

主战坦克武器系统降阶态易损性分析与评估仿真

李向荣¹, 刘云泉², 赵海龙¹, 赵硕¹, 王国辉¹

1. 装甲兵工程学院兵器工程系, 北京 100072
2. 中国人民解放军65053部队, 大连 116013

摘要 根据降阶态评估方法实施过程,以主战坦克武器系统为对象,进行降阶态易损性分析与评估仿真。在深入分析武器系统各子系统功能的基础上,进行武器系统易损性分析,确定了反应系统功能丧失降阶状态的DS值,并利用由上至下的演绎法构建了功能毁伤树;利用蒙特卡洛随机模拟方法,对二次破片瞬间速度进行模拟,实现弹目交汇处理。利用VC 6.0平台开发了部件级易损性评估仿真系统,进行了功能分析与功能模块设计,并进行具体实例运算与分析。结果表明,部件与命中点之间的相对位置关系,以及是否有遮蔽部件,直接影响部件的毁伤状态。进行装备部件级易损性分析时,不仅要考虑部件易损面积,还须考虑防护与遮蔽。本文研究内容是装甲装备目标部件级易损性评估的重要部分,可为装备战场损伤快速评估与装备精确保障仿真提供基础。

关键词 降阶态;易损性分析与评估;二次破片;毁伤树

中图分类号 TJ012.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.08.015

Degraded state vulnerability analysis and assessment simulation for main-battle tank weapon system

LI Xiangrong¹, LIU Yunquan², ZHAO Hailong¹, ZHAO Shuo¹, WANG Guohui¹

1. Department of Arms Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China
2. Unit 65053, PLA, Dalian 116013, China

Abstract Vulnerability analysis and assessment simulation was carried out with main-battle tank weapon system as the research object according to implementation procedure of degraded state (DS) assessment method. First, DS values revealing loss of functions of each sub-system were identified based on analysis of each sub-system functions. Function damage trees were created using deductive method from top to bottom. To realize threat-target interaction, instant velocity of debris behind armor was simulated using Monte Carlo stochastic simulation method. Component level vulnerability assessment simulation system was developed by Visual C 6.0 platform. Function modules were designed, and one case was run and simulated results were analyzed. It showed that relative space between one component and hit point and whether there are defense components directly affect damage state of the component. In component level vulnerability analysis, not only vulnerability area but also defense and shelter need to be considered. Research in this paper is one important part of component level vulnerability assessment of armored equipment and may provide a foundation for battle damage assessment and exact support simulation.

Keywords degraded state; vulnerability analysis and assessment; secondary debris; damage tree

目标易损性是指在敌对环境杀伤条件下,目标丧失全部或部分作战功能的可能性,目标易损性评估即对目标作战功

能丧失程度的评估。国外对于目标易损性的研究已经相当成熟,对于装甲车辆,美国弹道研究所(BRL)和陆军研究所

收稿日期:2014-09-30;修回日期:2014-12-27

作者简介:李向荣,副教授,研究方向为弹药终点毁伤效应及装备易损性分析与评估,电子信箱:lrx118@163.com;王国辉(通信作者),教授,研究方向为武器系统运用与保障工程,电子信箱:wanguohui1121@sohu.com

引用格式:李向荣,刘云泉,赵海龙,等.主战坦克武器系统降阶态易损性分析与评估仿真[J].科技导报,2015,33(8):89-93.

(ARL)进行易损性研究工作已有40余年,先后提出了累积参数模型、期望值点爆炸模型和随机点爆炸模型等适用于装甲战车的易损性分析模型,模型的研究层次逐步由系统向组件和部件层次过渡,易损性分析和评估的精确性和高效性也不断提升^[1]。目前,国外比较常用的降阶态易损性评估方法属于部件级毁伤评估方法^[2],简称为降阶态(degraded state, DS)法,是1988年美国BRL易损性/生存部提出,以坦克车辆性能降低为度量指标,并根据维持车辆各种功能(如机动性、火力等)任务的相关子系统(如补给、火力、乘员、通信等)来确定车辆性能降低的易损性分析方法。任务相关子系统可通过描述车辆功能性能的互为排斥和详尽的大量DS值确定。如主战坦克控制子系统的毁伤可以定义为4种降阶状态,即子系统未被毁伤、控制能力下降、运动过程中不能进行控制、运动过程中不能控制且控制能力下降。DS法的优点在于,可对每种DS发生概率进行逻辑上合理的和数学上严密的评估;度量指标易于理解,不像功能损失(loss of functions, LOF)那样比较模糊;可为系统易损性分析代码提供定量分析基础。DS法以功能毁伤子系统内的某个毁伤等级的发生概率为比较准则,且概率值通过对DS概率分布函数计算给出。

