

滑移网格法在滑阀三维瞬态流场解析的适用性分析

姜 涛, 夏明杰, 王安麟

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 在滑阀换向过程的三维有限元解析中, 由于流固耦合造成其网格大变形, 出现三维瞬态流场解析发散的问题. 提出了面向滑阀三维瞬态流场解析的滑移网格法, 即通过在静止网格与动态网格间用平行滑移网格连接构建三维解析模型, 以避免瞬态流场解析中动态网格反复重构所造成的计算发散问题, 实现滑阀换向过程的三维瞬态流场解析. 研究以某液压挖掘机多路阀回转联为对象, 以液压元件动态特性试验台试验结果为基准, 对比平稳工况条件下的解析值与实验结果, 验证了滑移网格法在滑阀三维瞬态流场解析中的适用性, 为建立挖掘机动态载荷与其阀芯结构形态间的动力学映射关系提供了工程化表达路径.

关键词: 滑阀; 三维有限元解析; 滑移网格法; 液压挖掘机
中图分类号: TH137.52 **文献标志码:** A

Applicability Analysis of Slide Valve in 3D Transient Flow Field Analysis of Sliding Mesh Method

JIANG Tao, XIA Mingjie, WANG Anlin

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In the three-dimensional finite element analysis of slide valve's reversing, calculation convergence of transient flow field may not be gained because of large mesh deformation caused by fluid-structure interaction. For this reason, sliding mesh method oriented to three-dimensional transient flow field analysis of slide valve is proposed in this study, using parallel sliding mesh connected between static and dynamic grid to build a three-dimensional analytical model, in order to avoid calculation divergence caused by repeating reconstruction of dynamic mesh in the transient flow field. Taking the swing way of multi-way valve used in hydraulic excavator as the object of the research and basing on the results of dynamic characteristics test bench for hydraulic components, the comparison between analytical and experimental results verifies the applicability of sliding mesh

method in transient flow field analysis of slide valve, providing an engineered expression possibility to build mapping relationship between dynamic load of excavator and its valve's structural morphology.

Key words: spool valve; three-dimensional finite element analysis; sliding mesh method; hydraulic excavator

多路换向阀被广泛应用在挖掘机、装载机等工程机械的液压系统中, 阀的性能对系统的工作有很大的影响, 多路阀同时控制多个执行机构, 对于滑阀式方向控制阀来说, 最重要的问题是换向过程平稳、可靠、响应快以及耗能少. 对滑阀瞬态流场分布的解析是目前研究的热点问题. 文献[1]利用计算流体软件中的滑移网格技术, 采用移动区流体模拟滑阀阀芯运动来研究滑阀瞬态流场. 文献[2-3]利用计算流体软件中的动网格技术, 研究单流相下滑阀阀芯的开启过程, 对阀内流场进行分析. 文献[4-6]应用计算流体动力学软件静态解析滑阀内流场. 文献[7]应用仿真软件对冲式止回阀局部流动特性仿真模拟. 以上研究多为单相流模型, 忽略固相模型对流相模型的影响. 其实在换向阀的工作机理研究中, 由于换向阀的开启与闭合过程是动态的, 阀芯与液压油是双向耦合的作用, 流体不仅对阀芯运动产生较大影响, 而且阀芯启合瞬间的速度变化很大, 阀芯的运动及变形会对流体产生很大的影响. 因此采用三维动态双向流固耦合模型模拟换向阀开启与闭合时的动态过程, 对滑阀三维瞬态流场进行解析.

针对以上分析, 本文以滑移网格法与流固耦合理论为基础, 建立有限元模型^[8]来模拟挖掘机用多路阀的回转联开启过程. 以稳态加载作为数值解析与试验的边界条件, 验证滑移网格法在滑阀三维瞬态流场解析的适用性, 为建立挖掘机动态载荷与其阀芯结构形态间的动力学映射关系提供了工程化表

