



过程和能源系统的 建模、分析与优化

MODELING, ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF
PROCESS AND ENERGY SYSTEMS

[美] F·卡尔·诺普夫(F. Carl Knopf) 著
王建平 王乐 译



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

过程和能源系统的 建模、分析与优化

Modeling, Analysis and Optimization of
Process Systems

[美] F·卡尔·诺普夫(F. Carl Knopf) 著
王建平 王乐 译



中国石化出版社

著作权合同登记 图字 01-2014-8334

Copyright© 2012 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. This translation published under license. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Petrochemical Press Co. LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited., written permission of the publisher.

中文版权为中国石化出版社所有。版权所有，不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

过程和能源系统的建模、分析与优化/(美)F·卡
尔·诺普夫(F. Carl Knopf)著;王建平,王乐译.1版.
—北京:中国石化出版社,2017.8
ISBN 978-7-5114-4502-5

I. ①过… II. ①F… ②王… ③王… III. ①过程工业
—研究 IV. ①T

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 149910 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或
任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 37 印张 847 千字

2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

定价:105.00 元



译者序

能源是人类活动的物质基础。随着世界经济的发展，能源需求总量不断增加，能源资源与生态环境约束却日益严格。转变能源发展方式、调整能源结构、提高能源利用效率，降低能源成本，是实现人类社会节约、清洁、安全可持续发展的必然选择。

《过程和能源系统的建模、分析与优化》一书由路易斯安那州立大学化学工程系资深教授 F. Carl Knopf 撰写，对包括石油化工在内的工业生产过程有关过程能量集成原理、建模、计算机软件、工程设计等方面进行了详细阐述。

本书共分为 17 章，是国内外少见的系统介绍包括石油化工在内的工业生产过程模拟、分析与优化方面的著作。随着能源政策、能源管理、能效提升技术在我国得到前所未有的重视和发展，本书的翻译出版具有重要的现实指导意义，将会有效满足国内石化行业及相关从事流程模拟研究的工程技术人员对于国外高水平学术著作的阅读和参考需求，也可作为工程技术人员进行过程和能源系统建模、分析和优化的重要参考图书。

本书翻译过程中，得到中国石化总部、中国石化抚顺石油化工研究院、石化盈科信息技术有限责任公司上海分公司、中国石化出版社等单位的大力支持，在此表示感谢。尤其感谢张英、马蕊英、胡丞等同志对本书付出的辛劳。

包括石油化工在内的工业过程模拟、分析与优化是一门涉及多学科的科学和技术，因译者水平和专业知识有限，虽竭尽全力，并请教了有关专家，但译文中不确切甚至错误之处恐仍难避免，敬请读者与同行指正。

译者

2017 年 7 月

前 言

能源成本几乎影响每一种工艺流程的利润率。本书通过对能源需求方-加工厂-能源供应方-可用热电资源进行分析,提供了一个用于流程改进的统一平台。其重点是首先量化过程中的物流和能量流,过程所需能量指导公用工程系统的优化设计。为了确保公用工程系统保持最佳成本效率运行,也给出了相关技术。

本书既适用于在职工程师,也适用于工科学生。对于在职工程师,本书提供了一种系统、独立的方法,最大限度减少操作设施的能源消费和成本。对于化学、机械、石油和能源工程专业的学生,本书提供了能源分析、设计和优化的详细评估方法。

本书特色

本书有许多特色,希望能方便读者使用。

示例文件的安装、问题解决文件和所有开发软件的编译和源代码文件详见第1章1.7节。

采用 Monte Carlo 模拟的能源成本、基本经济计算和经济不确定性的介绍见第1章、第2章。平准化公用设施成本见第16章。

开发了使用序贯模块(第3章、第5章)或联立模块方法的系统方法,并用于求解过程物料和能量平衡。作为求解过程的一部分,建立了必要的数值方法。

第6章介绍了数据校正和显著误差检测,第11章介绍了在实际热电联产系统的应用。

利用理想气体(第7章)和真实流体(第9章)的属性,开发了热电联产系统性能和设计及非设计计算。

第8章介绍了一个开放源码的热力学包(约7000行代码),用于热电联产、燃烧和蒸汽计算。给出的问题代码用英制或SI单位表示。代码用于解决热电联产设计、数据校正和电力调度问题。附录A详细说明了如何将这种或其他代码(用C、C++、Fortran等语言编写的)无缝整合到Excel中。

第12章介绍了实际热电联产体系优化电力调度的开发。

第13章和第14章给出一种处理热集成和全厂公用工程系统集成的统一方法,提供了一个开源软件包,用于帮助理解换热网络合成的基本概念。

第15章解决了现场排放问题,并将燃气轮机系统建模为串联搅拌槽和平推流反应器模型。从Excel的子程序中可以调用常微分方程求解器CVODE(来源于Lawrence Livermore国家实验室)。燃气轮机的排放量可用一套基于GRI-Mech 3.0的减少动力学方程组进行预测。

第16章解决了常规燃煤电站厂二氧化碳捕集,包括蒸汽轮机设计和非设计的计算经济性问题。

全文中使用的很多概念用于第17章有机朗肯循环的经济性分析。

文中关于热量和发电问题的讨论,都可在我们的网站——www.cogened.lsu.edu找到可以自行下载的包括自学指南的视频(约30分钟),更多问题请参看我们的网站。该网站还提供了来源于路易斯安那州立大学(LSU)热电联产系统的实时数据,这些数据可用于解决热电联产问题。

