基于变径轮廓优化的控压节流阀线性设计

陈亚洲[1,2] 王国荣[1,2*] 董学成[3] 唐 洋[1,2]
1.西南石油大学机电工程学院,成都,610500
2.西南石油大学能源装备研究院,成都,610500
3.成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室,成都,610059

摘要:针对深井及超深井控压钻井节流阀开度与压降非线性导致的控压精度不足问题,提出了基于变径轮廓优化的多类型节流阀线性设计方法。通过建立阀芯行程与节流面积的动态映射关系,并结合黏性流体总流伯努利方程、Leibniz定理,以及动能和面积的修正机制,对筒形阀芯和楔形阀芯的轮廓进行优化设计。实验结果表明,筒形阀、楔形阀在0~100%有效行程范围内的压降线性相关系数分别达到0.9932和0.9919,验证了所提方法可实现节流阀的全行程线性控压。

关键词:线性化压降响应;变径轮廓优化;阀芯设计;节流阀;控压钻井
中图分类号:TP242;TE973
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.008 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Linear Design of Pressure-control Throttle Valve Based on Variable-diameter Profile Optimization

CHEN Yazhou[1,2] WANG Guorong[1,2*] DONG Xuecheng[3] TANG Yang[1,2]
1.School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu,610500
2.Energy Equipment Institute, Southwest Petroleum University, Chengdu,610500
3.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu,610059

Abstract: To improve pressure control accuracy in managed-pressure-drilling for deep and ultra-deep wells, this paper proposes a linear design method for multiple-type throttle valves based on variable-diameter profile optimization. A dynamic mapping relationship between valve core stroke and throttling area was established, incorporating the viscous-fluid total-flow Bernoulli equation, Leibniz theorem, and kinetic energy and area correction mechanisms. Using this approach, the profiles of cylindrical and wedge-shaped valve cores were optimized. Experimental results demonstrate that the linear correlation coefficients of pressure drop for the cylindrical valve and wedge-shaped valve reach 0.9932 and 0.9919, respectively, within the 0-100% effective stroke range. These findings confirm that the proposed method enables full-stroke linear pressure control of throttle valves.

Key words: linear pressure-drop response; variablediameter profile optimization; valve core design; throttle valve; managed-pressure-drilling

0 引言

控压钻井通过调节井口回压使井筒压力在安全窗口内,是深井、超深井复杂地层安全钻进的重要技术。随着钻井装备数字化与自动化水平的不断提高,控压钻井技术正由人工调压逐步向智能闭环控制发展[1-5]。节流阀作为井口回压调节系统的核心执行元件,其开度与压降响应的特性直接关系到井筒压力的控制精度和系统运行稳定性。已有油田实测与相关研究表明,传统控压节流阀的开度与压降通常为非线性关系[6-7]。这种非线性会降低压力调节过程的可预测性,增大自动控制难度,限制智能闭环控压钻井系统的工程应用。因此,研究节流阀开度与压降的线性响应对提高控压钻井系统的压力调控精度具有重要意义。

围绕控压钻井节流阀的结构设计与控压特性,目前已建立了楔形节流阀节流面积与压降的计算模型,并开展了线性筒形节流阀设计、冲蚀优化及多相节流特性分析[7-10]。这些研究为节流阀的压降预测和结构优化提供了重要基础,但存在以下不足:①已有节流面积模型多针对轮廓切线固定的几何阀芯,难以描述变径曲面轮廓阀芯在

收稿日期:2025-07-04
基金项目:国家科技重大专项(2024ZD1404705);四川省自然科学基金(2025ZNSFSC0442);国家重点研发计划(2021YFC2800903)

连续行程下的动态截切面积；②阀芯行程与最小节流面积之间缺少显式动态映射，限制了开度与压降线性设计；③流道局部收缩、扩张及转向诱发的二次流和局部回流会改变局部速度分布与有效流通面积，而现有模型对该影响考虑不足；④现有线性化设计主要针对筒形阀芯，而线性化设计对楔形等其他结构阀芯的适用性仍需进一步验证。

针对上述问题，本文提出一种基于变径轮廓优化的多类型阀芯线性设计方法。该方法通过非线性回归构建阀芯行程与节流面积之间的动态映射关系，结合黏性流体总流伯努利方程与Leibniz包络定理，建立开度与压降响应预测模型，引入动能修正和面积修正机制来表征复杂流动对节流能力的影响。在此基础上，对筒形、针形和楔形开展变径轮廓设计，数值仿真与测试验证了控压钻井节流阀的线性控压能力。

1 控压节流阀的工作原理与优化分析

1.1 工作原理

如图1所示，筒形节流阀、针形节流阀和楔形节流阀（以下简称筒形阀、针形阀和楔形阀）主要由阀体、阀座、阀芯套、阀杆和阀芯组成，其中，阀体和阀芯套用于形成承压流道并承受高压流体。阀体内部设有流道，流体从入口端进入，从出口端流出。阀杆的作用是移动阀芯。阀芯套保护阀芯和阀杆，防止流体对其产生横向冲击。阀芯和阀座是节流阀的关键部件，共同控制节流阀的节流能力。三类节流阀通过移动阀芯来改变阀芯与阀座之间的节流面积，从而调节流体的流通，改变进出口的压力。除通过移动阀芯和阀杆改变节流面积外，还可通过调整阀座的尺寸改变节流面积[11]。

