

Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques:
Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy

太阳能基础理论与建模估算技术

——大气、环境、气候变化和可再生能源

Zekai Şen 著 付青 编译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

太阳能基础理论与建模估算技术

——大气、环境、气候变化和可再生能源

Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques

Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy

Zekai Şen 著 付青 编译



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书原著由 Springer 出版社出版,主要研究太阳辐射的估算理论与利用技术,同时含有能源和天文等方面与太阳能相关的基础知识,具有较强的学术性和科普性。全书共分 7 章,内容包括能源与气候变化、大气环境和可再生能源、太阳辐射确定性模型、线性太阳能模型、非线性太阳能模型、空间太阳能模型、太阳辐射利用设备和收集器等,可为太阳能利用爱好者提供较全面的基础知识和太阳能估算方法。

本书既可作为高等学校天文、气象和太阳能等相关专业的教材或参考资料,也可作为关注太阳能的学者和工程技术人员的参考书。

Translation from the English language edition:

Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques.

Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy

By Zekai Shen

© 2008 Spring-Verlag London Limited

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

版权贸易合同登记号:图字:01-2011-4345

图书在版编目(CIP)数据

太阳能基础理论与建模估算技术:大气、环境、气候变化和可再生能源 / (土) 森 (Sen,Z.) 著;付青编译.
—北京:电子工业出版社,2013.1

书名原文:Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques:Atmosphere,Environment,Climate Change and Renewable Energy

ISBN 978-7-121-19060-5

I. ①太… II. ①森…②付… III. ①太阳能—研究 IV. ①TK511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281562 号

策划编辑:徐蔷薇

责任编辑:韩玉宏

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15 字数:384 千字

印 次:2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

几乎所有的人类活动都存在大量的化石燃料的开采，由此造成的大气和环境污染已经导致了一些不良现象，而这些现象是人类有史以来还未经历过的。它们各有不同，包括全球变暖、温室效应、气候变化、臭氧层空洞和酸雨。自 1970 年以来，通过实验和研究，人们已经科学地认识到这些现象与化石燃料的使用密切相关，因为它们会释放出如二氧化碳（ CO_2 ）和甲烷（ CH_4 ）这样的温室气体，这些气体会阻止地面放出的长波辐射到外太空，从而导致地球的对流层变得更热。为避免这些现象的进一步影响，有两个主要的备选方案，要么提高化石燃料的质量从而减少其对大气排放有害气体，要么尽可能用环保、清洁的可再生能源取代化石燃料的使用，这点比提高化石燃料的质量更为重要。在这些替代能源中，太阳能是位列榜首的，因为与其他的可再生能源（如风能、地热、水电能、生物质能、波浪能和潮汐能）相比，太阳能资源丰富且更为均衡地分布在自然界中。为子孙后代提供一个可持续发展的环境是全人类的共同目标。从长远来看，已知的化石燃料有限，这迫使全人类共同努力使其逐渐被可再生能源取代而不是提高化石能源的质量。

太阳辐射通常是生成各种不同可再生能源不可或缺的一部分，但与其他构成部分相比，其特点在于它来自太阳的主要能源和持续性能源，而太阳是几乎取之不尽用之不竭的。可以预计，太阳能在未来将起到非常重要的作用，尤其是在发展中国家，并且在发达国家也极具潜力。书中所选取的资料是为了提供一种考虑全面的太阳能建模方法。为此，在文中特意加入了一些背景材料的说明，以便工程师和科学家们从中了解其有关应用及研究点。

本书的第 1 章主要介绍在社会、经济和其他方面，能源与各种人类活动的关系。第 2 章介绍大气环境和可再生能源方面的内容。第 3 章介绍一些常用的天文变量、它们的定义及其在太阳辐射（能）估计计算中的应用。这些基本概念、定义及衍生的天文公式为任意给定地点的太阳能估算提供了基础。第 4 章先对经典线性模型的现代供选方案，提出了基本的假设。在对可用的经典非线性模型进行了大致回顾后，第 5 章还会介绍与之完全不同的极具创新性的非线性模型。为从日照时间数据对太阳辐射进行非线性建模，引入模糊逻辑和遗传算法。对任意太阳辐射观测点，如何建立和利用区域性模型是第 6 章讨论的重点。为了对太阳辐射进行空间估算，还会介绍几何函数、反距离、反距离平方、半方差及积累半方差方法的使用。最后，第 7 章对太阳能设备进行总结。

