

# 基于响应曲面分析的射流泵抽吸性能多目标优化设计

白健华<sup>1</sup>, 于法浩<sup>1</sup>, 田文尧<sup>2</sup>, 高建华<sup>2</sup>, 曾润<sup>1</sup>, 何亚其<sup>1</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300459

2. 中海石油中海油田服务股份有限公司 天津 300459

项目支持: 中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目课题“海上稠油热采注采一体化技术优化研究与扩大应用”(KJGG-2024-0606); 中海油田服务股份有限公司级重点科研项目“海上油田智慧井筒关键技术研究(一期)”(YSB25YF007)

引用: 白健华, 于法浩, 田文尧, 等. 基于响应曲面分析的射流泵抽吸性能多目标优化设计[J]. 油气井测试, 2026, 35(1): 28-36.

Cite: BAI Jianhua, YU Fahao, TIAN Wenyao, et al. Multi-objective optimization design of jet pump suction performance based on response surface methodology [J]. Well Testing, 2026, 35(1): 28-36.

**摘要** 针对原油排采阶段射流泵抽吸能力不足的问题, 以提升其抽吸效率与流量特性为目标, 采用响应曲面法结合数值模拟技术, 选取喉嘴距、喉管直径等关键结构参数开展多因素耦合分析, 构建了参数与引射介质流量间的二次多项式数值模型并完成性能迭代优化。结果表明, 所建模型拟合精度达 99.72%, 拟合效果与可靠性优异; 优化后射流泵流量比提升 8.06%、工作效率提高 2.57%, 抽吸性能显著改善。研究明确了使流量比最大化的射流泵最优结构参数组合, 为射流泵的性能优化设计提供了可靠的理论支撑与实践依据。

**关键词** 射流泵; 响应曲面; CFD; 多目标优化; 抽吸性能; 数值模拟; 流量比

中图分类号: TE933

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.01.004

## Multi-objective optimization design of jet pump suction performance based on response surface methodology

BAI Jianhua<sup>1</sup>, YU Fahao<sup>1</sup>, TIAN Wenyao<sup>2</sup>, GAO Jianhua<sup>2</sup>, ZENG Run<sup>1</sup>, HE Yaqi<sup>1</sup>

1. Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin 300459, China

2. CNOOC Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China

**Abstract:** To address the insufficient suction capacity of jet pumps during the crude oil production stage, with the goal of enhancing suction efficiency and flow characteristics, and by integrating response surface methodology with numerical simulation techniques, a multi-factor coupling analysis was performed on key structural parameters, including throat-nozzle distance and throat diameter. In addition, A quadratic polynomial numerical model correlating these structural parameters with the entrained medium flow rate was established, and its iterative performance was optimized. The results indicate that a fitting accuracy of 99.72% is achieved for the developed model, demonstrating superior fitting performance and high reliability. Following optimization, an 8.06% increase in the flow ratio and a 2.57% improvement in operating efficiency were observed, signifying a substantial enhancement in suction performance. This study identifies the optimal combination of structural parameters to maximize the flow ratio of the jet pump, thereby providing a robust theoretical foundation and practical reference for the performance optimization design of jet pumps.

**Keywords:** jet pump; response surface methodology; CFD; multi-objective optimization; suction performance; numerical simulation; flow ratio

射流泵以高速射流为工作流体的流体机械设备, 借助射流中微元团的湍动能扩散, 将动能传递给被抽吸流体(液体、固体或气体)。其结构简单、无运动部件、操作便捷且运行稳定的优势, 在井下采油等实际生产中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。但工作时动力液与被抽吸流体在泵内剧烈混合产生的动能损失, 导致泵效率相对较低, 成为制约其性能的关键问题<sup>[2]</sup>。

键问题<sup>[2]</sup>。

针对上述问题, 国内外学者多通过数值模拟、实验测试等手段开展研究, 深入探究射流泵内部流场特性及关键部件对性能的影响。国内方面, 高贵军等<sup>[3]</sup>通过三维数值计算分析液气射流泵喉嘴腔收缩半角的影响, 发现收缩半角增大会使效率变化先剧增后缓降且存在最大值; 吴波<sup>[4]</sup>依托 CFD 技术

研究液-气射流泵,指出降低出口压力可提效;赵丽娟<sup>[5]</sup>用 FLUENT 软件明确多关键参数,优化后能提升引射效率;熊坤<sup>[6]</sup>针对气田泵堵问题优化参数,有效提升气井产能;刘爱超等<sup>[7]</sup>研发的不动管柱射流泵注采一体化技术,通过工艺创新实现注采转换,降低了作业成本与风险。国外研究中,WU 等<sup>[8]</sup>提出新型自激振荡空化喷嘴,结合大涡模拟与空化模型验证,发现其在低入口压力下具备更优冲击特性,为工程喷嘴选型提供指导;RIAZ 等<sup>[9]</sup>聚焦环形射流泵结构参数对吸入性能的影响,经数值模拟与实验验证,优化收敛角和喉管直径后,泵的吸入能力与效率显著提升。与此同时,多目标优化算法的应用为射流泵设计提供了新思路,助力其在不同工况下实现高效能运行。TAN 等<sup>[10]</sup>采用多目标优化方法改良固液两相环形射流泵,使效率提升 3.1%、能耗降低 34.3%;XU 等<sup>[11]</sup>基于 NSGA-II 多目标遗传算法优化射流泵结构,兼顾泵效率与鱼类运输损伤率控制;LONG 等<sup>[12]</sup>构建多参数、多目标遗传算法优化策略,为水射泵优化提供支撑;LU 等<sup>[13]</sup>通过全参数化建模完成泵射推进系统多目标优化,新型配置在水动力与噪声性能上均有明显提升;YANG 等<sup>[14]</sup>结合响应面方法与期望函数法,对热声斯特林发动机中的射流泵优化,实现最大压力幅度与最小功率耗散。

