doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.015

基于叶片撞击模型的鱼友好型轴流泵优化设计*

潘 强 张德胜 施卫东

(江苏大学流体机械工程技术研究中心,镇江 212013)

摘要:为降低鱼类通过大中型泵站后的死亡率,维持生态系统的稳定,研究了一种应用在轴流泵中的叶片撞击数学 模型,对某一轴流泵的鱼类通过性能进行了预测,包括叶片撞击概率、撞击死亡率和鱼类死亡率,分析得到设计工 况点的鱼类死亡率理论上高达 68%。以降低鱼类死亡率为主要目标,兼顾水力性能,通过考虑鱼损伤的关键因素, 优化设计了3种方案的鱼友好型轴流泵,对比分析了3个方案的鱼类通过性能和水力性能。研究结果表明,方案1 和方案2平均降低鱼类死亡率49%,方案3平均降低鱼类死亡率52%;3个方案在设计点扬程均可满足原型泵使 用要求,其中修正叶片进口安放角的方案2效率最高,设计点效率低于原型泵约3%,方案3鱼类通过性能最佳,设 计点效率低于原型泵约5%。

关键词:泵站 鱼友好型轴流泵 叶片撞击模型 数值模拟 优化设计 中图分类号:TH312 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)12-0102-07

Optimization Design of Fish-friendly Axial-flow Pump Based on Blade Strike Model

Pan Qiang Zhang Desheng Shi Weidong

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

Abstract: In order to reduce fish mortality during passage through the large and medium-sized pumping station and maintain the balance of the ecological system, a blade strike model applied to axial-flow pump was analyzed to predict the fish passage capacity of the original pump, including blade strike probability, strike mortality and fish mortality. The theoretical fish mortality of the original pump was only 68% at the design flow point. Thus, a fish-friendly pump was designed based on the original pump to reduce fish mortality and keep hydraulic performance acceptable. Furthermore, three optimization plans were done by reducing the number of blades to two, using the streamline method of nonlinear circulation distribution to design the inlet and outlet blade angles, increasing the chord length of the blade airfoil, optimizing the profile of the leading edge to spiral and thickening the leading edge. The comparison of the three optimization plans showed that the fish mortality of plans 1 and 2 was reduced by 49% on average and that of plan 3 which was better for fish to pass through the pump was reduced by 52%. Meanwhile, the flow through the pump was simulated with ANSYS-CFX, and the numerical results such as head and efficiency were compared with the experimental results to analyze the hydraulic performance. To be specific, the head of all the plans met the operating requirements at the design flow point and the efficiency of plan 2 which corrected the inlet blade angle of plan 1 was 3% lower than that of the original pump at the design flow point, while the efficiency of plan 3 which was better for fish was 5% lower. It was noted that the fish-friendly pump was effective to reduce fish mortality even with the efficiency dropping by 5%, and it can provide a basis for axial-flow pump design of agricultural irrigation works. Fish-friendly axial-flow pump Blade strike model Numerical simulation **Key words**: Pumping station

Optimization design

收稿日期: 2015-03-20 修回日期: 2015-04-15

^{*}国家自然科学基金资助项目(51479083)

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

通讯作者:张德胜,副研究员,博士生导师,主要从事流体机械流动特性研究,E-mail: zds@ ujs. edu. cn

103

(6)

引言

泵站建设作为重要的工程措施,在水资源的时 空调度和治理中起着不可替代的作用。同时,泵站 在防洪、防涝,保障人们生命和财产安全等方面发挥 着重要作用。然而,泵站发展也带来一些负面影响, 如当鱼类资源通过泵时会受到不可避免的损伤和死 亡^[1],这一方面阻碍了鱼类洄游,影响鱼类多样性, 另一方面,受伤和死亡的鱼类会对水域造成污染。 在当今许多国家重视生态保护的背景下,鱼类友好 型泵站的开发也受到越来越多的关注。

