

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221237

油雾抽吸装置对推力轴承内流场特性的数值模拟研究

杨 雄¹, 章志平¹, 彭绪意¹, 吴中华¹, 张送校¹, 聂 赛¹, 孙 洁², 郑 源³, 张玉全³

(1. 江西洪屏抽水蓄能有限公司, 江西 宜春 330600; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 电站轴承油槽油雾的逸出不仅会污染电站环境,还会给电气设备带来安全隐患。结合水电站的实际情况,安装油雾吸收装置,可有助于油槽内过量油雾的排出,有效避免电站油雾污染问题。为探究油雾抽吸过程中油槽内的油雾分布、速度、测点压力、油雾抽吸量等变化,对某抽水蓄电站推力轴承油槽及负压抽吸管道进行了数值模拟计算。结果表明,经过油雾抽吸,大部分油雾均能被有效排出;出口油雾抽吸量总体变化遵循先上升、后下降的规律;在-500 Pa的抽吸压力下,油雾最大抽吸量可达 0.008 23 kg/s;油雾抽吸完成后,油槽顶部的压强达 96.07%,压力差的降低可有效阻止油雾外逸至油槽盖板、风洞、转子等处。研究结果可为油槽油雾抽吸过程提供一定的理论帮助,以便于更好地制定油雾治理策略。

关键词: 油雾抽吸; 推力轴承; 数值模拟; 抽水蓄能电站; 蒸发-冷凝模型

中图分类号: TV737

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0180-05

1 引言

抽水蓄能电站的轴承油槽中,含有大量的透平油。当机组运行时,推力头镜板和轴瓦间的油膜会产生高温,并将热量传递给周围的润滑油。润滑油在高温下蒸发,油雾越来越多地聚集在油槽上方。在压力差的作用下,油雾会从旋转部件与挡油管的缝隙中逸出,对电站环境及电气设备性能产生不良影响^[1,2]。应对油雾问题,大多数电站采取的对策是改善密封结构,将油雾封堵在油槽内部^[3,4]。但大量的实践经验表明,仅采用“堵”的方式将油雾控制在油槽内并不可行。因为当油雾量聚集到一定程度时,压差带来的泄露就成了一种“必然”。因此,结合水电站的实际情况安装油雾吸收装置,可有效避免油雾污染问题^[5]。邓尧曦等^[6]在油槽盖板开孔,采用吸油雾装置将聚集的油雾引流至回油桶,这在极大程度上解决了电站的油雾外逸问题;曹硕桐^[7]采用改进的遗传-PID算法,研究了水电站机组油雾排放控制技术,为实现自动控制水电站机组油雾排放提供了有力支撑;孙志翔等^[8]提出了一种油雾抽吸装置,

有效地解决了油槽中的甩油、漏油及油雾逸出问题。目前大多数电站在进行油雾排放控制时均采取手动方式,存在不稳定和误差^[9,10]。因此,研究抽吸油雾过程及抽吸油雾前后油槽内部的流场变化非常重要。本文以某抽水蓄能电站机组的推力轴承油槽为例,通过 RNG κ - ϵ 湍流模型、VOF 多相流模型及蒸发-冷凝模型求解油雾抽吸过程中油槽内的油雾分布、速度、测点压力、油雾抽吸量等变化,以为油槽油雾抽吸过程提供一定的理论依据。

2 计算模型及方法

2.1 推力轴承模型

图 1 为推力轴承装配图及油雾抽吸管路现场图。其中,推力轴承油槽主要包括推力头及镜板、油槽盖板、油槽、推力瓦、销钉、垫板、垫片、吸油雾管道、螺钉等。为便于计算,对几何模型进行简化,即对螺钉、销钉、螺栓进行忽略处理,并缩短吸油雾管道的长度。建立带有吸油雾管道的推力轴承三维模型,见图 2。

推力轴承基本参数中的推力轴承油槽直径为

收稿日期: 2022-06-13, **修回日期:** 2022-08-22

基金项目: 国网新源控股有限公司科技项目(SGXJKJ-2021-037)

