

光纤图像制导弹导引头框架角分析

林德福, 姚怀瑾, 陈方正

北京理工大学宇航学院, 北京 100081

摘要 光纤图像制导弹导引头采取小型化结构, 为避免导引过程中发生碰框, 需要对导引头框架角进行约束。研究了图像制导弹在三点法和比例导引法下的需用框架角。结果表明, 三点法导引随弹目距离接近需用框架角增大, 比例导引法使框架角收敛, 由此提出极限框架角时刻, 即三点法导引转入比例导引的瞬间。讨论了目标机动对框架角的需求, 目标曲线逃逸情况下, 单纯的比例导引可能导致追踪过程中导弹框架角发散, 由此设计了带有框架角约束的比例导引律。仿真结果表明, 加入框架角约束项, 能够较为有效地将框架角限制在一个相对较小的波动范围, 实现框架角的约束, 适用于追踪曲线运动目标。

关键词 框架角; 目标机动; 导引律

中图分类号 TJ765.3⁺4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.07.009

Frame angle design of image guided aircraft

LIN Defu, YAO Huaijin, CHEN Fangzheng

School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In the design of the image guided bomb, the frame angle varies in a limited range in order to avoid hitting the frame of the miniaturization seeker. Therefore the guidance with a limited frame angle range of the image guided aircraft should be studied. The frame angle increases with the decrease of the line-of-sight distance in the three-point guidance, but it is the other way round using the proportional guidance. Therefore, the maximum frame angle is reached when changing the guidance law from the three-point guidance to the proportional guidance. In this paper, a modified proportional navigation is put forward to decrease the frame angle when following a curve escaping target. The frame angle can thus be limited in a small range according to the simulation results.

Keywords frame angle; target maneuver; guidance law

光纤图像制地对地导弹是一种先进的地对地攻击武器, 主要完成对短距离战场内的重要目标进行精确打击的战斗任务。光纤图像制地对地导弹的主要攻击对象为坦克、装甲车及移动速度较慢的直升机。它利用图像导引头中的摄像机对前方战场进行拍摄, 并将画面实时地传送到地面显示器。当射手从显示器上发现目标后, 只要操纵手柄将十字线压在目标图像中心, 即可使导弹准确地飞向目标^[1,2]。

图像制导弹的飞行弹道主要受到搜索视场和导弹落角2个因素制约, 飞行高度越低, 搜索视场越大, 而为了保证落角约束, 则需要较高的飞行高度^[3]。因此设计图像制导弹弹道时, 多以这两个因素为约束设计爬升弹道或是带落角约束的制导律。然而电视导引头采用双平面跟踪法, 即在俯仰和偏航2个方向实现对目标的捕获和跟踪。目前电视导引

头采用小型化结构, 同时受到光学镜头的约束, 导引头的框架角受到一定的限制^[4]。在搜索、跟踪目标的过程中, 当弹体纵轴与目标视线夹角大于导引头的可用框架角时, 导引头的光轴会出现极限偏转, 发生碰框^[5]。碰框对导引头的结构和制导精度都有很大影响, 应避免发生碰框。因此, 在图像制导弹弹道方案及导引律设计上, 又提出了新的要求。

一般情况下, 导弹与目标的速度比越小, 导弹的速度矢量越需要前置, 使得导引头的需用框架角增大。在弹道设计过程中, 制导律的选择和设计是关键之一, 带约束的导引律可实现对角度的控制^[6]。在框架角约束上, 为保证不碰框, 同样可从导引律入手。本文首先研究三点法、比例导引法、目标机动、制导律等对需用框架角的影响, 在其基础上分析在不同比例导引系数下及不同目标机动方案下对导弹需用框

收稿日期: 2014-08-23; 修回日期: 2014-11-28

作者简介: 林德福, 教授, 研究方向为飞行器总体, 电子信箱: lindf@bit.edu.cn; 姚怀瑾(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为飞行器制导与控制技术, 电子信箱: jin_remember@163.com

引用格式: 林德福, 姚怀瑾, 陈方正. 光纤图像制导弹导引头框架角分析[J]. 科技导报, 2015, 33(7): 55-60.

