

目标丢失对末制导炮弹末导段弹道特性影响

赵成旺^a, 宋卫东^a, 任旭^b

(军械工程学院, a. 火炮工程系; b. 科研部, 石家庄 050000)

摘要: 针对末制导炮弹受光电干扰及天气等因素影响, 在末导段出现丢失目标以及丢失后重新捕获目标等情况, 依据小扰动原理建立了比例导引模式下末制导炮弹控制模型, 获取末制导炮弹的脱靶量、法向过载等与目标丢失时机以及丢失时间长短的解析关系, 对目标机动特性不同情况下失去目标及重新捕获目标后的弹道特性进行了仿真, 对比分析了目标静止及机动情况下仿真结果中各种指标变化的异同及原因。仿真结果表明, 末导段目标丢失会对末制导炮弹弹道特性造成显著影响, 尤其是在目标采取机动的情况下。

关键词: 激光; 末导段; 末制导炮弹; 脱靶量; 目标丢失

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)01-0064-05

Influence of Target Missing on Terminal Ballistic Trajectory of Terminal Guidance Projectile

ZHAO Chengwang^a, SONG Weidong^a, REN Xu^b

(Ordnance Engineering College, a. Artillery Engineering Department; b. Scientific Research Branch, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Target missing and target re-capturing may happen in the terminal ballistic trajectory of terminal guidance projectile because of the factors as jamming and/or weather. To gain the relation between the terminal ballistic trajectory character and the time of target missing, the terminal guidance projectile control model was set up according to small disturbance theory. The trajectory character when missing target and re-capturing under different target maneuvering conditions was simulated. The simulation result for the target at uniform motion and uniform varying motion was analyzed, which demonstrated that the target missing during terminal trajectory has remarkable impact to projectile's terminal ballistic trajectory character, especially when the target is in maneuvering.

Key words: laser; terminal ballistic trajectory; terminal guide projectile; miss distance; target missing

0 引言

导引系统对目标跟踪的准确性与及时性, 决定着远程末制导武器系统精确打击能力的充分发挥。激光末制导炮弹直接命中目标, 要求炮弹导引头在惯导末段必须能够接收到一定能量的反射激光, 这就要求指示器与目标之间没有遮蔽物体且弹丸与目标之间相互通视。激光照射器对目标照射的时机、准确度及目标的反向特性对激光末制导炮弹精确打击能力的影响很大^[1]。战场环境下, 既可能有一些目标施放的烟幕, 又有自然因素比如低云层造成的干扰, 还有中导段和末

导段由于交接班问题^[2]导致导引系统无法获取激光信号, 进而无法感知目标信息, 这种情况出现的时机以及无法感知信息的持续时间, 对于末制导炮弹命中精度以及过载的影响, 值得从工程学角度进行定量研究分析。对于精确制导武器跟踪目标过程中目标丢失的问题, 国内学者在通过改进跟踪算法、应用滤波技术提高制导精度方面做了许多工作, 取得一定的研究成果^[3-8], 但对于失去目标以及失去目标重新捕获情况下的末导段弹道特性, 尚未涉及。本文对末导段某一阶段失去目标并重新获取目标及失去目标后未重新获取目标两种情况进行了分析和计算机仿真, 得出了失去目标时机及失去目标时间长短等因素对于脱靶量、法向过载等的影响程度, 对于提高末制导炮弹的作战效能具有指导意义。

1 末制导炮弹武器系统失去目标分析

导引头在惯导末段接收到攻击目标的激光回波

收稿日期: 2011-12-23

修回日期: 2012-02-13

基金项目: 总装重点基金资助项目(2010SY4303002)

作者简介: 赵成旺(1977—), 男, 河南泌阳人, 博士生, 讲师, 研究方向为弹道技术理论与应用。

后,使位标器从捷联惯导状态转变为陀螺稳定状态,并且利用陀螺的进动性解决目标的捕获与跟踪任务,使光轴指向目标,并将光轴与弹目线之间的误差角转换为电信号,驱动舵机,控制炮弹向目标逼近,达到精确打击的战术目的。

