

导叶通道当量预旋半径对离心压缩机性能的影响

刘天一¹, 祁大同¹, 谭佳健¹, 王锐², 韩凤翠¹

(1. 西安交通大学流体机械与工程系, 710049, 西安; 2. 沈阳鼓风机集团公司, 110142, 沈阳)

摘要: 为探索如何提高离心压缩机在使用可调进口导叶进行调节时的变工况性能进行了研究. 通过对进口导叶预旋及其影响因素之间的关系的定性分析, 定义了当量预旋半径的概念, 并提出了通过增加导叶通道的当量预旋半径来提高进口导叶的流动效率, 从而提高离心压缩机变工况性能的思路. 为 TR400 单级双支撑式离心压缩机设计了几种导叶通道改进方案, 并针对各改进方案使用 NUMECA 软件对整个压缩机内部流场进行了三维数值模拟. 结果显示: 在导叶翼型和轮廓基本不变的前提下, 效果最显著的改进方案能使压缩机效率提高 0.6%~2.1%, 并在正负预旋情况下都能取得改进效果; 导叶角度越大, 改进效果越明显.

关键词: 离心压缩机; 可调进口导叶; 导叶通道; 当量预旋半径

中图分类号: TH452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0091-04

Influence of Equivalent Prewhirl Radius of Guide Vane Passage on Performance of Centrifugal Compressor

LIU Tianyi¹, QI Datong¹, TAN Jiajian¹, WANG Rui², HAN Fenghui¹

(1. Department of Fluid Machinery and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenyang Blower Group Co. Ltd., Shenyang 110142, China)

Abstract: Research was done to improve the performance of a centrifugal compressor with adjustable inlet guide vanes. The concept of the “equivalent prewhirl radius” of the guide vane passage was proposed, and the method for improving the performance of a centrifugal compressor with adjustable inlet guide vanes was presented by increasing the equivalent prewhirl radius of the guide vane passage to raise the flow efficiency of the inlet guide vanes. Then several improvement schemes were designed for the guide vane passage of a TR400 single-stage and double-supporting-type centrifugal compressor, and for each improvement scheme, 3-dimensional numerical simulation was conducted on the flow field inside the compressor with the software NUMECA. The simulation result shows that when the best scheme is applied, the efficiency of the compressor increases by 0.6%-2.1%, and it increases more when the setting angle of the inlet guide vanes is large. This effect can be obtained for both positive prewhirl and negative prewhirl, while the profile and the airfoil of the vanes remain almost unchanged.

Keywords: centrifugal compressor; variable inlet guide vanes; guide vane passage; equivalent prewhirl radius

为了提高离心压缩机的变工况性能, 常用可调进口导叶进行调节^[1-3]. 由于压缩机的效率等于各元件效率的乘积, 因此提高进口导叶的流动效率有助

于提高整机效率. 进口导叶的效率取决于预旋和损失, 这二者不仅与导叶的轮廓、叶栅稠度、翼型等有关^[4-6], 而且与导叶通道的结构尺寸密切相关^[7-10].

因此,通过改进导叶通道可以提高进口导叶的效率,从而提高离心压缩机的变工况性能。

本文通过定性分析进口导叶的预旋、阻力与导叶通道的几何尺寸间的关系,定义了导叶通道当量预旋半径的概念,提出了通过增加导叶通道当量预旋半径来提高离心压缩机变工况性能的思路。基于该思路,针对一个双支撑式离心压缩机的导叶通道设计了改进方案,利用 NUMECA 软件对改进前后整个压缩机内部流场进行了数值模拟,模拟结果验证了改进思路的可行性。

1 改进思路

根据动量守恒定理可知,如果忽略了进口导叶与叶轮之间的流道损失,气体在流过导叶时获得的动量矩就等于流入叶轮时的动量矩,而后者即为叶轮实际获得进气预旋的大小。因此,本文以气体通过导叶时获得的动量矩 M 来衡量进气预旋。 M 的计算式为

$$M = \int_{R_H}^{R_S} v_\theta r dm \quad (1)$$

式中: v_θ 为气体的周向速度分量; r 为气体旋转半径; m 为质量流量,积分是在导叶尾缘所在的通流截面上进行。一般情况下,进口导叶轴向安装。为了便于定性分析,本文以导叶转轴所在截面(下文简称为导叶截面)代替导叶尾缘所在截面作为式(1)的积分区域。记导叶截面处的通道内壁半径和外径半径分别为 R_H 和 R_S , 这样 $m = \pi \rho v_z (R_S^2 - R_H^2)$, 其中 ρ 和 v_z 分别为气体通过导叶截面时的密度和轴向速度分量。

