

双流道泵蜗壳多目标多学科设计优化^{*}

赵斌娟 仇 晶 赵尤飞 张成虎 陈汇龙

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为实现同时提高双流道泵水力性能和结构性能的研究目标,采用均匀试验设计、高精度流固耦合计算、人工神经网络建模以及多目标遗传寻优相结合的方法,选取蜗壳的进口直径、进口宽度、隔舌安放角和扩散段长度为优化变量,利用均匀试验设计方法设计了50组试验,通过流固耦合计算方法得到双流道泵设计工况点的效率以及蜗壳段的最大应力,并以此为优化目标,通过BP人工神经网络训练建立近似函数,设计了离心泵专用的多目标多学科遗传寻优策略对目标函数进行寻优,得到了蜗壳几何参数组合的Pareto前沿。结果表明:相对于原始方案,优化方案的扩压效果明显改善,并且减少了隔舌处及扩散段的回流现象;优化方案的效率得到提升;优化方案的最大应力和最大应力点的平均振动速度显著降低。

关键词: 双流道泵蜗壳 均匀试验设计 BP神经网络 多目标遗传算法 多学科优化 流固耦合计算

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0096-06

Multi-objective and Multidisciplinary Optimization of Double-channel Pump

Zhao Binjuan Qiu Jing Zhao Youfei Zhang Chenghu Chen Huilong

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to improve the hydraulic and structural performances of the double-channel pump, the uniform test design, fluid-structure interaction calculation, combination of artificial neural network and multi-objective genetic optimization method were applied. The inlet diameter, inlet width, tongue angle and diffusion length were selected as optimization variables, which were then used to produce 50 tests by using the method of uniform test design. The efficiency and maximum stress, attained through fluid-structure interaction in a volute at the design condition, were chosen as the optimization goals and then were applied to get the approximate function by BP neural network training. Special multi-objective genetic optimization strategy was designed to solve the function and search the optimized results which are called the Pareto frontiers of geometry parameters of the volute. During the process of searching the Pareto frontiers, the efficiencies, heads and stresses were chosen as constrains to get the final two optimizations. The results showed that compared with the original case, pressure diffusion effects of the optimized cases were improved obviously, backflow phenomena was reduced, and the efficiencies of cases opt1 and opt2 were increased, while the maximum stresses and the mean vibration velocities of opt1 and opt2 were depressed. The results indicated that the proposed multi-objective and multidisciplinary optimization method can obviously improve the hydraulic and structural performances of double channel pump, meanwhile, it has some reference value for optimization researches on other turbomachineries.

Key words: Volute of double-channel pump Uniform test design BP neural network Multi-objective genetic algorithm Multidisciplinary optimization Fluid-structure interaction calculation

收稿日期: 2015-08-19 修回日期: 2015-10-30

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51109094)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目和江苏省高校研究生实践创新计划资助项目(SJLX15_0493)

作者简介: 赵斌娟,副教授,主要从事流体机械内部复杂多相流动和优化设计研究,E-mail: zhaobinjuan@mail.ujs.edu.cn

引言

在离心泵中,水力损失以叶轮内的损失最大,然而,蜗壳中的损失也不可忽视, Van Esch 等^[1]研究发现蜗壳可以影响整级泵 20% 的水力损失。Benra 等^[2-3]利用流场计算与试验研究相结合的手段对一无堵塞离心泵进行了研究,发现蜗壳隔舌位置的变化会对无堵塞离心泵的内部流场产生较大影响。Dong 等^[4]通过试验测得蜗壳内流场的压力分布变化、速度分布及叶轮与流体间的作用力,揭示了不同流量下隔舌间隙对离心泵蜗壳内部压力脉动、非定常流场和振动噪声的影响。

不仅如此,蜗壳参数的改变也会对离心泵的结构性能产生一定影响。Jin 等^[5]针对一些泵在长时间运行后蜗壳隔舌附近出现的疲劳破损现象对材料内部性能进行了研究。张德胜等^[6]使用流固耦合方法研究了单一蜗壳的振动特性,发现蜗壳基圆直径与叶轮外径的比值对蜗壳的振动特性有明显的影 响。由此可见,蜗壳的几何参数不仅影响水力性能,对结构性能也有较大作用,因此对离心泵蜗壳的形状优化也不容忽视。