由于战场环境复杂,且现代装甲目标已具备激光探测技术,在受到激光照射时,能够在车辆前产生足够浓度的烟幕,阻断激光照射或者阻断激光照射在其上的激光反射,二者均使炮弹导引系统无法接收到目标位置信息。此外,战场上由于爆炸等形成的烟幕也会造成导引系统无法接收到目标信息。

如果由于某种原因,导引系统在滑翔段时一直无法接收到目标信息,则炮弹继续以滑翔弹道飞行,无法完成精确打击任务,这种情况下,讨论脱靶量已无意义,本文重点研究末制导炮弹已经捕获目标后,由于某种原因丢失目标的情况下,末制导炮弹的弹道特性。

假定末制导炮弹在中导段结束后,能迅速捕获目标,并且进行稳定跟踪,倘若在击中目标前一直不受干扰,且目标机动特性在武器系统跟踪和攻击范围内,则认为炮弹能够击中目标。

定义导引头捕获目标时刻为 T_c ,第 i 次失去目标的时刻为 T_{li} ,第 i 次重新捕获目标的时刻为 T_{ri} ,炮弹击中或离目标最近的时刻为 T_h 。在无激光反射进导引头时,导引系统不输出控制信号,舵机恢复重力补偿位置,炮弹速度基本(不考虑风等因素)不做变化,此后若无法重新捕获目标并跟踪,则炮弹以现有速度飞行,直至落地。若在短暂失去目标后目标仍在导引头视场内,则能够重新捕获目标;若余下时间足够,仍能够对误差角进行校正并跟踪,最终精确命中;若余下时间不够,则进行调整并跟踪,脱靶量与目标机动特性、剩余时间及弹最后速度相关。

2 末制导炮弹末导段失去目标情况下脱靶量求解

一般情况下,某型激光末制导炮弹在距离 3 km 左右时抛掉鼻锥,以大视场搜索从目标上反射的激光信号,倘若在其视场内有与其编码特性相同且稳定的反射激光信号,则识别为待攻击目标,并转换为小视场继续进行跟踪,测量弹目线变化特征,为舵机提供相应驱动信息,导引炮弹接近并摧毁目标。

为方便求解,将目标分为静止目标、匀速直线运动目标及匀加速运动目标 3 种情况,同时,将目标信息丢失情况分为失去后重新捕获及无法重新捕获两种情况进行分析。

2.1 目标静止

目标静止情况下,如果在导引系统锁定目标后,经短暂调整,弹的速度与弹目线完全重合,即使由于自然烟雾或目标主动施放的烟雾遮断反射激光信号使之无法进入导引头光瞳,炮弹仍然能够击中目标,该情况极为偶然,即末制导炮弹由于某种原因失去目标对其命中精度无影响。倘若在捕获并锁定目标时,弹初速度与弹目线之间夹角较大,则整个武器系统需要较长时间来消除误差角,若在此期间失去目标,则炮弹以失去目标时的速度飞行,在重新捕获前无法使其速度方向与弹目线靠近,若无法重新捕捉目标,则脱靶量由失去目标前速度确定。如图 1 所示。

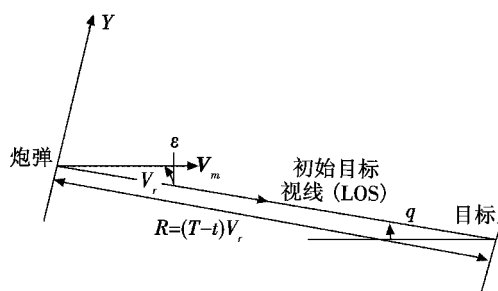


图 1 激光末制导炮弹与目标几何关系

Fig. 1 Relative geometrical relationship between TLGP and target

图 1 中: Y 方向表示与初始弹目线垂直方向; T 为总制导时间; t 为已用制导时间; V_r 为炮弹与目标之间沿初始弹目线方向的相对速度; V_m 为炮弹速度; ε 为弹初始速度与弹目连线夹角,可以作为末制导炮弹初始干扰。

