

文章编号: 1674-8190(2023)04-076-09

隐身靶机外形尺寸对导弹作战效能评估的影响

刘丰军, 赵阳, 张丽

(甘肃酒泉14支局, 酒泉 735018)

摘要: 随着第四代隐身飞机逐渐成为世界主要军事强国的主战装备, 导弹反隐身作战能力提升成为武器装备建设的必然要求。导弹作战效能评估, 实弹打靶是必不可少的环节, 国内已发展了一定数量的小型隐身靶机, 可用于模拟第四代隐身飞机的主要目标特性, 但有关其模拟的逼真度和对导弹作战效能评估准确性的分析, 却鲜见报道。对小型隐身靶机和真实隐身飞机雷达散射特性、物理尺寸、易损性、电子对抗特性等方面的差异进行对比分析, 研究各目标特性的差异对导弹各功能、效能发挥的影响。结果表明: 小型隐身靶机因自身外形、尺寸的固有特性, 难以全面、准确地评估导弹的作战效能, 有必要重视发展大尺寸隐身靶机, 这对评估导弹作战效能、正确引导导弹反隐身能力提升具有积极意义。

关键词: 隐身飞机; 靶机; 外形尺寸; 导弹; 作战效能

中图分类号: V279⁺.1; E927

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.04.08

The impact of stealth target drone dimensions on missiles operational effectiveness evaluation

LIU Fengjun, ZHAO Yang, ZHANG Li

(The 14th Sub-post Office of Jiuquan, Gansu, Jiuquan 735018, China)

Abstract: With the fourth generation stealth aircraft gradually becoming the main combat equipment of major military powers in the world, the improvement of missile anti stealth combat capability has become an inevitable requirement for the construction of weapons and equipment. In the evaluation of missile operational effectiveness, real shot shooting is an essential link. At present, there are a certain number of small stealth target aircraft that can be used to simulate the main target characteristics of the fourth generation stealth aircraft. However, their analysis of simulation fidelity and the accuracy of missile operational effectiveness evaluation is rarely seen in relevant literature. This paper makes a detailed comparison and analysis of the differences between the small stealth target and the real stealth aircraft in radar scattering characteristics, physical dimensions, vulnerability, electronic countermeasure characteristics, etc. Through the study of the impact of the differences in target characteristics on missile functions and effectiveness, it is believed that the small stealth target is difficult to be comprehensive to accurately evaluate the operational effectiveness of missiles due to its own shape and size inherent characteristics, it is necessary to attach importance to the development of large-scale stealth target aircraft, which is of positive significance for evaluating the operational effectiveness of missiles and correctly guiding the improvement of missile anti stealth capability.

Key words: stealth aircraft; target drone; dimensions; missile; operational effectiveness

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-10-23

通信作者: 赵阳, boming073259@163.com

引用格式: 刘丰军, 赵阳, 张丽. 隐身靶机外形尺寸对导弹作战效能评估的影响[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 76-84, 115.

LIU Fengjun, ZHAO Yang, ZHANG Li. The impact of stealth target drone dimensions on missiles operational effectiveness evaluation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 76-84, 115. (in Chinese)

0 引言

随着第四代隐身飞机不断成为世界主要军事强国的主战装备,反隐身作战能力建设已成为武器装备发展的必然要求,空空、地空导弹作战效能评估,实弹打靶是必不可少的试验环节。为检验武器装备对隐身作战飞机的作战效能,美军于2006年启动了5GAT大尺寸隐身靶机项目,2020年首架5GAT原型机交付美空军,其采用与典型隐身战斗机相似的外形设计,最终尺寸比F-16飞机略小^[1-2],起飞质量在5 t以上。国内的靶机产品包括众多小型靶机,用于模拟典型作战对象的主要目标特性,包括高度、速度、机动性能、可探测性等,其质量在数十千克到数百千克不等,多采用细长机身、小翼面积构型;在此基础上,近年来发展出了一定数量的小型隐身靶机^[3-4],在反隐身导弹作战效能评估领域发挥着一定作用。然而现代空战是高动态、制约因素复杂并充满不确定性的、激烈的空中博弈,世界各国均无空空、地空导弹击落现役隐身战斗机目标的先例,因此有必要对照美军隐身靶机发展情况,从外形尺寸的角度研究小型隐身靶机在导弹作战效能评估方面存在的差距与不足。

