doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.012

基于径向基神经网络的叶轮轴面投影图优化*

王文杰[1]　裴　吉[1]　袁寿其[1]　张金凤[1]　许长征[2]　张　帆[1]

（1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，镇江 212013；2. 宜兴优纳特机械有限公司，无锡 214205）

摘要：为了提高余热排出泵的效率，采用拉丁超立方试验设计方法对叶轮轴面投影图上的前盖板圆弧半径、后盖板圆弧半径、前盖板倾角和后盖板倾角 4 个几何变量进行 35 组叶轮方案设计，应用 ANSYS CFX 14.5 软件对余热排出泵进行定常数值模拟，得到设计工况下的效率，应用径向基神经网络建立效率与轴面投影图的 4 个几何变量之间的近似模型，最后采用遗传算法对近似模型进行极值寻优，获得最优的轴面投影图几何参数组合。研究结果表明：对比原始泵的数值模拟性能曲线和试验外特性能曲线，两者吻合较好；径向基神经网络能较好地预测泵设计点效率；优化的轴面投影图使得余热排出泵的水力效率提高了 6.18 个百分点，改善了叶轮内流场特性。因此，叶轮轴面投影图的优化设计方法是可行的。

关键词：余热排出泵　叶轮轴面投影图　优化　拉丁超立方试验设计　径向基神经网络　遗传算法

中图分类号：TM623；TH311　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2015)06-0078-06

Optimization of Impeller Meridional Shape Based on Radial Basis Neural Network

Wang Wenjie[1]　Pei Ji[1]　Yuan Shouqi[1]　Zhang Jinfeng[1]　Xu Changzheng[2]　Zhang Fan[1]

(1. *National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*

2. *Yixing Unite Machinery Co., Ltd., Wuxi* 214205, *China*)

Abstract: To improve the efficiency of residual heat removal pump, 35 impellers, whose design variables are the radius of shroud arc, radius of hub arc, angle of shroud and angle of hub, were designed by Latin hypercube sampling method. 3D steady simulation was conducted to get the efficiency under designed flow rate by ANSYS CFX 14.5 software. A radial basis neural network was used to build the approximation model between efficiency and design variables. Finally, the best combination of the design variables was obtained by solving the approximation model with genetic algorithm. The results showed that performance curve simulated by CFD had a good agreement with that of experiment. The deviations of efficiency and head between numerical result and experimental result were −2.1% and −3.7%, respectively. Compared the efficiency predicted by CFD with that predicted by radial basis neural network, the deviation was only 0.02%, thus the radial basis neural network can predict the efficiency under design condition accurately. The efficiency of the optimal pump was 76.75% and the optimization made an increase in efficiency by a percentage of 6.18. The optimization improved the velocity and turbulence kinetic energy distributions in the impeller. The vortexes disappeared and the velocity became uniform at the shroud. Thus, the optimization process for the impeller meridional shape was practical.

Key words: Residual heat removal pump　Impeller meridional shape　Optimization　Latin hypercube sampling method　Radial basis neural network　Genetic algorithm

收稿日期：2014-07-21　修回日期：2014-08-24

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAF14B04)、国家自然科学基金资助项目(51349004)、江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20140554)、中国博士后科学基金面上资助项目(2014M560402)、江苏省博士后科研资助项目(1401069B)、江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX_1042)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介：王文杰，博士生，主要从事离心泵水力优化设计研究，E-mail：wenjie.wang815@gmail.com

通讯作者：袁寿其，研究员，博士生导师，主要从事流体机械及排灌机械研究，E-mail：shouqiy@ujs.edu.cn

引言

核电站的安全是核电站运行的首要保障。在核电站系统中，余热排出系统的主要作用是保护核电站的安全以及在发生重大事故时将核能产生的损失最小化。在余热排出系统中，核心部件是两台余热排出泵和两台热交换器[1]。因此，余热排出泵的设计需要考虑安全性、高性能、稳定性、使用寿命等方面。近来年，在余热排出泵的水力性能优化方面已开展了研究，取得了一定的研究成果[2-4]。

