doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.018

基于 V3V 的泵站进水池内附底涡动力特性研究

宋希杰[1]　刘　超[2]

(1. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

摘要: 采用体三维速度场测试系统 V3V 测量漩涡工况下立式轴流泵喇叭管下方的流场,分析了附底涡演变过程中漩涡区速度梯度分布、漩涡强度及漩涡涡动能的变化。结果表明:附底涡的发生过程是一个伴随着附底涡区速度梯度、漩涡强度及漩涡涡动能不断变化的过程。随着时间的推移,附底涡区速度梯度、漩涡强度及漩涡涡动能先增大,达到最大后保持 0.4 s, 然后迅速减小,附底涡形成发展的时间大于漩涡溃退消失的时间。在漩涡发展初期,随着距离进水池底部高度的增大,漩涡强度逐渐减小;在漩涡进入保持阶段后,附底涡满足漩涡强度守恒定理;受喇叭管内复杂环境的影响,附底涡强度从喇叭管内最先溃退消失,从上向下逐渐减小。本研究可为进水池优化设计提供理论指导。

关键词: 泵站; 进水池; 体三维速度场测试系统; 附底涡; 速度梯度; 漩涡强度

中图分类号: TV675　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0177-09　　**OSID**:

Investigation on Dynamic Characteristics of Floor-attached Vortex in Pump Sump by V3V

SONG Xijie[1]　LIU Chao[2]

(1. *Department of Energy and Power Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*
2. *College of Hydraulic Science and Engineering*, *Yangzhou University*, *Yangzhou* 225009, *China*)

Abstract: The three-dimensional velocity field measurement system V3V was used to measure the flow field under the bell mouth of vertical axial-flow pump. The velocity gradient, vortex intensity and vortex kinetic energy in the vortex region during the evolution of floor-attached vortex were analyzed. The experimental results showed that the formation process of the floor-attached vortex was accompanied by the constant changes of velocity gradient, vortex intensity and vortex kinetic energy. The velocity gradient, vortex strength and kinetic energy of vortex in the vortex region was firstly increased with time and reached the maximum, and then maintained for 0.4 s, and then decreased rapidly. The duration of the formation and development of the floor-attached vortex was longer than that of the collapse and disappearance of the vortex. The vortex intensity was changed in different stages and positions reflected the characteristics of vortices in the evolution of vortices. The intensity of the floor-attached vortex was firstly increased with time, then maintained for a period of time, and then decreased rapidly. In the initial stage of vortex development, the vortex intensity was gradually decreased with the increase of the height from the bottom of the pump sump, after the floor-attached vortex entered the maintenance stage, the floor-attached vortex satisfied the vortex intensity conservation law; affected by the complex environment in the bell, the vortex was firstly collapsed and disappeared from the impeller inlet, and the floor-attached vortex intensity was gradually decreased from up to down. The research provided theoretical guidance for the optimal design of the pump sump.

Key words: pumping station; pump sump; three-dimensional velocity field measurement system; floor-attached vortex; velocity gradient; vortex intensity

收稿日期: 2021-01-06　修回日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279173)、清华大学水沙科学水利水电工程国家重点实验室及宁夏银川水联网数字治水联合研究院联合开放研究基金项目(sklhse-2021-Iow10)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 宋希杰(1990—),男,博士后,主要从事水力机械复杂流动研究,E-mail: 1227321904@qq.com

通信作者: 刘超(1950—),男,教授,主要从事泵站工程理论和应用技术研究,E-mail: liuchao@yzu.edu.cn

0 引言

泵站进水池是供水泵或吸水管直接吸水的水工建筑物,其内部流场设计的合理性直接关系到泵站的安全和运行效率。进水池中的不良流态往往伴随着漩涡等水力现象的出现。漩涡往往是引发机组振动、气蚀和水泵效率降低的主要原因,严重时将导致泵站不能正常工作[1-3],漩涡一直是流体力学中非常重要的研究课题[4-7]。文献[8]认为漩涡是流体运动的本质。文献[9]认为漩涡为湍流的原动力,漩涡分析对深入理解流体运动非常重要,是流体力学的基础和关键。文献[10]利用 2D - PIV 技术对进水池喇叭管附近产生的漩涡进行了测试,结果显示,一些漩涡发生的位置比较固定,而另外一些漩涡发生的位置不确定,还有一些漩涡表现出间歇、双涡的特征。文献[11]研究了进水池喇叭管悬空高、后壁距等几何因素对进附底涡的影响,在喇叭管下方设计了不同消涡方案,并采用高速摄像机验证了不同消涡方案的消涡效果。文献[12]采用 3D - PIV 分析了进水池内喇叭管内流场的流动规律。文献[13]采用 PIV 激光流速仪对进水池内附底涡进行了测量,分析了喇叭管下方附底涡核心区的细部流动结构,揭示了涡核内水流圆周分速度的分布规律。文献[14]针对泵站进水池内的有害漩涡进行了数值模拟,考虑湍流模型、网格数及漩涡的测量方法,研究了 VOF 方法的气液体积分数函数的阈值和用来识别对称和反对称速度梯度张量的第 2 个不变量。

目前,研究附底涡主要有模型试验和数值模拟两种方法。模型试验方法多进行二维流场的流场测试,而实际上漩涡存在于空间三维流场;数值模拟方法虽然能够计算得到三维流场,但难以保证数值模拟结果的准确性。本文采用高精度体三维速度场测试系统 V3V,研究进水池内附底涡的运动特性,以弥补之前研究方法的不足。

1 试验装置和测试设备

1.1 轴流泵装置

试验装置如图 1 所示。受试泵为立式轴流泵,叶轮直径为 120 mm,叶顶间隙为 0.1 mm,轮毂直径为 48 mm,叶片数为 4,叶片安放角为 0°,导叶数为 7。另外还包括 PVC 管道、电磁流量计、开敞式进水池、ISW150 - 200A 型不锈钢离心泵、PVC 管道、稳压圆柱形水箱、D341 型法兰式不锈钢软密封蝶阀,测试区域为进水池内喇叭管下方。速度场测试系统采用体三维速度场测试系统(V3V 测量系统)。

