

# 机械工程手册

第 73 篇 燃气轮机

(试 用 本)

机械工程手册  
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

1-62

73

TH-62  
2/28

# 机械 工 程 手 册

第 73 篇 燃 气 轮 机

(试 用 本)

机械工程手册  
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

本篇主要介绍燃气轮机的总体设计基本概念，热力循环和变工况，压气机、燃烧室和透平等主要分部的性能、结构和设计计算，以及机组的调节保安系统和热力性能试验等。内容以基本常用为主，阐明成套机组与各分部之间的内在联系。考虑到燃气轮机篇的完整性，将第76篇的第5章《轴流式压气机》作为本篇的附录。

本篇供燃气轮机专业的制造厂、研究所、设计院、大专院校以及发电厂、化工厂、油田、气田等使用部门的工人、技术人员、干部和师生查阅使用，也可供其他有关人员参考。

## 机械工程师手册

### 第73篇 燃气轮机

(试用本)

上海汽轮机厂 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

开本 787 × 1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> · 印张 6<sup>5</sup>/<sub>8</sub> · 字数 177 千字

1979年9月北京第一版·1979年9月北京第一次印刷

印数 00,001—40,000 · 定价 0.52 元

\*

统一书号: 15033 · 4634

## 编辑说明

(一) 我国自建国以来，机械工业在毛主席的革命路线指引下，贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验，同时采用国外先进技术，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的理论基础，常用计算公式，数据、资料，关键问题以及发展趋向。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的，有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员，更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本篇是《机械工程手册》第73篇，由上海汽轮机厂主编，参加编写的有上海汽轮机研究所、西安交通大学、哈尔滨汽轮机厂、上海机械学院等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组  
电机工程手册

## 常用符号表

$A$ —面积 $m^2$	$t$ —节距 $mm$
功热当量 $kcal/(kgf \cdot m)$	$u$ —圆周速度 $m/s$
$a$ —音速 $m/s$	$V$ —体积 $m^3$
导温系数 $m^2/h$	容积流量 $m^3/h$
$B$ —燃料耗量 $kg/h$	$v$ —比容 $m^3/kg$
角厚度 $rad$ (附录)	$W$ —比功 $kgf \cdot m/kg$
$b$ —燃料耗率 $kg/(kW \cdot h)$	$w$ —相对速度 $m/s$
叶片弦长 $mm$	$x$ —速比
$c$ —速度 $m/s$	$z$ —级数、叶片数
$c_p$ —定压比热 $kcal/(kg \cdot K)$	$\alpha$ —气流角 $^\circ$
$D$ —直径 $m$ , 外径 $m$ (附录)	绝对速度的气流角 $^\circ$ (附录)
$d$ —直径 $m$ , 内径 $m$ (附录)	过量空气系数
$F$ —面积 $m^2$ (附录)	$\beta$ —相对速度气流角 $^\circ$
$f$ —燃料空气比	燃料系数
$G$ —质量流量 $kg/s$	$\gamma$ —扩张角 $^\circ$
$g$ —重力加速度 $m/s^2$	叶型安装角 $^\circ$ (附录)
$g_c$ —换算因数 $g_c = 9.81 \text{ kg} \cdot m/(kgf \cdot s^2)$	$\delta$ —气流落后角 $^\circ$ (附录)
$H$ —整机焓降 $kcal/kg$	$\epsilon$ —气流转折角 $^\circ$ (附录)
$H_i$ —整机有效焓降 $kcal/kg$	$e$ —压损系数
$h$ —级焓降 $kcal/kg$	压力比 (附录)
焓降 $kcal/kg$ (附录)	$e_1$ —压气机进口压损系数
$h_i$ —有效级焓降 $kcal/kg$	$e_2$ —压气机出口至透平进口间压损系数
$I$ —摩尔焓 $kcal/kmol$	$e_3$ —透平排气压损系数
$i$ —比焓 $kcal/kg$	$\eta$ —效率
冲角 $^\circ$	$\eta_c$ —轴端效率, 有效效率
$l$ —叶片高度 $mm$	$\eta_{ca}$ —回热机组轴端效率
$M$ —马赫数	$\eta_i$ —内效率
力矩 $kgf \cdot m$	$\eta_u$ —轮周效率
$m$ —质量 $kg$	$\eta_m$ —机械效率
$N$ —功率 $kW$	$\theta$ —叶型弯角 $^\circ$ (附录)
$N_e$ —机组轴端功率 $kW$	$\kappa$ —绝热指数, 比热比
$N_{ei}$ —发电机端功率 $kW$	$\lambda$ —临界音速比
$n$ —转速 $r/min$	$\mu$ —摩尔质量 $kg/kmol$
$p$ —压力 $kgf/cm^2, ata$	流量系数
$p_a$ —大气压力 $kgf/cm^2, ata$	$\nu$ —轮毂比
$Q$ —热流量 $kcal/h$	$\xi$ —损失系数, 阻力系数
$Q_a$ —燃料低热值 $kcal/kg$	$\pi$ —压比
$q$ —单位质量工质热量 $kcal/kg$	圆周率
单位面积热流量 $kcal/(m^2 \cdot h)$	$\pi_T$ —透平膨胀比
$q_i$ —热耗 $kcal/(kW \cdot h)$	$\pi^*$ —相对压比
$R$ —半径 $m$	$\pi_{\eta_{max}}$ —对应于最高效率的压比
气体常数 $kgf \cdot m/(kg \cdot K)$	$\pi_{W_{max}}$ —对应于最大比功的压比
$r$ —半径 $m$	$\rho$ —密度 $kg/m^3$
$s$ —比焓 $kcal/(kg \cdot K)$	反动度
$T$ —温度 $K$	$\sigma$ —回热度
周期 $s$	稠度比, 子午面上流线夹角 (附录)
$T_a$ —大气温度 $K$	$\varphi$ —静叶速度系数
$t$ —温度 $^\circ C$	

