

基于数理统计的海洋平台燃爆数值建模优化研究

朱 渊¹, 师吉浩¹, 陈国明¹, 张肖锦¹, 郭子琛¹, 谢 镔²

(1. 中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东青岛 266580; 2. 杰斯康软件有限公司, 上海 200135)

摘要:海洋平台燃爆风险分析的关键基础之一是数值模型的建立,然而由于没有网格、障碍物拥塞度等的统一建模标准,难以保障超压载荷结果预测精度。基于数理统计理论离散超压及其影响因素的数学物理方程,构建超压后果集、模型集与工况条件集;进而借助拉丁超立方抽样,抽取不同工况条件组成的向量空间,以此进行模型建立的网格优化、物理模型优选方案及相似增补方案的分析;最后,以模型预测与理论模型结果的相关系数为优化结果考核指标,获取具有良好工程适用性的数值网格尺寸、障碍物删减尺寸等。结果表明:海洋平台燃爆数值模型核心区域的网格尺寸为 0.2 m;对于在役阶段的平台,建模过程中可直接忽略等效直径小于 0.06 m 的障碍物,可采用均匀圆管替代等效直径小于 0.08 m 的障碍物;对概念设计阶段的平台,可将等效直径为 0.08 m 的圆管用于数值建模,代表平台拥塞度,从而实现在保障超压预测准确度的基础上较大程度地减轻建模工作量。

关键词:数值模型;障碍物;优化方法;相似原理;燃爆风险分析

中图分类号:TE 58;X 93

文献标志码:A

引用格式:朱渊,师吉浩,陈国明,等. 基于数理统计的海洋平台燃爆数值建模优化研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017,41(4):132-139.

ZHU Yuan, SHI Jihao, CHEN Guoming, et al. Optimized scheme of numerical modeling for explosion of offshore platforms based on mathematical statistics[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(4): 132-139.

Optimized scheme of numerical modeling for explosion of offshore platforms based on mathematical statistics

ZHU Yuan¹, SHI Jihao¹, CHEN Guoming¹, ZHANG Xiaojin¹, GUO Zichen¹, XIE Bin²

(1. Center for Offshore Engineering and Safety Technology in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Gexcon China, Shanghai 200135, China)

Abstract: The numerical modeling is one of the key foundations for the explosion risk assessment of offshore platforms. However, there is a lack of unified modelling standards for grid size, obstruction congestion etc., and thus the prediction accuracy of the explosive overpressure is difficult to guarantee. This paper aims to propose a procedure to derive the optimized numerical modelling scheme based on the statistics theory. Firstly, the numerical equations of the overpressure and its influencing factors are discretized to get the overpressure set, model set and condition set. Then, the analysis of the grid optimization, physical model optimization and similar supplementary plan is carried out based on the vector space derived from the Latin hypercube sampling of condition set. At last, the correlation coefficient between the results of numerical model and theoretical model is used to determine the suitable grid size, the equivalent diameter of deleted obstacle for engineering. The result shows that the size of the grid in the core area of the numerical model for explosion risk assessment of offshore platforms is recommended as 0.2 m. For the platform in service, the obstacles with equivalent diameter less than 0.06 m can be ignored during modelling, and the obstacles with equivalent diameter less than 0.08 m can be replaced by the equivalent uniform tubes. For the platform

收稿日期:2016-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51579246);中央高校基本科研业务费专项(15CX05018A,15CX05003A,16CX06019A);工业和信息化部高技术船舶科研计划项目(工信部联装[2016]24号)

作者简介:朱渊(1982-),男,副教授,博士,研究方向为油气安全工程。E-mail:zhy3323@163.com。

under design, the tube with diameter of 0.08 m can be used to represent the congestion of the platform. The conclusion can help to reduce the workload of modelling while ensuring the accuracy of overpressure prediction.

Keywords: numerical model; obstacle; optimization method; similarity principle; explosion risk analysis (ERA)

海洋平台油气开采过程面临重大的燃爆风险,70%的海洋平台事故由燃爆导致^[1-2]。平台工艺设备密集,由此造成的受限区域障碍物成为燃爆事故后果加剧、引发灾难的潜在隐患^[3-4]。震惊世界的 Piper Alpha 平台油气燃爆事故表明油气燃烧火焰可在平台拥塞区域障碍物的激励作用下产生湍流效应,随之产生的爆炸超压载荷超过了关键设备承受极限,引发多米诺效应,最终平台沉没、报废。目前,在海洋平台运行全阶段(概念设计阶段、在役阶段),均须开展燃爆风险评价,为油气安全开采提供技术保障。该评价的核心在于准确获得燃爆造成的超压载荷,其受平台环境空间影响显著,须建立真实反映研究对象障碍物拥塞程度的试验、经验或 CFD 模型^[3]。其中,试验模型可还原燃爆火焰激励场景,但因其花费高、危险性大,通用性和重复性不强,多用于基础研究,无法工程推广;常用经验模型^[5]如 TNT、TNO,在描述障碍物对火焰燃烧加速过程方面存在显著不足,超压结果精确度差,在海洋工程风险实践领域国际领先的美国、挪威等,已经被标准放弃^[6-7]。随着流体动力学的不断发展,CFD 技术在预测油气燃爆超压方面取得了大量试验和理论验证,在海洋平台燃爆风险评价领域得到广泛的重视和应用,其可通过建立数值模型,求解有限体积方程,描述火焰燃烧速率在障碍物作用下的加速效应,准确预测爆炸超压。FLACS 作为采用 CFD 技术开展燃爆评价的领先系统,得到了国内外研究机构、专家学者的大量研究和应用。英国健康安全管理局通过对 Buncefield 油库爆炸事故的调研,发现设备周围灌木丛等障碍物是导致爆炸超压升级的重要因素,并借助 FLACS 工具验证了此结论^[8]。Hansen 等^[9-12]验证了 FLACS 火焰加速求解器在预测不同拥塞度下爆炸超压的准确性,强调障碍物等因素对结果的影响程度。翟良云等^[13-14]针对不同对象借助 FLACS,开展燃爆后果评价研究。由于燃爆评价结果受模型反映周边环境空间精细程度的显著影响,在 FLACS 应用中超压预测结果很难得到保障。鉴于此,笔者基于 FLACS,对影响模型预测精度的网格尺寸等关键因素进行分析,开展海洋平台数值建模优化方案研究。

