

冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响

石丽建¹, 付玲玲², 刘超¹, 汤方平¹, 张文鹏¹, 陈锋³

(1.扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏扬州225100; 2.扬州大学广陵学院,江苏扬州225100;
3.常州市长江堤防工程管理处,江苏常州213000)

摘要:【目的】研究冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响。【方法】针对比转数为880的轴流泵叶轮,采用数值模拟方法和数值优化技术,基于儒可夫斯基翼型从3个角度进行冲角对轴流泵水力性能的影响研究。【结果】当设计参数保持不变时,冲角增大,扬程升高,比转数发生变化,最高效率增大,高效区往大流量偏移。为了使翼型处于更高质量区,建议轮缘侧翼型冲角在0~3°之间,且比转数大者取小值。当改变轮毂侧和中间断面翼型冲角时,设计工况下,为了得到较高扬程和较高效率的轴流泵叶轮,可以适当增加中间断面的翼型冲角,同时为了减小叶片扭曲改善非设计工况的水力性能,可以适当减小轮毂侧的翼型冲角。当比转数保持一致时,冲角增大,流量-扬程性能曲线的斜率减小,最高效率值保持相当,高效区范围往大流量偏移且高效区范围变宽。【结论】冲角对轴流泵叶轮水力性能有着重要影响,实际工程应用中,为保证轴流泵叶轮具有较好的水力性能应同时兼顾轮毂和轮缘侧的翼型冲角。

关键词:冲角;优化设计;轴流式叶轮;水力性能

中图分类号:TH312

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180314

石丽建,付玲玲,刘超,等.冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(4):55-62.

0 引言

在轴流泵叶轮设计过程中,冲角的选择是比较重要的一个环节^[1-2]。当轴流泵叶轮各断面翼型冲角发生变化时,必然会使得叶轮中的流场结构形式发生变化。研究轴流泵叶片内外断面翼型冲角对轴流泵扬程、效率、必需汽蚀余量以及高效区范围的影响非常有必要。目前对冲角的研究主要集中于离心泵叶片和涡轮叶片等领域。研究表明,叶轮叶片冲角变化时,对设计点的扬程和效率影响不大,对于空化性能则存在一个最优值^[3];轴流压气机平面叶栅气动特性在-4°冲角时总损失最小^[4];冲角对涡轮叶栅内通道涡的影响显著大于对泄露流动的影响^[5];提出了新的压气机平面叶栅内的漩涡模型^[6]。综上,冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响比较显著,但目前对轴流泵叶片冲角研究的文献很少,主要原因是轴流泵叶片内外断面扭曲严重,内外翼型冲角变化较大。弄清冲角对轴流泵水力性能的影响对轴流泵优化设计具有重要的指导作用。为此,基于iSIGHT数值优化软件^[10-12]和CFD数值模拟软件^[7-9],研究冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响,以期对轴流泵设计过程冲角的选择提供一定理论依据。

1 儒可夫斯基翼型构造

轴流泵叶轮优化设计过程中,对翼型的设计构造是关键。翼型形状决定了轴流泵内部流场压力分析趋势和叶轮的水力性能,也是流动分析的基础与关键。分析翼型冲角对轴流泵水力性能影响时,一方面要使各断面翼型参数不发生变化,另一方面还要使翼型描述方法简单,翼型效果较好。儒可夫斯基翼型^[13]结构简单、参数意义明确,且精确控制翼型尺寸。因此,在后续研究过程中翼型均选择儒可夫斯基翼型。儒可夫斯基翼型的型线控制表达式可以表示为:

$$z = \sqrt{0.25 + \frac{1}{64\epsilon^2} - y_c^2} - \frac{1}{8\epsilon} \pm \frac{2\sqrt{3}}{9} \delta(1 - 2y_c) \sqrt{1 - 4y_c^2} \quad (1)$$

收稿日期:2018-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51376155);江苏省水利科技项目(2017031);国家科技支撑计划项目(2015BAD20B01-02);扬州市科技计划项目(YZ2018103);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:石丽建(1989-),男,江苏如皋人。讲师,博士,主要从事流体机械功能曲面多学科设计优化研究。E-mail: yzdxslj@126.com

式中： y_c 为翼型弦长的相对长度，是一个无量纲值，取值范围为[-0.5, 0.5]； ε 为翼型拱弧线距离弦长的最大值，即最大相对拱度值； δ 为翼型相对最大厚度值。对式(1)中的 ε 进行泰勒级数展开，忽略高阶项得：

$$z = (1 - 4y_c^2)\varepsilon \pm \sqrt{1 - 4y_c^2}(1 - 2y_c)\delta \quad (2)$$

式(2)翼型中心位于原点，公式第一项表示翼型骨线的形状，第二项表示翼型的厚度分布，取正号代表翼型的上型线，取负号代表翼型的下型线。

将翼型的前缘顶点移至原点，得：

$$z = 4\varepsilon y(1 - y) \pm 1.54\delta y^{0.5}(1 - y)^{1.5} \quad (3)$$

式(3)即为翼型端点在原点的基础儒可夫斯基翼型的函数表达式。

对尾缘翼型进行加厚处理，便于网格的划分，处理表达式为：

$$z = 4\varepsilon y(1 - y) \pm 1.54\delta y^{0.5}(1 - y)^{1.5} \pm 0.1y^6(1 - y)^{0.5} \quad (4)$$

