

国家重点基础研究发展计划（973计划）  
项目编号：2010CB227100

# 太阳能 热发电技术

黄 湘 王志峰 李艳红 邱河梅 黄文瀚 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

国家重点基础研究发展计划（973计划）  
项目编号：2010CB227100

# 太阳能 热发电技术

黄 湘 王志峰 李艳红 邱河梅 黄文瀚 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书在多年太阳能热发电技术研究的基础上，系统地介绍了太阳能光-热转换过程中的主要计算方法、世界太阳能资源分布情况、太阳能热发电设备、太阳能辐射测量仪器及使用方法；从点聚焦、线聚焦和面聚焦三种方式着手，总结了世界上不同的聚焦太阳能热发电（CSP）技术的特点，提出了三种太阳能热发电输出特性曲线；分析了以储热为手段的可再生能源发电方式对电网调峰的意义。

本书力求说理清晰，文字通顺，希望能使读者对太阳能热发电的原理、技术、工程有全面而正确的了解和掌握。本书可作为大专院校本科生、研究生学习的辅导材料，还可供电力、可再生能源利用、能源工程、环境保护等企业、事业部门的科研、工程设计、工程建设人员参考，也可供新能源爱好者阅读与参考。



### 图书在版编目（CIP）数据

太阳能热发电技术/黄湘等编著. —北京：中国电力出版社，2012.12

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3821 - 0

I. ①太… II. ①黄… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 299976 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京瑞和彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2013 年 5 月第一版 2013 年 5 月北京第一次印刷

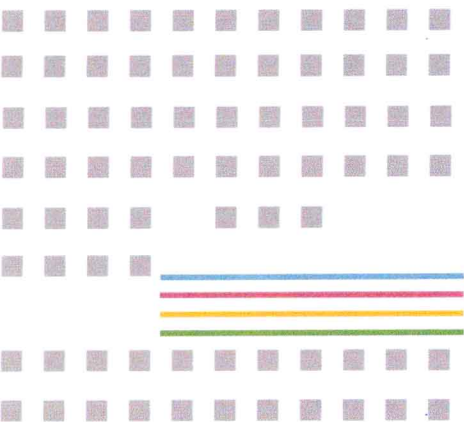
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 304 千字

印数 0001—3000 册 定价 69.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



## 序

步入 21 世纪后，我国能源体系正在向节约、高效、洁净、多元、安全的现代化能源结构转变，逐步进入一个保持可持续发展的、绿色、低碳能源发展阶段。其间要花大力气形成节能和科学用能机制，实现新型能源、可再生能源的突破；实现化石能源的洁净生产和利用，完成污染排放和温室气体排放的控制指标。

节能和科学用能，合理控制能源需求，是能源战略之本。对我国这个人均资源短缺的国家，必须确立人均能耗指标显著低于发达国家同等水平的思路。煤炭目前是我国主力能源，但煤炭在我国总能耗中的比重应该逐步下降，天然气的地位应该上升，而水电装机容量将有较大突破；同时，因地制宜，积极发展非水可再生能源，尽早使风能、太阳能、生物质能等成为新的绿色能源支柱。

新能源和可再生能源的发展与利用，重在核心能力的创新、技术经济瓶颈的突破，解决间歇性能源并网难题，降低风电、太阳能光伏与光热发电成本，提高经济效益。

实施科学、绿色、低碳能源战略，将明显抑制污染气体和温室气体的排放。二氧化硫等污染气体排放，将在目前的基础上逐步下降，以二氧化碳为代表的温室气体排放强度将逐步降低，绿色、低碳能源战略将确保我国做出的主动承诺的兑现。碳排放强度下降主要靠节能、提效和发展可再生能源来实现。科学、绿色、低碳能源战略不仅将催生新的经济增长点，也将推动科技创新和抢占新的战略制高点。

发展中国特色的高效安全（智能）电力系统、分布式用电方式和储能技术有重要意义。在我国能源结构中，电力所占的比重将逐步增加，在电力结构中，非火电的比例将逐步增加，煤电在电力中的比重将逐步下降；有必要做好电力发展的规划和电网构架的规划；利用信息技术与电网技术的结合，建设信息化、自动化的智能电网，使电网能够有效接纳更多的新能源发电电源，并使电网能够安全、高效运行；还应重视风电和光电的非上网和分布式用电方式，多种技术并举发展储能技术。

科学用能是要深入研究用能系统的合理配置和用能过程中物质与能量转化的规



律，以提高能源利用率和减少污染，最终减少能源消耗。科学用能是实现节能的根本途径，是能源科技发展的必然结果。科学用能的研究内容包括能量和物质转化的规律、用能的规划、用能的系统、用能的技术、用能的方法、用能的管理、法律及政策等。