1 气体燃爆的数学模型

1.1 可燃气云燃爆火焰传播速度模型

海洋平台油气开采过程中的燃爆事故,一般由泄漏可燃气体与空气混合,形成可燃燃气云,再遇点火源引发。由于气云活性较弱,不易集中等特点,且多被弱点火源(静电、火花)点燃,可燃气体爆炸初期,火焰面近似光滑,且以层流状态进行传播,火焰传播速率取决于燃料类型、初始压力等因素,方程为

$$S_L = S^0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{r_p} \quad (1)$$

式中, S_L 为层流状态的火焰传播速度, m/s; S^0 为层流状态的火焰传播速度, m/s; r_p 为基于燃料的参数; p 为燃烧产生的压力, kPa; p_0 为大气压力, kPa。

随后,受瑞利-泰勒效应等因素影响,火焰燃烧面产生不稳定性漩涡,火焰面发生曲皱,并呈半层流状态,火焰不断受到障碍物阻碍,瑞利-泰勒效应显著,半层流状态转变为湍流状态,传播速率及燃烧面积显著加大,爆炸超压也随之增大。此阶段基于 Bray 提出的简化模型^[15]得到火焰速率方程为

$$S_T = 15 S_L^{0.784} u'^{0.412} l_1^{1.196} \quad (2)$$

式中, S_T 为湍流状态的火焰传播速度, m/s; u' 为平均速度, m/s; l_1 为火焰传播长度, m。

整个燃爆过程满足质量、动量、能量以及组分守恒方程,且火焰燃烧过程包含在守恒方程中。

1.2 预测可燃气云燃爆超压理想模型

超压压力波与火焰传播速度之间存在相互激励效应,同时火焰传播速率又受到障碍物等因素的影响,故将超压看作障碍物等影响因素综合作用的结果,表示为

$$p \propto f(S_T) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

Eggen 等^[16]基于相似原理,通过开展均匀圆管障碍物下的爆炸试验,获取爆炸超压与可燃物成分、点火源位置、区域受限程度、障碍物拥塞度等因素相关性关系,由此给出了 GAME 模型,用于预测油气工艺区域燃爆超压。

在低点火能、不受限空间下,

$$\Delta p_0 = 0.84 \left(\frac{M_{VBR} L_f}{D} \right)^{2.75} S_1^{2.7} D^{0.7} \quad (4)$$

在低点火能、空间受两个平行板约束条件下,

$$\Delta p_0 = 3.38 \left(\frac{M_{VBR} L_f}{D} \right)^{2.25} S_1^{2.7} D^{0.7} \tag{5}$$

式中, Δp_0 为受限区域最大超压, kPa; M_{VBR} 为拥塞度, 即受限区域内障碍物与整个空间的体积比; D 为障碍物平均直径, m; L_f 为爆炸火焰涉及的最远距离, 受点火源位置及可燃气云体积影响, m; S_1 为层流状态可燃气云火焰传播速率, m/s。

2 数值建模优化方案

为研究式(3)中各个影响因素对以式(1)、(2)为理论基础的数值模型的影响, 首先, 离散超压及其影响因素, 分别构建超压后果集 P 、数值模型集。然后, 进一步离散数值模型集为模型集 F (如代表障碍物拥塞程度的物理模型集) 及工况条件集 N (如可燃气云成分集)。由此过程, 可将超压后果集 P 视为由模型集 F 与工况条件集 N 耦合作用的结果, 表示为

$$P \propto F \otimes N. \tag{6}$$

2.1 模型集建立

模型集 F 包含物理模型集、网格集、边界条件集等子集合。分析物理模型集 F_1 与网格集 G , 其中

物理模型集 F_1 包括物理模型尺寸集 A (研究区域长、宽、高), 障碍物平均截面积集 B , 拥塞度集 C 。表示为

$$F = \{A, B, C, G\}, \tag{7}$$

其中

$$A = \{ \langle x_a, y_a, z_a \rangle \mid 0 \leq x_a \leq x_{\max}, 0 \leq y_a \leq y_{\max}, 0 \leq z_a \leq z_{\max} \},$$

