

水电机组推力轴承镜板泵及油循环冷却系统的水力优化设计

赖喜德¹, 张翔¹, 陈小明¹, 卢珍¹, 杨仕福²

(1. 西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要:针对水电机组推力轴承镜板泵流体动力设计过程中孔的布置形式以及集油槽的断面形状、面积和出口管路直径等几何参数优化问题,提出适合镜板泵流道设计的镜板泵性能预测及优化设计方法。通过不同几何参数组合,采用基于多工况数值模拟的性能预测方法来分析镜板泵的主要过流部件的关键尺寸、形状等对其性能的影响,并在此基础上提出一种基于整个循环系统协同的镜板泵水力优化设计方法,可提高自循环系统设计中流体动力系统的性能及可靠性。对比试验表明,在原试验循环系统参数不变的条件下,某大型水电机组推力轴承镜板泵在优化设计后平均扬程提高4 m,平均效率提高5.5%,且 $H-Q$ 曲线能更好保证变工况运行时系统的稳定性。

关键词:水电机组;推力轴承;循环冷却系统;镜板泵;集油槽;优化设计;性能预测

中图分类号:TK730

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2016)03-0062-06

Hydraulic optimization design of runner-pump and oil circulating and cooling system for thrust bearing of hydroelectric units/LAI Xide¹, ZHANG Xiang¹, CHEN Xiaoming¹, LU Zhen¹, YANG Shifu²(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: In order to optimize the layout and number of holes and geometric parameters such as the section shape, area, and outlet pipe diameter of the oil bath in hydrodynamic design of a runner-pump for the thrust bearing of hydroelectric units, a method for performance prediction and optimization design suitable for the flow passages of the runner-pump is presented in this paper. Through combination of different geometric parameters, the influence of the size and shape of the main flow passage components on hydrodynamic performance of the runner-pump was analyzed using the performance prediction method based on multi-condition numerical simulations. In this way, a hydrodynamic optimization design method for the runner-pump based on cooperation throughout the circulation system, which can improve the performance and reliability of the hydrodynamic system for self-circulating system design, is proposed. The results show that, compared with the original runner-pump, the average head is increased by 4m, the average efficiency is increased by 5.5%, and the $H-Q$ curve can guarantee better stability of the system under varying condition operation for the optimized runner-pump under the same test conditions.

Key words: hydroelectric unit; thrust bearing; circulating and cooling system; runner-pump; oil bath; optimization design; performance prediction

推力轴承作为水轮发电机组的关键部件之一,其冷却循环系统对于推力轴承乃至整个机组的正常运行至关重要。由于镜板泵系统结构紧凑、运行维护方便^[1],近年来大中型水电机组采用镜板泵作为推力轴承自循环冷却系统的油流循环动力已成为一种发展趋势^[2-3]。镜板泵是在推力头(或镜板)上加工数个孔(类似于叶轮流道)和在其外缘装集油槽(相当于蜗壳)来形成类似叶片泵的功能。从理论上来说,镜板泵是一种在众多限制条件下的特殊结

构离心泵,然而普通离心泵的设计理论和方法并不完全适用于这种特殊结构的超低比转数离心泵。因其转速由水轮机转速确定,推力头(或镜板)的尺寸和结构受到机组设计的限制,镜板泵的孔型要考虑制造加工方便,孔径和数量必须兼顾对于推力头(或镜板)的强度的影响。推力头(或镜板)孔的布置形式和数量及集油槽的形状、面积和出口管路直径等几何参数对镜板泵流体动力性能有重大影响。在实际工程设计中按径向或后倾方向的孔型布置,

采用非常粗糙的流量-压力抛物线假设来近似计算镜板泵的扬程,较少考虑集油槽对水力性能的影响及其与镜板孔的性能匹配,这样的设计往往导致镜板泵性能较差^[1-5],在变工况下不利于保证循环系统的稳定性。

笔者拟提出一种基于整个循环系统协同的镜板泵水力优化设计方法:①通过对循环冷却系统进行1D 流体动力数值模拟来确定不同工况下对镜板泵的扬程和流量要求;②根据镜板尺寸和结构、转速,初步设计集油槽与镜板孔流道;③采用3D 数值模拟进行性能预测,优化流道设计,优选集油槽与镜板孔流道的匹配方案;④基于整个循环冷却系统的流体动力协同仿真优化来保证自循环流体动力系统的可靠性。该方法和技术路线已用于东方电机股份有限公司的推力轴承镜板泵研制,证明可明显提高并有效保证整个循环冷却系统性能。

