

小功率单轴燃气轮机及其功热并供装置 变工况典型解析特性*

中国科学院工程热物理研究所 张 娜** 蔡睿贤

摘要】 采用动力机械变工况特性解析分析方法^[1,2], 分析总结了使用离心式压气机的小功率单轴恒速燃气轮机稳态变工况的典型特性及一些定量规律。所得燃气轮机装置典型效率曲线及统计公式得到了实际数据的验证。计算了该种燃气轮机功热并供装置用饱和蒸汽供热时的典型情况及其他一些变工况性能, 如大气温度的影响等。

主题词: 燃气轮机 性能 解析解

分类号: V231

1 前 言

由于负荷及大气状态的变化, 实际上动力装置经常是在变工况下运行。但因其复杂性, 除了个别较简单的情况外, 对变工况性能的了解还不是很充分, 特别是缺乏一些基本定量的宏观规律性了解。如果应用解析化的变工况计算方法, 就可以方便地计算动力装置的典型变工况特性^[1-3], 总结出一些规律性以丰富理论研究, 并可作为标准解供研究数值计算之用。

本文将对小功率燃气轮机(用单级离心式压气机, 设计压比较低, 特性线较平)及其功热并供装置, 给出其典型的变工况特性并加以规律性的总结。这样所得的变工况特性虽不准确表达任何一种具体机组的变工况特性, 但又相当典型地表达了这种动力装置的通用特性。

2 小功率单轴燃气轮机变工况的典型特性

沿用文献[1]中燃气轮机变工况特性解析解的基本形式, 与轴流式压气机不同的是, 离心式压气机流量小、压比小、效率低、特性平, 特性关系式^[1]中的常数取 $m = p = 1.8$, 所得到的压气机特性与常用的离心压气机特性是相近的。

由于解析解的简单易算, 可以通过大量的算例来进行系统总结。选取了九组不同的燃气轮机设计温比($\tau_0 = 4.0, 4.5, 5.0$)和压比($\pi = 4.0, 5.0, 7.0$)的组合, 以考察它们对整机变工况性能的影响, 实际上压气机设计效率 η_0 和透平设计效率 η_0 对不同的设计温、压比也应取不同的值, 本文为便于计算和比较, 统一取为 $\eta_0 = 0.82, \eta_0 = 0.85$, 燃烧室设计效率 $\eta_0 = 0.99$, 压力损失集中用总压恢复系数表示为 $\varphi = 1 - \sum \frac{\Delta P}{P} = 0.97$, 结果示于图 1~4, 图中用 3 种不同线型代表不同的 π 值, 每一线型中又有 3 条不同 τ_0 值的曲线, 变量均用相对其设计值的比值

1998 年 10 月收稿; 1999 年 4 月两篇合并后来稿; 1999 年 5 月收到修改稿。

* 本文系国家攀登 B 计划(编号: 85-39)及国家自然科学基金(编号: 59846006)资助项目

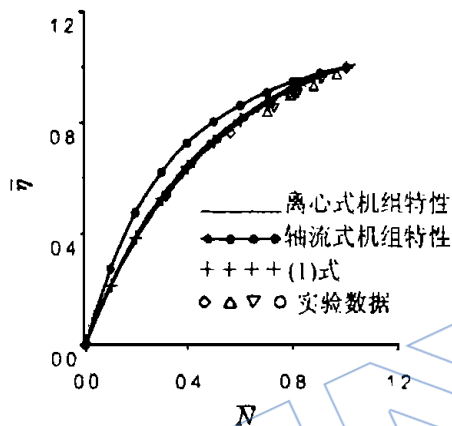
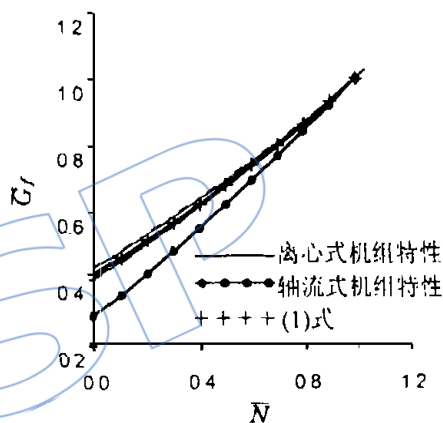
** 女 31 岁 硕士 助理研究员 北京中国科学院工程热物理研究所 100080

