

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221582

# 基于 CFD 的水轮发电机组推力轴承油槽油雾特性分析

姚 婵, 郑 源

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 在水轮发电机组中, 推力轴承油槽的体积最大、内部结构相对更为复杂, 故油槽内产生的油雾多, 常会出现内甩油和外甩油现象, 对机组的安全稳定运行产生很大影响。基于计算流体力学基本理论对某电站推力轴承建立计算模型, 并改变压油叶栅数量, 利用 ICEM 对三维模型划分网格, 在 Fluent 中进行计算, 利用 CFD-POST 分析推力轴承油槽油雾相关参数。结果表明, 在水轮发电机组设计时, 可适当增加压油叶栅数量, 以增大叶栅上下温度差、降低叶栅下方油温、增大压力, 从而更好地抑制内甩油现象, 有效防止油雾因低压而扩散。

**关键词:** 推力轴承; 油槽; 油雾; 内甩油; CFD

**中图分类号:** [TV734.2<sup>+</sup>1]; TK73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)06-0162-04

## 1 引言

水电站水轮发电机组大都会出现“甩油”和油雾溢出现象, 这主要是因为机组在运行过程中, 轴、轴领、甩油环等旋转部件会带动透平油旋转, 动静部件摩擦生热, 油温升高, 促使油雾形成和扩散。同时, 由于离心力飞溅的油液与因蒸发产生的油气在空气中发生雾化, 从而形成油雾。油雾在油槽中不断累积, 油面压力升高, 当超过外部大气压强时, 油雾便会从旋转部件与油槽盖等位置逸出。虽然短期内不会造成设备事故, 但其危害随着时间的积累会逐渐表现出来<sup>[1]</sup>。目前, 针对油雾逸出已进行了很多研究, 但很少通过改变某参数来研究油雾现象。PANG JIAYANG 等<sup>[2]</sup>研究了不同密封间隙和转速对油箱流场和油气分布的影响; GERTZOS K P 等<sup>[3]</sup>利用 Fluent 在一定边界条件下对油膜流体域的三维 N-S 方程进行了分析计算; 孙志翔等<sup>[4]</sup>提出了一种推力轴承油雾吸收装置, 为水轮发电机推力轴承油槽油雾治理提供了参考; 杨举等<sup>[5]</sup>提出了一种防治推力轴承油雾的新思路, 即先将油雾尽量封堵于油槽内, 再将溢出油槽的油雾通过油雾吸收装置予以吸收。鉴此, 本文对某抽水蓄能电站水轮发电机组的推力轴承油槽油雾逸出现象进行了研究, 通过

改变压油叶栅数量探究其对油雾的影响, 旨在控制油雾扩散, 减少内甩油和外甩油现象, 对于油雾的控制具有指导意义。

## 2 计算流体力学基本理论

### 2.1 控制方程

流体流动均满足物理学三大守恒定律, 主要包括质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。对于牛顿流体来说, 这些方程统称为 N-S 方程。

#### 2.1.1 质量守恒方程

质量守恒方程可表述为单位时间内在流体内部某一微元控制体内流体质量减少的量等于从控制体内流出的质量<sup>[6]</sup>, 即:

$$\partial \rho / \partial t + \partial (\rho u_i) / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为流体的密度;  $u_i$  ( $i = x, y, z$ ) 为在三个方向上速度的分量;  $x_i$  ( $i = x, y, z$ ) 为坐标方向。

当流体为不可压缩流体时, 密度为恒定的常数, 则连续性方程可简化为:

$$\partial (\rho u_i) / \partial x_i = 0 \quad (2)$$

#### 2.1.2 动量守恒方程

动量守恒方程表示单位体积流体的动量变化率与作用在该单位体积上流体的质量力与表面力之和相等。不可压缩流体的动量方程为:

$$\rho du/dt = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (3)$$

收稿日期: 2022-07-31, 修回日期: 2022-09-05

作者简介: 姚婵(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力机组故障诊断, E-mail: yaochanhhu@163.com

