

# 两级模化轴流压气机数值与试验研究

邓庆锋<sup>1,2</sup>, 孙勇<sup>1,2</sup>, 吴迪<sup>1,2</sup>, 高思华<sup>1,2</sup>

(1. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;

2. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘要:**以缩尺模化后的某大功率压气机前两级轴流压气机为对象,采用试验及数值的方法对进口可转导叶无角度变化和变角度下的压气机特性进行了对比研究,通过激光多普勒测速(Laser Doppler Velocimetry, LDV)系统对两级压气机第1级动叶进、出口的绝对气流角和绝对气流速度进行测量并与数值结果进行了对比分析。结果表明:试验与数值结果吻合较好,验证了数值方法的准确性;数值计算获得的压气机效率略高于试验结果;两级压气机缩尺模化前、后的压气机特性具有很高的相似性,流场具有基本相同的分布规律;缩尺模化后的两级压气机效率下降了1.23%。

**关键词:**轴流压气机;试验研究;数值模拟;模化缩放;激光多普勒测速

中图分类号:TK474.8

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.09.004

[引用本文格式] 邓庆锋, 孙勇, 吴迪, 等. 两级模化轴流压气机数值与试验研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(9): 31-37.

DENG Qingfeng, SUN Yong, WU Di, et al. Numerical and experiment investigation of a two-stage modular axial flow compressor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 31-37.

## Numerical and Experiment Investigation of a Two-stage Modular Axial Flow Compressor

DENG Qingfeng<sup>1,2</sup>, SUN Yong<sup>1,2</sup>, WU Di<sup>1,2</sup>, GAO Sihua<sup>1,2</sup>

(1. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078; 2. National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Harbin, China, Post Code: 150078)

**Abstract:** A comparative study was conducted on the characteristics of a two-stage axial flow compressor, using experimental and numerical methods under fixed and variable inlet guide vane conditions. The two-stage compressor was scaled and modeled from a high-power axial compressor. The absolute flow angle and velocity distributions in the spanwise direction at the inlet and the outlet of first rotor blade of the two-stage compressor were measured using a laser Doppler velocimetry (LDV) system. The calculated results are in good agreement with the measured results, verifying the correctness of numerical method. The calculated compressor efficiency is slightly higher than the experimental results. The characteristics of the two-stage compressors have a great similarity, and the flow fields of the two-stage compressor have the same distribution pattern before and after scaling and modeling. After scaling and modeling, the efficiency of the two-stage compressor decreases by 1.23%.

**Key words:** axial compressor, experimental investigation, numerical simulation, scaling and modeling, Laser Doppler Velocimetry (LDV)

引 言

在多级轴流压气机设计过程中,通常先进行压气机一维和二维气动设计,得到压气机气动设计方案;然后进行叶片造型和三维数值模拟,并根据计算结果对设计方案进行优化调整;最后对得到的优化结果进行试验测试。若压气机性能不能满足设计要求,则需根据试验测量结果对压气机方案进行改进。全尺寸多级轴流压气机由于尺寸大、加工成本高、试验耗功大,导致其研制周期长、研发难度大,因此缩放模化技术在多级轴流压气机研发与测试过程中被广泛应用。

