

叶轮机械叶片弯掠气动技术研究进展^{*}

张 森¹, 田思宇¹, 张新民¹, 李华星², 席德科², 和文强¹, 张安超¹

(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003;

2. 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 叶片弯掠技术在叶轮机械设计中的应用, 使叶片通道流场的稳定性得到了明显改善, 叶轮机械的工作效率得到了显著提升。结合近年来在叶片弯掠气动技术领域开展的研究, 详细综述了国内外叶片弯掠技术在叶轮机械设计中的研究进展。首先, 回顾了叶片弯掠气动技术的发展历程, 将叶轮机械叶片的设计分为3个阶段, 分别是直叶片、扭叶片和以弯扭掠为主要特征的空间叶片, 并指出以弯扭掠为主要特征的第3代叶片虽然已经得到应用, 但仍有很多问题还没有完全解决。然后, 分析现有研究中对叶片弯掠的定义, 指出其本质均是在直叶片的基础上, 通过移动叶型积叠点的位置使叶片产生弯曲或扫掠的效果, 进而拓展叶片的设计空间。其次, 综述了叶片弯掠对流场的影响, 并归纳总结其作用机理是通过改变叶片对气流的作用力在径向的分量, 实现叶片载荷和流量沿叶展的再分配, 进而控制低能流体微团的输运, 减小二次流损失。最后, 对叶片弯掠气动技术在今后的发展方向进行了展望。

关键词: 叶轮机械; 叶片; 弯曲; 扫掠; 叶型积叠

中图分类号: V232.4; TH453 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 11-2417-15

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200925

Research Progress of Skew and Sweep Aerodynamic Technology for Turbomachinery Blades

ZHANG Sen¹, TIAN Si-yu¹, ZHANG Xin-min¹, LI Hua-xing², XI De-ke², HE Wen-qiang¹, ZHANG An-chao¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Institute of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With the application of blade skew and sweep design technology in turbomachinery design, the stability of flow field in blade passage has been obviously improved, and the working efficiency of turbomachinery has been significantly improved. Based on the recent researches, the research progress of blade skew and sweep aerodynamic technology for turbomachinery design is reviewed in detail. Firstly, the development of blade skew and sweep aerodynamic technology is reviewed. The blade design of turbomachinery is divided into three stages, namely, straight blade, twisting blade and space blade characterized by skewing, twisting and sweeping. Although the 3rd generation blade characterized by skewing, twisting and sweeping has been applied, many problems have not yet been completely solved. Secondly, the definition of blade skew and sweep in the existing research is analyzed. The essence is that, on the basis of straight blade, the blade will be skewed or swept by moving the position of stacking point of blade profile, which expands the blade design space. Thirdly, the effect of

^{*} 收稿日期: 2020-11-20; 修订日期: 2021-02-24。

基金项目: 国家自然科学基金 (11772263); 河南理工大学创新型科研团队 (T2020-3); 河南理工大学博士基金 (760407/034)。

作者简介: 张 森, 博士, 讲师, 研究领域为流体机械设计理论及测试技术。

通讯作者: 张新民, 博士, 教授, 研究领域为流体机械设计理论与技术。

引用格式: 张 森, 田思宇, 张新民, 等. 叶轮机械叶片弯掠气动技术研究进展[J]. 推进技术, 2021, 42(11):2417-2431.
(ZHANG Sen, TIAN Si-yu, ZHANG Xin-min, et al. Research Progress of Skew and Sweep Aerodynamic Technology for Turbomachinery Blades[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(11):2417-2431.)

blade skew and sweep on the flow field is summarized. The mechanism is to redistribute the load and flow along the blade span by changing the radial component of the blade force on the air flow, so as to control the transport of low-energy fluid clusters and reduce the loss of secondary flow. And lastly, the development trend of blade skew and sweep aerodynamic technology in the future is prospected.

Key words: Turbomachinery; Blade; Skew; Sweep; Stacking of blade profile

1 引 言

叶片是叶轮机械实现能量转换的核心部件,如压缩机、航空发动机、蒸汽轮机、燃气轮机、通风机等,其设计的好坏直接影响到叶轮机械的工作性能。随着全球能源消耗的迅速增长,对更高性能叶片的需求愈加迫切,促使设计人员不断探索新的叶片设计技术。

随着弯掠技术的出现及在叶轮机械叶片设计中的应用,叶片通道流场的稳定性得到了极大改善,叶片工作效率也随之提升。相比于常规设计方法,弯掠技术的使用增加了叶片设计的自由度,有助于设计开发出更高性能的叶片。利用弯掠技术减小分离、增加失速裕度和提高工作效率已经成为叶轮机械领域的重要研究课题之一^[1-5]。

从19世纪末至今,叶轮机械叶片气动设计思想在不断地改进和提高。最初的叶片是一维直叶片,直到20世纪40年代出现了扭曲叶片和相应的设计理论;60年代又出现了一些新的设计方法,如可控涡流型、弯叶片等,但直到70年代可控涡流型才真正在工程实践中得到应用;从80年代开始,弯扭设计成为叶轮机械叶片设计的主流思想,并成功地应用于蒸汽轮机、燃气轮机和航空发动机;20世纪90年代,弯扭叶片已在欧美等发达国家得到较普遍的应用,国内在蒸汽轮机上得到成功的应用,而且在涡轮发动机中也开始进行尝试^[6-9]。综上所述,叶轮机械叶片的设计可分为3个阶段,分别是直叶片、扭叶片和以弯扭掠为主要特征的空间叶片。第3代叶片,即以弯扭掠为主要特征的叶片,虽然已经得到应用,但仍有很多问题还没有完全解决,特别是相互匹配和涡轮内采用弯掠叶片等问题还需深入研究^[10-12]。

本文结合近年来国内外在弯掠气动技术领域开展的研究,综述了叶片弯掠的定义、叶片弯掠对流场的影响和叶型积叠方式的研究现状,并对其今后的发展方向进行了展望。

2 叶片弯掠的定义

由于不同学者所研究的几何模型和关注的问题

不同,导致对弯掠的定义方法存在一定的差异。

Gümmer等^[13]给出了扫掠角和二面角的定义,如图1所示,积叠线为各叶型截面重心的连线,叶型截面沿轴向和周向倾斜分别产生了扫掠和弯曲的效果,这些特征很难用子午面上的倾斜角 ξ 和轴面上的倾斜角 η 来描述。

采用通过各叶型截面重心且与弦线平行等长的线段组成的曲面表示叶片,该曲面表示沿展向不同位置的主流方向,在轴对称锥形流面上表示绕叶片的流动。在积叠线和流面的交点 P 处建立坐标系 $P(x_p, y_p, z_p)$,定义流面和叶片的交线为 x_p 轴,垂直于叶片表面为 y_p 轴,与叶片表面相切为 z_p 轴。扫掠角 φ 为积叠线在点 P 处的切线与 z_p 轴的夹角,弯曲角(二面角) ν 为 y_p 轴与积叠线在流面上投影的夹角。利用Smith和Yeh^[14]推导出的三角函数,扫掠角 φ 和弯曲角 ν 可以用安装角 λ ,流面锥角 σ ,子午面上的倾斜角 ξ 和轴面上的倾斜角 η 表示。Gümmer等^[13]将叶型截面沿着弦线向来流方向偏移定义为前掠,将叶型截面沿着垂直弦线向升力方向移动定义为前弯。

Vad^[15]将轴流压气机/风扇转子叶型截面重心在径向线上叠加称为RS(Radial Stacking)技术,而将叶片扫掠、二面角和倾斜统称为轴流涡轮机械叶片排

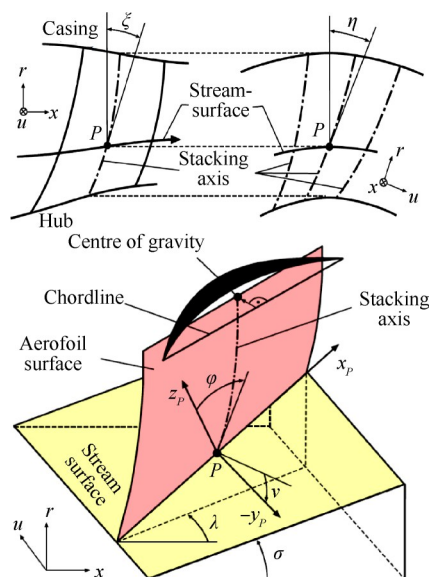


Fig. 1 Definition of sweep and dihedral on a compressor aerofoil^[13]

的NRS(Non-Radial Stacking)技术,并给出了相应的定义^[16-17]。如图2所示,当叶型截面沿着弦线和垂直弦线方向移动时,将分别产生扫掠和二面角。当所考虑的叶型截面位于相邻的内侧截面的上游/下游时,扫掠在端壁附近被定义为正/负,如果RS基准叶片的叶型截面平行于其弦线移动,使被考虑的叶型截面位于半径较小的相邻叶型截面的上游/下游,则叶片具有向前/向后扫掠。当端壁与吸力面成钝角/锐角时,定义二面角为正/负。RS基准叶片的叶型截面沿圆周方向向前/向后倾斜,即叶型截面沿正/反旋转方向移动,此时的移动是扫掠和二面角的特殊组合。

