

混流式水轮机上冠泄排水联合降压数值模拟

贵辛未^{1,2} 牧振伟^{1,2} 夏庆成^{1,2} 李泽发^{1,2} 张治山³

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆天富能源股份有限公司红山嘴水电站, 石河子 832000)

摘要: 为研究中高水头混流式水轮机上冠流道内不同降压结构效果及优化可行性,以红山嘴一级水电站4号机为例,将利用UG建立的4类不同上冠流道降压结构模型作为研究对象,基于计算流体动力学(CFD)技术,采用剪切应力传输(SST)湍流模型对4类不同的上冠泄排水结构在7种流量下展开数值模拟,计算工况共计28种。研究指标为泄漏水流态分布特性、主轴密封下侧压力、上冠轴向水推力、梳齿环密封性能。结果表明:不同泄排水降压结构内的泄漏水流态存在一定差异;为改善水轮机主轴密封性能可采取含转轮泵的联合泄排水降压结构,该结构相比其他结构对降低主轴密封压力、降低上冠轴向水推力、减少上冠间隙泄漏量均有显著效果;调整转轮泵降压结构的泵叶或泵盖几何参数可达到优化目的;针对该电站主轴密封漏水问题,采取含转轮泵的联合泄排水降压结构可使主轴密封下侧压力平均降低15.98%左右、上冠轴向水推力平均降低52.99%左右,大大提高电站运行效率。该研究在传统的单一泄排水降压结构基础上增设了转轮泵,为中高水头混流式水轮机获得最佳综合效益及其改造优化提供了参考依据。

关键词: 混流式水轮机; 泄排水联合降压; 轴向水推力; 主轴密封; 数值模拟

中图分类号: TK73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)11-0208-07 **OSID:** 

Combined Depressurization of Upper Crown Drainage of Francis Turbine Based on CFD

GUI Xinwei^{1,2} MU Zhenwei^{1,2} XIA Qingcheng^{1,2} LI Zefa^{1,2} ZHANG Zhishan³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China
2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China
3. Hongshanzui Hydropower Station, Xinjiang Tianfu Energy Co., Ltd., Shihezi 832000, China)

Abstract: In order to study the effect and optimization feasibility of different pressure-reducing structures in the upper crown flow channel of medium and high head Francis turbines, taking the No. 4 unit of Hongshanzui First-Stage Hydropower Station as an example, four different depressurization structure models of upper crown channel established by UG were taken as the research object. Based on computational fluid dynamics(CFD) technology, shear stress transport (SST) turbulence model was used to simulate a total of 28 calculation conditions of four different upper crown drainage structures under seven flow rates. The research indicators were the flow distribution characteristics of leakage water, the lower side pressure of main shaft seal, the axial water thrust of the upper crown and the sealing performance of the comb ring. The results showed that there were some differences in the leakage water flow regime in different drainage and depressurization structures. In order to improve the sealing performance of the turbine main shaft, a combined drainage and depressurization structure with a runner pump can be adopted. Compared with other structures, this structure had significant effects on reducing the main shaft sealing pressure, the axial water thrust of upper crown and the leakage of upper crown clearance. Adjusting the geometric parameters of the pump blades or pump cover of the pressure-reducing structure of the runner pump can achieve the optimization purpose. In view of the leakage problem of the main shaft seal of the power station, the combined drainage and pressure reduction structure with runner

收稿日期: 2022-01-22 修回日期: 2022-03-08
基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划创新团队项目(XJEDU2017T004)和新疆维吾尔自治区水利工程重点学科项目
作者简介: 贵辛未(1993—),男,博士生,主要从事流体机械内部流场分析与优化设计研究,E-mail: xjmulqmw@163.com
通信作者: 牧振伟(1973—),男,教授,主要从事流体机械设计及水利工程消能工研究,E-mail: xjmw@163.com

pump can reduce the lower side pressure of the main shaft seal by about 15.98% on average and the axial water thrust of the upper crown by about 52.99% on average, which can greatly improve the operation efficiency of the power station. A runner pump was added on the basis of the traditional single drainage and pressure-reduction structure, which provided a reference for obtaining the best comprehensive benefit and its transformation and optimization of a medium-high head Francis turbine.

Key words: Francis turbine; combined depressurization of water drainage; axial water thrust; main shaft seal; numerical simulation

0 引言

在设计和改造混流式水轮机过程中,采用合理的上冠泄排水降压结构对其运行效率和主轴密封性能的提高具有显著影响。电站为降低水轮机上冠顶部水压常采取多类结构措施,从而达到改善主轴密封工作条件以及减小转轮轴向水推力的目的。

近年来,电站在实际运行中发现各类上冠泄排水降压结构均存在一定优缺点,不同型号水轮机上冠泄漏水的排泄方式也不同。水轮机上冠流道的泄漏水为间隙流动,国内外学者在该方面的研究取得了一些成果^[1-2],研究内容主要集中在顶盖取水技术应用是否成功、上冠间隙泄漏水对水轮机性能的影响^[3-7]。

目前诸多学者多以某一类特定且单一的上冠降压结构作为研究对象,探究上冠间隙流动对水轮机性能的影响,而对不同工况下常见的上冠泄排水降压结构措施统筹考虑,分析各类结构对水轮机性能影响及其联合降压效果的研究较少。

