

离心叶轮的速度系数对级性能的影响

胡小文, 闻苏平, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 用数值模拟的方法研究了某离心压缩机叶轮速度系数对离心压缩机级性能的影响, 并分析了不同速度系数下叶轮流道内部的流动情况. 研究表明: 在叶轮轮盘的相对曲率半径大于 0.3 时, 叶轮速度系数的减小能改善叶轮流道内部的流体流动, 使叶片进口从盘侧指向盖侧的静压梯度降低, 同时叶轮出口通流速度不均匀程度得到改善, 因此使得离心压缩机的级效率得到明显提高, 在设计流量下等熵效率最大提高 1.5% 以上. 通过对不同速度系数的压缩机级的变工况性能进行分析, 发现速度系数的减小使得压缩机效率曲线右移, 压比曲线上移, 并有效地扩大了离心压缩机的工况范围.

关键词: 速度系数; 离心压缩机; 数值模拟

中图分类号: TH452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0807-04

Numerical Investigation of the Effect of Impeller Velocity Factor on the Performance of Centrifugal Compressor Stage

HU Xiaowen, WEN Suping, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effect of impeller velocity factor K_c of a centrifugal compressor on the performance of centrifugal compressor stages was investigated by numerical simulation, and the effect of K_c on the impeller inflow pattern was analyzed. The result shows that the decrease of K_c can meliorate the flow field in the impeller when the value of r/b_1 is larger than 0.3; the gradient of static pressure along hub to shroud at the inlet of blade is decreased and the fluid meridional velocity becomes more uniform at the outlet of impeller, so the efficiency of the centrifugal compressor stage can be improved significantly, the maximum improvement of isentropic efficiency is beyond 1.5 percents. In addition, the analysis on the performance of compressor stages with different K_c indicates that efficiency curve of the compressor stage moves to the right side and the pressure ratio curve moves to the upward with the decrease of K_c , and the operation range of the centrifugal compressor can also be extended.

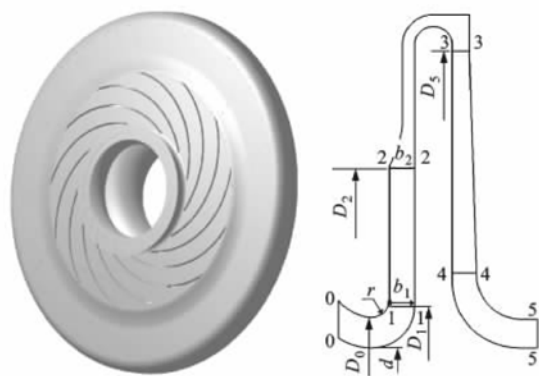
Keywords: velocity factor; centrifugal compressor; numerical simulation

离心压缩机叶轮子午形状参数对压缩机级性能有显著的影响^[1]. 叶轮速度系数 K_c 是叶轮子午形状的一个重要参数, 用以下公式来表示 (见图 1)

$$K_c = \frac{D_0^2 - d^2}{4D_1b_1}$$

当 d 、 D_1 、 D_0 一定时, K_c 的变化只能通过改变叶轮

进口宽度 b_1 来达到. 文献[2]通过改变 b_1 来调整速度系数, 文中的试验结果显示: K_c 从 1.1 变化到 0.9 时, 级的最高效率相对增加了 3%, 能量头增加了 0.5%. 近年来对叶轮子午参数的研究大多集中在对叶轮子午型线的优化方面^[3-4], 对速度系数等参数的研究较少. 计算流体动力学的发展使得通过



0-0:叶轮进口;1-1:叶轮叶道进口截面;2-2:叶轮出口;3-3:回流器进口;4-4 回流器出口;5-5:级出口

图1 计算模型

CFD 方法来研究叶轮参数对压缩机级性能影响变得更为方便、快捷。

本文应用 CFD 技术,对具有不同速度系数的叶轮的离心压缩机基本级进行数值模拟研究。通过固定 d 、 D_1 、 D_0 等叶轮进口参数,变化速度系数 K_c ,通过数值分析,揭示 K_c 对叶轮内部流动的影响以及对压缩机级效率、压比和性能曲线的影响规律,对离心压缩机叶轮设计具有参考价值。

