



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

# 太阳能制氢的能量转换、 储存及利用系统 ——氢经济时代的科学和技术

**Solar Hydrogen Energy Systems: Science and  
Technology for the Hydrogen Economy**

[意] 加布里埃莱·齐尼 (Gabriele Zini)

著

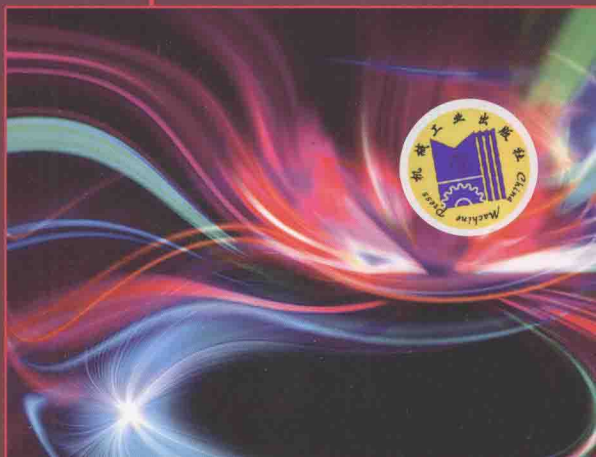
保罗·塔塔里尼 (Paolo Tartarini)

李朝升

译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 太阳能制氢的能量转换、 储存及利用系统

——氢经济时代的科学和技术

[意] 加布里埃莱·齐尼 (Gabriele Zini) 著  
保罗·塔塔里尼 (Paolo Tartarini) 著  
李朝升 译



机械工业出版社

Translation from English language edition;  
Solar Hydrogen Energy Systems: Science and Technology for the Hydrogen Economy

by Gabriele Zini and Paolo Tartarini

Copyright © 2012, Springer Milan

Springer Milan is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2012-5194 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统: 氢经济时代的科学和技术/(意) 齐尼 (Zini, G.), (意) 塔塔里尼 (Tartarini, P.) 著; 李朝升译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 10

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Solar Hydrogen Energy Systems: Science and Technology for the Hydrogen Economy

ISBN 978- 7- 111- 51748- 1

I. ①太… II. ①齐… ②塔… ③李… III. ①太阳能—制氢  
IV. ①TQ116. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 239915 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: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 薇

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 10.5 印张 · 196 千字

0001— 2800 册

标准书号: ISBN 978- 7- 111- 51748- 1

定价: 59.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统是一种替代当前基于化石能源集中式能源系统的有效、可靠、持续、独立的系统。该系统利用不同的能源转换技术，将太阳能等可再生能源转换为氢能并加以存储，然后利用燃料电池转化为电能或者直接作为燃料燃烧。

本书结合可再生能源的转换、存储和利用技术，给读者介绍了太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统的建模、运行和实施。本书讨论了太阳能光伏、风力发电、电解、燃料电池、传统和先进储氢等技术，并对系统管理和输出性能进行评估。还列举了现实生活中的装置实例来说明这些系统无需化石能源而能独立地供应能源。

本书可供从事新能源行业的科研人员使用，也可作为高等院校新能源相关专业学生的参考书。

# 原 书 序

可再生能源在未来的能源中将发挥非常重要的作用。这是我在法国国家太阳能研究所 (INES) 下属的太阳能系统实验室开展工作的驱动力, 这也是 Gabriele Zini 选择在同一个团队中研究光伏系统的原因。随着光伏组件和系统的价格降低, 欧洲南部的一些地区已经开始达成市电平价, 这意味着太阳能发电销售价格已经可以与传统电力竞争。在未来十年, 太阳能光伏发电甚至能够与许多地区的传统电力竞争。风力发电的应用也有类似的发展趋势。

然而, 可再生能源与传统能源之间的巨大差异会成为市场障碍。太阳能系统只能在阳光灿烂时产生能源。风能随风速的变化而变化。因为没有工具来控制它们, 所以传统电力运营商, 特别是在法国, 往往把可再生能源称为“致命的”能源来源。

在可再生能源的市场渗透性很低的时候, 这些波动是无关紧要的。然而, 一旦可再生能源入网, 需要创新性的解决方案以确保给客户提供可靠的电力供应。这对于岛屿上的能源供应非常重要; 对于我们今天可以看到像德国这样可再生能源渗透性高的大陆电网也是至关重要的。

