



国际电气工程先进技术译丛

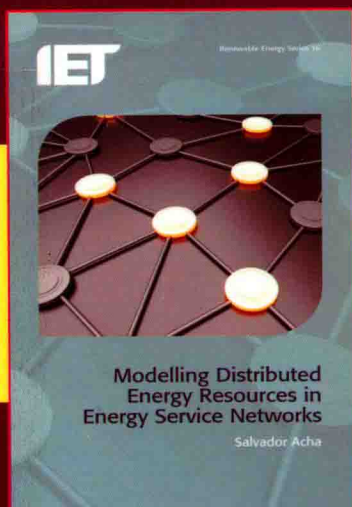
IET

能源服务网络中的 分布式能源模拟

**Modelling Distributed Energy Resources in Energy
Service Networks**

[英] 萨尔瓦多·阿查 (Salvador Acha) 著

赵英汝 等译



- ◎重点对城市能源系统中的两类关键基础设施及其嵌入式技术进行建模
- ◎介绍了一种在嵌入式技术存在的情况下对能源服务网络进行集成稳态优化的建模框架



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

能源服务网络中的 分布式能源模拟

[英] 萨尔瓦多·阿查 (Salvador Acha) 著
赵英汝 等译



机械工业出版社

Modelling Distributed Energy Resources in Energy Service Networks/by Salvador Acha/ISBN 978 - 1 - 84919 - 559 - 1

Original English Language Edition published by The Institution of Engineering and Technology

Copyright © The Institution of Engineering and Technology 2013

All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from IET. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 IET 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可的出口，视为违反著作权法，将受法律制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01 - 2013 - 7585 号。

图书在版编目（CIP）数据

能源服务网络中的分布式能源模拟/（英）萨尔瓦多·阿查（Salvador Acha）著；赵英汝等译．—北京：机械工业出版社，2017.7

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Modelling Distributed Energy Resources in Energy Service Networks

ISBN 978-7-111-57158-2

I. ①能… II. ①萨…②赵… III. ①能源管理系统 IV. ①TK018

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 145087 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

责任校对：潘蕊 封面设计：马精明

责任印制：张博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 12.25 印张 · 223 千字

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 57158 - 2

定价：69.00 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

读者购书热线：010 - 68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010 - 88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

本书介绍了一种对含嵌入式技术的能源服务网络进行集成稳态优化的建模框架。书中开发的新模型称为时间协调最优潮流（TCOPF）模型，此模型可通过一系列必要步骤计算天然气和电力网络的最优能流，同时计算插电式混合动力汽车（PHEV）和热电联产（CHP）装置的最优调度。因此，TCOPF 工具可以管理及协调配电网运营商和分布式能源之间的相互关系。

书中对分布式能源系统应当遵循的优化调度模式进行了描述，这种模式有望改善城市能源服务网络的性能。集成建模为希望有效协调分布式能源运行与能源公用事业运营策略的利益相关方提供了一个新的视角。最终，本书结合用于模拟 PHEV 行驶状况的基于 agent 的模型对 TCOPF 模型框架进行了扩展，以便更好地评估 PHEV 所代表的负载灵活性。

综上，为开发由多种能源基础设施与嵌入式分布式能源集成的综合模型，本书涵盖了电力系统工程师所需要关注的各类关键元素。

译者序

城市能源系统是一个能源资源开发、加工、转化、输送、消费等多个环节相互交织在一起的复杂网络系统，系统中各环节之间的互动关系导致大量不确定性的存在。这些复杂性和不确定性对能源资源供应、电力消费结构、甚至电力部门决策者将做出的相关决策方案有潜在影响，加剧了电力供应的不安全性。

本书作者 Salvador Acha 是英国帝国理工学院 BP 城市能源系统项目的主要研究人员之一。书中内容是该项目一部分科研成果的总结。本书侧重于利用嵌入式技术对城市能源系统的两个关键基础设施进行建模。这两个关键基础设施是天然气和电力网络，而嵌入式技术包括热电联产和电动汽车装置。书中开发的新模型称为时间协调最优潮流 (TCOPF) 模型，此模型可通过一系列必要步骤计算天然气和电力网络的最优能流，同时计算插电式混合动力汽车 (PHEV) 和热电联产 (CHP) 装置的最优调度。因此，TCOPF 工具可以管理并协调配电网运营商和分布式能源之间的相互关系。