本书共有160多个完整的章节案例。几乎每个案例都包含了一个计算机辅助(基于Excel)的解决方案。章节中额外提出了140个问题,其中大多数都有计算机辅助的解决方案。Wiley网站有章节问题的详细解决方案手册。教职人员或在职工程师可通过邮寄具有公司抬头的信件获得本手册。

背景

读者应具备一定的Excel和编程知识,并对基本物料和能量平衡计算有一定的了解。对不了解Visual Basic详细知识的读者,本书给出了应用程序(VBA)和C的详细信息,帮助读

者使用应用程序(VBA)和C。

本书中,在必要处理技术的开发中都考虑了“及时”方法。开发所需的处理技术往往提供了改善工程计算机技能的机会。使用Excel作为解决问题的初始平台;然而,使用Excel强化的VBA和C程序可以改进解决方案。文本给出了如何将VBA和C程序逐步结合到Excel表中,作为可调用的函数和子程序。用户有权利访问本书中的所有源代码,这将促进处理技术的完善和广泛使用。

本书中同时使用英制单位和SI单位。我了解到很多教师只喜欢使用SI单位,但我发现刚从业的工程师经常弄错单位。一种解决方法是用本书中提供的实例进行练习。因为计算机辅助技术几乎可以解决所有的实例和问题,所以利用本书中的解决方法,用户可以直接改变单位。

在几个实例的中间计算中给出了额外的有效数字,用于和Excel表中的数值直接进行比较。一些章节中的难题对增强和扩展提交材料尤其重要;文中给出了这些难题的详细解决方案。在手册中可以查到章节难题的详细解决方案。

能源系统优化设计和运行包括线性规划(LP)、非线性规划(NLP)、混合整数线性规划(MILP)或混合非整数线性规划(MINLP)问题的解决方案。同时利用Excel求解器和What's the best得出这些问题的解决方法。What's the best是一个Excel内插式程序,用于求解最优化问题。本书在LINDO系统中应用了What's the best的一个版本。

本书的使用

对于工程专业的学生,本书提供了一个逻辑顺序,帮助他们更好地理解加工厂的能量流动。自然产生了有关能源工程计算重要性的话题。这应该会证明是提高编码技能、采用数值方法解决工程问题以及制定和解决过程和工业能源优化问题的一种有趣方法。

按照以下途径,可将本书整合到工程课程中。

能源可持续利用课程

本书可作为一学期的专题课程,为三年级或四年级的工程学生介绍能源的可持续利用。该课程的前四分之三侧重于理解加工厂的能量流,以及热电联产和节能为何是国家能源组合的重要方面。以本书作为基础,结合课外阅读材料,该课程的后四分之一对主要的新兴能源技术进行了详细分析。对于新兴能源技术,包括生物质气化、太阳能/有机朗肯发电厂以及整体煤气化联合循环和其他先进的洁净煤工艺。这自然产生一个问题:为什么已经有这么多的新兴能源技术,还要研究这些课题?这是因为:首先,生物质能和太阳能/有机朗肯发电厂代表着新兴技术的广度;其次,目前最好的大型节能技术是热电联产;最后,必须解决煤的使用问题,因为在美国,约50%的发电量来源于煤发电。此外,这些技术的几个工艺单元是相同的。在朗肯电力循环中,这些工艺的能量输入(化学物质、燃料或太阳辐射)可用于产生蒸汽(或气化有机化合物);化学能既能被转化为合成气,也能在燃气轮机中使用。或者使用这些技术的某些组合。这要求学生能看到这些工艺的共同特征,并根据能量来源讨论最优工艺设计。学生可根据书中所建议的、以团队为导向的学期项目来研究其他的替代能源技术。

数值方法和高级毕业设计课程:建立“能源路线”

本书约50%用于应用数值分析课程,剩余章节作为高级毕业设计序列和课程设置中其他课程的一部分。这其实是本书编写的初衷;我们希望在工程课程中建立一个“能源路线”,而不是增加一门新的课程。对于大二学生的应用数值方法课程,专题包括工程规划(第2章)、线性和非线性方程的求解(第3章)、线性和非线性方程组的求解(第4章)、数据分析和曲线拟合(第6章)、常微分方程(第5章5.4~5.6节、第15章15.3和15.4节)、偏微分方程(第10章10.7节)和高级工程规划(附录A)。作为大四工程学生毕业设计的一部分,快速复习一遍第3~5章,突出了物料和能量平衡计算中计算机辅助求解的结构问题,然后学习第13和14章的物料强化加工厂能量来源的优化问题。第16和17章详细描述了均化经济。数据协调和显著误差检测(第6和11章)被当作大三工科学生的实验课程。确定燃气轮机性能(第7和第9章)和开发物理性质包(第8章)的章节可在工程热力学课程中使用。燃气轮机燃烧器的模拟(第15章15.2~15.4节)可在动力学和反应器设计课程中应用。

过程系统课程(工艺课程)

在工程课程中,本书可用来帮助提供对过程综合的完整介绍。在物料和能量平衡课程

中, 能源成本和基础经济学的流程构面、数据协调、显著误差检测、热能和电力系统、公用系统调度、热集成和热电联产的相关知识都可在本书中找到。

工业使用

本书的一大优势在于在职工程师能够使用本书。热电系统涉及大量流股, 而这放大了物理性能的不确定性。本书主要编码工作是为公用工程系统建立精确的物理性质。在附录 A 中, 我们向读者展示了如何将这热力学代码或用户编写的代码完美的合并到 Excel 中。第 8 章描述了热电联产、燃烧和蒸汽计算的热力学性质(约 7000 行代码)。其重点也是数据协调、显著误差检测、热电联产系统设计和非设计操作、实用系统调度、换热网络合成和工厂能量集成和排放预测。

