

# 出口测量探针布局对轴流压气机气动性能试验的影响研究

陈伟<sup>1</sup>, 刘鸣飞<sup>2</sup>, 崔树鑫<sup>1</sup>, 牛家宏<sup>1</sup>

(1. 四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2. 中国航发 四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621703)

**摘要:**为了研究出口测量探针布局(探针数量及所处轴向位置)对压气机气动性能试验的影响,针对含测量探针的三级轴流压气机开展全周非定常数值计算。结果表明:出口测量探针将改变上游的流场结构,在末级叶片进出口截面对应探针的周向位置处形成局部高总压区和气流角偏移区,该区域覆盖有3~4个叶栅通道;随着探针与末级叶片轴向距离增加,高总压区的强度减弱,但作用范围增加;增加出口探针数量并未明显改善压气机试验性能评估精度,与无探针条件下的压气机性能相比,压比偏高0.6%,效率绝对值偏高1.8%;为减少试验中基于探针测点得到的压气机性能试验误差,不仅需考虑探针对测量截面流场的影响,更应根据测量截面流场不均匀性合理布局探针。

**关键词:**出口测量探针;流场干扰;压气机;气动性能;数值分析

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.01.024

[引用本文格式]陈伟, 刘鸣飞, 崔树鑫, 等. 出口测量探针布局对轴流压气机气动性能试验的影响研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1):216-224. CHEN Wei, LIU Ming-fei, CUI Shu-xin, et al. Investigation of the effect of outlet measurement probe position on axial compressor aerodynamic performance test [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1):216-224.

## Investigation of the Effect of Outlet Measurement Probe Position on Axial Compressor Aerodynamic Performance Test

CHEN Wei<sup>1</sup>, LIU Ming-fei<sup>2</sup>, CUI Shu-xin<sup>1</sup>, NIU Jia-hong<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu, China, Post Code: 610065;

2. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Mianyang, China, Post Code: 621703)

**Abstract:** In order to investigate the influence of the outlet measurement probe layout such as the number and the axial position on the compressor aerodynamic performance test, the unsteady numerical analysis of a full annulus three-stage axial compressor including the probes was carried out. The results show that the outlet measurement probe will change the upstream flow field structure and form the local high total pressure zone and flow angle deviation region at the inlet and outlet sections of the last stage vane in circumferential direction, which cover 3 to 4 cascade channels; with the increase of the axial distance between the probe and the last stage vane, the strength of the high total pressure zone decreases, but the influence range increases; increasing the number of outlet probe does not improve the accuracy of compressor test performance evaluation obviously, the pressure ratio is still 0.6% higher and the efficiency abso-

收稿日期:2023-07-06; 修订日期:2023-08-23

基金项目:国家自然科学基金(52076143);四川省科技计划省院省校合作项目(2023YFSY0022);四川省航空及燃气轮机重大科技专项(2021ZDZX0004)

**Fund-supported Project:**National Natural Science Foundation of China (52076143); Sichuan Province Science and Technology Plan (2023YFSY0022);Science and Technology Major Project of Sichuan Province (2021ZDZX0004)

作者简介:陈伟(1984-),男,四川大学副教授.

通讯作者:牛家宏(1988-),男,四川大学副教授.

lute value is 1.8% higher than the performance of a compressor without probes; in order to reduce the compressor performance test error based on the probe measurement points in the axial compressor test, not only the influence of the probe on the flow field on measurement plane should be considered, but also a reasonable layout of the probe should be carried out according to the non-uniformity of the flow field on the measurement plane.

**Key words:** outlet measurement probe, flow interaction, compressor, aerodynamic performance, numerical analysis

## 引言

在压气机气动性能试验中,采用浸入式压力、温度探针测量内部流场中的气动参数,进而处理获得压气机压比、效率等主要性能,是最为常规的试验测量方法。作为一种接触式测试手段,将探针置于流道中将不可避免地对流场产生干扰,一方面是探针在流道中直接形成的物理堵塞效应,另一方面是探针对上、下游流场的扰动及其与叶片流场的相互作用。

在美国 GE 公司 E<sup>3</sup>压气机性能试验数据处理中,针对进气道内的探针影响考虑了 1.4% 的效率损失修正<sup>[1]</sup>。在研究探针的堵塞效应上,Wyler<sup>[2]</sup>的风洞试验表明,探针使风洞中的马赫数增大、静压降低,尤其在高马赫数条件下探针的堵塞效应更为明显。Coldrick 等人<sup>[3]</sup>数值研究了探针对单级压气机流场的影响,结果表明,探针引起对应叶栅通道流量的大幅下降,并改变相邻通道气流压力和速度分布。Ma 等人<sup>[4-5]</sup>通过单转子压气机试验发现,探针在不同叶高上的堵塞效应不同,其产生的尾迹将改变下游转子叶片的增压能力。在总体性能上,探针降低了压气机流量和气动效率,也削弱了压气机气动稳定性。Lepicovsky 等人<sup>[6]</sup>研究发现,安装于压气机转子上的旋转探针同样会降低所在叶栅通道的轴向速度,引起阻塞,但不同通道及区域流场受到的影响不同。

