

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.016

# 进水池表面吸气涡数值模拟与试验

吴鹏飞 郭志伟 钱忠东 王志远 陈芳

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 为了有效地消除表面吸气涡,对进水池内流场进行了数值计算,模拟了表面涡吸气的动态过程;建立了试验模型,验证 CFD 方法的可靠性;并提出了圆形盖板消涡装置,探求其有效性;采用了螺旋度密度分析法,揭示了表面涡的吸气及其抑制机理。结果显示:采用的 CFD 方法可以较好地预测表面吸气涡的动态过程;吸气准备阶段,自由水面出现凹陷,喇叭管进口附近形成螺旋度密度管;随着气体从自由水面进入水体,自由水面下方形成另一螺旋度密度管;当连续气柱形成时,两个螺旋度密度管相互连通,形成气体通道;通过在自由水面和喇叭管进口之间放置一定尺寸的圆形盖板装置,可以消除表面吸气涡。

**关键词:** 进水池; 表面涡; 吸气; 数值模拟

**中图分类号:** TV675; TV131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0120-06

## Numerical Simulation and Experiment on Free-surface Air-entraining Vortices in Pump Sump

WU Pengfei GUO Zhiwei QIAN Zhongdong WANG Zhiyuan CHEN Fang

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to suppress the free-surface air-entraining vortex in pump sumps, the three-dimensional unsteady vortex flow in a pump sump was calculated by computational fluid dynamics (CFD) method. The dynamic process of the free-surface air-entraining vortex was simulated. And an experimental model was conducted to verify the CFD method. In this experimental model, a circular plate device was placed between the free surface and the inlet of the bell-mouth to suppress the air entrainment. Furthermore, a parameter called helicity density was adopted to reveal the mechanism of air-entrainment and its suppression. The results showed that the numerical method used in this study can predict the dynamic process of air-entrainment for the free-surface vortex accurately. The helicity density played a very important role in the formation of air entrainment. When the dimple appeared on the free surface, a helicity density tube was formed around the inlet of the bell-mouth. As air entered into water, the other helicity density tube was formed under the free surface. When the two helicity density tubes were connected with each other, the air-core from the free-surface to the inlet of the bell-mouth was formed. This meant that the mechanism of air-entrainment for the free-surface vortex was the connection of the helicity density tubes which provided a passage for air to pass through. Moreover, the circular plate with enough dimension can successfully suppress the air-entrainment through cutting off the helicity density tubes.

**Key words:** pump sump; free-surface vortex; air entrainment; numerical simulation

## 0 引言

开敞式进水池广泛应用于中小型泵站中,可以使水流平稳地转向和加速,给水泵提供良好的进水

流态。然而,进水池内往往存在旋涡。进水池内的旋涡可以分为两大类:表面涡和内部涡<sup>[1]</sup>。当表面涡足够强的时候,可以携带气体进入水泵,形成表面吸气涡。表面吸气涡的存在会显著降低水泵的效

收稿日期: 2017-09-30 修回日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51422906、51609177)

作者简介: 吴鹏飞(1992—),男,博士生,主要从事水力机械、水力学和计算流体力学研究,E-mail: wpf@whu.edu.cn

通信作者: 钱忠东(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事水力机械和计算流体力学研究,E-mail: zdqian@whu.edu.cn

率,引起水泵振动并产生噪声等,严重时导致水泵无法正常运行<sup>[2-3]</sup>。因此,有必要研究表面吸气涡的形成机理,采取有效的措施消除表面吸气涡。

国内外不少学者通过建立试验模型的方法,采用粒子图像测速(PIV)和声学多普勒流速仪(ADV)等技术测量进水池内部的三维流场<sup>[4-12]</sup>。然而,模型试验存在耗时长、花费大等问题<sup>[2]</sup>。随着计算流体动力学(CFD)的发展,数值模拟被越来越多的学者应用到泵站进水池漩涡的研究之中。大多数学者采用单相流模型对进水池内流场进行数值计算,预测了旋涡的位置、强度和形状等相关特性,研究了几何参数对进水池内部流态和水力性能的影响<sup>[2,13-17]</sup>。在这些研究中,不考虑水面的波动,将自由水面简化为对称边界,无法模拟表面涡的吸气过程。近年来,不少学者开始尝试用多相流模型模拟表面吸气涡<sup>[18-19]</sup>。然而,对于进水池表面吸气涡形成及其抑制机理研究报道较少。

