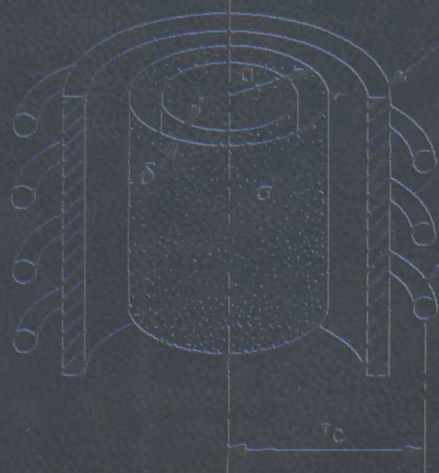


工业等离子体工程

第 I 卷 基本原理

〔美〕 J. R. 罗思 著



科学出版社

工业等离子体工程

第 I 卷 基本原理

39
01



33514802

0539



工业等离子体工程

第 I 卷 基本原理

〔美〕J. R. 罗思 著

吴坚强 季天仁 刘根胥 译
李光志 陈妙文

蒙 林 祝大军 鄢公扬 校

刘盛烈 钱嘉介 校



C0394329

科学出版社

1998

内 容 简 介

《工业等离子体工程》一书主要叙述等离子体的基础知识,工业等离子体工程的技术原理及物理过程,以及与等离子体相关的器件和等离子体的工业应用.本书分两卷出版.第Ⅰ卷包括第1章至第13章.内容有等离子体物理的基础知识和工业等离子体的物理过程;工业应用中所使用的离子源、电子束和电离辐射源;直流放电的物理过程和技术;射频放电的物理过程和技术等.

第Ⅱ卷从第14章至第23章.主要介绍等离子体的材料处理和加工,以及在具体工业过程或工业装置中的应用.

本书内容丰富、资料翔实,对于从事等离子体开发研究和工业应用的科技人员是一本很好的参考读物.它也可作为我国高等院校电子工程、材料科学、微电子学等专业的大学生、研究生的教科书和教师的教学参考书.

图字: 01-98-0437 号

图书在版编目(CIP)数据

工业等离子体工程 第Ⅰ卷:基本原理/[美]罗思(J. R. Roth)著;吴坚强、季天仁等译.-北京:科学出版社,1998

书名原文:Industrial Plasma Engineering/Vol. 1: Principles
ISBN 7-03-006375-9

I. 工… II. ①罗… ②吴… ③季… III. 等离子体工程-工业 IV. 0539

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 27754 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

新 世 纪 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1998年9月第 一 版 * 开本: 787×1092 1/16
1998年9月第一次印刷 印张: 23 3/4
印数: 1—1 500 字数: 539 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

译者的话

作者 J. R. Roth 是美国田纳西州立大学 Knoxville 分校电子与电气工程系等离子体科学专业教授,也是中国电子科技大学的名誉教授.他曾是 Lewis 电场皱褶环计划——一个早期的核聚变研究计划的主要研究人之一.

J. R. Roth 教授从事工业等离子体的教学工作与科学研究已多年.《工业等离子体工程》一书是他编写的教材,也是他多年来教学实践的积累与总结.

本书分两卷出版.第 I 卷是基础知识部分,主要讲述等离子体基础知识和工业等离子体工程的原理及物理过程;第 II 卷讲述等离子体在具体的工业过程或工业装置中的应用.在用作材料表面处理的大气压均匀辉光等离子体等方面所取得的比较新的研究成果在本书中也有详细的描述.

等离子体可以说无处不在,大到宇宙空间,小到纳米量级的材料.它的应用十分广泛,从军用到民用,从大工业到居民家庭,到处都可见到它们的踪迹.随着人类对能源需求的不断提高,以及地球上资源的日趋减少,在全球范围内提高总体能源的消费效益和效能,有效地保护环境,已成为全人类的当务之急,工业等离子体工程对此也将不容置疑地起十分重要的作用.例如,被认为将是 21 世纪最伟大的科技进展的核聚变堆的商业应用,与等离子体科学技术密切相关,现核聚变堆已进入工程试验堆阶段.由于信息革命正处于飞速发展的阶段,等离子体科技工作者正面临着一个难得的机遇与重大的挑战,更高的要求不断提出.例如,新的超大规模集成电路的生产,希望在直径 12~15 英寸的晶片上制作线宽小于 0.1 微米的集成块,这对于大直径、高密度、均匀工业等离子体的产生与控制,以及新的集成块的制作方法无疑是一个重大的挑战.这样的实例不胜枚举.

