



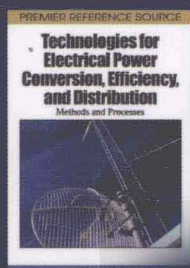
国际先进工业技术译丛

“十二五”
国家重点图书出版规划项目

智能电网之能量转换、 效率提升与分配技术

Technologies for Electrical Power
Conversion, Efficiency, and Distribution
Methods and Processes

【美】Mihail Hristov Antchev 著
刘自发 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国际先进工业技术译丛

智能电网之能量转换、 效率提升与分配技术

**Technologies for Electrical Power
Conversion, Efficiency, and Distribution
Methods and Processes**

【美】Mihail Hristov Antchev 著
刘自发 等译

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

智能电网之能量转换、效率提升与分配技术 / (美)
安特切夫著 ; 刘自发等译. — 北京 : 人民邮电出版社,
2012. 1

(国际先进工业技术译丛)

ISBN 978-7-115-27014-6

I. ①智… II. ①安… ②刘… III. ①智能控制—电
力系统—研究 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第241324号

版 权 声 明

First published in the English language under the title “Technologies for Electrical Power Conversion, Efficiency and Distribution: Methods and Processes” / by Antchev / ISBN 978-1-61520-647-6.

Copyright © 2010 by IGI Global, www.igi-global.com.

国际先进工业技术译丛

智能电网之能量转换、效率提升与分配技术

-
- ◆ 著 [美] Mihail Hristov Antchev
 - 译 刘自发 等
 - 责任编辑 毕 颖
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
 - 邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 16.75
 - 字数: 399 千字 2012 年 1 月第 1 版
 - 印数: 1-2 500 册 2012 年 1 月北京第 1 次印刷
 - 著作权合同登记号 图字: 01-2011-3139 号
 - ISBN 978-7-115-27014-6
-

定价: 65.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

内容提要

本书主要介绍了电能转换技术和所需要的电力电子转换装置。首先，从能量和能量效率、能量的储存和使用、电力电子技术及其在电能有效转换中的作用讲起，特别对交流/直流变换、交流/交流变换、直流/直流变换、直流/交流变换、电能产生和传输过程中的转换、可再生能源的电力转换做了较详细的介绍，并讲述了不间断电源供电系统、换流器系统及其应用，最后对电力电子研究进行了回顾。

本书在附录中给出了应用在电力电子周期函数的谐波分析。它可以帮助读者读懂书中的各个部分，同时也包括了电力电子应用分析的几个软件程序。

本书适合从事电力电子工程应用的技术人员阅读，也可作为高等院校电气与电子工程等相关专业的教学用书。

序

近年来，许多科学家和学者开始关注能量的产生、转换和储存的过程，这不仅仅是技术问题，更是全球人类面临的难题。在能源平衡中，电力能源所占的份额增大趋势正逐步显现出来。本书中，作者综述了用电力电子开关控制转换电能的过程，列出了将交流电转换成直流电或将直流电转换为交流电的各种电力电子转换装置，同时描述了转换装置控制系统的基本原理。此外，除了实际中使用的方法和模式之外，特别提到了采用更新的解决方法来提高设备效率的装置。书中分析了电力电子转换设备和系统在工业、交通运输业等领域和日常生活中的应用，并专门描述了不间断供电。

本书无论是文体结构上还是内容上都适合于电气与电子工程的教学并有助于此领域的专家解决实际问题。

电能产生传输和转换的问题不仅仅涉及工业，也涉及经济和日常生活。电力电子学已经快速发展成一门交叉学科。此领域问题的解决需要不同领域的专家共同努力。为此，本书的阐述风格和方式更能吸引感兴趣的读者，研究电能转换的电力电子问题和在转换过程中提高功率效率方法。

Stefan Tabakov 教授 博士

Stefan Tabakov 拥有电子工程学的学士和硕士学位，并在俄罗斯的莫斯科电力大学获得了电力电子的博士学位，曾任电子工程与技术学院院长。在任职期间，他一直是电力电子学的学科带头人。现任电力电子系教授，电子学、电气工程学和具有科学体系的通信联盟（保加利亚的技术联盟）的负责人，电气与电子工程学报的总编辑。Tabakov 教授在电力能源领域已发表了 130 多篇论文，拥有 10 项专利，出版了 20 多本书籍和手册。

