

激光制导炸弹捕获域快速解算方法

张道驰¹, 夏群利¹, 何晓夫², 刘大卫³

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 哈尔滨建成集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘要: 为实现激光制导炸弹全弹道捕获域的快速计算, 首先通过对激光导引头捕获目标条件分析, 以目标为中心建立了激光制导炸弹瞬时捕获域模型并给出了瞬时捕获域的形状及决定因素, 在此基础上, 提出了激光制导炸弹全弹道捕获域的计算方法。其次以制导炸弹飞行弹道倾角不变为假设, 给出了采用平台导引头和捷联导引头激光制导炸弹的全弹道捕获域理论表达式。最后, 对采用不同制导律的激光制导炸弹捕获域理论计算值与仿真值进行了对比, 结果表明: 捕获域理论表达式计算结果与弹道仿真结果基本吻合, 可用于激光制导炸弹捕获域的快速解算。

关键词: 捕获域; 平台导引头; 捷联导引头; 激光制导炸弹

中图分类号: TJ414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3535-06

Rapid calculation method for capture area of laser guided bomb

Zhang Daochi¹, Xia Qunli¹, He Xiaofu², Liu Dawei³

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Harbin Jiancheng Group Co. Ltd, Harbin 150030, China;
3. Ordnance Science and Research Academy of China, Beijing 100089, China)

Abstract: To achieve the rapid calculation of the laser guided bomb's total capture area, based on the principles of capture target of laser seeker, taking the target point as center, the instant capture area model was established and the shape of instant capture area and its deciding factor were analyzed. On this basis, the calculation method of total capture area of laser guided bomb was proposed. Secondly, under the assumption of flight path angle keeping constant, the total capture area's theoretical expressions of guided bomb with gimbale seeker or strapdown seeker were put forward. Finally, the results of total capture area of laser guided bomb guided by proportional navigation guidance and trajectory shaping guidance calculated through theoretical expression and computer simulation were contrasted. The results show that the expression's result matches the simulation and the theoretical expression can be used on fast calculation of laser guided bomb's total capture area.

Key words: capture area; gimbale seeker; strapdown seeker; laser guided bomb

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2014-12-24

基金项目: 北京理工大学基础研究基金(20130142016)

作者简介: 张道驰(1987-), 男, 博士生, 主要从事飞行器总体、飞行器制导与控制方面的研究。Email: zhangdaochi1988@163.com

导师简介: 夏群利(1971-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事飞行器总体、飞行器制导与控制方面的研究。

Email: 1010@bit.edu.cn

0 引言

激光制导炸弹采用激光半主动制导,炸弹飞行过程中激光导引头通过接收目标反射的激光回波信号形成误差信号引导炸弹命中目标。制导炸弹激光导引头可以分为两大类:陀螺稳定式导引头(简称平台导引头)与全捷联导引头,平台导引头探测器安置在稳定平台上,与弹体运动隔离。全捷联导引头较平台导引头移除了稳定和跟踪平台,使探测器和弹体固连。降低了导引头的成本,提高了导引头的可靠性,成为制导炸弹发展的趋势。不论采用何种导引头,导引头捕获目标是其实现精确打击的基础。尤其对于战场随遇运动目标,由于运动方向随机性,需要制导炸弹具有较大的捕获域以保证对目标的捕获。捕获域的计算对于制导炸弹指标论证具有重要意义。

关于导引头捕获域的研究,李国英^[1]给出了末制导炮弹导引头捕获域的计算方法,指出了影响导引头捕获域的因素。喻秋利^[2]给出了末制导炮弹的捕获域模型,提出了捕获域的分析方法并通过计算机仿真绘制了瞬态捕获域的形状。张西兴^[3]就末段寻的制导的反坦克导弹捕获域提出了一种新的概念,并通过相对性原理的思路建立了计算捕获域模型,分析了各主要因素对捕获域的影响。王江^[4],程振轩^[5]建立了地面任意点坐标与激光捷联探测器主轴垂直平面上点的映射关系,将地面瞬时捕获域映射到探测器主轴垂直平面上,用于捕获关系的快速判断。以上研究只是针对弹道上一点的静态捕获域,无法判断武器飞行过程中全弹道捕获域的大小及影响因素。赵成旺^[6]针对末制导炮弹提出了全弹道捕获域的概念,定性分析了全弹道捕获域的组成,并对影响捕获域的因素进行了仿真。温求道^[7]提出了利用激光导引头全弹道地面捕获域进行射表修正,但全弹道捕获域大小只能通过计算机仿真得到。

