

卷盘式喷灌机冲击式水涡轮结构参数优化

黎耀军^{1,2} 陈为升¹ 严海军^{1,2} 张振洲³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市供水管网系统安全与节能工程技术研究中心, 北京 100083;
3. 水利部建设管理与质量安全中心, 北京 100038)

摘要: 针对 JP75 卷盘式喷灌机冲击式水涡轮驱动力矩小、水力效率低、压力损失高等问题,以提升水涡轮水力性能为目标,在单因素分析的基础上,基于响应曲面模型和 CFD 数值模拟,选取叶轮侧端间隙宽度(侧端间隙)、出水管入口倒圆半径(倒圆半径)和喷嘴中心与叶轮轴的间距(中心间距)为设计变量,以水涡轮效率最高、驱动力矩最大和压力损失最小为目标函数,运用 Box – Benhnken 中心组合试验设计方法,开展三因素三水平优化设计分析。结果表明:所建立的二次多项式响应面模型可以准确表征响应指标与设计变量之间的关系,中心间距是影响水涡轮水力性能的最主要因素;水涡轮结构参数最优组合为:中心间距 73 mm、侧端间隙 2 mm、倒圆半径 20 mm;设计工况下的试验结果表明,与原型水涡轮相比,优化的水涡轮效率提高 17.6 个百分点,驱动力矩提高 13.2%,进出口压降降低 29.3%。

关键词: 卷盘式喷灌机; 水涡轮; 水力性能; 数值模拟; 响应曲面

中图分类号: S277.9⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0138-07

Optimization of Structure Parameters for Impulse Water Turbine of Hose Reel Irrigator

LI Yaojun^{1,2} CHEN Weisheng¹ YAN Haijun^{1,2} ZHANG Zhenzhou³
(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Engineering Research Center of Safety and Energy Saving Technology for Water Supply Network System, Beijing 100083, China
3. Center of Construction Management and Quality and Safety Supervision, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Optimization of the structure parameters for the impulse water turbine of a JP75 hose reel irrigator was presented with the aim to improve the hydraulic performance of the turbine. The SST $k-\omega$ turbulence model was adopted to analyze the flow field characteristics and the hydraulic performance of the water turbine. The reliability of the numerical method was verified by the available experimental data. On this basis, single factor experiments were conducted numerically to investigate the influence of the structure parameters on efficiency, driving torque and pressure drop of the turbine. Taking the impeller axial clearance width (axial clearance), the roundness radius of the outlet pipe entrance (roundness radius) and the spacing of the impeller axis and nozzle center line (center spacing) as the influence factors, three factors and three levels of quadratic regression orthogonal numerical testes were carried out by using Box – Benhnken central composite experimental design principles. Subsequently, the response surface methodology (RSM) was employed to analyze the influence of various factors on the efficiency, driving torque and pressure drop of the turbine under the design conditions. The results showed that the established quadratic pdynomial respense surface model is accurate enough to represent the corresponding relationship between the design variables and the response indicators. The spacing between impeller axis and nozzle center was the most important factor affecting the hydraulic performance of the water turbine. The optimal parameters combination of center spacing of 73 mm, axial clearance of 2 mm and roundness radius of 20 mm was obtained by using optimization module of Design-Expert data analysis software. The hydraulic performances of the optimized water turbine were predicted by using the proposed numerical

收稿日期: 2018-02-06 修回日期: 2018-06-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400109、2017YFD0201502)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-03)和河北省重点研发计划项目(17227207D-03)
作者简介: 黎耀军(1978—),男,副教授,主要从事流体机械内部流动及性能优化研究,E-mail: liyaojun@cau.edu.cn

simulation method and measured on a test rig. Compared with the original water turbine at the nominal operation point, the efficiency of the optimized turbine was increased by 17.6 percentage points, the torque was augmented by 13.2%, and the pressure drop was reduced by 29.3%.

Key words: hose reel irrigator; water turbine; hydraulic performance; numerical simulation; response surface methodology

0 引言

卷盘式喷灌机是典型的行喷式高效节水灌溉装备,具有地形适应性强、机动方便等优点,已成为农业灌溉领域广泛采用的机型^[1-5]。水涡轮是卷盘式喷灌机最常用的驱动装置,其水力性能直接影响喷灌机喷洒特性和机组能耗。目前,国内外卷盘式喷灌机采用的超低比转数冲击式水涡轮,普遍存在驱动力矩小、水力效率低、压力损失大等问题^[6],迫切需要开展水涡轮结构参数优化研究,以提升水涡轮水力性能,降低机组能耗。