目前,随着计算机技术和计算流体力学(CFD)的快速发展,将 CFD 分析和先进优化算法相结合的数值优化方法已成为叶轮机械优化设计的研究热点。已用于叶轮机械的优化算法中,遗传类算法因其良好的全局性、鲁棒性和移植性成为主流算法^[7-11]。此外,由于离心泵设计实质是一个覆盖了水力和结构等多个学科的复杂系统工程,发展考虑各学科间耦合效应的离心泵优化设计方法是必然趋势。多学科设计优化(MDO)就是这样一种解决复杂系统工程设计中耦合与权衡问题,同时对整个系统工程进行综合优化设计的有效方法,目前已被成功应用于许多研究领域^[12-15]。

针对目前双流道泵中存在效率低以及蜗壳内可能出现的应力集中问题,本文以一双流道泵的水力性能和结构性能为优化目标,结合多目标遗传优化算法(MOGA)、人工神经网络建模和均匀试验设计方法,对双流道泵的蜗壳进行多目标多学科设计优化研究。

1 原始蜗壳几何参数

本文所研究双流道泵的主要设计参数为:流量 $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=10\text{ m}$,转速 $n=1\,450\text{ r/min}$,比转数 $n_s=110.9$ 。其主要水力部件之一蜗壳为本文的优化对象,原始蜗壳的结构如图 1 所示,主要几何参数取值如表 1 所示;另一主要水力部件叶轮的几

何参数根据课题组已取得的优化研究结果确定^[16-17]。

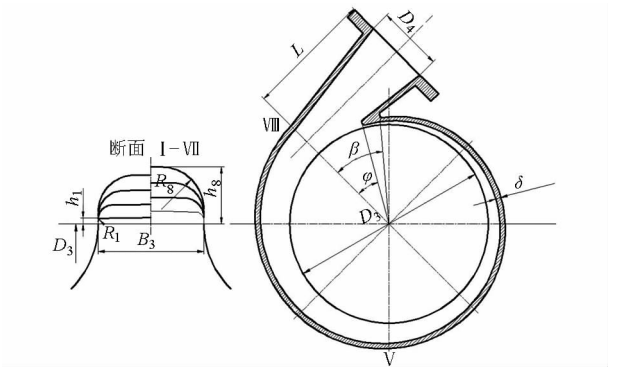


图 1 原始蜗壳结构示意图
Fig.1 Sketch of initial volute structure

表 1 原始蜗壳几何参数
Tab.1 Geometry parameters of initial volute

参数	数值	参数	数值
进口宽度 B_3/mm	74	外隔舌位置 $\beta/(\text{^\circ})$	40
进口直径 D_3/mm	235	蜗壳壁厚 δ/mm	5
出口直径 D_4/mm	80	法兰外径 D_5/mm	190
扩散段长度 L/mm	150	法兰厚度 h/mm	18
隔舌安放角 $\varphi/(\text{^\circ})$	30		

2 多目标多学科优化策略

2.1 优化变量

因为不同几何参数对双流道泵蜗壳的水力性能和结构性能有着不同程度的影响,本文首先根据课题组已做正交试验研究结果^[16-17],选取表 1 中的蜗壳进口直径 D_3 、进口宽度 B_3 、隔舌安放角 φ 和扩散段长度 L 这 4 个几何参数为优化变量,再根据泵技术手册中速度系数法系数的确定方法决定各优化变量的取值范围,并在此基础上适当扩大,原则是保证模型能成功建立,优化变量及取值范围为

$$\boldsymbol{X}=[D_3\ B_3\ \varphi\ L]^T\ (X_1\leqslant\boldsymbol{X}\leqslant\boldsymbol{X}_2)$$

$$\boldsymbol{X}_1=[215\ 65\ 20\ 120]^T$$

$$\boldsymbol{X}_2=[245\ 85\ 36\ 200]^T$$

2.2 目标函数

由于叶轮不变,蜗壳变化对双流道泵扬程的影响不大,基本能满足使用要求。应对目前节能要求,并结合工程上出现的蜗壳隔舌靠近盖板处出现的疲劳断裂现象,选择设计工况下双流道泵的效率 η 和蜗壳隔舌处的最大应力 σ 分别作为水力和结构性能的优化目标。因为蜗壳隔舌处的厚度通常较小,当效率较高时,应力可能会比较大,综合以上 2 个方面,最终期望找到能同时满足水力和结构性能要求的最优蜗壳结构。因此,本文建立的二维优化目标函数为

$$F(X) = [\max \eta(X) \quad \min \sigma(X)] \quad (X_1 \leq X \leq X_2)$$

2.3 均匀试验设计及归一化

因为 BP 神经网络近似模型的建立需要大量的初始样本,为了减少计算成本、保证样本点的合理分布,首先根据优化变量及其取值范围,设计了一个由 4 因素、50 水平组成的均匀试验设计表格 $U_{50}(50^4)$,并对表中所列试验数据进行归一化处理,公式为

$$Y_{ij} = \frac{X_{ji} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \tag{1}$$

