

华龙一号设备冷却水系统多目标优化设计

赵伟光^{1,2}, 于沛^{1,3}, 曾晓波^{1,2}, 范广铭^{1,2,*}, 阎昌琪^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点科学实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 3. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 为了改进华龙一号核岛冷链系统中的设备冷却水系统设计裕量大, 解决该系统冷源利用率低和经济性较差的问题, 根据系统热负荷传递逻辑和系统设计与运行特点, 建立了设备冷却水系统性能指标评价数学模型, 以重量、体积、系统投资费用与系统能耗为优化目标, 通过开发的优化算法进行了多目标优化, 并讨论了设备冷却水系统的部分指标变化对4个目标的影响。研究表明, 在满足冷链系统性能指标需求的前提下, 通过优化算法寻找设备冷却水系统温度、压力与大流量设备的流量的组合, 找到了4个目标相对最优的方案。该优化设计方案不仅能够有效解决设备冷却水系统设计时存在的问题, 还有效地提高华龙一号设备冷却水系统的经济性, 减小设备在厂房中占用的空间, 具有实际的工程意义, 为后续华龙一号冷链系统的研究和设计方案开发提供了参考。

关键词: 华龙一号; 设备冷却水系统; 经济性; 多目标优化; 性能指标评价模型

中图分类号: TL421.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)03-0616-09

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0503

Multi-objective Optimization Design of Component Cooling System in HPR1000

ZHAO Weiguang^{1,2}, YU Pei^{1,3}, ZENG Xiaobo^{1,2}, FAN Guangming^{1,2,*}, YAN Changqi^{1,2}

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing, 100840, China)

Abstract: To enhance the design of the component cooling system (RRI) within the HPR1000 cold chain system and to address issues of low utilization efficiency and poor economic performance under specific design and operational conditions, a mathematical model was developed. This model was designed to evaluate performance indicators based on the principles of heat load transfer, as well as the system design and operational characteristics of the RRI. The presence of multiple user systems and devices introduces complexity into the design process, making it challenging to improve the current state through a singular optimization approach. Therefore, optimization objectives including weight, volume, system investment cost, and energy consumption, were established. To manage this complexity, a novel optimization algorithm was implemented to perform multi-objective optimization. Additionally, a sensitivity analysis was conducted to assess the impact of various optimization variables

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-08-14

基金项目: 中核集团集中研发项目

* 通信作者: 范广铭

on these defined objectives. The final selection of optimization variables consisted of the RRI supply water temperature (T_1), the design pressure of the RRI (p_1), the seawater flow rate for cooling the RRI (G_1), and the water supply flow rates to the RFT (G_2), RHR (G_3), and CSP (G_4). Each variable possesses a specific range of values, which is critical for the optimization process. The theoretical model and the final optimization results demonstrate that the proposed evaluation model and optimization algorithm effectively assess the RRI's performance in multi-objective optimization calculations, allowing for a substantial degree of RRI optimization. The sensitivity analysis reveals that the T_1 and G_1 are key optimization variables that significantly influence the weight, volume, system investment cost, and energy consumption of the RRI. These parameters exhibit the most considerable optimization potential and should be prioritized in future research and engineering applications. However, it is important to note that achieving an optimal solution that satisfies all objectives while simultaneously optimizing four distinct targets is inherently challenging. The optimization results indicate that the weight, volume, system investment cost, and energy consumption of the RRI can be enhanced by up to 17.91%, 21.08%, 4.83%, and 29.08%, respectively. Furthermore, the intricate relationships among the performance indicators reflect characteristics of non-dominated optimal solutions. Each optimization target demonstrates improvements compared to the baseline design. This optimized design scheme effectively addresses challenges in RRI design, enhances the economic viability of the HPR1000 RRI, and reduces the footprint of the equipment within the factory building. Such advancements have practical engineering significance and provide a valuable reference for future research and design initiatives pertaining to subsequent iterations of the HPR1000 cold chain system.

Key words: HPR1000; component cooling system; economy; multi-objective optimization; performance evaluation model

华龙一号是我国完全自主研发的先进百万千瓦级压水堆核电站^[1]。其中, 华龙一号核岛冷链系统中的设备冷却水系统(RRI)是保证核动力装置正常工作和热工水力安全性的重要组成部分^[2]。RRI的功能是通过热交换器将冷却设备带出的热量传递至海水。由于RRI的用户系统多, 设计参数间相互杂糅、相关性强, 还需考虑一定的安全裕量, 且在设计时主要依靠设计人员经验, 在最初设计时RRI设计参数选取过于保守(如RRI的温度设计值为35℃, 实测运行时RRI的温度远低于设计值, 有时甚至低于15℃), 严重影响了华龙一号运行的经济性^[3-4], 因此有必要对RRI进行优化。