关于作者

Mihail Antchev 以最高荣誉取得了保加利亚索菲亚理工大学的电子工程学学士学位、硕士学位和电力电子学的博士学位。他的博士论文以提高可控整流器功率因数为论点。Antchev 博士是保加利亚索菲亚理工大学电力电子学科的教授。他曾在杂志上发表 70 篇文章和会议文献，出版 5 本图书，同时是 IEEE 期刊和会议文献的审稿人。《世界名人录》(Who's Who in the World) 第 24 版将他收录在内。他研究的领域包括电力电子换流器及电力电子系统的设计和控制、有功功率滤波器和不间断电源系统。

致 谢

很高兴能收到 IGI 全球团队寄来的邀请函，特别是 Jan Travers 女士，让我来完成这本书。本书的出版离不开 IGI 全球团队的辛勤工作和 Julia Mosemann 女士（本书的拓展编辑）的无私帮助。带着愉悦和感激的心情，作者需要强调在初稿准备过程中与副教授 Mariya Petkova 博士的讨论和最终的完成工作。作者同样要感谢他以前的同事和前任作者，教授 Stefan Tabakov 博士的推荐。

在此，我要对所有给予我帮助和资料的组织机构、科学学院和公司表述我的感激之情。

对我的家庭致以深深的感谢——Pepi、Hristo、Slavka 和 Stefka，谢谢你们在初稿准备中给予我的精神上的支持。

我将此书献给我的家人，我曾经的、现在的和未来的学生们。

前言

当今的基本能源是化石燃料——煤、石油和天然气。18 世纪煤是最主要的能源，它提供了世界上大约 90% 的能量。直到 19 世纪末，石油和天然气才成为能量的来源。化石燃料是由动植物经成千上万年腐烂形成的。快速消耗与慢速生成是它们的基本特征。根据不同的研究，石油和天然气的供给足够我们再用 40~60 年，然而煤可以持续使用 200 年。燃烧这些固体和液体的燃料会对大气造成污染并引发其他有害影响。世界平均温度的持续增长是一个统计事实，这就是所谓的全球变暖。全球变暖的一个主要原因就是大气中二氧化碳浓度的增高，这使得地球臭氧层的部分变薄。因此而产生的结果就是海平面上升，人类遭受温度的压力，如物种濒临灭绝，粮食欠收，热带疾病的传播，等。另一个有害影响就是酸雨。酸雨对树木、水池中的动植物有致命的危害，对建筑物和世界文化遗产造成慢性破坏。燃烧以上能源的结果就是地球上大城市的空气质量恶化。20 世纪中期之后，核燃料被当作一个潜在的能源。最开始人们认为核燃料可以全部代替其他所有的燃料。逐渐地，这种观点变得不那么乐观，因为铀也是有限的，并且世界范围内核电站事故也曾多次发生。使用核能的一个主要问题是核废料的处理问题。

由于世界人口的增长，越来越多的人需要能量。当然，能量的需求持续地在增长。近期，可再生能源——太阳能、风能、水能、地热能 and 生物质能引起了人们关注。多使用可再生能源希望能减少温室气体的排放，改善空气质量。目前为止，我们的重点放在了可再生能源的正面影响上。可再生能源也可能有负面的影响，但是就目前的使用程度，我们还不能有效评估其负面影响。

科学技术的发展不仅仅是人类文明进步的组成部分，在一定程度上更是进步过程中的具有影响力的部分。电能的发现开启了人类进步的新领域。将不同形式的能源转换成电能的需求更加迫切了。我们每天目睹天然能源的使用取得越来越显著的成就，比如宇宙飞船。近年来，可以高速地将大量的信息从地球传送到太空的信息和通信技术有迅速的发展。此外，我们注意到材料科学领域的发展是新的处理工艺的结果。使用当代计算机，运用通信电子技术在医学方面取得了意义深远的成就。应用在以上所提到的领域中的技术方法和设备在目前人类发展过程中是不可能离开电能的。电能的使用需求在增长，同时传统能源负载正在被取代。混合动力汽车就是一个鲜明的例子。