导引的目的是为消除初始速度与弹目线夹角所导致的法向距离,由于时间延迟以及系统需要一定时间来控制炮弹产生法向过载以消除法向误差,研究某一时刻炮弹与目标之间纵向偏差非常有必要。本文用一阶惯性环节近似陀螺导引头,用二阶振荡环节表示自动驾驶仪动力学,同时将初始速度与弹目线夹角、噪声、目标机动看作使炮弹偏离理想弹道的小扰动,从而对导引回路运动学环节进行线性化。在导引末段,当目标机动能力不是很强时,在击中目标前比例导引的弹道通常接近于直线,因此小扰动是合理的。这样可以得到经过简化的包括导引头及自动驾驶仪动力学滞后的比例导引回路线性时变模型,如图 2 所示。

根据文献[9]可知,在飞行过程某一时刻的纵向偏差为

$$\Delta Y = \varepsilon V_m \frac{T-t}{a-1} [1 - (1-t/T)^{a-1}] \quad (1)$$

式中: a 为比例导引系数,若在 t 时刻失去目标并未再

捕获,脱靶量可以上式计算,若在失去目标一段时间后重新捕获,倘若时间足够控制系统完成法向误差校正,脱靶量为零,否则脱靶量小于式(1)所计算的量。

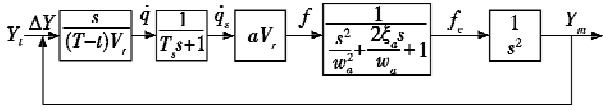


图2 激光末制导炮弹比例导引简化模型结构图

Fig.2 TLGP's PN loop model

2.2 目标机动

攻击敌装甲目标是末制导炮弹精确打击任务之一,现代装甲车辆一般具有较强的机动能力,虽然其速度与末制导炮弹相比很小,但在导引系统无法接收到激光反射波之后的机动,将不可避免地造成较大的脱靶量,甚至由于在失去目标期间机动出光学导引视场,导致无法重新捕获目标,无法完成精确打击任务。

激光末制导炮弹末导段采用比例导引法导引,弹目线角度由法向偏差与弹目之间距离之比近似地表示,当激光反射信号被阻断后,相当于自动驾驶仪失去角度变化信号输入,用于改变法向运动的输出控制信号将迅速衰减为零,若无法重新捕获目标,则脱靶量将由此时纵向偏差加上此后目标机动所造成的偏差。

考虑最为严重的一种情况,即在失去目标时刻,装甲目标速度方向垂直于弹目线方向,且无法再捕获目标,则最终的脱靶量可估算为

$$\Delta Y = \varepsilon V_m \frac{T-t}{a-1} [1 - (1-t/T)^{a-1}] + V_o(T-t) + \frac{1}{2} a_o (T-t)^2 \quad (2)$$

式中: V_o 为装甲目标垂直于弹目线方向速度; a_o 为垂直于弹目线方向的加速度,匀速运动时为零。

在仅考虑烟幕遮断激光信号导致失去目标的情况下,导引头能否重新捕获目标,与失去目标时间长短及目标机动速度有关。在炮弹速度远大于目标速度的情况下,相对速度可以炮弹速度替代,考虑对目标最有利的一种机动,即目标速度与弹目线垂直,炮弹导引系统在 t 时刻失去目标,并且延续 dt ,即 dt 时间段后目标有反射激光,则此时目标在垂直于弹目线方向上偏离的距离可依据式(3)估算,即

$$\Delta Y = \varepsilon V_m \frac{T-t-dt}{a-1} [1 - (1-(t+dt)/T)^{a-1}] + V_o dt + \frac{1}{2} a_o dt^2 \quad (3)$$

由于末制导炮弹在捕获目标后即关闭大视场光学通道,采用小视场跟踪,假定小视场范围为 δ ,则目标仍在视场内的条件为

$$\frac{\Delta Y}{R} = \frac{\Delta Y}{V_r(T-t-dt)} \leq \delta \quad (4)$$

将式(3)代入,可得

$$\frac{\varepsilon}{a-1} \left[1 - \left(1 - \frac{t+dt}{T} \right)^{a-1} \right] + \frac{V_o dt + \frac{1}{2} a_o dt^2}{V_m(T-t-dt)} \leq \delta \quad (5)$$

