

核动力二回路系统优化设计

刘成洋, 阎昌琪, 王建军, 刘振海

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 二回路系统是船舶核动力装置的重要组成部分, 其重量和尺寸是影响核动力装置合理布置的重要因素。随着船用核动力装置大功率、高推进速度的发展趋势, 二回路系统重量和体积进一步增加, 对核动力设备的设计安装带来困难, 并严重影响船舶的机动性。本工作建立了二回路系统的数学模型, 开发了相应的计算程序, 并对影响二回路重量的设计参数进行了敏感性分析。以二回路重量最小为目标和在给定的约束条件下, 采用混合粒子群算法对二回路系统进行了优化设计。研究结果显示, 采用优化方案后, 二回路系统重量减小了7%。最后对计算结果进行了分析, 指明了二回路系统优化设计的方向。

关键词: 二回路系统; 重量; 混合粒子群算法; 优化设计

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)03-0421-06

doi: 10.7538/yzk.2013.47.03.0421

Optimization Design for Secondary Circuit of Nuclear Power System

LIU Cheng-yang, YAN Chang-qi, WANG Jian-jun, LIU Zhen-hai

(National Defense Key Discipline Laboratory of Nuclear Safety and Simulation Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Secondary circuit system is important part of marine nuclear power plant whose weight and dimension are key factors to influence the rational arrangement of nuclear power plant. The trend of using high power and rapid propelling speed of marine nuclear power plant has resulted in that the weight and volume of secondary circuit system increase further, which causes difficulties to the design and arrangement of the nuclear power equipment, and that the marine maneuverability is seriously influenced. The mathematic model of secondary circuit system was established, and the corresponding codes were also developed. The sensitivity of design parameters influencing the secondary circuit system weight was analyzed. Taking the weight minimization as the objective, the design optimization of the secondary circuit system was carried out with the hybrid particle swarm optimization (HPSO) algorithm under the restriction conditions. Study results show that the secondary circuit system weight is reduced by 7% with the optimization scheme. Finally, the optimization results were analyzed, and the direction to guide design optimization of the secondary circuit system was indicated.

Key words: secondary circuit system; weight; hybrid particle swarm optimization algorithm; optimal design

二回路系统的主要功能是将反应堆及一回路系统产生并传递来的热量转化为船舶航行所需要的机械能,并生产动力装置及全船所需的电能和淡水^[1]。随着核动力船舶大吨位、大功率的发展趋势,二回路系统重量也在进一步增加,这将影响核动力装置性能的提高和船员的生活居住条件,增大大事故的发生率。因而对核动力二回路系统进行建模,选择合理的优化方法对其参数进行优化设计以减小二回路系统的重量,具有重要的理论和现实意义^[2]。

粒子群^[3]和遗传算法^[4]均已广泛应用于许多工程研究领域,也开始在核动力装置优化设计方面得到采用。Anderson等^[5]利用粒子群算法对压水反应堆核燃料装载问题进行了优化,Sacco等^[6]应用小生境遗传算法对堆芯进行了优化设计。本文拟提出一种混合粒子群算法,该算法运用复合形算法产生初始可行群体^[7],引入遗传算法中的交叉和变异策略^[8],避免粒子群陷入局部最优。通过对测试函数的计算,证明混合粒子群算法的全局搜索性和快速收敛性。在建立二回路数学模型的基础上,运用混合粒子群算法对其重量进行优化设计。

1 数学模型

核动力二回路系统主要包括蒸汽发生器、汽轮机、冷凝器、齿轮减速器、除氧器和给水加热器等设备。二回路系统是各组成设备的综合体,总体设计参数间是相互关联的,不能孤立确定。例如,提高蒸汽发生器二回路工作压力可间接提高汽轮机进汽参数;降低冷凝器冷凝压力可增加蒸汽在汽轮机中的焓降;汽轮机高低压缸功率比的变化会改变齿轮减速器轴功率。在核动力二回路系统的参数初步优化设计阶段,本文将简化二回路系统,只建立由蒸汽发生器、汽轮机、冷凝器和齿轮减速器组成的二回路数学模型。简化的二回路系统示于图1。