表示,如燃气轮机相对效率 $\eta = \eta / \eta_0$ 。类似文献[2],发现所得到的以相对值表达的机组效率 $\eta \sim$ 功率 N 、机组油耗 $\bar{c}_f \sim$ 功率 N 之间的关系几乎分别都可以用单一曲线来表达,见图 1 与图 2。他们的中值的拟合公式可表示为(图 1 与图 2 中的+ 号为此拟合公式值):

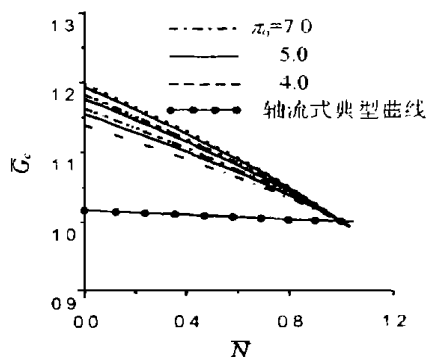
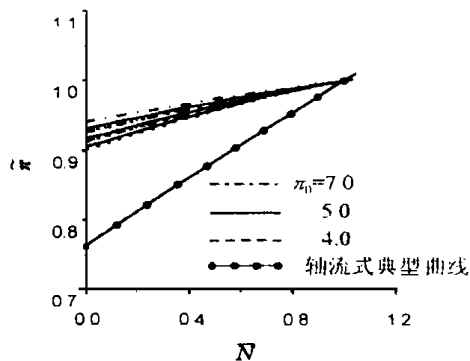
$$\eta = 2.367N - 2.467N^2 + 1.575N^3 - 0.475N^4 \quad (1)$$

$$\bar{c}_f = 0.416 + 0.473N + 0.111N^2 \quad (2)$$

一般说来,设计温比值较高时 $\eta \sim N$ 曲线中间略高一点,而 $\bar{c}_f$ 值略低一点;而设计压比对装置效率(或油耗)在变工况下相对变化曲线的影响则可基本忽略不计,空载油耗接近设计值的 40%。两图中并画出了采用轴流式压气机的燃气轮机变工况相对效率和相对油耗曲线^[2],可见采用离心式压气机时机组的变工况较差。图 1 中还示出我们目前能找到的不同的小功率机组变工况实验数据,二者基本吻合。

图 1 $\eta \sim N$ 变化关系图 2 $\bar{c}_f \sim N$ 变化关系

变工况时相对空气流量 $\bar{G}_c = G_c / G_{c0}$ 的变化见图 3。随着功率减小,空气流量增加较多,与采用轴流式压气机时有明显差别,说明采用离心式压气机的机组在减负荷时主要依靠比功的减小来实现。

图 3 $\bar{G}_c \sim N$ 变化关系图 4 $\bar{\pi} \sim N$ 变化关系

变工况时相对压比 $\bar{\pi} = \pi / \pi_0$ 的变化如图 4,空载的 $\bar{\pi}$ 在 0.90~0.94 之间,显明高于采用轴

