

# 基于响应面法的离心泵作透平水力和声学性能优化

代 翠<sup>1</sup>, 孔繁余<sup>2</sup>, 董 亮<sup>2\*</sup>, 汪家琼<sup>2</sup>, 柏宇星<sup>2</sup>

(1. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**摘 要:** 为综合优化离心泵作透平的水力和声学性能, 建立了一种基于响应面的离心泵作透平水力和声学性能多目标优化方法。首先在对比分析叶轮几何参数对透平水力和噪声影响的基础上, 根据敏感度筛选出对噪声影响显著的关键参数; 进而应用响应面方法构造显著变量与多目标函数的响应面多元回归模型, 分析影响水力效率与噪声的参数间交互作用; 最终以水力效率不降低和总声压级最小为响应目标, 兼顾性能与噪声确定最优参数组合, 即叶片进口安放角为 19.5°, 叶片出口安放角为 20°, 叶片出口宽度为 16 mm, 叶片包角为 92°, 叶轮进口直径为 101 mm, 叶片数为 12。对某离心泵作透平多目标优化结果表明, 叶轮进口直径、叶片出口宽度、叶片数及叶片包角对内场噪声总声压级影响显著; 响应面模型能够反映参数与响应值之间的相关性; 经试验验证优化后透平水力效率平均提高了 1.98 个百分点, 总声压级降低了 4.95 dBA, 表明采用的响应面法能够在不影响透平原有水力性能的前提下改善声学性能。

**关键词:** 离心泵; 透平; 声学性能; 优化设计; 响应面法; 水力性能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.006

中图分类号: TH311

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0040-08

代 翠, 孔繁余, 董 亮, 汪家琼, 柏宇星. 基于响应面法的离心泵作透平水力和声学性能优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 40—47. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.006 http://www.tcsae.org

Dai Cui, Kong Fanyu, Dong Liang, Wang Jiaqiong, Bai Yuxing. Hydraulic and acoustic property optimization for centrifugal pump as turbine based on response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 40—47. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.006 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

离心泵作透平是液体能量回收的一种主要技术, 广泛应用于石油、化工等重要领域<sup>[1-4]</sup>。为了提高能量回收利用率, 离心泵作透平正逐步向大功率化方向发展, 流体诱发噪声是影响其可靠运行的关键问题之一。

多目标优化的基本思路就是在满足给定约束条件的前提下, 从设计变量的取值范围内搜索最佳设计点, 使得多个设计目标决定的设计对象整体性能最优<sup>[5]</sup>。Wahba 和 Tourlidakis<sup>[6]</sup>采用多目标算法对离心泵叶轮进行优化设计, 建立以损失最小和扬程最大为目标的多目标函数; 通过二维流场结果计算适应值函数来获得最终的优化结果。Benini 和 Tourlidakis<sup>[7]</sup>以热力学损失最小和压力最大为目标对压缩机无叶扩压器进行了优化设计。Kim 等<sup>[8]</sup>结合数值计算和混合多目标进化算法以等熵效率和总压

比为目标对某离心压力机叶轮子午面前后盖板形状的 4 个参数进行了优化设计, 优化后全工况范围的等熵效率和总压均得到了提高。Bonaiuti 等<sup>[9]</sup>结合试验设计方法、响应面方法与多目标优化算法优化了离心压缩机叶轮。国内罗兴铨等<sup>[10]</sup>采用 NSGA-II 算法对某电站水轮机模型活动导叶的水力性能进行了优化设计, 优化后导叶流道的进出口总压损失减小了 26.97%, 导叶表面上的最低静压力值上升了 34.176%。郭涛等<sup>[11]</sup>以效率和扬程为优化目标, 应用遗传算法对 Dn1000 型潜油泵及 IS80-65-125 型清水泵的叶轮结构进行多目标优化。优化后 2 泵的水力性能有了明显提高, 在设计工况下扬程分别提高了 0.21 和 1.70 m, 效率分别提高了 1.9%和 2.3%。郑赞韬等<sup>[12]</sup>以离心泵的扬程、轴功率和效率为优化目标, 优化设计了某液体火箭发动机用离心泵叶轮。

上述借助优化算法来优化叶轮机械水力性能(扬程、效率等)的研究主要针对叶轮和蜗壳几何参数对水力性能的影响展开, 并未考虑声学性能的优化。且由于离心泵作透平几何参数众多, 作用机制各不相同, 各个参数之间存在交互影响, 因此有必要研究各个参数之间的相互关系以确定最优参数组合。本文综合考虑离心泵作透平的水力和声学性能, 从优化叶轮几何参数出发, 探讨叶轮主要形状参数对效率及声压级的影响, 分析显著影响因素之间的交互作用, 以获得高效低噪声目标函数与设计变量的关联式, 结合敏感性分析和响应面方法对叶轮进行优化, 并对比分析其与试验结果的差异, 以验证优化方法的有效性。

收稿日期: 2015-01-19 修订日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51309119, 51209106); 江苏大学高级人才科研启动基金(12JDG082, 15JDG052); 江苏高校优势学科建设工程项目; 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金资助项目(GK201403); 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室开放课题资助项目(szj2015-017)

作者简介: 代 翠, 女, 博士, 讲师, 主要从事能量回收设计理论及技术应用, 泵作透平振动噪声分析。镇江 江苏大学能源与动力工程学院, 212013。Email: daicui0113@163.com

\*通信作者: 董 亮, 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 助理研究员, 主要从事水泵 CFD 网格生成优化及振动噪声研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: edongliang@126.com

## 1 离心泵作透平的结构参数

以单级离心泵反转作透平为研究对象, 透平设计参数: 流量  $Q=90 \text{ m}^3/\text{h}$ , 水头  $H=35 \text{ m}$ , 转速  $n=1\ 500 \text{ r/min}$ , 比转速  $n_s=60$ 。原型离心泵作透平叶轮及蜗壳的主要结构参数(按泵工况命名)如表 1 所示。