式中：第三项的系数要尽可能的小，以减小对前缘翼型形状的影响。

取 $\varepsilon=0, \delta=0.2$ 和 $\varepsilon=0.1, \delta=0.2$ ，式(3)和式(4)表达的翼型的形状分别如图1和图2所示，图中红色虚线代表尾部加厚翼型。

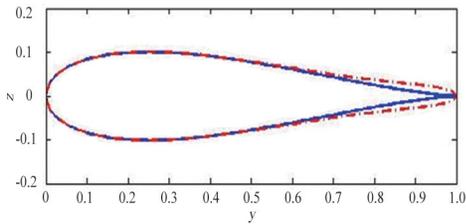


图1 无拱度翼型对照图

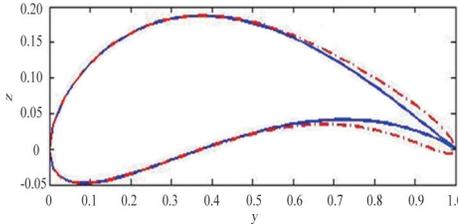


图2 有拱度翼型对照图

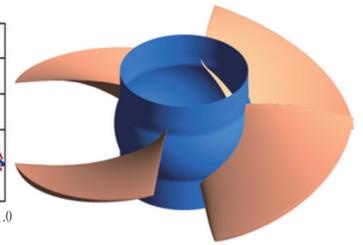


图3 叶轮计算模型

2 计算模型与数值模拟

2.1 计算模型

以TJ04-ZL-12号模型叶轮的设计参数为基础，通过改变翼型安放角，得到不同的轴流泵水力模型，进而从翼型冲角的角度分析对其水力性能的影响。模型叶轮的设计流量 $Q=360$ L/s，水泵扬程 $H=5.5$ m，转速 $n=1450$ r/min，设计工况下泵段的扬程为5.0 m，叶轮叶片数4片。叶轮模型如图3所示。

2.2 控制方程及边界条件

数值模拟计算控制方程采用时均 $N-S$ 方程，湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。进口边界条件设定为总压，总压为一个标准大气压；出口边界采用质量流量出口，设计流量 Q 为360 L/s。叶轮为旋转域，其中叶轮轮缘面边界设置为相对于叶轮反向同速旋转，其他为静止域。转速为1450 r/min。固体壁面边界包括叶片表面、轮毂表面、叶轮外壳的内表面等，采用固壁表面满足黏性流体的无滑移条件，近壁区域采用标准壁面函数边界条件。动静交界面采用速度平均的Stage交界面模型，其余各部分交界面均采用None交界面类型。

2.3 网格无关性

根据伯努利能量方程计算轴流泵叶轮扬程，由数值模拟计算得到的速度场和压力场以及叶轮上作用的扭矩预测轴流泵叶轮的水力性能。轴流泵叶轮扬程(H)和水力效率(η)计算式分别为：

$$H = (P_{out}^T - P_{in}^T) / (\rho g) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{T_p \omega} \quad (6)$$

式中： P_{out}^T 为叶轮出口断面总压(Pa)； P_{in}^T 为叶轮进口断面总压(Pa)； g 为重力加速度(m/s^2)； T_p 为扭矩($N \cdot m$)； Q 为流量(L/s)； ω 为叶轮旋转角速度(rad/s)。

轴流泵叶轮网格在Turbo-grid中采用六面体结构化网格划分。网格的疏密度对计算结果有着显著的影响。选择合理的网格疏密度不仅能获得良好的计算结果、从而预测泵的性能，有时还能减少网格的总节点数、节约计算时间。因此，网格无关性检查是数值计算不可缺少的一部分。就轴流泵叶轮进行网格无关性验证，网格均采用结构化网格，单通道网格从6万左右一直增加到18万，通过网格无关性分析可知，当单通道网格数在14万时，网格数的继续增加对效率基本无影响。因此，在计算时网格数设置在14万网格。

3 冲角对轴流泵水力性能的影响

从翼型的角度出发,升阻力系数的大小跟翼型的几何形状和来流冲角有关系。叶轮设计时翼型冲角处于较高质量区,可以得到较高的叶轮效率。在轴流泵叶片设计过程中,保持翼型的形状不变。冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响分为3个方面进行研究,即:

- 1)保证翼型形状不变,保证叶轮设计参数不变,保证内外翼型冲角变化大小一致,分析冲角对轴流泵水力性能的影响。
- 2)保证翼型形状不变,保证叶轮设计参数不变,改变内外翼型冲角变化值,分析内外翼型冲角对轴流泵水力性能的影响。
- 3)保证翼型形状不变,改变叶轮设计参数使其比转数一致,分析同一比转数下冲角对轴流泵水力性能的影响。

3.1 冲角单一参数改变对轴流泵性能的影响

以TJ04-ZL-12号叶轮为基础叶轮,在已有的内外翼型安放角的基础上分别增加4°、增加2°、减小2°与原有叶轮模型性能进行对比。计算结果分别如图4和图5所示。冲角的定量确定取翼型安放角与各断面翼型前缘水流入流角之差得到,叶轮各断面翼型冲角如图6所示,图中横坐标 $span=0$ 代表轮毂处翼型, $span=1$ 代表轮缘处翼型(下同)。

