



普通高等教育“十三五”规划教材
高等学校新能源科学与工程专业教材

可再生能源导论



刘建国 主 编
王 刚 吴聪萍 副主编

Introduction To Renewable Energy

 中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

普通高等教育“十三五”规划教材
高等学校新能源科学与工程专业教材

可再生能源导论

| 刘建国 主编 |
| 王刚 吴聪萍 副主编 |

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源导论/刘建国主编. —北京: 中国轻工业出版社,
2017. 2

普通高等教育“十三五”规划教材 高等学校新能源科学与
工程专业教材

ISBN 978-7-5184-1147-4

I. ①可… II. ①刘… III. ①再生能源—高等学校—教材
IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 241626 号

责任编辑: 王 朗 江 娟

策划编辑: 王 朗 责任终审: 唐是雯 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 王超男 责任校对: 吴大鹏 责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 北京君升印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 22

字 数: 532 千字

书 号: ISBN 978-7-5184-1147-4 定价: 48.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

150856J1X101ZBW

本书编委会

主 编：

刘建国 南京大学

副主编：

王 刚 中国质量认证中心

吴聪萍 南京大学

编 委：

吕 俊 三江学院

徐 超 华北电力大学

杨 浩 大唐集团

王胜年 美国路易斯安那理工大学

叶季蕾 中国电力科学研究院

前 言

人的生存过程，就是消费能源，向自然排放危害环境物质的过程。当人类活动的范围和活动能量不足够大时，我们并不能意识到人类活动对环境的破坏，而随着世界人口的增加，城市化进程加速，蓦然回首，我们却发现自身的生存环境岌岌可危。

三度普利策奖得主托马斯·弗里德曼在其引起世界轰动效应的《世界又热又平又挤》这一著作中分析了当今世界发展的五大趋势：能源与资源的供需失衡；石油的垄断；碳排放引发的全球气候变暖；能源日益匮乏；因人口爆炸性增长、无节制开发和环境污染导致的生物多样性消失，从而引发对未来地球及生命造成危害甚至毁灭的前景的深刻担忧。这不仅是托马斯·弗里德曼的担忧，这也是世界各国的科学家、环保主义者的共同担忧，他们呼吁要以创新的理念和方法求发展，减少和限制地狱能源（造成严重环境污染和气候变暖的传统能源，如石油、煤炭等），大力开发和使用清洁能源（太阳能、风能、潮汐等）。

因此，启动“绿色能源革命”是世界发展必然的选择。正如托马斯·弗里德曼说的，启动绿能，才能从地狱到天堂，谁能领导能源革命，谁就能主宰世界。绿色能源指的是清洁能源，不排放污染物的对环境友好的能源，主要就是可再生能源。可再生能源的特点就在于其具有取之不竭用之不尽、原材料可以再生的特性，具体包括太阳能光热利用、太阳能光伏利用、风能、生物质能、地热能、海潮能等。近年来，可再生能源发电的份额逐步提高，与传统的化石能源发电相比，风能、太阳能等再生能源的发电具有波动性和间歇性的特点，大规模纳入会对电网的安全稳定带来很大的冲击。因此储能技术是实施可再生能源并网的关键，它将促进可再生能源的集约化开发和利用。“储能+再生能源”是人类能源供需的未来和能源行业的发展路径。

《可再生能源导论》系统地介绍各种可再生能源技术的基本原理及当前开发利用的主流技术，并着重地介绍了解决可再生能源间歇性缺点的氢能与燃料电池，以及储能技术。

本教材的编写，希望能满足理工科大学对于新能源科学的教学与学习参考的需求，也期冀能为从事可再生能源技术研发的相关科技人员及工程技术人员提供有价值的借鉴。由于我们的水平和经验有限，书中难免出现错漏和不足之处，敬请读者批评指正。

本教材的编写，得到南京大学现代工程与应用学院各位领导和同事的大力支持，李艺萱和刘增勇参加了资料查阅、整理编写以及校阅等工作，在此一并致以衷心的感谢。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 能源的定义与分类	1
第二节 人类利用能源的历史	2
第三节 发展可再生能源的必要性	3
第四节 可再生能源的基本特点及发展概况	4
第二章 太阳能光热利用	6
第一节 太阳辐射及资源	6
第二节 太阳能光热转换	12
第三节 非聚光型光热利用	13
第四节 聚光型光热利用	22
第五节 中高温储热技术	33
第三章 太阳能光伏利用	40
第一节 光伏发电原理	40
第二节 光伏电池分类	44
第三节 晶体硅光伏电池的制备	50
第四节 晶体硅太阳能组件	64
第五节 光伏系统应用	74
第六节 光伏发电的展望	86
第四章 风能利用	91
第一节 概述	91
第二节 风能原理	96
第三节 风力发电机组	107
第五章 生物质能利用	118
第一节 生物质资源	119
第二节 生物质固体燃料技术	125
第三节 生物质气化技术	127
第四节 生物质液化技术	131
第五节 生物油品质提升	136
第六章 氢能与燃料电池利用	148
第一节 概述	148