马宏伟等人<sup>[7]</sup>的数值研究发现,探针尾迹主要通过增大压气机转子叶片附面层厚度、扩大叶片尾迹的影响范围以及支杆尾迹中的低能流体来增大流动损失,同时探针尾迹还会影响转子叶尖泄漏涡的形态与强度。高杰等人<sup>[8]</sup>研究认为,探针扰流会增大下游叶栅的总压损失和对应叶片的尾迹损失,当

来流马赫数较高时探针表面还将出现激波与附面层的干涉,使得附面层发生分离。Li 等人<sup>[9]</sup>的数值研究认为,探针尾迹引起转子叶片表面附面层的分离以及探针尾迹与主流的掺混损失是导致压气机效率和压比降低的主要原因。杨荣菲等人<sup>[10]</sup>研究发现:探针直径越大,引起压气机气动效率的降低以及特性线的偏移就越显著;同时,当探针尾迹引起的进口气流角脉动位于进口导叶不敏感角范围时,导叶的整流作用将削弱进口探针对压气机性能的影响。向宏辉等人<sup>[11-12]</sup>还发现,当探针引起的流场扰动频率接近下游转子叶片特定固有频率且尾迹激振强度较大时,将诱发转子叶片共振,且探针尾迹脱落涡会引起转子叶片进气攻角产生大幅值脉动。

在压气机试验中,其主要性能参数是根据若干支探针上的离散测点数据经过一定的处理方法获得。探针的引入除了会干扰压气机内部流场、影响压气机性能外,也将影响测点所“感受”的流场参数。Coldrick 等人<sup>[3,13-14]</sup>的数值研究发现,探针的位势效应使上游叶片与探针之间区域的压力升高、流速降低,进而影响探针上的测点读数;压气机出口流场具有较强的非定常和非均匀性,出口探针对于流场中的非定常波动感受不明显,但对于流场中的非均匀性,尤其是气流角的不同测量数据变化显著。Christoph 等人<sup>[15]</sup>的研究则进一步指出,探针不仅改变对应叶栅通道的流量和上游叶片的尾迹结构,即使在均匀来流条件下,探针及下游叶片的位势效应也会影响探针测量的准确性。Aschenbruck 等人<sup>[16]</sup>在针对涡轮的试验与数值研究中发现,在高速度梯度流场中,探针更容易引起上游叶片尾迹的周向偏移,并降低尾迹强度;同时,数值计算中考虑了探针影响的测点参数与试验测量参数吻合更好。因此,试验中要考虑探针及下游叶片对测点流场参数的影响。

从上述研究可以看出,浸入式探针对压气机内部流场有明显的影响,同时探针与上下游叶片流场的相互作用也会影响探针上各测点所“感受”的参数,进而影响压气机性能的试验评定。已有研究大多关注进口探针堵塞效应或探针尾迹对下游流场的影响,而针对出口测量探针对压气机性能试验的影响研究较少。实际上,压气机出口流场复杂,探针能否准确测量出口截面参数对压气机性能评定同样有着重要的影响。本文以三级轴流压气机为研究对象,通过全周三维定常及非定常数值计算,研究出口测量探针数量及所处轴向位置对压气机内部流场和性能的影响。

## 1 研究对象与数值方法

### 1.1 研究对象

采用定常及非定常数值计算相结合的方法,研究了4种出口测量探针布局方案对压气机气动性能及流场的影响。研究对象为三级轴流压气机,其采用等外径设计,额定转速为17 000 r/min。叶片几何模型如图1所示,由进口导流叶片(IGV)和三级转子、静子叶片构成,叶片数分别是38,25,40,31,42,39和46。

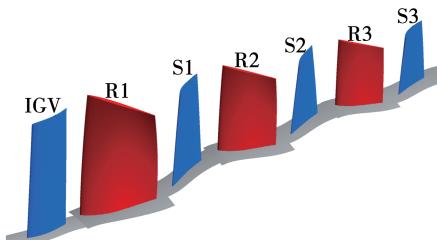


图1 三级轴流压气机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-stage axial compressor

### 1.2 出口测量探针布局

出口测量探针的布局形式如表1所示。出口测量探针包括多支梳状总温总压探针和1支梳状总压静压探针。探针主要包括支杆及外伸感受流场参数的测量点凸出结构。两种梳状探针支杆的横截面均为长条形。探针测点均为5点,呈径向等环面积分布,具体结构如图2所示。在计算分析中,压气机进口还设置有两支梳状总压探针。本文主要探讨出口探针的影响,进口探针在此不过多叙述。

