离心风机振动噪声及压力脉动实验研究

蔡建程 鄂世举 蒋永华 焦卫东 王冬云

浙江师范大学工学院,金华,321004

摘要:利用传声器、加速度计、微型精密压力传感器对离心风机噪声、管道振动及压力脉动进行测量 分析。结果表明,在风机噪声、管道振动、压力脉动频谱中与叶轮转动相关的离散分量明显,旋转频率分 量最大;离散频率处噪声、振动与压力脉动相干函数值在 0.5 以上,而宽频分量处的相干函数值较小;管 道内强烈压力脉动主要在距离风机出口 5D(D 为管道水力直径)的范围内,强度与参考动压 $\rho v_b^2/2$ (ρ 为流体密度, v_b 为体积速度)相当;在 10D 以后,管内流场趋于均匀,压力脉动值约为参考动压的 20%;压力脉动频谱中旋转频率分量最为明显,其幅度在风机出口 2D~4D 附近达到最大,为参考动压 的 25%左右。

关键词:离心风机;压力脉动;噪声;振动 中图分类号:TH43 DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2019.10.008

Experimental Study of Vibrations, Noises and Pressure Fluctuations of Centrifugal Fan

CAI Jiancheng E Shiju JIANG Yonghua JIAO Weidong WANG Dongyun College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang, 321004

Abstract: Microphones, accelerometers, and pressure transducers were used to measure the centrifugal fan noises, pipe vibrations and pressure fluctuations respectively. The results show that in the spectra of the fan noises, pipe vibrations and pressure fluctuations, the discrete frequency components related to the impellor rotations are notable, and the rotational frequency (RF) components are the maximum in general. The coherence of the noises and vibrations with the pressure fluctuations is higher than 0.5 at discrete frequencies, but lower at broadband frequencies. The most intensive pressure fluctuations are within 5D from the fan outlet, where D is the pipe hydraulic diameter, with the strength almost equaling to the reference dynamic pressure $\rho v_b^2/2$ (ρ as fluid density, v_b as bulk velocity). After 10D where the flow became quite uniform, the amplitude of pressure fluctuations is approximately 20% of the reference dynamic pressure. The RF components are the most conspicuous in the pressure fluctuation spectra, and the maximum valute is around 25% of the reference dynamic pressure occurring within 2D~4D from the fan outlets.

Key words: centrifugal fan; pressure fluctuation; noise; vibration

0 引言

管道流动广泛存在于能源动力、机械工程、石 油化工、暖通空调、航空航天、船舶海洋、农业工程 等众多领域。管道流动经常由泵、风机及压缩机 等流体机械驱动。流体机械出口的非定常流动 (如往复式流体机械周期性排气、叶轮式流体机械 叶轮出口的射流——尾迹)将在下游管道中产生 压力波动,进而造成管路系统的振动与噪声^[1-2]。

流体机械出口非定常流场一方面在管道内向 下游流动,所到之处产生流体动力性压力脉动即 伪声(pseudo sound)^[3];另一方面非定常流动的 速度、压力脉动分别是气动或水动噪声的四极子

收稿日期:2017-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575497,51405449); 浙江省自然科学基金资助项目(LY18E060006) 源和偶极子源,它们产生声波,声波在管内向上游 及下游传播^[4]。通常,伪声强度比声波强度大几 个数量级(管内发生声共鸣情况除外),且能对结 构注入大量激励能量,产生结构振动并对环境辐 射噪声。按这一思路,JIANG等^[5]对离心泵在内 部非定常流场激励下的泵壳受迫振动进行了数值 研究。

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

单独流体机械内部流场、压力脉动及相关流 动噪声预测的研究相当多,包括计算流体动力学 (computational fluid dynamics,CFD)仿真和实 验研究。JAFARZADEH 等^[6]用标准 k- ϵ 、RNG k- ϵ 和 RSM 湍流模型计算了离心泵的内部流动, 发现 RNG k- ϵ 模型的计算结果与实验最为接近。 张兄文等^[7]用标准 k- ϵ 两方程模型对离心泵叶轮 内变流量流动特性进行了数值模拟。蔡建程等^[8] 曾对某离心泵在变转速工况下隔舌处压力脉动进 行了实验研究。周佩剑等^[9]对旋转失速条件下离 心泵叶轮压力脉动特性进行了研究。KHALIFA 等^[10]实验研究了不同流量下泵内部压力脉动与 泵体振动的联系。袁寿其等^[11]和刘厚林等^[12]则 用 CFD 结合 Lighthill 声类比理论数值预测了泵 内偶极子水动噪声。

