

鱼友好型轴流泵流场数值分析与汽蚀性能优化

潘强 施卫东 张德胜

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为了提高鱼友好型设计造成的轴流泵汽蚀性能下降,通过实验对比验证了采用 ANSYS CFX 数值预测原型泵及鱼友好型泵汽蚀性能的可行性,得到经过鱼友好型设计后,原型泵许用空化余量(性能参数下降 3%)数值计算结果由 3.5 m 增加到 9 m,难以满足使用要求。通过分析鱼友好型泵的内部流场特性,揭示了轮毂处涡旋的产生机理以及叶片进口冲角过大的原因,由此设计出抑制涡旋产生、更加符合流动特性的叶片截面翼型,并修正部分设计参数。数值计算结果表明:优化后泵内部流场流动平稳,翼型头部液流过渡良好,没有局部速度增量产生,轮毂侧流动贴合叶片表面,在吸力面也没有产生涡旋,鱼友好型泵的装置许用空化余量预测值降低到 3 m 左右,完全满足原型泵的使用要求。

关键词: 泵站; 鱼友好型轴流泵; 汽蚀性能; 涡旋生成; 数值分析

中图分类号: TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0015-07

Numerical Analysis of Flow Field and Cavitation Performance Optimization of Fish-friendly Axial-flow Pump

Pan Qiang Shi Weidong Zhang Desheng

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Fish-friendly designs were done on a traditional pump which was effective for reducing fish mortality during passage through the pumping station. However, optimization designs which were good for fish-friendliness had disadvantageous effect on pump cavitation performance. With the aim of improving the cavitation performance of fish-friendly axial-flow pump, a commercial computational fluid dynamic software ANSYS CFX, which showed a fair agreement with the experimental results, was used to predict the cavitation performance. The predicted $NPSH_{r,3\%}$ of original pump was increased from about 3.5 m to 9 m after fish-friendly designs were done, which was unacceptable for pump running. Therefore, the inner flow field characteristics were numerically analyzed and the result indicated that there was vortex generated next to the hub and the inlet angle of attack was unsuitable, which was the primary reason for cavitation inception. The vortex formation mechanism was discussed and the airfoil section near the hub was redesigned to restrain the vortex generation. Furthermore, the design parameters of other airfoil sections were corrected to make streamlines smooth and fit the profile of blades. The optimization and numerical simulation results showed that the flow field was stable and flow transition around the head of airfoil section was smooth without velocity increment. The streamlines near the blade suction side fit the surface and there was no vortex generated. By reducing the inlet pressure, the predicted $NPSH_{r,3\%}$ value of optimized fish-friendly axial-flow pump was reduced to about 3 m, which was absolutely enough for pump running. The research result provided a complete design method for fish-friendliness and

收稿日期: 2015-09-22 修回日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479083)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015064-08)和江苏省高校优势学科项目1033000008(PAPD)

作者简介: 潘强(1991—),男,博士生,主要从事流体机械与工程研究,E-mail: 282184617@qq.com

通信作者: 施卫东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械与工程研究,E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

optimization of hydrodynamic performance for axial-flow pump.

Key words: pumping station; fish-friendly axial-flow pump; cavitation performance; vortex generation; numerical analysis

引言

传统泵站运行过程中会出现鱼类大量死亡的现象,阻碍鱼类的洄游产卵以及越冬洄游,影响鱼类的生物循环,导致很多鱼种数量锐减。近些年来,一些泵制造商开始关注鱼友好型泵及泵站的开发和应用,以大幅降低鱼类死亡率。但常年在泵站运行的大型轴流泵还需要考虑泵的水力性能及汽蚀性能,通过提高运行效率及稳定性,节约资源并延长使用寿命。

