

文章编号:1002-0640(2014)03-0128-05

不同时序破片和冲击波在对天线的复合毁伤分析

吕 勇¹,石 全²,钱 芳¹,徐建国¹,王广彦²

(1. 武汉军械士官学校,武汉 430075;2. 军械工程学院,石家庄 050003)

摘要:为了能清楚地了解杀伤爆破战斗部爆炸预制破片和冲击波对雷达天线阵面靶板的复合毁伤特性,采用LS-DYNA3D动力有限元软件,对破片和冲击波在不同时序下对天线阵面等效靶板的复合毁伤作用过程进行了一系列数值模拟研究,描述了两者在不同时序下对靶板的复合毁伤过程中的基本现象,分析了靶板某典型节点的位移变化规律,揭示了破片和冲击波作用靶板的不同时序对靶板损伤变形的影响。研究表明:破片和冲击波对装备部件的复合毁伤效应,不是二者毁伤效应的简单叠加,而存在特殊的作用机理,且这与二者到达目标的时序有关。所得结果不仅促进了损伤机理的研究与发展,而且还对杀伤爆破战斗部结构的优化具有参考价值。

关键词:破片,冲击波,复合毁伤,LS-DYNA,天线阵面,等效靶板

中图分类号:E927

文献标识码:A

Analysis of Multiplex Damages for Fragment and Shock Wave in Different Time Sequence to Antenna

Lü Yong¹, SHI Quan², QIAN Fang¹, XU Jian-guo¹, WANG Guang-yan²

(1. Wuahn Ordnance Non-Commissioned Officer Academy of PLA, Wuhan 430075, China;

2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of multiplex damages of the fragment and shock wave to the radar antenna array plate, a series of numerical simulation of the process of fragment and shock wave damage target is done by the finite element code LS-DYNA 3D. The basic phenomena of multiplex damages is described detailedly, the variation regularity of plate node displacement is analyzed. The multiplex damages complexion of equipment caused by fragment and shock wave in different time sequence is obtained. The research indicates that equipment multiplex damages effect under fragment and shock wave is not the simple add two damage effect, but have the special action mechanism which is related to the time sequence of them. The results are helpful to study and perfect the damage mechanism and have reference value for the structure optimization of the blast fragmentation warhead.

Key words: fragment, shock wave, multiplex damages, LS-DYNA, antenna array, equivalent plate

引言

在实际的反辐射导弹打击雷达阵地作战时,由于反辐射导弹的制导精度的限制或者出于成本的考虑,反辐射导弹很难直接命中雷达天线目标,而是利用近炸引信使其战斗部在雷达上方一定距离下爆炸^[1],利用产生的预制破片和爆炸冲击波对雷达天线阵面进行毁伤。文献[2]在圆柱靶上预先打以不同破片密度的穿孔,采用LS-DYNA有限元软

件对破片和冲击波联合作用下圆柱靶的毁伤试验进行了数值仿真。此时爆炸场只涉及爆炸冲击波和空气两者种介质,大大简化了计算的复杂性。文献[3]采用Visual C++6.0语言编制了相应的程序分析了对破片和冲击波的复合毁伤问题。但是由于缺少破片对目标的毁伤建模,使得复合毁伤中破片对目标的毁伤部分过于理想化,因此,所得结果较实际情况更为保守,且不能很好地实现破片和冲击波在复合作用下对目标的复合毁伤这一现象,再者没有

结合破片和冲击波在到达目标的时序进行研究,导致对复合损伤机理的研究不够深入和透彻。因此,本文将采用 LS-DYNA 软件就杀伤爆破型战斗部爆炸产生的破片和冲击波,在不同时序对装备的复合毁伤效应进行详细分析。