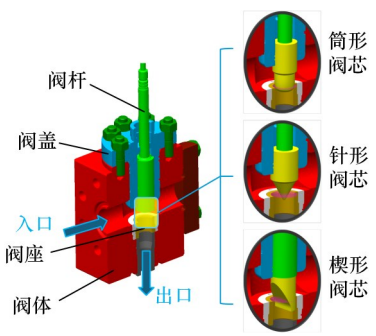


图1 常用控压钻井节流阀工作原理

Fig.1 The working principle of the commonly used throttle valve in managed pressure drilling

1.2 阀芯优化

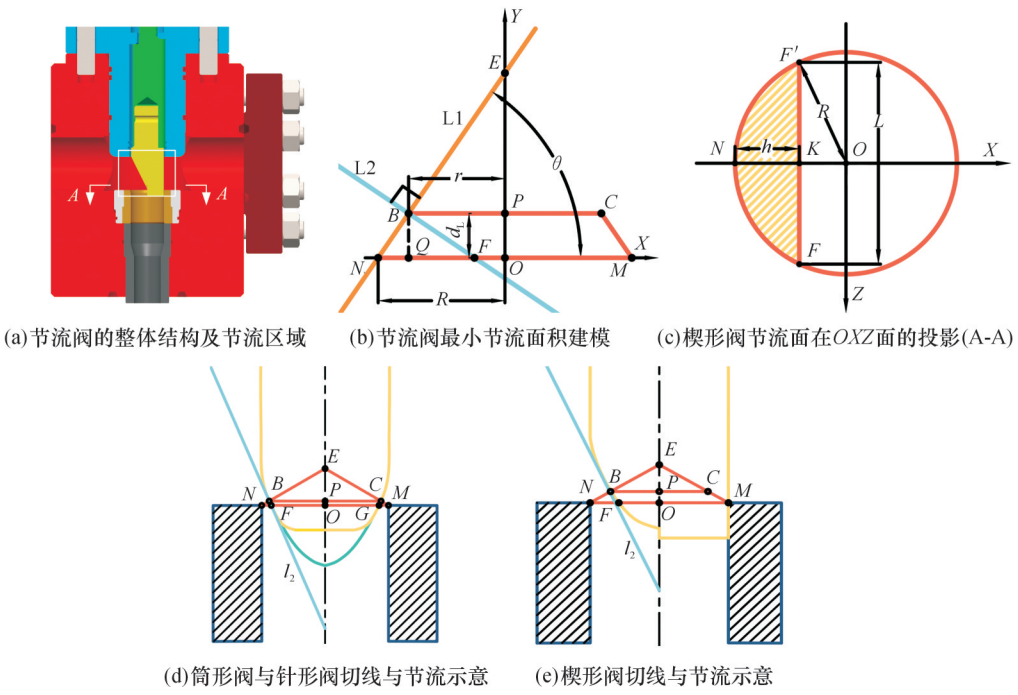
筒形阀芯与针形阀芯均为锥形阀系的几何衍生类型，具有相似的优化流程，因此将研究两类典型阀芯（筒形与楔形）的控压能力。根据节流阀的工作原理，阀的控压能力主要取决于阀芯结构，尤其是阀芯与阀座间的最小节流面积。不同结构的阀芯与阀座间的最小节流面积不同，因此需建立筒形阀芯和楔形阀芯的最小节流面积特征方程，以描述阀芯轮廓参数与流通截面的映射关系。

阀芯产生轴向位移时，筒形阀和楔形阀的阀芯外表面与固定阀座发生空间截切，形成随行程连续变化的最小节流面积（图1紫色区域）。这种空间截切作用构建出的渐缩型流道的最小节流面积不由静态几何参数决定，而由动态节流面的空间几何形态决定。

为获得期望的最小节流面积特征，设计了图2所示的变径轮廓筒形阀芯和楔形阀芯。筒形阀芯的关键面积参数在几何上等价于截切过程中形成的圆台$BCMN$的侧面积（图2b）。楔形阀芯的关键面积参数在几何上等价于截切过程中形成的圆锥面侧面积NBF。研究发现常规楔形节流阀的非线性调控缺陷源于平面阀芯结构的几何约束。采用具有曲面特征的改进型楔形阀芯（图2e中的圆弧面楔形阀芯）时，其三维几何形态可通过正交投影方法进行解析：①OXY平面投影中，楔形阀的最小节流面积形成由NBF顶点界定的类三角形流量调控区域，如图2b所示；②OXZ平面投影下，则显现出特征性的弓形截面结构，如图2d所示。该弓形截面的关键参数弦长L与弦高h均与阀芯行程y严格正相关。图2中，R为阀座孔半径，r为阀芯特征点到阀芯阀杆轴线的距离，d_L为阀芯特征点到阀座端面的轴向距离，L1为阀座内径点N与阀芯特征点B的连线，L2为阀芯在特征点B处的切线。经过改进的筒形阀芯和楔形阀芯设计，不仅能使节流阀的开度与压降呈线性关系，还保留了节流阀的高可靠性。

