

文章编号:1000-582X(2012)04-083-05

地面保护目标相对危险度确定算法设计及应用

何京江^{1,2}, 柴毅³, 魏洪波², 王强²

(1. 西安交通大学 电信学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000;
3. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要:针对运载火箭发射飞行安全控制任务的核心问题——地面保护目标,提出了地面保护目标相对危险度确定算法。此算法将地面保护目标相对危险度的度量考虑为当前时刻保护目标与火箭预示落点的距离、火箭残骸碎片散布和毒气扩散分布、保护目标的人口分布、保护目标重要设施的代价函数,实现了目标的危险程度综合评估。通过将该算法应用于某对策分析及决策支持系统,实现了运载火箭安全控制决策中对地面保护目标危险程度的定量描述,为安控人员实施火箭安全控制决策提供了有效的支持。

关键词:火箭安全控制;地面保护目标;目标相对危险度

中图分类号:TM571.6

文献标志码:A

Design and apply the relative criticality arithmetic of ground protected objects

HE Jing-jiang^{1,2}, CHAI Yi³, WEI Hong-bo², WANG Qiang²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, P. R. China; 2. Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, Sichuan, P. R. China; 3. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: For the core problem of ground safety control—the relative criticality estimation of ground protected objects in the rocket launch process, the relative criticality algorithm of ground protected objects is proposed in the paper. This algorithm transforms the measurement of the relative criticality for ground protected objects into cost function which considers the rocket's current fall point, the distribution of rocket's wreckage and poison gas, the population and the important establishments of the objects, realize the comprehensive evaluation of the relative criticality for different objects. To verify the effectiveness of this algorithm, it is applied to a decision support system to achieve the quantitative evaluation of the ground protected objects in several rocket launching tasks. This algorithm provides quantificational judgment evidence for rocket safety control officers in effective decision-making for safety control of the rocket launching.

Key words: rocket safety control; ground protected objects; the relative criticality of the ground protected objects

收稿日期:2011-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974090);教育部博士点基金资助项目(200806110021)

作者简介:何京江(1970-),女,西安交通大学博士,主要从事计算机结构方向研究,(Tel)13608149799;
(E-mail)hejingjianghj@163.com。

卫星发射是一项尖端科技试验,存在较大的风险,一旦运载火箭发生故障,其携带的大量燃料将会危及发射场、重要设施、人员和飞行航迹下城市的安全,造成非常严重生命财产损失和政治影响,因而必须对运载火箭实施安全控制,以使人员伤亡、设施损失和社会影响降低至最小程度^[1-8]。

地面安全控制实施的关键在于提供及时和精确的安全控制信息,并作出相应安全控制决策。在卫星发射过程中,安控决策依据除了根据事前制定的地面安全控制方案外,更重要的是基于飞行轨迹测量信息实时计算的地面目标相对危险度作出决策。因此,合理有效的地面目标相对危险度分析是圆满完成火箭地面安全控制任务的重要环节之一。

目前,国内外有关研究学者,针对地面保护目标相对危险度分析中弹道数据处理和估计,落点计算,毒气碎片影响分析和风险分析评估等相关问题开展了研究。其中,刘利生、曹贺、徐明友 Tang Yuyan 和 Yicong Li 在研究弹道处理与估计方法时^[1-5], Tang Yuyan 等弹道估计和 Yicong Li 等在研究弹道估计^[6-8]中, Wang TC 和 Mahapatra 等在研究机动目标跟踪^[9-11]方法时,刘仁、程光显等导弹落点计算中的运载火箭(或导弹)落点计算^[11-14],于古胜等航天器实时落点^[15]研究了于落点计算分析方法。

陈新华,周敏,车著明, Philipson, Anderson, Sala-Diakanda, Jose A. Sepulveda, Luis C. Rabelo 和 Serge 等在运载火箭或航天飞机发射故障时的毒气和碎片影响分析估计开展了研究^[16-18],其中, Anderson Sala-Diakanda, Jose A. Sepulveda, Luis C. Rabelo 和 Serge 等还进一步就发射失败时的风险评估方法等开展了研究^[16-17]。

