

CEFR I - II 型栅板联箱截流件的数值模拟

冯预恒, 胡文军, 乔雪冬, 侯志峰

(中国原子能科学研究院 快堆工程部, 北京 102413)

摘要: 使用流体动力学软件 CFX 对中国实验快堆(CEFR)的 I - II 型栅板联箱的流动阻力特性实验进行模拟计算。对比计算结果和实验数据, 讨论和分析产生误差的原因, 验证三维数值模拟计算的可靠性, 校验同类计算, 详细论述 CFD 技术与实验的关系, 证明三维数值模拟计算的可行性与可靠性, 为此后 CFD 技术在快堆设计的应用提供理论基础和计算依据。

关键词: 栅板联箱; CFD; 校验

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0150-05

Numerical Simulation for I - II Types of Distribution Header Throttle Structure in CEFR

FENG Yu-heng, HU Wen-jun, QIAO Xue-dong, HOU Zhi-feng

(China Institute of Atomic Energy, P. O. 275-95, Beijing 102413, China)

Abstract: In the simulation of distribution header throttle structure, using the computational fluid dynamic code-CFX, compared with experiment, the reasons of error were discussed and the reliability of this simulation was proved. Same types of calculations were checked, and the relationship between CFD and experiment was described. The results provide theoretic base and reference for CFD.

Key words: distribution header throttle; CFD; check

在核反应设计中, 由于 CFD 客观存在的计算误差, 使其可靠性一直受到来自传统计算方法领域的质疑。推广 CFD 技术, 就必须论证其可靠性, 得出计算精度, 找出影响精度的因素, 确保设计数据的可靠性。

近几年, 随着核电形势的迅猛发展, 对核反应堆的设计也提出了更高的要求, 必须应用新的高效、可靠、经济的方法, 既要提高设计效率和质量, 又要降低设计经费和周期。

CFD 虽是一种很好的选择, 但由于核反应设计所涉及的领域专业多, 且专业性强, 特别是对安全性的要求严格, 因此, 需完成对 CFD 技术可信度的验证后, 才能在设计中使用。将计算结果与实验数据相对比, 若得到的精度达到设计要求, 并具有良好的稳定性, 则 CFD 将可在此领域中使用。

本文是《中国实验快堆的 I - II 型栅板截流件的流动阻力特性实验》系列计算的第一部分,

即模拟中国原子能科学研究院反应堆工程研究设计所 22 室在 2003 年完成的对 CEFR I-II 型栅板联箱^[1]流动阻力特性实验,并将模拟实验与实验数据对比,讨论和分析产生误差的原因。

1 实验简介

为保证设计安全,在核反应设计过程中,须对大量关键设备和部件进行实物实验以验证和校对理论分析和数值计算。

为得到 CEFR I-II 型栅板联箱截流件的流动阻力特性,将其装在一个循环回路中,回路由两台屏蔽泵提供动力。分别选择 5 个流量值,测出实验模拟组件两端压力,数据采样处理后,得到截流件流动阻力特性,给出的阻力系数关系式^[2]。为保证实验所测压力稳定性(避免波动),进口测点设在距模拟件 1.7 m,出口测点在模拟件出口 0.77 m(图 1),因数值较小,忽略 P1、P2 进出口测点与模拟件间距的沿程摩阻。



图 1 测量方法
Fig.1 Measure method

本次计算域截取实验的循环回路中截流件流动道部分,并尽可能保持与实验的统一性。

2 实验计算方法和基本方程

实验中主要使用质量流量与压差的基本方

程为:

$$\Delta p = \zeta u^2 \rho / 2$$

将 $u = G / (\rho A)$ 代入上式,有:

$$\Delta p = \zeta G^2 / (2A^2 \rho)$$

设 $\xi = \zeta / (2A^2 \rho)$, 则:

$$\Delta p = \xi G^2$$

式中: u 为流速; G 为质量流量; Δp 为 P1、P2 测点的压力差; A 为流体截面积; ρ 为流体密度。

实验和模拟计算皆为了确定系数 ξ 。

3 模型和边界条件

3.1 模型简介

计算模型如图 2a 所示,严格遵守与实验部件的几何形状和尺寸的真实性,几何模型 360°, 主要包括栅板联箱截流件及内部结构两大部分。

在图 2a 中,回路中的流体,流过模拟管和外套管的外壁,通过外套管上 6 个外形类似足球场的开口,进入外套管内,外套管内部结构见图 2b。在图 2c 中,流过铸件内 3 个流道,重回循环管道,完成实验。

