

## 基于扫描角控制的末敏弹稳态扫描方法

翟保磊, 李波, 高晓光  
(西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

**摘要:** 针对末敏子母弹在稳态扫描过程中因扫描效率低、无法及时发现目标导致攻击失败的问题,提出了控制扫描角的末敏弹稳态扫描方法。首先构建了末敏弹在扫描阶段的模型,分析了扫描轨迹及传统扫描方式的缺点;然后提出了控制扫描角的搜索算法,详细阐述了该方法的原理,并对其进行了细致讨论;最后基于建立的子母弹毁伤效能评估模型及仿真平台验证了该方法能有效提高子母弹的作战效能。

**关键词:** 末敏弹; 稳态扫描; 扫描角控制; 作战效能

中图分类号: V271.4; TJ413 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2013)06-0058-04

## A Controlled Angle Approach for Stable Scanning of Terminal-Sensitivity Projectile

ZHAI Baolei, LI Bo, GAO Xiaoguang  
(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** An effective scanning method realized by controlling the scanning angle was proposed aiming at the drawbacks in stable scanning phase of Terminal-Sensitivity Projectile(TSP) as low efficiency and false alarm. Firstly, a model was established for the scanning phase of TSP, and analysis was made to the scanning trajectory as well as the disadvantages of traditional scanning method. Subsequently, a search algorithm with a controlled angle was proposed and its principle was then detailed. Finally, simulation demonstrated that the proposed approach can significantly improve the combat effectiveness of the TSP.

**Key words:** Terminal-Sensitivity Projectile (TSP); stable scanning; controlled scanning angle; combat effectiveness

### 0 引言

由于具有杀伤面积大,能自动搜索、捕获、攻击目标等优点,末敏子母弹在对坦克群等集群目标的打击中占据越来越重要的地位<sup>[1]</sup>。稳态扫描作为末敏弹捕获和攻击目标的一个重要环节,其搜索效率与末敏弹的攻击效果密切相关。文献[2-6]详细介绍了末敏弹传统扫描方式,即恒定扫描角扫描,该扫描方式下的扫描轨迹为一簇内螺旋线。目前有关末敏弹稳态扫描的文献绝大部分是以该扫描方式展开。采用恒定扫描角对目标进行探测,相邻两个周期的扫描曲线间距很小,会造成探测区域重合、探测效率低下<sup>[7]</sup>,如果目标

处于扫描区域的中心附近,末敏弹需要扫描较长的时间才能探测到目标,若末敏弹在比较低的位置发现目标,不利于末敏弹的导引。而在导弹的搜索扫描过程中,导引头可通过自身的运动达到扫描的目的<sup>[8-11]</sup>。针对当前末敏弹扫描过程中存在的问题并结合导弹导引头的扫描方式,提出了一种新型末敏弹的模型及控制扫描角的扫描方式,可以提高稳态扫描阶段的搜索效率和末敏弹整体的作战效能。

### 1 末敏弹工作原理

末敏弹是末端敏感弹药的简称,它的工作原理是:装有敏感子弹药的母弹发射后按预定弹道以无控的方式飞向目标,在目标区域上空的预定高度,引信作用,点燃抛射药,将敏感子弹从弹体抛出。在子弹降落过程中,弹上的扫描装置对地面进行扫描。一旦敏感装置在其视场范围内发现目标,就去攻击目标。如果敏感装置没有探测到目标,子弹便在着地时自毁。

收稿日期:2012-09-10 修回日期:2012-11-23

基金项目:西北工业大学基础研究基金(JC201144);全国高校博士点基金(20116102110026)

作者简介:翟保磊(1988—),男,山东聊城人,硕士生,研究方向为现代火力控制理论。

## 2 末敏子弹稳态扫描模型

### 2.1 扫描运动模型

本文提出的末敏子弹的模型组成如图1所示,子弹(有降落伞)匀速垂直下落,其速度矢量方向与子弹纵轴方向一致。探测器位于子弹内部,其纵轴与铅直纵轴之间的夹角即为扫描角 $\varphi$ ,它具有一个绕铅直轴旋转的角速度,称为扫描角速度 $\omega_{scan}$ 。