随着计算机的发展,目前采用计算流体动力学(CFD)模拟水轮机间隙流动的技术已较为成熟^[8-14],故本文利用 CFD 技术,结合红山嘴水电站工程实例,将 4 类不同的混流式水轮机上冠泄排水降压结构作为研究对象,建立不同的流体计算域模型,探究不同类型结构对上冠流道内泄漏水流动、主轴密封压力、上冠轴向水推力以及梳齿环密封能力的影响。

1 计算模型及方案

1.1 技术参数及结构模型

本文以新疆红山嘴一级电站 4 号水轮机为例,其主要技术参数:设计水头为 104 m,单机流量为 17.28 m³/s,额定转速为 375 r/min,单机容量为 16 MW。

目前国内外混流式水轮机上冠泄排水降压结构主要可归为 4 类:仅在顶盖上方设置排水管、仅在上冠开设泄水孔、上冠泄水孔和顶盖排水管联合降压结构、上冠增设转轮泵的联合降压结构。以上 4 类结构的剖面图如图 1 所示。

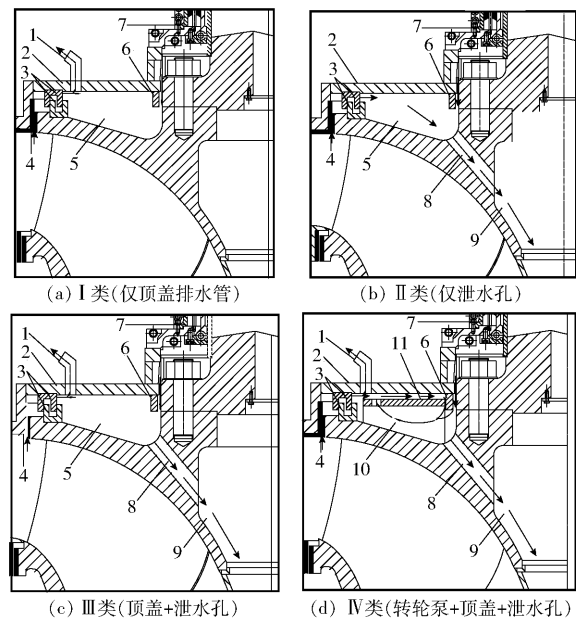


图 1 不同上冠泄排水降压结构图

Fig. 1 Structural diagrams of upper crown drainage and depressurization

1. 顶盖排水管 2. 顶盖 3. 梳齿环 4. 上冠间隙 5. 空腔体
6. 止水环 7. 主轴密封墙体 8. 泄水孔 9. 泄水锥 10. 泵叶
11. 泵盖

1.2 实验方案

本文将不同的转轮上冠降压结构作为研究对象,针对 4 类结构在 7 种流量下展开数值模拟。根据上冠间隙的进口特点,不同流量可由泄漏水进入上冠间隙前的轴向速度来反映,轴向速度 V_z 取 15、17、19、21、23、25、27 m/s,故计算工况共计 28 个。

1.3 计算域模型及网格划分

现阶段红山嘴水电站 4 号机组上冠降压措施为第 IV 类结构,如图 2 所示。根据真机几何参数,建立 4 类不同的转轮上冠降压结构计算域模型,因转轮上冠腔体内的泄水孔、顶盖排水管以及泵叶均为对称布置,故可取转轮上冠 1/4 的单流道作为计算域,同时可节省运算资源,提高工作效率。不同计算域模型如图 3 所示。

针对 4 类不同的计算域模型,均利用 ICEM 软件对其各自的部件进行结构化六面体网格划分,最后再组装^[15-18]。网格划分过程中考虑到转轮上冠为环形结构,采用了 2D 转 3D 块的方法,避免了繁



图2 真机结构模型
Fig.2 Real machine structure model

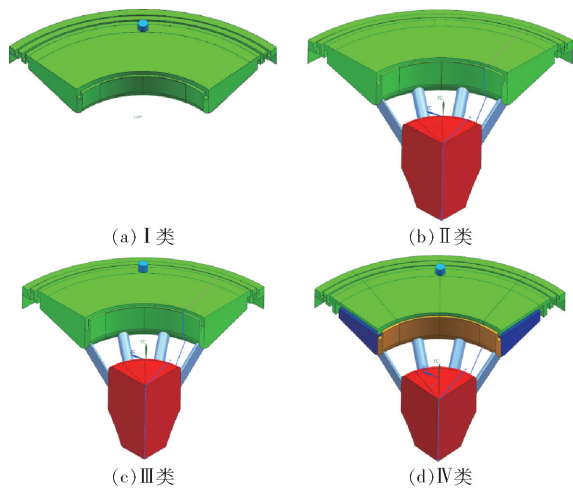


图3 不同降压结构的计算域模型
Fig.3 Different depressurization structure computational domain models