颜芳芳等^[5]介绍了包括俄罗斯RM-5V27A火枪绳隐身靶标在内的多型国外小型靶机,指出高机动性能、敏捷性、低可探测性及超声速巡航是靶机技术的发展趋势,但缺乏详细技术分析;段辰龙等^[6]指出缩比无人机可作为高性能靶机,并通过若干型高性能缩比无人机翼载、推重比及缩放比例三项关键总体参数进行对比分析,认为相对原准机,缩比机在升限、机动(盘旋)性能方面具备优势,但在速度(最大速度、水平加速性能)方面有一定劣势,可通过适当调整翼型、优化微型发动机总体参数使性能全面提升,但缺少对可探测性和易损性的分析。

基于此,本文讨论隐身作战飞机和小型隐身靶机的外形尺寸对其雷达散射特性、物理特性、电子对抗特性等目标特性的影响,以及受外形尺寸影响的目标特性对主动雷达制导型导弹(以下简称“导弹”)的不同功能、效能发挥的制约关系,分析采用小型隐身靶机来检验导弹反隐身作战效能的不足,以期对隐身靶机发展建设提供技术参考。

1 雷达散射特性

目标的雷达散射特性包括远场RCS特性、近场RCS特性、角闪烁特性,这些特性对导弹不同攻击阶段的制导性能均有一定的影响。

1.1 远场RCS特性

从争取空战“先敌发现、先敌发射、先敌脱离”绝对优势的作战理念出发,隐身作战飞机迎头锥角内RCS均值是其最被关注的指标之一,也是衡量目标是否隐身最直接的标准。作战飞机隐身设计需兼顾飞行性能,考虑气动、结构布局等因素的限制,在现有技术条件下,一般仅确保实现重点方向范围内的隐身,难以实现全空间隐身。空战中,弹目态势和目标姿态不断变化,对导弹制导而言,目标RCS处于起伏变化状态,故需要对真实目标和靶机重点角度范围内的RCS和RCS空间分布特征均进行分析。

1.1.1 远场RCS对导弹作战效能影响分析

1) 远场RCS幅值缩减影响分析

由雷达方程可知,RCS的缩减对导引头作用距离的缩短为4次方根规律;雷达受干扰条件下对隐身飞行器探测时,RCS的缩减对导引头作用距离的缩减为平方根规律^[7]。如RCS降低1个数量级,导引头作用距离降为56%,而干扰条件下甚至降为36%。可以看出,RCS缩减对导引头作用距离的压缩是相当明显的,其直接作用是压缩导引头的搜索跟踪时间和气动反应时间,进而降低导引头的截获概率、增大导引头的跟踪误差和导弹需用过载。

2) 远场RCS空间分布特征影响分析

分析目标RCS空间分布特征对导弹的影响需考虑两个方面,一是主要强散射方向的RCS,二是目标全空间RCS统计特性。

①强散射方向RCS幅值影响

针对隐身目标的威胁,导弹亦不断优化攻击策略,尽量确保末制导阶段从强散射方向攻击,以提高命中概率,比如设计高抛弹道,从目标大俯仰角区域攻击。

②全空间RCS统计特性影响

根据雷达脉冲信号检测原理可知,对于非起伏目标,回波振幅为 A 时,目标的检测概率为

$$P_{d_1}(r) = \int_{U_r}^{\infty} p_d(r|A) dr \quad (1)$$

式中: r 为检波器输入端信号加噪声的包络, 检波器输入端的噪声为高斯分布。

假定因 RCS 幅值起伏变化引起 A 的概率密度函数为 $f(A)$, 则雷达的检测概率为

$$P_{d_2}(r) = \int_{U_r}^{\infty} \int_0^{\infty} f(r, A) dA dr = \int_{U_r}^{\infty} \int_0^{\infty} p_d(r|A) \cdot f(A) dA dr \quad (2)$$

根据概率论相关知识, $P_{d_2}(r)$ 小于 $P_{d_1}(r)$, 具体数值取决于 RCS 空间起伏概率密度函数。丁鹭飞等^[8]给出目标 RCS 幅值分布呈施威林 I 型、II 型、III 型、IV 型分布 4 种情况时的相关计算结果; 杨英科等^[9]推导了目标 RCS 幅值分布服从卡方分布时, 雷达检测概率与 RCS 起伏强弱的数学关系。其结果均表明检测概率随起伏强度呈负相关。RCS 起伏越强时, 为保证一定的检测概率, 雷达需增加的输入信噪比或累计脉冲数越大。目标回波信号被正确检测是保证导引头成功截获并稳定跟踪目标的前提, 检测率下降必然影响导引头的截获与跟踪效能。但输入信噪比受雷达接收机噪声系数和噪声带宽限制, 脉冲累积数亦需考虑目标机动和处理速度的影响, 不可能无限增加。故雷达导引头设计时, 一般需对真实目标的 RCS 统计特性进行分析研究, 得出其概率密度函数, 作为导引头相关参数选择的先验知识, 之后通过实弹打靶进行验证。如果真实目标比导弹设计时推测模型的 RCS 起伏更强, 或者比小型隐身靶机的 RCS 分布起伏更剧烈, 导弹的跟踪性能可能偏离设计期望及靶试评估结论。