综上,现有研究为射流泵性能优化奠定了基础,但针对中心射流泵多因素耦合优化的系统性研究仍有提升空间,本文以此为切入点开展研究,采用响应曲面法结合数值模拟技术,选取喉嘴距、喉管直径等关键结构参数开展多因素耦合分析,构建了参数与引射介质流量间的二次多项式数值模型并完成性能迭代优化。旨在进一步提升其抽吸性能。

## 1 模型及优化方法

本节通过定义射流泵无量纲参数、建立理论方程,结合几何建模、网格划分与边界条件设置,构建数值模拟基础,为后续多因素优化提供可靠的模型支撑与方法依据。

### 1.1 射流泵无量纲参数

射流泵的流量与压力同其基本几何尺寸之间的相互关系,揭示了泵内部流场能量转换过程中,关键部件(喷嘴、喉管和扩散管)对泵性能的显著影响。为了更深入地探究射流泵的性能表现,一般利

用无量纲参数来表征射流泵的核心性能<sup>[15]</sup>。

流量比  $q$  为

$$q = \frac{Q_0}{Q_s} \quad (1)$$

式中:  $Q_0$  为被吸液流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_s$  为工作液流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

压力比  $h$  为

$$h = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_0} = \frac{P_c - P_s}{P_0 - P_s} \quad (2)$$

式中:  $P_0$  为工作液入口处压力, MPa;  $P_s$  为被吸液入口处压力, MPa;  $P_c$  为混合液出口处压力, MPa。

面积比  $m$  为

$$m = \frac{A_1}{A_n} \quad (3)$$

式中:  $A_1$  为喉管截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_n$  为喷嘴出口截面面积,  $\text{mm}^2$ 。

效率  $\eta$  为

$$\eta = q \frac{h}{1-h} \quad (4)$$

### 1.2 射流泵理论方程

射流泵实际运行过程中,动力液为清水,被吸液为稠油,但是,本研究的目的是验证喉管进口喇叭口型线设计方法的有效性,因此,可以将被吸液假设为清水,该假设同样可以达到验证设计方法有效性的目的。射流泵内部流动需满足连续性方程和动量方程<sup>[16]</sup>。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为清水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间, s;  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  分别为流体在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向上的分速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

动量方程为

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = -\frac{dp}{dx} + \frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} + \rho f_x \\ \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{dp}{dy} + \frac{d\tau_{yy}}{dy} + \frac{d\tau_{yz}}{dx} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} + \rho f_y \\ \rho \frac{dw}{dt} = -\frac{dp}{dz} + \frac{d\tau_{zz}}{dz} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dx} + \rho f_z \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P$  为静压, MPa;  $\tau_{ij}$  ( $i, j$  可以分别取  $x, y, z$ ) 为应力张量, MPa;  $f_k$  ( $k$  可以分别取  $x, y, z$ ) 为体积力,  $\text{N}/\text{m}^3$ 。

### 1.3 模型建立

射流泵主要工作结构包括喷嘴、喉管和扩散

管,根据已有的研究结果,设计了各单因素最优条件下的单喷嘴射流泵结构模型,其主要参数如表1所示,表中,d为喷嘴直径;L为喉管直径。

表1 射流泵主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of jet pump

参数名称	数值	单位
喷嘴直径	4.17	mm
喉嘴距	5.2125 (1.25 d)	mm
喉管长度	150 (15 L)	mm
喉管直径	15	mm
面积比	14.06	
扩散管长度	54.38	mm
扩散角	6	

#### 1.4 网格划分及边界条件设置

本文采用ICEM软件来划分网格,在具体划分时,采用对复杂几何有更好适应性的四面体网格来划分,并在喷嘴和喉管处进行局部加密,以得到更好的数值模拟效果。网格划分结果如图1所示。



图1 模型计算域网格

Fig. 1 Computational domain mesh of the model

模型泵的数值模拟在ANSYS FLUENT中进行,所有固体壁面都被定义为无滑移边界条件,设定的残差收敛标准是 $10^{-5}$ ,应用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型控制方程和SIMPLE算法来实现压力和速度场的耦合求解。动力液入口、被吸液入口的边界条件采用压力进口,分别设置为26.5 MPa和9.02 MPa;混合液出口的边界条件采用压力出口,压力值设置为13.0018 MPa。对于对流项,采取二阶迎风格式离散方法进行处理,而对于扩散项,则应用中心差分格式来进行离散化处理。

在数值模拟计算中,随着网格数量的增加,数值模拟的结果会更准确,但相应地计算过程会更复杂,离散点数量也会增加,因此,网格数量需要一个合适的值,为了防止网格尺寸对计算结果产生影响,基于原型射流泵模型对网格进行了无关性分析,设计了5组全局网格尺寸,得到的结果见表2和图2。在对比分析后,当网格尺寸统一设为2 mm时,吸入液体的流量变化不再显著,趋于稳定。因此,在后续数值模拟中采用2 mm尺寸作为全局尺寸,网格总数是2 847 408个。

表2 网格配置

Table 2 Mesh configuration

网格配置方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
全局网格尺寸/mm	5	4	3	2	1
总网格数/ $10^4$	72	110	183	284	518