叶轮设计是水泵设计过程中的关键，叶轮轴面投影图是重要的叶轮设计步骤之一，目前，轴面投影图的设计主要是以相似比转数、性能良好的轴面投影图作参考，再根据经验公式计算得到的叶轮几何参数绘图，往往要经过多次反复修改，如果设计不合理，将会导致泵性能变差[5]。在轴面投影图的研究中，一方面是轴面投影图的绘制及 CAD 软件开发[6-8]，另一方面是轴面投影图的优化[9-11]。

对旋转机械的性能优化，国内外专家学者们做了大量的数值模拟和试验优化研究[12-20]。采用的优化方法主要包括试验优化、正反问题迭代优化和现代优化算法等。

为了提高余热排出泵的效率，本文采用定常数值模拟、拉丁超立方试验设计、径向基神经网络和遗传算法对叶轮轴面投影图上的前盖板圆弧半径 r_s、后盖板圆弧半径 r_h、前盖板倾角 α_s 和后盖板倾角 α_h 4 个几何变量进行优化设计。

1　计算模型与数值方法

1.1　计算模型

图 1 为余热排出泵三维模型示意图，结构形式为单级单吸卧式结构。余热排出泵叶轮的原始轴面投影图采用的是单圆弧法进行绘制，即前后盖板流线均是一段直线和圆弧组成，如图 2 所示。余热排出泵过流部件的几何参数为：叶轮进口直径 D_j = 270 mm，叶轮出口直径 D_2 = 511 mm，叶片出口宽度 b_2 = 49 mm，叶片包角 φ = 115°，叶片出口安放角 β_2 = 23°，叶轮叶片数 Z_i = 5，导叶进口直径 D_3 = 515 mm，导叶出口直径 D_4 = 718 mm，导叶进口宽度 b_3 = 55 mm，导叶出口宽度 b_4 = 84 mm，导叶叶片数 Z_d = 7，蜗壳进口直径 D_5 = 840 mm，蜗壳进口宽度 b_5 = 250 mm。余热排出泵的性能参数如下：设计工况下流量 Q_d = 910 m^3/h，设计工况下扬程 H_d = 77 m，效率 η = 76%，转速 n = 1 490 r/min，比转速 n_s = 104.5。

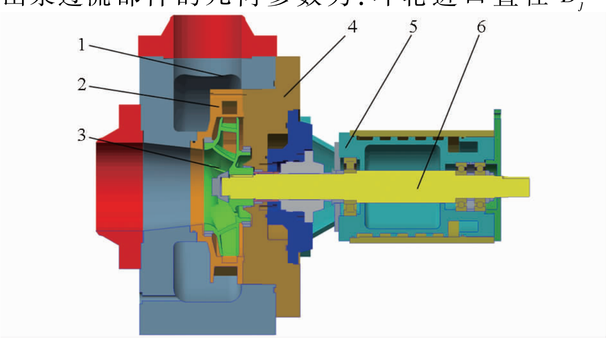

图 1　余热排出泵三维结构示意图

Fig. 1　3D structure of residual heat removal pump

1. 泵体　2. 导叶　3. 叶轮　4. 泵盖　5. 轴承体　6. 轴

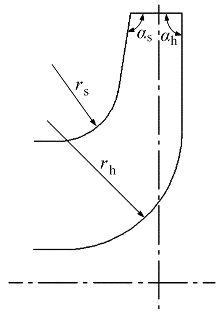

图 2　叶轮轴面投影图示意图

Fig. 2　Meridional shape of impeller

1.2　数值模拟方法

采用 Creo Parameter 2.0 软件对余热排出泵计算域进行三维造型，计算域包括进口段、叶轮、导叶和蜗壳共 4 个部分。并用 ICEM 软件进行结构化网格划分，对壁面进行网格加密。计算域网格如图 3 所示。