就我国目前的情况来说,从事等离子体研究的科技工作者正从各方面努力使自己的知识和经验为国民经济建设作出贡献,但往往由于缺乏规范化的工业生产与商品市场方面的知识,常常会遇到一些尴尬的情况.主要表现在了解等离子体产生及性质的人,却不了解或不太了解具体工业应用中涉及的其它科学技术问题.反之,掌握具体工业应用技术的人却对等离子体的行为不甚了解.对于这两部分人,本书不失为是一本很好的参考读物,它可以帮助从事等离子体开发研究和工业应用的科技人员建立起全面的概念与掌握必要的基础知识.对于学生来说,本书也是一本很好的教材.

本书包含了工业等离子体的一些较新的进展,但由于等离子体工业应用发展迅速,其内容,主要是应用实例方面的内容,很快就不再是最新的,这点请读者务必注意.

原书中涉及的人名较多,我们在翻译这些人名时,对一些比较著名的、在教科书中常用的有统一译名的人名,采用习惯的中文译名(如麦克斯韦、玻尔兹曼、德拜等),而其余的人名一般用原文表示.

此书由中国科学院院士刘盛纲教授和核工业西南物理研究院的钱尚介研究员主校.钱尚介研究员在百忙之中对全部译文进行了审阅和校订,加注了译者注,付出了大量的劳动.在此基础上,由刘盛纲教授主持,组织电子科技大学的吴坚强教授、季天仁教授、蒙林

博士、祝大军博士和鄢扬博士,并与钱尚介研究员一起,对此书的全部译文进行了校订,完成了最后的定稿工作.

在此书的出版过程中,得到了科学出版社的大力支持,尤其是唐正必女士在编辑加工此书的过程中,提出了很多建设性的意见,付出了大量辛勤的劳动,在此表示衷心的感谢.

最后,对关心和支持此书翻译工作的各位同仁们表示衷心的感谢.

前 言

本书分两卷,主要叙述与等离子体相关的器件及等离子体在工业中的应用.可供一般大学中二年级、且没有修过等离子体物理课程而具有普通物理和微积分知识的大学生或在职工程师阅读,也可作所有工程和物理学科的高年级学生或第一年研究生的教科书,以及在职工程师们的参考资料.

第 I 卷的前四章包含等离子体物理的基础知识和工业等离子体中的物理过程;第 5 到第 7 章描述工业应用中所使用的离子源、电子束和电离辐射;第 8 到第 10 章描述直流放电的物理过程和技术;第 11 到第 13 章是射频放电的物理过程和技术.第 II 卷的第 14 到第 23 章介绍等离子体材料处理及加工,后五章介绍各类工业装置、加工过程或等离子体的应用.

读者在学习时可根据需要对本书内容加以调整.已学习动力学理论的读者可不再学第 2 章;对等离子体物理已有一般了解的读者,第 3 和第 4 章可只供复习参考.本书对等离子体物理和材料科学的某些新进展,只给出结果,不作原理推导,读者可从一些研究生教材中找到,有些则列在本书各章节之后的参考资料或附录中.第 II 卷也是如此.全文采用 SI 单位制,除非由于传统习惯使用非 SI 单位制更准确(如电子伏特(eV),托(Torr)等).

在研究工业等离子体工程时,在现有的物理、化学和电子学领域的技术词典中的一般技术术语的词汇尚不足以恰当地表述其意义.初学者使用这些词典可发现,词意定义太过时、不完整、不准确,与现今使用的专业术语不一致.为了解决这一问题,提高本书的参考价值,本书所涉及的工业等离子体工程的技术词汇、专业术语和缩写词等,当第一次在文中出现时,连同词汇和其意义解释均加注解说明.这样,在工业等离子体工程的专业技术词典出现以前,对于学生学习关键词语和概念,对于在职工程师或科学工作者会有所帮助.

