

上海交通大学钟芳源 主编

燃气轮机 设计基础

机械工业出版社

燃气轮机设计基础

上海交通大学 仲芳源 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(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·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $20 \frac{1}{4}$ · 字数 490 千字

1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷

印数 0,001—1,515 · 定价 5.15 元

*

统一书号: 15033 · 6033



前 言

本书是根据一九八四年九月高等工业学校涡轮机专业教材编审小组审定的编写大纲编写的。

本书可作为高等工业学校涡轮机专业燃气轮机课程设计或毕业设计的辅助教材,也可供有关专业师生及工程技术人员参考。本书的某些章节还可以作柴油机涡轮增压器(第五、八、九章)、轴流通风机和鼓风机(第三、八、九章)设计参考用。

本书共分十章。第一章为“技术要求和设计原则”。第二章为“燃气轮机的型式和主要参数的选择以及热力循环计算”。第三至第六章介绍燃气轮机各主要部件——压气机、燃烧室、涡轮和进排气道的方案计算。第七章为燃气轮机的总体结构,主要介绍与绘制总体结构布置以及确定总体技术指标有关的内容。第八章为“叶片设计”,主要包括压气机和涡轮叶片的气动计算以及叶片造型等内容。第九章为“通流部分主要零件的强度与振动”,集中介绍叶片(叶身与榫头)和燃烧室的强度与振动的计算方法。第十章为“燃气轮机变工况性能计算”,主要介绍一种同时可供手算和电算用的估算方法。

本书的编写有三个特点:(1)为了加强燃气轮机设计的基础训练,在设计内容上突出重点,确定了“以简单循环为主、以通流部分方案计算为主、以设计工况为主、在零件设计中以叶片设计为主”的原则,而不准备全面介绍燃气轮机设计方法和经验。(2)为了能在有限的教学时数内更好地掌握燃气轮机设计基础。我们对诸如方案计算方法、叶片气动计算中沿径气流参数分布规律的计算方法、燃气轮机变工况性能计算方法等专门作了调整和修改。(3)在教材使用上可分为少学时(以方案设计为主,包括第一至七章)和多学时(增加叶片设计的内容,即增加第八至九章)两种,以分别满足动力机械专业和涡轮机专业各自的教学要求。此外,全书每章都列出计算表格和例题,它们可以作为手算训练的依据;而在本书附录中列出的几个设计中常用的电算程序,则可以用来借助微机进行参数选择和方案比较等设计基础训练。

本书由上海交通大学钟芳源教授主编。全书共十章。我编写第一章、第三章和第八章,并改写第五章和第六章;常弘哲副教授编写第四章;姚火林编写第七章和第九章;王永泓编写第二章和第十章;邵震、朱士录分别负责起草和最后完成第五章及第六章;邵震、宋华芬协助编制部分章节的例题和电算程序以及最后统一整理全部电算程序。本书由上海机械学院沈炳正教授主审。常弘哲副教授协助对全书进行文字修饰、符号统一等技术性工作以及第十章的修改工作。

本书在编写过程中,上海交通大学王兆华教授、吴铭岚副教授及上海机械学院的王乃宁、李燕生副教授对编写提出了许多宝贵的意见。作者特致深切的谢意。此外,周湘萍和邹梅绘制图表,钟平协助进行过部分例题的计算和电算程序的编制。作者在此也一并致谢。

由于作者水平有限,以及在编写过程中时间比较紧迫,本书内容难免有不当之处,恳请读者指正。

上海交通大学动力机械工程系教授

钟芳源 1985年6月

主要符号说明

一、通用符号

符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	名 称
A	m^2	面积	n	r/min	转速
a		轴向坐标轴	p	Pa	压力
c	m/s	绝对速度	R	$J/(kg \cdot K)$	气体常数
c_p	$J/(kg \cdot K)$	等压比热	r		径向坐标轴
c_v	$J/(kg \cdot K)$	等容比热	T	K	热力学温度
$D(R)$	m	直径(半径)	t	$^{\circ}C$	摄氏温度
G	kg/s	质量流量	η	—	效率
g	m/s^2	重力加速度	λ	—	气流折合速度
I	J/mol	焓	ξ	—	能量损失系数
i	J/kg	比焓	σ	—	总压恢复系数
k	—	绝热指数	$\bar{\sigma}$	—	总压损失系数
M	—	气流马赫数			

二、热力循环与总体性能符号 (第二、十章)

符号	单位	名 称	符号	单位	名 称
f	—	燃料空气比	η_m	—	燃气轮机机械效率
H_u	J/kg	燃料低热值	η_{rg}	—	减速器效率
N_e	kW	燃气轮机实际(有效)功率	η_{sh}	—	轴系效率
α	—	过量空气系数	π	—	膨胀(或增压)比
β	—	摩尔燃料系数	σ_b	—	燃烧室总压恢复系数
η_b	—	燃烧室效率	σ_{ts}	—	排气管总压恢复系数
η_c	—	压气机效率	σ_{ts}	—	进气管总压恢复系数
η_{at}	—	考虑附件耗功的效率	σ_t	—	中间管道总压恢复系数
η_e	—	燃气轮机有效效率	τ	—	温比

