

阀芯运动状态滑阀内部流场的可视化分析*

赵 蕾 陈 青 权 龙

【摘要】 应用CFD软件Fluent,以全周开口滑阀为例,对滑阀阀芯运动过程内部流场变化特性进行了可视化分析。计算发现当阀处于小开口、大流量、阀芯高速运动时,瞬态液动力数值较大,设计阀时必须加以考虑。由于流道和阀体的不对称,在阀杆上还作用有不对称的径向力,会引起阀芯卡紧,很难用结构设计的方法加以平衡。通过对滑阀动静态流量系数进行计算,发现随着阀口开度和阀芯运动状态的不同,流量系数变化较大。

关键词: 滑阀 可视化分析 液动力 径向力 流量系数

中图分类号: TH137.52

文献标识码: A

Visualization Analysis of the Flow Field in a Moving Spool Valve

Zhao Lei Chen Qing Quan Long

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract

The flow field inside the spool valve during spool moving was simulated and analyzed using the CFD software Fluent. The simulation results show that the transient flow force is large when the valve is in small throttle with large flow and high moving speed, which must be considered during the valve design. By the analysis of the hydraulic force act on the valve-pole, there is an additional radial force that causes valve element lockup existed. This force is difficult to be balanced with only structure method. By computing the discharge coefficient valve in static and dynamic condition, the results show that the discharge coefficient changes greatly with the spool stroke and moving state.

Key words Spool valve, Visualization analysis, Flow force, Radial force, Discharge coefficient

引言

近年,越来越多的国内外学者,采用计算流体力学(CFD)方法分析液压阀内流体的速度分布、压力变化、能量损失以及阀口的气穴现象^[1~5],目前的研究工作主要集中在阀芯处于某一开口的稳定状态。实际工作过程中,阀芯经常处于开启和关闭的运动状态,因此,液压阀阀芯运动过程中,其内部流场变化的可视化分析计算,对深入了解滑阀的工作机理,并从结构上优化非常有意义。文献[6]曾对阀芯运动过程中液压锥阀内部的流场变化进行了计算研究。滑阀阀芯上作用的流体作用力,有轴向液动

力和径向的不平衡力。目前对于稳态液动力的研究较多^[7],瞬态液动力研究工作较少,只有一些定性的分析^[8],本文通过可视化的手段对滑阀阀芯运动过程内部流场变化进行定量的分析。同时,对阀芯运动过程中进出口压差进行计算,对流量系数的大小和变化进行分析。

1 滑阀的几何模型

图1是滑阀的结构简图。主要尺寸为: $a = 7\text{ mm}$, $b = 5\text{ mm}$, $c = 4.5\text{ mm}$, $d = 6\text{ mm}$, $D = 11\text{ mm}$, $w = 6\text{ mm}$, $e = 15\text{ mm}$, x 为阀口开度。由于阀流道内的几何模型较为复杂,所以采用设计软

收稿日期:2007-12-12

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50675147)

赵 蕾 太原理工大学机械电子工程研究所 硕士生, 030024 太原市

陈 青 太原理工大学机械电子工程研究所 副教授 博士

权 龙 太原理工大学机械电子工程研究所 教授 博士 通讯作者

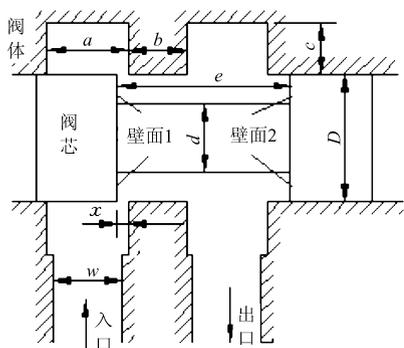


图 1 进口节流式滑阀结构简图

Fig.1 Structure of the metering-in spool valve

件 Pro/E 对研究对象进行建模。如图 2 所示。

2 网格划分和计算

2.1 网格划分

使用面向 CFD 的前处理器软件 Gambit 对滑阀内部流道进行网格划分,使用混合网格 hybrid。考虑到计算机运行时间和存储容量,计算时使用半剖模型,在入口和出口处采用较粗网格。由于阀口处的节流作用,阀口附近的流速和压力梯度较大,需要对网格进行细化,划分网格后阀内部流场情况如图 3 所示。

