

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 热能与动力工程基础

翁史烈摇主编

高等教育出版社

# 内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材之一。它全面系统地阐述了热能与动力工程学科所涉及的往复式热力机械、回转式热力机械、制冷装置、锅炉设备、新能源和可再生能源利用的理论与应用，各类设备的工作原理和基本概念，设计基础和基本方法，新技术的发展状况和发展方向。本书取材反映了国内、外热能与动力工程的设计、制造、运行和科学研究的新成果，着重于基本概念的阐述，图文并茂，易于掌握。

本书适合作热能动力工程专业学生的教材，亦可供从事与热能动力工程有关工作的工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

热能与动力工程基础 孙文烈主编 北京 : 高等教育出版社, 2004  
ISBN 7-04-014111-1  
I. ①热... II. 孙... III. ①热... ②动力工程... IV. ①T6

I 热 II 孙文烈 III ①热 ②动力工程 IV T6

中国版本图书馆CIP数据核字 (2004) 第 141111 号

策划编辑 宋晓 责任编辑 胡纯 封面设计 李卫青 责任绘图 朱静  
版式设计 马静如 责任校对 金辉 责任印制

出版发行 高等教育出版社 购书热线 010-64015000  
社址 北京市西城区德外大街 8 号 免费咨询 010-64015000  
邮政编码 100029 网 址 http://www.hep.edu.cn  
总 机 010-64015000 邮 政 100029

经销 新华书店北京发行所  
印 刷

开 本 787mm×1092mm 1/16 版 次 2004 年 1 月第 1 版  
印 张 10 印 次 2004 年 1 月第 1 次印刷  
字 数 240 000 定 价 18.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号：141111

# 前 言

摇摇热能与动力工程是能源利用的一个重要领域，不掌握其基本规律，就不可能把各种形式的一次能源高效、清洁地转化为人类需要的热能、机械能、电能，维持社会的可持续发展。在长期的实践中，热能与动力工程的各个分支，包括动力机械、制冷设备、新能源等都得到了迅猛发展，各种技术性能指标日新月异。但是，国民经济的快速发展、生活质量的不断提高、国防力量的进一步增强都期待着热能与动力工程的更大变革与创新。

“热能与动力工程基础”是热能动力工程专业的必修课程。本书全面系统地阐述了热能动力工程学科所涉及的往复式热力机械、回转式热力机械、制冷装置、锅炉设备、新能源和可再生能源利用等领域，分析了它们的基本工作原理、基本性能、基本系统、控制与安全性能，内容覆盖面较宽且具有相当的深度。本书注重介绍热能动力设备中基础理论的应用、新技术的发展状况和发展方向，启迪学生对各类热能机械装置的知识联系，拓宽学生的视野。本书取材尽量反映我国热能动力工程的设计、制造、运行和科学研究方面的成果，同时又注意反映国外该领域科学技术的新进展。

本书由中国工程院院士、上海交通大学翁史烈教授主编，参加编写的有上海交通大学机械与动力工程学院周校平、张丁旺、谷波、罗永浩、杜朝辉、于立军、臧述升、蒋安忠，由上海交通大学机械与动力工程学院陈汉平统稿。全书由清华大学热能工程系张学学教授审阅。

本书可作为热力发动机、制冷空调、热能工程专业高年级学生的教材，也可供从事热能动力系统科研、设计及教学的人员参考。

由于编者水平有限，时间仓促，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

# 目 录

## 第 1 章 绪论

能源利用与动力工程概述 ..... 1

## 第 2 章 锅炉及换热器

锅炉及换热器 ..... 2

## 第 3 章 叶轮式动力机械

叶轮式动力机械 ..... 3

## 第 4 章 往复式动力机械

往复式动力机械 ..... 4

## 第 5 章 制冷与空气调节

制冷与空气调节 ..... 5

## 第 6 章 热力发电技术

热力发电技术 ..... 6

## 第 7 章 新能源与可再生能源利用技术

新能源与可再生能源利用技术 ..... 7

# 第 1 章

## 能源利用与动力工程概述

### 本章要点

能量是物质运动的一种量度。任何物质都离不开运动，相应地有各种能量存在，能够产生能量的资源称为能源。

本章主要阐述内容有：能源的基本概念，热能转换为机械能的途径，热能动力设备的分类，热能动力设备的评价指标，以及热能利用与环境保护。

# 第 1 章 目录

主要符号表 .....	源
能源概论 .....	缘
一次能源简介 .....	缘
人类需要的能源形式 .....	怨
我国能源建设之形势 .....	园
热能利用与动力工程 .....	员
热能转变成机械能的途径 .....	员
热能动力设备的分类 .....	员
热能动力设备的评价指标 .....	员
热经济性 .....	员
功率 .....	员
体积重量 .....	员
评价指标对热能动力设备应用范围的影响 .....	员
热能动力设备的主要技术参数 .....	员
热能利用与环境保护 .....	员
热能动力设备对环境的影响 .....	员
环境保护的策略 .....	员
思考题 .....	缘
参考文献 .....	缘

