

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20250644

# Kaplan 水轮机轮毂无油化技术理论及应用研究

郑吉斯<sup>1</sup>, 何文才<sup>2</sup>, 李四伟<sup>3</sup>, 苏景军<sup>4</sup>, 郑程遥<sup>4</sup>

(1. 深圳市恩莱吉能源科技有限公司, 广东 深圳 518133; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510630;  
3. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南 长沙 410007; 4. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635)

**摘要:** 针对 Kaplan 水轮机轮毂内油量大, 且漏油往往造成河流污染的问题, 提出了水轮机轮毂无油化运行技术。根据 Kaplan 水轮机轮毂内摩擦副的力学特征, 相对于传统技术, 在假设牛顿流体作润滑介质条件下, 用 N-S 方程分析出其摩擦—润滑系统的关键因子。因为润滑的本质是用合适“剪切强度”的介质改善摩擦性能, 故将之拓展到非牛顿流体, 甚至是固体及混合物, 从而根据经典的 Stribeck 润滑机理, 建立了 Kaplan 机组轮毂内取消矿物油润滑的理论基础和关键技术。同时通过在 106 台 Kaplan 水轮机的实际应用, 证实了该技术不仅可以节约大量矿物油, 而且还提高了润滑效率, 尤其是其从根本上保护了河流生态安全, 具有重要的经济意义与环保意义。

**关键词:** Kaplan 水轮机; N-S 方程; Stribeck 曲线; 自润滑材料; 轮毂无油运行

**中图分类号:** [TV734.1]; TK73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2025)11-0182-04

## 1 引言

桨叶调节系统对于转桨式水轮机的高效运行至关重要<sup>[1]</sup>。目前, 转桨式水轮机绝大多数为接力器置于轮毂内, 轮毂其余空间皆充满矿物油, 其目的是作为轮毂内各摩擦副的润滑介质, 并平衡外部水压力以免河水进入轮毂以防止轮毂内金属结构生锈。由于转桨式水轮机内存在大量矿物油, 其渗油、漏油增大了河流被污染的风险。因此, 减少轮毂用油以减轻环境污染的相关技术成为研究热点<sup>[2]</sup>。1997~2010年, 瑞典 Vattenfall 电站的 11 个新转轮采用了带有高压接力器和无油轮毂的机组。1987~2023年, 日本东芝公司已经安装了 43 台配备无油转轮的 Kaplan 机组。灯泡贯流式机组最大容量 43.6 MW, 最大转轮直径为 5.3 m。俄罗斯称轮毂无油水轮机为环保型水轮机, 在大型轴流转桨式机组应用, 最典型为 Mainskaya 水电站, 转轮直径 10 m, 容量 110 MW。2012 年以来, 我国进行了轮毂无油运行理论与技术研究, 提出将接力器外置于轮毂, 去掉轮毂内所有矿物油代之以自润滑轴套等, 该技术在各种气候环境下运行了 106 台, 不仅可节省大量矿物油, 而且可提高摩擦效率和机组运行平稳性,

尤其是从根本上保护了河流生态安全。鉴于此, 本文将轮毂无油化技术的理论基础, 关键技术及工艺, 以及应用案例作一介绍, 为该技术的进一步应用及相关研究奠定基础。

## 2 理论基础

### 2.1 数学模型

传统的水轮机轮毂内充满了矿物油(机油), 其主要作用是液压传动和润滑。新型的 Kaplan 水轮机将接力器置于水轮机本体外, 水轮机本体内用机械传动取代液压传动。因此, 轮毂无油运行的关键是去掉矿物油后的润滑问题。显然, 用原来基于牛顿流体润滑(机油)的相关理论已经不够完备, 必须拓展到其他润滑介质, 例如非牛顿流体、干摩擦介质和混合介质等。为此, 首先揭示相关润滑介质与牛顿流体介质润滑的区别与联系。

牛顿流体摩擦润滑的基本方程式 N-S 方程, 写成矢量微分形式<sup>[3]</sup>为:

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right] = F - \nabla p + \eta \Delta v \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为密度;  $v$  为速度;  $t$  为时间;  $\nabla$  为 Nabta 算子;  $F$  为体积力;  $p$  为压强;  $\eta$  为动力粘度;  $\Delta$  为 Laplace 算子。

