

文章编号: 1000-8055(2004)03-0408-05

跨音风扇转子叶片抽吸气数值实验探索

周 海, 李秋实, 陆亚钧

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过选择合适的位置, 在叶片表面开缝, 从流道中抽取一定量的气体, 可以在一定程度上改善流动性能, 从而对风扇转子的效率和压比产生影响。ATS-2 跨音风扇转子计算实例表明, 吸气后分离区明显减小; 在很小的吸气量和开缝面积情况下, 已经能够对风扇的效率和压比产生明显的正效果。在叶片不同的位置吸气, 产生的效果也各不相同。适当增加开缝面积和吸气量, 有利于吸气的正效果。

关键词: 航空、航天推进系统; 分离流; 流动控制; 抽吸气风扇转子

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

Prospects of Numerical Analysis of an Aspirated Transonic Fan Rotor

ZHOU Hai, LI Qiu-shi, LU Ya-jun

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: The efficiency and pressure ratio in a fan stage can be affected, by means of removal of mass flow from the passage. With properly chosen positions and with holes or slots on the suction side of the blades, the fan rotor behaves better in terms of performance. Calculations of a transonic fan rotor, ATS-2, show that the separated-flow area has been observably reduced, and that positive impacts have been observed even with small bleeding mass flow on the rotor. The results also indicate that the bleeding location has a significant impact on the performance. And with adequate air removal, the effect becomes more distinct.

Key words: aerospace propulsion system; separated-flow; flow control; aspirated fan rotor

超、跨音速风扇级的出现, 使得高压比风扇级的设计成为可能。目前, 国内已经具备比较成熟的跨音速压气机 ATS-2, 其转子压比已经达到 2.3 ~ 2.5, 效率 87% ~ 89%; 级压比 2.2 ~ 2.3, 效率 86% ~ 87%^[1]。近年来, 叶轮机械设计要求的提高和设计方法的进步, 使得更高压比的风扇级设计提上日程。然而伴随着压比的提高, 带来了效率的下降和稳定裕度的损失, 这也是压比 3 一级的风扇迟迟未能出台的一个原因。MIT 的 Jack L. Ker-

rebrock^[2~4]等人通过大量的数值研究, 推出了跨/超音速风扇级系列, 在叶尖切线速度 457.2 m/s 时, 风扇转子压比为 3.7, 级压比 3.5; 同时效率分别为 94% 和 89%。Kerrebrock 采用的设计方法, 主要是通过在固壁上开缝(包括孔和槽), 通过在进口导叶、转子叶片、静子叶片表面开缝, 在机匣和轮毂沿周向分布开孔等方法, 从流道中抽取一定量的气体, 从而改善流动条件, 大大减小了叶背的分离, 从而能设计出高压比和效率的风扇级。

收稿日期: 2003-07-09; 修订日期: 2003-09-09

联系人: 李秋实

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50176001)

作者简介: 周海(1978-), 男, 湖南株洲人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院硕士生, 主要从事叶轮机 CFD 研究

目前国内尚无一套完整的采用抽吸气原理的设计体系;同时,我们对于抽吸气研究仍处于起步阶段,需要在这方面进行更多的探索和试验。我们选择了ATS-2这样一个成熟的设计为蓝本,并且仅对转子叶背的抽吸气进行专门研究,以期在可控及可预测的范围内,探明抽吸气的机理;通过观察吸气位置、吸气量等因素对流场以及效率、压比的影响,探索出一条有效的抽吸气增益的途径,为更高性能风扇和压气机的设计提供思路和经验。

1 网格与叶片开缝

1.1 确定开缝位置

叶片的开缝位置对转子性能的影响极大,合适的位置可以在压比和效率方面均获得正效果;不太理想的位置会降低正效果;而不合适的位置往往导致效率和压比的下降。由于仅在叶背开缝,因此开缝位置主要是指流向和径向位置。大量的试算结果表明,最佳的流向位置是在分离区即将发展扩大附近的位置。在分离区前或大分离区开缝则抽吸气的作用不大。至于径向位置,则可根据需要,从一定的叶高开始开缝,直到叶尖。在本文中,流向位置是根据对ATS-2原型计算所得流场分析来确定的;而径向则从出现较大分离的叶高位置开始直到叶尖。