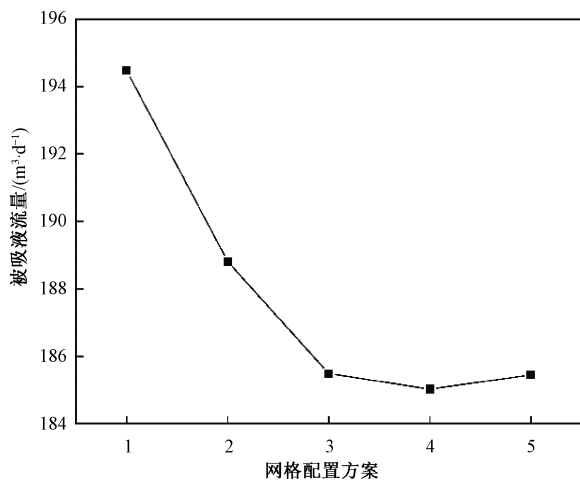


图2 网格参数对被吸液流量影响

Fig. 2 Influence of mesh parameters on the flow rate of the suction liquid

## 2 响应曲面优化设计

以流量比最大为目标,选取喉嘴距、喉管直径、喉管长度和扩散管角度四因素构建响应曲面试验,通过模型拟合、显著性检验及因素交互分析,确定射流泵最优结构参数组合。

### 2.1 方案设计

参考初始方案的参数组合,并结合前人所设计的射流泵结构参数<sup>[17]</sup>,提出了进行响应曲面法数值模拟参数的取值范围如表3所示。

表3 影响因素取值范围

Table 3 Range of values for influencing factors

水平	A 喉嘴距 /mm	B 喉管直径 /mm	C 喉管长度 /mm	D 扩散管 角度 $\theta/^\circ$
-1	3.34	1.8	30	3.2
0	5.21	3.5	67.5	5.0
1	7.09	5.2	105	6.8

其中,为便于计算,喉管直径采用面积比来表示,其关系如式(3)所示。

依据表3所提出的设计方案,将各个影响因素设为自变量,而将流量比 $q$ 设为因变量。基于此设计了一个四因素一水平的优化实验方案<sup>[18]</sup>,总共包括28组试验方案,其中包含4组重复试验(通过在响应曲面法中设置重复试验,可准确估计试验随机误差,为模型显著性检验与失拟检验提供依据,提高模型拟合精度与预测可靠性)。对这

28 组方案进行了数值模拟,方案内容及模拟结果 如表 4 所示。

表 4 响应曲面优化试验方案设计及结果  
Table 4 Design and results of response surface optimization experiment

试验 方案	因素				流量比 $q$
	A 喉嘴距/mm	B 喉管直径/mm	C 喉管长度/mm	D 扩散管角度 $\theta/^\circ$	
1~4	$\pm 1$	$\pm 1$	0	0	0.525 4;0.589 5;0.474 5;0.510 2
5~8	0	0	$\pm 1$	$\pm 1$	0.696 3;0.770 1;0.589 4;0.730 4
9~12	$\pm 1$	0	0	$\pm 1$	0.773 3;0.845 0;0.753 3;0.637 6
13~16	0	$\pm 1$	$\pm 1$	0	0.445 5;0.301 5;0.450 4;0.462 6
17~20	$\pm 1$	0	$\pm 1$	0	0.644 3;0.666 4;0.819 2;0.739 2
21~24	0	$\pm 1$	0	$\pm 1$	0.647 9;0.510 8;0.365 3;0.422 9
25~28	0	0	0	0	0.839 4

根据表 4 的结果,可以得到关于流量比的由四个因素拟合而成的二次多项式回归模型为

$$y = -0.103A - 0.087B + 0.056C - 0.053D + 0.023AB - 0.026AC - 0.047AD + 0.057BC + 0.038BD + 0.08CD - 0.027A^2 - 0.319B^2 - 0.09C^2 - 0.063D^2 + 0.8388 \quad (7)$$

在评估模型方程的统计显著性时,方差分析(ANOVA)中的  $F$  值用作检验统计量,而  $P$  值则用来评估显著性水平<sup>[19]</sup>。具体来说,如果  $P$  值落在  $[0, 1 \times 10^{-4}]$  这个范围内,这表明模型在回归区域内的拟合达到了统计学上的显著性;如果  $P$  值处于  $[1 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}]$  这个区间内,则表示模型具有次一级显著影响。通过表 5 可以得到,回归模型的  $P$  值小于 0.000 1,说明其模型具有高度的显著性。试验的四个影响因素的显著性从大到小依次为喉管长度 C、扩散管角度角 D、喉嘴距 A、喉管直径 B,其中喉管长度 C 和扩散管角度角 D 为显著因素、喉嘴距 A 和喉管直径 B 为次显著因素,在交互项中,AC、

AD、BC 具有显著影响,BD 具有次显著影响。在平方项中,各平方项均具有显著影响。

模型的可靠性可进一步依靠  $R^2$  (决定系数) 和  $R^2_{\text{adj}}$  (调整决定系数) 来验证<sup>[20]</sup>,通常上述两个系数越高,说明模型的拟合效果越好,此外,还可以通过变异系数(Coefficient of Variation, C. V.) 和精确度(Adequate Precision)这两个指标来评价模型的可靠性,上述四个评价指标如表 6 所示。在该模型中,决定系数为 0.997 2,校正决定系数为 0.992 4,这两个数值都显示了模型的拟合效果非常好,能够可靠地预测体积参数。这两个系数之间的差异是评估模型预测能力的一个重要指标;如果决定系数与校正决定系数之间的差异小于 0.2,那么模型就具有很好的预测性能<sup>[21]</sup>。在本模型中,两者的差异仅为 0.004 8。本模型的变异系数为 2.36%,这表明该实验具有较高的可靠性。如果精确度超过 4.0,则表明实验设计是合理的;本模型的精确度为 43.254 0,这进一步证实了实验设计的准确性。