流式压气机的机组, 这一点对变工况余热利用不利。\$\tau_0\$ 高的与 \$\tau_0\$ 低的空载 \$\bar{\pi}\$ 较低。

图 5 是在不考虑强度, 电机出力等约束条件下, 大气温度 \$T_1\$ 变化(假定透平前温与转速均不变)对燃气轮机效率及功率的影响。\$\bar{N} \sim T_1\$ 及 \$\bar{\eta} \sim T_1\$ 基本是线性函数, 且燃气轮机设计参数影响不大。通常在 \$\tau_0\$ 较低时, \$\bar{N} \sim T_1\$ 及 \$\bar{\eta} \sim T_1\$ 的负斜率较大, 平均大致有:

$$\frac{d\bar{\eta}}{dT_1} \approx -0.0032 \text{ K}^{-1}$$

$$\frac{d\bar{N}}{dT_1} \approx -0.0071 \text{ K}^{-1}$$

前者的绝对值比轴流式的大而后者则较小。

3 功热并供装置变工况典型性能

对于余热锅炉的变工况计算, 应用文献[4] 提供的一种解析近似算法, 它不涉及结构参数, 因而便于进行实际热力分析之用。

本文先只考虑饱和蒸汽供热, 蒸汽侧设计参数取为: 节点温差 \$\Delta T_{p0} = 20 \text{ K}\$, 逼近温差 \$\Delta T_{a0} = 20 \text{ K}\$, 给水温度 \$T_{w0} = 378 \text{ K}\$, 燃气轮机设计温比(\$\tau_0 = 4.5, 5.0, 5.5\$)和压比(\$\pi_0 = 4.0, 5.0, 7.0\$)及供热蒸汽饱和压力(\$p_{s0} = 0.3, 0.5, 0.9 \text{ MPa}\$)以考察它们对功热并供装置变工况性能的影响。

图 6(a) 与图 6(b) 所示为不同燃气轮机设计参数及饱和蒸汽设计参数下当量火用效率 \$\bar{\eta}\$ 及经济火用效率 \$\bar{\theta}^{[1]}\$ 和总能利用率 \$Z\$ 随负荷变化情况。燃气轮机设计压比值影响较小, 温比设计值与饱和蒸汽设计参数的影响略大一些。图 6(b) 中饱和蒸汽参数的提高对不同性能曲线的升降影响不一, 实际上是各性能指标对热与功评价方式不同所致, 可详见文献[2]。

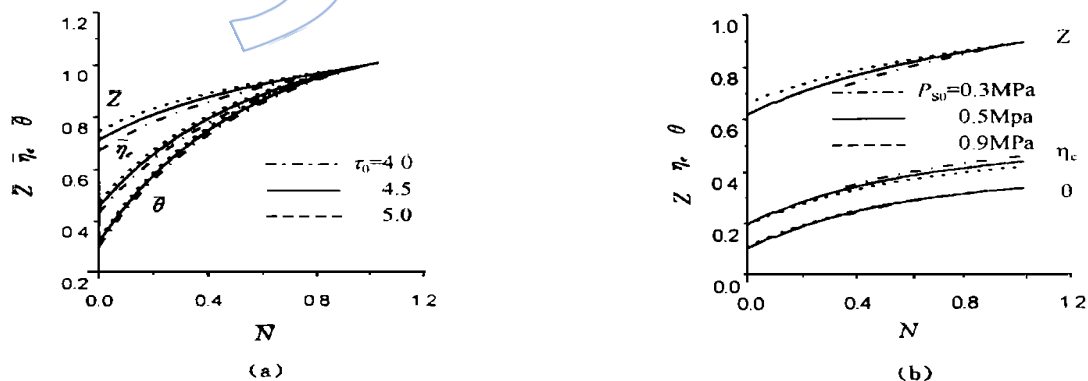


图 6 燃气轮机设计温压比和设计蒸汽参数对效率影响

由图 7(a) 与图 7(b), 相对蒸汽产量 \$\bar{G}_s \sim \bar{N}\$ 曲线与燃气轮机设计参数和蒸汽设计参数的关系都不大, \$\bar{G}_s\$ 基本上是随 \$\bar{N}\$ 的下降而下降, 但曲线略向上弯。

逼近温差 \$\Delta T_a\$ 的变化对余热锅炉省煤器的安全运行有重要作用。计算表明, \$\Delta T_a\$ 随负荷下降而减小, 燃气轮机设计参数对其变化趋势影响不算大(图 8a)。但略为提高饱和蒸汽设计

