

文章编号:1005-9865(2019)05-0118-09

深海立管相互碰撞的响应面法研究

张火明¹, 余润梁¹, 陆萍蓝², 孔令滨¹, 管卫兵³

(1. 中国计量大学 浙江流量计量技术重点实验室, 浙江 杭州 310018; 2. 中国计量大学 工程训练中心, 浙江 杭州 310018; 3. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘 要:针对深海立管在理想环境和外部水环境中发生碰撞的情况,从立管碰撞最大径向位移和应力峰值两方面展开研究,充分利用 ABAQUS 仿真得到的数据,基于数值模拟和回归分析,提出四因素三水平的立管碰撞响应面分析方法。采用 Design-Expert 软件的 BOX 设计,对立管的非线性碰撞过程中的碰撞应力峰值和最大径向位移等两个试验指标进行回归分析并分别建立二次响应面回归模型。通过将响应面分析所得最优化解与有限元计算结果的对比,最终验证了响应面分析方法及所得模型的准确性。

关键词:深海立管;相互碰撞;响应面方法;试验指标

中图分类号:P751 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2019.05.013

Study on response surface method for mutual collision of deep-sea risers

ZHANG Huoming¹, YU Runliang¹, LU Pinglan², KONG Lingbin¹, GUAN Weibing³

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Flow Measurement Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. Engineering Training Center, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 3. Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In view of the collision of the deep sea riser in the ideal environment and the external water environment, the research on the maximum radial displacement and stress peak of the riser collision was carried out, and the data obtained by the ABAQUS simulation were fully utilized. Based on numerical simulation and quadratic regression analysis, a response surface analysis method of riser collision was proposed, including four factors and three levels. For the nonlinear collision procedure of risers, the BOX-Behnken design method of Design-Expert software was used for response surface analysis between experimental factors and indexes. Through the work above, the response surface models were obtained. Ultimately, the response surface analysis method and the resulting models were validated by comparison with the results of the finite element calculation.

Keywords: deep sea risers; collision with each other; response surface analysis method; test index

立管间的相互碰撞是一个高度复杂的非线性接触过程^[1]。随着科学技术的进步以及工程实际需求,对立管碰撞的研究方法也在不断的完善和改进。最初的研究是从模型试验开始的^[2],接下来,由于计算机技术的不断发展以及 SESAM、ANSYS 等一系列仿真软件功能的逐步完善,数值方法成为了立管碰撞研究的重要手段。闫岩等^[3]对 TTR 和 SCR 立管的碰撞过程进行了整体模拟和局部碰撞分析;通过整体模拟,分别得到影响 TTR 和 SCR 立管碰撞速度的敏感性因素;而通过局部碰撞分析,得到了立管的实际弯曲和碰撞角度

收稿日期:2018-11-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1404200);浙江省自然科学基金项目(LY19E090004, Y13F020140);浙江省教育厅科研项目(Y201738206);卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金资助项目(SOED1706)

作者简介:张火明(1976-),男,湖北武穴人,副教授,主要从事海洋工程流体力学研究。E-mail:zhm102018@163.com

两因素对立管碰撞过程的影响。陈云水和王德禹^[4]采用有限元软件 ABAQUS 对 Spar 平台中立管碰撞过程进行研究,得到了不同内压、夹角以及碰撞速度条件下立管的碰撞响应特性,并通过显式方法求出了碰撞力和应力的最大解析解。由于深水立管分析的复杂性以及对计算精度的要求,目前对立管碰撞的研究普遍采用模型试验与数值模拟相结合的方法^[5]。

近年来,由于深海平台及其配套立管系统的优化设计和疲劳可靠性分析的需要,响应面分析法等最优化方法也被广泛应用在深海工程领域当中,桂劲松和康海贵^[6]提出了 RBF 神经网络响应面法,用于海洋平台等大型复杂海洋工程结构的可靠性计算分析;张晓莹等^[7]应用响应面法建立涡激振动疲劳安全系数与极限状态方程关系,研究疲劳安全系数对结构可靠性的影响,并分析了各随机变量的灵敏度;畅元江等^[8]在考虑海况随机性、结构随机性以及作业参数随机性的情况下,采用梯度投影确定取样点的响应面法,建立了 TLP 串行立管系统的结构极限状态方程,并在建立立管可靠性分析模型的基础上,确定一种立管可靠度计算方法;挪威船级社(简称 DNV)基于有限元仿真的结果,利用响应面法得到了立管碰撞应力峰值的响应面模型^[9],即:

$$\Delta\sigma \propto (U_{rel}, \theta) \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma$ 表示碰撞应力峰值, U_{rel} 和 θ 分别表示碰撞速度和碰撞角度。可知 DNV 提出的应力峰值响应面是基于速度和角度二因素的二次曲面。

