

燃气轮机结构

赵士杭 编著

清华大学出版社

燃气轮机结构

赵士杭 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

河北省固安县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

☆

开本：787×1092 1/16 印张：19 1/2 字数：470千字

1933年3月第一版 1933年3月第一次印刷

印数：1~6000

统一书号：15235·96 定价：2.40元

内 容 简 介

本书是以工业燃气轮机为重点来叙述燃气轮机的结构的。具体的内容为：压气机、透平、燃烧室三个部件的结构，燃气轮机的总体结构，燃气轮机的附属系统及设备，以及航空燃气轮机改装的燃气轮机。其中还叙述了一些专门的问题，例如：叶片顶部径向间隙的变化、透平叶片冷却、进排气蜗壳、轴承座、通流部分的清洗办法等。叙述是从设计的角度来着手的。在各个部分，都阐明了它们的设计要求及原则，介绍了多种现用的结构及其优缺点，指出了选用时的注意点等。

本书可供高等院校的燃气轮机专业、其它的透平机械专业的教学用书，以及燃气轮机和其它透平机械的设计、制造和使用单位的工程技术人员的参考用书。

前 言

我国自从1958年发展工业燃气轮机以来，至今已有二十多年的历史。在这段时间中，我国先后设计制造了多种型号的燃气轮机。但迄今为止，国内还未出版过一本系统地介绍工业燃气轮机结构的书。本书的编写就是作为一个尝试，以图填补这方面的不足。

本书是从设计的角度来叙述燃气轮机结构的。指出了总体和各个部件结构设计的要求及选用的原则，分析比较了现用的一些结构的优缺点，以及介绍了它们应用的情况。书中还介绍了燃气轮机的附属系统，以及主要设备的选用。

考虑到航空燃气轮机发展的成功经验，从原理到结构等都对工业燃气轮机的发展起了很大的作用；再考虑到航机改装为工业和船用燃气轮机的事业发展很快，因而本书在主要叙述工业燃气轮机结构的同时，也介绍了航机的一些结构，并在最后一章叙述航机改装的问题。

在本书编写过程中，参阅了国内一些工厂、科研单位、学校的有关图纸和资料；参阅了多台燃气轮机的产品样本或说明书、座谈报告及座谈纪要等；参阅了多种杂志，其中主要是“国际航空”（原名国外航空）、“Diesel and Gas Turbine Progress”及“Turbo-machinery International”（原名Gas Turbine International）中的多篇有关文章及图片。

本书由北京航空学院陈光同志进行了详细的审阅，清华大学何光新、李秀英、叶柏生、焦树建、倪维斗等同志作了详细的校阅，并都提出了许多宝贵意见。此外，北京重型电机厂协助完成了本书的描图工作。在此，谨致衷心的感谢。

由于本人的水平和能力有限，错误和不当之处，恳望读者批评指正。

赵士杭

一九八一年七月于北京

目 录

第一章 总述	1
§ 1-1 燃气轮机结构型式的发展	1
§ 1-2 整体式结构	7
§ 1-3 水平中分式及轴向装配式	14
第二章 压气机	19
§ 2-1 概述	19
一、几种通流部分型式	19
二、对结构设计的要求	20
三、结构简介	20
§ 2-2 气缸	22
§ 2-3 静叶	24
一、直接装配的静叶	25
二、静叶环	25
三、可调静叶	27
§ 2-4 转子	30
一、鼓筒式转子	30
二、盘式转子	30
三、盘鼓式转子	31
四、拉杆转子	33
§ 2-5 动叶	37
一、叶身	37
二、叶根	39
§ 2-6 气封	42
一、气封的用途	42
二、气封的工作原理	43
三、气封的结构	44
§ 2-7 径向间隙及轴向间隙	45
一、径向间隙	45
二、工作时径向间隙的变化	47
三、减小径向间隙的措施	49
四、轴向间隙	49
§ 2-8 离心式压气机的特点	50
§ 2-9 压气机所用的材料	56
一、叶片	56