式中 i ——表格行数 j ——表格列数
 X_{jmin} 、 X_{jmax} ——每列的最小、最大值
 X_{ji} ——表格第 i 行 j 列的数据

归一化处理后的前 10 组试验数据见表 2 的前 4 列。

表 2 归一化后的蜗壳均匀试验设计
Tab.2 Normalized uniform design of volute

试验 序号	设计变量				目标函数	
	进口 直径	进口 宽度	隔舌 安放角	扩散段 长度	效率	最大 应力
1	0.35	0.15	0.16	0.06	0.37	0.53
2	0.41	0.52	0.44	0.46	0.53	0.19
3	0.86	0.29	0.24	0.26	0.87	0.46
4	0.63	0.44	0.56	0.64	0.82	0.14
5	0.55	0.19	0.28	0.78	0.53	0.30
6	0.78	0.35	0.36	0.50	0.73	0.09
7	0.71	0.17	0.98	0.72	0.46	0.22
8	0.06	0.58	0.59	0.32	0.09	0.11
9	0.84	0.54	0.66	0.38	0.95	0.15
10	0.12	0.56	0.28	0.02	0.20	0.18

2.4 流固耦合计算

对均匀试验设计得到的 50 组参数进行参数化造型得到 50 组蜗壳的水力和结构模型,叶轮与蜗壳的材料均为灰铸铁。50 组方案的流场区域采用非结构化四面体网格,固体区域网格为有限元自由网格。经网格无关性检验,流场和固体区域的最大网格数分别为 2 077 456 和 191 634。流体和固体场的计算区域及网格划分如图 2 所示。

流固耦合计算有单向流固耦合和双向流固耦合 2 种。为节约计算成本,下文主要采用单向流固耦合方法,只是对优化方案进行结构性能分析时,采用双向流固耦合方法获得蜗壳段最大应力及振动速度的瞬态变化规律。

单向流固耦合求解在 ANSYS workbench 的静态动力分析模块中进行,设置蜗壳与流体相接触的面(即蜗壳内壁面),用来实现流体对结构的压力载荷

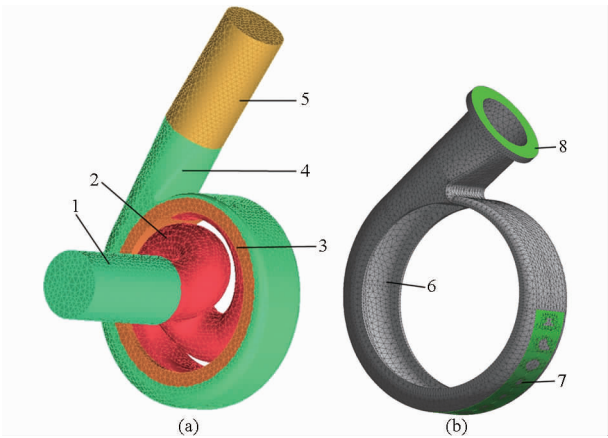


图 2 流固耦合计算区域及网格划分
Fig.2 Computational domain and grid of FSI
(a) 流体区域 (b) 固体区域

1.进口 2.叶轮 3.间隙 4.蜗壳 5.出口 6.流固耦合面
7.约束 1 8.约束 2

施加,固定约束面有 2 个(图 2):一为蜗壳中第 3 断面到第 7 断面之间蜗壳外壁的部分平滑面;二为蜗壳出口与管道连接的法兰面。流场计算采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,进口采用总压进口边界条件;出口采用质量流量出口边界条件;固壁上取无滑移边界,采用壁面函数法,壁面的绝对粗糙度设定为 0.012 mm。计算时,先在 CFX 模块中进行定常流场计算,然后在静态动力分析模块中流固耦合面上加载对应的流体部分的压力,进行有限元计算。

双向流固耦合求解在 ANSYS workbench 的瞬态动力分析模块中进行,约束面和流固耦合面的设置同单向流固耦合,不同的是固体区域需要设置计算总时间及时间步长,且需要同流体区域保持一致。固体区域的设置完成后输出 inp 格式文件,流场区域计算时调用此文件来实现流体场与结构场的数据传递。由于双流道泵的叶轮呈对称结构,所以设置叶轮旋转半周(180°)为一个计算周期。取叶轮旋转 10°作为一个时间点,即时间步长为 0.001 149 4 s。对应流场的瞬时求解采用 Second Order Backward Euler 格式,每个计算时间点上流场计算残差收敛目标为 10^{-4} ,耦合计算数据传递过程的松弛因子默认为 0.75,收敛标准为 10^{-3} 。非定常计算初始值调用定常计算结果。