现有针对水涡轮的研究主要集中在性能试验、流动模拟和结构改进等方面。为了获得水涡轮性能参数,袁寿其等^[7]搭建了卷盘式喷灌机水涡轮水力性能试验台,测得了 JP50 卷盘式喷灌机水涡轮在不同工况的外特性,并在数值模拟的基础上,设计了径向入流、轴向出流的新型水涡轮结构,较大幅度提高了水涡轮效率。为揭示水涡轮内部流动特征,多位学者采用数值模拟方法对不同结构形式的水涡轮进行了流动模拟研究^[8-10]。

水涡轮结构复杂,尽管国内外对水涡轮结构进行了持续改进,但目前尚未形成系统的水涡轮设计方法,不同结构参数对水涡轮水力性能的影响规律尚未充分揭示。本文以 JP75 卷盘式喷灌机采用的半开式叶轮冲击式水涡轮为对象,采用基于 SST $k-\omega$ 模型的数值模拟方法进行水涡轮内部流动分析和外特性预测,在单因素分析的基础上,以叶轮侧端间隙宽度、出水管入口倒圆半径和喷嘴中心与叶轮轴的间距等结构参数为主要因素,以效率、驱动力矩、进出口压降为主控目标,基于中心组合试验设计理论和响应曲面方法,分析各结构参数不同水平及其交互作用对水涡轮水力性能的影响,获取关键影响因素和最优结构参数组合,以期优化水涡轮结构,提升水涡轮水力性能。

1 水涡轮结构与流动计算方法

1.1 水涡轮结构

JP75 卷盘式喷灌机采用的冲击式水涡轮如图 1 所示,由涡轮壳、涡轮盖、叶轮和喷嘴等 4 部分组成,其中喷嘴安装于水涡轮入口段。水涡轮的半开式叶轮包含 12 枚圆柱形叶片,叶轮叶片与涡轮盖侧端间

隙 8.8 mm,喷嘴中心线到叶轮轴的间距为 74 mm,喷嘴出口直径为 22 mm,水涡轮其他主要结构参数见文献[8]。水涡轮转速范围为 200 ~ 1 200 r/min,流量范围为 14 ~ 30 m³/h。

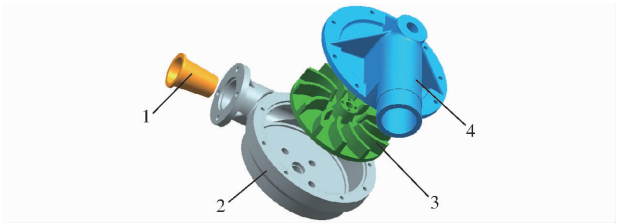


图 1 水涡轮结构图

Fig. 1 Structure diagram of water turbine

1. 喷嘴 2. 涡轮壳 3. 叶轮 4. 涡轮盖

1.2 流动计算方法

为探明水涡轮结构参数对水涡轮水力性能的影响,采用 CFD 技术对典型工况下的水涡轮内流动进行全流道数值模拟。基于 ANSYS CFX 软件平台,流动计算选用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[11],该模型考虑了流线曲率及逆压梯度等效应的影响^[12-14],其在强旋转湍流计算中的可靠性得到了验证^[13,15-17]。计算域包含水涡轮的完整流道,采用非结构网格离散计算域,固体壁面边界采用棱柱体边界层进行网格加密,经网格无关性分析,最终采用的计算域网格总数为 430 万。水涡轮流场计算采用的边界条件设置及流动控制方程求解方案与文献[8]一致。

额定转速下 ($n = 600$ r/min),水涡轮不同工况的效率、驱动力矩和进出口压降随流量的变化趋势如图 2 所示(试验结果见文献[8])。从图中可以看到,水涡轮的最高效率仅为 35% 左右,数值模拟预测结果与试验数据吻合良好,效率、驱动力矩和进出口压降的最大相对误差分别为 7.7%、7.3% 和

