


新能源科学与
工程应用丛书

光伏发电 原理、技术及其应用

朴政国 周京华 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源科学与工程应用丛书

光伏发电原理、 技术及其应用

朴政国 周京华 编著

机械工业出版社

地址：北京市西城区百万庄大街24号 邮编：100037
电话：(010) 68995100 传真：(010) 68995104
网址：www.cmpbook.com 电子邮箱：service@cmpbook.com

2019年10月

本书系统地介绍了太阳能光伏发电原理、制造工艺，以及光伏发电系统的构成。首先，介绍了能源与环境问题、全球能源发展现状、可持续发展的理念，以及可再生能源发展的必要性，并阐述了光伏发电技术的发展史及发展现状。其次，重点阐述了太阳能电池的半导体物理基础理论、太阳能光伏发电原理及其基本特性、目前采用的太阳能电池材料和制造工艺。最后，介绍了光伏发电系统的结构及构成。本书力图向读者提供太阳能光伏发电技术的专业基础理论知识、太阳能电池制造工艺及技术，以及应用情况和发展前景。

本书可作为高等院校光伏发电相关专业本科生、研究生教材，也可供从事太阳能光伏相关领域的研发和工程技术人员学习及参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏发电原理、技术及其应用/朴政国, 周京华编著. —北京: 机械工业出版社, 2020. 1

(新能源科学与工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-64564-1

I. ①光… II. ①朴… ②周… III. ①太阳能光伏发电 - 基本知识
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 013035 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧 朱 林

责任校对: 李 杉 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 郜 敏

北京中兴印刷有限公司印刷

2020 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.75 印张 · 298 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-64564-1

定价: 69.00 元

电话服务

客服电话: 010 - 88361066

010 - 88379833

010 - 68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机 工 官 网: www.cmpbook.com

机 工 官 博: weibo.com/cmp1952

金 书 网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

目前, 新能源及可再生能源快速发展, 其中太阳能光伏发电的发展速度最快。全球太阳能电池产量从 1996 年至 2017 年, 22 年间的年平均增速达到了 42%, 预计光伏发电将在 2030 年占到全球发电量的 10%, 对全球发电及能源供给做出实质性的贡献。

我国太阳能光伏产业也在快速增长, 有一批具有国际竞争力的光伏生产企业, 形成了具有规模化、国际化、专业化的产业链。2003 年我国成为世界上最大的光伏组件生产国, 2017 年硅片产量达到了 87GW, 占全球产量的 90% 以上, 几乎全球硅片都来源于我国。同时, 我国光伏系统装机容量大幅提高, 2017 年新装机容量占全球市场的比重达到 52%, 累计装机容量达到 130.48GW。

然而在光伏产业高歌猛进的同时, 由于其是一个综合性的高技术产业, 涉及电子学、光学、电工学、化学、材料学及建筑学等多学科, 我国目前的人才市场严重缺乏全方位的光伏技术专业人才。为了缓和光伏领域专业人才匮乏的局面, 一些大学设立了光伏专业, 开设了光伏发电相关的专业课程, 培养了专业人才。希望本书为高等院校本科生、研究生, 以及相关工程技术人员和从业人员提供光伏发电技术的基础理论知识及技术要点, 为培养光伏领域专业人才、推动我国光伏产业的发展发挥作用。

全书分为 7 章。第 1 章介绍了能源与环境问题、全球能源发展现状、可持续发展的理念以及可再生能源发展的必要性, 并阐述了光伏发电技术的发展史及我国光伏产业现状。第 2 章介绍了太阳辐射基础理论以及太阳能资源的分布。第 3~6 章系统地介绍了太阳能电池的半导体物理基础理论、光生伏特效应基本原理及其输出特性以及硅基太阳能电池材料和制造工艺。第 7 章介绍了光伏发电系统的结构及构成。

本书的作者在编写过程中力求相关理论知识全面而准确、信息量大而有力、表述清晰流畅。但作者水平有限, 书中难免存在欠缺、疏漏及错误之处, 恳请广大读者批评指正, 不吝赐教。