表 1 模型离心泵作透平的主要参数

Table 1 Main parameters of model pump as turbine

名称 Name	参数 Parameter	数值 Value
叶轮 Impeller	叶轮进口直径 Impeller inlet diameter	102
	叶轮出口直径 Impeller outlet diameter	255
	叶片出口宽度 Blade outlet width $b_2/\text{mm}$	14
	进口安放角 Impeller inlet angle $\beta_1/(\circ)$	19.5
	出口安放角 Impeller outlet angle $\beta_2/(\circ)$	20
	叶片数 Blade number $z$	6
	叶片包角 Blade wrap angle $\varphi/(\circ)$	130
蜗壳 Volute	蜗壳基圆直径 Volute base diameter $D_3/\text{mm}$	266
	蜗壳出口宽度 Volute outlet width $b_3/\text{mm}$	26
	蜗壳出口直径 Volute outlet diameter $D_4/\text{mm}$	65

## 2 数值计算

### 2.1 流场与声场数值计算方法

全流场计算域包括叶轮、蜗壳、泄漏流道以及进水管和尾水管 5 部分。通过网格无关性检验后, 最终网格数为 2600 000。采用 CFX 软件计算离心泵作透平三维不稳定流动, 湍流模型采用  $k-\varepsilon$  模型, 对流项和湍流项采用高阶格式。进口设置为静压进口, 出口设置为质量出口<sup>[13]</sup>。计算域中所有表面都采用无滑移壁面条件, 选用可升级壁面函数, 粗糙度按实际加工精度设置为  $50\mu\text{m}$ , 叶轮网格如图 1 所示。对于非定常数值计算, 为足够分辨内部流场的非定常信息, 时间步长设置为  $1.1111\times 10^{-4}\text{s}$ , 即每个时间步长内叶轮转过约  $1^\circ$ <sup>[14]</sup>。当流场呈现出稳定的周期性变化后, 输出 4 个周期的叶轮及壳体表面的压力脉动时域信息。

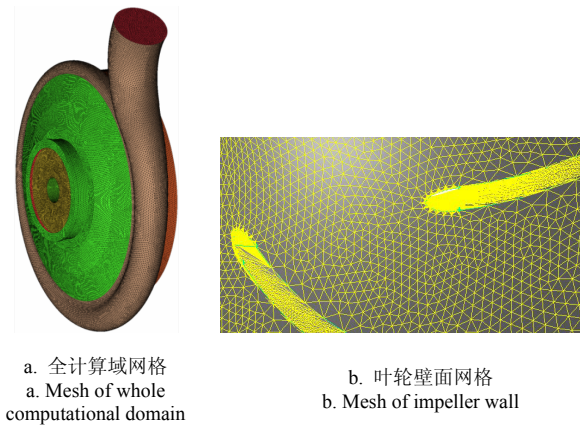


图 1 计算域网格

Fig.1 Mesh of computational domain

Ffowcs 和 Hawkings 推导出了物体在流体中作任意运动时形成的流动噪声计算方程, 即 FW-H 方程<sup>[15]</sup>:

$$\left( \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right) p' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (p_j n_j \delta(f)) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 v_j n_j \delta(f)) \quad (1)$$

式中:  $\left( \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right)$  为波动算子;  $\delta(f)$  为 Dirac 函数(描述物体表面的即时位置);  $n_j$  为表面法矢量;  $p_j n_j$  为物体作用于流体的单位面积法向力, Pa;  $p_{ij} = (p - p_0) \delta_{ij} - \tau_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  为 Kronecher 符号;  $v_j$  为流体速度, m/s。

在传统的 Lighthill 声类比理论中, 声场被人为地分为近场和远场, 声类比理论可以准确计算远场的辐射噪声, 但对近场的求解会产生较大误差。边界元法则与之不同, 它通过严格的数学推导将求解域内的微分方程转化为边界上的积分方程, 再利用数值方法将积分离散为简单的加权。由于边界元法求解流动噪声不需要紧致声源假定, 并通过对“奇点”的特殊处理, 使得其不必像传统 Lighthill 声学类比理论那样区分声学远近场, 可以求解整个计算域包括物体附近的声学信息。由于偶极子源为泵作透平内主要噪声源, 故仅考虑主要声源而忽略次要声源<sup>[16]</sup>。边界元方法的计算流程如图 2 所示。

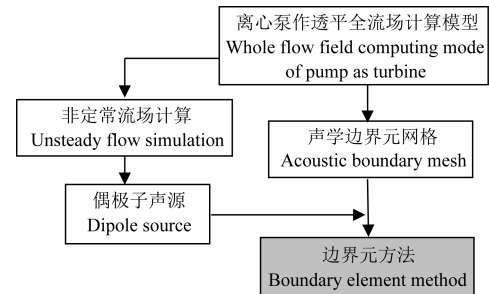


图 2 边界元方法计算流程

Fig.2 Calculating process of boundary element method

对离心泵作透平进行全流场数值计算, 水头 ( $H$ , m) 和水力效率  $\eta$  的计算方法如下<sup>[17]</sup>:

$$H = \frac{p_{in} - p_{out}}{\rho \cdot g} + \Delta z + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H} \quad (3)$$

式中:  $p_{in}$  为蜗壳进口总压, Pa;  $p_{out}$  为叶轮出口总压, Pa;  $\Delta z$  为进出口高度差, m;  $M$  为叶片工作面、背面和前后盖板内、外表面的力矩之和,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $\rho$  为液体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\omega$  为叶轮转动角速度,  $\text{rad}/\text{s}$ ;  $v_1$  透平进口水流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_2$  是透平出口水流速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

声压级 (sound pressure level, SPL) 可以反映声压脉动的强弱特性, 总声压级 (overall sound pressure, OASPL) 是声压级在 1/3 倍频程各个中心频率上声压级的叠加, 应用 A 级计权对不同频率声压级进行评价。以上各参数的计算公式分别为:

$$\text{SPL} = 20 \lg \left( \frac{p_{\text{rms}}}{p_{\text{ref}}} \right) \quad (4)$$

$$\text{OASPL} = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\text{SPL}_{f_i}}{10}} \right) \quad (5)$$