角注: w ——按最大比功 η ——按最高效率

三、叶片机符号 (第三、五、八章)

符 号	单 位	名 称
A, B, C, D	—	沿径气流参数分布规律用常数
	—	确定抛物线用常数
a	m/s	声速
b	m	叶片弦长
c	$m/s, m$	绝对气流速度, 叶型厚度

符 号	单 位	名 称
c_0	m/s	按 h_0 计算的假想速度
c_0^*	m/s	按 h_0^* 计算的假想速度
c_x, c_y	—	阻力系数, 升力系数
E	—	取决于叶栅进出口环形面积比的参数
e	m	叶型出口段型线弧度的平均曲率半径
e_x, e_o	m	动叶叶顶型面重心离径向线距离
f	m	叶型中弧线挠度
H_0	J/kg	级组中等焓降
h	J/kg	有效功
h_0	J/kg	级等焓降
h_0^*	J/kg	级的理想等焓降
h_u	J/kg	轮周功
Δh	J/kg	能量损失
i	(°)	气流攻角
k	m	(轴向或径向) 间隙
K	—	修正系数
l	m	叶片高度
M	N·m, —	转矩, 气流马赫数
m, n	—, —	沿径气流参数分布规律用指数
N_e, N_i	kW	有效功率, 内功率
O	m	叶栅通道 (出口) 宽度
r_1, r_2	m	叶型进口圆半径
t	m	叶栅节距
u	m/s	轮周速度
w	m/s	相对气流速度
X	—	叶端间隙影响的结构修正系数
x, y	m	中弧线坐标 (沿弦长和垂直于弦长)
x_0, y_0	m	对称叶型坐标 (沿中弧线和垂直于中弧线)
Y	—	计算沿径轴向速度变化用的变量
Z	—	级数目
α	(°), —	绝对气流方向, 重热系数
β	(°)	相对气流方向
γ	(°)	叶型安装角
Δ	m	超高低
Δ_1, Δ_2	m	内径和外径处超高; 型线的一次和二次差
$\Delta\beta$	(°)	气流转折角
δ	(°)	偏转 (落后) 角
ϵ	%	计算误差值
ζ	—	能量损失系数
η_e, η_i	—	有效效率, 内效率
η_t	—	未计及余速损失时的内效率

(续)

符 号	单 位	名 称
η_{rel}	—	多变效率
η_u	—	轮周效率
η_u^*	—	未计及余速损失时的轮周效率
θ	(°)	叶型几何转折角
θ_1, θ_2	(°)	进气与出气边上中弧线切线与叶弦的夹角
μ	—	滑差比 c_u/c_v
ν	m/s	运动粘性系数
σ	—, N/m ²	总压恢复系数, 应力
φ	—	导叶速度系数, 流量系数
χ	(°)	中弧线上任一点的切线与叶弦的夹角
ψ	—	动叶速度系数, 压头系数
Ω	—	级反动度
ω	rad/s	角速度
$\bar{\omega}$	—	总压损失系数

角注: σ, τ, u ——轴向, 径向, 周向

c, l ——计及三元(叶端)影响

f ——图示的

κ ——几何值

Δ, m, l ——轮毂, 中径, 叶顶

i, j ——沿径向, 沿叶高的计算序列数

0——总配置焓降值

P, α, s ——叶型, 焓差, 二次流

ref ——基准(最小损失)状态

sh ——叶型弧线

t ——理论(等熵)值, 叶型厚度

0, 1, 2——级前, 动叶前, 动叶后

$*$ ——滞止值, 额定值

四、燃烧室符号 (第四章)

符 号	单 位	名 称
f	—	燃料空气比
L_0	kg/kg	1 kg燃料完全燃烧时所需的理论空气量
Q_{Af}	J/(m ² ·h·Pa)	火焰管面积热强度
α	—	过量空气系数
α_s	(°)	旋流器安装角
δ_s	—	燃烧室总压损失系数
θ	(°)	扩压器扩张角
η_b	—	燃烧室燃烧效率
σ_b	—	燃烧室总压恢复系数
ψ	—	阻力系数

角注: a ——空气

b ——燃烧室

c ——压气机出口

d ——扩压器出口

f ——燃料, 火焰管

i ——内径

m ——中间值

max ——最大值

min ——最小值

o ——外径

p ——二次空气

ref ——参考值

s ——旋流器

t ——涡轮进口

五、进排气管符号 (第六章)

符 号	单 位	名 称
$A(\psi)$	m^2	在周角 ψ 下的蜗壳气道流通面积
B	m	进气稳压室宽度
$DC(\theta)_{crit}$	—	临界畸变角畸变指数
H	m	进气稳压室高度
h_{ex}	J/kg	排气管中总能量
h_d	J/kg	扩压器回收能量
h_o	J/kg	蜗壳回收能量
h_e	—	考虑蜗壳中流场不均匀等因素的面积修正系数
L	m	进气稳压室长度
n	—	扩张度
Q	m^3/s	容积流量
Δh	J/kg	流动损失
ΔP	Pa	总压损失
δ_i	—	局部地区的不均匀度
$\bar{\delta}$	—	压气机进口流场平均不均匀度
ξ	—	损失系数

