

向心透平导向叶栅的结构优化

魏新利, 邱志明, 马新灵, 王 慧

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:以 R245fa 为工质, 采用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT, 运用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 对叶片数分别为 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 叶片安装角分别为 $24^\circ, 28^\circ, 32^\circ, 36^\circ, 40^\circ$ 的导向叶栅进行了数值研究. 计算结果显示, 当叶片数为 21, 安装角为 28° 时, 导向叶栅的出口周向平均速度、出口平均温度、速度系数等与原设计相比均有了很大的改善. 在此叶片数和安装角下, 采用线性拟合得到了满足设计流量所需的叶高. 研究表明优化后流道内流动情况良好, 为高效导向叶栅的设计提供了参考.

关键词:向心透平; 导向叶栅; 二次流; 优化

中图分类号:TK14 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.011

0 引言

向心透平具有大焓降、高转速、高膨胀比等特点^[1], 在工程实际中有着广泛的应用. 例如以其作为关键部件的微小型燃气轮机, 广泛用于小型分布式发电、冷热电联供、车辆混合动力以及军用车辆的辅助电站等^[2]. 研究发现, 若静叶叶片与叶轮速度系数分别提高 1%, 整机轮周效率将分别提高约 1% 和 0.2%, 因此导叶的速度系数的变化对轮周效率的影响相当大, 提高导向器叶片的流动效率将会给向心透平带来更大的收益^[3]. 前人多以空气、水蒸汽或其他有机物为工质, 考虑因素也多仅限于单因素如叶高或叶片数单独对静叶性能的影响. 笔者通过 CFD 软件 FLUENT, 以 R245fa 为工质研究了叶片数和安装角同时对静叶性能的影响, 再根据设计流量确定叶高, 最终提出了优化后的设计方案.

1 数值模拟及分析方法

1.1 流体动力学控制方程

三维可压定常标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的各个基本方程如下^[4].

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

Reynolds 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}]. \quad (2)$$

紊流能量输送方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ + \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \varepsilon - 2\rho \varepsilon M_i^2. \end{aligned} \quad (3)$$

紊流能量耗散率方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \Phi. \quad (5)$$

其中, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$;

$$\begin{aligned} \Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ \left. \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda \text{div} u. \end{aligned}$$

式中: ρ 为密度; u_i 为速度; p 为流体微元体上的压力; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; σ_k 和 σ_ε 分别为与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数; μ 为动力黏度; μ_t 为湍流黏度; Pr_i 为湍动 Prandtl 数; g_i 为重力加速度在第 i 方向上的分量; β 为热膨胀系数; M_i 为湍流马赫数; c_p 为比热容; T 为热力学

收稿日期:2013-10-03; 修订日期:2013-11-06

基金项目:河南省科技攻关计划资助项目(122102210041); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A480722)

作者简介:魏新利(1956-), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事生物质能利用、低温余热制冷及发电等研究, E-mail:xlwei@zzu.edu.cn.

温度; λ 为流体的传热系数; Φ 为由于黏性作用机械能转换为热能的耗散部分. 常数分别取: $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

1.2 模型的建立和网格的生成

向心透平静叶主要结构参数如图 1 所示. 其中 b 为弦长, α 为叶片安装角, R_0 为静叶环进口半径, R_n 为静叶环出口半径, R_l 为叶轮入口半径, L_n 为叶片高度. 原设计静叶的叶型采用莫斯科动力学院的 TC-4P 叶型, 叶片数为 17, 叶高为 2.5 mm, 叶片安装角为 36° , 质量流量为 0.432 kg/s.

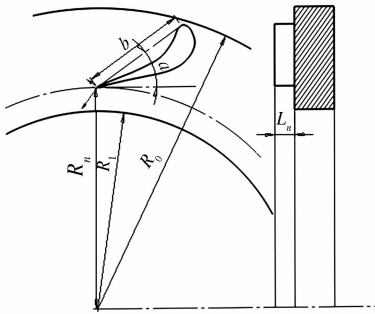


图 1 静叶结构参数
Fig.1 Structure parameters of stator

由于导向叶栅结构上的对称性, 为了研究方便笔者仅取单个流道作为研究对象进行数值研究. 对在静叶前缘、尾缘及壁面附近的网格进行局部加密结果如图 2 所示.

