

文章编号 : 0258-0926(2014)S2-0102-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0102

ORIENT1.0 软件系统的确认

王 涛, 蒋校丰, 吕 栋, 陈国华, 黄 勇, 张少泓

上海核星核电科技有限公司, 上海, 200235

摘要: ORIENT1.0 软件是最新开发的压水堆堆芯物理分析与燃料管理的软件系统。本文介绍 ORIENT1.0 系统的程序确认情况。确认工作采用国内运行的 3 种堆型的运行测量数据进行, 共计 59 个运行循环。比较的工况不仅包括零功率、低功率物理实验, 还包括正常功率运行时的测量数据。确认结果表明, ORIENT1.0 软件系统及系统所采用的中子学计算模型针对不同堆型均可给出满足工程精度要求的计算结果, 其性能全面达到实际工程应用的要求。

关键词: 压水堆; 堆芯分析; 燃料管理; 软件确认; ORIENT

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Validation of Core Analysis System ORIENT 1.0

Wang Tao, Jiang Xiaofeng, Lyu Dong, Chen Guohua, Huang Yong, Zhang Shaohong

Shanghai NuStar Nuclear Power Technology Co., Ltd., Shanghai, 200235, China

Abstract: Code validations are performed by comparing the calculated results against the measured data from three types of operating reactors. A total of 59 reactor cycles are evaluated and the results compared not only include the parameters measured at the startup physics test stage for zero- and low-power conditions but also that measured at the normal operation stage for full-power conditions. Validation results demonstrate that the neutronic models incorporated in ORIENT system are of high quality and the system is highly acceptable for performing routine neutronic analyses at PWR nuclear power plants.

Key words: PWR, Core analysis, Fuel management, Code validation, ORIENT

0 引言

上海核星核电科技有限公司与中核核电运行管理有限公司联合开发了一套拥有完整自主知识产权的核电厂反应堆堆芯物理分析与燃料管理软件系统 ORIENT。该软件系统由辅助建模工具 ORIOLE、核燃料组件计算程序 ROBIN、截面表制作程序 IBIS、堆芯计算程序 EGRET、可视化作业平台 NODDY 以及反应堆数据中心 TRAGOPAN 共 6 个部分组成; ROBIN、IBIS 以及 EGRET 构成整个软件系统的分析计算核心。

本文主要介绍利用核电厂实测数据对 ORIENT 软件系统的计算核心及所建立各型反

应堆分析模型的确认工作。

1 核心程序简介

ORIENT 适用于方形燃料组件压水堆的堆芯计算分析, 按目前国际上通用的“组件-堆芯”两阶段分析方法设计。该软件系统的核心架构及计算流程如图 1 所示。

1.1 核燃料组件计算程序 ROBIN

ROBIN 主要用于单组件运输燃耗计算或核燃料+围板/水反射层超组件计算。在 ORIENT 1.0 软件系统中, 该程序主要用于完成“组件-堆芯”两阶段分析方法中第一阶段组件计算所要求的计

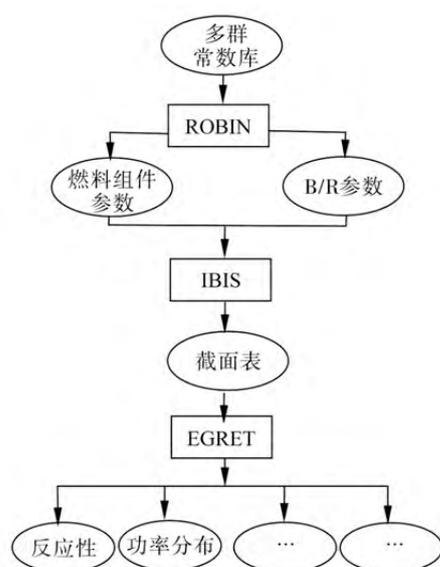


图1 ORIENT软件系统的核心计算流程

Fig. 1 Flow Chart of ORIENT Software Package

算任务。

ROBIN 程序及与其配套的 RLib-1.0 群常数库具有如下特点：基于最新评价核数据库制作多群常数库；采用特征线方法进行组件中子输运计算；采用粗网有限差分技术加速特征线法输运计算；采用中间并群但不并区的方法提高组件计算效率；对含钷燃料棒采用直接模拟；采用多组件模型产生凹凸形围板/反射层等效均匀化参数；适用于组件内复杂几何条件下 Dancoff 因子计算的改进中子流方法，可进行更精确的共振计算；适用于含钷组件的对数线性反应率方法，显著提高输运-燃耗计算的效率；特征线循环扫描技术及不同极角方向采用不同幅角数目的空间立体角离散方法。

