

# 入口非均匀流对核主泵性能影响研究

王巍\*, 王亚云, 卢盛鹏, 侯腾飞, 羿琦, 王晓放

(大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** CAP1400 反应堆冷却剂系统中蒸汽发生器下封头和核主泵直接连接, 使蒸汽发生器下封头出口接管的流场变得不均匀。为探究非均匀入流条件对核主泵性能的影响, 对核主泵叶轮和蒸汽发生器下封头进行联合简化建模, 采用 CFD 方法数值计算泵的能量、水动力以及空化性能, 并与均匀入流下的仿真结果进行比较。计算结果表明: 在  $0.7Q_0 \sim 1.2Q_0$  工况范围内, 进口的不均匀流动导致泵的扬程下降  $1.8\% \sim 5.1\%$ , 叶轮扭矩下降  $1.9\% \sim 6.4\%$ , 而效率没有发生明显的变化; 非均匀入流下扬程的降低使叶轮所受轴向力有所减小, 但径向力显著增大。空化发生时, 泵的临界空化余量增大, 抗空化性能降低, 空化区域出现明显的不对称。

**关键词:** 核主泵; 非均匀入流; 能量特性; 径向力; 空化性能

**中图分类号:** TH313

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201705003

## 0 引言

核电厂冷却剂回路循环泵是核蒸汽供应系统主回路中唯一高速旋转设备, 称为反应堆冷却剂泵, 是确保核电站安全和可靠运行的最关键动力设备。我国自主设计研发的 CAP1400 第三代核电机组, 在压水反应堆设计中沿用了西屋公司 AP1000 的“非能动”理念, 将蒸汽发生器和主泵直接连接, 取消了之间的过渡段, 简化了系统, 降低了堆芯裸露的可能, 但导致蒸汽发生器下腔室和主泵入口段的流场变得非常复杂, 主泵的进流不再符合均匀入流条件, 对主泵的长期稳定运行带来一定的影响<sup>[1]</sup>。

核主泵的设计以及安全可靠评估一般假设入流条件为均匀来流<sup>[2-3]</sup>, 非均匀入流条件对主泵运行性能的影响需要进一步研究。在实际工程应用中, 各种类型的泵都可能存在非均匀的入口速度分布, 该速度分布会对泵的性能产生一定程度的影响, 这方面已经有较多的相关研究。Bulten 等<sup>[4]</sup>对喷水推进泵进行了非稳态计算分析, 发现不均匀的入流速度分布给叶轮带来了附加的定常

径向力, 且该力的数值与进流的不均匀度和通过泵的流量有关。施卫东等<sup>[5]</sup>通过数值计算, 对比分析了不同入口速度分布对轴流泵外特性、径向荷载以及典型位置压力脉动的影响, 认为不同的入流条件对轴流泵的扬程、效率、径向力以及压力脉动特性具有不同程度的影响。Van Esch<sup>[6]</sup>对混流泵在非均匀入流条件下的水力性能和叶轮荷载进行了试验研究, 观察到非均匀入流下混流泵的扬程、扭矩有所降低, 但水力效率没有发生明显降低, 转子系统上承受的定常径向力显著增加。夏栓等<sup>[7]</sup>采用 PumpLinx 对 AP1000 反应堆冷却剂系统蒸汽发生器冷侧下腔室和主泵进行了耦合分析, 得到耦合部分的流场情况以及设计工况下主泵的压力和速度分布云图。侯向陶<sup>[8]</sup>将蒸汽发生器下封头和核主泵统一建模, 采用 CFD 方法对其耦合模型进行全三维流场计算, 得到了下封头对核主泵入口流场不均匀度的影响, 分别分析了稳态和瞬态情况下非均匀入流对主泵水力及水动力性能的影响, 并在核主泵入口管加装锥形挡板以改善主泵的入流条件, 但没有对核主泵空化性能加以考虑。Fujii 等<sup>[9]</sup>对四叶片诱导轮在有无进口

畸变工况下的空化性能进行了试验研究,认为进口畸变使诱导轮发生空化失速的空化数范围趋向更低,而两种工况的压力脉动幅值则比较接近.因此有必要对蒸汽发生器下封头对主泵性能的影响进行更加全面的评估.

