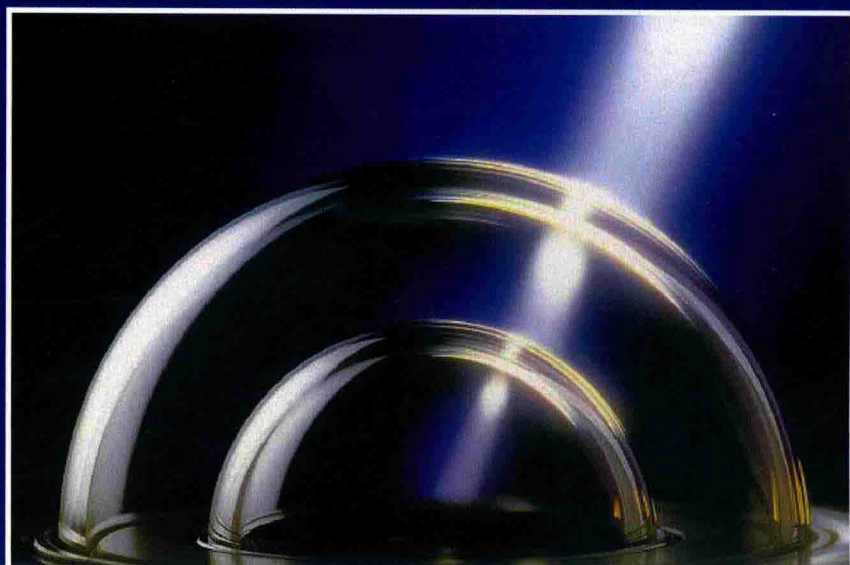




Xiandai Taiyang Fushe he Diqiu Fushe Celiang ji Biaozhun

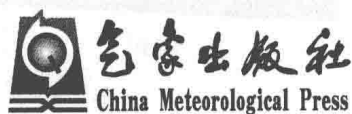
现代太阳辐射和地球辐射 测量及标准

王炳忠
莫月琴
杨云蕾
丁蕾

编著

现代太阳辐射和地球辐射 测量及标准

王炳忠 莫月琴 杨 云 丁 蕾 编著



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,结合自己多年从事气象辐射测量和研究所取得成果的基础上编写而成的。全书共计 24 章,详细介绍了与太阳辐射和地球辐射有关的基本概念和基础知识,介绍了国际上基准辐射站网系统所使用的、代表当前国际上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、校准、应用、安装、维护和操作,各种辐射量的测量方法以及对测量所获数据的质量控制方法等方面的内容。本书可帮助读者对太阳辐射和地球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的不确定度和提高辐射观测的质量。

本书可供具有中专以上文化程度,从事辐射测量和太阳能利用的研究、设计、制作和各类实际应用的各种专业工程技术人员,气象部门从事辐射观测、计量检定的科研人员以及从事地理、建筑设计、材料老化、空间技术等方面工作的人员使用,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

现代太阳辐射和地球辐射测量及标准 / 王炳忠等编
著. — 北京:气象出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-5029-6881-6

I. ①现… II. ①王… III. ①太阳辐射-测量-标准
②地球-大气辐射-测量-标准 IV. ①P422. 1-65
②P422. 2-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 281111 号

现代太阳辐射和地球辐射测量及标准

王炳忠 莫月琴 杨 云 丁 蕾 编著

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

邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:张 斌 王 迪

终 审:吴晓鹏

责任校对:王丽梅

责任技编:赵相宁

封面设计:博雅思企划

印 刷:三河市君旺印务有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:28.5

字 数:730 千字

彩 插:4

版 次:2018 年 12 月第 1 版

印 次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价:145.00 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

太阳辐射是地球能量的主要来源,它与国民经济、人民生活息息相关。太阳辐射与地球辐射测量是研究天气气候变化的重要手段,对于大气科学、农业生产、空间技术以及新能源开发与利用等均起着重要的作用。

由于辐射测量的特点,提高其测量准确度是一项十分艰巨的任务。迄今,在国际单位制的各项基本量的测量准确度中,辐射测量仍是其中最低的。经过近十年三个国外顶级科研单位(NPL,METAS,PMOD)若干名科学家的努力,所制作出的低温绝对太阳辐射计(CSAR),也仅将准确度提高了近半个数量级。在后续的试用中,仍在不断地发现新问题,需要加以克服。之所以会如此,原因就在于:自然界辐射无处不在,相互间的干扰不可避免;其次,一些定律过于理想化,如朗伯体,只能近似地找寻替代品,这就引入了测量误差;再次,仪器的清洁、巡检、及时校准等重要环节仍可能形成误差。经过国内外多名学者的研究,我国目前总辐射照度的测量误差仍然高达5%,与国际先进水平差距不小,难以满足天气气候变化监测与预测的需求。如何提高我国太阳辐射和地球辐射测量的准确度,仍是十分迫切的艰巨任务。

