

扩压叶栅中端壁附面层抽吸对流场品质调控的研究

李 聪,江达林,韩吉昂,徐文峰

(大连海事大学 船舶与海洋工程学院,辽宁 大连 116026)

摘 要:为调控平面扩压叶栅流场品质、使测量结果满足二维性,在叶栅端壁增加附面层抽吸装置。采用试验校核的数值方法,分析了不同抽吸位置、不同抽吸流量、不同冲角时端壁附面层抽吸对平面扩压叶栅出口气流角、轴向密流比和总压损失系数等参数的影响。结果表明:在抽吸位置上,位于叶片中前部的抽吸方案对扩压叶栅流场品质的改善效果相对最好。随抽吸流量增加,流场品质进一步改善,抽吸流量为原型进口流量的3%可使冲角为 0° 时的轴向密流比降低至0.995,主流区出口气流角偏差小于 0.1° ;抽吸流量为原型进口流量的2.25%可使计算冲角范围内轴向密流比均降低至1.05以下,主流区出口气流角偏差小于 0.2° 。冲角在 -5° 、 -3° 和 0° 时端壁抽吸使50%相对叶高位置处平均总压损失降低,冲角在 2° 、 4° 时使50%相对叶高位置处平均总压损失增加,损失冲角特性更接近理想二维叶栅。

关 键 词:扩压叶栅;端壁附面层抽吸;流场品质;数值模拟

中图分类号:V231.1

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.12.003

[引用本文格式]李 聪,江达林,韩吉昂,等.扩压叶栅中端壁附面层抽吸对流场品质调控的研究[J].热能动力工程,2021,36(12):14-23. LI Cong,JIANG Da-lin,HAN Ji-ang,et al. Study on flow field quality control of end wall boundary layer suction in compressor cascade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(12):14-23.

Study on Flow Field Quality Control of End Wall Boundary Layer Suction in Compressor Cascade

LI Cong,JIANG Da-lin,HAN Ji-ang,XU Wen-feng

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering,Dalian Maritime University,Dalian,China,Post Code:116026)

Abstract: In order to control the flow field quality of planar compressor cascade and make measurement results meet two-dimensional characteristics,the boundary layer suction device was added on the cascade end wall. The influence of the end wall boundary layer suction on the outlet flow angle,axial velocity density ratio and total pressure loss coefficient of the planar compressor cascade at different suction positions,different suction flow rates and different incidence angles was analyzed by using the numerical method of experimental verification. The results show that at the suction position,the suction scheme located in the middle and front of the blade has the relatively best effect on the improvement of flow field quality of compressor cascade. With the increase of suction flow rate,the flow field quality is further improved. The suction flow rate is 3% of prototype inlet flow,which can make the axial velocity density ratio decrease to 0.995 and the deviation of the outlet flow angle at mainstream area be less than 0.1° when the incidence angle is 0° . The suction flow rate is 2.25% of prototype inlet flow,which can make the axial velocity density ratio decrease to less than 1.05 in the range of calculated incidence angle and the deviation of outlet flow angle at mainstream area be less than 0.2° . When the incidence angle is -5° 、 -3° and 0° ,the average total pressure loss at 50% of relative blade height is reduced by the end wall suction. When the in-

收稿日期:2021-03-11; 修订日期:2021-08-23

基金项目:国家自然科学基金(51406022;51436002)

Fund-supported Project:National Natural Science Foundation of China(51406022;51436002)

作者简介:李 聪(1997-),男,河北秦皇岛人,大连海事大学硕士研究生。

cidence angle is 2° and 4° , the average total pressure loss at 50% of relative blade height is increased by the end wall suction, and the loss incidence angle characteristics are closer to the ideal two-dimensional cascade.

Key words: compressor cascade, end wall boundary layer suction, flow field quality, numerical simulation

引 言

为满足现代航空动力装置的性能要求,压气机设计向高效率、高压比、高负荷的方向不断发展。在设计过程中需要清晰地认识压气机的工作过程及工作原理,由于真实流动的复杂性,通常对其进行简化及分解。以级的流动作为多级轴流压气机的基本单元,用不同半径的圆柱面去切割级得到环形叶栅,以环形叶栅上的流动情况代表级的流动情况,为了研究方便将环形叶栅展开得到平面叶栅,用二维的流动来研究三维的情况。平面叶栅风洞试验就是用来检测叶型在指定来流条件下的二维气动性能,是压气机设计与优化过程的重要一环^[1-5]。理想的平面叶栅由无限长、无限多的叶片组成,为了更好验证叶型的气动性能,首先要保证平面叶栅中间叶高处气体流动的二维性,通常是用轴向密流比(AVDR)来作为二维流动的判别标准;其次叶栅流动通道之间的固有周期特性也是保证叶栅试验数据有效性和可靠性的重要技术要求。而在实际的平面叶栅试验中,端壁附面层受到流向逆压梯度和横向压差的影响于端壁吸力面角区堆积,使叶栅后有效通流面积减少,流道的收缩导致叶栅内流动偏离二维性,相对于理想平面叶栅存在轴向密流比偏大,出口气流角与总压损失系数产生偏差的问题,试验结果的稳定性和可靠性降低,需要采取措施对流场品质进行调节与控制^[6]。

蔡明等人^[7-8]对平面叶栅流场品质问题进行了研究,认为叶栅试验测量结果的可靠性由带叶栅试验件的流场品质最终决定。通过在可移动上侧壁抽吸来改善流场品质,使 3 个流道满足周期性要求。杨泳等人^[9]提出改变近端壁通道宽度来改善平面叶栅周期性的方法,通过调节上下尾板的形状、角度来改善试验条件下的周期性分布。陈志敏等人^[10]认为侧壁附面层会影响风洞试验二维性,采用理论研究的方法分析了合理的抽吸方案对改善流场品质

