

DOI: 10.7652/xjtuxb201711001

大预旋下离心压缩机进口结构与 导叶掠角的改进研究

赵家毅, 王志恒, 席光, 赵阳
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了解决大预旋下进口导叶诱发流动损失而降低进口预旋调节经济性的问题,将原进口导叶截面中前缘掠角改为相对顶端型线呈前掠,同时将传统衔接进口导叶处进气管道的顶端形状改为锥面。改进结构下进口导叶内部的二次流克服了大预旋下离心力引发的进口轮盘侧的大规模分离状况,改善了叶轮进口段的熵增情况。预旋角分别为 $+60^{\circ}$ 、 -60° 时,改进结构在宽流量范围内可以有效提升离心压缩机多变效率和总压比性能,提升幅值随流量的增大而升高;在工况范围左边界基本保持不变的情况下,改进结构对大预旋下压缩机工况范围右边界的扩展效果明显。该结果表明,改进结构可以有效提升大预旋下压缩机的性能,具有良好的应用前景及推广潜力。

关键词: 离心压缩机;进口导叶;掠角;流动控制

中图分类号: TK123 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0001-06

Improvements of Inlet Structure and Sweep-Angle of Guide Vane Inside a Centrifugal Compressor at Large Pre-Swirl

ZHAO Jiayi, WANG Zhiheng, XI Guang, ZHAO Yang
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: At large pre-swirl, the flow loss induced by the inlet guide vane (IGV) usually degrades the economy of the regulation scheme. Aiming at reducing flow loss at large pre-swirl, the sweep angle at the leading edge of the IGV is changed in forward direction relative to the shroud line. The traditional shape of the shroud of the inlet pipe connecting with the IGV is modified to the cone. The secondary flow initiated within the improved design overcomes the considerable hub flow separation caused by the centrifugal force at the high pre-swirl. The situation of the entropy increase is heightened at the impeller inlet. The new structure efficiently improves the polytropic efficiency and the total pressure ratio of the centrifugal compressor within a wide operation range for the pre-swirl of $+60$ and -60 degrees. The improvements are enhanced with the increasing flow rate. While the left margin in the operation range remains constant, the right margin obviously widens.

Keywords: centrifugal compressor; inlet guide vane; sweep-angle; flow control

离心压缩机可以通过进口导叶调节(预旋)的方式使其性能曲线发生偏移,达到在更小或者更大流量下运转的目的。然而,随着预旋角度的增大,进口段的流动损失增大。文献[1]研究表明,在大预旋

下,传统进口导叶结构的流动损失占离心压缩机整体流动损失的比例较高,因此降低进口导叶在大预旋下的流动损失对提高进口导叶调节的经济性具有重要的意义。

国内外学者针对大攻角流动的导叶叶型进行了研究。Coppinger 等分别采用不同安装角的串联导叶叶型来抑制大攻角下的叶片表面流动分离^[2]。Mohseni 等的实验研究表明,串联导叶叶型有利于控制流动分离^[3]。Zhang 等指出,传统扇形截面进口导叶的中间叶高处会因为弦长不足而导致流动偏转能力不足,据此设计了一种改进型进口导叶^[4]。谭佳健等对多种进口导叶叶型特点进行了对比^[5]。刘天一等研究结果表明,增大当量预旋半径参数可以提高进口导叶段的流动效率,但是同时会降低进口导叶下游部件的效率^[6]。范朝阳阐述了叶型的相对厚度与弯度对进口导叶内部流动情况的影响^[7]。Zheng 等优化进口段近轮盘侧型线结果表明,叶轮进口近轮盘侧的型线曲率增大会造成压缩机性能下降^[8]。

然而,通过改变进口导叶叶型来遏制大预旋下的流动恶化并不适用于整个运行工况的范围,这是因为不同工况下进口轴向速度有所不同。文献[1]研究发现,预旋诱发的离心力所导致的近轮盘面上的分离,以及预旋条件下近叶轮顶端流动入射角与叶片安装角不匹配,是造成大预旋下流动损失加剧的最主要原因,而叶型表面流动分离所导致的流动损失占整体进口导叶段损失的比例相对有限。