我们已经习惯了随处可得的电能。当停电改变了我们平常的生活方式时，我们无法质疑电力带来的便利。幸运的是，由于地球人口的增加，这种时刻会非常少而且很快会被忘记。

不同国家的人们将他们职业生活与发、输、配、用电的过程联系起来。电能领域的知识由学者世代相传。这个传承的过程在未来仍将继续。有关各种新能源形式的研究项目取得了国际和国内层面的资助。这些基金不仅来自大中型企业，也来自不同的政府。很多国家都成立了专门的组织例如委员会、政府的专业部门，以致力于提高功率效率研究的管理。

人类进行工业生产和日常生活用的基本设备都需要供电网络提供电能。大部分用户对电能质量的改变很敏感。电能质量偏差会引起我们不希望见到的结果，比如事故。这种结果是不可预测的，不仅对经济、时间产生损害，有时候还会危害到我们的生命。在我们周围有很多这样的用户——工艺过程控制设备、银行、医院、机场、远程通信设备、军舰、开采石油过程或者原子能使用、太空活动，等。为了保护设备的完好运行，我们使用过很多不同的解决方法。最普遍的解决方法之一就是不间断电源的应用。

电能产生、转换和分配的过程，以及储存和合理使用包括有时可作为一个不间断的来源来使用，都是需要持续研究和改进的，其中主要涉及电力电子转换的电力电子学。换流器是复杂的技术设备，基本上它是基于电力半导体开关和一个控制系统的电力器件的组合。总的来说，在电力电子换流器的输入端可用不同的方法输入，可以输入交流电或者直流电。此外，电力电子换流器的输出端只能输出与负荷类型相一致的交流电或者直流电。市面上有很多电能转换领域的论文集，其中大多数是专门研究关于换流器运行的。

在电能使用范围扩大的趋势下，提高电能效率的问题显得尤为重要。这些问题通常可以在专业论文集上和会议论文上找到，它们提出了特殊的解决方法。

这本书的目的就是向读者介绍电能转换技术和所需要的电力电子转换装置。在描述中运用了特定的术语和方法，需要有一定的专业背景。但是主要集中在决定能源效率的转换装置指标上。这一点在每一次讨论中，都提到了增加电能效率的电力电子转化装置是当今的成就和发展趋势。转换装置控制系统的操作对转换装置的运行来说非常重要。为转换装置所选取的控制算法和所使用的原理决定了运行稳定性。不同的转换装置类型、来源和负载，使得控制系统有不同的特性。因此，当用图例介绍特定转换装置的时候，有必要留下讨论的空间。在读者已经了解了电能转换装置所需要的技术和设备之后，对他来说，发现转换装置在不同领域中（例如在工业、交通运输业、家用等）是如何使用的，并查明这些转换装置是如何将可再生能源利用起来的，将会变得更有兴趣。

全球化发展过程和信息的自由交换不仅仅需要各领域工作的各地科学家、专家之间的沟通，更需要特定领域的信息可进入与之没有本质性的类似点的其他的工作领域。通常能量转换方面的深层知识需要特定大学的特殊储备。不同工程研究水平的研究生之间的相互交流更为常见，但这基本上都没考虑到人文和经济性。所以，本书以一个简单易懂的方式面向各个领域（不仅工程方面）的读者。本书旨在增加专家们关于能量转换中功率效率方面的沟通。或许您的新观点会在未来得以实施。我在这个有趣的领域——电力电子方面做了很多年的宣讲和研究，也得到了一些结论。若想在这个领域取得骄人的成就，我们必须团结各界专家的力量，因为电力电子是跨领域的学科。缘于上述原因，我将本书分为以下几章。

第1章“能量和能量效率”阐述了电能在中国和发达国家的使用现状和趋势，同时也提到了能源使用的历史以及由不同能源划分世界能源市场的发展前景。讨论了每个基础部门的能源消耗——交通运输业、工业、商业和居民。描述了在电能产生、传输和使用过程中提高能源效率的潜在方法。

