# 基于多目标进化算法的反应堆辐射屏蔽 优化方法研究

刘程伟<sup>1,2</sup>,陈珍平<sup>1,2,\*</sup>,杨 超<sup>1,2</sup>,张华健<sup>1,2</sup>,孙爱扣<sup>1,2</sup>,雷济充<sup>1,2</sup>,于 涛<sup>1,2</sup> (1. 南华大学核科学技术学院,湖南衡阳 421001; 2. 南华大学先进核能技术设计与安全教育部重点实验室,湖南衡阳 421001)

**摘要:**新型核能与核动力装置的发展对辐射屏蔽设计方法提出了更高要求。面对空间堆、船用堆等装置的小型化、轻量化设计需求,传统辐射屏蔽多目标优化方法存在优化目标少、优化参数单一、全局性差等缺陷,难以满足辐射屏蔽智能设计的需求。本文基于第三代非支配排序遗传算法和改进多目标人工蜂群 算法开展面向反应堆屏蔽层重量、体积和特定区域辐射剂量等多目标约束条件下的辐射屏蔽优化方法研 究,并对各算法的优化性能、优化方案进行对比分析。结果表明,本文方法相较于传统屏蔽智能设计方法 展现了更好的优化性能,并在实际工程问题中体现了可靠性,可为辐射屏蔽设计优化提供新思路。 关键词:辐射屏蔽设计;多目标优化;进化算法;核反应堆 中图分类号:TL37 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2024)06-1261-10

doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0764

# Research on Reactor Radiation Shielding Optimization Method Based on Multi-objective Evolutionary Algorithm

LIU Chengwei<sup>1,2</sup>, CHEN Zhenping<sup>1,2,\*</sup>, YANG Chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Huajian<sup>1,2</sup>,

SUN Aikou<sup>1,2</sup>, LEI Jichong<sup>1,2</sup>, YU Tao<sup>1,2</sup>

 (1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;
 2. Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy Design and Safety, Ministry of Education, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: The objective of radiation shielding design for nuclear reactors is to minimize external radiation doses (ALARA principle) by selecting appropriate shielding materials and structures to meet safety requirements for personnel. Furthermore, given the extensive use of nuclear energy in various sectors, shielding design must strike a balance between safety standards and considerations of compactness and lightweight design, as seen in marine nuclear power, land-based nuclear power sources, and space reactors. Thus, radiation shielding design for nuclear reactors poses a typical multi-objective combinatorial optimization challenge, involving various design objectives and parameters, including radiation dose rate, volume, weight, and more. Traditional multi-objective optimization methods for radiation shielding suffer from limitations such as a restricted number of optimization

收稿日期:2023-10-31;修回日期:2024-01-04

基金项目:国家自然科学基金(12175101);湖南省自然科学基金(2022JJ40345);衡阳市科技创新项目(202250045336)

<sup>\*</sup>通信作者:陈珍平

objectives, a limited set of optimization parameters, and suboptimal global optimization, rendering them inadequate for intelligent radiation shielding design. This paper introduced two multi-objective evolutionary algorithms, utilizing a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III) based on reference point selection and a multi-objective artificial bee colony (MOABC) algorithm based on crowding distance selection. These algorithms were employed to conduct optimization studies for reactor shielding layer weight, volume, and specific region radiation dose. The algorithms' performance was evaluated on a simple three-dimensional shielding structure, and practical engineering tests were performed on complex shielding structures. In the initial set of tests, the numerical results demonstrate that the proposed methods outperform traditional optimization methods, as evidenced by superior hyper volume indicators and excellent performance in terms of average objective values for weight and volume dimensions under varying mutation probabilities. For complex models, the lightest optimized solution is selected for presentation. After MOABC optimization, the solution demonstrates reductions of 4.01% in volume, 75.28% in weight, 5.25% in lateral dose rate, and 44.18% in top dose rate. In the case of NSGA-III, these reductions are 6.12% in volume, 77.80% in weight, 9.59% in lateral dose rate, and 41.98% in top dose rate. In practical engineering applications, the best-suited scheme can be chosen based on specific requirements. In summary, the proposed method effectively addresses the challenges of multi-objective optimization in radiation shielding design. For novel nuclear facilities with limited design experience, these methods hold significant promise for guiding radiation protection design decisions during the conceptual design phase and providing supplementary data.

