

# 某燃气涡轮多级空气透平试验研究

刘网扣,范雪飞,蒋俊,王秀瑾

(上海发电设备成套设计研究院有限责任公司,上海 200240)

**摘要:**为验证燃气涡轮的总体性能,将某重型燃气轮机涡轮末两级按0.5模化比模化后进行空气透平试验,建立了多级空气透平的试验系统,分析两级试验透平轮周效率、流量系数等特性参数随速比的变化。试验结果表明:空气透平设计工况效率达到了0.895,流量系数0.78,接近原燃气涡轮的设计值。试验结果验证了涡轮的总体性能,对燃气轮机涡轮的开发设计具有重要指导意义。

**关键词:**燃气轮机;模化;空气透平;轮周效率;流量系数

中图分类号:TK14 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.07.005

[引用本文格式]刘网扣,范雪飞,蒋俊,等.某燃气涡轮多级空气透平试验研究[J].热能动力工程,2021,36(7):27-31. LIU Wang-kou, FAN Xue-fei, JIANG Jun, et al. Experimental research on a gas turbine multi-stage air turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7): 27-31.

## Experimental Research on a Gas Turbine Multi-stage Air Turbine

LIU Wang-kou, FAN Xue-fei, JIANG Jun, WANG Xiu-jin

(Shanghai Power Equipment Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240)

**Abstract:** To verify the overall performance of a gas turbine, the 0.5 modeling ratio air turbine test of the last two stages of a heavy-duty gas turbine was carried out after modeling. A multi-stage air turbine test system was established to analyze the variation of characteristic parameters such as turbine wheel circumference efficiency and flow coefficient parameters with speed ratio. The test results show that the efficiency of air turbine design condition reaches 0.895 and the flow coefficient reaches 0.78, which is close to the design value of the original gas turbine. The test results verify the overall performance of the turbine, which have important guiding significance for the development and design of gas turbine.

**Key words:** gas turbine, modeling, air turbine, wheel circumference efficiency, flow coefficient

## 引言

透平机械领域往往采用空气透平试验开展蒸汽轮机和燃气轮机的研发。空气透平试验更接近叶栅实际工作条件,可以获得透平机械叶栅通道内气体流动更为真实的物理现象,为设计开发提供可靠的试验数据<sup>[1]</sup>。通过空气透平级试验,可得出透平轮周效率及流量系数随速比变化特性曲线,叶片根、顶部反动度变化规律,气动特性参数变化规律等重要试验数据。空气透平级试验从单级、一级半到多级,

是目前研究叶栅三维流场的有效手段<sup>[2-4]</sup>,试验结果可以对数值计算进行验证,从而建立数值计算与试验相结合的涡轮开发设计体系。

为更深入研究透平复杂流动机理,上海成套院搭建了先进的智能化高参数多级空气透平试验台,试验系统的风源参数达到国际先进水平,数据采集系统自动化程度高。为验证某燃气涡轮的总体性能,将某重型燃气轮机涡轮末两级按0.5模化比模化后进行了空气透平试验,得到了透平轮周效率及流量系数随速比变化特性曲线。

## 1 试验系统及方法

### 1.1 试验台

多级透平试验台系统示意图如图1所示。试验台由鼓风机、管路及阀门系统、空气透平本体、水力测功器、采集控制系统、高低压配电系统、水系统和油气系统等组成。

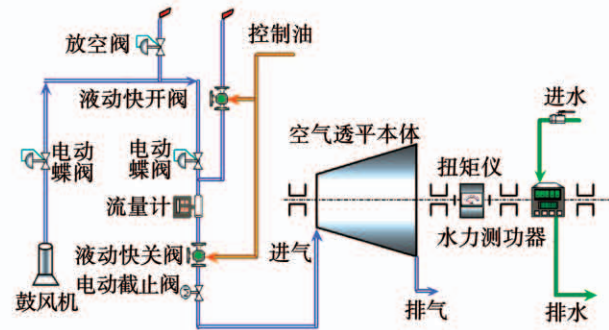


图1 试验台系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test bench system

试验台本体部分由空气透平、本体测控仪表、扭矩仪、水力测功器和拖动电机等组成,透平缸内径1 600 mm,缸内轴向跨距1 300 mm,叶片最大高度500 mm。试验台主要测量参数如表1所示。