根据文献[9]的研究,本文提出了一种改进进口导叶掠角和顶端型线的方法,来遏制大预旋下离心压缩机进口段的流动分离,同时研究了改进结构下进口导叶和叶轮内部流动结构的变化,以及改进结构对整机性能参数的影响。

1 数值方法及实验验证

采用商用软件 NUMECA FINE/Turbo、通过求解三维 RANS 方程组,来模拟西安交通大学流体机械及压缩机国家工程中心某 1.5 级大型离心压缩机实验平台的内部流动。湍流模型采用鲁棒性较好的 S-A 模型。离心压缩机各部件几何参数如表 1 所示。计算区域由单通道的叶轮、扩压器及全通道的蜗壳组成,并生成多块结构化网格,如图 1 所示。计算模型的网格节点数约为 400 万,为保证近壁面的流动模拟精度,所有近壁面网格进行了加密处理,使 $Y^+ < 10$ ($Y^+ = u^* \Delta y / \nu$, u^* 为壁面摩擦速度, Δy 为边界层第一层网格高度, ν 为运动黏性系数)。根

据文献[10],S-A 模型在 $Y^+ < 10$ 范围内可以较好地捕捉到叶片表面边界层的流动现象。为了研究不同预旋下的流动,分别建立了一 60° 与 $+60^\circ$ 这 2 种预旋下的计算模型。

表 1 离心压缩机几何参数

参数	进口导叶	叶轮	叶片扩压器
进口直径/mm	422	421.8	940
出口直径/mm	422	796	1 258
进口叶展高度/mm		103.9	43.8
出口叶展高度/mm		43.8	43.8
进口叶片安装角/ $^\circ$	0	28	17
出口叶片安装角/ $^\circ$	0	58	29
叶片数	13	10+10	13

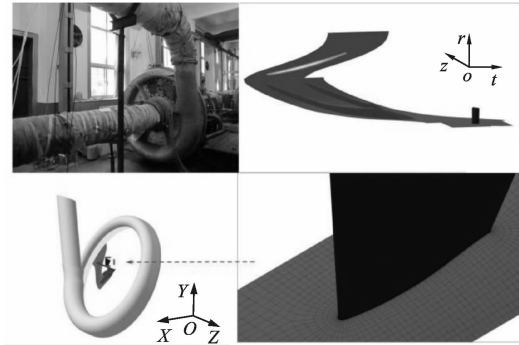


图 1 实验平台及计算网格

模拟时,进口采用恒定总温、总压边界条件,为实际测量时的室温(292.4 K)和大气压(97.96 kPa),出口采用质量流量条件,固壁采用无滑移绝热边界条件。计算收敛根据总残差是否到达 10^{-6} 来判定。

数值模拟结果与在实验平台上进行的不同进口导叶预旋下压缩机性能测试结果^[8]进行了对比,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,数值方法所得总压比与实验性能符合较好。一 60° 和 $+60^\circ$ 预旋下,在选取的工况范围内最大误差约为 1.5%,一 60° 和 $+60^\circ$ 预旋下,在选取的范围工况内最大误差分别约为 2.2%、1.7%。因此,本文数值模拟方法可以较

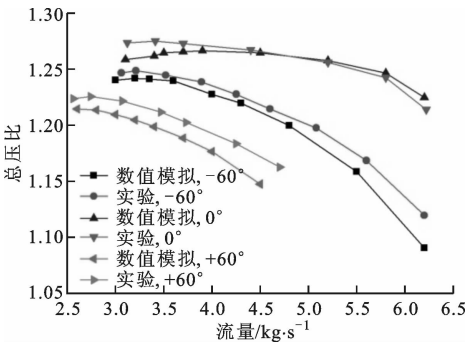


图 2 不同预旋下总压比的实验与数值模拟对比

好地捕捉到实际流场的变化情况。

2 原始方案的流动分析

如图 3 所示,原始方案采用圆柱形进气道与扇形截面导叶叶型设计。在无预旋下,这种设计方法可以在一定程度上抑制进口流动的不均匀性,同时在加工上具有一定的简便性。然而,在大预旋下,该方案会引发严重的流动分离问题。