假设 ρ 、 v_θ 和 v_z 均在导叶截面上均匀分布,忽略气体流动角与导叶角度 θ 之间的不一致性,不计导叶厚度,则式(1)经直接积分得

$$M = \frac{2}{3} \pi \rho v_z v_\theta (R_S^3 - R_H^3) \quad (2)$$

将 $\rho v_z = \frac{m}{\pi(R_S^2 - R_H^2)}$ 和 $v_\theta = v_z \tan \theta$ 代入式(2)可得

$$M = \frac{2(R_S^3 - R_H^3)}{3(R_S^2 - R_H^2)} \frac{m^2 \tan \theta}{\rho A} \quad (3)$$

式中: $A = \pi(R_S^2 - R_H^2)$, 代表导叶截面的通流面积。

记 $R = \frac{2(R_S^3 - R_H^3)}{3(R_S^2 - R_H^2)}$, 变形式(3)得

$$M = m v_\theta R \quad (4)$$

式(4)表明了 R 的物理意义:一定质量、以一定周向分速度 v_θ 作旋转运动的气体,从导叶截面上均匀通过时的总动量矩等于这些气体全部从半径 R

处通过时的总动量矩。因此,本文将 R 称为导叶通道的当量预旋半径。

由式(3)表明:在 m 、 ρ 、 M 一定的情况下, R 与 $\tan \theta / A$ 成反比;进口导叶的损失与 $\tan \theta$ 成正相关,与 A 成反相关。因此,增加 R 可以使进口导叶在损失更小的情况下产生所需的预旋,由此提高进口导叶的效率,这就是本文的改进思路。

2 改进方案

以沈鼓集团 TR400 单级双支撑式带进口导叶离心压缩机为研究对象,对导叶通道进行了改进研究。

TR400 压缩机进口导叶及导叶通道的主要结构、尺寸如图 1 所示,其中导叶处于全开位置,由 10 片节弦比为 1 的平板直叶片组成。导叶通道的内、外壁面均为圆柱面, $R_H = 60$ mm, $R_S = 147.5$ mm。

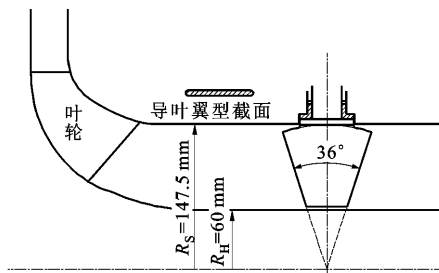


图1 TR400 压缩机进口导叶示意图

根据增加导叶通道当量预旋半径的思路,依据图 2 所示的基本结构,本文设计了几种改进方案。

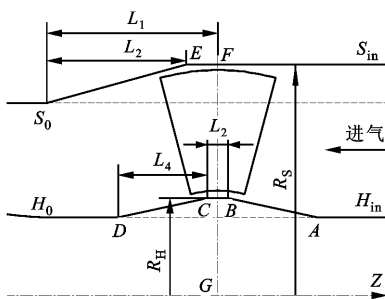


图2 改进方案结构示意图

图 2 中,虚线为原始方案导叶通道的内、外壁形线,实线 $H_{in}-A-B-C-D-H_0$ 和 $S_{in}-E-S_0$ 分别为改进后的导叶通道内、外壁形线,导叶转轴 $F-G$ 与叶轮之间的相对轴向距离等同于原始方案, $B-C$ 关于 $F-G$ 对称, $A-B$ 和 $D-C$ 关于 $F-G$ 对称。根据不同的 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 R_H 、 R_S 形成不同的方案,其中具代表性的 3 种方案 M21、M22 和 M23

的尺寸如表 1 所示.

为了保证改进方案和原始方案之间的可比性,改进方案中导叶的节弦比、弦长、间隙大小以及翼型等均与原始方案基本相同,仅仅在轮廓上做了必要的调整,以适应不同的通道形状.

表 1 $R_s=177\text{ mm}$ 、 $L_1=131.4\text{ mm}$ 、 $L_2=107.6\text{ mm}$ 下的改进方案参数

方案编号	M21	M22	M23
L_3/mm	10.8	15.7	17.8
L_4/mm	10.7	68.6	115.4
R_H/mm	61.9	74.6	84.5
R/mm	128.7	132.7	136.2

3 研究方法

本文用 NUMECA 软件对压缩机整机内部流场进行了三维黏性可压缩单通道定常数值模拟,换算得到了压缩机的变工况性能,以此衡量各方案的改进效果.

