

# 美国航天发射场安全评估与仿真技术应用

史荟燕 陈书驰

(北京航天飞行控制中心)

**摘要** 介绍一个为 NASA 开发的美国航天发射场安全评估决策支持环境,利用仿真技术建立虚拟发射场,对影响发射场安全的因子进行模拟研究,为发射场安全管理人员认识各种因素对安全的影响程度以及采取相应安全措施提供决策依据。同时,结合我国新发射场建设实际,为新一代运载火箭发射场安全评估工作提供借鉴。

**关键词** 航天发射 发射场 安全评估 仿真

**中图分类号** V555 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 03-0034-06

## 1 引言

在航天活动中,安全是指人不受到伤害(死亡或受伤),物(设备或财产)不受到损失,环境不遭到破坏。发射场安全问题一般可以分成两个时间段来研究,一是航天产品进场后至火箭点火发射期间;二是航天器发射升空后 120s 内。目前,国内对航天产品进场后到火箭点火发射这段时间内的安全评估做了详细的分析研究,其中常用的安全性分析方法有:故障模式、影响及危害性分析;故障树分析;危险分析;潜在电路分析和概率风险评估。国内针对发射后 2min 内的安全问题研究介绍较少,主要原因是后一阶段研究涉及发射、燃料、气象、地理信息和人口信息、医学等诸多专业内容,难度很大。本文介绍美国佛罗里达大学为美国国家航空航天局(NASA)开发的发射场安全评估系统,专门讨论航天器发射后 120s 内的发射场安全评估问题,通过建立虚拟发射场对各种影响因素进行模拟仿真,不仅可以让安全管理人员认识各种因素的影响程度,而且可以为采取何种减灾救援方案提供决策依据。本文期望能为开展新发射场安全评估提供思路。

本文的发射场概念不仅指发射场区,而且还包括航天运载工具飞向太空和从太空返回都要经过的

空间以及在地球上投影区域组成的发射场空间。这个空间的实际维度大小以及弹道在地面上的投影依赖于运载火箭的速度和方向,并且随着运载火箭的飞行运动,发射场空间不断包含进新的空间并使已经飞过的区域脱离危险。发射场安全最关注的就是在发射场空间范围内出现事故时暴露人员的安全,也就是可能产生的危害和人员伤亡预计值。爆炸碎片、毒气效应和冲击波超压都对人们造成影响。为了能定量研究各种因素的作用大小,在决策生成过程中提供帮助,NASA 委托开发了一个虚拟发射场系统作为仿真环境的原型,以发射场安全仿真模型、地理信息系统(GIS)和气象信息系统为主要部分,并与航天运载工具特征参数、飞行弹道以及概率计算器/仿真器无缝集成,计算出人员伤亡预计值( $E_c$ )。

## 2 虚拟发射场体系结构

虚拟发射场系统综合集成了地理信息系统、人口模型、气体扩散模型、航天飞机飞行弹道、故障模型以及气象资料,体系结构是模块化的,方便用于任何航天运载工具模型及发射操作区域(见图 1)。