# 主要符号表

## 拉丁字母

$P$	功率, 宰	$T$	绝对温度, 运
$q$	单位工质的热量, 噪	$W$	单位工质的功, 噪
$\dot{q}$	热耗率, 噪		

## 希腊字母

$\varepsilon_{\text{冷}}$	制冷系数	$\eta$	效率
$\varepsilon_{\text{热}}$	热泵系数	$\lambda$	有用功系数

# 1 能源概论

人类可利用的能源多种多样，可以从不同的角度加以分类。本书按能源的形成条件、可否再生、利用历史状况与技术水平以及对环境的污染程度将其分为以下几种：

## 1.1 一次能源与二次能源

一次能源是指自然界中存在的天然能源，如化石燃料、核燃料、太阳能、水力、风能、地热、海洋能、生物质能等。2009年我国一次能源消费结构如图 1-1 所示，其中一次电力包括水电、核电及新能源发电。

一次能源的一部分是来自天体的“吸入能量”，包括太阳能和月球能，另一部分存在于地面或地球内部。来自太阳的能量除太阳能外，还包括用之不尽的水力、风能、生物质能、海洋流动动能等其他能源；月球能主要表现为潮汐能。目前被大量开发和利用的地球能源是化石燃料的化学能、核燃料的原子能（核能）以及地热能。

二次能源是由一次能源直接或间接加工转换而成的人工能源，如电能、热水、蒸汽、压缩气、石油制品、煤制品、酒精、氢气、沼气、合成燃料、激光等。

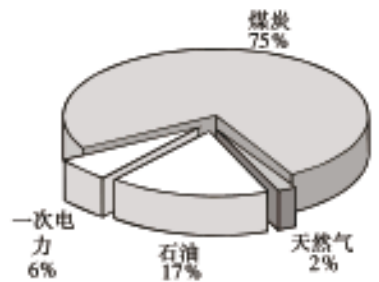


图 1-1 中国一次能源消费结构

## 1.2 再生能源与非再生能源

可重复产生的一次能源称为可再生能源，如太阳能、水力、风能、海洋能、生物质能等。不能重复产生的自然能源称为非再生能源，如化石燃料、核燃料、地热等。

## 1.3 常规能源与新能源

常规能源是指技术上已经成熟、已大量生产并广泛利用的能源，如化石燃料、水力等。

新能源是指技术上正在开发、尚未大量生产和广泛利用的能源，如太阳能、风能、海洋能、生物质能等。

核燃料及地热也常被看作新能源。

## 1.4 清洁能源与非清洁能源

在开发和利用中对环境无污染或污染程度很轻的能源叫做清洁能源，否则称为非清洁能源。清洁能源主要有太阳能、水力、风能、海洋能等。气体燃料中氢是一种清洁能源。天然气利用时所产生的污染物质比其他化石燃料少得多，因而也常被看作是清洁能源。

# 1.1 一次能源简介

## 1.1.1 化石燃料

化石燃料是古代埋入地下的动植物在一定地质条件下形成的，是不能再生的燃料资源，除天然气外它们大都是非清洁能源。化石燃料中按埋藏能量的多少顺序有煤炭、石油、油页岩、天然气和油砂。

## (员) 煤炭

煤炭是埋藏在地下的植物受高压和地热的作用，经过几千万年乃至几亿年的炭化过程，释放出水分、二氧化碳、甲烷等气体后，含氧量减少而形成的。由于地质条件和进化程度不同，煤炭的含碳量及发热量也不同。煤炭中或多或少都含有挥发分，通常年代越久的煤挥发分越少。按挥发分的多少分为褐煤、烟煤和无烟煤。

煤炭是地球上蕴藏量最丰富、分布最广的化石燃料。据世界能源委员会的评估，世界煤炭可采资源量达  $1.5 \times 10^{12}$  吨(标准煤)，占世界化石燃料可采资源量的  $1/3$ 。目前已探明的可采储量约为  $0.5 \times 10^{12}$  吨(标准煤)左右，储采比约  $100$  年。我国已探明的可采储量占世界的  $1/3$ ，储采比约  $100$  多年。

