCOS之中。

从测量技术本身来说，辐射测量的准确度在国际单位制的七项基本单位中是最底的。尤其是太阳辐照度和地球长波辐照度的测量不确定度与其他基本单位相比，相差绝不仅一点点，而是几个数量级，甚至十几个数量级。在现代辐射测量中，千分之几的准确度就代表了现代水平。而0.04%的准确度只能在辐射基准的比对中才能实现。之所以形成这样的局面，一方面，影响辐射测量的因子无处不在，例如凡是处在绝对温度以上的物体本身均能发射出干扰测量的辐射；另一方面，辐射功率是呈空间分布的，并随波长、位置、方向、时间和偏振同时变化。此外，测量过程中的每个物质粒子都在发射、吸收、散射辐射，测量仪器的每一部分也有自身的辐射存在。

为了提高我国在气象辐射测量方面的水平，中国气象局计划按照BSRN的要求逐步建立辐射基准站，一方面积极参与GCOS计划；另一方面，也能起到带动和提高我国一般辐射站网观测水准的作用。

本书为中国气象局国家气象计量站的几位同志，根据当代辐射测量研究的最新成果编写的；可以反映目前国际上气象辐射测量在建站、仪器、观测和数据处理技术等方面的先进水平；书中内容既全面、简洁、实用，又反映了这方

面的发展方向和趋势，相信本书的出版，对于相关的科研工作者、观测人员和管理人员迅速了解国际上气象辐射的最新进展是有益的。作者均长期从事气象辐射方面的监测和计量工作，在该领域有着丰富的经验，本书的出版凝聚着这些同志的辛勤劳动，也是他们工作经验的总结，在此谨向他们表示谢意。



2008 年 4 月

* 宋连春，正研级高工，现任中国气象局气象探测中心主任。

前 言

20 世纪 80 年代末，作者之一曾编写了《太阳辐射能的测量及其标准》（王炳忠 1989），书中内容仅限于 1985 年以前的。当时，为了遵循出版社的出版要求，该书的目标是一部全面、系统并具有手册性质的专著，凡是与太阳辐射测量有关的问题，书中尽可能予以详尽地介绍，所以其学术性强，内容涉及范围宽泛。从后来的实践看，与大多数使用的人员所感兴趣的内容相距较远，因而降低了其使用价值。更确切地说，限制了其更广泛地应用。

近廿多年来，一方面，在太阳辐射能测量技术方面取得了相当的进展，例如：总日射表热偏移特性得到了进一步的确认和研究；世界范围内长波辐射测量标准的建立，特别是 WMO 世界气候研究计划（WCRP）下的地面辐射基准站网（BSRN）的建立等^①。另一方面，随着国家对科技投入的增加，不少科研项目在开展研究的同时，大量采购国外的仪器。这种做法当然无可厚非。但是事后发现，有些情况下由于研究者对所用仪器知之较少，采购上存在着一定的盲目性；或以为凡是进口的仪器就是好的或盲目相信名牌厂家的产品，等等。

实际上，近年来国际上进行了一系列辐射仪器比对，如地球辐射表国际比对（Marty 等 2003, Philipona 等 1998, 2001）、散射日射表国际比对（Michalsky 等 2003, 2005, 2007）和光合有效辐射表比对（McArthur 2002, Pinker 等 2006）等；它们还不止一次进行了比对；有的甚至多次比对或逐年比对，如紫外辐射表比对等（WMO GAW No. 112, No. 141）。这些比对的结果对于仪器性能的了解以及解决存在的问题无疑具有重要的价值。

目前，国际上系统从事辐射测量研究的主要有三个方面：一方面是受美国能源部支持的“大气辐射测量计划”（ARM）。其主要目的是改进全球气候模式中涉及云和辐射物理的机制，以便改进模式适应气候变化的能力。美国航空航天局、国家海洋大气局以及一些知名大学和科研部门均有人员参加。ARM 的研究内容不是仅限于大气辐射测量研究，而是涉及大气物理的方方面面，其收集的大气辐射数据库已经陆续在学术期刊发表并被引用，同时这种可信度高的大气辐射地面观测数据也成为美国航空航天局地面观测系统（EOS）卫星遥感资料的校验点。另一方面是欧洲瑞士的达沃斯物理气象观象台/世界辐射中心（PMOD/WRC）。它除了承担太阳辐射标准的保存和传递工作外，也十分关心与气象辐射各有关项目计量标准的研制和传递方法的研究工作。最后，BSRN 在每隔两年召开一次的专题学术研讨会上，均成立由各国相应专家组成的各个专业工作组，实际上这也成为开发辐射测量仪器和研究观测业务技术的一个重要阵地。工作组在届会上将近两年来的工作情况和研究结果进行报告，根据情况决定该工作组研究成果是否在站网上具体应用，研究后续工作的重点或者研究决定是否继续保留该工作组等。