达路径。

1 滑阀三维瞬态流场解析的收敛性问题

1.1 解析对象与条件

滑阀结构如图 1 所示,其中组成包括阀体、阀芯、进油口 P_1 、工作口 A、工作口 B、回油口 T、U 形槽等; P_1 口与液压泵相连,A、B 口与执行机构(如液压缸或液压马达)连接.图示回转路换向阀过程可实现($P_1 \rightarrow A, B \rightarrow T$ 或 $P_1 \rightarrow B, A \rightarrow T$);当阀芯处于中位时,液压油直接从 P_1 通过中央旁通油路回油箱 T ($P_1 \rightarrow T$);当换向阀左位工作时,液压油顶开单向阀,从主进油口流向工作 A,由 A 流向工作液压缸,此时 $P_1 \rightarrow B$ 切断,B 口直接流回邮箱($P_1 \rightarrow A, A \rightarrow B, B \rightarrow T$);当换向阀右位工作时,液压油继续顶开单向阀从主进油口流向工作口 B,由 B 流向工作液压缸, $P_1 \rightarrow A$ 切断,A 口直接流回邮箱($P_1 \rightarrow B, B \rightarrow A, A \rightarrow T$).换向阀的换向过程即换向阀由中位($P_1 \rightarrow T$)换到工作位($P_1 \rightarrow A$ 或 $P_1 \rightarrow B$),在此过程流量、压力变化剧烈,研究这个过程的流场变化对改善阀的性能具有重要意义。

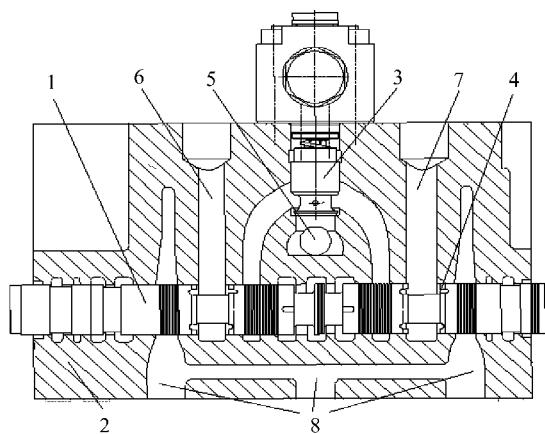
由于 4 个腔开启和关闭过程一致,故本文选取 $P_1 \rightarrow A$ 腔进行建模^[9],基本边界模型如图 2 所示, F_s 为操作力,表示为

$$F_s = p_c \pi r^2 \quad (1)$$

式中: p_c 为先导压力, r 为顶盖半径。

F_x 为弹簧力,表示为

$$F_x = F_0 + kx \quad (2)$$



1. 阀芯;2. 阀体;3. 单向阀;4. 节流槽;5. 进油口 P_1 ;6. 工作口 A;7. 工作口 B;8. 回油口 T

图 1 回转工况换向阀结构

Fig.1 Structure of reversing valve in the working of rotary

式中: F_0 为弹簧预紧力; k 为弹簧刚度; x 为阀芯行程。

如图 2 所示, P_{in}, P_{out} 与 Q_{in}, Q_{out} 分别为油液进出口压力与流量。

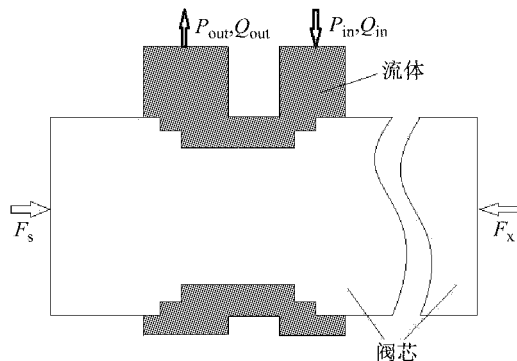


图 2 滑阀两腔流道简图

Fig.2 Flow structure of cavity in spool valve

1.2 解析的收敛性问题

在滑阀换向过程的三维有限元解析中,流场的边界是阀芯与流体的耦合界面^[10],它是一个移动壁面,在阀芯换向过程中,油液的作用力施加在阀芯结构界面上,反过来,阀芯运动也会使流体变化,假设阀芯是刚体,那么在有限元解析过程中,流体动态网格会不断被结构网格作用而发生大变形,很难实现滑阀换向过程的解析,出现三维瞬态流场解析发散的问题.一般的研究方法是三维静态解析,忽略阀芯结构运动对流体的影响,通过建立静态流体网格,定开口解析多路阀三维流场^[11],但阀芯实际工作时是处于不断运动的过程,这样就很难模拟滑阀的实际工作状态,也就难以表达挖掘机的实际工况.本研究采用滑移网格法来建立三维有限元模型,使阀腔外网格处于静止,阀腔内网格处于运动,很大程度上满足了解析的运动学条件,推进滑阀的三维瞬态解析。

