

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.017

引气对压气机非设计转速性能影响的试验研究

曹传军, 翟志龙

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要:以多级高负荷轴流压气机为研究对象, 试验研究了级间引气对非设计转速下压气机性能的影响。结果表明: 引气并不改变各单级的特性, 引气处上下游各级由于引气导致流量发生了改变, 从而改变了各级的匹配工作位置。在 90% 转速时压气机进口级来流马赫数高, 易进入临界工况, 进口级决定了压气机进口总流量。靠近进口级增加引气会显著提高压气机进口总流量。第 4 级出口引气增加 3.5% 时, 堵点流量增加 1%, 峰值效率相对提高 0.5%。

关键词:航空发动机; 轴流压气机; 级间引气; 试验; 性能

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0096-04

Test on Bleeding Influence over Performance of Compressor at Off-design Speed

CAO Chuanjun, ZHAI Zhilong

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: The effect of inter-stage bleeding on the performance of a highly-loaded multiple axial compressor was tested at off-design speed. The results show that bleeding doesn't change the single stage performance, but alter the upstream and downstream mass flow, leading to the changes of matching machine points at all stages. And at 90% speed, the Mach numbers of the front stages are high, the flow is easy to be critical and the total mass flow depends on the front stages. When the bleeding position is closer to the inlet, it will increase the inlet total mass flow of compressor significantly. When bleeding mass flow increases 3.5%, the choke mass flow increases 1%, and peak efficiency relatively raises 0.5%.

Keywords: aero engine; axial compressor; inter-stage bleeding; test; performance

0 引言

民用大涵道比涡扇发动机的性能是随着民用飞机日益增长的需求而不断提升的。随着飞机加、减速时间的缩短以及飞行姿态的灵活多变, 要求压气机不仅在设计点而且在非设计点都要有宽广的稳定工作范围。民用大涵道比涡扇发动机在非设计状态工作时, 多级轴流压气机各级速度三角形偏离设计点, 从而导致前面级和后面级的流通能力不匹配。为了保证压气机稳定、高效地工作, 需要各级工作在合适的位置。发动机在工作过程中, 根据飞机和发动机的不同工作状态, 需要从压气机主流通道引气用于客舱供气、防冰、涡轮叶片冷却、封严、起动防喘等。从高压压气机主流引出的气流可达到主流空气流量的 8%~10%^[1], 级间引气改变了压气机引气位置上、下游的级间匹配。

国内外研究者从数值分析和试验手段入手, 针对引气问题进行了大量的研究, 包含引气位置、引气方式、引气模型以及引气量影响等, 并得到了

很多有益的结论。WELLBORN 等^[2]研究了压气机机匣上不同的引气位置对压气机性能的影响。研究以一台高压压气机的中等负荷亚声速级为研究对象, 对转子和静子机匣引气分别进行研究, 引气结构为周向缝。结果表明: 在叶排轴向间隙的机匣上引气, 压比效率略有提高; 在叶片通道中引气效率略有下降。LEISHMAN 等^[3-5]研究了一系列不同引气结构的流场, 如圆孔引气结构和引气位置的影响、引气槽进口斜面的影响、引气斜槽与主流的干扰等。顾杨等^[6]通过试验方法研究了 0.9 转速以下引气对多级高压压气机性能的影响, 指出了压气机中间级引气对其性能和稳定工作范围的影响; 引气一方面减小了压气机流量堵塞状态, 改善了压气机的工作条件, 增加了压气机的稳定裕度, 另一方面使得压气机后面级工作条件恶化, 压气机效率随引气量的增加而下降。清华大学的邓峰等^[7]对燃气轮机的压气机级间引气进行了数值模拟研究, 结果表明引气的抽吸作用能够减小静叶尾迹以及机匣端壁附近附面层的损失。赵斌等^[8]研究结果表明转子机匣端壁引气可

第一作者简介: 曹传军(1982—), 男, 江苏南通人, 研究员, 博士, 研究方向为压气机设计与试验, ccjnuaa@126.com。

以有效控制间隙泄露流的发展,减小叶尖损失,提升压气机性能。静子端壁引气能够减小叶排损失,提升压气机效率。沙心国等^[9]以一台8级轴流压气机为研究对象,研究了级间引气对压气机总性能、内部流场和级间匹配的影响。结果表明,级间引气使得压气机进口流量增加近1%,最高效率提高约1.5%。晏松等^[10]研究表明:叶顶引气的抽吸作用改善了叶顶低速堵塞区,增强了转子叶顶流通能力,提高了转子稳定性。刘宝杰等^[11]研究表明,级间引气会影响压气机压升特性和失速裕度,影响程度与引气量大小有关。郑健生等^[12]研究了非均匀级间引气对压气机影响,即使有环形引气腔稳压,在大引气量下,非均匀引气依然对主流造成影响,引发了级间流场周向畸变。明亮等^[13]对引气后的压气机特性进行了预测,并对预测模型进行了验证,总压的相对误差不超过2%。