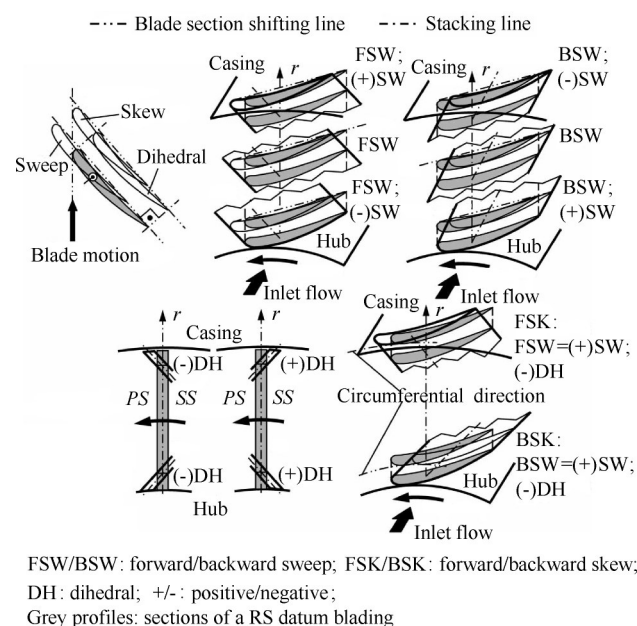


Fig. 2 Geometrical representation of blade sweep, dihedral, and circumferential skew^[15]

Zenger等^[18]在研究叶型积叠方式对低压轴流风扇声学特性影响的过程中,采用了与Vad^[15]一样的定义,并且给出了更详细的描述。如图3所示, I:无扫掠 λ ,无二面角 ν ; II:无扫掠 λ ,正二面角 ν ; III:前掠 λ ,无二面角 ν ; IV:前掠 λ ,正二面角 ν 。

Sasaki等^[19]在对压气机直列叶栅性能进行研究的过程中提出了一种叶片弯掠的定义。如图4所示,叶型截面沿垂直轴线方向的移动定义为弯曲,叶型截面沿平行弦线方向的移动定义为扫掠。这样的定义虽然简单,便于应用,但该定义的弯曲和扫掠之间存在相互转换的关系,即叶片弯曲时会产生一定的扫掠效果,叶片扫掠时也会产生一定的弯曲效果。

Beiler等^[20]指出风扇叶片经常在圆周方向 u 上倾斜,如图5所示,对于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的叶片安装角,叶片

在圆周方向的倾斜角 δ 是扫掠角 λ 和二面角 ν 的组合。

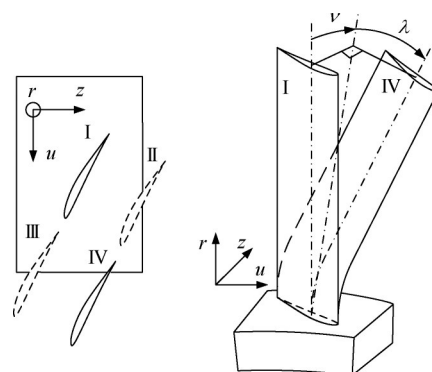


Fig. 3 Definition of sweep and dihedral^[18]

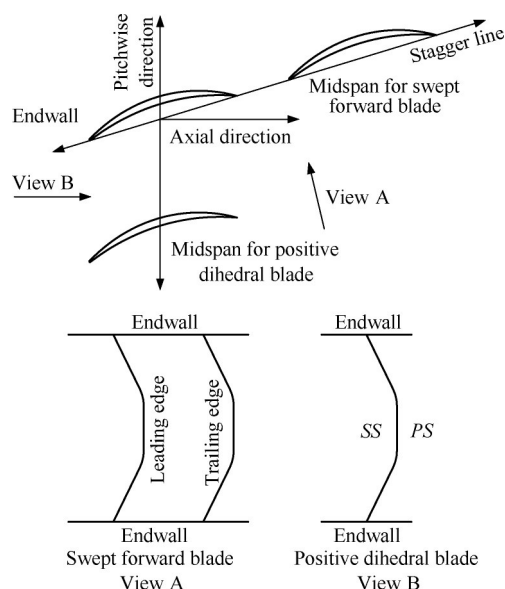


Fig. 4 Definition of blade sweep and dihedral^[19]

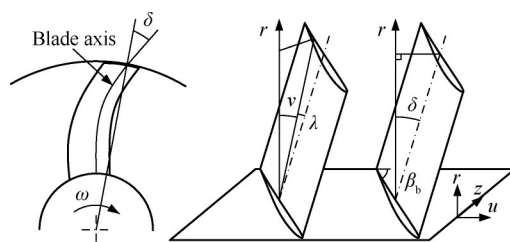
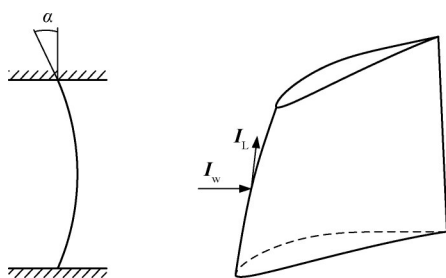


Fig. 5 Definition of blade skew^[20]

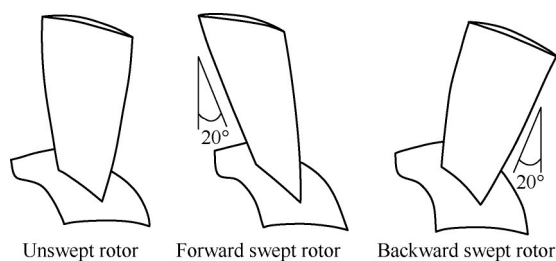
邹正平等^[21]在研究中也给出了一种弯掠的定义,如图6所示,弯曲角 α 为积叠线在梢部的切线与径向的夹角,当吸力面与端壁成钝角时为正弯,反之为反弯。扫掠角 i 为当地来流相对速度的矢量与叶片前缘切线夹角的余角,可表示为

$$i = \arcsin(I_L \cdot I_w) \quad (1)$$

式中 I_L 为叶片前缘切线的单位矢量, I_w 为当地来流相对速度的单位矢量。

Fig. 6 Definition of space sweep angle^[21]

Govardhan 等^[22-23]通过数值方法对一台轮毂直径和转子外径分别为 200mm 和 400mm 的单级低速轴流压气机进行了研究。文中计算了三个采用不同叶片的转子,分别为常规直叶片、20°前掠叶片和 20°后掠叶片,如图 7 所示。掠的定义为:从轮毂到叶尖的每个叶型截面都沿梢弦的方向线性平移,这样轮毂处的偏移量为零,越靠近叶梢偏移量越大。对于后掠转子,叶型截面沿弦线向来流方向移动,而对于前掠转子,叶型截面沿弦线向来流相反方向移动。

Fig. 7 Definition of blade sweep^[22]

在工程设计中还有一种常用的定义方法,即叶型积叠点的移动分为周向(沿转子旋转方向)和轴向(沿主流方向)两种。按工程惯例,通常令顺旋转或逆主流方向为“前”,逆旋转或顺主流方向为“后”。此外,为了区分周向和轴向的弯掠,通常称周向弯掠叶片为周向弯叶片,简称弯叶片;而轴向弯掠叶片则沿用航空术语,称为轴向掠叶片,简称掠叶片^[6,24]。Jeong 等^[25]在研究中就采用了这种定义方式,也有学者将这种定义称之为弯掠正交组合^[26-28]。

虽然上述研究中所给出的弯掠定义各有不同,其本质上均是在直叶片的基础上,通过移动叶型积叠点的位置使叶片产生弯掠的效果,从而增加叶片的设计自由度,拓展叶片的设计空间。

3 叶片弯掠对流场影响的研究现状

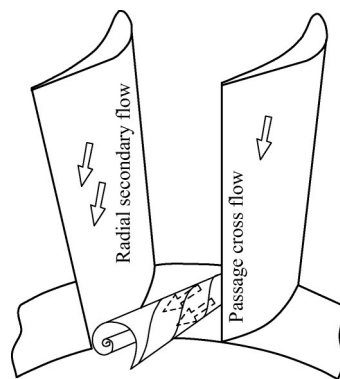
在现代叶轮机械叶片设计中,叶型的非径向积叠往往被认为是提高叶片性能的有效途径之一。然而,许多文献受所研究案例的限制,会导致相互矛盾

的结果,比如积叠线的一种修改在一项研究中产生积极影响,而在另一项研究中,同样的修改可能会产生消极影响^[29]。因此,国内外专家学者开展了大量的研究工作,探索叶片弯掠对叶轮机械流场的影响。

3.1 叶片弯曲对流场影响的研究现状

20 世纪 60 年代出现了弯叶片的概念,在实验中发现,叶片采用周向弯曲后,叶栅内的二次流损失减小,最初的解释是叶片采用周向弯曲使反动度沿叶片展向均匀分布,进而减小能量损失。

