

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806016

液压锥阀气穴现象两相流仿真及实验

王晓晶,沈志琦,满国佳

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要:为研究液压锥阀存在的气穴问题,基于流体力学理论及阀芯受力分析,计算出径向偏移量的大小,在考虑阀芯发生径向偏移的情况下,借助UG软件建立不同工况下的内流场三维模型,通过ICEM-CFD软件划分网格模型,基于FLUENT软件对锥阀内流场的气穴现象进行液-气两相流仿真,获得径向偏移、半锥角、开口度、背压4个影响因素下的气穴分布及强度的变化规律.搭建可视化的液压锥阀气穴现象实验台,借助高像素的相机拍摄各工况下阀口位置的气穴图像,对仿真结果进行实验验证.结果表明:仿真结果与实验结果相吻合,径向偏移使气穴集中分布在上锥面一侧的流场.半锥角为45°时,阀芯的锥阀气穴强度变化平缓,同时半锥角为45°时,开口度为0.4 mm时气穴的强度最明显,随着开口度增大,气穴现象的气团强度逐渐减弱.综合通流能力、气穴强度,半锥角为45°是一个较优的阀芯半锥角度,同时,增大开口度和背压具有抑制气穴发生的作用.

关键词: 液压锥阀; 径向偏移; 气穴; 两相流仿真; 阀芯半锥角

中图分类号: TH137.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)07-0144-10

Simulation and experiment of cavitation phenomenon two-phase flow of hydraulic cone valve

WANG Xiaojing, SHEN Zhiqi, MAN Guojia

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to investigate the cavitation phenomenon of the hydraulic cone valve, the magnitude of radial offset was calculated by the fluid mechanic theory and the radial force analysis of the fluid on the valve core. The solid models of the internal flow field were established by UG. The mesh was divided by using ICEM-CFD software. The numerical simulation of the two-phase flow was performed on the cavitation of the flow field inside the cone valve based on FLUENT. The variation on cavitation was obtained under four factors, such as radial offset, half cone angle, opening degree and back pressure. A visible experiment of the cone valve cavitation was built. A high pixel camera was used to capture the cavitation image of each valve position. According to the experiment results, the simulation results were verified. The results show that the radial offset causes the cavitation position accumulated in the valve cavity on the side of the upper cone. In addition, the strength of the cavitation changes slowly with the half cone angle of 45°. At the same time, when the half cone angle is 45°, and the opening degree is 0.4mm, the strength of cavitation is the most obvious. With the increase of the opening degree, the strength of air mass in the cavitation phenomenon gradually weakens. Combined with the flow capacity and cavitation strength, the half cone angle of 45° is suitable for cone valve. Furthermore, the increasing of the opening degree and back pressure in a reasonable range can effectively suppress cavitation.

Keywords: hydraulic cone valve; radial offset; cavitation; two-phase flow simulation; half cone angle of valve core

液压阀作为液压系统中的控制元件,通过控制液压系统中流体的流向、压力及流量,从而使液压执行元件及其驱动的工作机构获得所需的运动方向、运动速度(转速)及推力(转矩)等,达到传动及控制等需求,因此液压阀在液压系统中的作用尤为重要^[1]. 由于液压锥阀具有线性密封、无死区、灵敏性

好、通流能力强、加工成本低等优点,故较好地满足了液压阀未来的发展需求. 由于锥阀内流体介质的流动情况十分复杂,会产生漩涡、回流、高急流等流动状态. 当油液流经锥阀阀口位置时,流速增高,压力降低,析出气泡,从而形成气泡与流体的“气-液两相”运动. 大量的混沌气穴不仅会影响阀芯稳定性,也会诱发噪声,并且长时间的气穴堆积会在阀芯表面形成气蚀,对部件造成永久性的破坏,影响精密程度,引起锥阀失效,致使无法正常工作. 综上所述,对液压锥阀存在的气穴及噪声问题的研究对液

收稿日期: 2018-06-04
基金项目: 国家自然科学基金(51305108); 博士后研究人员落户黑龙江科研启动资助金(LBH-Q15069)
作者简介: 王晓晶(1981—),女,博士,教授
通信作者: 王晓晶, hitwangxiaojing@163.com

压阀甚至液压系统的性能提升及延长使用寿命具有重要的意义^[2-4]。

国内外研究者针对液压阀内的气穴现象等问题进行了大量开拓性的研究工作. Oshima^[5]对锥阀气穴噪声问题进行了较为深入的研究,分析了气穴发生时的临界条件,及气穴与压力场和速度场三者之间的关系. Inoue F^[6]等人使用二维模型和湍流场来研究阀口处的空化、漩涡及边界层分离情况,结合边界层厚度和流量系数分析了气穴发生的判决依据. Ueno H^[7]等人运用有限元分析法进行气穴现象的仿真研究,指出内流场的气穴是噪声的主要来源之一,并通过优化阀的结构降低了噪声. Bernad S^[8]等人对锥阀模型进行了数值模拟研究,分别采用了单相流和液-气双相流两种流场形式,并通过分析和比较仿真结果,给出了流场内发生气穴的区域及明显产生漩涡的位置. Chen Q^[9]等基于流体计算动力学理论,分别选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行了锥阀的空化仿真研究. Dayun YI^[10]指出液压锥阀产生啸叫噪声的条件是流体不稳定产生的周期性压力扰动信号的频率与阀腔声学共振频率接近. 高殿荣等人^[11]针对外流式液压锥阀,从二维模型到三维模型依次深入探究,巧妙地结合 Galekin 有限元计算法和 DPIV 手段进行现象图像验证,给出了速度变化规律和流线云图,以及阀口与阀芯角度之间的关系. 王京涛^[12]等人提出采用二级节流同时以过度圆弧的结构代替液压锥阀阀芯及阀座等关键部位的直角结构,可以有效地减小锥阀过流间隙的前后压差,从而可以有效降低锥阀阀口发生气穴的可能性,并可以减小振动、噪声及能量损失. 谭剑波^[13]针对液压锥阀喷流的特点对阀流场进行了数值计算和模拟,分析了关键几何尺寸对锥阀的气穴现象的影响规律. 张健^[14]研究锥形节流阀气穴问题,通过仿真和试验研究分析 5 种不同节流槽阀芯的压力特性及气穴气泡发生的主要部位,研究分析了气穴发生时所伴随的噪声及气泡发光现象,对工业用锥形节流阀的设计具有一定的参考意义. 易达云^[15]利用试验与仿真等手段揭示了振荡流场中空泡溃灭导致噪声增强的机制,指出锥阀振动破坏了回流低压区中固定型空化结构,使气核通过回流低压区时发展成空泡的事件增加,加剧了空化程度,基于锥阀中空化现象产生机理给出了低空化噪声锥阀的优化方案。