中国目标易损性研究源于对飞机目标的研究,自从20世纪70年代末正式提出以来,经过30多年的发展,在目标描述、等效靶板方法、易损性建模、毁伤准则、弹目交会处理以及易损性分析方法等方面成效显著。关于装甲车辆的易损性研究,翟晓丽等^[3]对装甲车辆易损性进行了理论分析与毁伤概率模拟计算;余文力^[4]研究了D02末制导炮弹对轻型装甲车辆毁伤效应。1996年,总参谋部军训与兵种部正式立项进行装甲装备战场损伤规律研究;装甲兵工程学院对不同弹药作用下装甲装备战斗毁伤概率进行了研究^[5]。但这些装甲车辆易损性研究没有深入地部件层次毁伤进行分析,并给出部件毁伤状态。为了实现装甲装备战场损伤快速评估与修复、装备精确保障仿真,必须开展部件级易损性评估,给出部件毁伤状态及引起的功能性毁伤等级^[6]。

1 DS值定义与毁伤树构建

1.1 武器系统各子系统DS值定义

DS(降阶态)值,即系统功能毁伤降阶状态值。对DS值进行定义是应用DS法对目标进行易损性评估的关键步骤,根据目标各子系统的任务功能定义DS值,能够详细地表示各子系统的功能毁伤状态,并通过某DS值的组合来体现上一层系统的功能毁伤状态。

首先,分析目标的各功能子系统,将某型主战坦克武器系统分为4大子系统,即坦克炮系统(artillery)、装填系统(load)、辅助武器系统(scatter-gun)和火控系统(control)。然后,将各功能子系统的功能毁伤状态划分 $X_j(j=0, 1, 2, \dots, k)$ 个基本状态, X 为子系统名称代码,下角标 j 为任意的一种功能毁伤的降阶态形式; k 为该子系统基本功能毁伤情形的总

数;其中初始毁伤状态定义为 X_0 ,表示未毁伤状态。以坦克炮系统为例,系统基本毁伤降阶态可定义: A_0 为未毁伤; A_1 为发射精度下降; A_2 为不能调节坦克炮方向; A_3 为不能完成弹药发射。

按英文首、尾字母的大写形式对DS值进行编码,可得到坦克炮系统各DS值为 AY_{0-j} ,装填系统各DS值为 LD_{0-j} ,辅助武器系统各DS值为 SG_{0-j} ,火控系统各DS值为 CL_{0-j} ,其中,坦克炮子系统的各DS值定义见表1。对武器系统进行易损性评估的最终结果将以各子系统DS值的某种组合的形式呈现,例如对整个武器系统的评估结果若是 $AY_1LD_2SG_2CL_2$,则表示武器系统发射精度下降,不能进行补弹、卸弹,失去低空防御能力,不能进行跟踪瞄准。通过对弹目交汇条件进行多次随机模拟,可得出每个组合的概率分布。

表1 坦克炮子系统AY的DS定义
Table 1 DS definition of tank artillery AY

DS定义	毁伤降阶态	DS定义	毁伤降阶态
AY_0	未毁伤	AY_4	AY_1, AY_2
AY_1	射击精度下降	AY_5	AY_1, AY_3
AY_2	不能调节坦克炮方向	AY_6	AY_2, AY_3
AY_3	不能完成弹药发射	AY_7	AY_1, AY_2, AY_3

1.2 子系统DS毁伤树及逻辑计算式

毁伤树包含着各子系统及其部件之间的逻辑关系,以及对应于各逻辑关系的运算法则,建立合理、全面的毁伤树是实现高精度目标易损性评估的基础。毁伤树的构建方法有合成法、判定表法和演绎法等。判定表法和合成法主要用于计算机辅助建树;演绎法是从顶事件由上至下的分析方法,主要用于人工建树。本文采用演绎法,以各子系统的DS值为顶事件,以关键部件的CDS值为底事件,构建DS毁伤树。以坦克炮子系统为例,构建毁伤树并确定毁伤逻辑计算式。

