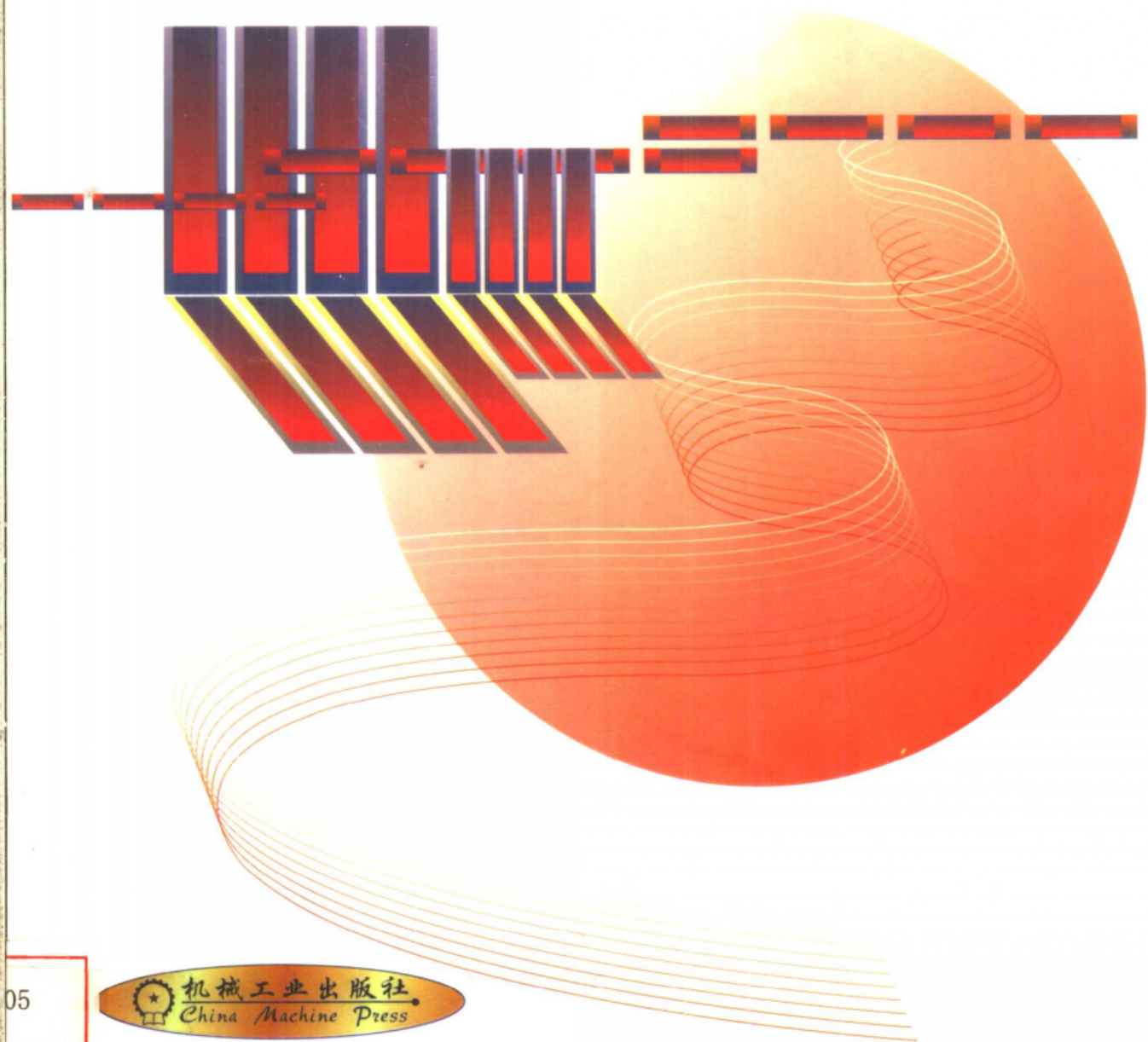


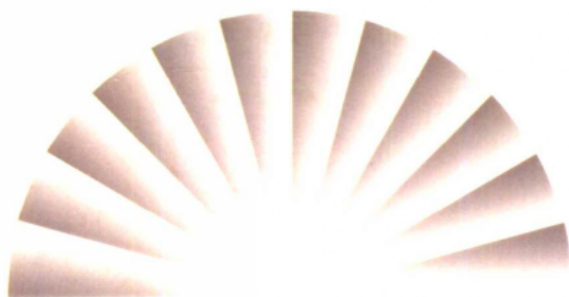
B

普通高等教育机电类规划教材

热力发动机基础

陈汉平 主编





普通高等工科教育热力发动机专业
规划教材及参考书目

- | | | | |
|----------------|--------|-----|----|
| ● 内燃机学 | 西安交通大学 | 周龙保 | 主编 |
| ● 热力涡轮机械原理 | 西安交通大学 | 俞茂铮 | 主编 |
| ● 热力发动机基础 | 上海交通大学 | 陈汉平 | 主编 |
| ● 热能与动力机械基础 | 天津大学 | 王中铮 | 主编 |
| ● 热能与动力机械制造工艺学 | 天津大学 | 程 熙 | 主编 |
| ● 热能与动力机械测试技术 | 浙江大学 | 严兆大 | 主编 |

ISBN 7-111-07926-4



9 787111 079262 >

定价: 13.00元

普通高等教育机电类规划教材

热力发动机基础

主编 陈汉平

参编 周校平

臧述升

主审 陆家祥



机械工业出版社

本书论述热力发动机在国民经济中的作用和现代热力发动机发展的特点,着重介绍内燃机、汽轮机与燃气轮机三种热力发动机的工作原理、基本结构和性能指标。

本书可作为大专院校热能与动力工程类专业的入门教材,也可供相关专业和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热力发动机基础/陈汉平主编. —北京:机械工业出版社, 2000.10

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07926-4

I. 热... II. 陈... III. 热能—发动机—高等教育—教材 IV. TK05

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第71639号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:赵爱宁 版式设计:张世琴 责任校对:申春香

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

济南新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·8.5印张·1插页·209千字

0 001—3 000册

定价:13.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677—2527

前 言

本书是根据原机械工业部全国高等学校热能与动力工程类专业教学指导委员会 1996 年编制的教学大纲和教材出版计划编写的。

本书论述热力发动机在国民经济建设中的重要作用，现代发动机发展的特点，着重介绍内燃机、汽轮机与燃气轮机的工作原理、基本结构、性能指标以及它们在能源和交通领域中的应用。