在 DNV 所得的立管碰撞应力峰值响应面模型的基础上,吴天龙^[10]考虑了内压对碰撞应力响应特性的影响,采用 Design-Expert 的 BBD 方法建立了三因素三水平的立管碰撞应力响应面模型,若用 p 表示内压,则有:

$$\Delta\sigma \propto (U_{rel}, \theta, p) \quad (2)$$

吴天龙的研究中,并未将立管的摩擦系数纳入碰撞应力响应面模型。在实际碰撞过程中,立管表面相互接触产生摩擦力,摩擦力的存在对碰撞结果会产生一定的影响,为了全面和系统地研究各因素对碰撞结果的影响,在上述研究的基础上,自变量增加了摩擦系数一项,并将立管的最大径向位移也作为响应量(试验指标)。下文基于有限元计算结果和二次回归分析,采用 Design-Expert 软件的 BOX 设计对上述两个试验指标进行回归分析并分别建立了相应的二次响应面回归模型。通过二次拟合得到了试验指标最大值出现的条件,并将所得最优化解与有限元计算结果作对比,最后对响应面分析方法及最终模型的准确性进行了验证。

1 响应面分析理论

1.1 响应面及响应面分析法

设变量 y 与自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 之间存在某种关联,并可表示如下:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (3)$$

根据上式,可以知道变量 y 与自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 之间的具体关系,变量 y 与自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 之间的这一函数关系式就称之为响应面。本文将立管碰撞结果影响因素的取值固定在一定数值范围内,根据式(3)建立立管碰撞结果与影响因素之间的响应面模型。

基于响应面的概念,数学家 Box 和 Wilson^[11]于 1951 年提出了响应面分析法(response surface methodology, 简称 RSM)。响应面分析法需要事先进行合理的试验设计,并通过具体的试验或数值计算得到相应数据,然后采用多元二次回归方程来拟合因素(也称自变量)和响应量之间的函数关系式。响应面分析法的本质仍是一种对多变量的最优化分析法,但是与其它基于统计学原理的最优化方法不同的是,通过响应面法可以得到更为直观的图形,进而能够凭直觉观察其最优化点和优化区域。

1.2 二次回归方程及其正交组合设计

选取样本点进行试验,由试验数据确定回归方程并检验,通过回归方程进行最优化分析。回归方程的次数是由试验因素及指标之间关系的复杂程度所决定的,诸如立管碰撞等复杂的非线性响应过程,此时建立一元回归方程的显著性检验往往达不到要求,故需要建立二次甚至更高次数的回归方程。尝试采用多元二次回归方程建立立管碰撞的响应面模型,其一般形式可表示为:

$$\hat{y} = a + \sum_{j=1}^m b_j x_j + \sum_{k < j} b_{kj} x_k x_j + \sum_{j=1}^m b_{jj} x_j^2, \quad k = 1, 2, \dots, m-1 (j \neq k) \quad (4)$$

式中: $a, \{b_j\}, \{b_{kj}\}, \{b_{jj}\}$ 为回归系数, 此时方程的总项数为:

$$1 + m + m(m - 1)/2 + m = \frac{(m + 1)(m + 2)}{2} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \bar{y} \\ b_j = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^n z_{ji}^2}, j = 1, 2, \dots, m \\ b_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^n (z_k z_j)_i y_i}{\sum_{i=1}^n (z_k z_j)_i^2}, j > k, \quad k = 1, 2, \dots, m - 1 \\ b_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{z}_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^n (\dot{z}_{ji})^2} \end{array} \right. \quad (6)$$

