论文

新型射击延迟误差门与射击重合门双门控制策略 与其射击准确度分析

汪国胜^{①②*}, 陈宇^①, 王璐^①, 刘宾^①, 魏来生^①^① 中国北方车辆研究所, 北京 100072;^② 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

* E-mail: wgsheng321449@163.com

收稿日期: 2016-01-25; 接受日期: 2016-03-15

国防预研基金(“十二五”共用计划)(批准号: 51334010601)资助项目

摘要 首先通过射击门分析了坦克火炮射击命中失败的途径; 再结合实车试验数据, 分析并比较了坦克射击重合门约束条件下、射击重合门与速度门双门约束下的火炮射击准确度指标, 分析表明: 射击重合门与速度门双门约束的击发信号控制策略提高坦克火炮射击准确度与命中率能力有限; 针对此问题, 提出了一种新型射击重合门与射击延迟误差门的双门约束控制策略, 并结合试验数据对其射击准确度指标进行了分析. 分析研究表明: 带有射击延迟误差门与射击重合门双门约束的火炮尽管牺牲了 10% 左右的有效射击命中机会, 但相对原有射击重合门约束的火炮, 命中率提高了 13.76%; 相对带有速度门与射击重合门的双门约束火炮, 有效射击命中机会丧失率降低 1%, 命中率提高 9.22%, 显著提高了火炮射击准确度与命中率. 因此带有射击延迟误差门与射击重合门双门约束的火炮击发信号控制策略科学、简单、实用.

关键词 射击延迟误差门, 速度门, 有效射击机会, 命中率, 射击准确度, 坦克火炮

1 引言

采用射击重合门与稳像式坦克火控系统能显著提高坦克火炮的射击精度^[1,2], 但在行进间射击时, 如果地形比较复杂而且车速较高, 车体颠簸等因素将会导致火炮快速通过射击重合门的现象发生, 此时火炮进门速度将会严重影响射击精度^[3~5], 使射击精度发生大幅度的下降. 相关研究表明, 这种现象主要是由于车辆底盘角振动造成的, 它主要跟坦克等

装甲车辆底盘角振动大小与目标角大小相关^[6].

国内外相关研究人员对提高火控射击精度进行了大量的研究, 采取了多种有利的措施, 提高了火炮的射击精度^[3,7,8], 其中的一个典型的措施是在常规射击重合门的基础上增加一个速度门控制, 由射击重合门与速度门共同约束控制火炮击发信号的触发, 实现高命中率的射击^[3]. 本文先通过射击门分析了坦克火炮射击命中失败的二种情况, 在获得的坦克行进间射击过程中振动试验数据基础上, 随机抽取一

引用格式: 汪国胜, 陈宇, 王璐, 等. 新型射击延迟误差门与射击重合门双门控制策略与其射击准确度分析. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 475–480
Wang G S, Chen Y, Wang L, et al. A new control strategy using double gates composed of shooting delay deviation gate and coincidence firing gate and its firing accuracy (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 475–480, doi: 10.1360/N092016-00043

组数据, 分析比较了仅射击重合门控制下、射击重合门与速度门并联控制下的有效射击机会与命中率. 分析表明: 射击重合门与速度门双门约束的射击控制策略虽然从一定程度上提高了射击精度, 但命中率提高有限. 针对这个问题, 本文提出了射击重合门与延迟误差门双门约束的射击控制策略, 并对其控制下的火炮有效射击机会与命中率等评价指标进行了统计分析, 分析研究表明: 射击重合门与射击延迟误差门双门约束的射击控制策略可在略降低有效射击机会的基础上, 把火炮命中率提高 13.76%, 从较大程度上提高了命中率.