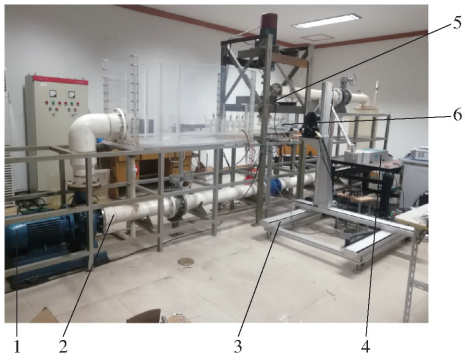

图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

1. 辅助泵 2. 循环管道 3. V3V 导轨架 4. 激光器 5. 立式轴流泵 6. 进水池

采用美国 VRI 公司生产的 VEO710 型高速摄像机进行漩涡形态的捕捉,该设备具有像素级连续可调的特点,在单帧中提供两次曝光时间,可避免图像中较亮部分被过度曝光,为苛刻条件下的清晰成像提供了保证,存储容量最高可达 2 TB,存储速率最快可达 700 MB/s,分辨率可达 2 400 像素 × 1 800 像素。

1.2 V3V 三维测速系统及标定

体三维速度场测试系统 V3V 采用独立的 3D 相机同时从 3 个不同的视角记录示踪粒子踪迹,相机内的 3 个传感器排列在一个共面三角形内,通过模式搜索算法直接从拍摄到的图像中提取粒子的三维位置,这种测量方法不同于传统的立体视觉摄影测量方法,相较于传统的 3DPIV 测量系统,在高密度粒子流速测量中,V3V 测量系统能够更可靠地实现流场测量[15]。最大测试体积可以达到 140 mm × 140 mm × 100 mm。V3V 测试系统包括 V3V - 9800 型探头、Beamtech Vlite - 500 型激光器系统、V3V - Lo 型体光源系统、60036 型同步控制器以及 3V - CAL 型标定系统、INSIGHTV3V - 4G 型图像处理系统。V3V - 9800 型探头包含 3 个可简易拆装的相机,相机为 PowerViewPlus 系列 2 560 像素 × 1 440 像素分辨率的 CMOS 型相机,全帧拍摄率为 180 f/s,采集频率为 7.25 Hz。V3V 示踪粒子采用 10090 型三氧化二铝空心玻璃球,粒径 55 μm,折射率 1.52。激光器采用镭宝光电公司生产的激光器,型号为 Vlite - 500,包括激光器发射器、激光器电源、冷却设备、导光臂。发射双腔 Nd:YAG 激光,激光输出波长 532 nm,单脉冲能量 500 mJ,重复频率 15 Hz,工作电压 220 V,脉冲宽度小于等于 8 ns,能量稳定度小于 3%。采用 LaserPulseSychronizer 610036 型时序同步器控制激光器和相机的同步性。同步器时间分辨率为 0.25 ns,通过 RS - 232 串行接口与计算

机、激光器、相机及标定系统导轨等相连接。

V3V 试验测量成功的关键要素之一就是三维标定，在实际流动测量中验证标定结果非常重要，三维标定的准确性影响着粒子的判别，不良的校准通常导致非常低的粒子匹配率[16-17]。V3V 标定系统包括标定靶盘、移动导轨及导轨控制器。在选定的测试区域安装标定靶盘。导轨和靶盘通过不锈钢八角棒连接，导轨必须与相机光轴平行，使标定靶盘位移处在相机的坐标系统中，保证测试中示踪粒子的匹配率。对标定结果进行计算，结果如图 2 所示，根据 TSI 公司技术手册要求，每幅标定图像上的粒子呈现为三角形且相似，不可出现突变及扭曲；3 条标定小孔成像校准曲线结果（校准率）要位于 0.95 ~ 1.1 之间且变化平顺无突出点；3 条标定机械校准曲线应小于 0.25 像素，且曲线平顺无明显突出点，本试验标定结果完全符合试验技术要求，达到试验可靠性标准。

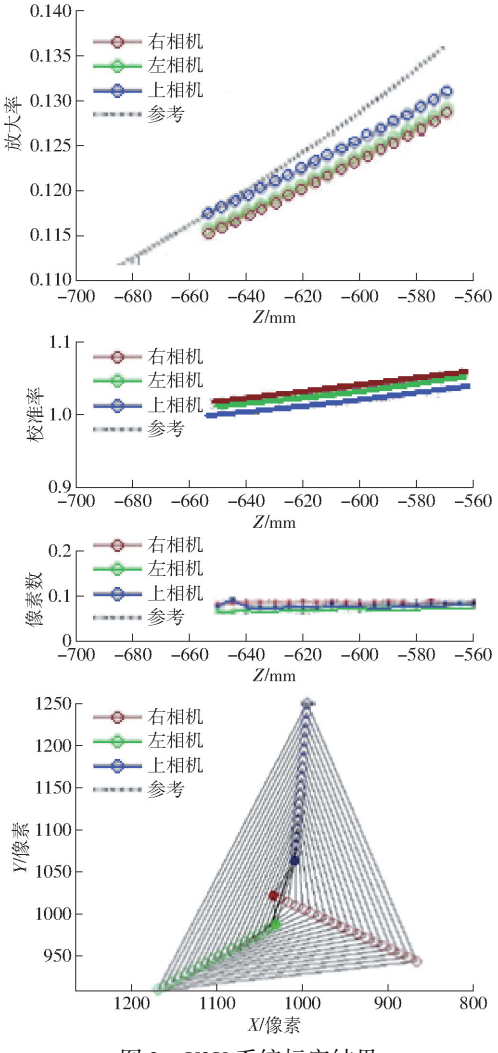

图 2　V3V 系统标定结果

Fig. 2　Results of calibration process in V3V

1.3　测试方法和测试区域

标定工作完成后，相机位置保持不变，将标定靶盘和标定导轨拆除后就可以进行喇叭管下方三维流速场的测试[18]。在采集界面 Capture 中，选择同步器模式，连续采集。为能够获得附底涡的发生频率以选择 V3V 采集频率，对多个时间时段内的附底涡发生次数进行统计。选择了 2、5、10、20 min 内漩涡发生次数的统计结果，对统计结果进行取平均值处理，最终得到在漩涡集中发生时段内，附底涡发生频率在 1.2 ~ 1.6 Hz 之间，漩涡持续时间在 0 ~ 2.1 s 之间。为充分采集漩涡完整周期内速度场数据，同时结合数据处理的方便和有效性，对漩涡每隔 0.1 s 采集一次，最终选择相机合适的采集频率 10 Hz 和采集时长 3 s。调整合适的时间步长，使得两束激光恰好位于相机两帧之间，即完成相机拍摄参数的设置。激光强度影响示踪粒子的反光效果，进而影响示踪粒子的捕捉和匹配率，因此选择合适的激光强度以保证粒子的有效捕捉和匹配。