表 5 模型方程系数显著性检验  
Table 5 Significance test of model equation coefficients

因素	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值	显著性
模型方程	0.662 3	14	0.047 3	205.24	< 0.000 1	显著
喉嘴距 A	0.001 0	1	0.001 0	4.40	0.039 2	次显著
喉管直径 B	0.000 3	1	0.000 3	1.28	0.040 1	次显著
喉管长度 C	0.021 5	1	0.021 5	93.28	< 0.000 1	显著
扩散管角度 D	0.020 3	1	0.020 3	88.24	< 0.000 1	显著
AB;CD	0.001 2;0.000 2	1	0.001 2;0.000 2	5.30;0.708 4	0.050 4;0.424 4	不显著
AC;AD;BC	0.002 6;0.008 8;0.007 0	1	0.002 6;0.008 8;0.007 0	11.31;38.09;30.58	0.009 9;0.000 3;0.000 6	显著
BD	0.001 9	1	0.001 9	8.07	0.0218	次显著
$A^2;B^2;$ $C^2;D^2$	0.003 3;0.417 3; 0.031 5;0.018 5	1	0.003 3;0.417 3; 0.031 5;0.018 5	14.29;1 810.17; 136.60;80.23	0.005 4;< 0.000 1; < 0.000 1;< 0.000 1	显著

## 2.2 因素交互作用对被吸液流量的影响

图 3~图 8 为四因素两两交互对流量比的响应结果。从图 3 可以看出,以流量比为目标时,喉嘴距 A 不是影响流量比的显著因素,随着喉嘴

距的增大,流量比几乎没有变化;喉嘴距不变,随着喉管直径的变化,流量比先增大后减小,喉管直径 B 的取值在中间值附近时,流量比的值最大。

表6 模型可信度分析

Table 6 Analysis of model credibility

参考系数	值
平均值 Mean	0.642 8
变异系数 C. V.	2.36
决定系数 $R^2$	0.997 2
校正决定系数 $R^2_{adj}$	0.992 4
预测决定系数 $R^2_{pre}$	0.957 1
精确度 Adeq Precision	43.254 0

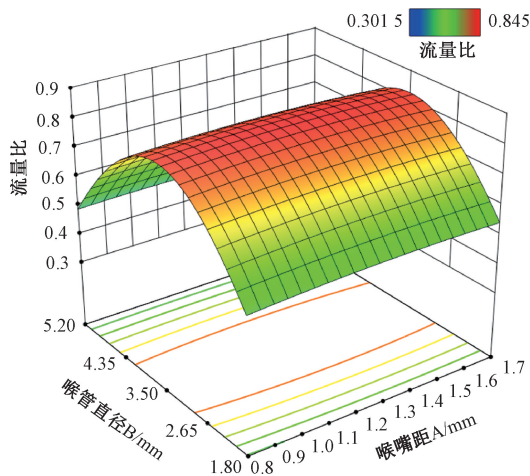


图3 AB两因素对流量比的响应面

Fig. 3 Response surface of factors A and B on flow ratio

图4为喉嘴距A和喉管长度C对流量比的响应结果。从图4可以看出,喉管长度不变,随着喉嘴距的增大,流量比几乎没有变化;喉嘴距不变,随着喉管长度C的增大,流量比呈上升趋势,喉管长度的取值在4.5 L附近时,流量比的值最大。

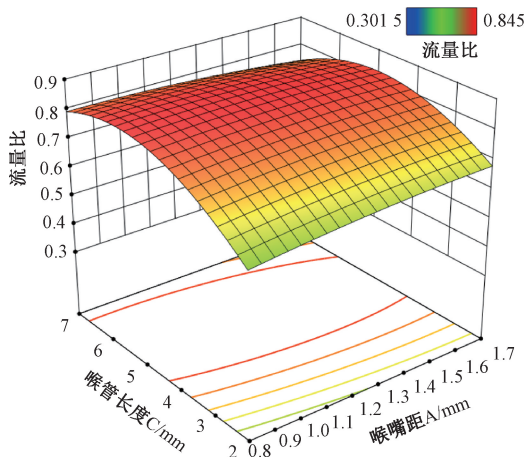


图4 AC两因素对流量比的响应面

Fig. 4 Response surface of factors A and C on flow ratio

图5为喉嘴距A和扩散管角度D对流量比的响应结果。在AD两因素的交互作用下,流量比始终处于一个较高水平;扩散管角度不变,随着喉嘴距的增大,流量比基本保持在最高水平不变,在1.3 d附近达到最大。喉嘴距一定时,随着扩散管角度的增大,流量比先增大后减小,最大值出现在扩散角5°附近。