通讯作者: 郑源(1964-), 男, 教授、博导, 研究方向为流体机械及水利水电工程技术, E-mail: zhengyuan@hhu.edu

式中,  $f$  为微元体质量力;  $p$  为微元体表面力;  $\mu$  为流体的动力粘度;  $\nabla$  为梯度;  $u$  为流体的速度。

### 2.1.3 能量守恒方程

能量守恒方程可描述为在流体空间的任一控制体积内流体动能的变化率等于单位时间内系统所增加的热量。如果以温度  $T$  为变量, 则可表示为:

$$\partial(\rho T) / \partial t + \text{div}(\rho u T) = \text{div}[(k / c_p) \text{grad} T] + S_T \quad (4)$$

式中,  $k$  为流体的传热系数;  $c_p$  为比热容;  $T$  为温度;  $S_T$  为流体的粘性耗散项。

### 2.1.4 湍流模型

采用有限体积法求解流场控制方程。湍流模型的选取与网格划分和计算模型有关, 在不考虑油膜建模的情况下, RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  模型更适合轴承用油雾计算, 在流体旋转上更具优势。湍流动能方程及湍流动能耗散率方程分别为:

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\kappa \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_\kappa \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (6)$$

式中,  $G_\kappa$  为平均速度梯度产生的湍流动能;  $G_b$  为浮力产生的湍流动能;  $Y_M$  为可压缩湍流波动膨胀对总耗散率的贡献;  $\alpha_\kappa$  为湍流动能有效普朗特数的倒数;  $\alpha_\epsilon$  为湍流耗散率  $\epsilon$  的有效普朗特数的倒数。

壁面边界条件用来设定流场几何壁面附近流场相互作用与热交换的条件。根据计算需求近壁面区采用标准壁面函数, 其余常系数项保持默认值。

## 2.2 边界条件设置

进出口边界条件与轴承润滑油的冷却方式有关<sup>[7]</sup>。对于外循环冷却方式, 需要将低温油注入油槽, 当润滑油完成一个循环后, 将热油从出油口排出。此时, 进口边界条件设置为质量流量进口, 进油管的冷油油温为 35 °C, 质量流量为 12.54 kg/s。出口边界条件为自由出流。推力头和镜板为旋转部件, 将其设置为旋转壁面。转速为 500 r/min。初始化时, 油槽内油温为 45 °C。

## 3 模型建立及结果分析

### 3.1 模型建立

#### 3.1.1 流体域建模

以某抽水蓄能电站推力轴承油槽为原型, 建

立三维几何模型。推力头、镜板为一体结构, 轴向推力通过推力头、镜板传递到推力瓦上。推力瓦共 12 块, 每个推力瓦下方由 18 个弹性橡胶垫支撑。图 1 为推力轴承装配图。主要由推力头及镜板、推力瓦、油槽、油槽盖、上机架、挡油板、挡油环等组成。

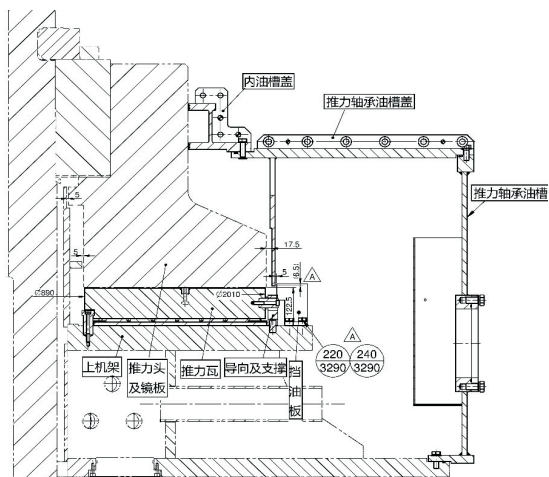


图 1 推力轴承装配图

Fig. 1 Installation diagram of thrust bearing

建模时, 忽略一些不重要部件结构, 对模型进行简化。考虑到物理模型的对称性, 采用 1/4 模型进行计算, 大大减少了网格数量和计算时间。另外, 对于动静间隙的问题, 将油槽假定为密闭环境。只考虑挡油管与滑转子的间隙, 这也是判断机组是否会发生内甩油的关键。简化后的推力轴承三维几何模型, 见图 2。