本书介绍了低温和高温集热器方面的太阳能应用和未来的研究方向。本书还讨论了未

来基于太阳能场地开发和采用多种途径（如光纤）远距离输送的光伏发电设备。与水结合生产氢气是太阳能在未来的另一个应用，由此电解产生的氢气将成为另一种清洁能源。该能源将被称做太阳氢能源。对于以后必须拓展的研究及可能得以推广的应用，本书做了足够的论证。本书提到了在将来要使用的新方法，最后，给出了对未来研究和应用的意见和建议，这些都附有相关的文献综述。感谢我的夫人 Fatma Şen，没有她的耐心支持与协助，我不会完成这些工作。

İstanbul, Çubuklu

2007 年 10 月 15 日

前 言

随着世界能源需求的高速增长，传统的化石能源日益紧缺，其带来的环境污染等问题也越来越严重，新能源和可再生能源的开发利用成为全球研究热点和解决能源危机的重要途径。太阳能作为最有前途的洁净能源，得到了全世界的普遍关注，近年来获得了飞速发展。随着国家对新能源和可再生能源的日益重视，国内掀起了新能源的研究热潮。越来越多的人希望加入太阳能利用行业，太阳能研究和开发利用队伍日益壮大，而利用太阳能的首要任务是去接触太阳能的基础知识、去了解太阳能、去理解如何对太阳辐射进行建模和估算，只有在此基础上才能更好地利用太阳能。

本书原著由 Springer 出版社出版，系统全面地介绍了太阳能利用的重要意义、太阳能基础理论、建模技术和太阳能利用设备等，其中包括多种太阳能模型，在太阳能的估算和收集利用方面具有很好的参考价值。本书介绍细致全面，前沿性强，既详细介绍了先进的太阳能建模技术，又有许多内容具有较强的科普性，内容由浅入深，由简单到复杂，逻辑性强，既适合初接触太阳能技术的读者，又对太阳能研究人员有较强的参考价值。

本书首先论述了能源对与人类活动相关的经济、社会等各方面的影响；接着对大气环境和可再生能源之间的必然联系进行了分析说明，对各种可再生能源的利用进行了概括，指出了可再生能源利用的重要性；然后介绍了基本天文变量的概念和基本天文公式的推导等太阳能估算中需要应用的基础知识；紧接着介绍了传统的线性太阳能模型；从其假设条件出发，论述了改进的非线性太阳能模型，在太阳辐射非线性建模中引入了模糊逻辑和遗传算法等智能算法；此外，本书说明了如何运用基因理论、反距离、反距离平方、半方差及积累半方差等方法对指定地区的太阳辐射进行空间上的估算；最后，本书就多种收集利用太阳能的方法和技术进行了归纳总结，并对以后的发展趋势进行了展望。

对太阳能进行利用，就要了解太阳及太阳能规律。本书的重点在于对太阳能的基础理论、建模技术及太阳能利用设备进行探讨和总结。本书可谓进入太阳能利用行业 and 进行太阳能利用系统设计的必读书籍之一，但由于编译者能力所限，加上时间和精力有限，在编译过程中难免会有错误和遗漏之处，敬请读者批评指正。

本书的编译获得了中山大学的大力支持,获得了中山大学太阳能系统研究所沈辉教授、邓幼俊副教授和洪瑞江教授等老师的指导和支持,中山大学太阳能系统研究所的多位研究生为此书的编译做出了重要贡献,在此一并表示感谢。

编译者:付 青

2012 年 11 月于中山大学

目 录

第 1 章 能源与气候变化	1
1.1 概述	1
1.2 能源与气候	3
1.3 能源和社会	5
1.4 能源与工业	8
1.5 能源和经济	10
1.6 能源与大气环境	12
1.7 能源与未来	15
参考文献	16
第 2 章 大气环境和可再生能源	20
2.1 概述	20
2.2 天气、气候和气候变化	21
2.3 大气及其自然成分	24
2.4 与人类行为相关的大气成分	27
2.4.1 二氧化碳 (CO_2)	27
2.4.2 甲烷 (CH_4)	28
2.4.3 一氧化二氮 (N_2O)	28
2.4.4 氯氟烃 (CFCs)	29
2.4.5 水蒸气 (H_2O)	29
2.4.6 气溶胶	31
2.5 大气中的能量动态	31
2.6 可再生能源和气候变化	32
2.6.1 太阳能	33
2.6.2 风能	34
2.6.3 水电能	34