## 73-VII 常用符号表

- $\varphi$ ——流量系数 (附录)
- $\psi$ ——动叶速度系数  
作功量系数 (附录)
- $\omega$ ——角速度 rad/s
- $\Omega$ ——减功系数 (附录)

### 上角标

- \*——滞止参数, 名义值

### 下角标

- 0——设计值、额定值、原始值
- 1——压气机进口参数
- 2——压气机出口参数
- 3——透平进口参数
- $3_m$ ——低压透平进口参数
- 4——透平出口参数
- $4_m$ ——高压透平出口参数
- a——大气、空气、轴向
- ad——绝热过程
- B——燃烧室
- C——压气机
- cr——临界参数
- d——排气 (附录)
- de——设计点 (附录)
- el——电机端
- f——燃料
- g——燃气, 发电机, 几何
- h——叶根 (附录)
- i——内, 变数, 轴向序号
- j——径向序号 (附录)
- L——负荷
- $l_a$ ——末级
- M——机械 (附录)
- m——平均、中间值、机械
- mb——动叶 (附录)
- o——外
- opt——最佳 (附录)
- pol——多变过程
- R——径向
- ref——基准值 (附录)
- s——等焓, 试验

- sb——静叶(附录)
- sh——轴的 (附录)
- st——级 (附录)
- su——喘振点 (附录)
- T——透平
- t——叶尖 (附录)
- th——理论 (附录)
- u——切向
- x——变工况 (附录)
- z——轴向
- max——最大
- min——最小

### 代号

- B——燃烧室
- C——压气机
- HB——高压燃烧室
- HC——高压压气机
- HT——高压透平
- IC——中间冷却器
- L——外负荷
- LB——低压燃烧室
- LC——低压压气机
- LT——低压透平
- MT——中压透平
- R——回热器
- T——透平
- ⊙——压气机特性线
- ⊗——高压透平特性线
- ⊕——低压透平特性线
- ⊖——透平特性线

### 使用单位制的补充说明

根据国务院1977年颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》, 我国计量单位制将逐步采用比较科学的国际单位制(SI), 故本篇采用质量作为基本单位(kg), 而力的单位, 国际单位制用牛顿(N), 即  $1\text{N} = 1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ , 考虑到国内实际情况, 仍沿用重力单位制中力的单位, 即公斤力(kgf)。由于同时采用两种单位制, 在具体计算中将引入牛顿与公斤力的换算因数  $g_c, g_c \approx 9.81\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kgf}\cdot\text{s}^2) = 9.81\text{N}/\text{kgf}$ 。



# 目 录

编辑说明

常用符号表

## 第1章 概 述

- 1 燃气轮机的工作原理.....73-1
- 2 燃气轮机的特点.....73-1
- 3 燃气轮机的应用.....73-2
- 4 燃气轮机的发展.....73-2
  - 4.1 提高机组效率.....73-3
  - 4.2 燃用多种燃料和廉价燃料.....73-3
  - 4.3 提高单机功率.....73-3

## 第2章 燃气轮机的总体设计

- 1 总体方案的选择.....73-4
  - 1.1 热力循环和轴系型式的选择.....73-4
  - 1.2 热力参数的选择.....73-6
- 2 总体结构和布置.....73-6
  - 2.1 压气机、燃烧室和透平的选型和排列方式.....73-6
  - 2.2 支承和滑销系统.....73-7
  - 2.3 总体布置.....73-8
- 3 起动设备.....73-8
- 4 设备保护及环境保护.....73-9
  - 4.1 高温元件的热腐蚀.....73-9
  - 4.2 进口空气净化.....73-10
  - 4.3 噪声.....73-10
  - 4.4 防爆.....73-11

## 第3章 燃气轮机的热力循环

- 1 开式简单循环及热力性能指标.....73-11
  - 1.1 开式简单循环.....73-11
  - 1.2 热力性能指标.....73-12
- 2 循环参数对热力性能指标的影响.....73-13
  - 2.1 温比的影响.....73-13
  - 2.2 压比的影响.....73-13
  - 2.3 透平和压气机等主要分部效率的影响.....73-13

2.4 压力损耗的影响.....73-14

- 3 热力循环的计算.....73-14
  - 3.1 比热法.....73-14
  - 3.2 精确算法.....73-16
- 4 复杂循环.....73-17
  - 4.1 回热循环.....73-17
  - 4.2 中间冷却和中间再热循环.....73-19

## 第4章 压气机与透平

- 1 压气机.....73-20
  - 1.1 分类与特点.....73-20
  - 1.2 燃气轮机对压气机的要求.....73-20
  - 1.3 压气机与透平的匹配.....73-21
  - 1.4 压气机的设计.....73-21
- 2 透平.....73-21
  - 2.1 透平的热力计算.....73-21
  - 2.2 透平的变工况.....73-26
  - 2.3 透平的冷却.....73-29
  - 2.4 平面温度场计算.....73-31
- 3 压气机和透平主要部件的结构.....73-33
  - 3.1 转子.....73-33
  - 3.2 透平叶片.....73-34
  - 3.3 气缸.....73-35
  - 3.4 轴承和轴承座.....73-35
  - 3.5 材料的选择.....73-35

## 第5章 燃烧室

- 1 燃烧室的工作过程.....73-36
  - 1.1 燃烧区.....73-36
  - 1.2 火焰管壁的冷却.....73-38
  - 1.3 高温燃气的掺冷.....73-38
- 2 燃烧室的结构.....73-38
- 3 燃料喷嘴.....73-41
  - 3.1 液体燃料喷嘴.....73-41
  - 3.2 气体燃料喷嘴.....73-43
- 4 点火.....73-44
  - 4.1 燃气轮机常用的点火器.....73-44