对附底涡完整周期内的空间三维速度场进行测试，获得附底涡不同发展阶段的形态图像，在此时间段内漩涡完成了初生发展到溃灭消失的全过程。为避免环境对示踪粒子捕捉的影响，选择在夜间进行试验，并将灯光关闭，保证示踪粒子的照射光源仅为激光。图 3 为其中一个时刻示踪粒子分布识别图，根据 TSI 公司技术手册要求，在单个网格内识别粒子数为 8 ~ 10 时，测试结果能够满足要求。对采集的粒子图在标定结果上进行粒子搜索处理、三角追踪处理、粒子速度处理及速度插值处理，并根据 TSI 公司技术手册的要求对每项计算参数进行调试设置，保证计算结果精确可信。

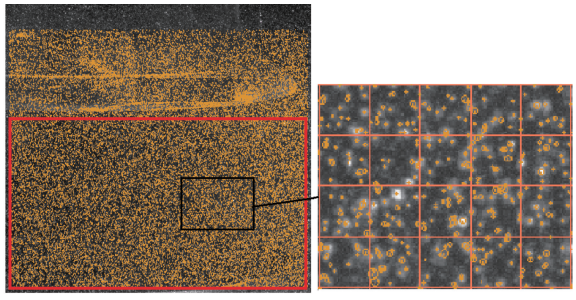

图 3　示踪粒子的识别

Fig. 3　Particle identification

试验方案流量为大流量工况 $1.2Q_d$（Q_d 为设计流量工况），叶轮转速为 2 200 r/min，进水池水深为 300 mm。根据附底涡发生位置，在喇叭管下方选择 V3V 三维速度场测试区域，如图 4 所示。通过多次观察发现附底涡移动区域集中在喇叭管内右前方，如图 5 所示。在测试区域进行 V3V 测试系统标定和三维速度场测试。断面 1－1、2－2、3－3、4－4、5－5 距离进水池底部的高度 h 分别为 13、28、43、58、73 mm，不同断面间隔为 15 mm。

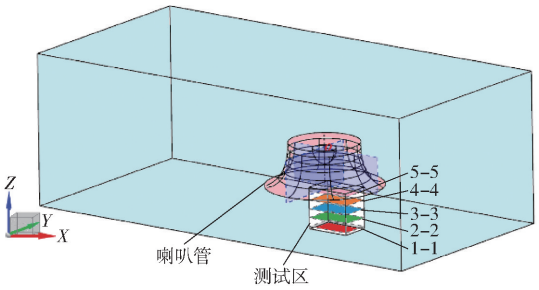

图 4 进水池 V3V 测试区域

Fig. 4 V3V test area in pump sump

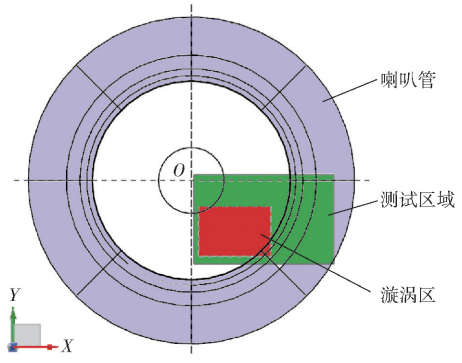

图 5 喇叭管下方附底涡活动区俯视图

Fig. 5 Top view of floor-attached vortex active area under bell

2 结果与讨论

图 6、7 分别为采用高速摄像机及 V3V 获得的附底涡。图 8 为采用 V3V 测得的测试区域三维速度场。V3V 所得附底涡粒子图与高速摄像机捕捉的附底涡形态一致。根据图 8 可知,在测试区域内 V3V 测试三维速度场比较均匀。

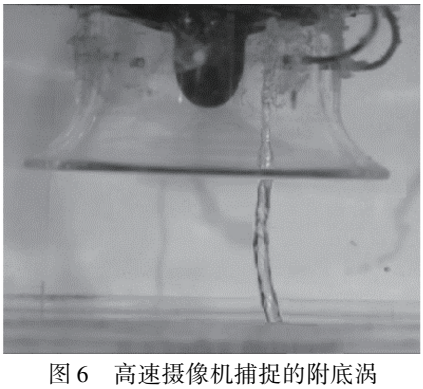

图 6 高速摄像机捕捉的附底涡

Fig. 6 Floor-attached vortex captured by high-speed camera

2.1 漩涡形态时空演化

文献[13]中提出了采用数值涡管描述附底涡形态的方法,参照这种方法对采用 V3V 测得的流速场数据进行处理,得到不同时刻的数值涡管,如图 9 所示。数值涡管不是真正的涡管,而是漩涡核心区流速场呈现的流动形态[19]。图 10 为采用高速摄像机进行同步测试捕捉的附底涡瞬时形态,数值涡管与附底涡形态相似,并且变化规律一致,说明数值涡

