

典型机场目标的毁伤效果研究



侯鹏¹,裴扬^{1,2},赵倩¹,马胤杰¹,葛玉雪¹

1.西北工业大学,陕西 西安 710072

2.航空工业光电所 光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471023

摘要: 本文分析典型弹药战斗部打击机场目标的毁伤情况,对提高空对地弹药打击机场目标的毁伤效能具有重要意义。选取与作战飞机相关的三类典型目标(飞机掩蔽库目标、停机坪上的预警机目标及机场跑道目标),构建三类目标的毁伤评估模型,分析典型弹药战斗部参数对毁伤效果的影响。飞机掩蔽库目标分为外部掩蔽库目标及内部战斗机目标,研究给定毁伤等级下落角对侵爆战斗部毁伤效果的影响。停机坪上的预警机目标以高精度预警机为易损性模型,分析瞄准点和炸高对杀爆战斗部毁伤效果的影响。机场跑道目标以封锁概率为毁伤效果评估指标,研究母弹参数、子弹参数、跑道尺寸以及最小起降窗口对子母弹封锁效果的影响。通过仿真算例验证了所构建模型的可行性与合理性,并计算分析了打击掩蔽库目标及掩蔽库内部的飞机目标时侵爆战斗部的最佳落角,打击预警机目标时杀爆战斗部的最佳瞄准点与最佳炸高,以及打击跑道目标时典型子母弹参数对于毁伤效果的影响。

关键词: 机场目标;掩蔽库;机场跑道;预警机;毁伤评估

中国分类号:V221

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.12.012

现代战争中,直接打击敌方的机场目标,使作战飞机无法完成正常的起降,从而降低敌方飞机的作战效能,进一步夺取制空权掌握战争的主导地位是制胜的关键因素^[1-4]。机场目标系统按照保障类型可分为指挥、引导、起降、驻停、勤务保障和防护6类分系统目标^[5]。按照军用机场的目标标准化过程,可从中抽离出和作战飞机密切相关的三类子目标系统,分别是飞机掩蔽库、停机坪上的飞机及机场跑道三类典型目标^[6]。构建这三类典型目标的毁伤效果评估模型,进一步分析关键影响参数与毁伤效果之间的关系,对于提高打击机场任务的效能具有重要意义。

飞机掩蔽库通过掩体来防护内部的作战飞机。在导弹对掩蔽库目标的毁伤研究方面,宋卫东等^[7]利用自编程序建立了机库的三维模型,采用后处理软件 Visc3D 分析了冲击波在机库内的分布情况,为如何高效地毁伤机库内的飞机提供了参考;李伟等^[8]针对掩蔽库内目标的不同停靠方式,提出了合理有效的掩体内目标毁伤评估方法,为空地导弹的研制提供了一定的参考;杨杰等^[9]以单机、双机掩蔽库为研究对象,提出基于网格法的飞机平均毁伤概率计算方法,在此基础上开展打击方案优化研究。参考文献[7]~[9]

从不同的方面研究了掩蔽库目标的毁伤评估问题,而对内部的飞机目标的建模进行了适当的简化。

在停机坪上飞机目标的研究方面,高士英等^[10]研究了典型交会条件下地面目标的毁伤效果,为导弹的作战使用与毁伤效能评估提供了切实可行的技术途径;张睿文等^[11]以高精度的预警机易损性模型为基础,提出了考虑任务系统易损性模型和近炸引信探测起爆过程的毁伤效果分析方法;侯鹏等^[12]构建典型对地作战飞机的高精度易损性模型,研究破片战斗部打击军用飞机的瞄准点选择方法。参考文献[11]~[12]虽建立了飞机的高精度易损性模型,但其毁伤评估为空中飞机的毁伤评估方法。而地面飞机的毁伤等级及交会模型会与空中目标有所差别。

有关机场跑道封锁研究方面的文献相对较多,王震宇等^[13]运用蒙特卡罗仿真研究反跑道子母弹斜切跑道情况下,不同参数对封锁效能的影响,所提方法能为反跑道设计提供指导;刘云辉等^[14]提出基于神经网络算法的子母弹反机场跑道封锁概率快速计算方法,可实现封锁概率的实时计算;李新其等^[15]建立了常规导弹封锁跑道任务的作战效能分析方法,能快速计算导弹封锁机场跑道的作战效能。

收稿日期: 2023-06-11; 退修日期: 2023-08-28; 录用日期: 2023-09-25

基金项目: 航空科学基金(20185153032)

引用格式: Hou Peng, Pei Yang, Zhao Qian, et al. Research on the damage effect of typical airport targets [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 100-110. 侯鹏,裴扬,赵倩,等. 典型机场目标的毁伤效果研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 100-110.

本文在参考文献[13]~[15]的基础上,进一步研究典型参数对机场跑道封锁效果的影响。

本文以典型的飞机掩蔽库目标、停机坪上的预警机目标以及机场跑道目标为研究对象,构建这些目标的毁伤评估模型,在此基础上分别分析典型侵爆战斗部落角对飞机掩蔽库目标毁伤效果的影响;典型杀爆战斗部炸高及瞄准点对停机坪上的预警机目标毁伤效果的影响;典型子母弹的母弹参数、子弹参数、跑道尺寸、最小起降窗口尺寸对跑道封锁效果的影响,以期为提高弹药战斗部打击机场目标的毁伤效能提供支撑。

1 打击典型机场目标的毁伤评估模型

机场目标分为主战系统和保障系统,主战系统是指执行作战任务的飞机,保障系统是指为作战飞机提供支持和保障的系统^[16]。不论是作战飞机的损失或保障系统的破坏都会影响飞机执行指定作战任务。现以飞机掩蔽库、停机坪上的预警机和机场跑道为典型机场目标,建立毁伤评估模型,分析相应导弹对典型机场目标的毁伤效果。

