

热力发动机优化设计

王 丰 著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内 容 简 介

本书是作者根据自己多年来科研成果撰写而成的专著。全书的内容可概括为四部分：第一部分采用作者所拟定的方法，对各种理想循环进行了优化分析，导出了计算各种热力发动机循环最佳性能参数和最经济性能参数的计算公式，并给出了计算结果；第二部分讨论了燃气轮机动力装置各个部件的效率，以及工质的热力学参数对其比功和热效率的影响；第三部分对各种新型燃气轮机装置的实际循环用计算机进行了优化分析，并研究了大气温度、回热度、喷水（或蒸汽）量等因素对动力装置的性能参数影响；第四部分对21世纪将要大量采用的涡轮动力装置，即核燃料的氦气轮机、氢燃料的燃气轮机、燃煤燃气轮机及其总能系统进行了探讨。从理论观点来看，本书是对理想循环基础理论进一步的深化和完善，而从工程实践角度来说，它把热力学的循环理论与实际涡轮动力装置的优化设计更好地结合了起来。书中的研究成果无论对新机的优化设计，还是对现有燃气轮机的技术改造都具有指导意义。

本书对从事各种热力发动机的工程技术人员将有所裨益，同时对热能工程和工程热物理专业的大学生和研究生，亦将是一本好的教材。

热力发动机优化设计

王 丰 著

责任编辑 阎瑞琪

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路23号）

（邮政编码 100044）

新华书店经售

北京市飞龙印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 印张 14⁵/₄ 332 千字

1993年 9月第一版 1993年 9月第1次印刷 印数：0001—2000册

ISBN 7-118-01100-2/V·92 定价：12.80元

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书，在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第一届评审委员会组成人员

主任委员：邓佑生

副主任委员：金朱德 太史瑞

委 员：尤子平 朵英贤 刘琯德

(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

基本符号说明

p	压力	η_T	涡轮效率
T	温度	ξ_c	燃烧效率
v	比容	σ	总压恢复系数
c_p	等压比热容	K	能量利用系数
c_v	等容比热容	g_l	油-气比
k	绝热指数或传热系数	g_v	喷汽量 (蒸汽量与空气量之比)
h	比焓	g_w	喷水量 (喷水量与空气量之比)
s	比熵	f	回热度
H_u	热值	π_c	增压比
q	加热量	π_T	膨胀比
W	循环功	r	汽化潜热
η_t	热效率	G	气体的流量
η_c	压气机效率	F	总传热面积

下角标

max	极大值	T	涡轮
min	极小值	a	空气
opt	最佳值	g	燃气
eco	最经济值	v	蒸汽
lim	极限值	R	回热器或反应堆
C	压气机或燃烧室	in	进口
cr	临界值	out	出口

序 言

科学家们把那些曾经引起人类社会生活巨大变革的科技成就，作为划分工业革命历史不同阶段的主要标志。国外一些人士认为人类正面临着“第四次产业革命”（也有人把它称为人类文明的“第三次浪潮”），关于前三次产业革命如何划分，目前还没有统一的定论，但比较流行的看法是：第一次产业革命出现在18世纪，这场革命使当时的工业从工场手工业发展到大规模的机器生产，这个历史阶段的典型事件是纺织机械和蒸汽机的出现。1784年英国人瓦特在吸收了前人研究成果的基础上，制成了能长期可靠工作的蒸汽机，从此它就成为这个时期内工业用的主要动力机械。第二次产业革命始于19世纪初叶，其科技成果主要以电力、钢铁工业和铁路交通为代表，由于在第一次产业革命之后大量采用了蒸汽机和内燃机作为纺织机械、矿山机械和各种工具机的动力源，因此极大地促进了冶金工业、铁路和水上交通事业的发展。20世纪上半叶原子能、航空、化工和汽车等新型工业的出现，是第三次产业革命时期的主要标志。

从上述事实可以看出，蒸汽机、活塞式内燃机、原子能、电力以及作为飞机心脏的各种涡轮喷气发动机的发明，都是工业革命史上具有划时代意义的事件。

在当今社会里，各种热力发动机已成为向人类提供动力的主要工具，它们对人类社会的发展起着举足轻重的作用。例如：在农业和林业方面，无论是在田野里工作的拖拉机、收割机，还是在森林里工作的伐木机械；在交通运输业方面，在陆地上奔驰的火车和汽车，行驶在江、海、河、湖中的各种船舶，以及航行在蓝天中的飞机；在煤炭、石油工业方面，为地质钻探、矿山采掘，以及石油、天然气的采集和输送时所用的各种机械；在动力和机械制造工业方面，各种大、中、小型火力发电厂，以及机械加工过程中所使用的工具机等，无不都是以活塞式汽油机、柴油机、燃气轮机和蒸汽轮机为动力的。不仅在民用工业中，而且在国防建设中热力发动机也起着重要的作用，例如：陆军使用的坦克和战车；海军使用的潜艇、巡洋舰、驱逐舰和其他战舰；空军使用的侦察机、歼击机和轰炸机；特种兵种使用的各种导弹，以及用于探索宇宙奥秘的卫星和航天飞机，也都是采用不同型式的热力发动机作为它们的动力。