1.1.2 外形尺寸对远场 RCS 分布的影响

真实目标迎头锥角内隐身设计受座舱和雷达罩功能发挥需求的限制, 除进气道及局部细节外, 无法大量涂覆隐身材料, RCS 缩减主要以赋形为主, 如扁平化设计、平行原则等; 小型隐身靶机尺寸较小, 同时在设计上无需考虑对座舱、雷达罩等强散射源的抑制, 除赋型外亦可大范围涂覆隐身材料, 加之其结构简单、外形更加平滑, 理论上来说, 迎头锥角范围内 RCS 幅值容易达到真实目标的量级。

真实目标主要强散射方向包括腹背方向、正

侧向、尾后以及垂直于翼面边沿方向。本文将通过两个算例定性分析尺寸增大对强散射方向 RCS 幅值的影响, 强散射方向 RCS 幅值亦间接表明 RCS 空间分布起伏的强弱。

1) 腹背向 RCS

真实目标采用扁平化设计、翼身融合表面, 在俯仰角接近 90° 时, 镜面反射作用对 RCS 起主要贡献。不考虑表面材料时, 目标可看成平板, 按照翼面积将目标简化为正方形金属表面后, 按照物理光学法, 矩形平板 RCS 计算公式为

$$\sigma_{po} = \frac{64\pi}{\lambda^2} a^4 \cos^2 \phi \left[\frac{\sin(2ka \sin \phi)}{2ka \sin \phi} \right] \quad (3)$$

算得翼面积分别为 1、4、16 和 64 m^2 时 RCS 幅值如图 1 所示。

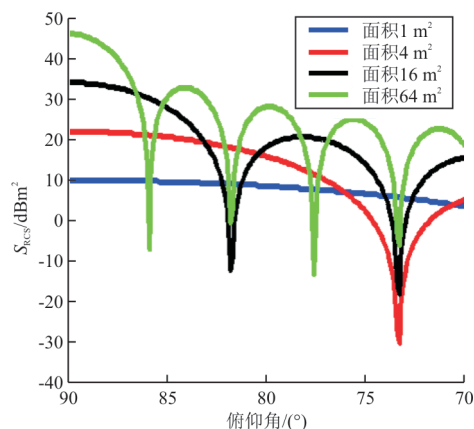


图 1 金属平板大俯仰角 RCS 幅值

Fig. 1 RCS of metal plate on the large elevation range

2) 正侧向 RCS

倾斜垂尾与翼身表面形成的二面角结构对正侧向 RCS 起主要贡献作用。范菊红等^[10]给出了二面角反射器 RCS 的理论计算方法。本文对其进行进一步简化, 令垂尾倾角为 O , 俯仰角为 0° , 雷达正侧向照射, 如图 2 所示。

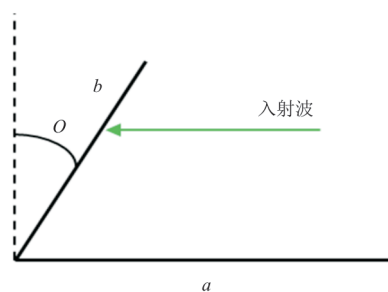


图 2 金属二面角结构示意

Fig. 2 The metal dihedral corner

设入射波与二面角中线的夹角为 β ,则 $\beta = 45^\circ - O/2$,当 $O \leq 45^\circ$ 、 $a \geq b/(2 \sin \beta)$ 时,对 RCS

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} \left| -jka' (d/\lambda) \sin(2\beta) \cdot \exp(-jka' \cos 2\beta) \cdot \frac{\sin(ka' \cos 2\beta)}{ka' \cos 2\beta} \right| \quad (4)$$

其中, $a' = b/[2 \sin(2\beta)]$,假设 b 为正方形金属板时,即 $b = d$ 时,不同面积的 RCS 与倾角 O 的关系如图3所示。

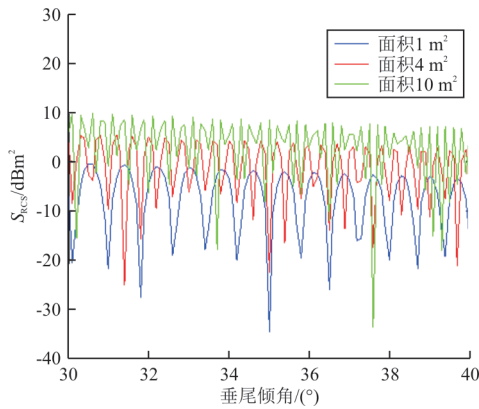


图3 金属二面角俯仰 0° 、正侧向 RCS

Fig. 3 The RCS of metal dihedral corner (pitch 0° , azimuth 90°)