2 滑阀性能试验的条件

2.1 试验系统

针对液压挖掘机工作过程的随机、动态特性,需要设计可模拟挖掘机实际工况的试验台进行对象试验.液压元器件动态特性综合试验台是实现液压挖掘机多路阀动态性能试验的工具,其被试阀及逻辑控制模块如图 3 所示,其组成及各模块功能如表 1 所示。

试验台回转联试验原理如图 4 所示,原理图包括主泵、多路阀回转联、加载模块、先导控制、回油测

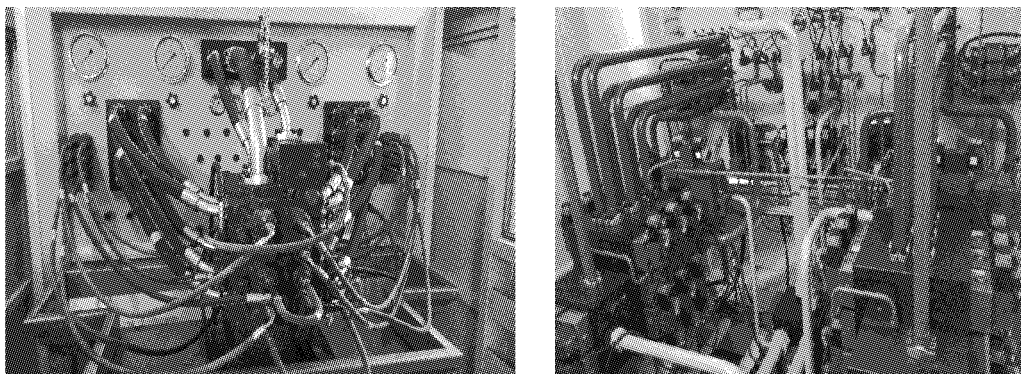


图 3 被试阀与逻辑控制模块

Fig.3 Tested valve and logical control modules

试. 先导控制系统由先导泵与先导阀组成, 先导泵为先导阀提供压力, 其最高压力由溢流阀调定, 通过减压阀调节先导压力大小; 主泵提供油源, 回转联与加载阀相连; 安装在油路中的流量计可以实时采集泵出口流量、阀出口流量以及回油流量; 压力传感器实时采集阀进口压力以及阀出口压力, 流量计以及压力传感器安装位置如图 4 所示。

表 1 试验台模块组成及功能

Tab.1 Composition and function of test bench modules

模块名称	组成	功能
供油模块	主泵、油箱、溢流阀等	为试验系统提供及分配油源
先导控制	先导泵、减压阀等	控制先导油压
逻辑控制	电磁阀、插装阀等	切换油路
加载模块	比例溢流阀、伺服方向阀	多工况模拟
测控模块	面板(手动)、计算机(自动)	实现数据实时采集及处理