虚拟发射场系统的工作流程可以简述为:一个离散事件仿真器模拟出现事故的时间,这个时间是由发射不同阶段事故发生的累积概率决定的,每个

来稿日期:2009-03-16

作者简介:史荟燕(1983.02—)女,硕士,助理工程师,主要从事航天气象研究。

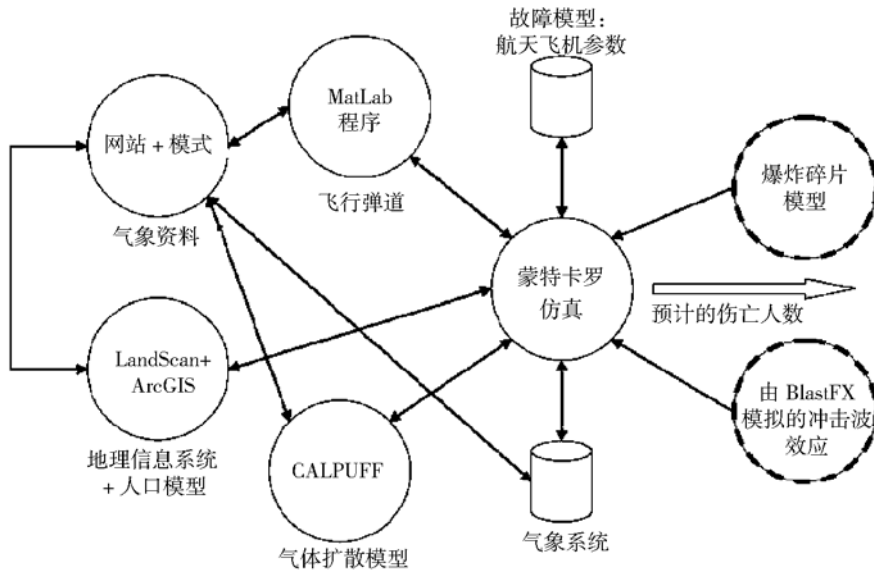


图 1 虚拟发射场及其组成模块

阶段持续的时间不同,发生事故的可能性也不同。根据事故发生的时间,模型参考航天器的飞行路线坐标,从已有模式数据文件中得出残留污染物的量。这些值作为气体扩散模型(CALPUFF)的输入值,每小时预报一次每一种毒素的浓度。这些预报值自动进入人口模型(ArcGIS),作为该系统的一层数据,以确定陆地上发射场空间范围内的污染程度。ArcGIS 的空间分析软件能够确定显示层覆盖的人口数量,我们利用暴露人数和污染物暴露反应函数导出参数,估计伤亡人数。通过大量的模拟运算重复这个过程,最终可以获得足够的信息来生成一个平均边界和相关的置信区间。

蒙特卡罗仿真是一种通过对不确定变量反复生成随机值来进行模拟的技术,以此来解释说明各种风险因子造成的效应,如火箭位置、推进剂消耗、天气的不确定性、火箭制导及其性能偏差等因素。对这些因素进行模拟的需求是极为重要的,比如,有毒气体影响风险就受气象参数和运载火箭参数的可变性、风的不确定性、以及其他一些与天气相关的特征量的影响。对任何预计的飞行路线,安全性要求使用实际条件(输入参数)来确定  $E_c$  值,这些分析将区别出对  $E_c$  值影响最大的参数。由于  $E_c$  值的计算受毒气扩散的限制,所以我们定义了一个临界值为  $30 \times 10^{-6}$ ,即每百万次飞行中有 30 人伤亡。以下分别分析各因素对  $E_c$  值计算的影响。

### 2.1 飞行弹道

图 2 显示的是从东靶场发射的典型射向扇区,

在发射过程中经过大西洋及其周围所有的陆地、海洋和运载火箭所能到达的大气空间,并向东延伸至印度洋和太平洋。通常运载火箭都是向东发射,而且射向方位角能避开大片陆地和人口密集区,例如加勒比群岛、百慕达、南美洲东北部沿海及非洲。从卡纳维拉尔角发射极轨卫星的方位角上限是  $37^\circ$ ,下限是  $44^\circ$ ;发射静止卫星的方位角上限是  $110^\circ$ ,下限是  $114^\circ$ 。因此,第一个重要的影响因素就是飞行弹道。