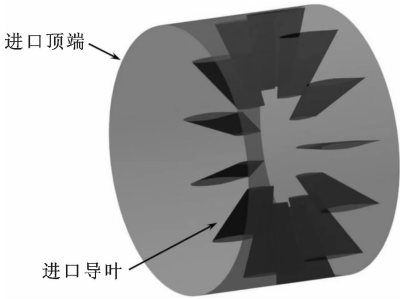
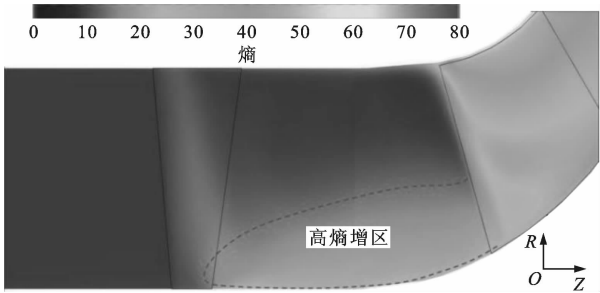
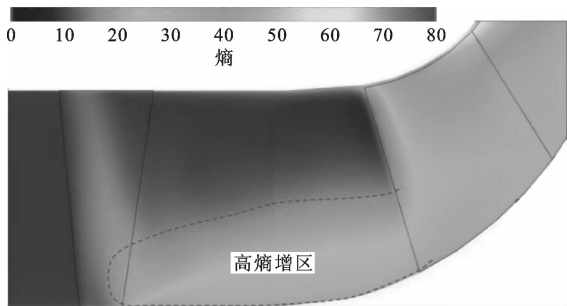


图 3 原始进口结构

图 4 给出了采用初始进口结构和导叶在 -60° 预旋下叶轮上游周向平均熵值的分布。从图 4 可以看出:质量流量 $Q_m=3.2\text{ kg/s}$ 时,进口导叶末端至叶轮叶片前缘间近轮盘侧会出现明显的高熵增区(见图中虚线);随着流量增大至 $Q_m=4.0\text{ kg/s}$,该区域内的流动损失有增大的趋势。 $+60^\circ$ 预旋下的情况类似,受篇幅影响,此处不再描述。



(a) $Q_m=3.2\text{ kg/s}$



(b) $Q_m=4.0\text{ kg/s}$

图 4 原始进口结构在 -60° 预旋下流动熵增图

图 4 中的高熵增区可由圆柱坐标系下周向平均(即忽略 θ 方向变化)流动沿 R 方向的动量方程来解释,方程如下

$$\rho\left(u_R\frac{\partial u_R}{\partial R}+u_Z\frac{\partial u_R}{\partial Z}-\frac{u_\theta^2}{R}\right)=-\frac{\partial p}{\partial R}+\mu\left(\nabla^2 u_R-\frac{u_R}{R^2}\right)+\rho f_R\tag{1}$$

式中: ρ 为气体密度; p 为静压; u_θ 为周向平均速度; u_Z 为 Z 方向流动速度; μ 为动力黏性系数; f_R 为 R 方向体积力。本文中,由于黏性力项 $\mu\left(\nabla^2 u_R-\frac{u_R}{R^2}\right)$ 和体积力项 f_R 在数值上远小于 $\rho\frac{u_\theta^2}{R}-\frac{\partial p}{\partial R}$ 项(小于 1%),故可以将式(1)中黏性力项和体积力项忽略,由此得到

$$\rho\left(u_R\frac{\partial u_R}{\partial R}+u_Z\frac{\partial u_R}{\partial Z}-\frac{u_\theta^2}{R}\right)=-\frac{\partial p}{\partial R}\tag{2}$$

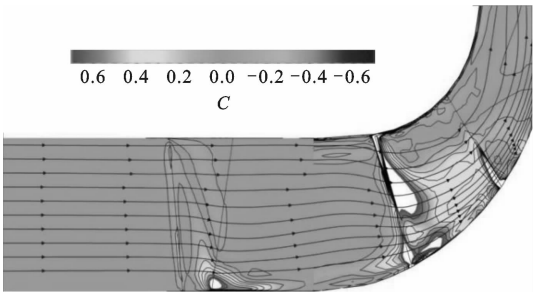
式(2)中,进口导叶段表征 R 方向流动速度 u_R 变化特征的 $u_R\frac{\partial u_R}{\partial R}+u_Z\frac{\partial u_R}{\partial Z}$ 项由 $\rho\frac{u_\theta^2}{R}-\frac{\partial p}{\partial R}$ 决定。