作者

2019 年 10 月

主要参数符号表

A	理查逊常数	(2) 力
A^*	有效理查逊常数	$f(E)$ 费米分布函数
A_{cell}	太阳能电池面积	$f_B(E)$ 玻耳兹曼分布函数
A_s	太阳方位角	FF 太阳能电池填充因子
a	(1) 晶格常数	G 太阳辐射强度
	(2) 加速度	G_{CN} 载流子净产生率
b	维恩常量	G_{DH} 地面太阳辐射强度
c	真空中的光速	G_{DN} 地表面直射太阳辐射强度
CP	太阳能电池收集概率	G_{EA} 大气层外太阳辐射强度
D	扩散系数	G_{GN} 地表面总太阳辐射强度
D_n	电子扩散系数	G_s^* 太阳辐射强度
D_p	空穴扩散系数	G_{sc} 太阳常数
D_{Sun}	太阳直径	G_θ 任意平面太阳辐射强度
d	厚度	$g(E)$ 状态密度
E	电子能量	$g_C(E)$ 导带底状态密度
E_0	真空中静止电子能量	$g_V(E)$ 价带顶状态密度
E_A	受主能级	GR 光注入时电子-空穴对生成率
E_C	导带底能量	H 磁场强度
E_D	施主能级	h 普朗克常数
E_F	费米能级	η 狄拉克常数
E_F^n	电子的准费米能级	I 电流强度
E_F^p	空穴的准费米能级	I_D pn 结结电流
E_{F_n}	n 型半导体的费米能级	I_m 太阳能电池最大功率点电流
E_{F_p}	p 型半导体的费米能级	I_{ph} 太阳能电池光生电流
E_g	禁带宽度	I_s pn 结反向饱和电流
E_i	(1) 本征费米能级	I_{SC} 太阳能电池的短路电流
	(2) 禁带中部位置	J 电流密度
E_t	复合中心能级	j^* 物体辐射度
E_V	价带顶能量	J_F pn 结正向电流密度
E	电场强度	J_{FD} pn 结正向扩散电流密度
F	(1) 自由能	J_G 势垒区产生电流密度

J_n	电子电流密度	p_0	平衡空穴浓度
J_p	空穴电流密度	Δp	非平衡空穴浓度
J_{ph}	光生电流密度	q	电子电荷
J_r	势垒区复合电流密度	QE	太阳能电池量子效率
J_s	反向饱和电流密度	QR	太阳能电池生成概率
k	(1) 波矢量 (2) 消光系数	R	(1) 电阻 (2) 反射系数
k_0	玻耳兹曼常数		(3) 复合率
L	扩散长度		(4) 日地距离
L_n	电子扩散长度	R_s	太阳能电池串联内阻
L_p	空穴扩散长度	R_{sh}	太阳能电池并联内阻
l	长度	r	(1) 复合概率 (2) 俘获系数
M_{Sun}	太阳质量	r_n	电子俘获系数
m_0	电子惯性质量	r_p	空穴俘获系数
m_n^*	电子有效质量	r_s	太阳半径
m_p^*	空穴有效质量	S	能流密度
N	(1) 折射率 (2) 电子浓度	S_p	空穴扩散流密度
N_0	表面入射光子通量	SR	太阳能电池光谱响应
N_A	受主浓度	T	透射系数温度
N_C	导带的有效状态密度	t	时间
N_D	施主浓度	t_s	真太阳时
N_t	复合中心浓度	V	(1) 电压 (2) 电势 (3) 体积
N_S	太阳能电池的串联数	V_D	pn 结内建电势差
N_P	太阳能电池的并联数	V_F	正向偏压
N_V	价带的有效状态密度	V_m	太阳能电池最大功率点电压
n_0	平衡电子浓度	V_{OC}	太阳能电池开路电压
n_D^+	电离施主浓度	V_S	表面势
n_i	本征载流子浓度	W	功函数
n_s	表面载流子浓度	W_m	金属功函数
n_t	复合中心电子浓度	W_S	半导体功函数
Δn	非平衡电子浓度	X_D	pn 结耗尽层宽度
P	功率	α	(1) 吸收系数 (2) 太阳高度角
P_m	太阳能电池最大输出功率		
p	(1) 空穴浓度 (2) 动量		

