

基于响应面法的丢手释放接头优化设计*

OPTIMUM DESIGN IN RELEASING JOINT OF RELEASING TOOL BASED ON RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

万 锋**¹ 管 锋***¹ 王 琼²

(1. 长江大学 机械工程学院, 荆州 434023)

(2. 荆州市赛瑞能源技术有限公司, 荆州 434023)

WAN Feng¹ GUAN Feng¹ WANG Qiong²

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

(2. Sunrise Energy Technology Co., Ltd., Jingzhou 434023, China)

摘要 为优化丢手释放接头的结构强度和重量,提出以应力和质量为目标函数的多目标优化设计方法。将响应面设计方法与有限元数值分析结合,建立了应力和质量关于结构参数的响应面模型,分析了参数间的交互效应。基于响应面模型,通过多目标优化分析获得了释放接头的最佳结构参数配置。优化后的结构应力下降 19.5%,而质量增长较小。数值及实验验证表明,优化后的结构安全可靠。所提优化设计方法结合了响应面原理、有限元数值分析和实验测试,可为类似机械或工程结构的设计提供参考。

关键词 响应面法 数值模拟 参数化建模 结构优化

中图分类号 TE925

Abstract In order to optimize the structural strength and weight of the release joint, a multi-objective optimization design method with stress and mass as objective functions was proposed. In this paper, the response surface methodology combined with finite element numerical analysis was used to construct the response surface model of stress and mass respectively with respect to structural parameters, and the interaction between the parameters was analyzed. Based on the response surface models, the optimal structural parameter configuration of the release joint was obtained by multi-objective optimization analysis. The stress of the optimized structure decreased by 19.5% with a slight increase in mass. Numerical and experimental verification shows that the optimized structure is safe and reliable. The proposed design method, which combines the response surface methodology, finite element numerical analysis and experimental testing, can provide reference for the design of similar mechanical or engineering structures.

Key words Response surface methodology; Numerical simulation; Parametric modeling; Structural optimization

Corresponding author: GUAN Feng, E-mail: gf2123@163.com, Tel: +86-716-8062080, Fax: +86-716-8062080

The project supported by the National Science and Technology Major Project of China (No.2017ZX05070-005), and the Yangtze Youth Science and Technology Innovation Team Fund of Yangtze University (No.2016cqt01)

Manuscript received 20191008, in revised form 20191207.

引言

丢手工具是油气开采领域中的重要工具,具有实现封隔器、尾管等井下工具或管柱的送入及分离的功能,在尾管悬挂、负压射孔、压裂、卡堵、分层采用等完井和采油增产作业中起着至关重要的作用^[1-4]。丢手方式可分为机械式、液压式和机械-液压混合式,丢手

工具的性能直接决定着各项丢手作业的成功与否。若丢手失败,则需要重新起下管柱,影响作业效率^[5]。随着深井和水平井的发展,机械丢手问题突出,液压及混合式丢手逐渐成为应用主流。液压式及混合式丢手虽然应用广泛,但由于工具的常规设计方法不够精细,在作业过程中由长完井管柱重力和连接件变形等造成的丢手失败案例时有发生,给完井或采油作业的高效

* 20191008 收到初稿, 20191207 收到修改稿。国家科技重大专项 (2017ZX05070-005), 长江大学长江青年科技创新团队基金 (2016cqt01) 资助。

** 万 锋, 男, 1990 年 06 月生, 湖北京山人, 长江大学机械工程学院博士, 研究方向为石油矿场机械。

*** 管 锋 (通信作者), 男, 1976 年 10 月生, 青海西宁人, 长江大学机械工程学院教授、博导, 研究方向为石油机械计算机辅助设计及分析、海洋工程装备设计及分析。

顺利实施造成阻碍^[6-7]。

丢手释放接头是丢手工具连接被送入工具或管柱的核心受力零件,对其进行结构优化,有利于提升丢手工具的可靠性和作业的成功率。丢手释放接头的结构优化涉及强度、刚度和质量等多个目标的相互制约,结构响应与多个几何参数相关。对于复杂结构寻优问题,通过理论方法获得最优化结构十分困难,而根据经验设计所获得的结果往往又过于保守。因此,通过试验设计方法构建结构响应与自变量之间的响应面模型,并根据响应面模型和约束条件寻求结构最优解,为复杂结构的优化问题提供有效的解决方案^[8]。近年来,该方法在机械^[9-11]和结构工程^{[12][13] 262-277]}等领域的优化问题中广泛应用。尤其是随着有限元仿真技术的发展,通过有限元仿真取代实验室试验使得优化过程更加高效、经济^[14-16]。

本文基于响应面法和数值仿真对液压丢手释放接头结构参数进行了优化。通过 Box-Behnken 试验设计、参数化建模和试验分析,建立了关于应力和质量的响应面函数,并基于响应面函数对释放接头的结构参数进行了优化,有效降低了释放接头的应力水平和质量,优化方法可为其他复杂结构的优化提供参考。