1.1 蒸汽发生器数学模型

蒸汽发生器为立式自然循环U形管式,主要由上封头、上筒体、下筒体、管束、管板和下封头等11个部件组成。蒸汽发生器设计步骤详见文献^[9],蒸汽发生器重量可由式(1)确定:

$$W_{SG} = W_{uh} + W_{sp} + W_{us} + W_s + W_c + W_w + W_{st} + W_{ls} + W_{ts} + W_{lp} + W_{lh} \quad (1)$$

其中: W_{SG} 为蒸汽发生器总重量,t; W_{uh} 、 W_{sp} 、 W_{us} 、 W_s 、 W_c 、 W_w 、 W_{st} 、 W_{ls} 、 W_{ts} 、 W_{lp} 、 W_{lh} 分别为蒸汽发生器上封头、汽水分离器、上筒体、支撑隔板、锥形筒体、套筒、传热管管束、下筒体、管板、水室隔板和下封头的重量,t。

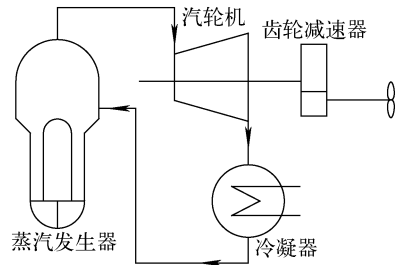


图1 二回路系统简图

Fig. 1 Scheme of secondary circuit system

1.2 汽轮机数学模型

汽轮机重量主要取决于它的外形尺寸,并与其结构形式和蒸汽参数有关,为简化计算模型,本文采用按汽缸最大直径与长度计算的方法^[2]:

$$W_T(i, j) = \sum_i^N \sum_j^{M(i)} \gamma_{ij} \frac{\pi D_{ij}^2}{4} L_{ij} \quad (2)$$

式中: W_T 为汽轮机重量,t; N 为汽轮机汽缸类型数目; $M(i)$ 为第*i*类型汽缸的数目; γ_{ij} 为第*i*类型第*j*个汽缸单位体积重量,t/m³; D_{ij} 为第*i*类型第*j*个汽缸的最大直径,m; L_{ij} 为第*i*类型第*j*个汽缸的最大长度,m。

1.3 冷凝器数学模型

冷凝器热计算和结构尺寸计算按下列步骤进行:1)确定传热系数*k*;2)确定传热面积*F*;3)确定冷却管数目*N_c*;4)进行冷却管振动校核;5)确定冷却管尺寸;6)确定管板尺寸;7)确定冷凝器尺寸;8)确定冷凝器重量。详细热计算和结构尺寸计算按文献^[10]进行,其中水和水蒸气物性采用基于IF97标准的水和水蒸气物性计算子程序计算。

冷凝器重量可由下式确定:

$$W_{Con} = W_{tube} + W_{gb} + W_{zc} + W_{qt} + W_{other} \quad (3)$$

$$W_{tube} = \rho_{tube} \frac{\pi (d_o - d_i)^2}{4} L N_c \quad (4)$$

$$W_{gb} = n_{gb} \rho_{gb} S_{gb} \delta_{gb} \quad (5)$$

$$W_{zc} = n_{zc} \rho_{zc} S_{zc} \delta_{zc} \quad (6)$$

式中: W_{Con} 为冷凝器总重量,t; W_{tube} 、 W_{gb} 、 W_{zc} 、 W_{qt} 、 W_{other} 分别为冷凝器冷却管、管板、支撑隔