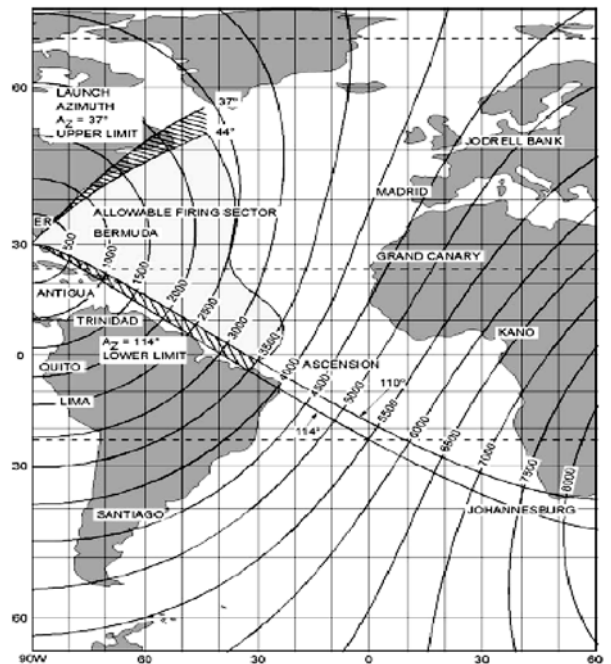


图 2 两种不同的飞行路线

### 2.2 航天飞机故障概率

第二个影响因素是航天飞机的故障概率。虚拟

发射场系统的用户界面允许随机选择任何可能发生的事故,或者选择一个固定时间或地点发生的事故。蒙特卡罗仿真通过生成随机数开始工作,随机数是基于某些事件发生的概率而生成的,而事件则是从为 NASA 开发的一个综合可靠性模式获得的<sup>[4]</sup>。这个可靠性模式提出了由不同的航天飞机系统和子系统

故障而导致空间运输系统失事的总概率(图 3)。为了得到前 120s 内不同阶段的失事概率,本文将这一段时间分成几个代表性的事件,描述了由于其中一个主要部件发生问题而导致失事的概率的时间范围,主要部件包括外贮箱、航天飞机主发动机、集成的固体火箭助推器和轨道飞行器(表 1 和图 4)。