本文采用 FLOW-3D 对进水池内的表面吸气涡进行数值计算,并与试验结果进行对比,验证数值模拟方法的可靠性。同时,提出用圆形盖板装置抑制吸气,采用螺旋度密度分析法揭示表面涡吸气及其抑制机理。

## 1 模型与方法

### 1.1 控制方程

FLOW-3D 软件在计算带有自由水面的工程问题时有较大优势。采用 Tru-VOF 方法来计算模拟自由水面,空气相不直接模拟计算,而是用空域来代替,从而节省计算时间。

控制方程可以表示为<sup>[20-21]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

- 式中  $x_i, x_j$ ——坐标分量  
 $u_i, u_j$ ——速度分量  
 $A_i, A_j$ ——计算单元面积  
 $t$ ——时间  
 $V_F$ ——流体体积分数  
 $\rho$ ——流体密度  $p$ ——压力  
 $g_i$ ——重力加速度分量  
 $f_i$ ——粘滞力

选择标准  $k-\varepsilon$  模型作为湍流计算模型,即

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \quad (6)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

- 式中  $x_k$ ——坐标分量  
 $\mu$ ——运动粘滞系数  
 $k$ ——湍动能  $\varepsilon$ ——耗散率  
 $\sigma_k$ ——湍动能  $k$  对应的 Prandtl 数  
 $\sigma_\varepsilon$ ——耗散率  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数  
 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ ——经验常数  
 $S_k, S_\varepsilon$ ——用户定义的源项  
 $G_k$ ——湍动能  $k$  的产生项  
 $\mu_t$ ——湍动粘度  $C_\mu$ ——经验常数

采用 FLOW-3D 特有的卷气模型来计算表面涡的吸气。

### 1.2 计算域与网格

本文采用武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开敞式试验台中进水池模型为研究对象,几何参数如图 1 所示。进水池形状为矩形,吸水管直径  $D=0.15\text{ m}$ ,喇叭管直径  $D_b=0.24\text{ m}$ 。吸水管对称地放置在进水池内,其中,边壁距  $L_1/D=L_2/D=2.3$ ,后壁距  $X^*/D=2.5$ ,悬空高  $C/D=1$ ,淹没深度  $S$  随着水位的变化发生改变。

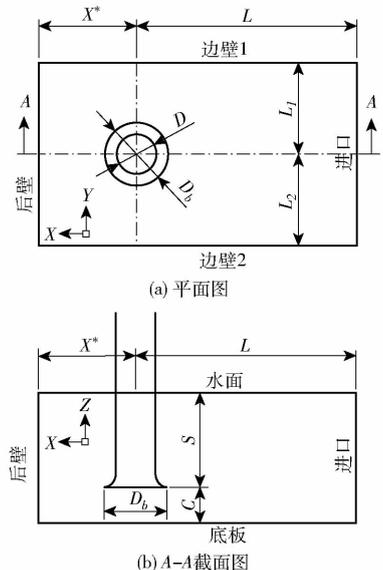


图 1 进水池几何参数

Fig. 1 Geometric parameters of pump sump

FLOW-3D 通过 FAVOR (Fractional area-volume obstacle representation) 技术来进行网格划分。该技术运用有限差分法,根据单元中没有被计算对象占据的面积以及体积的比例来模拟复杂形状<sup>[21]</sup>。分别采用 3 套不同单元尺寸的网格来计算进水池三维流场,进行网格无关性分析。综合计算时间和精度要求,选择单元尺寸为  $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  立方体网格,网格单元数为 2 462 400,如图 2 所示。