王仲奇等^[30]指出,常规叶栅中沿叶片表面存在较大的由叶梢指向叶根的正压力梯度,造成叶片吸力面上的边界层从叶梢向叶根迁移,并与轮毂壁面上做横向迁移的边界层汇合,最终导致该角区的边界层加厚,如图 8 所示。想要减弱或消除压力面和吸力面边界层的径向移动,就需要改变压力面和吸力面上的正压力梯度。采用正倾斜叶片可以获得负压力梯度,该负压力梯度将抑制叶片表面由叶梢指向叶根的边界层迁移,降低叶栅根部的能量损失。进一步地,采用弯曲叶片叶栅,可以使压力面和吸力面上的静压呈 C 型分布,使两端边界层的低能流体向中部移动,并被主流带走,然而中部的能量损失增加不明显,叶栅的总能量损失减小。叶片采用弯曲设计不仅可以抑制径向二次流,而且还可以削弱横向二次流,从而降低叶栅的总损失。该作用机理的解释也得到了众多学者的认同^[19,31-34]。

Fig. 8 Schematic of radial secondary flow and passage cross flow^[30]

弯叶片能够控制叶栅流道内部二次流动的根本原因是,叶片对气流的作用力在径向的分量不为零,如式(2)所示。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{c_u^2}{r} + \frac{c_m^2}{r_m} \cos \delta - \frac{\sin \delta}{2} \frac{\partial c_m^2}{\partial m} + F_r \quad (2)$$

径向压力梯度由方程右端的四项决定,其中第

四项 F_r 为叶片对气流的作用力在径向的分量,弯叶片作用的本质就是 F_r 不为零,其作用效果在涡轮叶栅中表现为使反动度沿叶片展向趋向均匀,在压气机叶栅中表现为使载荷分布沿叶片展向趋向合理^[35]。

弯叶片概念的提出为叶轮机械叶片的设计提供了新的思路,国内外专家学者开展了大量与弯叶片相关的研究。

Weingold 等^[36]构建了弯曲叶片升力线模型来对其作用机理进行解释,如图9所示。该模型将叶片简化为一条涡线,当叶片采用弯曲积叠后,弯曲的涡线将在子午面内产生一个涡分量,从而使端壁流管在前缘附近扩张,在后缘附近收缩。正弯曲叶片能够降低尖峰马赫数和吸力面后部的扩散率,从而导致局部扩压因子减小,进而推迟角区分离,反弯曲叶片的作用正好相反。

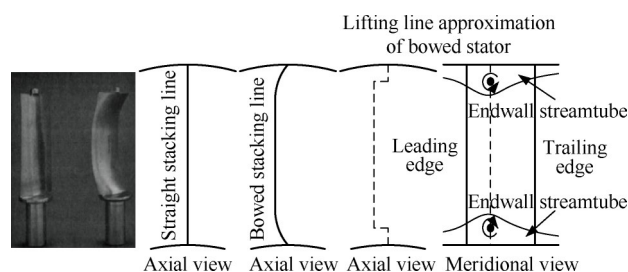


Fig. 9 Simplified lifting line model of bowed stator explains aerodynamic effects^[36]

Weingold 等^[36]还得到了一些有益的结论。弯曲定子在场中产生径向力,降低了吸力面拐角处的扩散速率,有效地延迟或消除了拐角处分离的形成。拐角处分离的消除,使定子的端壁区域能够在不过早分离的情况下工作,从而减少损失、减少堵塞并提高转速。实验测试表明,由于消除了定子拐角处的分离效应,在压气机工作包线的大部分区域内,压气机总效率可提高1%或更多,文献[37-38]中也得到了类似的结论。

Kim 等^[39]提出了一种基于混合多目标进化算法的轴流风扇叶片优化设计方法,通过选择与叶片倾斜角相关的设计变量,以总效率和转矩为目标函数进行多目标优化,提高了总效率,并减小了转矩。该研究认为性能改进的机理在于:叶片倾斜消除了轮毂附近和叶片吸力面的分离流动,使流场的稳定性得到了加强。

郑严等^[9]认为,以往的常规直叶片和扭曲叶片对气流的作用力在径向的分量趋于零,对通道内流动

的影响较小,可以忽略不计。而采用倾斜叶片或弯曲叶片时,其目的就是为了增大叶片对气流的作用力在径向的分量,从而达到控制通道内静压力分布的效果,因此该径向力的数量级应该与流体微团的离心惯性力有相同的数量级。

欧阳华^[40]利用涡动力学原理分析了弯曲叶片的作用机理。作者认为叶片弯曲导致的叶片对气流作用力的径向分量在叶片通道中产生了一个二次涡 ω_{fs} ,如图10所示。对于前弯叶片,该二次涡削弱了上半通道二次流,却增强了下半通道二次流,后弯叶片的作用正好相反。

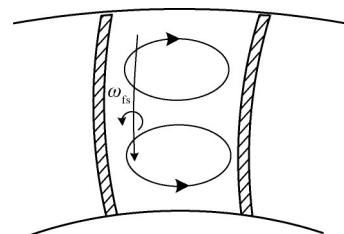


Fig. 10 Schematic of skewed blade controlling the passage cross flow^[40]

Breugelmans 等^[41]通过绕弦线旋转二维叶片得到了二面角分别为 0° , 15° , 25° 和 30° 的倾斜叶片直列压气机叶栅,并利用多孔探针对其出口流场进行了测试。结果表明,在名义攻角下叶片倾斜对直列压气机叶栅模型中二次流的发展有很大的影响,在吸力面与端壁呈锐角的一侧,二次流发展成一个大尺度的角失速,而在钝角侧,二次流得到了抑制。文献[19,30]的叶栅实验中也得到了类似的结论,并指出叶片曲线倾斜叶栅存在一个最佳倾斜角,对应于最小的总能量损失,当入射角向正方向或负方向变化时,最佳倾斜角减小或增大。韩万今等^[42]探讨了在不同径高比和外壁面扩张角的汽轮机环形静叶栅中叶片倾斜对叶栅出口流场的影响。实验结果表明,倾斜角与径高比和扩张角间存在最佳匹配关系,采用最佳倾斜角后,叶栅的能量损失减小,此外随着径高比和扩张角的增大,最佳倾斜角也随之增大。尚尔兵等^[43]采用实验方法研究了叶片周向倾斜和弯曲对轴流压气机平面叶栅的影响。结果表明,选择最佳积叠线可以更好地改善流场,而叶片正倾斜是提高压气机性能的一种有效途径。

在弯曲叶片对损失的影响和作用机理方面,国内外专家学者也做了大量的研究。

Harrison^[44]为了研究叶片倾斜对损失产生的影响机理,对高载荷低展弦比涡轮叶片的三个线性叶

栅进行了实验。三个叶栅的叶片具有相同截面,其中第一个叶栅两端垂直于端壁积叠,第二个叶栅在与垂直方向倾斜 20° 的直线上积叠,第三个叶栅在与垂直方向倾斜 30° 的圆弧上积叠。倾斜对叶片载荷、损失产生的分布以及叶片吸力面和端壁边界层状态有显著影响,但对总损失系数的影响最小。此外,简单倾斜使损失系数略有增加,而复杂倾斜对总体损失没有影响。该研究认为复杂倾斜增加了流动转向,减少了下游混合损失,并大大减少了平均流动角沿叶片展向的变化,在涡轮机中,这有可能减少下游叶片排的损失,并使匹配更容易,提高非设计工况性能。

钟兢军等^[45]对采用不同倾斜和弯曲形式的平面叶栅进行了风洞实验。结果表明,与采用直叶片的叶栅相比,采用弯曲叶片的叶栅端部损失明显降低,角区分离也得到了消除,当正弯角为 20° 时,叶栅的总损失降低16%。王东等^[46]在低速风洞中对5种不同积叠形式的矩形压气机叶栅进行了实验,分析了零冲角下叶栅出口总压损失分布情况和主流速度。结果表明,叶片弯曲对压气机叶栅流场有很大影响,叶片正弯曲降低叶栅的端壁损失,而叶片反弯曲加大角区分离,恶化两端区流动,总损失高于直叶栅;叶片正倾斜和S形叶片在降低端壁损失的同时,加剧上端壁气流分离,增加上端壁损失,使总损失高于直叶栅。赵桂杰等^[47]研究了直叶片、前掠叶片、后掠叶片及弯掠(正弯+前掠)叶片组成的四种不同平面扩压叶栅的壁面静压分布。结果表明,弯掠叶栅能够更好地控制端壁低能流体迁移和延缓角区分离,并可显著降低端壁附近的流动损失,同时增加叶片中部的损失。

此外,在使用弯曲叶片时,需要特别重视转静子之间的匹配。

Weingold等^[48]在一台三级压气机的三个静子上均采用了弯曲叶片,实验结果表明,从工作线到失速点的效率和压升以及通流能力均有提高,但是喘振裕度有所下降。该研究认为,性能的提升源于采用的弯曲静叶消除了吸力面在叶根和叶梢处的角区分离。同时,由于转子叶片未进行改变,静子叶片的几何出口角也没有变化,只是静子叶片的积叠线变成了一条曲线,静子和转子不匹配使冲角过大,从而引起静子的下游流场恶化,最终导致压气机的喘振裕度降低。徐国林^[49]在某单级风扇中采用前掠叶片改型设计,将叶顶边界层吸入主流,较好地减弱了叶顶区激波与边界层的相互作用引起的阻塞,提高了级

的气动性能,但由于没有考虑动静叶匹配问题,提高程度受到限制。Bogod等^[50]对采用弯曲静子叶片的压气机的亚声速级进行了实验。结果表明,采用正弯静叶级使级效率提高了1.0%~1.5%,而采用反弯静叶级使级效率提高了2.0%~3.0%。由此可以发现,正弯叶片和反弯叶片在压气机中均取得了有益的效果,具体哪一种弯曲方式更合适,还需要进一步的研究。