书中对分布式能源系统应当遵循的优化调度模式进行了描述，这种模式有望改善城市能源服务网络的性能。集成建模为希望有效协调分布式能源运行与能源公用事业运营策略的利益相关方提供了一个新的视角。最终，本书结合用于模拟 PHEV 行驶状况的基于 agent 的模型对 TCOPF 模型框架进行了扩展，以便更好地评估 PHEV 所代表的负载灵活性。

本书涵盖了能源系统模拟的基本原理与核心方法，为未来能源系统的设计和运行提供了有价值的参考。

本书主要由赵英汝翻译，其他参加翻译的人员有张尧立、张诗琪、詹翔燕、景锐、刘浩仑、郑徐跃。本书内容所涵盖的领域较宽，加之时间仓促，虽然经过译者仔细求证，但恐仍难免出现翻译不当甚至错误之处，恳请广大读者批评指正。

译者

原 书 序

本书是伦敦帝国理工学院 BP 城市能源系统项目的科研成果之一。于 2005 年底启动的这个项目推动了帝国理工学院能源未来实验室的创建，该实验室是整个学院能源研究的集汇地。设立这个项目的目的是应用多学科、系统性的方法来确定在城市能源系统的设计和运行中采用系统集成方法的潜在好处，同时确认节能和减缓气候变化的策略，由此探索可持续能源解决方案以应对全球城市化的加速。

该项目的重点是建模和优化方法的应用，此类方法已成功用于过程工程、电路设计和生物系统等城市能源系统的新兴领域。项目的主要挑战之一来源于城市能源系统通用建模框架的开发以及设计和运行问题。

该项目有一个前提假设，即尽管单个的城市能源系统可能已经得到了优化，对于不同资源系统和城市总能量消耗的集成建模工作尚未开展。如上所述，此类系统层面的优化已经在其他领域得到了应用，并且为炼油厂之类的系统提高了几十个百分点的效率。在过去的几十年中，计算机硬件和软件的迅速发展也为本项目的开展提供了强有力的支持。

这本书呈现了项目研发过程中非常有趣和创新的一部分研究成果，即围绕包括需求中心、插电式混合动力汽车、热电联产和能源服务（燃气和电力）网络在内的混合城市能源系统的运行优化开发出的复杂工具。书中对这一工具的开发过程进行了详述，通过文字描述了同时考虑能源系统的多个方面如何带来收益，并展示了如何将该工具与采用新技术后引发的对未来需求模式的前瞻性仿真相结合。总而言之，本书代表了向智能、高效的未来城市能源系统过渡的一个重要里程碑，可以为工程师解决复杂的跨学科能源问题提供启发和思路。

Nilay Shah
帝国理工学院

原 书 前 言

我们生存的这个世界，资源有限且整个能源供应链效率低下。从获得一次燃料到为数百万消费者提供电力，提高复杂能源系统的性能是一项艰巨任务。对于有意进入这一研究领域的能源研究人员而言，常常缺乏用来模拟此类多层面问题的软件工具，因此需要开发整体的模拟框架来捕捉复杂能源系统所表现出的关键特性。伦敦帝国理工学院近期开展的一系列跨学科研究，正是试图解决多能源网络与有助于提升城市区域内能源基础设施性能的先进技术相互影响所产生的问题。

电力系统工程师通常声称建设智能电网系统是为了改革电力输送方式，然而他们忽略了一点，那就是相互依存的基础设施可以使智能电网更加智能。

本书的撰写正是基于这样一种假设，即随着新技术的引进，公用设施现行的管理方法可能会导致其效率更加低下。这是因为即将部署的分布式能源（DER）必将使公用设施的资本运行更具成本效益，所以必须对基础设施进行多重分析以确保其关键服务不被中断。这一特性引发我们的思考，例如，燃气驱动热电联产技术的高度普及是否会对燃气网络带来不利的影响？此类问题便是本书讨论的核心。