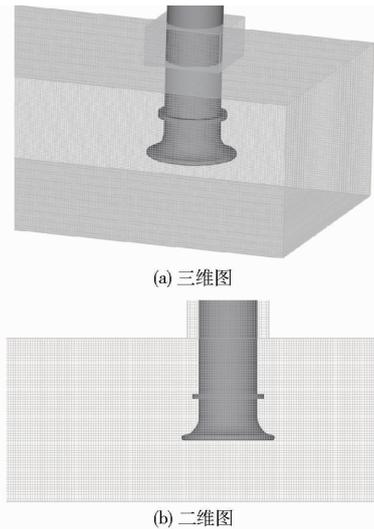


图 2 计算网格

Fig. 2 Computational meshes

### 1.3 边界条件和求解方法

进口边界为压力边界条件并且给出水位,出口边界为固定流量边界条件,壁面为无滑移的固体边界条件。初始化条件为计算区域充满不可压缩水体,其密度为  $1\ 000\text{ kg/m}^3$ ,动力粘度为  $0.001\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ ,温度为  $20^\circ\text{C}$ 。

采用有限差分法离散控制方程,对流项采用二阶迎风格式,扩散项采用二阶中心差分格式,离散方程的求解采用 GMRES (广义的极小残差算法) 方法,初始时间步长设为  $10^{-5}\text{ s}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 吸气动态过程

采用高速摄影技术,拍摄了表面涡吸气整个动态过程。从图 3 可以看出,整个过程可以分成 3 个阶段:准备、发展和成型阶段。准备阶段,自由水面上出现了一个旋涡,旋涡向下延伸,形成一个凹陷,如图 3a 所示。随着时间的推移,气体从凹陷的中心开始进入自由水面(图 3b),向喇叭管运动,预示着表面涡开始吸气。成型阶段,气体进入喇叭管,一个贯通自由水面和喇叭管的漏斗形气柱形成(图 3c),此时表面涡吸气完成。从动态过程可以看出,表面吸气涡形成的前提是气体从自由水面上凹陷的中心

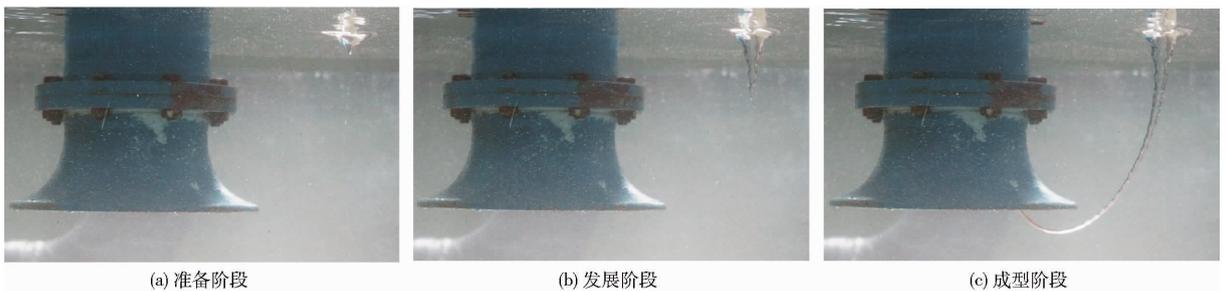


图 3 表面涡的吸气过程(试验拍摄)

Fig. 3 Dynamic process of air entrainment for free-surface vortex in experiments

通过,并进入水体。在气体从自由水面进入喇叭管的过程中,气体与水体相互作用。

为了分析表面涡的吸气过程,对大流量和低水位工况进行数值计算,压力收敛精度为  $10^{-5}\text{ Pa}$ ,预测的表面吸气涡如图 4 所示。对比试验结果(图 3)可以看出,采用的 CFD 方法较好地捕捉到了吸气的

