

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221537

# 大型抽蓄机组水导轴承润滑油系统 动态特性及甩油溢油应对策略

董文昌<sup>1</sup>, 周大庆<sup>1</sup>, 阚 阚<sup>1</sup>, 张 政<sup>2</sup>, 郭俊勋<sup>3</sup>, 邹佳杰<sup>1</sup>, 王胤淞<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 华东宜兴抽水蓄能有限公司, 江苏 无锡 214000;  
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 水导轴承润滑油系统甩油溢油现象在抽蓄机组运行中频发, 显著影响了机组的安全稳定性和电站的运行环境。借助 CFD 数值模拟技术和 VOF 多相流模拟方法, 探究了抽蓄机组抽水模式下水导轴承润滑油系统在多油位工况内部流动的动态特性。结果表明, 低油位工况下系统流动循环形成更快, 过渡过程流态稳定且油位较低, 因此甩油现象更轻微, 但过低油位可能导致不利于油温的控制; 高油位工况下, 流动前期甩油溢油现象多发生于旋转油盆毕托管侧附近, 流动后期多发生于毕托管另一侧; 通过对毕托管外壁改型优化的方法较传统的增大毕托管管径方法对甩油溢油现象抑制更加有效。结果为探究抽蓄机组水导轴承润滑油系统出现的甩油溢油现象机理与提出有效应对策略提供了理论基础和工程实践参考。

**关键词:** 水导轴承; 旋转油盆; 甩油现象; 临界油位; 数值模拟

**中图分类号:** TV734.1; TV738

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)01-0167-05

## 1 引言

水电与抽蓄机组水导轴承油槽常出现甩油及油雾溢出的现象<sup>[1]</sup>, 不仅使水导轴承内部润滑油润滑效率降低, 导致水导轴瓦升温无法有效传递主轴处径向力<sup>[2,3]</sup>; 且溢出的油雾附着在轴承密封部件处, 拆卸密封件清理造成了机组一体性的运转下降, 降低水导轴承寿命; 甩油溢油事故会增加水导轴承润滑油的使用量, 同时造成一定的水源及电站运行现场的环境污染<sup>[4]</sup>。目前关于机组甩油溢油的研究极少, 主要基于轴承结构对密封方式进行改进, 如干气密封、HDL 密封、新型油封等接触式与非接触式密封<sup>[5]</sup>。但这类改造主要以基于工程经验的改造为主, 缺乏理论支撑且甩油溢油机理不明。因此, 亟需开展机组水导轴承润滑油系统流动特性和甩油溢油的内在机理研究, 提出有效恰当的甩油溢油控制措施。本文以某大型抽蓄电站机组抽水模式下的水导轴承润滑油系统为例, 借助 CFD 数值模拟技术, 基于 VOF 多相流模型<sup>[6,7]</sup>研究旋转油盆在内部不同油位工况

下, 机组开机启动中水导轴承润滑油系统的流动特性差异<sup>[8]</sup>, 分析了润滑油动态特性、外特性参数变化规律及测点压力<sup>[9]</sup>等, 并提出了一种基于毕托管结构改造, 适用于电站实际情况的有效抑制甩油溢油的应对策略, 结果可为探究抽蓄机组水导轴承润滑油系统出现的甩油溢油现象机理与提出有效应对策略提供理论基础和工程实践参考。

## 2 水导轴承内部润滑油系统模型

建立大型抽蓄机组立式筒式水导轴承内部润滑油系统的流体域模型, 见图 1。主轴直径 970 mm, 上油盆直径 1 405 mm, 旋转油盆直径 1 470 mm, 上油盆停机油位为 180 mm, 主轴间隙油膜采用统一的 2 mm 油膜厚度, 机组额定转速为 375 r/min。旋转油盆设置三种工况下的停机油位, 即低油位 ( $H = 280$  mm)、中油位 ( $H = 305$  mm)、高油位 ( $H = 330$  mm)。

由于水导轴承润滑油系统内部流动为三维非定常高雷诺数流动, 通过对模型进行区域离散化及网格数量的合理分配, 对间隙附近区域与毕托

**收稿日期:** 2022-07-27, **修回日期:** 2022-08-31

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51979086)

