

基于改进多种群遗传算法的核电热力系统 参数优化

鹿纯彬 邢天阳 朱小良 胥建群

(东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘要: 核电机组二回路热力系统是将热能转化为机械能并进行发电的关键部分, 在保证安全的基础上提高其效率具有重要意义。对此, 首先根据热平衡法建立热力系统的数学模型。其次, 在多种群遗传算法的基础上增加并行机制与协同策略, 结合自适应策略提出一种改进多种群遗传算法, 并利用测试函数测试其寻优性能。最后, 以机组循环热效率为目标函数, 回热再热抽汽流量为决策变量, 在约束条件下采用改进算法对热力系统进行优化设计。结果表明: 改进多种群遗传算法比标准遗传算法与多种群遗传算法更有效率且收敛精度高; 采用该优化算法后, 机组循环热效率提高了 1.18%。

关键词: 核电热力系统; 改进式多种群遗传算法; 参数优化; 循环热效率

分类号: TL48

文献标识码: A

文章编号: 1001-5884(2024)03-0212-05

Optimization of Nuclear Power Thermal System Parameters Based on Improved Multi-population Genetic Algorithm

LU Chun-bin, XING Tian-yang, ZHU Xiao-liang, XU Jian-qun

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The two-loop thermal system of a nuclear power unit is the key part that converts thermal energy into mechanical energy and generates electricity, and it is of great significance to improve its efficiency on the basis of ensuring safety. In this regard, firstly, a mathematical model of the thermal system is established based on the heat balance method. Secondly, an improved multi-population genetic algorithm is proposed on the basis of multi-population genetic algorithm by adding parallel mechanism and collaborative strategy and combining with adaptive strategy, and its optimization-seeking performance is tested by using test function. Finally, the improved algorithm is used to optimize the thermal system under the constraints with the thermal efficiency of the unit cycle as the objective function and the return heat and reheat steam flow rate as the decision variable. The results show that the improved multi-population genetic algorithm is more efficient and has higher convergence accuracy than the standard genetic algorithm with multi-population genetic algorithm; the thermal efficiency of the unit cycle is improved by 1.18%.

Key words: nuclear power thermal system; improved multi-population genetic algorithm; parameter optimization; circulation thermal efficiency

0 前 言

由于能源消耗的增加, 能源资源正在迅速枯竭, 因此节能与高效成为能源发展趋势。核电作为一种清洁能源满足需求, 但与使用化石燃料的火电机组相比, 其热效率较低^[1], 因为核电机组的主蒸汽压力与温度明显低于火电机组。考虑到较低的热效率会降低核电机组的热经济性, 专家学者对此展开了研究。

邓世敏^[2]等采用非线性规划法通过变动汽轮机抽汽压力对汽轮机通流部分改造后的回热系统进行优化, 得到给水焓升最佳分配方案, 进一步提高机组性能。张松梅^[3]等在钠冷快堆热力系统的基础上研究不同加热器布置与给水焓升分配方案, 确定等焓降法的分配方案热经济性最好。以上研

究方法含不同的简化条件, 所得到的最佳方案准确性不高, 影响机组经济性。王成^[4]针对核电汽轮机效率低的问题, 提出新型混合遗传算法优化汽轮机抽汽系统参数。杨宇^[5]基于模式的搜索算法对汽轮机热力系统抽汽压力进行了单参数、多参数组合与全参数优化, 最大限度地弥补设计不足, 进一步降低机组热耗。周兰欣^[6]和 FU^[7]将自适应权重粒子群算法应用于核电二回路给水回热分配优化, 在此基础上改进算法^[8], 实现更便捷准确地给水在回热加热器的焓升分配优化, 一定程度上再次提高了机组循环热效率。这些研究主要优化汽轮机系统与给水加热系统参数, 机组整体优化设计有待发展。之后, 学者们逐渐扩大研究方向。Khan^[9]开发一种简化但准确的热力学模型, 采用遗传算法优化预测基于 VVER-1200 反应堆核电站的效率、输出功率和其它性能, 得到在冷凝器压力 4kPa 下核电站的最佳效率与输出功率。刘