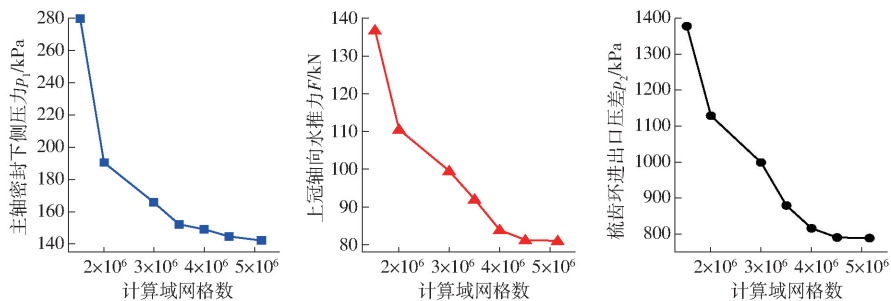


图5 网格无关性检验
Fig.5 Grid independence test

1.4 边界条件

根据水电站实测数据等资料,以水轮机额定水头 104 m 和额定转速 375 r/min 下最大输出功率为计算工况。

入口边界:由于转轮上冠流道内的泄漏水均来自上冠间隙和主轴密封,故 4 类模型的入口条件相同。设置主轴密封下侧进口流量 Q 为零、上冠间隙设置为速度进口,泄漏水在进入上冠间隙前包括圆周速度 V_u 和轴向速度 V_z ,根据顶盖取水公式^[19-20]

$$V_u = \frac{gH_{th}}{u_1}$$

(1)

的“O”型网格关联,并形成了 0.8 以上的高质量网格。另外对计算域模型 1.5 mm 密封间隙作局部加密处理,与其周围网格以 Biggermetric 方式 1.2 比例进行光滑过渡。因第Ⅳ类泄排水降压结构最为复杂,故以此为例,显示计算域网格划分效果,如图 4 所示。

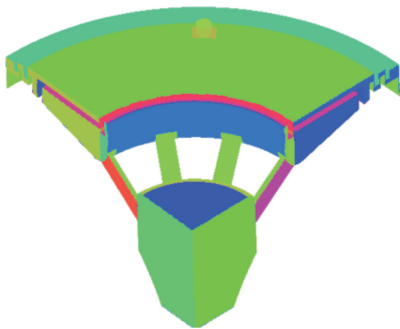


图4 第Ⅳ类结构网格划分图
Fig.4 Meshing diagram for type IV structures

正式计算前需对所有计算域模型进行网格无关性检验。以第Ⅳ类结构为例,当其网格节点为 4.6293×10^6 时,主轴密封下侧压力、上冠轴向水推力、梳齿环进出口压差 3 个指标变化范围均在 2.1% 以内,满足计算要求,如图 5 所示。另外,因其他类型计算域模型结构各不同,故划分网格过程中,将各结构包含的每个部件按与第Ⅳ类结构各部件网格数量保持一致处理,即可避免因网格数量造成仿真误差。

$$V_z = \frac{\sqrt{2g\Delta H}}{\sqrt{1 + 0.5\eta + \lambda L/(2b)}} \tag{2}$$

式中 H_{th} ——理论水头 g ——重力加速度
 u_1 ——转轮进口泄漏水的圆周速度
 ΔH ——间隙两端压力差
 η ——间隙进口圆角系数,一般取 0.5~0.9
 λ ——沿程阻力系数
 L ——间隙长度 b ——间隙宽度

经计算, V_u 为定值 28 m/s; V_z 取 15、17、19、21、23、25、27 m/s,该范围已包含正常工况下所有泄漏量。

出口边界:因 4 类转轮上冠泄排水降压结构的出口形式不尽相同,故出口边界需单独设置。I 类

结构因仅有顶盖排水管出口,故其出口设置为 0.1 MPa 的开放式边界;Ⅱ类结构出口仅有泄水锥,根据尾水出口位置建立伯努利方程,可求得泄水锥出口开放式边界条件的压力为 0.007 408 MPa;Ⅲ类结构作为Ⅰ类结构和Ⅱ类结构的联合降压措施,其包括顶盖排水管和泄水锥两个出口,分别设置为 0.1 MPa 和 0.007 408 MPa 的开放式边界条件;Ⅳ类结构较Ⅲ类结构主要增加了转轮泵,对整个计算域出口并无影响,故其采用与Ⅲ类结构相同的出口边界条件。

壁面边界:壁面条件采用无滑移边界条件。
其他边界:各降压结构计算域所涉及到的动静交界面均采用冰冻转子法^[21-22]。另外计算收敛精度设置为 10^{-4} 。

为表达计算域边界条件具体位置,以第Ⅳ类结构为例进行说明,如图 6 所示。

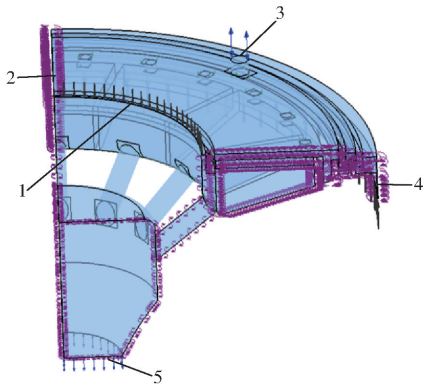


图 6 第Ⅳ类结构计算域边界条件

Fig. 6 Computational domain boundary conditions for type Ⅳ structures

1. 主轴密封进口 2. 交界面 3. 顶盖排水管出口 4. 上冠间隙进口 5. 泄水锥出口

2 结果分析

为验证模型可靠性,以该电站现阶段采用的转轮泵降压结构(Ⅳ类结构)为例,设置上述边界条件数值计算。以顶盖排水管出口压力为验证指标,数值计算结果 0.592 MPa 与现场实测值 0.580 MPa 相比,相对误差为 2.07%,模拟结果与电站实测值吻合,符合计算要求,故在此基础上,再对其他各类型的降压结构数值模拟。通过对比分析,重点探究各结构的优缺点以及转轮上冠联合降压结构优化的可行性。