2 底盘扰动引起的射击精度下降的原因

射击重合门逻辑图如图 1 所示^[3]. 在此条件下, 火炮高速通过射击重合门的现象有二种情况: 如图 2(1)火线运动轨迹线所示, 击发时刻火线在射击门内, 但由于角加速度方向与角速度方向相同, 且角速度或角加速度较大, 这样在火炮发射延迟时间 Δt (包括击发时间、火药燃烧时间、弹丸膛内运动时间)内, 快速穿过射击重合门, 这样当火炮发射出膛时, 火炮实际上已在进门侧的另一侧门外; 另一种情况如图 2 中(2)火线轨迹线所示, 这是由于角加速度与角速度反向, 但角加速度较大, 导致火炮发射延迟时间 Δt 过后, 较大的负角加速度导致火线快速返回, 当火炮发射时, 火线实际上已退回射击门外, 导致命中目标失败.

图 2 所示的这二种情况均是由于控制方位向的炮塔电机与高低向的电动缸或液压缸工作能力或控制能力有限, 使得炮管不能及时随动于瞄准线, 这样当车辆底盘角振动超过炮控系统正常的调节能力范围时, 火炮过门时速度或角速度过大, 出现火炮快速通过射击重合门的“闪门”现象, 实际上这种现象的发生概率受限于炮控驱动系统的最大驱动力矩

图 1 射击重合门逻辑图

图 2 (网络版彩图) 火炮在方位向快速穿过射击门原理图

($N_{\mu\max}, N_{\eta\max}$) 与自动控制能力.

3 重合门控制下的射击机会与射击精度

射击重合门只考虑了水平向与高低向的重合门限值 ($[\theta_{\mu}], [\theta_{\eta}]$), 其射击条件约束数学模型可用下式表达^[9]

$$(|\theta_{\mu}(t) - \theta_{\mu 0}| \leq a) \& (|\theta_{\eta}(t) - \theta_{\eta 0}| \leq b). \quad (1)$$

上式中, a, b 表示方位向与高低向射击重合门限值; $\theta_{\mu}, \theta_{\eta}$ 表示火炮实时方位向与高低角; $\theta_{\mu 0}, \theta_{\eta 0}$ 表示火炮方位向与高低向装定目标角.

而实际上, 由于射击延迟时间 Δt 的存在, 其真正的命中条件约束可表达为

$$(|\theta_{\mu}(t + \Delta t) - \theta_{\mu 0}| \leq a) \& (|\theta_{\eta}(t + \Delta t) - \theta_{\eta 0}| \leq b). \quad (2)$$

如果仅考虑底盘角振动对火炮的干扰, 射击重合门约束条件下的命中条件应同时满足式(1)与式(2)条件, 即

$$(|\theta_{\mu}(t) - \theta_{\mu 0}| \leq a) \& (|\theta_{\eta}(t) - \theta_{\eta 0}| \leq b) \& (|\theta_{\mu}(t + \Delta t) - \theta_{\mu 0}| \leq a) \& (|\theta_{\eta}(t + \Delta t) - \theta_{\eta 0}| \leq b). \quad (3)$$

为验证射击重合门与带有速度门的射击门的双门控制策略的优越性, 在某典型靶道上, 对某型坦克行进间射击行驶过程中(稳像工况)的角振动数据进行了测试, 随机抽取一组数据进行了分析(试验前设置方位向与高低向装定目标角均为零). 火炮二个方向火炮振动角度、角速度与角加速度分别见图 3 与图 4.

已知试验坦克发射某型炮弹时的射击延迟时间约为 12 ms; 如果以 20 km/h 的车速对 2000 米外宽 $\times$ 高($B \times H$)为 4.0 m $\times$ 2.0 m 的固定目标实施行进间射击时, 其对应的方位向与高低向的门限值约为 $a =$

图 3 (网络版彩图)行进间射击过程中火炮(a)方位角角度; (b) 角速度; (c) 角加速度曲线

图 4 (网络版彩图)行进间射击过程中火炮(a)高低角角度; (b) 角速度; (c) 角加速度曲线

0.955 mil 和 $a=0.478$ mil.