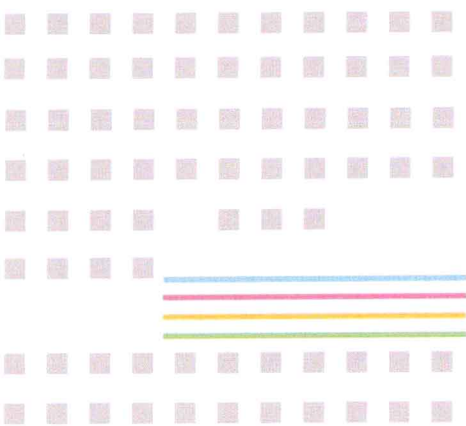
“温度对口、梯级开发”是科学用能的重要内容，用它来进行能源的规划有利于提高能效、减少污染。可以先用高温度的能量来发电，把剩下的中温、低温能量再用来做其他的事，发展不同于大电网的分布式能源系统，形成小区域内的能源系统，由发电设备、供热系统、制冷系统及其他构成，能量分层分级，实现“冷、热、电”等能量的多联供和梯级利用。

可再生能源代表着能源发展的趋势，我国应因地制宜地发展。就全国范围而言，当前一个阶段的发展重点，一是风力发电：我国有丰富的风电资源，风电市场发展飞速，目前最紧要的是提高风电机组的安全、稳定运行，突破风电输出负荷稳定的难题。只有解决风电的输出稳定性问题，电网才有可能接纳更多的电量。二是太阳能发电：我国有丰富的太阳能发电资源，我国西部地区太阳能资源足可以解决全国的用能问题，但太阳能热发电技术需要进步，满足电网需求的可控技术需要取得突破。

科技对能源的支撑涉及基础性研究及新技术的创新、重大工程项目和战略性新兴产业的支持等三个方面，我们欣喜地看到，我国的科技工作者们都意识到了这个问题。本书的作者从事电力行业的工作，参与过国家 863 和 973 项目，通过对可再生能源技术方面的研究，对太阳能热发电有了许多崭新的认识，提出了许多新的思想和思路，在推动可再生能源利用和太阳能热发电方面，相信本书能够起到积极作用。



2012年6月6日



# 前言

继大规模风能利用后，可再生能源发展中，最具潜力的是太阳能的利用。20世纪70年代始，西班牙、美国等国开展了太阳能热发电的研究及工程实践，发展了各种类型的太阳能热发电技术，我国在太阳能中、低温应用方面走在了世界前列，但在高温利用方面还远远落后于发达国家。

好在近些年，在国家支持、政策引导、科技投入、有识之士及企业的热情参与下，太阳能热发电得到了社会的广泛关注。但是，在太阳能光伏发电技术迅猛发展的今天，太阳能热发电是否有必要，将来是否有发展空间，这是作者自研究之日起一直萦绕心头的问题。试想，如果世界上一种发电方法以静悄悄的形式提供了人类所需能源，这将是多么激动人心的时刻。

实际上，任何一种发电方式都具有自身的特性，不同特性的发电方式都可以在不同场合得到最佳的应用。科技工作者的责任是发现其特性，找到与其结合的关键之处。

另外，无论电网如何智能，电网都是刚性的，用户始终是上帝，这就是为什么要求常规发电机组具有负荷调节能力，包括负荷范围和负荷速度调节。常规火电机组可以控制燃料的输入，以达到控制电量输出的目的，这是常规火电机组的优势。而大部分可再生能源的发电，其能量输入都是随机的，因而是不可控的。可再生能源最有意义的工作，就是要在不可控的能量输入条件下，得到可控的能量输出。看起来这是天方夜谭，但在太阳能热发电方面，作为输入条件，虽然太阳辐射能不可控，但通过能量的聚积-储存-热电转换三个环节，达到了发电输出的可控，这正是太阳能热发电技术的优势。

基于以上原因，作者完成了本书的编制。全书由十个章节构成，第1、2章介绍了太阳能天文和辐射计算方法，利用这些计算公式就能完成任何时间和地点下的太阳能辐射计算；第3章介绍了世界各主要国家和地区的太阳能利用辐射资源和条件；第4章介绍了太阳能辐射仪表的主要形式及使用方法；第5~7章将各种太阳能热发电形式分为点聚焦、线聚焦和面聚焦三类，介绍了世界各国已应用的太阳能热发电技术及机组主要参数；第8章从电网角度分析了太阳能热发电的输出特性，通过具有储热的太阳能发电技术的应用，满足电网对机组负荷调节的要求；第9章列举了常用储能技术，详细介绍了太阳能热发电常用介质及特性，分析了不同介质对发电特性的影响；第10章介绍了太阳能热发电中的主要设备。

本书可以作为从事新能源、可再生能源利用工作的设计、施工、调试及运行维护等工程技术人员的参考书，对于管理人员、相近专业的科研人员及在校师生，也会有所

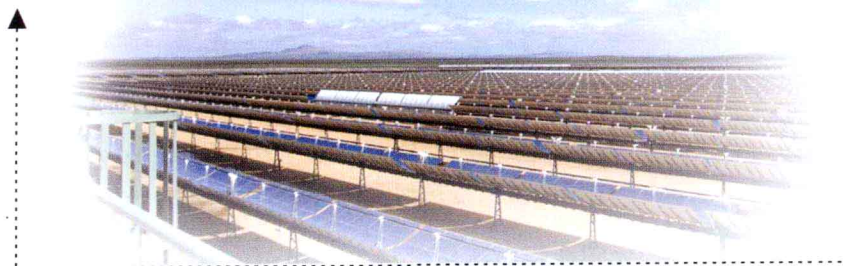
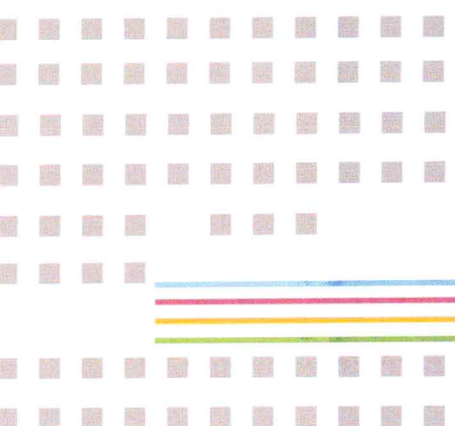
裨益。