式中:  $p_{\text{rms}}$  为有效声压, Pa;  $p_{\text{ref}}$  为参考声压, Pa。为便

于与外部空气中噪声辐射特性进行对比, 内外场噪声均以空气的参考声压  $p_{\text{ref}}=20 \mu\text{Pa}$  为基准<sup>[18]</sup>;  $f_i$  为 1/3 倍频程对应中心频率。

2.2 数值方法可靠性说明

作者在文献[19]中给出了原型离心泵作透平计算与试验水力性能曲线以及设计工况下噪声计算频谱曲线与试验的对比, 分别如图 3 和 4 所示。由图 3 可以看出, 透平的性能计算值与试验值趋势基本一致, 在最优及大流量工况计算值与试验值吻合较好。由图 4 可以看出, 在 12.5~450 Hz 频段内, 主频声压级计算值与试验值基本一致, 宽带谱存在较大差异; 而 450~2 000 Hz 频段内, 壳体偶极子作用的宽带谱更接近试验, 叶频倍频下的声压级偏差也更小。通过 BEM 壳体偶极子作用的流动噪声来预测内场噪声可行。

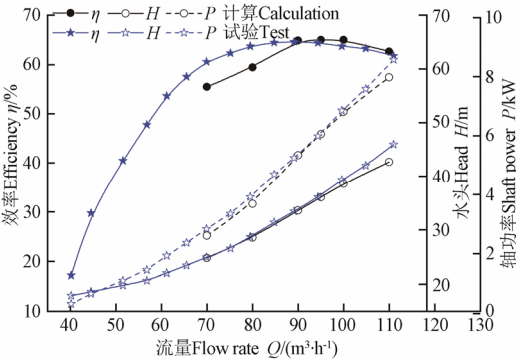


图 3 原型透平计算与试验水力性能对比<sup>[19]</sup>

Fig.3 Hydraulic performance comparison between calculation and test for original pump as turbine

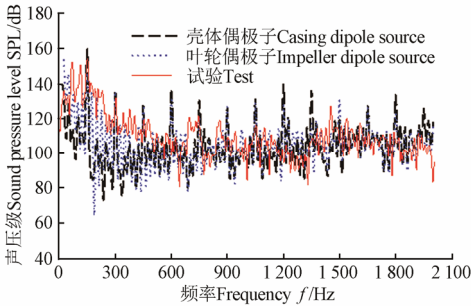


图 4 设计工况下计算与试验频谱曲线对比<sup>[19]</sup>

Fig.4 Comparison of spectrum versus frequency curves between calculated and experimental results under design condition

3 响应面优化试验及结果分析

响应面分析法 (response surface methodology, RSM) 是流体机械优化设计中的常用方法, 它通过代数和统计学方法建立设计变量与目标之间的近似模型, 进而来确定设计的最优解。响应面方法可以通过较少的试验获得设计变量与目标之间准确的相互关系, 并且可以用简单的代数形式表达出来, 给设计者带来了极大的方便<sup>[20]</sup>。以原型离心离心泵作透平为优化对象, 将噪声数值计算和 RSM 方法相结合, 对透平水力性能和内场噪声同时优化。具体流程如图 5。

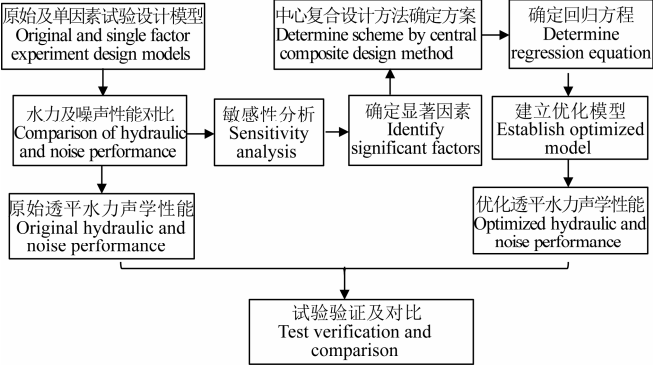


图 5 基于响应面法的透平水力 and 声学性能优化流程

Fig.5 Optimal process of hydraulic and noise performance for pump as turbine

3.1 叶轮主要几何参数敏感性分析

分析叶片进口安放角  $\beta_1$ 、叶片出口安放角  $\beta_2$ 、叶片出口宽度  $b_2$ 、叶片包角  $\varphi$ 、叶轮进口直径  $D_j$  以及叶片数  $z$  等 6 个叶轮主要几何参数对于离心泵作透平内场噪声的影响。采用单因素分析法时, 比较因素的几何参数及其范围如表 2 所示。

表 2 单因素试验各因素几何参数

模型 Model	进口 安放角 Impeller inlet angle $\beta_1/(^\circ)$	出口 安放角 Impeller outlet angle $\beta_2/(^\circ)$	叶片出 口宽度 Blade outlet width $b_2/\text{mm}$	叶片 包角 Blade wrap angle $\varphi/(^\circ)$	叶轮进 口直径 Impeller inlet diameter $D_j/\text{mm}$	叶片数 Blade number $z$
1	22.5	20	14	130	102	6
2	28.5	20	14	130	102	6
3	19.5	30	14	130	102	6
4	19.5	40	14	130	102	6
5	19.5	20	12	130	102	6
6	19.5	20	16	130	102	6
7	19.5	20	14	100	102	6
8	19.5	20	14	115	102	6
9	19.5	20	14	130	100	6
10	19.5	20	14	130	105	6
11	19.5	20	14	130	102	8
12	19.5	20	14	130	102	9

对于每一个几何参数需要了解它可能对透平噪声产生多大影响, 以及透平噪声对这些参数的变化能产生多大响应。要评价因素变化对指标的影响程度, 需要某些被普遍接受的准则。敏感性分析正是从定量分析的角度研究某一个或一组关键指标对某因素变化所致的响应量变化程度的一种分析技术, 其实质是通过逐一改变相关变量来解释关键指标受这些因素变动影响大小的规律<sup>[21]</sup>。用  $S$  表示敏感度, 定义为<sup>[22]</sup>:

$$S = \sum_{i=1}^2 \left| \frac{\Delta y_i}{y_0} / \frac{\Delta x_i}{x_0} \right| \quad (6)$$