1.2 开缝边界的处理

从网格生成的难度和质量来考虑,我们采用沿着网格线开缝的方法,即,缝的宽度为一个网格宽,长度则沿径向取相同流向序号的若干网格,并且作为出口边界。这样的处理并不是最优的,因为径向各个截面的分离区的位置往往是不同的,开缝位置理应有所不同。但是从探索机理的角度来说,这已经能够满足要求了。

1.3 转子计算域和边界条件

本文的计算只针对转子进行,取消了进口导叶和静子叶片,流向、径向和周向网格数分别为129, 49, 45, 共约37万网格节点。从计算量和研究目的考虑,采用三维定常NS方程求解。计算采用Spalart-A lmaras模型,平均雷诺数约为 2.59×10^6 ;方程的离散化使用显式四阶Runge-Kutta法。

进口边界给定总压、总温及速度方向;出口给定反压;开缝出口边界给定吸气量(流量)。对ATS-2原型和开缝处理后的转子,取相同的网格,仅仅是后者多一个开缝出口边界;同时,取相

同的边界条件,以便对比。

2 计算结果

本文的计算针对不同的吸气位置和吸气量分别进行,但主要的工作集中在吸气量为 0.1 kg/s (约占进口流量的0.4%),吸气流向位置位于叶片前缘后约0.6倍弦长处,径向位置为85%叶高以上部分。下面的讨论以该位置为主。

2.1 相对马赫数等值线图比较

图1和图2给出了给定反压下(近失速),85%叶高截面相对马赫数等值线图比较。由此可见,在吸力面进行抽吸气后,叶背的分离区大为减小,气流通道的堵塞得到缓解,因此在该反压下的流量必然会大于原型。

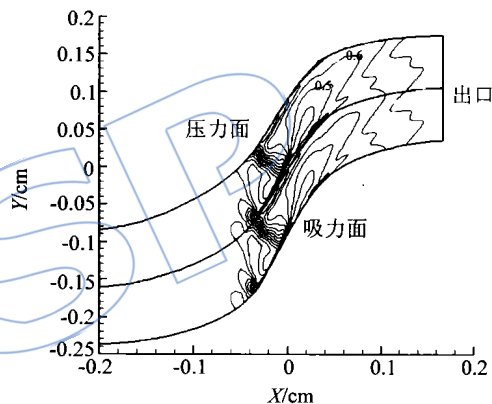


图1 ATS-2原型
Fig 1 ATS-2 Baseline

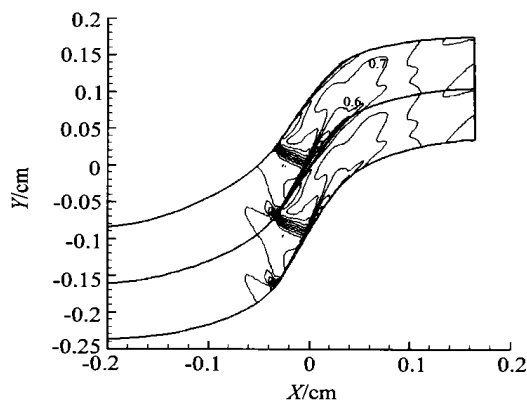


图2 吸气后
Fig 2 ATS-2 Aspirated

图3和图4给出了给定流量(近失速流量)下,90%叶高截面相对马赫数等值线图比较;可见,在给定的流量条件下,吸气后的分离区仍然减小了,降低了流动损失,从而使效率和压比有一定