国内关于捕获域的研究大多基于末制导炮弹及反坦克导弹,而针对激光制导炸弹捕获域研究较少。文中以激光制导炸弹为应用背景,首先以目标为中心建立了激光导引头地面瞬时捕获域模型,分析了瞬时捕获域的类型。其次,给出了激光制导炸弹全弹道捕获域的计算方法,基于制导炸弹的飞行弹道倾角不变的假设,得到了采用平台导引头和全捷联导

引头激光制导炸弹全弹道捕获域的理论表达式。最后,对采用不同制导律的激光制导炸弹的全弹道捕获域进行了仿真,并将仿真结果与理论计算结果进行了对比表明,理论计算捕获域与仿真结果基本吻合,可以利用文中计算结果进行激光制导炸弹全弹道捕获域的快速计算。

1 数学模型

1.1 相关坐标系及变换关系

(1) 导引头光轴系 $ox_s y_s z_s$

以导引头中心为原点 o ,沿光轴中心指向, ox_s 轴垂直于 oy_s 轴,向上为正, oz_s 轴由右手系确定。

(2) 目标点地面坐标系 $ox_t y_t z_t$

以目标中心为原点 o , ox_t 轴指向目标正向, oy_t 轴垂直于 ox_t 轴,向上为正, oz_t 轴由右手系确定。

导引头光轴坐标系和目标点地面坐标系关系可以通过两个角度来确定:

导引头俯视角 q_{sz} :导引头光轴与目标坐标系水平面($ox_t z_t$)之间的夹角,导引头光轴指向水平面上方为正,反之为负。

导引头侧视角 q_{sy} :导引头光轴在水平面内的投影 ox' 与地面坐标系 ox_t 之间的夹角,迎 oy_t 轴观察, ox' 轴转至 ox_t 逆时针时为正;反之为负。

图 1 给出了导引头光轴坐标系与目标坐标系之

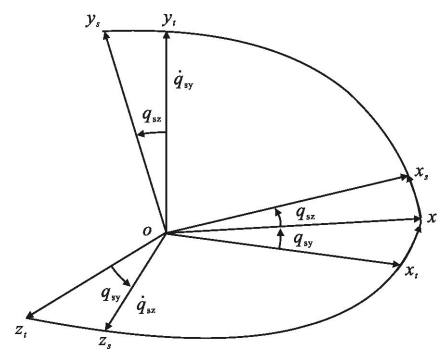


图 1 地面坐标系与导引头光轴系之间的关系

Fig.1 Relations between ground and seeker optical axis coordinate

间的位置关系示意图,其坐标旋转变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = L(q_{sz}, q_{sy}) \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中: } L(q_{sz}, q_{sy}) = \begin{bmatrix} \cos q_{sz} \cos q_{sy} & \sin q_{sz} & -\cos q_{sz} \sin q_{sy} \\ -\sin q_{sz} \cos q_{sy} & \cos q_{sz} & \sin q_{sz} \sin q_{sy} \\ \sin q_{sy} & 0 & \cos q_{sy} \end{bmatrix}.$$

1.2 导引头瞬时捕获域

激光制导炸弹飞行时, 导引头瞬时视场在地面的投影区域为导引头瞬时捕获域, 该捕获域必须同时满足^[8]: 弹目距离小于导引头最大作用距离; 误差角小于导引头视场角。则导引头光轴系下捕获域边界满足方程

$$\begin{cases} x_s^2 \tan^2 \varepsilon = z_s^2 + y_s^2 \\ x_s^2 + y_s^2 + z_s^2 = R^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε 为导引头半视场角。