第二节	制氢	150
第三节	提纯	166
第四节	氢能的储存	170
第五节	氢能的运输	180
第六节	加氢站	181
第七节	氢能系统的安全性	185
第八节	用氢	191
第九节	燃料电池的概念、历史及原理	193
第十节	燃料电池的分类	199
第十一节	燃料电池的应用	213
第七章	地热能利用	238
第一节	概述	238
第二节	地热资源的利用	244
第三节	地热开发利用面临的问题及发展前景	257
第八章	海洋能利用	262
第一节	概述	262
第二节	潮汐能	262
第三节	波浪能	269
第四节	海流能和潮流能	280
第五节	温差能	284
第六节	盐差能	288
第七节	海洋能发展现状及未来	292
第九章	储能技术	301
第一节	储能技术分类	301
第二节	技术原理及性能	302
第三节	储能技术综合比较	314
第四节	储能系统构成	319
第五节	储能系统在电力系统中的应用	329
参考文献		341

第一章 绪论

第一节 能源的定义与分类

一、能源的定义

能源是人类生存与社会发展的基础。在某种意义上讲，能源的开发与利用是衡量人类社会进化、国家经济发展以及科学技术水平的重要标志。

《大英百科全书》对能源的定义为“能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语，人类用适当的转换手段，给人类自己提供所需的能量。”中国《能源百科全书》定义为“能源是可以直接或经转换提供人类所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源。”《能源词典》中的解释为“能源是可以直接或通过转换提供人类所需的有用能的资源”。可见，能源就是一种呈多种形式的，且可以相互转换能量的源泉。

二、能源的分类

能源从不同的角度，可以有不同的分类。

1. 按照能源的来源分类

(1) 来自地球内部 如地球上的铀、钍等放射性物质发出的核能、地热能。

(2) 来自太阳辐射 太阳能、风能、煤、天然气、石油、水能、生物质能等的来源都可以追溯到太阳辐射。

(3) 来自天体引力 如潮汐能。

2. 从转换过程分类

(1) 一次能源 直接存在于自然界的天然能源，未经加工和转换，如煤、石油、天然气、水能、风能、核能、海洋能、生物质能、地热能等。

(2) 二次能源 由一次能源直接或间接加工转换而成的人工能源，如汽油、柴油、焦炭、煤气、水电、氢能、沼气、蒸汽、火电、核电、太阳能发电、潮汐能发电等。

3. 按照反复利用的属性分类

(1) 可再生能源 是不会耗尽的能源，如风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源。

(2) 不可再生能源 是随着人类的开发利用而越来越少的能源，如煤、石油、天然气、页岩气、核能燃料等。

4. 按照开发使用的技术成熟度分类

(1) 常规能源 如煤、石油、天然气、水能、核能（曾经属于新能源，随着其技术的成熟以及广泛地开发利用，现被归为常规能源）。

(2) 新能源 如太阳能、风能、海洋能、地热能、氢能、生物质能等。

5. 其他分类方式

(1) 按能源的性质 分为燃料型能源（如煤、石油、天然气、泥炭、木材等）和非燃料型能源（如水能、风能、地热能、海洋能等）。

(2) 按能源消耗后的污染性 分为污染型能源（煤、石油等）和清洁型能源（水能、电力、太阳能、风能等）。

(3) 按能源的物态 分为固态燃料（煤、炭）、液态燃料（石油）和气态燃料（天然气、高炉煤气）。

(4) 按能源的交易属性 分为商品能源和非商品能源。一般认为进入能源市场作为商品销售的能源称为商品能源，如煤、石油、天然气、电等；自用的薪柴和农作物残余（如秸秆等）称为非商品能源。

第二节 人类利用能源的历史

在漫长的历史长河中，人类对能源的利用经历了三个时期：薪柴时代、煤炭时代、石油时代。能源消费结构经历了两次大的转变，并且正在经历第三次大转变。

在薪柴时代，人类通过简单的收集薪柴、砍伐树木，并辅以畜力和简单的水利、风力，获得初级能源。通过对这些能源的消费，学会利用火来改变人类的生活方式。通过火，人类开始食用熟食，有了照明、取暖，学会了驱兽，开始冶金、制造生产工具和武器，甚至是酿酒。这一时期的生产和生活水平都很低，社会发展迟缓。