人们对流体机械相连的管内压力脉动进行了 研究。BODEN 等^[13] 将管道系统中的流体机械 建模成1端、2端等效声源,对管道中的压力脉动 进行了理论研究。徐斌等^[14] 通过理论及实验分 析了往复式压缩机出口管路内的压力脉动,表明 一维平面波动方程可以比较准确地计算出气柱固 有频率及压力脉动。周红等^[15] 分析了管道内流 的连续方程及运动方程,推导了管道内压力脉动 的一维声波方程,并用驻波法进行了求解。 CHEONG 等^[16] 用一维声学理论研究了泵引起的 管道内压力脉动。上述研究使用一维声学理论研 究管内压力脉动,没有关注流体机械出口管道内 的流体动力性压力脉动(即伪声)。

由上述文献可知,单独离心式流体机械的内 部流动、流体机械管道系统一维声学压力模型的 研究都已相当广泛,而离心式流体机械非定常流 动引起的管道内流体动力性压力脉动研究较少。 由文献[2]可知,单独流体机械的内部流动 CFD 仿真较成熟,但通过整体计算流体机械及管道系 统内部非定常流动求得压力脉动还比较困难,计 算规模庞大。本文针对某一离心风机下游管道的 振动噪声及内部压力脉动进行了实验研究。

1 实验台介绍

实验风机为多翼离心式风机,叶片数 Z=36, 叶轮转速 $n=2\ 600\ r/min, 风量\ Q=5.5\ m^3/min$ 。 旋转频率(RF)为 $n/60=43.3\ Hz$,叶片通过频率 (BPF)为 $Zn/60=1\ 560\ Hz$ 。风机出口经法兰连 接到边长为 100 mm 的方形横截面有机玻璃管道 内,管壁厚度为 3 mm。按水力直径的定义4A/P(A 为横截面积、P 为润湿周长),该方管的水力 直径 $D=94\ mm$ 。法兰长度为 0.5D,风机下游所 接总管长为 20.5D。风机及管道的主要尺寸见图 1。根据流量 Q 及方管截面积得到管内体积速度 为 $v_b=Q/A=10.4\ m/s$ 。

图 2 为实验台照片,其中振动加速度计使用 4394 压电式传感器,传声器为 MPA201。振动和 声学传感器连接到 OR36 24 位多通道数据记录 仪中。两个振动传感器分别安装在管道上离风机 出口 6.5D 及 14.5D 的位置。两个传声器安装在 距离风机进口及管道出口 50 cm、偏离轴线 45° 处。按风机噪声测量国家标准,传声器应放置离 进出口 1 m 的位置,考虑到噪声测量未能在消声 室中进行,本实验将传声器放在离进出口较近的 位置,以减小外界对风机噪声测量的影响。



(a)**实验风机**



(b)管道图 1 实验风机及管道

Fig.1 Test fan and duct



图 2 振动噪声及压力脉动测量实验台 Fig.2 Test rig for vibration, noise and press fluctuation measurement

为了进行管内压力脉动测量,在直管上表面 中心线以及角边线上,从距离风机出口 1D 到 20D 范围内以水力直径 D 为间距钻 ф4 mm 的 孔。考虑到风机出口附近流场较紊乱,在出口附 近的 1.5D 及 2.5D 处也设置测点。另外在风机 内部布置测点,位置见图 1 中风机上的测点标号, 距离叶轮出口 4 mm,传感器与蜗壳内壁面平齐。