Key words: radiation shielding design; multi-objective optimization; evolutionary algorithm; nuclear reactor

反应堆辐射屏蔽设计旨在通过选用适当的屏 蔽材料与结构,尽可能降低堆外辐射剂量(ALARA 原则)以满足从业人员的安全需求[1]。同时,伴随 着陆海空天全域反应堆谱系的发展,屏蔽设计在 满足安全标准的同时需要兼顾小型化、轻量化要 求,例如船用核动力[2]、陆基核电源、空间反应堆 等<sup>[3]</sup>。因此,反应堆辐射屏蔽设计是一个典型的受 辐射剂量、体积、重量等多设计目标、多设计参数约 束的非线性多目标组合优化问题。传统辐射屏蔽 设计主要依靠专家经验进行,需要人工反复迭代设 计以达到经验最优效果。随着人工智能技术与传 统核能科学交叉学科的发展,逐渐有学者采用传统 遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、差分算法(DE) 等单目标进化算法对辐射剂量进行单目标优化设 计[4-5]。近年来,亦有学者采用非支配排序遗传算 法(NSGA-II)、多目标粒子群算法(MOPSO)等[6-7] 对体积-剂量进行多目标优化。

然而在实际工程问题的屏蔽优化设计中,优 化目标往往大于3个,是典型的超多目标问题(待 优化目标≥4)<sup>[8]</sup>。传统多目标进化算法在处理超 多目标优化问题时效果欠佳,寻优性能和收敛性 能较差,难以满足实际工程设计需求。因此,本文 拟采用改进多目标人工蜂群(MOABC)<sup>[9]</sup>算法、基 于第三代非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅲ)<sup>[10]</sup>开展 超多目标辐射屏蔽优化研究,为新型核能与核动 力装置轻量化设计提供理论与技术支撑。

#### 1 辐射屏蔽多目标优化问题

辐射屏蔽设计是核反应堆工程中典型的多目 标优化问题,既要使屏蔽层的重量和体积尽可能 最小化,也要使屏蔽层外辐射剂量满足 ALARA 原则,然而重量、体积和辐射剂量是相互矛盾的 目标,无法同时达到最佳。在本文研究中,多目标 问题是指受屏蔽层的总重量、总体积以及一次屏 蔽后特定区域辐射剂量率等多个目标约束条件下 的辐射屏蔽优化设计问题,而上述每个目标又受 多参数(如屏蔽层厚度、材料种类等)约束。同 时,优化过程中需要对屏蔽层外快中子、热中子、 γ射线注量率进行一定限制。因此,反应堆辐射屏 蔽设计是一个多目标、多参数、多约束问题。针 对此类问题,本文提出并构建了以下数学模型:

$$\begin{cases} \min F(X) = (F_{R}(X), F_{W}(X), F_{V}(X)) \\ F_{R}(X) = R_{N}(X) + R_{p}(X) \leq R_{0} \\ F_{W}(X) = \sum_{m=1}^{M} V_{m} \cdot \rho_{m} \leq W_{0} \\ F_{V}(X) = \sum_{m=1}^{M} V_{m} \leq V_{0} \\ s.t. \begin{cases} X = (x_{1}, x_{2}, x_{3}, \cdots, x_{n-1}, x_{n}), X \in \mathbf{R} \\ L_{j} \leq x_{j} \leq U_{j}(j = 1, 2, \cdots, n) \end{cases} \end{cases}$$
(1)

式中:  $x_j$ 为屏蔽设计中的决策变量(屏蔽层厚度、 材料类型、材料组分);  $U_j$ 和 $L_j$ 分别为决策变量的 上下界; X为设计参数的 n 维决策向量,  $\mathbf{R}$ 为X的 参数空间;  $V_m$ 为该层屏蔽层体积,  $\rho_m$ 为该层屏蔽 层材料相应密度, 二者共同构成该层屏蔽层重量;  $R_N$ 和 $R_p$ 分别为屏蔽层最外部中子剂量及光子剂 量;  $F_{\mathbf{R}}(X)$ 、 $F_{\mathbf{W}}(X)$ 和 $F_{\mathbf{V}}(X)$ 分别为最外层屏蔽层 测得的辐射剂量、屏蔽层总重量和屏蔽层总体 积;  $R_0$ 、 $W_0$ 和 $V_0$ 分别为辐射剂量、重量和体积约 束值; F(X)为辐射屏蔽目标值向量, 目标值各维 度均以最小化为优化目标; m为屏蔽层序号; M为 屏蔽层总数; n为决策变量总数。

