

燃气轮机与压缩机组 操作维护手册

《燃气轮机与压缩机组操作维护手册》编委会 编



石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机与压缩机组操作维护手册/《燃气轮机与压缩机组操作维护手册》编委会编. —北京: 石油工业出版社, 2009. 9
ISBN 978-7-5021-7355-5

I. 燃…

II. 燃…

III. ①燃气轮机-操作-技术手册

②燃气轮机-检修-技术手册

③离心式压缩机-操作-技术手册

④离心式压缩机-检修-技术手册

IV. TK 47-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 160591 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 49.25

字数: 1260 千字 印数: 1—1000 册

定价: 168.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《燃气轮机与压缩机组操作维护手册》编委会

主 任：赵书辉

副主任：孙兴祥 刘保侠 伍 焱 赵维元 刘建臣
李晓魁 程庆功

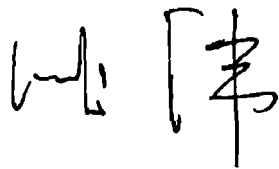
成 员：赵国辉 王 辉 孙明周 郭向光 袁立玮
刘福昌 贾光明 尹广增 许广波 张世强
陈瑞成 林立明 汪建国 李 杰 魏幼峰
祁红军 田克迎 丁 雨 高 斌 罗少春
陈文君 刘君涛 章 波 杨 光 李国栋
陶 金 王永军 李 亮 李国斌 王 宁
姜大海 时振江 逢仁刚

序

进入 21 世纪，国内长输天然气管道发展迅速，天然气在能源结构中所占比例快速增长，天然气输送与经济社会和民生的关系更加紧密，相应也承担着更加重大的安全、经济和社会责任。

燃气轮机与压缩机组用于增加长输天然气管道的输送能力，是管道运行的核心设备。燃气轮机驱动离心式压缩机由于利用天然气本身做动力来源，逐渐成为天然气管道压缩机组主流配置，属于国际先进的中小型压缩机技术设备。

涩宁兰管道地跨柴达木盆地、青藏高原和黄土高原，2005 年引入燃气压缩机组，逐渐摸索了机组在恶劣自然环境的运行规律，培养了一批具有较强动手能力的技术人员，达到压缩机组单机连续运行时间、机组故障停机率国内领先水平。本书以涩宁兰管道燃气透平离心式压缩机组为原型，结合实际运行经验，详细描述了燃气轮机与压缩机组及附属设施的原理、结构、操作和维护保养知识，具有很强的实效性和指导性。希望本书的出版，能为专业人员提供借鉴，更好地掌握燃气轮机与压缩机组的运行规律，保障输气管道的平稳运行，推动管道事业的安全高效和谐发展。



2009 年 9 月

前 言

涩宁兰输气管道增压工程于 2004 年启动, 2005—2007 年 3 年时间建设了 4 座压气站, 首期共配置了 6 台燃气轮机与压缩机组。至 2011 年底, 涩宁兰输气管道将有 15 台燃气轮机与压缩机组。

自 2005 年第一座压气站投产至今, 涩宁兰输气管道一直致力于培养一批高水平的燃气轮机与压缩机组运行、维护、操作人员。目前国内有关燃气轮机与压缩机组的资料较少, 有关压气站燃气轮机与压缩机组运行维护的资料更是少之又少。鉴于此, 涩宁兰输气管道公司决定依托自身力量, 编写《燃气轮机与压缩机组操作维护手册》, 不仅可用于培训本公司的运行人员, 同时可供天然气输送的兄弟单位参考。

本手册是由涩宁兰输气管道公司领导、燃气轮机与压缩机组运行中心及各压气站有关人员历时两年, 在参考了约 9000 页英文资料的基础上编制而成。全书共分四个部分: 第 1 章至第 4 章为有关燃气轮机的内容; 第 5 章至第 10 章为有关压缩机的内容; 第 11 章至第 13 章为压气站的主要配套设备; 最后一部分为附录。

在本手册的编写过程中, 得到了管道公司各级领导的高度关注和大力支持, 同时得到中国石油大学有关专家的指导, 在此一并致谢。

由于本手册编者从事燃气轮机与压缩机组操作维护时间较短、水平有限, 书中难免有不妥之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 9 月于兰州

目 录

第 1 章 燃气轮机概述	(1)
1.1 燃气轮机的演化	(1)
1.2 燃气轮机的应用	(2)
1.3 燃气轮机的组成	(4)
1.4 燃气轮机的系统理论	(8)
1.5 燃气轮机的控制	(9)
1.6 燃气轮机的附属设施	(10)
第 2 章 机组主要系统介绍	(13)
2.1 启动系统	(13)
2.2 燃料系统	(21)
2.3 控制模式与软件	(25)
2.4 电气控制系统	(30)
2.5 润滑油系统	(70)
2.6 箱体和辅助设备	(79)
2.7 涡轮发动机	(89)
第 3 章 附属设备	(137)
3.1 电气与安全设备	(137)
3.2 仪表自动化设备	(204)
3.3 机械设备	(414)
第 4 章 燃气轮机操作指南	(517)
4.1 辅助端操作系统介绍	(517)
4.2 站控室操作	(530)
第 5 章 压缩机基本介绍	(544)
5.1 概况	(544)
5.2 技术参数	(544)
第 6 章 压缩机结构与原理	(545)
6.1 工作原理	(545)
6.2 基本结构	(545)
第 7 章 压缩机的运行	(557)
7.1 振动监测	(557)
7.2 振动频率分析	(559)
7.3 平衡	(561)
第 8 章 压缩机的维护保养	(563)
8.1 检测	(563)
8.2 停机保养	(563)