第2章“能量的储存和使用”回顾了能量作为电化学能、电磁能、静电能和机械能储存的方法和技术。重点强调能量存储的不同形式。因为我们并不总是在生产的同时将其消耗，所以我们将能量储存起来作为备用。通过未来的趋势和前景，我们看到能量更多的是以电能的方式消耗。因此，能量转换需要与来源一致——交流或直流电源，同时伴随用户类型——直流或交流负载。

第3章“电力电子技术及其在电能有效转换中的作用”探讨了电力电子技术在电能转换中的重要作用。讨论了在输电和用电过程中电力电子提高功率效率的能力。电力电子转换装置是基于电力半导体开关和控制系统的电力器件的组合，它是一个有复杂特性的设备，在设计和使用时，需要不同科学技术领域专家的知识 and 经验，强调了电力电子学的跨学科特点。读者可以想象电力电子转换装置从一个起初的理论想法到大批量生产使用的艰难过程。最后，介绍了计算机仿真在电力电子换流器运行和不同物理研究过程中的应用，同时回顾了仿真研究需要的可用软件。

第4章“交流/直流变换”包括单相、三相不可控整流电路，单相、三相可控整流电路和交流电源的双向转换电路的运行原理。重点在换流器关于电源的指标——功率因数和电源电流的谐波频谱和提高交流/直流转换功率效率的方法上，同时提出了控制系统的必要性和图解。

第5章“交流/交流变换”讲解了单相、三相换流器的运行原理，讨论了决定于电源网络的电磁适应性的指标——功率因数和负载电流的谐波频谱，包括提高功率效率的方法和图解，提出了装置控制系统的必要性和图解。

第6章“直流/直流变换”分析了不带电气隔离的斩波器——降压斩波器、升压斩波器、升降压斩波器、库克换流器、SEPIC 换流器的运行原理，随之解析了带电气隔离的斩波器——正向斩波器、反馈斩波器、推挽式斩波器、半桥斩波器和全桥斩波器的运行原理。讨论了双向直流/直流换流器的运行原理，定义了决定换流器效率系数的基本特性，提出了提高效率系数和对电源及周围环境的电磁适应性方法。讲解了直流/直流换流器利用共振运行原理的软换向，介绍了控制系统的必要性和图解。

第7章“直流/交流变换”描述了直流输入使用单相、三相换流器得到交流输出的过程。这些转换装置通常叫做逆变器。我们可以使用不同的控制方法来提高输出电压的谐波频谱。本章研究了逆变器的基本指标、选定控制方法和提高指标与方法之间的关系，同样也介绍了控制系统的必要性和图解。

第8章“电能产生和传输过程中的转换”描述了远距离电能产生和传输过程中电力电子转换装置的应用，讲解了 HVDC 传输过程使用方法和传输中提高功率因数的方法。提到了可以补偿无功、提高已装置的设备的电流频谱的方法——静态无功补偿、有功滤波器和电能质量调节器。

第9章“可再生能源的电力转换”讨论了可再生能源的使用——太阳能和风能。能量转换需要不同类型的转换装置实现。转换装置的选取和兼容性决定了功率因数。此处，阐述了可再生能源——太阳光能、风能转换装置的基本特性，还描述了分布式发电的原理和连接在源配网上的最终输出逆变器的运行特性。近期，同这些可发电的可替代能源一起，使用燃料电池发电是一个可研究的课题，此课题不仅在电动汽车上有应用，在其他方面也有迫切的需求。这就是本书列出这些可与燃料电池一起使用的转换装置特性的原因。本章还介绍了提高

换流器功率效率的可能方法。最后介绍在小型水电厂中控制水能的转换装置的结构。

第 10 章“不间断电源供电系统”分析了对交流电能质量要求严格的关键用户供给不间断电能的方法并进行了图解，检验了可能的质量干扰源。不间断电源供电系统（UPS）是电能储存原理和不同转换装置的组合。本章讲解了实施动态或静态的 UPS 的原理，还描述了实施备用、交互式电路和双倍转换 UPS 的原则。同时分析了给供电系统配置多个可靠交流电源和 UPS 的方法，并且给出了 UPS 和其他系统的联系。