$$B = \{ 0 \leq l_b \leq l_{b\max} \},$$

$$C = \{ 0 \leq l_c \leq 1 \},$$

$$G = \{ 0 \leq l_g \leq l_{g\max} \}.$$

用于优化方案研究的物理模型如图 1 所示。其中, 图(a)、(b)分别为无受限、受两个平行板约束条件下的理想模型, 由正交均匀敷设的圆管组成; 图(c)为由实际海洋平台建立的精细物理模型, 拥塞区域主要集中在上层甲板、中层甲板及下层甲板之间, 同时此部分建模工作量大且耗时耗力, 故为优化方案的研究对象。为验证优化方案的有效性, 引入 FLACS 的试验模型, 见图(d)、(e), 此模型按照实际海洋平台油气处理模块建立^[18]。各模型集尺寸等见表 1。

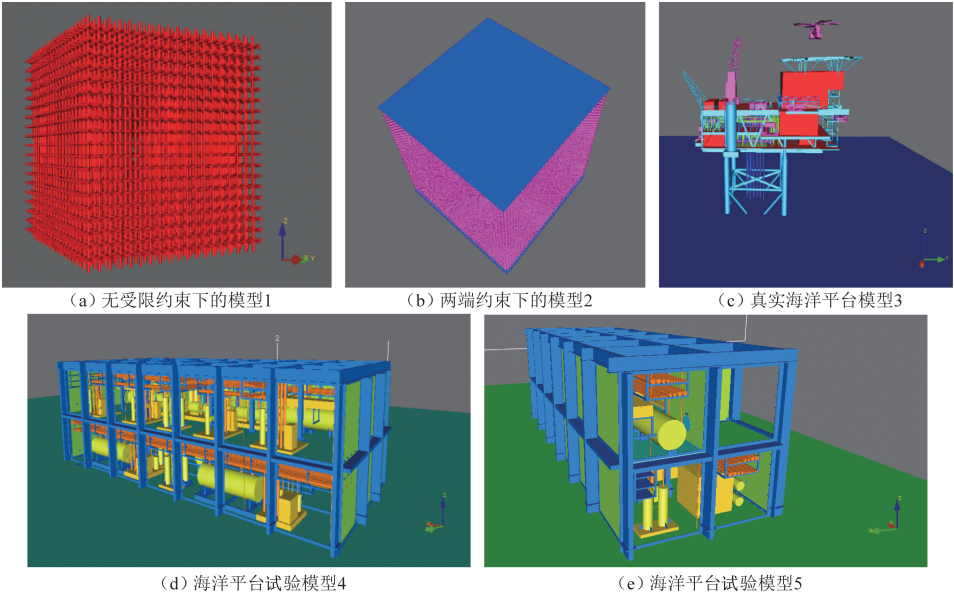


图 1 物理模型集
Fig. 1 Geometry set

表 1 物理模型集元素

Table 1 Parametric element of geometry set

模型	尺寸(x,y,z)	拥塞度	障碍物平均截面积/m ²
1	(80,80,80)	0.1	0.5
2	(80,80,80)	0.1	0.5
3	(32,24,8)	0.1	0.3
4	(26,8,8)	0.09	0.2
5	(28,12,8)	0.08	0.2

2.2 工况条件集建立

工况条件集 N 包含可燃气云尺寸集 A_2 (可燃气的长、宽、高), 可燃气云成分集 B_2 , 可燃气云位置集 C_2 , 点火源位置集 D_2 等子集合; 其中可燃气云尺寸集 A_2 、可燃气云位置集 C_2 、点火源位置集 D_2 由三维笛卡尔坐标系确定, 表示为

$$N = \{A_2, B_2, C_2, D_2\}. \tag{8}$$

$$A_2 = \{ \langle x_a, y_a, z_a \rangle \mid 0 \leq x_a \leq x_{\max}, 0 \leq y_a \leq y_{\max}, 0 \leq z_a \leq z_{\max} \},$$

$$C_2 = \{ \langle x_c, y_c, z_c \rangle \mid 0 \leq x_c \leq x_{\max}, 0 \leq y_c \leq y_{\max}, 0 \leq z_c \leq z_{\max} \},$$

$$D_2 = \{ \langle x_d, y_d, z_d \rangle \mid 0 \leq x_d \leq x_{\max}, 0 \leq y_d \leq y_{\max}, 0 \leq z_d \leq z_{\max} \}.$$

采用拉丁超立方抽样,抽取工况集中4个子集,离散为8个向量空间,每个向量下任意抽取50个监测点,获取400个爆炸超压值,用于相关性计算。拉丁抽样相对于传统抽样方法,通过将样本空间进行分层的形式,利用“抽样不替换”技术,避免了局部聚焦的缺陷,同时提升了获取代表各分层空间样本值的取样效率。以可燃气体尺寸集 A_2 为例进行抽样展示,图2为抽样结果分布情况。