目前,国内外学者在压气机缩尺模化设计方面进行了大量研究。Kumar 等人<sup>[1]</sup>基于相似理论发展了一种应用在小型喷气或者涡扇发动机上的混流压气机特性外推方法,成功将 1 台最大压比为 4.55 的高速混流压气机缩放至最大压比为 1.03 的低速压气机,并通过了试验验证。Yang<sup>[2]</sup>基于相似模化理论,从一系列压气机中构建了一种无量纲化模型,该模型可以预测不同尺寸压气机特性,可用于指导涡轮增压器的配型设计,试验结果和预测结果吻合较好。陈伟等人<sup>[3]</sup>采用 NUMECA 软件对某重型燃气轮机 17 级轴流压气机原型及模化放大和模化缩小的几何模型进行了数值计算和对比研究,结果表明,在 80% 及 100% 等高转速条件下压气机效率随着模化比例增大而增大,而在 50% 转速下模化缩放对压气机效率的影响较小。朱铭敏等人<sup>[4]</sup>为校验数值模拟方法,利用自有的低速大尺寸压气机试验台,对由某高负荷压气机后面级经过低速模化设计而来的 4 级压气机进行了试验研究,以验证低速模拟试验技术,结果表明,与试验结果相比,数值模拟的最大流量点流量较低,近失速流量较大;总压比及效率曲线的趋势相近,效率计算结果略高于试验结果。赵午安等人<sup>[5]</sup>在保证相对叶尖间隙相同的条件下,通过数值模拟对 Stage35 和某 3.5 级轴流压气机进行了缩尺模化,研究了不同缩尺比例的雷诺数效应,结果表明,随着缩尺比例减小,压气机特性线向左下方移动,在小缩尺比例下性能恶化程度增加。随着测量手段的不断发展,近年来,压气机试验研究的手

段也有了长足的进步。尉星航等人<sup>[6]</sup>对国内外激光多普勒测速(Laser Doppler Velocimetry, LDV)和粒子图像测速(Particle Image Velocimeter, PIV)两种非接触式测量技术在压气机内部流场测量的应用进展进行了介绍。

本文针对模化缩放的两级跨音速轴流压气机,开展了压气机总体性能和级间性能参数的详细测量,并与数值结果进行了对比分析。为探索模化后两级压气机和母型压气机的性能及流场差异,对两级压气机和母型压气机的总体性能和流场特性进行了数值研究,期望为多级轴流压气机的模化设计及试验提供更多的参考。

1 试验设备和方案

1.1 试验设备

两级跨音速轴流压气机试验台的布置方案如图 1 所示<sup>[7-8]</sup>。该试验台由流量计、稳压箱、试验压气机、齿轮箱、变频电机、扭矩仪、节流阀、退喘阀和排气管道等组成。空气经流量计、稳压箱进入压气机压缩之后,由排气管道排出。变频电机为三相异步电机,供电电压 10 kV,最大输出功率为 1 250 kW,最大输出转速为 3 000 r/min,齿轮箱增速比为 1:6。扭矩仪安装在齿轮箱与试验压气机之间,用于测量压气机转速和计算压气机扭矩效率。流量计为双扭线流量计,直径 0.6 m,测量范围为 0.7 ~ 24.5 kg/s。试验过程中,在转速不变的情况下,调节安装在排气管道上的双向螺杆式节流阀来实现节流和调节压气机出口背压。在排气管道旁路上设置了一个通过电磁开关控制的退喘阀,用于在试验过程中退喘。

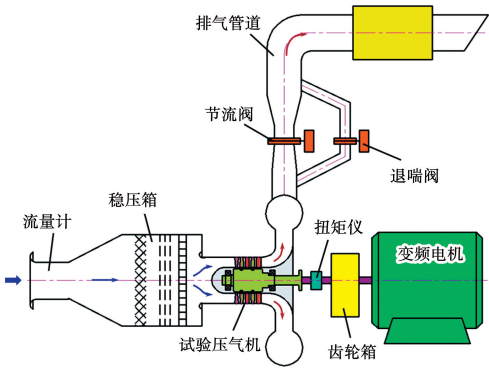


图 1 试验台布置方案

Fig. 1 Layout plan of test rig

图2为两级跨音速模化试验压气机剖视图,该压气机取自某大功率低压压气机前两级,由1列进口可转导叶,两级动、静叶和加装的1列出口气流调直导叶、径向扩压器、排气蜗壳等组成,其模化比为0.45。机匣上安装进口可转导叶联动环,通过手动调节联动环使其转动,从而达到调整可转导叶角度的目的。如无特别说明,文中两级压气机是指缩尺模化后并加装出口气流调直导叶的试验压气机。