国内外压气机引气影响的研究多数采用低负荷的单级或级数较少的多级压气机,设计转速研究的较多,且采用数值计算多,试验研究少。本文针对某高负荷多级压气机非设计转速(90%转速)开展了试验研究,探究级间引气对多级压气机总性能、级间流场的影响。

1 试验对象和方法

研究对象为某民用大涵道比涡扇发动机10级高压压气机,共21排叶片(包含进口导叶IGV),在4级和7级静子叶片机匣出口处引气,该引气用于涡轮叶片冷却、防冰和客舱供气等。本文研究了非设计点转速,90%相对换算转速下的流场特性。

试验在某航空发动机有限责任公司压气机试验台开展。该试验台采用电机驱动,功率输出平稳,最大功率为25 MW,流量调节范围为0~50 kg/s,最高转速20 000 r/min。试验装置主要包括进口流量管、节流阀、稳压箱、试验件本体、排气蜗壳、齿轮箱、测扭器等,图1给出了压气机试验台简图。试验过程中通过台架进口流量管测量物理流量,根据压气机进口测量的总温和总压值计算得到换算流量。压气机进口截面位于中介机匣支板通道中间,径向分别布置总温和总压梳状探针,测量压气机进口截面温度和压力,沿程静叶前缘布置叶型探针,测量级间总温和总压。压气机出口截面位于第十级静叶出口,布置总温、总压探针,测量出口截面温度和压力。试验时通过持续

关闭压气机出口节流阀,提升压气机压比,得到不同压比条件下对应的压气机流量和效率。通过引气处节流阀调节压气机第4级和第7级引气流量,得到引气对压气机总特性和级间流场的影响。基于级间总温、总压计算各级单级特性,基于进、出口测量值计算压气机总特性,其中效率根据试验数据采用文献[14]的变比热公式开展计算。

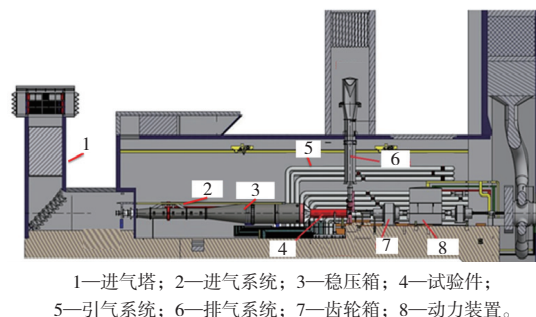


图1 压气机试验台

2 试验结果分析

2.1 引气对总特性的影响

图2给出了非设计转速下(90%相对换算转速)3种引气方案对压气机总特性的影响。考虑该试验件负荷高,喘振时能量大、风险高,引气试验均未进喘。图中方案A代表基准引气方案,方案B代表7级引气保持不变,4级引气相对于基准方案增加3.5%,方案C代表4级引气保持不变,7级引气相对于基准方案增加3.6%。图2(a)、图2(b)中横坐标均代表无量纲压气机进口换算流量,图2(a)纵坐标代表无量纲压比,图2(b)纵坐标代表无量纲等熵效率,其中换算流量采用方案A堵点流量进行归一化,压比采用方案A的最高压比进行归一化,效率采用方案A的峰值效率进行归一化。图2结果表明:不同引气方案时,压气机流量压比特性线发生平移,流量效率曲线也发生变化,引气对堵点流量、峰值效率产生了较大影响。其中方案B,7级引气保持不变,4级引气增加3.5%时,堵点流量增加1%,峰值效率相对提高0.5%,4级适当引气可以增加流通能力,提高效率;方案C,4级引气保持不变,7级引气增加3.6%,堵点流量基本不变(从图2(a)看到,方案C因7级增加引气,堵点流量相比方案A略有降低,这是因为两条特性线是在不同试验日录取的,流量存在0.11 kg/s的波动导致),峰值效率略有提高。结果表明:上、下游不同位置增加相同比

例的引气量,引气位置越远离压气机进口,堵点流量和峰值效率变化幅度越小,表明远离压气机进口的引气位置对总性能的影响在减弱。原因在于,在90%相对换算转速下,压气机前面级叶片喉道处马赫数依然远大于或大于压气机中间级和后面级叶片喉道处马赫数,压气机流量由前面级限制了,前面级易进入流量临界状态,在前面级增加流通面积(即第4级引气),可以显著增加压气机进口的总流量。级间引气影响的根本机制在于引气改变了上、下游各级的流量,从而改变各级工作点在工作线上的位置(偏向堵点或者偏向喘点),改变级间匹配并最终改变多级压气机的总特性。