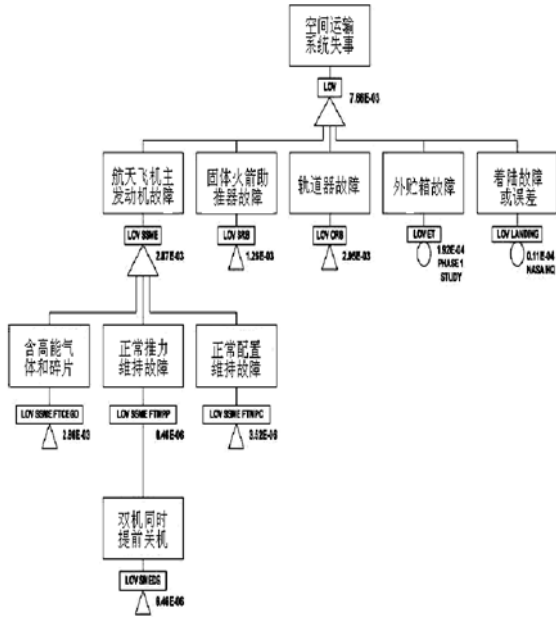


图 3 故障树分析的顶事件

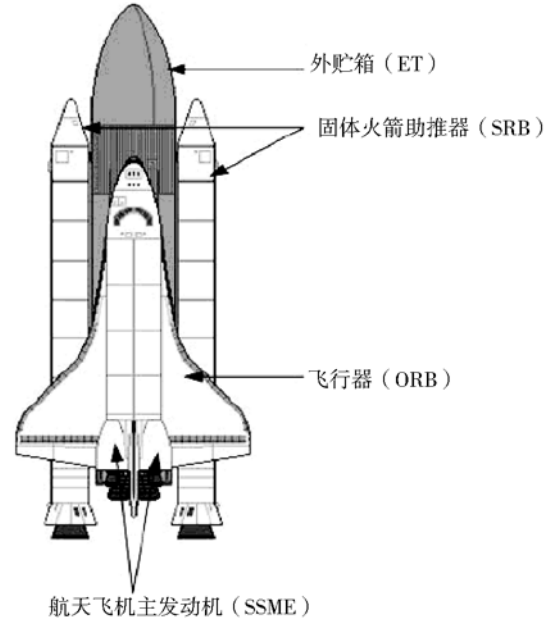


图 4 航天飞机及其主要部件

表 1 航天飞机发射后 120s 内的代表性事件

阶段编号	开始时间(s)	结束时间(s)	时间间隔(s)	事件	具体描述
1	0	0.3	0.3	固体助推器点火	固体助推器点火,航天飞机主发动机达到 100%额定功率,并调整到发射位置,塔架与火箭的所有连接收回或脱落。
2	0.3			起飞	火箭离开发射台。
3	0.3	6	5.7	脱离发射塔	做必要的修正以保持垂直飞行。
4*	6	10	4		
5	10	18	8	开始转弯机动	航天飞机转弯程序开始,获得向 KSC 东北向航迹,与赤道方向倾角 51.6°。
	18			转弯机动结束	航天飞机完成转弯程序,正面朝下,翅膀水平。
6*	18	26	8		
7	26	30	4	减速开始	三个液体燃料主发动机减速到 72%的额定推力,使火箭更容易飞出稠密的低层大气。
	30			减速飞行结束	
8*	30	60	30		
	60			最大 Q 值	最大动压力达到 580psf。
9	60	64	4	加速上升	主发动机开始加速,发动机推力加到 104.5%。
10*	64	120	56		
11	120	126	6	固体火箭助推器分离	推进剂耗尽,固体火箭助推器与外贮箱分离,由降落伞带着落入大西洋,进行回收再利用。

为了更好地估算在不同阶段失事的概率,要求航天飞机专家们必须给出航天飞机任一子系统的故障发生权重,有了这个信息,前 120s 内每一阶段的总概率便可由加权计算得到。

### 2.3 毒性模型

航天飞机依靠两个固体火箭助推器(SRBs)发射进入太空,SRBs 使用铝粉作为燃料,以高氯酸铵作为氧化剂。盐酸(HCl)是一个主要的燃烧副产品,由于其数量相对较大,所以其扩散的方向和浓度是主要的考虑因素。在正常状态下,飞行前 15km,产生的 HCl 总量是 163.3t,而在发射后的前 2min 内,在较高高度上约为 72.5t 多。如果在起飞后不久失事,在某些气象条件下,地面浓度将超过 7ppm,这是正常人对盐酸短期暴露所能承受的极限值(STEL)。

正常健康的人暴露于 HCl 气体随地点不同,接触引起的反应也会从轻微到严重随个体不同。轻度盐酸中毒症状包括过敏和头痛,这些症状在 48h 之内就会消失并且不会影响正常活动,也不需要医疗照顾。中等症状包括咳嗽和呼吸急促,需要一定的医疗照顾。严重症状包括由于空气不流通、大脑供氧不足而导致神志不清。当然,对于敏感人群(儿童、老人、哮喘病人和患有其他呼吸系统疾病的人)来说,STEL 值会更小并且很难预测。

图 5 显示的是敏感和正常人群接触 HCl 气体 30min 后的暴露反应函数(ERFs)。其中敏感人群指的是 14 岁以下的儿童和 75 岁以上的老人,同时也包括患有呼吸系统疾病的人群。Brevard 最近的人口普查资料显示  $\leq 18$  岁和  $\geq 65$  岁的人口占 42%,这个

比例预计到 2010 年会增加到 55%。图中的曲线表明,敏感人群和正常人群接触 HCl 气体 30min,伤亡预计值  $E_c$  达到  $30 \times 10^{-6}$  时,HCl 浓度分别为 15ppm 和 41.5ppm。

### 2.4 毒气扩散模型

虚拟发射场系统运用的是由 Earth Tech 开发和发布的 CALPUFF 模型,很多与 CALPUFF 模型相关的因子都会影响到  $E_c$  值的计算,其中最重要的因子包括毒气烟羽扩散的初始速度、气象条件(气温、湿度、气压、风速和风向)等。

