

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230196

转速对水轮发电机推力轴承油膜特性的影响研究

张 健, 丁 强, 马海波, 王 彤, 王浩宇

(国能大渡河检修安装有限公司, 四川 乐山 614000)

摘要: 推力轴承的性能对水轮发电机组的能量转换效率和安全稳定运行至关重要, 为此, 采用数值模拟方法探究了某水电站水轮发电机组推力轴承不同转速工况下推力轴承油膜特性, 分析了油膜内部的压力、速度和温度分布, 明确转速对推力轴承性能的影响规律。结果表明, 转速不会改变推力瓦表面的压力分布, 但随转速的升高, 最大压力与转速几乎呈线性变化的关系; 转速上升使得推力瓦表面高温区向出油边远离主轴方向移动, 且平均温差和最大温差均呈上升趋势。飞逸转速下推力轴承需要承受的压力远高于额定转速, 且也要承受局部的高温, 飞逸转速下最大温差超过 40 K, 容易造成轴瓦烧毁现象。研究结果为水电站推力轴承运行及优化设计提供了理论支撑。

关键词: 推力轴承; 油膜特性; 数值模拟; 飞逸转速

中图分类号: [TV734. 1]; TM312

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0205-04

1 引言

推力轴承是水轮发电机组的重要组成部分, 其性能关系到整个机组系统的安全稳定运行, 因此研究推力轴承的油膜特性非常有必要。目前, 普遍采用数值模拟方法研究推力轴承的性能, 如聂赛等^[1]研究了抽水蓄能机组的油膜特性, 发现油膜压力随机组转速的上升而增加, 因此机组应尽量避免低转速运行; 章志平等^[2]采用数值模拟方法对推力轴承的结构进行优化, 结果表明优化的轴承结构承载能力加强, 推力瓦表面温度降低; 王雪梅等^[3]采用流固耦合的方法分析了推力轴承的静力学; 姚泽等^[4]探究了额定转速下油膜厚度和瓦面倾角对油膜压力和速度的影响规律, 发现其承载力随膜厚的增大而减小; 周东岳等^[5]认为加强镜板边界层内外的对流作用, 能够有效解决推力瓦温度过高的问题; 韩钊等^[6]研究了注油泵压力对机组轴承油膜特性的影响。为此, 本文以某水电站的推力轴承为例, 对推力轴承油膜进行数值模拟, 分析不同转速工况下油膜内部压力、温度及速度分布, 明确转速对推力轴承性能的影响规律, 以期水电机组推力轴承的运行和优化提供参考。

2 推力瓦结构及油膜模型建立

2.1 推力瓦结构

水轮发电机组采用弹性油箱推力轴承, 共有 12 台弹性油箱, 每台弹性油箱上部支撑一块推力瓦。12 台弹性油箱由底盘连成整体, 并用联通管联通成为一个腔体, 充入一定压力的油液。机组运行时, 各推力瓦之间的不均匀负荷由弹性油箱均衡, 使 12 块推力瓦受力均匀, 图 1 为机组推力轴承结构图。

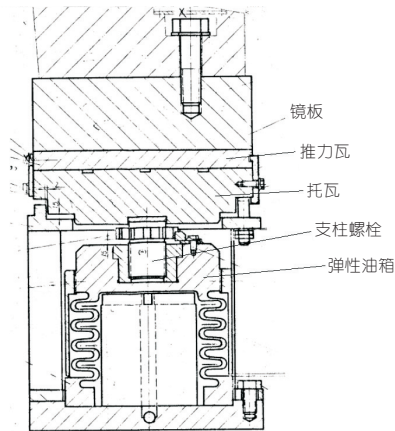


图 1 机组推力轴承结构图

Fig. 1 Thrust bearing diagram of hydro-generator unit

2.2 油膜计算模型

由于推力轴承 12 块推力瓦沿圆周方向均匀分布, 为降低计算量简化模型, 选取其中 1 块推力瓦及油膜进行分析。采用三维建模软件 UG 建立油膜的三维几何模型, 油膜平面图见图 2, 冷却油

