

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.06.016

低比转速混流式水轮机转轮上冠型线的优化方法

文哲男, 张英莉, 巴德纯, 岳向吉

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过混流式水轮机转轮上冠型线的优化,以提高水轮机效率为目的,基于 ISIGHT 软件集成 GAMBIT 和 ANSYS FLUENT16.0 软件,采用实验设计的最优拉丁超立方(optimal Latin hypercube, OLH)方法提出了 80 组设计方案.然后运用 ANSYS FLUENT16.0 软件对各方案进行数值计算,以设计工况下的水轮机效率为目标函数,进而用响应面方法(response surface method, RSM)得到近似模型.最后结合粒子群优化(PSO)算法进行自动优化设计,提出一种低比转速混流式水轮机转轮上冠型线的优化设计方法.该方法应用于模型混流式水轮机转轮上冠型线的优化设计,结果表明:优化后水轮机水力效率提高 0.35%,从而为混流式水轮机转轮上冠型线的优化设计提供了合理有效的途径.

关键词: 混流式水轮机; 转轮上冠; 数值模拟; PSO 算法; 计算流体力学

中图分类号: TK 730; TV 72

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)06-0839-05

Optimization Method for the Runner Crown Shape of a Low Specific Speed Francis Turbine

WEN Zhe-nan, ZHANG Ying-li, BA De-chun, YUE Xiang-ji

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: BA De-chun, E-mail: dchba@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The turbine efficiency was aimed to be improved through the optimization design of the runner crown shape in the Francis turbine. Based on ISIGHT software platform, a method which combined GAMBIT with ANSYS FLUENT16.0 software was presented. In this method, 80 sets of the sample points were generated using the optimal Latin hypercube (OLH) of the experiment design, whose performances were evaluated through ANSYS FLUENT16.0 software. The turbine efficiency in the design condition was used as the objective function, the approximate model was used based on the response surface method (RSM), and the optimization result was finally obtained using particle swarm optimization (PSO). The proposed method was applied for the optimization design of the runner crown shape of a model Francis turbine. The results indicated that the hydraulic efficiency of the Francis turbine increased by 0.35% through the optimization process. This method provided a reasonable and effective approach to the optimization design of the runner crown of Francis turbine.

Key words: Francis turbine; runner crown; numerical simulation; particle swarm optimization algorithm; computational fluid mechanics

混流式水轮机结构紧凑,效率较高,能适应很宽的水头范围,应用广泛.水轮机水力性能的好坏直接影响了水流能量的利用程度.水轮机流道部件的几何参数在很大程度上决定水轮机的过流能力.水轮机转轮设计方法主要有一维理论、二维理

论和三维理论^[1]:一维设计方法假定水流是理想流体、叶片无限薄、无限多,并不考虑液体的黏性影响;二维理论设计方法假定轴面速度沿过水断面是均匀分布的.用上述两种设计理论方法进行转轮叶片设计时,首先要确定转轮轴面流道部件,

收稿日期: 2017-01-26

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ24042101).

作者简介: 文哲男(1979-),男,朝鲜人,东北大学博士研究生;巴德纯(1954-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

转轮轴面流道设计通常采用下述两种方法:①首先用圆弧和直线给定转轮上冠和下冠型线,然后通过反复校正调整流道形状,得到转轮轴面型线;②先给定转轮流道中线以及流道面积变化规律,求取上冠和下冠型线.但这些方法精度低、准确性差.随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法的不断发展,CFD 分析技术已经广泛应用于水轮机流动分析与优化设计.国内外研究者关于透平机轴面流道优化设计方法进行了许多研究.郑源等^[2]采用 CFD 方法分析了在水轮机运行过程中效率降低的原因,通过调整叶片形式和选择三种不同的转轮上冠型线,对混流式水轮机转轮进行了优化设计. Wu 等^[3]在现有的混流式水轮机转轮进出口的直径和活动导叶高度不变的条件下,采用参数化的几何模型,初步生成了上冠形状,然后通过优化设计过程调整,最后获得合理的形状. Zhu 等^[4]采用 Bezier 曲线方法对可逆式水泵水轮机转轮进行参数化表达,以转轮轴面图几何参数为主要设计变量,以水力效率和最低压力值为目标函数,进行优化设计,得到了满意的优化结果.其他透平机械也可以采用类似的方法进行设计优化^[5].王凯等^[6]以离心泵叶轮轴面图的 5 个几何参数为设计变量,以泵的水力效率为目标,结合 CFD 和 DOE 方法,对叶轮轴面图进行了优化计算.选择合理的转轮上冠型线,对混流式水轮机的结构优化与性能提高具有重要意义,但目前还鲜有针对混流式水轮机转轮上冠进行优化设计的文献报道.本文基于 ISIGHT 软件的优化设计系统,以上冠型线的半径(R_2)和中心坐标(O_2)为优化变量,以水轮机效率作为优化目标,结合 CFD 方法和优化算法,对低比转速混流式水轮机转轮上冠进行优化设计,该方法为改善水轮机的性能提供了有价值的参考.