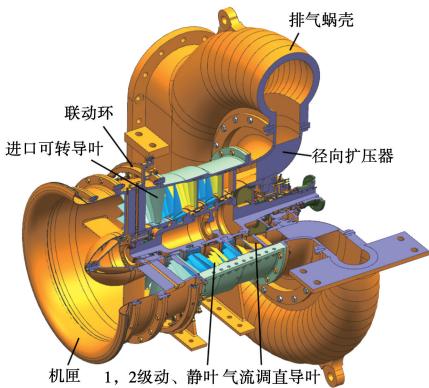


图2 两级压气机剖视图

Fig.2 Sectional view of two-stage compressor

表1为两级压气机主要设计参数。在101 325 Pa、288.15 K条件下,压气机进口雷诺数为 $9.7 \times 10^5$ ,处于自模化区。表2为两级压气机主要几何参数。

表1 两级压气机主要设计参数

| 参 数                                   | 数 值               |
|---------------------------------------|-------------------|
| 总压比 $\pi^*$                           | 1.621             |
| 折合流量 $G/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  | 17.3              |
| 折合转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ | 16 194            |
| 效率 $\eta/\%$                          | 89.58             |
| 进口雷诺数                                 | $9.7 \times 10^5$ |

表2 两级压气机主要几何参数

| 参 数                  | 进口导叶  | 1级动叶  | 1级静叶  | 2级静叶 | 2级静叶  | 出口导叶  |
|----------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 进口外径 $D_1/\text{mm}$ | 218.2 | 206.4 | 197.7 | 191  | 187.4 | 186.8 |
| 进口轮毂比 $\bar{d}$      | 0.35  | 0.37  | 0.43  | 0.49 | 0.54  | 0.57  |
| 叶片弦长 $b_m/\text{mm}$ | 40.5  | 56.3  | 28.2  | 40.6 | 39.3  | 50.0  |
| 展弦比                  | 3.36  | 2.30  | 3.95  | 2.34 | 2.22  | 1.46  |
| 叶片稠度                 | 1.04  | 1.10  | 0.89  | 0.94 | 0.84  | 1.03  |
| 叶片数 $N$              | 26    | 19    | 30    | 22   | 20    | 20    |

1.2 试验测量方案

LDV 测量系统采用丹麦丹迪公司粒子动态分析仪,型号为 FiberFlow,测量范围为  $0 \sim 1\,000\text{ m/s}$ 。图3为 LDV 系统测量区域和流场测点位置示意图。两级压气机沿流道方向在机匣壁面布置了2个 LDV 光学测量窗口,分布在第1级动叶进、出口截面位置,基本实现了第1级动叶前、后大部分流道的光学覆盖。试验过程中,通过三维坐标架移动 LDV 系统,以实现对不同光学窗口的测量。根据 LDV 的测量要求,还需向压气机内不断加入示踪粒子。利用烟雾发生器,以1:20的甘油/水混合液,喷出直径为  $1 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 、浓度范围为  $10^5 \sim 10^7\text{ 个}/\text{cm}^3$  的雾化粒子。在压气机进口截面布置有高频压力脉动传感器、总温探针和总压探针,在压气机出口截面布置有总压探针,分别用以判断压气机是否进入喘振、测量压气机进口总温和计算压气机总压比。

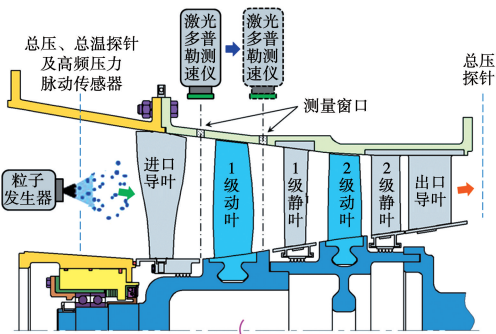


图3 LDV 系统测量区域和流场测点位置示意图

Fig.3 Location diagram of the LDV system measurement region and flow field measurement positons