美国太平洋西北国家实验室通过实验研究认为,造成鱼损伤和死亡的3个主要因素是机械损伤、 剪切速度引起的高梯度力以及压力波动,机械损伤 又包括叶片撞击、粗糙壁面的磨损和卡入间隙,其中 叶片撞击作为最主要因素,一直以来都是研究的焦 点。早在1957年,Von Raben^[2]就提出了一种叶片 撞击模型,预测鱼类和涡轮叶片的潜在撞击概率,随 后很多研究者拓展这个模型并应用在不同的涡轮机 械中。其中,Plosky 等^[3-5]将其应用在水轮机中, van Esch^[6-7]将其应用在离心泵、混流泵和轴流泵 中。

本文基于叶片撞击数学模型,分析轴流泵设计 参数对鱼类通过性能的影响,预测 BVOP125 – III – 140 型轴流泵的鱼类通过性能。采用非线性环量分 布的流线法^[8-10],优化设计一种鱼友好型轴流泵叶 片。通过对比叶片撞击概率、撞击死亡率和鱼类死 亡率,分析原型泵和鱼友好型轴流泵的鱼类通过性 能,并结合数值模拟^[11-13]和外特性实验,验证鱼友 好型轴流泵的水力性能。

1 叶片撞击数学模型

根据 van Esch 在轴流泵中所运用的叶片撞击 模型^[1],假设鱼为一维线性模型且与液流方向一 致,那么鱼通过叶片进口处过流断面所需要的时间 计算公式为

$$t_f = \frac{L_f}{v_{m1}} = \frac{L_f A_1}{Q}$$
(1)

式中 t_f ——鱼通过时间,s

L_f——鱼长度,m

 v_{m1} ——液流轴向速度分量,m/s

 A_1 ——过流断面面积,m²

在鱼与液流不发生相对滑移的前提下, v_m1即为 液流的轴向速度分量。在轴流泵中, A₁计算公式为

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) \tag{2}$$

式中 D1----叶片前缘轮毂处直径,m

D2----叶片前缘轮缘处直径,m

对于不同叶片数、不同转速的轴流泵,单个叶片 通过一个叶片距所需要的时间计算公式为

$$t_b = \frac{s}{v_t} = \frac{60}{nN} \tag{3}$$

式中 t_b——叶片通过时间,s

s-----单个叶片距,m

 v_i ——叶片距对应点的圆周速度,m/s

n——叶片数 *N*——转速,r/min

根据 $t_f 与 t_b$ 的比值,可以得到理论上的叶片撞 击概率 $P_{tb} = \min(100\%, P'_{tb})$,其中

$$P'_{\rm th} = \frac{t_f}{t_b} = \frac{L_f A_1 nN}{60Q} \times 100\%$$
(4)

在受到叶片撞击的鱼类中,有部分鱼类会死亡, 这个比例与叶片撞击速度 v 以及鱼类长度 L_f和叶片 前缘厚度 d 的比值有关, van Esch 根据一些泵站监 测的数据来预测受到撞击后鱼类的死亡率,并得 到^[1]

 $v = \sqrt{v_{m1}^2 + \left(\frac{\pi ND}{60}\right)^2}$

$$f_{MR} = \left(a \ln \frac{L_f}{d} + b \right) (v - 4.8) \times 100\%$$
 (5)

其中

式中 ƒмв——撞击死亡率

a、b——通过回归分析得到的系数,取值如 表1所示

D----叶轮外径,m

表1 撞击死亡率中系数的回归分析

Tab.1 Regression coefficient analysis for strike mortality

L_f/d	a	b
0 ~ 2	0.0531	0. 020 2
2 ~ 10	0.0829	-0.002 1
10 ~ 25	0. 032 7	0.1146

由于轴流泵的叶片撞击速度 v 在前缘沿径向变 化,所以用平均撞击速度 v_a代替^[1],即

$$f_{MR} = \left(a\ln\frac{L_f}{d} + b\right)\left(v_a - 4.8\right) \times 100\%$$
(7)

$$v_{a} = \frac{8(v_{2}^{2} - v_{1}^{2})}{3\omega^{2}(D_{2}^{2} - D_{1}^{2})}$$
(8)

式中 v₁——叶片前缘轮毂处叶片撞击速度,m/s v₂——叶片前缘轮缘处叶片撞击速度,m/s

由式(4)和式(7),可以得到理论上鱼类死亡率
$$P_m = P_{th} f_{MR} \times 100\%$$
 (9)

