

文章编号: 2095-4980(2016)01-0046-07

相对速度测量误差对防空导弹引战配合性能影响

路宇龙, 曹俊

(中国航天科工集团第二研究院 北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

摘 要: 弹目相对运动速度是引战设计利用的最重要的交会参数, 实际工程中使用的相对速度的测量通常都存在误差, 误差的大小直接影响引战配合性能。本文基于这一现实问题, 通过理论分析和仿真计算, 就相对速度测量误差对引战配合性能影响进行研究, 建立了引战配合的相对速度误差模型, 通过理论分析和数值计算, 得出了相关规律和减小其影响的措施, 对工程应用有一定借鉴意义。

关键词: 引战配合; 引战配合性能; 相对速度误差; 防空导弹

中图分类号: TJ760.1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0046

Effect of the relative velocity measuring error on the performance of air-defense missile fuze-warhead matching

LU Yulong, CAO Jun

(Beijing Institute of Electronic System Engineering, China Aerospace Science & Industry Corp., Beijing 100854, China)

Abstract: Relative velocity between missile and target is the most important encounter parameter. The measuring errors of relative velocity, which directly influence the performance of fuze warhead matching, always exist during practical engineering. On the basis of this question, the effect of the relative velocity measuring error on the performance of air-defense missile fuze warhead matching is studied by establishing a relative velocity error model of fuze warhead matching through theory analysis and simulation. Some regularities and measures are elicited to reduce the influence, which shows reference significance.

Key words: fuze warhead matching; performance of fuze warhead matching; relative velocity error; air-defense missile

引战配合设计, 如图1所示, 是防空导弹的一个重要领域, 其目的是使引信启动区与战斗部杀伤物质动态飞散区相匹配^[1]。防空导弹最常采用的模式是侧向窄波束天线引信和破片式战斗部, 引战配合的主要任务是调整引信启动区的分布规律, 使得战斗部破片在杀伤区内各种交会状态下均能最大限度地“覆盖”目标。

引信最佳延迟时间主要与目标类型及弹目交会参数相关, 延迟时间 T_{delay} 与弹目相对速度 v_r 、相对速度和弹轴夹角 Ω_r 、脱靶量 ρ 和脱靶方位 θ_r 相关^[2], 用公式表达为:

$$T_{\text{delay}} = f(v_r, \rho, \Omega_r, \theta_r) \quad (1)$$

式中, 弹目相对运动速度就是引战配合中最常用、最有效和最重要交会的参数。 v_r 可由地面雷达测量^[3], 再通过弹地通信传递给引信, 也可以由主动雷达导引头测量得到。但实际使用中, 由于各种各样的原因, 测得的相对速度总是存在或大或小的误差, 会直接影响引战配合效率。本文基于现今使用较多的波束定角引信加聚焦战斗部的引战系统, 对相对速度测量误差对引战配合性能的影响进行研究。

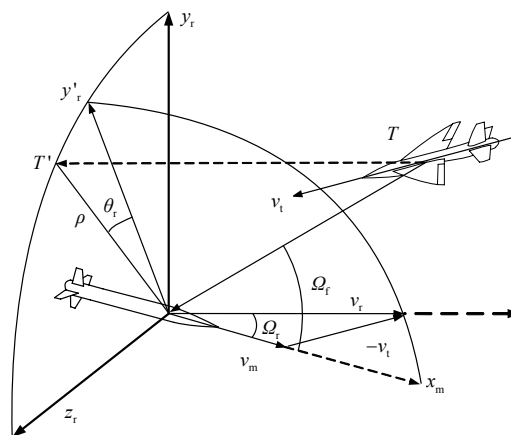


Fig.1 Design schematic diagram of fuze warhead matching
图1 引战配合设计示意图

1 引信最佳延迟时间

1.1 最佳延迟时间定义

当引信天线波束探测到目标并达到引信启动条件时，如果经过一定延迟时间给出战斗部起爆信号起爆战斗部，使得战斗部破片飞散中心命中目标中心或要害部位中心，则此延迟时间就是最佳延迟时间。当相对速度和弹轴夹角较小时，脱靶方位对延迟时间的影响可以忽略。