在目前核电厂系统与设备的优化设计中, 已有对于系统及设备自身重量、体积的研究。贺士晶等^[5]利用遗传算法改进复合形算法, 并以核动力设备中的稳压器为例进行优化计算, 得到稳压器的重量、体积的优化设计结果。Liu等^[6-7]引入复合形算法与遗传算法对粒子群算法进行了改进, 对蒸发器与核动力系统进行了优化。针对RRI的优化设计研究, 大多集中在RRI中某个换热器的

优化。于沛等^[8-9]对RRI中某板式换热器进行了换热性能分析, 并利用遗传算法进行了多目标优化计算, 得到了优化设计方案。Shang等^[10]对RRI中的乏燃料水池换热器进行了多目标优化, 提出了该换热器的优化方法与性能指标评估结果。因此, 在目前的研究中并未考虑RRI的系统参数组合对RRI性能指标的影响。

本文开发华龙一号核岛冷链系统中的RRI性能指标评价模型与优化程序, 在满足华龙一号核岛冷链系统安全性需求的情况下, 通过优化算法寻找规定范围内的RRI参数组合, 优化RRI的重量、体积、系统投资费用与系统能耗, 提升系统经济性, 为华龙一号核岛冷链系统提供设计指导。

1 性能指标评价程序

对于RRI的最优化设计工作而言, 首先应分析影响核岛换热系统优化目标的重要设备或系统, 对核岛换热系统进行组成简化, 将核岛换热系统简化为一系列关键设备的组合; 然后根据核岛换热系统所关心的目标, 建立核岛换热系统的各

关键设备的性能指标数学模型,以获得优化计算中设备性能指标随优化变量的变化规律。本文仅计算 RRI 中各需要设计的典型设备的重量、体积,包括: RRI-海水系统换热器、RRI-余热排出系统换热器、RRI-乏燃料水池冷却系统换热器等重要换热器,以及 RRI 水泵与冷却 RRI 用海水泵;系统投资费用包括上述换热器投资费用、RRI 水泵投资费用与 RRI 管网投资费用;系统能耗为水泵能耗。RRI 中其他不需设计与具有较高安全级的用户设备,作为固定输入换热设备,不在 RRI 的性能指标评价范围内,如一回路主泵电机、堆腔注水冷却系统泵电机等。

构建本文研究范围内的各设备的数学模型,利用 C#语言编制 RRI 的性能指标评价程序,程序计算流程如图 1 所示。程序计算流程为:1) 确定需要设计的设备,输入设计所需参数;2) 初步设计 RRI 用户系统换热器,包括一系列板式换热器、管壳式换热器、管壳式冷凝器;3) 根据用户系统设计结果,结合 RRI-海水系统换热器温度与流量需求,初步设计 RRI-海水系统换热器;4) 根据经济流速选取国标管道尺寸,按照目前华龙一号 RRI 的连接方式,将设备连接;5) 根据系统流量与

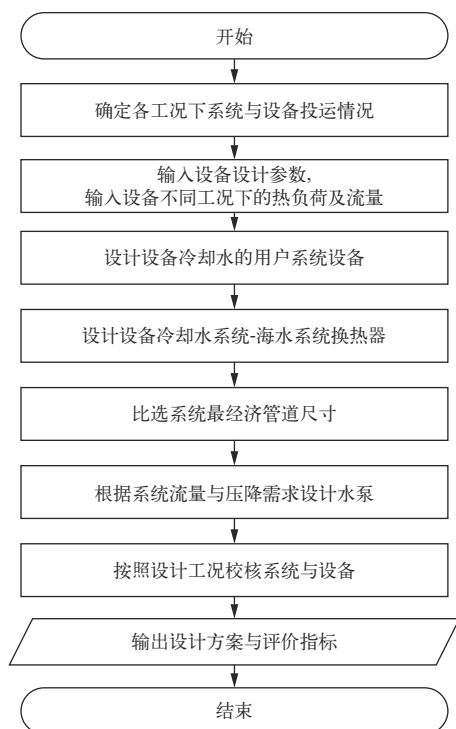


图 1 RRI 性能指标评价程序计算流程图

Fig. 1 Performance evaluation program calculation flowchart of RRI

压降需求,设计 RRI 水泵;6) 对 RRI 进行系统工况校核,判断流动换热是否满足稳态热工设计准则与系统安全性要求,若满足进行下一步,否则需调整设计变量值并进行重新设计,需要校核的工况包括启堆工况、正常运行工况、停堆 4~20 h 工况、停堆后 20 h 工况、冷却剂丧失事故(LOCA)工况和次临界工况;7) 输出满足要求的 RRI 性能指标。

