

Fluent 模拟 LNG 泄漏扩散的有效性评价

庄学强^{1,2}, 尹自斌^{1,2}, 李品芳^{1,2}, 廖海峰^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了评价通用 CFD 商业软件 Fluent 在液化天然气 (LNG) 泄漏扩散模拟上的适用性和有效性, 借助于 Coyote、Burro 等液化天然气泄漏扩散试验数据, 综合国外重气模型评价项目研究成果, 设计了 LNG 泄漏扩散 Fluent 模拟有效性评价方法。先采用 Fluent 对 LNG 现场试验进行建模模拟; 再将模拟结果与现场试验数据做偏差统计分析, 最后将偏差统计值与判断标准及其他模型模拟的偏差统计值做比较, 得出评价结果。评价结果表明: Fluent 能有效地模拟预测 LNG 泄漏扩散危害浓度变化特征, 且具有较好的预测精度, Fluent 应用于 LNG 泄漏扩散风险评价有较高的可信性。

[关键词] 液化天然气; 泄漏; 模拟; Fluent

[中图分类号] X 743

Effectiveness Assessment of Fluent Simulation for LNG Release & Dispersion

ZHUANG Xueqiang^{1,2}, YIN Zibin^{1,2}, LI Pinfang^{1,2}, LIAO Haifeng^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to evaluate feasibility and effectiveness of Fluent simulation for LNG release & dispersion, based on the datasets of LNG release field trials (Burro and Coyote) and the research results from the oversea Heavy Gas Dispersion Evaluation Protocols, an effectiveness assessing method of Fluent simulating LNG dispersion was presented. The assessing procedure was initiated by application of CFD software Fluent. The Statistical Performance Measures were then employed to evaluate the accuracy based on the assessment criteria as per statistics error between experimental data and those from predictions. It shows that Fluent could predict the characteristic of concentration variation from LNG release & dispersion effectively and accurately. It suggests that the results from Fluent simulation are reasonable and Fluent is a suitable CFD software for risk evaluation of LNG release & dispersion.

Keywords: LNG; release; simulation; fluent

[收稿日期] 2016-07-15

[修回日期] 2017-02-18

[基金项目] 交通运输部建设科技项目 (2013328811530); 福建省科技重大平台项目 (2014H2001); 福建省教育厅项目 (JA13181); 厦门南方海洋研究中心项目 (14GZB66NF30); 集美大学博士启动基金 (ZQ2013006)

[作者简介] 庄学强 (1974—), 男, 副教授, 博士, 从事水路危险品运输安全与防污染研究。

0 引言

对 LNG（液化天然气）泄漏扩散的研究主要有实验研究和仿真研究。实验研究包括现场试验和风洞实验，许多著名的大型试验（如 Maplin Sands、Burro、Coyote 和 Falcon 系列试验）等除了研究 LNG 泄漏扩散特征行为外，还为数学仿真模型积攒了丰富的试验数据。随着计算机技术快速发展，LNG 泄漏扩散数学仿真由于费用低、风险小以及可重复性高等优点，成为最被广泛使用的研究方法。成百上千种数学模型被相继开发建立，其中 CFD（计算流体力学）模型被认为是模拟 LNG 泄漏扩散的最好工具，代表着数学仿真研究的方向^[1]。尽管如此，专门的 CFD 模型（如 FLACS、FEM3）由于形式复杂、编程求解难度大，大大限制了其在 LNG 风险预测上的推广应用。随着许多优秀的 CFD 通用商业软件被相继推出，人们迫切地想知道：通用的 CFD 商业软件是否可以有效地用在 LNG 泄漏扩散预测这个专门的问题上。目前流行的 CFD 软件有 Fluent、CFX、STAR-CD 等，其中 Fluent 是目前国际上最流行的商用 CFD 软件包。

本文将借助于国外著名的 Coyote、Burro LNG 泄漏扩散试验数据，参考国外重气模型评价项目研究成果，设计科学的评价方法，对 LNG 泄漏扩散 Fluent 模拟有效性进行评价。

