

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.011

# 基于高速摄影技术的泵进水流道消涡试验分析\*

刘超<sup>1</sup> 杨帆<sup>1</sup> 赵军<sup>2</sup>

(1.扬州大学水利与能源动力工程学院,扬州 225127; 2.安徽省安兆工程技术咨询服务有限公司,蚌埠 233000)

**摘要:**针对箱涵式进水流道底部易产生涡带的问题,根据涡管强度守恒定理提出了4种新型的消涡装置,为验证4种消涡装置的有效性,采用高速摄影技术分别对设置4种消涡装置的泵装置吸水喇叭管进口处的流态进行了摄影,成功捕捉到不同工况时涡带的生成,分析了有无消涡装置及2种新型消涡装置对泵装置能量性能的影响,分析表明,采用新型消涡装置不仅能消除箱涵式进水流道底部的涡带,还可改善喇叭管内部流态,提高泵装置的能量性能。

**关键词:**泵装置 流道 涡带 试验 高速摄影

**中图分类号:** TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0061-05

## 引言

水泵吸入口处的涡带会对泵装置的运行造成很大的影响,如降低泵装置的效率;产生振动和噪声;加速轴承的磨损以及加速叶片的空蚀等。对涡带的研究采用纯理论分析并不可行,因其包含了大量不确定因素和假设条件。人们对流道内部涡带的研究最主要的目的是解决实际工程问题,因此特别强调和依靠包括 CFD 模拟在内的,以试验为基础的研究方法。

从漩涡发生的位置加以区分,可将漩涡分为附底涡、附壁涡和水面涡3种类型。对于水面涡的研究,国内外学者开展了不少的研究。Jong-Woong Choi 等<sup>[1]</sup>采用物理模型试验和数值计算研究分析了开敞式泵站多台机组运行时喇叭管下方涡带的情况及喇叭管进口处流速分布均匀性。Li Haifeng 等<sup>[2]</sup>采用 PIV 通过物理模型试验研究分析了开敞式进水池自由表面漩涡的产生机理。Chen Yunliang 等<sup>[3]</sup>采用物理模型试验方法结合理论分析对自由表面漩涡的产生机理进行了研究。Echávez 等<sup>[4]</sup>采用物理模型试验的方法研究分析了自由表面立轴漩涡的产生机理。对附底涡的研究,刘超等<sup>[5-6]</sup>采用理论分析及 CFD 计算,针对箱涵双向流道内附底涡的产生,提出了两套消涡措施即导流墩及消涡防涡栅,此两项技术已在工程中成功地得到推广应用。针对进水结构内部消涡措施的研究,国内还有不少

学者也已开展了相关研究<sup>[7-14]</sup>,但研究内容均限于对现有消涡装置的数值和物理模型试验研究,且均未提出具有实际工程应用价值的新型消涡装置。本文根据涡管强度守恒定理,提出4种新型消涡装置并采用物理模型的方法对4种新型消涡装置的消涡有效性进行高速摄影拍摄,并基于采集的试验数据分析各消涡装置对泵装置水力性能的影响,以期新型消涡装置的工程推广应用奠定试验基础。

## 1 试验装置的建立

为了研究箱涵式进水流道底部涡带的消涡装置,建立了一套可视化泵装置试验台,泵装置试验台如图 1a 所示,整个试验台由开敞式进水池、受测泵装置、稳压圆柱形水箱、管道及各种测试仪器组成。流量测量采用 LDG-SDN150 型电磁流量计,扬程测量采用 EJA 型智能压差变送器,扭矩及转速的测量采用 JCO 型转速传感器,各传感器输出端口均与 PowerLink JW-3 型显示仪相连,对各端口进行编程后实现泵装置各工况的自动数据采集。为了便于高速摄影机的拍摄,采用亚克力材料制作了箱涵式进水流道,试验研究的泵装置进水流道如图 1b 所示,研究的区域如图 1c 所示。

试验高速摄影机采用加拿大 Mega Speed 公司的 MS50K,传感器为 Mega Speed 型黑白 CMOS 传感器,最大分辨率 1 280 × 1 024,像素尺寸 12 μm × 12 μm。

收稿日期:2013-04-27 修回日期:2013-05-07

\* 国家自然科学基金资助项目(51279173)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2009138)和江苏省重点实验室开放课题资助项目(K11018)