最后，对一直给予本研究以支持的朱国桢先生、江自生先生、杨勇先生表达崇高的敬意；对徐建中院士给予的工作指导及教诲表示衷心感谢；对太阳能热发电技术应用方面的合作伙伴李和平先生、对策划本书的应静良先生、对担任本书校对和编辑等工作的各位表示深深的谢意。

作者

2012年6月6日





# 目 录

## 序 前言

<b>第 1 章</b>	<b>太阳能利用相关天文条件</b> .....	1
1.1	地球的坐标体系 .....	1
1.2	地球的自转与公转 .....	2
1.3	地球的运行规律 .....	4
1.4	太阳到地球的距离 .....	6
1.5	太阳赤纬角 .....	7
1.6	太阳高度角和方位角 .....	9
1.7	日出、日没时角 .....	10
1.8	太阳时和时差 .....	10
<b>第 2 章</b>	<b>太阳辐射条件</b> .....	12
2.1	太阳常数 .....	12
2.2	太阳辐射光谱 .....	13
2.3	地球大气层外的太阳辐射 .....	16
2.4	大气对太阳辐射的衰减作用 .....	19
2.5	地球表面的太阳辐射 .....	26
2.6	一天的太阳辐射分布 .....	28
<b>第 3 章</b>	<b>太阳能资源条件</b> .....	34
3.1	世界太阳能资源概貌 .....	34
3.2	欧洲南部太阳能资源分布 .....	34
3.3	非洲太阳能资源分布 .....	37
3.4	中东地区太阳能资源分布 .....	38
3.5	美国太阳能资源分布 .....	39
3.6	澳大利亚太阳能资源分布 .....	41
3.7	印度太阳能资源分布 .....	42



3.8	巴西太阳能辐射资源分布 .....	42
3.9	中国的太阳能辐射资源分布 .....	44
<b>第4章</b>	<b>太阳能辐射测量设备 .....</b>	<b>50</b>
4.1	总辐射表 .....	50
4.2	散射辐射表 .....	52
4.3	直射辐射表 .....	52
4.4	反射辐射表 .....	53
4.5	净全辐射表 .....	54
4.6	太阳日照仪 .....	54
4.7	太阳辐射设备的安装 .....	56
<b>第5章</b>	<b>点聚焦太阳能热发电系统（碟式） .....</b>	<b>60</b>
5.1	太阳能抛物面碟式斯特林热发电 .....	60
5.2	碟式抛物面太阳能聚光镜 .....	61
5.3	碟式太阳能集热器 .....	62
5.4	碟式斯特林发动机单元 .....	64
5.5	碟式镜面的跟踪和控制 .....	68
5.6	西班牙 PS10 电站中的碟式系统运行分析 .....	69
5.7	EURODISH 碟式系统的运行分析 .....	71
5.8	美国 Maricopa 太阳能碟式斯特林发电系统 .....	75
5.9	碟式太阳能直接蒸汽发电系统 .....	76
<b>第6章</b>	<b>线聚焦太阳能热发电系统（槽式） .....</b>	<b>78</b>
6.1	太阳能抛物面槽式热发电 .....	78
6.2	抛物面槽式聚光系统的温度分布及效率 .....	79
6.3	不同形式的抛物面槽式太阳能热发电 .....	81
6.4	蒸汽为介质的无蓄热发电 .....	81
6.5	太阳能槽式和燃气机组联合发电（ISCC） .....	83
6.6	导热油为介质的无蓄热发电 .....	86
6.7	导热油为介质的蓄热发电 .....	91
6.8	熔融盐为介质的蓄热发电（三介质） .....	92
6.9	熔融盐为介质的蓄热发电（两介质） .....	95
6.10	菲涅耳式太阳能热发电系统 .....	97
6.11	不同类型槽式热发电的技术特点 .....	99
<b>第7章</b>	<b>面聚焦太阳能热发电系统（塔式） .....</b>	<b>101</b>
7.1	太阳能塔式热发电 .....	101
7.2	以水为介质的太阳能塔式热发电 .....	103

