

文章编号: 1005-0523(2007)01-0015-04

随机振动环境中射击的命中率问题

包忠有, 余学文

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 行进中的坦克、装甲车或航行中的舰、艇向目标射击时由于受路面或海浪的环境激励发生随机振动, 导致炮弹或枪弹的出口速度发生随机变化, 影响射击的命中率. 本文假定: 运动物体采用线性系统模型; 垂直振动的速度远小于弹体的出口速度; 文中讨论了射击偏差及若干提高射击命中率的分析方法.

关键词: 随机振动; 射击; 命中率

中图分类号: O3 **文献标识码:** A

1 道路谱引起战车射击命中的偏差

分析坦克、装甲车在越野行驶时所产生的随机振动, 路面对车体的激励是随机的, 使得车体发生垂直位移 $y(t)$ 、垂直速度 $\dot{y}(t)$ 、纵向角摆 φ 和横向角摆 Ψ 四个振动量都是随机的. 安装在车体上的火炮或机枪也处于随机振动的环境中. 战车在行驶中的射击, 影响命中率的因素较多, 但其中垂直振动速度 $\dot{y}(t)$ 的影响是主要的, 即不考虑车辆的俯仰时. 现假定:

1) 车辆的竖直振动与俯仰彼此独立, 仅考虑竖直振动命中目标的影响.

2) 战车向目标射击时沿路面方向的速度是常量, 与弹丸速度相比是小量; 射击时枪弹或炮弹相对膛体的速度 \vec{V}_0 也是常量. 那么, 由于垂直振动速度 $\dot{y}(t)$, 将随机地改变弹丸的出口速度 \vec{V}_a , 致使弹丸偏离原先瞄准的目标, 见图 1. 又由于 $\dot{y}(t)$ 的幅值相对于 \vec{V}_0 值是十分小的, 这里认为 $\dot{y}(t)$ 仅仅随机地改变了 \vec{V}_a 的方向, 而没有改变 \vec{V}_a 的大小, 即有 $\vec{V} = \vec{V}_0$. 由于 \vec{V}_a 的方向改变, 产生一个微小角度变化 $d\theta$ 而产生射击偏差, 与有如下关系:

$$\Delta y = C_1 \dot{y} \quad (1)$$

式中 $C_1 = \frac{l}{V_0 \cos^3 \theta_0} \left(\cos \theta_0 - \frac{gl}{V_0^2} \sin \theta_0 \right)$
 θ_0 —瞄准角(常量); A —瞄准的目标; A' —实际弹着点;
 l —到目标的水平距离(常量)

3) 车体的弹簧刚度与阻尼均认为是线性的, 先把车体简化为轮式的单自由度线性振动系统, 见图 2.

4) 地表不平度假定是平稳各态历经的, 可以用自功率谱密度函数或 $W(x)$ 来描述地表对战车的输入.

于是不计俯仰时战车的竖直振动的微分方程式为:

$$m \ddot{y} + r(\dot{y} - \dot{x}) + k(y - x) = 0 \quad (2)$$

或

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_0 \dot{y} + \omega_0^2 y = \omega_0^2 f(t) \quad (3)$$

式中 m 、 r 、 k 分别为战车的悬挂质量、粘性阻尼系数和弹簧系数;

$$f(t) = \frac{2\xi}{\omega_0} \dot{x} + x; \quad \xi = r/2 \sqrt{km}; \quad \omega_0 = \sqrt{k/m}.$$

系统的频率响应函数为:

$$H_{xy}(\omega) = \frac{\omega_0^2 + 2i\xi\omega_0 \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2i\xi\omega_0 \omega} \quad (4)$$

收稿日期: 2006-10-26

$$H_{xy}(\omega) = \frac{i\omega_0^2 \omega - 2\xi\omega_0 \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2i\xi\omega_0 \omega} \quad (5)$$

下面分别讨论两种车辆的响应.

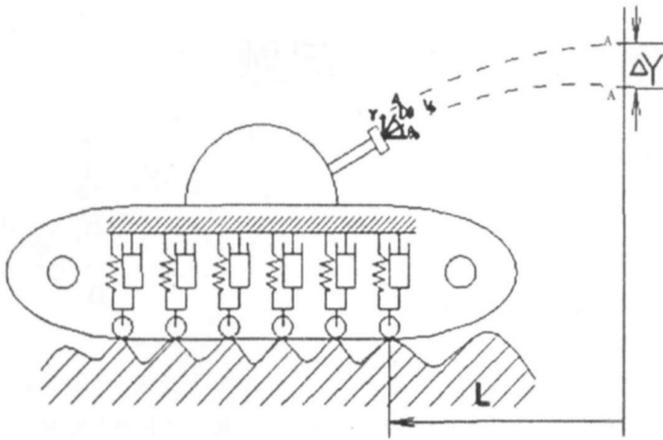


图1 战车射击示意图

1.1 轮式车辆振动的位移及速度响应

就轮式装甲车而言,在行进中受路面不平度的激励,路面谱^[1]为:

$$S_{xx}(\omega) = \frac{a}{a^2 + \omega^2} \quad (6)$$

应用输入输出的随机振动理论公式,位移和速度的响应谱分别为:

$$S_{yy} = a \cdot \left| \frac{\omega_0^2 + 2i\xi\omega_0 \omega}{a\omega_0^2 + i\omega(2\xi a\omega_0 + \omega_0^2) - \omega^2(a + 2\xi\omega_0) - i\omega^3} \right| \quad (7)$$

$$S_{\dot{y}\dot{y}} = a \cdot \left| \frac{i\omega_0^2 - 2i\xi\omega_0 \omega^2}{a\omega_0^2 + i\omega(2\xi a\omega_0 + \omega_0^2) - \omega^2(a + 2\xi\omega_0) - i\omega^3} \right| \quad (8)$$

响应的均值为:

$$E[y] = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{yy}(\omega) d\omega} = 0 \quad (9)$$

$$E[\dot{y}] = H_{xy}(0) \cdot E[x] = 0 \quad (10)$$

响应的均方值为:

$$E[\dot{y}^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\dot{y}\dot{y}}(\omega) d\omega$$

$$E[y^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{yy}(\omega) d\omega$$

以上两式可查 James^[2]公式,得到:

$$E[y^2] = \frac{\pi a}{2\xi\omega_0 a} \left\{ \frac{a + 2\xi\omega_0 a + 4\xi\omega_0^2 a}{a^2 + 2\xi\omega_0 a + \omega_0^2} \right\} \quad (11)$$

$$E[\dot{y}^2] = \frac{\pi a \omega_0^2}{2\xi} \left\{ \frac{\omega_0 + 8\xi^3 a + 4\xi^2 \omega_0}{a^2 + 2\omega_0 a + \omega_0^2} \right\} \quad (12)$$

响应的标准离差分别为:

$$\sigma_y = \sqrt{E[y^2]} \quad \sigma_{\dot{y}} = \sqrt{E[\dot{y}^2]}$$

在平稳过程中 y 与 \dot{y} 不相关的,则知:

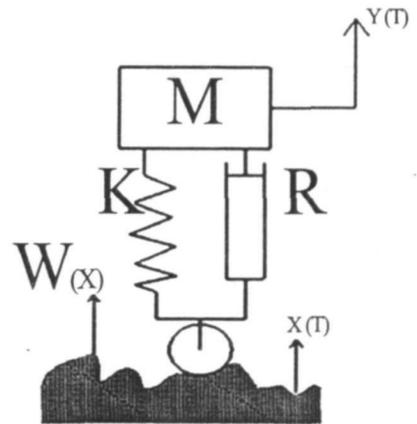


图2 车体轮式单自由度线性振动示意图

$$p(y, \dot{y}) = p(y) \cdot p(\dot{y}) \quad (13)$$

有关文献^[3]指出,车体振动的响应符合正态分布,故有:

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp(-y^2/2\sigma_y^2) \quad (14)$$

$$p(\dot{y}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\dot{y}}} \exp(-\dot{y}^2/2\sigma_{\dot{y}}^2) \quad (15)$$

1.2 履带车辆的速度响应

在行进中的坦克其路面谱参考美国阿伯汀试验场的激励谱^[1],见图3.

由于均方值的被积函数为非可积型,采用列表法^[2],当 $\xi=0.1$, $\omega_0 = \sqrt{g/\delta} = 18.1 \text{ 1/s}$, δ 为弹簧的压缩量.在 $\delta=3 \text{ cm}$ 时,得到响应的均方值.

$$E[\dot{y}^2] = 7481e_0 + 56612e_1 \quad (16)$$

在均值为零的情况下,响应的标准离差为:

$$\sigma_{\dot{y}} = \sqrt{E[\dot{y}^2]} \quad (17)$$

响应的概率密度函数也有如(15)、(16)、(17)式的形式.