表1 出口测量探针布局形式

Tab. 1 Outlet measurement probe layout scheme

算例	总温/总压	总压/静压	距出口导叶的距离	阻塞比/%
	探针数量	探针数量	叶的距离	
1(3探针-1 $b_{s3}$ )	2	1	1 $b_{s3}$	1.57
2(3探针-2 $b_{s3}$ )	2	1	2 $b_{s3}$	1.57
3(3探针-3 $b_{s3}$ )	2	1	3 $b_{s3}$	1.57
4(5探针-1 $b_{s3}$ )	4	1	1 $b_{s3}$	2.67

注:表中 $b_{s3}$ 为末级静叶的轴向弦长;“3探针-1 $b_{s3}$ ”表示出口有3只测量探针,各探针距离末级静叶的轴向距离为1 $b_{s3}$ 。

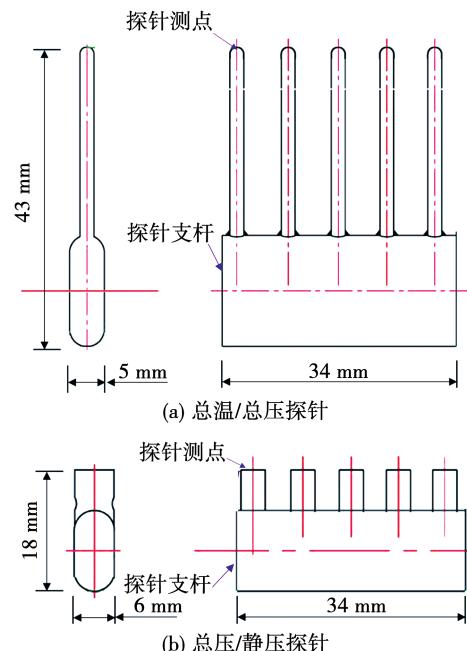


图2 出口测量探针结构示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of outlet measurement probe structure

为研究出口测量探针布局方案对压气机气动性能及流场的影响,从测量探针数量和探针所处轴向位置两个因素来分析。其中,算例1~3之间的差异是出口测量探针距离末级静子叶片的轴向距离不同。算例4与前3种方案的差异是梳状总温总压探针数目不同。不难想到,探针数目不同将形成不同的堵塞比效果(堵塞比为探针在流道横截面上的投影占流道总面积的比例)。压气机试验中,为避免对流场的集中干扰,测量探针周向布置在不同的叶栅通道内,以测量试验件出口1个栅距内的参数分布,如图3所示。

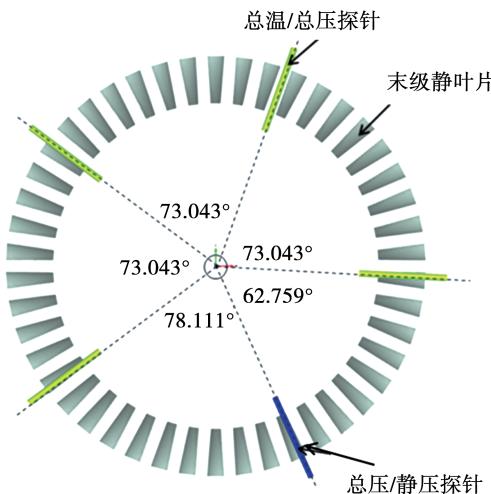


图3 出口测量探针所处的周向位置示意图

Fig. 3 Circumferential positions of outlet measurement probes

### 1.3 数值计算方法

为准确捕捉探针前后的流场细节,对所有压气机叶片及探针采用全周尺寸三维数值计算。为减少计算网格量保证网格质量,计算中简化了探针的测点凸出结构。同时,假设梳状探针贯穿了从轮毂到机匣的整个径向区域。

数值计算基于 NUMECA FINE/Turbo 程序进行,采用有限体积法求解三维 N-S 方程,空间离散采用高分辨率格式,定常计算以隐式时间格式推进,非定常计算采用双重时间步法以加速收敛,湍流模型为 Spalart-Allmaras。转/静交界面采用滑移网格,区域缩放方法。

计算中,进口给定总温 288.15 K 以及总压 0.1 MPa,气流轴向进气。出口给定平均静压。转子转速为 17 000 r/min。在非定常计算中,以定常结果作为初场,物理时间步为 8.82 μs,相当于转子旋转 1 周需 400 时间步长。

#### 1.3.1 计算网格

计算网格采用 AutoGrid 划分,主流区拓扑结构化网格为 HOH 型,端部间隙采用蝶型网格,如图 4 所示。对近壁网格加密以满足湍流模型计算需求 ( $y^+ < 10$ )。经网格无关性分析,不同出口探针布局方案下的计算总网格数量为 5 000 万~6 000 万左右。

