

改进的 Qiu 滑移因子模型用于离心压气机 叶轮的参数研究

孟 斐, 田晓沛, 单 鹏

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为适用于微型离心压气机叶轮的通流设计, 对 Qiu 滑移因子模型加入了 3 个经验参数. 首先对经验参数的求解方法及参数对于设计精度的影响进行了分析研究, 发现其中经验参数 c_r 对于设计精度影响较大. 其次在通流设计中应用改进的 Qiu 滑移因子模型辅助生成叶片, 用计算流体动力学(CFD)研究了 c_r 所影响的模型滑移因子, 与数值流场的出口平均滑移因子对比, 得到了多种叶轮总体参数下 c_r 的最佳取值. 发现虽然微型、大型离心压气机叶轮总体参数变化范围很大, 但 c_r 的取值均以 0.7 左右为其最佳值.

关 键 词: 离心压气机; 大小叶片; 通流设计; 流线曲率法; 滑移因子模型

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Parametric research on improved Qiu slip factor model for centrifugal compressor impellers

MENG Fei, TIAN Xiao-pei, SHAN Peng

(School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To adapt the slip factor model proposed by Qiu to the through-flow design of micro-centrifugal impellers, three empirical parameters were introduced to reduce the system error. Firstly, the solving method of these empirical parameters and the impact on the design accuracy were researched. It is seen that empirical parameter c_r influences the design accuracy greatly. Secondly, with employment of the improved Qiu slip factor model, a micro-centrifugal impeller was designed. The predicted slip factors impacted by c_r in the model were compared with the impeller-outlet-averaged slip factors resulted from the CFD flow field simulation. The most suitable values of c_r were found at different prescribed design overall parameters. It is found that c_r nearby 0.7 has a best estimation, though the overall parameters of micro- or large-centrifugal compressor impeller vary widely.

Key words: centrifugal compressor; splitter blade; through-flow design;
streamline curvature method; slip factor model

离心压气机被广泛应用于高性能、小流量燃气轮机、涡轮增压器等领域. 与轴流压气机叶轮显著不同, 离心压气机叶轮具有流道狭长、流道子午投影曲率大等特点, 同时具有单级气动负荷大、二次流动复杂等特征. 因此离心压气机叶轮出口的

气流滑移现象是普遍存在的, 与离心压气机叶轮气动性能密切相关, 是叶片设计中不可回避的重要流动特征. 本文主要研究 Qiu 滑移因子模型(以下简称 Qiu 模型)在微型和大型高负荷离心压气机通流设计中的应用.

1 滑移机理和 Qiu 模型

有限叶片数的离心压气机中,相对速度沿通道宽度是不均匀的,沿叶片运动方向的前壁面上速度较低,压力较高,在后壁面上则相反.这种速度分布是由径向速度 w_r 和环流速度 w_c 叠加而成^[1],由速度叠加原理,当 $w_r < w_c$,在叶片的前壁上就可能出现倒流现象(见图1, ω 为转速).

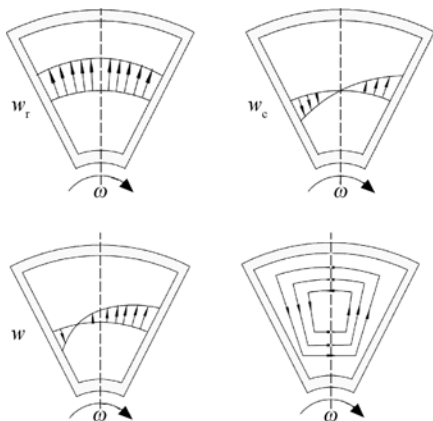


图1 离心压气机叶轮中两种速度的合成及通道涡的形成

Fig. 1 Synthesis of two speeds in centrifugal compressor impeller and formation of passage vortex

叶片通道内气体的相对回转,使得流道出口气体相对速度 w_2 在切向产生一个与圆周速度反向的分量 Δw_u ,使相对速度分量 Δw_{2u} 减小,引起绝对速度 c_{2u} 的下降,直接使叶轮加给气体的加功量减小.与无限多叶片叶轮(以下标 ∞)相比,有限多叶片时,显然出口周向速度

$$c_{2u} = c_{2u\infty} - \Delta w_u \quad (1)$$

需要加入一个系数来考虑其速度损失,即滑移因子

$$\sigma = c_{2u} / c_{2u\infty} \quad (2)$$

人们通过很多计算和实验方法来找出影响滑移因子的各种因素,但影响滑移现象的因素有很多,比如流向压力梯度、附面层特征、间隙涡等^[2-6],因此目前从理论上确定滑移因子还是一个困难的问题.对滑移模型机理的理解以及各影响因素的模化就成了预测滑移现象的关键.不同学者对于主控因素的选择略有不同,但是一般认为主要有两个: $r-\theta$ 平面内气流的通道涡和 $z-\theta$ 平面内气流的扭转(见图2).

美国北部研究与工程公司(NREC)的 Qiu 等^[7]在滑移因子模型的通用性和适用范围等方面

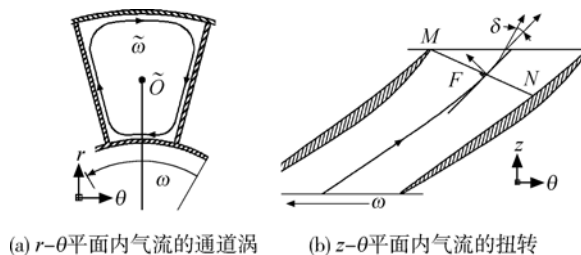


图2 气流滑移主控因素示意图

Fig. 2 Schematic diagram of primary reasons for flow slip

进行研究,提出并部分验证了通用于离心、轴流、斜流压气机叶轮的敏感于叶轮出口流量系数的滑移因子模型,较之传统离心压气机叶轮的滑移因子模型具有明显进步意义,即为 Qiu 模型.用该模型已验证了其可以成功拟合若干典型叶轮在典型流量系数下的滑移因子.可以看到,Qiu 模型中滑移因子受气流流动状态影响,这有助于在更宽的有效范围内有效预测滑移因子.