## (圆) 石油

石油是水中堆积的有机物残骸，在地下高压作用下形成的碳氢化合物。石油经过精炼后可得到汽油、煤油和重油等。石油在地球上的分布极不平衡，世界剩余石油探明储量的一半以上在中东，我国仅占  $1/10$ 。按国际上通行的能源预测，地球上的石油将在  $100$  年内枯竭，而我国的石油仅可开采  $100$  年。

## (猿) 天然气

天然气以含甲烷为主，是蕴藏量丰富、最清洁而便利的优质能源。以热当量计算，天然气储量已超过石油储量。天然气资源分布很不均匀，中东、前苏联和欧洲储量之和约占世界储量的  $1/2$ 。天然气大约还可用  $100$  年。

## (源) 油页岩和油砂

油页岩是水藻炭化后形成的，含灰分过多，故多半不能自燃。油砂是含重质油  $10\% \sim 20\%$  的沙子。油页岩和油砂在美洲大陆较多。

化石燃料目前仍是世界一次能源的主要部分，其生产及消费数量都很大，因而对环境的影响也格外令人关注。开采过程对环境影响最典型的是煤炭开采，主要表现在对土地、村庄的损害，以及对水资源的影响。化石燃料在利用过程中对环境的影响主要是燃烧时各种气体、固体废物及发电时的余热所造成的污染。

## 核燃料

核能是指由原子核反应所产生的能量，其获得方式有两种：一种是铀一类的重原子核的核裂变释放的能量；另一种是重水(氘和氧化合成的水)一类的轻原子核的核聚变释放的能量。

每千克核燃料完全裂变可以放出  $10^{10}$  千焦的热量，这相当于  $1000$  吨标准煤燃烧所放出的热量。核聚变比核裂变释放出更多的能量。例如，铀  $^{235}$  的裂变反应将千分之一的物质变成了能量，而氘的聚变反应将近千分之四的物质变成了能量。每千克热核聚变燃料聚变放出的热量，是核裂变所放出能量的  $10$  倍。

科学的本意在于为人类谋取福利。不幸的是，在这个充满斗争和混乱的世界上，原子核刚从实验室崭露头角的时候，就被人们拖进了战争的深渊，败坏了原子核能的声音。

20 世纪 50 年代以来，中国加快了现代化建设的步伐。中国核工业的工作重点转向为经济建设和人民生活服务，贯彻“军民结合，以核为本，发展核电，多种经营”的方针，调整产业结构和产品结构，和平利用核能核技术，发展对外科技合作和经济贸易，初步形成了以核电为龙头，核电、核燃料、民用产品多种经营为三大经济支柱的新型核工业体系，为迎接新世纪

的发展奠定了坚实的基础。

发展核电是和平利用核能的主要方面，到目前为止，我国已投运的核电机组有：广东大亚湾核电站（两台单机容量为 985MW 压水堆反应堆机组），浙江秦山核电站 1 号机组（功率为 985MW 压水堆）、秦山二期 2 号机组（功率为 985MW，压水堆）、秦山三期 1 号机组（功率为 1090MW，重水堆），广东岭澳 2 号机组（功率为 1090MW，压水堆）。江苏连云港市的田湾核电站工程已于 2002 年 12 月 15 日正式开工，厂区按 3 台百万千瓦级核电机组规划，并留有再建 3 台至 5 台的余地，一期建设 2 台单机容量 1090MW 的俄罗斯 VVER-1000 型压水堆核电机组。浙江省三门核电项目“四通一平”工程已经开工，其中一期 2 台百万千瓦级核电机组的场址已按计划于 2007 年 12 月完成。

核燃料资源非常丰富，重核裂变使用的主要原料是铀，国际能源署公布的探明储量可使用约 400 年；而轻核聚变使用的燃料是海水中的氘，1 吨海水能提取 0.03 克氘，在聚变反应中能产生约等于 10 吨汽油的能量，即“1 吨海水约等于 10 吨汽油”，地球上海水中就有 46 亿吨（约 10 亿吨）氘，足够人类使用上亿年。

### 太阳能

太阳是一个炽热的气态球体，其内部连续进行着氢聚合成氦的核聚变反应，不断地释放出巨大的能量。尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其辐射总能量（约 173 兆瓦）的二十二亿分之一，但已高达 168 兆瓦，也就是说，太阳每秒钟照射到地球上的能量相当于 1000 万吨煤。

