

# 基于二维数组的换料机偏置换料算法

赵阿朋<sup>1</sup>, 李元昊<sup>2</sup>, 吴凤岐<sup>1</sup>, 陆秀生<sup>1</sup>

1. 中核华核技术研究院, 深圳, 518026; 2. 中广核工程有限公司, 深圳, 518026

**摘要:** 换料算法是换料机控制系统的核心技术, 决定着整个换料过程的安全性和经济性。通过对堆芯组件分布建模, 提出以二维数组为基础的堆芯偏置换料算法并对算法相关的关键问题进行论述。工程实践表明, 此算法简单高效, 在满足核安全的前提下, 能大幅缩短换料时间, 具有可观的经济效益。

**关键词:** 二维数组; 偏置换料; 算法

**中图分类号:** TP29 **文献标志码:** A

## 0 前言

压水堆核电站经过一个运行周期, 需按照预定换料方案更换核燃料, 此过程通过安装在乏燃料和反应堆厂房的核燃料装卸贮存系统完成, 是核电站换料大修过程的关键步骤之一。大亚湾核电站核燃料装卸贮存系统采用美国西屋公司的技术, 换料机产品采用以指针轮询为基础的堆芯二次偏置算法。该算法将堆芯燃料组件记录为指针表, 通过轮询目标位置指针判断是否可启用偏置方式, 运行效率较低, 不具有实时性, 存在误判断风险; 二次偏置过程中换料机慢速运行, 耗时较长。本文通过对换料算法核心问题分解并结合二维数组技术, 提出一种可实时判断、换料效率高的换料优化算法, 并在实际工程中得到应用。

## 1 堆芯建模

### 1.1 堆芯组件布置

大亚湾核电站压水堆堆芯共有 157 根核燃料组件, 堆芯组件由阻力塞组件、控制棒组件、可燃毒物组件、中子源组件(首次装料时使用)等组成, 除控制棒组件略重(>60 kg)外, 其他组件重量相差不到 20 kg, 可统一归为轻组件。

### 1.2 二维数组模型

根据堆芯组件分布图及组件类型, 优化算法除记忆每个堆芯格架是否装载组件外, 还需要记忆组件的类型。此外, 根据核燃料组件技术规范, 组件在受到辐照变形无法正常装载时,

可旋转 180° 后继续装载, 因此, 优化算法需要记忆燃料组件装载角度。

通过上述功能需求分析, 可采用 17×17 的二维数组对堆芯进行建模。其中  $X$  为换料机大车运动方向, 涵盖堆芯 01~15 编码组件;  $Y$  为换料机小车运动方向, 涵盖堆芯 A~R 编码组件, 单个二维数组  $[X, Y]$  代表堆芯相应格架。单个数组数据类型为单整型, 第 1 位数据用于存储目标格架是否已装载, 第 2 位数据用于存储组件角度, 第 3 位数据用于存储组件类型, 以此类推。

### 1.3 数组维度计算

为了准确判断换料机所处格架位置, 需要实时计算二维数组  $X$ 、 $Y$  维度, 供算法调用。

假设堆芯中心点的坐标为  $(x_0, y_0)$ , 堆芯格架间隔为  $L$ , 换料机当前位置为  $(x, y)$ , 可建立如下坐标系(图 1)(以上参数的单位均为 mm)。

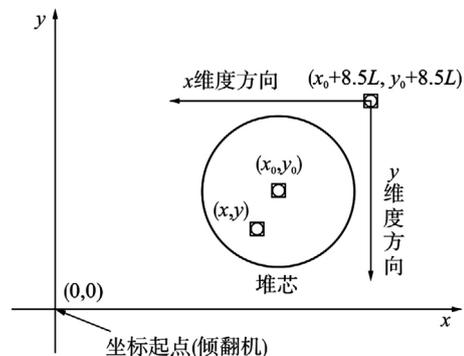


图 1 数组维度计算坐标

Fig. 1 Array Index Calculation Coordination

根据维度与格架间隔  $L$ 、坐标的关系，可得出二维数组  $[X, Y]$  的维度计算公式为：

$$\begin{cases} X = \text{int} \left[ \frac{x_0 + 8.5L - x}{L} \right] \\ Y = \text{int} \left[ \frac{y_0 + 8.5L - y}{L} \right] \end{cases}$$