为了配合日益提高的太阳辐射与地球辐射观测水平,积极向国际先进水平靠拢,便于相关技术人员尽快了解太阳辐射和地球辐射测量和进展的最新动态,特别是找出测量中的误差源,就成为极为重要的工作。作者在全面系统地总结国内外大量文献资料基础上,概括了迄今辐射观测方面的最新成就,并结合了作者长期从事辐射测量研究所取得的成果,编写了这本《现代太阳辐射和地球辐射测量及标准》。全书共24章,介绍了与太阳辐射和地球辐射测量有关的历史沿革、基本概念、基础知识和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的工作原理、结构、性能特点和校准方法,各种辐射量的测量方法以及对测量后所获数据质量的控制方法等方面的情况。

本书撰写严谨,内容全面、简洁而实用,对于从事太阳辐射和地球辐射观测研究和管理人员都是十分有参考价值的科学技术著作。我坚信作者所付出的辛勤劳动,将有效地推动我国太阳辐射和地球辐射测量工作的新发展。



2018年7月

前 言

太阳辐射测量是一项基础性工作,其服务的对象不仅仅限于气象领域及其分支学科,还更广泛地服务于研究地球上各种生物和物理过程。因此,详尽地了解与太阳辐射测量有关的原理、技术性能、仪器构造、观测方法、校准方法、计量标准和测量不确定度等方面的需求也日益增长。随着环境问题日益严重,各种新能源项目受到普遍的关注,其中各种太阳能工程项目,如光电、光热等对辐射资源测量的依赖更为明显。

在气象观测项目中,辐射观测具有自己的特点,目前微处理器的发展,为辐射测量带来了更多的便利,主要体现在采样的速率、数据的计算以及数据的后处理和存储等方面。而面对传感器诸多本质性的问题,自动化也爱莫能助。例如在国际单位制 7 项基本量:时间、长度、质量、温度、电量、发光强度和辐射度中,就 20 世纪末测量的水准,时间量的测量不确定度已经达到 10^{-12} ,而辐射度(WRR)仅在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 。

目前,在我国的科学实践中,不少部门花费重金购买了国外高等级的太阳辐射测量仪器,但如果观测时缺少对仪器的特别关注,高级别的仪器未必就能得出更好的结果。当然,在同样情况下,使用低级别的仪器,其效果会更差。所以,高质量的数据,离不开观测人员对仪器的悉心照料。

在国际范围内,作者所能搜集到的有关太阳辐射测量的文章与书籍,按出版年代的先后,有如下数种:

1857, Янишевский Ю Д, Актинометрические приборы и методы наблюдений. Гидрометиздат, Ленинград.

1938, Калитин Н Н, Актинометрия. Гидрометиздат, Л. -М.

1956, Кондратьев К Я, Лучистая энергия солнца. Гидрометиздат. Л.

1966, Robinson N, Solar radiation. Elsevier Publishing Company.

1975, Coulson K L, Solar and terrestrial radiation: method and measurements. New York: Academic Press.

1981, Кмито А А, Складов Ю А, Пиргелиметрия. Л. Гидрометиздат.

1982, 柴田和雄・内嶋善兵衛, 太陽エネルギーの分布と測定. 学会出版センター.

1983, Iqbal M, An introduction to solar radiation. ELSEVIER.

1986, Fröhlich C and London J(Editor), Revised instruction manual on radiation instruments. WMO/TD No. 149.

2012, Vignola F et al., Solar and infrared radiation measurements. CRC Press.

其中 Кондратьев К Я, Robinson N, Iqbal M 和柴田和雄・内嶋善兵衛等人的书籍,其内容并非专门论述辐射测量仪器的著作,仅是其中的一部分,对辐射测量仪器有所介绍。

Vignola等人的书籍,出版年代最近,对本书的编写帮助最大。本书更多的内容,主要参考了各种外文期刊、会议报告和文集,但难免会遗漏某些重要的相关内容。另外,受时间的限制,我们所能参考的文献,终止于2018年中已正式出版的或网上所能搜集到的。

