Journal of System Simulation

Volume 27 | Issue 5 Article 30

9-1-2020

# Optimization Design for a New Type Throttle Valve of Managed Pressure Drilling Based on Response Surface Methodology

Guorong Wang
*1. College of Mechanical and Electrical Engineering Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;;*

Chu Fei
*1. College of Mechanical and Electrical Engineering Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;;*

Hongkang Fan
*2. Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China;;*

Siyu Tao
*1. College of Mechanical and Electrical Engineering Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

# Optimization Design for a New Type Throttle Valve of Managed Pressure Drilling Based on Response Surface Methodology


## Abstract

Abstract: *The Kriging response surface of single parameter and double parameters versus mass loss of valve spool* about bonnet length, bonnet external radius and chamber inner radius of a new type throttle valve used in Managed Pressure Drilling was carried out by *using CFX and ANSYS-Design Exploration*. The results show that these dimensions have significant influence on erosion mass loss of valve spool. In order to improve the anti-erosion ability of the spool and enhance the service life of the whole valve, *the multi-objective genetic algorithm was used for dimensional optimization design of the mentioned variables*. After optimization design, the averaged erosion mass loss of plug was decreased 30.2% than that in original chamber dimensions. The detail analysis of spool contour in symmetry plane indicates the erosion rate of majority points on the contour are decreased obviously, and especially significant at the back side of the spool.



## Keywords

throttle valve of managed pressure drilling, spool erosion, response surface methodology, optimization design, computational fluid dynamics



## Authors

Guorong Wang, Chu Fei, Hongkang Fan, Siyu Tao, Zhu Hao, and Jiang Long



## Recommended Citation

Wang Guorong, Chu Fei, Fan Hongkang, Tao Siyu, Zhu Hao, Jiang Long. Optimization Design for a New Type Throttle Valve of Managed Pressure Drilling Based on Response Surface Methodology[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 1133-1137.



This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol27/iss5/30

第 27 卷第 5 期 系统仿真学报© Vol. 27 No. 5
2015 年 5 月 Journal of System Simulation May, 2015

# 基于响应面法的新型控压钻井节流阀优化设计

王国荣[1]，楚飞[1]，范红康[2]，陶思宇[1]，朱颢[3]，蒋龙[1]
（1.西南石油大学机电工程学院，成都 610500；2.中国石化石油工程技术研究院，北京 100101；
3. 中石化石油工程机械有限公司，武汉 430205）

**摘要：***运用 CFX 和 ANSYS Design Exploration，采用中心组合法和响应面法*计算了新型控压钻井节流阀阀盖长度、阀盖外径、阀腔内径*单一参数和双参数关于阀芯平均质量损失的克里金响应面*，结果表明这些尺寸对阀芯的平均质量损失影响显著。为增强阀芯耐冲蚀性，提高节流阀使用寿命，*采用多目标遗传算法对上述尺寸进行了优化*。优化后阀芯的平均质量损失减弱 30.2%，阀芯对称面轮廓线上各点随 x 坐标冲蚀率的变化表明大部分点冲蚀率有明显减弱，阀芯背部冲蚀率减弱最显著。

**关键词：**控压钻井节流阀；阀芯冲蚀；响应面法；优化设计；计算流体力学
中图分类号：TE931　　文献标识码：A　　文章编号：1004-731X (2015) 05-1133-05

## Optimization Design for a New Type Throttle Valve of Managed Pressure Drilling Based on Response Surface Methodology

*Wang Guorong*[1], *Chu Fei*[1], *Fan Hongkang*[2], *Tao Siyu*[1], *Zhu Hao*[3], *Jiang Long*[1]
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China; 3. Petroleum Machinery Co. SINOPEC, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** *The Kriging response surface of single parameter and double parameters versus mass loss of valve spool* about bonnet length, bonnet external radius and chamber inner radius of a new type throttle valve used in Managed Pressure Drilling was carried out by *using CFX and ANSYS-Design Exploration*. The results show that these dimensions have significant influence on erosion mass loss of valve spool. In order to improve the anti-erosion ability of the spool and enhance the service life of the whole valve, *the multi-objective genetic algorithm was used for dimensional optimization design of the mentioned variables*. After optimization design, the averaged erosion mass loss of plug was decreased 30.2% than that in original chamber dimensions. The detail analysis of spool contour in symmetry plane indicates the erosion rate of majority points on the contour are decreased obviously, and especially significant at the back side of the spool.