本书可作为热力发动机专业的入门教材，也可供相关专业和工程技术人员参考。

上海交通大学陈汉平担任本书主编并编写第一章，周校平编写第二章，臧述升编写第三章。本书由山东工业大学陆家祥主审。

限于编者水平，书中难免有错误或不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

1999 年 5 月

目 录

前 言

第一章 热力发动机概论 1

第一节 热力发动机及其分类 1

一、能源与热力发动机 1

二、热力发动机的分类 3

第二节 热力发动机性能及应用 5

一、热力发动机性能 5

二、常用热力发动机的性能与应用 9

第三节 现代热力发动机 12

思考题 13

第二章 内燃机 14

第一节 内燃机的工作原理 14

一、四冲程内燃机 14

二、二冲程内燃机 16

三、内燃机的总体构造 18

四、内燃机主要性能指标与特性 21

第二节 着火 26

一、自燃 27

二、传统点火系 27

三、电子点火系 31

第三节 混合气的形成 33

一、传统化油器式汽油机的混合气形成 33

二、电子控制汽油喷射系统 37

三、柴油机混合气的形成 41

四、柴油机电控喷油装置 49

第四节 换气 51

一、四冲程机的换气 51

二、二冲程机的换气 53

三、电控可变配气定时气门机构 55

第五节 排气涡轮增压 56

一、排气涡轮增压系统的基本形式 57

二、车用增压 58

三、二冲程柴油机的增压 58

第六节 排放与净化 59

一、柴油机排放特性与控制 59

二、汽油机的排放与净化 65

第七节 主要运动件 68

一、活塞 68

二、连杆 70

三、曲轴 71

思考题 72

第三章 汽轮机与燃气轮机 73

第一节 涡轮机工作原理 73

一、涡轮级的基本概念 73

二、典型的涡轮机级 78

三、涡轮机损失 84

四、多级涡轮机 84

第二节 汽轮机 87

一、汽轮机分类 87

二、电站汽轮机 88

三、蒸汽动力装置 96

四、汽轮机调节和保护 101

五、工业与运输推进用汽轮机 104

第三节 燃气轮机 108

一、燃气轮机装置工作原理 108

二、燃气涡轮 111

三、压气机 111

四、燃烧室与燃料供应控制 118

五、燃气轮机与汽轮机联合循环 123

六、内燃机排气涡轮增压器 128

思考题 128

参考文献 130

第一章 热力发动机概论

第一节 热力发动机及其分类

一、能源与热力发动机

能源供应是人类社会和经济发展的基本条件。工农业生产、商贸运输、人民生活一时一刻也离不开能源。

自然界供人类使用的能源有许多形式，如水库蕴藏的高位水的势能，大气流动中蕴藏的风力动能，太阳能，蕴藏在煤、石油、天然气等化石类矿物燃料中的化学潜能，裂变和聚变材料中蕴藏的核能，以及潮汐能，生物能，地热能等。人们利用发动机将自然界提供的能源转化为机械功。发动机产生的机械功除了直接用来开动机器，驱动汽车、轮船、飞机等交通工具外，还将通过发电机转变为更便于输送和分配、使用也更为广泛的能量形式——电能，再用电来照明、开动各种机械及电器设备。

水力势能、风能本身就是机械能，通过水轮机或风车能直接用来驱动生产设备。风车的主体就是一个装有高大叶片的转轮（图 1-1）。叶片受风力推动时风车旋转，把风的动能转化为机械功。水轮机的主体也是一个带有多个叶片的转轮（图 1-2）。高位水库内的水通过落差提高流速，把势能转变为动能，再推动水轮机旋转，把动能转化为机械功。可见水轮机和风车都是把机械能转变为机械功的发动机。

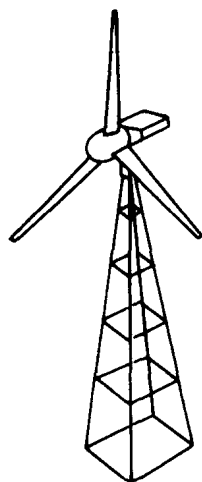


图 1-1 风车简图

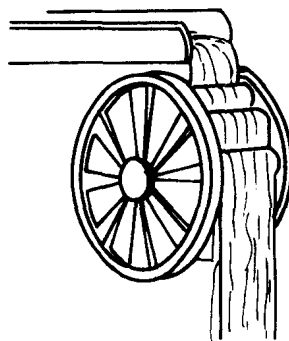


图 1-2 水轮机简图

当前在自然界众多能源中，人们利用最多的还是煤、石油和天然气等化石燃料。化石燃料蕴藏的能量并不是机械能，要使化石燃料（也包括其它生物质燃料）蕴藏的能量转变为机械功，首先要通过燃烧产生热能，然后再将热能转变为机械功。热力发动机就是将热能转变

为机械功的机械设备。太阳能和核能的利用通常也要通过热能，最终由热力发动机产生机械功，因此热力发动机在能源生产和利用中占有极其重要的地位。能源和交通是国民经济的两大优先发展领域，无论是发电，或是汽车、轮船和飞机都广泛使用热力发动机。由于热能转变为机械功比机械能转变为机械功复杂得多，因此热力发动机的工作原理也比风车和水轮机更为复杂。人们也可以不通过燃烧和热功转换，而在一定条件下（如高温或催化）直接使化石燃料中蕴藏的能量转变为电能，燃料电池就是这样一种设备。目前燃料电池尚有许多技术问题有待解决，而且燃料电池单位重量产生的能量较低，不可能替代热力发动机的重要地位。

内燃机、汽轮机和燃气轮机是最常见的热力发动机。这里先简单叙述热力发动机的工作原理，目的是从中认识热力发动机的工质、热力循环、机械运动方式等基本要素。

发动机将各种不同形式的能量转变为机械功总是依赖某种介质来实现的，这种介质叫做发动机的工质。水轮机的工质是水，风车的工质是空气。高位水库中的水具有势能，风是以一定速度运动的空气，具有动能，它们可以直接推动水轮机或风车旋转作功。可见发动机的工质其实就是能量贮存和传递的载体。热力发动机需将化石燃料燃烧或核反应等产生的热能转变为机械功，而化石燃料、核燃料自身并不能像水轮机中的水和风车中的空气那样直接作为工质推动发动机作功。热力发动机需要利用空气与燃料混合燃烧产生的燃气，或利用专门提供的水、水蒸气、空气等介质作为工质，让它们吸收（或携带）由化石燃料燃烧或其它方式产生的热能，再进入热力发动机作功。