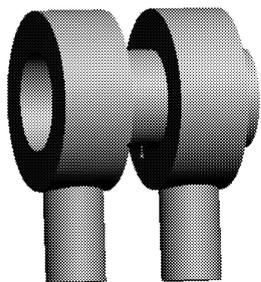


图 2 Pro/E 建立的滑阀模型

Fig.2 Model of the spool valve established by Pro/E

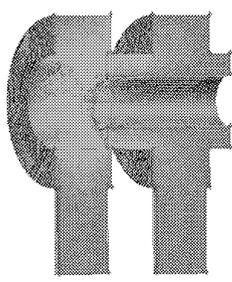


图 3 滑阀网格划分的半剖模型

Fig.3 Mesh of the half spool valve

2.2 边界条件和计算条件

流体与壁面接触的边界为静止壁面。进出口边界条件分别取为速度进口和压力出口。计算过程中对流体的流动状态做了以下假设:① 流体为牛顿流体,不可压缩。② 流动介质为液压油,运动粘度为 $29 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。③ 流动状态为紊流,采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型。④ 出口压力取为 0.15 MPa ,操作压力为大气压。

3 仿真结果及比较分析

对滑阀阀芯的开启和闭合过程,采用动态网格技术实现。阀芯运动后新的边界位置由 Fluent 自动执行更新,只需给定初始网格和使用用户自定义函数 UDF 定义运动区域的运动即可。UDF 功能可

以定义不同的阀芯运动速度和运动方向进行仿真计算。图 4 是阀芯速度为 0.1 m/s ,流量为 40 L/min ,阀芯运动过程中 3 个不同位置的示意图。

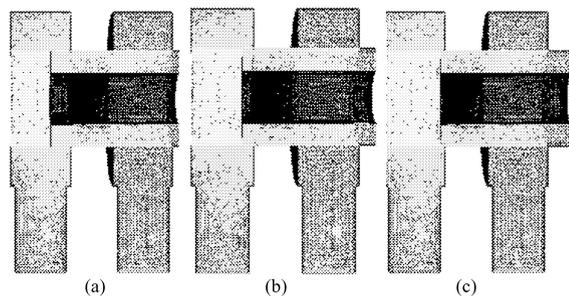


图 4 阀芯闭合位置示意图

Fig.4 Motion sketch of the spool valve

3.1 液动力

液动力是作用在滑阀上的主要轴向力之一,它的控制特性不但影响阀的操纵力大小,而且是造成阀不稳定的原因之一。液动力分为稳态液动力和瞬态液动力。

稳态液动力是液流通过滑阀流道,因液流量变化而产生的作用在阀芯上的附加力,可采用动量定理来计算滑阀的稳态液动力

$$F_s = 2C_q C_v \pi D x \Delta p \cos \theta \quad (1)$$

式中 C_q ——流量系数 C_v ——流速系数

Δp ——阀口前后压差

θ ——滑阀节流口处的射流角,对于理想滑阀,取为 69°

根据动量定理,瞬态液动力的理论求解为

$$F_i = ma = \rho L \frac{dQ}{dt} = C_q \omega L \sqrt{2\rho \Delta p} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

式中 ω ——阀口周长 L ——阻尼长度

ρ ——液体密度 Q ——阀口流量

阀芯受到的作用力是通过阀芯台肩壁面所受压力对面积的积分得到的。为了求出作用在阀芯上的液动力,仿真了阀芯处于静止、开启和闭合 3 种状态下阀芯表面的压力分布。阀芯静止时,阀芯台肩壁面的压力在阀芯表面的积分即为稳态液动力。阀芯静止和运动状态下,阀芯台肩壁面的压力差值在阀芯表面的积分,即为瞬态液动力。图 5 给出了流量 40 L/min ,阀口开度为 0.5 mm ,阀芯运动速度为 0.1 m/s ,阀芯分别在静止、开启和闭合状态下,阀芯台肩壁面的压力分布情况。