鱼友好型泵的相关研究,要追溯到1994年美国进行的先进水轮机系统项目,该项目主要研究了鲑鱼洄游通过水轮机后的鱼类损伤情况,并通过数学模型及相关实验评估了水轮机损伤机理;美国太平洋西北国家实验室通过实验提出了造成鱼损伤和死亡的最主要因素是叶片撞击;由 Von RABEN 最早提出^[1],后人不断发展并运用在不同水力机械上的叶片撞击模型,为鱼友好型泵的设计及开发提供了理论基础^[2-9]。在设计过程中,鱼类通过性能与水力性能往往是相互矛盾的,追求提高鱼类存活率的鱼友好型设计会降低泵的水力性能,如扬程、效率、汽蚀性能等,而 CFD 技术的发展使得通过数值模拟手段分析水力机械内部流场,优化设计参数,提高水力性能成为了热门的研究方法。KUBOTA 等^[10]在 Rayleigh - Plesset 方程基础上提出了两相流模型并较好地模拟了绕二维 NACA 水翼的空泡发展;杨敏官等^[11-12]模拟了轴流泵叶轮内的空化并与实验结果对比,验证了数值计算的正确性;施卫东等^[13-15]通过数值计算分析了轴流泵叶轮区域的空化特性,以及不同叶片数对轴流泵模型空化特性的影响;张德胜等^[16]采用不同湍流模型对轴流泵叶顶泄漏及其内部空化特性进行了数值模拟,并通过可视化试验进行了验证;DING 等^[17]通过试验与数值模拟相对比,验证了数值模拟技术对工程应用中的轴流泵汽蚀性能预测的可靠性。

课题组完成了对荷兰 Bosman 公司 BVOP 系列轴流泵的鱼友好型设计,基于叶片撞击模型预测了鱼友好型轴流泵鱼类通过性能,可在不同工况下(转速、流量)大幅降低鱼类死亡率,通过数值计算及实验对比验证了扬程、效率等性能参数可满足原型泵的使用要求^[18]。本文旨在分析与提高鱼友好型轴流泵的汽蚀性能,将数值计算结果与实验结果

进行对比,分析鱼友好型设计对泵内流场产生的影响以及泵汽蚀性能下降的原因。此外,在保证鱼类通过性能、不改变鱼友好型设计的前提下,重新设计叶片轮毂侧翼型,包括3个方案,并修正各截面翼型的进口角。

1 数值方法

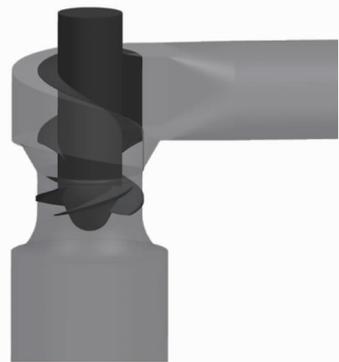
1.1 水力模型

原型泵为荷兰 Bosman 公司 BVOP125 - III - 140 型轴流泵,适用于大中型泵站,其设计参数包括:叶轮外径 $D = 1\ 260\ \text{mm}$,叶片数 $n = 4$,设计工况点流量 $Q = 11\ 850\ \text{m}^3/\text{h}$,扬程 $4.35\ \text{m}$,效率 80.5% 。

为了进行全流场数值计算,采用 UG 对各过流部件进行三维造型,包括进口段、叶轮段、导叶段、出口段,如图1所示。为保证网格质量,对一些局部细节进行了简化处理。考虑到叶轮进出口需要足够的距离以保证流动的充分发展,进口段长度为叶轮直径的3倍,出口段长度为叶轮直径的5倍。



(a) 原型泵



(b) 三维模型

图1 原型泵及三维模型

Fig. 1 Original pump and 3D model

1.2 网格划分

网格划分是数值模拟的重要组成部分,网格质量直接影响数值计算的收敛精度和收敛速度。本文采用 ICEM 进行网格划分,对叶轮部分采用结构化网格,其他部分采用非结构化网格,如图2所示为叶轮域的结构化网格。理论上来说,网格数越多,由网

格引起的误差会越低,然而也要考虑计算机的运算能力和运算时间,选取合适的网格数,本文采用的网格数控制在叶轮域 165 万、全流域 325 万。

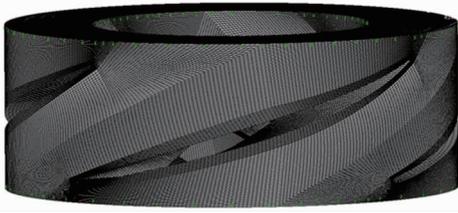


图 2 网格生成

Fig. 2 Mesh generation

1.3 控制方程及其边界条件

基于 Reynolds 时均 N-S 方程,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型使方程组封闭,把空泡和流体作为连续均质相考虑,引入 ZART 等^[19]提出的空化模型来描述气相与液相之间发生的质量传递过程,即