1.3 计算方法和边界条件

计算区域采用结构化网格, 湍流模型采用标

准 $k-\varepsilon$ 模型. 工质从入口到出口逐渐加速膨胀且均处于气态, 计算中对应物性参数直接从数据库中调取. 网格单元所在区域采用静止的绝对坐标系. 将进出口截面分别设为压力进口和压力出口, 将因分割流道而产生的面设成周期性边界条件, 其余面均设为绝热固壁条件. 进出口边界参数均按设计工况给定. 入口总压为 500 kPa, 总温为 343 K. 出口静压为 180 kPa, 回流总温为 324.18 K.



图 2 模型的建立和网格的生成过程
Fig.2 Modeling and the mesh generation

2 计算结果与分析

对原设计静叶进行数值模拟, 发现气体在叶片入口附近缓慢膨胀, 在斜切口附近开始急剧膨胀, 压力总体分布情况与实际情况相符. 另外, 计算得到的出口平均速度为 153.25 m/s, 与热力计算得到的静叶出口速度 158.82 m/s 吻合得较好. 由于笔者考虑了壁面的黏性力等产生的耗散作用, 因此计算结果与热力计算所得数值相比略小是可以接受的, 所以计算结果是可信的.

相同条件下, 静叶出口速度越大, 温度越低, 则叶栅的膨胀能力越好. 图 3 是各参数随不同安

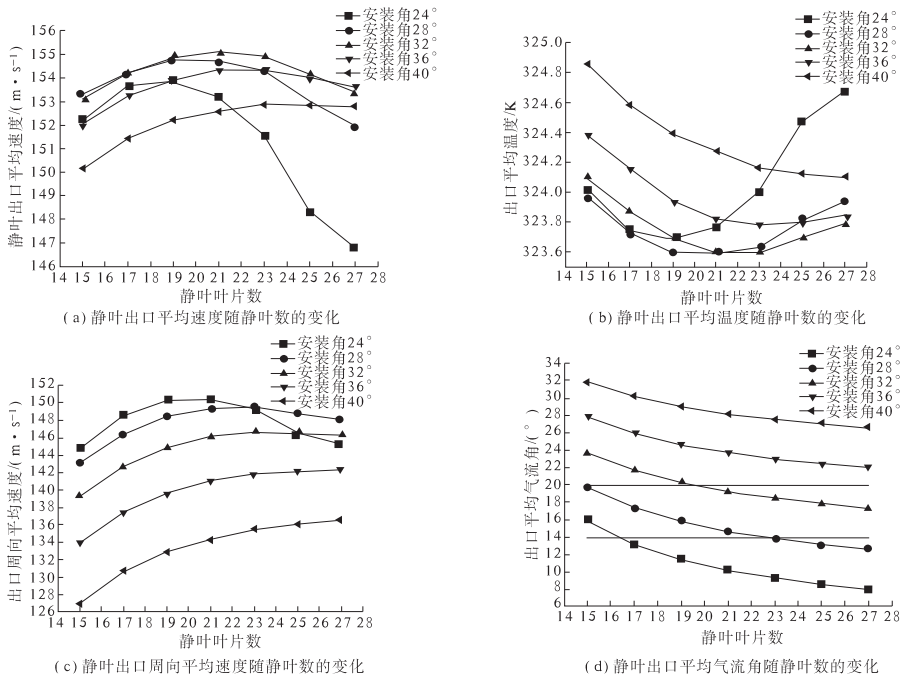


图 3 各参数随不同安装角和叶片数的变化曲线
Fig.3 Curves of each parameter changing with different setting angles and vane number