飞行航区地理信息系统的建立,地面安控系统可以实时综合各方因素,更为直观地、精确地获得地面保护目标的度量信息。提出了一种地面保护目标的相对危险度分析计算方法,通过实时获取火箭飞行参数、地面保护目标的地理信息、爆炸碎片散布和毒气扩散分布、受影响人口数量、设施重要程度等信息,计算地面目标相对危险度。

1 地面保护目标相对危险度的定义

地面保护目标相对危险度是指在卫星发射过程中,在某一时刻,为该地面目标实施火箭安全控制的紧急程度。

影响保护目标相对危险度的因素有^[3-6]:

1) 当前时刻火箭预示落点与保护目标的距离。距离越近,则该地面目标实施火箭安全控制的紧急程度越高。

2) 爆炸碎片散布和毒气扩散分布爆炸碎片散布和毒气扩散分布范围内将影响的受危害人口数量及危害程度。

3) 保护目标的人口分布人口分布密度越大,受到火箭爆炸的危害程度越高,为该地面目标实施火箭安全控制的紧急程度越高。

4) 保护目标的重要程度如目标处有核电站、化工厂、油料库、医院和学校等重要设施,为该地面目标实施火箭安全控制的紧急程度较高。

2 地面保护目标相对危险度确定算法设计

火箭爆炸后对地面的威胁范围可以近似看成一个椭圆,如图 1 所示。以 t 时刻火箭瞬时预示落点为左焦点,火箭飞行方向 OA 为落点地面坐标系的 OX 轴,做一个长半轴为 a 、短半轴为 b 的地面水平椭圆平面 XOZ ,平面坐标系原点 O 为椭圆中心。为了保证算法的实时性,考虑威胁椭圆平面之内的地面保护目标。

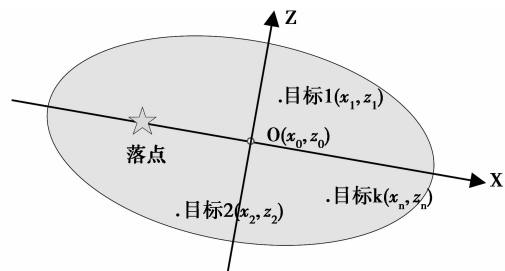


图 1 火箭爆炸威胁范围示意图

$$U(t) = [U_1(t), U_2(t), \dots, U_k(t), \dots, U_{N_k}(t)]^T, \quad (1)$$

$$\frac{x_k^2}{a^2} + \frac{z_k^2}{b^2} \leq 1, k = 1, 2, \dots, N_k,$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻火箭爆炸威胁椭圆平面之内的地面保护目标的相对危险度; $U_k(t)$ 为目标 k 的相对危险度; N_k 为火箭爆炸威胁椭圆范围内的保护目标的数量。

设火箭 t 时刻爆炸,目标 k 的相对危险度 $U_k(t)$ 算法为

$$U_k(t) = \mathbf{K}^T \mathbf{V}_k(t) =$$

$$K_d V_{k,d}(t) + K_r V_{k,r}(t) + K_\rho V_{k,\rho}(t) + K_f V_{k,f}(t) =$$

$$K_d \frac{\max_k Dis_k(t) - Dis_k(t)}{\max_k Dis_k(t)} + K_r \sum_{l=1}^M s_{k,l}^l \rho_{k,l}^{\text{hum}} +$$

$$K_\rho \sum_{i=1}^{N_\rho} \sum_{j=1}^{N_i} s_{k,\rho_i^j}(t') \rho_{k,j}^{\text{hum}} + K_f \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{n=1}^N f_{s,n}^k(s^m), \quad (2)$$

其中, $\mathbf{K}=[K_d, K_r, K_\rho, K_f]^T, 0 \leq K_d \leq 1, 0 \leq K_r \leq 1, 0 \leq K_\rho \leq 1, 0 \leq K_f \leq 1, K_d + K_r + K_\rho + K_f = 1, \mathbf{V}_k(t) = [V_{k,d}(t), V_{k,r}(t), V_{k,\rho}(t), V_{k,f}(t)]^T$ 。 $Dis_k(t)$ 为 t 时刻火箭瞬时预示落点与目标 k 之间的距离值。 $\max_k Dis_k(t)$ 为 t 时刻, 图 1 所示的椭圆内的地面保护目标距离落点的最大距离值。

