



普通高等教育“十二五”规划教材

可再生能源工程

刘荣厚 主 编

张全国 林 聪 姚兴佳 副主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

可再生能源工程

刘荣厚 主编

张全国 林 聪 姚兴佳 副主编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本教材根据编写组人员长期的教学经验和研究成果,结合世界上可再生能源的研究发展前沿,系统地阐述了可再生能源技术的原理、工艺、设备及其应用。本教材注重理论与实践相结合,主要包括可再生能源的含义与能源分类和可再生能源的利用状况,太阳辐射及太阳能光伏发电系统,太阳能热水器及太阳能热储存,太阳房、太阳能干燥及太阳能温室,生物质的直接燃烧与压缩成型技术,生物质热裂解技术,生物质气化技术,沼气技术,燃料乙醇的生产技术,生物质制氢及生物柴油技术,风能工程,水能、地热能及海洋能技术,以期能对我国可再生能源的教学、科研与开发产生有益的影响。

本教材可作为自然科学与工程技术类本科生通识教育课程,以及新能源和可再生能源领域相关专业本科生和研究生的教材,也可供从事以上相关专业的高等院校师生、科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

可再生能源工程/刘荣厚主编. —北京:科学出版社,2016.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-045923-7

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(2015)第239649号

责任编辑:刘 畅/责任校对:张小霞
责任印制:赵 博/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年1月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:486 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《可再生能源工程》编委会

主 编：刘荣厚（上海交通大学）

副 主 编：张全国（河南农业大学）

林 聪（中国农业大学）

姚兴佳（沈阳工业大学）

参编人员：（以姓氏笔画为序）

王宇欣（中国农业大学）

王艳锦（河南农业大学）

牛卫生（沈阳农业大学）

兰 青（云南师范大学）

朱锡锋（中国科学技术大学）

梅晓岩（辽宁农业管理干部学院）

盛奎川（浙江大学）

前言

能源是经济和社会发展的重要物质基础。工业革命以来,世界能源消耗剧增,煤炭、石油、天然气等化石能源资源消耗迅速,生态环境不断恶化,特别是温室气体排放导致日益严峻的全球气候变化,人类社会的可持续发展受到严重威胁。随着经济的发展和人民生活水平的提高,我国的能源需求将快速增长,能源、环境和经济三者间的矛盾也将更加突出。能源生产和消费革命关乎发展与民生,因此,从根本上解决我国的能源问题,不断满足经济和社会发展的需要,保护环境,实现可持续发展,除大力提高能源效率外,加快开发利用可再生能源也势在必行。可再生能源是指在自然界中可以不断再生、永续利用、取之不尽、用之不竭的资源,它对环境无害或危害极小,而且资源分布广泛,适宜就地开发利用。《中华人民共和国可再生能源法》已由中华人民共和国第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议于2005年2月28日通过,自2006年1月1日起施行。《中华人民共和国可再生能源法》指出:本法所称可再生能源,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。随着科学的进步和可再生能源技术的不断发展,可再生能源技术具有极大的潜在市场,将成为世界,特别是我国发展多元化清洁能源战略的重要组成部分。

本教材全面系统地阐述了可再生能源技术的原理、工艺、设备及其应用,主要包括可再生能源技术的含义与能源分类和可再生能源的利用情况,太阳与地球的空间关系,太阳辐射,太阳能电池的基本原理及太阳能光伏发电系统的组成,太阳能热水器的类型及系统,太阳能集热器的构造及工作原理,太阳能热储存,太阳房的原理、类型、评价指标及实例,太阳能干燥原理及物料干燥特性,太阳能干燥装置的分类和特点,太阳能温室技术,生物质燃料的化学与物理特性,生物质的直接燃烧技术,生物质压缩成型技术,生物质热裂解的概念及机制,生物质热裂解液化技术的工艺流程,生物质热裂解制取生物油装置及产物的特性与应用,生物质气化技术的原理、分类,生物质气化系统的设计及应用案例分析,沼气发酵的基本过程、工艺条件、工艺类型,水压式沼气池的构造与工作原理,沼气、沼液、沼渣的利用,乙醇的性质和发酵机制,糖质原料制取乙醇工艺,淀粉质原料糖化及乙醇连续发酵的工艺技术,木质纤维素类原料水解工艺技术,乙醇蒸馏的原理及工艺,生物质制氢的基本原理、工艺类型及装置,生物柴油技术,风能的基本知识,风力机的结构及工作原理,风轮的基本理论,风能的应用,水能资源及水电站,地热资源及利用,海洋能技术,以期能对我国可再生能源的教学、研究、开发、推广、应用和管理产生有益的影响。