收稿日期: 2023-02-14, 修回日期: 2023-03-09

作者简介: 张健 (1987-), 男, 工程师, 研究方向为水电设备检修, E-mail: 12076797@chnenergy. com. cn

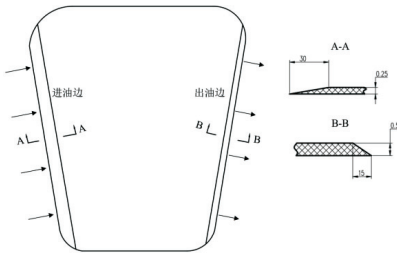


图 2 油膜平面图

Fig. 2 Diagram of oil film

从左侧进油边流入油膜内,从右侧出口边流出,两个壁面分别为推力瓦和镜板平面;油膜厚度与推力轴承的设计值保持一致,进油边和出油边的油膜厚度分别为 0.25、0.50 mm,从进油边到出油边以线性规律变化。

3 数值模拟方法

3.1 流动状态分析

在进行数值模拟前,首先确定油膜内的流动状态,即通过雷诺数 Re 来判断流动为层流或湍流,根据轴承油膜理论,油膜流动的临界雷诺数为 1 500 左右。

推力轴承使用的润滑油为[#]46 透平油,密度为 850 kg/m^3 ,动力粘度为 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$,比热容为 $2\,000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,导热率为 $0.128 \text{ kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。取油膜平均厚度作为特征长度,则可计算油膜内的雷诺数为 143,因此可判断油膜内的流动为层流。

3.2 控制方程

在进行数值模拟时,假设[#]46 透平油为不可压缩牛顿流体,即密度保持不变,所以水轮发电机组推力轴承油膜内的流动满足质量守恒、动量守恒和能量守恒方程。其方程式分别为:

$$\nabla(\rho\vec{v}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = \rho\vec{g} - \nabla p + \nabla[\mu(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)] + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla[\rho\vec{v}T] = \nabla\left[\frac{k}{c_p} \nabla T\right] + S_T \quad (3)$$

式中, ρ 为流体密度; \vec{v} 为速度; t 为时间; S_m 为不可压缩流体,取为 0; p 为压力; μ 为动力粘度; T 为温度; \vec{F} 为质量力; k 为流体传热系数; c_p 为比热容; S_T 为由机械能转换成热能的部分。

3.3 网格划分

由于油膜内的压力梯度和速度梯度较大,网格质量的好坏直接决定数值模拟的精度,为保证数值计算的准确性,本文对流体域进行结构化六

面体网格划分,并对靠近壁面的边界层进行加密处理;为精确模拟油膜性能,沿油膜厚度方向布置 20 层网格节点,保证温度、压力和速度沿油膜厚度方向的传递。此外对网格无关性进行了验证,最终确定的网格单元数为 95×10^4 个。

3.4 边界条件

在进油边给定质量流量,流量为单块推力瓦润滑油循环量的设计值 3 kg/s ;进口温度为该电站冷却油进入推力轴承油槽时的油温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;出口选择压力出口,所有壁面均采用无滑移壁面,设置收敛准则最大残差为 10^{-4} 。在计算不同转速工况时,保持进口流量和温度不变。

该机组额定转速为 89.2 r/min ,选取转速分别为 20、40、60、89.2 r/min 共计 4 个工况,研究机组转速上升过程中推力轴承油膜的压力、温度和速度分布规律;此外机组飞逸转速为 180 r/min ,分析对比了飞逸转速与额定转速下油膜的特性。

4 计算结果与分析

4.1 瓦面压力分布

不同转速下压力推力瓦表面压力分布见图 3。由图 3 可看出,不同转速下压力分布规律基本相同,均在左侧进油边形成了高压区,压力从左侧进油边到右侧出油边逐渐降低,并呈带状分布;润滑油在进油边和出油边压力差的驱使下从进油边流向出油边。转速会明显影响压力的大小,随转速的升高,压力值逐渐增加,到达额定转速时,局部的高压区压力上升至 8 MPa 。