式中:  $\Delta y_i$  表示总声压级的变化量;  $y_0$  表示原始模型的总声压级;  $\Delta x_i$  表示因素的变化量;  $x_0$  表示原始模型对应因素参数。  $S$  越大, 说明总声压级对该因素敏感度越高。敏感度系数可能因各因素变化率取值不同而有所变化, 但其数值大小并不是计算该项指标的目的, 重要的是各因素敏感度系数的相对值, 借此了解不确定因素的相对影

响程度，以选出敏感度系数比较大的不确定因素。

表 3 给出了设计工况叶轮主要几何参数改变对总声压级影响的敏感度系数。进口安放角  $\beta_1$  和出口安放角  $\beta_2$  的灵敏度系数低于 0.50，对噪声的影响程度较小。出口宽度  $b_2$ 、叶片包角  $\varphi$ 、进口直径  $D_j$  和叶片数  $z$  4 个因素，其敏感度系数均超过了 0.50，即在各自参数范围内，透平噪声特性能够得到较大程度的改善。为此，筛选出这 4 个因素作为敏感因素，进行下一步的多目标优化以降低透平的噪声水平。

表 3 叶轮几何参数敏感度

Table 3 Sensitivity of impeller geometric parameters

因素 Factor	总敏感度 Total sensitivity
进口安放角 Impeller inlet angle $\beta_1/(\circ)$	0.08
出口安放角 Impeller outlet angle $\beta_2/(\circ)$	0.18
叶片出口宽度 Blade outlet width $b_2/\text{mm}$	1.26
叶片包角 Blade wrap angle $\varphi/(\circ)$	1.00
叶轮进口直径 Impeller inlet diameter $D_j/\text{mm}$	7.92
叶片数 Blade number $z$	0.51

### 3.2 响应面试验设计

应用 Design Expert 软件采用中心复合设计方法 (central composite design, CCD)，对上节筛选出的 4 个重要因素进行试验设计，见表 4。根据试验设计，共进行 30 次试验。其中 24 个试验点是析因点，6 个试验点为区域的中心点，重复计算用以估计试验误差。

表 4 中心复合设计各因素水平

Table 4 Factor levels of CCD

因素 Factor	编码水平 Code level				
	-2	-1	0	1	2
叶轮进口直径 Impeller inlet diameter $D_j/\text{mm}$	95	98	101	104	107
叶片出口宽度 Blade outlet width $b_2/\text{mm}$	12	13	14	15	16
叶片数 Blade number $z$	4	6	8	10	12
叶片包角 Blade wrap angle $\varphi/(\circ)$	70	90	110	130	150

### 3.3 响应面试验结果

表 5 为试验设计结果。

表 5 中心复合设计结果

Table 5 Results of central composite design

模型 Model	叶轮进口 直径 Impeller inlet diameter $D_j/\text{mm}$	叶片出 口宽度 Blade outlet width $b_2/\text{mm}$	叶片数 Blade number $z$	叶片包 角 Blade wrap angle $\varphi/(\circ)$	效率 Efficiency $\eta/\%$	总声压级 Overall sound pressure level $L_a/\text{dBA}$	模型 Model	叶轮进口 直径 Impeller inlet diameter $D_j/\text{mm}$	叶片出 口宽度 Blade outlet width $b_2/\text{mm}$	叶片数 Blade number $z$	叶片包 角 Blade wrap angle $\varphi/(\circ)$	效率 Efficiency $\eta/\%$	总声压级 Overall sound pressure level $L_a/\text{dBA}$
1	0	2	0	0	64.22	153.51	16	1	1	1	1	66.64	154.16
2	1	-1	-1	-1	63.50	142.08	17	0	0	2	0	66.11	138.91
3	-1	-1	-1	-1	63.69	142.93	18	0	0	0	0	66.64	152.03
4	0	-2	0	0	63.34	153.38	19	-1	-1	1	-1	66.90	154.26
5	0	0	0	0	66.64	152.03	20	-1	-1	-1	1	64.68	139.30
6	1	1	1	-1	66.31	154.46	21	0	0	0	0	66.64	152.03
7	0	0	0	0	66.64	152.03	22	1	1	-1	1	65.53	140.22
8	0	0	-2	0	64.00	149.56	23	-2	0	0	0	67.14	152.08
9	2	0	0	0	64.25	152.04	24	-1	1	1	-1	67.00	154.95
10	-1	1	1	1	63.91	154.04	25	-1	1	-1	1	65.51	142.91
11	-1	1	-1	-1	63.85	141.28	26	1	1	-1	-1	63.44	135.63
12	0	0	0	2	65.73	153.29	27	0	0	0	-2	64.32	153.01
13	1	-1	-1	1	64.44	139.57	28	-1	-1	1	1	64.64	155.20
14	1	-1	1	-1	65.84	153.32	29	0	0	0	0	66.64	152.03
15	0	0	0	0	66.64	152.03	30	1	-1	1	1	65.57	153.85

采用三阶多项式拟合得到水力效率基于实际因子水平的回归方程，表示为：

$$\eta = -5377.40 + 54.51D_j + 760.94b_2 + 1.30z - 0.33\varphi - 7.35D_j \cdot b_2 + 0.03D_j \cdot z + 6.03 \times 10^{-3}D_j \cdot \varphi - 0.03b_2 \cdot z + 4.95 \times 10^{-3}b_2 \cdot \varphi - 0.02z \cdot \varphi - 0.02D_j^2 - 27.35b_2^2 - 0.09z^2 - 9.28 \times 10^{-4}\varphi^2 + 0.26D_j \cdot b_2^2 \quad (7)$$

