

太阳能—热能转换过程

〔美〕J. A. 达菲 W. A. 贝克曼 著

葛新石 龚 堡 陆维德 译

科 学 出 版 社

1 9 8 4

内 容 简 介

本书系统而全面地论述了太阳热利用过程的基本原理，并介绍了在工程实践中的主要应用。全书共分十五章：前三章叙述太阳辐射；第四到第六章阐明一些基本传热问题；第七、八章分析平板型和聚焦型两种集热器；第九、十章分别介绍贮能和热过程模型；第十一到十四章说明太阳热水、采暖和空调方面的应用；第十五章简单介绍其他太阳热利用。书中各章均列出了例题，书末还附有习题。

本书可供太阳能利用、热能动力、建筑等科技部门的科研、工程技术人员参考，亦可供高等院校有关专业的师生参考。

J. A. Duffie, W. A. Beckman

SOLAR ENERGY THERMAL PROCESSES

John Wiley & Sons, 1974

太阳能-热能转换过程

[美] J. A. 达菲 W. A. 贝克曼 著

葛新石 龚 堡 陆维德 译

责任编辑：范铁夫

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

1980年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1984年10月第二次印刷 印张：11 7/8

印数：5,951—10,450 字数：265,000

统一书号：15031·286

本社书号：1777·15—10

定价：1.80 元

译 者 的 话

太阳能是一种巨大的、无污染的能源。照射到地球表面上的太阳辐射能，能量主要集中在其波长为 $0.3 \sim 2.5$ 微米范围内，包括紫外、可见和近红外三部分。对于这种能量的利用，可以有各种不同的途径：通过直接转换为热能的利用；通过光电效应直接转换为电能的利用；先转换为热能，再通过热机转换为电能或通过热化学反应贮能后的利用；通过光化学作用直接转换为电能或制成氢后的利用；通过光合作用，生长植物后的利用等等。因此，太阳能利用是一门综合性的技术学科。

本书主要阐明太阳能直接转换为热能过程的基本原理，着重论述热过程的物理概念、热性能分析及工程计算方法。这对于我国从事有关太阳能利用工作的人员有一定的参考价值。

中译本是根据原书第一版第三次印刷本翻译的。翻译时还参考了 1976 年出版的德译本。

本书序言及第一至第五章由陆维德译出，第六至第十章由龚堡译出，第十一至第十五章及附录由葛新石译出。译稿互相进行了校阅。

鉴于译者水平有限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

译 者

1978 年 11 月

序

由于常规能源的价格不断上涨，以及从环境观点认为可以接受的那些燃料的进口和开采均存在着问题，因而自 1970 年以来对太阳能又重新发生兴趣。由于太阳能的不连续性和分散性以及利用装置的投资昂贵（成本高），使太阳能过程的工程设计和分析至今还有许多问题尚待解决。本书的目的是总结与这些问题有关的知识，在某种意义上有助于工程师们了解和设计太阳能利用过程。

虽然可把太阳能看作一种新的或者非常规的能源，但它已应用于（而且历史上早已使用）几个方面。用太阳能蒸发海水来制取食盐和用太阳能干燥农产品，均已实践了许多世纪。在澳大利亚、以色列和日本部分地区，用太阳能加热水是提供家庭用热水的普通方法。在这些国家中，已建立起一些虽小但能自立的制造、销售与安装太阳热水设备的工业。

在本书中我们只讨论太阳热过程。在这个过程中，太阳辐射被表面吸收并转变为热。然后将这部分热量贮存起来或直接用于加热水，建筑物的采暖和吸收式制冷那样的能量转换设备的工作，以及其他一些用途。我们不讨论光电、光化或光合过程，而将重点放在利用太阳能满足建筑物的热量需要问题上。至于太阳热过程的其他技术，其中包括以热的方式将太阳能转化为机械能，与这里提到的采暖与制冷技术基本上大同小异。但所论述的对系统部件和整个系统的分析的基本方法亦适用于其他过程。对太阳池、太阳发电及太阳蒸馏，我们只简单地提了一下，并列出了参考资料，通过这些资料可以