板、壳体和冷凝器其他部件的重量, t ; ρ_{tube} 、 ρ_{gb} 、 ρ_{zc} 分别为冷却管、管板和支撑隔板材料的密度, kg/m^3 ; d_i 、 d_o 分别为冷却管内径和外径, m ; L 为冷却管长度, m ; N_c 为冷却管数目; n_{gb} 、 n_{zc} 分别为管板和支撑隔板的数目; S_{gb} 、 S_{zc} 分别为管板和支撑隔板的面积, m^2 ; δ_{gb} 、 δ_{zc} 分别为管板和支撑隔板的厚度, m 。

1.4 齿轮减速器数学模型

齿轮减速器的具体设计内容详见文献[11-12], 齿轮减速器的重量可由下式确定:

$$W_G = \beta \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} (3.35 + 3.90d_{ij}^2) b_{ij} \quad (7)$$

式中: W_G 为减速器重量, t ; β 为设备重量系数, t/m^3 ; I 为减速器级数; $J(i)$ 为第 i 级减速器中减速齿轮组数; d_{ij} 为第 i 级减速器第 j 个齿轮组的大齿轮分度圆直径, m ; b_{ij} 为第 i 级减速器第 j 个齿轮组的齿宽, m 。

1.5 二回路重量

二回路重量 W_s 为蒸汽发生器重量、汽轮机重量、冷凝器重量和齿轮减速器重量的总和:

$$W_s = W_{\text{SG}} + W_{\text{T}} + W_{\text{Con}} + W_G \quad (8)$$

2 混合粒子群算法

在对各种改进粒子群算法研究的基础上, 提出了一种混合粒子群算法 (HPSO)。该算法运用复合形算法产生粒子群算法的初始可行群体, 加快粒子群的收敛速度; 引入遗传算法中的交叉和变异策略, 避免粒子群陷入局部最优。混合粒子群算法流程如图 2 所示。

测试函数为:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) &= (x_1 - 10)^3 + (x_2 - 20)^3 \\ g_1(\mathbf{x}) &= -(x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 + 100 \leq 0 \\ g_2(\mathbf{x}) &= (x_1 - 6)^2 + (x_2 - 5)^2 - 82.81 \leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $13 \leq x_1 \leq 100$, $0 \leq x_2 \leq 100$ 。理论最优解位于 $x^* = (14.095, 0.84296)$, 最优值 $f(x^*) = -6961.81388$ 。该问题的可行域占搜索空间的比值为 0.0057%, 因此优化算法需有较好的搜索能力。

实验参数设置为: $c_1 = c_2 = 2.0$, $\omega_0 = 0.9$, $\omega_1 = 0.5$, $P_c = 0.8$, $P_m = 0.1$ 。取粒子数为 50, 运行 100 代, 测试用例在相同条件下独立运行 5 次。计算结果列于表 1。

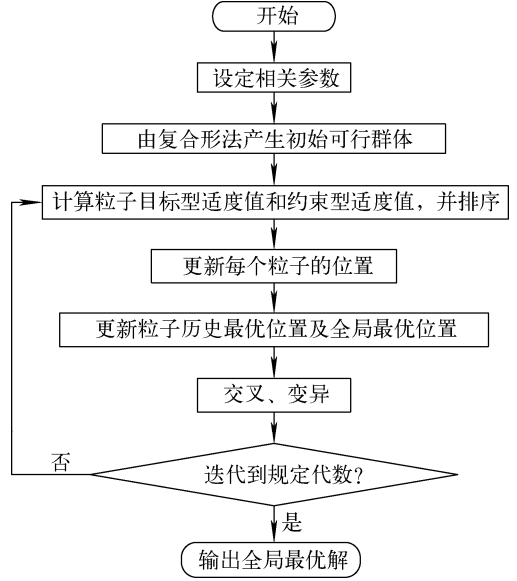


图 2 混合粒子群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of HPSO

表 1 测试函数计算结果

Table 1 Results of testing function

次数	t/s	x_1	x_2	f	δ
1	7.1	14.095	0.84299	-6961.78	-4.57×10^{-4}
2	7.2	14.095	0.84296	-6961.81	-2.28×10^{-5}
3	7.0	14.095	0.84297	-6961.81	-8.01×10^{-5}
4	7.3	14.095	0.84302	-6961.75	-9.82×10^{-4}
5	6.6	14.095	0.84296	-6961.81	-5.85×10^{-5}