二、转子	57
三、气缸	60
四、材料性能	60
第三章 透平	61
§ 3-1 概述	61
一、对结构设计的要求	61
二、结构简介	62
§ 3-2 气缸	63
§ 3-3 静叶	64
一、静叶	64
二、静叶环	65
三、静叶及静叶环的固定	67
四、可调静叶	73
§ 3-4 转子	74
一、盘式转子	75
二、盘鼓式转子	78
三、结构设计的注意点	81
§ 3-5 动叶	82
一、叶身	83
二、叶顶	84
三、叶根	86
四、振动阻尼	90
§ 3-6 径向间隙及轴向间隙	92
一、径向间隙	93
二、工作时径向间隙的变化	93
三、减小径向间隙的措施	95
四、轴向间隙	96
§ 3-7 静子和转子的冷却及隔热	97
一、透平的冷却系统	97
二、冷却及隔热结构	100
§ 3-8 热应力及有关的问题	102
一、稳定工况时的情况	103
二、过渡工况时的情况	104
§ 3-9 透平叶片的冷却	106
一、概述	107
二、叶片冷却的型式	108
三、综合冷却叶片	114
四、冷却空气的导入及要求	116
五、叶片冷却技术的进一步发展	119

§ 3-10 向心式透平的特点	121
§ 3-11 透平所用的材料	127
一、动叶	127
二、静叶	129
三、转子	129
四、静子	129
五、材料性能	132
六、高温陶瓷材料	132
第四章 燃烧室	133
§ 4-1 概述	133
§ 4-2 燃烧室的结构	135
一、旋流器	135
二、射流孔	136
三、火焰筒壁面的冷却	136
四、火焰筒的固定	138
五、刚性和热应力问题	139
六、燃烧室结构示例	141
§ 4-3 燃烧室的布置	145
一、单管燃烧室	145
二、双管燃烧室	146
三、分管燃烧室	147
四、环管燃烧室	148
五、环形燃烧室	148
§ 4-4 燃烧室所用的材料	149
第五章 转子的连接和支承	151
§ 5-1 联轴器	151
§ 5-2 转子的支承	155
一、双支点支承	155
二、三支点支承	156
三、四支点支承	156
§ 5-3 轴向推力和相对死点	157
一、轴向推力	157
二、相对死点	158
§ 5-4 套轴结构的特点	159
§ 5-5 轴承	162
一、滑动轴承的工作原理和要求	163
二、径向轴承	165
三、推力轴承	171
四、联合轴承	174

五、滚动轴承	175
§ 5-6 轴承座	177
一、轴承座的型式	178
二、穿过通流部分的连接结构	179
三、弹性支承	181
四、轴承座的密封	183
五、轴承座的隔热和冷却	187
第六章 燃气轮机的总体结构	189
§ 6-1 有回热时的特点	189
一、简述	189
二、对压气机、燃烧室和透平结构的要求	191
三、回热器的布置	193
§ 6-2 进、排气蜗壳	196
一、蜗壳设计的要求	196
二、蜗壳构型的方案	196
三、蜗壳的结构	200
§ 6-3 内部零件的方便检查措施	202
一、能局部拆卸的结构	203
二、孔探仪的应用	204
三、其它检查办法	207
§ 6-4 单元体结构	208
一、单元体结构设计概念	208
二、单元体结构示例	210
§ 6-5 通用性强的设计	213
一、单轴和分轴结构的方便变型	214
二、多种功率输出的方便变型系列设计	217
§ 6-6 燃气轮机的支承及固定	221
一、燃气轮机固定的要求	221
二、绝对死点	222
三、各种支承结构	224
四、底盘	230
第七章 燃气轮机的附属系统及设备	232
§ 7-1 概述	232
§ 7-2 附属设备的传动	233
一、传动的方案	233
二、主机传动辅机的方法	233
三、辅机传动的结构	234
§ 7-3 起动装置	235
一、起动机	235