2 改进的 Qiu 模型

文献[8]将 Qiu 模型用于通流反问题并做出了3点改进^[8]. Qiu 模型是叶轮出口处气流滑移平均值的模型,而叶轮出口气动和几何参数沿叶片展向分布都是不均的,故改进如下:①对 Qiu 模型做了多流管化或展向差分化的改进(见图3),将其推广为能反映出流场的展向变化的一维模型;②引入了经验参数 c_r , c_{mst} 来校正多流管化改进所产生的系统性误差;③引入了叶片尾缘形状等效厚度 $t_{tr,eq}$ 以代替 Qiu 模型中的叶片尾缘金属厚度 t_{tr} .

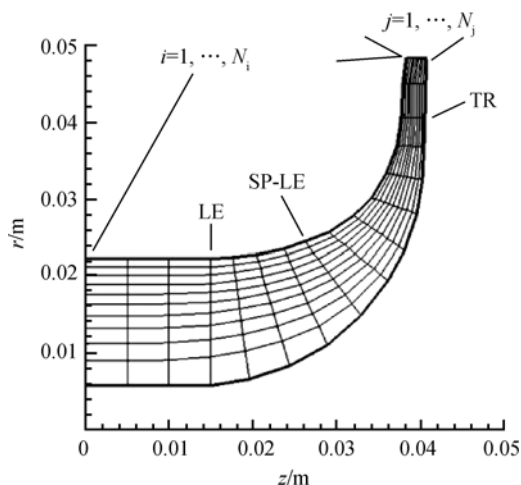


图3 通流设计计算站

Fig. 3 Integration stations for through-flow design

图 3 中 LE 代表叶片坐标起始点, 取为 4; SP-LE 代表分流叶片起始点, 取为 8; TR 代表叶片坐标结束点, 取为 14, N_i 为计算站数目, 取为 16; N_j 为流线数目, 取为 11.

综上, 改进的 Qiu 模型中, 第 j 流管的滑移因子 σ 为^[8]

$$\sigma = 1 - \Delta\sigma_{\text{radial}} - \Delta\sigma_{\text{turn}} - \Delta\sigma_{\text{passage}} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{\text{radial}} = (c_r F \pi \cos \bar{\beta}_b \sin \bar{\gamma} / Z)_{\text{tr}} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{\text{turn}} = \Delta\tilde{\sigma}_{\text{turn}} + c_{\text{mst}} (\Delta\tilde{\sigma}_{\text{turn}} - \Delta\bar{\sigma}_{\text{turn}}) \quad (5)$$

$$\Delta\tilde{\sigma}_{\text{turn}} = \left[\frac{F \bar{s} \bar{\varphi}}{(4 \cos \bar{\beta}_b)} \right] \frac{\Delta \bar{\beta}}{\Delta \bar{m}} \bigg|_{\text{tr}} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{\text{passage}} = \left[\frac{-F \bar{s} \bar{\varphi} \sin \bar{\beta}_b}{4 \bar{\rho} b} \frac{\Delta(\bar{\rho} b)}{\Delta \bar{m}} \right]_{\text{tr}} \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{tr}} = (\bar{V}_m / \bar{U})_{\text{tr}} \quad (8)$$

$$F = 1 - [2 \sin(\bar{\beta}_b + \pi / Z) \sin(\pi / Z) \cdot \cos \bar{\beta}_b \sin \bar{\gamma} + t_{\text{eq}} / (\bar{s} \cos \bar{\beta}_b)]_{\text{tr}} \quad (9)$$

$$t_{\text{tr,eq}} = c_t \cdot \bar{t}_{\text{tr}} \quad (10)$$

$$\bar{r}_{\text{le}} / \bar{r}_{\text{tr}} < F \quad (\text{叶轮半径条件}) \quad (11)$$

其中引入了一个展向平均值

$$\Delta\tilde{\sigma}_{\text{turn}} = \sum_{j=1}^{N_j-1} \frac{\Delta\tilde{\sigma}_{\text{turn},j}}{N_j-1} \quad (12)$$

上标“-”表示第 j 根流管的参数为其上下壁面参数的代数平均值. 参数 Z, b, m, r, s, t 分别代表叶片数、流道子午投影宽度、子午曲线的坐标值、半径、栅距、叶片厚度; β_b 为无限多叶片假设下理想相对气流角; $\Delta\sigma_{\text{radial}}$ 表示 σ 的修正量; $\Delta\tilde{\sigma}, \Delta(\bar{\rho} b)$, $\Delta\bar{m}$ 各表示对应参数沿流向的差分; γ 为流线子午投影的切向量与轴线所夹锐角, 即流线子午投影倾角. 角标 tr 为叶轮尾缘, 其余符号含义详见文献[8]. 其中:

1) $\Delta\sigma_{\text{radial}}$ 是与通道涡相关的分量, $\Delta\sigma_{\text{turn}}$ 是与叶片流向扭转相关的分量, $\Delta\sigma_{\text{passage}}$ 是与流道扩张导致的气流加载相关的分量.

2) 叶轮出口气流无量纲子午速度 φ_2 (即出口流量系数) 和气流密度 ρ 为该模型的两个气动参数. 如果忽略 $\Delta\sigma_{\text{passage}}$, 随之 ρ 也被忽略, 则可知滑移因子是 φ_2 的线性函数.