## 73-VI 目 录

- 4.2 影响点火性能的因素.....73-44
- 5 燃烧室的调整试验 .....73-44
  - 5.1 燃烧室的低压近似模化试验.....73-44
  - 5.2 试验测定项目.....73-45
- 6 燃烧室的故障及排除 .....73-46

### 第6章 燃气轮机的变工况

- 1 变工况计算方法 .....73-47
  - 1.1 机组各分部的变工况规律.....73-47
  - 1.2 各类用户的负荷特性.....73-49
  - 1.3 机组变工况的计算方法.....73-49
- 2 单轴燃气轮机的变工况 .....73-49
  - 2.1 单轴机组变工况分析.....73-49
  - 2.2 单轴恒速机组的变工况计算.....73-51
  - 2.3 单轴机组变工况特性网.....73-51
- 3 分轴燃气轮机的变工况 .....73-51
  - 3.1 串联透平的压比分配规律.....73-51
  - 3.2 可调喷管低动力透平.....73-52
  - 3.3 分轴机组变工况分析.....73-52
  - 3.4 分轴机组的变工况计算.....73-52
- 4 大气条件对燃气轮机工况的影响.....73-55
  - 4.1 气压、气温和海拔对机组工况的影响.....73-55
  - 4.2 折合参数特性网的应用.....73-55
- 5 燃气轮机的过渡工况 .....73-56
  - 5.1 起动过程.....73-56
  - 5.2 起动和加速的时间.....73-56

### 第7章 调节保安系统

- 1 调节保安系统的原则方案 .....73-57
  - 1.1 主调节系统.....73-57
  - 1.2 保安系统.....73-59
  - 1.3 过渡工况的控制.....73-60
- 2 调节保安系统的类型 .....73-61
  - 2.1 用于交流发电机组的调节保安系统.....73-62
  - 2.2 用于机车动力机组的调节保安系统.....73-62
  - 2.3 用于输气管线增压机组的调节保安系统.....73-63
- 3 燃气轮机的自动化 .....73-63
  - 3.1 检测仪表.....73-64
  - 3.2 程序控制和联锁保护.....73-64
- 4 调节系统的研究和设计 .....73-64

### 第8章 机组热力性能试验

- 1 试验前的准备 .....73-65
  - 2 测量项目、测点布置及要求 .....73-66
  - 3 试验数据整理 .....73-68
    - 3.1 用热平衡法计算空气流量和透平进口温度.....73-68
    - 3.2 功率和效率的计算和修正.....73-69
    - 3.3 分部性能.....73-70
  - 4 机组无因次特性线的试验测定 .....73-70
    - 4.1 目的.....73-70
    - 4.2 试验测定方法.....73-70
- 附录 轴流式压缩机.....73-72
- 参考文献.....73-97

# 第1章 概述

燃气轮机是以连续流动的气体为工质的内燃式旋转热力机械。它是由压气机、燃烧室和透平三大分部，以及相应的辅助设备组成的成套动力装置。

本篇以陆用开式循环燃气轮机为主，介绍它的工作原理和设计方法。燃气轮机与汽轮机同属透平机械，凡设计中有关气体动力学、强度、振动和调节等与汽轮机相似的问题，可直接参阅第72篇《汽轮机》。

## 1 燃气轮机的工作原理

开式简单循环燃气轮机的工作原理见图73-1-1。压气机从大气中吸入空气，并把它压缩到一定的压力，然后进入燃烧室与喷入的燃料混合燃烧，成为高温燃气。具有作功能力的高温燃气，进入透平膨胀作功，推动透平转子带着压气机一起旋转。从而把燃料中的化学能，部分地转变为机械功。燃气在透平中膨胀作功，而其压力和温度都逐渐下降，最后排向大气。

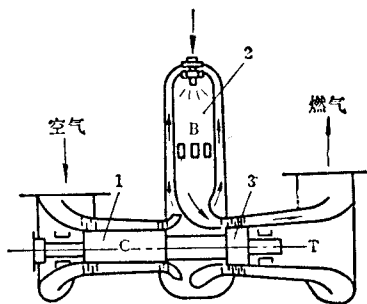


图73-1-1 开式简单循环燃气轮机工作原理图  
1—压气机 2—燃烧室 3—透平

透平发出功率的2/3左右用来拖动压气机，消耗于空气的压缩功，剩余的功率则通过机组的输出轴带动各种外负荷。

图73-1-2为闭式循环气轮机系统图，它与开式循环燃气轮机的主要区别在于，工质是间接地从外界接受热量，并在封闭回路中循环工作。工质也不是燃气，而是氦气、氮气或二氧化碳等气体。闭式

循环气轮机的特点是：可用提高工质的基础压力的办法来增大单机功率；利用流量调节达到较高的部分负荷效率；由于工质纯净，流通部分不易污染；另外，还能适应多种燃料（包括煤和核燃料）提供的热源。但庞大的回热器和必不可少的后冷器未使燃气轮机结构轻小的固有优点为之逊色。

## 2 燃气轮机的特点

a. 重量轻、体积小 燃气轮机电站的金属消耗量约为同功率汽轮机电站的1/4~1/6，厂占地面积约为1/3~1/5。基建投资省，建设周期短。

b. 厂用水、电和润滑油省 用水少，甚至可不用水。厂用电极少，甚至可无电源起动。润滑油消耗也较汽轮机或内燃机省。因此，适用于缺水、缺电地区。

c. 燃料适应性强、公害少 能燃用多种燃料和廉价燃料，如重油、原油、煤气和核燃料等。同一台机可燃用液体或气体等几种燃料而其设备不需作很大变动。排气比较干净，除NO<sub>x</sub>需加考虑外，对空气污染较少。

d. 起动快、自动化程度高 工业燃气轮机从冷态起动、加速直到带上满负荷，一般只需3~15分钟。易于实现集控、程控和遥控，运行维护方便，甚至可不需要现场运行人员。

目前燃气轮机的热效率已相当于中等参数的汽轮机动力厂的热效率，但还不如往复式内燃机和高参数汽轮机，特别是在部分负荷工况下，热效率会显著降低。另外，机组的高温元件需用镍、铬、钴等稀有合金，而且寿命又较短。这些都使燃气轮机的综合经济性和使用可靠性受到一定的不利影响。不过随着科学技术和工业水平的不断发展，这些问题都在逐步得到解决。

