

γ 辐照装置多目标优化排源算法研究及其应用

杨磊¹, 刘燕¹, 罗志平², 李文革², 周毅吉², 张美琴¹

(1. 烟台大学, 山东烟台 264005; 2. 湖南省农业科学院, 湖南长沙 410300)

摘要: 本文介绍了新评价模型并定义了新目标函数, 对求解模型所采用的模拟植物生长算法进行了改进, 相关代码利用C++、CUDA编写并用GPU加速。利用两座大型 γ 辐照装置进行了排源实践, 新剂量场分布采用不同的重铬酸银剂量计测量。结果表明: 测量结果与理论计算结果符合较好, 剂量不均匀度(DUR)相对偏差小于4.125%; 新评价模型与原模型相比, DUR增加不明显, 能量利用率提高了若干倍, 计算时间从h量级缩短到min量级。检测结果验证了新方法的可行性和有效性。

关键词: γ 辐照; 优化排列; 多目标优化方法; GPU加速

中图分类号: TL99; TB114.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2019)05-0932-07

doi: 10.7538/yzk.2018.youxian.0569

Study on Multi-objective Optimization Algorithm for Source Pencil Deployment of Gamma Irradiation Facility and Its Application

YANG Lei¹, LIU Yan¹, LUO Zhiping², LI Wenge², ZHOU Yiji², ZHANG Meiqin¹

(1. Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410300, China)

Abstract: A new evaluating model was introduced and a new target function was defined. The plant growth simulation algorithm (PGSA) solving the target function was improved. The related codes were written in C++ and CUDA, and were accelerated by GPU. Two big facilities from different cooperative companies were rearranged individually and their new dose field distributions were also detected individually by different potassium dichromate dosimeters. The results show that the experimental dose uniformity (DUR) accords well with the theoretical ones, and the relative deviation is less than 4.125%. Compared with the old evaluation model, the DUR obtained by new model increases little, the energy efficiency is improved for several times, and the computation time is reduced from hours to minutes. The results verify the feasibility and validity of the new method.

Key words: γ irradiation; optimization deployment; multi-objective optimization method; GPU acceleration

收稿日期: 2018-08-21; 修回日期: 2018-11-21

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2016AQ24)

作者简介: 杨磊(1982—), 男, 山东淄博人, 讲师, 博士, 核技术及应用专业

网络出版时间: 2019-01-09; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190109.0906.002.html>

^{60}Co γ 辐照加工技术在农业、工业、医疗卫生、食品、环境保护等多个领域应用十分广泛^[1], 目前总体发展平稳, 新建装置呈现大型化、自动化及泛用化等特点^[2]。因 ^{60}Co 源半衰期较短, 为维持和扩大加工能力, 需定期补充和更换 ^{60}Co 源棒, 而源价格昂贵, 为此提高源的整体利用率十分重要。生产实践表明, 优化 ^{60}Co 辐照装置排源设计是提高源利用率的核心技术因素, 对优化装置剂量学性能、改善货物加工剂量、降低单位成本、提高装置加工量和经济效益等均有显著影响。

排源方法主要包括人工经验排源和计算机自动排源两大类, 行业公司仍以使用前者为多, 此类方法对工作人员专业素质要求高, 人工和时间花费多^[3], 研究快速、可靠、结果方案足够优化的自动排源方法成为必然需要。目前国内外有基于贪心算法、神经网络算法(深度学习算法)等的排源方法, 贪心算法快速有效但全局搜索能力不够^[4]。李磊等^[5]结合经验方法提出了一种混合求解方法, 提高了全局搜索水平且排源效果较好。神经网络算法潜力巨大, 但其难点在于需搜集足够多的优秀排源方案对算法进行预训练^[6]。文献[7-8]提出了一种全局随机搜索型方法, 针对辐照装置剂量不均匀度(DUR)进行优化排源设计并证实其可行有效, 文献[9-10]在此基础上对相关算法进行并行化改进并利用 GPU 加速, 可满足任意装机规模辐照装置的排源工作。近年来通过与多家单位的交

流合作发现, 企业不仅对 DUR, 而且对射线能量利用率、源棒排布工作量等更多目标均有需求, 因此本文对原方法的评价数学模型、求解算法及代码均进行改进, 形成一种新型多目标优化排源方法。