3.2 初始边界条件

流质皆为普通水、流体内压力为常压、水温 25 °C、管道直径为 0.77 m、进口流量同选 5、10、15、20、25 kg/s,出口距其 0.77 m。

模拟计算时,因壁面被设为光滑,壁面对压降无任何贡献。所以,计算模型的压力取点进、出口距模拟件分别为 0 和 0.77 m,两者进口处不同,实验测点距其 1.7 m,模拟计算取点距其 0.2 m。

3.3 计算模型

紊流模型采用 $k-\epsilon$, 壁面对紊流的影响为

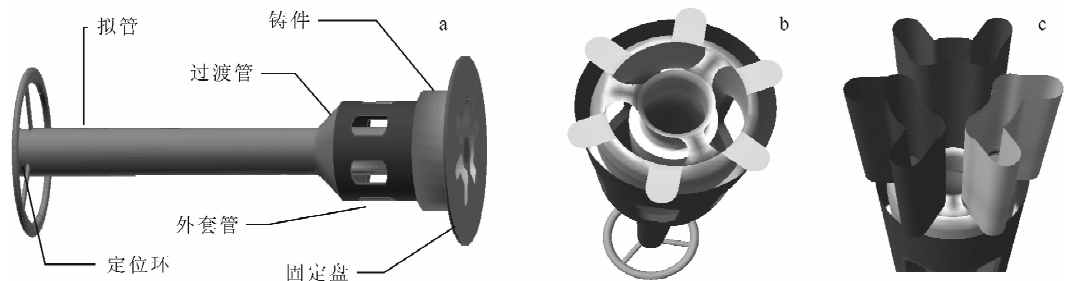


图 2 模拟栅板联箱截流件及内部结构

Fig.2 Structure of distribution header

a——栅板联箱截流件模型;b——外套管内部结构;c——铸件结构

标准情况,考虑重力的影响,各流量下流道内初始流速以理论计算为准,其它的输入和模型选择默认值。自动生成四面体非结构化网格,在结构复杂和流动间隙处采用密集网格。在保证计算精度前提下,尽量减少网格数量,采用网格一体化,模型分区等技术,将网格数量降为当前的230多万。为保证计算结果的准确性,使用的模型与实验部件几何尺寸比为1:1。

3.4 计算模型与实验的差异

由于客观条件所限,为尽量降低网格数量和提高模型的计算速度和收敛性,部件中几何尺寸在0.25 mm以下的形状基本省略。

4 计算结果与分析

4.1 模拟计算与实验结果的对比

模拟计算及实验结果的对比列于表1。从表1可看到模拟计算结果比实验数据偏大。

表1 数据结果比较

Table 1 Contrast of data

流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	压力实验 值/Pa	压力计算 值/Pa	相对偏 差/%
5	1 188.87	1 275.28	7.312
10	4 718.12	5 113.81	8.368
15	10 558.56	11 890.2	12.612
20	18 669.06	21 202.4	13.57
25	29 000.10	33 026.3	13.883

相对偏差的计算为:(理论计算压力值—实验压力值)/实验压力值 $\times 100\%$ 。

应用实验数据拟和的质量流量和压力的关系式为: $\Delta p = 48.532 \times 1.987G$ 。应用数值模拟计算拟合的质量流量和压力的关系式为: $\Delta p = 52.832 \times 1.989G$ 。比较两者的系数,相对偏差为8.862%。综合比较压差的平均相对偏差11.065%(表1)和系数的相对偏差3.2%,两者较为接近,仅相差约3%,且各项相对偏差均远小于30%。从拟合的关系式可看出,质量流量和压力为近似的平方关系。因此,质量流量越大,数值模拟结果与实验数据的压差之间的差值就越大。