# 2 辐射屏蔽多目标优化方法

#### 2.1 基于适应度的屏蔽方案性能评估方法

2.1.1 屏蔽方案适应度计算 适应度在不同数学问题中存在不同定义方式,一般来说,适应度与目标值相等或为目标值的倒数。但在辐射屏蔽问题中由于各目标值间量级差异过大,故而将各维度归一化后的目标值作为相应的适应度。适应度转换函数及定义如式(2):

$$f(X) = \frac{F(X) - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \Rightarrow f_{pop} = \begin{bmatrix} f(X_1) = [f_{1,1} \ f_{1,2} \ \dots \ f_{1,p}] \\ \vdots \\ f(X_q) = [f_{q,1} \ f_{q,2} \ \dots \ f_{q,p}] \end{bmatrix}$$
(2)

式中:  $F_{max}$ 和 $F_{min}$ 分别为种群最大目标值向量和 最小目标值向量; f(X)为转换后的适应度向量;  $f_{pop}$ 为种群适应度矩阵;  $f_{q,p}$ 为第 q 个方案的 p 维 子目标适应度。

2.1.2 快速非支配排序 本文利用 Pareto 支配方 法作为屏蔽设计方案的性能评价方法,即当两个 方案间存在 Pareto 支配关系时,其中处于支配地

位的方案性能将优于处于被支配地位的另一方案。对于方案集合中任意两个方案 *X*<sub>u</sub>和*X*<sub>v</sub>,如果 *X*<sub>u</sub>和*X*<sub>v</sub>满足式(3)就认为*X*<sub>u</sub>支配*X*<sub>v</sub>,即*X*<sub>u</sub> < *X*<sub>v</sub>。

$$\operatorname{Dom}(X_{u}, X_{v}) = \operatorname{if} \begin{cases} F(X_{u}) \neq F(X_{v}) \\ F_{W}(X_{u}) \leq F_{W}(X_{v}) \\ F_{V}(X_{u}) \leq F_{V}(X_{v}) \\ F_{R}(X_{u}) \leq F_{R}(X_{v}) \end{cases} \Rightarrow X_{u} < X_{v} \quad (3)$$

式中,  $Dom(X_u, X_v)$ 为无约束条件下的支配关系判断函数。

针对带约束的优化问题,本文采取可行性法则<sup>[11]</sup>进行优劣判断。首先判断个体是否满足约束,满足则设定约束变量 Res(*X*)为0,否则为1。 当*X*<sub>u</sub>和*X*<sub>v</sub>的Res(*X*)相等时,进行非支配判断。当 二者 Res(*X*)不相等时,值为0的个体将支配值为 1的个体,即:

$$\operatorname{Res}(X) = \begin{cases} 0 & \text{if } r(X) \leq r_0(X) \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$
(4)

 $\operatorname{Dom}_{\operatorname{res}}(X_{u}, X_{v}) = \begin{cases} \operatorname{Dom}(X_{u}, X_{v}) & \text{if } \operatorname{Res}(X_{u}) = \operatorname{Res}(X_{v}) \\ X_{u} < X_{v} & \text{else if } \operatorname{Res}(X_{u}) < \operatorname{Res}(X_{v}) \\ X_{v} < X_{u} & \text{else} \end{cases}$ (5)

式中:  $r_0(X)$  为约束向量; r(X) 为相应个体的约束 值; Dom<sub>res</sub>( $X_u, X_v$ ) 为约束条件下的支配关系判断 函数。支配关系判定结束后, 对种群进行快速非 支配排序, 如图 1 所示。图 1 中首先将父代种群  $P_g$  与产生的子代种群 $Q_g$  合并为种群 $C_g$ , 按照支配 关系将合种群分为 1~l 层, 方案所在的非支配层 序号越靠前, 代表该方案在当前方案集合中的适 应度越好, 越容易将信息传递给下一代。

**2.1.3** Pareto 集合选择策略 非支配排序结束后, 需要根据支配等级顺序依次将个体加入下一代种 群 *P*<sub>g+1</sub> 内, 直到当前非支配层个体无法全部放入





本文采取参考点选择<sup>[10]</sup>和拥挤度选择<sup>[12]</sup>两 种 Pareto 前沿选择方法,拥挤度选择通过考虑个 体在目标空间中的拥挤度来实现多样性维持,参 考点选择则通过在归一化超平面构建参考点来引 导解的搜索方向。

# 2.2 基于 MOABC 算法的辐射屏蔽优化策略

人工蜂群(ABC)算法是一种基于群体智能的 全局进化算法,其直观背景来源于蜂群的采蜜行 为,蜂群根据各自的分工进行活动,并实现蜂群信 息的共享及交流,进而找到问题的最优解。本文 基于基础 ABC 算法使用了一种改进后的 MOABC 算法<sup>[13]</sup>,利用差分搜索算子和拥挤度排序策略对 解空间进行搜索。