第一个解决方案可能是提供大规模的太阳能发电与电力需求来匹配。然而, 这对于整体电力需求是无法完成的。而且实现匹配快速波动的需求是更加困难的。这就是为什么我们要准备解决问题的第二套方案——储能一体化。氢能便于能源存储和运输, 是一种很有前途的存储选择。这是本书正在探索和作者多年来一直在研究的内容。我确信读者可以在这里找到关于氢能可再生能源系统的有趣简介。我也相信读者会发现氢能是能提高可再生能源市场渗透率的一个有趣工具。

**Jens Merten**

**国家太阳能研究所 (INES) 太阳能系统实验室主任**

# 前 言

化石能源完全枯竭或者成本过高难以开采，只是时间问题。如果延续这种趋势，化石能源时代终将要画上句号。人类面临的问题除了化石能源日益减少之外，还有燃料在开采、运输、加工和使用过程中所引起的环境污染问题，这就是我们为什么必须尽快找寻到解决当前现状的措施，从而尽快进入新能源时代的原因。

氢能被视为在这个历史过渡期间最可能充当领导角色的候选者之一。毋庸置疑，不能通过化石能源来提供制备氢气所需要的能量。因此，有必要求助于取之不尽、用之不竭、环境影响尽可能小的可再生能源。在可再生能源当中，作者认为太阳能是最佳的选择之一，其原因将在本书中进行阐述。

本书共分为 11 章来给读者展示太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统的运行和实施的最新知识。该系统结合不同的技术，有效、协调地将可再生能源转换为化学能并以氢的形式储存起来，然后转化为更容易利用的能源形式——电能。

本书第 1 章介绍了以氢为基础的新能源系统相关的宏观经济、技术和历史。第 2 章介绍了氢的理化性质、生产、应用以及用于氢储存和运输材料的失效现象和相容性。第 3 章详细探讨了电解槽和燃料电池的性能和建模。第 4 章和第 5 章分别描述了光伏和风能的技术基础。第 6 章讨论了其他潜在可用于制氢的可再生能源。第 7 章阐述了另一个重要问题的全过程：氢存储。第 8 章提供了许多关于在标准电池和其他更先进电池替代品中化学存储的相关信息。第 9 章详细讨论了实际实现氢气的完整系统和利用数学模型模拟系统的性能。第 10 章列举了现实生活中一些很有趣的应用实例。第 11 章给出了最终结论。在每章的末尾为进一步探讨该主题的读者列出了相关参考文献。

本书的目标是与大家分享太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统的科学和技术，并帮助建立一个新的可持续能源经济。我们希望我们将会成功。

非常感谢西蒙娜·佩得拉茨 (Simone Pedrazzi) 为本书部分模型和模拟提供的帮助，感谢意大利维基董事会秘书安德列·赞尼 (Andrea Zanni) 帮助正确使用来自维基媒体数据库知识共享 (Creative Commons) 授权图片。

# 缩 略 语

|      |                                                    |
|------|----------------------------------------------------|
| AC   | Alternate Current, 交流电                             |
|      | Activated Carbon, 活性炭                              |
| AE   | Alkaline Electrolyser, 碱性电解剂                       |
| AFC  | Alkaline Fuel Cell, 碱性燃料电池                         |
| BET  | Brunauer-Emmett-Teller, 布鲁诺尔-艾米特-泰勒                |
| BoS  | Balance of System, 系统平衡                            |
| CAES | Compressed Air Energy Storage, 压缩空气储能              |
| CHP  | Combined Heat and Power, 热电联产                      |
| COP  | Coefficient of Performance, 性能系数                   |
| DC   | Direct Current, 直流电                                |
| DL   | Double Layer, 双电层                                  |
| DOE  | Department of Energy, 能源部                          |
| EDL  | Electrical Double Layer, 双电荷层                      |
| EL   | Electrolyser, 电解剂                                  |
| FC   | Fuel Cell, 燃料电池                                    |
| FF   | Filling Factor, 填充因子                               |
| GHG  | Greenhouse Gas, 温室气体                               |
| HA   | Hydrogen Attack, 氢蚀                                |
| HC   | Hydrocarbon, 碳氢化合物                                 |
| HCV  | Higher Calorific Value, 高发热值                       |
| HE   | Hydrogen Embrittlement, 氢脆                         |
| HFL  | Higher Flammability Limit, 较高的可燃性极限                |
| HHV  | Higher Heating Value, 高热值                          |
| HTE  | High Temperature Electrolysis, 高温电解                |
| HTS  | High Temperature Shift, 高温变换                       |
| IEA  | International Energy Agency, 国际能源署                 |
| IEC  | International Electrotechnical Commission, 国际电工委员会 |
| LCV  | Lower Calorific Value, 低发热值                        |
| L-F  | Langmuir-Freundlich (equation), 朗格缪尔-弗罗因德利希 (方程)   |