#### 1.3.2 数值计算方法验证

为验证数值计算方法的可靠性,采用上述网格

条件及数值方法,计算了该三级轴流压气机的性能,其与试验结果对比如图 5 所示。在相同设计流量下,压比、效率的计算值与试验值的偏差小于 2%,表明所采用的数值方法较为可靠。

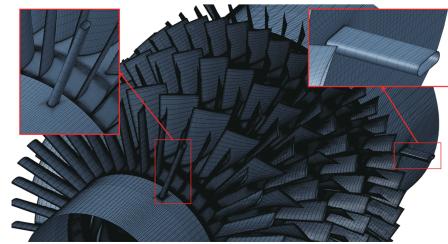


图4 数值计算网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of CFD mesh

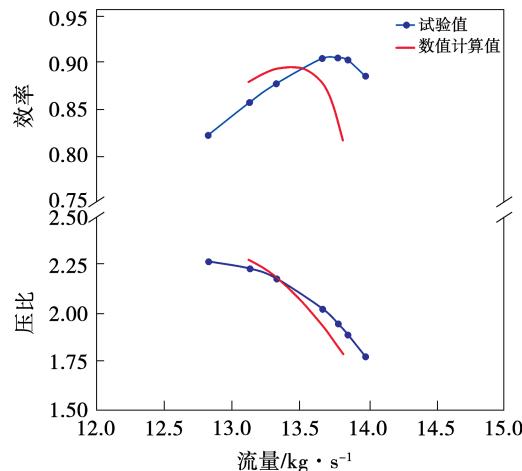


图5 数值计算结果与试验结果的比较

Fig. 5 Comparison of compressor performance between numerical calculation and experiment results

## 2 结果与分析

为分析出口测量探针布局对压气机性能和内部流动的影响,同时进行了无探针条件下的压气机三维数值计算。受篇幅所限,且不失一般性,主要以压气机高效率点展开讨论。

### 2.1 出口探针轴向位置对压气机内部流动的影响

首先,评估出口探针轴向位置对压气机压比和效率的影响。表 2 是压气机在不同探针布局方案下高效率点的性能参数对比。表中:面平均指的是对探针所在截面上的物理参数作整体平均;点平均则是对探针端部 5 个测点所对应位置处(即测点感受参数)的物理参数进行平均。以此来对比探针测点

测量平均值与测点所在平面物理参数平均值从表 2 中可以看出,出口测量探针引入后,尽管探针的轴向位置有所不同,基于测量平面参数平均所获得的压比、效率、流量等主要性能与无探针条件下的差异并不大。其中,流量略有减小,压比、效率略有提高,这主要是由于探针引入后造成压气机状态点略有偏移所造成的。而基于探针测点参数平均所获得的压比、效率差异较大,相比无探针条件下的性能,探针

距离末级静叶 1 倍轴向弦长的算例 1 的压比偏低 1%、效率绝对值偏低 0.38%,而算例 2 的压比偏高 3.2%、效率绝对值偏高 5.47%,算例 3 的压比偏高 1.4%、效率绝对值偏高 3%。说明,由于出口探针的测点数量有限,基于探针测点测量参数的平均值并不能准确反映出口测量平面的平均参数,因而导致基于探针测点获得的压气机性能与基于截面平均值的性能相差较大。

表 2 不同出口探针周向距离布局下的压气机性能对比(最高效率点)

Tab. 2 Comparison of compressor performance under different outlet probe layouts (maximum efficiency point)

参数	无探针	算例 1(3 探针 - $1b_{s3}$ )		算例 2(3 探针 - $2b_{s3}$ )		算例 3(3 探针 - $3b_{s3}$ )	
	面平均	面平均	点平均	面平均	点平均	面平均	点平均
压比	2.031	2.033	2.008	2.033	2.097	2.034	2.059
效率/%	87.47	87.63	87.09	87.63	92.94	87.85	90.45
流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	13.468	13.448	13.448	13.445	13.445	13.444	13.444

图 6 是压气机 50% 叶高截面上总压分布。从中可以看到,在 S3 末级静子叶片进、出口截面上出现 3 个高总压区,且所在位置与出口探针位置重合,表明出口探针会对末级叶片的总压分布造成影响。

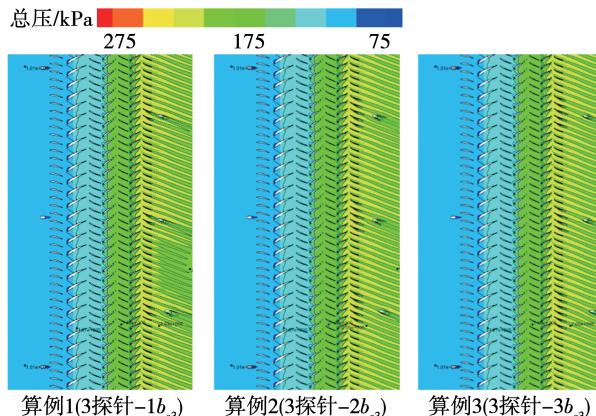


图 6 压气机流道 50% 叶高截面总压分布

Fig. 6 Total pressure distributions on section of compressor flow channel at 50% blade span