1.1 板式换热器设计评价模型

板式换热器的设计计算是在已知换热器冷侧和热侧的质量流量、进出口温度的前提下,计算板式换热器所需的传热面积、流程与流道组合。根据换热热负荷与板片型号,假定初始传热面积,确定换热板片数,得出换热器的流程与流道的组合。迭代计算传热系数与理论传热面积,直至理论传热面积与假定传热面积的相对误差不超过 $\pm 10^{-3}$ 。计算板式换热器的冷侧与热侧流动阻力,若流动阻力超出设计准则,需重新选取流程与流道的组合。计算并输出板式换热器的重量、体积、投资费用。流动换热与性能指标的详细计算过程参见文献[11-13]。

1.2 管壳式换热器设计评价模型

管壳式换热器同板式换热器的设计方法类似。对于管壳式换热器,基本的换热元件为换热管,换热管的基本参数可由国标进行选择,包括换热管内径、换热管外径以及换热管管材等,主要设计参数包括换热管根数、换热管长度等。在管壳式换热器的设计过程中,需要对管程以及壳程压降进行校核,使管壳式换热器满足工艺要求。管壳式换热器的评价模型同样包含设备自身的重量、体积和投资费用,部分详细计算过程参见文献[14-16]。

管壳式换热器的体积 V_{st} 主要由换热器的管箱与封头决定,可由下式计算:

$$V_{st} = \frac{\pi}{4} (H_{st} - \delta_{h1} - \delta_{h2} - D_{st}) (D_{st} + 2\delta_s^2) + \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D_{st} + 2\delta_s}{2} \right)^3 \quad (1)$$

式中: H_{st} 、 D_{st} 、 δ_s 分别为管壳式换热器的总高度、管箱内径与壳体厚度, m; δ_{h1} 、 δ_{h2} 分别为管壳式换热器两侧封头厚度, m。

管壳式换热器的重量 M_{st} 主要由换热器的管箱重量、封头重量、换热管重量、折流板和固定管

板重量、连接法兰重量组成,可由下式计算:

$$M_{st} = \frac{2\rho}{3} \left\{ \alpha \left[\left(\frac{D_{st}}{2} + \delta_{h1} \right)^3 - \left(\frac{D_{st}}{2} \right)^3 \right] + \beta \left[\left(\frac{D_{st}}{2} + \delta_{h2} \right)^3 - \left(\frac{D_{st}}{2} \right)^3 \right] \right\} + \pi n_t \rho_t (r_{to}^2 - r_{ti}^2) L_t + n_p \rho_p \delta_p A_p + \pi \rho_f \delta_f (r_{fo}^2 - r_{fi}^2) \quad (2)$$

式中: ρ 为管壳式换热器的管箱材料密度, kg/m^3 ; α 、 β 为两侧封头的圆心角; n_t 为换热管根数; ρ_t 为换热管材料的密度, kg/m^3 ; r_{to} 为换热管外径, m ; r_{ti} 为换热管内径, m ; n_p 为折流板和固定管板总片数; L_t 为换热管长度, m ; ρ_p 为板片材料的密度, kg/m^3 ; δ_p 为板片厚度, m ; A_p 为单个板片面积, m^2 ; ρ_f 为连接法兰材料的密度, kg/m^3 ; r_{fo} 为连接法兰外径, m ; r_{fi} 为连接法兰内径, m ; δ_f 为连接法兰厚度, m 。

管壳式冷凝器的计算方法与管壳式换热器计算方法相同,不再赘述。

1.3 水泵设计评价模型

水泵的设计需满足运行工况中最高的流量和扬程要求,并尽量使水泵的工作点处于高效率范围。为确保满足在输送介质的流量条件下,水泵的扬程要能够克服各项流动压降的总和,因此需计算管网设计评估模型中的工作介质流经管道、阀门、弯头等部件时产生的摩擦压降、局部压降等各项流动压降。根据水泵的额定流量与额定扬程,计算水泵特性曲线,判断水泵特性曲线与水泵所在管网实际特性曲线是否匹配,输出合格的水泵重量、体积、投资费用与能耗。水泵特性曲线计算方式与结构的详细计算过程参见文献 [17-18]。

1.4 RRI 管道评价模型

RRI 管道评价模型主要包括:在 RRI 参数确定的基础上,根据目前华龙一号 RRI 设计情况确定的管道长度、阀门类型与数量、弯头类型与数量;参考 RRI 设计流量和经济流速区间确定的管道内径;根据 RRI 设计温度与设计压力确定的管壁厚度;根据管网结构与参数计算管网压降,主要为管道沿程压降与管网部件导致的局部压降。基于上述参数,计算管道与部件的投资费用,具体计算过程参见文献 [19]。RRI 管道涉及的系统与厂房较多,空间连接方式复杂多变,因此不考虑管道的重量和体积对 RRI 性能指标的影响。