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v \alpha_v u_j)}{\partial x_j} = m^+ - m^-$$

式中 α_v ——蒸汽体积分数

u_j ——速度分量, m/s

ρ_v ——蒸汽密度, kg/m³

m^+ ——蒸汽生成率

m^- ——蒸汽凝结率

t ——时间, s

x_j ——张量形式的坐标轴方向

对全流域采用有限体积法离散,控制方程中的扩散项采用中心差分,对流项采用高阶离散格式,近壁区的低雷诺数流动采用 ANSYS CFX 中自带的可缩放的壁面函数处理,固体壁面与流体之间采用无滑移壁面条件,设定收敛精度为 10^{-5} ,为提高收敛速度和收敛精度,将无空化的单相计算结果作为空化计算的初始条件。设置进口空泡体积分数为 0,流体体积分数为 1,参考压力设为 0 Pa,定义 25℃ 时水的饱和蒸汽压为修正值 3 574 Pa。边界条件为静压进口和流量出口,通过逐步降低进口静压的方法使泵内部发生空化,直至泵能量参数(扬程、效率)下降 3%,此时计算的空化余量 K 满足

$$K = K_{a,3\%} = K_{r,3\%} = (p_{tot} - p_{va}) / (\rho g)$$

式中 p_{tot} ——泵进口总压, Pa

p_{va} ——流体工作温度下的饱和蒸汽压

$K_{a,3\%}$ ——有效空化余量, m

$K_{r,3\%}$ ——许用空化余量, m

ρ ——25℃ 水密度

2 原型泵汽蚀性能预测及实验

荷兰 Bosman 公司 BVOP 系列轴流泵已有多

年开发经验, BVOP125-III-140 作为系列中的一个产品已有完整的性能实验,图 3 为原型泵在各流量下的空化余量曲线。在设计流量点的空化模拟结果如图 4 所示,数值计算的空化余量在 3.5 m 左右,与实验值对比如图 3 所示,略高于实验值 3.2 m,考虑到在叶轮建模时简化了叶片间隙,采用无间隙叶轮,即略微增大了叶片的外径 D_2 ,导致空化的出现提前,故模拟计算的结果较为准确,可作为后文鱼友好型轴流泵空化模拟结果的对比。图 5 为在不同装置空化余量(进口压力)下,叶片吸力面空泡体积分数为 0.1 时的空泡分布情况,可见空化余量在 15 m 左右时在前缘轮毂处开始出现空化,随着空化余量的降低,空泡体积逐渐变大,并朝着前缘轮毂处和后缘发展,最终覆盖大部分的叶片吸力面。随着空泡体积的增大,叶片载荷逐渐降低,叶片做功能力下降,导致扬程和效率等能量参数下降。