对 50 组模型的单向流固耦合计算结果进行适当处理后可得到优化目标函数——效率 η 和蜗壳段的最大应力 σ 。其中,蜗壳段的最大应力 σ 直接从计算结果数据库中提取;效率 η 的计算公式为

$$\eta = \frac{0.97\rho gQH}{M_{y1}\omega} \times 100\% \tag{2}$$

式中 η ——效率,% ρ ——液体密度,kg/m³
 ω ——旋转角速度,rad/s

M_{y1} ——叶轮扭矩, $N \cdot m$

再按照表达式(1)对计算结果进行归一化处理,前 10 组试验数据对应的优化目标函数值见表 2 的后 2 列。

2.5 神经网络近似模型

在进行多目标遗传算法寻优时,为了减少计算时间和缩短优化周期,利用 BP 人工神经网络建立一个近似模型,用来预测双流道泵的水力与结构性能,这样在遗传寻优过程中产生的大量子代样本的优化目标函数就可以直接通过近似模型预测得到。该近似模型的具体建立步骤如下:对初始 50 组样本的设计变量和目标函数进行归一化处理;训练 BP 神经网络,隐含层采用 $tansig$ 型传递函数,输出层采用 $purelin$ 型传递函数,4 个输入变量,2 个输出变量(效率 η 和蜗壳段的最大应力 σ);结合遗传寻优过程,调整神经网络学习率和隐含层数,要求双流道泵性能预测网络的准确性平均方差小于 10^{-3} 。

2.6 多目标遗传寻优策略

以多目标遗传算法(MOGA)为寻优算法,结合 BP 神经网络近似模型和高精度的流固耦合计算,建立了适用于双流道泵的多目标多学科优化策略,具体流程如图 3 所示。多目标遗传寻优的第 1 代种群采用随机方法生成,个数设置为 200,优化变量采用二进制的编码和解码方法,以 BP 神经网络预测所得目标函数值作为评价种群个体的适应度值,通过选择、变异和复制算子产生子代种群,以随机竞争法作为选择算法。在复制遗传操作中包含了 2 个遗传操作,一是挑选适应度值最大的精英个体,用于产生子代;二是将挑选后剩下的个体通过交叉算子产生子代,交叉算子确保了不同个体的优良基因可以遗传下来。通过对个体的二进制编码进行随机的变异产生新的个体,增加种群的多样性。本文所采用的交叉和变异概率分别为 0.8 和 0.2。为了提高神经网络预测的准确性,对适应度较高的优化解进行验证,如果预测误差超过 5%,则将优化解纳入初始训练样本中,重新进行网络预测,直至神经网络预测值和数值模拟计算值的相对误差小于 5%,则寻优结束、输出 Pareto 前沿解。

