




新能源开发与利用丛书

# 可再生能源系统设计

Renewable Energy System Design

[美] 齐亚德·萨拉梅赫 (Ziyad Salameh) 著  
杨勇 译

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

## 关于本书

本书是一本覆盖了各主要可再生能源系统、资源及相关主题的图书，其主要特点包括：

- ▶ 用图表和示例来说明和演示太阳能、风能、风光混合动力和新兴可再生能源系统的设计和运行原理；

- ▶ 利用案例研究帮助工程师预见并克服常见的设计挑战；

- ▶ 探讨可再生能源储存方式，特别是蓄电池、燃料电池和新兴可再生能源储能技术。

本书内容丰富，读者可根据具体从事的专业对部分章节予以取舍。

新能源开发与利用丛书

# 可再生能源系统设计

Renewable Energy System Design

[美] 齐亚德·萨拉梅赫 (Ziyad Salameh) 著  
杨 勇 译



机械工业出版社

本书的目的是为读者全面提供可再生能源领域的基础知识,使读者对该领域的现状和未来发展趋势有所了解。

本书共分为5章。第1章介绍了可再生能源的重要性以及影响可再生能源发展的因素。第2章和第3章介绍了光伏发电和风力发电系统这两种目前应用最为广泛的可再生能源系统,并以较为详细的篇幅介绍了各自系统的设计与分析。第4章主要介绍了在可再生能源系统中占有重要地位的储能系统,对蓄电池、燃料电池、飞轮储能、超级电容器、超导储能、抽水储能和压缩空气储能进行了讨论。第5章主要介绍了新型的可再生能源,包括海水温差发电、潮汐能发电、波浪能发电、生物质能发电、地热能发电、太阳热能发电和卫星发电等内容。

本书适合从事可再生能源系统设计和应用的工程师阅读,也适合作为电气或机械工程专业高年级本科生或低年级研究生的课程教材或参考书。



## 译者序



长久以来，可再生能源都被认为仅能作为化石或核电等能源的补充。但是近年来，随着化石能源的日益减少，环境污染的日益严重，以及日本福岛核电站事故之后人们对于核能安全利用的反思，可再生能源获得了前所未有的发展机遇，越来越多的国家采取鼓励可再生能源的政策和措施，可再生能源的生产规模和使用范围正在不断扩大。

在这一大背景下，出版一本全面覆盖可再生能源系统的图书，帮助学生和相关从业人员了解可再生能源开发中的基本系统组成，建立全面的设计概念，掌握必要的基础知识，也就成为一个迫切需求。为了帮助教师更好的教授、学生更好的学习这一领域的基础知识，我翻译了这本英文著作。本书主要适用于理工科高校相关专业的本科生、研究生作为教材或参考书使用。同时对希望掌握可再生能源系统设计基础理论的工程技术人员也是很好的工具书。

本书是一本覆盖了各主要可再生能源系统、资源及相关主题的图书，其主要特点包括：①用图表和示例来说明和演示太阳能、风能、风光混合动力和新兴可再生能源系统的设计和运行原理；②利用案例研究帮助工程师预见并克服常见的设计挑战；③探讨了可再生能源储存方式，特别是蓄电池、燃料电池和新兴可再生能源储能技术。本书内容丰富，读者可根据具体从事的专业对部分章节予以取舍。

本书的翻译工作主要由华中科技大学的杨勇教授完成。在本书的出版过程中，得到机械工业出版社刘星宁编辑的大力支持，在此一并表示感谢。由于译者水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

杨 勇

2017年10月

于华中科技大学

## 原书前言

近年来，世界对于能源的需求总量不断增长，但地球上的化石燃料储量是有限的，终有一天将难以为继。能源对于工业发展和人类生活都至关重要。对化石燃料枯竭的忧虑促使科学家和工程师们不断寻找可满足未来需求的替代能源。人们逐渐意识到，这种能源必须是可持续供应的，可再生的，而且是无污染的。本书的主要内容就是对这些新型能源进行介绍。

本书是以电气或机械工程专业高年级本科生或低年级研究生为对象的课程教材。此外，本书还可为从事可再生能源系统设计和应用的工程师提供参考。本书要求的先修课程包括基本电路、物理、化学和数学等工程类本科生必修的课程。本书内容可供一个学期的课堂讲授。