设目标坐标系中弹体位置为 $M(x_m, y_m, z_m)$, 目标系中一点 $T(x_t, y_t, z_t)$, 由坐标转换关系, MT 在光轴坐标系中位置为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = L(q_{sz}, q_{sy}) \begin{bmatrix} x_t - x_m \\ y_t - y_m \\ z_t - z_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2)可得目标坐标系下捕获域为:

$$\begin{aligned} & [(x_t - x_m) \cos q_{sz} + (y_t - y_m) \sin q_{sz} - (z_t - z_m) \cos q_{sz} \sin q_{sy}]^2 \cdot \\ & \tan^2 \varepsilon = [-(x_t - x_m) \sin q_{sz} \cos q_{sy} + (y_t - y_m) \cos q_{sz} + \\ & (z_t - z_m) \sin q_{sz} \sin q_{sy}]^2 + [(x_t - x_m) \sin q_{sz} + (z_t - z_m) \cos q_{sz}]^2 \\ & [(x_t - x_m) \cos q_{sz} \cos q_{sy} + (y_t - y_m) \sin q_{sz} - (z_t - z_m) \cdot \\ & \cos q_{sz} \sin q_{sy}]^2 + [-(x_t - x_m) \sin q_{sz} \cos q_{sy} + (y_t - y_m) \cdot \\ & \cos q_{sz} + (z_t - z_m) \sin q_{sz} \sin q_{sy}]^2 + \\ & [(x_t - x_m) \sin q_{sy} + (z_t - z_m) \cos q_{sy}]^2 = R^2 \end{aligned} \quad (4)$$

考虑到目标系下 $y_t=0, y_m=H$, 同时假设导弹在纵向平面内运动, 即 $q_{sy}=0, z_m=0$, 公式(4)简化为:

$$\begin{cases} \frac{(x_t - x_m + C)^2}{A} + \frac{z_t^2}{B} = 1 \\ (x_t - x_m)^2 + z_t^2 = R^2 - H^2 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\begin{cases} A = H^2 \tan^2 \varepsilon / (1 - \eta^2) \\ B = H^2 \tan^2 \varepsilon / (1 - \eta) \\ C = H \sin 2q_{sz} / 2 (\cos^2 \varepsilon - \cos^2 q_{sz}) \\ \eta = \cos^2 q_{sz} / \cos^2 \varepsilon \end{cases}$

η 为导引头俯视角与半视场角关系, 当 $\eta > 1, \eta = 1, \eta < 1$ 分别代表导引头半视场角大于、等于、小于导引头俯视角。

由公式(5)可知 η 取值不同, 地面瞬时捕获域分别为椭圆、抛物线、双曲线与圆相交围成的区域。

(1) $\eta < 1$ 时, 瞬时捕获域为一椭圆与圆形相交区域, 椭圆中心为 $(x_m - C, 0)$, 长短半轴分别为 $H \tan \varepsilon / (1 - \eta), H \tan \varepsilon / \sqrt{1 - \eta}$ 。

(2) 当 $\eta = 1$, 瞬时捕获域为一抛物线, 其顶点为 $(H \tan 2q_{sz}, 0)$ 。

(3) 当 $\eta > 1$, 瞬时捕获域为双曲线的一支, 其中心为 $(x_m - C, 0)$, 有效单支与 x 轴交点为 $x_m - C + \sqrt{A}$ 。

