

基于 Monte-Carlo 方法的爆炸碎片飞散仿真

周宵灯, 魏永松, 刘 昭, 刘 童

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要:为合理预测某型液体运载火箭爆炸生成碎片的危害区域, 保证地面发射场设施设备及人员的安全, 采用 Monte-Carlo 方法模拟了爆炸碎片的飞散轨迹, 分析了碎片初速和火箭爆心高度对碎片散布的影响。结果表明: 火箭爆炸碎片初始速度是影响碎片最大飞行距离的重要因素, 火箭爆炸碎片的最大飞行距离随着碎片初始速度的增大而增大, 但随着碎片初始速度的增大, 碎片最大飞行距离的增长幅度慢慢减小; 随着爆心高度的不断增加, 爆炸碎片飞行距离概率分布曲线的变化程度不大。本文使用美国 PYRO 项目中的爆炸试验数据, 验证了数值仿真的可靠性和爆炸碎片飞散模型的可用性。

关键词:爆炸碎片; 数值模拟; Monte-Carlo 方法; 液体火箭

本文引用格式:周宵灯, 魏永松, 刘昭, 等. 基于 Monte-Carlo 方法的爆炸碎片飞散仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(S2): 80-84.

Citation format:ZHOU Xiaodeng, WEI Yongsong, LIU Zhao, et al. Simulation of Explosive Debris Dispersion Based on Monte-Carlo Method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(S2): 80-84.

中图分类号:V475

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)S2-0080-05

Simulation of Explosive Debris Dispersion Based on Monte-Carlo Method

ZHOU Xiaodeng, WEI Yongsong, LIU Zhao, LIU Tong

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: In order to reasonably predict the hazardous area of debris generated by the explosion of a liquid launch vehicle and ensure the safety of facilities and personnel in the ground launching site, the Monte-Carlo method was used to simulate the trajectory of debris dispersion, and the effects of debris initial velocity and rocket core height on debris dispersion were analyzed. The results show that the initial velocity of rocket explosive debris is an important factor affecting the maximum flying distance of debris. The maximum flying distance of rocket explosive debris increases with the increase of the initial velocity of debris, but with the increase of the initial velocity of debris, the increase range of the maximum flying distance of debris decreases slowly. Lines do not change much. In this paper, the reliability of numerical simulation and the availability of explosive debris dispersion model are verified by using the explosion test data of PYRO project in the United States.

Key words: explosive debris; numerical simulation; Monte-Carlo method; liquid rocket

液体运载火箭发生意外爆炸会产生巨大的能量, 造成内部贮箱和箭体结构无法承受而发生结构分解或撕裂, 产生各种形状、尺寸和质量的碎片。爆炸碎片初速高, 并随机向周围飞散, 这些高速运动的碎片会对地面发射场设施设备及人

员造成毁伤, 是一个潜在的重大危险源。开展在极端环境条件下爆炸碎片的飞散轨迹及其影响因素的研究对发射场的安全性评估和安全防护具有一定的指导意义。

目前国内还缺乏完整的实际运载火箭爆炸碎片的相关

收稿日期:2019-07-25; **修回日期:**2019-08-20

作者简介:周宵灯(1994—), 男, 主要从事装备理论与装备技术研究。

统计数据,也没有进行过等当量的推进剂爆炸实验^[1]。火箭爆炸碎片飞散轨迹的影响因素较多,在进行理论分析时往往进行一定的简化因此结论缺乏普遍适用性,对实际问题的解决能力有限。数值仿真能够为发射场爆炸碎片的安全分析提供方便、快捷、有效的途径,也是目前重要的研究手段之一。Gayle、Willoughby 等通过整理土星 IV 火箭的模拟爆炸试验碎片数据,研究了爆炸碎片的质量、飞散方位、飞行距离、大小形状和初始速度等参数的分布^[2-6]。Chrostowski J D 和 Wenshui Gan^[7]对战神 I 号火箭爆炸碎片特性进行了详细仿真分析,给出了不被爆炸碎片危害的安全距离。李永远等^[8]分析了液体火箭爆炸当量系数、碎片初始速度和碎片气动参数等关键因素,建立了用于计算、分析和演示的软件平台,为爆炸碎片散布分析提供有效的工具。