3) 式(13)表示该模型的适用范围是叶轮进出口半径比小于叶轮叶片形状因子 F .

在 Qiu 模型中, $\Delta\sigma_{\text{passage}}$ 是首次被考虑的因素, 但 Qiu 等在模型实验验证中却忽略了该项^[9], 且模型计算结果同实验结果基本一致. 但文献[8]指出, 当叶片后弯角绝对值较大 (即 $-\beta_{2b} > 0$ 较大) 时, 叶轮的滑移因子分量 $\Delta\sigma_{\text{passage}}$ 可能并不降

为小量, 同时数值计算表明, 由于 $\Delta\sigma_{\text{passage}}$ 中包含多个经验参数, 忽略 $\Delta\sigma_{\text{passage}}$ 对滑移因子的影响, 虽然在近轮盖区的误差会增加, 但是有效减少了经验参数给定带来的误差. 因此本文对于 $\Delta\sigma_{\text{passage}}$ 仅计算并监视其值, 并不反馈到叶片造型之中.

3 经验参数的意义及研究方法

为了校验改进的 Qiu 模型, 本文将它用于大小叶片结构的微型^[10]和大型离心压气机的设计, 微型离心压气机通流设计的给定参数见表 1. 目前 CFD 数值计算广泛应用于离心压气机气动性能的研究^[11]. 定常三维流场求解目前已经被认为有了较高的精度, 其精度远高于通流设计计算, 因此本文采用 NUMECA 软件的 Fine/Turbo 定常有黏全三维流场求解器对叶轮进行气动数值计算, 湍流模型为 Spalart-Allmaras 模型, 湍黏系数为 $4.71 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[12].

表 1 通流设计的给定参数

Table 1 Prescribed parameters of through-flow design

参数	数值
流量/(kg/s)	0.15~0.27
转速/(r/min)	100 000~110 000
转子增压比	2.2~3.5
转子出口直径/mm	81.0
转子出口线速度/(m/s)	424~467
进口总温/K	288.15
进口总压/Pa	101 325
大叶片数	8~12
转子进出口外径比	0.547
转子出口叶片高度/mm	2.9

经过初步数值计算, 认为用于通流反问题的改进的 Qiu 模型对 $\Delta\sigma_{\text{radial}}$ 的估计偏大, 而对 $\Delta\sigma_{\text{turn}}$ 的估计比较准确 (见式(4)、式(5)). 影响两者数值的有 3 个经验参数 c_r , c_{mst} 和 c_t . 关于叶片尾缘形状的厚度的等效系数 c_t , 作者认为在实践中可取为 1.

改进的 Qiu 模型引入经验参数 c_{mst} 是为了调整 $\Delta\sigma_{\text{turn}}$ 的展向分布 (见式(5)), 使给出平均化的 $\Delta\sigma_{\text{turn}}$ 的 Qiu 模型在多流管化非平均的 $\beta_{b,\text{tr}}$ 下给出不过分估计的 $\Delta\sigma_{\text{turn}}$, 同时不改变整个流道平均的 $\Delta\sigma_{\text{turn}}$ 的值. 从图 4、图 5 可见, c_{mst} 的引入可使 $\Delta\sigma_{\text{turn}}$ 和 σ 沿展向线性分布, c_{mst} 越小, $\Delta\sigma_{\text{turn}}$ 的周向分布斜率越小. 不合理的 c_{mst} 取值将使 $\Delta\sigma_{\text{turn}}$

乃至滑移因子 σ 在轮盖处出现突变,导致准三维通流程序收敛困难. 经过试算, c_{mst} 取 0.22 及更小数值时,通流收敛性较好,且 $\Delta\sigma_{turn}$ 分布较为合理. 因此本文取 c_{mst} 为 0.22.

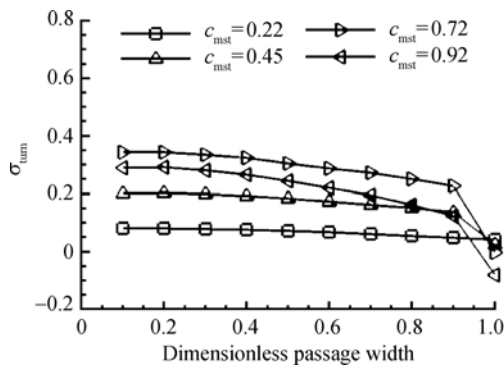


图4 c_{mst} 对 σ_{turn} 的影响

Fig. 4 Effect of c_{mst} on σ_{turn}

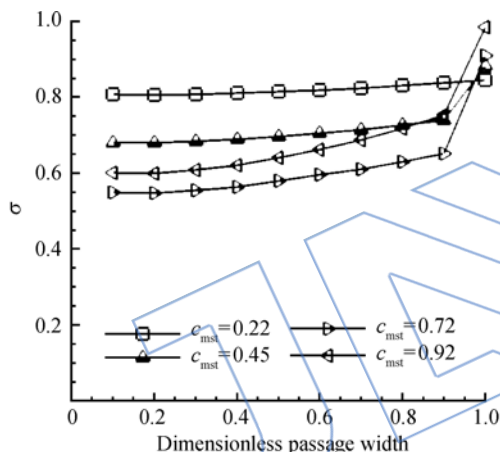


图5 c_{mst} 对 σ 的影响

Fig. 5 Effect of c_{mst} on σ

在改进的 Qiu 模型的应用中发现,经验参数 c_r 对于设计结果的气动性能影响有一定的不稳定性^[13],因此本文主要关注其对于设计结果的影响,以及不同算例中 c_r 的合理取值. 在改进的 Qiu 模型中,用 2 阶精度的差格式

$$(dv/dm)_i \approx (\Delta v/\Delta m)_i =$$

$$(3v_i - 4v_{i-1} + v_{i-2})/(m_i - m_{i-2}) \quad (13)$$

来求气动变量 β, ρ, b 沿流向的差分以代替微分,因一般通流设计中使用较大的空间步长,则会存在较大的误差,且此设计误差不可忽略. 由于 $\Delta\sigma_{radial}$ 与 $\Delta\rho b/\Delta m$ 直接成正比,直接受到此误差的影响,因此改进的 Qiu 模型通过人为给定经验参数 c_r 来减少 $\Delta\sigma_{radial}$ 的误差(见式(4)),以修正滑移因子.

