

叶片开槽对大涵道比风扇的流动控制研究

刘恩波,周正贵

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:提出利用空心结构在涡扇发动机大涵道比风扇内部从前缘到吸力面开槽,利用来流速度冲量在吸力面形成微喷气控制吸力面附面层的流动控制方法。研究不同槽道进、出口宽度和出口位置对二维叶栅的影响,选取最优方案进行三维叶片开槽。结果表明:叶片开槽可有效抑制吸力面附面层发展,减少附面层和尾迹损失,使效率增加了 0.46%,失速裕度增加了 1.8%,总压比增加了 1.3%;微喷气流量适中并作用在吸力面附面层发展的起始位置时对附面层的抑制效果最好。

关键词:涡扇发动机;大涵道比风扇;开槽叶片;流动控制;附面层分离;数值模拟

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)03-0168-04

Analysis on Flow Control of High Bypass Ratio Fan by Blade Slot

LIU Enbo, ZHOU Zhenggui

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A flow control method is proposed to control the layer on the suction surface by using the micro-jet formed on the suction surface with the inflow velocity impulse and the hollow structure slotted from the leading edge to the suction surface inside the fan blade of a high bypass ratio turbofan engine. The influence of different inlet and outlet widths and outlet positions of slot channels on the two-dimensional slotted cascades was studied, and the three-dimensional blade was slotted with the optimal scheme. The results show that the blade slot can effectively restrain the development of the layer on suction surface after the shock wave, reduce the losses of boundary layer and wake, and increase the efficiency by 0.46% and stall margin by 1.8%, and the total pressure ratio grows by 1.3%. When the jet flow is moderate and acts on the initial position of the development of the layer on suction surface, the inhibition effect on the layer is the best.

Keywords: turbofan engine; high bypass ratio fan; slotted blade; flow control; boundary layer separation; numerical simulation

0 引言

大涵道比风扇是涡扇发动机的重要部件^[1-2]。由于风扇直径大,叶尖线速度高,气流在叶片通道内的逆压力梯度流动引发的吸力面分离是造成风扇流动损失的主要原因之一。采取流动控制方法抑制吸力面附面层分离,可提高风扇的工作效率和裕度,改善风扇的气动性能^[3-4]。

STURM W 等^[5]认为吸力面开槽喷气速度提高、喷气方向与主流方向尽可能平行时,可有效控制附面层,减少流动损失。张相毅等^[6]提出了从叶片压力面到吸力面开孔射流延缓吸力面尾缘气流分离的思想,并采用三维流场数值计算方法,验证了吸力面开孔射流对尾缘气流分离的抑制效果。周敏等^[7-9]提出了叶片两段式开槽方案,对开槽位置和槽道结构进行了讨论。吴培根等^[10]设计了一种收敛转折型槽道结构,这种局部流动控制方法可以有效加速吸力面附面层流动,抑制附面层分离。沈爾明等^[11]研究发现,为了减轻风扇质量,先进大涵道比风扇通常采用空心结构,因此便于在叶片内部开槽。

本文以某大涵道比风扇转子叶片为原型,提出了一种开槽叶片流动控制方法,即槽道进口位于叶片前缘,槽道

出口位于吸力面,利用速度冲量形成微喷气控制吸力面附面层。采用流场数值计算方法,探索这种开槽方法对风扇气动性能的改进。

1 叶片开槽方法

风扇三维叶片由若干个叶型沿叶高按一定积叠线构成。图 1(a)为 90%叶高叶型上开槽示意图,槽进口位于叶型前缘(图 1(b)为前缘局部放大);槽出口位于吸力面(图 1(c)为槽出口局部放大)。

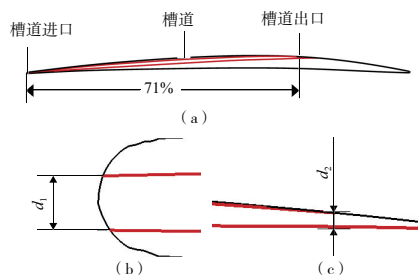


图 1 开槽结构示意图

基金项目:国家科技重大专项(2017-II-0001-0013)