角注: d ——扩压器 cy ——压气管 i ——计列序号, 进口, 内径处 in ——进气管 o ——出口, 外径处 e ——蜗壳

六、结构与强度符号 (第七、九章)

符号	单 位	名 称	符号	单 位	名 称
b	m	叶型弦长	u	m/s	圆周速度
c_{max}	m	叶型最大厚度	V	m^3	体积
E	N/m^2	材料弹性模数	W	kg	重量
F	N	作用力	α	$(^\circ)$	倾斜角
f	s^{-1}	振动频率	β	$(^\circ)$	楔形角
I	m^4	断面轴惯性矩	δ	m	厚度
J	m^4	断面板惯性矩	ϵ	—	应变
L	m	跨距	η	—	主惯性轴坐标
l	m	叶片高度	θ	—	径高比
M	$N \cdot m$	弯矩	λ	$W/(m \cdot K)$	导热系数(导热率), 叶片截面比
m	kg	质量	μ	—	材料泊松系数
N	—	循环数	ξ	—	主惯性轴坐标
p	N/m^2	压强	ρ	kg/m^3	材料密度
$\dot{p}$	rad/s	角频率	σ	MPa	零件应力
Q	N	叶片榫头拉力	τ	h	零件寿命
q	N	轮缘凸块拉力	ψ	—	截面收缩率
s	m^2	静矩	ω	s^{-1}	角速度

目 录

主要符号说明

第一章 技术要求和设计原则	1
§ 1-1 动力装置对燃气轮机设计提出的技术要求	1
§ 1-2 燃气轮机设计原则和设计方法	4
§ 1-3 燃气轮机设计内容和设计阶段	5
§ 1-4 燃气轮机课程设计任务和内 容	6
参考文献	7
第二章 燃气轮机的型式和主要参数的选择以及热力循环计算	8
§ 2-1 燃气轮机型式的选择	8
§ 2-2 燃气轮机主要参数的选择	12
§ 2-3 燃气轮机各主要部件型式的选择	15
§ 2-4 燃气轮机在设计工况下的热力循环计算	19
附注	30
参考文献	31
第三章 多级轴流压气机方案计算	33
§ 3-1 通流部分形状的选择	34
§ 3-2 转速和圆周速度的选择	36
§ 3-3 第一级轮毅比与末级叶高的选择	37
§ 3-4 各级平均直径上基元级主要气动特性值的选择	38
§ 3-5 通流部分方案计算	42
参考文献	52
第四章 燃烧室方案计算	53
§ 4-1 燃烧室设计概述	53
§ 4-2 燃烧室总体布置方案	54
§ 4-3 燃烧室总体尺寸的确定	56
§ 4-4 燃烧室主要零部件选型	66
§ 4-5 火焰管进气量分配	72
参考文献	74
第五章 多级轴流涡轮方案计算	75
§ 5-1 通流部分形状的选择	75
§ 5-2 燃气涡轮叶片冷却方法的选择	77
§ 5-3 圆周速度和转速的选择以及第一级与末级的直径和叶高的确定	79
§ 5-4 第一级与末级叶片的强度估算	80
§ 5-5 各级平均直径上基元级主要参数的选择	81
§ 5-6 通流部分方案计算	84
参考文献	97
第六章 进排气道主要尺寸的估计	98
§ 6-1 进气管道主要尺寸的估计	99

§ 6-2 排气管道主要尺寸的估计	104
参考文献	116
第七章 燃气轮机的总体结构、重量估算以及通流部分的零件材料	117
§ 7-1 燃气轮机的总体结构	117
§ 7-2 作用于燃气轮机通流部分零部件上的气体负荷	122
§ 7-3 燃气轮机的重量估算	127
§ 7-4 通流部分主要零件的材料	131
参考文献	137
第八章 叶片设计	138
§ 8-1 沿径向气流参数分布规律的选择及其计算	138
§ 8-2 平面叶栅主要几何参数的确定及气动特性的估计	159
§ 8-3 平面叶栅叶型曲线以及几何参数的选择	189
§ 8-4 叶片造型方法及其步骤	202
参考文献	213
第九章 通流部分主要零件的强度与振动	215
§ 9-1 转子叶片的应力分析	215
§ 9-2 叶片的振动计算	241
§ 9-3 燃烧室的强度与振动	245
参考文献	250
第十章 燃气轮机变工况性能的计算	251
§ 10-1 燃气轮机变工况性能及其计算方法综述	251
§ 10-2 燃气轮机在部分负荷下的性能计算方法	253
参考文献	282
附录 电算程序 (BASIC 算法语言)	283
附录说明	283
附录 1 燃气轮机热力循环电算程序	283
附录 2 多级轴流压气机方案计算电算程序	287
附录 3 燃烧室总体尺寸电算程序	291
附录 4 多级轴流涡轮方案计算电算程序	294
附录 5 轴-径流式环形扩压器造型电算程序	302
附录 6 沿径向气流参数分布规律电算程序	304
附录 7 轴流涡轮级叶栅气流流动损失及流出角电算程序	309