1 释放接头物理模型

释放接头结构如图 1 所示,其左端与上连接件通过螺纹连接,右端通过剪切销钉挂住下连接件,释放接头与下连接件之间设置有 U 型导向槽。工作时,丢手工具携带下连接件送入到指定深度位置,进行坐封(固定)操作后,打压将销钉剪断,丢手工具与下部连接件完成脱开。

释放接头长度为 l_1 ,右端凸台长度为 l_2 ,释放接头内径为 r_1 ,凸台外径为 r_2 ,凸台厚度为 t ,凸台台阶高

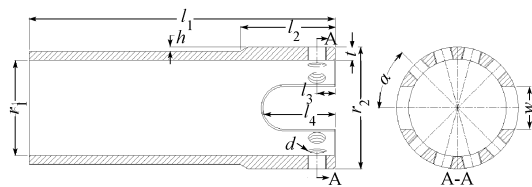


图 1 释放接头几何尺寸

Fig.1 Geometry of release joint

度为 h ,剪切销钉孔直径为 d ,销钉孔至右端面距离为 l_3 ,U 型导向槽宽度为 w ,导向槽长度为 l_4 ,最外侧销钉孔轴线与导向槽中心面夹角为 α 。释放接头的材料为 42CrMo,密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $E=212\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.28$,屈服强度为 930 MPa ,许用应力范围为 $186\text{ MPa}\sim 310\text{ MPa}$,根据工程实际,取安全系数为 3,对应的许用应力 $[\sigma]=310\text{ MPa}$ 。根据工程实际,释放接头配置的剪切销钉数量最多为 8,承受的最大拉力载荷为 356 kN 。考虑到与其他零件的配合关系,释放接头的内径、导向槽及销钉孔尺寸均为定值,剩余待优化的独立变量有 $l_1, l_2, l_3, t, h, \alpha$,初始方案的结构参数如表 1 所示。

运用 Abaqus 有限元软件进行试验仿真,以确定结构的质量和在额定载荷下的应力状况。为保证分析结果的精确性,对结构有限元模型进行了网格收敛性分析。分别对模型划分不同的网格尺寸并进行分析,模型单元数量的变化范围为 $444\sim 20\ 860$ 。表 2 反映了结构应力随单元数量增加的变化情况,当模型单元数量达到 4 396 后,继续细化网格,应力变化范围较小,即网格精度的继续增加对计算结果影响较小,故有限元模型取 4 396 单元数量对应的网格尺寸。有限元分析结果如图 2 所示,初始方案的结构应力为 382.6 MPa ,大于许用应力 310 MPa ,结构有进一步优化的空间。

表 1 初始设计尺寸和响应值

Tab.1 Initial design dimensions and response values

t/mm	l_2/mm	l_3/mm	$\alpha/(\text{ }^\circ)$	l_1/mm	h/mm	$\alpha/(\text{ }^\circ)$	应力 Stress S/MPa	质量 Mass M/kg
8	75	16	40.5	200	0.8	40.5	382.6	1.51

表 2 网格无关性验证

Tab.2 Grid independence verification

单元数量 Number of element	444	1 262	2 176	4 396	11 408	20 860
应力 Stress S/MPa	289.5	336.3	354.2	382.6	388.6	393

2 响应面模型

2.1 响应面法

响应面法(Response Surface Methodology)是通过试验设计方法确定设计点集合并展开试验,运用数理统计手段探索设计变量和响应值之间关系,得到目标

函数和约束函数的响应面模型,来预测非试验点响应值的方法^[17]。对具有 n 个设计变量和相应响应的输入-输出数据对,其响应和输入变量之间的函数关系以矩阵形式表述为

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (1)$$

其中, y 为响应, X 为设计变量, β 为回归系数,通过最

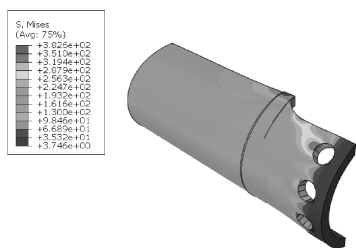


图2 初始方案结构应力云图

Fig.2 The structural stress nephogram of initial design

小二乘法确定, ε 为误差项。

研究中,通常采用二阶模型构建响应面模型,其表达式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \quad (2)$$

2.2 数值模拟试验设计

释放接头的质量和在载荷作用下的应力涉及到的结构尺寸较多,除去因配合关系需要固定的尺寸外,本文选取释放接头长度 l_1 , 右端凸台长度 l_2 , 销钉孔至右端面距离 l_3 , 凸台厚度 t , 凸台台阶高度 h 和最外侧销钉孔轴心线与导向槽中心面夹角 α 等 6 个结构参数作为设计变量,各因素水平设置如表 3 所示。基于 Design-Expert 试验设计平台,运用 Box-Behnken 设计方法 (BBD) 开展 6 因素 3 水平响应面试验设计,试验方案共包括 54 组实验。根据试验方案所提供的不同结构设计参数组合,利用 Abaqus 软件结合 Python 语言快速建立释放接头有限元模型并开展仿真试验,相应的应力 S 和质量 M 响应分析结果记录于表 4。