图 2 中 (a), (b), (c) 分别给出了椭圆型、抛物线型、双曲线型瞬时捕获域示意图。

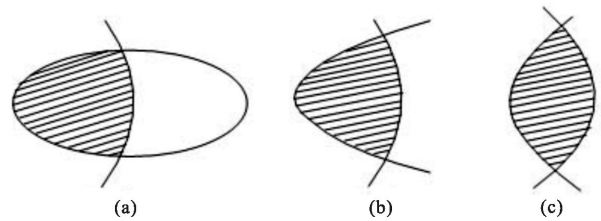


图 2 瞬时捕获域类型

Fig.2 Instant capture area type

2 导引头全弹道捕获域

2.1 全弹道捕获域计算方法

导引头地面瞬时捕获域随着制导炸弹的运动而不断变化, 制导炸弹飞行过程中, 地面瞬时捕获域所覆盖的区域即为导引头的全弹道捕获域。

以导引头瞬时捕获域为圆与椭圆相交区域为例, 炸弹飞行过程中弹目距离较大时, 探测器作用距离为半径的圆球与目标平面相交形成的圆 (简称作用圆), 与以探测器视场角为顶角光轴为中心轴的圆锥与目标平面相交成的椭圆 (简称椭圆) 不相交, 此时瞬时捕获域为零。随着炸弹高度下降, 作用圆及椭圆中心向目标点方向移动, 作用圆半径增大, 椭圆长短半轴减小, 作用圆与椭圆相交, 相交区域为地面瞬时捕获域。当弹目距离小于一定值时, 椭圆位于作用圆内, 此时的瞬时捕获域为椭圆区域。制导炸弹运动过程中, 瞬时捕获域椭圆与圆交点的运动轨迹即为捕获域边界。图 3 给出了炸弹飞行过程中瞬时捕获域的变化趋势。瞬时捕获域为圆与双曲线相交区域时与之相同不在赘述。

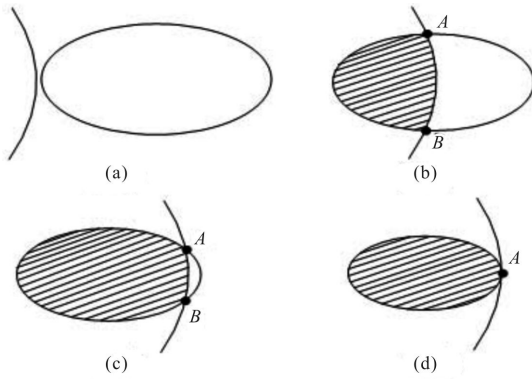


图 3 捕获域变化趋势

Fig.3 Instant capture area transformation

2.2 平台型导引头全弹道捕获域

由以上分析得到作用圆与椭圆或曲线交点随制导炸弹运动的轨迹即可得到制导炸弹全弹道捕获域。由公式(5)解得圆与椭圆或曲线交点为:

$$\begin{cases} x=x_m+H\tan q_z+\frac{R\cos\varepsilon}{\cos q_z} \\ z=\pm\sqrt{R^2-H^2-\left(H\tan q_z-\frac{r^2\cos\varepsilon}{\cos q_z}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

采用 INS/GPS 中制导+激光导引头末制导激光制导炸弹,为保证末端捕获目标,中制导或捕获目标前一般采用追踪法,使弹体速度方向始终指向装订目标位置。当满足捕获条件后,炸弹捕获目标转入末制导。捕获目标之前,弹体速度方向基本保持不变。

对于采用平台型导引头的制导炸弹,在中制导时通过框架角指令使导引头光轴始终指向预装订目标方向。此时导引头俯视角即为弹道倾角,即 $q_z=\theta$ 。

若飞行过程中弹道倾角保持不变,则有

$$H=x_m\tan\theta \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(6)并消去 x_m 可得全弹道捕获域表达式:

$$\frac{x^2}{R^2\sin^2\varepsilon/\sin^2\theta}+\frac{z^2}{R^2\sin^2\varepsilon}=1 \quad (8)$$

即采用平台导引头制导炸弹全弹道捕获域为以目标点为中心,长半轴为 $R\sin\varepsilon/\sin\theta$,短半轴为 $R\sin\varepsilon$ 的椭圆。