1 LNG 泄漏扩散 Fluent 模拟有效性评价方法

为了评价常用的重气扩散模型在模拟重气泄漏扩散事件上具有更好的“适用性（Fit）”，Hanna 等人相继开展了多个重气扩散模型有效性评估^[2-3]，评价方法主要是分析比较试验数据值与各模型模拟值的偏差。其中，欧盟开展的重气扩散模型评估项目（SMEDIS Project）不但构建了较完整的验证数据库，而且还制订了比以往更科学的评价方法。英国健康与安全实验室（HSL）在 SMEDIS Project 研究基础上开展了 LNG 泄漏扩散模型评估草案研究，专门研究了 LNG 泄漏扩散模型的有效性评价方案。本文综合了前人在重气扩散模型有效性评估项目上取得的研究成果，总结 LNG 泄漏扩散 Fluent 模拟有效性评价方法如下：1）根据 LNG 现场试验情景，采用 Fluent 软件对实验建模仿真计算，模拟 LNG 泄漏扩散过程；2）采用目前国际公认的重气扩散模型偏差分析方法对 Fluent 模拟值与试验实测值作偏差统计分析，计算出各偏差值；3）分析偏差计算结果，参照偏差判别标准，得出 Fluent 模拟是否有效的评价结论；4）借助于文献检索，尽可能获取其他模型工具（PHAST、DEGADIS、FLACS、FEM3 等）对 LNG 泄漏扩散模拟的偏差统计值，通过与 Fluent 模拟的偏差统计值相比较，用于判断 Fluent 模拟是否更有效。Fluent 模拟 LNG 泄漏扩散的有效性评价流程如图 1 所示。

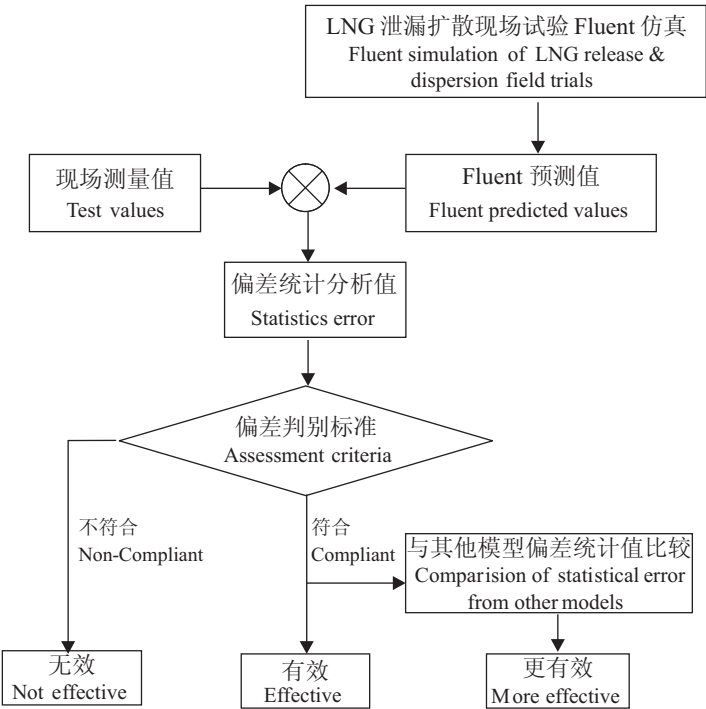


图 1 Fluent 模拟 LNG 泄漏扩散有效性评价流程
Fig.1 Flow Chart of Effectiveness Assessment of
Fluent Simulation for LNG Release & Dispersion

对国外著名 LNG 泄漏扩散试验数据^[4-5]梳理时发现，Burro 的 3、5、7、8、9 号试验，Coyote 的 3、5、6、7 号试验以及 Falcon 的 1、2、3、4 号试验，不但很好地反映出 LNG 泄漏扩散过程重气效

应、气云沉降等关键物理变化特点，而且测量精度较好，数据记录较完整，可选作为 LNG 泄漏扩散 Fluent 模拟有效性评价的试验验证数据。

偏差统计分析（SPM）采用目前国际公认的重气扩散模型偏差分析方法^[6]，该方法能更科学地分析统计 Fluent 模拟值与现场试验测量值间的离散或偏差方向，包括：相对偏差（*FB*）、几何平均偏差（*MG*）、几何平均方差（*VG*）、相对均方误差（*MRSE*）、归一化均方误差（*NMSE*）等统计方法，各偏差计算表达式如下：

$$FB = 2(\overline{X_o} - \overline{X_p})/(\overline{X_o} + \overline{X_p}); MG = \exp(\overline{\ln X_o/X_p}); VG = \exp(\overline{(\ln X_o/X_p)^2});$$
$$MRSE = \overline{(4 \cdot (X_p - X_o))/(X_p + X_o)^2}; NMSE = \overline{(X_p - X_o)^2/X_p \times X_o}。$$