热力发动机中工质的任务是携带热能并将其转化为机械功，但由于热能是一种分子无序运动的能量，并不能自发地转变为机械能。如果热力发动机的工质不具备高的压力，即使吸收了燃烧产生的热量形成高温，仍然不能推动热力发动机作功。为此，必须先将发动机的工质进行压缩达到高压，再让它吸收燃烧产生的热量，然后才能在降压膨胀过程中推动热力发动机作功。下面以图 1-3 所示的四冲程内燃机为例，说明工质在其中经历的热力过程。

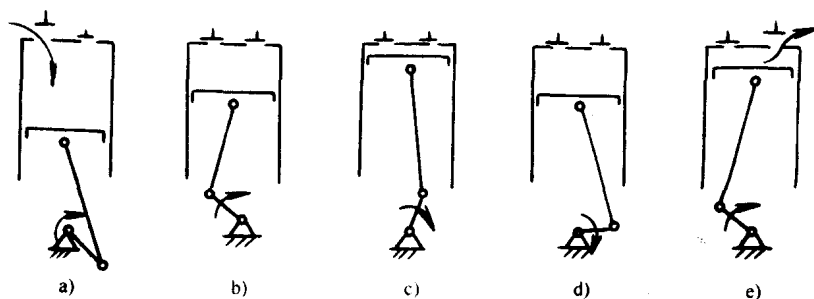


图 1-3 四冲程内燃机工作原理示意图

a) 吸气 b) 压缩 c) 加热 d) 膨胀 e) 排气和放热

从图上可见，当活塞向下运动时进气门打开，空气作为工质被吸进气缸，见图 1-3a；活塞向上运动时进气门关闭，气缸内的空气受活塞压缩，见图 1-3b；当活塞接近最高位置时气缸内的空气压力已大大提高，即与注入的燃料混合燃烧，吸收燃料燃烧产生的热量形成高温燃气，见图 1-3c；高压高温燃气膨胀推动活塞运动作功，见图 1-3d；作功后燃气的压力和温度降低成为废气排出气缸，废气的温度仍然高于环境大气，它们将在外界环境中逐渐放热回复到初始状态，见图 1-3e。为了压缩工质，发动机活塞机构需要消耗一定量的机械功，但高压高温工质膨胀时能向活塞机构作更多的功，膨胀功扣除压缩功之后的剩余功就

是热力发动机最终输出的机械功。吸入内燃机的工质经历压缩、加热、膨胀、放热，最终又回到了原来的状态。这一完整过程称为内燃机工质的热力循环。工质及工质热力循环是任何热力发动机及热能动力装置必不可少的基本要素。内燃机的工质是空气和经过燃烧的燃气，其压缩、加热、膨胀过程都是在同一气缸内进行，放热过程在大气中完成。蒸汽动力装置中的工质是水和水蒸气，上述四个过程则分别在水泵、锅炉、汽轮机和凝汽器四种设备中进行。尽管水轮机、风车等发动机未被划在热力发动机的范围之内，在形式上它们直接利用自然界水和空气的机械能，也没有显而易见的热力循环，然而供它们使用的能源归根到底还是太阳提供的热能。如果把地面上水在太阳照射下蒸发再变成雨积聚在高位水库中，或大气热环境差异形成风等发生在大自然中的过程和它们在水轮机或风车中作功作为一个大系统来考虑，那么工质及其循环其实是任何发动机的共同特点。

二、热力发动机的分类

热力发动机通常按用途、使用的工质、燃料类型及燃烧方式、热力循环形式、实施工质压缩和膨胀的机械运动形式等特征进行分类。

能源和交通是国民经济中热力发动机应用最广泛的领域。按照用途可把热力发动机分为发电用热力发动机，工业设备驱动用发动机，汽车、内燃机车、船舶、航空和火箭等运输设备驱动用发动机。发电用热力发动机承担巨大的能量供应任务，因此要求能量转换效率高，使用的燃料价格应较便宜，而运输用热力发动机在体积和重量方面往往有更高的要求。发电用热力发动机的一个重要特点是它的工作转速始终保持不变以保证发电机的输出电流频率不变，驱动工业设备或运输设备的发动机的转速往往随着负载的变化而变化。在功率输出方式方面，发电用热力发动机，驱动工业设备、汽车和船舶发动机的输出功率都是以转矩方式实现的，航空发动机既可以输出转矩驱动螺旋桨，也可以通过排出高速气流获得反作用力的方式推动飞机前进。火箭发动机在没有空气的外层空间工作，完全依靠排出高速气流的方式获得推力。

实施工质膨胀和压缩的机械主要有往复式活塞式机械和叶轮式机械两种形式，相应地将使用它们的发动机分为往复式活塞式发动机和叶轮式发动机。常见的内燃机属于往复式活塞式发动机，汽轮机和燃气轮机属于叶轮式发动机。往复式活塞式膨胀和压缩机械是由气缸及气缸内作往复运动的活塞所组成，通过一套曲轴连杆机构将活塞的往复运动转变为旋转运动，如图 1-3 所示。当气缸内高压工质膨胀时气缸容积增大，工质推动活塞作功且使曲轴作旋转运动。当曲轴旋转推动活塞迫使气缸容积减小时曲轴作功，气缸内的工质被压缩。往复式活塞式发动机的膨胀和压缩过程是在同一副气缸活塞组件内实现的。叶轮机械则是一种旋转式机械。工质的膨胀和压缩在两种流道形状不同的叶轮内实现。叶轮式膨胀机械像一个风车或水轮机，在一个圆轮上装了许多叶片，如图 1-1 和图 1-2。汽轮机和燃气轮机的作功主体就是一个膨胀叶轮，这些叶轮上安装的叶片要比风车更加稠密，当高速、高温的工质流经叶轮时推动叶轮旋转做功。压缩式叶轮机械也是一个装了许多叶片的圆轮，只是叶片形成的通道形状正好与膨胀叶轮相反，当压缩式叶轮旋转时，不断地将工质吸入并提高工质的速度和压力。叶轮式压缩机械就像一个电风扇。因为流道形状不同，压缩和膨胀不可能在同一个叶轮机械中完成。叶轮机械又可根据工质流动方式分为轴向流动式和径向流动式两种，后者又称作离心式或向心式叶轮机械。