1 排源评价数学模型

影响 ^{60}Co γ 辐照装置性能的主要因素及相互关系如图 1 所示^[11-13], 优化选源、排源是保证和提高 ^{60}Co γ 辐照装置加工质量和加工效率的关键, 因目前相关单位多直接购买成品源棒, 源的活度分布选择余地小, 为此排源成为工作核心。相关单位在评判排源设计方案时会综合考虑 DUR、射线能量利用率及排布工作量等, 而主流评价方法——参考平面法^[14-15]难以直接评判货箱中剂量分布 DUR 和射线能量利用率。本文从真实辐照情景出发, 通过计算货箱在辐照室中完成动态辐照后的累积剂量分布, 可直接得到上述参量值。

1.1 辐射场分布和货箱累积剂量分布的计算方法

^{60}Co 源棒可合理视为均匀线源, 对空间任一点(参考点)的空气吸收剂量率 \dot{D}_{air} 的计算公式可表示为:

$$\dot{D}_{\text{air}} = C \frac{\bar{W}_e}{e} \frac{\Gamma A}{aL} \left(\arctan\left(\frac{L+b}{a}\right) - \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \right) \quad (1)$$

式中: $\frac{\bar{W}_e}{e}$ 为空气平均电离能, eV; Γ 为照射量率

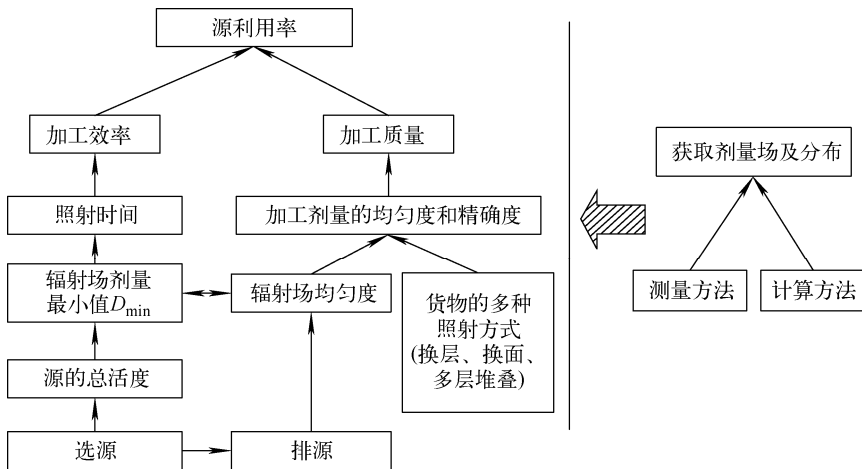


图 1 影响 ^{60}Co γ 辐照装置性能的主要因素及相互关系

Fig. 1 Main factor affecting ^{60}Co gamma irradiation facility and interrelation

常数,对 ^{60}Co , $\Gamma = 2.503 \times 10^{-18} \text{ C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; A 为源棒活度, Bq ; L 为源棒长度, m ; a 为待计算空间点到线源垂直距离的绝对值, m ; b 为垂足到线源最近点的距离, m ; C 为校准因子(测量值/理论值),以修订源棒包壳、剂量计、辐照装置附属机构(如导源管、护源板(罩))带来的射线散射和吸收影响,对已定装置而言 C 近似为常数且归一化处理后实际对当前研究无影响。

图2为源架、货箱及剂量计的空间布置,位于源架不同棒位的源棒发射的射线形成

复合场并照射货箱。将货箱按 x 、 y 、 z 轴方向划分不同网格数,最大分别为 I 、 J 、 K 个,只要网格足够多,通过计算网格中心点(参考点)处的剂量,即可获得足够精确的货箱剂量分布。从式(1)可知,特定源棒在货箱特定空间点造成的剂量仅与 A 有关,因此源架第 m 行、 n 列棒位中单位活度源棒在货箱中第 i 行、 j 列、 k 层参考点(或剂量计)产生的剂量率 \dot{D}_{mijk} 可由式(1)计算得到。对 \dot{D}_{mijk} 与 A_{mn} 的乘积求和,即可得到参考点的剂量率 \dot{D}_{ijk} 。