2 多目标优化

对于优化计算中的优化设计问题,其相应的数学模型一般包括:1) 优化变量,即系统与设备需要优选的底层设计参数;2) 目标函数,即设计优化中需要达到最佳理论预期的重要性能指标,由各个优化变量经过复杂、严谨的计算得出;3) 约束条件,即优化设计问题中系统与设备的设计限制。

2.1 优化变量

华龙一号的 RRI 作为核岛冷链系统的重要组成部分,其性能指标在一定程度上体现着冷链系统内各个设备的设计情况,而设备的设计结果又会影响系统的流动换热性能,需要统筹地选取相对独立的优化变量,确保设计优化的优化空间覆盖范围大。设定的优化变量有 RRI 设计温度 T_1 、RRI 设计压力 p_1 、冷却 RRI 用海水流量 G_1 、RRI 向乏燃料水池冷却(RFT)系统供水流量 G_2 、RRI 向余热排出(RHR)系统供水流量 G_3 、RRI 向安全壳喷淋(CSP)系统供水流量 G_4 ,其中 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 之间相互独立, G_2 、 G_3 、 G_4 均为 RRI 供水总流量的组成部分。此外,RRI 其余的用户系统流量较小,在优化设计时对系统性能指标影响不大,作为常量处理。因此,优化变量 X 可写为:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [T_1, p_1, G_1, G_2, G_3, G_4]^T \quad (3)$$

2.2 目标函数

针对 RRI 目前存在的重量和体积偏大、系统投资费用较高的问题,选择 RRI 的重量、体积、系统投资费用与系统能耗这 4 个评价指标作为优化目标,构造优化目标函数,目标函数可写为:

$$\begin{cases} \min f_M(X) = M_t(X) = \sum_{i=1}^m n_i M_i(X) \\ \min f_V(X) = V_t(X) = \sum_{i=1}^m n_i V_i(X) \\ \min f_{Eco}(X) = Eco_t(X) = \sum_{i=1}^m n_i Eco_i(X) \\ \min f_P(X) = P_t(X) = \sum_{i=1}^m n_i P_i(X) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_M(X)$ 、 $f_V(X)$ 、 $f_{Eco}(X)$ 、 $f_P(X)$ 分别为 RRI 的重量、体积、系统投资费用和系统能耗的优化目标函数; M_t 、 V_t 、 Eco_t 、 P_t 分别为 RRI 的重量、体积、系统投资费用和系统能耗; n_i 为第 i 种设备的台

数; M_i 、 V_i 、 E_{co_i} 、 P_i 分别为第 i 种设备的重量、体积、投资费用和能耗; m 为所有设备的个数。

2.3 约束条件

在设备冷却水系统多目标优化设计问题中, 为了使优化结果合理、优化方案不脱离实际, 在优化计算前还需要对部分性能指标参数设置相关的限制。根据 RRI 的设计要求与运行安全准则, 需要考虑约束条件如下。

1) RRI 的稳态安全热工设计准则, 如 RRI-海水系统换热器在正常运行工况下的热侧入口温度、RRI 在停堆与事故工况下的最高供水温度、海水系统在各工况下冷却 RRI 的设计用最高温度等一系列安全参数。

2) 根据各 RRI 用户系统的设计用最高温度, 限制用户侧换热器的热侧出口温度, 保证用户系统的正常热交换。通过 RRI 的换热校核计算, 保证各用户系统在不同工况下均可满足安全换热要求, 并保留一定的安全裕量。

3) RRI 中各换热器的运行流动压降必须处于规定的压降区间。RRI 在不同工况下工作时, 流动压降不应大于一般核用换热器的压降, 保证换热器的设计流量与换热面积符合设计要求。

4) RRI 中循环水泵的压头与流量必须满足系统最大压降与流量需求, 并具有一定的安全裕量; 水泵的几何尺寸必须满足一般核用泵的设计要求, 占地面积与高度不可超标。

5) 冷却 RRI 的海水需求流量不超过目前华龙一号的海水设计流量。

3 混合多目标遗传算法

遗传算法是一种广域寻优的优化算法, 具有较强的全局寻优能力^[20]。同时, 遗传算法的变异操作具有种群多样性, 在一定程度上能够跳出局部最优解, 可以很好地克服非线性多峰值问题, 在国内外应用广泛。对于换热系统一类的非线性高变量维度多峰值优化问题, 首先选取遗传算法作为基础算法并进行适应性改进。为满足 RRI 的多目标优化设计工作, 基于选择的遗传算法, 通过引用非支配概念, 并提出多目标处理方法及改进策略, 形成新型混合多目标遗传优化算法。多目标优化算法的逼近性和收敛速度是由算法的搜索能力决定的, 遗传算法具有较强的全局和局部搜索