收稿日期: 2023-10-25

作者简介: 鹿纯彬(2000-) 女, 硕士研究生。研究方向为核电机组热力系统建模仿真与多目标优化。

成洋^[10]建立核电二回路系统的计算模型,利用新型混合粒子群算法在满足约束条件的情况下对参数进行优化,较大地提高了机组效率。WANG^[11]利用改进遗传单纯形算法对典型压水堆核电站的蒸汽循环进行了参数优化,总结出提高热效率和输出功率的最佳蒸汽参数。此外,同时考虑典型核电机组的热力学与热经济学目标^[12],最大限度地满足低成本与高效率要求。

上述学者在核电机组系统开展不同的参数优化设计,一定程度实现了电厂热力学性能的提高,但是部分参数涉及一回路系统,没有做到不改变反应堆热功率的机组效率最大。压水堆核电站热力系统优化是一个多变量非线性约束的复杂问题,传统的智能算法的寻优能力与速度难以匹配其优化需求。本文根据热平衡法建立压水堆核电机组热力系统模

型,将并行协同机制与自适应策略融入多种群遗传算法中,提出改进多种群遗传算法用于机组热力系统回热再热抽汽参数的优化,为典型压水堆核电站的节能高效运行提供参考。

1 热力系统模型

图1所示为典型1000MW核电机组热力系统简图,二回路热力系统主要包括主蒸汽系统、汽轮机系统、汽水分离再热系统与给水加热系统,与传统火电机组最大不同在于汽轮机高、低压缸间增设汽水分离再热器,除湿加热以提高效率降低零部件腐蚀概率。不同子系统与设备组成热力系统,包括汽轮机、汽水分离再热器、除氧器、给水加热器等,对此分析并建立各模块数学模型。

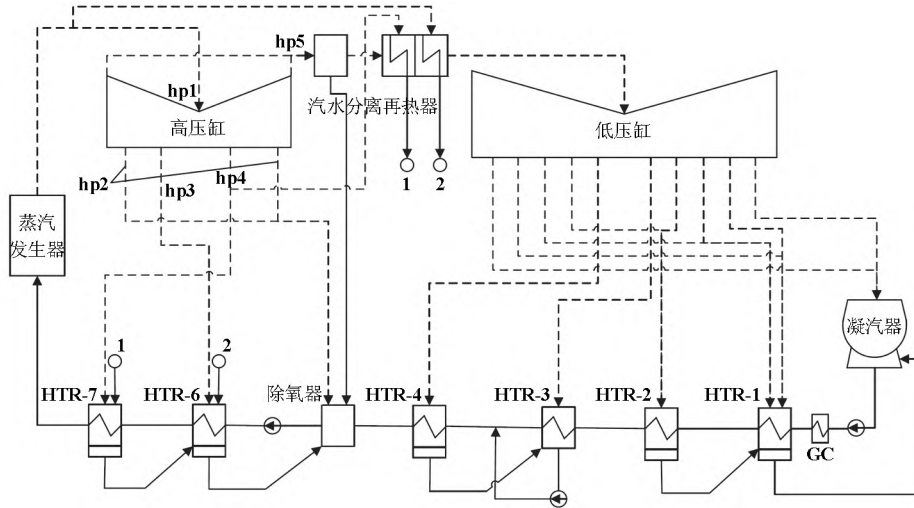


图1 典型核电机组热力系统示意图

1.1 汽轮机模型

核电机组普遍采用抽汽式汽轮机,分高压缸与低压缸,由多个级组成。主蒸汽进入高压缸膨胀做功,排汽经汽水分离再热器除湿加热送往低压缸继续做功,之后排入凝汽器凝结成水。依据质量守恒原则计算各机组进出口质量流量,采用弗留格尔公式对汽轮机进行变工况计算。

$$G_{hp1} = G_{hp2} + G_{hp3} + G_{hp4} + G_{hp5} \quad (1)$$

式中, G 为蒸汽流量;下标 hp 代表高压缸,1、2、3、4、5分别代表高压缸进口、抽汽与排汽。下标顺序按照设备从上到下、从左到右排列。

$$\frac{G_1}{G} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{21}^2}{p_0^2 - p_2^2}} \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}} \quad (2)$$

式中, G 、 T_0 、 p_0 、 p_2 分别为变工况前蒸汽流量、温度、级前与级后压力; G_1 、 T_{01} 、 p_{01} 、 p_{21} 分别为变工况后蒸汽流量、温度、级前与级后压力。