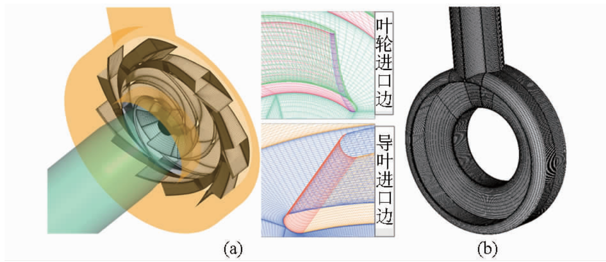

图 3　流体计算域网格

Fig. 3　Mesh of computational domain

（a）叶轮和导叶流道　（b）蜗壳流道

采用 ANSYS CFX 14.5 对计算域进行定常数值模拟。视流体为三维不可压粘性流，用 SST $k-\omega$ 湍流模型求解雷诺时均方程。采用多重旋转坐标系技术设置旋转域和静止域。进出口的边界条件分别设置为总压进口和质量流量出口。叶轮与静止部件的交接面设置为“Frozen rotor”，静止部件之间设置为“None”，壁面采用无滑边界条件，近壁区采用自动壁面函数处理。求解离散设置为二阶迎风格式，物理时间设置为 1/ω，其中 ω 为叶轮的旋转角速度，收敛残差为 10^{-5}。

2　试验验证

为了验证数值模拟计算的可靠性，对余热排出泵按比例缩小 30% 的模型泵进行外特性试验，试验

在宜兴优纳特机械有限公司的开式试验台进行，如图 4 所示。

图 4 开式试验台

Fig. 4 Open test rig

1. 进口压力测量点 2. 出口压力测量点 3. 电磁流量计

图 5 所示是数值模拟与试验得到的泵外特性曲线，其中流量系数 ϕ 和扬程系数 ψ 定义为

$$\phi=\frac{Q}{nD_2^3} \tag{1}$$

$$\psi=\frac{gH}{n^2D_2^2} \tag{2}$$

式中 Q——流量，m^3/h H——扬程，m

g——重力加速度，m/s^2

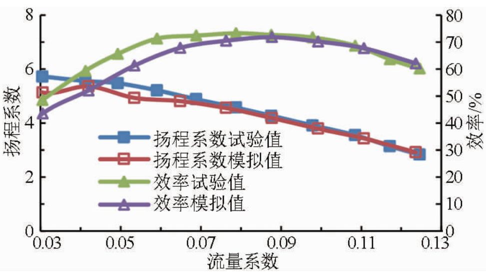

图 5 数值模拟与试验对比

Fig. 5 Comparison between CFD and experiment results

从图中可以看出，数值模拟得到的性能曲线与试验性能曲线基本一致，在设计工况下，数值模拟得到的扬程系数为 4.56，效率为 70.57%，试验得到的扬程系数为 4.66，效率为 73.3%，相对偏差分别为 -2.1% 和 -3.7%。因此数值模拟能较准确地预测余热排出泵的性能曲线，数值模拟结果可信。

3 优化设计过程

在优化设计过程中，如对设计变量进行多方案组合设计的数值模拟，必然会消耗大量的计算资源和时间，才能找到最优的方案。本文基于 Isight 优化软件平台，结合近似模型和现代优化算法，将数学方法应用到优化设计过程中，以节省优化设计周期，减少计算资源。采用拉丁超立方试验设计方法对叶轮轴面投影图进行多方案设计，对每个方案进行数值模拟计算，得到设计工况下的效率，采用径向基神经网络建立效率与轴面投影图上几何参数之间的近似函数模型，采用遗传算法对近似函数模型进行寻优，最终得到优化的几何参数。优化设计流程如图 6 所示。

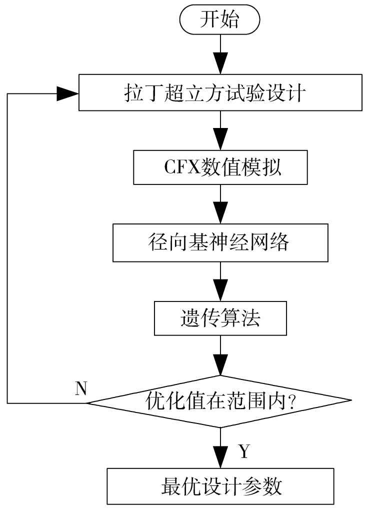

图 6 优化流程图

Fig. 6 Flow chart of optimization

3.1 设计目标

本文优化设计的目标是提高余热排出泵的效率 η。由径向基神经网络近似模型建立效率与叶轮轴面投影图上的 4 个几何参数之间的函数关系为

$$\eta=f(r_s,r_h,\alpha_s,\alpha_h) \tag{3}$$

约束条件：45 mm $\leqslant r_s \leqslant$ 60 mm；105 mm $\leqslant r_h \leqslant$ 125 mm；95° $\leqslant \alpha_s \leqslant$ 99°；90° $\leqslant \alpha_h \leqslant$ 94°。