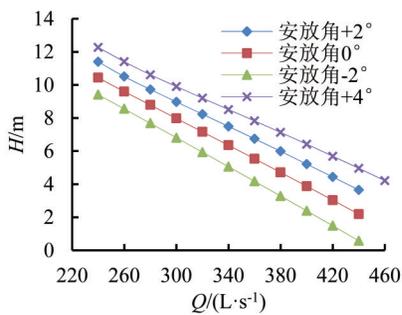


图4 不同安放角模型流量扬程曲线

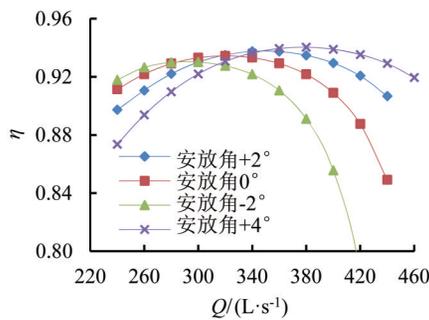


图5 不同安放角模型流量效率曲线

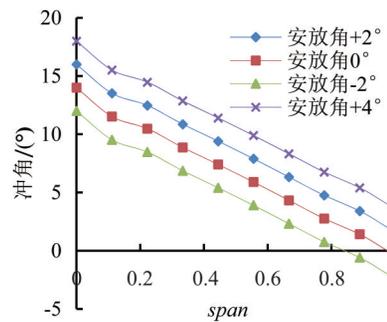


图6 不同模型设计工况冲角变化曲线

根据图4和图5可知,当叶片安放角增大,其他参数保持不变时,设计工况下各断面冲角增大,扬程增大,效率升高,翼型处于更高质量区。在设计工况下,翼型冲角从轮缘到到轮毂基本上呈现线性减小。从效率曲线上看,当叶片安放角增大时,冲角增大,叶片做功能力增强,最高效率点增加,其中安放角为+4°时,最高效率点达到了94%,高效区同时往大流量偏移。针对0°安放角下的效率曲线,在轮缘处几乎为0冲角,随着流量的增加,轴面速度增加,叶轮进口液流角增加,轮缘处冲角为负冲角,翼型工作质量急剧下降,导致叶轮效率在大流量区域下降较快。一方面说明了翼型在负冲角条件下工作状态极差,另一方面也说明了轮缘处的翼型设计状态对叶轮性能的作用较大。

将不同模型的最高效率点处的冲角取出,用于对比叶轮最佳状态时冲角的分布趋势,如图7所示。

由图7可知,不同模型在最高效率点处翼型冲角变化基本也是呈现线性变化,但均未出现负冲角的情况,轮缘处冲角基本在0~3°之间,从设计效果而言,为了使设计的叶轮最高效率比较高,高效区范围比较宽,轮缘处的冲角取值可在0~3°之间。且当冲角取大值时,扬程增加较大,叶轮比转数降低,因此比转数小的冲角取大值。

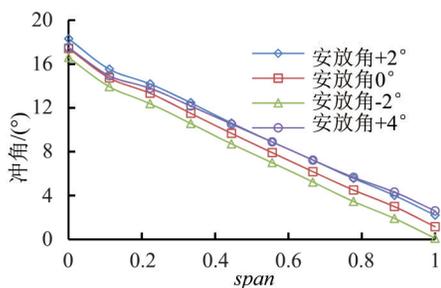


图7 不同模型最高效率点冲角变化曲线

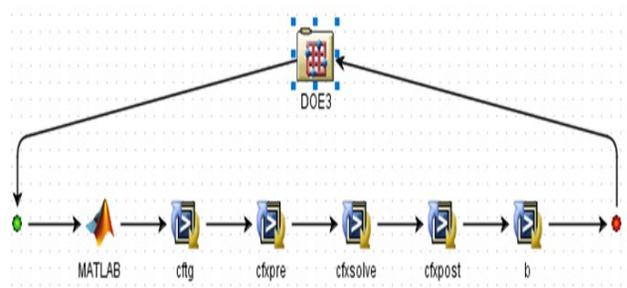


图8 计算流程图

3.2 内外翼型冲角变化对轴流泵设计工况性能的影响

1) 参数化建模。轴流泵设计时,需要10个断面的翼型安放角数据,数据过多直接影响设计优化的速度和效率,对初始叶轮10个断面翼型安放角数据进行分析,发现10个数据近似为一条抛物线。因此,分析时,控制轮毂侧、轮缘侧和中间断面的翼型安放角,其他断面通过matlab程序编写进行三次抛物线插值。这样就将叶片10个断面的翼型安放角通过3个参数进行控制,即通过中间断面翼型安放角(x_1)、轮毂翼型安放角(x_2)和改变轮缘翼型安放角(x_3)实现轴流泵翼型安放角的改变,初始值分别为 $x_1=26^\circ, x_2=45^\circ, x_3=15^\circ$ 。