作者还要感谢 Pei-Shu Wu 的翻译和编辑，大大提高了本书定稿的质量。最后，我们还要感谢施普林格意大利公司的 Francesca Bonadei、Maria Cristina Accella 和 Pierpaolo Riva 在本书最终出版阶段给予的帮助！

**Gabriele Zini**  
**Paolo Tartarini**

|       |                                                                                                        |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LFL   | Lower Flammability Limit, 较低的可燃性极限                                                                     |
| LHV   | Lower Heating Value, 低热值                                                                               |
| LIB   | Lithium-Ion Battery, 锂离子电池                                                                             |
| LTS   | Low Temperature Shift, 低温变换                                                                            |
| MCFC  | Molten Carbonate Fuel Cell, 熔融碳酸盐燃料电池                                                                  |
| MCP   | Measure, Correlate, Predict, 测量、校准、预测                                                                  |
| MPPT  | Maximum Power Point Tracking, 最大功率点跟踪                                                                  |
| MWCNT | Multi-Wall Carbon Nano-Tube, 多壁碳纳米管                                                                    |
| NBP   | Normal Boiling Point, 标准沸点                                                                             |
| OTEC  | Ocean Thermal Energy Conversion, 海洋温差发电                                                                |
| PAFC  | Phosphoric Acid Fuel Cell, 磷酸燃料电池                                                                      |
| PDF   | Probability Distribution Function, 概率密度函数                                                              |
| PEM   | Proton Exchange Membrane, 质子交换膜<br>Polymer Electrolyte Membrane, 高分子电解质膜                               |
| PEMFC | Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 质子交换膜燃料电池<br>Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cell, 高分子电解质膜燃料电池 |
| PLC   | Programmable Logic Controller, 可编程序控制器                                                                 |
| PM    | Particulate Matter, 颗粒物                                                                                |
| PME   | Polymeric Membrane Electrolyser, 高分子膜电解槽                                                               |
| PV    | Photovoltaic, 光伏                                                                                       |
| QoS   | Quality of Service, 服务质量                                                                               |
| RES   | Renewable Energy Source, 可再生能源                                                                         |
| SHC   | Specific Heat Capacity, 比热容                                                                            |
| SHE   | Standard Hydrogen Electrode, 标准氢电极                                                                     |
| SHES  | Solar Hydrogen Energy System, 太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统                                                       |
| SMES  | Superconducting Magnetic Energy Storage, 超导磁蓄能                                                         |
| SMR   | SteAM Reforming, 蒸气重整                                                                                  |
| STP   | Standard Temperature and Pressure, 标准温度和压力                                                             |
| SOC   | State Of Charge, 充电状态                                                                                  |
| SOFC  | Solid Oxide Fuel Cell, 固体氧化物燃料电池                                                                       |
| SPE   | Solid Polymer Electrolyser, 固体聚合物电解槽                                                                   |
| SRC   | Specific Rated Capacity, 比额定容量                                                                         |
| SWCNT | Single-Wall Carbon Nano-Tube, 单壁碳纳米管                                                                   |

## VIII 太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| TM   | Trademark, 商标                       |
| TSR  | Tip-Speed Ratio, 叶尖速比               |
| UC   | Ultra-Capacitor, 超级电容器              |
| UPS  | Uninterruptible Power Supply, 不间断电源 |
| USD  | United States Dollar, 美元            |
| VRB  | Vanadium Redox Battery, 钒电池         |
| VRLA | Valve Regulated Lead-Acid, 阀控铅酸     |