本教材主编为刘荣厚，副主编为张全国、林聪、姚兴佳，由王宇欣、王艳锦、牛卫生、兰青、朱锡锋、梅晓岩、盛奎川参与编写。其中，刘荣厚编写第一章、第六章；张全国编写第十章；林聪编写第八章；姚兴佳编写第十一章；王宇欣编写第四章；王艳锦编写第十二章；牛卫生编写第二章的第一节至第三节；兰青编写第二章的第四节和第三章；朱锡锋编写第七章；梅晓岩编写第九章；盛奎川编写第五章；最后由刘荣厚教授统稿。本书在编写过程中，参考了大量国内外有关资料，在此表示深深的谢意。很多研究生对本教材的编写给予了热情帮助，在此表示诚挚的谢意。科学出版社的编辑对本书的编写给予了热情指导，在此表示感谢。

由于书中内容涉及面广，且编者水平有限，书中难免存在不足之处，欢迎读者批评指正。

编者

2015年6月10日

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 可再生能源的含义与能源分类	1
一、可再生能源的含义	1
二、能源分类	1
第二节 可再生能源的利用状况	4
一、太阳能的利用状况	4
二、生物质能转换技术的类型及利用状况	5
三、风能的利用状况	13
四、水能、地热能及海洋能的利用状况	15
五、开发可再生能源的意义	16
第二章 太阳辐射及太阳能光伏发电系统	18
第一节 太阳与地球的空间关系	18
一、地理位置坐标	18
二、天球坐标系与太阳的位置	18
三、地球的运动	20
四、太阳位置的角度计算	21
五、斜面上的太阳照射时间	23
第二节 太阳辐射	25
一、太阳常数	25
二、大气质量	26
三、太阳辐射在大气中的衰减	26
四、到达地面上的太阳辐射强度	27
第三节 太阳辐射的测量	29
一、辐射的测量方法	30
二、太阳辐射测量的仪表	31
三、太阳辐射数据的几种用法	33
四、从太阳总辐射估算直射辐射和散射辐射	33
五、斜面上的太阳辐射估算公式	35
第四节 太阳能光伏发电系统	36
一、太阳能电池的基本原理	36
二、太阳能电池的分类	39

三、太阳能光伏发电系统的构成	41
第三章 太阳能热水器及太阳能热储存	42
第一节 太阳能集热器的分类	42
一、按传热工质的类型分类	42
二、按进入采光口的太阳辐射是否改变方向分类	43
三、按是否跟踪太阳分类	43
四、按是否有真空空间分类	43
五、按工作温度范围分类	43
六、其他分类方式	44
第二节 太阳能热水器的类型及系统	45
一、太阳能热水器的类型	45
二、家用太阳能热水器	46
三、太阳能热水系统	48
第三节 平板型太阳能集热器	50
一、平板型太阳能集热器的基本结构	50
二、平板型集热器的技术要求	52
第四节 真空管太阳能集热器	52
一、全玻璃真空管集热器	54
二、热管式真空管集热器	55
第五节 太阳能热储存	57
一、概述	57
二、太阳能热储存的分类及一般要求	58
三、太阳能显热储存	60
四、太阳能潜热储存	64
五、化学反应热储存	65
六、总结	65
第四章 太阳房、太阳能干燥及太阳能温室	66
第一节 太阳房的原理与类型	66
一、太阳房概述	66
二、太阳房的原理	66
三、太阳房的类型	67
四、太阳房评价指标	72
五、太阳房实例	74
六、太阳房存在的问题及应用前景	75
第二节 太阳能干燥	76
一、太阳能干燥技术概述	76
二、太阳能干燥原理及物料干燥特性	76
三、太阳能干燥装置的分类和特点	79
第三节 太阳能温室	81