#### 2.4.1 CALPUFF 模型

CALPUFF 采用烟团函数分割方法,垂直坐标采用地形追随坐标,水平结构为等间距的网格,空间分辨率为一至几百公里,垂直不等距分为 30 多层。污染物包括  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $C_mH_n$ 、 $O_3$ 、 $CO$ 、 $NH_3$ 、 $PM_{10}$ (TSP)、Black Carbon,主要包括污染物的排放、平流输送、扩散、干沉降以及湿沉降等物理与化学过程。CALPUFF 模型系统可以处理连续排放源、间断排放情况,能够追踪质点在空间与时间上随流场的变化规律,考虑了复杂地形动力学影响、斜坡流、FROUND 数影响及发散最小化处理。

CALPUFF 模拟系统包括诊断风场模型 CALMET、高斯烟团扩散模型 CALPUFF 和后处理软件 CALPOST 三部分。CALPUFF 模型可运用于静风、复杂地形等非定常条件。CALMET 利用质量守恒原理对风场进行诊断,输出包括逐时风场、混合层高度、大气稳定度(PGT 分类)、各种微气象参数等。CALPOST 为计算结果后处理软件,对 CALPUFF 计算的浓度进行时

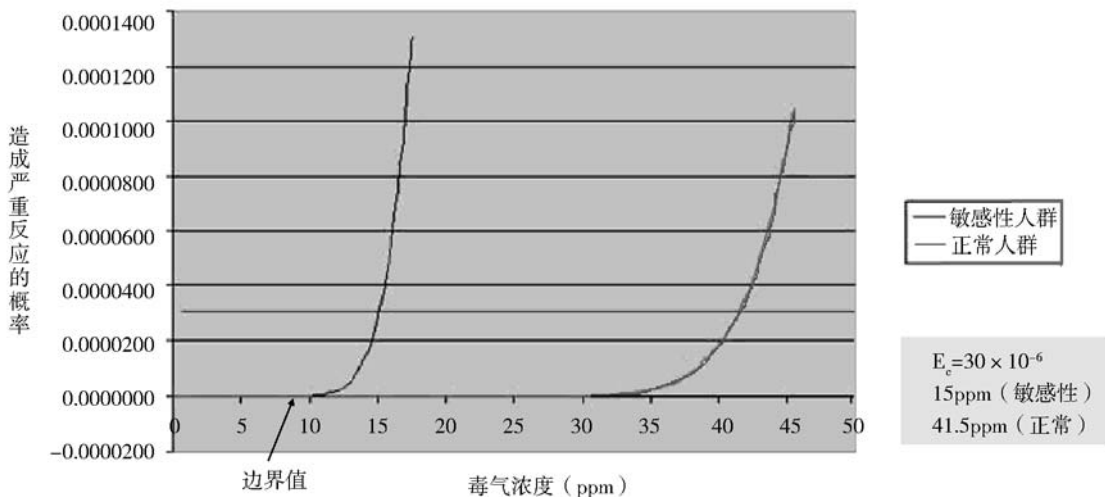


图 5 HCL 的暴露反应函数

间分配处理,并计算出干(湿)沉降通量、能见度等。

#### 2.4.2 地面气象观测资料

地面气象观测资料从国家海洋和大气管理局获得。数据文件包括风速、风向、气温、云量、云底高度、地面气压、相对湿度、降水量和降水类型的近实时观测值。为了提高精度,只要给出气象站的位置和站号,就可以从附近的气象站获得地面气象数据。

#### 2.4.3 高空气象探测资料

这部分探测资料包括风速、风向、气温、气压和高度的垂直廓线,这些资料都是通过访问国家海洋和大气管理局的无线电探空仪数据库获得的。

#### 2.4.4 海洋资料

这部分资料对于了解海上运输和扩散是必需的,为此,有必要获取以下信息:纬度、经度、海气温差、海表层温度、相对湿度、海上混合层高度以及风向风速。这些信息都来自于最近的浮标站。