的可行性。王东等人^[11]通过增加叶片数来改善流场周期性,并与标准叶栅进行对比,得出轴向密流比会对叶片性能参数产生较大影响的结论。韩露等人^[12]认为叶型流场计算时,不考虑轴向密流比会造成计算结果与试验结果的明显差异。刘前智等人^[13]通过在试验段叶栅通道内侧壁加装斜垫块的方法来控制轴向密流比,认为在高负荷压气机设计的时候必须考虑轴向密流比的影响。邓熙等人^[14]进行平面叶栅试验时,通过栅状抽吸槽控制轴向密流比并发展了一套叶栅非设计点损失预估模型。

相关的研究大多仅提及用抽吸的方法对流场品质进行调整或在模拟抽吸过程中采用抽吸槽来代替真实的抽吸结构。而实际的试验过程中不同抽吸位置、不同抽吸流量、不同冲角时流场品质控制效果不同,因此选择一种流场品质控制效果好、抽吸代价低的方案是试验设计时必须面对的问题。本文通过试验校核的数值模拟方法,以轴向密流比、出口气流角和总压损失系数为流场品质评价标准,建立带抽吸腔的抽吸模型,探究不同抽吸位置、不同抽吸流量、不同冲角时端壁抽吸对流场品质的影响,为后续的平面叶栅试验设计提供指导。

1 方案设计与数值方法

1.1 叶栅参数

叶栅几何参数如表 1 所示,结构如图 1 所示。

表 1 叶栅几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of cascade

参 数	数 值
弦长 b/mm	40
稠度 τ	1.73
展弦比	2.5
安装角/ $(^{\circ})$	23.8
几何进气角 $\beta_{\text{in}}/(^{\circ})$	42.98
几何出气角 $\beta_{\text{out}}/(^{\circ})$	9.99
来流马赫数 Ma_1	0.6

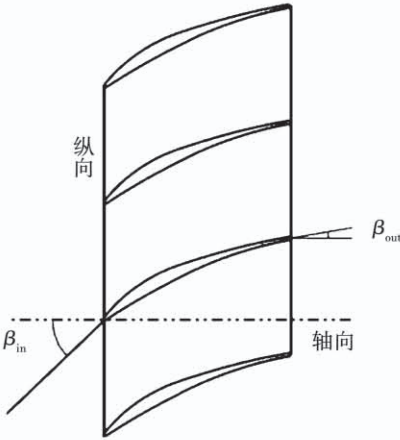


图 1 叶栅结构图
Fig. 1 Structural diagram of cascade

1.2 数值方法与抽吸方案

图 2 为计算域。其中进口为压力进口, 给定进口总压、总温与速度方向。出口为压力出口, 给定平均静压。壁面均为光滑、绝热、无滑移壁面。流道两侧给定周期性边界条件。设置抽吸出口为压力出口, 通过调节抽吸出口压力值来得到需要的抽吸流量。采用 ANSYS CFX 求解雷诺平均 N-S 方程, 采用 SST 湍流模型^[15]。

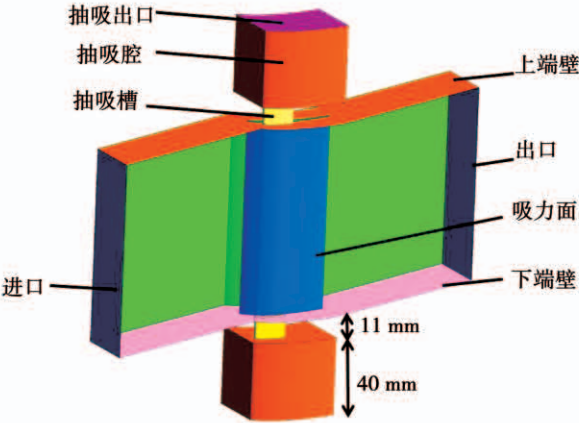


图 2 计算域
Fig. 2 Calculation domain

为了使数值模拟结果更贴近试验条件, 在进行数值模拟时考虑进口附面层的影响, 图 3 给出了实验室的平面叶栅风洞进口相对总压沿叶高的分布。

轴向密流比定义为:

$$AVDR = \int_0^S (\rho_2 \omega_{x,2})_{MS} dy / \int_0^S (\rho_1 \omega_{x,1})_{MS} dy$$

式中: MS—50% 相对叶高处即叶展中部; ω_x —轴向速度分量; y —节距方向; ρ —密度。

对平面叶栅实验流场品质一般要求为: 轴向密流比 (AVDR) 控制在 0.95 ~ 1.05 之间, 流动满足良好的二维性。控制实验中密流比较有效的方法是进行附面层抽吸, 其中重要的是抽吸位置和抽吸流量的选择。为了改善扩压叶栅流场品质, 对叶栅轴向密流比进行控制, 使出口气流角与总压损失系数与理想二维叶栅相吻合。在端壁近吸力面侧开设流向抽吸槽, 共设计了 5 种方案。抽吸槽位置在节距方向距吸力面 1 mm 处, 抽吸槽宽 2 mm。沿流向依次命名为 EWA、EWB、EWC 方案, 如图 4 所示。将 EWA 和 EWB 抽吸槽合并得到 EWAB 方案, 同理得到 EWABC 方案。

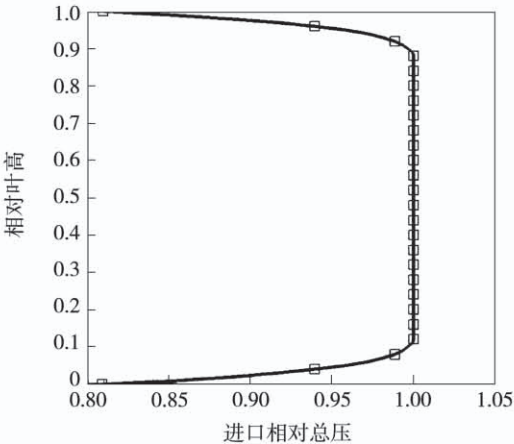


图 3 进口相对总压沿叶高分布
Fig. 3 Distribution of inlet relative total pressure along blade height