2 原型泵鱼类通过性能分析

2.1 水力模型

所用原型泵为荷兰 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 = 1.26 m,叶片数 n = 4,设计工况点流量 Q = 11 850 m³/h,扬程 4.35 m,效率 80.5%。

2.2 鱼类通过性能分析

鱼类通过性能分析包括叶片撞击概率 P_{th} ,撞击 死亡率 f_{MR} 和鱼类死亡率 P_{m} 。当泵在不同工况点下 运行时(如流量变化、转速变换等),鱼类通过性能 会呈现不同的分布,而泵性能的相似换算使鱼类通 过性能的换算成为可能。本文基于 van Esch 应用 在轴流泵中的叶片撞击模型,根据相似准则可以换 算所有工况下鱼类的通过性能。如图 1 所示,假设 鱼长度 L_f = 150 mm,原型泵叶轮外径 D = 1.26 m,叶 片数 n = 4,叶片前缘厚度 d = 10 mm,分别得到叶片 撞击概率 P_{th},撞击死亡率f_{MR}以及死亡率 P_m的分布 图,从图中可以看出原型泵在设计工况下的叶片撞 击概率约为 68%,撞击死亡率已高达 100%,由 式(9)得到死亡率为 68%。产生高撞击概率的原因 主要是叶片数多,而高撞击死亡率的原因主要是叶 片前缘厚度小,叶轮高速旋转时叶片前缘如刀片一 般切割鱼类。



Fig. 1 Fish passage capacity of original pump(a) 叶片撞击概率 (b) 撞击死亡率 (c) 鱼类死亡率

3 原型泵数值模拟与实验

3.1 模型建立

为了进行全流场数值计算,采用 UG 分别对原 型泵进口延伸段、叶轮、导叶、出口延伸段进行建模,



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,设置进口延伸段长度为叶轮外径的3倍,出 口延伸段长度为叶轮外径的5倍,图2为叶轮实物 图与三维模型。



图 2 原型泵叶轮实物模型和三维模型 Fig. 2 Physical and 3D models of original pump impeller (a)实物模型 (b)三维模型

3.2 网格划分

网格划分是数值模拟的重要组成部分,网格质量的好坏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,为了保证较高的网格质量和边界层网格尺寸,对叶轮部分采用结构化网格,其他部分采用非结构化网格,其中图3为叶轮域的结构化网格。理论上,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。

3.3 湍流模型及边界条件

采用有限体积法将计算区域离散化,对全流域 建立时均 Navier – Stokes 方程,引入标准 *k* – *e* 湍流 模型^[14]使方程组封闭,并采用可缩放的壁面函数处



图 3 叶轮域结构化网格 Fig. 3 Structured mesh of impeller domain

理近壁区的流动,边界条件为最稳健的流量进口和 压力出口。控制方程组的对流项采用高阶离散格 式,设定收敛精度为10⁻⁵。



3.4 模拟结果与实验对比

为验证数值模拟的准确性,让优化叶片的模拟 结果有比对值,本文对原型泵进行外特性实验,实验 结果与模拟结果对比如图4所示。考虑到在前处理 中没有对壁面粗糙度进行设置,数值模拟的扬程及 效率略大于实验值,且差值呈现随流量增大而增大 的趋势,这是由于大流量时流速大,粗糙壁面造成的 局部损失和沿程损失更大,故理想条件下模拟值会 高于实验值。由此可见,数值模拟的结果能够真实 反映泵外特性随流量的变化趋势。