叶轮机械三维流场的复杂性给测试带来了较大的困难,而三维仿真技术的发展为这一问题提供了有效的解决途径,因此部分专家学者通过数值方法对弯曲叶片的作用机理进行了研究。

Robinson等^[51]在一台低速运转的克兰菲尔德4级压气机的第3级上采用叶片端部弯曲静子,用来模拟采用带超临界叶片的10级高速高压压气机的叶型速度分布。计算结果显示,在壳体上,端部弯曲成功地缓解了吸力面拐角处的失速,并且与常规叶片相比,在该叶片的根部附近流线扭曲明显减少。张艳英等^[52]采用一种在时间方向具有二阶精度的隐式方法,模拟了三维弯叶片定常粘性流场,捕捉到了流场中的各种涡系结构。与直叶片流场的对比发现,弯叶片降低损失的一个主要原因是,弯叶片能将对二次流起主要作用的通道涡限定在一个稳定的范围内。姜斌等^[53]采用数值方法研究了弯掠三维设计技术对具有较高载荷的跨声速轴流压气机性能改善所起到的作用和抑制流动损失增加的机理。结果表明,动叶上半部分采用反弯设计能够有效改变动叶端区压力梯度,减少泄漏流在出口压力面侧的堆积,增加动叶梢部的通流能力。张晨凯等^[54]采用数值优化的方法对某低速大尺度轴流压气机原型转子的积叠线进行了优化,提高了设计工况下的性能,而这种提升主要体现在轮毂附近叶片正弯有效减小了该区域的流动损失。陈榴等^[55]在高载荷轴流风扇中采用弯角为 30° 的正弯叶片,并采用数值模拟方法,对比了直叶片和正弯叶片的叶轮流场,与直叶片相比,采用正弯叶片后工作效率提高了1.64%,静压升增大了10.74%。宋彦萍等^[56]对具有弯曲动叶的跨声速轴流压气机进行了数值研究。结果表明,反弯曲动叶级效率最低,而正弯曲动叶级的载荷沿叶片展向分布均匀,气动效率最高。

3.2 叶片扫掠对流场影响的研究现状

20世纪60年代,科学工作者们开始尝试利用叶片扫掠控制压气机叶栅内的流动,其作用机理:一方面,后掠有助于控制马赫数,从而控制激波损失;另

一方面,前掠有利于减小阻力和防止低速下的叶尖失速^[29,57-59]。为了探寻叶片扫掠对叶轮机气动性能的影响,国内外专家学者进行了大量的研究工作。

叶片扫掠作为扩稳和提高效率的重要措施在轴流压气机的设计中受到了广大设计者的青睐。轴流压气机中的一个主要问题是叶片表面边界层流体在离心力作用下的径向迁移以及在叶梢处的堆积,最终导致性能降低,如升力和工作范围减小,以及失速裕度降低,叶片扫掠是解决上述问题的方法之一。由于叶片扫掠后不再是径向的,叶片表面边界层的径向移动将不会导致在叶梢附近积聚低能流体,因此与直叶片相比性能更好^[19,22,60]。

Gümmer等^[13]认为叶片倾斜可以用扫掠和二面角来描述,并从流体力学角度出发,总结了扫掠叶片作用模型,如图11所示。

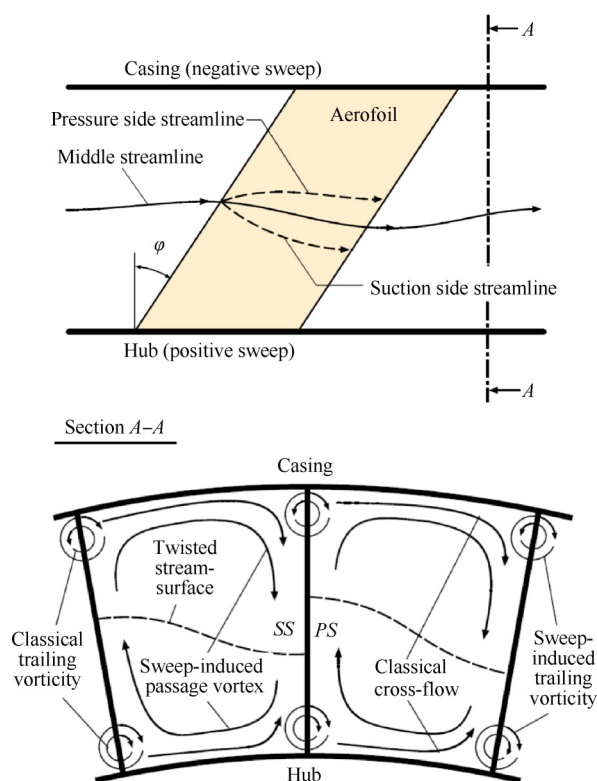


Fig. 11 Classical and sweep-induced secondary flow components^[13]

流线从叶片通道中间高度的前缘开始偏离,并在流动方向上逐渐增加,这是由扫掠引起的,最终产生一个扭曲和非轴对称的流面。流面在叶片中部扭曲,形成一个覆盖整个叶片通道的二次流旋涡,叶片扫掠诱导的通道涡与轮毂处的经典横流方向相反,在壳体处与经典横流方向相同。在端壁附近,流线偏移被抑制,且叶片扫掠诱导的旋涡从后缘脱落,这

些涡流与轮毂处的经典尾涡具有相同的旋转方向,而在壳体处具有相反的方向。因此,扫掠叶片中二次流的流型比传统积叠叶片更加的复杂。

Masi等^[59]认为环量沿叶展方向的分布会造成流体微团的径向迁移,进而导致风扇转子性能恶化。在回顾并重新解释 Adolf-Busemann 提出的扫掠机翼概念的基础上,提出了叶片扫掠的简化理论。根据上述理论,提出了低轮毂比单转子轴流风扇固定涡流型叶片初步设计中前掠角的选择方法。

季路成等^[61]将扫掠看作是叶片设计的一个自由度,并指出扫掠通过改变载荷在叶片展向上的分布来影响压气机的激波、边界层、失速性能、叶尖泄漏和二次流等,这些因素共同作用最终导致整机效率的变化。

一些学者认为,叶片扫掠使不同截面的流量和载荷重新分配,进而影响其气动性能。

Amano等^[62]对跨声速压气机叶片的扫掠效应进行了数值研究,在不改变压气机叶片其他特征的情况下研究扫掠效应,即在所有情况下保持叶片流出角和叶型在设计截面上相同,并测试了跨声速压气机转子叶片的扫掠效应。结果表明,扫掠可以根据积叠线的不同重新分配流量,减少二次流损失,同时叶片前掠减小了静压力系数,即叶梢载荷。

Gallimore等^[16,63]的研究报道指出,叶片前掠增加了前缘附近的载荷,降低了叶片中部后缘附近的载荷。但前掠叶片的应用在机壳处效果不佳,因为该处的叶梢间隙损失增加。

Corsini等^[64]采用数值计算的方法,研究了叶片前掠对亚声速轴流风扇转子气动性能的影响。根据设计工况和非设计工况的对比分析,得出了有益的结论,前掠叠加线在通道前部诱导了一个涡分量,其方向与可控涡流型设计的涡分量和转动进入端壁边界层的涡分量相反。由于反向旋转扫掠诱导涡流和可控涡流型诱导涡流之间的相互作用,导致沿叶片展向二次流衰减,引起测试流量范围内叶片通道内轴向速度分布重新排列。

He等^[65]系统研究了叶片扫掠对跨声速离心压气机叶轮气动性能的影响机理。结果表明,扫掠的主要气动效应是使叶片载荷沿叶展方向重新分布,从而对激波结构、叶顶泄漏涡和流动分离产生影响。在叶顶区域,前掠限制了叶片载荷、激波强度和叶尖泄漏涡,减少了壳体附近的损失;在轮毂区域,后掠抑制了叶片载荷和流动分离,降低了轮毂附近的损失。

还有一些专家学者通过真机实验来研究叶片扫掠对叶轮机气动性能以及流场结构的影响。

Mohammed 等^[66]认为前掠叶片可以减少由于离心力的影响而在叶梢附近积聚的边界层流体,并对三组叶片基元几何轮廓相同、前掠角不同的叶轮进行了实验研究。结果显示,扫掠叶片比无扫掠叶片运行效率更高,尤其是在小流量工况下。此外,前向扫掠有效地减小了叶梢区域边界层流动的恶化,使叶片基元失速延迟。

Yamaguchi 等^[67]以单级压气机为模型研究了前掠叶片对压气机气动性能的影响,并解释了前掠叶片控制端壁二次流的作用机理。当采用常规积叠叶片时,径向压力梯度的存在引起边界层内的低能流体向端壁区域堆积,进而增加气动损失,降低喘振裕度。当采用前掠积叠叶片时,一方面叶片前掠使边界层内的低能流体无法到达端壁区域,另一方面叶片梢部吸力面上的高压区更接近前缘,抑制了低能流体的径向迁移,减少了在端壁处的堆积。