第 11 章“换流器系统及其应用”讲述了换流器和换流器系统在以下几个方面的应用：工业、交通运输业、家用和通信技术。工业应用涉及感应加热、焊接、电解和空气净化等。本章描述了不同交通工具需求的换流器。当代节能灯也需要电能转换装置，文中包含了实现照明的方法和图解。电力电子转换装置广泛应用于普通家庭生活中，并且电力电子转换装置保证了通信技术不同应用的可靠性。最后，特地分析医学上对上述电力电子转换装置的需求。

第 12 章“电力电子研究回顾”旨在向读者介绍电力电子领域里几个最新的成就和研究方向，已经对本书熟知的读者看到本章后可以发现这个有趣领域的基本发展趋势。

附录中包括了应用在电力电子周期函数的谐波分析。它可以帮助读者读懂书中的各个部分，同时也包括了电力电子应用分析的几个软件程序。

通读本书，读者可以看到电力电子转换装置的很多不同特性。这本书需要根据章节的设定一章接着一章地读。有理论和实践背景的读者可以只选读其中的几部分找到个别的论题。没有工程学背景的读者需要读第 1、2、3、8、9、10、11 和 12 章。本书讲解电力电子转换的基本知识，更强调转换过程中提高功率效率的方法和途径。我很荣幸能将它带到您的眼前，希望您阅读愉快。

Mihail Antchev

目 录

第一部分 能量和能量转换及存储

第 1 章 能量和能量效率	2	2.6 电能的应用	23
1.1 能源	2	2.7 参考文献	23
1.2 能源效率和发展趋势	7	第 3 章 电力电子技术及其在电能有效转换中的作用	25
1.3 参考文献	9	3.1 概述	25
第 2 章 能量的储存和使用	10	3.2 电能转换的原理	27
2.1 概述	10	3.2.1 将交流电转化为直流电的换流器运行原理:	
2.2 电化学能量储存	11	整流	27
2.2.1 碱性燃料电池 (AFC)	17	3.2.2 交/交变换	28
2.2.2 聚合物交换膜燃料电池 (PEM)	17	3.2.3 直流/直流斩波	29
2.2.3 磷酸燃料电池 (PAFC)	17	3.2.4 逆变原理	29
2.2.4 熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)	17	3.2.5 矩阵换流器的工作原理	30
2.2.5 固体氧化物燃料电池 (SOFC)	17	3.3 电脑辅助设计电力电子技术中的转换装置	30
2.3 作为电磁能储存能量	19	3.4 参考文献	35
2.4 作为静电能储存能量	20	3.5 尾注	36
2.5 作为机械能储存能量	21		

第二部分 电力电子转换装置

第 4 章 交流/直流变换	38	4.3.2 三相可控整流器	54
4.1 供电网络的基本指标	38	4.4 AC/DC 的双向变换	60
4.2 单相与三相不可控整流器	41	4.5 提高交流/直流转换效率的方法	64
4.2.1 单相不可控整流器	41	4.5.1 不可控整流器中的有功功率因数校正技术	64
4.2.2 三相不可控整流器	47	4.5.2 改善可控整流器功率因数的方法	69
4.3 单相与三相可控整流器	50		
4.3.1 单相可控整流器	50		

4.6	参考文献	73
第5章	交流/交流变换	75
5.1	供电网络的基本指标	75
5.2	单相和三相交流调节器	75
5.2.1	单相交流调节器	75
5.2.2	三相交流调节器	82
5.3	在交流/交流转换中提高功率效率的方法	89
5.4	参考文献	103
第6章	直流/直流变换	104
6.1	基本指标	104
6.2	无电气隔离的转换	104
6.3	带电气隔离的转换	110

6.4	双向直流变直流 (DC/DC) 转换	119
6.5	提高直流变直流 (DC/DC) 转换输出功率的方法	121
6.6	参考文献	127

第7章	直流/交流变换	129
7.1	基本指标	129
7.2	单相逆变器和三相逆变器	130
7.2.1	单相逆变器	130
7.2.2	三相换流器	142
7.3	提高功率 DC / AC 转换效率的方法	155
7.4	参考文献	158