发动机使用的化石燃料有以煤为代表的固体燃料，以汽油、煤油、柴油等石油制品为代

表的液体燃料, 以及以天然气、合成气、煤制气为代表的气体燃料, 相应地可以把发动机分为燃煤发动机、燃油和燃气发动机。汽油机和柴油机都是燃油的内燃发动机, 由于使用的燃料不同, 两者在构造、工作原理和性能方面有不少差别。我国能源结构中煤占 75%, 因此消耗能源最多的发电设备大多用煤作为燃料, 采用蒸汽动力装置。随着我国西北地区和东南沿海大陆架天然气开采的发展, 使用天然气燃料来实现热功转换将会逐渐增多。汽车、船舶、飞机等运输用内燃机和航空燃气轮机则多使用汽油、柴油、煤油等液体燃料。

发动机常用的工质有空气和水蒸气两种。内燃机和燃气轮机使用的工质都是空气, 因此它们也叫做空气发动机, 尽管这两种发动机膨胀过程的工质是经过燃烧的燃气而不再是純粹的空气。化石燃料可以直接在空气工质内部进行燃烧, 这就使空气发动机常被作成内燃式发动机, 把燃烧和工质加热过程完全结合在一起。内燃机和燃气轮机都属于内燃式发动机。内燃机更是把燃烧过程放在实施压缩、膨胀的同一气缸活塞组件内完成, 使内燃机看起来更像是一台完整的机器。燃气轮机的燃烧过程也是直接在空气工质内进行的, 但是它的压缩和膨胀过程需在各自独立的叶轮内完成, 燃烧也不能在叶轮内进行, 在构造上需分设压缩叶轮、燃烧设备和膨胀叶轮等多个组成部件, 因此燃气轮机通常被看成是一套装置。图 1-4 所示就是最简单的燃气轮机装置的示意图。压缩叶轮称为压气机, 它消耗的功需由膨胀叶轮提供。膨胀叶轮称为涡轮, 涡轮作的功大约有 $2/3$ 用于驱动压气机, 只有剩余的 $1/3$ 才是有效的输出功。此外, 从循环角度来看, 由于空气容易得到, 空气发动机可以直接从大气中吸入空气作为工质, 在发动机内部完成工质的压缩、加热和膨胀后把它们直接排入大气, 在那里逐渐放热回复到初始状态。可见空气发动机热力循环的一部分是在大气中完成的, 这种热力循环被称为是开式循环。

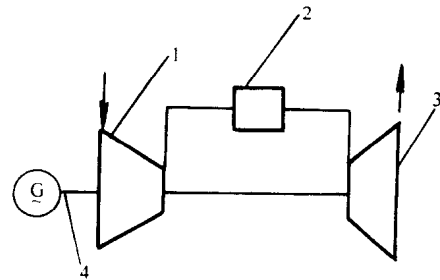


图 1-4 最简单的燃气轮机装置示意图

1—压气机 2—燃烧室 3—涡轮 4—输出轴

蒸汽动力装置使用的工质是水和水蒸气。由于蒸汽动力装置输出功率大, 又能使用煤为燃料, 因此在发电领域被广泛应用。蒸汽动力装置中承担热功转换、输出机械功职能的汽轮机是一种叶轮式的膨胀机械, 高压高温水蒸气在汽轮机中完成膨胀过程, 输出机械功。早年使用过的蒸汽机是一种活塞式膨胀机械, 因其效率和输出功率都很低, 现在已极少应用。水不像空气那样容易得到, 蒸汽动力装置通常采用闭式循环, 让工质在动力装置内反复循环使用。汽轮机中作完功的蒸汽排入凝汽器, 在那里与外界引入的冷却水进行热交换完成放热过程, 同时形成低压以便增加汽轮机的作功能力, 水蒸气工质则被冷却下来凝结成水。凝结水被吸入水泵提高压力, 相当于进行压缩过程。由于水和水蒸气不能直接参与煤或其它化石燃料的燃烧, 这就需要采用外燃方式设置专门的锅炉来完成燃烧和工质加热。燃料和空气被引入锅炉炉膛燃烧产生高温燃气, 但燃气并不是作功的工质, 仅作为热源通过热交换加热由水泵引入锅炉的高压水, 最终产生高压高温的水蒸气, 作为工质推动汽轮机叶轮膨胀作功。虽

然闭式循环的工质始终在动力装置内部循环而不进入外界环境，但与开式循环一样，在完成热能转变成机械能的同时，同样有一部分热量放入大气，蒸汽动力装置中通过凝汽器冷却水带入外界的就是这部分热量。图 1-5 为最简单的蒸汽动力装置示意图。

使用不同的工质决定了热动力装置的燃烧方式和循环形式。一些使用氨、氨等特殊工质的动力装置必须采用闭式循环。往复活塞式发动机有时因安装环境（如潜艇内）无法直接吸入空气，或因利用廉价劣质燃料而不能在气缸内进行直接燃烧加热，也就需要采用外燃方式和闭式循环。活塞式热气发动机（也称斯特林发动机）就是一种外燃的闭式循环活塞发动机。

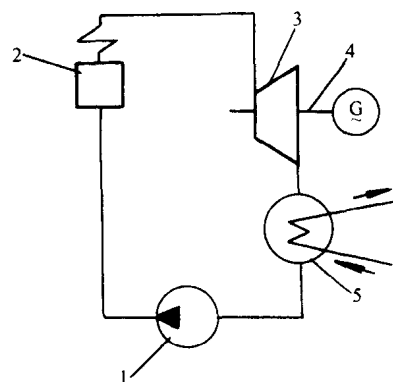


图 1-5 最简单的蒸汽动力装置示意图

1—水泵 2—锅炉 3—汽轮机
4—输出轴 5—凝汽器

第二节 热力发动机性能及应用

一、热力发动机性能

人们从各个方面对热力发动机性能提出要求，包括发动机的作功能力，能量转换的经济性，适应负载和环境条件改变的能力，发动机排放物对环境的污染程度，发动机的重量、尺寸指标以及发动机的工作寿命等。

