

高等学校试用教材

热力系统与设备

西安交通大学 黄祥新 编
上海机械学院 孙家庆

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

前 言

1982年10月在上海召开的热能工程专业教材会议,决定设立“热力系统与设备”为一门专业课,1985年9月在浙江建德召开的教材会议上通过了该课程的教学大纲。本书即是根据此教学大纲编写的。本书初稿曾以油印讲义的形式在西安交通大学的教学中使用过,效果较好。

全书共六章。第一章在介绍能和能源的一般知识的基础上,突出能的质的概念,由此推出能的合理利用的原理和实施方案。第二章简述了电力用户和热力用户的情况,根据用户的特性对各种热能利用系统的优、缺点和应用范围作出正确评价,并介绍了发电厂、区域锅炉房、工业余热的热力系统及设备。第三章简述了热力发电厂的基础理论及提高热力发电厂热经济性的各项措施,介绍了评价热力发电厂及其设备的热经济性的指标。第四章至第六章介绍了汽轮机设备、泵与风机、锅炉设备的主要结构、基本工作原理、使用性能和选用方法等。

本书具有综合性和实用性强的特点。能够起到扩大知识面、开拓思路、提供新技术的作用。目前,我国能源消耗大,供应较紧张,浪费严重。因此,利用本书所提供的节能原理和节能技术,如热水供热系统、热电联产、热管技术、高效炉拱等可解决众多的实际问题,并将会取得显著的成效。

本书为高等学校热能工程(锅炉)专业教材,也可作为各类高等学校及中等技术学校热力涡轮机和与之相近专业的教材或教学参考书,还可供工厂企业中从事热能工程、热力涡轮机,乃至化学工程等方面工作的工程技术人员和管理干部参考之用。

本书由西安交通大学黄祥新副教授(编写第一、二、三、五章,§6-1~§6-4)及上海机械学院孙家庆副教授(编写第四章,§6-5~§6-7)合编,由黄祥新作全书统稿。由西安交通大学陈听宽教授及上海机械学院李燕生教授审阅。西安交通大学顾亚平同志协助黄祥新编写,并承担了全书的校对、绘图等工作。上海机械学院陶正良同志协助孙家庆编写。西安交通大学许晋源教授对本书的编写作了诸多指导,并提出了不少宝贵意见。西安交大马才云同志参加了本书油印稿的校对工作。特别应该提出的是有关兄弟院校的同志对本书的编写十分关怀,哈尔滨工业大学锅炉教研室对本书的编写还提供了书面意见。对此,我们一并敬致谢意。

编者

1988年4月

目 录

第一章 能源利用概论	1	§ 4-3 汽轮机的总体结构.....	119
§ 1-1 能源概念及其分类和评价.....	1	§ 4-4 汽轮机的本体结构.....	126
§ 1-2 热能、热能动力生产对国民经济的 意义	3	§ 4-5 汽轮机中能量转换过程.....	144
§ 1-3 热能的合理利用	5	§ 4-6 汽轮机的调节	162
第二章 热能利用系统与设备构成	10	第五章 泵与风机	177
§ 2-1 电力用户及其特性	10	§ 5-1 概述	177
§ 2-2 热力用户及其特性	13	§ 5-2 离心泵与风机的叶轮理论.....	179
§ 2-3 热能利用系统的型式	17	§ 5-3 泵与风机的设备性能.....	190
§ 2-4 发电厂的热力系统及设备构成	22	§ 5-4 离心泵与风机的构造.....	205
§ 2-5 区域锅炉房的集中供热系统及设备 构成	39	§ 5-5 其他常用泵与风机.....	210
§ 2-6 工业余热的回收和利用系统及其设 备构成	44	§ 5-6 泵与风机的运行和调节.....	214
第三章 发电厂热力过程	60	§ 5-7 泵与风机的选择.....	227
§ 3-1 发电厂热力过程的理论基础	60	第六章 锅炉设备	230
§ 3-2 热力发电厂的型式及其热经济性	66	§ 6-1 概论.....	230
§ 3-3 蒸汽参数、中间再热及给水的回热 加热	81	§ 6-2 燃料及燃烧计算.....	235
第四章 汽轮机	111	§ 6-3 锅炉的热平衡与热效率.....	249
§ 4-1 概述.....	111	§ 6-4 锅炉的燃烧设备.....	256
§ 4-2 汽轮机的基本工作原理及分类.....	113	§ 6-5 锅炉蒸发受热面.....	287
		§ 6-6 蒸汽的净化.....	292
		§ 6-7 过热器与再热器.....	295
		§ 6-8 省煤器及空气预热器.....	300
		参考文献	306

第一章 能源利用概论

§ 1-1 能源概念及其分类和评价

一、能源的基本概念

自然界中能够产生能量的资源称为能源。人们利用这些资源可以获得各种形式的能量，如热能、电能、机械能、辐射能、声能等等，为发展社会生产和维持人类生活服务。可见能源不仅应产生能量，而且这种能量还应是可以利用的。

二、能源的分类

1. 按地球能源的来源分类

(1) 来自太阳的能量 除了直接来自太阳的辐射能外，还有间接来自太阳的能量，如石油，天然气，煤炭，风力，水力，生物质等。

(2) 来自地球内部的热能 如地下热水，地下蒸汽等地热能。

(3) 来自放射性元素铀、钍等的核裂变能和氘、氚等的核聚变能。

(4) 来自太阳、月亮对地球的引力能 如潮汐能等。

2. 按利用能源的方式分类

(1) 一次能源 自然界自然存在的，即没有经过加工或转换的能源，如煤炭，石油，天然气，植物燃料，水能，风能，太阳能，原子能，地热能，海洋能，潮汐能等。

(2) 二次能源 由一次能源经过加工转换而成的能源产品，如焦炭，煤气，电力，蒸汽，以及各种石油制品等。

3. 按人类利用能源的成熟程度分类

(1) 常规能源 一般是指已经使用多年，技术上已经成熟、经济上比较合理的能源，如煤炭，石油，天然气，水能和核裂变能。这些也是目前世界上使用的主要能源。其中核裂变能，国际上统计在常规能源之列，我国迄今由于民用核能体系尚未形成，故列在新能源一类。