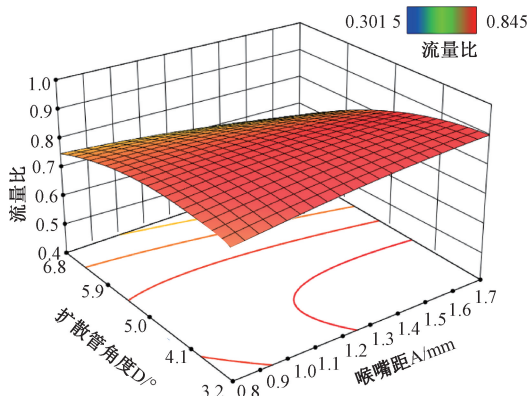


图5 AD两因素对流量比的响应面

Fig. 5 Response surface of factors A and D on flow ratio

图6为喉管直径B和喉管长度C对流量比的响应结果。当喉管长度不变时,随着喉管直径的变化,流量比先增大后减小,流量比率在喉管直径B处于其中间值时达到最大值,这一结果与前文图3的分析相同。喉管直径一定时,随着喉管长度的变化,流量比一直保持在一个水平上,没有较大变化。

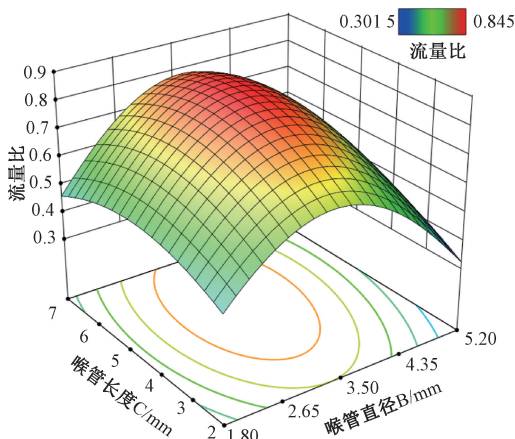


图6 BC两因素对流量比的响应面

Fig. 6 Response surface of factors B and C on flow ratio

图7为喉管直径B和扩散管角度D对流量比的响应结果。扩散管角度不变时,喉管直径对流量比的影响与前文所分析结果大致相符,这再次验证了前文得到的结果。喉管直径不变,随着扩散管角度的增加,流量比呈小幅下降的趋势。

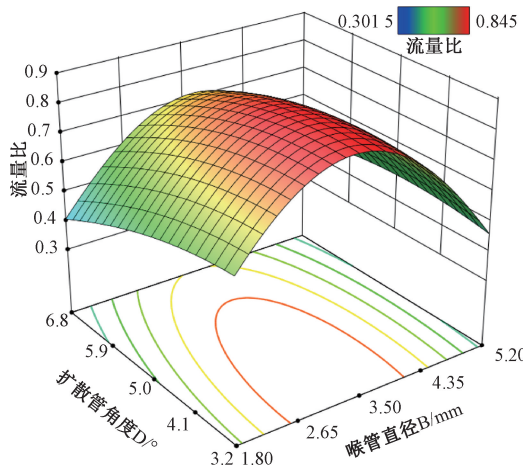


图7 BD两因素对流量比的响应面

Fig. 7 Response surface of factors B and D on flow ratio

图8为喉管长度C和扩散管角度D对流量比的影响结果,扩散管角度一定时,随着喉管长度的增加,流量比先增大后减小,最大值出现在5 L附近。喉管长度不变,随着扩散管角度的增加,流量比小幅下降,其下降幅度在扩散管角度大于5°后变大。

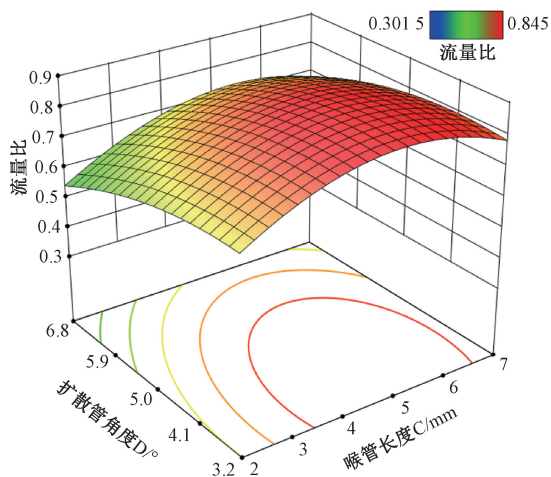


图8 CD两因素对流量比的响应面

Fig. 8 Response surface of factors C and D on flow ratio

基于上述显著性检验及因素交互的结果,可以得到要使流量比最大,四个因素的取值大致为:喉嘴距A取1.3 d附近,喉管直径B约为7.8 mm,喉管长度C约为4.5 L,扩散管角度D约为5°,再结合模型的回归方程,可以得到四因素的最佳组合为:喉嘴距A为1.29 d,喉管直径B为7.80 mm,喉管长度C为4.5 L,扩散管角度D为4.5°。

### 3 模拟结果与分析

通过数值模拟对比优化前后射流泵的抽吸性

能、内部静压分布及速度场特性,揭示参数优化对泵内流场能量传递效率的改善机制,验证优化方案的有效性。

#### 3.1 抽吸性能对比分析

在得到最优组合方案后,设置与原型方案相同的边界条件,采用FLUENT软件进行数值模拟,得到的结果如表7所示,采用响应曲面方案得到的最优结果与原型方案相比,被吸液流量从原型的172.504 5 m<sup>3</sup>/d提升至190.304 2 m<sup>3</sup>/d,增加了约10.4%,流量比提升了8.06%,说明响应曲面方案可以有效地提升射流泵的抽吸性能。

表7 原型与最优组合方案对比

Table 7 Comparison of prototype and optimal combination scheme

方案	工作液流量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	被吸液流量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	流量比
原型	206.613 2	172.504 5	0.834 9
最优组合方案	207.861 7	190.304 2	0.915 5