除大量的索引外,附录中还列出了文中出现的所有数学术语和单位,以及常用的等离子体数学公式、物理常量和转换因子等,它们作为参考资料源更增加了本书的实用价值.在第 II 卷书后列出了一份带注释的参考书目,它包括从教科书、专题文章和会议论文集中收集来的共计五十多种书目,这是本书各章内容的入门指导.

为了便于将本书用作教科书,我还为第 I 卷准备了一份教学手册,具体细节可由出版社提供.教学手册中包括家庭作业及其解答;图及表的全部拷贝,可方便地用于制成透明胶片;用于制作透明胶片的放大的书中所有的公式,以及附有所在页码的 42 页全书概要.一个类似的手册将与第 II 卷同时出版.

我谨向对本书提出建议而形成目前手稿的许多个人表示感谢.我本人对本书的手稿的内容与正确性负有全部责任.同时,也感谢我的研究生与小班学生,他们指出了本书中的错误以及早期手稿中需要改进的地方.特别感谢 Donald L. Smith 博士,他对最终手稿进行了详细有益的评审.我也要感谢 Roberta Campbell 小姐打印了最终稿子及全部各种手稿,Jenny Daniel 小姐几乎完成了本书全部的绘图工作.

最后,我衷心希望与使用该书的广大同学、老师和在职专业人员保持联系,以便对本书作进一步完善和修正.同时乐意解答各种问题.如有什么意见和建议,请随时与我联系:
电话:(615)974-4446,传真:(615)974-5472,电子邮件:ROTH@ECE. ENGR. UTK. EDU.

J. R. 罗思博士

于美国田纳西州卡纳什维尔(Knoxville, Tennessee, USA)

1994年10月28日

致 谢

本书所有的插图是经精心选择的,其中大部分是在作者指导下制作的原图.正如图表中所说明的,一些图是选自其它出版物重绘的,一些表中数据摘自其它出版物.作者和出版社十分感谢允许使用已发表的材料.我们试图与引用图表的所有版权者联系以便得到引用允许,但向那些仍未得到允许已引用的版权持有者表示道歉.

图 1.1, 1.4 和 1.5 引自 Perry 和 Landsberg(1977),得到 National Academy Press, Washington, DC; ©1977 National Academy of Science 的允许.

图 1.2 引自 Gibbons 和 Blair(1991),图 5.21 引自 Pierce(1940),图 11.17 和 11.18 引自 Cottrell et al. (1991),图 12.21 和 12.22 引自 Aydil 和 Economou(1991),图 13.21 引自 Rose 和 Brown(1957),图 13.24 和 13.25 引自 Lax et al. (1950),图 13.33 引自 Mitsu-da et al. (1989),所有这些引用都得到 American Institute of Physics, New York 的允许.

图 1.3 引自 Shepard et al. (1988),得到 Electric Power Research Institute 的允许.

图 1.6 引自 Schwartz(1989),图 1.8 引自 Baes 和 McLaughlin(1984),图 1.14 引自 Roberts(1989),所有这些引用都得到 American Association for the Advancement of Science; ©AAAS 的允许.

图 1.7 引自 Francis(1987),最初由 Joan Forbes 绘制,其引用得到 The Christian Science Monitor, ©1987 TCSPS 的允许.

图 1.9 和 1.10 引自 Post et al. (1990),引用得到 Sigma Xi, the Scientific Research Society 的允许.

图 1.11 引自 McElroy(1988),图 1.12 引自 Gribbin(1989),图 1.13 引自 Anon. (1989),所有这些引自 New Scientist 的引用都得到 IPCMagazines 的允许.

图 4.9 引自 Geller 和 Hosea(1968),引用得到 Association Euratom-CEA 的允许.

表 4.2 和 4.3 引自 Vidmar(1990),引用得到 SRI International, Menlo Park, CA. 的允许.

图 5.8 引自 Poeschel et al. (1979),引用得到 Hughes Research Laboratories, Malibu, CA. 的允许.

图 5.9 引自 Forrester(1988),图 13.22 引自 Brown(1966),这些引用得到 John Wiley and Sons, Inc., New York 的允许.

图 5.22 和 6.6 引自 Cooper et al. (1972),引用得到 International Atomic Energy Agency, Vienna 的允许.