2.1 流态分布

为探究混流式水轮机不同泄排水降压结构对上冠流道内泄漏水流态的影响,首先将 4 类结构在不同泄漏量下 ($V_z = 15\text{ m/s}$ 、 $V_z = 21\text{ m/s}$ 、 $V_z = 27\text{ m/s}$) 的流态场进行对比分析,如图 7~10 所示。

由图 7 可知,随着上冠间隙泄漏量的增加,梳齿环出口前的流态变化较小,集中表现为泄漏水在经过上冠间隙时动能增大,随后进入梳齿环腔内后形成典型的旋涡会消耗大部分能量。当泄漏水从梳齿环出口流出时,因上冠流道断面面积逐渐增大,泄漏水动能会逐渐降低,呈内低外高阶梯式分布。

另外泄漏量的增加对转轮上冠流道高压区域影响较大。主要表现为在高压区域会形成两个大小不同的旋涡。当泄漏量较小时,内侧旋涡较大,随着泄漏量的增加,外侧旋涡会逐渐占据上冠高压区域,呈现出向内侧移动趋势,这是因为泄漏水受到无滑移壁面边界层的影响,产生的不均匀逆压力梯度导致回流现象。

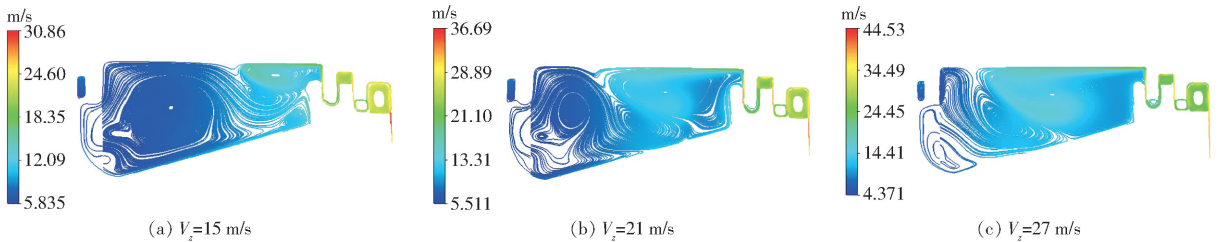


图 7 仅顶盖排水管降压结构二维流线图

Fig. 7 Top cover drain pipe depressurization structure only of 2D streamline diagrams

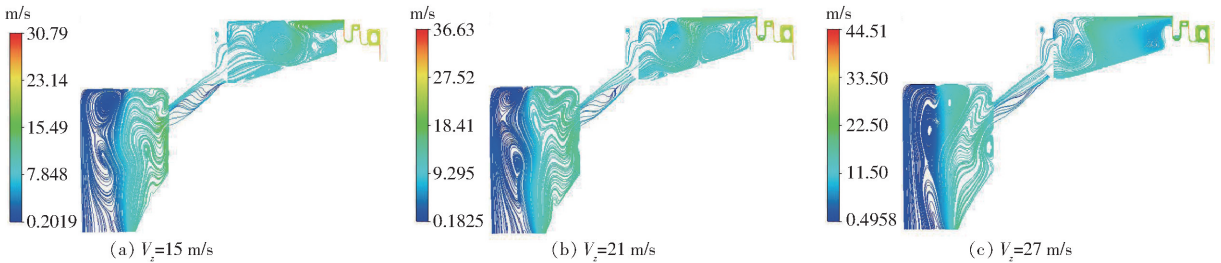


图 8 仅泄水孔降压结构二维流线图

Fig. 8 Depressurization structure with only scupper hole of 2D streamline diagrams

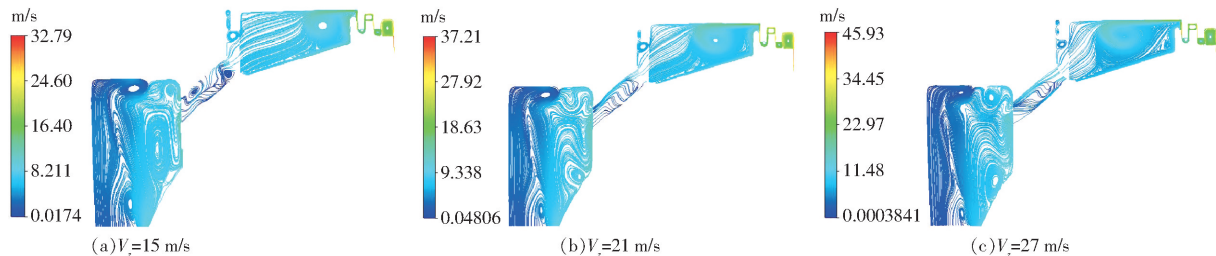


图 9 顶盖排水管和泄水孔联合降压结构二维流线图

Fig. 9 Combined depressurization structure of top cover drain pipe and scupper hole of 2D streamline diagrams

