

射流装置启泵过程的瞬态特性

陈 晖 曾文杰 张栋南 于 涛

(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

摘要 射流装置由射流泵和主泵组成,引入 MRX (Marine Reactor X)压水堆一回路系统中,有助于提升反应堆的固有安全性。反应堆启泵过程中,流量急剧上升导致堆芯温度变化,影响堆芯运行安全。通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对引入射流装置 MRX 一回路 10%满功率(Full Power, FP)、17.5% FP 和 25% FP 堆芯功率下启泵进行三维瞬态模拟,分析 MRX 一回路中射流装置流场瞬态特性。结果表明,射流装置的加入可以改善一回路自然循环能力,提高启泵工况下冷却剂初始变化流量,减缓变化趋势,改善过渡安全性;启泵过程中一回路温度存在波动现象,且堆芯功率越大,波动幅度越大,时间越长;启泵完成后射流泵喷嘴处流速较大。验证了压水堆中引入射流装置提升反应堆固有安全性的可行性,同时为进一步优化设计方案提供方向参考。

关键词 射流装置, 启泵, 计算流体力学, 三维流场

中图分类号 TL333

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.050602

Analysis of jet device transient feature during start-up period of primary pump

CHEN Hui ZENG Wenjie ZHANG Dongnan YU Tao

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract Background: The jet device composed of jet pump and primary pump has the advantages of simple structure and high reliability, and it is suitable for the special environment, such as radioactive, flammable and explosive. It is helpful to improve the inherent safety of the reactor by introducing the jet device as primary pump for Marine Reactor X (MRX). The sudden increase of the coolant flow rate of the reactor leads to the change of the core temperature during start-up period, which affects the safety of the core operation. **Purpose:** This study aims to obtain the jet device transient feature during start-up period of primary pump in the MRX which introducing the jet device as primary pump. **Methods:** The primary loop circuit system is modeled with a 3-dimensional (3D) Computational Fluid Dynamics (CFD) code FLUENT, and transient characteristics at 10% full power (FP), 17.5% FP and 25% FP core power conditions were analyzed during the stage of primary pump startup. **Results:** The analysis results show that the jet device can effectively improve the natural circulation ability of the primary loop circuit system, reform the initial flow rate and slow down the trend of coolant temperature change during start-up period of primary pump, so it can improve the safety of the transition. On the other hand, there are some unfavorable factors of reactor safety during start-up period of primary pump, such as the temperature of the primary circuit fluctuates (the greater the core power, the greater the fluctuation range) and the high flow rate of jet pump. **Conclusion:** The design of jet device is feasible to improve the safety of MRX, but the real use also needs some adjustment.

Key words Jet device, Start-up period of primary pump, CFD, 3D flow field

核反应堆系统设计技术重点实验室(No.2015SYS02)资助

第一作者: 陈晖, 男, 1991 年出生, 2013 年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究方向为反应堆工程

通信作者: 于涛, E-mail: yutao29@sina.com

收稿日期: 2017-01-09, 修回日期: 2017-02-21

Supported by Foundation of Laboratory of Nuclear Reactor System Design and Technology (No.2015SYS02)

First author: CHEN Hui, male, born in 1991, graduated from University of South China in 2013, master student, focusing on reactor engineering

Corresponding author: YU Tao, E-mail: yutao29@sina.com

Received date: 2017-01-09, accepted date: 2017-02-21

射流泵是一种利用高速流体作为工作动力的混合反应设备,具有结构简单、可靠性高等优点,适合水下、放射性、易燃易爆等环境使用。射流泵主要包括吸入室、喷嘴、喉管和扩散管等,如图1所示^[1]。压水堆为了简化反应堆设计,提高反应堆安全性,参考沸水堆^[2]在压力容器与堆芯吊篮间布置20台射流泵与主泵组成射流装置。射流装置在压水堆(Pressurized Water Reactor, PWR)中工作流程如图2所示。一部分换热完成的冷却剂经主泵增压后在射流泵喷嘴内形成高速射流,剩余部分冷却剂则在喷嘴高速射流的紊动扩散作用下,经射流泵吸入室进入射流泵内,两股流体在射流泵内进行混合,最后由射流泵扩散管排出,再次进入堆芯循环^[3]。