补充材料

对文中所讨论的几种关于供热和发电的话题, 可在网站: www.cogenerated.lsu.edu 下载到视频(约 30 分钟)以及相关文件。这些材料已设计出来供学生使用, 并经过了 LSU 测试, 佛罗里达农工大学-佛罗里达州立大学(FAMUFSU)(John Telotte 博士), 阿拉巴马大学(Heath Turner 博士), 以及佛罗里达大学(Peng Jiang 博士)。

致谢

本文中提供的代码是在我有幸合作过的研究生和博士后的努力下完成的。热电联产热力学代码(第 8 章)最初是由 Shane Stafford 博士开发的, 后经 Derya B. Orzyurt 博士修订完成。在开发连接 Excel 和 C/C++ 代码技术方面, 已与 Janardhana R. Punuru 博士展开长期合作。Punuru 博士为 15 章中讲到的 CVOID 开发了 Excel 界面(CVOID 是常微分方程求解器, 可从 Lawrence Livermore 国家实验室得到)。换热网络综合程序 THEN 的初始版本(第 13 章)是由 Sanjay P. Bhargava、Sanjay G. Pethe 和 Rajiv Singh 开发的, 后来在研究余热回收蒸汽发生器问题的 Punuru. Lina M. Bustami 博士以及研究热电联产初始数据协调问题和能源调度模型的 Robert Buckley 帮助下, 将其耦合到 Excel 中。

感谢我的同事, 他们对本书做出了突出贡献。特别感谢 Kerry M. Dooley 博士(LSU), 他阅读并修改了本书中每一章的初稿。Louis Braquet (LB Services) 以及 David Dismukes (LSU) 博士都对第一章进行了审阅。我曾和他们多次讨论过能源系统和能源发电的成本问题。Dismukes 博士编写了第 17 章中替代能源系统的平准化成本的表格。理查德·麦金尼审阅了附录 A, 并对编码进行了必要修改, 以将其从 Microsoft Visual C++ 6.0 版升级到 Visual C++ 2008 精简版。彼得·戴维森和托尼·丘比特(LSU 设施服务)帮助提供了最优能源调度模型所需的数据和热电联产经营策略。Oscar Jimenez Cabeza (GEPROP) 博士和 Roger Nordman 博士(瑞典 SP 技术研究所)对能源一体化章节进行了关键性的审阅。John Telotte 博士审阅了第 8 章和 15 章中的热力学部分。

特别感谢 Frank Madron 博士(ChemPlant)和 Michael Erbes 博士(Enginomix)。Madron 博士对有关数据协调的章节进行了很多修正和说明。Erbes 博士提出了能源可持续利用和建模、热电联产系统、涡轮机设计和非设计运行工况下性能方面的专业知识, 并且还审阅了第 7、9、10 和 16 章。

Ralph Pike 博士(LSU)和 G. V. Reklaitis 博士(普渡大学)帮忙提炼本书的主线并提出了改进意见。Mohammed Syed 审阅了本书的最终版本, Vamshi Kandula 帮助收集本书中的所有材料。

特别感谢 Don Freshwater 教授, 他建议由 Tom Gamble 完成 ICI 威尔顿作品的封面。感谢英国莱斯特郡拉夫堡大学的 Chris D. Rielly 教授允许使用其著作, 并提供副本。

感谢美国国家科学基金会(NSF)一期和二期的资金资助。资助项目名称为“热电联产设施到工程教育中的整合”, 编号为 NSF 奖 0535560(一期)和 0716303(二期)。

路易斯安那州, 巴吞鲁日

F. Carl Knopf

目 录

第 1 章 能源使用、成本和效率	(1)
1.1 美国能源使用情况	(1)
1.2 能源成本	(3)
1.3 能源效率	(4)
1.4 自发电和外购电成本对比	(10)
1.5 燃料成本和燃料热值	(12)
1.6 本书结构	(13)
1.7 入门	(16)
1.8 小结	(18)
参考文献	(18)
习题	(19)
第 2 章 工程经济学与 VBA 程序	(21)
2.1 工程经济学简介	(21)
2.2 货币的时间价值：折现值(PV)和未来值(FV)	(21)
2.3 年金	(25)
2.4 对比备选过程	(35)
2.5 工厂设计经济学	(39)
2.6 基于能源优化的确定性经济分析	(42)
2.7 不确定性的经济分析：蒙特卡罗模拟	(43)
2.8 小结	(47)
参考文献	(47)
习题	(47)
第 3 章 计算机辅助法求解物料平衡：序贯模块求解法	(51)
3.1 基本的物料平衡模块	(51)
3.2 序贯模块方法：循环物料平衡	(55)
3.3 撕裂流迭代法	(59)
3.4 包含替代规格的物料平衡	(70)
3.5 单变量优化问题	(74)
3.6 局部非线性规范的物料平衡问题	(83)
3.7 小结	(84)
参考文献	(85)
习题	(85)