#### 3.2 优化前后静压对比分析

为了探究射流泵参数对射流泵内压力场的影响,创建轴线截面,以喷嘴出口中心点为原点,以射流泵喷嘴出口所对的方向为正方向,距离为-30~180 mm创建轴向线段,如图9所示。

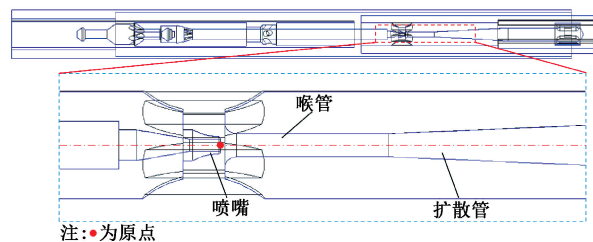


图9 射流泵轴向线段示意图

Fig. 9 Schematic diagram of axial line segment of jet pump

如图10优化前后射流泵轴向压力变化情况可以发现,优化前后方案的轴线压力变化趋势相同,都是先大幅下降后再小幅回升。特别地,优化后的方案有着更低的静压力,且低压区较原型方案更长。由图11压力云图对比图可知,以射流轴向压力9.007 MPa为界限值,从喷嘴出口延伸至该压力值的距离界定为射流压力的核心长度。在这一标准下,原型方案的射流压力核心长度被测量为22.63 mm,优化后的射流压力核心长度有所增加,达到了34.62 mm;通过对比不同方案下射流轴向压力的变化及其对应的同一压力值下的长度,可以推断出,在动力液从喷嘴喷出后,优化后所形成的低压区域

在长度上更显著,即其高速区域相较于原型方案更长。

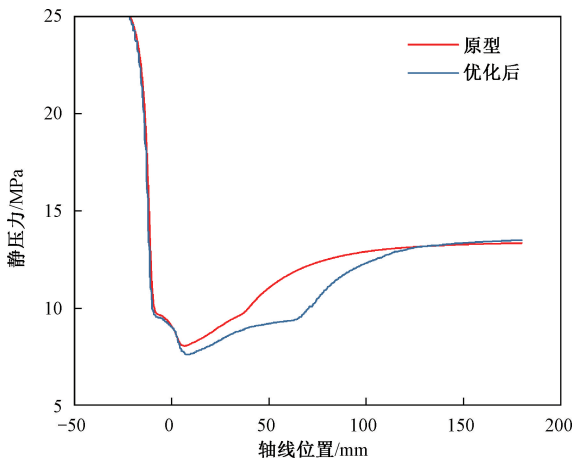


图 10 优化前后射流泵轴线压力变化情况

Fig. 10 Axial pressure variation of jet pump before and after optimization

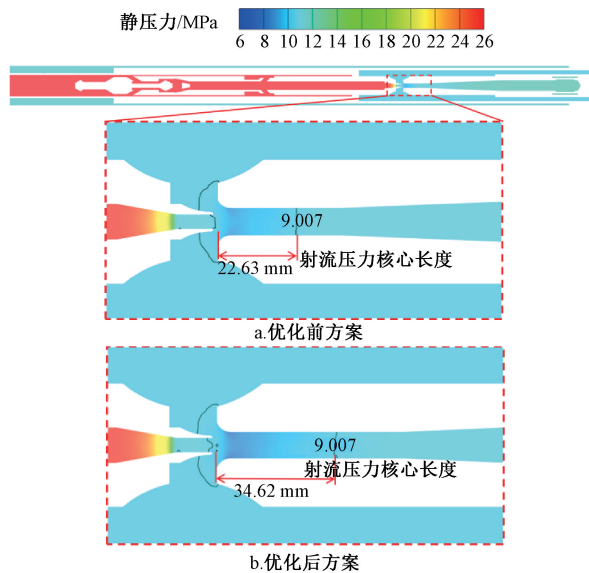


图 11 优化前后压力分布云图对比

Fig. 11 Comparison of pressure distribution contours before and after optimization

### 3.3 优化前后速度对比分析

为了探究射流泵参数对射流泵内速度场的影响,同样创建轴线截面,以喷嘴出口中心点为原点,以射流泵喷嘴出口所对的方向为正方向,距离为 $-30\sim 180\text{ mm}$ 创建轴向线段,读取优化前后方案轴线上的速度数据,如图 12 所示。由图 12 可得,在工作液尚未从喷嘴喷射出时,优化前后方案速度区别不大,在射流从喷嘴射出后,两方案的速度均呈现下降趋势,但优化后的方案有着更高的速度,且下降的趋势也更缓慢。由图 13 的速度云图对比可以发现,同样由最大速度下降到 $100\text{ m/s}$ 时,优化后的

方案这一区间内的长度为 $69.62\text{ mm}$ ,较优化前提高了 $10.10\text{ mm}$ 。结合图 12 和图 13 的结果,优化后的方案有着更高的最大流速和更长的高速区间,这两项结果可以有效提高射流泵抽吸的被吸液流量,增大流量比。