由式(5)可以看出,在炮弹速度、目标速度及视场范围确定的情况下能否重新捕获目标,显然由失去目标时刻 t 及失去目标延续时间 dt 确定。确切地说,失去目标时刻越接近于制导末段,即 t 越大,目标越容易机动出小视场,即使能重新捕获目标,由于余下制导时间较短,系统可能难于对较大的纵向偏差进行修正,从而命中概率大幅度降低,同时,失去目标持续时间越长,目标机动造成的纵向偏差越大,同样容易机动出小视场,或者即使在小视场内,由于偏差较大,会对武器系统过载提出过高的要求,难以精确命中。

3 仿真与分析

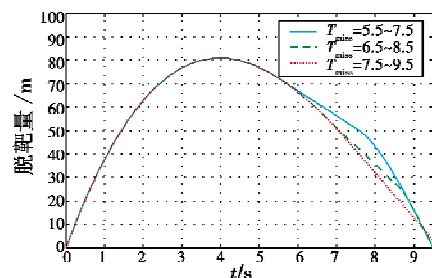
对末导段导引系统在某一时刻失去目标,及失去目标后重新捕获目标情况进行仿真,目标类型分为静止、匀速运动、均加速3种情况。

3.1 仿真参数设置

在导引开始时,弹速与弹目线存在夹角的情况与弹速指向目标但目标具有一定法向速度的情况从本质上是一致的,因此,本文只考虑前一种情况和目标沿弹目线垂直方向匀加速的情况。比例导引末制导时间取 $T=9.5$ s;弹平均速度为 $V_m=240$ m/s,弹初速与弹目线夹角 $\varepsilon=10^\circ$,在目标匀加速运动时, $a=5$ m/s²,比例导引系数 $N=3$, $T_r=0.1$, $\tilde{\omega}_a=12.5$ rad/s, $\xi_a=0.1$ 。

3.2 仿真结果及分析

对于目标静止,弹初速与弹目存在夹角的情况进行仿真,并分别在仿真时间5.5~7.5 s、6.5~8.5 s、7.5~9.5 s时中断角速度变化信号输入,以分析在攻击过程中失去目标并重新捕获目标的时机对整体弹道的影响,得脱靶量(弹目之间纵向距离)、弹目之间纵向相对速度、弹纵向过载曲线、弹目线转动速度(失去目标时间分别为5.5~6.5 s、6.5~7.5 s、7.5~8.5 s),如图3所示。



a 法向脱靶量变化曲线

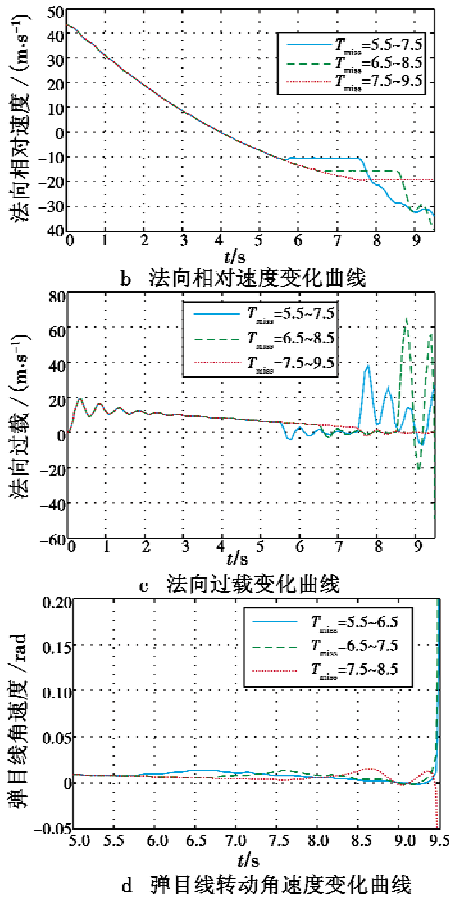


图3 不同时间段失去目标末导段弹道特性曲线对比(目标静止条件下)