2 数值计算方法

2.1 计算网格

为了与试验结果进行对比分析,对两级压气机开展了数值模拟研究。图4为两级压气机叶栅通道计算域。网格模型选用m为单位,对应的壁面网格尺度取 $3 \times 10^{-5}\text{ m}$ 。为了更真实地模拟压气机流场,在第1级静叶端部增设了气封槽道结构,用于模拟静叶端壁篦齿密封的影响,在第2级动叶根部增设了引气口,用于模拟平衡压气机轴向力的引气。对各列叶栅通道、引气口和静叶端壁气封槽道两侧等划分完全匹配周期性网格,最终生成的压气机计算域网格节点总数为72.8万,最小正交性为 $12.6^\circ$ ,

网格最大长宽比为 4.6, 网格最大延展比为 544.5, 最大展向网格偏转角为 143.2°。

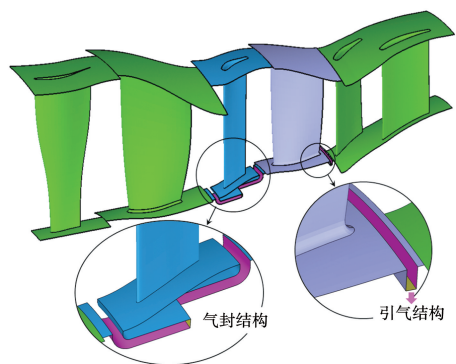


图 4 两级压气机叶栅流道计算域

Fig. 4 Computational domain of two-stage compressor cascade channel

根据实际情况,在动叶根部、部分静叶端部建立了倒角网格,在动叶顶部建立了间隙网格。图 5 为端壁倒角和间隙网格局部视图。倒角半径和叶顶间隙按理论加工尺寸分别取 2 和 0.5 mm。

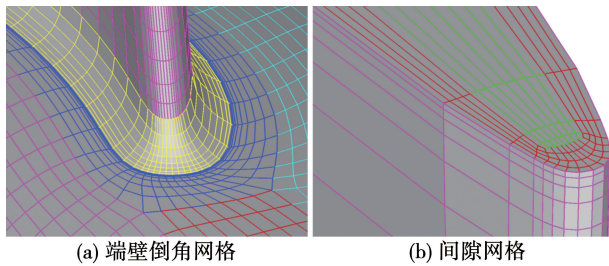


图 5 端壁倒角和间隙网格局部视图

Fig. 5 Local views of endwall fillet and tip clearance mesh

2.2 数值方法和边界条件

湍流计算采用  $k-\varepsilon$  两方程模型和 Scalable 可缩放壁面函数,从而适应不同  $y^+$  变化。对流项离散采用二阶高紧致格式,湍流数值项离散采用一阶精度。计算工质基于理想气体,定压比热采用零压力多项式。湍流分数强度为 0.02,湍流长度为 3 mm。各列叶栅转静交接面采用 Stage 模式。静叶端壁气封槽道交接面采用冻结转子法,计算物理时间步长选择  $1 \times 10^{-4}$  s。

进口边界条件按标准大气条件给定,出口给定静压。转子转速按两级压气机折合转速。静叶端壁气封槽道交接面通过的流量按压气机进口流量的

0.3% 设定,后轴承腔室平衡引气流量按压气机进口流量的 0.6% 设定。从较低的出口背压开始计算,通过不断增加背压,逐渐向近喘点推进,以出现数值发散作为压气机喘振的标准,得到压气机喘振边界。