目前,在国内外学者关于锥阀相关问题的研究中很少有考虑阀芯发生径向偏移的情况,但实际上,液压系统在运行时,存在液压油脉动、系统振动、气穴等问题,流体介质作用在阀芯上的径向力无法达

到完全相互抵消的理想状态^[16-17],因此阀芯在径向上存在偏移现象. 针对此现象,本文通过数值模拟计算出径向偏移量的大小、方向,结合阀芯半锥角、开口度、背压等影响因素,在考虑阀芯径向偏移的情况下,基于 FLUENT 软件对锥阀的气穴现象进行了液-气两相流的仿真,获得锥阀内流场的气穴分布及变化规律,并通过相对应的实验研究同仿真结果进行对比,验证其正确性,对液压锥阀的性能研究具有一定的指导意义。

1 液压锥阀阀芯受力分析

1.1 锥阀阀口流量与液动力计算

本文选取的锥阀类型为全锥阀芯和直角阀座,流向选择外流式. 当阀口打开至行程内的任意开口度 x 时,绘制阀口剖切面的几何模型如图 1 所示。

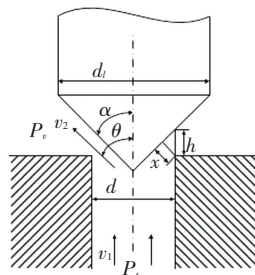


图 1 锥阀阀口过流断面图

Fig.1 Cross section diagram of cone valve port

如图 1 所示,在锥阀阀芯移动的行程内,过流断面是一个圆台的侧面,其面积随着开口度大小而改变. 它的基圆是阀座的进油口,母线是阀座的直角顶点到阀芯锥面的垂线,即开口度. 因此得到阀口通流面积公式为

$$A_0 = \pi dh \left[1 - \frac{\sin(2\alpha)}{2d} h \right] \sin \alpha. \quad (1)$$

式中: d 为入口直径 (mm), α 为阀芯半锥角 ($^\circ$), h 为阀芯移动距离 (mm)。

因为锥阀结构尺寸精小,阀芯开口度也较小,故采用小孔流量方程作为计算阀口通流量的方程. 其流量方程表达式为

$$Q = C_d A_0 \sqrt{\frac{2(p_s - p_v)}{\rho}}. \quad (2)$$

式中: p_s 为入口压力 (MPa), p_v 为出口压力 (MPa), ρ 为流体密度 (kg/m^3), C_d 为流量系数,经验取值为 0.8。

锥阀稳态液动力表达式为

$$F_w = -2C_d C_v A_0 \Delta p \cos \alpha. \quad (3)$$

由于在理论计算公式的推导建立的过程中,存在适当的简化和忽略项,如液体流经阀口时的射流角度

使用阀芯半锥角代替,流体入口速度忽略不计,因此理论计算公式也存在一定的偏差. 为了探究锥阀液动力对阀芯的影响,本文采用 CFD 方法对锥阀内流场液动力进行模拟计算.

1.2 锥阀阀芯径向力计算

在研究流体对阀芯产生的作用力时,往往重点考虑的是针对轴向的作用力,大多数的研究认为阀芯受到的径向力可以达到一种相互抵消^[18-19]的理想状态. 然而流体的湍流状态十分复杂,没有固定的形式和路径. 而锥阀中开口面积很小,液压油流过阀口时存在高急流、漩涡流等流动状态,因此在锥阀力学特性的研究中对阀芯受到的径向力的探究必不可少.

目前在国内外的研究中,有关径向偏移的理论研究较少,在关于径向偏移的阀芯径向受力研究中,日本学者 Maeda^[20]提出了一个重要的无量纲参数: R^* (阀座比),即阀座水平边缘处的直径与阀芯锥尖位置阀座的直径的比值. 如图 2 所示的阀芯径向偏移结构图为本文研究对象,其中 R^* 为 1. 通过一维雷诺方程推导,并代入流量方程,得到此结构的稳态流动下偏心阀锥所受到的径向力公式为

$$F = - \pi r p_s (R^* C_d)^2 x_d \cot \alpha. \tag{4}$$

式中: r 为锥阀入口半径 (mm), p_s 为锥阀入口压

力 (MPa), R^* 为阀座比, C_d 为流量系数, x_d 为阀芯径向偏心位移 (mm), α 为阀芯半锥角 ($^\circ$).

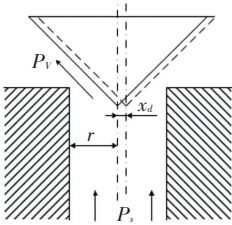


图 2 阀芯径向偏移结构图

Fig.2 Radial offset diagram of spool

实际中,锥阀阀芯的受力情况比较复杂,一般存在液动力、剪切力、时变力等影响,很难得到精确的理论计算值. 本文通过采用 CFD 技术对阀芯受到的流体作用力情况进行解析,在基于 CFD 计算得到轴向稳态液动力的情况下,根据式 (4) 近似求得阀芯径向偏移量的大小,为后续两相流仿真提供了理论基础.

1.3 锥阀内流场数值模拟

在液压阀流场的研究中,CFD 技术在流体工程中有着越来越广泛的应用^[21-22]. 本文使用流场仿真软件 FLUENT 对锥阀内流场进行了数值模拟. 选取半锥角为 45° 的阀芯结构锥阀,建立了 7 个不同开口度下的内部流场模型. 其中 0.2 mm、0.6 mm、1.0 mm、1.4 mm 下的模型如图 3 所示.