汽轮机内功率是评价汽轮机热经济性的重要参数,对机组节能与高效运行影响极大。抽汽将汽轮机分为多个级,总功率为各级组功率之和。其具体表达为:

$$P_i = \sum_1^m G_i^{hp} (h_i - h_{i-1}) + \sum_1^n G_j^{lp} (h_j - h_{j-1}) \quad (3)$$

$$P_e = \eta_m \eta_e P_i \quad (4)$$

式中, P_i 为汽轮机内功率; P_e 为电厂输出功率; m 、 n 为高、

低压缸级数; G_i^{hp} 为高压缸第 i 级进口流量; h_i 为高压缸第 i 级进口焓值; G_j^{lp} 为低压缸第 j 级进口流量; h_j 为低压缸第 j 级进口焓值; η_m 为机械效率; η_e 为发电效率。

1.2 汽水分离再热器模型

汽水分离再热器内含分离器、一级和二级再热器,高压缸排出的湿蒸汽进入分离器进行汽水分离,蒸汽输送到一级再热器和二级再热器进行加热,疏水到除氧器加热给水。整个过程满足质量平衡与能量平衡方程。

$$G_{ms3} = G_{ms1} + G_{ms2} \quad (5)$$

$$G_{1rh3} (h_{2rh4} - h_{1rh3}) = G_{1rh1} (h_{1rh1} - h_{1rh2}) + G_{2rh1} (h_{2rh1} - h_{2rh2}) \quad (6)$$

式中,下标 ms 代表汽水分离器,1 rh 代表一级再热器,2 rh 代表二级再热器。

1.3 除氧器模型

除氧器是给水加热系统关键设备之一,以亨利定律和道尔顿定律作为热力除氧的理论基础,将给水加热到除氧器工作压力下的饱和温度,除去溶解氧与其它气体。除氧器是一种混合式加热器,其能量平衡方程为:

$$\begin{aligned} G_{dea5} (h_{dea4} - h_{dea5}) &= G_{dea1} (h_{dea1} - h_{dea4}) \\ &+ G_{dea2} (h_{dea2} - h_{dea4}) \\ &+ G_{dea3} (h_{dea3} - h_{dea4}) \end{aligned} \quad (7)$$

2 改进多种群遗传算法

2.1 多种群遗传算法

遗传算法(GA)是一种从遗传学和自然选择中汲取灵感的计算优化方法,通过观察整个人口来寻找问题的最佳解决方案^[13]。标准遗传算法(SGA)为交叉概率与变异概率固定的一种算法,由于其局部搜索能力差,容易陷入“早熟”而无法寻找到最优解^[14]。学者们提出了多种群遗传算法(MPGA)以解决算法过早收敛的问题。

MPGA是在GA的基础上引入了多个策略,首先将初始种群分为多个种群同时进行优化;其次加入移民策略,通过移民算子连接多个种群实现多种群协同进化;最后建立精华种群,通过人工选择算子保存各种群每次迭代中的最优个体,并作为判断算法收敛的依据。这一标准利用遗传算法在进化过程中的知识积累,比最大遗传次数标准更为合理^[15]。

2.2 改进多种群遗传算法

本文在MPGA的基础上提出了改进多种群遗传算法(IMPGA)。该算法保留了MPGA在进化前期的初始种群多样性,融合并行协同机制,将初始多个种群根据适应度分为3个小种群,加快收敛速度,增加种群多样性;引入自适应策略,对不同适应度的种群分配可变的交叉变异概率,提高收敛精度,解决迭代后期种群同质化严重的问题。算法流程如图2所示。

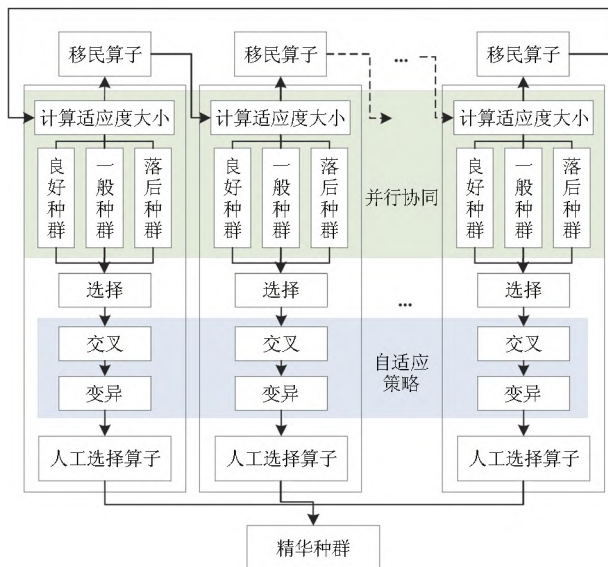


图2 改进多种群遗传算法流程图

2.3 算法测试

为了测试所提出的IMPGA算法寻优性能,选取Schaffer函数与较复杂的标准测试函数^[16]两种测试函数进行测试,表达式分别为:

测试函数 T_1 :

$$\max f(x_1, x_2) = 0.5 - \frac{(\sin \sqrt{x_1^2 + x_2^2})^2 - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2} \quad (8)$$

测试函数 T_2 :

$$\begin{aligned} \min f = & x_1^2 + x_2^2 + x_1x_2 - 14x_1 - 16x_2 + (x_3 - 10)^2 \\ & + 4(x_4 - 5) + (x_5 - 3)^2 + 2(x_6 - 1) + 5x_7^2 \\ & + 7(x_8 - 11)^2 + 2(x_9 - 10) + (x_{10} - 7)^2 + 45 \quad (9) \end{aligned}$$

约束条件:

$$105 - 4x_1 - 5x_2 + 3x_7 - 9x_8 \geq 0 \quad (10)$$

$$-10x_1 + 8x_2 + 17x_7 - 2x_8 \geq 0 \quad (11)$$

$$8x_1 - 2x_5 - 5x_9 + 2x_{10} + 12 > 0 \quad (12)$$

$$-3(x_1 - 2)^2 - 4(x_2 - 3)^2 - 2x_3^2 + 7x_4 + 120 > 0 \quad (13)$$

$$-5x_1^2 - 8x_2 - (x_3 - 6)^2 + 2x_4 + 40 > 0 \quad (14)$$

$$-x_1^2 - 2(x_2 - 2)^2 + 2x_1x_2 - 14x_5 + 6x_6 \geq 0 \quad (15)$$

$$-0.5(x_1 - 8)^2 - 2(x_2 - 4)^2 - 3x_5^2 + x_6 + 30 \geq 0 \quad (16)$$

$$3x_1 - 6x_2 - 12(x_9 - 8)^2 + 7x_{10} > 0 \quad (17)$$

测试函数 T_1 为多峰函数,含有2个决策变量,取值范围 $-10 \leq x_i \leq 10$ 。测试函数 T_2 为含有10个决策变量、8个不等式约束条件的复杂函数,取值为 $0 \leq x_i \leq 10$ 。分别使用两个测试函数对SGA、MPGA与IMPGA进行算法测试,结果如图3、图4所示。

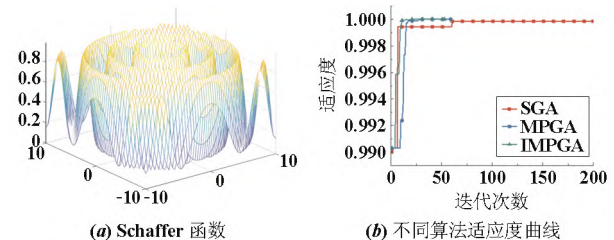


图3 函数 T_1 测试结果

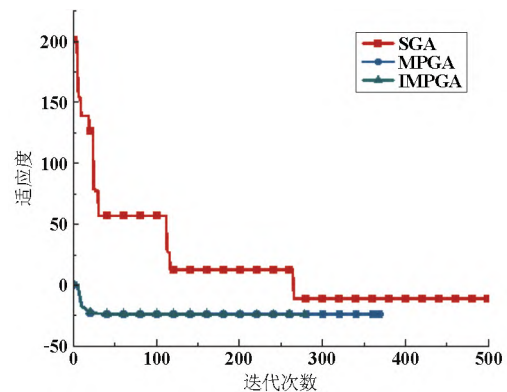


图4 函数 T_2 测试结果

图3显示函数 T_1 存在较多的局部最大值点,只有处于(0,0)时达到全局最大值1,因此算法极易陷入局部寻优。测试结果中SGA陷入局部极值,MPGA与IMPGA寻得全局最大值,但是在收敛速度上,IMPGA更胜一筹。由图4可知,3种算法寻得最小值分别为-11.456、-23.999和-24.299,IMPGA相较其它算法更接近最优解。同时,IMPGA的收敛速度最快。

