

含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化

石秀安, 刘志宏, 胡永明

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化是燃料管理优化研究中的难点。应用通常的优化算法效率低、全局性差,特征统计算法更适合求解该优化问题。本研究克服了原特征统计算法装料优化将组件布置(LP)优化和新组件可燃毒物配置(BP)优化脱耦处理的缺陷,对LP和BP同时进行优化,结合堆芯分析程序CYCLE2D,成功地研制了压水堆LP和BP耦合优化程序CSALPBP。用该程序对大亚湾2号机组第10循环进行了堆芯装料优化计算。结果表明:CSALPBP程序具有很高的搜索效率和很好的全局性。

关键词:压水堆;可燃毒物;装料优化;特征统计算法;耦合优化

中图分类号:TL421.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)09-0804-06

Reloading Optimization of Pressurized Water Reactor Core With Burnable Absorber Fuel

SHI Xiu-an, LIU Zhi-hong, HU Yong-ming

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The reloading optimization problem of PWR with burnable absorber fuel is very difficult, and common optimization algorithms are inefficient and have bad global performance for it. Characteristic statistic algorithm (CSA) is very fit for the problem. In the past, the reloading optimization using CSA has shortcomings of separating the fuel assemblies' loading pattern (LP) optimization from burnable absorber's placement (BP) optimization. In this study, LP and BP were optimized simultaneously using CSA coupled with CYCLE2D, which is a core analysis code. The corresponding reloading coupling optimization software, CSALPBP, was developed. The 10th cycle reloading design of Daya Bay Nuclear Power Plant was optimized using CSALPBP. The results show that CSALPBP has high efficiency and excellent global performance.

Key words: pressurized water reactor; burnable poison; loading optimization; characteristic statistic algorithm; coupling optimization

国内外对含可燃毒物的压水堆装料优化通常是将燃料组件布置优化和可燃毒物配置优化

脱耦处理^[1]。这种处理方式虽简化了优化问题的规模,但全局性较差。美国西屋公司基于逆

向求解扩散方程方法研制的 ALPS 程序^[2]应用比较广泛,它能在较短的时间内对数十万个方案进行计算选择,但本质上仍是一个对装料方案进行枚举搜索的程序,且 ALPS 方法的全局性较差。

本研究以大亚湾 2 号机组第 10 循环堆芯为参考堆芯,通过分析提取 LP(燃料组件在堆芯中的布置)优化和 BP(新组件内可燃毒物的配置)配置优化的特征量,利用特征统计优化算法结合格林函数节块法堆芯计算程序 CYCLE2D,研制出压水堆燃料组件布置与新组件内可燃毒物配置的装料耦合优化程序 CSALPB,并使用该程序对大亚湾 2 号机组第 10 循环进行堆芯装料优化计算。

1 含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化问题及研究现状

研究以组件类型最多、换料特点最复杂的大亚湾核电厂 2 号机组第 10 循环装料堆芯为优化模型,优化初始条件为:来自第 6 循环富集度为 3.2%的组件 9 个,来自第 9 循环富集度为 3.7%组件 52 个,来自第 9 循环富集度为 4.45%组件 48 个,富集度为 4.45%的新组件 48 个。1/4 堆芯优化模型(中心组件固定)如图 1 所示,图中左上方的方格表示中心组件,新组件的方格中的数字表示可燃毒物棒的数目。

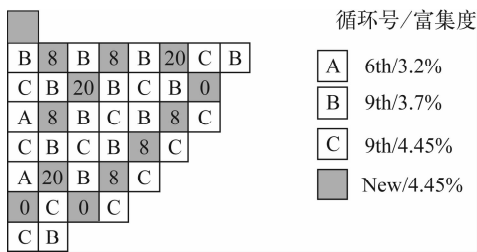


图 1 含可燃毒物的压水堆装料优化模型
Fig. 1 Reloading optimization model of PWR with burnable absorber fuel