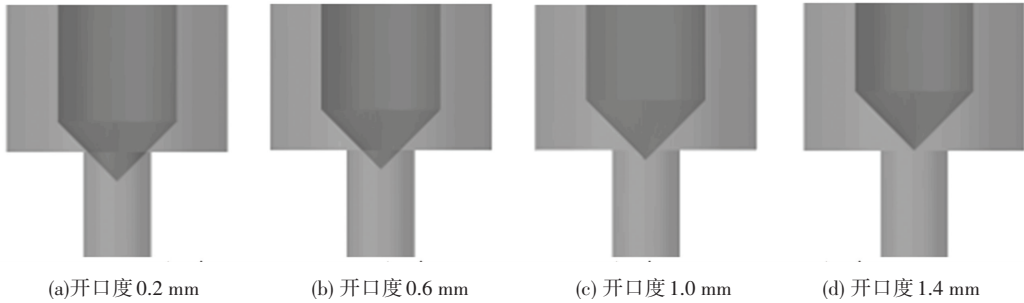


图 3 不同开度下锥阀内流场模型

Fig.3 Internal flow field model of cone valve under different opening

将建立好的三维模型导入到 ICEM-CFD 中进行网格模型的划分. 对尖角处、流速高和压力梯度大的区域进行网格加密处理从而使计算结果更加精确,同时为了模拟近壁面流场,又加入了边界层网格来模拟近壁面流场,边界层网格的初始层厚度为 0.1mm,增长率为 0.2,层数为 5 层. 划分完成的锥阀内流场网格模型如图 4 所示,网格质量检查良好,符合计算要求. 将划分好的网格模型导入到 FLUENT 中进行仿真模拟,选择稳态的湍流模型,在高精度的 Coupled 耦合求解器下进行模拟计算.

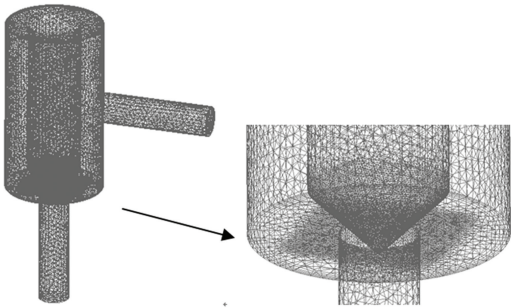


图 4 锥阀内流场网格模型

Fig.4 Mesh model of internal flow field of cone valve

设置入口压力为 5 MPa, 出口压力为 0 MPa, 通过初始化, 进行迭代计算. 通过残差曲线图观察计算收敛情况. 图 5 所示的残差曲线, 横坐标表示数值计算的迭代数, 纵坐标为残差值.

由图 5 可知, 仿真计算结果收敛性良好. 由于液压锥阀的内流场模型是沿轴面对称的结构, 为了更清晰地展示阀口区域的压力分布情况, 通过 FLUENT 的后处理选取 0.2 mm、0.6 mm、1.0 mm、1.4 mm 开口度下的对称截面的压力云图及阀口位置放大图作展示, 如图 6 所示.

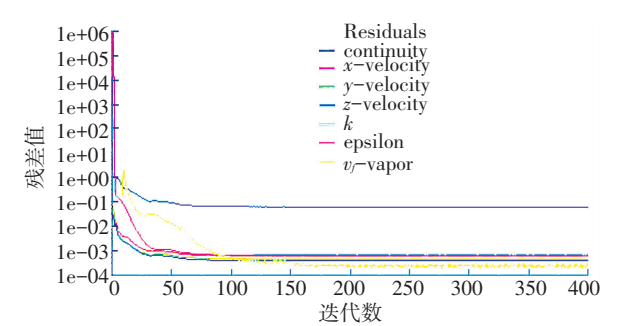


图 5 残差收敛曲线
Fig.5 Residual convergence curve

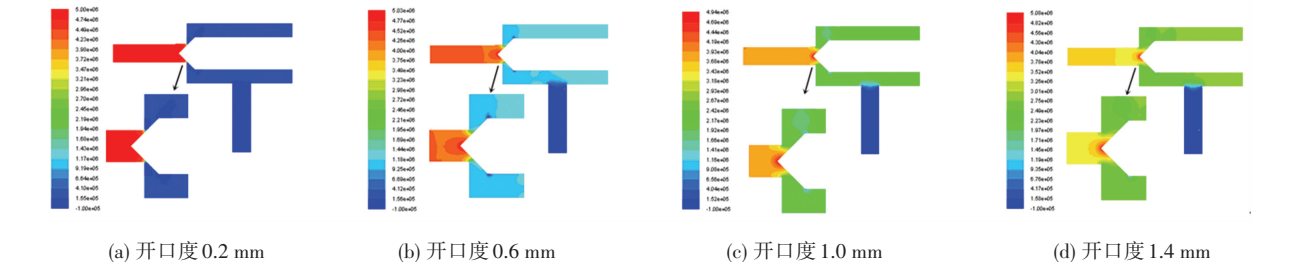


图 6 不同开口度下锥阀内流场压力分布

Fig.6 Pressure distribution in the inner flow field of the cone valve under different opening

由图 6 可以看出, 随着开口度的增大, 内流场的压力分布变得越来丰富. 具体的明显变化为: 1) 液压油入口的近阀芯域逐渐形成低压; 2) 开口度位置, 压力梯度层次分布较多; 3) 阀芯锥面与圆柱面

的转折处的整个圆周呈现出极小压, 阀腔内压力云图成云状分布在阀芯两侧, 其形式不对称.

为了进一步观察内流场的分布情况, 结合对应开口度下流场速度变化云图 7 进行分析.