架角的要求,同时,引入带落角约束的比例导引律,并对分析偏置项系数对框架角约束的效用。

1 导引弹道框架角分析

当导引头光轴的安装位置与导弹纵轴一致时,光轴与弹轴之间夹角即是导引头的框架角^[7]。为视线跟踪,光轴必须始终指向目标。若忽略光轴与视线之间的角度误差,则视线与弹轴之间的夹角可近似为框架角^[8]。

平面内导弹与目标的相对运动如图1所示。图中, θ 为弹体姿态角, θ_m 为速度矢量角, α 为弹体轴与速度矢量间夹角, r 为弹目之间距离, ξ 为导引头框架角。假设导引头对目标的跟踪是理想的,则有: $\xi=q-\theta$,因为 $\theta=\theta_m-\alpha$,所以 $\xi=q-\theta_m+\alpha$ 。假设在导弹运动过程中攻角与侧滑角均为0,即弹体轴与速度矢量间夹角为0,则框架角^[5]近似为

$$\xi = q - \theta_m \quad (1)$$

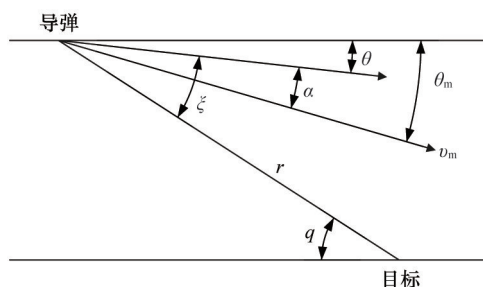


图1 平面内导弹与目标相对位置示意

Fig. 1 Relative position between missile and target

1.1 中制导段弹道分析

中制导段采用三点法导引。三点法导引是指导弹在攻击目标的导引过程中,导弹始终处于制导站与目标的连线上。在水平平面内的三点法导引中,设制导站静止,攻击平面为水平平面,即目标和导弹始终处在通过制导站的水平平面内运动。

三点法导引弹道主要用于研究水平面内,中制导时导弹速度矢量和弹目线之间夹角的变化规律。平面三点法导引弹道曲线如图2所示。

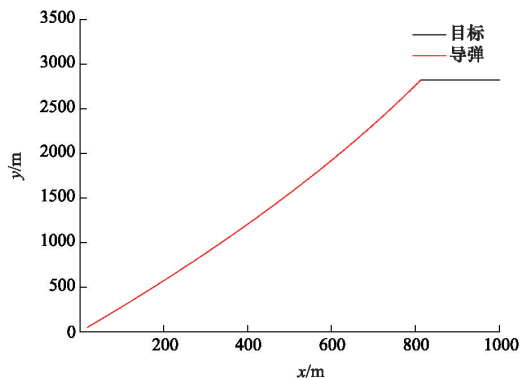


图2 平面三点法导引弹道曲线

Fig. 2 Trajectory of three-point guidance method

中制导段框架角变化曲线如图3所示。由图3可见,在中制导过程中,由于速度矢量超前,弹目连线形成的角度会随着弹目距离的缩短而增大,从而导致需用框架角变大。

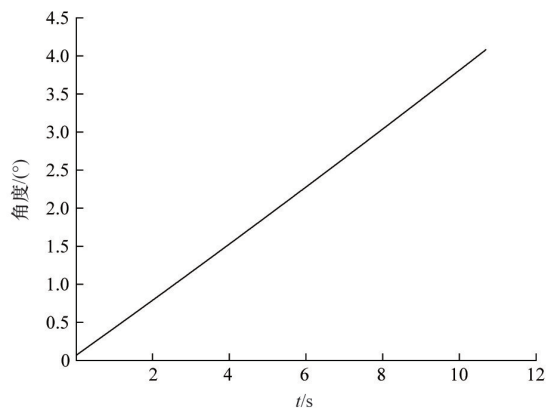


图3 中制导段采用三点法导引的框架角变化曲线

Fig. 3 Framework angle of three-point guidance method

1.2 末制导段弹道分析

末制导段采用比例导引法进行弹道设计。比例导引法指导弹在攻击目标的导引过程中,导弹速度矢量的旋转角速度与目标线的旋转角速度成比例^[9]。末制导段比例导引法弹道主要用于以下研究:

- 1) 导弹运动的运动特性,包括轨迹、需用过载及框架角的变化趋势。
- 2) 不同导引起始条件下(初始时速度矢量和弹目线夹角)导弹的运动特性。
- 3) 研究不同比例系数下导弹的运动特性。

改变末制导段比例导引律中的比例系数 $K(2\sim6)$,可得到一组弹道轨迹和过载曲线,如图4所示。可以看出,在末制导段采用比例导引法的情况下,选取的比例系数越小,弹道越弯曲,命中目标时落角越大。当 $K=1$,过载在导引过程中迅速变大,甚至发散。当 $K\geq 3$,初始过载随 K 增大,导引末端过载曲线收敛。因此可以考虑在导引的初始阶段采用较小的比例系数,用于提高落角,而在导引的末端采用较大的导引系数,保证命中精度。

改变末制导比例导引律中的比例系数 $K(2\sim6)$,可以得到一组需用框架角曲线,如图5所示。可以看出,比例导引过程中速度矢量和弹目线的夹角是逐渐收敛的,改变比例系数并不改变框架角收敛趋势。

1.3 导引弹道框架角分析

由于比例导引过程中框架角随弹目距离减小逐渐收敛,因此导弹进入末制导段比例导引,初始时刻的速度矢量与弹目线的夹角是导引段框架角的最大值。期望导引段有小的框架角,需使导引初始段框架角小,即要求中制导段结束时框架角小。

由图3和图5分析可知,采用三点法导引框架角是逐步增大,而比例导引过程中可以使较大的框架角呈现收敛趋

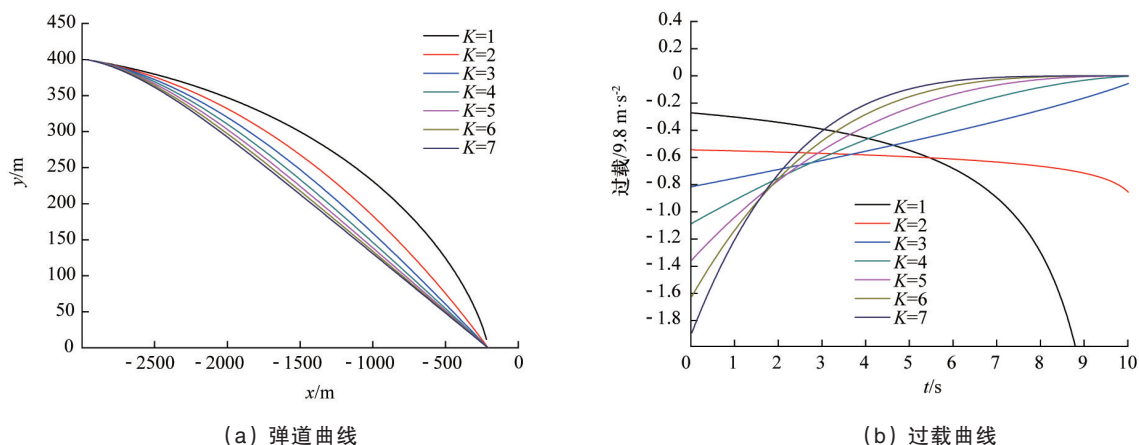


图4 不同比例系数下的弹道曲线和过载曲线

Fig. 4 Trajectories and acceleration curves for different proportional coefficients

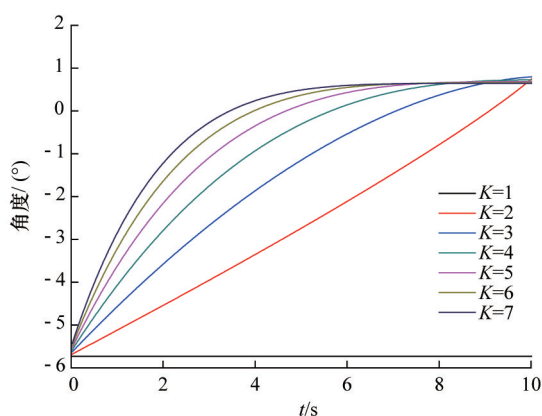


图5 不同比例系数下的需用框架角曲线

Fig. 5 Frame angles for different proportional coefficients

势,因此,在中制导与末制导的交接过程中,可以采用框架角约束作为转移条件,在中制导段采用三点法进行导引,当需用框架角达到可用框架角的极限时,转入比例导引,进入末制导阶段。