1.3 旋流场的影响机制

在不考虑阀门结构对流动影响的理想状态下，根据黏性流体总流伯努利方程推导可得到理想不可压缩流体定常流动下的流量-压降特性方程[9-10]。工程应用研究表明，改变流道节流面积会直接影响阀门流道截面的流体流速分布。非圆截面直管的流动特性研究表明：在小顶角三角形管道中，靠近底边的管壁区域在较小的雷诺数下即可出现湍流，而顶角区域在较大雷诺数下仍可能保持层流状态；同心双圆管结构中，内管会显著减小旋流场的雷诺数[12]。由此可见，流道几何结构是影响流体流动状态及局部流动特征的重要因



(a)节流阀的整体结构及节流区域　(b)节流阀最小节流面积建模　(c)楔形阀节流面在OXZ面的投影(A-A)

(d)筒形阀与针形阀切线与节流示意　(e)楔形阀切线与节流示意

图2　阀芯结构特征与节流面积示意

Fig.2　Structural characteristics of the valve core and schematic illustration of the throttling area

素。筒形阀与楔形阀的节流区域具有不同的几何构型，阀内的流体速度分布、局部压力变化及整体节流特性可能存在明显差异。

节流阀流道内的边界层分离、局部涡旋和回流等现象会对节流阀的控压性能产生显著影响。如图3所示，节流阀流道截面对流体具有明显的导流和约束作用，且流道内部存在局部收缩、扩张及流向偏转等复杂特征。流体流经节流口及拐角区域时，流道截面和流动方向发生快速变化，局部区域易形成不利的压力梯度，使近壁面流体动量不足，诱发边界层分离，产生涡旋和回流结构[13]。

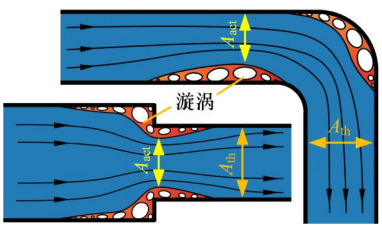


图3　管道拐角处生成的漩涡

Fig.3　The secondary flow generated at the corner of the pipe

在截面积突然减小的区域，流体微团间的摩擦与碰撞急剧增强，流动方向发生明显改变，产生二次流动即漩涡[14]。漩涡由局部压力差引起，不仅改变了截面处的速度分布，还导致实际流通面积发生变化。如图3所示，管道流通面积的理论值A_{th}明显大于实际值A_{act}，二者的偏差会改变局部速度梯度和有效过流能力，进而影响节流压降的计算精度。

上述现象表明，流道几何形态显著影响节流阀内部的速度分布、局部涡旋结构及有效流通面积。为准确描述节流阀内部流体的流动特性并揭示节流阀的动态调节机理，有必要引入动能修正系数来修正流量压降特性方程。

2　新型节流阀的线性开度压降分析模型

2.1　静态数学模型

筒形阀最小节流面积的特征方程为

$$A_{rt}=\pi(R+r)\sqrt{d_L^2+(R-r)^2} \tag{1}$$

式中：A_{rt}为筒形阀芯与阀座之间形成的最小节流面积；d_L为阀芯特征点到阀座端面的轴向距离。

研究楔形阀最小节流面的面积特征时，采用曲率协变积分法建立具有几何自适应特性的微元积分数学模型。如图4所示，该模型沿流动切线方向将弓形底面面积A_{arc}分解为几何微元面积A_k(黄色区域)的叠加，节流面积A_r由过流截面微元面积A_i(红色区域)叠加获得，具体可表示为

$$A_{rx}\approx\zeta\cos\theta\sum_{k=1}^{n}A_k=2\zeta\cos\theta\int_{-R}^{h-R}\sqrt{R^2-x^2}\,\mathrm{d}x \tag{2}$$

式中：ζ为面积修正系数，用于修正最小节流面积随阀芯行程y变化引起的偏差(通过试验数据非线性回归得出)；A_k为对弓形底面面积A_{arc}进行等宽离散划分后得到的第k个面积微元；$h=r$。

控压节流阀是典型的开度-压差节流阀[15]。为实现开度与压降的线性调节，在设计阶段将阀芯行程y与节流阀进出口压差Δp之间的目标关系设定为线性：

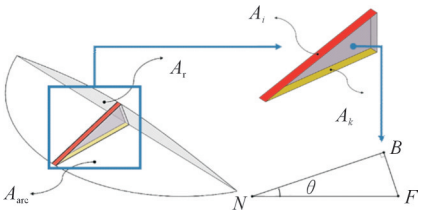


图4 节流面积与弓形面积微段示意图

Fig.4 Diagram showing the throttling area and the arc-shaped area micro-section

$$\Delta p = p_m y / L_m + b \tag{3}$$

式中：p_m为节流阀进出口最大压差；L_m为节流阀阀芯最大行程；b为常数。

通过式(3)明确阀芯行程与节流阀前后压差的线性关系，为在控压钻井作业过程中对井筒压力进行精准调节提供理论基础[16]。

为准确描述节流阀内部流体流动特性，本研究引入动能修正系数a[10]，并根据流体的能量守恒原理给出黏性流体的总流伯努利方程：

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + a\frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \tag{4}$$