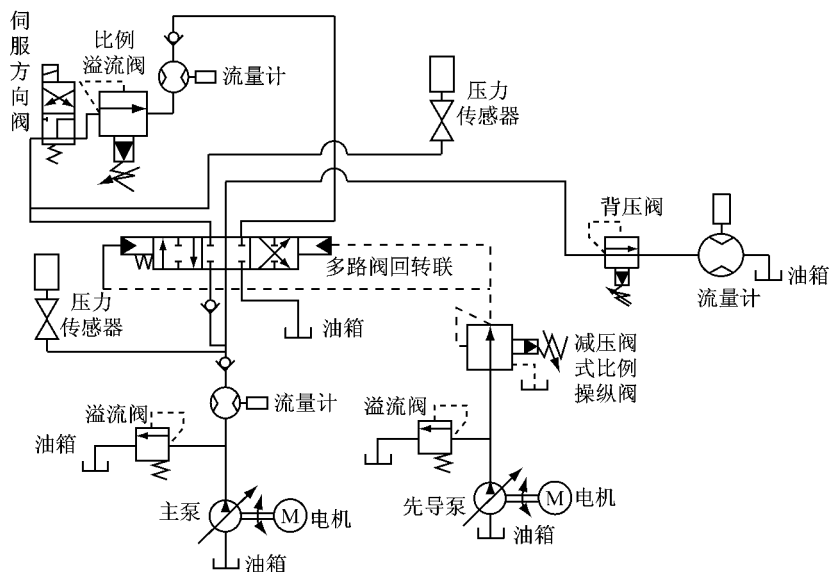


图 4 回转联试验原理图

Fig.4 Test schematic diagram of rotary way

2.2 试验条件

为了对比数值计算值与试验值, 针对某型多路换向阀回转联设计实验如表2所示, 以测量该加载

表 2 平稳(恒压)工况加载试验

Tab.2 Tests of stationary (constant pressure) working load

试验项目	系统压力/ MPa	转速/ (r · min)	先导压力/ MPa	加载信号/ MPa	温度/ ℃
1	30	1500	3.5	10	35
2	30	1500	3.5	12	35

工况条件下流量与进口压力值。

在阀芯开启过程, 设定转速为 $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 泵的排量为 $112 \text{ ml} \cdot \text{r}^{-1}$, 由公式(3)获得理论流量, 因为泵的各密封间隙有泄漏, 所以试验测得的泵实际流量要小于理论值。

$$Q = V \times n \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: Q 为理论流量; V 为泵排量; n 为电机转速。

由表 2 设计的加载试验得到的开启过程流量值如图 5 所示。传感器的采样频率为 100 Hz , 为了使数

据对比明显,如图5所示为阀芯在0.6 s内开启过程的试验数值,参照试验数值设置仿真条件对滑阀开启过程进行解析,研究阀腔内瞬态流场。由比例溢流阀加载得到的载荷值如图6所示,阀芯开启前处在中位,工作口关闭,液压油直接从中央旁通油路回油箱,此时油液经过中央旁通油路会产生1.5~2.0 MPa左右的压力损失,随着阀芯运动,阀口打开,在节流槽部位产生超调,压力会有一个峰值;阀口全开时,压力趋于稳定。如图所示,加载值越小,延时越小,因为其达到的加载值所需的流量更小,负流量控制所需的时间就更少。在目前条件下,以一定比例缩放后的缩放仿真加载条件,分别为0.5 MPa和0.6 MPa,来等效研究阀腔内瞬态流场。

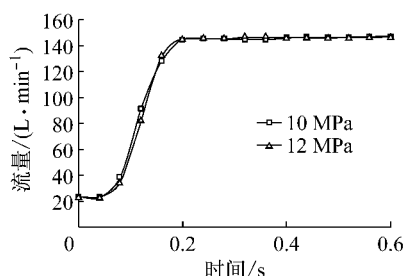


图5 稳态加载时阀芯开启过程入口流量值
Fig.5 Inlet flow rate of opening process in steady loading

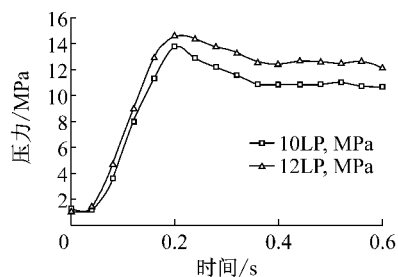


图6 稳态加载时阀芯开启过程的载荷值
Fig.6 Load value of opening process in steady loading

3 基于滑移网格法的滑阀瞬态响应解析

3.1 滑移网格法原理

滑移网格技术是在两个或多个单元区域设置网格分界面的网格技术,每个单元区域至少有一个边界的分界面,该分界面区域和另一单元区域相邻,这两个单元区域互相之间相对沿网格分界面移动。

