

水电站用TFW型调压阀的流固耦合分析

袁兴慧^{1,2}, 宋文武^{1,3*}, 侯洁^{1,3}, 符杰^{1,3}, 石建伟^{1,3}

¹西华大学流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都

²四川省水利职业技术学院, 四川 成都

³西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都

Email: song4817077@126.com

收稿日期: 2020年9月30日; 录用日期: 2020年10月15日; 发布日期: 2020年10月22日

摘要

TFW型调压阀是水电站中用来替代调压井的一种调压设备, 在水电站运行过程中不可避免会遇到机组突甩负荷的情况, 导致管道中压力升高, 此时即通过调压阀对管道进行泄压, 所以整个引水系统的压力调控效果将由调压阀的性能决定。本文借助CFX、Workbench等软件, 基于流固耦合理论, 建立了调压阀阀盘与流体的流固耦合计算模型并进行了流固耦合分析。经过数值计算得出阀盘的应力与变形随开度变化的分布规律, 从而为调压阀的安装、维护及运行提供依据。

关键词

TFW调压阀, 流固耦合, 数值计算

Fluid-Solid Coupling Analysis of TFW Pressure Regulating Valve for Hydropower Station

Xinghui Yuan^{1,2}, Wenwu Song^{1,3*}, Jie Hou^{1,3}, Jie Fu^{1,3}, Jianwei Shi^{1,3}

¹The Ministry of Fluid and Power Machinery Ministry of Key Laboratory, Xihua University, Chengdu Sichuan

²Sichuan Province Institute of Water Resources Vocational Technology, Chengdu Sichuan

³Energy and Power Engineering of Xihua University, Chengdu Sichuan

Email: song4817077@126.com

Received: Sep. 30th, 2020; accepted: Oct. 15th, 2020; published: Oct. 22nd, 2020

Abstract

TFW pressure regulating valve is a pressure regulating device used to replace the pressure regu-

*通讯作者。

lating well in the hydropower station. During the operation of the hydropower station, it is that the unit will suffer sudden load rejection. As a result, the pressure in the pipeline will increase. At this time, pressure regulating valve will be used to relieve the pressure in the pipeline. Therefore, the effect of the pressure regulation in water diversion system will be determined by the performance of the the pressure regulating valve. Based on the fluid-solid coupling theory, this paper establishes the fluid-structure coupled calculation model of pressure regulator valve disc and fluid and analyzes the fluid-structure interaction by using CFX, Workbench and other software. After the numerical calculation, the distribution law of the stress and deformation of the valve disc changes with the opening degree are obtained, which provides the basis for the installation, maintenance and operation of the pressure regulating valve.

Keywords

TFW Pressure Regulating Valve, Fluid-Structure Coupling, Numerical Calculation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

TFW 型调压阀是水电站引水系统中替代调压井进行调压的重要调压设备，主要由阀体、阀盘、进水管、泄水管等部件组成。如果阀盘损坏不能正常工作，那么将直接影响整个操作系统的运转，危及机组的运行安全。通过对调压阀内流道流体进行仿真可知，阀盘在运动过程中流体会对其产生作用力，这些力会对阀盘产生一定的变形，阀盘有可能会因此而存在损坏的可能，因此对阀盘与流体之间进行流固耦合分析是很有必要的。