为方便量化分析命中率等射击准确度评价指标, 现把图 3 与图 4 所示二个方向上的发射角时间历程(约 65s)按射击延迟时间($\Delta t=12$ ms)为周期划分为 N_0 个等时发射区间, 则 N_0 为分析时间段内可实施射击的理论最大射击次数; 满足式(1)的区间数量 N_1 为可实施射击的有效射击次数; 满足式(3)的区间数量 N_2 为能命中目标的理论最大射击命中目标次数, 它表

表 1 射击门约束下的射击准确度评价参数表

计算指标	N_0 (次)	N_1 (次)	N_2 (次)	N_3 (次)	P_0 (%)	P_2 (%)	P_3 (%)
数值	5360	2425	1938	1938	45.24254	100	79.91753

明在该时段内, 能达到的最大命中(目标)次数; 而实际上由于各种条件所限, 实际命中目标次数 N_3 达不到理论最大射击命中目标次数 N_2 , 即 $N_3 < N_2$. 现定义射击机会 P_1 、有效射击机会 P_2 、命中率 P_3 等三个反映战斗力的概率指标分别为

$$P_1 = N_1 / N_0, \tag{4}$$

$$P_2 = N_2 / N_1, \tag{5}$$

$$P_3 = N_3 / N_1. \tag{6}$$

显然, P_1 越大, 炮弹发射频次越高, 射击机会越多; P_2 表示命中机会发现概率, N_2 越接近 N_1 , P_2 越高, 表示火炮捕捉到的可命中目标的射击机会越多, 捕捉准确率越高, 战斗力发挥得也越好; P_3 越大, 表示命中率越高; 但是如果 $N_1 < N_2$, 即 $P_2 > 1$, 则表明火炮会丧失一些有效射击机会, 有效射击机会丧失率 P_4 可定义为

$$P_4 = \frac{N_2 - N_1}{N_2} \times 100\%. \tag{7}$$

现对图 3-a 与图 4-a 所示的一段随机的实时发射角时间历程进行统计分析, 其结果见表 1.

从表 1 中可见, 在此时间段内, 试验坦克理论最大射击次数为 5360, 但满足式(1)的有效射击次数 N_1 为 2425, 射击机会 P_1 为 $2425/5360=45.24\%$; 理论最大射击命中目标次数 N_2 为 1938, 这表明在 2425 次射击中, 将最多会有 1938 次机会命中目标. 如果忽略其它因素对射击确实度的影响, 1938 次射击可全部命中目标, 即 $N_3 = N_2 = 1938$, 则有效射击机会 P_2 将达到最大值 100%, 命中率 P_3 约为 $1938/2425=79.92\%$, 脱靶率将达到 20%以上, 这对战斗力的发挥是不利的, 需要加以改进.

4 速度门与射击重合门双门控制下有效射击机会与命中率

相关研究表明, 火炮进门速度也会引起射击误差. 为此有人提出了如图 5 所示的速度门与射击门双门控制火炮击发信号的思路^[3], 假设火炮进门时的方

图5 带有速度门的重合射击门逻辑图

位向角速度与高低向角速度为 $(\omega_\mu, \omega_\eta)$, 则火炮在射击延迟时间 Δt 内方位向与高低向角度变化引起的目标距离偏差为^[9]

$$\begin{cases} \Delta B_1 = D \int_0^{\Delta t} \omega_\mu dt \approx \omega_\mu D \Delta t, \\ \Delta H_1 = D \int_0^{\Delta t} \omega_\eta dt \approx \omega_\eta D \Delta t. \end{cases} \quad (8)$$

上式中, D 表示目标距离, $D = 2000\text{m}$.

$\Delta B_1, \Delta H_1$ 表示火炮角速度引起的方位向与高低向目标距离偏差.

除此之外, 火炮在射击过程中, 火炮角速度 $(\omega_\mu, \omega_\eta)$ 也会赋予弹丸一个横向初速, 这个横向初速度使弹丸在飞行过程中产生的目标距离偏差可近似表示为

$$\begin{cases} \Delta B_2 = \omega_\mu \times R_{\text{fw}} \times \frac{D}{V}, \\ \Delta H_2 = \omega_\eta \times R_{\text{gd}} \times \frac{D}{V}. \end{cases} \quad (9)$$

上式中, $\Delta B_2, \Delta H_2$ 表示弹丸横向初速度引起的方位向与高低向目标偏差; $R_{\text{fw}}, R_{\text{gd}}$ 表示火炮方位向

与高低向的火炮回转半径, $R_{\text{fw}} = 6.5\text{ m}$, $R_{\text{gd}} = 5.5\text{ m}$; V 表示弹丸出膛时的平均飞行速度, 已知其发射某型弹时 $V = 1600\text{ m/s}$ ($D = 2000\text{ m}$).