2.6.4 生物质能	35
2.6.5 波浪能	36
2.6.6 氢能	36
2.7 能量的单位	38
参考文献	39

第 3 章 太阳辐射确定性模型

3.1 总述	42
3.2 太阳	42
3.3 电磁频谱	45
3.4 地球的能量平衡	49
3.5 地球运动	50
3.6 太阳辐射	54
3.7 太阳常数	58
3.8 太阳辐射的计算	60
3.9 太阳参数	63
3.9.1 地球的偏心率	63
3.9.2 太阳时	64
3.9.3 一些有用的角度	65
3.10 太阳几何学	67
3.11 天顶角计算	73
3.12 太阳能计算	74
3.12.1 水平面上的日太阳能	75
3.12.2 倾斜面上的太阳能	77
3.12.3 日出时角和日落时角	79
参考文献	82

第 4 章 线性太阳能模型

4.1 概述	85
4.2 太阳辐射和日光测量	86
4.2.1 仪器误差和不确定性	87
4.2.2 操作误差	88
4.2.3 漫辐照数据测量误差	88

4.3	模型的统计评价	89
4.3.1	确定性系数 (R^2)	92
4.3.2	相关系数 (r)	92
4.3.3	平均误差、平均绝对偏差、均方根误差	93
4.3.4	离群分析	94
4.4	线性模型	95
4.5	迭代 (SS) 模型	100
4.6	无限制模型 (UM)	106
4.7	主要元素分析 (PCA) 模型	112
4.8	线性簇方法 (LCM)	117
	参考文献	121
第 5 章	非线性太阳能模型	126
5.1	概述	126
5.2	经典非线性模型	126
5.3	简单幂模型 (SPM)	130
5.4	不同模型的比较	133
5.5	太阳辐照多边形模型 (SIPM)	134
5.6	三重太阳辐照模型 (TSIM)	141
5.7	三重干旱太阳辐射模型 (TDSIM)	145
5.8	模糊逻辑模型 (FLM)	148
5.8.1	模糊集与逻辑	149
5.8.2	模糊算法在太阳辐射中的应用	150
5.9	基因-模糊模型 (GFM)	156
5.10	按月主要成分模型 (MPCM)	158
5.11	抛物线按月辐射模型 (PMIM)	165
5.12	从周围的空气温度估算太阳辐射	172
	参考文献	175
第 6 章	空间太阳能模型	178
6.1	概述	178
6.2	空间差异性	178
6.3	线性插值	181

6.4	几何加权函数	182
6.5	积累半方差 (CSV) 和加权函数	184
6.6	区域估算	189
6.6.1	交叉验证	190
6.6.2	空间插值	194
6.7	应用概述	197
	参考文献	203
 第 7 章 太阳辐射利用设备和收集器		206
7.1	概述	206
7.2	可替代能源——太阳能	206
7.3	热传递和热损耗	207
7.3.1	热传导	208
7.3.2	对流	209
7.3.3	辐射	210
7.4	收集器	211
7.4.1	平板集热器	212
7.4.2	跟踪集热器	214
7.4.3	聚光集热器	214
7.4.4	倾斜集热器	216
7.4.5	太阳池集热器	217
7.4.6	光-视收集器	217
7.5	光伏 (PV) 电池	219
7.6	燃料电池	222
7.7	氢储存和运输	222
7.8	太阳能屋	223
7.9	太阳能和海水淡化工厂	224
7.10	展望未来	225
	参考文献	226
 附录 A β 分布的简单解释		228
 附录 B 简单的幂模型		229

