

文章编号：0258-0926(2021)03-0014-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2021.03.0014

一体化 CHF 关系式开发系统研制及验证

刘 伟, 李治刚, 陆 祺, 杜思佳, 刘 余, 邓 坚, 胡 迎

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要：针对手动开发临界热流密度 (CHF) 关系式中环节众多、过程繁琐、数据量大、出错率高、耗时较长等缺点和不足, 中国核动力研究设计院 (NPIC) 进行了一体化 CHF 关系式开发系统 (ICODES) 的研制。本文对 ICODES 的理论基础、系统结构等进行了说明, 并基于自主化燃料组件的 CHF 关系式 (CF-DRW 关系式) 形式和 NPIC 的棒束 CHF 实验数据对 ICODES 进行了验证。结果表明, ICODES 能够满足燃料组件 CHF 关系式的开发需求。

关键词：临界热流密度 (CHF) 关系式; 开发; 验证

中图分类号：TL334 **文献标志码：**A

Development and Validation of Integrate CHF Correlation Development System

Liu Wei, Li Zhigang, Lu Qi, Du Sijia, Liu Yu, Deng Jian, Hu Ying

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In the manual development of rod bundle CHF correlation, there are shortcomings and deficiencies such as numerous links, tedious process, large amount of data, high error rate and long computing time, so the integrate CHF correlation development system (ICODES) is researched and implemented by Nuclear Power Institute of China (NPIC). This paper introduces the theory and structure of the ICODES, and performs the validation based on the rod bundle CHF test data and the basic shape of homemade CF-DRW correlation from NPIC. This study indicates that ICODES satisfies the requirements of the development of CHF correlation for fuel assembly design.

Key words: CHF correlation, Development, Validation

0 引言

临界热流密度 (CHF) 关系式的开发与评价是先进燃料组件研发的重要组成部分, 在开发燃料组件 CHF 关系式时, 传统方法是基于大量可靠的 CHF 实验数据, 确定合理的 CHF 关系式形式, 采用非线性回归技术等数学方法求解系数, 并通过统计学方法评价 CHF 关系式的性能^[1]。

传统手动开发 CHF 关系式的环节众多、过程繁琐、数据量大、出错率高、耗时较长。为提高 CHF 关系式的开发效率, 减少人为差错, 中国核动力研究设计院 (NPIC) 开展了集实验数据的筛选与处理、CHF 关系式形式优化与系数求解、偏

离泡核沸腾比 (DNBR) 限值确定以及关键参数图像输出等功能于一体的 CHF 关系式开发系统 (ICODES) 的研制。

本文将系统阐述 ICODES 的基本原理和系统结构, 并采用自主化燃料组件的 CHF 关系式 (CF-DRW 关系式)^[2]和棒束 CHF 实验数据验证 ICODES 的正确性和计算效率。

1 ICODES 的研制

1.1 计算原理

(1) CHF 关系式

ICODES 中采用具有自主知识产权的

收稿日期：2020-04-07; 修回日期：2020-06-20

作者简介：刘 伟 (1989—), 男, 博士研究生, 工程师, 现主要从事反应堆热工水力与安全分析研究, E-mail: liuwei0958@126.com

CF-DRW 关系式，其基本形式为：

$$q_{\text{CHF}} = \frac{f_1(p, G, X) + f_2(p, G, X, d_g, g_{\text{sp}}, D_e, D_h)}{F_{\text{NU}}} \quad (1)$$

$$F_{\text{NU}} = \frac{K}{\left[q_{\text{local}}(l_{\text{DNB}}) \right] \left(1 - e^{-K l_{\text{DNB}}} \right)} \times \int_0^{l_{\text{DNB}}} q(z) e^{-K(l_{\text{DNB}}-z)} dz \quad (2)$$

$$K = \frac{d_1(1-X)^{d_2}}{G^{d_3}} \quad (3)$$

式中， q_{CHF} 为临界热流密度； p 为局部压力； G 为局部质量流速； X 为局部热平衡含汽率； F_{NU} 为非均匀热流分布因子； D_e 为水力直径； D_h 为热当量直径； d_g 为 CHF 发生位置距上游第一道交混格架的距离； g_{sp} 为交混格架间距； l_{DNB} 为发热段入口至偏离泡核沸腾 (DNB) 发生位置的高度； q_{local} 为当地热流密度； $q(z)$ 为轴向功率分布函数； z 为轴向高度； d_1 、 d_2 、 d_3 分别为待定系数。