2 目标机动对框架角影响

由于框架角近似等于弹体姿态角与弹目视线角之差,因此在末制导段导引律一定的情况下,可以预见,框架角与弹目视线角的变化直接相关。即,在目标进行各种机动的情况下,随着弹目距离的减小,由于弹目相对位置的变化,弹目视线角变化较大,从而可能使需用框架角产生较大变化。

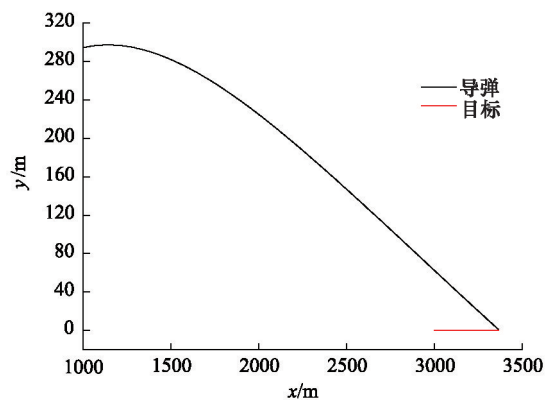
末制导段采用比例导引法,选取比例系数 $K=5$,对不同情况下的目标机动进行仿真验证。

2.1 目标做直线运动

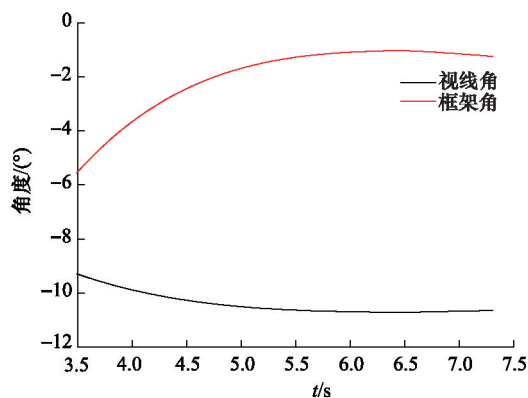
目标做直线运动可分为2种运动方式:匀速直线运动和变速直线运动。仿真选取了3种目标运动方式,1) 在初始弹目连线方向上,目标做匀速直线运动;2) 在初始弹目连线方向上,目标做匀加速直线运动;3) 在与初始弹目连线成固定

角度方向,目标做匀速直线运动。

目标做匀速直线运动的弹道曲线及目标运动曲线如图6(a)所示,弹目视线角及导弹需用框架角曲线如图6(b)所示。



(a) 弹目运动曲线



(b) 弹目视线角和导弹需用框架角曲线

图6 目标做匀速直线运动下的弹目运动曲线、弹目视线角及导弹需用框架角曲线

Fig. 6 The curves of trajectory, line-of-sight angle and frame angle for a target uniform motion in a straight line

目标做 $a_t = 5 \text{ m/s}^2$ 的匀加速直线运动的弹道曲线及目标运动曲线如图 7(a) 所示, 弹目视线角及导弹需用框架角曲线如图 7(b) 所示。目标做与初始弹目视线连线方向成 30° 角度的匀速直线运动的弹道曲线及目标运动曲线如图 8(a) 所示, 弹目视线角及导弹需用框架角曲线如图 8(b) 所示。

当目标做直线运动, 由图 6(a)、图 7(a)、图 8(a) 可知, 比例导引律可以较好地完成命中目标的任务, 脱靶量较小, 弹

道平滑; 根据图 6(b)、图 7(b)、图 8(b) 可知, 框架角随着弹目接近而趋于收敛, 符合本研究对末制导段的框架角分析。因此, 当目标做直线运动, 采用比例导引律, 基本可以满足导引头对框架角的需求。目标做直线运动时, 只需保证由中制导段转入末制导段的瞬间, 即需用框架角最大时小于最大可用框架角, 即可保证在末制导段导引头不发生碰框。