第4章 计算机辅助求解过程物料平衡：同步求解法	(95)
4.1 线性方程组的求解：同步求解法	(95)
4.2 非线性方程组的解法—Newton-Raphson 算法	(102)
参考文献	(114)
习题	(115)
第5章 过程能量平衡	(121)
5.1 前言	(121)
5.2 分离器—平衡闪蒸	(125)
5.3 包含回收过程的平衡闪蒸：模拟方法	(133)
5.4 绝热平推流反应器(PFR)和带有速率表达式的能量 平衡——欧拉—阶方法	(137)
5.5 苯乙烯生产过程：用反应速率表示能量平衡和物料平衡方程	(143)
5.6 数值积分—欧拉法和四阶龙格-库塔法	(148)
5.7 小结	(152)
参考文献	(153)
习 题	(153)
第6章 数据校正与粗差检测	(162)
6.1 标准偏差和概率密度函数	(164)
6.2 数据校正：Excel 求解器	(166)
6.3 数据校正：余度和变量类型	(169)
6.4 数据校正：线性和非线性的物料和能量平衡	(175)
6.5 数据调解——拉格朗日乘数法	(182)
6.6 粗差检测和识别	(191)
6.7 小结	(196)
参考文献	(196)
习 题	(197)
第7章 燃气轮机热电联产系统性能，工况和超出工况下的计算： 理想气体流体性质	(204)
7.1 单一可压缩流体平衡态：T ds 方程的推导	(205)
7.2 开口系统的一般能量平衡公式	(207)
7.3 热电联产燃气轮机系统性能计算：理想气体工质流体	(208)
7.4 空气基燃气轮机性能计算	(211)
7.5 燃烧室能量平衡	(214)
7.6 余热锅炉：设计性能计算	(215)
7.7 燃气轮机热电联产系统性能与余热锅炉设计	(219)
7.8 余热锅炉超工况计算：补燃	(224)
7.9 燃气轮机设计和超设计性能	(231)
7.10 小结	(240)
参考文献	(241)

习题	(242)
第 8 章 计算热电联产物理性质程序的推导	(247)
8.1 热电联产计算可调用的函数	(247)
8.2 纯物质热力学性质	(251)
8.3 纯物质热力学性质运算公式的推导	(256)
8.4 理想混合物热力学性质: 考虑一般推导和燃烧反应	(259)
8.5 理想混合物热力学性质: 目前的困难	(262)
8.6 状态方程混合原则	(264)
8.7 小结	(267)
参考文献	(268)
习题	(269)
第 9 章 燃气轮机热电联产系统性能、设计和超设计计算: 真实流体性质	(276)
9.1 热电联产燃气轮机系统性能计算: 真实物理性质	(277)
9.2 HRSG: 设计性能计算	(287)
9.3 HRSG 超工况设计计算: 补燃情况	(289)
9.4 燃气轮机设计和超设计性能	(294)
9.5 小结	(297)
参考文献	(297)
习题	(298)
第 10 章 燃气轮机热电联产系统经济最优化设计和余热锅炉数值分析	(303)
10.1 热电联产热电联产系统: 规模经济	(303)
10.2 热电联产热电联产系统结构: 区域功率-热力比	(305)
10.3 热电联产经济优化: CGAM 问题	(306)
10.4 CGAM 问题经济设计优化: 理想气体	(310)
10.5 CGAM 热电联产设计问题: 真实物理性质	(312)
10.6 COGEN 和通用电气的 GATECYCLE™ 的比较	(315)
10.7 HRSG 换热问题数值求解	(316)
10.8 小结	(331)
参考文献	(332)
习题	(333)
第 11 章 热电联产系统数据校正与过失误差检测	(339)
11.1 热电发电系统数据校正	(339)
11.2 热电联产系统过失误差检测和鉴定	(347)
11.3 结果的直观显示	(351)
11.4 小结	(352)
参考文献	(353)
习题	(353)
第 12 章 热电联产设施中最优能量调度	(355)
12.1 最优化调度模型的开发	(355)

12.2	热电联产系统的概述	(357)
12.3	一般操作策略的考虑	(358)
12.4	设备能量效率	(359)
12.5	预测天然气和购电的价格	(373)
12.6	热电联产设施多时段调度模型的建立	(377)
12.7	小结	(386)
	参考文献	(387)
	习题	(387)
第 13 章	过程能量集成	(392)
13.1	过程能量集成/最小公用工程	(392)
13.2	温度区间/问题表分析	(394)
13.3	总复合曲线 GCC	(396)
13.4	用真实接近点温度进行温度区间/问题表分析	(396)
13.5	从工艺流程图判断热物流和冷物流	(399)
13.6	最大能量回收(MER)法换热器网络设计	(405)
13.7	采用物流分割法设计换热网络	(410)
13.8	利用最小单元数法进行换热网络设计	(412)
13.9	换热网络设计基础教学软件(换热网络教学 THEN)	(414)
13.10	换热网络设计:蒸馏塔	(415)
13.11	小结	(420)
	参考文献	(420)
	习题	(421)
第 14 章	过程和全局公用工程集成	(428)
14.1	燃气轮机联合循环公用工程系统	(428)
14.2	工艺工厂中基于汽轮机的公用工程系统	(440)
14.3	全局范围内的公用工程系统注意事项	(445)
14.4	小结	(453)
	参考文献	(454)
	习题	(455)
第 15 章	公用工程系统的污染物排放	(459)
15.1	考虑化学当量的污染物排放	(459)
15.2	从燃烧平衡计算污染物排放	(462)
15.3	使用基本动力学速率表达式进行污染物排放预测	(474)
15.4	燃气轮机污染物排放的预测模型	(477)
15.5	小结	(491)
	参考文献	(491)
	CVODE 教程	(492)
	习题	(493)

