

低比转速半开式叶轮参数正交优化与数值分析

张钊豪

广州大学机械与电气工程学院 广东 广州 510006

【摘要】：针对低比转速半开式叶轮离心泵在小流量工况下效率偏低、关键结构参数相互影响难以快速判别敏感参数的问题，基于设计工况 $Q=0.5\text{ kg/s}$ 、 $H=3\text{ m}$ 、 $n=1000\text{ rpm}$ 建立基准水力模型并选取叶轮进口直径 D_j 、出口直径 D_2 、出口宽度 b_2 、叶片进出口角 β_1/β_2 及叶顶间隙 δ ，6个因素开展优化研究。采用 $L_{18}(3^6)$ 正交表构建 18 组方案。正交结果显示，18 组方案扬程分布为 $1.5149\sim 2.8137\text{ m}$ ，水力效率为 $53.37\%\sim 64.37\%$ 。研究表明，叶顶间隙对两项指标影响最为显著(效率 $R=7.38$ 、扬程 $R=0.67$)，出口直径 D_2 对扬程影响次之($R=0.41$)，叶片进口角 β_1 对效率影响较突出($R=1.25$)；据此确定综合最优组合为 $D_j=39\text{ mm}$ 、 $D_2=144\text{ mm}$ 、 $b_2=4\text{ mm}$ 、 $\beta_1=25^\circ$ 、 $\beta_2=38^\circ$ 、叶顶间隙 0.5 mm 。在 $0.2\sim 0.7\text{ kg/s}$ 范围内对优化模型与原模型进行外特性对比，低流量段效率平均提升约 2.98% ，中高流量段在峰值附近及 $0.5\sim 0.6\text{ kg/s}$ 处平均提升约 5.05% ，同时扬程曲线整体上移并拓宽高效区。研究可为低比转速半开式离心泵叶轮关键参数选取与快速优化提供可复用的试验设计—仿真评估路径与参数搭配参考。

【关键词】：低比转速离心泵；正交试验；数值模拟；叶轮优化；半开式叶轮

DOI:10.12417/3041-0630.26.04.040

离心泵是一种把原动机的机械能转化成被输送流体的动能和压力能的流体机械，在农业灌溉、水利工程、能源供给等方面均起着重要作用。离心泵作为全球电力消耗的主要来源之一，对离心泵进行结构优化以提高水力效率，对节约能源，降低成本具有重要意义。^[1]但影响离心泵性能的几何参数众多，其中叶轮进出口直径、叶片进出口宽度、叶片数等对离心泵的性能有较大的影响^[2]。为提高离心泵性能，不少学者利用正交实验的方法来改进离心泵结构，取得了许多有价值的成果。王伟等^[3]通过正交试验和数值计算对多级离心泵进行优化。钟朝孺^[4]等利用正交实验对单级双吸离心泵叶轮进行结构优化。沈海军等^[5]利用正交实验及 CFD 对低比转速离心泵实现优化设计。

目前研究人员对离心泵进行了大量的研究，但对半开式叶轮离心泵的研究相对较少。所以，为探明结构参数的改变对低比转速的半开式叶轮离心泵性能影响的大小，并得出最佳参数组合。文中采用正交试验和数值模拟的方法研究叶轮主要结构参数对泵效率和扬程的影响，并利用极差分析的方法得到最优组合参数，以期提高离心泵的扬程和水力效率，为该类离心泵的设计和关键参数的选取提供参考。

1 离心泵的水力设计

本文所设计离心泵应用于城市供暖网道，为层间管道输送暖水增压以确保热量分配的均匀。其设计参数为：流量 $Q=0.5\text{ kg/s}$ ，扬程 $H=3\text{ m}$ ，额定转速 $n=1000\text{ rpm}$ 。根据设计参数采用速度系数对离心泵半开式叶轮进行结构设计，得到如下几何参数：叶轮进口直径 $D_j=34\text{ mm}$ ，叶轮外径 $D_2=140\text{ mm}$ ，叶

轮出口宽度 $b_2=3.7\text{ mm}$ ，叶片进口 $\beta_1=30^\circ$ ，叶片出口角 $\beta_2=37^\circ$ ，叶顶间隙 $\delta=0.8\text{ mm}$ ，比转速 $ns=36\text{ mm}$ 。