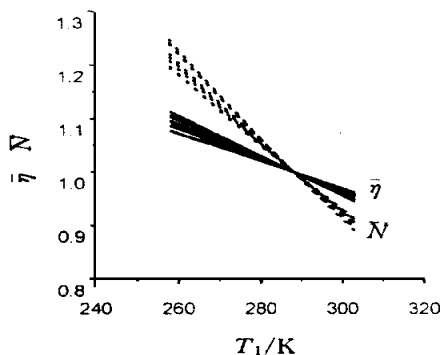


图 5 大气温度变化对性能影响

参数就会加大逼近温差随出功而下降的速度,使逼近温差变负的危险性增大(图 8b)。

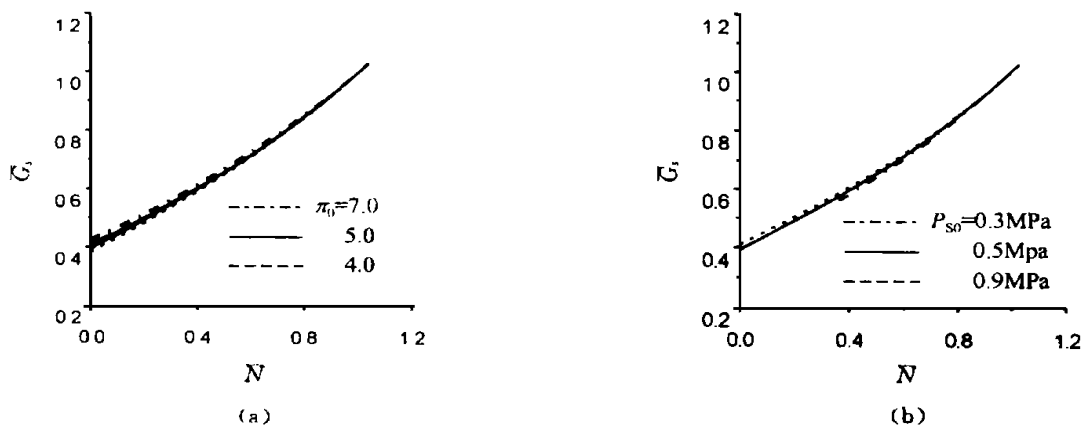


图 7 燃气轮机设计温压比和设计蒸汽参数对相对蒸汽产量的影响

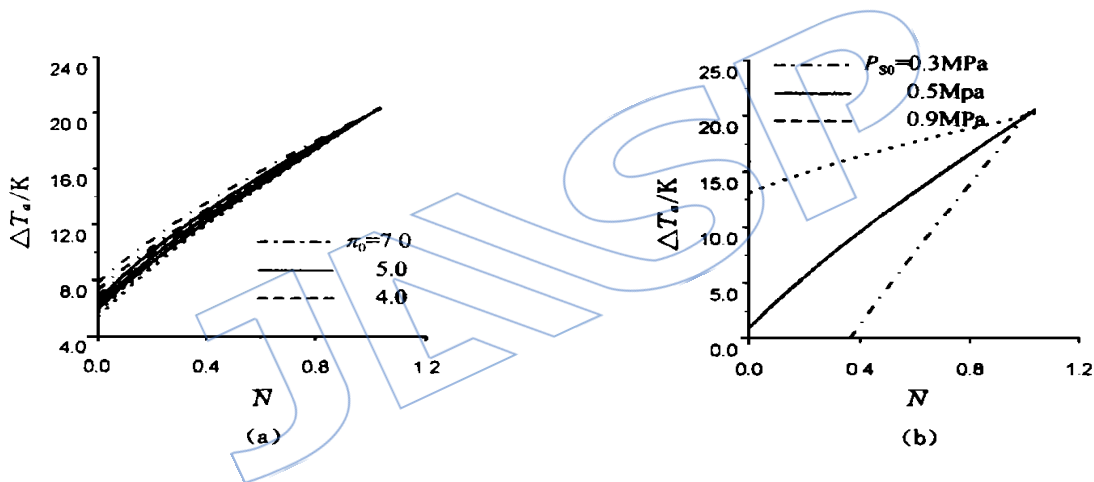


图 8 燃气轮机设计温压比和设计蒸汽参数对逼近温差影响

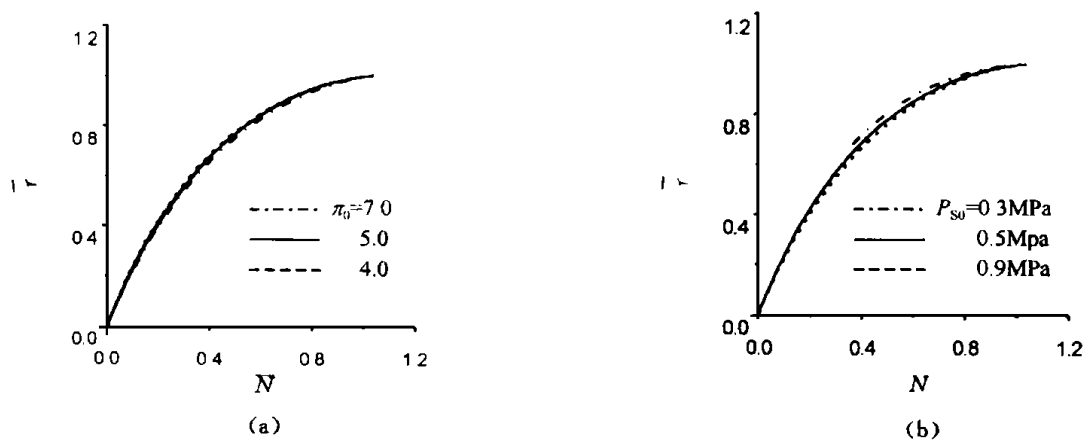