第1章
绪论

ε	介电常数	σ_n	n 型电导率
η	效率	σ_p	p 型电导率
λ	波长	δ	赤纬角
μ	(1) 平均漂移速度 (2) 迁移率	ω	时角
μ_n	电子迁移率	θ_{zs}	太阳天顶角
μ_p	空穴迁移率	ϕ	观测者地理纬度
ρ	电阻率	Φ_s	太阳辐射总功率
σ	(1) 电导率 (2) 斯特藩-玻耳兹曼常数	ϕ_n	肖特基势垒高度
σ_i	本征电导率	ν	频率
		χ	电子亲和能

能源是人类当前和未来生存和发展的基础。在一定的条件下,只有不断开发、合理利用能源,人类当前和未来生存和发展的自然因素和社会条件,才能得到改善,才能满足生产发展、生活安定和能源需求。

能源是物质做功的本力,能量是指做功的数量,其单位是焦耳(J)。能量是考察物体运动状况的物理量,是物体运动的度量,如物体运动的机械能,分子运动的热能,电子运动的电能,原子运动的电磁辐射能,物质结构改变时释放的核能,原子核衰变作用时释放的核能等。

能源的起源由地质、生物界中植物通过光合作用自然资源及由它们加工或转化而成。能源产生并贮集为能源,也就是说,能源就是能够向人类提供某种形式能量的自然资源,包括所有的燃料(煤炭、阳光、地热能、风能),它们均可通过适当的转换手段将其为人类生产和生活提供所需的能量。例如煤和石油等化石能源燃烧时提供热能,风能和风力可以发电供机械使用,太阳的辐射可以转化为热能或电能等。

1.1.2 能源的分类

在能源的开采、开发和利用的过程中,出于表达的需要,可以根据其生成过程、使用功能、利用状况等进行分类。能源的分类方式多种多样,本书仅介绍常用能源分类,如表 1-1 所示。

1. 按生成条件分类

按生成条件分类,与以往能源分为一次能源与二次能源,即一次能源和二次能源。一次能源又称原能源,指以天然形态存在于自然界中,未经过加工、可直接从自然界中获取的能源,如煤炭、石油、天然气、太阳能、水能和地热能等。对二次能源来说,各种能源的用途各不相同,在能源系统的生产和消费,特别是在发电系统环节中,决定又于种能源的用途如何。例如水能,每度电的热值为 2.9×10^7 J,而煤、油、气等燃料均可按平均发电热效率来评价。

在能源利用中,一次能源的利用形式,大致有 3 种情况。

(1) 第一类能源是来自地球以外天体(主要是太阳)的能源,例如太阳能和地

目 录

前 言

主要参数符号表

第 1 章 绪论 1

1.1 能源	1
1.1.1 能源的概念	1
1.1.2 能源的分类	1
1.1.3 能源的品质	3
1.2 能源与社会发展	4
1.2.1 能源利用与人类文明	4
1.2.2 全球能源发展现状	5
1.3 能源与环境问题	8
1.3.1 常规能源的环境影响	8
1.3.2 可持续发展战略	11
1.4 我国能源概述	12
1.4.1 我国能源现状、问题与对策	12
1.4.2 我国可再生能源现状与前景	14
1.5 太阳能的利用	15
1.5.1 太阳能的特点	16
1.5.2 太阳能的利用方式	17
1.6 光伏发电技术	18
1.6.1 光伏发电技术发展史	19
1.6.2 光伏行业发展史	20
1.6.3 我国光伏产业现状	21
习题	27
参考文献	27