“十一五”期间，我国气象部门计划按照 WMO BSRN 的标准建立辐射基准站网，随着

^① 有关 BSRN 的具体介绍，请参阅附录 C。

辐射基准站的逐步建立，相应技术人员的培训必然会提到议事日程上来。为此，根据当代世界气象辐射测量发展的状况，我们编写了本书。本书以《太阳辐射能的测量及其标准》为鉴，内容以实用为主，并充分涵盖目前气象辐射测量仪器所达到的最高水平。为了避免一些专业性较强的内容出现得过于突兀，书中还包括了一些必要的公式。对其不感兴趣的可以略去。

本书中多处可见 BSRN，这是由于 BSRN 无论在测量手段上，还是在测量方法和校准方法上均代表了当前辐射测量的最高水准。至于辐射测量场地等方面的内容，也许并非为一般有关辐射研究人员所关心，但是了解其精神实质，并在测量中加以关注，无疑会对提高测量准确度有所裨益。也正因为如此，故本书的内容会与现行的为一般辐射站编写的辐射测量规范不尽相同。一方面是测量水平的要求不同；另一方面，也有与时俱进的因素在内，这是事先必须说明的。

辐射仪器的校准应是本书的一部分内容，但是考虑到，本书中涉及的辐射仪器均为级别最高的，对它们的计量校准，自然也应是最高水准的。但无论从辐射基准站上的现有人员水平上，还是仪器设备上，均无法就地完成校准的目标。另外，正由于计量校准是针对等级最高仪器的，其对象主要应针对有关计量人员，所以只能期待另行编写一本相应的手册以应需求。

本书之所以冠以“气象辐射”的名称，主要是其中不仅包括太阳辐射的内容，而且还有与气象过程密切相关的大气和地面的长波辐射。对于太阳能利用来说，前者当然重要，但后者也不应忽视，因为它直接影响着太阳能利用装置的热损失，特别是夜间的热损失。

书中介绍的各种仪器虽不全面，但都是 BSRN 各站点广泛使用的，即质量最优的。它们当中，有的我们已经亲自使用过，有的则未曾使用过，即使使用过的也存在使用时间不长、经验不充分等现实情况，为了弥补这方面的不足，书中采用了部分 BSRN 操作手册（McArthur 2004）的内容。另外，为了便于具体介绍热电堆传感器的一些细节，我们将总日射表一章放在了直接日射表一章的前面。

本书从章节的安排、内容的厘定、网上文献的搜集以及文字的校勘都是由三位作者共同完成的，只不过由于有的作者已经退休，时间上较为充裕，多做了些工作，因此才有这样的名次排列。

我们深知要编写一部既要反映当前世界气象辐射测量最高水准，又要通俗易懂；既要让从事辐射的观测人员对与气象辐射相关的知识有较全面的了解，又不能过分难以理解是一项十分艰巨的任务。限于编著者的水平，本书是否满足了这样的要求，以及文中存在的不够确切或遗误之处，谨以求实之诚，敬希读者不吝赐教、斧正，更希望得到读者在自己实践中积累的心得、体会与经验，以便补苴罅漏。