1.2 最佳延迟时间计算

原点与导弹固连的相对速度坐标系中，设交会方式为迎击，导弹速度 v_m ，目标速度 v_t ，弹目相对速度 $v_r = v_m - v_t$ 。脱靶量为 ρ ，战斗部破片初速 V_0 ，战斗部破片在弹体坐标系内的静态飞散中心方向角为 ϕ_s ，动态飞散中心方向角 ϕ_d ，引信天线主波瓣倾角 Ω_f ，战斗部中心距引信天线中心距离 Δx_f ，目标长度 L ，不妨设相对速度和弹轴夹角 $\Omega_r = 0$ ，最佳延迟时间计算示意图如图 2 所示。

图中 A 为引信天线波束探测到目标时刻， B 为战斗部破片动态飞散中心命中目标中心的时刻，最佳延迟时间 $\Delta\tau$ 即为目标从 A 运动到 B 的时间，这段时间目标相对导弹运动的距离为 Δx 。

$$\Delta x = \rho \cot \Omega_f - \rho \cot \phi_d + \Delta x_f + \frac{L}{2} \quad (2)$$

根据相对速度坐标系内破片动态飞散速度的合成关系可得：

$$\cot \phi_d = \frac{v_r + v_0 \cos \phi_s}{v_0 \sin \phi_s}, 0 < \phi_d < \pi \quad (3)$$

于是有：

$$\Delta\tau_{\text{ideal}} = \frac{\Delta x}{v_r} = \frac{\rho(\cot \Omega_f - \cot \phi_s) + \Delta x_f + \frac{L}{2}}{v_r} - \frac{\rho}{v_0 \sin \phi_s} \quad (4)$$

对于一个确定的引战系统，公式中的多个参数均为常数，为方便计算，令 $K = \rho(\cot \Omega_f - \cot \phi_s) + \Delta x_f + \frac{L}{2}$ ，

$C = \frac{\rho}{v_0 \sin \phi_s}$ ，则会有：

$$\Delta\tau_{\text{ideal}} = \frac{K}{v_r} - C \quad (5)$$

式中 $C = \frac{\rho}{v_0 \sin \phi_s} = \rho(\cot \phi_d - \cot \phi_s)$ ，物理意义是战斗部破片

沿脱靶平面飞散到脱靶量位置时所用的时间。于是，典型的

延迟时间随相对速度变化曲线见图 3，当速度接近无穷大时，破片动态飞散角超前于引信波束倾角，最佳延迟时间为 $-C$ ，表示最佳延迟时间超前引信启动 $-C$ 时间，该时间为负值，在实际中无法实现，应尽量避免这种情况出现。

2 允许的相对速度误差计算

在工程中，由于目标机动、通信时间间隔以及测量装置本身的误差，测得的弹目相对速度通常会存在误差，此时由引信计算得到的实际延迟时间就会与理想延迟时间存在偏差，如果要求破片命中目标，就要求延迟时间误差在一定范围内。

2.1 由相对速度误差引起的延迟时间偏差

图 4 是保证战斗部破片命中目标的引信实际延迟时间偏差示意图， E 为战斗部起爆破片刚好命中目标头部的时刻，此刻为延迟时间允许的最小值 $\Delta\tau_{\min}$ ， D 为战斗部起爆破片刚好命中目标尾部的时刻^[4]，此刻为允许的最大值 $\Delta\tau_{\max}$ 。

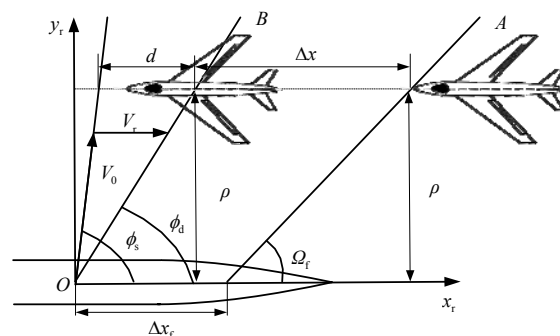


Fig.3 Calculating schematic diagram of ideal delay time
图 3 引信最佳延迟时间计算示意图

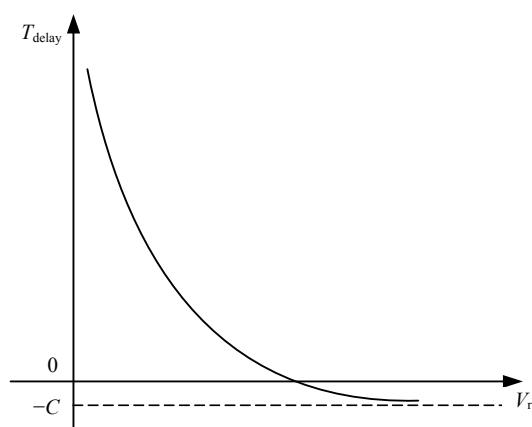


Fig.3 Curve of relative velocity variation vs. ideal delay time
图 3 最佳延迟时间随相对速度变化曲线

