

燃气轮机 性能分析

主编 ● 翁史烈

出版 ● 上海交通大学出版社

RANQI LUNJI
XINGNENG FENXI
SHANGHAI
JIAOTONG DAXUE
CHUBANSHE

TK47
W 62

298289

燃气轮机性能分析

翁史烈 等著

上海交通大学出版社

前 言

在燃气轮机发展的初期，部件和总体性能并没有引起足够的重视。四十年代末，尽管燃气轮机的论著之多已如雨后春笋，但是，绝大多数都是阐述叶片机械的热力学和气动力学的原理与设计，很少有部件和总体性能方面的研究资料。

燃气轮机的实践引起了人们对燃气轮机平衡运行和动态响应的重视。从五十年代初期起，部件特性的实测和理论研究蓬勃开展，而基于部件性能资料的发动机总体性能，包括设计工况性能、非设计工况性能以及发动机在小扰动和大扰动下的动态性能也得到了各国学者的重视。在五十年代发表的文献，如契尔卡索夫(Черкасов Б.А.)关于涡轮特性的计算方法、安利(Ainley D. G.)的涡轮叶栅特性统计曲线和涡轮特性的计算方法、霍威尔(Howell A. R.)的压气机叶栅特性统计曲线和压气机特性的骨干线法、马斯洛夫(Маслов Л. А.)的燃气轮机总体稳态性能计算方法以及柯特利雅尔(Котляр И. В.)关于燃气轮机变工况的专著都有一定的代表性，迄今还有实用价值。

六十年代后期和七十年代，一方面由于燃气轮机本身技术的发展，另一方面，也许是更重要的，由于电子计算机技术的异军突起，揭开了计算方法的新一页，燃气轮机的部件和总体性能的传统理论和方法面临着新的挑战。于是在七十年代，国内外又相继发表了一些与计算方法发展有关的燃气轮机性能研究的新资料。

编写本书的目的在于把非线性方程和非线性规划的求解、回归、拟合、最优控制理论与算法等计算方法上的发展引入燃气轮机领域，从而在部件和总体性能研究方法的更新上起一些推波助澜的作用。本书中提供的理论、算法以及计算实例都是取自学科组

多年课题研究的结果。第一、第四章由王永泓副教授编写,第五章由张百年副教授编写,第二、第三章由本人编写,全书经本人审定。特别要指出的本书的出版是和邹介棠博士、宋华芬讲师、苏明博士的大量研究工作紧密有关。因此,本书实际上是学科组的集体成果。

翁史烈

1987年3月8日

主 要 符 号

<i>A</i>	截面积(m^2), 参变量
<i>B</i>	燃料耗量(kg/h), 燃烧室
<i>C</i>	压气机, 系数, 电容(F)
<i>D</i>	直径(m)
<i>E</i>	残量。 $E(\xi)$ 随机变量 ξ 的数学期望
<i>F</i>	统计量
<i>G</i>	质量流量(kg/s)
<i>I</i>	转动惯量($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), 电流(A)
<i>K</i>	常数, 系数, 直流放大器放大倍数, 传递系数。 K , 时间比例尺
<i>M</i>	扭矩($\text{N}\cdot\text{m}$), 马赫数,
<i>N</i>	功率(kW), 负荷
<i>Q</i>	热量(kJ), 总离差平方和
<i>R</i>	气体常数($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), 阻力, 电阻(Ω), 复相关系数
<i>S</i>	熵(kJ/K)
<i>T</i>	开氏温度(K), 涡轮, 推力(N)
<i>V</i>	容积(m^3), 舰船航速
$\overline{W}$	折合供油量, $\overline{W}_a$ ($\overline{W}_d$) 折合加速(减速)供油量
<i>Z</i>	阻抗
<i>b</i>	经验修正系数, b_e 燃油消耗率($\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)
<i>c</i>	流速(m/s), 比热($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
<i>f</i>	燃料空气比
<i>i</i>	电流(A)
<i>k</i>	比热比

n	转速(r/min), $\bar{n}_z$ 折合给定转速, $\Delta \bar{n}_{du}$ 折合选择转速
p	压力(Pa)
r	半径(m)
t	摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)
u	圆周速度(m/s), 电压(V)
v	比容(m^3/kg)
w	相对流速(m/s)
x	自变量
y	因变量
α	过量空气系数, 气流角
β	模尔燃料系数, 回归系数, 相对气流角
η	燃气轮机效率, 随机因变量
λ	无因次速度
ξ	阻力系数, 随机自变量
ε	压气机压比, 随机误差
π	涡轮膨胀比
ρ	密度(kg/m^3)
μ	回热度, 动力涡轮的扭矩系数
τ	温比, 时间(s)
σ	总压恢复系数, 方差
ω	角速度(rad/s)