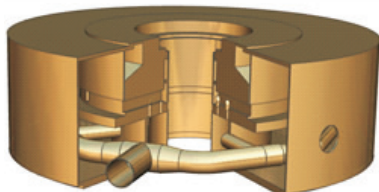


图 2 推力轴承模型

Fig. 2 Thrust bearing model

设置旋转周期性边界面减少计算时的网格数量。计算模型分油管路计算域及油槽计算域。见图 3。

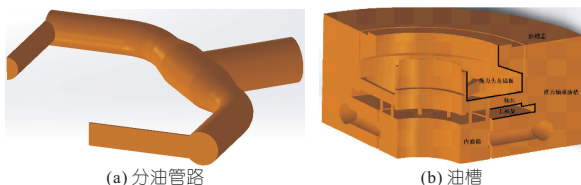


图 3 分油管路和油槽计算域

Fig. 3 Calculation domain of oil pipe line and oil tank

#### 3.1.2 网格划分

网格划分是进行模拟仿真的关键步骤。目前

网格划分技术主要分为结构化网格和非结构化网格<sup>[8]</sup>。结构化网格生成速度快,比较适合结构相对简单的模型,但当处理一些较复杂的模型时,工作量很大,难度也高。由于推力轴承模型结构形状不规则,因此采用适应性较好的非结构化网格对计算域离散。网格模型见图 4。

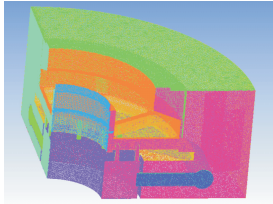


图 4 网格模型

Fig. 4 Mesh model

### 3.1.3 网格无关性验证

不同的网格划分方法会改变网格的数量,继而影响计算精度和计算时间,一般网格数量增加会增加计算精度,但用时更长。为保证仿真的准确性,选用五套网格进行计算,比较油槽内某点的压力、温度(表 1、2),Mesh3 压力误差和温度误差均在 1% 以内,故最终选择 Mesh3 进行后续计算。

表 1 五套网格数量

Tab. 1 Number of five sets of grids 个

部件	Mesh1	Mesh2	Mesh3	Mesh4	Mesh5
进油管网格数量	95 615	159 424	204 030	266 603	334 667
油槽网格数量	1 015 472	1 337 990	1 702 106	2 297 635	2 607 570
总网格数量	1 111 087	1 497 414	1 906 136	2 564 238	2 942 237

## 3.2 结果分析

利用 FLUENT 软件进行求解,VOF 方法是通过追踪控制单位体积中不同流体相的体积分数

表 2 不同网格数量压力、温度的变化

Tab. 2 Change of pressure and temperature in different grids

网格	压力/kPa	温度/℃	压力误差/%	温度误差/%
Mesh1	-10 806.1	35.797		
Mesh2	-11 402.1	35.989	5.515	0.536
Mesh3	-11 503.7	36.116	0.891	0.352
Mesh4	-11 586.3	36.195	0.718	0.218
Mesh5	-11 640.5	36.235	0.467	0.111

来确定自由液面位置和形状,而 MAC 方法是追踪自由液面流体质点的运动轨迹来确定自由液面位置和形状。VOF 方法相对来说具有计算速度快、节约时间等优势,本文采用 VOF 模型<sup>[9]</sup>。

### 3.2.1 压油叶栅数量对油槽温度的影响

初始时刻,油箱内油温为 40 ℃,冷油管进油的油温为 35 ℃。当改变压油叶栅的数量  $n$  时(图 5),油槽内整体温度变化不大。但随着压油叶栅数量的增加,叶栅上下的温度差增大,当  $n$  为 3 时,其温差最大。这是由于油雾在上流时路程更长,压油叶栅对油雾外溢有一定的阻碍作用。表明压油叶栅不仅能阻挡润滑油因负压的上流,还能使叶栅下方润滑油温度降低,减小润滑油蒸发而产生的油雾。当润滑油的热量传递给上部空气时,由于空气流动性较强,且热传递较快,因此油槽内油温分布也比较均匀。