本书在编写和出版过程中，得到国家气象计量站沙奕卓站长的鼎力襄助，特此致谢。

编著者识
2008 年 4 月

目 录

序

前 言

1 必要的天文知识	(1)
1.1 天球和天球坐标系	(1)
1.2 天球的视运动	(8)
1.3 时和时区	(14)
1.4 太阳的电磁波谱	(17)
2 与辐射测量有关的基本概念和定律	(19)
2.1 术语及其单位	(19)
2.2 黑体及其有关定律	(21)
2.3 有关辐射的其他定律	(25)
2.4 定律应用举例	(30)
3 气象辐射量及其测量仪器	(31)
3.1 气象辐射量及其分类	(31)
3.2 气象辐射量的符号	(33)
3.3 气象辐射传感器	(34)
3.4 气象辐射测量仪器	(39)
4 辐射测量场地	(42)
4.1 站点要求	(42)
4.2 辐射仪器布设	(43)
5 总日射表	(45)
5.1 总日射表的分类和分级	(45)
5.2 总日射表的结构	(48)
5.3 几种常用的总日射表	(48)
5.4 总日射表存在的问题	(53)
5.5 总日射的测量	(57)
5.6 散射日射的测量	(58)
5.7 反射日射的测量	(59)
6 直接日射表	(61)
6.1 直接日射表的孔径参数	(61)
6.2 直接日射表的分类与分级	(62)
6.3 直接日射表的结构	(63)

7 地球辐射表	(71)
7.1 地球辐射表的结构.....	(71)
7.2 地球辐射表的测量原理.....	(71)
7.3 常用的几种地球辐射表.....	(72)
7.4 地球辐射的测量.....	(75)
8 (净)全辐射表	(76)
8.1 全辐射表的结构.....	(76)
8.2 全辐射表的分级.....	(77)
8.3 全辐射的测量.....	(78)
8.4 净辐射表及其测量.....	(78)
9 光合有效辐射表	(83)
9.1 光合有效辐射的单位.....	(83)
9.2 光合有效辐射表的分类.....	(84)
9.3 光合有效辐射表的结构.....	(85)
9.4 有关量子传感器的一些问题.....	(86)
9.5 几种常用的光合有效辐射表.....	(89)
9.6 光合有效辐射的测量.....	(92)
10 紫外辐射表	(94)
10.1 紫外辐射的相关术语.....	(95)
10.2 紫外辐射表的分类.....	(98)
10.3 几种常用的紫外辐射表及其结构.....	(102)
10.4 国外紫外辐射测量概况.....	(108)
11 气溶胶光学厚度(AOD)的测量	(118)
11.1 概论.....	(118)
11.2 测量原理.....	(118)
11.3 测量仪器种类.....	(119)
11.4 测量注意事项.....	(124)
12 辐射测量辅助设备	(125)
12.1 太阳跟踪器及遮光装置.....	(125)
12.2 通风器.....	(130)
12.3 数据采集系统.....	(131)
12.4 窗口清洗器.....	(133)
13 测量设备的安装与维护	(135)
13.1 安装.....	(135)
13.2 维护.....	(137)
14 辐射测量标准	(140)
14.1 气象辐射测量标准.....	(140)
14.2 低辐照度测量标准.....	(148)

15 辐射数据的质量保证	(155)
15.1 一般检查方法.....	(156)
15.2 数据质量控制方法.....	(158)
参考文献	(164)
附录 A 计算太阳位置的数值模拟法程序	(168)
附录 B BSRN 提供的太阳位置算法	(170)
附录 C WMO 地面辐射基准站网(BSRN)简介	(176)

1 必要的天文知识

1.1 天球和天球坐标系

1.1.1 天球

无论在什么地方仰望天空、观察天体时,无论太阳、月亮、星体等,在感觉上,它们都分布在一个天穹的内表面上。这个天穹犹如一个球体,天体一方面在这个球面上运动;另一方面又随其旋转。观察者无论身居何处,总是觉得处在该球体的中心,尽管这个球体实际上并不存在。虽然在球体上面的各个天体与观察者的距离千差万别,只是由于天体和观察者间的距离与观测者随地球在空间移动的距离相比要大得多,所以看上去天体似乎都离我们一样远,犹如散布在以观测者为中心的一个圆球的球面上。实际上,我们所看到的就是天体在这个巨大的圆球球面上的投影位置,但为了便于研究天体运动,天文学把它作为一种工具,这个以观察者为中心,以无限长为半径的球体就称为天球。图 1.1 就是从外界看到天球的样子。