研究要求不改变燃料组件的类型与数目,在满足工程约束的条件下,通过优化确定燃料组件在堆内的布置与新组件内的可燃毒物配置,从而实现循环长度的最大化或功率峰因子的最小化等优化目标。因此,优化问题为:

$$\text{Maximize } J(\text{LP} + \text{BP})$$

$$s. t. \text{FF}_i < \text{FF}_{\text{lim}}, i = 1, \dots, N$$

式中: J 为优化目标; FF_{lim} 为约束条件,包括循环长度、功率峰值因子、初始临界硼浓度等的限制。

含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化问题同时包括 LP 优化和新组件的 BP 配置优化两种不同的优化问题。在图 1 所示的堆芯中,无可燃毒物的堆芯装料优化问题的搜索空间为 39! 个方案;假定新组件有 5 种可燃毒物类型选择,则含可燃毒物的堆芯装料优化问题的搜索空间为 $39! \times 5^{12}$ 个方案。在如此巨大的搜索空间内快速地搜索到全局最优解或近似全局最优解是非常困难的^[3-4]。本课题组开发的一种基于概率统计的全局优化算法——特征统计算法(CSA)^[5-6](文献曾称为统计归纳算法 SIA),它通过统计指定的特征量来指导优化搜索方向,并最终得到全局优化解。CSA 能很好地利用装料优化问题的特征,具有很高的优化效率和很好的全局性,更适合求解含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化问题。

前期研究含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化^[7]时采用了脱耦处理解法,先利用 CSA 结合哈林原理进行 LP 优化,然后对最优的一批 LPs 手工配置 BP,使真实的组件功率接近哈林功率,但效果不理想。本研究在原研究的基础上加以改进,对 LP 和 BP 同时进行优化,研制高效实用的压水堆 LP 和 BP 装料耦合优化程序。

2 CSA 简介以及与其它算法的比较

CSA 根据优化问题的特点,选取与目标函数的全局性相关的量为特征量,利用这些特征量在优化过程中的变化规律来引导优化搜索。CSA 的步骤为:1) 按照预先指定的特征量对样本作统计,得到每个特征量的概率统计分布;2) 在全局定义域内随机产生 N 个新解,反复扰动,挑选并保留与样本有相近特征量分布的解;3) 计算新解的目标函数值;4) 将这 N 个新解加入到样本中,按照目标值重新排序,选出 N 个解作为新的样本,然后返回 1)。其中,衡量新解群体与样本群体特征量统计分布的相近程度用专门定义的距离 s 来定量衡量,即 $s = s_1 + s_2 + \dots + s_{39}$,式中的 s_i 用下式表示:

$$s_i = \sum_{j=1}^J \int_{x_{m,j-1}}^{x_{m,j}} |x(P_m(x) - P_{m,\text{ref}}(x))| dx \tag{1}$$

式中: $P_m(x)$ 为新解群体的特征量概率; $P_{m,ref}(x)$ 为样本群体参考功率的概率; J 为某条距离曲线的分段数目, 应保证 $\int_{x_{m,j-1}}^{x_{m,j}} (P_m(x) - P_{m,ref}(x)) dx$ 的积分值等于零。

CSA 的原理为: 多极值优化问题的函数曲线(图 2)各局部极值点相互远离, 要找全局极值很困难, 但如果能找到某种映射关系 $\{G_i\}$, 使这些局部极值点对应的自变量 x 的某些映射(即特征量 $G_i(x)$) 的值相互接近, 则可使这些相互远离的局部极值点建立起统计意义上的联系, 从而将优化问题从多极值问题转化为统计意义上的单极值或少极值问题。这样, 在优化搜索过程中, 即可以特征量为“桥梁”从一个局部极值直接过渡到另外的局部极值, 从而达到全局优化的目的。

