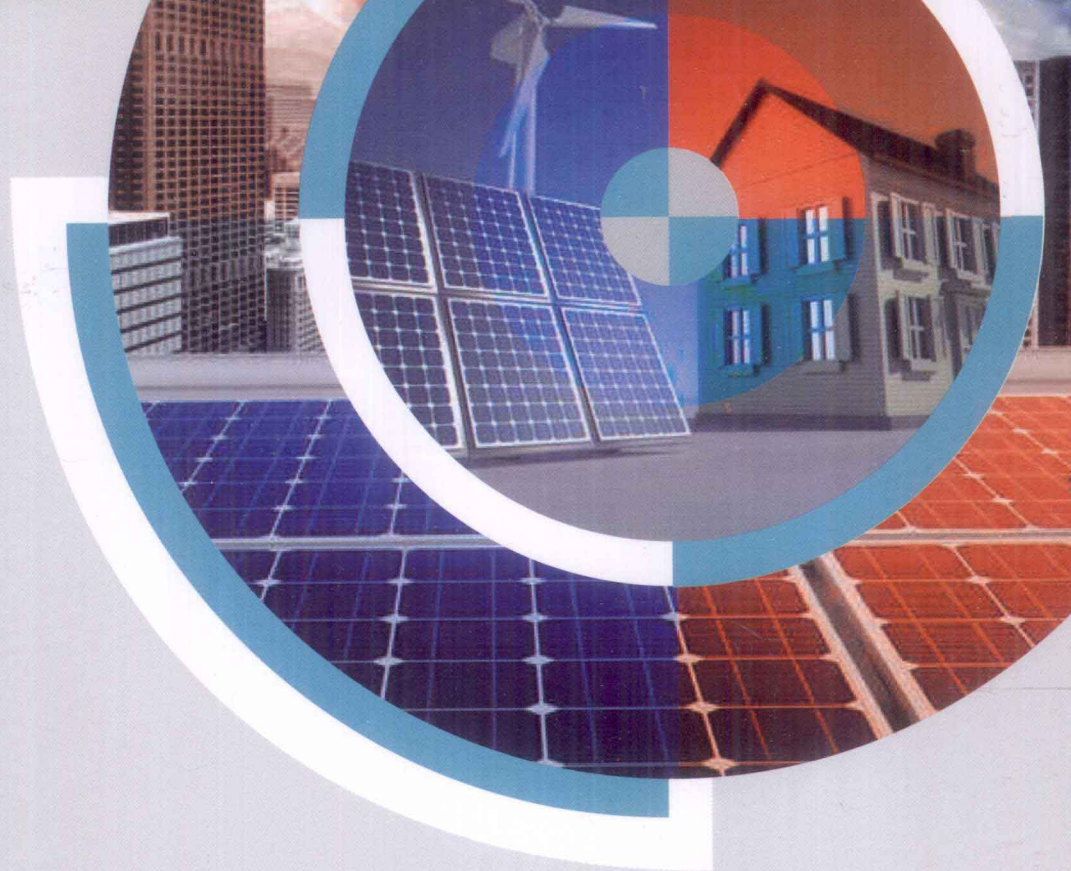




太阳能建筑 一体化技术应用

(光热部分)

主编 海涛 林波
何江

 科学出版社

太阳能建筑一体化技术应用

(光热部分)