能力, 因此将其搜索策略作为新型多目标优化算法的基础。在遗传算法的基础上, 融合非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 中的多目标处理方法, 并对相关策略进行改进, 提高多目标优化效率与优化深度, 构成了混合多目标遗传算法 (novel hybrid genetic algorithm for multi-objective optimization, NHGA-MO)。NHGA-MO 算法流程如图 2 所示。

NHGA-MO 的主要操作包括: 模拟遗传进化过程的并行交叉变异操作, 处理约束的归一化自适应松弛约束处理法, 对个体进行分层排序的快速自适应 ϵ 支配排序, 对第 1 层非支配个体进行局部深度寻优的单纯形深度搜索, 以及对个体进行筛选的动态拥挤距离排序。反复执行上述操作, 当达到算法的终止准则后, 寻优结束并输出非支配解集。

4 优化参数敏感性分析

分别研究作为优化变量的 RRI 设计参数在偏离母型值时对重量、体积、系统投资费用与系统能耗的影响, 通过仅改变现有设计参数组合中的某一个优化变量参数的值, 分析目标函数最优时的优化变量参数范围, 提高优化效率, 验证优化结果。保持 RRI 其他设计参数与边界条件不变, 根据变化后的设计参数组合, 计算出 6 个优化变量对应的优化目标结果, 如图 3 所示, 图 3 中目标函数的值均为相对值。考虑到系统安全、管网稳定、设备设计难度与部分工程可实现因素, 各优化变量的变化区间需根据变量实际情况进行选取, 因此区间大小有所不同。

如图 3a 所示, 当 RRI 的其他设计参数均为母型值、RRI 设计温度在 0.9~1.1 区间内变化时, 各目标均可取得相对最小值。如图 3b~e 所示, 当 RRI 的其他设计参数均为母型值时, 目标函数与优化变量为线性相关关系, 但相同优化变量对于不同目标函数的线性变化趋势存在差异。如图 3f 所示, 当 RRI 向 CSP 系统供水流量在 0.95~0.98 区间内变化时, 系统能耗相同。这是由于 RRI 水泵在设计时是按照满足最不利环路压降与最大工况流量的方式设计的, 水泵安装在主管路上, CSP 换热器与其他设备安装在支路上且为并联连接, 当 RRI 向 CSP 系统供水流量处于 0.95~0.98 区间

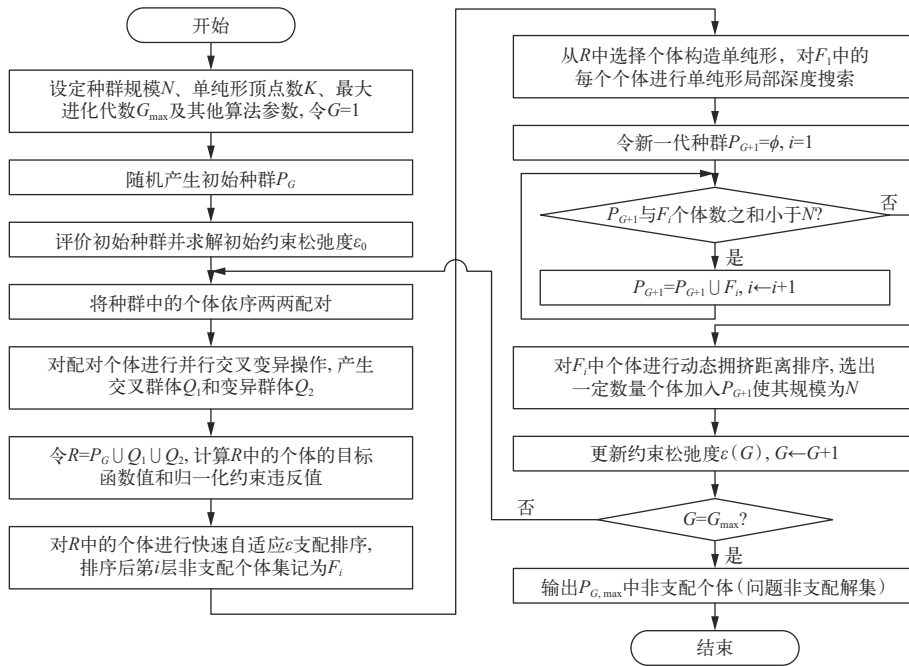


图2 NHGA-MO算法流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm process of NHGA-MO