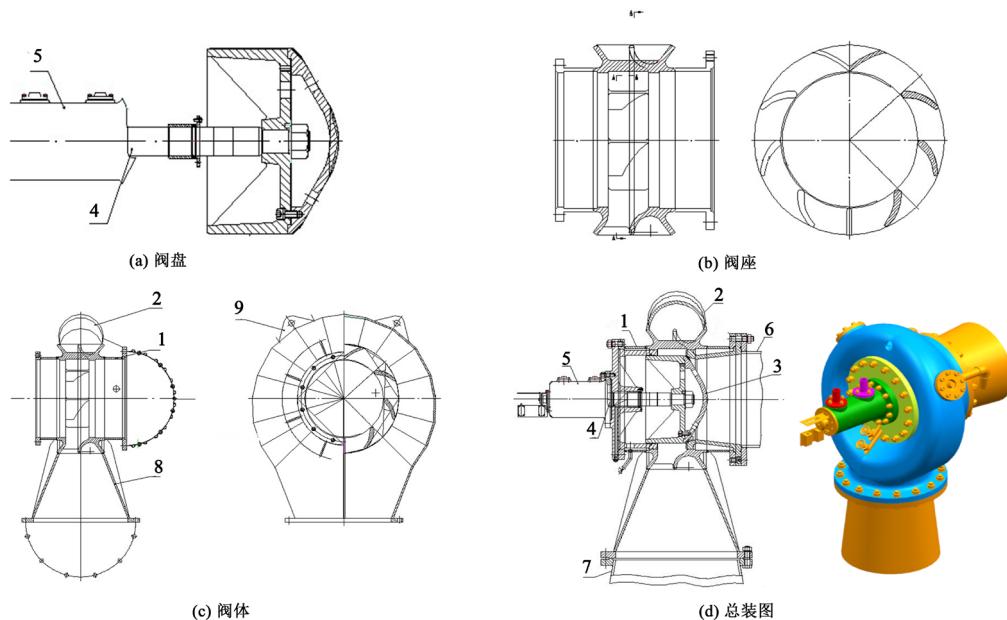
流固耦合分为单向流固耦合与双向流固耦合，前者指单向的数据传递，一般只考虑流体对固体的作用，而双向流固耦合既要考虑流体对固体产生的作用又要考虑固体对流体的作用。近年来，国内外学者运用流固耦合技术研究了人体生物、航天船舶以及机械等方面[1]-[9]。包凯基于 ANSYS/Workbench 软件，用比较分析的方法分析了节流阀在不同工况下，其内部流场和阀芯静力学情况，得出阀腔内的应力集中处在阀芯台阶面和销钉连接孔的位置，同时还得出引起阀芯振动失效的原因是由于楔形导流面处的漩涡，与实际情况相符[10]。潘永成针对自动化系统中的调节阀，分析其阀腔内流场与阀芯的相互作用，最终经过分析得出其阀芯变形与应力云图[11]。Deng 利用流固耦合仿真技术，分析了滑阀在粘热效应作用之下的内流道与阀芯之间的耦合作用[12]。综上所述，在流固耦合研究方面，学者们作了大量的工作，对阀的流固耦合也仅仅在滑阀流道与阀芯之间的耦合作用研究，但是，对于应用于中小型水电站引水系统之中代替调压井作用的调压阀的流固耦合研究方面还少见有报道。

本文以 TFW600/130 调压阀为研究对象，分别构建了调压阀在 11 种开度下的内流体模型及相应的阀盘有限元模型。然后运用 ANSYS/Workbench 对此模型进行单向流固耦合研究，分析阀盘在动作过程中的位移场与应力场，研究其在不同开度下阀盘产生的变形与应力的分布规律。

2. 调压阀的结构及工作原理

本文主要研究 TFW600/130 型调压阀，图 1 为其结构示意图，主要由阀体、阀盘、进水管、泄水管等部件组成，而阀体又包括阀座、蜗壳和阀身。其中阀壳由蜗型管合成，内部设有固定导水叶，主要起

消能作用。此阀的入口内直径为 600 mm, 出口内直径为 900 mm, 阀盘为圆形阀盘。TFW 型调压阀具有结构简单, 布置紧凑, 占地面积小的特点。



1、阀座；2、阀壳；3、阀盘；4、主轴；5、接力器缸部件；6、进水管；7、出水管；8、阀身；9、吊耳

Figure 1. Schematic diagram of TFW600/130 pressure regulating valve

图 1. TFW600/130 型调压阀结构示意图

调压阀调压的工作原理如下:

当机组转速因弃荷或频率大波动而上升时, 调速器将紧急关闭水轮机导叶, 同时调压阀接力器紧急开启带动阀盘泄水。水轮机导叶关闭后, 调压阀阀盘则由全开慢速地关闭至全关。也就是说导叶关闭之后, 调压阀继续将引水系统内的压力水向尾水管排泄, 进而有效地(相当于)延长了水轮机导叶的关闭时间, 达到了减少水锤压力、降低水压上升率和降低机组转速上升率的目的, 起到了调压井的功能。特别是在较长引水系统的情况下, 设置这种调压阀替代调压井, 能够起到降低较长引水系统压力的作用, 同时降低工程造价。

3. 计算模型的建立

3.1. 构建调压阀流体域模型

本文选用 ANSYS/ICEM 软件分别构建了调压阀在各种开度下的内流道流体网格计算模型, 如图 2 所示的是某一特定开度下的调压阀内流道流体网格三维模型。图 3 所示为调压阀三维模型的计算域截面及流体计算模型。网格划分完毕之后, 将上述不同开度下的模型导入 ANSYS/CFX 软件中, 对边界条件、湍流模型进行设置, 对应设置好壁面、进出口、以及 interface 面, 便于进行耦合仿真时数据的传递。然后进行仿真计算。调压阀内介质为清水, 边界条件设置如下:

- 1) 入口边界条件: 本模型采用的是压力进口, 将调压阀进水管入口设为压力入口边界, 根据实际工程, 给定压力 0.855 Mpa (设计水头下的压力上升值)。
- 2) 出口边界条件: 采用大气压作为出口的边界条件。
- 3) 壁面边界条件: 无滑移的边界条件, 每个交界面之间采用静静交界面。
- 4) 湍流模型: RNG $K-\varepsilon$ 模型, 控制方程为 Navier-Stokes 方程, 残差值为 10^{-4} 。

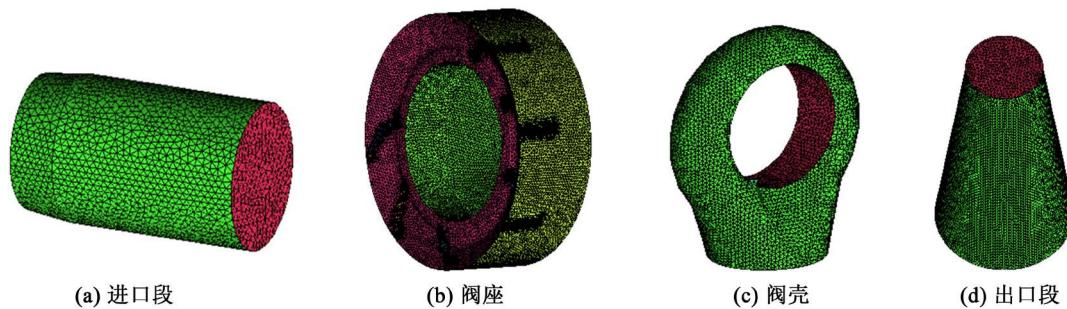


Figure 2. 3D grid model of flow channel in pressure regulating valve
图 2. 调压阀内流道网格三维模型