二、离合器	236
§ 7-4 盘车装置	239
一、盘车的目的	239
二、连续盘车	240
三、间歇盘车	240
§ 7-5 滑油系统	242
一、滑油系统的要求	242
二、滑油系统的主要部件	243
三、滑油系统示例	245
§ 7-6 通流部分的清洗装置	247
一、清洗的目的	247
二、几种清洗方法和设备	248
三、清洗的间隔和功率的恢复	251
§ 7-7 空气滤清设备	253
一、空气滤清的目的和要求	253
二、空气滤清器的几种型式	255
三、滤清设备的选择	260
四、除雪和防冰	263
§ 7-8 消声与隔声	264
一、噪声及其容许标准	264
二、消声器	268
三、隔声	275
四、合理的布局	275
§ 7-9 进、排气管路系统	276
一、进气系统	276
二、排气系统	278
第八章 航机改装的燃气轮机	281
§ 8-1 概述	281
一、发展简况	281
二、优点	283
§ 8-2 燃气发生器	284
一、参数选择和部件改型	284
二、结构和材料等的改进	285
三、调节和保安系统的改型	286
四、改型的示例	286
§ 8-3 动力透平与单个燃气发生器相配的机组	288
一、动力透平的结构	288
二、机组的总体结构	293
§ 8-4 用于发电时的多种配合方案	296

一、两台或多台改装的燃气轮机带动一台发电机.....	296
二、数台燃气发生器配一台动力透平来带动发电机.....	298
三、多台燃气发生器和动力透平带动一台发电机.....	299
主要参考书.....	299

第一章 总 述

自从1939年第一台燃气轮机投入使用以来,至今已有四十多年。在这不太长的时间内,燃气轮机的发展是很迅速的,特别是在近二十多年内,其性能与结构不断地提高和完善,应用场所已扩大到了国民经济的很多部门,成了热机中的一支劲旅。

在燃气轮机的发展过程中,合理的结构设计及其不断的完善起了很大的作用。可以这样说,它是使燃气轮机不断提高性能的基础之一。在本章中我们先就燃气轮机结构作一总的简述,然后在以后各章中就各个部件及总体的结构等方面分别给以叙述。

§ 1-1 燃气轮机结构型式的发展

目前,大中型燃气轮机的结构型式大体可以分为两类,一类是工业型,一类是航机改装型。前者是按地面工作要求而设计的,主要的要求是寿命长、能长期安全运行;其次是达到较高的效率、少用贵重合金材料。航机改装型则是把航空用的涡喷(涡轮喷气)发动机、涡扇(涡轮风扇)发动机、涡桨(涡轮螺旋桨)发动机、涡轴(涡轮轴)发动机等加以改装后用于工业及船用的机组,其主要特点是结构比工业型的轻巧、燃气初温高、机组效率高。这即通常所说的航机改装,它开始于40年代。

工业型燃气轮机是目前地面上应用最广泛的机组,由于要求寿命长(一般按工作十小时来设计),在长期连续运行中安全可靠要求高,使其重量较重,尺寸也较大。在燃气轮机发展的前期,即40年代到50年代,由于制造厂的条件、习惯、经验等的不同,就整台燃气轮机来说,工业型机组的结构又可分为两种。一种是压气机、燃烧室、透平之间气流用管道连接起来,布置较分散,因而重量重且尺寸大,显得很笨重。另一种是压气机、燃烧室、透平直接连接成一体,称为整体式结构,与航空燃气轮机有些相象,故结构紧凑、重量较轻、尺寸较小。过去,曾有人根据上述特点,把分散布置的称为重型机组,整体式的称为轻型机组。