上角标:

* 滞止

下角标:

0 静止, 额定

分轴燃气轮机,

1 压气机进口

2 压气机出口, 燃烧室进口

3 燃烧室出口, 高压涡轮进口

4 高压涡轮出口, 低压涡轮进口

5 低压涡轮出口

三轴燃气轮机,

1 低压压气机进口

2 低压压气机出口, 高压压气机进口

3 高压压气机出口, 燃烧室进口

4 燃烧室出口, 高压涡轮进口

5 高压涡轮出口, 中压涡轮进口

6 中压涡轮出口, 低压涡轮进口

7 低压涡轮出口

a 大气, 轴向

B 燃烧室

O 压气机

T 涡轮

col 冷却

d 干燥空气

e 有效, 轴端

ex 出口

ad 绝热

cr 临界

g 燃气

H 高压

M 中压

L 低压

in 进口

opt 最佳

w 水, 潮湿空气

z 级数

f 火焰筒

目 录

第一章 燃气轮机的变工况性能	1
§ 1-1 燃气轮机的部分负荷和过渡过程	1
§ 1-2 燃气轮机各主要部件的变工况特性	3
一、压气机的变工况特性分析	4
二、涡轮的变工况特性分析	9
三、燃烧室的变工况特性分析	15
四、回热器、中间冷却器和管道阻力等的变工况 特性分析	21
§ 1-3 燃气轮机的外特性	26
§ 1-4 燃气轮机的稳态和动态性能分析	40
一、概述	40
二、单轴燃气轮机的变工况性能	43
三、分轴燃气轮机的变工况性能	48
四、平行双轴和多轴燃气轮机的变工况性能	59
§ 1-5 大气参数变化对燃气轮机性能的影响	76
一、概述	76
二、燃气轮机工况相似的决定性准则	77
三、实验或计算数据的整理	80
四、工况相似的近似性	83
五、不同大气条件下的平衡工作线	85
第二章 燃气轮机稳态和动态性能的数学模型及其解法	87
§ 2-1 燃气轮机动态和稳态的数学模型	87
§ 2-2 稳态数学模型的解法	92
一、平衡技巧	94

二、方程组的简化和降维	96
§ 2-3 燃气轮机过渡过程的解法	98
一、过渡过程求解的条件	99
二、方程的简化	100
三、求解方法	101
第三章 燃气轮机总体性能的优化	108
§ 3-1 多变量燃气轮机	108
§ 3-2 变几何涡轮的计算	111
§ 3-3 燃气轮机总体性能的优化—混合解法	118
§ 3-4 燃气轮机的结构参数优选—当量通流部 分的应用	127
§ 3-5 燃气轮机动态过程的最优控制	136
第四章 燃气轮机及其部件特性的回归分析	144
§ 4-1 概述	144
§ 4-2 回归分析的基本原理和公式	148
§ 4-3 用两步拟合法建立压气机特性的回归模型	155
一、压气机特性回归函数形式的选择	155
二、自变量的舍选和逐步回归计算	157
三、两步拟合法的基本原理	168
四、实例分析	177
§ 4-4 用综合法确定变几何涡轮特性的回归函数	180
一、变几何涡轮特性回归函数表达式的建立	181
二、变几何涡轮特性回归函数式中待定参数的确定	190
三、计算实例及结果分析	198
§ 4-5 用最优子集回归法建立燃气轮机特性的 回归方程	204
一、最优子集回归法的提出	204
二、最优子集法中变量选择的准则	206
三、最优子集回归法	207

四、程序简介	211
五、算法举例	215
六、改进回归方程的精度	219
第五章 燃气轮机计算机仿真	222
§ 5-1 计算机仿真	222
§ 5-2 燃气轮机部件特性的计算机仿真	244
§ 5-3 燃气轮机总体性能的计算机仿真	265
一、线性化燃气轮机仿真模型	267
二、准非线性化燃气轮机仿真模型	276
三、非线性化燃气轮机仿真模型	282
§ 5-4 燃气轮机数字控制系统的计算机仿真	288
参考文献	301

第一章 燃气轮机的变工况性能

§1-1 燃气轮机的部分负荷和过渡过程

燃气轮机是一个整体,它由涡轮、燃烧室、压气机等部件组合而成。燃气轮机的总特性不仅与这些部件的性能有关,而且还与它携带的外界负荷所固有的特性密切相关。所谓燃气轮机的总体性能就是指涡轮、燃烧室、压气机以及外界负荷这四者之间联合工作时所表现出来的总特性。