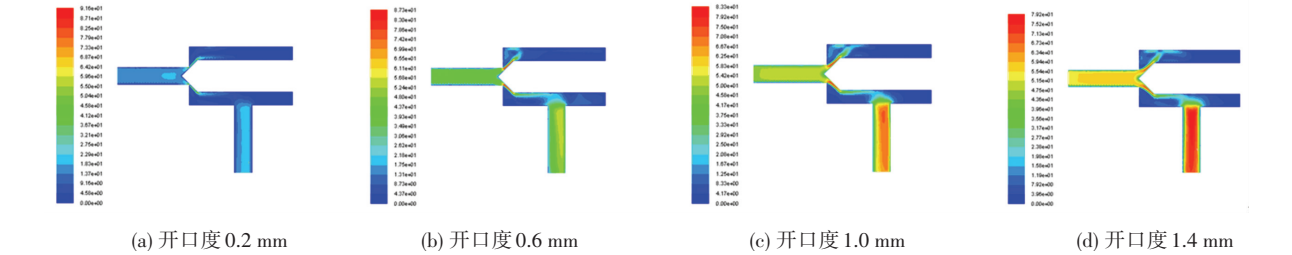


图 7 不同开口度下锥阀内流场速度分布

Fig.7 Velocity distribution of inner flow field in cone valve with different opening

根据图 7 所示流场分布. 可看出随着开口度的增大, 形成的漩涡流现象更明显, 并且阀芯两侧的云状流速形态不同, 因此随阀芯的作用力分布也不同. 将阀芯两侧有效面积上的流体压强进行积分得到阀芯两侧的径向作用力如表 1 所示. 其中表 1 所述的上锥面为远离出口一侧的阀芯表面, 下锥面为靠近出口一侧的阀芯表面.

由表 1 可知, 在开口度较小时, 阀芯两侧受到的径向受力基本相同, 随着开口度的增大, 压力差值逐渐变大, 约在 0.4 mm 的开口度以后, 阀芯下锥面受到的径向力比上锥面大的压力值基本维持在 9~11 N 左右. 选取稳态下开口度大于等于 0.6 mm 时的阀芯两侧径向力差值代入到径向力的公式 (4)

中, 计算得到径向偏移量为 0.4 mm 左右, 偏移方向为向下锥面一侧偏移. 将其引用在后续的锥阀气穴的仿真研究中, 作为参考值.

表 1 随开口度变化的阀芯表面受力

Tab.1 Radial force data with the change of the opening

开口度/mm	上锥面径向力/N	下锥面径向力/N	径向力差/N
0.2	32.48	33.15	0.67
0.4	103.05	109.91	6.86
0.6	180.69	190.06	9.37
0.8	251.67	263.22	11.55
1.0	307.78	319.60	11.81
1.2	352.54	363.79	11.25
1.4	374.97	385.25	10.27

2 锥阀气穴现象仿真结果及分析

根据上文提出阀芯存在径向偏移的现象,结合阀芯半锥角、背压、开口度等因素,基于 FLUENT 软件对锥阀内流场进行气-液两相流仿真. 在仿真研究中,特别选取了 Mixture 多相流模型、Zwart-Gerber-Belamri 气穴模型及声学模型. 液相选用了 32#抗磨液压油,密度为 870 kg/m^3 ,粘度 $2.784\times 10^{-2}\text{ Pa}\cdot\text{s}$;气相的密度为 1.225 kg/m^3 ,粘度 $1.26\times 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$;饱和蒸气压 $1\text{ }000\text{ Pa}$. 声速 $2\text{ }730\text{ m/s}$,远场密度 1.18 kg/m^3 . 入口边界选择压力入口,出口边界设置压力出口.

2.1 径向偏移对锥阀气穴的影响

由于振动、脉动等不稳定因素影响,液压锥阀在工作时径向偏移量会与理论计算值存在一定偏差,

故结合计算结果选取 0 mm 、 0.2 mm 、 0.4 mm 、 0.6 mm 作为径向偏移的变量值,开口度 0.6 mm ,阀芯半锥角 45° ,背压 0.6 MPa . 依次在入口压力 1 MPa 、 2 MPa 、 3 MPa 、 4 MPa 、 5 MPa 下进行仿真.

为了直观展示阀口以及阀芯表面气穴分布情况,在后处理中将其他部分流域设置成透明色. 其中入口压力 4 MPa 工况下(下同)的气穴现象如图 8 所示. 在阀芯未发生径向偏移时,气穴的主要析出位置是在阀芯圆锥与圆柱过渡处的整个圆周位置,且气穴分布比较均匀. 随着径向偏移量的增大,气穴的分布位置发生变化,逐步向上锥面的一侧区域转移. 当径向偏移量达到 0.4 mm 时,下锥面的一侧已经基本不见气穴发生,但上锥面的一侧气穴强度越来越强.

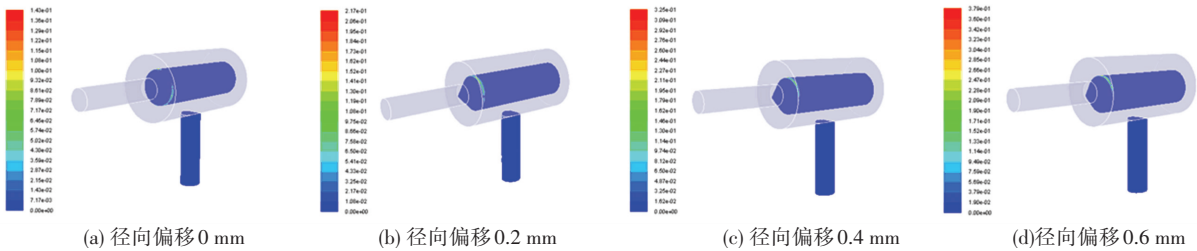


图 8 不同径向偏移下气穴分布

Fig.8 Distribution of cavitation under different radial migration

将仿真结果中的最大气相体积分数绘制曲线,如图 9 所示,气穴的强度随着入口压力的增大而增大. 在偏移量为 0 mm 时,入口压力 2 MPa 以后开始析出气穴;当径向偏移大于 0.4 mm 时,在入口压力为 2 MPa 时,气穴早已析出. 相同工况下,气穴强度随着径向偏移量的增大而增大.