1 数值模型

1.1 几何模型

本文的计算模型如图 1 所示,计算区域分别包括叶轮、无叶扩压器、弯道、回流器以及出口延伸段。叶轮几何参数见表 1,回流器具有 18 个香蕉型叶片。叶轮设计流量 Q_d 为 0.691 1 kg/s,转速 n 为 12 000 r/min。

表1 叶轮参数

进口安装角 /(°)	出口安装角 /(°)	D_2 /mm	b_2 /mm
21	17	225	18.5

1.2 控制方程与湍流模型

数值计算求解相对柱坐标系下的积分守恒型三维雷诺平均 N-S 方程。湍流模型采用一方程 Spalart-Allmaras 模型,该模型与二方程湍流模型相比具有较好的鲁棒性及需要更少的计算机时间。

1.3 边界条件

叶轮进口给定总温,总压为大气条件,速度方向为轴向进气,湍流黏性为 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,出口条件给定质量流量并假设一个出口压力初值,该压力对计

算结果没有影响。这里给定出口设计流量为 0.691 kg/s,出口压力初值设为 0.103 MPa。

1.4 网格划分及数值方法

网格划分采用结构化网格,如图 2 所示。叶轮叶片数为 13,为避免过大的网格数,只取单通道计算,计算网格数为 70 万。第 1 个网格离壁面距离 y^+ 控制到 10 以内。在不同速度系数 K_c 下,各个模型网格具有相同的分布。

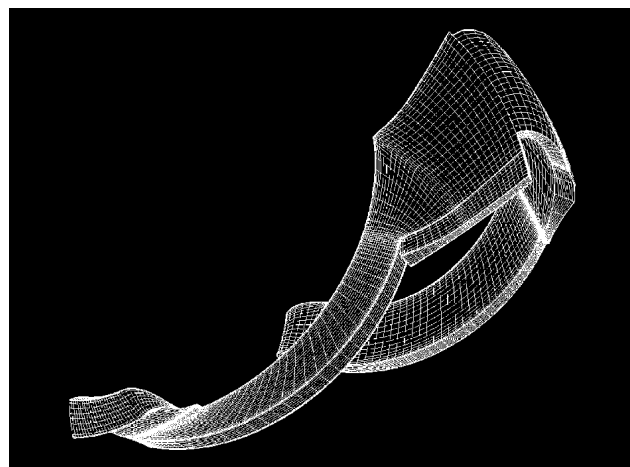


图2 计算网格

计算为定常计算,空间离散采用有限体积法,离散格式采用中心差分格式,在离散方程中加入 Jameson 构造的自适应人工耗散项,时间项求解时采用四阶 Runge-Kutta 法,并加上隐式残差光顺和当地时间步长以提高收敛速度。

2 计算结果及分析

2.1 速度系数

从图 3 可以看出,在 K_c 较大时,离心压缩机的级等熵效率 η_s 随着 K_c 的减小而增大。当 K_c 从 0.99 减小到 0.81 时,压缩机的级等熵效率提高 1.5%;当 K_c 变化到小于 0.8 时,级等熵效率又呈下降趋势。从压比 ϵ 随 K_c 的变化可以看出:压比随 K_c 的增大呈增大趋势,压比的变化在 K_c 为 0.81 附近变缓。

当 d 、 D_1 、 D_0 一定时, K_c 增大导致 b_1 增大,并引起叶轮进口的绝对速度分量 c_{1r} 减小,根据速度三角形(见图 4)可知,相对速度 w_1 也是减小的。叶轮进口通常按最小相对速度原则来设计, w_1 的减小不但降低了叶轮流道的扩压度 w_1/w_2 ,而且可以相应地降低相对马赫数 Ma_{w_1} ,可有效改善叶轮进口气流的流动情况,并减小流动损失。同时,较小的扩压度也能抑止边界层分离。又由于叶轮其余参数基本相