生产分散布置机组的工厂,一般都是原来生产蒸汽轮机的工厂,它们是按照设计制造蒸汽轮机的经验来设计燃气轮机的结构的。例如瑞士的BBC(布朗·波维利公司)、苏联的JIM3(列宁格勒金属工厂)等。其特点是压气机和透平各自独立,两者的气缸分别支承在支座上,支座再固定在安装基础或钢结构的底盘上,即通过基础或底盘把压气机与透平的气缸连接起来,再以联轴器把两者的转子连接起来。当轴承座与气缸分为两体时,一般是气缸支承固定在轴承座上,轴承座再固定在基础或底盘上,这时仍然是通过基础或底盘把两者的气缸连接在一起。这种机组的燃烧室一般采用单管式,尺寸较大而需单独支承,与压气机、透平之间用管道相互接通。

简单循环单轴机组采用分散布置结构的一个例子见图1-1,它是1500千瓦发电用燃气轮机。从图看出,压气机和透平是由各自气缸上的、位于进排气端的搭爪(每端两个)支承在支座上,由于下部管道较多,使压气机和透平需安装在高出地面较多的平台上。机组

的燃烧室布置在上方，用专门的支架支撑。该机组的重量仅压气机、燃烧室、透平三个部件本体就在20吨以上，甚为笨重。而其尺寸，从图看出显然是较大的，特别是所占的空间

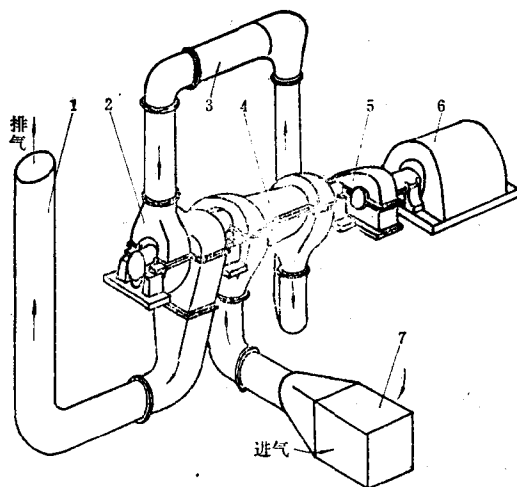


图 1-1 分散布置结构的燃气轮机

1—烟囱 2—透平 3—燃烧室 4—压气机 5—减速齿轮箱 6—发电机 7—空气进口过滤器

很大。该机组需分为多个部件分别装箱运输。到安装工地后再逐件地装配和安装起来，故它运输麻烦，安装周期长，所需费用大。

分散布置结构机组的另一个例子见图1-2和图1-3，它是BBC在50年代制造的6000千瓦发电用单轴燃气轮机。其压气机和透平也是单独的两体，两者的转子用联轴器相连接。压气机和透平转子均采用焊接结构，这是BBC的传统结构，是该公司生产的燃气轮机的一

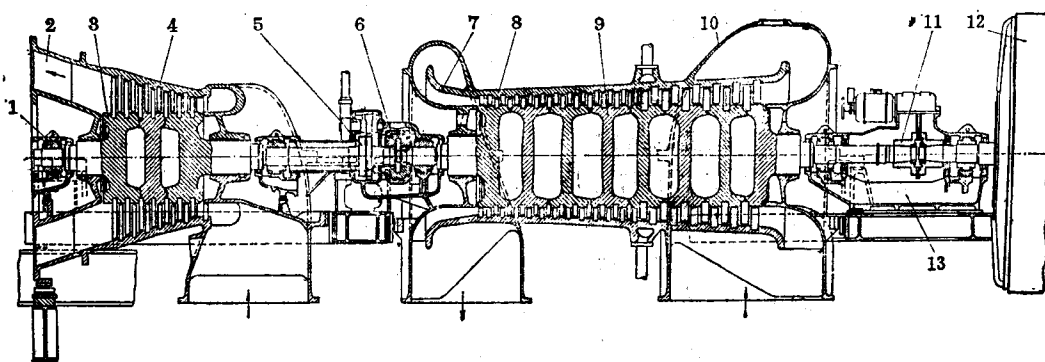


图 1-2 6000千瓦燃气轮机

1—径向轴承 2—透平出口扩压器 3—透平转子 4—透平气缸 5—联轴器 6—推力轴承 7—压气机出口扩压器 8—压气机气缸 9—压气机转子 10—压气机进气缸 11—输出联轴器 12—发电机 13—轴承座