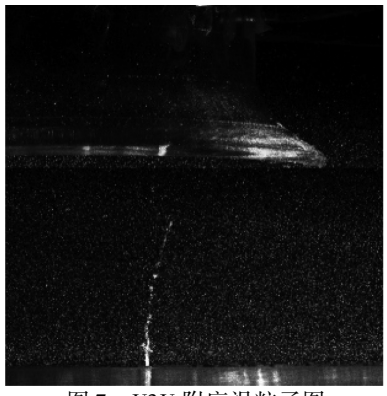

图 7 V3V 附底涡粒子图

Fig. 7 Particle image of floor-attached vortex captured by V3V

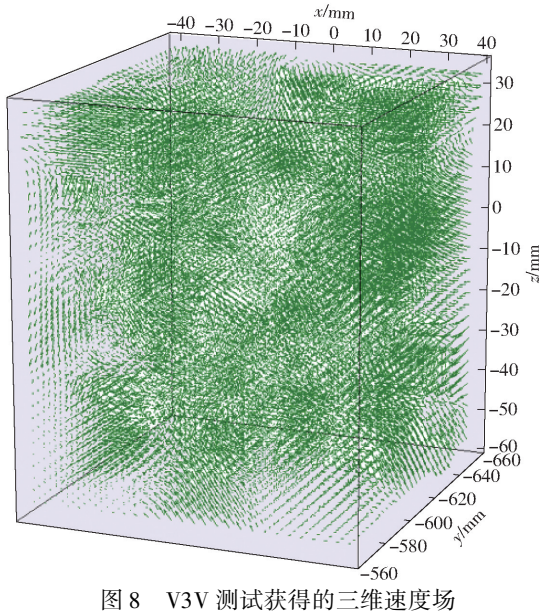

图 8 V3V 测试获得的三维速度场

Fig. 8 Three-dimensional velocity field measured by V3V

管处理方法可靠。根据不同时刻的数值涡管和不同时刻高速摄像机获得的涡管形态变化规律可看出附底涡从初生到消失的周期性变化过程。附底涡的变化过程分为初生、发展、保持、溃退、消失等 5 个阶段。0 ~ 0.1 s 为初生阶段,0.1 ~ 0.9 s 为发展阶段,0.9 ~ 1.3 s 为保持阶段,1.3 ~ 1.7 s 为溃退阶段,1.7 ~ 1.9 s 为消失阶段。漩涡源于进水池底部,在初生阶段附底涡开始显现,并向漩涡涡管形态发展;随着时间的增加,漩涡涡管逐渐增长接近叶轮进口;在保持阶段,漩涡形态达到最大,并保持 0.4 s;在溃退阶段,附底涡与叶轮叶片壁面接触,叶轮的旋转作用造成漩涡旋转能量的耗散,导致漩涡瞬时溃退;在消失阶段,漩涡旋转能量耗散后,迅速消失。为进一步分析附底涡的内在演化特性,以下对附底涡演化过程中漩涡区速度梯度、涡动能及漩涡强度的演化规律进行深度分析。

2.2 附底涡区速度梯度

为探究附底涡的发生演变机理,对漩涡发展过

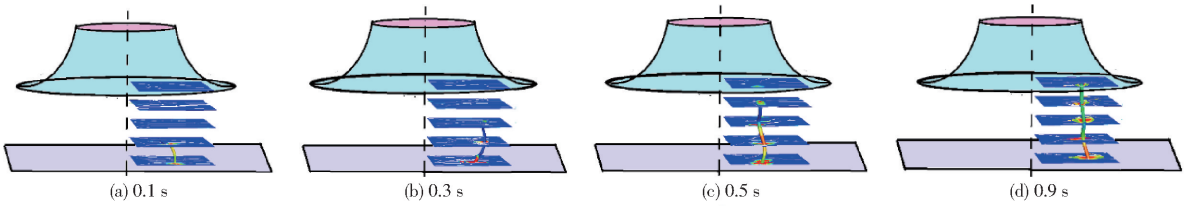

图 9　不同时刻附底涡数值涡管图

Fig. 9　Numerical vortex ropes of floor-attached vortices at different moments

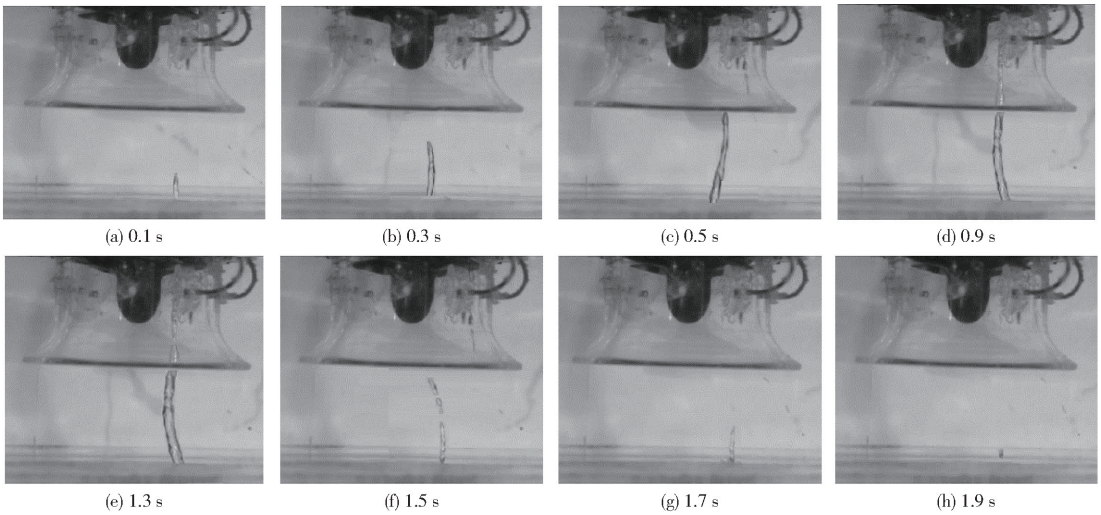

图 10　不同时刻高速摄像机捕捉的附底涡

Fig. 10　Floor-attached vortices at different moments captured by high-speed camera

程中漩涡区域速度梯度 τ 进行分析。速度梯度 τ 定义[20]为

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} \tag{1}$$

其中　$\tau_x = \mu \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}$　　$\tau_y = \mu \dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$