作者简介: 杨雄(1987-),男,工程师,研究方向为抽水蓄能电站机电设备安全运行,E-mail:624757452@qq.com

通讯作者: 郑源(1963-),男,博士、教授,研究方向为流体机械及海洋能利用,E-mail:zhengyuan@hhu.edu.cn

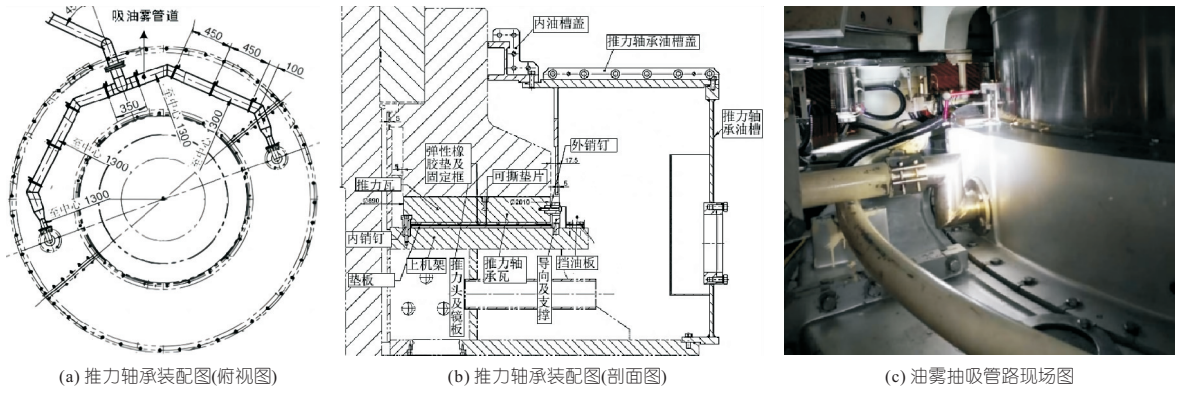


图 1 推力轴承装配图及油雾抽吸管路现场图

Fig. 1 Assembly diagram of thrust bearing and oil mist suction pipe site photo

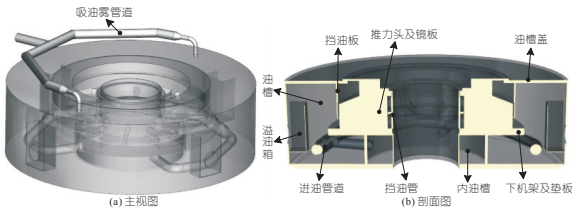


图 2 带油雾抽吸管道的推力轴承三维模型

Fig. 2 3D model of thrust bearing with oil mist pipe

为 3 300 mm; 共有 12 片推力轴瓦, 推力轴瓦外径为 2 010 mm, 推力轴瓦内径为 890 mm, 每片轴瓦瓦宽为 560 mm, 瓦长为 316 mm; 在正常发电运行过程中, 机组额定转速为 500 rpm, 正常油位为 720 mm。

2.2 计算模型

采用 VOF 多相流模型模拟油槽内润滑油、油雾和空气的运动; 采用 RNG κ - ϵ 湍流模型来封闭 RANS 方程组; 对于润滑油与油雾之间的质量转换和能量传递, 则使用蒸发冷凝模型 Lee 来实现。控制方程中的连续性方程为:

$$\nabla(\alpha_A \rho_A \vec{v}) = -\partial(\alpha_A \rho_A) / \partial t \quad (1)$$

$$\nabla(\alpha_L \rho_L \vec{v}) = -\partial(\alpha_L \rho_L) / \partial t + S_{a_L} \quad (2)$$

$$\nabla(\alpha_V \rho_V \vec{v}) = -\partial(\alpha_V \rho_V) / \partial t + S_{a_V} \quad (3)$$

$$\alpha_L + \alpha_A + \alpha_V = 1 \quad (4)$$

式中, ∇ 为梯度; α_A 、 α_L 、 α_V 分别为空气、润滑油、油雾的体积分数; ρ_A 、 ρ_L 、 ρ_V 分别为空气、润滑油、油雾的密度; \vec{v} 为平均速度; S_{a_L} 、 S_{a_V} 分别为液态油、油雾的质量源项, 表示在计算过程中, 润滑油与油雾之间发生了质量交换。