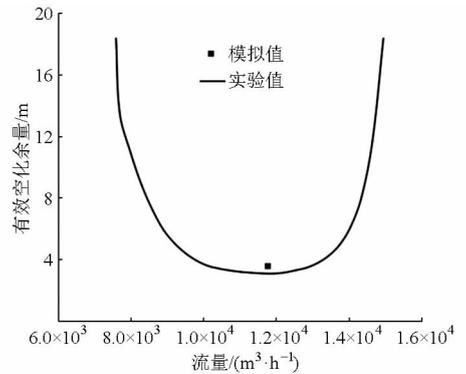


图 3 有效空化余量数值计算与实验结果

Fig. 3 Numerical and experimental results

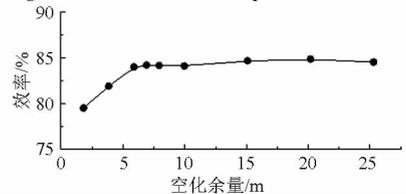


图 4 原型泵设计点汽蚀性能预测结果

Fig. 4 NPSH prediction of original pump at design point

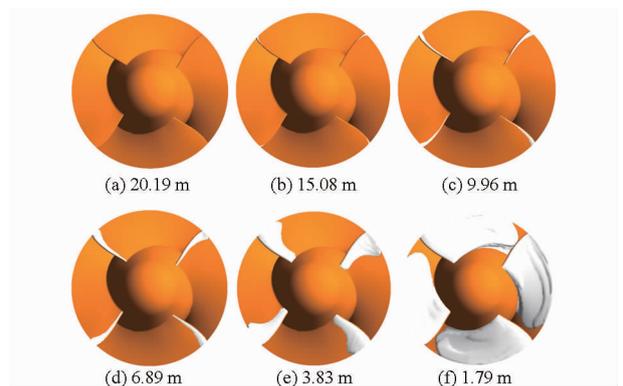


图 5 原型泵叶片吸力面空泡分布图

Fig. 5 Cavitation distribution on suction surface of original pump

3 鱼友好型泵汽蚀性能分析

3.1 汽蚀性能预测

鱼友好型设计包括减少叶片数,增加叶片翼型弦长及前缘厚度,轴向且周向弯掠前缘形成螺旋形进口等,翼型参数按照非线性环量分布的流线法设计,叶轮三维图如图6所示,可在满足原型泵对扬程、效率要求的前提下大幅降低鱼类死亡率。

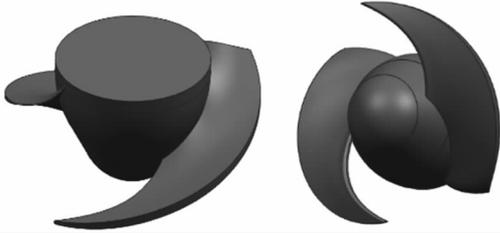


图6 鱼友好型轴流泵

Fig.6 Fish-friendly axial-flow pump

然而,提高鱼类通过性能的一些设计点恰恰会导致泵空化性能的下降,比如典型的减少叶片数和弯掠叶片前缘,如图7所示的汽蚀性能预测,经过鱼友好型设计后的泵汽蚀性能大幅下降,许用空化余量在9 m左右,难以满足原型泵(许用空化余量为3.5 m)的使用要求。空泡的产生在泵的运行过程中一方面会产生汽蚀腐蚀过流部件,另一方面会造成性能下降,严重时扬程大幅降低,会使泵中的液流中断,不能工作。

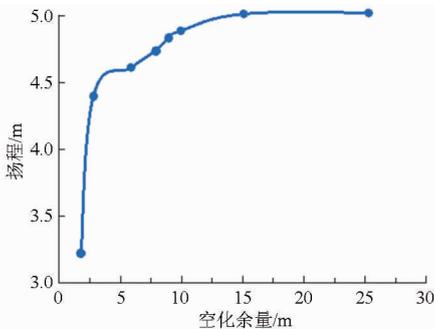


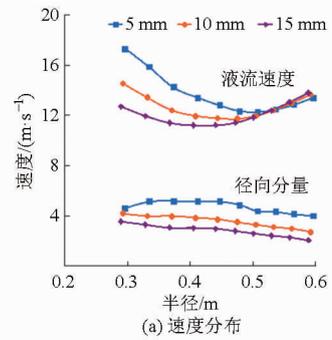
图7 汽蚀性能预测结果

Fig.7 Prediction of cavitation performance

3.2 内流场分析

如图8所示,在距离前缘圆周方向不同距离处取点计算速度分布,得到图8a中的液流速度及径向分量沿前缘的分布趋势,图中液流速度正值表示速度沿顺时针方向,径向速度分量正值表示方向指向圆心。由于前缘加厚且沿周向和轴向前掠,叶片高速旋转产生较大的径向流动,且沿前缘向圆心处逐渐累积增大,这种径向流动会对流场产生影响,将轮毂处的液流导向轮毂侧通过叶片前缘,造成前缘靠近轮毂侧的液流速度增大,轮毂处甚至大于轮毂处,从图8a中可以看出前缘不同位置的速度分布都反