一、太阳能温室的分类	81
二、塑料大棚	82
三、日光温室	82
第五章 生物质的直接燃烧与压缩成型技术	85
第一节 生物质燃料的特性	85
一、生物质燃料的成分与化学特性	85
二、生物质燃料的物理性质	89
三、秸秆与薪柴	91
第二节 生物质燃烧技术	92
一、生物质的燃烧过程与要素	92
二、省柴灶	94
三、生物质燃烧发电/热电联产	96
第三节 生物质压缩成型技术	96
一、生物质成型工艺及影响因素	96
二、生物质压缩成型设备	101
三、生物质成型燃料的特性及应用	105
第六章 生物质热裂解技术	110
第一节 生物质热裂解的概念及机制	110
一、生物质热裂解的概念	110
二、生物质热裂解反应机制	110
第二节 生物质热裂解液化技术的工艺流程及反应器类型	113
一、生物质热裂解工艺类型	113
二、生物质热裂解液化技术的工艺流程	114
三、生物质热裂解液化反应器的类型	114
四、影响生物质热裂解过程及产物组成的因素	115
五、生物质快速热裂解液化技术研究及开发现状	117
第三节 生物质热裂解制取生物油装置	118
一、流化床反应器生物质快速热裂解制取生物油装置	118
二、旋转锥反应器生物质闪速热裂解液化装置	126
第四节 生物质热裂解产物的特性	128
一、生物油的特性	128
二、生物油的精制	131
三、不可冷凝气体与生物炭的特性	133
第五节 生物质热裂解产物的应用	134
一、生物油应用概述	134
二、生物油用于燃烧	134
三、生物油用于涡轮机发电	134
四、生物油作为柴油机代用燃料	135
五、生物油制取化学品	135

18	六、生物油作为脱硫、脱硝剂	135
28	七、生物油制取黏合剂	135
28	八、不可冷凝气体的应用	135
28	九、生物炭的应用	136
	第七章 生物质气化技术	137
28	第一节 生物质气化技术原理	137
28	一、气化基本原理	137
10	二、气化反应动力学	138
29	三、气化反应平衡分析	141
29	第二节 生物质气化技术分类	143
40	一、按气化压力进行分类	143
60	二、按气化温度进行分类	143
60	三、按气化剂进行分类	143
60	四、按加热方式进行分类	145
101	五、按气化炉结构进行分类	145
201	六、气化主要影响因素	149
011	第三节 生物质气化系统的设计	149
011	一、气化主要评价参数	149
011	二、生物质气化系统的构成	151
011	三、气化炉设计计算举例	151
111	第四节 生物质气化技术应用案例分析	152
111	一、生物质气化集中供气	152
411	二、生物质气化发电	154
	第八章 沼气技术	157
211	第一节 沼气发酵的基本过程	157
711	一、什么是沼气发酵	157
810	二、沼气发酵过程的产酸阶段	157
811	三、沼气发酵过程的产甲烷阶段	161
851	四、产酸菌与产甲烷菌之间的相互关系	164
851	五、产酸与产甲烷的速度平衡	165
851	第二节 沼气发酵的工艺条件	166
131	一、严格的厌氧环境	166
131	二、温度	166
134	三、pH	168
431	四、接种物	169
431	五、沼气发酵原料	171
431	六、搅拌	176
231	七、沼气发酵添加剂和抑制剂	177
231	第三节 沼气发酵工艺类型	178

一、按发酵温度划分	179
二、按投料方式划分	180
三、按发酵阶段划分	182
四、按发酵级差划分	183
五、按发酵料液浓度划分	184
六、按料液流动方式划分	185
七、按厌氧消化器的分类划分	185
八、厌氧消化器类别	187
第四节 水压式沼气池和分离储气浮罩沼气池的构造及工作原理	192
一、水压式沼气池	192
二、分离储气浮罩沼气池	193
第五节 沼气、沼液、沼渣的利用	194
一、沼气的成分及其物理性质	194
二、沼气的利用	195
三、沼气发酵残留物的性质	196
四、沼肥的利用技术	198
第九章 燃料乙醇的生产技术	199
第一节 乙醇的性质和发酵机制	199
一、乙醇的性质	199
二、乙醇的发酵机制	200
三、乙醇发酵过程	201
四、乙醇发酵副产物	202
第二节 糖质原料制取乙醇工艺	202
一、糖质原料预处理	202
二、糖质原料乙醇发酵技术	208
三、酵母培养工艺技术	211
四、糖质原料乙醇发酵副产物的处理与利用	213
第三节 淀粉质原料糖化及乙醇连续发酵的工艺技术	214
一、淀粉糖化机制	214
二、薯类原料糖化工艺	215
三、谷类原料糖化工艺	216
四、淀粉质原料乙醇连续发酵的工艺	218
第四节 木质纤维素类原料水解工艺技术	218
一、木质纤维素水解机制	218
二、木质纤维素原料预处理工艺	220
三、木质纤维素稀酸水解工艺技术	223
四、木质纤维素浓酸水解工艺技术	223
五、木质纤维素酶水解技术	224
第五节 乙醇蒸馏的原理及工艺	225