从图2~图3可以看出:正方形金属平板在接近俯仰角 90° 方向,尺寸每增大1倍(即面积增大为4倍),RCS增大约 $10 \sim 15$ dBm²;倾角 $30^\circ \sim 40^\circ$,尺寸每增大1倍,RCS增大约 $5 \sim 10$ dBm²。不考虑隐身材料使用情况,尺寸增大对强散射方向 RCS 的增强是比较明显的。隐身材料对 RCS 的缩减作用有限,太小尺寸的靶机难以模拟真实目标强散射方向的 RCS 幅值及空间分布特征,在一定程度上,可能对导弹攻击策略和雷达导引头截获、跟踪性能评估的客观性造成影响。

1.2 近场 RCS 特性

导弹的引战配合性能是导弹有效杀伤目标的关键,引信的输出受弹目交会参数、目标近场 RCS 以及引信的参数3个要素的制约,如图4所示。引信参数是根据目标近场 RCS 特性、外形尺寸及弹目交会态势而设计的触发参数,以确保引信触发后,战斗部能够在相对目标合适的部位起爆,以有效杀伤目标。对于导弹设计而言,要求其在所有或大多数交会态势下杀伤目标,故引信的参数设计需最大程度地适应目标的近场 RCS 特性。从这个意义上来讲,靶机近场 RCS 逼真模拟对于导弹

起贡献作用的仅有 b 面至 a 面的二次反射作用,文献[10]中的计算方法简化为

有效杀伤目标起重要的导向作用。

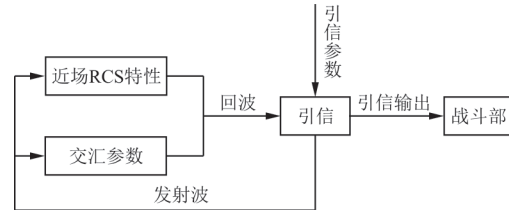


图4 引信工作逻辑

Fig. 4 Fuze working logic

近场 RCS 特性是与雷达天线特性高度相关的数值分布。用相对目标某一方向上不同位置的反射功率比表达^[11],假定发射功率恒定,则采用回波强度描述。构型完全相同的飞机,在相同交会态势下,飞机尺寸越小,反射面越小,回波强度越小,且交会时回波强度满足门限的持续时间越小。

一般导弹引信采用高增益天线鉴别目标部位,弹目交会时,天线的尖锐性会使目标获得不均匀照射响应,尤其是大尺寸目标在遇靶阶段往往处于局部照射状态,如图5所示,设目标与引信天线的距离为 d ,天线主瓣宽度为 θ ,则天线主瓣对目标照射区域的尺度为 $l = d \sin \theta$ 。如引信主瓣波束宽度为 6° ,在弹目距离为5 m时,主瓣对目标照射区域的尺度仅为0.5 m左右。主瓣作为引信回波的主要能量方向,其照射区域的目标结构直接影响回波信号强度。比如相同机长及翼展的飞机,采用细长型机身、小翼面积构型,与采用翼身融合设计的飞机相比,后者反射面大,交会过程中回波信号持续性好。

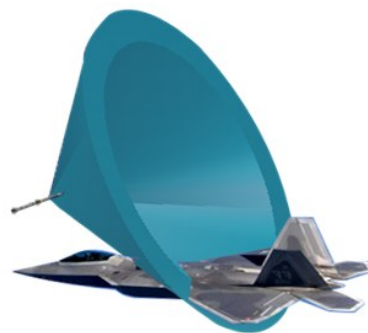


图5 引信主瓣波束照射目标示意图

Fig. 5 Main lobe beam of the fuze

另外由于目标被非均匀照射,飞机的进气道、尾翼、尾喷管等局部结构特征以及机身的材料使用、隐身材料涂覆等都对近场 RCS 有较大影响,甚至在某些分布角域,一些结构细节也可能成为影响该角域近场 RCS 特性的主要因素。

综上所述,近场 RCS 与靶机的外形、尺寸紧密相关,无论采用小型靶机还是结构布局差异较大的靶机检验导弹的引信动作,均会对导弹的反隐身作战能力评估产生较大的不确定性。