映出这一趋势,且越靠近前缘趋势越明显。这种液流速度分布造成的后果就是靠近轮毂侧的压力更低,更容易出现空化。



(a) 速度分布

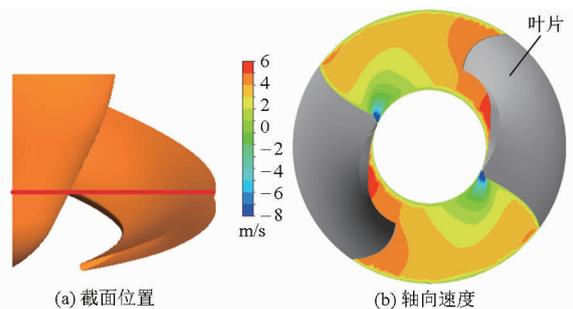


(b) 取点分布

图8 前缘速度分布

Fig.8 Velocity distribution of leading edge

此外,在前缘靠近轮毂侧,半椭球形轮毂会造成液流轴向速度的“挤压”,越靠近轮毂侧的液流轴向速度分量越小,如图9所示。轴向速度降低导致液流偏转严重不足,与叶片前缘产生更大的冲角,且越靠近轮毂处越严重,如图10所示。一方面,靠近轮毂侧叶片圆周速度较小的区域,在大冲角以及大的液流速度作用下先产生了空化并发展,如图11所示;另一方面,靠近轮毂侧部分流向叶片压力面的液流在轮毂的阻碍下被卷吸到叶片吸力面,如图10a所示,这也解释了图9中叶片前缘靠近轮毂的局部区域产生与流动方向相反的轴向速度负值。



(a) 截面位置

(b) 轴向速度

图9 轴向速度分布

Fig.9 Axial velocity distribution

轮毂侧被卷吸至叶片吸力面的逆向液流与流向叶片吸力面的液流形成剪切,导致涡旋的产生,并在流场作用下运动轨迹如图12所示(白色等值面为 70 s^{-1} 的旋转强度)。通过流线可以发现涡旋的旋向由 ω_1 逐渐发展为 ω_2 ,并流向后面的过流部件,影响了流动稳定性和效率,涡核中心的低压区也成为空化初生的薄弱点。

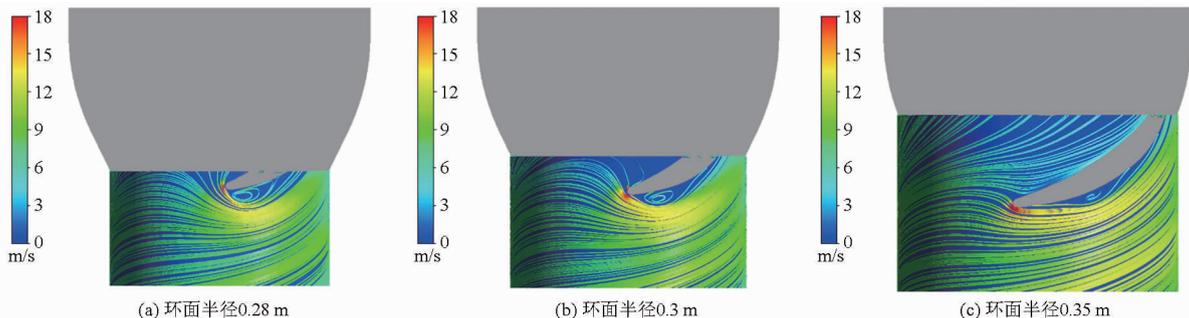


图 10 不同截面的流线

Fig. 10 Streamline of different sections

以提高汽蚀性能和水力性能。

4 优化与结果分析

4.1 翼型头部优化

在保证鱼类通过性能,不改变鱼友好型设计的前提下,对泵汽蚀性能进行优化。考虑到前缘靠近轮毂侧的液流速度及冲角很大,液流卷吸甚至产生了轴向速度负值(逆流液方向),故在叶片靠近轮毂侧添加了 $d-d$ 截面,约束轮毂侧的翼型头部,如图 13 所示。为防止前缘轮毂侧产生涡旋,匹配轴向速度负值,对轮毂侧的叶片翼型头部尝试了 3 种设计方案,如图 14 所示,可见进口角设计为负值且将翼型头部加厚的方案 C 更加符合流动规律,液流在经过翼型头部时过渡良好,流动平稳,贴合叶片表面,在吸力面也没有产生涡旋。为 3 个方案设置同一个速度标尺,可见方案 A 和方案 B 的翼型头部吸力面则有局部的速度增量,不利于提高汽蚀性能,故采用方案 C 为轮毂侧翼型。