太阳是一个巨大、久远而无尽的自然能源，世界上一切生命和能量几乎都来自太阳。广义的太阳能包括的范围很大，地球上的风能、水力、海洋温差能、波浪能、生物质能以及部分潮汐能都源自于太阳，即使是地球上的化石燃料从根本上说也是远古以来储存下来的太阳能。这些能源的利用可以看作是对太阳能的间接利用。

通常所讲的太阳能仅限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。

太阳能是清洁的可再生的一次能源。它资源丰富、无需运输且可免费使用。但太阳能有两个主要缺点：一是能流密度低；二是其强度受地点、季节及气候等各种因素的影响而不能维持常量。这两大缺点从很大程度上限制了太阳能的有效利用。

### 水力

水是生命之源，是人类生活中不可缺少的战略物质。这里所讲的水力是指水资源所具有的位能。水力本身是机械能，无需进行转换便可利用。过去水力用于提水、碾米、磨面，当今主要用于发电。

水力是常规能源中唯一一种清洁的可再生能源。水能实际上来自于太阳：地面水吸收太阳辐射热蒸发而产生云，再在高空凝聚成雨，不断地降水使水力资源得到补给。江河川流不息，水力不会枯竭。

中国位于亚洲大陆东部，太平洋西岸，陆地面积 960 万平方公里，居世界第三位。在这广袤的国土上，河流众多，径流丰沛、落差巨大，蕴藏着非常丰富的水能资源。据统计，中国河流水能资源蕴藏量 6.8 亿千瓦，年发电量 1.5 万亿千瓦时；可能开发水力资源的装机容量为 3.8 亿千瓦，年发电量 8.4 万亿千瓦时。不论是水能资源蕴藏量，还是可能开发的水能资源，中国在世界各国中均居第一位。

截至 2005 年底,我国水电机装机容量为 1.6 亿千瓦,占总装机容量的 85%;发电量为 1.2 万亿千瓦时,占总发电量的 75%。

## 风能

风是地球上的一种自然现象,它是由太阳辐射热引起的。太阳照射到地球表面,地球表面各处受热不同产生温差,从而引起大气的对流运动形成风。全球的风能约为 1.7 亿千瓦,其中可利用的风能为 0.5 亿千瓦,比地球上可开发利用的水能总量还要大 16 倍。我国位于亚洲大陆东南,濒临太平洋西岸,季风强盛,风能总量约为 5.3 亿千瓦,近期可开发的约为 1.2 亿千瓦,其中内蒙古、青海、黑龙江、甘肃等省风能储量居我国前列。

人类利用风能的历史可以追溯到公元前,但数千年来,风能技术发展缓慢,没有引起人们足够的重视。然而,自 1973 年世界石油危机以来,在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下,风能作为新能源的一部分才重新有了长足的发展。风能作为一种无污染和可再生新能源有着巨大的发展潜力。特别是对沿海岛屿、交通不便的边远山区、地广人稀的草原牧场,以及远离电网和近期内电网还难以达到的农村、边疆,作为解决生产和生活能源的一种可靠途径,风能的利用有着十分重要的意义。即使在发达国家,风能作为一种高效清洁的新能源也日益受到重视。

## 地热

地热能是指储存在地球内部的热能,它起源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变。地下水的深处循环和来自极深处的岩浆进入到地壳后,把热量从地下深处带至近表层。在有些地方,热能随自然涌出的热蒸汽和水而到达地面,自史前起它们就已被用于洗浴和蒸煮。对近地表层的地热能,则可通过钻井将热能从地下的储层引入水池、房间、温室和发电站。

地热能的储量相当大,据估计,每年从地球内部传到地面的热能相当于 1.3 亿千瓦。地热能的分布相对来说比较分散,开发难度大。实际上,如果地热能不是本身已集中在某些地区的话,用目前的技术水平是无法将地热能作为一种热源和发电能源来使用的。严格地说,地热能不是一种可再生能源,而是一种像石油一样可开采的能源,最终的可开采量将依赖于所采用的技术。然而由于全球地热资源潜量十分巨大,如果热量的提取速度不超过补充的速度,则可认为地热能是可再生的。

## 海洋能

海洋能指依附在海水中的可再生能源。海洋面积约占地球表面的 71%,平均深度约 3700 米。一望无际的大海,不仅为人类提供航运、水产和丰富的矿藏,而且还蕴藏着巨大的能量。通常意义上的海洋能包括潮汐能、波浪能、海洋温差能、海洋盐差能和海流能等,更广义的海洋能还包括海洋上空的风能、海洋表面的太阳能以及海洋生物质能等。