第 16 章 带 CO ₂ 捕集的传统燃煤热电厂(设计和非设计工况下的汽轮机性能)	(497)
16.1 电厂的设计性能(利用满负荷操作数据)	(497)
16.2 电厂非设计工况下的性能(带节流控制操作的部分负载)	(507)
16.3 公用工程定价的均准化经济性分析	(514)
16.4 CO ₂ 捕集及其对传统公用电厂的影响	(517)
16.5 小结	(521)
参考文献	(522)
习题	(523)
第 17 章 替代能源系统	(525)
17.1 替代能源系统的平准化成本	(525)
17.2 有机朗肯循环(ORC): 确定平准化成本	(526)
17.3 核电循环	(532)
参考文献	(535)
习题	(535)
附录 桥接 Excel 和 C 代码	(537)
A.1 简介	(537)
A.2 使用函数	(539)
A.3 使用向量	(544)
A.4 使用矩阵	(554)
A.5 小结	(560)
参考文献	(561)
教程	(562)
单位换算	(575)
符号说明	(576)

第 1 章 能源使用、成本和效率

1.1 美国能源使用情况

首先，来看一下美国的能源使用情况。图 1.1、图 1.2 是美国能源信息署 (EIA) 和劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 统计的 2000 年和 2008 年美国能源使用情况。图中所采用的单位是万亿 (1 万亿 = 10^{15} 英热单位)。