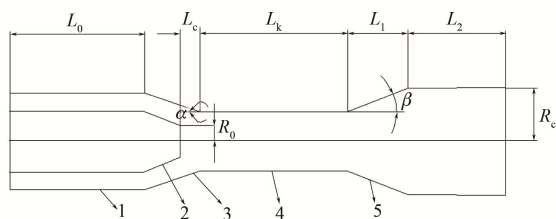


图1 射流泵结构

1) 吸入室, 2) 喷嘴, 3) 喉管入口, 4) 喉管, 5) 扩散管

Fig.1 Schematic diagram of jet pump.

1) Suction chamber, 2) Nozzle, 3) Throat entrance, 4) Mixing throat, 5) Diffuser

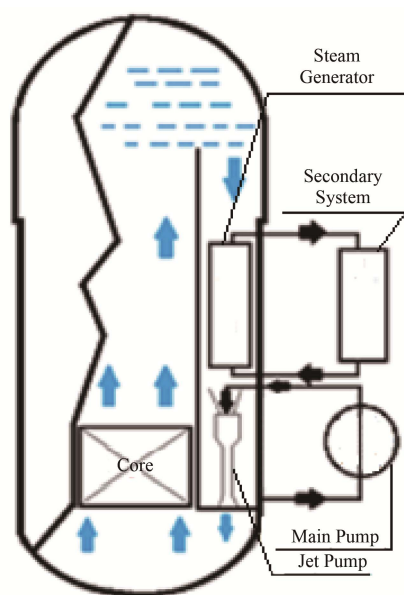


图2 压水堆工作流程图

Fig.2 Working flow of PWR.

何培杰等^[1]利用混合有限分析法对沸水堆中单个射流泵展开二维数值计算并进行流动分析,赵雪岑等^[3]选取面积比、喉嘴距、喉管长径比作为关键参数,以提高效率为优化目标,对压水堆中单个射流泵的水力特性开展数值优化计算;龙新平等^[4]使

用 FLUENT 软件对核电站中单个射流泵内部流动进行数值模拟,优化射流泵扩散角。Mangialardo等^[5]将射流泵引入铅冷快堆并对射流泵进行计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)三维建模分析,分析了铅冷快堆中射流泵方案的可行性;李忠朋等^[6]将射流装置引入到自然循环系统中,针对系统自然循环过渡特性开展实验研究,结果表明引入射流装置能够改善过渡特性。主泵启动过程中,冷却剂流量的急剧上升使得堆芯冷却剂温度周期变化且幅度较大^[7-8];选择合适的流量变化速度,可以减缓反应堆温度变化幅度,有助于提高反应堆安全;同时,合适的堆芯初始反应堆功率也能改善过渡特性。压水堆引入射流装置有望提升系统自然循环能力改善过渡特性,目前国内外针对射流装置的研究多数集中于单个射流泵结构优化、射流装置的实验研究,对压水堆中引入射流装置的研究甚少。因此,验证压水堆中射流装置方案的可行性,并提供进一步的优化方向对提高压水堆固有安全性具有重要的意义。

以 MRX (Marine Reactor X)压水堆为研究对象,参照沸水堆中射流泵的布置方式,采用 CFD 方法,开展带射流装置压水堆一回路系统三维建模,模拟 10%满功率(Full Power, FP)、17.5% FP 和 25% FP 三种功率水平下,主泵启动过程中一回路射流泵流场和回路瞬态特性,分析射流泵方案的可行性。

1 数学模型

压水堆一回路由堆芯、蒸汽发生器、主泵和稳压器组成,采用 CFD 直接对一回路系统进行三维模拟。采用多孔介质与均匀热源对堆芯^[9]与蒸汽发生器进行简化处理,主泵使用增压边界,利用启泵函数模拟启泵过程中增压变化。