**Keywords:** throttle valve of managed pressure drilling; spool erosion; response surface methodology; optimization design; computational fluid dynamics

## 引言

控压钻井技术(Managed Pressure Drilling)是近年来发展起来的，有效解决复杂地层经常出现的井漏、井涌、压差卡钻、井壁失稳等钻井事故的先进钻井技术[1]。该技术能够有效控制井筒液柱压力剖面，达到安全、高效钻井、降低成本，简化操作，缩短非生产时间的效果，显著改善油井生产率[2-3]。控压钻井节流阀是控压钻井系统最为关键的装备之一，是整个地面回压控制系统的核心。目前国内

收稿日期：2014-10-24　　修回日期：2014-11-26；
基金项目：国家油气重大专项(2011ZX05048-04HZ)；
作者简介：王国荣(1977-)，男，湖北仙桃，博士，教授，博导，研究方向为岩石破碎学与钻头、计算机仿真；楚飞(1989-)，男，河南商丘，硕士生，研究方向为井口节流装备、计算机仿真；范红康(1965-)，男，河南洛阳，学士，高工，研究方向为欠平衡钻井、控压钻井、钻井井控技术。



Published by Journal of System Simulation, 2015

厂家生产的控压节流阀普遍存在阀芯防磨防冲蚀性能差、使用寿命短等问题。阀芯持续冲蚀磨损造成节流阀控压特性下降，甚至阀芯破坏，不得不暂停钻井作业更换阀芯，其造成的非生产时间损失巨大，并且严重影响钻井安全。

文献调研发现控压钻井节流阀的冲蚀研究已经引起国内学者的关注，但从公开的文献来看，研究侧重于分析阀腔流场特性对阀芯抗冲蚀能力的影响规律及阀芯型面的改进设计。练章华等[4]基于楔形节流阀阀腔流场分析改进了阀芯结构，有效的延长了楔形阀芯的使用寿命。王德玉等[5-6]对节流阀阀芯进行了受力分析，并定性地探究了节流阀冲蚀的原因。朱焕刚等[7]设计的控制压力钻井用节流阀在结构上采用对称面设计并建议采用硬质合金材料增加节流阀的耐冲蚀性。刘清友等[8]采用流固耦合方法探究了压力场、速度场及工况条件对于阀芯损坏的影响规律。

新型筒形控压钻井节流阀的特点是节流阀阀芯表面是为保证线性控压而专门设计的[9]，通过改变阀芯形状，以牺牲控压能力来增加阀芯使用寿命的方法并不可行。本文以节流阀阀腔作为研究对象分析其结构对节流阀阀芯寿命的影响规律。针对阀腔的具体几何特点，将中心组合设计方法、响应面法及多目标遗传算法与计算流体力学软件(CFX)相结合，对节流阀的阀腔尺寸进行了优化设计，以得到更优化的阀腔设计方案，提高阀芯的使用寿命。

# 1 计算模型及边界条件

## 1.1 计算模型及网格

计算域是节流阀的整个内部流场，流域对称面示意图如图 1。建立三维全尺寸流体域，出入口直径 D = 103.2 mm，为使湍流充分发展，进、出口管道分别延伸 2D，5D。采用四面体网格划分，并对阀芯周围流域网格进行加密处理，共生成 71 051 个网格，15 899 个节点。

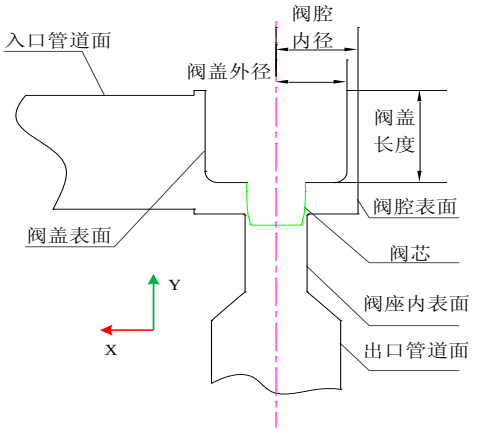


图 1 计算域对称面示意图

## 1.2 计算方法及边界条件

采用软件 CFX14.5 求解模型，采用欧拉法求解连续相，积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程求解离散相颗粒，入射面上随机追踪 10 000 个固相颗粒；Finnie 模型求解颗粒对阀芯的冲蚀质量损失。收敛标准为残差均方根 $10^{-6}$。

边界条件：连续相为水，密度为 1 000 kg/m$^3$，动力粘度 1.003×10$^{-3}$ kg/m·s；固相颗粒为铝钒土陶粒砂，平均直径 0.42 mm，堆密度 1 800 kg/m$^3$，视密度 3 300 kg/m$^3$，颗粒垂直进口面入射；连续相与颗粒入口速度遵循 1/7 律(one seventh power law)，中心速度 1.42 m/s；节流阀阀芯材料为 40 Cr。