由式(8)与式(9)可知, 火炮角速度引起的目标距离偏差 $(\Delta B, \Delta H)$ 为两者的代数叠加:

$$\begin{cases} \Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 = \omega_\mu \times R_{\text{fw}} \times \frac{D}{V} + \omega_\mu D \Delta t, \\ \Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \omega_\eta \times R_{\text{gd}} \times \frac{D}{V} + \omega_\eta D \Delta t. \end{cases} \quad (10)$$

在稳像工况下, 如果火炮在一侧进门时自动击发底火, 并以击中目标另一侧边缘为条件, 则允许最大的角速度为

$$\omega_\mu = \frac{B}{\left(R_{\text{fw}} \times \frac{D}{V} + D \Delta t\right)}, \omega_\eta = \frac{H}{\left(R_{\text{gd}} \times \frac{D}{V} + D \Delta t\right)}. \quad (11)$$

代入上述相应数值, 得角速度门限值 $[\omega_\mu] = 14.27^\circ/\text{s}$, $[\omega_\eta] = 7.42^\circ/\text{s}$, 得对应的角速度门约束条件为

$$(|\omega_\mu| \leq [\omega_\mu]) \& (|\omega_\eta| \leq [\omega_\eta]). \quad (12)$$

考虑到速度门限值如果取值太小, 会导致进门频率降低, 增加系统反应时间, 降低作战效率; 如果取值太大, 又不能保证射击精度^[3]. 现联立式(1)与式(12), 分析得到射击门与不同速度门限值双门约束下的评价指标值, 具体见表2.

从表2中看到, 在1倍速度门与射击重合门双门控制下射击机会与命中率仍分别为45.24%与79.92%. 这说明速度门限值取得过大, 没有达到提高射击命中率的效果; 现把速度门减小到一半后^[3], 实际命中目标次数降低1.03%, 而命中率仅提高0.4%; 把速度门限值降低到原来的0.15倍后, 有效射击次数 N_1 降

表2 基于射击重合门与不同速度门限值约束下射击准确度评价参数表

速度门限值	$ \omega_\mu \leq 1.0[\omega_\mu]$	$ \omega_\mu \leq 0.75[\omega_\mu]$	$ \omega_\mu \leq 0.5[\omega_\mu]$	$ \omega_\mu \leq 0.3[\omega_\mu]$	$ \omega_\mu \leq 0.15[\omega_\mu]$
	$ \omega_\eta \leq 1.0[\omega_\eta]$	$ \omega_\eta \leq 0.75[\omega_\eta]$	$ \omega_\eta \leq 0.5[\omega_\eta]$	$ \omega_\eta \leq 0.3[\omega_\eta]$	$ \omega_\eta \leq 0.15[\omega_\eta]$
N_0 (次)	5360	5360	5360	5360	5360
N_1 (次)	2425	2424	2388	2192	1724
N_2 (次)	1938	1938	1938	1938	1938
N_3 (次)	1938	1937	1918	1824	1456
P_1 (%)	45.24253	45.22388	44.55224	40.89552	32.16418
P_2 (%)	100	99.95	98.97	94.12	—
P_3 (%)	79.91753	79.90924	80.31826	83.21168	84.45476
P_4 (%)	—	—	—	—	11.04

低到 1724, 低于理论最大射击命中目标次数 N_2 , 有效射击机会丧失率 P_4 为 11.04%; 实际命中目标次数降低到 1456, 命中率仅提高 4.54%. 由此可见, 文献 [3]提出的仿照智能射击重合门的原理设计智能速度门, 根据具体地形和作战任务选择合适的速度门进行射击的改进方法, 命中率提升效果不甚显著, 且在实际战斗中作战人员难以对地形、车速实时变化等情况准确把握, 操作难度较大.