1) 雇佣蜂搜索

在该阶段,将派遣数量与种群大小一致的雇 佣蜂对历史蜜源(解空间)进行搜索。本文蜂群的 搜索方式是一种基于精英策略的差分搜索方法。 随机将 Pareto 最优集合中的个体作为引导项,并 采用差分进化算子产生新解:

$$\mathbf{X}^{t} = \mathbf{X}^{t1} + R\left(\mathbf{X}^{t1} - \mathbf{X}^{t2}\right) + R\left(\mathbf{X}^{t1} - \mathbf{X}^{t3}\right)$$
(6)

式中: X<sup>1</sup>, X<sup>2</sup>, X<sup>3</sup> 是从 Pareto 最优集合中选出的 3 个互不相同的解,并且按密度从小到大排序; R 为 [0,1] 之间随机数。

X'引导搜索的过程为:

$$x_{ij} = x_j^t \tag{7}$$

式中: x'<sub>j</sub>为X'的第j 维分量; x<sub>ij</sub>为随机候选解X<sub>i</sub>的 第j 维分量, 通过 x<sub>ij</sub>更新后产生的新候选解记为 X<sub>i</sub>'。雇佣蜂搜索阶段主要追求对解空间的探索, 故采用较大蜜源更新率 F<sub>µ</sub>对蜜源决策变量进行 更新, 更新率设置在 [0.1,0.5] 之间, 实际问题中可 设置固定概率或根据目标值收敛趋势进行动态 更新。

2) 跟随蜂搜索

跟随蜂基于轮盘赌对优秀蜜源进行重复寻优,其具体寻优操作与雇佣蜂相同,但该阶段注重 对解空间的开发,仅对蜜源中一位决策变量进行 更新。其中跟随蜂评估函数为:

$$fit_i = \frac{dom}{FoodNumber}$$
(8)

式中: dom 为第 *i* 个可行解在全部可行解中的可支 配数量; FoodNumber 为蜜源总数量。

轮盘赌选择概率定义为:

$$p_{i} = \frac{\text{fit}_{i}}{\sum_{n=1}^{\text{FoodNumber}} \text{fit}_{n}}$$
(9)

式中,n为相应的蜜源序号。

概率越大的食物源会在跟随蜂搜索阶段获得 更多的搜索机会,以保证算法对优秀解空间的快 速挖掘。

3) 侦察蜂搜索

对于每一代最差方案,即最后一层 Pareto 前 沿中拥挤度最高的食物源 (MOABC 算法采用拥 挤度选择策略),进行决策向量随机化,并重置其 对应目标值。

#### 2.3 基于 NSGA-Ⅲ的辐射屏蔽优化策略

遗传算法是最为经典的进化算法之一,它模 拟了自然界中的遗传和进化过程,通过选择、交 叉和变异等操作来搜索优化问题的解空间。基于 不同评价策略的遗传算法在不同问题的求解上有 着较大性能差异,以下对遗传算法的基础操作以 及本文所使用的 Pareto 集合选择策略进行说明。

本文根据个体适应度进行选择操作,根据适 应度大小对部分个体进行选择作为父代,用于产 生下一代。适应度高的个体在选择中具有更高的 概率被选中,从而保留优秀基因信息。交叉操作 模拟了生物进化中的杂交过程。它选择两个或多 个父代个体的染色体片段(基因)进行交换,生成 新的后代个体。交叉操作有多种方式,包括单点 交叉、多点交叉和均匀交叉等,本文采取的交叉 操作为单点交叉。染色体在不断更新的过程中产 生变异过程,变异操作为算法引入了一定随机性, 通过改变个体染色体上的一些基因值来产生新的 个体。变异操作能够增加种群的多样性,防止陷 入局部最优解。本文采取的变异操作为位翻转突 变。算法将基于参考点选择策略迭代进化。

# 2.4 多目标优化流程

本文将多目标进化算法与粒子输运计算软件 相结合,该方法可对反应堆一次屏蔽结构、材料 种类进行优化,通过自动化流程获得最佳屏蔽优 化效果。基于该方法的程序被编码至本团队自主 研发的多功能辐射输运模拟仿真平台 (MOSRT) 中<sup>[14-15]</sup>,通过该软件开展的辐射屏蔽优化流程如 图 2 所示,具体步骤如下。1)通过 MOSRT 软件 完成反应堆 CAD 模型构建,提取屏蔽结构信息生 成相应的粒子输运计算模板文件,并实现屏蔽优 化特殊编码等前处理步骤。2)设置初始参数如 最大迭代次数 MaxGen、种群大小 N、变异概率 M、蜜源更新率 $F_{\mu}$ 等。3)随机生成初始父代种群 $P_{s}$ , 并求解相应适应度。4)根据父代种群信息特征 生成子代种群Qg。其中NSGA-Ⅲ采用选择、交 叉、变异的方式生成子代种群,MOABC采用雇佣 蜂、跟随蜂、侦察蜂搜索的方式进行子代种群的 更新,并对子代种群进行适应度求解。将父代种 群Pg与子代种群Qg合并,得到第g代组合种群Cg。 5)对合并后的种群进行快速非支配排序,并判断 是否达到最大迭代次数。若达到则输出屏蔽结构 设计方案集合,反之则进入步骤6。6)根据算法