### 3.2.2 压油叶栅数量对油雾生成的影响

随着压油叶栅数量增加,挡油管聚集了较多油雾,但压油叶栅阻止了油雾外溢(图 6)。当  $n=1$  时区域 A 仍有少量油雾绕过压油叶栅扩散,当  $n=2$  时油雾量明显减少,当  $n=3$  时不再有油雾扩散。由于压油叶栅数量的增加,油雾生成且外

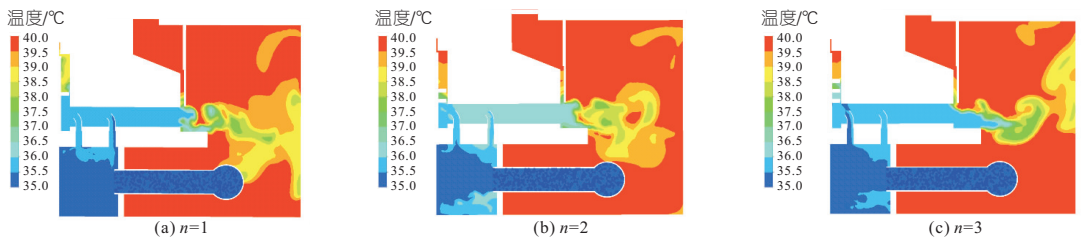


图 5 压油叶栅数量不同时旋转周期面的温度分布云图

Fig. 5 The temperature distribution cloud chart of the rotating periodic surface with different number of pressure oil blade

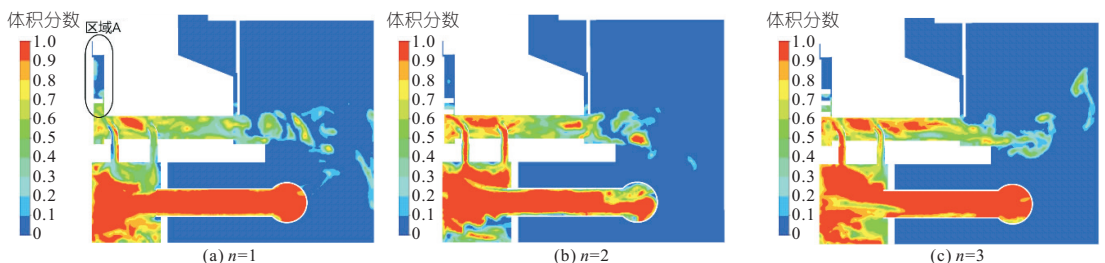


图 6 压油叶栅数量不同时旋转周期面的油雾体积分数云图

Fig. 6 Oil Fog volume fraction cloud map of rotating periodic surface with different numbers of pressure oil blade

溢的速度越来越慢。表明压油叶栅能很好地将油雾控制在油箱内,不会从区域 A 扩散出去,即抑制了内甩油现象的发生。

### 3.2.3 压油叶栅数量对油槽压力的影响

内甩油和外甩油现象一般分别发生在区域 A、B。图 7 为改变压油叶栅数量时,旋转周期面上的压力分布云图。由图 7 可知,当压油叶栅数量增加时,区域 A、B 压力均会增加,具体数值可通过绘制曲线 a、b 来获得,见图 8。

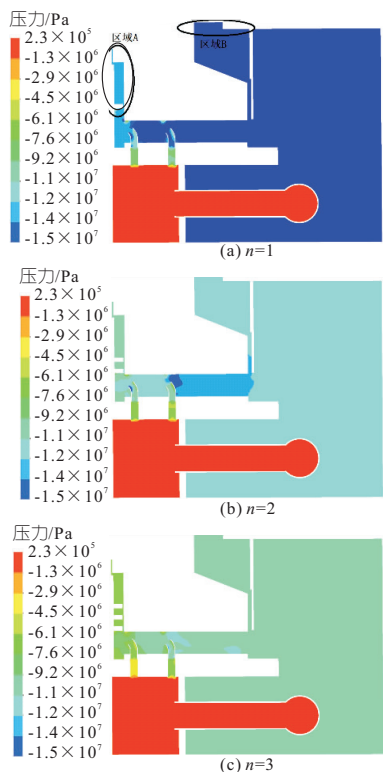


图 7 压油叶栅数量不同时旋转周期面的压力分布云图

Fig. 7 Pressure distribution cloud chart of rotating periodic surface with different number of pressure oil blade