根据以上分析求出战车射击偏差的概率分布为:

$$P(\Delta y) = 1 - \exp\left[-\frac{(\Delta y)^2}{2C_1^2 \sigma_y^2}\right] \quad (18)$$

$$P(\Delta y) = \frac{|\Delta y|}{C_1^2 \sigma_y} \cdot \exp\left[-\frac{(\Delta y)^2}{2C_1^2 \sigma_y^2}\right] \quad (19)$$

和的关系可以用图4表示.

$$(\Delta y_0) C_1 \sigma_y \quad (20)$$

$$\text{均方值为: } E[(\Delta y)^2] = C_1^2 \sigma_y^2 \quad (21)$$

$$\text{均值为: } m_{\Delta y} = E[(\Delta y)] = 0 \quad (22)$$

$$\text{标准离差为: } \sigma_{\Delta y} = \sqrt{E[(\Delta y)^2]} = C_1 \sigma_y \quad (23)$$

$$\text{射击的最大偏差为: } (\Delta y)_{\max} = 3C_1 \sigma_y = 3(\Delta y_0) \quad (24)$$

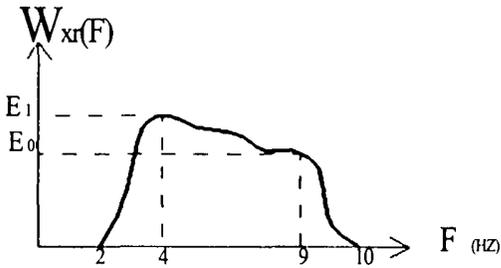


图 3 行进中的坦克路面激励谱图

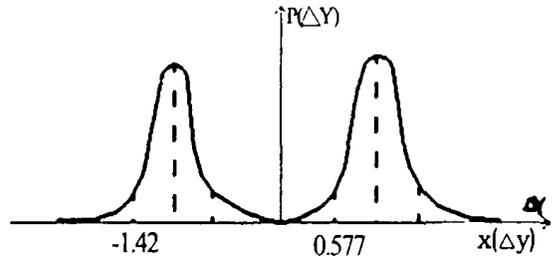


图 4 $P(\Delta y) - \Delta y$ 曲线

从图 4 可以看出:

①小的 Δy 值和大的 Δy 值概率不大,即在随机振动环境中射击,就一定会出现偏差,此量命中目标的概率很小,中等偏差的概率大.

② Δy 落在 (Δy_0) 附近的概率为相对最大.

③落在 $0.577(\Delta y_0) \sim 1.42(\Delta y_0)$ 区间的概率为 96%.

2 海浪谱引起舰、艇射击的偏差

与战车分析采用相同的力学模型,进行相似的计算,舰、艇受海流的激励后,也会引起射击命中目标的偏差,见图 5

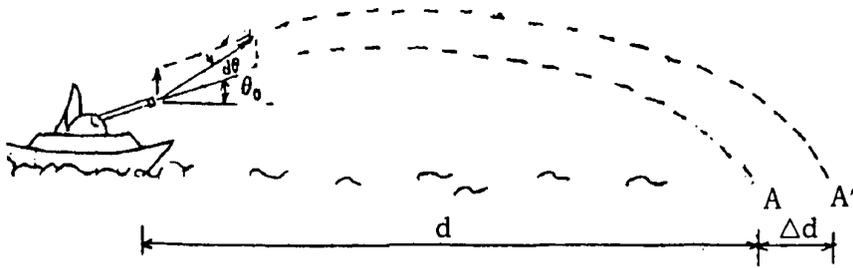


图 5 舰艇射击命中偏差图

$$\Delta d = C_2 \dot{y} \quad (25)$$

$$E[\dot{y}^2] = 2.137e \quad (30 \text{ 海里/小时}) \quad (27)$$

式中

海浪谱^[4]如图 6 所示,图中 e 为海浪的单位能量.

也因为求均方值的积分式中被积函数不可积,则采用列表法计算.在 $\xi = 0.1, \omega_0 = \sqrt{g/\delta} = 18.1 \text{ 1/s}$, ($h = 3 \text{ m}$, 为吃水深度).

不同的速度前进时响应的均方值为:

$\sigma_y, p(\dot{y}), p(y, \dot{y})$ 形式同(14)、(15)、(17)式.

则舰、艇行进中射击偏差的概率分布是:

$$P(\Delta D) = 1 - \exp\left[-\frac{(\Delta D)^2 g^2}{8V_0^2 \cos^2 2\theta_0 \sigma_y^2}\right] = 1 - \exp\left[-\frac{(\Delta D)^2}{C_2^2 \sigma_y^2}\right] \quad (28)$$

$$p(\Delta D) = \frac{|\Delta D|}{C_2^2 \sigma_y^2} \exp\left[-\frac{(\Delta D)^2}{C_2^2 \sigma_y^2}\right] \quad (29)$$

$P(\Delta D)$ 和 ΔD 的关系与图 4 相同.