1 循环冷却系统的管路特性数值模拟与镜板泵设计参数确定

1.1 采用镜板泵的推力轴承自循环冷却系统

采用镜板泵为推力轴承自循环冷却系统提供油流循环的循环冷却系统的压力和流量要求与管路特性有关。在镜板泵设计中,应该首先根据循环冷却系统的布置进行管路特性数值模拟来确定镜板泵设计参数,或者在工程实际中通过调整管路特性来满足镜板泵的运行参数要求,这些都需要通过准确的数值模拟仿真来完成。图1为配合推力轴承试验台验证镜板泵性能的循环冷却系统管路,镜板泵泵出的压力油流通过环管进入冷却系统。该循环冷却系统管路系统由4组油冷却器、若干阀门和管路等组成,通过投入油冷却器数量、调节阀门的配合,满足不同参数的推力轴承循环冷却系统试验。该试验系统作为商业试验台已通过行业鉴定。



图1 试验台循环冷却系统管路

1.2 循环冷却系统的管路特性计算与试验验证

自循环冷却系统由镜板泵、一定数量的油冷却器、阀门、管路等组成。不同的电站,其油冷却器、阀门、管路的布置和安装高程等都可能不同,对镜板泵

要求的压头也不同。在镜板泵设计中,由于受到推力轴承尺寸和机组转速的限制,经反复计算仍不能满足泵参数要求时,还可通过调整循环冷却系统元件的特性来满足要求,所以对循环冷却系统的管路特性进行准确数值模拟分析和优化非常重要。传统的管路水力损失计算方法不便准确获得油循环管路系统各细节的流动参数,采用Flowmaster 软件对镜板泵试验台油循环管路系统进行1D 流体动力仿真分析,其模型如图2所示。Flowmaster 软件是由英国Flowmaster 公司开发的一维流体系统仿真软件,通过对系统管路内的压力、速度、温度等参数的解算来对流体系统各支路或各部件的工作性能进行预测和分析。

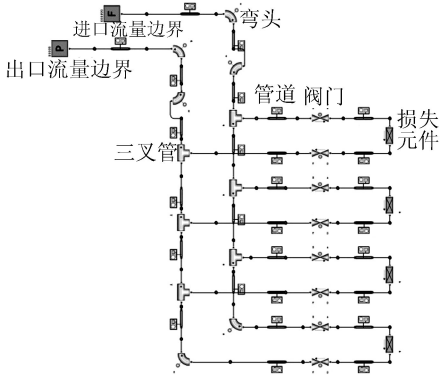


图2 镜板泵试验台循环冷却系统的管路计算模型

为了验证仿真数值计算的正确性,分别投入1、2、3个油冷却器进行了管路特性试验(Δh_1 、 Δh_2 、 Δh_3 为对应的水力损失),试验结果与数值模拟结果见图3,最大相对误差小于2%,证明采用此种方法计算管路特性是可行的。

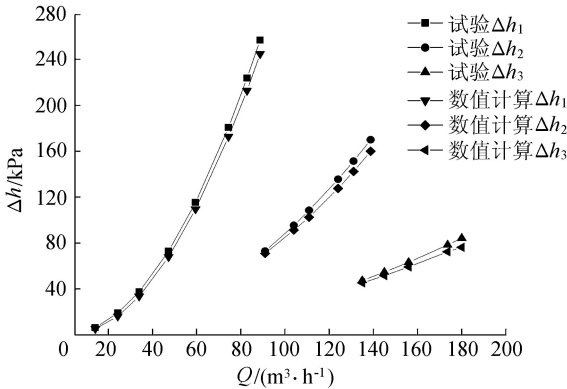


图3 管路特性试验与数值模拟对比

1.3 镜板泵设计流体动力参数的确定

采用数值计算方法预先计算推力轴承循环冷却系统的管路特性,得到的管路油流阻力特性(图3)可为镜板泵的设计提供较为准确的参数。在镜板泵设计中,还可通过调整冷却系统元件的特性和泵的设计性能参数来满足推力轴承循环冷却系统的要求。