Fig. 3 Comparison of trajectory characters when missing target at different time(target is motionless)

由图3a、图3b可知,在失去目标时间段,弹目之间纵向距离的减小速度变慢,与失去目标时间段相对速度为负但绝对值不变相对应。但重新捕获目标后,控制系统重新操纵炮弹接近目标,法向相对速度绝对值变大,距离缩短,但由于控制系统在失去目标阶段处于开环状态,在某些情况下无法弥补失去目标时间造成的偏差,造成最终的脱靶。由图3c可知,正常控制情况下,随着弹目之间距离的接近,法向过载亦越来越小,但失去目标后分别引起了一定的振荡,重新捕获后由于控制系统激励突然增大,法向过载也急剧增大且呈现一定的振荡,甚至是失稳,这对弹的控制是危险的。由图3d可知,在失去目标阶段,由于炮弹控制系统无信号位置输入,导致目标法向运动无法跟踪,造成实际弹目线转动角速度变大,而重新捕获目标后控制系统发挥作用,均会逐渐减小并趋于稳定。但在制导末段,弹目线转动速度产生了较大的变化,这是由于弹目距离接近时,按几何关系计算的角度求解精度下降造成的,未必会影响命中精度。

对于从开始捕获便以垂直于弹目线方向的加速度

进行机动的目标,同样分别在仿真时间 5.5 ~ 7.5 s、6.5 ~ 8.5 s、7.5 ~ 9.5 s 时中断角速度变化信号输入,以分析在攻击过程中失去目标并重新捕获的时机对整体弹道的影响,得脱靶量(弹目之间纵向距离)、弹目之间纵向相对速度、弹纵向过载曲线、弹目线转动速度(失去目标时间分别为 5.5 ~ 6.5 s、6.5 ~ 7.5 s、7.5 ~ 8.5 s),如图4所示。

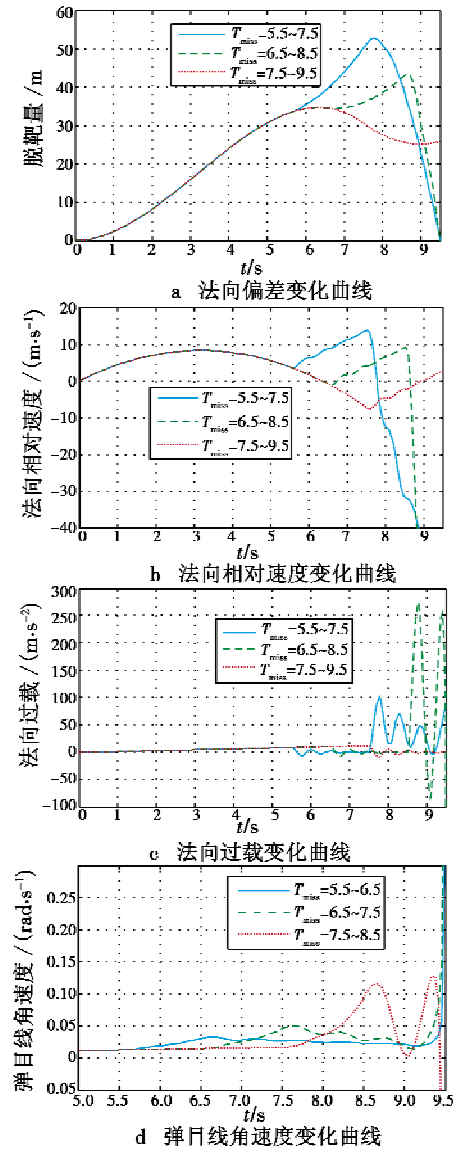


图4 弹目线转动角速度变化曲线

Fig. 4 Comparison of trajectory characters when missing the target at different time(target is in uniform varying motion)

由图4a可知,在导引系统失去目标阶段,控制系统无法获取导引系统根据目标位置信息提供的控制信号,炮弹当时的法向速度与具有法向加速度的目标法向速度差距会变大,引起法向距离的迅速增大。由图4b可知,在重新捕获目标后,法向相对速度迅速减小为零甚至负值,以减小弹目之间法向距离。与匀速运动相比,由目标加速度引起的失去目标阶段的偏差及