8.3	紧固	(564)
8.4	专用工具	(564)
第9章	压缩机的故障分析及处理	(566)
9.1	压缩机部分	(566)
9.2	密封气部分	(568)
第10章	压缩机的附属设备	(571)
10.1	防喘阀	(571)
10.2	干气密封气过滤器	(579)
10.3	加载阀	(587)
10.4	空冷器	(588)
第11章	燃气发电机	(608)
11.1	主要性能参数	(608)
11.2	结构	(608)
11.3	工作原理	(610)
11.4	并车柜的功能	(610)
11.5	运行过程中参数监控	(610)
11.6	操作规程	(611)
11.7	定期维护保养内容	(612)
11.8	机组常见故障与处理	(613)
11.9	并车柜报警代码及故障处理	(614)
第12章	空气压缩机	(617)
12.1	简介	(617)
12.2	结构介绍	(617)
12.3	工作原理	(618)
12.4	联控柜	(619)
12.5	维护保养内容及方法	(630)
12.6	常见故障与处理	(632)
第13章	Rotork IQ 系列电动执行机构	(636)
13.1	组成及功能	(636)
13.2	操作	(636)
13.3	显示器	(637)
13.4	执行机构的检查与维护	(637)
13.5	常见故障排查	(638)
附录 A	各系统启动、运行控制原理图	(639)
A.1	机组启动检查程序框图	(639)
A.2	启动、加载到正常运行程序框图	(642)
A.3	试验带转 (TEST CRANK) 程序框图	(646)
A.4	防火系统程序框图	(467)
A.5	备用继电器系统程序框图	(647)
A.6	机组卸载正常停机程序框图	(648)

附录 B 燃气轮机与压缩机组各系统控制流程 (649)

 B. 1 启动程序 (649)

 B. 2 排放系统 (650)

 B. 3 压缩机密封系统 (650)

 B. 4 燃气轮机箱体系统 (654)

 B. 5 压缩机监控 (658)

 B. 6 辅助系统 (660)

 B. 7 其他控制 (662)

 B. 8 场站阀门控制 (663)

 B. 9 燃料系统 (666)

 B. 10 滑油系统 (690)

 B. 11 重要的安全程序 (697)

 B. 12 双轴燃机泄放轴承温度监控报警和停机报警 (727)

 B. 13 防喘控制系统 (743)

附录 C 其他相关资料 (753)

 C. 1 报警提示信息及处理方法 (753)

 C. 2 常见英文缩写统计表 (771)

 C. 3 机组性能曲线 (777)

第 1 章 燃气轮机概述

1.1 燃气轮机的演化

1.1.1 历史

燃气轮机是以连续流动的气体为工质带动叶轮高速旋转，将燃料的能量转变为有用功的内燃式动力机械，是一种旋转叶轮式热力发动机。

中国在公元 12 世纪的南宋高宗年间就已有走马灯的记载，它可以说是是涡轮机（透平）的雏形。15 世纪末，意大利人列奥纳多·达芬奇设计出烟气转动装置，其原理与走马灯相同。至 17 世纪中叶，透平原理在欧洲得到了较多应用。

1791 年，英国人巴伯首次描述了燃气轮机的工作过程，然而直到 1920 年，德国人霍尔茨瓦特才制成第一台实用的燃气轮机（图 1.1.1），其效率为 13%、功率为 370kW。1939 年，瑞士 BBC 公司制成世界上第一台功率为 4000kW 的工业燃气轮机，此后，经过 70 年的发展，燃气轮机已在发电、管线动力、舰船动力、坦克和机车动力等领域获得了广泛应用。