本书的目的是为读者全面提供可再生能源领域的知识，并使其对该领域的现状和未来发展趋势有所了解。本着实用的原则，可再生能源相关的概念在本书中都有相应深度的介绍。读者一旦学习了本书内容，即可考虑将所学应用至实际生活中。

本书共分为5章。第1章介绍了可再生能源的重要性。第2章和第3章介绍了光伏发电和风力发电这两种目前应用最为广泛的可再生能源发电技术，并以较为详细的篇幅介绍了其设计与分析。

第4章主要介绍了在可再生能源系统中占有重要地位的储能系统，对蓄电池、燃料电池、飞轮储能、超级电容器、超导储能、抽水储能和压缩空气储能进行了讨论。第5章主要介绍了新型的可再生能源，包括海水温差发电、潮汐能发电、波浪能发电、生物质能发电、地热能发电、太阳热能发电和卫星发电。

# 目 录

译者序  
原书前言

## 第 1 章 促进可再生能源发展的因素 ..... 1

1.1 引言 .....	1
1.2 美国 and 全球发电耗能 .....	2
1.3 影响可再生能源使用的因素 .....	4
1.3.1 高油价的影响 .....	4
1.3.2 化石燃料对可再生能源的影响 .....	10
1.4 全球变暖和可再生能源使用 .....	17
1.4.1 全球变暖概览 .....	20
1.4.2 全球变暖和海平面上升 .....	21
1.4.3 其他关于全球变暖的忧虑 .....	22
1.4.4 遏制全球变暖的措施 .....	23
1.5 结论 .....	24
参考文献 .....	24

## 第 2 章 光伏发电 ..... 26

2.1 引言 .....	26
2.2 太阳辐射特征 .....	27
2.2.1 太阳常数 .....	27
2.2.2 太阳辐射的日变化和季节变化 .....	27
2.2.3 阳光直射和漫射 .....	27
2.2.4 大气质量 .....	27
2.2.5 峰值日照时数 .....	29
2.3 光伏转换 .....	31
2.3.1 原子数 .....	31
2.3.2 光伏电池的性质和特征: p-n 结 .....	33
2.4 光伏电池、模块、面板和阵列的性能评估 .....	35
2.4.1 伏安特性 .....	35

2.4.2	功率 - 电压特性 .....	36
2.4.3	光伏模块的最大功率点 .....	36
2.4.4	电阻负载对工作点的影响 .....	37
2.4.5	光伏电池的等效电路 .....	39
2.4.6	开路电压和短路电流 .....	41
2.4.7	喷气推进实验室模型 .....	41
2.5	光伏器件的连接 .....	43
2.5.1	光伏器件的串联 .....	43
2.5.2	光伏器件的并联 .....	44
2.5.3	阻流二极管 .....	45
2.5.4	旁路二极管 .....	46
2.5.5	光伏电池面板朝向 .....	46
2.6	光伏阵列的优化 .....	47
2.6.1	简介 .....	47
2.6.2	阻抗匹配方法 .....	48
2.6.3	电池储能方法 .....	49
2.6.4	太阳能聚光方法 .....	49
2.6.5	太阳跟踪控制方法 .....	51
2.6.6	电动光伏阵列重构方法 .....	52
2.6.7	最大功率点跟踪方法 .....	54
2.7	光伏系统 .....	58
2.7.1	光伏系统的分类 .....	58
2.7.2	光伏系统的组成 .....	60
2.7.3	带电池储能的独立光伏系统设计 .....	64
2.8	光伏技术的应用 .....	69
2.8.1	太阳能发电的演变历史 .....	69
2.8.2	便携式面板和发电装置 .....	73
2.8.3	使用光伏发电的家庭和偏远村庄 .....	74
2.8.4	集中式光伏电站 .....	77
2.8.5	前景展望 .....	77
2.9	并网光伏发电系统的问题和需求 .....	78
2.9.1	简介 .....	78
2.9.2	电力公司和可再生能源客户的交互 .....	79
	习题 .....	82
	参考文献 .....	84