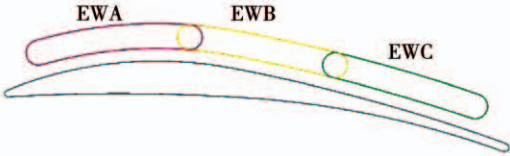


图 4 端壁抽吸方案示意图
Fig. 4 Schematic diagram of end wall suction schemes

1.3 网格无关性验证

叶栅通道网格用 NUMECA AUTOGRID5 生成, 抽吸部分网格使用 ICEM CFD 生成, 均为结构化网格。网格之间的连接使用非匹配连接方法。为满足湍流模型对壁面 y^+ 值小于 1 的要求, 对叶表与端壁区域网格进行加密, 第一层网格高度设定为 3×10^{-3} mm。为满足求解器对网格长宽比的要求, 计算时采用双精度求解器进行计算。网格与 y^+ 分布如图 5 所示。

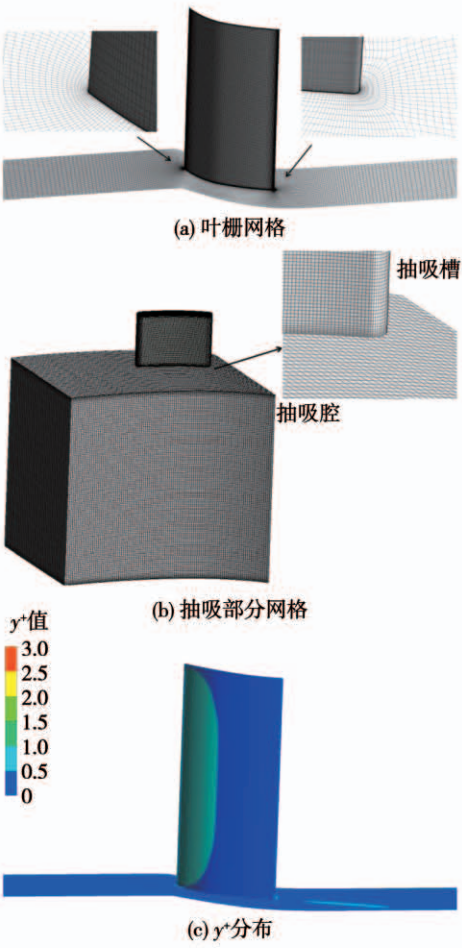


图 5 网格与 y^+ 分布

Fig.5 Grids and y^+ distribution

为了排除网格数量对计算结果的影响,针对计算模型开展了网格无关性验证。图 6 分别给出了总压损失系数随网格数量的变化曲线。可以看到,当网格总数超过 120 万后总压损失系数的相对改变量已经小于 0.5%,计算结果满足网格无关性要求。

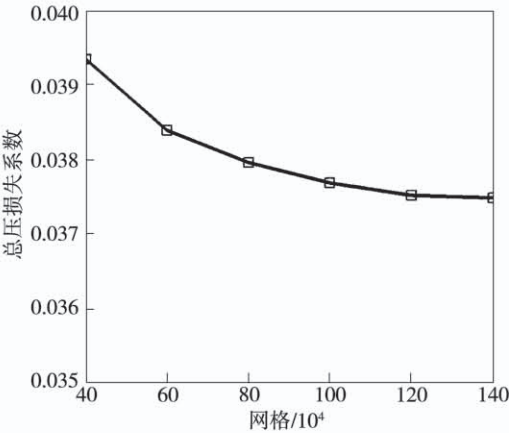


图 6 网格无关性验证

Fig.6 Grid independence verification

为了进一步确认数值计算结果的有效性,给出了 $Ma_1=0.6$,冲角为 0° 的情况下,在 50% 叶高位置处总压损失沿节距分布的数值仿真结果与试验结果对比,如图 7 所示。可以看到,仿真结果在尾迹损失宽度、位置与分布上与试验结果基本相符合。综合来看,数值计算的结果可信度与准确度较高,满足要求的计算精度。

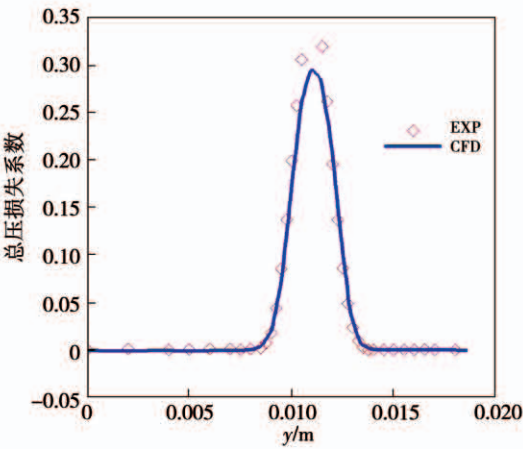


图 7 数值结果与试验对比

Fig.7 Comparison of numerical and experimental results

2 结果与分析

2.1 不同端壁抽吸位置对流场品质的影响

研究了来流冲角 $i=0^\circ$,抽吸流量为 0.75% 进口流量的情况下,5 种端壁抽吸方案对流场品质的影响。

图 8 给出了原型与不同端壁抽吸方案对应的轴向密流比(AVDR)和相对抽吸负压。相对抽吸负压(p/p_{in})为抽吸出口平均负压与叶栅进口总压之比,相对抽吸负压越小则意味着对设备抽吸能力的要求越低。

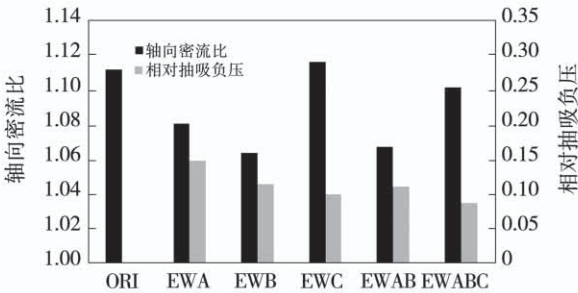


图 8 不同端壁抽吸方案轴向密流比与相对抽吸负压

Fig.8 Axial velocity density ratio and relative suction negative pressure under different end wall suction schemes