装角和叶片数的变化曲线图. 从图 3(a)、(b)中可以看出:在不同安装角下,静叶的出口平均速度都随叶片数的增加有先增大后变小的趋势,而静叶的出口平均温度的变化趋势则恰好相反. 这是由于随着叶片数的增加,气流速度分布的均匀程度也逐渐增加,减少了气流的局部脱离进而减少了漩涡的产生. 然而随着叶片数的增加,壁面摩擦损失也随之增加. 当叶片达到一定数目时,壁面摩擦损失已占主导地位,此时若继续增加叶片数将会导致效率大大降低. 图 3(a)还表明随着安装角的增大,最大速度系数所对应的叶片数呈现出逐渐增大的趋势. 综合图 3(a)、(b)可知,叶片安装角为 28°或 32°,叶片数为 21 是较为理想的选择.

提高静叶出口周向速度是提高向心透平轮周功的有力手段. 从图 3(c)中可以看出当叶片数从 15 变化到 27 时,除安装角为 24°外,出口周向速度随着安装角的减小以及叶片数的增加而不断增大. 单从该图来看,安装角为 24°,叶片数为 19 或者 21 与安装角为 28°,叶片数为 21 或者 23 都是

较为理想的选择.

在现有的向心透平结构中,导向叶栅出气角很少有超过 25°的,一般都处于 14°~20°^[1]. 从图 3(d)中可以看出:相同叶片数下,叶片安装角越小,静叶的出气角越小;同一安装角下,出口气流角随着叶片数的增加逐渐减小,而且减小的趋势变得越来越平缓. 这是由于随着叶片数的增加,各个叶片对单位质量的工质的导向作用越来越强. 而在一定的安装角下,叶片改变来流工质的气流方向的能力是有限的. 图中的两条黑直线之间的范围表示气流角在 14°~20°内,该范围内的点都在可选范围之内. 它们分别是:安装角为 24°,叶片数为 15;安装角为 28°,叶片数为 15,17,19,21 和安装角为 32°,叶片数为 21,23,25,27.

以上计算结果虽是在设计条件下得出的,但分析其产生的现象的本质原因可知,其基本的定性规律仍适用于其它工况. 综合图 3 的分析结果可知,设计条件下,安装角为 28°,叶片数为 21 是最佳的选择,该方案能保证静叶高效地运转.

表 1 不同叶片高度下透平的流量
Tab.1 The mass flowrate of turbine in different blade height

叶高/mm	2.5	3	3.5	4	4.5
流量/(kg·s ⁻¹)	0.241 708	0.289 450	0.335 711	0.383 827	0.429 889

在其它结构参数不变的情况下,调整叶片高度及叶片安装角都可使向心透平的流量发生变化^[5]. 为使优化后静叶能满足设计所需的流量 0.432 kg/s,由于安装角已确定,下面还需确定叶片的高度.

表 1 是当叶片高度由 2.5 mm 变化到 4.5 mm 时向心透平的质量流量. 图 4 为静叶质量流量随叶片高度变化的折线图和拟合后的直线图. 从图中可以看出两者几乎重合. 拟合得到的直线为

$Y=0.006\ 6+0.941\ 5X(R^2=0.999\ 96)$. (6)
其中, Y 表示静叶出口的质量流量,kg·s⁻¹; X 表示静叶的叶片高度,mm; R 是相关系数.

把 $Y=0.432$ 代入式(6),计算得 $X=4.518\ 32$.

至此,静叶的全部结构参数都已确定. 建立安装角为 28°,叶片数为 21,叶高为 4.518 32 mm 的导向叶栅. 按前文所述步骤离散化后再进行计算.