第一作者简介:刘恩波(1997—),男,湖南双峰人,硕士研究生,研究方向为风扇/压气机流动控制。

这种开槽结构可利用来流速度冲量在叶片吸力面产生高动量微喷气,作用在吸力面附面层有效抑制附面层发展。开槽的主要参数有槽道进出口宽度 d_1 和 d_2 ,槽出口在吸力面位置。由于该风扇在 70% 叶高以上效率较低,因此在 70% 叶高以上的所有叶型开槽、连成一个开槽空腔(图 2)。

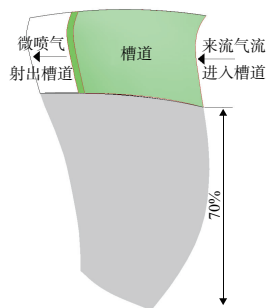


图2 叶片开槽三维视图

2 流场数值计算

本文采用商业软件 NUMECA 模拟该大涵道比原型风扇转子、开槽叶片风扇转子以及二维叶型流场。控制方程为雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程,空间离散采用二阶迎风差分格式,湍流模型选 Spalart-Allmaras 模型,并通过多重网格技术加快计算和收敛速度。

网格采用 NUMECA 软件的 Autogrid5 模块自动生成, S1 流面网格如图 3 所示,在叶片附近采用 O4H 拓扑结构,可以保证叶片附近网格的正交性良好。

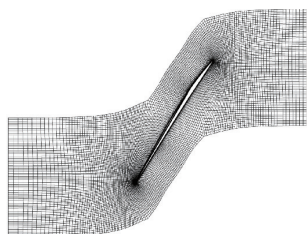


图3 S1 流面计算网格

图 4 为前缘网格局部放大图;图 5 为槽道出口处网格局部放大图。S1 流面网格单元数为 2.6 万,其中槽道内网格单元数为 217×9 。对于风扇三维流场计算,沿径向 73 层网格单元,因此不开槽风扇总网格数为 189 万,开槽风扇的网格单元总数为 210 万。边界条件设置方面,叶片主通道进口边界给定总压、总温以及绝对气流角;出口边界给定指定半径处的静压。

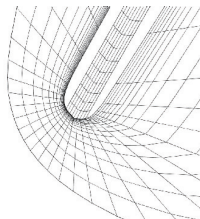


图4 槽道进口网格

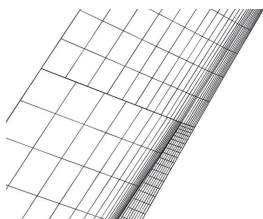


图5 槽道出口网格

3 二维叶型开槽关键参数影响分析

槽道进、出口宽度决定槽道微喷气流量,槽道出口位置即为微喷气与吸力面附面层作用位置,因此这 3 个参数是槽道关键参数。本文针对 90% 叶高二维叶型,分析槽道进、出口宽度和出口位置对回转面二维叶栅流动的影响。各开槽方案设计见表 1,其中出口位置作相对弦长无量纲化。与不开槽叶型相比,6 种开槽方案的总压比基本不变,方案 3 的叶栅效率最高。

表1 开槽方案流场参数

项目	d_1/mm	d_2/mm	出口位置/%	槽内流量占比/%	效率/%	总压比
原型叶栅	—	—	—	—	90.21	1.63
方案 1	0.39	0.62	71	0.213	90.55	1.63
方案 2	0.48	0.62	71	0.243	90.64	1.63
方案 3	0.48	0.87	71	0.284	90.66	1.63
方案 4	0.48	1.01	71	0.294	90.44	1.63
方案 5	0.48	0.87	61	0.216	89.45	1.63
方案 6	0.48	0.87	81	0.292	90.60	1.63

对比槽道进、出口宽度不同的开槽方案 1 到方案 4 可知,槽道进、出口宽度增加可以增加槽内流量,即增加微喷气流量。但叶栅效率并非与槽内流量呈正相关,如图 6 所示,随着槽内流量的增加,尾迹损失逐渐下降,但通道损失呈先减后增的趋势。这是因为微喷气在为附面层注入动量的同时也会带来它与主流的掺混损失,所以槽内流量越大,尾迹损失因附面层低速气体动能的增加而越小;当槽内流量超过临界值时,叶栅通道内的损失就会开始增加,从而导致总损失上升。