图 5 中径向坐标是指阀芯径向方向的坐标值。从图 5 曲线可知,相同边界条件,阀芯处于不同状态时,阀芯台肩壁面的压力分布趋势基本相同,但是,最低负压值不同。闭合和开启状态的负压值小于稳定状态。静止和开启状态的压力最大值大于闭合状态。

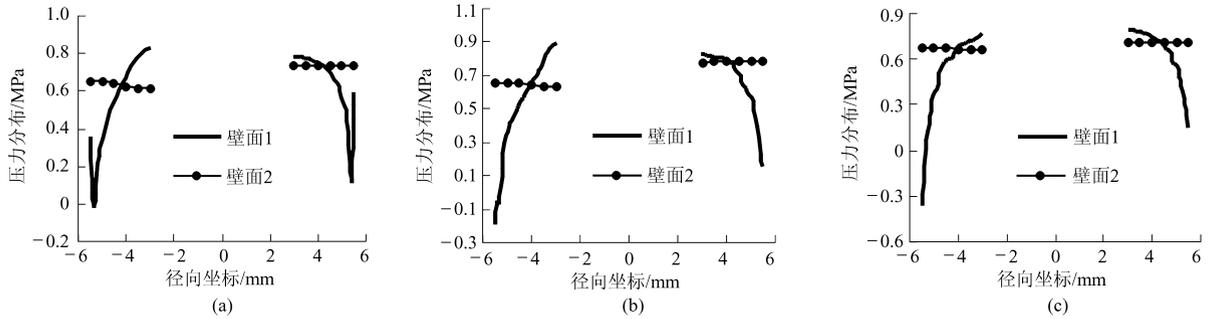


图5 阀芯台肩壁面的压力分布情况

Fig.5 Pressure distribution of spool wall

(a) 阀芯静止 (b) 阀芯开启 (c) 阀芯闭合

图6给出3种流量下,按式(1)和CFD计算所得作用在阀芯上的稳态液动力随阀口开度的变化曲线。

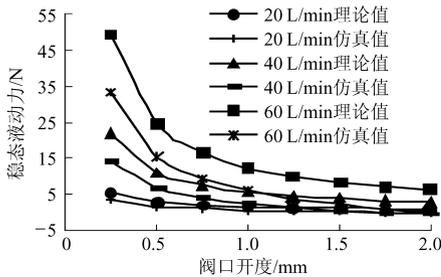


图6 稳态液动力的仿真值与理论值比较曲线

Fig.6 Comparative curves of the theoretical and simulation valve of steady flow force

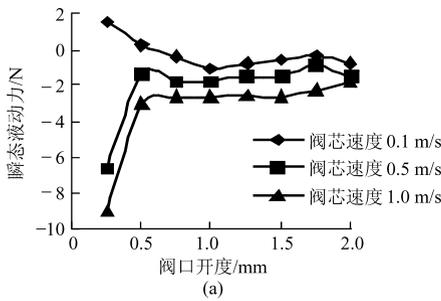
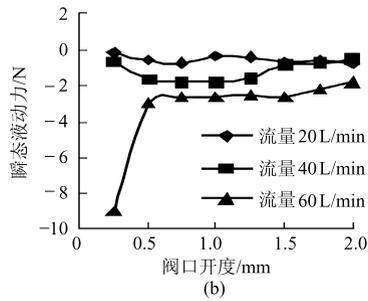