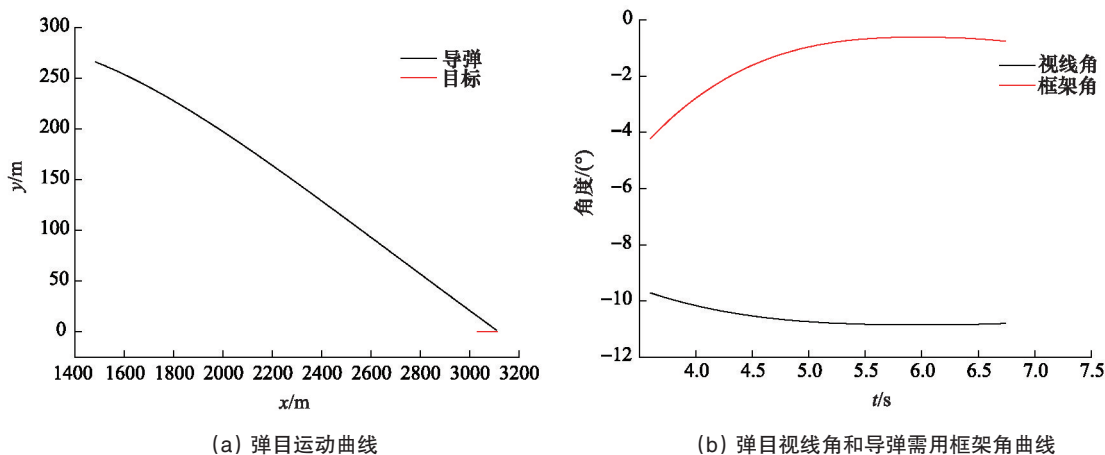


图 7 目标做匀加速直线运动下的弹目运动曲线、弹目视线角及导弹需用框架角曲线

Fig. 7 The curves of line-of-sight angle and frame angle for a target uniform acceleration in a straight line

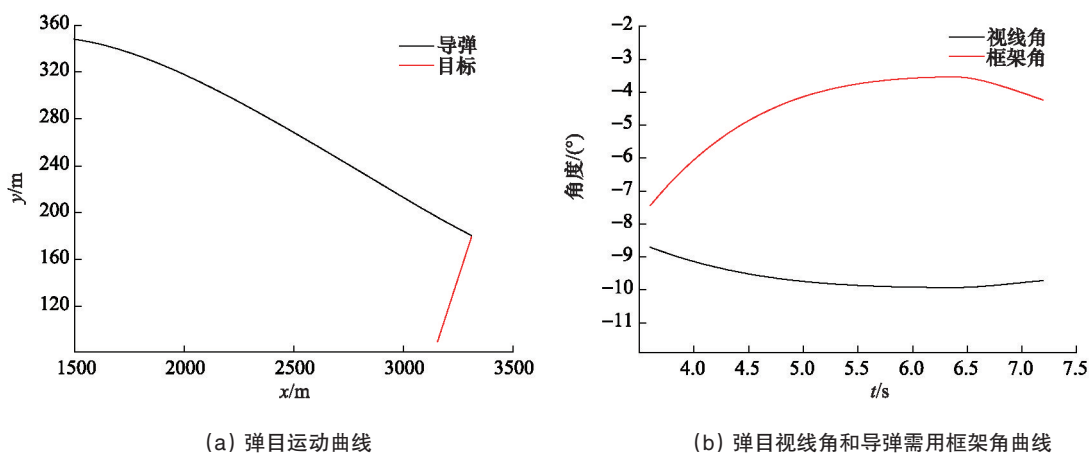


图 8 目标做倾斜方向上的匀速直线运动的弹目运动曲线、弹目视线角及导弹需用框架角曲线

Fig. 8 The curves of trajectory, line-of-sight angle and frame angle for a target uniform motion on an upward slope

2.2 目标做曲线运动

在实际情况下, 目标逃逸一般不为直线运动。目标做曲线运动, 对导引律的要求更为苛刻。选取目标做正弦机动及圆周运动, 仿真并分析弹目相对运动及导弹需用框架角变化特征。