式中： $\overline{X_o}$ 为实测值平均； $\overline{X_p}$ 为模拟值平均； X_o 为实测值； X_p 为模拟值。

FAC2 ∈ [0.5, 2.0] 表示模拟值和实测值比的模拟数据占有所有数据的比值。

FAC2、*NMSE*、*MRSE*、*VG*、*MG* 和 *FB* 的理想值分别为 1、0、0、1、1 和 0。

有了 SPM 方法，还是不能直接评价某个气体扩散模型模拟的“有效”或者“无效”，还需要有普遍认可的偏差判别标准。Hanna 等^[7]经过多年研究，给出了重气扩散模型的偏差判别标准推荐值，即 $0.7 < MG < 1.3$ ； $VG < 1.6$ ； $-0.3 < FB < 0.3$ ； $FAC2 > 0.5$ ； $NMSE < 4$ ，这是目前国际上公认的重气扩散模型偏差判别标准。然而 LNG 泄漏扩散还是有别于一般的重气，因此，HSL 在 Hanna 等的重气扩散模型偏差判别标准研究基础上，针对 LNG 的泄漏扩散特征，专门制定了 LNG 泄漏扩散模型的偏差判别标准^[3]，即： $-0.4 < FB < 0.4$ ； $0.67 < MG < 1.5$ ； $NMSE < 2.3$ ； $VG < 3.3$ ； $FAC2 > 0.5$ 。

2 基于 Burro 现场试验数据集的有效性评价

2.1 Burro 试验情况

Burro 试验和 Coyote 试验都是在一个深为 1 m、直径为 58 m 的水池里开展的，为了让泄漏出的 LNG 迅速蒸发为蒸气，在水池水面上设有压力氮气吹送装置和分流板，泄漏出的 LNG 将迅速在池面铺展开来。25 根测量柱被架设在泄漏源下风向 57，140，400，800 m 圆弧处，每根测量柱上距离地面 1，3，8 m 的高度各安装 1 个天然气浓度传感器，用于测量气云浓度。有关 Burro 3，5，7，8，9 号主要实验数据如表 1 所示。

表 1 Burro 3,5,7,8,9 号主要实验数据
Tab. 1 Main test data of Burro 3,5,7,8,9

试验编号 Test data	泄漏速率 Release rate /($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	LNG 温度 LNG temp/ $^{\circ}\text{C}$	持续泄漏时间 Release time/s	平均风速 Mean wind velocity /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对湿度 Relative humidity /%	环境温度 Ambient temperature/ $^{\circ}\text{C}$
Burro9	18.40	-164	79	5.7	13.1	35.4
Burro8	16.00	-164	107	1.8	4.5	33.1
Burro7	13.57	-164	174	8.4	5.6	33.7
Burro5	11.30	-164	190	7.4	5.6	40.5
Burro3	12.20	-164	167	5.4	5.2	33.8

2.2 Burro 试验 Fluent 仿真

2.2.1 数值仿真流域的确定

数值仿真流域空间尺寸的合理设置是十分必要的，流域尺寸过大，网格数太多，计算资源消耗较大，计算时间过长；流域尺寸太小，边界面离 LNG 泄漏试验水池太近，容易在边界面上形成回流现象，导致计算收敛困难，计算精度不高。鉴于 Burro 等大型 LNG 泄漏扩散现场试验都是在空旷的大气

边界层中开展的, 因此本研究借鉴了计算风工程的研究成果^[8-10], 结合了 LNG 大气泄漏扩散特征 (重气沉降效应), 最终确定的计算流域空间尺寸为 1500 m (L) × 850 m (B) × 50 m (H), LNG 泄漏试验水池中心位于流域的 1/3 L 处, 出口边界面距试验水池 1000 m, 约为水池直径的 17 倍, 基本保证了流场流动得到充分发展。