由图 8 可知,原型叶栅轴向密流比为 1.11,大于 1.05,此时叶栅流场偏离二维性,流场品质不好。在 3 种槽道长度相同的抽吸方案中,EWA 方案可以使轴向密流比降低 0.03,但是其所需要的相对抽吸负压是 3 种方案中最大的。EWB 方案控制轴向密流比的能力是 3 种方案中最强的,使轴向密流比降低 0.05,同时相对抽吸负压较小。EWC 方案所需的相对抽吸负压最小,但是其使轴向密流比增加,叶栅流场更偏离二维性。在 EWB 方案的基础上扩大抽吸槽得到的 EWAB 方案,相较于 EWB 控制轴向密流比效果仅减弱了 8%,需要的相对抽吸负压进一步降低。EWABC 方案需要的相对抽吸负压最小,但是轴向密流比控制效果有限。

可以看到,在计算的方案中,在叶片前部布置抽吸槽对轴向密流比控制效果较好。靠后布置抽吸槽或增加抽吸槽长度则可以降低需要的相对抽吸负压。

图 9 为不同端壁抽吸方案下出口气流角沿叶高分布。其中 2D 代表理想的平面叶栅,通过将原型叶栅上下端壁设置为周期性边界条件得到。从图 9 可以看到,原型叶栅在主流区的出口气流角相对于理想叶栅较小,在近端壁区的出口气流角则相对于理想叶栅较大。端壁抽吸使出口气流角分布向理想情况靠近,但在 0.75% 的流量下距理想平面叶栅仍有一定距离。

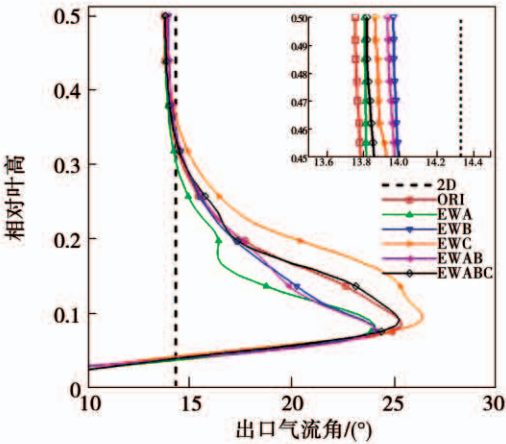


图 9 不同端壁抽吸方案出口气流角沿叶高分布
Fig.9 Distribution of outlet flow angle along blade height under different end wall suction schemes

出口气流角减少了 1°。EWABC 方案对近端壁位置处出口气流角的影响很小,气流角沿叶高分布形态基本不变。EWC 方案使近端壁区出口气流角增加了 1.2°,出口气流角分布进一步远离理想叶栅。5 种抽吸方案主流区出口气流角相对于原型均有少量增加,向理想平面叶栅靠近,其中 EWB 方案增加得最多,可以增加 0.2°,EWAB 与 EWC 方案次之,EWA 与 EWABC 方案最差。

图 10 给出了不同端壁抽吸方案下的 S3 流面总压损失系数分布。可以看到,原型叶栅端壁附面层在横向与流向逆压梯度的影响下向端壁角区位置迁移并堆积,高损失流体占据了出口截面的很大一部分面积,堵塞了叶栅内部的流动。主流区面积的减小使叶栅通道内的流动偏离二维性。EWA、EWB、EWAB 3 种方案削弱了高损失流体向端壁角区的迁移与堆积,减少堵塞区,流场品质得以改善。EWC 方案抽吸槽所处位置相对靠后,端壁附面层已完成堆积,此时端壁抽吸使叶片的堵塞区增加,流场品质变差。EWABC 方案削弱端壁附面层迁移与堆积的能力不佳,对流场品质影响较小。

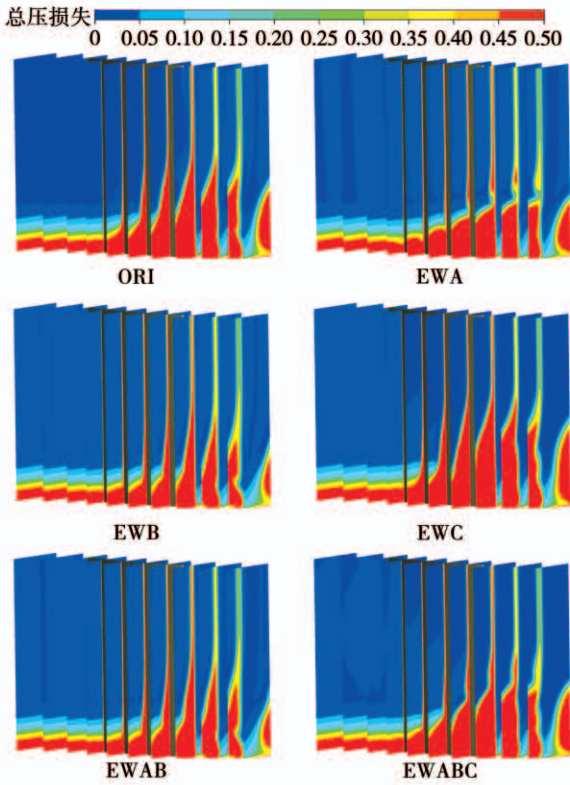


图 10 不同端壁抽吸方案 S3 流面总压损失云图
Fig.10 Total pressure loss contours of flow surface S3 under different end wall suction schemes

EWA、EWB 和 EWAB 方案使近端壁位置处的

综合考虑 5 种方案对轴向密流比、出口气流角和损失分布的影响,EWA、EWB、EWAB 3 种位于叶片中前部的抽吸方案对流场品质改善效果较好。但在 0.75% 的流量下,与理想的平面叶栅仍有一定差距。

2.2 不同端壁抽吸流量对流场品质的影响

对 EWA、EWB 和 EWAB 3 种抽吸方案改变抽吸流量,以获得不同抽吸流量对流场品质的影响。图 11 为 3 种方案在不同抽吸流量下的轴向密流比和相对抽吸负压。