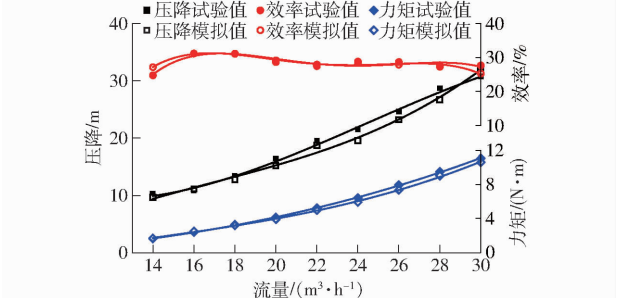


图 2 原型水涡轮外特性曲线预测值与试验值对比

Fig. 2 Comparison of predicted and measured performance curves of baseline model

5.5%,表明采用的数值计算模型可以较准确模拟水涡轮内部流动。因此,采用上述数值模拟模型进行不同结构参数组合的水涡轮性能预测,具有较高的可靠性。

2 结构参数对水力性能影响的单因素分析

2.1 因素及水平

流场结构显示,原型水涡轮在喷嘴出口附近存在回流区^[8],受叶轮出口侧出流条件的限制,水涡轮内部存在复杂的大尺度漩涡。文献[8]提出的改进喷嘴方案,有效提升了水涡轮的水力性能。为了进一步探明其他结构参数对水涡轮性能的影响,在匹配改进喷嘴的基础上(称为改进模型),如图3所示,本文选取叶轮侧端间隙宽度(侧端间隙 δ)、叶片出口侧径向切削长度(切削长度 Δ)、出水管入口倒圆半径(倒圆半径 R)、喷嘴中心与叶轮轴的间距(中心间距 L)4个结构参数,采用数值计算模型对单因素影响下的水涡轮内流动进行模拟,研究不同结构参数对水涡轮效率、驱动力矩和进出口压降的影响规律。单因素分析参数的因素水平如表1所示。

2.2 单因素对水力性能的影响分析

图4所示为设计工况下($Q = 20\text{ m}^3/\text{h}$, $n = 600\text{ r/min}$),数值模拟获得的水涡轮水力性能随4个结构参数的变化规律。从图中可以看出,在所选参数范围内,随叶轮侧端间隙增加,水涡轮效率、驱动力矩和进出口压降总体均呈下降趋势;随出水管入口倒圆半径增大,水涡轮效率、驱动力矩和压降整

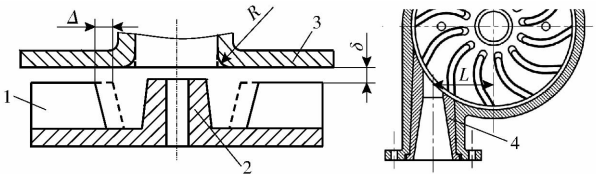


图3 影响水力性能的参数示意图

Fig.3 Sketch of parameters affecting hydraulic performance

1. 叶片 2. 轮毂 3. 涡轮盖 4. 改进喷嘴

表1 因素水平

Tab.1 Factors and levels for single factor analysis

mm				
水平	因素			
	侧端间隙	切削长度	倒圆半径	中心间距
	δ	Δ	R	L
1	1	2	5	69
2	2	4	10	71
3	3	6	15	73
4	4	8	20	75
5	5	10	25	77
6	6			79

体上先增加后下降,倒圆半径 $R = 15\text{ mm}$ 时,效率达到最大值;水力性能参数随中心间距的变化趋势并不明显。综合分析,水涡轮较优的水力性能对应的侧端间隙、倒圆半径和中心间距尺寸范围分别为 $2 \sim 4\text{ mm}$ 、 $10 \sim 20\text{ mm}$ 和 $69 \sim 77\text{ mm}$ 。由图4b可以看到,随叶片出口侧径向切削长度增加,效率和驱动力矩均较明显下降,进出口压降则有所增大,水涡轮水力性能总体呈下降趋势。