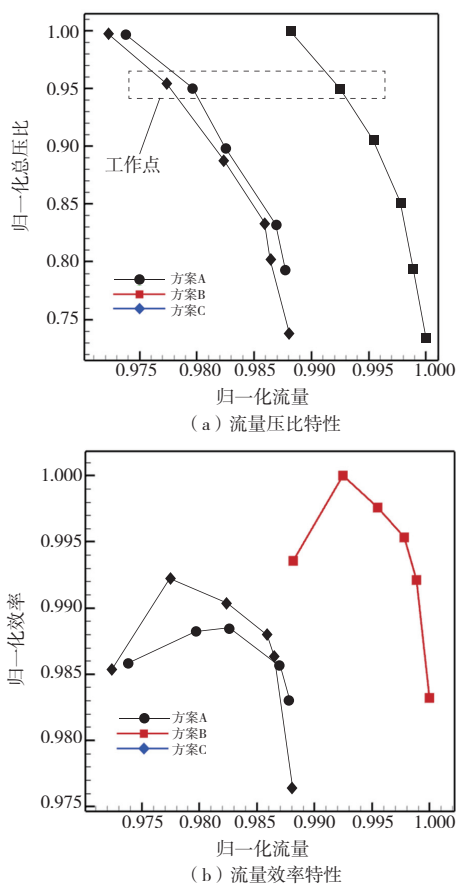


图2 不同引气方案下的总特性对比

2.2 引气对工作点各级压比的影响

图3给出了不同引气方案下各级压比分布。对比图中方案A与方案B,第4级静叶出口引气增加,使得前面各级(第1—第4级)压比降低,后面各级(第5—第10级)压比升高,且前面级变化更为明显。而第7级引气比例增加(方案C),对前面级的压比影响小(上游的第4—第6级压比降低),对后面级压比的影响较大(第8—第10级压比明显升高)。压比的变化与2.1节流量的变化是相互印证

的,引气并没有改变上、下游的级特性,但是改变了上、下游的流量,从而影响了各级工作点在特性线上的位置,即改变了上下游的匹配。

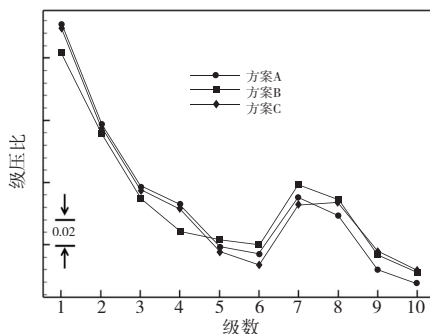


图3 各级压比分布

2.3 引气对级间匹配的影响

图4、图5、图6分别给出了引气对第1级、第4级、第7级单级特性的影响。图4和图5表明,与基准引气结果相比,不同引气方案时第1级和第4级特性线基本重合(图4中方案A与其他曲线的差异可能来自前文提到的不同试验日录取的流量波动),表明在下游引气并不改变上游各级特性,仅影响各级在特性线上的工作位置。图6表明,第4级处增加引气(方案B)对第7级的特性产生了明显的影响,这是因为引气改变了上、下游匹配,从而改变了第7级进口总温,使得该级的换算转速发生了变化。分析不同引气位置对各级的匹配影响,对于前面级,以第1级为例,特性线不变,4级引气增加,工作点沿着流量增加,压比降低方向移动,即引气增加导致该级工作点往偏堵点移动;7级引气增加,工作点位置基本不变,各级的特性重合得较好。