轴向密流比效果最好。在 2.25% ~ 3% 的抽吸流量时 EWAB 方案控制轴向密流比效果最好。

由图 11(b) 可以看到,抽吸流量的增加导致所需要的相对抽吸负压随之增加。EWA 与 EWB 两种方案相对抽吸负压随流量变化剧烈上升。这两种方案对试验设备抽吸能力的要求更高,3% 的抽吸流量对应的相对抽吸负压已超过 0.8,在实际试验中难以满足要求。EWAB 方案所需要的相对抽吸负压随流量变化平缓,3% 的抽吸流量只需要 0.3 相对抽吸负压,满足现有试验设备的抽吸能力,并且留有继续增加抽吸流量的潜力。

图 12 为 3 种端壁抽吸方案在不同抽吸流量下出口气流角沿叶高分布。可以看到,随抽吸流量的增加,3 种方案近端壁区气流的折转能力与主流区出口气流角均增加,同时出口气流角沿叶高分布的梯度减少,出口气流角沿叶高分布更加均匀,向理想平面叶栅靠近,流场品质更好。EWA 方案随抽吸流量的增加,对增加主流区出口气流角的能力逐渐减弱。EWB 方案相比于 EWA 方案对出口气流角的影响更大,在 3% 的抽吸流量下近端壁区部分出口气流角变化可达 5°,主流区也可改变 0.5°,在主流区与理想平面叶栅出口气流角差距小于 0.1°。当抽吸流量大于 1.50% 时,出口气流角沿叶高分布形态发生变化,在 0.14 ~ 0.16 相对叶高处出现一个气流角相对不变区。增加抽吸流量,这个气流角相对不变区沿叶高向下移动。对于 EWB 方案,2.25% 的抽吸量之后继续增加抽吸量对出口气流角分布影响很小。

EWAB 方案在不同抽吸流量下,流量改变对出口气流角的影响比较均匀。当抽吸流量大于 1.50% 时,与 EWB 方案类似,出现一个气流角相对不变区。可以看到,EWAB 方案在抽吸流量为 3% 时,主流区出口气流角沿叶高呈近似直线分布,与理想平面叶栅出口气流角差距小于 0.1°,流场品质更好。综合考虑流场品质控制效果和相对抽吸负压,EWAB 方案为计算范围内的最优方案。

图 13 给出了 EWAB 方案在不同抽吸流量下拟 S3 流面总压损失云图。可以看到,随抽吸流量的增加,高损失区面积逐渐减少,主流区面积沿流向趋于均匀,叶栅内部流动二维性增加,流场品质得到改

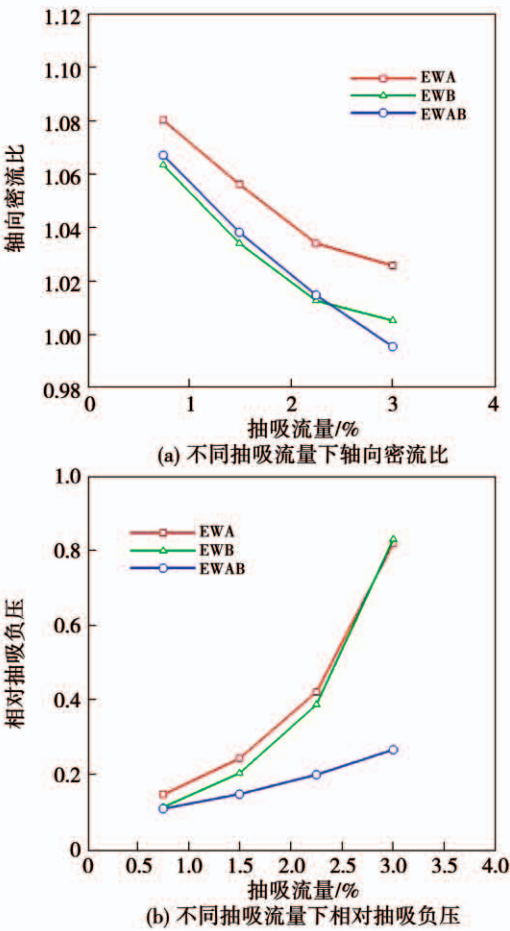


图 11 不同抽吸流量下轴向密流比与相对抽吸负压
Fig. 11 Axial velocity density ratio and relative suction negative pressure under different suction flow rates

由图 11(a) 可知,在计算流量范围内,3 种端壁抽吸方案轴向密流比均随抽吸流量的增加而降低,当抽吸流量超过 2.25% 之后,EWA 与 EWB 方案对轴向密流比的控制能力变弱。EWAB 方案在计算流量范围内轴向密流比的控制能力基本不变。在 0.75% ~ 2.25% 的抽吸流量范围内 EWB 方案控制