目标正弦机动下的弹道曲线及目标运动曲线如图 9(a) 所示, 弹目视线角及导弹需用框架角曲线如图 9(b) 所示。目标圆周机动下的弹道曲线及目标运动曲线如图 10(a) 所示, 弹目视线角及导弹需用框架角曲线如图 10(b) 所示。

目标做曲线运动时, 由图 9(a)、图 10(a) 可知, 比例导引律可保证一定的命中精度, 但在弹目接近过程中, 弹目视线角有增大的趋势, 且弹目视线角变化速率较大。由图 9(b)、图 10(b) 同样可知, 目标做曲线运动, 应用比例导引法, 框架角随着弹目接近不再趋于收敛, 出现较大波动且趋于发散。由此可见, 单纯采用比例导引律, 不易满足导引头对框架角的需求。目标在机动速率较大或运动曲率较大时, 随着弹目距离接近, 弹目视线角会出现较大的转率, 使需用框架角大幅增加, 可能发生碰框。

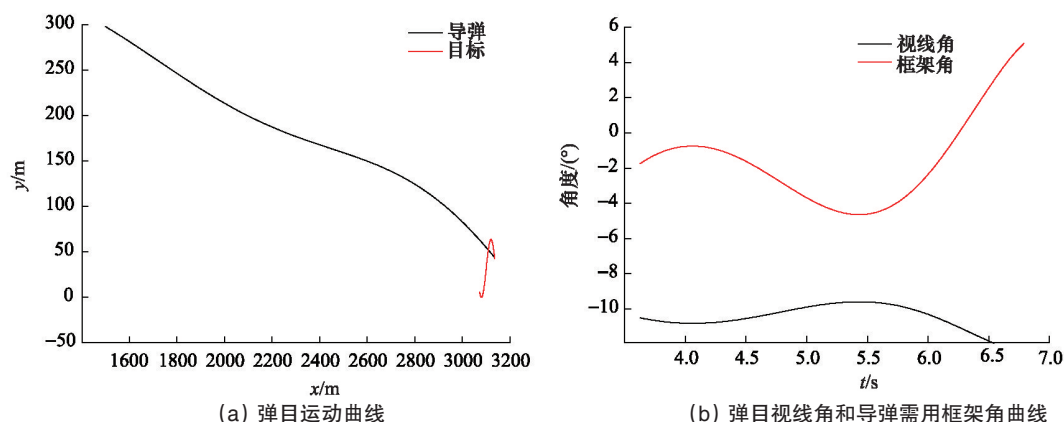


图9 目标做正弦机动下的弹目运动曲线、弹目视线角及导弹需用框架角曲线

Fig. 9 The curves of trajectory, line-of-sight angle and frame angle for a target sinusoidal motion

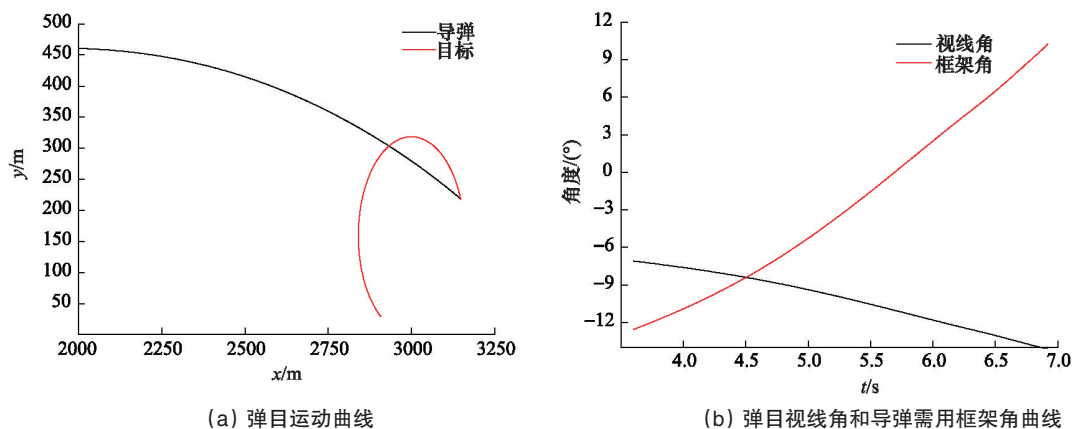


图10 目标做圆周机动下的弹目运动曲线、弹目视线角及导弹需用框架角曲线

Fig. 10 The curves of trajectory, line-of-sight angle and frame angle for a target uniform circular motion