第一章 技术要求和设计原则

§ 1-1 动力装置对燃气轮机设计提出的技术要求

燃气轮机设计的依据是使用对象（如电站、机车、飞机、船舶等）的动力装置技术要求。归纳起来，大致可分以下十个方面：

1. 功率和油耗 包括在给定的大气压力 p_a (Pa) 和大气温度 T_a (K) (扣除给定的进排气道阻力损失，即为燃气轮机进口大气压力 p_a^* 、进口大气温度 T_a^* 和出口压力 p_b ，详见图 2-5) 下，设计工况以及几个主要非设计工况的功率 (kW) 和相应的单位油耗 ($\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)。此外，燃气轮机功率随大气温度 T_a 和大气压力 p_a (即海拔高度) 的变化，特别是最大功率的限制值，往往也需要事先规定。

2. 重量尺寸 通常对包括燃气发生器、动力涡轮、箱装体等整个燃气轮机组的重量和尺寸 (长×宽×高) 都有严格的规定。考虑到燃气轮机需要有比较大的进排气道装置，有时为了限制进排气道的重量尺寸，往往会对燃气轮机的空气流量 G_a (kg/s) 也提出限制的要求。

3. 运行可靠 要求在规定工作寿命期内，在所有的运行条件（大气压力、大气温度、负荷特性或其他环境条件的变化）和运行工况（设计与非设计的稳态工况以及启动、加速、停机和倒车等过渡工况）下，燃气轮机的气动热力性能和机械性能安全可靠。通常在气动热力性能方面规定有：（1）最高的燃气初温（常常通过燃气轮机排气温度来控制）和最高转速的限制值；（2）最低稳定运行工况。有时对低速下压气机防喘措施及有关参数也会有严格规定（如规定防喘放气阀开启时，功率不得高于某值）；（3）在规定的运行条件下，均能顺利地启动。考虑到启动失败的可能性，往往还要求燃气轮机能够连续启动若干次；（4）进气道必要时（在海洋、高空、低温环境下）要求装设防冰（加热）装置，以避免压气机性能恶化导致燃气超温。在机械性能方面通常规定有：（1）燃气轮机的前、中、后几个测振点的振动幅值；（2）轴承或滑油出口温度的最高限值以及轴承进口油压的最低允许值；（3）转子与机壳膨胀的最高限制值。为了保证燃气轮机运行的安全可靠，燃气轮机必需设计具有上述参数的监测、调节、报警以至危急遮断器（自动紧急停车）等系统（参看本节第 9 项——调节、保安与控制）。

4. 工作寿命（翻修期）通常对高温易损的热端零部件（如燃烧室火焰筒、燃气轮机叶片等）规定较短的工作寿命，有的还往往要求能够（不进发动机厂）在现场停机调换。对航空改型、轻型结构的燃气发生器，一次翻修期通常规定不少于 3000 h，并要求能够换装整个燃气发生器；而动力涡轮的一次翻修期要求不少于 6000 h、总寿命通常希望与使用（装机）对象相同（一般要在 10~15 年以上）。对工业型、重型结构的燃气发生器和动力涡轮，一般要求有很长的工作寿命，往往达 100000 h 以上。为了保证燃气轮机的工作寿命，除了在设计中选用耐高温材料和合适的冷却方式以外，往往在设计阶段对整个工作寿命期中实际

使用各种负荷（功率）分配的比例，特别是最大功率使用的总时数和起动次数，也需作出严格规定。对于某些在特殊环境（如海洋、沙漠等）下运行的燃气轮机，除了在动力装置设计中必需考虑设置具有盐雾或沙尘分离作用的进气过滤装置外，燃气轮机设计者必需对材料的选择、防腐涂层的采用，以至日常清洗系统的设计使用予以认真对待。

6. 维护检修和安装运输 维护检修主要包括：（1）高温易损的热端部件（如燃烧室火焰筒、高压涡轮叶片等）的“在线”监察（如采用孔探仪）；（2）易损部件的更换，以至整个燃气发生器的换装；（3）主要气动热力和机械性能参数的监控，或进一步采用“故障诊断”等先进技术；（4）盘车机构、清洗系统、疏水装置等日常维护。为了尽可能缩短燃气轮机的检修时间，目前在结构设计中已有采用先进的“模块”设计^[10]，即把燃气轮机沿通流部分分为（进气机匣、低压压气机、高压压气机、燃烧室、发生器涡轮、动力涡轮等）5至6个“模块”，检修时只要象搭积木似的，把某一个所需调换的模块换上即可。安装与运输应包括：（1）零部件在安装检修时必需考虑吊装和对中的措施；（2）零部件以至整个燃气轮机在厂内和外场条件下均便于运输（其中有对重量、高度、宽度、长度等的限制）。

6. 制造成本 由于燃气轮机需要使用大量昂贵的、难加工的高温合金以及制造工艺上的严格要求，往往使整个燃气轮机的制造成本要比柴油机、汽轮机等其他动力机械有较大幅度的增加。为了使燃气轮机产品有足够的竞争能力，特别是在民用产品中，设计者必须节省，甚至限制使用国家稀少的、昂贵的耐高温材料，采用改进设计、改革工艺等多种措施，力求降低制造成本。