1.3 角闪烁特性

角闪烁是由于雷达扩展目标中各散射单元间的相互影响引起的在目标角度测量和角度跟踪上的固有误差源^[12],角闪烁误差属于目标噪声,一般用角闪烁线偏差描述。对角闪烁机理的一种解释是回波信号的波前畸变,即由于目标不同散射源的相互干涉,回波的波前面畸变为非球面波,在接收天线口面上,波前法线产生倾斜,从而导致角闪烁偏差^[13]。殷红成等^[13]采用相位梯度法计算得到目标位置满足雷达远场条件时($r > 2L^2/\lambda$),角闪烁线偏差的一般公式如式(5)所示;范红旗等^[14]研究表明,在不满足远场条件时,目标相对雷达的距离为 100~300 m 时,该公式仍有一定的准确度,而此时已进入或接近一般雷达导引头的盲距范围。

$$\begin{cases} e_\theta = -\frac{1}{k_0} \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} \\ e_\varphi = -\frac{1}{k_0 \sin \theta} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \end{cases} \quad (5)$$

其中,

$$\zeta = \iint_s [J_s - (J_s \cdot \hat{r}) \hat{r}] \exp(jk_0 \mathbf{r}' \cdot \hat{r}) d\mathbf{s}' \quad (6)$$

式中: $\mathbf{r}'$ 为位于导体表面上点相对原点的矢量; $\hat{r}$ 为 $\mathbf{r}$ 的单位矢量。

可以看出,角闪烁线偏差仅与 $\hat{r}$,即观测角度 (θ, φ) 有关,与距离无关。

通过式(5)计算角闪烁线偏差需要进行复杂的电磁仿真计算,黄培康等^[7]采用式(5)给出的双源目标角闪烁线偏差更能解释角闪烁线偏差的产生机理。即假定双源目标距离为 d ,观测角为 q ,幅度比和初相差分别为 Z_0 和 δ 时,归一化的角闪烁线偏差(角闪烁线偏差与扩展目标几何长度之比)为

$$\epsilon_0 = \frac{1 - Z_0^2}{1 + Z_0^2 + 2Z_0 \cos \psi} \quad (7)$$

$$\psi = \sin q \cdot 2\pi d / \lambda + \delta \quad (8)$$

1) 角闪烁线偏差与尺寸的关系

式(5)中, J_s 的幅值、相位等确定时,角闪烁线偏差与目标的尺寸($\mathbf{r}'$)呈正相关。实际情况下, J_s 的幅值、相位随机分布,但根据统计学原理,大量散射单元的幅值和初相位随机分布情况下,随着尺寸增大,在所有观测角下,角闪烁线偏差总体上增大。

式(7)中,观测角、双源距离随机变化, ϵ_0 的数值相应随机变化,但其幅值范围仅与 Z_0 相关;当 ϵ_0 确定后,角闪烁线偏差($\epsilon_0 d$)与双源目标距离呈线性正相关。目标尺寸越大时,不同散射单元间距增大的概率更大,在所有视向角范围内,角闪烁线偏差也将总体增大。

2) 角闪烁线偏差与 RCS 及外形的关系

国内诸多研究成果^[7,15]表明角闪烁线偏差与 RCS 幅值呈负相关。通过对式(7)做进一步计算可以看出, Z_0 越接近于 1,角闪烁线偏差越大。较小 RCS 情况下,目标可以看成有限个强度相当、相位不同的散射中心相互作用,角闪烁线偏差增大的概率大;而较大 RCS 情况下,目标相当于大量强度不一的散射单元,因散射单元数量多,且强度、相位随机分布,相互抵消,相对 RCS 幅值较小的目标,角闪烁线偏差增大的概率较小。

需要注意的是,上述小 RCS 导致角闪烁线偏差增大的机理,本质上是由散射中心的分布特点决定的,即散射中心数量有限、且强度相当,在隐身设计上,这一般是赋形设计而产生的效果,通过整体缩小尺寸或无差别涂覆隐身材料来缩减 RCS,难以明显放大角闪烁线偏差,文献[16]的仿真结果可以印证该结论。

通过上述分析,目标的角闪烁线偏差与距离无关,但因角闪烁线偏差形成的跟踪角偏差与弹目距有关,即距离越近,影响越大,在制导末端可能成为影响雷达跟踪精度的主要误差。大尺寸、隐身和隐身外形设计 3 个因素对角闪烁线偏差都起着放大的作用。以小尺寸隐身靶机和非隐身的大尺寸靶机模拟真实目标,对于导弹实弹打靶来说均属降低考核标准。角闪烁线偏差对制导影响如图 6 所示。