Passrucker 等^[68]介绍了一款前掠跨声速压气机转子的设计与实验,研究了叶片前掠对单级跨声速压气机性能和稳定性的影响,并与叶型重心径向叠加设计的转子进行了比较。结果表明,与径向叠加转子相比,叶片前掠转子的效率更高,失速裕度也更大。特别是在接近失速的情况下,叶片前掠将气流转移到叶尖区域,从而提高了该区域的稳定性,即使在轮毂区域发生分离,叶片前掠的转子也可以在稳定状态下运行,而不会产生旋转失速。

Wadia 等^[69]报道了叶片扫掠技术在压气机气动性能和稳定性方面的实验和分析评价。实验结果表明,相对于无扫掠转子,前掠转子的失速裕度有了显著改善,而后掠对失速裕度有不利影响。该研究认为,轴向流动扩散减少和叶片表面边界层在叶梢的堆积减少,以及激波与边界层相互作用减弱,是叶片向前扫掠增强压气机性能的主要原因。

Neubert 等^[70]对美国海军先进风扇组件技术计划的第2阶段进行了描述,量化了低展弦比和高压比跨声速风扇级前缘气动扫掠的综合性能优势,并指出扫掠转子的设计使风扇转子的绝热效率提高了1.5%。

Bergner 等^[71]采用三维激光-2焦点测量方法研究了扫掠对轴流跨声速压气机转子流场的影响,并与传统的径向积叠转子进行了比较。结果表明,在峰值效率下,前掠转子具有减小叶梢间隙涡流的特点,减少了二次流损失,而且前掠明显改善了激波结构,

同时增加叶梢弦长,有助于提高失速裕度。

伴随着叶片扫掠作用机理研究的同时,科学工作者在他们的研究中也给出了一些进行叶片扫掠设计的指导建议。

Beiler 等^[20]数值研究了叶片沿圆周方向弯曲和沿叶弦方向扫掠对轴流风扇的影响,并用3传感器热膜探针在固定参考系中测量了三维速度场,用快速响应的总压探头测量总压分布。在分析结果的基础上,提出了一种扫掠叶片风扇的设计方法,利用该方法设计的前掠风扇具有良好的空气动力性能,在风扇噪声测试设备上测量的声功率级得到了改善。

Govardhan 等^[22]认为轴流压气机采用倾斜和扫掠叶片具有一定的优越性,并通过数值方法研究了叶片扫掠对低速轴流压气机转子出口处的性能和三维流场的影响。结果表明,采用后掠叶片的转子端壁附近性能恶化,而叶片中部的尾流总压损失减小,但失速裕度也有减小;叶片前掠改变了流线的流型,使得吸入面流线向轮毂偏转,压力面流线向机壳偏转。

Vad 等^[72]采用统计方法处理和评估了大量的文献数据,并建立了趋势函数来量化上述关系。结果显示,随着叶片沿径向的环量梯度增大,前掠产生的效率增益有增大的趋势,这意味着在设计过程中有目的地和前向扫掠结合在一起,对于可控涡流型设计的转子而言,可以提高效率。通过内部开发的设计方法,可以得到最大效率增益为2%~3%。此外,对于自由涡流型转子,由于前向扫掠而导致的效率提高往往较小。

Vijayraj 等^[73]数值研究了对旋轴流风扇叶片扫掠对性能的影响。研究发现,对于前级转子,轴向扫掠使压比增加,且叶顶附近的损失减小;对于后级转子,扫掠是无效的,压比小于常规转子,且失速裕度较小。

单鹏等^[74-75]对超声速和跨声速轴流压气机叶片前缘扫掠/弯曲进行了综合研究,对三维后掠激波表面的运动特征变量进行了分析,为扫掠激波面运动的设计奠定了基础。

昌皓等^[76]选择 NASA Rotor 37 跨声速压气机转子作为研究模型,在叶片 90% 展高以上通过沿弦向位置移动叶型来构造叶梢掠的特征,并采用数值方法进行了研究。结果表明,叶梢前掠减小了叶片梢部进口的平均攻角,而后掠则有相反的效果,且随着流量的减小,扫掠对攻角的影响更加显著。

3.3 叶片弯掠组合对流场影响的研究现状

弯曲和扫掠概念的引入扩展了叶片的积叠方

式,增加了叶片设计自由度,两者对流场的作用相辅相成,为叶轮机械性能的改善提供可能。近年来,叶片弯掠组合设计成为叶轮机械领域的研究热点。

Seo等^[77]采用响应面法对低速轴流风扇叶片积叠线进行了数值优化设计,弯掠组合设计成功地提高了总效率,并显著改善了叶片的非设计工况性能。同时,弯掠组合设计使局部效率沿叶展方向的分布更加均匀,这主要是由于叶片倾斜通过抑制泄漏涡使质量流量沿叶展方向的分布趋于均匀。

Song等^[78]数值研究了叶尖扫掠和倾斜对压气机机匣处理的影响,将机匣处理与弯掠设计相结合进行多目标优化。结果显示,叶尖的扫掠和倾斜重新分配了展向和弦向载荷,增强了机匣处理改善叶片性能的能力。

王维等^[10]研究了机匣处理与静子叶型安装角及弯掠的组合设计对压气机性能的影响,通过对静子叶型安装角及弯掠规律的优化设计,进一步提高了压气机级的失速裕度。其中,机匣处理与尖部反弯根部正弯静子的组合设计,使静子叶根吸力面在激波作用下发生边界层分离,且与轮毂表面边界层相互作用形成角涡。接近失速边界时,静子叶根形成“前缘溢流,尾缘反流”现象,造成静子通道的大范围堵塞,诱发压气机失速。

Zenger等^[79]研究了叶型积叠方式对低压轴流风扇特性曲线的影响。结果表明,压力系数和效率的特性主要取决于风扇叶片端部弯掠的组合类型。在典型运行范围内,相比于后向和先后再后扫掠,前向和先后再前扫掠叶片风扇具有更大的运行范围和更高的效率,且总声压级也显著降低。

Neipp等^[80]以一台用于工质能量回收的轴流式膨胀涡轮为例,进行了CFD(Computational Fluid Dynamics)流场自动优化,在不缩小工作范围的前提下,提高了汽轮机效率。优化结果表明,即使优化目标的微小变化也会对新叶片的倾斜和扫掠设计结果产生显著影响。研究最后指出,二次流结构对涡轮性能具有决定性的影响,但是二次流的复杂性使得叶片倾斜和扫掠对流动特性的影响不可能得到普遍有效的解释。

Patel等^[81]认为叶片弯曲、扫掠以及弯掠组合是实现低速轴流风扇性能改进的方法之一,叶型的非径向叠加会改变二次流、叶尖涡效应、轮毂通道涡,从而影响气动性能参数,如失速裕度、效率、压比和叶片载荷。然而,由于目前的研究仅局限于少数情况下的比较,不同的积叠线可能会产生不同的效果,

从而导致相互矛盾的结果。

尽管国内外专家学者做了大量的研究工作,但叶片弯掠对叶轮机械流场影响的研究还不够系统。例如,文献中没有对同一研究对象应用具有不同弯掠角度的不同弯掠类型(即正弯和反弯、前掠和后掠、仅叶梢弯掠等)。此外,大多数的研究都是在解释叶片弯掠对叶轮机械气动性能影响的作用机理,并依据经验给出针对特定产品的设计指导,但这些设计指导的普遍适用性还有待进一步的研究。

4 叶型积叠方式的研究现状

叶片采用弯掠设计后,叶型的积叠线不再是径向线,而是通过几种修改,例如扫掠、二面角、倾斜或这些修改的组合,来更改积叠线。

Bogod等^[50]以亚声速多级压气机为模型,研究了6种不同积叠方式的出口导流叶栅,如图12所示(h 为叶片高度)。实验结果显示,采用叶片弯曲积叠的5个案例的整机气动性能均有所提高,其中采用叶片正弯曲积叠的4个案例的级效率提高1.0%~1.5%,而采用叶片反弯积叠案例的级效率在运行工况范围内,最大提高3.0%。此外,6个案例的稳定工作范围基本一致,且叶片采用弯曲积叠后使载荷沿叶片展向和弦向均产生变化,从而导致级性能改变。

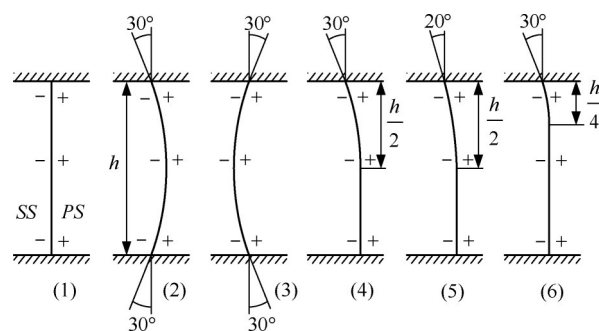


Fig. 12 Stacking line of stator blade^[50]

Weingold等^[48]也采用了类似于上述的定义,以一台三级压气机为实验模型,其中第3级静子采用弯叶片设计,从距叶片两端20%~30%处开始分别向两端弯曲,弯曲角为30°。结果显示,弯叶片消除了第3级静子端壁的角区分离,使角区损失明显下降,而叶片中部的损失变化不大。此外,整机性能也产生了一定的变化,在近失速点整机的损失降低约4%,在设计点整机损失没有太大变化,在大流量工况点整机损失却有所增加。