(2) 非线性回归方法

CHF 关系式的预测性能与关系式各项的形式和系数密切相关，由于 CHF 关系式中部分项具有较强的非线性，传统最小二乘法难以求解得到较为精确的系数。非线性回归方法在求解非线性优化问题方面具有显著的优势，本文采用拟牛顿迭代 (Quasi-Newton) 法，在科学工程计算软件 Scilab 中的调用格式^[3]为：

$$[x, \text{err}] = \text{datafit}(g, Z, x_0, q_n) \quad (4)$$

式中， g 为拟合目标函数； Z 为存放测量数据的矩阵； err 为误差返回值； x_0 为系数初始值； x 为优化所得系数； q_n 代表 Quasi-Newton 法。

(3) 欧文 (Owen) 准则

当测量值/预测值 (M/P) 数据满足正态分布时，可采用 Owen 准则确定 DNBR 限值^[4] C ：

$$C = \frac{1}{\bar{x} - k(\beta, \gamma, \nu)s} \quad (5)$$

式中， $k(\beta, \gamma, \nu)$ 为 Owen 系数，括号内为可能性 β 、置信度 γ 和样本自由度 ν ； \bar{x} 为 M/P 数据的平均值； s 为 M/P 数据的标准偏差。

当可能性和置信度都为 95% 时，可以采用式

(6) 确定对应的 Owen 系数：

$$k(\nu) = \frac{1.645 + 1.645 \times \sqrt{1 - \left[1 - \frac{2.706}{2 \times (\nu - 1)} \right] \times \left(1 - \frac{1}{\nu} \right)}}{1 - \frac{2.706}{2 \times (\nu - 1)}} \quad (6)$$

1.2 系统结构

ICODES 基于结构化程序设计，采用 C++ 编程语言进行流程控制和数据存储，同时，对第三方程序集成预留接口。

(1) 计算程序：ICODES 采用具有自主知识产权的子通道程序 CORTH^[5] 计算 CHF 发生位置的局部参数，为了与 ICODES 较好地耦合，对 CORTH 程序进行了代码级别的集成。

(2) 模块功能：CHF 实验数据预处理模块：对获得的大量 CHF 实验数据点进行预处理，形成开发数据库和验证数据库，分别用于 CHF 关系式的开发和验证；子通道计算模块：批量生成 CORTH 程序输入卡，并进行批量计算。该模块能够进行多核并行计算；CHF 关系式系数求解模块：基于对沸腾临界现象的物理认知和参数趋势分析的结果，确定并优化 CHF 关系式的形式，求解得到 CHF 关系式的各项系数；建立 M/P 数据库模块：基于子通道程序 CORTH，再次对 CHF 开发数据库进行计算，提取烧毁 (BO) 点和最小 DNBR (MDNBR) 点的当地参数，形成对应的 M/P 数据库；确定 DNBR 限值模块：对 M/P 数据库进行统计分析和检验，采用多种方法确定 DNBR 限值；CHF 关系式的验证与评价模块：基于 CHF 验证数据库获得对应的 M/P 数据库，结合开发数据的 M/P 数据库，评价新 CHF 关系式的预测率，并分析参数变化趋势。

总体而言，ICODES 将实验数据的筛选与处理、CHF 关系式形式优化与系数求解、DNBR 限值确定以及关键参数图像输出等功能集于一体，形成了研究和开发 CHF 关系式的高效集成平台。