表3 设计变量水平分布

Tab.3 Levels distribution of design variables

设计变量 Design variable	代码 Code	-1	0	1
t/mm	A	8	12	16
l_2/mm	B	70	75	80
l_3/mm	C	12	16	20
$\alpha/(\circ)$	D	40	45	50
l_1/mm	E	200	250	300
h/mm	F	0.5	1.5	2.5

2.3 响应面模型建立

采用逐步回归方法对试验数据进行多项式拟合,建立应力和质量响应关于设计参数的响应面模型。运用统计方法对所建立的响应面模型、回归方程中的各项显著性以及拟合效果进行检验。表 5 和表 6 分别总结了应力和质量响应面模型对应的方差分析和显著项。

表4 试验设计和仿真结果

Tab.4 Experiment design and simulation results

序号 No.	A	B	C	D	E	F	应力 Stress S/MPa	质量 Mass M/kg
1	8	70	16	40	250	1.5	402.9	1.75
2	16	70	16	40	250	1.5	169.1	4.18
3	8	80	16	40	250	1.5	385.9	1.77
4	16	80	16	40	250	1.5	167.4	4.2
5	8	70	16	50	250	1.5	389.5	1.75
6	16	70	16	50	250	1.5	186.5	4.18
7	8	80	16	50	250	1.5	381.2	1.77
8	16	80	16	50	250	1.5	185.3	4.2
9	12	70	12	45	200	1.5	233.8	2.3
10	12	80	12	45	200	1.5	230.3	2.32
11	12	70	20	45	200	1.5	236.1	2.3
12	12	80	20	45	200	1.5	232.3	2.32
13	12	70	12	45	300	1.5	233	3.53
14	12	80	12	45	300	1.5	229.5	3.55
15	12	70	20	45	300	1.5	254.1	3.53
16	12	80	20	45	300	1.5	231.4	3.55
17	12	75	12	40	250	0.5	225	3.16
18	12	75	20	40	250	0.5	225.5	3.16
19	12	75	12	50	250	0.5	256	3.16
20	12	75	20	50	250	0.5	255.2	3.16
21	12	75	12	40	250	2.5	244.1	2.7
22	12	75	20	40	250	2.5	240.9	2.7
23	12	75	12	50	250	2.5	268.3	2.7
24	12	75	20	50	250	2.5	252.1	2.7
25	8	75	16	40	200	1.5	401.5	1.4
26	16	75	16	40	200	1.5	168.7	3.31
27	8	75	16	50	200	1.5	389.9	1.4
28	16	75	16	50	200	1.5	185.6	3.31
29	8	75	16	40	300	1.5	391.9	2.13
30	16	75	16	40	300	1.5	168.2	5.07
31	8	75	16	50	300	1.5	384.6	2.13
32	16	75	16	50	300	1.5	185.7	5.07
33	12	70	16	45	200	0.5	227.7	2.48
34	12	80	16	45	200	0.5	226.6	2.48
35	12	70	16	45	300	0.5	226.7	3.83
36	12	80	16	45	300	0.5	225.9	3.84
37	12	70	16	45	200	2.5	244.2	2.13
38	12	80	16	45	200	2.5	237.7	2.16
39	12	70	16	45	300	2.5	243.2	3.23
40	12	80	16	45	300	2.5	236.5	3.26
41	8	75	12	45	250	0.5	355.1	1.98
42	16	75	12	45	250	0.5	171.5	4.44
43	8	75	20	45	250	0.5	352.5	1.98
44	16	75	20	45	250	0.5	171	4.44
45	8	75	12	45	250	2.5	401	1.55
46	16	75	12	45	250	2.5	178.9	3.94
47	8	75	20	45	250	2.5	391.1	1.55
48	16	75	20	45	250	2.5	179.1	3.94
49	12	75	16	45	250	1.5	232.4	2.93
50	12	75	16	45	250	1.5	232.4	2.93
51	12	75	16	45	250	1.5	232.4	2.93
52	12	75	16	45	250	1.5	232.4	2.93
53	12	75	16	45	250	1.5	232.4	2.93
54	12	75	16	45	250	1.5	232.4	2.93

表 5 应力 S 响应面模型方差分析表Tab.5 Analysis of variance table for stress S response surface model