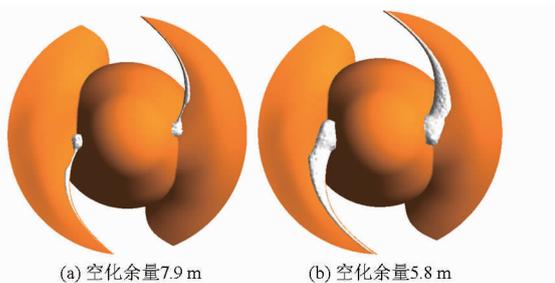


图 11 空泡分布

Fig. 11 Cavitation distribution

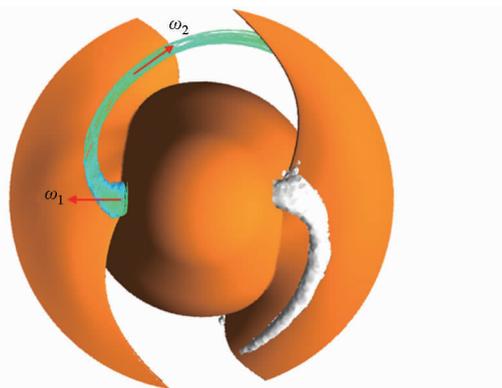


图 12 涡旋运动轨迹

Fig. 12 Vortex moving trajectory

虽然鱼友好型轴流泵的叶片进口角按照流线法精确计算,但弯掠的前缘和半椭球形轮毂造成流场的不均匀分布,在设计翼型时无法预知,通过数值模拟后流场的流线分布(图 10b、10c)可以发现,流场速度的不均匀分布使叶片进口冲角偏大,且从轮缘处至轮毂处逐渐加剧,合适的翼型及进口角修正可

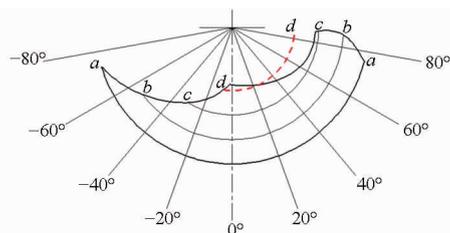


图 13 叶片截面

Fig. 13 Sections of blade

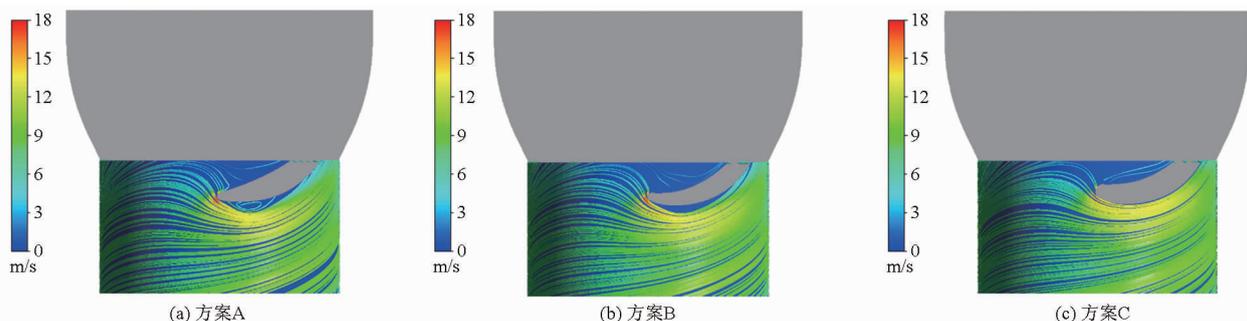


图 14 轮毂侧翼型优化方案

Fig. 14 Optimization of airfoil section next to hub

4.2 翼型进口角优化

$a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 截面翼型需对叶片进口角进行修正,但每次修正又会造成轴向速度的重新分布。故在分析图 10 中的液流冲角后,经过设计-模拟-分析-修正这样一个反复迭代过程,寻找合适的进口角。考虑到流线法设计出的叶片扬程完全满足使用要求,且修正叶片进口角对轴流泵扬程的影响不大,仅需微调叶片出口角及弦长就可以满足扬程要求,

如表 1 所示。本文选取了最终 3 个优化设计结果(表 1),可见随着优化次数增加,修正角越来越小,进口角也越来越接近最优值。由于方案 3 的汽蚀性能预测值已满足原型泵的使用要求,故确定了方案 3 为最终方案。与按照流线法设计的叶片参数对比,模拟修正后鱼友好型轴流泵叶片进口角分布规律与传统轴流泵相反,由轮毂至轮缘逐渐增大。