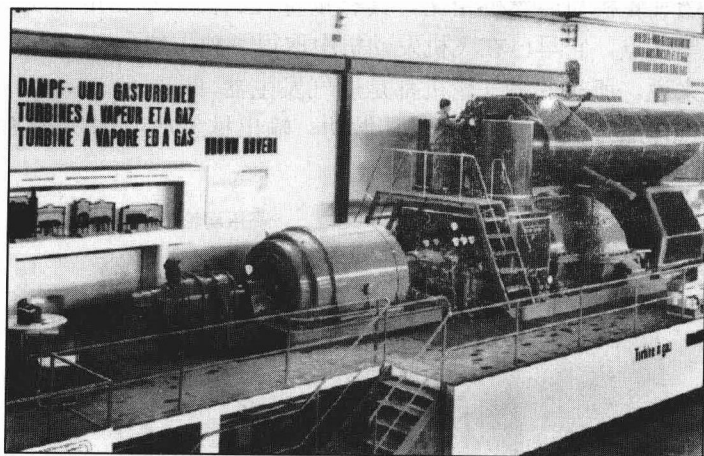


图 1.1.1 世界上第一台工业燃气轮机（瑞士 BBC 公司）

1.1.2 技术改进

技术的进步使燃气轮机得到广泛的应用，同样，燃气轮机的普及应用对燃气轮机技术也起到推动作用。相比以前而言，现代燃气轮机（图 1.1.2）大发展主要归功于以下三个因素：

- 1) 冶金技术的进步使燃气轮机的燃烧室和涡轮（Turbine）能耐更高的温度；
- 2) 空气动力学和热力学知识的不断发展；
- 3) 计算机技术不仅在燃气轮机设计阶段起到巨大作用，同时也使燃气轮机的控制更加高效和可靠。

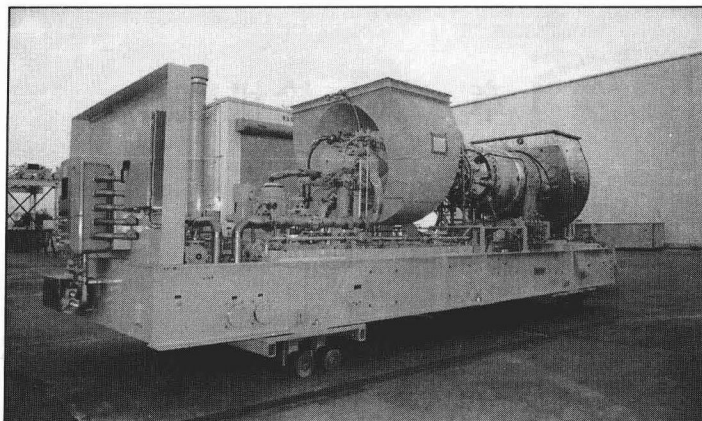


图 1.1.2 现代工业燃气轮机 (Solar Turbines 公司 Titan130 燃气轮机)

1.2 燃气轮机的应用

燃气轮机以不同的功能在很多行业有着广泛的应用，但是所有的应用形式都可以分为两大类：飞机发动机和机械驱动。

飞机发动机：燃气轮机与内燃机相比，具有重量轻、体积小、单机功率大、运行平稳、寿命长、维修方便等优点，它早已在飞机发动机中取得了独占地位。

从严格意义上来说，所有的燃气轮机都是燃气发生器 (Gas Generator)。燃料在燃烧室燃烧后产生的炽热气体通过涡轮 (Turbine) 做功，输出推力或者轴功。飞机发动机就是输出推力的燃气轮机 (图 1.2.1)。

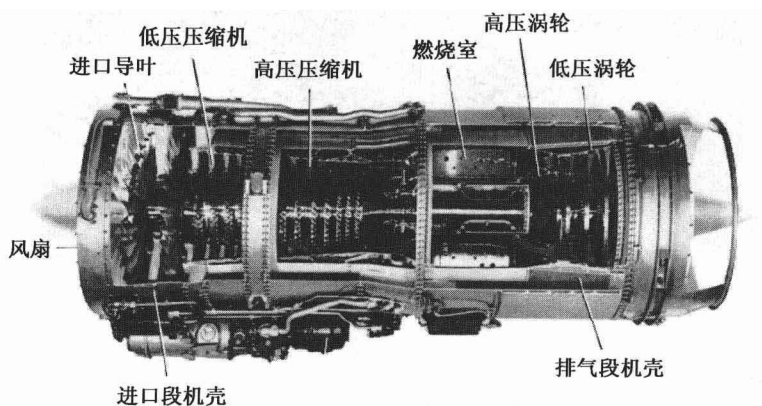


图 1.2.1 典型的飞机发动机组成 (JT8D 型)

机械驱动：以机械驱动的形式存在的燃气轮机广泛应用于舰船、机车动力、发电、海上采油气平台及管道输送等。

用作机械驱动的燃气轮机与用作飞机发动机的燃气轮机原理、结构基本一致，只是前者比后者多了动力透平 (Power Turbine)，因此不像后者那样输出的是推力，而是输出轴功 (图 1.2.2)。