动量方程为:

$$\partial(\rho \vec{v}) / \partial t + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = \rho \vec{g} - \nabla p + \nabla \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) + \vec{F} \quad (5)$$

式中, ρ 、 \vec{v} 分别为流场的混合密度、混合流速; \vec{g} 为重力加速度; p 为压力; μ 为动力粘度; \vec{F} 为相间作用力。

能量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \vec{v}(\rho E + p) = \nabla(k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \quad (6)$$

$$E = \frac{\alpha_A \rho_A E_A + \alpha_L \rho_L E_L + \alpha_V \rho_V E_V}{\alpha_A \rho_A + \alpha_L \rho_L + \alpha_V \rho_V} \quad (7)$$

式中, E 为能量; k_{eff} 为导热系数; T 为温度; S_h 为润滑油和油雾在质量交换过程中发生的能量转移。

RNG κ - ϵ 湍流模型为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\kappa \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa + G_b - \rho \epsilon \kappa \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) +$$

$$(G_\kappa + C_{3\epsilon} G_b) C_{1\epsilon} \epsilon / \kappa - C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2 / \kappa - R_\epsilon \quad (9)$$

式中, $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 均为常量, $C_{1\epsilon} = 1.42$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.68$ 、 $C_{3\epsilon} = \tanh |v/u|$; a_κ 、 a_ϵ 分别为 κ 、 ϵ 方程的湍流 Prandtl 数, $a_\kappa = a_\epsilon \approx 1.393$ 。

蒸发-冷凝模型为:

$$\begin{cases} S_{a_L} = -r \alpha_L \rho_L (T - T_s) / T_s & T \geq T_s \\ S_{a_L} = r \alpha_V \rho_V (T_s - T) / T_s & T < T_s \end{cases} \quad (10)$$

式中, r 为相变传质系数; T 为液态润滑油温度; T_s 为油雾蒸汽饱和温度。

2.3 网格划分、边界条件和计算方法

(1) 网格划分。由于轴承油槽内部结构较复杂, 采用非结构化网格对计算域进行离散, 网格划分见图 3。对细小的部件进行局部加密, 经网格无关性验证, 总网格单元数为 650×10^4 个。

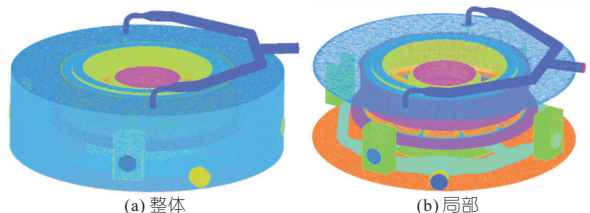


图 3 网格划分示意图

Fig. 3 Grid division diagram

(2) 计算域和边界条件设置。计算域及计算

条件设置示意图,见图 4。计算域分为油槽部分、吸油管路部分、进油管路三个部分。润滑油进口采用质量流量进口,进口流量为 50.16 kg/s,进口温度为 35 ℃;润滑油出口共有四个,均设置为 Outflow;油雾的出口压力设置为 -500 Pa。

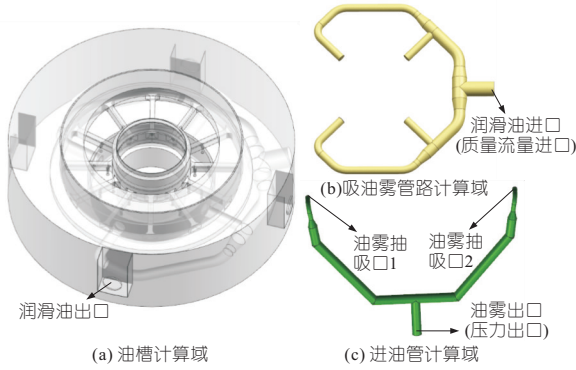


图 4 计算域及边界条件

Fig. 4 Calculation domain and boundary conditions

(3)计算方法设置。采用基于压力的求解器,压力-速度耦合方式为 Coupled,空间离散均采用二阶离散格式。为了确保迭代时解的收敛性,适当降低松弛因子。在迭代步不超过 1 000 步时,关闭油雾抽吸口,模拟油雾产生和聚集的过程;在迭代步介于 1 000~4 000 步之间时,打开油雾抽吸口,模拟油雾被抽吸的过程。