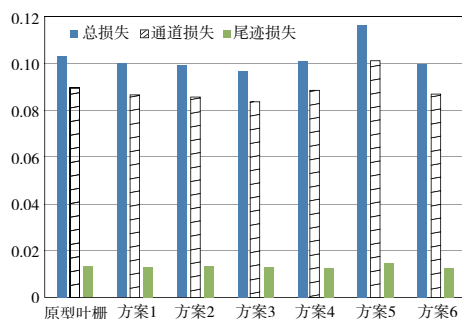


图6 叶栅损失组成

对比槽道出口位置不同的开槽方案 3、方案 5 和方案 6 可知,槽内流量随着出口位置向尾缘的靠近而增加,因此方案 5 的尾迹损失最大,方案 6 的尾迹损失最小、通道损失高于方案 3。此外,由于出口位置的不同,微喷气对吸力面附面层作用位置的差异也是这 3 种开槽方案效果不同的原因之一。图 7 表明,原型叶栅的激波结构和强度与方案 3 和方案 6 基本一致,而方案 5 流场中的激波为脱体激波。这是由于槽道出口的微喷气改变了叶栅通道的

流场结构,使气动喉道的位置随槽道出口的位置移动。方案3的激波位置与原型叶栅基本一致(71%相对弦长),方案6的激波位置更靠近尾缘。而方案5的槽道出口位于原型叶栅激波位置之前,所以开槽后通道内的激波向上游移动,逐渐退出通道。

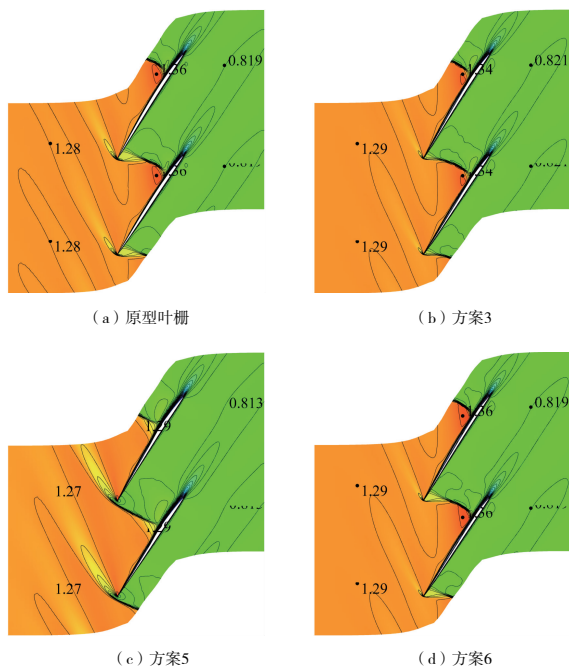


图7 二维叶型相对马赫数等值线云图

由图8可知,与方案3相比,方案5的微喷气使得吸力面附面层发展提前,导致通道损失大幅增加;方案6的微喷气作用在吸力面附面层低速区内,因此对吸力面低能气流的吹除作用有限;而方案3的微喷气作用在附面层发展的起始位置,有效地延缓了附面层的发展,降低了附面层厚度,因而通道损失最低。

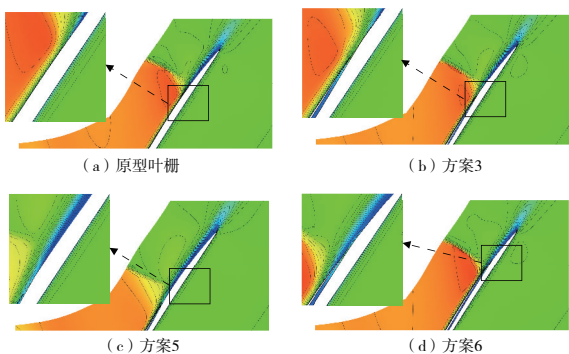


图8 二维叶型槽道出口相对马赫数等值线云图

4 三维开槽叶片流场分析

由于对90%叶高二维叶型开槽方案3效率提高最大,因此对应用此方案确定的进出口槽道宽度和出口位置进行三维叶片开槽,分析开槽对风扇性能影响。表2展示了开槽风扇与原型风扇在设计总压比下的性能对比,该表表

明,开槽后风扇的等熵效率增加了0.46%,失速裕度增加了1.8%,总压比增加了1.3%,总流量提升了0.22%;槽道内流量很小,即微喷气流量仅占总流量的0.07%。

