

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.06.004

实时仿真系统中坦克射击命中判断仿真

杨建兵¹, 杜涛², 张士臣³

(1. 蚌埠坦克学院 学员二大队, 安徽 蚌埠 233050; 2. 蚌埠坦克学院 装甲兵装备运用系, 安徽 蚌埠 233050;
3. 蚌埠坦克学院 训练部, 安徽 蚌埠 233050)

摘要: 通过目标坐标变换, 依据目标几何模型和空间姿态, 在投影平面上采用统计抽样方法来确定弹着点。该方法可以真实模拟射弹散布规律, 能满足实时仿真的要求, 而且可以推广到坦克等类似系统上使用。

关键词: 实时仿真; 系统; 坦克射击; 命中判断

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Tank Firing Hit Estimate Simulation in Time Simulation System

YANG Jian-bing¹, DU Tao², ZHANG Shi-chen³

(1. No. 2 Student Group, Bengbu Tank Institute, Bengbu 233050, China;
2. Dept. of Armored force Equipment Apply, Bengbu Tank Institute, Bengbu 233050, China;
3. Train Department, Bengbu Tank Institute, Bengbu 233050, China)

Abstract: Adopt a method of statistical sample to confirm hitting point on projection plane according to target geometry model and space position through target coordinate switch. The method can simulate of fire dispersion rule, meets real time simulation's requirements, and can be extended to tank similar system.

Keywords: Time simulation; System; Tank fire; Hit target judgment

0 引言

通常有 2 种坦克射击仿真中的命中判断方案。第一种是采取实时解弹道的方法, 求得弹道与物体的交点, 即弹着点。这种方法在数字仿真中即为解方程的过程, 在实体仿真中即为碰撞检测。第二种是根据火控系统精度, 采取随机模拟的方法, 确定弹着点。由于目前弹道模型精度难以满足要求, 且难以表现射弹散布的规律, 所以第一种方案的可操作性不强, 而且, 在目前的坦克火控系统中, 也未采用第一种方案进行弹道解算工作。故将采用随机模拟的方法确定弹着点, 采用投影平面统计抽样方法, 根据几何模型和空间姿态计算命中部位, 从而完成坦克射击命中判断的建模。

1 目标坐标变换

在坦克射击中, 由于目标所处的状态不同, 如不同的运动方向和倾斜角度, 会改变目标受弹面的形状和大小, 从而对命中乃至毁伤效果产生影响, 所以需要通过几个坐标系将目标数据进行变换, 最终将目标投影到视平面坐标系中, 在视平面坐标系中判断命中情况。

1.1 点的旋转变换

在三维空间中, 目标的任何方位上的变化均可分解为围绕其 3 个坐标轴的旋转。点在三维空间中的旋转变换与在平面上绕其原点的旋转基本相同。

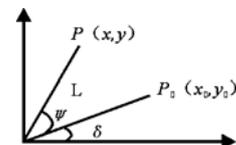


图 1 一点绕坐标原点的旋转

如图 1, 对于距原点距离为 L 的点 $P_0(x_0, y_0)$ 绕原点逆时针旋转一个角度 ψ 后的新点 $P(x, y)$, 有:

$$x_0 = L \cos \delta \tag{1}$$

$$y_0 = L \sin \delta \tag{2}$$

$$x = L \cos(\delta + \psi) \tag{3}$$

$$y = L \sin(\delta + \psi) \tag{4}$$

由于

$$\sin(\delta + \psi) = \cos \delta \sin \psi + \sin \delta \cos \psi \tag{5}$$

$$\cos(\delta + \psi) = \cos \delta \cos \psi - \sin \delta \sin \psi \tag{6}$$

因此有:

$$x = x_0 \cos \psi - y_0 \sin \psi \tag{7}$$

$$y = x_0 \sin \psi + y_0 \cos \psi \tag{8}$$

用矩阵表示为:

$$(x, y) = (x_0, y_0) \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \tag{9}$$