式中：h_1、h_2分别为节流阀入口和出口的静压头；p_1、p_2分别为节流阀入口和出口的流体压力；v_1、v_2分别为节流阀入口和出口的流体平均流速；ρ为流体密度；g为重力加速度。

在油田现场应用中，节流阀通常安装在水平管道上，因此，可忽略节流阀入口与出口的高度差，即

$$h_1 = h_2 \tag{5}$$

根据不可压缩流体的质量守恒方程，即连续性方程，可得经过阀体的流量

$$q_V = A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{6}$$

式中：A_1、A_2分别为节流阀入口和出口的流道面积。

联立式(4)～式(6)并进行方程变换，可得基于黏性流体总流伯努利方程的修正流量压降特性数学模型：

$$q_V = 5.09\sqrt{\frac{A_r^2 A^2 \Delta p}{\rho(aA^2 - A_r^2)}} \tag{7}$$

式中：A_r为流体的最小节流面积；A为阀座孔道面积。

2.2 动态数学模型

由式(3)可知，设计目标是使节流阀进出口压差Δp随阀芯行程y呈线性变化；由式(7)可知，压差Δp与最小节流面积A_r密切相关。因此，实现Δp与y线性调节的关键在于建立满足目标压降关系的A_r与y的映射。结合筒形阀和楔形阀的最小节流面积表达式即式(1)和式(2)，分别建立两类阀芯的行程、节流面积与压差之间的耦合关系。

阀芯轮廓曲线的几何构型可解析为移动切线簇的包络线，如图5所示。在该几何模型中，阀芯特征点的位置随阀芯行程和切线倾角变化而变化，气阀芯轴线的距离r为待求轮廓参数，切线倾角θ为控制参数。因此，可先建立包含r、θ和y的参数化直线簇方程，再利用包络线形成条件确定阀芯轮廓。具体推导过程如下。

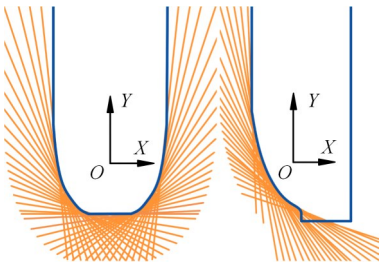


图5 阀芯变径轮廓包络线

Fig.5 The envelope line of the valve core′s variable diameter profile

由B点和E点的距离可推导出

$$d_L = \frac{1}{\tan\theta}\left(r + R\tan^2\theta - \frac{r}{|\cos\theta|\cos\theta}\right) \tag{8}$$

$$R\tan^2\theta + r - d_L\tan\theta \geqslant 0$$

联立式(1)、式(3)、式(7)、式(8)可得筒形节流阀的参数化直线簇方程：

$$F_t = R\sin^2\theta + r\cos^2\theta - \varepsilon\sin\theta\cos\theta - r \tag{9}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\eta}{\pi^2(R+r)^2} - (R-r)^2}$$

$$\eta = \frac{L_m A^2 q_V^2 a\rho}{L_m \rho q_V^2 + 5.09^2 A^2 p_m y}$$

联立式(2)、式(3)、式(7)可得楔形节流阀的参数化直线簇方程：

$$F_x = 2\zeta\cos\theta\int_{-R}^{h-R}\sqrt{R^2 - x^2}\,\mathrm{d}x - \eta^{0.5} \tag{10}$$

由于阀芯变径轮廓由移动切线簇包络线构成，将阀芯特征点到阀芯阀杆轴线的距离r作为待求轮廓参数，将切线倾角θ作为控制参数，利用Leibniz定理[17]建立基于变径轮廓参数化建模的压差线性调节方程：

$$\left.\begin{aligned} F &= 0 \\ \partial F/\partial\theta &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

$$F = F_t, F_x$$

将式(11)分别与筒形节流阀的参数化直线簇方程(式(9))和楔形节流阀的参数化直线簇方程(式(10))联立，可求得不同阀芯行程y对应的轮廓半径和切线倾角，进而获得满足目标线性压降关系的阀芯变径轮廓。

3 新型节流阀线性控压能力的仿真分析和试验验证

3.1 算例分析

为验证所建立的线性设计模型与阀芯变径轮廓设计方法，将表1所示的典型控压钻井工况作为设计算例。根据该工况确定流体物性、泵排量、

阀芯有效行程及目标压差范围，进一步计算面积修正系数与阀芯轮廓参数，最终设计出开度与压降呈线性关系的节流阀阀芯结构。

表1　钻井作业工况参数

Tab.1　Drilling operation working condition parameters

参数	数值
公称通径/ mm	50.8
流体密度/(g•cm^{-3})	1.7
流体泵排量/ (m^3•h^{-1})	72
阀芯有效行程/ mm	30
节流阀最大调节压力/ MPa	20
节流阀最小调节压力/ MPa	5