# 目 录

原书序

前言

缩略语

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第1章 绪论                        | 1  |
| 1.1 现状                        | 1  |
| 1.2 石油峰值理论                    | 1  |
| 1.3 能源的种类以及对环境的影响             | 3  |
| 1.4 能源系统的可持续性                 | 5  |
| 1.5 氢新能源系统                    | 6  |
| 1.6 前景                        | 6  |
| 1.7 氢能的替代品                    | 8  |
| 参考文献                          | 8  |
| 第2章 氢                         | 10 |
| 2.1 氢气和能源载体                   | 10 |
| 2.2 性质                        | 11 |
| 2.3 生产                        | 12 |
| 2.3.1 蒸汽重整                    | 13 |
| 2.3.2 固体燃料汽化                  | 13 |
| 2.3.3 部分氧化                    | 14 |
| 2.3.4 电解水                     | 14 |
| 2.3.5 热裂解                     | 14 |
| 2.3.6 氨裂解                     | 15 |
| 2.3.7 其他体系：光化学、光生物学、半导体及它们的组合 | 15 |
| 2.4 用法                        | 16 |
| 2.4.1 直接燃烧                    | 16 |
| 2.4.2 催化燃烧                    | 19 |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 2.4.3 直接燃烧蒸汽法 .....       | 19        |
| 2.4.4 燃料电池 .....          | 19        |
| 2.5 退化现象和材料兼容性 .....      | 19        |
| 2.5.1 材料退化 .....          | 19        |
| 2.5.2 材料选择 .....          | 20        |
| 2.6 配件：管道、接头和阀门 .....     | 21        |
| 2.7 传输 .....              | 21        |
| 参考文献 .....                | 23        |
| <b>第3章 电解槽和燃料电池 .....</b> | <b>24</b> |
| 3.1 引言 .....              | 24        |
| 3.2 化学动力学 .....           | 25        |
| 3.3 热力学 .....             | 25        |
| 3.4 电极动力学 .....           | 27        |
| 3.4.1 活化极化 .....          | 27        |
| 3.4.2 欧姆极化 .....          | 27        |
| 3.4.3 浓差极化 .....          | 28        |
| 3.4.4 反应极化 .....          | 28        |
| 3.4.5 转移极化 .....          | 29        |
| 3.4.6 输运现象 .....          | 29        |
| 3.4.7 温度和压力对极化损耗的影响 ..... | 29        |
| 3.5 电池的能量和效用能 .....       | 29        |
| 3.6 电解槽 .....             | 30        |
| 3.6.1 电解槽的功能 .....        | 30        |
| 3.6.2 电解槽技术 .....         | 31        |
| 3.6.3 热力学 .....           | 32        |
| 3.6.4 数学模型 .....          | 34        |
| 3.6.5 热模型 .....           | 35        |
| 3.7 燃料电池 .....            | 36        |
| 3.7.1 燃料电池功能 .....        | 36        |
| 3.7.2 燃料电池技术 .....        | 38        |
| 3.7.3 热力学 .....           | 40        |
| 3.7.4 数学模型 .....          | 43        |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 3.7.5 热模型 .....                | 44        |
| 参考文献 .....                     | 44        |
| <b>第4章 太阳辐射和光电转换 .....</b>     | <b>46</b> |
| 4.1 太阳辐射 .....                 | 46        |
| 4.2 光伏效应、半导体和 p-n 结 .....      | 48        |
| 4.3 晶体硅光伏电池 .....              | 50        |
| 4.4 其他电池技术 .....               | 52        |
| 4.5 转换损失 .....                 | 53        |
| 4.6 $I$ - $U$ 曲线中的变化 .....     | 54        |
| 4.7 光伏电池和组件 .....              | 55        |
| 4.8 光伏电站的种类 .....              | 56        |
| 4.9 表面接收的辐射 .....              | 58        |
| 4.10 工作点的选择 .....              | 59        |
| 参考文献 .....                     | 61        |
| <b>第5章 风能 .....</b>            | <b>63</b> |
| 5.1 简介 .....                   | 63        |
| 5.2 风的数学描述 .....               | 64        |
| 5.3 风的等级划分 .....               | 66        |
| 5.4 风力发电机的数学模型 .....           | 67        |
| 5.5 功率控制及其系统设计 .....           | 72        |
| 5.6 风力发电机的级别划分 .....           | 75        |
| 5.7 发电机 .....                  | 75        |
| 5.8 计算实例 .....                 | 76        |