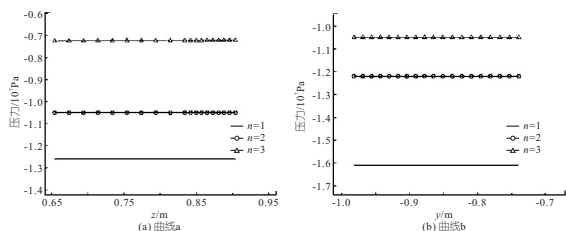


图 8 曲线 a、b 压力分布图

Fig. 8 Pressure distribution chart of curve a, b

当压油叶栅增加时,曲线 a 上平均压力分别为 -12 644 720、-10 458 740、-7 230 225 Pa; 曲线 b 上平均压力分别为 -16 101 887、-12 209 933、-10 499 424 Pa。曲线 a 上的压力变化率为

42.82%, 曲线 b 上的压力变化率为 34.79%。可以看出压油叶栅数量的变化对曲线 a 影响更大,即对内甩油影响也更大。由于推力轴承油槽较大,而压油叶栅距离曲线 a 较近,因此压油叶栅数量的改变对内甩油的影响更加明显。同时,转子在高速旋转的过程中,由于压差的作用,油雾一般会向低压区扩散并聚集,但随着压油叶栅数量增加,压差减少,抑制了油雾的扩散与泄露,从而将油雾控制在油箱内。

## 4 结论

针对水轮发电机组的油雾问题,在改变压油叶栅的数量后,利用 CFD 进行分析计算,比较了油槽内温度、油雾体积分数及压力的不同,得出压油叶栅不仅可以阻挡润滑油因负压而聚集,还能减小润滑油蒸发而产生的油雾。同时,与外甩油相比,压油叶栅对内甩油现象有更明显的抑制作用。因此,在水轮发电机组中,可以适当增加压油叶栅的数量,从而减少油雾对于机组的危害。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] PANG JIAYANG, LIU HUIZI, LIU XIAOBING, et al. Analysis on the escape phenomenon of oil mist from turbine lower guide bearing based on VOF model [J]. Advances in mechanical engineering, 2021, 13(11).
- [3] GERTZOS K P, NIKOLAKOPOULOS P G, PAPAADOPOULOS C A. CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant [J]. Tribology international, 2008, 41(12).
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孔珑. 工程流体力学 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 卢德平. 大型水轮发电机推力轴承油槽内流场分析和结构优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] 葛晨昊. 基于 CFD 分析的水轮发电机导轴承优化设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [9] 张承志. 基于 CFD 的水轮发电机组推力轴承油槽的尺寸优化 [D]. 长春: 长春工程学院, 2020.

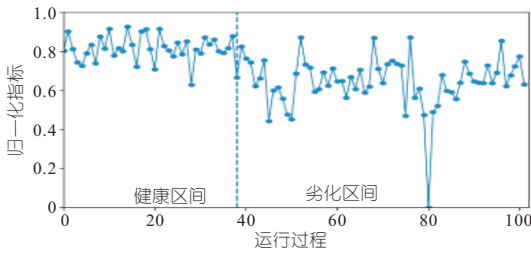


图 5 综合劣化曲线

Fig. 5 Comprehensive degradation curve

## 5 结论

a. 利用 MCVMD 进行多通道信号处理, 针对每个轴承面构建基于振动瞬时轨迹的特征图像的机组表征方法, 相比单一信号或单一指标更能反映机组运行状态。

b. 利用基于工况参数的条件对抗生成网络构建健康模型, 能够学习不同工况下振动轨迹特征, 有效避免了工况差异对劣化过程分析的影响。

c. 利用遗传算法对多轴承面劣化过程进行权重寻优, 降低了指标在健康运行阶段的波动性, 提高了其劣化表征的可信度。

## Degradation Assessment of Shaft System of Hydropower Unit Based on Instantaneous Orbit Feature Image and Conditional Generative Adversarial Network