一、乙醇蒸馏的基本原理	225
二、乙醇蒸馏的工艺	226
第十章 生物质制氢及生物柴油技术	228
第一节 生物质制氢技术	228
一、氢的性质与氢能利用	228
二、生物质制氢的基本原理	232
三、生物质制氢的特点	236
四、生物质制氢的工艺类型	237
五、生物质制氢装置	242
第二节 生物柴油技术	245
一、生物柴油技术概述	245
二、生物柴油生产技术	250
第十一章 风能工程	252
第一节 风能的基本知识	252
一、风的形成	252
二、风力等级	256
三、风的物理特性	257
四、风能可利用区的划分	261
第二节 风力机的结构及工作原理	261
一、风力机的分类	261
二、叶片	263
三、轮毂	266
四、风轮	266
第三节 风轮的基本理论	270
一、贝兹极限	270
二、旋转尾流模型	272
三、叶素-动量定理	274
四、风力机转矩计算流程	277
第四节 风能的应用	278
一、风力发电	278
二、风力提水	281
三、风力制热	282
第十二章 水能、地热能及海洋能技术	283
第一节 水能	283
一、概述	283
二、水能资源	284
三、水电站	284
第二节 地热能	291
一、概述	291

二、地热资源	292
三、地热能利用	294
四、地热开发对环境的影响	302
第三节 海洋能	303
一、概述	303
二、各种海洋能的定义	304
参考文献	306

1

第一章 绪 论

第一节 可再生能源的含义与能源分类

一、可再生能源的含义

(一) 能源的定义

能源是指可以从其获得能量(如热、光、动力等)的资源。

(二) 可再生能源的含义

1. 联合国会议提出的可再生能源的含义

1981年8月10~21日,联合国在肯尼亚首都内罗毕召开了“联合国新能源和可再生能源会议”,提出的新能源和可再生能源的含义为: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与利用,用取之不尽、周而复始的可再生能源来不断取代资源有限、对环境有污染的化石能源,重点在于开发太阳能、风能、生物质能、海洋能、地热能和氢能等。所以它是能源领域的高新技术,新的和可再生的是一个完整的含义,在英文中缩写为NRSE,即 new and renewable sources of energy,在中国则习惯地简称为“新能源”或“可再生能源”。在我国,新能源与可再生能源是指除常规能源和大型水力发电之外的生物质能、风能、太阳能、小水电、海洋能、地热能、氢能等能源资源。

2. 根据能源的使用消耗提出的可再生能源的含义

可再生能源是指在自然界中不会随本身的转化或人类的利用而日益减少并有规律地得到补充(再生)的能源,如太阳能、风能、水能、生物质能等。

3. 《中华人民共和国可再生能源法》中指出的可再生能源的含义

《中华人民共和国可再生能源法》已由中华人民共和国第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议于2005年2月28日通过,自2006年1月1日起施行。

《中华人民共和国可再生能源法》指出:本法所称可再生能源,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。

水力发电对本法的适用,由国务院能源主管部门规定,报国务院批准。

通过低效率炉灶直接燃烧方式利用秸秆、薪柴、粪便等,不适用本法。

二、能源分类

地球上可开发利用的能源种类是很多的,为了了解各种能源的特点,找出开发利用它们

的规律, 可以将它们从不同的角度进行分类。

(一) 按能源的来源分类

按能源的来源进行分类, 能源可分为三大类。

1. 来自太阳的能源

来自太阳的能源, 或称为来自地球以外天体的能源。太阳能除了被人们直接利用光和热外, 还是地球上许多种能源的主要来源。目前, 人类所需能量的绝大部分都直接或间接地来源于太阳能。各种植物通过光合作用, 把太阳能转变成化学能, 在植物体内储存下来, 这部分能量为人类和动物界的生存提供了能源。地球上的煤炭、石油、天然气等矿物燃料(也称化石燃料), 是由古代埋在地下的动植物经过漫长的地质年代形成的。所以矿物燃料实质上是由古代生物固定下来的太阳能。另外, 风能、水能和海洋波浪能等, 也都是由太阳能转换得来的。