# 2 优化设计方法

传统的优化设计是由设计者提供若干不同的设计方案，从中比较，挑选出最优化的方案[10]。这种方法是建立在设计者经验的基础上。由于时间和经济条件的限制提供的可选方案往往数量有限，而真正意义上的最佳方案依赖可用于比较的大量设计方案，往往所谓的最优设计并不是最优化的结果。响应面法是试验设计与数理统计相结合的优化方法，对指定的设计点集合进行连续试验，求解参变量之间的关系，建立响应面，从而在设计空间构造测定量的全局逼近。响应面法计算简单，通过回归模型的选择，可拟合复杂的响应关系[11]，具有很好的鲁棒性[12]。因此该方法能够克服传统优化设

计的缺点，达到真正意义上的优化设计[13-15]。将采用该方法求解响应面，并对阀腔尺寸进行优化设计。

### 2.1 克里金(Kriging)响应面

克里金响应面是在克里金插值算法的基础上求解响应面的方法。克里金认为输出参数是输入参数的多项式形式与扰动项的综合。可表示为：

$$Y(x)=f(x)+Z(x) \tag{1}$$

其中：$Y(x)$是目标未知函数；$f(x)$是 $x$ 的多项式，$Z(x)$是局部扰动项，其服从高斯随机分布，均值为 0，方差 $\sigma^2$，协方差非零。$Z(x)$可表示为：

$$Z(x)=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i r(x^i,x) \tag{2}$$

$r(x^i,x^j)$ 是任意两个样本点的空间相关函数，由下式决定

$$r(x_i\ ,x_j\ )=\exp(-\sum_{k=1}^{M}\theta_k\,|\,x_k^i-x_k^j\,|^2) \tag{3}$$

$\theta_k$ 是未知参数的拟合模型，$M$ 是设计变量的个数，$x_k^i$ 和 $x_k^j$ 是 $x^i$ 和 $x^j$ 的 $K$ 次分量。

Kriging 响应面经过所有的试验样本点，无法通过试验样本点与响应面计算值的拟合程度来判断响应面的有效性。本文随机产生测试点用以判断响应面的有效性。

### 2.2 目标驱动优化设计

ANSYS 提供的目标驱动优化设计(Goal Driven Optimization)是一系列多目标优化设计程序的集合，该程序能够从用户指定参数的样本集中找到最优解。其中涉及的优选方法和计算原理，ANSYS 帮助文档给予了详细的说明，本文不再赘述。根据该项目的特点，选择筛选法(Screening)初步寻找响应面上可能存在的极值，缩小范围后利用多目标遗传算法(Multi-objective Genetic Algorithm)计算更为精确的局部极值。

## 3 优化过程及结果分析

### 3.1 优化流程

该优化的流程如下：首先，建立三维流场模型并参数化阀盖长度、阀盖外径和阀腔内径，初始尺寸见表 1。然后，划分网格并在 CFX 中选择模型、设定边界，计算阀腔流场及阀芯的冲蚀，确定结果与实际相符后，进入 Design Exploration 模块，设计试验点并计算响应面。确保响应面精确后，选择上述优选方法选择最优的尺寸。

表 1 待优化参数

| 参数名称 | 参数符号 | 初始尺寸 /mm | 最大值 /mm | 最小值 /mm |
|---|---|---|---|---|
| 阀盖外径 | coverR | 56.5 | 56.5 | 35.4 |
| 阀盖长度 | coverlength | 82 | 90 | 55 |
| 阀腔内径 | chamberR | 65 | 84.75 | 65 |

### 3.2 模型验证及结果

#### 3.2.1 模型验证

为证明模型的正确性，应用选取的模型计算了开度为 66.87%时的节流阀阀芯质量损失情况，并与相同条件下的实验数据做了对比，如图 2 所示。对比结果表明该模型仿真结果与实验数据比较吻合，仿真质量损失略大于试验值，符合文献[16]的结果，证明了该模型的有效性。