2.2.2 网格划分及边界面类型确定

网格划分对计算精度有重要的影响, 为了划分出较高质量的网格, 同时兼顾计算效率, 本研究采用了分体划分法对计算流域进行网格划分, 将整个计算流域分割成 29 分块, 全部采用六面体结构网格, 如图 2、图 3 所示。网格划分主要基于如下考虑: 1) 水池附近区域 LNG 浓度变化梯度大, 需要对水池附近区域的网格做加密处理, 而从水池往四周方向发展网格设置为逐渐变疏; 2) 泄漏水池虽然为简单圆形, 但如果直接对圆形区域进行网格划分, 网格质量难以保证, 经反复试划分, 最终将水池圆形区域采用“古铜钱”分割划分, 该方案能得到较高网格质量; 3) 为了能用壁面函数法来模拟近地面流动计算, 对地面进行边界层网格划分, 第一列网格高度为 0.02 m, 扩大因子为 1.2, 总边界层列数为 4, 过渡类型 1:1, 地面边界层划分如图 4 所示。经计算, 所划分的地面边界层 Y^+ 值在 50 ~ 300 之间, 满足壁面函数法使用条件 (Y^+ 在 30 到 500 之间), 地面边界层网格 Y^+ 值如图 5 所示。整个计算流域的网格划分质量统计截图如图 6 所示, 网格总数约为 155 万个, 83.7% 网格倾斜率小于 0.1, 全部网格倾斜率小于 0.6, 没有出现负体积。后续的模拟计算证明, 本研究采用的计算流域网格划分方案不仅节省了计算资源, 计算容易收敛, 而且计算精度有足够的保证。

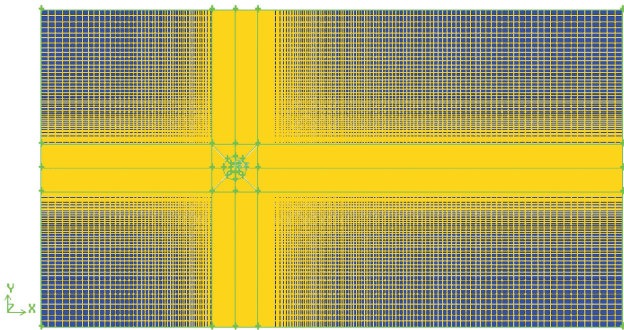


图 2 计算流域的分体网格划分效果

Fig.2 Partition meshing effect of modeling domain

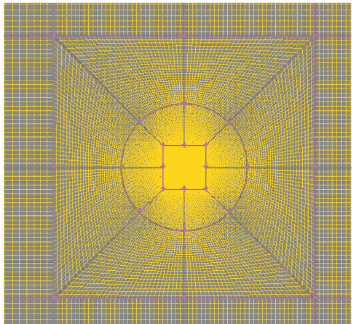


图 3 泄漏水池附近区域网格划分

Fig.3 Meshing in the vicinity of release pool

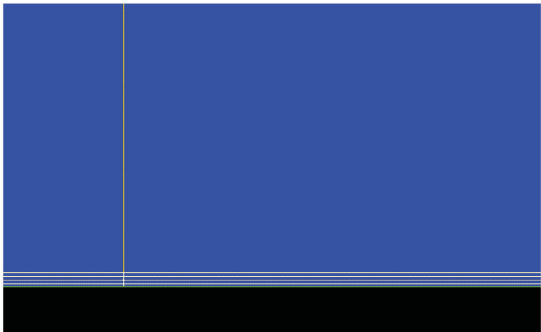


图 4 地面边界层划分

Fig.4 Creating boundary layer for ground

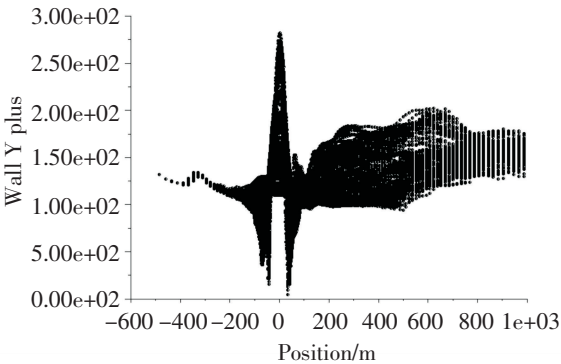


图 5 地面边界层 Y^+ 值截图

Fig.5 Screenshot of Boundary layer Y^+ value on ground

已建立的计算流域包括有前入流面、后出流面、地面、顶面和 LNG 泄漏面等多个边界面。各边界面类型设置如下: 前入流面为风入流面, 由于大气边界层内风流的速率小于 110 m/s, 即马赫数