善。主流区与近端壁区交界部分有一小面积高损失区,对应出口气流角相对不变区。

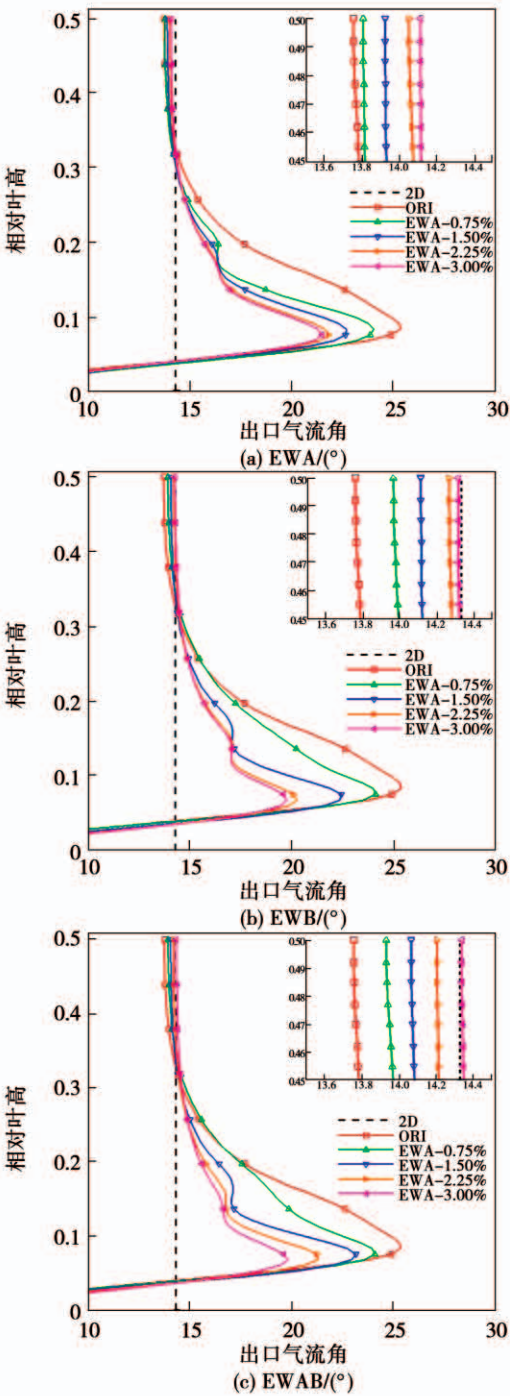


图 12 不同抽吸流量下出口气流角沿叶高分布
Fig. 12 Distribution of outlet flow angle along blade height under different suction flow rates

2.3 不同冲角下端壁抽吸对流场品质的影响

在来流冲角 $i = -5^\circ, -3^\circ, 0^\circ, 2^\circ$ 和 4° 的情况下对 EWAB 方案进行分析以得到不同冲角下端壁抽吸对流场品质的影响。

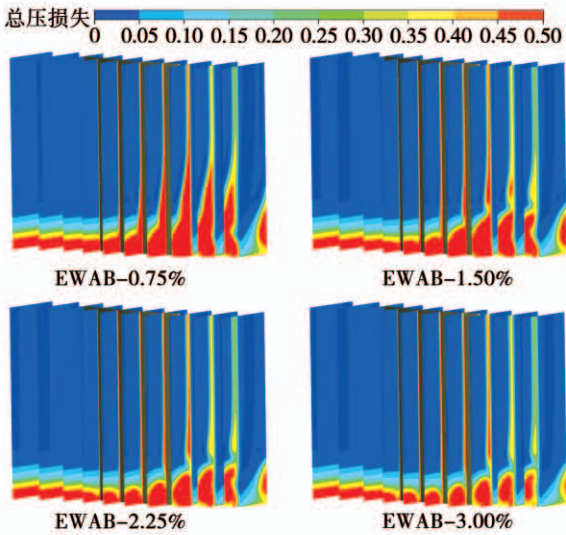


图 13 EWAB 方案在不同抽吸流量下 S3 流面总压损失云图

Fig. 13 Total pressure loss contours of flow surface S3 under different suction flow rates in EWAB scheme

图 14 为不同冲角下的轴向密流比与相对抽吸负压。可以看到,原型叶栅轴向密流比随冲角的增大而增大,在 $i = 4^\circ$ 时达到 1.16,在 $i = -5^\circ$ 时达到 1.06,均不满足轴向密流比要求。EWAB 方案在 2.25% 的抽吸流量可以将 $i = 4^\circ$ 时的轴向密流比降低至 1.05,在 $-5^\circ \sim 2^\circ$ 时降低至 1.02 以下。端壁抽吸使轴向密流比随冲角变化趋于平缓。EWAB 方案需要的相对抽吸负压随冲角变化趋于平缓,基本只与流量相关。

图 15 为不同冲角下的叶栅 50% 相对叶高处平均总压损失冲角特性。将其与理想平面叶栅进行对比,可以看到原型叶栅的冲角特性与理想情况存在较大偏差,流场品质较差。理想情况下最小总压损失冲角为 0° ,原型方案最小总压损失冲角为 2° 。原型叶栅最小总压损失冲角相对理想叶栅向正方向移动,同时总压损失的具体数值也相对理想情况有较大偏差。 $i = -5^\circ, -3^\circ$ 和 0° 时,得到的叶栅总压损失相比理想情况更大, $i = 2^\circ, 4^\circ$ 时得到的叶栅总压损失相比理想情况更小。 $i = 4^\circ$ 时总压损失相对偏差可达 35%。差的流场品质会导致测得的冲角特性发生变化,总压损失数值发生偏移,降低试验的可靠性。

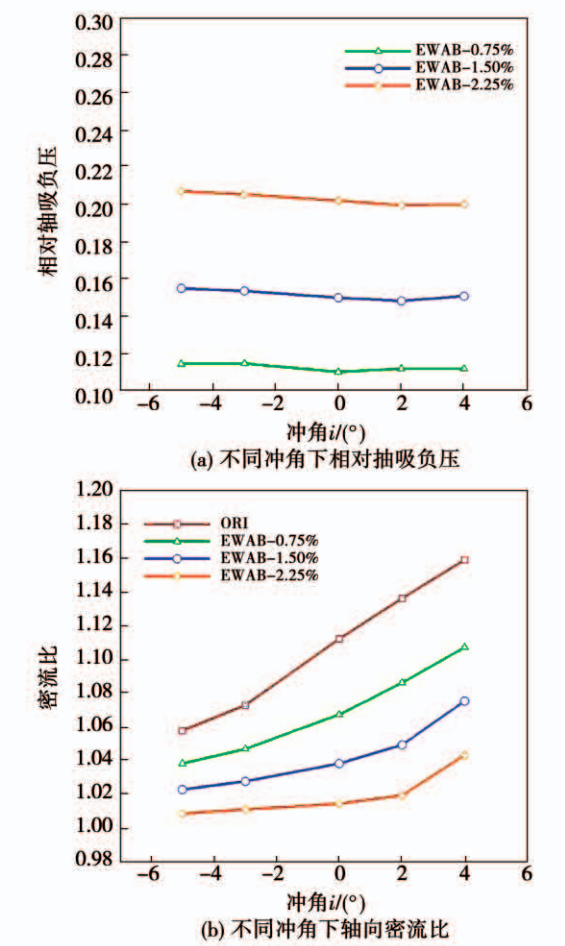


图 14 不同冲角下轴向密流比与相对抽吸负压
Fig. 14 Axial velocity density ratio and relative suction negative pressure under different incidence angles