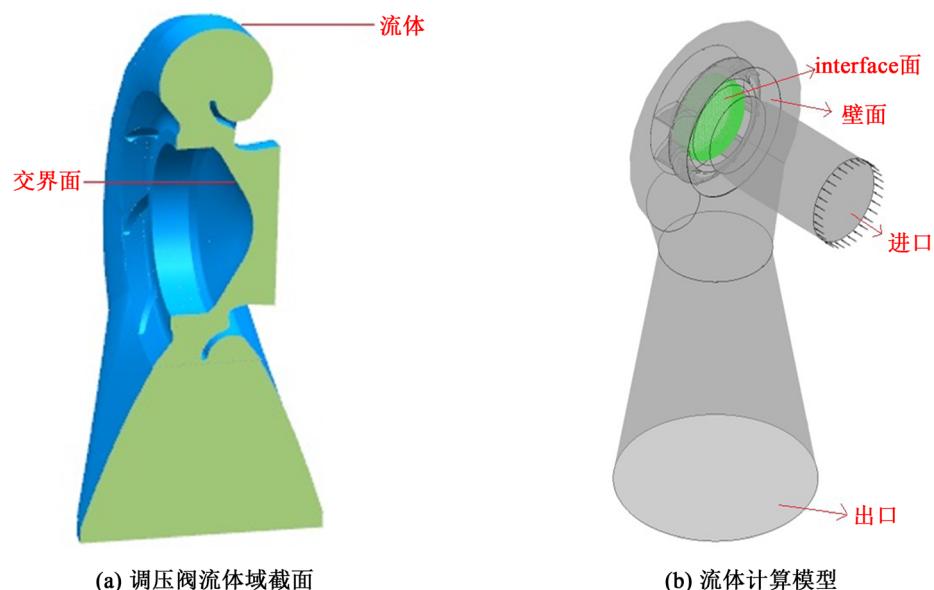


Figure 3. Fluid domain and calculation model of pressure regulating valve
图 3. 调压阀流体域与计算模型

3.2. 阀盘计算模型的建立

采用 UG 软件画出阀盘的三维实体模型，并以 x-t 文件格式导入 ANSYS Workbench 中进行网格的划分与计算。图 4 给出了特定开度下调压阀阀盘的三维模型，同时也给出了相应的有限元网格。需要注意的是针对不同开度下的内流道流体要对应相应匹配的阀盘模型。流体与阀盘的耦合分析步骤如下：

- 1) 材料属性定义：此调压阀阀盘材料为结构钢，密度 ρ 为 7850 kg/m^3 ，弹性模量 E 为 $2.5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。
- 2) 将内流道流场的仿真计算结果 res 文件导入 Workbench 平台。
- 3) 构建有限元模型：如图 4(a)所示，在 ANSYS/Workbench 软件中，运用 static structural 软件划分好网格，并且施加约束与荷载。计算设置如下：将之前在流场计算中(由于篇幅所限，流场计算的结果没有在本文展示)，流体对 interface 面上所产生压力用外荷载的形式添加到阀盘的耦合面上；在固定开度下，阀盘后面及活动轴是固定不动的，因此将阀盘后面边缘面(含止水部件)及轴的边缘面设置固定约束，具体阀盘计算模型如图 4(c)。
- 4) 计算结果分析：对 11 种开度下的调压阀阀盘的有限元模型进行求解，得出其在各种开度下的位移及应力变化规律。

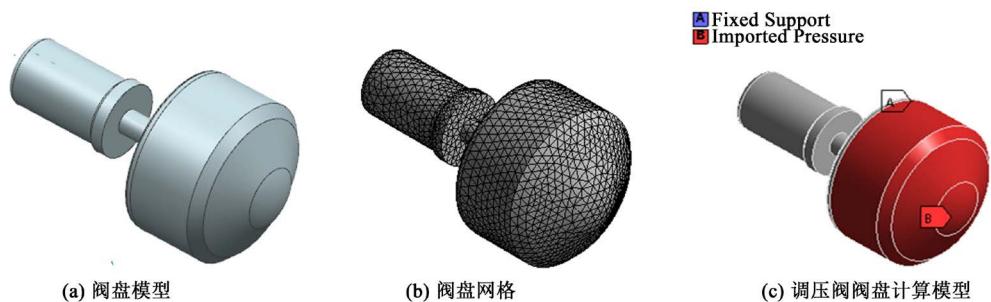


Figure 4. Grid and calculation model of pressure regulating valve disc
图4. 调压阀阀盘网格与计算模型