本文主要进行非均匀入流条件对核主泵水力、水动力性能以及空化性能影响的研究.考虑到建立蒸汽发生器下封头、核主泵联合三维模型的难度,本文将简化的蒸汽发生器下封头与课题组自主设计的核主泵叶轮缩尺模型进行耦合,模拟稳态情况下非均匀入流条件对主泵运行性能的影响.

## 1 物理模型和数值方法

### 1.1 几何模型及网格划分

几何模型包括核主泵入口管、叶轮和蒸汽发生器下封头.核主泵 1:2.5 缩尺模型设计参数为:流量  $Q=1\ 385\ \text{m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H=17.5\ \text{m}$ ,转速  $n=1\ 485\ \text{r/min}$ .为保证计算结果的收敛性,在叶轮出口加了延长段,采用 ANSYS-TurboGrid 六面体结构化网格对主泵叶轮进行网格划分.经过网格无关性验证,认为扬程变动范围在 1% 以内,达到要求,最终确定网格总数为  $1.1 \times 10^6$ .本文对蒸汽发生器下封头做了如下简化:由于蒸汽发生器下封头冷管侧对称连接两台核主泵<sup>[10]</sup>,采用下封头 1/4 模型和单台核主泵联合计算.不考虑 U 形管对流速的影响,下封头和入口管都采用四面体网格.几何模型装配图如图 1 所示.

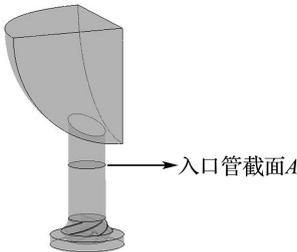


图 1 非均匀入流下核主泵几何模型

Fig. 1 Geometry model of reactor coolant pump under non-uniform suction flow

### 1.2 数值模拟方法

以 ANSYS CFX 作为求解器,选取标准  $k-\epsilon$

湍流模型<sup>[11]</sup>进行湍流计算,入口设置为流量入口边界条件,出口为压力出口边界条件.设置模型的对称面为对称性边界条件,其他壁面设置为无滑移条件.叶轮与入口管流体域间、叶轮与出口延长段间的动静耦合通过设置 Frozen Rotor 交界面实现.

研究空化性能时,采用 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型,该模型以均质多相模型和 Rayleigh-Plesset 方程考虑空泡的生长和溃灭,进而模拟空化流动,其液相蒸发速率和气相凝结速率表达式为

$$F_e = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}}; \quad p \leq p_v \quad (1)$$

$$F_c = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}}; \quad p > p_v$$

式中: $F_e$  为液相的蒸发速率, $F_c$  为气相的凝结速率, $\alpha$  表示体积分数, $\rho$  表示密度,其中下角标  $v$  表示气相,下角标  $l$  表示液相.计算环境温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ ,设介质的饱和蒸汽压力  $p_v$  为  $3\ 169.75\ \text{Pa}$ ;空化核体积分数  $\alpha_{\text{nuc}}$  取  $5.0 \times 10^{-4}$ ;空泡的平均直径  $R_B$  取  $2 \times 10^{-6}\ \text{m}$ ;  $F_{\text{vap}}$  和  $F_{\text{cond}}$  分别为蒸发系数和凝结系数,分别取 50 和 0.01.泵内部空化的产生通过逐步降低泵出口的静压实现.

## 2 计算结果和讨论

### 2.1 叶轮外特性的验证

对核主泵叶轮模型  $0.7Q_0 \sim 1.2Q_0$  时 7 个工况点下的流场进行模拟,根据计算结果预测模型泵的外特性,与相同条件下的试验结果进行对比,以验证数值计算方法的可行性.模型泵叶轮在不同工况下外特性的预测值与试验值的对比如图 2 所示.

由图 2 可以看出,数值计算预测的扬程和效率随流量的变化趋势与试验相同,可以一定程度上反映泵的特性,存在的误差在可以接受的范围内.水力效率的预测值与试验值相比偏高,这主要是导叶和蜗壳内的流动造成了较大的流动损失,同时,数值计算中没有考虑过流部件表面粗糙度的影响.