找到有关这些方面的文献。

本书的内容是以作者在威斯康星大学太阳能实验室历时二十年的研究工作为基础的。它是我们正在从事的现代太阳能研究所采用的方法的直接成果。这些方法是，模型的提出及模拟技术，通过这些技术可以加深人们对太阳热过程及其设计与计算问题的理解。因此，我们所给出的材料易于用计算机模拟(虽然其中大部分也可用作手算)；可以相信在将来，由于计算机被普遍利用，将有可能用它作为设计太阳能利用过程的一种主要方法。

本书的内容分四个部分。

第一部分，第一至第三章。概述了太阳辐射、它的起源、性质以及可利用性。给出了太阳辐射的数据，并将它们加工成为对太阳热过程计算的有用的形式，以作为太阳过程设计计算的基础。

第二部分，第四至第六章，叙述了太阳能利用方面的一些重要的传热问题。特别是对辐射换热和材料性质进行了详细的论述。

第三部分，第七至第十章。论述了太阳能的利用过程及系统的模型。详细地分析了平板型集热器，因为它们是太阳能利用过程中最感兴趣的基本部件。其后，论述了聚焦型集热器和能量贮存，以建立它们的基本原理及描述其热性能的基本方程。第十章讨论了系统的模型与模拟，即求解部件方程组的方法。

第四部分，第十一至第十四章。从分析、实验和应用三方面着手，讨论了一系列的应用问题。第十一章是讲太阳热水，第十二章讲采暖，第十三章讲空调。在每一章中都在前一章研究的装置系统的基础上加进了新的部件和新的负荷。第十四章讲太阳能采暖和空调的其他可能用到的方法。这些方法

与前三章讲的方法有所不同；通过这一章试图开阅读者考虑太阳能采暖和空调过程的视野。

计量单位是个重要问题。在太阳能的文献中出现各种单位，读者在阅读这些文献时不得不对它们作出必要的处理。对此，我们采取了以下的办法：对一般性的资料和著作，通常采用原作者所用的单位。然而，若该材料是作为工程计算的数据来源，就将它换算到国际单位制（SI 单位）。我们自己的著作用的是 SI 单位，并推荐使用者也用这些单位（时间用小时为单位，而不用秒）。功率和传热率*，用的是千瓦或千焦耳/小时。读者在文献中会遇到这两种单位制，使用时要留意，以免把两者混淆起来。

在本书的一些章节中，我们编选了若干例题用以说明计算方法及预期的结果。习题放在附录一中。

在编写本书过程中，我们收集了大量原始资料。这些资料皆列为各章后面的参考文献。这些参考文献是不完全的，它不包括有关这些内容所发表的全部文献，但有助于读者更详细地获得有关课题的原始材料。这篇序言的后面附有太阳能利用的一般参考书目，如会议录和专题论文集，其中也包括国际太阳能学会出版的“太阳能”杂志(*Journal of Solar Energy*)，它是该领域中有用资料的主要来源。

本书是根据许多原始资料写成的，但我们较多地采用了几个单位的新成果，在此有必要特别提一下。它们是：麻省理工学院（MIT）太阳能规划以及 H. C. Hottel 和他的同事们的工作，A. Whillier 发表的著作（自 MIT，后来又自麦吉尔大学），G. O. G. Löf 在采暖和经济方面的工作，澳大利亚联邦科学和工业研究组织（CSIRO），机械工程部的许多文章以

* 原文为传热系数，传热系数的单位应是千瓦/米²℃。——译者注

及 R. C. Jordan 和他的同事在明尼苏达大学发表的文章。

我们还感谢 P. I. Cooper, D. J. Close, K. G. T. Hollands, G. O. G. Löf 和 S. L. Sargent 对手稿的有益的指正。

John A. Duffie William A. Beckman

于威斯康星州麦迪逊 1974 年 6 月

太阳能方面的著作

Space Heating with Solar Energy, R. W. Hamilton, Ed., Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 1954.

Solar Energy Research, F. Daniels and J. A. Duffie, Eds., Madison. University of Wisconsin Press, 1955.

Wind and Solar Energy, Proceedings of the New Delhi Symposium, United Nations Education, Scientific, and Cultural Organization; 19 ave Kleber, Paris-16^e, France (1956). Printed by Imprimerie Chaix, 20 rue Bergere, Paris-9^e, France.

Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix, Ariz., Stanford Research Inst., Menlo Park, Calif. (1956).