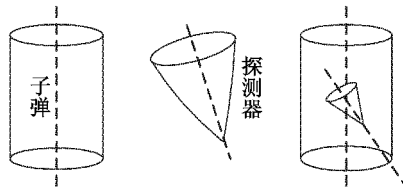


图1 末敏子弹模型

Fig. 1 The model of TSP

末敏弹在稳态扫描阶段如图2所示。

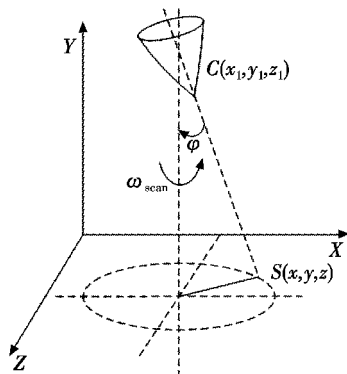


图2 探测器的运动模型

Fig. 2 Motion model of detector

子弹以速度 $v$ 垂直下落,探测器在陀螺仪的带动下绕铅直纵轴旋转,该旋转角速度即为扫描角速度。

$$\omega_{scan} = \frac{\omega}{\sin \varphi} \quad (1)$$

式中, $\omega$ 为陀螺仪进动角速度,为常量。

设探测器质心的初始位置坐标为 $C(x_1, y_1, z_1)$ ,则探测器质心沿其纵轴到地面的距离为

$$s = \frac{y_1}{\cos \varphi} \quad (2)$$

因此,扫描轨迹方程为

$$\begin{cases} x = x_1 + s \times \cos(t \times \omega_{scan}) \\ z = z_1 + s \times \sin(t \times \omega_{scan}) \end{cases} \quad (3)$$

结合以上两式可得

$$\begin{cases} x = x_1 + y_1 \times \tan \varphi \times \cos(t \times \omega_{scan}) \\ z = z_1 + y_1 \times \tan \varphi \times \sin(t \times \omega_{scan}) \end{cases} \quad (4)$$

在一个扫描周期内认为 $\omega_{scan}$ 和 $\varphi$ 不变,所以上式可简化为

$$(x - x_1)^2 + (z - z_1)^2 = y_1^2 \tan^2 \varphi \quad (5)$$

由上式可以看出,末敏弹在扫描时的扫描轨迹是一个以 $(x_1, z_1)$ 为圆心,以 $|y_1 \times \tan \varphi|$ 为半径的圆。因子弹不断下落,即 $y_1$ 越来越小,圆的半径就越来越小,所以扫描轨迹为一簇内螺旋线。

### 2.2 捕获目标判定方法

令扫描步长为 $\Delta t$ ,在每一个步长内计算一次弹目连线单位矢量 $r_o$ 及探测器光轴单位矢量 $w_o$ 。

判定条件为 $r_o \cdot w_o - \cos \beta$ 。其中, $\beta$ 角为探测器的视场角的一半,当 $r_o \cdot w_o - \cos \beta \geq 0$ 时,认为扫描到目标。若扫描到目标,则探测器以一定的捕获概率 $P$ 捕获到目标。

## 3 扫描角自适应控制搜索方法

### 3.1 控制扫描角方法原理

控制 $\varphi$ 每进行完一个扫描周期变化一个合理的值 $\Delta\varphi$ ,使得相邻两个扫描周期的探测区域相切,即

$$H \times \tan(\varphi - \beta) = H_1 \times \tan[(\varphi + \Delta\varphi) + \beta] \quad (6)$$

式中: $H$ 为探测器高度(单位为m), $t_{ob}$ 为一个扫描周期的时间(单位为s), $n$ 为扫描周期。这样就可以避免对某一区域重复扫描,实现高效搜索,如图3所示。