20世纪80年代和2008年,本书作者曾先后编撰过《太阳辐射测量与标准》和《现代气象辐射测量技术》。但是由于科学技术的快速发展,原书中的内容已经显得陈旧,必须及时予以增补和修订。从这个意义上讲,本书也可视作《现代气象辐射测量技术》的第二版,而实际上,我们不仅对原书进行了修订,另外,还从原来的15章增补至24章,使得内容更为充实、全面。

书中第12章有关气溶胶(AOD)测量部分,作者从未实际操作过这类仪器,因为目前我国,此项测量并未纳入正式的气象观测业务中,而是由具体科研部门负责,气象计量站不拥有相应的标准设备和开展相应校准工作的职责。因此,这一章的内容全部依据GAW相关文献写出,若有不当之处,敬希相关学者批评指正。

书中第14章有关太阳常数的介绍,只能算是简介。因为它实际上涉及仪器制作、性能评定、理论分析、模式计算等诸多方面,这些既非作者所长,也超出了本书的范围。

书中第22章,正如标题所示,仅涉及辐射站常规仪器的校准,至于其他种类辐射仪器的校准,由于涉及一些专用名词术语和计算公式,就包括在介绍该种仪器的相应章节中了。

本书中多处可见BSRN(基准地面辐射站网),这是由于BSRN无论在测量手段上,还是在测量、校准和管理上均代表了当前世界辐射测量的最高水准。但需要注意的是,建立BSRN等级的辐射站绝不能等同于购买、使用等级最高的进口仪器这样简单的事。没有备份仪器,就不能替换使用中的仪器去定期校准,更何况不是任意校准单位,均有校准BSRN仪器的资质。至于辐射测量场地的选择、辐射仪器的日常维护、数据的筛查处理以及专业人员的配备等方面,更不是一般辐射站所能胜任,但是了解其精神实质,并在测量中加以关注和落实,才会对提高辐射测量的质量有所裨益。成为BSRN的正式成员是需经过审批的。BSRN每两年召开一次“科学评论与研讨会”,迄今已经举办了16次,每次会上均会按照当前辐射观测中所发现的问题,组成若干个专门的工作组,在两次会间期内,开展专题研究,并在下次会议上作出报告、讨论改进办法,以及研究建立新的工作组等。除了上述报告外,还有其他有关辐射科研成果的介绍和交流。所以,对于辐射测量来说,这确是一个内容丰富且十分实用的重要会议。更是从事辐射工作的人员交流心得、提出问题的场所。

在辐射测量方面,我国从大气本底站建立起,就曾依据BSRN的要求建立了瓦里关、临安、龙凤山和北京上甸子等含有辐射项目的观测站;后来国家有关部门依据BSRN的标准又先后建立起锡林郭勒、大理、北京上甸子、焉耆、温江、漠河、许昌等7个基准辐射站。遗憾的是,迄今并无一站成为BSRN的正式成员,也就无人参与上述会议,失去了很多参与国际交流活动和获得辐射测量新信息的机会。

目前,国内在辐射研究方面是薄弱的,与辐射测量相结合的研究就更少。常见的是利用美国在网上提供的卫星数据,进行我国范围内的相关分析。这似乎是一条捷径,但实际上,并不值得提倡。美国卫星的数据是与美国地面测量数据相结合,形成模式后再进行计算,实际上只能更好地反映美国大范围的情况,但并不能真正代表其他地方的情况,更遑论,代表我国独具特色的青藏高原的情况了。并且,这样的工作也失去了原创性。

由于新版有关太阳辐射仪器技术参数和分级标准的国际标准ISO 9060,尚在修订,虽然作者已经见到了新版的草稿,并了解了其中的主要内容,但由于它尚未得到各成员国的正式投

票批准,故未将其具体内容写入本书,但是为了使读者对其修订精神有个大致的了解,我们将其中的主要表格列为本书的附录,供大家参考。原来与该标准类似的仪器技术参数和分级标准,在 WMO《气象辐射仪器和观测方法指南》中可以查到,只是其等级的命名采用的是高质量、良好质量与中等质量等词汇。而在制定我国太阳能名词术语国家标准的过程中,中国计量科学研究院的有关人士曾指出,依照我国仪器等级的命名习惯:普通工作仪器应分为一级、二级,而标准仪器则应区分为一等、二等。原 ISO 9060:1990 标准中,所使用的也是二等标准、一级和二级。我国的国家标准《太阳能热利用名词术语》中也采用了这种方式,所以本书仍遵循这样的命名原则。