作者简介:刘超,教授,博士生导师,主要从事水泵及泵装置理论与工程应用研究,E-mail:liuchao@yzu.edu.cn

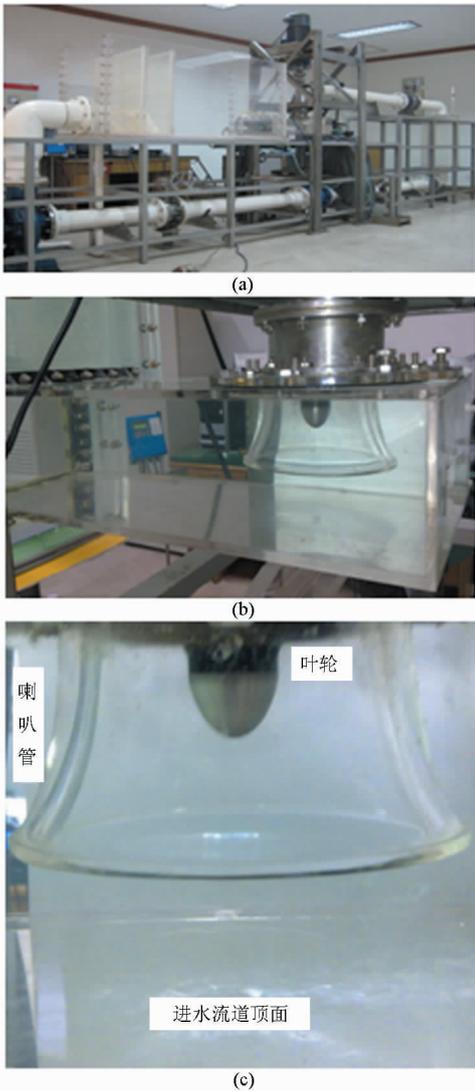


图1 试验装置

Fig.1 Test-rig

(a) 泵装置试验台 (b) 受测装置 (c) 研究区域

## 2 试验方法及方案

研究箱涵式进水流道底附涡带的生成及其对泵装置性能的影响,采用如表1所示的试验方案。试验转速为2400 r/min,从小流量到大流量测试各工况点的性能参数,泵装置效率 $\eta$ 计算公式为

$$\eta = \frac{30\rho gQH}{n(M - M')} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\eta$ ——泵装置效率  $\rho$ ——液体的密度  
 $g$ ——重力加速度  $Q$ ——泵装置流量  
 $H$ ——泵装置扬程  $n$ ——叶轮转速  
 $M$ ——模型泵装置输入扭矩  
 $M'$ ——模型泵装置机械损失扭矩

针对箱涵式进水流道底部易产生涡带的特点,根据涡管强度守恒定理设计了4种消涡装置,如图2所示,各消涡装置的详细说明见表1所示。

不同方案进行泵装置模型试验仅改变喇叭管下

表1 试验方案  
 Tab.1 Test scheme

方案序号	有无消涡措施	消涡措施
1	无	无消涡措施
2	有	光滑表面消涡锥(如图2a所示)
3	有	光滑表面消涡锥+16根矩形消涡条(如图2b所示)
4	有	光滑表面消涡锥+16根锯齿形消涡条(如图2c所示)
5	有	光滑表面消涡锥+8根锯齿形消涡条(如图2d所示)

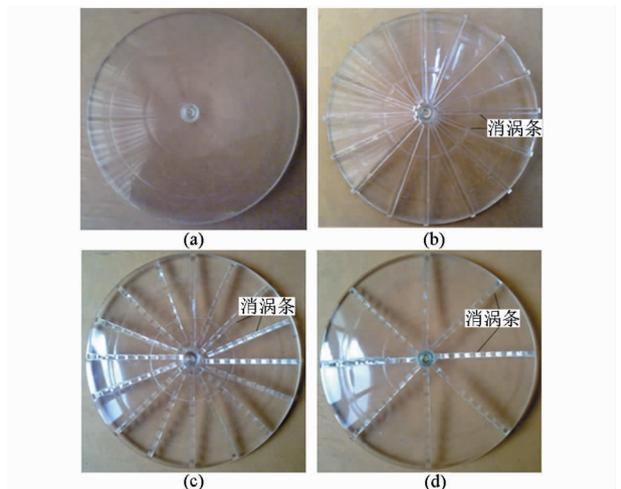


图2 不同消涡装置的物理模型

Fig.2 Different physical models of vortex-elimination

(a) 方案2 (b) 方案3 (c) 方案4 (d) 方案5

方的消涡装置,其他条件均不改变。在进行泵装置各工况的能量性能试验数据采集时,采用高速摄影机对喇叭管底部的涡带进行摄影,本试验通过物理模型试验验证各消涡措施的有效性及其对泵装置水力性能的影响。