3 优化结果及分析

3.1 优化方案的确定

经过 129 步的迭代寻优,获得双流道泵蜗壳多目标多学科遗传寻优的 Pareto 前沿解,末代种群及 Pareto 前沿解的分布如图 4 所示。

接着根据设计和运行要求对 Pareto 前沿解进行筛选,筛选要求:扬程大于 10 m,满足使用要求;水

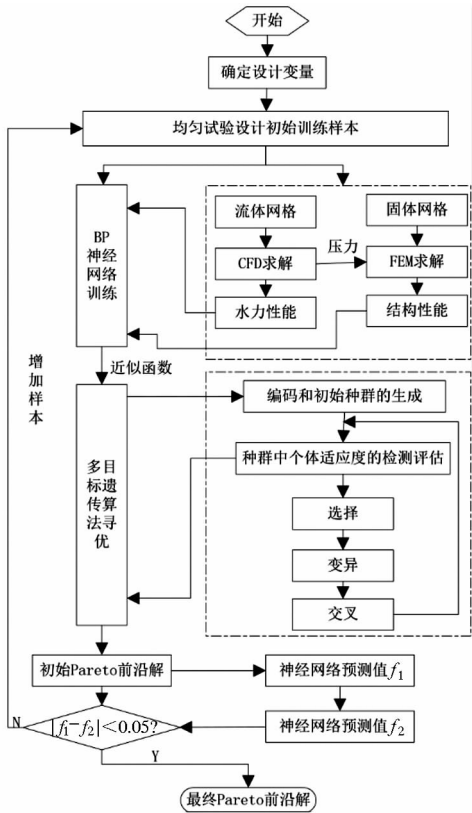


图 3 多目标多学科优化执行流程图
Fig. 3 Execution flow chart of MOGA optimization

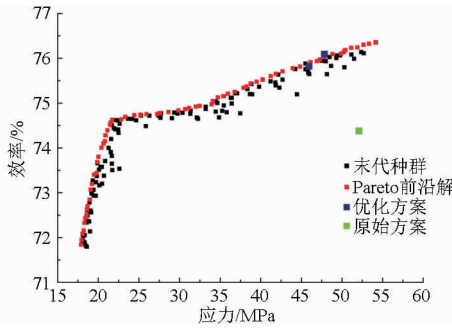


图 4 蜗壳优化前沿解的分布
Fig. 4 Pareto frontiers of volute optimization

泵效率大于 74%,保证水力性能的优越性;蜗壳段最大应力小于 60 MPa,使得隔舌处应力尽量小于许用应力。在这个范围内的结构参数主要集中于 2 组参数组合,如图 4 所示。其中,优化方案 opt1 对应几何参数组合为 $D_3 = 244.3 \text{ mm}$, $B_3 = 84.6 \text{ mm}$, $\varphi = 26^\circ$, $L = 190 \text{ mm}$;优化方案 opt2 对应的几何参数为 $D_3 = 244.9 \text{ mm}$, $B_3 = 85 \text{ mm}$, $\varphi = 29^\circ$, $L = 165 \text{ mm}$ 。表 3 给出了单向流固耦合计算所得优化前后双流道泵的主要外特性指标及蜗壳段的最大应力对比,由此可见,2 种优化方案的性能较原始方案都有一定程度的提高,下文将分别从水力和结构性能 2 个方面进行具体分析。

3.2 水力性能对比分析

图 5 给出了优化前后 3 种方案蜗壳内壁面上的

表 3 优化前后性能对比

Tab.3 Performance comparison before and after optimization

方案	效率/%	最大应力/MPa	扬程/m
原始方案	74.38	52.10	10.230
opt1	75.82	46.91	10.152
opt2	76.09	47.83	10.132

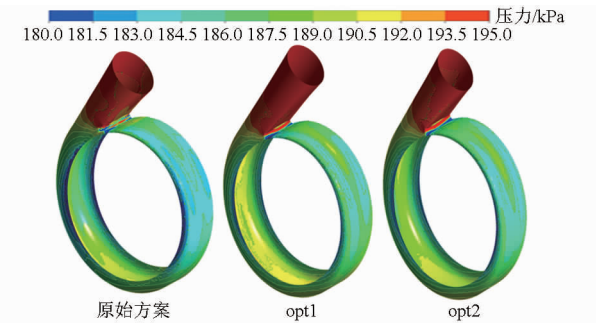


图 5 蜗壳内壁上静压分布

Fig.5 Static pressure distribution on volute inner face

静压分布云图。通过比较蜗壳隔舌处的压力分布可以发现,优化前后 3 种方案在此处都出现了局部高压现象,说明这 3 种蜗壳隔舌处的流动都存在着流动滞止或局部阻塞现象。蜗壳扩散段的压力分布对比显示,原始泵蜗壳的扩压效果较差,而且扩压不均匀,到达出口时依然存在明显压力差;opt1 的扩压效果在 3 个方案中最优,并且压力扩散均匀;opt2 扩压效果介于原始方案和优化方案 opt1 之间。

图 6 给出了优化前后双流道泵中间截面上的湍动能分布,以及重点关注区域的速度和流线变化情况。由图可见,原始蜗壳在扩散段的湍动能分布不均匀,2 种优化方案的湍动能分布相对均匀;蜗壳的不同也导致了叶轮内部出现不同程度的湍动能分布不均的状况。通过对图中虚线框位置所示的隔舌附近及叶轮流道的流动速度分布进行放大,可以发现原始蜗壳的隔舌附近出现明显低速区,并且有少量流体回流至蜗壳螺旋段。与此同时,在原始泵蜗壳的扩散段中也出现了回流现象,与周围的流动方向相反,在扩散段产生了漩涡,这可以解释原始泵内湍动能分布不均的现象。对比 2 种优化后的方案可以看到,蜗壳扩散段内的流动相对于原始泵明显改善,并且在隔舌处,流动滞止现象也减弱。而在叶轮中,通过比较优化前后叶轮内的湍动能和速度分布可以发现,虽然优化方案 opt1 和 opt2 较原始方案的湍动能和速度分布不均匀,但是综合蜗壳的性能提升效应以后,双流道泵的整体水力性能还是较原始方案有了一定程度的提升。