坦克炮子系统部件按 $X_i(i=0, 1, 2, \dots, k)$ 的形式编号,列于表2。除已规定编号的组件毁伤作为中间事件外,其余中间事件的编码可,根据不同层次的需要,定义为 M_i 的形式。例如,对于不能调节火炮方向(AY_2),当方向机驱动能力毁伤(A_6)与高低机驱动能力毁伤(A_{10})两者之一发生时,就导致 AY_2 毁伤事件,故 A_6 与 A_{10} 为串联关系。再对下一级事件进行分析,只有当方向机炮控驱动能力毁伤(M_1)和方向机手动驱动能力毁伤(M_2)同时发生时,才会导致 A_6 事件;只有当高低机手动驱动能力毁伤(M_3)和高低机炮控驱动能力毁伤(M_4)同时发生时,才会导致 A_{10} 事件,所以 M_1 与 M_2 、 M_3 与 M_4 应该是并联关系。再按此方法对下一级事件进行分析,构建的“不能调节火炮方向”这一毁伤事件的毁伤树如图1所示。

表2 坦克炮系统关键组件从属部件编码定义
Table 2 Code definition of key components of tank artillery

编号	名称	编号	名称	编号	名称
X ₁	坦克炮身管	X ₁₀	抽筒装置	X ₁₉	齿圈固定器
X ₂	炮尾	X ₁₁	方向机箱体	X ₂₀	手动发射装置
X ₃	连接筒	X ₁₂	炮塔电动机	X ₂₁	电发射装置
X ₄	抽气装置	X ₁₃	电磁离合器	X ₂₂	高低机蜗轮箱
X ₅	炮门闭锁装置	X ₁₄	测速电机	X ₂₃	传动装置
X ₆	炮门击发装置	X ₁₅	保险离合器	X ₂₄	解脱装置
X ₇	炮门保险装置	X ₁₆	行星排	X ₂₅	离合装置
X ₈	关门装置	X ₁₇	涡轮蜗杆	X ₂₆	驻退机
X ₉	复拨器	X ₁₈	消除空回机构	X ₂₇	复进机

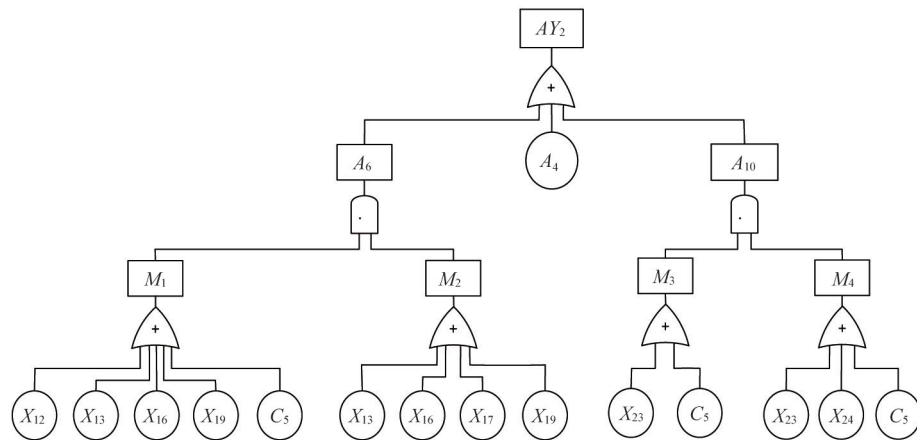


图1 不能调节火炮方向的毁伤树

Fig. 1 Damage tree in the case where artillery direction could not be adjusted

AY₂的计算式为

$$\begin{aligned}
 AY_2 &= A_6 + A_4 + A_{10} = M_1 \cdot M_2 + A_4 + M_3 \cdot M_4 \\
 &= (X_{12} + X_{13} + X_{16} + X_{19} + C_5)(X_{13} + X_{16} + X_{17} + X_{19}) + A_4 + (X_{23} + C_5)(X_{23} + X_{24} + C_5) \\
 &= X_{12}(X_{13} + X_{16} + X_{17} + X_{19}) + X_{13} + X_{16} + X_{19} + A_4 + X_{23} + C_5 \\
 &= X_{12} \cdot X_{17} + X_{13} + X_{16} + X_{19} + A_4 + X_{23} + C_5 \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中, C₅为炮长操纵台毁伤。