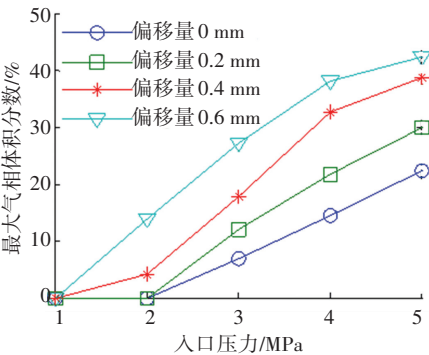


图 9 最大气相体积分数变化曲线

Fig.9 Maximum vapor volume fraction curve

综上径向偏移对气穴影响分析,在阀芯径向偏移量 0 mm 时,气穴分布在阀芯的圆锥与圆柱的转折位置均匀分布. 随着径向偏移量的增加,气穴主要聚集在上锥面一侧,下锥面一侧几乎不见气穴,且气穴强度随偏移量的增大而增强. 故阀芯发生径向偏移,会引起气穴聚集,导致局部高度气蚀.

2.2 阀芯半锥角对锥阀气穴现象的影响

选取半锥角度为 35° 、 40° 、 45° 、 50° 的 4 种阀芯. 设置径向偏移量为 0.4 mm ,开口度 0.6 mm ,背压 0.6 MPa . 依次在入口压力 1 MPa 、 2 MPa 、 3 MPa 、 4 MPa 、 5 MPa 下进行仿真.

经过后处理得到气穴分布云图如图 10 所示,随着半锥角度的增大,气穴现象越明显,然而半锥角度为 40° 和 45° 的阀芯下气团的强度相近,半锥角 50° 时气穴分布更集中,更明显. 气穴分布在阀芯的上锥面一侧,半锥角度对气穴的分布影响不大.

由仿真结果得出的不同半锥角度下的气相变化的曲线如图 11 所示. 在相同工况下,半锥角度变大,则气穴析出的体积占比变大;但在 40° 和 45° 角时气穴的最大气相体积分数比较相近;在半锥角 50° 时气穴现象明显比其他 3 种角度都强烈,局部最大气相体积分数占比最高达到 53.5% . 随着半锥角度增大,气穴现象越强烈, 40° 和 45° 时气穴强度相近,变化稳定.

综上所述,通过分析半锥角对气穴的影响,可以发现,随着半锥角增大,气穴强度增加,在 40° 和 45° 角时气穴强度相近,在 50° 角时气穴强度强烈,但在相同开口度下,半锥角小的锥阀通流量小. 故综合通流能力、气穴强度衡量,半锥角为 45° 时是一个较优的阀芯半锥角度.

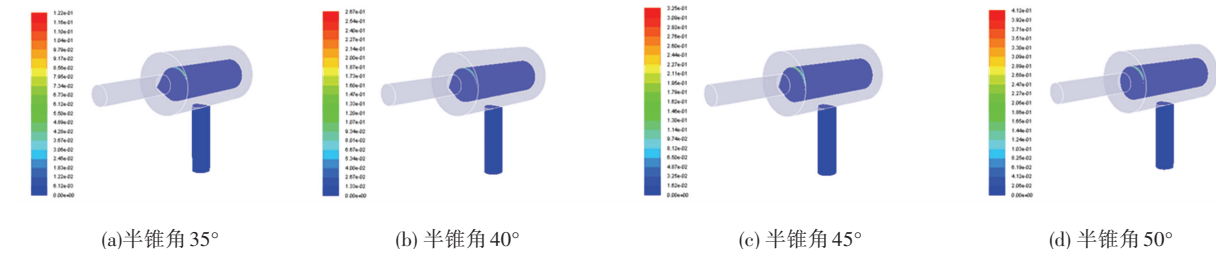


图 10 不同半锥角下气穴分布云图

Fig.10 Distribution of cavitation and pressure under different half cone angle

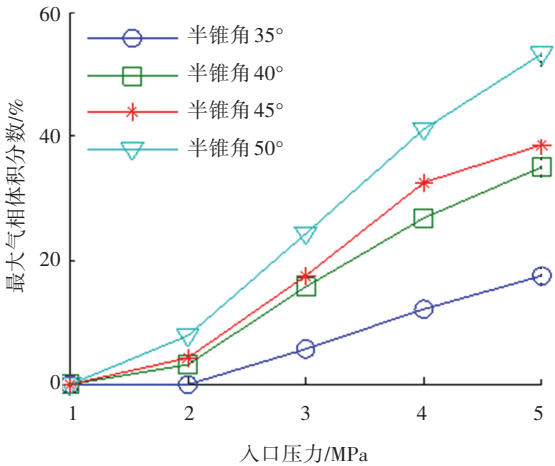


图 11 最大气相体积分数变化曲线

Fig.11 Maximum vapor volume fraction curve

2.3 开口度对锥阀气穴现象的影响

选取开口度为 0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm, 设置径向偏移量 0.4 mm, 背压 0.6 MPa, 半锥角 45°. 依次在入口压力 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa、5 MPa 下进行仿真。

不同开口度下气穴分布如图 12 所示. 各个开口度下, 气穴分布均聚集在上锥面一侧, 但气穴强度明显减小; 当开口度为 1.0 mm 时, 如图 12(d) 所示, 阀芯表面气穴云团明显减弱, 但出口位置出现了明显气穴云团。

将仿真结果绘制相关最大气相占比曲线, 如图 13 所示. 在相同入口压力下, 随着开度的增加, 气穴的产生逐渐被抑制; 在开口度为 0.4 mm 和 0.6 mm 时, 最大气穴体积分数变化趋势相同, 然后随开口度增大, 最大气相体积分数增加速度越来越快。