K_d, K_r, K_ρ, K_f 分别为目标落点距离影响系数、残骸碎片分布影响系数、毒气扩散影响系数和目标重要设施影响系数。

$V_{k,d}(t), V_{k,r}(t), V_{k,\rho}(t), V_{k,f}(t)$ 分别为地面保护目标 k 在 t 时刻的目标落点距离参数值、残骸碎片分布影响值、毒气扩散影响值、目标重要设施影响值。

(x_k, z_k) 为地面保护目标 k 在落点地面坐标系下 XOZ 平面的坐标值, 由地面保护目标 k 的大地坐标值 (L, B, h) 通过坐标转换得到。

1) 大地坐标到地心空间直角坐标的转换

已知目标 k 的大地坐标值 (L_k, B_k, h_k) , 由式(3)得到目标 k 的地心空间直角坐标值 $(X_{G_k}, Y_{G_k}, Z_{G_k})$ 。

$$\begin{cases} X_G = (N_G + h) \cos B \cos L; \\ Y_G = (N_G + h) \cos B \sin L; \\ Z_G = [N_G(1 - e_G^2) + h] \sin B, \end{cases} \quad (3)$$

式中, $N_G = \frac{a_G}{(1 - e_G^2 \sin^2 B)^{1/2}}$, a_G, e_G 分别为 DX-1 号参考椭球体的长半轴和第一偏心率。

2) 地心空间直角坐标系与发射坐标系的转换

假设图 1 中的 O 为发射坐标系原点, 它的天文坐标分别 $(\lambda_0, \varphi_0, H)$, 天文射向为 A_T 。目标位置由发射坐标系坐标 $[X]$ 转换成地心空间直角坐标系坐标 $[X_G]$ 的关系式为

$$[X_G] = [\lambda_0][\varphi_0][A_T]^T [X] + [X_{G_0}], \quad (4)$$

$$\text{其中, } [X_G] = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}, [X] = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, [X_{G_0}] = \begin{bmatrix} X_{G_0} \\ Y_{G_0} \\ Z_{G_0} \end{bmatrix},$$

$$[\lambda_0] = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ \cos \lambda_0 & \sin \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[\varphi_0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[A_T] = \begin{bmatrix} \cos A_T & 0 & \sin A_T \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_T & 0 & \cos A_T \end{bmatrix}.$$

式中 $[X_{G_0}]$ 为原点 O 的大地坐标 $[L_o, B_o, h_o]$ 代

入式(3)求得的地心坐标系的坐标值。

2.1 预示落点与目标距离算法

$V_{k,d}(t)$ 为地面保护目标相对危险度确定算法中目标 k 的落点目标距离参数值。 $V_{k,d}(t)$ 是 t 时刻火箭预示落点与目标 k 之间距离的函数, 函数关系如式(5)所示

$$V_{k,d}(t) = \frac{\max_k Dis_k(t) - Dis_k(t)}{\max_k Dis_k(t)}, \quad (5)$$

其中, $0 \leq V_{k,d}(t) \leq 1$, 由于地面目标的区域信息以及地面地形等因素影响, 落点距保护目标的 2 点之间的距离计算转换为点到若干折线段之间的最短距离计算, 如图 2 所示。残骸落点 o 距离地面目标 k 的边界 ab 段、 bc 段、 cd 段的距离分别为 og 、 of 、 oe 。但 e 点和 g 点没有在边界上, 算法规定, 残骸落点距离地面目标 k 的距离为 of 线段的长度。即 $Dis_k(t)$ 由式(6)确定。

$$\begin{cases} Dis_k(t) = \sqrt{(x_o - x_f)^2 + (z_o - z_f)^2}; \\ (x_c - x_f)(z_f - z_b) = (x_f - x_b)(z_c - z_f); \\ (x_c - x_b)(x_f - x_o) = -(z_c - z_b)(z_f - z_o). \end{cases} \quad (6)$$