总之，无论从我国或世界范围来看，还是从现实或发展的观点来看，各种热动力装置的设计、制造都占有非常重要的地位。事实上，热力发动机已成为人类在改造大自然过程中最强有力的工具之一，它是保证人类高度物质文明生活的重要物质条件，全世界用于发电和各种运输动力机械的燃料，约占全部能耗的 $1/4$ 。因此，对各种热力发动机优化理论的研究，不仅在节约能源方面有巨大的经济价值，而且在国防建设中也具有重大的军事意义。

从减少燃料消耗量，也就是从降低热力发动机运行费用的角度来考虑，希望耗油率尽可能低些，而从减少热力发动机的体积和重量，或者说从降低制造费（节约原材料和加工费）的角度来说，要求比功尽可能大一些。总之，体积小、重量轻、热效率高是衡量各种热力发动机质量优劣的重要指标。

本书在研究方法和内容方面具有下列特点:

1. 理论密切联系实际。在分析理想循环时,采用了作者拟定的循环分析方法,它的特点是以优化思想为指导,用衡量热力发动机质量好坏的几个主要性能参数——最大循环功、最高热效率、最佳增压比、最经济增压比和对数平均温度差(对采用回热的机组)为准则,全面、系统地分析了各种热力发动机的理想循环,导出了计算循环功和热效率的公式,同时利用高等数学确定极大值的方法,求得了循环功为极大值时的最佳增压比,热效率为极大值时的最经济增压比,以及最大循环功和最高热效率的计算公式。

2. 进行了定量的分析。利用作者所导出的大量公式,计算了各种循环的最佳性能参数和最经济性能参数,并将计算结果用图线和表格的形式表达出来,通过分析对比,可以一目了然地看出各种热力发动机的优缺点和它们今后的发展方向。

3. 重视对热机工作过程物理本质的分析。本书导出了分别考虑各种压力损失、大气温度和工质的热力学性质等不同因素影响时,循环功和热效率等性能参数的计算公式,并计算了考虑这些影响后的最佳和最经济性能参数。根据这些计算结果,可以定量的看出上述各种因素对发动机性能参数的影响。显然,采用这种分析方法所得的结果,不仅可以更深入地了解热力发动机工作过程的物理本质,而且对如何抓住主要矛盾来改善热力发动机的性能具有指导意义。

4. 系统地研究了提高热力发动机性能的各种技术措施,并分析了它们的优缺点。本书对采用中间冷却、回热和再加热等这些可以显著地改善燃气轮机性能的技术措施所组成的复杂循环进行了优化分析,计算了这些复杂循环的最佳和最经济性能参数,根据计算结果可以看出这些技术措施的优缺点。

5. 对现有的以及目前正在研制的各种新型燃气轮机动力装置的实际循环进行了优化分析,反映了国内外近些年来燃气轮机发展的最新成果。本书对于全面考虑了各种因素影响的,按简单循环、回热循环和中间冷却-回热循环工作的涡轮动力装置进行了优化分析,计算了这些动力装置的最佳与最经济性能参数,并对计算结果从不同角度进行了综合评价。同时对国外近几年研制的新型燃气轮机组——回注蒸汽循环热电并供机组、蒸发-回热燃气轮机组,以及作者本人拟定的中间冷却蒸发-回热燃气轮机组进行了优化分析,详细地计算了回热度、注汽(或饱和水)量对最佳性能参数和最经济性能参数的影响。与此同时,对21世纪将大量采用的原子能氦气涡轮动力装置进行了深入研究。计算结果表明,这些新型燃气涡轮动力装置具有很大的循环功和很高的热效率,它们是燃气轮机工业今后发展的方向。

总之,本书深刻地揭示了各种热力发动机工作的基本规律,加深了人们对发动机工作过程物理本质的认识。介绍了提高燃气涡轮动力装置经济性的各种途径,为燃气轮机的发展方向提供了理论根据。这些研究成果无论对于新机的研制,还是对现有燃气轮机的技术改造均有参考价值。

由于篇幅的限制,本书对带回热的再加热实际循环、同时带中间冷却再加热-回热实际循环,燃气-蒸汽联合实际循环,以及各种涡轮喷气发动机实际循环未能予以介绍。

本书在编写过程力争做到:在体系上注重理论的系统性以及理论密切联系实际;在基本理论的叙述上深入浅出,并着重从物理概念上说明事物的本质。全书的内容尽可能

反映燃气轮机动力装置的最新研究成果，在内容的组织安排上注意各部分内容的相互联系和有层次的发展。通过了解对各种热力发动机实际循环的分析，希望能使读者学到一些具有创造性的探讨方法。这些研究方法虽然是在研究热力发动机循环时使用的，但在处理其他科技问题时也仍将有参考意义。作者希望本书的出版能对我国动力机械的发展，对各种热力发动机的节能工作，以及在人材的培养等方面有所裨益。