式中　τ_x——x 方向速度梯度

τ_y——y 方向速度梯度

μ——水流粘度系数

v——x 方向速度　　u——y 方向速度

根据式(1)对不同时刻速度场数据进行处理，得到不同时刻不同断面漩涡区的速度梯度。

2.2.1　典型断面漩涡区不同时刻的速度梯度分布

对断面 1－1、3－3、5－5 漩涡区的速度梯度进行分析。图 11a 为断面 1－1 不同时刻漩涡区速度梯度分布。断面 1－1 速度梯度分布代表了漩涡底端速度梯度的变化。在 0.1 s 时速度梯度分布差异很小。随着时间的增加，漩涡区速度梯度分布开始变化。在 0.3 s 时围绕漩涡中心开始形成大速度梯度聚集区。在 0.3 ~0.9 s 内大速度梯度聚集区范围不断增长，漩涡处于发展阶段。在 0.9 s 时大速度梯度聚集区范围达到最大，大速度梯度聚集区范围在 0.9 ~1.3 s 内基本不变，此时漩涡处于保持阶段。在 1.3 ~1.7 s 内漩涡区大速度梯度聚集区范围逐渐减小，漩涡处于溃退阶段；在 1.9 s 时大速度梯度聚集区消失，断面 1－1 速度梯度恢复均匀分布，漩涡处于消失阶段。图 11b 为断面 3－3 不同时刻漩涡区速度梯度分布。相对于断面 1－1 上速度梯度分布，断面 3－3 上速度梯度分布复杂，这是因为断面 1－1 距离进水池底部很近，在进水池底部水流流态较为稳定，因此断面 1－1 速度梯度分布较为均匀。在 0.1 s 时断面 3－3 存在不均匀的速度梯度分布，这是由于断面 3－3 与进水池底部有一定距离，此处水流流动变化大，所以速度梯度分布不均匀。0.1 s 时漩涡处于初生阶段，断面 3－3 没有形成大速度梯度聚集区。在 0.3 s 时断面 3－3 开始形成很小的速度梯度聚集区，这是因为附底涡从进水池底部逐渐向喇叭管内发展，漩涡发展到断面 3－3 需要时间。在 0.5 s 时开始形成以漩涡为中心的大速度梯度聚集区，此时漩涡处于发展阶段，并且随着时间的变化，断面 3－3 大速度梯度聚集区范围不断扩大，说

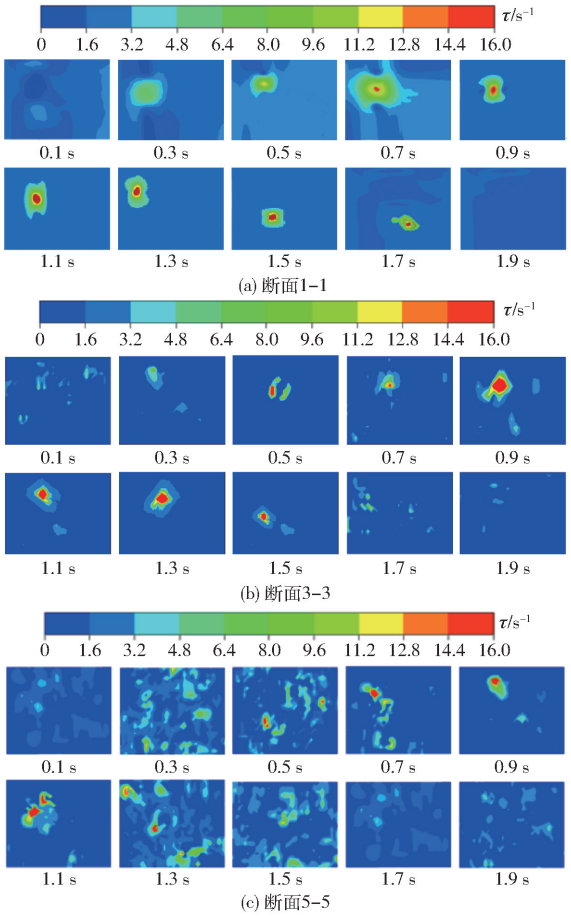

图 11 不同断面不同时刻漩涡区速度梯度分布

Fig. 11 Velocity gradient distributions of vortex zones at different moments and sections

明附底涡不断发展。在 0.9 ~ 1.3 s 内大速度梯度聚集区范围保持不变,此时漩涡处于保持阶段。断面 3 - 3 大速度梯度聚集区范围在 1.3 ~ 1.7 s 内迅速减小,在 1.7 s 时大速度梯度聚集区消失,漩涡处于溃退阶段区。在 1.9 s 时,大速度梯度聚集区彻底消失。图 11c 为断面 5 - 5 不同时刻漩涡区速度梯度分布。整体上断面 5 - 5 速度梯度分布较为散乱,这是因为 5 - 5 断面区位于喇叭管进口,此处水流流动变化大,所以断面 5 - 5 速度梯度分布相对于断面 1 - 1 和断面 3 - 3 速度梯度分布散乱。在 0.1 s 时和 0.3 s 时断面 5 - 5 没有大速度梯度聚集区,在 0.5 s 时断面 5 - 5 开始出现大速度梯度聚集区,这是因为断面 5 - 5 距离进水池底部最远,大速度梯度聚集区范围在 0.5 ~ 0.9 s 内不断变大。在 0.9 ~ 1.3 s 内漩涡区大速度梯度聚集区保持不变,此时漩涡处于保持阶段。在 1.3 s 时漩涡区大速度梯度聚集区开始变小,并且在 1.3 ~ 1.7 s 内迅速消失,漩涡处于溃退阶段。在 1.9 s 时,大速度梯度聚集区彻底消失。断面 5 - 5 大梯度聚集区范围相对于断面 1 - 1 和断面 3 - 3 出现时间晚,消失时间早,这是因为漩涡从底部向上发展需要一定时间,并且受叶轮旋转作用的影响,从喇叭管内最先溃退消失。

2.2.2 同一时刻不同断面漩涡区速度梯度分布

进一步探究附底涡的发生机理,分析相同时刻不同断面速度梯度对附底涡发生的影响。根据 2.2.1 节中 0.1 s 和 1.9 s 时各断面的速度梯度分布可知,在漩涡初生阶段和漩涡消失阶段不同断面速度梯度分布差异很小,其他阶段不同断面速度梯度分布差异很大,所以分析了漩涡发展阶段、保持阶段、溃退阶段不同断面漩涡区速度梯度分布。选取 0.4、1.2、1.8 s 时刻不同断面的速度梯度分布,分别代表了漩涡发展阶段、保持阶段、溃退阶段不同断面漩涡区速度梯度分布。

图 12a 为 0.4 s 时不同断面漩涡区速度梯度分布。在断面 1 - 1 和断面 2 - 2 有明显的大速度梯度聚集区,在断面 3 - 3 速度梯度汇集区域强度较小,在断面 4 - 4 和断面 5 - 5 没有明显的大速度梯度聚集区,此时漩涡处于发展阶段,附底涡还没有发展到断面 4 - 4 和断面 5 - 5,这说明漩涡的形成是由于较大速度梯度的存在。图 12b 为 1.2 s 时不同断面漩涡区速度梯度分布。在 1.2 s 时,不同断面均有明显的大速度梯度聚集区,此时漩涡处于在保持阶段。不同断面大速度梯度聚集区范围存在一些差异,在断面 1 - 1 速度梯度汇集区域范围最大,这是由于附底涡具有不稳定性,其涡管形态会发生变化,不同位置的涡管管径不一定相同,因此不同断面位置的速度梯度汇集区大小不等。图 12c 为 1.8 s 时不同断面漩涡区速度梯度分布。在溃退阶段,漩涡受叶轮旋转作用的影响,漩涡上端首先溃散,可以看到在断面 3 - 3、4 - 4、5 - 5 大速度梯度聚集区已经消失。