第三部分 电子式电能换流器的应用

第8章	电能在发电和传输过程中的转换	160
8.1	发电过程中的能量转换	160
8.2	静止无功补偿器 (SVC)	161
8.3	静止同步补偿器 (STATCOM)	162
8.4	晶闸管可控串联补偿器 (TCSC)	162
8.5	静止同步串联补偿器 (SSSC)	163
8.6	统一功率流控制器 (UPFC)	163
8.7	线间功率流控制 (IPFC)	164
8.8	高压直流输电	173
8.9	参考文献	175
第9章	可再生能源的电力转换	177
9.1	概述	177
9.2	太阳能的转换	178
9.3	风能的转化	182
9.4	水能的转换	186
9.5	参考文献	187

第10章	不间断电源供电系统	189
10.1	基本概述	189
10.2	UPS 基本模式及其指标	194
10.3	提高系统可靠性的措施	200
10.4	UPS 系统和不同系统之间通信	204
10.5	参考文献	205
第11章	换流器和换流器系统的其他应用	207
11.1	工业应用	207
11.1.1	电焊技术	209
11.1.2	真空电弧和等离子炉	210
11.1.3	电阻炉	211
11.1.4	电解	212
11.1.5	水煤气的净化	212
11.2	传输方面的应用	213
11.3	家用电器	217
11.3.1	照明	218
11.3.2	制热、制冷和空气净化设备	220
11.3.3	日常电力设备	221

11.4	电梯	223
11.5	通信方面的应用	223
11.5.1	电信中枢电源	223
11.5.2	电信设备的供电电源	224
11.6	医疗应用	225
11.6.1	热稳定性	225
11.6.2	高可靠性的其他要求	225
11.6.3	IPX 标准	226
11.6.4	间距	226
11.6.5	绝缘电压	226
11.6.6	污染等级	226
11.6.7	瞬变现象	226
11.6.8	抗扰度	227
11.6.9	漏电流	227
11.6.10	对于电池和其充电的 几点特殊要求	227
11.7	参考文献	227

第 12 章	电力电子研究水平回顾	229
12.1	概述	229
12.2	电力电子技术组件的研究 现状	229
12.3	电力电子换流器组成电路的 研究现状	231
12.4	电力电子换流器构成的系统之 研究现状	234
12.5	电力电子换流器控制系统的 研究现状	236
12.6	电力电子换流器在计算机仿真 领域的研究现状	236
12.7	参考文献	237

附录	波形的傅里叶分析和总谐 波失真 (THD)	246
----	--------------------------	-----

第一部分

能量和能量转换及存储

第 1 章

能量和能量效率

1.1 能源

以前，直到工业飞速发展的时代——18 世纪，煤是最主要的能源。随后特别是在 19 世纪，石油和石脑油被广泛地应用。以上几种化石类能源的一个特征就是它们需要很长的时间才能形成。它们是由于动植物物种腐烂而形成的。跟它们形成所需要的时间来比，它们的使用时间是很短暂的。根据大量数据表明，液体化石燃料将在 2050 年左右被消耗殆尽，同样，地球现有的煤供给大概可以维持 200 年的时间。因此，核电的出现成为一种新的发电方式。如今，由于核能发电具有很大的风险性并且这些危险已通过世界上发生的重大核事故所证实，因此很多国家抵制核能发电。同时核废料的处理也成为一难题。新能源成为另一种产生能源的可能。

目前已知的不同种类能源如图 1.1 所示。

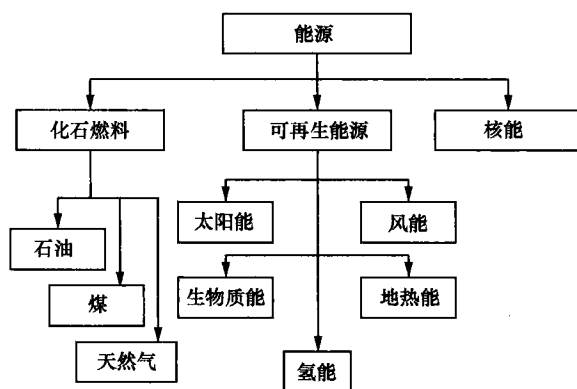


图 1.1 能源种类

20 世纪，人类取得了显著的成就。我们需要更多的电能。尤其是在发展中国家，这种需要显得更加迫切。但随后将会产生如下问题：

- (1) 全球能源消耗是怎样发生变化的？不同行业和国家的需求趋势是什么？未来我们的需求是什么？
- (2) 主要能源的消耗平衡点是什么？它们发展的前景怎么样？
- (3) 各种能源的使用对环境造成了怎样的影响？
- (4) 提高各种能源的使用效率是可能的吗？