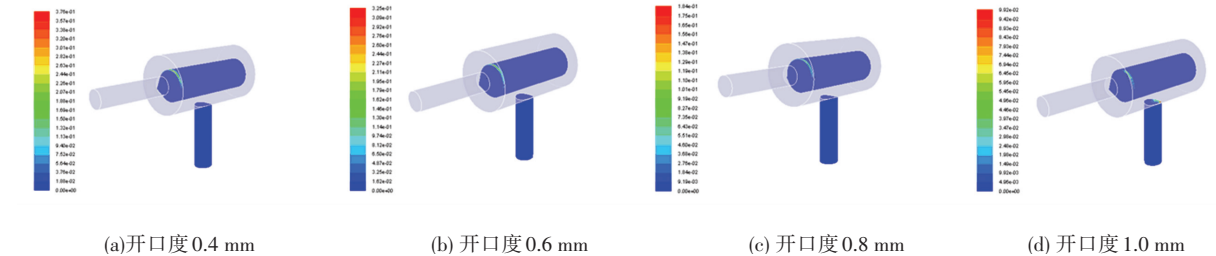


图 12 不同开口度下气穴分布

Fig.12 Distribution of cavitation under different opening

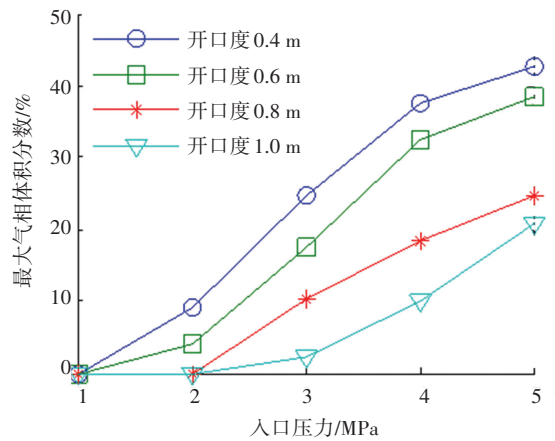


图 13 最大气相体积分数变化曲线

Fig.13 Maximum vapor volume fraction curve

发现, 增加开口度可以抑制阀口流场的气穴强度, 但是当开口度过大时, 也会引起出油口位置流场气穴的析出。

2.4 背压对锥阀气穴现象的影响

选取背压值为 0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa, 设置径向偏移量 0.4 mm, 开口度 0.6 mm, 半锥角 45°. 依次在入口压力 1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa、5 MPa 下进行仿真。

不同背压下的气穴分布如图 14 所示. 在无背压时, 气穴现象非常明显, 在阀芯表面形成了强烈的气团, 甚至延续至出口位置出现深色的气团, 如图 14(a) 所示. 当背压逐渐增加时, 气穴强度逐渐减弱; 阀芯上锥面及出口位置的气穴现象皆逐渐减弱; 在背压 0.6 MPa 时出口位置的气穴已完全被抑制。

综上所述, 通过分析开口度对气穴的影响, 可以

表 2 实验设备

Tab.2 Experimental equipment

实验设备	型号	设备参数
液压泵	YB1-25	公称转速 960 r/min,公称排量 25 ml/r,额定压力 6.3 MPa
溢流阀	Y-63B	压力范围 0.5~6.3 MPa,最大流量 63 L/min
流量传感器	CYB-10WLC	量程为 0~25 L/min,测量精度 0.5%
压力传感器	CYB-20S	量程为 0~15 MPa,精度±0.1%FS
声级计	AWA6228	A 级计权声级,测量精度 I 级 (±0.7dB)
液压油	32#抗磨液压油	常温下,粘度 $2.784\times10^{-2}\text{pa}\cdot\text{s}$,密度 870 kg/m^3
温度计	—	实验温度范围 20 ℃~45 ℃

3.3 不同半锥角下锥阀气穴现象实验

针对不同半锥角度对气穴现象的影响进行了实验研究,实验条件选择半锥角度分别为 35°、40°、45°、50°的阀芯,背压 0 MPa,开口度 0.6 mm,依次在入口压力为 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa下进行实验. 其中入口压力 2 MPa 工况下

(下同)各半锥角的气穴现象如图 18 所示,并将存在气穴现象的位置圈出. 实验表明:随着半锥角增大,气穴强度明显增强,与本文 2.2 的仿真研究的变化趋势相同. 并且通过圈出的气穴现象发生的明显位置,皆为阀芯上锥面的一侧,这与本文 2.1 仿真结果吻合.

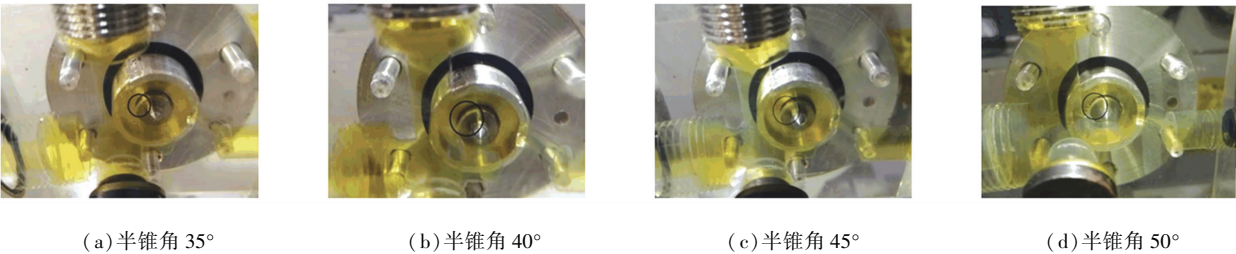


图 18 不同半锥角下的气穴现象图

Fig.18 Cavitation phenomena of different half cone angles

3.4 不开口度下锥阀气穴实验

针对开口度对气穴现象的影响进行了实验研究,实验条件选择开口度为 0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm,半锥角 45°的阀芯,背压为 0 MPa,依次在入口压力为 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、

2.0 MPa、2.5 MPa 下进行实验. 不同开口度下拍摄的气穴现象如图 19 所示. 在开口度为 0.4 mm 时气穴的强度最明显. 随着开口度增大,气穴现象的气团强度逐渐减弱. 这与本文 2.3 仿真得到的随开口度变化的气穴现象强弱程度次序相同.