7. 使用燃料 往往由动力装置设计限定使用某一种燃料，如飞机使用航空煤油、舰艇使用轻柴油、电站使用重油或某些气体燃料等。有时也有要求能使用多种燃料的，如在油田，往往要求燃气轮机既能使用原油又能使用天然气。

8. 操纵性能 通常包括对启动、加速、减速、停车以及倒车（对船舶、机车、坦克、汽车等水陆运输工具）过程在时间上以及在这些过程中对可靠性直接有关的参数（如最高排气温度——用它来控制燃气初温，最大扭矩等）的严格规定。

9. 调节、保安与控制 调节系统的目的是实施稳态工况调节（即在大气温度和压力或负荷特性发生变化的条件下，使燃气轮机仍能提供相应的功率）和过渡过程调节（即在保证燃气轮机可靠的条件下，从一个工况迅速过渡到另一个工况）。保安系统实际上应包括：监测、过量调节、报警、危急遮断等完整的功能。而控制系统通常必需保证有机旁、机舱、驾驶室（或为集中控制室）的“三级”控制。利用电子计算机对燃气轮机及其整个动力装置（系统）进行控制，包括稳态与过渡工况的控制以及紧急事故的处理等，目前已在航空和电站等燃气轮机中开始获得应用，使燃气轮机的热经济性及其他性能得以进一步改善，可靠性也同时得到明显增强。

10. 噪声及外壳壁温 燃气轮机噪声，包括环境（外场）噪声及机旁噪声，和外壳壁温的限制，都是为了改善运行人员的工作条件和减少环境污染。通常，燃气轮机必需在进排气道中分别装设进气与排气消声器，以降低环境噪声；必需采用箱壳体（具有隔声罩的作用）或仅仅敷设隔声隔热材料（罩壳）以降低机旁噪声——一般要求低于90~110 dB。对于进排气道全部敞开于大气中，如航空燃气轮机、气热艇用升力与推力风扇以及一般的通风机等，除了常规的气动热力和结构设计外，目前都要求进行气动声学设计，即从减少噪声源或降低噪声源强度的角度出发，合理选择气动及结构参数。燃气轮机外壳温度一般要求不超过

60℃ (防止烫伤运行人员)。通常, 可以采用箱装体 (内壁中敷有隔声隔热材料, 并由专用风扇或燃气轮机排气引射而造成一定流量的冷却空气来进行冷却), 也可以只采用带绝热外敷设隔热隔声材料 (即罩壳或轻型结构)。

以上十个方面, 是动力装置设计对燃气轮机提出的一般技术要求。不同的使用对象往往会有各自不同的侧重点, 而且还会有其他的特殊要求。由于篇幅限制, 在本书中不准备详细介绍。但是, 应该提出, 对燃气轮机设计者来说, 不同的侧重点以及外加的特殊要求, 也是十分重要的, 有时甚至比一般技术要求更需注意。

下面给出某一般用燃气轮机设计任务书的主要内容可供设计时参考:

一、技术指标

1. 功率和耗油率

在大气温度 $T_a = 27^\circ\text{C}$ 、大气压力 $P_a = 101332\text{ Pa}$ (即为 1.0332 kg/cm^2), 并考虑进气管道损失为 980.665 Pa (即 100 mmHg)、排气管道损失为 1471 Pa (即 150 mmHg) 的条件下, 动力涡轮输出端的最大持续功率为 $\times\times\text{ MW}$ (或 $\times\times\times\times\text{ 马力}$), 相应的耗油率为 $\times\times\times\text{ g (kW}\cdot\text{h)}$ (或为 $\times\times\times\text{ 克/马力小时}$)。这时, 动力涡轮输出轴的转速为 $\times\times\times\times\text{ r/min}$, 燃气轮机空气流量为 $\times\times\text{ kg/s}$ 。

2. 重量尺寸

轻型结构 (罩壳式) 的燃气轮机的尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 (mm)、总重量为 $\times\times\text{ t}$; 箱装体结构的燃气轮机的尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 (mm)、总重量为 $\times\times\text{ t}$ 。燃气轮机净重 (不包括罩壳、支架、箱装体等的燃气轮机自重) 为 $\times\text{ t}$ 。

3. 寿命

燃气轮机第一次翻修期不小于 $\times\times\times\times\text{ h}$ 。动力涡轮第一次翻修期不小于 $\times\times\times\times\text{ h}$, 其使用寿命与船龄相当。工作寿命中最大持续工况运行时长为翻修期的 $\times\%$ 。燃气轮机上所带附件的翻修期应与燃气轮机相同。

4. 调节控制

(1) 起动方式 采用空气涡轮机起动。起动用的空气, 可来自船上气源 (气压为 $\times\times\text{ kPa}$), 也可来自相邻已运行的燃气轮机抽气。每次起动空气耗量为 $\times\times\text{ kg}$ 。允许连续起动次数应不少于 6 次。起动机还应能兼做清洗动力源用。