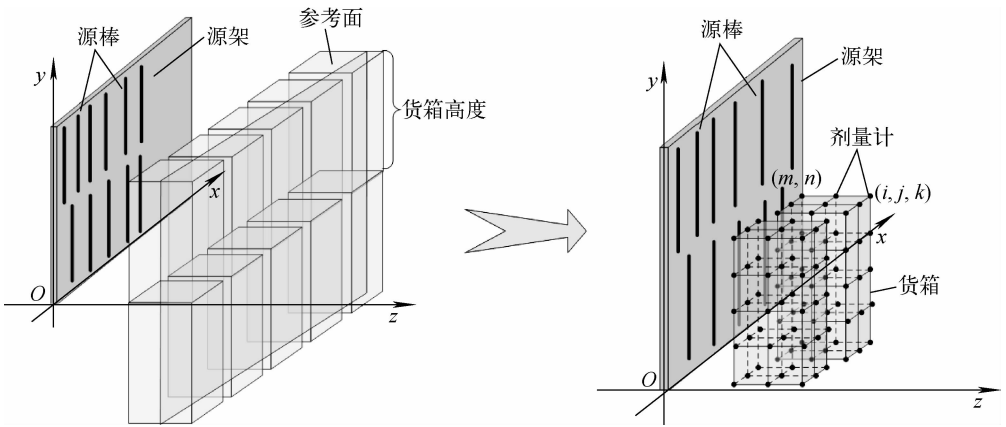


图2 源架、货箱及剂量计的空间布置

Fig. 2 Spatial arrangement of source rack, container and dosimeter

若动态照射时的节拍时间为 Δt 、流水线层数为 O 、每层货箱数为 S ,则货箱通过源架单侧流水线各工位且换层后的参考点累积剂量 $D'_{i,j,k}$ 可表示为:

$$D'_{i,j,k} = \sum_{oi=1}^O \sum_{si=1}^S \dot{D}_{ijk} \Delta t \quad (2)$$

其中: oi 为流水线层编号; si 为流水线上货箱工位编号。

进一步考虑货箱换面照射,则货箱中参考点的最终累积剂量 $D_{i,j,k}$ 可表示为:

$$D_{i,j,k} = \sum_{k=1}^{K/2} (D'_{i,j,k} + D'_{i,j,K-k}) \quad (3)$$

1.2 基于多目标的评价函数定义

DUR 反映货箱中辐射剂量分布的均匀程度,剂量平均值 \bar{D} 则可反映货箱内射线的整体强度和射线能量的实际利用率,为满足客户需求和合理量化评价排源方案水平,新的多目标

评价函数定义为:

$$P = \text{DUR} = \frac{\max(D_{1,1,1}, \dots, D_{i,j,k}, \dots, D_{I,J,K})}{\min(D_{1,1,1}, \dots, D_{i,j,k}, \dots, D_{I,J,K})}$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I D_{i,j,k}}{I + J + K}$$

$$P' = \frac{P}{P_{\text{init}}}$$

$$\bar{D}' = \frac{\bar{D}}{\bar{D}_{\text{init}}}$$

$$L = \min f = \alpha P' + (1 - \alpha) \frac{1}{\bar{D}'} \quad (4)$$

式中: P_{init} 、 \bar{D}_{init} 分别为人工给出的初始排源方案对应的 DUR 和剂量平均值; P' 和 \bar{D}' 分别为 P 和 \bar{D} 的归一化值; α 为客户对 P 和 \bar{D} 重视程度倾向的权重系数; f 为目标函数值。其中, f 越小则代表排源方案越好,因此 P' 越小越好, \bar{D}' 越大越好。

2 排源模型的局部复合求解算法

从评价模型可知,排源问题为典型的非线性规划问题,相关研究表明模拟植物生长算法(PGSA)求解排源问题可行有效,该算法通用性强,原则上只需替换评价函数即可^[16]。为减少现场布源工作量,本文改进了PGSA而形成局部复合求解算法。

2.1 局部复合求解的基本原理

PGSA潜在需至少1个在所有变量维数上尽量均匀分布的初始方案,文献[16]表明强鲁棒性虽使得初始方案对最终结果的优化影响不大,但计算量变化剧烈。为保证初始方案的合理性及降低计算量,在求解过程中将源架分割为若干区域,源棒按总活度进行比例分配,分别排源后组成1个次优化方案,再进行整体优化计算。