Fig. 4 Comparison of simulation and experiment results

图 4

4 优化设计与分析

4.1 鱼友好型轴流泵优化设计

为了降低鱼类的死亡率 P_m,可以通过两种方法 实现:一是降低叶片撞击概率 P_{th},二是降低撞击死 亡率 f_{MR}。理论上来说,减少叶片数 n 和增加叶片前 缘厚度 d 是降低撞击概率和撞击死亡率最有效的方 法,然而,减少叶片数不仅会使扬程大幅下降,也使 滑移系数相应增加,增大叶片前缘厚度会产生更大 的冲击损失。这就造成泵性能参数大幅度降低,难 以满足原型泵在泵站使用的性能要求。本文兼顾原 型泵对使用性能的要求,优化设计一种鱼友好型轴 流泵(图 5),主要包括^[15-20]:① 叶片数减少为 2 个,并采用非线性环量分布的流线法设计叶片进出 口角。② 增大叶片翼型弦长以增大做功面积,弥补 由于减少叶片数带来的扬程下降。③ 考虑到螺旋 离心泵在输送鱼类中应用广泛,其螺旋形入口的无 损性能好,故将叶片前缘周向前掠,轴向前伸形成螺 旋形入口。④由于撞击位置主要发生在叶片前缘, 且前缘撞击对鱼类的损伤最大。故增加叶片前缘厚 度,缓解叶片前缘高撞击速度对鱼造成的损伤。5 叶 片不同截面翼型头部均为半圆形,避免叶片前缘棱角 切割鱼类,同时增大撞击接触面积,降低撞击损伤。

4.1.1 叶片结构

对于传统轴流泵来说,不同截面翼型展开图的



图 5 鱼友好型轴流泵 Fig. 5 Fish-friendly axial-flow pump (a)正等测图 (b)斜视图

竖直中心线在同一角度上,即叶片平面图中的平面 中心线为过轴心的直线。本文为了在轴流泵中运用 螺旋形入口,将各截面翼型作了相应的偏移,偏移量 决定了螺旋程度。如图6所示的叶片不同截面的翼 型展开图,以*a-a*截面翼型为基准,*b-b*、*c-c*截面 翼型分别逆叶轮旋转方向(图中为水平向右)偏移 了16°和14°,沿液流方向(图中为竖直向上)偏移了 63 mm和117 mm。各截面翼型头部均为半圆形,其 直径取值即为叶片前缘在该截面处的厚度。

4.1.2 翼型参数

本文所设计的鱼友好型轴流泵,采用非线性环 量分布的流线法设计叶片进、出口角,增加了弦长取 值以提高由于减少叶片数带来的扬程降低,具体的 翼型参数如表2中的方案1所示。考虑到螺旋形叶 片前缘上各点轴向速度分布与传统轴流泵前缘轴向



(a) 平面投影(工作面) (b) 轴面投影(工作面) (c) *a*-*a* 截面 (d) *b*-*b* 截面 (e) *c*-*c* 截面

速度的恒定分布不同,且当叶片数减少为2个时,滑 移系数也会相应增大,液流的偏转达不到设计要求, 这就意味着叶片进口角与实际液流角之间产生较大 的冲角,为了降低冲击损失,提高效率,将方案1的 叶轮进口角作相应的修正,得到优化方案2,具体参 数如表2中的方案2所示。

表 2 设计参数 Tab.2 Design parameters

参数 一	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
直径/mm	1 260	1 031	802	1 260	1 031	802	1 260	1 031	802
弦长/mm	1 930	1 460	1 000	1 930	1 450	1 020	2 050	1 500	1 040
进口角/(°)	12.6	14.5	17.5	12.6	13.9	15.8	12.0	13.4	15.5
出口角/(°)	21.9	28.9	44.6	21.9	28.9	44.6	21.9	28.9	44.6
叶弦角/(°)	17.25	21.70	31.05	17.25	21.40	30. 20	16.95	21.15	30.05
最大厚度/mm	48	59	67	48	59	67	48	59	67

为了缓解叶片前缘在高撞击速度下如刀片一般 切割鱼类,方案1和方案2的叶片前缘厚度d为原 型泵的2倍,都是恒定的20mm。考虑到前缘圆周 速度分布从轮毂处至轮缘处按照线性分布,在轮缘 处达到最大值,故设计优化方案3,前缘厚度在轮缘 处为30mm,轮毂处为20mm,在轮毂至轮缘之间的 厚度取值呈线性增大,其他翼型参数如表2所示。 虽然加厚的前缘会产生更大的冲击损失,但加厚前 缘对降低撞击死亡率十分有效,略微的性能降低换 取鱼类通过性能的提高是可以接受的。

4.2 优化叶片鱼类通过性能分析

基于叶片撞击模型,对3个优化方案的鱼类通 过性能进行预测,假设优化设计与原型泵性能达到 一致,分析叶片撞击概率 P_{th},撞击死亡率 f_{MR}和鱼类 死亡率 P_m。