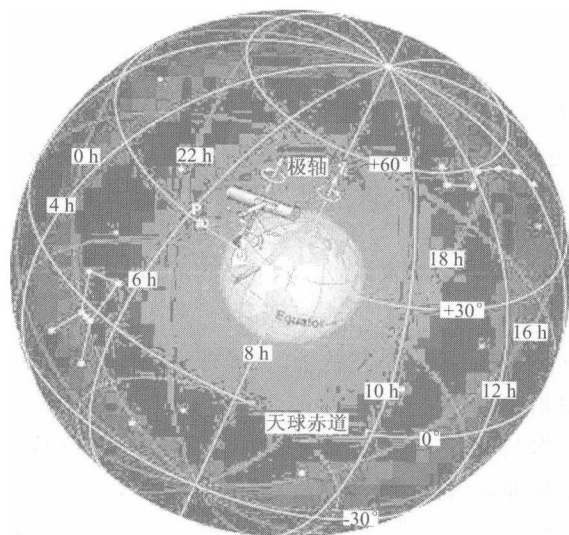


图 1.1 天球外观(见彩图)

如果从观察者的角度去观察,则天球如图 1.2 所示。

地球是真实的,有直线距离,也有角距离。而天球是假想的,天球上各天体之间只有角距离而没有直线距离。实际的天体是有直线距离的,但它是宇宙空间的直线距离,而不是天球上的直线距离。观测者所能直接辨别的只是天体的方向。在天文学的一些应用中,都用天体投

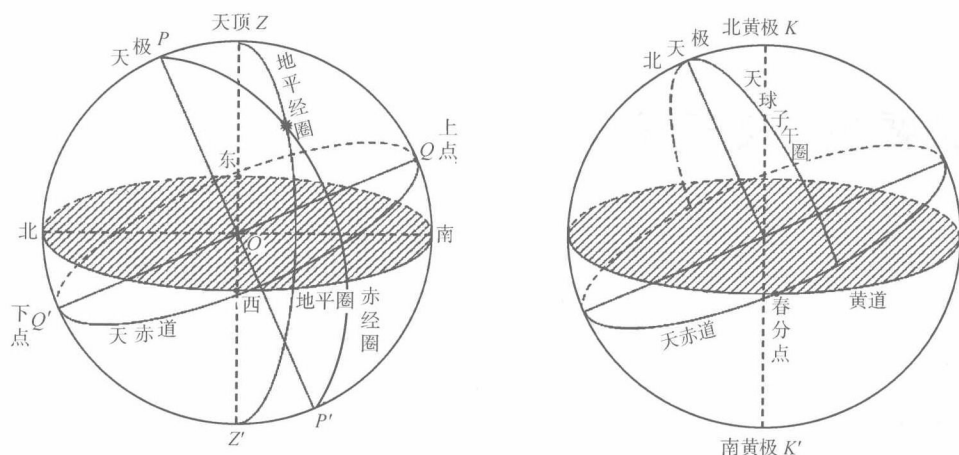


图 1.2 天球上的基本点

影在天球上的点与点之间的角距离来表示它们之间的位置关系。为了定量表示和研究天体投影在天球上的位置和运动,需要在天球上建立参考坐标系,并主要应用球面三角学计算点位的关系。

1.1.1.1 天顶、天底和地平圈

观察者所处的位置即天球的中心 O ,过天球中心的铅垂线向上下两方向无限延展与天球相交于两个点,上方的称天顶 Z ,下方的称天底 Z' 。过天球中心 O 作平面与 ZZ' 垂直,平面与天球相交形成大圆,称为地平圈或真地平。

1.1.1.2 天极和天赤道

天球在旋转过程中有两个不动点,称作天极,也就是地球自转轴向两侧无限延展与天球的交点。在北侧的称北天极 P ,在南侧的称南天极 P' 。连接南、北天极的直线 PP' 称天轴。过天球中心 O 作与天轴 PP' 垂直的平面,该平面与天球相交形成的大圆,称为天赤道。通过天顶、天底和天极的大圆称天球子午圈。子午圈与天赤道在南、北各有一个交点,在南侧的由于在地平之上,称上点 Q ;在北侧的由于在地平之下,称下点 Q' 。

1.1.1.3 黄极、黄道

垂直于地球绕太阳公转平面的轴是公转轴,过天球中心作平行于公转轴的平行线,将该线向两端无限延展,与天球相交于两个点,靠近北天极的交点称北黄极 K ;靠近南天极的交点称南黄极 K' 。过天球中心作与 KK' 相垂直的平面,该平面称黄道面,它与天球相交形成的大圆,称为黄道。天文学中称地球绕太阳公转的轨道平面与天球相交的大圆为黄道;另外,也把太阳在天球上的周年视运动轨迹,称为“黄道”。这种看似不同的定义,其实二者的实质是相同的,只不过看问题的角度不同。前者指的是,假如我们能够跳出太阳系以外,从太空中所能看到的情况;而后者,则是在地球上能够观察到的景象。天文学上的诸多现象就像苏轼诗句所描述的“不识庐山真面目,只缘身在此山中”。