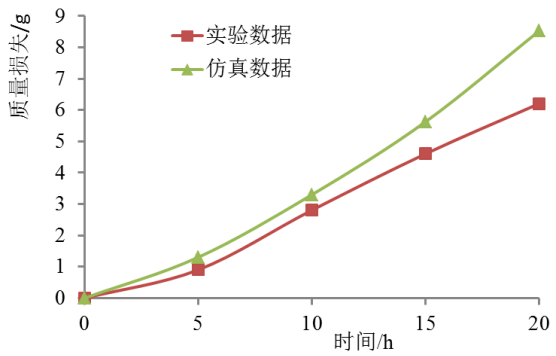


图 2 阀芯冲蚀量曲线的实验值与仿真值对比

#### 3.2.2 响应面

在 Design Exploration 模块中选择 Kriging 响应面，并选择自动修正。图 3 是在初始尺寸条件下针对阀盖长度、外径和阀腔内径的单一参数的响应面。可看出，阀芯平均质量损失随阀盖长度变化先增加后减小，在 77 mm 左右处存在拐点并达到极大值；

随阀盖外径增大阀芯平均质量损失减小，在 51 mm 处达到极小值后有缓慢增大趋势；随着阀腔内径的增大阀芯平均质量损失逐渐增大，阀腔内径大于 71 mm 时增长率略有减小。

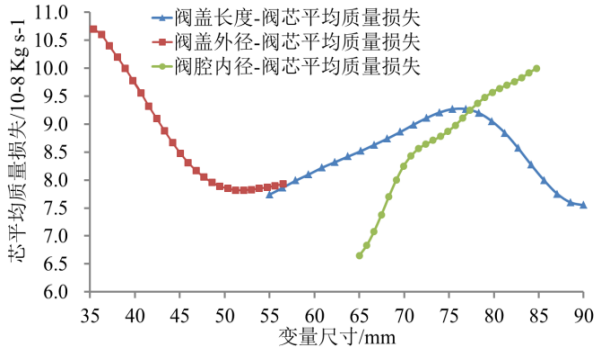


图 3 单一参数响应面

单一参数的响应面只能研究其他参数固定，单一参数对输出参数的影响关系。建立两个变量综合作用下的响应面，可以研究两个变量综合影响下的阀芯质量损失关系，有利于寻求最优解。图 4 显示了阀盖长度、阀腔内径 2 个参数变量空间内阀芯平均质量损失的关系，可确定阀芯平均质量损失在变量空间内的最大值出现在两变量均达到最大值附近，最小值位于阀腔内径 75 mm，阀盖长度 90 mm 左右。整个响应面存在多个极值点。

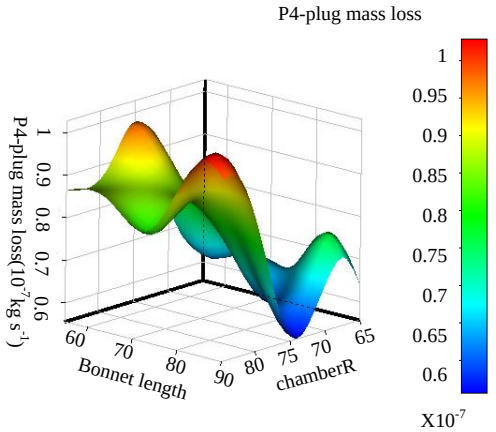


图 4 阀盖长度、阀腔内径双参数响应面

### 3.2.3 优化结果分析与比较

在响应面的基础上，选择目标驱动优化设计，以阀芯最小质量损失为目标在整个变量空间优选参数。程序自动筛选了 4 个候选尺寸，并计算了各个尺寸下阀芯的冲蚀质量损失，与原尺寸对比发现，4 个候选尺寸均有不同程度的减弱冲蚀作用，最佳候选尺寸下，阀芯的平均质量损失较初始尺寸降低了 30.2%。

阀芯对称面轮廓线(图 1 绿色线)在初始尺寸和最佳候选尺寸两种条件下，冲蚀率随 x 坐标的变化见图 5。对比发现，候选尺寸 3 在轮廓线大部分位置的冲蚀率均小于初始尺寸下的冲蚀率，冲蚀率峰值减小了 35.1%；阀芯背部(图 11 中-25 mm< $\chi$ < -20 mm)冲蚀减弱明显。

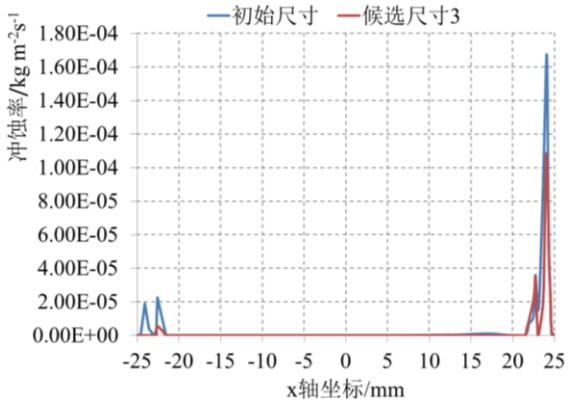


图 5 阀芯交线上冲蚀率对比

通过上述分析，优化后阀芯的冲蚀质量损失不仅整体上得到了降低，局部的冲蚀情况也得到了很大的改善。阀芯平均质量损失降低了 30%，阀芯背部冲蚀率降低最为明显。

## 4 结论

(1) 采用 CFX 和 Workbench 中的 Design Exploration 对新型筒形控压钻井节流阀阀腔 3 个参数变量进行了基于响应面的优化设计。避免了传统优化设计样本不足和基于实验的单因素改变分析的缺陷。