3.1 数值方法

根据文献[4-6]的建议,本文以压缩机设计工况点为起点的单根调节性能曲线来代替多根性能曲线族,以此反映压缩机的变工况性能.这样做既能保证比较的可靠性,又能大大减少数值计算的工作量.

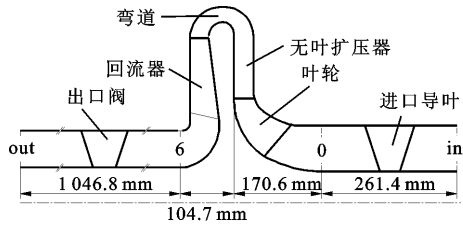
获得调节性能曲线的实验方法^[6]是:先设定导叶为全开(导叶角度 $\theta=0^\circ$),调节压缩机出口阀门使得压缩机流量在工作转速下达到设计流量,再测量压缩机的各项性能参数;固定此时的出口阀门开度,维持其他条件不变,以 $\theta=0^\circ$ 作为起点逐步向正预旋或负预旋方向调节导叶角度.在调节过程中,测量不同导叶角度下的压缩机性能参数,测得的性能参数值(如压力、效率等)将表示为随流量的变化曲线,即压缩机的调节性能曲线.

仿照上述实验方法,分别在 9 种不同的导叶角度 -20° 、 -10° 、 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 下,对压缩机采用改进方案前后的整机内部流场进行了数值模拟.如果采用某种进方案后,压缩机在导叶角度为 60° 时的流量超过 3 kg/s ,就要再补算导叶角度为 65° 的情况,以便与原始方案比较.

3.2 数值方法及可靠性分析

数值模拟的计算区域如图 3 所示,其中包括导叶、叶轮、无叶扩压器、弯道、回流器和出口阀.为了保证数值模拟结果的可比性,在所有方案和算

例中,in、0、6、out 4 个截面的位置以及 0、6 截面之间的网格均相同,6 截面与 out 截面之间、in 截面与 0 截面之间的网格拓扑结构相同.在建模过程中,忽略了导叶根部的传动机构,考虑了导叶根部和端部的间隙.计算网格总数约为 146 万,满足网格无关性要求.动静界面之间使用周向平均耦合方法进行处理,以保证动量、质量、能量守恒.以理想气体为工质,采用 Navier-Stokes 方程和时间推进法进行求解,选用 Spalart-Allmaras 湍流模型和中心差分作为离散格式.叶轮转速为 $9\,900\text{ r/min}$,额定流量为 4.291 kg/s ;入口的给定总温为 298 K ,总压为 95 kPa ,进口气流方向为轴向;出口的给定平均静压为 101.325 kPa .



in,out:计算区域的入口、出口界面;

0:导叶与叶轮分界面;6:级出口界面

图 3 TR400 压缩机计算区域示意图

本文所用软件和数值方法^[11]在模拟同类离心压缩机内部流动方面是比较可靠的,因此其也适用于模拟 TR400 压缩机的内部流动.

4 计算结果及分析

根据整机数值模拟结果,取图 3 中 in、0 这 2 个截面上的流动参数来计算进口导叶的流动效率,取图 3 中 6、out 这 2 个截面上的流动参数来计算压缩机的级性能参数.压缩机进口导叶的流动效率、压缩机的级效率、级压比的调节曲线如图 4~图 6 所示.从图 4 可见,在整个变工况范围内,采用改进方案明显提高了进口导叶的流动效率,设计工况点附近的流动效率提高约 1%,导叶角度较大时的效率可提高 4% 以上,表明本文中的定性分析是准确的.

图 5、图 6 显示,改进方案在保证级压比基本不变的同时,可以提高压缩机的级效率,其中效果最好的方案 M21 将效率提高了 0.6%~2.1%,表明通过增加当量预旋半径提高压缩机变工况性能的改进思路取得了预期的效果.