2. 地球本身蕴藏的能源

这类能源主要指地热能和原子核能, 它们都存在于地球本身。

(1) 地热能。地球是一个大热库, 地球内部储存的地热资源异常丰富, 从地下喷出地面的温泉和火山爆发喷出的岩浆, 都是地热的表现。按目前的钻井技术, 可以达到地下 10km 的深度, 估计在这个深度内地热总量相当于世界能源全年消费量的 400 多万倍。

(2) 原子核能。它是指某些物质在进行人工控制的原子核反应时放出来的能量。现在许多国家建设的原子能发电站(核电站), 就是使用铀原子裂变时放出来的能量。原子核聚变放出的能量更多, 如能充分利用海洋里的氘和氚进行核聚变反应, 由其提供的聚变能量足够人类亿万年使用。

3. 地球和月球、太阳等天体之间有规律的运动及相对位置的变化所形成的能源

这类能源是指由于天体之间引力使海水涨落形成的潮汐能。和上面两类能源相比, 这一类能源的数量不大。

(二) 按能源形成的条件分类

按能源形成的条件进行分类, 能源可分为两大类。

1. 一次能源

一次能源是指在自然界中现成存在、没有经过加工或转换的能源, 如煤炭、石油、天然气、水能、太阳能、风能和柴草等。

2. 二次能源

由一次能源经过加工、转换的能源产品如电力、煤气、石油制品、蒸汽、焦炭等, 一般通称为二次能源。

(三) 按能源的使用消耗分类

按能源的使用消耗进行分类, 能源可分为两大类。

1. 可再生能源

可再生能源是指在自然界中不会随本身的转化或人类的利用而日益减少并有规律地得到补充(再生)的能源, 如太阳能、风能、水能、生物质能等。

2. 不可再生能源

不可再生能源是指经过亿万年形成、使用后逐渐减少、短期内无法恢复的能源, 如石油、

煤炭、天然气、核燃料等。

(四) 按能源利用的技术状况分类

按能源利用的技术状况进行分类, 能源可分为两大类。

1. 常规能源

常规能源是指在一定历史时期和科学技术水平下, 已经被人们广泛应用的能源, 如煤炭、石油、天然气、电力等。

2. 新能源

新能源则是指对许多古老的能源采用先进的方法加以广泛利用, 以及用新发展的先进技术而得以利用的能源, 如太阳能、风能、生物质能、水能、地热能及原子核能等。

(五) 按使用性能分类

按使用性能进行分类, 能源可分为两大类。

1. 燃料能源

通常称为燃料的煤炭、石油、天然气、生物质、煤气、沼气、乙醇、氢及核燃料等为燃料能源。

2. 非燃料能源

太阳能、水能、风能、地热能、电力等则为非燃料能源。

(六) 按在经济流通领域中的地位分类

按在经济流通领域中的地位进行分类, 能源可分为两大类。

1. 商品能源

商品能源是指进入市场、在国内或国际市场上进行买卖的能源, 如煤炭、石油及其制品、天然气、电力、焦炭等。

2. 非商品能源

非商品能源是指那些一般不通过市场进行买卖的能源, 如秸秆、薪柴、牲畜粪便等。某些非商品能源虽在当地市场上有买卖, 但规模很小, 国家也未将其列入正式商品, 仍称为非商品能源。

人类在生产和生活中需要各种形式的能, 其中用量最大的是热能、机械能和电能。上述自然界中存在的能源, 人们可以用各种方式将其转化为所需要的能。目前绝大多数能源是转化为热或动力直接利用, 或者通过动力机械转化为机械能或电能使用。图 1-1 表示出目前各种主要能源的转换和利用情况。最上面一排表示各种能源, 如天然气、石油、煤炭、生物质及其转化生成的固体、液体、气体燃料, 从水中产生的氢等。除一部分作为化工原料使用外, 绝大部分都在各种燃烧装置(如锅炉、内燃机等)中通过燃烧, 把化学能转化为热能。核能则经过反应堆转化为热能。此外, 还可以从地热、太阳能等直接得到热能。热能除了直接使用外, 还可以通过热机转化为机械能。水力可以通过水轮机、风力可以通过风力机转化为机械能。使用光电池或燃料电池, 可以直接从太阳能或化学能得到电能, 但目前绝大部分电能主要还是通过机械能转化而来的。通过电动机或电炉等装置, 电又可以很方便地转化为机械能或热能。最终, 用户(包括生产和生活)可以得到热能、机械能和电能的供应。