第 1 章 能源与气候变化

1.1 概述

能源和淡水是两个主要商品，它们是保障人类活动合理化、生活质量可持续发展的基础。能源是社会发展的动力，它是经济和社会发展的基本需求。太阳能是最古老的能源，几乎所有化石能源和可再生类型能源都来源于太阳能。早在远古时代，人们就已经使用特殊的设备从太阳能和其他类型的能源中获益了。在早期文明中，水能和风能就已经作为主要能源被用于导航、贸易和信息传播了。例如，被 Şen (2005) 提到的 Ebul-İz Al-Jazari (1136—1206)，是第一位开发了各种仪器以便有效利用能源的科学家。Al-Jazari 绘出了第一台往复活塞式发动机、吸泵和阀。他所发明的一个双缸往复式活塞吸泵，在现代工程学发展中有重要意义。该泵是由一个水车（水能）驱动的，水车则通过一个齿轮系统来驱动振动槽棒，该槽棒与连接两个活塞的杆子相接，从而驱动两个活塞。这两个活塞工作于水平对置的汽缸中，每个活塞装备有汲水管和输送管，并都备有阀门可进行开关操作。他的原始手绘图如图 1.1 (a) 所示，其中装有一个用风能来移动面板的曲轴，通过使用活塞、汽缸和曲轴来拖动水。等效的仪器设计由 Hill (1974) 实现，如图 1.1 (b) 所示。

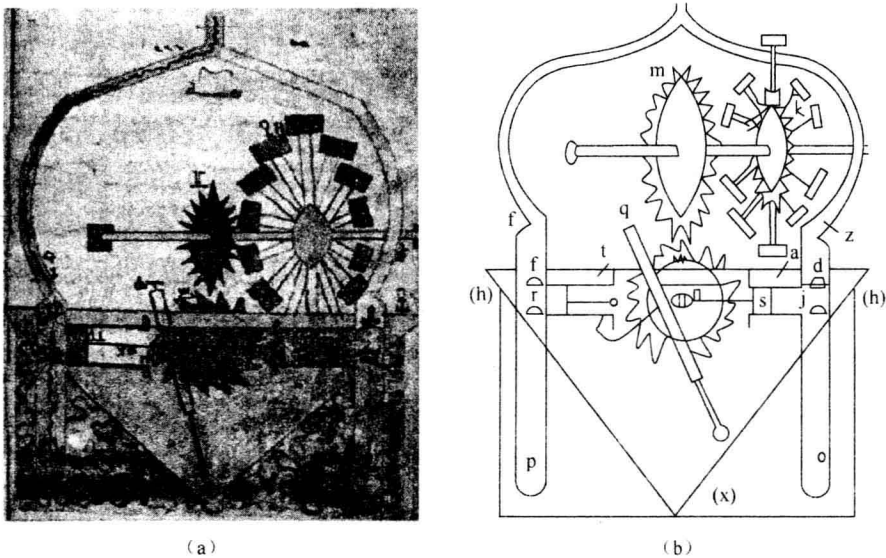


图 1.1 (a) Al-Jazari (1050) (b) Hill (1974)

Al-Jazari 制作的机器人手绘图如图 1.2 所示。通过从如图 1.2 所示的左、右喷嘴中流出的水流的冲击，从而使坐在大象上的机器人的左、右手上下移动。

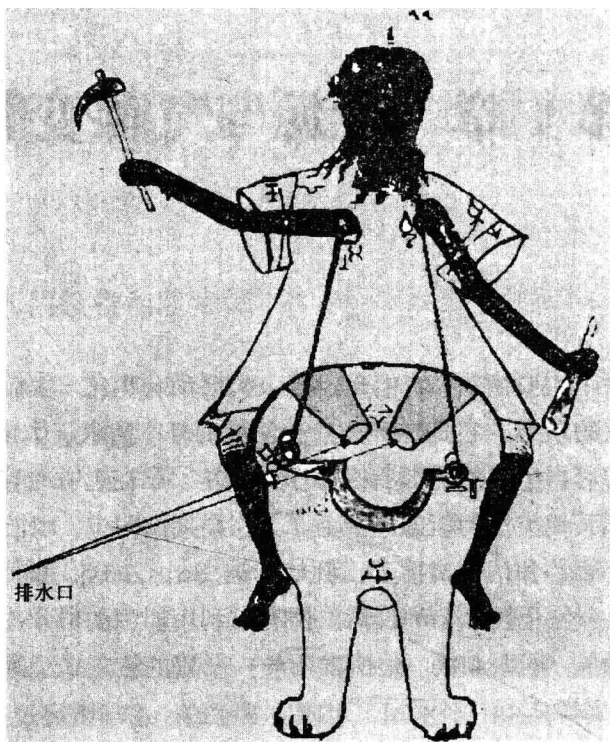


图 1.2 Al-Jazari 制作的机器人手绘图

在近几个世纪的时间里，我们对能源类型和量的需求以一种前所未有的方式在增长，人类需要更多的能源。而今，能源是社会未来和科技发展的持续动力。在所有人类的交易活动中，能源是至关重要、必不可少的组成部分，没有了能源，所有的人类活动都无从进行。目前，人口增长的平均速度为 2%，这也对有限的能源造成了额外的压力。