全球海洋能的可再生量很大,据估计,五种海洋能理论上可再生的总量为 1.6 亿千瓦。其中温差能为 1.2 亿千瓦,盐差能为 0.4 亿千瓦,潮汐能和波浪能各为 0.1 亿千瓦,海流能为 0.9 亿千瓦。海洋能的强度较常规能源为低,各种能量涉及的物理过程、开发技术及开发利用程度等方面存在很大差异,难以实现把上述全部能量取出,而温差利用则受热机卡诺效率的限制。设想只利用较强的海流、潮汐和波浪,利用大降雨量地域的盐度差,估计技术上可用海洋能量 0.4 亿千瓦,其中盐差能为 0.1 亿千瓦,温差能为 0.2 亿千瓦,波浪能为 0.1 亿千瓦,海流能为 0.1 亿千瓦,潮汐能为 0.1 亿千瓦。

我国有 1.8 万多公里长的海岸线及 3000 多个大小岛屿，有着丰富的海洋能资源。我国海洋能开发的历史已有 100 多年，20 世纪 80 年代以来获得了较快发展。迄今已建成多座潮汐电站，并已在波力及潮流发电技术上取得了成功运行的经验。

### 1.1 生物质能

生物质是指由光合作用而产生的各种有机体。生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物中的一种能量形式，一种以生物质为载体的能量，它直接或间接地来源于植物的光合作用。在各种可再生能源中，生物质是唯一一种可再生的碳源，可转换成常规的固态、液态和气态燃料。

世界上约有 50 万种生物，生物质能的潜力很大，它是仅次于煤炭、石油、天然气的第四大能源。据估计，地球上每年植物光合作用的固定碳达 100 亿吨，含能量达 100 亿吨。因此，每年通过光合作用贮存在植物的枝、茎、叶中的太阳能，相当于全世界每年耗电量的 100 倍。生物质遍布世界各地，其蕴藏量极大，仅地球上的植物，每年生产量就相当于目前人类消耗矿物能的 100 倍，或相当于世界现有人口食物能量的 100 倍。虽然不同国家单位面积生物质的产量差异很大，但地球上每个国家都有某种形式的生物质。生物质能是热能的来源，为人类提供了基本燃料。

## 1.2 人类需要的能源形式

现代社会人类需要的能源形式主要有电能、热（冷）能、机械能。

### 1.2.1 热能

热能是能量的一种基本形式。分子运动学说认为，热能是物体大量分子等微粒杂乱运动的动能。由前面的讨论可知，自然界存在的一次能源中，除风力、水力及部分海洋能作为机械能可直接利用外，其他各种能源或是直接以热能形式存在，或是经过燃烧反应、原子核反应等首先将其转换为热能再予以利用。所以，人们从自然界获得能源的主要形式是热能。

热能的取得方式主要有太阳热能、地热、燃料燃烧放热、核裂变或核聚变放热。热能还可由电能转换而来，或由机械能通过摩擦而得到，但在多数情况下摩擦都被认为是不希望有的现象，并力图减小或消除它。

由热力学第二定律知：热和功之间的转变存在着明确的方向和限度，热能是一种品位较低的能量，且其品位直接与温度有关。因此，要合理利用热能，就必须做到按质供热，热尽其用。

### 1.2.2 机械能

物体宏观机械运动所具有的能量称为机械能。机械能是一种更为理想的能量形式，它能以 100% 的效率转换为热能，也能以非常高的效率转换为电能。机械能除用于拖动发电机生产电能外，人们日常生活及生产中需要的动力都来自机械能。

机械能除少部分来自一次能源中的水力、风能和海流、潮汐和波浪外，基本上都是通过某种类型的热机（如内燃机、燃气轮机、蒸汽轮机等）从热能转换而得到，或通过电动机由电能转换而来。

### 1.2.3 电能

电能是电荷的流动或聚积而具有的作功能力。电能有各种形式，例如直流电能、交流工频电能和变频电能等。电能可以非常方便高效地转化为几乎任何形式的其他能量，广泛用于动力、照明、冶炼、电镀、电热、电信等领域。除易于变换外，电能的优点还有便于控制、测量和远距离输送等。

电能的生产有直接能量转换及间接能量转换之分。直接生产电能的方式主要有：热能直接转换为电能的磁流体发电，化学能直接转换为电能的各类电池或燃料电池发电，电磁能直接转换为电能的太阳能电池等。间接能量转换是目前电能生产的主要方式，它是通过交流发电机将机械能转换为电能的。

到目前为止，直接能量转换生产的电能还占不到整个电能生产的 1%，而用于电能生产的机械能 99% 以上是通过某种类型的热机从热能转换而得到。因而，热能与动力工程学科所涉及的内容，是与现代社会人类生产生活密不可分的。