**作者简介:** 董文昌(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为抽蓄机组稳定性分析, E-mail: 1605060319@hhu.edu.cn

**通讯作者:** 周大庆(1976-), 男, 博士、教授, 研究方向为抽蓄机组稳定性分析, E-mail: zhoudaqing@hhu.edu.cn

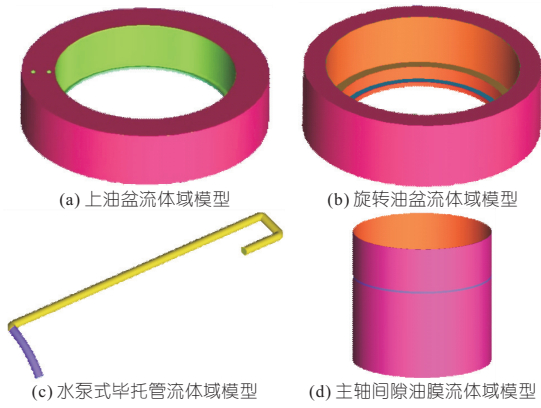


图 1 水导轴承内部润滑油系统三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of internal lubricating oil system of water guide bearing

管附近区域进行局部加密。设置 5 套网格以验证网格无关性(表 1),所有网格边界条件设置相同,以水泵式毕托管进口润滑油流量和旋转油盆与主轴间隙油膜回油流量为参考,计算方案 1~5 的流量误差,发现当大于  $668 \times 10^4$  个网格时(方案 4),误差小于 1%。基于计算效率与计算准确性,最终选择方案 4。

表 1 网格参数

Tab. 1 Mesh parameters

方案	油盆总网格数 / $10^4$	主轴间隙网格数 / $10^4$	总网格数 / $10^4$	方案	油盆总网格数 / $10^4$	主轴间隙网格数 / $10^4$	总网格数 / $10^4$
1	249	30	279	4	582	86	668
2	333	47	380	5	702	108	810
3	484	62	546				

### 3 研究方法

#### 3.1 控制方程

控制方程为质量守恒方程和动量守恒方程。此外,通常认为水导轴承内部的流体不可压缩,即密度不随时间发生改变,故控制方程如下。其中质量守恒方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{f} - \nabla p / \rho + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{u}$  为流线;  $t$  为时间;  $\nabla$  为哈密顿算子;  $\mathbf{f}$  为质量力;  $\rho$  为密度;  $p$  为静压强;  $\nu$  为运动粘度;  $\nabla^2$  为拉普拉斯算符。

#### 3.2 表面张力修正

为了解决现有模型在高精度数值模拟中未考虑相间相互作用力的缺点,在轴承润滑油的流动中,相间作用力主要为表面张力,研究开发了考虑表面张力影响的数值计算方法,在均质流假设的前提下,在动量方程中引入表面张力源项,同时引

入 Level Set 方法将表面张力源项转化为可计算的项,动量方程表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \sigma \kappa \delta(\phi) \mathbf{n} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\rho_m$  为流体密度;  $u_i, u_j$  分别为  $i, j$  方向的分速度;  $\mu_m, \mu_t$  分别为流体的动力粘度、数值粘度;  $\sigma \kappa \delta(\phi) \mathbf{n}$  为表面张力相;  $\sigma$  为表面张力系数;  $\kappa$  为交界面表面曲率;  $\mathbf{n}$  为法向向量;  $\phi$  为 Level Set 函数。

#### 3.3 VOF 模型

采用 VOF 模型进行仿真,VOF 控制方程为:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (4)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (5)$$

$$c_p = \sum_i \frac{(c_p)_i \rho_i}{\rho} \alpha_i \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \alpha_i dV + \int_S \alpha_i (V - V_g) d\alpha = \\ \int_V \left( S_{\alpha_i} - \frac{\alpha_i}{\rho_i} \frac{D\rho_i}{Dt} \right) dV \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\alpha_i$  为体积分;  $\rho_i, \mu_i, (c_p)_i$  分别为第  $i$  相的密度、分子粘度、比热;  $S_{\alpha_i}$  为第  $i$  相的源项;  $D\rho_i/Dt$  为  $\rho_i$  相的物质导数或拉格朗日导数<sup>[10]</sup>。