本书中多次引用 WMO《气象仪器和观测方法指南》(第 7 版)一书,该书出版于 2008 年。但是,在 2012 年召开的 CIMO 管理组第 10 次会议上,决定启动更新《气象仪器和观测方法指南》的工作。此次更新并非全面重新编写,而是依照各个章节的具体情况,分别决定需要更新的内容。2014 年 2 月 WMO 秘书长致函 WMO 会员,邀请他们审阅 2014 年预审版的《气象仪器和观测方法指南》,并于 2014 年 7 月召开的 CIMO 第 16 届会上,批准了此《气象仪器和观测方法指南》的 2014 临时版本(Provisional 2014 Edition of the CIMO Guide),本书中所有涉及《气象仪器和观测方法指南》的内容,均源自此版本。

本书的名称采用“地球辐射”,而不用红外辐射,因为红外辐射是个更宽泛的概念,地球辐射只是红外辐射中的一部分,其测量的要求与一般的红外辐射测量存在着诸多不同,并有着自己的特点,这是需要特别指出的。

由于热电堆的种类繁多,更多的是应用在总日射表上,为了便于具体介绍热电堆传感器的一些细节,将总日射表一章放在了直接日射表一章的前面。

我们深知,要编写一部既要全面反映当前世界气象辐射测量最高水准、又要通俗易懂、还要让从事辐射观测或管理的人员对与气象辐射相关的知识有较全面的了解、又不能过分难于理解的书籍,是一项艰巨的任务。限于编著者的水平,本书是否满足了这样的要求,以及书中存在的不够确切或疏漏之处,谨以求实之诚,敬希读者不吝赐教、斧正,更希望得到读者自己在辐射测量实践中积累的心得、体会与经验,以便补苴罅漏。

作者衷心感谢周秀骥先生拨冗为本书作序,并对本书给予积极和正面的评价。

本书在编写和出版过程中,得到了中国气象局气象探测中心张雪芬和贺晓雷两位的鼎力相助,也一并在此致谢。

编著者

2018 年 6 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	(6)
1.3 时和时区	(11)
1.4 有关太阳位置的计算	(15)
1.5 太阳的电磁波谱	(17)
参考文献	(19)
2 辐射观测发展的历史沿革	(20)
2.1 我国古代对太阳的观测	(20)
2.2 20 世纪以前的情况	(20)
2.3 20 世纪以来的情况	(25)
2.4 我国气象辐射测量历史	(35)
参考文献	(37)
3 与辐射测量有关的基本概念和定律	(39)
3.1 术语及其单位	(39)
3.2 黑体及其有关定律	(41)
3.3 有关辐射的其他定律	(45)
3.4 定律应用举例	(51)
参考文献	(51)
4 气象辐射量及其测量仪器	(52)
4.1 气象辐射量及其分类	(52)
4.2 气象辐射量的符号	(56)
4.3 气象辐射传感器	(57)
4.4 气象辐射测量仪器	(63)
参考文献	(65)
5 辐射测量场地	(66)
5.1 站点要求	(66)
5.2 辐射仪器布设	(70)
参考文献	(72)

6 总日射表	(73)
6.1 总日射表的分类和分级.....	(73)
6.2 总日射表的结构.....	(78)
6.3 几种常用的总日射表.....	(79)
6.4 总日射表存在的问题.....	(84)
6.5 总日射的测量.....	(96)
6.6 散射日射的测量.....	(97)
6.7 反射日射的测量.....	(102)
参考文献.....	(103)
7 直接日射表	(105)
7.1 直接日射表的孔径参数.....	(105)
7.2 直接日射表的分类与分级.....	(106)
7.3 直接日射表的结构.....	(107)
参考文献.....	(120)
8 地球辐射表	(121)
8.1 引言.....	(121)
8.2 地球辐射表的结构.....	(122)
8.3 地球辐射表的测量原理.....	(123)
8.4 常用的地球辐射表.....	(128)
8.5 地球辐射表存在的问题.....	(131)
8.6 地球辐射的测量.....	(133)
参考文献.....	(134)
9 全辐射表	(136)
9.1 引言.....	(136)
9.2 全辐射表的结构.....	(136)
9.3 全辐射表的分级.....	(140)
9.4 全辐射的测量.....	(141)
9.5 净辐射的测量.....	(142)
9.6 净全辐射标准.....	(144)
参考文献.....	(144)
10 光量子型光合有效辐射表	(146)
10.1 一些基本概念.....	(146)
10.2 光量子型光合有效辐射表的结构.....	(147)
10.3 几种常用的光量子型光合有效辐射表.....	(148)
10.4 光合有效辐射的单位.....	(153)
10.5 有关光量子传感器的一些问题.....	(155)
10.6 光合有效辐射表的校准.....	(157)
10.7 光合有效辐射的测量.....	(158)
参考文献.....	(158)