1. 发动机的作功能力

热力发动机的输出功来源于工质在热力循环中作的功，从中还要扣除各种机械损失。每单位质量工质在发动机一个完整的热力循环中输出的机械功称为比功，也就是发动机的膨胀功减去压缩功后的净功，单位是 kJ/kg 。比功与通过发动机工质流率的乘积再扣除机械损失后就是每单位时间发动机输出的机械功，即发动机的输出功率，单位是 kW 。工质流率是指每单位时间流过发动机的工质质量，单位是 kg/s 。内燃机等活塞式发动机还常用每单位气缸工作容积在一个循环中输出的有效功来衡量其作功能力。

从热力学知道：工质的热力状态变化可以用状态参数图上的过程线来表示，如压缩过程线、加热过程线等。完整的发动机热力循环的过程线在状态图上形成一个封闭的图形。在压力—比体积（比容）图（ $p-v$ 图）上，热力过程线与 v 坐标之间的面积 $\int v dp$ 代表单位质量的工质在该过程作的功，过程线与 p 坐标之间的面积 $\int p dv$ 代表单位质量工质的过程功与该工质流进及流出推挤功的总和，封闭的过程线图形所包围的面积表示单位质量工质在发动机热力循环中输出的净功，也就是发动机的比功。在温熵图（ $T-s$ 图）上热力过程线与 T 坐标之间的面积 $\int T ds$ 代表该过程与外界交换的热量，封闭过程线围成的面积则是发动机热力循环从外界得到的净热量。根据热力学第一定律，热力循环所作的功与所消耗的热量是等量的。所以，对于不计机械损失和散热损失的理想化循环而言，封闭过程线在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上所围面积分别表示发动机单位质量工质输出的机械功和发动机单位质量工质与

外界交换的热量，它们代表的能量在数量上是相等的。

热力状态图为发动机比功和效率分析计算提供了直观而方便的工具。以理想化的汽油机循环分析为例能清楚地看到这一点。理想化汽油机的压力—比体积图和温熵图分别如图 1-6 和图 1-7 所示。图 1-6 中，图线 1—2 表示压缩过程，工质的压力升高，比体积减小，温度升高，由于不计损失也没有热交换，工质的熵不变，在图 1-7 温熵图上过程线与 s 轴垂直。图线 2—3 为加热过程，由于汽油机工质的加热过程在点火爆燃中实现，时间极短，气缸容积来不及变化，可视为等容加热，即压力升高、比体积不变，温度升高，熵也升高。图线 3—4 为膨胀过程，压力降低，比体积增大，温度降低，工质在不计损失的膨胀过程中熵不变。图线 4—1 为放热过程，工质排出气缸后与环境大气热交换，温度和压力降低，然后再次被吸入气缸。汽油机的放热过程实际上是在发动机外进行的。由于工质从排出气缸至再被吸入气缸时其压力、温度都有所降低，比体积却基本相等，可以看作等容放热。这样，在压力—比体积图和温熵图上就形成了简化的热力循环封闭过程线。在 $p-v$ 图上封闭过程线所围的面积 1—2—3—4—1 表示该发动机的比功，在 $T-s$ 图上相应的面积 1—2—3—4—1 表示该发动机单位工质消耗的热量。

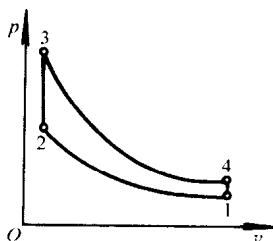


图 1-6 理想化的汽油机热力循环 $p-v$ 图

1—2: 等熵压缩 2—3: 等容加热
3—4: 等熵膨胀 4—1: 等容放热

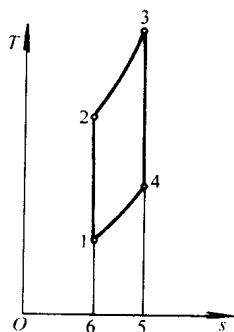


图 1-7 理想化的汽油机热力循环 $T-s$ 图

1—2: 等熵压缩 2—3: 等容加热
3—4: 等熵膨胀 4—1: 等容放热

焓熵图特别适宜于发动机热力循环效率分析。由于热力发动机总是在工质流动状态下完成作功的，某一过程的能量转换除了工质自身内能 u 的变化外，还应包括工质流经该过程进出口所作的推挤功。从状态参数焓 i 的定义

$$i = u + p/\rho \quad (1-1)$$

可知焓值代表的正是工质内能与推挤功的总和。焓差便于用来直接计算热力过程的能量转换，膨胀过程和压缩过程前后的焓差分别表示流动状态下的膨胀功和压缩功，加热过程和放热过程前后的焓差相当于热交换能量与流经换热过程有效推挤功的总和。

状态参数焓在数量上是温度与比定压热容的乘积。如果工质的比定压热容可认为不变，那么焓熵图与温熵图相似，温度和焓值只差了一个比例常数。如果比热容的变化不可忽略，就需要用专门的工质比热容实验数据（热力性质表）来计算焓值。当工质有相变时，例如蒸汽轮机的工质水和水蒸气，在同一相变温度下由于相变潜热的存在，水蒸气的焓值比水的焓值大得多。水蒸气热力性质表和水蒸气焓熵图正确反映了比热容变化及相变影响，为汽轮机

热力分析提供了方便。

热力发动机的输出总功率正比于比功和工质的质量流率。一般提高发动机的比功不很容易,因而增加工质流量是提高发动机输出功率的直接手段。但是,工质的流量过大会影响到发动机的尺寸、强度和发动机的布置,使用开式循环时还会造成发动机进出口尺寸过大以及对环境的过度依赖。

2. 发动机能量转换经济性

热效率是描述发动机能量转换经济性的主要指标。效率总是指一种行为的得益与耗费的比值,热力发动机的得益是其输出的机械功或机械能,耗费则是燃料提供的热量,两者之比就是发动机的热效率,常用 η 表示。

以上面讨论过的理想化汽油机为例,燃料提供的热量用于工质的加热,可用图 1-7 上加热过程线下方的面积 2—3—5—6—2 来表示,输出机械功相应的热量用过程线围成的封闭面积 1—2—3—4—1 来表示,两者之比就是不计机械损失时该发动机的热效率,或称发动机循环热效率。即

$$\eta = \frac{\text{相应于输出机械功的热量 (面积 } 1-2-3-4-1)}{\text{燃料提供的加热量 (面积 } 2-3-5-6-2)} \quad (1-2)$$