20 世纪 70 年代的石油危机导致了可再生替代能源研究的激增和迅速发展，特别是太阳能。这些成果与能源的市场价格浮动有着紧密的联系，由于之后能源市场价格暴跌，可再生替代能源的研究遭受到了重创。在可再生替代能源的研究和发展过程中，人们缺乏一个长远的视角，人们应考虑有关太阳能取代化石能源的研究和发展政策在更大范围内所受到的阻碍，而不是考虑对临时的价格波动作何反应。石油危机还促进了有关自然资源的最优开采、可去率的研究和发展促进竞争力技术（Tsur 和 Zemel 1998）方面文献的增加。同样也产生了相当大数量的文献，来讨论基于大气污染和气候变化过程的能量消耗监控（Clarke 1988; Edmonds 和 Reilly 1985, 1993; Hoel 和 Kvendokk 1996; Nordhaus 1993, 1997; Tsur 和 Zemel 1996; Weyant 1993）。

这一章的主要目的是展现能源和各种不同人类活动（包括社交、经济和其他方面）之间的联系。

1.2 能源与气候

在过去,人们不认为自然气候、自然气象与能源之间有联系;然而在过去的 30 年里,能源的使用和大气成分之间的紧密相互作用变得明显了,而这一相互作用会影响气象和气候现象。在过去的 100 年里,化石燃料的使用已经使大气载入了多余的成分,尤其是二氧化碳(CO_2),其增加超过一定限度就会影响气候(第 2 章)。自 19 世纪起,由于工业革命,大气中各种温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等)排放量的增加已经使它们的浓度以惊人的速度提高,从而导致地球的平均气温异常升高。科学家们已经证实,近期全球平均气温上升的趋势是不正常的现象(Rozenzweig 等, 2007)。这种现象的根源在于世界经济见证下的不可预见的工业增长,而这种增长恰恰是建立在能源消耗的基础之上的。

由于人工干预气候是无法实现的,因此,人类必须开始谨慎地使用能源,尽量减少化石燃料的使用,并使用一些清洁、环保的能源,例如,用太阳能、风能、水能和生物质能这些可再生的能源来取代化石能源。这样,污染对大气的额外负担可减少到大气能够进行自然调节的水平,这样能源才能可持续性地被传递给子孙后代。

由于大量使用化石燃料,大气中的 CO_2 含量在 20 世纪里有所上升,但这其中也有与人口增长和消费增加有关的因素,如土地利用变化等。在全球范围内,温室气体排放速度的升高(尤其是 CO_2)对世界气候构成了巨大的威胁。在对大气层圈的研究中,各种理论和计算已经表明,在过去的 50 年里,出现了气温持续升高的趋势,平均气温升高达 0.5°C 。如果这种趋势在未来继续下去,预计地球上的一些地区将会出现极端天气,如过量的降雨和随之而来的洪水、干旱,并且区域性的气候失衡将引起局部地区气温不寻常地上升与下降。这种现象也将影响世界粮食的产量。此外,到 21 世纪末全球气温可能再上升 $1\sim 3.5^\circ\text{C}$,这将引发很多地区潜在的破坏性气候变化。现在,通过使用可再生能源来开始控制 CO_2 的排放,可能会使 CO_2 对气候变化的影响降低到可以适应的水平。可再生能源的使用需要在全世界范围内都适用的能源系统。能源政策必须有助于保证未来的能源供应和推动必要的过渡。国际合作是实现成本效益、公平和长期有效的气候问题解决方法的先决条件。

目前,全球能源面临的挑战是应对气候变化的威胁、满足日益增长的能源需求及保障能源供应的安全。可再生能源,尤其是太阳能,都是有效的能源技术,这种技术以一定规模进行全球部署,可以帮助解决气候变化的问题。可再生能源使用的增加减少了 CO_2 的排放,削减了地方性的空气污染,创造了高价值的就业机会,减缓了一个国家越来越依靠进口化石能源来发展的趋势(通常来自政治不稳定的地区),并防止社会发展到能源枯竭的地步。