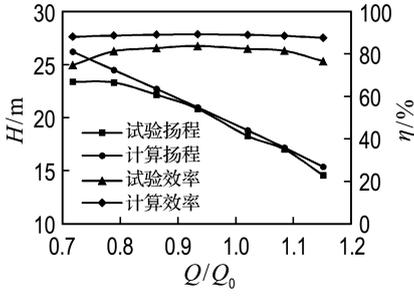


图 2 核主泵外特性计算与试验值对比

Fig. 2 Comparison of computational and experimental results of external performance of reactor coolant pump

### 2.2 非均匀入流对核主泵能量特性的影响

图 3 为核主泵入口管截面 A 在非均匀入流和均匀入流下的压力分布和流线图。在蒸汽发生器下封头的影响下，核主泵入口管形成了两个回旋方向相反的漩涡，而不考虑蒸汽发生器下封头时，入口截面压力分布周向对称，流体无横向流动。为了定量描述非均匀入流特征，用入口管截面 A 处速度标准差与平均速度的比值表征入流的不均匀度，记为  $\zeta$ 。

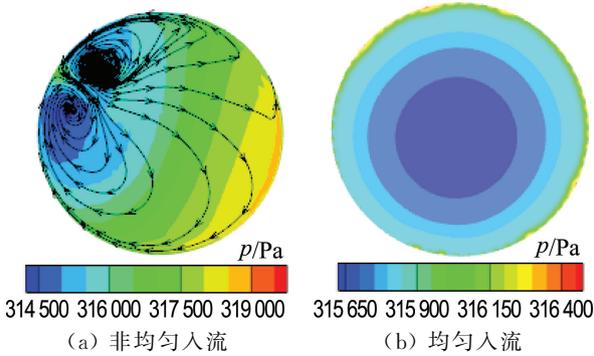


图 3 核主泵入口压力分布和流线图

Fig. 3 Distribution of pressure and streamlines at the inlet of reactor coolant pump

不均匀度可表示为

$$\zeta = \frac{1}{\bar{v}} \sqrt{\frac{\sum (\bar{v} - v_p)^2}{n}} \quad (2)$$

式中： $\bar{v}$ 为截面平均速度， $v_p$ 为网格节点速度， $n$ 为网格节点数。如图 4 所示，进流流场的均匀度与流量有关，在  $0.7Q_0 \sim 1.2Q_0$ ，不均匀度随流量的增加呈 S 形下降。

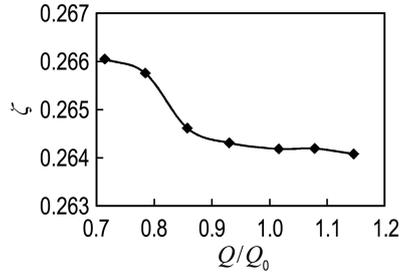


图 4 入流不均匀度随流量变化曲线

Fig. 4 The curve of non-uniformity of the inflow field with flow rate

图 5 为核主泵在非均匀和均匀两种入流条件下扬程和效率随流量变化曲线。图 6 为两种入流条件下的叶轮所受扭矩随流量变化曲线。从图 5 可以得到：非均匀入流条件下，核主泵的扬程出现明显的下降， $0.72Q_0$  工况扬程下降 1.8%， $1.15Q_0$  工况扬程下降 5.1%，且下降率随流量的增大而增大，而两种入流条件下的效率没有明显的变化。均匀入流下，设计工况泵内液体的流动情况与过流部件的几何形状相符合，冲击损失很小，非均匀入流导致叶片进口处相对速度的大小和方