1.1 飞机掩蔽库目标

典型的掩蔽库主要有钢筋混凝土拱形结构和波纹钢拱形结构。掩蔽库内部分为单机、双联和四联布置。算例以单机钢筋混凝土拱形掩蔽库为例,其模型结构图如图1所示。

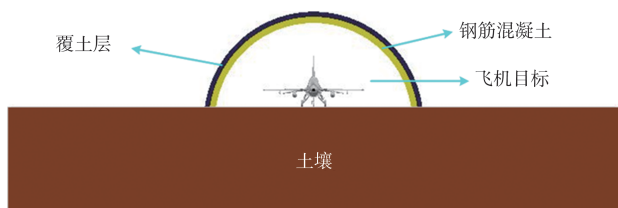


图1 掩蔽库结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of aircraft shelter

弹药战斗部对飞机掩蔽库目标的毁伤主要分为对外部掩体的毁伤以及对掩蔽库内部飞机的毁伤。外部掩体主要包括土壤、钢筋混凝土结构和覆土层。外部掩体的毁伤主要考虑的是钢筋混凝土结构被侵彻战斗部穿透,计算的等级为中度毁伤和重度毁伤^[17]。重度毁伤与中度毁伤的定义参阅参考文献[17]。掩蔽库内的飞机目标主要考虑任务放弃毁伤等级^[18]。采用三维建模软件将内部飞机目标用基本形体表示,利用损伤模式及影响分析确定给定等级下飞机的关键部件,各关键部件的毁伤情况利用落在关键部件上破片的个数阈值和关键部件处的冲击波阈值判断。

针对掩蔽库目标的典型战斗部主要是动能侵彻战斗

部、聚能侵彻战斗部和复合侵彻战斗部^[8]。侵彻战斗部运动参数会随着侵彻介质深度的增加而变化,如图2所示。采用穿透方程(美国陆军水道实验室(WES)公式、Forrestal公式、别列赞公式、萨布斯基公式等)^[19]计算弹药战斗部的运动参数变化。利用侵彻深度判断混凝土层的毁伤情况。在侵彻战斗部在空腔内引爆后,根据引爆点的速度并结合破片的静态飞散速度,确定各关键部件在破片打击下的毁伤概率^[20],同时计算关键部件在冲击波作用下的毁伤概率^[8]。联合关键部件在破片作用下和在冲击波作用下的毁伤概率,即可得到部件在侵彻战斗部作用下的毁伤概率

$$p_{k,i} = 1 - (1 - p_{t,i})(1 - p_{b,i}) \quad (1)$$

式中, $p_{k,i}$ 是第*i*个关键部件在破片和冲击波联合作用下的毁伤概率, $p_{t,i}$ 为第*i*个关键部件在破片作用下的毁伤概率, $p_{b,i}$ 为第*i*个关键部件在冲击波作用下的毁伤概率。在此基础上,根据关键部件和飞机之间的毁伤逻辑确定飞机在给定毁伤等级下的毁伤结果。

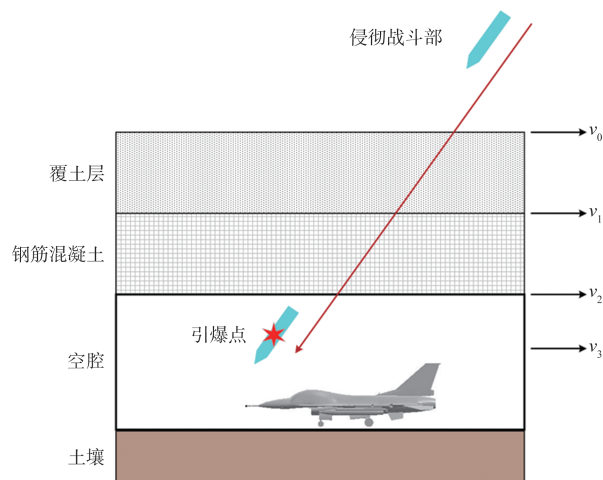


图2 侵彻战斗部在介质内的运动

Fig.2 Movement of penetrating warhead in media

1.2 停机坪上的预警机目标

预警机由飞机主体和作战的任务系统组成,主要用于执行目标探测、区域监控、作战指挥等任务。针对飞机的打击多采用破片式战斗部^[21],破片战斗部对预警机的毁伤需以由目标的几何功能模型、毁伤树模型以及关键部件的毁伤判据模型构成的飞机易损性模型为基础。

预警机的几何功能模型用于描述各个部件的几何位置关系以及各个功能系统的材料信息,是毁伤效果评估的基础。在预警机真实模型的基础上适当简化,利用三维建模软件构建飞机的数据模型并赋予各部件材料、厚度以及所属功能分系统即可得到其几何模型。分析实现基本飞行以及完

成指定任务时需要的飞机性能和功能,确定可能与这些功能或性能相关的系统及部件。对这些部件进行损伤模式及影响分析,并最终确定在给定毁伤等级下能造成飞机损耗毁伤或是任务放弃毁伤的关键部件。算例以E-2预警机为原型构建预警机的几何功能模型,如图3所示。该模型包括25个外形部件、21个结构部件以及66个任务功能部件。

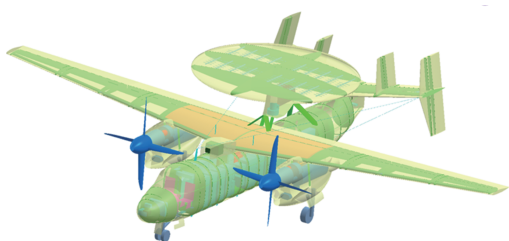


图3 预警机的几何功能模型

Fig.3 Geometric model of the early warning aircraft

毁伤树用于描述飞机关键部件毁伤与飞机整机毁伤之间的逻辑、权重关系^[22]。毁伤树采用自顶向下的方式确定导致飞机在给定毁伤等级下毁伤的基本事件,将飞机、功能系统以及关键部件之间的毁伤关系以树状图的形式表达。关键部件毁伤对于整机毁伤的权重通过关键部件在打击方向的致命面积与其暴露面积的比值或通过相关的工程试验数据^[23]确定。算例主要研究飞机在任务放弃等级下的毁伤效果,其毁伤树模型(系统级)如图4所示。

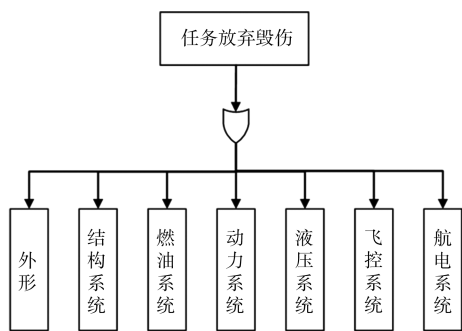


图4 预警机的毁伤树模型

Fig.4 Damage tree model for early warning aircraft

毁伤判据用于确定在给定毁伤等级下飞机关键部件的毁伤情况。根据预警机关键部件的类型以及破片式战斗部的毁伤特点,可利用穿透判据、引燃判据描述关键部件的毁伤情况^[24]。