3 计算结果与分析

3.1 油雾抽吸前后油槽内油雾分布对比

图 5 为油槽内的油雾体积分数分布云图。由图 5 可知,在推力头的旋转过程中,轴瓦处的动压油膜受到粘性剪切应变作用,温度升高,并向周围的润滑油传递热量,造成了油槽内润滑油蒸发。由于油雾的密度比空气小,因此油雾会聚集在油槽上方,聚集部位主要为挡油环与推力头之间的区域(区域 1)和挡油环外侧与油槽外壁面之间的区域(区域 2)。区域 1 中的油雾浓度较低,而区域 2 中的油雾浓度较高。

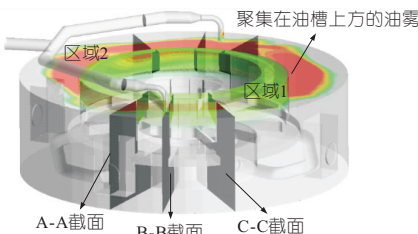


图 5 油槽内的油雾体积分数分布云图

Fig. 5 Diagram of oil mist volume fraction distribution in oil tank

由于油雾抽吸管道位于区域 2,因此结合三

个典型截面(A-A 截面、B-B 截面、C-C 截面)分析油雾抽吸前后的油槽内流场变化。

图 6 为油雾抽吸前后轴承油槽截面上的油雾体积分数分布云图。由图 6 可知:①在油雾抽吸前后,区域 2 的油雾分布量变化十分显著,绝大部分油雾均通过抽吸管道被排出,且剩余的油雾体积分数降至 0.3 以下,达到了油雾抽吸的目的。对于区域 1 而言,虽然有相当一部分油雾受到挡油环的阻碍,未被排出,但抽吸前后油雾体积分数从 0.44 降至 0.32,油雾浓度降低,会减小这一区域的压力,从而减小压力差,将油雾控制在油槽中。②在油槽的不同内截面上,油雾的分布形态、油雾分布量也存在一定差异,这与油雾在油槽内的不均匀分布有关。受到重力和推力头旋转离心力的影响,油槽内的润滑油一直以周期性的规律波动,润滑油的浪涌、对空气的卷吸及油滴的飞溅等行为均会造成油雾在油槽上方空间分布不均。

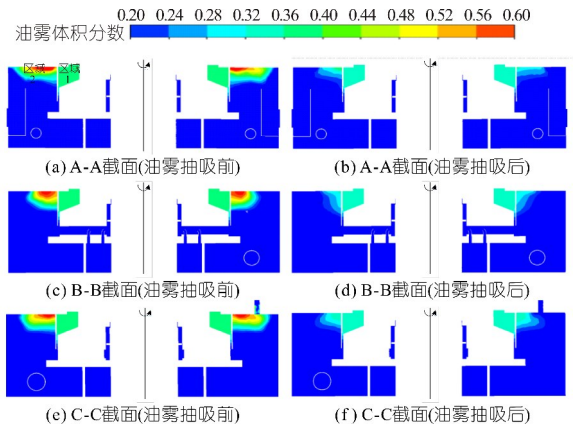


图 6 油雾抽吸前后轴承油槽截面上的油雾体积分数分布云图

Fig. 6 Cloud diagrams of oil mist volume fraction distribution on bearing oil groove section before and after oil mist discharge