2) 研究方法。根据研究结果,将设计工况点轮缘断面的冲角取为0冲角,改变中间断面和轮毂侧的翼型安放角。采用DOE(Design of experiment)试验方法进行试验分析。试验设计方法属于数理统计的范畴,也是其重要的组成部分。DOE方法一般主要用于辨识试验因子关键参数、确定DOE因子的最佳组合、研究参数因子与结果响应的关系、构造因子与响应间的近似模型和提高参数设计的健壮性等。由于优化拉丁方试验方法具有更好的空间填充性和均衡性,所以采用优化拉丁方分析方法。采用多学科优化平台集成matlab和CFX软件对不同方案进行数值模拟计算。DOE计算流程如图8所示。

3) DOE结果分析。每一次计算都是一套完整的迭代过程,通过DOE分析在设计空间一共产生40个数据点,在设计工况下对结果进行分析。 x_1, x_2 分别为叶片中间断面和轮毂侧的翼型安放角值。中间断面在初始值的基础变化 2° ,轮毂侧在初始值基础变化 3° 。根据文献[14],直接采用叶片表面静压预测的必需汽蚀余量为5.9 m,与试验测得的5.8 m差别很小,该公式的预测精度较高。故采用该公式预测汽蚀性能,公式为:

$$NPSH_{re} = \frac{P_{in}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g}, \quad (7)$$

式中: P_{in} 为叶轮进口的总压,此处即为1个大气压; P_v 为叶轮背面靠轮毂侧($span=0.85$ 处)且距离叶片进口处15%~20%位置处的最小压力。

根据DOE计算结果可以清楚地认识到设计变量之间以及设计变量与响应之前的关系,DOE计算云图如图9所示,主效应图如图10所示,交互效应图如图11所示,各变量的贡献率图如图12所示。