## 2 算法分析

### 2.1 目标合法性判断

燃料组件技术规范规定，堆芯内组件至少有相邻的两面受到支撑（可以是围板或另一组组件），防止组件因重心不稳倾倒，因此换料机操作组件前必须对目标合法性进行判断。

假设目标位置的二维数组维度为  $[X, Y]$ ，为了便于分析，将目标位置周围组件进行编号。

通过分析，目标位置合法布尔表达式为图 2 中（1 或 5）与（3 或 7）条件为真。

### 2.2 偏置合法及方向判断

为避免燃料组件在相对运动时出现刮蹭、超欠载等情况，换料机采用偏置方式操作核燃料组件，因此不但要求目标位置合法，同时要求周围 3 个相邻位置尚未装载组件。在判断目标位置是否合法的 9 种情形中，只有图 2 中 4 种情形符合偏置换料条件。

通过对 4 种有效情形进行分析，偏置合法性及方向判断流程见图 3。

### 2.3 偏置路径优化

偏置分为全偏置与半偏置。将距离堆芯目

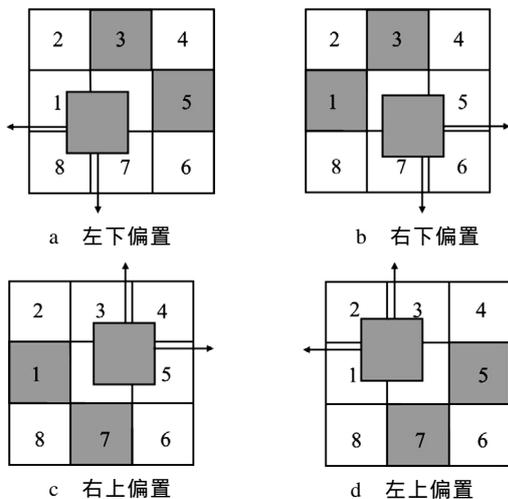


图 2 4 种合法偏置及方向

Fig. 2 Four Valid Offset Type with Directions

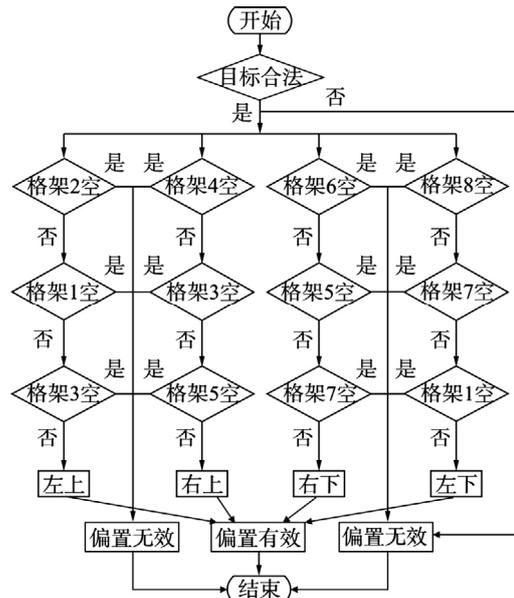


图 3 偏置合法及方向判断流程图

Fig. 3 Offset Validation and Directions Judgment Flowchart

标格架中心点 45~72 mm 的区域定义为全偏置区；将距离堆芯目标格架中心点 20~45 mm 的区域定义为半偏置区。

西屋公司同时采用全偏置和半偏置进行换料。以装料过程为例，当换料机带载运行至全偏置区时，换料机主提升高速下降至 7900 mm 高度（燃料组件底部与换料机固定套筒底部平行于提升高度零点，堆芯全程高度约为 8954 mm），换料机大小车重新定位至半偏置区；换料机主提升慢速继续下降至 8700 mm 高度，换料机大小车重新定位至目标格架正上方；换料机主提升慢速继续下降，直至载荷释放，燃料组件坐落于目标格架上。卸料过程与此相反。

