

末段脉冲修正弹攻击区研究*

杨荣军, 王良明, 曹小兵, 修 观

(南京理工大学动力工程学院, 南京 210094)

摘要: 为了确定采用激光半主动制导的末段脉冲修正弹的攻击区域, 建立了导引头探测区模型, 建立了六自由度有控弹道方程组, 并提出了攻击区建模和仿真的方法。利用上述模型对不同条件下的攻击区进行了仿真计算与分析, 结果表明增大导引头视场角、脉冲修正能力、启控点高度和发射条件都将影响攻击区的范围。

关键词: 激光半主动制导; 脉冲发动机; 末段修正弹; 攻击区; 弹道仿真

中图分类号: TJ013.2 文献标志码: A

Study on Attack Area for Terminal Correction Projectile with Impulse Thruster Control

YANG Rongjun, WANG Liangming, CAO Xiaobing, XIU Guan

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to determine the attack area of semi-active laser guided projectile with impulse thruster for terminal correction, the model of acquisition area for the seeker is established. Based on the analysis of impulse forces and impulse moments, the 6-DOF equations for trajectory under control are deduced, and an approach for constructing the model of attack area and its simulation method are proposed. With the models, attack area simulations under different control conditions are carried out. The results indicate that the range of attack area is affected by seeker's parameters, correction ability of impulse thrusters, and altitude of control active, firing conditions and so on.

Keywords: semi-active laser guidance; impulse thruster; terminal correction projectile; attack area; trajectory simulation

0 引言

末段弹道修正弹是在弹道末段将制导控制技术应用于炮弹上, 以提高射击精度的一种弹药^[1]。末段弹道修正弹可以采用激光半主动制导技术, 利用脉冲发动机修正弹道偏差^[2]。弹丸飞行至弹道末段, 弹上的激光导引头接收到目标反射的能量后, 经弹载计算机处理得到目标偏差信息形成修正指令, 控制弹上的脉冲发动机点火工作并修正弹道, 以达到提高精度的目的。末段修正弹需要解决许多关键技术问题, 如滚转控制及稳定、作战效能和攻击区等。文中主要对脉冲式末段修正弹的攻击区域进行了分析和研究。

1 激光导引头探测区建模

能否及时、可靠地捕获目标是实现末段修正

的必要条件, 而导引头是用来探测目标信息、指引弹丸飞向目标方向的装置。文中采用的导引头为四象限捷联式激光导引头。

1.1 坐标系转换关系

为了研究激光导引头对目标的探测区, 选取导引头平动坐标系 $o' - x_3 y_3 z_3$ 、导引头光轴坐标系 $o' - x_4 y_4 z_4$, 具体定义参见文献^[3], 各坐标系及相互之间的空间关系如图1所示。图中 M 为弹体质心; T 为地面目标; G 为导引头光轴与地面的

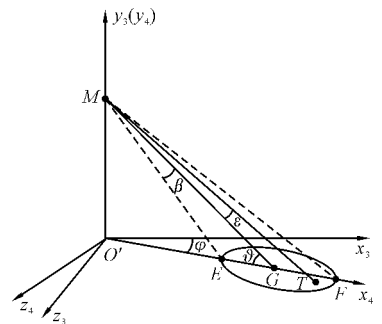


图1 选用的坐标系及其空间关系图

* 收稿日期: 2008-12-26

作者简介: 杨荣军(1986-), 男, 湖南永州人, 博士研究生, 研究方向: 飞行器制导与控制技术。

交点; φ 为 $o'x_4$ 与 $o'x_3$ 之间的夹角, $o'x_4$ 偏向射击平面右方为正; β 为导引头视场角; ϑ 为导引头光轴与地面的夹角; E 、 F 为以 M 为顶点,导引头光轴为中心轴, β 为立体锥角的圆锥面与 $o'x_4$ 轴的两交点; ε 为弹目连线与导引头光轴之间的夹角。

将导引头光轴坐标系中的任一点 $K(x_{K4}, y_{K4}, z_{K4})$ 转换至导引头平动坐标系 $o'-x_3y_3z_3$ 通过下式变换:

$$\begin{bmatrix} x_{K3} \\ y_{K3} \\ z_{K3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{K4} \\ y_{K4} \\ z_{K4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 探测区模型