### 第3章 风力发电系统 .....

3.1	引言 .....	86
-----	----------	----

3.2 风的特性 .....	90
3.2.1 平均风速 .....	90
3.2.2 风速 - 持续时间曲线及其随高度的变化 .....	90
3.2.3 风速随时间和方向的变化 .....	92
3.2.4 风玫瑰图 .....	92
3.2.5 风切变和阵风 .....	93
3.2.6 风速分布及其概率函数 .....	94
3.3 风力发电机的空气动力学理论 .....	96
3.4 风力功率曲线 .....	97
3.5 风力发电系统的基本组成 .....	101
3.5.1 风力发电机的类型 .....	104
3.5.2 水平轴和垂直轴风力发电机的对比 .....	109
3.5.3 逆风型和顺风型风力发电机 .....	110
3.5.4 大型与小型风力发电机的对比 .....	110
3.5.5 风力发电机 .....	111
3.6 风力发电系统发电方案 .....	118
3.6.1 恒速恒频方案 .....	118
3.6.2 近恒速恒频方案 .....	118
3.6.3 变速恒频方案 .....	119
3.6.4 变速变频方案 .....	120
3.7 风力发电系统的选址和定容 .....	120
3.8 风力发电机选址匹配 .....	123
3.9 风力发电系统的应用 .....	124
3.9.1 独立运行 .....	124
3.9.2 小规模应用 .....	124
3.9.3 中等规模应用 .....	128
3.9.4 并网风力发电系统 .....	129
3.9.5 风电场 .....	131
3.10 风力发电在电网系统中的地位 .....	134
3.11 风力发电系统的前景展望 .....	137
3.12 风光混合发电系统 .....	144
3.12.1 概述 .....	144
3.12.2 HWPS 的优点 .....	145
习题 .....	147
参考文献 .....	150

## 第 4 章 储能系统 .....

4.1 电池技术 .....	153
----------------	-----

4.1.1	简介	153
4.1.2	电池结构与工作原理	156
4.1.3	应用	159
4.1.4	用于储能的电池类型	159
4.2	燃料电池	171
4.2.1	简介	171
4.2.2	燃料电池组成部分和运行	172
4.2.3	燃料电池的类型	173
4.2.4	主要类型燃料电池的对比	181
4.2.5	燃料电池的效率	182
4.2.6	燃料电池的应用	182
4.2.7	燃料电池的未来展望	186
4.2.8	重整装置	187
4.2.9	储氢	192
4.3	压缩空气储能	193
4.3.1	简介	194
4.3.2	压缩空气储能系统的组成	194
4.3.3	压缩空气储能系统的运行	195
4.3.4	在燃气发电厂中使用压缩空气储能系统	195
4.3.5	压缩空气储能系统的优缺点	196
4.3.6	世界各地的压缩空气储能系统	196
4.3.7	压缩空气储能系统中的能量储存	198
4.3.8	未来的压缩空气储能系统及其建造计划	200
4.4	飞轮储能	200
4.4.1	工作原理	201
4.4.2	飞轮的基本组成部分	201
4.4.3	飞轮的运行	204
4.4.4	能量储存	204
4.4.5	安装	205
4.4.6	飞轮储能系统的优缺点	206
4.4.7	与其他储能系统的对比	207
4.4.8	实际应用	207
4.5	水力发电	208
4.5.1	简介	208
4.5.2	水力发电主要组成部分和工作原理	210
4.5.3	水轮机类型	211
4.5.4	抽水储能系统的原理	212
4.6	超级电容器	213
4.6.1	超级电容器的结构、特点和运行	213

4.6.2	超级电容器的优缺点	215
4.6.3	超级电容器和其他储能技术的差异	216
4.6.4	超级电容器的应用	217
4.6.5	超级电容器的其他应用	218
4.7	超导储能	218
4.7.1	简介	218
4.7.2	超导的历史	219
4.7.3	超导储能系统的组成和运行	219
4.7.4	超导储能系统中储存的能量	220
4.7.5	超导储能的应用	221
4.7.6	超导储能系统的优缺点和未来	222
	习题	223
	参考文献	223