3 个阶段,准备(图 4a)、发展(图 4b)和成型阶段(图 4c),可以用来定性地分析表面涡的吸气过程。

### 2.2 吸气机理

表面涡吸气的过程中,水体与气体相互作用,速度和涡量分布较为复杂,单一采用速度和涡量难以解释吸气产生的原因。螺旋度密度  $H_d$  是一个与三

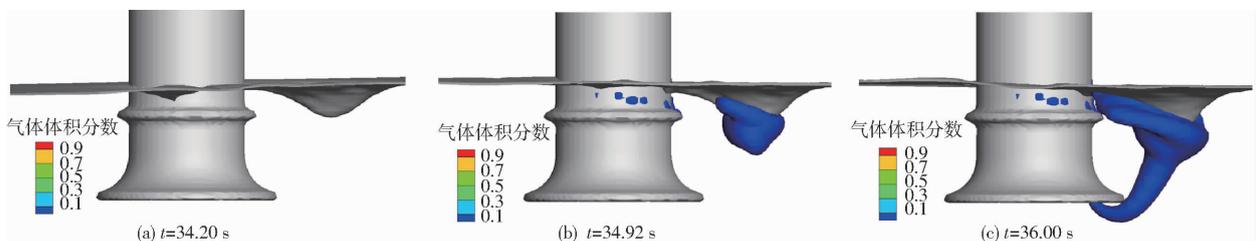


图 4 表面涡的吸气过程(计算结果)

Fig. 4 Dynamic process of air entrainment for free-surface vortex in numerical simulations

维流场中涡系拓扑结构相关的物理量,由速度和涡量共同作用,可以表示为

$$H_d = \mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (9)$$

式中  $\mathbf{u}$ ——速度  $\boldsymbol{\omega}$ ——涡量

图 5 显示了吸气动态过程中各时刻螺旋度密度的等值面。在自由水面凹陷形成的时候(图 4a),一个螺旋度密度管(以下简称螺旋管)出现在喇叭管进口附近(图 5a)。因为此时吸气没有形成,所以该螺旋管全部由水体占据。随着气体开始从凹陷的中心进入水体(图 4b),另一螺旋管出现在自由水面下方,同时,喇叭管进口附近的螺旋管向自由水面延伸(图 5b)。当连续气柱形成的时候(图 4c),由图 5c 可以看出,2 个螺旋管相互连通,形成一个新螺旋管。该螺旋管贯通自由水面和喇叭管,是气体从自

由水面进入并运动到喇叭管的路径。综上所述,在吸气的过程中,2 个螺旋管分别形成于喇叭管进口附近和自由水面下方。吸气的机理是这 2 个螺旋管相互连通,并提供气体一个从自由水面进入喇叭管的通道。

为了清晰地显示各时刻螺旋度密度分布情况,采用过吸水管中心的平面截取螺旋管,如图 6 所示。图中负号表示旋涡旋转方向为顺时针。对比螺旋度密度的大小,可以看出,开始阶段,喇叭管进口附近出现较大值区域,并向自由水面延伸。随后,自由水面下方出现另一较大值区域。最后,两个较大值区域相互连通。综合图 4~6 可以看出,气柱形成的位置螺旋度密度远大于其周围位置,螺旋度密度与表面涡的吸气密切相关。