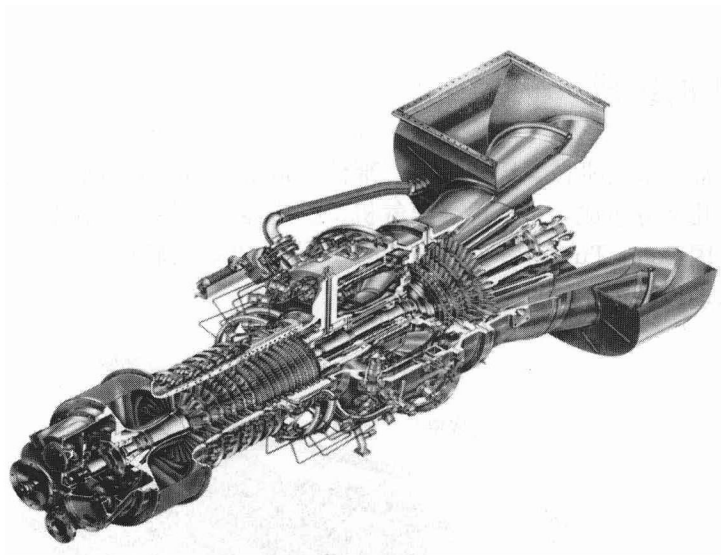


图 1.2.2 用于机械驱动的燃气轮机 (Solar Turbine 公司
Titan130 机械驱动燃气轮机)

本书将重点介绍用于驱动天然气管道压缩机的现代燃气轮机。随着我国经济的高速发展,对能源的需求也在迅速增长,天然气作为一种高效、优质、清洁的一次能源和化工原料,在我国能源结构中的比例正在迅速增大。自进入 21 世纪以来,我国陆续建成了涩宁兰、忠武、西气东输一线、陕京二线、冀宁和兰银管道,正在建设或者规划建设的天然气管道有西气东输二线、东北天然气管网、中哈天然气管道、中土天然气管道等。近 10 年来,我国天然气长输管道的迅猛发展,管道压气站的建设和投用也达到了高峰。目前已分别在 9 条天然气管道上建成投产 31 座压缩机站,共投运各类型管道压缩机组 72 套,其中大多数为燃气轮机驱动 (图 1.2.3)。今后几年内,还将有多座燃气轮机驱动压缩机的压气站建成。

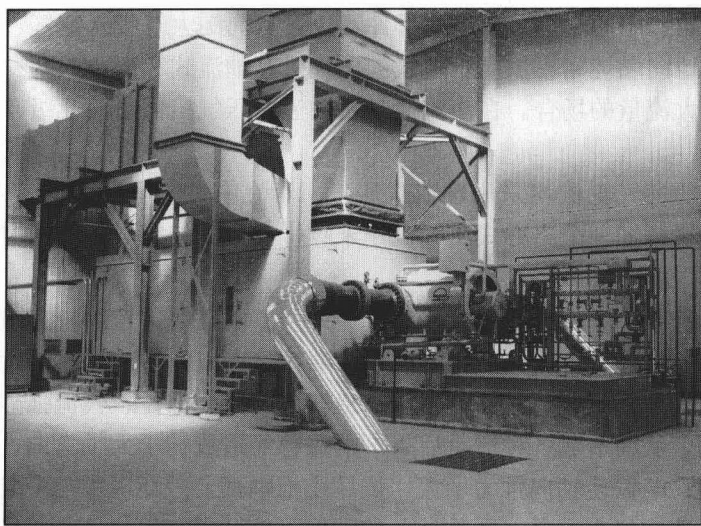


图 1.2.3 燃气轮机驱动压缩机输送天然气 (涩宁兰输气管道乌兰压气站)

1.3 燃气轮机的组成

燃气轮机是非常复杂的机械，组成的零、部件非常多，但是概括来讲，典型的燃气轮机不外乎由以下主要几部分组成：进气段、压气机、扩压器、燃烧室、透平、排气段。

图 1.3.1 为美国 Solar Turbines 公司生产的 Titan 130 燃气轮机的主要组成部分示意图，其中减速箱根据从动设备的不同要求可能是联轴器等。

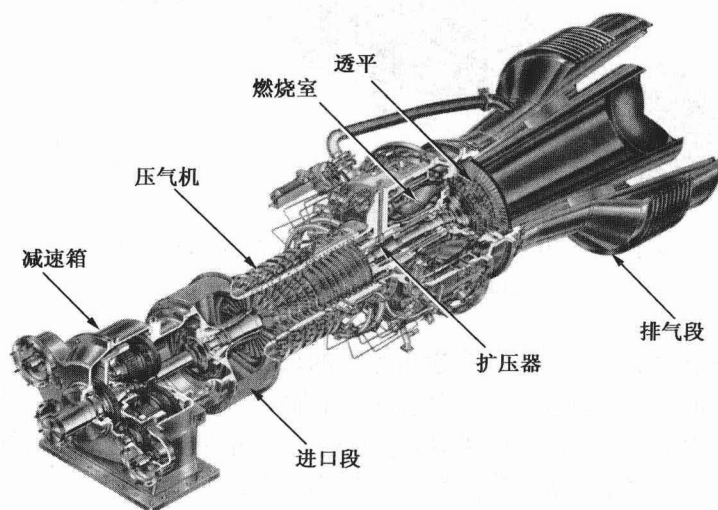


图 1.3.1 燃气轮机的组成 (Solar Turbine 公司 Titan130 燃气轮机)