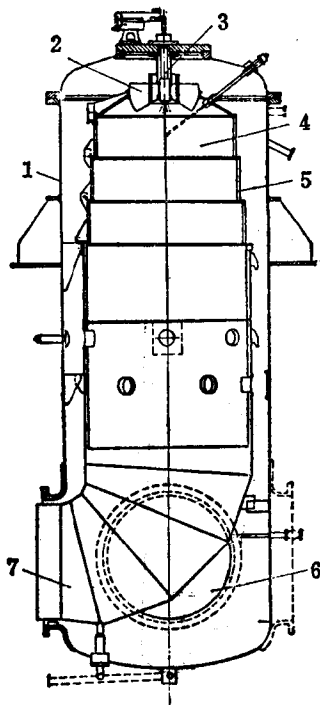


图 1-3 燃烧室

1—燃烧室外壳 2—旋流器 3—喷油嘴 4—火焰筒 5—冷却挂片 6—空气进
口 7—燃气出口

个显著特征。压气机气缸在进气端及排气端用搭爪支承在支座上。透平气缸在进气端亦用搭爪支承在支座上，而在排气端则支承在两个能活动的支撑摇杆上。支撑摇杆的结构见 § 6-6。机组的燃烧室见图1-3，是单管回流式，直立布置在机组一侧。火焰筒是冷却挂片结构。冷却挂片是在空气侧有冷却筋片的长条形零件，把很多块这种挂片排列挂在圆形框架上就组成了一个圆筒，再把数段直径不同的这种圆筒组合在一起，就形成了图中所示的阶梯状的火焰筒，这也是BBC的传统结构。该机组总重约120吨，单位重量为20公斤/千瓦，和下面例举的、单位重量为2.5公斤/千瓦的一台整体式结构机组相比较，显然重得多。造成重量差别大的原因，除结构的因素外，还与压气机、燃烧室、透平的性能有关，如转子叶片圆周速度的高低、转速的高低、燃烧室热强度的高低等有关。该6000千瓦机组由于这些方面的数值都较低，使其体积较大，从而更增大了重量。

生产整体式结构机组的，很多是同时生产或原来生产过航空燃气轮机的工厂，它们按照或部分按照航空燃气轮机的经验来设计地面燃气轮机。例如美国的GE公司（通用电气公司）、WH公司（西屋电气公司），瑞典的Stal-Laval（斯达·拉瓦尔）工厂等。也有一些工厂原来虽未生产过航空燃气轮机，但吸收了航机的特点来进行结构设计，如英国的Ruston（鲁斯顿）公司。

图1-4为美国GE公司于1948年制成的第一台工业型燃气轮机，用于机车牵引动力。它是以TG-180（J-35）涡喷发动机为母型来设计的，功率4800马力。它是一台整体式结构机组，压气机和透平的气缸在燃烧室处用六块均布的筋板连接成一体，六个顺流式分管燃

