

## 制导滑翔炸弹虚拟比例末制导律研究

薛晓东<sup>1</sup>, 刘代军<sup>1</sup>, 王虎峰<sup>1</sup>, 刘琪<sup>2</sup>

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 空军装备部, 北京 100843)

**摘要:** 对于不同的地面目标,以不同的着角命中目标,可大幅提高制导滑翔炸弹的毁伤效能,虚拟比例末制导律是实现这一目的的有效途径。其实现方法是:按照距离和角度约束公式,计算出虚拟目标的坐标,采用比例制导律引导制导滑翔炸弹飞向虚拟目标。距离约束保证了制导滑翔炸弹、虚拟目标和目标在命中时刻重合,角度约束保证了前两者以给定着角接近目标,最终保证脱靶量和着角满足要求。通过数字仿真,最大着角超过 $80^\circ$ ,着角误差小于 $5^\circ$ 。此方法只需要制导滑翔炸弹的坐标、速度以及目标坐标信息就可实现,所需信息量小,且形式简单、计算量小、工程上易于实现。

**关键词:** 滑翔炸弹; 虚拟目标; 着角; 比例制导

**中图分类号:** V271.4; TN956

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2013)01-0041-03

## Terminal Virtual Proportional Navigation Law for Guided Glide Bomb

XUE Xiaodong<sup>1</sup>, LIU Daijun<sup>1</sup>, WANG Hufeng<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>2</sup>

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China; 2. Air Force Armament Department, Beijing 100843, China)

**Abstract:** The terminal virtual proportional navigation law can improve the damage effect of guided glide bombs greatly by attacking the target at different impact angles for different ground targets. The method may calculate the coordinates of the virtual target according to the distance and angle limits, and guide the glide bomb to fly to the target by using proportional navigation law. The distance limit guarantees that the glide bomb, the virtual target and the target coincidence in the impact time, and the angle limit guarantees that the glide bomb approaches the virtual target in the set impact angle, which ensure the satisfied miss distance and impact angle. According to the simulation result, the maximum impact angle is larger than  $80^\circ$ , and the error is less than  $5^\circ$ . This method only needs the coordinates of the bomb and target and the bomb's speed, which is easy to realize in engineering and has less computation cost.

**Key words:** glide bomb; virtual target; impact angle; proportional navigation

### 0 引言

制导滑翔炸弹<sup>[1]</sup>(简称滑翔弹)是在普通低阻航空炸弹上加装制导控制装置和折叠弹翼组件而形成的防区外精确制导武器<sup>[1-2]</sup>。其主要特点是:采用惯性导航及卫星定位复合制导体制<sup>[3]</sup>,可全天时、全天候使用,精确制导;通过加装折叠弹翼组件,滑翔弹具有高的升阻比,使之具备了防区外投放的能力,提高了载机的生存能力。

最具代表性的滑翔弹有美国的JDAM-ER和SDB系列。滑翔弹除了用于攻击地面非加固目标(机场跑道、桥梁等)外,还需要对各种地面加固目标(如机库)和各种地下目标进行攻击,这就要求滑翔弹不仅具备足够远的射程、非常高的制导精度,还需要在攻击目标时,能以给定着角<sup>[4]</sup>命中目标,以达到最佳毁伤效果。

滑翔弹为了实现远射程和给定着角,一般都采用最优攻角或定俯仰角中制导实现远射程,而为了实现给定弹着角,需要采用带落角约束的末制导律<sup>[5]</sup>。本文给出一种基于虚拟目标<sup>[6]</sup>的三维比例制导律,能够实现以给定着角命中目标。