在燃气轮机所有组成部分中，压气机、燃烧室和透平段为三大核心。

1.3.1 压气机

压气机是燃气轮机中的一个重要组成部件，负责从周围大气吸入空气，并将空气压缩增压，然后连续不断地向燃烧室提供高压空气。压气机有轴流式和离心式两种，轴流式压气机效率较高，适用于大流量的场合。在小流量时，轴流式压气机因后面几级叶片很短，效率低于离心式。

现代较大功率的燃气轮机均采用轴流式压气机，在有些对尺寸有较高要求的燃气轮机中，采用轴流式压气机加一个离心式压气机作末级，在达到较高效率的同时又缩短了轴向长度 (图 1.3.2)。

任何压缩机运行中一个特殊现象就是喘振。许多事实证明，压缩机大量事故都与喘振有关，防止喘振是压缩机运行中极其重要的问题。喘振之所以能造成极大的危害，是因为在喘振时气流产生强烈的往复脉冲，来回冲击压缩机转子及其他部件；气流强烈的无规律的震荡引起机组强烈振动，从而造成各种严重后果。喘振曾经造成转子大轴弯曲、密封损坏，造成严重的漏气，漏油；喘振使轴向推力增大，烧坏止推轴瓦，破坏对中与安装质量，使振动加剧；强烈的振动可造成仪表失灵；严重持久的喘振可使转子与静止部分相撞，主轴和隔板断裂，甚至整个压缩机报废。

燃气轮机的压气机也是压缩机的一种，之所以称为压气机是为了和它所驱动的管线离心

压缩机区分。同样，压气机也存在喘振的问题，因此采取了不少措施预防压气机喘振，如可转动的导流叶片、放气阀等。

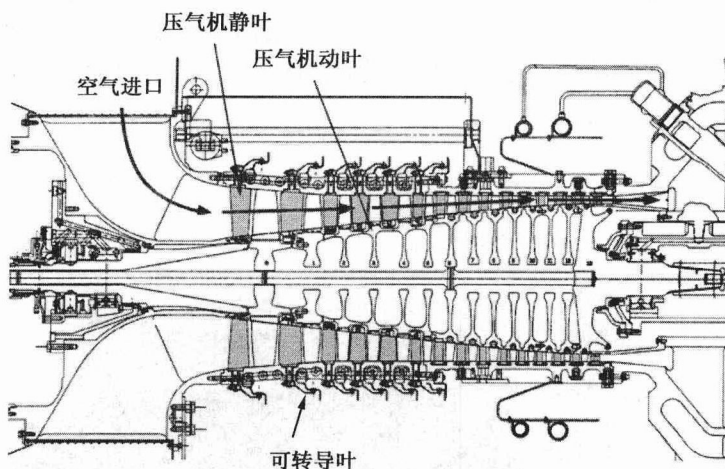


图 1.3.2 轴流式压气机

1.3.2 燃烧室

燃烧室是燃气轮机中使喷入的燃料与从压气机来的高压空气混合燃烧从而形成高温燃气的设备。它能在近乎等压的条件下把燃料中的能量释放出来，直接加热水质（空气）以提高其做功能力。

为了适应燃气轮机轻小的特点，燃烧室的尺寸都设计得比较紧凑，一般它在单位时间和单位体积内能够燃烧释放出比常压锅炉大 10~300 倍的热量，因而燃烧过程是在高温、高速流动的连续气流中进行的。此外，由于进入燃气透平的燃气初温的限制，供给燃烧室的空气流量与燃料流量的比值总是比理论燃烧条件下的配比关系大得多，而且气流的温度、压力和流速都随燃气轮机负荷的改变而发生较大幅度的变化，有时还要求同一个燃烧室能够兼烧多种燃料。这些特点使得燃烧过程甚难组织，为此必须采取特殊措施，否则，燃烧室会被烧坏，火焰容易被吹灭，燃料不能完全燃烧，火焰伸得过长而烧毁燃气透平。

燃烧室通常有圆筒型、分管型、环管型和环型之分。典型的燃烧室由扩压段、外壳、火焰筒、燃料喷嘴、点火器和燃气导管等部件组成（见图 1.3.3）。在火焰筒上一般都装有旋流器，并开设一次空气射流孔、二次空气掺混射流孔和冷却空气射流孔。此外，为了把火焰筒安装在外壳中，还设置有定位元件。在分管型和环管型燃烧室中，为了点火传焰和平衡各燃烧室之间的压力，还装设有联焰管，使各火焰筒的燃烧空间能够彼此沟通。

对于图中的燃烧室来说，由压气机（也即压缩机）送来的高压空气，首先在扩压段中扩压降速，以减小气流流经燃烧室时的流阻损失，同时使火焰能在速度稍低的火焰筒中稳定地燃烧，以防被吹灭。进入燃烧室的空气分流成为几个部分逐渐流入火焰筒，以适应空气流量与燃料流量的比值总是比理论燃烧条件下的配比关系大很多的特点。其中之一称为“一次空气”，它分别由旋流器和一次空气射流孔流入火焰筒前端的燃烧区，与由燃料喷嘴供来的燃料混合和燃烧，转化成为 1500~2000℃ 的燃气，这部分空气大约占进入燃烧室的总空气流量的 25%；另一部分空气称为“冷却空气”，它通过许多排冷却空气射流孔，沿着火焰筒的