本文将在国内外相关研究的基础上,结合该型运载火箭相关参数利用理论分析和数值仿真相结合的方法,模拟爆炸碎片的飞散轨迹,分析碎片初速和火箭爆心高度对碎片散布的影响,以为发射场安全性设计以及防护措施设置提供参考。

1 Monte-Carlo 方法

Monte-Carlo 方法又称统计模拟法,是一种以概率和统计理论方法为基础的随机模拟方法^[9]。方法中通常要将需要解决的问题同一定的概率模型相联系,然后通过计算机产生的随机数来进行计算。从文献 10 得到的三维体系内爆炸碎片飞行轨迹方程可知,碎片初速 v_0 、阻力系数 k 、飞散角 φ 和方位角 θ 是影响碎片飞行轨迹的四个参数,其中阻力系数还受到空气密度、迎风角等因素的影响。为了解决多变量造成的碎片飞散轨迹的求解困难,Hauptmanns^[10]引入了 Monte-Carlo 方法。本章基于 Matlab 软件,编程产生随机数,通过大量抽样代入碎片轨迹方程,得到了爆炸碎片的飞行轨迹。整个碎片飞行轨迹求解过程如图 1 所示。

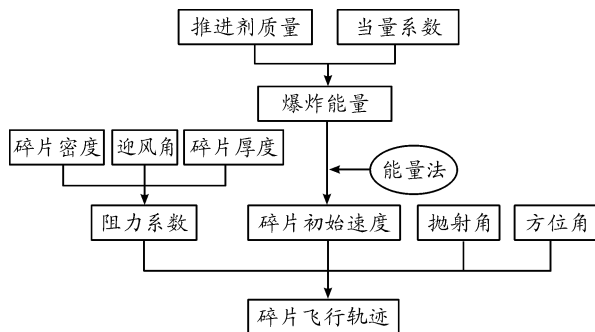


图 1 碎片飞行轨迹求解流程框图

Monte-Carlo 方法的核心思想是通过某一合适的概率模型和将要解决的问题联系起来,然后利用计算机生成随机数进行计算。图 2 为碎片飞行轨迹的 Monte-Carlo 方法数值模拟流程框图。通过定义计算参数的数值或者分布模型,由计

算机产生特定的计算参数,代入碎片飞行轨迹方程,以图像的方式直观展示火箭爆炸碎片的飞行轨迹,为提高仿真计算精度,人为设置了阈值即最大抽样次数,当达到该阈值时输出轨迹图像,否则继续上述步骤直至达到最大抽样。

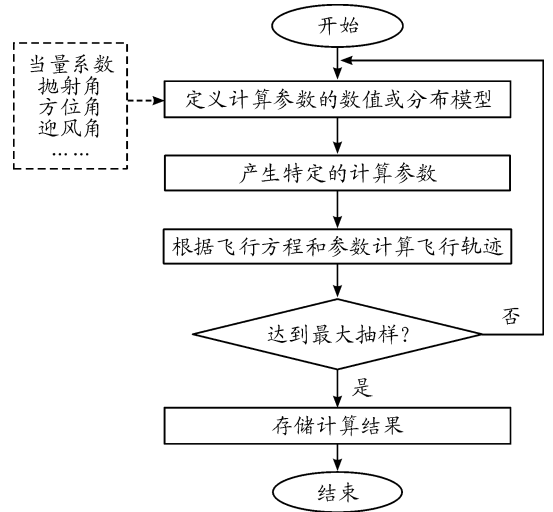


图 2 碎片飞行轨迹的 Monte-Carlo 方法数值模拟流程框图

2 爆炸碎片飞散模型

本文结合某型火箭爆炸碎片初始参数的计算分析结果以及某型火箭贮箱结构尺寸和质量数据等相关数据,整理计算得到所需参数。表 1 中的数据为某型火箭在地面发生完全爆炸时对应的仿真计算参数^[11]。