New Sources of Energy and Economic Development, United Nations, Department of Economics and Social Affairs, New York (1957), (Sales #1957. II. B. 1).

Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy. The Scientific Basis, Tucson, University of Arizona Press (1958).

Applications Thermiques de L'Energie Solaire Dans le Domaine de la Recherche et de L'Industrie, Proc. of Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, Montlouis, June 23 to 28, 1958. Printed by Centre National de la Recherche Scientifique, 15 Quai Anatole-France, Paris (VII^e) (1961).

Introduction to the Utilization of Solar Energy, A. M. Zarem and D. D. Erway (Eds.), University of California Engr. and Sciences, Ext. Series, McGraw-Hill, 1963.

Proceedings of the UN Conference on New Sources of Energy, (1961, Rome), New York (1964). Volumes 4, 5 and 6. (UN sales numbers 63. I. 38, 63. I. 39 and 63. I. 40.)

- Direct Use of the Sun's Energy*, F. Daniels. New Haven. Conn. Yale University Press (1964).
- World Distribution of Solar Radiation, G. O. G. Löf, J. A. Duffie, and C. O. Smith. Report #21 published by the Engineering Experiment Station, Madison, University of Wisconsin, 1966.
- Low Temperature Engineering Application of Solar Energy*, R. C. Jordan, Ed. Published by the American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, New York 1967.
- Solar Energy in Developing Countries: Perspective and Prospects. A report of an ad hoc advisory panel to the National Academy of Science, Washington (March 1972).
- Solar Energy as a National Energy Resource, NSF/NASA Solar Energy Panel Report, (1972), available from National Technical Information Service, 5285 Port Royal Rd., Springfield, Va. 22151, Report #PB221659.
- Solar Energy for Man*, B. J. Brinkworth, Compton, Chamberlayne, Salisbury, England, The Compton Press Ltd., 1972.

太 阳 能 杂 志

- Solar Energy: The Journal of Solar Energy Science and Technology, published by the International Solar Energy Society. (U. S. address: International Solar Energy Society, c/o Smithsonian Radiation Biology Lab., 12441 Parklawn Dr., Rockville, Maryland 20852.)
- Cooperation Mediterraneenne pour L'Energie Solaire, Bulletin, published by COMPLES, 32 Cours Pierre-Puget, 13006 Marseilles, France.
- Heliotechnology (Gelioteekhnika), a Russian language journal published in English translation by Allerton Press New York.

目 录

第一章 地球外的太阳辐射	1
§ 1.1 太阳	1
§ 1.2 太阳常数	3
§ 1.3 地球外太阳辐射的光谱分布	5
第二章 地球表面上的太阳辐射	8
§ 2.1 定义	8
§ 2.2 地球外太阳辐射的变化	9
§ 2.3 直射辐射的衰减	9
§ 2.4 地面上的漫射辐射	14
§ 2.5 直射辐射的方向	14
§ 2.6 漫射辐射的方向	18
§ 2.7 太阳时和时差	18
第三章 太阳辐射: 测量、数据和估算	21
§ 3.1 定义	21
§ 3.2 太阳辐射的测量和仪表	23
§ 3.3 太阳辐射数据	29
§ 3.4 平均太阳辐射的估算	38
§ 3.5 从日辐射数据推算小时辐射量	45
§ 3.6 斜面上和水平面上的直射辐射的比值	49
§ 3.7 斜面上和水平面上的总辐射的比值	53
§ 3.8 接收表面的方位及运动的影响	55
第四章 有关的传热问题	60
§ 4.1 电磁波光谱	60
§ 4.2 光子辐射	61
§ 4.3 黑体——辐射的完全吸收体和完全发射体	62