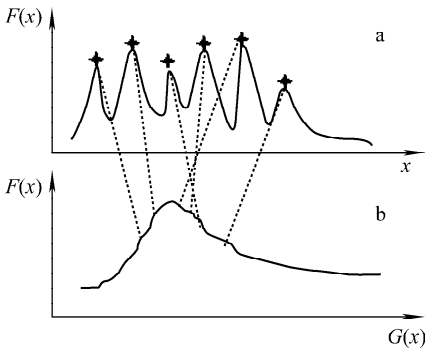


图 2 多极值优化问题示意图

fig. 2 Scheme of multi-extreme optimization problem

星号位置表示各局部极值

a——多极值优化问题函数曲线; b——特征量 $G(x)$ 曲线

CSA 与其它优化算法相比, 具有如下优点: 1) CSA 能充分利用问题的特征量分布来指导搜索, 具有更好的智能性和更高的优化效率; 2) 每次迭代时, CSA 均先在整个定义域内随机产生新解然后调整, 具有更好的全局性, 而其它优化方法则很难达到好的全局性。例如, GA 是通过交叉和变异来拓展其搜索范围, 为了保持遗传特性, 交叉操作基本上只能在邻域附近做局部扰动。作为交叉操作的补充, 变异显然也不能显著拓展其域。因此, GA 算法全局性的实现只有无限的迭代下去才能达到, 而在有限的迭代下, 则难于达到全局性。图 3 所示为

GA 和 CSA 在整个定义域内的搜索过程形象描述图。从图 3 可清楚地看出, CSA 的全局性要好得多。

理论上, CSA 适用于各种优化问题。通过优化基准问题(如连续函数及旅行商问题)的验证比较^[5]表明, CSA 比其它优化算法具有更好的全局性和更高的优化效率。另外, CSA 应用于无可燃毒物压水堆的装料优化^[6]以及反应堆屏蔽设计优化^[8]研究也取得了很好的效果。

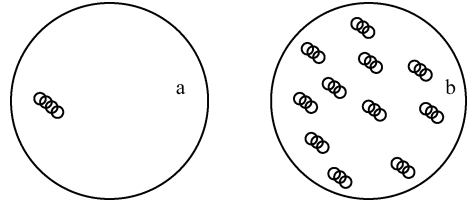


图 3 GA(a)和 CSA(b)的搜索示意图

Fig. 3 Scheme of GA (a) and CSA's (b) search

大圈表示整个定义域, 小圈表示每次迭代的搜索域

3 压水堆 LP 和 BP 耦合优化研究

为使含可燃毒物的燃料组件制造方便, 核电站使用的一批新组件中可燃毒物含量均相同。国际上的压水堆核电厂普遍采用 6%~8% 的 Gd_2O_3 含量(图 4)。该含量范围的可燃毒物组件的反应性的释放速度较稳定, 有利于堆芯功率峰因子的控制。在本研究中, Gd_2O_3 毒物的含量取大亚湾实际所用的 8% 含量。在固定可燃毒物含量的条件下, 新组件的可燃毒物配置优化即转换为可燃毒物棒的根数优化。

经过研究分析发现, 对于含可燃毒物的压水堆, LP 布置的贡献是主要的, BP 配置的作用主要在于展平功率分布、降低堆芯功率峰因子。因此, 研究提出: 每次迭代时, 先构造新的 LP

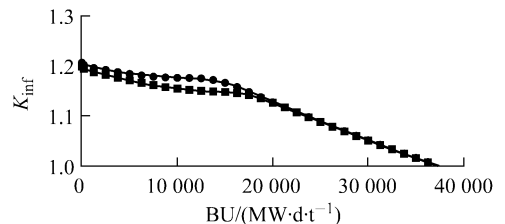


图 4 不同钆浓度的含钆组件 K_{inf} 随燃耗(BU)的变化

Fig. 4 Assembly K_{inf} variation vs. burn-up

of different Gd concentrations

●——6% Gd_2O_3 ; ■——8% Gd_2O_3

群体,再构造相应的 BP 配置,最后评价新 LP+BP 方案整体的优劣。这样,可合理有效地简化优化问题的规模,且不失全局性。

3.1 样本群体的产生和更新

在全局定义域内随机产生 N 个 LP,并对每个 LP 随机配置 BP,从而得到初始样本群体 (N 个 LP+BP)。以后,每次构造新解群体结束后,将 N 个新 LP+BP 加入到原样本群体中,根据目标值大小,重新选择 N 个好的 LP+BP 作为新的样本群体。