表 1.1 是对图 1.1、图 1.2 主要结果以及 2000~2008 年能源利用数据的总结。

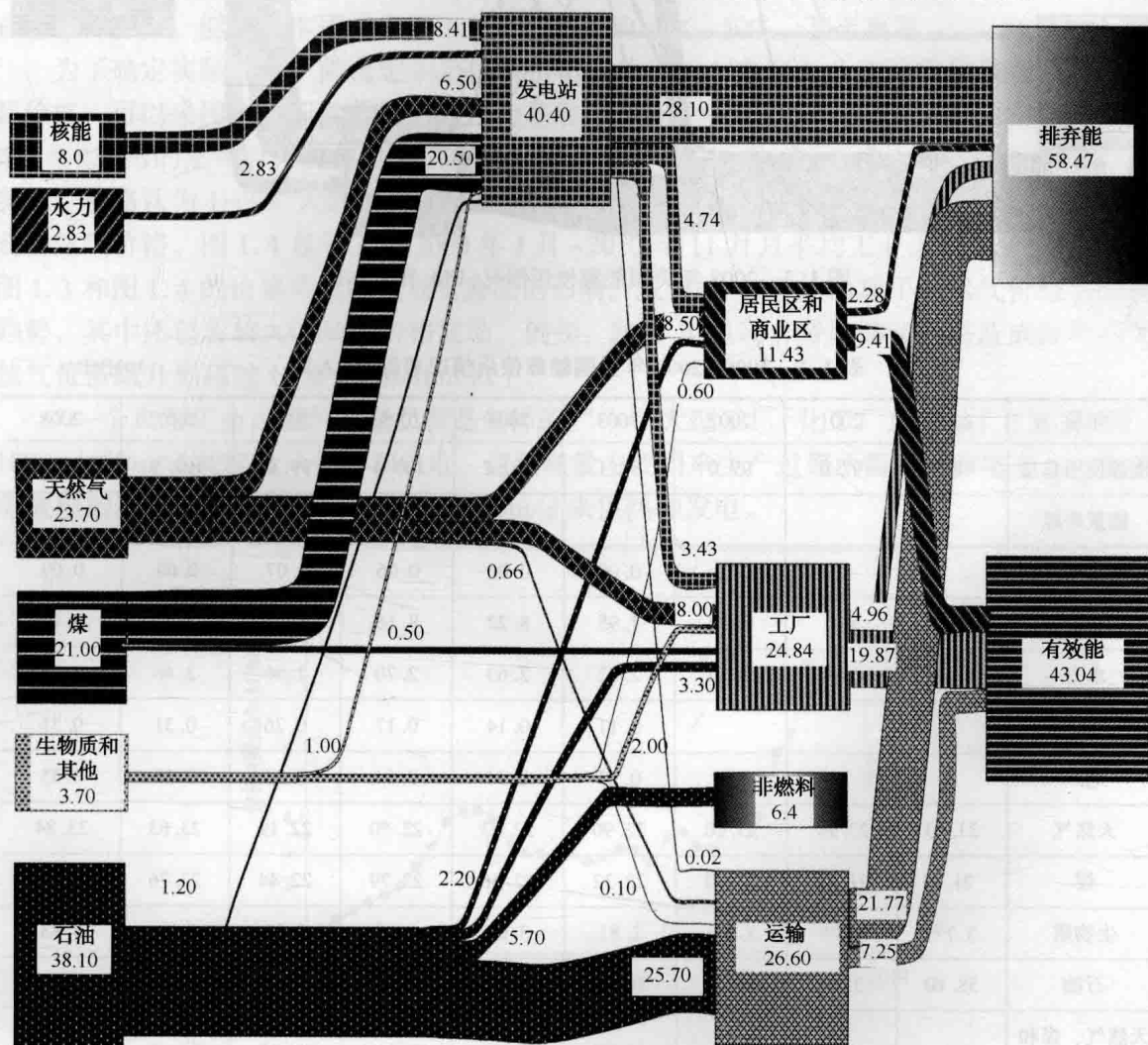


图 1.1 2000 年美国能源使用情况 (EIA 和 LLNL; 参见引用的网站)。

本图中，石油用作非燃料的用途如用作化工原料。

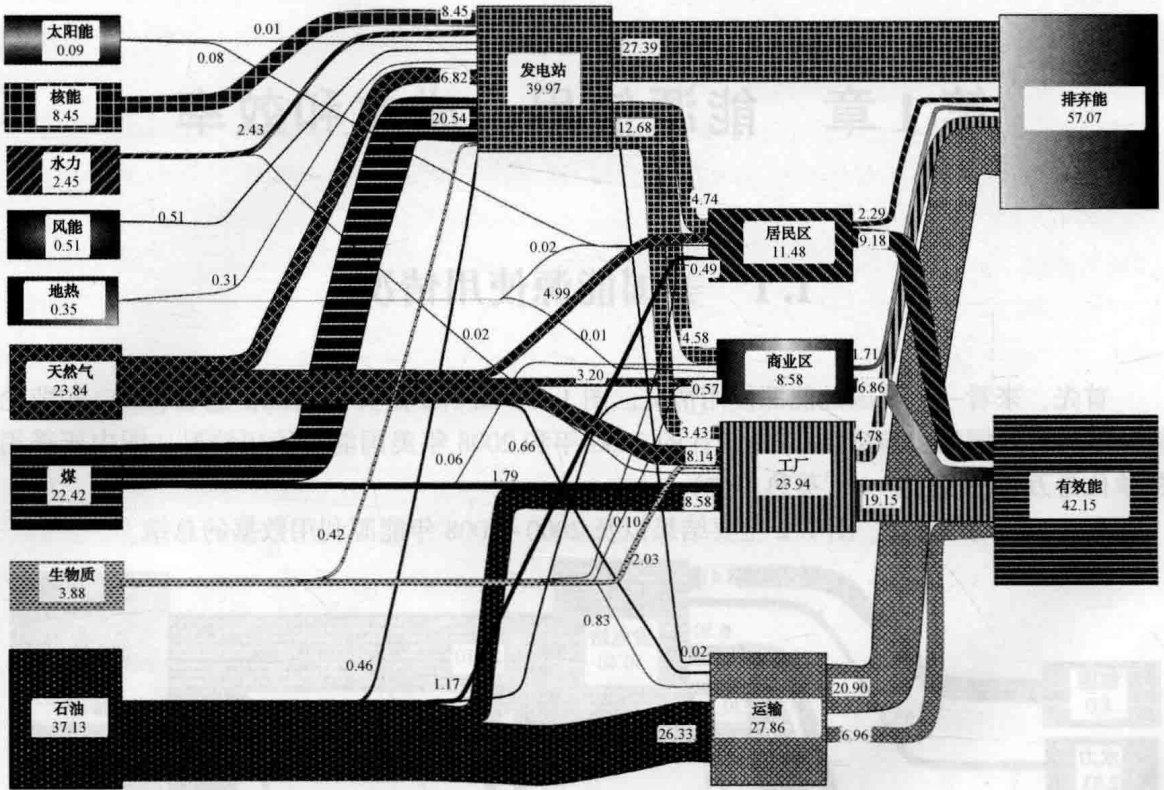


图 1.2 2008 年美国能源使用情况 (EIA 和 LLNL)

表 1.1 2000~2008 年美国能源使用情况总结 (EIA)

10MMBtu

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
能源使用总量	98.5	97.0	97.0	98.1	100.2	100.4	99.8	101.5	99.2
能量来源									
太阳				0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09
核	8.0	8.0	8.10	7.95	8.22	8.16	8.21	8.41	8.45
水力	2.83	2.30	2.60	2.82	2.69	2.70	2.86	2.46	2.45
风				0.11	0.14	0.17	0.26	0.31	0.51
地热				0.33	0.34	0.34	0.34	0.35	0.35
天然气	23.70	23.20	23.20	22.90	22.93	22.50	22.19	23.63	23.84
煤	21.0	21.90	22.30	22.32	22.46	22.79	22.44	22.76	22.42
生物质	3.7 ^①	3.3 ^①	3.2 ^①	2.81	3.02	3.15	3.37	3.61	3.88
石油	38.10	38.0	38.10	38.80	40.29	40.39	39.95	39.81	37.13
天然气、煤和石油能源	82.28	83.10	83.60	84.05	85.68	85.68	84.58	86.30	83.39

① 2000~2002 年的生物质数据包括木材和废弃物、地热、太阳能和风能。

从表 1.1 可以看出, 在 2000~2008 年间, 美国总的能源使用量保持相对平稳。并且, 近十年来对“传统”碳氢能源(天然气、煤、石油)的依赖几乎没有变化。可以预期, 未来可替代能源技术会越来越重要。例如风能使用量从 2003~2008 年增长了将近 5 倍。但是近期必须重新考虑如何最高效地利用现有能源, 尤其是传统碳氢能源。根据 LLNL 的评估, 图 1.1、图 1.2 表明, 美国能源总的利用效率大约为 42%, 剩余约 58% 的损耗主要归因于燃烧中热损耗。本书的写作动机之一, 就是帮助已建和在建的加工厂和能源相关设施, 尽可能高效利用能量。

