

电力需求侧管理系列丛书

国家发展和改革委员会
电力需求侧管理培训推荐用书

空调与热泵技术

国家发展改革委经济运行调节局
国家电网公司营销部 编
南方电网公司市场营销部

DSM



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

空调与热泵技术

国家发展改革委经济运行调节局
国家电网公司营销部 编
南方电网公司市场营销部



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《电力需求侧管理系列丛书》是国家发展和改革委员会开展电力需求侧管理培训工作的推荐用书，丛书共 13 个分册，涵盖电力需求侧管理工作的管理、技术、工具三个层面。本书是其中的《空调与热泵技术》分册。具体介绍了湿空气的物理性质、空气调节系统的组成和工作原理、空气调节系统的分类与运行调节、空气调节系统的冷热源、热泵系统与设备、热泵系统节能与优化运行、热泵热水系统、热泵在建筑节能中的应用等内容。

本丛书可供各级政府主管部门、电网企业、能源服务机构、电力用户相关人员阅读、使用。

图书在版编目（CIP）数据

空调与热泵技术/国家发展改革委经济运行调节局，国家电网公司营销部，南方电网公司市场营销部编。—北京：中国电力出版社，2013.8

（电力需求侧管理系列丛书）

ISBN 978-7-5123-4795-3

I. ①空… II. ①国… ②国… ③南… III. ①空气调节设备—热泵系统—技术培训—教材 IV. ①TB657

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 179466 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 8 月第一版 2013 年 8 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 17.25 印张 257 千字

印数 0001—3000 册 定价 43.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电力需求侧管理系列丛书》编委会

主 任 鲁俊岭

副主任 徐阿元 吴建宏 王 勤 胡兆光

编 委 (按姓氏笔画排序)

马丽华	王玉萍	王成强	王 林	王宗义	王海龙
王海波	王 榕	王德亮	王 鑫	韦加雄	卞忠庆
左松林	田永军	史景坚	冯小维	朱 炯	朱 清
乔 昆	任 泽	华普校	刘学军	刘宪明	刘继东
关长祥	江 峰	孙红光	李开明	李永宁	李 郁
李绍祥	李洪宾	李家才	李惊涛	杨仁泽	杨锦辉
何 胜	汪穗峰	张庆云	张兴华	张 军	张志飞
张 波	张南娇	张艳红	张继刚	张 磊	陈少江
陈 军	陈 枫	范继臣	林世良	金必煌	金国生
周新民	郑建平	赵小平	赵青山	胡占廷	钟树海
段学民	姜林福	羿宗胤	夏云飞	夏 鑫	顾国栋
徐 兵	徐 磊	卿三红	郭炳庆	朗 琼	陶时伟
黄永斌	黄志明	黄惠英	梅学民	曹念忠	崔海山
董 新	舒旭辉	路民辉	詹 昕	廉国海	颜庆国
薛建虎	檀跃亭	魏宏俊			

《电力需求侧管理系列丛书》编写组

组 长 陈江华

副组长 周 珏 徐杰彦

编写人员 (按姓氏笔画排序)

丁 胜	王振宇	王 鹤	尹玉霞	吕晓剑
闫华光	吴亚楠	吴在军	李玉琦	李 军
李铁男	李涛永	李德智	邱泽晶	张小松
陈 磊	苗常海	周伏秋	周 莉	周 晖
单葆国	钮文洁	黄学良	曹 荣	蒋利民
谭显东	Wolfgang Eichhammer			

前 言

为深入开展电力需求侧管理工作，增强全社会科学用电、节约用电、有序用电的意识，提高从业人员电力需求侧管理业务水平，国家发展和改革委员会经济运行调节局会同国家电网公司营销部、南方电网公司市场营销部组织有关单位和专家编写出版了《电力需求侧管理系列丛书》。

本丛书共 13 个分册，涵盖电力需求侧管理工作的管理、技术、工具三个层面。其中，管理层面有《中国节约能源法规与政策解析》《综合资源规划与资源选择》等分册；技术层面有《能效电厂理论与实践》《负荷特性及优化》《重点用能行业节能技术》《能源审计》《通用节能技术》《分布式能源与热电冷联产》《空调与热泵技术》《电机系统节能技术》《电蓄冷蓄热技术及技术经济评估》等分册；工具层面有《节能量和节约电力测量与核证》《欧盟能效指令与白色证书》等分册。