#### 2.4.5 地球物理资料

这部分资料是 CALMET 模型需要的地球物理学输入数据,包括土地使用类型、下垫面类型、地表粗糙度、反射率、波文比率、土壤热通量、植被冠层热通量和植被代码。

### 2.5 地理信息系统和人口模型

虚拟发射场系统使用 ESRI 公司提供的商业地理信息系统软件—ArcGIS,提供数据可视化、数据查询、分析以及集成能力,并且具备创建和编辑地理数据的能力,以此来区分扩散气体覆盖的区域。我们模拟的

区域基本围绕卡纳维拉尔角地区,包括美国佛罗里达州的 Brevard 和 Orange 县,以及围绕卡纳维拉尔角的大面积海域,模拟区域覆盖扩散源点(卡纳维拉尔角)周围大约 150km 范围。由于卡纳维拉尔角周边地区地势平坦无复杂地形,并且被海洋包围着,所以插入模式中的气象数据在模拟中起着十分重要的作用。模拟区域划分为许多等间距的网格,以方便研究区域内正常发射或爆炸产生的气体浓度。每个网格都是一个正方形的单元格,边长可为几十米到几百千米。

虚拟发射场系统通过陆地扫描全球人口数据库来确定处于特定风险成分中的人口数量,这个数据库是橡树岭国家实验室(ORNL)开发的一个世界人口公众区域数据库,它给出了相关模拟区域的人口资料。数据库包含了每个国家的人口普查资料(通常到省级),并按农村和城市分类把人口分布到 30s×30s 的经纬网格上。为了给每一个指定的单元格赋值,数据库对每个单元格计算了一个概率系数,并应用到人口普查计算中。这个概率系数是根据地形坡度、距离公路的远近、陆地覆盖、夜间灯光和城市密度等因子来计算的。

ArcGIS 是和陆地扫描全球人口数据库一起使用的。在这个地理信息系统环境中,人口分布模型与气体扩散模式结合起来计算航天器失事的  $E_c$  值。空间分析软件是 ArcGIS 的一个延伸工具集,用来查询气体扩散模式中的  $H_{cl}$  数据,选出  $H_{cl}$  浓度超过临界值的地区(图 6 中粗圆白点区)。空间分析软件和人

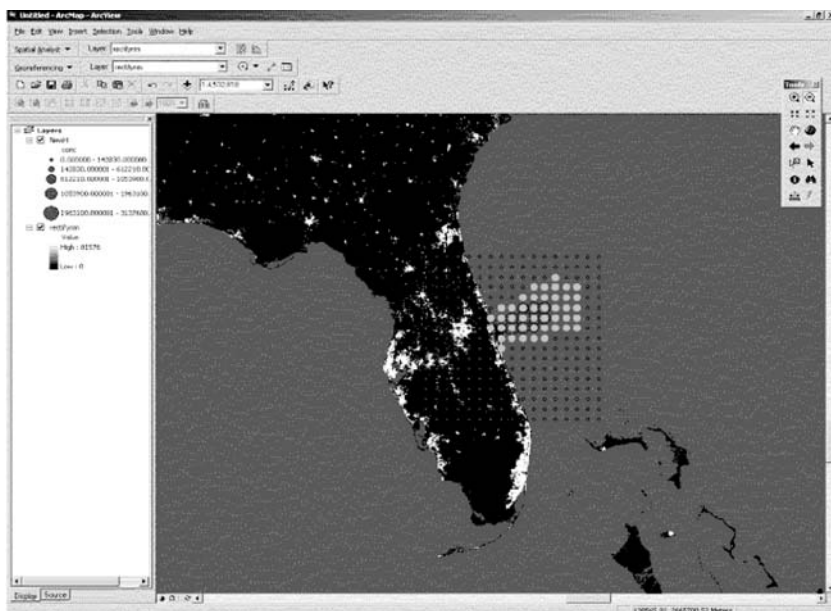


图 6 虚拟发射场系统示例(ArcGIS 输出的 STS-112 发射 34s 后事故模拟结果)