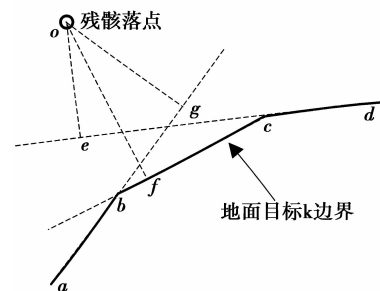


图 2 最短距离示意图

2.2 碎片威胁程度算法

$V_{k,r}(t)$ 为地面保护目标相对危险度确定算法中火箭爆炸残骸碎片对地面目标 k 造成威胁程度的参数值。 $V_{k,r}(t)$ 为碎片分布和目标 k 人口分布密度的函数, 函数关系如式(7)所示

$$V_{k,r}(t) = \sum_{l=1}^M s_k^l \rho_{k,l}^{\text{hum}}, \quad (7)$$

其中, 碎片在目标 k 区域范围内的分布区域面积为 S_c , S_c 按照目标 k 人口密度分布分解为 M 个不同人口密度 $\rho_{k,l}^{\text{hum}}$ 的子区域, 其面积表示为 s_k^l , ($l=1, \dots, M$)。

火箭爆炸碎片分布范围与火箭发生爆炸时的状态(位置、速度、剩余的常规和低温推进剂的质量)、爆炸模式(空中爆炸、地面爆炸)有关。通过确定火箭爆炸威力、碎片初始速度、碎片受力分析, 最后确

定爆炸碎片的散布范围。考虑碎片速度在 XOY 平面的情况,碎片飞行方程如下

$$\begin{cases} \ddot{X} = -\frac{AC_D\rho(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}{2m_p}\cos\alpha + \frac{AC_L\rho(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}{2m_p}\sin\alpha; \\ \ddot{Y} = -g - \frac{AC_D\rho(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}{2m_p}\sin\alpha + \frac{AC_L\rho(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}{2m_p}\cos\alpha, \end{cases} \quad (8)$$

式中: \dot{X} 、 \ddot{X} 分别表示碎片在 X 方向的速度、加速度; \dot{Y} 、 \ddot{Y} 分别表示碎片在 Y 方向的速度、加速度; A 、 C_D 、 C_L 分别为已知的碎片的受力面积、阻力系数、升力系数; ρ 、 m_p 分别为已知的碎片的密度、质量; α 为已知的碎片攻角。由于爆炸发生后,碎片的初始位置 $(x_0, y_0, 0)$ 、初始速度 $(\dot{x}_0, \dot{y}_0, 0)$ 已知,可以用迭代法求解碎片 t 时刻位置 $(x_t, y_t, 0)$,与地形数据 $(x_i, y_i, 0)$ 比较。当碰到地面时 $(y_t = y_i)$,迭代结束。碎片落点坐标为 $(x_t, y_t, 0)$ 。

对于初始速度不在 XOY 平面的碎片,首先根据爆炸初始速度确定碎片与 XOY 平面的夹角 γ ,然后用迭代法确定碎片落点坐标 $(x_t \cos\gamma, y_t, x_t \sin\gamma)$ 。

2.3 毒气扩散危害程度算法

$V_{k,\rho}(t)$ 为地面保护目标相对危险度确定算法中毒气扩散对目标 k 造成的危害参数值。 $V_{k,\rho}(t)$ 为毒气扩散面积、密度和目标 k 人口分布密度的函数,如式(9)

$$V_{k,\rho}(t) = \sum_{i=1}^{N_\rho} \sum_{j=1}^{N_i} S_{k,\rho_i}^j(t') \rho_{k,j}^{\text{hum}}, \quad (9)$$

其中,在 $t' > t$ (t 为爆炸发生时刻)时毒气在目标 k 区域范围内的扩散覆盖面积为 $S_{k,d}(t')$,浓度为 ρ_i 的区域面积为 $S_{k,\rho_i}(t')$, $i=1, \dots, N_\rho$ 。 $S_{\rho_i}(t')$ 按照目标人口密度分布分解为 N_i 个具有人口密度 ρ_j^{hum} 的子区域,其面积表示为 $S_{\rho_i}^j(t)$, $j=1, \dots, N_i$ 。