综合两种测试结果,改进后的IMPGA保留了MPGA的种群多样性,不容易陷入局部最优的优势;结合自适应与并行协同策略,寻优精度高且收敛速度快,说明了算法改进的有效性。

3 热力系统参数优化

3.1 优化模型

为进一步提高核电热力系统的热力学性能,在保证反应堆热功率不变的前提下实现机组节能高效的运行目标,根据建立的数学模型以循环热效率为目标函数,选取影响循环热效率的主要抽汽参数作为决策变量。

$$\max \eta_{th} = \frac{P_e}{Q_R} \tag{18}$$

$$G = (G_{1rh1}, G_{2rh1}, G_{7htr1}, G_{hp4}, G_{hp2}, G_{lp7}, G_{lp6}, G_{lp5}, G_{lp4}, G_{lp3}, G_{lp2}) \tag{19}$$

基于核电热力系统性能与安全运行要求,参数优化必须考虑一些约束条件^[11,17]。首先,为了降低汽轮机及零部件腐蚀的概率,高压缸抽汽排汽干度不得低于0.84,低压缸蒸汽干度大于0.9。其次,凝汽器压力为0.0067MPa,低压缸排汽压力必须大于该数值。同时除氧器的压力保持在0.8MPa~1.0MPa,除氧器抽汽压力 $p_{5htr1} \geq 1.05p_{dea}$ 。然后,设置给水加热器下端差为5.6℃,且由于加热器设计时预留一些换热管,能量平衡满足±5%。最后,规范决策变量的波动范围,给水加热器抽汽流量范围为±20%,再热器抽汽流量为±10%,具体数值见表1。

表 1 决策变量取值范围

决策变量	原值	下限	上限
$G_{1rh1}/(\text{kg/s})$	83.68	75.31	92.05
$G_{2rh1}/(\text{kg/s})$	79.36	71.43	87.30
$G_{7htr1}/(\text{kg/s})$	70.41	56.33	84.49
$G_{hp4}/(\text{kg/s})$	119.46	95.57	143.35
$G_{hp2}/(\text{kg/s})$	99.64	79.71	119.57
$G_{lp7}/(\text{kg/s})$	68.40	54.72	82.08
$G_{lp6}/(\text{kg/s})$	51.38	41.10	61.66
$G_{lp5}/(\text{kg/s})$	75.52	60.42	90.62
$G_{lp4}/(\text{kg/s})$	15.24	12.20	18.29
$G_{lp3}/(\text{kg/s})$	29.02	23.21	34.82
$G_{lp2}/(\text{kg/s})$	964.13	771.31	1156.96

3.2 结果与分析

以典型压水堆 1000MW 核电机组为研究对象,给定初始条件:主蒸汽压力 6.45MPa,温度 280.3℃,凝汽器压力 0.0067MPa,给水温度 226℃,各管道抽汽压损系数设置 3%,分别采用 SGA、MPGA 和设计的 IMPGA 进行重复 20 次的优化设计,得到图 5 所示的最佳适应度进化曲线。各算法优化参数分配结果与原值对比见表 2。

从图 5 可以看出,SGA 在迭代 60 次后达到适应度最大 0.3596,而 MPGA 与 IMPGA 分别在 19、17 次迭代后寻到机组效率最优值 0.3608、0.3628。由此可见,IMPGA 收敛精度与速度明显优于其它两种算法,打破局部最优解,增强鲁棒性与并行性。

表 2 展现了抽汽流量的分配方案以及对应汽轮机内效率,对比抽汽流量的原值与优化值发现,3 种算法下的一级再

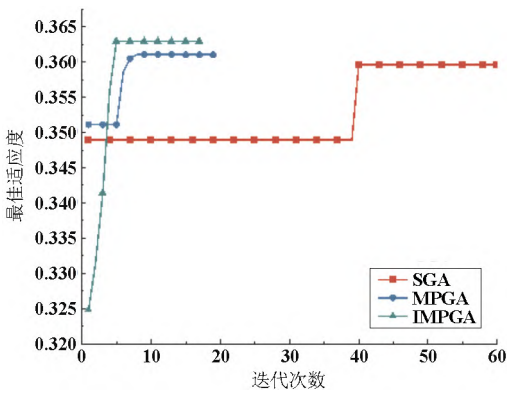


图 5 适应度进化曲线

热器与二级再热器的抽汽流量(高温蒸汽)较原值都有所增加,保证低压缸进汽品质,提高低压缸做功能力。高压缸抽汽送往高压给水加热器与除氧器的流量减少,而低压给水加热器的抽汽流量有些许增多。这说明效率进一步地提高需要增加低压缸较低品质的蒸汽,激发低压缸的性能潜力。原方案汽轮机内功率为 1228.63MW,采用 SGA、MPGA 和 IMPGA 算法后,内功率分别增加了 14.89MW、19.42MW 和 25.68MW,机组热效率(35.1%)提高到 35.96%、36.08% 和 36.28%。