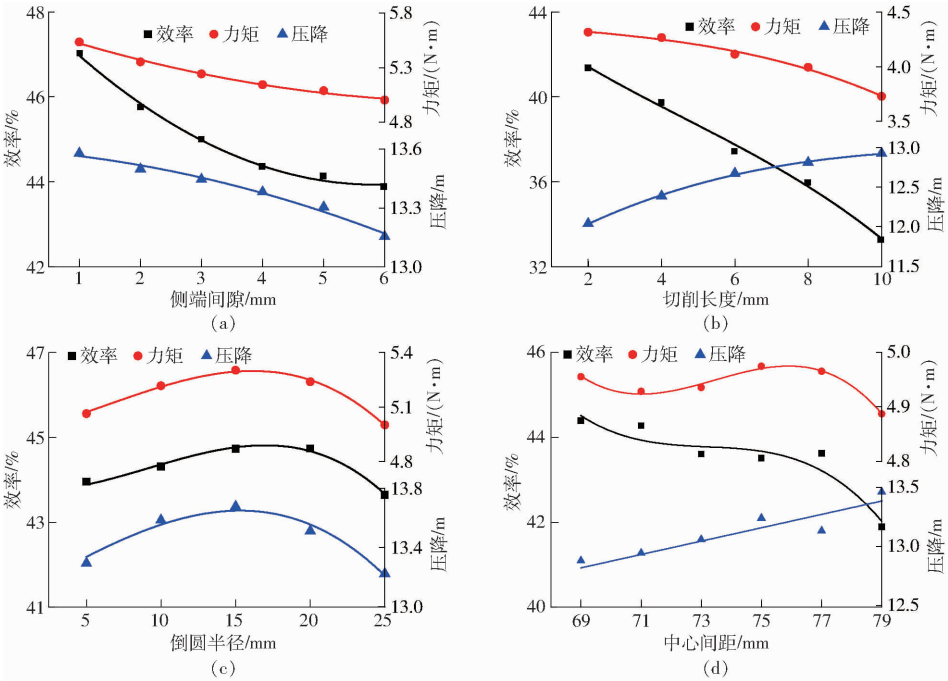


图4 各结构参数对水力性能的影响

Fig.4 Influence of various structural parameters on hydraulic performance

3 结构参数优化与分析

3.1 中心组合优化试验

单因素分析表明叶片切削总体上将导致水涡轮水力性能下降,因此仅选取侧端间隙、倒圆半径、中心间距 3 个主要结构参数,进行多因素优化设计分析。通过建立不同结构参数组合的水涡轮模型,采用基于 SST $k-\omega$ 模型的流动模拟和性能预测方法,获得不同结构参数组合下水涡轮的效率、驱动力矩和进出口压降。

根据 Box - Benhnken 中心组合设计理论^[18],以效率、驱动力矩和进出口压降作为响应值,对侧端间隙、倒圆半径、中心间距开展响应面模拟试验研究。采用三因素三水平二次回归正交试验设计方案^[19],对影响效率、驱动力矩和进出口压降的 3 个主要参数进行显著性检验和分析,最终获得试验因素与评价指标的响应曲面模型。根据图 4 所得的水涡轮较优性能对应的结构参数范围,选取中心组合优化试验的因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码			
Tab.2 Factors and coding of experiment mm			
编码	因素		
	中心间距 L	侧端间隙 δ	倒圆半径 R
-1	69	2	10
0	73	3	15
1	77	4	20

3.2 结果与分析

根据 Box - Benhnken 中心组合设计三因素三水平分析试验,试验方案包括 15 个试验点,其中有 12 个分析因子,3 个零点估计误差。试验方案与结果见表 3,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示中心间距 L 、侧端间隙 δ 和倒圆半径 R 编码值。

3.2.1 响应面模型及显著性检验

根据表 3 中的样本数据,运用 Design-Expert 数据分析软件进行多元回归拟合分析,建立效率 Y_1 、驱动力矩 Y_2 和进出口压降 Y_3 对 3 个自变量(X_1 、 X_2 、 X_3)的二次多项式回归模型。

$$Y_1 = 47.98 - 0.37X_1 - 0.1X_2 + 0.025X_3 - 0.64X_1X_2 - 0.037X_1X_3 - 0.018X_2X_3 - 2.01X_1^2 + 0.22X_2^2 + 0.32X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 4.8 - 0.063X_1 + 0.01X_2 - 0.012X_3 - 0.02X_1X_2 - 0.00825X_1X_3 - 0.01X_2X_3 + 0.11X_1^2 - 0.001292X_2^2 - 0.018X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 11.53 - 0.058X_1 + 0.051X_2 - 0.036X_3 + 0.12X_1X_2 - 0.011X_1X_3 - 0.021X_2X_3 + 0.77X_1^2 - 0.052X_2^2 - 0.12X_3^2 \quad (3)$$

表 3 试验方案与结果						
Tab.3 Experiment scheme and results						
试验 序号	因素			响应值		
	X_1	X_2	X_3	效率 $Y_1/\%$	力矩 $Y_2/$ (N·m)	压降 Y_3/m
1	0	0	0	47.95	4.794	11.538
2	-1	-1	0	45.96	4.910	12.326
3	1	0	1	45.77	4.776	12.042
4	-1	1	0	47.01	4.991	12.251
5	0	0	0	47.69	4.784	11.576
6	-1	0	-1	46.75	4.981	12.295
7	-1	0	1	46.74	4.951	12.223
8	0	1	1	48.51	4.764	11.331
9	1	0	-1	45.93	4.839	12.158
10	1	-1	0	46.65	4.856	12.013
11	0	-1	1	48.72	4.785	11.333
12	0	1	-1	48.36	4.787	11.423
13	0	-1	-1	48.50	4.767	11.343
14	1	1	0	45.15	4.857	12.416
15	0	0	0	48.30	4.808	11.487