表1 试验台主要测量参数

Tab. 1 Main technical parameters of the test bench

参数	数值
最高进气压力/MPa	0.4
最高进气温度/°C	165
最大功率/kW	3 000
最高转速/ $r \cdot \min^{-1}$	6 000
最大流量/ $m^3 \cdot \min^{-1}$	1 800
流量测量精度	0.5级
功率测量精度/%	0.03
压力测量精度/%	0.05
温度测量精度/%	0.25
转速控制精度/ $r \cdot \min^{-1}$	$\pm 5$

采用高精度双文丘里流量计测量流量,并经专业认证机构进行流量标定,达到0.5级精度。采用PSI公司9116系列电子压力扫描阀测量压力,精度0.05%。采用铠装双支热电阻测量温度,精度0.25%。

多级透平排气轴端依次布置扭矩仪、水力测功器和变频电机,扭矩仪和水力测功机均可以测量透平的输出功率。扭矩仪采用HBM公司法兰式扭矩仪,精度更高,本次试验中主要采用扭矩仪对输出功率进行测量。水力测功机主要用作负载,将透平发出的功消耗掉,同时起到调节、控制试验转速的目的。末端的变频电机主要用于试验透平空转功率的测量,停机阶段可用于慢速盘车。

### 1.2 试验件

该燃气涡轮为4级反动式拉杆转子结构透平,设计总压比12。本试验件为该涡轮第1级、第4级组成的级组按0.5模化比模化后组成的多级试验透平,实验工质为空气。图2为该试验透平的通流部分,试验件主要由第3级静叶1、第3级动叶2、第4级静叶3、第4级动叶4、持环5、进气部分6、排气部分7、拉杆转子8和透平缸等组成。除汽封结构和间隙、叶片尾缘结构等未完全模化外,试验透平通流部分完全按原涡轮末两级的0.5模化比进行模化设计。

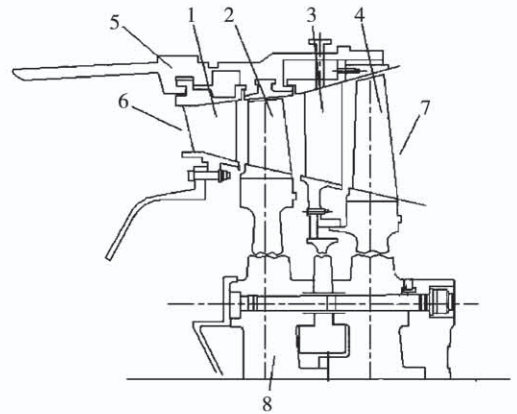


图2 试验透平通流剖面图

Fig. 2 Test turbine flow profile

### 1.3 试验方法

试验级组设计压比为3.5,采用固定压比变转速方式调节级组速比,通过改变水力测功器的进水量调节转速,级组速比变化范围为0.5~0.85。除设计压比工况,进行压比3和2.5两档变工况试验。每档压比变转速(变速比)的试验工况点保证在30个点以上,每一试验工况点的数据采集步骤为:测量透平级前的进气管道中空气流量,需测量的参数包括文丘里流量计前静温、文丘里流量计前的静压及

文丘里管的压差;测量空气进入透平级前的滞止温度;试验透平级组前总压、级组后静压;测量转子的转速;测量扭矩仪的扭矩(功率)。

对设计压比工况的试验参数进行计算,计算结果如表 2 所示。压比 3.5 时进口总压 361 kPa,级马赫数 1.125,速比范围 0.5 ~ 0.85 对应的转速为 3 386 ~ 4 556 r/min。

表 2 设计压力工况下试验参数

Tab. 2 Test parameters under design pressure conditions

参 数	数 值
进口总压 $p_0^*$ /kPa	361
出口静压 $p_2$ /kPa	103
压比 $p_0^*/p_2$	3.5
进口总温/°C	195
级马赫数 $M$	1.125
总焓降 $H_0$ /kJ · kg <sup>-1</sup>	48.518
雷诺数 $Re$	$3.07 \times 10^5 \sim 5.04 \times 10^5$
级理想速度 $C_0$ /m · s <sup>-1</sup>	382.5
级组速比 $u/C_0$	0.5 ~ 0.85
圆周速度 $u$ /m · s <sup>-1</sup>	191 ~ 325
转速/r · min <sup>-1</sup>	3 386 ~ 4 556