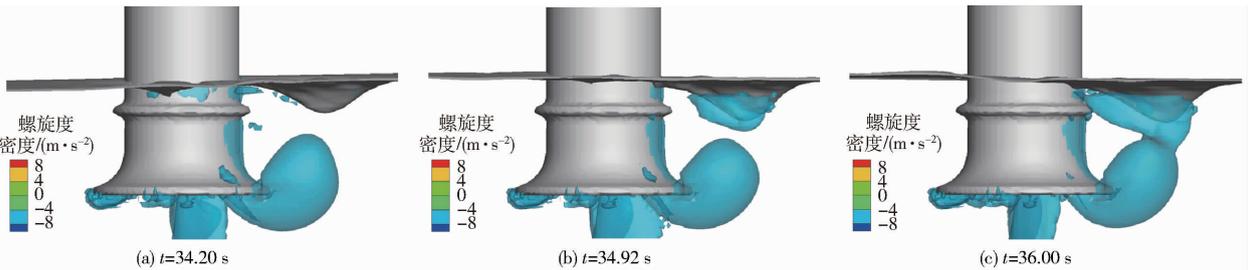


图 5 不同时刻螺旋度密度等值面

Fig. 5 Iso-surfaces of helicity density at different times

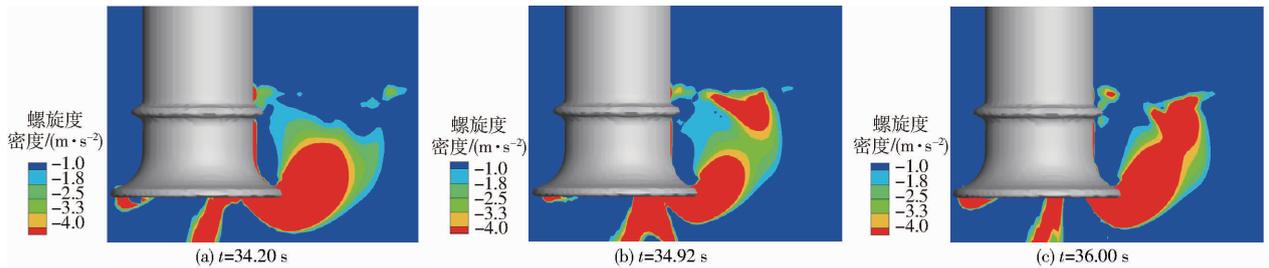


图 6 不同时刻螺旋度密度截面分布

Fig. 6 Distributions of helicity density in a cross section at different times

螺旋度密度  $H_d$  在 3 个正交方向的分量可以表示为

$$H_d = \mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\omega} = u_x \omega_x + u_y \omega_y + u_z \omega_z \quad (10)$$

式中  $u_x \omega_x$ ——螺旋度密度在 X 方向上的分量

$u_y \omega_y$ ——螺旋度密度在 Y 方向上的分量

$u_z \omega_z$ ——螺旋度密度在 Z 方向上的分量

其中,  $u_x \omega_x$  和  $u_y \omega_y$  称为水平螺旋度密度。

图 7 表示的是螺旋度密度 3 个分量在气柱形成时刻的分布情况。可以看出,水平螺旋度密度( $u_x \omega_x$  和  $u_y \omega_y$ ) 主要集中于喇叭管进口附近,贡献于气体的横向移动(图 7a 和图 7b),Z 方向螺旋度密度则沿着气体通道存在较大值(图 7c),负责推动气体从

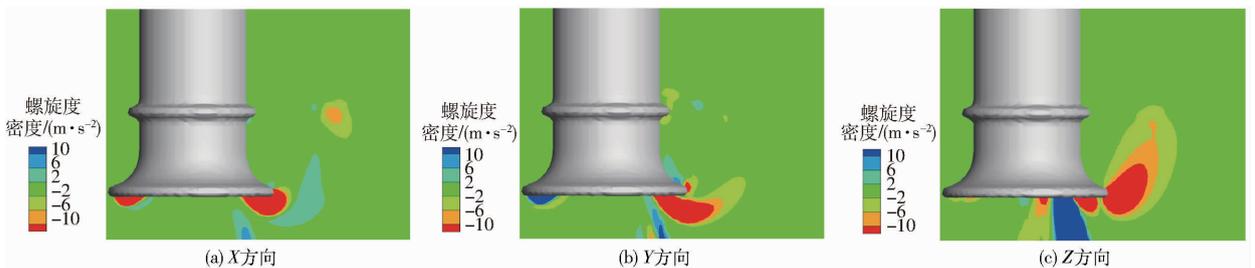


图 7 螺旋度密度分量分布

Fig. 7 Distributions of helicity density in three orthogonal directions

自由水面进入水体,到达喇叭管进口附近,对于表面涡的吸气起到重要作用。

### 2.3 抑制机理

进水池内表面吸气涡进入水泵以后,会严重影响水泵的水力性能。为了有效消除这些吸气涡,本文提出了一种圆形盖板装置。在这种装置中,圆形盖板置于自由水面和喇叭管进口中间,并用4个螺丝钉进行固定。

图8表明了两种不同尺寸的圆形盖板(盖板1和盖板2)对表面吸气涡的影响,其中盖板1和盖板2的直径分别为0.45 m和0.60 m。从图8a可以看出,尽管放置了盖板1,仍然存在间歇式表面吸气涡,并不能完全消除表面吸气涡。然而,对比图3c,旋涡位置偏离吸水管,吸气的强度减弱,吸气量减少,这表明盖板1起到削弱表面吸气涡的作用。相对于盖板1,盖板2具有较大的尺寸,可以完全消除表面吸气涡,如图8b所示。