使用 XTL-140M-1D 超小型压力传感器和 PXI-4220 16 位数据采集卡搭建数据采集系统。 压力传感器探头直径 2.54 mm,侧表面带 M3.5 的外螺纹。传感器带 KAA-B-1B 放大器,后置 4 个接线头,其中两线头接 12V 电源以获得供电, 另外两线头为信号输出端分别接到 PXI-4220 数 据采集卡对应接头上。在 LabVIEW 中编写数据 采集程序,用以采集及保存传感器的电压输出信 号,根据 KULITE 公司标定的传感器灵敏度,转 换得到压力脉动。采样频率设为 10.24 kHz。

2 实验结果及分析

2.1 振动噪声特性

管道振动的频谱如图 3 所示,可以看出振动 谱中与风机旋转相关的离散谱明显,离风机出口 较近的 *x*=6.5*D* 处振动幅度大于 14.5*D* 处的振 动幅度,因为离风机较近。*x*=6.5*D* 处频谱中旋 转频率振动幅度最大。频谱中除了旋转频率谐波 分量外,还存在非整数倍离散分量,这可能归因于 结构固有频率。







风机噪声频谱如图 4 所示,可以看出频谱中 离散噪声较大,在旋转频率及其谐波、叶片通过频 率上都有明显峰值。管道出口处叶片通过频率噪 声相对较大。另外还有 100 Hz、200 Hz 离散分 量,这可能与 50Hz 的交流供电有关。风机进口 和管道出口噪声时域信号去除直流分量后的均方 根值(RMS)分别为 0.127 16 Pa 和 0.100 53 Pa, 分别是参考动压的 0.2%和 0.16%。参考动压定 义为 $p_r = \rho v_b^2/2 = 63.81$ (Pa)(ρ 为流体密度)。





2.2.1 系统测量误差

在测量管道压力脉动前,先对系统测量误差 进行核对。在不启动风机的情况下,进行多次数 据采集,结果表明压力传感器的 RMS 值在1.75 Pa 左右。下文中,风机运转时的压力脉动 RMS 值在数十 Pa 的量级上,除了管道末端的 3 个测 点,压力脉动系统整体测量误差范围能控制在 5%以内。

2.2.2 压力脉动频谱特性

风机内 4 个测点的压力脉动功率谱密度如图 5 如示,其中频谱中旋转频率及其低次谐波分量 突出,叶片通过频率分量在图中也可见但不显著。 宽频压力脉动强度比离散频率小一个量级左右, 且在整个频率范围内基本保持不变,说明风机叶 轮出口附近气流扰动较大。

管道内距风机出口 x = 4D 处的压力脉动也 显示在图 5 中,以便与风机内压力脉动进行比较。 可以看出,旋转频率的压力脉动分量非常明显,与 风机内部具有相同量级;旋转频率的谐波分量也 可见。随着频率提高,宽频压力脉动衰减迅速,这 与风机内的情况不同。叶片通过频率压力脉动也



Fig.5 Power spectrum density of pressure fluctuations

有所减小,表明风机出流的高频压力脉动沿下游 管道有明显减小,这归因于气流在管道中趋于 均匀。

2.2.3 压力脉动与振动噪声的相关性分析

为了分析压力脉动与风机噪声、管道振动的 联系,对管道测点的压力脉动与噪声、振动信号的 相干函数进行预估,结果见图 6。可以看出,在旋



转频率及其谐波分量、叶片通过频率处的相干函数值基本在 0.5 以上,表明离散频率下噪声、振动 与压力脉动联系紧密。宽频振动噪声与压力脉动 的相干函数值较小,表明宽频噪声与振动所受的 影响因素较多。

2.3 风机管道内压力脉动的特性分析

2.3.1 压力脉动整体幅度的变化特性

为研究风机下游管道内压力脉动的分布特性,移动传感器测得管道内不同测点的压力脉动 数据。各个测点传感器探头伸入深度 h 分别为 7.5 mm、5.0 mm、2.5 mm 和 0(与壁面平齐)。压 力脉动减去直流分量的 RMS 值再除以参考压力 $p_r(p_r = 63.81 \text{ Pa})得到量纲一强度,频率除以旋$ 转频率进行量纲一化。