## 第5章 新型可再生能源 226

5.1	海洋温差发电	226
5.1.1	简介	226
5.1.2	海洋温差发电方案	226
5.1.3	功率和效率计算	227
5.1.4	陆基和海基海洋温差发电厂	229
5.1.5	海洋温差发电的优缺点	231
5.1.6	海洋温差发电的未来	232
5.2	潮汐能	232
5.2.1	潮汐的背景	232
5.2.2	潮汐周期、大小和输出功率计算	233
5.2.3	潮汐发电系统	234
5.3	波浪发电系统	240
5.3.1	波浪发电原理	240
5.3.2	波浪发电系统的类型	241
5.4	地热能源系统	247
5.4.1	简介	247
5.4.2	地热资源	248
5.4.3	地热发电技术	251
5.5	生物质能源系统	254
5.5.1	简介	254
5.5.2	生物质能转换	255
5.5.3	生物能源	256
5.5.4	生物燃料的类型	257

5.5.5 生物质能的优缺点 .....	265
5.6 太阳能热转换系统 .....	265
5.6.1 简介 .....	265
5.6.2 大型太阳能热转换系统 .....	266
5.6.3 小型太阳能热转换系统 .....	270
5.6.4 太阳能热转换系统的优缺点 .....	271
5.7 微型燃气轮机 .....	273
5.7.1 微型燃气轮机的定义和应用 .....	273
5.7.2 微型燃气轮机的组成和运行 .....	274
5.7.3 微型燃气轮机的优缺点 .....	275
5.8 卫星发电系统 .....	275
5.8.1 简介 .....	276
5.8.2 太阳能发电卫星的类型 .....	276
5.8.3 太阳能发电卫星的优缺点 .....	278
5.8.4 太阳能发电卫星的未来 .....	279
习题 .....	280
参考文献 .....	281

# 第 1 章

## 促进可再生能源发展的因素

### 1.1 引言

近年来，全球变暖、环境污染、油价飙升等问题促使政府管理者、能源提供商和公众对风能、太阳能和生物质能等可再生能源给予越来越多的关注。

可再生能源是对环境友好的能源，它们构成了分布式发电系统的主干。近几十年来对可再生能源领域的关注很大程度上反映在对其的学术研究上，这些研究在传统的孤立系统之外开发出了大量可再生能源利用的新方法。

分布式发电系统指的是由靠近主负载的多个小型发电设施组成的系统，这种系统与传统的大型中央式发电站存在根本性的不同。由于分布式发电系统在物理上距离负载较近，因此可大幅降低传输损耗。此外，分布式发电系统由于不再依靠少量传输线缆覆盖广大的区域，因此其可靠性更高，且可以采用更小容量的主传输线路和变压器。

在当今世界，有很多理由促使人们减少对传统能源的使用量，转而使用可再生能源，主要包括：

1) 高昂的油价——由于供不应求，造成油价飙升。

2) 化石能源的大量使用对环境造成影响：

① 运输过程中汽车及其他机动车尾气，以及火力发电站对大气的污染，造成对人类尤其是儿童健康的危害；

② 氮化物和硫化物与云层中的水汽结合形成酸雨；

③ 由于温室效应造成的全球变暖。

3) 由于政治因素造成能源供应中断从而引发的国家安全危机。

全球能源市场的竞争性带来了能源供应的不可预测性。图 1.1 所示为由于使用化石能源造成的污染。

相对于工业革命前的 1750 年，大气中二氧化碳和甲烷的含量已分别增加了 31% 和 149%。从全球的角度来说，大气中的温室气体排放主要来源于化石燃料的燃烧。约

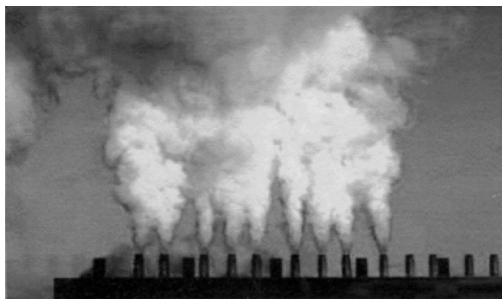


图 1.1 化石燃料燃烧造成的污染

17%的排放是由于传统电站，尤其是热电站发电所燃烧的燃料造成的。

## 1.2 美国 and 全球发电耗能

图 1.2 所示为美国用于发电的各种能源在总能源中所占的百分比。在 3.883 万亿 kWh 的总发电量中，约 50% 是由燃煤发出的。水电约占总发电量的 6.5%，核能约占 19.3%，可再生能源约占 2.3%，总能源供应量将近 4.055 万亿 kWh。