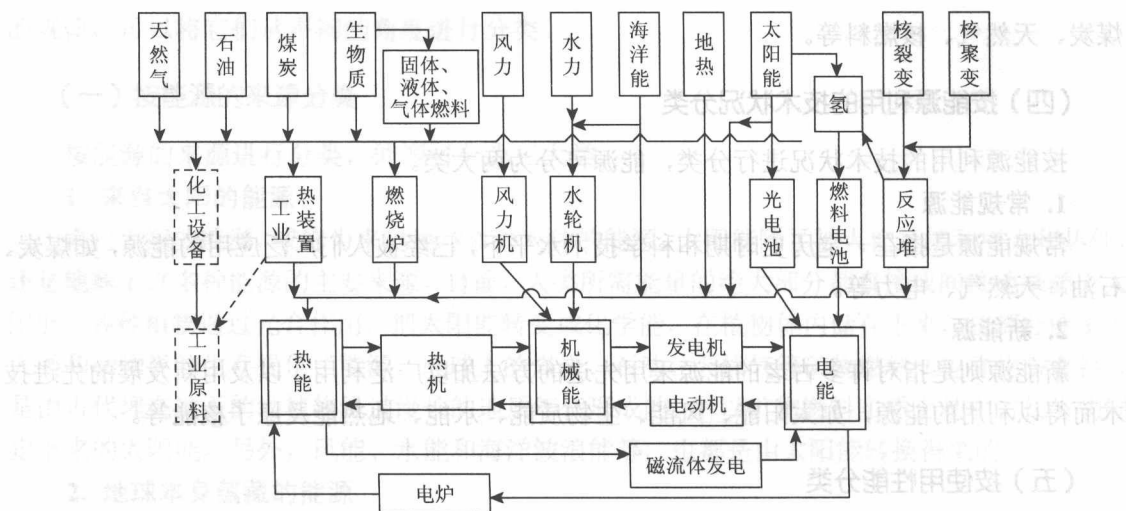


图 1-1 目前各种主要能源的转换和利用情况

第二节 可再生能源的利用状况

一、太阳能的利用状况

(一) 太阳辐射能

太阳是一个巨大的火球，它以光辐射的形式每秒向太空发射 $3.8 \times 10^{20} \text{MW}$ （兆瓦）的能量，相当于每秒烧掉 $1.32 \times 10^{16} \text{t}$ 标准煤放出的能量，有 1/22 亿投射到地球上，太阳光被大气层反射、吸收之后还有 70% 透射到地面上，尽管如此，地球上一年中接收到的太阳能仍然高达 $1.8 \times 10^{18} \text{kW} \cdot \text{h}$ ，每年地球获得的总能量比目前地球耗费的能量还多。

(二) 太阳能的特点

太阳能作为一种可再生能源，与常规能源如化石燃料（煤炭、石油、天然气）及核燃料相比有以下特点。

1. 太阳能的广泛性

太阳能到处皆是，就地可用，取之不尽，用之不竭，对于山区、沙漠、海岛等偏僻地区，其优越性更明显，人们只要一次性投资建好发电设备后，平均的维持费用远比其他能源要小。

2. 太阳能的清洁性

利用太阳能作为能源，没有废气、废料，不污染环境，因此太阳能称为清洁的能源。

3. 太阳能的分散性

太阳辐射尽管遍及全球，但每单位面积上的入射功率很小，因此要得到较大的功率，就必须有较大的受光面积，这就使设备的材料、结构、占用土地的费用增加，从而影响了推广应用。

4. 太阳能的间歇性

太阳的高度角一日内及一年内在不断变化，加之气候、季节的变化影响，太阳能的可用量很不稳定，随机性很大，利用太阳能发电时除并网发电外，一般情况下必须备有相当容量