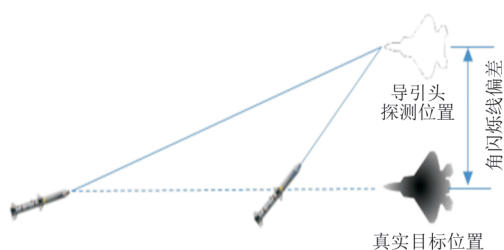


图6 角闪烁线偏差对制导影响示意图

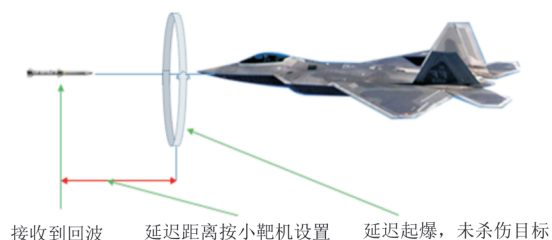
Fig. 6 The impact of angular glint on guidance

2 物理特性影响分析

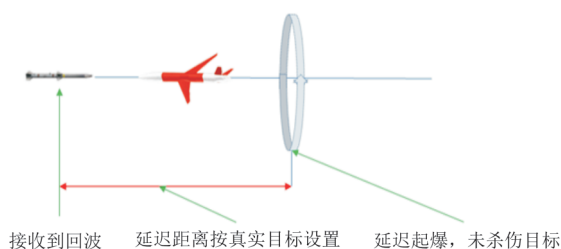
2.1 物理尺寸影响分析

导弹攻击目标,针对不同目标的物理尺寸量级,设计不同引信启动策略,如延迟时间或延迟距离等,以确保有效杀伤目标,尤其是越小当量战斗部的导弹,其杀伤效果对引信启动时机的敏感度更高。

如果采用攻击真实目标的延迟参数攻击小型靶机,则满足起爆条件时,导弹可能已过靶,难以有效评估导弹的引战配合及杀伤效果;如果采用攻击小型靶机的延迟参数攻击真实目标,则大概率提前引爆,可能无法命中真实目标的关键部位,同样难以评估导弹的引战配合及杀伤效果。导弹采用不匹配的延迟参数攻击目标如图7所示。



(a) 采用攻击小型隐身靶机的延迟参数攻击真实目标示意图



(b) 采用攻击真实目标的延迟参数攻击小型隐身靶机示意图

图7 导弹采用不匹配的延迟参数攻击目标示意图

Fig. 7 The missiles attack targets with mismatched parameters

2.2 易损性分析

易损性是决定飞机作战生存力的主要因素。易损性侧重研究的是飞机被武器命中之后的毁伤特性,常用的度量指标为命中条件下的杀伤概率或毁伤面积^[17]。小型靶机与真实目标的易损性相比,在毁伤效能和毁伤机理方面存在较大的差别。

1) 毁伤效能不同

导弹对目标的毁伤主要通过爆炸冲击波杀伤和破片动能杀伤实现。爆炸冲击波对目标的毁伤主要体现在造成机体蒙皮崩落、翼面折损,从而导致目标气动参数恶化而带来二次损伤,致使目标失控。破片对目标的杀伤主要体现在以动能侵彻击穿主要部件的表面结构,致使相关部件失能或引爆弹药、引燃燃油等。

真实目标的主要结构件,例如,燃油箱、机身壁蒙皮、发动机壁等结构的强度及等效厚度大,破片击穿或者引燃油箱/引爆弹药所需的动能更大。小尺寸的靶机,受空间、重量、飞行性能等诸多因素的限制,上述结构的强度、厚度远小于真实目标。

爆炸冲击波超压在大气中快速衰减,其毁伤半径有限,在一定脱靶量下,小型靶机被毁伤面积所占其机体的比例大于真实目标。比如按照文献[18]提出的超压准则,算得1 mm厚的LY12铝合金板极限超压值为0.78 kgf/cm²,暂以此为判据,根据萨道夫斯基公式算得不同高度下TNT药量和杀伤半径的关系如图8所示。

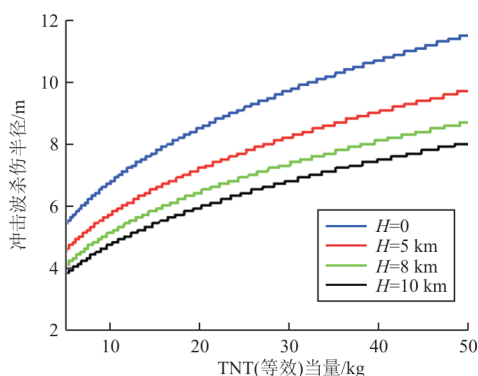


图8 不同当量TNT的冲击波杀伤半径

Fig. 8 The relationship of shock wave radius and the weight of TNT

4 综合分析

上文分析了小型隐身靶机在逼真模拟典型隐身作战飞机各目标特性方面的可满足度,其中:

- 1) 在高度、机动性能、重点方向隐身性能等模拟方面,小型隐身靶机理论上更具优势;
- 2) 小型隐身靶机通过优化气动布局、提升小微型发动机性能,可满足对真实目标速度的模拟;
- 3) 对 RCS 空间分布特征、近场 RCS、角闪烁特性的逼真模拟,要求隐身靶机尺寸接近真实目标、并具备与真实目标相似的隐身外形设计;
- 4) 对易损性的模拟,同样要求隐身靶机尺寸接近真实目标,同时需合理设计、布局关键部件/位,尤其是对导致飞机毁伤成串联关系的部件/位分散分布、冗余度设计;
- 5) 对电子对抗特性的模拟,要求隐身靶机具备更大的电子对抗设备内埋加装空间和载荷能力,采用高功率动力及发电系统。

综上所述,有必要借鉴美军隐身靶机的发展情况,发展外形相似、尺寸接近的大尺寸隐身靶机。导弹不同攻击环节与各目标特性的相关性 <small>及小型隐身靶机的可满足度如表 1 所示。

表 1 目标特性和导弹攻击环节综合分析
Table 1 Comprehensive analysis of target characteristics and missile attack links

目标特性	攻击环节					
	构成发射条件	载机目标指示	中末制导交接	稳定跟踪目标	引信正确启动	有效杀伤目标
高度	●	—	—	—	—	—
速度	●	●	—	—	—	—
机动	●	●	●	●	—	—
RCS 幅值	●	●	●	●	—	—
RCS 起伏	—	◎	◎	◎	—	—
电子对抗	—	◎	◎	◎	—	—
角闪烁	—	—	—	○	—	—
近场 RCS	—	—	—	—	○	○
物理尺寸	—	—	—	—	○	○
易损性	—	—	—	—	—	○

注:—表示目标特性与导弹攻击环节弱相关;
●表示小型隐身靶机逼真模拟技术可行;
◎表示小型隐身靶机可有限模拟;
○表示小型隐身靶机难以模拟。

从表 1 可以看出:在导弹发射至末制导前期的攻击过程中,小型隐身靶机具备一定的模拟能力,不失为兼顾科学性和经济性的模拟途径;但越接近导弹攻击末端,小型隐身靶机的模拟逼真度越低,这可能使导弹的作战效能评估面临较大的不确定性。

大尺寸隐身靶机的研制成本相比小型隐身靶机,将面临成数量级的增加,但其通过合理设计可基本满足导弹攻击各个环节中对典型作战对象逼真模拟的需求,这在准确、全面评估导弹作战效能方面具有重要的军事价值。另外,大尺寸隐身靶机并非小型隐身靶机的替代方案,而应作为其重要补充,尤其在考核导弹末端效能方面,这对导弹而言,属于技术级评估,靶机消耗数量有限;而中末制导交接前的攻击环节,涉及战术级和交战级评估,需要考虑复杂的作战场景,在不同的条件下开展靶试,消耗靶机数量多,多采用低成本小型隐身靶机是合理的途径。总之,大尺寸隐身靶机虽然单机成本高,但军事价值突出,总体使用成本可控。

5 结 论

- 1) 小型隐身靶机因自身外形、尺寸等固有特性,虽然在模拟真实隐身战斗机关键雷达散射特性方面具备优势,但难以逼真模拟真实目标的远场 RCS 起伏、近场 RCS 特性和角闪烁特性,在雷达导引头的截获与跟踪性能评估方面有一定的不足;其物理尺寸和易损性难以评估导弹引战配合效果和毁伤效能。
- 2) 主动雷达制导型导弹成功攻击目标需要确保中末制导交接、稳定跟踪目标、引信正确启动、有效毁伤目标等环节全部实现,采用小型隐身靶机模拟真实隐身飞机在导弹效能评估实弹打靶试验中,会使试验评估存在一定的不确定性,因此有必要按照外形相似、尺寸接近的原则,设计研发大尺寸隐身靶机,用于导弹实弹打靶。
- 3) 从经济性角度出发,应针对不同的试验科目,大尺寸隐身靶机和小型隐身靶机搭配使用,以确保在成本可控的前提下,更加全面、充分地评估导弹作战效能,正确引导导弹反隐身作战能力