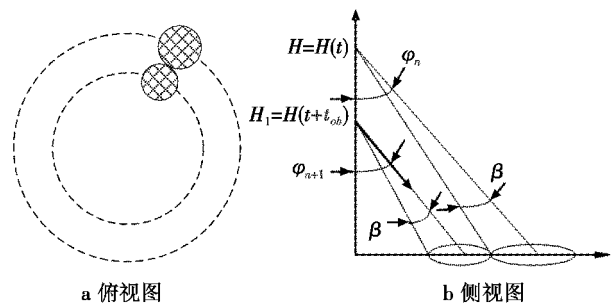


图3 扫描角控制方式下近似的扫描轨迹

Fig. 3 Approximated scanning trajectory with angle controlled

采用这种控制扫描角的方法,扫描角依次递减,探测器扫描过程中对所覆盖的区域则只进行一次扫描。如果目标处在探测器的探测区域内,但是没有捕获到目标,就会产生遗漏。针对扫描遗漏问题,本文对该扫描过程提出了改进方案——通过扫描角递增扫描方式完善扫描过程。即每进行完一个扫描周期, $\varphi$ 角增大一个值,使得相邻两个扫描周期的探测区域(探测器视场)相切。在不同的情况下合理地运用扫描角增大、减小的控制方法,就能实现对末敏弹覆盖区域的循环扫描。

引入扫描角控制参数 $I$ ,如果 $I = 1$ ,扫描角 $\varphi$ 以递减的方式进行变化;如果 $I = -1$ , $\varphi$ 以扫描角递增的方式进行变化。在每个扫描周期开始时刻,如果 $\varphi$ 大于某一门限值 $\alpha$ ,则令 $I = 1$ ;如果 $\varphi$ 小于 $\beta$ 时,令 $I = -1$ 。流程如图4所示。