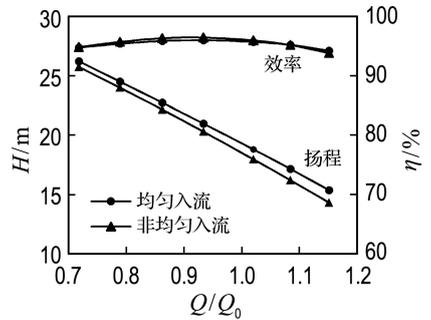


图 5 不同入流下扬程和效率随流量变化曲线

Fig. 5  $H-Q$  curves and  $\eta-Q$  curves under different suction flows

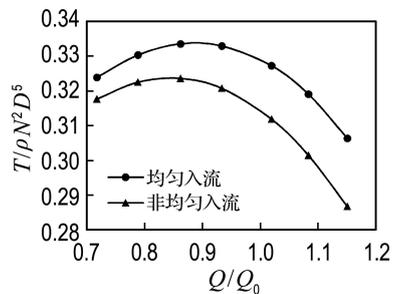


图 6 不同入流下叶轮扭矩随流量变化曲线

Fig. 6  $T-Q$  curves under different suction flows

向都发生变化,在叶片进口处产生较大的冲击损失,使同一流量下泵的扬程降低.从图 6 可以看出,核主泵叶轮所受扭矩随流量变化曲线为较平滑有极值的曲线,非均匀入流下叶轮扭矩下降,叶轮对液体的做功能力减小.

### 2.3 非均匀入流对核主泵水动力性能的影响

泵内流动的轴不对称性导致径向力的产生,该径向力对轴承加载,并可能会导致轴承过早磨损甚至疲劳失效.将叶轮看作一个控制体,则引起径向力主要有 3 个要素<sup>[12]</sup>:(1)叶轮出口压力的周向变化;(2)叶轮盖板和泵体之间从叶轮出口到叶轮进口之间的泄漏流动,盖板-泵体间隙内压力的周向不均匀导致叶轮盖板的外部形成径向力;(3)叶轮出流流量的周向不均匀性引起的出流流量不均匀.本文只考虑(1)、(3)两项,由于存在非均匀入流条件,同时考虑进口流动的周向不均匀性对径向力产生的影响.叶轮轴向力主要由下列分力组成:(1)叶轮前后盖板不对称产生的轴向力;(2)液流通过叶轮方向发生变化产生的动反力;(3)叶轮前后盖板泵腔内的径向流的影响.在进行力的计算时,取叶轮为控制体,在 CFD-post 中提取叶轮进口面和出口面  $x$ 、 $y$  向的力进行合成得到径向力,对  $z$  向的力合成得到轴向力,不考虑弯矩的影响.

图 7 为均匀和非均匀两种入流条件下叶轮轴向力和径向力随流量变化曲线.从图可以得到结论:(1)均匀入流条件下叶轮承受的径向力数值在零附近波动,这是由于计算模型仅考虑了叶轮,没有考虑导叶和压水室的影响,通过叶轮的流体的

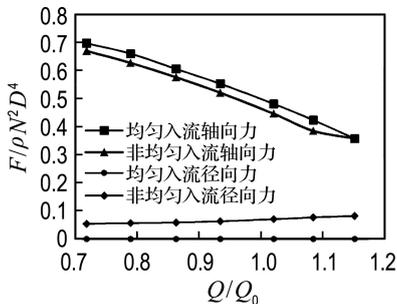


图 7 不同入流下轴向力与径向力随流量变化曲线  
Fig. 7 The variation curves of axial force and radial force with flow rate under different suction flows

流动是轴对称的,几乎不会产生径向力,符合理论实际.叶轮轴向力随流量的增加而减小,这是流量增加转速不变,叶轮出口和进口的压差减小以及液体冲力减小造成的.(2)进口条件非均匀时,叶轮受到的轴向力有所减小,这是非均匀入流下扬程下降,前后盖板上的压力差减小造成的.但叶轮承受的径向力比均匀入流下的值显著增大,且径向力随流量的增大而增大,这说明非均匀入流使泵内流动的周向不均匀性增加.

### 2.4 非均匀入流对核主泵空化性能的影响

空化现象是泵内常见的一种破坏现象,虽然在设计工况下核主泵不会发生空化,但是在一回路破口事故和热阱丧失时,有可能产生空化现象.所以有必要对非均匀入流条件对核主泵空化性能的影响进行探究.