当今世界正处在技术和经济激烈竞争的时代，我国的动力机械工业正面临着严峻的形势，即处在机遇与挑战并存，困难与发展同在的情况下，看准方向、把握时机作出正确的决策，是我国燃气轮机工业能否占领国内市场和走向世界的关键步骤。

《热力发动机优化设计》是根据作者长期的研究成果撰写而成的，本书第二章和第四章的某些内容曾作为《发动机热力学》一书的部分内容出版，该专著曾受到我国一些著名学者和部分读者的好评，并获得 1982 年全国优秀科技图书纪念奖，同时还参加了 1985 年法兰克福国际书展。本书与《发动机热力学》一书在编写和出版过程中，得到了原北京航空学院院长曹传钧教授、教务长王绍曾教授、航空航天工业部科技委员吴大观教授、北京理工大学谢焕章教授、西北工业大学朱长青教授以及南京航空学院郑际睿教授等学者的热情指导和大力支持，作者在此表示衷心感谢。

作者还要特别感谢学部委员、清华大学王补宣教授给予的具体指导和大力支持。

最后作者还要对我的研究生叶磊、刘志伟等同志为本书完成的大量计算工作表示衷心感谢。

限于作者的水平，书中不妥之处恳请读者不吝指正。来信请寄北京航空航天大学四零二教研室。

作者

1991年8月于北京

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 能源	1
§ 1-2 水资源	3
§ 1-3 环境污染	4
§ 1-4 节约能源	9
第二章 简单燃气轮机理想循环的优化分析	10
§ 2-1 概述	10
§ 2-2 热力发动机工作原理及其研究方法	10
§ 2-3 卡诺循环的简述	12
§ 2-4 等压加热燃气轮机的理想循环	14
§ 2-5 等容加热燃气轮机的理想循环	21
第三章 各种因素对燃气轮机性能参数的影响	27
§ 3-1 概述	27
§ 3-2 压气机效率对燃气轮机性能参数的影响	28
§ 3-3 涡轮效率对燃气轮机性能参数的影响	30
§ 3-4 总压损失对燃气轮机性能参数的影响	32
§ 3-5 工质最高温度对燃气轮机性能参数的影响	35
§ 3-6 大气温度对燃气轮机性能参数的影响	38
§ 3-7 工质的热力学参数对燃气轮机性能参数的影响	40
§ 3-8 实际循环与理想循环性能参数的比较	42
第四章 各种复杂燃气轮机理想循环的优化分析	45
§ 4-1 概述	45
§ 4-2 提高燃气轮机性能参数的几种技术措施	45
§ 4-3 带中间冷却器的燃气轮机理想循环的优化分析	49
§ 4-4 两级膨胀级间再加热燃气轮机理想循环的优化分析	54
§ 4-5 带回热燃气轮机理想循环的优化分析	63
§ 4-6 中间冷却-回热燃气轮机理想循环的优化分析	71
§ 4-7 再加热-回热燃气轮机理想循环的优化分析	75
§ 4-8 中间冷却-再加热-回热燃气轮机理想循环的优化分析	79
§ 4-9 各种回热循环优缺点的分析对比	84
第五章 几种燃气轮机最佳与最经济性能参数的计算	87
§ 5-1 概述	87
§ 5-2 燃气轮机实际循环优化计算的说明	88
§ 5-3 等压加热燃气轮机最佳与最经济性能参数的计算	88
§ 5-4 热-电并供燃气轮机最经济性能参数的计算	93
§ 5-5 中间冷却燃气轮机最佳与最经济性能参数的计算	95
§ 5-6 回热燃气轮机最经济性能参数的计算	98

XII

§ 5-7	中间冷却-回热燃气轮机最经济性能参数的计算	108
§ 5-8	几种燃气轮机性能参数的比较	113
第六章	几种新型燃气轮机最佳与最经济性能参数的计算	118
§ 6-1	概述	118
§ 6-2	回注蒸汽燃气轮机最佳性能参数的计算	119
§ 6-3	蒸发-回热燃气轮机最佳与最经济性能参数的计算	133
§ 6-4	中间冷却-蒸发-回热燃气轮机最佳与最经济性能参数的计算	143
§ 6-5	各种燃气轮机性能参数的综合比较	151
第七章	采用新能源的燃气轮机及其优化分析	158
§ 7-1	概述	158
§ 7-2	核能的应用现状及其发展趋势	159
§ 7-3	核动力、单回路闭式循环等压加热氦气轮机最佳与最经济性能参数的计算	164
§ 7-4	核动力、单回路闭式循环热-电并供氦气轮机的优化分析	170
§ 7-5	核动力、单回路闭式循环带回热氦气轮机最佳与最经济性能参数的计算	172
§ 7-6	核动力、单回路闭式循环中间冷却-回热氦气轮机最佳与最经济性能参数的计算	174
§ 7-7	氢能发展的现状与展望	178
§ 7-8	煤炭使用的问题	186
§ 7-9	燃煤燃气轮机	189
参考文献		194
附录一	燃气与水蒸气混合气体的等压比热容	195
附录二	燃气与水蒸气混合气体的绝热指数	205
附录三	燃气与水蒸气混合气体的比焓	215