如图 7a 所示的叶片撞击概率分布,3 个方案的 叶片数都由 4 个减少为 2 个,在小于 3 000 m³/h 的 流量区,由于小流量使得液流和鱼共同的轴向速度 v_m过小,撞击概率仍然保持在 100%;而在大于 3 000 m³/h 的流量区,与原型泵对应工况点的撞击 概率降低了约 50%,在设计工况点,撞击概率由 68%降低为 34%,大大降低了叶片撞击到鱼的可 能。

如图 7b、7c 所示的撞击死亡率分布,方案 1 和 方案 2 的叶片前缘厚度 d 为 20 mm,与原型泵对应 工况点的撞击死亡率降低了约 20%,方案 3 的叶片 前缘厚度 d 由轮毂处的 20 mm 过渡到轮缘处的 30 mm,与原型泵对应工况点的撞击死亡率降低了 约 30%,虽然大流量下的撞击死亡率仍然保持 100%,但在小流量区和高效区的撞击概率都有相应 降低。

如图 7d、7e 所示的鱼类死亡率分布,方案 1 和 方案 2 的鱼类死亡率平均降低了约 49%,且按流量 分布明显,与原型泵相比,在 0~3 000 m³/h 流量区 对应工况降低了约 20%,3 000~10 000 m³/h 流量 区对应工况点降低了约 60%,10 000~20 000 m³/h



Fig. 7 Analysis of fish passage capacity
 (a) 叶片撞击概率 (b) 撞击死亡率(d=20 mm) (c) 撞击死亡率(d=20~30 mm)
 (d) 鱼类死亡率(d=20 mm) (e) 鱼类死亡率(d=20~30 mm)

的流量区对应工况点降低了约 50%;方案 3 的鱼类 死亡率平均降低约 52%,在 0~3 000 m³/h 的流量 区对应工况点降低了约 30%,3 000~10 000 m³/h 的流 量区对应工况点降低了约 65%,10 000~20 000 m³/h 的流量区对应工况点降低了约 50%,由此可见,方 案 3 的鱼类通过性能最佳。

4.3 数值模拟与对比分析

采用与 2.2 节同样的方法,对优化设计的鱼友 好型轴流泵的 3 个方案进行三维造型、网格划分和 数值模拟。模拟结果与原型泵模拟结果对比如图 8 所示,可见两叶片的鱼友好型泵性能曲线更加平坦, 这是由于叶片数减少,叶栅稠密度降低而造成的。 对比设计工况点下的扬程,3 个优化方案均已达到 原型泵的使用要求;方案 2 效率略高于方案 1,在设 计工况点高于方案 1 约 2%,说明考虑滑移系数对 进口角修正可有效地提高性能;方案 3 效率略低于 方案 2,在设计工况点低于方案 2 约 2%,这是加厚 叶片前缘带来的结果。与原型泵设计工况点效率相 比,方案2低于原型泵3%,方案3低于原型泵5%, 考虑到叶片设计以提高鱼类存活率为主要目标,兼 顾性能,选择方案2为较优方案。3个方案都大幅 提高了鱼类通过性能,略微的效率降低在可接受范 围之内。

5 结论

(1)分析叶片撞击模型可得:鱼类长度是综合 影响撞击概率和撞击死亡率的主要因素;在叶片设 计参数中,叶片数是影响撞击概率的最主要因素,叶 片前缘厚度是影响撞击死亡率的最主要因素,本文 从这两点切入,设计出可大幅降低鱼类死亡率的鱼 友好型轴流泵。

(2)基于叶片撞击模型,对比分析原型泵和鱼 友好型轴流泵的鱼类通过性能,3个方案在设计工 况点的鱼类死亡率由68%降至34%,降幅达50%; 其他工况点的鱼类死亡率降幅按流量分布明显,方 案1和方案2平均降幅在49%左右,方案3平均降