图 7 示出了不同测点的实验结果,可以看出,压力脉动最强烈的地方主要集中在距风机出 口 x=5D 的范围内,最大的脉动强度与参考动压 $p_r = \rho v_b^2/2$ 相当。对于管道中间排,最大脉动发 生在 x=2.5D 附近,对于角边排,最大压力脉动 强度在 x=1D 附近。风机出口附近流场较紊乱, 在管道入口段得到了体现。在压力脉动强度较大 的位置,传感器探头伸入管道越深压力脉动强度 越大,即内部的压力脉动强度大于壁面压力脉动 强度。距离风机出口大于 10D 以后,压力脉动值 约为参考动压 p_r 的 20%,同一测点不同深度处







的压力脉动强度很接近,且管道中间排及角边排 的压力脉动幅值及趋势也非常接近,表明 10D 以 后管道内横截面上流场已趋于均匀,进入了充分 发展段。在管道出口附近气动脉动幅度将会明显 下降,这是因为出口处气流扩散到环境中,压力将 恢复为大气压。对比管道出口噪声的声压可以看 出,充分发展段管道内压力脉动幅度(20%参考动 压)比声压幅度(0.1%~0.2%参考动压)大 2 个 数量级。

2.3.2 压力脉动频谱特性

为了进一步研究风机下游管道的压力脉动特性,本文对各测量时域信号进行 Fourier 变换以 分析其频谱特性。图 8、图 9显示了若干点处压 力脉动频谱:距离风机出口 x = 1D(管道入口 段)、距离风机出口 x = 14D(充分发展段),以及 旋转频率(RF)分量最大值所在位置。从图中可 以看出,管内压力脉动频谱特性离散频率分量不 及振动及噪声谱中丰富,频谱中主要以旋转频率 及其 3 次、5 次谐波这 3 个窄带分量突出,其中旋 转频率分量最大。与振动噪声不同,压力脉动的 叶片通过频率分量不明显。

为了进一步研究旋转频率压力脉动,图 10 显示了其幅度随距离变化情况。可以看出,旋转 频率压力脉动在距风机出口 $2D \sim 4D$ 附近达到 最大,其值可达参考动压的 25%左右,超过 5D 后 压力脉动呈下降趋势,在方管出口附近 x = 19D处已降到参考动压的 3%左右。方管出口处气流 扩散到环境中,其压力变为大气压,气流脉动幅度 将会明显下降,这可从图 10 中 x = 20D(距方管 出口 0.5D)处的脉动值看出。

3 结论

本文通过实验测量了离心风机噪声、管道振动及压力脉动,研究了离心式流体机械管道内部 压力脉动及其引发管道振动噪声特性,得到如下 结论。

(1)风机噪声及管道振动频谱中旋转频率及 其谐波分量都较明显:风机噪声、离风机较近的管 道振动频谱中旋转频率最为显著,叶片通过频率 也突出。声压脉动强度约为参考动压 ρv²_b/2 的 0.2%。

(2)风机内部压力脉动中旋转频率分量及其 低次谐波、叶片通过频率分量突出。宽频压力脉 动强度比离散频率小1个数量级左右,且在整个 频率范围内基本保持不变。管道压力脉动中,旋 转频率分量非常明显,大小与风机内部的相当。



图 8 中间排压力脉动频谱特性





图 9 角边排压力脉动频谱特性



随着频率提高,宽频压力脉动衰减迅速。离散频 率处压力脉动与风机噪声、管道振动的相干函数 值基本在 0.5 以上,表明在这些频率处压力脉动 决定噪声、振动。宽频振动噪声与压力脉动的相 干函数值较小,表明宽频振动噪声所受影响因素 较多。

(3)管道内压力脉动最强烈的地方主要集中 在距离风机出口 5D(D 为管道水力直径)的范围 内,最大脉动强度与参考动压相当。在这一段管 道,内部的压力脉动大于管壁的压力脉动。距离 风机出口 10D 以后,压力脉动值约为参考动压的 20%左右,同一测点不同深度处的压力脉动强度 很接近,表明 10D 以后管道内流场已趋于均匀。 对比风机噪声的声压,得知该段管道内压力脉动 幅度比声压幅度大 2 个数量级。