(5) 环境污染将会持续吗？我们怎样减少污染的排放？

全球各类能源当前状况和未来需求预测比例如图 1.2 所示。天然气和其他的新能源的使用量持续增长非常明显，不同国家的详细数据可在 2008 年电子工业协会的报告中获取。截至 2005 年各行业的能源消耗比例如图 1.3 所示。

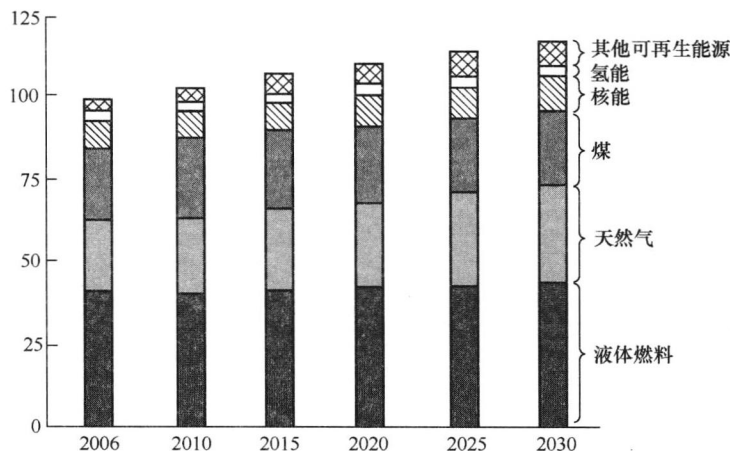


图 1.2 不同种类能源的消耗率（百分比）

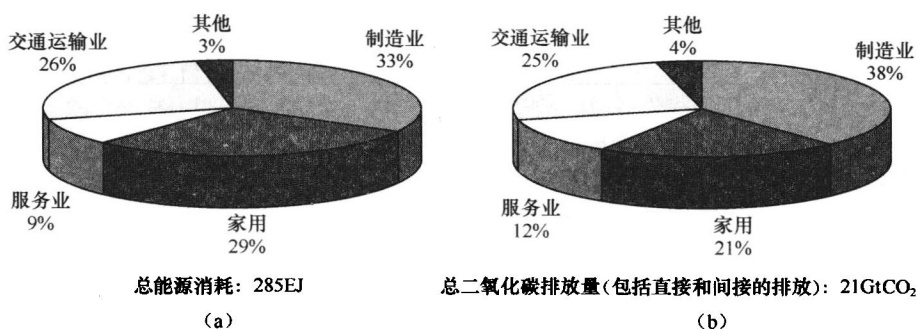


图 1.3 2005 年全球不同行业全球能源消耗和二氧化碳排放量比例

可以看出，基础的能源消耗行业包括占总量 33% 的工业用电以及紧随以后的占总量 29% 的生活用电。排在第三位的是占总量 26% 的交通运输业。根据 2008 年电子工业协会提供的数据显示，从 1990 年到 2005，其能源消耗增长了 23%。最大的能源消耗增长是交通运输业和服务业，共增长了 37%。

不同国家的能源消耗结构是不同的，在以下的研究中，我们将国家按照是否是经济合作与发展组织成员国分成两组讨论。在能量利用过程中，我们通常用一些能够体现每单位能量活性的指标来衡量不同国家能量的利用情况。这些指标中，最常用的指标是单位国内生产总值（GDP）能源消耗（TFC）指标和人均消耗指标。

TFC 与 GDP 的比值表明生产每一元的产品需要的能量多少。为了使这种比较在不同的国家可以进行，要求我们用通用的 GDP 计算方法。目前有两种把一个国家的 GDP 转换成通用的 GDP 方法。

一种是按照市场汇率（以下简称 MER）换算，另一种是按照购买力平价（以下简称 PPP）换算。两种方法的结果（2005 年）如图 1.4 所示。可见，对于单位国内生产总值（GDP）能