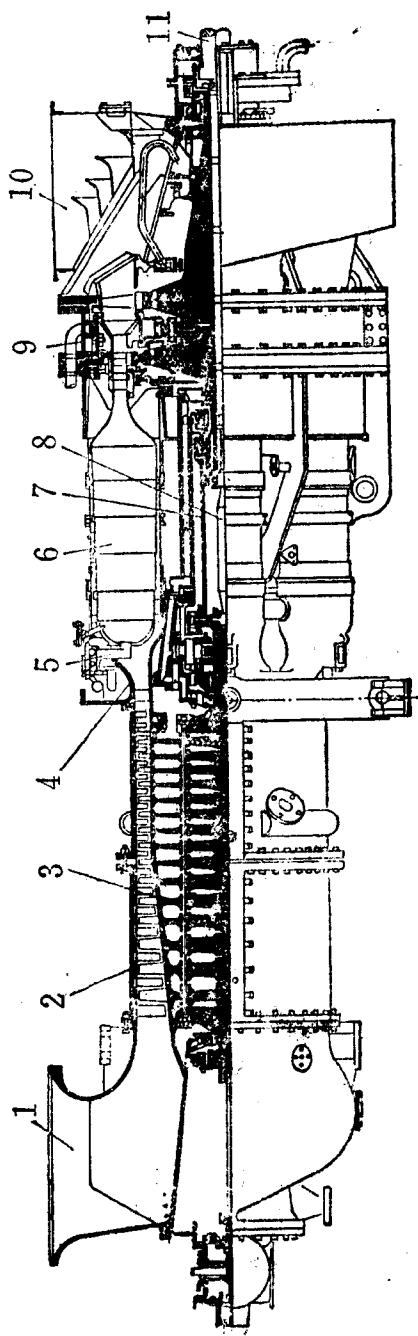


图 1 4 4800马力机车燃气轮机

- 1—压气机进气缸 2—压气机气缸 3—压气机转子 4—压气机出口扩压器 5—
 喷油嘴 6—燃烧室 7—联轴器 8—轴向推力传递杆 9—透平 10—透平排气
 缸 11—减速齿轮箱传动轴

烧室位于筋板之间。机组的压气机、燃烧室、透平的气流通道是直通式的布置，与航空燃气轮机相同。15级压气机的转子用外围拉杆螺栓连接固紧，该结构GE公司一直沿用到现在。两级透平的转子用外围短螺栓及一根中心拉杆螺栓连接固紧。两个转子各自支承在两个轴承上，中间以较长的齿式联轴器相连接，自透平排气端输出功率。与上述的6000千瓦机组相比较，本机组结构紧凑轻巧，其本体仅重9吨，单位重量约2.5公斤/千瓦。

从上述可看出，在燃气轮机发展的初期，整体式结构与分散布置结构相比较，前者已显示出无可争辩的优越性。它重量轻、体积小，便于整体装箱运输，在工地的安装工作量较小，安装周期短。因而自60年代起，一些原来生产分散布置结构的工厂，如BBC及JIM3，都将其生产的燃气轮机改为整体式结构。因此，目前各国生产的工业型燃气轮机均为整体式结构。

航机改装的燃气轮机是把那些有相当数量累计飞行小时数的、成熟的航空燃气轮机加以适当改装而成。改装的情况视发动机的种类不同而不同：对涡喷发动机，去掉尾喷管并适当改进后加装动力透平；对涡扇发动机，去掉或改变前面的风扇部分，适当变更透平，去掉尾喷管，加装动力透平；对涡桨发动机及涡轴发动机，由于它们在空中就是输出轴功率，因而改装的工作量较少。地面和空中要求的主要不同点是：地面要求的使用寿命长，希望大修间隔能达到1~3万小时；其次是周围环境的空气比高空脏，且不少的含有腐蚀的成份。故航机改装时，要降低燃气初温及工作转速，同时改变一些零件的材料乃至结构。此外，还要对燃烧室重新调试并改型，使能燃用柴油或天然气等燃料。其它如调节系统及附属系统等，也应按使用的要求来改装或重新设计，详见第八章。

目前，西方国家大量生产航空燃气轮机的工厂主要有：英国RR公司（罗耳斯·罗伊斯公司），美国的PWA公司（普拉特·惠特尼公司）、GE公司，它们是西方国家中三家最大的航机制造厂。它们不断研制新的航机，成批生产多种型号的航机，同时不断地把使用成熟的航机加以改装用于工业及船用。它们除自己成批生产改装后的燃气轮机外，同时还成批生产燃气发生器供应其它工厂，由这些工厂配置动力透平及其它的各种设备再供应用户。这些机组仍保留航机的特点，如结构紧凑、重量轻（单位重量一般在2公斤/千瓦之内）、效率高（已达到34~38%）等。在实际运行中，很多航机改装的机组在燃用天然气并作为基本负荷用时，大修间隔的时间已达到2~3万小时，很好的满足了地面需长期安全运行的要求。故目前航机改装的燃气轮机发展很快，在整个燃气轮机中所占的比重在不断地增大。