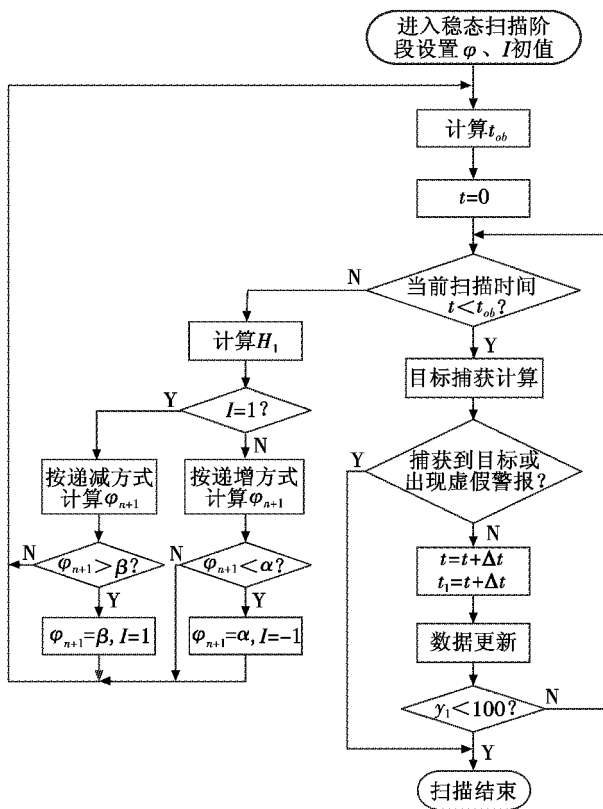


图4 扫描角控制方式的扫描过程流程图

Fig. 4 Flow chart of scanning process with angle controlled

### 3.2 扫描角计算方法

#### 3.2.1 扫描角递减

图5a为扫描角度递减时的侧视图。

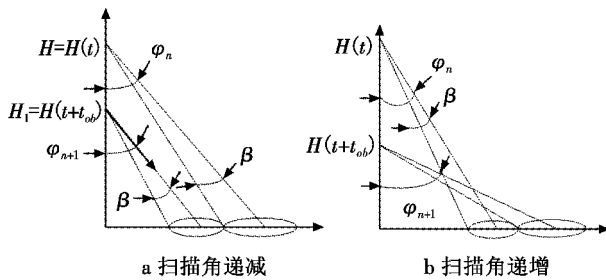


图5 扫描角控制方式扫描侧视图

Fig. 5 Side view of scanning with angle controlled

由图5及式(6)可得

$$t_{ob} = \frac{2\pi}{w_{scan}} \quad (7)$$

$$\varphi_{n+1} = \arctan\left(\frac{H \times \tan(\varphi_n - \beta)}{H_1}\right) - \beta \quad (8)$$

利用式(8)即可求出扫描角递减过程中每一个扫描周期的扫描角。

#### 3.2.2 扫描角递增

图5b为扫描角度递增时的侧视图。根据图5b可以得出扫描角度递增时的扫描角计算方法。

$$\varphi_{n+1} = \arctan\left(\frac{H \times \tan(\varphi_n + \beta)}{H_1}\right) + \beta \quad (9)$$

利用式(9)可求出扫描角递增过程中每一个扫描周期的扫描角。

### 3.3 工程中的实际应用

采用两个扫描周期圆相切,容易丢失边沿的目标,工程中应考虑有适当的扫描区域重叠,这样不易丢失目标。引入系数 $\delta$ ,作为决定重叠区域大小的参数。

$$\varphi_n^* = \begin{cases} (1 + I \times \delta) \varphi_n, & \varphi_n \neq \alpha, \beta \\ \varphi_n, & \varphi_n = \alpha \text{ 或 } \beta \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\varphi_n^*$ 表示修正后的 $\varphi_n$ 。式(10)给出了修正后 $\varphi_n$ 应取的值,即在相切的基础上附加一个角度值,使得扫描区域的边沿部分存在一定的重叠。实际应用中综合利用式(8)~(10)即可得到每个扫描周期的扫描角。

## 4 子母弹毁伤效能分析

由于子母弹主要用来打击敌方军事目标,其作战效能主要体现在完成作战任务的能力上,所以本文采用不同“完成任务的程度”下所需的子母弹数目来评估子母弹的毁伤效能。

“完成任务的程度”是指使用一定数量的子弹所摧毁的目标数占总目标数的比例,即

$$p(x) = \frac{\sum_{i=1}^x d_i}{N_{tar}} \quad (11)$$

式中: $p(x)$ 代表使用 $x$ 颗子弹或母弹所能达到的完成任务程度; $d_i$ 表示第 $i$ 颗子弹是否摧毁了某个现存目标, $d_i = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 颗子弹没有击毁目标} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 颗子弹击毁了一个目标} \end{cases}$ ;  $N_{tar}$ 代表每一次任务中总的目标数。图6给出了评估模型的算法结构流程图。

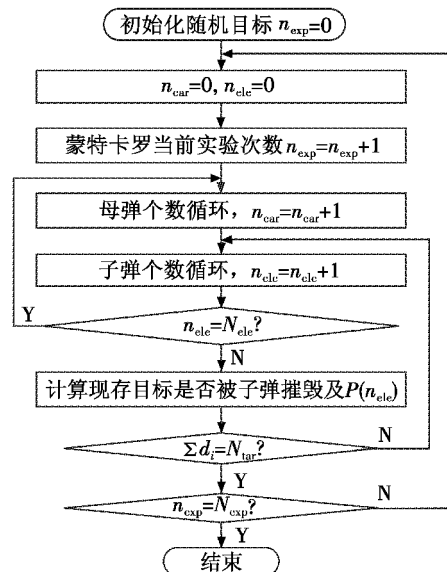


图6 评估模型算法结构

Fig. 6 Algorithm structure of evaluation

图中： $N_{exp}$ 代表蒙特卡罗实验次数； $N_{ele}$ 代表一个母弹中子弹的个数； $n_{exp}$ ， $n_{car}$ ， $n_{ele}$ 分别为当前蒙特卡罗实验次数序号、母弹序号、子弹序号。