3 引入框架角约束的比例导引律

根据2.2节分析,当目标做曲线运动,在末制导段单纯采用比例导引律并不能保证很好的框架角约束,因此提出一种引入框架角约束的比例导引律。为减小需用框架角,将导引头框架角信号引入比例导引律,构建积分比例导引律^[10]:

$$\dot{\theta} = k_1 \dot{q} + k_2 \xi \quad (2)$$

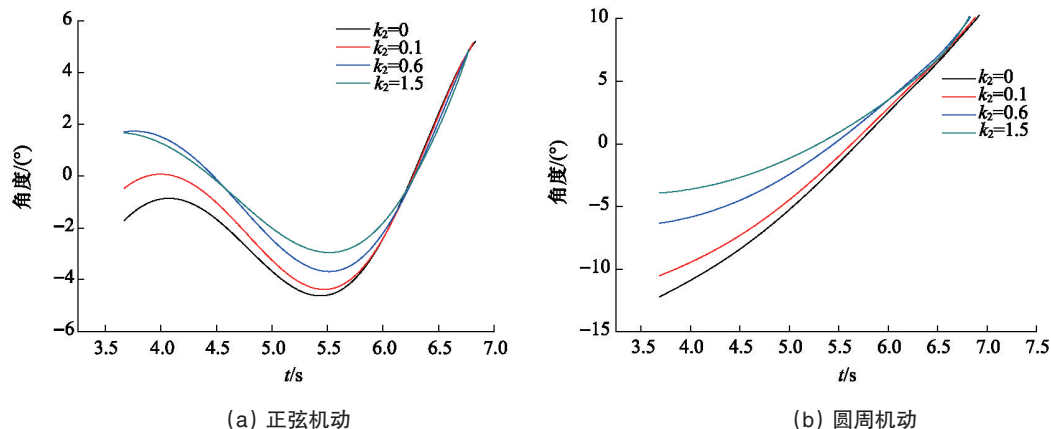


图11 目标正弦机动和圆周机动下的框架角变化曲线

Fig. 11 Frame angle curves according to different proportional coefficients for target sinusoidal motion and uniform circular motion

式中, k_1 为比例系数, k_2 为框架角修正比例系数。 k_1 为 5, k_2 分别选择 0、0.1、0.6、1.5, 对目标进行正弦机动以及圆周机动仿真。

目标在正弦机动和圆周机动的框架角曲线如图 11 所示。可以看出,在比例导引律中增加框架角修正项可在一定程度上减小框架角的变化速率,且随着框架角修正项比例系

数的增加,修正作用越明显,框架角可在一个相对较小的范围内变动。

目标在正弦机动和圆周机动下的弹道曲线如图 12 所示。可以看出,随着框架角修正系数的增加,弹道变弯曲,且

飞行高度明显下降。说明在 k_2 增大的过程中,导弹在相同动力条件下,需要更多的能量用于框架角修正。过于强调满足框架角要求,会使弹道特性变差,因此需要合理地选择框架角修正系数 k_2 。