在确定飞机的易损性模型后,需根据弹道参数确定破片式战斗部与飞机的相对位置,如图5所示。

落点偏差和落点方位可以确定落点的位置,进而利用落角、交会角及炸高可以确定炸点相对于飞机的位置。在

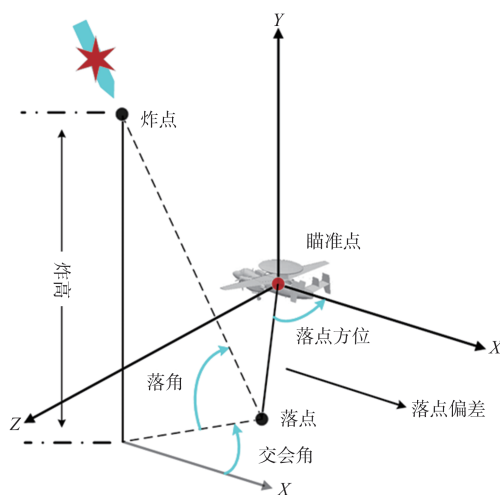


图5 弹道参数

Fig.5 Ballistic parameters

确定炸点位置后,以导弹战斗部落速结合破片静态飞散初速即可得到各破片的动态飞散初速,以此为基础,采用射击线法^[25]确定战斗部破片与飞机各关键部件的交会情况。破片在飞机内部的运动参数可由THOR侵彻方程^[12]确定。通过破片的运动参数结合关键部件的毁伤判据即可得到部件的毁伤概率。进一步利用毁伤树构建的关键部件与飞机之间的毁伤逻辑确定飞机整机的毁伤概率。

1.3 机场跑道目标

机场跑道目标是由混凝土、沥青、混合质以及级配碎石等材料铺筑而成的典型窄长型面目标^[26],主要用于作战飞机的起飞和降落。针对机场跑道封锁的武器主要有普通航弹、反跑道弹、子母封锁弹以及GPS制导炸弹等^[27],其中子母弹因为其覆盖范围广、毁伤效果好而被广泛应用于打击机场跑道目标。对机场跑道的封锁主要有两种方式:一是破坏飞机跑道使跑道上找不到满足飞机最小起降窗口的区域;二是在跑道附近区域形成一定时间、空间分布的杀伤元,阻止飞机起降。本文主要考虑第一种封锁方式。

机场跑道在侵彻子弹作用下会产生弹坑,弹坑的形态与半径系数、深度系数、爆炸当量、区域临界影响因子(两个)、比例控制因子、内部变形区域外围高度和入射角8个参数相关^[28]。对跑道的封锁应使子弹药产生的弹坑均匀分布,以使跑道上没有满足飞机起降的窗口。子母弹对跑道的封锁一般需要多枚,其瞄准点的位置设置如图6所示。母弹间的间隔 dx 可表示为

$$dx = L/M \quad (2)$$

式中, L 为跑道长度; M 为母弹个数。

实际作战中由于母弹受制导误差(CEP)的影响,其落

2.1 掩蔽库在侵爆战斗部作用下的毁伤

掩蔽库目标选择单机钢筋混凝土拱形掩蔽库,其易损性模型如图9所示。主要研究落角对典型侵爆战斗部打击效果的影响。侵爆弹等效装药质量为274.36kg,装药类型为TNT,圆概率误差 CEP 设置为10m,侵爆弹落速设置为600m/s。交会角设置为180°,落角变化范围为 $-90^{\circ}\sim-55^{\circ}$,每隔 5° 计算一次。掩蔽库目标的毁伤概率采用蒙特卡罗多次仿真获得,仿真次数设置为1000次。

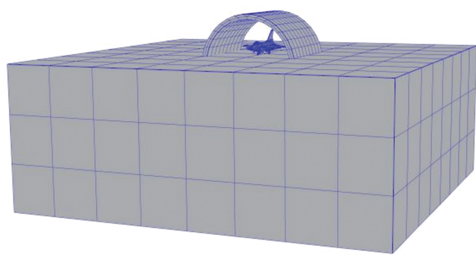


图9 掩蔽库目标的易损性模型

Fig.9 Vulnerability model of the aircraft shelter

利用数值仿真程序计算掩蔽库目标各落角条件下的杀伤概率云图,典型的毁伤概率云图如图10所示。图10中,绿色为毁伤部位,灰色显示与目标接触时的初始位置,最终引爆点显示为红色时表示毁伤概率为1,为白色时表示毁伤概率为0。

统计各落角下掩蔽库目标以及掩蔽库内部飞机目标在

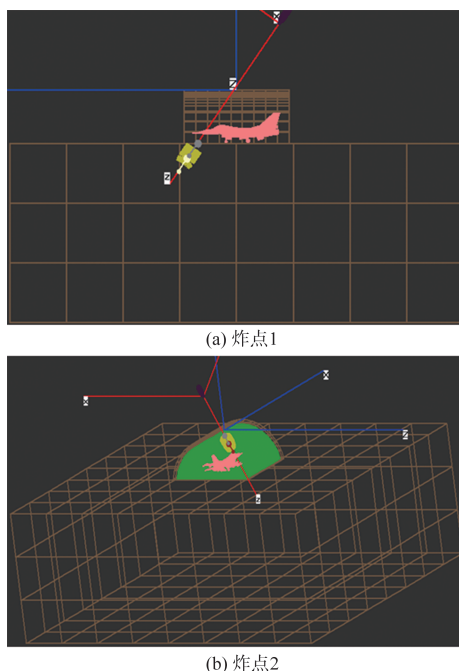


图10 典型炸点的毁伤概率云图

Fig.10 Damage probability cloud of typical detonation points

给定毁伤等级下的毁伤概率结果,如图11所示。随着落角绝对值的增大,掩蔽库目标中度毁伤概率和重度毁伤概率均逐渐增大。同样地,随着落角值绝对值的增大,飞机任务放弃毁伤概率也逐渐增大。以0.78作为最佳落角的判断标准时,掩蔽库中度毁伤的最佳落角为 $-90^{\circ}\sim-65^{\circ}$,掩蔽库重度毁伤的最佳落角为 $-90^{\circ}\sim-80^{\circ}$ 。飞机任务放弃毁伤的最佳落角为 $-90^{\circ}\sim-80^{\circ}$ 。