速度变化更为剧烈,更容易脱靶,这与速度与加速度在位置方向的时间累积效应不同是一致的。图 4c 显示在末导段前段,与匀速情况下相比过载较小,这与后者在导引开始时便具有一定的速度差异相关,在失去目标阶段,匀速与匀加速的情况在法向过载方面表现是一致的,都在重新捕获目标后有很大幅度的振荡。图 4d 与图 3d 大致走向一致,但显然弹目线角速度因失去目标引起的变化幅度更大,其物理解释与图 3a、图 3b 解释相同。

4 结论

由仿真结果可知,只要存在初始方位角偏差或者目标机动的情况,在末导段某一阶段失去目标均会导致弹道特性曲线的变化,且愈接近末端愈明显。总体上看,目标进行加速情况下失去目标时,更容易导致控制系统失稳,造成无法重新捕获目标或者无法精确打击。由于造成目标丢失的主要原因有烟幕阻断等主动干扰,因此,在实际作战过程中,应尽量延缓直接将激光对准目标的时间,而是先瞄准目标前某一位置进行跟踪定位,防止被目标探测到而采取干扰措施。在打击移动目标时,倘若通视条件不好,应慎重使用。

对于激光半主动导引的末制导炮弹来说,能否及时而准确地获取目标位置及运动信息,是精确命中的关键。而实际战场并不总是符合理想使用条件,研究末制导炮弹在末导段失去目标以及重新捕获目标情况

下的弹道特性,对于研究实战条件下武器系统的作战效率具有理论意义,也利于采用有效的战术,尽量避免在导引末段失去目标情况,提高武器系统命中精度。

参 考 文 献

- [1] 张群兴,李广勇. 目标反射特性对激光末制导精度的影响[J]. 火力与指挥控制,2004,29(1):95-97.
- [2] 姬厚磊,王军,卢福刚. 小视场导弹弹道中末段交接班问题分析[J]. 弹道与制导学报,2007,27(2):239-241.
- [3] 王江涛,杨静宇. 遮挡情况下基于 Kalman 均值偏移的目标跟踪[J]. 系统仿真学报,2007,19(18):4216-4220.
- [4] 沈文亮,李艳斌. 被动导引头抗目标信号丢失方法研究[J]. 无线电工程,2007,37(6):29-31.
- [5] 柳伟,罗以宁,孙南. 基于背景优化的 Mean Shift 目标跟踪算法[J]. 计算机应用,2009,29(4):1015-1017.
- [6] 钱水青,谢勤岚. 结合 Camshift 和 Kalman 预测的运动目标跟踪[J]. 计算机工程与科学,2010,32(8):81-83,137.
- [7] 李明锁,井亮,邹杰,等. 结合扩展卡尔曼滤波的 Camshift 移动目标跟踪算法[J]. 电光与控制,2011,18(4):1-5.
- [8] 杨心力,杨恢先,冷爱莲. 在线特征选择和遮挡处理的目标跟踪[J]. 计算机应用研究,2011,28(7):2797-2800.
- [9] 牟宇,林德福,祁载康,等. 激光末制导炮弹比例导引律性能研究[J]. 红外与激光工程,2009,38(2):250-255.

下 期 要 目

武器投放规划研究

利用单影像解析飞机姿态参数

减少激光指示器照射时间的目标跟踪算法研究

基于施密特正交变换 UKF 的单站无源定位算法

多普勒计程仪辅助捷联惯导初始对准技术研究

多目标雷达组网实时系统偏差稳健估计研究

边界扫描测试技术发展综述

一种增大空地导弹落角的新制导律

高分辨率 InGaAs 短波红外成像系统

大型海上编队空中警戒力量优化部署

电控旋翼的误差通道在线辨识桨距控制

SAR 转发式相参干扰效果分析

物理真随机数发生器的设计

非水平转弯轰炸新方法

制导炸弹攻击区拟合算法研究

红外探测器发展需求

欢迎订阅期刊 欢迎刊登广告