其中效率 η 由定常数值计算得到，即

$$\eta=\frac{\rho gHQ_d}{P} \tag{4}$$

式中 ρ——液体密度，kg/m^3

P——不考虑机械损失的数值模拟功率，W

3.2 拉丁超立方试验设计方法

拉丁超立方试验设计方法能设计出在空间上均匀分布的设计方案，同时有能力拟合二阶或更非线性的关系[21]。叶轮轴面投影图的 4 个设计变量范围如表 1 所示。表 2 是由拉丁超立方试验设计方法得到 35 组叶轮设计方案及由数值模拟得到的设计工况下的对应效率值。

表 1 设计变量范围

Tab. 1 Ranges of design variables

设计变量	下限值	上限值	原始值
r_s/mm	45	60	58
r_h/mm	105	125	103
α_s/(°)	95	99	99
α_h/(°)	90	94	90

3.3 径向基神经网络

径向基神经网络属于前向神经网络类型，是一种3层前向网络，第1层为输入层，第2层为隐含

表 2　35 组设计方案及效率

Tab. 2　35 schemes and calculated efficiencies

方案序号	α_s/(°)	α_h/(°)	r_s/mm	r_h/mm	η/%
1	95.00	91.29	56.91	105.59	76.21
2	95.12	90.00	52.50	110.29	76.45
3	95.24	92.24	60.00	120.88	76.17
4	95.35	93.18	50.29	107.35	76.20
5	95.47	92.47	58.68	114.41	75.91
6	95.59	90.12	54.71	118.53	76.31
7	95.71	90.59	52.06	117.94	76.07
8	95.82	93.41	45.88	112.06	75.72
9	95.94	90.71	48.97	115.00	76.07
10	96.06	93.53	56.03	122.06	76.13
11	96.18	92.59	58.24	120.29	76.01
12	96.29	92.94	55.15	119.71	76.16
13	96.41	91.65	59.12	115.59	76.07
14	96.53	93.88	48.53	117.35	76.00
15	96.65	93.76	57.79	125.00	75.39
16	96.76	91.53	49.85	116.18	73.99
17	96.88	90.94	45.00	112.65	76.47
18	97.00	91.18	48.09	116.76	76.09
19	97.12	91.88	57.35	108.53	76.14
20	97.24	92.82	54.26	123.82	75.49
21	97.35	90.82	55.59	107.94	76.38
22	97.47	91.76	51.62	106.76	76.42
23	97.59	93.65	51.18	110.88	75.98
24	97.71	90.47	46.32	105.00	76.37
25	97.82	92.00	53.38	111.47	75.86
26	97.94	91.06	50.74	121.47	75.97
27	98.06	92.71	47.65	122.65	75.50
28	98.18	94.00	47.21	124.41	75.05
29	98.29	93.06	59.56	113.24	75.92
30	98.41	92.12	46.76	123.24	75.40
31	98.53	90.24	49.41	106.18	76.30
32	98.65	93.29	52.94	109.12	75.62
33	98.76	92.35	56.47	113.82	76.04
34	98.88	91.41	45.44	119.12	75.54
35	99.00	90.35	53.82	109.71	75.74

层，径向基函数为对中心点径向对称且衰减的非负非线性函数。第 3 层为输出层，输出输入值对应的响应值。径向基神经网络具有结构简单、学习收敛速度快的优点，而且能够逼近任意非线性函数。其结构形式如图 7 所示。