实际发动机的热效率应该在热循环输出功中扣除了机械损失后再来计算。不难看出,为了提高发动机的热效率应该尽量提高工质的加热最高温度 T_3 ,降低放热最低温度 T_1 ,同时尽可能扩大比功面积 1—2—3—4—1。提高加热最高温度受到应力、可靠性等许多限制,必须依赖耐热材料和发动机冷却技术的进步才能得以实现。放热最低温度受环境的限制不能任意降低。从图 1-7 看出,为了在给定的 T_3 和 T_1 条件下将比功面积扩至最大,就需要将图 1-7 上的 1—2—3—4—1 改为矩形。这时热力循环由等熵压缩、等温加热、等熵膨胀、等温放热四个过程组成,如图 1-8 所示。这种发动机循环称为卡诺循环,在同样的加热和放热温度下有最高的比功和热效率。由式 (1-2) 得出卡诺循环的热效率,即

$$\eta = \frac{T_3 - T_1}{T_3} \quad (1-3)$$

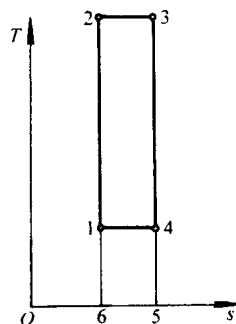


图 1-8 $T-s$ 图上表示的卡诺循环

1—2: 等熵压缩 2—3: 等温加热
3—4: 等熵膨胀 4—1: 等温放热

卡诺循环只是一种理想的境界,实际上是很难实现的。因为加热和放热都是热传导过程,在严格等温条件下是无法实现的,即使采用小温差也常因为需要很大的换热面积而难以做到。压缩和膨胀过程也做不到完全等熵。卡诺循环的意义在于它给出了发动机热效率的定量目标,并启示人们,为了提高发动机的热效率,设计热力循环应在尽量提高加热最高温度,降低放热温度,尽量使加热和放热过程接近等温条件,膨胀和压缩过程尽量接近等熵条件,使发动机热力循环向卡诺循环靠拢。在以后的几章中将看到人们在热力发动机研制中为向这一方向努力所采取的一些措施。

除了发动机热效率外,也常用热耗率或燃料消耗率来表达发动机的热经济性。热耗率指发动机输出每单位机械功所消耗的热量。不难看出,发动机的热耗率和热效率成倒数关系。燃料消耗率指发动机输出每单位机械功所消耗的燃料量,单位是 $\text{kg (燃料) / kJ (机械功)}$ 。当给定了燃料的发热值和燃烧过程热损失时,很容易实现热耗率和燃料消耗率的换算。汽轮机常

用蒸汽消耗率来描述经济性〔它表示每输出单位机械功率所消耗的符合某种规定品质的蒸汽质量流率，单位是 $\text{kg}(\text{蒸汽})/(\text{s}\cdot\text{kW})$ 〕，同样能够实现汽耗率、热耗率和热效率之间的相互换算。

发动机的热效率与发动机的形式、采用的技术水平及其机械完好状态直接有关。采用高水平的机械、流动、传热、燃烧设计，先进的结构及高性能的材料才有可能承受高的加热温度、降低各种损失、保持高的效率。在同类发动机和同等技术水平的条件下，输出功率小的发动机不容易保持高效率。因为任何热力发动机不可避免地存在摩擦、漏泄、散热等各种损失，发动机功率越小，工质流率越小，单位工质分担的各类损失就越多，发动机效率也就越低。发动机出厂时机械状态有严格的控制，热效率能够得到保证。长期运行之后，机械状态恶化，热效率会逐渐减低，需经维修恢复正常的机械状态后才能使热效率得到恢复。正确的运行操作、适时的状态检修等都是保证发动机保持良好状态和性能水平必不可少的措施。

3. 热力发动机特性

热力发动机是在一种标定工况，即某一特定转速、负荷和运行环境条件下设计的。例如：某发电用汽轮机标定功率 300MW，工作转速 3000r/min，工作环境地处海平面，冷却水温度为 285K (12℃)；某车用内燃机标定功率 100kW，环境大气压 103kPa，环境温度 300K (27℃) 等。但实际运行时发动机常常会偏离标定工况，如夜晚发电负荷减低，汽轮机的输出功率可能降为 200MW；汽车低速行驶时，内燃机的输出功率比全速时大大减低；天气炎热时环境温度增高，吸入发动机的空气密度降低，工质的质量流量将要减少，而且高温空气不容易压缩导致压缩耗功增加。无论负荷、转速或环境等工况条件的变化都会使发动机的实际工作过程与原设计不相匹配，从而导致输出功率、效率等发动机性能的变化。热力发动机性能对外部因素变化的响应称为热力发动机特性。影响发动机特性的因素很多，关系复杂，通常用特性曲线来描述，如内燃机负荷特性，燃气轮机变工况特性等。

值得注意的是，当热力发动机运行偏离标定工况较远且进入一定范围时还有可能引起发动机工作不稳定或不安全。例如，电站汽轮机热力系统的负荷减少到很低时可能引起锅炉燃烧不稳定，燃气轮机流量过低而压比较高时会引起压气机喘振，燃气温度落入涡轮叶片材料的腐蚀范围会引起叶片的破坏等。因此，某些热力发动机需要根据运行稳定性和可靠性来规定允许使用的最低功率范围。

由此可见，在选择和评价某一热力发动机性能时，除了考察它的标定工况性能外，还必须根据使用要求对非标定工况下发动机特性进行全面考察。

4. 热力发动机排放物对环境的污染及其控制

开式循环热力发动机需要向环境大气排放燃烧产物，其中带有不少污染物质。化石能源的燃烧产物是空气中污染物的主要来源。空气中的二氧化硫、氮氧化物、固体悬浮物、二氧化碳、一氧化碳和碳氢化合物等污染物都与化石燃料燃烧有关。化石燃料尤其是煤炭中往往含有硫，它们在燃烧过程中形成的二氧化硫是产生酸雨的元凶。化石燃料燃烧组织不当还会产生大量有害的氮氧化物。煤燃烧产生的灰分和油燃烧产生的炭烟是空气中固体悬浮物的重要来源。化石燃料燃烧产生的大量二氧化碳会造成温室效应，破坏生态平衡。大部分化石燃料的燃烧是在热力发动机中完成的，因此，热力发动机排放物污染必须严格控制，确保满足国家环境保护法规和国民经济可持续发展的要求。