(2) 燃气发生器调节系统 液压机械式。工况可按要求控制。起动、加速、减速、停车及超速、超温、超压、防喘等均为自动调节。

(3) 监控系统 除动力涡轮极限转速调节为液压机械式外, 其余均为电子式。应设有动力涡轮超速、超温、超振、滑油压力过低及防冰、防火等报警或自动保护装置。

(4) 带有机旁控制台, 并备有动力装置集中控制用的接口, 以备集中控制室和船桥的控制用。

5. 燃料和滑油

燃料型号为 $\times\times\times\times$ 。燃气发生器滑油为 $\times\times\times\times$ 高温合成润滑油。动力涡轮与齿轮采用同一种润滑油为 $\times\times$ 号透平油。

二、技术要求

1. 最低稳定工况为最大持续工况的 $\times\%$ 。慢车转速应低于最低稳定工况转速。

2. 在 $-25\sim 35^\circ\text{C}$ 的大气温度下, 从冷态起动到慢车工况不大于 1 分钟。从冷态起动经

慢车工况直至最大持续工况的时间不大于3分钟。当双机并车时,每一个燃气轮机均能正常地起动、加速和减速,两台燃气轮机应能正常地转换工作状态。

3. 在冲击载荷为垂向15g、横向9g、纵向6g的条件下,燃气轮机完好并可正常工作。

4. 燃气轮机装船以后,在长期横倾 $\pm 15^\circ$ 、长期纵倾 $\pm 5^\circ$ (不包含主机安装角度),以及瞬时横摇 $\pm 45^\circ$ 、瞬时纵倾 $\pm 10^\circ$ (周期10秒)条件下,可安全可靠工作。船上主机安装为 $\times$ 度。

5. 燃气发生器各方向上的双振幅值不大于0.05~0.10mm,动力涡轮各方向上的双振幅值不大于0.10~0.15mm。

6. 燃气轮机排烟温度不高于 $\times \times \times ^\circ\text{C}$ 。

7. 燃气轮机热表面应设有隔热或冷却措施。轻型结构(罩壳式)应保证壁面温度不高于 60°C ,而箱装体结构应保证壁面温度比环境温度不高出 10°C 。

8. 燃气轮机应具有隔声降噪措施,以保证在燃气轮机侧面距表面1m的中心高度处的噪声;对轻型结构(罩壳式)的不大于110dB(A)、对箱装体结构的不大于100dB(A)。

9. 燃气轮机应便于日常维护保养,应设有盘车和清洗装置。

10. 随机供应的仪表、电器和电子设备应满足防油雾、防盐雾、防霉的标准和船规的要求。

§ 1-2 燃气轮机设计原则和设计方法

一个好的燃气轮机设计,只有在正确的设计思想和设计原则的指导下才能获得成功。一般来说,这些设计思想和原则对其他产品设计也是必须遵守的。总结国内外产品设计经验,大致可归纳以下三条:

1. 从实践出发。即从国家资源,从制造厂生产条件,从设计、制造、安装、运行人员的水平和经验等具体实践出发(特别是在材料和结构的选择以及工艺设计等方面)。这不仅关联到设计实施的现实可能性问题,也涉及到能否发挥优势,设计出高水平产品的问题。成套先进设备以及先进设计制造专利的引进,则属于改造这个实践以适应“面向现代化,面向世界”的发展要求。

2. 有重点地全面满足动力装置设计所提出的技术要求。动力装置设计对燃气轮机所规定的技术要求必须全面满足,这是肯定无疑的。但是,这些技术要求往往是相互矛盾的(例如高的热效率与小的重量尺寸之间),而且它们对不同的使用对象(如电站或船舶)所起的作用也是不同的。此外,动力装置设计者所提出的技术要求有时往往偏于苛刻。因此,燃气轮机设计者必需在深入掌握使用对象对燃气轮机的实际要求的基础上,有重点地全面满足,或者说,最大限度地满足动力装置设计所规定的技术要求。

3. 建筑在经过长期运行实践考验的、成熟的设计方法和设计经验的基础上。这是产品设计能否成功的关键,也是成熟产品设计与新产品预研(发展)的主要区别。一种新的设计方法和技术措施得以实际采用,不仅需要经过理论研究和实验室的实验验证,而且还需要经过中间工业性试验以及小批量样机试用等阶段的考验。因此,无论是设想一次设计、一批产品就会获得十全十美的结果,或者是设想一个设计、一种产品,能够几十年一贯地不作任何改进,都将是不现实的。燃气轮机设计者必需十分重视以往设计产品(包括国内外同类产品)

在实际使用过程中所发生的种种故障以及相应的改进措施,以此作为新产品设计的借鉴。

燃气轮机的设计方法,与其他产品设计一样,可以采用如下三种:

1. 测绘仿制“母型”机的设计方法。选择某一个燃气轮机产品作为“母型”机来代替所要设计的燃气轮机,在缺乏设计和工艺资料的情况下,通过测绘、分析、验算、试验等一系列的“反设计”工作,制订出一整套设计与工艺文件,仿制出与“母型”机性能指标完全一致或基本一致的产品。这种设计方法可以在发展初期采用,以便利用自己的力量,在短期内掌握并生产出国内还没有的产品。但是,采用这种设计方法不可能生产出那些需要更先进的技术水平和工艺设备而我们目前又还没有具备的、先进的产品。国外先进技术专利和生产设备的引进,再经过仔细消化并掌握以后,上述设计方法的缺点可以得到弥补。