2 ICODES 的验证

2.1 棒束 CHF 实验数据

本文采用中国核动力研究设计院开展的 5×5 全长棒束 CHF 实验数据，选取具有代表性的实验布置系列，如表 1 所示。

表 1 5×5 CHF 实验系列信息
Tab. 1 Information of 5×5 CHF Experiment Series

系列号	轴向热流分布	栅元类型	数据点
1	均匀	典型栅元	78
2	均匀	典型栅元	50
3	均匀	典型栅元	99
4	均匀	导向管栅元	47
5	均匀	典型栅元	71
6	非均匀	典型栅元	36
7	非均匀	典型栅元	65
8	非均匀	典型栅元	75
9	非均匀	导向管栅元	65
数据点总计			586

2.2 计算例题

ICODES 为用户提供了丰富的可选控制参数, 用户可根据使用需求进行设置。为了验证 ICODES 是否满足功能需求, 并确定重要控制参数的影响, 本文以表 1 中的系列 1 为基准算例, 组合形成 16 组不同的实验序列进行验证计算, 验证算例见表 2。

表 2 验证算例
Tab. 2 Validation Case

序列组号	开发数据比例/%	开发数据是否随机	运行核数
1	50	否	8
2	50	是	8
3	50	否	1
4	50	是	1
5	70	否	8
6	70	是	8
7	70	否	1
8	70	是	1
9	70	是	4
10	70	否	4
11	70	是	16
12	70	否	16
13	90	否	8
14	90	是	8
15	90	否	1
16	90	是	1

2.3 计算结果及分析

(1) 参数分布结果: 提取子通道程序 CORTH 计算结果中 BO 点热流密度的 M 和 P, 从其分布可以看出, P 与 M 沿 45° 对角线分布, 这说明 ICODES 采用非线性回归方法开发得到的

CF-DRW 关系式预测的热流密度趋势准确, 且精度较高。从 M/P 值随当地参数 (压力、质量流速和含汽率) 的分布可以看出, M/P 随当地压力、质量流速和含汽率的分布基本覆盖实验参数范围, 不存在明显的倾向性, 这符合 CHF 关系式的开发和统计学评价要求。

(2) 计算效率: 由于传统方法的计算周期较长, 针对调用子通道计算具有天然并行性的特点, 在 ICODES 中提供了 OpenMP 并行^[6]和 POSIX 线程池并行^[7]2 种并行方案, 优先推荐采用 OpenMP 并行方案。统计各测试算例的运行时间发现, 随着运行核数的增加, 计算时间呈对数函数减少。但核数并不是越多越好, 运行核数由 8 核增加到 16 核带来的计算时间减小效应越来越弱, 而且在实际应用中, 单个计算节点计算资源往往是有限的, 因此, 本文推荐采用最大序列组号/2 附近的偶数核 (表 2 所示的验证计算中推荐采用的偶数核为 16/2=8), 既能保证计算效率, 又不至于造成计算资源的浪费, 计算效率相比单核提高约 5 倍。开发数据所占比例对计算时间有一定的影响: 比例高, 则串行计算时间较长; 比例低, 则串行计算时间较短。

(3) DNBR 限值: 图 1 给出了 BO 点的 M/P 分布情况, 可以看出, M/P 值基本分布在正态分布 95/95 置信区间内, 因此可以采用 Owen 准则确定 DNBR 限值。

图 2 给出了验证算例在 BO 点和 MDNBR 点的 DNBR 限值。可以看出, BO 点的 DNBR 限值大于 MDNBR 点的 DNBR 限值, 相比于 MDNBR 点具有一定的保守性。此外, 并行内核的数目并不影响 DNBR 限值的结果。开发数据所占比例和