1 破片和冲击波复合作用问题描述

杀伤爆破战斗部爆炸后形成冲击波和大量的高速破片,由这两种毁伤元的共同作用来毁伤目标,这两种杀伤元的毁伤机理是不同的。对于破片杀伤元是通过破片的高速撞击、侵彻作用破坏目标的结构及削弱其强度,进而使天线阵面易损部件功能劣化甚至全部丧失;在爆炸冲击波作用下,天线阵面会发生弯曲、变形、震颤等物理状态的改变,进而影响天线的电性能。这两种杀伤元共同作用在目标上,存在两种聚合方式:一是简单的聚合,各损伤机理之间无相关性,或可以忽略之间的相关性,这种聚合比较简单,可分别对各损伤机理进行仿真,最后进行简单的叠加;二是考虑各损伤机理之间的相关性,这时有必要深入分析不同时序下两种机理之间的复合关系。因此,这里基于破片和冲击波作用目标的先后顺序将破片和冲击波对目标的共同作用分为以下 3 种情形:

(1)破片先作用,冲击波后作用

当破片先到达靶板表面时,破片首先撞击阵面靶板形成破片孔,且会使得阵面靶板撞击点处 3 倍~5 倍直径范围内发生局部塑性变形;而后冲击波载荷到达已损的结构表面,由于破片孔的存在,靶板的结构被削弱,且出现应力集中的现象,此时冲击波的再次作用会使得阵面靶板结构遭受更大的损伤。

(2)当冲击波和破片同时到达目标作用时

只有在某一个特定的时间点两种杀伤元才会在同一时刻到达目标,实际的遭遇过程几乎不可能出现,属于小概率事件,因此本文不作具体分析。

(3)冲击波先作用,破片后作用

当冲击波先到达目标时,靶板在冲击波载荷下会出现凹陷变形响应;而后破片撞击目标,会在结构已受到一定程度毁伤基础上,使得靶板损伤进一步增大,且形成破片孔。

为研究确定破片和冲击波两种机理在不同时序下的复合毁伤效应,下面采用 LS-DYNA 软件就破片和冲击波在不同时序下对天线阵面靶板的复合毁伤效应进行数值仿真分析。

2 有限元模型的构建

2.1 破片先作用冲击波后作用的有限元模型的构建

通过上述对于问题的分析,根据对相控阵天线阵

面等效靶板的分析,等效成 6.66 mm 的 LY-12 铝合金是被广泛认可的^[4]。本文在便于研究不是代表性的基础上,取天线阵面等效靶板为长方形六面体结构,四边固支,长、宽、高分别为 24 cm、12 cm、0.666 cm。为冲击波能够传播,需建立一个空气层,为了观察到靶板变形的整个过程,在靶板底侧另外建立一个空气层。所以整个空气区域的长、宽、高分别为 24 cm、12 cm、22 cm。为了便于复合作用毁伤机理研究及网格划分,破片取为单个球形钨合金破片,战斗部取为少量的立方体装药,该部分装药爆炸所产生的所有能量全部用于冲击波的传播。破片的直径设定为 10 mm,战斗部尺寸为 4 cm × 2 cm × 2 cm,上下表面中心同时起爆,装药质心距离天线阵面左侧的距离设定为 60 mm。装药、空气、破片及靶板几何模型的对称性,为了减小运算工作量,节约运行时间,建立 X-Z 为水平面,Y 为重力方向的三维坐标系,以 X-Y 平面为对称面建立 1/2 实体模型,采用 cm-g-us-k 单位制。网格划分采用 Lagrange 法。单元类型采用 8 节点三维实体单元 SOLID164。装药采用 *MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 模型,空气采用 MAT-NULL 模型,破片和靶板均采用 Johnson-Cook 模型,模型参数的具体取值分别见文献[5-6]。装药和空气的划分网格尺寸为 0.5 cm,天线等效靶板网格划分较为密集长宽都是 60 等分,厚度为 6 等分,破片网格划分为 8 等分。破片与靶板之间的接触采用面-面侵蚀接触算法,保证在模型外部的单元失效被删除后剩下的单元依然能够考虑接触。在对称面上施加平动约束和转动约束,靶板与空气边界处添加非反射边界条件。采用单点积分和沙漏控制以更好地反映大变形和材料失效等非线性问题。网格划分后的装药、空气、天线等效靶板及破片有限元模型如图 1 所示:其中装药节点数为 125 个,单元数为 64 个;空气节点数为 28 125 个,单元数为 25 280 个;等效靶板的节点数位 11 766 个,单元个数为 9 600 个;破片的节点数位 1 569 个,单元个数为 1 296 个。