1.1.1.4 黄赤交角和春分点

黄道与天赤道之间的夹角,等于 $23^{\circ}26'26'' \sim 23^{\circ}26'28''$ 。两者之间相交于两点,每年 3 月 21 日前后,太阳由南半天球进入北半天球通过天赤道的那一点称为“春分点”(τ);而在 9 月 23

日前后太阳由北半天球进入南半天球通过天赤道的另一点,称为“秋分点”(♏)。

1.1.1.5 上、下中天

天体通过观测点的天球子午圈的时刻称中天。一日之内有两次中天,天体距天顶较近的一次为上中天,距天底较近的一次为下中天。

1.1.2 天球坐标系

为了确定天球上某一点的位置,必须引入坐标系。在球面上确定点的坐标,类似于平面坐标,并明确如下概念:

轴——选定的一条直径。选择不同的轴,构成不同的球面坐标系。

极——轴与球面的交点。如图 1.2 的 P 与 P' 等。

基本圆——通过天球球心且与轴相垂直的平面,与球面相交的大圆。天球坐标系以基本圆的名字命名。

辅助圆——通过轴的平面同球面相交的大圆。

原点——起始经圈同基本圆的交点。

经圈——通过球面上某一点和极的大圆。

纬圈——通过球面上某一点与基本圆平行的小圆。

如图 1.2 所示,首先选定一条球的直径作为坐标系的轴。选择不同的轴线,便构成不同的球面坐标系。天球坐标系由于涉及球体,与地理坐标大体相同,主要由经度和纬度来定位(图 1.3),只不过由于基本圆和辅助圆、原点和度量方向等项的不同,天球坐标系有地平坐标系、时角坐标系(又称第一赤道坐标系)、赤道坐标系(又称第二赤道坐标系)、黄道坐标系和银道坐标系等多种。凡与太阳辐射关系不大的坐标系,这里不再详述。

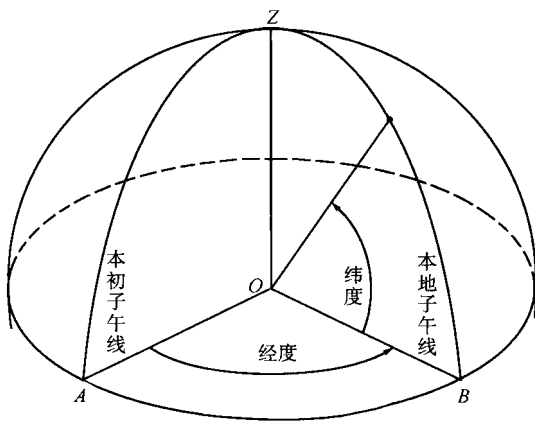


图 1.3 球面坐标

1.1.2.1 地平坐标系

从图 1.4 可以看到,以观测者为天球中心,过天球中心并与过观测者的铅垂线相垂直的平面称为地平面,它与天球相交而成的大圆称为地平圈。地平圈是地平坐标系的基本圆。天顶是地平坐标系的极。经过天顶的任何大圆称为地平经圈;与地平圈平行的小圆称为地平纬圈。过北天极的地平经圈称为子午圈,它与地平圈相交于南点和北点;与子午圈相垂直的地平经圈

称为卯酉圈,它与地平圈相交于东点和西点。地平经度又名“方位角” A ,是地平坐标系中的一个坐标,即子午圈和通过天体的地平经圈在天顶所成的角度或在地平圈上所夹的弧长。通常取北点或南点作为原点。大地测量学通常从北点起沿地平圈顺时针向度量,辐射计算中则从南点起按顺时针方向度量,向西为正,向东为负。地平纬度又名“高度角” h ,是地平坐标系中的另一个坐标,即天体对地平所张的仰角或俯角。从地平起沿天体的地平经圈度量,由 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,天体在地平之上为正,在地平之下为负,高度角的余角称天顶距,以天顶为原点。