(2) 新能源 指新近才开始利用，或正在开发研究的，亦即在技术上尚未成熟，或经济上还未过关的能源，如太阳能，潮汐能，地热能，核聚变能等。有些能源，如风能，生物质能（沼气）等虽属于古老的能源形态，但目前在研究采用新的利用技术，所以也可将它们归入新能源之列。

4. 按能源资源的再生性分类

(1) 可再生能源 在生态循环中能不断再生的能源，如太阳能，水能，风能，生物质能，潮汐能等。

(2) 非再生能源 能源资源储藏量有限，随着不断地开发利用终究要消耗殆尽，而不能再生的能源，如煤炭，石油，天然气等矿物能源。

5. 从环境保护的角度来看，能源亦可分为

(1) 清洁型能源 在利用过程中不污染环境的能源，如太阳能，水能等可再生能源均

属于此类。

(2) 非清洁型能源 在利用过程中对环境污染较严重的能源, 如煤炭, 石油等非再生能源均属于此类。

三、常规能源的评价

为了尽快地开发和有效地利用能源资源, 必须从技术、经济等方面对能源, 特别是常规能源给以正确的评价。

1. 煤炭

根据世界能源会议资料估计, 全世界煤炭资源地质总储量为 10.8 万亿 t, 探明储量为 1.4 万亿 t, 分布在 80 个国家内。另据 1980 年 5 月世界煤炭研究会估计, 约 90% 的地质储量和 60% 的可采储量集中在美国、苏联、中国和澳大利亚四国。我国煤炭资源丰富, 地质储量和可采储量两项指标均名列世界第三位。国外估计我国的地质储量为 1.44 万亿 t。1980 年底的探明储量达 6000 多亿 t, 而且煤种齐全, 分布面广, 在我国大陆 29 个省、市、自治区中, 27 个有煤炭资源, 其中山西、内蒙两省、区的探明储量占全国的 61.3%。

2. 石油和天然气

据 1980 年第十届世界石油会议估计, 世界石油储量约为 3000 亿 t; 到 1980 年底, 已探明储量为 1432 亿 t, 其中累计采出量为 634 亿 t, 剩余可采储量约为 888 亿 t, 按 1980 年世界石油产量 30 亿 t 计, 可维持开采 30 年左右, 但估计还有一半石油资源有待进一步探明。1980 年底, 世界天然气的探明储量为 73.8 亿 m³。世界石油资源探明储量最多的是苏联、伊朗和美国。

我国石油和天然气资源分布广, 前景光明。从地质构造情况看, 全国陆相沉积岩面积约为 420 万 km², 沿海有 130 万 km², 都可能有储油。但大部分陆相沉积岩面积还没有进行普查和勘探, 海域石油的地质勘探工作还刚开始, 所以确切的资源情况还未查明。现在除了在大陆继续寻找含油、气地区外, 还积极利用先进技术进行沿海大陆架的勘探工作。目前已探明的石油储量主要集中在东北和华北地区, 天然气资源主要在四川, 东北和中南地区还有比较丰富的油页岩资源。

3. 水能

我国水力资源极为丰富。据 1979 年复核资料, 水力资源理论蕴藏量达 6.8 亿 kW, 居世界第一位。其中可开发的水力资源装机容量为 3.7 亿 kW, 年发电量 1.9 万亿 kW·h。我国的水力资源主要分布在西部地区, 其中以西南地区为最多, 约占 71%。云南、四川、西藏的水力资源均超过 1 亿 kW。其次是中南和西北地区, 分别占全国的 10% 左右。东北、华北、华东三个地区仅占 9%, 是水力资源相对较少的地区。

四、我国的能源状况

建国以来, 我国能源工业得到了迅速发展, 1980 年与解放初期相比, 煤炭增长 18 倍, 石油增长 820 多倍, 天然气增长 1200 多倍, 水电增长 80 多倍。在此期间, 工农业总产值增长 13 倍, 而能源消耗量却增长了 24 倍, 比世界平均消耗增长率快 6 倍。

我国能源开发利用的特点:

(1) 能源分布不均和历史形成的工业分布不合理之间的矛盾较为突出 能源资源偏居一方, 造成了大量能源长途输送的困难, 因而增加了能源工业建设的投资, 增加了能源开发和运输的成本。北煤南运, 西煤东运, 以及近年来出现的煤炭往东北运输的现象等, 造成了可

观的运输量。据统计,煤炭和石油的运输量占全国铁路货运量的43%;占交通部所属水运货运量的47%。因此,必须选择最佳的能源开发和输送方案,并合理安排工业布局,以逐步解决问题。

(2) 在能源构成中煤炭占主要地位 就能源资源的可采储量而言(按燃料的热值计算),我国固体燃料与液体燃料之比为40:1,而世界上为4:1。在能源消费领域内,世界上经济发达国家都大量使用石油、天然气。1978年在能源总消费中,石油和天然气的比重:美国为77%;英国为61%;法国为75%;联邦德国为66%;日本为79%,而我国只有26%。相应地我国煤炭的比重约占70%,比世界上高一倍。与石油、天然气相比,由于煤的品质较差,因此在开采、运输和利用等方面均有不利之处。

(3) 在能源消费结构中,工业耗能占有较大的比重 1979年工业部门耗能占能源总消费量的69.4%,商业和民用耗能只占17.2%,交通运输和农业耗能分别占5.7%和4.9%。1978年各发达国家工业耗能比重是:美国36%,联邦德国37%,法国44%,日本57%;交通运输耗能比重一般为(15~26)%,比我国高1.5~3倍;商业和民用耗能比重为(20~46)%。这一方面表明西方国家在生活和商业上用能的浪费,另一方面也反映出我国工业生产中能源利用率低,生活用能水平低。随着能源管理的加强,以节能为中心的工艺设备的改进,工业耗能比重将有所下降;而随着人民生活的不改善,民用耗能比重将逐渐上升,这是符合现代化建设发展规律的。