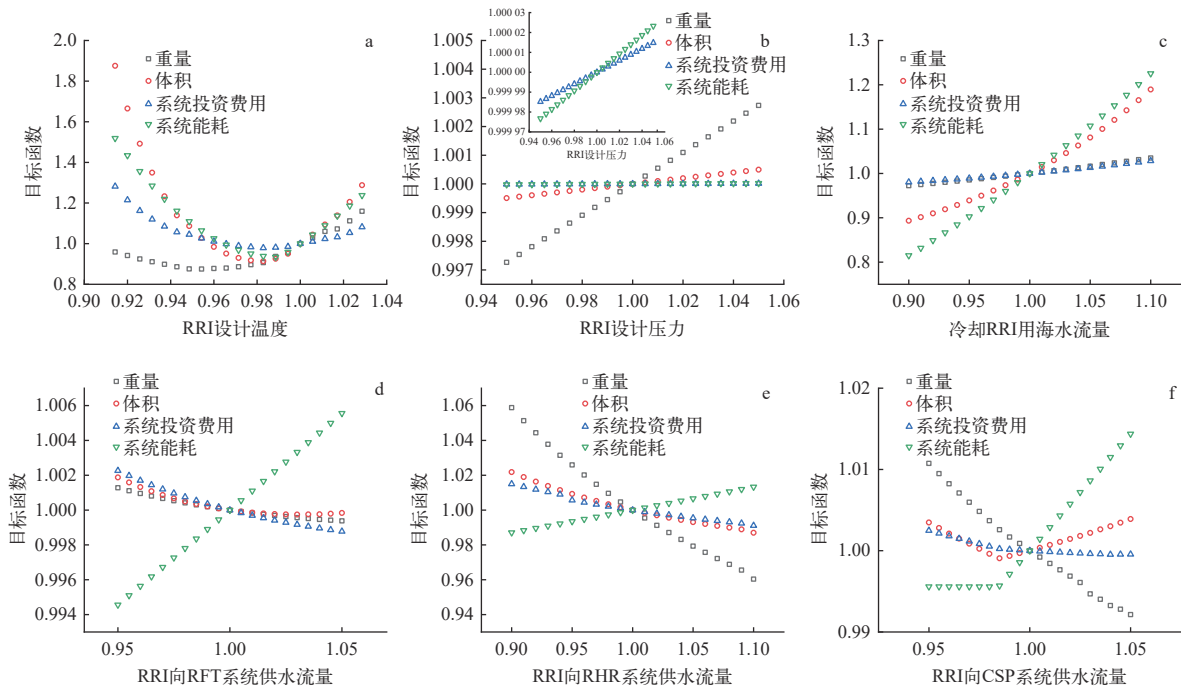


图3 优化变量对RRI优化目标的影响

Fig. 3 Impact of optimization variable on optimization objective of RRI

时, CSP 换热器所在管网支路的压降小, CSP 系统所在管网支路不是最不利环路, 不影响水泵设计, 水泵设计结果取决于其他设备所在管网支路; 当 RRI 向 CSP 系统供水流量处于 0.98~1.05 区间时, CSP 换热器的压降与流量需求相较其他设备

较大, CSP 系统所在管网支路为最不利环路, 影响水泵的流量和压头设计。

5 优化过程与优化结果

根据 RRI 性能指标评价程序, 按照规定的优

化变量、优化目标,在 RRI 边界条件与约束条件构成的优化空间内,利用 NHGA-MO 优化算法对 4 个目标同时进行优化计算。RRI 性能指标评价程序可根据算法设置计算各优化变量对应的 RRI 优化设计结果,形成并输出优化设计方案与评价指标,优化设计方案内容包括各优化变量的值与其他设计参数;评价指标即优化目标,包括 RRI 的重量、体积、系统投资费用与系统能耗。NHGA-MO 设置的参数为:种群大小 $N=150$,迭代次数 $T=200$,单纯形加速操作系数 $Nv=3$,交叉概率 $Pc=0.2$,变异因子 $=0.2$ 。在所得到的合格方案群中选取每个目标的最优化方案进行分析,方案中的优化变量,即设计参数如表 1 所列。同时可根据表 1 中各方案的优化变量,即设计参数值计算出各方案具体的优化目标,即性能指标值。表 1 中的数据以归一化的母型方案值为基准,给出了

各优化方案中作为优化变量的设计参数的变化比例,给出的优化方案可作为下一代或者改进型设计的参考设计方案。

根据表 1 的设计参数计算出各最优化方案的性能指标,具体情况如下:1) 对于重量最优化方案,系统的重量相比母型方案减小了 18.03%,体积减小了 17.59%,系统投资费用减小了 2.69%,系统能耗减少了 20.84%;2) 对于体积最优化方案,系统的重量相比母型方案减小了 15.01%,体积减小了 21.03%,系统投资费用减小了 4.74%,系统能耗减少了 27.76%;3) 对于系统投资费用最优化方案,系统的重量相比母型方案减小了 15.81%,体积减小了 20.91%,系统投资费用减小了 4.83%,系统能耗减少了 26.58%;4) 对于系统能耗最优化方案,系统的重量相比母型方案减小了 13.97%,体积减小了 20.58%,系统投资费用减小了 4.47%,系统能耗减少了 28.07%。