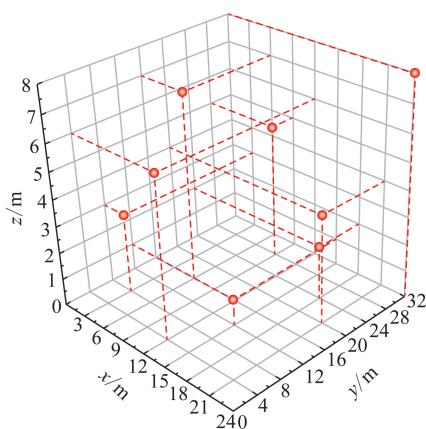


图2 可燃气体尺寸集取样点分布

Fig.2 Sampling distribution of dimensional set of flammable gas

2.3 数值建模优化方案

优化方案流程如下:

(1)对网格集 G 进行优化。首先以无约束的模型1与两端约束的模型2为对象,基于GAME模型,确定最优网格尺寸的大致范围;其次以真实海洋平台3为对象,进行网格敏感度分析,最终确定适用于实例模型的最优网格尺寸。

(2)对物理模型集 F_1 进行优选方案分析,确定可删减的障碍物尺寸。首先,在获取的最优网格尺寸基础上,以实例模型为对象,建立精确、详细的数值模型;其次,采用拉丁超立方抽样,在 N 集中随机取样,建立工况条件矩阵,由CFD计算获得燃爆超压矩阵 P_0 ;然后,将集 B ,集 C 离散化,以 Δs 为基准对障碍物进行删减,对应减少的堵塞度为 Δv ,并计算删减 $i\Delta s$ 对应障碍物的平均直径 D_i ;最后获取各删减模型的超压矩阵 P_i ,并与 P_0 进行相关性计算,根据相关性大小,确定删减尺寸,表示为

$$B = \{ l_b - \Delta s, l_b - 2\Delta s, \dots, l_b - i\Delta s \}, \quad (9)$$

$$C = \left\{ l_c - \frac{\Delta v}{V}, l_c - 2 \frac{\Delta v}{V}, \dots, l_c - i \frac{\Delta v}{V} \right\}, \quad (10)$$

其中

$$i\Delta s = \pi (D_i/2)^2,$$

$$R^2 = \frac{(P_i - \bar{P}_i)(P_i - \bar{P}_i)^T - (P_i - \bar{P}_0)(P_0 - \bar{P}_0)^T}{(P_i - \bar{P}_0)(P_i - \bar{P}_0)^T}. \quad (11)$$

(3)针对各删减模型,进行相似增补方案分析,即根据相似原理,进行增补均匀圆管工作,还原删减模型的堵塞程度。首先,设置均匀圆管直径为 D_i ,分别以堵塞区域的长 x_a 、宽 y_a 、高 z_a 为圆管的长度,并由删减的堵塞度分别计算不同长度圆管的个数 n_i ;其次,将3种不同的圆管均匀铺设在删减区域,形成3种增补方案,通过数值计算获取每种方案超压矩阵 $P_{i,j}$;最后,通过计算 P_0 进行相关性分析,获取合理的增补圆管布置方案,表示为

$$\Delta v = n_i \pi (D_i/2)^2 (x_a; y_a; z_a), \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{(P_{i,j} - \bar{P}_{i,j})(P_{i,j} - \bar{P}_{i,j})^T - (P_{i,j} - \bar{P}_0)(P_0 - \bar{P}_0)^T}{(P_{i,j} - \bar{P}_0)(P_{i,j} - \bar{P}_0)^T}. \quad (13)$$

3 数值建模优化结果

以图1中模型1、2、3为对象,确定合理的网格尺寸、合理的删减障碍物尺寸及合理的增补圆管布置方案。

3.1 网格敏感度分析

使用模型1、2,结合GAME模型对比,获取最优网格范围。图3为不同网格时燃爆超压与GAME模型的相关性计算结果。由图3可得,随着网格尺寸的减小,相关系数 R^2 增大,且网格在0.2~0.5 m, GAME模型在低点火能、不受限空间下,相关系数 R^2 在0.9附近,相关性显著;而网格为0.5 m时,在低点火能、空间受两个平行板约束条件下,相关系数 R^2 接近0.8,显著效果低于模型1,这可能是由GAME理想模型本身的缺陷所致^[16]。

由GAME模型获取的网格最优范围,以原模型3为对象进行网格敏感度分析,获得适用于实际模型的最优网格尺寸。不同网格时不同甲板区域随机选择的监测点爆炸超压结果对网格的敏感程度如图4所示。由图4可得,随着网格尺寸减小,网格密度增大,两种实际模型中监测点最大超压均趋于减小,且减小程度逐渐降低,尤其网格由0.2 m降低为0.1 m时,超压变化不大,然而网格尺寸的降低增加