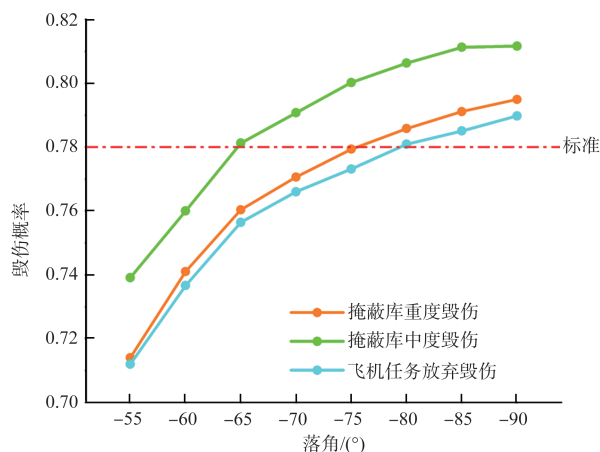


图11 不同落角下掩蔽库目标的毁伤概率

Fig.11 Damage probability of shelter target under different drop angles

2.2 停机坪上的预警机在杀爆战斗部作用下的毁伤

停机坪上的预警机参考E-2T预警机,其易损性模型如图12所示,主要研究炸高、瞄准点对杀爆弹打击效果的影响,预警机的毁伤等级选择任务放弃等级。

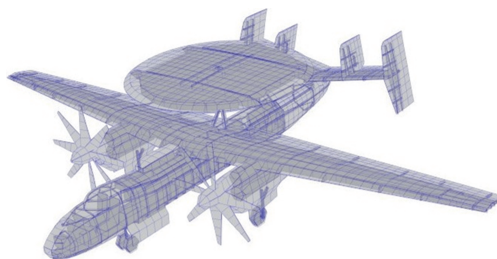


图12 E-2T预警机的易损性模型

Fig.12 Vulnerability model of E-2T early warning aircraft

导弹速度设置为850m/s,落角固定为 -60° ,交会角为180°,CEP设置为10m。破片数量为3000枚,飞散角为 $75^{\circ}\sim 105^{\circ}$,静态飞散初速为2000m/s。炸高计算范围设置为6~15m,间隔1m。机身上的瞄准点设置如图13所示。预警机目标的毁伤概率采用蒙特卡罗仿真^[31]计算获得,仿真次数设置为1000次。

采用仿真程序计算预警机在不同瞄准点、不同炸高位

置下的毁伤概率结果。典型的预警机目标在给定打击下的毁伤概率云图如图 14 所示。

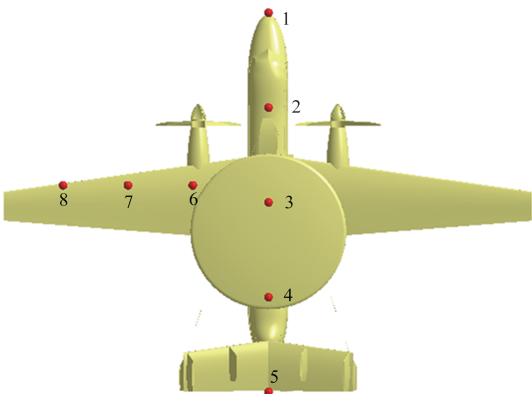
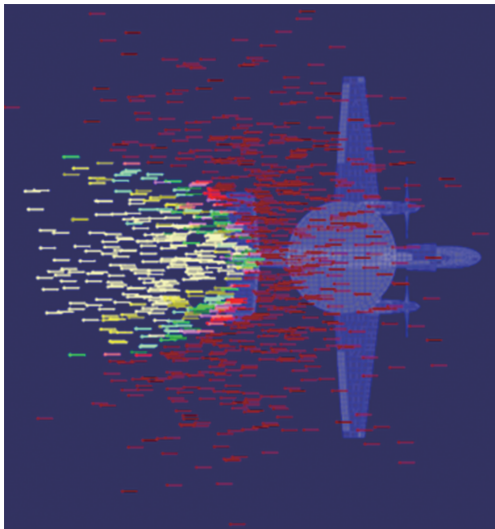
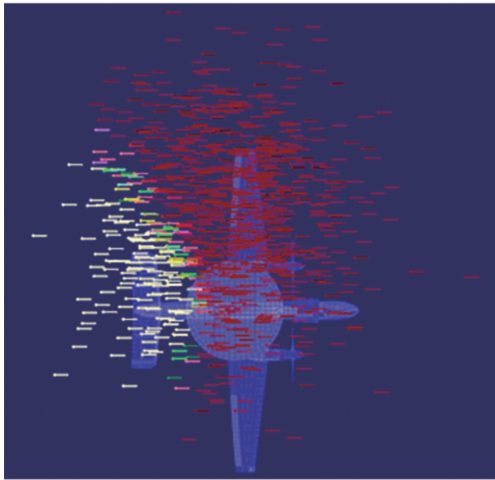


图 13 瞄准点设置
Fig.13 Aim point setting



(a) 瞄准点5-炸高8m



(b) 瞄准点7-炸高13m

图 14 预警机的毁伤概率云图

Fig.14 Damage probability cloud of early warning aircraft

累计各个打击方向下各瞄准点的毁伤概率结果,得到不同参数下停机坪上的预警机在任务放弃毁伤等级下的毁伤概率结果,如图 15 所示。在不同瞄准点下,预警机的毁伤概率变化规律不同。其中,瞄准点为 3、4、5、6、7 时,预警机的毁伤概率随着炸高的增大而减小;瞄准点为 1 时,预警机毁伤概率随着炸高的增大而呈增大的趋势;瞄准点为 2、8 时,预警机的毁伤概率随着炸高的增大而呈先增大后减小的趋势。

取毁伤概率 0.9 为最优炸高的评估标准,可以看出不同瞄准点下最优炸高的个数不相同。其中,瞄准点为 2 和 8 时,在炸高范围内(6~15m),各炸高预警机的毁伤概率均超过 0.9,也就是杀爆在落角为 -60° 、交会角为 180° 时,瞄准点 2 和瞄准点 8 为最优瞄准点。而瞄准点为 5 时,仅在炸高为 6m 时,预警机的毁伤概率超过 0.9。这是因为导弹以尾追的角度打击飞机,瞄准点为 5 时,导致仿真计算中很多炸点下破片并没有落到飞机的关键部件上。从炸高的角度看,在炸高等于 6m 时,仅有一个瞄准点即瞄准点 1 的毁伤概率小于 0.9。这说明炸高为 6m 时,是各瞄准点的最优炸高。