(2) 从优化结果上看，采用响应面法优化后的节流阀，阀芯局部冲蚀减弱效果明显，整体抗冲蚀性能有较大的改善；其中阀芯背部的冲蚀减弱效果最为明显，整体阀芯平均质量损失降低了 30.2%。

(3) 优化结果验证了 CFX 和 Design Exploration 优化设计方法在节流阀优化设计中的有效性。本次设计仅对阀腔的尺寸进行了优化，但是该优化设计方法可以方便的推广到基于有限元分析的其他流体机械的优化设计问题中。

## 参考文献：

[1] 向雪琳，朱丽华，单素华，等. 国外控制压力钻井工艺技术[J]. 钻采工艺, 2009, 32(1): 27-30.

[2] 黄兵，石晓兵，李枝林，等. 控压钻井技术研究与应用新进展[J]. 钻采工艺, 2010, 33(5): 1-4.

[3] 刘伟，蒋宏伟，周英操，等. 控压钻井装备及技术研究进展[J]. 石油机械, 2011, 39(9): 8-12.

[4] 练章华，刘干，龚建文，等. 高压节流阀流场分析及其结构改进[J]. 石油机械, 2004, 32(9): 22-24.

[5] 王德玉，刘清友，何霞. 高压节流阀的失效与受力分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 94-96.

[6] 张祥来，刘清友. 井控节流阀冲蚀机理及结构优化[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 83-84.

[7] 朱焕刚，杨德京，陈永明，等. 控制压力钻井用节流阀的研制[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(2): 110-112.

[8] 刘清友，包凯，付玉坤，等. 高压节流阀节流特征及流固耦合失效分析[J]. 流体机械, 2014, 42(6): 50-54.

[9] Wang G R, Tao S Y, Liu Q Y, *et al*. Experimental Validation on a New Valve Core of the Throttle Valve in Managed Pressure Drilling [J]. Advances in Mechanical Engineering, Article ID 324219 (S1687-8132), 2014, 6: 324219. http:// dx.doi.org/10.1155/2014/324219.

[10] 黄志新，刘成柱. ANSYS Workbench 14.0超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社, 2013.

[11] 成沉，鲍福廷，刘旸，等. 基于响应面法的喉栓式喷管型面优化设计[J]. 固体火箭技术，2014, 37(1): 47-51.

[12] 熊俊涛. 基于响应面方法的气动优化设计[D]. 西安：西北工业大学, 2005.

[13] 许京荆. ANSYS Workbench数值模拟技术[M]. 北京：中国水利水电出版社, 2012.

[14] 谢志江，孙玉，李诚，等. 基于ANSYS Workbench的搬运机械手结构优化设计[J]. 机械与电子, 2010, 1(1): 65-67.

[15] 祁丽，张军，黄冠星. 基于Fluent和Workbench的蒸汽喷射器流场分析和结构参数优化[J]. 流体机械，2014, 42(5): 35-38.

[16] Gnanavelu A, Kapur N, Neville A, *et al*. A Numerical Investigation of a Geometry Independent Integrated Method to Predict Erosion Rates in Slurry Erosion [J]. Wear (S0043-1648), 2011, 271(5): 712-719.

(上接第 1132 页)

[7] Rodriguez-Molins M, M A Salido, F Barber. Intelligent planning for allocating containers in maritimeterminals [J]. Expert Systems with Applications (S09574174), 2012, 39(1): 978-989.

[8] Petering M E, K G Murty. Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2009, 36(5): 1711-1725.

[9] Chen L, Z Lu. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal [J]. International Journal of Production Economics (S0925-5273), 2012, 135(1): 73-80.

[10] Le M, H Yu. The RHSA strategy for the allocation of outbound containers based on the hybrid genetic algorithm [J]. Journal of Marine Science and Application (S1671-9433), 2013, 12(3): 344-350.

[11] 乐美龙，于航. 考虑箱区利用率的出口箱资源配置启发式算法[J]. 计算机工程与应用，2013, 49(8): 231-235.