2.2 算法的求解流程

算法的求解流程及功能如下。

1) 读入计算所需的各种初始数据,包括源架、棒位、源棒、货箱及填充材料、相应空间位置及控制算法本身等的系列参数。

2) 源架可按子源板自然分为 N_0 个子区域,或按源架对称轴划分;将源棒按总活度对应分为 N_0 组,接近退役的源棒优先分配到一起。

3) 依次将源棒分组排布到各源板子区域,若全部排布完,则进行步骤11;若没有,则进行步骤4。

4) 源棒总数 N_b 为变量维数,创建初始生长点 $\mathbf{x}^0 = [x_1^0, x_1^0, \dots, x_{N_b}^0, y_1^0, y_1^0, \dots, y_{N_b}^0]$, 得到目标函数 $f(\mathbf{x}^0)$ 。定义生长基点 \mathbf{x}^B 及目标函数最小值点集合 \mathbf{X}^{\min} , 令 $\mathbf{x}^B = \mathbf{x}^0$, $\mathbf{X}^{\min} = \mathbf{x}^0$, 对应的目标函数值 $f(\mathbf{x}^B) = f(\mathbf{X}^{\min}) = f(\mathbf{x}^0)$ 。该步骤是生长周期起始。

5) 以 \mathbf{x}^B 为起点,以 $\lambda (\geq 1)$ 的正整数为步长,在各维变量上沿坐标轴的正负方向寻找满足约束条件 $[a, b]$ 的生长点 \mathbf{x}^{Temp} , 若 $f(\mathbf{x}^{\text{Temp}}) < f(\mathbf{x}^0)$, 则将 \mathbf{x}^{Temp} 放入生长点集 \mathbf{X} 内。

6) 求出 \mathbf{X} 内目标函数值最小点 \mathbf{x}^{\min} , 若 $f(\mathbf{x}^{\min}) \leq f(\mathbf{X}^{\min})$ 且不重复,则把该点放入最小生长点集合 \mathbf{X}^{\min} 。

7) 若生长点集合 \mathbf{X} 容量太大,则以一定的修剪比例对 \mathbf{X} 内的劣势生长点进行裁减,经验值取 0.4~0.6 为佳;本轮产生的 \mathbf{x}^{Temp} 应全部保留从而保持生长点集合 \mathbf{X} 的生物多样性以

防算法早熟而导致优化停滞。

8) 若当前生长周期内的 $f(\mathbf{x}^{\min})$ 相比 $f(\mathbf{X}^{\min})$ 没有进步即视为生长停滞,且停滞次数超过设定值,或总的生长周期数大于设定值,那么本分组计算结束,保存 \mathbf{X}^{\min} 、 $f(\mathbf{X}^{\min})$ 等结果待合并,进入步骤3开始下一分组排源,若不足则进入步骤9。

9) 计算 \mathbf{X} 内各生长点的形态素浓度,即各自的状态空间概率^[16]。

10) 产生随机数 β 并计算落入的状态空间,将所落区间对应的生长点记为新生长基点 \mathbf{x}^B , 转回步骤5开始新的生长周期。

11) 将所有分组的 \mathbf{X}^{\min} 合并,完成所有源棒在整体源架上的排放。

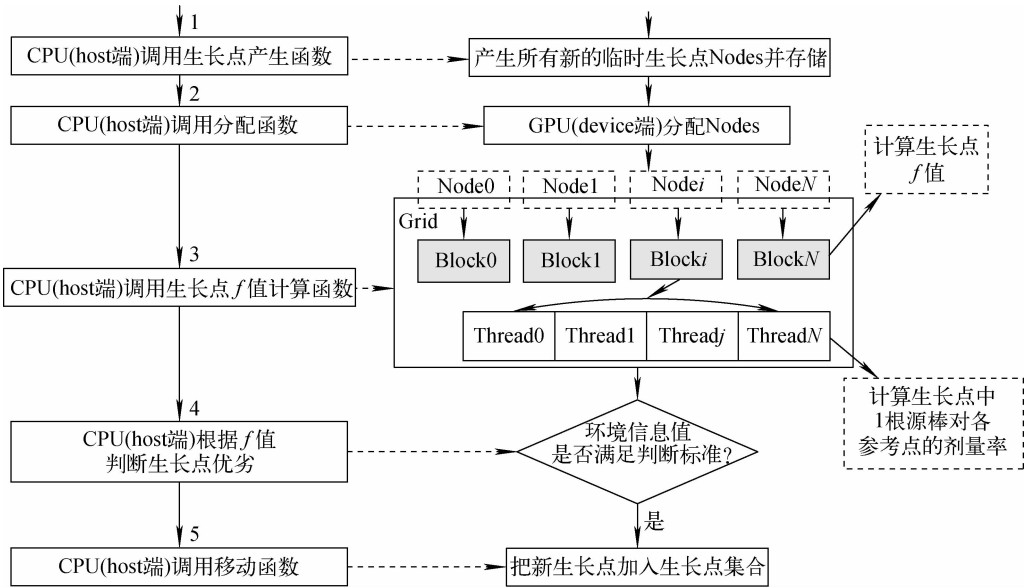
12) 若不需进一步整体排源,则输出 \mathbf{X}^{\min} 形成系列最终排源方案,进而精细计算得到这些方案在货箱中的 DUR、能量利用率、平均累积剂量等评价用结果。若进一步需要整体计算,则将 \mathbf{X}^{\min} 作为整体排源用初始生长点 \mathbf{X}^0 , 依次调用步骤4~10完成整体优化计算,最终得到系列优化排源方案供客户选用。