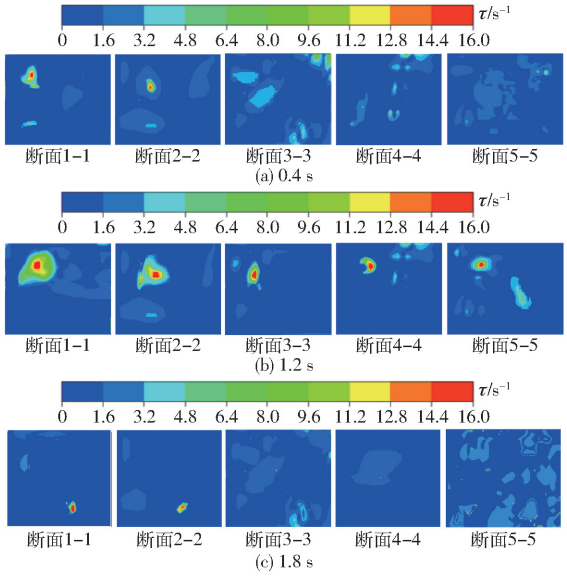

图 12 不同断面漩涡区速度梯度分布

Fig. 12 Velocity gradient distributions of vortex zones in different sections

断面 1－1、2－2 上的大速度梯度聚集区虽然还存在，但是相对于发展阶段，溃退阶段速度梯度聚集区分布范围明显减小。

通过分析典型断面漩涡区不同时刻的速度梯度分布变化和同一时刻不同断面漩涡区速度梯度分布变化可知，附底涡的形成是由大速度梯度导致，大速度梯度是漩涡形成的必要条件。

2.3　附底涡的涡动能分布

漩涡的发展必然伴随着旋转能量的积累变化[21－24]，因此为进一步研究附底涡演化过程中漩涡能量的变化规律，基于 V3V 试验测得的漩涡流速场数据，对不同时刻漩涡区涡动能分布及其平均涡动能进行分析。涡动能 E 定义为[25]

$$E = (u^2 + v^2 + w^2)/2 \tag{2}$$

式中　w——z 方向速度，m/s

选取断面 1－1 进行附底涡涡动能的变化规律分析。采用式(2)计算得到断面 1－1 不同时刻漩涡的涡动能分布和平均涡动能变化曲线。图 13 为断面 1－1 不同时刻的涡动能分布，图 14 为断面 1－1 漩涡平均涡动能随时间的变化曲线。

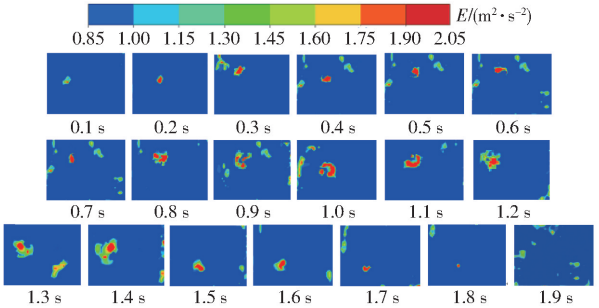

图 13　不同时刻附底涡的涡动能分布

Fig. 13　Eddy kinetic energy distributions at different moments

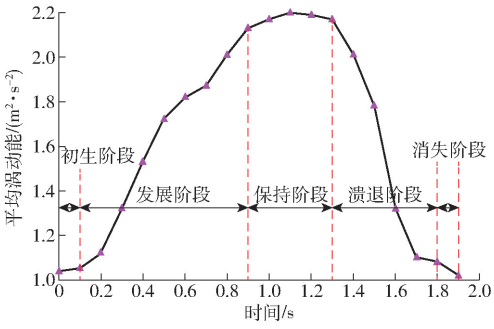

图 14　漩涡平均涡动能随时间的变化曲线

Fig. 14　Average eddy kinetic energy variation at different moments

在 0.1 s 时，附底涡的大涡动能聚集区开始呈现，并且根据图 9 和图 10 可知，此时附底涡涡管也刚开始显现，漩涡处于初生阶段；在 0.1 s 后，漩涡进入发展阶段，随着进水漩涡的发展大涡动能聚集区不断扩大；0.9 ~ 1.3 s 之间大涡动能聚集区范围达到最大，漩涡处于保持阶段；在 1.3 s 后漩涡进入溃退阶段，大涡动能聚集区范围迅速减小；在 1.9 s 时大涡动能聚集区消失，漩涡处于消失阶段。根据图 14 可以得到附底涡演化过程中能量分布的变化规律，涡动能聚集区在漩涡初生阶段呈现为一个点，随着时间增加漩涡进入发展阶段，漩涡涡动能聚集区慢慢扩大；然后漩涡进入保持阶段，漩涡涡动能聚集区保持 0.4 s 基本不变；随后漩涡涡动能聚集区迅速溃退消失。附底涡的涡动能分布变化规律与试验现场附底涡涡管变化规律一致。

由图 14 可知，在初生阶段附底涡涡动能增长幅度缓慢，平均涡动能在 1.02 ~ 1.03 m^2/s^2 之间；在发展阶段附底涡涡动能随时间增长幅度加快；在保持阶段附底涡涡动能达到最大，平均涡动能在 2.15 ~ 2.19 m^2/s^2 之间；在溃退阶段漩涡涡动能迅速减小；在消失阶段附底涡的涡动能进一步减小。漩涡演化经历的涡动能增大–发展–减小的过程是一个涡动能聚集–保持–耗散的过程。漩涡溃退的时间明显小于漩涡形成发展的时间，这说明在漩涡初生–发展阶段漩涡旋转能量的积累需要相对较长时间，而漩涡旋转能量的耗散时间却很短，表明漩涡瞬间破灭，极不稳定，附底涡一旦接触到旋转的叶轮，就会导致漩涡迅速溃退消失。