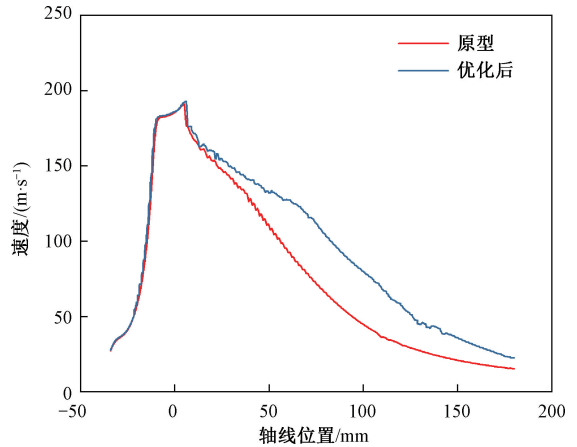


图 12 优化前后射流泵轴线速度变化情况

Fig. 12 Axial velocity variation of jet pump before and after optimization

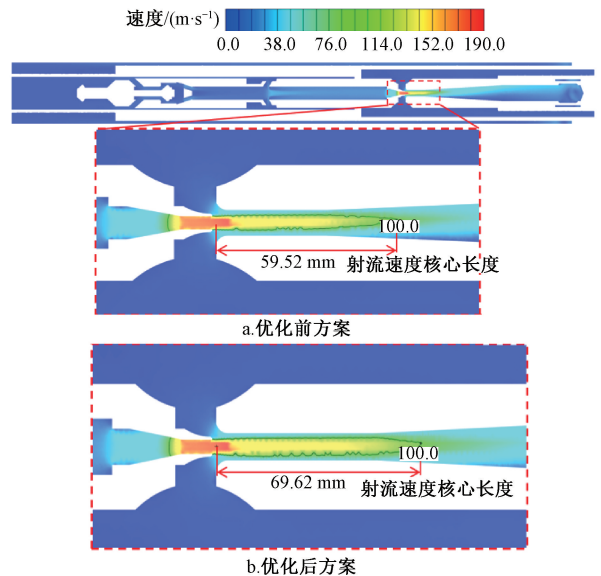


图 13 优化前后速度分布云图对比

Fig. 13 Comparison of velocity distribution contours before and after optimization

## 4 试验验证

依据前文设计的射流泵模型所设定的边界条件以及各组件的具体参数,进行了射流泵原型机的设计工作,并构建了相应的试验平台,各通道流量采用 LS100-HEF 一体式电磁流量计测量流量。通过在预设工况下对射流泵进行测试,以验证数值模拟的准确性和可靠性。

试验时,将基于响应曲面法得到的最优组合方

案的原型机安装在试验平台上,实验流程如图 14 所示。原型机通过动力液体管道、被输送液体管道以及混合液体出口管道与系统相连。接通电源后,启动射流泵,并开启电磁流量计、动力液体入口阀和混合液体出口阀。待系统稳定运行,被输送液体通道的流量计显示数据稳定后,记录该数据,并进行三次重复测量,取平均值作为实际测试的吸入流量数据。测试数据采集完毕后,依次关闭所有阀门和开关,结束实验。得到流量比的对比结果如表 8 所示。

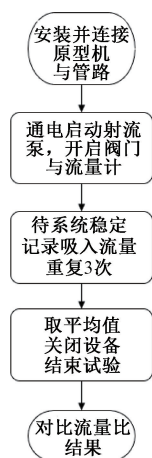


图 14 试验验证流程图

Fig. 14 Flowchart of experimental validation

表 8 射流泵流量比试验验证结果与仿真结果对比

Table 8 Comparison of experimental and simulation results of jet pump flow ratio

试验次数	仿真结果	实测结果	误差/%
试验结果 1	0.915 5	0.878 6	4.03
试验结果 2	0.912 3	0.887 6	2.71
试验结果 3	0.920 6	0.898 1	2.44

表 8 中验证部分三次仿真采用完全相同的边界条件与最优结构参数,结果存在小幅差别是 CFD 数值模拟中迭代收敛精度波动、雷诺时均湍流模型的统计性误差及网格离散固有误差导致的正常数值离散现象。三次验证的仿真结果与实测数据的误差在允许范围内,说明本文所提出的将响应曲面方案应用在射流泵结构参数优化的方案合理,能有效提升泵的抽吸性能,且该方案具有一定的现实意义,能够为射流泵性能的进一步优化提供有价值的参考。

## 5 结论

(1) 在应用响应曲面法的四个因素中,喉管长度 C 和扩散管角度 D 为显著因素、喉嘴距 A 和喉管

直径 B 为次显著因素,喉管长度对流量比的变化最为显著,通过响应曲面法得到适用于本文射流泵模型的最佳组合方案为:喉嘴距 A 为 1.29 d,喉管直径 B 为 7.80 mm,喉管长度 C 为 4.5 L,扩散管角度 D 为 4.5°,这一结果与基于因素交互作用的结果接近,说明结果可靠且可以互相印证。

(2) 经过对比优化前后不同工况下的性能表现,优化后的流量比提升了 8.06%,达到了 0.92,证实了曲面响应优化设计方法在射流泵结构优化上的有效性,且优化后的模型有着更长的低压区间,和更高的射流速度,更有利于提高射流泵的稳定性,同时也为射流泵的性能优化提供了新的方向。

(3) 将用响应曲面法得到的方案进行试验验证,试验得到的结果与仿真得到的结果最大误差为 0.045,小于 5% 的范围,说明将响应曲面法应用在射流泵结构参数优化方面具有一定的可行性。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司和中海石油中海油田服务股份有限公司提供资料及技术支持。