$Ma = v/c < 0.3$ ，属于不可压缩流动，因此设前入流面的类型为 VELOCITY_INLET。同时，由于试验中 LNG 泄漏强度是已知的，为了准确计算 LNG 蒸气进入计算流域，将 LNG 泄漏入口面设为 MASS_FLOW_INLET，地面设置为 WALL。仿真流域左右侧面和顶面定义为 SYMMETRY（对称边界面），相当于自由滑移的光滑壁面。后出流面边界类型先设置为 OUTFLOW（出流面），等风场稳态计算结束，进行 LNG 泄漏扩散非稳态计算时，改变为 PRESSURE-OUT（压力出口），这样设置可以使整个计算更容易收敛。

2.2.3 仿真计算控制

1) 风场仿真计算。由于所要模拟的 LNG 泄漏扩散现场试验都是在大气边界层环境下开展的，因此对风场的模拟要充分考虑到大气边界层风的特性。风的特性用风特征参数给予表征，平均风采用指数平均风剖面，脉动风采用湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 。平均风剖面 and 脉动风湍流参数的输入采用 UDF（用户自编程序）通过 Fluent 专用接口同风入流面 VELOCITY_INLET 链接。在风场模拟计算中，可以先把 LNG 泄漏入口面 MASS_FLOW_INLET 的质量流量设置为 0，不启动能量方程，采用非耦合稳态计算，气体密度采用不可压缩理想气体定律，湍流模型选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型，近地面的湍流计算采用壁面函数法，Pressure-Velocity Coupling（压力速度耦合）采用 SIMPLE 方式，离散格式选择二阶迎风。

2) LNG 泄漏扩散仿真计算。这时启动能量方程和组分输运方程，设混合材料为 methane-air（甲烷-空气），选择非稳态计算；根据模拟的试验情况，编制 LNG 泄漏速率 UDF 程序，经 Fluent 专用接口与 MASS_FLOW_INLET 链接，LNG 泄漏方向设为竖直向上，温度为 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；LNG 泄漏扩散后，周边的温度将会降低，地面与流场间将存在热交换，因此还必需根据热交换规律编制地面和流场间热传递 UDF 程序，耦合到地面 WALL 和流场能量方程源项。LNG 泄漏扩散模拟刚开始时，由于流场将发生激烈的物质和能量耦合，计算有可能发散，因此欠松弛因子不能设太大（最好设 $0.1\sim 0.2$ ），时间步长取 0.01 s ，随后可视情况逐渐加大时间步长。

2.3 Fluent 对 Burro 仿真结果的有效性评价

采用 Fluent 对 Burro 现场试验建模拟计算，从模拟结果中获取下风向 57, 140, 400, 800 m 处最大浓度值，并与试验实测值相比较。结果表明，Fluent 基本能预测最大浓度发展变化，如表 2 所示（表 2 中“实测值”指的是离地面 1 m 高度的气体传感器测量值；“—”表示由于气体传感器故障导致实测值缺失）。运用 SPM 对表 2 的模拟值和实测值做偏差统计计算，得出单个实验和系列实验综合的 SPM 结果，如表 3 所示。通过与 HSI 推荐的判别标准比较后发现，无论是单个实验还是系列实验综合统计，Burro 试验 Fluent 模拟的偏差统计值（ FB 、 VG 、 MG 、 $MRSE$ 、 $NMSE$ 、 $FAC2$ ）都符合偏差判别标准规定，表明了 Fluent 软件对 Burro 试验模拟的适用性和有效性。