我们衡量一台燃气轮机总体性能的优劣,不仅要看它在设计工况下的技术性能指标,而且还必须研究它在偏离设计工况条件下的工作性能的好坏,这样才能对燃气轮机的总体性能作出全面的评价。

燃气轮机在负荷、转速、大气或其他参数偏离设计状态下工作称为燃气轮机的变工况,它包括部分负荷和过渡过程二种。

部分负荷的特点是机组工作的稳定平衡,讲得确切一些,就是在任一部分负荷时,燃气轮机中的一切参数,例如气温、气压、转速、功率等,都不随时间而变。所以,部分负荷都是稳定工况。

然而,一切平衡、稳定都是相对的,有条件的,燃气轮机的工作也是如此。若外界负荷、燃油量、大气温度的变化或管道局部阻力的改变等都会破坏燃气轮机的原有平衡工作。例如,舰船在海洋中航行时,海面情况会经常不断地出现变化,从而作用在燃气轮机上的外界负荷(即螺旋桨吸收功率)也经常发生变化。另外,舰船为了适应不同任务和不同情况,需要改变航速,这时可通过燃油量的改变来改变燃气轮机的功率,以满足不同航速的需要。这些变化、不管是外界负荷还是燃油量,都导致燃气轮机平衡工作的破坏。

平衡破坏之后，燃气轮机就开始进入过渡过程。这时机组的参数都是不稳定的，它们都随时间而变化，例如转速可能逐渐上升或降低，温度、压力等也随时间作相应的变化。这种变化一直要延续下去，直到出现新的平衡条件，燃气轮机才进入新的稳定工况。由此可见，过渡过程往往是介于二个稳定工况之间，是从一个稳定工况转换到另一稳定工况的中间过程。

燃气轮机的主要过渡过程有启动过程、加速过程、减速过程、倒车过程、紧急停车过程等。

这里特别要指出的是，燃气轮机经常在变工况条件下工作。对舰艇的实际调查可知：一艘舰艇的绝大部分时间(90~97%)都是在巡航状态下工作，而只有3~10%时间在较大或最大航速下工作。在许多现役的军舰中，燃气轮机往往由几台机组组成，在巡航时只有部分机组参加工作，这样可大大地减少每台机组工况变化的幅度，但是舰船在进出港、停泊靠岸、护渔护航时还是要求机组在低负荷下工作。至于电站用的燃气轮机，由于外界负荷或大气条件的变化，甚至由于涡轮通道部分结垢的影响，它也是经常会处于偏离设计工况条件下工作的。由此可知，燃气轮机变工况的研究是具有很重要的实际意义的。

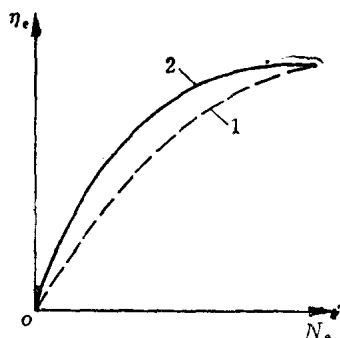


图 1-1 燃气轮机的 η_e - N_e 关系曲线

变工况研究的重点在于提高燃气轮机的稳态和动态特性的品质，使机组能够可靠而又经济地工作。燃气轮机的稳态和动态性能主要是用下列三个指标进行分析比较的。

1. 经济性

燃气轮机部分工况下经济性的好坏是用热效率来衡量的。一般来说，燃气轮机在部分工况下的热效率总是要比设计工况下的低。人们总希望燃气轮机的热效率 η_e 在部分工况时下降少一些，

也即要求 η 随负荷功率 N 的下降而尽量平缓一些。从图 1-1 可见, 曲线 2 比曲线 1 所表示的变工况经济性要好一些。一般, 燃气轮机经济性的改善和热力循环方案与轴系组合方案的复杂程度有关。

2. 稳定性

燃气轮机变工况下, 稳定性的好坏是用压气机是否喘振来衡量的。

当压气机远离设计工况时, 在压气机工作叶栅进口处会出现过大的气流正冲角, 以致会使压气机进入喘振工况。那时, 整台燃气轮机的工作就不能稳定, 压气机内的气体发生轴向振荡, 同时还会使机组伴随有强烈的振动。因而, 燃气轮机在压气机喘振工况下运行是绝对不能允许的。