### 4 数值计算结果与分析

#### 4.1 旋转油盆多油位润滑油流动演变差异

图 2 为停机油位分别为 280、305、330 mm 三种油位下前 2 s 竖直截面气液两相分布。机组开机后,润滑油由液动压力驱动进入水泵式毕托管,毕托管管内液面呈锥状,旋转油盆内润滑油从内测脱离。由图 2 可看出,前 0.5 s 高油位工况下水泵式毕托管内油位较更低油位工况更高,但毕托管内液柱上升量更少,循环过程较低油位形成更慢。其中,在  $T=0.5$  s 时,旋转油盆非毕托管侧出现润滑油在运行过程中被吸附粘着于旋转油盆内壁,且高油位较低油位现象愈明显,流态更紊乱;在  $T=1.1$  s 时,旋转油盆非毕托管侧流态恢复正常,旋转油盆毕托管侧流态开始紊乱,堆积的润滑油集中在毕托管侧吸附在旋转油盆内壁且存在爬升至旋转油盆与水导轴瓦连接的间隙处的趋势,该趋势是导致润滑油甩油现象发生的主要原因;在  $T=2.0$  s 时,润滑油流态紊乱现象重新出现在旋转油盆非毕托管侧,高油位工况已出现大

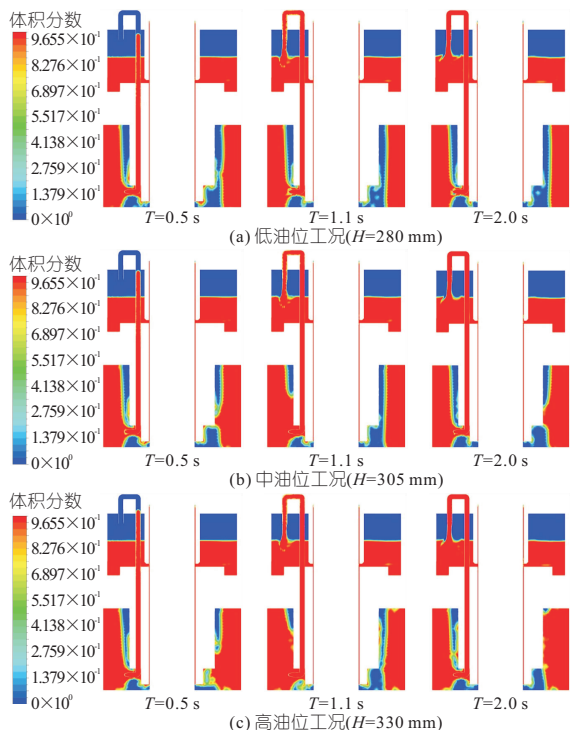


图 2 各油位工况全过程气液两相图

Fig. 2 Gas-liquid two-phase diagram of the whole process at each oil level

幅度甩油,中油位与低油位工况流动情况较好,但中油位工况仍出现了部分润滑油吸附在内壁的情况。对比各时刻旋转油盆内润滑油流态,可见润滑油甩油现象具有周期性,且甩油现象随停机油位升高而加剧。

定义变量总压  $P_t$ ,其数值等于该位置静压力与动压力总和,即:

$$P_t = P_s + \rho c^2 / 2 \quad (8)$$

式中, $P_s$  为该处静压强; $\rho$  为流体密度; $c$  为该处平均速度。

各油位工况的毕托管质量流率与进口总压强时域图见图 3。由图 3(a)可知,循环流动形成过程期间,初始油位越高,毕托管内润滑油质量流率越低,原因是高油位工况相较低油位工况,润滑油存量更多,阻碍外壁旋转外部液体以内摩擦力驱动内部液体旋转致使毕托管吸油能力降低。由图 3(b)可知,各油位工况在润滑油循环流动形成期间进口总压强大致相同,在稳定循环流动过程

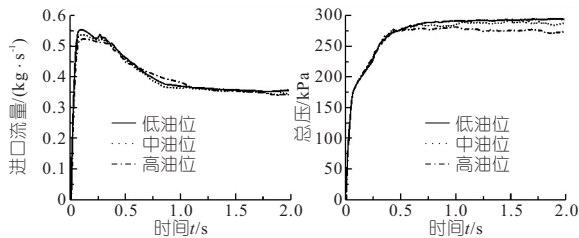


图 3 各油位工况毕托管进口流量与总压曲线

Fig. 3 Curve of inlet flow and total pressure at each oil level

中低油位工况进口总压强对比中、高油位更高且曲线平滑、压力波动小,证明低油位工况下水泵式毕托管进口处流态更稳定,发生溢油的可能性更小。

### 4.2 旋转油盆多油位动态特性

#### 4.2.1 多油位甩油溢油动态特性差异

旋转油盆内部润滑油稳定循环流动形成后,竖直油面由于周期性摆动致使润滑油被吸附于水导轴瓦与旋转油盆安装的密封间隙,最终产生甩油,因此在旋转油盆顶部内侧设置一监测面模拟水导轴瓦与旋转油盆安装间隙处的润滑油含量,监测该面的油相体积分数来反映不同油位工况下润滑油甩油溢油的严重程度。