本文所用的网格和数值方法已经过文献[9]验证,能够较准确地预测压气机特性。

3 结果与分析

3.1 压气机特性试验和数值结果对比研究

图 6 为进口可转导叶角度为  $0^\circ$  条件下,两级压气机的试验特性和数值特性对比。

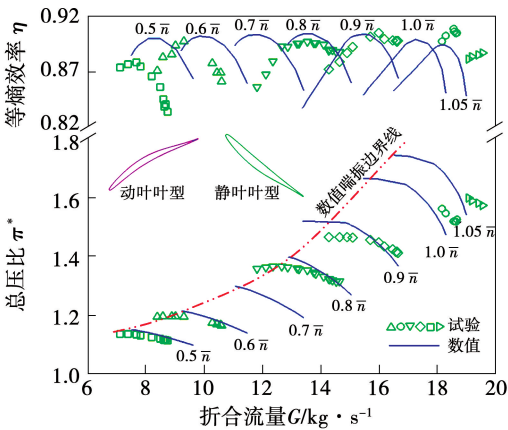


图 6 试验和数值预测压气机特性对比

Fig. 6 Comparison of experimental and predicted compressor performance results

对于  $1.0\bar{n}$  和  $1.05\bar{n}$  相对转速,由于转速较高,压气机振动较大,滑油温度上升过快,导致热力性能数据不稳定,因此高转速工况下未进行憋喘试验。分析原因可能是扭矩仪只有一侧安装了膜片联轴器,致使在高速运转情况下齿轮箱、扭矩仪及两级压气机同心度不满足使用要求。下一步准备在扭矩仪另一侧增加一组膜片联轴器。由于采用人工判喘,试验过程中将引入人为误差,使得数据不确定性较大,因此图 6 中未给出试验获得的压气机喘振边界。从总体上看,试验获得的压气机特性线与数值预测的压气机特性线在低转速区域吻合较好,在高转速区域有些许偏差。在高转速区域,临近喘振边界附近,试验测量得到的压比较数值计算整体偏小。对于  $1.0\bar{n}$  和  $1.05\bar{n}$  相对转速特性线,试验获得的流量比数值计算大,在其他转速工况趋势则相反,不

排除试验过程中出口调直导叶内环存在泄漏的情况。除  $1.0\bar{n}$  相对转速外,数值计算得到的压气机效率特性比试验获得的压气机等熵效率特性整体偏高。图中还给出了压气机气动设计所采用叶型。从图中可以看到,在  $0.6\bar{n} \sim 0.9\bar{n}$  转速范围内,试验获得的压气机最高等熵效率点几乎不变,这主要得益于压气机采用可控扩散叶型设计的结果。

图 7 为进口可转导叶变角度条件下,压气机的试验特性和数值特性对比。试验过程中,可转导叶角度随压气机转速非线性变化。由于压气机可转导叶角度试验的目的是对比可转导叶变角度下与  $0^\circ$  角度下的流量、效率、压比等参数,因此各转速线角度调节试验均未憋喘,仅录取到峰值效率点附近。从图中可以看到,由于可转导叶的作用,压气机各转速线近喘点对应流量有明显的减少,特别是  $0.75\bar{n} \sim 0.9\bar{n}$  转速线改善最为明显。受可转导叶作用,压气机喘振边界线“凹陷”程度得到改善,各转速线对应的压气机稳定工作裕度得到不同程度的提高。对比图 6 可以看到,可转导叶角度调节也会带来效率特性曲线的整体下降。

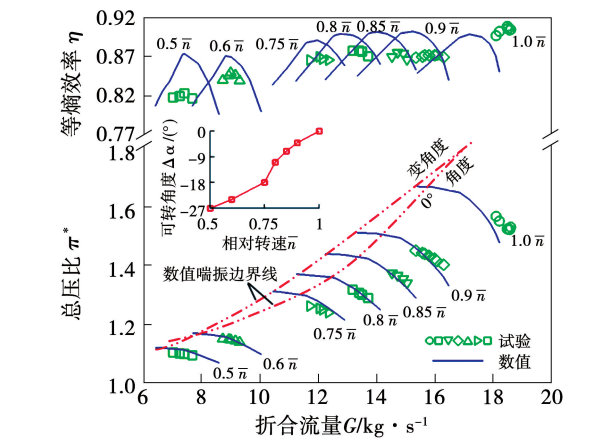


图 7 进口可转导叶对两级压气机性能的影响  
Fig. 7 Effect of variable inlet guide vane on two-stage compressor performance