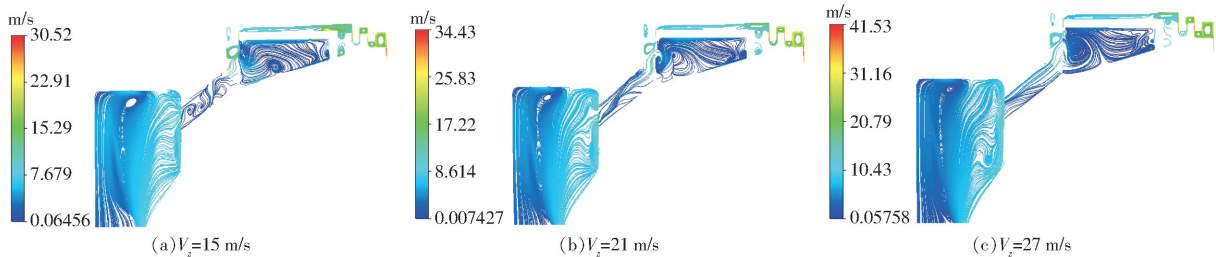


图 10 含转轮泵联合降压结构二维流线图

Fig. 10 Combined depressurization structure with runner pump of 2D streamline diagrams

由图 8 可知,随着上冠间隙泄漏量的增加,仅含泄水孔单一降压结构的梳齿环进出口流态分布情况与仅含顶盖排水管单一降压结构的类似。主要区别表现为泄漏水在泄水孔内呈螺旋状流入泄水锥,且因转轮的高速旋转使得泄漏水进入泄水锥后流态更为紊乱,此过程中流速整体呈逐渐减小趋势。

由图 9 可知,泄漏水在上冠流道局部高压区形成一个较大旋涡且涡量随 V_z 的增大而增大,在进入泄水锥后流态基本相同。在顶盖排水管和泄水孔的双重作用下,泄漏水在上冠流道内及泄水锥内部流速会有所降低,但水力损失仍然较大。该结构较单一形式的降压结构具有更好降压效果及稳定性。

由图 10 可知,上冠增设了转轮泵(泵叶和泵盖),对上冠空腔泄漏水流态有显著影响。泄漏水首先经梳齿环后沿着泵盖下腔进入泵盖下腔,随后泄漏水分为两个途径排出,其中一路在转轮泵泵叶加压作用下经顶盖排水管排出,另一路经泄水孔进入泄水锥流出且流态稳定。

随着泄漏量的增加,上冠流道内泄漏水流态整体变化较小,这主要因在多项联合降压措施下,上冠流道内压力重新分布,使得泄漏水被高效稳定排出。同时由于转轮泵的离心作用,降低了主轴密封下侧压力,来自主轴密封腔体内的泄漏水更易被吸入泵腔并及时排除,因此含转轮泵的泄排水降压结构不仅可降低水轮机轴向水推力还可延长主轴密封的使用寿命。另外,可发现若进一步调整转轮泵的泵叶或泵盖的参数将更接近优化目的。

2.2 主轴密封压力分析

水轮机主轴密封漏水是电站常见难题。尤其对

泥沙量较大的红山嘴电站而言,最突出的问题就是主轴密封使用寿命很低,洪水期维修频率高达每周一次,严重影响运行效率。该一级电站采用转轮泵结构泄排水降压装置后表现出理想效果。不同泄排水降压装置对主轴密封的影响不容忽视,因此本文将主轴密封下侧压力作为研究指标之一。主轴密封下侧绝对压力用 p_1 表示,该值越小说明越有利于主轴密封处更多泄漏水被吸入上冠空腔内,对主轴密封工作环境越有利。

不同泄排水降压结构的主轴密封下侧压力变化特性曲线如图 11 所示。

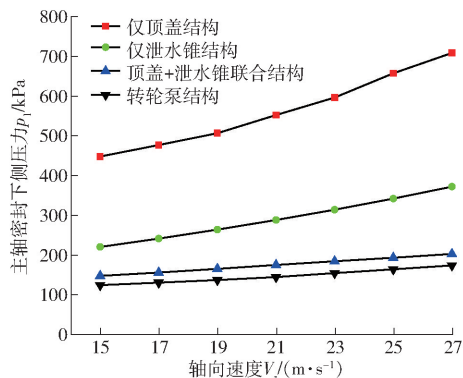


图 11 主轴密封下侧压力变化特性曲线

Fig. 11 Characteristic curves of pressure change on lower side of main shaft seal

由图 11 可知,4 类不同的转轮上冠泄排水降压方式所引起的主轴密封压力均随 V_z 的增大呈增长趋势,说明无论哪类结构,泄漏量的增加对主轴密封压力均不利,轴向速度 V_z 是影响主轴密封腔体压力的直接因素,水电站在主轴密封改造过程中可采取减小上冠间隙尺寸等措施解决漏水问题。将 4 类不

同降压结构在不同泄漏量下对主轴密封压力的影响对比可知,仅顶盖排水管或仅泄水孔的单一降压结构的主轴密封下侧压力,随着泄漏量的增加平均变化幅度较为明显,分别为 58% 和 68%,而顶盖排水管及泄水孔联合结构或含转轮泵降压结构的主轴密封压力平均变化幅度较为平缓,仅为 37.6% 和 39.8%,可见在不同泄漏量下,后者更有利于主轴密封压力稳定。