1 水轮机转轮上冠型线和问题的数学描述

如图 1 所示,混流式水轮机上冠型线可以分为曲线和直线型两种.直线型上冠型线(A 形)便于制造加工,但采用此种型线会导致水轮机单元流量减少及水力效率降低,特别是在大负荷时水轮机的水力效率更低.由于曲线形的上冠型线增加了转轮流道出口附近的过水断面面积(B 形和 C 形),有利于提高水轮机的单元流量和水力效率,故大部分水轮机采用曲线型上冠.

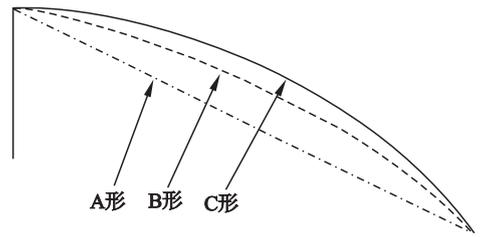


图 1 混流式水轮机上冠型线

Fig. 1 Crown shape of Francis turbine

在现有水轮机活动导叶高度和转轮进出口直径不变的条件下,搜寻最合理的上冠型线形状是上冠流道优化设计过程中需要面对的巨大挑战.图 2 为典型的低比转速混流式水轮机转轮轴面投影图,本文在转轮轴面图的二维平面上,以上冠型线的半径(R_2)和中心坐标 $O_2(X_2, Z_2)$ 作为转轮上冠型线的设计变量;即在导叶高度(ac)和转轮进口直径不变的条件下,以 R_2 和中心坐标的控制点 O_2 为优化变量, O_2 控制点坐标的变化范围通过该坐标值的变化值来控制,该变量分别为 ΔX , ΔZ , 优化问题的数学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} & \text{maximize: } f(X) = \eta. \\ & \text{over: } X = (R_2, \Delta X, \Delta Z), \\ & \text{subject to: } X_{lb} \leq X \leq X_{ub}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: X 为设计变量; $f(X)$ 为目标函数; X_{lb} 和 X_{ub} 分别为设计空间的变量下限和上限.

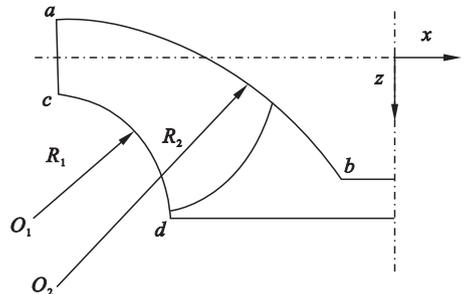


图 2 转轮的轴面投影图

Fig. 2 Meridional projection of runner passage

2 优化理论和方法

一般来说,设计过程可以被认为是一个与设计变量的目标值有关的函数优化问题.在本文的研究中,设计变量是转轮上冠型线的半径(R_2)和中心坐标(O_2),该设计变量采用实验设计方法中的 OLH 方法确定在设计空间的实验样本,通过 ANSYS FLUENT16.0 软件获得目标值,根据获得的输入变量点和目标值,利用 RSM 方法建立输入变量(设计变量)点和输出变量(效率)之间的

响应面关系,并基于此采用 PSO 算法在设计空间内寻找最优的转轮上冠型线,其优化系统如图 3 所示.

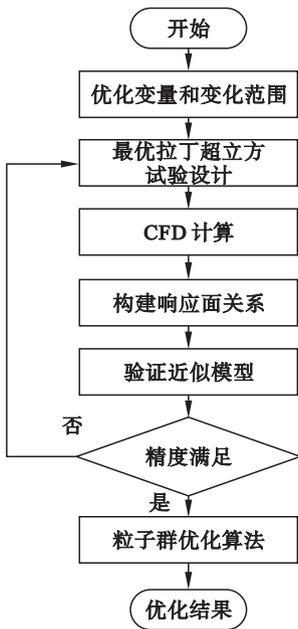


图 3 优化设计系统

Fig. 3 System of optimization design

2.1 CFD 分析

运用商用软件 ANSYS FLUENT16.0 对混流式水轮机内部流场进行数值模拟,考虑到混流式水轮机内部流动为复杂的三维不可压缩黏性湍流,基于不可压缩的连续性方程和三维雷诺平均的 Navier - Stokes 方程^[7-9],采用 Menter^[10]提出的剪切应力输运 (shear stress transports, SST) 湍流模型.控制方程如下:

连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \tag{2}$$

动量方程为

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u' u' u'_j}). \tag{3}$$

式中: u, p, μ 和 ρ 分别为流体的速度、压强、动力黏度、密度.