表 2 不同算法优化结果

参数	原值	SGA	MPGA	IMPGA
$G_{1rh1}/(\text{kg/s})$	83.68	90.84	86.05	91.23
$G_{2rh1}/(\text{kg/s})$	79.36	84.19	86.07	86.39
$G_{7htr1}/(\text{kg/s})$	70.41	67.28	57.34	57.026
$G_{hp4}/(\text{kg/s})$	119.46	120.20	130.06	118.7
$G_{hp2}/(\text{kg/s})$	99.64	92.54	99.43	110.62
$G_{lp7}/(\text{kg/s})$	68.40	68.687	73.41	63.18
$G_{lp6}/(\text{kg/s})$	51.38	47.19	48.24	41.97
$G_{lp5}/(\text{kg/s})$	75.52	65.10	76.12	79.29
$G_{lp4}/(\text{kg/s})$	15.24	16.73	15.79	13.51
$G_{lp3}/(\text{kg/s})$	29.02	33.05	24.42	24.31
$G_{lp2}/(\text{kg/s})$	964.13	954.46	943.86	957.37
P_i/MW	1228.63	1243.52	1248.05	1254.31

4 结 论

本文根据热平衡法建立反应堆热功率不变的热力系统模型,利用改进多种群遗传算法对抽汽参数进行优化,得到以下结论:

- (1) 在不改变反应堆设计参数的基础上对核电机组热力系统全面的参数优化可以使效率在一定范围内最大提高,达到节能高效的目的。
- (2) 改进多种群遗传算法性能良好,有较强的收敛精度与寻优速度,在求解多变量非线性约束条件的核电机组热力系统效率最大问题上具备一定优势。
- (3) 改进算法优化后,机组循环热效率提高了 1.18%,汽

轮机内功率由1228.63MW增加到1254.31MW,优化效果明显。对其它类型机组热力系统挖掘节能潜力和优化设计具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Ebrahimgol H, Aghaie M, Zolfaghari A, et al. A novel approach in exergy optimization of a WWER1000 nuclear power plant using whale optimization algorithm[J]. Annals of Nuclear Energy 2020, 145.
- [2] 邓世敏,迟全虎,金红光. 汽轮机通流部分改造后机组的回热系统优化[J]. 动力工程 2004 24(2):195-198.
- [3] 张松梅,张东辉. 快堆核电厂热力系统加热器设计方案热经济性分析[J]. 原子能科学技术 2018 52(1):82-89.
- [4] 王成,阎昌琪,王建军. 核电汽轮机抽汽系统参数优化[J]. 哈尔滨工程大学学报 2017 38(4):588-594.
- [5] 杨宇,林润达. CAP1400 核电汽轮机抽汽参数优化研究[J]. 汽轮机技术 2018 60(2):85-88,122.
- [6] 周兰欣,李飞,付文锋,等. 基于粒子群算法的压水堆核电机组回热系统优化[J]. 热力发电 2014 43(9):5-11.
- [7] Fu W F, Li F, Zhou L X. Application of PSO in the Optimization of Nuclear Power Unit's Heat Regenerative System[J]. Advanced Materials Research 2014 3294(986-987).
- [8] 付文锋,王蓝婧,李飞,等. 基于改进动态自适应粒子群优化算法的汽轮机组给水回热分配优化方法[J]. 动力工程学报, 2014 34(8):653-659.
- [9] Khan A H, Hossain S, Hasan M, et al. Development of an

optimized thermodynamic model for VVER-1200 reactor-based nuclear power plants using genetic algorithm[J]. Alexandria Engineering Journal 2022 61(11):9129-9148.