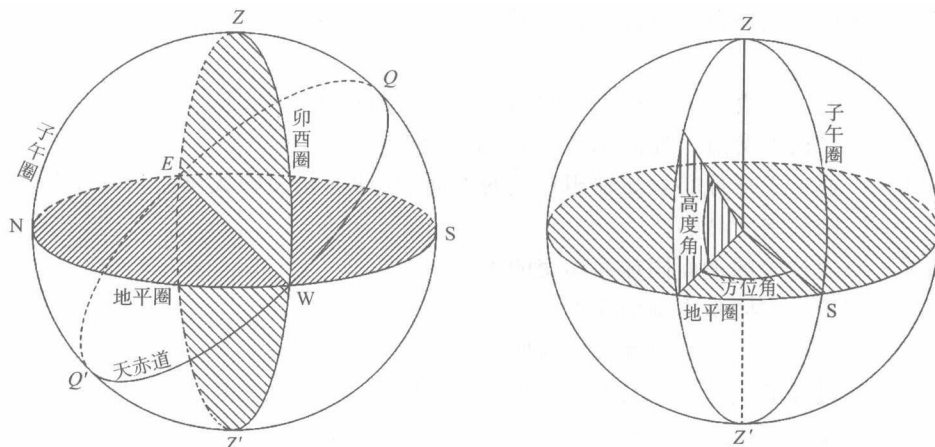


图 1.4 地平坐标系

由于周日运动的关系,天体对于同一地点的地平坐标不断变化;另一方面,对于不同地点的观测者,由于铅垂线的方向不同,就有不同的地平坐标系,在同一瞬间同一天体的地平坐标也就不同。地平坐标系的作用就是用来表示当地天体在天空中的方位和高度及其周日变化。

1.1.2.2 时角坐标系

过天球中心与天轴相垂直的平面称为天球赤道面,它与天球相交而成的大圆称为天赤道。赤道面是赤道坐标系的基本圆。天极是赤道坐标系的极。经过天极的任何大圆称为赤经圈或时圈 t ;与天赤道平行的小圆称为赤纬圈。天球上从天赤道沿赤经圈到天体的角距离称为该天体的赤纬 δ ,由天赤道起算, $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 度量,赤道以北为正,以南为负,以度、分、秒表示。赤纬的余角称为极距,由北天极起算。子午圈与通过某一天体的赤经圈在北天极所成的角度,称为该天体的赤经或时角(图 1.5),以上点为原点,自原点起沿着天赤道向左、右方向度量,以时、分、秒表示,向东为负,向西为正。顾名思义,这种坐标系的设置,主要用于时间的度量。

1.1.2.3 赤道坐标系

除了以过春分点的赤经圈为主圈,并以春分点为原点按逆时针方向度量赤经 α 外,其他方面与时角坐标系并无差异(图 1.6)。由于涉及春分点,必然与黄道有关,所以图 1.6 中标出了黄道。天体的赤道坐标不会因观测时间和观测地点的不同发生变化。本坐标系主要用于表示天体在天球上相对不变的位置。

1.1.2.4 黄道坐标系

过天球中心与两黄极连线相垂直的平面为黄道面,黄道面与天球相交的大圆为黄道。黄道面是黄道坐标系的基本圆。天球上通过两黄极的大圆称黄经圈。与黄道平行的小圆称黄纬。从黄道起,沿某天体的黄经圈到该天体的角距离称为该天体的黄纬。在黄道以北的黄纬