(4)管内压力脉动频谱中离散分量不及振动





噪声频谱中的丰富,旋转频率分量最为突出,其3 次、5次谐波明显,叶片通过频率分量并不显著。 旋转频率分量脉动在离风机出口2D~4D附近 达到最大,其值可达参考动压的25%左右,超过 5D 后压力脉动呈下降趋势,在方管出口附近 (19D 处)已经下降到参考动压的3%左右。

参考文献:

- [1] KANEKO S, NAKAMURA T. Flow-induced Vibrations: Classifications and Lessons from Practical Experiences[M]. London: Elsevier, 2014.
- [2] HAYASHI I, KANEKO S. Pressure Pulsations in Piping System Excited by a Centrifugal Turbomachinery Taking the Damping Characteristics into Consideration [J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 45(1): 216-234.
- [3] FAHY F,ROSSING T D. Foundations of Engineering Acoustics[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(3):1142.
- [4] 徐辰,杨爱玲,毛义军. 离心风机噪声预测方法的 进展与分析[J]. 流体机械, 2011, 39 (7): 35-40.
 XU Chen, YANG Ailing, MAO Yijun. Review and Analysis on the Prediction Method of Centrifugal Fan Noise[J]. Fluid Machinery, 2011, 39 (7): 35-40.
- [5] JIANG Y, YOSHIMURA S, IMAI R, et al. Quantitative Evaluation of Flow-induced Structural Vi-

bration and Noise in Turbomachinery by Full-scale Weakly Coupled Simulation [J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23 (4): 531-544.

- [6] JAFARZADEH B, HAJARI A, ALISHAHI M M, et al. The Flow Simulation of a Low-specific-speed High-speed Centrifugal Pump[J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35 (1): 242-249.
- [7] 张兄文,李国君,李军. 离心泵叶轮内变流量流动特 性的数值模拟[J]. 农业机械学报,2005,36(10): 62-65.

ZHANG Xiongwen, LI Guojun, LI Jun. Numerical Simulation of Flow Characteristics in Centrifugal Pump Impellers with Variant Mass Flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (10): 62–65.

[8] 蔡建程,潘杰,GUZZOMIA,等.离心泵隔舌区压 力脉动测量与分析[J].农业机械学报,2015,46 (6):92-96.

CAI Jiancheng, PAN Jie, GUZZOMI A, et al. Pressure Fluctuations around Volute Tongue of Centrifugal Pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (6): 92-96.

[9] 周佩剑,王福军,姚志峰.旋转失速条件下离心泵
 叶轮压力脉动特性研究[J].农业机械学报,2015,46 (10):56-61.
 ZHOU Peijian, WANG Fujun, YAO Zhifeng. In-

vestigation of Pressure Fluctuation in Centrifugal Pump Impeller under Rotating Stall Conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (10): 56-61.

- [10] KHALIFA A E, Al-QUTUB A M, BEN-MAN-SOUR R. Study of Pressure Fluctuations and Induced Vibration at Blade-passing Frequencies of a Double Volute Pump[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2011, 36 (7): 1333-1345.
- [11] 袁寿其,司乔瑞,薛菲,等.离心泵蜗壳内部流动 诱导噪声的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2011,29(2):93-98.
 YUAN Shouqi, SI Qiaorui, XUE Fei, et al. Numerical Calculation of Internal Flow-induced Noise in Centrifugal Pump Volute[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2):93-98.
- [12] 刘厚林,丁剑,王勇,等.基于大涡模拟的离心泵 水动力噪声数值模拟[J].机械工程学报,2013, 49(18):177-183.

LIU Houlin, DING Jian, WANG Yong, et al. Numerical Simulation of Hydrodynamic Noise in Centrifugal Pump Based on LES[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (18): 177-183.

• 1194 •

[72] 姚蔚峰,袁巨龙,江亮,等.偏心运动双平面超精 研抛圆柱面研究[J].中国机械工程,2018,29 (19):2327-2334.

> YAO Weifeng, YUAN Julong, JIANG Liang, et al. Study on Both-side Cylindrical Ultra-precision Lapping and Polishing Processes in Eccentric Rotations[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (19): 2327-2334.