### 5 仿真并计算

根据所建立的模型开发了制导子母弹仿真作战平台,在此平台上进行仿真试验。在仿真中根据不同的子母弹指标参数  $I$  仿真扫描图形。

#### 5.1 扫描轨迹仿真

两种不同扫描方式下的仿真如图7所示,图中矩形框为目标随机分布区域,虚线圆为扫描轨迹,小圆圈代表目标。

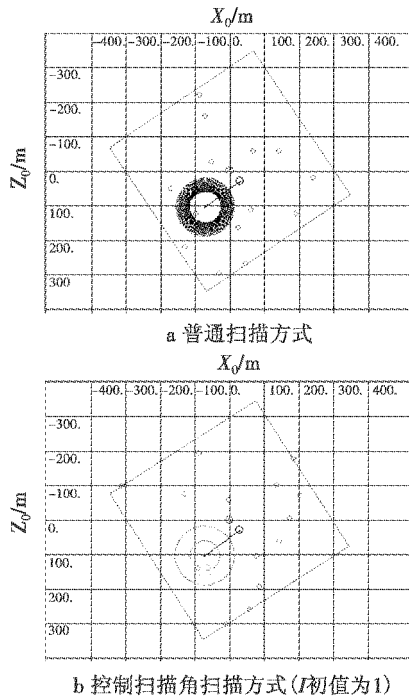


图7 稳态扫描阶段扫描轨迹

Fig. 7 Scanning trajectory of steady scanning stage

通过图7明显可以看出,普通扫描方法搜索效率比控制扫描角方式低很多,对位置相似的两个目标,普通扫描方法要扫描多次才能搜索到,控制扫描角方法只需两次即可扫描到。

#### 5.2 不同扫描方式下的毁伤效能对比

仿真条件如下。

蒙特卡罗实验任务次数为100;每个母弹中子弹的数目为10;一次实验中目标的数目为12;搜索段每个积分步长内虚假警报的概率为0.001;搜索段的初始高度为600 m;视场角的一半值 $\beta$ 为 $2^\circ$ ;初始扫描角为 $\varphi_1 = 8^\circ$ (取0.139 rad),扫描门限值 $\alpha$ 为 $8^\circ$ ,当搜索到离地面小于100 m时子弹自毁, $\delta$ 取1/10。

100次蒙特卡罗实验在一定扫描方式下,不同数目的子弹完成任务的程度统计结果如图8所示。

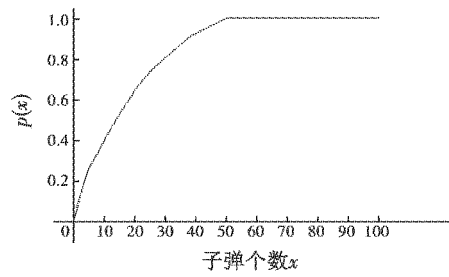


图8 100次实验仿真统计结果

Fig. 8 Result of one hundred experiments

表1列出了不同扫描方式下击毁所有目标所需要的子弹的数目以及扫描时间。

表1 蒙特卡罗方法统计结果

Table 1 Statistical result of Monte Carlo method

扫描方式	子弹数目	母弹数目	每个子弹的平均扫描时间/s
普通	52.14	6	9.556
角控制	46.90	5	1.301

仿真结果表明,扫描角控制的搜索方法比普通搜索方法在完成一次任务中能节省约6个子弹,平均扫描时间提高了8.255 s(积分步长为0.1 s),说明该方法能有效地提高子母弹的搜索效率及作战效能。

### 6 结束语

稳态扫描是末敏弹作战应用中很重要的一个方面,角控制扫描方法是在末敏弹稳态扫描过程中采用控制扫描角的方式实现扫描。本文基于建立的毁伤效能评估模型及仿真平台进行了多组仿真实验,仿真结果表明,角控制扫描方式下完成指定任务与普通扫描方式相比,可以节省子母弹的数目并减少平均扫描时间,可有效提高末敏子母弹的作战效能。该方法也为其他导弹、炸弹等作战武器搜索过程的改良提供了思路。