显而易见，为了确保所需的系统性能得以全部实现，需要进行整体性的分析。因此，填补基础设施相互依存关系领域现有的研究空白是一项值得尝试的工作，可为未来能源系统的设计和运行提供有价值的指导意见。

本书介绍了一种在嵌入式技术存在的情况下对能源服务网络进行集成稳态优化的建模框架。文中开发的新模型称为时间协调最优潮流（TCOPF）模型，此模型可通过一系列必要步骤计算天然气和电力网络的最优能流，同时计算插电式混合动力汽车（PHEV）和热电联产（CHP）装置的最优调度。因此，TCOPF 工具可以管理配电网运营商和分布式能源之间的相互关系。

书中对分布式能源系统应当遵循的优化调度模式进行了描述，这种模式有望改善城市能源服务网络的性能。集成建模为希望有效协调分布式能源运行与能源公用事业运营策略的利益相关方提供了一个新的视角。最终，本书结合用于模拟 PHEV 行驶状况的基于 agent 的模型对 TCOPF 模型框架进行了扩展，以便更好地评估 PHEV 所代表的负载灵活性。

综上，为开发由多种能源基础设施与嵌入式分布式能源集成的综合模型，本书涵盖了电力系统工程师所需要关注的各类关键元素。全书的架构如下：

第 1 章：简述进行这项工作的背景和动机。重点阐述全世界范围内不断增长的能源需求，以及为什么城市中心是能源消耗的聚集地，强调以最优方式使用资源对于城市的重要性。

第 2 章：对涉及本研究主题的相关文献进行综述，包括有关能源基础设施与嵌入式技术集成分析的建模方法等。此外，概述前人针对天然气和电力联合网络所进行的分析工作。

第3章：从电力和天然气网络建模的数学原理出发，围绕针对这两类基础设施的建模，详细介绍采用牛顿-拉夫逊法的稳态潮流分析，并比较两类系统的相似性。

第4章：扩展第3章所搭建的模型框架，引入控制装置和嵌入式技术，控制机理包含天然气系统中的压缩机以及电力系统中的有载分接开关（OLTC）。介绍能量转换与存储技术涉及的概念和公式，并对含热存储的热电联产机组以及含电化学存储的PHEV装置进行分析。

第5章：以第3章和第4章中建立的模型框架为基础，使用TCOPF进行能源服务网络的集成优化能流分析。提出多周期TCOPF问题的普适数学表述，由此对目标函数和约束条件的基本特性进行讨论。

第6章：通过TCOPF程序对不同运行策略下的案例情景进行分析，说明分布式能源如何影响天然气和电力网络的技术-经济性运行参数，并对仿真所得数据进行详细的分析。特别关注控制、转换和存储装置之间的协调，探索适合未来能源服务网络的运行模式。由此为利益相关者提供关于分布式能源理想化管理的指导意见。

第7章：说明如何通过基于agent的模型，将其输出数据连接到TCOPF建模框架以完成车辆行驶的分析。这种方式下，PHEV负载的时间和空间特征可用于潮流问题分析。通过案例研究展示了结果的粒度。

第8章：讨论本文的贡献，得出结论，同时探讨该领域未来的不同研究方向。

以上章节纲要涵盖了能源模拟的核心基本原理，可供能源研究者参考以制定自己的模拟框架。可以明确的是，在这一研究领域，灵活性是至关重要的，而若每个系统的原理都能得到适当地表述，综合分析也是可以实现。不过，我认为一些模型假设似乎有些宽泛，尽管如此，我相信本书已经实现了它的价值，也希望能源领域的研究人员能在此基础上做出更多的贡献。

任何一本书都不可以凭一己之力完成，本书也不例外。因此，特别感谢IET出版社对本书原稿所做的贡献。此外，还要感谢所有同事、家人和过去几年对我的研究有积极影响的朋友们，是你们造就了这本书。