Qiu 模型的进步意义在于,滑移因子的模型

化不仅包含了几何参数,而且包含了气动参数的影响. 鉴于其相关参数较多,我们暂时无法对 c_r 的取值有一个物理的、解析的分析方法,而只能采用数值计算方法来求解. 本组准三维反问题程序需要提供初始一维流道参数^[14],因此流道数值计算在不同的流道(见图 6)、增压比、流量、叶片数和转速条件下,通过对比模型滑移因子与数值计算出口流场的滑移因子,来得到各算例各工况下的最佳经验参数. 其中,由式(1)和式(2)可推得滑移因子

$$\sigma = c_{2u}/c_{2u\infty} = 1 - \Delta\omega_u/c_{2u\infty} = 1 - \varphi_2(\tan\beta_2 - \tan\beta_{2b}) \quad (14)$$

其中 β_2 为叶轮出口相对气流角, β_{2b} 为无限多叶片假设下出口处的理想相对气流角. 上式用于求数值计算出口流场的滑移因子.

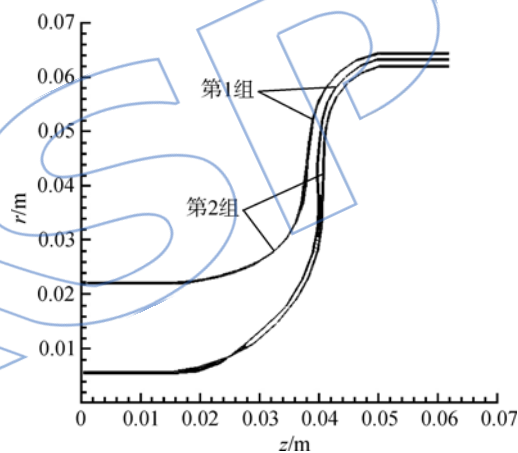


图6 两组离心压气机级设计算例的流道的对比

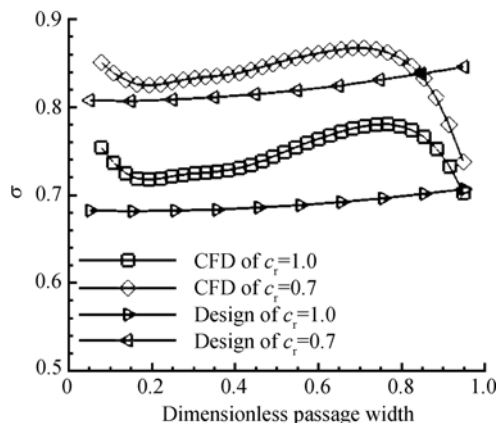
Fig. 6 Comparison of flow channels for two groups of centrifugal compressor stage design examples

4 参数 c_r 的通流/CFD 对比

c_r 对于通流设计结果的影响较大,具体如下.

4.1 c_r 对滑移因子展向不均匀性的影响

在设计增压比为 3.0,流量为 0.23 kg/s,转速为 103678 r/min,转子出口直径为 81 mm 的算例中,采用准三维通流程序进行设计,其中经验参数 $c_r = 1.0$, $c_{mst} = 0.22$. 通过对比经验参数 $c_r = 1.0$ 和 $c_r = 0.7$ 两个算例(见图 7,图中对比了通流用模型滑移因子与 CFD 数值流场的叶片出口周向平均滑移因子),可看出当 $c_r = 0.7$,在设计工况下通流程序更好地预测了滑移因子的大小. 此时程序已经达到了工程应用精度. 这也进一步说明了 c_r 的取值对于滑移模型的应用有较大影响.

图7 σ 沿叶片展向分布的对比Fig. 7 Comparison of spanwise distributions of σ

4.2 c_r 对滑移因子与流量系数关系的影响

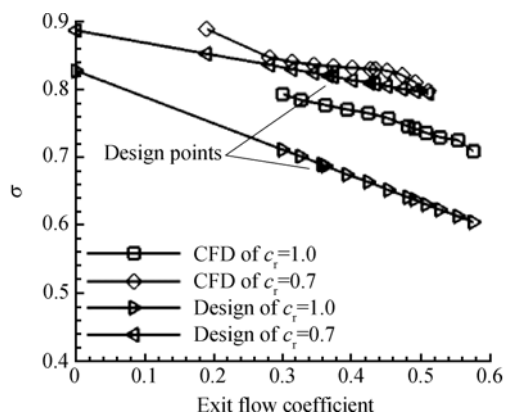
由于忽略 $\Delta\sigma_{\text{passage}}$, 改进的 Qiu 模型中的 ρ 消失, 影响模型滑移因子的气动参数仅有叶轮出口气流无量纲子午速度, 即流量系数 φ_2 . 因此在其他参数不变的情况下, 滑移因子与流量系数成线性关系

$$\sigma = A\varphi_2 + B \quad (15)$$

其中斜率、截距分别为(均忽略 $\Delta\sigma_{\text{passage}}$)

$$A = -\Delta\sigma_{\text{turn}}/\varphi_{1r}, \quad B = 1 - \Delta\sigma_{\text{radial}} \quad (16)$$

式中除 φ_2 外其余参数均选取离心压气机通流设计工作点上的值. 由图8中CFD解得的两根曲线可见, 除近失速点和近堵塞点外, 滑移因子基本与流量系数成线性关系, 而在近失速点和近堵塞点, 认为由于附面层分离严重, 流场不均匀程度增加, 使线性关系不再成立. 从图8又可见, 在 $c_r = 0.7$ 的取值下, 滑移模型的解能与CFD数值解很好地

图8 σ 随转子出口流量系数变化的对比Fig. 8 Comparison of σ varying with rotor exit flow coefficient

吻合, 而在 $c_r = 1.0$ 取值下, 两者偏差较大.