表 1 仿真计算参数

参数	符号	值或者分布
推进剂质量/kg	m_p	419 344
TNT 当量系数/%	Y	12.2
火箭直径/m	d_0	3.35
火箭平均壁厚/mm	δ	3
火箭质量/kg	M	12 223
碎片初速/($m \cdot s^{-1}$)	v	2 973.2
碎片飞散角	α	均匀分布 $[0, 90^\circ]$
碎片方位角	β	均匀分布 $[0, 360^\circ]$
碎片与水平面夹角	α	均匀分布 $[0, 90^\circ]$

通过 Matlab 编程,得到了某型火箭爆炸碎片飞行轨迹的 Monte-Carlo 模拟结果。图 3 为模拟碎片飞散轨迹的三维空间图,图中显示了每个碎片的飞行轨迹,可为接下去的分析计算奠定基础。图 4 为火箭爆炸碎片的落点分布图。碎片散布主要集中在半径为 400 m 的圆形范围内,因此在发射场布局规划中应避免在此碎片落点范围内。

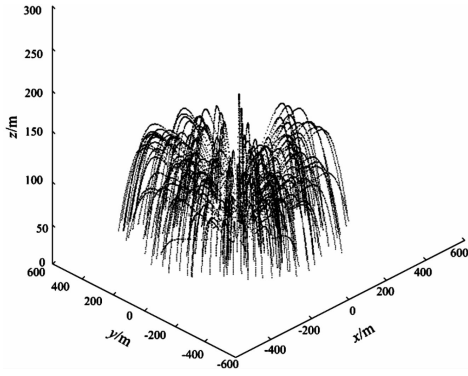


图3 模拟碎片飞散轨迹的三维空间图

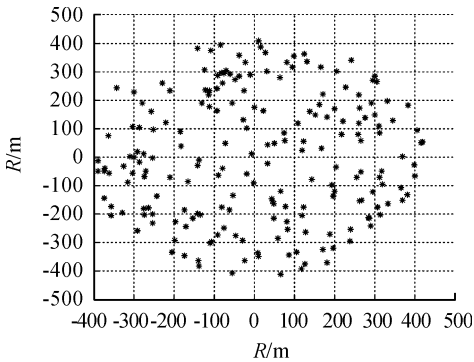


图4 碎片落点分布图

爆炸碎片飞行距离 L 对应的概率是指飞行距离小于 L 的碎片概率。碎片在飞行距离上的概率分布情况如表2。表3为几种液体运载火箭爆炸碎片散布半径统计结果^[12]。

表2 某型火箭爆炸碎片飞行距离概率分布统计结果

概率	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
飞行距离 L/m	40.05	87.48	116.27	150.83	201.36
概率	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
飞行距离 L/m	247.21	288.39	330.62	371.56	416.11

表3 不同型号火箭爆炸碎片散布半径统计结果

火箭型号	推进剂总质量/kg	TNT 当量/kg	碎片散布半径/m
土星-IV	45 360	454	122
宇宙神	13 680	876	122
土星-IV	41 270	1 452	152
土星-IVB	104 782	1 043	183
某型火箭	419 344	51 151	416