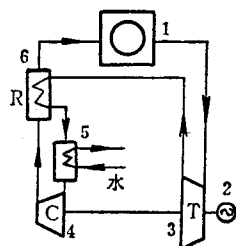


图73-1-2 利用核能的闭式循环气轮机系统图  
1—反应堆 2—发电机  
3—透平 4—压气机  
5—后冷器 6—回热器

燃气轮机在高温、高速旋转的条件下工作,设计时应重视燃烧、传热与冷却、高温零件的热应力、热变形、热腐蚀和寿命等问题。压气机叶片的加工质量对压气机性能的影响很大,因此,叶片的加工工艺应确保叶片气动性能的要求。另外对管道压损和环境保护等问题也应给予充分注意。

### 3 燃气轮机的应用

燃气轮机在航空工业中已占绝对优势,在舰船动力方面发展也很快,在发电、石油化工、交通运输以及冶金工业等部门,也获得了广泛的应用。

a. 发电 燃气轮机在电力工业中主要用作应急备用电源或大电网中的调峰机组。目前已能生产单机功率为5~10万千瓦、效率为30~31%的大功率燃气轮机,而蒸汽-燃气联合循环的热效率更可达34~42%,这样就增加了采用燃气轮机承担基本负荷的现实性。

移动式燃气轮机电站(列车电站、卡车电站和船舶电站),由于体积小、起动快、机动性好,特别适用于无电源缺水地区和急需用电的新工矿、油田和边远地区。列车电站和卡车电站一般采用中等功率的快装机组或航空发动机改装的机组。船舶电站方面,目前国外已建成由四艘驳船组成的船舶电站,其总容量高达60万千瓦以上。

b. 原油、天然气的开采和输送 在油田中为了提高采油率,常常用高压水或气注入油井,以提高和维持油井的喷油压力,这时,驱动增压水泵或压气机最理想的原动机是燃气轮机。在天然气和原油的输送管线上采用燃气轮机增压机组,除了有单机功率大、运行安全可靠、维护费用低、便于集中遥控、适宜于无电源缺水地区等优点外,还能就地燃用所输送的原油或天然气,节省燃料运输费用。随着输气管径和压力的不断增大,大流量输气干线采用燃气轮机增压机组已成必然趋势。据不完全统计,从1960年到1970年,美国用于天然气管线上的燃气轮机大约增加了7倍左右。管线用燃气轮机大多采用分轴、快装或航机改装,有的机组还采用回热循环以提高其经济性。另外,海上钻采平台上的动力装置也大多采用燃气轮机。

c. 舰船和交通运输 燃气轮机在舰艇上的应用,对实现国防现代化有十分重要的现实意义。由于燃气轮机具有:优越的起动和加速性能,可以大

大提高舰艇的机动性和灵活性;与蒸汽轮机相比,可节省60%的机舱面积,用以增强武器装备;可以实现全盘自动化和遥控来减少运行维护人员;尤其是当前船用燃气轮机的单机功率已提高到40000马力,油耗率已降低到180克/(马力·小时)左右,接近中速柴油机的水平,比功率增高到400马力/公斤(空气)/秒,翻修期限延长到8000小时以上;因此,某些国家已大量采用燃气轮机作为舰艇推进动力。另外,燃气轮机也可用作气垫船、水翼船的推进动力和船舶辅机。

燃气轮机机车特别适用于高原、寒冷、无电源缺水的边远地区。它除了有体积小、功率大等优点外,还可用分轴机组取得良好的扭矩特性,并且有利于采用高效率的机械传动。此外,还在发展用燃气轮机作为汽车和坦克的动力。

d. 工业流程及其他 工业中有不少工艺流程需要大量的压缩空气,同时在生产过程中又能产生大量的高温气体或可燃气,如果采用燃气轮机作为动力,则既经济又可靠。例如冶金工业中以高炉煤气为燃料的燃气轮机-鼓风机组,以及在某些化肥生产和塑料生产流程中使用的燃气轮机。

在其他方面的应用还有:与其他热机联合运行的蒸汽-燃气联合循环、自由活塞燃气轮机和增压器等。此外,与高温气冷反应堆配合的封闭式氦气轮机也已问世,这就为燃气轮机的发展和应,提供了一个新的、有相当生命力的前景。

### 4 燃气轮机的发展

自1939年瑞士制造成功第一台发电用燃气轮机以来,随着高温材料、冷却技术、气体动力学、热力学和制造工艺等基础科学和基础技术的进步和应用,燃气轮机在产量、质量和品种等方面都有了飞跃的发展。现在世界上已有二十多个国家,一百多个企业生产近千种型号的燃气轮机。至1976年底,世界工业燃气轮机的装机总容量已达2.2亿千瓦左右,从1964年到1976年的平均增长率达30%以上。目前,最大单机功率为10万千瓦,最高燃气温度达1100~1300℃,压气机单机压比高达16以上。因此,简单循环热效率已可达34%。