总声压级基于实际因子水平的回归方程，表示为：

$$L_a = -43876.04 + 871.06D_j + 13.32b_2 + 5417.39z - 0.72\varphi - 0.12D_j \cdot b_2 - 107.21D_j \cdot z + 4.44 \times 10^{-3}D_j \cdot \varphi + 0.15b_2 \cdot z + 0.03b_2 \cdot \varphi + 2.96 \times 10^{-4}z \cdot \varphi - 4.31D_j^2 - 0.20b_2^2 - 0.63z^2 - 6.95 \times 10^{-4}\varphi^2 + 0.53D_j \cdot b_2^2 \quad (8)$$

为了保证模型的适应性和准确性，还须对其进行预测能力的评估，一般是对响应曲面方程进行显著性检验，常采用以下复相关系数  $R^2$  和校正决定系数  $R_{\text{adj}}^2$  来评估响应面的逼近程度：

$$R^2 = \frac{S_R}{S_T} = \frac{S_R - S_E}{S_T} = 1 - \frac{S_E}{S_T} \quad (9)$$

式中： $S_T$  为总平方和， $S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ； $S_R$  为回归平方和；

$S_E$  为残差平方和， $S_E = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$ ； $\bar{y}$  为响应值的均值；

$\hat{y}$  为响应面的预测值。 $R^2$  是完全拟合的度量值，反映了响应面符合给定数据的程度，通常要求  $R^2$  值在 0.9 以上。

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{S_E / (n - n_p - 1)}{S_T / (n - 1)} = 1 - \frac{n - 1}{n_p - 1} (1 - R^2) \quad (10)$$

式中： $n$  为样本数量； $n_p$  为优化变量个数， $R_{\text{adj}}^2$  表示全部自变量与因变量的相关程度，校正决定系数越接近 1 回归效果就越好。仅仅  $R^2$  有较大的值也不能说明模型拟合



的很好, 因为如果给原有模型增加其它的项, 无论该项是否具有统计意义, 总能使  $R^2$  的值增加。

对拟合的回归方程进行方差分析, 结果见表 6 所示。可以看出, 水力效率回归方程复相关系数  $R^2=0.9261$ , 校正决定系数  $R^2_{adj}=0.8470$ , 两者都接近 1, 可以认为拟合得到的回归方程有意义, 可以用来预测透平的水力效率。总声压级回归方程  $F$  值为 11.25, 说明模型对实际情况拟合较好。Prob( $P$ )> $F$  值小于 0.0001, 表明该模型高度显著可用来进行响应值预测, 试验方案设置正确。复相关系数  $R^2=0.9234$ 、校正决定系数  $R^2_{adj}=0.8414$ , 两者都接近 1, 可以认为拟合得到的回归方程有意义, 可以用来预测透平的内场总声压级。CV=1.64%, 精密度达到 11.050, 表明试验的可信度和精确度高且有效。

3.4 影响噪声的参数间交互作用

由于本文将内场噪声总声压级作为透平噪声控制问题的主要考察指标, 将次要的分析指标即透平效率作为约束条件, 因此图 6 给出了影响目标函数总声压级的参

数间交互作用, 分别是进口直径  $D_j$  和出口宽度  $b_2$ 、进口直径  $D_j$  和叶片数  $z$ 、进口直径  $D_j$  和叶片包角  $\varphi$ 、出口宽度  $b_2$  和叶片数  $z$ 、出口宽度  $b_2$  和叶片包角  $\varphi$  以及叶片数  $z$  和叶片包角  $\varphi$  间的相互作用。

表 6 水力效率回归方程的方差分析  
Table 6 Variance analysis of efficiency regression equation and OASPL regression equation

项目 Item	类型 Type	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F 值 F-value	Prob(P)>F
水力效率 Efficiency	回归 regression	15	43.82	2.92	11.70	<0.0001
	误差 Error	14	3.50	0.25		
	失拟性	9	3.50	0.39		
	总和 Sum	29	47.32			
			$R^2=0.9261, R^2_{adj}=0.8470, CV=0.76\%, Adeq\ precision=12.401$			
总声压级 OASPL	回归 regression	15	1011.11	67.41	11.25	<0.0001
	误差 Error	14	83.85	5.99		
	失拟性	9	83.85	9.32		
	总和 Sum	29	1094.97			
			$R^2=0.9234, R^2_{adj}=0.8414, CV=1.64\%, Adeq\ precision=11.050$			