SST $k - \omega$ 湍流模型表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中: G_k 为湍流动能生成项; G_ω 为耗散方程产生项; Γ_k 和 Γ_ω 为 k 与 ω 的有效扩散系数; Y_k 和 Y_ω 为 k 与 ω 发散项; D_ω 为正交发散项; S_k 和 S_ω 为 k 与 ω 的源项. SST 湍流模型综合了 $k - \omega$ 模型在近壁区计算的优点和 $k - \varepsilon$ 模型在远场计算的优点,广泛应用于工程计算.

2.2 试验设计

在工程优化设计问题中近似模型的精度基于采用的样本数据,试验设计 (design of experiments, DOE) 方法提供有效且合理的数据,该方法在工程设计中有着广泛的应用. DOE 方法包括拉丁超立方设计、最优拉丁超立方设计、正交试验设计、中心组合设计等.最优拉丁超立方设计方法使所有的试验点均匀地分布在设计空间中,并且具有非常好的空间均衡性和填充性.因此本文采用 OLH 设计方法进行样本点的选取,即采用 80 组设计方案的样本点,设计变量的范围为 $[-10\%, 10\%]$.

2.3 近似模型

近似模型包括 RSM, Kinging 模型和径向基函数神经网络模型等.基于现代数理统计和最优优化理论方法的 RSM 是一种综合优化方法. RSM 可以通过较小的实验样本点在局部范围内比较精确地逼近函数关系,设计优化简便,具有良好的鲁棒性.通常 RSM 采用一阶或二阶的多项式来逼近响应面,大部分情况下应用二阶多项式.本文采用比较高准确性的二阶多项式响应面模型,可表示为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=2}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j. \tag{5}$$

式中: y 为输出变量; x_i, x_j 为设计变量; β_{ij} 为交叉项系数; k 为设计变量的个数; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为多项式各项系数,多项式各项系数可以采用最小二乘法来求解.为保证近似模型的精度,采用相关系数 R^2 判断近似模型的拟合精度.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T}. \tag{6}$$

式中: $SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$; $SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$. n 为样本点数; \hat{y}_i 为预测值; \bar{y} 为平均值; y_i 为真实值. R^2 的大小在 $[0, 1]$ 之间,一般要求在 0.9 以上,其值越接近 1 说明拟合的程度越好.通过响应面模型的构建,得到设计变量和性能参数之间的关系式.

2.4 遗传算法

随着计算机技术的不断发展和智能仿生优化

算法的进步,目前已经开发了许多进化算法. PSO 算法^[11]类比于鸟类的飞行空间,来源于对鸟群捕食行为的模拟. 利用 PSO 算法求解优化问题时,每个粒子代表探索空间中的一个可能的解,每个粒子都有速度、位置以及一个由优化函数决定的适应值,粒子的速度决定飞行方向和距离,它的位置表示优化问题的可能解. PSO 算法中,粒子 i 在 m 维探索空间中的位置表示矢量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im})$, 该粒子 i 当前飞行的速度表示矢量 $V_i = (u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, \dots, u_{im})$, 粒子 i 所经历的最好位置表示 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{im})$. 粒子 i 在 $k+1$ 时刻的第 m 维空间中速度和位置可表示为^[11]

$$V_{im}^{k+1} = \omega V_{im}^k + c_1 r_1 (P_{im}^k - X_{im}^k) + c_2 r_2 (P_{gm}^k - X_{im}^k). \quad (7)$$

$$X_{im}^{k+1} = X_{im}^k + V_{im}^{k+1}. \quad (8)$$

式中: ω 为惯性因子; k 为当前迭代次数; c_1 和 c_2 为加速因子; r_1 和 r_2 为在 $[0, 1]$ 间的随机值. PSO 的探索性能取决于算法的控制参数: 最大迭代次数、粒子数、惯性权重和加速常数等. PSO 算法的控制参数: 最大迭代次数 100, 粒子数 100, 惯性权重 1.0, 全球增加 0.9, 粒子增加 0.9.