收稿日期:2011-10-24

修回日期:2012-01-12

作者简介:薛晓东(1977—),男,河南三门峡人,学士,高工,研究方向为导弹总体设计。

### 1 坐标系

为了简化计算,建立如下所述坐标系。

## 1) 坐标原点。

由于滑翔弹攻击的目标为固定目标,因此,坐标系原点选择为目标点,这样,弹目相对位置以及虚拟目标坐标的计算就可以得到简化。

2)  $OX$  轴。

以滑翔弹投放点在目标点水平面上的投影点与目标点的连线为  $OX$  轴,指向目标点为正。

3)  $OY$  轴。

垂直于  $OX$  轴指向天向。

4)  $OZ$  轴。

垂直于  $OXY$  平面构成右手坐标系。

## 2 虚拟目标实时坐标生成算法

滑翔炸弹、目标和虚拟目标相对位置关系见图1。

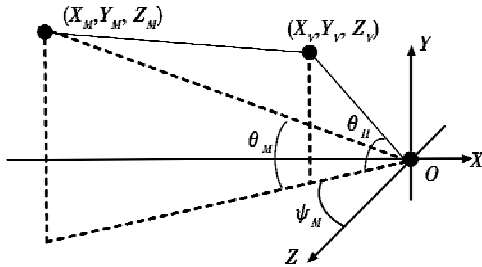


图1 弹目相对位置示意图

Fig.1 Relative location of the missile and target

图1中:  $(X_M, Y_M, Z_M)$  为滑翔弹的坐标;  $(X_V, Y_V, Z_V)$  为虚拟目标的坐标;  $\theta_H$  为期望着角,可在投放时由载机装订(或滑翔弹根据装订的目标类型确定);  $\theta_M$  为弹目连线与水平面的夹角。

为了保证滑翔弹以期望的弹道倾角  $\theta_H$  命中目标,并且在虚拟目标与实际目标重合时命中目标,需要对虚拟目标的坐标进行约束

$$Y_V/R_V = \tan \theta_H \quad (1)$$

$$(Y_M - Y_V)^2 + (R_M - R_V)^2 = \lambda(Y_V^2 + R_V^2) \quad (2)$$

其中

$$R_V = -\sqrt{X_V^2 + Z_V^2} \quad (3)$$

$$R_M = -\sqrt{X_M^2 + Z_M^2} \quad (4)$$

$\lambda$  为常数,取值范围为  $(0, +\infty)$ 。

式(1)保证了虚拟目标与目标的连线同水平面夹角为  $\theta_H$ ,式(2)保证了虚拟目标在滑翔弹命中实际目标以前能以合适的速度来导引滑翔弹,保证最终三点合一。其中,  $\theta_H \neq 90^\circ$ , 如果  $\theta_H = 90^\circ$ , 那么式(1)将变成  $R_V = 0$ 。将式(1)代入式(2)整理可得

$$AR_V^2 + BR_V + C = 0 \quad (5)$$

其中

$$A = (1 - \lambda)(1 + \tan^2 \theta_H) \quad (6)$$

$$B = -2(Y_M \tan \theta_H + R_M) \quad (7)$$

$$C = Y_M^2 + R_M^2 \quad (8)$$

当  $\lambda \neq 1$  时,为保证式(5)有解,必须要求

$$B^2 - 4AC \geq 0 \quad (9)$$

将式(6)~式(8)代入式(9),可得到

$$\lambda \geq \frac{(\tan \theta_M - \tan \theta_H)^2}{(1 + \tan^2 \theta_M)(1 + \tan^2 \theta_H)} \quad (10)$$

其中

$$\tan \theta_M = \frac{Y_M}{R_M} \quad (11)$$

绘制  $\lambda$  的取值曲线如图2所示,只要  $\lambda$  取值在曲线上方就可保证式(5)有解。由图2可知,当  $\theta_M$  与  $\theta_H$  相差较多时,要求  $\lambda$  取值大,而采用虚拟比例制导律将使  $\theta_M$  逐渐趋近于  $\theta_H$ , 因此,  $\lambda$  取值时,只要保证初始时刻的值在对应的取值曲线上方即可保证在整个末制导段式(4)始终有解。