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	均方差 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	293.900	10.886.05	205.5	<0.000 1
A	262.500	262.500	4.955.8	<0.000 1
B	245.76	245.76	4.64	0.040 7
D	691.23	691.23	13.05	0.001 3
F	1.640.11	1.640.11	30.96	<0.000 1
AD	711.56	711.56	13.43	0.001 1
AF	595.13	595.13	11.23	0.002 5
A^2	16.615.24	16.615.24	313.65	0.000 1
D^2	1.256.86	1.256.86	23.73	0.000 1
残差 Residual	1.377.3	52.97		
总和 Cor total	295.300			

编码因子形式的应力响应面函数
Stress response surface function in terms of coded factors

相关系数 R -squared	0.995 3	$S = 232.4 - 104.59A - 3.2B - 0.22C + 5.37D - 0.15E + 8.27F + 2.8AB + 1.53AC + 6.67AD + 1.81AE - 8.63AF - 2.44BC + 1.15BD - 1.18BE - 1.41BF - 1.79CD + 2.34CE - 1.61CF + 0.61DE - 3.16DF - 0.062EF + 40.19A^2 - 0.17B^2 + 1.97C^2 + 11.05D^2 + 0.87E^2 + 0.47F^2$
修正系数 Adj R -squared	0.990 5	
预测相关系数 Pred R -squared	0.975 6	
信噪比 Adeq precision	44.753	

表 6 质量 M 响应面模型方差分析表Tab.6 Analysis of variance table for mass M response surface model

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	均方差 Mean square	F 值 Value F	P 值 Value P
模型 Model	46.35	1.72	1.006×10^5	<0.000 1
A	35.33	35.33	2.07×10^6	<0.000 1
B	2.204×10^{-3}	2.204×10^{-3}	129.15	<0.000 1
E	9.14	9.14	5.355×10^5	<0.000 1
F	1.28	1.28	75.198.59	<0.000 1
AE	0.53	0.53	31.079.89	<0.000 1
AF	2.45×10^{-3}	2.45×10^{-3}	143.55	<0.000 1
BF	3.125×10^{-4}	3.125×10^{-4}	18.31	0.000 2
EF	0.033	0.033	1.904.96	<0.000 1
A^2	0.024	0.024	1.383.7	<0.000 1
B^2	1.143×10^{-4}	1.143×10^{-4}	6.7	0.015 6
残差 Residual	4.437×10^{-4}	1.707×10^{-5}		
总和 Cor total	46.36			

编码因子形式的质量响应面函数
Mass response surface function in terms of coded factors

相关系数 R -squared	1	$M = 2.93 + 1.21A + 9.583 \times 10^{-3}B + 0.62E - 0.23F + 0.26AE - 0.018AF + 6.25 \times 10^{-4}BE + 6.25 \times 10^{-3}BF - 0.064EF + 0.048A^2 - 3.333 \times 10^{-3}B^2 - 8.333 \times 10^{-4}C^2 + 4.167 \times 10^{-4}D^2 - 8.333 \times 10^{-4}E^2 + 4.167 \times 10^{-4}F^2$
修正系数 Adj R -squared	1	
预测相关系数 Pred R -squared	0.999 99	
信噪比 Adeq precision	1.230.595	

由表 5 和表 6 可知, P 值均小于 0.000 1, 表明两个模型均显著, 并且只有 0.01% 的概率是因为噪声而引起这样的 F 值。两模型的预测相关系数和修正相关系数之间的差异均小于 0.2, 具有合理的一致性。信噪比远大于 4, 表明模型在设计区域内是适用的。

图 3 和图 4 展示了释放接头应力和质量的真实值与预测值之间的关系。图片显示, 应力和质量的值基本落在预测结果的最佳拟合线上, 每个响应的预测残差很小, 表明所建立的响应面模型是合格的。

3 因素分析

3.1 结构参数对应力响应的影响

图 5 展示了凸台厚度 t 与夹角 α 的交互作用, 由图可知增大凸台厚度会明显降低应力, 并且当夹角 α 为较小值时(下面一条曲线), 凸台厚度的影响力越显著。而增大夹角 α 会使应力升高。图 6 为凸台厚度 t 与凸台台阶高度 h 的交互作用, 曲线显示增大凸台台阶高度 h 将会使结构应力升高, 且使得凸台厚度 t 对应力的影响更加强烈。