(4) 我国农村用能目前以生物质能为主 据1978年统计,农村用于生产和生活的能源总消费量为3.2亿t标准煤,占我国总能源消费量的39%,其中用于生活的占81%。在农村消费的能源中,生物质能占84%,均用作生活燃料。这种原始的使用方式,反映了我国农村用能的落后状况。解决的途径应是因地制宜,开发多种能源,如沼气、太阳能、水能、风能等。

(5) 我国按人口平均的用能水平低,而浪费大,能源利用率低 1979年我国生产了6.3亿t煤炭,1亿多t石油,145亿m³天然气,除少量出口之外,均为国内生产和生活所消费,折合5.87亿t标准煤。就消费的绝对量而言,仅次于美国和苏联,居世界第三位。但由于我国人口众多,按人口平均所占有的能源数量只有600kg,为美国的1/20,苏联的1/11,相当于世界平均水平的1/4。我国能源消费量比日本还多一些,但日本的钢产量为1亿多吨,是我国的3倍;生产电力4000多亿kW·h,是我国的1.6倍;此外,还供应2600万辆汽车的用油,满足了1亿多人口现代化生活对能源的需要。这充分说明我国能源利用率低,用能浪费大,有巨大的节能潜力。

由以上所述可知,为了实现现代化,逐步提高人民生活水平,必须加快开发能源,同时还必须节约能源,以满足需要。国家正是根据我国具体的能源状况,制定了现阶段的能源方针:“开发和节约并重,近期把节约放在优先地位,对国民经济实行以节能为中心的技术改造和结构改革。”这是能源工作各领域必须遵循的准绳,近年来的节能工作实践也充分证明了这一方针的正确性。

§ 1-2 热能、热能动力生产对国民经济的意义

热能、热能动力生产对国民经济具有极大的意义。这可从以下诸方面看出。

一、电能和热能使用的广泛性

能量是发展生产和改善生活的重要基础。现代生产和生活中消耗着各种能量，但其中使用最广泛、耗量最大的是电能和热能。

电能在各种能源中占有特殊地位，因为它具有一系列无可比拟的优越性。电能可以在损耗很小的情况下高压输送很远的距离；电能又可极方便地分配到任意多的大小用户中去；用户还可借助各种电机和电器，以高效率把电能转变为工业、农业和生活等需要的其他形式的能量；此外，电能又是一种清洁型能源。总之，电能不愧为一种万能的高级能。它已成为国民经济和人民生活中须臾不可离开的东西。

电能应用的广泛性表明了电力生产的重要性。众所周知，电力按其生产方式而言有水电和火电两种，但水电在我国电能生产总量中仅占 16% 左右，火电占了我国电力中的绝大部分。而火电基本上是从热能动力转换而来，可见热能动力的生产实际上体现了电力生产，其重要性就不言而喻了。

热能是生产和生活中消耗量最大的一种能，它的应用也极为广泛。许多工业部门，特别是化工、纺织、造纸、石油、制糖、食品、玻璃等的生产都是以蒸汽的供应为先决条件。人民生活中诸如采暖、热水和蒸汽等的用热则更为广泛和不可缺少。另外，如上所述，热能中还有相当一部分用于转换成动力，以供生产电力之用。

二、热能、热能动力生产的可靠性对国民经济的影响

热能和热能动力生产对生产和人民生活的影响，往往是不能仅用它们本身的价值来衡量的，再考虑到热能，特别是电能的难于储存，决定了热能和热能动力的生产必须连续，而不容许间断。可以说热能和热能动力生产的可靠性就是最大的经济性。例如一台 30 万 kW 发电机组如因事故停运一天，就少发电 720 万 kW·h，但其损失不仅是少发电本身，更大的的是间接影响到工农业生产。若计及后一损失，所造成的总损失将超过 3000 万元。这就是说，停运几天所造成的损失就相当于建设电厂的总投资，何况现代大容量锅炉启停一次所多消耗的费用也是相当可观的。此外，电力生产的突然中断有时还会引起设备事故，例如电炉炼钢一旦停电就会立即危及电炉设备的安全，从而造成更大的损失。热能供应中断危害之大也是毋庸置疑的，对于那些以蒸汽的连续供应为其生产必要条件的工厂来说，蒸汽停供就不能生产，所以这类工厂往往把锅炉设备看成是整个工厂的“命根子”。至于电能和热能的中断对生活的影响那就更是不言而喻了。

三、热能、热能动力生产中的节能潜力

热能和热能动力的生产需要消费大量的能源。全国仅工业锅炉、电厂锅炉和工业炉三种设备每年就要消耗我国原煤产量的 50% 和相当数量的石油。而且工业锅炉，特别是工业炉的热效率比较低，存在着严重浪费能源的现象。因此，在节约能源方面有着广泛的可能性和很大的潜力。另一方面，从我国能源情况来看，虽然所拥有的能源资源比较丰富，但我国人口众多，因此按人口平均计算的能源资源并不富裕。尤其目前我国能源生产的发展速度还跟不上生产的增长速度，国民经济今后能否保持较快的增长速度、能否出现一个新的发展局面，在很大程度上取决于能源问题能否得到恰当的解决。所以，作为最大能源消耗者的热能和热能动力的生产，在其扩大生产的同时，应不断地提高生产的热效率、有效地节省能源，这将对我国国民经济的发展具有特殊重要的意义。

四、热能、热能动力生产中的环境保护问题

由于我国能源资源的构成是以煤为主，而煤炭与石油、天然气相比，其品质较差，废料也较多。因此，在热能和热能动力的生产中存在着较为严重的大气污染问题。事实表明，各种锅炉，特别是小型工业锅炉是最大的大气污染源，是环保工作的重点对象。由此可见，切实搞好热能和热能动力生产中的环境保护工作是一项十分重要的任务。