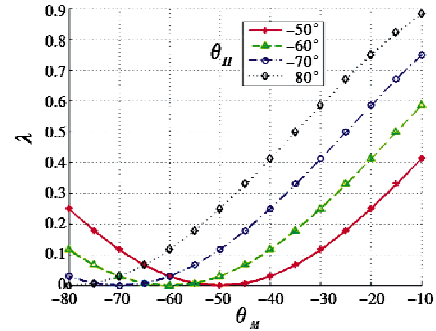


图2  $\lambda$  的取值曲线

Fig.2 Valve curve of  $\lambda$

在实际应用中,  $\theta_H$  为给定值,在滑翔弹进入末制导时刻,可根据式(11)、式(10)计算出  $\theta_M$ 、 $\lambda$  的取值。

式(5)的解为

$$R_V = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (12)$$

由于有两个解,根据实际情况,选取与实际目标距离近的为合理解。由图1、式(4)和式(7)可知,  $B > 0$ , 因此选择合理解为

$$R_V = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (13)$$

当  $\lambda = 1$  时

$$R_V = -\frac{C}{B} \quad (14)$$

则可以得到虚拟目标的三维坐标为

$$\begin{cases} X_V = R_V \cos \psi_M \\ Y_V = R_V \tan \theta_H \\ Z_V = -R_V \sin \psi_M \end{cases} \quad (15)$$

## 3 比例制导律

比例制导律的关系方程<sup>[7]</sup>为:  $\dot{\sigma} = K\dot{q}$ ,  $K$  为比例系

数。如图1所示,导弹弹道角 $\sigma$ 可认为是由先旋转弹道偏角 $\psi$ ,再旋转弹道倾角 $\theta$ 而得到的<sup>[8]</sup>。视线角 $q$ 也可以认为是分两步旋转得到的,即先旋转角 $\psi_M$ ,再旋转角 $\theta_M$ 。则有

$$\begin{cases} \dot{\theta} = K_1 \dot{\theta}_M \\ \dot{\psi} = K_2 \dot{\psi}_M \end{cases} \quad (16)$$

式中, $K_1$ 和 $K_2$ 为比例系数。由图1可以得到滑翔弹与虚拟目标的相对几何关系为

$$\begin{cases} \Delta X = X_v - X_M \\ \Delta Y = Y_v - Y_M \\ \Delta Z = Z_v - Z_M \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \psi_M = \arctan \frac{\Delta Z}{\Delta X} \\ \theta_M = \arctan \frac{\Delta Y}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Z^2}} \end{cases} \quad (18)$$

对式(18)求导可得

$$\begin{cases} \dot{\psi}_M = \frac{\Delta X \Delta \dot{Z} - \Delta \dot{X} \Delta Z}{\Delta X^2 + \Delta Z^2} \\ \dot{\theta}_M = \frac{(\Delta X^2 + \Delta Z^2) \Delta \dot{Y} - \Delta Y (\Delta X \Delta \dot{X} + \Delta Z \Delta \dot{Z})}{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2) \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Z^2}} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\Delta \dot{X}$ 、 $\Delta \dot{Y}$ 、 $\Delta \dot{Z}$ 分别为相对速度在地面坐标系各轴上的投影分量。由于滑翔弹目标为静止目标,则有

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = -V_{MX} \\ \Delta \dot{Y} = -V_{MY} \\ \Delta \dot{Z} = -V_{MZ} \end{cases} \quad (20)$$

纵向和航向的过载控制指令可分别设计为

$$\begin{cases} n_Y = \frac{V_M \dot{\theta}}{g} = \frac{K_1 V_M}{g} \dot{\theta}_M \\ n_Z = \frac{V_M \dot{\psi}}{g} = \frac{K_2 V_M}{g} \dot{\psi}_M \end{cases} \quad (21)$$

滑翔弹为面对称外形,采用BTT-90控制方式<sup>[1]</sup>,其控制指令为

$$\begin{cases} n_p = \text{sign}(n_Y) \sqrt{n_Y^2 + n_Z^2} \\ n_q = 0 \\ \gamma = \text{sign}(n_Y) \arctan \frac{n_Z}{n_Y} \end{cases} \quad (22)$$