第 2 章 太阳与太阳辐射 30

2.1 太阳	30
2.2 日地天文关系	31
2.2.1 地球的自转与公转	31

2.2.2 天球与天球坐标系	32
2.2.3 太阳时	33
2.2.4 太阳位置	35
2.3 太阳辐射	35
2.3.1 太阳辐射光谱	36
2.3.2 太阳辐射	37
2.3.3 太阳常数	38
2.3.4 地表太阳辐射强度	39
2.3.5 任意平面太阳辐射强度	40
2.4 太阳能资源分布	42
2.4.1 世界太阳能资源分布	42
2.4.2 我国太阳能资源分布	43
习题	44
参考文献	45
第3章 半导体物理基础	46
3.1 晶体结构	46
3.1.1 晶格	47
3.1.2 晶格的周期性	48
3.1.3 晶向及晶面	49
3.1.4 晶体的对称性	51
3.2 晶体缺陷	58
3.2.1 点缺陷	58
3.2.2 线缺陷	62
3.3 能带理论	65
3.3.1 原子能级和能带	65
3.3.2 晶体中电子的状态	67
3.3.3 电子在外力作用下的运动和有效质量	72
3.3.4 导体、绝缘体和半导体的能带论解释	73
3.4 半导体的特性	75
3.4.1 本征半导体的导电结构	76
3.4.2 典型半导体的能带结构	78
3.4.3 半导体中的杂质和杂质能级	80
3.4.4 缺陷能级	82
3.5 半导体中载流子的费米统计	83
3.5.1 费米统计分布	84
3.5.2 玻耳兹曼分布函数	85
3.5.3 本征半导体的载流子浓度	86
3.5.4 杂质半导体的载流子浓度	90

3.6 半导体的导电性	95
3.6.1 载流子的散射及漂移运动	95
3.6.2 半导体的迁移率	97
3.7 非平衡载流子	98
3.7.1 非平衡载流子的寿命	99
3.7.2 非平衡载流子的复合	100
3.7.3 载流子的扩散运动	103
3.7.4 非平衡载流子的漂移运动	104
3.8 pn 结	105
3.8.1 pn 结及其能带图	105
3.8.2 理想 pn 结电流 - 电压特性	108
3.8.3 影响 pn 结电流 - 电压特性的因素	113
3.9 半导体的光学性质	116
3.9.1 半导体的光学常数	116
3.9.2 半导体的光吸收	118
习题	122
参考文献	122

第 4 章 光生伏特效应 124

4.1 pn 结的光生伏特效应	124
4.1.1 光生电流	124
4.1.2 光电压	129
4.2 pn 结太阳能电池特性	132
4.2.1 理想太阳能电池的等效电路	132
4.2.2 电流 - 电压特性	132
4.2.3 转换效率	134
4.3 效率影响因素	135
4.3.1 寄生电阻	135
4.3.2 太阳辐射强度的影响	138
4.3.3 温度影响	139
4.4 太阳能电池的串并联	141
4.4.1 平衡串并联	141
4.4.2 不平衡串并联	142
习题	144
参考文献	144

第 5 章 其他光生伏特效应 145

5.1 肖特基结	145
5.1.1 金属和半导体的功函数	145

5.1.2	肖特基势垒	146
5.1.3	肖特基结的电流 - 电压特性	148
5.1.4	欧姆接触	149
5.2	MIS 结构	150
5.2.1	表面态对接触势垒的影响	150
5.2.2	表面电场效应	152
5.2.3	MIS 太阳能电池	153
5.3	半导体异质结	155
5.3.1	界面态	155
5.3.2	异质结能带图	157
5.3.3	异质结的电流 - 电压特性	159
5.4	非晶态半导体	162
5.4.1	非晶态半导体的结构	162
5.4.2	a-Si:H 的掺杂效应及 pn 结	163
5.4.3	非晶硅太阳能电池	164
	习题	165
	参考文献	166
第 6 章 硅基太阳能电池材料及制造工艺		167
6.1	晶硅电池材料	167
6.1.1	硅材料提纯	167
6.1.2	拉单晶	171
6.1.3	铸造多晶硅	174
6.1.4	制作硅片	176
6.2	晶硅太阳能电池	177
6.2.1	表面制绒	178
6.2.2	扩散制结	181
6.2.3	边缘刻蚀及去磷硅玻璃	182
6.2.4	镀减反射膜	183
6.2.5	印刷电极及烧结	185
6.2.6	测试分选及包装入库	187
6.3	晶硅太阳能电池组件	188
6.3.1	组件的主要封装材料	188
6.3.2	组件封装工艺	190
6.4	非晶硅薄膜太阳能电池的制造	192
6.4.1	制备透明导电薄膜	194
6.4.2	沉积 p-i-n	194
6.4.3	激光切割技术	195
	习题	196