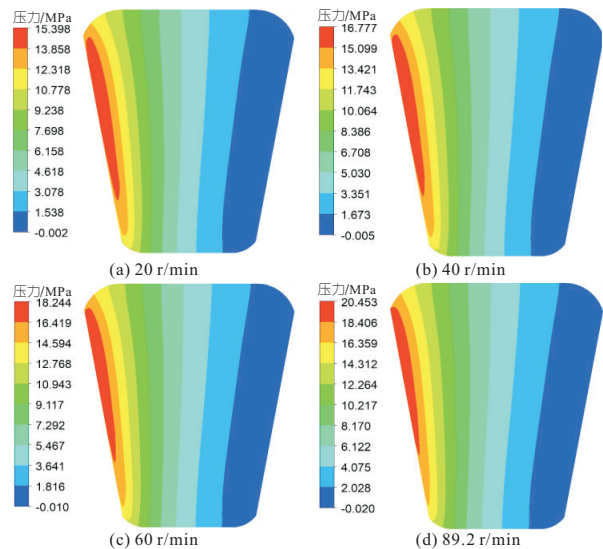


图 3 不同转速下推力瓦表面压力分布

Fig. 3 Pressure distribution of thrust pad under different speeds

推力轴承的承载压力可通过下式来计算:

$$F = \frac{12}{9 \times 810} \iint_A P ds \quad (4)$$

式中, A 为积分区域; P 为推力瓦压强; ds 为面积分。

在后处理软件中对推力瓦表面的压力进行面积分,即可求出单个推力瓦油膜的承载力,然后根据推力瓦的数量,利用式(4)即可得到整个推力轴承的承载力。4 个转速下推力轴承的承载总压分别为 1 829、1 987、2 145、2 370 t,发现随转速的上升,推力轴承需承受的载荷也逐渐上升,且转速与载荷几乎呈线性变化。

4.2 瓦面温度分布

图 4 为不同转速下推力瓦表面温度分布。由图 4 可看出,左侧进口边润滑油的温度较低,这是因为左侧进油边为冷油;随润滑油进入油膜内部,温度逐渐升高,这是因为推力轴承要承受发电机转子的重量及轴向水推力,旋转部件镜板与固定部件推力瓦之间产生大量的热,这些热量被润滑油吸收,所以越靠近右侧出油边,温度越高,在右侧形成了高温区。

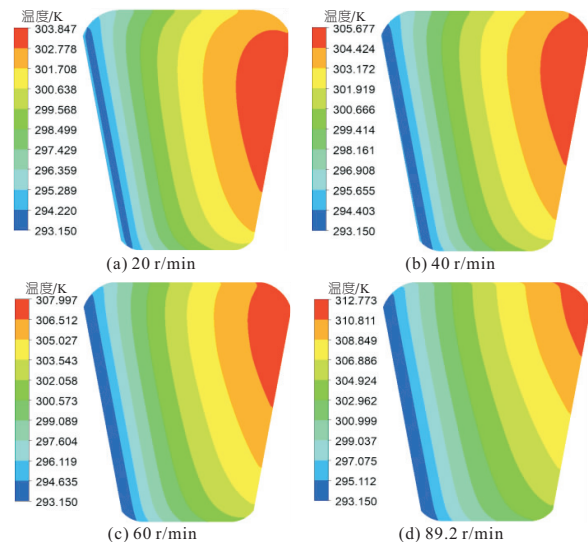


图 4 不同转速下推力瓦表面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of thrust pad under different speeds

当转速变化时,温度分布表现出两个明显的变化,一方面体现在分布规律上,左侧进口边的低温度区保持不变,但右侧出油边的高温区位置发生了变化,在 20 r/min 时,高温区基本位于出油边的中间位置,占据了大部分出油边的面积;随转速的上升,高温区逐渐向右上角移动,当达到额定转速 89.2 r/min 时,高温区分布在出油边远离主轴中心的一侧,这是因为镜板的转速增加时,整个油膜内流体所受到的离心力增大,在离心力的作用下,流体更容易被甩向远离中心的位置,

所以润滑油向出油边右上角聚集。另一方面体现在温度值上,转速上升后,产生了更多的热量,所以推力瓦表面的温度增加。

4.3 速度分布

图 5 为不同转速下镜板表面速度分布。由图 5 可看出,不同转速下镜板表面速度分布规律完全一致,均表现为从靠近主轴侧到远离主轴侧逐渐增加的现象,且同一径向位置的速度基本相同,这是因为镜板作为与发电机同步旋转的部件,所以镜板的速度分布完全符合转动部件的速度分布规律。在靠近主轴侧,半径小,线速度较低,随径向位置的增大,线速度也增大。随着转速的增加,线速度也逐步增大。