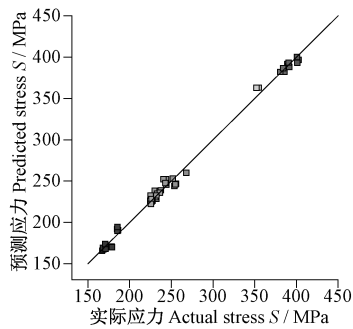


图3 应力散点图

Fig.3 Stress scatter diagram

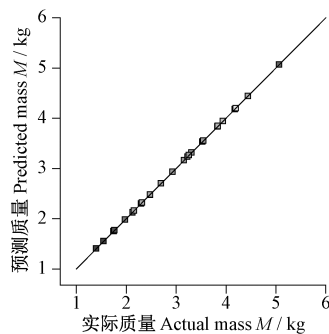


图4 质量散点图

Fig.4 Mass scatter diagram

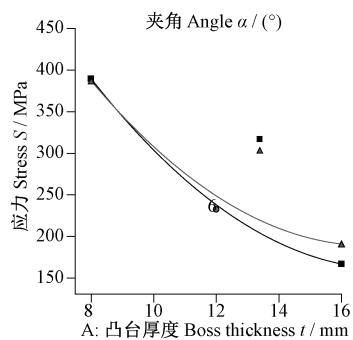
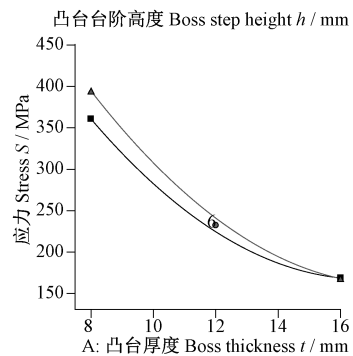
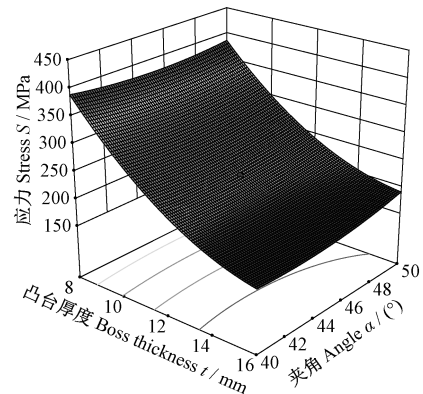
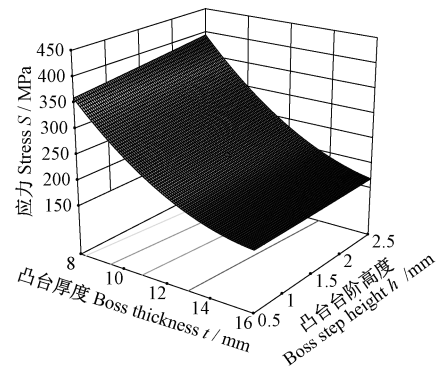
图5 凸台厚度 t 与夹角 α 对应力响应的交互作用Fig.5 The interaction of boss thickness t and angle α on stress response图6 凸台厚度 t 与凸台台阶高度 h 对应力响应的交互作用Fig.6 The interaction of boss thickness t and boss step height h on stress response

图7和图8分别是应力关于 t - α 以及 t - h 的响应面,由图可知较大的凸台厚度 t 值搭配较小的夹角 α 和凸台台阶高度 h 有利于降低结构应力。

图7 应力关于凸台厚度 t 和夹角 α 的响应面Fig.7 The response surface of stress about the boss thickness t and angle α 图8 应力关于凸台厚度 t 和凸台台阶高度 h 的响应面Fig.8 The response surface of stress about the boss thickness t and boss step height h

3.2 结构参数对质量响应的影响

图9中的因素扰动图表明,质量响应主要依赖于凸台厚度 t 、释放接头长度 l_1 和凸台台阶高度 h 。

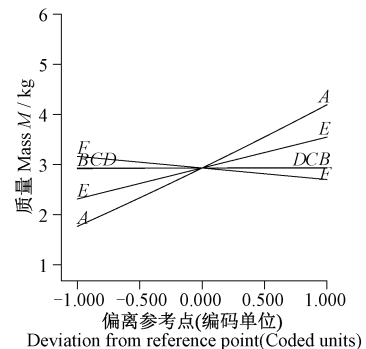


图9 质量响应的设计参数扰动图

Fig.9 Perturbation diagram of design parameters for mass response

$t-l_1$ 和 $t-h$ 对质量响应的交互作用效应如图 10 和图 11 所示。由 F 值可知, l_1-h 交互效应远小于前面两组参数, 此处不加讨论。如图 10 所示, 凸台厚度 t 和释放接头长度 l_1 的增大都会导致结构的质量显著增加。而任一参量的变化都会使得另一参量对质量响应的影响更加显著。凸台厚度 t 和凸台台阶高度 h 也体现出相似的交互作用效应, 如图 11 所示。不同之处在于 $t-l_1$ 的交互作用不如 $t-h$ 明显, 从两组参量的质量响应也可得出相同的结论, 如图 12 和图 13 所示。较小的质量响应在凸台厚度 t 和释放接头长度 l_1 取小值, 而凸台台阶高度 h 取较大值时取得。