滑移网格法的计算可以通过GGI来实现^[12],它通过插值算法在动静区域间建立连接,并传递参数

和变量。界面两边的面定义为主面和副面,如图7所示。从副面B到主面A的流动参数可表示为

$$\varphi_{A_i} = \sum_j W_{B_j-A_i} \varphi_{B_j} \quad (4)$$

式中: φ_{A_i} 为第*i*个主面单元上的流场参数; φ_{B_j} 为第*j*个副面单元上的流场参数; $W_{B_j-A_i}$ 为副面*j*单元对主面*i*单元的加权因子。其中加权因子可根据界面两侧网格交集状态计算得到。

$$W_{B_j-A_i} = \frac{|S_{B_j-A_i}|}{|S_{B_j}|} \quad (5)$$

式中: S_{B_j} 为主面单元*i*的面积; $S_{B_j-A_i}$ 为副面单元*j*与主面单元*i*的交集面积。

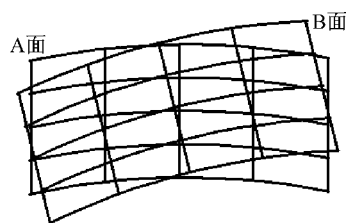


图7 插值示意图

Fig.7 Sketch of interpolation

滑动界面对包含一个或多个移动部件的流场和流固耦合分析都非常有用。移动壁面边界条件允许不同区域的网格相互移动,但经过滑动界面的物理量仍然是连续的。滑动界面两侧的节点是相互独立的。界面处的数值格式满足质量、动量和能量守恒定律。为了便于说明,下面以2D情况为例。如图8所示,点M、 S_1 和 S_2 分别位于滑动界面的两侧,要通过插值法得到M点处控制体的通量和作用力。M点处的控制体是由上半部分和下半部分两个子控制体组成的。对下半部分来说,利用节点M处的信息可求出通量。而对于上半部分,由于网格在界面处不是连接在一起的,所以得不到直接的信息。因此,上半部分控制体的通量要利用相邻界点 S_1 和 S_2 来计算。可以通过对节点M、 S_1 和 S_2 处的控制体的相对位置做线性插值得到。

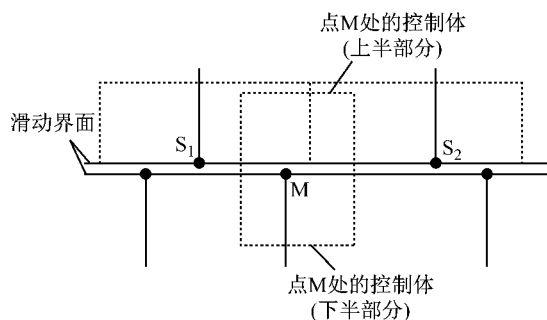


图8 滑动界面耦合

Fig.8 Sliding mesh interface coupling

3.2 基于滑移网格法的滑阀瞬态响应解析实例

3.2.1 边界条件

流体与壁面接触的边界为静止壁面,进出口边界条件分别为速度和出口压力.计算过程的流体状态设置定为:①流体为牛顿流体,不可压缩.②液压油密度为 $890 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,动力粘度为 $0.036 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$,体积模量为 700 MPa .③流动状态为湍流,采用标准 $k-\epsilon$ 模型④仿真入口流量与出口压力加载条件为:入口速度 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,该值以试验流量为依据,由载荷匹配而得;出口压力分别为 0.5 MPa 和 0.6 MPa ;操作力为 15 N ,弹簧刚度 k 为 $5000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

3.2.2 仿真模型

滑移网格的剖面模型如图9所示.在使用滑移网格时,根据计算流体软件要求必须要有部分重叠区域,重叠厚度范围大致是模型尺寸的 10^{-6} m .因为阀芯结构比较复杂,所以采用四面体网格划分,根据滑移网格的计算要求,本文采用自由网格划分方法,在划分网格之前首先设置单元类型,并为实体模型分配单元属性,本文中的流场模型采用的是3-D流体单元,结构模型采用的是3-D固体单元,阀芯与流体之间的耦合面流场变化比较大,采用整体网格划分,根据划分结果,腔外流体静网格模型共有单元93 747个,腔内流体动网格模型共有单元72 304个,节点共37 520个;阀芯结构网格模型共有单元139 397个,节点共27 130个,网格划分结果模型如图10所示.由于滑移网格的存在,流体部分就被分为两部分,一部分是阀腔外的流体静网格,另一部分是阀腔内的流体动网格,流体动网格跟随阀芯结构一起运动,而静网格不动,通过滑移网格把通量传递到动网格.考虑到滑阀微动过程会有泄漏,为了能与实际工况有较好的吻合,本文在动静网格交集处设置厚度符合阀芯与阀体配合间隙的油膜,如图11所示为其设置部位示意放大图,所指油膜为阀芯与阀体配合的单边间隙.流体动网格通过ALE Mesh(任