通常, 燃气轮机转速下降过多, 或气体流量过小, 或机组在过渡过程(如启动、加速等)时供油量配合不当, 都可能引起压气机喘振。因此, 要求燃气轮机在各种部分工况和过渡过程下, 压气机都不进入喘振工况, 以确保机组能稳定可靠地工作。

3. 加载性

燃气轮机过渡过程(包括启动、加速、倒车及停车等)中, 加载性的好坏是用机组能否迅速改变工况的能力来衡量的, 通常以时间的长短作为指标的。

对于负荷工况经常发生迅速变动的燃气轮机来说, 例如舰船燃气轮机、机车燃气轮机等运输式机组, 必须适应经常变动的外界负荷的要求, 因此这类机组的加载性能要求就较高。

综合起来说, 通过对稳态和动态性能中几个方面的分析比较, 我们就能对一台燃气轮机的总体性能作出较全面的评定。

§1-2 燃气轮机各主要部件的变工况特性

燃气轮机是由各部件, 包括压气机、燃烧室、涡轮、热交换器和

管道等组成的。只有从各部件的特性着手研究,才有可能了解燃气轮机总体的性能。由于篇幅的关系,这里仅能把各部件的变工况性能作一概要的介绍(详见参考文献[1-3][1-4][1-5][1-6][1-7][1-8][1-9])。

一、压气机变工况特性分析

压气机的特性可以用绝对参数(一般为容积流量 V_c , 绝对转速 n_c)或用相似参数(例如 $G_c\sqrt{T_1^*}/p_1^*$, $n_c/\sqrt{T_1^*}$ 等)。表示。

根据相似原理,如果在雷诺数 Re 自模化区内(即 $Re \geq 1.5 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^5$),气体的参数场是相似的,压气机的进口气流也是稳定的等条件下,则压气机的压比 π_o^* 和效率 η_o^* 与相似参数(轴向马赫数 M_a 和周向马赫数 M_u)之间的关系为

$$\pi_o^* = f(M_a, M_u); \eta_o^* = f(M_a, M_u)。$$

参数 M_a 和 M_u 对于压气机特性曲线在实际工作中的应用并不总是方便的,因此,在绘制压气机特性曲线时,经常还采用与相似准则 M_a 和 M_u 成正比的量,例如,用参数 $G_c\sqrt{T_1^*}/p_1^*$ 代替 M_a 及用参数 $n_c/\sqrt{T_1^*}$ 代替 M_u (注脚“1”表示压气机进口处的参数)。还可以利用压气机进口的相对密流 $q(\lambda_a)$ 取代参数 $G_c\sqrt{T_1^*}/p_1^*$ 。

为了使用方便,常将压气机通用特性线换算成进气是标准大气状态下的特性线。标准大气状态是指海平面温度为 288 K 和压力为 101325 Pa 时的状态。这时,

$$G_s = G_c \frac{101325}{p_a^*} \sqrt{\frac{T_a^*}{288}}, \quad (1-1)$$

$$n_s = n_c \sqrt{\frac{288}{T_a^*}}, \quad (1-2)$$

式中注脚 s 表示折算成标准状态时的参数。

式(1-1), (1-2)又可写成

$$G_s = G_c \sqrt{\theta} / \delta, \quad (1-3)$$

$$n_s = n_c / \sqrt{\theta}, \quad (1-4)$$

式中

$$\theta = \sqrt{\frac{T_a^*}{288}}, \delta = \frac{p_a^*}{101325}。$$

图 1-2 给出了轴流式压气机通用特性曲线示意图。以下来分析通用特性曲线的变化特点。

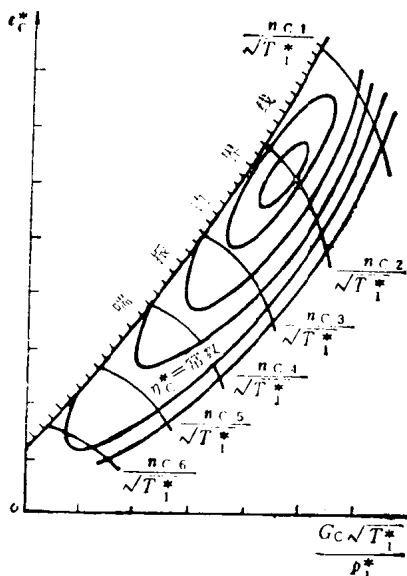


图 1-2 轴流式压气机的通用特性曲线

压气机的工作特性可以用 ϵ_c^* , $n_c / \sqrt{T_1^*}$, $G_c \sqrt{T_1^*} / p_1^*$ 和 η_c^* 等四个参数间的关系来表示。在 ϵ_c^* , $n_c / \sqrt{T_1^*}$, $G_c \sqrt{T_1^*} / p_1^*$ 等三个参数中, 只要其中任意两个参数一经确定, 那末压气机就有一个完全确定的工作状态, 因此压气机运行工况的独立参变量只有两个。