参考文献	197
第7章 光伏发电系统	198
7.1 光伏发电系统的分类	198
7.1.1 离网型光伏发电系统	199
7.1.2 并网型光伏发电系统	200
7.1.3 光伏与建筑的结合	201
7.1.4 光伏发电系统的采光方式	202
7.1.5 聚光型光伏发电系统	203
7.2 并网型光伏发电系统的体系结构	207
7.2.1 集中式结构	207
7.2.2 串行结构	207
7.2.3 多支路结构	208
7.2.4 模块式结构	208
7.3 光伏并网逆变器	209
7.3.1 光伏并网逆变器的电路拓扑	209
7.3.2 光伏并网逆变器的功能	214
习题	215
参考文献	215
附录	217
附录 A 常用物理常数表	217
附录 B IV族半导体材料的性质	218
附录 C III - V族半导体材料的性质	219
附录 D II - VI族半导体材料的性质	220
附录 E IV - VI族半导体材料的性质	221

1.1 能源

1.1.1 能源的概念

自然资源(能源)指在一定时期和地点,在一定条件下具有开发价值、能够满足或提高人类当前和未来生存和生活状况的自然因素和条件,包括气候资源、水资源、矿物资源、生物资源和能源等。

能是物质做功的能力,能量是指能的数量,其单位是焦耳(J)。能量是考察物质运动状况的物理量,是物体运动的度量。如物体运动的机械能、分子运动的热能、电子运动的电能、原子振动的电磁辐射能、物质结构改变而释放的化学能、粒子相互作用而释放的核能等。

能量的来源即能源,自然界中能够提供能量的自然资源及由它们加工或转化而得到的产品都统称为能源。也就是说,能源就是能够向人类提供某种形式能量的自然资源,包括所有的燃料、流水、阳光、地热、风等,它们均可通过适当的转换手段使其为人类生产和生活提供所需的能量。例如煤和石油等化石能源燃烧时提供热能,流水和风力可以提供机械能,太阳的辐射可转化为热能或电能等。

1.1.2 能源的分类

在能源的获取、开发和利用的过程中,为了表达的需要,可以根据其生成条件、使用性能、利用状况等进行分类。能源的分类方式多种多样,本节仅介绍常用的几种。

1. 按生成条件分类

按生成条件分类,可以把能源分为一次能源与二次能源。

一次能源又称自然能源,指以天然形态存在于自然界中(现成存在),可直接取得而不需改变其基本形态的能源,如煤炭、石油、太阳能、风能及地热能等。对于一次能源来说,各种燃料的热值是不同的,在统计能源的生产和消费,特别是在计算能耗指标时,常定义一种假想的标准燃料,即标准煤。标准煤的热值为 $2.9 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$,各种燃料均可按平均发热量折算成标准煤。

自然界中一次能源的初始来源,大致有 3 种情况。

1) 第一类能源是来自地球以外天体(主要是太阳)的能量,例如能以光和热

的形式直接利用的太阳能，能以化石或生物体等物质形式存储的能量，能以风、水流、波浪等形式体现的能量。

2) 第二类能源是来自地球内部的能源，主要是核能和地热能，还包括地震、火山喷发和温泉等自然呈现的能量。

3) 第三类能源是地球与其他天体相互作用产生的能量，例如月亮、太阳引力变化形成的潮汐能。

为了满足生产和生活的需要，有些能源通常需要经过加工进行直接或间接的转换才能使用。由一次能源经加工转换而获得的另一种形态的能源即为二次能源，如电能、沼气、酒精、汽油以及氢能等，其中电能是最重要的二次能源。

2. 按发展应用状况分类

按发展应用状况分类，可把能源分为常规能源与新能源。

常规能源是在当前的技术水平和利用条件下，已被人们广泛应用了较长时间的能源，这类能源使用较普遍，技术较成熟，现阶段主要有煤炭、石油、天然气、水能、核（裂变）能等。它们的工业化程度非常高，在总耗能量中占据绝对优势和份额。

新能源是由于技术、经济或能源品质等因素的限制而未能大规模使用的能源，有的甚至还处于研发或试用阶段，如太阳能、风能、海洋能、地热、生物质和氢能等。

常规能源与新能源的分类是相对的，在不同历史时期会有变化，这取决于应用历史和使用规模。例如在 20 世纪 50 年代，核（裂变）能属于新能源，现在有些国家已把它归为常规能源。有些能源虽然应用的历史很长，但正经历着利用方式的变革，而那些较有发展前途的新型应用方式尚不成熟或规模尚小，也被归为新能源，例如太阳能、风能。在中国，新能源指除常规化石能源和大中型水力发电、核裂变发电之外的一次能源，包括生物质能、太阳能、风能、地热能，以及海洋能。