除了需求方面的影响，能源的生产也可能受到气候变化的影响。在不考虑极端天气事件的影响下，能用于研究能源生产和供应受气候变化影响的证据，要比能用于研究其受能源消耗影响的证据更加有限。我们在以下几种情况之下研究气候变化对能源生产和供应的影响（Wilbanks 等，2007）。

- （1）如果气象事件变得更加激烈。
- （2）如果地区水力发电依赖水供应或火电厂冷却水的供应面临消减。
- （3）如果环境的变化影响到工厂选址。
- （4）如果影响生物质能、风能或太阳能的环境发生变化（正面的或负面的）。

在世界上的许多地方，气候的变化可能影响能源的使用和能源的生产。在一些可能影响的方面，气候变化的作用是相当明显的。由于地域差异和季节的变化，气候的变化也有所不同。在由气候变化引起气候变暖的地方，工业扩张所需要的热能便减少（Cartalis 等，2001）。然而，全国范围的净能源需求将会受到能源供给结构的影响。用于冷却的主要能源是电能，煤、石油、天然气、生物质能和电能都可用于空间加热。对冷气和暖气都有大量需求的地区进行研究可以发现，尽管对其他制暖能源的需求在减少，但每年的净电力需求仍会增加（Hadley 等，2006）。能源需求总量的季节性变动也是很重要的。在某些情况下，由于基础设施的限制，高峰时段的能源需求可能超过传输系统的最大容量。Tol（2002 a, b）预估了气候变化对全球能源需求的影响，通过研究一个特定国家模型（英国，这类国家需要使用能源生产冷气和暖气来度日），可以从中推断出他们的人均收入和能源效率。根据 Tol 的预计，到 2100 年，通过减少暖气获得的利益将约占国民生产总值（GDP）的 0.75%，而增加冷气造成的损失将约占 GDP 的 0.45%，在这些地方，可将热密集地区的居民移民到冷密集地区以削弱这种反差（Wilbanks 等，2007）。

在涉及炎热气候条件下制冷的问题时，能源和气候是相互关联的。能源的使用已经并将持续受到气候变化的影响，一部分是因为空调的使用（尤其在发达国家，这是主要的能源消耗）会影响气候。然而，建筑物中的室内空间使用能源加热或冷却受气温升高影响的程度是不确定的。有可能已经（或是将会）采取一定的应对气候变化的措施（例如，更加严格的建筑节能标准）。能源部门可以通过预测可能的影响和逐步增强自身的韧性（例如，将能源供应多样化，扩大与其他地区的联系，以及投资科技以便于扩大其投资组合的选择）来应对气候变化和其影响（Hewer 2006）。许多能源部门的应对战略涉及高成本，以及在采用应对气候变化方案时所需要的社会认可，可能导致能源价格的上升。

气候变化可能对火力发电产生负面影响，因为在某些地方由于气候性缺水（Arnell 等，2005）或季节性的河川径流改变（Zierl 和 Bugmann 2005）引起冷却水减少了，能源分布对气候变化也很敏感。平均气温升高引起汽油输送管阻稍微升高，而最高气温上升对输送管损耗和压缩机效率都会产生负面影响。所有这些因素都加剧了气候变化对电网影响的不确定性。

1.3 能源和社会

据官方的文件统计记录和年度报告，由于 1973 年燃烧矿石造成空气污染引发的能源危机已经对森林、历史遗迹和许多国家的人类健康造成了严重的危害。很多环境破坏，包括酸雨和其对森林毁坏带来的后果，已经在短期内特别是长期内造成了严重的经济损失。因此，看似廉价的能源可能让社会承担非常高的代价。图 1.3 显示了在一个社会问题中的 3 个相互联系的合作体，包括一个物质受益人、一个热受益人和在他们之间与两个主要人物都没关系的第三方。

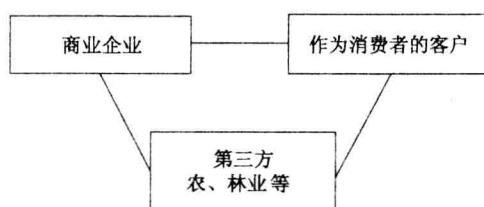


图 1.3 能源使用的相互关系

另外，今天的能源消费者在使用能源中可能造成的社会成本将传递给下一代，这是另一个由 CO_2 排放引起的气候变化的例子。而且，过量地燃烧化石能源是导致气候变化的主要原因。