为了更清晰地了解探针对末级叶片总压分布的影响规律,图 7 显示了 S3 进口截面和出口截面叶中处总压沿圆周分布曲线。可以看出,没有探针时 S3 进口截面的总压沿圆周呈典型的叶栅周期性变化,由于探针的存在,探针前方的 S3 进口截面上形成高总压区,高总压区两侧则伴随有两个相对低压区(峰值低于无探针时的总压峰值)。

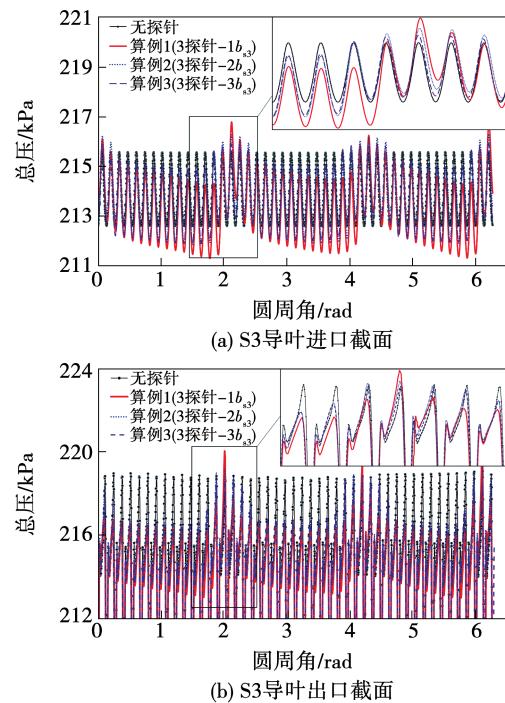


图 7 S3 导叶 50% 叶高进、出口周向总压分布

Fig. 7 Circumferential total pressure distributions at inlet and outlet of S3 vane at 50% blade span

进一步对比 3 种探针布局方案可以看到,随着出口探针与末级叶片轴向距离的增大,高总压区峰值会减弱,但其周向作用范围会增大。S3 出口截面的总压沿圆周分布也呈现相同特征,出口探针使得 S3 出口截面的压力周向分布呈现明显的不均匀性。

图8和图9为S3叶片进、出口截面的气流角分布。可以看到,与出口探针对应位置处存在明显的气流角分布异常区。同时,随着出口探针轴向距离的增大,算例2和算例3的气流角异常区域范围扩大,明显大于算例1。这进一步说明,出口探针对S3叶片出口截面气动参数的影响没有减弱,且影响区域范围增加。

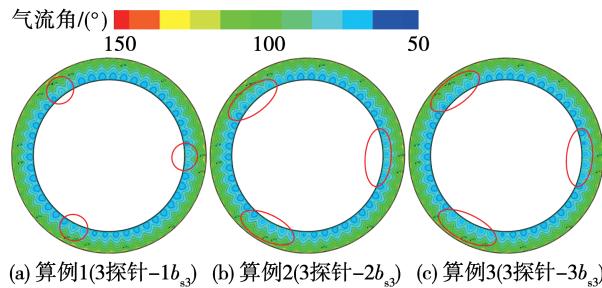


图8 S3 导叶进口截面气流角分布

Fig. 8 Flow angle distributions on inlet section of S3 vane

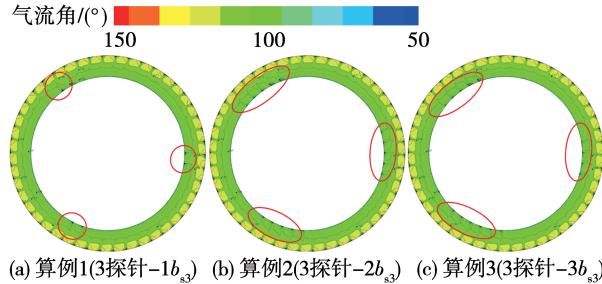


图9 S3 导叶出口截面气流角分布

Fig. 9 Flow angle distributions on outlet section of S3 vane

## 2.2 出口探针数量对压气机内部流动的影响

在上述研究中观测到出口探针对上游流场的影响,而基于探针测点测量参数的平均值并不能准确反映出口测量平面的平均参数。本节探讨增加出口测量探针数量对压气机性能和内部流动的影响。算例4中总温总压探针数量增加至4支,即出口探针总数量共为5支,探针距离末级叶片S3的轴向距离均为S3叶片的1倍轴向弦长。

表3是压气机在增加探针数量后高效率点的性能参数对比。可以看到,与无探针条件下的压气机性能相比,探针数量增加后的算例4压比偏高0.6%,效率绝对值偏高1.8%。其偏差绝对值比算