第一章 绪 论

各种热力发动机是以石油、天然气、煤和原子能等能源为燃料，并利用水、空气或其他流体为工质或冷却剂的，同时所有的热力发动机在工作过程中都会对人类生存的环境产生严重的污染。如何有效地开发利用各种能源、节约水资源，以及在能源使用过程中尽可能减少对环境的污染是人类面临的重大问题。由于动力机械的发展受到能源、水源和大气环境的制约，因此本章将对这三方面的问题以及节能问题作概要的叙述。

§ 1-1 能 源

一、能源的使用和人类物质文明的进步

能源开发和利用的历史，可以追溯到史前时代，虽然地球上一切生命赖以生存的太阳能和其他能源早已存在。但是，在学会使用火（即热能）以前，在能源的使用方面人类并没有明显地区别于其他动物。原始人学会取火、用火是人类启蒙性发掘和利用热能争取自身生存的重要的第一步。有了火，原始人才能吃到熟食；有了火，可以防御严寒；同时也给黑暗的洞穴带来了光明，使他们的生活变得舒适些。总之，热能的利用提高了原始人在大自然中生存的能力，可以说火的利用是人类发展史上具有划时代意义的事件。恩格斯^[1]，曾经高度地评价了这一发现，他说：“摩擦生火第一次使人支配了一种自然力，从而最终地把人和动物界分开”。学会摩擦取火，人类才开始自由地支配了一种能源，即能够主动地、有控制地从燃料中取得热能。自然能源的开发和利用是人类社会走向繁荣的起点。

几千年来，人类在认识和利用能源的过程中，经历了四次重大的突破：即火的使用、蒸汽机的发明、电能的问世以及原子能的应用。而每次重大的突破，都对国民经济的发展和科学技术的进步起了巨大的推动作用。

18 世纪中叶蒸汽机的诞生，为工业生产提供了一种强有力的动力机械，开创了热能动力工程的新纪元。蒸汽机的广泛应用促进了工业生产的迅速发展，并首先在欧洲掀起了历史上著名的工业革命，彻底改变了原来的小生产方式，为工业化革命奠定了牢固的物质基础，推动了资本主义经济的发展和人类物质文明的进步。

从 19 世纪下半叶开始，电能的使用范围得到迅速的扩大。电能的特点不仅是转换方便，从而使各个生产部门很容易地取得动力，促进了工农业生产的机械化和自动化，而且电能还可以转换为声能、光能和产生复杂的图像，使人们能进行远距离通信，能更有效地开展各种科技、教育和文体活动。微电子产品、特别是电子计算机的迅速发展，使一些未来学家对它的深远影响作出了惊人的预言。总之，电能的发现和应用使得社会生产和人类的生活取得了巨大的进步。

原子能的应用是从 20 世纪 60 年代开始的，它的最大优点之一是功率密度巨大，1 g U^{235} 所释放的能量约等于 2.4 t 标准煤所具有的热能。据国外有关资料报导，全世界海

水中铀的总量达 40~45 亿 t，花岗岩中也含有大量的铀，如能充分利用，可供人类使用 1000 万年。因此，原子能的利用为解决能源问题展现出令人乐观的前景。

在现代生活中，无论是工农业生产、科研工作和文化教育事业，还是人们的日常生活即衣、食、住、行都离不开能源，实际上，能源已成为社会存在和运动的物质基础，是人类生活和生产的最重要的支柱之一。国外统计资料表明，按人口平均计算的国民生产总值和能源消耗之间的关系，反映了一个国家的发达程度，即人均能耗越大，人均国民生产总值越高。社会愈发展，机械化、电气化和自动化的程度愈高，能源的消耗量就愈大。国防力量的强弱，从某种意义上来说，取决于能源工业发达的程度。有了高度发达的能源工业，才会有强大的国防力量。

二、能源使用的历史和它的未来

如上所述，能源是国民经济的基本动力，它在国家建设中起着非常重要的作用。人类社会已经经历了三个能源时期，即柴薪时期、煤炭时期和石油时期，以柴薪为主要燃料的能源时期延续的时间最长，这个时期的社会生产力水平很低。到 18 世纪煤炭的开采和应用已有了相当的规模，但那时的煤炭还仅仅是作为燃料使用，而不是提供动力的能源。蒸汽机的大量应用，为煤炭工业找到了更加广阔的市场，而蒸汽机本身又成为采掘煤炭的重要装备，使煤炭的生产得到了迅速的发展，并使它成为工业生产中的主要能源，煤炭作为主要能源的地位一直延续到 20 世纪中叶。