## 参考文献

- [1] 焦明华,邱婷,俞建卫. 基于 ANSYS-Workbench 的 BY004-1 型轴向柱塞泵缸体的结构优化[J]. 液压与气动, 2013 (7): 33-36.  
JIAO Minghua, QIU Ting, YU Jianwei. Structural optimization of the BY004-1 type axial piston pump cylinder based on ANSYS-Workbench [J]. Hydraulics & Pneumatics, 2013(7): 33-36.
- [2] LONG X P, ZENG Q L, YANG X L, et al. Structure optimization of an annular jet pump using design of experiment method and CFD [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(1): 052020.
- [3] 高贵军,邢亚东,王迎樑. 喉嘴段收缩角对液气射流泵流场特性影响的数值研究[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(2): 174-179.  
GAO Guijun, XING Yadong, WANG Yingliang. Numerical study on the influence of throat-to-mouth contraction angle on flow field characteristics of gas-liquid jet pump [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(2): 174-179.
- [4] 吴波. 液气射流泵性能研究与数值模拟[D]. 成都:西南石油大学,2017:36-41.  
WU Bo. Research on performance and numerical simulation of gas-liquid jet pump [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017: 36-41.
- [5] 赵丽娟. 液固射流混合过程的模拟与实验研究[D]. 沈阳:东北大学,2019:45-49.  
ZHAO Lijuan. Simulation and experimental study on liquid-

- solid jet mixing process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019: 45-49.
- [6] 熊坤. 东胜气田射流泵排采工艺优化[J]. 油气井测试, 2025, 34(2): 29-35.
- XIONG Kun. Optimization of jet pump production technology in Dongsheng gas field [J]. Well Testing, 2025, 34(2): 29-35.
- [7] 刘爱超, 翟欢, 郝紫阳, 等. 不动管柱射流泵注采一体化技术在海上稠油开发中的应用[J]. 石化技术, 2025, 32(5): 150-152.
- LIU Aichao, ZHAI Huan, HAO Ziyang, et al. Application of non-removable tubing jet pump injection and production integration technology in offshore heavy oil development [J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32(5): 150-152.
- [8] WU W, XU Y, YIN Z, et al. The flow characteristics of cavitation water jets with different nozzle structures [J]. Physics of Fluids, 2025, 37(2): 025126.
- [9] RIAZ S, AALTONEN J, PINKSE T, et al. Parametric study of structural influences on suction performance in an annular jet pump-CFD and experimental validation [J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, 70: 107066.
- [10] TAN M, SHAO C, LIU H, et al. Multi-objective performance optimization of a solid-liquid two-phase annular jet pump[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(2): 023400.
- [11] XU M, ZENG G, WU D, et al. Structural optimization of jet fish pump design based on a multi-objective genetic algorithm[J]. Energies, 2022, 15(11): 4104.
- [12] LONG Y, TIAN C, ZHU R, et al. Optimization of water-jet pump based on the coupling of multi-parameter and multi-objective genetic algorithms [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(8): 719.
- [13] LU Y, LI C, GU Z, et al. Research on multi-objective optimisation design of pump-jet propulsion [J]. Ocean Engineering, 2025, 322: 120086.
- [14] YANG P, CHEN H, LIU Y W. Application of response surface methodology and desirability approach to investigate and optimize the jet pump in a thermoacoustic stirling heat engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1005-1014.
- [15] OROZCO-MURILLO W, ARCILA I D P, PALACIO-FERNANDEZ J A. Fluid dynamic simulations and genetic-based algorithms for parametric analysis and performance optimization of air-solid jet pumps used in pneumatic transportation of high-density particles [J]. Powder Technology, 2025, 455: 1-14.
- [16] LONG J, YU B, WANG D, et al. Effects of nozzle eccentricity on performance of varying geometry two-phase R744 ejectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 268: 125964.
- [17] YADAV D, SINGH R K, MANJUNATH K. Response surface method-based hydraulic performance optimization of a single-stage centrifugal pump [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2025, 97(1): 20-43.
- [18] 张勇, 刘伟, 蒋明虎, 等. 基于响应面法的同向出流旋流器结构参数优化研究[J]. 流体机械, 2019, 47(4): 19-23.
- ZHANG Yong, LIU Wei, JIANG Minghu, et al. Study on optimization of structure parameters of co-rotating outflow hydrocyclone based on response surface methodology [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(4): 19-23.
- [19] 张德胜, 梅剑, 赵睿杰, 等. 基于响应曲面法的氟塑料两相流泵优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(9): 898-903.
- ZHANG Desheng, MEI Jian, ZHAO Ruijie, et al. Response surface method-based optimization of impeller of fluoroplastic two-phase flow centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(9): 898-903.
- [20] 蒋登辉, 周佩剑, 王磊, 等. 基于响应曲面法的双叶片污水泵叶轮优化分析[J]. 水力发电学报, 2021, 40(11): 72-82.
- JIANG Denghui, ZHOU Peijian, WANG Lei, et al. Study on optimization method of two-blade sewage pump impellers based on response surface model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(11): 72-82.
- [21] 郭永胜, 王鹏, 袁寿其, 等. 基于曲面响应分析的混流式多级泵优化设计[J]. 流体机械, 2022, 50(8): 22-29.
- GUO Yongsheng, WANG Peng, YUAN Shouqi, et al. Optimization design of mixed flow multistage pump based on surface response analysis [J]. Fluid Machinery, 2022, 50(8): 22-29.

编辑 吴志力

第一作者简介:白健华,男,1978年出生,硕士,高级工程师,2019年毕业于西南石油大学油气田开发专业,现主要从事海上采油工艺技术方面研究。电话:022-66501152, Email: baijh@cnooc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局大厦B座,邮政编码:300459。