要对方程的回归系数进行估值, 则需要的试验次数 $n \geq [(m + 1)(m + 2)]/2$; 而为了计算出二次回归方程的各个系数, 每个试验因素至少应取 3 个水平, 然后通过二次回归正交试验即可对回归系数进行求解, 具体计算公式如式(6); 此外, 为提高回归模型的显著性, 往往会在正交回归试验的基础上再增加部分特定试验点形成新的试验方案, 此即为二次回归正交组合设计。

多元二次回归方程的总平方和及其自由度如式(7)所示, 该式可用于本文中的平方和及自由度计算。

$$S_T^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2, \quad f_T = n - 1 \quad (7)$$

回归方程及其各组成项的显著性水平可以通过 p -value (p 值) 来确定, 该值可以在 Design-Expert 软件中直接得到。当 $p \leq 0.01$ 时, 回归方程或该项极显著; 若 $0.01 < p \leq 0.05$, 回归方程或该组成项达到了显著水平; 若 $p > 0.05$, 该项对 y 影响不显著, 一般应去掉该项, 重新对回归模型进行修正。

根据编码公式或二次项的中心化公式, 可以将 z_i, x_i 与试验指标 y 之间的回归关系式转换为试验因素 x_i 与试验指标 y 之间的回归关系式。此外, 通过求极值的必要条件可以对最优化试验因素的组合进行求解, 如下式所示:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial y}{\partial x_3} = 0, \dots \quad (8)$$

2 立管碰撞响应面分析

2.1 有限元模型

根据 DNV-RP-F203^[9] 规范中对立管局部碰撞分析的要求, 降低边界条件对碰撞结果的影响, 选取深海顶张力立管 (即 TTR) 的一段裸管进行研究, 该段立管的长度为 9.0 m, 立管的内、外直径分别设为 0.26 m 和 0.3 m, 管壁厚度取为 0.02 m, 两立管圆心距离为 0.62 m。由参与质量法^[12] 可知, 立管参与碰撞的区域实际只占全长的一小段。Li 和 Morrison^[13] 提出了一种用于求解立管参与碰撞长度的计算公式, 如式(9)所示, 由此可求出参与碰撞的立管长度约为 2.0 m, 根据参与碰撞的立管长度, 以两立管中心横截面为界上下各取 1 m 作为碰撞位置, 并对该区域网格进行加密。

$$L = 2.7 \left(\frac{EI}{k_c} \right) \quad (9)$$

式中: L 表示立管参与碰撞的长度, EI 为立管截面的弯曲刚度; 而 k_c 表示立管的接触刚度, 其计算公式如式(10)所示, 式中 D 和 t 则分别表示立管的等效外径和壁厚。

$$k_c = \frac{2}{3} \frac{32\pi}{(3\pi - 8)} E \left\{ \left(\frac{\bar{D}_1}{t_1} \right)^3 + \left(\frac{\bar{D}_2}{t_2} \right)^3 \right\}^{-1} \quad (10)$$

采用 ABAQUS 软件的 ABAQUS/Explicit 分析模块,选用显示动态分析步,计算总时长设置为 0.06 s,最大时间增量取 0.001,定义相互作用并施加载荷,接触类型为全局接触,立管间的碰撞接触通过设置摩擦系数实现,对于两立管边界条件的设置,其中一根定义为被撞击管,对其上下边界处理为刚性固支;而另一根则定义为运动管,对此则需施加沿轴向的初始速度,立管的碰撞角度取两立管在垂直于初始速度的平面所呈几何夹角。立管的材料等级为 API-X80,类型取为理想弹塑性材料,具体参数如表 1 所示。

表 1 立管材料参数设定

Tab. 1 Parameter setting of riser material

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)	屈服强度/MPa	切线模量/MPa
207	0.3	7 850	552	460

2.2 响应面的设计

采用 Design-Expert 的 BOX 设计方法,对立管的非线性碰撞过程进行四因素三水平的响应面分析。其中,自变量因素有四个,分别为碰撞速度(A)、内压(B)、碰撞夹角(C)和摩擦系数(D);而响应量有三个,分别为最大碰撞力(X)、应力响应峰值(Y)和最大径向位移(Z)。BOX 设计在进行响应面分析时对每个自变量均设置为三水平,其编码取值为-1,0 和 1。基于上述介绍,对四个试验因素各水平进行赋值,如表 2 所示。