针对节流几何面积小、流速梯度显著的特征，结合流体力学边界层效应，选取筒形阀的动能修正系数a_t=1.03、楔形阀的动能修正系数a_x=2，以表征湍流条件下能量耗散特性。初始假设面积修正系数ζ=1，计算理论节流面积A_{th}。通过三维建模获取实际节流面积A_{act}，提取不同阀芯行程y的面积偏差，并进行六次多项式回归拟合，即

$$\zeta=\sum_{i=0}^{6}\beta_i y^i \tag{12}$$

式中：β_i表征节流面积非线性修正量随行程变化的动态规律；i=0，1，…，6。

引入面积修正系数ζ后，修正后的理论节流面积与三维建模获得的节流面积吻合度明显提高，二者随阀芯行程的变化趋势基本一致。楔形阀节流面积变化趋势如图6所示。

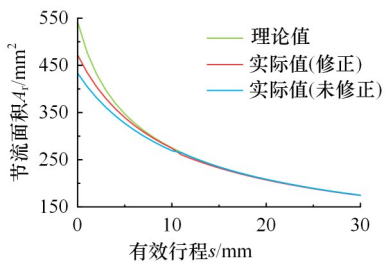


图6　节流面积A_t随有效行程y的修正变化趋势

Fig.6　Correction trend of throttling area A_t with effective stroke y

根据表1中的工况参数，将节流面积模型、目标压差关系及包络线条件联立求解，获得筒形阀芯和楔形阀芯在0～30 mm有效行程内的轮廓特征点。对离散特征点进行曲线拟合后得到连续的变径轮廓曲线（图7a），并将拟合曲线导入三维建模软件，生成对应的阀芯实体特征面，如图7b、图7c所示。

3.2　建立节流阀仿真模型与搭建实验平台

基于节流阀实际结构尺寸，构建包含阀体-阀芯系统的节流阀三维几何模型。建立完整的节流阀阀腔内部流场计算域，介质物性参数按油田现场工况

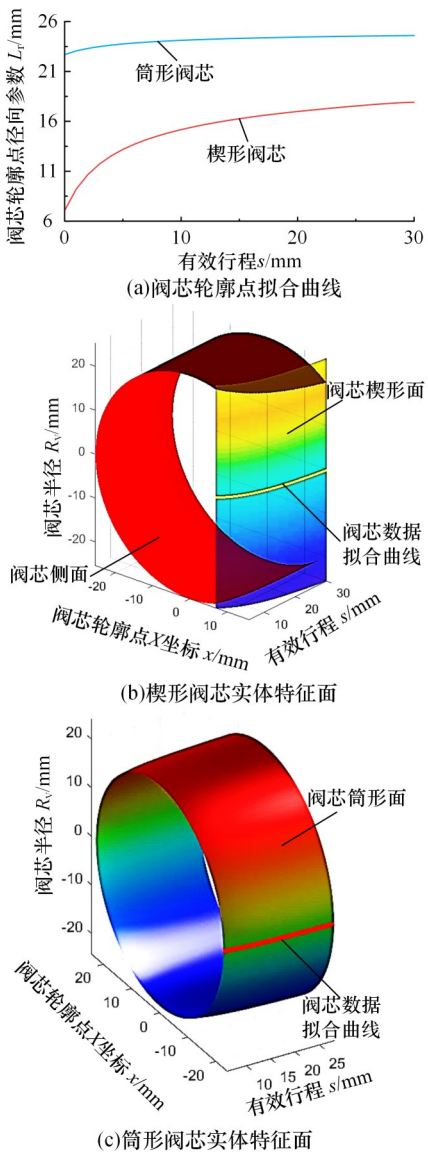


图7　轮廓点参数与特征面示意图

Fig.7　Schematic of contour point parameters and feature surfaces

设定：密度ρ=1700 kg/m^3，动力黏度μ=0.02 Pa•s，入口直径D=78 mm，出口直径为50.8 mm。

针对节流阀内部复杂流道，采用Patch Conforming方法生成10节点二次四面体单元（TET10）网格，单元阶次为Quadratic，并对阀芯、阀座及节流区域壁面进行局部加密。网格质量统计结果显示，全域网格平均偏斜度（Skewness）为0.238，满足数值计算精度要求。

考虑到控压节流阀的工作状况，设置入口边界条件为速度进口，出口边界条件为压力出口，并按照表1所示的工况参数设置边界条件。同时，节流阀内部流场的数值模拟采用RNG k-ε湍流模型[18]。