对比图 4、图 5 可以发现,在设计工况点附近,方案 M23 虽然显著提高了进口导叶效率,但却未能

提高整机效率,表明此时压缩机其他元件的效率必然有所下降,其中原因有待进一步研究。

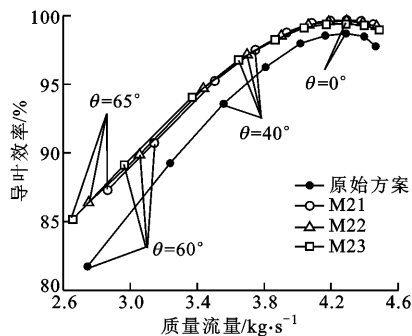


图4 导叶效率调节曲线

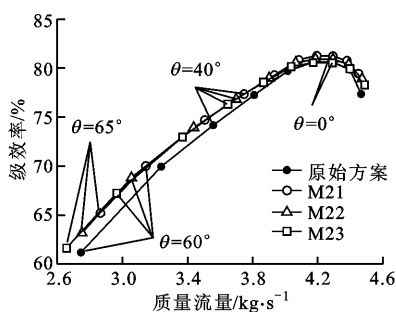


图5 级效率调节曲线

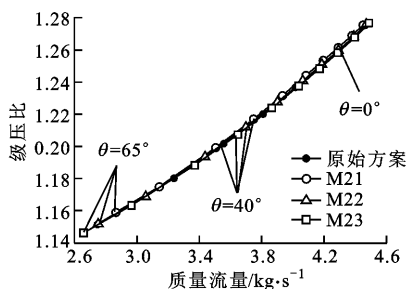


图6 级压比调节曲线

5 结论

(1)根据合理的思路及方案改进导叶通道,可以提高离心压缩机在正、负预旋下的变工况性能。因此,从改进导叶通道入手来提高离心压缩机变工况性能是一种可行的途径。

(2)增大导叶通道的当量预旋半径可以有效地提高进口导叶的流动效率,从而提高离心压缩机的变工况性能。

(3)增大导叶通道的当量预旋半径可能会降低压缩机的其他元件的效率,其中原因有待进一步研究。若能克服这一方面缺陷,则有望取得更好的改进

效果。

(4)导叶通道各部位的结构尺寸均对进口导叶的调节性能产生影响,当量预旋半径只是其中的一个重要影响因素。在后续研究中,若能对导叶通道结构与离心压缩机变工况性能之间的关系进行深入、系统的分析,并将导叶通道和叶片的改进措施相结合,则有望取得更好的改进效果。

参考文献:

- [1] 谭佳健,毛义军,祁大同,等. 离心式压缩机可调进口导叶研究综述[J]. 风机技术, 2006, (3): 44-47.
TAN Jiajian, MAO Yijun, QI Datong, et al. Research overview on adjustable inlet guide vane for centrifugal compressor[J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2006, (3): 44-47.
- [2] RODGERS C. Centrifugal compressor inlet guide vanes for increased surge margin[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113(4): 696-702.
- [3] 徐忠. 离心压缩机原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1990:146.
- [4] 张义云,祁大同,谭佳健,等. 基于叶型和叶栅稠度改进调节门性能的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (5): 583-587.
ZHANG Yiyun, QI Datong, TAN Jiajian, et al. Experimental study on performance of inlet guide vane with improvement of blade airfoil and cascade solidity [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (5): 583-587.
- [5] 张义云,祁大同,谭佳健,等. 离心风机平板直叶片调节门的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (9): 1044-1048.
ZHANG Yiyun, QI Datong, TAN Jiajian, et al. Experimental study on inlet guide vane with straight blade in a centrifugal fan[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(9): 1044-1048.
- [6] ZHANG Yiyun, QI Datong, MAO Yijun. Experimental investigation and improvement of the inlet guide vane with plate vane in a centrifugal fan[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part A Journal of Power and Energy, 2009, 223 (A4): 401-413.
- [7] COPPINGER M, SWAIN E. Performance prediction of an industrial centrifugal compressor inlet guide vane system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part A Journal of Power and Energy, 2000, 214 (A2): 153-164.
- [8] SWAIN E. The design of an inlet guide vane assembly

for an industrial centrifugal compressor[J]. Energy Saving in the Design and Operation of Compressors, 1996 (13): 11-22.

[9] ARMAN M, ERIK G, RENÉ A, et al. Novel IGV designs for centrifugal compressors and their interaction with the impeller[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010; Power for Land, Sea and Air. New York, USA: ASME, 2010: 2019-2029.

[10] 商景泰. 通风机手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 371-376.

[11] TAN Jiajian, QI Datong, WANG Rui. The effects of radial inlet on the performance of variable inlet guide vanes in a centrifugal compressor stage [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010; Power for Land, Sea and Air. New York, USA: ASME, 2010: 1723-1732.

(编辑 苗凌)