3.3 结构性能对比分析

图 7 给出了单向流固耦合计算所得原始蜗壳流

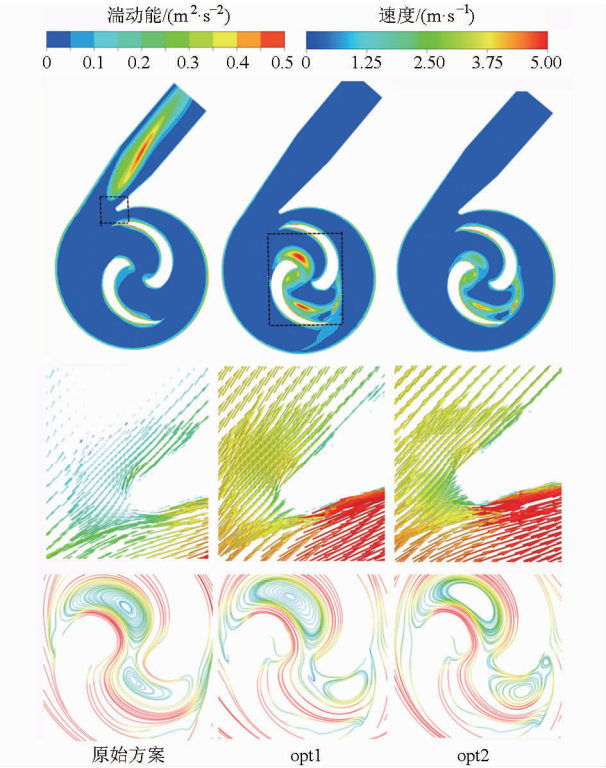


图 6 湍动能及速度分布

Fig.6 Turbulence kinetic energy and velocity distribution

固耦合交界面上的应力分布,由图可以发现在隔舌圆角附近与前后盖板连接位置(图中红色箭头所示)出现了应力集中现象,这就是工程上出现的长时间运行之后出现疲劳破损的位置。为进一步研究此处的应力集中现象,下文对优化前后 3 种方案的双流道泵分别进行了双向流固耦合计算,提取了此处的瞬时应力,并绘制了叶轮旋转一周此处的瞬时应力变化情况,如图 8 所示,叶轮相对于蜗壳隔舌的初始位置见图 6。

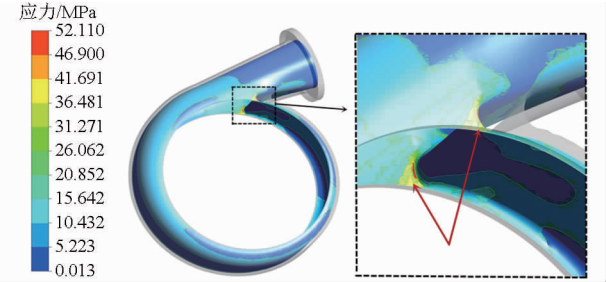


图 7 蜗壳流固耦合交界面上的应力分布

Fig.7 Stress distribution on FSI interface of volute

由图 8 可见,蜗壳段最大应力呈现周期性变化,并且在叶片扫过隔舌圆角处时,应力最小,而在叶片远离隔舌圆角时,应力偏大。这是因为在叶片扫过隔舌附近时,瞬时扬程较小,又由于叶片与隔舌区的动静干涉,扩散段与隔舌到第 1 断面间的压力差最小,而产生的应力最小;当叶片远离隔舌时,瞬时扬程变大,扩散段的扩压效果也较好,隔舌上下压力差较大,应力也就更大。同时比较原始泵与 2 种优化方案的最

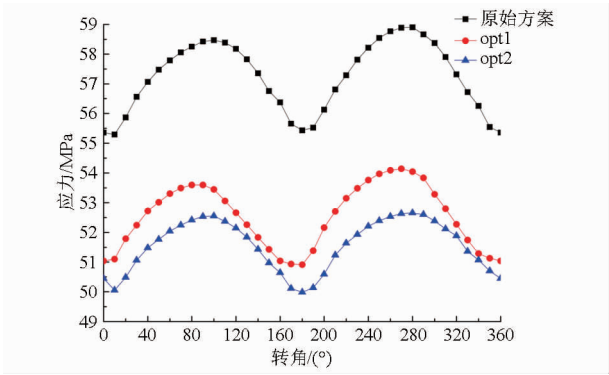


图 8 瞬时应力随叶轮转角变化规律

Fig. 8 Stress variation with impeller's rotation angle

大应力可以发现,优化方案 opt1 和 opt2 分别比原始泵减少了 5.19 MPa 和 4.27 MPa,降幅为 9.96% 和 8.20%。因此,在防止疲劳断裂方面而言,优化后的方案有一定的优势,其中又以优化方案 opt2 为最优。