WANG Yi-guo<sup>1</sup>, CHANG Hui<sup>2</sup>, CHEN Dong-jun<sup>3</sup>, WU Yi-fan<sup>4</sup>, LI Chao-shun<sup>4</sup>

(1. Guangdong Energy Group Co., Ltd., Guangzhou 510630, China; 2. Tianshengqiao First-class Hydropower Development Co., Ltd., Xingyi 562400, China; 3. Guangdong Yudean Changhu Power Generation Co., Ltd., Yingde 513021, China; 4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The shaft system of hydropower unit has a significant impact on the stability of the unit. The degradation assessment of the shaft system can visually reflect the operating condition of the unit. This paper presents a method for assessing the degradation of the unit's shaft system using instantaneous orbit feature image and conditional adversarial generative network (CGAN). Firstly, the vertical signals of each bearing were constructed as a complex signal, and the multivariate complex variational mode decomposition (MCVMD) method was used to process the signal and extract the instantaneous orbit features to construct the instantaneous orbit feature images. CGAN was used to construct the health model. The health model can fit the distribution of feature images in different operating conditions in healthy state and thus output health feature images. The healthy indicator was constructed using the differences between real and healthy images. The genetic algorithm was used to optimize the weights of multiple bearings in order to reduce the volatility of the comprehensive degradation curve in the healthy zone. The proposed method was tested on the unit's shaft system data and its validity has been proved.

**Key words:** hydropower unit; degradation assessment; instantaneous orbit feature; conditional generative adversarial network; genetic algorithm

\*\*\*\*\*  
(上接第 165 页)

## Oil Mist Analysis of Thrust Bearing Oil Tank of Hydro-generator Unit Based on CFD

YAO Chan, ZHENG Yuan

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In hydro-generator units, the thrust bearing oil tank has the largest volume and the internal structure is relatively more complex. Therefore, there are many oil mists in the oil tank, and there are often internal and external oil spills, which have a great impact on the safe and stable operation of the unit. Based on the basic theory of computational fluid dynamics, the calculation model of thrust bearing in a power station was established, and the number of pressure oil blade was changed. The ICEM was used to mesh the three-dimensional model, and Fluent was used to calculate. The CFD-POST was used to analyze the oil mist related parameters of thrust bearing oil tank. The results show that in the design of hydro-generator units, the number of pressure oil blade can be appropriately increased, so as to increase the temperature difference between the upper and lower blades, reduce the oil temperature below the blade and increase the pressure, so as to better inhibit the occurrence of internal oil rejection and effectively prevent the diffusion of oil mist due to low pressure.

**Key words:** thrust bearing; oil tank; oil mist; internal oil spill; CFD

## 参考文献:

[1] 胡晓,肖志怀,刘东,等. 基于无监督特征学习的水电机组健康状态实时评价方法[J]. 水利学报, 2021, 52(4):474-485.

[2] 王继选,胡润志,管一,等. 基于 RFOA 优化 GRNN 的水电机组振动预测[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21):120-126.

[3] CUI X, HUANG J, LI C, et al. Three-dimensional instantaneous orbit map for rotor-bearing system based on a novel multivariate complex variational mode decomposition algorithm[J]. Mechanical systems and signal processing, 2022, DOI: 10. 1016/j. ymssp. 2022. 109211.

[4] MIRZA M, OSINDERO S. Conditional Generative Adversarial Nets[J]. Computer Science, 2014:2672-2680.

[5] REHMAN N U, AFTAB H. Multivariate variational mode decomposition[J]. IEEE transactions on signal processing, 2019, DOI: 10. 1109/TSP. 2019. 2951223

[6] GOLDMAN P M A. Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics[J]. Orbit, 1999, 20(1):17-21.

[7] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets [J]. MET Press, 2014.