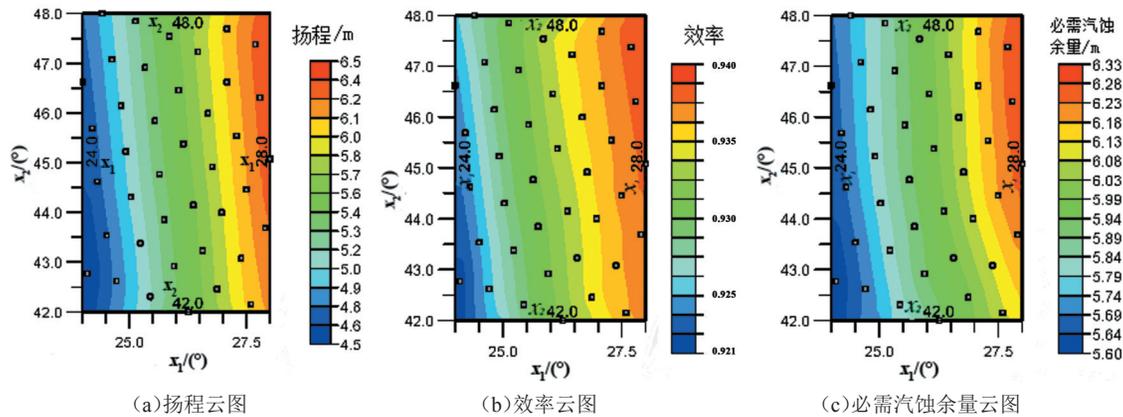


图9 DOE计算云图分析

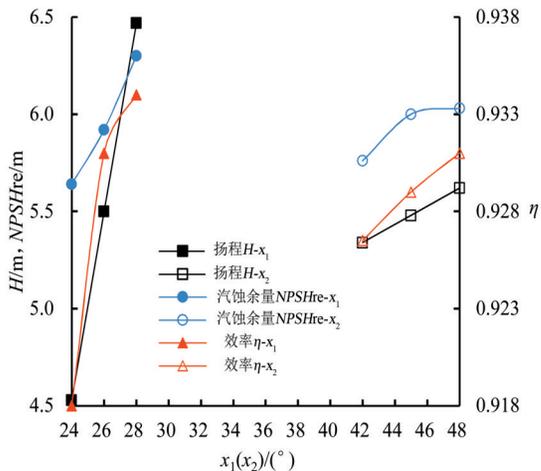


图10 各变量主效应图分析

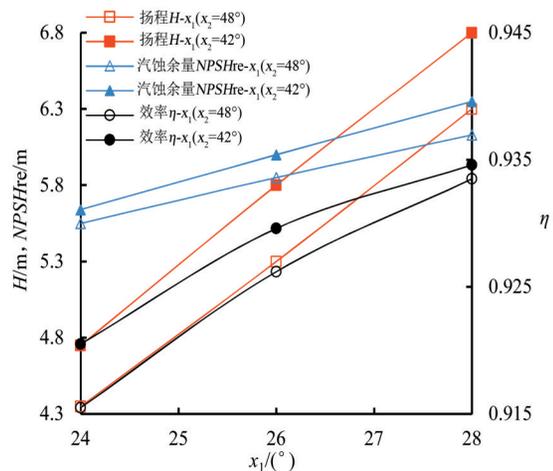


图11 各变量交互效应图

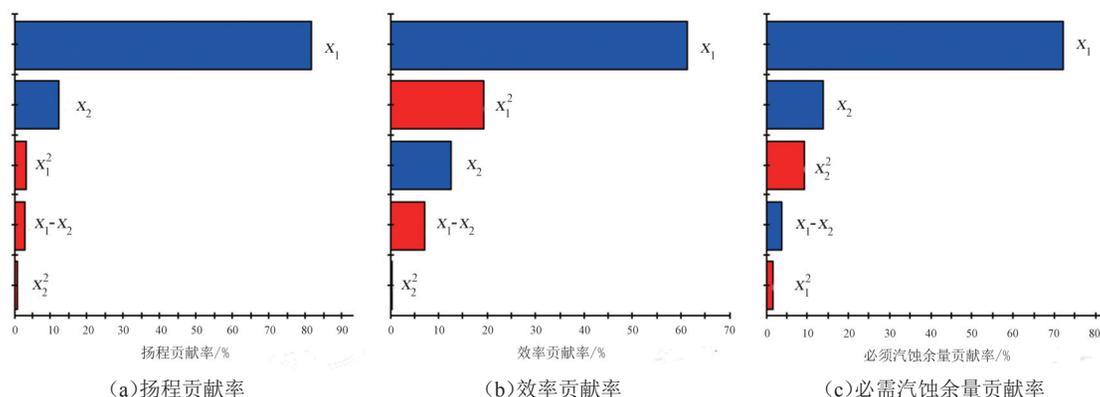


图 12 各变量贡献率图分析

由图 9 可知,设计工况下,优化拉丁方方法生成的试验设计样本点均匀地分布在设计空间。中间断面翼型安放角减小,且轮毂侧翼型安放角减小,叶片各断面翼型冲角减小,做功能力减小,扬程变小,效率增加,必需汽蚀余量值增加,汽蚀性能变差。由图 10 可知,中间断面的冲角增加对扬程、效率和汽蚀余量影响较大,且均呈现正的主效应,即中间断面冲角增加,扬程增大,效率升高,必需汽蚀余量增大,汽蚀性能变差,轮毂侧冲角增大对其水力性能趋势的影响跟中间断面一致,但其主效应值很小,即改变轮毂侧冲角对叶轮的水力性能影响有限。由图 11 可知,对轴流泵性能影响的交互曲线基本平行或夹角很小,说明轮毂侧冲角和轮缘侧冲角之间对叶轮水力性能的交互效应影响很小,因此,同时改变轮毂侧冲角和中间断面的冲角不会造成水力性能的急剧变化,与单独改变冲角影响趋势一致。根据图 12 贡献率图可知,中间断面的冲角对扬程、效率和汽蚀性能的贡献率均最大,说明改变中间断面的冲角对计算结果影响最大。其次,中间断面冲角的二阶主效应和交互效应的贡献率很小,可忽略不计,说明了翼型冲角跟轴流泵的扬程基本呈线性关系。而中间断面的二阶主效应对效率和汽蚀性能均有一定的负贡献率,因此,冲角对轴流泵效率和汽蚀性能的影响是非线性的。综合上述分析,针对轴流泵设计工况,为了得到较高扬程和较高效率的轴流泵叶轮,可以适当增加中间断面的翼型冲角,同时为了减小叶片扭曲改善非设计工况的水力性能,可以适当减小轮毂侧的翼型冲角。

3.3 同一比转数下翼型冲角对轴流泵水力性能的影响

只改变翼型冲角,不改变叶片其他设计参数,带来的影响就是一旦冲角发生改变,该轴流泵水力模型比转数即会发生变化。而针对某一特定的泵站工程而言,其设计工况扬程不能发生较大的变化。因此,在实际泵站工程应用中,水泵的比转数需要保持一致,即研究冲角对轴流泵水力性能影响时,在改变各断面翼型冲角大小时,需要改变叶片其他的设计参数,以保证设计流量下对应的扬程不发生较大的变化,也就是不同冲角下的水力模型均能满足泵站的实际运行要求。

1)叶栅稠密度参数化建模。在改变翼型冲角时,要保证翼型形状不发生变化,即最大拱度比和最大厚度比保持不变。同时为了研究方便,轮毂比、叶片数等大尺寸参数也保持不变,只改变叶栅稠密度值使得比转数保持一致。叶栅稠密度是轴流式叶轮设计的重要参数,其值不仅影响叶轮的效率和过流能力,同时也决定叶轮汽蚀性能的大小。当给定冲角和一定的来流条件时,叶栅稠密度必须满足能量转换条件,当冲角变小时,叶片的做功能力降低,为了达到同样的做功能力,此时必须增加叶栅稠密度值以提高叶片的做功能力;相反当冲角变大时,叶片做功能力增加,可适当减小叶栅稠密度值,以均衡扬程要求。

在轴流式叶轮设计时,通常有 10 个翼型断面,就需要沿叶片展向 10 个断面的叶栅稠密度数据,而这 10 个断面的叶栅稠密度数据采用从轮毂到轮缘近似的叶片等强度分布规律。因此,只需要确定轮缘叶栅稠密度和轮毂叶栅稠密度倍数。通过 FORTRAN 编程,根据轮缘叶栅稠密度和轮毂叶栅稠密度倍数生成 10 个断面的叶栅稠密度。将 10 个设计变量减少为 2 个,提高叶片优化设计的效率。即通过改变轮缘叶栅稠密度(x_4)和轮毂叶栅稠密度倍数(x_5)实现轴流泵叶片叶栅稠密度的改变。