4. 结果分析

4.1. 调压阀内部流场计算结果及分析

对调压阀在 0.855 MPa 压力条件下进行数值模拟，随着开度的增加，进水管处的压力是逐步降低的，说明调压阀的开启起到了对管道减压的作用。调压阀在开度为 10 mm、40 mm、75 mm 及 150 mm 处的内流场流线图，如图 5 所示，由出口处的紊乱流线可以看出出口处存在漩涡，增加了能量损失，使泄水管产生了消能的作用，达到泄压效果。

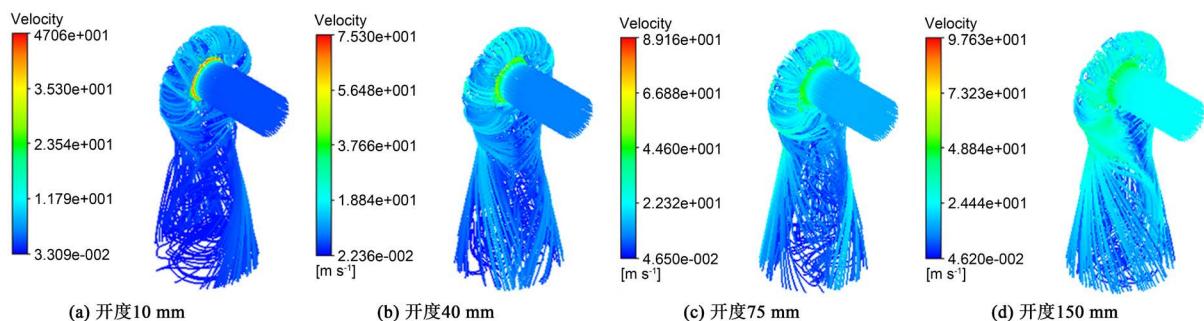
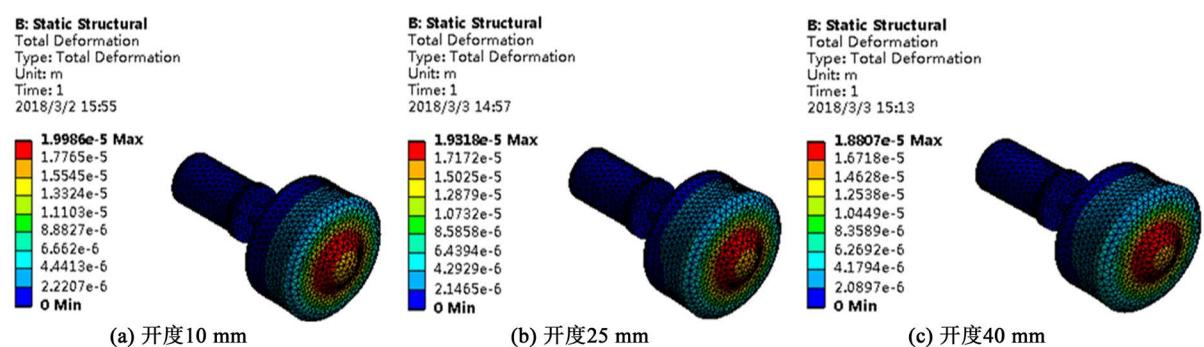
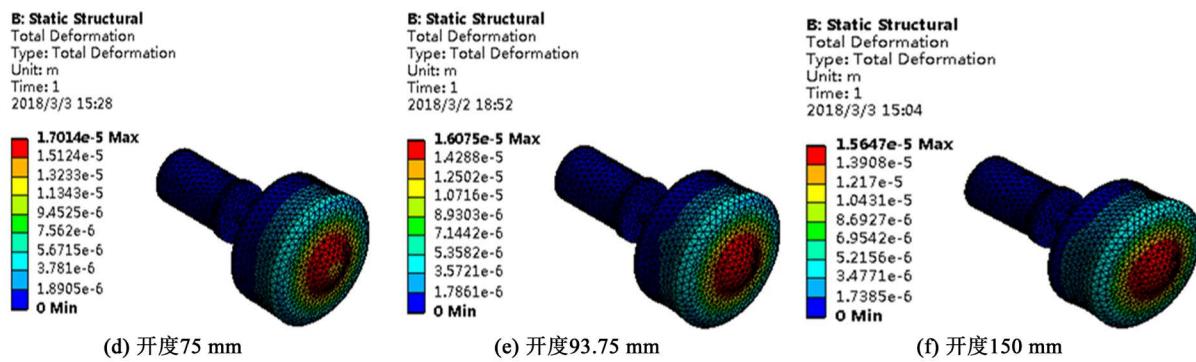
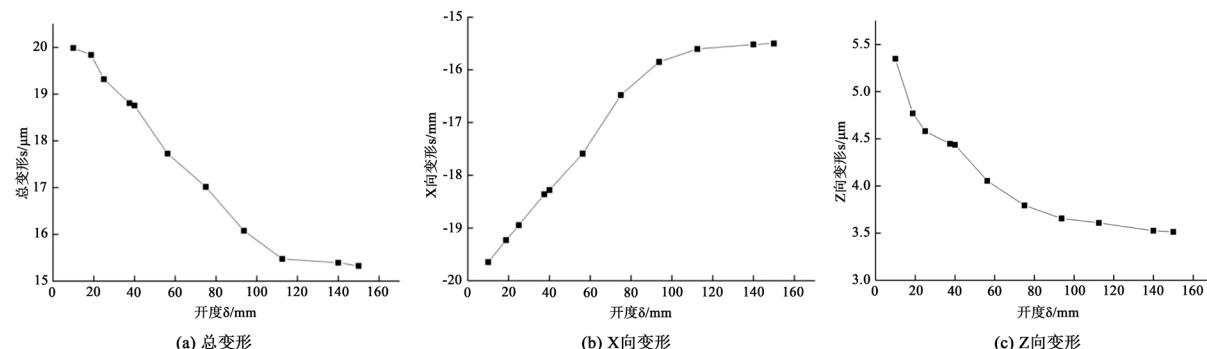