收稿日期: 2025-04-10, 修回日期: 2025-07-19

作者简介: 郑吉斯(1985-), 男, 博士, 研究方向为水轮机无油化技术, E-mail: zjs\_skywalker@msn.com

### 2.2 物理模型

摩擦—润滑系统取决于材料、润滑剂、负载/结构尺寸、工作压力和滑动速度,这五个基本变量<sup>[4]</sup>。因此,构建相关参数的数学—物理模型是问题的关键。Kaplan 水轮机轮毂内的各摩擦副主要有枢轴与轴套,导向杆与导向槽、连杆、拐臂等,通常前两者为主要磨损件,而两者的分析模型相似<sup>[4]</sup>,故以此为对象建模分析。

枢轴与轴套摩擦副的模型为一个偏心的径向轴承模型(图 1(a))。对水轮机桨叶轴套而言,转动角速度为 1°/s,而轴径一般为 200~600 mm,压力为 20~200 MPa。故承载力大,线速度慢。而导向杆与导向槽与径向轴承摩擦副的本质一样,均为固体界面间缝隙的流动润滑(图 1(b)),可用两个平板间的缝隙流动来建模<sup>[1-2,4]</sup>。

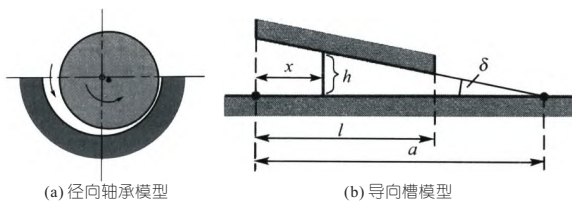


图 1 润滑剂缝隙流动模型

Fig. 1 Lubricant gap flow model

数学—物理模型采用如下假设<sup>[3]</sup>:①流体的流态为牛顿流体。②流体与固体间不存在滑移;③流体的惯性力与重力可忽略不计;④沿膜厚方向,流体的压力为常数;⑤流体不可压缩。根据假设对式(1)进行简化,可得方程<sup>[4]</sup>:

$$f_1 = 2.4 \sqrt{\eta v / (\rho r)} \quad (2)$$

$$f_2 = 2 \sqrt{\eta v_0 / (L \rho)} \quad (3)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_2$  分别为图 1(a)、(b)摩擦副的摩擦系数;  $v_0$  为最小膜厚度时的相对速度。

从式(2)、(3)可以看出,影响摩擦系数的主要因子为  $\eta v / \rho$ ,称之为赫西数。摩擦系数与赫西数的关系曲线为 Stribeck 曲线<sup>[4]</sup>(图 2)。

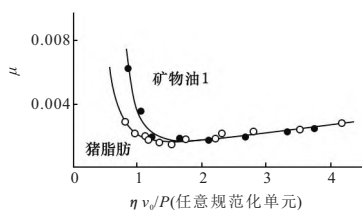


图 2 矿物油与油脂的 Stribeck 曲线

Fig. 2 Stribeck curve for mineral oil and grease

欧特尔·普朗特将牛顿流体(矿物油)与非牛顿流体(猪油脂)等对摩擦系数影响的变量均取为  $\eta v / \rho$ 。可见,  $\eta v / \rho$  作为摩擦因子具有普适性。原因在于无论是牛顿流体还是非牛顿流体,“粘度  $\eta$ ”实际上是与剪切强度对应的因子。因此,润滑本

质上就是以一定剪切强度的润滑介质去改善磨损。

Stribeck 对各种介质作了全面、精确的试验,得出了广义 Stribeck 曲线<sup>[3]</sup>(图 3)。由图 3 看

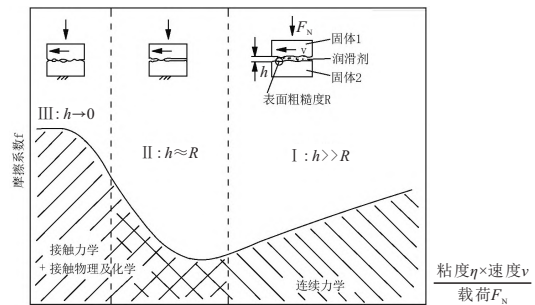


图 3 广义 Stribeck 曲线

Fig. 3 The generalized stribeck curve

出,当膜厚  $h$  与固体表面的粗糙度  $R$  满足下式时摩擦系数最小:

$$h - R \approx 0 \quad (4)$$

由式(4)可知,最小摩擦系数是在润滑介质将摩擦件表面“抹平”发生。此刻,称之为 Stribeck 曲线的混合润滑(Mixed Lubrication),部分载荷由接触表面微凸体承担(边界润滑机制),部分载荷由逐渐形成的、不连续或不稳定的流体动压/弹流润滑膜承担。这是边界润滑向流体润滑过渡的区域。由此,预示着可以以一种混合介质改善摩擦而不用矿物油,这实际是牛顿流体润滑的一种拓展。

事实上,现今的自润滑材料,如石墨、聚四氟乙烯、二硫化钼等,均为相应介质。

自润滑轴套的摩擦原理见图 4。将石墨以一定工艺,镶嵌在铜质母材上。当轴与轴瓦的摩擦副工作时,石墨即粘附在摩擦面上,将粗糙度“抹平”,使得其摩擦系数小,磨损小,经试验验证其摩擦系数  $< 0.1$ 。

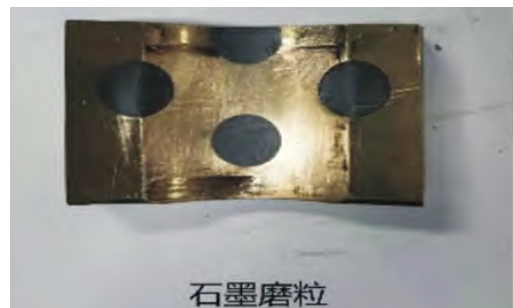


图 4 石墨轴承局部解剖图

Fig. 4 Partial sectional view of the graphite bearing

轮毂内的摩擦副速度慢、承载力大。若用矿物油润滑,因其粘度较小,则赫西数很小。工况点在 Stribeck 曲线的左边界,这摩擦系数大,磨损较大。而改用自润滑材料,因其“粘度”合适,工况点可满足式(4),磨损小。由此可见,轮毂内采用矿物油润滑不合适,采用自润滑材料较佳。

### 3 轮毂无油运行水轮机结构的构成与主要特征参数

#### 3.1 结构构成

Kaplan 水轮机叶片上承受巨大的水力矩与水推力,这样调节角度的接力器活塞自然承受较大的反作用力,为保证活塞杆的刚度,通常将接力器置于轮毂内,以形成“短杆”结构,保证其刚度。但接力器是一液压传动装置,这样就使得转轮轮毂内部存在压力油,为实现轮毂无油运行,须将接力器从轮毂内取出,采用高油压传动技术,使得接力器的体积大为缩小,采用有限元分析技术,使操作轴的刚度可以通过计算可靠保证,使接力器置于发电机轴端。再将轮毂内的所有摩擦副用自润滑材料作为介质,可去掉主轴和轮毂内的全部矿物油,形成无油化结构 Kaplan 水轮机(图 5(a))。

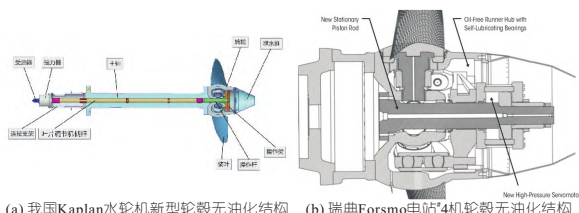


图 5 轮毂无油化结构

Fig. 5 Oil-free hub

我国的轮毂无油水轮机(图 5(a))与欧美国家的轮毂无油水轮机(图 5(b))区别较大,欧美的轮毂无油水轮机接力器仍在轮毂内(轮毂存在漏油和渗油),只是在轮毂与水的边界采用了自润滑轴套,并去除了矿物油,以求环保。而我国的轮毂无油水轮机,轮毂内接力器移至水轮机本体外,轮毂内完全无油,更重要的是图 5 所示水轮机,压力油须从轴端受油器输送到轮毂内接力器,通过多层操作油管,其既有与转轮同步的高速旋转运动,又有操作时的往复运动,与多个浮动瓦组成摩擦副,要求制造精度很高,否则会造成较大的磨损,使得漏油窜油现象发生。由此看出,图 5(a)水轮机结构比图 5(b)水轮机结构简单可靠,运维成本较低。