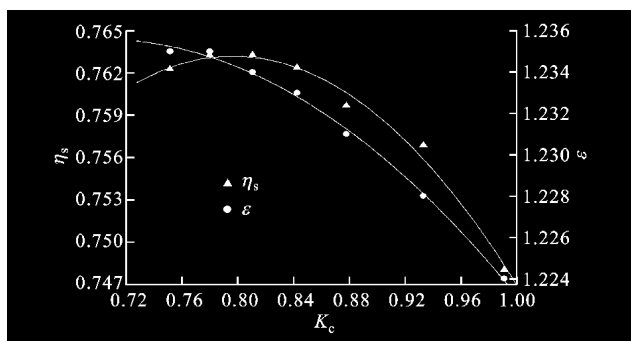


图3 级等熵效率与压比随速度系数变化的曲线

同,增大 b_1 的同时会增大轮盖倾角,减小叶轮进口子午流道转弯处的气体分离现象。因此,随着 K_c 的减小级效率增加。当 K_c 减小到一定程度时, ω_1 下降的幅度已很小,同时由于它的减小导致轮盖的相对曲率半径 r/b_1 减小,当 r/b_1 小到一定程度时速度不均匀性会增加,从而引起叶片进口冲击损失增加以及转弯处气流边界层分离,出现图3中左端所示级效率下降的情况。图5表示了所研究叶轮的 r/b_1 值随 K_c 变化的趋势,两者基本呈线性关系。在 K_c 减小到0.8、 r/b_1 达到0.3附近的情况下,压缩机级仍有较高的效率,因此设计叶轮的速度系数时可以采用0.8或者更小,同时保证 r/b_1 在条件许可的情况下尽可能取较大值。

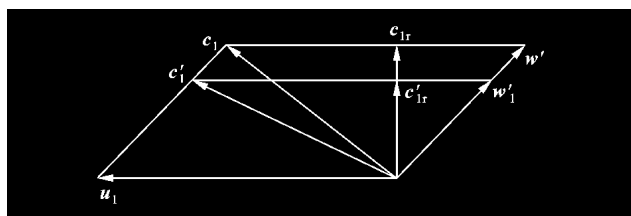
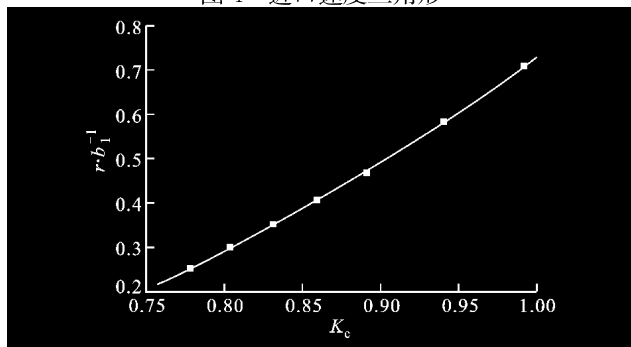


图4 进口速度三角形

图5 r/b_1 随速度系数的变化

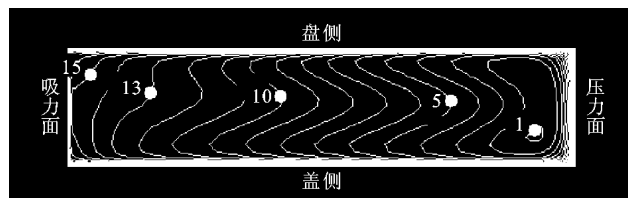
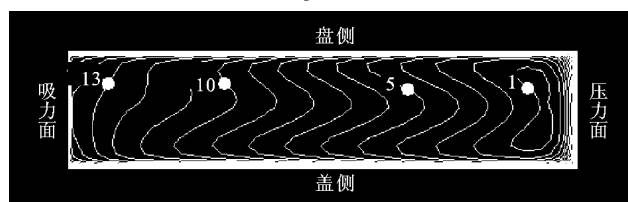
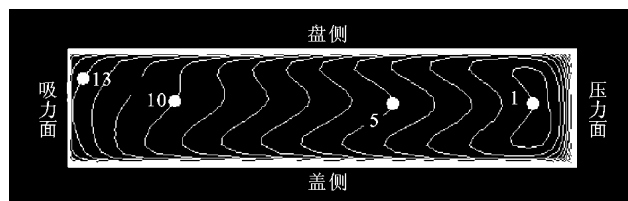
2.2 速度系数对设计工况下级内流动的影响

图6给出了 K_c 分别为0.991、0.933和0.814时叶轮出口截面的熵分布情况。可压缩流体的熵定义为

$$C_v \ln \frac{(p_{\text{stat}}/p_{\text{statinlet}})}{(\rho/\rho_{\text{inlet}})^{\gamma}}$$