表 2 试验因素的编码及取值

Tab. 2 Coding and values of test factors

因素	编码水平及取值		
	-1	0	1
碰撞速度 A /(m · s ⁻¹)	1.2	1.6	2.0
内压 B /MPa	1.0	2.0	3.0
碰撞夹角 C /(°)	3	6	9
摩擦系数 D	0.05	0.10	0.15

在 Design-Expert 软件的 BOX 分析中输入各试验因素的名称及数值,三个预设响应量任选其一作为试验指标。BOX 分析的试验点中不包括所有因素均为高水平的情况,四因素三水平的 BOX 响应面试验点的总个数为 27,其中包括 3 组因素均取零水平时的重复性试验。由于本文分析的原始数据是通过有限元计算得到的,建模条件相同时的仿真结果也完全一致,故重复性试验的次数取为 1。以此作为有限元建模的依据。在 ABAQUS/CAE 中进行计算从而得到原始数据。试验样本的具体取值如表 3 所示。

2.3 碰撞应力峰值响应面的建立及分析

将立管碰撞应力峰值作为试验指标,对表 3 中的相应数据进行回归分析。在选择回归模型时,处理流程(process order)的类型选择二次方程式(quadratic)。回归模型的显著性可以通过调整组成项的个数进行修改。为了提高回归方程的显著性,经过多次尝试,去掉了 AD 、 BD 、 CD 和 A^2 共计 4 项,这也是回归分析常用的办法。此时回归模型和方程各组成项回归分析的结果如表 4 所示。根据所选模型,可知该回归模型的 p 值 < 0.000 1,达到了极显著水平,该模型结果可靠。而回归模型的决定系数 R^2 为 0.879 6 > 0.80,说明该模型拟合优度较好,因此采用该模型对立管碰撞的碰撞应力峰值的响应情况进行分析和预测是可行的。此外,在回归方程的各项中, A 项(碰撞速度)和 C^2 极显著; B 项(内压)也达到了显著水平。从具体的数值上可以看出,在影响立管碰撞响应的四个因素中,对碰撞应力峰值影响由大到小依次为:碰撞速度 > 内压 > 碰撞角度 > 摩擦系数。

表 3 四因素三水平立管碰撞响应面设计

Tab. 3 Four-factor three-level riser collision response surface design

样本编号	碰撞速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	内压/MPa	碰撞夹角/ $(^\circ)$	摩擦系数	碰撞力/kN	碰撞应力/MPa	径向位移/mm
1	1.2	1.0	6	0.10	258.56	32.91	5.15
2	2.0	1.0	6	0.10	430.81	69.87	15.81
3	1.2	3.0	6	0.10	259.11	43.28	5.48
4	2.0	3.0	6	0.10	482.85	74.83	16.36
5	1.6	2.0	3	0.05	485.63	66.59	14.70
6	1.6	2.0	9	0.05	329.85	72.57	11.45
7	1.6	2.0	3	0.15	486.26	67.34	14.41
8	1.6	2.0	9	0.15	335.50	71.45	11.44
9	1.2	2.0	6	0.05	274.00	37.87	5.34
10	2.0	2.0	6	0.05	443.17	68.14	16.07
11	1.2	2.0	6	0.15	252.22	38.05	5.32
12	2.0	2.0	6	0.15	442.35	67.84	16.11
13	1.6	1.0	3	0.10	585.97	64.69	14.32
14	1.6	3.0	3	0.10	464.11	70.59	14.72
15	1.6	1.0	9	0.10	367.05	60.21	11.03
16	1.6	3.0	9	0.10	358.99	76.90	11.77
17	1.2	2.0	3	0.10	406.86	37.48	6.25
18	2.0	2.0	3	0.10	686.01	61.35	20.04
19	1.2	2.0	9	0.10	281.43	46.71	5.67
20	2.0	2.0	9	0.10	496.20	77.38	16.75
21	1.6	1.0	6	0.05	412.16	44.72	10.37
22	1.6	3.0	6	0.05	426.96	52.97	10.82
23	1.6	1.0	6	0.15	409.17	43.80	10.39
24	1.6	3.0	6	0.15	419.49	52.23	10.86
25	1.6	2.0	6	0.10	412.87	48.03	10.61