了计算时间,不便于工程应用。建议研究模型核心

区域取 0.2 m 网格。

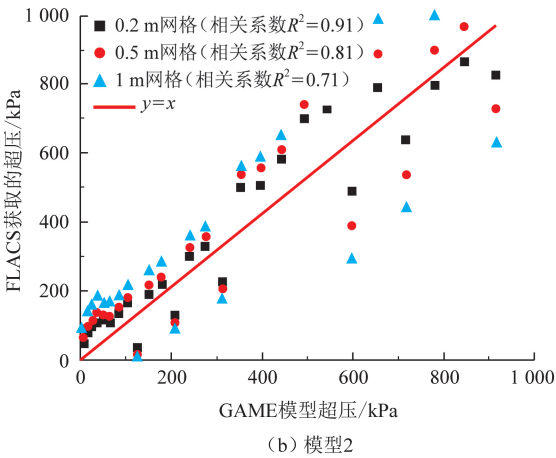
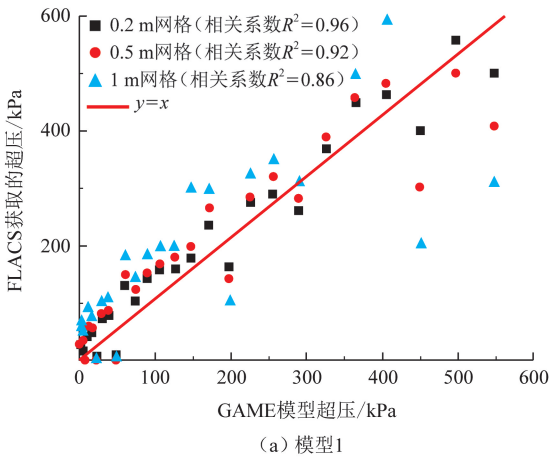


图 3 不同网格下 FLACS 燃爆超压与 GAME 模型相关性结果

Fig. 3 Correlation of overpressure between FLACS and GAME under different grids

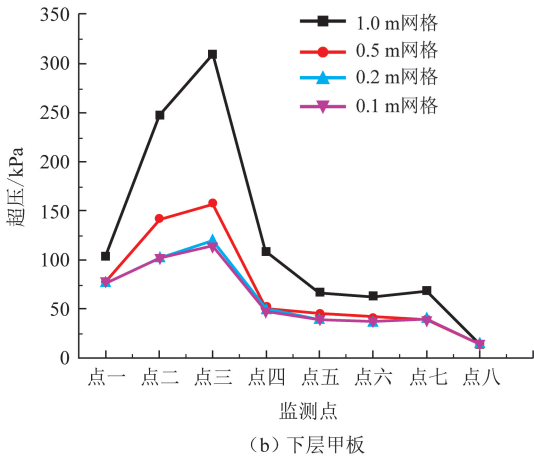
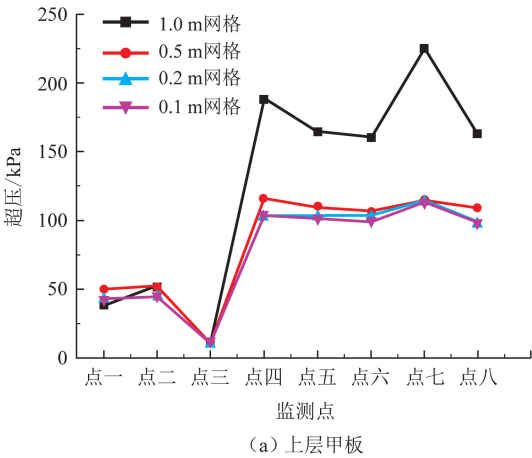


图 4 不同网格下原模型 3 不同甲板区域的随机监测点超压敏感度对比

Fig. 4 Grid sensitivity analysis on overpressures from monitors of different modules of geometry 3

3.2 优选方案分析

选取模型 3,设置核心网格、边界条件等构建数值模型,并计算拉丁抽样获取的工况条件下燃爆超压值,构建超压矩阵 P_0 ;将模型 3 的集合 B 离散,设置 Δs ,并从小到大依次删减,获取对应的超压矩阵 P_i ,由式(13)计算与矩阵 P_0 的相关性。

以删减障碍物截面积分别为 0.002 5、0.003、0.005、0.008、0.01 及 0.025 m^2 为例进行分析,获取的超压矩阵为

$$\begin{Bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 364, 357, 354, \cdots, 45, 40, 37 \\ 305, 303, 304, \cdots, 17, 36, 52 \\ 314, 290, 300, \cdots, 42, 35, 48 \\ 337, 294, 298, \cdots, 46, 39, 38 \\ 290, 287, 299, \cdots, 45, 38, 40 \\ 298, 275, 283, \cdots, 43, 38, 35 \\ 197, 183, 198, \cdots, 33, 33, 28 \end{Bmatrix}.$$

图 5 为相关性计算结果。由图 5 可知,随着删减障碍物尺寸不断增大,研究区域堵塞区域 M_{VBR} 下降,爆炸超压也随之降低,删减障碍物截面积为 0.002 5 m^2 ,即将平均直径小于 0.06 m 的障碍物尺寸进行删减,模型所得超压与原模型的相关性系数 R^2 约为 0.91,具有显著的相关性。删减障碍物截面积为 0.005 m^2 ,即将平均直径小于 0.08 m 的障碍物全部删减,超压结果与原模型的相关性系数 R^2 低于 0.8,显著性不满足工程要求。将平均直径小于 0.12、0.20 m 的障碍物删减后,相关性为负相关,与实际差别较大。由此可见,爆炸超压对平均直径小于 0.06 m 的障碍物敏感程度较小,建模时可对这部分障碍物进行删减。对于尺寸大于 0.06 m 的障碍物,如若进行删减,须进行相似增补方案分析,进而确定合理的删减模型。