从表 1 可看出, 本算法得到的结果与理论最优值的误差均在 10^{-4} 以上, 且 5 次计算平均用时 7 s, 证明混合粒子群算法有很好的优化性能。因此, 本文选择混合粒子群算法进行二回路优化设计。

3 二回路系统重量优化设计

3.1 优化变量

影响核动力装置二回路重量的参数有热工参数和结构参数等, 本文仅对影响核动力二回路重量的主要参数进行优化, 选取下列 5 个优化变量: 蒸汽发生器二回路工作压力 p_s 、传热管外径 d_{os} 、传热管节径比 α_s 、冷凝器压力 p_{co} 和汽轮机高低压缸功率比 φ_t , 故取优化变量组合为:

$$\mathbf{X} = [p_s, d_{os}, \alpha_s, p_{co}, \varphi_t]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T \quad (10)$$

3.2 目标函数

在最优化设计中, 一般对特定优化设计问

题所追求的目标用设计变量的数学函数关系式表达。在核动力二回路系统的参数优化设计中,目标函数为:

$$\begin{aligned} \text{Min } W_S(\mathbf{X}) &= \text{Min } W_S(p_s, d_{os}, \alpha_s, p_{co}, \varphi_t) \\ X_{OP} \leftarrow R \end{aligned}$$

$$R = \{\mathbf{X} \mid \varphi_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m\} \quad (11)$$

其中: $\varphi_j(x)$ 为约束函数; m 为约束函数个数。

3.3 约束条件

基于核动力二回路系统汽动性能、结构强度和合理布置等要求,二回路系统的优化设计必须满足下列约束条件。

1) 变量约束:二回路压力 p_s 、蒸汽发生器传热管外径 d_{os} 、蒸汽发生器传热管节径比 α_s 、冷凝器压力 p_{co} 和汽轮机高低压缸功率比 φ_t 均在一定范围内。

2) 性能约束:汽轮机有一定的功率储备,蒸汽发生器二回路水循环速度 u_s 、循环倍率 m 、汽轮机末级圆周速度 u_z 、冷却水阻 Δp 、凝液过冷度 Δt_{sub} 和减速器齿轮圆周速度 u_G 均在一定范围内。

3) 结构约束:蒸汽发生器高度与直径比 L_s/D_s 、调节级径高比 λ_{Gov} 、高压缸末级径高比 λ_{Hz} 、低压缸末级径高比 λ_{Lz} 、调节级第 2 列动叶片总应力 σ_{Gov} 、高压缸末级动叶片总应力 σ_{Hz} 、低压缸末级动叶片总应力 σ_{Lz} 、冷却管壁厚 t_m 、

冷凝器壳体长度与宽度比 L_k/W_k 、冷却管节距与冷却管外径比 δ_p/d_p 、减速器齿轮的齿面接触应力 σ_H 和齿根弯曲应力 σ_F 均在一定范围内,减速器齿轮不发生根切,减速器高速级大齿轮齿顶与低速轴不发生干涉相碰。

所有约束函数均写成式(11)中 $\varphi_j(x) \leq 0$ 的形式,则加权约束总值为:

$$\phi_j(x) = \sum_{j=0}^m \lambda \cdot \varphi_j(x) \quad \varphi_j(x) > 0 \quad (12)$$

式中, λ 为约束权值, $\lambda = 1/m$ 。满足约束时, $\phi_j(x) = 0$,不满足约束时, $\phi_j(x) > 0$ 。

3.4 敏感性分析

本文利用 C# 语言编制二回路数学模型评价程序,并对优化变量进行敏感性分析。图 3a~e 分别示出 5 种变量对二回路系统重量的影响,图中还示出加权约束总值随优化变量的变化曲线。图 3 中优化变量和重量均为归一化无量纲参数。