2. 局部改进“母型”机的设计方法。选择与动力装置所规定的技术要求相近的某一个燃气轮机作为“母型”机,局部修改某些部件以全面满足所规定的技术要求。局部修改的份额的大小,取决于所设计的与“母型”燃气轮机之间的差别程度的多少。这是一种最常采用的设计方法。任何一个产品的完善与发展,也是采用这种方法,只不过这时是把前一个型号作为后一个型号的“母型”机罢了。

3. 全新设计,或者说与“母型”机相比有根本性变革的设计方法。它通常用于产品更新换代的阶段和新产品的预研中。这时,设计中往往需要采用大量的先进的科研成果和技术进步措施,往往需要经过部件试验-样机试制-中间工业性试验-小批量生产试用-定型、大批量生产等几个阶段,一般需要长达7~10年的发展过程。

§ 1-3 燃气轮机设计内容和设计阶段

燃气轮机设计内容主要包括以下六个部分:

1. 选型与循环热计算。它包括总体与部件型式及方案的选择、热循环主要参数及性能指标的确定。

2. 部件的气动热力计算。它包括气动热力草算(或称方案计算)和气动热力详细计算。气动热力草算的目的是确定各部件(进排气道、压气机、燃烧室、涡轮等)的主要结构型式和参数(包括转速、级数、直径、叶高、轴向长度等),绘制通流部分草图,提供详细计算所需的控制参数。气动热力详算的目的则是确定通流部分的结构参数和尺寸,以及设计工况和几个主要非设计工况下的燃气轮机变工况性能与沿通流部分热力参数的变化,绘制燃气轮机通流部分图。

3. 结构设计。它包括通流部分、机匣、转子、轴承、传动、箱装体、机座等的型式与材料的选择以及尺寸的确定,最后绘制零部件设计图纸。

4. 强度与振动的验算。它包括除标准件以外所有承力零部件的强度与振动的验算。与确定通流部分尺寸有关的零部件强度及振动的验算,往往需要与气动热力计算相结合,交叉进行。

5. 附件系统的设计。它包括燃油、调节保安、控制监察、冷却、压气机防喘、滑油、启动(盘车)、清洗、防冰、防火等系统。

6. 工艺设计。它包括除标准件以外所有零部件的工艺要求、加工过程以及有关工夹具的设计。

燃气轮机设计阶段，通常可分为方案设计、技术设计和施工设计三个阶段：

(1) 方案设计阶段 这阶段主要是为了确定设计方案。其设计内容，除了1) 选型和循环热计算、2) 部件的气动热力计算以外，还需进行3) 结构设计中的总体结构设计草图以及主要零部件的选材、4) 强度与振动验算中，直接影响设计方案选取的某几个主要零部件的验证、5) 附件及系统设计中重大变革部分的初步设计。根据方案设计的结果，经过与动力装置设计单位的协商，有可能部分修改设计任务书中所规定的技术指标。

(2) 技术设计阶段 按照方案设计审查会通过的设计方案，以及最后所规定的燃气轮机技术指标，进行上述设计内容中，除工艺设计以外的全部设计工作。绘制全部图纸，编制所有计算书。

(3) 施工设计阶段 根据技术设计审查会通过的技术设计图纸，制造工厂的工艺设计人员会同燃气轮机设计人员制订零件的工艺过程，绘制施工图纸，并进行必需的工装具设计。这时，如果发现制造工厂对于某些零部件的加工有困难，那末可以采取改革工厂工艺（包括外协）或者在取得设计者同意后用修改设计图纸的方法来解决。

以上我们仅仅讨论了设计方面的工作。实际上，一个成功的设计必需由设计、研究（包括理论与试验研究）、制造三个部门与使用部门，在整个设计过程中密切配合下，才有可能完成。例如，任何一个方案、一个零件，以至象压气机、燃烧室等部件的新的设计，只有经过试验验证，并加以必要的调正以后，才有可能用在燃气轮机中进行整机调试。因此，试验验证必需贯穿在整个设计过程之中。试验验证一般可分为：方案验证、零部件或其模型件的试验验证和整机调试等三个阶段。只有制造部门的自始至终的积极参与，尤其是在技术设计阶段，才有可能使燃气轮机设计师设计出既满足设计任务要求，又能切合制造工厂实践的合理结构。否则，一定会造成施工设计阶段对技术设计图纸作出重大修改。至于使用部门人员的参加，可以帮助燃气轮机设计人员，切实按照最大限度地满足使用对象的要求来指导设计工作。

§ 1-4 燃气轮机课程设计的任务和内容

燃气轮机课程设计的任务是综合运用燃气轮机专业有关课程（透平机械原理、燃烧室、燃气轮机装置、自动调节、零件强度及振动、制造工艺等）进行燃气轮机设计的基础训练。考虑到设计教学时数有限。我们安排了以方案设计阶段的训练为主，内容包括以下八个部分：