Figure 5. The Velocity Streamline of full flow channel at different opening positions
图5. 调压阀在不同开度下的全流道流线图

4.2. 阀盘变形分析

图 6 分别展示了调压阀开度为 10 mm、25 mm、40 mm、75 mm、93.75 mm 及 150 mm 的阀盘的总变形图。可以看出阀盘变形沿阀盘的中心线(轴线)对称，最大的变形在阀盘中部。图 7 分别给出了调压阀阀盘总变形、X 向变形、Z 向变形(X 向为沿主轴方向、Z 向为垂直主轴方向)与随着开度变化的相关曲线。



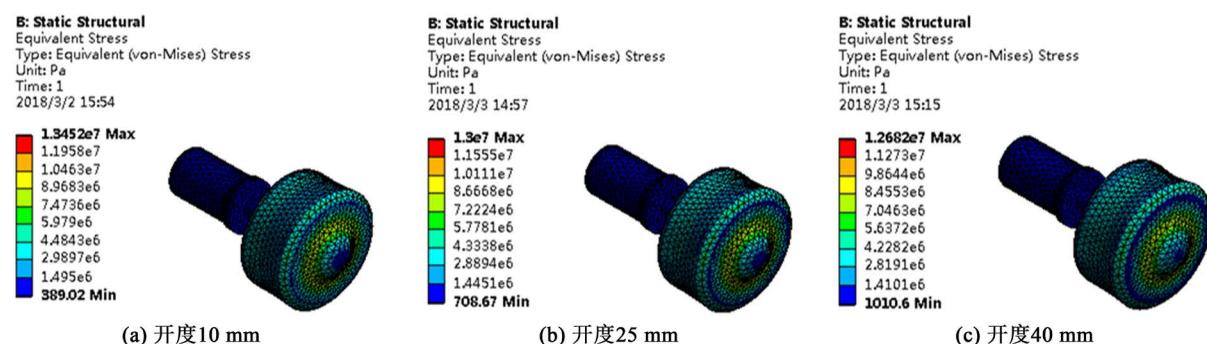
**Figure 6.** Maximum total deformation cloud map of valve disc at different openings**图 6.** 阀盘在不同开度下的最大总变形云图**Figure 7.** The curve of the deformation of the valve disc of the pressure regulator with the opening degree**图 7.** 调压阀阀盘的变形随开度的变化曲线