由于研究对象为马赫数小于 0.4 的内部流动,故为了便于讨论,本文近似认为气体不可压缩, ρ 为恒定值,同时在衡量流动过程中气体受到离心力作用的参数定义为

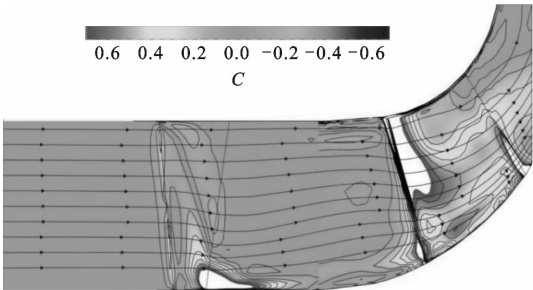
$$C=\left(\rho\frac{u_\theta^2}{R}-\frac{\partial p}{\partial R}\right)/P_0\tag{3}$$

式中: P_0 为进口总压。

图 5 描述了原始进口结构在 -60° 预旋下进口



(a) $Q_m=3.2\text{ kg/s}$



(b) $Q_m=4.0\text{ kg/s}$

图 5 原始进口结构在 -60° 预旋下 C 参数与流线分布

段 C 参数的分布及对应流动情况。从图 5 中可以发现:在进口导叶下部存在较大的正 C 参数区域,这是因为此区域中存在较大的离心力,而与其方向相反的压力梯度却较小;该区域后部的流动速度沿流线方向具有明显 R 方向的增量,这就造成了主流不能很好地适应近轮盘侧型线,进而形成高熵增区;随着流量的增大,该区域范围明显扩大, C 参数值显著增大,即对流动的影响更显著。这就解释了随着流量增大近轮盘区高熵增区扩大的原因。

3 进口结构与导叶的改进方案

为了有效抑制进口导叶后端至叶轮叶片前缘间近轮盘侧高 C 参数区域的作用,本文利用改变进口导叶掠角的方法来调整进口导叶进口流动状态,使导叶尾部主流具有向轮盘侧聚集的趋势,从而使 R 方向的运动趋势得到抑制。具体的改进方案如图 6 中虚线所示:在保持进口导叶底面叶型不变的基础上将导叶底端型线向上游方向平移,使进口导叶前缘掠角 θ_2 相对底面呈 75° 后掠。该设计主要目的在于,控制导叶进口来流向轮盘侧偏移。为了克服主流向轮盘侧偏移导致近顶端侧流动能力不足的问题,同时考虑到直线型线与流动配合的问题,改进结构中将顶端型线由原始方案下圆柱面(黑色实线所示)改为锥面(黑色虚线所示)。考虑到过大的锥角可能带来新的流动分离问题,设计的锥角 θ_1 为 12° (限于篇幅,此处没有给出更多方案)。同时,在保持进口导叶上端面叶型不变的基础上,将沿新的导叶前缘线方向向斜上方移动,在此过程中进行适当的偏转使之与顶端型线保持良好的配合。

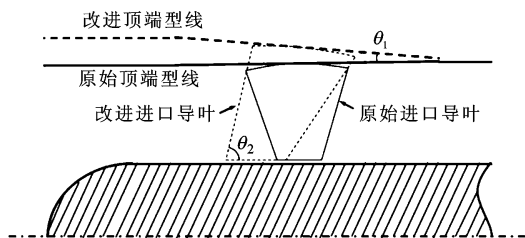
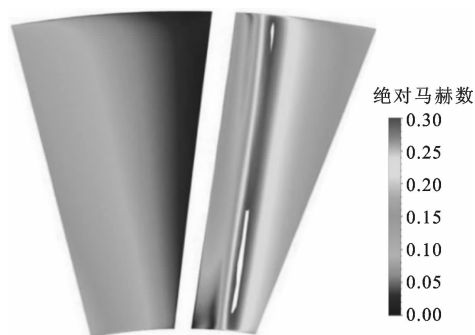