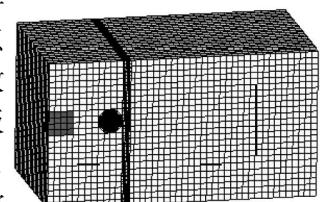


图 1 装药、空气、天线等效靶板及破片的有限元模型

2.2 冲击波先作用破片后作用的有限元模型构建

为研究冲击波先作用破片后作用时对天线阵面靶板的复合毁伤这一问题,通过改变 2.1 中破片与靶板的距离,保持其他参数不变,就破片与靶板距离 100 cm 时破片与冲击波复合毁伤靶板进行数值模拟。考虑到装药、空气、破片及靶板几何模型的对称性,为了减小运算工作量,节约运行时间,建立 X-Z

为水平面, Y 为重力方向的三维坐标系, 以 $X-Y$ 平面为对称面建立 $1/2$ 实体模型, 采用 cm-g-us-k 单位制。其他有限元的相关参数的设置与 2.1 相同。

3 仿真结果分析与比较

3.1 破片先作用冲击波后作用下对天线阵面复合毁伤的过程及分析

图 2 是单破片和爆炸冲击波对靶板的复合毁伤过程图。图中(1)为破片、炸药和靶板的初始相对位置, 图中(2)为破片先对靶板进行侵彻, 历经一段时间到图中(4)破片飞射而出; 在 $t=420 \mu s$ 时刻起爆炸药, 由于炸药简化为立方体装药, 上下表面中心同时起爆, 所以如图中(5)初始波阵面近似表现为球体形状; 在 $t=440 \mu s$ 时左右时, 如图中(6)波阵面首先到达靶板的上表面, 爆炸载荷与已损靶板相互作用, 一方面受到靶板的阻挡产生反射波, 迎爆面上的压力迅速增大。另一方面随着冲击波载荷穿过靶板破片孔到达靶板的背面, 空气截面的突扩, 冲击波在此处产生衍射如图中(7), 为了进一步研究靶板破片孔后不同位置处爆炸冲击波的衍射情况, 在靶板破片孔后周围选取 5 个测点, 单元号依次为 305、11 926、12 567、25 167 和 25 286, 测点位置及各单元处超压时程曲线分别如图 3、图 4 所示。衍射产生的冲击波继续向前传播如图中(8), 对天线阵面背后的其他雷达部件进行毁伤。如此反复, 直至冲击波超压衰减到 0。

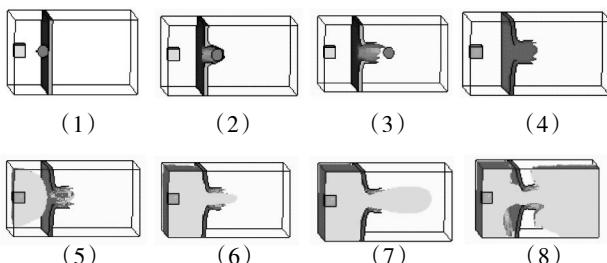


图 2 破片先作用冲击波后作用时靶板复合毁伤的过程图

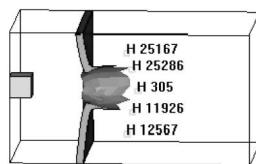


图 3 空气单元测点位置

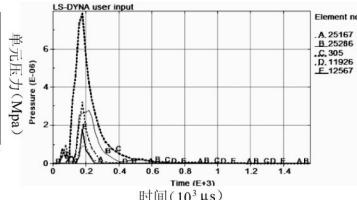


图 4 5 个测点的冲击波超压时程曲线

3.1.1 破片未作用完冲击波后作用的情形

根据上述复合毁伤仿真研究和平面相控阵天线阵面单元的变形损伤的有关资料, 选取损伤临界值为 0.3 cm 为单元影响最小值, 取此变形值单元节点为损伤影响终点, 以损伤边界圆来描述天线靶板