直到18世纪60年代，英国产业革命的兴起，特别是蒸汽机的发明和使用，大大提高了人类的生产力水平，也促使了煤炭勘探、开发和运输的发展。人类能源利用进入了煤炭时代，也完成了从薪柴为主到煤炭为主的能源消费结构的第一次转变。到1920年，煤炭占世界能源构成的87%，煤炭取代薪柴，成为世界能源消费的主体。这一转变使人类的生活和文化水平得到了极大的提高，从根本上改变了人类社会的面貌。人类开始进入对大自然进行大规模改造的时期。

19世纪中期，煤油的商品化使石油进入灯油时代，为此人类开始大规模开采石油。伴随内燃机的发明，汽车、飞机、坦克、军舰等的不断出现，石油成为燃料和动力原料，使石油工业从灯油市场转向汽油市场，开始了人类能源利用的又一新时期——石油时代。20世纪50年代，石油勘探和开采技术的不断改进，中东、美国、北非相继发现大型油气田，加上石油冶炼技术的发展，促使各种成品油供应充足、价格低廉，致使消费量大幅提高，最终引发了人类能源消费结构的第二次转变，从以煤炭为主转变为以石油、天然气为主。1920—1959年间，石油和天然气在世界能源构成中的比例，从11%上升到50%，煤炭的比例则由87%下降到48%。这次转变带来了世界经济的超前繁荣，创造了人类史上空前的物质文明，人类进入高速发展时期。

两次能源消费结构的转变，将人类从原始落后的天然薪柴能源时代带入以煤、石油和天然气等不可再生资源的化石能源时代，创造了人类社会史上的空前繁荣。但化石能源固有的不可持续特性，以及无节制的开采，给全球环境带来的压力日益严重，温室效应、化石能源枯竭、生态环境破坏等，已成为威胁人类生存和发展的严重问题。为了解决

这一系列的问题，人类不得不大力发展太阳能、地热能、海洋能、风能、生物质能、氢能、核能等新能源。因而从 20 世纪中期以后，核能和太阳能的应用比例不断提高，太阳能的增速呈现比核能更快的趋势。世界能源结构已经开始向多元化的方向发展。人类能源消费结构进入一个新的转变期，即从石油、天然气等传统能源向可再生能源转变。

第三节 发展可再生能源的必要性

一、能源形势

在全球经济高速发展的今天，能源安全已上升到了国家的高度，能源是经济发展的原动力，不仅影响着世界的政治格局，而且关系到世界的安宁。化石能源的快速消耗，导致的能源短缺问题日益突出，能源危机迟早会到来。2014 年，世界原煤消费量 55.5 亿 tce (tce 表示 1t 标准煤当量)，世界原油消费量达到 42.11 亿 t，世界天然气消费量 33930 亿 m^3 。据估算，按照目前的石油开采速度，地球上的石油储藏将在几十年内全部采完；煤的储量稍多一些，但也将 200 多年时间内采完。如果能源供应出现严重短缺或中断，与能源有关的各种经济社会生活将会受到强烈冲击而造成巨大混乱。

二、环境污染

气候变化问题已经成为国际政治、经济和环境领域关注的热点问题之一。化石能源所带来的环境问题，也越来越受到人类的重视。由化石能源燃烧产生的 CO_2 ，成为污染环境的主要废气，由 CO_2 为主的温室气体所引发的厄尔尼诺、拉尼娜等全球气候异常，以及由此产生的世界粮食减产、沙漠化等对人类的生存和发展造成了极大的威胁；煤炭的燃烧、机动车尾气所排放的颗粒污染物，导致 PM2.5 的严重超标，造成大面积雾霾，对人类的健康造成巨大的危害；化石燃料燃烧产生的 NO_x 是造成臭氧层破坏的主要原因之一，导致紫外线辐射强度增大，致使人类皮肤癌患者数量增加；化石能源中常常含有较多的硫，燃烧时形成的 SO_2 等物质会使雨水的酸度升高，形成“酸雨”，腐蚀建筑物，造成土壤酸化。这些对自然环境的污染以及对人类的危害已超出国家和地区的范畴，成为世界范围的公害。建立能源高效、合理利用的能源新体系，开发可再生能源、寻找替代能源、研发能源节约技术已刻不容缓。