某机组设计转速 $n = 225 \text{ r/min}$,根据推力轴承温

度控制要求,冷却油的流量 $Q=124\text{ m}^3/\text{h}$ 。针对图 1 的镜板泵试验台循环冷却系统的管路计算,投入 3 个油冷却器,仿真计算的管路水力损失约 19.5 m,因此确定镜板泵的设计参数为:流量 $Q=124\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=20\text{ m}$ 。镜板泵的比转速 $n_s=14.2$ 。

2 镜板的孔型方案及对性能的影响

推力轴承结构尺寸由水力发电机组设计确定,试验镜板主要几何参数为:内径 $D_1=1\,040\text{ mm}$,外径 $D_2=2\,139\text{ mm}$ 。根据流体动力参数要求,原始试验方案(方案 A)为:镜板孔形状为径向直孔,孔径 $d=40\text{ mm}$,孔数 $Z=8$;集油槽基圆直径 $D_3=2\,296\text{ mm}$,进口宽度 $b_3=65\text{ mm}$,断面形状为矩形,外形线为对数螺旋线,出口总面积 $F_1=24\,531\text{ mm}^2$,8 个出口周向均匀布置。初步方案镜板泵的流道如图 4(a)所示。

2.1 孔型方案

为了优化镜板孔流道设计,根据前述镜板的结构尺寸,在原始试验方案的径向直孔的基础上,考虑结构强度和加工工艺限制,再设计了 5 种形式,共选取了 6 种形式的镜板孔进行对比研究。每种形式的镜板孔之间有差异的参数见表 1,其 3D 几何模型见图 4。

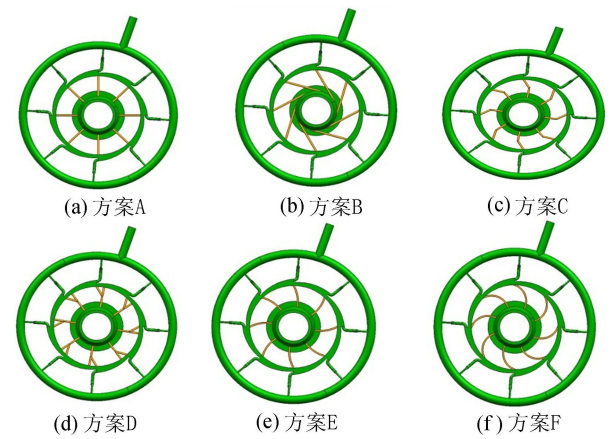


图 4 6 种镜板孔的 3D 模型
表 1 镜板孔型方案几何参数

方案	镜板孔形式	孔断面形状	特 征
A	直孔	圆形	均为径向孔
B	斜孔	圆形	在镜板上钻单直线孔,出口安放角最小(约为 61°)
C	折孔 (1 个出口)	圆形	镜板孔出口安放角为 61°
D	折孔 (2 个出口)	圆形	镜板孔出口安放角斜孔为 61°,另一孔为径向孔
E	圆弧孔 (出口安放 61°)	方形	镜板孔出口安放角为 61°,进口安放角为 90°
F	圆弧孔 (出口安放 20°)	方形	镜板孔出口安放角为 20°,进口安放角为 90°

2.2 不同孔型镜板泵的 3D 几何造型及网格划分

采用 Unigraphics NX 软件对不同形式镜板孔与

集油槽和环管组合而成的镜板泵进行 3D 几何造型,如图 4 所示。采用 Icem-CFD 软件对镜板泵进行全流道 3D 模型网格划分。由于存在动静区域,故分别对进口区域、镜板孔、集油槽、出口弯管和出口环管进行网格划分,之后在前处理里面通过交界面将各部分进行连接。另外,对流动梯度大的区域进行局部加密处理。数值模拟试验表明,只要全流道网格数大于 558 700 就可保证数值模拟结果与网格数无关。

2.3 3D 流场数值模拟及性能预测方法

为了预测镜板泵的外特性曲线,考虑到实际可能,采用 ANSYS CFX 对 $(0.6\sim1.4)Q_d$ (Q_d 为设计工况下冷却油的流量)运行范围进行 3D 流场数值模拟。根据数值模拟得到的镜板泵进出口的质量加权平均总压、压力对镜板所做功的功率及黏性力对镜板所做功的功率,可以预测计算镜板泵的扬程、功率和效率^[3-5]。