战斗损伤的范围。因此, 分别以靶板的节点处最大位移及损伤边界圆半径大小为基准进行破片和冲击波在不同时序下的复合毁伤效果的差异分析。

以 28 427 节点为研究对象, 它的位移时程曲线如图 5 中①所示。在破片未作用完冲击波后作用复合毁伤下, 在穿孔周围形成一个向下凹的类圆锥状变形, 为得到变形数据, 沿着圆锥某一棱边, 按照一定间距选择阵面靶板单元节点, 获取节点处位移数据, 将所得的这组节点变形仿真数据结合 MATLAB 软件进行曲线拟合出如图中②所示。

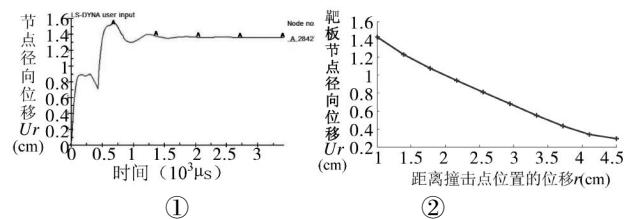


图 5 靶板节点径向变形图(1)

3.1.2 破片先作用完冲击波后作用的情形

在 K 文件中改变炸药的起爆时间, 使起爆时间滞后破片 $4000 \mu s$ 。同时以 28 427 节点为研究对象, 它的位移时程曲线如图 6 中①所示, 由于在复合作用下, 在穿孔周围形成一个向下凹的类圆锥状变形, 根据上述同样的方法, 获取节点结果数据, 获取节点位移结果数据, 并将所得的这组节点变形仿真数据结合 MATLAB 软件进行曲线拟合出如图中②所示。

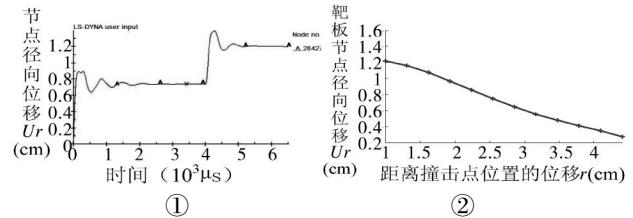


图 6 靶板节点径向变形图(2)

从图 5 和图 6 可以总结得出:

如图 5 中①, 当靶板变形还处于塑性回弹时, 冲击波接着对靶板进行冲击波载荷加载, 使得靶板受到进一步损伤, 28 427 节点作为靶板最大位移节点, 其值为 1.363339 cm ; 而图 6 中①则是在靶板受到破片侵彻损伤至一个稳定状态, 此时冲击波载荷再对已损靶板进行加载损伤, 同样 28 427 节点作为最大位移节点, 其值为 1.20015 cm , 两节点处位移相差约 13.6% , 说明此时破片作用完冲击波后作用的情形对复合毁伤效果的影响较大。如图 5 中②和 6 中②所示, 靶板损伤边界圆的半径都约为 4.1 cm , 在距离破片撞击点约 3 cm 以外的节点处位移相差不大, 此区域破片作用完冲击波后作用的情形对复合毁伤效果的影响较小。一般靶板的塑性变形范围是破片直径的 3 倍左右^[7], 综上所述: 在靶板的塑性变形范围

内, 破片作用完冲击波后作用的情形对复合毁伤机理的影响较大;但在塑性变形范围之外, 破片作用完冲击波后作用的情形对复合毁伤机理的影响则较小, 造成这一现象的原因是破片对靶板的穿孔, 只会使穿孔周围一定范围内的应力强度减弱, 而对穿孔远区处的应力强度几乎不造成影响。