11 紫外辐射表	(160)
11.1 引言.....	(160)
11.2 紫外辐射的相关术语.....	(162)
11.3 紫外辐射表的分类.....	(166)
11.4 几种常用的紫外辐射表及其结构.....	(176)
11.5 紫外辐射测量概况.....	(182)
11.6 紫外辐射仪器的校准.....	(187)
参考文献.....	(189)
12 气溶胶光学厚度(AOD)测量	(191)
12.1 引言.....	(191)
12.2 测量原理.....	(192)
12.3 测量仪器.....	(195)
12.4 校准问题.....	(200)
12.5 数据评价.....	(202)
12.6 质量控制和保证.....	(203)
参考文献.....	(204)
13 日照时间的测量	(206)
13.1 引言.....	(206)
13.2 日照计的标准和日照的定义.....	(207)
13.3 世界气象组织推荐的方法.....	(208)
13.4 现有商售日照计评述.....	(216)
13.5 可照时间.....	(221)
13.6 日照仪器的校准.....	(222)
参考文献.....	(224)
14 太阳常数的测量	(226)
14.1 引言.....	(226)
14.2 历史沿革.....	(227)
14.3 TSI 的研究团队	(232)
14.4 TSI 数据	(241)
14.5 我国 TSI 测量的进展	(246)
参考文献.....	(249)
15 太阳能应用的辐射测量	(252)
15.1 引言.....	(252)
15.2 光电型总日射表的特点.....	(252)
15.3 光电型总日射表的特性与分级.....	(253)
15.4 光电型总日射表.....	(254)
15.5 旋转遮光带辐射表(RSR).....	(255)
15.6 光电型总日射表的一些问题.....	(257)
15.7 SPN1 型日照总日射表	(261)

15.8 倾斜面上的太阳辐射测量	(264)
参考文献	(267)
16 辐射测量的辅助设备	(269)
16.1 太阳跟踪器及遮光装置	(269)
16.2 通风器	(275)
16.3 数据采集系统	(277)
16.4 窗口清洗器	(279)
16.5 防鸟装置	(280)
参考文献	(281)
17 测量设备的安装与维护	(282)
17.1 安装	(282)
17.2 维护	(284)
参考文献	(286)
18 短波辐射测量标准	(287)
18.1 直接日射测量标准	(287)
18.2 国际计量局(BIPM)与SI	(293)
18.3 散射日射测量工作标准	(297)
参考文献	(299)
19 短波辐射测量标准新进展:低温太阳绝对辐射计(CSAR)	(300)
19.1 问题的提出	(300)
19.2 CSAR 的优势	(301)
19.3 CSAR 的外观	(302)
19.4 CSAR 辐射计的结构	(302)
19.5 试用结果	(309)
参考文献	(314)
20 地球辐射测量标准	(316)
20.1 世界辐射中心:红外辐射部(WRC-IRS)	(317)
20.2 新型标准红外辐射计	(327)
20.3 新型标准红外辐射计与世界标准组之间的比对	(331)
20.4 国际地球辐射表比对(IPgC)	(336)
20.5 我国的长波辐射标准状况	(340)
参考文献	(342)
21 低辐照度测量标准	(344)
21.1 引言	(344)
21.2 国家辐照度基准装置	(344)
21.3 光谱辐照度标准灯	(345)
21.4 世界校准中心—紫外部(WCC-UV)	(348)
21.5 中国国家气象计量站的光谱辐射标准	(353)
参考文献	(356)

22 常规辐射测量仪器的校准	(357)
22.1 我国辐射校准历史简述.....	(357)
22.2 太阳辐射标准的组成.....	(358)
22.3 太阳辐射测量标准的量值溯源/传递	(359)
22.4 辐射仪器的校准方法.....	(363)
22.5 太阳辐射仪器的性能测定(杨云 等,2012a)	(377)
22.6 国家级太阳辐射测量标准的质量控制(杨云 等,2015b)	(381)
22.7 国家级散射日射测量标准的质量控制.....	(385)
参考文献.....	(387)
23 气象辐射测量的不确定度	(389)
23.1 测量不确定度的评定方法.....	(389)
23.2 气象辐射仪器测量不确定度分析评定实例.....	(392)
23.3 结束语.....	(407)
参考文献.....	(407)
24 辐射数据的质量保证	(409)
24.1 一般检查方法.....	(410)
24.2 数据质量控制方法.....	(412)
24.3 数据质量和控制算法的自动化.....	(418)
参考文献.....	(420)
常用英文缩写的中英文对照表.....	(421)
附录 A 计算太阳位置的数值模拟法程序	(424)
附录 B BSRN 提供的太阳位置算法	(426)
附录 C WMO《气象仪器和观测方法指南》(2014)的附录 7D:有用的公式	(432)
附录 D WMO 地面辐射基准站网(BSRN)简介	(435)
附录 E 新版 9060 总日射表分级指标(草案表格部分节录)	(439)
附录 F 新版 9060 直接日射表分级指标(草案表格部分节录)	(441)