2)优化算法。轴流式叶轮的优化过程是一个串行过程。优化模型为有约束的非线性模型。梯度优化算法是解决这类问题的理想方法,采用梯度优化下的顺序二次规划法(NLPQL),因为该法是目前公认的最优秀的非线性规划算法之一。其核心算法为序列二次规划法(SQP),将目标函数以二阶泰勒级数展开,并把

约束条件线性化,通过解二次规划得到下一个设计点。SQP算法具有良好的全局收敛和局部超线性收敛特性,收敛速度快,求解过程需要的迭代次数较少,并具有很强的沿约束边界进行搜索的能力,对求解文中优化变量少、约束条件不多的设计优化问题非常合适。

3)优化设计模型。优化的目的就是要在设计变量范围内,寻找设计参数的最优值,满足目标函数的期望。对轴流式叶轮的优化问题定义为:冲角不一致时,不断改变叶栅稠密度的值,约束条件为扬程,使叶轮的效率最高。设计变量的初始值 $x_4=0.8, x_5=1.2$ 。

优化目标函数:
$$\max \eta(x), \tag{8}$$

设计变量范围:
$$x = \{x_4, x_5\}, \quad \begin{cases} 0.6 \leq x_4 \leq 1.0 \\ 1.1 \leq x_5 \leq 1.45 \end{cases}, \tag{9}$$

约束条件:
$$5.4 \leq H \leq 5.6. \tag{10}$$

根据初始翼型安放角,各断面翼型安放角均增加或减小 1° ,改变不同的叶栅稠密度值,优化设计3幅比转数一致的轴流泵水力模型。

4)数据流程的建立。iSIGHT是一个仿真分析流程自动化的优化工具,提供了一个可视化的灵活的仿真流程搭建平台。根据叶轮优化设计的思路,优化设计流程图与图8一致。每一种翼型冲角都需要这样一套优化迭代流程。matlab生成叶片断面数据,然后调用Turbo-Grid对轴流式叶轮进行建模并划分网格,网格经过CFX前处理、计算和后处理,最后将得到的数据计算分析,输出扬程、效率和必需汽蚀余量的值。

5)优化设计结果及分析。经过多次优化迭代得到优化结果,如表1所示。根据表1得到3幅轴流泵水力模型的各断面设计参数,采用基于面元法的平面叶栅理论设计得到同一比转数的3幅轴流泵水力模型,如图13所示。图中FA1、FA2、FA3分别代表模型1、模型2和模型3的计算数据。

表1 优化结果

参数	$Q/(L \cdot s^{-1})$	H/m	$x_1/(^\circ)$	$x_2/(^\circ)$	$x_3/(^\circ)$	x_4	x_5	η	$NPSHr/m$
模型1	360	5.546	26	45	15	0.8	1.2	0.928 9	5.987 4
模型2	360	5.499	27	46	16	0.640 8	1.205 1	0.932 3	7.364 3
模型3	360	5.405	25	44	14	1.0	1.393 9	0.918 8	4.614 3

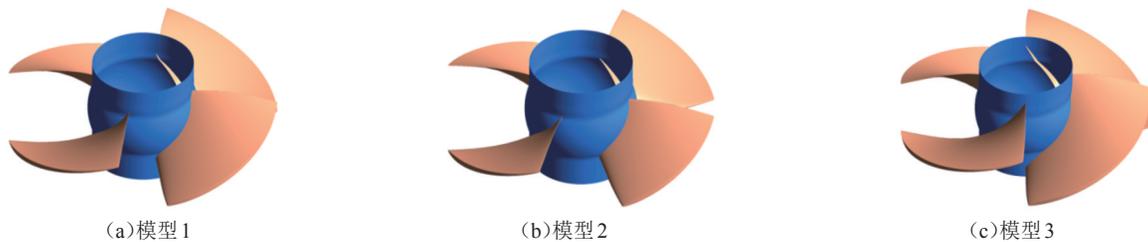


图13 比转数相同的3幅轴流泵水力模型

由表1可知,3幅水力模型设计工况下扬程接近,比转数保持一致,叶片安放角大的,冲角大,做功能力强,叶栅稠密度值较小,这与理论分析趋势一致。设计工况下,冲角增大时,效率升高,必需汽蚀余量增加,汽蚀性能变差。

将不同模型从轮毂到轮缘各断面翼型冲角取出,如图14所示,比较分析轴流泵水力性能曲线,如图15和图16所示,根据设计工况设计配套导叶,匹配进水管和出水弯管进行泵段数值模拟计算,计算结果如图17和图18所示。