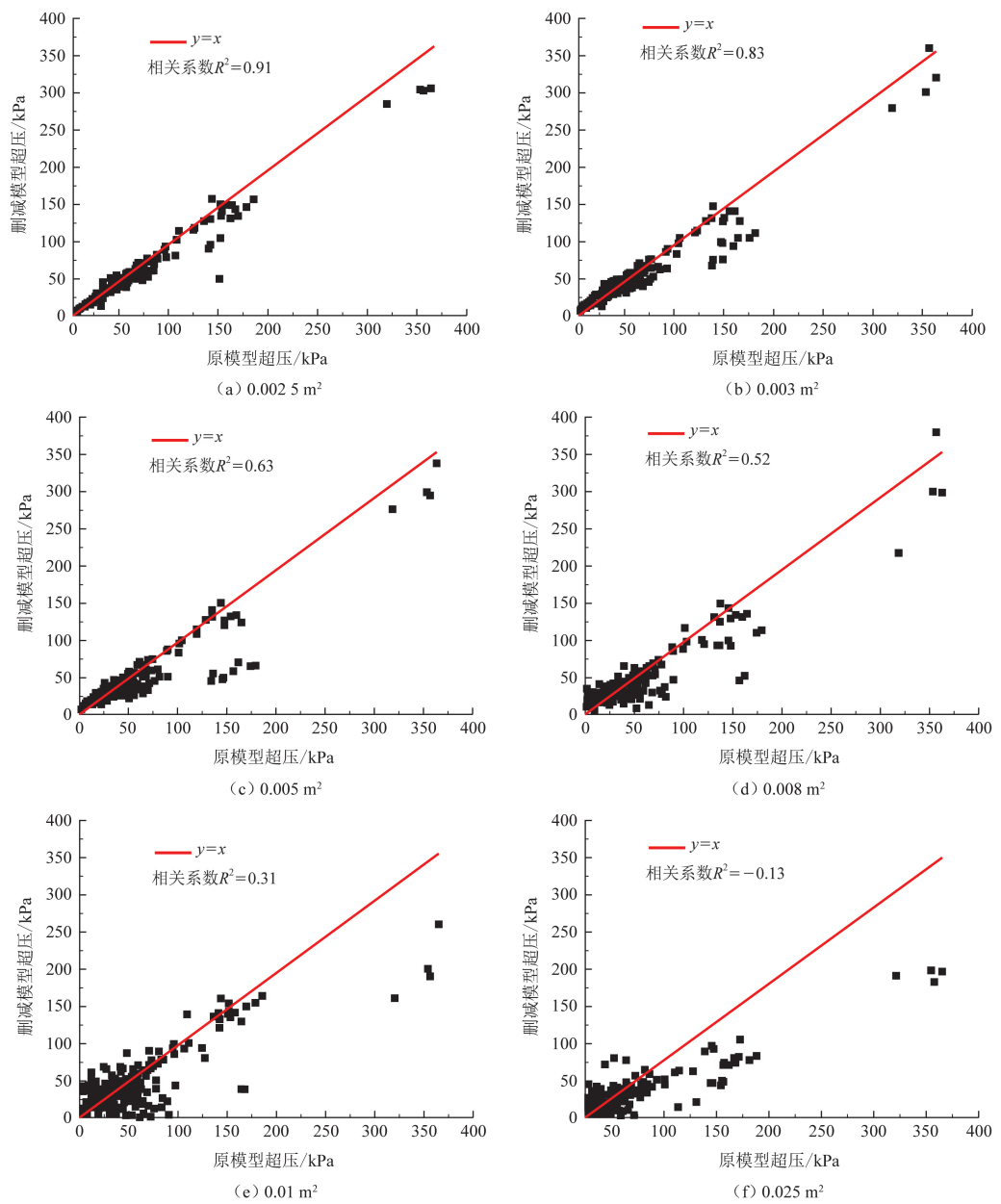


图 5 模型优选分析结果

Fig.5 Results of optimized method

3.3 相似增补方案分析

基于优化方案,在研究区域均匀敷设长度分别为堵塞区域长、宽、高的圆管,由此构建 3 种增补方案,以还原堵塞度。以删减障碍物截面积为 0.0025 m^2 的模型进行分析,如图 6 所示。各个方案的相关性系数均在 0.9 以上,均能达到预期效果。

表 2 为 6 种删减模型增补圆管后,获取的超压矩阵与原矩阵的相关性结果。由表 2 可见,删减障碍物截面积在 0.005 m^2 以下时,通过增补方案,相关性系数在 0.9 以上,说明删减直径小于 0.08 m 并