1.1 堆芯

MRX 堆芯由 19 个燃料组件、265 根燃料棒组成,直接进行 CFD 模拟相当复杂,需要进行简化处理。忽略堆芯的实质几何结构,对堆芯进行等体积圆柱处理,堆芯功率按均匀热源处理。堆芯中由于固体物质的存在减少了流体流动的有效空间,同时对流体的动量和能量的传递和转换造成影响,采用多孔介质模型,对标准的流体控制方程组的动量方程中增加额外的源项表示固体部分对流场的影响。该源项由粘性损失项和惯性损失项组成:

$$S_i = -D_i \mu(T) v_i - C_i \frac{1}{2} \rho(T) |v| v_i \quad (1)$$

式中： D_i 为粘性压力损失系数， m^{-2} ； C_i 为惯性压力损失系数， m^{-1} ； $\mu(T)$ 为流体粘度， $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ； $\rho(T)$ 为流体密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； v_i 为流体速度， $m \cdot s^{-1}$ 。

1.2 蒸汽发生器

蒸汽发生器结构复杂，其固体物质对流场的影响采用同堆芯相同的处理策略，采用多孔介质模型。换热效应采用换热模型，换热模型中使用面积等效进行简化，使用用户自定义函数(User-Defined Functions, UDF)实现其换热反馈功能，换热模型中假定二回路热阻、传热管壁热阻和污垢热阻为恒定值，蒸汽发生器中由一次侧传递至二次侧的热量：

$$Q = KA\Delta t_m \quad (2)$$

式中： K 为平均传热系数， $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ； A 为总传热面积， m^2 ； Δt_m 为二次侧回路流体间的平均温差， K 。

平均传热系数方程：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_{ca}}{d_0} + C} \quad (3)$$

其中：

$$C = \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d_{ca}}{d_i} + R_W + R_F$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_0}$$

$$Nu = \frac{0.2Re^{0.65}}{[1 + 3(1 - \frac{\sigma}{2})^3]^2} Pr^{0.33}$$

$$Re = \frac{\bar{\rho}vl}{\mu}$$

式中： α_1 为一次侧对流传热系数， $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ； α_2 为二次侧对流传热系数， $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ； R_W 为传热管壁热阻， $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ； R_F 为污垢热阻， $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ； d_i 为换热管内径， m ； d_0 为换热管外径， m ； d_{ca} 为传热管外径， m ； λ 为介质的平均导热系数， $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ； μ 为介质平均粘度， $Pa \cdot s$ ； v 为介质平均流速， $m \cdot s^{-1}$ ； l 为蒸汽发生器特征半径， m ； $\bar{\rho}$ 为介质平均密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； Re 为雷诺数； Pr 为普朗特数； $\sigma=s/d_0$ 为纵向往相对间距。

1.3 主泵

不考虑主泵的实际结构，仅考虑其增压效应，

启泵时泵压头随时间变化关系^[10]为：

$$p(t) = p_0 \tanh^2(5.118 \, 3t) \quad (4)$$

式中： $p(t)$ 为主泵瞬时增压， Pa ； p_0 为稳态时主泵增压， Pa ； t 为时间， s 。

2 一回路满功率强迫循环工况验证

依据 MRX 压水堆一回路结构尺寸^[11]及沸水堆中射流泵的布置方式，结合射流泵的结构尺寸，对一回路进行几何建模，如图 3(a)所示。考虑计算的经济性，选取模型的 1/10 进行计算，如图 3(b)所示。采用四面体网格划分技术对一回路进行网格划分。由于启泵过程中射流泵内流场较为复杂，需对网格加密。比较强迫循环工况下网格数分别为 372 万、408 万、432 万、453 万的模拟结果进行网格敏感性分析，最终确定网格数为 432 万的网格作为后续计算用网格，其中射流泵网格总数为 80 万左右，网格质量为 0.35 以上，符合 FLUENT 的计算要求。

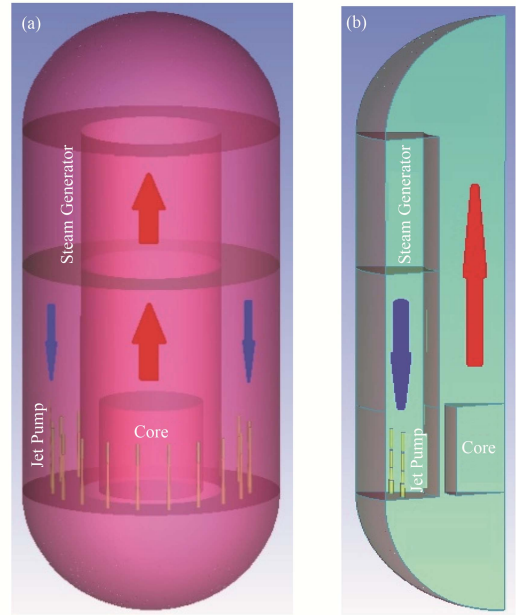


图3 反应堆一回路三维模型
Fig.3 3D model of primary loop circuit system.