现代石油工业始于 1859 年。1870 年发明了汽油机，从此石油制品就不仅用于照明和加热，而是更多地用于提供动力。由于内燃机具有体积小，重量轻、比功率大和热效率高等一系列的优点，因此它在交通运输和电力等工业部门得到了广泛的应用。20 世纪初叶石油登上了能源的舞台，与此同时煤炭在能源构成中的优势地位逐渐下降。20 世纪 50 年代以来，以石油和天然气为原料的石油化学工业突飞猛进，石油便成为国民经济各部门使用的主要能源。在近四分之一世纪的时间里，世界上许多国家依靠石油和天然气，创造了人类历史上空前灿烂的物质文明。

表 1-1 ● 给出了 1900~1978 年全世界煤炭、石油、天然气的产量，以及包括水力和原子能在内时各种能源构成 (%) 的变化。

从表 1-1 中的数据可以看出，从 20 世纪初至 70 年代末，煤炭在能源构成中的百分数逐年下降，而石油和天然气的地位则不断上升。

根据已查明的能源资源预测，石油再过 50 年将要枯竭，而天然气大约在 70 年后也将耗尽，这就是说石油和天然气的黄金时代在不久的将来就会结束。从现在起，人类所利用的能源又开始向新的能源结构时期过渡，能源种类的多样化，是当前能源结构的特点之一。由于煤炭资源丰富^①，它将再次成为 21 世纪的主要能源之一；由于原子能发展很快，它也可能成为第四种主要常规能源。因此，原子能和煤炭可能是 21 世纪中叶能源组成的两大支柱。与此同时，太阳能、地热和氢能⁽²⁾等新能源也将得到发展。

● 本书中有关各种能源构成等方面的资料，均引自参考文献[20]。

① 据 1989 年前西德《海洋技术》杂志报导，如果人类对地球资源的消费量以现在的速度增长下去，煤可维持 173 年，硬煤可维持 102 年。

表1-1 1900~1978年世界能源构成的变化

年 份	煤炭、石油和天然 气的产量 (亿 t 标准煤)	各种能源的产量 (亿 t 标准煤)	能 源 构 成 (%)			
			煤炭	石油	天 然 气	水电、原 子能②
1900	7.6725	7.75	95.0	4.0①		1.0
1937	18.88194	20.13	69.7	18.9	5.2	6.2
1950	26.21376	26.64	59.3	29.8	9.3	1.6
1955	33.67758	34.26	52.7	34.4	11.2	1.7
1960	43.92918	44.78	48.9	35.8	13.4	1.9
1965	54.70652	55.88	40.6	41.2	16.1	2.1
1970	72.6418	74.20	32.6	46.6	18.7	2.1
1975	83.3004	85.70	30.7	47.2	19.3	2.8
1978	90.70704	93.32	29.8	48.8	18.6	2.8

① 1900年石油比重中包括天然气。

② 水电和原子能按每度电等于 0.123kg标准煤计算。

表 1-2 为国外能源专家对未来 30 年能源构成的预测 (%)。

表1-2 1979~2020年世界未来能源构成的预测 (%)

年 份	石油	煤炭	天然气	核能	其他能源	总 计
1979	44	28	21	2	5	100
2000	29	28	23	10	10	100
2020	11	26	13	31	19	100

能源需求量的长期预测是一项非常困难的任务，因为它取决于国民经济的结构，人口和经济增长速度，能源生产和消费的情况，能源进出口的数量，能源的价格政策，能源开采的技术装备、生产工艺和管理水平，以及其他许多难于估计的因素，如政治形势。同时，确定地球上究竟有多少可利用的能源资源也不是一件容易的事情，首先是很难得到完整、可靠的统计资料，其次是许多地下资源的蕴藏量是随着地质勘探工作的进展而不断修正的，不可能事先对它作出准确的预测。最后还应该指出的是，许多自然资源探明其蕴藏量固然重要，但其中究竟有多少可以合理利用却是另一回事情，而且上述这些因素都不是一成不变的，因此很难建立能预测长期能源需求的复杂数学模型。表 1-2 中给出的预测数据只能供参考。

对国内今后能源供需情况的预测，也只能是这样的。据我国能源专家预测，如 2000 年我国人口达到 12 亿人[●]，按人口平均 1.6 t 标准燃料/(人·年) 计算，全国能源消耗量的最低值为 18~20 亿 t 标准燃料。