图 8.6 和表 8.3 的一部分引自 Cobine(1958),引用得到 Dover Publications, Inc., New York 的允许.

图 10.16 和 10.17 引自 Eberhart 和 Seban(1966),引用得到 Elsevier Science Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington OX5 1GB, UK; ©1966 的允许.

图 13.18 引自 MacDonald 和 Brown(1949),图 13.23 引自 MacDonald et al. (1963),

这些引用得到 American Physical Society; ©1949 和 1963 的允许.

上述引用的所有参考文献可在对应章节的末尾见到.

在前言中已对作者的同事和学生所作的贡献进行了感谢.

目 录

译者的话

前言

致谢

1 引论	(1)
1.1 内容安排	(1)
1.2 全球长期的能源问题	(2)
1.3 工业等离子体工程的社会作用	(11)
1.4 重要定义	(12)
1.5 等离子体物理与技术的发展历史	(13)
1.6 等离子体物理的分类和问题	(18)
1.7 等离子体科学的学术交流	(20)
参考文献	(22)
2 气体运动论	(24)
2.1 高真空的测量	(24)
2.2 粒子分布函数	(25)
2.3 粒子碰撞	(28)
2.4 刚性球模型的动力学特性	(30)
2.5 直接输运现象	(33)
参考文献	(36)
3 电荷在电场和磁场中的运动	(37)
3.1 带电粒子在电场中的运动	(37)
3.2 带电粒子在磁场中的运动	(40)
3.3 带电粒子在恒定电、磁场中的运动	(43)
3.4 带电粒子在缓变电场或磁场中的运动	(47)
3.5 相对论带电粒子运动	(61)
3.6 平面二极管理论	(66)
3.7 相对论平面二极管	(71)
3.8 圆柱二极管理论	(74)
参考文献	(77)
4 等离子体的特性	(79)

4.1	等离子体的整体特性	(79)
4.2	等离子体的准中性	(84)
4.3	静电玻尔兹曼方程	(85)
4.4	简单的静电等离子体鞘层	(87)
4.5	等离子体频率	(88)
4.6	沙哈(Saha)方程	(91)
4.7	等离子体中的扩散输运	(92)
4.8	电子碰撞频率	(96)
4.9	低压放电	(100)
4.10	等离子体电源	(102)
	参考文献	(107)
5	电子源和电子束	(108)
5.1	热电子发射源	(108)
5.2	光电发射源	(110)
5.3	场致发射源	(111)
5.4	中空阴极源	(113)
5.5	二次电子发射源	(115)
5.6	源和束的特性	(116)
5.7	带电粒子束传输	(118)
	参考文献	(127)
6	离子源和离子束	(128)
6.1	离子源的特性	(128)
6.2	离子源的品质因数	(129)
6.3	离子源特性参数	(131)
6.4	离子源设计	(132)
6.5	考夫曼离子源	(135)
6.6	彭宁放电离子源	(138)
6.7	束-等离子体离子源	(141)
6.8	冯阿登离子源	(143)
6.9	弗里曼(Freeman)离子源	(145)
6.10	其它离子源	(147)
6.11	表面电离源	(148)
	参考文献	(151)
7	电离辐射源	(152)
7.1	非相对论回旋运动	(152)
7.2	相对论回旋运动	(153)

7.3	电子感应加速器	(154)
7.4	同步回旋辐射	(156)
7.5	感应球型箍缩	(157)
7.6	电阻球型箍缩	(159)
7.7	等离子体聚焦	(160)
	参考文献	(161)
8	气体中的暗放电	(162)
8.1	本底电离	(162)
8.2	饱和区	(163)
8.3	汤森放电	(164)
8.4	电晕放电	(173)
8.5	电晕源	(175)
8.6	电击穿	(188)
	参考文献	(193)
9	气体中的直流辉光放电	(194)
9.1	直流辉光放电唯象学	(194)
9.2	直流辉光放电理论	(199)
9.3	动辉纹理论	(209)
9.4	直流等离子体鞘层理论	(217)
9.5	直流辉光放电等离子体源	(224)
9.6	辉光放电反应器的特性	(231)
9.7	辉光放电物理问题	(237)
	参考文献	(238)
10	气体中的直流电弧放电	(240)
10.1	电弧工作区	(240)
10.2	电弧现象学	(242)
10.3	电弧中的物理过程	(245)
10.4	电弧运行的实例	(253)
10.5	电弧的电源	(257)
10.6	电弧的引燃机制	(259)
10.7	实用的电弧结构	(259)
10.8	电弧物理学中的一些问题	(266)
	参考文献	(266)
11	气体中的射频感应放电	(268)
11.1	引言	(268)