海 涛 林 波 主编
何 江 主审

科 学 出 版 社

北 京

前 言

地球环境由于大量燃烧矿物能源已产生很明显的变化,人类生存的环境正在逐渐恶化,减少传统常规能源的消耗量、减少温室气体的排放和保护环境已迫在眉睫。建筑能耗是各行业中的耗能大户,在我国建筑耗能已接近社会总能耗的 30%,如何有效地降低建筑能耗是目前人们关注的焦点之一。在大力节能的基础上如何使用可再生能源,降低建筑物传统能量消耗是多年来人们的努力方向。太阳能以其清洁、用之不竭的特性近几年再次引起人们的高度关注,太阳能光热建筑产品的生产和销售平均每年都以超过 30% 的速度增长,太阳能光热建筑将成为最普及的建筑可再生能源利用形式之一。当前,我国高等教育正面临新时期的发展需求。培养应用型技术人才是工科教育的一个重要教学目标。为了满足在应用能力培养实施过程中对教材的同步需求,本书综述了太阳能光热利用的主要理论知识和应用技术,简要阐述了太阳能建筑一体化综合设计的原则和方法。全书共 9 章,第 1 章和第 2 章介绍了太阳能研究背景及国内外研究应用的发展现状;第 3 章~第 5 章主要论述了太阳能热水系统和高层住宅外观一体化设计,太阳能热水系统和建筑室内水系统一体化设计;第 6 章~第 8 章,描述了太阳能集热器最佳倾角研究,高层住宅建筑遮挡对立面集热器安装的影响,太阳能热水系统的节能效益分析;第 9 章是太阳能建筑一体化实例及相关产品。

本书是为普通高等教育应用型本科太阳能教材编写的,重点突出了知识的应用性。本书可作为太阳能应用专业的本专科教材,也可作为硕士研究生及从事相关工程技术人员的参考书。书中许多章节中有面向工程实践的详细举例。本书系统论述了太阳能一体化和太阳能集热器利用的基本知识,介绍了国内外太阳能热利用的发展趋势,以及我国在太阳能热利用方面的进展和优势。本书每章开头有内容提要,结尾有小结和习题,便于教学和自学。

本书的编写工作开始于 2010 年 7 月,由广西大学电气工程学院硕士生导师海涛、广西比迪光电科技工程有限责任公司林波任主编。广西大学土木建筑工程学院博士生导师何江教授担任本书的主审。参与本书编写工作的还有广

西公安厅交警总队科研所副所长廖炜斌、广西大学李晖、王佳亮、陈快、王钧、郑燕芳、广西桂东电力股份有限公司供电公司欧剑、四川中恒工程设计研究院有限公司唐芳旭,以及谢晓鹏先生。广西大学海涛负责全书编写和统稿工作。

在本书的编写过程中,广西比迪光电科技工程有限责任公司李敏、黄坛芳、韦秋华、李春妮、李银萍、韦丽金、艰云耀、王懿、黄雅婧,广西大学陶虎、李昭勇、石清革等人为本书的撰写做了很多工作,广西比迪光电科技工程有限责任公司董事长黎家足、董事副总经理韦俊强、董事彭荣汉对编撰此书也给予了大力支持和帮助,在此对他们的辛勤工作表示感谢。由于时间紧迫,编者水平有限,书中谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

E-mail:haitao5913@163.com

编者
2011年9月

目 录

第 1 章 太阳能研究背景和意义	1
1.1 新能源和可再生能源的含义、特点及种类	1
1.1.1 新能源和可再生能源的基本含义	1
1.1.2 新能源和可再生能源的主要特点	1
1.1.3 新能源和可再生能源的种类	2
1.1.4 太阳能	2
1.2 开发利用新能源和可再生能源的意义	3
1.2.1 新能源和可再生能源是化石能源的替代能源	3
1.2.2 新能源和可再生能源是人类赖以生存的清洁能源	4
1.2.3 新能源和可再生能源是不发达国家现实的能源	6
1.3 太阳能利用简史	6
1.4 太阳的构成	11
1.4.1 太阳是一个巨大的火球	11
1.4.2 太阳的能量巨大	13
1.4.3 太阳能量的传送	14
1.4.4 太阳的光谱	16
1.4.5 太阳辐照度及特点	16
1.5 太阳能利用基本方式	19
1.6 中国的太阳能资源	20
1.7 能源危机和环境问题的双重压力	23
1.8 太阳能热水系统的优越性	25
1.9 太阳能热水系统在国内的发展趋势	26
1.10 太阳能热水系统在使用和推广中的诸多问题	26
本章小结	28
本章习题	29