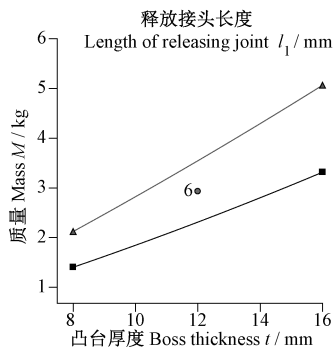


图 10 凸台厚度 t 与释放接头长度 l_1 对质量响应的交互作用

Fig.10 The interaction of boss thickness t and the length of releasing joint l_1 on mass response

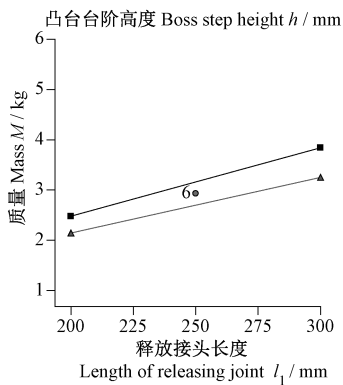


图 11 释放接头长度 l_1 与凸台台阶高度 h 对质量响应的交互作用

Fig.11 The interaction of length of releasing joint l_1 and boss step height h on mass response

4 基于响应面函数的结构优化

为了减轻结构重量, 并满足结构强度要求, 同时对质量和应力进行优化。该问题的数学模型可表述为如下形式

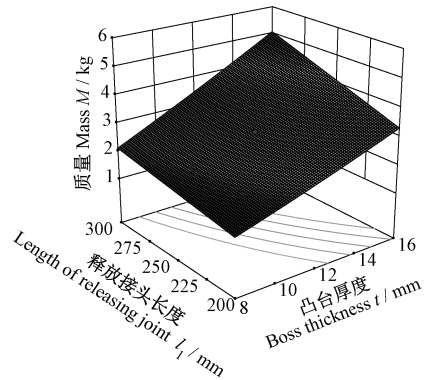


图 12 质量关于凸台厚度 t 和释放接头长度 l_1 的响应面

Fig.12 The response surface of mass about boss thickness t and length of releasing joint l_1

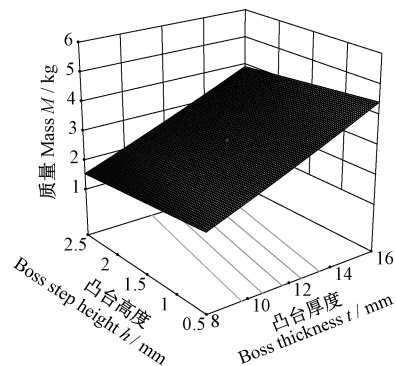


图 13 质量关于凸台厚度 t 和凸台台阶高度 h 的响应面

Fig.13 The response surface of mass about boss thickness t and boss step height h

$$\begin{cases} \min y_1 = M(x) \\ \min y_2 = S(x) \\ x^L \leq x \leq x^U \end{cases} \quad (3)$$

其中, $S(x)$ 为关于设计参数的应力响应面函数, $M(x)$ 为质量响应面函数, $x^L = (x_1^L, x_2^L, \dots, x_k^L)$ 和 $x^U = (x_1^U, x_2^U, \dots, x_k^U)$ 分别为结构设计参数的上下边界。

基于 Design-Expert 软件, 采用满意度法对式 (3) 描述的问题进行优化, 该方法将多个待优化目标转化为一个无量纲的整体满意度函数 D , 优化过程即寻找出使得满意度函数最大化的一个或多个设计变量的组合^{[13]262-277}。整体满意度函数为各响应的几何平均, 其表达式为

$$D = \left(\prod_{i=1}^m d_i \right)^{1/m} \quad (4)$$

其中, m 为响应数量, d_i 为第 i 个响应的满意度函数, d_i 的值随着响应值的增大由 0 逐渐增大到 1。本文中质量和应力优化均为望小特性响应, 其满意度函数为公式 (5), wt_i 决定着满意度函数的形状^[18]

$$d_j(Y_i(X)) = \begin{cases} 1 & Y_i \leq Y_j^{\min} \\ \left[\frac{Y_j^{\max} - Y_i(X)}{Y_j^{\max} - Y_j^{\min}} \right]^{w_i} & Y_j^{\min} \leq Y_i(X) \leq Y_j^{\max} \\ 0 & Y_i(X) \geq Y_j^{\max} \end{cases}$$

(5)

其中, $Y_j^{\max}$ 和 $Y_j^{\min}$ 分别为上、下界。
本文以结构变量为约束条件,质量和应力最小化为优化目标,寻求释放接头的最佳结构配置,相应的优化参数设置如表 7 所示。着重考虑质量最小化,其权值和重要性分别设置成 5 和 4。

表 7 优化参数设置
Tab.7 The settings of optimize parameter

变量 Variable	目标 Goal	下限 Lower limit	上限 Upper limit	权值 Weight	重要性 Importance
t	在范围内 In range	-1	1	1	3
l_2	在范围内 In range	-1	1	1	3
l_3	在范围内 In range	-1	1	1	3
α	在范围内 In range	-1	1	1	3
l_1	在范围内 In range	-1	1	1	3
h	在范围内 In range	-1	1	1	3
应力 Stress S /MPa	最小化 Minimize	167. 4	402. 9	1	3
质量 Mass M /kg	最小化 Minimize	1. 4	5. 07	5	4