以上面最大应力位置为监测点,提取优化前后 3 种方案在叶轮旋转一周内的振动速度瞬时响应图,如图 9 所示。由图可见,优化方案 opt1 的最大振动速度相对于原始泵没有明显改进,优化方案 opt2 的最大振动速度只有原始泵的 78.9%。通过对 1 个周期内的瞬时振动速度进行平均化可以得到原始方案、优化方案 opt1、优化方案 opt2 的平均振动速度分别为 0.439、0.393、0.379 mm/s。因此总的来说,优化方案有利于抑制振动,且优化方案 opt2 要优于优化方案 opt1。

4 结论

(1)均匀试验设计方法既减少了计算成本又保

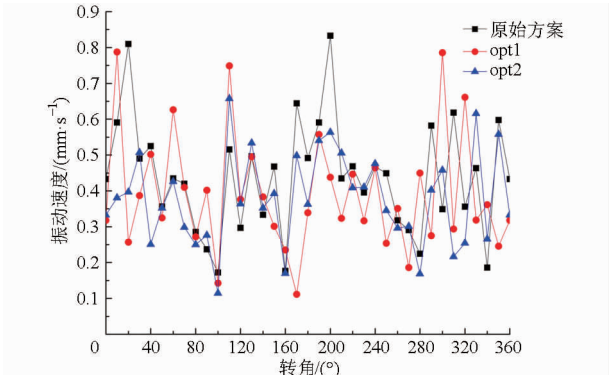


图 9 瞬时振动速度随转角变化规律

Fig. 9 Vibration velocity variation with impeller's rotation angle

证了初始训练样本点的合理分布,使得 BP 神经网络所建近似模型的预测精度得到了有效保证,且在优化中不断增加新的训练样本,进一步提高了神经网络的预测精度,确保寻优朝着真实优化结果方向推进。

(2)BP 神经网络近似模型和高精度流固耦合计算组成的变精度的多学科目标函数赋值方法,极大地减少了多目标多学科遗传寻优的计算成本,使双流道泵蜗壳的多目标多学科优化得以成功实现。

(3)以水力和结构性能目标函数值共同作为评价种群个体的适应度值,通过选择、变异和复制算子不断产生子代种群,并利用随机竞争法作为选择算子,既保证适应度高的精英个体的优良基因可以遗传下来,又增加了种群的多样性,确保了寻优能获得全局最优解。

参 考 文 献

1 Van Esch B P M, Kruyt N P. Hydraulic performance of a mixed-flow pump: unsteady inviscid computations and loss models[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(2): 256 – 264.

2 Benra F K. Numerical and experimental investigation on the flow induced oscillations of a single-blade pump impeller[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(4): 783 – 793.

3 Benra F K, Hans Josef Dohmen. Comparison of pump impeller orbit curves obtained by measurement and FSI simulation[C]// Proceedings of IPC2007, PVP2007 – 26149, 2007.

4 Dong R, Chu S, Katz J. Effect of modification to tongue and impeller geometry on unsteady flow, pressure fluctuations and noise in a centrifugal pump[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 506 – 515.

5 Jin Weon Kim, Yang Suk Kim, Chi Yong Park. Failure analysis of cracking at volute tongues of feedwater pump casings[J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(1): 17 – 30.

6 张德胜, 张磊, 施卫东, 等. 基于流固耦合的离心泵蜗壳振动特性优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 40 – 45.

Zhang Dsheng, Zhang Lei, Shi Weidong, et al. Optimization of vibration characteristics for centrifugal pump volute based on fluid-structure interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 40 – 45. (in Chinese)

7 Derakhshan S, Pourmahdavi M, Abdollahnejad E, et al. Numerical shape optimization of a centrifugal pump impeller using artificial bee colony algorithm[J]. Computers & Fluids, 2013, 81: 145 – 151.

8 Verstraete T, Alsalihi Z, Van den Braembussche R A, et al. Multidisciplinary optimization of a radial compressor for microgas turbine applications[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132(3): 1 – 7.