第2章 国内外太阳能研究应用的发展现状	31
2.1 国内外太阳能发展现状的比较	31
2.2 中国建筑业发展速度与规模	35
2.3 中国建筑能耗发展状况	36
2.4 太阳能建筑应用的发展	38
2.4.1 我国太阳能建筑应用发展历史	38
2.4.2 我国目前太阳能建筑应用发展分析	42
2.4.3 我国太阳能建筑应用发展特点	49
2.5 我国太阳能热水系统应用现状	53
2.6 高层住宅太阳能热水系统应用存在的问题	54
本章小结	55
本章习题	55
第3章 太阳能热水系统	57
3.1 太阳能集热器的分类	58
3.1.1 平板型太阳能集热器	58
3.1.2 真空管型太阳能集热器	59
3.2 太阳能热水系统的分类	60
3.2.1 自然循环太阳能热水系统	62
3.2.2 强制循环太阳能热水系统	64
3.2.3 直流式太阳能热水系统	65
3.3 集热器的连接	66
3.4 太阳能热水系统和建筑一体化设计概念	68
3.5 太阳能热水系统的整合设计	69
本章小结	70
本章习题	71
第4章 太阳能热水系统和高层住宅外观一体化设计	73
4.1 太阳能热水系统和住宅外观结合设计技术的发展	73
4.2 太阳能热水系统和高层住宅外观结合的难点	75
4.3 太阳能集热器和高层住宅外观一体化设计	76
4.3.1 功能性要求	76

4.3.2	太阳能热水系统安全性要求	94
4.4	具体结合方式	95
4.4.1	太阳能集热器和平屋顶结合	95
4.4.2	太阳能集热器和坡屋顶结合	97
4.4.3	太阳能集热器和飘板、装饰构架结合	98
4.4.4	太阳能集热器和墙面结合	99
4.4.5	太阳能集热器和阳台结合	101
4.4.6	太阳能集热器和格栅结合	101
4.5	太阳能集热器和建筑外观一体化的进一步发展	104
4.5.1	构件尺寸匹配性	104
4.5.2	集热器产品多样化	105
4.5.3	集热器构件化	106
4.6	太阳能热水系统其他部分和建筑的一体化设计	108
4.6.1	贮热水箱布置	108
4.6.2	太阳能热水系统管线布置	108
	本章小结	109
	本章习题	110
第5章	太阳能热水系统与建筑一体化设计	111
5.1	太阳能热水系统与建筑一体化系统结构	111
5.1.1	太阳能热水系统与建筑结合的基本要求	111
5.1.2	太阳能热水系统与建筑物的结合方式	112
5.2	太阳能热水系统的选择	113
5.2.1	太阳能集热器的选择	113
5.2.2	系统运行方式	116
5.2.3	系统换热方式	119
5.2.4	辅助热源的安装位置和启动	121
5.2.5	水箱和集热器的关系	121
5.2.6	建筑中运行的特点	123
5.3	太阳能热水系统建筑一体化设计的一般原则	126
	本章小结	127
	本章习题	128

第6章 太阳能集热器最佳倾角研究	129
6.1 太阳辐射及相关参量	129
6.1.1 太阳辐射	129
6.1.2 地球与太阳的运动规律	131
6.1.3 太阳角的计算	133
6.1.4 太阳常数	136
6.2 集热器倾角研究现状	136
6.2.1 国外研究现状	136
6.2.2 国内研究现状	137
6.3 太阳辐射强度计算	139
6.3.1 直射辐射强度计算	139
6.3.2 散射辐射强度计算	141
6.3.3 反射辐射强度计算	141
6.4 倾斜表面月平均日辐射量计算	142
6.4.1 倾斜表面上的直射辐射	142
6.4.2 散射辐射量和地面反射辐射量	143
6.5 集热器最佳摆放位置的确定	144
6.5.1 最佳方位角的确定	144
6.6 集热器最佳安装倾角	147
6.7 太阳辐射的测量及测量标准	151
本章小结	153
本章习题	154
第7章 高层住宅建筑遮挡对立面集热器安装的影响	155
7.1 高层住宅建筑间距要求	156
7.1.1 高层建筑与北侧建筑间距	157
7.1.2 高层建筑与东西侧建筑间距	157
7.2 立面集热器布置高度	157
7.3 高层住宅的长度对集热器的影响	158
7.4 高层住宅建筑形式对集热器的影响	158
7.5 两种日照统计方式对集热器的影响	159
7.6 高层建筑遮挡情况典型案例分析	160