2 弹目交汇处理

部件级易损性评估是建立在弹药已经击中目标的基础上,对于主战坦克关键部件而言,主要是弹药击中并穿透防护装甲后产生的二次破片对其造成毁伤。

二次破片场中破片分布参数主要包括质量、数量和速度^[7],本研究主要分析基于蒙特卡洛方法的破片瞬间速度随机模拟,为弹目交汇模拟做好准备。

动能弹丸侵彻后形成的二次破片场一般为截椭球体,但由于前端破片较少,考虑到建模的便利性与结果精度需求,将二次破片场看作为锥体^[8]。在命中点坐标系中, E_j轴即为破片场锥体的中轴线,则可认为锥体表面即由某直线绕 E_j轴

旋转而成,将锥体向 jEk 平面做投影可得图2,图中 θ_{max} 为二次破片最大飞散角(半锥角), h 为锥体高, b 为锥底半径。

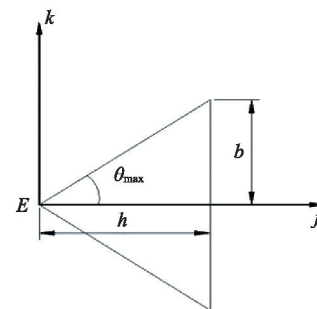


图2 破片场锥体在 jEk 平面的投影

Fig. 2 Projection of fragments field on jEk plane

利用蒙特卡洛法对破片的各向速度进行随机模拟的框图,如图3所示。选择破片飞散角 θ 和破片轴向坐标 j 为随机变量,根据描述,破片空间分布的假定形式有指数分布、莫特分布、对数分布、威布尔分布等,本研究假设飞散角 θ 为正态分布,取值范围为 [-40°, +40°], 并假设破片的轴向坐标在 [0, h] 内均匀分布。

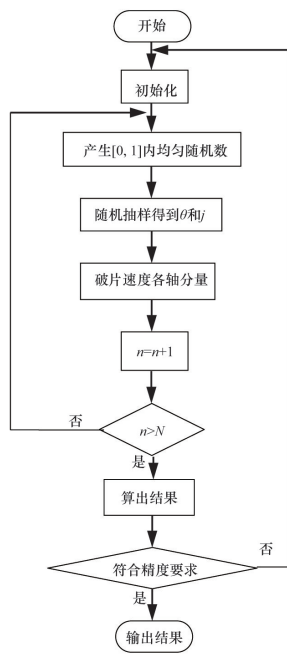


图3 蒙特卡洛法随机模拟破片速度流程

Fig. 3 Flow chart of fragment velocity simulation with Monte-carlo method

利用计算机在 $[0, 1]$ 区间内生成均匀分布的随机数 r_i , 并利用极限近似法, 生成标准正态分布的随机数

$$R_i = \sum_{i=1}^n r_i - \mu \quad (2)$$

式中, n 为抽样次数, μ 为抽样均值。

利用 $P_i = \mu + \sigma R_i$ 生成服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的随机变量, 取 $\theta_i = P_i \cdot 40^\circ$, 即可获得飞散角 θ 在 $[-40^\circ, +40^\circ]$ 区间内的正态分布随机变量。对于破片与目标的交汇模拟见文献[9], 得到击中部件的破片个数后, 再根据毁伤准则, 即可计算出破片对目标部件的物理毁伤情况。

3 易损性评估仿真

3.1 评估仿真系统开发

1) 系统功能设计。该评估仿真系统需要实现的功能有前处理、运算、结果分析。前处理中包括系统参数设置、目标库管理、目标参数设置、弹药参数设备; 后处理中可以显示弹目相对位置、查看被毁伤部件状态、显示毁伤效果与毁伤曲线。

2) 系统运行流程。利用该系统进行评估的流程如下。

第1步: 导入目标模型。

第2步: 对各部件进行编号, 以便于设置程序变量, 并进行跟踪分析。

第3步: 选择导入模型的关键部件, 确定具有针对性的分析部件, 可以对前一步骤设定好的目标进行操作, 也可以从目标库中调用目标。

第4步: 分别设置弹药和目标的初始参数。

第5步: 开始进行运算, 并得到计算结果。

对于目标模型导入说明如下: 为了便于采用射击线技术进行弹目交汇模拟, 需要对三维实体模型进行网格划分, 以得到网格模型及各网格所在区域的坐标, 划分后的某部件网格如图4所示。然后, 利用 VC 6.0 软件的接口技术, 将实体模型与网格模型转换成 K 文件进行导入, 得到实体模型。