3.2 油雾抽吸过程中的速度变化分析

图 7 为油雾抽吸过程中的油槽内截面流速分布云图。由图 7 可知:①受到推力头壁面高速旋转(500 rpm)的影响,推力头周围(如推力头与挡油环之间、推力头与挡油管之间的区域)的流体会受到影响,具有一定速度;②受到负压力抽吸的影响,靠近负压抽吸管道的流体会因压力差而发生流动,具有一定的流速。本文重点探究抽吸管道中的流速变化。

图 8 为抽吸口 1、抽吸口 2、油雾出口断面的速度变化曲线。由图 8 可知,抽吸口和出口的速度均随油雾的抽吸而不断降低,但在抽吸过程中,出口流速明显低于抽吸口流速,两个抽吸口的速度变化由于油雾的空间分布不均也存在一定差

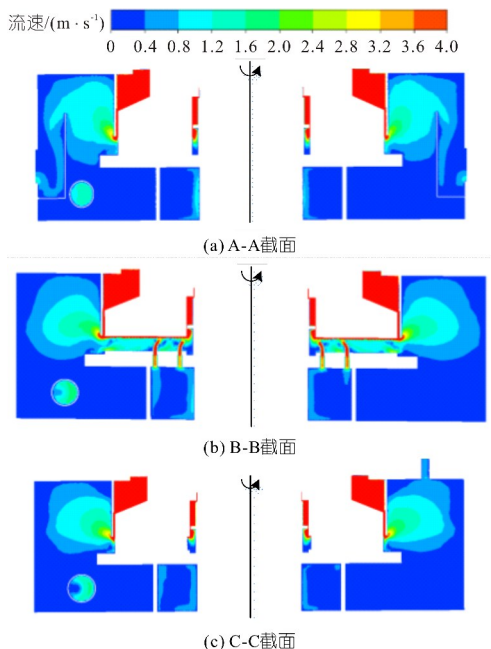


图 7 油雾抽吸过程中油槽内截面流速分布云图

Fig. 7 Velocity distribution in oil tank during oil mist discharge

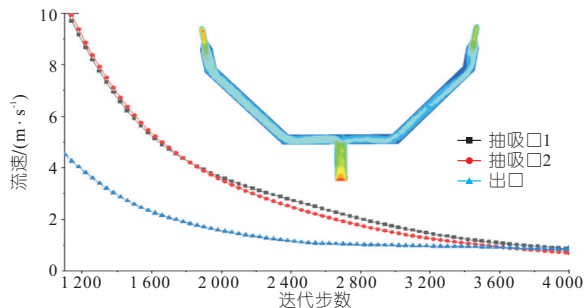


图 8 抽吸管道速度变化曲线

Fig. 8 Velocity curve of oil mist pipe

异。具体分析如下:在油雾抽吸过程中,抽吸口 1、2 的速度变化曲线相似,在抽吸开始时刻,速度最大达 10 m/s,随着迭代步数的增加,速度开始呈抛物线状下降,之所以抽吸口 1、2 的曲线不完全相同,是因油雾在油槽上方的分布不均匀所致。同时,随着速度的减小,断面流速分布也愈加不均匀。与抽吸口 1、2 的速度变化不同,出口断面的流速在抽吸过程中明显较低,但随着迭代步数增加,出口处的速度变化梯度并不如抽吸口大,在计算停止时,出口断面流速已与抽吸口趋于一致。

3.3 油雾抽吸过程中的测点压力变化分析

图 9 为油雾抽吸管道的压力测点布置位置及 4 个测点的相对压力曲线。测点 1 位于抽吸口正中,即油槽上方,可用其压力值估计油槽顶部的压力变化。由图 9(b)可知:①在未开启抽吸口前,油槽顶部的相对压力约为 3 736.1 Pa,此时,油雾又聚集在油槽顶部,很容易因为压力差的作用导致油雾从油槽盖的密封处泄露,造成电站环境污

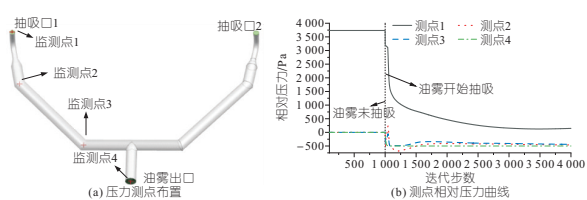


图 9 油雾抽吸管道的压力测点布置及测点相对压力曲线

Fig. 9 Layout of measuring points and relative pressure curve of measuring points in oil mist pipe