降低排放物污染指标的措施有以下几项：热力发动机燃烧设计中通过控制燃烧温度和燃

烧流程尽量减少排放污染物的产生；发动机排气部分设置专门的装置实施脱硫脱硝捕捉烟尘和其它污染物的净化处理；采用电子控制技术通过控制空燃比和点燃时间等措施保证热力发动机始终处在有利于排放无害化的条件下工作。

5. 热力发动机的使用寿命

热力发动机的使用寿命是有限的。影响寿命的主要原因是发动机热端部件损坏，材料腐蚀、磨损，尤其是承受交变应力零部件的疲劳破坏。发动机制造厂根据设计、试验和运行经验对发动机的全寿命、大修周期、一次大修后的使用寿命、热端部件使用寿命、易损易耗件使用寿命等作出规定。燃气轮机、汽轮机启动和停机时承受大幅度变化的交变应力，寿命损耗大，为了保证运行安全，往往需要对使用寿命期内的启动次数作出专门限制。

6. 发动机的体积和重量

对于运输设备使用的发动机，体积和重量也是重要指标，有时甚至是决定性的指标。体积和重量过大将直接影响运输设备的性能，还给布置安装带来极大的困难。发动机的体积指标用长、宽、高三维尺寸表示；重量指标常用总重量和单位输出功率的重量来表示，即 kg/kW 。

二、常用热力发动机的性能与应用

各种类型的热力发动机都有其不同的工作原理、结构特点和性能指标，从而也决定了各自的应用领域。下面将分析内燃机、蒸汽动力装置和燃气轮机这三种最常用的热力发动机的性能及其应用。

1. 内燃机

内燃机是一种结构紧凑，单机效率较高的热力发动机，工质流量及进排气部分尺寸也较小，非常适合于用作汽车、拖拉机、船舶等运输设备的发动机，也可用作中小型发电或工业设备的动力源。车用发动机需要的功率范围从几十千瓦到几百千瓦甚至上千千瓦，正是内燃机充分发挥其长处的领域，因此绝大部分车辆都采用内燃机。轿车多采用汽油机，大型客车、运输卡车、坦克和拖拉机多采用柴油机。民用和中小型军用船舶也大都采用低速或中高速柴油机。

内燃机的单机功率不大，但效率较高。这一特点与内燃机作功部件的往复运动密切相关。对于每个气缸而言，曲轴每转一周或两周才完成一次吸气压缩、燃烧加热、膨胀作功、排气放热的完整热循环，作功是不连续的。一次短暂的燃烧之后气缸和活塞有较长的冷却时间和较好的冷却条件。即使采用耐高温性能适中的材料也可以接受很高的燃烧加热温度，一般可超过 2500K ，从而提高了内燃机的热效率。提高燃烧加热温度是通过增加喷油量来实现的。通常把实际吸入的空气量与欲使喷入油量刚好完全燃烧所需要的理论空气量之比称为过量空气系数，一般热力发动机的过量空气系数总是大于 1。过量空气系数越小，燃烧温度也就越高，汽油机允许使用接近于 1 的过量空气系数。另一方面内燃机气缸容积有限，曲轴每转一周或两周仅有一次吸气，且由于存在往复运动部件使发动机转速不能太高。若要增大发动机总功率就需要加大气缸容量或增加气缸数目，这将导致发动机结构复杂、重量增加。

二次大战前的飞机发动机都采用内燃机。随着飞机航速越来越高，推进功率成倍增长，才使功率更大、重量更轻的燃气轮机取代内燃机，成为广泛使用的航空发动机。

2. 蒸汽动力装置

蒸汽动力装置的特点是功率大、寿命长，使用燃料的范围广，尤其是可以用煤作燃料。这些特点使蒸汽动力装置成为我国乃至世界许多国家主要的热力发电用动力设备。与往复式

内燃机不同，蒸汽动力装置中作功的汽轮机是叶轮式旋转机械，进汽通流面积大，而且连续进汽，因此工质流量和总功率可以设计得很大。最大的汽轮机输出功率超过 100 万 kW，我国的电站汽轮机主力机型的输出功率是 30 万 kW 和 60 万 kW。这样大的单机功率是内燃机和燃气轮机难以达到的。汽轮机功率大的优点满足了现代发电厂输出功率越来越大的要求。从燃烧加热方式来看，蒸汽动力装置是一种外燃式发动机，包括锅炉、汽轮机、凝汽器、水泵等设备组成的一套完整装置。大功率蒸汽动力装置规模十分庞大，锅炉高达数十米，高大的烟囱往往成为电厂的标志。蒸汽动力装置的锅炉主要以煤为燃料，也可以烧油或气。我国是以煤为主要一次能源的国家，汽轮机在我国能源生产中具有特别重要的地位。目前，我国多数电站汽轮机采用亚临界过热蒸汽作为工质，水被高压水泵增压至低于临界压力，进入锅炉通过锅炉换热面被间接加热，完成工质由液相向气相的转变，然后饱和蒸汽继续被加热成为过热蒸汽。一般工质最高温度约为 550℃ 的亚临界蒸汽动力装置，热效率能达到 35% ~ 38%。采用超临界和超超临界压力的汽轮机体积尺寸更小，热效率也更高。

蒸汽动力装置也是核电站中实现能量转换的主要组成部分。核电站发电由两个回路来完成。一回路由核反应堆产生衰变热，用以加热工质形成高压高温水蒸气，其功能类似于锅炉。二回路与常规火电站相似，由汽轮机将高压高温蒸汽工质的热能转变为机械功。核电站蒸汽动力装置使用的蒸汽参数通常要比火电站的低。