另外,在同一泄漏量下将 4 类不同降压结构对主轴密封压力的影响进行对比,可发现降压效果从优到劣依次为:转轮泵降压结构、顶盖排和泄水孔联合泄排水降压结构、仅泄水孔降压结构、仅顶盖排水管降压结构。诸多电站采用含转轮泵的降压结构对改善主轴密封工作条件显出一定优势,因为来自主轴密封以及上冠间隙的泄漏水经转轮泵泵叶区加压后,经顶盖排水管可快速排出;另外,上冠流道低压腔未及时排除的多余泄漏水又可通过泄水孔下泄至泄水锥,最后经泄水锥排至尾水,转轮泵降压结构的双重作用使得主轴密封下侧长期保持较低压力,更有利于主轴密封的泄漏水及时排出。顶盖排水管和泄水孔联合泄排水降压结构与含转轮泵的降压结构相比降压效果平均下降 15.98%,这是因为缺少转轮泵的加压作用,该结构对于含泥沙量较大的机组不建议使用。仅顶盖或仅泄水孔的单一降压结构对主轴密封降压效果较差,这主要因为开孔数量或几何结构参数不合理,导致泄漏水不能被及时排出,甚至还会经主轴密封腔体出现上溢。

经对比可知,混流式水轮机转轮上冠增设转轮泵对主轴密封寿命的提高具有显著作用,尤其对于含泥沙量较大的机组更为适宜。

2.3 上冠轴向水推力对比分析

降低水轮机轴向水推力可减轻其轴承负荷,延长轴油封及轴承使用寿命,故不同泄排水降压结构对水轮机上冠轴向水推力的影响也是该研究的重要指标。

水轮机上冠轴向水推力用 F 表示(规定向下为正方向),该值越小说明上冠空腔内的水压越低,更利于降低上冠轴向水推力。不同泄排水降压结构的上冠轴向水推力变化特性曲线,如图 12 所示。

由图 12 可知,随着泄漏量的增加,4 类不同泄排水降压方式所引起的上冠轴向水推力均呈增长趋势。尤其仅顶盖排水管降压结构引起的上冠轴向水推力较大且平均变化幅度为 17.1%,原因是顶盖排水口数量不足或孔径过小,泄漏水进入上冠空腔后因顶盖排水管的限制不能被及时排除,在上冠空腔内大量累积,从而大幅度增大了向下的轴向水推力;

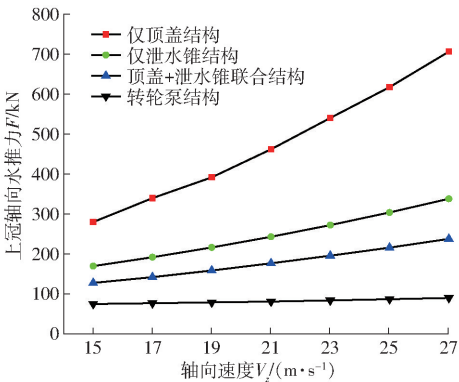


图 12 上冠轴向水推力变化特性曲线
Fig. 12 Variation characteristic curves of axial water thrust of upper crown

同时说明若采用此降压结构需通过增加梳齿环的密封性能或减小上冠间隙宽度的措施来满足降压要求。

在相同泄漏量下,仅泄水孔降压措施与仅顶盖结构降压措施相比所引起的上冠轴向水推力较小,但不是最优,这主要是因泄水孔数量或安置角度不适引起的,以上两类单一的泄排水降压措施对减小转轮上冠轴向水推力效果一般,故工程中常采用顶盖排水和泄水孔联合的泄排水降压措施,其效果突出且轴向水推力受泄漏量影响的平均变化幅度为 11.03%。

对于含转轮泵结构的泄排水联合降压措施,由于其泵叶的增压作用提高了上冠空腔泄漏水的排出效率,它较一般的联合降压结构可使上冠轴向水推力平均降低 52.99%。另外,该结构引起的上冠轴向水推力受泄漏量的变化影响较小,平均变化幅度仅达 3.12%。随着电站运行,转轮上冠间隙必会增大,从而致使泄漏量增加,而含转轮泵的泄排水降压结构较其他降压结构产生的轴向水推力不会出现较大幅度波动,更有利于机组稳定运行,故建议在中高水头混流式水轮机组上推广使用含转轮泵的泄排水联合降压结构。

2.4 梳齿环进出口压差分析

水轮机上冠轴向水推力以及主轴密封压力均与经梳齿环的泄漏水量有直接联系,为增强梳齿环密封性能,从根本上减少泄漏水量,提高水轮机运行效率,故将 4 类不同的上冠泄排水降压结构对梳齿环进出口压差的影响作为研究指标之一。