4.2 结果分析

4.2.1 流场 具体的流场如图3所示。在整个过程中有几次较大的变化:1)进入截流件后,由于受到固定环的阻挡,流体从外套管6个开孔进入模拟环和外套管间的环形内,但主要是由开孔的上沿进入;2)进入模拟环和外套管间环形区域内的流体,通过铸件的3个猫耳朵形状通道时,在通道下沿的流道死角处猫耳朵的两个顶端,各形成了1个漩涡(图4);3)流体从通道冲出后,在3股流体的周围,产生了1个较大的环状涡流,在动能转换完成后,流线又恢复为直线的形状。

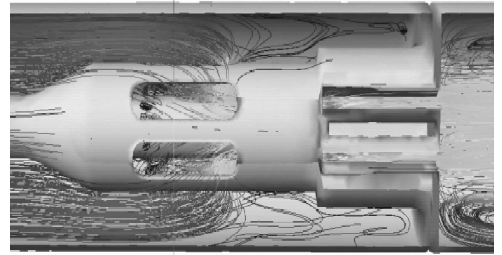


图3 截流件流场

Fig. 3 Velocity distribute in distribution header

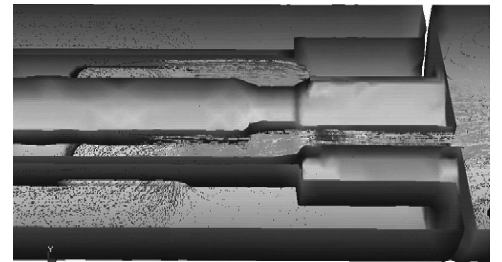


图4 截流件内部速度场矢量图

Fig. 4 Velocity distribute in distribution header inside

4.2.2 压力场 速度场和压力场分布情况示于图5。压力和速度变化成正比,流速与流经区域的截面成反比,即面积越小速度越快,速度在整个流动过程的变化规律为:进入外套管6个开孔前,流速基本保持不变;压力基本保持不变;从6个开孔到3个进口间,流速增大;在3个进口之间流速最大,压力损失最多,此处流道截面最小;3个通道之间,流速由最大值有所衰减,流速变小,出现负压;从3个出口处到距约0.4 m处,流速迅速变小,形成负压;剩余

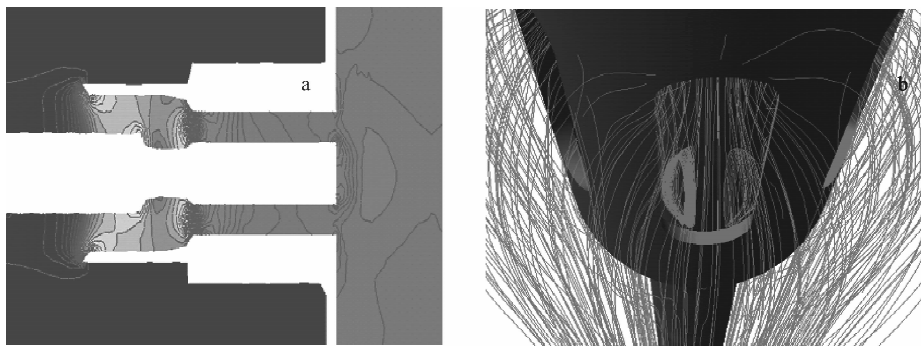


图5 速度场(a)与截流件压力场(b)

Fig. 5 Velocity (a) and pressure (b) distribution

约 0.3 m 流道内,流速保持不变,压力回复为相对出口的 0。流速变化基本趋势为:在 3 个猫耳朵形状出口前流速变大,在此后变小。压力基本变化趋势:进入 3 个通道前,压力迅速变小,压差为正;在动量转换过程中,压力变大,压差为负;过程完成后,回复为相对出口压力 0。总之,压力场与速度场保持一致。模拟与实验现象吻合很好。