§ 1-2 水 资 源

水是生命之源，也是人类赖以生存的重要物质。在地球表面的水资源可以说是很丰富的，其总量高达 15 万亿 m³。但是，在全球浩瀚的水域中，有 98% 的水是不能直接为人们饮用或工农业使用的咸水，剩下很小量可使用的淡水，大部分被封在南北极的冰

● 据我国 1990 人口普查的数字分析，本世纪末我国人口将达 13 亿。

山上或埋藏在地下的水层中，人类能得到的留在江河、湖泊和小溪里的淡水，只占全部水资源的 0.014%，而且在人类能得到的这点宝贵的水资源中还有 65~70% 则因蒸发、流失及其他浪费而损失掉了。

由于人口的不断增长、工农业的发展以及水源被污染，水资源的危机也将日益严重。关于 90 年代无害水和卫生问题的世界咨询会议的一份工作文件中指出：“……占世界人口 40% 的 80 个国家已经蒙受严重缺水之害，缺水的严重性还在不断的加剧，1975 年时 19 个发展中国家已经没有可供重新开发给家用和灌溉用的水资源”。到 2000 年将再有 10 个国家加入到这个行列，到 2025 年按乐观的估计严重缺水的国家将增加到 37 个。另据世界资源研究所的一项报告指出：“世界上 53 亿人口中有 34 亿人平均每人每天只能有 50 L 水”。

中国水源总量为 28000 亿 m^3 (其中地下水为 8000 亿 m^3)，居世界第六位，而人均数只相当于世界人均水量的 1/4，居世界第 88 位。1985 年对全国 324 个城市调查表明，列入水资源匮乏的城市有 183 个，其中有 40 个城市为贫水危机城市，全国城市每天总共缺水 2000 万 t，影响工业产值 200 亿元！全国每年废水排放量为 369 亿 t，每年因水污染造成的经济损失为 434 亿元。

1977 年 3 月科学家们在联合国水资源会议上就曾经发出“水、不久将成为一个深刻的社会危机”的严重警告。

当人们开始担心石油和天然气经济将渡过它的黄金时代，由于温室效应全球将变暖，氟里昂使臭氧层遭到破坏，以及地球环境受到严重污染的同时，人类又听到一个可怕的警告：“水不够了！”这种令人颤栗的呼喊应该引起全世界的政治家和科学家们的高度重视，并应尽快采取有效措施来保卫孕育人类生命的水源！

全世界淡水污染越来越严重，到 21 世纪初叶所有淡水几乎都将受到污染，而到 21 世纪下半叶全部淡水将消耗殆尽！这不是恶梦，而将是活生生的现实。因此有人预言，水将是未来战争的根源！这就是说，今天一些国家的领导人为争夺石油而发动战争，那么明天将会为水而挑起战火。事实上，约旦国王侯赛因已把水的争端列为导致约旦向以色列宣战的缘由，埃及和埃塞俄比亚、印度和孟加拉国都因为水源问题而引起了激烈的争端，在海湾地区水也可能成为一种重要的武器，因为土耳其可以阻止水由底格里斯河和幼发拉底河流入伊拉克。

总之，人类应该意识到水不是取之不尽，用之不竭的，它是一种无法由其他物质替代的，而且极易受到污染的宝贵“商品”，因此必须倍受保护。各种热力发动机的发展，必将受到水的制约。这是从事动力工业研究的科技工作必须考虑的问题。

§ 1-3 环境污染

能源的开采、运输和利用都直接或间接地改变着地球上的生态平衡，并对人类生存的环境产生了严重影响。就我国环境被污染的情况来看，由于能源所引起的环境污染约占 80% 以上。我国的能源以煤炭为主，在由能源所产生的污染中，煤炭占 70% 以上，石油和天然气占 20% 以上。在使用能源过程中对人类生存的环境有哪些污染？它们会产生哪些危害？下面将对这个重大问题做一简要的综述。

一、热 污 染

所有矿物燃料能源，当它们将其化学能转变为热能进而转变为机械能的过程中，都不可避免地伴随着各种形式的能量损失，而且这些损失最终都以热能的形式传给大气或水源，这就是说各种热力发动机在工作过程中都将对环境产生热污染。当大量的热资源（如发动机用的冷却水）被排放到江河湖泊时，热污染将会破坏水中的生态循环。水中含氧量减少时将危害水生生物和植物的生存；水温高时还会影响鱼类的生长和繁殖，阻碍水藻的繁生。

由于使用各种能源而排放到地球表面和大气里的热能，只占地球从太阳辐射所吸收热能（除去地球的反射、地球得到的太阳辐射能约为 $122 \times 10^{12} \text{ kW}$ ）的 0.0076% 。这就是说，人类目前由于耗费各种能源所产生的热污染，对全球性气候还不会造成任何明显的影响，但是发动机排出的 CO_2 所引起的温室效应，却对地球表面的热平衡有较大的影响。