7.6.1	遮挡情况条件设定	160
7.6.2	分析依据	161
7.6.3	两种不同建筑形式的遮挡情况	161
本章小结		164
本章习题		164
第 8 章	太阳能热水系统的节能效益分析	165
8.1	总 则	165
8.2	太阳能热水系统节能效益的预评估	166
8.2.1	系统的年节能量预评估	166
8.2.2	太阳能热水系统的节能费用预评估	166
8.2.3	太阳能热水系统增加投资回收期的预评估	167
8.2.4	太阳能热水系统环保效益的评估	168
8.3	太阳能热水系统节能效益的长期监测	169
8.3.1	太阳能热水系统节能效益的监测	169
8.3.2	太阳能热水系统的太阳能保证率及太阳能集热系统效率	170
8.3.3	太阳能热水系统的节能收益	170
8.3.4	太阳能集热系统增投资的回收年限	171
8.3.5	系统实际运行的环保效益	171
8.4	南方某小区坡屋面多层住宅	171
8.4.1	设计施工说明	171
8.4.2	太阳能热水系统设计原理图	175
8.4.3	与建筑结合节点图	175
8.4.4	系统节能效益分析	176
本章小结		177
本章习题		178
第 9 章	太阳能建筑一体化实例及相关产品	179
9.1	太阳能相关产品	179
9.1.1	太阳能平板集热器	179
9.1.2	太阳能家用水箱系列	182

9.1.3 工程组合水箱	183
9.2 工程热泵	183
9.2.1 空气源热泵	184
9.2.2 地源热泵	187
9.2.3 家用热泵	189
9.3 太阳能控制系统动力站	190
9.4 太阳能供热水系统	191
9.5 太阳能与建筑一体化实例	192
本章小结	195
本章习题	196

附录 A 不同城市纬度和遮挡距离表	197
-------------------------	-----

附录 B 太阳能集热器面积现配速查表	199
--------------------------	-----

附录 C 太阳能集热器面积速查表	201
------------------------	-----

附录 D 太阳能建筑一体化公司	203
-----------------------	-----

第 1 章 太阳能研究背景和意义

太阳能是取之不尽的清洁可再生能源,其特点是处处都有且无害,但因辐射能量密度低,收集困难。当地的太阳辐射量与太阳高度、大气质量、大气透明度、地理纬度、日照时间及海拔高度密切相关,直接影响太阳能利用效果。中国的太阳能资源丰富,开发利用太阳能具有重大战略意义。中国在太阳能研究、应用上给予高度重视。本章主要介绍太阳能应用的简史和利用的基本方式。

1.1 新能源和可再生能源的含义、特点及种类

1.1.1 新能源和可再生能源的基本含义

1981 年联合国于肯尼亚首都内罗毕召开的新能源和可再生能源会议提出的新能源和可再生能源的基本含义为: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;它不同于常规化石能源,可以持续发展,几乎是用之不竭,对环境无多大损害,有利于生态良性循环;重点是开发利用太阳能、风能、生物质能、海洋能、地热能和氢能等。

1.1.2 新能源和可再生能源的主要特点

新能源和可再生能源共同的特点主要有:

- (1) 能量密度较低并且高度分散。
- (2) 资源丰富,可以再生。
- (3) 清洁干净,使用中几乎没有损害生态环境的污染物排放。
- (4) 太阳能、风能、潮汐能等资源具有间歇性和随机性。

(5) 开发利用的技术难度大。

1.1.3 新能源和可再生能源的种类

关于新能源和可再生能源,联合国开发计划署(UNDP)分为三大类:

(1) 大中型水电。

(2) 新可再生能源,包括小水电、太阳能、风能、现代生物质能、地热能 and 海洋能等。

(3) 传统生物质能。

我国目前是指除常规化石能源和大中型水力发电及核裂变发电之外的生物质能、太阳能、风能、小水电、地热能、海洋能等一次能源以及氢能、燃料电池等二次能源。

1.1.4 太阳能

太阳辐射能作为一种能源,与煤炭、石油、天然气、核能等比较,有其独特的优点:

(1) 普遍:阳光普照大地,处处都有太阳能。

(2) 无害:利用太阳能作能源,不产生对人体有害的物质,因而不会污染环境,没有公害。

(3) 长久:只要存在太阳,就有太阳辐射能,是取之不尽、用之不竭的。

(4) 巨大:一年内到达地面的太阳辐射能的总量,要比地球上现在每年消耗的各种能源的总量大几万倍。

太阳能利用的困难之处有:

(1) 分散性。即能量密度低。晴朗白昼的正午,在垂直于太阳光方向的地面上, 1m^2 面积所能接收的太阳能,平均最大只有 1kW 左右。在实际利用时,往往需要一套面积相当大的太阳能收集设备,这就使得设备占地面积大、用料多、结构复杂、成本增高,影响了推广应用。

(2) 随机性。到达某一地面的太阳直接辐射能,由于受气候、季节等因素的影响,是极不稳定的,这就给大规模的利用增加了不少困难。

(3) 间歇性。到达地面的太阳直接辐射能,随昼夜的交替而变化,这就使大多数太阳能设备在夜间无法工作。为克服夜间没有太阳直接辐射、散射辐射也很微弱所造成的困难,就需要研究和配备储能设备,以便在晴天时把太阳能收集并储存起来,供夜晚或阴雨天使用。

1.2 开发利用新能源和可再生能源的意义

为保护人类赖以生存的地球的生态环境、走经济社会可持续发展之路,为世界上约 20 亿无电人口和特殊用途解决现实的能源供应,开发利用新能源和可再生能源都具有重大战略意义。

1.2.1 新能源和可再生能源是化石能源的替代能源

在当今的世界能源结构中,人类所利用的能源主要是石油、天然气和煤炭等化石能源。1998 年世界一次能源(包括生物质能)消费总量为 140.50 亿吨标准煤¹⁾,其消费构成如图 1.1 所示。

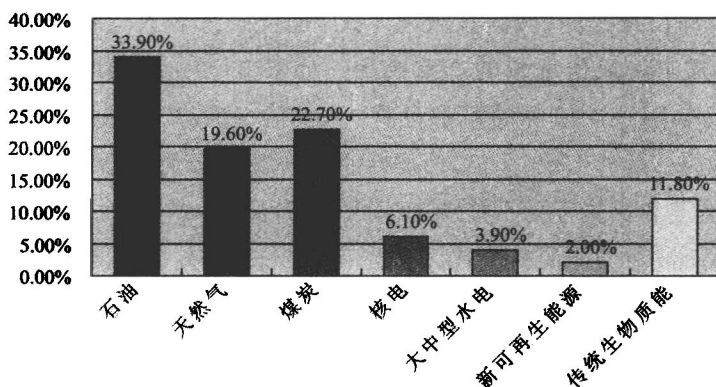


图 1.1 能源消费构成图

随着经济的发展,以及人口的增加,预计未来世界能源消费量将以每年 3% 的速度增长,到 2020 年世界一次能源消费总量将达到 200 亿~250 亿吨标准煤。根据“BP Statistical Review of World Energy, June 2003”的统计,2002 年世界一次能源消费量为 94.05 亿 t 石油当量。截至 2002 年年底,世界石油可采储量为 1427 亿 t,可采 40.6 年;天然气为 155.78×10^4 亿 m^3 ,可采 60.7 年;煤炭为 9844.5 亿 t,可采 204 年。我国的能源资源储量不容乐观,现有探明技术可开发能源总资源量超过 8230 亿吨标准煤,探明经济可开发剩余可采总储量为 1392 亿吨标准煤,约占世界总量的 10.1%。我国能源剩余可采总储量的结构如图 1.2 所示。

我国能源经济可开发剩余可采储量的资源保证程度仅为 129.7 年,其中:原煤仅为 114.5 年,原油仅为 20.1 年,天然气仅为 49.3 年。我国人口众多,人