7.3	以熔融盐为介质的太阳能塔式热发电 .....	107
7.4	以空气为介质的太阳能塔式热发电 .....	110
7.5	不同类型塔式热发电的技术特点 .....	112
7.6	太阳能热发电形式的分类 .....	112
<b>第8章</b>	<b>太阳能热发电负荷输出特性 .....</b>	<b>114</b>
8.1	不同发电输出特性对电网的影响 .....	114
8.2	储能技术对电网负荷调节的意义 .....	116
8.3	太阳能常规发电负荷输出特性 .....	118
8.4	太阳能储热发电负荷输出特性 .....	122
8.5	太阳能“储热蓄能”电站负荷输出特性 .....	124
8.6	太阳能热发电站机组容量的确定 .....	125
8.7	不同纬度地区的太阳余弦效率 .....	126
8.8	太阳能热发电负荷输出的局限性 .....	129
<b>第9章</b>	<b>常用储能技术特点 .....</b>	<b>131</b>
9.1	物理方法储能及特点 .....	131
9.2	化学方法储能及特点 .....	133
9.3	电磁方法储能及特点 .....	135
9.4	热力方法储能及特点 .....	136
9.5	储能技术性能比较 .....	147
<b>第10章</b>	<b>太阳能热发电设备 .....</b>	<b>149</b>
10.1	真空集热管 .....	149
10.2	平面及抛物面玻璃镜 .....	154
10.3	塔式吸热器 .....	160
10.4	镜场支架及传动结构 .....	163
10.5	熔盐箱及熔融盐换热器 .....	166
10.6	斯特林发动机 .....	169
10.7	高温熔融盐泵 .....	173
10.8	太阳能热发电汽轮机设备 .....	176
附录1	天文学常用数据 .....	181
附录2	日出、日没表 .....	183
附录3	太阳赤纬(度)表 .....	187
附录4	中国十年气象辐射均值数据表(1998~2008) .....	189
附录5	Dowtherm A 导热油液态特性表 .....	192
附录6	Dowtherm A 导热油气态特性表 .....	193
附录7	Dowtherm A 导热油压力-焓特性曲线 .....	195
附录8	全球运行的太阳能热发电站一览表 .....	196
参考文献	.....	198

## 第 1 章



# 太阳能利用相关天文条件

在考虑利用和开发太阳能之前，首先要了解太阳的升起和降落，考虑太阳和我们的相对关系，以及影响它的辐射能力的环境条件。

## 1.1 地球的坐标体系

地球无时无刻都在运动，除了绕地轴自转外，同时又围绕太阳公转，太阳在天空中相对地球上任一点的位置随时间都在变化，因此太阳对该点的辐射强度也在变化。为了掌握太阳和地球的相对运动关系，需要确立包括地球和太阳在内的坐标体系，确立原点，以便研究太阳相对地球任意点随时间的运动关系，从而掌握地球任意点在任何时刻的太阳辐射规律，这是太阳能利用需要做的初步工作。

在天文学中，针对所观察的天体，需要建立不同的坐标系。一般来讲，以哪一种天体作为参考点，研究其他天体，就建立哪一种坐标体系。譬如以太阳作为出发点，观察太阳系内行星的运行规律，就把太阳中心作为天体球心，取黄道为基本圈，北黄极为基本点，出发点取春分点，沿黄道按逆时针方向度量，即为黄道坐标系；如果观察银河系内的恒星和星团运行规律，则把银河中心作为天球中心，银道为基本圈，通过以赤道坐标的换算得到基本点和出发点，即为银道坐标系；而如果以地球作为参考点，观察恒星、星云、星团等星体的运行规律，就以地球中心作为天球中心，天赤道为基本圈，北天极为基本点，以天赤道与子午圈（正南方向）的交点为原点，即为时角坐标系（又称为第一赤道坐标系）；如果将时角坐标系定义中的天赤道与子午圈（正南方向）的交点改为以春分点为原点，即为赤道坐标系（又称为第二赤道坐标系）。

如果参考平面是观察者所在的地平面，观察对象是围绕地球运转的太阳、月亮、人造卫星，观察流星、彗星等星体，则取地平圈为基本圈，天顶为基本点，以南点（通过天顶和天北极的地平经圈与地平圈交于两点，靠近天南极的那个点为南点）为原点，即为地平坐标系。不同的坐标体系，互相之间具有相对关系，通过计算公式可以互相转换，只是繁简问题，对于研究太阳相对地球任意一点的位置关系，采用地平坐标系是最简单的。地平坐标系的示意图 1.1。

在地平坐标系中，研究的目标主要是太阳，因为天文学中确定了从地球到太阳的距离为一个天文单位，所以两个角度就能确定太阳位置。第一个角为“太阳高度角”，以  $\alpha_s$  表示，以地平圈为基准，天顶方向为正，到达天顶时为  $90^\circ$ ，水平以下为负。第二个角度为“方位角”，以  $\gamma_s$  表示，以正南方向为起点，向西（顺时针方向）为正，向东（逆时针