3 优化设计实例

3.1 计算对象与边界条件

某电站的模型混流式水轮机的基本参数为: 模型转轮直径 D_1 为 0.35 m, 叶片个数 19, 设计水头 30 m, 蜗壳进口直径 272.4 mm, 活动导叶分布圆直径 $D_0 = 1.19444 D_1$, 单位转速 54.9 r/min.

运用 GAMBIT 软件, 对混流式水轮机蜗壳和转轮等过流部件的流道进行三维建模, 如图 4 所示. 流动模型包括混流式水轮机从蜗壳进口到尾水管出口的流动区域. 为了提高数值模拟的准确性, 将流动区域划分为五部分: 蜗壳、固定导叶、活动导叶、转轮和尾水管各部分的耦合面设置 Interface. 考虑转轮部分的几何形状复杂, 该流动区域采用适用性比较强的四面体非结构化网格, 其他流动区域采用六面体网格. 转轮流道内的水体设置在旋转坐标系下, 其余水体设置在固定坐标系下, 计算域的进出口边界条件设置为压力边界, 固体壁面为无滑移光滑壁面. 为了提高计算精度, 对压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 采用二阶精度的空间离散方法. 为平衡计算精度与计算时间, 对水轮机活动导叶开度为 21° 的工况划分计算网格, 在 200~800 万网格数区间内选取七组不同网格规模的水轮机全流场数值模型分别进

行数值计算, 并将数值模拟计算结果进行对比. 图 5 给出了不同网格数时设计工况点的混流式水轮机效率. 当网格数达到 700 万以上时, 水轮机效率相对误差为 0.05%, 为节约计算资源采用 700 万网格规模进行后续优化计算.

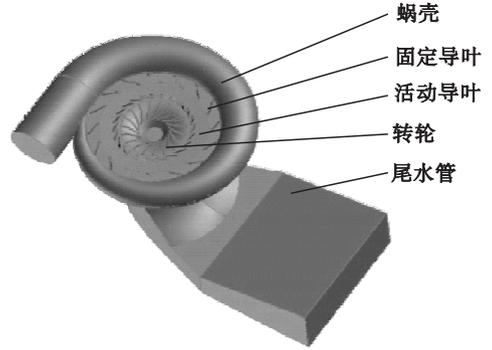


图 4 混流式水轮机三维几何模型
Fig. 4 3D modeling of Francis turbine

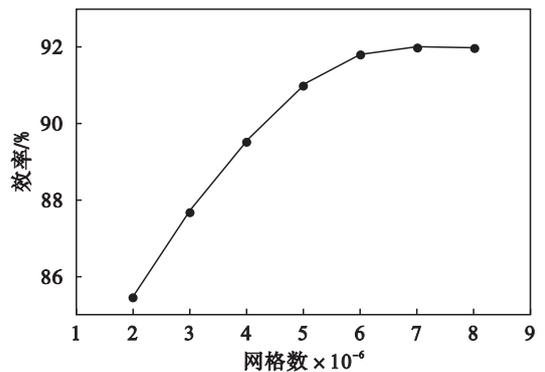


图 5 网格独立性的验证
Fig. 5 Verification of grid independence

3.2 优化结果及分析

选取混流式水轮机设计工况点的转轮水力效率为优化目标, 以转轮上冠型线的半径和它的中心坐标为优化变量, 对混流式水轮机进行优化设计. 基于 80 个设计样本, 对各方案进行数值模拟计算, 其中采用 65 个设计样本, 建立了输入变量与输出变量之间的响应面关系, 然后利用 15 个设计样本验证近似模型的精确度. 近似模型计算结果与 15 个 CFD 计算结果对比如图 6 所示. 由图 6 可以看到, 近似模型具有较高的可靠性, 该模型精确度的相关系数为 0.978, 即 R^2 大于 0.9, 因此构建的近似模型可以用于求解最优解. 采用 PSO 算法对近似模型进行计算, 经过 10 000 步迭代计算, 得到了最优值, 优化前和优化后结果对比如表 1 所示, 优化后在设计工况点下水力效率提升了 0.35%. 图 7 给出优化前后转轮上冠形状对比.

基于获得的优化方案, 再对 5 个不同活动导

叶开度的计算工况点优化前、后的混流式水轮机性能进行数值模拟计算,并进行对比分析,结果如图 8 所示. 可以看到,在小流量工况下整个水轮机水力效率提高程度较少,在大流量工况下水轮机效率明显增加. 由以上分析结果可知,转轮上冠型线优化可以提高混流式水轮机的水力效率.