1) 1 吨标准煤发出的热量为 $2926 \times 10^7 \text{J}$ ($700 \times 10^7 \text{cal}$)。

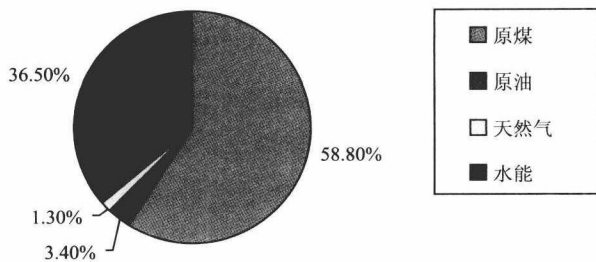


图 1.2 我国能源剩余可采总储量结构图

均能源资源占有量非常低。我国人均能源探明储量只有 135 吨标准煤,仅相当于世界人均拥有量 264 吨标准煤的 51%。其中:煤炭人均探明储量为 147t,是世界人均值 208t 的 70%;石油为 2.9t,为世界人均值的 11%;天然气为世界人均值的 4%;即使是水能资源,按人口平均,也低于世界人均值,而我国所面临的却是能源需求量成倍增长的严重挑战。如果 2050 年我国的人口总数为 15 亿左右的话,届时一次能源的需求量将为 30 亿~37.5 亿吨标准煤,约为目前美国能源消费总量的 1.5~2 倍,为届时世界一次能源消费总量的 16%~22%。以石油、天然气和煤炭等化石能源为主的时期,仅是一个不太长的阶段,它们终将走向枯竭而被新的能源所取代。研究和实践表明,新能源和可再生能源资源丰富,分布广泛,可以再生,不污染环境,是国际社会公认的理想替代能源。根据国际权威机构的预测,到 21 世纪 60 年代,全球新能源和可再生能源的比例,将会发展到占世界能源构成的 50%以上。

1.2.2 新能源和可再生能源是人类赖以生存的清洁能源

化石能源的大量开发和利用,是造成大气和其他类型环境污染与生态破坏的主要原因之一。如何在开发和使用能源的同时,保护好人类赖以生存的地球的环境与生态,已经成为一个全球性太阳能利用技术的重大问题。目前,世界各国都在纷纷采取提高能源效率和改善能源结构的措施,以解决这一与能源消费密切相关的重大环境问题。这就是所谓的能源效率革命和清洁能源革命,也就是我们通常所说的节约能源和发展清洁干净的新能源与可再生能源。

自从工业革命以来,约 80% 的温室气候是人类活动引起的,其中 CO_2 的作用约占 60%。 CO_2 是大气中的主要温室气体类型,而化石燃料的燃烧是能源活动中 CO_2 的主要排放源。1990 年全世界一次能源消费量 114.76 亿吨标准煤,其中煤炭、石油、天然气分别占到 27.3%、38.6% 和 21.7%。据政府间气候变化专门委员会(IPCC) 的气候变化 2007 综合报告报道,在 1970 年至 2004 年

期间,全世界 CO_2 年排放量已经增加了大约 80%,从 210 亿 t 增加到 380 亿 t,在 2004 年已占到人为温室气体排放总量的 77%(图 1.3)。在最近的一个十年期(1995~2004 年), CO_2 当量排放的增加速率(每年 9.2 亿 t CO_2 当量)比前一个十年期(1970~1994 年)的排放速率(每年 4.3 亿 t CO_2 当量)高得多。