11.2	射频-等离子体相互作用的唯象学	(269)
11.3	等离子体的趋肤深度	(272)
11.4	感应等离子体炬	(276)
11.5	产生感应等离子体炬的其它方法	(281)
	参考文献	(285)
12	气体中的电容耦合射频放电	(286)
12.1	非磁化射频放电	(286)
12.2	磁化射频放电	(289)
12.3	射频等离子体鞘层理论	(297)
12.4	电容耦合射频等离子体源	(300)
12.5	电容耦合射频等离子体反应器的实例	(307)
12.6	电容耦合等离子体源存在的问题	(315)
12.7	电容耦合高频等离子体源的应用	(316)
	参考文献	(316)
13	气体中的微波放电	(318)
13.1	引言	(318)
13.2	集体效应区域中电磁波的传播	(322)
13.3	微波气体击穿	(329)
13.4	ECR 微波等离子体源	(341)
13.5	非谐振微波等离子体源	(346)
	参考文献	(350)
附录 A	术语	(351)
附录 B	物理常量	(359)
附录 C	单位和转换因子	(360)
附录 D	实用的公式	(362)
	关于作者	(364)

1 引 论

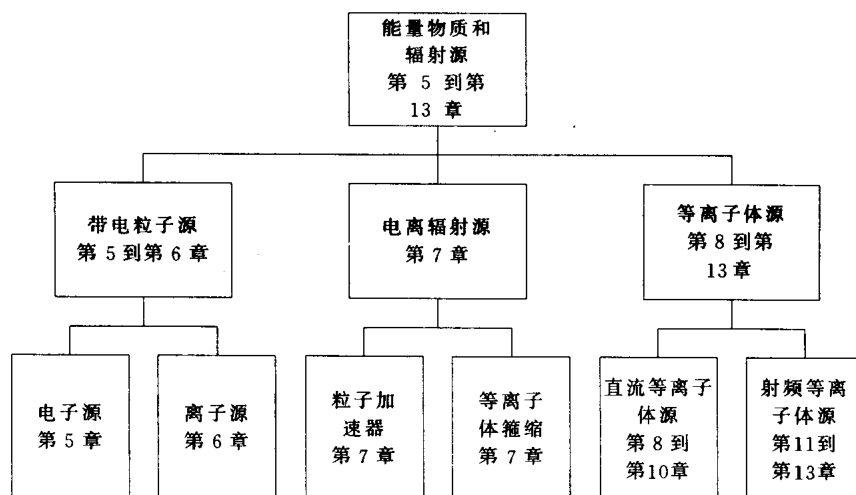
1.1 内 容 安 排

本书分两卷出版,第Ⅱ卷将在第Ⅰ卷出版后两年内出版.第Ⅰ卷包括第1到第13章,主要讲述工业等离子体工程的原理.第Ⅱ卷从第14到第23章,讲述等离子体在具体的工业加工过程或工业装置中的应用.

第Ⅰ卷的第2到第4章,包含了学习工业等离子体必需的物理基础,力求让读者懂得某些工程领域及精密科学中的工业等离子体理论.虽然其中一些应用对大多数读者来说是初次接触,但对已有良好基础的读者,这些章节中的材料可用作复习参考.

第Ⅰ卷的其余部分的内容编排用表1.1表示.工业等离子体工程师常需要解决离子源、电子束及电离辐射等方面的问题.第Ⅰ卷的第5到第7章中,将主要阐述这些主题.第8到第10章主要描述直流放电的物理过程、技术及等离子体源.第11到本卷末尾第13章将描述高频RF放电的物理过程和技术及等离子体源.卷中包括有相当长历史时期的参考文献,其中有些可以追溯到19世纪.其解决问题的方法及大多数词汇与聚变能研究中适用的完全不同.实际上,对于那些仅熟悉聚变能相关的等离子体理论的读者来说,后六章的所有内容将是新的.大多数等离子体的工业应用都有等离子体源,这是共同特点.等离子体源将在最后六章中讲述,因此这部分内容就没有必要在每一章节中重复叙述了.