弹体的法向过载限幅取为:  $-0.5 \leq n_p \leq 1.5$ 。

### 4 仿真

取滑翔弹进入末制导的位置为(-10000 m,6000 m,5400 m), $\theta_H = 80^\circ$ , $\lambda$ 分别取0.8、1.0和10。仿真结果如图3所示。

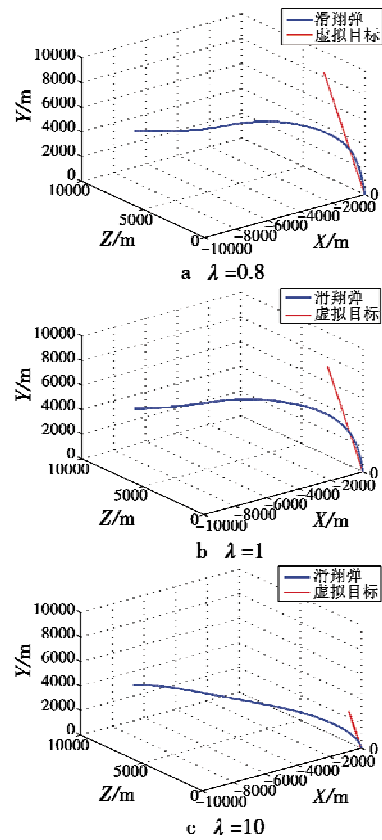


图3 末制导弹道仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of the terminal trajectory

由图3a、图3b和表1可以看出,只要 $\lambda$ 满足图2的取值要求,且在一定范围内,均可保证弹着角达到 $\theta_H$ 。当 $\lambda = 10$ 时,末端弹道明显比较弯曲,因此末端需用过载较大(仿真数据显示最大负向过载达到-0.5),且由表1可以看出,弹着角为 $78.7^\circ$ ,小于期望值 $80^\circ$ 。

取不同的末制导进入位置、 $\lambda$ 和 $\theta_H$ 进行仿真,结果如表1所示。

表1 着角和脱靶量仿真结果统计表

Table 1 Statistics of the impact angle and the miss distance

进入位置/m			系数 $\lambda$	期望弹着 角 $\theta_H/(^\circ)$	弹着角 $\theta_t/(^\circ)$	脱靶量 $D_M/m$
X	Y	Z				
-10000	6000	5400	0.8	60	63.3	2.6
-10000	6000	5400	0.8	80	85.5	0.6
-10000	6000	5400	10	80	78.7	2.1
-8000	6000	4500	1	85	87.3	3.5
-8000	6000	4500	0.8	80	81.8	3.0
-5000	5800	3000	0.8	80	84.4	1.9

通过仿真结果可以看出,采用虚拟比例制导律对进入末制导的位置没有严格要求,且能够实现 $80^\circ$ 以上的大着角攻击目标。

### 5 结束语

滑翔弹作为一种价格低廉的防区外<sup>[2,9]</sup>精确制导武器  
(下转第73页)

如表 1 所示,快速波形匹配的方法进行匹配所需时间较长,SSDA 的匹配方法使时间缩短了近 2/3。使用本文所提出的改进的 SSDA 匹配方法,并且在波形库建立时采取本文所提出的预处理方法之后,匹配时间大幅降低,匹配精度并未下降。

## 5 小结

本文提出了一种通过改进 SSDA 波形匹配的方法来预测一次电流过零点,从而控制高频电源开关来提高电源的输出效率。在波形库的建立过程中采取了两次滤波,并进行了限定条件的取点,然后将图像匹配的 SSDA 算法通过阈值设定方面的改进之后用于波形的匹配过程。经过 Matlab 仿真实验表明,本文提供的方法在匹配时间上能达 0.5 ms 左右,同时由于取点方法的改进又保证了很高的匹配精度。考虑到 DSP 实时处理数据速度要比 Matlab 仿真速度快很多,因而之后工作中将考虑使用 DSP 对此方法进行硬件实现,并将研究高频电源的故障诊断和容错控制<sup>[13]</sup>等方面的内容,使之应用于高频电源工作现场。