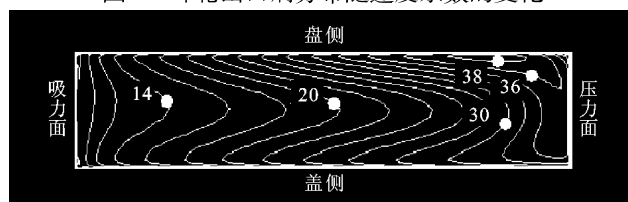
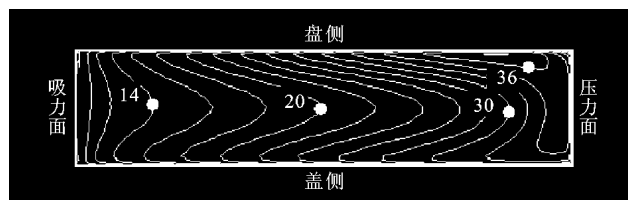
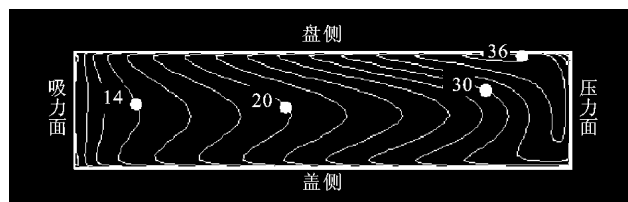
由图6可以看出:具有不同 K_c 的叶轮具有相似的熵分布,从压力面附近到吸力面附近熵是递增的,流动熵增主要发生在壁面附近。比较3个 K_c 下出口的熵分布可知,叶轮出口熵随着 K_c 的减小而逐渐减小,表明叶轮损失随 K_c 的减小而降低。因此,级效率随 K_c 的减小而增大。

定义通流速度 $V_m = (V_r^2 + V_z^2)^{1/2}$ 。图7表示出口

(a) $K_c = 0.991$ (b) $K_c = 0.933$ (c) $K_c = 0.814$

单位: J/(kg · K)

图6 叶轮出口熵分布随速度系数的变化

(a) $K_c = 0.991$ (b) $K_c = 0.933$ (c) $K_c = 0.814$

单位: m/s

图7 叶轮出口通流速度随速度系数的变化

通流速度随 K_c 的变化情况. 从图 7 可以看出: 叶轮出口尾迹区随速度系数的减小逐渐减小, 射流区也随之变小, 叶轮出口通流速度变得更均匀, 因此速度系数的减小能减小射流尾迹损失, 提高压缩机的级效率.

从图 8 可以看出: 速度系数对叶片进口附近流场有显著的影响, 叶片进口处于叶轮子午型线转弯附近, 静压在转弯附近的梯度方向近似为盘侧指向盖侧, 静压从盘侧指向盖侧的压力梯度区域在大速度系数下伸展到叶道里, 随着速度系数的减小, 压力梯度大的区域越来越往叶片进口靠近, K_c 的减小使叶片进口静压轮盘指向轮盖的梯度降低, 因此对抑止二次流在叶轮中的发展是有利的.

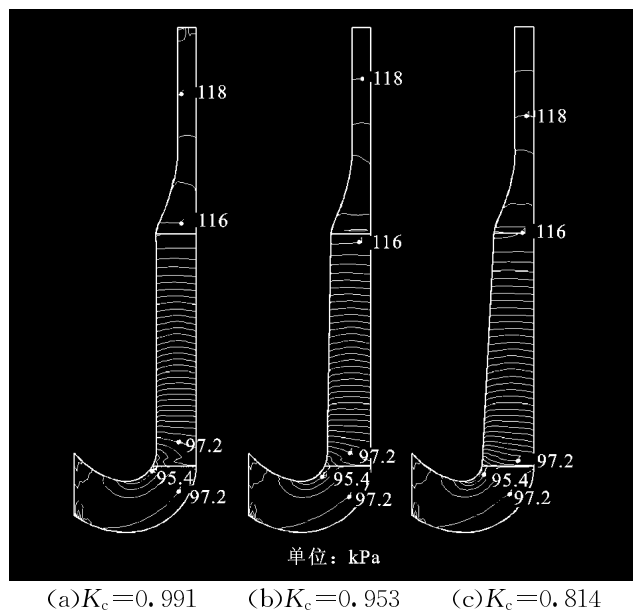


图 8 速度系数对静压的影响

2.3 速度系数对压缩机性能的影响

图 9 和图 10 所示的是 K_c 分别为 0.991、0.933 和 0.814 时 3 个不同叶轮离心级的变工况的性能曲线, 图中横坐标表示实际流量与设计流量的比值, 即归一化的流量

$$\bar{Q} = Q/Q_d$$

从图 9 可以看出: 当 K_c 为 0.814 时, 压缩机级表现出最高的等熵效率; 当 K_c 为 0.991 时, 级的等熵效率最低; 具有不同速度系数的级性能曲线具有相似的形状变化特征; 随着速度系数的增大, 性能曲线往左偏移.