- [10] 刘成洋,阎昌琪,王建军. 核电厂二回路热力系统的参数优化[J]. 核科学与工程 2015 35(1):123-129.
- [11] Wang C, Yan C, Wang J, et al. Parametric optimization of steam cycle in PWR nuclear power plant using improved genetic-simplex algorithm[J]. Applied Thermal Engineering 2017 125.
- [12] Sayyaadi H, Sabzaligol T. Various approaches in optimization of a typical pressurized water reactor power plant[J]. Applied Energy 2009 86(7):1301-1310.
- [13] Mohammed W, Rashid A, Sana S. Adaptive genetic algorithm for user preference discovery in multi-criteria recommender systems[J]. Heliyon 2023 9(7).
- [14] Khan A H, Hossain S, Hasan M, et al. Development of an optimized thermodynamic model for VVER-1200 reactor-based nuclear power plants using genetic algorithm[J]. Alexandria Engineering Journal 2022 61(11):9129-9148.
- [15] 李艳波,李若尘,史博,等. 基于改进模拟退火遗传算法的高速公路服务区自洽能源系统高效优化[J]. 西安交通大学学报 2023 58(1):1-10.
- [16] Summanwar V S, Jayaraman V K, Kulkarni B D, et al. Solution of constrained optimization problems by multi-objective genetic algorithm[J]. Computers and Chemical Engineering 2002 26(10):1481-1492.
- [17] 广东核电培训中心编. 900MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京:原子能出版社 2005.

(上接第211页)

(1) 得到了储气室压力降低过程中节流阀和补气阀的行程信息,确定了开度曲线,为配气系统的控制设计提供了参考和依据。

(2) 释能时随着储气室压力的降低,当补气阀没有开启时,各级透平的膨胀比、出口温度和等熵均小幅变化;当补气阀开启后,首级透平关键参数将发生大幅变化,故补气阀开启后应密切监视首级透平的参数变化,防止过大热应力的产生;如果储气室压力降至最低工作点以下透平仍在工作,各级透平的关键参数均发生较大变化。

(3) 透平入口温度对透平的功率输出特性和阀门调节过程有着较大的影响,当温度低于设计值时,透平为了满发需开大阀门,从而限制了出力水平,故透平入口温度应尽可能维持在高位;当透平入口温度降至138℃时,透平的出口温度将降至转子的脆性转变温度以下,故从安全运行角度考虑透平应限制出力。

参考文献

- [1] 梅生伟,李瑞,陈来军,等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报 2018 38(10):2893-2907.
- [2] 梅生伟,公茂琼,秦国良,等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J]. 电网技术 2017 41(10):3392-3399.
- [3] 梅生伟,张通,张学林,等. 非补燃压缩空气储能研究及工程

实践——以金坛国家示范项目为例[J]. 实验技术与管理, 2022 39(5):1-8,14.

- [4] 何新兵. 先进压缩空气储能系统性能分析与优化研究[D]. 武汉:华中科技大学 2021.
- [5] 李雪梅,杨科,张远. AA-CAES 压缩膨胀系统的运行级数优化[J]. 工程热物理学报 2013 34(9):1649-1653.
- [6] Zhao P, Gao L, Wang J, et al. Energy efficiency analysis and off-design analysis of two different discharge modes for compressed air energy storage system using axial turbines[J]. Renewable Energy 2015 85(JAN):1164-1177.
- [7] 陈辉,李文,盛勇,等. CAES 释能过程多工况动态仿真及效率分析[J]. 动力工程学报 2023 43(7):869-876,892.
- [8] 李秋白,苟非非,石红晖,等. 两级填充床式压缩空气储能系统充放电行为研究[J]. 热能动力工程 2022 37(9):73-80,88.
- [9] 国际首套300兆瓦先进压缩空气储能系统膨胀机下线[J]. 华北电业 2023(8):4.
- [10] 张冬阳. 压气机特性的系数拟合法[J]. 燃气轮机技术 1993(3):27-32.
- [11] 房友龙,刘东风,贺星,等. 压气机特性曲线精确分步拟合方法研究[J]. 燃气轮机试验与研究 2019 32(2):21-27.
- [12] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社 2006:197-296.
- [13] 张利,李友荣. 换热器原理与计算[M]. 北京:中国电力出版社 2017:52-106.
- [14] Grazzini G, Milazzo A. A Thermodynamic Analysis of Multistage Adiabatic CAES[J]. Proceedings of the IEEE 2012, 100(2):461-472.