## 3 试验结果分析

### 3.1 试验台测量的不确定度分析

试验不确定度按其性质可划分为系统不确定度和随机不确定度<sup>[15]</sup>,泵装置模型效率的系统不确定度计算公式为

$$E_s = \pm \sqrt{E_{Q,s}^2 + E_{H,s}^2 + E_{n,s}^2 + E_{M,s}^2} \quad (2)$$

式中  $E_{Q,s}$ ——流量测量系统不确定度,其值为 $\pm 0.3\%$

$E_{H,s}$ ——扬程测量系统不确定度,其值为 $\pm 0.075\%$

$E_{n,s}$ ——转速测量系统不确定度,其值为 $\pm 0.05\%$

$E_{M,s}$ ——扭矩测量系统不确定度,其值为 $\pm 0.2\%$

试验台效率的随机不确定度计算为

$$E_r = \pm \sqrt{E_{Q,r}^2 + E_{H,r}^2 + E_{n,r}^2 + E_{M,r}^2} \quad (3)$$

式中  $E_{Q,r}$ ——流量测量随机不确定度

$E_{H,r}$ ——扬程测量随机不确定度

$E_{n,r}$ ——转速测量随机不确定度

$E_{M,r}$ ——扭矩测量随机不确定度

效率试验的综合不确定度  $E_\eta$  由系统不确定度和随机不确定度平方和根合成,计算公式为

$$E_\eta = \pm \sqrt{E_s^2 + E_r^2} \quad (4)$$

在方案4进行泵装置能量试验时,选取泵装置在某一工况下运行,实测一组流量、扬程及转速转矩值,计算试验台效率的随机不确定度(限于篇幅,不给出具体测试数据),并计算综合不确定度

$$E_\eta = \pm \sqrt{E_s^2 + E_r^2} = \pm \sqrt{0.372^2 + 0.354^2} = \pm 0.00514$$

### 3.2 各消涡装置的有效性验证

漩涡的形成主要是由边界几何形状突变、流动的不对称性以及流体绕流障碍物而散发出的漩涡等单独或联合作用的结果。环量是涡场强度与涡场(不可压缩流体积流量的对应物)的乘积,环量沿涡管保持常数。现实中的漩涡最明显特点是其运动的非稳定性,因而对流动边界条件十分敏感。漩涡的运动服从N-S方程,其时空变化剧烈,迁移加速度和当地加速度对其发展均有确定的贡献。由此可知,涡强较大的漩涡生成的决定性条件是漩涡在流动过程中旋转能量持续不断地积累,它需要适宜的空间才能产生,它需要足够的时间才能发展增强,二者不可或缺。

从水泵进口水流流动形态可知,水泵进口下方的涡带始于泵装置进水流道底板终于叶轮。针对该特点,从破除附底涡的初生基础,促进入口水流区域内水流环量无法积聚,丧失产生较大漩涡条件出发,达到消除附底涡和调整喇叭管内部水流的目的,减小内部压力波动,提出4种不同的消涡装置,为验证各消涡装置的有效性,分别进行了相关的可视化试验。各工况时方案1进水流道均阵发性出现附底涡,图3给出了3个特征工况( $Q = 16.5、21.5$ 和 $34.0 \text{ L/s}$ )附底涡的高速摄影图片,从图3可知附底涡出现的相对位置基本保持不变。

为了消除附底涡,采取了4种不同方案的消涡措施,如表1所示。采用光滑表面消涡锥并不能消除附底涡,测试工况范围内,消涡锥表面均出现涡带。图4b仅给出了大流量 $Q = 32.5 \text{ L/s}$ 时的附底涡图,由图4b可知,附底涡起于消涡锥的表面,进而影响了泵装置的水力性能。在方案2基础上,添加16根消涡条以破坏涡带生成条件,通过全工况试验