由图 4 可得:

$$\begin{cases} \Delta\tau_{\max} = \frac{\Delta x_{\max}}{v_r} = \Delta\tau_{\text{ideal}} + \frac{L}{2v_r} \\ \Delta\tau_{\min} = \frac{\Delta x_{\min}}{v_r} = \Delta\tau_{\text{ideal}} - \frac{L}{2v_r} \end{cases} \quad (6)$$

根据上式,得到不同相对速度下允许的实际延迟时间最大值和最小值,给定仿真条件进行计算: $\rho=40$ m, $\Omega_f=65^\circ$, $\cos\phi_s=90^\circ$, $v_r=[0.2, 2]$ km/s, $v_0=2$ km/s, $\Delta x_f=0.5$ m, $L=10$ m, 利用 MATLAB 软件进行仿真计算,结果见图 5,从计算结果可以看出,相对速度越大,延迟时间允许的误差范围越小。

当 $\Delta\tau_{\max}(v_{r_limit})=0$, 即 $v_{r_limit}=\frac{2K+L}{2C}$ 时,允许的延迟时间上限为零,由于引战系统无法实现负的延迟时间,只能按照零延时处理,所以当相对速度大于 v_{r_limit} 时, $\Delta\tau=0>\Delta\tau_{\max}(v_{r_limit})$,此时无法命中目标。

$$\begin{cases} v_r > \frac{K-L}{C}, \Delta\tau_{\min}=0 \\ v_r > \frac{K+L}{C}, \Delta\tau_{\max}=0 \end{cases} \quad (7)$$

一旦出现负延,就无法通过调整引战配合来保证命中目标,只能借助目标尺寸长度带来的延迟时间容忍能力来命中目标。因此,在设计时如果实际延迟时间与理想延迟时间存在误差,就要充分考虑相对速度的上限 $(2K+L)/2C$ 。应通过调整其他参数保证在导弹实际的相对速度在这个范围内,且尽量不要出现负延时。本文后续的讨论都是在不出现在负延时的假定下进行。

2.2 允许的相对速度误差范围计算

由于相对速度越大,理想延迟时间越小,无法从允许的延迟时间绝对误差值的大小衡量对引战配合的实际影响,而应该从允许的速度误差的大小进行分析。

$$\begin{cases} \Delta\tau_{\max} = \frac{\Delta x_{\max}}{v_r} = \Delta\tau_{\text{ideal}} + \frac{L}{2v_r} \\ \Delta\tau_{\min} = \frac{\Delta x_{\min}}{v_r} = \Delta\tau_{\text{ideal}} - \frac{L}{2v_r} \end{cases} \quad (8)$$

相对速度与延迟时间成负相关,所以延迟时间允许的最大值对应相对速度的最小值 $v_{\min}$, 延迟时间允许的最小值对应相对速度的最大值 $v_{\max}$, 即:

$$\begin{cases} \Delta\tau(v_{\max}) = \frac{K}{v_{\min}} - C = \Delta\tau_{\min} \\ \Delta\tau(v_{\min}) = \frac{K}{v_{\max}} - C = \Delta\tau_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

解得:

$$\begin{cases} v_{\max} = v_r \frac{2K}{2K-L} \\ v_{\min} = v_r \frac{2K}{2K+L} \end{cases} \quad (10)$$

得到允许的速度误差上下限为:

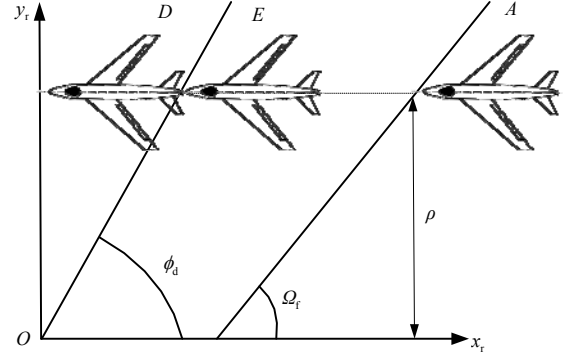


Fig.4 Schematic diagram of delay time deviation

图 4 延迟时间偏差意图

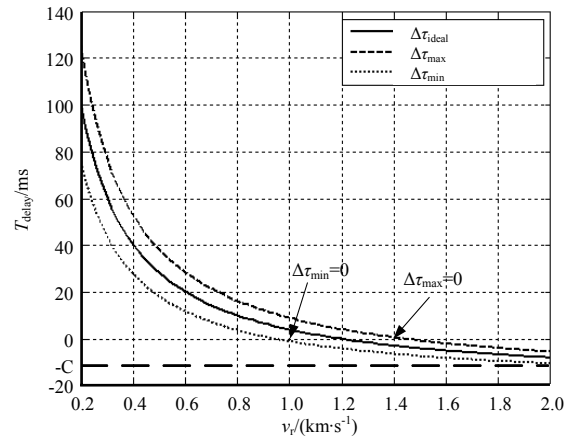


Fig.5 Allowable range of delay time

图 5 延迟时间允许范围

$$\begin{cases} \varepsilon_{v,\max} = v_{\max} - v_r = v_r \frac{L}{2K-L} \\ \varepsilon_{v,\min} = v_{\min} - v_r = v_r \frac{L}{2K+L} \end{cases} \quad (11)$$

按照 2.1 节的算例利用 MATLAB 软件进行仿真计算^[5], 得到结果如图 6、图 7 所示。

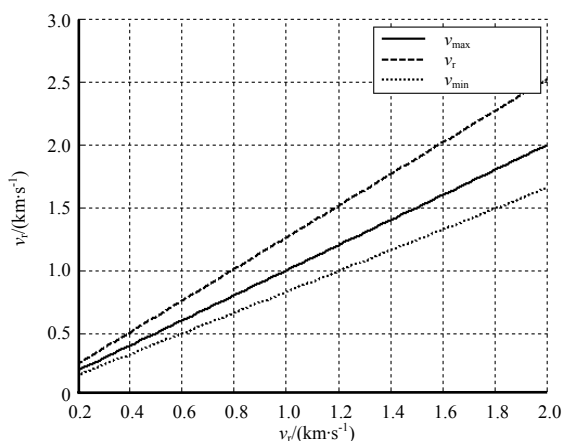


Fig.6 Allowable range of relative velocity

图 6 允许的相对速度范围

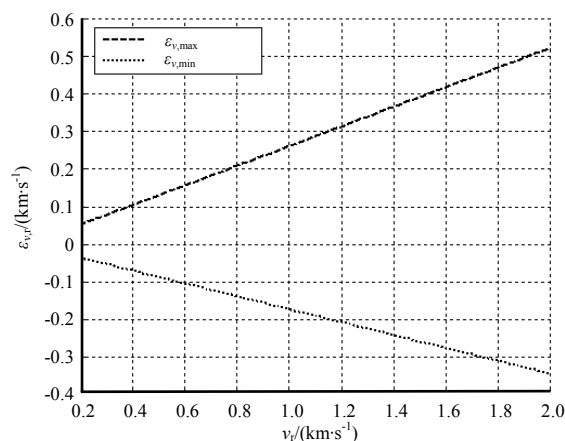


Fig.7 Allowable range of relative velocity error

图 7 允许的相对速度误差

可以看出与允许的延迟时间误差规律相反, 相对速度越大, 允许的速度误差越大, 特别当相对速度很低时, 几乎不允许相对速度误差偏下限, 这是有直接借鉴意义的。且允许的上下误差限不对称, 随着相对速度增大, 误差带向上倾斜。也就是相对速度越大, 对速度误差的上限容忍度与下限容忍度相差越大。

3 工程应用研究

3.1 无目标速度信息的引战配合

此结果还能应用于完全无法获得目标速度时的引战系统, 此时由于目标速度的方向无法得到, 且无法区分迎击和尾追, 只能按照目标速度为零来计算延迟时间, 则目标的真实速度就是相对速度误差。

$$\varepsilon = v - v_r = v_{\text{missile}} - (v_{\text{missile}} - v_{\text{target}}) = v_{\text{target}} \quad (12)$$

目标速度以标量进行讨论。尾追攻击时, 测得的相对速度比实际相对速度要大, 属于正误差, 最大正误差对应尾追时允许的最大目标速度; 迎面攻击时, 测得的相对速度比实际相对速度小, 最大负误差对应的是迎击时允许的最大目标速度。

$$\begin{cases} v_{\text{tail}} = v_{\text{target_max}} = (v_{\text{missile}} - v_{\text{tail}}) \frac{L}{2K-L} \\ v_{\text{head}} = v_{\text{target_min}} = (v_{\text{missile}} + v_{\text{head}}) \frac{L}{2K+L} \end{cases} \quad (13)$$