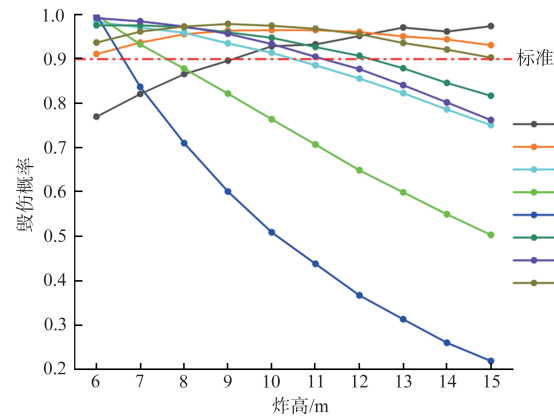


图 15 不同炸高下预警机的毁伤概率
Fig.15 Damage probability of early warning aircraft at different detonation heights

2.3 机场跑道目标在子母弹作用下的毁伤

将机场跑道目标简化为矩形的面目标,研究典型子母侵爆弹对机场目标的毁伤效果,分析母弹参数、子弹参数以及最小起降窗口对毁伤效果的影响。采用蒙特卡罗法计算不同情况下跑道的封锁概率,仿真次数设置为 1000 次,随机法搜索最小起降窗口的次数也设置为 1000 次。仿真过程中典型子母弹的母弹参数、子弹参数、跑道尺寸参数及最小起降窗口参数的默认值设置见表 1。

母弹参数主要研究母弹个数和母弹 CEP 对侵爆效果的

表1 仿真参数的默认值

Table1 Default values for simulation parameters

母弹个数	母弹 CEP/m	单发母弹所含子弹个数	子弹抛撒盲区半径/m
8	100	70	60
子弹抛撒半径/m	子弹威力半径/m	跑道尺寸/m	最小起降窗口/m
300	2	3000×60	800×20

影响。其中母弹个数在[1,10]内取值,间隔为1。母弹 CEP 在[0,300m]上取值,间隔 50m。子弹参数、跑道尺寸和最小起降窗口取表 1 中的默认值。不同母弹参数机场跑道的封锁概率如图 16 所示。随着母弹个数的增多,不同 CEP 下的封锁概率都呈逐渐增大的趋势。此外,跑道封锁对母弹个数要求存在下限,只有大于这一下限才有可能实现跑道封锁。而随母弹个数的增多,封锁概率的增大趋势逐渐变缓。以封锁概率 0.9 作为高毁伤效果判断标准,只有 CEP=0、50m、100m,母弹个数大于 8 时,才能达到高毁伤效果。且就封锁效果来看,CEP=50m 时的封锁效果优于其他 CEP 值。

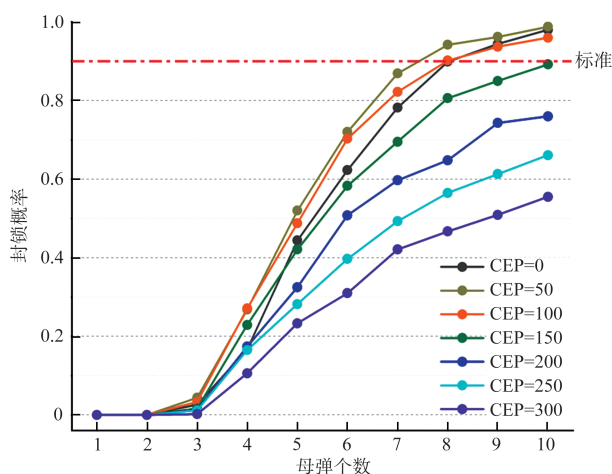


图 16 不同母弹个数下的封锁概率

Fig.16 Blockade probability with different number of munition

进一步通过仿真结果分析落在跑道上有效子弹个数随子母弹参数的变化,结果如图 17 所示。可以看出,随着母弹个数的增多,各 CEP 下的有效子弹个数呈线性增加。CEP=50m 时,各个母弹个数下的有效子弹个数均最多。这就导致图 16 中 CEP=50m 时的封锁概率最优。

子弹参数主要研究单发母弹所含子弹个数、子弹抛撒盲区半径、子弹抛撒半径、子弹威力半径对封锁概率的影响。其中子弹个数在[30,100]区间取值,间隔为 10。子弹抛

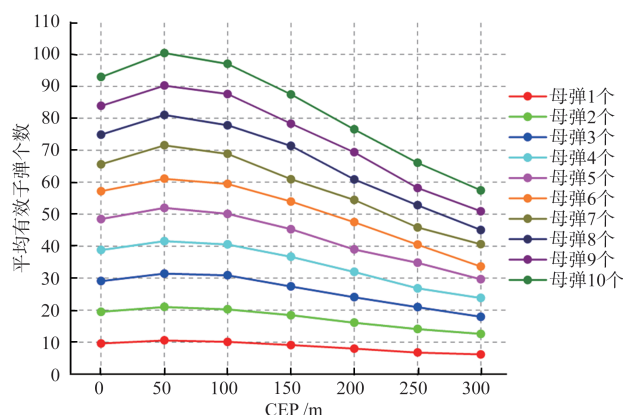


图 17 不同 CEP 下的有效子弹个数

Fig.17 Number of effective bullets under different CEPs

撒盲区半径在[0m,120m]区间取值,间隔为 20m。子弹抛撒半径在[150m,450m]区间取值,间隔为 50m。子弹威力半径在[2m,8m]区间取值,间隔为 2m。在考察给定参数的影响分析时,其余参数按表 1 取默认值。不同子弹参数下的跑道封锁概率如图 18 所示。可以看出,封锁概率随着单发子弹个数的增加而增大,且随着单发子弹个数的增加,封锁概率的增大趋势逐渐变缓。而随着子弹威力半径的增大,封锁概率逐渐增大,但并不明显。有效子弹个数随单发子弹个数的变化趋势与随着威力半径的变化趋势均呈现出线性,但随单发子弹个数的增加,其变化趋势明显。这说明单纯提高子弹的威力半径并不经济。封锁概率随着子弹盲区半径增大以及随着子弹药抛撒半径增大均呈先增大后减小的趋势。而有效子弹个数则随着子弹盲区半径,以及子弹药抛撒半径的增大而减小。虽然随着盲区半径或威力半径的增大,有效子弹数均减少,但适当的增大反而能提高跑道的封锁概率,改善封锁效果。

不同的机场跑道尺寸可能不尽相同,取 4 种典型的跑道尺寸,研究不同子母弹个数对这几种典型跑道的封锁情况。子母弹个数在[3,8]区间取值,间隔为 1。跑道参数设置见表 2。其余参数的设置取表 1 中的默认值。