5 带有射击延迟误差门与射击重合门双门控制方法及其射击机会与命中率

从上分析可见, 仅采取调整速度门大小对大幅度提高有效射击机会与命中率难度较大. 那么有没有合适的方法达到不损失有效射击机会, 同时又保证命中率呢? 其实这个问题实际上是一种怎样高效甄别有效射击机会的问题.

仔细分析式(12)不难看出, 式(12)仅考虑到了角速度对射击偏差的影响, 而没有考虑角加速度的影响. 其实从图 2 中(2)线所示的工况来看, 角加速度对射击偏差的影响也是较大的. 如图 3-c 与图 4-c 所示二个方向角加速度曲线来看, 火炮方位向角加速度峰值达到 $500^{\circ}/s^2$ 以上, 尤其是高低向角加速度峰值达到 $1000^{\circ}/s^2$ 以上, 均方根值达到 $365^{\circ}/s^2$, 其对发射角与射击准确度的影响是很大的. 为充分考虑车辆底盘及火炮角速度、角加速度对射击准确度的影响, 本文提出一种新型的基于预测射击延迟(发射角)误差的高效甄别有效射击机会的简单方法. 其方法就是利用预击发时的火炮角速度与角加速度简单地预测射击延迟时间 Δt 后的发射角, 如果 Δt 后的发射角仍在射击重合门内, 则允许击发, 其逻辑图如图 6 所示. 其击发信号对应的约束条件在此简称为射击延迟误差门, 其数学模型可用式(13)表示:

$$\begin{aligned} & \left(\left| \theta_{\mu}(t_0) + \omega_{\mu} \Delta t + \varepsilon_{\mu} \Delta t^2 / 2 - \theta_{\mu 0} \right| \leq a \right) \& \\ & \left(\left| \theta_{\eta}(t_0) + \omega_{\eta} \Delta t + \varepsilon_{\eta} \Delta t^2 / 2 - \theta_{\eta 0} \right| \leq b \right). \end{aligned} \tag{13}$$

联立式(1)与式(13)可得到带有射击延迟误差门与射击重合门双门控制约束数学模型为

图 6 带有延迟误差门的射击重合门逻辑图

$$\begin{aligned} & \left\{ \left(\left| \theta_{\mu}(t) - \theta_{\mu 0} \right| \leq a \right) \& \left(\left| \theta_{\eta}(t) - \theta_{\eta 0} \right| \leq b \right) \& \right. \\ & \left\{ \left(\left| \theta_{\mu}(t_0) + \omega_{\mu} \Delta t + \varepsilon_{\mu} \Delta t^2 / 2 - \theta_{\mu 0} \right| \leq a \right) \& \right. \\ & \left. \left(\left| \theta_{\eta}(t_0) + \omega_{\eta} \Delta t + \varepsilon_{\eta} \Delta t^2 / 2 - \theta_{\eta 0} \right| \leq b \right) \right\}. \end{aligned} \tag{14}$$

根据式(14), 重新对试验数据进行分析, 得到表 3 所示的射击延迟误差门与射击重合门双门控制下的射击评价参数表.

从表 3 中可见, 射击延迟误差门与射击重合门双门约束下, 有效射击次数降为 N_1 1739, 射击机会 P_1 为 32.44%; 与 1938 次理论最大有效射击命中目标次数 N_2 相比, 有效射击命中机会丧失率 P_4 为 10.27%, 但在 1739 次射击中, 将会有 1629 次机会命中目标, 命中率 P_3 提高到 93.67%, 与表 1 所示的射击重合门约束下 79.92%命中率水平相比, 提高 13.76%; 与表 2 所示的带有速度门与射击重合门的双门约束下 11.04%的有效射击命中机会丧失率与 84.45%最高命中率水平相比, 有效射击命中机会丧失率降低 1%, 但命中率要高出 9.22%. 从各项评价指标来看, 提升效果是显著的.