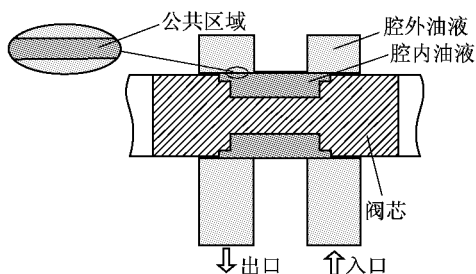


图9 滑移网格示意图及重叠区放大图

Fig.9 Sketch map of sliding mesh and enlarged view of overlapping area

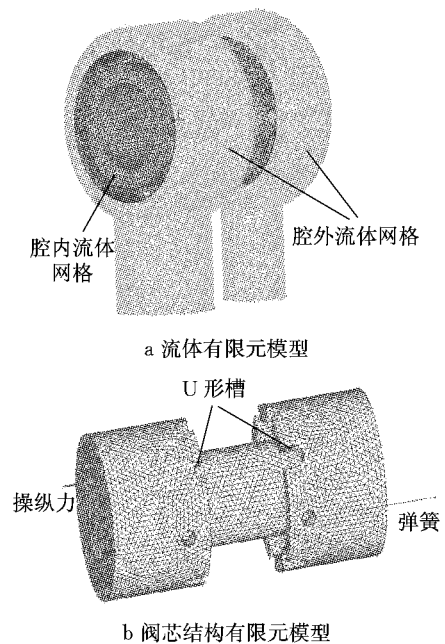


图10 三维有限元模型

Fig.10 3D finite element model

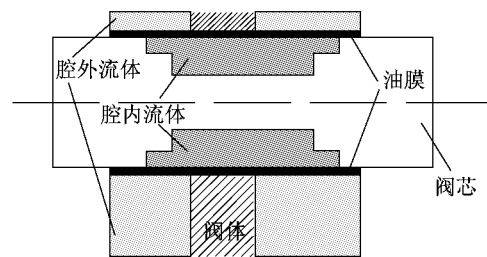


图11 油膜部位示意放大图

Fig.11 Oil slick position

意拉格朗日欧拉耦合网格)中 Leader-Follower 模块控制滑移网格跟随阀芯结构网格同时运动,实现滑阀动态解析.

图12所示为流体—阀芯耦合时阀芯开启的瞬态流场图.图12a为阀口处于负开度时的瞬态压力云图;图12b为阀口处于正开度时的瞬态压力云图.该模型可以模拟换向阀开启时的运动过程,表达流体与阀芯结构的运动状态,为阀芯的结构设计提供理论依据.

3.2.3 结果对比

本文的仿真边界条件是将试验的加载条件以一定的比例缩放后所得的数值.所以本研究通过对比解析结果与试验结果的趋势来模拟试验系统见图13,进而验证采用滑移网格法解析滑阀瞬态流场的适用性.