三、我国发展可再生能源的必要性

我国能源总储量虽然丰富，但是人均资源量有限。据 2015 年报道，我国人均装机容量接近 1kW，约为 2000 年的 4 倍，但仍不到欧美发达国家的一半。加拿大人均装机容量超过 4kW，美国人均装机容量超过 3kW，法国和日本均超过 2kW。我国正处于经济飞速发展阶段，对能源的需求量增大，由于化石能源的大规模使用，有害物质排放不断增多，环境污染严重。因此，我国发展可再生能源是十分必要的。

1. 发展可再生能源利于实现经济、社会和环境的协调发展

我国可再生能源储量丰富，分布广泛，加快发展可再生能源利于实现经济、社会和环境的协调发展，利于促进我国能源结构调整、实现可持续发展。

2. 发展可再生能源利于环境保护

我国历经近 30 多年经济高速发展的同时，环境受到严重的破坏，生态系统脆弱，发展可再生能源利于保护社会环境。开发利用可再生能源以减少 CO₂ 气体排放是应对气候变化的有效措施。

3. 发展可再生能源利于经济转型升级，扩大就业

可再生能源是高新技术产业和新兴产业，它的发展不仅可以充分利用自然资源和人力资源，而且可以有效带动相关产业的发展，利于产业结构调整，促进经济增长，扩大就业。

第四节 可再生能源的基本特点及发展概况

一、可再生能源的基本特点

可再生能源资源丰富，分布广泛，可就地开发利用，便于建立分布式能源系统，在能源的输送和利用上分片布置，减少长距离输送能源的损失，有效地提高了能源利用的安全性和灵活性，是替代化石能源的首选。可再生能源清洁干净，可以循环利用，没有或很少排放对生态环境有破坏的污染物，并且风力和太阳能光伏不像火力发电需要大量的水，对于干旱地区尤其具有突出的优点。可再生能源开发利用的技术逐渐趋于成熟，作用日益突出，经济可行性不断改善。虽然现阶段可再生能源的经济性还不算高，但随着世界各国政府的大力推广，有些可再生能源已经形成规模效应，成本不断降低，经济性不断提高。如风能、太阳能光伏、太阳能热水器、地热采暖等。

在现代人类生存、生活和科研活动中，电能发挥着不可替代的作用。因此可再生能源发电成为可再生能源开发利用的主要方式。可再生能源发电种类多样，具有环境友好、可循环利用、分布广泛等优点，同时又具有能量密度低、随机性和间歇性等缺点。因此，可再生能源发电设施往往需要大容量的储能装置或备用电源，初期投资较大。

二、全球可再生能源的发展概况

1980 年联合国召开的“联合国新能源和可再生能源会议”指出：以新技术和新材料为基础，使传统的可再生能源得到现代化的开发和利用，用取之不尽、周而复始的可再生能源取代资源有限、对环境有污染的化石能源，重点开发太阳能、风能、生物质能、潮汐能、地热能、氢能和核能。1981 年 8 月联合国新能源及可再生能源会议通过了《促进新能源和可再生能源的发展与利用的内罗毕行动纲领》（简称《内罗毕行动纲领》），并设立了按专业划分的 10 个特设专家组：水力、薪炭、生物质能、太阳能、地热能、风能、油页岩和焦油砂、海洋能、畜力、泥炭。会议上确定了新能源和可再生能源的基础概念：它不同于常规能源，可以是一些古老的能源，但是需采用先进的方法或技术开发利用，对环境和生态友好、可持续发展、资源丰富。

在此基础上，世界各国根据自身实际出发，对新能源和可再生能源的含义进行了不同的定义。但共同的认识是，除常规的化石能源如煤、石油、天然气，以及核裂变核能以外，其他能源都可以称为新能源和可再生能源。

截至2015年初,已有至少164个国家拥有可再生能源发展目标,约145个国家颁布了可再生能源支持政策。2014年,全球风电市场新增51GW,新增光伏发电装机约40GW(光伏累计装机约177GW)。其中,中国可再生能源装机容量占全球总量的24%,新增装机占全球增量的42%。全球可再生能源发电占电力总量的22.8%。

三、我国可再生能源的发展概况

我国于1995年颁布的《新能源和可再生能源发展纲要》明确要“因地制宜地开发和推广太阳能、风能、地热能、潮汐能、生物质能等清洁能源”。在2005年颁布的《中华人民共和国可再生能源法》里面强调指出“可再生能源,是指风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源。”随着科技的不断发展,现阶段在我国一般认为新能源和可再生能源主要包括风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能、小水电、热核聚变的核能、氢能等,而把大中型水电、核裂变核能归为常规能源。