图 8 模拟结果对比 Fig. 8 Comparison of simulated results

幅在 52% 左右;优化设计的鱼友好型轴流泵有效降低了鱼类死亡率。

(3)对比原型泵数值模拟结果与实验结果,得 到数值模拟的泵效率和扬程随流量的变化趋势与实验结果基本一致,证实了数值模拟预测泵性能的可 行性。

(4)将优化方案的模拟结果与原型泵模拟结果 对比,得到3个优化方案的扬程均可满足原型泵的 使用要求;修正叶片进口角的方案2效率略高于方案1和方案3,其设计工况点效率低于原型泵约 3%;方案3的鱼类通过性能最优,设计工况点效率 低于原型泵约5%;略微的效率降低在可接受范围 之内。

(5)考虑到调水泵站一般长时间运行,效率下降3%已不是小量;而对于排涝泵站,鱼类通过性要求不是很突出,故选择方案2为最终优化方案。

- 参考文献
- 1 van Esch B P M. Fish injury and mortality during passage through pumping station [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071302.
- 2 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.
- 3 Ploskey G R, Carlson T J. Comparison of blade-strike modeling results with empirical data [M]. Richland Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2004.
- 4 Deng Zhiqun, Thomas J Carlson, Dennis D Dauble, 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 Ferguson, Gene R Ploskey, Kjell Leonardsson, 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 Cheng L, van Esch B P M. Blade interaction forces in a mixed-flow pump with vaned diffuser [C] // Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009, 1:165 173.
- 7 van Esch B P M, I L Y Spierts. 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 张德胜, 施卫东, 关醒凡, 等. 轴流叶轮进出口流场的测量[J]. 排灌机械, 2009, 27(4): 210-214.
- 9 张德胜,李通通,施卫东,等. 轴流泵叶轮出口轴面速度和环量的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 73 77. Zhang Desheng, Li Tongtong, Shi Weidong, et al. Experimental investigation of meridional velocity and circulation in axial-flow impeller outlet[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 73 - 77. (in Chinese)
- 10 张德胜,施卫东,李通通,等. 轴流泵叶轮非线性环量数学模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 58-61,66. Zhang Desheng, Shi Weidong, Li Tongtong, et al. Establishment and experiment on nonlinear circulation mathematical model of axial flow pump impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 58-61,66. (in Chinese)
- 11 李忠,杨敏官. 轴流泵内部流场数值模拟及实验研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(11): 1847-1850.
- 12 Shi Weidong, Zhang Desheng, Guan Xingfan, et al. Numerical and experimental investigation on high-efficiency axial-flow pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 38-44.
- 13 Zhang Desheng, Shi Weidong, Chen Bin, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser. B, 2010, 22(1): 35 - 44.
- 14 张德胜,施卫东,张华,等.不同湍流模型在轴流泵性能预测中的应用[J].农业工程学报,2012,28(1):66-71. Zhang Desheng, Shi Weidong, Zhang Hua, et al. Application of different turbulence models for predicting performance of axial flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1):66-71. (in Chinese)
- 15 鄢碧鹏,汤方平.叶片数变化对轴流泵性能影响的研究[J].扬州大学学报:自然科学版,1998,1(3):53-55.
- 16 施卫东,邢津,张德胜,等. 后掠式叶片轴流泵固液两相流数值模拟与优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 76-82. Shi Weidong, Xing Jin, Zhang Desheng, et al. Numerical simulation and optimization of solid-liquid two-phase turbulent flow in back swept axial pump[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 76-82. (in Chinese)
- 17 刘竹青,肖若富,吕腾飞,等.弯掠叶片对轴流泵驼峰及空化性能的影响[J].排灌机械工程学报,2012,30(3):270-273.

Liu Zhuqing, Xiao Ruofu, Lü Tengfei, et al. Effect of swept blade on hump and cavitation characteristics of axial flow pump[J].
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3): 270 - 273. (in Chinese)

- 18 王桃,孔繁余,袁寿其,等.前弯叶片液力透平专用叶轮设计与实验[J].农业机械学报,2014,45(12):75-79.
 Wang Tao, Kong Fanyu, Yuan Shouqi, et al. Design and experiment on pump as turbine with forward curved blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):75-79. (in Chinese)
- 19 朱荣生,曹梁,龙云,等.高比转数离心式潜水排污泵设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(4):47-52.
 Zhu Rongsheng, Cao Liang, Long Yun, et al. Design and experiment of high specific speed centrifugal submersible sewage pump
 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultaral Machinery, 2015, 46(4):47-52. (in Chinese)