由图 3a 可见,二回路重量 W_s 随蒸汽发生器二回路工作压力 p_s 增加基本呈增大的趋势。在其他设计参数一定时, p_s 增大,蒸汽发生器二次侧蒸汽产量降低,蒸汽发生器二次侧饱和水温度升高,一、二次侧的传热温差降低,则蒸汽发生器传热面积增大,从而使管束重量增加,故蒸汽发生器重量增大; p_s 增大,汽轮机进汽参数

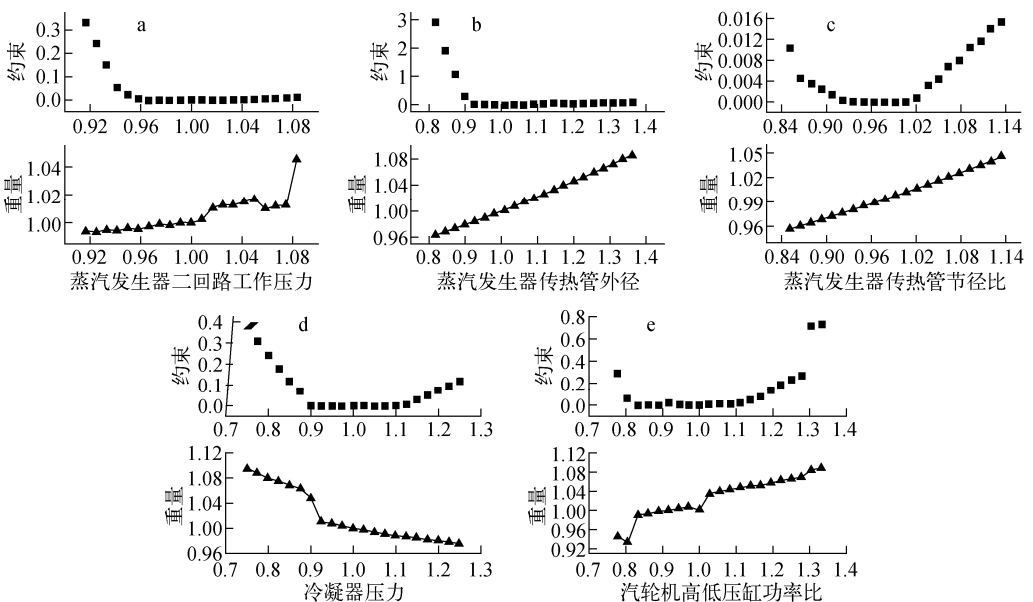


图 3 优化变量对二回路系统重量的影响

Fig. 3 Influence on secondary circuit system weight by optimization variables

提高,机组焓降增大,则所需蒸汽体积流量降低,从而使汽轮机尺寸减小; p_s 增大,汽轮机排汽量降低,则冷凝器热负荷降低,故冷凝器尺寸减小。 p_s 增加,蒸汽发生器重量增加起主导作用,因此二回路重量呈增大的趋势。在 p_s 为0.96~1.04的范围内,加权约束总值基本为零,即满足约束条件,因而二回路系统重量最优值应在此范围内取得。

由图3b可见,二回路重量 W_s 随传热管外径 d_{os} 增加呈线性增大的趋势。较小的 d_{os} 可有效提高蒸汽发生器一次侧强迫对流换热系数,减小换热面积。在 α_s 不变时, d_{os} 减小,传热管节距减小从而使管束结构紧凑,使蒸汽发生器的外形尺寸降低。因此,蒸汽发生器重量随 d_{os} 呈线性正比例变化。在 d_{os} 大于0.9的范围内,计算结果满足约束,因此二回路系统重量最优值应在此范围内取得。