| 5.9 环境影响 .....                 | 77        |
| 参考文献 .....                     | 77        |
| <b>第6章 其他能用于制氢的可再生能源 .....</b> | <b>78</b> |
| 6.1 太阳热能 .....                 | 78        |
| 6.2 水力发电 .....                 | 79        |
| 6.3 潮汐能、波浪能和海洋温差能 .....        | 80        |
| 6.4 生物质能 .....                 | 81        |
| 参考文献 .....                     | 81        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第7章 储氢 .....               | 83  |
| 7.1 储氢过程中的问题 .....         | 83  |
| 7.2 物理存储 .....             | 84  |
| 7.2.1 压缩存储 .....           | 84  |
| 7.2.2 液化存储 .....           | 87  |
| 7.2.3 玻璃或塑料容器存储 .....      | 88  |
| 7.3 物理化学存储 .....           | 89  |
| 7.3.1 物理吸附 .....           | 89  |
| 7.3.2 分子间相互作用的经验模型 .....   | 90  |
| 7.3.3 吸附和脱附速率 .....        | 91  |
| 7.3.4 吸附和脱附的实验测试 .....     | 93  |
| 7.3.5 等温吸附线 .....          | 93  |
| 7.3.6 吸附热动力学 .....         | 94  |
| 7.3.7 其他的吸附等温线 .....       | 95  |
| 7.3.8 吸附等温线的分类 .....       | 96  |
| 7.3.9 碳材料在物理吸附氢气中的应用 ..... | 96  |
| 7.3.10 替代碳的物理吸附 .....      | 98  |
| 7.3.11 沸石材料 .....          | 98  |
| 7.3.12 金属氢化物 .....         | 99  |
| 7.4 化学存储 .....             | 100 |
| 7.4.1 化学氢化 .....           | 100 |
| 参考文献 .....                 | 101 |
| 第8章 其他电力储能技术 .....         | 103 |
| 8.1 引言 .....               | 103 |
| 8.2 电化学储能 .....            | 103 |
| 8.2.1 阀控式铅酸电池 .....        | 104 |
| 8.2.2 锂离子电池 .....          | 105 |
| 8.2.3 钒电池 .....            | 106 |
| 8.3 超级电容器储能 .....          | 108 |
| 8.4 压缩空气储能 .....           | 109 |
| 8.5 地下抽水蓄能 .....           | 109 |
| 8.6 抽热蓄能 .....             | 109 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 8.7 天然气生产储能 .....                         | 110        |
| 8.8 飞轮储能 .....                            | 110        |
| 8.9 超导磁储能 .....                           | 111        |
| 参考文献 .....                                | 111        |
| <b>第9章 太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统的仿真研究 .....</b>  | <b>113</b> |
| 9.1 太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统 .....              | 113        |
| 9.2 逻辑控制 .....                            | 114        |
| 9.3 性能分析 .....                            | 115        |
| 9.3.1 收集系统效率 .....                        | 116        |
| 9.3.2 整体效率 .....                          | 118        |
| 9.4 光伏转换和压缩存储的仿真 .....                    | 119        |
| 9.5 光伏转换和活性炭存储的仿真 .....                   | 126        |
| 9.6 风能转换、压缩和活性炭存储的仿真 .....                | 133        |
| 9.7 有关火用分析的说明 .....                       | 140        |
| 9.8 太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统仿真的评论 .....         | 140        |
| 参考文献 .....                                | 140        |
| <b>第10章 太阳能制氢的能量转换、储存及利用系统的实际应用 .....</b> | <b>143</b> |
| 10.1 简介 .....                             | 143        |
| 10.2 FIRST 项目 .....                       | 143        |
| 10.3 Schatz 太阳能制氢项目 .....                 | 145        |
| 10.4 ENEA 项目 .....                        | 146        |
| 10.5 Zollbruck 小镇的村镇发电系统 .....            | 146        |
| 10.6 GlasHusEtt 项目 .....                  | 147        |
| 10.7 Trois-Rivière (三河) 发电站 .....         | 148        |
| 10.8 SWB 工业电站 .....                       | 149        |
| 10.9 HaRI 项目 .....                        | 150        |
| 10.10 从实际应用中得出的结论 .....                   | 151        |
| 参考文献 .....                                | 152        |
| <b>第11章 结语 .....</b>                      | <b>153</b> |