5 误差分析

在使用三维商业软件进行计算之前,应尽量对应好实验条件和数值模拟的边界条件,并尽量少使用软件自带的默认值,并将其量化,选择合适的数学模型,从而可将误差降低。任何计算软件都有其特点,又存在一定的局限性。所以应使用合适的软件解决合适的问题。同时,数值模拟计算与实验必定不同,理论与实际情况必然存在差异,能否处理好此类问题,是计算正确与否的关键。

产生误差的原因主要有以上几点。

1) 计算模型与实验装置形状上的差别

模型难以模拟实验装置在制造加工的某些方面,如外套管的外壁进口边缘,模型为两面相交直角。而装置在此处将直角处倒圆,且其它同类型的地方均如此处理,精度均小于 0.25 mm。受到软硬件限制,模型网格尺寸的最小加密单位 0.1~0.25 mm,难以模拟此加工工艺,导致模型与装置在形状上存在差异。而计算中,装置两端的压差主要是由形阻引起的,两者在形状间的细小差别,对流动却产生较大的影响,尤其在流体改变流动方向和流道截

面变化剧烈时,影响就更大。这是误差产生的主要原因。由于模型中存在的棱角实验中不存在,导致模拟形阻大于实验组件,所以,计算结果比实验数据大。直角处引起的压力分布变化示于图 6。

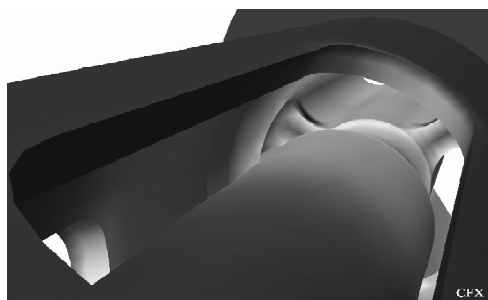


图6 直角处的压力分布

Fig. 6 Pressure distribution at straight corner

2) 边界条件存在差异

在实验中,某些客观存在而未知的条件和现象,对实验结果也产生影响,但在数值计算中无法实现,如内壁粗糙度等。

综合以上原因及其它未知因素,理论计算的数据比实验测量值大。

6 结论

应用 CFX 模拟 CEFR 栅板截流件水力实验,计算获得的压力场、速度场、流场的分布情况和变化规律,与理论方法分析得到的结果一致,且其计算误差也在范围内。计算结果说明,三维数值模拟的结果是可靠的,计算精度超过了传统计算方法,此方法完全可在核反应设计

(至少在热工流体领域)中使用。因影响精度的原因和计算对象相联系,故不可机械套用。保证精度的有效方法,除排除应用模拟技术的人为干扰外,还需在计算前确定影响精度的因素,否则,计算精度难以保证。

在实验前采用 CFD 技术,可预知热工参数的分布和变化,其计算结果的展示直观而逼真,在屏幕上对细节的展示如同实验现场的再现。对于研究流动情景、温度、压力变化等非常有益,以此预测和改进实验。

实验与 CFD 相对比发现:实验结果真实可靠,但耗时且经费大。同时,限制实验的条件较多:如经费有限时,设备和部件较大而无法实现,实验采用相似原则,将其按比例缩小进行实验;又如当流体具有高危险时,采用参数近似的流体代替等。以上情况必然影响实验数据。CFD 技术在理论上完全不受计算部件尺寸大小、形状、流体性质的限制,可作为实验的补充方法。随着对 CEFr 的深入研究,面对堆内设

备众多、结构复杂,流动和传热相互影响、研究领域内空缺多等原因,传统的研究方法制约了开展研究学科的深度和专业广度。将三维数值模拟与实验相结合,实验为三维数值模拟提供各参量的设置,而三维数值模拟可预测和指导实验。运用 CFD 技术,可提高反应堆的设计精度和设计安全,降低设计经费,缩短设计周期,开拓研究领域。

参考文献:

- [1] 冯预恒. 大栅板联箱及一回路压力管流动数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(增刊): 208-212.
FENG Yuheng. Numerical analysis of distribution header and primary loop pressure tube for china experiment fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41 (Suppl.): 208-212(in Chinese).
- [2] 丁振鑫. CEFr I - II 型小栅板联箱流动阻力特性实验[R]. 北京:中国原子能科学研究院, 2007.