1.2 截面表制作程序 IBIS

IBIS 程序的主要功能是：将 ROBIN 程序针对各种类型核燃料组件计算产生的、不同参考工况下的组件等效均匀化参数，加工成随各独立变量变化的插值表的形式，供下游堆芯计算软件 EGRET 使用。IBIS 程序不但能考虑控制棒插入、慢化剂中可溶硼浓度变化、核燃料芯块温度变化以及冷却剂温度变化等瞬时效应对核燃料组件等效均匀化参数的影响，还可以考虑核燃料燃耗以及不同的燃耗历史对核燃料组件等效均匀化参数的影响。

1.3 三维堆芯计算程序 EGRET

EGRET 程序主要用于三维堆芯临界-燃耗计算，在 ORIENT 软件系统中，主要用于完成“组件-堆芯”两阶段分析方法中第二阶段堆芯计算所要求的计算任务。

EGRET 程序具有如下特点：采用多群半解析粗网节块方法进行三维堆芯扩散计算；显式表示堆芯活性区外围的围板和水反射层；可显式模拟燃料组件定位格架并消除控制棒尖端效应的动态子网方法；采用节块内一维横向积分中子通量密度形状作为定解条件，直接通过多项式和谱函数加以拟合的精细功率重构方法。

2 软件确认结果

表 1 给出了进行确认计算的所有算例来源及比较的测量值类型的统计。

对 ORIENT 1.0 软件系统开展了如下 2 个类别的软件确认工作：

(1) 利用软件系统进行核电厂反应堆历史运行情况的跟踪计算。

(2) 利用软件系统，先对尚未启动运行的换料堆芯进行预测，待电厂实际测得这些参数后，再将已准备好的预测值和实测值加以比较。

启动物理试验阶段的验证内容有：不同棒组状态下的临界硼浓度比较；不同棒组状态下的温度系数比较；控制棒组价值比较；不同棒组状态下的硼微分价值比较。

功率运行阶段的验证内容有：临界硼浓度比较，包括运行跟踪过程临界硼浓度比较和标准状态临界硼浓度比较两部分；功率分布比较，包括宏观的核燃料组件径向功率分布比较、轴向功率偏差比较以及微观的核焓升热管因子和核热流密度热点因子的比较。

以下针对各数据的计算值与实测数据的比较统计出 ORIENT 系统计算各主要物理量的偏差，总结软件系统工程应用的精度水平和不确定性。

2.1 不同棒组状态下的临界硼浓度

临界硼浓度共计有 172 个测量数据。计算值与测量值的最大正负偏差分别为 +32 mg/kg 和 -28 mg/kg；平均偏差为 -0.08 mg/kg，标准偏差为 14.3 mg/kg，落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 偏差范围内的概率为 97.09%。