2.4 不同孔型的流体动力性能计算分析

采用前述的 3D 流场数值模拟方法对 6 种形式的镜板孔搭配同一集油槽的组合进行数值模拟,并预测计算不同镜板泵的外特性曲线如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,在整个计算工况范围内,不同镜板泵的扬程变化趋势相同,均随流量的增大而单调减小。扬程由高到低依次是方案 B、D、F、E、C、A。主要原因是随着出口安放角的增大,扬程逐渐降低,符合离心泵的扬程曲线变化规律。从图 5(b)可以看出,效率呈现出与扬程相同的变化趋势。效率由高到低依次是方案 B、F、D、E、C、A。

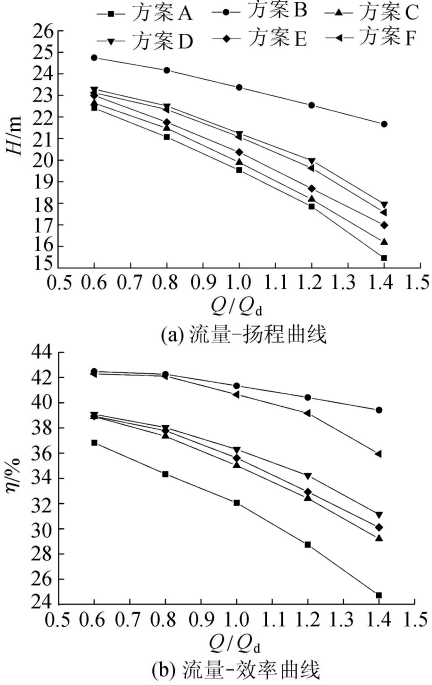


图 5 6 种孔型镜板泵外特性对比

按能量转换关系不同,将镜板泵分解成镜板(类似于叶轮)和集油槽两部分。图 6 和图 7 分别为镜板和集油槽的效率曲线(镜板和集油槽效率定义为镜板或集油槽的输出能量与输入能量的比值)。

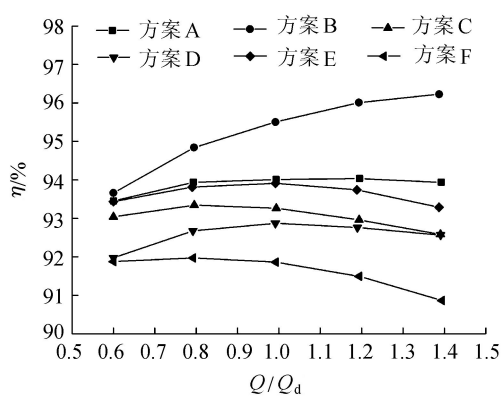


图 6 镜板效率曲线

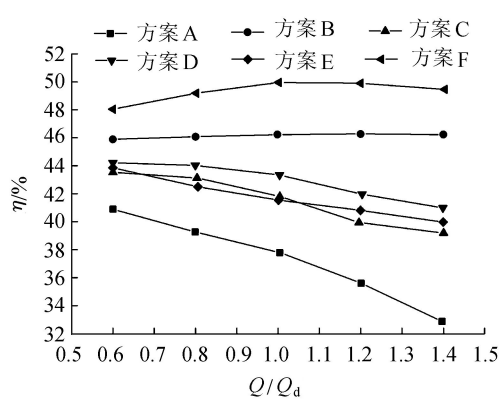


图 7 集油槽效率曲线

从图 6 可以看出,B 方案的镜板效率随流量增大而呈现出明显的递增趋势,且效率整体最高,这是因为该方案的出口安放角小并与集油槽匹配较好。其余方案的镜板在 $(0.6 \sim 1.4) Q_d$ 运行范围内运行效率曲线相对较为平坦,变化范围较小,镜板效率由高到低的方案是 B、A、E、C、D、F。从图 7 可以看出,F 和 B 方案的集油槽效率曲线较为平坦,而其余方案的集油槽效率随流量的增大而逐渐减小,这是因为出口安放角与集油槽匹配不合理、摩擦损失较大所致,集油槽效率由高到低的方案是 F、B、D、E、C、A。

综合上述分析可见,镜板孔的进出口安放角对镜板泵性能影响较大,在结构允许的条件下应尽可能采用小的出口安放角和进口冲角。

3 集油槽几何参数对镜板泵性能的影响

在实际工程设计中,大多数情况下较少考虑集油槽的流体动力性能,而主要将其作为收集镜板孔出口流体并将流体输送到出口循环冷却管路的装置。实际上集油槽(相当于蜗壳)对性能影响很