2.3 基于 GPU 的并行加速计算

本文提出的新评价模型相比原模型,其理论复杂度更高而计算复杂度偏低,原模型所耗计算时间占总计算时间的 90% 以上^[7],新模型经初步测试计算占 45% 左右,需进一步提升其计算效率。文献[17]中基于 GPU 通用计算技术实现了 PGSA 的并行化,在费用增加不明显的前提下使得原方法的计算效率显著提高。基于同样思路,改进后的 PGSA 也进行了基于 GPU 的并行化计算改进。

限于篇幅,本文仅给出当前算法中最重要的改进部分,即目标函数 f 的 GPU 并行化实现原理,如图3所示,其中步骤1、2、4、5计算压力小,以 GPU 最大 Block 和 Thread 数执行即可,步骤3计算压力大,执行时设计为每个 Block 负责计算生长点集合1个生长点的目标函数值,Block 中每个 Thread 计算1根源棒造成的剂量。

新评价模型对每个 Thread 的任务压力明显下降,求解代码不仅计算效率显著提升,且在 GPU 单精度计算模式下即可获得满意结果,可避免购买昂贵的专业双精度计算卡。

图3 PGSA中目标函数 f 基于GPU的并行化原理Fig. 3 GPU parallelization principle of target function f by PGSA

3 实际应用及结果分析

3.1 相关装置参数

以不同大型辐照装置的实践排源设计结果为例,验证算法的可靠性和有效性,表1列出了辐照装置的有关参数。

表1 辐照装置参数

Table 1 Parameter of irradiation facility

参数	量值	
	装置1	装置2
源架类型	单板源	单板源
源架高/宽, cm	197.5/287.8	217.05/284.1
源架层数	4	4
每层板块数/棒位数	3/99	6/126
待排列源棒数	44	117
装源总活度, Bq	$1.931\ 94 \times 10^{16}$	$2.88\ 632 \times 10^{16}$

算法代码的测试平台主要参数为:CPU, Xeon E3 1230 V2(数量1);GPU, GTX285(数量1, 硬件规格1.3);内存, DDR3 1333(8 GB);软件平台, Windows 7 64bit, VS2008, CUDA4.2, C++。

算法的鲁棒性较好,参数限制少。计算时源板按每层板块数划分,源棒按总活度等比例划分并由程序随机抽取后均匀布放到棒位上,货箱中参考点的空间间隔为5 cm,算法修剪比

例为50%,编写参数输入文件,利用不同版本的代码程序计算,其耗费时间情况列于表2。从表2可知,计算同等规模装置,本文提出的新方法对应代码的计算时间明显缩短,可显著缩短排源方案设计周期。

表2 不同版本排源代码的计算时间

Table 2 Computation time for source pencil deployment of various codes

代码类型	计算时间	
	装置1	装置2
基于CPU的串行代码	超过36 h,	超过36 h,
	人为终止	人为终止
原方法的GPU并行代码	2 050 s	4 022 s
新方法的GPU并行代码	527 s	771 s

3.2 结果及分析

现场部署排源方案后,按国标采用重铬酸银剂量计布置测试用货箱,表3为测试货箱参数、装置剂量场的计算结果及实测结果。

从表3可知,计算采取均衡策略,在测试货箱充满模拟货物前提下,对于装置1和装置2,新模型的理论DUR相比原模型分别增大了7.0%和16.5%,实测DUR相比计算结果分别增加了4.195%和0.70%,均显著低于国标要