从图 1-2 中还可以清楚地看到, 压气机的通用特性曲线是有等折合转速线、喘振边界线和效率特性线等三部分组成的。等折合转速线的变化特点是: 随压比 ϵ_c^* 的增加, 工质的折合流量 $G_c \sqrt{T_1^*} / p_1^*$ 会减小。通常, 多级轴流式压气机的特性线在高转

速时比低转速时的变化更加陡峭。在级数较多的高压比压气机中，其压比和效率的变化更剧烈，因此其特性线的陡峭程度将更加严重。

喘振边界线又称为稳定工作边界线。压气机在喘振边界线右侧工作时，其工作是稳定的；而在喘振边界线左侧工作时，压气机的工作就不稳定了。在每一条等 $n_c/\sqrt{T_1^*}$ 特性线上，当 $G_c\sqrt{T_1^*}/p_1^*$ 减小至某一值时，压气机将出现不稳定的工作状态，这时的工作点叫喘振点，其对应的流量叫喘振流量。喘振时，气流沿压气机轴线方向将发生低频率、高振幅的气流振荡现象，并伴有强烈的机械振动，甚至会引起压气机工作叶片的折断。因而，决不能允许压气机在喘振区内工作。

压气机效率特性线的分布规律表明，在每一条等 $n_c/\sqrt{T_1^*}$ 线上，都有一个最佳效率 η_c^* 运行点，而且各转速下的最佳效率值是不同的。当流经压气机的 $G_c\sqrt{T_1^*}/p_1^*$ 偏离了该运行点所对应的折合流量时，压气机的 η_c^* 会降低下来。

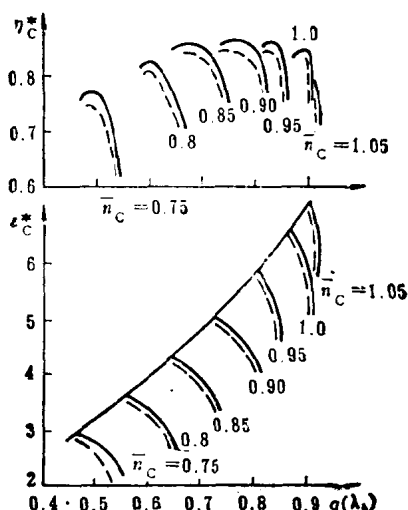


图1-3 在自模区(——) Re_{cmin} 大于 4×10^5 时和在非自模区 $Re_{cmin} = 2.5 \times 10^5$ (---)时的压气机特性

这里要强调指出的是,上面所讲的压气机通用特性曲线只有在满足了下述的假设后才能符合正确的结果:

- (1) 雷诺数处在自模化区域;
- (2) 被压缩气体的物理常数(k , R 等)都不改变;
- (3) 压气机进、出口截面均存在稳定的气流或不变的速度场;
- (4) 压气机所有各部件的几何尺寸及表面状况是不变的。

下列这些条件的偏差会对压气机特性曲线造成巨大的影响^{[1-7][1-9]}。

1. 雷诺数的降低

当 Re 数小于自模化数时,就使叶片上附面层增厚,因而使损失增加,在输入功不变的条件下,会使流量减少,因此增压比和效率都降低,整个特性曲线移向空气流量小的一方(见图 1-3)。由于 Re 数的降低会同时导致增压比和空气流量的下降,因而压气机特性曲线场内,喘振边界线位置改变得不大,但压气机和涡轮的共同工作状态会向喘振边界线方向移动,因此稳定工作裕度明显减小。

2. 大气湿度的改变

因潮湿空气的气体常数 R_w 大于干燥空气的气体常数 R_d ,这就使得潮湿空气的音速变大。当在给定的转速下,流向压气机叶片的气流 M 数就降低。这时潮湿空气的折合转速 $\bar{n}_w$ 可以用下式来表示:

$$\bar{n}_w = \bar{n}_d \sqrt{\frac{R_d}{R_w}}, \quad (1-5)$$

式中 $\bar{n}_d$ 为干燥空气的折合转速。

从式(1-5)中可知, $\bar{n}_w < \bar{n}_d$,因而会导致增压比和折合空气流量的减小。此外, R_w 还直接对空气密度有影响,会造成空气流量的进一步下降。

3. 进口流场不均匀的影响

压气机进口处的总压或速度分布不均匀,进口总温分布不均