当前,燃气轮机发展的特点是:不断提高透平进口的燃气温度和机组热效率,增大单机功率,燃用多种燃料和廉价燃料等,以便与其他热机相匹敌。

#### 4.1 提高机组效率

提高燃气温度是提高燃气轮机效率的主要措施,它可以从研制高温材料和采用先进的冷却技术两方面着手。近年来高温合金的发展,平均每年可使燃气温度提高 $10^{\circ}\text{C}$ ,但高温合金毕竟有其耐温极限。因此,还需通过改进冷却技术来降低高温零件的金属温度。试验表明,采用先进的气膜、发散气冷等冷却方式,大约可使叶片温度降低 $500^{\circ}\text{C}$ 左右,从而有可能大幅度地提高燃气温度。为了进一步提高燃气温度,目前还在研究用水及液态金属的冷却技术和采用陶瓷叶片等。另外,还有采用渗铝、铬,涂陶瓷及复合材料等办法来提高燃用重燃料时的抗高温腐蚀性能。

提高燃气温度的同时,必须相应地提高压气机的压比,才能有效地提高简单循环燃气轮机效率。因此,设计产品时,必须解决大流量、高压比、高效率压气机的问题。通常是在性能良好的模型级或母型压气机的基础上,模化放大和增加前置级或后置级以提高整机流量和压比。必要时还利用可转导叶等办法来改善压气机的运行特性。

充分利用燃气轮机的排气余热,可以大大提高机组的热效率。采用回热循环或者用排气余热生产蒸汽等能量综合利用,能使机组的热效率提高到相当于往复式内燃机的水平,而机组的全能利用率则可达40%以上。因此,燃气轮机在这方面的发展已引起世界各国的重视。

#### 4.2 燃用多种燃料和廉价燃料

燃用廉价的重油和原油时,由于重油分子结构复杂、挥发性差、燃烧速度慢、粘度大而不易雾化等问题,给燃烧方面带来一定困难。通常应:将燃油预热,降低其粘度;改进喷嘴和燃烧室的结构,提高雾化质量,控制燃烧温度,确保燃烧完全;从而提高燃烧效率,延长高温部件的寿命和防止大气污染。由于重质燃料中含有大量灰分和杂质,它们随高温燃气流过透平通道时,在叶片表面会产生结垢和腐蚀,一般是采用水洗、过滤或加添加剂等措施对燃料进行处理。

另外,结合解决能源问题,目前都在开展以气化或液化的煤作为燃气轮机燃料的研究工作,以便综合解决高温腐蚀、大气污染和燃用廉价燃料等一系列问题。这也为发展蒸汽-燃气联合循环,提高电站经济性创造了有利条件。还有,与高温气冷反应堆配合的闭式循环氦气轮机也是一个新的有前途的发展方向。

#### 4.3 提高单机功率

提高单机功率,能降低单位功率的材料消耗和制造工时,提高机组的经济性。其主要措施是:尽可能提高循环参数,选用性能优良的、大流量高压比的压气机和透平,以及合理解决由于增大压气机和透平的通流尺寸所带来的叶片和转子的强度和振动等问题。

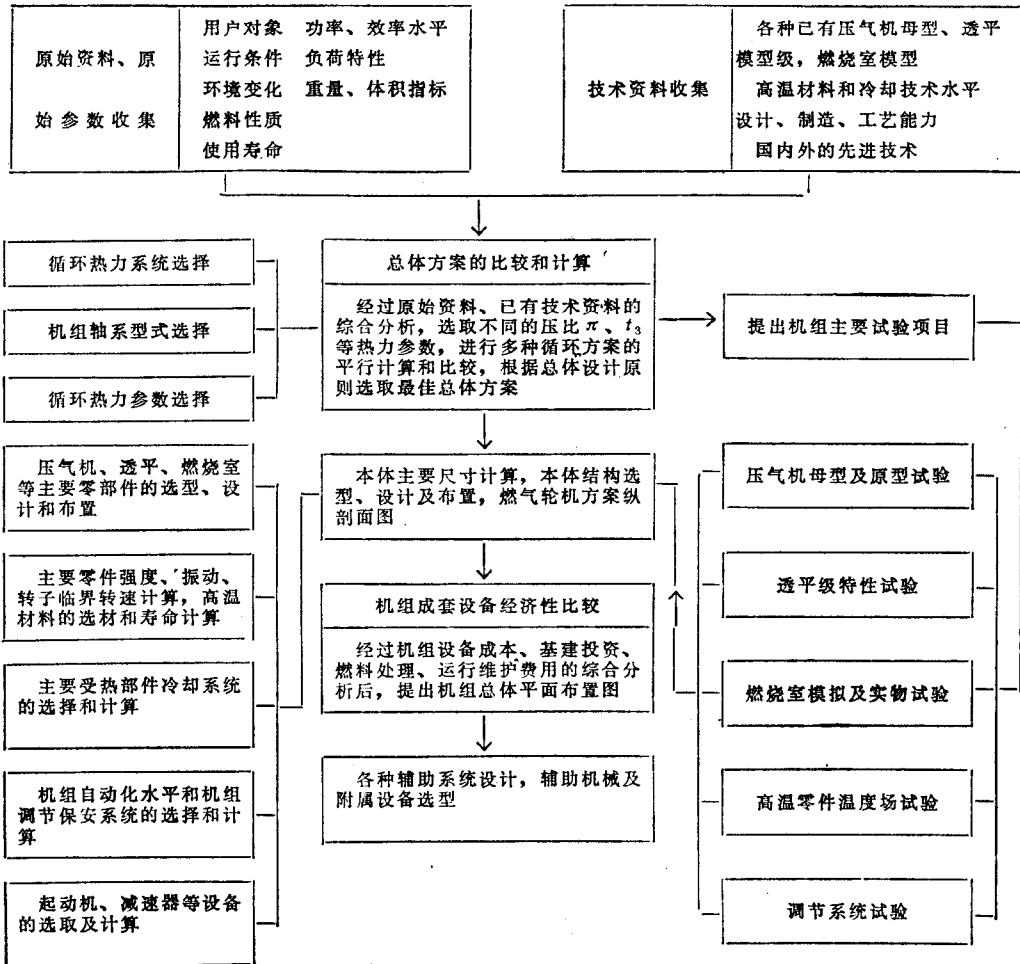
## 第2章 燃气轮机的总体设计

燃气轮机是以独立、完整的动力装置(站)的形式提供使用的。因此,燃气轮机的总体设计应从成套动力装置出发,根据外负荷特性、运行条件、性能指标和燃料品种等要求,以尽量提高产品的系列化程度和综合经济指标,充分发挥燃气轮机的固有优点,确保安全可靠,自动化程度高,以及注意环境保护等为原则,合理地确定机组的热力循环、热力参数和轴系型式等总体方案;恰当地选定压气机、透平、燃烧室和各辅助设备的型式和结构,以及它们之间合理的总体布置;根据运行条件,配置