为验证仿真分析的可靠性，按图8所示的实验原理搭建实验台。提前配置好的流体从水箱抽取后，经压力传感器、流量计、闸阀、试验节流阀、压

力传感器后回到水箱。试验节流阀设有位移传感器，以将阀芯行程传输到显示端。流量计监测循环系统的流量，前后压力传感器用以获得压差。

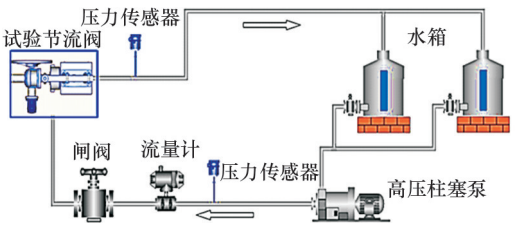


图8 实验原理图

Fig.8 Experimental schematic diagram

4 仿真与实验结果分析

4.1 线性控压效果的仿真分析结果

数值仿真得到的压力云图(图9)、速度云图(图10)、动能修正系数影响图(图11)揭示了节流阀内部流动的复杂特性。

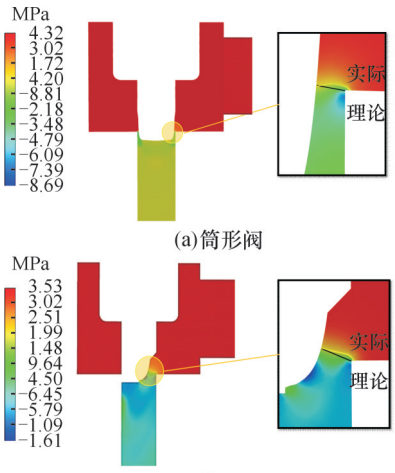


图9 压力云图

Fig.9 Pressure contours

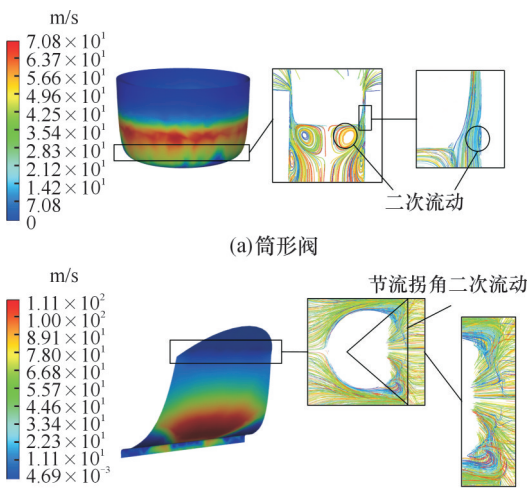


图10 速度云图

Fig.10 Velocity contours

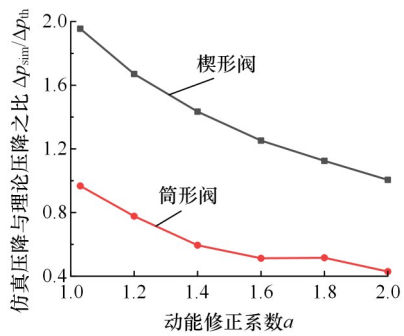


图11 不同动能修正系数下的节流压降比值

Fig.11 Throttling pressure drop ratio under different kinetic energy correction coefficients

仿真结果呈现以下三个显著特征：

1)仿真压力突变区域与理论设计最小节流面积区域一致。如图9所示，筒形阀和楔形阀的流体压力均在阀芯与阀座形成的最小节流截面附近快速下降。仿真所得主要压力突变区域与理论模型确定的最小节流截面在空间位置上基本一致，验证了最小节流面积设计方法的合理性。

2)二次流动的形成。如图10所示，流体在节流区域的拐角处产生了明显的二次流动，导致局部速度分布发生显著变化。楔形节流阀的A点、B点的速度分别为18.86 m/s和69.46 m/s，这表明二次流动不仅通过改变流道截面面积、影响流体速度分布，还可能引入公式计算的偏差，间接说明二次流动对阀芯线性设计的潜在影响。因此，建模引入动能修正系数来修正速度梯度具有必要性。

3)动能修正系数可提高模型吻合度。图11给出了不同动能修正系数下仿真压降与理论压降的比值。以压降比值接近1作为评价判据，筒形阀在a_t=1.03、楔形阀在a_x=2.00的仿真压降与理论压降偏差最小。该结果表明，合理选取动能修正系数能提高理论模型对节流阀内部复杂流动和压降响应的表征精度。

4.2 新型阀芯控压能力实验验证

节流阀的流量系数K_v即温度5～40 ℃、两端压差100 kPa时，水流经阀门的流量(单位m³/h)，是只与阀结构有关的重要指标[19]。K_v的计算公式为

$$K_v = 10q_V\sqrt{\frac{\rho}{\rho_0\Delta p}}$$

式中：ρ_0为水在15 ℃的密度，kg/m³。

为验证新型节流阀在复杂流体介质中的适应性，设计并实施了一系列高压循环实验。测试介质为不同密度和黏度的两种流体，实验流量分别为36、54、72 m³/h。流体介质参数如表2所示。

除密度1700 kg/m³、黏度0.02 Pa•s、流量

表 2　实验中不同流体的参数

Table 2　Parameters of different fluids in the experiment

	第一种流体	第二种流体
密度(kg/m³)	1700	1030
黏度(Pa·s)	0.02	0.005

72 m³/h的基准参数外，节流阀在其余工况、不同行程(开度)下的理论压降均采用反算法获得，即先根据阀芯有效行程确定对应的最小节流面积，再将各工况下的实验流量和流体物性参数代入式(7)，计算不同有效行程下的理论压降，从而获得相应工况的理论压降曲线。

实验结果表明，流量与流体密度恒定时，压降的理论值与实验值高度一致，且两者的流量系数相近。如图 12、图 13 所示，理论计算数据与实验数据具有良好的贴合度，验证了理论模型和实验台设计的正确性。