2 正交实验方案设计

正交实验的优点是能够显著减少必要的实验次数。与需要测试所有可能性组合的全因子实验相比，正交实验通过正交表的设计，用极少数的实验次数覆盖了主要信息。对于因素和水平众多的复杂系统，传统方法可能需要成千上万次实验，而正交实验法则提供了一条切实可行的高效路径^[4]。研究表明^[5-8]影响半开式叶轮离心泵性能的主要叶轮几何参数有如下 6 个：叶轮进口直径 D_j 、叶轮直径 D_2 、叶轮出口宽度 b_2 、 β_1 叶片进口角、 β_2 叶片出口角、叶顶间 δ 。为确保实验的准确性和可靠性，需要选取合理的叶轮几何参数变量范围，如果变量的设计范围过窄则有可能使优化点遗漏若取值范围过大所获取的最优解仅仅是理论最优解它不符合泵的设计规律及制造工艺性。本文根据速度系数法^[9]中的经验统计和文献给出的经验统计得出。

表 1 叶轮几何参数的取值范围

几何参数	下限值	上限值
D_j/mm	32	39
D_2/mm	134	144
b_2/mm	3	4
$\beta_1/(^\circ)$	25	35
$\beta_2/(^\circ)$	32	38
δ/mm	0.5	1.5

作者简介：张钊豪，男，汉族，广东省湛江市，硕士，研究方向结构优化，数值模拟，CFD,离心泵。

利用正交试验法建立上述6个参数的正交试验因素水平表,其中每个因素设置3种水平,如表2所示。

表2 正交试验因素水平表

水平	因素					
	Dj/mm	D2/mm	b2/mm	$\beta 1(o)$	$\beta 2(o)$	δ /mm
1	32	134	3	25	32	0.5
2	36	139	3.5	30	35	1
3	39	144	4	35	38	1.5

选用L18(3⁶)正交表,表3中的18种方案,通过数值模拟可以得出上述几何因素对扬程、效率的影响。

表3 正交实验方案

序号	Dj/mm	D2/mm	b2/mm	$\beta 1(o)$	$\beta 2(o)$	δ /mm	H/m	$\eta /%$
1	32	134	3	25	32	0.5	2.25	64.37
2	32	134	3.5	30	38	1.5	1.74	53.92
3	32	139	3	35	38	1	2.02	57.44
4	32	139	4	25	35	1.5	2.14	56.18
5	32	144	3.5	35	35	0.5	2.81	61.73
6	32	144	4	30	32	1	2.59	58.20
7	36	134	3	35	35	1.5	1.51	53.37
8	36	134	4	25	38	1	2.35	61.29
9	36	139	3.5	30	35	1	2.30	59.93
10	36	139	4	35	32	0.5	2.72	61.52
11	36	144	3	30	38	0.5	2.71	63.54
12	36	144	3.5	25	32	1.5	2.10	56.18
13	39	134	3.5	35	32	1	2.14	61.47
14	39	134	4	30	35	0.5	2.53	62.24
15	39	139	3	30	32	1.5	1.71	54.99
16	39	139	3.5	25	38	0.5	2.64	62.63
17	39	144	3	25	35	1	2.33	59.50
18	39	144	4	35	38	1.5	2.43	57.12

3 模拟设置及正交实验分析

3.1 数值模拟设置

根据上述参数利用Cfturbo完成建模,运用mesh对水体模型进行网格划分,在流体域交界面、叶片和隔舌处适当加密,如图1。



(a)进口段网格划分 (b)叶轮区网格划分 (c)蜗壳区网格划分
图1 网格划分

本文所研究离心泵的流体介质为25°C水,密度为997kg/m³,湍流模型选择SST k- ω 模型,边界条件设置进口边界为流量入口,质量流量大小为0.5kg/s;出口边界设置为流出出口。交界面处采用动静交界面。

3.2 极差分析

利用Fluent软件对表4中18组正交方案进行数值仿真计算,以扬程H和水力效率 η 作为性能评价指标得到正交实验结果确定各因素对实验结果影响的主次顺序和最佳水平组合。根据正交实验结果,对实验数据进行极差分析,其分析结果如表4所示。

表4 实验方案下数据的极差分析汇总

实验指标		Dj/mm	D2/mm	b2/mm	$\beta 1(o)$	$\beta 2(o)$	δ /mm
$\eta /%$	排序	3	4	6	2	5	1
	R值	1.02	0.66	0.56	1.25	0.63	7.38
H/m	排序	5	2	3	5	4	1
	R值	0.04	0.41	0.37	0.04	0.07	0.67