#### 3.2 主要特征参数

轮毂无油水轮机是多项技术进步综合的结果,其基本特征参数较传统的 Kaplan 水轮机有较大不同,主要体现在以下特征参数:①油压。油压存在于受油器与接力器中,传统的油压为 2.0~6.3 MPa。国际上普遍采用 12 MPa<sup>[5]</sup>,我国中小水电站调速器采用 16 MPa 操作油压,为保证操作油压系统的一致性,故轮毂无油水轮机操作油

压额定值选定为 16 MPa。②摩擦系数。由于选用了自润滑材料,且根据载荷合理设计轴套结构尺寸,使得赫西数在最优值附近。摩擦副(特别是桨叶轴套与枢轴)的摩擦系数  $f < 0.1$ ,为使操作力留有裕量,实际设计时一般取  $f = 0.15$ 。③轴套磨损量。为保证轮毂无油水轮机可靠运行和精确调节,及桨叶密封的有效性,要求自润滑轴套的磨损量在使用寿命周期内  $\leq 0.03$  mm,一般合格的自润滑轴套的磨损曲线见图 6。④调节轴的刚度与临界转速。轮毂无油水轮机的特点是叶片调节轴较长,一般为 6~20 m,为细长杆,故“压杆”的稳定问题十分突出,需要用有限元分析(FEM),并且要求其屈曲安全系数  $n \geq 8$ 。

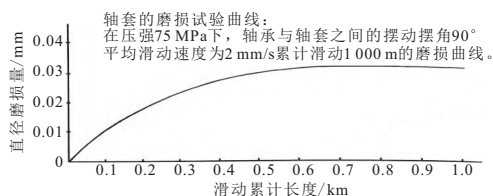


图 6 轴套磨损试验曲线

Fig. 6 Wear test curve of the shaft sleeve

为防止水轮机结构发生共振,应对调节轴进行模态分析,其一阶临界转速大于水轮机飞逸转速的 25%。

## 4 轮毂无油水轮机的主要安装工艺

#### 4.1 密封结构

首先,受油器采用间隙密封且无瓦结构<sup>[6]</sup>,由于轮毂无油水轮机转轮、操作架、主轴、调节轴、接力器均以同一速度旋转,它们之间不存在径向相对运动,故采用“静密封”就很容易保证其有效性。而对于调节轴,由于调节时存在轴向往复运动,所以为动密封,但由于其速度较慢(约 10 mm/s),故采用多层密封(承压层、过滤层、阻挡层)组合。

对于桨叶密封(图 7),其转动速度不大,只要轴套磨损值满足要求,则叶片枢轴不会与密封件产生较强磨损,可保证密封的可靠性。密封件采用了特殊的“X<<”结构,V 的开口迎向水面,水压力使密封更为紧密。