图1-5为RR公司用涡喷发动机Avon（埃汶）改装成的燃气发生器，1964年投入使用，至1980年已经生产了900多台，累计运行时间达1千万小时以上。该燃气发生器与Avon涡喷发动机的结构相同，主要是改变了压气机和透平中部分零件的材料，重新设计了燃烧室及附属系统等。17级压气机轮盘装在一个空心大鼓轴上。整个转子以三个轴承来支承，其中3级透平转子是悬臂的。燃烧室是有八个火焰筒的环管型。整台燃气发生器看上去仍和一台航空发动机一样，重量仅1615公斤。在Avon燃气发生器投产以来，由于RR公司对其性能不断地改进，如提高转速、透平叶片采用空气冷却以提高燃气初温，使其排气功率由最初的17800气马力提高到23800气马力，增加了约1/8。后者在配以动力透平后，机组的输出功率大于2万马力，效率达29%。

目前，以Avon燃气发生器加装动力透平的机组，主要用于发电、天然气及石油管道输送的增压站，机组运行的可靠性达到了高的水平。例如在天然气管道输送中作为基本负

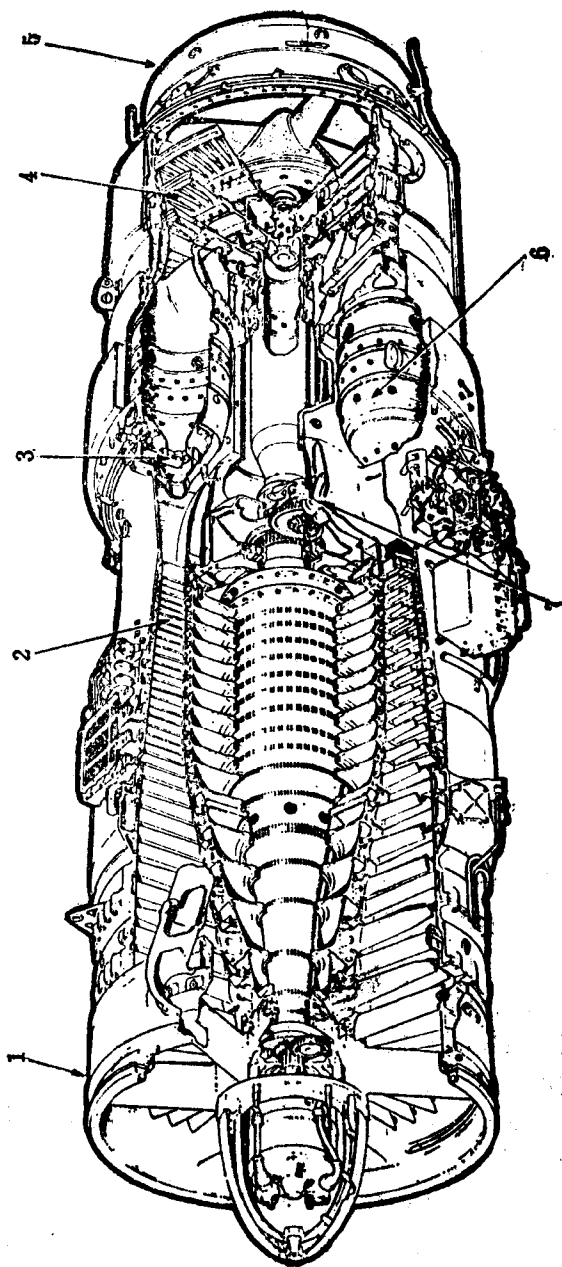


图 1-5 Avon燃气发生器

1—压气机进气机匣 2—压气机 3—燃料喷嘴 4—透平 5—透平排气机匣 6—
燃烧室 7—辅机传动

荷用时，燃气发生器的大修平均时间间隔已接近于3万小时。

在燃气发生器后加装的动力透平，一般的工厂均按工业型燃气轮机长寿命的要求来设计，零件较为厚重，采用滑动轴承，工作转速也比燃气发生器的低，因而动力透平的重量及尺寸均较大。通常，加装的动力透平连同需配置的底盘和附属设备等的重量，往往比燃气发生器大很多倍，例如十几倍甚至更大，成为决定整台机组重量的主要因素。因此，航机改装的燃气轮机，大多数的重量比原航机大为增加，变得与工业型燃气轮机相近。