国务院印发《能源发展战略行动计划2014—2020年》,未来我国将继续大力发展可再生能源,大幅增加包括水电、风电、太阳能、地热能等在内的可再生能源消费比例。

据统计,我国2014年水电新增装机约20GW,总装机约300GW,提前一年完成“十二五”规划目标。新投产核电机组5台,全国在运核电机组达22台,装机容量达20.1GW。风电并网装机90GW,年发电量1500亿kW·h;太阳能发电并网装机达到30GW,年发电量250亿kW·h;生物质能、地热能发电装机超过9.2GW,发电量350亿kW·h。

思考题

1. 什么是能源,有哪些主要分类方法?
2. 发展可再生能源的意义是什么?
3. 可再生能源的基本特点是什么?

参考文献

1. 国网能源研究院. 世界能源与电力发展状况分析报告. 北京: 中国电力出版社, 2015.
2. 刘泉. 新能源技术与应用. 北京: 化学工业出版社, 2015.
3. 冯飞, 张蕾等. 新能源技术与应用概论. 北京: 化学工业出版社, 2011.
4. 陈砺, 王红林, 方利国. 能源概论. 北京: 化学工业出版社, 2009.

第二章 太阳能光热利用

太阳是个巨大的辐射源，它每时每刻都在向宇宙空间辐射能量，这种以电磁波的形式向外传递的能量称为太阳辐射。太阳能一般是指这种太阳辐射能量，它有多种多样的利用形式，包括光热利用、光电转换、光化学利用、光生物利用等。太阳能光热利用是指通过物体吸收太阳辐射，并将辐射能转变成热能然后加以利用，它是太阳能利用的一种主要形式。吸收太阳辐射并将其转换为热能的过程通过集热器来实现，不同的集热器可以实现不同的集热温度，从而满足不同场合的热需求。太阳能光热利用具有非常悠久的历史，而当前由于人类对能源需求的日益增长和常规能源的日益短缺，太阳能热利用得到世界各国的普遍重视，各种太阳能热利用技术层出不穷，太阳能热利用将为人类社会的可持续发展提供重要保障。本章将介绍太阳能热利用的基础知识，具体包括太阳辐射及资源、太阳能光热转换、非聚光型光热利用、聚光型光热利用，及中高温储热技术。

第一节 太阳辐射及资源

一、太阳及太阳辐射

(一) 太阳

太阳，简单地说，可以看作一个炙热的气体火球。它是位于太阳系中心的恒星，直径大约为 139 万千米，是地球直径的 109 倍，体积是地球的 129 万倍，而它的质量大约是地球的 33 万倍，平均密度是地球的 $1/4$ 。组成太阳的主要元素是氢和氦，其中氢大约占 78%，氦大约占 20%，其他包括氧、碳、氮、铁和其他重元素，占大约 2%。

太阳的结构包括太阳内部以及太阳内部之外的太阳大气层。太阳的内部主要可以分为三层：核心区、辐射区和对流区。取太阳的半径为 R ，在 $0 \sim 0.25R$ 范围内是太阳的核心区，其质量约为整个太阳质量的一半以上，是太阳所释放的巨大能量的源头所在，也被称作核反应区。太阳核心区之外从 $0.25R \sim 0.86R$ 的范围是辐射层，它占据了整个太阳体积的绝大部分。这里包含了各种电磁辐射和粒子流，辐射从内部向外部的传递过程是多次被物质吸收而又再次发射的过程。辐射层内的温度、密度和压力都是从内向外递减的。太阳辐射层之外是对流层，即从 $0.86R$ 向外到达太阳大气层的底部，其厚度大约有十几万千米，这是太阳内部结构的最外层。在对流层内，温度、压力和密度梯度都很大，气体性质变化剧烈，很不稳定，形成明显的上下对流运动。太阳内部的能量就是通过这种对流运动实现向外部传输。

在对流层之外是太阳大气层，它又可以分成光球层、色球层和日冕层。光球层是太阳大气层的最里层，就是人们平常肉眼所看到的太阳表面，它确定了太阳非常清晰的边界。

光球层是一层不透明的气体薄层，温度大约为 6000K，其平均密度只有水的几亿分之一，但是由于它的厚度达到 500km，所以光球是不透明的。光球层表面常有黑子及光斑活动。色球层是光球层以上的一层大气层，厚约 2000km。色球层平时不易被观测到，通常需要通过单色光色球望远镜或者在日全食时才能观测到。日冕层是太阳大气的最外层，主要是高温、低密度的等离子体，它的密度比色球层更低，而它的温度反而比色球层高，可以达到上百万摄氏度。