文中以地面固定目标为例,建立捷联式激光导引头探测区数学模型。其探测区由导引头视场角 β 及最远作用距离 R 确定。以 M 为顶点,导引头光轴为中心轴, β 为锥角的圆锥面与地面相交将得到一条圆锥截线,如图 1 所示。以 M 为球心, R 为半径的球面与地面相交将得到一个圆。圆锥截线与圆弧线在地面相交所限定的区域便是导引头的探测区域^[4]。对于末段弹道修弹,其启控点高度不大,而导引头作用距离 R 足够大(R 通常可达到 2000m 以上),则探测区即为此圆锥截线。在坐标系 $o'-x_4y_4z_4$ 中,该探测区可用集合 U' 描述为:

$$U' = \{(x_4, z_4) \mid z_4^2 \leq ax_4^2 + bx_4 + c\} \quad (2)$$

图中 G 点横坐标为 $x_{G4} = y_M/\tan\vartheta$,圆锥截线上对应于该横坐标的两点的坐标为 $(y_M/\tan\vartheta, 0, \pm y_M \tan\beta/\sin\vartheta)$, E 、 F 两点的坐标分别为 $(y_M/\tan(\beta+\vartheta), 0, 0)$ 、 $(y_M/\tan(\vartheta-\beta), 0, 0)$ 。将上述坐标值代入圆锥截线方程中,经推导整理得:

$$\begin{cases} a = \tan^2\beta\cos^2\vartheta - \sin^2\vartheta \\ b = y_M\sin 2\vartheta/\cos^2\beta \\ c = y_M^2(\sin^2\vartheta/\cos^2\beta - 1) \end{cases} \quad (3)$$

2 脉冲推力控制模型

导引头探测到目标后,按照一定的规则确定出所需工作的脉冲发动机的数量及角度,然后点火进行弹道修正。

2.1 脉冲发动机的布置

脉冲推力发动机布局如图 2 所示。

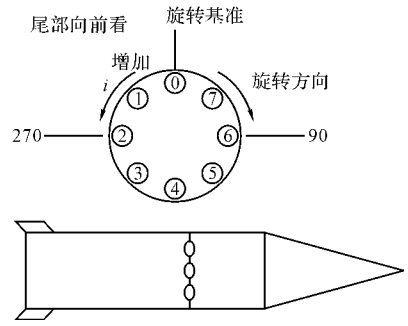


图 2 脉冲发动机的布置图

2.2 尾翼旋转弹脉冲修正模型

发动机的喷口中心线与弹轴垂直相交,瞬时作用力与准弹体坐标系^[5]中的 oy_4 夹角称为脉冲方向角 γ_i ,则脉冲修正力 P 在准弹体坐标系 $ox_4y_4z_4$ 中的投影为:

$$F = P \cdot [0 \quad \cos\gamma_i \quad \sin\gamma_i]^T \quad (4)$$

脉冲力作用在弹丸非质心位置时还会产生脉冲修正力矩 M_F 。设脉冲力 F 在准弹体坐标系中的作用点距弹丸质心的距离为 L ,在弹体质心前为正, M_F 在准弹体坐标系中的投影为:

$$M_F = P \cdot L [0 \quad \sin\gamma_i \quad -\cos\gamma_i]^T \quad (5)$$

为实施有效的控制,通常末段修正弹为低旋尾翼弹。脉冲发动机工作时,描述该弹箭的空间低速滚转运动方程组为:

$$m \frac{dV}{dt} = -X - mg\sin\theta + P\cos\gamma_i\sin\alpha^* \cos\beta^* - P\sin\gamma_i\sin\beta^*$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = Y\cos\gamma_v^* - Z\sin\gamma_v^* - mg\cos\theta + [P(\cos\gamma_i\cos\alpha^* \cos\gamma_v^* - \sin\alpha^* \sin\beta^* \sin\gamma_v^*) + P\sin\gamma_i\sin\gamma_v^* \cos\beta^*] \quad (6)$$

$$-mV\cos\frac{d\psi_v}{dt} = Y\sin\gamma_v^* + Z\cos\gamma_v^* + [P\cos\gamma_i(\sin\alpha^* \sin\beta^* \cos\gamma_v^* + \cos\alpha^* \sin\gamma_v^*) - P\sin\gamma_i\cos\gamma_v^* \cos\beta^*]$$

$$J_{y_4} \frac{d\omega_{y_4}}{dt} + (J_{x_4} - J_{z_4})\omega_{x_4}\omega_{z_4} + J_{z_4}\omega_{z_4}\dot{\gamma} = M_{y_4} + P\sin\gamma_i L$$

$$J_{z_4} \frac{d\omega_{z_4}}{dt} + (J_{y_4} - J_{x_4})\omega_{y_4}\omega_{x_4} + J_{y_4}\omega_{y_4}\dot{\gamma} = M_{z_4} - P\cos\gamma_i L$$