大^[6-8]。从上面分析可知,镜板泵孔型必须与集油槽流道匹配,且集油槽几何参数的变化对镜板泵性能有较大的影响。作为镜板泵最重要的过流部件之一,必须根据镜板孔型进行匹配优化设计。下面分别计算分析集油槽的断面形状和出口面积对镜板泵性能的影响。

3.1 集油槽断面形状

在原始试验模型泵(方案 A)集油槽的矩形(RET)断面基础上,再设计了梯形(LAD)和圆形(CIR)断面两种方案。集油槽按“等速度”规律设计,除集油槽断面形状外,镜板泵其余几何参数与不同镜板孔组合中完全一致。断面形状对比如图 8 所示。

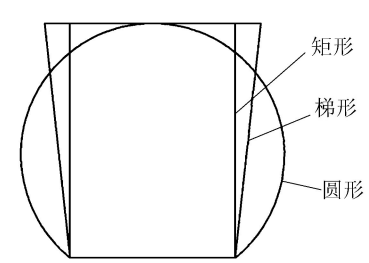


图 8 3 种形式集油槽出口断面

将 3 种断面形状的集油槽与 6 种形式的镜板孔分别进行配对组合成 18 个镜板泵进行性能预测及分析。图 9 为直孔配合 3 种断面形式集油槽的外特性对比,可以看出:直孔在配合圆形和矩形断面集油槽时,镜板泵扬程的相对差异在 1.5% 以内,绝对效率差异在 2% 范围内。

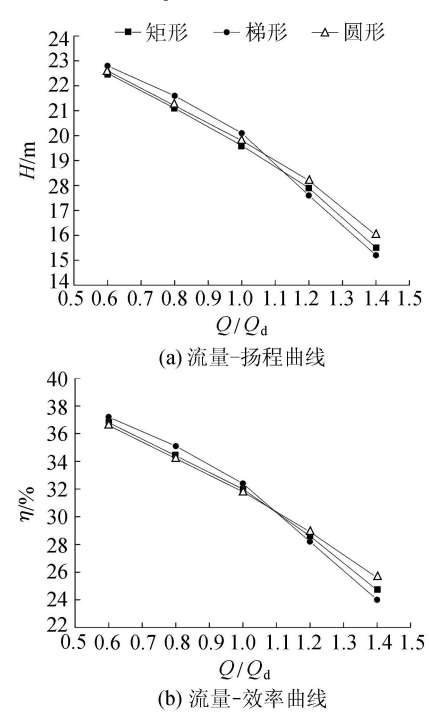


图 9 直孔配合 3 种断面形式集油槽的外特性

对 18 种组合方案进行数值模拟,对比分析发现,3 种断面形式的集油槽与 6 种形式的镜板孔进

行配合时,镜板泵性能相差都在 2% 以内,说明集油槽的断面形状对镜板泵的性能影响很小,设计时可仅从制造工艺的角度考虑而不用顾及断面形状对性能的影响。

3.2 集油槽出口面积

采用原始试验方案的镜板泵(方案 A)模型为研究对象,原始模型集油槽出口管径为 65 mm。为了分析出口管径变化对镜板泵性能的影响,改变集油槽出口面积为原始面积的 0.5 和 2 倍,对应管径大致分别为 46 mm 和 92 mm,除此之外,模型其他几何参数保持不变。

不同的集油槽出口管径下镜板泵外特性如图 10 所示,可以看出,出口面积缩小一半时镜板泵扬程和效率均有所提高,出口面积增大一倍时扬程和效率均出现小幅下降。这说明原始试验方案镜板泵模型的出口管径偏大,导致扩散损失较大,适当减小其出口管径有利于提高其性能。