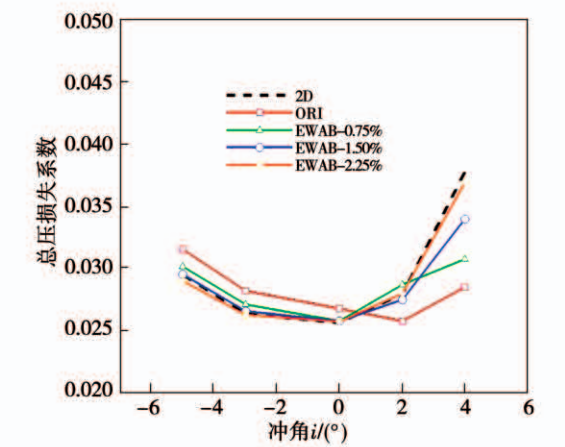


图 15 总压损失冲角特性
Fig. 15 The characteristics of total pressure loss with incidence angle

可以看到,0.75%的端壁抽吸量时,得到的最小损失冲角已与理想情况相同。随抽吸流量的增加,损失的冲角特性曲线向理想情况靠近。 $i = -5^\circ$ 、 -3° 和 0° 时,随抽吸流量的增加,总压损失系数降低。 $i = 2^\circ$ 和 4° 时,随抽吸流量的增加总压损失系数升高。 $i =$

4° 时,2.25%的抽吸流量可以使总压损失相对偏差降低至3%。可以认为,端壁抽吸恢复了叶栅50%相对叶高位置处流动的二维性,流场品质变好。

图16为不同冲角下的出口气流角沿叶高分布。 $i = -5^\circ$ 、 -3° 和 0° 时出口气流角分布情况类似,因此只给出 $i = -5^\circ$ 时的气流角沿叶高分布。可以看到,在各个冲角下,原型叶栅主流区处出口气流角相比于二维情况均偏小。端壁抽吸增加主流区处的出口气流角。

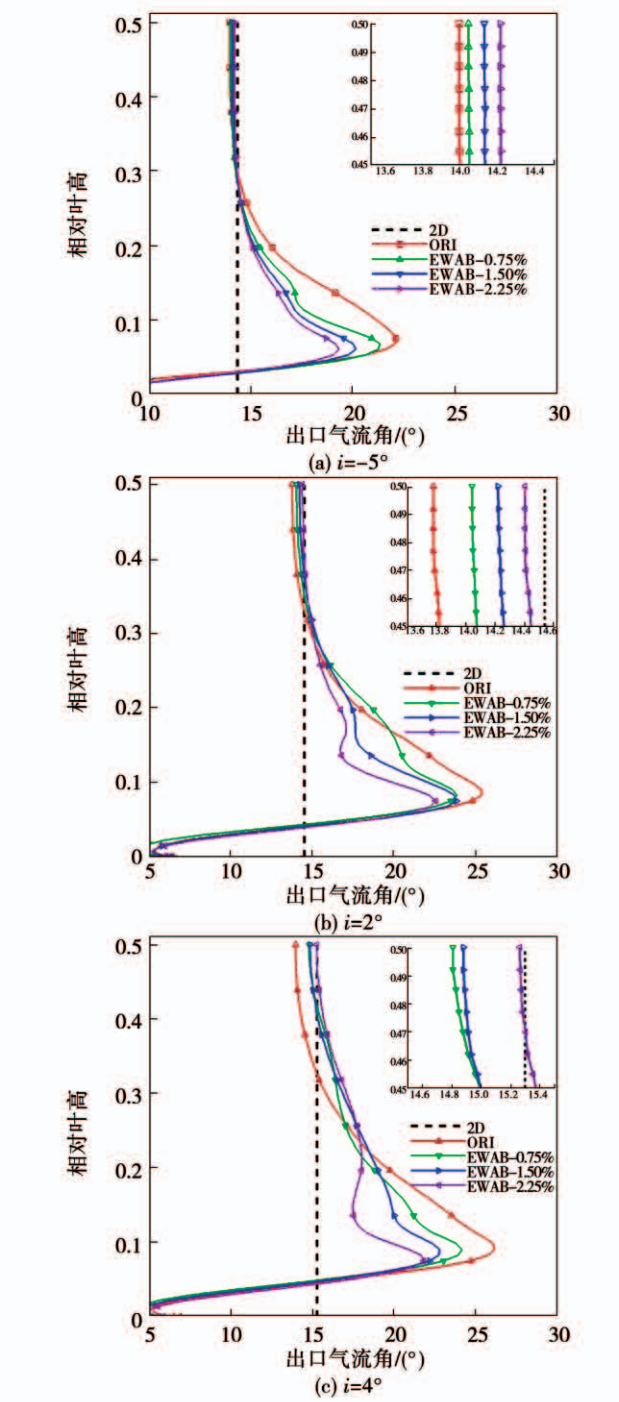


图 16 不同冲角下出口气流角沿叶高分布
Fig. 16 Distribution of outlet flow angle along blade height under different incidence angles

在 $i = -5^\circ$ 时,随端壁抽吸流量的增加,出口气流角向理想情况靠近,沿叶高的梯度也逐渐变小,分布更接近直线。2.25% 的抽吸流量可使出口气流角偏差小于 0.2° 。在 $i = 4^\circ$ 时可以看到原型叶栅主流区范围已非常小,主流区出口气流角相较于理想情况偏差已达 1.2° ,在近端壁区偏差可以达到 11° ,并且出口气流角沿叶高的梯度较大,出口气流角沿叶高分布不均匀。端壁抽吸改善了近端壁区的气流欠偏转与主流位置的过偏转,在 2.25% 抽吸流量时,出口气流角沿叶高分布的梯度仍然很大,但主流区的出口气流角偏差已小于 0.2° 。

3 结 论

(1) 在抽吸位置上,位于叶片中前部的抽吸方案对流场品质控制效果较好;位于叶片后部的抽吸方案需要的相对抽吸负压较小;在实际的方案选择时要根据实际情况对二者进行取舍。

