

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0019-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0019

特征统计算法换料优化程序 CSA 针对实际工程设计要求的改进研究

刘志宏¹, 赵晶¹, 石秀安², 张明², 高伟², 蔡德昌², 彭良辉³

1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京, 100084; 2. 中科华核电技术研究院, 广东深圳, 518026;
3. 国家核电技术公司北京研发中心, 北京, 100190

摘要: 为了将自主开发的特征统计算法(CSA)燃料管理优化程序用于实际核电厂堆芯换料设计, 需要针对换料设计中的一些特殊工程要求进行相应的改进。本文以岭澳核电站堆芯为计算模型, 针对这些工程要求对原有 CSA 程序进行了改进开发, 并分别在无可燃毒物堆芯、有可燃毒物堆芯以及平衡循环堆芯换料设计问题上进行了测试验证。最终的结果证明, CSA 程序经过相应的改进后, 完全可以真正用于核电厂堆芯换料设计和优化。

关键词: 特征统计算法; 换料优化; 实际工程要求

中图分类号: TL329+.2 文献标志码: A

Improvement of Characteristic Statistic Algorithm Reloading Optimization Program CSA for Actual Engineering Requirements

Liu Zhihong¹, Zhao Jing¹, Shi Xiuan², Zhang Ming², Gao Wei², Cai Dechang², Peng Lianghui³

1. INET, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong, 518026, China;
3. State Nuclear Power Technology R&D Center, Beijing, 100190, China

Abstract: In order to use the characteristic statistic algorithm fuel management optimization program CSA in the actual nuclear power plant reloading design, the improvement of some special requirements in the practical engineering problems is needed. This paper introduces how to improve the original CSA optimization program for Ling'ao nuclear power plant and the validation results of improved program in the actual nuclear power plant reloading design problems. The problems include a core without burnable poison, a core with burnable poison, and an equilibrium-cycle core reloading design. The final results proved that after the corresponding improvement, the CSA program can be used to do reloading optimization for the actual reactors in the nuclear power plants.

Key words: Characteristic statistic algorithm, Reloading optimization, Actual engineering requirements

0 前言

目前国内核电厂的堆芯装料方案设计基本是依据经验手工进行, 能够考虑到的方案数量有限, 而且对换料经验要求很高, 这种作法很难适应我国未来核能发展的要求。国内各个高校及研究机构虽然开发了一些燃料管理优化方面的程序, 但由于计算效率、优化解的全局性以及实际工程

限制条件和实际要求考虑较少等问题, 大多未能得到实际应用。

本课题组基于自主提出的全局优化算法——特征统计算法(CSA), 开发了相应的堆芯装料优化程序, 可以快速自动给出多个具有较高全局性的堆芯装料优化方案。为了将 CSA 用于实际核电厂堆芯换料设计, 针对实际的核电厂工程要求,

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2015-01-11

作者简介: 刘志宏(1976—), 男, 副研究员, 现主要从事反应堆物理、屏蔽设计及全局优化算法研究工作

对 CSA 优化程序进行相应的改进,并采用该核电厂的工程设计程序进行验证,以测试 CSA 程序用于实际核电厂堆芯装料设计的可行性。

1 理论模型

1.1 优化模型

在反应堆换料时,卸出燃耗较深的部分旧组件后,装入部分新组件,这些新组件和旧组件在下一个循环堆芯中如何摆放,使堆芯满足最优化的安全性和经济性要求,这是堆芯装料优化要解决的问题。

对于这种带有约束条件的优化问题,一般通过罚函数法,即引入惩罚因子,将它变成无约束问题,然后采用各种优化算法来进行优化求解。

1.2 优化目标和约束条件

堆芯装载方案主要考虑因素包括:循环长度、燃料棒功率峰值因子(FDH)、慢化剂温度系数(MTC)、停堆裕量(SDM)及寿期末组件最大燃耗。

在找到满足上述主要技术参数的初步装载方案后,从兼顾运行的考虑需要对初步装载方案做以下因素的验证:停堆窗口验证、象限功率倾斜验证、堆芯出口最大温差验证、控制棒扰动验证及控制棒位置组件燃耗不宜过大的验证。

在方案既满足主要设计参数要求又兼顾了现场运行的考虑后,还需要考虑该方案在后续安全评价中会不会引起安全分析参数的超限。

1.3 优化算法

CSA^[1-2]是本课题组自主提出的一种基于概率理论的新的全局优化算法。它能够根据优化问题自身的特点,选取与目标函数的全局性相关的量作为特征量,然后利用这些特征量在优化搜索过程中的统计规律来引导搜索方向,并最终达到全局优化的目的。

CSA 目前已经在多个不同类型的全局优化问题上进行了应用。与其他全局优化算法(例如遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、分布估计算法^[3]等)相比,CSA 的优化思想同样是希望利用已有的搜索信息给出新的搜索方向。但 CSA 最大的不同之处在于其采用特征量的统计信息来指导搜索方向,这种“统计特征信息—构造新解”的搜索方式可以将一个复杂的多极值优化问题转化为特征量空间上的单极值或者少极值问题。具体