表 2 优化后的主要参数
Tab.2 Main parameters after optimization

平均速度/ (m·s ⁻¹)	平均温度/ K	周向速度/ (m·s ⁻¹)	速度 系数	质量流量/ (kg·s ⁻¹)
155.032 9	323.578 2	149.732 6	0.927 3	0.432 797 4

计算得到的主要参数如表 2 所示. 与原设计相比,优化后的速度系数提高了 1.16%,周向速度提高了 8.93%,静叶出口的质量流量为 0.432 797 4 kg/s,与设计目标值的相对误差仅为 1.85e10⁻³.

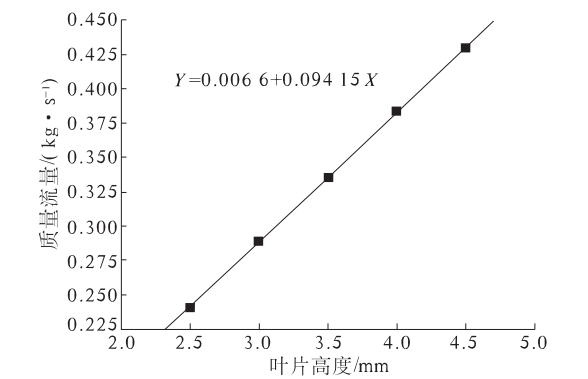


图 4 静叶质量流量与叶片高度的关系
Fig.4 Relation of mass flowrate and blade height

图 5 为优化前后半叶高处叶片表面的静压分布.对比发现优化前后工质在压力面上的压力分布基本保持不变;优化前在叶片入口处吸力面的压力就开始明显下降,而优化后到约沿弦长方向 20% 处压力才开始迅速下降.并且优化后沿弦长方向约 50% 处的小段逆压区趋势也变得较为平缓.

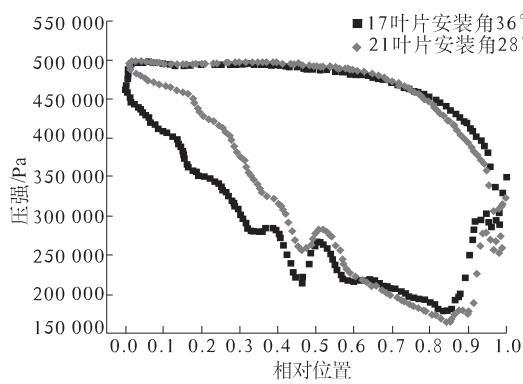


图 5 优化前后半叶高处叶片表面的静压分布
Fig.5 Static pressure distributions on blade surface at half of vane's height before and after optimization

二次流是区别于主流而定义的一种流动,是指在叶栅通道上下端部的附面层内,由于汽流速度相对很小,所产生的离心力不足以抵消从叶栅压力面到吸力面产生的横向压力差,在横向压力差作用下,上下端壁附面层的汽流便从叶栅内弧向背弧横向运动^[6].因此控制压力面和吸力面之间的横向压力差能有效地防止二次流的产生.从图 5 看出优化后叶片前半部分压力面与吸力面的压差明显小于优化前的值,这进一步降低了二次流发生的可能性.叶根处由于黏性力的存在流速相对较小,最易产生二次流.图 6 为流道叶根处的极限流线分布图和叶片前缘、尾缘的局部放大图.从图中可以看出流道内流线分布均匀顺畅并无横向流动情况,在叶片前缘气流分流处和尾缘气流汇集处过渡平缓.

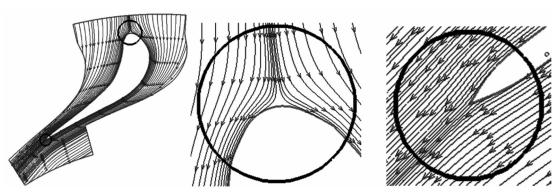


图 6 叶根处的流线分布
Fig.6 The distribution of streamlines at hub

3 结论

(1)一般情况下,安装角相同时,随着叶片数的增加,静叶速度系数呈现出先增大后减小的趋势,这本质上是由于局部脱流产生的漩涡损失和与叶片的摩擦损失共同作用的结果;安装角变化时,最大速度系数所对应的叶片数是不一样的.设计条件下,当安装角从 24°变化到 40°时,最大速度系数所对应的叶片数呈现出逐渐增大的趋势.