由图3c可见,二回路重量 W_s 随传热管节径比 α_s 增加呈线性增大的趋势。 α_s 是蒸汽发生器传热管节距与传热管外径的比值,其变化主要影响传热管束的紧凑程度,而传热管节距的大小对换热性能、流动性能和结构均产生了较大影响。在 d_{os} 不变时, α_s 减小,导致传热管节距减小,从而使管束结构紧凑,使蒸汽发生器的外形尺寸降低,在相同换热量下换热面积减小,从而使蒸汽发生器重量减小。在 α_s 为0.87~1.02的范围内,计算结果满足约束,因此二回路系统重量最优值应在此范围内取得。

由图3d可见,二回路重量 W_s 随冷凝器压力 p_{co} 增加基本呈减小的趋势。在其他设计参数一定时, p_{co} 增大,汽轮机机组焓降减小,在机组功率输出不变时所需蒸汽质量增加,但在 p_{co} 计算范围内,蒸汽平均比热容减小起主导作用,蒸汽体积流量减小,从而使汽轮机的尺寸和重量减小。汽轮机所需蒸汽量增大,则蒸汽发生器的蒸汽产量增大,一、二次侧传热量增大,则传热面积增大,从而使蒸汽发生器重量增大。汽轮机排汽量增大,但冷凝器压力增大,单位质量蒸汽的热负荷降低,在冷凝器压力计算范围内,冷凝器总热负荷是降低的,故冷凝器尺寸和重量减小。综上可知,随 p_{co} 增大,汽轮机和冷凝器重量减小起主导作用,二回路重量呈减小的趋势。在 p_{co} 为0.9~1.1的范围内,二回路

系统重量取得最优值。

由图3e可见,二回路重量 W_s 随汽轮机高低压缸功率比 φ_t 增加基本呈增大的趋势。在其他设计参数一定时, φ_t 影响了汽轮机和减速器重量。 φ_t 增大,高压缸分配焓降增大,则高压缸平均直径和轴向长度增大,相应低压缸分配焓降减小,轴向长度减小。在 φ_t 取值范围内,汽轮机高速轴和低速轴的功率输出影响了减速器的重量。在 φ_t 为0.85~1.05的范围内,二回路系统重量取得最优值。

3.5 优化结果

本文采用混合粒子群算法对核动力二回路重量进行寻优计算,在五维可行域内寻找使二回路重量达到最小值的设计参数组合,优化结果列于表2。其中,各参数均为无量纲归一化数值。

表2 二回路系统重量优化结果

Table 2 Optimal results of secondary circuit system weight

名称	无量纲参数	优化值	优化率/%
优化变量	蒸汽发生器二回路工作压力	1.03	3
	蒸汽发生器传热管外径	0.91	-9
	蒸汽发生器传热管节径比	0.89	-11
	冷凝器压力	1.25	25
	高低压缸功率比	0.96	-4
部分约束条件	蒸汽发生器换热面积	1.00	0
	蒸汽发生器蒸汽产量	1.03	3
	低压缸出口蒸汽实际干度	1.00	0
	全速级末级动叶拉应力	1.01	1
	冷却水过冷度	0.99	-1
	齿轮减速器第2级	1.02	2
	大齿轮弯曲应力	0.98	-2
第2级齿轮轮周速度	0.98	-2	
目标函数	二回路重量	0.93	-7

优化结果显示,在满足核动力二回路系统的设计约束条件下,采用混合粒子群算法对其参数进行优化后,二回路重量得到了明显优化。与原方案相比,核动力装置二回路重量减少了7%,表明原有二回路设计具有一定的优化空间。最优设计变量与母型设计变量相比,二回路压力增加了3%,蒸汽发生器传热管外径减小了9%,蒸汽发生器传热管节径比减小了11%,冷凝器压力增加了25%,汽轮机高低压缸功率比减小了4%。