增补对应直径的圆管是可行的。

表 2 三种增补方案相关性系数对比

Table 2 Comparison of correlation coefficients for three different laying schemes						
增补	删减障碍物截面积/ m^2					
方案	0.002 5	0.003	0.005	0.008	0.01	0.025
方案一	0.99	0.95	0.91	0.81	0.76	0.77
方案二	0.98	0.94	0.90	0.8	0.72	0.73
方案三	0.96	0.93	0.90	0.79	0.68	0.70

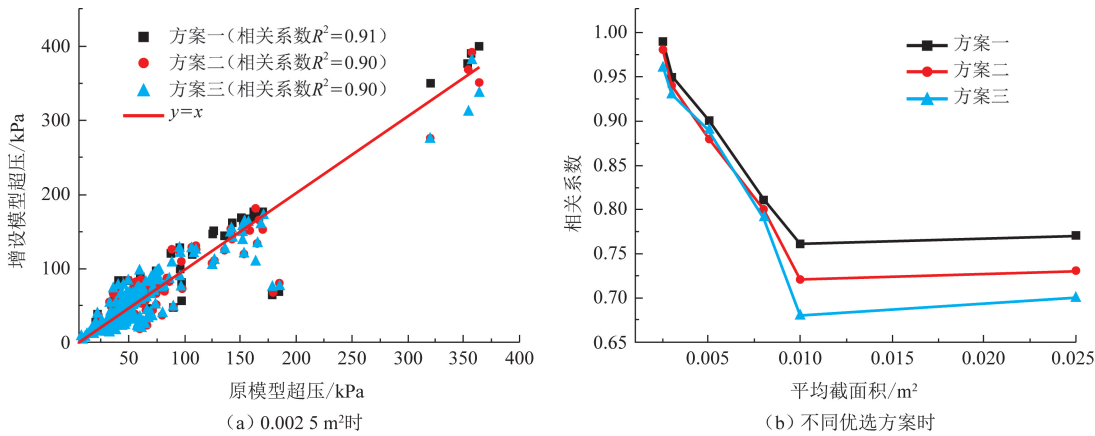


图6 模型相似增补方案结果

Fig.6 Result of supplementary plan

4 实例应用及其验证

选取海洋平台试验模型4、5,对上述优化尺寸进行验证,首先将两个模型中小于0.06、0.08 m的障碍物进行删减,结果如图7所示。删减尺寸为0.06 m时,相关系数均在0.9以上,删减模型与原

模型相关性显著;而删减尺寸为0.08 m时,相关系数约为0.6,相关性不显著。此时通过增补方案,对删减尺寸为0.08 m的模型进行堵塞度还原,结果如图8所示。相关系数均约0.9,3种增补方案获取的模型与原模型相关性显著,验证了优化尺寸的准确性。由此,对于在役阶段海洋平台,在开展燃爆风险