图7 瞬态液动力仿真结果曲线

Fig.7 Simulation results of transient flow force

(a) 流量为 60 L/min,不同阀芯运动速度 (b) 阀芯运动速度为 1 m/s,不同流量



动力越大。

对比稳态液动力的计算结果可知,滑阀瞬态液动力总体很小,相对于稳态液动力几乎可以忽略。但是当阀处于小开口、大流量、阀芯高速运动时,瞬态液动力的值将很大,这在设计阀时,必须加以考虑。

3.2 径向不平衡力

在考虑滑阀的受力情况时,一般只考虑轴向力,认为径向方向的力相互抵消而不予考虑。但是,由于滑阀流道和阀体的不对称性,径向力并不能完全被平衡掉,当它比较大时,可能导致液压阀芯卡紧等不良结果。图8给出了不同情况下,出口节流式滑

从图中可以看出,阀芯开口一定时,流量越大,稳态液动力越大。但是随着阀口开度的增大,由于阀进出口压差的减小,稳态液动力也随着减小。CFD仿真结果和按计算公式的计算值变化趋势一致,数值也较接近,只是在流量大时差别有所增大,这主要是因为仿真计算时,由于阀口前后压差不好测量,用进出口压差代替阀口压差,计算中附加有沿程损失所导致。

图7所示为瞬态液动力的仿真结果曲线。通过比较发现,瞬态液动力与阀芯运动速度、通过阀的流量以及阀口开度有关。瞬态液动力随着阀口开度的增大而减小。相同流量时,阀芯运动速度越大,瞬态液动力越大;相同阀芯运动速度,流量越大,瞬态液

阀阀杆上下表面的径向压力差值的分布情况。图中的坐标是指沿阀杆长度方向,阀口关闭时壁面1所处的位置为零位,阀芯开启方向为正,反方向为负。

比较图8中曲线发现,阀口开度相同时,流量越大,阀杆的径向不平衡力越大;流量相同时,阀口开度对径向不平衡力影响较小。相同阀口开度,相同流量,阀芯运动状态不同时,靠近节流口处阀杆上的径向力受影响较大,阀芯开启时的径向不平衡力大于阀芯静止和闭合时的径向不平衡力。