图1-6是Avon燃气发生器加装两级动力透平后得到的燃气轮机。从图看出，动力透平的尺寸较大，零件比燃气发生器的厚重，转子为悬臂支承在两个滑动轴承上。由于动力透

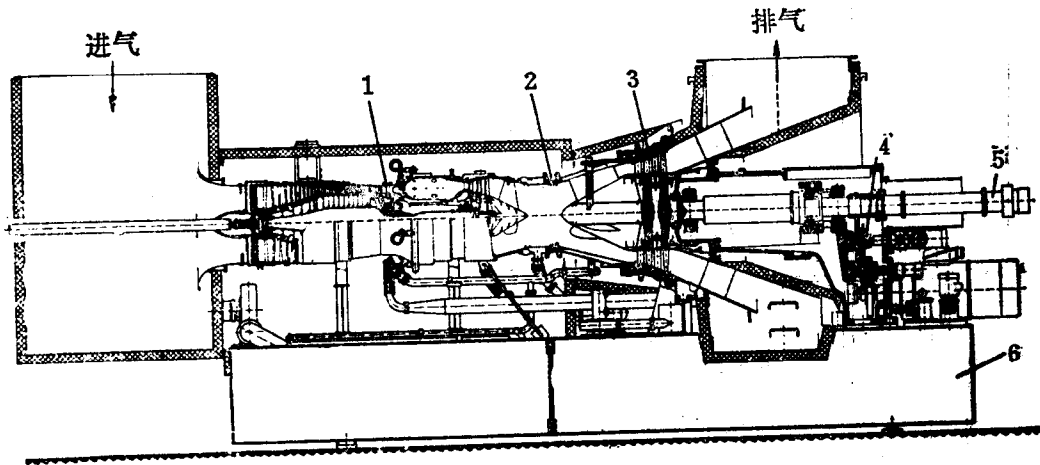


图 1-6 Avon燃气发生器加装动力透平而成的燃气轮机

1—Avon燃气发生器 2—过渡机匣 3—动力透平 4—动力透平处的辅机传动
5—输出轴 6—底盘

平的直径比燃气发生器的大不少，因而两者之间有一过渡机匣。机组总重28吨，单位重量约1.9公斤/千瓦。

上面所述的是燃气轮机结构的大体分类及其发展简况。由于目前地面所用的燃气轮机以工业型的整体式结构为主，故在本书中重点叙述整体式结构，同时也叙述一些航机的结构。

§ 1-2 整体式结构

如上所述，整体式结构的显著特征是压气机、燃烧室、透平相互连接成一体。图1-4所示的4800马力燃气轮机是早期的例子。该机组的压气机和透平的转子各自分别支承，中间以联轴器相连接，即整个转子支承在四个轴承上。随着燃气轮机结构的不断改进，在50年代就开始出现了把透平和压气机转子连接成一体后支承在两个（有的是三个）轴承上的结构。这样一来，简化了机组的结构，并使可靠性得到提高。

下面再例举几台燃气轮机，以简述整体式结构的一些特点。

图1-7为我国南京汽轮电机厂生产的1000千瓦单轴燃气轮机，它由11级压气机、单管