图 4 为监测面处油相体积分数时域图。由图 4 可知:①低油位工况下。由于旋转油盆内部润滑油存量较少,稳定循环过程中油面摆动幅度较低,旋转油盆内部润滑油流态较好,因此机组不存在甩油现象,与低油位工况下旋转油盆内部流态更稳定,发生溢油可能性更小的结论吻合。②中油位工况下。存在甩油现象且峰值出现在  $T = 0.8$  s,随后逐渐减小。因此,中油位工况下甩油出现于旋转油盆内部润滑油循环流动形成过程末期,稳定循环形成后甩油现象消失。③高油位工况下。甩油现象更恶劣,在润滑油稳定循环流动形成后持续甩油,且甩油量随时间增加而增加,并于  $T = 2.0$  s 处达到峰值。

从不同油位工况来看,低油位工况最安全稳定;中油位工况流态良好,存在甩油现象但泄流量较小,由此可推断出水导轴承润滑油系统运行时的临界油位;高油位工况下甩油量大,旋转油盆内润滑油流态极为紊乱,压力波动较大,对机组运行

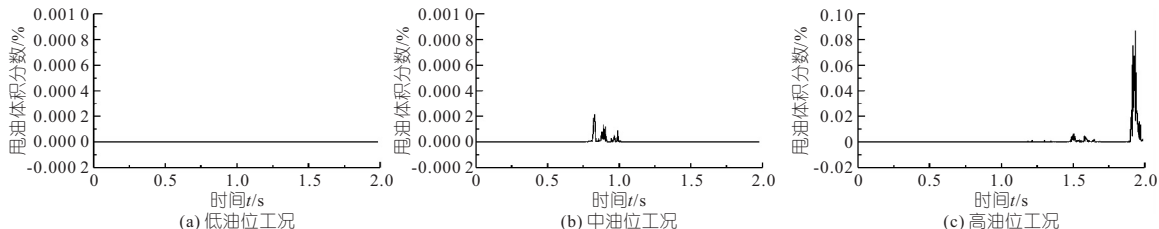


图 4 各油位工况甩油特性曲线

Fig. 4 Oil spill characteristic curve at each oil level

的稳定性与安全性有很大威胁。从甩油溢油现象发生时间点来看,甩油现象发生于润滑油系统稳定循环过程形成的末期,随稳定循环过程形成而消失。

### 4.2.2 高油位工况压力波动特性

由于甩油现象仅在高油位工况下较明显,因此选取高油位工况作为甩油现象动态特性分析的数据依据。在旋转油盆内部选取位于左侧、右侧、顶部、底部的四个特征位置,根据压力波动特征定位甩油发生位置,各压力监测点布置见图 5。

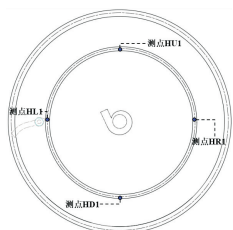


图 5 压力测点分布图

Fig. 5 Distribution diagram of pressure measuring points

图 6 为高油位工况下各压力测点压强时域图。由图 6(a)可知,甩油间隙左右侧压强前期基本对称,机组运行前期毕托管侧甩油间隙压力波动较大,该侧前期出现甩油现象概率较大,稳定循环过程形成后,无毕托管侧出现大幅压力波动,并在  $T=2.0\text{ s}$  处出现大幅甩油。由图 6(b)可知,旋转油盆底部流动中期压力波动较大,亦为润滑油溢出的主要位置;同时旋转油盆顶部测点压力波动全过程较小,甩油量较少。