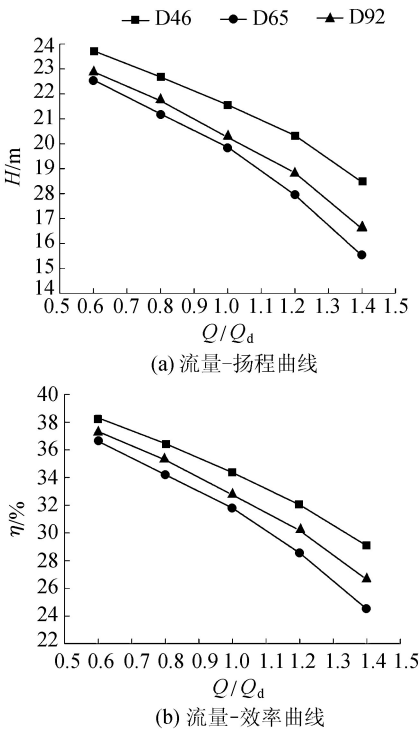


图 10 不同集油槽出口管径外特性对比

4 某大型水电机组推力轴承镜板泵优化设计

如前 1.3 所述的水电机组,根据前面的计算分析,对原试验镜板泵模型(方案 A)进行优化。因镜板结构尺寸限制,设计镜板孔的直径为 40 mm,考虑到结构要求,取集油槽出口管径为 50 mm,并渐扩至 92 mm。为了进一步减小整个集油槽的出口总面积,将集油槽的 8 个出口减少至 2 个(其出口总面积与管径为 46 mm 时基本一致)。这样既能保证集油槽的轴向尺寸不至于过小,又能有效地减小集油槽

的出口总面积。优化后的方案流道 3D 模型如图 11 所示。

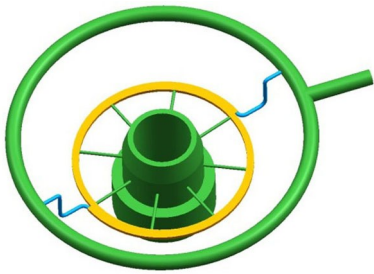


图 11 优化后的流道

优化后镜板泵的外特性如图 12 所示,可以看出,优化后镜板泵在 $(0.6 \sim 1.4) Q_d$ 范围内运行时平均扬程增加约 4m,平均效率提高 5.5%。由此可见,在结构允许的情况下,适当减小集油槽出口总面积,能使镜板孔与集油槽的匹配关系最佳,使得镜板泵性能提高。

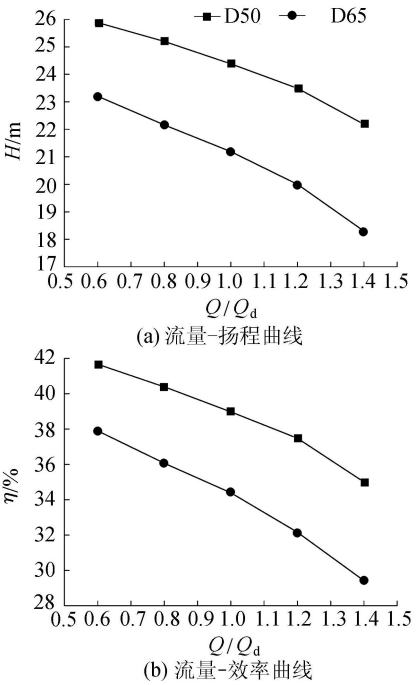


图 12 优化前后的镜板泵外特性

5 结 论

- a. 在镜板泵的设计过程中,应先根据水电站真机推力轴承冷却油循环系统管路布置,采用 1D 流体动力数值模型计算管路特性,计算的管路特性曲线可为镜板泵的设计提供更为准确的参数。
- b. 对于镜板孔形式选择,在结构允许的条件下尽可能采用较小的出口安放角和进口冲角。
- c. 集油槽与镜板孔的匹配问题对镜板泵性能影响非常大。在集油槽的断面形状设计时,可以仅从制造工艺的角度考虑而不用顾及断面形状对性能的影响。在结构允许的情况下,应适当减小集油槽

出口的总面积,但为了降低管路损失,应慎重选择出口管路的形式和管径。

d. 采用基于多工况流场数值模拟的性能预测技术来进行镜板泵设计方案分析和性能优化与控制是可行的。

参考文献:

[1] 武中德,张宏,张仁江,等. 水轮发电机镜板泵外循环技术[J]. 华中电力,2004,17(6):32-34. (WU Zhongde, ZHANG Hong, ZHANG Renjiang, et al. Technology of outer circulation with runner-pump for hydrogenerators[J]. Central China Electric Power, 2004, 17(6):32-34. (in Chinese))

[2] 雷霆,胡鑫凡,秦留生. 银盘水电站推力轴承支撑性能及镜板泵外循环技术研究[J]. 机电工程,2012,29(9):1042-1045. (LEI Ting, HU Xinfan, QIN Liusheng. Research on thrust supports performance and runner-pump extrinsic technology of Silver Plate Hydropower Station[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(9):1042-1045. (in Chinese))

[3] 赖喜德,张翔,卢珍,等. 水力发电机组的镜板泵流体动力优化研究报告[R]. 成都:西华大学,2013.