为了比较 Burro 系列实验 Fluent 模拟与其他模型模拟的“有效”程度，本文借鉴了 O R Hansen 等^[11-12]的研究成果，将 DEGADIS、PHAST 等其他模型对 Burro 系列试验模拟的几何平均偏差（ MG ）和几何平均方差（ VG ）标注在同一个纵坐标为 VG 、横坐标为 MG 的图上，如图 7 中的“■”符号所示。坐标点（1,1）为理想模型的所在位置，简称“理想点”。哪个模型在图中的标注点离“理想点”越近，说明该模型对 Burro 系列实验的模拟越有效。由图 7 可见，相比于其他模型，Fluent 模型离坐标点（1,1）明显更近，表明了采用 Fluent 对 Burro 模拟将会更准确。

From value	To value	Count in range	% of total count (1550400)
0	0.1	1297928	83.72
0.1	0.2	108052	6.97
0.2	0.3	74316	4.79
0.3	0.4	48244	3.11
0.4	0.5	21380	1.38
0.5	0.6	480	0.03
0.6	0.7	0	0.00
0.7	0.8	0	0.00
0.8	0.9	0	0.00
0.9	1	0	0.00
0	1	1550400	100.00
Measured minimum value: 1.30573e-010			
Measured maximum value: 0.5			

图 6 计算流域的网格 Skewness 统计截图
Fig.6 Statistical screenshot meshing quality of modeling domain Skewness

表 2 Burro 试验实测值与 Fluent 预测值对比
Tab.2 Comparison of Burro test and Fluent predicted data

下风向距离 Downwind distance/m	甲烷气体体积分数 Volume fraction of CH ₄ /%									
	试验实测值 Test data					Fluent 模拟值 Predicted data				
	Burro3	Burro5	Burro7	Burro8	Burro9	Burro3	Burro5	Burro7	Burro8	Burro9
57	22.40	19.04	17.94	—	—	20.78	17.36	19.19	26.70	10.09
140	8.99	9.60	7.13	16.49	9.60	7.43	8.02	8.96	17.08	8.75
400	0.80	2.42	3.86	4.25	3.96	1.12	2.02	4.73	5.73	3.37
800	0.40	0.41	0.80	1.93	1.40	0.62	0.27	1.36	2.56	1.10

表 3 Burro 现场试验 Fluent 模拟偏差统计 Tab.3 Statistics error between Fluent prediction and Burro data					
实验序号 NO. trial	FB	MRSE	MG	VG	FAC2
Burro 3	-0.125	0.085	0.880	1.091	1
Burro 5	0.216	0.061	1.243	1.064	1
Burro 7	-0.254	0.092	0.773	1.100	1
Burro 8	-0.204	0.056	0.814	1.058	1
Burro 9	-0.192	0.046	1.214	1.048	1
Burro series	-0.038	0.070	0.962	1.074	1

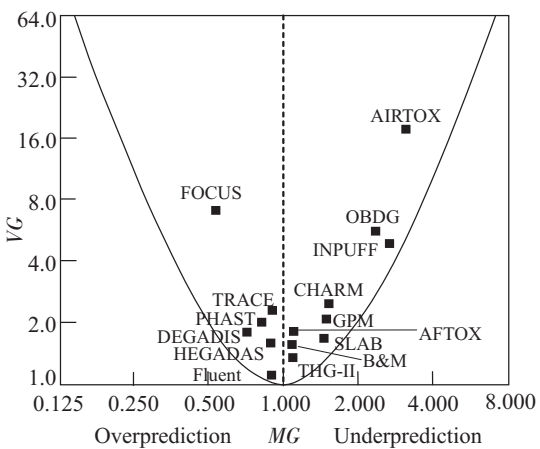


图 7 各种模型对 Burro 试验的 MG 与 VG 偏差统计
Fig.7 Models performance measures(MG and VG) for Burro series

3 基于 Coyote 现场试验数据集的有效性评价

Coyote 系列试验是在 Burro 试验的同一水池上开展的, 只不过 LNG 泄漏时间相对较短, 泄漏量较小, 蒸气云扩散范围较小, 为此在下风向距离泄漏源 140 ~ 400 m 之间较小范围内架设气体浓度测量桩, 气体传感器离泄漏源更近。Coyote 3、5、6、7 号试验主要数据如表 4 所示。