根据 AFA 3G 组件尺寸、堆芯尺寸及水池基准尺寸数据，当核燃料组件距离零点 8700 mm 高度时，燃料组件下管座距离堆芯定位销尚有 250 mm 距离，且燃料组件位于全偏置位置，在此高度以上快速运行能确保核燃料组件安全。由全偏置模式转为半偏置模式过程中换料机全程慢速运行，耗时过长，影响换料效率。基于上述安全性和效率考虑，可取消半偏置过程，同时全偏置的高度由 7900 mm 修改为 8700 mm。

优化后的换料流程见图 4。

防城港核电厂换料机设备出厂试验结果表

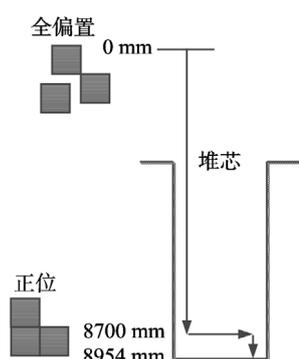


图4 新偏置换料流程图

Fig. 4 Inserting Fuel Assembly without Half Offset

明,采用优化后的换料流程后,单根燃料组件耗时 6 min 51 s,而西屋公司的全偏置+半偏置单根燃料组件耗时 10 min 左右,由此推算单个

换料周期可节省关键路径时间 8 h,换料效率提高了 20%。

### 3 结束语

本文通过分析堆芯组件分布,建立了以二维数组为基础的数学模型,推导出目标格架度与换料机坐标的换算公式,确定了维度与坐标的直接关系;分析并解决了算法中目标合法性、偏置合法性及方向等关键问题,保证了算法的安全性;通过优化偏置流程,节约了换料时间,提高了算法经济性。

目前,该新型算法已成功应用于广西防城港核电厂一期工程换料机设计,预计将为后期商业运营带来可观收益。

## Development of Nuclear Reactor Core's Full Offset Refueling Algorithm Based on Two-Dimensional Array

Zhao Apeng<sup>1</sup>, Li Yuanhao<sup>2</sup>, Wu Fengqi<sup>1</sup>, Lu Xiusheng<sup>1</sup>

1.China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong, 518026, China;

2.China Nuclear Power Engineering Company LTD., Shenzhen, Guangdong, 518026, China

**Abstract:** The reactor's refueling algorithm, which determines safety and efficiency of whole core's refueling progress, is the key part of manipulator crane control system. This paper presents a new kind of full offset refueling algorithm through reactor core's modeling based on two-dimensional array. It also resolved significant issues related to the algorithm. The engineering practice shows that the new algorithm can save refueling time prior to ensure nuclear safety, which means bringing considerable benefits to current operating nuclear power reactor station.

**Key words:** Full offset refueling, Algorithm, Two-dimensional array

作者简介:

赵阿朋(1983—),男,工程师。2004年毕业于浙江大学电气工程及其自动化专业,获学士学位。现主要从事换料机器人研究,现为国家863计划专项课题“换料机器人”项目技术经理。

李元昊(1975—),男,工程师。1998年毕业于天津理工学院热能与动力工程学院锅炉专业,获学士学位。现从事换料机设备研究,现为CPR1000堆型换料机设备采购技术负责人。

吴凤岐(1972—),男,高级工程师。1996年毕业于东北电力学院继电保护与自动远动技术专业,获学士学位。现从事国产化设备研发工作,现为高级项目经理。

(责任编辑:杨洁蕾)