3. 按循环恢复能力分类

按循环恢复能力分类，能源分为非再生能源和可再生能源。

非再生能源又称不可再生能源，指用完后不可重新生成的能源，这类能源总有一天会枯竭，如化石燃料和核燃料均为非再生能源。据估计，按照现有的探明储量和开采程度，地球上的化石燃料最多还可使用几百年。

而可再生能源则可以循环使用，能够有规律地不断得到补充，没有使用期限，也不会因长期使用而减少，如太阳能、水能、风能、海洋能、地热能和生物质能，均为可再生能源。

4. 按能源存在和转移形式分类

能源按其能源存在和转移形式可以分为能体能源和过程性能源。

能体能源包含能量的物质或实体。这类能源可以直接存储和运输，例如化石燃料、核燃料、生物质、地热水和地热蒸汽。

过程性能源是随着物质运动而产生、并且仅以运动过程的形式存在的能源。这类能源无法直接存储和运输。如风、水、海潮、波浪和地热等。

5. 按环境污染程度分类

按环境污染程度分类，能源分为清洁能源和非清洁能源。

清洁能源是指对环境没有污染或污染较小的能源，有时也叫绿色能源，如太阳能、风能、海洋能、垃圾发电和沼气等。

非清洁能源是指可能对环境造成较大污染的能源，例如煤炭等化石燃料。清洁与非清洁能源的划分也是相对的，能源分类见表 1-1。

表 1-1 能源分类

能源类别		可再生能源				非再生能源	
一次能源	第一类能源 来自地球以外天体的能源	太阳能	生物质能			煤炭	
		风能	水能			石油	
		海水温差能	海水盐差能			天然气	
		海洋波浪能	海(湖)流能			油页岩	
		雷电	宇宙射线				
	第二类能源 来自地球内部能源	地热能	地震			核能	
		火山喷发	温泉				
	第三类能源 产生于地球和其他天体相互作用	潮汐能					
二次能源	燃料能源	焦炭	煤气	沼气	氢能		
		酒精	汽油	柴油	煤油		
		重油	液化气	电石			
	非燃料能源	电力	蒸汽	热水			

1.1.3 能源的品质

各种能源均有优点，也各有不足。从开发、利用的角度考虑，可以从以下几个方面对其进行评价和比较。

1. 能流密度

能流密度是指在单位空间或单位面积内，能够从某种能源获得的功率。化石燃料与核燃料的能流密度大，各种可再生能源的能流密度一般都比较小。能流密度太小，经济性就会过差，不利于开发利用。

2. 开发费用和设备造价

对于化石能源与核燃料，探、采、加工、运输均需投入大量人力和物力，而其发电设备单位容量的初期投资较小。而可再生能源的开发费用主要是开发能源的一次性投资，其设备造价比较高，而运营费用很低。开采和利用的成本与能源的转化和利用的技术难度关系很大。随着技术的发展、政策的倾斜、污染代价的计入，对

于需要能源规模不是很大的场合，可再生能源发电的初期投资相对成本正在不断降低。

3. 存储的可能性与供能的连续性

在工业、农业和人们的日常生活中，对能量的需求都存在着高峰、低谷、间歇等规律，有时要求持续很长时间不间断地供能，这就要求所使用的能源在不需要的时候能够存储起来，需要时能立即输出。在这方面，化石燃料都比较容易存储，也便于连续供应；而太阳能、风能等可再生能源则不易保存，能量供应也可能有波动性和间歇性。

4. 运输费用与损耗

运输过程本身也要投资并消耗能源，远距离运输的成本和损耗会影响能源的使用。太阳能、风能、地热能难以运输，但可以就地利用，无需运输。而化石燃料可以运输，但要考虑运输的成本和耗能。

5. 对环境的影响

随着环保呼声的提高和可持续发展概念的提出，人类对环境的重视会进一步加强，对排污指标的限制也将增加。化石燃料燃烧过程中会排放 CO_2 等温室气体，甚至还有一些有毒或腐蚀性物质，对环境影响较大。核燃料有放射性污染及废料处理的问题。即使是水力发电，也会对生态平衡、土地盐碱化、灌溉与航运造成不利影响，需要加以考虑。而可再生能源大多对环境的影响较小。