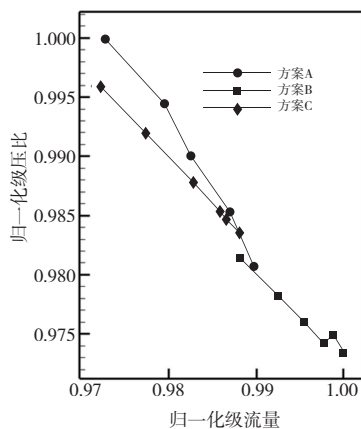


图4 不同引气方案下的第1级流量压比特性

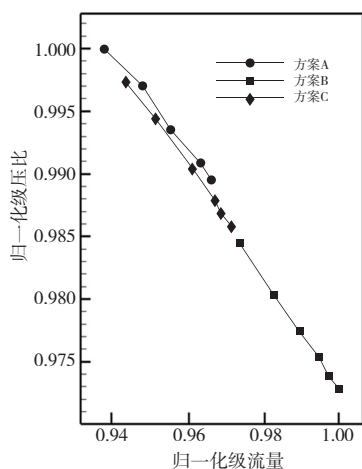


图5 不同引气方案下的第4级流量压比特性

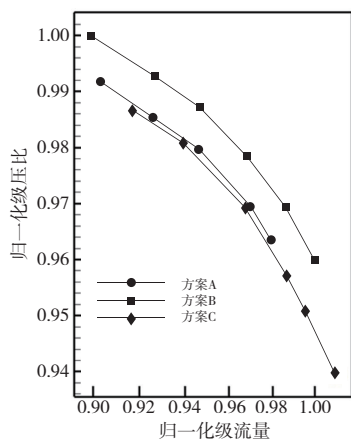


图6 不同引气方案下的第7级流量压比特性

3 不同转速下引气对总流量的影响

文献[15]对该10级压气机在100%设计转速下引气的影响进行了试验分析(图7)。图中方案B为第4级引气增加2%的方案。试验表明,在100%转速时,4级引气增加2%,压气机进口总流量增加0.800%,第4级引气平均每增加1%,总流量增加0.400%。相比本文研究的在90%转速时(图2),4级引气增加3.5%时,堵点流量增加1%,平均第4级引气每增加1%,总流量增加0.286%,表明在低于100%设计转速时,第4级处引气对压气机进口总流量的影响减小。在100%设计转速时,转速和总压比高,压气机抽吸能力强,流量大。进口级靠近叶尖处是超音气流,但叶片中部至叶根流道依然是亚音气流,没有达到临界,在第4级出口处引气依然可以增加压气机进口的总流量。相比100%转速,在90%转速时,压气机转速降低,抽吸能力减弱,同样在第4级引气,对进口流量增加的影响减弱。

另外也可以看到,不管是在100%转速时还是在90%转速时,在第7级出口处引气,对压气机进口总流量的影响都很微弱,几乎不变;7级出口引气时,下游主流流量会显著减小(从图3第8—10级压比变化推断)。

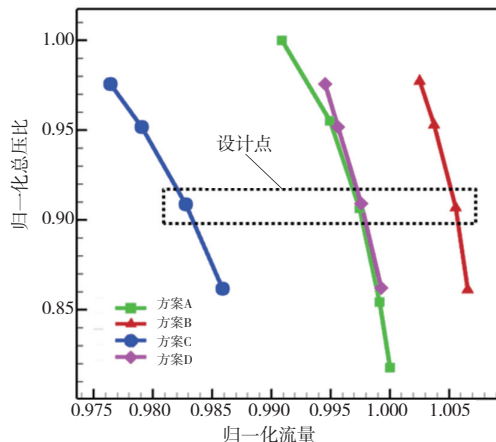


图7 100%设计转速特性

4 结语

本文研究了某高负荷10级轴流压气机在90%转速下级间引气的影响,得到如下结论。

1)在90%转速下,压气机进口级来流马赫数高,易进入临界工况,进口级决定了压气机进口总流量。靠近进口级增加引气,可显著提高压气机进口总流量。4级引气增加3.5%时,堵点流量增加1%,峰值效率相对提高0.5%;7级引气增加3.6%,堵点流量基本不变。

2)级间引气通过改变引气处上、下游各级的流量,从而改变各级之间的匹配关系。引气并不改变各单级的固有特性,只是根据流量变化改变了各级的匹配工作位置,在90%转速和100%转速下此规律一致。

3)与在100%转速下相比,在90%转速时,第4级出口处引气对压气机进口总流量的影响减小。原因在于在90%转速时,压气机转速降低,抽吸能力减弱,引气对进口流量的影响减弱。

参考文献:

- [1] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册:第16册[M]. 北京:航空工业出版社,2006.
- [2] WELLBORN S, KOIRO M. Bleed flow interactions with an axial-flow compressor powerstream[C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis, Indian: AIAA, 2002: AIAA2002-4057.

(下转第163页)

- 收稿日期: 2024-08-30

- [3] LEISHMAN B A, CUMPSTY N A, DENTON J D. Effects of bleed rate and endwall location on the aerodynamic behavior of a circular hole bleed off-take[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 645-658.
- [4] LEISHMAN B A, CUMPSTY N A, DENTON J D. Effects of inlet ramp surfaces on the aerodynamic behavior of bleed hole and bleed slot off-take configurations[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 659-668.
- [5] LEISHMAN B A, CUMPSTY N A. Mechanism of the interaction of a ramped bleed slot with the primary flow[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 669-678.
- [6] 顾杨, 崔健, 夏联, 等. 压气机带静叶优化的引气试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(4): 15-19.
- [7] 邓皞, 顾春伟, 薛耀华, 等. 压气机级间抽气的数值模拟[J]. 工程热物理论, 2008, 29(1): 40-42.
- [8] 赵斌, 李绍斌, 李秋实, 等. 引气提升轴流压气机性能的数值研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 262-271.

- 收稿日期: 2024-05-06