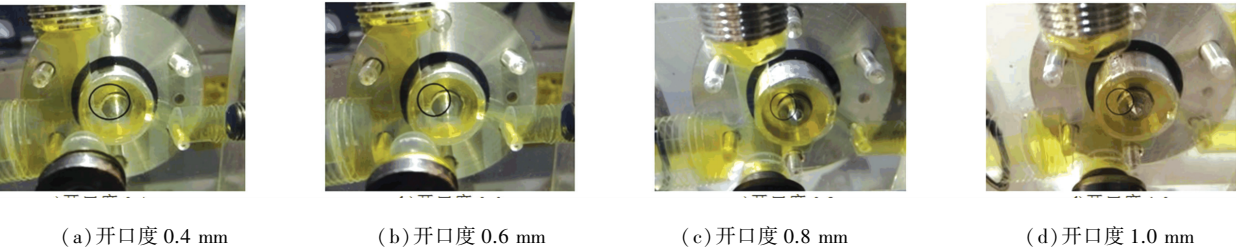


图 19 不同开口度下的气穴现象图

Fig.19 Cavitation phenomena of different opening

3.5 不同背压下锥阀气穴现象实验

针对背压对气穴现象的影响进行了实验研究,实验条件选择背压为 0 MPa、0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa,半锥角为 45°的阀芯,开口度为 0.6 mm,依次在入口压力为 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、

2.0 MPa、2.5 MPa 下进行实验. 实验得到不背压下气穴现象如图 20 所示. 可以看出 4 种背压下气穴强度由大到小的排列顺序依次为 0 MPa、0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa. 说明背压对气穴的发生有抑制作用,与本文 2.4 的仿真结果具有同样的规律性结论.

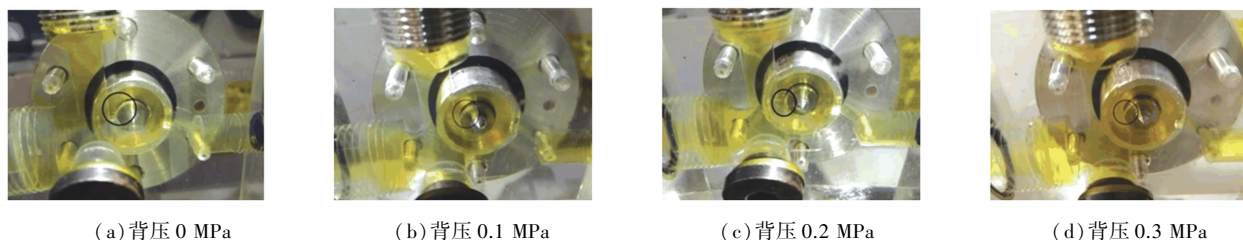


图 20 不同背压下的气穴现象图

Fig.20 Cavitation phenomenon under different backpressure

4 结 论

1) 通过分析锥阀内流场的压力和流场分布,发现阀芯两侧的流场分布不对称,得到径向力无法相互抵消的结论,然后计算出了阀芯在工作时存在的径向偏移,为后面的两相流仿真提供了理论依据。

2) 通过分析锥阀内流场的气穴分布及变化规律,得到结论:随着径向偏移量的增加,气穴主要聚集在上锥面一侧,下锥面一侧几乎不见气穴,且气穴强度随偏移量的增大而增强。故阀芯发生径向偏移,会引起气穴聚集,导致局部高度气蚀。

3) 通过实验与仿真结果进行对比,最终验证了仿真研究的正确性,并得到结论:综合通流能力、气穴强度衡量,半锥角为 45° 时是一个较优的阀芯半锥角度。

4) 增加开口度可以抑制阀口流场的气穴强度,但是当开口度过大时,也会引起出油口位置流场气穴的析出。同时,背压具有抑制气穴发生的作用,故液压系统中合理设置背压值对减小气穴具有重要的作用。

参考文献

- [1] 杨华勇,王双,张斌,等. 数字液压阀及其阀控系统发展和展望[J]. 吉林大学学报(工), 2016, 46(5): 1494. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgxb201605017
YANG Huayong, WANG Shuang, ZHANG Bin, et al. Development and prospect of digital hydraulic valve and valve control system [J]. Journal of Jilin University (Engineering), 2016, 46(5): 1494. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgxb201605017
- [2] 刘晓红,柯坚. 基于计算流体动力学解析的液压锥阀噪声评价[J]. 中国机械工程, 2007, 18(22): 2687. DOI: 10.3321/j.issn:1004-132x.2007.22.010
LIU Xiaohong, KE Jian. Noise appraisalment of hydraulic poppet valves based on CFD [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(22): 2687. DOI: 10.3321/j.issn:1004-132x.2007.22.010
- [3] 冀宏,傅新,杨华勇. 内流道形状对溢流阀气穴噪声影响的研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 19. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2002.08.004
JI Hong, FU Xin, YANG Huayong. A study on the effect of internal flow passage shape on cavitation noise of relief valve [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8): 19. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2002.08.004

- [4] 傅新,杜学文,邹俊,等. 孔隙高速流动中的气穴观测与噪声特性[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 98. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2007.04.017
FU Xin, DU Xuewen, ZOU Jun, et al. Cavity observation and noise characteristics in high-speed pore flow [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 98. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2007.04.017
- [5] SHIGERU O, LEINO T, LINJAMA M. Experimental study on cavitation in water hydraulic poppet valve [J]. Transactions of the Japan Fluid Power System Society, 2002, 33(2): 29. DOI: 10.5739/jfps.33.29.
- [6] INOUE F, OUTA E, TAJIMI K, et al. An experimental study on control valve cavitation. (3rd Report. Vortex Shedding and Cavitation Inception on a Contoured Plug) [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1993, 59(562): 1905. DOI: 10.1299/kikaib.59.1905
- [7] UENO H, OKAJIMA A, TANAKA H, et al. Noisemeasurement and numerical simulation of oil flow in pressure control valves [J]. Jsme International Journal, 1994, 37(2): 336. DOI: 10.1299/jsmeb.37.336
- [8] BERNAD S I, SUSANRESIGA R. Numerical model for cavitation flow in hydraulic poppet valves [J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2012, 2012(1687-5591): 10. DOI: 10.1155/2012/742162
- [9] CHEN Q, STOFFEL B. CFD simulation of a hydraulicconical valve with cavitation and poppet movement [C]//4th International Fluid Power Conference. Dresden: [s.n.], 2004: 331
- [10] YI Dayun, LU Liang, ZOU Jun, et al. Squeal noise in hydraulic poppet valves [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2016, 17(4): 317. DOI: 10.1631/jzus.A1400351
- [11] 高殿荣,王益群,申功. 液压控制锥阀内流场的数值模拟与试验可视化研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4): 66. DIO: 10.3321/j.issn:0577-6686.2002.04.014
GAO Dianrong, WANG Yiqun, SHEN Gong. Numerical simulation and experimental visualization of flow field in hydraulic control cone valve [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(4): 66. DIO: 10.3321/j.issn:0577-6686.2002.04.014
- [12] 王京涛,吴张永,岑顺锋,等. 基于 ANSYS 的液压锥阀流场分析及结构优化[J]. 机床与液压, 2011, 39(13): 128. DIO: 10.3969/j.issn.1001-3881.2011.13.038
WANG Jingtao, WU Zhangyong, CEN Shunfeng, et al. Flow field analysis and structure optimization of hydraulic poppet valve based on ANSYS [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(13): 128. DIO: 10.3969/j.issn.1001-3881.2011.13.038
- [13] 谭剑波. 液压锥阀气穴分析与流场参数化仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2014