(2)一般情况下,在合理范围内叶片安装角的减小能提高静叶的速度系数,但减小到超过一定值(本文静叶的这个值在 28°~32°之间)时,静叶的效率会迅速减小.这主要是由于安装角减小到这个值时,流体的尾迹损失会迅速增加引起的.

(3)通过分析叶片数、叶片安装角、叶片高度共同对静叶性能的影响,得出叶片安装角为 28°,叶片数为 21,叶高约为 4.52 mm 时满足设计要求.在设计工况下,该方案与原设计方案相比不仅减小了流道中压力面与吸力面的压力差,在更大程度上避免了二次流的产生,而且使周向速度提高了 8.93%,速度系数提高了 1.16%.

参考文献:

[1] 康婷,李雪松,顾春伟. 微型燃气轮机向心透平内部流动分析[J]. 热力透平,2009,38(2):38.
[2] 奚忠,径流透平气动设计及优化方法研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所,2012.
[3] 邓清华,丰镇平. 微型燃气轮机向心透平导向器的流场分析与设计研究[J]. 西安交通大学学报, 2005,39(9):962-965.
[4] 张师帅. 计算流体动力学及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011:82-84.
[5] 张鹏刚. 微型燃气轮机向心透平气动性能的数值研究[D]. 大连:大连理工大学能源与动力学院,2005.
[6] 栾忠兴,李勇,薛彦光,等. 汽轮机静叶栅二次流损失的数值研究[J]. 东北电力大学学报,2012,32(2):43-47.

The Structural Optimization of Guide Vane of Radial-Inward-Flow Turbine

WEI Xin-li, QIU Zhi-ming, MA Xin-ling, WANG Hui

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: R245fa is used as the the working fluid, the computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT is adopted, and the standard $k-\varepsilon$ model is applied in this paper. The guide vanes that blade numbers range from 15 to 27 increased by 2 and the setting angles range from 24° to 40° increased by 4° have been numerically studied. The results of computation show that the guide vane's outlet average circumferential velocity, outlet average temperature and velocity coefficient have greatly improved compared with the original design, when the vane number is 21 and the setting angle is 28° . The blade height that original design flowrate required is got with the linear fitting method in this vane number and setting angle. Research shows that the flow in the channel is in good condition after optimization. This paper may provide a reference for designing an efficient guide vane.

Key words: radial-inward-flow turbine; guide vane; secondary flow; optimization

(上接第 45 页)

- | | |
|--|---|
| [5] COHEN W W, SCHAPIRE R E, SINGER Y. Learning to order things[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1999, 10(1): 243 - 270. | [C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. Lawrence Erlbaum: Associates LTD, 2005: 27 - 32. |
| [6] ELZINGA C, WANG Hui, LIN Zhi-wei, et al. Concordance and consensus[J]. Information Sciences, 2011, 185(12): 2529 - 2549. | [8] AUGUSTO J C, WANG Hui, LIU Jun. Situation assessment in disaster management[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2008, 1(3): 237 - 247. |
| [7] WANG Hui, DUBITZKY W. A flexible and robust similarity measure based on contextual probability | |

An Approach to Aggregating Partially Ordered Preferences with Belief Degrees for Decision Making

CHEN Shu-wei, ZHOU Wei, CAI Li-na

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: we propose in this paper an approach to aggregating partially ordered preferences with belief degrees for decision making. We consider a set of preferences associated with belief degrees, and treat each preference as a sequence with belief degree. For every pair of considered alternatives, we calculate the probability that one alternative should be placed before another. These probabilities are then fed to the ORDER-BY-PREFERENCE algorithm to generate an approximately optimal total order over all the alternatives. A simple example is given to illustrate this approach.

Key words: decision making; preference; partial order; belief degree; aggregating