染。当油雾开始抽吸,测点 1 的压力不断下降,直至计算停止,油槽顶部压力已降至 146.5 Pa,即在油雾抽吸前后,油槽顶部的压力能降低 96.07%。②对于管道中的测点 2~4,当未开始油雾抽吸前,测点的相对压力值为大气压,当油雾开始抽吸时,测点压力先降低,后缓慢升高并趋于稳定。在计算停止时,测点 2、3、4 的压力分别为 -425、-446、-500 Pa。由此可见,当负压抽吸值设定为 -500 Pa 时,可有效抽出油槽顶部的绝大部分油雾(图 6),且能有效降低油槽顶部的压力,避免油雾因压差作用外逸至油槽盖板、风洞、转子等处。

3.4 油雾抽吸量变化曲线

图 10 为油雾抽吸过程中油雾抽吸量的变化曲线。由图 10 可知,出口油雾抽吸量的总体变化遵循先上升、后下降的规律。在迭代步数为 1 000 步时,开始进行油雾抽吸,由于油雾从抽吸口到达油雾出口需一定的时间,因此在迭代步为 1 245 步前,出口油雾量一直为 0。然后,随着迭代步数的增加,油雾开始排出,且抽吸量也不断升高,直至迭代步为 1 820 步时,油雾抽吸量达顶点,为 0.008 23 kg/s。最后,由于油槽顶部压力的下降和油雾量的减少,油雾抽吸量开始下降,直至计算停止,油雾的抽吸量降至 0.000 7 kg/s。这代表着油槽内的绝大部分油雾均已通过抽吸管道被排出。

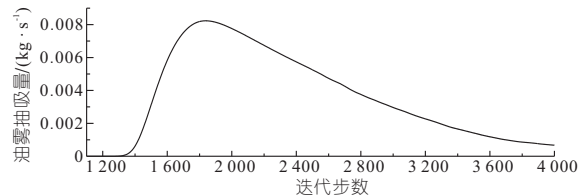


图 10 油雾抽吸过程中油雾抽吸量的变化曲线

Fig. 10 Curve of oil mist amount during oil mist discharge

4 结论

经过油雾抽吸,大部分油雾被有效排出,油槽顶部的相对压力从 3 736.1 Pa 降至 146.5 Pa,压降达 96.07%。出口油雾抽吸量总体变化遵循先上升、后下降的规律,油雾最大抽吸量可达 0.008 23

kg/s。油雾抽吸装置能有效排出油雾,抑制油雾外逸。

参考文献:

[1] 何宝海,赵宇彤,李荣耀,等.棉花滩水电站机组推力轴承防甩油问题的研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2019,20(3):28-31.

[2] 杨举,王涛,周峰峰,等.葛洲坝水电站发电机推力轴承油雾防治分析[J].人民长江,2018,49(17):103-106,112.

[3] 杨攀,陈怡,潘鹏.瀑布沟机组上导轴承油槽密封盖板改造[J].水电与新能源,2021,35(7):48-49,55.

[4] 武彬,任泽民,敬燕飞.瀑布沟水电站发电机油雾的治理研究及应用[J].大电机技术,2016(5):52-55.

[5] 黄德建.小型水电站机组轴承油雾问题研究与治理[J].四川水利,2021,42(5):47-49.

[6] 邓尧曦,叶玉麟.浅析吸排油雾装置在水电站的应用[J].水电与新能源,2020,34(5):58-61.

[7] 曹硕桐.水电站机组油雾排放控制技术的研究与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.

[8] 孙志翔,吴卫康.一种推力轴承油雾吸收装置的研究与应用[J].科学技术创新,2022(4):193-196.

[9] 王荣光,曹硕桐,田翔,等.基于改进的遗传-PID算法的机组轴承油雾排放控制策略[J].应用科技,2019,46(3):70-75.