通过上述两点可看出, 如果在通流设计前能给出较为合适的经验参数 c_r , 就能很好地预测出滑移因子, 并可使相应的通流设计方法达到工程实用的精度. 因此, 对滑移因子展向分布的不均匀性和它与流量系数的线性关系做出较好的估计, 这问题落实到找到合适的 c_r .

本文通过试取 c_r 进行反问题设计, 并对其进行三维黏性CFD模拟, 再求转子出口速度场的CFD周向平均滑移因子, 得出设计与模拟滑移因子的对照. 第一批对于图6的两组流道下的通流设计所得出的12+8=20个全级设计算例的对照结果见表2、表3.

表2 流道1的算例结果汇总

Table 2 Results of examples in flow channel 1

编号	增压比	流量/(kg/s)	转速/(r/min)	叶片数	合理 c_r
1	2.2	0.15	103 678	8+8	0.6
2	2.4	0.17	103 678	8+8	0.7
3	2.6	0.19	103 678	8+8	0.6
4	2.6	0.17	103 678	8+8	0.6
5	3.0	0.23	103 678	8+8	0.7
6	3.0	0.2	103 678	8+8	0.7
7	3.4	0.23	103 678	8+8	0.8
8	2.8	0.22	103 678	8+8	0.65
9	3.0	0.22	103 678	12+12	0.7
10	2.6	0.19	103 678	12+12	0.7
11	2.8	0.21	103 678	12+12	0.6
12	3.0	0.23	110 000	8+8	0.7

表3 流道2的算例结果汇总

Table 3 Results of examples in flow channel 2

编号	增压比	流量/(kg/s)	转速/(r/min)	叶片数	合理 c_r
13	2.8	0.23	103 678	8+8	0.6
14	3.0	0.23	103 678	8+8	0.7
15	3.5	0.23	103 678	8+8	0.8
16	3.0	0.25	103 678	8+8	0.7
17	3.0	0.27	103 678	8+8	0.7
18	3.0	0.23	110 000	8+8	0.8
19	3.0	0.23	100 000	8+8	0.6
20	3.0	0.23	107 000	8+8	0.7

关于 c_r 对滑移因子展向不均匀性的影响,图9示出了表2中算例1(流量、增压比最小)的通流用滑移因子与CFD周向平均滑移因子的展向分布的对比.关于 c_r 对滑移因子与转子出口流量系数关系的影响(见式(15)),图10示出了算例1的滑移因子与转子出口流量系数的关系.该图是通过在CFD模拟中给出不同的级反压而得到的,也可以看作级特性中的滑移因子特性.同理,图11~图20分别是算例5(流量、增压比居中),算例7(增压比最大),算例17(流量最大),算例19(转速不同),算例20(转速不同)的这两种影响的图示.

第二批,对于文献[15]中由 Krain 等所给出的一个离心压气机叶轮,采用本文方法重新进行

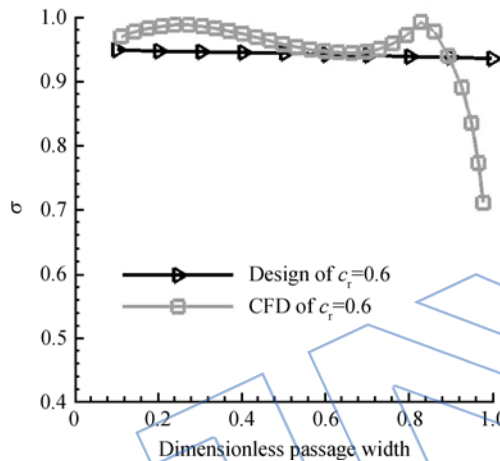


图9 算例1中 c_r 对 σ 展向不均匀性的影响
Fig. 9 Inhomogeneity of spanwise distributions of σ impacted by c_r in example 1

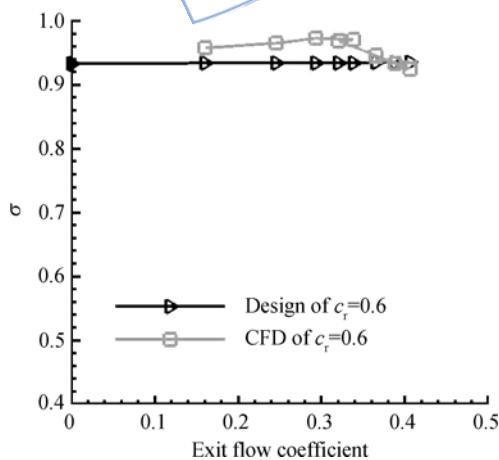


图10 算例1中 c_r 对 σ 与转子出口流量系数关系的影响
Fig. 10 Relationship between σ and rotor exit flow coefficient impacted by c_r in example 1