§ 4.4	普朗克定律与维恩位移定律	63
§ 4.5	斯蒂芬-波耳兹曼公式	65
§ 4.6	辐射表	65
§ 4.7	辐射强度与辐射通量	70
§ 4.8	灰表面之间的红外辐射换热	73
§ 4.9	天空辐射	74
§ 4.10	辐射换热系数	75
§ 4.11	平行平板间的自然对流	76
§ 4.12	用蜂窝结构抑制自然对流	80
§ 4.13	平行平板间的受迫对流换热	81
§ 4.14	各种换热公式	81
第五章	不透明材料的辐射特性	84
§ 5.1	吸收率与发射率	84
§ 5.2	克希荷夫定律	87
§ 5.3	表面的反射	88
§ 5.4	吸收率、发射率和反射率的关系	93
§ 5.5	表面辐射特性的测定	94
§ 5.6	选择性表面	97
§ 5.7	“黑”表面	102
§ 5.8	镜反射表面	103
第六章	通过半透明介质的辐射传递	107
§ 6.1	交界面的反射	107
§ 6.2	辐射在半透明介质中的吸收	110
§ 6.3	透过率与吸收率的乘积	112
§ 6.4	透过率的光谱关系	114
§ 6.5	表面层对透过率的影响	116
第七章	平板型集热器	118
§ 7.1	平板型集热器综述	119
§ 7.2	平板型集热器的基本能量平衡方程	120
§ 7.3	平板型集热器的一般特性	121

§ 7.4	集热器的总传热系数	123
§ 7.5	管子间的温度分布和集热器效率因子	135
§ 7.6	流动方向的温度分布	142
§ 7.7	集热器的热转移因子和流动因子	143
§ 7.8	平均板温	147
§ 7.9	有效的透过率与吸收率的乘积	149
§ 7.10	灰尘与遮影的影响	152
§ 7.11	平板型集热器中热容的影响	154
§ 7.12	其他几何形状的集热器	157
§ 7.13	集热器的短期性能	163
§ 7.14	集热器的长期性能	166
§ 7.15	平板型集热器的若干必须考虑的实际问题	169
第八章	聚焦型集热器	172
§ 8.1	太阳圆面和理论上太阳的象	174
§ 8.2	聚集器、接收器和定向系统	176
§ 8.3	聚焦型集热器系统的一般特性	181
§ 8.4	光学损失; ρ 与 $\tau\alpha$	183
§ 8.5	光学损失; γ	184
§ 8.6	聚焦型集热器的热性能	192
§ 8.7	热容的影响	196
§ 8.8	聚焦型集热器的实验性能	196
§ 8.9	为使集热器提供最大能量的最佳化计算	199
§ 8.10	特殊的几何形状	203
§ 8.11	反射器的材料与结构	203
第九章	贮能	207
§ 9.1	过程负荷和太阳集热器输出	207
§ 9.2	太阳热过程系统中的能量贮存	209
§ 9.3	水的贮存	211
§ 9.4	堆积床换热器蓄热	218
§ 9.5	相变蓄热	222

§ 9.6	蓄热介质的容量	225
§ 9.7	蓄热系统的容量	226
§ 9.8	其他贮能方法	227
§ 9.9	贮能研究提要	228
第十章	太阳热过程模型	231
§ 10.1	部件模型	232
§ 10.2	系统模型	233
第十一章	太阳热水	242
§ 11.1	热水系统	242
§ 11.2	集热器和蓄水箱	245
§ 11.3	系统的负荷和大小	247
§ 11.4	辅助能	249
§ 11.5	集热器中的流量分布	252
§ 11.6	自然循环系统的性能	254
§ 11.7	结冰温度	256
§ 11.8	两种特殊用途的设计	258
§ 11.9	一个热水系统的模拟结果	258
第十二章	太阳采暖	261
§ 12.1	太阳采暖实验概述	262
§ 12.2	太阳采暖系统	263
§ 12.3	丹佛太阳房	266
§ 12.4	MIT 4 号房	270
§ 12.5	太阳采暖的经济问题	274
§ 12.6	某些建筑上的考虑	280
§ 12.7	太阳采暖系统的模拟	283
§ 12.8	太阳供热系统的性能和费用计算	284
第十三章	太阳制冷	295
§ 13.1	太阳吸收式制冷述评	296
§ 13.2	太阳吸收式制冷机的性能	300
§ 13.3	太阳供热和空调的经济问题	302