3.2 冲击波先作用破片后作用下对靶板的复合毁伤的基本过程和现象描述

如图 7 所示为冲击波先作用破片后作用时靶板复合毁伤的过程图。图中(1)为复合作用前炸药与靶板的相对位置, 图中(2)为 $t=100 \mu\text{s}$ 时, 上下表面中心同时起爆的方式起爆炸药, 且波阵面近似球状, 历经图中(4)、(5)、(6)过程, 冲击波波阵面传播到达靶板左侧面, 对靶板进行爆炸载荷加载, 作用 $500 \mu\text{s}$ 后, 此刻破片到达靶板右侧面对已变形的靶板进行侵彻, 侵彻作用致使已变形靶板再次受到损伤, 直至破片飞射出去, 靶板还要经过一段时间的塑性回弹区。

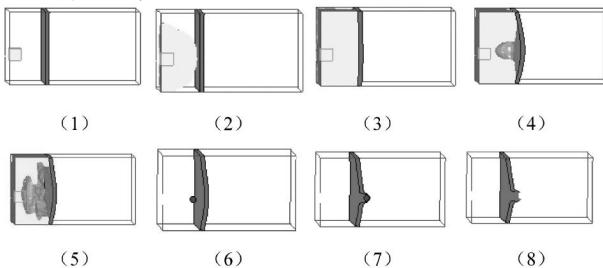


图 7 冲击波先作用破片后作用下对靶板复合毁伤的过程图

3.2.1 冲击波未作用完破片后作用的情形

同样根据上述复合毁伤仿真研究和平面相控阵天线阵面单元的变形损伤的有关资料, 选取损伤临界值为 0.3 cm 为单元影响最小值, 取此变形值单元节点为损伤影响终点, 以损伤边界圆来描述天线靶板战斗损伤的范围。因此, 分别以靶板的节点处最大位移及损伤边界圆半径大小为基准进行破片和冲击波在不同时序下的复合毁伤效果的差异分析。

28660 节点作为整个靶板节点处位移最大的一个节点, 位移时程曲线如图 8 中①所示, 在冲击波未作用完破片后作用的复合作用下, 靶板先发生大面积变形, 变形未达到稳定状态破片就到达靶板左侧进行侵彻, 结果在靶板穿孔周围形成一个向下凹的类圆锥状变形, 为得到变形数据, 沿着圆锥某一棱边, 按照一定间距选择阵面靶板单元节点, 获取节点处位移数据, 将所得的这组节点位移结果数据结合 MATLAB 软件进行曲线拟合出如图中②所示。

3.2.2 冲击波先作用完破片后作用的情形

为了研究冲击波作用完破片后作用下对靶板的复合毁伤问题。将 2.1 中破片与靶板之间的距离改为 200 cm , 保持其他参数不变, 进行该情形下的复合毁

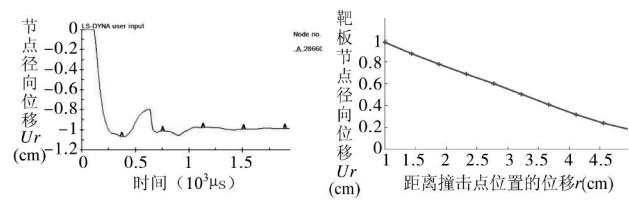


图 8 靶板节点径向变形图(3)

伤效应数值模拟。同样 28660 节点作为整个靶板节点处位移最大的一个节点, 位移时程曲线如图 9 中①所示, 由于在两种机理的复合作用下, 靶板先发生大面积变形, 变形未达到稳定状态破片就到达靶板左侧面进行侵彻, 结果在靶板穿孔周围形成一个向下凹的类圆锥状变形, 根据相同的方法获取靶板节点变形数据, 并将所得的这组节点变形仿真数据结合 MATLAB 软件进行曲线拟合出如图中②所示。

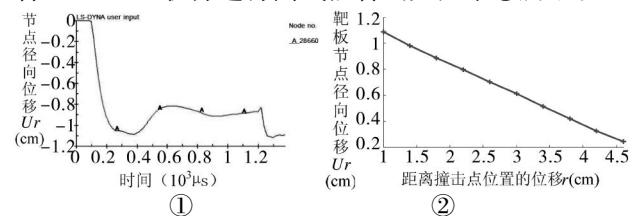


图 9 靶板节点径向变形图(4)