不同跑道尺寸下的跑道封锁效果如图 19 所示。随着跑道尺寸的增大,虽然有效子弹个数增多,但封锁效果逐渐变差,工况 1 下在母弹个数为 8 时,封锁概率接近 1,而对应的工况 4 的封锁概率仅为 0.1220。

不同飞机目标的最小起降窗口也不相同,取 5 种典型的起降窗口,研究不同子母弹个数对这几种起降窗口的封锁情况。子母弹个数在[3,8]区间取值,间隔为 1。跑道参数设置见表 3。其余参数的设置取表 1 中的默认值。结果如

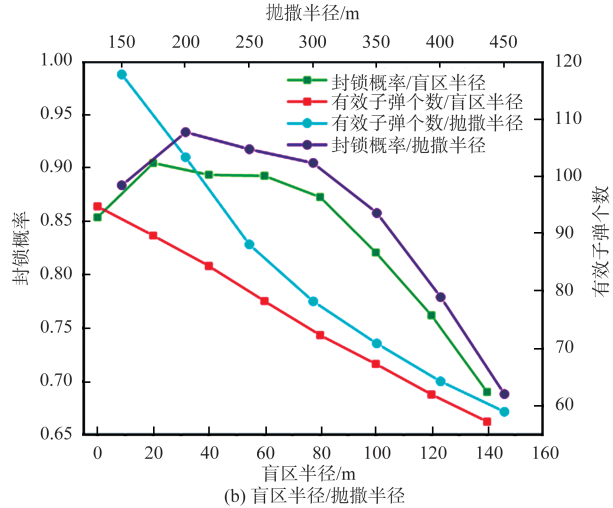
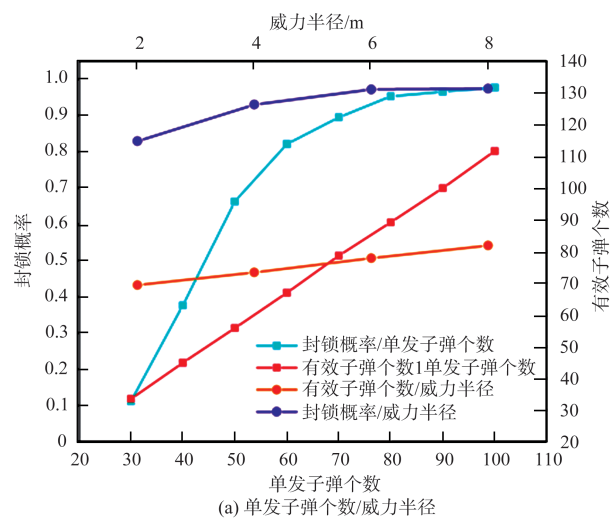


图18 不同子弹参数下的封锁效果

Fig.18 Blockade effect under different submunitions parameters

表2 跑道尺寸设置

Table 2 Runway size settings

工况 1/m	工况 2/m	工况 3/m	工况 4/m
2000×40	3000×60	4000×80	5000×100

图20所示。由图20可以看出,在给定子母弹个数时,随着最小起降窗口的增大,封锁概率逐渐增大。对于工况d和工况e,只需三枚子母弹就可以使封锁概率达到0.9以上。而对于工况a,即使子母弹个数达到8个,封锁概率也只有0.2320。

综上所述,对于给定的跑道尺寸和最小起降窗口,母弹个数、母弹CEP、单发子弹个数对封锁概率的影响较大。而子弹的抛撒半径、子弹的盲区半径以及子弹的威力半径对封锁概率的影响相对较小。特别值得一提的是,只通过提高子弹的威力半径来提高封锁概率很不经济。

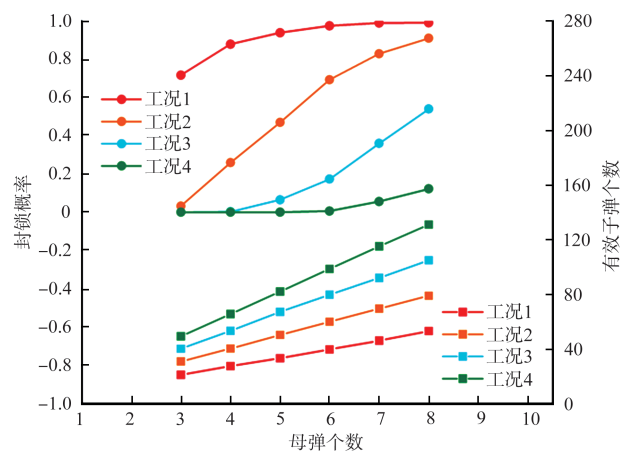


图19 跑道尺寸对封锁效果的影响

Fig.19 Influence of runway size on blockade effect

表3 最小起降窗口设置

Table 3 Default values for simulation parameters

工况 a/m	工况 b/m	工况 c/m	工况 d/m	工况 e/m
(600,15)	(800,20)	(1000,25)	(1200,30)	(1400,35)

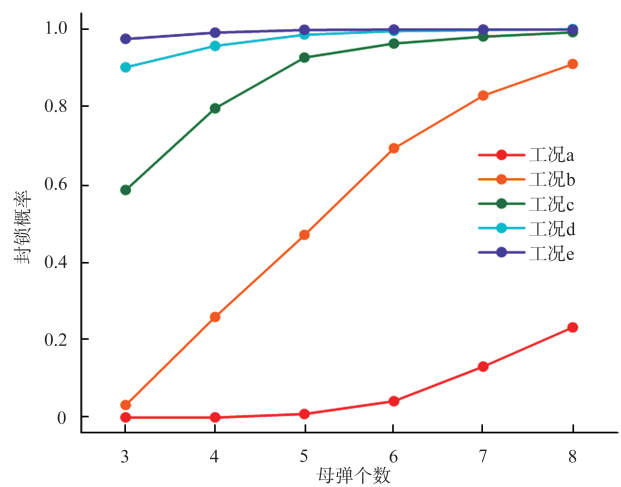


图20 最小起降窗口对封锁效果的影响

Fig.20 The Influence of minimum leave window on the blockade effect

3 结论

对于典型机场目标的毁伤评估问题,本文有针对性地建立了不同导弹打击下的毁伤评估模型,分析了典型的参数对掩蔽库目标、停机坪上的预警机目标及机场跑道目标的毁伤效果。主要结论如下:

(1)构建了单机钢筋混凝土拱形掩蔽库在侵爆战斗部打击下的毁伤评估模型,分析了不同落角对掩蔽库目标及掩蔽库内的飞机目标毁伤效果的影响。中度毁伤条件下,

典型侵爆战斗部打击掩蔽库目标时的最佳落角为 $-90^{\circ}\sim-65^{\circ}$,重度毁伤时为 $-90^{\circ}\sim-80^{\circ}$ 。在任务放弃等级下,侵爆战斗部打击掩蔽库内飞机目标的最佳落角为 $-90^{\circ}\sim-80^{\circ}$ 。

(2)构建了停机坪上的E-2T预警机在杀爆战斗部作用下的毁伤评估模型,分析了不同炸高以及不同瞄准点位置对毁伤效果的影响。典型杀爆战斗部在炸高为6~15m时,瞄准点2和8的毁伤概率均超过0.9,为最优瞄准点。而在各瞄准点中,炸高为6m时,各瞄准点的毁伤概率总体上比较高,为最优炸高。

(3)构建了典型机场跑道目标在侵爆子母弹作用下的毁伤评估模型,分析了母弹参数、子弹参数、跑道尺寸、最小起降窗口设置对毁伤效果的影响。封锁概率随母弹个数、子弹个数的增多而增大。母弹CEP的变化也对封锁概率产生了较大的影响。而子弹盲区半径和子弹抛撒半径对封锁概率的影响有限。而子弹威力半径的增大虽可在一定程度上提高封锁概率,但威力半径是由较大的装药量决定的,单纯提高子弹威力半径并不经济。

AST

参考文献

- [1] 梁振刚,刘阔,潘浙平,等.子母弹对机场跑道的封锁效能评估[J].兵器装备工程学报,2021,42(1): 35-38.
Liang Zhengang, Liu Kuo, Pan Zheping, et al. Evaluation of blockade effectiveness of submunition against airport runway [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(1): 35-38. (in Chinese)
- [2] 王刚,李臣明,刘怡昕.远程制导火箭子母弹对机场跑道毁伤研究[J].火力与指挥控制,2015,40(4): 111-114.
Wang Gang, Li Chenming, Liu Yixin. Study on destruction of aerodrome runway by cluster ammunition of long-range guidance rocket projectile[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(4): 111-114. (in Chinese)
- [3] 李勇,赵青松,邹志刚,等.面向效果的机场跑道打击方案评估方法[J].兵器装备工程学报,2021,42(3): 97-101.
Li Yong, Zhao Qingsong, Zou Zhigang, et al. Evaluation method of effect-oriented runway strike plan[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(3): 97-101. (in Chinese)
- [4] 李其然,史玉彬,陈志华,等.基于动态贝叶斯网络的民用机场空袭毁伤评估模型[J].弹道学报,2018,30(1): 93-96.
Li Qiran, Shi Yubin, Chen Zhihua, et al. Damage assessment model of civil airfield in an air raid based on dynamic Bayesian network[J]. Journal of Ballistics, 2018, 30(1): 93-96. (in Chinese)
- [5] 邓烨,陶西贵,奉祁林,等.基于保障链的机场系统目标毁伤联合火力分配问题研究[J].防护工程,2022,44(6): 20-28.
Deng Ye, Tao Xigui, Feng Qilin, et al. Research on joint fire distribution of airfield system target damage based on support chain[J]. Protective Engineering, 2022, 44(6): 20-28. (in Chinese)
- [6] 王然辉,李文胜,杨世荣,等.基于易损性的目标标准化及其应用[J].火力与指挥控制,2017,42(12): 105-110.
Wang Ranhui, Li Wensheng, Yang Shirong, et al. Research on target standardization and application based on vulnerability [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(12): 105-110. (in Chinese)
- [7] 宋卫东,吴开腾,宁建国.机库内爆炸效应的数值模拟研究[J].兵工学报,2007(11): 1329-1334.
Song Weidong, Wu Kaiteng, Ning Jianguo. Numerical simulation on the explosion effects in a hangar deck[J]. Acta Armamentarii, 2007(11): 1329-1334. (in Chinese)
- [8] 李伟,方洋旺,王晓云,等.空地导弹对飞机掩蔽库的毁伤效能评估[J].火力与指挥控制,2016,41(5): 52-55+61.
Li Wei, Fang Yangwang, Wang Xiaoyun, et al. Study on damage assessment methods of typical hard-target[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(5): 52-55+61. (in Chinese)
- [9] 杨杰,占君,陈志翔,等.弹道式杀爆弹打击掩蔽库飞机方案的优化方法[J].西北工业大学学报,2023,41(1): 115-124.
Yang Jie, Zhan Jun, Chen Zhixiang, et al. Optimization method of ballistic blast fragmentation warhead striking aircraft in aircraft shelter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(1): 115-124. (in Chinese)
- [10] 高士英,魏志毅.杀爆战斗部对地面飞机的毁伤仿真研究[J].弹箭与制导学报,2008(1): 109-111+114.
Gao Shiyong, Wei Zhiyi. A simulation of surface airplane damage by blast-fragmentation warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008(1): 109-111+114. (in Chinese)
- [11] 张睿文,裴扬,侯鹏,等.破片式战斗部对预警机毁伤评估研究[J].北京理工大学学报,2022,42(4): 347-358.
Zhang Ruiwen, Pei Yang, Hou Peng, et al. Research on damage