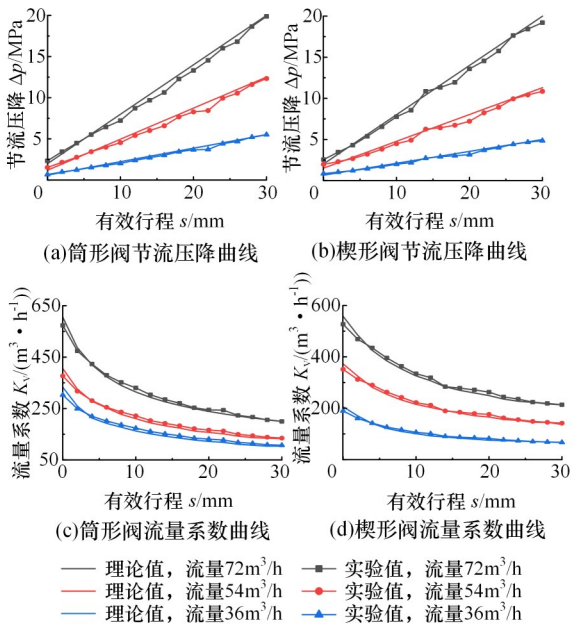


图 12　第一种流体参数下理论值与实验值对比

Fig.12　Comparison of theoretical values and experimental values under the first fluid parameter setting

筒形节流阀与楔形节流阀的特征压降曲线(图 12、图 13)分析结果表明：有效行程 0～30 mm(对应有效开度为 100%～0)内，两种节流阀的压降与开度参数呈现良好的线性关系，筒形节流阀、楔形节流阀的平均线性相关系数分别为 0.9932 和 0.9919。两种节流阀均展现出优异的线性调节性能，有效增强了压降参数的调控精度。

目前普遍采用的线性筒形阀芯设计方法即曲线簇包络法[7]在仿真中可实现的有效线性开度为

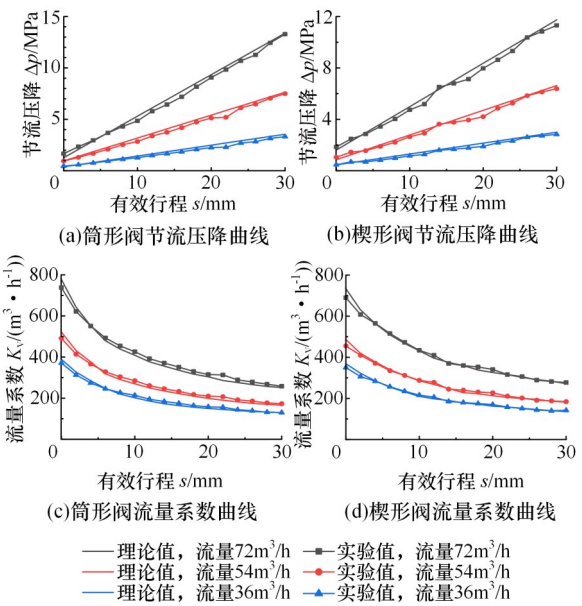


图 13　第二种流体参数下理论值与实验值对比

Fig.13　Comparison between theoretical and experimental values under the second fluid parameter set

0～90%，但实际的有效线性开度为 25%～85%。实际有效线性开度区间减小的原因如下：①曲线簇包络法建立的方程包含轮廓点参数的二次项，显著增加了计算复杂度；②曲线簇包络法未考虑动能修正与面积修正，导致模型精度受限。

本文所提的变径轮廓优化方法显著拓展了筒形节流阀的有效线性调节区间，为智能闭环控压钻井系统提供高精度执行终端设计依据。

5　结论

1)通过微分思想与非线性回归方程建立了行程与节流面积的动态量化关系，有效消除了传统隐式方程在工程应用中的局限性。基于黏性流体总流伯努利方程与 Leibniz 包络定理提出的变径轮廓优化方法显著拓展了节流阀的线性调节区间。实验结果表明，筒形节流阀、楔形节流阀在 0～100% 行程的压降线性相关系数分别为 0.9932 和 0.9919；相较于传统筒形结构，线性调节范围扩大了 66.7%。由于针形阀芯与筒形阀芯均为回转体结构，本文所提方法具有推广至针形节流阀线性化设计的理论基础。

2)通过理论分析与仿真验证，探讨了阀芯几何形态对流体动能分布的调控规律。结果表明，筒形阀和楔形阀在节流口及下游区域均存在局部回流现象。这种现象使节流截面速度分布呈现明显的非均匀性，并使筒形阀和楔形阀在同一工况下的仿真压降与理论压降不同。引入动能修正系数可提高模型对复杂流动特征的表征精度。

筒形阀、楔形阀的最佳动能修正系数分别为1.03和2.00。

3)提出的多类型阀芯轮廓设计思路和变径轮廓优化方法可使筒形阀芯与楔形阀芯的开度与压降为线性关系。该设计思路还可进一步推广至针形阀芯等相近结构。实验结果表明,新型节流阀在全有效行程范围内具有良好的压降线性调节能力,可为智能闭环控压钻井系统高精度节流执行机构的设计提供参考。

参考文献:

[1] 李福君. 关于石油钻井工程技术的探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(21): 190-192.
LI Fujun. Discussion on Petroleum Drilling Engineering Technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2024, 44(21): 190-192.