收稿日期: 2010-01-30; 修回日期: 2010-03-17

作者简介: 杨建兵 (1977-), 男, 内蒙古人, 讲师, 硕士, 从事装甲兵火力运用与指挥研究。

三维坐标系中的坐标变换情况可依此类推。

1.2 目标方向角

方向角是在水平面上，坦克武器的射击方向与目标车辆纵轴或目标运动方向所构成的夹角，如图 2。

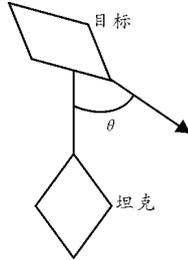


图 2 目标方位角

作战中，无论静止或运动的目标，总会与坦克产生一个方向角，该方向角使目标受弹面发生变化。用 θ 表示方向角，逆时针方向为正，顺时针方向为负。因此：

- 当 $\theta=0$ 时，射手观察到的是目标正面；
- 当 $\theta<0$ 时，射手观察到的是目标左斜面；
- 当 $\theta>0$ 时，射手观察到的是目标右斜面。

目标上的任一点 P ，在目标坐标系中的原始坐标为 $P(x_0, y_0, z_0)$ ，绕 Y 轴逆时针旋转 θ 角后，在地面坐标系中的新坐标为 $P(x, y, z)$ ：

$$(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

若考虑炮塔的旋转，只需将坦克和炮塔的方向角度分别计算，代入式 (8) 即可。

1.3 高低与方向倾斜角

作战中，目标不可能完全处于水平地面上，总会倾斜一定的角度，这个倾斜角按空间解析几何原理可分解为目标（或装甲车辆）分别绕自身纵轴和横轴各旋转一定角度 α 、 β 。或者说目标在绕自身横轴 X 旋转一个高低倾角 β 的基础上，再绕自身的纵轴 Z 旋转一个方向倾角 α 。这样，就把一个三维坐标旋转变换问题化解为 2 个二维坐标旋转变换。

方向倾斜角取左倾为正，右倾为负。当目标车辆有一个方向倾斜角 α 时，目标坐标系中的一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ ，绕 Z 轴旋转角 α 后，在地面坐标系中的新坐标为 $P(x, y, z)$ ：

$$(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

高低倾斜角（即俯仰角）取左倾为正，右倾为负。当目标车辆有一个高低倾斜角 β 时，目标坐标系中的一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ ，绕 X 轴旋转角 β ，在地面坐标系中的新坐标为 $P(x, y, z)$ ：

$$(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.4 目标投影

为了判断射击命中情况，需要将地面坐标系中的三维坐标投影为视平面坐标系中的二维坐标。对于地面坐标系中的任意一点 $P(x_c, y_c, z_c)$ ，在视平面坐标系中的新坐标为 $P(x, y)$ ：

$$(x, y) = (x_c, y_c, z_c) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -x_p/z_p & -y_p/z_p \end{bmatrix} \quad (11)$$

或：

$$\begin{cases} x = x_c - z_c \left(\frac{x_p}{z_p} \right) \\ y = y_c - z_c \left(\frac{y_p}{z_p} \right) \end{cases} \quad (12)$$

其中， (x_p, y_p, z_p) 为投影方向向量，即视平面的法向量。

投影方向向量即炮弹入射方向的方向向量，主要受炮弹落角和炮目高低角的影响。

炮目高低角是炮目线与炮口水平面的夹角，用 ε 表示。当目标的炮目高低角不为 0 时，会使炮弹入射角发生变化，从而影响毁伤效果。

$$\text{炮目高低角用下式确定：} \quad \text{tg} \varepsilon = \frac{H}{D}$$

式中， H 为目标炮目高差， D 为目标水平距离。在射击模拟中， H 和 D 可根据数字地图实时取得。目标高于炮口水平面时， ε 为正，低于炮口水平面时 ε 为负。