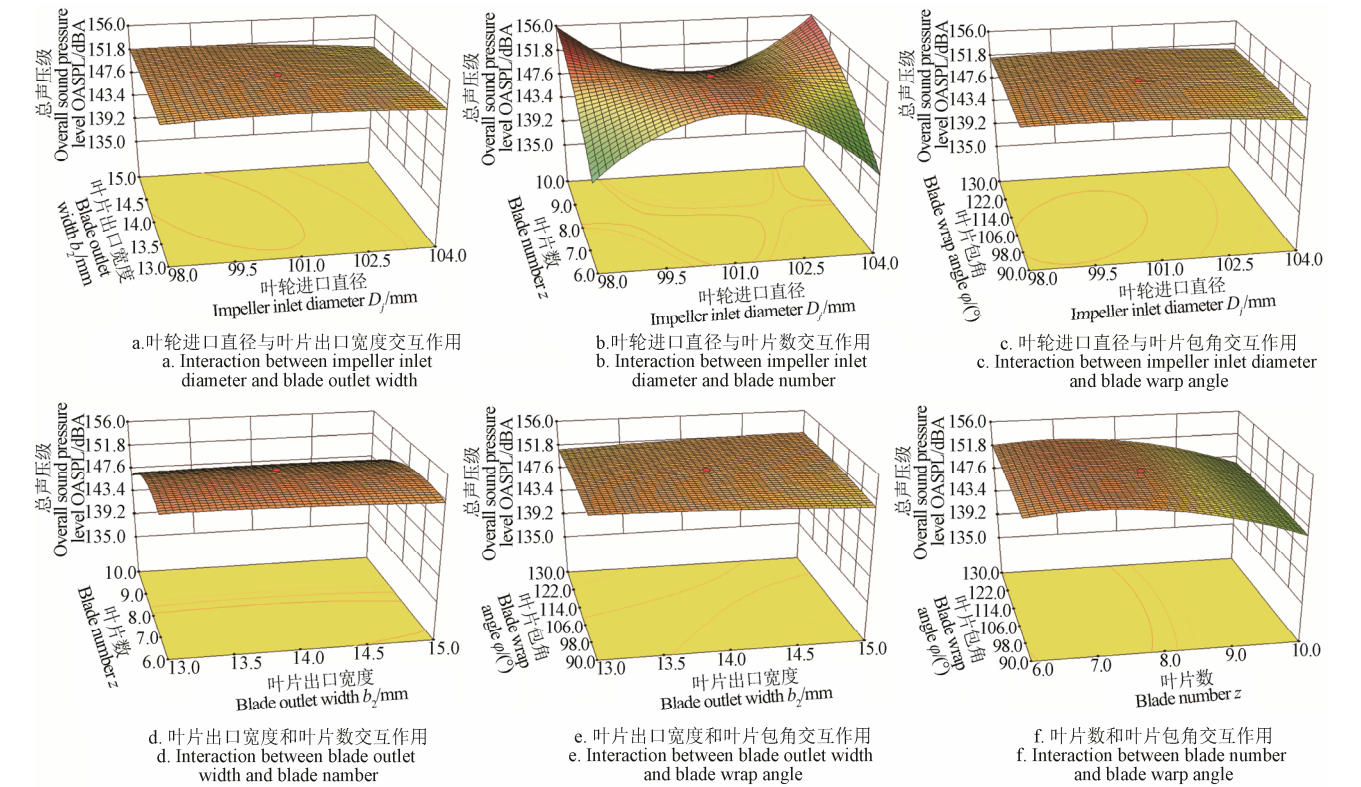


图 6 影响总声压级的参数间的交互作用  
Fig.6 Interaction between parameters affecting OAPL

由图 6a 可以看出, 进口直径和出口宽度变化引起的透平总声压级变化较小, 这两个因素组合在  $z=8$  和  $\varphi=110^\circ$  情况下对透平总声压级的影响都较小。此外, 等高线呈现较大曲率的椭圆形说明进口直径和出口宽度交互影响显著。由图 6b 可以看出, 进口直径和叶片数对总声压级影响较为复杂。当进口直径处于中间水平 ( $D_j=101\text{ mm}$ ) 时, 总声压级随叶片数增加而降低, 而进口直径在其它区域时, 总声压级随叶片数增加而增加。

等高线表明进口直径和叶片数交互影响不显著。由图 6c 可以看出, 进口直径和叶片包角曲面坡度比较缓慢, 这两个因素在  $b_2=14\text{ mm}$  和  $z=8$  情况下对总声压级影响较小; 且等高线呈现曲率较小的椭圆, 进口直径和叶片包角交互影响不显著。由图 6d 可以看出, 叶片出口宽度和叶片数曲面坡度比较缓慢, 2 个因素在  $D_j=101\text{ mm}$  和  $\varphi=110^\circ$  情况下对透平总声压级的影响较小。沿叶片数轴的等高线密度变化相对于叶片出口宽度轴的变化更大,

说明叶片数对透平总声压级的影响比叶片出口宽度显著。由图 6e 可以看出, 当出口宽度处于低水平时 ( $b_2=13\text{ mm}$ ), 总声压级随叶频包角增加而降低, 当叶片包角处于低水平时 ( $\varphi=90^\circ$ ), 总声压级随出口宽度增加而降低, 两者最佳配合位于对角线附近。由图 6f 可以看出, 随着叶片数增加透平的总声压级逐渐降低; 沿叶片数轴的等高线密度变化相对于叶片包角轴的变化更大, 说明在  $D_f=101\text{ mm}$  和  $b_2=8\text{ mm}$  情况下叶片数对总声压级的影响比叶片包角显著。

3.5 试验验证

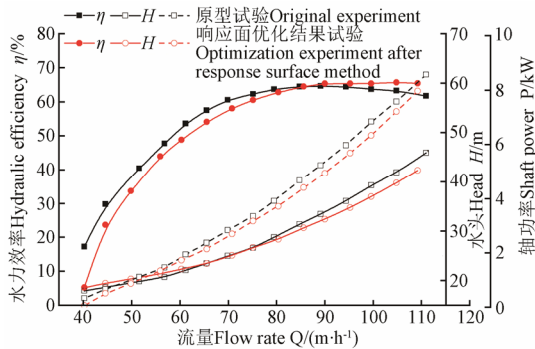
在约束条件下联立求解水力效率和总声压级的回归方程 (7) 和 (8), 可以得到透平水力效率不低于原始透平情况下, 使透平声压级最小的 4 个因素的值, 其参数为  $D_f=101\text{ mm}$ ,  $b_2=16\text{ mm}$ ,  $z=12$ ,  $\varphi=92^\circ$ , 其余参数为  $\beta_1=19.5^\circ$ ,  $\beta_2=20^\circ$ 。

表 7 给出了  $90\text{ m}^3/\text{h}$  工况经响应面优化以及试验的水力效率和内场声压级结果。可以看出, 对于水力效率, 响应面优化结果与试验的误差为  $-0.49\%$ ; 对于内场噪声声压级, 响应面优化结果与试验的误差为  $-9.57\%$ 。经试验验证,  $90\text{ m}^3/\text{h}$  下经响应面优化后透平水力效率提高  $0.72$  个百分点,  $1/3$  倍频程声压级降低  $4.95\text{ dBA}$ 。

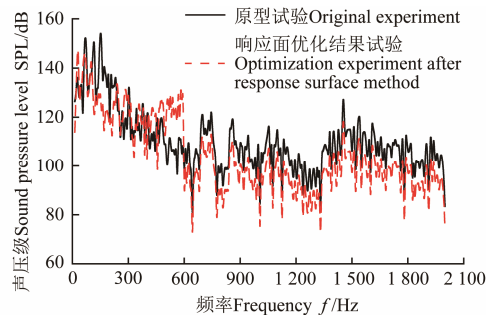
表 7 响应面优化结果验证  
Table 7 Validation of optimized results by response surface method