优化后的最佳结构配置以及响应值如表 8 所示。由表可知,新结构对应的应力为 308. 2 MPa,质量为 1. 65 kg。为验证优化结果的准确性,将优化后的结构参数导入 Abaqus 软件建立释放接头模型,并分析有限元分析获得的应力和质量分别为 308 MPa,质量为

1. 65 kg,与响应面模型优化结果吻合较好,应力图如图 14 所示。表 8 同时列出了初始方案的结构参数和应力、质量响应,对比有限元分析结果可知优化后结构应力下降 19. 5%,质量仅增加 0. 14 kg,约 9. 3%,不难发现优化效果明显。

表 8 优化前后变量和响应
Tab.8 Before and after optimization design variables and responses

设计方案 Design scheme	t /mm	l_2 /mm	l_3 /mm	α / (°)	l_1 /mm	h /mm	应力 Stress S /MPa	质量 Mass M /kg
优化后 Optimized	9. 78	80	20	45. 15	200	2. 5	308. 2	1. 65
初始方案 Initial design	8	75	16	40. 5	200	0. 8	382. 6	1. 51

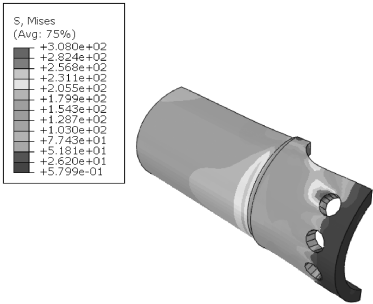


图 14 优化后结构应力云图
Fig.14 The structural stress nephogram of optimized design

为验证优化后结构方案的可行性,对表 8 中参数进行圆整,分别取为 $t = 10\text{ mm}$, $l_2 = 80\text{ mm}$, $l_3 = 20\text{ mm}$, $\alpha = 45^\circ$, $l_1 = 200\text{ mm}$, $h = 2.5\text{ mm}$ 。根据圆整后的结构参数,制造释放接头样品,进行剪断销钉室内试验,试验结果表明释放接头能实现剪断销钉的功能,并且其强度满足要求。图 15 为试验后的释放接头及销钉。

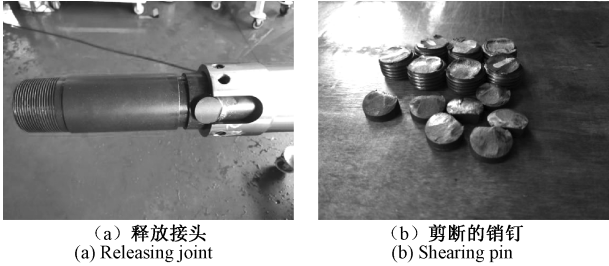


图 15 销钉剪切试验
Fig.15 The pins shear test

5 结论

基于响应面法与数值分析、实验测试相结合的优化方法,对丢手释放接头进行了结构优化,取得了较好的优化效果,该优化方法可为机械零部件或结构的优化工作提供参考。通过研究,本文得出如下结论:

1) 本文采用 Box-Behnken 设计方法获得了响应面试验设计方案,通过有限元仿真试验得到了各组试验方案对应的应力值及质量响应,并建立了释放接头应

力值及质量关于结构设计参数的响应面模型。

2) 应力响应和质量响应存在着矛盾对立关系。对应力响应而言, 凸台厚度 t 、夹角 α 和凸台台阶高度 h 的影响较大, 且存在交互效应。增大 t , 减小 α 和 h 有利于降低结构应力。质量响应主要受到凸台厚度 t 、释放接头长度 l_1 和凸台台阶高度 h 及其交互效应的影响。减小 t 和 l_1 , 增大 h 有利于减轻结构质量。

3) 基于结构应力和质量响应面模型, 在约束应力状态下对结构质量进行优化求解, 获得了最优结构参数组合, 并通过数值仿真和实验测试对优化方案的可靠性进行了验证。

参考文献 (References)