当 $\eta>1$ 时,捕获域长轴 $R\sin\varepsilon/\sin\theta$,在目标坐标系下 $x_m<0$,因此目标右侧(即 $x>0$),捕获域的最大值应小于导引头作用距离即 $x^2+z^2\leq R^2$,即目标点右侧捕获域为以目标点为圆心,导引头作用距离为半径

的圆与公式(8)确定的捕获域椭圆相交的区域。

2.3 捷联导引头全弹道捕获域

当制导炸弹采用全捷联导引头或捕获前未解锁的平台导引头时,捕获目标前导引头与弹体固连,导引头光轴方向与弹体方向相同,此时导引头视角为炸弹俯仰角。则在纵向平面内有

$$q_z=\theta+\alpha \quad (9)$$

代入公式(5)可得交点为:

$$\begin{cases} x=x_m+\frac{H\sin(\alpha+q_z)+R\cos\varepsilon}{\cos(\alpha+q_z)} \\ z=\sqrt{R^2-H^2-\left(\frac{H\sin(\alpha+q_z)+R\cos\varepsilon}{\cos(\alpha+q_z)}\right)^2} \end{cases} \quad (10)$$

假设炸弹飞行过程中平衡攻角及弹道倾角保持不变,同上由公式(7)及公式(10),可得捷联导引头捕获域:

$$\frac{(x_t+R\sin\varepsilon\cos\varepsilon/\sin\theta)^2}{R^2\sin^2\varepsilon\cos^2\alpha/\sin^2\theta}+\frac{z_t^2}{R^2\sin^2\varepsilon}=1 \quad (11)$$

由公式(11)可知捷联导引头全弹道捕获域为以 $(R\sin\varepsilon\cos\varepsilon/\sin\theta,0)$ 为中心,长半轴为 $R\sin\varepsilon\cos\varepsilon/\sin\theta$,短半轴为 $R\sin\varepsilon$ 的椭圆。

同平台型导引头,当 $\eta>1$ 时,目标点右侧捕获域为以目标点为圆心,导引头作用距离为半径的圆与公式(11)确定的捕获域椭圆相交的区域。

制导炸弹飞行平衡攻角较小($1^\circ\sim 5^\circ$),故有 $\cos\alpha\approx 1$,比较公式(8)和公式(11)可知相同条件下,捷联导引头和平台导引头捕获域相同,只是捷联导引头捕获域相对于平台导引头捕获域向前平移一段距离。

由公式(8)和(11)可知对于同一制导炸弹,若不采用搜索策略,平台导引头捕获域与捷联头捕获域基本相同,通过一定的修正技术^[5],两种导引头对目标的捕获概率应基本相同。

3 捕获域仿真计算

采用某型激光制导炸弹气动数据,取制导炸弹初始投放条件如下:投放高度 4km,射程 12km,初始速度 250m/s,初始投放角度 0° ,导引头作用距离 4km,导引头视场角 $\pm 15^\circ$,炸弹飞行平衡攻角在 $1^\circ\sim 3^\circ$ 之间。

为增大制导炸弹射程,炸弹采用“中制导机动+末制导”的弹道方案,采用追踪制导律到达机动点^[7]后炸弹转入末导段将弹体速度方向对向目标,为捕获创造有利条件。仿真中取机动斜距 6km,机动角度 -30° 。弹道仿真计算时利用 Newton 法实时求解方

程式(5)结果。

3.1 末制导采用追踪制导律捕获域仿真

图 4(a)和(b)分别给出了平台导引头和全捷联导引头全弹道捕获域理论计算值与通过弹道仿真值对比图,由图可见:

侧向捕获域最大值仿真结果与理论计算值相同,这因为侧向捕获域半长轴只与导引头作用距离和视场角相关,与飞行弹道倾角无关。

纵向捕获域计算值与仿真结果存在误差,主要原因是炸弹飞行过程中弹道倾角变化,对于捷联导引头还包括飞行过程中攻角变化。

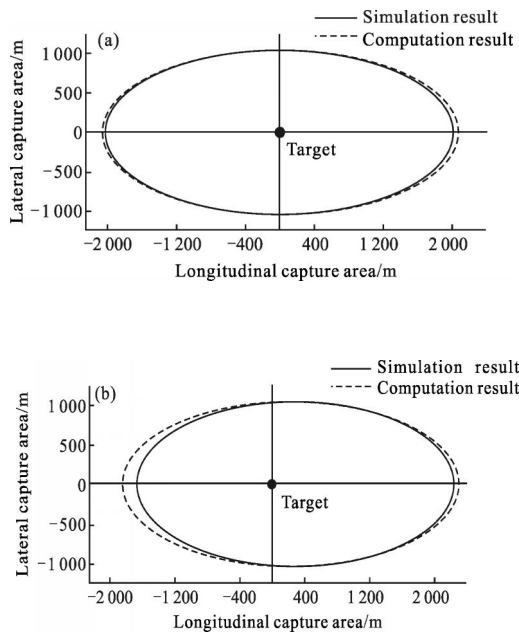


图 4 仿真值与理论值对比

Fig.4 Comparison between simulation and computation result

表 1 给出了相同条件下平台导引头与捷联导引头纵向捕获域长度的理论计算值与仿真结果估计误差,由表中数据可知,理论计算值与仿真结果误差较小。

表 1 捕获域计算值与仿真值

Tab.1 Computation and simulation results of total capture area

Seeker type	Theoretical value/m	Simulation value/m	Estimating error
Gimbaled	4 140	4 038	2.5%
Strap down	4 138	3 901	5.7%

3.2 末制导采用大落角导律捕获域仿真

对于侵彻型激光制导炸弹,为保证战斗部侵彻效果,末端要求较大的落角。末制导一般采用大落角制导律,此时对于平台导引头仍可以通过框架角指令使导引头光轴指向目标。

由于大落角制导律末制导时弹道倾角变化,公式(6)不成立,因此不能通过公式(8)直接计算捕获域大小,但仍利用公式(8)通过选择适当的角度估计捕获域大小。由公式(8)导引头侧向捕获域不受弹道倾角的影响,并且在目标点时达到最大,因此导引头可考虑采用将导引头捕获域分为目标前和目标后两部分分别被计算。目标前捕获域导引头俯视角为末制导初始导引头俯视角,即 $q_i=q_{sj}$,目标后捕获域计算角度可选取为:

$$q_j=q_i+k(q_r-q_i) \tag{12}$$

式中: q_{sj} 为机动点^[9]处导引头俯视角; k 为角度变化系数,仿真中取 0.25。

表 2 给出了不同落角下纵向捕获长度理论计算值与仿真结果,图 5 给出了落角为 -80° 时理论估计捕获域与仿真结果比较图。由图及表中数据可知,理论计算结果与仿真结果误差较小。可以通过公式(8)估计制导炸弹全弹道捕获域的大小。

表 2 不同落角下计算结果与仿真结果比较

Tab.2 Computation and simulation results of total capture area with different impact angle

Terminal angle/ $^\circ$	Theoretical value/m	Simulation value/m	Estimating error
-50	3 874	3 889	0.3%
-60	3 770	3 749	0.5%
-70	3 680	3 635	1.2%
-80	3 602	3 532	2.0%
-90	3 534	3 468	1.9%

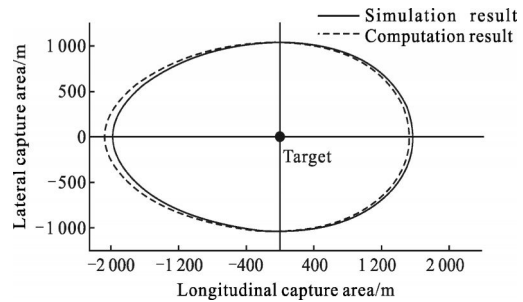


图 5 大落角下仿真值与理论值对比

Fig.5 Comparison between simulation and computation result with high impact angle