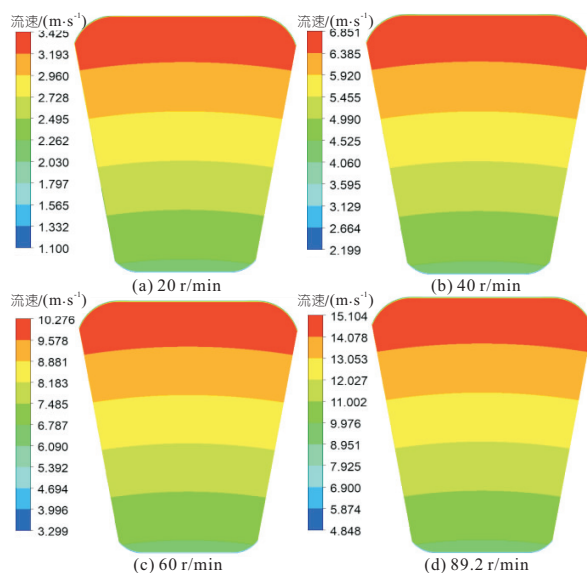


图 5 不同转速下镜板表面速度分布

Fig. 5 Velocity distribution of mirror plate under different speeds

由于镜板为旋转部件,推力瓦为静止部件,所以沿油膜厚度方向速度的分布规律不同,如图 6 所示。选取镜板为参考面,通过偏移得到 5 个不同位置的速度分布,其中 0 处为镜板,0.98h (h 为沿油膜高度方向的无量纲距离)为靠近推力瓦,由于推力瓦固定不动,表面速度为 0,所以选取靠近推力瓦表面的速度进行分析。

在 0.25h 位置,速度增大,高速区的位置发生了变化,主要集中在左侧进油边,润滑油进入推力瓦和镜板中间后,速度逐渐降低,在出油边远离主轴位置出现了低速区。在油膜厚度中间 0.50h 位置,速度达到最大,最高速度为 46.2 m/s,进油边高速区向靠近主轴方向移动,出油边低速区有所改善。在 0.75h 位置,速度开始降低,速度分布规律表现为从左下角到右上角逐渐降低。在靠近推力瓦的 0.98h 位置,受到静止部件推力瓦表面边界层的影响,速度明显减小,几乎整个平面均

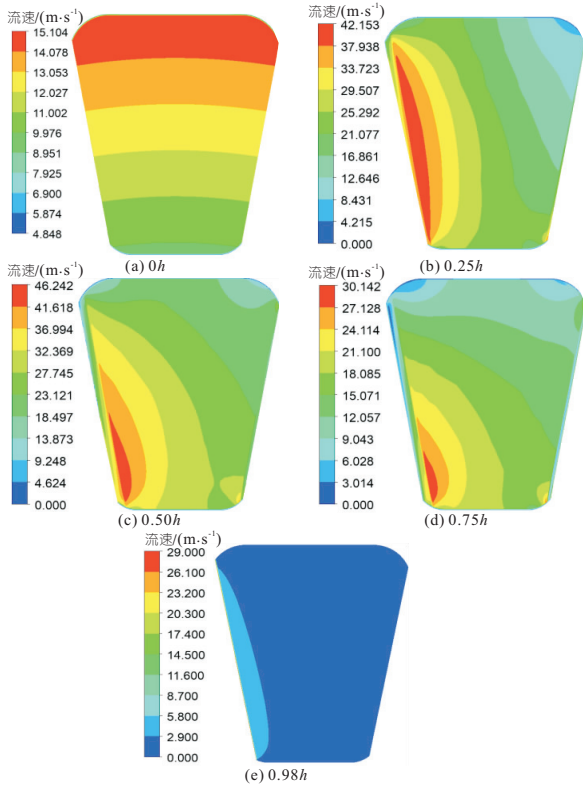


图 6 额定转速下油膜厚度方向不同高度速度分布
Fig. 6 Velocity distribution of oil film at different heights under design speed