例1更大。由此可见,探针数量的增加并没有明显改善基于探针测点测量平均值所获得的压气机性能评估精度。

表3 不同出口探针数量下的压气机性能对比(最高效率点)

Tab. 3 Comparison of compressor performance with different outlet probe quantities (maximum efficiency point)

参 数	无探针	算例1(3探针-1b <sub>s3</sub> )		算例4(5探针-1b <sub>s3</sub> )	
	面平均	面平均	点平均	面平均	点平均
压比	2.031	2.033	2.008	2.037	2.043
效率/%	87.47	87.63	87.09	87.8	89.26
流量/kg·s <sup>-1</sup>	13.468	13.448	13.448	13.441	13.441

图10和图11是压气机50%叶高截面上总压和熵分布。

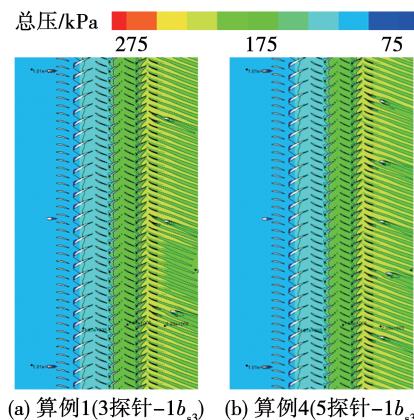


图10 压气机50%叶高截面总压分布

Fig. 10 Total pressure distributions on section of compressor at 50% blade span

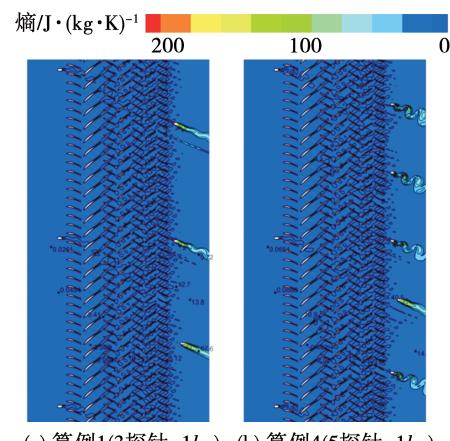


图11 压气机50%叶高截面熵分布

Fig. 11 Entropy distributions on section of compressor at 50% blade span

从中可以看到,随着出口探针数量的增加,末级静子叶片 S3 进、出口截面上的高总压区也对应增加。从非定常计算结果中的静熵分布可以看到,算例 4 中出口探针的尾迹涡街现象更为明显,表明当地流动条件更加有利于形成周期性的卡门涡街,这也进一步说明算例 1 和算例 4 出口探针处的流动条件并不完全相同。

图 12 显示了 S3 进、出口截面叶中处总压沿圆周分布曲线。可以看出,随着出口探针的增加,探针上游 S3 进口截面上的高总压区数目也相应增加,但高总压区峰值差异不大。高总压区两侧伴随有两个相对低压区,但由于探针数量增加,相对低压区的范围缩小。S3 出口截面的总压沿圆周分布也呈现相同特征,具有明显的不均匀性,且高总压区数量和位置与出口探针对应。

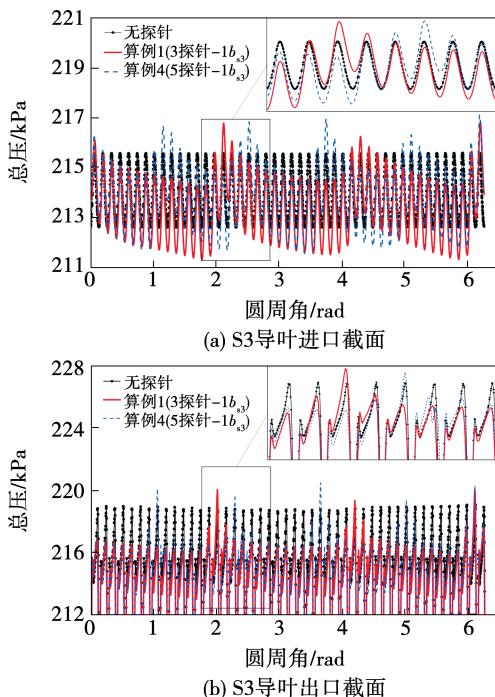


图 12 S3 导叶 50% 叶高进、出口周向总压分布

**Fig. 12 Circumferential total pressure distributions at inlet and outlet of S3 vane at 50% blade span**

图 13 是不同典型时刻 S3 出口截面的总压分布。其中,  $T$  为一个转子旋转周期, 即转子转过 1 周所需的时间。从该结果可看到, 在不同时刻, S3 出口截面上在出口探针对应区域内的总压始终偏高, 尽管不同时刻下的总压偏高程度有所差异, 但与出口探针数量完全对应。另一方面, 高总压区并不仅