§ 1-3 热能的合理利用

一、能量的品质与热能的品位

在工程技术和日常生活中，能量大致分为五大类，即贮藏能（燃料的化学能和核能）、机械能、电能、热能和量子能（光能、声能）。从能量的转换和利用的角度来看，各种能量有着“质”的差别，即有高级和低级之分。贮藏能、机械能和电能从理论上讲可以互相地、可逆地全部转换，称为高级能量。从本质上说，高级能量是完全有序运动的能量，可不受限制地完全转变为功，因而它的数量和质量是统一的。相反，热能是分子热运动所形成的不规则能，它不能全部转换为有用功。所以热能是一种较为低级的能量。从热变功的角度来看，热能本身还有质的特征，或者说本身具有品位的高低。根据热力学第二定律，热转功最大份额为：

$$\Phi = \left(1 - \frac{T_h}{T} \right) = \eta. \quad (1-1)$$

式中 T_h ——环境温度；

T ——工质获得热量时的温度。

Φ 是表征热能品位（质量）特性的因子，可称为热能的能级，也可称为能质率。它在数量上等于此温度区间的卡诺循环的效率。显然，对于高级能来说， $\Phi = 1$ 。

所谓焓就是指某一能量在给定环境条件下所能完成（或转换）的最大功。按照这个定义，稳定状态下载热工质的热量焓可按下式计算：

$$I_e = Q \left(1 - \frac{T_h}{T} \right) = Q - T_h \frac{Q}{T} = i - i_h - T_h (S - S_h) \quad (1-2)$$

式中 i 、 S ——给定状态下的焓和熵；

i_h 、 S_h ——环境温度 T_h 下的焓和熵。

电能、机械能和热能是工程技术和日常生活中常见的能量形式。它们多是由贮藏能转换而来的。所谓供能最佳化就是指贮藏能得到最大限度的利用。贮藏能不经过热能阶段而变成电能或机械能，以达到有效地利用，称为能量的直接转换，如燃料电池那样。这是现今世界上一项被着重研究的课题。遗憾的是在当今的工程技术中，作为产生动力的能还不得不经过低级能——热能的阶段。这就不可避免地导致转换效率的低下。与此同时，供能最佳化的问题在很大程度上就转化为合理利用热能的问题。

二、热能的分级利用原理

理论和实践表明，热能的可用性和使用价值是由其质量或品位决定的。很明显，从热功转换的角度来看，当热能的品位降低到环境状态时，不管其数量多大，就不可能再利用了。从另一方面看，由于热能在实际的转换、传递和使用过程中总是有这样或那样的不可逆因素

存在,通常凡是有热现象发生的过程,例如燃料的燃烧、化学反应、在有温差情况下换热、介质节流降压,以及有摩擦的流动等都是典型的不可逆过程,这都要引起焓值下降,造成焓值损失,因此,热能品质的降低是不可避免的。为了达到热能在数量上的高利用效率,就必须尽可能提高生产热能的能级,并在使用过程中最大限度地减小级降。可以说过程中热能的级降 $\Delta\phi$ 的大小是热能利用的合理性的标志。显然,级降越大,说明热能的利用过程越不合理;反之亦然。为了使供热系统中各用能过程、环节、设备或系统的热能级降减低到最低限度,应采取的关键措施是热能的分级利用。所谓热能的分级利用,就是热能按质、逐级、匹配使用,亦即高质能高级用,中质能中级用,低质能低级用。做到能尽其质,热尽其用。

热能分级利用这一热力学原理在实施上可有如下一些原则:

(1) 提高生产热能的能级 这就要求提高燃烧和化学反应过程的温度,减小工质换热的温差等。当然,这样做主要受到材料耐热性能的限制。

(2) 先转功后用热 如热电联产,即是利用燃料燃烧所形成的高温,产生较高参数的蒸汽,先把它用来生产高级能——发电,然后将用后的低参数乏汽用来供热。

(3) 按质用热 亦即根据生产工艺等实际需要的能级,供给相应品位的热能。做到:能用低压蒸汽就不用高压蒸汽;能用饱和蒸汽就不用过热蒸汽;能用废热或余热加热的就不用新鲜蒸汽等热源加热。

(4) 有效热能的重复利用 有效热能是指为了达到某工艺要求时理论上所必需消耗的热能。但有些已经利用过的热能,特别是品位较高的、清洁的热能还可在能级递降的其他用途中逐级、重复、多次利用。如作为有效热量的高温钢材、赤焦、蒸汽、热水、物料等带出热量的再利用,都属于有效热能的重复利用。

(5) 余热利用 即利用过程中所损失的热量去预热燃料、空气和物料、干燥物品、加热水、生产蒸汽、供应热水等低级用途。

三、技术经济与社会效益的评价

热能利用要以一系列的物质条件为基础,而系统的热力学完善性和技术、经济性,以及社会效益之间不总是一致的。因此,必须对热能利用系统进行技术经济和社会效益的评价,使之在技术上是可行的,在经济上是合理的,同时又是能为社会所接受的。正确评价热能利用方案的合理性是一项比较复杂的工作。在确定热力学上的效应,即明确减少焓损失的理论根据的前题下,首先要考虑技术上是否有实现的可能。如果有此可能,就要进一步研究需要哪些物质条件,付出多少经济代价,然后将此与提高焓效率所带来的经济效益进行综合分析比较,从而得到比较合理的热能利用方案。最后还需考察本方案对社会的影响,例如它是否符合环境保护的要求,包括对环境热污染、噪声的影响程度等。应当指出,在评价中经济分析通常总是主要的。因较多的情况是,为了提高系统的热力学完善性,需要对系统作较多的技术改造,更换或改进较多的设备,甚至要改变工艺流程,从而过多地增加了基建投资和运行费用,造成经济上的不合理。这种现象在我国目前燃料与钢材、设备比价较低的情况下更容易发生。