从图 8 和 9 可以总结得出:

图 8 中①破片作用后, 当靶板变形还处于塑性回弹时, 破片紧接着对靶板进行侵彻作用, 靶板受到进一步损伤, 28660 节点作为最大位移节点, 其值为 0.982841 cm ; 而图 9 中①则是在冲击波载荷下靶板变形至一个稳定的状态下, 此时破片再对已损靶板进行侵彻, 同样 28660 节点作为最大位移节点, 其值为 1.09 cm , 两节点出位移相差约 10.9% , 说明此时冲击波作用完破片后作用的时序不同对复合毁伤效果的影响较大。如图 8 中②和 9 中②所示, 靶板损伤边界圆的半径都约为 4.2 cm , 靶板各节点处的位移相差都比较大, 最小也到了 7.9% , 说明此时冲击波作用完破片后作用的情形对复合毁伤效果的影响较大, 然而靶板损伤边界圆的半径都约为 4.2 cm , 从阵面单元的损坏角度来考虑, 说明两种情形下造成的伤害几乎是一样的, 区别不大。

3.3 破片或冲击波单一作用下对靶板的毁伤分析

分别对破片或冲击波对靶板的单一毁伤作用各进行一次数值模拟。下页图 10 中①为破片单一侵彻作用时靶板最大位移节点的位移时程曲线, 图中②是按照上述方法得到的靶板节点径向位移图。图中③为冲击波单一作用时靶板最大位移节点的位移时程曲线, 图中④是按照上述方法得到的靶板节点径向位移图。

从图 10 可以总结得出:

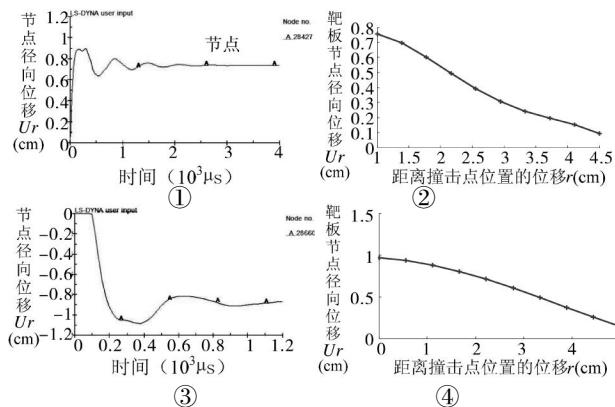


图 10 靶板节点径向变形图(5)

图 10 中①破片的单一作用时,靶板最大节点 28 427 处的位移为 0.782 431 cm;图 10 中③冲击波单一作用下,靶板最大节点 28 665 处的位移为 0.958 585 cm。则是在靶板受到破片侵彻损伤至一个稳定的状态下,此时冲击波载荷再对已损靶板进行加载损伤,同样 28 427 节点作为最大位移节点,其值为 1.200 15 cm,两节点出位移相差约 13.6%,说明此时破片先作用和冲击波后作用的时序不同对复合毁伤效果的影响较大。说明冲击波单一作用比破片造成靶板损伤变形程度要大。如图 10 中②和④所示,两者造成的损伤边界圆的半径分别为 2.9 cm、4.0 cm,冲击波单一作用下靶板各节点处的位移均比破片单一作用下靶板各节点处的位移大,相差最小也到达了 22.4%,说明单一作用下冲击波比破片的损伤程度和范围都要大。

通过上述就破片和冲击波在时序不同条件下对靶板的复合毁伤效应和单一毁伤效应进行了详细分析,总结得出破片和冲击波在单一毁伤机理下及在不同时序的复合毁伤机理下靶板物理状态改变战斗损伤如表 1 所示。