- evaluation of fragmentation warheads against early-warning aircraft[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(4): 347-358. (in Chinese)
- [12] 侯鹏,裴扬,张睿文,等.地空导弹破片式打击军机的瞄准点选择方法[J].北京航空航天大学学报,2023,49(6): 1434-1445.
Hou Peng, Pei Yang, Zhang Ruiwen, et al. Selection method of aim point for surface-to-air missile fragment against military aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(6): 1434-1445. (in Chinese)
- [13] 王震宇,陈江,张宏兵,等.斜切模式子母弹对跑道封锁效能研究[J].四川兵工学报,2014,35(9): 28-31.
Wang Zhenyu, Chen Jiang, Zhang Hongbing, et al. Studies on the blockade effectiveness of bomblets to runway[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2014, 35(9): 28-31. (in Chinese)
- [14] 刘云辉,冯源,高月光,等.子母弹反机场跑道封锁概率快速计算方法[J].火力与指挥控制,2022,47(9): 159-162+169.
Liu Yunhui, Feng Yuan, Gao Yueguang, et al. Research on fast calculation method of probability of airstrips blocked by cluster munitions[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(9): 159-162+169. (in Chinese)
- [15] 李新其,李红霞,邱艳粉.基于SEA的常规导弹封锁机场跑道作战效能分析的系统建模和解析[J].弹道学报,2023,35(1): 94-102.
Li Xinqi, Li Hongxia, Qiu Yanfen. System modeling and analysis of operational effectiveness on conventional missile blocking airport runway based on SEA[J]. Journal of Ballistics, 2023, 35(1): 94-102. (in Chinese)
- [16] 范阳涛,杨萍,世文学,等.基于毁伤的机场作战效能评估[J].四川兵工学报,2009,30(10): 93-95.
Fan Yangtao, Yang Ping, Shi Wenxue, et al. Evaluation of airport combat effectiveness based on damage[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2009, 30(10): 93-95. (in Chinese)
- [17] 张国伟,徐立新,张秀艳.终点效应及靶场试验[M].北京:北京理工大学出版社,2009.
Zhang Guowei, Xu Lixin, Zhang Xiuyan. Endpoint effect and range test[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [18] Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. 2nd Edition. Reston: AIAA Education Series, 2003.
- [19] 王树山.终点效应学[M]. 2版.北京:科学出版社,2019.
Wang Shushan. Terminal effects[M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
- [20] Konokman H E, Kayran A, Kaya M. Aircraft vulnerability assessment against fragmentation warhead[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 67:215-227.
- [21] 毛亮,姜春兰,王超,等.基于改进遗传算法的破片杀伤战斗部优化设计[J].兵工学报,2015,36(3): 457-462.
Mao Liang, Jiang Chunlan, Wang Chao, et al. Optimization design method of fragmenting warfare based on improved genetic algorithm improved genetic algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(3): 457-462. (in Chinese)
- [22] 刘小川,张宇.作战飞机关键结构易损性评估方法研究进展与展望[J].航空科学技术,2021,32(12): 43-56+42.
Liu Xiaochuan, Zhang Yu. Research progress and prospects of vulnerability assessment methods for key structures of combat aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 43-56+42. (in Chinese)
- [23] 胡净哲,李向东,周兰伟,等.武装直升机在杀爆弹打击下的易损性及防护策略[J].北京航空航天大学学报,2020,46(6): 1214-1220.
Hu Zhengzhe, Li Xiangdong, Zhou Lanwei, et al. Vulnerability and defense strategy for gunship against HE munition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1214-1220. (in Chinese)
- [24] Li Jun, Yang Wei, Zhang Yugang, et al. Aircraft vulnerability modeling and computation methods based on product structure and CATIA[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 334-342.
- [25] Lomazzi L, Cadini F, Giglio M, et al. Vulnerability assessment to projectiles: Approach definition and application to helicopter platforms[J]. Defence Technology, 2022, 18(9):1523-1537.
- [26] 黄寒砚,王正明,袁震宇,等.跑道失效率的计算模型与计算精度分析[J].系统仿真学报,2007(12): 2661-2664.
Huang Hanyan, Wang Zhengming, Yuan Zhenyu, et al. Model for computing destruction probability of runway and calculating precision analyzing[J]. Journal of System Simulation, 2007 (12): 2661-2664. (in Chinese)
- [27] 韩荣辉,吴锴.对地!对地![M].北京:解放军出版社,2011.
Han Ronghui, Wu Kai. Illustrating air to ground operations

- [M]. Beijing: Liberation Army Press, 2011. (in Chinese)
- [28] 邵小耀, 徐丙立, 牛树来, 等. 炮弹触地爆炸作用下的弹坑形变建模与纹理生成方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1412-1421.
- Shao Xiaoyao, Xu Bingli, Niu Shulai, et al. Deformation modeling and texture generation of crater caused by projectile touchdown explosion[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1412-1421. (in Chinese)
- [29] 黄寒砚, 王正明. 子母弹对机场跑道封锁时间的计算方法与分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(3): 295-300.
- Huang Hanyan, Wang Zhengming. Calculation and analysis of the time of airstrips blockaded by cluster munitions[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(3): 295-300. (in Chinese)
- [30] 汤孝, 高朝晖, 郝展, 等. 航空发电机健康特征参数与老化模式分析[J]. 航空科学技术, 2021, 32(6): 27-35.
- Tang Xiao, Gao Zhaohui, Xi Zhan, et al. Analysis on health characteristic parameters and aging mode of aerospace generator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(6): 27-35. (in Chinese)
- [31] 袁慎芳, 王劫, 徐秋慧, 等. 基于导波-高斯混合模型蒙特卡罗迁移度量的结构损伤量化诊断方法研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(3): 33-39.
- Yuan Shenfang, Wang Jie, Xu Qiuhui, et al. Research on quantitative diagnosis method of structural damage based on guided wave-gaussian mixture model Monte Carlo migration measurement[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(3): 33-39. (in Chinese)

Research on the Damage Effect of Typical Airport Targets

Hou Peng¹, Pei Yang^{1,2}, Zhao Qian¹, Ma Yinjie¹, Ge Yuxue¹

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, AVIC Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Luoyang 471023, China

Abstract: Analyzing the damage situation of typical ammunition warheads against airport targets is of great significance for improving the damage efficiency of air to ground ammunition against airport targets. Three typical targets related to combat aircraft, namely aircraft shelter targets, early warning aircraft targets on the apron, and airport runway targets, are selected to construct the damage assessment models, and the influence of typical ammunition warhead parameters on the damage effect is analyzed. The aircraft shelter targets are divided into external shelter targets and internal fighter targets, and the impact of drop angle on the damage effect of the invasion warhead is studied. Taking high precision early warning aircraft as the vulnerability model, the influence of aim point and blast height on the damage effect of detonating warhead is analyzed. The airport runway target takes the blockade probability as the evaluation index of damage effect, and the effects of bomb parameters, submunition parameters, runway dimensions and minimum leave window on the blocking effect of shrapnel on runways are studied. The feasibility and rationality of the constructed model are verified by the simulation examples. It also calculates and analyzes the optimal drop angle of the missile when striking the shelter target and the aircraft target inside the shelter, the optimal aim point and the optimal blast height of the missile when striking the target of the early warning aircraft, and the influence of typical parameters of submunitions on the damage effect when striking runway targets.

Key Words: airfield targets; shelter; airport runway; early warning aircraft; damage evaluation

Received: 2023-06-11; **Revised:** 2023-08-28; **Accepted:** 2023-09-25

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20185153032)