从表3可以看出,某型火箭推进剂总质量和估算出的TNT当量要远大于其余型号火箭,因此,该型火箭发生意外爆炸时释放的能量更大,表现为碎片散布半径也越大。

3 爆炸碎片散布影响因素分析

利用 Monte-Carlo 方法进行抽样计算时,抽样次数的多少不仅会影响计算时间,还会对计算精度造成影响。为分析仿真结果对抽样的依赖性,更经济地选取抽样次数,利用表1的相关参数进行仿真计算,得到抽样次数与碎片最大飞散距离的关系曲线如图5所示。当抽样次数较少时,碎片最大飞行距离随抽样次数变化很大,当抽样次数增加到200次以上时,关系曲线的波动幅度较小,碎片最大飞行距离的仿真结果趋于稳定。图6抽样次数与计算精度、计算时间的关系曲线中,曲线1表示数值模拟计算精度随抽样次数收敛的一般曲线,曲线2代表计算时间随抽样次数的变化,可以看出,抽样次数较少时,增加抽样数量可以使计算精度明显提高,而计算时间不会有大的增加。但是当抽样次数达到一定值后,再继续增加抽样次数,对计算精度的提高不明显,计算时间反而迅速增加。综上,抽样次数的最佳取值 P 为200,这样既保证了计算结果精度,又减少了抽样次数,提高了效率。

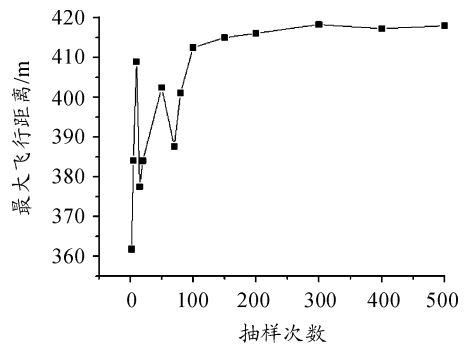


图5 碎片最大飞散距离-抽样次数曲线

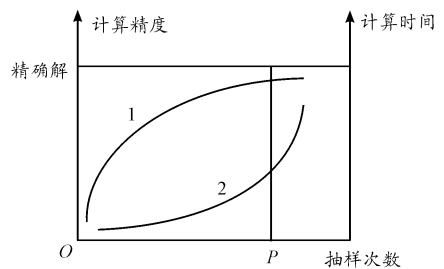


图6 抽样次数与计算精度、计算时间的关系曲线

3.1 碎片初始速度对碎片飞行距离的影响

从碎片飞散轨迹方程可以看出碎片初始速度是影响碎片飞行距离的重要因素。为研究碎片初始速度与碎片飞行距离的关系,选取了6个不同的速度进行计算。不同碎片初速下碎片最大飞行距离如表4所示。图7为利用表中数据作出的碎片最大飞行距离随碎片初速变化曲线。不难发现,爆炸碎片初始速度是影响碎片最大飞行距离的重要因素,火箭爆炸碎片的最大飞行距离随着碎片初始速度的增大而增大,但随着碎片初始速度的增大,碎片最大飞行距离的增长

幅度慢慢减小。

表4 碎片飞行距离统计结果

初始速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	500	1 000	1 500
最大飞行距离/m	223.27	304.17	342.23
初始速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2 000	2 500	3 000
最大飞行距离/m	378.76	408.47	416.93

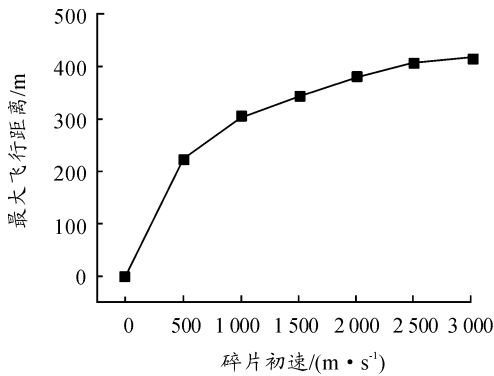


图7 不同初始速度下碎片的最大飞行距离曲线

3.2 爆心高度对碎片飞行距离的影响

当液体运载火箭发生爆炸时,不同爆炸模式下爆炸中心的位置是不同的,为了研究爆心高度对碎片飞行距离的影响规律,根据该型火箭的结构参数,选取 0 m, 15 m, 30 m, 45 m 和 55 m 作为火箭爆炸中心高度,利用爆炸碎片飞散模型进行仿真计算,得到不同爆心高度对应的爆炸碎片飞行距离概率分布统计结果如表 5 所示。