的提高。

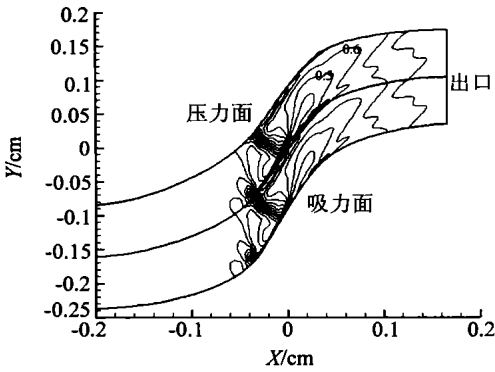


图 3 ATS-2 原型, 流量 24.7 kg/s
Fig 3 ATS-2 Baseline, mass flow 24.7 kg/s

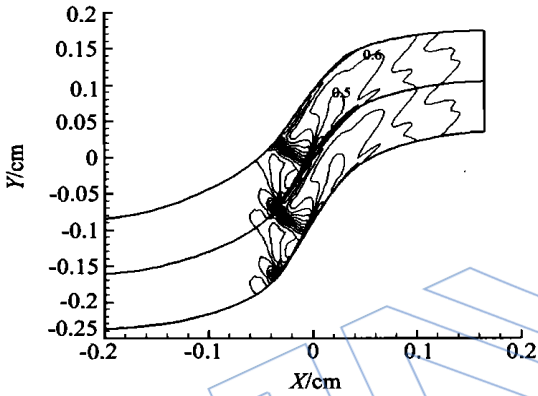


图 4 吸气后, 流量 24.7 kg/s
Fig 4 ATS-2 A spirated, mass flow 24.7 kg/s

2.2 特性线比较

吸气前后转子效率特性线比较如图 5 所示, 压比特性线比较如图 6 所示。

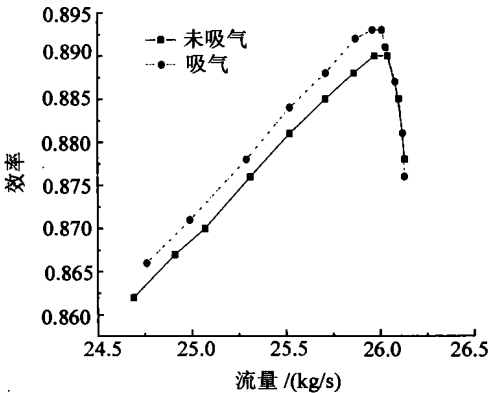


图 5 效率特性曲线
Fig 5 Efficiency characteristic curve

从效率对比图可知, 在效率最高点以后的各个流量下, 吸气后的效率都有提高。而压比则是在

各个流量下都有提高。提高的幅度不大(效率提高约 0.5%, 压比提高约 1.7%), 原因可能是:

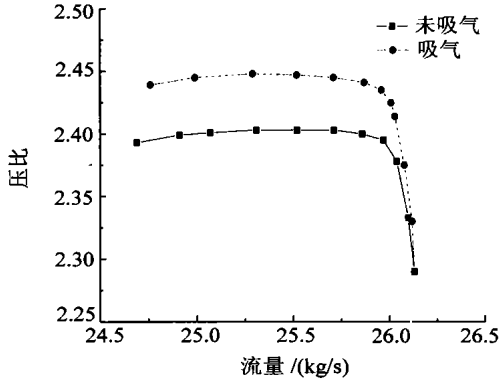


图 6 压比特性曲线
Fig 6 Pressure ratio characteristic curve

(1) ATS-2 原型除靠近叶尖的很小部分外其它位置分离很小, 提高性能的余地并不太大, 吸气也只适于对叶尖部分进行。而 M Π 的实验从 40% 叶高开始吸气, 因此其效果也较好。