表 1 靶板物理状态改变战斗损伤表 /cm

项目	变形边界圆半径 (以 0.3 cm 为损 伤临界值)	靶板厚度	节点处最大位 移
破片未作用完 冲击波后作用	4.1	0.666	1.363 339
破片作用完 冲击波后作用	4.1	0.666	1.200 15
冲击波未作用 完破片后作用	4.2	0.666	0.982 841
冲击波作用 完破片后作用	4.2	0.666	1.09
破片单一作用	2.9	0.666	0.958 585
冲击波单一作用	4.0	0.666	1.200 15

从表 1 分析可总结得出:

(1) 从靶板损伤边界圆半径的大小出发,破片

单一作用下靶板损伤边界圆半径为 2.9 cm,冲击波单一作用损伤边界圆半径为 4.0 cm,而破片和冲击波复合作用下损伤边界圆半径则约为 4.1 cm,说明破片单一作用下毁伤效果比两者复合作用下毁伤效果要差。

(2) 从靶板典型节点处最大位移角度出发,破片单一作用下靶板节点处最大位移为 0.958 585 cm,而在破片和冲击波复合作用下靶板节点处位移均比破片单独作用下节点位移要大,如破片未作用完冲击波后作用下的复合毁伤下的情况,节点处最大位移达到 1.363 339 cm,比之要大的多,可以推断破片和冲击波复合作用毁伤性能比破片单独作用下的毁伤性能要好得多;但破片和冲击波复合作用存在着时序问题,如表 1 中破片未作用完冲击波后作用的复合作用下靶板该节点处最大位移为 1.363 339 cm,破片作用完冲击波后作用的复合作用下靶板该节点处最大位移为 1.200 15 cm,冲击波未作用完破片后作用的复合作用下靶板该节点处最大位移为 0.982 841 cm,冲击波作用完破片后作用的复合作用下靶板该节点处最大位移为 1.09 cm,说明破片和冲击波作用的时序的不同对复合毁伤结果有很大的影响。

4 结束语

本文通过 LS-DYNA 软件仿真技术分析了破片和冲击波在不同时序下对相控阵天线阵面等效靶板的复合毁伤效应,根据破片和冲击波的作用使得靶板发生物理形态的改变,产生靶板典型位置节点位移以及损伤边界圆,分析不同时序下破片和冲击波对靶板的复合毁伤时靶板典型位置节点位移以及损伤边界圆半径的差异,这些仿真结果和计算数据说明了破片和冲击波对装备部件的复合毁伤效应,不是二者毁伤效应的简单叠加,而存在特殊的作用机理,且这与二者到达目标的时序有关。对破片和冲击波复合机理的研究提供科学依据和参考,也对平面相控阵天线的战时抢修和天线配件的维修储备具有一定的指导意义。但相控阵雷达天线的损伤仿真分析是一项非常复杂和艰巨的工作,涉及到机械和电子部件的多项复杂建模,本文只是进行一些初步探讨,所建立的破片和冲击波在复合作用下对天线阵面的毁伤仿真模型比较简单粗糙。因此,对于杀伤爆破战斗部爆炸预制破片和冲击波对相控阵天线阵面的复合毁伤,还需要进行大量系统深入的研究工作。

参考文献:

- [1] 曹柏桢. 飞航导弹战斗部与引信 [M]. 北京: 宇航出版社,
(下转第 139 页)

据链采用已定型的成熟产品,因此,作用距离等相关均满足要求通视要求。系统主要在海拔小于1 000 m 平原地区使用,因此,实用升限(爬升率 $\geq 0.5 \text{ m/s}$)确定为 3 000 m,这样可充分相对高度 $\geq 2 000 \text{ m}$,按照无线电通视概算公式 $\Delta H \geq (D/3.57)^2$ 计算的相对高度 $\Delta H \geq 1 766 \text{ m}$,所以满足通视要求;续航时间 $\geq 5 \text{ h}$,最低巡航速度为 120 km/h,150 km 处往返时间为 2.5 h,起降回收时间为 0.5 h,这样可在最远作战区域执行 2 h 任务。