2.4　漩涡强度变化

漩涡强度体现了漩涡本身的特性，分析附底涡强度的变化规律有助于了解漩涡的特性，因此，对于不同阶段以及不同位置的附底涡强度的分析是很必要的。根据流体动力学中漩涡强度 I 计算公式对试验所得的流速场数据进行处理。漩涡强度 I 计算公式[26]为

$$I = \iint_s \boldsymbol{\Omega} \mathrm{d}s \tag{3}$$

其中

$$\boldsymbol{\Omega} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)\boldsymbol{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right)\boldsymbol{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial zy}\right)\boldsymbol{k} \tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$——x、y、z 方向的单位矢量

$\boldsymbol{\Omega}$——附底涡涡量　　s——单位面积

2.4.1　典型断面上不同时刻的漩涡强度

图 15 为不同断面漩涡强度随时间的变化曲线。整体上，不同断面的漩涡强度随时间变化先增大，漩涡强度达到最大后，漩涡强度保持 0.4 s，然后当漩涡与叶轮叶片表面接触时，叶轮的旋转作用破坏了附底涡的保持状态，附底涡强度会迅速减小，附底涡溃退消失。根据图 15 可知，在漩涡初生阶段，由于漩涡涡动能增长缓慢，导致不同断面漩涡强度增长缓慢，在 0.001 m^2/s 以下。在发展阶段，随着漩涡

旋转能量的积累,附底涡强度增长速度明显提高,在0.9 s时漩涡强度达到0.011 9 m^2/s。在0.9~1.3 s之间漩涡为保持阶段,不同断面的漩涡强度保持在0.012 1~0.012 4 m^2/s之间。在1.3~1.8 s漩涡强度迅速减小,漩涡处于溃退阶段。在1.8~1.9 s内漩涡强度逐渐减至为0 m^2/s。

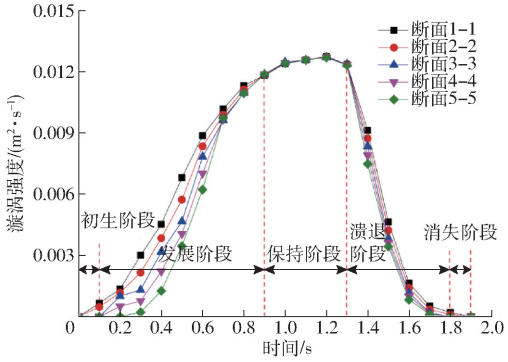

图15 不同断面漩涡强度随时间的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of vortex intensities at different sections with time

2.4.2 相同时刻不同高度的附底涡强度

为能够充分探究附底涡强度随距离进水池底部不同高度的变化规律,分析了0.1、0.4、1.2、1.4、1.8 s的不同高度位置的附底涡强度。漩涡分别处于初生阶段、发展阶段、保持阶段、溃退阶段、消失阶段。

图16为相同时刻不同h附底涡强度,在0.1 s时漩涡处于初生阶段,此时漩涡强度很小,断面1-1和断面2-2处漩涡强度为0.000 96 m^2/s和0.000 48 m^2/s,其他断面漩涡强度为0 m^2/s,这是由于在初生阶段,漩涡刚刚显现,还没有发展到断面3-3、4-4、5-5。在0.4 s时漩涡处于发展形成阶段,随距离进水池底部高度的增加,漩涡强度逐渐减小,在断面1-1处漩涡强度最大,为0.004 5 m^2/s,断面5-5位置的附底涡强度最小,为0.001 26 m^2/s,这是由于在漩涡发展阶段,漩涡向上部发展,漩涡旋转能量自下向上逐步积累,底部漩涡强度大于上部漩涡强度。在1.2 s时漩涡处于保持阶段,不同断面漩涡强度在0.012 72~0.012 74 m^2/s之间,差值很小,基本满足漩涡强度守恒定理。这说明在保持阶段漩涡已经处于稳定形态。在1.4 s时漩涡处于溃退阶段,断面1-1处漩涡强度为0.009 2 m^2/s,随高度的增加,漩涡强度逐渐减小,这是由于叶轮的旋转作用导致漩涡从喇叭管内叶轮附近开始自上向下溃退。在1.8 s时,漩涡处于消失阶段,在不同断面漩涡强度均很小,在断面4-4和断面5-5漩涡强度接近0 m^2/s。

通过对附底涡演化过程中涡管形态、漩涡区速度梯度的时空演化特性、漩涡涡动能和漩涡强度进行分析可以得到附底漩涡的内在演化规律,轴流泵进水池喇叭管下方附底涡起于底板的奇点区,在该处主流急剧改变流动方向并脱离底板产生漩涡即漩涡脱落,脱离的持续导致漩涡不断产生,附底涡产生的根本原因是漩涡区速度梯度产生差异,速度梯度变化经历了积累、逐渐增大、保持、迅速减小直至消失的过程,使得附底涡演化过程分为初生、发展、保持、溃退、消失5个阶段,漩涡演化过程中伴随着能量的变化,体现在漩涡强度的变化。

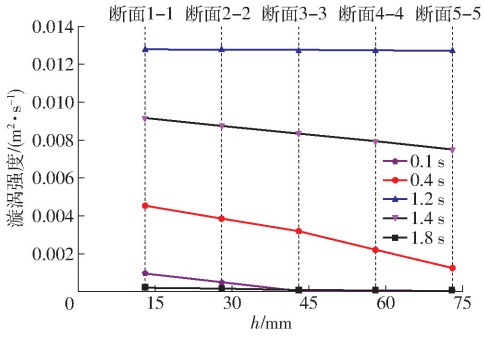

图16 相同时刻不同h的附底涡强度

Fig. 16 Curves of floor-attached vortex intensities at different heights at the same time

3 结论

(1)基于附底涡的演化机理,采用体三维速度场测试系统V3V对进水池内喇叭管下方漩涡演化过程中的流速场进行测量。对漩涡区速度梯度分布、漩涡涡动能、漩涡强度进行分析,得到附底涡的运动特性。通过分析漩涡核心区流动得到附底涡的变化过程,揭示了初生、发展、保持、溃退、消失5个阶段的时空演化规律。