梳齿环进出口压差用 p_2 表示,该值越小,说明越不利于间隙泄漏水进入上冠空腔。不同泄排水降压结构的梳齿环进出口压差变化特性曲线如图 13 所示。

由图 13 可知,4 类不同的上冠泄排水降压方式所引起的梳齿环进出口压差均随着轴向速度 V_x 的

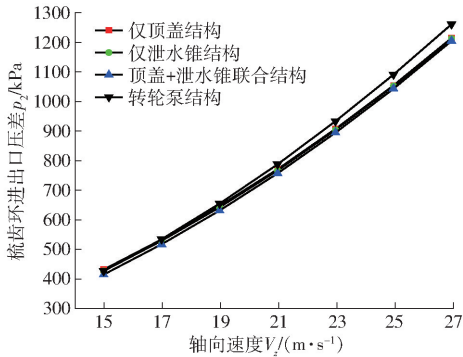


图 13 梳齿环进出口压差变化特性曲线

Fig. 13 Characteristic curves of pressure difference between inlet and outlet of comb ring

增加呈较大幅度增加,可见上冠间隙泄漏水量严重影响梳齿环的密封性能。另外,不同泄排水降压结构在同一泄漏量下的梳齿环进出口压差变化幅度很小且稳定,这说明无论采用 4 类泄排水降压结构的何种类型对梳齿环进出口压差造成的影响均较小,故在实际工程中若要增强梳齿环的密封性能,从根本上减少上冠间隙泄漏量,还需在梳齿环自身结构上采取改造措施才可达到优化目的。

考虑到不同上冠泄排水降压结构对梳齿环进出

口压差的影响较小且红山嘴电站主要是以提高水轮机主轴密封性能以及减小上冠轴向水推力为改造目标,故采用含转轮泵的泄排水降压结构为最优方案。

3 结论

(1)中高水头混流式水轮机不同的泄排水降压结构对上冠流道泄漏水流态分布存在一定差异,主要集中在高压腔和泄水锥区域,另外,含转轮泵的联合降压结构较其他结构流态更加稳定。

(2)在中高水头混流水水轮机上冠采用含转轮泵的联合降压措施对降低主轴密封内腔压力、减小上冠轴向水推力、减少上冠间隙泄漏量具有显著效果。

(3)针对新疆红山嘴一级电站主轴密封漏水问题,建议电站采用含转轮泵的联合泄排水降压结构,该结构可使主轴密封下侧压力平均降低 15.98% 左右,更有利于泄漏水被吸入上冠空腔,延长主轴密封的使用寿命。

(4)该电站机组采用含转轮泵的联合降压结构,可使上冠轴向水推力平均降低 52.99% 左右,有效降低主轴轴承及轴油封的磨损程度。

参 考 文 献

[1] 林文华,毛中宇,李向阳,等. 水泵水轮机泵工况轴向力特性分析与改善[J]. 农业机械学报,2020,51(6):132-137.
LI Wenhua, MAO Zhongyu, LI Xiangyang, et al. Analysis and improvement of axial force characteristics of pump turbine pump working conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):132-137. (in Chinese)

[2] 周大庆,陈洋. 含泄水孔混流式水轮机间隙流动数值模拟[J]. 农业机械学报,2015,46(4):53-58.
ZHOU Daqing, CHEN Yang. Numerical simulation of gap flow in Francis turbine with scupper hole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):53-58. (in Chinese)

[3] 李国梁. 水轮机上冠泄水降压及从顶盖取冷却水分析[J]. 水电站设计,1998(1):28-32.
LI Guoliang. Analysis of water turbine top cover discharge and pressure reducing and cooling water taken from the top cover[J]. Design of Hydropower Station, 1998(1):28-32. (in Chinese)

[4] 杨二豪,吴钢,杨庭豪,等. 黄登水电站水轮机转轮上冠泵板对顶盖取水的影响[J]. 水电能源科学,2016,34(10):150-153.
YANG Erhao, WU Gang, YANG Tinghao, et al. Influence of the upper crown pump plate of the turbine runner of Huangdeng Hydropower Station on the water withdrawal from the top cover[J]. Water Power Energy Science, 2016,34(10):150-153. (in Chinese)

[5] 高瑜,张惟斌,江启峰,等. 基于响应面法的水轮机组转轮泵优化设计[J]. 水力发电,2017,43(2):67-72.
GAO Yu, ZHANG Weibin, JIANG Qifeng, et al. Optimal design of runner pump of water turbine unit based on response surface method[J]. Hydropower, 2017,43(2):67-72. (in Chinese)

[6] 梁武科,黄汉维,吴子娟,等. 混流式水轮机上冠空腔结构内部流场及单向流固耦合分析[J]. 水利学报,2020,51(11):1383-1392.
LIANG Wuke, HUANG Hanwei, WU Zijuan, et al. Analysis of the internal flow field and unidirectional fluid-solid coupling of the upper crown cavity of a Francis turbine[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020,51(11):1383-1392. (in Chinese)

[7] KIM C, KIM S, CHOI C H, et al. Effects of inducer tip clearance on the performance and flow characteristics of a pump in a turbopump[J]. Journal of Power and Energy, 2017, 89(7):398-414.