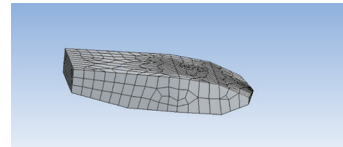


图4 划分网格模型

Fig. 4 Grid model of one component

3.2 评估仿真实例及结果分析

1) 评估的初始条件。

弹药: 选取某尾翼稳定脱壳穿甲弹为弹药, 弹芯材料为 93 钨合金、直径 31.68 mm、长度 305 mm、初速 1600 m/s。

目标: 某型主战坦克炮塔以及观瞄系统相关部件, 各部件材料均等效为 603 均质装甲钢, 密度为 7.83 g/cm^3 。假设炮塔前端防护能力为 730 mm, 侧向防护能力为 680 mm, 各部件的壳体厚度上限值为 12 mm。

2) 假设条件。

(1) 作战环境为夜间或不良视线条件, 即考虑热像仪毁伤对系统的影响。

(2) 弹药与目标垂直刚性碰撞, 弹体在侵彻过程中不发生偏转。

(3) 目标距离炮口 500 m, 并处于静止状态。

(4) 根据文献[10]所述, 弹杆以 1280 m/s 着速侵彻 12 mm 厚的靶板, 要使靶板贯穿, 钨球形破片半径尺寸至少为 5.5 mm, 经计算可得, 破片的能量阈值可设定为 20.1 kJ, 即当产生的二次破片能量超过 20.1 kJ 时, 视为有效破片。当没有破片命中部件时, 部件未毁伤, 命中部件的有效破片数 ≥ 5 时, 部件完全毁伤。

3) 仿真模拟结果分析。对目标行驶方向分别为 x 、 y 方向上各进行 5 次模拟, 打击位置分别为侧向和正向, 侧向瞄准点为自动跟踪器 (C_{21}) 与热像仪 (C_{10}) 所构成面元的几何中心处, 正向瞄准点为热像仪与瞄准镜 (C_{20}) 所构成面元的几何中心处。部件有效命中破片个数与命中点位置之间的关系分别如图 5 和图 6 所示。得到有效命中数与 CDS 值结果列于表 3。

如图 5 所示, 当侧向瞄准点为自动跟踪器与热像仪所构成面元的几何中心处时, 受各部件空间位置关系和命中点散布精度不同, 造成各部件的破片命中数差异较大。热像仪与瞄准镜沿 y 轴并列排列, 且热像仪位于靠近命中点一侧, 为瞄准镜形成遮蔽防护, 破片只有贯穿热像仪才能对瞄准镜进行侵彻毁伤, 瞄准镜的破片命中数始终少于热像仪的破片命中数。自动跟踪器安装于炮塔内壁上, 且距离命中点非常近, 自动跟踪器可能位于破片飞散角形成的盲区范围内, 因此破片命中个数为 0; 或者位于形成的截椭球体二次破片场内, 形成的有效二次破片大部分命中自动跟踪器。

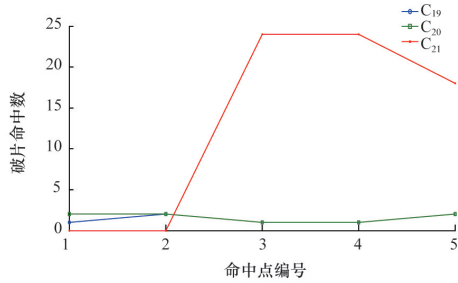


图5 侧向碰撞下各部件破片命中个数

Fig. 5 Number of hit fragments of components with lateral impact

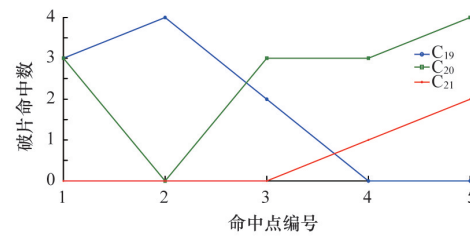


图6 正向碰撞下各部件破片命中个数

Fig. 6 Number of hit fragments of components with forward impact

表3 不同命中点下的模拟结果

Table 3 Simulation results with different hit points

瞄准方位	命中点编号	有效命中数			CDS值			DS值(CI ₂)
		C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	
侧向	1	1	2	0	0.2	0.4	0	0.6
	2	2	2	0	0.4	0.4	0	0.8
	3	1	1	24	0.2	0.2	1	1
	4	1	1	24	0.2	0.2	1	1
	5	2	2	18	0.4	0.4	1	1
正向	1	3	3	0	0.6	0.6	0	1
	2	4	0	0	0.8	0	0	0.8
	3	2	3	0	0.4	0.6	0	1
	4	0	3	1	0	0.6	0.2	0.8
	5	0	4	2	0.4	0.8	0.4	1