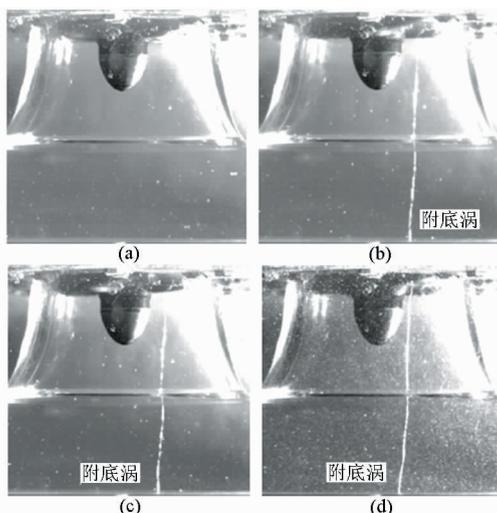


图3 3个不同工况的附底涡(方案1)

Fig.3 Bottom-vortex under three operating conditions (Test scheme 1)

(a) 测试开始图 (b)  $Q = 16.5 \text{ L/s}$   
(c)  $Q = 21.5 \text{ L/s}$  (d)  $Q = 34.0 \text{ L/s}$

高速摄影机拍摄可知,流量 $Q$ 在 $15.0 \sim 32.5 \text{ L/s}$ 范围内均未出现附底涡,在大流量工况 $Q = 33.0 \text{ L/s}$ 时,消涡锥的表面再次出现了细小的涡带,如图5b所示,附底涡带的强度均弱于方案2,也表明了方案3的消涡措施取得了进一步的消涡效果。

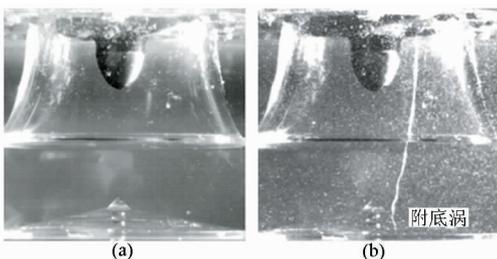


图4 方案2附底涡

Fig.4 Test scheme 2

(a) 测试开始图 (b)  $Q = 32.5 \text{ L/s}$

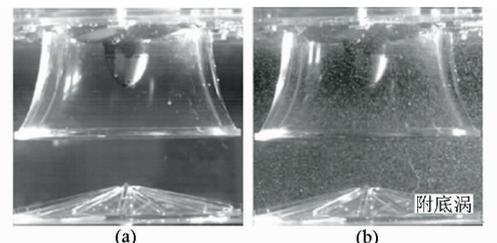


图5 方案3附底涡

Fig.5 Test scheme 3

(a) 测试开始图 (b)  $Q = 33.0 \text{ L/s}$

在方案3的基础上,对消涡条进行了改进,进一步破坏涡带发生的初始条件,将矩形消涡条更改为具有锯齿状的消涡条,消涡条的数量仍为16根,该方案如图6所示,通过对泵装置流场的试验观察,各工况均未见附底涡的出现,表明了该消涡措施的有效

效性。在方案4的基础上,减少锯齿状消涡条的数量,将其减少为8根,图7给出了大流量工况  $Q = 32.5 \text{ L/s}$  时的高速摄影图片,由图7可知,该工况时未见附底涡的存在,该消涡措施与方案4可取得相同的消涡效果,但材料却得到了节省,具有节省成本的经济价值。

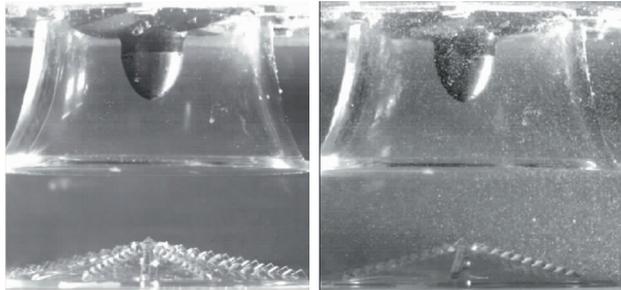


图6 方案4附底涡  
Fig.6 Test scheme 4

图7 方案5附底涡  
Fig.7 Test scheme 5

### 3.3 消涡装置对泵装置能量性能的影响

为进一步分析消涡措施对泵装置能量性能的影响,首先分析了无、有导水锥对泵装置能量性能的影响,即方案1和方案2的泵装置能量性能比较,两方案的泵装置性能曲线如图8所示。