图 9 燃气轮机设计参数和设计蒸汽参数对功热比的影响

功热比是功热并供装置的重要参数。燃气轮机设计参数对相对功热比 $\bar{r} \sim \bar{N}$ 曲线的影响不大(图 9a)。设计饱和蒸汽压较高时变工况下的功热比略高一些(图 9b)。

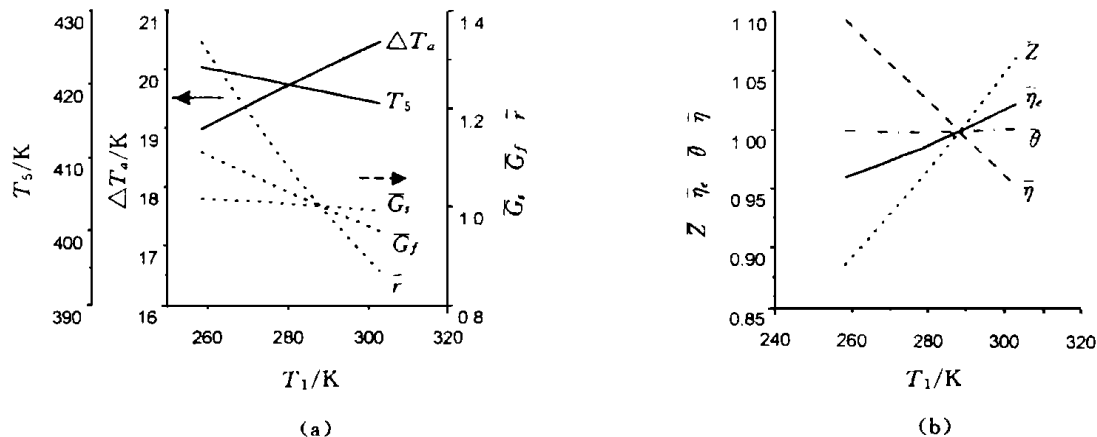


图 10 大气参数对功热并供装置性能影响

图 10(a) 与 (b) 是反映大气温度变化(假定透平前温与转速不变)对功热并供装置性能的影响。发现不同的效率指标随大气温度变化的方向是不同的, 可参见文献[2]中的解释。图 10(a) 中还指出了当大气温度下降时, 逼近温差也是下降的。