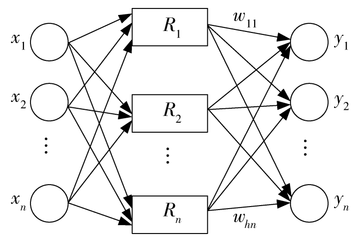

图 7　径向基神经网络结构示意图

Fig. 7　Structure of radial basis neural network

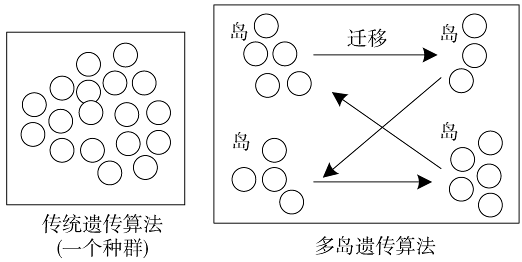

图 8　多岛遗传算法岛生成原理

Fig. 8　Principle of multi-island genetic algorithm

3.4　多岛遗传算法

多岛遗传算法在传统遗传算法上进行了改进，具有更优良的全局求解能力和计算效率。其原理如图 8 所示，优点在于将每个种群分为几个子群，即“岛”，可以抑制传统遗传算法中的早熟现象[21]。在 Isight 优化软件中多岛遗传算法的部分参数选取子群规模数为 20，岛的个数为 10，迭代数为 50，交叉概率为 0.9，变异概率为 0.01，岛间迁移率为 0.01。

3.5　优化设计结果

根据表 2 的数据建立了效率与 4 个设计参数之间的径向基神经网络近似模型，采用多岛遗传算法对近似模型进行寻优，经过 10 000 步迭代计算，优化前后的几何参数和效率对比如表3所示，通过遗传算法计算的效率为 76.73%。从图 9 可以看出优化后前盖板圆弧半径变小、后盖板圆弧半径变大、前盖板倾角变小而后盖板倾角不变。根据优化得到的叶轮轴面投影图几何参数，对叶轮重新造型并进行数值模拟，得到泵在设计工况下的效率为 76.75%，比原始方案效率提高了 6.18 个百分点，同时与径向基神经网络预测的相差 0.02 个百分点，说明径向基神经网络能准确地预测出泵在设计工况下的效率。

表 3　几何参数和效率对比

Tab. 3　Comparison between geometry parameters and efficiency

	α_s/(°)	α_h/(°)	r_s/mm	r_h/mm	η/%
原始	99.00	90	58	103.0	70.57
优化(预测)	96.52	90	45	114.6	76.73
优化(CFD)	96.52	90	45	114.6	76.75

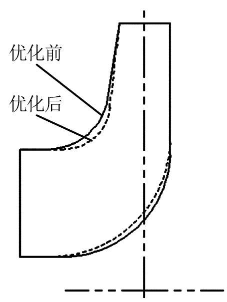

图 9　优化前后轴面投影图对比

Fig. 9　Comparison of meridional shape between original and optimal schemes

3.6 内流场对比

图10为原始叶轮与优化叶轮速度分布对比,可以看出,前盖板的速度分布明显不同,而叶轮后盖板上的速度分布则没有太大变化。从图10a可知,原始叶轮在前盖板存在低速区域,有明显的漩涡,产生较大的水力损失,且进口区域速度梯度变化大。由图10b可以看出,前盖板漩涡区域消失,且速度分布均匀,说明优化后的轴面有效地使轴面形状更符合流体流动特性,从而提高了叶轮的水力效率。

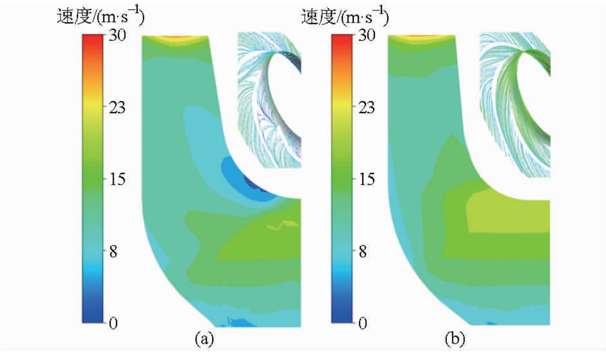

图10 速度分布对比

Fig. 10 Comparison of velocity distribution between original and optimal schemes

(a) 原始叶轮 (b) 优化叶轮

原始叶轮与优化叶轮内湍动能分布如图11所示,湍动能反映了流体在流道内产生的脉动损失程度。优化前的叶轮内湍动能分布不均匀,在叶轮出口处湍动能最大;优化后的叶轮明显降低了叶轮内的湍动能,因而内部流场得到改善。