如图6所示,正向瞄准点为热像仪与瞄准镜形成面元的几何中心处时,破片命中距离命中点近的热像仪和瞄准镜较多,命中自动跟踪器的则相对较少。受命中点散布精度影响,当命中点偏向热像仪一侧时,热像仪命中破片数较多,而瞄准镜命中破片数则较少;反之,当命中点偏向瞄准镜一侧时,热像仪命中破片数较少,而瞄准镜命中破片数则较多。

由此可知,关键部件有效命中破片数与各部件空间位置关系很大,部件与命中点之间的相对位置关系,以及是否有其他部件为关键部件形成遮蔽,直接影响着关键部件的毁伤状态。

4 结论

1) 采用基于部件级的降阶态易损性评估方法,对主战坦克进行易损性分析与评估仿真,能给出部件毁伤状态、子系统毁伤等级等实用性参数,为装备战场损伤快速评估和装备保障精确仿真提供基础。

2) 主战坦克内部关键部件有效命中破片数与各部件空间位置关系很大,部件与命中点之间的相对位置关系,以及是否有其他部件为关键形成遮蔽,直接影响着关键部件的毁伤状态,因此,在研究部件易损性时,不仅要考虑其易损面积,防护与遮蔽的考量也必不可少。

参考文献(References)

[1] Martin L. Operational requirements document for the bradley linebacker. Headquarters[R]. Fort Bliss, Texas: US Army Air Defense Artillery School, 1996.

[2] Klopjic J T, Reed H L. Historical perspectives on vulnerability/lethality analysis[R]. Adelphi, Maryland: US Army Research Laboratory, 1999.

[3] 翟晓丽. 装甲车辆易损性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1997. Zhai Xiaoli. Armored vehicles vulnerability research[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1997.

[4] 余文力. D02末制导炮弹对轻型装甲车辆毁伤效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2000. Yu Wenli. D02 terminal guidance projectile damage effect research of light armored vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2000.

[5] 李建明. 装甲装备战斗毁伤概率分析研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 1997. Li Jianming. The armored equipment battle damage probability analysis research[D]. Beijing: Academy of Armored Force Engineering, 1997.

[6] 王国辉, 李向荣. 破甲弹对复合装甲毁伤数值模拟分析[J]. 北京理工大学学报, 2014, 37(8): 791-795. Wang Guohui, Li Xiangrong. Numerical simulation on damage effects of shaped charge to composite armor[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 37(8): 791-795.

[7] 赵海龙. 榴弹作用下主战坦克关键部件战损评估方法研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2013. Zhao Hailong. Grenade battle tanks under key component battle damage assessment method research[D]. Beijing: Academy of Armored Force Engineering, 2013.

[8] 王海福, 李向荣, 刘志雄, 等. 基于射击线网格法的易损性仿真方法[J]. 火箭与制导学报, 2002, 22(2): 74-79. Wang Haifu, Li Xiangrong, Liu Zhixiong, et al. The vulnerability simulation method based on aiming grid of shot lines[J]. Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance, 2002, 22(2):74-79

[9] 李向荣, 王国辉, 徐峰. 杀爆弹对主战坦克毁伤评估仿真[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 4(2): 44-47. Li Xiangrong, Wang Guohui, Xu Feng. Fragmentation bomb to battle tank damage assessment[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2009, 4(2): 44-47.

[10] 裴扬, 宋笔锋, 韩庆. 基于专家系统的飞机致命性部件辨识方法研究[J]. 现代防御技术, 2004, 32(6): 20-25. Pei Yang, Song Bifeng, Han Qing. Aircraft deadly component identification method based on expert system research[J]. Modern Defense Technology, 2004, 32(6): 20-25. (编辑 陈华姣)