其余相关方程及符号意义详见文献^[5]。

2.3 脉冲点火逻辑

低速滚转弹箭的脉冲控制有如下特点:作用不连续性;脉冲工作唯一性;一次性使用;脉冲力方向变化性。文中主要采用文献[6]所述的点火逻辑。

利用上述模型可编制末段脉冲修正弹六自由度仿真程序。

3 脉冲式修正弹攻击区建模

3.1 脉冲最大修正区域

弹丸飞至启控点后,所有脉冲发动机沿不同方位 r' 连续作用后,落点涵盖的区域称为脉冲最大修正区域。

为了确定脉冲修正弹的最大修正区域,必须计算脉冲在所有可能作用方向角 γ' ($\gamma' \in [0, 2\pi]$) 上的最大修正量。因此可在仿真时对 γ' 进行赋值,按照步长 $\pi/10$ 递增,拟选择 20 个作用方位。记录每个脉冲方向角下依次作用完所有脉冲发动机后的落点坐标,将落点坐标连线即可构成脉冲修正弹的最大修正区域。

3.2 攻击区模型

根据文中所采用的脉冲控制方案,为了对目标进行有效攻击,必须保证启控时目标能够被探测到,且脉冲发动机具有足够的修正能力。因此脉冲式末段修正弹的攻击区即为探测区和脉冲最大修正区域相交后所包含的区域。

4 算例与分析

文中以某低速旋转尾翼稳定弹为例,对攻击区进行仿真计算。沿弹体周向均匀布置 8 个脉冲发动机,脉冲力偏离质心距离 $L = 100\text{mm}$ 。弹丸初速 $v_0 = 750\text{m/s}$,发射角 $\theta_0 = 45^\circ$,转速 $\omega = 6\text{r/s}$,并以弹体的高度参数量来描述启控点。

设单个脉冲大小 $I_p = 50\text{N} \cdot \text{s}$,作用时间 $t = 30\text{ms}$ 。令启控点参数为 $y = 800\text{m}$,该点质心坐标为 $x_M = 14077.6\text{m}$, $z_M = -45.621\text{m}$; $\vartheta = 58.79^\circ$, $\varphi = -0.50^\circ$,导引头参数 $\beta = 5^\circ$ 。将该点的弹道参数代入探测区模型,利用 Matlab 仿真可得探测区。采用第 2 节中方法可以确定脉冲修正弹在以 800m 高度为起控点,工作 8 个不同脉

冲量发动机下的攻击区,如图 3 所示阴影部分。图 3 显示了不同脉冲冲量下的攻击区域对比图,可以看出,随着脉冲冲量增大,修正能力增大,攻击区增大至探测区未完全覆盖最大修正区域时,对导引头视场角 β 提出要求。

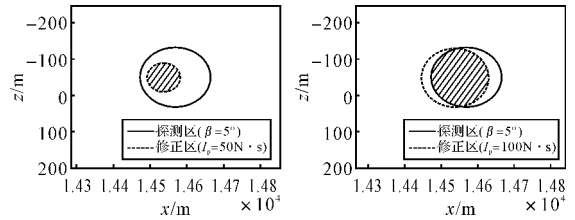


图 3 不同脉冲冲量下的攻击区对比图

图 4 给出了启控点为 $y = 1000\text{m}$, $I = 100\text{N} \cdot \text{s}$, $\beta = 5^\circ$ 和 $\beta = 8^\circ$ 时攻击区仿真结果。对比图 3 可知,在导引头视角相同的条件下,随着起控点高度增加,探测区和修正能力都有所增大,两者相交构成的攻击区也将增大。图 4 对比可知随着导引头视角 β 增大为 8° ,使得导引头的探测区覆盖了脉冲最大修正区,且由于提高了脉冲的冲量,使得攻击区进一步得到明显的增大。

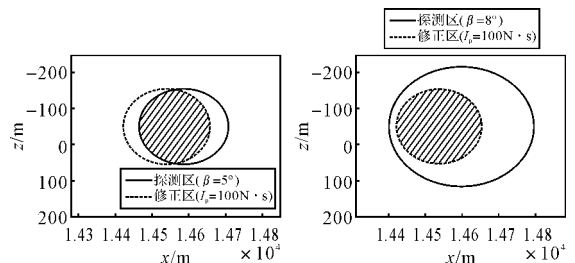


图 4 不同导引头视角下的攻击区对比图

通过上面的仿真计算与分析,可以采取以下方法提高攻击区范围:

- 1) 增大探测区域。对于末段修正弹,主要采取增加导引头的视角来扩大探测区域。
- 2) 提高修正能力。可以增加单个脉冲冲量来提高脉冲力和力矩;或通过改变脉冲作用点到质心的位置,以增大作用时的脉冲力矩;以及增加多排脉冲发动机来实现。
- 3) 增加起控点高度,以增大探测区和提高修正能力来扩大攻击区域范围。

需要注意的是:采用方案 2 时,需要考虑当脉冲发动机作用时弹体的动态稳定性;采用方案 3 时,若启控点过高,则需要考虑导引头的最大探测距离 R 对探测区的影响。

在此就用 AB 之间的距离 Δd 来表示式(9)中 d 的变化率, 得出对应的 Δt_1 , 从而确定阻力执行机构准确开启时间。上述算法可在较少的重复计算次数内使得 Δd 小于事先给定的落点精度 ϵ , 解决了采用增加或减少步长大小的不确定性带来的计算量较大的缺点。

4.2 计算机仿真结果与分析

表 1 中预设的落点精度 ϵ 为 10m。取初速为

表 1 一维弹道修正弹仿真数据

序号	初速/ (m/s)	射角/ (°)	增阻 系数	预定 修正 距离/m	循环 计算 次数	余量/ m
1	750	40	1.8	200	1	2
2	750	40	1.8	400	2	1
3	750	40	1.8	600	3	7
4	750	45	1.8	200	2	0
5	750	45	1.8	400	1	2
6	750	45	1.8	600	2	-3
7	750	60	1.8	200	2	8
8	750	60	1.8	400	3	9
9	750	60	1.8	600	3	8
10	930	45	1.8	200	1	-1
11	930	45	1.8	400	2	0
12	930	45	1.8	600	1	-2
13	930	49	1.8	200	1	-7
14	930	49	1.8	400	0	2
15	930	49	1.8	600	2	3
16	930	60	1.8	200	2	1
17	930	60	1.8	400	4	-5
18	930	60	1.8	600	4	8

(上接第 164 页)

5 结 论

文中提出了一种用于捷联式激光半主动制导的末段脉冲修正弹攻击区的研究方法。在设定的启控条件下, 利用文中探测区域与脉冲修正模型对攻击区进行了仿真计算, 通过不同条件下的攻击区对比图, 提出了提高攻击区的方法。对于低成本末段修正弹的导引头设计提供了分析方法, 对攻击区的求解以及脉冲发动机的设计也有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 洪元军, 雷雅茹. 国外弹道修正引信发展现状研究

750m/s 和 930m/s 时某炮弹在不同射角、不同修正距离的仿真数据。表中余量表示修正后弹道落点与预定目标的距离, 负值表示落在 OB 区。

仿真结果表明, 经过 0~4 次的重复计算弹道就能够达到预设的落点精度, 大大缩短计算时间, 保证修正过程顺利进行, 从而为研制一维弹道修正弹解决阻力执行机构开启时间这一关键问题起到很大作用。

5 结 论

文中结合一维弹道修正炮弹的工作原理, 建立了修正弹质心运动方程, 对阻力执行机构开启时间与修正距离进行分析研究, 并给出两者之间的关系。在此基础上, 通过求微分的方法, 给出了一种快速、准确确定阻力执行机构开启时间的优化算法。仿真分析表明, 该方法具有一定的实用性, 同时此研究也为后续型号项目研制奠定了重要基础。

参考文献:

[1] 浦发. 外弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
 [2] 刘怡昕, 刘玉文. 决定射击诸元理论[M]. 北京: 海军出版社, 2001.
 [3] 王中原, 王良明. 修正弹道的弹道测定密集分析[C]// 中国兵工学会弹道专业委员会弹道学术交流会会议文集. 北京: 中国兵工学会, 2001: 75-78.
 [J]. 探测与控制学报, 2001(4): 2-6.
 [2] 高敏, 张强. 弹道修正弹实际弹道探测技术综述[J]. 弹道学报, 2003(1): 91-96.
 [3] 徐劲祥. 末段修正迫弹激光探测器及目标方位模型[J]. 兵工学报, 2007, 28(7): 793-795.
 [4] 李国英. 未制导炮弹攻击区仿真研究[J]. 弹道学报, 1997, 9(1): 69-72.
 [5] 钱杏芳, 林瑞雄, 赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京理工大学出版社, 2000.
 [6] Thanat Jitraphai, Bradley Burchett, Mark Costell. A Comparison of different guidance schemes for a direct fire rocket with a pulse jet control mechanism, ADA401519[R]. US: DoD, 2002: 6-7.