[8] 李琪飞,张毅鹏,敏政,等. 混流式水泵水轮机密封间隙流动分析[J]. 兰州理工大学学报,2016,42(1):51-55.
LI Qifei, ZHANG Yipeng, MIN Zheng, et al. Analysis of flow in the seal gap of Francis pump turbine[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(1):51-55. (in Chinese)

[9] 郭峰山,贾明,林伟豪,等. 竖轴潮流能水轮机群数值模拟研究[J]. 太阳能学报,2014,35(9):1810-1815.
GUO Fengshan, JIA Ming, LIN Weihao, et al. Numerical simulation of vertical axis tidal current turbine group[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2014,35(9):1810-1815. (in Chinese)

- Conference on Artificial Intelligence, 1995.
- [37] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [38] 周晓红, 张飞, 张海威, 等. 艾比湖湿地自然保护区土壤盐分多光谱遥感反演模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1229 – 1235.
- ZHOU Xiaohong, ZHANG Fei, ZHANG Haiwei, et al. A study of salinity inversion based on multispectral remote sensing index in Ebinur Lake wetland nature reserve[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4): 1229 – 1235. (in Chinese)
- [39] 王飞, 杨胜天, 丁建丽, 等. 环境敏感变量优选及机器学习算法预测绿洲土壤盐分[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 102 – 110.
- WANG Fei, YANG Shengtian, DING Jianli, et al. Environmental sensitive variable optimization and machine learning algorithm using in soil salt prediction at oasis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 102 – 110. (in Chinese)
- [40] 古丽努尔·依沙克, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 段素素. 基于全极化 Radarsat-2 数据的干旱区典型绿洲盐渍化信息提取[J]. 中国农村水利水电, 2018(12): 13 – 19.
- GULNUR Isak, ILYAS Nurment, DUAN Susu. The extraction of saline soil information in typical oasis of arid area using fully polarimetric Radarsat-2 data[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(12): 13 – 19. (in Chinese)
- [41] 段素素, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 郭莉丹, 等. 基于全极化微波遥感的干旱区典型绿洲盐渍化信息提取[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(2): 110 – 114.
- DUAN Susu, ILYAS Nurment, GUO Lidan, et al. Extracting soil salinization in typical arid area based on fully PolSAR[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(2): 110 – 114. (in Chinese)
- [42] 张智韬, 魏广飞, 姚志华, 等. 基于无人机多光谱遥感的土壤含盐量反演模型研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 151 – 160.
- ZHANG Zhitao, WEI Guangfei, YAO Zhihua, et al. Soil salt inversion model based on UAV multispectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 151 – 160. (in Chinese)

(上接第 214 页)

- [10] LI X J, CHEN B, LUO X W, et al. Effects of flow pattern on hydraulic performance and energy conversion characterisation in a centrifugal pump[J]. Renewable Energy, 2019, 97: 228 – 235.
- [11] GUO Q, ZHOU L, WANG Z. Numerical evaluation of the clearance geometries effect on the flow field and performance of a hydrofoil[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 390 – 397.
- [12] WANG K, LUO G Z, LI Y, et al. Multi-condition optimization and experimental verification of impeller for a marine centrifugal pump[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 12(45): 125 – 132.
- [13] 黄世雄. 上冠间隙对水泵水轮机泵工况流动特性影响的数值研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- HUANG Shixiong. Numerical study on the effect of crown clearance on the flow characteristics of water pump turbine pump [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] 韩伟, 陈雨, 刘宜, 等. 水轮机活动导叶端面间隙磨蚀形态演变预测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 100 – 107.
- HAN Wei, CHEN Yu, LIU Yi, et al. Prediction of the wear pattern evolution of the end face clearance of the movable guide vane of a hydraulic turbine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 100 – 107. (in Chinese)
- [15] 冯建军, 罗兴铸, 吴广宽, 等. 间隙流动对混流式水轮机效率预测的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 53 – 58.
- FENG Jianjun, LUO Xingqi, WU Guangkuan, et al. Influence of gap flow on efficiency prediction of Francis turbine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 53 – 58. (in Chinese)
- [16] PEI J, DOHMEN H J, YUAN S Q, et al. Investigation of unsteady flow-induced impeller oscillations of a single-blade pump under off-design conditions[J]. Journal of Fluids Structures, 2012, 35: 89 – 104.
- [17] WU D H, YUAN S Q, REN Y, et al. CFD investigation of the influence of volute geometrical variations on hydrodynamic characteristics of circulator pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 315 – 324.
- [18] 梁武科, 董彦同, 赵道利, 等. 混流式水轮机减压管对密封间隙及其周围流场的影响[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 135 – 140.
- LIANG Wuke, DONG Yantong, ZHAO Daoli, et al. Influence of pressure reducing pipe of Francis turbine on sealing gap and its surrounding flow field[J]. Journal of Hydropower Generation, 2008, 27(2): 135 – 140. (in Chinese)
- [19] 敏政, 梁昌平, 董志强, 等. 混流式水泵水轮机泄漏量的计算及分析[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 679 – 684.
- MIN Zheng, LIANG Changping, DONG Zhiqiang, et al. Calculation and analysis of leakage of mixed-flow pump turbine[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8): 679 – 684. (in Chinese)
- [20] 董志强. 混流式水泵水轮机间隙流动的数值分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- DONG Zhiqiang. Numerical analysis of gap flow in Francis pump turbine[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [21] GAO J, ZHENG Q, WANG Z. Effect of honeycomb seals on loss characteristics in shroud cavities of an axial turbine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1): 69 – 77.
- [22] LIU Y, TAN L. Tip clearance on pressure fluctuation intensity and vortex characteristic of a mixed flow pump as turbine at pump mode[J]. Renewable Energy, 2018, 129: 606 – 615.