结果表明,叶顶间隙 δ 对扬程与水力效率的影响最为显著,间隙减小可同时提升两项指标;叶轮出口直径D2对扬程、叶片进口角对效率表现出次要影响,其余因素影响相对较弱。基于上述趋势分析,下面对各因素的最优水平组合进行综合确定。鉴于正交表具备均衡分散与综合可比的核心特性,本文综合考虑离心泵扬程和水利效率,根据评价指标确定组合为叶轮进口直径(Dj)39mm、叶轮出口直径(D2)144mm、叶轮出口宽度(b2)4mm、叶片进口角($\beta 1$)25°、叶片出口角($\beta 2$)38°、叶顶间隙(δ)0.5mm。

4 数值模拟分析

4.1 外特性曲线分析

为验证优化方案的可靠性,本文对优化模型与原模型在流

量范围 0.2~0.7kg/s(其中额定流量为 0.5kg/s); 转速 1000rpm 情况下进行数值模拟分析。图 2、3 为效率特性曲线和扬程特性曲线对比。

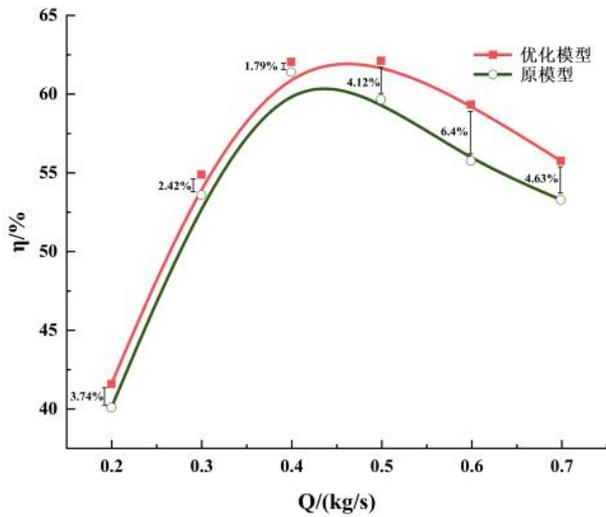


图 2 效率 η 特性曲线

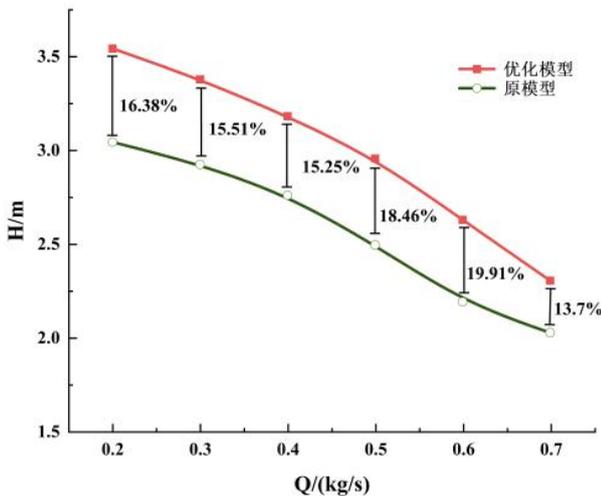


图 3 扬程 H 特性曲线

由图可知在效率方面低流量工况下, 优化模型较原模型性能有小幅提升, 增幅均值在 2.98%左右; 效率曲线在中高流量段提升更为明显, 峰值附近和 0.5 - 0.6 kg/s 处增益最大, 增幅均值为 5.05%。优化后模型扬程有较大提升, 整体扬程曲线在原模型之上, 同时拓宽了高效区, 优化效果显著, 达到了优化目的。

4.2 叶轮流场对比分析

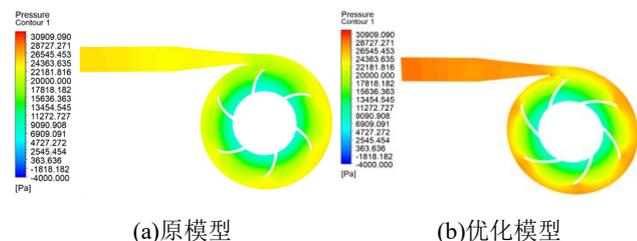
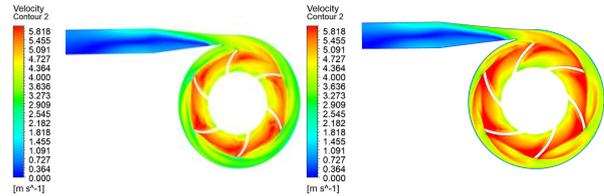