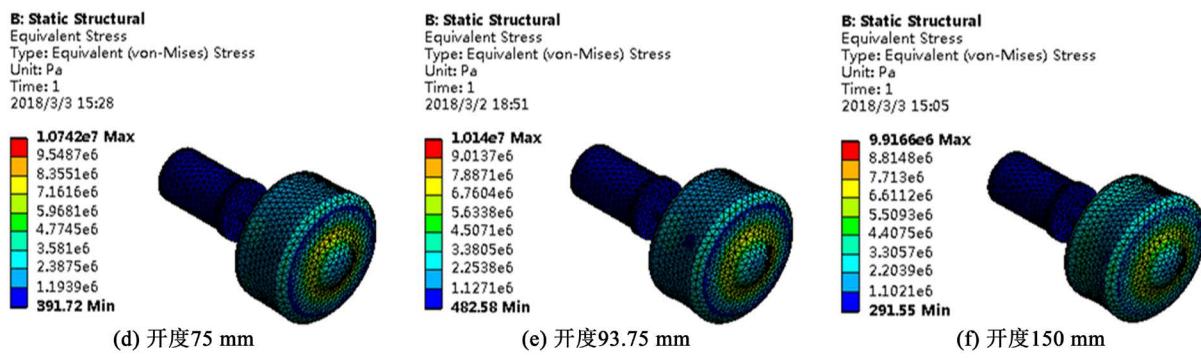
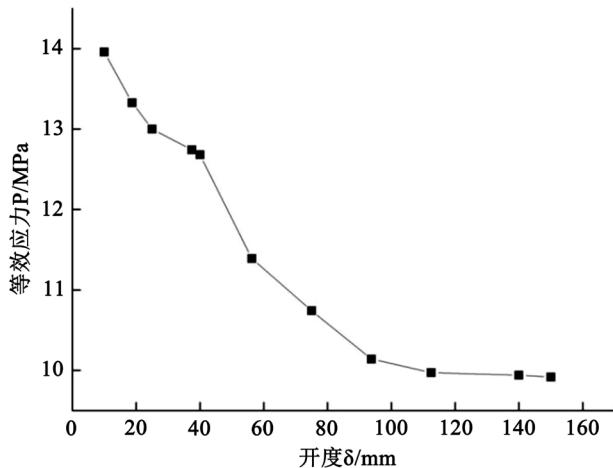
从以上图中可以得出：阀盘的最大总变形随开度增大而变小，Z 向变形随开度的增大而减小，X 向的变形随开度增大均为减小的趋势。两者变形趋势一致，主要原因是随着开度的增大，泄流量的加大，阀盘两面的水压力作用，导致阀盘的变形减小，说明阀盘运行应该是非常平稳的。

当开度小于 100 mm 时，阀盘位移变化剧烈，当开度大于 100 mm 时，阀盘位移变化趋势变缓。

4.3. 阀盘应力分析

图 8 分别展示了调压阀在 6 种开度下的阀盘的应力云图。从图中可以看出由于对称性，阀盘的等效应力也对称，对称中心是阀盘的中间截面，并且均匀分布在阀盘上。随着水体进入阀内冲击阀盘，使得靠近阀口入口处阀盘顶部周围一圈的应力值较大。图 9 展示了调压阀阀盘的等效应力随着开度变化的关系曲线图，从图上可以明显得出：随着开度的增加，阀盘的等效应力值逐渐降低，并且变化趋势减弱。