在上述四个因素中,同样是摩擦系数对碰撞应力峰值的影响最小,这也与立管局部碰撞有限元分析中的结论一致。最后,通过 Design-Expert 软件的 BBD 方法得到的立管碰撞应力回归方程如式(11)所示:

$$\begin{aligned} \text{碰撞应力峰值} = & 71.857\ 35 + 36.410\ 42A - 10.550\ 59B - 22.447\ 42C - 271.595\ 10D + \\ & 3.778\ 90B^2 + 1.617\ 93C^2 + 1\ 340.058\ 82D^2 - 3.381\ 25AB + 1.416\ 67AC + 0.899\ 17BC \end{aligned} \quad (11)$$

根据立管碰撞应力峰值的响应面分析,同样可以得到响应面的二维等高线图和三维响应曲面。以速度和内压两因素对立管碰撞应力峰值响应面的结果为例,可知该响应曲面倾斜程度较大,同样表明了碰撞速度与内压两因素之间的相互作用显著。对图 1 中的二维等高线图进行分析,可以发现固定内压的水平,立管碰

撞应力的峰值响应会随着碰撞速度水平的上升而逐渐增大。

表 4 立管碰撞应力峰值回归分析

Tab. 4 Regression analysis of peak values of riser collision stress

来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>p</i>	显著性验证
模型	4 278.37	10	427.84	10.23	<0.000 1	* *
碰撞速度	2 794.11	1	2 794.11	66.81	<0.000 1	* *
内压	248.43	1	248.43	5.94	0.028 7	
碰撞夹角	115.20	1	115.20	2.75	0.119 2	* *
摩擦系数	0.39	1	0.39	0.009	0.924 9	
<i>AB</i>	7.32	1	7.32	0.17	0.682 1	
<i>AC</i>	11.56	1	11.56	0.28	0.607 3	
<i>BC</i>	29.11	1	29.11	0.70	0.418 2	
<i>B</i> ²	69.36	1	69.36	1.66	0.218 7	
<i>C</i> ²	1 029.88	1	1 029.88	24.62	0.000 2	*
<i>D</i> ²	54.51	1	54.51	1.30	0.272 7	
残差	585.54	14	41.82			
总和	4 863.91	24				

注：“*”标示显著；“* *”标示极显著。

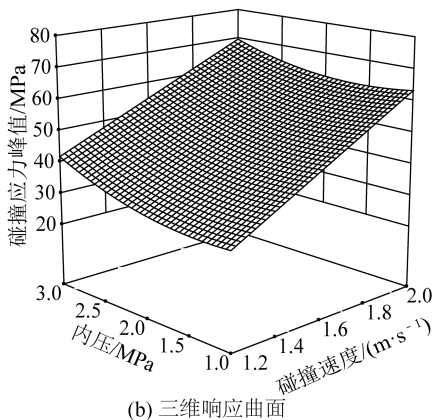
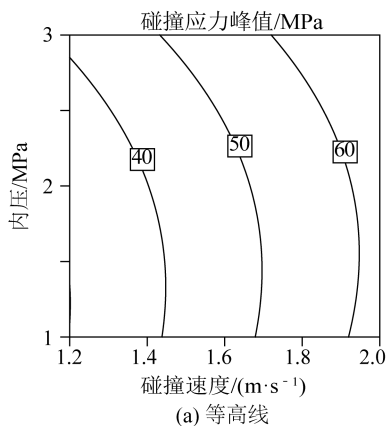


图 1 碰撞速度和内压两因素对立管碰撞应力峰值响应面结果

Fig. 1 Velocity and internal pressure on the peak response surface of collision stress

最后,根据 Box-Benhknen 的中心组合试验设计原理,选择对立管碰撞应力峰值响应有显著影响的四个因素:碰撞速度(*A*)、内压(*B*)、碰撞夹角(*C*)和摩擦系数(*D*),通过二次拟合得到试验指标的最大值及其对应的最佳因素组合,即:碰撞速度 2.0 m/s,内压 3.0 MPa,碰撞夹角 9°以及摩擦系数 0.05,此时相应的碰撞应力峰值为 95.32 MPa。根据上述敏感性参数的取值建立有限元模型并进行计算,将两种方法所得计算结果作对比,如表 5 所示,可知两种方法对应结果之间的相对误差达到了 13.11%,两值的误差较大。