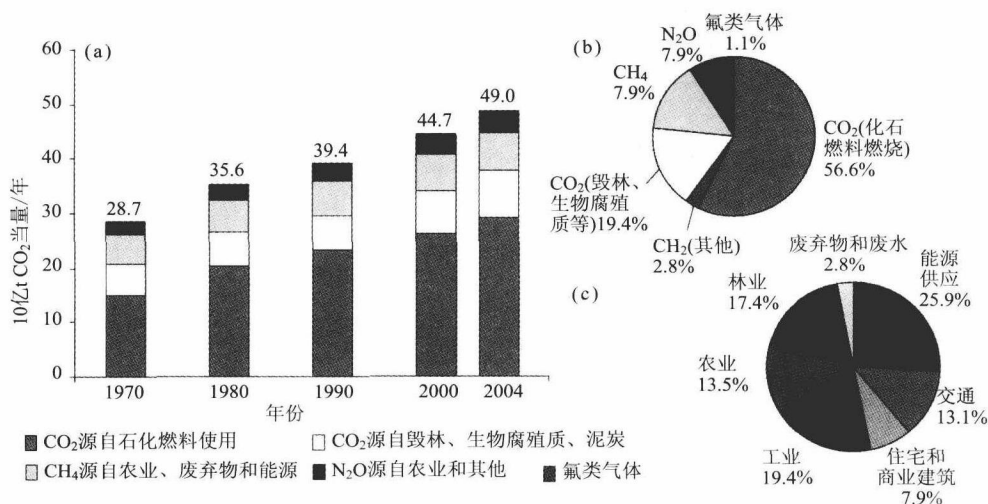


图 1.3 (a) 1970~2004 年全球人为温室气体年排放量;(b)按 CO_2 当量计算的不同温室气体占 2004 年总排放的份额。(c)按 CO_2 当量计算的不同行业排放量占 2004 年总人为温室气体排放的份额(林业包括毁林)。摘自 IPCC 气候变化 2007 综合报告

我国的能源开发利用对于环境造成的污染非常严重。我国是世界上少数几个能源结构以煤炭为主的国家,也是世界上最大的煤炭消费国。2000 年中国能源生产总量为 10.9 亿吨标准煤,其中煤炭占 67.2%;能源消费总量 12.8 亿吨标准煤,其中煤炭占 67%。若不包括我国,1999 年全球一次能源结构中煤炭的比例已降到 20.2%,远低于石油所占的比例,也低于天然气所占的 25.5%的比例。煤炭燃烧所产生的温室气体的排放量比燃烧同热值的天然气高 61%,比燃油高 36%。1999 年我国排放 6.69 亿 t 碳,居世界第 2 位,其中 85%是燃煤排放的。2000 年我国排放 SO_2 1995 万 t,居世界第 1 位,其中 90%是由燃煤排放的;排放烟尘 1165 万 t,其中 70%是由能源开发利用排放的。由于能源利用和其他污染源大量排放环境污染物,造成全国有 57%的城市颗粒物超过国家标准限制值;有 48 个城市的 SO_2 浓度超过国家二级排放标准;有 82%的城市出现过酸雨,面积已达国土面积的 30%。 SO_2 和酸雨造成的经济损失已约占全国 GDP 的 2%。近年来,由于城市汽车大幅度增加,燃用汽油产生的汽车尾气已成为城市环境的重要污染源。目前各种发电方式的碳排放率

(g 碳/kW·h)如图 1.4 所示。

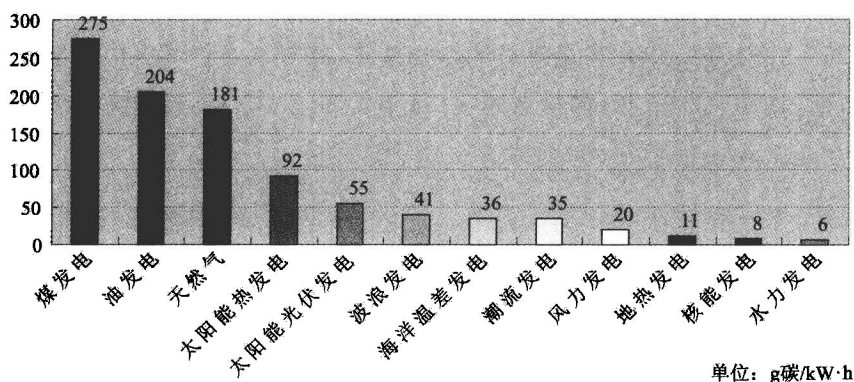


图 1.4 目前各种发电方式的碳排放率

这些数据,是以各种发电方式用的原料和燃料的开采和输运、发电设备的制造、电源及网架的建设、电源的运行发电以及维护保养和废弃物排放与处理等所有循环中消费的能源,按照各种发电方式在寿命期间的发电量计算得出的。新能源和可再生能源是保护人类赖以生存的地球的生态环境的清洁能源;采用新能源和可再生能源以逐渐减少和替代化石能源的使用,是保护生态环境、走经济社会可持续发展之路的重大措施。