在文中试验的阀芯位移是通过节流公式先获得阀口面积,再由阀口面积对应的阀口开度获得物理量与阀口开度的对应关系.图13a为加载压力10

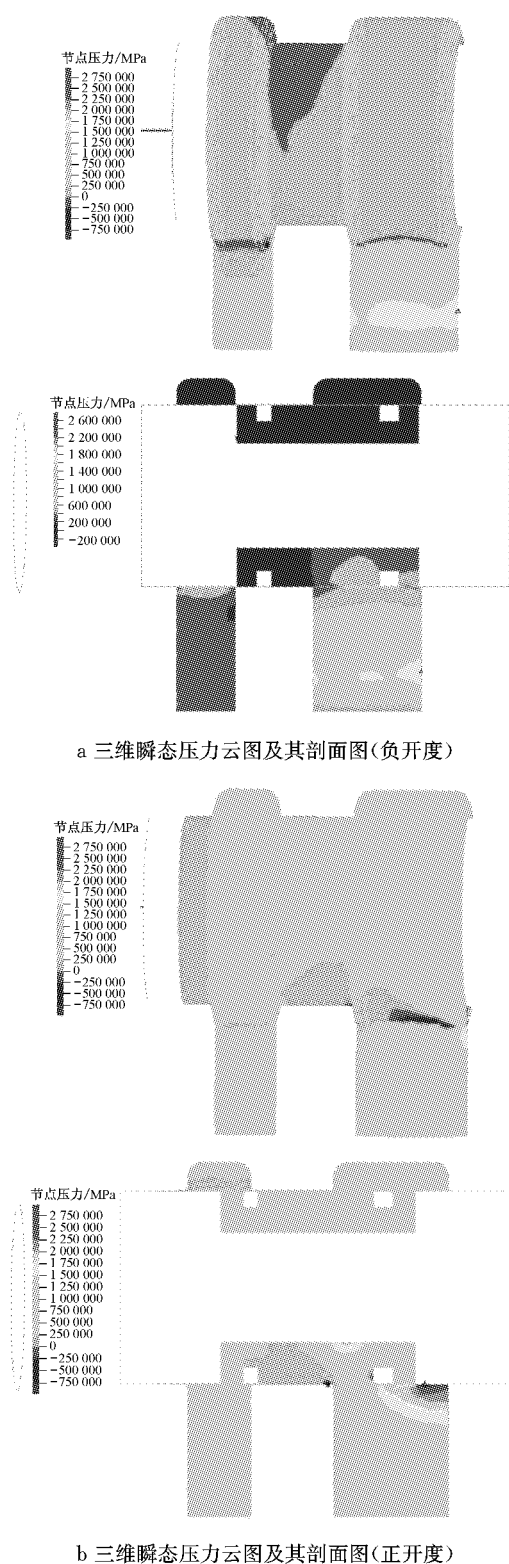


图 12 三维瞬态压力云图及其剖面图

Fig. 12 3D pressure contours and their cross-sectional views

MPa 时试验入口压力响应值与仿真边界条件为 0.5 MPa 时仿真入口压力响应值对比结果;图 13b 为加载压力 12 MPa 时试验入口压力响应值与仿真边界条件为 0.6 MPa 时仿真入口压力响应值对比结果。

由图可以看出,从阀口开启至全开阶段,阀芯行程在 1~2 mm 间发生超调,仿真值有细微振荡,数值解析值与试验值整体趋势相近,表明滑移网格法预测液压阀流场具有较高的精度,为建立挖掘机动态载荷与其阀芯结构形态间的动力学映射关系提供了工程化表达路径。

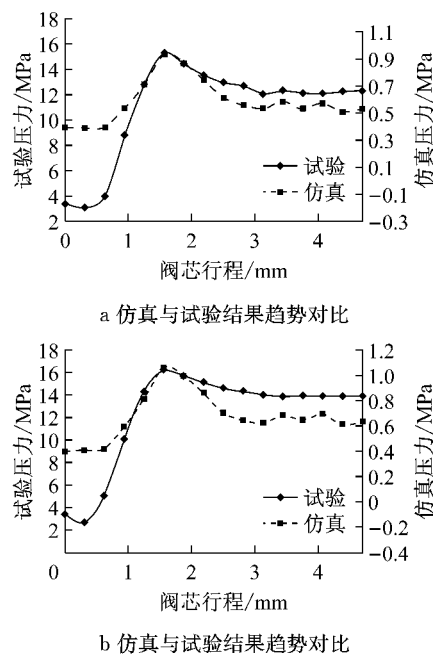


图 13 仿真与试验结果趋势对比

Fig. 13 Trend comparison between the results of simulation and the test

4 结论

以某液压挖掘机多路换向阀回转联开启过程为对象,对比平稳工况条件下的数值解析值与实验值,有良好的吻合度。为此,可得出如下结论:

(1)滑移网格数值法在三维瞬态平行滑移流场解析过程具有良好的收敛性和适用性。

(2)滑移网格法有效地适用于滑阀三维瞬态流场模型中细部流场条件(例如油膜厚度等)的精细化表达。

(3)论文中滑阀性能解析与试验条件(P 口流量、B 口压力等)均来自挖掘机整机试验数据,以此滑移网格法数值解析边界条件的真实性,验证了论文分析结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 朱钰. 液控换向阀内流场及动态特性的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(5): 133.