表1 ORIENT 程序系统确认算例
Table 1 Validation Cases of ORIENT Software System

校算对象	算例数量 /运行循环数	比较的参数
秦山第一核电厂压水堆运行跟踪	15	启动物理试验过程所得的 41 个临界硼浓度、36 组控制棒价值、52 个温度系数和运行过程所得的 137 张堆芯组件功率分布图、2145 个临界硼浓度数值和 137 个 AO/FQ/FDH 数值
秦山第二核电厂 1 号机组压水堆运行跟踪	11	启动物理试验过程所得的 37 个临界硼浓度、28 组控制棒价值、18 个温度系数、27 个硼微分价值、45 张堆芯组件功率分布图和运行过程所得的 101 张堆芯组件功率分布图、2957 个临界硼浓度数值和 101 个 AO/FQ/FDH 数值
秦山第二核电厂 2 号机组压水堆运行跟踪	10	启动物理试验过程所得的 34 个临界硼浓度、26 组控制棒价值、15 个温度系数、25 个硼微分价值、40 张堆芯组件功率分布图和运行过程所得的 99 张堆芯组件功率分布图、2771 个临界硼浓度数值和 99 个 AO/FQ/FDH 数值
秦山第二核电厂 3 号机组压水堆运行跟踪	4	启动物理试验过程所得的 18 个临界硼浓度、15 组控制棒价值、18 个温度系数、11 个硼微分价值、12 张堆芯组件功率分布图和运行过程所得的 23 张堆芯组件功率分布图、958 个临界硼浓度数值和 23 个 AO/FQ/FDH 数值
秦山第二核电厂 4 号机组压水堆运行跟踪	3	启动物理试验过程所得的 15 个临界硼浓度、13 组控制棒价值、12 个温度系数、9 个硼微分价值、9 张堆芯组件功率分布图和运行过程所得的 13 张堆芯组件功率分布图、651 个临界硼浓度数值和 13 个 AO/FQ/FDH 数值
我国在役百万千瓦级机组运行跟踪	16	启动物理试验过程所得的 34 个临界硼浓度、64 组控制棒价值、24 个温度系数和运行过程所得的 88 张堆芯组件功率分布图、381 个临界硼浓度
秦山第二核电厂 3 号机组第 4 循环预测	1	不同控制棒状态下的临界硼浓度、控制棒价值、硼微分价值、等温温度系数、慢化剂温度系数和堆芯功率分布等
秦山第二核电厂 4 号机组第 3 循环预测	1	不同控制棒状态下的临界硼浓度、控制棒价值、硼微分价值、等温温度系数、慢化剂温度系数和堆芯功率分布等
宁德核电厂 1 号机组第 2 循环预测	1	不同控制棒状态下的临界硼浓度、控制棒价值、慢化剂温度系数和等温温度系数等

2.2 不同棒组状态下的温度系数

温度系数共计有 142 个测量数据。计算值与测量值的最大正负偏差分别为 3.222×10^{-5} 和 -3.27×10^{-5} ；平均偏差为 -0.21×10^{-5} ，标准偏差为 1.13×10^{-5} ，落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 偏差范围内的概率为 95.77%。

2.3 控制棒组价值

控制棒组价值共计有 189 个测量数据，计算值与测量值的最大正负偏差分别为 +10.05% 和 -9.87%；平均偏差为 0.69%，标准偏差为 3.54%，落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 偏差范围内的概率为 94.17%。

2.4 定期试验的组件功率分布

定期试验所得的组件功率分布共计有 517 张注量率图，65725 个组件功率测量数据。组件功率的平均偏差为 0.16%，标准偏差为 1.49%，落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 偏差范围内的概率为 94.64%。

2.5 堆芯热流密度热点因子 (FQ)

堆芯 FQ 共计有 444 个测量值比较。最大正负偏差分别为 4.30% 和 -6.11%，平均偏差为 -0.47%，标准偏差为 1.78%，落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 偏差范围内的概率为 96.40%。

2.6 堆芯轴向功率偏差 (AO)

堆芯 AO 共计有 429 个测量数据。AO 的最大正负偏差分别为 +3.0% 和 -4.89%，平均偏差为 -0.08%，标准偏差为 1.03%，落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 偏差范围内的概率为 93.24%。

3 结论

采用不同功率压水堆核电厂的实测数据对 ORIENT 软件系统进行了充分的工程验证校算。对于所有的比较参数，计算值与测量值都符合良好，可以得出以下结论：

(1) ORIENT 系统对压水堆核电厂的建模是正确的。

(2) ORIENT 系统的计算计算结果与测量值吻合良好，满足工程计算要求精度。

感谢：

中核核电运行管理有限公司孔德萍副总工程师以及堆芯燃料处全体同志在 ORIENT 系统研制过程中的支持，也感谢赵荣安博士和姚增华研究员对软件系统研制工作的支持和帮助！

(责任编辑：左成元)