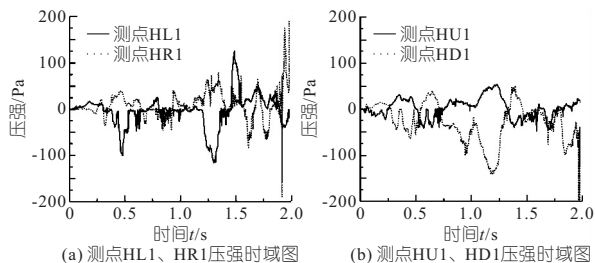


图 6 各监测点压强时域图

Fig. 6 Time domain diagram of pressure at each monitoring point

## 4.3 基于毕托管改型的甩油溢油应对策略

### 4.3.1 原理分析

水导轴承中的甩油溢油现象,主要源自运行过程中旋转油盆内部的紊流流态造成的润滑油堆积吸附于旋转油盆内壁进而渗入水导轴瓦与旋转油盆的间隙。旋转油盆内部流态主要受水泵式毕托管影响,抽蓄机组普遍使用圆形截面的水泵式毕托管,圆形毕托管后方因圆柱绕流影响<sup>[11]</sup>出现大面积的旋涡区域从而恶化旋转油盆内部流态致使甩油,因此将毕托管圆形截面改造为椭圆形截

面可减少旋涡、改善流态。

### 4.3.2 改造方案与数值模拟效果对比

目前旋转油盆内部结构改造注重于提高转动油盆高径比、增大毕托管直径、减小水导轴瓦与主轴的间隙等,其核心是减少机组运行时旋转油盆内部的动态存油量,对毕托管外形改造研究较少。图 7 为水泵式毕托管改造方案,将毕托管外径改进为椭圆形,以使流线贴合壁面抑制旋涡恶化流态。

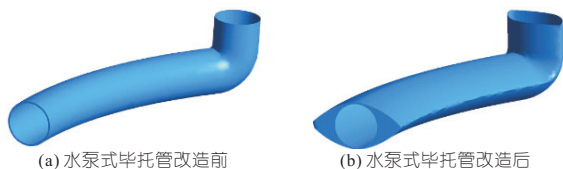


图 7 水泵式毕托管改造方案示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of pitot tube transformation scheme

由于甩油现象仅在高油位工况下较明显,因此改造后方案以高油位工况运行,对比改造前高油位工况下的甩油特性曲线,分析改造效果。图 8 为改造前后高油位工况下水导轴承润滑油系统的甩油特性曲线。由图 8 可知,将毕托管外壁改为椭圆形后,减少了圆柱绕流对旋转油盆内部流态的影响,优化了旋转油盆内部流态,减少了甩油现象发生,可见改进方案可行。

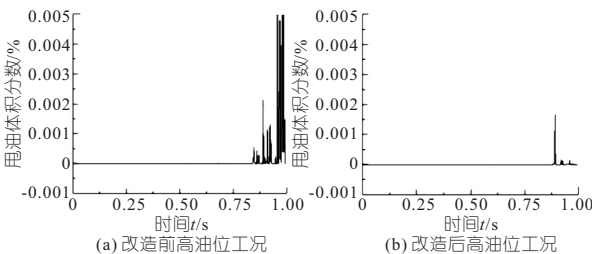


图 8 改造前后甩油特性对比  
Fig. 8 Comparison of oil spill characteristics before and after modification

## 5 结论

a. 低油位工况下旋转油盆内部水泵式毕托管进口流量较高油位工况更高,进口总压更高,压力波动更小,流态更稳定,润滑油流动循环过程形成更快。但过低油位可能导致换热速率下降,不利于润滑油油温的控制。

b. 甩油现象发生后会随油位升高而加剧,机组运行的临界油位约在 300 mm;旋转油盆毕托管侧、毕托管另一侧、底部均为甩油现象发生的主要位置,而由旋转油盆顶部润滑油流动诱发的甩油现象可能性较低。因此,在实际工程中,限制临界油位为一种有效控制甩油溢油现象的措施。

c. 基于水泵式毕托管外壁改形的方法可显著

改善毕托管进口附近流态,进而减少毕托管外形对旋转油盆内部润滑油流动的不良影响。此方案适用于运行电站的现场实际,对比传统应对方案中增大毕托管直径更便于改造旋转油盆,同时对甩油现象抑制效果明显有效。

参考文献:

[1] 余丰.蔡家洲水电站水导轴承甩油环故障浅析[J].机电信息,2021(11):27-28.

[2] 徐文峰,隗军峰,赵海英.二滩水电厂水导轴承甩油原因分析及改造[J].水电站机电技术,2005(1):3-4,87.

[3] 彭祖贤,张华.水轮机导轴承甩油现象的原因分析与探讨[J].水电与新能源,2020,34(10):61-62.

[4] 王琪,陈晶晶,蒋璆,等.抽水蓄能机组导轴承油雾治理实践[J].中国农村水利水电,2020(2):181-183.