[2] 惠正文. 石油工程中钻井技术的问题及发展[J]. 化工管理, 2020(22): 187-188.
ZhengwenXI/HUI). Problems and Development of Drilling Technology in Petroleum Engineering[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(22): 187-188.

[3] 赵治岗, 倪明春, 倪俊强. 油田钻井中的控压钻井设备研究[J]. 中国设备工程, 2024(19): 89-91.
ZHAO Zhigang, NI Mingchun, NI Junqiang. Research on Pressure-controlled Drilling Equipment in Oilfield Drilling[J]. China Plant Engineering, 2024(19): 89-91.

[4] ERGE O, GU Qifan, CHEN Dongmei, et al. MPD Choke Control Considering the Thixotropic Gelation Behavior of Drilling Fluids[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109793.

[5] LIAO Youqiang, SUN Xiaohui, SUN Baojiang, et al. Wellhead Backpressure Control Strategies and Outflow Response Characteristics for Gas Kick during Managed Pressure Drilling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 75: 103164.

[6] YANG Hongwei, LONG Zhenyu, LI Jun, et al. Managed Pressure Drilling and Automated Well Killing Based on African Vulture Optimization-proportional Integral Derivative Controller[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(2): 027192.

[7] 王果,范红康,牛新明,等. 控压钻井线性节流阀及其控制[J]. 石油学报,2017,38(8):955-962.
WANG Guo, FAN Hongkang, NIU Xinming, et al. Linear Throttle Valve for Controlled-Pressure Drilling and Its Control[J]. Chinese Journal of Petroleum, 2017, 38(8): 955-962.

[8] 屈俊波. 井底恒压法控压钻井波动压力计算与气侵控制研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
QU Junbo. Research on Calculation of Surge and Swab Pressures and Control of Gas Kick in Constant Bottom Hole Managed Pressure Drilling[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.

[9] 屈俊波, 闫铁, 孙晓峰, 等. 控压钻井楔形节流阀节流压降规律研究[J]. 化工机械, 2018, 45(3): 328-332.
QU Junbo, YAN Tie, SUN Xiaofeng, et al. Study on Choke Pressure Drop of Wedge-shaped Throttle Valves Used in Managed Pressure Drilling[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2018, 45(3): 328-332.

[10] 张土乔. 高等工程流体力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2024.
ZHANG Tuqiao. Dvanced Engineering Fluid Mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2024.

[11] 王国荣, 朱颢, 范红康, 等. 控压钻井节流阀工作特性数值模拟及试验研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(8): 1254-1258.
WANG Guorong, ZHU Hao, FAN Hongkang, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Working Mechanisms of a Throttle valve Used in MPD[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(8): 1254-1258.

[12] 赵琴. 高等工程流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
ZHAO Qin. Advanced Engineering Fluid Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[13] 陈大达, 王斌武. 工程流体力学基础[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2020.
CHEN Dada, WANG Binwu. Fundamentals of Engineering Fluid Mechanics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2020.

[14] ZHANG Zhi, SUN Baojiang, WANG Zhiyuan, et al. Multiphase Throttling Characteristic Analysis and Structure Optimization Design of Throttling Valve in Managed Pressure Drilling[J]. Energy, 2023, 262: 125619.[LinkOut]

[15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 工业过程控制阀 第2-3部分: 流通能力试验程序: GB/T 17213.9—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Industrial-process Control Valves: Part 2-3: Flow Capacity—Test Procedures: GB/T 17213.9—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[16] 楚飞. 基于冲蚀分析的新型筒形控压钻井节流阀优化设计[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
CHU Fei. Optimal Design of a New Tubular Controlled Pressure Drilling Throttle Valve Based on Erosion Analysis[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

[17] 刘培杰数学工作室. Leibniz定理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2018.
LIU Peijie Mathematics Studio. Leibniz Theorem[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2018.

[18] 王国荣, 楚飞, 陶思宇, 等. 控压钻井节流阀液-固两相流冲蚀预测及验证[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 754-759.
WANG Guorong, CHU Fei, TAO Siyu, et al. Prediction and Verification on Liquid-solid Two-phase Flow Erosion of Managed Pressure Drilling Throttle Valve[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 754-759.

(编辑 张 洋)

作者简介: 陈亚洲,男,2001年生,博士研究生,研究方向为特深井井控装备。发表论文2篇。E-mail:2569164339@qq.com。王国荣*(通信作者),男,1977年生,教授,博士研究生导师。E-mail:200331010023@swpu.edu.cn。

本文引用格式:

陈亚洲,王国荣,董学成,等. 基于变径轮廓优化的控压节流阀线性设计[J]. 中国机械工程,2026,37(7):1595-1602.

CHEN Yazhou, WANG Guorong, DONG Xuecheng, et al. Linear Design of Pressure-control Throttle Valve Based on Variable-diameter Profile Optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1595-1602.