## 1 我国能源建设之形势

关于我国能源建设问题所面临的形势，国家发展和改革委员会能源局专家分析指出：要实现使国内生产总值到 2020 年力争比 2000 年翻两番的宏伟目标，未来 20 年间国内生产总值年均增长不应低于 7%，相应地必须有可靠的能源供应作基础。2000 年我国一次能源消费总量为 10.1 亿吨标准煤，按 2000 年现值计算，万元国内生产总值的能耗为 1.22 吨标准煤。充分考虑结构调整、技术进步和节能降耗等措施，每万元国内生产总值的能耗按年均 1% 降低测算，到 2020 年每万元国内生产总值的能耗约为 1.1 吨标准煤，届时全国共需能源消费 12.1 亿吨标准煤，比 2000 年增加约 2 亿吨标准煤。这个增加量是相当大的，因此搞好能源建设是一项非常重要的工作。

首先，必须做好能源发展的规划工作，结合我国能源资源和能源消费的特点，提出能源发展的长期规划，并严格执行，认真落实。总体来看，在今后相当长的时期内，我国能源消费将持续平稳增长，但也不排除个别年份和个别时段能源消费的波动，从而引起能源供需的暂时不平衡。由于能源设施建设具有周期长、投资大的特点，能源建设难以仅按照现时的市场状况来安排，必须要根据长远发展需要，在认真研究和规划的基础上均衡安排，不能因为一时能源略有富余就忽视能源建设，也不能因为一时能源略显紧张就全面开花，不顾后果地大干快上。否则，能源供需只能是忽多忽少，时紧时松，能源结构也不能得到有效调整。

其次，要抓好能源发展的战略重点。我国能源资源的特点是以煤为主，抓好煤炭资源的勘探和煤矿的建设是我国能源发展最重要的战略重点，必须持之以恒地高度重视煤炭问题，决不能因为一时的能源供应富余而忽视煤炭建设。石油是目前最重要的能源资源，由于我国石油资源相对短缺，今后国内大规模增加石油产量比较困难，而石油的需求量仍将高速增长，解决好国内石油供应不足问题也是我国能源发展的战略重点。天然气是一种清洁和使用方便的能源，具有广阔的发展前景，加强天然气勘探和开发，大力开拓天然气市场，提高天然气在能源消费中的比重同样是能源发展的战略重点。电力是由一次能源转换而来的二次能源，也是使用最方便和应用范围最广的能源形式，特别是随着经济的发展，电力需求的增长比一次能源的增长会

大得多，将来作为能源的煤炭将主要通过转换为电力而使用，做好电力建设工作是能源建设的重中之重，决不能有丝毫的放松。

第三，高度重视新能源和可再生能源的开发和利用。新能源和可再生能源是指常规能源和大型水力发电之外的生物质能、风能、太阳能、小水电、海洋能、地热能等能源资源。中国新能源和可再生能源资源非常丰富。按气象资料，我国陆上风能储量约为  $1.6 \times 10^{12}$  kW，浅海海域风能储量约为  $1.5 \times 10^{12}$  kW。太阳能是一种“取之不尽、用之不竭”的清洁能源，全国总面积三分之二以上地区年日照时数大于  $2000$  小时，具有太阳能利用的极好条件。生物质能是指蕴藏在生物质中的能量，主要是农作物秸秆和薪柴，一直是人类赖以生存的重要能源。目前，我国农村地区  $1/3$  以上的生活能源是由秸秆和薪柴等生物质能提供的，每年约折合标准煤  $1.5$  亿吨。其他新能源和可再生能源资源，如海洋能、地热能等也很丰富，均具有很好的开发和利用价值。

## 1.1 热能利用与动力工程

由前一节的讨论得知：现代社会人类需要的能源形式主要有电能、热（冷）能及机械能三种，而一次能源中可被人们直接利用的热能和机械能却为数不多，绝大多数一次能源都须首先转换为热能才可予以利用。对热能的利用分为直接利用和间接利用两种方式，直接利用是指热能直接用于工业生产中的加热、烘干以及日常生活中的烹煮、制冷、取暖等，间接利用则是通过热机等进一步将热能转化为机械能或电能再加以利用。

随着经济的迅猛发展，电力需求的增长比一次能源的增长会大得多，而用于电能生产的机械能  $1/3$  以上是通过某种类型的热机从热能转换而得到。因而，热能便成为化石燃料、核燃料、生物质能等一次能源转换成电能的枢纽。