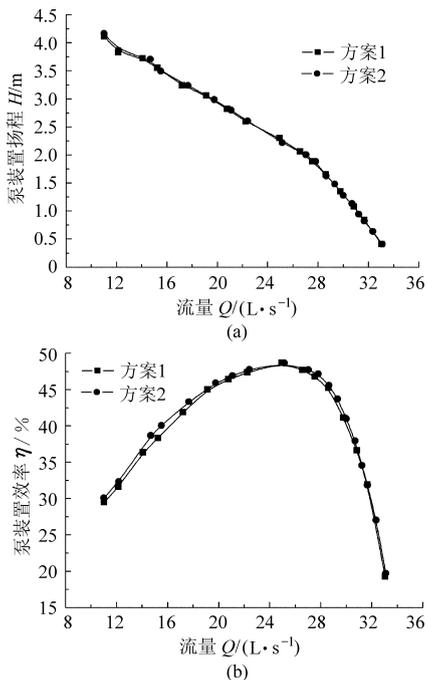


图8 方案1与方案2的泵装置性能曲线  
Fig.8 Performance curves of pump system  
(Test scheme 1 and 2)

(a) 流量-扬程曲线 (b) 流量-效率曲线

两方案的流量-扬程曲线差别并不明显,方案2的扬程曲线略高于方案1,流量  $Q$  在  $11 \sim 15 \text{ L/s}$  范围内时,方案2的流量-扬程曲线高于方案1较为明显。方案2的泵装置效率明显高于方案1,但在最优工况 ( $24 \sim 26 \text{ L/s}$ ) 范围内和大流量工况 ( $Q >$

$31 \text{ L/s}$ ) 时,方案2的泵装置效率与方案1的差别很小,仅为  $0.01\%$  左右。从两方案的泵装置性能曲线可知,采用光滑消涡锥虽不能消除附底涡带,对于调整喇叭口内部流态起到了积极作用。

通过上述的试验分析,可知方案4与方案5均可取得有效的消涡效果,两方案泵装置的能量性能曲线如图9所示。两方案的流量-扬程曲线的差异较小,但流量-效率曲线差异性较为明显,流量  $Q$  在试验工况范围内,方案4的泵装置效率高于方案5,效率的增值随着流量的增大先增大而后减小,主要因大流量和小流量工况时,喇叭管内部流态相对紊乱,消涡装置对其内部流态影响较低。

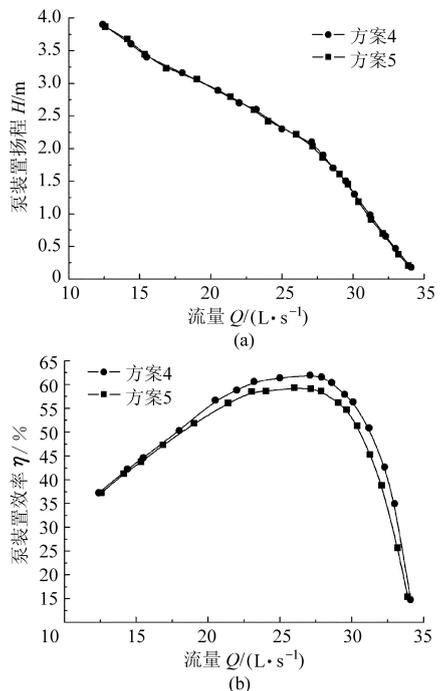


图9 方案4与方案5的泵装置性能曲线  
Fig.9 Performance curves of pump system  
(Test scheme 4 and 5)

(a) 流量-扬程曲线 (b) 流量-效率曲线

## 4 结论

(1) 箱涵式进水流道的泵装置在大流量工况有附底涡带产生,同时诱发水力振动,进而加剧叶轮的空化,降低水泵的效率,对泵装置机组造成严重危害。首次采用高速摄影技术捕捉到箱涵式进水流道附底涡发生发展的过程以及常规观测方法所不及的细微漩涡结构。据此提出4种消涡装置,研究分析完全消除进水流道内附底涡的问题。

(2) 在设置光滑消涡锥的情况下,泵装置运行的各工况附底涡并未被完全消除,但减小了漩涡的强度,对喇叭口内部流态的调整起到了积极作用,经泵装置能量性能测试表明,设置光滑消涡锥后泵装