## 2 数据整理及误差分析

### 2.1 数据整理

在设计压比 3.5 及其他两个压比工况下进行变转速的级组特性试验。对每个试验点工况进行测量和数据采集。

轮周效率与速比按二次多项式的关系整理成关系曲线  $\eta_u' = f(u/C_0)$ ;级流量系数与速比按线性关系整理成曲线  $\mu = f(u/C_0)$ 。

轮周效率  $\eta_u'$ 、轮周功率  $N_u'$ 、级组等熵焓降  $H_0$ 、流量系数  $\mu$  为:

$$\eta_u' = \frac{N_u'}{GH_0} \quad (1)$$

$$N_u' = N_w + N_x \quad (2)$$

$$H_0 = R \frac{k}{k-1} T_0^* \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (3)$$

$$\mu = \frac{G}{0.04042 F_1 p_0^*} \frac{1}{\sqrt{T_0^*}} q \quad (4)$$

式中: $u/c_0$ —级组速比; $u$ —动叶中径处的圆周速度平均值,m/s; $c_0$ —一级的平均理想速度,m/s; $G$ —级流量,kg/s; $N_w$ —扭力测功器测得的功率,kW; $N_x$ —空转功率,kW; $R$ —空气气体常数; $k$ —绝热指数; $T_0^*$ —一级组前滞止温度,K; $p_0^*$ —一级组前总压,Pa; $p_2$ —一级组后平均静压,Pa; $F_1$ —进口环道面积,m<sup>2</sup>; $q$ —平均压比气动函数。

### 2.2 空转功率

进行透平级试验时,扭矩仪测量得到的功率是试验透平对外输出的功率,其仅是透平级组发出功的一部分。透平级组性能试验的目的要精确得到轮周功率和轮周效率,这就要求在透平轴输出功率的基础上加上空转功率。

空转功率通过专门的空转功率试验获得。试验过程中完全关闭空气透平进气阀门,由变频电机拖动空气透平空转,逐渐升速至最高转速,升速过程采用电功率表测量电机功率,最终的空气透平空转功率试验曲线<sup>[5]</sup>如图 3 所示。随着转速升高,功率呈下凸的曲线,转速越高,空转功率越大。

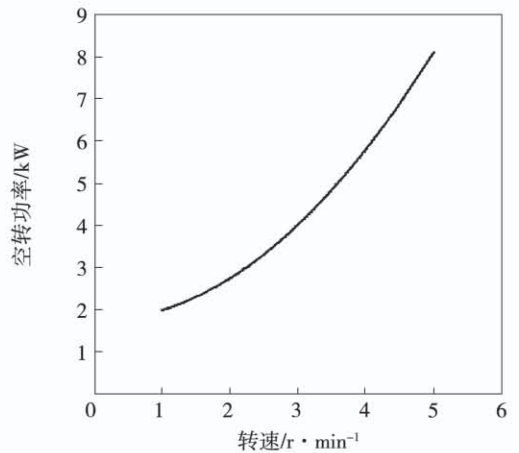


图 3 试验透平空转功率曲线

Fig. 3 Test turbine idle capacity curve

### 2.3 误差分析

试验测量的参数包括流量、压力、温度、转速和功率等,采用 0.5% 级文丘里流量计测量流量;采用扫描阀测量压力,精度 0.05%;采用 A 级 Pt100 热电偶测量温度,精度 0.25%;采用高精度电涡流传感器测量转速,精度 0.02%;采用扭矩仪测量功率,精度 0.03%。以上仪表测量精度均指满量程的对

应精度,随着实际测量值的变化,测量值越小精度越差,一般呈线性关系。比如扭矩仪满量程为4 000 kW,实际测量值为2 000 kW时对应的测量精度会下降至0.06%。测量仪表厂家一般会给出随着量程变化的仪表精度修正曲线,根据厂家给出的精度修正曲线进行误差分析<sup>[6]</sup>。