- 16 杨明珍,包震宇,师晓春,等. 鸟粪石沉淀法处理沼液实验研究[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(3): 31–32.
Yang Mingzhen, Bao Zhenyu, Shi Xiaochun, et al. Experimental study on treatment for anaerobic fermentation slurry by struvite precipitation[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(3): 31–32. (in Chinese)
- 17 Song Y, Yuan P, Zheng B, et al. Nutrients removal and recovery by crystallization of magnesium ammonium phosphate from synthetic swine wastewater[J]. Chemosphere, 2007, 69(2): 319–324.
- 18 白晓凤,李子富,尹福斌,等. 蒸发法处理厌氧发酵沼液试验研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 164–170.
Bai Xiaofeng, Li Zifu, Yin Fubin, et al. Evaporation treatment on biogas slurry from anaerobic fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 164–170. (in Chinese)
- 19 沈耀良,王宝贞. 吹脱法去除渗滤液中氨的动力学及机理[J]. 污染防治技术, 1999, 12(2): 67–70.
Shen Yaoliang, Wang Baozhen. Dynamics and mechanism of ammonia removal by stripping[J]. Pollution Control Technology, 1999, 12(2): 67–70. (in Chinese)
- 20 陈欣. 生物填料“涌动床 BIOFINGE”在污水处理工程中的应用[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
Chen Xin. Biological carrier flowing bed BIOFINGE application in wastewater treatment engineering [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 21 汤琪,罗固源,季铁军,等. 磷酸铵镁同时脱氮除磷技术研究[J]. 环境科学与技术. 2008, 31(2): 1–5.
Tang Qi, Luo Guyuan, Ji Tiejun, et al. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus by magnesium ammonium phosphate process [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 1–5. (in Chinese)
- 22 余荣台,丁丽丽,任洪强,等. 磷酸铵镁化学结晶技术研究现状[J]. 工业用水与废水, 2014(6): 1–3,50.
Yu Rongtai, Ding Lili, Ren Hongqiang, et al. Research status of struvite chemical crystallization technology[J]. Industrial Water & Wastewater, 2014(6): 1–3,50. (in Chinese)
- 23 陈瑶. 以鸟粪石形式从污水处理厂同时回收氨氮和磷的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2006.
Chen Yao. Simultaneous ammonia nitrogen and phosphorus recovery by struvite from wastewater treatment plant [D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- 24 Bouropoulos N C, Koutsoukos P G. Spontaneous precipitation of struvite from aqueous solutions[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 213(3–4): 381–388.
- 25 杜英君,沈欣军,李艳平. 磷酸铵镁法处理污水回收氮磷影响因素的研究[J]. 水处理技术, 2012,38(增刊):19–22,27.
Du Yingjun, Shen Xinjun, Li Yanping. Research of treated wastewater and removal retrieve of nitrogen and phosphorus by magnesium ammonium phosphate process[J]. Technology of Water Treatment, 2012,38(Supp.):19–22,27. (in Chinese)

(上接第 101 页)

- 9 Murr R, Thieriot H, Zoughailb A, et al. Multi-objective optimization of a multi water-to-water heat pump system using evolutionary algorithm[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 3580–3591.
- 10 田辉,孙秀玲,郭涛,等. 基于遗传算法的离心泵叶片水力性能优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 64–67.
Tian Hui, Sun Xiuling, Guo Tao, et al. Optimization for the hydraulic performance of centrifugal blade based on the genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 64–67. (in Chinese)
- 11 袁寿其,王文杰,裴吉,等. 低比转数离心泵的多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 46–52.
Yuan Shouqi, Wang Wenjie, Pei Ji, et al. Multi-objective optimization of low-specific-speed centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 46–52. (in Chinese)
- 12 Xiao Mi, Shao Xinyu, Gao Liang, et al. A new methodology for multi-objective multidisciplinary design optimization problems based on game theory[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(3): 1602–1612.
- 13 Michael M Joly, Tom Verstraete, Guillermo Paniagua. Multidisciplinary design optimization of a compact highly loaded fan[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2014, 49(3): 471–483.
- 14 汤方平,石丽建,雷翠翠,等. 轴流泵叶片多学科设计优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 96–100.
Tang Fangping, Shi Lijian, Lei Cuicui, et al. Multidisciplinary design optimization of axial-flow pump blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 96–100. (in Chinese)
- 15 申秀丽,龙丹,董晓琳. 航空发动机初步设计阶段涡轮流道多学科优化设计分析方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1369–1375.
Shen Xiuli, Long Dan, Dong Xiaolin. Multidisciplinary design optimization of aero-engine turbine flow path in preliminary design phase[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1369–1375. (in Chinese)
- 16 赵斌娟,侯多华,陈汇龙,等. 叶轮流道结构对双流道泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(4): 294–299.
Zhao Binjuan, Hou Duohua, Chen Huilong, et al. Influence of impeller passage structure on performance of double-channel pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(4): 294–299. (in Chinese)
- 17 Zhao Binjuan, Wang Yu, Chen Huilong, et al. Hydraulic optimization of a double-channel pump's impeller based on multi-objective genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 634–640.