### 1.1.1 热能转变成机械能的途径

#### 1.1.1.1 热能动力装置

燃料在适当的设备中燃烧而产生热能，然后在热能动力机中将热能转变为机械能。燃烧设备、热能动力机以及它们的辅助设备统称为热能动力装置。

热能动力装置主要有两大类：一种是以燃烧产生的燃气直接进入发动机进行能量转换，如内燃机和燃气轮机等；另一种则首先将燃料燃烧产生的热能传递给某种液体使其汽化，然后将蒸气导入发动机进行热功转换，如蒸汽机和汽轮机等。在内燃机或蒸汽机中，汽缸内的高温高压燃气或蒸汽经膨胀可推动活塞作功，并通过曲柄连杆机构将能量传递到发动机轴上。在燃气轮机和蒸汽轮机中，高温高压的燃气或蒸汽首先在喷管中膨胀加速，将热能转换为动能，然后冲击叶片使轴转动而作功。

#### 1.1.1.2 工质

尽管上述两类热机的装置构造及工作原理不同，但都必须用某种媒介物质从高温热源获取热能，使它具有高能而对机器作功，并把余下的热能排向低温热源。这个过程对任何一种热机

都是共同的，也是本质性的。这种实现热能和机械能相互转化的媒介物质称为工质。

工质是完成热功转换所必需的载体。内燃机及燃气轮机装置中的工质为空气和燃气，蒸汽机和汽轮机装置中的工质为水蒸气。如果密封问题能够彻底解决，还可采用水银、新型复合物质作为热动力装置的工质。

燃气作为工质在完成热功转换任务后通常被排出系统，而蒸汽作为工质在完成热功转换任务后往往被冷却凝结成水并循环使用。

## 1 热动力设备的分类

热动力设备的种类繁多，分类的方式也有多种。

按能量转换方向分类

(1) 原动机

将燃料的化学能、原子能和生物质能等所产生的热能转换为机械能的动力设备称为原动机，如蒸汽机、蒸汽轮机、燃气轮机、汽油机、柴油机等。

(2) 工作机

通过消耗机械能而使流体获得能量或使系统形成真空的动力设备称为工作机，如离心泵、真空泵、柱塞泵、螺杆泵、风机、压缩机等。

按机械运动方式分类

(1) 回转式

转子（叶轮）在缸内作回转运动以实现能量的转换，如蒸汽轮机、燃气轮机、离心泵、真空泵、螺杆泵、风机等。

(2) 往复式

活塞在气缸内作往复运动而实现能量的转换，如蒸汽机、汽油机、柴油机、柱塞泵、往复压缩机等。

按工质流动方式分类

对叶轮机械，按流体在机器中的主要运动方向可分为：

(1) 轴流式

流体的主要运动方向与旋转轴平行，如蒸汽轮机、燃气轮机、轴流式压气机等。

(2) 径流式

流体的主要运动方向为沿着旋转轴的直径方向，如离心泵、离心式压缩机、离心透平等。

(3) 混流式

流体的主要运动方向与旋转轴成某一锐角，如混流式压缩机、混流式透平等。

按用途分类

热动力设备按用途可以分得很细，但不外乎发动机、泵、风机、压缩机等几大类。

# 1.1 热能动力设备的评价指标

## 1.1.1 热经济性

### 1.1.1.1 循环的热经济指标

热经济性是评价热能动力设备性能优劣的一个重要指标。热经济性可用下式表示：

$$\text{经济指标} \begin{cases} \text{越} \\ \text{越} \end{cases} \frac{\text{得到的收获}}{\text{花费的代价}} \quad (1.1.1)$$

#### (1) 热能动力循环

最常用的表示热能动力循环（正向循环）热经济性的指标为热效率  $\eta_{\text{热}}$ 。由上式可知，热效率  $\eta_{\text{热}}$  等于循环功与吸热量的比值，即

$$\eta_{\text{热}} \begin{cases} \text{越} \\ \text{越} \end{cases} \frac{\text{循环功}}{\text{吸热量}} \quad (1.1.2)$$

#### (2) 制冷循环

制冷循环的热经济性以制冷系数  $\varepsilon_{\text{制}}$  表示。制冷循环所付出的代价为循环耗功  $W_{\text{制}}$ ，得到的收获为从低温热源带走的热量  $Q_{\text{冷}}$ 。因此

$$\varepsilon_{\text{制}} \begin{cases} \text{越} \\ \text{越} \end{cases} \frac{Q_{\text{冷}}}{W_{\text{制}}} \quad (1.1.3)$$