起动设备。另外,机组还必须配备能确保运行安全可靠、调节性能良好的调节保安系统。总体设计时,应针对不同的使用对象,对机组的自动调节、巡回检测、程序控制和联锁保护等自动化水平提出不同的要求,分别实现集中控制、程序控制、模拟-数字组合控制以至用计算机为主的全自动遥控、遥测等。

总体设计的主要任务和原则性程序参见表73-2-1。

表73-2-1 总体设计主要任务和程序



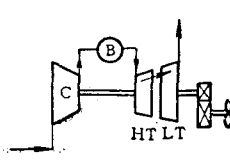
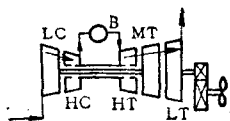
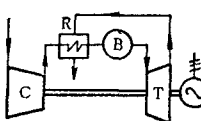
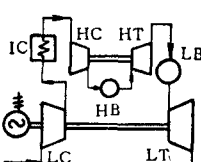
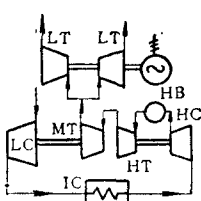
## 1 总体方案的选择

### 1.1 热力循环和轴系型式的选择

表73-2-2 各种热力循环和轴系型式分析比较

循环型式	轴系型式	示意图	主要特点	应用范围
简单循环	单轴		1. 设备简单, 结构轻小, 金属耗量小, 成本低 2. 起动快, 加速性好 3. 调节简单, 易实现自动化 4. 厂用水、电省、安装、维护方便 5. 部分负荷时效率下降较大, 低速时易喘振, 变速范围窄 6. 应尽量提高循环参数来提高机组效率	应用范围广, 大多数发电机组都用它

(续)

循环型式	轴系型式	示意图	主要特点	应用范围
简单循环	分轴		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 具有单轴机组的优点</li> <li>2. 与单轴机组相比, 起动功率小, 变工况性能较好, 不易喘振</li> <li>3. 可提高高压轴转速来减小机组尺寸</li> <li>4. 轴承工作条件差</li> <li>5. 甩负荷时, 动力透平易超速</li> </ol>	应用范围广, 适用于驱动变速负荷及牵引动力
	三轴(套轴)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 具有分轴机组的优点</li> <li>2. 结构紧凑, 但较复杂</li> <li>3. 采用两个压气机(转速可不同), 压比较高, 可相应提高燃气温度来提高效率, 变工况性能较好</li> <li>4. 都用双转子发动机改装而成</li> </ol>	对各种型式的负荷都适用
复杂循环	单轴或分轴(回热)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 效率可比简单循环提高20~30%</li> <li>2. 对于低压比机组, 采用回热, 则更为有利</li> <li>3. 回热器结构笨重, 金属耗量大, 成本高</li> </ol>	要求效率较高的带基本负荷机组
	平行双轴(间冷再热)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 压比高, 效率高, 各种负荷下的经济性好, 不易喘振</li> <li>2. 与回热器联用, 则经济性更好</li> <li>3. 结构复杂, 设备笨重, 成本高</li> <li>4. 金属耗量大, 用水量较多</li> <li>5. 调节复杂, 运行维护不便</li> </ol>	要求效率较高的带基本负荷的发电机组, 但由于设备笨重, 应用不多
	三轴(间冷)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 性能同平行双轴机组, 一般无再热</li> <li>2. 与平行双轴机组相比, 调节较简便, 变速范围广</li> <li>3. 结构复杂, 用水量较多</li> <li>4. 甩负荷时, 动力透平易超速</li> </ol>	要求效率较高的变速机组

1.2 热力参数的选择

环循的热力参数有：燃气初温  $T_3$ 、压比  $\pi$ 、机组各主要分部的效率  $\eta$ 、流量  $G$ 、压损系数  $\epsilon$  等。鉴于热力参数对机组的经济性、安全性、重量和尺寸等都有很大的影响，因此，在压气机、透平、燃烧室等主要分部的选型时，应尽量提高它们的效率水平，降低各进、排气口和中间连接管道，以及燃烧室等的压损系数。当这些效率和压损系数确定后，影响循环效率和比功的主要因素就只有  $T_3$  和  $\pi$  两项。通常  $\pi_{\eta_{max}} > \pi_{W_{max}}$ ，故压气机的最佳压比都在  $\pi_{\eta_{max}}$  和  $\pi_{W_{max}}$  之间进行选择。压比选得接近  $\pi_{W_{max}}$ ，能提高机组的比功，从而使机组比较轻小，这对移动式机组是合适的。对于承担基本负荷的发电机组，为提高其经济性，压比接近  $\pi_{\eta_{max}}$  为宜。

热力参数的选取应与热力循环和轴系方案的选择同时进行，即用选取的热力参数对各种不同的循环和轴系方案进行平行的计算和分析比较来确定最合适的总体方案。

2 总体结构和布置

2.1 压气机、燃烧室和透平的选型和排列方式

在发展系列化生产时，首先应掌握一台性能优良、结构合理、运行安全可靠的成熟的模型机组，然后在此基础上，根据不同需要，将压气机、透平、燃烧室等主要分部进行模化和改进，从而发展出成熟可靠的产品系列。但这些主要分部原型的设计、试验和调整周期很长，故应重视基础技术的试验研究和发展工作，以不断增加新的技术储备。