1.2 能源成本

加工能源成本究竟有多重要? 能源成本以及劳动力成本和原材料成本是加工厂最大的费用。这些加工厂包括化工和石化、农业化工、药品、塑料、造纸和纸浆、金属和采矿。在这些行业中, 能源成本通常占加工厂操作费用的 10%~50%, 甚至更高。

为了确定实际成本, 需选定一个能源价格并估计一个典型工业工程能量负荷。对于能源价格, 可以采用工业天然气的价格作为基准。美国许多工业企业都建立有“\$2”天然气标准。“\$2”指的是每百万英热单位(MMBtu)的价格为 2 美元或每千标准立方英尺(mSCF)为 2 美元。粗略认为 1mScF 天然气包含 1MMBtu 的能量。图 1.3 显示了 1973~2009 年的年均工业天然气价格。图 1.4 显示了从 2000 年 1 月~2010 年 11 月月平均工业天然气价格(EIA)。图 1.3 和图 1.4 的价格均忽略了通货膨胀的影响。从 2000 年开始出现了天然气价格上涨的趋势, 其中还包含较大的短期价格波动, 例如, 2005 年飓风卡特里娜和丽塔造成短期内天然气价格飙升到超过 15 美元/MMBtu 以上。

“一个典型工业过程的能量负荷是怎样的?” 一个大型工厂(化工厂或炼油厂)需要 $(50\sim 100)\times 10^9$ Btu/d 的能量来供热和发电。这些能量主要用来生产过程所需蒸汽和电力。一个中等规模的工厂或大学需要 $(10\sim 20)\times 10^9$ Btu/d 来供热和发电。

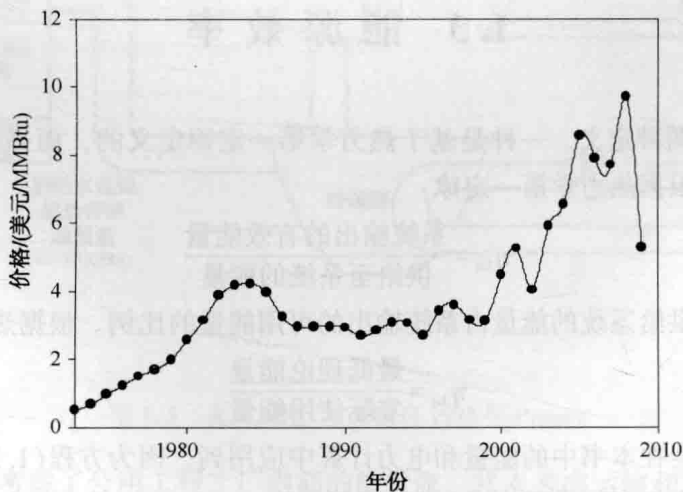


图 1.3 交付天然气工业价格和 1970~2009 年年均价格(EIA)

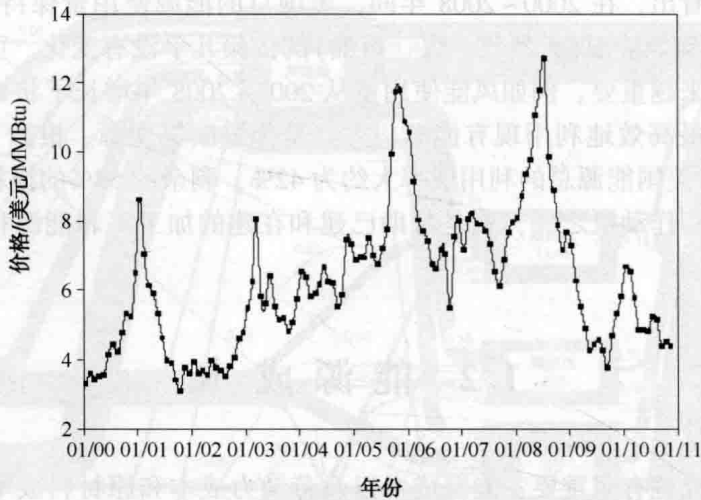


图 1.4 交付天然气工业价格和 2000 年 1 月~2010 年 12 月月均(EIA)

使用长期预测 8 美元/MMBtu 的天然气价格作为燃料成本, 预计一个大型工厂的公用工程费用大约为 200×10^6 美元/年, 而中等规模的工厂或大型大学公用工程费用约为 40×10^6 美元/年。如果从当地电厂购买电力, 用锅炉生产蒸汽, 而未利用热电联供的优势, 公用工程费用可能更高。

在大多工程过程中都必须慎重考虑能源成本问题。预计全球能源需求的增长会导致公用工程费用进一步增加。因此, 很有必要评估当前过程中的能源利用情况和为减少能源使用而采用的系统方法。在许多炼油厂, 电力来自外购和自发电; 在有些放松管制的地区, 工厂可能在公开市场出售自己富裕的电力。能源成本的波动(见图 1.4), 就要求炼厂将自身的能源需求与公用工程的生产计划和购买紧密结合起来。

1.3 能源效率

能效 η 通常有两种定义。一种是基于热力学第一定律定义的, 而另一种是基于热力学第二定律定义的。根据热力学第一定律:

$$\eta_{1st} = \frac{\text{系统输出的有效能量}}{\text{供给至系统的能量}} \quad (1.1)$$

此处的能效为供给系统的能量占系统输出的可用能量的比例。根据热力学第二定律:

$$\eta_{2st} = \frac{\text{最低理论能量}}{\text{实际使用能量}} \quad (1.2)$$

这两种定义都会在这本书中的能量和电力计算中应用到。因为方程(1.2)需要进一步的研究, 所以本章所举实例和问题都用式(1.1)进行解决。

在许多能效计算中, 式(1.1)可以直接使用。有些情况下, 特别是当一个特定的操作涉及消耗或产生电能(例如汽轮机)时, 使用式(1.2)更便利。对于能量(电力)产生系统, 通