1.2.3 新能源和可再生能源是不发达国家现实的能源

迄今,世界上不发达国家还有约 20 亿人口尚未用上电,其中我国约占 3000 万人。由于无电,这些人口大多仍然过着贫困落后、日出而作、日落而息、远离现代文明的生活。这些地方,缺乏常规能源资源,但自然能源资源丰富,并且人口稀少、用电负荷不大,因而发展新能源和可再生能源是解决其供电和用电问题的重要途径。

有些领域如沿海与内河航标、高山气象站、地震测报台、森林火警监视站、光缆通信中继站、微波通信中继站、边防哨所、输油输气管道阴极保护站等,在无常规电源的特殊条件下,其供电电源采用新能源和可再生能源,不消耗化石燃料,可无人值守,最为先进、安全、可靠和经济。

1.3 太阳能利用简史

人类利用太阳能的历史悠久。许多外国文献,大多认为人类利用太阳能的最早者是古希腊的著名科学家阿基米德。相传公元前 214 年,古希腊科学家阿

基米德让数百名士兵手持磨亮的盾牌面对太阳,使照射在盾牌上的太阳光经过反射而聚焦,对准攻打西西里岛拉修斯港的古罗马帝国的木制战船,使得这支入侵的舰队被烧着而沉没和溃散。然而历史研究表明,人类利用太阳能的历史并非源于阿基米德,而是可以追溯到更加久远的年代。

实际上中国是世界上利用太阳能最早的国家,中华民族的祖先是人类利用太阳能最早、最杰出的先驱。根据古籍记载,早在公元前 11 世纪(西周时代),我们的祖先就已发明利用铜制凹面镜汇聚阳光点燃艾绒取火,古书上称之为“阳燧取火”。这就是太阳能利用技术。铜制凹面镜就是一种原始的太阳能聚光器。“阳燧取火”在世界科学发明史上占有重要地位,大约比阿基米德利用太阳能聚焦要早 900 多年。

伴随科学技术和现代工业生产的迅猛发展,在化石能源资源有限性和大量燃用化石燃料对生态环境破坏性日益显现和加剧的大背景下,才促进了人们对于太阳能利用的重视,进入应用现代科学技术利用太阳能的阶段。从世界范围来说,真正引起国际社会重视并有组织地对太阳能利用开展较大规模研究开发和试验示范工作,开始于 20 世纪 60 年代之初。1961 年联合国在罗马召开的国际新能源会议,把太阳能利用作为主要议题之一。以后,由于石油生产快速发展,对太阳能利用的兴趣一度降低。20 世纪 70 年代初开始的影响全球的石油危机,再次激起人们对太阳能利用的热情,许多国家都以相当大的人力、物力和财力进行太阳能利用的研究,并制定了全国性的近、中、远期规划。1979 年美国总统卡特正式宣布,到 2000 年以太阳能为主的可再生能源要发展到占全国能源构成的 20%。欧洲共同体在好几个成员国合资建立了太阳能利用研究试验基地。很多国家建立了太阳能工业。我国于 20 世纪 50 年代末开始现代太阳能利用器件的研究,自 70 年代初开始把太阳能利用列入国家计划进行安排。经过 30 多年的努力,取得了众多的成果,使现代太阳能利用技术及其产业快速发展,为 21 世纪更加广泛地开发利用太阳能奠定了坚实的技术基础和产业基础。

人类利用太阳能虽然已有 3000 多年的历史,但把太阳能作为一种能源和动力加以利用,却只有不到 400 年的历史。按照太阳能利用发展和应用的状况,可把现代世界太阳能利用的发展过程划分为如下八个阶段。

1. 第一阶段:1615~1900 年

近代太阳能利用的历史,从 1615 年法国工程师所罗门·德·考克斯发明世界上第一台利用太阳能驱动的抽水泵算起。这一阶段的主要成果有:1878 年法国人皮福森研制出以太阳能为动力的印刷机。1883 年美籍瑞典人埃里克