蒸汽动力装置还用于直接驱动压缩机、鼓风机、化工等工业设备，在运输设备方面被用作大吨位军用船舶的推进动力装置。

3. 燃气轮机

燃气轮机的突出优点是轻巧，起动、停机及变负荷响应速度极快，输出单位功率所需的发动机体积、重量要比内燃机和汽轮机低得多。燃气轮机也是叶轮式旋转发动机，工质流量大，因此也能输出较大的功率。燃气轮机的功率范围可以从几十 kW 直至几万 kW。简单循环燃气轮机的效率低于内燃机，尤其是小功率燃气轮机的效率更低，通常只用作特殊工作条件下的辅助设备。1000kW 以上的现代简单循环燃气轮机热效率达到 30% 以上，加之体积、重量方面的绝对优势，使燃气轮机在高速运输设备推进动力领域具有优势。在空中，飞机对发动机体积、重量要求苛刻，现在几乎所有民用航空干线飞机和军用飞机全都采用燃气轮机，巡航导弹等飞行兵器也都使用燃气轮机。燃气轮机用于航空推进动力在工作原理上有特殊的有利条件。燃气轮机主轴输出的机械功可驱动螺旋桨或风扇推动飞机前进，燃气轮机排出的大流量高速气流也能产生推力推动飞机前进，这就是所谓喷气推进技术。不同速度的飞机分别选择燃气轮机螺旋桨、燃气轮机喷气、或燃气轮机风扇加喷气等不同的推进方式。图

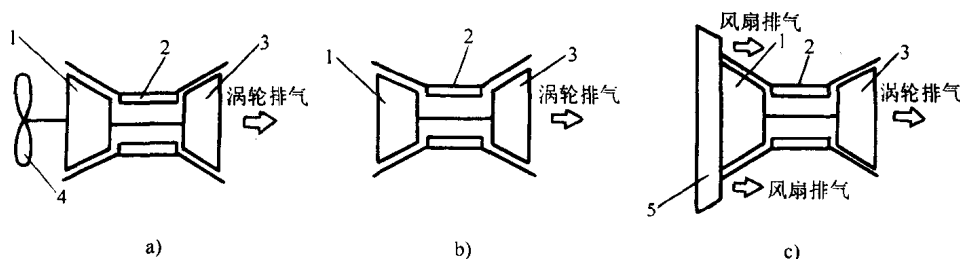


图 1-9 航空用燃气轮机

a) 涡轮螺旋桨发动机 b) 涡轮喷气发动机 c) 涡轮风扇发动机

1—压气机 2—燃烧室 3—涡轮 4—螺旋桨 5—风扇

1-9 中的图 a、图 b、图 c 为这三种航空燃气轮机推进系统的示意图。在燃气轮机喷气推进系统中，涡轮轴输出的机械功仅用来驱动压气机，飞机所需的推力完全依靠燃气轮机排出的高速燃气流产生的反作用而获得。在风扇发动机和螺旋桨发动机推进中，涡轮功用于驱动压气机外还驱动风扇和螺旋桨，由风扇和螺旋桨产生主要推力，燃气轮机排气也提供部分推力。在海上，许多高速客船和大中型水面舰艇已采用燃气轮机。在地面，部分坦克和比赛用汽车也开始采用燃气轮机。

火箭发动机在大气层外的高空飞行，只能依靠喷气推进，且不可能像地面发动机那样直接从环境吸入空气工质，发动机所用的燃料和氧化剂都必须由火箭自带。因此，火箭发动机可以看成是一种没有压气机和涡轮，只有燃烧室和喷管的特殊燃气轮机，贮存在容器中的燃料和氧化剂被泵注入燃烧室燃烧产生高压、高温燃气，通过设在燃烧室出口的变截面喷口形成高速燃气流，推动火箭前进。

燃气轮机又一重要用途是发电。简单循环燃气轮机在热效率方面并没有多大优势，但由于起停、变负荷速度快，使它在快速响应电网负荷变化方面占有明显的优势。国外较早发展了一种专供电网尖峰负荷用的燃气轮机调峰电站，我国随着用电量和用电峰谷差的增大，现在也已开始建设燃气轮机电站以增强电网调峰能力。然而，燃气轮机在发电领域更大的优势在于燃气轮机与汽轮机组成的联合循环动力装置。

简单循环燃气轮机效率不高的主要原因在于燃气轮机进出口工质的温度差不够大。燃气最高温度受到燃烧室和涡轮叶片材料耐高温性能的严格限制，由于这些部件连续地处于高温燃气的包围之中，即使采用耐热合金和冷却技术，目前其容许的燃烧最高温度仍然比内燃机的燃烧最高温度低。另一方面燃气轮机中，高压比、大流量压气机的设计难度很大，而压气机的压比（也就是燃气轮机工质膨胀比）不足，燃气轮机的排气温度就较高，大量的余热随排气带走，从而限制了燃气轮机热效率。

联合循环动力装置把燃气轮机和汽轮机组合起来，大大提高了联合装置的输出功率和热效率。最简单的余热锅炉式联合循环动力装置如图 1-10 所示。图中，燃气轮机回路排出的温度仍然较高的低压废气没有直接排入大气，而被引入余热锅炉，在那里把部分热量传递给水和水蒸气，待废气温度进一步降低后再排入大气。汽轮机回路与常规的汽轮机装置相似，只是余热锅炉代替了通常的燃料锅炉，余热锅炉产生的蒸汽进入汽轮机做功。余热锅炉实际上是一个热交换器，高温侧流过废热燃气，低温侧流过水和水蒸气。由于余热锅炉内并不存在燃烧，并没有耗费额外燃料，却从汽轮机回路得到了机械功。虽然燃气轮机的排气通过余热锅炉会增加一定的流动损失，输出功率稍有降低，但联合循环从燃气轮机和汽轮机得到的总功率则比简单循环燃气轮机多得多，热效率也因此大大提高。简单余热锅炉式的燃气轮机与汽轮机联合循环的热效率可达 45%。近年来，联合循环的发展十分迅速，带有压气机压缩过程中间冷却、涡轮膨胀过程中间再热、空气工质注水、注蒸汽循环以及湿空气工质

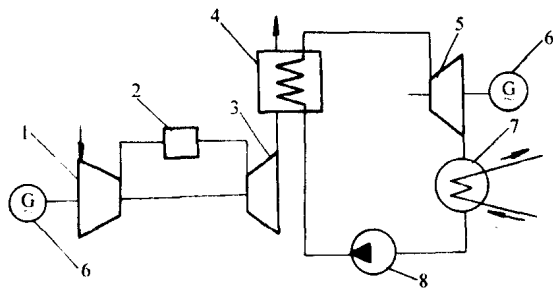


图 1-10 余热锅炉式简单燃气蒸汽联合循环

1-压气机 2-燃烧室 3-燃气涡轮 4-余热锅炉
5-汽轮机 6-负载 7-凝汽器 8-水泵