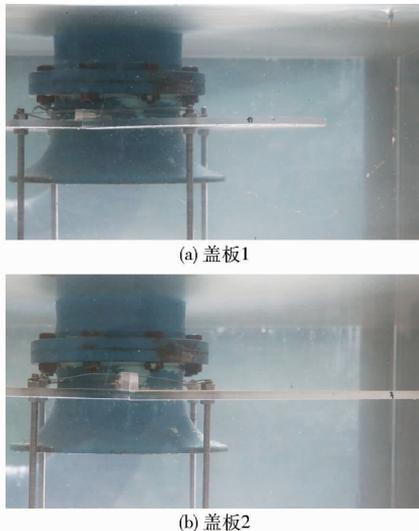


图8 圆形盖板装置对表面吸气涡的影响

Fig. 8 Effects of circular plate device on free-surface air-entraining vortex

为了揭示圆形盖板装置对表面涡吸气抑制机理,本文对已放置盖板2的进水池流场进行数值计算。图9给出了吸入气体体积分数等值面,对比

图4c,可以看出,表面吸气涡完全消失,与试验结果相吻合(图8b)。与此同时,分析了此工况下螺旋度密度的分布情况,从图10可以看出,螺旋度密度管主要分布在喇叭管进口附近,自由水面下方的螺旋度密度管消失。综上所述,圆形盖板装置有效地截断了螺旋度密度管的连通,从而阻断了气体从自由水面进入吸水管。

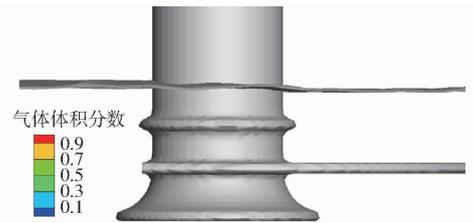


图9 吸入气体体积分数等值面(盖板2)

Fig. 9 Iso-surface of volume fraction of air with circular plate 2

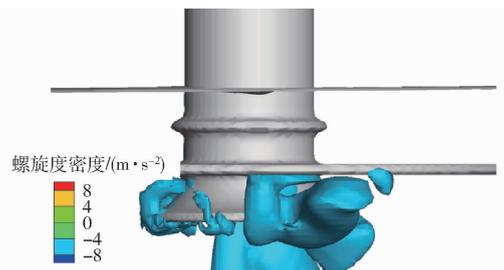


图10 螺旋度密度等值面分布(盖板2)

Fig. 10 Iso-surface of helicity with circular plate 2

### 3 结论

(1) 表面吸气涡的形成与螺旋度密度密切相关。当自由水面下方与喇叭管进口附近螺旋度密度管相互连通时,将形成一个贯通自由水面和喇叭管进口的连续气柱。

(2) 在螺旋度密度的分量中, $Z$ 方向的分量推动气体从自由水面进入水体,并向喇叭管进口附近移动,水平分量则贡献于气体横向移动进入喇叭管。

(3) 放置在自由水面和喇叭管进口之间的圆形盖板装置可以截断螺旋度密度管,进而抑制表面涡的吸气。

### 参 考 文 献

- 何耘. 水泵进水池旋涡研究的主要进展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(5): 92-96.  
HE Yun. Main advances of research on vortices in pump sumps[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(5): 92-96. (in Chinese)
- 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)
- QIAN Zhongdong, WU Pengfei, GUO Zhiwei, et al. Numerical simulation of air entrainment and suppression in pump sump[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(12): 1847-1855.
- OKAMURA T, KAMEMOTO K, MATSUI J. CFD prediction and model experiment on suction vortices in pump sump [C] // Proceedings of the 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, AICFM9-053, 2007.