表 4 Coyote 3,5,6,7 号试验主要数据
Tab.4 Main test data of Coyote 3,5,6,7

试验编号 Test data	泄漏速率 Release rate /m ³ · min ⁻¹	LNG 温度 LNG temp /℃	持续泄漏时间 Release time/s	平均风速 Mean wind velocity /m · s ⁻¹	相对湿度 Relative humidity /%	环境温度 Ambient temperature/℃
Coyote 3	13.5	-164	65	6.0	11.3	37.9
Coyote 5	17.1	-164	98	9.7	22.1	27.9
Coyote 6	16.6	-164	82	4.6	22.8	24.3
Coyote 7	14.0	-164	111	6.0	22.2	25.3

同样的, 先用 Fluent 对 Coyote 试验建模, 按照现场试验传感器布设空间位置, 在虚拟流场中设置相应的监控点, 进行仿真后输出各监控点处气体浓度随时间变化情况, 再与相应的传感器实测值做

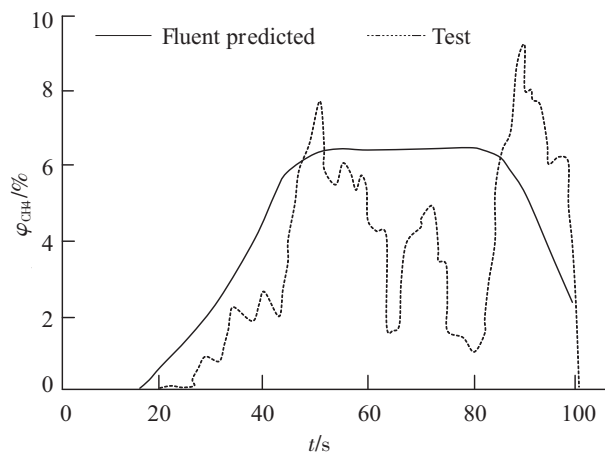


图 8 Coyote 3(140,0,1)处体积分数-时间
实测值与预测值比较

Fig.8 Comparison of Coyote 3test and Fluent
predicted volume fraction on point of (140,0,1)

比较。图 8、9 分别为 Coyote 3、5 试验下风向 (140, 0,1) (单位: m) 处气体体积分数随时间变化的 Fluent 模拟和传感器实测对比图; 图 10 为 Coyote 5 试验下风向 (200,0,1) (单位: m) 处气体体积分数随时间变化的 Fluent 模拟和传感器实测对比图。

对 Coyote 3、5、6、7 号试验各监控点的 Fluent 模拟值与实测值进行偏差统计并做综合处理, 得出的 Fluent 模拟综合偏差统计值, 其与 SLAB 和 DEGA-DIS 模拟相比较, 如表 5 所示。由表 5 可见, Fluent 比 SLAB 和 DEGADIS 能更有效地预测 Coyote 现场试验的气体 (体积分数) 扩散变化情况。

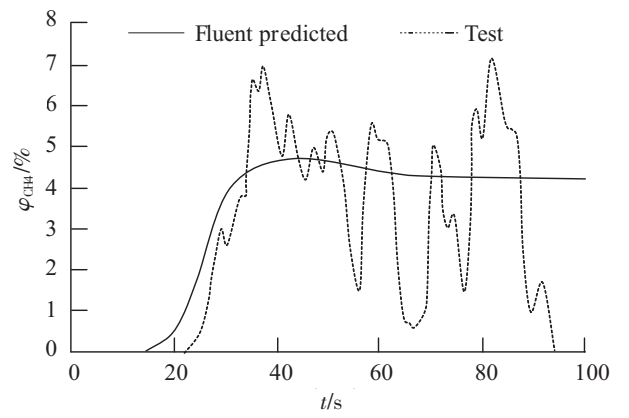


图 9 Coyote 5(140,0,1)处体积分数-时间
实测值与预测值比较

Fig.9 Comparison of Coyote 5test and Fluent predicted
volume fraction on point of (140,0,1)