到堆芯装料优化问题上,CSA 可以通过选择合适的特征量很好地解决该问题中自变量二维相关这个核心困难,而遗传算法、分布估计算法等都无法很好地解决自变量二维相关这个问题,因此在装料优化问题上难以取得很高的优化效率。

本课题组采用 CSA 开发的压水堆堆芯装料优化程序 CSA1.1,其全局性能和优化效率已经在多个不同的堆芯计算模型上得到了证明^[4-6]。但目前该装料优化程序只对一些通用的设计要求(包括循环长度、功率峰值、卸料燃耗、温度系数、控制棒价值等)进行了考虑,如果需要实际用于真正的装料设计工作,还需要针对具体核电厂的特殊要求在程序中增加相应的限制条件。

2 优化程序改进及验证

针对实际工程问题,以岭澳核电站堆芯作为研究和测试对象,针对实际的完整的工程设计要求,对 CSA 优化程序进行相应的改进,然后根据换料设计要求进行了堆芯换料设计优化,并采用该核电厂的工程设计程序对优化方案进行验证,以测试 CSA 程序用于实际核电厂堆芯装料设计的可行性。

具体的测试模型分为 3 类:不含可燃毒物堆芯的换料方案优化;含可燃毒物堆芯的换料方案优化;含可燃毒物的平衡循环堆芯设计方案优化。

2.1 无可燃毒物堆芯的换料优化

岭澳核电站 302 循环(LA302)换料设计要求如下表 1:

(1) 可用新组件包括:4 组富集度为 3.1%的 AFA3G 组件(优先考虑使用),52 组富集度为 3.2%的 AFA3G 组件。

(2) 旧组件:来自首循环(入堆前硼玻璃管已抽出)的 5 组 1.8%富集度的 AFA3G 组件,52 组 2.4%富集度的 AFA3G 组件,52 组 3.1%富集度的 AFA3G 组件。

采用 CSA 针对该循环堆芯方案进行优化,得到了满足各个基本设计要求的优化方案。但是当进一步进行事故分析时(次临界提棒、功率运行下控制棒失控抽出、弹棒、落棒事故等),发现多个事故分析结果超限,不满足设计要求,因此不是实际工程意义上的可行方案。

通过进一步的理论分析和计算测试,发现事

故超限的主要原因是各组控制棒价值过大或者过小，而控制棒价值主要与控制棒位置的组件 k_{inf} 以及该位置的中子价值有关。为了优化搜索过程中考虑事故分析的因素，通过事故分析反馈的经验关系在 CSA 中加入一些控制棒位置组件 k_{inf} 限制条件，重新进行换料设计优化，得到了满足各种事故分析限值的优化方案。该问题每次优化所需要的堆芯方案计算次数为 4000 次左右。

表 1 给出了以循环长度最大化为目标的优化结果，优化时考虑了优先使用 3.1% 富集度的新组件。

表 1 LA302 堆芯换料设计要求及优化结果

Table 1 Optimized Scheme and Design Goals of LA302

换料设计要求	设计限值	优化方案
循环长度/EFPD	245	253
焓升因子	<1.38	1.337
慢化剂温度系数/ $10^{-5} \cdot ^{-1}$	非正	1.0
停堆裕量/ 10^{-5}	>2000	3072
组件最大卸料燃耗 /MW · d · t ⁻¹ (U)	<52000	25200
Tilt、长短窗口的 FDH	<1.38	满足要求
事故分析结果	满足要求	满足要求

注：EFPD——有效满功率天；长短窗口——前一循环实际停堆时间与预计停堆时间的长短偏差

从表 1 中可知，如果在 CSA 中加入一些经验反馈给出的简单限制条件，即可在优化过程中考虑到各种事故分析因素，从而使优化方案为实际工程可行方案。

2.2 含可燃毒物堆芯的换料优化

LA212 循环换料设计要求为：

(1) 可用新组件包括：64 组富集度为 4.45% 的 AFA3G 组件，其中 8 组无钷 (Gd)，24 组 8 根钷棒，32 组 20 根钷棒；

(2) 旧组件：可选择来自第 5/9/10/11 循环的旧组件。

对于本问题，优化程序 CSA 遇到的最大困难在于优化模块中的哈林原理脱耦方法。根据一般的优化原则，可燃毒物应当是根据组件布置方案的结果来进行配置，而本问题中由于组件已经订货生产，可燃毒物的配置方案已经固定，无法在优化中采用灵活的可燃毒物配置方法来使得堆芯功率接近于哈林功率，因此不能直接参与原 CSA 来进行求解。

为了解决这一特殊问题，本课题组修改了原

CSA 中的核心优化模块，优化时所考虑的特征量不但包含了原有的各个组件的哈林功率，还增加了循环初配置了可燃毒物后的实际功率。这样所统计的特征量数目增加了一倍。优化模块修改完毕后，对 LA212 堆芯换料设计进行了优化计算，得到了多个比参考方案各方面都更优的优化方案，具体优化结果见表 2。每次优化所需要的堆芯方案计算次数为 6000 次左右。