- 5 PATEL V C, RAJENDRAN V P. Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(5): 322 - 334.
- 6 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150806&journal\\_id=jcsam](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.
- 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. (in Chinese)
- 7 唐洪武, 徐夕荣, 张志军. 粒子图象测速技术及其在垂直进水口漩涡流场中的应用 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 1999, 14(1): 128 - 134.
- TANG Hongwu, XU Xirong, ZHANG Zhijun. Particle image velocimetry technique and its application of free vortex at vertical intake [J]. *Journal of Hydrodynamics Ser, A*, 1999, 14(1): 128 - 134. (in Chinese)
- 8 朱红耕, 奚斌. 水泵进水池模型试验新方法研究 [J]. *农业机械学报*, 2003, 34(5): 72 - 75.
- ZHU Honggeng, XI Bin. New method for pump sump hydraulic model study [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(5): 72 - 75. (in Chinese)
- 9 汤方平, 耿卫明, 杨国平. 进水池流态对泵进口流场的影响 [J]. *排灌机械*, 2004, 22(5): 12 - 14.
- TANG Fangping, GENG Weiming, YANG Guoping. Influence of the flow pattern in the sump on the flow field of pump inlet [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004, 22(5): 12 - 14. (in Chinese)
- 10 李永, 李小明, 吴玉林, 等. 封闭式水泵吸水池内部流动的 PIV 量测 [J]. *农业工程学报*, 2001, 17(3): 45 - 48.
- LI Yong, LI Xiaoming, WU Yulin, et al. PIV experiments on flow in a closed model pump suction sump [J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(3): 45 - 48. (in Chinese)
- 11 刘树红, 樊毅, 吴玉林, 等. 水泵吸水池内部流场数值模拟和试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2007, 26(2): 119 - 123.
- LIU Shuhong, FAN Yi, WU Yulin, et al. Numerical simulation and experimental research on flow in an open pump sump [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(2): 119 - 123. (in Chinese)
- 12 肖若富, 李宁宁. 进水池形状对吸入涡影响试验研究 [J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(11): 953 - 958.
- XIAO Ruofu, LI Ningning. Experimental investigation into effects of sump shape on suction vortex [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(11): 953 - 958. (in Chinese)
- 13 成立, 刘超. 基于 CFD 技术的泵站进水池水力性能研究 [J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(1): 52 - 56.
- CHENG Li, LIU Chao. Hydraulic performance of pump sumps based on CFD approach [J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2009, 37(1): 52 - 56. (in Chinese)
- 14 刘超, 成立, 汤方平, 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, TANG Fangping, 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)
- 15 朱红耕. 进水池对水泵进水条件影响的数值模拟和试验 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(6): 57 - 60.
- ZHU Honggeng. Numerical simulation and model test for the influence of pump intake design on pump flow conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(6): 57 - 60. (in Chinese)
- 16 蒋红樱, 成立, 颜红勤, 等. 不同形状的泵站封闭式进水池喇叭口水力性能模拟与验证 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 31 - 35.
- JIANG Hongying, CHENG Li, YAN Hongqin, et al. Simulation and validation of hydraulic performance of closed-style pump sump with different bell-mouth shapes [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(13): 31 - 35. (in Chinese)
- 17 资丹, 王福军, 姚志峰, 等. 基于响应曲面模型的泵站进水池参数优化方法研究 [J]. *水利学报*, 2017, 48(5): 594 - 607.
- ZI Dan, WANG Fujun, YAO Zhifeng, et al. Research on optimization method of pump sump parameters based on response surface model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(5): 594 - 607. (in Chinese)
- 18 BAYEUL-LAINÉ A C, SIMONET S, BOIS G, et al. Two-phase numerical study of the flow field formed in water pump sump: influence of air entrainment [C] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(2): 022007.
- 19 LUCINO C. Vortex detection in pump sumps by means of CFD [C] // XXIV Latin American Congress on Hydraulics, 2010: 21 - 25.
- 20 HU H, HUANG J, QIAN Z, et al. Hydraulic analysis of parabolic flume for flow measurement [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2014, 37: 54 - 64.
- 21 肖苒辘, 王文娥, 胡笑涛. 基于 FLOW-3D 的田间便携式短喉槽水力性能数值模拟 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 55 - 61.
- XIAO Yizhou, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Numerical simulation of hydraulic performance for portable short-throat flume in field based on FLOW-3D [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(3): 55 - 61. (in Chinese)