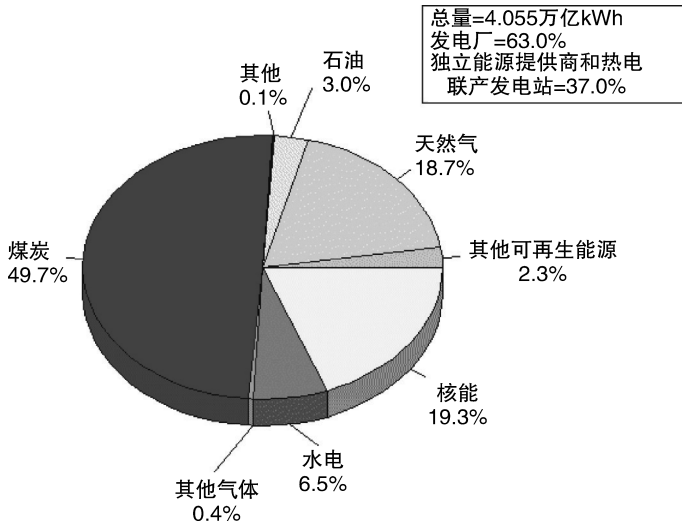


图 1.2 美国用于发电的各种能源在总能源中所占的百分比

通过现有的发电数据（见图 1.2）及其与未来预测数据（见图 1.3）的对比，读者可对该领域未来 20 年的发展有一个比较清晰的认识。总体来说，随着经济和人口的增长，发电总量会逐步增加。考虑到来自核能和可再生能源的供应基本保持不变，发电总

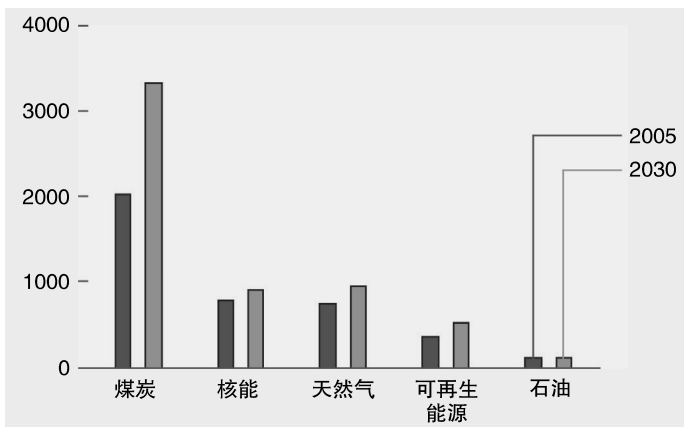


图 1.3 2005 年与 2030 年各种能源的发电量对比（单位：10 亿 kWh）

量的增加将与化石燃料的供应密切相关。如图 1.4 所示，水电也将基本保持现有规模，其对发电总量的增加量的贡献也将十分有限。从图中还可以非常清楚地看到，可再生能源所占份额将显著增加，而石油所占比例由于未来油价上涨的预期将不会增加。煤炭所占的份额也将会增加。

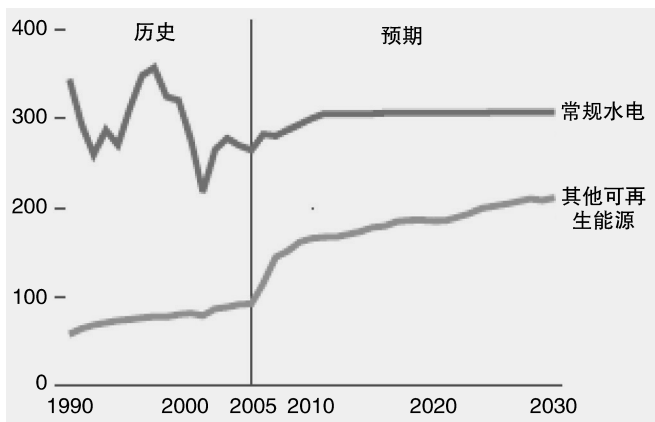


图 1.4 2005 ~ 2030 年可再生能源发电量 (单位: 10 亿 kWh)