内壁表面流动，形成冷却空气保护膜，与在外壳和火焰筒之间流动的气流一起，冷却高温的火焰筒壁，使其免遭烧坏。剩下的那部分空气则称为“二次掺混空气”，它由开在火焰筒尾部的掺混射流孔喷射到由燃烧区流来的高温燃气中去，以使燃气温度能够比较均匀地降低到燃气初温的设计值。这股燃气通过燃气导管送到燃气透平中去做功。调整各股空气流量的分配规律、改善燃料雾化质量及其与一次空气流的配比关系，设计良好的燃烧室和燃料喷嘴的结构，可以保证满意的燃烧性能。

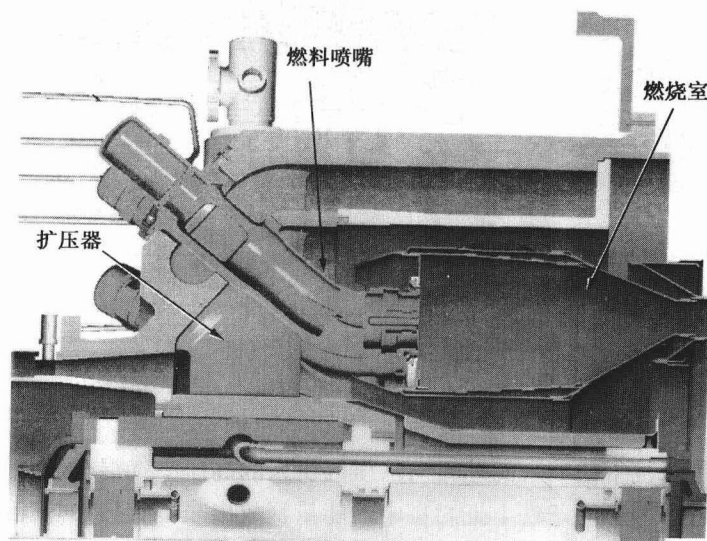


图 1.3.3 燃烧室（图片来自 Solar Turbines 公司）

燃烧室中火焰筒的工作条件是极为恶劣的。在高温、高压的燃烧火焰和热燃气的作用下，火焰筒承受着高强度的热负荷和热冲击负荷（指温度急剧变化，例如负荷突然改变时，在燃烧室结构中产生的高应力或交变应力），有时还有一定程度的机械振动负荷。火焰筒常会发生裂纹、翘曲和变形等损坏现象，甚至还会出现脱焊、掉块、磨损和烧穿等故障。为了解决这些问题，以确保安全和延长燃烧室的工作寿命，就必须合理地组织火焰筒壁的冷却过程。壁面冷却的任务在于合理地组织冷却气流，使受热零件获得有效的冷却，以保证火焰筒壁温能比较均匀地保持在金属材料的强度所能允许的范围之内。

早期，燃烧室的火焰筒壁面是靠二次空气在进入火焰筒之前，先以一定流速流过火焰筒与外壳之间的夹套（又称二次流道），通过对流换热从外侧对火焰筒进行冷却。后来毫无例外地采用效果更好的“气膜冷却”方案，就是除了二次空气仍在火焰筒外层流动以外，特别分配一定量的冷却空气，使其以适当的方式引入火焰筒而紧贴内壁流动，形成一层将金属壁与火焰隔离的冷却气膜。常用的气膜冷却结构见图 1.3.4。

1.3.3 透平

增压气机压缩提高了压力的空气，在燃烧室中吸收了燃料燃烧所释放的能量，变成高温高压的燃气，进入透平膨胀做功。所以，透平是把燃气工质的热能转化成透平转子轴输出机械功的部件（图 1.3.5）。所做机械功一部分用来带动压气机工作，多余的部分则作为燃气轮机的有效功输出，去带动外界的各种负荷。