满功率强迫循环工况下，堆芯采用均匀热源和多孔介质边界条件，蒸汽发生器使用均匀冷源和多孔介质边界条件，主泵采用增压边界条件，在 FLUENT 14.0 中采用 $k-\epsilon$ 湍流模型并开启强化壁面处理（壁面网格较密同时非射流泵区域近壁面雷诺数较低）和浮力效应，导入水物性，操作压力设定为 12 MPa，平均残差收敛量级设定为 10^{-5} 。引入射

流装置后满功率强迫循环工况下模拟值与 MRX 堆设计值对比如表 1 所示。各特征量误差在 16.2%以

内, 误差可接受, 可以利用 CFD 的方法进行之后的研究。

表 1 满功率强迫循环工况下 CFD 模拟值与设计值对比
Table 1 Comparison between the calculated and the design value at the forced circulation.

参数 Parameters	堆芯功率 Core power / MW	一回路流量 Reactor coolant flow rate / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	一回路工作压力 Reactor coolant operating pressure / MPa	蒸汽发生器进出口温差 Difference in temperature between the Steam generator inlet and outlet / K
设计值 Design value	100	1 250	12	15.4
模拟值 Calculated value	100	1 266	12	12.9
误差 Error	0%	1.28%	0%	16.2%

3 射流装置启泵瞬态特性分析

堆芯使用均匀定热源和多孔介质边界条件, 蒸汽发生器使用换热模型和多孔介质边界条件, 主泵采用增压边界条件, 主泵启动后增压按启泵函数变化, 分别对 10% FP、17.5% FP 和 25% FP 工况下展开启泵瞬态模拟研究。

3.1 自然循环流量随堆芯功率变化趋势

自然循环流量直接影响射流泵方案的可行性, 利用一维流动守恒方程, 对动量和能量守恒方程沿环路积分, 得自然循环流量:

$$q_m = \left(\frac{2\alpha_v P_t g \Delta L \rho_0^2}{R c_p} \right)^{\frac{1}{3-n}} \quad (5)$$

式中: P_t 为堆芯热功率, kW; α_v 为冷却剂的体膨胀系数; c_p 为冷却剂在一回路冷却剂温度范围内的比定压热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; R 为计算阻力因数时的比例常数; ρ_0 为参考温度下冷却剂的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; ΔL 为蒸汽发生器与堆芯中心高度差, m; n 的数值取决于流型, 对于充分湍流, $n=0.2$, 层流时, $n=1$ 。与 FLUENT 模拟值比较如图 4 所示, 射流装置的引入可以实现一回路自然循环, 自然循环流量随堆芯功率而增加, 由于自然循环状态下一回路除射流泵外其他部分流速较缓慢, 湍流不充分, 模拟值更接近层流理论值。

3.2 启泵过程中一回路温度瞬态特性

启泵过程中冷却剂流量急剧上升, 导致堆芯冷却剂温度发生周期变化, 影响反应堆运行安全。不同堆芯功率下堆芯冷却剂瞬态温度如图 5 所示。主泵启动后堆芯冷却剂平均温度呈现周期振荡, 振荡周期为 37 s; 10% FP、17.5% FP、25% FP 工况下堆

芯冷却剂平均温度最大温差分别为 12.67 K、19.10 K、24.67 K; 不同堆芯功率下启泵, 一回路冷却剂温度达到稳定所需时间也存在差异, 功率越大稳定所需时间越长, 25% FP 工况下一回路冷却剂温度在三个振荡周期后基本达到稳定状态, 而 10% FP 工况下则是 2.5 个振荡周期。