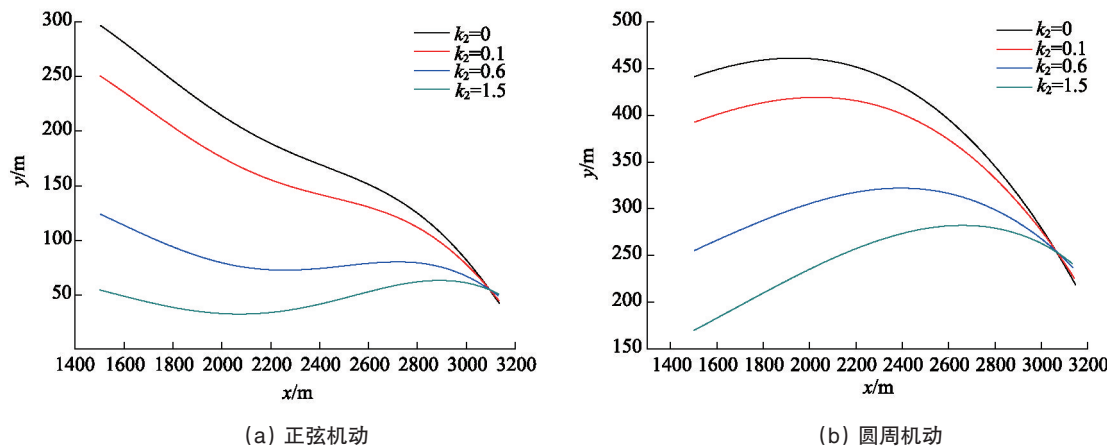


图 12 目标正弦机动和圆周机动下的弹道曲线

Fig. 12 Trajectories according to different proportional coefficients for target sinusoidal motion and uniform circular motion

4 结论

1) 研究了图像制导导弹在中制导段应用三点法导引以及末制导段应用比例导引的情况下对框架角的需要。结果表明,三点法导引随弹目距离的接近需用框架角增大,而末制导比例导引中比例系数并不改变框架角的收敛趋势,由此提出了极限框架角时刻,即中制导转为末制导的瞬间。

2) 讨论了目标机动对于导弹框架角的需求,特别是在目标曲线逃逸的情况下,单纯的比例导引会导致导弹在追踪目标过程中的框架角发散。为保证导弹平稳有效地命中目标,避免碰框,在经典比例导引律的基础上设计了带有框架角约束的比例导引律。仿真结果表明,加入框架角约束项,能够较为有效的将框架角限制在一个小的波动范围,实现框架角的约束,适用于追踪曲线运动目标。

参考文献 (References)

- [1] 林海. 图像制导导弹的弹道设计[J]. 弹箭与制导学报, 2000, 20(1): 14-18.
Lin Hai. Trajectory design of image guided missile[J]. Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance, 2000, 20(1): 14-18.
- [2] 周琼, 闫杰. 大跟踪场图像导引头位标器设计[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2009, 33(1): 93-95.
Zhou Qiong, Yan Jie. Design for the second climbing trajectory of image guided missiles[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 33(1): 93-95.
- [3] 朱勇, 刘莉, 杜大程. 图像制导导弹二次爬升方案弹道设计[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 195-198.
Zhu Yong, Liu Li, Du Dacheng. Design of coordinator of image seeker with large track field[J]. Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(1): 195-198.
- [4] 杨俊鹏, 祝小平, 周洲. 电视制导无人机导引律研究[J]. 西北工业大学

- 学报, 2005, 23(4): 479-481
Yang Junpeng, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou. Image guided UAV guidance law[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(4): 479-481.
- [5] 郭延宁, 李传江, 张永合, 等. 采用框架角受限控制力矩陀螺的航天器姿态机动控制[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1231-1239.
Guo Yanning, Li Chuanjiang, Zhang Yonghe, et al. Spacecraft attitude maneuver using control moment gyroscope with gimbal angle constraints [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1231-1239.
- [6] 李森, 祁载康. 一种弹道成形水平攻击制导律研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 37-44.
Li Miao, Qi Zaikang. A research on trajectory shaping horizontal attack guidance law[J]. Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(4): 37-44.
- [7] 林海. 图像制导导弹的射程和速度分析[J]. 战术导弹技术, 2002(5): 6-10.
Lin Hai. Analysis of range and velocity of image guided missile[J]. Tactical Missile Design, 2002(5): 6-10.
- [8] 徐一鸣, 刘晓莉, 刘怡昕. 电视制导小灵巧炸弹三维导引律[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(6): 47-50.
Xu Yiming, Liu Xiaoli, Liu Yixin. Research on a three-dimensional guidance law for TV-guidance small smart bomb[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(6): 47-50.
- [9] 张伟, 沈吉, 祁载康. 微旋弹导引头对地搜索规律设计[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(3): 81-84.
Zhang Wei, Shen Ji, Qi Zaikang. Searching law design of micro rotary projectile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2002, 22(3): 81-84.
- [10] 林海. 一种适用于图像制导导弹的制导律[J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(增 1): 124-127.
Lin Hai. Guidance law for Image Guided Missile[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 19(Suppl 1): 124-127.

(编辑 陈华蛟)