图6 进口结构改进示意图

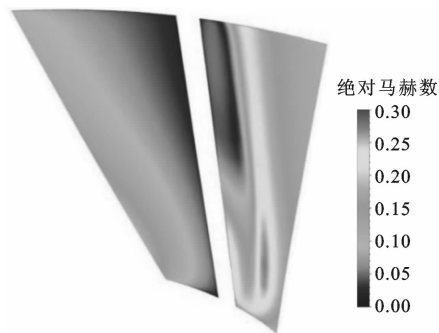
4 进口结构与改进导叶的流场分析

4.1 改进方案与原始方案的流场对比

图 7 给出了 Q_m 为 4.0 kg/s 且在 -60° 预旋下原始与改进导叶进口处绝对马赫数分布对比。从图 7 中可以看出,改变掠角后从根本上改变了原始导叶结构中上、下较为均匀的马赫数分布情况。在改进结构中,受导叶右侧上部近叶片表面低速区的挤



(a) 原始进口结构

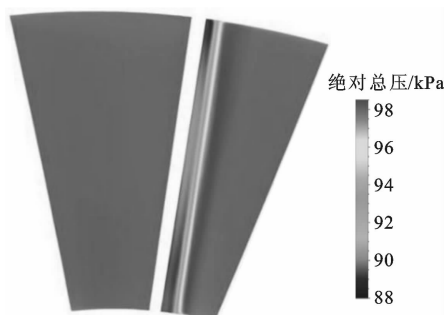


(b) 改进进口结构

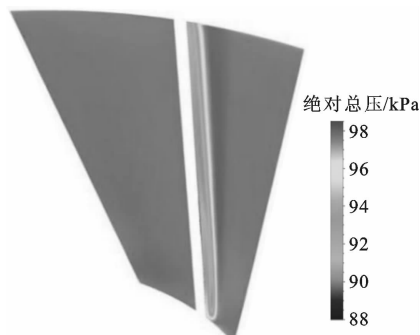
图7 Q_m 为 4.0 kg/s 且在 -60° 预旋下原始与改进导叶进口处绝对马赫数分布

压,导叶进口马赫数分布呈现出上低下高的趋势。

图 8 给出了 Q_m 为 4.0 kg/s 且在 -60° 预旋下



(a) 初始进口结构



(b) 改进进口结构

图8 Q_m 为 4.0 kg/s 且在 -60° 预旋下原始与改进导叶进口处绝对总压分布

原始与改进导叶进口处绝对总压分布。从图 8 可以看出,导叶进口处的叶片表面分离情况十分有限,改进前、后进口处的总压损失都集中在十分贴近导叶叶片表面的有限区域内,而其余绝大多数区域依然基本保持在进口总压的水平。因此,除有限的总压损失区以外的绝大部分区域近似满足 $p + \frac{1}{2}\rho u^2 = P_0$, 其中 u 代表绝对速度, $u = aMa$, a 为当地声速, Ma 为当地绝对马赫数。

结合图 7 可以推断,对于原始进口结构,展向相对均匀的马赫数分布决定了展向静压分布的相对均匀性,表明 $\frac{\partial p}{\partial R}$ 项在该结构的进口截面上的变化并不显著。与此同时,考虑到进口处的 u_θ^2/R 项几乎不存在,可以推测出原始结构下导叶进口处 $u_R \frac{\partial u_R}{\partial R} + u_z \frac{\partial u_R}{\partial Z}$ 项的作用是不明显的,进口流动整体平缓,该特征也可以从图 5 中的流线分布看出。类似地,从右侧明显上低下高的展向马赫数分布可以推断出,改进结构中进口 $\frac{\partial p}{\partial R}$ 项的变化相比原始结构更为显著,如图 9 所示。从图 9a 的 C 参数与流线分布图可以看出,在进口导叶进口处,受负 C 参数区域的驱动,进口来流在进入进口导叶后即刻具有了明显的向下(即 $-R$ 方向)的偏转趋势,气体工质在该影响

下不断向近轮盘区域积累,有效消除了原始结构中近轮盘区域的流动分离情况,与此同时,锥形的顶端保证了顶部与主流之间较好的贴合,所以在顶端附近几乎没有出现新的流动分离情况。从图 9b 可以发现,原始结构中近轮盘侧的高熵增区几乎消失,而导叶表面的熵增情况也有所减弱。