处于低速度区。

4.4 飞逸转速下油膜特性

图 7 为飞逸转速 180 r/min 下推力瓦表面的压力和温度分布。由图 7 可看出,与额定转速下的分布规律相同,但压力值更大,推力轴承需承载总压为 3 100 t;另外推力瓦表面的温度也更高,最大温度达 336.1 K,高温区位于推力瓦出油边远离主轴位置。由此可看出在飞逸转速下,推力轴承需承受的压力远高于额定转速,且承受局部高温,易造成轴瓦烧毁现象。

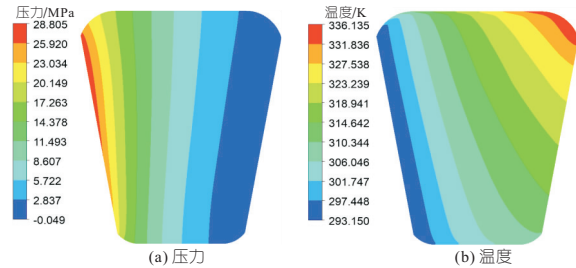


图 7 飞逸转速下推力瓦压力和温度分布
Fig. 7 Pressure and temperature distribution of thrust pad under runaway speed

对进油边和出油边的温度取平均值得到进出口的平均温差,根据图 3、4 得到推力瓦表面的最大压力和温差,见图 8。由图 8 可看出,随转速的上升,平均温差和最大温差均呈上升趋势,转速在 20~60 r/min 时,两个上升的幅度基本相同,但

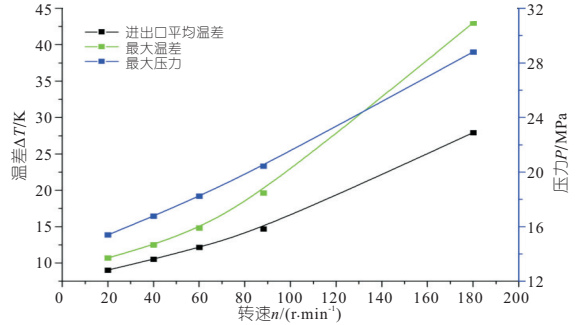


图 8 不同转速下油膜表面温差和最大压力
Fig. 8 Temperature difference and maximum pressure under different speeds

当转速从额定转速上升到飞逸转速时,最大温差的增幅明显大于平均温差,飞逸转速下最大温差超过 40 K。最大压力与转速曲线几乎为一条正斜率直线,说明转速上升导致最大压力上升,且两者几乎表现为线性关系。

5 结论

a. 油膜的速度分布沿厚度方向的分布规律不同,靠近镜板的高速区主要集中在左侧进油边;油膜厚度中间速度达到最大值;靠近推力瓦的速度明显减小。

b. 随着转速的升高,推力瓦表面压力值逐渐增加,高温区向出油边远离主轴方向移动,平均温差和最大温差增加,飞逸转速下需承受的压力和局部温度远高于额定转速。

参考文献:

- [1] 聂赛,刘泽,秦程,等. 抽水蓄能机组不同工况下推力轴承油膜特性研究[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(3):58-62.
- [2] 章志平,徐利君,彭绪意,等. 基于 CFD 的推力瓦优化的数值模拟与试验分析[J]. 水电能源科学,2018,36(12):137-140.
- [3] 王雪梅,孙建伟,刘斌,等. 抽水蓄能机组推力轴承静力学特性分析[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(5):64-69.
- [4] 姚泽,文亚南,屈波,等. 抽蓄机组稳态工况下推力轴承油膜运行机理的数值分析[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(3):104-107.
- [5] 周东岳,周攀,秦俊,等. 基于 N-S 方程的抽水蓄能机组推力轴承润滑特性研究[J]. 水电与抽水蓄能,2016,2(1):54-57.
- [6] 韩钊,黄毅,刘斌,等. 注油泵出口压力对抽水蓄能机组推力轴承油膜特性的影响研究[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(5):76-82.