[10] 刘传东,曹硕桐,田翔,等.基于P-模糊PID控制的发电机轴承油雾排放策略[J].科学技术创新,2018(34):8-10.

Numerical Simulation of Flow Field Characteristics of Thrust Bearing by Oil Mist Discharge Device

YANG Xiong¹,ZHANG Zhi-ping¹,PENG Xu-yi¹,WU Zhong-hua¹,ZHANG Song-xiao¹,NIE Sai¹,SUN Jie²,ZHENG Yuan³,ZHANG Yu-quan³

(1. Jiangxi Hongping Pumped Storage Co.,LTD, Yichun 330600, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The escape of oil mist from bearing oil groove of power station will not only pollute the environment of power station, but also bring safety hazard to electrical equipment. Combined with the actual situation of hydropower station, the installation of oil mist absorption device can help to discharge excess oil mist from oil tank and effectively avoid the pollution problem of oil mist in power station. In order to investigate the variation of oil mist distribution, velocity, pressure at measuring points and discharge amount of oil mist in the oil tank, numerical simulation calculation of thrust bearing oil tank with negative pressure oil mist pipe was carried out. It is found that after complete oil mist discharged, most of the oil mist can be effectively discharged; The overall change of the amount of oil mist at the outlet follows the law of rising first and then falling. Under the suction pressure of -500 Pa, the maximum discharge amount of oil mist could reach 0.008 23 kg/s. After the oil mist is discharged, the pressure drop at the oil tank upper region reaches 96.07%, and the reduction of the pressure difference can effectively prevent the oil mist from escaping to the cover plate, the wind tunnel, the rotor and so on. The research can provide some theoretical help for the oil mist discharge process of oil tank so as to better formulate the oil mist control strategy.

Key words: oil mist discharge; thrust bearing; numerical simulation; pumped storage power station; evaporation-condensation model



(上接第 149 页)

[4] 徐南,马符讯,贾东振.智能优化LSSVM算法的混沌时间序列边坡变形预测模型[J].测绘与空间地理信息,2015,38(2):9-11,17.

[5] 易庆林,张明玉,文凯,等.三峡库区白水河滑坡变形特征及影响因素的阶段分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2017,39(1):38-42.

[6] 卢书强,易庆林,易武,等.库水下降作用下滑坡动态变形机理分析——以三峡库区白水河滑坡为例[J].工程地质学报,2014,22(5):869-875.

[7] 王孔伟,常德龙,李春波,等.再论“滑坡群”——以三峡库区为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(5):1491-1501.

Mechanism of Formation and Deformation Characteristics of Baihe Landslide in the Three Gorges Reservoir Area

LIU Shi-yuan^{1,2},WANG Kong-wei^{1,2},ZHOU Zhun^{1,2},ZHAO Zhi-hao^{1,2},WANG Lan^{1,2},ZHANG Kai-yuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Baishuihe landslide is a typical representative of bedding landslide in the Three Gorges reservoir area. However, the research on its formation evolution process and deformation characteristics after water storage is not deep. On the basis of field geological investigation and the latest survey data and GPS monitoring data, this paper makes a detailed study on the rock and soil structure of Baishuihe landslide and its deformation characteristics after impounding. The results show that the evolution process of Baishuihe landslide has gone through the early stage of landslide, the rock landslide and the accumulation landslide. At present, Baishuihe landslide is in the accumulation landslide stage; Baishuihe accumulation landslide is the product of vertical superposition of landslide accumulation bodies caused by the destruction of the second-stage rock landslide, and there is a clay layer in the middle. Corresponding to the water level of 135 m and 156-175 m, the deformation of Baishuihe landslide can be divided into two stages. The deformation characteristics of Baishuihe landslide are gently inclined steps and steeply inclined steps. The research results provide the corresponding decision-making suggestions for the treatment of Baishui River landslide, and also provide the direction for the later treatment of geological disasters with similar structural characteristics.

Key words: Baishuihe landslide; clay ground; monitoring data; deformation characteristics