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,太阳、月亮、星体等,在感觉上,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,另一方面又像随其旋转。观察者无论身居何处,总会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,但是由于天体和观察者间的距离同观察者与地面空间移动的距离相比要大得多,所以看上去各种天体似乎总是离我们同样远,犹如散布在以观测者为中心的一个球体的表面上。实际上,我们所看到的是天体在这个巨大的球面上的投影位置,为了便于研究天体运动,天文学将其作为一种工具,将这个以观察者为球心,以无限长为半径的球体称为天球。图 1.1 就是从外界看到的天球的样子。

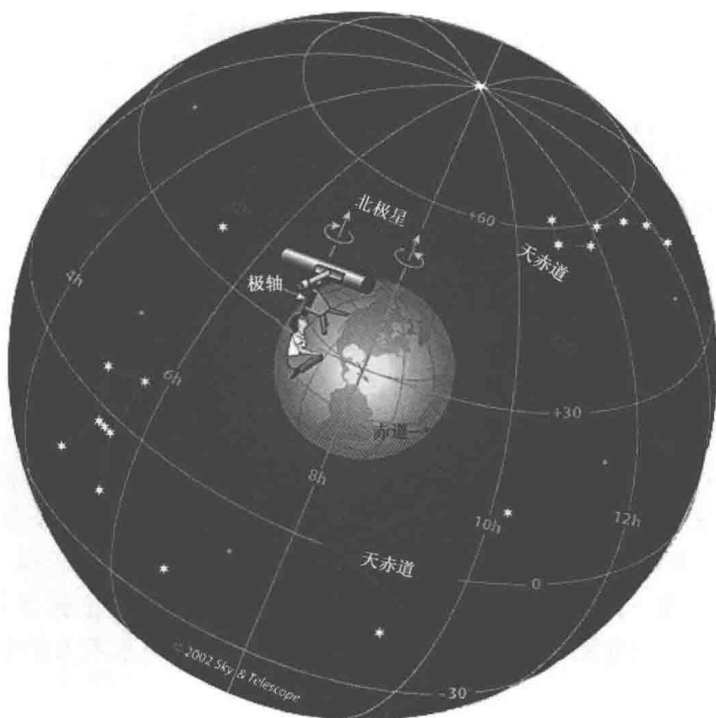


图 1.1 天球外观(取自网页)(见彩图)

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。实际天体之间是有直线距离的,但它是宇宙空间的直线距离,而不是天球上的直线距离。观测者能直接辨别的只是天体的方向。在天文学中,都是用天体投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来计算点位之间的关系。

(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,该平面与天球相交形成的大圆,称之为地平圈或真地平。

(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伸与天球的交点。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' 。

(3) 上中天和下中天

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' 点,如同地球的南、北极。

基本圆——通过天球球心且与轴相垂直的平面,与天球相交的大圆。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,极、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。下面只介绍前三种坐标系,其他与太阳辐射关系不大的坐标系,不拟详述。