太阳从核心向外的温度分布并不是递减的。太阳的温度从核心向外先是逐渐下降，到达光球层顶部接近色球层时的温度大约是 4600K，但是在色球层它的温度又逐渐上升，到色球层顶部时达到几百度，到了日冕区温度又陡然升至上百万度。

太阳的内部会不断发生 4 个氢核合成 1 个氦核的聚变反应，称为氢热核反应。它主要包括质子-质子反应和碳氮氧循环反应，这两类反应都使 4 个氢原子核合成 1 个氦原子核，并导致总质量稍微减少，损失的质量即转换为能量释放出去，这就是太阳不停地向外释放巨大能量的来源。太阳向外释放能量的功率达到了 $3.87 \times 10^{26} \text{ W}$ ，相当于每秒钟烧 $1.32 \times 10^{16} \text{ t}$ 的标准煤所释放的能量。虽然由于传播过程中的各种损耗，最终到达地球表面大气层的能量只有其中的 22 亿分之一，但这也使得地球表面吸收的功率达到了 $1.76 \times 10^{17} \text{ W}$ ，折合成标准煤大约为每秒钟 600 万 t。地球所接受到的太阳辐射能量是地球大气运动的主要能量源泉，也是地球光热能的主要来源。

(二) 太阳辐射

1. 大气层外太阳辐射

地球上接收到的太阳辐射能量主要决定于太阳和地球之间的距离、太阳高度角和昼长，其有规律的变化形成了地球上季节的规律变化。太阳高度角是指太阳光线与地平面的夹角，它有日变化和年变化。太阳高度角越大，地球表面接收到的太阳辐射越强，而昼长越长则太阳辐射也越强。

人们通常以“太阳常数”来表征达到大气层外的太阳辐射的强度，它定义为在日地平均距离处，地球大气层上界垂直于太阳光线的面上所接受的太阳辐射通量密度，用 S_0 来表示。通过测量，可以得到 $S_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ 。但是，由于太阳位于地球公转轨道稍微偏离中心的位置，实际上地球公转的轨迹是一个偏心率很小的椭圆。因此，太阳和地球之间的距离在一年之内不断发生变化，每年 1 月 2 日至 5 日经过近日点，7 月 3 日至 4 日经过远日点。这导致了到达地球大气层外的太阳辐射通量密度 S 会产生微小变化。实际的地球大气层外的太阳辐射通量密度 S 可以用以下公式计算：

$$S = S_0 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right) \right] \quad (2-1)$$

式中 n ——日序，即当天在一年中的顺序数，以 1 月 1 日为第一天来计算

太阳常数是一个非常重要的常数，它的有效测量有助于了解和进一步研究太阳辐射以及太阳内部核反应的机制，也会对大气层研究、气象分析、太阳能利用等方面有所帮助。

由于太阳各部分温度并不一样，所以太阳并不是某一固定温度的黑体辐射体，而是各层发射和吸收各种波长辐射的综合辐射体。太阳辐射由连续变化的不同波长的光混合而成，太阳辐射能按波长的分布称为太阳辐射光谱，如图 2-1 所示。在全部太阳辐射能中，波长在 $0.15 \sim 4 \mu\text{m}$ 的辐射能占 99% 以上，且主要分布在可见光和红外区，其中可见光区

约占太阳辐射总量的 50%，红外光区约占 43%，紫外区的太阳辐射能很少，只占总量的 7%。图 2-1 所示的地球大气层上界的太阳光谱能量分布曲线，与用普朗克黑体辐射定律计算出的温度为 5762K 的黑体光谱能量分布曲线非常相似。所以在太阳能热利用的技术中，可将太阳辐射看成温度为 5762K 的黑体辐射。