(2)大速度梯度是漩涡发生的必要条件。在初生阶段,漩涡大速度梯度聚集区开始显现;在发展阶段,漩涡大速度梯度聚集区范围随时间不断扩大;在保持阶段,漩涡大速度梯度聚集区分布范围最大;在溃退阶段,大速度梯度聚集区范围迅速减小;在消失阶段,漩涡大速度梯度聚集区消失。

(3)通过分析涡动能得到漩涡演化过程中能量的变化规律。附底涡的涡动能随时间变化呈现增大、保持、减少的变化规律,漩涡演化经历的涡动能变化过程是一个漩涡能量聚集、保持、耗散的过程。漩涡形成发展时间大于漩涡溃退消失的时间。

(4)不同阶段及不同位置的漩涡强度变化反映了漩涡演化过程中漩涡的特性。附底涡强度随时间推移先增大,然后保持一段时间,最后迅速减小。随着漩涡强度的增加,附底涡由进水池底部向上发展,不断增长;到达叶轮进口附近,漩涡强度达到最大,

并保持一段时间；之后漩涡强度突然减弱，漩涡瞬间消失。漩涡强度达到最大时，漩涡形成一个短暂的稳定阶段，不同断面漩涡强度基本相等，满足漩涡强度守恒定理。

参 考 文 献

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京：中国水利水电出版社，2009.

[2] 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(6)：49－59.
LIU Chao. Researches and developments of axial-flow pump system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(6)：49－59. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150608&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.008.(in Chinese)

[3] 丛国辉，王福军. 湍流模型在泵站进水池漩涡模拟中的适用性研究[J]. 农业工程学报，2008，24(6)：31－35.
CONG Guohui，WANG Fujun. Applicability of turbulence models in numerical simulation of vortex flow in pump sump[J]. Transactions of the CSAE，2008，24(6)：31－35.(in Chinese)

[4] INHWAN P，KIM H J，SEONG H，et al. Experimental studies on surface vortex mitigation using the floating anti-vortex device in sump pumps[J]. Water，2018，10(12)：441－449.

[5] 刘超，成立，周济人，等. 水泵站开敞进水池三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报，2002，33(6)：53－55.
LIU Chao，CHENG Li，ZHOU Jiren，et al. Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow for opening pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2002，33(6)：53－55.(in Chinese)

[6] 刘树红，吴玉林，左志钢. 应用流体力学[M]. 2 版. 北京：清华大学出版社，2012.

[7] 黄欢明，高红，沈枫，等. 轴流泵内流场的数值模拟与试验[J]. 农业机械学报，2008，39(8)：66－69.
HUANG Huanming，GAO Hong，SHEN Feng，et al. Numerical simulation and experimental validation of the flow field inaxial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2008，39(8)：66－69.(in Chinese)

[8] HUBERT C. Applied hydrodynamics[M]. London：CRC Press，2013.

[9] JENS K，GEORG M，ROBERT M. PIV measurements of air-core intake vortices[J]. Flow Measurement and Instrumentation，2014，40(14)：74－81.

[10] RAJENDRAN V P，PATEL V C. Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2000，126(5)：322－334.

[11] 杨帆，刘超，汤方平，等. 箱涵式进水流道的立式轴流泵装置水动力特性分析[J]. 农业工程学报，2014，30(4)：62－69.
YANG Fan，LIU Chao，TANG Fangping，et al. Analysis of hydraulic performance for vertical axial-flow pumping system with cube-type inlet passage[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(4)：62－69.(in Chinese)

[12] 李大亮，刘超，汤方平. 开敞式进水池内部流动的 3DPIV 试验研究[J]. 中国农村水利水电，2012(4)：102－106.

[13] 刘超，梁豪杰，金燕，等. 立式轴流泵进水流场 PIV 测量[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(8)：33－41.
LIU Chao，LIANG Haojie，JIN Yan，et al. PIV measurements of intake flow field in axial-flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(8)：33－41. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150806&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.006.(in Chinese)

[14] SHINICHIRO Y，YAMASAKI R，TOSHINORI K，et al. Numerical study of air-entraining and submerged vortices in a pump sump[C]//Kyoto，29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems，2018.

[15] HITE J E，MIH W C. Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes[J]. Journal of hydraulic Engineering，ASCE，1994，120(3)：284－297.

[16] HIRT C W，NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary[J]. Journal of Computational Physics，1981，39(1)：201－225.

[17] CONSTANTINESCU G S，PATEL V C. Role of turbulence model in prediction of pump-bay vortices[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2000，126(5)：387－391.

[18] YOSHINOBU Y，CHISACHI K，TAKAHIDE N，et al. Suction vortices in a pump sump-their origin，formation，and dynamics[J]. Journal of Fluids Engineering，ASME，2020，142(2)：235－239.

[19] NORIZAN H，REDA E，HARUN Z. Enhancement of vorticity reduction by floor splitter in pump sump to improve pump efficiency[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments，2018，26(11)：28－37.

[20] CONSTANTINESCU G S，PATEL V C. A numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices[J]. Journal of Hydraulic Engineering，1998，124(2)：123－134.

[21] 王福军，张玲，张志民，等. 轴流泵不稳定流场的压力脉动特性研究[J]. 水利学报，2007，38(8)：1003－1009.
WANG Fujun，ZHANG Ling，ZHANG Zhimin，et al. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in axial-flow pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2007，38(8)：1003－1009.(in Chinese)

[22] AMIRI S，MAHDI Z，AMIR R. Surface vortex prevention at power intakes by horizontal plates[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers：Water Management，2011，164(4)：193－200.

[23] MATAHEL A，TATSUAKI N. Experimental study of 3D pump-intake flows with and without cross flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2001，127(10)：825－834.

[24] 张金凤，蔡海坤，陈圣波，等. 长短叶片尾缘形状对离心泵性能与动静干涉的影响[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(4)：122－130，190.
ZHANG Jinfeng，CAI Haikun，CHEN Shengbo，et al. Influence of long and short blades trailing edge shape onperformance and rotor-stator interaction in centrifugal pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：122－130，190. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200406&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.014.(in Chinese)

[25] YONG G L. Unstructured grid arbitrarily shaped element method for fluid flow simulation[J]. AIAA Journal，2000，38(12)：2246－2252.

[26] HUNT J C，WRAY A A，MOIN P. Eddies，streams，and convergence zones in turbulent flow[J]. Center for Turbulence Research Proceeding of the Summer Program，1988，18(2)：193－207.