局限于探针对应的局部区域, 而是分布在 3~4 个叶栅通道范围内, 并向两侧逐渐减弱。

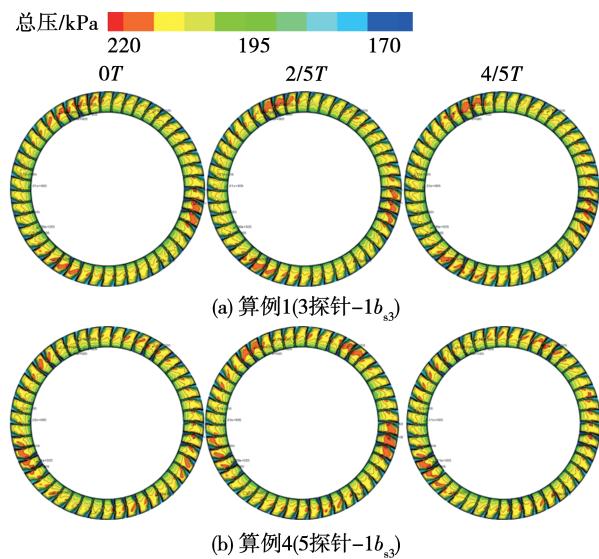


图 13 S3 导叶出口截面总压分布随时间变化

**Fig. 13 Variations of total pressure distribution on outlet section of S3 vane at different time**

图 14 是不同典型时刻测量截面的总压分布。从该结果可看到, 在不同时刻测量截面上在出口探针对应区域内的总压始终较高。因此, 探针测点所“感受”测量到的总压也会偏高, 而无法准确反映该测量截面的平均总压。

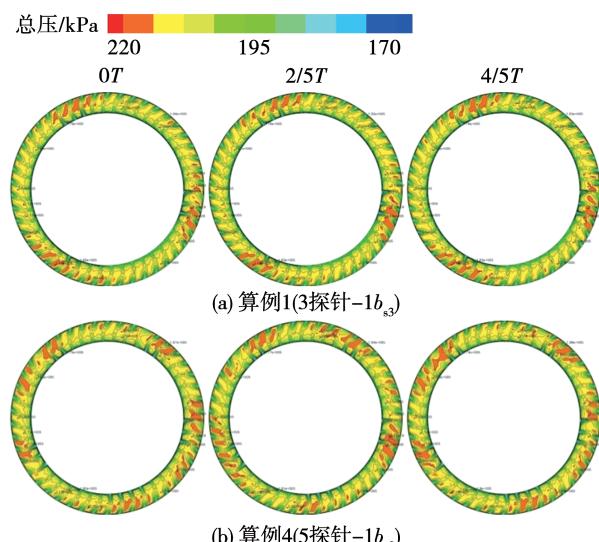


图 14 测量截面总压分布随时间变化

**Fig. 14 Variations of total pressure distribution on measurement section at different time**

通过上述分析不难得到,随着出口测量探针数量的进一步增多,一方面物理堵塞比增大,会降低压气机流量。另一方面,会进一步干扰上游流场,使得测量平面上的高总压区域更多,提高了平均总压。同时,探针测点测量参数是否准确反映截面平均参数也存在不确定性。从这个角度说,出口测量探针数量应尽量少,探针几何尺度应尽量小,以减小对压气机流场的干扰。然而,压气机出口流场具有较强的非定常性和非均匀性,采用数量较少的探针和测点又难以获得准确的出口截面平均参数。因此,在进行压气机性能试验前就应开展相应的数值计算,了解出口流场特征,针对性的进行探针及测点位置设计。进一步的,通过数值计算获得出口测量探针布局对压气机性能的影响规律,对试验数据进行修正。

### 3 结 论

针对三级轴流压气机开展了全周定常和非定常数值分析,探讨了出口测量探针布局,主要是探针数量及所处轴向位置对压气机气动性能及流场的影响,得出如下结论:

(1) 出口探针对压气机末级叶片进、出口截面上的气动参数均具有明显的影响。其中,末级叶片进、出口截面上将形成与出口探针相对应的局部高总压区和气流角偏移区。且局部高总压区覆盖有3~4个叶栅通道。

(2) 随着出口探针和末级叶片轴向距离的增加,末级叶片进、出口截面上的高总压区强度减弱,但高压区作用范围增加。

(3) 基于出口探针测点得到的压气机性能与基于测量截面平均值得到的压气机性能差异较大。一方面是因为出口探针改变了测量截面上气动参数的周向分布,另一方面是由于测量截面流场不均匀,有限的探针测点未能准确反映测量截面气动参数平均值。

(4) 出口测量探针数量的增加,增加了末级叶片进、出口截面上局部高总压区数量,提高了平均总压,但并未改善压气机试验性能评估精度。与无探针条件下的压气机性能相比,压比偏高0.6%,效率