以轮周效率  $\eta'_u$  的计算公式(5)为例,根据误差分析理论,得到的误差分析计算式,  $\delta_x$  表示物理量  $X$  的绝对随机误差,  $\varepsilon_x$  表示某物理量  $X$  的相对随机误差。流量、功率和流量系数等参数的误差公式与轮周效率的计算公式类似,功率误差受空转功率测量影响,实际功率测量误差约为0.2%。

$$\varepsilon\eta'_u = \frac{\delta\eta'_u}{\eta'_u} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta N'_u}{N'_u}\right)^2 + \left(\frac{\delta G}{G}\right)^2 + \left(\frac{\delta H_0}{H_0}\right)^2} \quad (5)$$

$$\delta N'_u = \pm \sqrt{\delta N_w'^2 + \delta N_x'^2}$$

$$\varepsilon N_x = \frac{\delta N_x}{N_x}$$

$$\delta H_0 =$$

$$\pm \sqrt{\left\{C_p \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \delta T_0^* \right\}^2 + \left[C_p T_0^* \frac{k-1}{k} \left(\frac{P_2}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}}\right]^2 \cdot \frac{P_0^{*2} \delta_2^2 + P_2^2 \delta p_0^{*2}}{P_0^{*4}}}$$

$$\varepsilon G = \frac{\delta G}{G} =$$

$$\pm \sqrt{\left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta p}{p}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2} \quad (6)$$

以压比3.5工况为例进行详细的误差计算,此工况点的速比  $u/C_0 = 0.6295$ 。计算得出效率误差1.3%,流量系数误差0.89%。

### 3 结果与分析

图4为三档压比效率与速比的关系曲线。每一档压比工况变速比试验点数均在30点以上,保证了试验曲线的拟合精度。

级组效率随速比变化的规律基本一致,随速比变化呈一上凸的曲线。设计工况压比3.5时效率最高,最高效率0.90位于速比0.68附近。随着压比降低(透平负荷下降),效率也随之下降,压比3.0时最佳效率0.89位于速比0.68附近,压比2.5时

效率曲线下降较多,最佳效率0.865位于速比0.65附近。

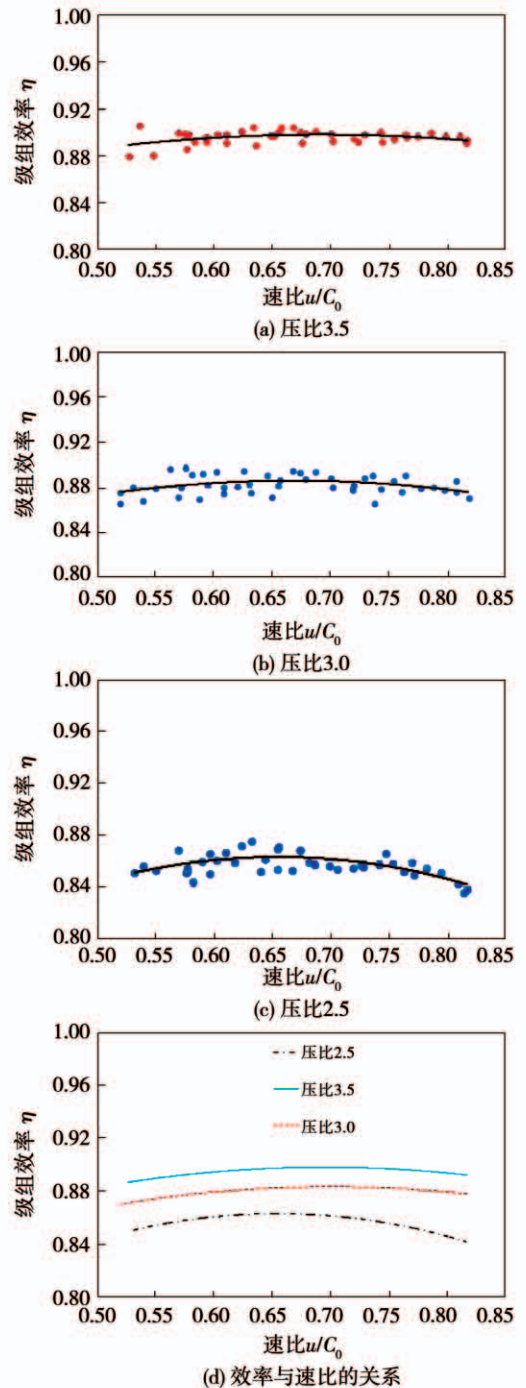


图4 三档压比下效率与速比关系

Fig. 4 Relation curve between efficiency and speed ratio at three pressure ratios

图4(d)为三档压比合在一起的曲线,压比3.0时比设计工况效率下降不到1%,压比2.5时效率下降约3.5%。该空气透平的变工况特性较好。

图5为三档压比条件下流量系数与速比关系曲线。由图5可知,流量系数随速比近似呈线性变化,速比增加时流量系数略增加。设计压比3.5时流量系数最大,约为0.78;压比3.0时流量系数约为0.76;而压比2.5时流量系数最小,约为0.74。