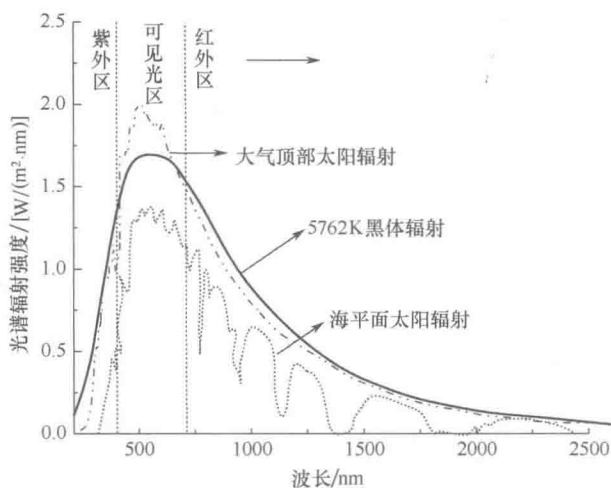


图 2-1 太阳辐射光谱

2. 大气层对太阳辐射的影响

由于地球外围被大气层包裹，太阳辐射要到达地球表面，就必须先通过这层大气层。因此，研究地球表面太阳辐射的时候，就必须要考虑大气层对太阳辐射的影响。太阳辐射经过大气层时，会被空气中的各种成分（如二氧化碳、水蒸气、臭氧、灰尘等）所吸收、反射和散射。这使得到达地球表面的太阳辐射有了显著的变化和削弱，也导致了到达地球表面上的太阳总辐射分成直射辐射和散射辐射两种。大气层对太阳辐射的削弱程度，不仅和太阳辐射的传播路径长短有关，还和大气的透明度有密切关系。

(1) 大气对太阳辐射的吸收 由于大气层对太阳辐射存在吸收作用，所以导致透过大气层的光谱曲线会变得极不规则。产生这一现象的主要原因是大气中的水蒸气、二氧化碳、臭氧、二氧化氮以及灰尘颗粒等成分有选择性地吸收一定波长的辐射能。这种效应使得太阳辐射光谱中存在着许多吸收带，并使辐射能量受到损耗。从空间分布的角度来看，大气对太阳辐射的吸收，在平流层以上主要是氧和臭氧对紫外辐射的吸收，在平流层至地面的空间内，主要是水蒸气对红外辐射的吸收。这部分被大气吸收的太阳辐射转化成了大气的内能，而不会再到地球表面。

(2) 大气对太阳辐射的散射 太阳辐射通过大气时遇到空气分子、尘粒、云滴等质点时，能量会减小，并且传播方向也会改变，这种变向和衰减的综合作用称为散射。但散射并不像吸收那样把辐射能转变为热能，而只是改变辐射方向，使太阳辐射以质点为中心向四面八方传播开来。经过散射之后，有一部分太阳辐射就到不了地面，原来传播方向上的太阳辐射会减弱。

大气散射的波长范围与大气吸收的波长范围恰恰相反，都集中于太阳辐射能力最强的

可见光区内。因此，大气层对太阳辐射的散射是太阳辐射减弱的最重要原因。研究发现，大气层对太阳辐射的散射作用十分不稳定，其散射强度差异特别明显。太阳高度角、云量的多少、云层形状以及云层厚度、大气透明度等都会对散射强度产生非常大的影响。在这些变化因素中，云层变化对太阳辐射的散射作用最为重要。

(3) 大气层对太阳辐射的反射 大气层对太阳辐射也存在反射作用，它主要由以下两个方面引起。一方面是因为大气散射方向与入射方向相反，这一方面的散射就包括了大气分子、水汽分子以及灰尘杂质等粒子所造成的反射；另一方面的反射，则是由于云层的存在，对太阳辐射造成了反射。一般情况下，云层的云量、云朵形状以及云层厚度是经常发生变化的，因此，云层所造成的太阳辐射的反射也是经常变化的。一般来讲，随着云层厚度的增加，反射能力也会增加。

二、地球表面的太阳辐射

由于大气层的作用，实际到达地球表面的太阳辐射通常是由直射辐射和漫射辐射两部分组成的。直射辐射是指来自太阳且辐射方向未发生改变的辐射；漫射辐射则是被大气层散射和反射后方向发生了改变的太阳辐射。可以作为光热利用的太阳辐射主要以直射辐射为主。

在地球表面上，任意一个平面能够截取的太阳直射辐射的大小主要取决于太阳光线的入射角，它是太阳光线与该平面法线之间的夹角，用符号 θ 表示。太阳入射角越小，则该平面能够截取的太阳辐射越大。太阳入射角是太阳赤纬角、地球纬度、太阳时角、该平面的倾斜角和方位角的函数，有关角度的关系如图 2-2 所示。下面首先介绍相关太阳角度的定义及相关角度之间的计算，然后介绍地球表面倾斜面上截取太阳辐射的计算。