二、二氧化碳的影响

二氧化碳在大气中的含量很小^[3]，其容积百分数为 0.03% ，但是它对地球的热平衡起着至关重要的作用。二氧化碳为吸收性介质，它只吸收和辐射下列波段的能量：

第一波段 $2.65 \sim 2.80 \mu\text{m}$

第二波段 $4.15 \sim 4.45 \mu\text{m}$

第三波段 $13.0 \sim 17.0 \mu\text{m}$

对于其他波长的辐射能二氧化碳可认为是透体。

太阳表面温度约为 6000 K ，根据维恩位移定律，太阳辐射强度最大的波长为 $0.48 \mu\text{m}$ 。在二氧化碳的主要吸收波段范围内，太阳能的相对辐射量很小，因而对太阳辐射而言，二氧化碳可视为透体，太阳所辐射的能量可以自由地穿过大气层到达地面。

但是对地球表面辐射来说情况就不同了，假定地球表面最高温度为 30°C ，最低温度为 -30°C ，由维恩位移定律计算可知，在此温度下地球辐射强度为极大值时所对应的波长分别为 $9.6 \mu\text{m}$ 和 $11.9 \mu\text{m}$ ，即地球辐射的主要波段正好处在二氧化碳的第二波段和第三波段之间，因而二氧化碳对地球表面所辐射的能量有相当大的吸收能力。大气中的二氧化碳吸收了地面的部分红外辐射后，它本身又重新辐射能量，其中的一部分又回到地球表面，另一部分则传给高层大气里的二氧化碳，在那里它又重复上述辐射过程。显然，大气中二氧化碳的含量越多，则会使更多的热能阻留在地球表面，而导致地球表面的温度提高，这就是所谓二氧化碳的“温室效应”。

近几十年来，使用矿物燃料生成的二氧化碳，大约以 4% 的速率逐年递增，目前全世界每年由于燃烧矿物燃料向大气中排放的二氧化碳将近 50 亿 t 。今后如果仍以这样的速率继续增长，再过几十年，大气中二氧化碳的浓度将增加一倍，它可能对地球表面的气候产生很大的影响。

大家知道由煤炭、石油和天然气等有机燃料和核燃料所释放出来的能量，最终都是以热能的形式散发到大气中，人类利用这些燃料的规模还在不断的扩大，上述温室效应将会增大，因而有理由提出这样的问题：会不会因为人们肆无忌惮的大量使用能源，而

使地球表面温度不断上升呢？据国外有关资料介绍，地球表面平均温度升高 3°C ，极区的冰雪将会融化，可使海平面大约升高 100 m，世界上不少海滨城市会被淹没；地球表面温度上升后，冰雪覆盖区会缩小，从而使地球表面的反射率下降，吸收的太阳辐射能更多，温度逐渐升高。据国外有关资料记载，从 1900 年到 1945 年，地球表面的气温大约上升了 0.4°C 。然而，近几十年来，地球表面的气温还是相对稳定的，实际上影响地球表面温度的因素很多，例如：云量增加会提高大气层的反射率，从而可以减少太阳辐射到地面的热能。此外，大气污染的增加，特别是大气中尘埃的增多，也使得大气对太阳辐射的反射增大，这些现象都起到降低地球表面温度的作用。

总之，人类在使用矿物燃料过程中向大气排放的大量二氧化碳，究竟在多大程度上影响地球表面的温度，这是一个非常复杂的问题。但是人们有理由担心，它可能对人类生存的环境产生严重后果。

保护和培植森林是减少空气中二氧化碳含量的有效措施之一，它是拯救地球环境和造福于人类的一项战略决策，也是每个公民应尽的义务。

三、对大气的污染

与能源开采、运输和利用有关而造成大气污染的另一事实，是燃烧矿物燃料时向大气中排放大量的烟尘和有毒气体，特别是燃烧含硫量高的煤时会产生“酸雨”，它对环境的影响最为严重。下面将分别就硫化物、一氧化碳和氮化物 NO_x 以及粉尘的危害问题作一简述。

（一）粉尘

粉尘是人类健康的大敌，目前世界上每年向大气排放的煤粉尘近亿吨，每燃烧 1t 煤就要给天空增添十几公斤的烟尘，使蔚蓝洁白的天空变得混浊不清。

人吸入的粉尘除一部分在鼻腔、气管和支气管阻留外，小于 $5\mu\text{m}$ 的粉尘将进入肺泡，这些粉尘除一部分沉积下来外，其余的部分将随淋巴液而流到支气管淋巴结，或者进入血液系统和其他器官。这种粉尘在人体内滞留的时间可达数年之久。人们长期吸入含有粉尘的空气后，就会引起鼻炎、各种呼吸道病以及肺癌等病症。

粉尘的另一严重危害是它能大量吸收太阳辐射的紫外线短波部分。当空气中粉尘浓度为 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 时，紫外线的辐射将减少 42.7%，浓度为 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 时，减少 71.4%，这将严重地影响儿童的发育成长。此外，空气中含有粉尘还会使光照度和能见度减弱，这不仅将影响动、植物的生长，同时还将影响飞机、船舶和各种车辆的安全行驶，使交通事故增多。