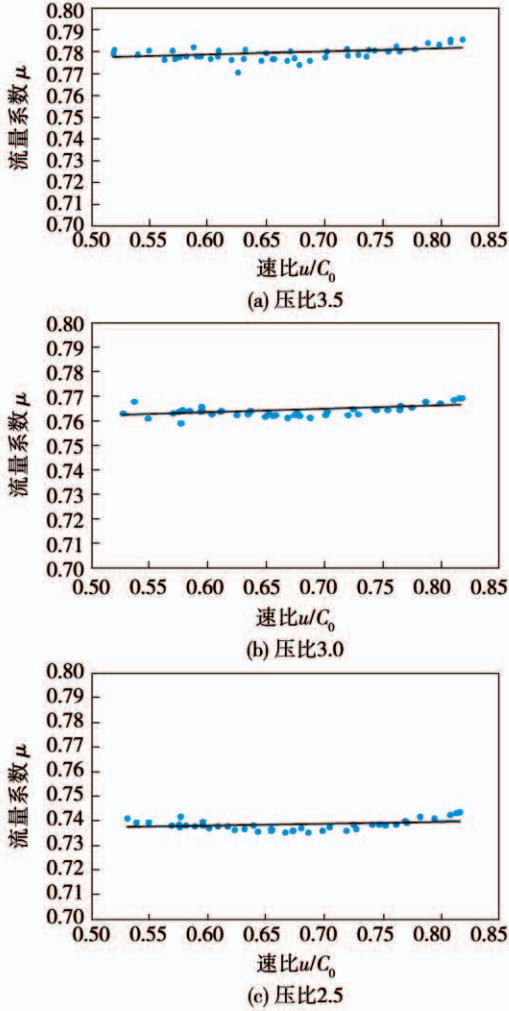


图5 三档压比下流量系数与速比关系曲线

Fig.5 Relation curve between flow coefficient and speed ratio at three pressure ratio

试验测量结果中,部分效率测点的分散度较大,达到2%以上,这主要与空转功率的测量误差较大有关。在此情况下增加了试验工况的测量点数,保证了曲线拟合的精度。压比0.65~0.7属于最佳速

比区间,叶栅的能量损失系数最小,这是造成部分试验工况点流量系数略有下降的主要原因。

## 4 结论

(1) 空气透平级效率及流量系数随速比变化的曲线规律与原机组设计基本一致,设计工况最佳效率约0.895,接近原四级燃气涡轮的最佳效率。

(2) 透平变工况时效率下降,流量系数降低,压比2.5时效率和流量系数分别比设计工况低3.5%和4%,总体的变工况性能较好。

(3) 本次试验对两级空气透平的总体特性进行了试验,试验的精度和可靠性高,试验结果验证了燃气涡轮的通流设计性能,对燃气涡轮的设计开发具有重要指导意义。

## 参考文献:

- [1] 孙奇,孔祥林,江生科,多级空气透平试验台的设计与开发[J]. 东方电气评论,2010(4):10.  
SUN Qi, KONG Xiang-lin, JIANG Sheng-ke. The design and development for multi-stage air test turbine[J]. Dongfang Turbine, 2010(4):10.
- [2] HALLER B R, BA M A. Improvements in the aerodynamics of large steam turbines[J]. Mech. E. Pap. C, 1990, 386.
- [3] SEGAWA, Kiyoshi, et al. An improvement of performance in steam turbine by developing three-dimensionally designed blades[J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 1998, 41(4):1035-1041.
- [4] SHIKANO Y. An investigation of leaned nozzle effects on low pressure steam turbine efficiencies[J]. ASME PWR, 1990, 10:151.
- [5] 空气试验透平的空转功率[R]. SPERI/JSBG-02.GC-1980. 上海:上海发电设备成套设计研究所,1980.  
Idle capacity of air test turbine[R]. SPERI/JSBG-02.GC-1980. Shanghai:Shanghai Power Equipment Research Institute,1980.
- [6] 冯师颜. 误差理论与实验数据处理[M]. 北京:科学出版社,1964.  
FENG Shi-yan. Error theory and experimental data processing[M]. Beijing:Science Press,1964.

(王治红 编辑)