对所建立的回归模型进行方差分析,显著性检验结果如表 4 所示,由表 4 分析可知,效率 Y_1 、驱动力矩 Y_2 和进出口压降 Y_3 的响应面模型显著水平值均为 $P < 0.01$,表明效率、驱动力矩和进出口压降的回归模型均极度显著; Y_1 、 Y_2 和 Y_3 响应面模型失拟项的显著水平值均为 $P > 0.05$,失拟项不显著,表明在试验范围内,回归模型与实际情况拟合度较好; Y_1 、 Y_2 和 Y_3 响应面模型的决定系数 R^2 依次为 0.985 8、0.952 5 和 0.993 4,均大于 0.95,表明各响应面模型可以解释 95% 以上的响应值变化,仅有不到 5% 的总变异不能由模型来解释,预测值和实际值之间具有高度相关性,试验误差小。因此,可用该模型对水涡轮外特性的各指标进行分析和预测。

回归方程中各变量对指标影响的显著性由 F 检验判定, P 越小则相应变量的显著性越高^[19-20]。由表 4 可以看出, X_1 、 X_1X_2 和 X_1^2 对响应指标 Y_1 影响极显著; X_1 和 X_1^2 对响应值 Y_2 影响极显著; X_1X_2 和 X_1^2 、 X_3^2 对响应指标 Y_3 均影响极显著。 X_2 、 X_3 和其余回归项 $P > 0.05$,对响应指标的影响均不显著,其可能原因是基于单因素分析选取的侧端间隙和倒圆半径的水平范围已接近最优值。

3.2.2 因素影响效应分析

由表 4 中 F 值分析可知,3 个因素对效率的影响重要性顺序为 X_1 、 X_2 、 X_3 ;对驱动力矩的影响重要性顺序为 X_1 、 X_3 、 X_2 ;对进出口压降的影响重要性顺序为 X_1 、 X_2 、 X_3 。运用 Matlab 软件绘制四维切片图,分析各因素对响应指标的影响效应。

表 4 回归模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of response surface model

指标	来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
效率 <i>Y</i> ₁	模型	19. 0	9	38. 55	0. 000 4
	<i>X</i> ₁	1. 10	1	20. 05	0. 006 5
	<i>X</i> ₂	0. 08	1	1. 46	0. 280 3
	<i>X</i> ₃	0. 005	1	0. 092	0. 774 4
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	1. 63	1	29. 76	0. 002 8
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	5. 63 × 10 ⁻³	1	0. 1	0. 761 3
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	1. 23 × 10 ⁻³	1	0. 022	0. 886 8
	<i>X</i> ₁ ²	1. 49	1	272. 04	0. 000 1
	<i>X</i> ₂ ²	0. 18	1	3. 23	0. 132
	<i>X</i> ₃ ²	0. 39	1	7. 08	0. 044 8
	残差	0. 27	5		
	失拟项	0. 086	3	0. 31	0. 824 1
	误差	0. 19	2		
	总和	19. 2	14		
<i>R</i> ²		0. 985 8			
驱动力矩 <i>Y</i> ₂	模型	8. 30 × 10 ⁻²	9	11. 13	0. 008 1
	<i>X</i> ₁	3. 20 × 10 ⁻²	1	38. 34	0. 001 6
	<i>X</i> ₂	8. 41 × 10 ⁻⁴	1	1. 01	0. 360 8
	<i>X</i> ₃	1. 23 × 10 ⁻³	1	1. 47	0. 279 0
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	1. 60 × 10 ⁻³	1	1. 92	0. 224 0
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	2. 72 × 10 ⁻⁴	1	0. 33	0. 591 9
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	4. 41 × 10 ⁻⁴	1	0. 53	0. 499 1
	<i>X</i> ₁ ²	4. 40 × 10 ⁻²	1	53. 2	0. 000 8
	<i>X</i> ₂ ²	6. 16 × 10 ⁻⁶	1	0. 007 4	0. 934 7
	<i>X</i> ₃ ²	1. 20 × 10 ⁻³	1	1. 45	0. 283 1
	残差	4. 16 × 10 ⁻³	5		
	失拟项	3. 87 × 10 ⁻³	3	8. 87	0. 103
	误差	2. 91 × 10 ⁻⁴	2		
	总和	8. 70 × 10 ⁻²	14		
<i>R</i> ²		0. 952 5			
压降 <i>Y</i> ₃	模型	2. 47	9	83. 89	0. 000 1
	<i>X</i> ₁	2. 70 × 10 ⁻²	1	8. 31	0. 034 5
	<i>X</i> ₂	2. 10 × 10 ⁻²	1	6. 31	0. 053 8
	<i>X</i> ₃	1. 10 × 10 ⁻²	1	3. 22	0. 132 8
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	5. 70 × 10 ⁻²	1	17. 48	0. 008 6
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	4. 90 × 10 ⁻⁴	1	0. 15	0. 716 2
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	1. 68 × 10 ⁻³	1	0. 51	0. 505 3
	<i>X</i> ₁ ²	2. 19	1	669. 81	0. 000 1
	<i>X</i> ₂ ²	1. 00 × 10 ⁻²	1	3. 07	0. 140 4
	<i>X</i> ₃ ²	5. 70 × 10 ⁻²	1	17. 4	0. 008 7
	残差	1. 60 × 10 ⁻²	5		
	失拟项	1. 20 × 10 ⁻²	3	2. 06	0. 342 8
	误差	3. 99 × 10 ⁻³	2		
	总和	2. 48	14		
<i>R</i> ²		0. 993 4			