设计流量下,通过逐步降低出口压力对核主泵的空化性能进行模拟.图 8 为均匀和非均匀两种入流条件下泵扬程-空化余量曲线.由图 8 可知,均匀和非均匀两种入流条件下泵的扬程-空化余量曲线都表现出相同的变化趋势,即随着空化余量的减小,空化从发生、发展到逐渐严重,扬程先保持不变,再出现拐点,然后急剧下降.扬程下降 3% 所对应的空化余量为临界空化余量.均匀和非均匀入流条件下临界空化余量分别为 1.73、2.20 m,即不均匀的入流使临界空化余量相对增大了 27%,泵的抗空化性能降低,不利于泵的安全运行.根据泵内空化发展的程度从空化初生到逐渐严重,下面对泵出口压力分别为 0.23、0.21、0.19 MPa 的叶轮内部空化发展进行对比分析,图 9 为叶轮内部气泡体积分数的分布图,气泡表面定义为气泡体积分数为 10% 的等值面.

如图 9 所示,两种入流条件下空化发展的过程具有相同之处:空化首先在叶片吸力面进口边靠近轮缘处发生,叶轮内发生空化区域较小,对泵的性能影响甚微.随着空化余量的降低,空化继续发展,气泡沿着叶片吸力面从叶轮进口向出口发展,同时从靠近轮缘处向叶片中部发展,叶片压力面进口边也开始出现气泡.空化程度继续加剧,叶片吸力面堆积的气泡和压力面的气泡相连,堵塞流道.不同的是,均匀入流条件下每一流道空化发

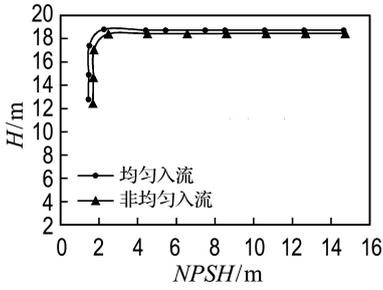
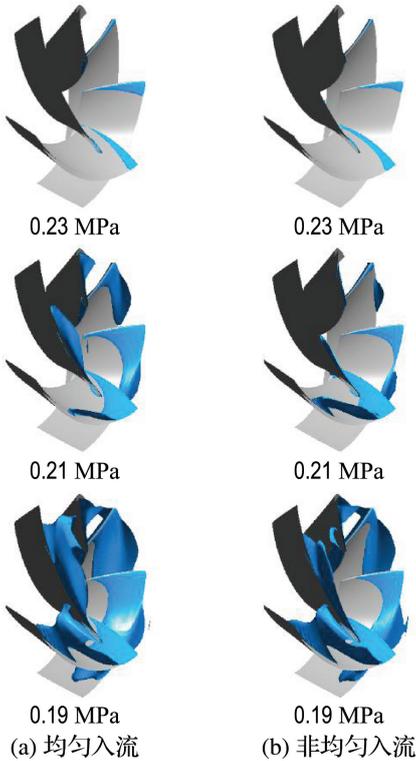


图8 不同入流下空化性能曲线

Fig. 8 Cavitation performance curve under different suction flows

图9 不同入流下叶轮内气泡体积分数等值面  
Fig. 9 Isosurface of vapour volume fraction in impeller under different suction flows

展程度基本相同,空化区域周向对称分布,非均匀入流导致空化区域出现明显的不对称,每一叶片上空化程度不同,气泡体的形状、位置也不同.空化区域的不对称使泵的空化性能恶化,使泵在空化状态运行时产生的振动和噪声增大.

### 3 结 语

蒸汽发生器下封头与核主泵直接连接的特殊结构使核主泵产生了非均匀的入流条件,该条件对泵的能量、水动力以及空化性能具有一定的影

响.与均匀入流条件相比,非均匀入流条件下:

(1)泵的扬程下降了1.8%~5.1%,叶轮扭矩下降了1.9%~6.4%,下降率都表现为随流量的增大而增大的趋势.水力效率不发生明显变化.

(2)非均匀入流导致的扬程下降使叶轮承受的轴向力有所减小,但由于泵内流动周向不均匀性加剧,径向力显著增大.

(3)泵的关键空化余量增大,且叶轮内的空化区域出现明显的不对称,泵的抗空化性能降低,不利于其安全可靠运行.