表2 峰值效率点性能对比

项目	等熵效率/%	失速裕度/%	总压比	流量/(kg/s)	槽内流量占比/%
原型风扇	94.37	19.3	1.58	218.2	—
开槽风扇	94.83	21.1	1.60	218.7	0.07

图9和图10为原型风扇和开槽风扇特性线,可以看出开槽后风扇的工作流量范围也有所增加;而在整个工作流量范围内,效率和压比都有所提升。图11和图12分别为原型风扇和开槽风扇在峰值效率点的等熵效率和总压比径向分布。这两图表明在70%叶高以上开槽可提高风扇在对应叶高位置的效率和压比,而开槽后叶片整体气动性能得到改善,未开槽叶高位置的效率和压比也有所提高。

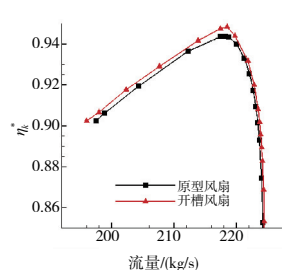


图9 效率-流量特性线

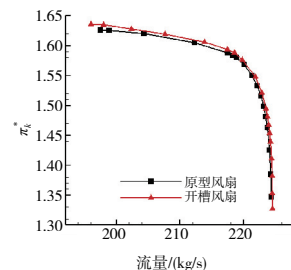


图10 总压比-流量特性线

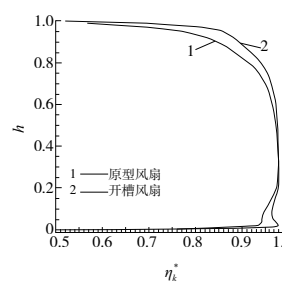


图11 等熵效率径向分布

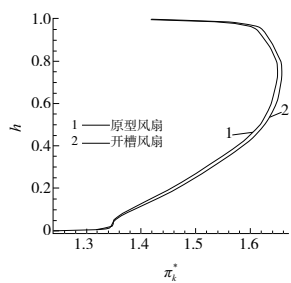


图12 总压比径向分布

图13为原型风扇和开槽风扇在90%叶高位置的相对马赫数等值线云图。由图可知,开槽与不开槽叶片通道内流场结构大致相同,比如:进口马赫数、激波形状、位置与强度基本相同。从前缘局部放大图(图14)可看出,与原型风扇相比,开槽风扇前缘局部脱体激波强度不变;但更靠近叶片前缘,因此激波尺寸更小,造成的损失更小。经过槽道的抽吸作用,前缘气流得到了加速而且滞留程度减小。尾缘局部放大图(图15)表明,原型叶片吸力面激波后附面层增厚较快,并且尾迹尺寸较大;开槽叶片由于在激波后附面层内注入高速气体,吸力面附面层发展得到有效抑制并且尾迹尺寸也相应减小,附面层损失和尾迹损失降低。

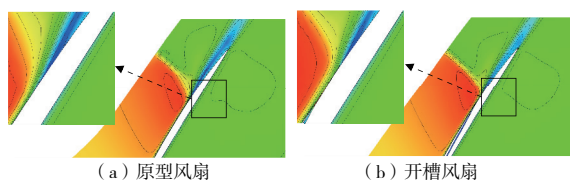
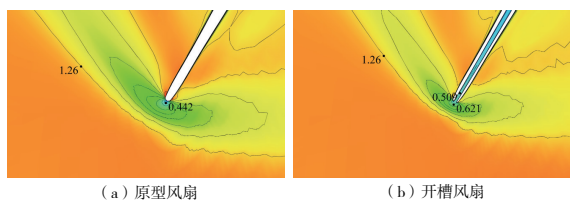
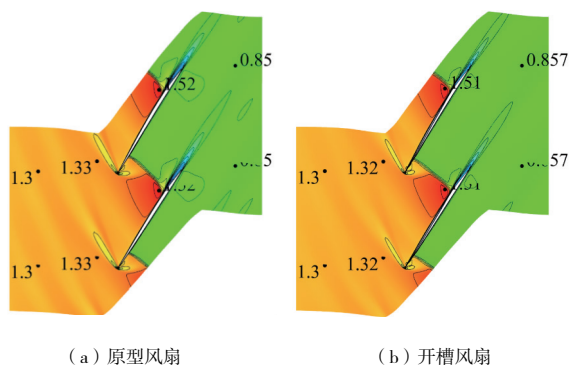
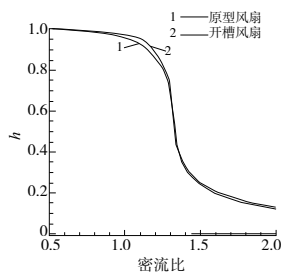
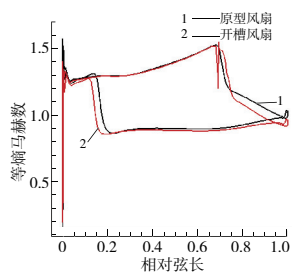