绝对值偏高1.8%。

### 参 考 文 献:

- [1] BOLT C R, LEE D, MC-DONALD P W. Rotor redesign for a highly loaded 1800 FT/SEC tip speed fan II - final performance report [R]. NASA - 5523 - 92, 1980.
- [2] WYLER J S. Probe blockage effects in free jets and closed tunnels [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1975, 97(4): 509 - 515.
- [3] COLDRICK S, LVEY P, WELLS R. Considerations for using 3D pneumatic probes in high speed axial compressors [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, Netherlands, 2002.
- [4] MA H W, LI S H, WEI W. Effects of probe support on the flow field of a low-speed axial compressor [J]. Journal of Thermal Science, 2014, 23(2): 120 - 126.
- [5] MA H W, LI S H, WEI W. Effects of probe support on the stall characteristics of a low-speed axial compressor [J]. Journal of Thermal Science, 2016, 25(1): 43 - 49.
- [6] LEPICOVSKY J. Effects of a rotating aerodynamic probe on the flow field of a compressor rotor [R]. NASA/CR - 2008 - 215215, 2008.
- [7] 马宏伟,项乐. 探针支杆对压气机转子性能及流场影响的数值模拟研究[J]. 推进技术, 2016, 37(12): 2288 - 2295.  
MA Hong-wei, XIANG Le. Numerical investigation of effects of probe support on performance and flow field of compressor rotor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37 (12): 2288 - 2295.
- [8] 高杰,向宏辉,代秋林,等. 探针支杆尾迹特性对压气机叶栅性能的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32 (6): 6 - 13, 40.  
GAO Jie, XIANG Hong-hui, DAI Qiu-lin, et al. Effect of probe support wake characteristics on compressor cascade performance [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2019, 32(6): 6 - 13, 40.
- [9] LI B W, WU H, HOU C K. Influence of probe blockage effect on compressor test performance [C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, London, United Kingdom, 2020.
- [10] 杨荣菲,赵建通,向宏辉,等. 进口探针支杆对1.5级压气机气动性能的影响[J]. 推进技术, 2017, 38(5): 1038 - 1046.  
YANG Rong-fei, ZHAO Jian-tong, XIANG Hong-hui, et al. Effects of inlet probe support on aerodynamic performance of 1.5-stage compressor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(5): 1038 - 1046.
- [11] 向宏辉,高杰,杨荣菲,等. 探针支杆尾迹对压气机转子叶片振动特性的影响研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(2):

58 – 66.

XIANG Hong-hui, GAO Jie, YANG Rong-fei, et al. Effect of probe support wake on vibration characteristics of compressor rotor blade [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35 (2) : 58 – 66.

[12] YANG R F, WANG G L, LIU H X, et al. Numerical study on the flow mechanism of compressor rotor blade vibration under different inlet probe configurations [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020 (4) : 8897211.1 – 8897211.12.

[13] COLDRICK S, LVEY P C, WELLS R G. The influence of compressor aerodynamics on pressure probes: Part 1 – In rig calibrations [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, Vienna, Austria, 2004.

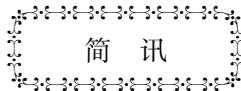
[14] COLDRICK S, LVEY P C, WELLS R G. The influence of com-

pressor aerodynamics on pressure probes: Part 2 – Numerical models [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, Vienna, Austria, 2004.

[15] CHRISTOPH S, MARIUS T, MAGNUS H, et al. Numerical studies on the intrusive influence of a five-hole pressure probe in a high-speed axial compressor [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Charlotte, NC, USA, 2017.

[16] ASCHENBRUCK J, HAUPTMANN T, SEUME J R. Influence of a multi-hole pressure probe on the flow field in axial-turbines [C]//Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Madrid, Spain, 2015.

(丛 敏 编辑)



## 简讯

### 用数字解决方案和人工智能使新的核项目提质增效

近日,22个国家在COP28会上签署了“净零核倡议”,承诺到2050年将其核能能力提高两倍。

Terra Praxis是一家非营利组织,通过其REPOWER计划以及与政府、监管机构和其他行业利益相关者的合作,旨在加快核项目监管进程,从可行性评估、设计到建设和运营。其理念是减少时间、成本和风险,以刺激进一步的投资,实现行业的潜力。Terra Praxis的创始董事兼联合首席执行官Eric Ingersoll说,该组织的另一个重点领域涉及使用人工智能的自动化设计。

美国能源部(DOE)此前的一项研究发现,数百个燃煤电厂可以转换为先进的核能源,与绿地建设项目相比,可能会降低15%至35%的基本建设成本。这一范围将取决于燃煤电厂基础设施的再利用。Terra Praxis相信其解决方案将增加市场机会,甚至超出美国能源部的评估范围。该组织的煤炭重新供电解决方案的目标是每兆瓦时的能耗为35~40美元。

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