现今，任何社会的发展规模是由人均拥有或使用的能源量来衡量的，这一衡量标准被列为最重要的影响因素。事实上，大多数工业化国家所需求的是为他们的交通、工业、家庭和军队提供系统可靠、高效且易获得的能源。这对发展中国家，特别是那些没有可靠、充足的能源来源的国家，尤其重要。

充足的能源供应是任何现代社会经济增长的先决条件，但能源依旧是大气和环境污染的主要来源（1.6 节）。全球范围内日益增加的空气污染排放是温室气体和气候变化的主要原因。如果 CO_2 含量以现有的速度持续增加，那么在水文和大气循环中主要气候的中断和局部失衡将会导致骤冷骤热、暴雨和干旱这些严重后果。这些变化已经产生并在影响着全球的粮食生产潜力。在未来继续使用传统能源将会产生不利于自然环境的影响，因此，与能源有关的社会问题预计在将来会有所增加。然而，太阳能、风能、生物质能、小水电、波浪能、地热能及太阳氢能这类新兴能源的出现，将成为能减轻甚至解决未来能源政策的环境问题和社会问题的新因素。

一直以来，人口的稳定增长和人类追求更好的生活是能源消耗增加的两个主要原因。在接下来的 50 年里世界人口预计增长一倍，这样的人口增长最有可能发生在发展中

国家，因为发达国家不会出现任何重大的人口增长。到 2050 年，由于人口增长和发展中国家为摆脱贫困而努力地发展经济，能源需求量将增加一倍，甚至两倍。

能源需求的增长和人口的增长是有部分关联的，但能源需求的增长同样也是更大的人均能源消耗的结果。全球范围内能源的需求和产量在可预见的未来是一定会增加的。当然，发展中国家的增长值绝对会比发达国家更大。图 1.4 显示了到 2050 年世界人口在 100 年内按预测速度的增长曲线。它显示了在近几年，总人口都以一个指数增长的趋势增长，每通过一个固定时间段，也就是倍增时间里，人口都增长了一倍。

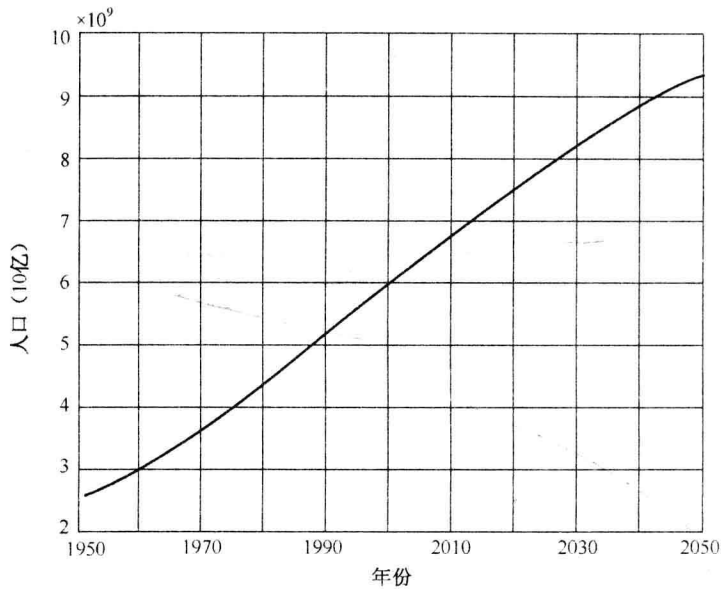


图 1.4 人类人口

近期人口剧增，同时大家也更清楚地意识到人均能源消耗的增加会加重能源消耗的影响。在接下来的几十年里，经济发展和人口增长将是持续导致能源需求增长的两个主要原因。未来能源需求如表 1.1 所示（Palz 1994）。

表 1.1 未来能源需求

1000 Moet	1990	2020	增长（%）
发达国家	4.1	4.6	12
中欧和东欧	1.7	1.8	5
发展中国家	2.9	6.9	137
全世界	8.7	13.3	52

注：Moet 等效于百万吨石油（能源单位）。

我们可以用一个社会的能源消耗来区别它和其他社会的发展规模。在一个欠发达国家，贫穷的公民生存仍需要依赖人力和畜力。与之相反，发达国家却消耗了大量的能源，用于交通、工业及制造室内冷气和暖气。