从图 10 可以看出: 小速度系数的叶轮级具有更大的压比, 且 K_c 为 0.814 时叶轮具有最高的压比. 因此, 减小速度系数也能小幅度提高级压比. 从性能曲线看: 具有小速度系数的压缩机级具有更好的性能.

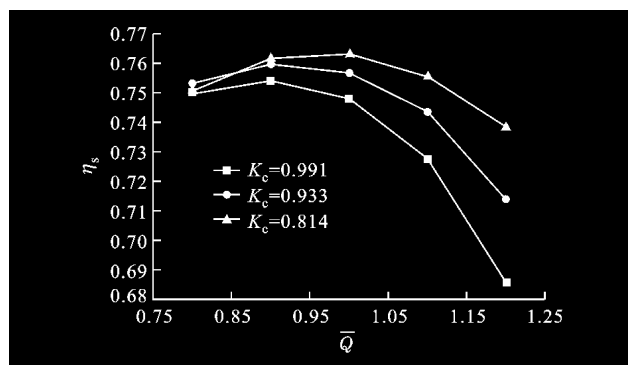


图 9 速度系数对变工况级效率的影响

性能, 但减小速度系数对改善压缩机级性能是有限度的, 因为过大增加叶片进口宽度, 会引起叶轮进口到叶轮叶片流动的收敛程度减小或者成为扩压流动, 导致叶轮轮盖转弯处分离损失增加. 从速度三角形进行分析: 过大地增加 b_1 会使叶轮进口冲角增大, 引起叶轮叶片吸力面分离损失增大, 从而导致级效率下降. 这个结果从图 3 中也可以得到验证. 当 K_c 减小到 0.8 时, 继续减小速度系数, 在设计流量下级效率下降.

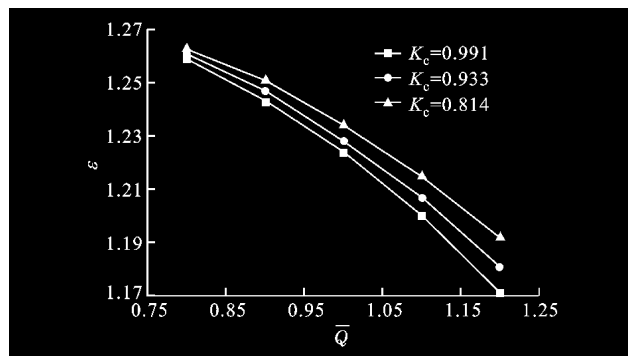


图 10 速度系数对变工况级压比的影响

3 结 论

(1) 当叶轮进口轮盖的 r/b_1 值大于 0.3 时, 速度系数的减小能明显提高离心压缩机级等熵效率及压比. 计算结果表明, 当 K_c 从 0.99 减小到 0.81 时, 压缩机级效率提高 1.5%.

(2) 当速度系数减小时, 叶片进口静压由轮盘指向轮盖的静压梯度降低, 同时降低了叶轮出口的熵, 改善了叶轮出口通流速度的不均匀性和尾迹区.

(3) 速度系数的减小使性能曲线右移, 且压比曲线上移, 表明具有小速度系数的叶轮压缩机具有更好的性能.

参考文献:

- [1] AUNGIER R H. Centrifugal compressors; a strategy for aerodynamic design and analysis [M]. New York, USA: ASME Press, 2000.
- [2] 徐忠. 离心压缩机原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.
- [3] 陈江, 季路成. 某离心叶轮改型气动设计[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 131-136.
- CHEN Jiang, JI Lucheng. Aerodynamic redesign of a centrifugal compressor impeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 131-136.
- [4] 楚武利, 吴艳辉, 卢新根. 小型高速离心压气机级内部的三维流场分析[J]. 应用力学学报, 2006, 23(3): 511-516.
- CHU Wuli, WU Yanhui, LU Xingen. Numerical investigation to small high speed centrifugal compressor [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(3): 511-516.

(编辑 王焕雪)