[4] 张翔,王洋,徐小敏,等. 低比转速离心泵能量转换特性[J]. 农业机械学报,2011,42(7):75-81. (ZHANG Xiang, WANG Yang, XU Xiaomin, et al. Energy conversion characteristic within impeller of low specific

speed centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):75-81. (in Chinese))

[5] LU Zhen, LAI Xide, ZHANG Xiang, et al. Numerical simulation of influence of oil tank with different throat areas on mirror-plate-pump performance[J]. Advanced Materials Research, 2013, 774/775/776:347-350.

[6] 刘厚林,杜辉,董亮,等. 离心泵蜗壳内压力脉动特性数值分析[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1):18-21. (LIU Houlin, DU Hui, DONG Liang, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in the volute of centrifugal pump[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1):18-21. (in Chinese))

[7] 典平鸽. 低比转速离心泵空化性能的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6):31-34. (DIAN Pingge. Numerical simulation of cavitation characteristics of low specific speed centrifugal pump[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6):31-34. (in Chinese))

[8] 王飞,王庆方,王勇军,等. 水轮机蜗壳的优化设计与CFD分析[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):86-88. (WANG Fei, WANG Qingfang, WANG Yongjun, et al. Optimization design and CFD analysis of spiral cases of water turbines[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5):86-88. (in Chinese))

(收稿日期:2015-04-30 编辑:郑孝宇)



(上接第 61 页)

[13] 李青云. 长江堤防工程安全评价的理论和方法研究[D]. 北京:清华大学,2002.

[14] 朱勇华,郭海晋,徐高洪,等. 防洪堤防洪综合风险研究[J]. 中国农村水利水电,2003(7):11-14. (ZHU Yonghua, GUO Haijin, XU Gaohong. Flood-control comprehensive risk study for dikes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(7):11-14. (in Chinese))

[15] 吴兴征,丁留谦,张金接. 防洪堤防的可靠性设计方法探讨[J]. 水利学报,2003,34(4):94-100. (WU Xingzheng, DING Liuqian, ZHANG Jinjie. Study on reliability design method of flood defenses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(4):94-100. (in Chinese))

[16] 吴兴征,丁留谦. 土石坝工程的病险评价和加固决策[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2004.

[17] 邢万波. 堤防工程风险分析与实践研究[D]. 南京:河海大学,2006.

[18] 邢万波,徐卫亚,王凯,等. 外秦淮河堤防水文失事风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(3):262-266. (XING Wanbo, XU Weiya, WANG Kai, et al. Risk analysis of hydrological failures of levees in External Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(3):262-266. (in Chinese))

[19] 陈锋. 上海地区防汛墙加固工程关键问题[J]. 水利水电科技进展,2014,34(6):49-55. (CHEN Feng. A study of the key problems of reinforcement of flood control wall in Shanghai[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6):49-55. (in Chinese))

[20] 朱元牲. 上海防洪(潮)安全风险分析和管理的[J]. 水利学报,2002,33(8):21-28. (ZHU Yuansheng. Risk analysis and management of flood control for Shanghai[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(8):21-28. (in Chinese))

[21] 卢永金,刘新成,崔冬,等. 上海市海塘防汛墙防汛能力调查评估[R]. 上海:上海市水利工程设计研究院有限公司,2013.

[22] 陈为民. 黄浦江河口建闸工程经济效益分析[J]. 水利经济,2002,20(4):53-58. (CHEN Weiming. Economic analysis of gate project in Huangpujiang River Estuary[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2002, 20(4):53-58. (in Chinese))

[23] 黄浦江潮位分析课题组. 黄浦江潮位分析(修编)[R]. 上海:上海市水文总站,2004.

[24] 中国国家海洋局,2013年中国海平面公报[EB/OL]. [2014-03-17]. [http://www. coi. gov. cn/gongbao/nrhaipingmian/nr2013/201403/t20140317_30621. html](http://www.coi.gov.cn/gongbao/nrhaipingmian/nr2013/201403/t20140317_30621.html).

(收稿日期:2015-04-20 编辑:郑孝宇)