1.1.2.1 地平坐标系

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。

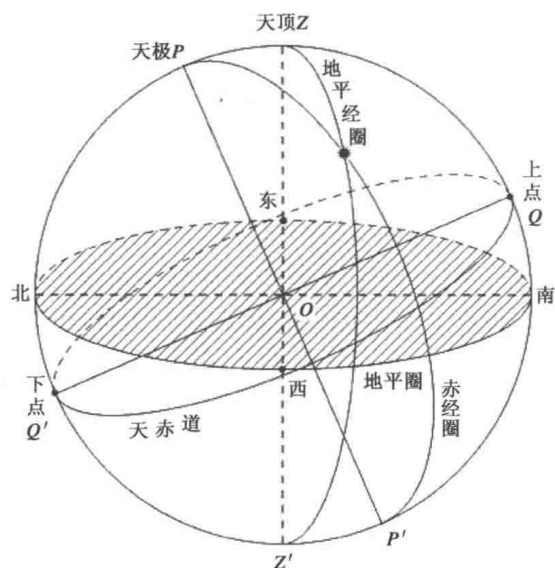


图 1.2 天球上的基本点

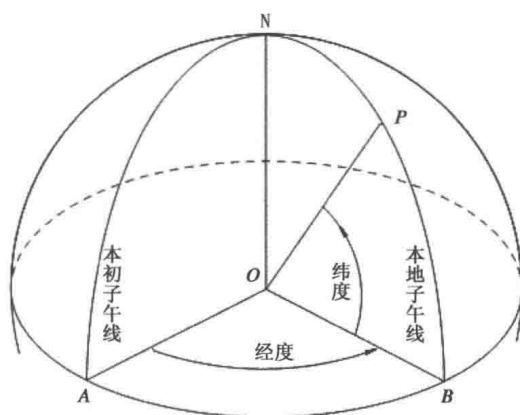


图 1.3 球面坐标

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(图 1.4)。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(N)或南点(S)作为原点。大地测量学通常从北点起沿地平圈顺时针方向度量；在辐射计算中则从南点起顺时针方向度量，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，高度角的余角称为天顶距 Z ，以天顶为原点。

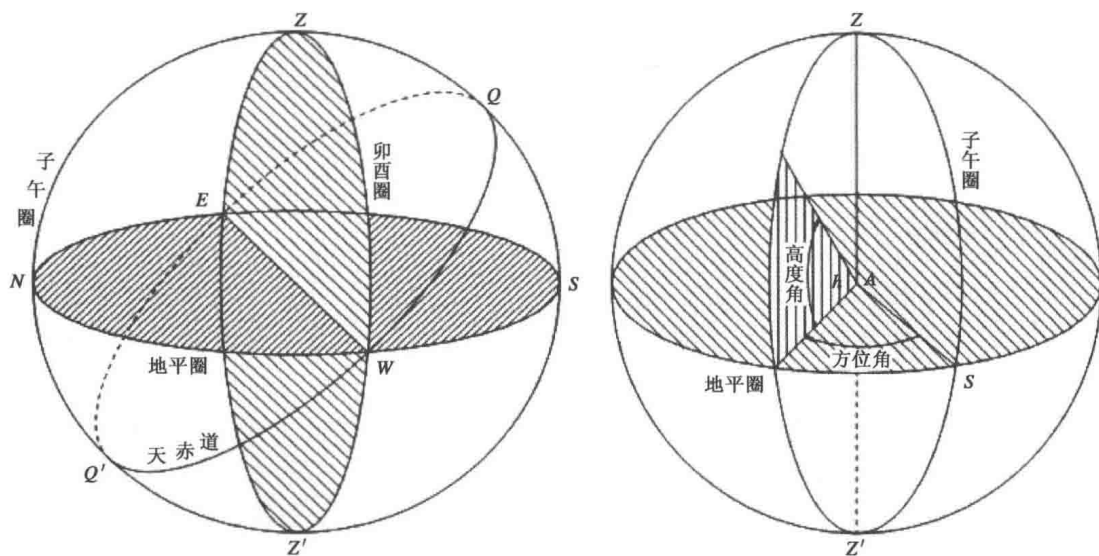


图 1.4 地平坐标系

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,具体到我们感兴趣的太阳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角 A 和高度角 h 及其周日变化。但是,只有地平坐标系还不足以确定 A 和 h ,因此,要引入其他坐标系。

1.1.2.2 时角坐标系

时角坐标系又称第一赤道坐标系。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。天赤道、子午圈是时角坐标系的基本圈。天极是赤道坐标系的极(图 1.5)。经过天极的任何大圆称为赤经圈,与天赤道平行的小圆称为赤纬圈。

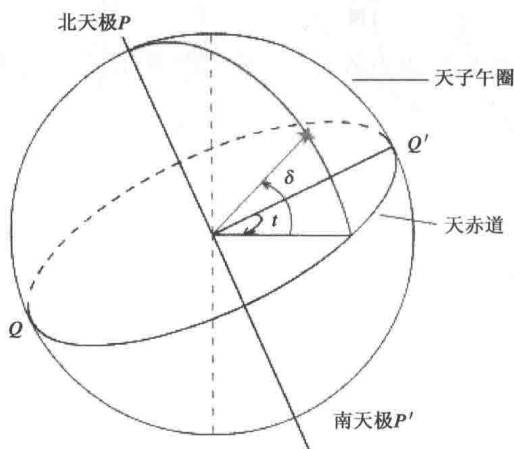


图 1.5 时角坐标系

基本点:

天赤道与天球子午圈近南点的交点(Q' 点)(天赤道上 4 个相距 90° 的点:东、西、南(上)、北(下),四个交点)。

两个坐标:

时角(t):自子午圈起向西为正,向东为负,可以是角度单位,范围 $0^\circ \sim 360^\circ$,也可以使用小时,分,秒作单位来表示,从 0 时至 24 时;赤纬(δ):自赤道向北天极为正,向南天极为负。

1.1.2.3 赤道坐标系

赤道坐标系又称第二赤道坐标系。之所以设立这个坐标系,是由于地球自转所造成的天体的周日运动并不影响春分点与天体之间的相对位置,因此,也就不会改变天体的赤经和赤纬,可是在不同的地点和不同的时间,天体的时角却是在变化当中。

基本点:春分点是黄道与赤道的升交点。这里所谓的黄道就是太阳在天球上视运行的轨迹,由于它与天球赤道不在一个平面上,而是相交的,所以就形成了两个交点,又由于太阳是运动的,当它自天赤道的下面与天赤道相交,此相交处即升交点,此交点被定义为春分点。另外,黄道与赤道的交角又称为黄赤交角,是天文学中的一个重要概念,后面还会用到。

两个坐标:赤经(α)和赤纬(δ)。

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。经过南北天极的任何大圆称为赤经圈或时圈,以春分点为原点;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 (图 1.6),由天赤道起算,以 $0^\circ \sim 90^\circ$ 度量。地球公转的轨道面(黄道面)与天球赤道面的夹角称黄赤交角,交点就是春(秋)分点(图 1.7)。

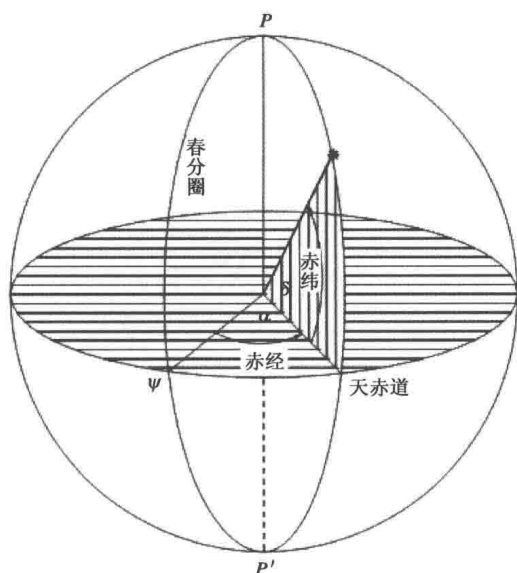


图 1.6 赤道坐标系

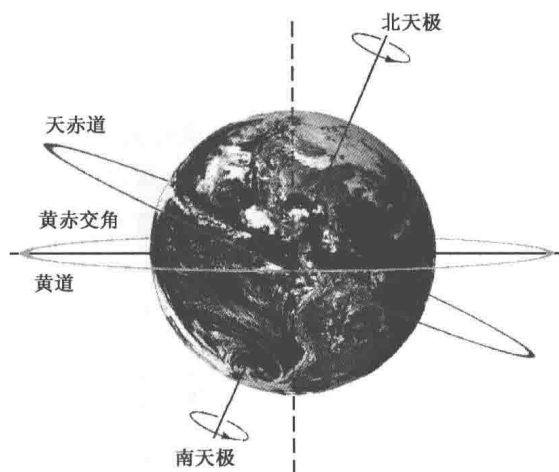


图 1.7 黄赤交角

1.1.2.4 地平坐标系与时角坐标系间的联系

将地平坐标系与时角坐标系联系起来,实际上就是要得出地平坐标系的两个坐标(方位 A 和高度角 h)与时角坐标系的两个坐标(时角 t 和赤纬 δ)之间的关系。这两种坐标系均以子午圈为始圈。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;纬度越高,二者越接近。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。

推导两坐标系之间的关系,需要利用球面三角公式。这里只给出推导结果。

太阳高度角 $h_{\odot}$:

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

式中, φ 为当地的地理纬度, δ 为当时的太阳赤纬, t 为当时偏离南点的时角。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,而不能按平太阳时来计算。

$$\text{太阳方位角}(A): \cos(A) = [-\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(t)] / \cos(h_{\odot}) \quad (1.2)$$

$$\text{或} \quad \sin(A) = \cos(\delta) \cdot \sin(t) / \cos(h_{\odot}) \quad (1.3)$$

式中其他符号与太阳高度角的计算公式(1.1)的相同(朱光华等,1990)。