火箭爆炸毒气扩散范围与火箭推进剂爆炸后的毒气蒸发速率、爆炸上空风场有关。在得到推进剂爆炸后有有毒气体的扩散速率、发射坐标系下的 3 个风速矢量 (u, v, w) ,解毒气扩散方程,获得爆炸 t' s 后毒气在发射坐标系中的扩散浓度 c_i ,确定出毒气扩散范围。每种毒气成份的浓度 $c_i(x, y, z, t')$ 可由以下守恒方程确定

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_i}{\partial t'} + \frac{\partial}{\partial x}(uc_i) + \frac{\partial}{\partial y}(vc_i) + \frac{\partial}{\partial z}(wc_i) = \\ D_i \left(\frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} \right) + R_i(c_i, T) + \dot{W}_{ci}(x, y, z, t'), \end{aligned} \quad (10)$$

式中: t' 为火箭推进剂爆炸后的时间; c_i 为待求的扩

散浓度(百万分之一体积浓度 PPM); D_i 为第 i 种毒气成份的分子扩散系数(当毒气成份确定后,该值是常数); R_i 为第 i 种成份的化学反应生成率; \dot{W}_{ci} 为第 i 种毒气成份毒气蒸发速率; T 为绝对温度, (u, v, w) 为发射坐标系中的已知风速矢量。

2.4 设施重要程度计算

$V_{k,f}(t)$ 为地面保护目标相对危险度确定算法中目标 k 重要设施参数值。 $V_{k,f}(t)$ 是残骸分布和目标 k 重要设施分布的函数,函数关系如式(11)所示

$$V_{k,f}(t) = \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{n=1}^N f_{s,n}^k(s^m), \quad (11)$$

其中:碎片在目标区域范围内的分布区域面积为 S_c , S_c 分解为 N_m 个包含各类重要设施的子区域,其面积表示为 s^m , $m=1, \dots, N_m$, $f_{s,n}^k(s^m)$ 为目标 k 子区域 s^m 内重要设施的代价函数,其可能的取值为 N 。式(12)显示了当 $N=4$ 时,设计确定的 $f_{s,n}^k(s^m)$ 可能取值。

$$\begin{cases} d\text{Imp1, 核电站、重要军事设施;} \\ d\text{Imp2, 化工厂、油料库;} \\ d\text{Imp3, 水库、水电站;} \\ d\text{Imp4, 医院、学校等其他设施。} \end{cases} \quad (12)$$

3 算法应用

从公式(2)可知,地面保护目标 k 的相对危险度 $U_k(t)$ 的 4 个影响因子 $V_{k,d}(t)$ 、 $V_{k,r}(t)$ 、 $V_{k,\rho}(t)$ 、 $V_{k,f}(t)$,需要根据火箭飞行状态(位置、速度、剩余推进剂质量)、爆炸模式、风场数据和目标 k 的地理信息进行实时计算。因此,当算法应用到实时应用系统时,为了保证应用系统的实时性,事先将地面保护目标分别按照人口密度的分布、重要设施的分布划分成不同的区域,以目标属性的形式对 GIS 系统进行扩充。在实时计算地面保护目标相对危险度 $U(t)$ 时,直接提取各目标的相关地理区域划分信息,提高实时计算速度。

地面保护目标相对危险度确定算法已在某对策分析及决策支持系统中编码实现,并在多次卫星发射任务中得到应用,使火箭安控人员对地面保护目标的危险程度有了定性和定量的了解。在某次应用中,算法中各系数的取值如下

$$\begin{cases} K_d = 0.4 \\ K_r = 0.15 \\ K_\rho = 0.15 \\ K_f = 0.3 \end{cases}, \begin{cases} d\text{Imp1} = 1.0 \\ d\text{Imp2} = 0.8 \\ d\text{Imp3} = 0.6 \\ d\text{Imp4} = 0.5 \end{cases}, \begin{cases} a = 25 \text{ km} \\ b = 15 \text{ km} \end{cases}.$$