图 4 半开式叶轮中间截面压力分布(Q=0.5kg/s)

在额定工况下(Q=0.5 kg/s), 优化后叶轮周围和出口处平均压力更高, 静压梯度较平滑, 无大范围负压或强回流区, 如图 4 所示。平均压力的有效增加是由于离心泵在工作时, 叶轮通过叶片把力矩传给液体, 使液体的能量增加。该力矩 M 在单位时间对液体作的功为 $M \cdot \omega$, 由角动量守恒定律和动量矩守恒定律可得如下公式。说明适当增加叶轮直径可以提高叶轮外周线速度, 进而提高其输出的切向能量, 因此扬程提高; 而减小叶顶间隙、增大叶片出口宽度可以增加叶轮的动量转化, 进一步提高扬程。



(a)原模型 (b)优化模型

图 5 半开式叶轮中间截面速度分布(Q=0.5 kg/s)

图 5 中优化模型叶轮出口的切向速度更高且分布更为均匀。这是叶轮外径与出口宽度的共同作用下使得出口处可以获得更大的切向速度, 同时出口宽度的增大使流道横截面积变大进而使径向速度分布更均匀。



(a)原模型 (b)优化模型

图 6 叶顶间隙处速度迹线图

对比实验发现原模型与优化模型在 $Q=0.6\text{kg/s}$ 时效率差值较大, 截取 Z-X 平面叶顶间隙处流线进行分析, 如图 6 所示。对比发现原模型在叶顶间隙邻近区域的迹线卷曲更强、近壁流动更紊乱, 叶轮流道中段回流涡明显加剧, 且扰动沿程扩展, 表明泄漏流与主流耦合更早、更剧烈; 优化模型在进口端存在一个明显的绕流涡, 这主要是因为叶顶间隙的减小使间隙泄漏量较少导致叶轮流道内回流形成绕流涡, 对比叶轮流道中段优化模型在同位置的迹线更趋于分层, 卷曲与回转尺度明显收敛, 主流带更连续。其成因在于叶顶间隙增大会增强压力面向吸力面的跨隙泄漏, 泄漏流在间隙处与吸力面近壁主流混合并诱发叶顶泄漏涡, 涡强度与尺度随间隙增大而增大, 从而形成更显著的近壁低速区与剪切耗散区, 导致局部能量损失加剧并削弱叶片有效做功能力; 当间隙减小后, 泄漏量下降、掺混与耗散减轻, 因此叶顶间隙附近流动更平稳, 使优化模型效率有

所提升。

5 结论

(1)针对低比转速半开式离心泵小流量效率偏低的问题,采用 L18(3⁶)正交设计与 CFD 数值模拟对叶轮关键参数进行筛选与优化。

(2)研究表明,扬程为 1.5149~2.8137 m,水力效率为

53.37%~64.37%;叶顶间隙 δ 影响最显著($R\eta=7.38$ 、 $RH=0.67$),叶轮出口直径 D2 对扬程影响次之($RH=0.41$),叶片进口角 β_1 对效率影响较突出($R\eta=1.25$)。

(3)综合确定较优组合为 $D_j=39$ mm、 $D_2=144$ mm、 $b_2=4$ mm、 $\beta_1=25^\circ$ 、 $\beta_2=38^\circ$ 、叶顶间隙 $\delta=0.5$ mm;在 0.2~0.7 kg/s 范围内低流量段效率平均提升 2.98%,0.5~0.6 kg/s 区间效率平均提升 5.05%。

参考文献:

- [1] 袁寿其.低比速离心泵理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011.
- [3] 王伟,施卫东,蒋小平,等.基于正交试验及 CFD 的多级离心泵叶轮优化设计[J].排灌机械工程学报,2016,34(03):191-197.
- [4] 钟朝孺,李凯莉,李晨昊,等.基于正交试验的单级双吸离心泵多目标优化设计[J].大电机技术,2024,(03):77-84.
- [5] 沈海军,吴宏飞.基于正交实验及 CFD 的低比转速离心泵优化设计[J].装备制造技术,2023,(09):41-44.
- [6] 刘淄.应用正交试验法优化设计参数[J].机电元件,1990,(04):9-10.
- [7] 张方芳,陶然,肖若富.叶顶间隙对半开式叶轮离心泵的性能影响研究[J].大电机技术,2023,(03):43-50.
- [8] 司乔瑞,郭勇胜,田鼎,等.半开式叶轮离心泵气液两相条件下内部流动特性分析[J].农业工程学报,2021,37(24):30-37.