### 致谢:

本文研究工作的开展也得益于辽宁重大装备制造协同创新中心的大力支持,在此表示衷心感谢.

### 参考文献:

- [1] 黄 伟,张文其,陶文铨,等. 蒸汽发生器下封头/主泵连接处流动特性试验研究[J]. 核动力工程, 2002, **23**(s1):38-42.  
HUANG Wei, ZHANG Wenqi, TAO Wenquan, *et al.* Flow characteristics experimental study within connection between steam generator channel head and pump suction [J]. **Nuclear Power Engineering**, 2002, **23**(s1):38-42. (in Chinese)
- [2] 邹志超. 核主泵水力部件初步设计及情转特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.  
ZOU Zhichao. Preliminary hydraulic design of reactor coolant pump and power-off transient rotation characteristics research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [3] XIE Rong, QI Heng, SHEN Fei. Modelling design and blade profile optimization for a mixed-flow pump impeller [J]. **Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research**, 2014, **32**(2):1099-1106.
- [4] BULTEN N H, VAN ESCH B P M. Fully transient CFD analyses of waterjet pumps [J]. **Marine Technology**, 2007, **44**(3):185-193.
- [5] 施卫东,张光建,张德胜,等. 入口非均匀流对轴流泵性能和压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, **32**(4):277-282.  
SHI Weidong, ZHANG Guangjian, ZHANG

- Desheng, *et al.*. Effects of non-uniform suction flow on performance and pressure fluctuation in axial-flow pumps [J]. **Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering**, 2014, **32**(4):277-282. (in Chinese)
- [6] VAN ESCH B P M. Performance and radial loading of a mixed-flow pump under non-uniform suction flow [J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2009, **131**(5):051101.
- [7] 夏 栓, 冯 斌, 张海军. AP1000 核岛主泵流场数值模拟[J]. 核技术, 2013, **36**(4):040620.  
XIA Shuan, FENG Bin, ZHANG Haijun. Simulation of AP1000 reactor coolant pump flow field CFD [J]. **Nuclear Techniques**, 2013, **36**(4):040620. (in Chinese)
- [8] 侯向陶. 蒸汽发生器下封头对核主泵性能影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
HOU Xiangtao. Study of steam generator channel head on the performance of reactor coolant pumps [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [9] FUJII A, AZUMA S, YOSHIDA Y, *et al.*. Unsteady stress of 4-bladed inducer blades and the effect of inlet flow distortion [J]. **JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering**, 2002, **45**(1):47-54.
- [10] SCHULZ T L. Westinghouse AP1000 advanced passive plant [J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2006, **236**(14/15/16):1547-1557.
- [11] JONES W P, LAUNDER B E. Prediction of laminarization with a 2-equation model of turbulence [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 1972, **15**(2):301.
- [12] BRENNEN C E. **Hydrodynamics of Pumps** [M]. Oxford: Oxford University Press, 1994.

## Research on effects of non-uniform suction flow on performance in reactor coolant pump

WANG Wei\*, WANG Yayun, LU Shengpeng, HOU Tengfei, YI Qi, WANG Xiaofang

( Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Reactor coolant pump (RCP) of CAP1400 reactor coolant system is designed welded directly to the steam generator (SG) channel head, which makes the flow field in the SG channel head outlet nozzle non-uniform. To study the influence of inflow distortion on RCP performances, comparisons of energy, hydrodynamics and cavitation characteristics between non-uniform and uniform inflow conditions are carried out by CFD method through modelling integrally the channel head of SG and RCP impellers. Calculation results show that at  $0.7Q_0$ - $1.2Q_0$  the inflow distortion reduces pump head and impeller torque by 1.8%-5.1% and 1.9%-6.4% respectively, and efficiency is not affected. With the decrease of head, axial loading drops slightly whereas radial loading increases significantly under non-uniform suction flow. As cavitation occurs, the critical NPSH of the pump increases, anti-cavitation performance is reduced and cavitation area appears obvious asymmetric.

**Key words:** reactor coolant pump; non-uniform suction flow; energy characteristic; radial loading; cavitation characteristic