表 1.1 能量物质源、辐射、等离子体分类图



第Ⅱ卷的前五章讲述了等离子体的材料加工.第14章是等离子体的表面处理,描述了暴露于等离子体活性成分的材料能够改变其可湿性、可印刷性、附着性和电荷保持性.

第 15 章到第 17 章描述了在微电子线路制造中十分重要的等离子体加工. 第 18 章介绍用热等离子体进行材料加工的过程, 包括等离子体喷射、等离子体炬和其它高能电弧的应用. 第 19 章是关于等离子体化学, 描述了如何将等离子体用来制造有商业效益的化学物质.

在第 II 卷的第 20 章到第 23 章描述了等离子体在工业中的一些特殊应用. 第 20 章讲述了等离子体在高压电子设备及电力配电系统中的一些重要现象. 第 21 章集中讨论了等离子体照明器件和装置. 第 22 章是关于电流体力学, 主要讨论了在静电除尘器和喷涂中的应用. 第 23 章覆盖了等离子体在一些还未得到广泛应用的工业领域的研究和发展, 如磁流体力学(MHD)的应用; 地球物理和空间等离子体对通信和大容量电能配电网的运用产生的影响; 利用等离子体相关原理的物质加速的空间推进系统等. 最后, 第 23 章中的关于等离子体的军事应用将是本书中最具推测性的.

1.2 全球长期的能源问题

现代工业社会的一大基本特征是大量的能源消耗. 等离子体相关工业过程就是或可能成为生产、变换、分配和消耗总能源的一个重要成分. 等离子体相关过程的重要性不仅在于它能大大地提高能源使用效率, 而且它能为那些本来要求大能源输入或强能源的工业行业创造新的加工过程和新产品. 一些特殊例子将在本章表 1.2 和第 II 卷的应用章节中讨论. 在本节, 我们将回顾能源前景的某些方面, 它使全世界作长远规划的人们相信: 有效地使用无污染能源是现代工业化社会未来能生存的一个必要条件.

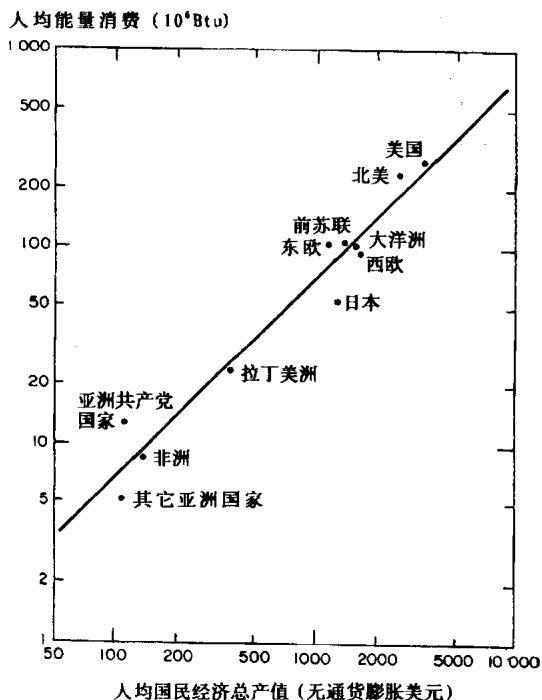


图 1.1 人均能耗和人均国民生产总值的函数关系, 对所选的工业化国家和地区扣除了通货膨胀的影响(Perry and Landsberg 1997)

1.2.1 能源和生活质量

过去, 一个国家的平均收入和人均能源消耗之间有着很强的相互关系. 图 1.1 中列举了从美国国家研究委员会的调查资料《能源与气候》(Perry and Landsberg 1997)中摘录的数据. 它给出人均能源消耗对少数发达国家及地区性的国家群的人均国民生产总值的函数关系. 在很大程度上, 这些数据按直线分布, 对两组国家数值差达五十倍.