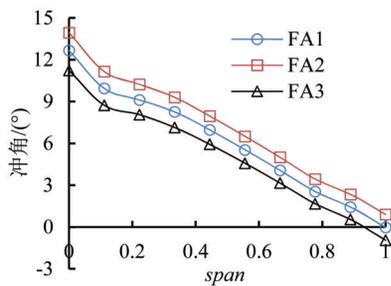


图14 不同水力模型各断面翼型冲角

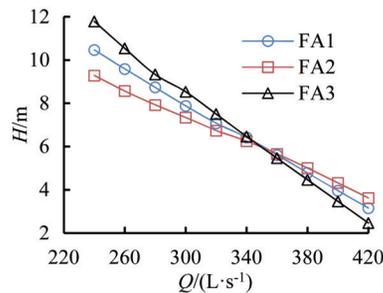


图15 叶轮流量-扬程性能曲线

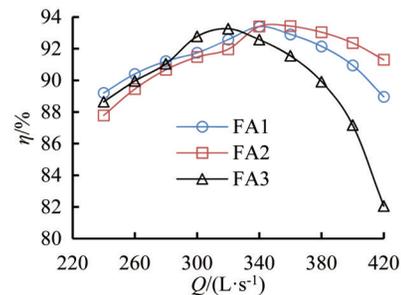


图16 叶轮流量-效率性能曲线

如图14所示,各断面翼型安放角均匀变化 1° ,轮缘侧冲角在 -1° 到 1° 之间,轮毂侧冲角在 11° 到 14° 之间,内外翼型冲角变化较大。由图15可知,设计工况点扬程相差不大,冲角越小,其流量-扬程性能曲线斜率越大,最高扬程越高,大流量时,扬程下降较快。如图16所示,3幅水力模型的最高效率点相差不大,当冲角增大时,大流量效率明显升高,高效区范围变宽,在小流量区域3幅水力模型的效率差别不大。

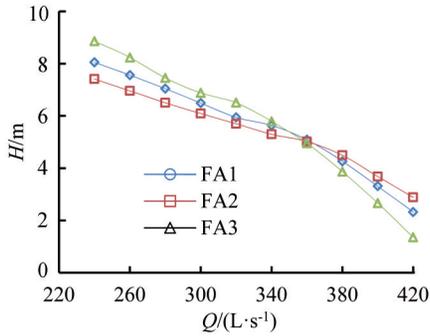


图17 泵段流量-扬程性能曲线

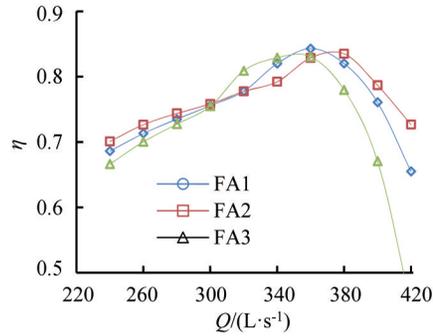


图18 泵段流量-效率性能曲线

由图17可知,泵段运行扬程随翼型冲角的变化趋势与叶轮变化趋势一致。由图18可知,泵段流量-效率曲线与叶轮的流量-效率曲线有些许区别。在高效区附近泵段流量-效率曲线随着冲角的增加而向大流量偏移,在小流量区域和大流量区域效率随着冲角变大均增大。

因此,流量-扬程性能曲线斜率较大的水力模型高效区范围反而较窄,对此,在实际泵站工程应用中,需要兼顾最高运行扬程时,可适当减小翼型冲角;若运行水位波动较大,为提高泵站的综合效率,节省运行成本,可增加翼型冲角,使泵站高效区范围较宽。

4 讨论

根据叶片角与冲角的关系,主要从3个方面研究了叶片冲角对轴流泵水力性能的影响,得到3个主要研究结论。保持叶片设计参数不变时,改变翼型安放角,进而改变冲角,通过数值计算结果可知,随着冲角增大,最高运行效率有所增加,但随着轮缘翼型冲角的进一步增大,叶片扭曲严重,轴流泵效率有所降低,因此建议轮缘侧翼型冲角在 $0^\circ\sim 3^\circ$ 之间,与文献[2]研究结果一致。文献[2]从理论分析的角度得到结论,而本文基于数值计算结果得到这一结论,虽然研究手段有所区别,但结论是一致的。与此同时,本文在数值模拟的基础上,结合数值优化方法,针对冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响进行了深入探讨。首先,运用实验设计的分析方法,改变内外翼型的冲角,通过设计变量的主效应、交互效应以及冲角对轴流泵叶轮水力性能的贡献率分析,得到了轮毂侧、中间断面及轮缘侧翼型冲角变化对轴流泵叶轮水力性能的影响,从定量的角度更为全面地分析了冲角对轴流泵性能的影响,为减小叶片扭曲改善轴流泵非设计工况的水力性能可以适当减小轮毂侧的翼型冲角,该结论也为今后轴流泵设计过程中冲角的选择提供了理论依据。其次,在弄清轴流泵不同断面翼型冲角对叶轮水力性能的影响后,采用数值优化技术和数值模拟手段,对轴流泵叶轮进行了优化设计,共设计出3幅比转速一致的叶轮,可以发现,冲角增大时,流量-扬程性能曲线的斜率减小,最高效率值保持相当,高效区范围往大流量偏移且高效区范围变宽。这一结果采用CFD的分析手段,较传统凭经验修改设计参数的优化方式更为精确。根据这一研究结果,在今后的轴流泵叶轮设计过程中,为得到性能更优的轴流泵叶轮可适当增加冲角,减小叶栅稠密度。本文主要研究冲角对轴流泵叶轮能量性能的影响,其冲角改变还会对叶片进口流场产生影响,表现为进口压力脉动变化较大,这属于旋转机械领域流场测试研究领域,因此,研究冲角变化对叶片进口流场的影响,可以在流场测试方面进一步研究。