3.2 LDV 测试结果分析

图 8 和图 9 为 LDV 系统在压气机折合转速  $8\ 164\ \text{r/min}$  (对应  $0.5\bar{n}$ )、可转导叶角度  $0^\circ$  情况下测量获得的第 1 级动叶进、出口绝对气流角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,以及进、出口绝对气流速度  $c_1$  和  $c_2$  沿叶高的分布。为了对比分析,图中还给出了数值结果。从图

8 中可以看出,第 1 级动叶进、出口绝对气流角试验测量结果与数值结果吻合较好,绝对气流角沿叶高的最大偏差不超过  $1^\circ 25'$ 。由图 9 中可见,数值结果同样能够较好地模拟第 1 级动叶进、出口的绝对气流速度沿叶高的分布趋势,但得到的结果略小于试验结果。从总体上看,可以认为数值计算与试验测量结果基本一致,说明本文数值计算具有较高的准确性。

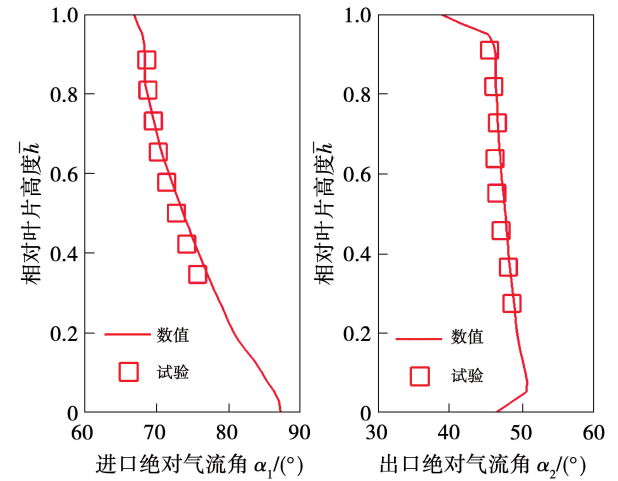


图 8 第 1 级动叶进、出口绝对气流角沿叶高分布  
Fig. 8 Spanwise distributions of absolute flow angles at inlet and outlet of first stage rotor blade

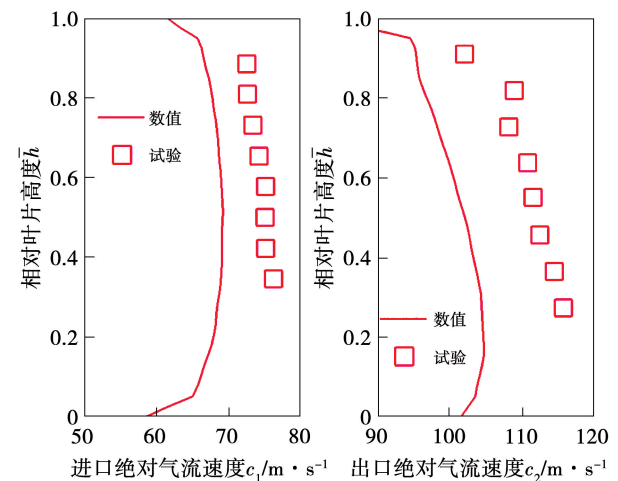


图 9 第 1 级动叶进、出口绝对气流速度沿叶高分布  
Fig. 9 Spanwise distributions of absolute flow velocity at inlet and outlet of first stage rotor blade

由于当前两级压气机的局限性,目前只能进行内部流场的单点测量。后续将考虑对两级压气机进

行改造,尝试安装面积较大的光学窗口,以便 LDV 或 PIV 测量压气机内部三维流场以及通道涡、间隙涡流向的传播过程。

3.3 缩尺模化前后压气机特性对比

采用数值方法,对缩尺前的母型压气机和缩尺后的两级压气机特性进行了对比分析。与两级压气机不同的是,母型压气机无出口调直导叶。为了保持一致,两级压气机的压比和效率特性计算取第 2 级静叶出口截面进行数据分析。母型压气机数值模拟采用与两级压气机相同的网格拓扑结构、网格数量和数值方法。母型压气机叶顶间隙取 0.5 mm 与两级压气机数值相同。