项目 Item	效率 Efficiency $\eta/\%$	总声压级 Overall sound pressure/dBA
原型试验 Prototype experiment	64.60	159.32
响应面优化结果 Optimization after response surface method	65.00	139.6
响应面优化结果试验 Optimization experiment after response surface method	65.32	154.37

图 7a 给出了经响应面优化与原型透平的水力性能试验曲线。可以看出, 经响应面优化后的透平最高水力效率点向大流量偏移, 最高水力效率为  $65.70\%$ , 对应的流量为  $104.9\text{ m}^3/\text{h}$ 。相比原型透平, 优化后透平在大于  $85\text{ m}^3/\text{h}$  的大流量区水力效率有所提高, 平均提高  $1.98$  个百分点。图 7b 给出了  $90\text{ m}^3/\text{h}$  工况经响应面优化试验的出口声压频响曲线, 并与原型透平声压频响曲线进行了对比。可以看出, 各离散频率及宽频下, 优化后透平声压级均有一定程度的下降。



a. 水力性能对比  
a. Comparison of hydraulic performance curves



b. 声压频响曲线对比  
b. Comparison of spectrum versus frequency curves

图 7 响应面优化与原型透平水力性能和声压频响曲线对比

Fig.7 Comparison of hydraulic performance curves and spectrum versus frequency curves between prototype and optimization

比较优化模型与原模型可知, 叶片进出口角没变化, 进口直径变化不大, 出口宽度增加为  $16\text{ mm}$ , 叶片数增加为  $12$ , 叶片包角减小为  $92^\circ$ 。这主要是因为出口宽度的增加使得叶轮出口面积增加, 减小了透平的理论水头和轴功率; 叶片数的增加减小了叶轮内的速度梯度, 降低了叶轮内部水力损失, 然而叶片数的增加也会增大叶片表面摩擦损失; 叶片包角的减小会进一步减小叶轮内部的速度梯度且使叶轮流道变短, 从而减小了叶轮内部摩擦损失和水力损失。另一方面, 出口宽度的增加有利于消除二次流的旋涡, 但过大的出口宽度会造成回流, 使得叶轮和蜗壳的动静干涉作用增强; 叶片数的增加削弱了叶轮内的旋涡区; 而叶片包角的减小会增加作用于叶轮和壳体上的径向力。因此, 在三者的共同作用下, 离心泵作透平内效率较好, 且动静干涉产生的压力脉动较低, 使得流体激励振动噪声幅值维持在一个较低水平。

4 结 论

将敏感性分析和响应面法应用于离心泵作透平噪声性能的优化, 筛选出对噪声影响显著的叶轮几何参数, 分析影响噪声的参数间交互作用, 确定最优参数组合。得到结论如下:

1) 在对比分析不同叶片进口安放角、叶片出口安放角、叶片出口宽度、叶片包角、叶轮进口直径以及叶片数等 6 个叶轮主要几何参数对离心泵作透平水力性能和噪声特性影响的基础上, 建立了同时考虑变量变化范围及幅值的噪声灵敏度分析模型, 进而筛选出了 4 个对透平噪声影响显著的参数, 即叶片出口宽度、叶片包角、叶轮进口直径和叶片数。

2) 采用 CCD 方法对筛选出的 4 个重要参数进行试验设计 (共计 30 组试验方案), 建立了用于透平水力性能和噪声特性的多元回归模型, 同时运用方差分析检验

了预测模型的拟合度。结果表明:回归模型对实际情况拟合较好,能够反映参数与响应值之间的相关性,试验设计科学合理。

3) 通过求解所建立的多元回归方程,得到了总声压级最低而效率不低于原模型的最优参数组合,经试验验证,效率平均提高 1.98 个百分点,1/3 倍频程声压级降低 4.95 dBA。