图 16 为 90% 叶高原型风扇和开槽风扇的叶片表面等熵马赫数分布。从图中可看出, 叶片开槽使激波在压力面的位置向上游移动, 而激波在吸力面的位置基本不变。同时开槽后叶片尾部载荷减小, 附面层发展更为迟缓, 因此吸力面附面层厚度和尾迹尺寸更小。图 17 为原型叶片和开槽叶片的密流比沿径向分布图。从图中可以看出, 开槽后叶尖密流比上升, 说明开槽增加了叶尖气流的流通能力, 进而提高了总流量。



5 结语

本文提出了一种从叶片前缘向吸力面开槽的流动控制方法,针对原型风扇 70%叶高以上效率较低,设计了在 70%~100%叶高位置的叶片开槽方案,通过流场数值模拟和分析,结果表明:

1) 开槽叶片利用速度冲量抽吸前缘气流,在槽道出口排出形成高动量微喷气,可有效抑制激波后吸力面附面层发展,提高风扇效率和失速裕度;

2) 开槽后风扇的等熵效率增加了 0.46%, 失速裕度增加了 1.8%, 总压比增加了 1.3%, 总流量提升了 0.22%; 槽道内流量很小, 即微喷气流量仅占总流量的 0.07%;

3) 槽道出口微喷气作用在吸力面附面层发展的起始位置时效果最好;喷气流量增加可减少尾迹损失,但同时会带来与主流的掺混损失,流量超过临界值时会增加通道损失,进而增加总损失;此外槽道宽度还受叶片厚度的限制。

参考文献:

- [1] 陈云永,杨小贺,卫卫飞.大涵道比风扇设计技术发展态势[J].航空学报,2017,38(9):27-34.
- [2] 陈云永,万科,杨小贺,等.大涵道比风扇/增压级叶尖间隙影响研究[J].航空学报,2017,38(9):190-197.
- [3] 张亚飞.轴流风扇叶片气动特性及其流动控制机理数值模拟[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [4] 胡小文,张龙新,胡斯特,等.叶顶小翼对不同加载叶顶型线轴流风扇的流动控制研究[J].中国电机工程学报,2020,40(24):8090-8097,8246.
- [5] STURM W, SCHEUGENPFLUG H, FOTTNER L. Performance improvements of compressor cascades by controlling the profile and sidewall boundary layers[C]//Proceedings of ASME 1991 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA; 2015.
- [6] 张相毅,周敏,王如根,等.叶片压力面到吸力面射流对其气动特性的影响[J].空气动力学报,2006,24(2):152-156.
- [7] 周敏,王如根,曹朝辉,等.开槽处理技术对叶片尾缘气流流动特性的影响[J].航空动力学报,2007,22(7):1100-1105.
- [8] 周敏,王如根,曹朝辉,等.开槽位置和槽道结构对叶栅性能的影响[J].空气动力学报,2008,26(3):400-404.
- [9] ZHOU M, ZHU J Q, LU X G, et al. Study of flow control using a slotted blade for a compressor airfoil at low Reynolds numbers[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, Glasgow, UK; 2010:279-287.
- [10] 吴培根,王如根,罗凯,等.开槽叶片对大转角扩压叶栅性能的影响[J].航空动力学报,2013,28(11):2503-2509.
- [11] 沈爾明,王剛,王宇,等.鸟撞对商用发动机风扇叶片选材影响[J].航空动力,2021(5):68-71.

收稿日期:2022-01-04