图 10 为数值计算得到的两级压气机和母型压气机归一化处理得到的压气机特性图,以缩尺前、后母型压气机和两级压气机设计点为参考。从图中可以看到,两级压气机与母型压气机数值预测特性在全转速范围内吻合较好,特性曲线形状基本重合。在高速靠近喘振边界区域,母型压气机预测的压比略高于两级压气机。在全转速范围内,两级压气机效率有所下降。在设计点,两级压气机效率较母型压气机下降了 1.23%,这主要受尺寸效应的影响,模化缩比后的压气机边界层相对厚度增大,粘性摩擦损失和二次流损失所占比重增大,气动效率有所下降。

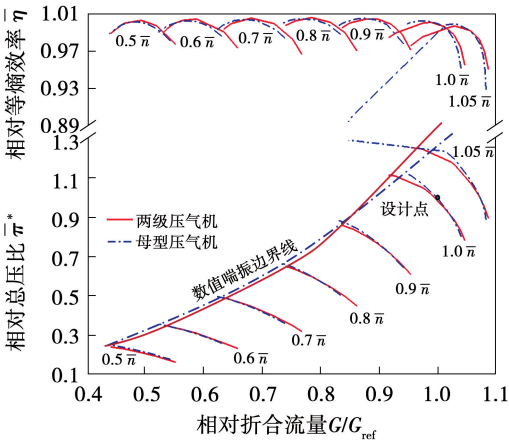


图 10 两级压气机和母型压气机特性对比

Fig. 10 Comparison of performance of two-stage compressor and prototype compressor

其中,相对总压比  $\bar{\pi}^*$ 、相对等熵效率  $\bar{\eta}$  计算公式为:

$$\bar{\pi}^* = (\pi^* - 1)/(\pi_{ref}^* - 1) \tag{1}$$

$$\bar{\eta} = \eta/\eta_{ref} \tag{2}$$

式中: $\bar{\pi}^*$ —相对总压比; $\pi^*$ —总压比; $\pi_{ref}^*$ —设计点总压比; $\bar{\eta}$ —相对等熵效率; $\eta$ —等熵效率; $\eta_{ref}$ —设计点等熵效率。

图 11 为数值计算得到的设计点两级压气机和母型压气机在 50% 叶高截面上的相对马赫数云图。这里选择压气机前 3 列叶栅进行对比分析,主要是因为第 2 级压气机容易受到出口边界条件的影响,前 3 列叶栅流场更符合模化压气机创造的相似模化的流场环境。从图中可以看到,两级压气机和母型压气机内部流动分布规律基本相同,客观验证了流场的相似性。理论上,两级压气机和母型压气机符合完全相似条件,其流场也应完全相同,但是在实际过程中,受尺寸效应的影响,两级压气机与母型压气机之间存在性能差异。表现出来的结果是,母型压气机高速区范围较缩尺模化后的压气机略大。

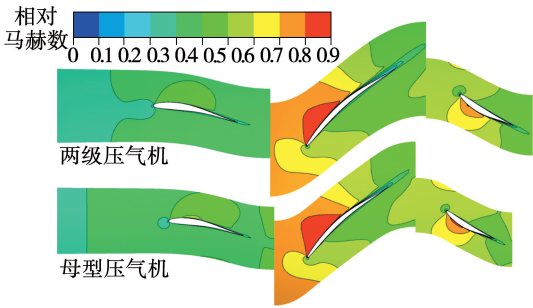


图 11 设计工况下前 3 列叶片中部截面马赫数云图

Fig. 11 Mach number contour of the first three blade rows in the midspan under design condition

4 结 论

本文对两级压气机进行了总体性能及气动参数分布的试验和数值研究,得到如下结论:

- (1) 数值方法能够较为准确地预测压气机特性及气动参数分布等结果,两级压气机的试验结果和数值结果吻合较好,校验了数值方法的准确性。
- (2) 压气机进口可转导叶可以起到拓宽压气机稳定工作裕度的作用,特别是 0.75  $\bar{n}$  ~ 0.9  $\bar{n}$  转速区间改善尤为明显,可以避免压气机发生失速和喘振。
- (3) 对缩尺前、后的母型压气机和两级压气机特性及内部流场进行了数值研究及对比分析,结

果表明,两级压气机和母型压气机在压气机特性和内部流场方面都具有高度的相似性,可指导工程设计。

参考文献:

[1] KUMAR H, MISTRY C S. Implementation of similarity principle and scaling laws for low-to-high speed mixed flow compressor [C]// New York:Proceedings of ASME Turbo Expo,2023.

[2] YANG B. Modeling compressor pressure ratio vs. mass flow rate including choke line and surge line using scaling theorem [C]// Chicago:SAE International,2022.

[3] 陈伟,崔树鑫,张毅,等.多级轴流压气机模化设计中尺寸缩放对气动性能影响的数值研究[J].热能动力工程,2022,37(12):11-19.

CHEN Wei,CUI Shuxin,ZHANG Yi,et al. Numerical study of the effects of size scaling on aerodynamic performance in multi-stage axial compressor modeling process[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(12):11-19.

[4] 朱铭敏,羌晓青,居振州,等.四级低速大尺寸压气机的试验与数值模拟研究[J].工程热物理学报,2021,42(5):1150-1160.

ZHU Mingmin,QIANG Xiaoping,JU Zhenzhou,et al. Experimental and numerical research in a four-stage low speed research compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42 ( 5 ): 1150 - 1160.

[5] 赵午安,陈江,任兰学,等.轴流压气机缩尺模化比例与性能关联研究[J].热能动力工程,2021,36(9):25-32.

ZHAO Wuan,CHEN Jiang,REN Lanxue,et al. Study on the correlation between scale modeling proportion and performance of axial

compressor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(9):25-32.

[6] 尉星航,马宏伟,廖鑫. LDV 和 PIV 测速技术测量离心压气机内部流动的应用进展[J]. 实验流体力学,2021,35(5):1-18.

YU Xinghang, MA Hongwei, LIAO Xin. Application progress of LDV and PIV in measuring flow in centrifugal compressor [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2021,35(5):1-18.

[7] 王繁成. 2.5 级压气机内部流场数值仿真及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.

WANG Fancheng. Numerical simulation and experimental research on internal flow field of 2.5 stage compressor[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2018.

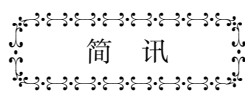
[8] 王萌,王明金,王忠义,等. 低工况下轴流压气机可转导叶调节规律研究[J]. 热能动力工程,2021,36(9):33-41.

WANG Meng,WANG Mingjin,WANG Zhongyi,et al. Research on the adjustment law of variable inlet guide vane of axial compressor at off-design condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(9):33-41.

[9] 邓庆锋,张舟,洪青松,等. 一种基于全三维数值计算的多级轴流压气机喘振边界预测方法[J]. 热能动力工程,2021,36(9):18-24.

DENG Qingfeng,ZHANG Zhou,HONG Qingsong,et al. A prediction method based on full three-dimensional numerical calculation for predicting the surge margin of the multistage axial compressor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(9):18-24.

(刘颖编辑)



美国计划将燃煤电厂改建成核电站

美国密歇根大学(University of Michigan)公布了一项研究结果,他们称这是“迄今为止最全面的煤炭与核能源转型分析”。这项研究是对美国煤炭与核能源转型的潜在地点的调查,它将促使美国对 245 个运营的燃煤发电厂改造成先进的核反应堆,这是电力公司和能源部(Department of Energy)正在规划的一项战略。

将燃煤发电厂转型为核电站可产生稳定的、基本负荷的电力,且碳排放较少。此外,新的核电站可利用现有的输电线路等基础设施,并为依赖燃煤发电厂的地区提供就业机会并带来经济增长。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)