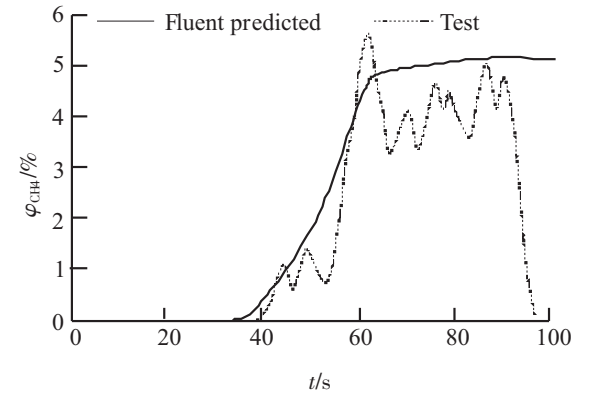


图 10 Coyote 5(200,0,1)处体积分数-时间实测值
与预测值比较

Fig.10 Comparison of Coyote 5test and Fluent
predicted volume fraction on point of (200,0,1)

表 5 Coyote 现场试验 Fluent 模拟偏差统计

Tab.5 Statistics error between Fluent prediction and Coyote data

偏差统计 Statistics error	MG	FB	VG	NMSE	MRSE	FAC2
理想值 Ideal values	1	0	1	0	0	1
评价标准 Assessment criteria	(0.67,1.5)	(-0.4,0.4)	< 3.3	<2.3	-	>0.5
Fluent	0.932	-0.101	2.330	0.232	0.115	0.87
SLAB	0.732	0.238	5.324	0.628	0.710	0.82
DEGADIS	0.609	-0.402	11.833	0.672	0.732	0.74

4 结语

为了评价通用 CFD 商业软件 Fluent 在 LNG 泄漏扩散预测上的适用性和有效性,研究制定了 LNG 泄漏扩散模拟有效性的评价方法,收集了国外大型 LNG 泄漏扩散现场系列试验 (Burro、Coyote) 的试验数据,采用 SPM 方法对测量值与 Fluent 预测值进行偏差统计。统计分析结果表明,Fluent 不但能有效的模拟预测 LNG 泄漏扩散浓度变化特征,且具有较好的预测精度,将 Fluent 应用于 LNG 泄漏扩散风险评价有较高的可信性。

[参考文献]

- [1] 庄学强, 廖海峰. 液化天然气泄漏扩散数值模型分析 [J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2011, 16(4): 292 - 295.
- [2] DAISH N C, BRITTER R E, LINDEN P F, et al. SMEDIS: Scientific model evaluation of dense gas dispersion models [J]. Int J Envir Pollution, 2000, 14(1-6): 39-51.
- [3] LVINGS M J, JAGGER S F, LEE C J. Evaluating vapor dispersion models for safety analysis of LNG facilities research project [R]. Massachusetts: The Fire Protection Research Foundation, Quincy, 2007.
- [4] GOLDWIRE H C, RODEAN H C, CEDERWALL R T, et al. 1983 Coyote series data report: LLNL/NWC 1981 LNG spill tests dispersion, vapor burn and rapid-phase transitions [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1983.
- [5] BROWN T C, CEDERWALL R T, CHAN S T, et al. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field [R]. Chicago: Gas Research Institute Report, 1990.
- [6] SPYROS SKLAVOUNOS, FOTIS RIGAS. Simulation of coyote series trials-Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions [J]. Chemical Engineering Science, 2006(61): 1434-1443.
- [7] HANNA S R, HANSEN O R, DHARMAVARAM S. CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 4675-4687
- [8] BEKELE S A, HANGAN H. A comparative investigation of the TTU pressure envelope numerical versus laboratory and full scale results [J]. Wind and Structures, 2002, 5(2/3/4): 337-346.
- [9] 殷慧君. 膜结构风荷载的数值模拟研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [10] EASOM G. Improve turbulence models for computational wind engineering [D]. Nottingham UK: The University of Nottingham, 2000.
- [11] 黄琴, 蒋军成. 液化天然气泄漏扩散实验的模拟 CFD 验证 [J]. 工业安全与环保, 2008, 34(1): 21-23.
- [12] HANSEN O R, MELHEIM J A, STORVIK I E. CFD-Modeling of LNG dispersion experiments [C] //2007 AIChE Spring National Meeting-Conference Proceedings. Houston, Texas: AIChE, 2007: 22-26.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)