本丛书是国家发展和改革委员会开展电力需求侧管理培训工作的推荐用书，可供各地政府主管部门、电网企业、能源服务机构、电力用户相关人员阅读、使用。

丛书的编写得到了国家发展和改革委员会能源研究所、能源基金会、德国国际合作机构、国际自然资源保护协会、国网能源研究院、中国电力科学研究院、东南大学、北京交通大学等单位、机构和专家的大力支持。

本分册为《空调与热泵技术》，全书由东南大学张小松教授主编并执笔，东南大学博士张恺、程清、陈遥、折晓会、赵善国参与了部分章节的编写工作，

全书由东南大学杜培教授主审。

由于编写时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见。

编者

2013年6月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 空气调节技术的发展概况	1
第二节 空气调节系统与建筑能耗	7
第二章 湿空气的物理性质	13
第一节 湿空气的组成与状态参数	13
第二节 湿空气的相关理论	23
第三节 湿空气热力状态参数的计算方法	36
第三章 空气调节系统的组成和工作原理	39
第一节 空气调节系统的组成	39
第二节 空气调节系统的工作原理	62
第四章 空气调节系统的分类与运行调节	108
第一节 空气调节系统的分类	108
第二节 常用中央空气调节系统的类型	110
第三节 空气调节系统的选择	113
第四节 空气调节系统变工况及运行调节	115
第五章 空气调节系统的冷热源	127
第一节 空气调节系统冷热源的种类	127
第二节 空气调节系统冷热源的选择	135
第六章 热泵系统与设备	140
第一节 热泵技术及其低位热源	140

第二节	空气源热泵	143
第三节	地源热泵系统	146
第四节	水环热泵系统	154
第五节	吸收式热泵	158
第六节	燃气热泵	163
第七节	空调(热泵)多联机系统	166
第八节	热泵在冷热电联供系统中的应用	168
第七章	热泵系统节能与优化运行	171
第一节	热泵系统的评价指标与经济性分析	171
第二节	热泵节能技术	179
第三节	空气源热泵除霜技术	184
第八章	热泵热水系统	192
第一节	热泵热水系统发展与现状	192
第二节	空气源热泵热水系统	196
第三节	多功能热泵热水系统	201
第四节	热泵热水系统实际应用	211
第九章	热泵在建筑节能中的应用	218
第一节	工程实例一——空气源热泵系统	218
第二节	工程实例二——空气源热泵热水器	224
第三节	工程实例三——地表水地源热泵系统	227
第四节	工程实例四——土壤源与地表水源复合热泵系统	233
第五节	工程实例五——土壤源热泵用于地板辐射采暖	237
第六节	工程实例六——蓄水式地源热泵系统	238
第七节	工程实例七——水环热泵系统	242
第八节	工程实例八——吸收式热泵回收电厂冷凝热的热电联产	246
附录	空调与热泵负荷计算相关图表	250
参考文献		265

概 述

空气调节简称“空调”，其定义为：使房间或封闭空间的空气温度、湿度、洁净度和气流速度等参数，达到给定的技术要求。即通过人工技术手段营造并保持满足一定要求的空气环境，使空气达到所需要的状态或使空气处于正常状态，从而满足人体舒适度及工艺生产过程的要求。

第一节 空气调节技术的发展概况

15 世纪末，意大利的达·芬奇制造出了第一台通风机，为通风和空调工程创造了基本的条件。1851 年法国卡莱设计制成了第一台氨吸收式制冷机，给空调的夏季供冷奠定了基础。1872 年美国波义耳设计制成了第一台氨制冷压缩机，大大地推动了空调工程的发展。

18 世纪 30 年代，第一次工业革命在英国产生了纺织业，19 世纪后半叶，随着纺织工业的发展，空调产业受到了巨大的挑战，其中对纺织车间环境的加湿处理成为空调的主要任务。从那时起，空调系统就被公认为至少应具有以下功能：①加热或降温，能够调节空气的温度；②加湿或减湿，能够调节空气的湿度；③能够使空气具有一定的流动速度；④能够使空气具有一定的洁净度。以上简称空调功能的“四度”。此后，美国工程师克勒谋根据“四度”的要求设计并安装了美国南部约 1/3 纺织厂的空调系统，获得了 60 多项专利权，并于 1906 年用“Air Conditioning”对其进行命名，就是我们现在的空气调节。