经济分析的计算方法种类繁多,原则上可分为静态计算方法和动态计算方法两类。动态计算方法与静态计算方法的主要区别是考虑投资资金的时间因素,即考虑资金的增值,具体计算时,就是计及资金的利息。过去,由于我国的基建投资,包括节能投资都由国家无偿拨款。使用单位既不付息,也不还本。因此,在计算投资经济效果时多用静态方法。但这就不

能完全地反映投资的真正效果。目前,基建投资多已从拨款改为贷款。使用单位既要付息,更要还本。因而在计算节能经济效果时,理应采用动态计算方法。

在节能评价中最常使用的是“投资回收年限法”,并以“年节吨煤净增投资”作为节能投资的经济界限。

(一) 投资回收年限法

1. 静态算法

$$\tau = \frac{K}{S}$$

式中 τ ——投资回收年限;

K ——投资数额;

S ——年净收益。

这样求出的投资回收年限称为绝对投资回收年限。其涵义是,所化的投资要经过多少年才能依靠企业新增的利润全部得到回收。如果 τ 小于或等于国家规定的标准偿还年限 τ_0 , 则认为该热能利用方案在经济上是合理的。在我国, τ_0 一般定为 5 年。

在两个热能利用方案中选择其中较佳者时,应计算投资的相对回收年限,它的计算公式为:

$$\tau = \frac{K_2 - K_1}{S_2 - S_1}$$

它的涵义是,一个方案多增加的投资,要经过多少年才能从多增加的利润额(或从多节约的成本费用)中全部回收回来。这种评价两个方案之间经济效果的补充投资的回收年限称为相对回收年限。

2. 动态算法

利用动态方法计算时,必需考虑投资和净收益的增值,一般可采用复利公式。

增值后的投资总额为:

$$K_E = K(1+i)^{\tau}$$

式中 K_E —— τ 年后投资总额;

K ——第 0 年的投资金额;

τ ——投资使用的年数;

i ——投资年利率。

贴现到 τ 年时的全部净收益按多项复利公式计算:

$$\begin{aligned} S_E &= S(1+i)^{\tau-1} + S(1+i)^{\tau-2} + \cdots + S(1+i) + S \\ &= S \left[\frac{(1+i)^{\tau} - 1}{(1+i) - 1} \right] \\ &= S \left[\frac{(1+i)^{\tau} - 1}{i} \right] \end{aligned}$$

若投资回收年限为 τ , 则必有

$$K_E - S_E = 0$$

或

$$K(1+i)^{\tau} - S \left[\frac{(1+i)^{\tau} - 1}{i} \right] = 0.$$

解上式即可得投资回收年限为

$$\tau = \frac{\lg \frac{S}{S-K}}{\lg(1+i)}$$

以上公式是假定投资 K 一次完成。如果投资逐年分配，则贴现到 τ 年时的全部投资可按下述多项复利公式计算：

$$K_{\Sigma} = K_1(1+i)^{\tau-1} + K_2(1+i)^{\tau-2} + \cdots + K_{\tau-1}(1+i) + K_{\tau}$$

式中 $K_1 \cdots K_{\tau}$ ——逐年的投资额。

投资回收年限法的有效性在很大程度上取决于能源与热能利用系统所消耗的各种材料、物资、设备等的价格比的合理性。显然，如果能源的价格过低，而各种材料、物资、设备等的价格过高，那就可能使一些合理的热能利用系统无法得以实现。

(二) 年节吨煤净增投资

这一指标是节能投资的经济界限。它的涵义是，当节能系统或设备每节约一吨煤所净增的投资不超过全国平均开采一吨煤所耗费的投资时，该节能措施即被认为是合理的。由于这不是从企业偿还贷款的角度出发，而是从国民经济的全局考虑，将节能和开发进行比较，因此节能投资被允许的经济界限就要宽些。应当指出，尽管这是从国家有限资金的合理分配使用这一点出发的，也就是量国家现有经济实力而行的，因而无疑是可行的，但是从减少国家能源资源消耗这一国家长远利益来看，节能和煤矿开发这两方面仍然是有所不同的，同时，节能与煤矿的开发相比，在时间的耗费和现实条件的具备方面都要优越得多。因此，“近期应把节能放在优先的地位”。这就是说，年节吨煤净增投资这一指标对节能的限制是不会过宽的。

开发一吨标准煤的总投资包括开采的投资和运输及供应方面的投资，考虑到节能建设周期与开发建设周期不同所造成的利税的差别，节能被允许的经济界限为：

$$[K] = (K_1 + K_2) \frac{(1+r)^{n_2}}{(1+r)^{n_1}} \times 1.4$$

式中 K_1 ——全国平均每开采一吨原煤的投资；

K_2 ——全国平均每运输和供应一吨原煤的投资；

r ——全国平均的资金创利税率，目前约为 0.18；

n_1 ——节能建设周期，一般 $n_1 \leq 1$ 年；

n_2 ——开发建设周期，一般 $n_2 \geq 5$ 年；

1.4——原煤和标准煤的换算率。

根据 30 年的统计资料，全国平均每开采一吨原煤的投资为 100 元，运输和供应方面的投资为 60 元。

将有关数字代入上式，得 $[K] \approx 400$ 元左右。这就是说，从理论上讲，每节约一吨标准煤的投资，只要小于这一数值都是合理的。

应当指出，过去单纯用投资回收年限的长短作为衡量节能方案优劣的指标，现在看来这

是不甚适当的。因为投资回收年限未考虑到设备的使用年限或寿命，这就可能导致投资大、投资回收年限长，但使用年限长、节煤量多、净利润大的方案被投资少、投资回收年限短，但节煤少、净利润小的方案所淘汰。年节吨煤净增投资这一指标弥补了这方面的缺陷。对于投资回收年限和年节吨煤净增投资两个指标都不超过国家规定的方案，应选择其中节煤量多和净利润大者。