**Figure 8.** Equivalent stress contours of valve discs at different openings**图 8.** 阀盘在不同开度下的等效应力云图**Figure 9.** Curve of valve disc equivalent stress as a function of opening degree**图 9.** 阀盘等效应力随开度变化的曲线

通过建立调压阀内流道流体与阀盘流固耦合分析模型，并进行耦合分析得出，随着调压阀开度的增大，泄流量的加大，阀盘的变形减小，说明阀盘运行应该是非常平稳的。同时，当开度小于 100 mm 时，阀盘位移变化剧烈，当开度大于 100 mm 时，阀盘位移变化趋势变缓。但总的来讲，阀盘的变形量及等效应力都比较小，由此可知阀盘完全满足强度与刚度的要求。

5. 结论

本文采用 CFX 软件建立了调压阀的内流道计算模型，在 ANSYS/Workbench 中运用 static structural 软件建立好阀盘的计算模型，将调压阀内流场所计算得到的流体对交界面产生的压力以外荷载的形式施加到阀盘表面上进行流固耦合计算，经过耦合分析得到调压阀阀盘在不同开度、不同压力下的应力场及位移场，并且总结出它们随开度及压力变化的分布规律。因此可以得出：调压阀阀盘的最大总变形，最大 X 向变形，最大 Z 向变形都随着开度的增大而逐步减小，等效应力也逐步降低，并且开度在 100 mm 后变化趋势都渐缓。在调压阀运行过程中，其变形量及应力都变化较小，在合理范围之类，且满足刚度、强度要求。

基金项目

流体及动力机械教育部重点实验室开放基金(No. szjj2014-045); 四川省科技厅项目(No. 2016JY0187)。

参考文献

- [1] 侯洁. 水电站用 TFW 型调压阀的水力特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2018.
- [2] 王辉昊, 陈博, 詹红生, 等. 流固耦合分析颈椎生理活动对椎动脉血流动力学的影响[J]. 医用生物力学, 2014, 29(6): 511-516.
- [3] Mehryan, S.A.M., Ghalambaz, M., Ismael, M.A., et al. (2017) Analysis of Fluid-Solid Interaction in MHD Natural Convection in a Square Cavity Equally Partitioned by a Vertical Flexible Membrane. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **424**, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.123>
- [4] 杨金有, 俞航, 刘静, 洪洋. 流固耦合分析分层的腹主动脉瘤模型[J]. 生物医学工程与临床, 2014, 18(4): 310-314.
- [5] 裴吉, 袁寿其, 袁建平. 流固耦合作用对离心泵内部流场影响的数值计算[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 107-112.
- [6] Xiao, R., Wang, Z. and Luo, Y. (2008) Dynamic Stresses in a Francis Turbine Runner Based on Fluid-Structure Interaction Analysis. *Tsinghua Science & Technology*, **13**, 587-592. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(08\)70096-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(08)70096-8)
- [7] Saeed, R.A., Galybin, A.N. and Popov, V. (2013) 3D Fluid-Structure Modelling and Vibration Analysis for Fault Diagnosis of Francis Turbine Using Multiple ANN and Multiple ANFIS. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **34**, 259-276. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.08.004>
- [8] 张福星, 郑源, 魏佳芳, 丁琳, 杨春霞. 基于流固耦合的贯流式水轮机应力分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 267-273.
- [9] 叶万权, 杨礼康, 杜嘉鑫, 周安江. 基于流固耦合的减振器复原阀外特性分析[J]. 浙江科技学院学报, 2017, 29(6): 429-432.
- [10] 包凯, 刘清友. 基于 workbench 流固耦合节流阀数值分析与优化设计[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(4): 116-119.
- [11] 潘永成. 压力调节阀的流场流动特性和流固耦合特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2010.
- [12] Deng, J., Shao, X.M., Fu, X., et al. (2009) Evaluation of the Viscous Heating Induced Jam Fault of Valve Spool by Fluid-Structure Coupled Simulations. *Energy Conversion and Management*, **50**, 947-954. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.033>