4.2 不同预旋下的性能对比

图 10 与表 2 分别给出了原始与改进结构下叶轮进口 $Z/Z_0=1$ (其中 Z_0 为叶轮进口轴向位置)截面及该截面处质量平均流动角的情况,可以发现,改进后的结构在流动偏转能力上与原始结构没有太大差异,都可以达到有效预旋的目的。

表 2 $Z/Z_0=1$ 截面处质量平均流动角

预旋角/(°)	$Q_m/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	质量平均流动角/(°)	
		改进结构	原始结构
-60	3.2	-61.84	-64.91
-60	4.0	-61.96	-65.13
-60	4.8	-61.98	-64.72
+60	3.0	61.52	64.51
+60	4.0	61.69	63.10
+60	5.0	61.63	62.90

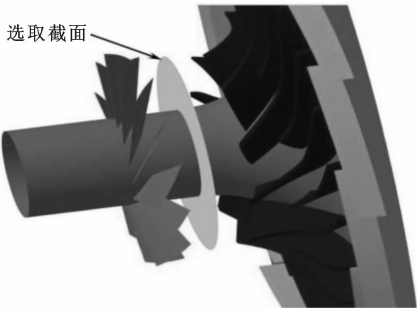


图 10 $Z/Z_0=1$ 截面示意图

图 11 给出了不同预旋下原始与改进结构的整机性能对比。由图 11 表明:在所选工况范围(雷诺数范围)内,改进结构在向小流量工况调节能力上与原始结构基本相似,这可以从总压比曲线看出,即在 -60° 、 $+60^\circ$ 预旋下,原始与改进结构的总压比曲线下降点对应的流量十分接近;在整体工况范围,改进结构可以明显提升压比和效率。 -60° 预旋时,在近失速工况 $Q_m=3.0 \text{ kg/s}$ 上多变效率与总压比分别提升 1.72% 和 1.33%,在改进前的最高效率工况 $Q_m=3.4 \text{ kg/s}$ 上多变效率与总压比分别提升 2.97% 和 1.84%; $+60^\circ$ 预旋时,在近失速工况 $Q_m=3.2 \text{ kg/s}$ 上多变效率与总压比分别提升 3.39% 和

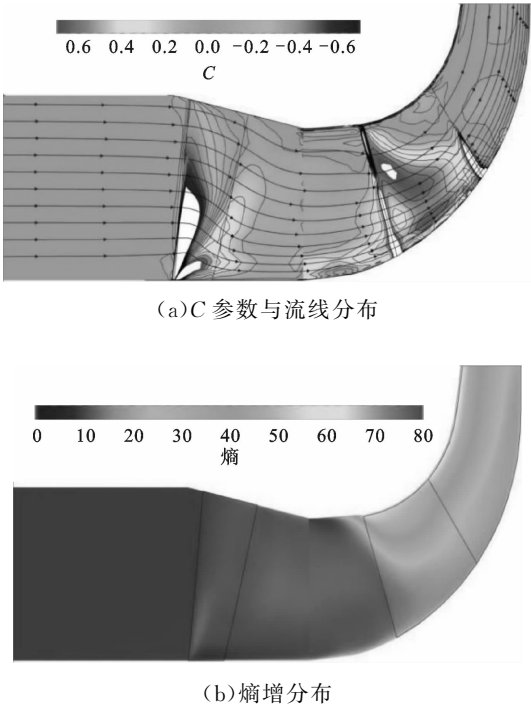
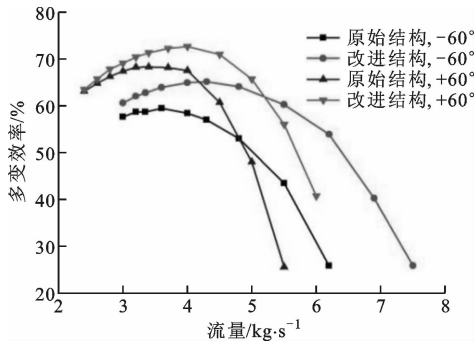
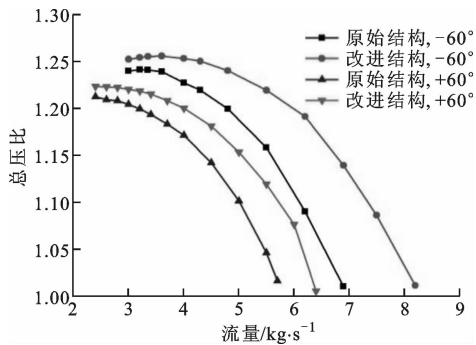