表 1 设计参数对比

Tab. 1 Comparison of design parameters

截面	原设计(流线法)			方案 1			方案 2			方案 3		
	$a-a$	$b-b$	$c-c$	$a-a$	$b-b$	$c-c$	$a-a$	$b-b$	$c-c$	$a-a$	$b-b$	$c-c$
直径/mm	1 260	1 031	802	1 260	1 031	802	1 260	1 031	802	1 260	1 031	802
弦长/mm	1 920	1 450	1 000	1 920	1 460	1 080	1 920	1 500	1 110	1 920	1 500	1 110
进口角/(°)	12.6	14.5	17.5	12	12	12	12	10	8	12	9	6
出口角/(°)	21.9	28.9	44.6	21.9	28.9	44.6	22	29	45	22	29	45
叶弦角/(°)	17.25	21.7	31.05	16.95	18.95	28.3	17	19.5	26.5	17	19	25.5

4.3 结果分析

对 3 个优化设计方案的空化性能预测结果如图 15 所示,不断修正进口角提高了空化性能,方案 3 作为最优方案的许用空化余量预测值在 3 m 左右,完全满足原型泵对空化性能的要求。图中可以看出,虽然方案 3 装置空化余量在 6 m 左右时有局部极小值,但并没有出现扬程的急剧下降,在该区域中泵仍然可以正常运行。不同进口压力下的空泡分布如图 16 所示,与图 11 对比可看出,优化后对应空化余量下的空泡体积减少,虽然轮毂侧还是先产生空化,但优化后的空泡分布更加均匀。

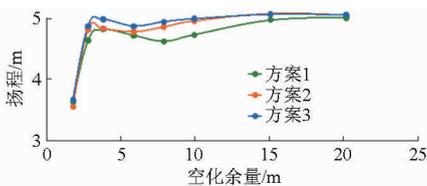


图 15 优化结果预测结果

Fig. 15 Prediction of optimization result

看到设计流量点下的扬程满足使用要求,效率相比按照流线法设计的原方案高出约 3%,可见消除轮毂侧生成的涡旋并采用更适合流场的进口角,有利于提升空化性能及效率。

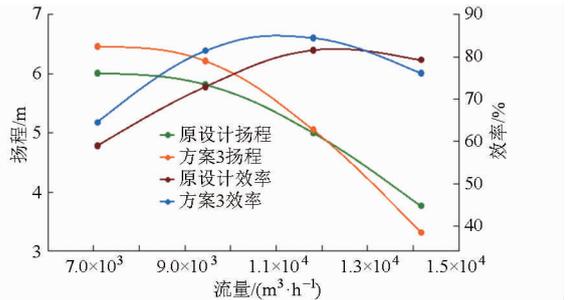


图 17 水力性能对比

Fig. 17 Comparison of hydraulic performance

5 结论

(1) 采用数值方法较为准确的预测了原型泵的空化性能,许用空化余量预测值在 3.5 m 左右,实验值在 3.2 m 左右,吻合度较高。

(2) 预测了鱼友好型轴流泵的汽蚀性能,发现鱼友好型设计大幅降低了泵的汽蚀性能,许用空化余量在 9 m 左右,无法满足原型泵的使用要求。

(3) 分析了鱼友好型轴流泵的流场特性,包括轮毂处涡旋的产生机理以及叶片进口冲角过大的原因;基于流场分布特点,设计了过渡良好的轮毂侧翼型,并优化设计出了由轮毂至轮缘逐渐增大的叶片进口角分布规律。