于是:

$$\begin{cases} v_{\text{tail}} = v_{\text{missile}} \frac{L}{2K} \\ v_{\text{head}} = v_{\text{missile}} \frac{L}{2K} \end{cases} \quad (14)$$

利用 2.1 节的算例进行仿真, 得到曲线如图 8 所示。可以看出, 导弹速度越大, 所能对付的目标速度越大, 迎击与尾追能力相同, 因此 2 条曲线重合。

3.2 相对速度误差造成的命中位置偏差

上述讨论已经得出相对速度越大容忍的速度测量误差越大, 在实际工程中还需要计算在某一相对速度下, 不同的相对速度误差带来的破片命中部位偏差。分别按不同的相对速度为计算速度误差带来的命中位置偏差, 结果如图 9 所示。

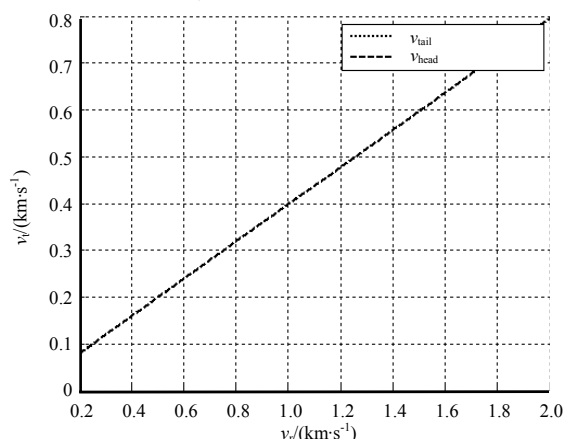


Fig.8 Allowable range of target velocity at different missile velocities

图 8 不同导弹速度能对付的目标速度范围

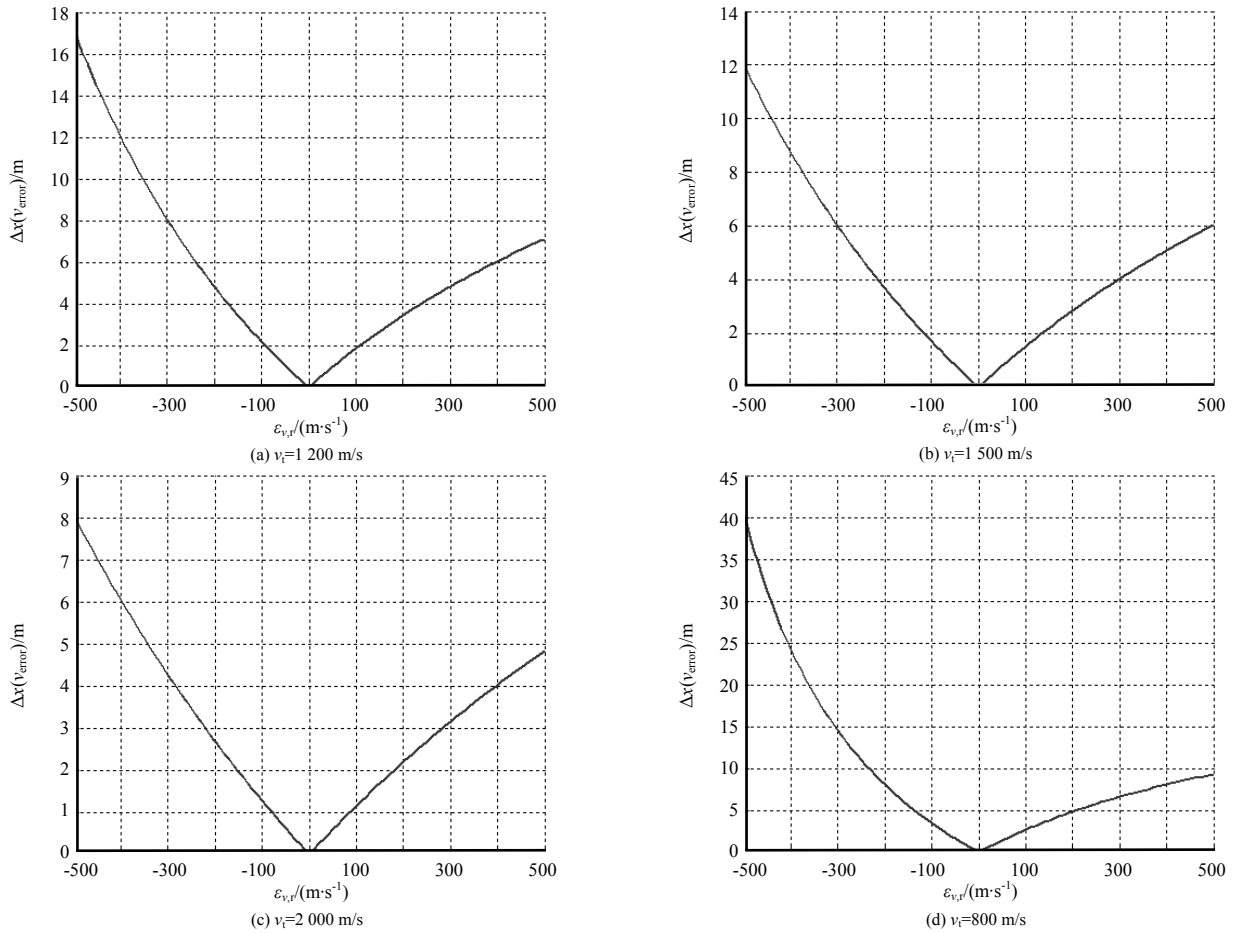


Fig.9 Curves of hit position error variation vs. relative velocity error under different relative velocities

图 9 不同相对速度下命中位置偏差随速度偏差变化曲线

$$\Delta x(v_{\text{error}}) = v_r |\Delta \tau(v) - \Delta \tau_{\text{ideal}}| = K \left| \frac{v_{\text{error}}}{v_{\text{real}} + v_{\text{error}}} \right| \quad (15)$$

从计算结果可以看出,当速度误差的绝对值相同时,负误差比正误差带来的影响要大,相对速度较大时,同样的速度误差带来的位置偏差较小,这与 2.2 节中得出的结论也相符。