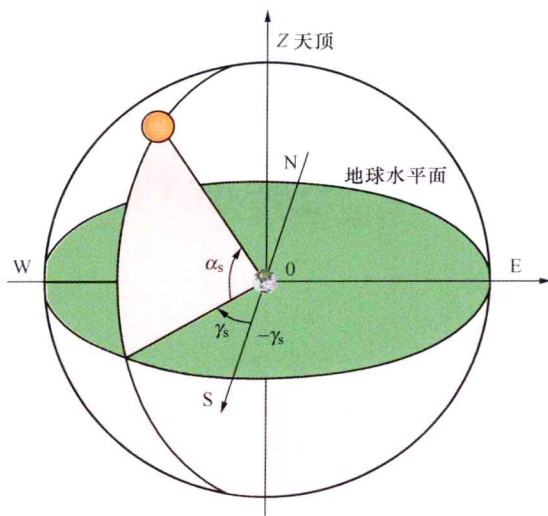


图 1.1 地平坐标系

方向) 为负。

## 1.2 地球的自转与公转

人们很早开始就在研究地球的形状和大小，公元前 5 世纪，古希腊人就从哲学概念出发，认为地球是球形的。16 世纪葡萄牙人麦哲伦的环球航行第一次用实践证明地球为球形。公元前 3 世纪的希腊人埃拉托斯特尼，用三角测量法测出地球的周长约为 39 600km，这一数据与实际长度误差仅 0.85%。17 世纪牛顿研究地球自转和地球形态关系，推测地球是一个赤道处略为隆起，两极略为扁平的椭球体，半径差约 20km。

20 世纪 50 年代后，科学技术迅速发展，大地测量中，高精度的微波、激光测距，人造卫星测量，电子计算机的运用，使人们可以精确地测出了地球的形状和大小。通过实测和分析，得到地球的平均赤道半径为 6378.14km，极半径为 6356.76km，赤道周长和子午线方向的周长分别为 40 075km 和 39 941km。地球表面积为  $5.11 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，地球的赤纬角为  $23^\circ 26' 21.27''$  ( $23.4369^\circ$ )。测量还发现，北半球低纬度区地面半径比平均半径略小，高纬度区比平均半径大，北极地区比平均半径高出 18.9m。南半球地面半径比平均半径略大，而南极地区则比平均半径低约 30m<sup>[1]</sup>。地球形状像一个鸭梨，见图 1.2。

地球每天绕着自身南、北极的“地轴”自西向东自转，每转一周为  $360^\circ$ ，一昼夜分为 24h，所以地球每小时自转  $15^\circ$ 。除了自转外，地球还绕太阳沿着椭圆形轨道运行，称为“公转”。

由于地球围绕太阳公转的平面和其自转的平面不在一个平面内，它们的垂线形成的夹角称为赤纬角，地球在自转和公转的时候，地球处于运行轨道的不同位置点，赤纬角始终在变化，因此阳光投射到地球上的方向也就不同，形成地球四季的变化，见图 1.3。这也表示在地球绕太阳运行的四个典型季节里，地球在不同区域受到不同的太阳照射。

每年的春分日（3 月 21 日，闰年时为 3 月 20 日），此时太阳赤纬角为  $0^\circ$ ，太阳水平直射到赤道上，地球北半球的春季开始，南半球处于秋季，在地球自转一周过程中，太



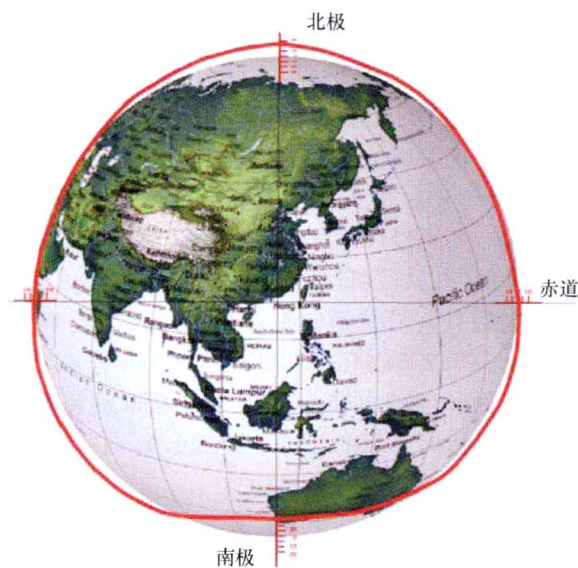


图 1.2 地球实际形状

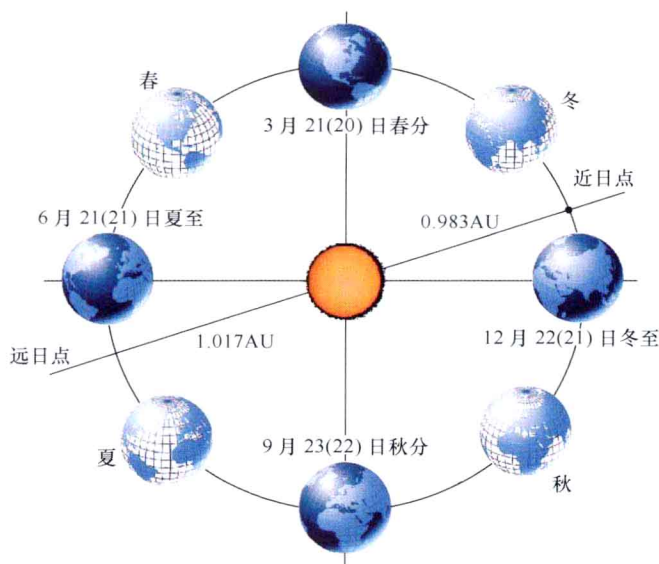


图 1.3 地球绕太阳运行规律 (括号内为闰年)