§ 13.4 联合的太阳采暖和空调系统·····	305
§ 13.5 吸收式制冷机的模拟·····	307
§ 13.6 采暖和空调系统的模拟·····	309
§ 13.7 太阳供热和空调系统的性能和费用计算·····	310
第十四章 太阳采暖和空调的其他方法 ·····	322
§ 14.1 集热器-蓄热器墙系统 ·····	322
§ 14.2 集热器-散热器 蓄热器系统·····	324
§ 14.3 集热器-散热器-热泵系统·····	324
§ 14.4 太阳能-热泵系统 ·····	328
§ 14.5 热和光生伏打系统·····	329
§ 14.6 开式循环空调系统·····	331
第十五章 有关太阳池、太阳动力及太阳蒸馏问题 ·····	336
§ 15.1 太阳池·····	336
§ 15.2 太阳热动力·····	337
§ 15.3 太阳蒸馏·····	338
附录一 习题 ·····	340
附录二 符号表 ·····	355
附录三 国际单位制 [SI] ·····	358

第一章 地球外的太阳辐射

太阳本身的结构和特性决定了它向空间辐射能量的性质。本章主要讲述地球大气层外的太阳辐射能的特性，这是下一章的基础。在下一章里，我们将研究太阳辐射在大气中的衰减效应及地球表面可利用的太阳能的一些特点。本书主要叙述波长在 0.3 到 3.0 微米范围内的辐射，因为这部分光谱包含了太阳辐射的绝大部分能量。

§ 1.1 太 阳

太阳是一个炽热的气体球。它的直径为 1.39×10^6 公里，离地球的平均距离为 1.5×10^8 公里。从地球上看来，太阳围绕着它自身的轴每四星期转一周。不过它不象刚体那样转动，在赤道它自转一周用 27 天左右，而在两极则要花 30 天左右。

太阳表面的有效温度约为 6000K^* ，中心区域的温度各说不一，估计在 8×10^6 至 $40 \times 10^6\text{K}$ 的范围内。那里的密度约为水的 80—100 倍。实际上，太阳是一个持续的核聚变反应堆，其组成的气体，就象装在“容器”里的气体一样，只不过是借助引力来束缚住罢了。目前，认为供给太阳辐射能的聚变反应有几种类型，其中最重要的一种是氢（即 4 个质子）聚合成氦（一个氦核）；氦核的质量小于 4 个质子的质量，在反应过

* 更确切地说，太阳表面的有效温度是 5762K 。根据 Thekaekara 的文章 (1974)。

程中这个损失的质量转变为能量。该能量是在太阳内部产生的，温度可达数百万度，它必然要传到太阳的表面，然后向空间辐射出去。同时必然出现连续不断地辐射和对流过程，并伴随着连续的发射、吸收和再辐射。在太阳的核心区，所辐射的是光谱中的X射线和 γ 射线部分，随着径向距离的增大，温度逐步下降，辐射的波长也相应增长。

太阳的结构示意图如图 1.1.1 所示。粗略地估算，太阳辐

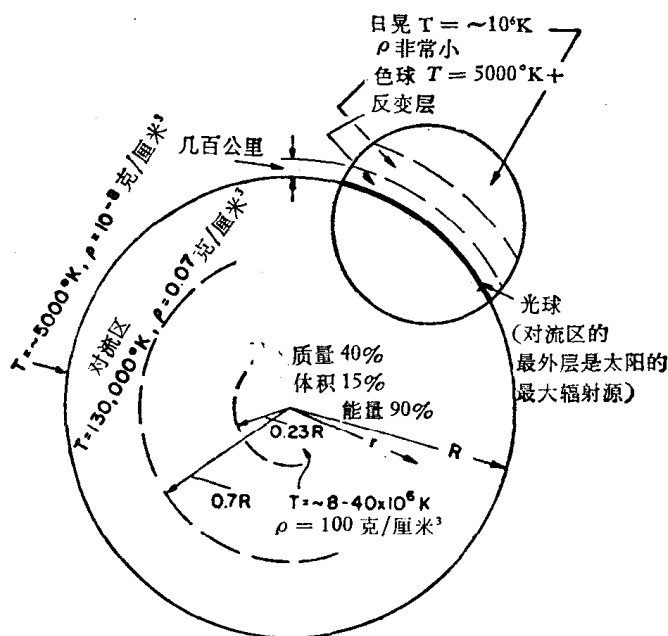


图 1.1.1 太阳结构示意图

射能的 90% 是在 0 至 $0.23R$ (R = 太阳的半径) 的区域内产生的，该部分的质量占太阳质量的 40%。在离中心 $0.7R$ 处，温度降至约 130,000 K，密度降至 0.07 克/厘米³；在这里，对流过程开始起重要作用。自 0.7 至 $1.0R$ 之间的区域称为对流区。在该区内，温度降至约 5000 K，密度降至约 10^{-8} 克/