比较发现,当阀口开度为 0.25 mm,流量 40 L/min的时候,阀杆上、下表面的径向压差最大,为 0.25 MPa 左右,此力较大,且不能用平衡槽平衡

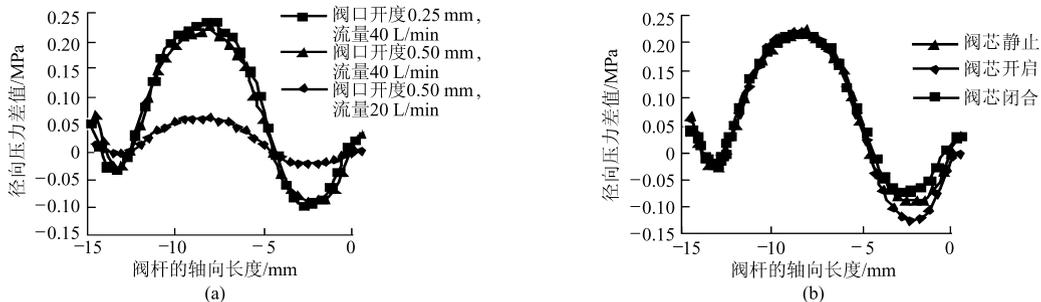


图 8 阀杆上的径向力差值

Fig. 8 Radial unbalance force on the valve-pole

(a) 阀芯静止 (b) 阀芯运动

掉。所以当小开口、大流量的时候, 阀杆上的径向作用力是不能忽略的, 这在设计的时候应该引起注意。

3.3 流量系数

根据阀口的流量公式

$$Q = C_q A(x) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

对于全周开口滑阀

$$A(x) = \pi D x$$

可以推导出

$$C_q = \frac{Q}{\pi D x \sqrt{2\Delta p / \rho}} \quad (4)$$

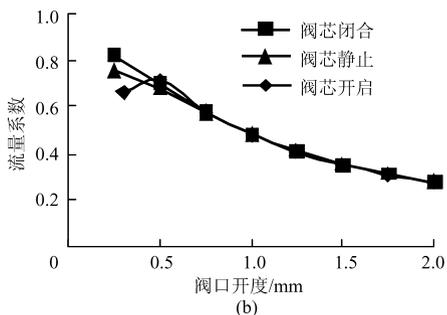
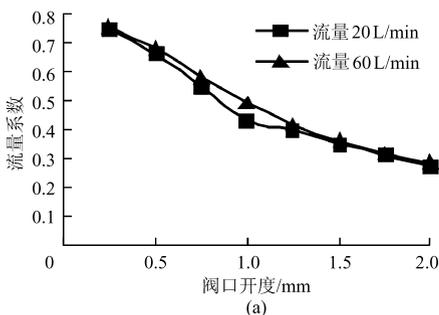


图 9 流量系数与阀口开度的关系曲线

Fig. 9 Relationship of discharge coefficient and opening

(a) 阀芯静止 (b) 阀芯不同运动状态

的增大而减小, 这主要是因为用进出口压差代替阀口前后压差, 将沿程损失计算在内所致。滑阀阀芯在静止、开启以及闭合状态时, 流量系数基本相同, 只是在小开口度时, 流量系数相差较大。阀芯开启时, 流量系数小于阀芯关闭和静止时。这主要是因为当流量一定时, C_q 只和 Δp 有关, Δp 越小, 流量系数越大。从仿真的速度矢量图可以看出, 当阀芯闭合时, 阀口的流体速度大于阀芯开启时, 这可根据伯努利方程, 推导出此时 Δp 更小, 所以 C_q 更大。

4 结论

(1) 瞬态液动力与阀口开度、阀的流量和阀芯

根据仿真结果得到阀芯在不同状态下的阀口前后压差, 代入式(4)得到流量系数与阀口开度的关系。

流量系数反映液压阀内的流动特征。计算比较不同流量在阀芯静止时, 阀口开度与流量系数的关系, 并且研究阀芯运动对滑阀流量系数的影响。比较滑阀在一定流量 40 L/min, 阀芯静止、开启(从 0.25 mm 到 2 mm)和关闭(从 2 mm 到 0.25 mm)时的流量系数。图 9 所示曲线为流量系数与阀口开度的关系。

比较图中曲线, 可以看出, 相同阀口开度下, 滑阀的流量系数与流量大小几乎无关, 随着阀口开度

运动速度有关。当阀处于小开口、大流量且阀芯高速运动时, 瞬态液动力将很大, 这时在设计阀时必须加以考虑。

(2) 由于滑阀流道和阀体的不对称性, 在滑阀阀杆上存在着径向不平衡力, 在小开口度、大流量时会很大, 不能忽略。另外阀芯开启时, 节流口附件的阀杆上的径向不平衡力相对更大。

(3) 采用进出口压差计算流量系数, 由于存在沿程损失, 滑阀的流量系数随着阀口开度的增大而减小。并且在阀芯运动, 小开口度情况下, 受阀芯的运动状态影响较大。

(下转第 155 页)