#### [参 考 文 献]

- [1] 论立勇, 谢英柏, 杨先亮. 基于管输天然气压力能回收的液化调峰方案[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 114—116.  
Lun Liyong, Xie Yingbo, Yang Xianliang. Lng peak-shaving proposal based on pressure energy recovery of pipe gas[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 114—116. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨军虎, 张雪宁, 王晓晖. 基于离心泵的多级液力透平的性能预测与数值模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(2): 42—46.  
Yang Junhu, Zhang Xuening, Wang Xiaohui. Performance prediction and numerical simulation of hydraulic turbine based on multi-stage centrifugal pump[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(2): 42—46. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王松岭, 论立勇, 谢英柏, 等. 基于天然气管网压力能回收的联合循环构思[J]. 热能动力工程, 2005, 20(6): 628—631.  
Wang Songling, Lun Liyong, Xie Yingbo, et al. Combined cycle system concept for the recovery of pressure energy of a natural-gas pipe network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(6): 628—631. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郑志, 王树立, 王婷, 等. 天然气输配过程流体压力能回收技术现状与展望[J]. 天然气与石油, 2009, 27(1): 11—15.  
Zheng Zhi, Wang Shuli, Wang Ting, et al. Present status and prospect of fluid pressure energy recovery in natural Gas transmission and distribution[J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(1): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王晓鹏. 遗传算法及其在气动优化设计中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.  
Wang Xiaopeng. Genetic Algorithm and Its Application in the Aerodynamic Optimization Design Research[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [6] Wahba W A, Tourlidakis A. A genetic algorithm applied to the design of blade profiles for centrifugal pump impellers[C]. 15th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, California, USA, 2001: 2001—2582.
- [7] Benini E, Tourlidakis A. Design optimization of vaned diffusers for centrifugal compressors using genetic algorithms[J]. AIAA Paper, 2001, 11: 2001—2012.
- [8] Kim J H, Choi J H, Husain A, et al. Multi-objective optimization of a centrifugal compressor impeller through evolutionary algorithms[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2010, 224(5): 711—721.
- [9] Duccio B, Andrea A, Micro E, et al. Analysis and optimization of transonic centrifugal compressor impellers using the design of experiments technique[C]. ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air, New Orleans, USA, 2002: 1089—1098.
- [10] 罗兴铨, 郭鹏程, 朱国俊, 等. 基于 NSGA-II 算法的水轮机活动导叶多目标优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 369—373.  
Luo Xingqi, Guo Pengcheng, Zhu Guojun, et al. Multi-object optimum design for hydraulic turbine guide vane based on NSGA-II algorithm[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 369—373. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郭涛, 李国君, 田辉, 等. 基于遗传算法的离心泵叶轮参数化造型及优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 384—388.  
Guo Tao, Li Guojun, Tian Hui, et al. Parametric modeling and optimization design of centrifugal pump impeller based on genetic algorithm[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 384—388. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郑赞韬, 蔡国飙, 尹贵增. 液体火箭发动机离心泵叶轮的多目标优化设计[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 14—18.  
Zheng Yuntao, Cai Guobiao, Yin Guizeng. Multi-objective optimization and design for centrifugal impeller of rocket engine pumps[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(1): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [13] Spence R, Amaral-Teixeira J. Investigation into pressure pulsations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial tests[J]. Computers & Fluids, 2008, 37(6): 690—704.
- [14] Dai Cui, Kong Fanyu, Dong Liang. Pressure fluctuation and its influencing factor analysis in circulating water pump[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(1): 149—155.
- [15] Ffowcs W J, Hawkings D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1969, 264(1151): 321—342.
- [16] 丁剑, 刘厚林, 王勇, 等. 叶片出口角影响离心泵噪声辐射数值研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 122—127.  
Ding Jian, Liu Houlin, Wang Yong, et al. Numerical study on the effect of blade outlet angle on centrifugal pump noise[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 122—127. (in Chinese with English abstract)
- [17] 代翠. 离心泵作透平流体诱发噪声特性理论数值与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.  
Dai Cui. Flow-induced Noise Characteristics for Centrifugal Pump as Turbine: Theoretical, Numerical and Experimental Investigations[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [18] 詹福良, 徐俊伟. Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.

- [19] 董亮, 代翠, 孔繁余, 等. 叶片出口安放角对离心泵作透平噪声的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 69—75.  
Dong Liang, Dai Cui, Kong Fanyu, et al. Impact of blade outlet angle on acoustic of centrifugal pump as turbine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 69—75. (in Chinese with English abstract)
- [20] Khuri A I, Mukhopadhyay S. Response surface methodology[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(2): 128—149.
- [21] Miles J, Cummins R P, French D D, et al. Landscape sensitivity: an ecological view[J]. Catena, 2001, 42(2/3/4): 125—141.
- [22] Usher M B. Landscape sensitivity: From theory to practice[J]. Catena, 2001, 42(2/3/4): 375—383.

## Hydraulic and acoustic property optimization for centrifugal pump as turbine based on response surface method

Dai Cui<sup>1</sup>, Kong Fanyu<sup>2</sup>, Dong Liang<sup>2\*</sup>, Wang Jiaqiong<sup>2</sup>, Bai Yuxing<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

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

**Abstract:** As a way of energy saving by recovery of residual pressure, centrifugal pump as turbine (PAT) has been widely used in many fields. As PAT is gradually developed for high power, flow-induced noise becomes one of the most important issues that cause negative effect on reliability. In order to improve both hydraulic and acoustic performances of PAT, an optimization method combining sensitivity analysis and response surface was established. Firstly, through comparison of impeller parameter impact on hydraulic and noise performances, the geometric parameters with great influence on acoustic were filtered based on sensitivity analysis. Further more, with the efficiency and A-weighted overall sound pressure level (OASPL) as target, the multiple regression models connecting variables and multi-objective functions were constructed. Optimization for high efficiency and low OASPL of PAT was carried out with the focused research on the interaction among key parameters. During the investigations, a synchronous acquisition of hydraulic parameters and noise signals were realized on the basis of INV3020C data acquisition system and hydraulic test system in an open test loop. The liquid was pressurized through booster pump, and then impacted the turbine's impeller to make it rotate. The dynamometer consumed and measured the turbine's energy. The operating condition was adjusted by regulating the converter's frequency to change the booster pump's capacity. The flow-induced noise signals were collected using hydrophone at a sampling frequency of 25,600Hz. The signals were amplified and recorded by INV3020C data acquisition system, and Fast Fourier Transform was used to compute the spectra with the Hanning window for reducing the spectrum leakage. The hydraulic performance (such as head, shaft power and hydraulic efficiency) was calculated. The unsteady numerical simulation was performed to obtain noise-generating fluid forces using  $k-\varepsilon$  turbulence model. After that, a time series of pressure fluctuations at fluid-wall interface was obtained. Then, the boundary element method (BEM) was applied to study flow-borne noise caused by impeller and casing dipole sources in interior acoustic. Validated by experiments, the flow-borne interior noise prediction by  $k-\varepsilon$  turbulence model combined with BEM acting by casing dipole source was feasible. The results showed that the factors including impeller inlet diameter, blade outlet width, blade number as well as blade wrap angle had a great influence on OASPL in interior noise. The interaction between inlet diameter and outlet width was significant, while it was not obvious between inlet diameter and blade number, inlet diameter and wrap angle. The impact of blade number on OASPL was more significant than outlet width. The best match of outlet width and wrap angle was near the diagonal. The impact of blade number on OASPL was more significant than wrap angle. After variance analysis on regression equation, the response surface model of hydraulic efficiency and OASPL could reflect the correlation between parameter and response value. According to the experiments, after optimization using this proposed method, one third octave OASPL of the PAT was reduced by 4.25dBA with efficiency increase of 1.98%. All these showed that the response surface method can improve acoustic performance without losing the original hydraulic performance.

**Key words:** centrifugal pumps; turbines; acoustic properties; optical design; response surface method; hydraulic performance