Fig. 2 Multi-objective optimization flowchart for radiation shielding

特性基于拥挤度或参考点两种方式生成新父代种 群*P*<sub>s+1</sub>,并更新各算法迭代次数,最终重复步骤4。

# 3 数值验证

本文基于简单三维屏蔽结构对 NSGA-Ⅲ和 MOABC 在不同参数下的优化性能进行分析,并 与 NSGA-Ⅱ进行对比。基于本文提出的优化方法 对复杂屏蔽结构开展约束多目标优化,并与基准 方案进行对比。数值验证中的中子数据库为 ENDF/B-Ⅲ.0<sup>[16]</sup>,光子数据库为 MCPLIB84,采用的 中子通量-剂量率转换因子和光子通量-剂量率转 换因子分别为 NCRP-38 和 ANSI/ANS 1977<sup>[17]</sup>。采 用蒙特卡罗程序进行粒子输运<sup>[18-19]</sup>模拟。

### 3.1 三维屏蔽结构数值验证

针对简单三维屏蔽结构进行一次屏蔽优化, 如图 3 所示。优化目标为 R1~R10、U1~U5 以及 L1~L5 屏蔽层的总体积和总重量,以及屏蔽 层径向侧方和轴向上下方剂量率,可变参数为 R1~ R10 厚度、U1~U5 和 L1~L5 高度、屏蔽层材料 种类,并通过平均目标值、超体积(HV)指标对不 同变异概率(蜜源更新率)下算法优化性能做出对 比分析。其中各方法优化参数均设置为种群大小 210、进化代数 100,反应堆由高度为 167.6 cm、半 径为 78.8 cm 的均匀化堆芯构成,其中轴向上下方 各设置 5 层屏蔽层,径向设置 10 层屏蔽层,单层 厚度为 0.25~13 cm。堆芯中子源设置为基于 Watt 裂变谱的固定源。

绘制 Pareto 前沿均值变化趋势如图 4 所示, 从图 4a 可看出,在体积维度上 NSGA-Ⅲ各变异概 率均表现优异,而 MOABC 和 NSGA-Ⅱ均值分布 较为接近。从图 4b 可看出, 在重量维度上 NSGA-III 和 MOABC 效果均优于 NSGA-II 。从图 4c~e可看出, 在各向剂量率维度上, NSGA-II 在 0.04 和 0.05 变异概率下表现优异, MOABC 和 NSGA-II 并无明显差异。总体而言在目标均值指标中, NSGA-II 效果最佳, MOABC 次之, NSGA-II 最差。由于本节验证主要关注于算法在屏蔽问题中的优化性能对比分析, 并未对剂量相关目标进行约束, 故而各向剂量率平均值均出现一定程度劣化。

本文亦采用 HV<sup>[20]</sup> 指标衡量各算法性能,结 果列于表 1。HV 指标通过计算非支配解集与参 考点所构成目标空间中体积和数值大小评判算法 在多目标优化问题中的综合性能。从表 1 可看 出, NSGA-III总体表现更好, MOABC 次之, NSGA-II 最差。三者 HV 指标最优的变异概率或蜜源更新 率分别为 0.04、0.5、0.05。HV 指标与图 4 展现的 优化效果基本一致, 因此在后文中, 各算法将基于 上述最优变异概率对复杂模型进行优化验证。

#### 3.2 复杂屏蔽结构数值验证

针对复杂屏蔽结构进行一次屏蔽优化,如图 5 所示。该模型参考某船用堆工程模型构建,并基 于人工经验优化设计了初始参考方案,优化目标 为*R*1~*R*8、*U*1~*U*3 屏蔽层的总体积和总重量,以 及屏蔽层径向侧方和轴向上方剂量率。约束目标 为*S*1~*S*8 处中子注量率和光子注量率满足国标 一次屏蔽堆顶和堆侧外表面约束<sup>[21]</sup>(热中子注量 率小于 1.0×10<sup>5</sup> cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、快中子注量率小于 1.0× 10<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、光子能量注量率小于 6.0×10<sup>6</sup> MeV/ (cm<sup>2</sup>·s))。可变参数为 *R*1~*R*8 和 *U*1~*U*2 厚度、