还应指出，在评价热能利用方案的合理性时，还应考虑到社会效益，即非经济因素。对其社会效益（例如环保）的要求较高的项目，经济方面的要求可以有所降低。

第二章 热能利用系统与设备构成

热能的合理利用是通过热能利用系统及其设备来实现的。热能利用系统应满足一系列要求：

(1) 必须满足消费者的需求 包括用户对热、电在数量和质量上的要求，而且要考虑热、电负荷的变化特点，务使能量系统安全可靠、保质保量地满足消费者的需求。

(2) 应为节能创造条件 这就是说在系统的设计中应尽可能实行热能分级利用和综合利用的原则。

(3) 系统的操作、管理应是简单易行的 在达到特定目标的前提下，力求系统及其组件在空间和时间方面配合协调，形成一个紧凑而简捷的整体，以提高操作控制的灵活性，并降低其自身的能耗。

(4) 满足环保要求 在拟定热能利用系统的过程中，必须结合具体情况，务使系统满足环保要求。

(5) 经济上的合理性在任何情况下都是必须满足的 正是为了达到这一要求，一些节能方案难以得到实现。

总之，合理的热能利用系统，应在满足预定目标的条件下，保证经济上合理，安全可靠和环保许可，并力求技术上先进。

为了满足上述要求，热能利用系统应该有合理的规划。为此，必须做好如下工作：

(1) 合理选择能源 从我国能源资源的特点来看，在今后较长时期内，仍将以煤炭为主。所以广大产煤地区应选用地方煤尤其是当地低质煤作为能源。对于缺煤地区，一般亦应以用煤为主，但也可慎重选用燃料油作为系统主要的或辅助的能源。此外还应因地制宜地选用其他种能源如水能、太阳能、天然气、地热、生物能，乃至核能等。必要时应作出选用能源的技术经济论证。

(2) 查清各种负荷的特性，确定负荷的最大和最小值，以及供热参数，作为选择设备的类型、额定容量、工质参数等的依据。

(3) 在初步了解给定条件和规划目标的前提下，正确分析和理解热能利用过程中各环节的相互关系，拟订出热能转换和利用的流向图 这种图包括了自一次能源的输入起直至所有用户止的整个能量转换和利用流程。它将成为规划热能系统的指导性框图。

(4) 拟定本任务所要求的热能利用主系统和辅助系统 在拟定过程中，应以系统框图为基础，参考已有的典型热能利用系统，经过分析、评价，逐步加以确定。

§ 2-1 电力用户及其特性

电厂在每一瞬间所承担发出的电功率称为电厂的电力负荷。由于电能这种工业产品不能储存备用，因此在每一瞬间，电厂应该根据用户的需要生产出相应数量的电力，不能多也不能少，多了用不出去，少了不能满足用户的需要。换句话说，发电厂在生产过程中所发出的

电力要永远等于那一瞬间外界所需的电能。因为所有电力用户的工作情况是在不断变化着的, 这样电厂的电力负荷也就随时在相应地变化。为了使电厂能够总是可靠而经济地工作, 重要的是相当准确地预先获知电厂的每一时刻的电力负荷, 以便在电厂的设计、建造和运行时作为基本依据而得到考虑。既然电厂的电力负荷决定于电力用户, 因此研究各类用户的用电情况就成为估计电力负荷的必要步骤。

一、工业负荷

工业负荷在任何电力系统中都是最主要的负荷。其一般特性如下:

1) 工业负荷的昼夜分布不仅决定于工业用户的工作制度, 而且用户的种类及其特性也有极大的影响。显然, 如果各工业企业均按一班制工作, 高峰负荷互相重叠, 全日负荷曲线图必然表现出很大的波动; 相反, 若许多企业按两班制或三班制进行生产, 高峰负荷不在同一时间出现, 负荷变化也就比较和缓。同时, 研究电力系统的负荷情况时, 不仅要研究整个的工业负荷, 而且还应当研究个别工业部门的负荷情况, 以掌握工业负荷的变化规律。

2) 凡是工业负荷比重大的任何电力系统, 其工业负荷综合曲线的特点是在一昼夜内负荷比较均匀, 仅在第一批午间的 12~14 时内因为午饭休息的缘故, 负荷有些降低; 另外, 在节假日的负荷也较低。

3) 夏季的工业负荷较冬季略低, 其原因是工业的照明负荷降低。不过在有季节性负荷(如建筑业、制糖工业等)的系统内, 夏季工业负荷也可能比冬季为高。

4) 工业负荷最低的时间为非工作时间。因而在早晨 6、7 时出现负荷突然上升, 到 8 时左右达到最高值; 中午负荷几乎直线下降, 午后 1 时后负荷再行上升, 午后高峰一般较上午高峰为低。

图2-1所示的为正常的工业负荷日负荷曲线。

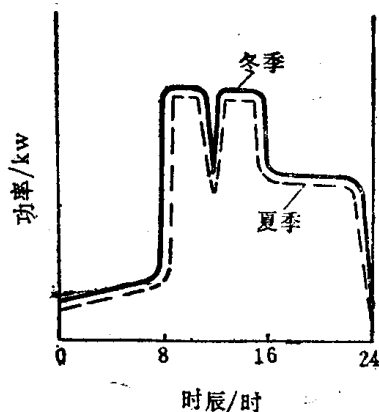


图2-1 工业负荷日负荷曲线

二、农业负荷

农业负荷的特性与中型工业负荷相似, 但有如下不同点:

1) 农业用户开始用电及负荷增加的时间比工业负荷略早(约在 5~6 时), 但同样在 10~11 时为午休时间, 负荷降低。

2) 农业在夏秋两季要进行灌溉、收割、打磨等作业, 因此负荷要比冬季高一些。

三、交通运输负荷及公共事业负荷

这两种用户的负荷在整个系统的总负荷中所占比重不大, 因而其影响也不大。

交通运输负荷包括: 电车、地下电车、电气机车等。

公共事业负荷包括上、下水道用电等。

四、生活照明负荷

生活照明负荷包括单纯照明及市民的电热用电等。至于工业照明用电的负荷则计入工业用电负荷内。生活照明负荷的一般特性为:

1) 在一昼夜内负荷分布极不均匀, 而且冬夏两季的负荷曲线, 也有很大的差别。

2) 冬季照明负荷曲线上通常有早晨和晚上的两个尖峰; 但在夏季则只有晚上的一个尖峰, 并且比冬季要小得多, 在发生的时间上也要晚一些。

3) 在一般系统内, 生活照明用电约为全部用电的20%以上; 而在最高负荷的时间内, 其所占的百分数还要高一些。因此照明负荷对于系统的综合负荷曲线有决定性的意义, 特别是在形成早晨(冬季里)和晚间的最高负荷时。

图2-2所示的为生活照明负荷日负荷曲线。

在以上所述的几种负荷中, 工业负荷及生活照明负荷是电力系统的主要负荷, 它们在电力系统的用户中占(80~90)%, 甚至更多。因此, 无论在编制计划的系统负荷曲线, 或是为了平复负荷而拟定各种调整办法时, 注意到工业和生活照明这两种主要用户负荷的相互关系是极为重要的。

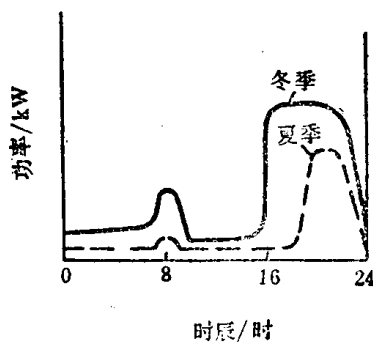


图2-2 生活照明日负荷曲线

五、发电厂的电力负荷曲线及其调整

一个孤立运行的发电厂的总电负荷或一个电力系统中并列运行的一组发电厂的总负荷等于所有电力用户负荷的总和。但是发电厂全天每小时实际所发出的电力还应该包括输电损失和电厂自用电量, 这部分电能消耗量约等于输出电能量的(10~15)%。

1. 电力负荷曲线

发电厂在某一时期内电力负荷的变化可用负荷曲线来表示。发电厂的代表性电负荷曲线可分为全日负荷曲线、全年负荷曲线及全年负荷持续时间曲线。

(1) 全日负荷曲线

工业区的全日电力负荷曲线的形式主要是由工业与生活照明负荷曲线的形式来决定。这就是说把图2-1和图2-2相加, 就基本上可以得到一份一般性的全日电力负荷曲线图。图2-3所示的是发电厂全日电力负荷构成的曲线图。应当指出, 这种曲线图是与季节有关的。显然, 冬季和夏季会有最大的差别。

(2) 全年负荷曲线

它是按照一年的月份来标绘的全年负荷的分布曲线。在

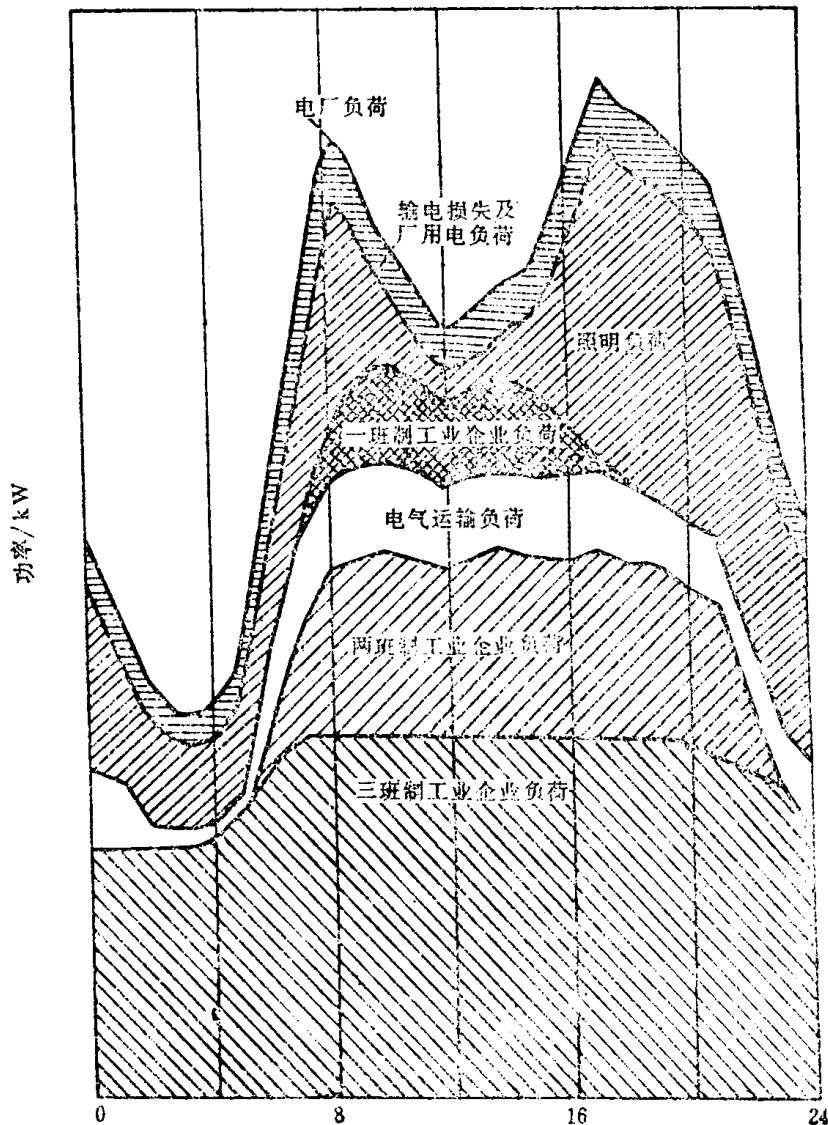


图2-3 全日电力负荷构成曲线图

全年负荷曲线上可以表示出最大、平均和最小负荷的数值曲线。平均（每月平均）负荷曲线以下的面积确定了发电厂全年发出的电量。全年最大电力负荷曲线通常用以决定电力用户在一年中不同季节内所需的最大用电量，又可用以拟订设备检修计划。