3.2 新的 LPs 的构造

研究参考原 CSA 装料优化研究,利用基本的反应堆物理知识:目标函数和约束条件均与各位位置处组件的相对功率密切相关,而组件相对功率主要与该位置处的组件以及邻近位置处组件的无穷增殖系数相关。因此,研究选取特征量为该位置处的哈林组件相对功率 (FFH(i)),有:

$$G(i) = K_{\text{inf}}(i) + \sum_{j=1}^4 \omega_j \times K_{\text{inf}}(j) \quad (2)$$

式中: K_{inf} 指组件无可燃毒物时的无穷增殖系数(如果组件内有可燃毒物,则为考虑可燃毒物的无穷增殖系数); $\omega_1 \sim \omega_4$ 为相邻组件 K_{inf} 的权重因子,由线性拟合得到。

对于新解 LP 群体的构造,首先在全局定义域内均匀随机地产生一批 LPs,然后通过组件两两互换的方法对它们不断地调整,最终使新的 LP 群体的特征量 $G(i)$ 的统计分布接近样本 LP 群体的哈林功率分布。这里需说明的是,此处仅借用哈林功率分布来判断新解群体的特征量分布是否与样本群体 LP 的特征量分布相近,并不使用哈林燃料和哈林功率作为评价 LP 方案优劣的依据,而是使用二维堆芯物理计算程序的真实结果来评价 LP+BP 方案的优劣。

3.3 新的 BPs 构造

BP 构造所选取的特征量为该位置处的真实组件相对功率(FFA(i)),有:

$$G'(i) = K_{\text{inf}}(i) + \sum_{j=1}^4 \omega'_j \times K_{\text{inf}}(j) \quad (3)$$

式中: $\omega'_1 \sim \omega'_4$ 为相邻组件 K_{inf} 的权重因子,由线性拟合得到。

研究首先按照样本群体在堆芯各位置处的新组件中最多的可燃毒物根数类型给新 LPs 的新组件配置可燃毒物,然后不断地调整新组件中的 BP 根数类型(BP 的根数类型从 0 根/8 根/12 根/16 根/20 根 5 种类型中选择),使特征量 $G'(i)$ 的统计分布最终接近样本群体在循环初的组件相对功率的统计分布。

3.4 优化目标函数与方案评价程序

循环长度优化函数为:

$$\text{Maximize } L(\text{LP} + \text{BP})$$

$$\text{s. t: } \text{FFA} \leq \text{FFA}_{\text{ref}}$$

$$\text{CB(BOC)} \leq \text{CB(BOC)}_{\text{ref}}$$

式中: L 为循环长度;FFA 为峰值组件相对功率;CB(BOC)为循环初(BOC)的临界硼浓度;下标 ref 为参考状态。

堆芯功率峰因子优化函数为:

$$\text{Minimize } F(\text{LP} + \text{BP})$$

$$\text{s. t: } L \geq L_{\text{ref}}$$

$$\text{CB(BOC)} \leq \text{CB(BOC)}_{\text{ref}}$$

式中: F 为堆芯峰值组件功率。

受实验室计算条件所限,研究使用了组件相对功率结果,而不是棒功率结果来评价方案的优劣。但各种方案均在同样的模型和计算程序下比较的,因此,可采用组件功率结果来检验 CSA 优化程序是否有效。

方案评价使用基于第 2 类边界条件格林函数节块法程序 NGFM-N^[9] 而研制的 2 维堆芯物理分析程序 CYCLE2D,它可以计算出循环长度、各燃耗点的临界硼浓度、组件相对功率分布和平均燃耗分布。优化过程中取燃耗间距为每步 3 000 MW·d·t⁻¹,分多步燃耗计算装料方案的目标函数值,计算速度约为每个方案 3 s。