厘米⁴。

太阳表面看来象是由许多小光球(不规则的对流小团)组成,此小光球的分布区域估计从 1000 至 3000 公里,它的寿命只有几分钟。对流区的外层称为**光球**。虽然那里的密度甚小(约为海平面处空气密度的万分之一),但光球的边界仍可以严格地划分出来。光球基本上是不透明的,因为构成光球的气体被强烈地电离,并且能够吸收和发射一个连续的辐射光谱。光球是太阳的最大辐射源。

在光球的外面存在一层程度不同的透明的太阳雾,当发生全日蚀时或用仪器将圆盘状的太阳遮盖后都可以观测到。这层进深为几百公里的较冷的气体层称为**反变层**。它的外面一层称为**色球**,厚度约 10,000 公里。这是其温度稍高于光球而密度较低的气体层。最外面一层是**日冕**,其密度十分小而温度非常高(10^6K)。

从这张太阳的简图,它的物理结构以及它的温度和密度的变化率等可以判断,事实上不能将太阳当作有固定温度的黑体辐射体。更确切地说,太阳所发射的辐射是它各层发射和吸收各种波长的辐射综合作用的结果。况且在它辐射光谱的超短波及超长波部分,其光谱强度的分布也随着时间略微有些变动。但在许多场合(例如热转换过程),把太阳当作在 6000 K 温度下的黑体辐射源是恰当的;对其他与波长有关的过程中,光谱分布显得十分重要(例如光化或光电过程),则必须作更周密的考虑。要了解关于这方面的更为深入的资料,可参阅 Thomas (1958) 和 Elson (1974) 的文章。

§ 1.2 太 阳 常 数

图 1.2.1 简略地表示了日-地间的几何关系。地球轨道的

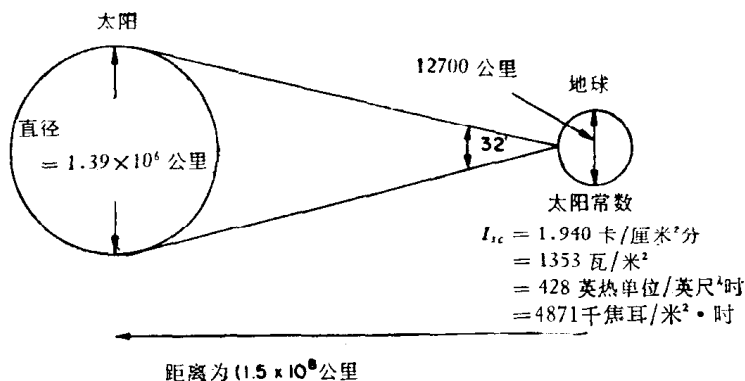


图 1.2.1 日地关系简图(不按比例),在日地平均距离时
 太阳的张角为 32'

偏心率,以日-地间距离变化来计算,不超过 $\pm 3\%$ 。当日-地间的距离等于一个天文单位距离(即为日-地间的平均距离)时,太阳的张角为 32'。太阳本身的特征以及它与地球之间的空间关系,使得地球大气层外的太阳辐射强度几乎是一个定值。**太阳常数 I_{sc}** ,是指在平均日地距离时,在地球大气层外,垂直于太阳辐射的表面上,单位面积单位时间内所接收到的太阳辐射能。

直到最近,太阳常数还是根据地面上所测得的太阳辐射来估算的。在太阳辐射通过大气层之后,其中一部分就被大气层中的成分吸收和散射。在高山上进行的地面测量的外推必须以估算太阳光谱中各部分的大气透过率为基础。C. G. Abbot 和他的同事们在 Smithsonian 学院对这方面进行了探索性研究。Johnson (1954 年)总结了前人的研究成果和后来从火箭上测得的数据; Abbot 所确定的太阳常数为 1332 瓦/米²,后来被 Johnson 修正为 1395 瓦/米²。

近年来,随着高空飞机、气球和空间飞行器等先进探空工具的使用,就有可能直接测得大部或全部地球大气层外的太