3.2 侦察能力

可见光识别靶面分辨率为 $1 024 \times 768$ 象元,焦距 $\geq 220 \text{ mm}$,最小视场角为 $2.4^\circ \times 1.8^\circ$,空间分辨率为 0.04 mrad,6 km 处对应地面分辨率为 0.24 m,因此,满足对 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 目标识别概率要求;红外探测器靶面分辨率为 640×480 ,小视场角为 $2.4^\circ \times 1.8^\circ$,空间分辨率为 0.065 mrad,5 km 处地面分辨率为 0.33 m,因此,可以满足对 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 目标识别概率要求。

3.3 最大攻击距离

最大攻击距离是指飞机与目标之间最大射击距离,主要取决于导弹飞行距离、目标识别距离、激光照射距离等指标,三者可统一取作用距离 $\geq 6 \text{ km}$,依据导弹攻击包络,如图 4 所示,只有在相对飞行高度为 2.5 km 以上时可以达到最大攻击距离 6 km。

3.4 打击精度

打击精度主要与激光束散角、光电转台跟踪精度、瞄准线误差和导弹制导精度有关。对于激光束散角 $\leq 0.3 \text{ mrad}$,光电转台跟踪照射精度 $\leq 0.35 \text{ mrad}$,瞄准线误差 $\leq 0.2 \text{ mrad}$,导弹制导精度为 3 m(CEP),以 6 km 照射距离考虑,打击精度计算如下:

$$[(6 \times 0.3)^2 + (6 \times 0.35)^2 + (6 \times 0.2)^2 + 3^2]^{0.5} = 4.25 \text{ m (CEP)} \quad (1)$$

由式(1)计算结果可知,系统可以满足 5 m 的打

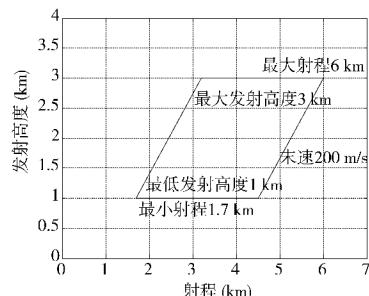


图 4 导弹攻击发射包络

击精度要求。

4 结论

本文给出了一种轻型察打一体化无人机系统设计方案,对系统主要功能进行了分析,并将其合理分配到各分系统中,系统设计对系统指标进行了仿真分析,给出了系统能够达到的主要技术指标。系统的仿真结果验证了本设计的合理性和可达性。

参考文献:

- [1] 印骏,谭玲,谭绍杰.美军无人机的作战应用及其发展趋势[J].飞航导弹,2010(8):26-29.
- [2] Secretary of Defense (USA).Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030[R].Office of the Secretary of Defense (USA)Report,2005.
- [3] Sweetman, Bill. Drones That Sting--combat UAV Programs Take the Offensive [J].Journal of Electronic Defense,2004(6):34-40.
- [4] 王超,董秋杰.侦察打击一体化无人机武器系统的研究[J].科技创新导报,2009(4):6-7.
- [5] 吴辉喜,徐鹏,陈小春,等.基于信息一体化系统的无人机数据链技术应用[J].四川兵工学报,2013,34(2):114-116.
- [6] 欧阳平,沈亮.捕食者系列无人机及其武器配置[J].教练机,2012(1):34-37.

(上接第 132 页)

- [1] 1995: 124-126.
- [2] 金乾坤.破片和冲击波毁伤圆柱形靶的数值仿真[J].兵工学报,2006,27(2):215-218.
- [3] 曹兵.破片和冲击波复合作用下对导弹的毁伤[D].南京:南京理工大学硕士学位论文,2006,5: 49-50.
- [4] 李学林,项鑫,黄广炎,等.钨球破片对相控阵雷达典型部件的侵彻特性研究 [J].兵工学报,2010,31(1): 51-54.

- [5] 时党勇,李裕春,张胜民.基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [6] 楼建锋,王政,洪滔,等.钨合金杆侵彻半无限厚钨合金靶的数值研究 [J].高压物理学报,2009,23(1): 65-70.
- [7] 何翔,庞伟宾,曲建波,等.防护门在空气冲击波和破片作用下的破坏[J].爆炸与冲击,2004,24(5):475-479.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>