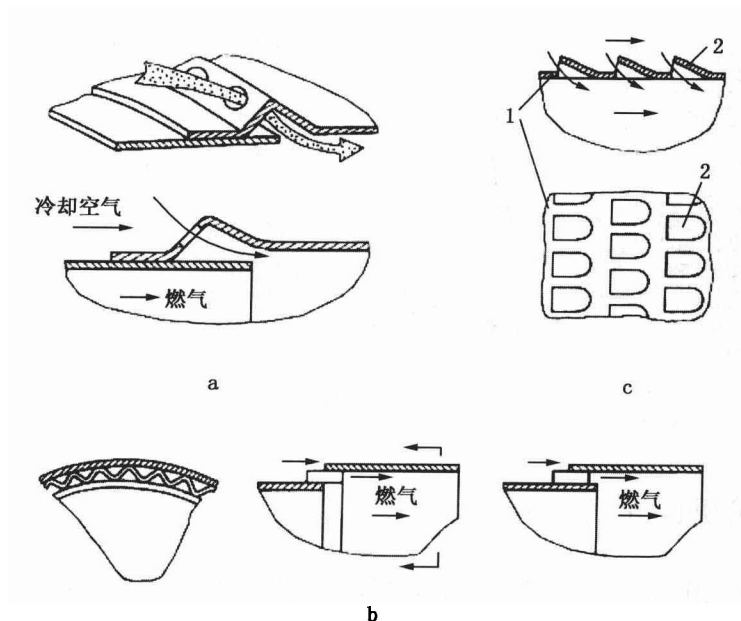


图 1.3.4 各种火焰筒壁冷却方案

1—火焰筒壁；2—鱼鳞孔；

a—二次膨胀式孔冷却；b—波纹形的冷却环套；c—鱼鳞孔式的冷却

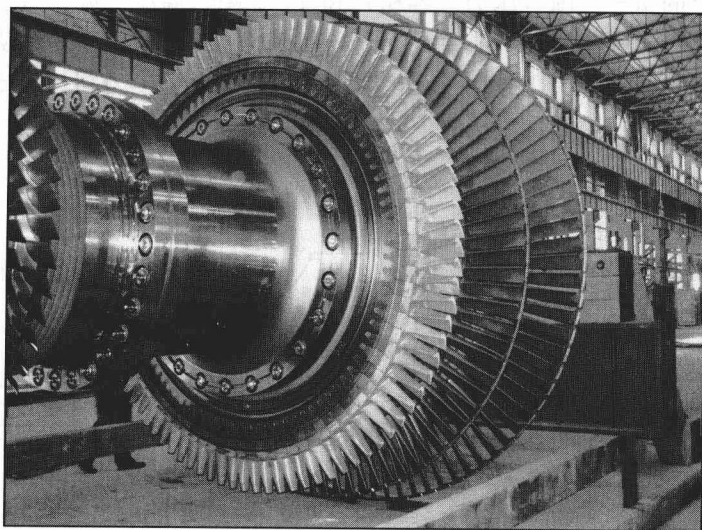


图 1.3.5 透平叶片 (图片来自 GE 公司)

按照燃气在透平内部的流动方向，通常可以把透平分为轴流式和径流式两大类（图 1.3.6，图 1.3.7）。

在燃气轮机中，以轴流式透平用得最多，因为轴流式可以通过较大的工质流量、效率较高、结构上便于做成多级型式，因而能满足高膨胀比和大功率的要求。径流式透平多用在微型燃气轮机中。

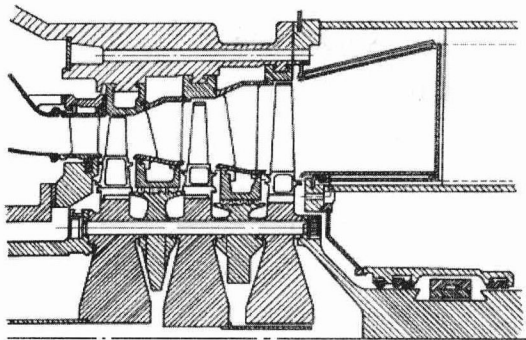


图 1.3.6 轴流式透平结构示意图

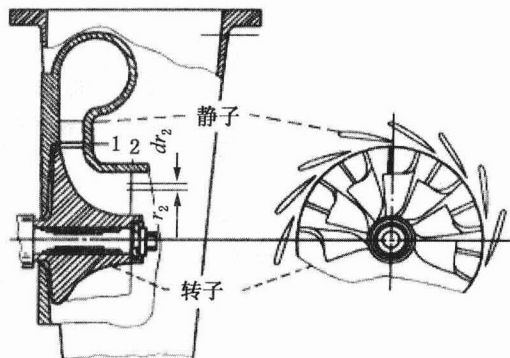


图 1.3.7 径流（向心）式透平结构示意图

1.4 燃气轮机的系统理论

燃气轮机的工作过程是，压气机（即压缩机）连续地从大气中吸入空气并将其压缩；压缩后的空气进入燃烧室，与喷入的燃料混合后燃烧，成为高温燃气，随即流入燃气透平中膨胀做功，推动透平叶轮带着压气机叶轮一起旋转；加热后的高温燃气的做功能力显著提高，因而燃气透平在带动压气机的同时，尚有余功作为燃气轮机的输出机械功。

燃气轮机的简化工作过程可以用理想状态下的布雷顿循环（Brayton Cycle）来描述。

从图 1.4.1 上的 $p-V$ 图（压力—容积）和 $T-s$ 图（温度—熵）可以看出，从 1 到 2 为空气在压气机的绝热压缩过程，压力、温度升高，容积缩小，熵不变；从 2 到 3 为压缩空气与燃料混合后在燃烧室的等压燃烧过程，容积、熵增大，温度升高；从 3 到 4 为燃烧后高温气体在透平中膨胀做功，温度、压力下降，容积减小，熵不变。