在带地形环境的作战模拟中， H 和 D 可根据三维地形数据实时取得。

炮弹落角由射表给出，用 r 表示， r 均取正值。射表给出的 r 值为 $\varepsilon=0$ 时的值，根据弹道刚性原理，可假定在 ε 不很大的情况下， r 值保持不变。

确定投影向量。在三维地面坐标系中，由于视平面坐标系平面通过 X 轴，在炮目高低角 ε 与炮弹落角 r 的作用下，视平面与 Y 轴夹角为 $r-\varepsilon$ ，如图 3。

则视平面方程为：

$$-tg(r - \varepsilon)y + z = 0 \quad (13)$$

故视平面法向量即投影方向向量为:

$$(x_p, y_p, z_p) = (0, -tg(r - \varepsilon), 1) \quad (14)$$

或:

$$(x_p, y_p, z_p) = (0, -\sin(r - \varepsilon), \cos(r - \varepsilon)) \quad (15)$$

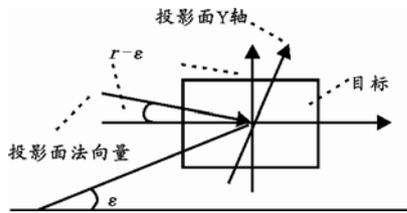


图 3 投影变换示意图

1.5 目标遮蔽度

当目标隐蔽于土包、掩体等物体后时, 目标下部会被遮挡一定高度。在射击中, 射手瞄准点会相应上移, 取目标可见部分中心或某一部位, 同时被遮挡部分不能被命中。

提供的模型可以满足目标位于任意高度遮蔽物后的情况。设目标被遮挡高度为 h , 检查出最低的一条边, 确定出被遮挡部分的上边缘 Y 坐标, 当炮弹 Y 坐标 y 低于上边缘时, 即设目标投影上最低点 Y 坐标为 y' , 若:

$$y < y' + h \quad (16)$$

为不命中。

2 判定命中点

根据射击误差的随机正态分布规律, 在投影平面上采用统计抽样方法来确定弹着点。

2.1 确定瞄准点

射手的瞄准是通过操作操纵台实现的。射手操作操纵台上下左右转动来控制瞄准线的方向, 瞄准线与目标的交点即为瞄准点。

算法步骤: 首先, 将瞄准线诸因素变换到中间坐标系, 再在中间坐标系中求瞄准线空间方程和投影面空间方程, 瞄准线方程与投影面方程求交即得瞄准点, 再将此点变换到观察坐标系中即可。

2.1.1 瞄准线变换

与瞄准线相关的瞄准线方位角、瞄准线高低角、瞄准线起始坐标 (瞄准镜后聚焦点) 均是在地面坐标系中给出的, 由于中间坐标系由地面坐标系平移其坐标原点所得, 因此与地面坐标系的各坐标轴方向相同。

设中间坐标系原点 (即目标中心) 在地面坐标系中的位置为 (x', y', z') , 瞄准线起始点在地面坐标系中为 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, 则瞄准线在中间坐标系中的位置如图 4。瞄准线起始点在中间坐标系中的位置为:

$$(x_t, y_t, z_t) = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) - (x', y', z') \quad (17)$$

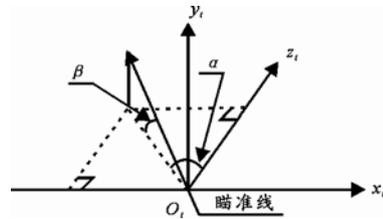


图 4 中间坐标系中的瞄准线

在中间坐标系中, 瞄准线方位角与高低角仍不变。

2.1.2 瞄准线方程

1) 空间直线的对称式方程

当一条直线上的一点 $M(x_0, y_0, z_0)$ 和它的一个方向向量 $s = \{m, n, p\}$ 为已知时, 直线的对称式方程为:

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p} \quad (18)$$

2) 瞄准线方程

根据瞄准线的起点和它与坐标轴的夹角, 就可以确定瞄准线的空间方程。

设瞄准线方位角为 α , 高低角为 β , 根据这两个角可确定瞄准线方向向量。取瞄准线上的一个单位向量 s , 则 s 在中间坐标系 3 个坐标轴上的分量为:

$$s = \{-\cos \beta \sin \alpha, \cos \beta \cos \alpha, \sin \beta\} \quad (19)$$

因此, 可以确定瞄准线的对称式方程为:

$$\frac{x - x_t}{-\cos \beta \sin \alpha} = \frac{y - y_t}{\cos \beta \cos \alpha} = \frac{z - z_t}{\sin \beta}$$

2.1.3 投影面在中间坐标系中的方程

1) 平面的点法式方程

过空间一点可以作而且只能作一平面垂直于一已知直线, 所以当平面 Π 上一点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和它的一个法线向量 $\vec{n} = (\vec{n}_i, \vec{n}_j, \vec{n}_k)$ 已知时, 平面的位置就完全确定了。平面与法向量关系如图 5。

设 P 是平面上任一点, 则向量 $\vec{P_1P}$ 必与法向量 \vec{n} 垂直, 则:

$$\vec{n} \cdot \vec{P_1P} = 0$$

所以

$$\vec{n}_i(x-x_i) + \vec{n}_j(y-y_j) + \vec{n}_k(z-z_k) = 0 \quad (20)$$

为平面法式方程的一般形式。

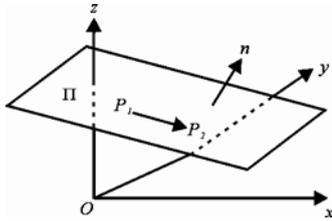


图 5 平面与法向量

2) 投影面方程

投影面即观察坐标系的 $O_p x_p z_p$ 平面，即通过中间坐标系原点、以瞄准线方向向量为法向量的平面。因此，其点法式方程为：

$$(-\cos\beta\sin\alpha)x + (\cos\beta\cos\alpha)y + (\sin\beta)z = 0 \quad (21)$$

2.1.4 瞄准点在中间坐标系中的坐标

将瞄准线方程和投影面方程联立，即可解得瞄准点坐标为：

$$\begin{cases} (-\cos\beta\sin\alpha)x + (\cos\beta\cos\alpha)y + (\sin\beta)z = 0 \\ \frac{x-x_t}{-\cos\beta\sin\alpha} = \frac{y-y_t}{\cos\beta\cos\alpha} \\ \frac{x-x_t}{-\cos\beta\sin\alpha} = \frac{z-z_t}{\sin\beta} \end{cases} \quad (22)$$

解得：

$$\begin{cases} x = \frac{(a^2c^2 + b^2)x_t + a^2cdy_t + abdz_t}{b^2 + a^2c^2 + a^2d^2} \\ y = \frac{c}{d}x_t + y_t - \frac{c}{d}x \\ z = \frac{b}{ad}x_t + z_t - \frac{b}{ad}x \end{cases} \quad (23)$$

式中， $a = \cos\beta$ ， $b = \sin\beta$ ， $c = \cos\alpha$ ， $d = \sin\alpha$ 。

点 (x, y, z) 即为中间坐标系中的瞄准点。

如果 $\alpha = 0$ ，则直线方程为：

$$\begin{cases} x = x_t \\ \frac{y-y_t}{\cos\beta\cos\alpha} = \frac{z-z_t}{\sin\beta} \end{cases} \quad (24)$$

解得：

$$\begin{cases} x = x_t \\ z = \frac{abdx_t - abcy_t + a^2c^2z_t}{b^2 + a^2c^2} \\ y = y_t - \frac{ac}{b}z_t + \frac{ac}{b}z \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = x_t \\ y = \frac{a^2cdx_t + b^2y_t - abcz_t}{b^2 + a^2c^2} \\ z = z_t - \frac{b}{ac}(y - y_t) \end{cases} \quad (25)$$