- ZHU Yu. Numerical simulation of flow field and dynamic characteristics of pilot operated directional valve [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(5):133.
- [2] 赵蕾,陈青,权龙. 阀芯运动状态滑阀内部流场的可视化分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11):142.
- ZHAO Lei, Chen Qing, QUAN Long. Visualization analysis of the flow field in a moving spool valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):142.
- [3] 赵蕾. 阀芯运动过程液压滑阀内部流场的 CFD 计算[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- ZHAO Lei. CFD study for the flow field inside the hydraulic spool valve considering of the movement of valve element [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008
- [4] 冀宏,王东升,刘小平,等. 滑阀节流槽阀口的流量控制特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1):198.
- JI Hong, WANG Dongsheng, LIU Xiaoping, *et al.* Flow control characteristic of the orifice in spool valve with notches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):198.
- [5] Amirante R, Del Vescovo G, Lippolis A. Evaluation of the flow forces on an open centre directional control valve by means of a computational fluid dynamic analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47:1748.
- [6] Lisowski E, Rajda J. CFD analysis of pressure loss during flow by hydraulic directional control valve constructed from logic valves [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65(8):285.
- [7] 王戈,韩伟实,孟现珂,等. 对冲式止回阀局部流动特性仿真模拟[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(7):1206.
- WANG Ge, HAN Weishi, MENG Xianke, *et al.* Numerical simulation of local flow characteristics of contra-push check valve [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(7):1206.
- [8] 张德胜,张磊,施卫东,等. 基于流固耦合的离心泵蜗壳振动特性优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9):40.
- ZHANG Desheng, ZHANG Lei, SHI Weidong, *et al.* Optimization of vibration characteristics for centrifugal pump volute based on fluid-structure interaction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):40.
- [9] 王安麟,吴小锋,周成林,等. 基于 CFD 的液压滑阀多学科优化设计[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(12):1767.
- WANG Anlin, WU Xiaofeng, ZHOU Chenglin, *et al.* Multidisciplinary optimization of a hydraulic slide valve based on CFD [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(12):1767.
- [10] 王雯,傅卫平,孔祥剑,等. 单座式调节阀阀芯-阀杆系统流固耦合振动研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5):291.
- WANG Wen, FU Weiping, KONG Xiangjian, *et al.* Research on fluid-structure coupling vibration of valve core-stem system in a single-type control valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):291.
- [11] 方文敏,成琳琳,傅新,等. 带 U 形节流槽的滑阀稳态液动力研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(3):574.
- FANG Wenmin, CHENG Linlin, FU Xin, *et al.* Investigation on steady-state flow force of spool valve with U-grooves [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(3):574.
- [12] 张凌新,胡龙兵,邵雪明. 滑移网格下泵内流场的非定常流计算[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(1):10.
- ZHANG Lingxin, HU Longbing, HAO Xueming. Computation of unsteady flow fields in a pump using sliding mesh method [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(1):10.

• 下期文章摘要预报 •

混凝土梁桥动力特性对耐久性指标的灵敏度

张立业, 孙利民

根据简支梁的振动频率和振型函数,建立了基于监测信息条件下的可靠度功能函数.采用可靠性的灵敏度分析方法,研究材料参数和截面几何参数对混凝土梁桥振动频率的影响.理论分析表明,振动频率对钢筋弹性模量的灵敏度低于对混凝土弹性模量的灵敏度,对混凝土截面惯性矩的灵敏度低于对钢筋截面惯性矩的灵敏度.算例表明,振动频率对钢筋腐蚀的灵敏度高于对跨中损伤的灵敏度;当钢筋腐蚀程度和跨中损伤程度分别为5%,10%,15%和20%时,钢筋腐蚀引起的1阶振动频率变化率是跨中损伤引起的1阶振动频率变化率的1.94,1.85,1.80和1.74倍.