[5] 李胜.九里沟水电站立式水轮机导轴承和主轴密封

的技术改造探索[J].中国水能及电气化,2018(6):29-32.

[6] 郑志富,孟凡瑞,赵国勇,等.利用VOF模型模拟水环真空泵的气液两相流[J].真空科学与技术学报,2022,42(2):139-144.

[7] 黄依,黄坤荣,章征服,等.基于VOF的U形重力热管的数值模拟[J].机械工程师,2022(2):86-89.

[8] 刘加将,袁东,李兵.立式水轮机水导轴承漏油原因分析及处理方法[J].现代工业经济和信息化,2021,11(10):231-232.

[9] 陶红.轴领泵外循环式水轮机导轴承的性能分析与设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

[10] 葛新峰,孙洁,吴丹,等.基于VOF模型的排水渠道流动数值模拟及消能措施优化研究[J].水电能源科学,2021,39(5):109-112.

[11] 陈斌,郭烈锦,杨晓刚.圆柱绕流的离散涡数值模拟[J].自然科学进展,2002,12(9):964-969.

### Dynamic Characteristics of Lubricating Oil System of Water Guide Bearing of Large Pumped-storage Unit and Countermeasures for Oil Spillage

DONG Wen-chang<sup>1</sup>, ZHOU Da-qing<sup>1</sup>, KAN Kan<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>2</sup>, GUO Jun-xun<sup>3</sup>, ZOU Jia-jie<sup>1</sup>, WANG Yin-song<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. East China Yixing Pumped Storage Co. LTD, Wuxi 214000, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The phenomenon of oil spilling and oil spill in the lubricating oil system of the water guide bearing occurs frequently during the operation of the pumped-storage unit, which significantly affects the safety and stability of the unit and the operating environment of the power station. With the help of CFD numerical simulation technology and VOF multiphase flow simulation method, the dynamic characteristics of water guide bearing lubricating oil system in the multi-oil level working condition under the pumping mode of the pumped-storage unit were explored. The research results show that under the low oil level condition, the system flow cycle is formed faster, the flow state is stable and the oil level is low during the transition process, so the oil rejection phenomenon is milder, but too low oil level may lead to unfavorable control of oil temperature; Under the condition of high oil level, the phenomenon of oil spillage in the early stage of the flow mostly occurs near the side of the Pitot tube of the rotating oil basin, and it mostly occurs on the other side of the Pitot tube in the later stage of the flow. Compared with the traditional method of increasing the diameter of the Pitot tube, the method of optimizing the outer wall of the Pitot tube is more effective in suppressing the phenomenon of oil spillage. The results provide a theoretical basis for exploring the causes of the oil spill phenomenon in the water guide bearing lubricating oil system of the pumped-storage unit and the optimization of the oil slinger.

**Key words:** water guide bearing; oil slinger; oil spill; critical oil level; numerical simulation

(上接第 81 页)

### Analysis of Urban Waterlogging and LID Reconstruction Scheme in Nanchang City Based on MIKE & SWMM

XU Wen-bin<sup>1</sup>, JIANG Zhu-qing<sup>1</sup>, YUAN Yi<sup>1</sup>, ZHAI Meng-meng<sup>2</sup>, LI Ning<sup>2</sup>, GAO Jia-yu<sup>2</sup>, LI Jia-ke<sup>2</sup>

(1. Nanchang Urban Planning & Design Institute, Nanchang 330038, China; 2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in the Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The problem of waterlogging in old city has become the focus of natural disaster research. Taking Fenghuang District of Nanchang City as an example, the MIKE FLOOD model was established to analyze the risk and causes of waterlogging. Based on the above results, the SWMM model was used to conduct the research on LID layout and optimization. Analytic hierarchy process was used to evaluate its comprehensive benefits, and the optimal cost-benefit scheme was finally obtained. According to the study, the rainfall return period is 5 years, there are 16 waterlogging points, and the risk level of waterlogging in some areas has reached level IV. It can be seen that the urban waterlogging prevention and control research is urgent. LID combination facilities have a good effect on alleviating waterlogging. The scheme of 22.5% rainwater garden + 7.5% pervious pavement is the best. This conclusion can provide technical reference for the following low impact development and construction of sponge cities and the proportion selection of facilities.

**Key words:** MIKE; SWMM; LID facility; runoff control rate; analytic hierarchy process