表 2 LA212 堆芯换料设计要求及优化结果
Table 2 Optimized Schemes and Design Goals of LA212

设计要求	限值	优化方案 1	优化方案 2	优化 3 (少 4 个新组件)	参考方案
循环长度/EFPD	442 ±5	443.5	443.7	438.2	437.2
焓升因子	<1.481	1.447	1.447	1.457	1.456
慢化剂温度系数/ $10^{-5} \cdot ^{-1}$	< 0	-4.52	-4.32	-4.15	-4.73
停堆裕量/ 10^{-5}	>2300	3445	3466	3372	3488
最大卸料燃耗 /MW · d · t ⁻¹ (U)	<52000	51727	51867	51924	51414
Tilt、长短窗口的 FDH	<1.481	满足要求	满足要求	满足要求	满足要求
事故分析结果	满足要求	满足要求	满足要求	满足要求	满足要求

2.3 含可燃毒物的平衡循环方案优化

该优化问题的主要困难在于：平衡循环优化没有循环初组件信息，循环初组件燃耗值需要根据堆芯布置方案进行物理计算迭代得到，因此统计特征量时需要进行专门处理。另外本问题的特殊之处在于该堆芯采用 1/4 换料，堆芯内新组件数量少，导致可燃毒物配置手段并不灵活，当 CSA 中采用哈林原理脱耦后，在可燃毒物配置阶段，难以较好地使堆芯功率满足哈林功率分布。

为了解决该问题，对原 CSA 计算流程进行了一些新的改进。首先仍然处于哈林原理脱耦的方法进行优化，得到堆芯组件布置方案以及循环初各组件的燃耗分布。然后固定新组件位置，按照单循环问题来对旧组件布置进行优化，优化过程中重新进行平衡循环迭代以更新循环初的组件燃耗值信息。

采用上述方法得到的优化方案以及与参考方案的比较见表 3。每次优化所需要的堆芯方案计算次数为 10000 次左右。其中参考方案是通过较

表3 岭澳 1/4 换料平衡循环设计要求和优化结果
Table 3 Optimized Results of LA 1/4 Equilibrium Cycle

设计要求	设计目标	优化方案 4	优化方案 5	优化方案 6	参考方案
循环长度	尽量长	316	317	317	316
焓升因子	1.481	1.464	1.462	1.453	1.466
慢化剂温度系数/ $10^{-5} \text{ } ^{-1}$	< 0	-2.55	-1.98	-2.01	-3.6
停堆裕量/ 10^{-5}	>2300	2637	2758	2729	2892
最大卸料燃耗/ $\text{MW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}(\text{U})$	<57000	56900	56100	56000	55300

长时间手工经验搜索得到的方案。从表中结果可见,采用 CSA 优化程序可得到多个不同模式的可行优化方案,且最优方案的循环长度及功率峰值均优于手工经验搜索方案。

3 结论与展望

通过在 3 类不同的实际核电厂堆芯换料设计问题上的测试发现,针对具体工程设计要求将原 CSA 进行一些必要的改进后,该程序完全可以用于各种实际的核电厂堆芯换料设计和优化,且 CSA 优化程序得到的方案均优于手工经验搜索得到的设计方案。在计算时间方面,程序的计算时间为半小时到几十个小时之间,而且 CSA 算法存在天然的并行性,如果采用并行计算,计算速度可提高 2 个量级左右。该程序可作为核电厂堆芯

换料设计人员的一个非常高效的辅助工具。

另外,本文优化程序中的物理计算模块均采用课题组自主开发的堆芯物理计算程序 CPACT,给出优化方案后,采用岭澳核电站的工程设计程序 SCIENCE 进行验证。本文结果均为 SCIENCE 程序的最终计算结果。这 2 个物理计算程序计算结果之间的少许差异也会对最终的优化效果有一定影响。后续如果直接将 CSA 中的物理计算模块替换为工程设计的物理程序,将会进一步提高 CSA 的优化效果。

参考文献:

- [1] 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, 2002,5:580-583.
- [2] 刘志宏, 胡永明, 施工. 特征统计算法及其在 NP 组合优化问题上的应用[J]. 科技导报, 2006,24(11):28-30.
- [3] S Jiang, A K Ziver. Estimation of distribution algorithms for nuclear reactor fuel management optimisation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2006, 33: 1039-1057.
- [4] 刘志宏, 胡永明, 施工. 特征统计算法(CSA)在堆芯装料方案优化中的应用[J]. 核动力工程, 2007, 28(2):1-4.
- [5] 石秀安, 刘志宏, 胡永明. 含有可燃毒物的压水堆核电站堆芯装料设计优化研究[J]. 核科学与工程, 2008, 28(2): 138-146.
- [6] 陶乃贵, 张少泓. 基于换料优化基准问题的特征统计算法研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32(3): 193-197.

(责任编辑:刘君)