(2) 虽然叶尖部分的流动状况有了很大改善, 但整个风扇其它部分对效率和压比的贡献是主要的, 因此对叶尖性能的提高无法充分的反映到整个风扇中。

尽管如此, 对于给定的吸气量和开缝面积来说, 它已经产生了较大的正效果。另外, 当流量本身比较大时, 吸气的作用并不明显, 几乎与不吸气的情形完全相同。也就是说, 抽吸气的作用可能主要体现在最大效率对应的流量以下各个工况。

2.3 出口截面周向平均的性能比较

效率沿叶高的径向分布图如图 7 所示, 对于每个计算的径向网格截面, 分别计算出周向平均

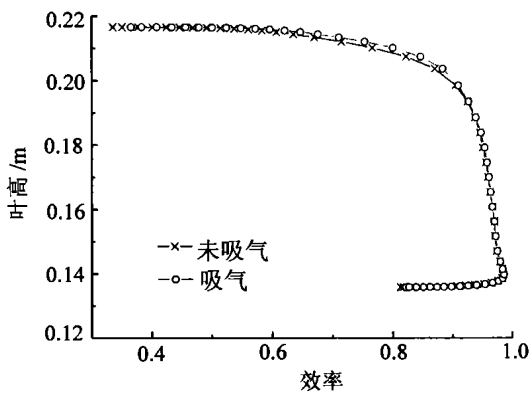


图 7 效率沿叶高的周向平均分布图
Fig 7 Azimuthal averaged efficiency

(按流量平均) 的效率, 以便能观察出吸气对径向

各截面的具体影响。同样的方法应用于图 8, 以观察吸气前后各截面的压比情况。

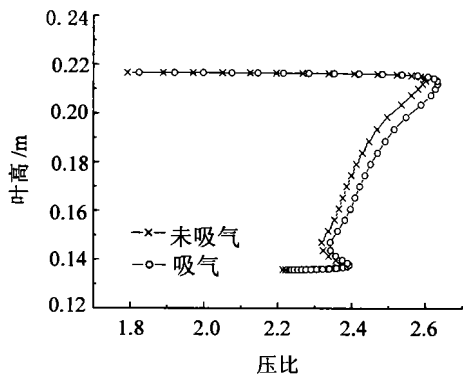


图 8 压比沿叶高的周向平均分布图

Fig 8 A azimuthal averaged pressure ratio

考虑到开缝的位置在 86% 叶高以上, 可以看到, 在该叶高以上各截面的效率比吸气前有了较大的提高, 且增幅一般在 4% 以上。对于压比, 则吸气后几乎对整个叶高都产生了正效果, 最大增幅超过了 2%。

值得注意的是, 尽管吸气后的效率在沿叶高各处也呈增加趋势, 但在吸气叶高位置以下, 其作用很微弱。这也是整个转子效率没有大幅提高的原因。

最后, 从周向平均的熵来看, 沿叶高, 吸气后的熵更为下降, 尤其在叶尖吸气位置, 大约下降了 20% 左右。这也体现了吸气的正效果。

2.4 开缝流向位置不同对正效果的影响

除了选择在叶片前缘后约 0.6 倍弦长处开缝外, 还对该位置之前(约 0.55 倍弦长)以及该位置之后(约 0.7 倍弦长)分别进行了计算。结果表明, 在 0.7 倍弦长处开缝的正效果不明显, 因此可以认为, 在大分离区之后的位置开缝吸气意义并不大。图 9 和图 10 给出了在约 0.55 倍和 0.6 倍弦长处开缝的若干工况对比图, 当流量降低到一定程度以下时, 在 0.55 倍弦长处吸气的效果较好。

当风扇工况接近失速工况时, 叶背分离区的位置向前缘移动了, 因此, 如果吸气的位置相应也前移, 则吸气的效果将会增加。

2.5 增加开缝面积以及吸气量对正效果的影响

针对缝的长度过小的情况, 选择了增加径向缝长度的做法, 将开缝的径向位置从 85% 叶高以上改为约 50% 叶高以上; 并且相应增大了吸气量, 从 0.1 kg/s 增为 0.3 kg/s(约占进口流量的 1.2%)。这时的正效果要更加明显。虽然效率的