#### 4.2 安装工艺

(1)轴套安装。轴套装配采用冷套工艺,将轴套通过液态氮冷却后,再嵌入相应轴孔中。之后,轴套的膨胀力紧嵌轴孔,保证合适的配合。

(2)密封件安装。要求密封槽与密封件预紧力约为 1 MPa。安装完成后,应在 1.5 倍的最大水头的压力下(但不小于 0.5 MPa)做 24 h 保压

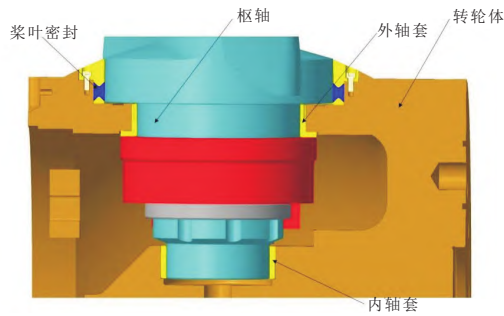


图 7 桨叶枢轴摩擦副及桨叶密封的结构图

Fig. 7 Structural diagram of blade pivot friction pair and blade seal

试验,试验介质采用压缩空气,将之通入轮毂内部,而外部密封口用肥皂水泡覆盖,试验时如肥皂泡没有鼓出则表明密封合格。

这里需要特别说明的是,只要在最大水头(并留有一定裕量)的静压下,保证密封合格,则在水轮机转轮运行时,因为有部分压能转化为动能,水对密封的压力会减小,对桨叶密封反而有利。图 8 为 CFD 对 10 m 水头的轴流机组桨叶密封口流场分析。可以看到,桨叶密封部分(图中红圈部分)所承受的静压基本为负压,这是因为在轮毂表面水流速较快,因此大部分势能转化成了动压,残留的静压通常已经不足一个大气压。由此可见,轮毂外部的水通过桨叶密封渗漏进轮毂的可能性很低。



图 8 轮毂周围流场静压分布 CFD 分析结果

Fig. 8 CFD analysis results of static pressure distribution in the flow field around the hub

在密封结构和相关制造工艺的保证下,轮毂无油水轮机的防渗标准为,对受油器和接力器组合为“油的不可见渗漏”,对转轮桨叶密封为“水的不可见渗漏”。

## 5 应用案例

### 5.1 广东红桥水电站的检查结果

红桥水电站位于广东省英德市,2012 年设计了  $2 \times 3\,500\text{ kW}$  的两台轮毂无油灯泡贯流转桨式水轮机,至今已运行 11 年。为严格验证轮毂无油运行的技术成果,在甘溪水电站(直径 1.8 m)

运行 6 年后,将转轮吊出拆卸检查;红桥水电站(直径 3.56 m)运行 8 年后,将其轮毂吊出全面检查,检查结果为:①最大摩擦深度仅 0.02 mm;②轮毂内运动构件如连杆、拐臂、导向槽等无明显磨损;③密封无损坏或老化痕迹;④转轮室内无任何水滴或锈蚀。

### 5.2 广东四会白沙水电站

白沙水电站 2 台灯泡贯流式水轮机发电机组,转轮直径 5.5 m,单机容量 10 MW。由于水轮机转轮叶片密封磨损老化,导致漏油。而距离该电站不到 200 m 的对岸就是四会市供水厂的取水口,为近 50 万市民生产生活用水水源。电站于 2020 年开始对机组进行轮毂无油化改造,显著节省了运维成本,保证了供水安全。

## 6 结论

a. 润滑系统为润滑剂、负载/结构尺寸、工作压力和滑动速度,轮毂内以矿物油作为润滑介质,不合适。

b. 采用轮毂无油化技术可节约矿物油,免除了油对河流污染的风险,而且还提高摩擦效率。

c. 由于材料科学的进步,水力机械相关摩擦副对润滑介质和润滑结构的方式有了更为广泛的选择空间,特别是自润滑技术和“干摩擦技术”的应用研究。

### 参考文献:

- [1] 罗红云,吴义斌,周学志,等. 轴流转桨式机组不同工况运行稳定性研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(6): 179-183.
- [2] FALKENHEM R, NAKAGAWA N, HAVARD D. Technologies for eliminating oil in Kaplan turbines[J]. Hydro review worldwide, 2010.
- [3] 霍斯特·契可斯. 摩擦学 对摩擦、润滑和磨损科学技术的系统分析[M]. 北京:机械工业出版社,1984: 108-120.
- [4] (德)瓦伦丁 L. 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 李强, 雒建斌, 译. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2019: 179-181.
- [5] ENZENHOFER K. Statkraft hydro power plants-oil spills and valuable areas[D]. Sweden:Mid Sweden University, 2014.
- [6] 郑程遥,刘安平,劳鹏飞,等. 水轮机高油压桨叶电液全自动调节器的开发与应用[J]. 水电站机电技术, 2016, 39(6): 20-23.

(下转第 72 页)

台机组,故不能仅依靠调压井来消除该扰动。

参考文献:

[1] 董钟明,郭俊勋,周玉国,等.考虑下游河道明渠流扰动的尾水隧洞水力波动特性研究[J].水电能源科学,2024,42(6):59-63.

[2] 孙洪亮,陈益民,蔡付林,等.白鹤滩水电站输水发电系统水工模型试验研究[J].水电能源科学,2021,39(2):90-92,89.

[3] 孙洪亮,陈益民,杨飞,等.白鹤滩水电站尾水洞明满流段优化试验研究[J].中国水利,2019(18):80-83.