- [73] YAO Weifeng, YUAN Julong, ZHOU Fenfen, et al. Trajectory Analysis and Experiments of Bothsides Cylindrical Lapping in Eccentric Rotation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88(9/12):1-11.
- [74] YUAN Julong, YAO Weifeng, ZHAO Ping, et al. Kinematics and Trajectory of Both-sides Cylindrical Lapping Process in Planetary Motion Type
 [J]. International Journal of Machine Tools &. Manufacture, 2015, 92:60-71.
- [75] JIANG Liang, YAO Weifeng, HE Yongyong, et al. AnExperimental Investigation of Double-side Processing of Cylindrical Rollers Using Chemical Mechanical Polishing Technique[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1/4):523-534.
- [76] JIANG Liang, HE Yongyong, LUO Jianbin. Chemical Mechanical Polishing of Steel Substrate Using Colloidal Silica-based Slurries [J]. Applied Surface Science, 2015, 330:487-495.
- [77] DAITO M, HASEBE T, KANAI A, et al. Study on the Development of Centerless Profile Grinding Machine for Chatter Free Crinding [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2003, 69(680):1131-1138.
- [78] ZHOU L, SHIINA T, QIU Z, et al. Research on Chemo-mechanical Grinding of Large Size Quartz Glass Substrate[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4):499-504.
- [79] 王永强. 大抛光模磁流变超光滑平面抛光技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
 WANG Yongqiang. Study on Magnetorheological Finishing Using Large Polishing Tool for Ultra smooth Flat Surface[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [80] 李敏.剪切增稠抛光方法的基础研究[D].长沙: 湖南大学,2015.

LI Min. Fundamental Research on Shear-thickening Polishing Method[D]. Changsha: Hunan University, 2015.

[81] LI Min, LYU Binghai, YUAN Julong, et al.

Shear-thickening Polishing Method [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 94:88-99.

- [82] LI Min, LYU Binghai, YUAN Julong, et al. Evolution and Equivalent Control Law of Surface Roughness in Shear-thickening Polishing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016, 108:113-126.
- [83] LI Min, HUANG Zhenrong, DONG Ting, et al. Surface Integrity of Bearing Steel Element with a New High Efficiency Shear Thickening Polishing Technique[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 313-316. (编辑 胡佳慧)

作者简介:姚蔚峰,男,1986 年生,讲师、博士。研究方向为超精 密加工技术及装备。E-mail: yao0402141028@126.com。袁巨龙 (通信作者),男,1962 年生,教授、博士研究生导师。研究方向为 超精密加工技术及装备。E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn。

(上接第 1194 页)

- [13] BODEN H, ÅBOM M. Modelling of Fluid Machines as Sources of Sound in Duct and Pipe Systems[J]. Acta Acustica(Les Ulis), 1995, 3(6): 549-560.
- [14] 徐斌,冯全科,余小玲. 压缩机复杂管路压力脉动 及管道振动研究[J]. 核动力工程,2008,29(4): 79-83.
 XU Bin, FENG Quanke, YU Xiaoling. Study on Pressure Pulsation and Piping Vibration of Complex Piping of Reciprocating Compressor[J]. Nu-

clear Power Engineering, 2008, 29 (4): 79-83. [15] 周红,刘永寿,岳珠峰. 输流管道压力脉动计算分

- 析[J]. 机械科学与技术, 2011, 30 (9): 1435-- 1438.

ZHOU Hong, LIU Yongshou, YUE Zhufeng. Calculation Analyze of Pressure Pulsation in Fluid Flowing Pipeline[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30 (9): 1435-1438.

[16] CHEONG J S. An Analytical Prediction on the Pump-induced Pressure Pulsation in a Pressurized Water Reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 1999, 27 (15): 1373-1383.

(编辑 王旻玥)

作者简介:蔡建程,男,1980年生,副教授、博士。研究方向为流 体机械内流及流动噪声。E-mail:cai_jiancheng@foxmail.com。 鄂世举(通信作者),男,1970年生,教授。研究方向为新型功能 材料应用技术及机电装备技术。E-mail:eshiju@qq.com。