Fig. 4 Pareto front mean change trend plot

	<b>VI</b>	
算法种类	变异概率/蜜源更新率	HV 数值
NSGA- II	0.01	0.716 2
	0.02	0.715 9
	0.03	0.662 6
	0.04	0.681 9
	0.05	0.750 8
NSGA-Ⅲ	0.01	0.745 4
	0.02	0.776 4
	0.03	0.778 4
	0.04	0.846 4
	0.05	0.822 7
MOABC	0.1	0.782 3
	0.5	0.812 1

表1 HV 指标数值 Table 1 Hyper-volume metric value

U1~U3高度、屏蔽层材料种类(水、硼钢、硼聚 乙烯、铅硼聚乙烯和钨合金)以及部分材料组分 含量。可变组分材料分别为硼聚乙烯(硼变化范 围 10%~70%)、铅硼聚乙烯(铅变化范围 50%~ 90%)、钨合金(钨变化范围 90%~99%)。

各算法参数均设置为种群大小100、进化代

数50、单层厚度为15~80 cm,反应堆由高度为 167.6 cm、半径为 78.8 cm 的均匀化堆芯构成, 堆 芯功率为 69 MW。其中 NSGA-II、NSGA-III、 MOABC 设置的变异概率或蜜源更新率分别为 0.05、0.04和0.5。为保证计算精度,优化过程基 于栅元重要性减方差方法<sup>[22]</sup>并采用 4 块 AMD EPYC 7H12 型号 CPU 共计 1024 线程进行大规模 蒙特卡罗并行计算,单算法优化耗时约41.6h。

优化完成后,从NSGA-II算法最终代非支配 解集中挑选屏蔽设计方案作为对比方案,并绘制 NSGA-Ⅲ和 MOABC 算法最终代目标值平行坐标 图,如图6所示。图6中各维度目标值均相对于 对比方案做归一化处理。从图 6 可看出 MOABC 共有3个方案支配对比方案(黑色实线为对比方 案,红色划线为支配方案),NSGA-Ⅲ则有5个。 在实际工程中可根据需求选定相应方案,本文以 各算法优化后重量最轻方案作为选定方案,并采 用权窗减方差方法[23]进行高精度屏蔽计算。屏 蔽结构示意图如图7所示,设计参数及优化效果 如表 2~4 所列,最外层各段中子注量率及光子能 量注量率如表5所列。



Fig. 5 Schematic diagram of complex shielding structure



Fig. 6 Parallel coordinate plot of final generation for each algorithm



a——对比方案示意图; b——MOABC 重量最轻方案示意图; c——NSGA-Ⅲ重量最轻方案示意图 图 7 屏蔽设计方案示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shielding design scheme

表 2 屏蔽设计方案详细参数 Table 2 Detailed parameter of shielding design scheme

屏蔽层序号 -	对比方案		MOABC		NSGA-III	
	几何参数/cm	材料种类	几何参数/cm	材料种类	几何参数/cm	材料种类
R1(厚度)	28.7	B-Steel	40.0	Pb-B-PE	26.2	Pb-B-PE
R2(厚度)	25.8	Pb-B-PE	18.8	$H_2O$	70.3	Pb-B-PE
R3(厚度)	35.4	W-Ni-Fe	25.6	$H_2O$	34.6	$B_4C$
R4(厚度)	32.2	Pb-B-PE	36.7	$H_2O$	17.4	$H_2O$
R5(厚度)	36.9	W-Ni-Fe	40.0	$H_2O$	22.0	$H_2O$
R6(厚度)	21.8	W-Ni-Fe	40.0	B-PE	21.5	Pb-B-PE
R7(厚度)	50.0	Pb-B-PE	20.0	$H_2O$	38.0	B-PE
R8(厚度)	66.8	$H_2O$	33.8	W-Ni-Fe	49.2	Pb-B-PE
U1(厚度)	34.1	W-Ni-Fe	80.0	W-Ni-Fe	72.4	W-Ni-Fe
U2(厚度)	58.0	$H_2O$	20.0	$H_2O$	59.1	$H_2O$
U3(高度)	46.4	Air	20.0	Air	15.9	Air