(4) 修正翼型及参数后的鱼友好型轴流泵空化性能提高显著,许用空化余量预测值在 3 m 左右,满足原型泵的使用要求。

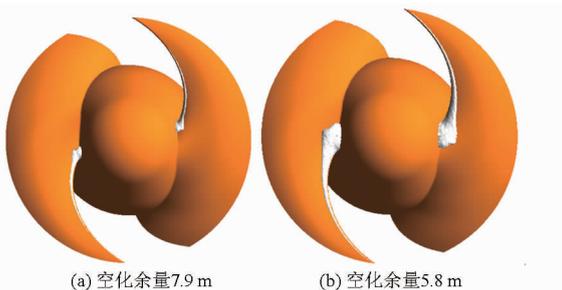


图 16 优化后空泡分布

Fig. 16 Cavitation distribution after optimization

对方案 3 的水力性能预测及对比如图 17 所示,减小进口角使设计点略微向小流量偏移,但可以

参 考 文 献

- 1 VON RABEN K. Regarding the problem of mutilations of fishes by hydraulic turbines[J]. Fisheries Research Board of Canada, Translation Series, 1957, 448(4):97-100.
- 2 PLOSKEY G R, CARLSON T J. Comparison of blade-strike modeling results with empirical data[M]. Richland Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2004.
- 3 DENG Z, CARLSON T J, PLOSKEY G R, et al. Evaluation of blade-strike models for estimating the biological performance of Kaplan turbines[J]. Ecological Modelling, 2007, 208(2): 165-176.
- 4 DENG Z, CARLSON T J, DAUBLE D D, et al. Fish passage assessment of an advanced hydropower turbine and conventional turbine using blade-strike modeling[J]. Energies, 2011, 4(1): 57-67.
- 5 JOHN W F, GENE R P, KJELL L, et al. Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess mitigation strategies for fish passing dams[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2008, 65(8): 1568-1585.
- 6 VAN ESCH B P M. Fish injury and mortality during passage through pumping station[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7):071302.
- 7 VAN ESCH B P M, SPIERTS I L Y. Validation of a model to predict fish passage mortality in pumping stations[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 71(12): 1910-1923.
- 8 KRAKERS L A, KRUYT H P, RUTJES H A. Full-scale validation of a comprehensive criterion to predict fish-friendliness of pumps[C]//ASME-JSME-KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference, 2015: 1344-1357.
- 9 AMARAL S V, HECKER G E, DIXON D A. Designing leading edges of turbine blades to increase fish survival from blade strike [C]//EPRI-DOE, Conference on Environmentally-Enhanced Hydropower Turbines, 2011.
- 10 KUBOTA A, KUTO H, YAMAGUCHI H. A new modeling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 240: 59-96.
- 11 吴光焱, 杨敏官, 康灿. 轴流泵叶轮内空化的数值模拟与实验研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(18): 2229-2232.
WU Guangyan, YANG Minguan, KANG Can. Numerical simulation and experiment study of cavitation in axial flow pump impeller[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(18): 2229-2232. (in Chinese)
- 12 杨敏官, 姬凯, 李忠. 轴流泵叶轮内空化流动的数值计算[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 10-14.
YANG Minguan, JI Kai, LI Zhong. Numerical calculation of cavitating flow in impeller of axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 10-14. (in Chinese)
- 13 施卫东, 李通通, 张德胜, 等. 轴流泵叶轮区域空化特性数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 88-96.
SHI Weidong, LI Tongtong, ZHANG Desheng, et al. Numerical simulation on cavitating characteristic in impeller of axial-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 88-96. (in Chinese)
- 14 施卫东, 吴苏青, 张德胜, 等. 叶片数对高比转数轴流泵空化特性的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 72-77.
SHI Weidong, WU Suqing, ZHANG Desheng, et al. Effects of number of blades on cavitation of high specific speed axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 72-77. (in Chinese)
- 15 施卫东, 邵佩佩, 张德胜, 等. 轴流泵内部流动数值模拟及 PIV 试验[J]. 排灌机械工程学报, 2015(4): 277-282, 289.
- 16 张德胜, 吴苏青, 施卫东, 等. 不同湍流模型在轴流泵叶顶泄漏涡模拟中的应用与验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 46-53.
ZHANG Desheng, WU Suqing, SHI Weidong, et al. Application and experiment of different turbulence models for simulating tip leakage vortex in axial flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13): 46-53. (in Chinese)
- 17 DING H, VISSER F C, JIANG Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(1): 011101.
- 18 潘强, 张德胜, 施卫东. 基于叶片撞击模型的鱼友好型轴流泵优化设计[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 102-108.
PAN Qiang, ZHANG Desheng, SHI Weidong. Optimization design of fish-friendly axial pump based on blade strike model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 102-108. (in Chinese)
- 19 ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Multiphase Flow, 2004.