4 结 论

文中以目标点为中心建立了激光导引头瞬时捕获域模型,以飞行弹道倾角不变为假设,推导了激光制导炸弹全弹道捕获域理论表达式,并对采用不同制导律的激光制导炸弹捕获域进行了仿真验证,通过文中的结果,可不经弹道仿真计算激光制导炸弹全弹道捕获域的大小,对制导炸弹的捕获目标能力给予评价。通过文中分析还可以得到以下结论:

(1) 导引头全弹道捕获域的大小只与导引头的作用距离、视场角及飞行弹道倾角相关,导引头纵向和侧向捕获域与导引头作用距离、视场角成正比,纵向捕获域与飞行弹道倾角成反比,侧向捕获域与飞行弹道倾角无关。

(2) 相同技术指标条件下,采用平台型激光导引头和全捷联激光导引头,制导炸弹的捕获域基本相同,捷联头捕获域较平台导引头向前平移一段距离。

(3) 由于 $\sin^2\theta < 1$, 导引头的纵向捕获域大于侧向捕获域,因此在纵向上允许目标散布大,侧向允许目标散布小。对于打击运动目标,迎头和尾追更容易捕获目标。

参考文献:

- [1] Li Guoying. The simulation study of the attack area of the terminal guided projectile[J]. *Journal of Ballistics*, 1997, 9(1): 69-72. (in Chinese)
李国英. 末制导炮弹攻击区仿真研究[J]. 弹道学报, 1997, 9(1): 69-72.
- [2] Yu Qiuli. Analysis and simulation of the target capture area of guided projectile [C]//the 7th Annual Meeting of Rocket and Missile branch of Chinese Ordnance Society, 1998: 159-164. (in Chinese)
喻秋利. 制导炮弹目标捕获域分析与仿真[C]//中国兵工学会火箭导弹分会第七次学术年会, 1998: 159-164.
- [3] Zhang Xixing, Tan Yali, Li Xiaohai. A research on capture field for the terminal homing antitank missile[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2003, 23(4): 25-26, 30. (in Chinese)
张西兴, 谭亚莉, 李小海. 末段寻的制导的反坦克导弹捕获域研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23(4): 25-26, 30.
- [4] Wang Jiang, Lin Defu, Fu Peijie, et al. Research of the hit accuracy base on the pulse force control of strapdown photodetector guidance system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 88-91. (in Chinese)
王江, 林德福, 付培杰, 等. 脉冲控制捷联探测器制导体制下命中精度研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 88-91.
- [5] Cheng Zhenxuan, Lin Defu, Wang Hui. Analysis of the acquisition probability and hitting precision of laser-guided mortar bomb [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 291-294. (in Chinese)
程振轩, 林德福, 王辉. 激光制导迫弹捕获概率与命中精度分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 291-294.
- [6] Zhao Chengwang, Song Weidong, He Wei. Research on total capture area of terminal guidance projectile [J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(2): 54-58. (in Chinese)
赵成旺, 宋卫东, 何伟. 某型末制导炮弹全弹道捕获域研究[J]. 弹道学报, 2013, 25(2): 54-58.
- [7] Wen Qiuqiu, Cui Yingying, Xia Qunli, et al. Firing table modifying based on acquisition ground zone of seeker for laser guidance bomb [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2053-2057. (in Chinese)
温求迺, 崔莹莹, 夏群利, 等. 基于导引头地面捕获域的射表修正技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2053-2057.
- [8] Xia Qunli, Liu Yiyang, Yang Guiqing. Comparison study of target acquisition probability between two types of laser-guided bombs with different seekers [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(13): 3397-3340. (in Chinese)
夏群力, 刘轶英, 杨桂清. 采用不同导引头的激光制导航弹捕获概率对比分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3397-3340.
- [9] Liu Dawei. Study on the terminal optimal guidance law with multiple constraints and trajectory of penetrating guided bomb [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012: 106-110. (in Chinese)
刘大卫. 侵彻制导炸弹终端多约束最优制导律与弹道研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012: 106-110.