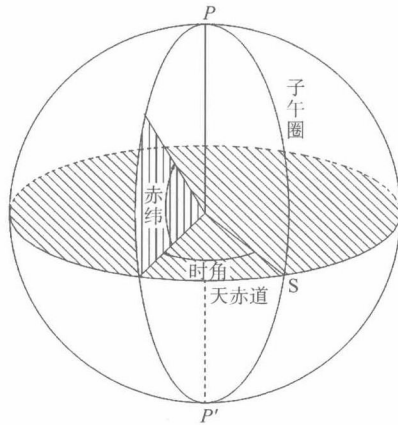


图 1.5 时角坐标系

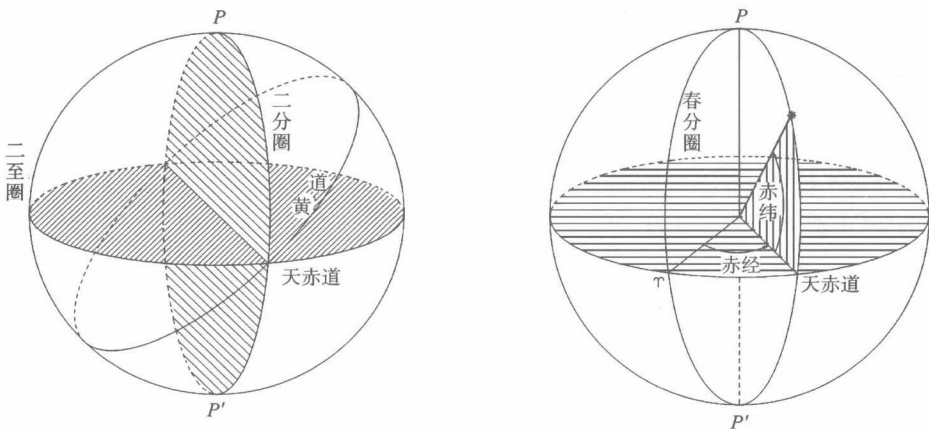


图 1.6 赤道坐标系

为正,黄道以南的为负,各从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 度量。春分点的黄经圈与通过某一天体的黄经圈在黄极所成的角度成为该天体的黄经,黄经从黄道上的春分点起算,沿着与太阳周年运动相同的方向,从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 度量(图1.7)。同赤道坐标系相似,天体的黄道坐标不会因观测时间和观测地点的不同而发生变化。本坐标系主要用于表示天体在空间的位置和运动。

1.1.2.5 各种坐标系间的联系

(1)地平坐标系与时角坐标系:这两种坐标系都属于右旋坐标系,它们的经度(方位与时角)都是向西度量的;而且,二者都以子午圈为始圆。但是,前者以地平圈为基本圆,因而以南点为原点;后者则以天赤道为基本圆。这样,天体的高度便不同于赤纬,方位也不同于时角。它们之间的具体差异与当地的纬度有关,纬度越低,二者越不同;纬度愈高,二者愈接近。在南北两极,天赤道与地平圈重合,天北极位于天顶。这时,高度就是赤纬,方位等于时角。

(2)赤道坐标系与黄道坐标系:这两种坐标系都属于左旋坐标系,它们的经度(赤经和黄经)都是向东度量;而且,它们有共同的原点(春分点)。但是,前者以天赤道为基本圆,因而以春分圈为始圆;后者以黄道为基本圆,因而以二至圈为始圆。这样,天体的赤纬不同于黄纬,赤

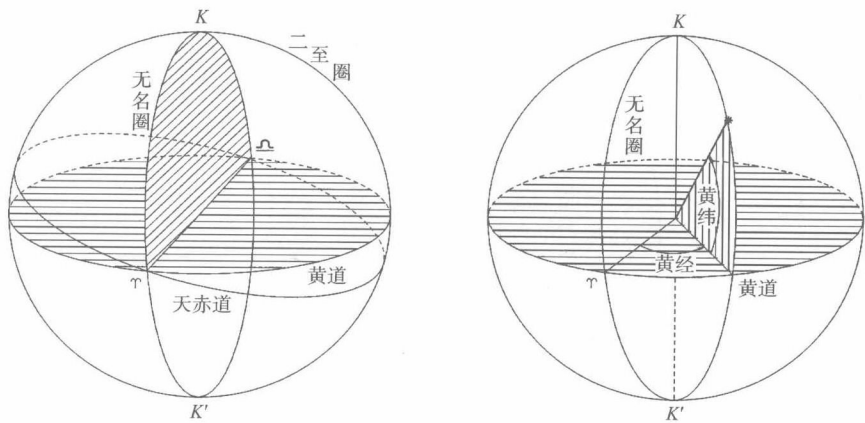


图 1.7 黄道坐标系

经不同于黄经。与前述二种右旋坐标系一样,它们之间的具体差异与黄赤交角有关。

(3)时角坐标系与赤道坐标系:这两种坐标系都以天赤道为基本圆,因而有共同的纬度(赤纬),所不同的是它们的经度。时角坐标系以子午圈为始圆,其经度(时角)自上点向西度量(属右旋系统)。赤道坐标系以春分圈为始圆,其经度(赤经)自春分点向东度量(属左旋系统)。所以,天体的时角不同于赤经;二者的具体差异,同当时的恒星时有关。