阳出于正东而没于正西，白昼和黑夜等长。太阳在正午的高度角，北半球等于  $90^\circ - \phi$  ( $\phi$  为地球上任一点的地理纬度)，南半球等于  $90^\circ + \phi$ 。春分点过后，在北半球太阳的升落点逐日移向北方，北半球白昼延长，黑夜缩短，正午时太阳高度逐渐增加，南半球白昼缩短，黑夜延长，正午时太阳高度逐渐减小。到夏至日时 (6月21日)，北半球太阳正午高度等于  $90^\circ - \phi + 23.44^\circ$  (精确值为  $23.43695^\circ$ )，太阳高度达到最大，北半球白昼最长，夏季开始；南半球，白昼最短，冬季开始。夏至过后，北半球太阳正午高度逐日降低，白昼逐日缩短，南半球太阳正午高度逐日增加，白昼逐日延长，太阳的升落又趋向正东和正西。

秋分日（9月23日，闰年时为9月22日），太阳从北半球移动到赤道，此时太阳赤纬角为 $0^\circ$ ，太阳水平直射到赤道上，地球北半球的秋季开始，南半球处于春季，在地球自转一周过程中，太阳出于正东而没于正西，白昼和黑夜等长。秋分点过后，在北半球太阳的升落点逐日移向南方，北半球白昼缩短，黑夜延长，正午时太阳高度逐渐下降，南半球白昼延长，黑夜缩短，正午时太阳高度逐渐增加。到冬至日（12月22日），北半球太阳正午高度等于 $90^\circ - \phi - 23.44^\circ$ 太阳高度达到最低，北半球白昼最短，冬季开始；南半球，白昼最长，夏季开始。冬至过后，北半球太阳正午高度逐日增加，白昼逐日延长，南半球太阳正午高度逐日降低，白昼逐日缩短，太阳又从赤道以南移向赤道。

假定太阳自春分点为起始日，沿黄道向东运行一周又回到春分点的时间间隔称做一个回归年，一个回归年等于365.2564日，即365天5时48分46.08s，周期为一年。地球的公转面称为黄道面，黄道面和地球自转赤道面的夹角即为太阳赤纬角。地球公转时其自转轴的方向始终不变，总是指向天球的北极，见图1.4。

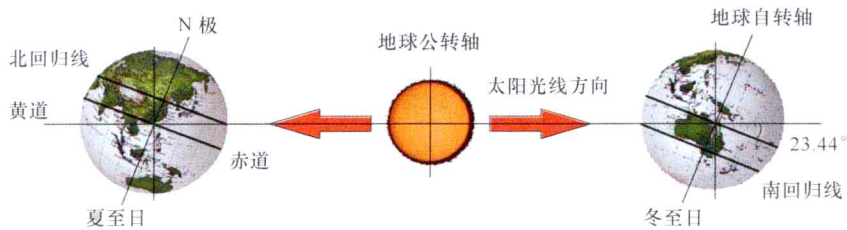


图 1.4 夏至与冬至日时地球与太阳相对关系

### 1.3 地球的运行规律

地球在一年里自西向东围绕太阳公转一周，地球上的观测者看到太阳在天球上自东向西沿着黄道运转一周，黄道是地球公转轨道在天球上的投影。但是由于地球在公转椭圆轨道的一个焦点上，因此地球的公转是不均匀的，太阳周年视运动也是不均匀的，每年的1月初，地球过近日点时公转速度最快，这一天太阳周年视运动速度最大，地球东移 $1^\circ 1' 11''$ ；地球过远日点是每年的7月初，地球过近日点时公转速度最慢，这一天太阳周年视运动速度最小，地球东移 $57' 11''$ 。所以从春分经夏至到秋分点的时间间隔为186天，而从秋分经冬至到春分点的时间间隔为179天，两者相差7天之久。

时间是人的生产和生活中必要的物理量之一，时间计量包括两方面内容，“时刻”和“时间间隔”。“时刻”是指某一事件发生的瞬间，表示时间的早晚，“时间间隔”指两个事件之间所需的时间的长短，因此，“时刻”的确定需要找到时间原点，“时间间隔”的确定需要选择一种具有周期性并均匀稳定的物质运动作为时间的衡量依据。

最初人们认为地球的自转相当均匀，周期稳定，能够满足计量时间的要求，地球自转一圈成为了时间的基本单位一日。随着观察的深入，发现地球由于受到不同天体的引力，自转速度变化不均匀，自转周期还经常减慢，每100年大约增加0.001s，因此就采用地球的公转运动作为计时单位。1958年国际天文学联合会第八届会议决定自1960年开始采用历书时。历书时是以地球公转为基础的计时系统，规定公元1900年整回归年的长

度为 31 556 925.97s，其倒数作为历书时的时间单位，称为历书时秒，起点从公元 1900 年 1 月 1 日 0 时开始，这就确定了标准时间的开始点。

由于历书时精确度低，不能满足 20 世纪科学发展的需要，因此从 1967 年开始国际上启用了原子时，起算点从 1958 年 1 月 1 日 0 时开始。因为原子中的电子在不同能级之间的跃迁产生的电磁频率稳定，不受外界影响且容易测定，所以国际上定义铯-133 原子基态的两个精细能级之间跃迁辐射 9 192 631 770 周所持续的时间，作为 1s 的长度。原子时和世界时非常接近，每年世界时与原子时相差不到 1s，一般通过“闰秒”的方法调整进行同步。