25% FP 堆芯功率下, 一回路温度随时间变化云图如图 6 所示, 启泵前期(6 s)一回路处于自然循环稳态工况, 回路温度呈现由堆芯到蒸汽发生器的高温到低温的分层现象; 启泵后主泵压力迅速增加并稳定, 但是换热及对流相对缓慢, 导致在堆芯上方形成一个温度极高区域, 第 9 s 温度云图所示; 随着时间的继续, 第 20 s 时蒸汽发生器冷却剂温度大于堆芯冷却剂温度; 射流泵的管径相对较小, 射流泵内冷却剂流速相对较高, 导致射流泵周围的流场相对较复杂, 致使 35 s 时射流泵周围的温度场分布较复杂; 经过一段时间的对流与换热, 一回路冷却剂温度分布再次趋向于稳定分层, 如第 120 s 回路温度云图所示。

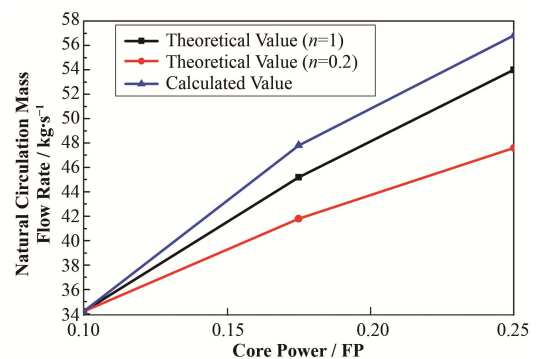


图 4 自然循环流量模拟值与理论值对比
Fig. 4 Comparison between simulation value and theoretical value of natural circulation flow.

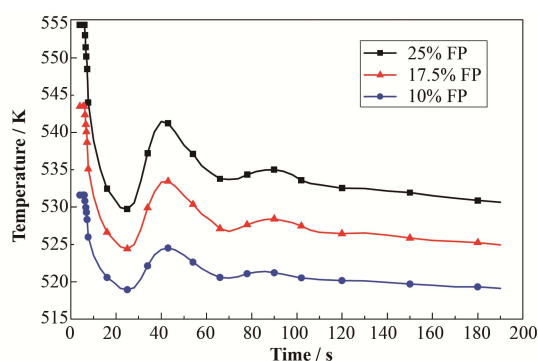


图5 不同堆芯功率下堆芯冷却剂瞬态温度
Fig.5 Core coolant transient temperature under different core power.

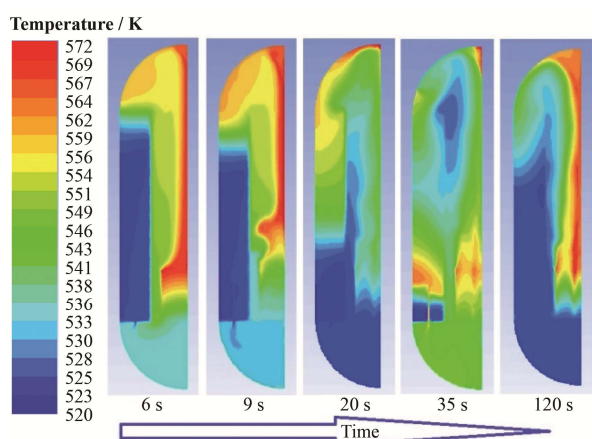


图6 一回路温度随时间的变化
Fig.6 Temperature distribution of primary loop circuit system over time.

综上所述, 启泵前堆芯功率越大, 堆芯功率振荡幅度越大, 振荡时间越长, 越不利于过渡安全性; 射流泵内部和周边温度场分布较复杂, 容易造成设备疲劳。

3.3 射流泵流场瞬态特性

引入射流装置, 一回路冷却剂增加了吸入室循环通道, 使得回路启泵过程中一回路流量变化趋势发生改变。图7为引入射流装置与非射流装置下, 相同主泵增压时间系数、25% FP 功率下启泵回路流量变化趋势。射流装置的引入使得回路冷却剂流量变化的起点提高趋势变缓, 有利于改善过渡安全性。射流泵喷嘴和吸入口瞬态流量如图8所示, 启泵前期, 喷嘴入口面处于关闭状态, 喷嘴流量为零, 在回路冷却剂密度差压头的驱动下, 冷却剂通过吸入口进行循环; 启泵初期, 主泵的驱动下喷嘴流量迅速增加, 吸入口流量在喷嘴主泵增压的干扰下出现短暂的下降, 随后在喷嘴紊流作用下流量随喷嘴流量而增加, 并在7.5 s后基本达到稳定, 吸入口与喷嘴流量比为1.36。