2.1.5 投影面上的瞄准点

对中间系中瞄准点作观察变换后取 (x, z) 即可。

2.2 模拟弹着点

坦克射击中，射击误差指弹着点与瞄准点间的偏差，由系统误差和散布误差组成。系统误差主要由测距、环境数据输入等因素引起（如测距未对准目标，气温 30 却输入 20 等）。散布误差指的是射击准备误差和射弹散布误差（这个意义上的射击准备误差是准备中误差的随机成份，实质为散布误差）。因此，弹着点坐标即是瞄准点坐标加上由系统误差与散布误差引起的射弹在方向与高低上的偏差量。在实际仿真中，环境数据等可能引起系统误差的因素易于排除，主要考虑测距不准的系统误差。

2.2.1 误差模型

设射击误差的方位向与高低向误差的均方差分别为 σ_x 、 σ_z ，在投影平面上瞄准点对坐标原点的偏差为 (μ_x, μ_z) ，则方位向误差与高低向误差分别服从 $N(\mu_x, \sigma_x)$ ， $N(\mu_z, \sigma_z)$ 分布。弹着点 $P(x, z)$ 坐标在投影平面上的分布密度为：

$$\begin{aligned} f(x, z) &= \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left\{-\frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \end{aligned} \quad (26)$$

2.2.2 模拟方法

由于射击误差在高低向与方位向是独立的，因此可以分别进行模拟。用随机模拟法模拟弹着点，就是用服从 $f(x, z)$ 的正态随机变量 (x, z) 的抽样值 (x_i, z_i) 来模拟射弹的落点坐标。

首先产生 2 个相互独立的在区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 r_1 、 r_2 ，则：

$$\begin{cases} t_1 = \sqrt{-2\ln r_1} \cos(2\pi r_2) \\ t_2 = \sqrt{-2\ln r_1} \sin(2\pi r_2) \end{cases} \quad (27)$$

为 2 个相互独立的分别服从 $N(0, 1)$ 分布的随

机数, 而

$$\begin{cases} x = t_1 \times \sigma_x + \mu_x \\ z = t_2 \times \sigma_z + \mu_z \end{cases} \quad (28)$$

为 2 个分别服从 $N(\mu_x, \sigma_x)$, $N(\mu_z, \sigma_z)$ 分布的随机数。

上述模拟所得的 (x, z) 即为不考虑系统误差对目标射击时, 投影平面上—发射弹弹着点位置坐标。

3 结束语

实际应用证明: 该方法实现方便, 结果精确, 其计算模块运行时间在 10~20 ms (可以将此运行时间计入到火炮发射延迟时间的仿真中, 火炮发射延迟时间按电点火式发射装置算约为 65 ms), 而且可以方便地求出弹道上任一点的弹道诸元。求出弹着点后, 还可以依据射弹入射方向、命中点以及目标的空间姿态, 进一步求解出目标的被命中部件。

(上接第 10 页)

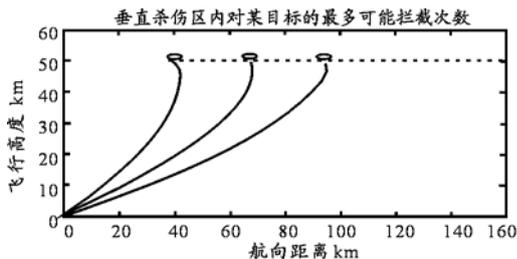


图 5 垂直杀伤区内对某目标的最多拦截次数仿真

更改目标的飞行高度, 其他目标属性保持不变, 多次仿真即可得到垂直杀伤区内对该目标的拦截远界。受导弹低空反导特性、探测或制导雷达的低空探测性能等因素制约, 防空武器杀伤区远界随着目标飞行高度的降低而有较大缩小。如图 6。