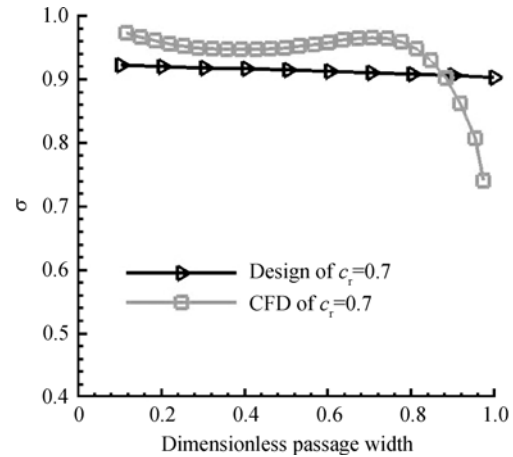


图11 算例5中 c_r 对 σ 展向不均匀性的影响
Fig. 11 Inhomogeneity of spanwise distributions of σ impacted by c_r in example 5

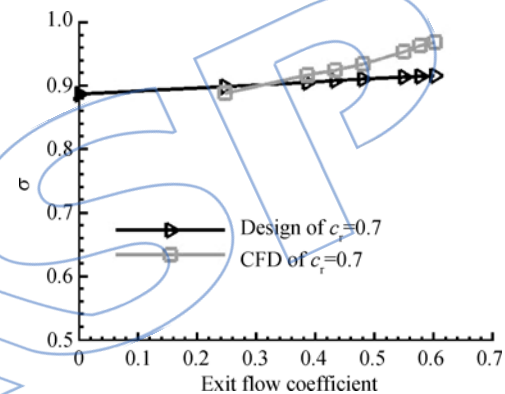


图12 算例5中 c_r 对 σ 与转子出口流量系数关系的影响
Fig. 12 Relationship between σ and rotor exit flow coefficient impacted by c_r in example 5

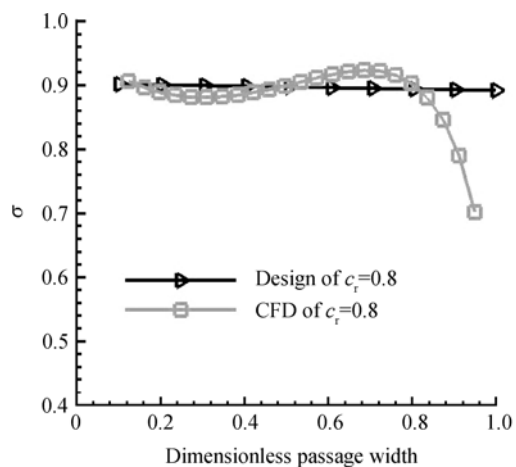


图13 算例7中 c_r 对 σ 展向不均匀性的影响
Fig. 13 Inhomogeneity of spanwise distributions of σ impacted by c_r in example 7

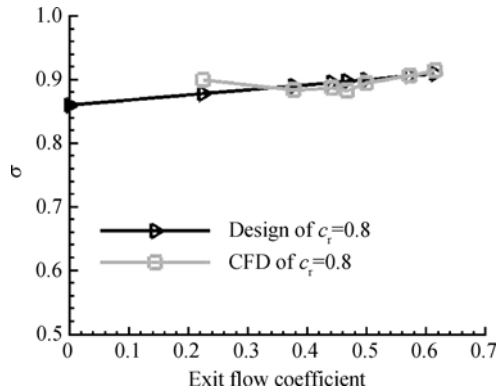


图 14 算例 7 中 c_r 对 σ 与转子出口流量系数关系的影响

Fig. 14 Relationship between σ and rotor exit flow coefficient impacted by c_r in example 7

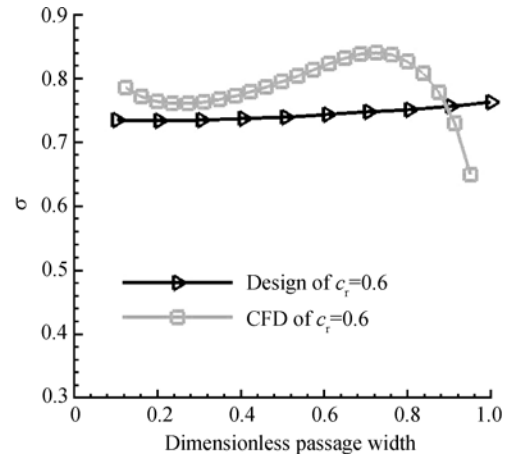


图 17 算例 19 中 c_r 对 σ 展向不均匀性的影响
Fig. 17 Inhomogeneity of spanwise distributions of σ impacted by c_r in example 19

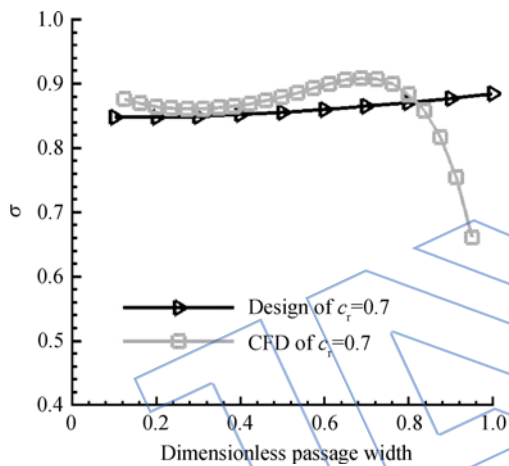


图 15 算例 17 中 c_r 对 σ 展向不均匀性的影响
Fig. 15 Inhomogeneity of spanwise distributions of σ impacted by c_r in example 17