## 参考文献

- [1] 孙广鹏,张传成,孙更生. 电除尘节能技术探讨与研究[J]. 通用机械,2009(1):77-79.
- [2] POLTL A, FROHLIEH K. A new algorithm enabling controlled short circuit interruption [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2003, 18(3): 802-808.
- [3] THOMAS R, DAALDER J, SOLVER C E. An adaptive, self-

checking algorithm for controlled fault interruption[C]//The 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, 2005:1-5.

- [4] CHEN C C, CHU H T. Similarity measurement between images[C]//Proceedings of the 29th Annual International Computer Software and Applications Conference, 2005:41-42.
- [5] 陈智. 图像匹配技术研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2006.
- [6] PAN Jianjia, TANG Yuanyan, PAN Baochang. The algorithm of fast mean filtering[C]//Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2007:244-246.
- [7] 王科俊,熊新炎,任楨. 高效均值滤波算法[J]. 计算机应用研究, 2010(2):434-438.
- [8] LIU Haifeng, XIAO Chuangbai, DENG M, et al. A faster image registration algorithm[C]//Image and Signal Processing(CISP), 2010(10):1218-1221.
- [9] 王立新,刘彤宇,李阳. SSDA 图像匹配算法的研究及实现[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3):53-55.
- [10] 杜杰. 两种基于灰度的快速图像匹配算法[D]. 大连:大连海事大学, 2007.
- [11] 李俊山,谭园园,张媛莉. SSDA 的改进算法[J]. 电光与控制, 2007, 14(2):66-68.
- [12] 黄文清,张福欣. 基于梯度图像的改进 SSDA 方法[J]. 电光系统, 2004(4):7-10.
- [13] 张岐龙,单甘霖,段修生,等. 基于小波支持向量机的模拟电路故障诊断[J]. 电光与控制, 2010, 17(5):66-69.

(上接第 43 页)

器,得到世界各国的重视,以美国为首的西方发达国家均在大力发展。提高滑翔弹毁伤概率成为滑翔弹改进发展的重点,由于制导律的优化作为提高滑翔弹毁伤概率<sup>[10]</sup>的重要途径,应对其进行深入研究。文中给出了基于虚拟目标的比例末制导律,该制导律在满足脱靶量的同时,可保证滑翔弹以给定的着角命中目标,最大着角超过 80°,可满足攻击不同地面目标的着角要求,且在工程上易于实现,具有较高的实用价值。

## 参考文献

- [1] 王颖,宋龙,张拥军. 制导滑翔炸弹的最优末制导律研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(4):51-54.
- [2] 范金荣. 制导炸弹发展综述[J]. 现代防御技术, 2004, 32(3):27-31.
- [3] 吴盘龙,杜国平,薄煜明. 空地制导弹药的 MIMU/GPS 组

合导航系统研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(10):65-68.

- [4] 周义,王自焰,郁青安. 美军机载精确制导炸弹发展趋势[J]. 飞航导弹, 2003(5):26-29.
- [5] 张功,李帆,万聪梅,等. 三维空间内导弹弹着角可控制导律[J]. 飞行力学, 2010, 28(1):65-68.
- [6] 顾文锦,赵红超. 基于虚拟目标的反舰导弹的最优制导律研究[J]. 现代防御技术, 2006, 34(4):56-60.
- [7] 方振平,陈万春,张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.
- [8] 赵红超,顾文锦,于进勇. 三维虚拟目标比例导引律研究[C]//飞行力学与飞行试验专业分论坛暨第十九界学术交流会议文集, 2003.
- [9] 吴盘龙. 防区外空面导弹制导系统关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
- [10] 程江涛,王超勇,谢振华. 空对舰导弹目标毁伤概率的研究[J]. 电光与控制, 2001, 8(1):43-45.