#### (3) 热泵循环

热泵循环的热能经济性以热泵系数  $\varepsilon_{\text{热}}$  表示。热泵循环所花费的代价仍为循环耗功  $W_{\text{热}}$ ，但得到的收获为向高温热源放出的热量  $Q_{\text{热}}$ 。因此

$$\varepsilon_{\text{热}} \begin{cases} \text{越} \\ \text{越} \end{cases} \frac{Q_{\text{热}}}{W_{\text{热}}} \quad (1.1.4)$$

### 1.1.1.2 提高循环热经济性的途径

为便于定性分析，可以利用循环的平均吸热温度和平均放热温度的概念，将式 (1.1.2) ~ (1.1.4) 改写为以热源温度表示的形式。

#### (1) 热能动力循环

$$\eta_{\text{热}} \begin{cases} \text{越} \\ \text{越} \end{cases} \frac{T_{\text{吸}}}{T_{\text{放}}} \quad (1.1.5)$$

由式 (1.1.5) 可知：热能动力循环的热效率  $\eta_{\text{热}}$  总是小于 1 的。为了提高热效率，就必须在可能的条件下，尽量提高  $T_{\text{吸}}$  和降低  $T_{\text{放}}$ 。由于传热必然存在温差，而排气必须要有压差，所以要降低循环的平均放热温度  $T_{\text{放}}$ ，就必须使工质膨胀到尽可能低的压力和温度。提高循环平均吸热温度的最有效方法就是提高工质的初参数（压力和温度），而初参数的提高受到材料性能的限制。因此，对热能动力装置而言，除了改进材料的性能外，还可用改进循环方式的办法提高  $T_{\text{吸}}$ 。例如，对于蒸汽动力装置，可以采用再热和回热循环；燃气轮机装置可以采用回

热、间冷及分段燃烧的方式；内燃机可以采用混合加热循环等。

### (圆) 逆向循环

对制冷循环及热泵循环

$$\varepsilon_{\text{制}} = \frac{t_2}{t_1 - t_2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{热}} = \frac{t_1}{t_1 - t_2} \quad (2)$$

由此可见， $\varepsilon_{\text{热}}$ 总是大于1的。若以环境介质为低温热源向建筑物内供暖， $\varepsilon_{\text{热}}$ 理论值则可达10左右，即使在考虑实际装置的各种损失后供热系数仍可达7以上。因此，热泵采暖的经济性远优于任何电取暖装置。 $\varepsilon_{\text{制}}$ 原则上可以大于1也可以小于1，但除深度制冷装置外，通常 $\varepsilon_{\text{制}}$ 也是大于1的。

由于制冷循环与热泵循环的冷热源温度不可能一致，因而不能由以上两式得出 $\varepsilon_{\text{热}}$ 总是比 $\varepsilon_{\text{制}}$ 大1的结论，实际空调系统的制冷系数通常还略大于热泵系数。

由式(1)及(2)可知，减小温差 $t_1 - t_2$ ，可以有效地提高制冷及热泵装置的经济性。然而，空调系统的冷、热源温度是由环境及用户确定的，制造厂只能提供综合性能更优的设备，却无法为用户节约太多的电能，节能的控制手段掌握在用户手中。与环境温度保持较小的温差不仅可明显地节约能源，同时对人身健康也极为有利。

## 1.1 功率

功率是作功快慢程度的量度，通常用单位时间内所作的功或消耗的功来表示。单位有瓦特(W)、千瓦(kW)等。原动机功率的大小直接反映了设备进行热功转换的能力；工作机功率的大小则表示了设备工作时需要向设备输入的动力。

额定功率——原动机长期连续运行中所能保持的最大功率。额定功率也称铭牌功率，有时也称为容量。三种主要的热能动力装置中，蒸汽轮机的单机容量最大，可达1000MW；目前，燃气轮机的最大容量为100MW，最大内燃机功率为1000kW。

经济功率——设计机器时作为热力计算依据的功率。发电厂用大功率机组运行时承担基本负荷，经济功率通常取为额定功率。除此之外，一般发动机较少在满负荷工况运行，为了获得更高的运行经济性，经济功率通常小于额定功率。

对于内燃机而言，除了用功率表示发动机的工作能力外，排量也可表示发动机工作能力的大小；而蒸汽动力装置中的锅炉，则通常用最大长期连续蒸发量表示其容量。

工作机通常用压缩比、扬程及流量表示其工作能力的大小，而空调机通常用制冷量及制热量表示其能力的大小。

## 1.2 体积重量

体积和重量也是热能动力设备的一项重要评价指标。设备的体积和重量不仅直接影响设备的使用场合，还直接影响材料的消耗量和制造工作量。