增加仍然与未增加缝面积时相同, 但压比却有了更加明显的提高, 最大增幅达 4%。

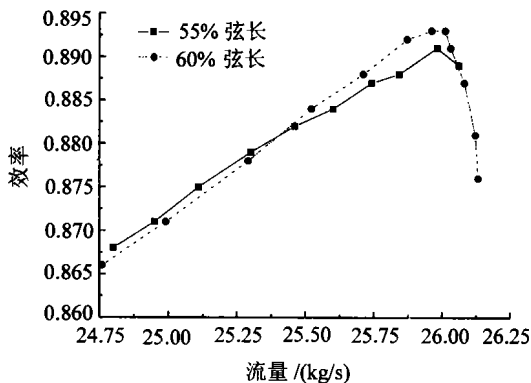


图 9 效率对比图

Fig 9 Efficiency comparison

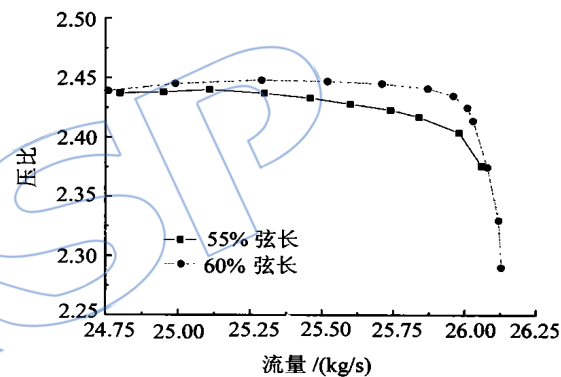


图 10 压对比图

Fig 10 Pressure ratio comparison

另一种方法是不改变开缝面积和位置, 只加大吸气量。然而计算表明, 这时的效果与吸气量为 0.1 kg/s 相比并未有增加, 而当吸气量超过一定数值时, 效果反而减弱。例如, 在吸气量达到 0.5 kg/s(约占进口流量的 2%) 时, 反而出现了负效果。

3 结 论

(1) 在 ATS-2 跨音速风扇级的基础上, 在转子叶片吸力面开缝, 从气流通道中抽出一部分气体, 能够改善分离区的流动, 从而对效率和压比产生了积极的正效果。

(2) 正效果的产生, 可能的原因, 一是因为吸气改善了激波与附面层干扰引起的流场混乱, 减小了激波损失; 另一方面, 通过从分离区中抽出部分低速(低能)气体, 减小了分离区, 使得气流通道内流动更为有序。

(3) 抽吸气的流向位置对性能影响至关重要。计算表明, 在分离区即将扩大的位置进行吸气, 其效果是最理想的。如果在其它位置吸气, 则不明显。要取得最好的吸气位置, 应根据分离区的位置来确定吸气位置。另一方面, 可以预测, 在叶片吸力面进行适当的抽吸气, 将有利于减小分离区, 改善流动条件, 提高压比和效率。并且可以推断, 分离区越大, 吸气的正效果越明显。这就为设计更高压比的风扇和压气机提供了一条值得尝试的途径。通过更为深入的定量研究, 并将抽吸气原理应用于叶轮机械的设计体系中, 将为新一代的高性能风扇/压气机的设计提供有效的思路。

参考文献:

[1] 邢秀清 跨音风扇掠弯气动数值最优化[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999

[2] Kerrebrock J L, Reijnen D P, Zim insky W S, et al A spirated Compressors[R]. A S M E 97- GT- 525, 1997.

[3] M erchant A, Drela M , Kerrebrock J L. Aerodynam ic Design and A nalysis of a High Pressure Ratio A spirated Compressor Stage[R]. A S M E 2000- GT- 619, 2000

[4] Kerrebrock J L, Drela M , M erchant A , Schuler B J. A Fan ily of Designs for A spirated Compressors[R]. A S M E 98- GT- 196, 1998