表5 不同爆炸高度下碎片飞散距离概率分布统计结果

概率	爆高 0 m	爆高 15 m	爆高 30 m	爆高 45 m	爆高 55 m
0.1	33.25	51.42	69.75	76.43	83.97
0.2	60.93	75.12	83.37	91.67	98.46
0.3	102.44	115.13	123.99	129.47	135.01
0.4	187.30	189.13	191.25	203.24	206.14
0.5	278.76	281.81	284.21	286.32	288.81
0.6	329.71	338.29	340.98	343.93	345.50
0.7	370.14	379.98	381.84	386.49	387.32
0.8	389.53	396.98	401.57	405.03	409.01
0.9	406.73	415.11	417.03	418.00	419.50
1.0	416.11	420.80	424.94	429.28	432.21

图 8 为不同爆心高度对应的爆炸碎片飞散距离概率分布曲线。相同爆心高度下,随着分布概率的增加,碎片飞散距离越来越远,碎片密度先增加后降低。碎片主要集中分布在 150 m 到 350 m 的环形区域,近距离和远距离的碎片占比较

低。碎片落点距离爆炸点较近时,爆心高度的影响比较明显,随着落点距离的增大,爆心高度的影响越来越小,表现为碎片飞行距离概率分布曲线之间的间距由大逐渐变小,当二者相差达到一定程度后,爆高的影响就可以忽略不计了。液体火箭发生爆炸时,碎片危害性区域较广,往往需要考虑的是爆炸碎片对中远场的危害,因此在分析火箭爆炸碎片危害性时,可以忽略爆心高度对碎片飞散距离概率分布的影响。

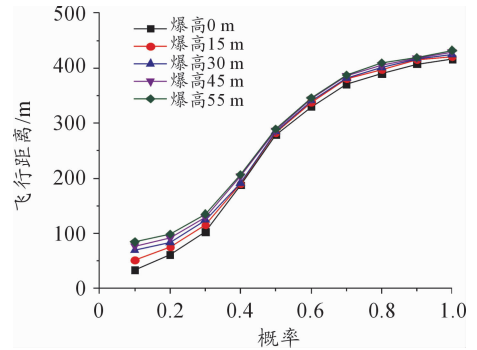


图8 不同爆炸高度下碎片飞行距离概率分布曲线

4 爆炸碎片飞散模型验证

为验证爆炸碎片飞散模型的准确性,本文选择美国宇航局 PYRO 工程中第 62 号实验中获得的碎片相关参数^[13]进行计算对比。仿真计算参数如表 6 所示,选取抽样次数为 200 次,结果如表 7 所示。

表6 仿真计算参数

参数	符号	值或者分布
推进剂质量/kg	m_p	45 359
TNT 当量系数/%	Y	1.1
火箭直径/m	d_0	6.6
火箭质量/kg	M	6 500
碎片密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ_{sp}	2 800
火箭壁厚/mm	δ	5.5
碎片飞散角	α	均匀分布 $[0, 90^\circ]$
碎片方位角	β	均匀分布 $[0, 360^\circ]$
碎片与水平面夹角	α	均匀分布 $[0, 90^\circ]$

从表 7 可以看出,仿真计算结果与 PYRO 工程得到的实验数据存在一定的误差,这种误差对于理论上预估液体火箭爆炸碎片的危害性影响不大,只是相对保守一些,仿真结果和实验数据在整体的变化趋势上是一致的,验证了数值模拟的有效性和可靠性。爆炸过程中碎片的产生以及碎片在空中飞行的过程都是随机的,即使条件相同多次爆炸实验也会得到不同的数据。因此,可以认为本文提出的爆炸碎片飞散模型具有良好的可用性。

表7 碎片飞行距离概率分布统计

概率	实验数据/m	仿真结果/m	相对误差/%
0.1	30.48	35.59	16.5
0.2	54.86	59.37	8.2
0.3	70.10	73.12	4.3
0.4	83.82	88.97	6.1
0.5	91.44	107.21	17.2
0.6	100.58	118.43	17.7
0.7	114.30	132.39	15.8
0.8	129.54	141.45	9.2
0.9	160.02	186.48	16.5
1.0	274.32	314.61	14.7