6. 蕴藏量

蕴藏量是能源品质评价的一个重要方面，储量少的能源就没有开发利用的价值，与蕴藏量有关的评价还应考虑其可再生性和地理分布情况。像化石燃料等非再生能源，蕴藏量是有限的，总有用完的时候。而太阳能、风能等可再生能源可以循环使用，不断地得到补充，即使每年更新的数量有限，长期来看，也是无穷无尽的。

7. 能源品位

能源品位反映的是能源利用的方便程度。其中，二次能源要比一次能源品位高。而能直接变成机械能和电能的能源（如水力和风能），要比那些必须先经过热利用环节的能源（如化石燃料）的品位高。

从以上几个方面评价能源的品质，应以动态的观点来衡量。随着科学技术的进步和应用的发展，其各项指标都可能发生变化，也许会得到改善。

1.2 能源与社会发展

1.2.1 能源利用与人类文明

能源是人类赖以生存的物质基础，是国民经济发展的命脉。天然能源的原始利

用起源非常早,几十万年以前人类就学会了用火,这是利用能源的第一次大突破。在漫长的岁月里,人类一直以柴草为生活能量的主要来源,燃火用于烧饭、取暖和照明,这一时期也被称为柴草时期。后来人类逐渐学会将畜力、风力、水力等自然动力用于生产和交通运输。

2000多年以前人类就知道煤炭可以作为燃料。14世纪的中国、17世纪的英国采煤业都已相当发达,但煤炭长期未能在能源消费结构中占据主导地位。在1860年的世界能源消费结构中,薪柴和农作物秸秆仍占能源消费总量的73.8%,煤炭仅占25.3%。

18世纪70年代,英国的瓦特制成了以煤炭作为燃料的改良型蒸汽机,这种蒸汽机得到迅速推广,大大推动了机器的普及和发展。人类社会由此进入了“蒸汽时代”。蒸汽机的广泛应用使煤炭迅速成为第二代主体能源,煤炭时期即从此时开始。煤炭在世界一次能源消费结构中所占的比重,从1860年的25%,上升到1920年的62%。煤炭的大量使用,使人类进入了机械化时代。

之后便是石油时代。人类很早就发现了石油,《汉书》《梦溪笔谈》中都有描述。直到19世纪,石油工业才逐渐兴起。1854年,美国宾夕法尼亚州开采出了世界上第一口油井,是现代石油工业的开端。1886年,德国人本茨和戴姆勒研制出第一辆以汽油为燃料、由内燃机驱动的汽车,从此进入大规模使用石油的汽车时代。石油和天然气逐渐取代煤炭,在世界能源消费构成中占据主要地位。1965年,在世界能源消费结构中,石油首次超过煤炭占居首位,成为第三代主体能源。到1979年,石油所占的比重达到54%,相当于煤炭的3倍。

原始能源最广泛的利用方式是转化为电能。1881年,美国建成了世界上第一个发电站,同时还研制出电灯等实用的用电设备。从此以后,电力的应用领域越来越广,发展规模也越来越大,人类社会逐步进入电气化时代。石油、煤炭、天然气等化石燃料被转换成更加便于输送和利用的电能,进一步推动了工业革命,带来了巨大的技术进步。

1973年西方世界爆发了石油危机,宣告了石油时代的结束。核能利用迅速发展起来,在世界能源结构中占据了重要位置。到20世纪90年代,核能发电所提供的电力已占全世界发电总量的17%左右。

进入21世纪以来,太阳能、风能、海洋能、生物质能等可再生能源发展很快,并且逐渐走向成熟化和规模化,所占的比重也有望大幅度提高,为人类解决能源和环保问题开辟了新的天地。

1.2.2 全球能源发展现状

根据英国石油公司(British Petroleum, BP)发布的《BP世界能源统计年鉴》2017版,截至2016年化石能源探明可采储量分别为,全球石油2407亿吨、天然气186.6万亿立方米,以及煤炭11393.31亿吨,折合1.72万亿吨标准煤,其中煤