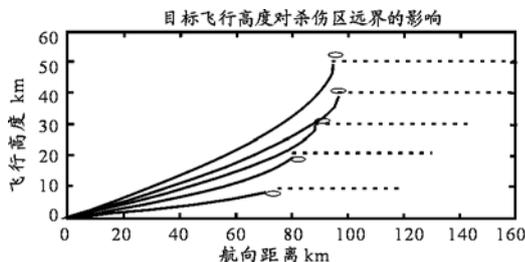


图 6 垂直杀伤区内对某目标的拦截远界仿真

4 结束语

基于弹道仿真进行杀伤区计算的建模过程是对防空武器系统尤其是导弹发控等作战原理、战技指标及各项风洞测试样本进行梳理研究的过程, 采用的数据越准确全面, 仿真子模块设置越细致, 得到

同时可以根据被命中部件的性质, 计算或仿真目标毁伤情况。因此, 该方法可以满足实时仿真的要求, 而且可以推广到坦克等类似系统上使用。

参考文献:

- [1] 郭锡福, 赵子华. 火控弹道模型理论及应用[M]. 北京: 军事科学出版社, 1999: 30-31.
- [2] 李向东. 目标毁伤理论及工程计算[M]. 南京: 南京理工大学, 1997: 110-112.
- [3] 中国人民解放军总参谋部兵种部. 作战模拟基础[M]. 北京: 解放军出版社, 1994: 87-90.
- [4] 王靖君, 赫信鹏. 火炮概论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 65-67.
- [5] 尹健, 王忠义等. 一种现代主战坦克武器系统综合评价的灰色方法[J]. 兵工自动化, 2009, 28(8): 15-17.
- [6] 朱琳, 李备, 崔国恒. 基于应急条件下潜艇自导鱼雷连续射击仿真[J]. 四川兵工学报, 2009(1): 26-30.

的理论杀伤区指标也越具有现实意义。但由于该模型结构在一定的假设条件下才能成立, 同时因为个别模块得不到具体数据而采取了简化或插值等处理, 最后的仿真结论还存在一定的误差。

参考文献:

- [1] 陈久生, 李向林. 垂直发射低空超低空防空导弹杀伤区近界研究[J]. 现代防御技术, 2004, 32(5): 21-24.
- [2] 汤善同. 地空导弹弹道设计和杀伤区特性分析. 航天部科技报告, HT-860107J[R]. 1986.
- [3] Shun-Wen Cheng. Very Long Range Anti-Air Missile Systems Design. 2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings[C].
- [4] 罗文义. 地空导弹杀伤区低界决定因素[J]. 防空武器, 1985(3): 16-18.
- [5] 周明安. 地空导弹武器杀伤区分析[J]. 凯山科技, 1990(3): 25-28.
- [6] 李云, 柳世考, 殷业飞. 某小型地空导弹杀伤区仿真研究与分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006(2): 881-884.
- [7] 曹泽阳, 李为民. 防空导弹杀伤区的 BP 神经网络解算模型研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003(1): 24-26.
- [8] 徐品高. 防空导弹武器系统的杀伤区、作战区、拦截区和发射区[J]. 现代防御技术, 1994(1): 11-17.
- [9] 滕克难, 王国田. 舰空导弹系统原理与分析[M]. 北京: 解放军出版社, 2003.
- [10] 徐品高. 地空导弹武器杀伤区远界确定方法[J]. 战术导弹技术, 1990(3): 25-30.
- [11] 徐品高. 关于地空导弹的杀伤区近界问题[J]. 现代防御技术, 1992(1): 1-10.
- [12] 高桂清, 向进, 董承博. 基于遗传算法的常规弹道导弹火力分配[J]. 四川兵工学报, 2009(11): 9-11.