目前简单循环的单轴或分轴机组，广泛采用压气机与透平为整体气缸和整体转子的结构。组合的整体转子则支承在两个轴承上，这就要求尽量缩短转子的轴向尺寸，以提高其刚度。机组最常用的排列方式是将压气机的高压端对着透平高压端，从而使结构紧凑，气流流程缩短，并能平衡一部分压气机和透平的轴向推力。如果再配以逆流式分管或环

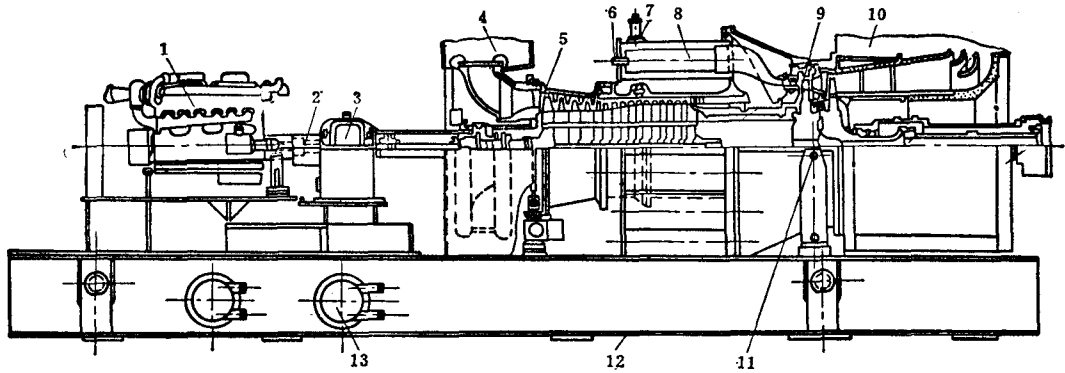


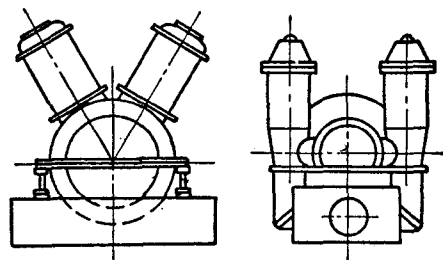
图73-2-1 单轴机组纵剖面图

- 1—起动机 2—起动机离合器 3—齿轮箱 4—进气室 5—压气机 6—喷嘴 7—点火器 8—燃烧室  
9—透平 10—排气室 11—绝对死点处气缸支承 12—公共底盘 13—冷油器

管型燃烧室，则可更进一步缩短机组的轴向尺寸，见图 73-2-1。又如采用双管或单管燃烧室，则燃烧室可布置在透平进气口的上方或侧面（图 73-2-2 和图 73-2-3），这将使机组的外型尺寸或高温燃气管道的长度有所增加。

在这种排列方式中，透平端或压气机端都可以作为机组功率的输出端。

至于分轴机组的压气机和高压透平，也是以高压端对高压端的方式排列组成燃气发生器，低压动



a) 倾斜布置 b) 垂直布置

图73-2-2 双管燃烧室布置图



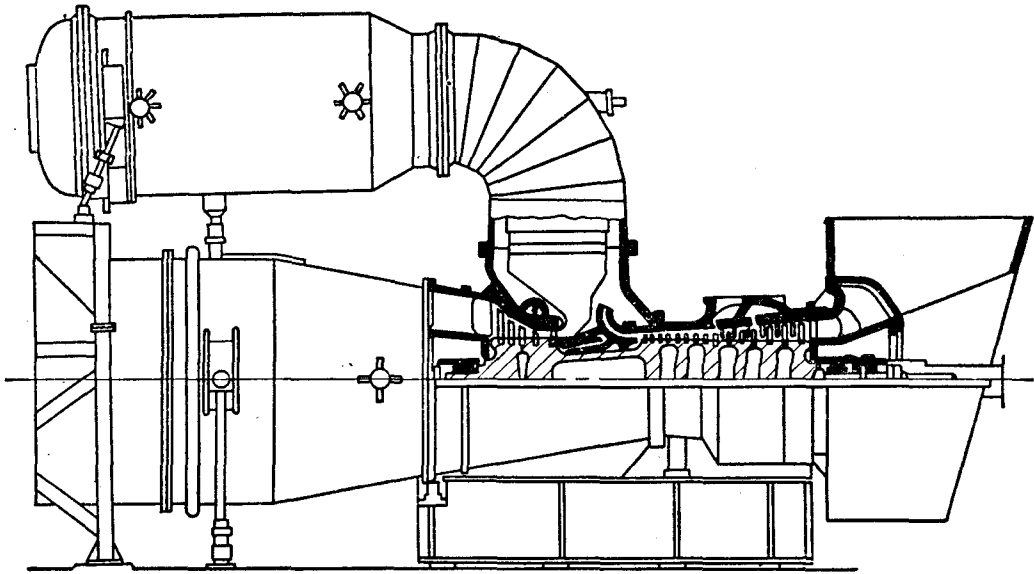


图73-2-3 单管燃烧室布置图

力透平则对外输出功率。利用航空发动机加装动力透平而改装成的机组即为一例，其结构则更为紧凑轻巧。

### 2.2 支承和滑销系统

在考虑机组的排列方式和安装结构时，除应保证机组的安装位置正确，连接可靠，以及基础振动符合要求等外，还应确保机组在各种工况下的热胀自由和热态对中心。

在满足气缸刚性的前提下，气缸的支承点的数目应尽量减少，其中要有一点为绝对死点（参见第72篇“汽轮机”第5章）。对于单轴机组，其绝对死点常设在温度较低的功率输出端，以减少减速齿轮或输出端联轴器的热胀补偿，简化装配对中心的工作（见图73-2-1）。分轴机组的绝对死点则常设在低压力透平端。绝对死点的选取必须与转子的相对死点统一考虑，应注意各种工况下动静部分的胀差，以保证机组能高效、安全地运行。绝对死点的支架形式和结构，应结合气缸横销、纵销和立销一并考虑，确保气缸的中心线在任何工况下都与机组中心线保持不变。绝对死点处的气缸支架的支承面高度应力求接近机组中心线，以便确保气缸支承面与机组中心之间的距离  $h$  在热态时变化不大，见图73-2-4。当气缸刚性不够而挠度过大时，可在适当