如果对非水电类可再生能源发电量进行仔细的分析 (见图 1.5)，读者会发现目前已有的可再生能源技术未来的发展趋势。太阳能的利用目前还不够广泛，但是预计在未来 20 年将得到比较大的发展。风能和生物质能增长的比例最大，而地热能和城市固体废弃物利用将在未来几年得到比较大的发展而后增速趋缓。

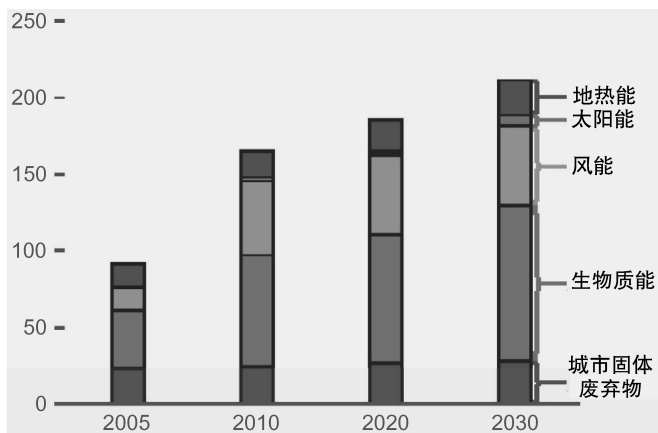


图 1.5 非水电类可再生能源发电量 (单位: 10 亿 kWh)

图 1.2 ~ 图 1.5 主要集中于美国国内发电量的情况。图 1.6 所示为世界范围各类能源的发电总量。其发展趋势与美国国内的发展趋势基本一致。化石能源 (包括煤炭、石油和天然气) 的增速仍将超过可再生能源和核能。

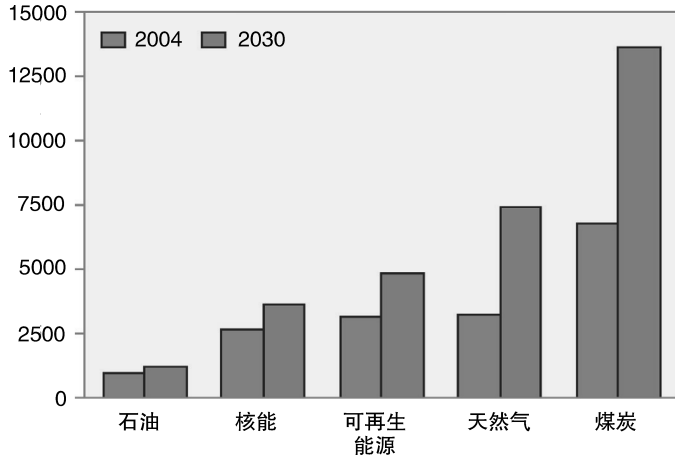


图 1.6 2004 年与 2030 年世界范围内各种能源的发电量对比 (单位: 10 亿 kWh)

## 1.3 影响可再生能源使用的因素

### 1.3.1 高油价的影响

50 年前, 美国国内的石油产量可以保证自给自足。目前, 美国国内的石油有 50% 依靠进口, 其消耗总量占全球消耗量的 25%。直到 20 世纪 50 年代, 煤炭仍然是世界最主要的燃料来源, 但是很快被石油取代。在 1973 ~ 1979 年的石油危机期间, 媒体对石油供应大肆报道。这也引发了公众对石油的忧虑, 因为石油储量是有限的, 终有一天将消耗殆尽, 至少随着石油储量的下降其经济成本将大大提高。

有些人认为, 由于石油的储量是有限的, 20 世纪 70 年代对石油的悲观预测仅仅是被推迟了。也有些人认为, 地球内部还有大量以沥青砂、柏油和页岩气等形式存在的非常规石油, 不断涌现的新技术将使这些非常规石油的开采成为可能, 从而使石油的供应量在未来得以继续保持。例如, 加拿大的沥青砂和美国的页岩气的预期储量与目前全世界的常规石油储量相当。

目前, 汽车燃料 90% 来自于石油。石油占美国能源消耗总量的 40%, 但是只占发电总量的 2%。石油的价值在于其高能量密度及其便携性, 可为大部分机动车提供燃料。同时, 石油作为世界上最重要的商品, 还是制造大量工业化学品的原材料。世界上约有 80% 的可开采储量位于中东地区, 阿拉伯国家在其中所占的比例高达 62.5%: 沙特阿拉伯 12.5%, 阿联酋、伊拉克、卡塔尔、科威特和美国各占不高于 3%。