注: *P* < 0. 01 (极显著); *P* < 0. 05 (显著)。

中心间距、侧端间隙和倒圆半径 3 个因素对效率的影响效应如图 5a 所示, 总体影响趋势为中心间距接近 73 mm、侧端间隙越小、倒圆半径越大, 则效率越高, 反之效率越低。分析其原因, 侧端间隙过大

将增加叶轮与涡轮壳体间的泄漏量, 喷嘴射流对叶轮的有效冲击作用减弱, 会导致叶轮的输出功率 (有效功率) 下降, 进而降低水涡轮效率; 较大的出水管入口倒圆半径则有利于增加轮毂末端附近的过流面积, 叶轮出流通畅, 减弱了叶片出口与轮毂间环形区域的循环流动对叶片通道内流动的阻滞作用, 有利于降低叶轮区水力损失, 提高效率。

水涡轮 3 个结构参数对驱动力矩的影响效应如图 5b 所示, 在所分析的侧端间隙和倒圆半径范围内, 中心间距越小则驱动力矩越大。其可能原因是中心间距减小, 虽然缩短了喷嘴射流的作用力臂, 但喷嘴射流在叶片上的作用位置远离叶片进口边, 可以有效减少叶片进口边与水涡轮壳体之间径向间隙内的泄漏流动, 增加喷嘴射流的冲击力, 增大驱动力矩。

图 5c 所示为中心间距、侧端间隙和倒圆半径 3 个因素对进出口压降的影响效应, 总体影响趋势为中心间距为 73 mm 左右、倒圆半径接近 10 mm 和 20 mm 时, 对应的进出口压降均相对较小, 侧端间隙对压降的影响则不明显。

3.3 参数优化

水涡轮内部流动复杂, 图 5 的分析表明, 各因素对性能评价指标的影响趋势各不相同, 为了获得最优的水涡轮水力性能, 需要综合考虑 3 个性能评价指标, 对影响因素进行综合优化。

根据水涡轮设计工况的流量和转速, 在所选定的中心组合设计试验约束条件范围内, 按照效率最高 (*Y*₁ → *Y*_{1max})、驱动力矩最大 (*Y*₂ → *Y*_{2max})、进出口压降最小 (*Y*₃ → *Y*_{3min}) 的水力性能优化目标, 进行水涡轮结构参数优化。建立多目标优化函数

$$\varphi = \left(\prod_{i=1}^n \varphi_i^{r_i} \right)^{\frac{1}{\sum r_i}}$$

(4)

式中 *n*——响应值数量 (*n* = 3)

r_i——响应值重要程度 (*r_i* = 1)

φ_i——响应值 *Y_i* 的理想范围

其中, 若 *Y_i* → *Y_{imax}*, 有

$$\varphi_i = \begin{cases} 0 & (Y_i \leq Y_{imin}) \\ \frac{Y_i - Y_{imin}}{Y_{imax} - Y_{imin}} & (Y_{imin} < Y_i \leq Y_{imax}) \\ 1 & (Y_i > Y_{imax}) \end{cases}$$

(5)

若 *Y_i* → *Y_{imin}*, 有

$$\varphi_i = \begin{cases} 0 & (Y_i > Y_{imax}) \\ \frac{Y_{imax} - Y_i}{Y_{imax} - Y_{imin}} & (Y_{imin} < Y_i \leq Y_{imax}) \\ 1 & (Y_i \leq Y_{imin}) \end{cases}$$

(6)