常是应用式(1.1)的变形——工厂净热耗率计算整体性能。

$$\text{电厂净热耗率} = \frac{\text{供给至系统的能量 (Btu)}}{\text{系统输出的可用电能 (kW} \cdot \text{h)}} \quad (1.3)$$

例 1.1 公用工程公司电厂能效

图 1.5 为一火力发电厂。忽略时间因素，只考虑 1000 lb 的煤加入锅炉时，产生的能量流。图中的数值反映了进入每个单元的能量，例如锅炉从煤炭原料获得的能量为 12.72MMBtu，这些能量部分送入汽轮机（随着蒸汽），部分随着烟气消耗。对于送入涡轮机的 11.194MMBtu 热量，其中 5.261MMBtu 用来发电，这里采用的汽轮机是凝汽式汽轮机。这通常也被称为后发电式循环，因为蒸汽中所有用于发电的能量都通过汽轮机提取，随后蒸汽被冷凝。冷凝汽轮机低压蒸汽需要向环境中释放 4.933MMBtu 热能。该冷凝过程可以回收锅炉给水，并用泵给锅炉给水增压。锅炉回水热量为 1.0MMBtu。

可以将图 1.5 中的能量流直接转换成能量传输效率，例如，1000lb/h 的煤将产生 12.72MMBtu/h 热量。另外，也可以认为图 1.5 中能量流是可直接扩展的，例如 2000lb 煤炭将产生 25.44MMBtu/h 热量。目前，可使用图 1.5 的能量值来确定锅炉、汽轮机、发电机以及整体过程的热效率（有时称为电厂净热效率）和电厂的净热耗率 [Btu/(kW·h)]。

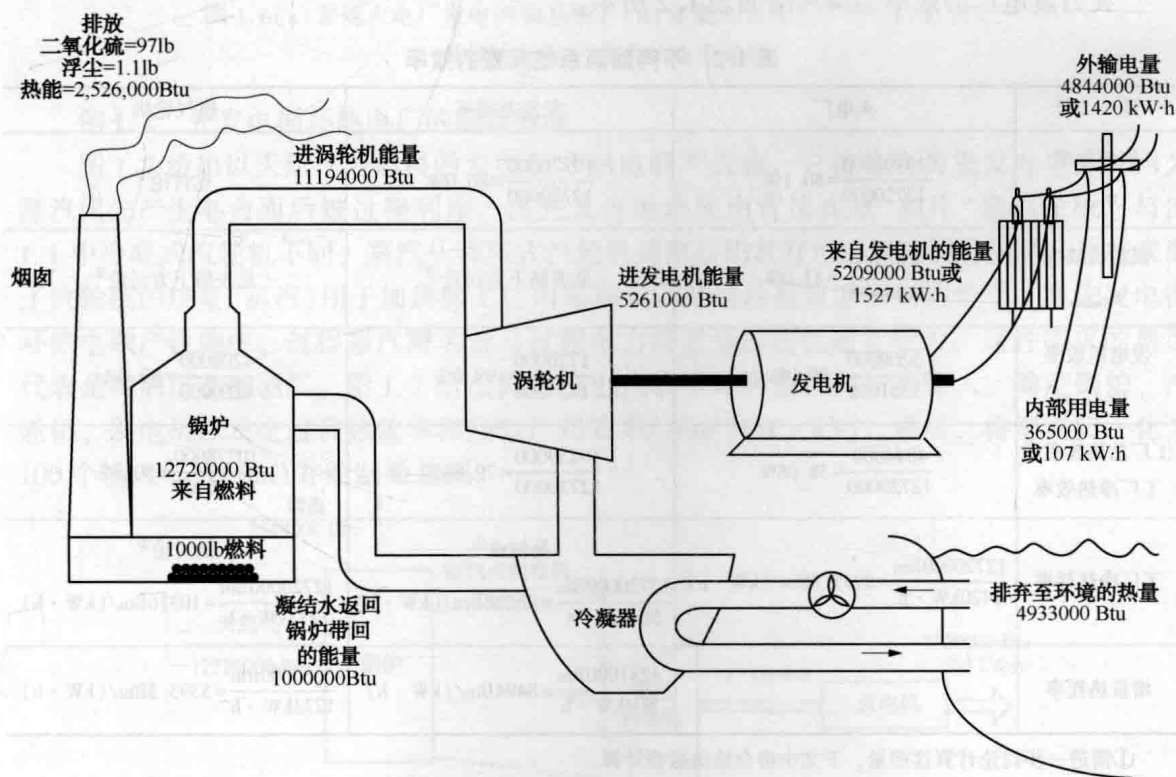


图 1.5 火力发电厂(改编自 1973 年 Priest)

在上例中，只考虑了公用工程工厂内部的能量流，并未考虑运输和配送过程中的损失。从电厂到用户终端，输出电网通常会有 5%~8% 输配电损失（见习题 1.5）。

解：当试图利用式(1.1)和式(1.3)一起确定单元到单元和整个系统的效率时，会令人