（3）全年负荷持续时间曲线 表示着全年各负荷的全部持续小时。其纵坐标表示负荷数值，横坐标表示全年各负荷的持续小时，从零到一年的全部持续小时数，即8760小时。全年负荷持续时间曲线以下的面积就是全年发出的电量，它与发电厂的蒸汽消耗量或煤耗量基本上成正比。所以全年负荷持续时间曲线不仅绘出了全年期间发电厂可能的工作情况，而且还能够用来选择最合理的各个机组的容量，以及计算全年蒸汽及燃料消耗量等。

从全日负荷曲线（图2-3）可知，全日负荷的分布是相当不均匀的。显然，设法降低综合的最大需要功率对于提高发电厂设备利用率、改善发电厂的经济性具有十分重要的意义。通过实施一些组织措施，以调整用户的工作时间，就可以大大地降低综合的最大负荷，这就是电力负荷的调整。下面择要引述几种调整负荷的可能措施。

2. 负荷调整措施

1) 将非整天生产的企业或其个别车间的工作时间移到发电厂负荷最低的时间内，例如可以让自来水厂的水泵在夜间工作。

2) 错开不同企业上下班的时间，可使全日负荷曲线有某些改善。因为在交接班时电力需要会有所下降，同时间进行交接班将会加剧日间和夜间负荷的低落。

3) 错开不同机关的上下班时间也可以改善电厂的负荷曲线。因为同时间上下班会导致城市交通电力负荷的大幅度增加。

4) 为了提高电力系统负荷曲线的均衡性，必要时可错开各个企业的厂休日。

5) 推行奖励性的电费制度，即按较低廉的价格出售夜间的电量，也可促使负荷曲线平缓化。

6) 将几个发电厂联成一个电力系统，可以改善个别电厂的负荷曲线。因为用户数目的增加会减少各用户最大需要功率同时发生的可能性，从而降低了综合的最大负荷。同时，由于电力系统发电设备增多，同时发生故障的可能性减小，因此可以减小全系统的公共备用容量，加大了设备容量的利用系数。

§ 2-2 热力用户及其特性

与电能相仿，热能这种工业产品也是难以储存备用的。因此，在每一瞬间，供热系统所生产的热量要基本上等于那一瞬间外界所需的热能。为了合理地拟订供热方案、选择供热设备、计算输热管直径，以及为了确定合理的运行方式和进行供热调节，就必须较详细地了解供热系统的热力用户及其特性。所以供热系统的热负荷及其特性是供热工作的重要基础资料。

供热系统的热力用户包括供暖、通风、生产及生活用热等四类。前两类属于季节性热力用户，它们随室外空气温度、湿度、风向、风速和太阳辐射等气象条件而变化。后两类属于全年性热力用户，主要决定于用热设备的数量、使用人数、使用状况、生产过程、生产量及工作制度等因素，而与室外气象条件关系不大。

一、供暖热负荷

供暖热负荷就是供热系统向住户、机关及生产厂房供暖所需的热力负荷。这种热负荷有如下特征：

1) 一天中的热消耗很均衡，而在一年中的变化极大。一年内，采暖的热耗量从零（夏季）至最大（在十二月到一月），在一年中最冷的几天达到最大值；而在一昼夜间的采暖热耗量几乎不变。

2) 这种热负荷与当地气候条件（尤其是室外温度）和建筑物的性质、用途有关。

我国采暖地区主要在东北、西北和华北；而东北寒冷地区的采暖热耗要比温带地区大得多。对于建筑物的性质而言，有良好绝热的建筑物当然要比普通建筑物所需的热耗量小得多。

建筑物采暖用的热负荷即在一定室温下的热量损失。供暖热负荷是根据冬季供暖房间的热平衡算出的。它主要等于：门、窗、墙、地板、屋顶等房间的各部围护结构由于房间内、外空气温度差而从室内传到室外的热量；由门窗缝隙及门、孔洞等处渗入室内的冷空气的耗热量；以及通过其他途径散失的热量等相加的总和，减去热管道、照明设备、人体、热物料等的散热量。

供暖热负荷的概算，一般采用热指标的方法。根据建筑物的性质和外围体积按下式决定：

$$Q_N = q_v V_w (t_n - t_w) \quad (2-1)$$

式中 Q_N ——建筑物的供热负荷；

q_v ——建筑物的供暖热指标，系指各类建筑物在室内外温差 1°C 时，每 m^3 建筑物体积的供暖热负荷；

V_w ——建筑物的外围体积；

t_n ——供暖室内计算温度；

t_w ——供暖室外计算温度。

q_v 值与建筑物的性质，即其建造用材、墙壁厚度、窗户面积等有关。大多数永久性建筑物的 q_v 值在 $0.20 \sim 0.70 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。在概算新建区的热耗量时，可以建议采用下列供暖热指标值：

生产用工业建筑物 $q_v = 0.50 \sim 0.80$ ；

非生产用工业建筑物 $q_v = 0.40$ ；

住宅和公共建筑物 $q_v = 0.35$ 。

室内计算温度 t_n 根据供暖建筑物的用途来规定：生产厂房一般取 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ ；住宅及公共建筑物为 $16 \sim 20^\circ\text{C}$ 。

室外计算温度 t_w 的确定是一项重要而复杂的工作。因为它在相当程度上决定了建筑物在采暖中不稳定传热过程的散热量，而当地的室外温度在整个采暖期内无论在每日、每月，或是每年都是变化的。室外计算温度应该能够足够准确地确定建筑物的散热量。为此，就必须根据建筑热物理学所揭露出的围护结构向外传热量与结构本身的性质及外温波动情况之间规律性的联系，通过适当的方法对当地外温进行一定时期的统计，然后以实用的形式确定其计算值。室外计算温度 t_w 我国目前规范规定为：“历年平均每年不保 5 天的日平均温度”。这是指采用的温度是 20 年的统计期间里每年可有 5 天，或总共可有 100 天的实际日平均气温低