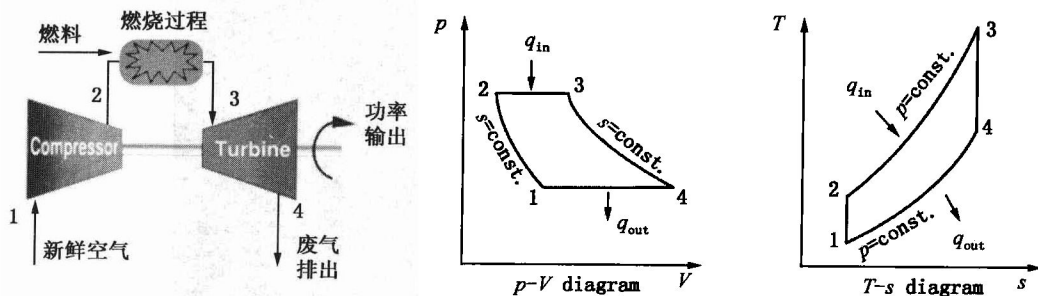


图 1.4.1 理想状态下的布雷顿循环

以上讨论的燃气轮机工作过程是最简单的，称为简单循环；此外，还有回热循环和复杂循环。燃气轮机的工质来自大气，最后又排至大气，是开式循环；此外，还有工质被封闭循环使用的闭式循环。燃气轮机与其他热机相结合的称为复合循环装置。

燃气初温和压气机的压缩比，是影响燃气轮机效率的两个主要因素。提高燃气初温，并相应提高压缩比，可使燃气轮机效率显著提高。目前有点燃气轮机压缩比高达 35；工业燃气轮机的燃气初温最高达 1350℃ 左右，航空燃气轮机的超过 1400℃。燃气轮机的效率也从上世纪 15% 提高到目前最高 50%。

1.5 燃气轮机的控制

燃气轮机是一个高度集成、复杂、高速运转的机械设备，如果没有一套合适的控制系统，压气机可在 50ms 内进入喘振区域，燃气轮机可在 1/4s 内超过安全温度，可在 2s 内超速。环境温度和压力的微小变化都会深刻地影响到燃气轮机的运行，因此，控制系统对于保证燃气轮机各部分协调、稳定、安全运行的意义是不言而喻的。

早期的燃气轮机控制系统采纳了液压机械式燃气轮机调速器，并辅以气动温控，启机燃料限制稳定及手动程控等功能。其余诸如超速、超温、着火、熄火、无润滑油及振动超标等保护均由独立的装置来实现。1968 年美国 GE 公司推出的第一台燃机电子控制系统的雏形。该套系统，也就是后来被定名为 SpeedTronic MARK I 的控制系统，以电子装置控制取代了早期的机械装置控制。

现代的燃气轮机控制系统是建立在长期积累的控制成功经验基础上，大量采用电子技术和微处理器技术，随着控制系统发展，使用独特构造性能的合乎逻辑编程。运行可靠性、系统可用率、使用的灵活性及操作的方便性也不断提高。比较有代表性的是 GE 公司的 SpeedTronic MARK VI 以及 Solar Turbines 公司的 TurboTronic 4 控制系统等。

一个完整的燃气轮机控制系统（图 1.5.1）应该包括：

现场信号收集模块——用于收集、显示机器各种参数，包括压力、温度、速度、振动等。

输入模块——将现场收集到的信号统一转换为数字信号，交给控制器处理。

控制器——处理输入模块提交的各类现场信号，并做出相应处理指令，将指令发送至输出模块。

输出模块——接受控制器发来的指令，根据实际情况进行数模转换，发送给相关的现场执行模块。

现场执行模块——接受控制器经由输出模块发送来的指令，采取相应动作。现场执行模块包括电机、开关、电磁阀等。

显示模块——用来显示用户所关心的参数、过程等。

备用模块——当主控制器失效时，备用模块保证燃气轮机安全停车，不会超速。

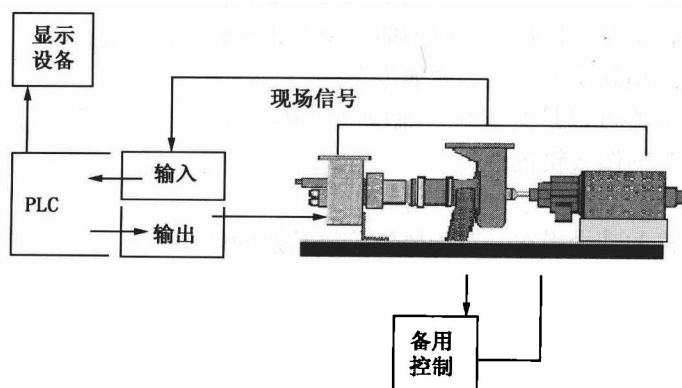


图 1.5.1 完整的燃气轮机控制系统结构示意图