TAN Jianbo. Hydraulic poppet valve cavitation analysis simulation of flow field parameters [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014

[14]张健. 液压锥型节流阀的气穴热效应及噪声的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014

ZHANG Jian. Cavitation thermal effect and noise of hydraulic cone type throttle valve [D]. Haerbin: Harbin University of Technology, 2014

[15]易达云. 锥阀振荡流场流动噪声增强机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015

YI Dayun. Study on the intensification mechanisms of flow-induced noise in the oscillating field of poppet valve [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015

[16]李光飞. 基于液动力修正的锥阀振动特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013

LI Guangfei. The research on poppet valve vibration based on corrected hydrodynamic force [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013; 10

[17]李光飞, 刘恒龙, 邓斌 等. 液动力对锥阀振动特性的影响 [J]. 机床与液压, 2014, 42(5):28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2014.05.008

LI Guangfei, LIU Huanlong, DENG Bin, et al. Effect of flow force to the poppet valve vibration [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42 (5) : 28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2014.05.008

[18]陆倩倩, 阮健, 李胜. 伯努利效应引起滑阀阀芯径向力的研究 [J]. 中国机械工程, 2017(19):2332. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2017.19.010

LU Qianqian, RUAN Jian, LI Sheng. Research on radial forces for hydraulic slide valves caused by bernoulli effect [J]. China Mechanical Engineering, 2017 (19) : 2332. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2017.19.010

[19]王建森, 王鹏飞, 冀宏 等. 空化流动下液压锥阀所受推力的数值计算 [J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43 (2) :54. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2017.02.011

WANG Jiansen, WANG Pengfei, JI Hong, et al. Numerical calculation of thrust on poppet valve under condition of cavitating flow [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43 (2) : 54. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2017.02.011

[20]MAEDA T. Studies on the dynamic characteristics of a poppet valve; 2nd report, experimental analysis [J]. Bulletin of JSME, 1970, 13(56) : 290. DOI: 10.1299/jsme1958.13.290

[21]钟英杰, 都晋燕, 张雪梅. CFD 技术及在现代工业中的应用 [J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(3):284. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4303.2003.03.012

ZHONG Yingjie, DU Jinyan, ZHANG Xuemei. CFD technology and application in modern industry [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2003, 31(3) : 284. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4303.2003.03.012

[22]张迪嘉, 姜继海. 插装型液压锥阀流场与气穴仿真研究 [J]. 液压与气动, 2016(4):34. DOI: 10.11832/j.issn.1000-4858.2016.04.007

ZHANG Dijia, JIANG Jihai. Simulation of flow field and cavitation for hydraulic cartridge cone valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016 (4) : 34. DOI: 10.11832/j.issn.1000-4858.2016.04.007

(编辑 王小唯)

(上接第 143 页)

[10]HU P, GUO J, LI L, et al. A robust longitudinal sliding-mode controller design for autonomous ground vehicle based on fuzzy logic [J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2013, 11(4):368

[11]冀杰, 李以农, 郑玲, 等. 车辆自动驾驶系统纵向和横向运动综合控制 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(5):120

JI Jie, LI Yinong, ZHENG Lin, et al. Integrated control of longitudinal and lateral motion for autonomous vehicle driving system [J]. Chin J Highway and Transp, 2010, 23(5) : 120

[12]BAE I, MOON J, CHA J, et al. Integrated lateral and longitudinal control system for autonomous vehicles [C]// IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Qingdao: IEEE, 2014:406

[13]ROSOLIA U, BRUYNE S D, ALLEYNE A G. Autonomous vehicle control: a nonconvex approach for obstacle avoidance [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017,25(2):469

[14]YANG X J. Improvements in vehicle handling and stability by a novel wheel slip coordination control scheme[J].International Journal of Vehicle Design, 2013, 62(2/3/4) : 206

[15]LI L, LU Y S, WANG R R, et al. A 3-Dimensional dynamics control framework of vehicle lateral stability and rollover prevention via active braking with MPC [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 99(6) :1

[16]WU J, CHENG S, LIU B, et al. A human-machine-cooperative-driving controller based on AFS and DYC for vehicle dynamic stability[J]. Energies, 2017, 10(11):1737

[17]LI Haiqing, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Nonlinear dynamics modeling and rollover control of an off-road vehicle with mechanical elastic wheel[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2018, 40(2) : 1

[18]周自维, 李长乐, 赵杰, 等. 复杂局部地形中的实时路径规划算法设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(8):65

ZHOU Ziwei, LI Changle, ZHAO Jie, et al. A real time path planning algorithm based on local complicated environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(8) :65

[19]丁海涛, 郭孔辉, 李飞, 等. 基于加速度反馈的任意道路和车速跟随控制驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10):116

DING Haitao, GUO Konghui, LI Fei, et al. Arbitrary path and speed following driver model based on vehicle acceleration feedback [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10):116

[20]王健. 汽车在两种转向工况下的路径规划与路径跟踪研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.

WANG Jian. Research on path planning and path tracking for automobile in two steering conditions[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[21]ZHAO J, GUO Y, DUAN X. Dynamic path planning of emergency vehicles based on travel time prediction [J]. Journal of Advanced Transportation, 2017(11-12):1

(编辑 王小唯)