1901 年美国的威利斯·开利（Willis H. Carrier）博士在美国建立世界上第一所空调试验研究室。1902 年 7 月 17 日开利博士针对美国纽约市布鲁克林的一家印刷厂在印刷过程中遇到的温度和湿度不恒定，从而导致画面模糊等问题，

为他们设计了世界公认的第一套科学空调系统。这套空调系统实现了对空气湿度的控制，也成为空调行业的标志，它首次向世界证明了人类对环境温度、湿度、通风和空气品质的控制能力。1906年，开利博士获得“空气处理装置”的专利权，这是世界上第一台喷淋式空气洗涤器，即喷水室，它的发明使空调能够全年满意地应用于200种以上不同类型的工厂，成为他的空调的完美之作。

1911年，通过实验，开利博士得出了空气干球、湿球和露点温度间的关系，并绘制了湿空气的焓湿图。湿空气的焓湿图依然是今日空调计算的基础，这是空气调节史上的里程碑。1922年开利博士发明了世界上第一台离心式冷水机组，1937年开利博士又发明了空气-水系统的诱导器装置，是目前常见的空调末端装置——风机盘管的前身。开利博士以其一生在空调科技方面的卓越成就，超过80项发明专利，被誉为“空调之父”。

空气调节应用于工业及科学实验过程一般称为“工艺性空调”，而应用于以人为主的空气调节则称为“舒适性空调”。美国的工艺性空调开始于19世纪后半叶，但舒适性空调却远远迟于工艺性空调。直到20世纪20年代，才开始在几百家影剧院设置全空气空调系统，这类公共建筑物空间较大，有足够的地方安装风道，温湿度只需集中调节，所以迄今单风道或双风道的全空气系统仍在使用。1930年后，由于小型制冷机的发展以及可靠性的提高，舒适性空调才扩展到各类商店、旅店、餐厅及交通运输工具，此阶段首批房间空调器正式销售。1945年，舒适性空调正式进入住宅。

美国之外的其他国家的空调技术也得到了迅速发展。1920年，南非西部金矿区的舒适性空调引起人们的关注。1938年，慕尼黑美术馆实现了空调。在法国，1927年巴黎附近的一家医院实现了空调，1932年一家电话交换局实现了空调。在日本，1917年，一家私人住宅实现了空调，1920年一家糖果厂实现了空调，1927年一家剧场实现了空调。

我国的工艺性空调和舒适性空调与国外几乎是同时起步的。20世纪30年代，曾有过一个高峰时期。当时上海地区许多纺织厂已有了空调系统，几座高层建筑的旅馆和几家“首轮”电影院也先后设置了全空气式的空调系统，其中

一家电影院和一家银行还安装了离心式制冷机组。当时，高层建筑装有空调，上海是居于全亚洲之冠的。但到 1937 年，由于日本侵略者的破坏，致使空调产业的发展被迫中断。

新中国成立以后，我国空调技术得到了飞速的发展，尤其自 20 世纪 80 年代改革开放以来，我国各大城市的高级旅馆、影剧院、购物中心等先后都设置了空调系统，各式空调机组已进入学校、机关、医院以及平常百姓家。目前，全国现有大、中、小型设计单位近万个，1/4 以上能做空调设计。已掌握的高精度恒温恒湿可连续保持静态偏差优于 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 2\%\text{RH}$ 的水平；超高性能洁净室，洁净度达到国标 1 级标准；已经掌握各种等级的生物洁净整套技术，从而为高新技术发展提供了环境技术保障。

在空调设备方面，我国已成为仅次于美国、日本两国，位居世界第三的制冷空调设备生产国。根据中国制冷空调工业协会统计，1995 年我国风机盘管产量已超过 45 万台，大大超过了空调大国美国、日本的年销量 30 万台左右的水平。同时我国也是世界上最大的冷水机组市场，其中吸收式冷（热）水机组产量居世界第二位，其中 352kW 以上的机组产量，中国居第一位。在户式集中空调方面，我国推出水系统—热泵冷热水系统，与日本的制冷系统——VRV 及美国的空气系统——风管机形成三足鼎立之势。