（二）二氧化硫

二氧化硫是一种无色、有臭味的窒息性气体，它主要是由含硫的煤和石油等燃料燃烧时产生的。煤的含硫量为 0.2%~7%，石油中的含硫量比煤中的含量要低些，大致为 0.05%~2%，有些地区的天然气也含有极少量的硫。这些燃料的含硫量随产地而异，同时在同一地区不同煤层或油层其含量也不相同。目前全世界每年消耗的煤炭量已接近 50 亿 t，估计每年向大气中排放的二氧化硫的数量达 1.6 亿 t 以上。

二氧化硫对人的危害性极大，它单独存在时主要是刺激粘膜，引起呼吸道的疾病。但严重的是它很少单独存在于大气之中，而往往与粉尘结合在一起进入人体的肺部，引

起各种恶性疾病。例如：20 世纪 40 年代美国洛杉矶的烟雾，曾使很多人眼睛红肿、喉咙肿痛；中毒严重者则呼吸困难、视力减退、头晕目眩甚至手足抽搐；长期中毒会引起人体动脉硬化、生理机能衰退等疾病。又如：1952 年震惊一时的伦敦烟雾事件，在两个月内有近万人死亡。此外，排放到大气中硫的氧化物最后会形成“酸雨”回到地面上，使许多珍贵的野生动、植物受到严重的损害，危及它们的安全。酸雨的另一危害使金属、石灰石及其制品受到腐蚀，一些有纪念意义的建筑物、纪念碑遭到破坏，一些艺术珍品也因腐蚀变质而失去了原有的价值。

控制硫化物最简单的方法是采用流化床燃烧方法，可以通过在煤内加入石灰石把生成的硫的氧化物除去。而解决硫化物污染的最理想的措施是把煤气化或液化，并在这些过程中除去硫和灰尘等有害物质。煤炭经液化或气化后既不污染大气，又能节约大量的燃料。美国、德国和日本等技术先进的国家都在大力从事煤气的研究，但是研究这种技术需要大量的经济投资。我国煤炭资源丰富，煤的气化或液化也是我国能源工业发展的必由之路。

（三）一氧化碳

一氧化碳是含碳燃料在空气量供应不足的情况下，不完全燃烧时的产物。各种活塞式发动机是一氧化碳的主要排放源，当然各类锅炉也会产生一氧化碳。因广泛使用矿物燃料，每年有近 3 亿 t 的这种物质进入大气。虽然这个数量远小于自然界中由于植物腐烂而生成的一氧化碳的量（约 35 亿 t），但是它是一种有剧毒的气体。燃烧过程中产生一氧化碳不仅造成环境污染，而且降低了能源利用率。在城市交通繁忙的街道上一氧化碳的浓度可超过 50 ppm^⑤，这种浓度将对人体健康造成威胁。控制一氧化碳的关键措施，是在燃烧过程中保证空气的余气系数大于 1。

（四）氮的氧化物

由化学热力学计算可知，当矿物燃料与空气完全燃烧时，其燃烧产物为 CO_2 、 H_2O 、 N_2 和 O_2 ，而燃烧不完全时还包括 CO 、 H_2 、 C 和 C_xH_y ，对于含 S 的燃料，其燃烧产物中还有 SO_2 和 S。当矿物燃料与余数系数不大的高温空气进行燃烧时，还会产生另一种有害物质，即氮的氧化物 NO_x ，它的主要来源是汽车和飞机（包括在地面工作的高温燃气轮机动力装置）所排出的废气。 NO_x 对人体健康有很坏的影响，当空气中这种物质的浓度较大时其毒性很大。它易和动物血液中的血色素结合，造成血液缺氧而引起中枢神经麻痹， NO_2 对人体的肺组织、心脏、肝脏、肾脏和造血组织都有损害，同时支气管哮喘的发病与它有密切关系。上述 40 年代美国洛杉矶烟雾公害，就是因 NO_2 经太阳紫外线照射后，与汽车尾气中未燃的碳氢化物相遇时生成的一种浅蓝色的有毒烟雾。

NO_x 对人类生存环境产生更大的危害还在于在高空的 NO_x 会破坏臭氧层，臭氧浓度降低会使太阳对地面的紫外线辐射强度显著增高，当臭氧浓度降低 1.0% 时，地面上紫外线辐射强度将增高 2.0%。

（五）氟里昂

氟里昂（其中主要是 R_{11} 和 R_{12} ）不仅是用于电冰箱、空调机和冷库的制冷剂，同时也是低温余热动力装置中采用的一种工质。自从 1974 年美国科学家玛丽亚·莫利纳

⑤ ppm (parts per million) 为百万分 (10^{-6}) 之几。