两种方法所得计算结果误差较大的原因为:立管结构属于弹塑性连续体,ABAQUS 软件中对于该类结构应力的计算,是根据其弹性状态下的本构关系得到的。 $t-\Delta t$ 到 t 时间段内的应力增量:

$$\dot{\epsilon}(\Delta S_e) = D^e(\Delta \epsilon) \tag{12}$$

式中: ΔS_e 和 $\Delta \epsilon$ 分别表示对应时刻的应力增量和应变增量;而 ΔS_e 中的下标 e 表示应力的计算基于结构的弹性性能;而 D 为弹性矩阵,表达式为:

$$D = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1 - \nu}{2} & 0 & 0 \\ \text{对称} & & & \frac{1 - \nu}{2k} & 0 \\ & & & & \frac{1 - \nu}{2k} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： E 和 ν 分别表示立管材料的弹性模量和泊松比。

此外，计算接触应力时还需考虑材料的塑性。ABAQUS 中以真实应力和真实应变来定义塑性。由塑性变形的不可压缩性，可得真实应力为：

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{l}{l_0} = \sigma_{\text{nom}} \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (14)$$

式中： σ 和 σ_{nom} 分别表示真实应力和名义应力， F 为接触力， A 为当前接触面积；而 l/l_0 又可表示为 $1 + \varepsilon_{\text{nom}}$ ，其中 ε_{nom} 指的是名义应变。

综上所述，ABAQUS 软件所采用的碰撞应力计算方法是与材料的弹性属性（如弹性模量和泊松比）以及接触面积等因素有关，其结果更接近于实际值；而响应面分析所得结果只是将最佳试验因素组合代入回归方程得到的，没有对结构参数和材料属性等因素予以考虑。

表 5 两种方法计算结果的对比

Tab. 5 Comparison of the calculation results of the two methods

自变量因素的取值				响应面 结果/MPa	有限元 结果/MPa	相对误差/(%)
碰撞速度/(m · s ⁻¹)	内压/MPa	碰撞角度/(°)	摩擦系数			
2.0	3.0	9	0.05	95.32	84.27	13.11

2.4 最大径向位移响应面的建立及分析

在 Design-Expert 软件中试验指标选择立管的最大径向位移，对表 3 中的相应数据进行回归分析。与之前两个指标的响应面分析所采用的方法相同，在选择回归模型时，处理流程（process order）的类型仍选择二次方程式（quadratic）。回归模型的显著性可以通过调整组成项的个数进行修改。经过多次尝试，本回归方程保留二次方程式的所有组成项。此时回归模型和方程各组成项回归分析结果如表 6 所示。

由表 6 可知，该回归模型的 p 值 < 0.0001 ，达到了极显著水平，该模型结果可靠。而回归模型的决定系数 R^2 为 $0.9912 > 0.80$ ，说明该模型拟合优度较好，因此采用该模型对立管碰撞的最大径向位移响应情况进行分析和预测是可行的。此外，在回归方程的各项中， A （碰撞速度）、 C （碰撞角度）以及 C^2 均达到了极显著水平。从具体数值上可以看出，在影响立管碰撞响应的四个因素中，对其最大径向位移影响由大到小依次为：碰撞速度 $>$ 碰撞角度 $>$ 内压 $>$ 摩擦系数。其中，碰撞速度和碰撞角度二者对横截面变形的影响无法直接看出。在上述四个因素中，摩擦系数对立管最大径向位移的影响最小，这也与立管局部碰撞有限元分析中的结论一致。最后，通过 Design-Expert 软件的 BBD 方法得到的立管最大径向位移的回归方程如下所示：

$$\begin{aligned} \text{最大径向位移} = & - 7.77167 + 21.27292A - 0.70333B - 2.41472C - 17.53333D - 1.27604A^2 + \\ & 0.13708B^2 + 0.23009C^2 + 64.83333D^2 + 0.13750AB - 0.56458AC + \\ & 0.75000AD + 0.028333BC + 0.10000BD + 0.46667CD \end{aligned} \quad (15)$$