由敏感性分析可知,在 p_s 范围为 $[0.96, 1.04]$ 、 d_{os} 范围为 $[0.9, 1.02]$ 、 α_s 范围为 $[0.87, 1.02]$ 、 p_{co} 范围为 $[0.9, 1.25]$ 和 φ_t 范围为 $[0.85, 1.05]$ 内,二回路重量能取得最优值,且计算结果满足约束条件,表 2 的计算结果也验证了敏感性分析的准确性。因而优化结果可行,结果显著。

由此可见,在核动力二回路系统的设计中引入最优化方法是合理可行的,通过合理地选择和改变相关变量,即可使二回路系统性能得到提升。这种方法不仅克服了传统半经验设计方法的不足,同时也可作为工程设计提供技术参考。

4 结论

本文建立了由蒸汽发生器等 4 种设备组成的核动力二回路系统数学模型,对影响二回路系统重量的参数作了敏感性分析,应用混合粒子群算法对核动力二回路系统进行参数优化设计,并得出以下结论。

1) 本文提出的数学模型对核动力二回路系统重量优化是有效的,优化效果显著。

2) 计算结果表明,在满足约束条件下,优化后的二回路重量减小了 7%,表明二回路系统的设计具有一定的优化空间,适当增加蒸汽发生器二回路工作压力和冷凝器压力,适当减小蒸汽发生器传热管外径、传热管节径比和汽轮机高低压缸功率比,可减小二回路系统重量。

3) 本文进行的核动力二回路的优化是多变量单目标的优化,混合粒子群优化算法可解决诸如此类的复杂的工程实际问题。另外,对二回路的优化还可从体积、效率及可靠性等方面入手,进行多变量多目标的优化。

参考文献:

[1] 彭敏俊. 船舶核动力装置[M]. 北京:原子能出版社,2009:101-102.

[2] 刘成洋,阎昌琪,王建军. 船舶汽轮机组初步优化设计研究[J]. 船舶工程,2011,33(Z2):57-60. LIU Chengyang, YAN Changqi, WANG Jianjun. Study on the optimal design of ship steam turbine unit [J]. Ship Engineering, 2011, 33 (Z2): 57-60(in Chinese).

[3] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C] // IEEE International

Conference on Neural Networks. USA: IEEE, 1995: 1 942-1 948.

- [4] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [5] ANDERSON A M M, MARCELO D M, ROBERTO S. Particle swarm optimization applied to the nuclear reload problem of a pressurized water reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 51 (2): 319-326.
- [6] SACCO W F, MARCELO D M, CLAUDIO M N A, et al. The fuzzy clearing approach for a niching genetic algorithm applied to a nuclear reactor core design optimization problem[J]. Annals of Nuclear Energy, 2004, 31(1): 55-69.
- [7] 王福林,吴昌友,杨辉. 用遗传算法求解约束优化问题时初始种群产生方法的探讨[J]. 东北农业大学学报,2004,35(5):608-611. WANG Fulin, WU Changyou, YANG Hui. Study on the productive method on the initial population by using genetic algorithm to solve the constrained optimization problem[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2004, 35(5): 608-611(in Chinese).
- [8] HIGASHI N, IBA H. Particle swarm optimization with Gaussian mutation[C]//IEEE Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium. Indianapolis: IEEE Inc., 2003: 72-79.
- [9] 秦慧敏,阎昌琪,王建军,等. 立式自然循环蒸汽发生器的重量优化设计[J]. 原子能科学技术, 2011,45(1):66-72. QIN Huimin, YAN Changqi, WANG Jianjun, et al. Optimal design of vertical circulation steam generator weight[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(1): 66-72(in Chinese).
- [10] 郑静,阎昌琪,王建军. 核动力装置冷凝器体积的优化设计[J]. 原子能科学技术,2011,45(1): 60-65. ZHENG Jing, YAN Changqi, WANG Jianjun. Optimal design of condenser volume in nuclear power plant [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(1): 60-65(in Chinese).
- [11] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [12] 中国机械工业联合会. JB/T8830—2001 高速渐开线圆柱齿轮和类似要求齿轮承载能力计算方法[S]. 北京:机械科学研究院,2001.