如果在一般时间上考查一个国家的发展状况, 这种关系也是很明显的. 例如在美国, 在 1973 年之前的 83 年当中, 人均国民收入以无通货膨胀的美元计算, 其直接与人均能源消耗成正比. 尽管对平均收入与生活质量的关系需采取谨慎态度, 但从这些数据资料中, 我们仍可得出这样一个结论: 生活质量, 或至少是低平均收入, 与平均能源消耗之间有着根本的必然联系.

图 1.2 给出了这种联系的一些最新数据 (Gibbons and Blair 1991), 图中, 美国的国民生

产总值(GNP)、电能消耗和总的能源消耗从1950年以后均以1972年的值归一化. 图1.2中还画出了能源强度即总能源消耗与GNP之比, 虽然, 电能消耗保持与GNP成正比关系. 但是, 1973年OPEC(石油输出国组织)石油禁运后的能源强度变化关系表明, 美国在降低总能源消耗时, 其国民总收入并未成比例降低. 然而, 从更广的角度上看, 图1.1和1.2中所列举的这些数据已使许多长远计划的策划者得出这样的结论: 不仅全球能源消耗必然会增加, 以使非工业化国家达到工业化国家的经济水平, 而且也必须改进能源使用的效率和效用.

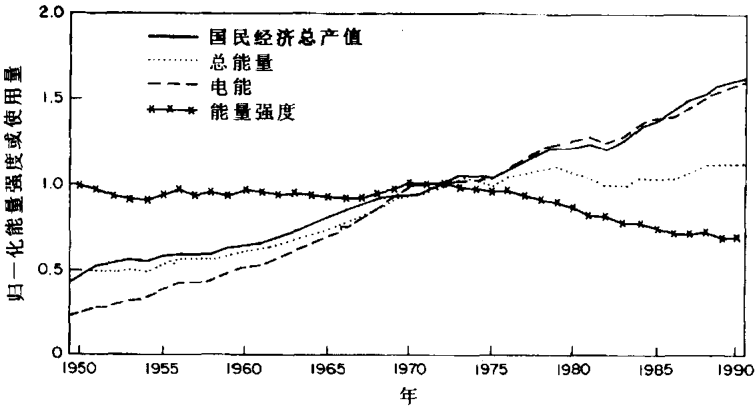


图 1.2 从1950到1990年,电能、总能耗和国民生产总值GNP的增长情况 (Gibbons and Blair 1991). 图中“×”号表示能量密度,即所用总能量对GNP之比,所有曲线均归一化为1972=1.0

1.2.2 一次能源选择

以上提到的几乎所有的能源生产都源于四种一次性能源:煤、石油、天然气和铀. 图1.3中,根据实际得到的数据,列出了1980年这些世界一次性能源使用的分布状况,以及为

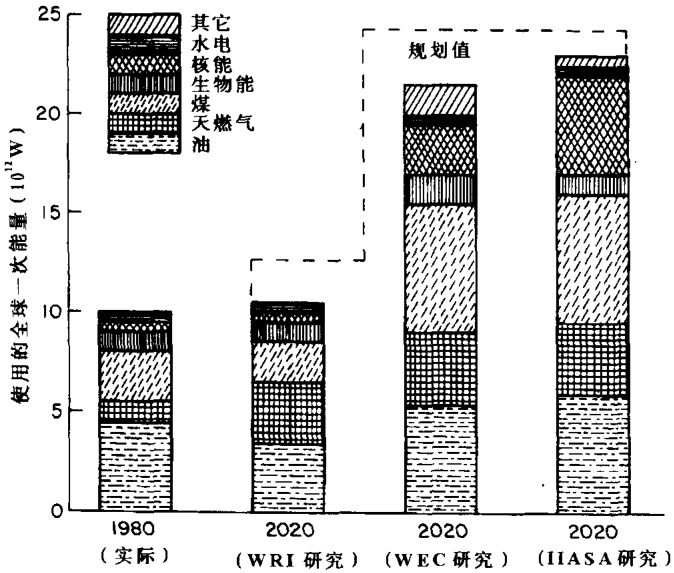


图 1.3 当前实际的和未来规划的主要能源使用情况, 时间到2020年, 规划是根据三个不同团体的假定作出的: 世界资源研究所(WRI)、世界能源会议(WEC)、国际应用分析系统研究所(IIASA)(Shepard et al. 1988)

2020 年提出的三项规划设想,其中每个规划由不同的组织运用不同的假设得到的 (Shepard et al. 1988). 从这些规划看出,即使作最保守的估计,到 2020 年,耗用能源大约将翻一倍,其中大部分新增能源主要来自煤的燃烧和核能的利用.