随着国民经济的飞速发展和居民生活水平的不断提高，对空气调节技术将会提出更高的要求，面对新的挑战，业内人士必须把握机遇，不断开拓进取，创造健康、舒适、安全、方便的人居环境。展望 21 世纪空调技术的发展，节约能源、保护环境必将是空气调节工程与相关产业可持续发展的基本条件。从某种意义上来说，现代空气调节技术的发展，不仅应在能源利用、能量的节约与回收、空调设备性能的改进、系统的运行管理、优化设计与技术经济分析以及自动控制精度等方面继续研究和深化，而且在舒适空调迈向健康空调，提高室内空气品质，改善小区空气环境等方面展开进一步研究。

我国幅员辽阔，东起东经 135° ，西至东经 74° ，南起北纬 8° ，北至北纬 54° ，总面积近千万平方公里。全国最热的地方最高温度在 45°C 以上，夏季常见高温达 38°C ；全国最冷的地方最低温度在 -42°C 以下，冬季常见低温为 -35°C 。大气

压力在太平洋沿岸地区接近于标准大气压,但在西部高原城市拉萨,却只有 0.64 标准大气压。各地自然环境、气象条件差异之大,在全世界位居第一。

盛夏的酷暑和隆冬的严寒,会给工农业生产和人民生活带来很多不便,甚至带来一些危害。其中,纺织、印刷、钟表、胶片、食品、卷烟等行业,以及地下建筑、隧道、粮食仓库、农业温室等部门,以及公共建筑如大会堂、图书馆、医院等建筑,空调系统都是必不可少的。而对于电子、仪表、精密机械、计量室、检验室等除了要求空调系统满足温湿度和气流速度等要求外,含尘浓度也必须限定在某一范围之内。对于制药工业和医院的手术室等,不但要满足上述要求,还规定其所含细菌的数的限度。甚至航天器、潜水艇等的密闭舱室也需要空调系统来解决其内部的空气问题。因此,可以概括地说:现代化发展需要空气调节,空气调节技术和手段的发展也要依赖于现代化的发展。空气调节不再是以前所讲的温湿环境工程,而是对空间环境质量全面的调节与控制的人工环境工程。

从最初的全空气系统到空气-水系统,从定风量系统到变风量系统,空气调节技术突飞猛进,这些发展不只是环境温湿度控制要求的提高,更重要的是节约能源的要求。工业先进的国家用于空气调节的电能约占全国总能耗的 20%~30%,我国也在接近这个数字,所以空调节能迫在眉睫。这就要求现代空调系统不仅能满足:①营造合适的室内气候,满足工业生产及科学研究的需要;②营造舒适的环境,以利于人们工作、学习和休息;③营造特定的气候条件,满足医疗、航空等尖端科学的研究;④为妥善保存珍贵物品、博物馆藏、图书馆藏提供条件。还需走可持续发展道路,节约能源,充分利用自然能源及热泵技术。从某种意义上来说,现代空调的发展,既是节能技术、空调技术的发展过程,又是一个控制不断加强、精确、深化的过程。因此,以下四个方面应是今后空气调节技术研究和发展的重点。

(一) 提高室内空气品质

随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,空调系统已不再是什么奢侈品,很多家庭都装有 2 台或更多的房间空调器,有的家庭还装有户式中央空调,人们长期待在空调房间里,房间的空气质量直接关系到人们的身体健康。另一

方面。随着工业的快速发展,危害人体健康的各种微粒与气体也在不断增长,人类健康所需的空气净化技术已迫在眉睫。因此,已不能只关注医院、博物馆等场所的空气品质,而应全面提高所有场所的室内空气品质,应大力研究开发效率高、价廉,而且便于自净的技术与设备。加强对纤维过滤技术、吸附技术、光催化技术、负离子技术、臭氧技术、低温等离子技术等空气品质处理技术的研究。而且,人们不但要关心室内空气环境的改善,而且要关心城市,特别是小区空气环境的改善,促使舒适空调迈向健康空调。

(二) 能源的合理利用

近年来,世界性的能源危机问题日益受到人们的关注。随着经济的发展,能源紧缺问题日益严重,其中建筑能耗是能源消耗的大户之一。据统计,我国建筑能耗已占国民经济总能耗的 27% 左右,且呈递增趋势,而空调能耗又是建筑的主要能耗,占总能耗的 30%~50%,因此空调整能是建筑节能中关键环节。因此,一方面要不断提高空调产品的性能,降低能源消耗,同时,可采用溶液除湿、蒸发冷却等方式,促进利用余热、自然能源和可再生能源的产品的开发和利用;另一方面,要认真研究制冷空调用能结构,针对建筑用能负荷的不均衡性,大力提倡相变蓄能型空调系统,天然气驱动的空调系统,缓解电力供应带来的压力。