位置上加装可调式辅助弹性支架。

中、大型机组的进、排气管道的体积和重量都比较大，安装时应妥善考虑它们与气缸的连接方式，并设置各自的支架来支承本身的重量并确保自由膨胀，以避免由于进、排气管道给气缸带来附加推力而引起气缸变形，从而产生转子与静子碰擦，甚至造成机组强烈振动等事故。

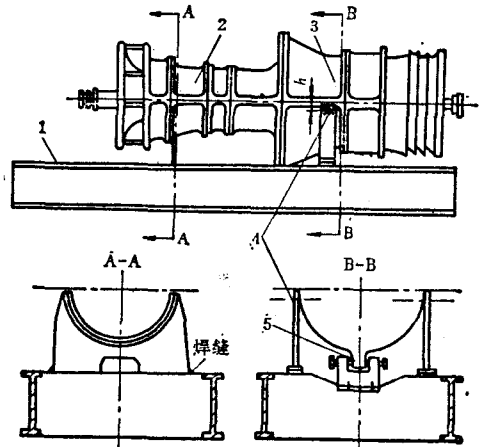


图73-2-4 气缸的支承结构

- 1—公共底盘 2—压气机 3—透平
- 4—绝对死点处气缸支承 5—纵销

2.3 总体布置

燃气轮机除压气机、燃烧室、透平等主机设备外，还应配置性能优良、配套合理、自动化程度高、安全可靠的辅机设备和辅助系统，才能充分发挥成套设备的最大效用。主要的辅机设备包括：起动机设备、传动装置、各种油泵、水泵、管道、阀门和附件等。主要辅助系统则有润滑油系统、动力油系统、燃料油系统，以及冷却空气和水系统等。

成套设备可以布置在固定的水泥基础上，也可安装在一个公共底盘上，以便于搬动，移动式电站则可直接安装在卡车或车厢的钢架上。目前的趋向是发展组装式快装机组，以充分发挥燃气轮机轻、小、简便的优点（见图 73·2-5）。无论采用何种布置和安装方式，都应力求紧凑合理，安全可靠，安装维修方便。做到：部件对中正确，热胀自如；冷却、隔热、保温良好；连接管道短、直；支架负荷均匀。

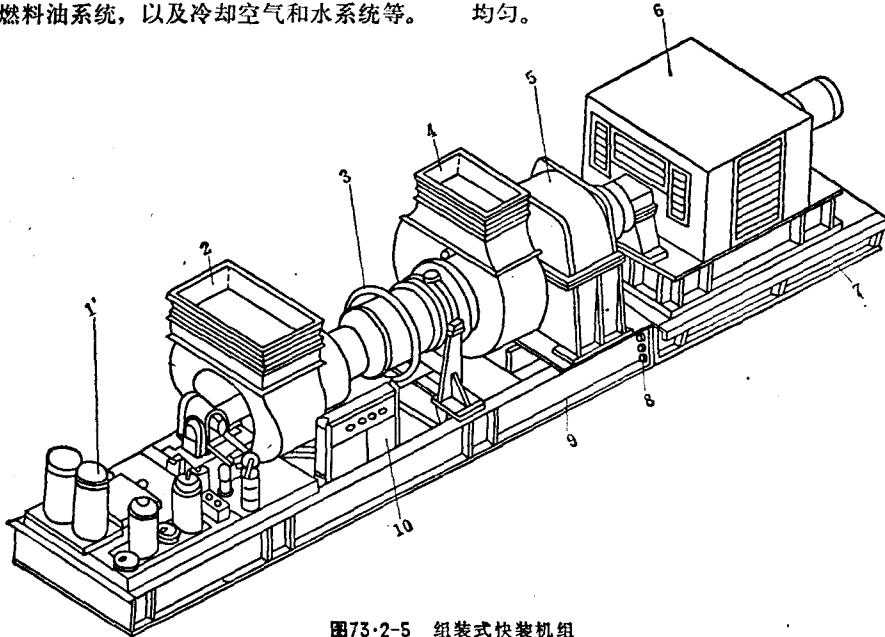


图73·2-5 组装式快装机组

- 1—辅助设备 2—压气机 3—燃烧室 4—透平 5—减速器 6—发电机 7—发电机底盘  
8—连接螺钉 9—燃气轮机底盘 10—控制箱

3 起动设备

燃气轮机起动方式的选择，取决于机组的循环型式和用途，起动时间指标和起动能源的型式，以及机组主要部件的气动、热强特性和转子惯量等。起动设备应能满足下列主要要求：1) 良好的外特

性和足够的功率；2) 起动方便，安全可靠，在大气条件变化时性能变化不大；3) 能多次连续起动而时间间隔较短；4) 起动能量消耗省；5) 本身重量轻，维护方便。各类起动设备的性能分析见表 73·2-3。

表73·2-3 起动设备的类型及性能

分类	特 点	起 动 能 源	外 特 性
直 流 电 动 机	起动可靠，升速平稳，外特性好，常用励磁机代替。直流电源设备笨重，成本高，直流电动机功率不能很大，适用于中小型机组	蓄电池组，交直流设备	