5 结论

1)改变翼型冲角,其他设计参数保持不变时,冲角增大,扬程升高,最高效率增大,高效区往大流量偏移。为了使翼型处于更高质量区,建议轮缘侧翼型冲角在 $0^\circ\sim 3^\circ$ 之间,且比转数大的取小值。

2)改变轮毂侧和中间断面翼型冲角时,设计工况下,为了得到较高扬程和较高效率的轴流泵叶轮,可以适当增加中间断面的翼型冲角,同时为了减小叶片扭曲改善非设计工况的水力性能,可以适当减小轮毂侧的翼型冲角。

3)通过改变叶栅稠密度使得轴流泵比转数保持一致时,冲角增大,流量-扬程性能曲线的斜率减小,最高效率值保持相当,高效区范围往大流量偏移且高效区范围变宽。

参考文献:

- [1] 吴晨晖,汤方平,石丽建,等. 导叶位置对S型轴伸贯流泵装置水力性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11):63-69.
- [2] 关醒凡. 轴流泵和斜流泵水力模型设计试验及工程应用[M]. 北京:中国宇航出版社, 2008.
- [3] 王勇,刘厚林,袁寿其,等. 叶片进口冲角对离心泵空化特性的影响[J]. 流体机械, 2011, 39(4):17-20, 66.
- [4] 李大春,杨凌,高宇,等. 轴流压气机平面叶栅气动特性的数值研究[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(3): 71-77.
- [5] 周逊,王振峰,王祥锋,等. 冲角变化对涡轮叶栅内间隙流动的影响[J]. 实验流体力学, 2009, 23(3): 65-69.
- [6] 张华良,王松涛,王仲奇. 冲角对压气机叶栅内二次涡的影响[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1):150-155.
- [7] 周济人,汤方平,石丽建,等. 基于CFD的轴流泵针对性设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8):42-47.
- [8] YANG Zhengjun, WANG Fujun, ZHOU Peijian. Evaluation of subgrid-scale models in large-eddy simulations of turbulent flow in a centrifugal pump impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 911-918.
- [9] YE Liang, LIU Zhongmin. Design of implantable axial-flow blood pump and numerical studies on its performance[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(4): 445-452.
- [10] 赵敏,崔维成. 多学科设计优化研究应用现状综述[J]. 中国造船, 2007(3): 63-72.
- [11] 龙腾,刘建,陈余军,等. 基于约束 EGO 的对地观测卫星多学科设计优化[J]. 机械工程学报, 2018, 5(10):133-142.
- [12] 郑传宇,黄江涛,周铸,等. 飞翼翼型高维目标空间多学科综合优化设计[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(4):587-597.
- [13] 严敬,王桃,肖国华,等. 基于儒可夫斯基变换的轴流叶片翼型设计[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2):265-269.
- [14] 汤方平. 喷水推进轴流泵设计及紊流数值模拟[D]. 上海:上海交通大学, 2005.

Impacts of the Angle of Attack on Hydraulic Characteristics over the Axial flow Impeller

SHI Lijian¹, FU Lingling², LIU Chao¹, TANG Fangping¹, ZHANG Wenpeng¹, CHEN Feng³

(1.School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China;

2. Guangling College, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China;

3. Changzhou Changjiang Levee Project Management Office, Changzhou 213000, China)

Abstract:【Objective】 This paper presents the results of a study on influence of the angle of attack on hydraulic characteristics of the axial flow impeller. 【Method】 The study was based on numerical simulation and optimization assuming the spinning speed of the impeller was 880. We presumed the impeller was Joukowski airfoil, and compared the impact of the angle of attack in three perspectives. 【Result】 When other design parameters remained the same, increasing the angle of attack increased the lift height and the maximum efficiency of the impeller; it also changed the specific speed, with the high-efficiency area shifting to the large mass flow area. To make the airfoil work at high mass region, the angle of attack on the flange side wing should be in $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ by keeping the larger specific speed as small as possible. Under the design condition, changing the hub side and the middle section of the airfoil angle, in order to get a higher lift and high efficiency axial pump impeller, can be appropriate to increase the middle section of the airfoil angle, at the same time, reducing the attack angle of the wheel side wing can reduce the level of the blade distortion and improve the hydraulic performance under the off-design conditions. When the specific speed remained unchanged and the attack angle increased, the slope of the discharge-head characteristic curve would decrease, the maximum efficiency maintained, the high efficient area was shifted to the large mass flow offset, and the high efficiency area of pump-operation was widened. 【Conclusion】 The attack angle has an important influence on the hydraulic performance of the axial-flow impeller. In order to ensure the better hydraulic performance, the airfoil angle of the hub and rim side of the impeller should be considered at the same time.

Key words: attack angle; optimization design; axial-flow impeller; hydraulic performance

责任编辑:刘春成