3.5 压水堆 LP 和 BP 耦合优化流程

图 5 所示为利用 CSA 研制的压水堆 LP 和 BP 配置的耦合优化流程。其中,LP 指 39 个组件在堆内的排列,BP 指新组件内的可燃毒物根数。新 LPs 的构造方法是通过组件两两互换使新解 LP 的特征量 $G(i)$ 的统计分布最终接近样本群体的 LP 的哈林功率分布。新 BPs 的构造方法是通过调整新组件中的可燃毒物棒的数目使特征量 $G'(i)$ 的统计分布最终接近样本群体在 BOC 时的 FFA(i) 统计分布。



图5 压水堆 LP 和 BP 耦合优化流程

Fig. 5 Flow of LP and BP coupling optimization for PWR

4 优化结果分析

研究编制了 LP 和 BP 耦合优化程序 CSALPBP, 并分别以循环长度最大和堆芯峰值组件相对功率最低为优化目标对 dywU2C10 进行了装料优化计算, 其中, 可燃毒物棒在组件内的布置与大亚湾实际方案相同。表 1 列出了耦合优化方案、脱耦解法得到的峰值组件相对功率优化方案和实际装料方案的 CYCLE2D 计算结果。从表 1 可看出, CSALPBP 程序具有很好的优化性能; 从表 1 还可看出, 脱耦解法得到的峰值组件相对功率优化方案其结果不满足工程约束条件。实际上, 堆内 LP 和 BP 之间的耦合作用非常强烈, 并且, 可燃毒物的类型有限, 因此, 难以配置 BP 使堆芯功率分布接近哈林功率分布。图 6 所示为脱耦解法优化方案的理论峰值组件功率和配置 BP 后的真实功率随燃耗变化曲线。从图 6 可看出, 对于大亚湾第 10 循环这种含可燃毒物的非初装堆芯, 脱耦解法的全局性较差。

表 1 优化方案和实际方案的 CYCLE2D 结果比较

Table 1 Comparison of optimization scheme and actual scheme according to their CYCLE2D results

方案名称	循环长度(EFP)	最大组件相对功率	循环初的临界硼浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	优化效果
实际方案	391	1.393	1 354	
循环长度优化方案	425	1.384	1 236	8.7%
堆芯峰值组件功率优化方案	391	1.325	1 252	4.9%
脱耦解法的堆芯峰值组件功率优化方案	377	1.447	1 589	不满足工程约束条件

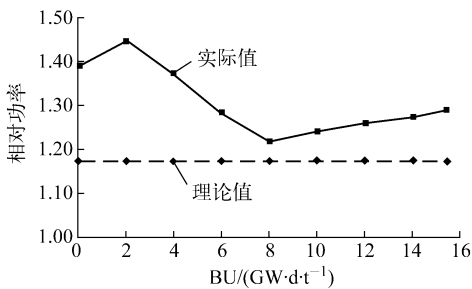


图6 大亚湾第10循环优化方案的堆芯峰值组件相对功率随燃耗的变化

Fig. 6 Core peak assembly relative power variation vs. burn-up of Daya Bay 10th cycle

5 结论

含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化同时包括组件布置(LP)优化和新组件的可燃毒物配置(BP)优化, 其搜索空间巨大, 求解复杂, 采用通常的优化算法效率低、全局性差。特征统计算法(CSA)具有很高的优化效率和很好的全局性, 更适合该优化问题。

本研究克服了原特征统计算法装料优化将 LP 优化和新组件 BP 优化脱耦处理的缺陷, 对 LP 和 BP 同时进行优化, 结合堆芯分析程序 CYCLE2D, 成功地研制了压水堆 LP 和 BP 耦合优化程序 CSALPBP。使用该程序对大亚湾 2 号机组第 10 循环进行了装料优化计算。结果表明, CSALPBP 程序在求解含可燃毒物的压水堆堆芯装料优化问题方面有很高的搜索效率和很好的全局性。