Salvador Acha
帝国理工学院

缩 略 语 表

英文缩略语	英文全称	中文解释
ABM	Agent – based models	基于 agent 的模型
AC	Alternate current	交流
ATR	Ancillary – to – transport ratio	辅助运输率
BEV	Battery electric vehicle	纯电动汽车
BMS	Building management system	建筑管理系统
CCS	Carbon capture and sequestration	碳捕获与封存
CHP	Combined heat and power	热电联产
CO ₂	Carbon dioxide	二氧化碳
CPP	Critical peak pricing	尖峰电价
CVP – SS	Control vector parametrisation steady – state	稳态控制向量参数化
DC	Direct current	直流
DER	Distributed energy resource	分布式能源
DMS	Demand management system	需求管理系统
DNO	Distribution network operator	配电网运营商
DSM	Demand side management	需求侧管理
EHR	Electricity – to – heat ratio	电热比
EUf	Energyutilization factor	能量利用率
EV	Electric vehicle	电动汽车
EVLF	Electric vehicle load flexibility	电动汽车负载灵活性
FACTS	Flexible AC Transmission Systems	柔性交流输电系统
<i>g</i>	Gravity	重力
G2V	Grid – to – vehicle	电网到车辆
GHV	Gross heating value	总热值
GIS	Geographical Information System	地理信息系统
GPS	Global positioning system	全球定位系统
GW	Gigawatt	兆瓦

(续)

英文缩略语	英文全称	中文解释
h	hour	小时
HEV	Hybrid electric vehicle	混合动力汽车
hl_f	Head loss	水头损失
ICE	Internal combustion engine	内燃机
IT	Information technology	信息技术
KCL	Kirchhoff's Current Law	基尔霍夫电流定律
KKT	Karush, Kuhn, Tucker	卡罗需 - 库恩 - 塔克
km	kilometre	千米
kV	kilovolt	千伏
kW	kilowatt	千瓦
kW_{el}	kilowatt - electricity	千瓦电力
kWh	kilowatt - hour	千瓦时
kW_{th}	kilowatt - thermal	千瓦热
LDZ	Local distribution zones	当地分销商
LMC	Locational marginal costs	边际成本
Micro - CHP	Micro - combined heat and power	微型热电联产
MDMS	Meter data management system	量测数据管理系统
MVA	Megavolt - ampere	兆伏 - 安
MW	Megawatt	兆瓦
MW_{el}	Megawatt - electricity	兆瓦电力
MWh	Megawatt - hour	兆瓦时
MW_{th}	Megawatt - thermal	兆瓦热
OLTC	On - load tap - changer	有载分接开关
OPF	Optimal power flow	最优潮流
PHEV	Plug - in hybrid electric vehicle	插电式混合动力汽车
PMU	Phasor measurement units	相位测量装置
PU	Per unit	单位
PV	Photo - voltaic	光伏
SCADA	Supervisory control and data acquisition	数据采集与监控
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	超导磁蓄能

(续)

英文缩略语	英文全称	中文解释
SOC	State of charge	荷电状态
TCOPF	Time – coordinated optimal power flow	时间协调最优潮流
TES	Thermal energy storage	储热
UF	Utility factor	利用率
UK	United Kingdom	英国
UN	United Nations	联合国
UPS	Uninterrupted power supply	不间断电源
USA	United States of America	美国
V2G	Vehicle – to – grid	车辆到电网
V2R	Vehicle – to – road	车辆到道路
W2W	Well – to – wheel	油井到车轮
Wh	Watt – hour	瓦时

符 号 表

符号	变量名称	国际单位
B	电纳	S
CO_2	二氧化碳	mmol/L
D	管径	mm
F	气流	m^3/s
G	电导	S
GW	兆瓦	GJ/s
GWh	兆瓦时	GJ
I	电流	A
K	管摩擦	NA
kW	千瓦	kJ/s
kWh	千瓦时	kJ
L	管长	m
MW	兆瓦	MJ/s
MWh	兆瓦时	MJ
p	压力	Pa
P	实际功率	W
Q	无功功率	VAR
S	复数功率	VA
V	电压幅值	V
Y	导纳	S
Z	阻抗	Ω
$\in$	容许值	NA
ω	角频率	rad/s
θ	相位角	rad