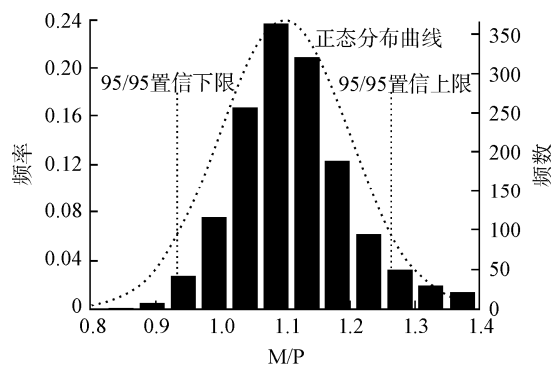


图 1 M/P 的正态分布

Fig. 1 Normal Distribution of M/P

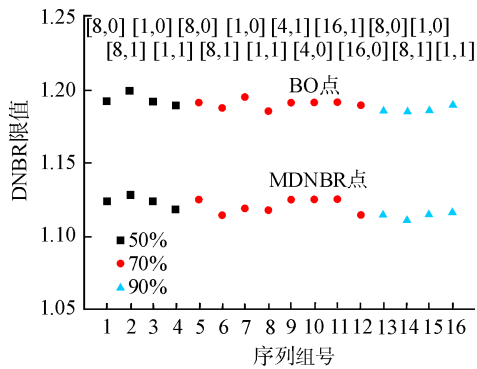


图 2 DNBR 限值分布

Fig. 2 Calculated Value Distribution of DNBR

中括号里第 1 个数值表示运行核数,第 2 个数值表示随机性,“1”表示随机,“0”表示不随机

开发数据随机组成对确定 DNBR 限值有一定的影响,且这种影响不是简单的线性关系。这是因为当开发数据库采用随机方式生成,且所占比例较小时会带来 M/P 不满足正态分布检验等问题,采用 Owen 准则确定 DNBR 限值需要进行惩罚性修正,而这种修正产生的影响是不确定的。

3 结 论

为实现燃料组件 CHF 关系式的全自动化开发、验证及统计学评价,NPIC 研制了 ICODES。本文对 ICODES 的基本原理和系统结构进行了说明,并基于 CF-DRW 关系式和 NPIC 的棒束 CHF 实验数据对 ICODES 进行了验证,所得结论如下:

(1) ICODES 能够将实验数据的筛选与处理、CHF 关系式形式优化与系数求解、DNBR 限值确定以及关键参数图像输出等功能集成,形成一

化的 CHF 关系式开发系统。

(2) ICODES 各模块的计算结果正确,所获得的 P 与 M 分布及 M/P 值随压力、质量流速和含汽率的分布不存在明显的倾向性,符合已有的理论和实验研究结论,满足燃料组件 CHF 关系式的开发和统计学评价要求。

(3) 采用 ICODES 能明显提高 CHF 关系式的开发效率,同时消除人为出错率。此外,ICODES 还可拓展应用于板型、环形等燃料组件 CHF 关系式的开发与评价。

参考文献:

- [1] 刘伟,彭诗念,江光明,等. 基于最小 DNBR 点法和 BO 点法的棒束 CHF 预测研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(5): 172-175.
- [2] 刘伟,彭诗念,江光明,等. 适用于新型 PWR 燃料组件的 CHF 关系式的开发及应用[J]. 核动力工程, 2019, 40(1): 8-11.
- [3] 胡宝钢,赵星,康孟珍. 科学计算自由软件: SCILAB 教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 33-40.
- [4] OWEN D B. Factors for one-side tolerance limits and for variable sampling plans: SCR-607[R]. USA: Sandia Corporation, 1963.
- [5] 刘余,谭长禄,潘俊杰,等. 自主化子通道分析软件 CORTH 的研发[J]. 核动力工程, 2017, 38(6): 157-162.
- [6] SALVINI S. Unlocking the power of OpenMP[C]. Germany, Aachen: The Fifth European Workshop on OpenMP, EWOMP, 2003.
- [7] KASIM H, MARCH V, ZHANG R, et al. Survey on parallel programming model[C]. Berlin, Heidelberg: Network and Parallel Computing, 2008.

(责任编辑: 孙 凯)