提升。

本文不足之处是未能从兼顾成本和模拟逼真度的角度出发,得出大尺寸隐身靶机具体的尺寸量值,这需要在实际工程实践中权衡各方面性能和模拟需求,通过迭代设计最终确定。

参考文献

- [1] CARTER D, BURRIS P, BRANDT S. Fifth-generation target drone phase III design [C] // 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Virginia, VA, USA: AIAA, 2011: 70-79.
- [2] 杨小川, 张思远, 魏建烽, 等. 美国第五代航空靶机发展历程及应用趋势分析[J]. 飞航导弹, 2021, 8(8): 7-11.
YANG Xiaochuan, ZHANG Siyuan, WEI Jianfeng, et al. Analysis of the development process and application trend of the fifth generation of American aerial target drones [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021, 8(8): 7-11. (in Chinese)
- [3] 毛师彬, 王景伟, 洪剑锋, 等. 空中靶机系统发展历程及展望[J]. 无人机, 2018(8): 22-26.
MAO Shibin, WANG Jingwei, HONG Jianfeng, et al. Development and prospect of air target system [J]. Unmanned Vehicles, 2018(8): 22-26. (in Chinese)
- [4] 佚名. 打隐身飞机[J]. 现代军事, 2016(10): 10.
Anon. Attacking the stealth fighter [J]. Conmilit, 2016(10): 10. (in Chinese)
- [5] 颜芳芳, 袁关章, 邓克绪. 靶标技术的现状与关键技术与发展趋势[C] // 第九届长三角科技论坛——航空航天科技创新与长三角经济转型发展分论坛论文集. 南京: 江苏省航空航天学会, 2012: 1-7.
YAN Fangfang, YUAN Guanzhang, DENG Kexu. Status quo of key technologies and development trend of target technology [C] // Proceedings of the 9th Yangtze River Delta Science and Technology Forum—Aerospace Science and Technology Innovation and Economic Transformation and Development Sub Forum of the Yangtze River Delta. Nanjing: Jiangsu Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012: 1-7. (in Chinese)
- [6] 段辰龙, 巩子元, 李岩. 高性能缩比无人机关键总体参数分析及优化[J]. 航空科学技术, 2022, 33(4): 7-12.
DUAN Chenlong, GONG Ziyuan, LI Yan. Analysis and optimization of key population parameters of high-performance scaled UAV [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(4): 7-12. (in Chinese)
- [7] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar target character [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [8] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
DING Lufei, GENG Fulu. Radar principle [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. (in Chinese)
- [9] 杨英科, 李宏, 李文臣, 等. 目标起伏特性对雷达检飞实验的影响及应用[J]. 现代雷达, 2013, 35(2): 22-25.
YANG Yingke, LI Hong, LI Wenchen, et al. Influence and application of target movement characteristic on radar flight test [J]. Modern Radar, 2013, 35(2): 22-25. (in Chinese)
- [10] 范菊红, 王月清. 二面角反射器的 RCS 特性分析[J]. 舰船电子工程, 2006(2): 148-150.
FAN Juhong, WANG Yueqing. Analysis of RCS characteristic of dihedral corner reflectors [J]. Ship Electronic Engineering, 2006(2): 148-150. (in Chinese)
- [11] 陶建锋, 盛孝鹏, 孙青. 复杂目标的近场散射特性分析[J]. 现代雷达, 2006, 10(10): 75-78.
TAO Jianfeng, SHENG Xiaopeng, SUN Qing. Analysis to near field scattering characteristics of complex targets [J]. Modern Radar, 2006, 10(10): 75-78. (in Chinese)
- [12] 王瑞奇, 逯程, 刘宇, 等. 末制导雷达目标角闪烁抑制技术研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 10-14.
WANG Ruiqi, LU Cheng, LIU Yu, et al. Overview of research on target glint suppression technology of terminal guidance radar [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 10-14. (in Chinese)
- [13] 殷红成, 黄培康, 王超. 再论扩展目标的角闪烁[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 499-504.
YIN Hongcheng, HUANG Peikang, WANG Chao. Re-discussion about angular glint of the extended target [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 499-504. (in Chinese)
- [14] 范红旗, 王胜, 祝依龙, 等. 相位梯度法计算近场角闪烁的解析式[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 937-941.
FAN Hongqi, WANG Sheng, ZHU Yilong, et al. An analytic expression for computing near field angular glint by phase gradient method [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 937-941. (in Chinese)
- [15] 肖琴, 张云华, 何思远, 等. 粗糙面上方二维目标角闪烁特性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1748-1753.
XIAO Qin, ZHANG Yunhua, HE Siyuan, et al. Angular glint of the 2-D target above a rough surface [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(8): 1748-1753. (in Chinese)
- [16] 方宁, 王谷, 王宝发. 复杂涂覆目标的角闪烁特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(3): 259-262.

(下转第 115 页)