不幸的是,这些不可替代的燃料储量是有限的. 每一种可用能源决定于在给定年份中,能源储量的发现和投入生产量,同时还要扣掉同一年能源耗尽的或者关闭的储量数量. 在一个较长时间内的净消耗,可以用一条高斯或者铃状耗用曲线来描述,其变化可由式(1.1)给出:

$$p = p_0 \exp\left(\frac{1}{2}\left[\frac{t - t_0}{\sigma}\right]^2\right) \quad (\text{J/y}) \quad (1.1)$$

参数 t 为能量产量年份, t_0 为最大能量产量的年份, σ 为分布的标准偏差.

图 1.4 摘自 Perry 和 Landsberg 1977 年的数据,示出了美国 400 年间煤、石油、天然气和铀的理想耗尽曲线. 由图可见,石油和天然气已经超出了其最大可用储量,而铀已经接近其最大国内可用储量,看来只有煤,还有大量资源可供未来开采.

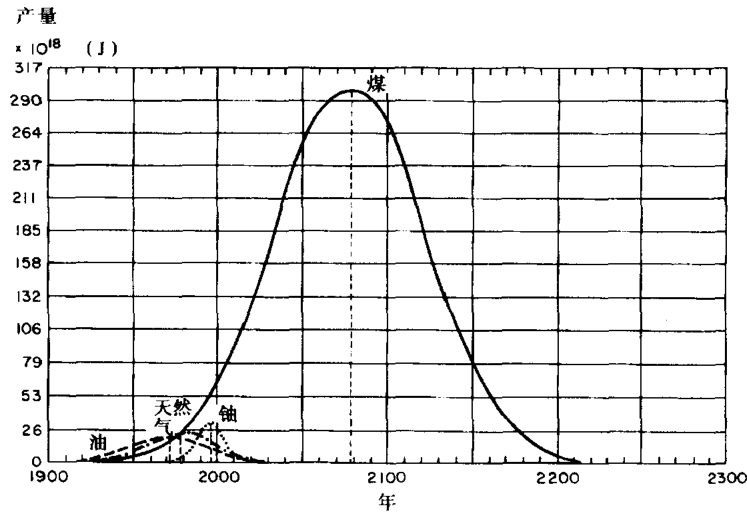


图 1.4 美国的煤、铀、天然气和石油的理想能量衰耗曲线. 由式(1.1)所描述的这些曲线由方程(1.1)给出 (Perry and Landsberg 1977)

同样,摘自 Perry 和 Landsberg 1977 年数据的图 1.5 给出了世界其余国家的一组类似的曲线. 可见,石油和天然气尚没有达到其耗尽曲线的最大值,煤看来仍是未来主要的能源. 但是,到公元 2200 年之前,它也几乎要被耗尽了. 图 1.4 和 1.5 中所指的铀是浓缩的铀,它适合于在轻水裂变反应器中燃烧. 如果增殖反应堆技术得到广泛应用,那末,自然界中 99.3% 的以 U^{238} 同位素形式存在的铀能够用以燃烧,相应铀衰耗曲线下的总面积可以与煤相比,甚至更大. 图 1.4 和 1.5 中所涉及到的所有能源,在地球表面上的分布是不均衡的. 尽管对于某些地理条件优越的小国来说,有足够的资源供他们维持几百年甚至更长的生活,但很明显,对于偌大一个世界来说,却远非如此.

2020 年以后的日子中,核聚变也许将贡献于整个能源的生产,但是仅用现今的方法,无论是技术上还是经济可行性上还要拭目以待,正如图 1.3 所示,未来的生物能、水力能、太阳能、潮汐,以及其它能源资源对能源的贡献与总的需求相比还是要小得多.