Helming^[82]为了研究叶片扫掠对损失产生和能量

传递的影响,对三个低压比的不同扫掠风扇转子进行了数值分析。转子通过沿弦线方向移动叶型截面进行扫掠(图 13:从叶片 1 到叶片 2),同时将叶型截面转回一个圆周位置,以避免二面角效应(图 13:从叶片 2 到叶片 3),壳体的轮廓以与叶片相同的方式轴向移动。数值分析结果表明,扫掠转子在整个叶中的总压比低于无扫掠转子,只有在轮毂附近,前掠转子的压比才会更高。原因是扫掠转子会在前缘产生强烈的径向压力梯度,这种压力梯度造成的流向端壁和流出端壁的流动偏转,具有使端壁附近流动扩散和膨胀的影响。

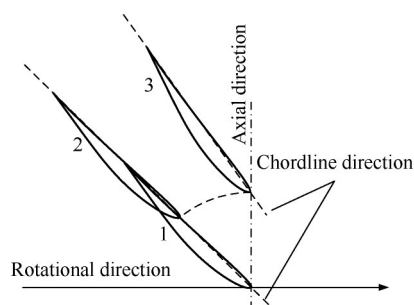


Fig. 13 Stacking method of blade sweep^[82]

Sasaki 等^[19]通过实验的方法研究了弯掠技术对压气机叶栅气动性能的影响。结果显示,叶片采用正弯和前掠积叠时,叶栅性能得到了显著的改善,而反弯和后掠所带来的效果并不理想。因此,叶片弯曲积叠线的形状对叶栅损失的影响较大,过大的弯曲角度会导致流场的恶化。此外,弯曲叶片降低了叶栅的端部载荷,延缓了分离的发生,而叶片中部的载荷增加,损失也随之增大,叶栅总的效率是两者相互作用的结果。通过对不同积叠形式的叶栅的实验分析最后得出结论:对于弯曲叶片,15°弯角和 1/6 弯高的前弯叶片性能最佳;对于扫掠叶片,30°掠角和 2/6 掠高的前掠叶片性能最佳。

Ilkan 等^[17,29]总结了最常见的叶型非径向叠加方法,如图 14 所示,扫掠定义为沿平行于叶型弦线的方向移动叶型,当较高半径的剖面沿着弦线方向相对于较低半径的剖面向上游或下游移动时,扫掠分别命名为 FS(Forward Sweep)或 BS(Backward Sweep)。在靠近端壁的区域,当特定半径处的剖面分别位于相邻内侧断面的上游或下游时,扫掠被命名为正扫掠或负扫掠,扫掠角表示连接基准叶片叶型形心的径向线与从轮毂叶型形心开始到相关叶型新形心位置结束的连线之间的角度。

Tweedt 等^[60]实验研究了采用定子端壁前缘扫掠

改善轴流压气机定子排性能的方法,为了实现定子端壁前缘扫掠,将叶型的后缘点作为积叠点,通过加长靠近端壁的叶型截面弦长的方法实现端壁前缘扫掠,具体实施效果如图 15 所示。

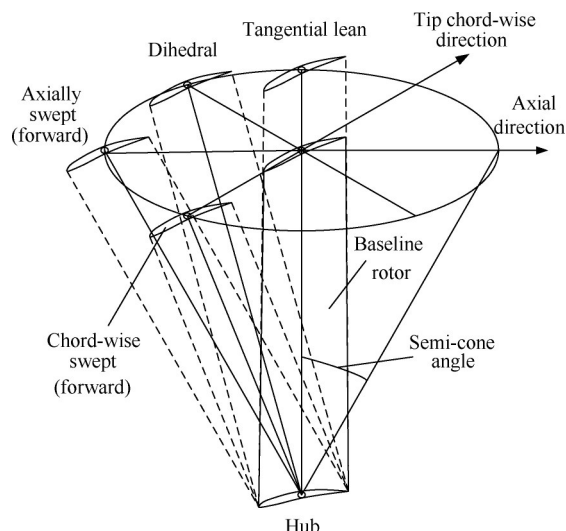


Fig. 14 Definition of non-radial stacking^[17,29]

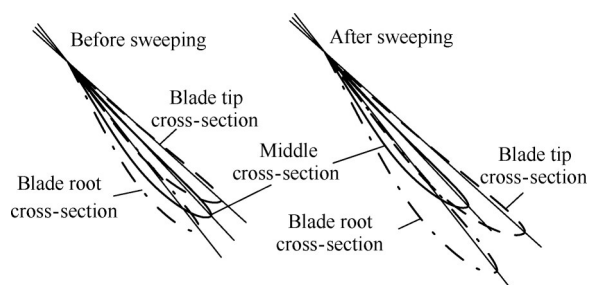


Fig. 15 Schematic of leading edge sweep of stator endwall^[60]

王仲奇等^[30]在研究叶片弯曲对不同攻角下矩形叶栅流动特性的影响中采用了曲线倾斜叶片,其中叶片的两端采用与径向呈一定倾斜角度的直线,中间采用圆弧过渡连接,具体实施方式如图 16 所示。

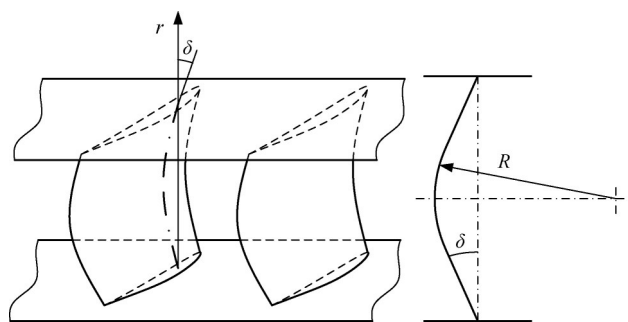


Fig. 16 Schematic of cascade with curved blades^[30]

王会社等^[83]在弯曲叶片积叠线影响压气机叶栅气动性能的研究中指出,拼接型积叠线在研究中经常被使用,即两端是直线而中间用曲线光滑过渡,或

两端和中间均采用直线,而直线中间采用曲线光滑连接,如图17所示。

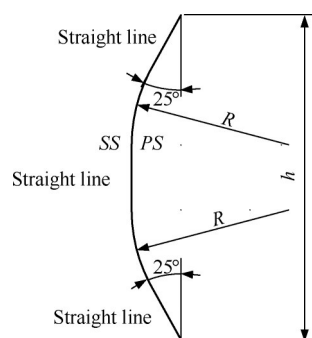


Fig. 17 Schematic of stacking line^[83]

董学智等^[84]研究采用弯曲叶片对压气机叶栅叶片表面流动稳定及转换的影响时,采用的弯曲积叠线与上述文献中的类似,然而两者的弯曲方向截然相反,如图18所示。

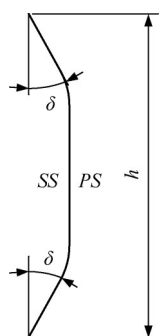


Fig. 18 Schematic of stacking line^[84]

D'Ippolito等^[37]报道了用于蒸汽机的涉及直列叶栅和环列叶栅的叶片倾斜角的敏感性分析,其中叶片是通过沿不同的线性轴积叠,并以相同的二维剖面构建,弯曲叶片的倾斜角 δ 为 10° , 15° 和 20° ,其定义方式如图19所示,从图中可以发现该文献中的叶片弯曲方向是向着压力面一侧倾斜。

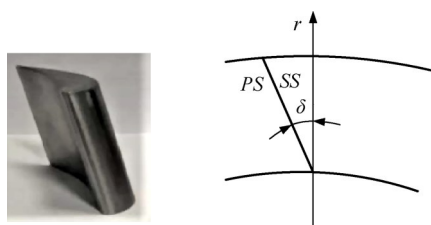


Fig. 19 Picture of the full leaned blade and sketch of its axis arrangement (view from upstream)^[37]

也有学者利用优化方法对叶片积叠线进行设计,并取得了一些有益的效果。

Razavi等^[24]采用人工神经网络优化方法,以实现

最大的级压比、效率和工作范围为目标,分别对跨声速轴流压气机转子叶片的扫掠和倾斜设计进行了优化。Asgarshamsi等^[85]将CFD流动模拟程序与遗传算法相结合,以增大效率和/或压比为目标,实现了单级轴流式燃气轮机定子和转子叶片的倾斜角、扫掠角等参数的优化设计。胡俊等^[86]基于NUMECA/Design3D全三维优化设计平台,通过人工神经网络和遗传算法相结合的方法,对一低压轴流风机叶片的空间弯掠积叠线进行三维优化设计,将设计工况点的效率和全压分别提高了1.92%和3.98%。朱芳勇等^[87]通过MATLAB语言实现空调低压轴流风叶叶栅的积叠线选择与控制,联合CFD仿真技术,研究弯曲角、扫掠角和安装角对空调外机出风特性的影响,并利用该方法将风量提升了14.4%。还有学者提出了双激盘理论及相应的计算方法,用于进行低速低载荷轴流式弯掠风扇的设计和性能估计,丰富了轴流风扇的设计方法^[40,88]。