置的能量性能有所提高。

(3)高速摄影捕捉到采用矩形消涡条的消涡装置在大流量工况时该消涡装置表面产生了细小涡带,表明了该消涡措施并不能全工况消除附底涡;采用锯齿形消涡条的消涡装置在各个工况时均未捕捉

到涡带,表明采用锯齿形消涡条的消涡装置可消除全工况条件下流道底部的附底涡;泵装置性能测试表明采用16条锯齿形消涡条的消涡装置不仅能消除附底涡还可较大幅度提高泵装置的水力性能,可满足实际工程的需要,具有直接的推广应用价值。

#### 参 考 文 献

- 1 Choi Jong-Woong, Choi Young-Do, Kim Chang-Goo, et al. Flow uniformity in a multi-intake pump sump model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(7):1389-1400.
- 2 Li Haifeng, Chen Hongxun. Experimental and numerical investigation of free surface vortex[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(4):485-491.
- 3 Chen Yunliang, Wu Chao, Ye Mao, et al. Hydraulic characteristics of vertical vortex at hydraulic intakes[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(2):143-149.
- 4 Echávez G, McCann E. An experimental study on the free surface vertical vortex[J]. Experiments in Fluids, 2002, 33(3):414-421.
- 5 刘超. 大型泵站钟形进水流道流速场的试验研究[J]. 江苏农学院学报, 1985, 6(2):41-47.  
Liu Chao. The experimental research on the flow fields in bell-draft inlet casing of axial flow pump[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1985, 6(2):41-47. (in Chinese)
- 6 刘超, 金燕, 周济人, 等. 箱型双向流道轴流泵装置内部流动的数值模拟和试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5):192-198.  
Liu Chao, Jin Yan, Zhou Jiren, et al. Study of internal flow in cube-type bidirection passages of axial-flow pump system by numerical simulation and experiment[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5):192-198. (in Chinese)
- 7 Yamamoto Y, Yoshida T. Application of unsteady flow analysis using the vortex method to the design of pump sumps[C]//2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, San Diego, United States, 2004.
- 8 Kim C G, Choi Y D, Choi J W, et al. A study on the effectiveness of an anti vortex device in the sump model by experiment and CFD[C]//26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Beijing, China, 2012.
- 9 Kawakita K, Matsui J, Isoda H. Experimental study on the similarity of flow in pump sump models[C]//26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Beijing, China, 2012.
- 10 Arboleda G, EL-Fadel M. Effects of approach flow conditions on pump sump design[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(9):489-494.
- 11 Rajendran V P, Patel V C. Measurement of subsurface vortices in a model pump sump[C]//Proceedings of the 1997 27th Congress of the International Association of Hydraulic Research, San Francisco, United States, 1997.
- 12 徐宇, 吴玉林, 李永. 水泵吸水池内流场的 PIV 试验分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10):42-45.  
Xu Yu, Wu Yulin, Li Yong. Analysis of PIV experiments on flow in a closed model pump sump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10):42-45. (in Chinese)
- 13 杨帆, 刘超, 汤方平. 基于 CFX 的双向立式轴流泵装置水力性能分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(3):403-412.  
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping. Analysis on hydraulic performance of reversible vertical pumping system based on CFX[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(3):403-412. (in Chinese)
- 14 郭加宏, 陈红勋. 泵站水泵进水池内消涡装置有效性的数值验证[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(增刊):85-88.
- 15 SL140—2006 水泵模型及装置模型验收试验规程[S].

## Analysis of the Vortex-elimination Device of Pump Suction Passage Using High-speed Photography

Liu Chao<sup>1</sup> Yang Fan<sup>1</sup> Zhao Jun<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China

2. Anhui Anzhao Engineering Technical Advisory Services Limited Company, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of bottom-vortex in the cube type suction passage of pump 4 types of vortex-elimination devices were designed based on the vortex tubes intensity conservation theorem. To verify the validity of these devices, the test-rig was set up for experiment and the high-speed photography was applied to the flow pattern of the suction passage with different types of vortex-elimination devices. The bottom vortices in the original passage were captured successfully under different operation conditions. The effects of 4 new vortex-elimination devices on the hydraulic performance of pump system were analyzed based on the energy test. The results show that the new vortex-elimination device can eliminate the bottom vortex, the flow pattern of flare and the hydraulic performance of pump system can be improved.

**Key words:** Pump system Passage Vortex Test High-speed photography