6 结论

综上所述, 射击延迟误差门与射击重合门双门控制策略由于同时考虑了角速度与角加速度在未来射击延迟时间内对发射角的影响, 其预测原理与 PID 控制方法类似, 采用该方法对射击机会进行预测, 其预测精度自然要比单个的射击重合门与双门(带有速度门的射击重合门)预测精度要高. 实车测试与分析表明, 采用该方法控制, 坦克火炮尽管牺牲了 10%左

表 3 射击延迟误差门与射击重合门双门约束下的射击精度评价参数表

计算指标	N_0 (次)	N_1 (次)	N_2 (次)	N_3 (次)	P_1 (%)	P_2 (%)	P_3 (%)	P_4 (%)
数值	5360	1739	1938	1629	32.44403	-	93.67452	10.27

右的有效射击命中机会, 但由相对原有射击重合门约束的火炮, 命中率提高了 13.76%; 相对带有速度门与射击重合门的双门约束控制策略, 有效射击命中机会丧失率降低 1%, 命中率提高了 9.22%, 显著

提高了火炮射击准确度与命中率. 因此带有射击延迟误差门与射击重合门双门约束的火炮击发信号控制策略简单、科学、可行, 值得进一步在试验中进行实炮射击验证.

参考文献

- 1 刘卓. 稳像式火控瞄准镜伺服系统设计与实现. 硕士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2013
- 2 郭治, 徐刚. 稳像式坦克火控系统射击反应时间的研究. 火力与指挥控制, 1988, 1: 14–18
- 3 王钦钊, 王伟, 李小龙, 等. 坦克火控系统重合射击重合门误差分析及速度门设计. 火炮发射与控制学报, 2009, 2: 73–76
- 4 郝玉生. 动态弹道补偿. 火力与指挥控制, 2003, 28: 92–94
- 5 杨凤岗. 稳像式坦克火控系统的几个总体技术问题. 火力与指挥控制, 2003, 28: 45–47
- 6 汪国胜, 药凌宇, 魏来生, 等. 目标角大小对坦克行进间射击精度影响机理研究. 南京理工大学学报, 2016, 40: 77–83
- 7 李魁武, 裴益轩, 霍勇谋. 自行高炮射击精度综合补偿技术研究. 兵工学报, 2015, 36: 214–219
- 8 王钦钊, 谷晓伟, 李小龙, 等. 基于高机动条件下的坦克火控系统. 兵工自动化, 2012, 31: 19–21
- 9 卢志刚, 陈晋良, 林学华. 稳像式坦克火控系统智能射击重合门数学模型研究. 电脑开发与应用, 2002, 15: 22–23

A new control strategy using double gates composed of shooting delay deviation gate and coincidence firing gate and its firing accuracy

WANG GuoSheng^{1,2}, CHEN Yu¹, WANG Lu¹, LIU Bin¹ & WEI LaiSheng¹

¹ China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China ;

² School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

The reason why tank gun fails to hit the target is analyzed through coincidence firing gate firstly. On the basis of real vehicle experiment data, firing accuracy evaluation parameters such as the effective shooting probability and hit rate are analyzed under the restraint of single coincidence firing gate as well as under the restraint of coincidence firing gate with velocity gate respectively. Analysis shows that double gates control strategy by adopting coincidence firing gate with velocity gate reduces the shooting probability, and improve the firing accuracy limitedly. Aiming at this problem, a new control strategy by using double gates such as shooting delay deviation gate and coincidence firing gate is proposed, and its firing accuracy evaluation parameters are analyzed in the same test data. The analysis and research show that, although new control strategy will reduce the effective shooting probability by near 10% compared with the first traditional control method with the single coincidence firing gate, it improves the shooting accuracy of tank gun by 13.76%; Compared with the double gates control strategy using coincidence firing gate and velocity gate, the effective shooting probability is almost up 1% as well as the hit rate is up 9.22%. It is verified that the new double gates control strategy, which adopts coincidence firing gate and the shooting delay deviation gate, is scientific, simple and practical.

shooting delay deviation gate, velocity gate, effective shooting probability, hit rate, firing accuracy, tank gun

doi: 10.1360/N092016-00043