$$(\Delta D) = c_2 \cdot \sigma_y \quad (30)$$

$$\text{均方值为: } E[(\Delta D)^2] = C_2^2 \cdot \sigma_y^2 \quad (31)$$

$$\text{均值为: } m_{\Delta D} = E[(\Delta D)] = 0 \quad (32)$$

$$\text{标准离差为: } \sigma_{\Delta D} = \sqrt{E[(\Delta D)^2]} \quad (33)$$

$$\text{则炮击时最大的偏差为: } (\Delta D)_{\max} = 3C_2 \sigma_y = 3(\Delta D)_0 \quad (34)$$

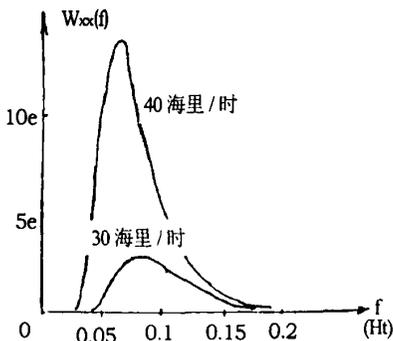


图 6 海浪谱图

$$E[\dot{y}^2] = 11.011e \quad (40 \text{ 海里/小时}) \quad (26)$$

3 提高命中率的分析方法

不论是战车受路面谱激励或者是舰艇受海浪谱

激励,它们影响射击命中率的形式大致上是相同的,因此提高射击命中率的一个共同方法是合理地选择系统本身的各种参数,如质量 m 、阻尼 r 及刚度 k ,使系统具有良好的隔振、减振和抗冲击能力;或者在炮座下安装合适的减振器,以降低值.从(22)、(26)、(32)、(35)式可以发现,降低了 σ_y 值,就能使 (Δy_0) 、 $(\Delta y)_{\max}$ 、 (ΔD_0) 、 $(\Delta d_0)_{\max}$ 的值减少,从而提高了射击的命中率.

提高射击命中率的第二种方法,就是合理选择瞄准角度 θ_0 ,使 (Δy_0) 、 $(\Delta y)_{\max}$ 、 (ΔD_0) 、 $(\Delta d_0)_{\max}$ 具有极小值.

$$\text{对战车而言, } \theta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \sqrt{1 - 3 \frac{gl}{V_0^2}}}{3} \right] \quad (35)$$

对舰艇而言,当 θ_0 十分接近而不是等于 $\pi/4$ 时,对提高命中率具有很大的优越性,此时不但能打得远,而且也能打得准.

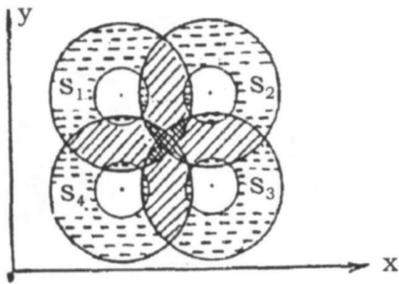


图7 多管炮射击时弹着点的平面散布

第三种方法是采用多管炮筒和发射筒,由于前面分析的枪炮,都是单管发射的,其射击时弹着点的平面散布如图7所示的 S_1 .为了提高射击命中率,可采用多管炮筒和发射筒.因此,每管炮在随机垢励环境中的弹着点,分布在图7中的 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 内,虚线内就可能同时被数炮命中,从而使命中率大为提高.

图7中短线表示有可能被一个炮弹击中的区间;

斜线表示有可能被一、二个炮弹击中的区间;

网状线表示有可能被一、二、三、四个炮弹击中的区间.

参考文献:

- [1] 庄表中, 陈乃立. 随机振动的理论及实例[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [2] 庄表中, 王行新. 随机振动概论[M]. 北京: 地震出版社, 1982.
- [3] T. Dablberg, Parametric Optimization of a 1-DoF Vehicle Travelling On a Randomly Profied Road, J. Sound and Vibration 55, 245-253, 1977.
- [4] R. D. 白莱文斯著, 吴恕三, 王觉, 等译. 流体诱发振动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

The Problem of Shooting Percentage of Hits Under Environments of Random Vibration

BAO Zhong-you, YU Xue-wen

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Owing to the excitation of circumstances of road surface or sea wave, when shooting the target, the tank and armoured car marching forward or the naval ships and boats will be vibrated randomly. And so the random changes for the speed of shell or bullet in gun muzzle will be engendered that the percentage of hits is affected.

Under the hypohese that the model of system for a body in motion is linear and the speed of vertical vibration is very small, the shooting deviation and a few analysis methods for improving shooting percentage of hits are discussed in this paper.

Key words: random; vibration; hits; shooting; percentage