各种坐标系的比较见表 1.1。

表 1.1 各种坐标系比较

项 目	地平坐标系	时角坐标系	赤道坐标系	黄道坐标系
基本圆	地平圈	天赤道	天赤道	黄道
原点	南点 S	上点 Q	春分点 τ	春分点 τ
极	天顶 Z	天北极 P	天北极 P	黄极 K
轴	当地垂线	天轴	天轴	黄轴
辅助圆	地平经圈	时圈	赤经圈	黄经圈
始圆	子午圈	子午圈	二分圈	二至圈
纬度	高度角 $h_{\odot}$	赤纬 δ	赤纬 δ	黄纬 β
经度及度量方向	方位角 A、向西	时角 t 、向西	赤经 α 、向东	黄经 λ 、向东

1.1.3 太阳位置的计算

对于气象辐射测量来说,最重要的就是太阳高度角和方位角的计算。这些计算的基础是球面三角学。此处免除一些球面几何学的关系式推导,仅给出最终结果。

1.1.3.1 太阳高度角

太阳高度角($h_{\odot}$)的计算公式为:

$$\sin(h_{\odot}) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t), \quad (1.1)$$

式中 φ 为当地的地理纬度, δ 为当时的太阳赤纬, t 为当时偏离上点的时角。由于太阳运行是按照自身的规律进行的,所以太阳时角应按照真太阳时,而不能按照平太阳时来计算。有关时

间的问题,详见本书 1.3 节。

1.1.3.2 太阳方位角

太阳方位角(A)的计算公式为:

$$\cos(A) = \frac{-\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(t)}{\cos(h_{\odot})} \quad (1.2)$$

或

$$\sin(A) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(t)}{\cos(h_{\odot})}. \quad (1.3)$$

式中符号与计算太阳高度角的公式(1.1)的相同。

有关太阳赤纬的具体准确数值,可以从当年的天文年历中查阅。天文年历中所提供的数据是十分准确的,甚至可以准确到 $0.1''$ 的程度。对于太阳辐射测量的计算来说,是不需要如此高的准确程度的,因此也可以借助一些现有的公式简化计算。不过,不管采用何种方法,原始的数据均来自天文年历,而天文年历中的所有数据都是以格林尼治时间(现称力学时)00 时为准的,所以在采用其进行计算时,务必首先进行格林尼治时与北京时之间的换算(二者相差 8 h,北京时滞后,即格林尼治时间 00 时相当于北京时 08 时);然后,再进行真太阳时的计算。

1.1.3.3 太阳赤纬、时差和地球向径的简化算法

太阳位置的计算方法在文献中可以查找到多种,不过归纳起来可分为如下两类:数值模拟法和理论展开式法。所谓数值模拟法,其实质就是从某年的天文年历中将所有计算参数的逐日值摘出作为应变量,以积日(即从 1 月 0.0 日起算的日数)为自变量,然后借助傅里叶回归法,拟合出多项式各项的参数。这种方法比较常见,所以种类也较多。据文献(王炳忠等 1991, 2001)的研究,以文献(王炳忠等 1991)提出的方法,在类似的方法中效果最优。其之所以达到最优是因为它考虑了如下三点:

(1)一回归年的长度为 365.2422 日,而非 365.25 日。

(2)即使使用当年天文年历中提供的数值也是格林尼治经度力学时 00 时的,如需其他地区的,则要按地理经度内插求出。

(3)不同地区不同时间的数值也需按时间内插求出。

用该方法对太阳赤纬(δ)、时差(e_q)和地球向径(AU)参数的计算误差分别为:

$$\delta: <|2'|;$$

$$e_q: <|30 \text{ s}|;$$

$$AU^2: <|2 \times 10^{-4}|.$$

这里所谓的地球向径是以日地平均距离 R_0 (天文单位:ua)为单位度量逐日实际日地距离 R 的数据,所以它是个无量纲量,以 AU 表示。由于常用于平方反比定律,故直接计算其平方值 AU^2 ,即 $AU^2 = (R/R_0)^2$ 。

具体的各参数的拟合计算式如下:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.3723 + 23.2567\sin(\theta) + 0.1149\sin(2\theta) - 0.1712\sin(3\theta) - \\ & 0.7580\cos(\theta) + 0.3656\cos(2\theta) + 0.0201\cos(3\theta); \end{aligned} \quad (1.4)$$