Table 3         Objective value and optimization rate of shielding design scheme									
设计方案	体	体积		重量		~ 径向侧方剂量率		轴向上方剂量率	
	数值/cm <sup>3</sup>	优化 比例/%	数值/10 <sup>8</sup> g	优化 比例/%	数值/ (rem·h <sup>-1</sup> )	优化 比例/%	数值/ (10 <sup>-1</sup> rem·h <sup>-1</sup> )	优化 比例/%	
对比方案	1.01×10 <sup>8</sup>		9.11		9.90		9.95		
MOABC	9.67×107	4.01	2.25	75.28	9.38	5.25	5.55	44.18	
NSGA-Ⅲ	9.46×107	6.12	2.09	77.80	8.95	9.59	5.90	41.98	

表 3 屏蔽设计方案目标值及优化比例

表 4 屏蔽设计方案材料组分质量分数

Table 4	Material composition	mass fraction o	f shielding des	sign scheme
I abit 4	material composition	mass machon o	1 shielding ues	ngn seneme

设计主安	硼聚乙烯		铅硼聚乙烯			钨合金		
以打刀杀	w(B <sub>4</sub> C)/%	w(PE)/%	w(Pb)/%	w(B <sub>4</sub> C)/%	w(PE)/%	w(W)/%	w(Ni)/%	w(Fe)/%
对比方案	80.30	19.70	53.17	2.34	44.49	98.66	0.94	0.40
MOABC	12.79	87.21	90.00	0.50	9.50	90.00	7.00	3.00
NSGA-Ⅲ	59.82	40.18	68.56	1.57	29.87	90.53	6.63	2.84

表 5 屏蔽设计方案各段注量率 Table 5 Dose rate for each section of shielding design scheme

		MOABC			NSGA-∭	
区间	热中子	快中子	光子能量	热中子	快中子	光子能量
	注量率/	注量率/	注量率/	注量率/	注量率/	注量率/
	$(cm^{-2} \cdot s^{-1})$	$(cm^{-2} \cdot s^{-1})$	$(MeV/(cm^2 \cdot s))$	$(cm^{-2} \cdot s^{-1})$	$(cm^{-2} \cdot s^{-1})$	$(MeV/(cm^2 \cdot s))$
<i>S</i> 1	1.18×10 <sup>2</sup>	7.74×10 <sup>2</sup>	3.39×10 <sup>6</sup>	1.40×10 <sup>3</sup>	8.19×10 <sup>2</sup>	$1.37 \times 10^{6}$
<i>S</i> 2	7.31×101	4.88×10 <sup>2</sup>	$1.07 \times 10^{6}$	$7.07 \times 10^{2}$	5.04×10 <sup>2</sup>	7.09×10 <sup>5</sup>
<i>S</i> 3	5.50×101	3.97×10 <sup>2</sup>	9.33×10 <sup>5</sup>	5.29×10 <sup>2</sup>	$4.21 \times 10^{2}$	6.35×10 <sup>5</sup>
<i>S</i> 4	4.31×101	3.13×10 <sup>2</sup>	7.37×10 <sup>5</sup>	$4.01 \times 10^{2}$	$3.11 \times 10^{2}$	5.15×10 <sup>5</sup>
<i>S</i> 5	3.63×10 <sup>1</sup>	$2.78 \times 10^{2}$	5.32×10 <sup>5</sup>	$3.22 \times 10^{2}$	2.96×10 <sup>2</sup>	4.04×10 <sup>5</sup>
<i>S</i> 6	3.34×10 <sup>1</sup>	2.30×10 <sup>2</sup>	3.83×10 <sup>5</sup>	5.59×10 <sup>0</sup>	$2.14 \times 10^{2}$	3.67×10 <sup>5</sup>
<i>S</i> 7	3.29×10°	2.45×10 <sup>2</sup>	3.18×10 <sup>5</sup>	3.29×10 <sup>0</sup>	$1.57 \times 10^{2}$	3.52×10 <sup>5</sup>
<i>S</i> 8	5.05×10 <sup>1</sup>	1.57×10 <sup>2</sup>	1.47×10 <sup>5</sup>	$1.32 \times 10^{1}$	1.95×10 <sup>2</sup>	1.09×10 <sup>5</sup>

# 4 结论

面向新型核能与核动力装置小型化轻量化设 计需求,本文提出了基于 NSGA-III 和 MOABC 算 法的辐射屏蔽多目标优化方法,可高效精确获得 更加紧凑、轻量化、安全的优化屏蔽方案集。首 先,本文基于简单三维屏蔽模型开展了优化方法 性能评估验证,数值结果表明本文提出的两种方 法在不同变异概率下的优化性能均优于 NSGA-II。 其次,在复杂屏蔽结构优化验证中,本文提出的方 法均能获得相较于对比方案各目标值均更优的设 计方案集。综上所述,本文方法能够有效地在辐 射屏蔽设计初期寻找性能更佳的辐射屏蔽方案, 对于缺少工程设计经验的新型核能与核动力装 置,在概念设计阶段中的辐射屏蔽设计决策和提供补充数据具有重要的指导意义。