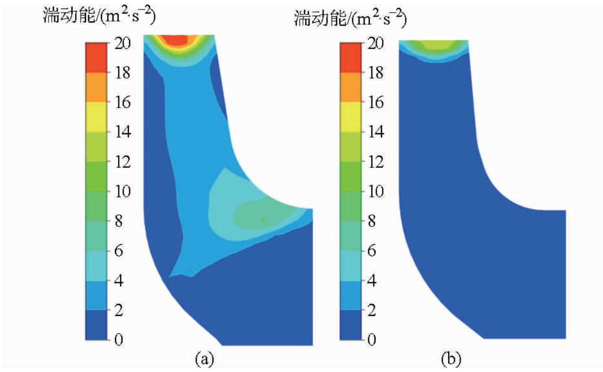

图11 湍动能分布对比

Fig. 11 Comparison of turbulent kinetic energy distribution between original and optimal schemes

(a) 原始叶轮 (b) 优化叶轮

4 结论

(1)结合定常数值模拟、拉丁超立方试验设计、径向基神经网络和遗传算法对叶轮轴面投影图上的4个几何变量进行优化设计,可实现对叶轮轴面投影图的快速优化,缩短优化设计周期,节省计算资源。

(2)应用径向基神经网络建立了目标函数与设计变量之间的近似模型,对比近似模型预测值与CFD计算值,径向基神经网络具有较高的预测精度。

(3)通过优化叶轮轴面投影图,余热排出泵的效率提高了6.18个百分点,同时有效地改善了叶轮内部流场特性。说明优化方法具有可行性,对优化叶轮的其他主要几何参数具有重要的参考意义。

参 考 文 献

1 刘鹏, 龙湘鹏, 关海波. 浅谈1 000 MW核电站用余热排出泵[J]. 水泵技术, 2008(6): 18-20.

2 甄咏鹏. 余热排出泵水力设计研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.
Zhen Yongpeng. Study on hydraulic design of residual heat removal pump[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

3 常书平,王永生. 基于三维湍流数值模拟的余热排出泵叶轮优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(5):397-400.
Chang Shuping, Wang Yongsheng. Optimal design of impeller for residual heat removal pumps based on numerical simulation of 3D turbulent flow[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(5):397-400. (in Chinese)

4 施亮. AP1000余热排出泵的设计研究[D]. 镇江:江苏大学,2012.
Shi Liang. The design and research of AP1000 residual heat removal pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu Univesity, 2012. (in Chinese)

5 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社,2011.

6 王艳艳, 李红, 季柳金. 基于CAD系统的离心泵叶轮轴面投影绘型[J]. 排灌机械, 2006, 24(3):5-9.
Wang Yanyan, Li Hong, Ji Liujin. Research based on CAD system of drawing mer idional plane in impeller of centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(3):5-9. (in Chinese)

7 杨军虎,张云周,孟瑞锋,等. 基于UG的离心叶轮轴面流道绘制软件开发[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(5): 42-47.
Yang Junhu, Zhang Yunzhou, Meng Ruifeng, et al. Development of drawing software for meridian flow passage of centrifugal pump impeller based on UG[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(5): 42-47. (in Chinese)

8 苏进, 李春, 周昕,等. 水泵叶轮设计中轴面流道及流线的确定[J]. 上海理工大学学报, 2001, 23(2): 114-118.
Su Jin, Li Chun, Zhou Xin, et al. Determination of flow passage and streamlines in axial plane in pump CAD[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2001, 23(2): 114-118. (in Chinese)

9 严敬,王桃,李维承,等. 离心泵轴面流线分点的解析计算[J]. 排灌机械,2009,27(3):137-139.
Yan Jing, Wang Tao, Li Weicheng, et al. Precise calculation for points along meridional streamline of centrifugal pumps[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(3): 137-139. (in Chinese)