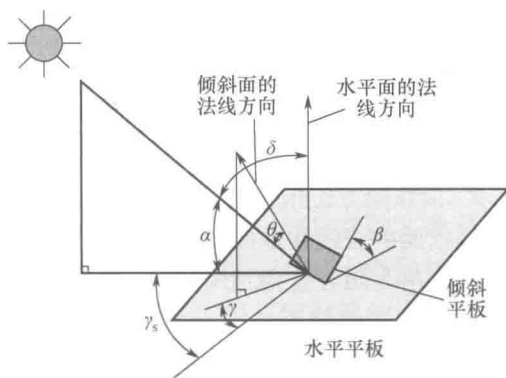


图 2-2 相关太阳角度的关系

(一) 相关太阳角度的定义及相关角度之间的计算

1. 赤纬角 δ

赤纬角又称为太阳赤纬，是地球赤道平面与太阳和地球中心连线之间的夹角，用符号 δ 表示。赤纬角是由于地球绕太阳运行形成的角度，它随时间而变化。因为地轴方向不变，所以赤纬角随地球在运行轨道上的不同点具有不同的数值。在一年当中， δ 每天都在发生变化，但是赤纬角的变化范围在 $-23^{\circ}26' \sim +23^{\circ}26'$ 。通常，赤纬角采用的计算公式如下：

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2-2)$$

式中 n ——一年当中，以 1 月 1 日为计算日期的天数

2. 时角 ω

时角，即为单位时间地球自转的角度，规定正午时刻时角为 0，上午时角为负值，下午时角为正值，用符号 ω 表示。在地球上，对于处于同一时刻、同一经度、不同纬度的人

来说, 太阳对应的时角都是相同的。由于地球自转一周是 360° , 地球自转所需要的时间为 24h, 所以地球每小时自转所对应的时角为 15° 。由弧度表示的 t 时刻的时角 ω 的计算公式如下:

$$\omega = \frac{\pi(t-12)}{12} \quad (2-3)$$

3. 太阳高度角 α

如前所述, 太阳高度角是指太阳光线与地平面的夹角, 而更专业的表述是指某地太阳光线与通过该地与地心相连的地表切面的夹角, 简称高度角。实际中, 当太阳高度角为 90° 时, 此时的太阳辐射强度能够达到最大; 而当太阳斜射地面时, 太阳辐射强度会随着斜射的角度而逐渐发生变化。太阳高度角用符号 α 表示, 它可以用下面的公式进行计算:

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \quad (2-4)$$

式中 φ ——当地地理纬度

δ ——太阳赤纬角

ω ——太阳时角

4. 太阳方位角 γ_s

太阳方位角即太阳所在的方位, 指太阳光线在地平面上的投影与当地经线的夹角, 用符号 γ_s 表示。太阳方位角可以近似地看作是竖立在地面上的直线在阳光下的阴影与正南方的夹角。规定正南方为零度, 向西为正, 向东为负, 则它的取值范围是 $-180^\circ \sim +60^\circ$ 。太阳方位角可以用下列公式计算:

$$\cos\gamma_s = \frac{\sin\alpha\sin\varphi - \sin\delta}{\cos\alpha\cos\varphi} \quad \text{或} \quad \sin\gamma_s = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha} \quad (2-5)$$

5. 接收面方位角 γ

接收面的法线在地面上的投影与正南方的夹角称为接收面的方位角, 用符号 γ 表示。度量方法与太阳方位角相同。

6. 接收面倾斜角 β

接收面平面与水平面的夹角称为接收面的倾斜角, 用符号 β 表示。

(二) 地球表面倾斜面上截取太阳辐射的计算

对任意一个面积为 A 、太阳入射角为 θ 的倾斜面或接收面, 它截取的太阳直射辐射能量可以用下列公式计算:

$$Q = A \times DNI \times \cos\theta \quad (2-6)$$

式中 DNI ——太阳直射辐射强度, W/m^2

因此, 当计算任一表面所截取的太阳直射辐射能量时, 最重要的是确定太阳入射角。太阳入射角和上述相关太阳角度的关系可以通过下列公式表示:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta(\sin\varphi\cos\beta - \cos\varphi\sin\beta\cos\gamma) + \\ & \cos\delta\cos\omega(\cos\varphi\cos\beta + \sin\varphi\sin\beta\cos\gamma) + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \end{aligned} \quad (2-7)$$

通过式 (2-7), 可以计算出任意地理位置、任意天数、任意时刻、任意接收面几何位置时的太阳入射角, 从而可以获得接收面截取的太阳直射辐射能量。下面讨论不同条件下式 (2-7) 的简化结果。

(1) 当接收面竖直放置时, 倾斜角为 90° , 式 (2-7) 简化为:

$$\cos\theta = -\sin\delta\cos\varphi\cos\gamma + \cos\delta\cos\omega\sin\varphi\cos\gamma + \cos\delta\sin\gamma\sin\omega \quad (2-8)$$