时间还需要有一个出发点，天体的时角是从子午圈量起的，地点的不同观测者拥有不同的子午圈。为了避免各地采用不同地方时所带来的不便，1884 年华盛顿国际子午线会议决定，采用区时系统作为国际统一计时系统，规定英国格林尼治天文台子午线作为时间和经度计量的零点，称为本初子午线。以  $15^\circ$  作为标准经线的区隔，在其东、西各  $7.5^\circ$  经度范围内属于同一时区。时区内以标准经线的地方平太阳时作为全时区内的统一时间，称为区时，也称为标准时。格林尼治的区时称为世界时，我国采用东八区时作为全国统一时间，称为北京时间，该时位于东经  $120^\circ$  标准经线的地方平太阳时。

经过上述的定义，这就产生了两个时间，一个是真实的太阳时，在受到黄赤交角影响和地球运动的椭圆轨道影响而产生运动的快慢变化，这个具有运动速度不均匀特点的太阳时间称为真太阳时，也称为视太阳时；而另一个按照原子时确定的匀速运动的太阳时称为平太阳时。平太阳时等于平太阳在天球上由东向西连续两次通过同一子午圈所需要的时间，详见图 1.5。

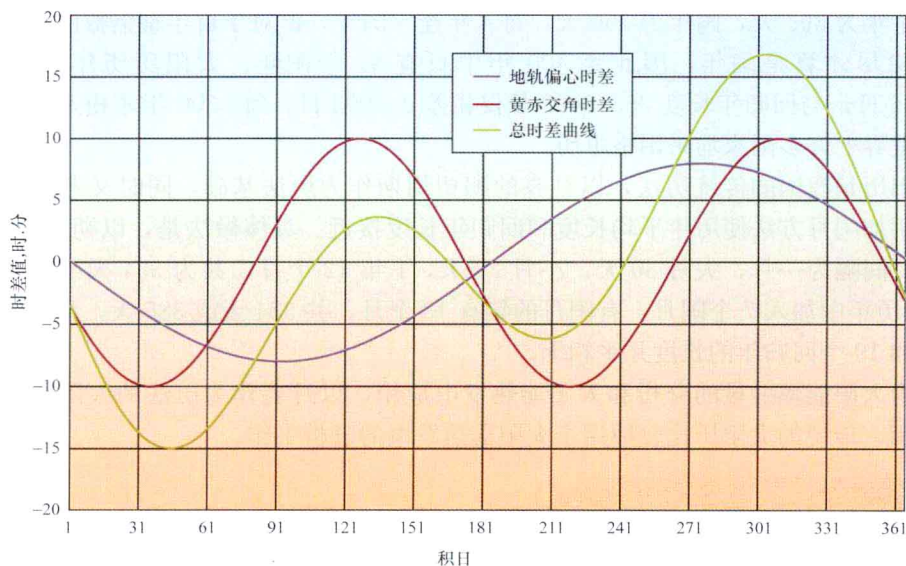


图 1.5 时差曲线图

真太阳时的运动规律是由地球自转和公转共同作用的结果，太阳沿黄道运动，而太阳的时角是沿天赤道计量，在春分和秋分点附近，太阳经过的黄道弧段比决定太阳时角变化的天赤道弧段要长；在夏至和冬至点附近，太阳经过的黄道弧段比决定太阳时角变化的天赤道弧段要短。这就造成太阳日的长短是变化的，最长日（12 月 23 日）和最短日（9 月 16 日）相差可达 51s。因此，真太阳时不是一个完善的计时系统。



平太阳时是匀速周日视运动所确定的计时系统，假想地球在圆形轨道上以匀速运行，平太阳连续两次上中天的时间间隔叫平太阳日，把一个平太阳日分为 86 400 平太阳秒，平太阳时的任意时间段内的运动速度和行程都是均匀一致的，人们日常生活中的时间概念就是平太阳时。真太阳时和平太阳时之间的误差值可通过计算公式或图表表示。

依据地球自转的计量时间系统有恒星时、真太阳时、平太阳时；依据地球公转的计时系统有历书时；依据原子振荡的计时系统有原子时、力学时；还有混合类型的协调世界时。它们的区别在于以不同的运动为依据，或是选取的单位和时间起点不同。

推算时间的长度和制定时间序列法则的办法就是历法。人们以昼夜的变化、寒暑的周期往复和月亮盈亏周期作为计量时间间隔的标志。但是，四季更迭的回归年周期为 365.2422 日，月亮盈亏周期是 29.5306 日，都不是日的整倍数。因此制定历法的原则，就是把历年和历月的平均长度和回归年、朔望月的长度尽可能接近，以使历书与太阳、月亮在天球上的视位置基本一致，以免出现寒暑颠倒，与自然界周期发生矛盾的情况。从基本原理上看，中外历法可以归纳为三种类型，太阴历、太阳历和阴阳历。