经过国内外专家学者的共同努力,叶片弯掠对叶轮机机械流场影响的作用机理已基本清楚,然而目前所研究的叶片弯掠积叠方法都是针对某一特定模型的实验或以经验的方式给出,其普遍适用性有待进一步验证。季路成等^[61]也曾指出,扫掠仅是叶片设计的一个自由度,如果没有指导经验,则使用起来耗费资源且不可靠。因此,研发总结出叶片弯掠设计的数学模型是将叶片弯掠设计落实为实用技术的必经之路。

5 结论与展望

叶片弯掠技术历经近60年的发展,已经取得了丰硕的成果,部分成果已经在叶轮机领域得到了广泛应用。但仍有一些问题需要国内外专家学者继续进行进一步的探索和研究:

(1) 叶片弯掠技术在叶轮机设计中的应用,增加了叶片设计的自由度,有助于设计开发出更高性能的叶片。由于所研究的几何模型和关注的问题不同,不同学者对弯掠的定义方法存在一定的差异,但本质上均是在直叶片的基础上,通过移动叶型积叠点的位置使叶片产生弯曲或扫掠的效果,进而拓展叶片的设计空间。然而,叶片弯掠定义方法的差异还是给不同研究之间的比较以及成果的推广应用带来了不便。因此,建立标准的弯掠定义方法或不同定义方法的通用换算准则将有助于叶片弯掠气动技术的进一步发展。

(2) 目前的研究对叶片弯掠影响流场结构作用

机理的解释基本是一致的,主要是通过叶片弯掠改变叶片对气流的作用力在径向的分量,实现叶片载荷和流量沿叶展的再分配,进而控制低能流体微团的输运,减小二次流损失,降低叶栅的总损失,提高整机的气动性能。然而,如何利用弯掠作用机理构建叶片弯掠作用物理模型,进而形成可用于指导叶片弯掠设计的数学模型还需要更深入的研究。

(3)当前关于叶片弯掠作用机理的研究多是将弯曲和扫掠作为单独的自由度分别进行解释,而关于两者组合后对流场影响的作用机理以及与叶片扭曲规律的相互匹配关系却鲜有报道。此外,当前关于叶片弯掠的文献报道多以单级叶轮或多级叶轮中的某一级为研究对象,对于多级叶轮级与级之间的弯掠匹配还需要进一步的研究。

致 谢:感谢国家自然科学基金、河南理工大学创新型科研团队、河南理工大学博士基金的资助。

参考文献

- [1] Adjei R A, Fan C, Wang W, et al. Multidisciplinary Design Optimization for Performance Improvement of an Axial Flow Fan Using Free-Form Deformation[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2021, 143(1).
- [2] 陈海生, 谭春青. 叶轮机械内部流动研究进展[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(2): 1-12.
- [3] 杨 彤, 王松涛, 姜 斌. 弯曲叶片造型对涡轮叶栅作用力影响的非定常数值研究[J]. *推进技术*, 2013, 34(6): 760-767. (YANG Tong, WANG Song-tao, JIANG Bin. Unsteady Numerical Study of Effects on Turbine Blade Forces for the Bowed Blade[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(6): 760-767.)
- [4] 李龙婷, 宋彦萍, 陈 浮, 等. 不同来流附面层特性下端壁射流对弯曲叶栅内流场的影响[J]. *推进技术*, 2017, 38(6): 1278-1286. (LI Long-ting, SONG Yan-ping, CHEN Fu, et al. Effects of Endwall Jet on Flow Fields in Bowed Compressor Cascades at Different Inlet Boundary Layers[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1278-1286.)
- [5] 昌 皓, 金东海, 桂幸民. 掠叶片进口流动的流线曲率通流模型[J]. *航空学报*, 2018, 39(3): 60-70.
- [6] Wang Z, Qu F, Wang Y, et al. Research on the Lean and Swept Optimization of a Single Stage Axial Compressor[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2021, 15(1): 142-163.
- [7] Masi M, Lazzaretto A. A New Practical Approach to the Design of Industrial Axial Fans: Part II - Forward-Swept Blades with Low Hub-to-Tip Ratio[R]. *ASME GT* 2019-91532.
- [8] 程颢颐, 乔渭阳, 王良锋, 等. 倾斜/后掠叶片对风扇单音噪声的控制研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(2): 295-306. (CHENG Hao-yi, QIAO Wei-yang, WANG Liang-feng, et al. Control of Tonal Noise in an Axial Flow Fan with Rotor Tip Clearance, Stator Lean and Sweep[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(2): 295-306.)
- [9] 王仲奇, 郑 严. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(6): 37-40.
- [10] 王 维, 李 轩, 卢金玲, 等. 机匣处理作用下高负荷轴流压气机转/静子匹配设计研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(7): 1505-1513. (WANG Wei, LI Xuan, LU Jin-ling, et al. Study of Axial Matching of Rotor/Stator for a High-Loaded Axial Flow Compressor with Casing Treatment[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1505-1513.)
- [11] 王 前, 胡 骏, 李 亮, 等. 弯曲静子叶片对叶尖射流扩稳效果的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(12): 2970-2975.
- [12] Razavi S R, Boroomand M. Numerical and Performance Analysis of One Row Transonic Rotor with Sweep and Lean Angle[J]. *Journal of Thermal Science*, 2014, 23(5): 438-445.
- [13] Gümmer V, Wenger U, Kau H P. Using Sweep and Dihedral to Control Three-Dimensional Flow in Transonic Stators of Axial Compressors [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2001, 123(1): 40-48.
- [14] Smith L H, Yeh H. Sweep and Dihedral Effects in Axial-Flow Turbomachinery[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(3): 401-414.
- [15] Vad J. Aerodynamic Effects of Blade Sweep and Skew in Low-Speed Axial Flow Rotors at the Design Flow Rate—An Overview [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2008, 222(1): 39-85.
- [16] Gallimore S J, Bolger J J, Cumpsty N A, et al. The Use of Sweep and Dihedral in Multistage Axial Flow Compressor Blading, Part I: University Research and Methods Development[R]. *ASME GT* 2002-30329.
- [17] Ilikan A N, Ayder E. Influence of Dihedral Stacking on the Performance of an Axial Fan[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2014, 8(4): 518-529.
- [18] Zenger F, Herold G, Becker S. Acoustic Characterization of Forward- and Backward-Skewed Axial Fans under Increased Inflow Turbulence [J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(4): 1241-1250.
- [19] Sasaki T, Breugelmans F. Comparison of Sweep and Dihedral Effects on Compressor Cascade Performance [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(3): 454-463.
- [20] Beiler M G, Carolus T H. Computation and Measurement

- of the Flow in Axial Flow Fans with Skewed Blades [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(1): 59-66.
- [21] 邹正平, 赵令德, 陈懋章, 等. 叶轮机械叶片的三维造型及其对叶片气动负荷的影响[J]. 航空动力学报, 1998, 13(3): 12-17.
- [22] Govardhan M, Krishna Kumar O G, Sitaram N. Investigations on Low Speed Axial Compressor with Forward and Backward Sweep[J]. *Journal of Thermal Science*, 2007, 16(2): 121-133.
- [23] Krishna Kumar O G, Govardhan M, Sitaram N. Effect of Forward Sweep on the Performance and Stall Margin of a Low Speed Axial Compressor[J]. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2007, 24(4): 195-206.
- [24] Razavi S R, Sammak S, Boroomand M. Multidisciplinary Design and Optimizations of Swept and Leaned Transonic Rotor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, 139(12).
- [25] Jeong S, Choi B, Kim K. Rotor Blade Sweep Effect on the Performance of a Small Axial Supersonic Impulse Turbine[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2015, 16(4): 571-580.
- [26] 张伟光, 王晓宇, 孙晓峰. 叶片弯掠组合设计对风扇气动噪声的被动控制[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 167-175.
- [27] 蒋永松, 郑文涛, 赵航, 等. 风扇出口导向叶片低噪声设计 I: 方法与优化[J]. 航空学报, 2019, 40(10): 14-24.
- [28] 郑文涛, 蒋永松, 赵航, 等. 风扇出口导向叶片低噪声设计 II: 数值验证[J]. 航空学报, 2019, 40(10): 25-37.
- [29] Ilikan A N, Ayder E. Influence of the Sweep Stacking on the Performance of an Axial Fan[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(6).
- [30] Wang Z Q, Han W J, Xu W Y. The Effect of Blade Curving on Flow Characteristics in Rectangular Turbine Stator Cascades with Different Incidences[R]. *ASME 91-GT-060*.
- [31] 王建明, 何朝锋, 马阳. 叶片局部弯曲对跨音速轴流压气机转子性能的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2017, 34(1): 20-25.
- [32] 王会社, 钟兢军, 王仲奇, 等. 叶片正弯对扩压叶栅气动性能的影响[J]. 推进技术, 2002, 23(4): 321-324. (WANG Hui-she, ZHONG Jing-jun, WANG Zhong-qi, et al. Effects of Blade Positive Curving on Aerodynamic Performance of Compressor Cascades [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(4): 321-324.)
- [33] 王会社, 袁新, 钟兢军, 等. 叶片正弯曲对压气机叶栅叶片表面流动的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(3): 210-214. (WANG Hui-she, YUAN Xin, ZHONG Jing-jun, et al. Influence of Positive Curving on Blade Surface Flow of Compressor Cascade[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(3): 210-214.)
- [34] Obaida H M B. Cryogenic Cycle Power Turbines Optimised by Hub Contouring[D]. *Leicester: University of Leicester*, 2017.
- [35] Hourmouziadis J, Hubner N. 3-D Design of Turbine Airfoils[R]. *ASME 85-GT-188*.
- [36] Weingold H D, Neubert R J, Behlke R F, et al. Reduction of Compressor Stator Endwall Losses Through the Use of Bowed Stators[R]. *ASME 95-GT-380*.
- [37] D'Ippolito G, Dossena V, Mora A. The Influence of Blade Lean on Straight and Annular Turbine Cascade Flow Field[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(1).
- [38] 钟兢军, 苏杰先, 王仲奇, 等. 弯叶扩压叶栅壁面静压分布实验研究[J]. 航空动力学报, 1994, 9(3): 255-258.
- [39] Kim J, Choi J, Husain A, et al. Performance Enhancement of Axial Fan Blade Through Multi-Objective Optimization Techniques[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(10): 2059-2066.
- [40] 欧阳华. 新型可逆式弯掠组合叶片的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [41] Breugelmans F A H, Carels Y, Demuth M. Influence of Dihedral on the Secondary Flow in a Two-Dimensional Compressor Cascade[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 1984, 106(3): 578-584.
- [42] 韩万今, 徐文远, 王仲奇. 叶片倾斜对叶栅出口流场的影响[J]. 动力工程, 1991, 11(4): 43-48.
- [43] 尚尔兵, 苏杰先, 王仲奇, 等. 有周向倾斜叶片的压气机叶栅的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1992, 13(4): 363-368.
- [44] Harrison S. The Influence of Blade Lean on Turbine Losses[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 114(1): 184-190.
- [45] 钟兢军, 苏杰先, 王仲奇, 等. 叶片倾斜和弯曲对扩压叶栅出口流场的影响[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(1): 29-34.
- [46] 王东, 苏杰先, 王仲奇, 等. 叶片弯曲对压气机叶栅损失与速度的影响[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 1045-1048.
- [47] 赵桂杰, 陈浮, 宋彦萍, 等. 不同掠型扩压叶栅壁面静压分布特性研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 265-269.
- [48] Weingold H D, Neubert R J, Behlke R F, et al. Bowed Stators: An Example of CFD Applied to Improve Multi-stage Compressor Efficiency[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(2): 161-168.
- [49] 徐国林. 采用弯扭掠叶片改进设计风扇的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [50] Bogod A B, Kimasov Y I, Mitrokhin V I. Direct and In-