114×10⁸、100×10⁸ 元。

c. 漫湾水库生态服务功能主要体现在生态调节、物质生产、生态支持三个方面,三项服务功能的服务价值贡献度最高。

d. 水库生态服务价值的能值优化调度将生态—社会—经济联系起来,从能值角度兼顾考虑经济效益和生态系统健康,是生态调度的新发展阶段,对维持河流水库生态系统健康发展具有重要意义,可推广至其他河流水库生态系统。

参考文献:

[1] 范继辉. 梯级水库群调度模拟及其对河流生态环境的影响[D]. 成都:中国科学院研究生院(水利部成都山地灾害与环境研究所), 2007.

[2] 毛文永. 流域开发规划环境影响评价的战略意义——以岷江上游紫坪铺水库工程与都江堰保护问题为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2001(3): 91-94.

[3] 戴凌全, 戴会超, 李玮, 等. 兼顾四大家鱼产卵需求的梯级水电站生态调度[J]. 水力发电学报, 2022,

41(5): 21-30.

[4] 王霞, 郑雄伟, 陈志刚. 基于河流生态需水的水库生态调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 59-61.

[5] 方国华, 丁紫玉, 黄显峰, 等. 考虑河流生态保护的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(7): 1-9.

[6] 张代青, 沈春颖, 于国荣, 等. 基于河道流量生态服务效应的水库生态价值优化调度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(2): 101-109, 116.

[7] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.

[8] 刘维丽, 程锦添, 杭桂兰, 等. 能值分析方法的应用与展望[J]. 福建师大福清分校学报, 2021, 39(2): 112-117, 126.

[9] 杨婷. 基于蚁群算法的水库群生态服务价值联合调度[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.

[10] 刘玘玘, 汪妮, 解建仓, 等. 水库群供水优化调度的改进蚁群算法应用研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 31-36.

[11] 徐刚, 马光文. 基于蚁群算法的梯级水电站群优化调度[J]. 水力发电学报, 2005(5): 7-10.

Optimal Dispatching of Manwan Reservoir Ecological Service Value Based on Energy Value Analysis

FU Jiang-feng, ZHANG Dai-qing, ZHANG Hui, MA Sen, CHEN Yi-jing

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to realize the sustainable utilization and maintain the healthy development of river and reservoir ecosystem, this paper applied energy value analysis to reservoir ecological operation for discussing the energy optimal operation of reservoir ecological service value. With the objective of maximizing the service energy of Manwan Reservoir and the constraints of ecological water demand and social economic water consumption, an optimal operation model of reservoir ecosystem service energy was established, and the ant colony algorithm was used to solve the model. The results show that the total service energy of Manwan Reservoir is 2.10×10²² sej in high flow year, 1.79×10²² sej in normal year, 1.58×10²² sej in dry year. Main service values are ecological regulation, water supply and ecological support, material production followed, cultural entertainment is the minimum. The results have practical value and important significance for maintaining the healthy development of the Lancang River basin, especially for the ecosystem of the Manwan Reservoir Region.

Key words: river and reservoir; ecosystem; service value; optimal scheduling; Manwan Reservoir



(上接第 208 页)

Influence of Rotating Speed on Oil Film Characteristics of Thrust Bearing of Hydro-generator Unit

ZHANG Jian, DING Qiang, MA Hai-bo, WANG Tong, WANG Hao-yu

(China Energy Dadu River Repair & Installation CO., LTD., Leshan 614000, China)

Abstract: The performance of thrust bearing is very important to the energy conversion efficiency and stable operation of hydro-generator unit. Therefore, the thrust bearing of a hydropower station was taken as the research object. The characteristics of thrust bearing oil film under different rotating speed conditions were studied. The pressure, speed and temperature distribution inside the oil film were analyzed. The influence law of rotating speed on the performance of thrust bearing was clarified. The results show that the rotational speed cannot change the pressure distribution on the thrust pad surface, but with the increase of rotational speed, the relationship between the maximum pressure and rotational speed is almost linear; The high temperature zone on the thrust pad surface moves away from the main shaft towards the oil outlet side with the increase of the rotating speed, and the average temperature difference and the maximum temperature difference show an upward trend. At runaway speed, the thrust bearing needs to bear much higher pressure than the rated speed, and also needs to bear local high temperature. The maximum temperature difference at runaway speed is more than 40 K, which is easy to cause bearing bush burning. The research results provide theoretical support for the operation and optimal design of thrust bearings in hydropower stations.

Key words: thrust bearing; oil film characteristics; numerical simulation; runaway speed