库和相关非结构化数据资源共存的管理问题。并且利用静态页面生成技术,完全实现了系统的显示与业务逻辑的分离,仅在执行后台管理功能时才访问

数据库,降低了服务器的负担,提高了系统的运行效率,使得生成的静态页面系统可以独立于资源数据库系统运行,增强了系统的安全性和部署的灵活性。

参 考 文 献

- 1 阎楚良,田兆锋. 农业机械与农副产品加工信息电子商务平台的建设[J]. 农业机械学报,2005,36(1):152~154.
- 2 郭云飞,黄东. 基于 B/S 模式的多层结构的电厂设备管理系统的设计[J]. 计算机与现代化,2004,12:119~121.
Guo Yunfei, Huang Dong. Design of B/S mode-based multi-layer structure power plant equipment management system[J]. Computer and Modernization, 2004,12: 119~121. (in Chinese)
- 3 何晓蓉. 科研机构内容管理模型的研究及实现[D]. 广州:中山大学,2005.
He Xiaorong. Research and implement on model for content management in scientific research institution[D]. Sun Yat-sen University,2005. (in Chinese)
- 4 石永革,许建林,石峰. 富客户端技术应用研究与实现[J]. 计算机工程与设计,2008,29(3):639~641.
Shi Yongge, Xu Jianlin, Shi Feng. Research of rich client technology application[J]. Computer Engineering and Design, 2008,29(3):639~641. (in Chinese)
- 5 文必龙,张全,马士宾. 基于富客户端技术的查询系统的设计与实现[J]. 科技创新导报,2008(1):39~41.
- 6 Devin Rader, Jason Beers, Ambrose Little, et al. Silverlight™ 1.0[M]. Indiana: Wiley Publishing, Inc., 2007:2~5.
- 7 赵韶平. PowerDesigner 系统分析与建模[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 8 阎楚良,田兆锋,高国忠. 基于 J2EE 三层结构的农业机械企业信息管理系统[J]. 农业机械学报,2006,37(7):154~157.
- 9 田兆锋,阎楚良. 基于 UML 和 JSP 的农业机械装备信息网络平台[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2006,24(6):648~655.
Tian Zhaofeng, Yan Chuliang. Design of China agriculture mechanization information network based on UML and JSP technology[J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition,2006,24(6):648~655. (in Chinese)

(上接第 145 页)

参 考 文 献

- 1 冀宏,傅新. 非全周开口滑阀压力分布测量研究[J]. 机械工程学报,2004,40(4):99~102.
Ji Hong, Fu Xin. Measurement on pressure distribution of non-circular opening spool valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2004,40(4):99~102. (in Chinese)
- 2 Bao Min, Fu Xin. Computational fluid dynamic approach to pressure loss analysis of hydraulic spool valve[C]. Proceedings of the 5th International Conference of Fluid Power Transmission and Control, Hangzhou, China,2001:467~471.
- 3 高殿荣,侯桂庆. 进口节流式滑阀内流场的有限元计算与 PIV 研究[J]. 机械工程学报,2004,40(6):10~18.
Gao Dianrong, Hou Guiqing. Finite element numerical simulation and PIV investigation of flow field inside metering-in spool valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2004, 40(6):10~18. (in Chinese)
- 4 Qiao Qin, Charles C S Song, Roger E A Arndt. A virtual single-phase natural cavitation model and its application to Cav2003 Hydrofoil[C]//Fifth International Symposium on Cavitation(Cav 2003), Osaka, Japan, 2003.
- 5 Chen Q, Stoffel B. CFD simulation of a hydraulic servo valve with turbulent flow and cavitation[C]//Proceedings of ASME-PVP04 2004 Computational Technologies for Fluid/Thermal/Chemical/Stressed Systems with Industrial Applications, 2004.
- 6 郑淑娟,权龙,陈青. 阀芯运动过程液压锥阀流场的 CFD 计算[J]. 农业机械学报,2007,38(1):168~172.
Zheng Shujuan, Quan Long, Chen Qing. Analysis and CFD simulation of the flow filed in a moving poppet valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(1):168~172. (in Chinese)
- 7 王林翔,章明川,方志宏. 阀内流道布置对液动力的影响[J]. 机床与液压,2000(6):27~28.
Wang Linxiang, Zhang Mingchuan, Fang Zhihong. Effects of internal structure on flow force[J]. Machine Tool and Hydraulics,2000(6):27~28. (in Chinese)
- 8 张慧兰. 液动力对滑阀使用的影响[J]. 南方冶金学院学报,1996,17(3):200~203.
Zhang Huilan. The effect of flow force on operating the spool valve[J]. Journal of Southern Institute of Metallurgy, 1996, 17(3):200~203. (in Chinese)