#### 1. 石油生产

直到 20 世纪 70 年代, 美国国内的石油产量还能满足其自身需求。但自此之后, 其国内需求逐渐依赖于进口。2000 年美国原油的日产量为 580 万桶, 1999 年的日产量为

590 万桶。1985 ~ 1986 年油价崩溃之后，美国国内原油产量急剧下降。与 1985 年相比，2000 年的产量下降了 24%。但是根据美国能源信息管理局（EIA）的统计，2001 年的日均产量增加了 7 万桶，同比增加 1.1%。

美国大陆发现大型油田的可能性已基本不大，但还存在一定在近海区域发现油田的可能性。海上油田的开采在很多地区都是被严令禁止的。目前远洋开采尚有部分区域存在比较好的前景，但是远洋开采通常都位于深水区，因此成本极高。美国国内石油产量占全球产量的 12%，主要集中在美国本土以及沿得克萨斯 - 路易斯安那州的墨西哥湾沿海地区。这片区域向内陆延伸并包括得克萨斯州西部、俄克拉荷马州和堪萨斯州东部。阿拉斯加州中北部地区也存在较为丰富的石油储量。

美国国内对石油的需求量每年都在缓慢增长，但是国内产量逐年下降。2000 年美国日均石油消耗量为 1960 万桶。据估计，2000 年前 8 个月美国日均进口量为 1090 万桶。根据这一数据，美国石油进口量占总消耗量的 57%。

美国进口的石油主要由加拿大（日均 168 万桶）、沙特阿拉伯（日均 149 万桶）、委内瑞拉（日均 146 万桶）、墨西哥（日均 135 万桶）等国提供。美国目前对部分主要产油国，包括伊朗、伊拉克和利比亚，实施经济制裁，因此美国公司无法从这些国家采购石油。

根据 2005 年 8 月国际能源组织的报告，全球石油日均需求量为 8490 万桶，年均需求量约为 310 亿桶。国际经济合作与发展组织（OECD）一度只有满足世界日常需求 54 天的储备，再加上 37 天的应急储备。地理学家科林·坎贝尔于 2000 年创立了油气峰值研究协会（ASPO）。该协会曾预测，全球常规原油产量将在 2004 年达到峰值。

2004 年，全球石油总产量为 300 亿桶，其中常规原油 240 亿桶，其他 60 亿桶来自于重油、沥青砂、深海油田和液化天然气（见图 1.7）。2005 年油气峰值研究协会对其

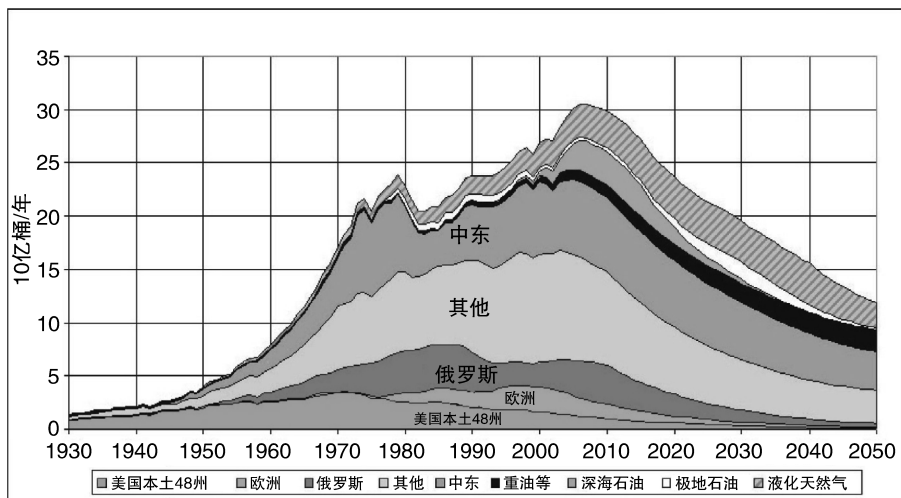


图 1.7 2004 年全球石油和天然气产量。即使在包含液化天然气、深海石油和极地石油的情况下，全球石油产量也正迅速接近其峰值产量