1. 燃气轮机型式和主要参数的选择以及循环热计算。
2. 多级轴流压气机的方案计算。
3. 燃烧室的方案计算。
4. 多级轴流涡轮的方案计算。
5. 进排气道主要尺寸的计算。
6. 绘制燃气轮机（通流部分）纵剖面图。
7. 叶片设计和造型（包括强度核算）。
8. 燃气轮机变工况性能的估计。

如果学生全部进行以上八个部分的内容，建议安排讲课48学时，课外（设计）168学时，折合成课内总时数为96学时。我们称它为“多学时”课程设计。如果设计学时数有限，

那么最后的 7 和 8 两部分内容可以不进行。我们建议安排课内 36 学时, 课外 126 学时, 折合成课内总学时数为 72 学时。我们称后者为“少学时”课程设计。

为了加强计算方法的基础训练以及进行各种方案和不同参数的比较, 我们建议: 学生第一遍计算应采用手算方法, 而计算的“返工”、参数的变化和方案的比较等, 则适宜采用电算方法。

参 考 文 献

- [1] 沈炳正编, 燃气轮机装置, 机械工业出版社, 1981。
- [2] 赵士民编, 燃气轮机结构, 清华大学出版社, 1981。
- [3] 王钟铭编, 舰船燃气轮机装置, 国防工业出版社, 1981。
- [4] 北京航空学院编, 航空涡轮发动机构造与零件强度计算, 国防工业出版社, 1961。
- [5] John W. Sawyer, editor, Gas Turbine Engineering Handbook, Gas Turbine Publications, Inc. 1966。
- [6] John B. Woodward, Marine Gas Turbine, John Wiley & Sons, Inc. 1975。
- [7] Jack L. Kerrebrock, Aircraft Engines and Gas Turbines, MIT press, 1977。
- [8] Г. С. Кубицкий, Авиационные Газотурбинные Двигатели, Конструкция и Расчет, Ленинград, 1981。
- [9] Я. Х. Сорока, Теория и Проектирование Судовых Газотурбинных Двигателей, 1982。
- [10] John W. Fairbanks, The FT9 Marine Gas Turbine Engine Development Program, Naval Engineers Journal, December 1975。

第二章 燃气轮机的型式和主要参数的选择以及热力循环计算

§ 2-1 燃气轮机型式的选择

燃气轮机型式繁多, 分类各异。燃气轮机的结构形式主要取决于热循环方案、部件的组合型式和输出功率的传递方式。下面分别予以介绍, 并着重讨论它们的优点及其应用。

一、简单循环、复杂循环与复合循环

(一) 简单循环

简单循环的燃气轮机具有: 体积小、重量轻、结构紧凑、辅助机械少、工作可靠。它的主要缺点是经济性较差, 特别是低工况性能差。

选用加速燃气轮机, 由于其运行时间很短, (一般仅占整个航行时间的 5~10%), 故对重量尺寸要求特别苛刻, 而热经济性仅具有次要意义, 所以采用简单循环较为适宜。机车燃气轮机, 由于机车尺寸的严格限制, 所以, 大多采用简单循环。发电用燃气轮机中的备用机组和尖峰负荷机组, 由于要求成本低、投资少、重量轻、尺寸小、起动快, 相对来说, 效率和寿命并不是主要考虑的因素, 因此选用简单循环较为恰当。至于用于带动各种辅机, 如移动式发电机、小型空气压缩机以及各种泵等的小功率燃气轮机, 要求轻便可靠, 但对热效率并不强调, 因此几乎都采用简单循环。

简单循环燃气轮机, 由于在上述这些领域内具有明显的优点, 特别是由航空改型的燃气轮机被其广泛地应用于舰船、电站以后, 更加引起了人们的注意。目前, 简单循环燃气轮机的低的热经济性, 已由燃气初温和增压比的提高, 得到了显著地改善。在舰船燃气轮机领域内预期在今后的二十年内, 由航空改型、采用简单循环的舰船燃气轮机, 其燃气初温可达 1600~1650 K。增压比可达 35, 这时燃气轮机的耗油率将接近目前高速船用柴油机水平^[5]。

(二) 复杂循环

在复杂循环的燃气轮机中, 由于采用了回热、中间冷却或中间加热等措施, 循环的比功和效率与简单循环的相比, 都可得到增加。

电站中要求负荷的机组, 由于连续长期运行于额定工况, 因此要求其额定负荷效率高、寿命长、运行可靠而便于维护。这时, 采用复杂循环比较合适。对舰船全工况燃气轮机, 由于大部分时间是在低负荷下运行, 故要求部分负荷效率高, 因而采用复杂循环也是有前途的。

但是, 迄今为止, 复杂循环还没能在舰船燃气轮机得到很大的发展。因为采用复杂循环以后, 整个燃气轮机在结构上显得十分复杂, 体积庞大, 可靠性和机件性能明显下降, 而制造成本大大增加。此外, 近年来, 全工况燃气轮机已成功地被多台具有高热效率的简单循环燃气轮机的组合所取代, 人们可以启动其中若干台燃气轮机来适应不同负荷的要求。然而, 复杂循环的丧失失对人们的吸引力。仍有不少学者致力于研究复杂循环。例如美国兰普技术大