口数据库相结合给出受影响区域暴露于污染气体中的人口数量。然而,这个数字代表的是风险人数的上限,毫无疑问有些人能够采取一些防御措施,或者在气体扩散到达之前就已经逃离了该地区。

### 3 新一代运载火箭发射场安全评估建议

借鉴 NASA 航天发射场的安全评估仿真技术,可以为我们建立新一代运载火箭发射场安全评估系统提供思路,主要应考虑以下几个方面的因素:

(1)新一代运载火箭发射场发射的射向范围为 $90^{\circ}\sim 185^{\circ}$ 。航程约 1200km 之前,火箭将先后飞越我国领空、国际空域和外层空间,飞行高度超过 100km 时,射向的扇面区域能够避开首区地面重要设施、重点保护区和居民密集区,因此这个因素不是影响发射场安全的主要因素。

(2)一般的运载火箭发射后都将依次经过火箭程序转弯、一二级分离、抛整流罩、二三级分离、三级一次点火、三级一次关机、三级二次点火、三级关机、火箭调姿、星箭分离等过程,我们结合新一代运载火箭发射程序的实际情况,可以与工业部门一起合作,请航天专家们对不同阶段的失事概率进行估算。

(3)新一代运载火箭使用液氢、液氧和煤油等清洁型推进剂,对环境污染小,但航天器推进剂仍主要为肼类和绿色四氧化二氮等,毒性较大。通过研制偏二甲肼的暴露反应函数可以估算出受毒气污染的人群数量。

(4)利用 CALPUFF 模型来评估毒气扩散效应,新一代运载火箭发射场建成后可以获得地面气象观测资料和高空气象探测资料,地球物理资料可以由遥感测绘部门提供,由于发射场周围没有建浮标站,所以海上的观测资料只能由海洋局提供。

(5)利用 ArcGIS 软件来确定有毒气体覆盖的区域,这就需要对海南省进行人口普查,并将人口分布插值到模拟区域中。

(6)新一代运载火箭的直径超过常规的运载火箭,一旦发生爆炸,冲击波、爆炸碎片效应都会对安全造成很大的影响,因此在以后的工作中还将对这方面进行深入的研究。

### 4 结束语

利用仿真技术对新一代运载火箭发射场进行模拟仿真,可以协助安全管理人员更多地了解伤亡数字(致命伤、重伤、轻微受伤、没有受伤)以及不同情形下建筑物和设备的损坏程度,从而可以更好地制定减灾方案。◇

#### 参 考 文 献

- [1] American Institute of Aeronautics and Astronautics (1992), Atmospheric Effects of Chemical Rocket Propulsion, AIAA Publications, Washington, DC.
- [2] Anderson, J. and McCaleb, R. (2004), Toxic gas exposure risks associated with potential shuttle catastrophic failures. NASA Technical Report 2004-213284.
- [3] Earth Tech (2002), Addendum for CALPUFF Version 6, Earth Tech, Boston, MA.
- [4] Fragola, J. and Maggio, G. (1995), Probabilistic risk assessment of the space shuttle. Phase 3: a study of potential of losing the vehicle during nominal operation, Vol. 2, Integrated Loss of Vehicle Model Report, report submitted by SAIC (Science Applications International Corporation) to NASA.
- [5] Philipson, L. (1999), An expert elicitation of estimates of exposure limits for space and missile launch toxicants. NASA Technical Report No. 99-400/11.2-01.
- [6] 徐克俊等. 航天发射场可靠性安全性评估与分析技术 国防工业出版社 2006 年

## Space Launch Range Safety Assessment and Simulation Technology

SHI Huiyan CHEN Shuchi

(Beijing Aerospace Flight Control Center, China)

**Abstract:** This paper introduces a space launch range safety assessment decision-support environment of NASA, using simulation technology to create a virtual range, having a series of simulations to the impacting factors. It will help range safety managers estimate the various factors on the degree of security and take relevant safety measures. At the same time, combined with the actual circumstances of our new launch vehicle range, it will provide a reference to safety assessment work.

**Key words:** Space launch, launch range, safety assessment, simulation