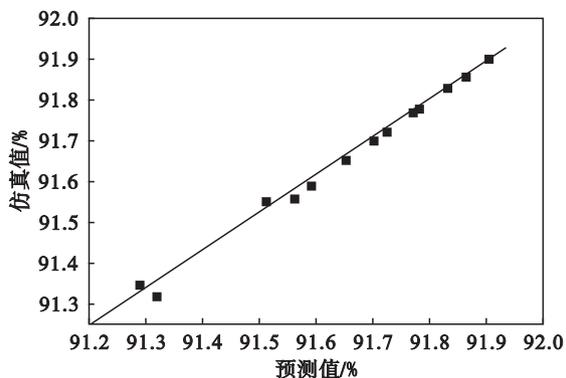


图 6 RSM 近似模型验证

Fig. 6 Validation of response surface approximate model

表 1 优化前后结果对比

Table 1 Result comparison before and after optimization

结果	R_2/mm	X/mm	Z/mm	$\eta/\%$
优化前	164.69	-183.746	145.674	91.98
优化后	179.53	-165.37	160.11	92.33

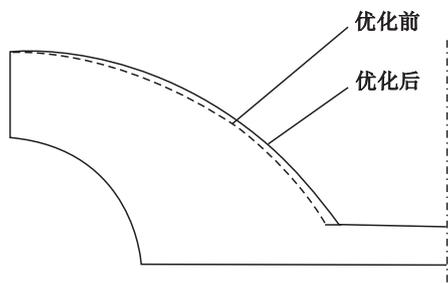


图 7 优化前后转轮上冠比较

Fig. 7 Shape comparison of runner crown before and after optimization

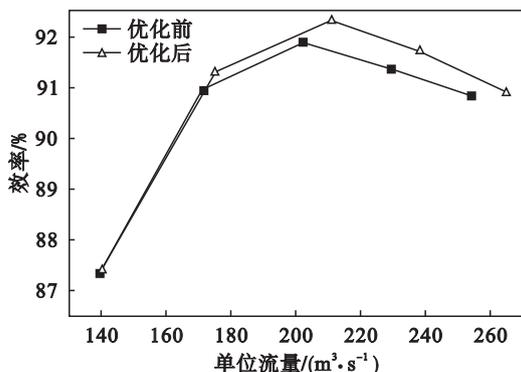


图 8 单位流量 - 效率关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of unit flow and efficiency

4 结 论

本文结合 DOE 方法、CFD 方法、RSM 和 PSO 算法,建立了混流式水轮机转轮上冠优化设计方法,该方法提高了转轮水力效率,显著减少 CFD 数值模拟求解次数. 采用建立的优化设计方法对某电站的低比转速混流式水轮机转轮上冠型线进行了优化设计,优化后的水轮机效率在设计工况点提高了 0.35%. 表明此优化方法可以为混流式水轮机优化设计提供有效的途径.

参考文献:

- [1] 郑源,陈德新. 水轮机[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
(Zheng Yuan, Chen De-xin. Hydroturbine [M]. Beijing: China Water & Power Press,2011.)
- [2] 郑源,杨春霞,周大庆,等. 卧轴双转轮混流式水轮机的优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(3):341-345.
(Zheng Yuan, Yang Chun-xia, Zhou Da-qing, et al. Optimization design of horizontal Francis turbine with two runners[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(3):341-345.)
- [3] Wu J C, Shimmei K, Tani K, et al. CFD-based design optimization for hydro turbines [J]. Journal of Fluids Engineering, 2007,129(2):159-168.
- [4] Zhu B, Wang X, Tan L, et al. Optimization design of a reversible pump-turbine runner with high efficiency and stability[J]. Renewable Energy, 2015,81:366-376.
- [5] Wang J, Wang D, Cai W X, et al. Study on the influence of meridional channel to centrifugal compressor performance [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 220: 592-596.
- [6] 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 Hou-lin, Yuan Shou-qi, et al. Automatic optimization of impeller meridional shape for centrifugal pumps based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10):39-43.)
- [7] Yang C X, Zheng Y, Li L Y. Optimization design and performance analysis of a pit turbine with ultralow head[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6(4): 226-232.
- [8] Ruprecht A. Unsteady flow simulation in hydraulic machinery [J]. Task Quarterly, 2002,6(1):187-208.
- [9] Choi H J, Zullah M A, Roh H W, et al. CFD validation of performance improvement of a 500kW Francis turbine[J]. Renewable Energy, 2013,54(6):111-123.
- [10] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 2012,32(8): 1598-1605.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, 1995:1942-1948.