5 结论

火箭爆炸碎片初始速度是影响碎片最大飞行距离的重要因素,火箭爆炸碎片的最大飞行距离随着碎片初始速度的增大而增大,但随着碎片初始速度的增大,碎片最大飞行距离的增长幅度慢慢减小。随着爆心高度的不断增加,爆炸碎片飞行距离概率分布曲线的变化不大,在考虑爆炸碎片对中远场的危害过程中,可以忽略爆炸中心高度对碎片飞行距离概率分布的影响。

参考文献:

- [1] 陈新华,聂万胜等.液体推进剂爆炸危害性评估方法及应用[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [2] GAYLE J B. Investigation of S-IV All Systems Vehicle Explosion [R]. MSC, Huntsville, Alabama, NASA TM X-53039, April 27, 1964.
- [3] GAYLE J B, BRANSFORD J W. Size and duration of fireballs from propellant explosions [R]. NASA TM X-53314. August 4, 1965.
- [4] WILLOUGHBY A B, WILTON A B, MANSFIELD J. Liquid propellant explosive hazards, Vol. I technical documentary report [R]. AD855086, 1968.
- [5] WILLOUGHBY A B, WILTON A B, MANSFIELD J. Liquid propellant explosive hazards, Vol. II test data [R]. AD857342, 1968.
- [6] WILLOUGHBY A B, WILTON A B, MANSFIELD J. Liquid propellant explosive hazards [R], Vol. III prediction methods. AD855087, 1968.
- [7] CHROSTOWSKI J D, GAN Wenshui. Analysis of a Hypergolic Propellant Explosion During Processing of Launch Vehicles in the VAB [R]. 2010 DDESB Explosives Safety Seminar Portland, OR July 15, 2010.
- [8] 李永远,黄春平等.基于液体运载火箭初始段爆炸碎片散布分析的系统设计[J].导弹与航天运载技术,2011(4):18-22.
- [9] HAUPTMANN U. A Monte Carlo-based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 16(4): 307-312.
- [10] 刘振翼,黄平.柱形罐爆炸碎片抛射的 Monte-Carlo 分析[J].爆炸与冲击,2010,30(6):569-576.
- [11] 戚发轫.长征三号甲运载火箭分册[M].北京:北京宇星舟印刷厂,1999:149.
- [12] 甘朝红.测试发射中运载火箭爆炸危害性[D].北京:装备学院,2012.
- [13] 曹少川,陈景鹏,赵继广.液体火箭爆炸碎片抛射的 Monte-Carlo 分析[J].四川兵工学报,2013,34(9):32-35.

(责任编辑 周江川)

(上接第75页)

参考文献:

- [1] 邵世纲,邢冠楠.新形势下武器装备综合保障体系建设研究[J].航天工业管理,2018,35(3):9-13.
- [2] 傅振峰.提升武器装备综合保障管理的措施[J].航天工业管理,2012,29(8):74-77.
- [3] 王建群,傅振峰.战术型号武器装备综合保障研究与实践[J].航天工业管理,2011,28(6):85-88.
- [4] 邵红伟,黄银秋.IETM在装备信息化保障中的应用研究[J].中国舰船研究,2018(3):74-80.
- [5] 吴国富.装备维修管理信息系统的研究与开发[D].成都:四川大学,2006.
- [6] 杨拥民.装备维修保障信息化体系结构概论[M].北京:国防工业出版社,2012.
- [7] 程跃兵.武器装备售后服务管理系统建设研究[J].指挥控制与仿真,2018,40(4):129-132.
- [8] 邵世纲.新形势下武器装备军民融合保障机制探索研究[J].军民两用技术与产品,2018,34(7):31-34.
- [9] 郭璐,毛勇,姚会举.面向装备综合保障设计的大数据系统研究[J].空天防御,2019,2(1):70-75.

(责任编辑 周江川)