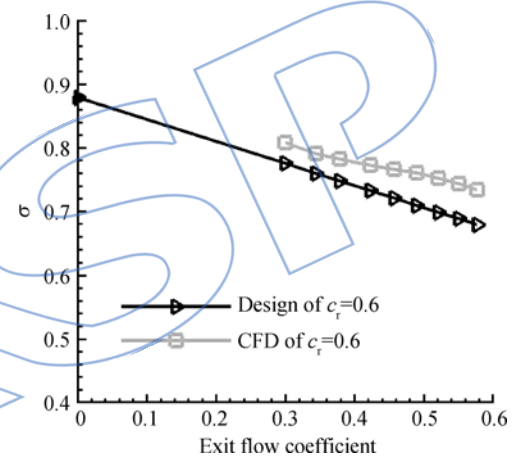


图 18 算例 19 中 c_r 对 σ 与转子出口流量系数关系的影响
Fig. 18 Relationship between σ and rotor exit flow coefficient impacted by c_r in example 19

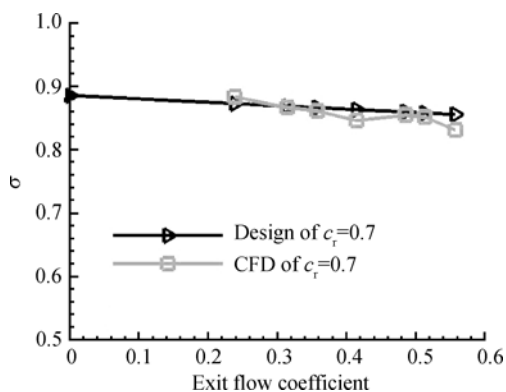


图 16 算例 17 中 c_r 对 σ 与转子出口流量系数关系的影响
Fig. 16 Relationship between σ and rotor exit flow coefficient impacted by c_r in example 17

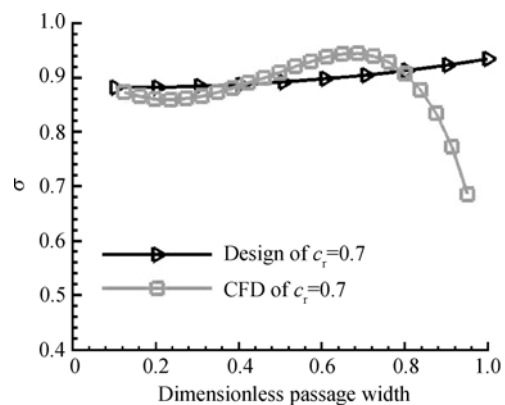


图 19 算例 20 中 c_r 对 σ 展向不均匀性的影响
Fig. 19 Inhomogeneity of spanwise distributions of σ impacted by c_r in example 20

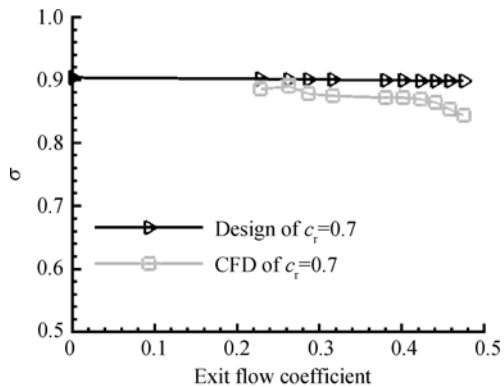


图 20 算例 20 中 c_r 对 σ 与转子出口流量系数关系的影响

Fig. 20 Relationship between σ and rotor exit flow coefficient impacted by c_r in example 20

通流设计. 设计取用其转子精确流道(见图 21)和遵循全部设计点性能参数(见表 4), 所设计的全级设计算例的对照结果见图 22、图 23. 从表 4 可见, 其叶轮出口线速度、叶轮进出口外径比与上文离心压气机接近, 但其叶轮尺寸很大, 外径为 0.4 m, 流量为 3.6 kg/s, 增压比达 3.7, 负荷系数为 0.714, 故为发动机用高速离心压气机. 由图 22 得, 在 $c_r = 0.7$ 时, CFD 模拟所得转子出口周向平均滑移因子展向分布基本吻合于通流用模型滑移因子展向平均值, 由图 23 的 CFD 滑移因子曲线可见, 除近失速点外, 滑移因子基本与转子出口流量系数成线性关系, 其斜率同本文修正的 Qiu 模型预测基本吻合. 因此可认为 0.7 是 c_r 的合理取值.

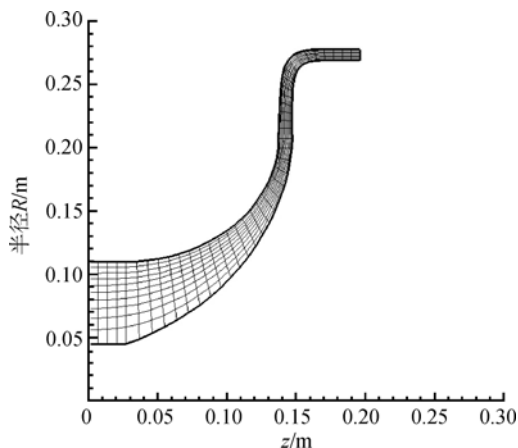


图 21 文献[15]的离心压气机的全级流道
Fig. 21 Flow channel of centrifugal compressor stage of Ref. [15]

表 4 模拟通流设计的参数
Table 4 Simulated through-flow design parameters

参数	数值
流量/(kg/s)	3.6
转速/(r/min)	22 363
转子增压比	3.7
转子出口直径/mm	400.0
转子出口线速度/(m/s)	468
进口总温/K	288.15
进口总压/Pa	101 325
大叶片数	12
转子进出口外径比	0.550
转子出口叶片高度/mm	14.7