目 录

译者序

原书序

原书前言

缩略语表

符号表

第 1 章 能源资源、基础设施和转换技术有效管理所面临的挑战	1
1.1 全球城市化和能源系统效率	1
1.2 城市能源系统的演变	5
1.3 能源系统的综合管理	8
第 2 章 集成建模综述	12
2.1 关于分布式能源的建模问题	12
2.1.1 分布式发电面临的挑战	12
2.1.2 热电联产技术对电网的影响	14
2.1.3 PHEV 技术对电网的影响	17
2.2 模拟多能源网络的方法	22
2.2.1 多联产分析	22
2.2.2 综合能源运输系统	22
2.2.3 能源枢纽建模	23
2.2.4 天然气和电力的一体化研究	24
第 3 章 能源服务网络建模	26
3.1 电网建模	26
3.1.1 电力系统的基本原理	26
3.1.2 定义电力潮流问题	27
3.1.3 节点公式和导纳矩阵	28
3.2 天然气网络建模	31
3.2.1 天然气系统的基本原理	31
3.2.2 定义天然气潮流问题	32
3.2.3 节点公式和关联矩阵	33
3.3 能源服务网络类比	36
3.3.1 部件和变量的建模	36

3.3.2 牛顿-拉夫逊算法	37
3.3.2.1 电力系统的雅可比矩阵	38
3.3.2.2 天然气系统的雅可比矩阵	39
3.3.2.3 潮流总结	41
第4章 能源服务网络中嵌入式技术的建模	43
4.1 有载分接开关（OLTC）变压器的建模	43
4.1.1 OLTC 变压器的基本原理	43
4.1.2 OLTC 模型方程	45
4.2 压缩机组建模	47
4.2.1 压缩机组的基本原理	47
4.2.2 压缩机模型方程	48
4.3 热电联产技术建模	49
4.3.1 热电联产机组的基本原理	49
4.3.2 含热电联产天然气网络的节点公式	56
4.3.3 储热管理方程	58
4.4 PHEV 技术建模	60
4.4.1 PHEV 的基本原理	60
4.4.2 含 PHEV 电网的节点公式	68
4.4.3 电化学储能管理方程	70
第5章 能源服务网络的时序最优潮流	73
5.1 TCOPF 问题概述	73
5.1.1 问题描述	73
5.1.2 优化求解	75
5.1.3 TCOPF 工具的输入数据和假设	77
5.2 TCOPF 的目标函数	78
5.2.1 即插即忘	78
5.2.2 燃料成本	78
5.2.3 能量损失	78
5.2.4 能源成本	79
5.2.5 综合目标	79
5.3 TCOPF 的数学公式	79
5.3.1 目标函数的公式	79
5.3.1.1 即插即忘情景	80
5.3.1.2 燃料成本最小化情景	80
5.3.1.3 能量损失最小化情景	80
5.3.1.4 能源成本最小化情景	80
5.3.1.5 多目标最小化情景（如现货价格成本与排放成本）	81

5.3.2 约束条件	82
5.3.2.1 关于电网	82
5.3.2.2 关于天然气网	82
5.3.2.3 关于嵌入电网的 PHEV	83
5.3.2.4 关于嵌入天然气网络的热电联产装置	83
5.3.3 TCOPF 问题和求解的特性	84
第 6 章 能源服务网络中的分布式能源优化：案例分析	86
6.1 TCOPF 能源服务网络案例研究	86
6.1.1 输入数据和假设	86
6.1.2 案例研究和能源系统参数的说明	89
6.2 技术-经济性结果	93
6.2.1 概述	93
6.2.2 集成与非集成系统	94
6.2.3 天然气网络	96
6.2.4 热电联产技术	100
6.2.5 电网	107
6.2.6 PHEV 技术	110
6.3 结果综述	116
第 7 章 能源服务网络中电动汽车流动性的建模	119
7.1 PHEV 流动性的建模	119
7.1.1 建模方法	119
7.2 基于 agent 的模型与潮流模型的综合	120
7.2.1 车辆基于 agent 的模型	121
7.2.2 PHEV 的优化潮流公式	122
7.2.2.1 PHEV 充电成本最小化情景	123
7.3 PHEV 充电的 ABM-TCOPF 案例研究	124
7.3.1 输入数据和假设	124
7.3.1.1 驾驶员资料	124
7.3.1.2 PHEV 特性	124
7.3.1.3 城市布局	124
7.3.1.4 电力负载资料和网络特性	125
7.3.2 案例研究和能源系统参数	126
7.4 技术-经济性结果	127
7.4.1 基于 agent 的模型结果	127
7.4.2 优化潮流模型结果	130
第 8 章 结束语	134
8.1 总结和贡献	134