4 结 论

本文采用动力机械变工况特性解析分析方法, 较全面地分析总结了小功率单轴燃气轮机装置在恒速运行时的变工况典型特性, 并得出了一些重要结论。

例如当对所有变工况参数都用与其设计值的比值来表达时, 发现燃气轮机的效率(或油耗)可以总结成为单一的曲线, 与设计参数关系很小, 并且拟合了统计表达式。

计算并总结了单轴燃气轮机功热并供装置用饱和蒸汽供热时的典型情况。对其他变工况性能如大气温度的影响等也做了相应研究。

参 考 文 献

- 1 张娜, 蔡睿贤. 单轴恒速燃气轮机及其功热并供装置的变工况显式解析解. 工程热物理学报, 1998, 19(2):
- 2 蔡睿贤, 张娜. 单轴恒速燃气轮机及其功热并供装置的典型变工况特性. 工程热物理学报, 1998, 19(2):
- 3 张娜, 蔡睿贤. 单轴恒速回热燃气轮机的变工况解析特性及初步经济分析. 工程热物理学报, 1999, 20(3):
- 4 蔡睿贤, 胡自勤. 余热锅炉变工况计算. 工程热物理学报, 1990, 11(1):
- 5 蔡睿贤. 功热并供评价准则及燃气轮机功热并供基本分析. 工程热物理学报, 1987, 8(3):

(责任编辑 王震华)

FATIGUE LIFE PREDICTION OF TENONS IN AEROENGINE COLD- SECTION DISCS BASED ON SMALL CRACK GROWTH

Liu Shaolun, Wu Xueren, Huang Hongfa, Liu Jianzhong, Ding Chuanfu, Han Xipeng
(*Lab of mechanical properties, Beijing Institute of Aeronautics Materials, Beijing 100095*)

Yang Shijie and Wei Duokui

(*Research Institute of Aeroengine, Shengyang 110015*)

ABSTRACT

Tests for small and large crack growth were conducted on sub-structure model of tenon in the aeroengine cold section disc which was made of Titanium alloy TC11. Stress intensity factor solution of the substructure was obtained by FEM and its weight functions were analyzed. Plasticity introduced Newman Crack Closure model was used to predict the total fatigue life of the substructure, in which small crack was initiated from swallow-tailed groove bottom. Prediction results are in good agreement with tested results.

Key Words Aeroengine Cracks Fatigue life Prediction

ANALYTICAL PART- LOAD PERFORMANCE OF SINGLE SHAFT SMALL GAS TURBINE AND ITS COGENERATION

Zhang Na and Cai Ruixian

(*Institute of Engineering Thermophysics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

ABSTRACT

The typical analytical part-load performances of constant speed single shaft small gas turbine with centrifugal compressor and its cogeneration are given. The influence of gas turbine design parameters and steam side design parameters are thoroughly investigated. The typical efficiency curve and statistical formula obtained for this type gas turbine are consistent with the practical data. The part-load performance of cogeneration is studied with saturated steam supply. It is pointed out that the approaching temperature difference may be negative in low load condition with high steam parameter and low ambient temperature. Some other part-load performances and quantitative rules are summarized as well.

Key Words Gasturbines Performance Analytic solutions

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON COMPRESSOR ROTOR- STATOR INTERACTION

Hu Jun and Tang Guocai

(*2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016*)

ABSTRACT

An experimental investigation on the effect of the rotor wake on unsteady loading of downstream stator has been carried out in a low speed single stage axial compressor. The unsteady pressure distribution along the stator blade was measured, and the effects of axial gap between rotor and stator, operating rotation speed and mass flow of the