- [1] 王玲玲, 肖国华, 陈 雷, 等. JDY455 可取式多用途丢手封隔器的研制[J]. 石油机械, 2015, 43(10): 93-95.
WANG LingLing, XIAO GuoHua, CHEN Lei, et al. JDY455 retrievable multipurpose releasing packer [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(10): 93-95 (In Chinese).
- [2] 郭朝辉, 徐明会, 孙文俊. 巴基斯坦 UEP 油田牵制型旋转尾管固井关键技术[J]. 钻采工艺, 2018, 41(6): 30-33.
GUO ZhaoHui, XU MingHui, SUN WenJun. Key issues of liner cementing using rotating liner hanger with hold-down sub in UEP oilfield of PAKISATN [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(6): 30-33 (In Chinese).
- [3] 马荣兰, 马开华, 郭朝辉, 等. 旋转尾管悬挂器的研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 103-106.
MA RongLan, MA KaiHua, GUO ZhaoHui, et al. Development and application of rotary liner hanger [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 103-106 (In Chinese).
- [4] 孙文俊, 候乃贺, 李富平, 等. 筛管液压丢手装置的研制与应用[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(3): 118-121.
SUN WenJun, HOU NaiHe, LI FuPing, et al. Development and application of hydraulic releasing device for screen pipe [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 118-121 (In Chinese).
- [5] 张 斌, 左 凯, 包陈义, 等. 尾管送入导向接头的研制与应用[J]. 石油机械, 2018, 46(11): 10-15.
ZHANG Bin, ZUO Kai, BAO ChenYi, et al. Design and application of guiding joint for liner running [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(11): 10-15 (In Chinese).
- [6] 郑瑞强. 球挂式液压丢手工具失效原因及解决措施[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(5): 72-75.
ZHENG RuiQiang. Failure cases and solution of ball hanging type hydraulic releasing tool [J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(5): 72-75 (In Chinese).
- [7] 廖前华, 于小龙, 刘禹铭, 等. 新型导向液压丢手工具的研制及应用[J]. 石油机械, 2011, 39(3): 45-46.
LIAO Qian Hua, YU XiaoLong, LIU YuMing, et al. Development and application of a new-type navigational and hydraulic releasing tool [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(3): 45-46 (In Chinese).
- [8] 陈洪武, 田 铖, 彭聪聪, 等. 基于响应面法的桁架结构优化设计[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(1): 48-51.
CHEN HongWu, TIAN Cheng, PENG CongCong, et al. Truss structure optimization design based on response surface method [J]. Machine Design and Research, 2016, 32(1): 48-51 (In Chinese).
- [9] 熊 攀, 鄢曙光, 刘玮寅. 基于响应曲面法的旋风分离器结构优化[J]. 化工学报, 2019, 70(1): 154-160.
XIONG Pan, YAN ShuGuang, LIU WeiYin. Structure optimization of cyclone based on response surface method [J]. CIESC Journal, 2019, 70(1): 154-160 (In Chinese).
- [10] 何 畏, 沈平生, 李华川, 等. 基于响应面法的牙轮钻头球面浮动套优化设计[J]. 机械强度, 2018, 40(2): 338-343.
HE Wei, SHEN PingSheng, LI HuaChuan, et al. Optimization of the cone bit of spherical floating sleeve based on response surface methodology [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(2): 338-343 (In Chinese).
- [11] 弓海霞, 刘 哲, 王立权, 等. 转动式对接裙壳体关键参数多目标优化与试验样机研制[J]. 机械强度, 2018, 40(3): 626-631.
GONG HaiXia, LIU Zhe, WANG LiQuan, et al. Multi-objective optimization of shell key parameters of rotating butt skirt and prototype development [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(3): 626-631 (In Chinese).
- [12] Baroutaji A, Gilchrist M D, Smyth D, et al. Analysis and optimization of sandwich tubes energy absorbers under lateral loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 82(8): 74-88.
- [13] Baroutaji A, Morris E, Olabi A G. Quasi-static response and multi-objective crashworthiness optimization of oblong tube under lateral loading [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82(9): 262-277.
- [14] 陈洪武, 田 铖, 彭聪聪. 基于 Box-Behnken 法的曲柄结构优化设计[J]. 机械强度, 2017, 39(5): 1220-1223.
CHEN HongWu, TIAN Cheng, PENG CongCong, et al. Optimal design of crank based on box-behnken method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(5): 1220-1223 (In Chinese).
- [15] 郑 彬, 张敬东. 基于响应面法的龙门加工中心回转工作台结构优化设计[J]. 机械强度, 2018, 40(5): 1131-1137.
ZHENG Bin, ZHANG JingDong. Structure optimization design for the rotary worktable of gantry machining center based on response surface methodology [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(5): 1131-1137 (In Chinese).
- [16] 张学刚. 一种改进响应面法结构可靠度计算方法[J]. 机械强度, 2018, 40(6): 1382-1388.
ZHANG XueGang. Structural reliability analysis based on an improvement of the response surface method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(6): 1382-1388 (In Chinese).
- [17] 姜 衡, 管贻生, 邱志成, 等. 基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 125-133.
JIANG Heng, GUAN YiSheng, QIU ZhiCheng, et al. Dynamic and static multi-objective optimization of a vertical machining center based on response surface method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 125-133 (In Chinese).
- [18] Jeong I J, Kim K J. Interactive desirability function approach to multi-response surface optimization [J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2003, 10(2): 205-217.