# 参考文献:

- [1] CACUCI D G. Handbook of nuclear engineering, Vol. 1: Nuclear engineering fundamentals; Vol. 2: Reactor design; Vol. 3: Reactor analysis; Vol. 4: Reactors of generations III and IV; Vol. 5: Fuel cycles, decommissioning, waste disposal and safeguards[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] FREIRE L O, de ANDRADE D A. Historic survey on nuclear merchant ships[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 293: 176-186.
- [3] CAFFREY J. Radiation shielding for space nuclear

propulsion[D]. America: Oregon State University, 2017.

- [4] 杨寿海,陈义学,王伟金,等.多目标辐射屏蔽优化设计 方法[J].原子能科学技术,2012,46(1):79-83.
   YANG Shouhai, CHEN Yixue, WANG Weijin, et al. Multi-objective optimization design method of radiation shielding[J]. Atomic Energy Science and Technology,
- [5] SAZALI M A, RASHID N K A M, HAMZAH K. A preliminary study to metaheuristic approach in multilayer radiation shielding optimization[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. England: IOP Publishing, 2018, 298(1): 012042.

2012, 46(1): 79-83(in Chinese).

- [6] LEI J, YANG C, ZHANG H, et al. Radiation shielding optimization design research based on bare-bones particle swarm optimization algorithm[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(6): 2215-2221.
- [7] CHEN Z, ZHANG Z, XIE J, et al. Multi-objective optimization strategies for radiation shielding design with genetic algorithm[J]. Computer Physics Communications, 2021, 260: 107267.
- [8] 孔维健, 丁进良, 柴天佑. 高维多目标进化算法研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 321-326.
  KONG Weijian, DING Jinliang, CHAI Tianyou. Survey on large-dimensional multi-objective evolutionary algorithms[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 321-326(in Chinese).
- [9] AKBARI R, HEDAYATZADEH R, ZIARATI K, et al. A multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2012, 2: 39-52.
- [10] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I : Solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-601.
- HE Q, WANG L. A hybrid particle swarm optimization with a feasibility-based rule for constrained optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 186(2): 1407-1422.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [13] 葛宇,梁静.一种多目标人工蜂群算法[J]. 计算机科学,

2015, 42(9): 257-262.

GE Yu, LIANG Jing. Multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Computer Science, 2015, 42(9): 257-262(in Chinese).

- [14] 李玥航, 于涛, 陈珍平, 等. 船用堆辐射屏蔽优化设计平 台开发与验证[J]. 核动力工程, 2022, 43(1): 208-214.
  LI Yuehang, YU Tao, CHEN Zhenping, et al. Development and verification of radiation shielding optimization design platform for marine reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(1): 208-214(in Chinese).
- [15] 张震宇. 船用反应堆辐射屏蔽多目标智能优化方法及 平台开发[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
- [16] BROWN D A, CHADWICK M, CAPOTE R, et al. ENDF/B-VII. 0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data[J]. Nuclear Data Sheets, 2018, 148: 1-142.
- [17] HARIMA Y. An historical review and current status of buildup factor calculations and applications[J]. Radiation Physics and Chemistry, 1993, 41(4-5): 631-672.
- [18] ROMANO P K, FORGET B. The OpenMC Monte Carlo particle transport code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 51: 274-281.
- [19] LUX I. Monte Carlo particle transport methods[M]. America: CRC Press, 2018.
- [20] BEUME N, NAUJOKS B, EMMERICH M. SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(3): 1653-1669.
- [21] 国防科学技术工业委员会. GJB843.21A—2006 潜艇 核动力装置设计安全规定第 21 部分: 辐射屏蔽设计准 则[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2006.
- [22] 王益祺, 刘仕倡, 靳程建, 等. 基于 cosRMC 的同位素电 池屏蔽计算研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(3): 622-629.

WANG Yiqi, LIU Shichang, JIN Chengjian, et al. Shielding calculation of isotope battery based on cosRMC[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(3): 622-629(in Chinese).

[23] WAGNER J C, PEPLOW D E, MOSHER S W. FW-CADIS method for global and regional variance reduction of Monte Carlo radiation transport calculations[J]. Nuclear Science and Engineering, 2014, 176(1): 37-57.