求限值而实际影响不大,同时能量利用率显著提高 5.72 倍和 3.02 倍。实测 DUR 相比理论值升高,其主要原因是计算模型相比实际辐照装置做了合理简化,未考虑护源板、货箱壁,另外计算模型以空气为受照介质,而实测采用了密度更大的材料,射线的衰减和散射差别较大,

IAEA 证实这类问题可采用 ρ -DUR 关系曲线修订而不影响排源^[18],且排源工作核心点是寻找优化方案,DUR 和能量利用率的值仅用于评判方案的优化程度。

优化的排源方案在装置 1、2 参考面(图 2)上的等剂量线分布如图 4 所示。

表 3 测试货箱参数、装置剂量场的计算结果及实测结果

Table 3 Test container parameter and result of facility dose field calculation and measurement

参数	量值	
	装置 1	装置 2
测试货箱	内填瓦楞纸,平均密度为 0.10 g/cm ³	内填米糠、麸皮及锯末,平均密度为 0.20 g/cm ³
权重因子 α	0.5	0.5
DUR	计算值 1.28(1.37),实测值 1.43[4.195%]	计算值 1.21(1.41),实测值 1.42[0.70%]
能量利用率, %	0.93(5.32)	1.24(3.75)

注:()内为模型改进后的数据; []内为相对偏差

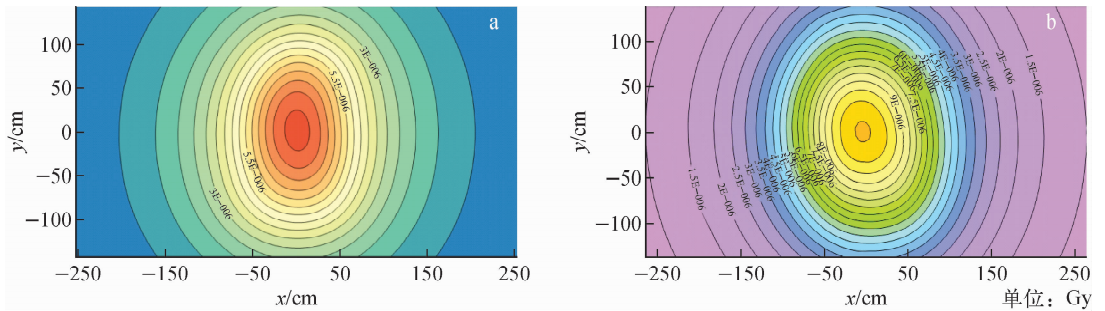


图 4 装置 1(a)、2(b)参考面上的剂量分布

Fig. 4 Dose distribution along reference plane in facility 1 (a) and facility 2 (b)

从图 4 可知,排源方案在装置 1、2 参考面上的剂量分布很均匀,基本以装置中心为圆心呈同心圆分布且梯度均匀,这对降低 DUR 有利,证实了排源方案设计的可靠性。

4 结论

本文提出了一种新型多目标优化排源方法,建立了综合考虑货物 DUR、射线能量利用率、现场布源工作量等多目标参数的新数学模型,设计了新型的 GPU 并行 PGSA 算法用于模型求解,并对两座大型 γ 辐照装置进行了实践排源。计算和测量结果表明:新方法计算精确度得到保证,对昂贵专业计算卡的依赖度下降;计算效率提升显著,计算时间从原有方法的 h 量级下降到 min 量级;新方法的理论和实测 DUR 比原方法增大但仍显著低于国标控制标准,且能量利用率显著提升,同时分区排源降

低了现场布源工作量。检测结果验证了新方法的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 王传祯. γ 辐照装置及其应用[M]. 北京:中国原子能出版社,2013.

[2] 杜静玲,赵志祥,刘文平,等. 中国核技术应用发展现状与趋势[J]. 同位素,2018,31(3):180-187.

DU Jingling, ZHAO Zhixiang, LIU Wenping, et al. Status and prospect of applications of nuclear technology in China[J]. Journal of Isotopes, 2018, 31(3): 180-187(in Chinese).

[3] 郭权,曾民生,郭仕源,等. 大型单板源 Co-60 辐照装置的排源方法和实践[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2014,32(3):61-66.