图 9 Q_m 为 4.0 kg/s 且在 -60° 预旋下改进结构的 C 参数、流线及熵增分布



(a)多变效率



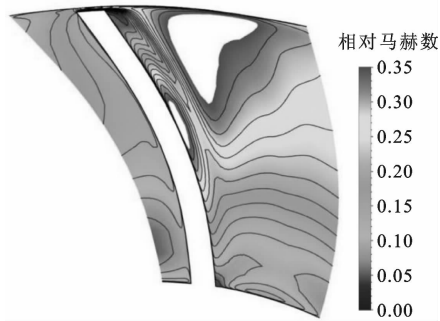
(b)总压比

图 11 不同预旋下原始与改进结构的整机性能对比

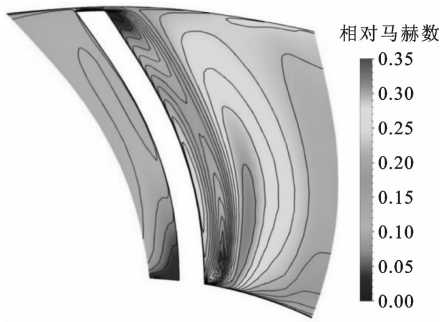
1.05%，在改进前的最高效率工况 $Q_m=4.0\text{ kg/s}$ 上多变效率与总压比分别提升 6.51% 和 2.12%。同时发现，改进结构对于性能的提升则随着流量的上升不断增大。这是因为随着流量的增大，原始结构的分离损失就越大，而改进结构对其进行有效抑制后所恢复的性能就越明显。需要强调的是，改进结构在近阻塞工况下的性能良好： -60° 预旋时，改进结构在 $Q_m=5.5\text{ kg/s}$ 上多变效率与总压比较原始结构提高 16.9% 和 5.26%； $+60^\circ$ 预旋时，改进结构在 $Q_m=5.0\text{ kg/s}$ 上多变效率与总压比较原始结构提高 17.7% 和 4.72%。此外，图 11 性能曲线还表明， $+60^\circ$ 预旋时改进结构下的工况范围右边界较原始进口结构扩大了 12.3%， -60° 预旋时右边界扩大了 18.8%。其原因见图 12：采用改进结构对于叶轮进口截面上近轮盘处的阻塞具有良好改善作用，即通过将原始结构下叶轮近顶端处高马赫数的流动引导至近轮盘区，可以使叶轮进口截面处的马赫数展向分布更加均匀，整机的阻塞流量也因此向更大的流量区域迁移。

5 结 论

本文通过改进进口导叶掠角和顶端型线的方法，



(a)原始结构



(b)改进结构

图 12 $Q_m=5.0\text{ kg/s}$ 且在 $+60^\circ$ 预旋下原始与改进结构对叶轮前缘进口截面处相对马赫数的影响

法，改善了某 1.5 级离心压缩机平台在大预旋下的流动和性能。改进结构在显著提升效率与压比的同时，还在一定程度上扩大了工况调节范围，所得结论如下。

(1) 流动分离会引发位于进口导叶后端至叶轮前端间近轮盘侧的高熵增区。与大预旋下导叶叶片表面流动损失相比，该类型损失更为显著。

(2) 采用同时改进进口导叶掠角及顶端型线的方法，可以有效抑制大预旋下进口段近轮盘面上的流动损失。改进结构可以在宽工况曲线范围内显著提高整机性能，且随着流量的增大，改善效果更明显。

(3) 在保持叶轮进口流动偏转能力基本一致的情况下，改进结构的叶轮进口马赫数的分布更为合理，从而扩大了压缩机在大流量时的工作范围。 $+60^\circ$ 、 -60° 预旋时，改进结构下的工况调节范围均显著增大。

本文提出的离心压缩机进口结构与导叶掠角改进方案能大幅提高整机的多变效率与压比，适用于较为宽广的预旋角度范围和工况范围，具有实际工程推广、应用的潜力。进一步的研究将在此基础上，对导叶前掠角和进口结构进行设计优化。

(下转第 50 页)