- verted Calculation of 2D Axisymmetric and 3D Flows in Axial Compressor Blade Rows [J]. *Revue Francaise de Mecanique*, 1992, 4: 351-359.
- [51] Robinson C J, Northall J D, McFarlane C W R. Measurement and Calculation of the Three-Dimensional Flow in Axial Compressor Stators, with and without End-Bends [R]. *ASME 89-GT-6*.
- [52] 张艳英, 苏杰先, 吴 猛, 等. 叶轮机械三维弯叶片粘性流场的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(3): 11-13.
- [53] 姜 斌, 郑 群, 王松涛, 等. 跨声速风扇的弯、掠三维设计研究[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(8): 1815-1825.
- [54] 张晨凯, 胡 骏, 王志强, 等. 低速轴流压气机转子叶片三维优化的数值研究[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(2): 483-490.
- [55] 陈 榴, 胡 磊, 戴 韧. 高负荷轴流风扇中弯曲动叶的应用研究[J]. *风机技术*, 2017, 59(3): 14-19.
- [56] 宋彦萍, 李 娜, 王松涛, 等. 弯曲动叶对跨音轴流压气机性能的影响[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(4): 582-584.
- [57] Padullaparthi V R, Govardhan M. On Loading Corrections and Loss Distributions in Low-Speed Forward Swept Axial Compressor Rotors[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2011, 225(1): 120-130.
- [58] Lewis R I, Hill J M. The Influence of Sweep and Dihedral in Turbomachinery Blade Rows[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science* 1959-1982, 1971, 13(4): 266-285.
- [59] Masi M, Lazzaletto A. A Simplified Theory to Justify Forward Sweep in Low Hub-to-Tip Ratio Axial Fan [R]. *ASME GT 2015-43029*.
- [60] Tweedt D L, Okiishi T H, Hathaway M D. Stator End-wall Leading-Edge Sweep and Hub Shroud Influence on Compressor Performance[R]. *ASME 86-GT-197*.
- [61] 季路成, 陈 江, 林 峰. 轴流压气机设计中“掠”的另类认识[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(4): 567-571.
- [62] Amano R, Xu C. Blade Sweep Effects of Turbomachinery [R]. *AIAA 2005-48*.
- [63] Gallimore S J, Bolger J J, Cumpsty N A, et al. The Use of Sweep and Dihedral in Multistage Axial Flow Compressor Blading: Part II—Low and High Speed Designs and Test Verification[R]. *ASME GT 2002-30329*.
- [64] Corsini A, Rispoli F. Using Sweep to Extend the Stall-Free Operational Range in Axial Fan Rotors[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2004, 218(A3): 129-139.
- [65] He X, Zheng X. Mechanisms of Sweep on the Performance of Transonic Centrifugal Compressor Impellers[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(10).
- [66] Mohammed K P, Raj D P. Investigations on Axial Flow Fan Impellers with Forward Swept Blades[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1977, 99(3): 543-547.
- [67] Yamaguchi N, Tominaga T, Hattori S. Secondary-Loss Reduction by Forward-Skewing of Axial Compressor Rotor Blading[C]. *Yokohama: Yokohama International Gas Turbine Congress*, 1991.
- [68] Passrucker H, Engber M, Kablitz S, et al. The Effect of Forward Sweep in a Transonic Compressor Rotor[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2003, 217(4): 357-365.
- [69] Wadia A R, Szucs P N, Crall D W. Inner Workings of Aerodynamic Sweep [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(4): 671-682.
- [70] Neubert R J, Hobbs D E, Weingold H D. Application of Sweep to Improve the Efficiency of a Transonic Fan. I-Design[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(1): 49-54.
- [71] Bergner J, Kablitz S, Hennecke D K, et al. Influence of Sweep on the 3D Shock Structure in an Axial Transonic Compressor[R]. *ASME GT 2005-68835*.
- [72] Vad J, Halasz G, Benedek T. Efficiency Gain of Low-Speed Axial Flow Rotors Due to Forward Sweep[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2015, 229(1): 16-23.
- [73] Vijayraj K, Govardhan M. Aerodynamics of Contra-Rotating Fans with Swept Blades[C]. *India: ASME 2015 Gas Turbine India Conference*, 2015.
- [74] Shan P. Kinematic Analysis of 3-D Swept Shock Surfaces in Axial Flow Compressors[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2000, 122(3): 490-500.
- [75] Shan P, Zhou S. A Helical Surface Model for 3-D Shock Structure Analysis[R]. *ASME 99-GT-226*.
- [76] 昌 皓, 朱 芳, 金东海, 等. 叶片掠对跨声转子进口流动的影响[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(4): 857-866.
- [77] Seo S J, Choi S M, Kim K Y. Design Optimization of a Low-Speed Fan Blade with Sweep and Lean[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2008, 222(1): 87-92.
- [78] Song W, Zhang Y, Chen H. Design and Optimization of Multiple Circumferential Casing Grooves Distribution Considering Sweep and Lean Variations on the Blade Tip [J]. *Energies*, 2018, 11(9).
- [79] Zenger F, Müller J, Becker S. Investigation of Aero-

- acoustic Properties of Low-Pressure Axial Fans with Different Blade Stacking[R]. *AIAA* 2017-3389.
- [80] Neipp A, Riedelbauch S. Numerical Investigation of Blade Lean and Sweep Affecting Secondary Flows in an Axial Expansion Turbine[C]. *Grenoble: 28th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, 2016.
- [81] Patel A B, Viswanath K, Nath D D. Effect of Axial Sweep and Tip Extension on Performance of an Axial Fan [C]. *Arizona: ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2016.
- [82] Helming K. Numerical Analysis of Sweep Effects in Shrouded Propfan Rotors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1996, 12(1): 1-10.
- [83] 王会社, 袁 新, 岳国强, 等. 弯曲叶片积叠线对压气机叶栅气动性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2002, 17(3): 327-331.
- [84] 董学智, 张华良, 赵洪雷, 等. 弯叶片对压气机叶片表面流动稳定性影响研究[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(12): 2015-2018.
- [85] Asgarshamsi A, Hajilouy-Benisi A, Assempour A, et al. Multi-point Optimization of Lean and Sweep Angles for Stator and Rotor Blades of an Axial Turbine[J]. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering*, 2017, 41(1): 35-47.
- [86] 胡 俊, 金光远, 崔政伟, 等. 基于复合弯掠技术的轴流风机叶轮优化[J]. *空气动力学学报*, 2019, 37(6): 966-973.
- [87] 朱芳勇, 吴俊鸿, 高 旭, 等. 空调低压轴流弯掠叶片参数化优化设计与实验研究[J]. *制冷技术*, 2019, 39(3): 17-21.
- [88] 乔清华, 杨 波, 钟芳源, 等. 双激盘理论在轴流风机设计中的应用[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(7): 1140-1143.

(编辑:梅 瑛)