(三) 热泵技术的推广

20 世纪 70 年代初,由于能源危机的出现,热泵以其回收低温废热,节约能源的特点,在产品经过改进后,重新登上历史舞台,受到了人们的关注。热泵技术是一种有效的节能手段,合理利用高品位能量、综合能源效率高。研究表明,电动热泵的制热系数只要大于 3,则从能源利用方面看热泵就会比热效率为 80% 的区域锅炉房用能节能,且供暖区无污染,环保效益好。利用热泵技术夏季可以供冷,冬季可以供暖,一机两用,设备利用率高,使用灵活,调节方便。

热泵技术是一种有效的节约能源、减少 CO₂ 排放和大气污染的环保技术,空气源热泵的除霜,以及各种低品位能源的利用(包括热回收)等,可以把自然界的低温废热转变为暖通空调系统可利用的再生能源。这就为人们提出了一条节约矿物燃料进而减少温室气体排放、提高能源利用效率、减轻环境污染的新途径。

目前, 100kW 以下的中小型空调装置中, 热泵占 50%以上, 并取得良好效果。

由此可见, 热泵技术是一种有效的节能手段, 热泵技术的发展不仅与国民经济总体发展有关, 还与能源的结构与供应、环境保护与可持续发展密切相关。从综合的经济效益和社会效益看, 热泵技术在中国具有广阔的发展空间, 应加强有关热泵空调方面的研究工作, 积极推广、使用热泵空调技术。

(四) 先进控制技术的应用

随着计算机技术、控制技术、电子技术的发展, 全面促进了空调事业的发展, 而空调事业的发展也越来越离不开计算机技术或者说控制技术的支撑。现代化的空调系统一方面可实现全自动的季节转换, 另一方面更可精确地实现室内热湿负荷和室外气象条件等因素的变化, 利用现代先进的控制技术, 使空调系统在每个季节都能处于最佳工况下运行。同时, 计算机自动控制技术与变频技术相结合, 在空调领域产生了不可忽视的影响, 变风量、变水量和变制冷剂流量系统就是在这种情况下取得了飞速的发展。

模糊控制不依赖于对象的数学模型, 通过对模糊信息的处理可以对复杂对象实施良好的控制。因其具有良好的鲁棒性和稳定性等优点, 已受到空调行业专家学者的广泛关注。目前已有专家将模糊控制应用于家用空调器中, 而且预计不久的将来, 在线辨识技术, 神经网络技术, 专家控制系统也将会应用到空调系统中。

随着互联网普及、物联网技术的推广及自适应技术的应用, 自感知空调将成为一大发展趋势, 空调系统可以自动感应人体活动区域及人体的温度, 从而通过物联网技术自动调节房间温度, 做到需要多少用多少, 并对各用能产品的用能情况进行分项计量, 以便对整个建筑的用能情况进行分析, 并对空调系统实施有效的节能改造。

(五) 加强标准化建设

近年来, 在标准化工作与国际接轨的大背景下, 在空调领域的竞争更是白热化, 标准已成为国内空调行业内最热门的词汇。目前, 我国虽然已经制定了相当数量的各种空调的产品标准、测试和设计及施工验收规范, 在标准化工作上取得了很大成绩, 但因种种原因, 标准水平参差不齐, 标准体系有待进一步完善。为此, 我们应该夯实标准化战略基础, 站在战略高度做标准, 积极与国际接轨, 并

正视我国的国情，努力提高产品质量的同时增强国际竞争力，保护国家利益。

第二节 空气调节系统与建筑能耗

根据英国石油公司 BP 于 2011 年 6 月发布的 2010 年世界能源统计数据(BP Statistical Review of World Energy 2011)，世界能源消耗总量在经过 2009 年的短暂衰减后，2010 年全年世界能源消耗总量达到 12002.4Mtoe（百万吨油当量：Million tons oil equivalent），年增长率为 5.6%，增长率为自 1973 年以来的最大值。法国能源咨询和信息服务公司 Enerdata 发布的统计数据(Global Energy Statistical Yearbook 2011) 稍有不同，能源消耗总量为 12852Mtoe，年增长率为 5.5%。