对立管最大径向位移的响应面分析结果如图 2 所示。从图 2 可知三维响应曲面倾斜程度较大，说明碰撞速度与内压两因素之间的相互作用显著。而由等高线图，对纵轴因素内压的水平进行固定，此时响应量最大径向位移会随着碰撞速度水平的上升而逐渐增大。

表 6 立管最大径向位移回归分析
Tab. 6 Regression analysis of maximum radial displacement of riser

来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>p</i>	显著性验证
模型	436.13	14	31.15	80.05	<0.000 1	* *
碰撞速度	384.54	1	384.54	988.08	<0.000 1	* *
内压	0.72	1	0.72	1.85	<0.203 6	
碰撞夹角	22.22	1	22.22	57.10	<0.000 1	* *
摩擦系数	4.03×10^{-3}	1	4.03×10^{-3}	0.010	0.920 9	
<i>AB</i>	0.012	1	0.012	0.031	0.863 6	
<i>AC</i>	1.84	1	1.84	4.72	0.055 0	
<i>AD</i>	9.00×10^{-4}	1	9.00×10^{-4}	2.31×10^{-3}	0.962 6	
<i>BC</i>	0.029	1	0.029	0.074	0.790 8	
<i>BD</i>	1.00×10^{-4}	1	1.00×10^{-4}	2.57×10^{-4}	0.987 5	
<i>CD</i>	0.020	1	0.020	0.050	0.827 0	
<i>A</i> ²	0.12	1	0.12	0.30	0.594 4	
<i>B</i> ²	0.053	1	0.053	0.14	0.719 6	
<i>C</i> ²	12.11	1	12.11	31.11	0.000 2	* *
<i>D</i> ²	0.074	1	0.074	0.19	0.671 7	
残差	3.89	10	0.39			
总和	440.02	24				

注:表中“* *”表示极显著;“*”表示显著。

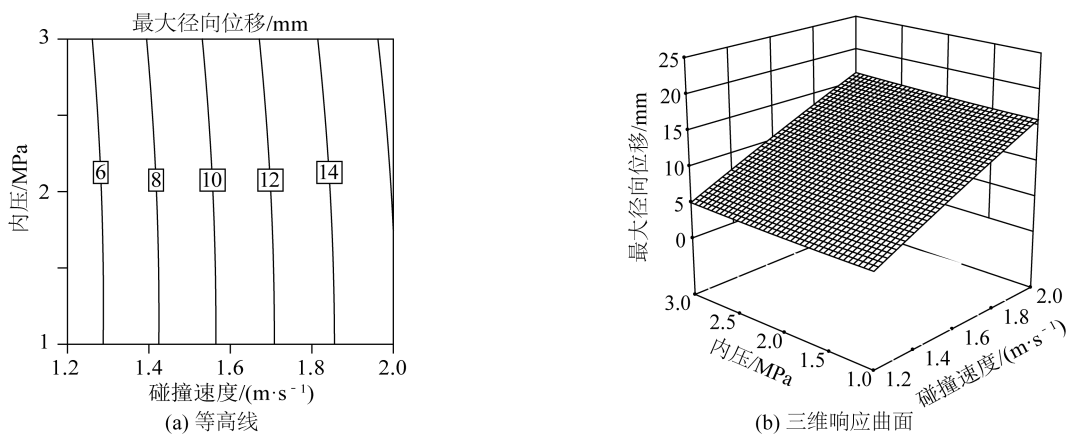


图 2 碰撞速度和内压两因素对立管最大径向位移响应面结果

Fig. 2 Velocity and internal pressure on the maximum radial displacement response surface of the riser

最后,根据 Box-Benhnken 中心组合试验设计原理,选择对立管最大径向位移有显著影响的四个因素:碰撞速度(*A*)、内压(*B*)、碰撞夹角(*C*)和摩擦系数(*D*),通过二次拟合得到最优化解及其对应的因素组合。根据计算结果,试验指标最大值出现的条件为:碰撞速度 2.0 m/s,内压 3.0 MPa,碰撞夹角 3°以及摩擦系数 0.05,此时立管的最大径向位移为 20.76 mm。根据上述敏感性参数的取值建立有限元模型并进行计算,通过将两种方法所得计算结果作对比,如表 7 所示,可知两种方法对应结果之间的相对误差为 0.73%,两数值的吻合度极高。因此,文中对立管最大径向位移指标所采取的响应面分析方法及最终得到的响应面模型是可靠的。