[4] 周建旭,刘峰宏.复杂输水发电系统尾水隧洞明满流对水力过渡过程的影响[J].水利水电科技进展,2024,44(3):51-56.

[5] 陈益民,程文超,周建旭,等.白鹤滩水电站输水发电系统水力干扰稳定性分析[J].水利水电科技进展,2022,42(5):78-84.

[6] BESHARAT M, TARINEJAD R, AALAMI M T, et al. Study of a compressed air vessel for controlling the pressure surge in water networks: CFD and experimental analysis[J]. Water resources management, 2016, 30(8): 2687-2702.

[7] CHENGY G, LI J P, YANG J D. Free surface-pressurized flow in ceiling-sloping tailrace tunnel of hydropower plant: Simulation by VOF model[J]. Journal of hydraulic research, 2007, 45(1): 88-99.

[8] 史晓阳,杨玉锋,赵子杰,等.基于VOF方法的尾水隧洞过渡过程明满流水力特性研究[J].水电技术(中英文),2021,52(1):78-88.

### Study on Transient Characteristics of Free-surface-pressurized Flow in Tailrace Systems Under Downstream River Water Level Fluctuation

LI Wen-jie<sup>1</sup>, ZHOU Da-qing<sup>1,2</sup>, GUO Jun-xun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In actual hydropower operations, activities like flood discharge and load adjustment induce downstream water level fluctuations, heightening the possibility of free-surface-pressurized flow transitions in the tailrace system and challenging system reliability and operational stability. To investigate the impact of downstream river water level fluctuations on the transient characteristics of free-surface-pressurized flow in the tailrace system, numerical simulations including the VOF multiphase flow, turbulence and compressible model were conducted to simulate four free-surface-pressurized flow conditions with different water level variation rates. The results show that the amplitude of pressure fluctuations within the tailrace system exhibits a positive correlation with the rate of change in the downstream water level. Furthermore, pressure fluctuations in the tailrace tunnel downstream of the surge shaft exhibit periodic oscillations, primarily generated by the coupling effect between downstream water level variations and water level fluctuations within the surge shaft itself. The surge shaft absorbs high-frequency pressure pulsations generated by downstream water level changes, thereby exerting a low-frequency influence on the operation of the two turbine units sharing the same tailrace tunnel. During rapid downstream water level changes, the tailrace tunnel experiences sharp pressure surges and drops; Concurrently, numerous vortex structures emerge accompanied by flow separation, leading to highly disordered flow patterns, which adversely affect the operational stability of the generating units.

**Key words:** free-surface-pressurized flow; transition process; VOF model; pressure pulsation; flow field evolution

\*\*\*\*\*  
(上接第 185 页)

### Study on the Theory and Application of Oil-free Technology for Kaplan Turbine Hubs

ZHENG Ji-si<sup>1</sup>, HE Wen-cai<sup>2</sup>, LI Si-wei<sup>3</sup>, SU Jing-jun<sup>4</sup>, ZHENG Cheng-yao<sup>4</sup>

(1. Shenzhen Energy Science and Technology Co., Ltd., Shenzhen 518133, China; 2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510630, China; 3. Hunan Water Resources and

Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China;

4. Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** To address the issue of oil inside the Kaplan turbine hub and the resulting risk of river pollution due to leakage, this study proposes an oil-free operation technology for Kaplan turbines. Based on the mechanical characteristics of the friction pairs within the hub, the study identifies the key factors of the friction - lubrication system using the N-S equations under the assumption of Newtonian fluid lubrication. Recognizing that the lubrication lies in using a medium with appropriate shear strength to improve friction performance, the analysis is extended to non-Newtonian fluids, as well as solids and mixtures. This leads to the establishment of a theoretical foundation and key technical principles for eliminating mineral oil lubrication within the Kaplan hub in terms of the classical Stribeck lubrication mechanism. Practical application on 106 Kaplan turbine units demonstrates that the proposed technology not only significantly reduces mineral oil consumption but also improves lubrication efficiency. More importantly, it fundamentally protects riverine ecological safety, offering substantial economic and environmental benefits.

**Key words:** Kaplan turbine; N-S equations; Stribeck curve; self-lubrication material; operation of turbine hub without oil