10 王凯,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵叶轮轴面图的全自动 CFD 优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 39 - 43.
Wang Kai, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Automatic optimization of impeller meridional shape for centrifugal pumps based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 39 - 43. (in Chinese)
11 张人会.离心泵叶片的参数化设计及其优化研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2010.
Zhang Renhui. The research on the parametric design of centrifugal pump blade and it's optimization[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010. (in Chinese)
12 Derakhshan S, Pourmahdavi M, Abdolahnejad E, et al. Numerical shape optimization of a centrifugal pump impeller using artificial bee colony algorithm[J]. Computers & Fluids, 2013, 81: 145 - 151.
13 Kim J H, Oh K T, Pyun K B, et al. Design optimization of a centrifugal pump impeller and volute using computational fluid dynamics[C]∥IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(3): 032025.
14 肖若富,陶然,王维维,等. 混流泵叶轮反问题设计与水力性能优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 84 - 88.
Xiao Ruofu, Tao Ran, Wang Weiwei, et al. Inverse design and hydraulic optimization of mixed-flow pump impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 84 - 88. (in Chinese)
15 谭磊, 曹树良, 桂绍波, 等. 离心泵叶轮正反问题迭代设计方法 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 30 - 35.
Tan Lei, Cao Shuliang, Gui Shaobo, et al. Centrifugal pump impeller design by using direct inverse problem iteration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 30 - 35. (in Chinese)
16 王秀礼, 朱荣生, 苏保稳, 等. 无过载旋流泵正交设计数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 48 - 52.
Wang Xiuli, Zhu Rongsheng, Su Baowen, et al. Numerical simulation and experiment of Latin square design on non-overload vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 48 - 52. (in Chinese)
17 Zhou Ling, Shi Weidong, Wu Suqing. Performance optimization in a centrifugal pump impeller by orthogonal experiment and numerical simulation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013(2013): ID385809.
18 Kim J H, Kim K Y. Analysis and optimization of a vaned diffuser in a mixed flow pump to improve hydrodynamic performance [J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071104.
19 Luo X, Zhang Y, Peng J, et al. Impeller inlet geometry effect on performance improvement for centrifugal pumps[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(10): 1971 - 1976.
20 Lee Y T, Ahuja V, Hosangadi A, et al. Impeller design of a centrifugal fan with blade optimization[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2011(2011):ID537824.
21 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012.

(上接第 34 页)

9 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
10 胡鸿烈, 孙福辉. 单体仿形压轮式播种单组的设计与试验研究[J]. 农业机械学报, 1996, 27(10): 53 - 57.
Hu Honglie, Sun Fuhui. Study on designing and testing of the drill unit with individual profiling press wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(10): 53 - 57. (in Chinese)
11 贾洪雷, 王刚, 姜铁军, 等. 1GH - 3 型行间耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 35 - 41, 160.
Jia Honglei, Wang Gang, Jiang Tiejun, et al. Design and experiment of 1GH - 3 inter-row tillage machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6): 35 - 41, 160. (in Chinese)
12 Jia Honglei, Ma Chenglin, Li Guangyu, et al. Combined rototilling-stubble-breaking-planting machine[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1): 73 - 82.
13 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38 - 42.
Gu Yaoquan, Jia Honglei, Guo Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow openner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38 - 42. (in Chinese)
14 何进, 李洪文, 毛宁, 等. 玉米免耕播种深松联合作业机试验研究[J]. 农机化研究, 2004,4(6): 163 - 166.
He Jin, Li Hongwen, Mao Ning, et al. Experiment and research on drilling and subsoiling combined machine for no-tillae maize [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004,4(6): 163 - 166. (in Chinese)
15 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
16 成大先. 机械设计手册: 单行本. 弹簧 · 起重运输件 · 五金件[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
17 司海宝, 蔡正银. 基于 ABAQUS 建立土体本构模型库的研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 599 - 603.
Si Haibao, Cai Zhengyin. Development of static constitutive model library for soils based on ABAQUS[J]. Journal of Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 599 - 603. (in Chinese)
18 于英杰, 戈振扬, 李厚春, 等. 土壤压实对施肥机地轮滑移率影响的模拟[C]∥中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011.
19 赵振家, 邹猛, 薛龙, 等. 压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 311 - 313.
Zhao Zhenjia, Zhou Meng, Xue Long, et al. Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 311 - 313. (in Chinese)
20 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.
21 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995.