射流泵入口及喷嘴处速度矢量图如图9所示, 第6 s时主泵处于停止状态, 喷嘴处冷却剂流速为零, 吸入室入口成为冷却剂循环的唯一入口, 在冷却剂密度差的驱动下, 吸入口平均流速为 $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 第6.1 s时, 射流泵喷嘴入口及吸入口流速处在同等水平状态; 随着主泵继续增压, 第7 s时主泵增压已经达到相对稳定的状态并远大于冷却剂密度差驱动压头, 此时射流泵喷嘴处入口冷却剂流速 $70.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、吸入口流速 $55.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 由于喷嘴出口处收缩角的加速作用喷嘴出口流速为 $133.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

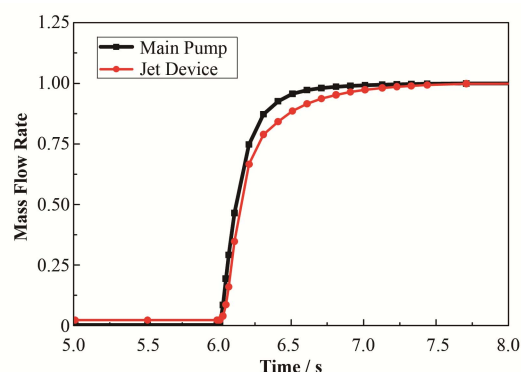


图7 带射流装置与非射流装置回路启泵流量变化
Fig.7 Coolant flux variation of main circuit with or without a jet device.

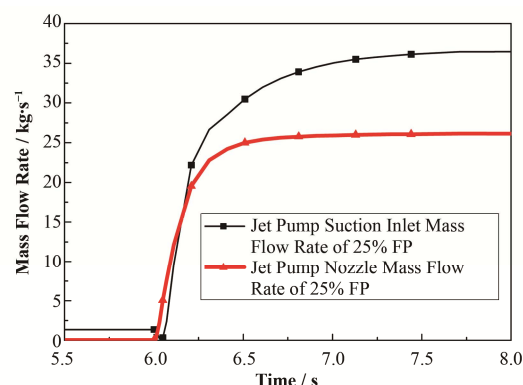


图8 射流泵喷嘴入口和吸入口瞬态流量
Fig.8 Nozzle inlet and suction line inlet transient flow of jet pump.

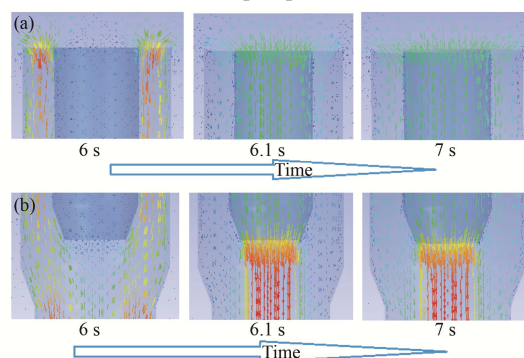


图9 射流泵入口(a)和喷嘴处(b)速度矢量图
Fig.9 Velocity vector diagram of inlet (a) and nozzle (b) of jet pump.

4 结语

采用CFD方法, 对引入射流装置压水堆10% FP、17.5% FP、25% FP堆芯功率下启泵瞬态工况进行三维模拟, 分析射流装置和回路流场特性表明:

1) 引入射流装置可以改善压水堆的自然循环能力, 自然循环流量随堆芯功率而增加, 10% FP、17.5% FP、25% FP 堆芯功率下, 流量分别为 $34.2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $47.8 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $56.8 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2) 启泵过程中一回路冷却剂温度存在振荡现象, 周期为 37 s, 堆芯功率越大, 振幅越大, 过渡所需时间越长, 10% FP、17.5% FP、25% FP 堆芯功率下堆芯冷却剂最大振幅分别为 12.67 K、19.10 K、24.67 K, 达到稳定所需时间分别为 102 s、126 s、144 s。