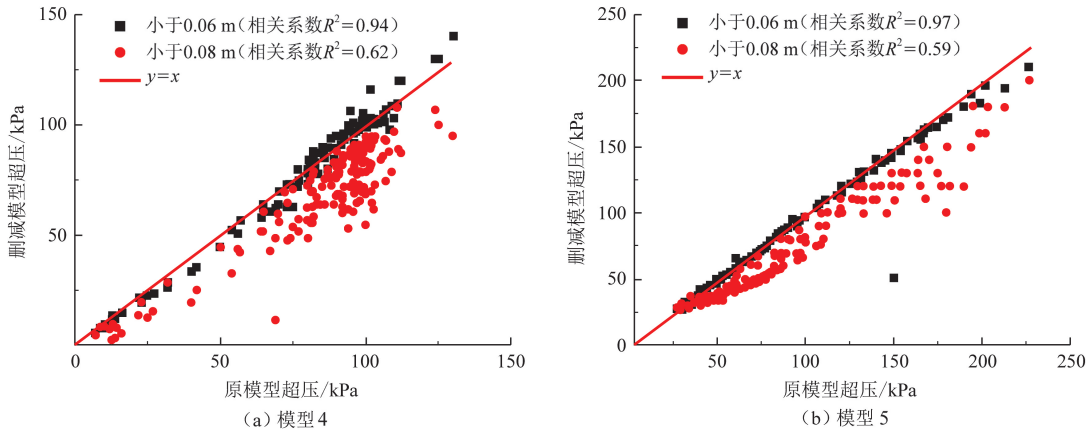


图7 模型优选方案应用验证

Fig.7 Validation of optimized method

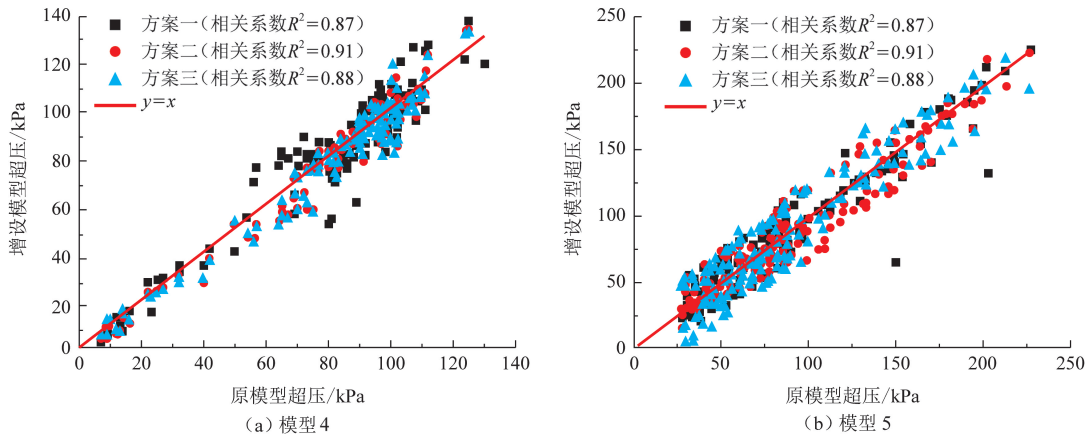


图8 模型相似增补方案应用验证

Fig.8 Validation of supplementary plan

分析时,可忽略等效直径小于0.06 m的障碍物,并将等效直径小于0.08 m的障碍物用对应尺寸的圆管代替,以减轻建模工作量,并能保证结果精度。

对于概念设计阶段海洋平台,由于缺少详细的信息,一般通过经验、统计的方法设置圆管,代表区域拥塞程度。根据平台的相似性^[3],给出了不同平台的拥塞度定义,即每立方米体积内圆管的长度值,但没有给出对应的圆管直径。推荐以直径为0.08 m的圆管表征平台拥塞度,研究设备布局合理性。

5 结 论

(1)在保障超压结果准确度的基础上,基于FLACS的海洋平台燃爆数值模型核心区域网格尺寸为0.2 m。

(2)对海洋平台在役阶段的燃爆风险分析中,建议直接忽略等效直径小于0.06 m的障碍物,并将等效直径小于0.08 m的障碍物用对应尺寸的圆管代替,既简化建模工作量,又可准确还原拥塞度。

(3)可将等效直径为0.08 m的圆管用于概念设计阶段的燃爆数值建模,用以代表平台拥塞程度,以快速开展燃爆风险评价,获取最优设备布局形式。优化方案合理可行,建模指标具有工程适用性。

参考文献:

- [1] Det Norske Veritas. Accident statistics for floating offshore unites on the UK continental shelf(1980—2005) [R]. London: Health and Safety Executive, 2007.
- [2] PAIK J K, CZUJKO J, KIM B J, et al. Quantitative assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations[J]. Marine Structures, 2011, 24(2): 73-96.
- [3] HUSER A, FOYN T, SKOTTENE M. A CFD based approach to the correlation of maximum explosion overpressure to process plant parameters[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(3): 324-331.
- [4] VIANNA S S V, CANT R S. Explosion pressure prediction via polynomial mathematical correlation based on advanced CFD modelling[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1): 81-89.
- [5] GUPTA S, CHAN S. A CFD based explosion risk analysis methodology using time varying release rates in dispersion simulations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 39: 59-67.
- [6] Norwegian Oil Industry Association, Federation of Norwegian Industry. Risk and emergency preparedness assessment: NORSOK Z-013 [S]. Strandveien: Standards Norway, 2010.
- [7] ISO/TC67/SC7/WG3. Petroleum and natural gas indus-

tries—specific requirements of offshore structures part 3: topside structure; ISO 19901-3[S]. Vernier: International Organization for Standardization, 2010.

- [8] Steel Construction Institute. Burchfield explosion mechanism phase 1 [R]. London: Health and Safety Executive, 2009.
- [9] HANSEN O R, GAVELLI F, ICHARD M, et al. Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(6): 857-877.
- [10] MIDDHA P, HANSEN O R, GRUNE J, et al. CFD calculations of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: validation against ignited impinging hydrogen jet experiments[J]. Journal of hazardous materials, 2010, 179(1): 84-94.
- [11] MIDDHA P, HANSEN O R, STORVIK I E. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 1034-1038.
- [12] BLEYER A, TAVEAU J, DJEBAILI-CHAUMEIX N, et al. Comparison between FLACS explosion simulations and experiments conducted in a PWR Steam generator casemate scale down with hydrogen gradients [J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 245: 189-196.
- [13] 翟良云,赵祥迪,袁纪武,等.石化行业控制室承爆风险评估方法研究[J].中国安全科学学报, 2009(6): 129-134.
ZHAI Liangyun, ZHAO Xiangdi, YUAN Jiwu, et al. Study on explosion risk assessment method for control room in petrochemical industry[J]. China Safety Science Journal, 2009(6): 129-134.
- [14] 罗振敏,张群,王华,等.基于FLACS的受限空间瓦斯爆炸数值模拟[J].煤炭学报, 2013, 38(8): 1381-1387.
LUO Zhenmin, ZHANG Qun, WANG Hua, et al. Numerical simulation of gas explosion in confined space with FLACS[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1381-1387.
- [15] BRAY K N C. Studies of the turbulent burning velocity [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1990, 431 (1882): 315-335.
- [16] JBMM E. GAME: development of guidance for the application of the multi-energy method [M]. London: Health and Safety Executive, 1998.
- [17] JOHNSON D M, CLEAVER R P, PUTTOCK J S, et al. Investigation of gas dispersion and explosions in offshore modules [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2002.

(编辑 沈玉英)