表 1 RRI 多目标优化设计结果

Table 1 Multi-objective optimization design result of RRI

参数	母型方案	优化后的参数值/%			
		$\min f_M$	$\min f_V$	$\min f_{\text{eco}}$	$\min f_P$
RRI 设计温度	1	-3.46	-1.80	-1.79	-1.80
RRI 设计压力	1	-4.98	-4.99	-4.99	-4.98
冷却 RRI 用海水流量	1	-9.99	-10.00	-9.99	-10.0
RRI 向 RFT 系统供水流量	1	-5.00	-5.00	-4.97	-4.99
RRI 向 RHR 系统供水流量	1	9.90	9.72	10.0	7.10
RRI 向 CSP 系统供水流量	1	4.89	-1.19	3.33	-3.34

结合表 1 可以看出,适当减小 RRI 设计温度、RRI 设计压力、冷却 RRI 用海水流量与 RRI 向 RFT 系统供水流量,适当增加 RRI 向 RHR 系统供水流量,可使重量、体积、系统投资费用与系统能耗均有一定优化。对于不同目标的最优化方案,优化计算时可保证单一目标达到最优化,但另外 3 个目标无法保证最优,在实际工程中可以根据设计需要,选取最合适的设计方案。

结合图 3、表 1 和各最优化方案的优化情况可以看出,本文规定的优化变量的变化量最大不超过其母型值的 $\pm 10\%$,但 RRI 在 4 个目标上仍有较大的优化空间。RRI 设计温度 T_1 和冷却 RRI 用海水流量 G_1 的取值范围较广,对 RRI 的重量、体积、系统投资费用与系统能耗影响较大,是本文

研究内容中最具有优化空间的参数;RRI 向 RHR 系统供水流量 G_3 和 RRI 向 CSP 系统供水流量 G_4 对 4 个优化目标有影响,但影响程度较小;RRI 设计压力 p_1 和 RRI 向 RFT 系统供水流量 G_2 对 4 个目标的影响程度最小。此外, T_1 、 G_1 、 G_2 和 G_3 各自对于不同优化目标的优化方向一致,可见 T_1 、 G_1 、 G_2 的设计值偏高,有较大设计裕量, G_3 的设计值偏低,在后续的优化设计中可重点关注这 4 个参数。

6 结论

本文基于开发的华龙一号 RRI 性能指标评价模型与优化程序,对 RRI 的重量、体积、系统投资费用与系统能耗进行优化计算,并从优化变量对

优化目标影响的角度进行了敏感性分析, 得出以下结论。

1) 从理论模型角度与最终优化结果可以看出, 本文提出的性能指标评估模型与优化算法在多目标优化计算中是有效的, 可精确评估 RRI, 并在一定程度上优化 RRI。

2) 各优化目标对应的最优化方案, 相比较华龙一号 RRI 的母型方案, 在 4 个目标上均可取得一定的优化, 说明寻找 RRI 温度、压力与大流量设备的流量的组合, 可在满足冷链系统性能指标需求的前提下, 优化 RRI 的重量、体积、系统投资费用与系统能耗。

3) RRI 设计温度 T_1 和冷却 RRI 用海水流量 G_1 作为优化变量的取值范围较广, 对 RRI 的重量、体积、系统投资费用与系统能耗影响较大, 是本文研究范围内最具有优化空间的参数, 需在后续优化研究和工程实践中重点考虑。

4) 对 4 个目标同时进行优化, 并不能得到同时满足所有目标最优的方案, 从非支配最优解的角度可以看出, RRI 的性能指标参数间具有复杂的相关性。

本研究结果是基于华龙一号核岛冷链系统的 RRI 得出的, 其优化设计方法也适用于其他类型核电厂, 为核岛冷链系统优化设计、设计的科学性提供技术手段。

参考文献:

- [1] 邢继. 华龙一号乘风起航[J]. 科学世界, 2021(5): 3.
XING Ji. HRP1000 set sail with the wind[J]. Science World, 2021(5): 3(in Chinese).
- [2] 宋代勇, 赵斌, 袁霞, 等. “华龙一号”能动与非能动相结合的安全系统设计[J]. 中国核电, 2017, 10(4): 468-471.
SONG Daiyong, ZHAO Bin, YUAN Xia, et al. Design of integrated active and passive safety systems of HRP1000[J]. China Nuclear Power, 2017, 10(4): 468-471(in Chinese).
- [3] 许淑惠, 严颖, 王哲斌, 等. 水泵并联选型及节能运行相关问题探讨[J]. 北京建筑工程学院学报, 2008, 24(2): 1-4.
XU Shuhui, YAN Ying, WANG Zhebin, et al. Study on related problems of parallel pump selecton and energy saving in running[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2008, 24(2): 1-4(in Chinese).
- [4] 邢晓峰, 张正楼, 刘林保. 低海水温度模式下核电厂重要厂用水系统运行优化研究[J]. 动力工程学报, 2022, 42(7): 642-646, 656.
XING Xiaofeng, ZHANG Zhenglou, LIU Linbao. Study on operation optimization of essential service water system in nuclear power plant under low seawater temperature condition[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(7): 642-646, 656(in Chinese).
- [5] 贺士晶, 阎昌琪, 王建军, 等. 复合形-遗传算法在核动力设备优化设计中的应用研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(2): 122-125, 135.
HE Shijing, YAN Changqi, WANG Jianjun, et al. Research on application of complex-genetic algorithm in nuclear component optimal design[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(2): 122-125, 135(in Chinese).
- [6] LIU C, YAN C, WANG J. Optimal design of vertical natural circulation steam generator[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 252: 167-178.
- [7] LIU C, YAN C. Development of an improved particle swarm optimization algorithm and its application in the optimal design of nuclear power system[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, China: IEEE, 2012.
- [8] 于沛, 付浩然. 华龙一号设备冷却水系统板式换热器性能研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(S1): 115-118.
YU Pei, FU Haoran. Performance of plate heat exchanger for component cooling water system in HPR1000[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(S1): 115-118(in Chinese).
- [9] 于沛, 赵伟光, 周秀安, 等. “华龙一号”某板式换热器多目标优化设计研究[J]. 中国核电, 2022, 15(增刊): 196-199.
YU Pei, ZHAO Weiguang, ZHOU Xiuan, et al. Research on multi-objective optimal design of plate heat exchanger in HPR1000[J]. China Nuclear Power, 2022, 15(Suppl.): 196-199(in Chinese).
- [10] SHANG Y, ZHAO W, YAN C. Multi-objective optimization design of plate heat exchanger for spent fuel pool cooling system[M]//Springer Proceedings in Physics. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 134-146.
- [11] 兰州石油机械研究所. 换热器[M]. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2013.
- [12] 李滢, 阮富城, 杨昊泽. 板式换热器设计程序开发及变工况特性分析[J]. 电站辅机, 2019, 40(2): 35-38, 52.
LI Ying, RUAN Fucheng, YANG Haoze. Development of the design software for plate heat exchanger and stud-

- ies on variable operating conditions[J]. *Power Station Auxiliary Equipment*, 2019, 40(2): 35-38, 52(in Chinese)
- [13] 王立新, 黄凯, 孙志坚. 板式换热器热工选型优化算法探讨[J]. *能源工程*, 2019(2): 79-82, 88.
WANG Lixin, HUANG Kai, SUN Zhijian. Discussion on optimization algorithm for sizing calculation of plate heat exchanger[J]. *Energy Engineering*, 2019(2): 79-82, 88(in Chinese).
- [14] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [15] 李夔宁, 张继广, 李进, 等. 应用遗传算法优化设计壳管式换热器[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(8): 97-102.
LI Kuining, ZHANG Jiguang, LI Jin, et al. Optimization design of shell-and-tube heat exchangers based on genetic algorithm[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(8): 97-102(in Chinese).
- [16] 周玉, 郑楠, 赵明飞. 管壳式换热器设计程序开发及变工况特性分析[J]. *东北电力技术*, 2015, 36(8): 50-54.
ZHOU Yu, ZHENG Nan, ZHAO Mingfei. Design procedure development of shell-and-tube heat exchanger and characteristic analysis of variable operating conditions[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2015, 36(8): 50-54(in Chinese).
- [17] 赵倩, 林建泉, 黄忠, 等. 工业循环冷却水变频恒压供水系统水泵并联运行策略研究[J]. *制冷与空调(四川)*, 2015, 29(2): 157-161, 168.
ZHAO Qian, LIN Jianquan, HUANG Zhong, et al. The study of pumps in parallel operation of industrial circulating cooling water supplying system with variable frequency and constant pressure[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2015, 29(2): 157-161, 168(in Chinese).
- [18] 高璞珍. 核动力装置用泵[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
- [19] 张金婷. 基于蒙特卡洛模拟法的给水管网多目标优化设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [20] 陈磊. 核动力系统多目标优化方法研究及可行性验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.