3) 相同主泵时间系数下, 引入射流装置可以提高启泵工况下回路冷却剂流量变化起点减缓变化趋势, 改善启泵过渡安全性, 启泵完成后射流泵内部流速较大(喷嘴出口处流速达 $133.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

4) 压水堆中引入射流装置具有提升反应堆固有安全性、改善过渡特性的可行性, 考虑到目前射流泵内流速较大, 射流装置的结构尺寸需要进行进一步的优化设计。

参考文献

- 何培杰, 吕俊贤, 龙新平, 等. 喷射泵内部流动数值分析[J]. 核动力工程, 2005, 26(2): 135-139. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2005.02.009.
- HE Peijie, LYU Junxian, LONG Xinping, *et al.* Numerical analysis on flows in jet pumps[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(2): 135-139. DOI: 10.3969/j.issn. 0258-0926.2005.02.009.
- Ortiz J. BWR online monitoring system based on noise analysis[J]. Nuclear Engineering & Design, 2006, 236(22): 2394-2404. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.02.009.
- 赵雪岑, 王金涛, 刘松亚, 等. 射流泵水力特性优化设计研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(4): 129-132. DOI: 10.13832/j.jnpe.2014.04.0129.
- ZHAO Xuacen, WANG Jintao, LIU Songya, *et al.* Research of optimization design of jet pump's hydraulic characteristics[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(4): 129-132. DOI: 10.13832/j.jnpe.2014.04.0129.
- 龙新平, 王丰景, 俞志君. 喷射泵内部流动模拟与其扩散角优化[J]. 核动力工程, 2011, 32(1): 53-57.
- LONG Xinping, WANG Fengjing, YU Zhijun. Optimization of divergence angle of jet pump based on numerical simulation of interior flow field[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(1): 53-57.
- Mangialardo A, Borreani W, Lomonaco G, *et al.* Numerical investigation on a jet pump evolving liquid lead for GEN-IV reactors[J]. Nuclear Engineering & Design, 2014, 28(9): 608-618. DOI: 10.1016/j.nucengdes. 2014.09.028.
- 李忠朋, 史重淼. 带喷射泵系统中自然循环过渡特性实验研究[J]. 核动力工程, 1995, 16(4): 322-325.
- LI Zhongpeng, SHI Chongmiao. An experiment investigation of natural circulation transient behaviours in a loop with jet pump[J]. Nuclear Power Engineering, 1995, 16(4): 322-325.
- 郝亚雷, 于雷, 蔡章生, 等. 核动力装置强迫循环与自然循环过渡过程特性研究[J]. 核科学与工程, 2007, 27(1): 20-26. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2007.01. 005.
- HAO Yalei, YU Lei, CAI Zhangsheng, *et al.* Study on operation characteristics of natural circulation and forced circulation in nuclear power plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(1): 20-26. DOI: 10.3321/j.issn: 0258-0918.2007.01.005.
- 姚青生, 王章立, 韩伟实, 等. 自然循环向强迫循环过渡时的反应性变化[J]. 核动力工程, 2008, 29(3): 18-22.
- YAO Qingsheng, WANG Zhangli, HAN Weishi, *et al.* Transitional reactivity variation from natural to forced circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(3): 18-22.
- 陈森, 刘余, 田茂林, 等. 基于多孔介质模型的压水堆堆芯温场数值模拟[J]. 核技术, 2015, 38(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090601.
- CHEN Sen, LIU Yu, TIAN Maolin, *et al.* PWR core transient temperature numerical simulation based on porous media model[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090601.
- Gao H, Gao F, Zhao X C, *et al.* Analysis of reactor coolant pump transient performance in primary coolant system during start-up period[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 54(54): 202-208. DOI: 10.1016/j.anucene. 2012.11.020.
- 汪胜国. 日本改进型船用堆 MRX 概念设计综述[J]. 核动力工程, 1995, 16(3): 209-217.
- WANG Shengguo. Conceptual design report on advanced marine reactor MRX of Japan[J]. Nuclear Power Engineering, 1995, 16(3): 209-217.