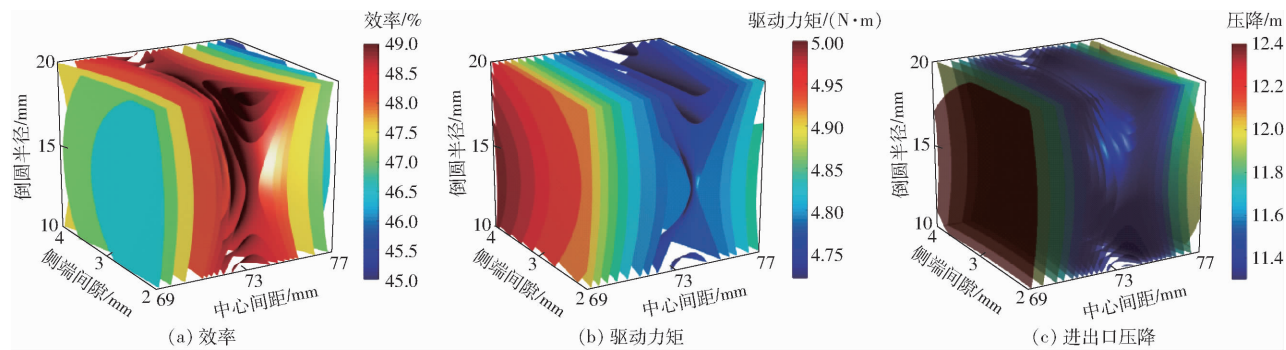


图 5 驱动力矩、进出口压降和效率随试验因素变化的四维切片图

Fig. 5 Four-dimensional slice diagrams of changing trends of driving torque, pressure drop and efficiency with test factors

s. t. $\begin{cases} 69\text{ mm} \leq L \leq 77\text{ mm} \\ 2\text{ mm} \leq \delta \leq 4\text{ mm} \\ 10\text{ mm} \leq R \leq 20\text{ mm} \end{cases} \quad (7)$

运用 Design-Expert 数据分析软件对建立的 3 个响应指标的全因子二次回归模型进行最优化求解,得到的各因素最优参数为:中心间距 72.69 mm,侧端间隙 2 mm,倒圆半径 20 mm;数值模拟预测得到最优结构参数组合的水涡轮效率为 48.72%,驱动力矩为 4.79 N·m,进出口压降为 11.33 m。

4 试验验证

为验证响应面模型和优化结果,参照文献[8]提出的试验方法,在图 6 所示的水涡轮专用试验台上,对最佳参数组合(考虑实际应用的可行性,将参数最佳条件修正为中心间距 73 mm,叶端间隙 2 mm,倒圆半径 20 mm,与表 3 中试验序号 11 对应参数一致)的优化模型进行真机水力性能测试,检验优化模型的可靠性和最优结构参数组合的合理性。

额定转速下,水涡轮优化模型的外特性数值模拟结果和实测结果与原型水涡轮外特性的试验值如图 7 所示。由图 7 可以看出,匹配改进喷嘴的水涡轮优化模型,其数值模拟预测的驱动力矩、进出口压降和效率与试验结果的最大相对误差分别为 5.3%、6.6% 和 6.1%,验证了数值模拟模型的可靠性。试验测得的优化水涡轮设计工况效率为 46.23%,驱动力矩为 4.57 N·m,进出口压降为 11.54 m。试验结果的对比分析表明,相比原型水涡轮,参数优化后的水涡轮在设计工况下效率提高 17.6 个百分点、驱动力矩提高 13.2%、进出口压降降低 29.3%,在所测试的流量范围内驱动力矩增加 8.2%~15.3%,进出口压降减小 24.4%~30.1%,水涡轮效率提高 7.8~20.4 个百分点。

数值模拟及真机试验结果表明,最优结构参数组合明显提升了水涡轮水力性能,在水涡轮改进设计中推荐采用最优参数组合,即中心间距 73 mm,侧



图 6 水涡轮性能测试试验台

Fig. 6 Experimental setups for performance measurement of turbine

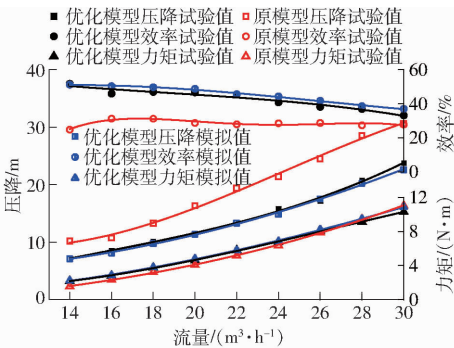


图 7 优化模型与原模型外特性曲线

Fig. 7 Performance curves of optimized model and original model

端间隙 2 mm,倒圆半径 20 mm。

5 结论

(1)单因素模拟试验表明,在所选参数范围内,水力性能参数随中心间距的变化趋势不明显;随水涡轮侧端间隙增加,水涡轮效率、驱动力矩和进出口压降总体均呈下降趋势;叶片出口侧切削长度增加,效率和驱动力矩均下降较明显,进出口压降则有所增大;随出水管入口倒圆半径增大,水涡轮效率、驱动力矩和压降整体上先增加后下降,倒圆半径 $R = 15\text{ mm}$ 时,效率达到最大值。