图 7 示出了大亚湾 2 号机组第 10 循环实际装料、循环长度优化和堆芯峰值组件功率优化方案的布置(图中的方格含义同图 1)。

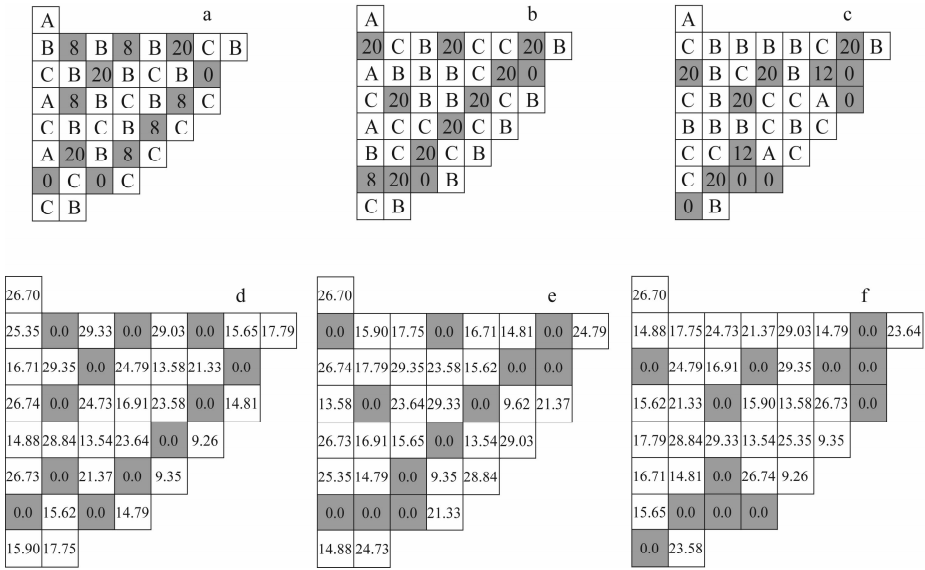


图7 实际装料方案(a,d)、循环长度优化方案(b,e)和堆芯峰值组件功率优化方案(c,f)

Fig.7 Actual reloading scheme (a,d), reloading scheme of cycle-length optimization (b,e) and core peak assembly relative power optimization (c,f)

a,b,c——组件布置与可燃毒物配置;d,e,f——组件平均功耗分布(方格内数值为燃耗,单位为 $\text{GW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$)

参考文献:

[1] DeCHAIINE M D. Stochastic fuel management optimization using genetic algorithms and heuristic rules[D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 1995.

[2] JOHANSEN B J. ALPS: An advanced interactive fuel management package[C]//Proceedings of Topical Meeting on Advances in Reactor Phys. Knoxville, Tennessee: [s. n], 1994: 324.

[3] SUH J S. Optimized automatic reload program for pressurized water reactors using simple direct optimization techniques[J]. Nuclear Science and Engineering, 1990, 105: 371-382.

[4] AKIO Y. A quantitative comparison of loading pattern optimization methods for in-core fuel management of PWR[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1997, 34(4): 339-347.

[5] 刘志宏,施工,胡永明. 一种新的全局优化算法——统计归纳算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版,2002, 5:580-583.

LIU Zhihong, SHI Gong, HU Yongming. A new global optimization algorithm; Statistic inductive algorithm[J]. Journal of Tsinghua University; Science and Technology, 2002, 5: 580-583(in Chinese).

[6] LIU Zhihong, SHI Gong, HU Yongming. New global optimization algorithm and its application on in-core fuel management[C]//ANS Meeting of PHYSOR. Seoul: ANS, 2002.

[7] HU Yongming, LIU Zhihong, SHI Xiuan, et al. Improvement of characteristic statistic algorithm and its application on equilibrium cycle reloading optimization[C]//ANS Meeting of PHYSOR. Vancouver: ANS, 2006.

[8] 石秀安,刘志宏,胡永明. 中国先进研究堆水平孔道屏蔽设计优化研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(5): 87-90.

SHI Xiuan, LIU Zhihong, HU Yongming. Optimization study on shielding design for horizontal ducts of China Advanced Research Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(5): 87-90 (in Chinese).

[9] 胡永明,赵险峰. 第二类边界条件先进格林函数节块法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(4):17-21.

HU Yongming, ZHAO Xianfeng. Advanced nodal Green's function method on neumann boundary condition[J]. Journal of Tsinghua University; Science and Technology, 1998, 38 (4):17-21(in Chinese).