4 其他交会参数对速度误差容忍能力的影响

以上分析了不同相对速度下允许的速度误差以及造成的命中位置偏差的分布规律,下面讨论除相对速度本身以及目标尺寸之外,影响速度误差容忍度的因素。

4.1 目标存在交会姿态时度误差

当目标对称轴方向与相对速度方向存在夹角时,会造成目标在相对速度方向上的投影尺寸减小^[6],同时由于引战配合无法自适应这种变化,导致战斗部破片瞄准的中心任为目标上最先触发引信的位置后 $L/2$ 的位置,这会使命中目标偏后,同时由于目标有效尺寸缩短,所允许的速度误差也减小,正负相对速度误差的变化规律并不相同。

存在交会角时的偏差示意图如图 10 所示,假设目标纵轴与相对速度方向的夹角为:

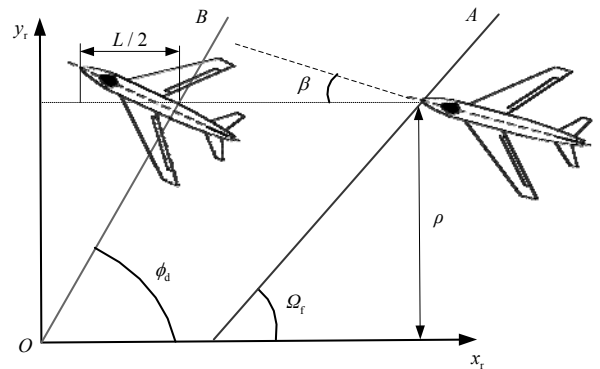


Fig.10 Deviation schematic diagram when rendezvous angle exists

图 10 存在交会角时的偏差示意图

$$\begin{cases} \Delta\tau_{\max} = \frac{\Delta x_{\max}}{v_r} = \Delta\tau_{\text{ideal}} + \frac{L}{v_r}(\cos\beta - \frac{1}{2}) \\ \Delta\tau_{\min} = \frac{\Delta x_{\min}}{v_r} = \Delta\tau_{\text{ideal}} - \frac{L}{2v_r} \end{cases} \quad (16)$$

略去中间计算步骤, 得:

$$\begin{cases} \varepsilon_{v,\max} = v_r \frac{L}{2K-L} \\ \varepsilon_{v,\min} = v_r \frac{L(2\cos\beta-1)}{2K+L(2\cos\beta-1)} \end{cases} \quad (17)$$