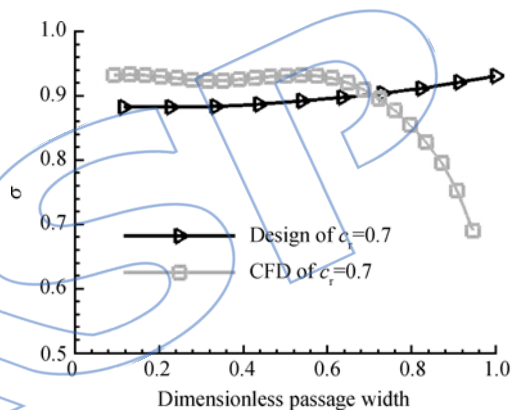


图 22 c_r 对 σ 展向不均匀性的影响
(文献[15]中的叶轮)

Fig. 22 Inhomogeneity of spanwise distributions of σ impacted by c_r (impellers from Ref. [15])

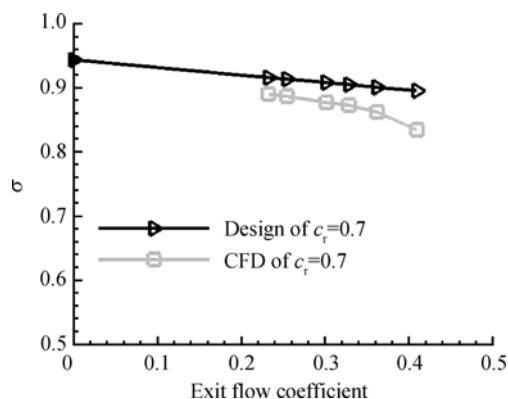


图 23 c_r 对 σ 与转子出口流量系数关系的影响
(文献[15]中的叶轮)

Fig. 23 Relationship between σ and rotor exit flow coefficient impacted by c_r (impellers from Ref. [15])

综上, c_r 受离心压气机级总体设计参数增压比、转速、流量和叶片数的影响, 但变化范围较小, 多数情况下对应于合理的滑移因子的 c_r 在 0.6~0.8, c_r 为 0.7 具有一定的普适性. 而算例 1、算例 7 和算例 15 的叶片弯扭程度过大, 它们不适合于工程应用. 因此可以得到结论, c_r 为 0.7 对于离心压气机准三维通流设计具有普适性, 使得模型对于滑移因子的预测最准确.

5 结 论

1) 对 Qiu 滑移因子模型应用于准三维通流设计进行了适用性改进, 并加入系统误差校正用经验参数, 其中经验参数 c_r 对于滑移的预估影响较大.

2) 改进的 Qiu 滑移因子模型应用于微型或大型高速离心压气机叶轮反问题气动设计时, 经验参数 c_r 对增压比、流量和转速等设计参数敏感, 但变化范围不大. 当 c_r 在 0.7 左右时, 大多数情况下能得到较为理想的结果, 具有一定的普适性.

3) 改进的 Qiu 滑移因子模型的准三维通流设计仅进行了数值计算分析其经验参数取值, 但由于数值计算仍有误差, 有待实验来校验此模型和经验参数.

参考文献:

- [1] 舒士甄, 朱力, 柯玄龄, 等. 叶轮机械原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [2] Stodola A. Steam and gas turbines [M]. New York: McGraw-Hill, 1927.
- [3] 陈宗华, 张亚丁. 半开式叶轮离心式压缩机的设计与分析[J]. 化工设备与防腐蚀, 2000(3): 3-8.
- [4] Wiesner F J. A review of slip factors for centrifugal impellers[J]. Journal of Engineering for Power, 1967, 89(4): 558-572.
- [5] Eck B. Fans: design and operation of centrifugal, axial flow, and cross-flow fans[M]. Frankfurt, Germany: Pergamon Press, 1973.
- [6] Del Greco A S, Biagi F R, Sassanelli G, et al. A new slip factor correlation for centrifugal impellers in a wide range of flow coefficients and peripheral Mach numbers[R]. ASME Paper GT-2007-27199, 2007.
- [7] Qiu X, Mallikarachchi C, Anderson M. A new slip factor model for axial and radial impellers[R]. ASME Paper GT-2007-27064, 2007.
- [8] 田晓沛, 单鹏. Qiu 滑移模型在小型离心叶轮通流设计中的改进[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2539-2547.
TIAN Xiaopei, SHAN Peng. Improvements of Qiu slip factor model applied for quasi-3D through-flow design of small centrifugal impellers[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2539-2547. (in Chinese)
- [9] Qiu X. Analysis and validation of a unified slip factor model for impellers at design and off-design conditions[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(4): 041018. 1-041018. 9.
- [10] 马平, 田晓沛, 单鹏. 离心压气机通流反问题的损失模型研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 858-866.
MA Ping, TIAN Xiaopei, SHAN peng. Loss model application study in the through-flow inverse design approach for centrifugal compressors[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 858-866. (in Chinese)
- [11] Tang J, Teemu T S, Reunanen A, et al. Numerical investigation of the effect of tip clearance to the performance of a small centrifugal compressor[R]. ASME Paper GT-2006-90893, 2006.
- [12] NUMECA International. FINE™ user manual version 6.2-b [M]. Brussels, Belgium: NUMECA International, 2004.
- [13] TIAN Xiaopei, SHAN Peng. A compressible 3-dimensional inverse method based on the streamline curvature approach and Clebsch formulation for radial and mixed flow turbomachines[R]. Anaheim, US: ASME 2012 Power Conference, 2012.
- [14] 孟斐. 离心压气机一维气动程序改进和通道构形设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
MENG Fei. Improvement of the one-dimensional centrifugal compressor aerodynamic design program and design on passage configuration[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [15] Krain H, Hoffmann W. Centrifugal impeller geometry and its influence on secondary flows[R]. Advisory Group for Aerospace Research and Development, CP 469, 1990.