# 第 1 章 绪 论

化石能源的不断减少和负面影响对我们的生态系统已造成了巨大危害。氢气能够替代这些传统能源，成为未来能源经济中的最有潜力的能源载体。本章讨论能源的可持续性，并证明基于氢和可再生能源的新能源系统在技术和经济上的可行性。

## 1.1 现状

接近 88% 的当代能源经济依赖于化石能源，然而随着化石能源日益减少并且严重破坏生态系统，有必要采取全新思维去寻找解决问题的答案，并规划未来更安全和可持续的能源供应。为了达到这个目的，人类需要一个基于自然可再生能源或安全清洁核能技术的不同的新能源系统。

由于化石燃料的生成需要亿万年，因此以目前的消耗速度，这些资源将不可能及时得到补充。这样的能源不能在合理的时间范围内再生，因而不能被视为可再生能源。与此相反，可再生能源的定义是来自可在一段短时间内重复再生的自然过程的能源。在诸多可再生能源中，地球每天收到的来自太阳的电磁能量便是其一；其他的例子还包括月球和地球之间的引力以及我们星球内部的热能。

当然，能量也可以通过核技术提供，特别是在地球上通过聚变电站尝试重现恒星内部发生的过程。然而这仍然遇到艰巨的技术挑战，在化石燃料枯竭前非但不可能及时解决，而且在过渡期间给环境造成难以修复的破坏。同时，目前的核聚变技术仍存在许多缺陷和安全风险，很多人认为利用核能技术将是弊大于利。基于这些因素，当前值得重点关注的是如何更好地开发和利用可再生能源。在新能源格局建立并完全取代当前的化石燃料为基础的经济之前，巨大的技术和经济方面的挑战必须得以克服。此外，这种转变也将带来重大的制度变革，在未来的几十年对我们的生活方式和国际权力平衡带来完全、彻底的转变。

## 1.2 石油峰值理论

由于化石燃料必将消耗殆尽，在讨论可取代这些化石能源的新能源之前就必须对目前化石燃料的开采和消耗模式有一个清醒的认识。

在 20 世纪 50 年代,美国地质学家哈伯特 (M. K. Hubbert) 提出了石油峰值理论,并指出石油和其他燃料的开采模式遵循钟形曲线。从曲线的趋势来看,随着时间的增加,发现和开采石油的数量增长达到最大值,之后便按照镜像对称轨迹逐渐下降。这个模型概念的基础就是化石燃料的供应是有限的,或是由于发现新的石油储备的减少或是由于现存为数不多油田开采成本的增加而导致的。

该曲线由逻辑增长模型 (又称自我抑制性方程) 描述为

$$Q(t) = \frac{Q_{\max}}{1 + a \exp(bt)} \quad (1.1)$$

式中,  $Q_{\max}$  是可用资源的总量;  $Q(t)$  是迄今累积的生产量;  $a$  和  $b$  是从 1911 ~ 1961 年在美国原油产量减少模型所获得的常数。

很多不同的研究数据都表明:哈伯特模型确实和许多石油生产国实际石油生产格局严格匹配。在图 1.1 中,模型 (黑线) 被应用到美国 1910 ~ 2005 年期间记录的实际石油生产的趋势 (灰线),这两条曲线互相吻合是显而易见的。其他国家的石油生产也表现出相同的自我抑制生产趋势。例如,作为 OPEC 成员国的印度尼西亚,其生产曲线同样类似哈伯特模型,已经从一个石油出口国转变成石油进口国。

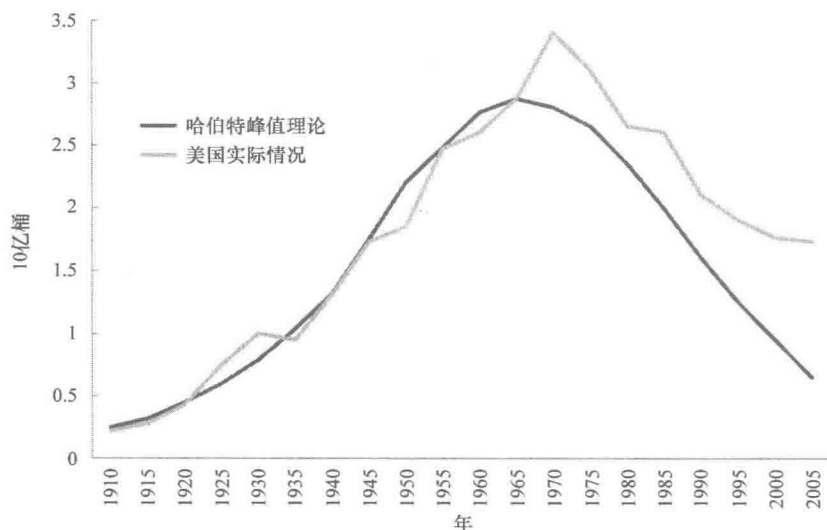


图 1.1 哈伯特模型和美国石油生产曲线

此刻,基于石油的静态消费<sup>⊖</sup>可以预言世界石油的经济周期还有 50 年。然

⊖ 静态消费意味着以现有的水平保持固定的消费速率,不依赖于世界消费量的变化。石油的世界消费量预计会持续增加,而且排除发现新的可采储量的可能性。