分别以交会角 $\beta=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 进行计算, 仿真结果如图 11 所示。当存在交会角时, 允许误差下限减小明显, 而上限影响不变, 这是因为引战配合延迟时间是以最先触发引信的时刻为参考点计算延时的, 所以并没有将有效目标尺寸的缩短考虑在内, 导致命中位置偏后, 进而导致后限的余量减小。速度偏大时得到的延迟时间减小, 命中位置前移, 所以不受影响。交会角越大, 允许的相对速度负误差越小, 直至减为零, 当 $L\cos\beta < L/2$ 即 $\beta > 60^\circ$ 时, 目标在相对速度方向投影尺寸小于 $L/2$, 此时理论计算的最佳延迟时间范围无法命中目标, 反而需要一定的相对速度正误差, 使得延迟时间减小才能命中目标。

综上, 在进行引战配合设计时, 如果弹目交会角较大无法忽略, 则需要在按平行交会设计得到的结果基础上进行调整, 适当减小延迟时间来提高引战配合效率。

4.2 脱靶量

从上面的分析可知, 速度误差允许上限和下限的规律完全相同, 以上限为例, 讨论脱靶量对速度误差容忍度的影响。

由公式 $\varepsilon_{v,\max} = v_r \frac{L}{2K-L}$ 知, 在目标尺寸 L 一定的情况下, $\varepsilon_{v,\max}$ 与 K 成反比, 而 $K = \rho(\cot\Omega_f - \cot\phi_s) + \Delta x_f + \frac{L}{2}$, 其中 ϕ_s, Ω_f 和 Δx_f 均为固定值, 于是 K 与脱靶量成正比, $\varepsilon_{v,\max}$ 与 ρ 成反比。其物理意义为脱靶量越大, 目标从引信启动点运动到战斗部破片飞散中心需要走过的距离 Δx 就越长, 需要的时间越长, 测量的速度误差随着积累时间的增加而增加, 造成命中位置的偏差也就越大^[7]。可以通过一组仿真数据来体现, 如图 12 所示, 自上而下分别为 $\rho=5\text{ m}, 15\text{ m}, 25\text{ m}, 35\text{ m}$ 时的曲线。所以在相对速度误差较大时, 可以通过减少脱靶量来增加对速度误差的容忍度, 进而提高引战配合效率。

4.3 规律和分析

通过上述分析和计算, 可以得到相对速度测量误差在引战配合中存在以下规律:

- 1) 可以接受的延迟时间误差随相对速度的增大而减小, 正负误差范围相等;
- 2) 可以接受的相对速度测量误差随相对速度的增大而减小, 允许的正误差大于负误差, 且两者绝对值的差随相对速度增大而增大;
- 3) 当无法获得任何目标速度信息时, 引战配合能够对付的目标速度随导弹速度值的增加而增加, 且对付迎击与尾追的能力相同;
- 4) 绝对值相等的速度误差, 负误差造成的命中位置偏差大于正误差, 相对速度越小, 造成的命中位置偏差越大;
- 5) 弹目存在交会角时, 可以接受的相对速度正误差减小, 负误差不受影响;
- 6) 脱靶量越小, 可以接受的相对速度误差越大。

基于以上结论, 在速度测量精确度无法提高时, 可以采取以下措施来提高引战配合的能力:

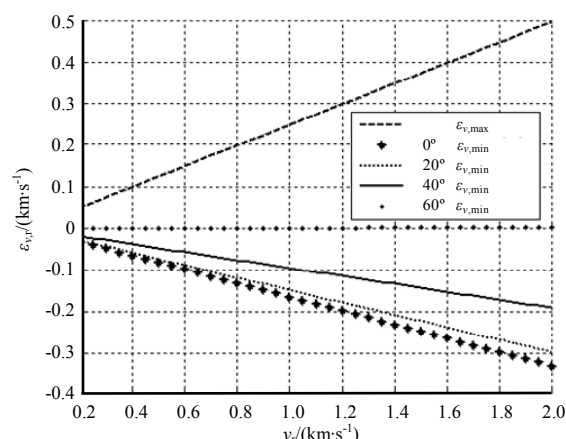


Fig.11 Allowable range of relative velocity error when rendezvous angle exists

图 11 存在交会角时速度误差允许范围

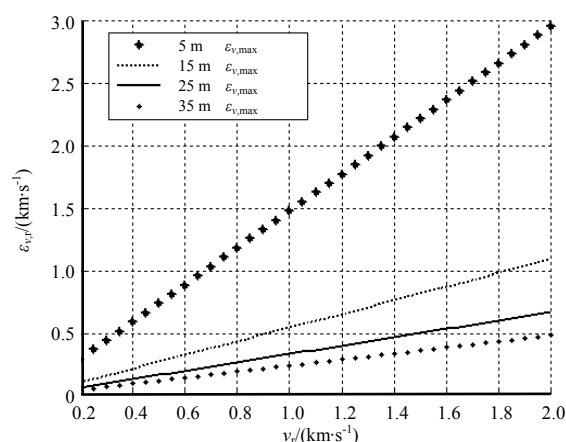


Fig.12 Delay time error under different miss distances

图 12 脱靶量对延迟时间误差的影响

- 1) 增加导弹速度;
- 2) 减小弹目交会角;
- 3) 减小脱靶量;
- 4) 提供脱靶方位信息;
- 5) 提供“迎击”还是“尾追”的信息;
- 6) 适当缩短延迟时间;
- 7) 在不出现负延时的情况下尽量减小目标触发引信到最佳起爆点运动的距离。

如果计算结果表明战斗部破片动态飞散角与目标易损性构件相交,则通常认为战斗部能够有效杀伤目标^[8]。通过本文上述的理论分析和仿真可知,只要测得的相对速度值满足 2.2 节中“允许的相对速度误差范围”,就可以认为引战配合能够满足武器系统的要求。

5 结论

综上所述,相对速度测量误差对防空导弹引战配合性能有较大影响,且其影响在不同条件下存在不同的规律,认识并把握这些规律对日常工作中进行引战配合设计有一定的指导意义。有利于设计出性能更加优秀的引战系统,提高引战配合效率;同时还便于对武器系统提出提高引战配合能力的改进要求,对整个武器系统的研制有促进作用。

参考文献:

- [1] 张志鸿,周申生. 防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计[M]. 北京:宇航出版社,1994. (ZHANG Zhihong, ZHOU Shensheng. Fuze-Warhead Matching Efficiency and Warhead Design of Air-defence Missile[M]. Beijing:China Astronautix Publishing House, 1994.)
- [2] 张斌. 引战配合动态仿真计算软件[J]. 现代防御技术, 1998,26(2):27-31. (ZHANG Bin. Fuze-warhead matching dynamic simulation software[J]. Modern Defence Technology, 1998,26(2):27-31.)
- [3] 简金蕾,任宏滨,汤伟华,等. 防空导弹引战配合的数字仿真[J]. 计算机仿真, 2000,17(2):40-42. (JIAN Jinlei, REN HongBin, TANG Weihua, et al. Air-defence missile fuze-warhead matching digital simulation[J]. Computer Simulation, 2000,17(2):40-42.)
- [4] 刘波,郑学合,杨德有. 防空导弹飞行试验的引战配合性能分析方法[J]. 现代防御技术, 2003,31(3):24-27. (LIU Bo, ZHENG Xuehe, YANG Deyou. A performance analysis method of air-defense missile's fuze-warhead matching [J]. Modern Defence Technology, 2003,31(3):24-27.)
- [5] 刘敏,魏玲. MATLAB 通讯仿真与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011. (LIU Min, WEI Ling. MATLAB Communication Simulation and Applications[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2011.)
- [6] 李延杰. 防空导弹武器系统射击效率[M]. 北京:北京航空学院出版社,1987. (LI Yanjie. Efficiency of Air-Defense Missile Weapon System Design[M]. Beijing:Beijing Aviation College Press, 1987.)
- [7] 江舸,成彬彬,张健,等. 基于 0.14 THz 成像雷达的 RCS 测量[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):19-23. (JIANG Ge, CHENG Binbin, ZHANG Jian, et al. 0.14 THz radar imaging based Radar Cross Section measurement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):19-23.)
- [8] 王成,刘杰,吴尚昀,等. 0.14 THz 10 Gbps 无线通信系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(3):265-269. (WANG Cheng, LIU Jie, WU Shangyun, et al. 0.14 THz 10 Gbps wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3):265-269.)

作者简介:



路宇龙(1987-),男,内蒙古自治区丰镇市人,硕士,工程师,主要研究方向为引战配合设计.email:luyulong12@163.com.

曹俊(1976-),男,湖北省随州市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为引战配合设计。