图 1-1 为世界能源消耗总量在过去 30 年内的变化情况，可以看出世界能源消耗总体上朝着增大的方向，而其中 2009 年的下降主要是由于当年的全球经济衰退引起的（2009 年全球 GDP 下降 0.6%）。虽然 2009 年全球能源消耗 20 年内首次降低，但中国近年来能源消耗走势却一直持续增长，图 1-2 为中国近 30 年内能源消耗情况，可以看出近年来经济快速发展的同时我国能源消耗也在快速增加。根据 BP 提供的数据，2010 年中国（不包括港澳台）总的能源消耗为 2432.2Mtoe，已经超越美国的 2285.7Mtoe 而成为世界上能源消耗最大的国家，占世界能源消耗总量的 20.3%。图 1-3 为 2010 年世界能源消耗前十名国家排名，图中可以看出中美两国能源消耗远远领先其他国家，而对比近年来世界各国经济发展态势，可以预知我国能源消耗势必会进一步增加。到 21 世纪中叶，如果我国达到中等发达国家水平，若按当时的人口数量 15 亿以及人均能耗 4tce（标准煤当量：Ton of standard coal equivalent）来计算，总能耗将达 60 亿 tce，传统能源生产方式显然不能满足需求。而由于设备及技术条件的限制，我国能源在开采、转化及利用等方面与发达国家相比效率很低。因此，能源问题现已成为世界各国共同面临的严峻问题，而在我国，情况尤为严重！如何在发展经济的同时阻止能耗过快的增长已成为我国制定相关政策需着重考虑的问题之一，在这种形势下，我国在制定“十二五”规划时，明确提出单位国内生产总值能耗要降低 16%。

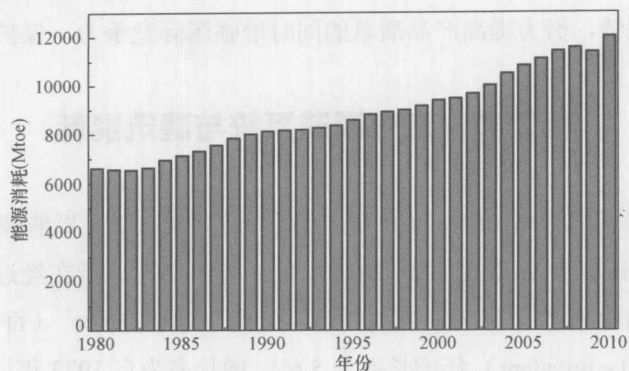


图 1-1 世界近 30 年内逐年总能源消耗

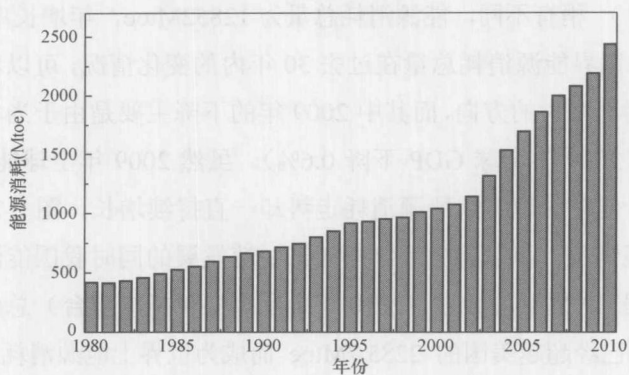


图 1-2 中国近 30 年内逐年总能源消耗

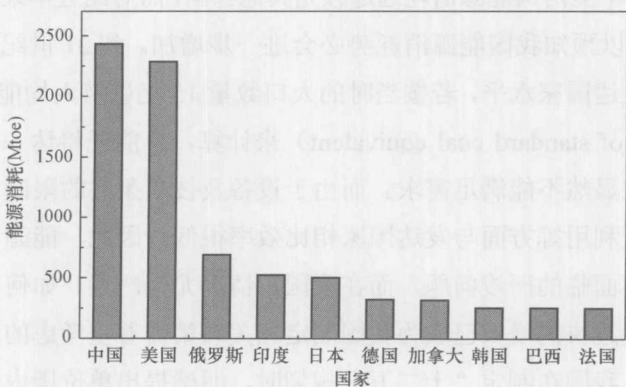


图 1-3 2010 年世界能源消耗前十名国家排名