表 7 两种方法计算结果的对比

Tab. 7 Comparison of the calculation results of the two methods

自变量因素的取值				响应面 结果/mm	有限元 结果/mm	相对误差/(%)
碰撞速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	内压/MPa	碰撞角度/($^{\circ}$)	摩擦系数			
2.0	3.0	3	0.05	20.76	20.61	0.73

3 结 语

基于数值模拟和二次回归分析,提出了四因素三水平的立管碰撞响应面分析方法。采用 Design-Expert 软件的 BOX 设计,对立管碰撞应力峰值和最大径向位移这两个试验指标进行回归分析并分别建立了二次响应面回归模型。通过二次拟合得到了试验指标最大值出现的条件,并将所得最优化解与有限元计算结果进行对比。计算结果表明,基于两种方法得到的立管最大横截面变形量两个响应量的相对误差为 0.73%,以此验证了本文响应面分析方法及所得模型的准确性;而立管碰撞应力峰值的相对误差较大,但该响应面模型也能用于允许碰撞准则下立管系统设计及安全评估的大致预测当中。

参考文献:

- [1] 董富祥,洪嘉振. 多体系统动力学碰撞问题研究综述[J]. 力学进展, 2009, 39(3): 352-359. (DONG Fuxiang, HONG Jiazhen. Review of impact problem for dynamocs of multibody system[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(3): 352-359. (in Chinese))
- [2] HUSE E. Interaction in deep-sea riser arrays[C]//Proceedings of the 25th Annual Offshore Technology Conference. 1993: 10.4043/7237-MS.
- [3] 阎岩,张崎,黄一. 基于张力腿平台的顶张紧式立管碰撞分析[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2012, 35(1): 1-6. (YAN Yan, ZHANG Qi, HUANG Yi. Analysis of collision between top tension risers on a tension leg platform[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2012, 35(1): 1-6. (in Chinese))
- [4] 陈云水,王德禹. SPAR 平台立管相互碰撞的有限元分析[J]. 振动与冲击, 2007(9): 115-119. (CHEN Yunshui, WANG Deyu. Finite element analysis of the collision of risers in spar platform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007(9): 115-119. (in Chinese))
- [5] DUGGAL A S, NIEDZWECKI J M. An experimental study of tendon/riser pairs in waves[C]//Proceedings of the 25th Annual Offshore Technology Conference. 1993: 10.4043/7239-MS.
- [6] 桂劲松,康海贵. 计算结构可靠度的 RBF 神经网络响应面法[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 81-85. (GUI Jingsong, KANG Haigui. The response surface method of RBF artificial neural network for structural reliability analysis [J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(3): 81-85. (in Chinese))
- [7] 张晓莹,薛鸿祥,唐文勇. 深海顶张紧式立管涡激振动疲劳可靠性研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(6): 17-23. (ZHANG Xiaoying, XUE Hongxiang, TANG Wenyong. VIV fatigue reliability and fatigue safety factor analysis of deep-water riser[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(6): 17-23. (in Chinese))
- [8] 畅元江,王康,张卫国,等. 台风下 TLP 立管系统可靠性评估[J]. 海洋工程, 2017, 35(4): 1-7. (CHANG Yuanjiang, WANG Kang, ZHANG Weiguo, et al. Reliability assessment of TLP riser system under typhoon[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(4): 1-7. (in Chinese))
- [9] DNV-RP-F203, Riser interference[S]. Norway: DNV, 2009.
- [10] 吴天龙. 海洋立管相互碰撞问题研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014. (WU Tianlong. The research of collision for a pair of marine risers[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [11] KLEIJNEN J P C. Response surface methodology[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics, 2014, 2(2): 128-149.
- [12] NETO E T, RUGGIERI C, FERRARI J A. Numerical representation of the collision interaction mass for dual riser systems [C]//Proceedings of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2002: 10.1115/OMAE2002-28336.
- [13] LI Y S, MORRISON D G. The "colliding participating mass": A novel technique to quantify riser collisions[C]//Proceedings of ETCE/OMAE2000 Joint Conference. 2000, 2: 289-298.