#### 参考文献

- [1] 夏明旗,姜玉海,肖艳文. 浅析末敏弹的研制方法[J]. 国防技术基础,2010(8):49-50.
- [2] 巨养锋,薛建国,张乐. 干扰末敏弹技术探讨[J]. 四川兵工学报,2012,33(2):35-37.
- [3] 顾建平. 末敏弹扫描运动数学力学模型及计算机仿真[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [4] 王爱中. 无伞末敏弹扫描特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [5] 李良华. 无伞末敏弹稳态扫描运动参数的测量技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.
- [6] 顾建平,韩子鹏. 末敏弹扫描运动的影响因素分析[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(3):136-138.

(下转第69页)

的总的像面温度变化为 0.56272 mK,而所有视场的冷反射弥散斑最小值引起的温度变化为 0.74010 mK,二者都远小于制冷型探测器的灵敏度 17 mK。因此,可以忽略光学系统的冷反射对系统产生的影响,从另一个角度也验证了采用逆光路追迹像点弥散分析冷反射的方法的准确性。

### 3 结论

对制冷型红外光学系统中的各个表面进行反向光线追迹,能够得到各个表面产生的冷反射弥散斑大小,同利用评价参数  $YNI$  与  $I/I_{bar}$  和经验公式计算分析得到的结果一致。采用逆光路追迹分析冷反射的方法能够直观、准确地实现制冷型红外光学系统对冷像的评估。

### 参 考 文 献

[1] LLOYD J M. Thermal imaging systems[M]. New York: Plenum Press, 1975:275-281.  
 [2] HOWARD J W, ABEL I R. Narcissus; Reflections on retroreflections in thermal imaging systems[J]. Appl Opt, 1982, 21:3393-3397.  
 [3] ARASA J, PIZARRO C, TOMAS N, et al. Contribution of ghost and narcissus effects in MTF calculation [J].

SPIE, 1999, 3737:118-124.  
 [4] 栾亚东. 红外扫描成像系统中冷反射的光学抑制[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s2):26-30.  
 [5] 杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(1):35-38.  
 [6] 刘洋, 安晓强. 制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, 32(2):274-280.  
 [7] 焦明印. 红外扫描成像系统中 Narcissus 等效温差的修正计算[J]. 光学学报, 1997, 17(1):126-127.  
 [8] HE F Y, CUI J C, FENG S L, et al. Narcissus analysis for cooled staring IR system [J]. Proc. SPIE, 2007, 6722: 67224N.  
 [9] 刘志祥, 马冬梅, 胡明鹏, 等. 凝视型红外成像系统中冷像的仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 702-705.  
 [10] 顿雄, 陶玉, 孟军合. 双视场红外扫描成像系统冷反射抑制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4):732-735.  
 [11] 刘欣, 潘枝峰. 红外光学系统冷反射分析和定量计算方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7):1684-1688.  
 [12] Code V reference manual [Z]. Version 9. 5, Optical Research Associates, 2004.  
 [13] WOLFE W L. Optical engineer's desk reference [M]. Optical Society of America, 2003.

(上接第 61 页)

[7] 赵新生, 邢立新, 孙超. 末敏弹稳态扫描段扫描间隔分析[J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(4):900-903.  
 [8] 宋磊, 黄长强, 王治军, 等. 红外导引头定向扫描控制研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(5):14-17.  
 [9] CARLSON B D, EVANS E D, WILSON S L. Search radar detection and track with the Hough transform part I: System concept[J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(1):102-108.

[10] WILSON S L, CARLSON B D, EVANS E D. Search radar detection and track with the Hough transform part II: Detection statistics[J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(1): 109-115.  
 [11] EVANS E D, WILSON S L, CARLSON B D. Search radar detection and track with the Hough transform part III: Detection performance with binary integration [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(1):116-125.