(2) 随抽吸流量增加,轴向密流比进一步降低,出口气流角更接近理想平面叶栅,栅后主流区面积增加。综合考虑流场品质控制效果与相对抽吸负压,EWAB 方案为计算范围内最优方案,在 3% 的抽吸流量下,可将轴向密流比降低至 0.995,出口气流角偏差小于 0.1° 。

(3) 不同冲角下,原型叶栅相对于理想叶栅存在出口气流角偏移与损失冲角特性偏移。端壁抽吸可以改善流场品质,使计算冲角范围内密流比降低至 1.05 以下;主流区出口气流角增加,出口气流角偏差小于 0.2° ;冲角 $i = -5^\circ \sim 0^\circ$ 时使总压损失降低, $i = 2^\circ \sim 4^\circ$ 时使总压损失增加,损失的冲角特性曲线向理想叶栅靠近。

参考文献:

- [1] 李晓东,钟兢军.某压气机静叶基元叶型优化设计及实验[J].航空动力学报,2020,35(3):510-518.
LI Xiao-dong,ZHONG Jing-jun. Optimum design and experiment of stator blade profile of a compressor[J]. Journal of Aerospace power,2020,35(3): 510-518.
- [2] 魏 巍,刘 波,杜 炜,等.可控扩散叶型与双圆弧叶型实验对比研究[J].推进技术,2017,38(1):61-68.
WEI Wei,LIU Bo,DU Wei,et al. Experimental comparison of controlled diffusion airfoils with double circle airfoils[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(1): 61-68.
- [3] 高 宇,钟兢军,李晓东,等.跨声速压气机动叶平面叶栅实验[J].航空动力学报,2016,31(5):1178-1185.
GAO Yu,ZHONG Jing-jun,LI Xiao-dong,et al. Experiment on rotor plane cascade of transonic compressor[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(5): 1178-1185.
- [4] 薄相峰,刘 波.压气机平面叶栅内流场 PIV 试验研究[J].流体机械,2014,42(11):1-7.
BO Xiang-feng,LIU Bo. PIV experimental research in compressor cascade flow field[J]. Fluid Machinery,2014,42(11): 1-7.
- [5] 周正贵.模拟叶尖间隙流的转动平面叶栅实验方案[J].南京航空航天大学学报,2002,34(2):182-185.
ZHOU Zheng-gui. Development of rotating linear cascade facility for simulating blade tip clearance flow[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2002,34(2):182-185.
- [6] 王 东,刘建明,马 磊,等.平面叶栅流场校测及数值分析[C]//合肥中国力学学会流固耦合力学专业委员会,2018.
WANG Dong,LIU Jian-ming,MA Lei,et al. Measurement and numerical analysis of plane cascade flow field[C]//Hefei Fluid Solid Coupling Mechanics Committee of Chinese Mechanical Society, 2018.
- [7] 蔡 明,高丽敏,刘 哲,等.不同条件下平面叶栅风洞流场品质的实验研究[J/OL].推进技术,2021,42(5):1-9.
CAI Ming,GAO Li-ming,LIU Zhe,et al. Experimental study on flow field quality of linear cascade wind tunnel under different conditions[J/OL]. Journal of Propulsion Technology,2021,42(5): 1-9.
- [8] 蔡 明,高丽敏,刘 哲,等.基于抽吸的亚声速平面叶栅风洞流场品质控制研究[J/OL].推进技术,2021,42(9):1-8.
CAI Ming,GAO Li-min,LIU Zhe,et al. Study on flow field quality control of subsonic linear cascade wind tunnel based on suction[J/OL]. Journal of Propulsion Technology,2021,42(9):1-8.
- [9] 杨 泳,徐开俊,李珊珊,等.平面叶栅周期性特性数值研究[J].液压与气动,2018,(9):92-97.
YANG Yong,XU Kai-jun,LI Shan-shan,et al. Numerical simulation on flow periodic characteristics of linear cascade[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics,2018(9):92-97.
- [10] 陈志敏.二元翼型风洞的侧壁干扰与抽气研究[J].实验力

学,2002,17(2):147-152.

CHEN Zhi-min. Side wall effect and suction technique in two-dimensional transonic airfoil wind tunnel test[J]. Journal of Experimental Mechanics,2002,17(2):147-152.

[11] 王 东,刘建明,李 昊,等. 扩压平面叶栅端壁流动控制仿真与试验研究[C]//合肥中国力学学会流固耦合力学专业委员会,2018.

WANG Dong,LIU Jian-ming,LI Hao,et al. Simulation and experimental study on end wall flow control of diffused linear cascades [C]//Hefei Fluid Solid Coupling Mechanics Committee of Chinese Mechanical Society,2018.

[12] 韩 露,周正贵,陈劲帆. 宽裕度超声叶型气动优化设计[J]. 航空动力学报,2020,35(6):1247-1256.

HAN Lu,ZHOU Zheng-gui,CHEN Jin-fan. Wide stability margin aerodynamic optimization design of supersonic profile[J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(6):1247-1256.

[13] 刘前智,严汝群. 轴向密流比对叶栅性能影响的研究[J]. 西北工业大学学报,1989(2):129-137.

LIU Qian-zhi,YAN Ru-qun. Investigations of the effects of axial velocity density ratio on cascade performances of the compressor [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,1989(2):129-137.

[14] 邓 熙,刘 波,马乃行. 高亚声速大弯角轴流压气机平面叶栅损失模型研究[J]. 推进技术,2015,36(9):1302-1308.

DENG Xi,LIU Bo,MA Nai-xing. Investigation of loss model applicable to large range of high subsonic cascades in axial-flow compressor[J]. Journal of Propulsion Technology,2015,36(9):1302-1308.

[15] 杨 凌,李大春,钟兢军. 不同湍流模型对平面叶栅气动性能预测的研究[J]. 中国科技论文,2017,12(23):2690-2694.

YANG Ling,LI Da-chun,ZHONG Jing-jun. Research on predicting accuracy of turbulence models for transonic plane cascade aerodynamic [J]. China Science Paper, 2017, 12 (23): 2690-2694.

(姜雪梅 编辑)