(2)基于响应面法建立的水涡轮水力性能指标与结构参数的二次多项式回归模型,可用于分析结构参数对水涡轮外特性的影响规律。效率的影响显

著性顺序为中心间距、侧端间隙、倒圆半径;驱动力矩的影响显著性顺序为中心间距、倒圆半径、侧端间隙;进出口压降的影响显著性顺序为中心间距、侧端间隙、倒圆半径。

(3)在选取的参数优化试验约束条件范围内,以效率最高、驱动力矩最大、进出口压降最小为优化目标,求解优化模型得到水涡轮结构参数最优组合

为:中心间距 73 mm,侧端间隙 2 mm,倒圆半径 20 mm;设计工况下,水涡轮优化模型的效率为 46.23%,驱动力矩为 4.57 N·m,进出口压降为 11.54 m。额定转速的不同流量工况,优化模型相比原型水涡轮整体上效率提高 7.8~20.4 个百分点,驱动力矩增加 8.2%~15.3%,进出口压降减小 24.4%~30.1%。

参 考 文 献

- 1 郑耀泉,刘婴谷,严海军,等. 喷灌与微灌技术应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- 2 范永申,王全九,周庆峰,等. 中国喷灌技术发展面临的主要问题及对策[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(5):450-455.
FAN Yongshen, WANG Quanjiu, ZHOU Qingfeng, et al. Main problems in technological development of sprinkler irrigation in China and corresponding countermeasures [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(5): 450 - 455. (in Chinese)
- 3 JOBBÁGY J, HOLBAY A, TOMÁŠIK L. Design and testing of device for measuring the longitudinal uniformity of reel hose irrigation machine [J]. Journal of Central European Agriculture, 2013, 14(4):1317-1325.
- 4 HASHIM S, MAHMOOD S, AFZAL M, et al. Performance evaluation of hose-reel sprinkler irrigation system [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2016, 41(10):1-8.
- 5 JANGRA P, JHORAR R K, KUMAR S, et al. Performance evaluation of a traveller irrigation system [J]. Irrigation & Drainage, 2017, 66(2):173-181.
- 6 汤跃,朱相源,梅星新,等. JP50 卷盘喷灌机水涡轮水力性能试验[J]. 中国农村水利水电,2014(2):26-29.
TANG Yue, ZHU Xiangyuan, MEI Xingxin, et al. Performance test of water turbine of JP50 reel sprinkler [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(2): 26 - 29. (in Chinese)
- 7 袁寿其,牛国平,汤跃,等. JP50 卷盘式喷灌机水涡轮水力性能的试验与模拟[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(7):553-557.
YUAN Shouqi, NIU Guoping, TANG Yue, et al. Experiment and numerical estimation of performance of hydraulic turbine of JP50 reel sprinkle [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 553 - 557. (in Chinese)
- 8 黎耀军,张振洲,严海军,等. JP75 卷盘式喷灌机水涡轮水力性能分析与结构改进设计[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):100-107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180112&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.012.
- 9 LI Yaojun, ZHANG Zhenzhou, YAN Haijun, et al. Hydraulic performance analysis and optimization for water turbine of JP75 hose reel irrigation machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):100-107. (in Chinese)
- 9 程俊,汤跃,汤玲迪. JP75 型卷盘喷灌机水涡轮能耗贡献率分析[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(11):1008-1012.
CHENG Jun, TANG Yue, TANG Lingdi. Energy consumption analysis of hydraulic turbine of JP75 hose reel irrigator [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(11): 1008 - 1012. (in Chinese)
- 10 TANG L, YUAN S, TANG Y. Performance improvement of a micro impulse water turbine based on orthogonal array [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017(6):1-15.
- 11 MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity transport turbulence model for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):1598-1605.
- 12 MENTER F R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, 23(4):305-316.
- 13 PINTO R N, AFZAL A, D'SOUZA L V, et al. Computational fluid dynamics in turbomachinery: a review of state of the art [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017, 24(3):467-479.
- 14 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(2):1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160201&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.001.
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):1-14. (in Chinese)
- 15 江伟,李挺,王玉川,等. 导叶式离心泵内部流场数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):121-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170915&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.015.
JIANG Wei, LI Ting, WANG Yuchuan, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in centrifugal pump with vane diffuser [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 121 - 128. (in Chinese)
- 16 ZAMIRI A, JIN T C. Ability of URANS approach in prediction of unsteady turbulent flows in an unbaffled stirred tank [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 133(11):178-187.
- 17 ANSYS. ANSYS fluent 14.0 user's guide [Z]. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc., 2014.
- 18 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 19 隋允康,宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京:科学出版社,2011.
- 20 陈演波,祁力钧,吴亚奎,等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):22-29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004.
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):22-29. (in Chinese)