太阴历以月球圆缺的周期朔望月为基本周期，与地球公转运动无关。历月平均长度为 29.5 天，规定单数月 30 天，双数月 29 天，12 个历月为 1 年，共 354 天。为保证每年年初和每月月初出现新月，又规定 30 年内增加 11 个闰日，有闰日的年称闰年。闰年长 355 天。太阴历的历年比回归年大约短 11 天，不足是隔一段时间冬夏的月份就会出现倒置现象。目前，太阴历仅在伊斯兰教国家和地区使用。

太阳历（又叫格里历）以四季循环周期回归年为基本周期，是我们现在使用的历法。太阳历平年为 365 天，闰年为 366 天，每 4 年逢一闰年，但对于百年整倍数的年份，只有被 400 除尽才算是闰年，因此每 400 年中只有 97 个闰年。太阳历历年平均长度为 365.2425 日，与回归年长度 365.2422 日仅相差 0.0003 日，每 3300 年才相差 1 日。目前我国和世界上许多国家均采用格里历。

阴阳历是我国的传统历法，以月亮的朔望周期作为历法基础，同时又考虑回归年周期，采用加闰月方法使历年平均长度和回归年长度接近。具体做法是，以朔日作为初一，两个朔日间隔为一月，大月 30 天，小月 29 天，1 年 12 个月，共为 354 天或 355 天。并在 19 个历年中加入 7 个闰月，有闰月的年有 13 个月，共 384 天或 385 天，称做闰年。19 个历年和 19 个回归年的长度几乎相等。

作为太阳能辐射量的分析和太阳能热发电应用，以月亮作为历法的太阴历和阴阳历均不适用，传统的太阳历比较适用于太阳能热发电的分析工作。

## 1.4 太阳到地球的距离

地球绕着以太阳为一个焦点的椭圆轨道运转。由于达到大气上端的太阳辐照度和太阳与地球间的距离的平方成反比，因此太阳和地球间的距离对于太阳辐射来说非常重要，如图 1.6 所示。

通常说日地距离是指太阳与地球的平均距离，指忽略质量的无摄动行星沿开普勒轨道绕太阳公转，当其公转周期为 365.256 893 263 平太阳日，其椭圆轨道的长半径，定义为 1 个天文单位（AU），在 1976 年国际天文联合会中确定了该数。

$$r_0 = 1 \text{ (AU)} = 1.495\,978\,75 \times 10^{11} \text{ (m)} \quad (1.1)$$



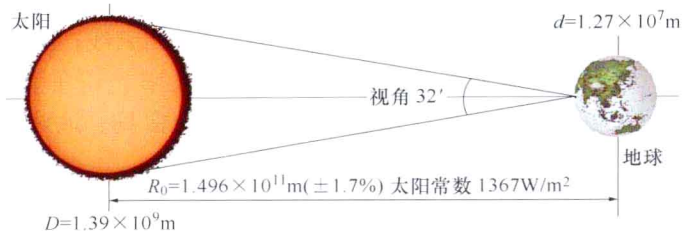


图 1.6 太阳到地球的距离

式中  $r_0$  指太阳到地球的距离，定义为 1 个天文单位 (AU)。

由于日地之间运行轨道为椭圆，太阳和地球之间近距离点约为 0.983 个天文单位，称为近日点，时间大约为 1 月初的一天；太阳和地球之间远距离点约为 1.017 个天文单位，称为远日点，大约为 7 月初的一天。而每年太阳和地球达到平均距离的时间点，大约为 4 月 4 日和 10 月 5 日两天。

如果想要得到更精确的计算结果，可以利用天文年鉴中的数值，计算得到更为准确的太阳和地球间距离。

利用下式公式<sup>[2]</sup>，可以求得误差在 0.01% 以内的任意一天的距离修正系数，即

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$$

$$= 1.000\ 11 + 0.034\ 221\cos\Gamma + 0.0128\sin\Gamma + 0.000\ 719\cos(2\Gamma) + 0.000\ 077\sin(2\Gamma)$$
(1.2)

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (\text{弧度})$$
(1.3)

式中  $E_0$ ——距离修正系数，指 1 个标准 AU 和 1 个实际日地距离的比值；

$r$ ——太阳到地球的实际距离，km；

$\Gamma$ ——椭圆轨道上地球位置的角度，弧度；

$n$ ——一年中从 1 月 1 日到 12 月 31 日每天对应的序列号，12 月 31 日对应的是 365，其中，2 月按 28 天计算（即使是闰年误差值也非常小）。

更简单的表示方式见式 (1.4)，其误差值小于 0.1%，即

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right)$$
(1.4)

按上述方法，太阳与地球间的 1 个标准 AU 的辐射强度除以根号距离的修正系数，就可以求出太阳在大气层上端的辐射强度。

另一个太阳到地球的距离的计算公式为

$$r = 1.495\ 978\ 75 \times 10^8 \times \left\{ 1 + 0.017\sin\left[\frac{2\pi(n-93)}{365}\right] \right\} \quad (\text{km})$$
(1.5)

式中  $n$ ——一年中的第  $n$  天，起始点为 1 月 1 日。

## 1.5 太阳赤纬角

地球围绕太阳公转的平面称为黄道面，地球自转的平面称为赤道面，两者之间形成的夹角称为赤纬角，用  $\delta$  表示。详细见图 1.7 地球的太阳赤纬角与白天日照时数。赤纬角