8.2 研究的受益者	136
8.3 未来的研究方向	137
附录	139
附录 A 城市群数据	139
附录 B 英国的能流分析.....	140
附录 C 电力负载潮流代码.....	142
附录 D 天然气负载潮流代码	145
附录 E 有载分接开关偏导数.....	147
附录 F 标么值	148
附录 G KKT 最优化条件	149
附录 H 牛顿迭代法	149
参考文献	151

第 1 章 能源资源、基础设施和转换技术有效管理所面临的挑战

1.1 全球城市化和能源系统效率

在 2011 年底，世界人口已经达到了 70 亿，而 1960 年全球人口约为 30 亿^[1]。图 1.1 为联合国（UN）发布的 1800 - 2100 年世界人口的变化趋势及预测。目前，人们还不知道人口增长的制约因素，但可以肯定的是，人口的高速增长加大了世界资源，诸如水、食物和能源的供给压力。自 19 世纪工业革命开始之后，能源的消耗与人类活动的关系变得更为紧密。此外，随着社会的不断发展，人们对于能源的需求也变得更加相似。这就是为什么人类集中的地方，能源的消耗也相对集中。在城市不断发展的过程中，人们不断地追求更高的生活质量和更便捷的生活方式，因此，近数十年来的高速城市化已成为一种常态。可以预计，世界各地的城市化水平是不一样的。在 1950 年，有 8 个城市居民超过 500 万，据估计，到 2015 年，有 58 个城市将超过这个值。附录 A 为 2015 年特大城市的详细清单。表 1.1 和表 1.2 分别列出了五大城市在 1950 年和 2015 年的人口规模^[2]。

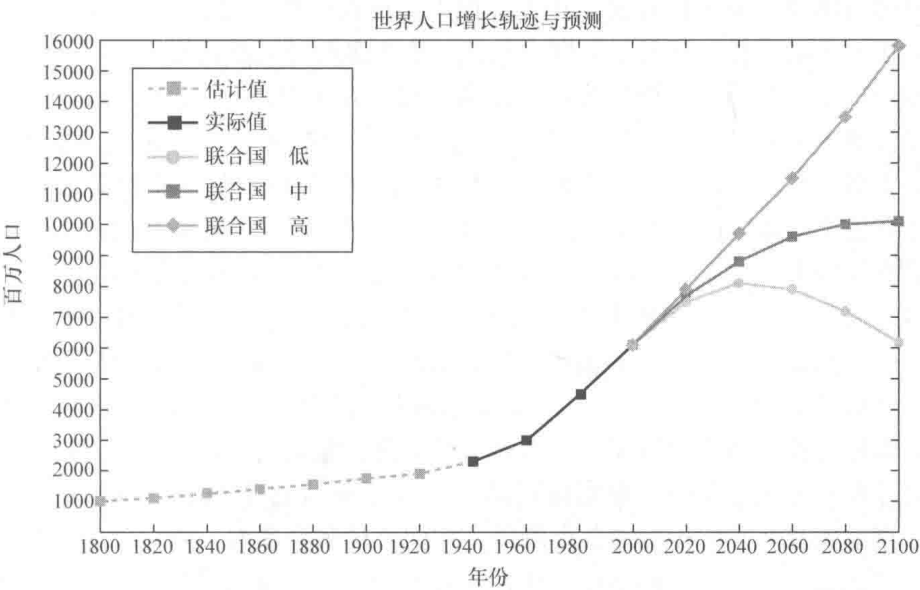


图 1.1 1800 - 2100 年的世界人口变化趋势（联合国预测）^[3]