在某次应用中,某对策分析及决策支持系统与

地面保护目标危险度分析有关的某一时刻局部运行界面如图3所示。

城市名	距落点距离	危险性指数
地面目标1	75.347	0.805
地面目标2	84.292	0.796
地面目标3	35.171	0.745
地面目标4	39.363	0.741
地面目标5	42.562	0.737
地面目标6	47.227	0.733
地面目标7	160.717	0.719
地面目标8	65.890	0.714
地面目标9	80.895	0.699
地面目标10	87.748	0.692
地面目标11	12.095	0.688
地面目标12	93.185	0.687
地面目标13	17.944	0.682
地面目标14	20.187	0.680
地面目标15	23.189	0.677

图3 某时刻局部运行界面

参考文献:

- [1] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 455-461.
- [2] 甘楚雄, 刘冀湘. 弹道导弹与运载火箭总体设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [3] PHILIPSON L. An expert elicitation of estimates of exposure limits for space and missile launch toxicants[R]. Houston, Texas, USA; NASA Technical Report, 1999.
- [4] ANDERSON J, MCCALED R. Toxic gas exposure risks associated with potential shuttle catastrophic failures[R]. Houston, Texas, USA; NASA Technical Report, 2004.
- [5] SALA-DIAKANDA S N, SEPULVEDA J A, RABELO L C. A methodology for realistic space launch risk estimation using information-fusion-based metric[J]. Information Fusion, 2010, 11(4): 365-373.
- [6] RABELO L, SEPULVEDA J, COMPTON J, et al. Disaster and prevention management for the NASA shuttle during lift-off [J]. Disaster Prevention and Management, 2006, 15(2): 262-274.
- [7] INGALLS R G, ROSSETTI M D, SMITH J S, et al. Factors affecting the expectation of casualties in the virtual range toxicity model[C] // Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, Dec. 5-8, 2004. Washington D.C. USA; [s. n.], 2004: 1762-1769.
- [8] 曹贺. 基于天基预警系统的导弹主动段弹道估计算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [9] 徐明友, 丁松滨. 飞行动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] TANG Y Y, HUANG P K. Boost-phase ballistic missile trajectory estimation with ground based radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(4): 705-708.
- [11] LIH Y C, KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y, et al. Trajectory and launch point estimation for ballistic missiles from boost phase LOS measurements [C] // Proceedings of the 1999 IEEE Aerospace Conference, March 6-13, 1999. USA; IEEE, 1999, 4: 425-442.
- [12] WANG T C, VARSHNEY P K. A tracking algorithm for maneuvering targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(3): 910-925.
- [13] MAHAPATRA P R, MEHROTRA K. Mixed coordinate tracking of generalized maneuvering targets acceleration and jerk [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 992-1000.
- [14] 刘仁, 王爱华, 郭桂治. 基于关机点状态的战术弹道导弹落点估计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(1): 27-30.
LIU REN, WANG AI-HUA, GUO GUI-ZHI. Impact point estimation of tactical ballistic missile based on the state of burnout point [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2010, 11(1): 27-30.
- [15] 程光显, 张士峰. 导弹落点精度的鉴定方法——概率圆方法[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 13-16.
CHENG GUANG-XIAN, ZHANG SHI-FENG. Assessment for the accuracy of the fall points—probability circle method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(5): 13-16.
- [16] 于古胜, 李连登, 翟丽丽. 航天器实时落点计算误差修正方法[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(3): 143-146.
YU GU-SHENG, LI LIAN-DENG, ZHAI LI-LI. Error correction method for real-time estimating aircraft fall point [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(3): 143-146.
- [17] 陈新华, 佟连捷, 向四桂, 等. 液体火箭爆炸后有毒气体危害安全距离估算方法[J]. 指挥技术学院学报, 1998, 9(1): 29-34.
CHEN XIN-HUA, TONG LIAN-JIE, XIANG SI-GUI, et al. The method of estimating safety distance of poison gas hazards for liquid propellant rocket explosion [J]. Journal of Institute of Command and Technology, 1998, 9(1): 29-34.

(编辑 侯 湘)