GUO Quan, ZENG Minsheng, GUO Shiyuan, et al. A proposal and practice for source pencil

- deployment of large single plate source Co-60 irradiator[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2014, 32(3): 61-66 (in Chinese).
- [4] 雷鹏, 祝清俊, 邓鹏, 等. 辐照装置源棒排列与参考面不均匀度的关系[J]. *核农学报*, 2007, 21(4): 387-389.
LEI Peng, ZHU Qingjun, DENG Peng, et al. Relation of source pencil arrangement and uniformity of standard plane at irradiation facility[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2007, 21(4): 387-389(in Chinese).
- [5] 李磊, 李晓燕, 蒋树斌, 等. 基于改进型贪心算法的单板源源棒排列优化[J]. *核技术*, 2015, 38(10): 100204
LI Lei, LI Xiaoyan, JIANG Shubin, et al. Optimization of source pencil deployment of single-plate irradiation facility based on improved greedy algorithm[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, 38(10): 100204(in Chinese).
- [6] MANAI K, TRABELSI A. Neural network modelling of dose distribution and dose uniformity in the tunisian gamma irradiator[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2013, 157(1): 125-132.
- [7] 杨磊, 刘珂, 刘义保, 等. 模拟植物生长算法在⁶⁰Co源栅格排布中的应用[J]. *核技术*, 2011, 34(3): 199-204.
YANG Lei, LIU Ke, LIU Yibao, et al. Practical application of plant growth simulation algorithm for source pencil deployment of ⁶⁰Co irradiator[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34(3): 199-204 (in Chinese).
- [8] 杨磊, 刘义保, 刘玉娟, 等. 基于模拟植物生长算法的钴源源棒的排列优化[J]. *核技术*, 2009, 32(12): 915-921.
YANG Lei, LIU Yibao, LIU Yujuan, et al. Optimization of source bars arrangement based on plant growth simulation algorithm at irradiation facility[J]. *Nuclear Techniques*, 2009, 32(12): 915-921(in Chinese).
- [9] 杨磊, 王玲, 龚学余. 基于 CUDA 的大型 gamma 辐照装置通用并行排源算法[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(2): 303-311.
YANG Lei, WANG Ling, GONG Xueyu. General-purpose parallel algorithm based on CUDA for source pencils' deployment of large gamma irradiator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(2): 303-311(in Chinese).
- [10] 杨磊, 刘义保, 龚学余, 等. 改进的模拟植物生长算法及其在大型辐照装置自动排源中的实用化[J]. *原子能科学技术*, 2010, 44(11): 1 403-1 408.
YANG Lei, LIU Yibao, GONG Xueyu, et al. Improved plant growth simulation algorithm and its practical application for source bars arrangement at big irradiation facility[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(11): 1 403-1 408(in Chinese).
- [11] 杨斌. 辐射加工类企业若干经济管理问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [12] 陈勋, 黄成, 肖华丽, 等. γ 辐射加工中剂量控制技术[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2012, 30(3): 183-186.
CHEN Xun, HUANG Cheng, XIAO Huali, et al. The research of dose control in the γ -irradiation process[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2012, 30(3): 183-186 (in Chinese).
- [13] 彭伟, 高爱民, 张军哲. 大型工业钴源辐照装置排源优化分析[C]// 中国核学会 2009 年学术年会. 北京: 原子能出版社, 2009.
- [14] 单贤尧, 关迟, 徐力平, 等. 强⁶⁰Co源辐照装置的最佳源棒排列设计及其辐射场的分布[J]. *原子能科学技术*, 1990, 24(5): 39-45.
SHAN Xianchu, GUAN Chi, XU Liping, et al. Optimum designing of bars arrangement and distribution of radiation field for a strong ⁶⁰Co irradiator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1990, 24(5): 39-45(in Chinese).
- [15] 国家技术监督局. JJG 591-89 γ 射线辐射源(辐射加工用)[S]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [16] 李彤. 模拟植物生长算法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [17] 杨磊, 龚学余. 基于 GPU 的并行植物模拟生长算法[J]. *计算机工程与设计*, 2016, 37(12): 3 271-3 279.
YANG Lei, GONG Xueyu. Parallel plant growth simulation algorithm based on GPU[J]. *Computer Engineering and Design*, 2016, 37(12): 3 271-3 279(in Chinese).
- [18] International Atomic Energy Agency. Gamma irradiators for radiation processing[R/OL]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005. [2018-08-20]. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1386_web.pdf.