

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.12.004

## 基于三维地理信息的坦克炮火控优化方法

刘彦君, 黄金才, 朱承

(国防科学技术大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为提高复杂地理环境下的坦克火炮打击效能, 研究三维数字地理信息支持下坦克炮火控优化方法。在目标点位置已知时提出基于遗传算法的最佳射角反解算法; 通过插值求出弹落点圆概率误差, 在此基础上构造落点 CEP 解算模型, 提出基于三维数字地理信息的最优火力点选择模型, 并进行案例分析。结果表明, 该方法弹道模型精确, 完成火力点的选择平均仅需 3~4 s, 可作为坦克火炮火控的辅助决策手段。

**关键词:** 遗传算法; 最佳射角; 火力点优化选择; 三维地理信息

**中图分类号:** O224; TJ38 **文献标识码:** A

## An Optimization Method for Tank Gun Based on 3D Geographic Information

Liu Yanjun, Huang Jincai, Zhu Cheng

(Information System Engineering Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to improve hit potency of tank guns in sophisticated topography, this paper has researched the optimize method of tank guns with 3D geographic information. With the information of target position, the paper advanced an algorithm of optimal angle of fire based on GA. Then it solved out the CEP of the point of fall through interpolation in order to build the model of it. Ultimately, it advanced the model of alternative optimal fire point based on 3D geographic information. Meanwhile, we proved the feasibility and validity through analyzing a case. It turned out that this method has an accurate ballistic model and accomplishes option of fire points within 3~4s medially, which can be a tool of paramilitary decision-making.

**Keywords:** GA; optimal angle of fire; optimize fire point; 3D geographic information

### 0 引言

在火控系统中, 坦克炮射程一般在两千米左右; 自行火炮的圆概率误差高达几十米; 精确制导武器的费用高昂。因此, 坦克是地面作战的主要突击兵器和装甲部队的基本装备, 各国军事继续坚持装甲车辆综合电子信息系统的发展, 使其具备复杂地理环境下远程打击目标和对付武装直升机的能力, 对坦克的发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。

目前, 弹丸的外弹道模型已经十分成熟, 如文献[2-3]中 4D 及改进的 4D 模型, 精度以及时间复杂度都令人满意, 周启煌等提出的外弹道实时解算方法效果也很显著; 文献[4-7]对运动目标也做了创造性工作, 但是对于各火力点的打击效果都无法进行很好的定量评估。文献[1]中还提到了复杂地理环境下坦克群的指挥信息系统建设, 但仅局限在信息共享、数据链路搭建、战役级指挥控制方面, 而对具体的战术级作战行动或具体的目标打击并未太多涉及。为解决上述不足, 笔者提出了基于遗传算法的火力点最佳射角求解算法和基于三维地理信息的火力点优化选择算法。

### 1 总体设计

笔者采用 4D 外弹道模型<sup>[3]</sup>, 假定火力点和目标点位置信息已知, 并根据弹道特点对射击初始条件加以约束, 使遗传算法能够更快地反解出火力点的最佳射角及最佳射角下的弹道轨迹; 由于弹道误差符合一定的正态分布<sup>[8]</sup>, 并且假定弹丸的圆概率误差 (CEP) 仅与弹丸飞行路程相关, 建立误差概率模型, 解算最优射角下弹落点 CEP, 得到命中概率; 在求得各火力点最佳射角下的弹道轨迹和命中概率之后, 通过提取的复杂地理环境信息对弹道轨迹进行约束, 比较命中概率, 选择最优火力点。其描述的流程如图 1。

### 2 基于遗传算法的火力点最佳射角求解算法

由于受到弹丸初速、弹丸旋转角速度、弹丸发射角度、弹丸质量与形状和重力、空气阻力、风向、风速及偏流等诸多因素的影响, 炮弹弹丸在空中的飞行轨迹是一条非常复杂的空间曲线, 尤其是弹丸飞行过程中受到的随机影响, 要在外弹道微分方程中加入随机因素构成随机微分方程, 使得求解复杂、

收稿日期: 2010-07-09; 修回日期: 2010-08-06

基金项目: 国家自然科学基金 (70701038)

作者简介: 刘彦君 (1987-), 男, 河南人, 从事指挥信息系统研究。

速度缓慢, 无法满足要求。因此, 笔者首先建立外弹道模型和误差概率模型, 再将两者结合, 然后基

于遗传算法求得最佳射角及命中概率的方式, 以便快速精确计算。

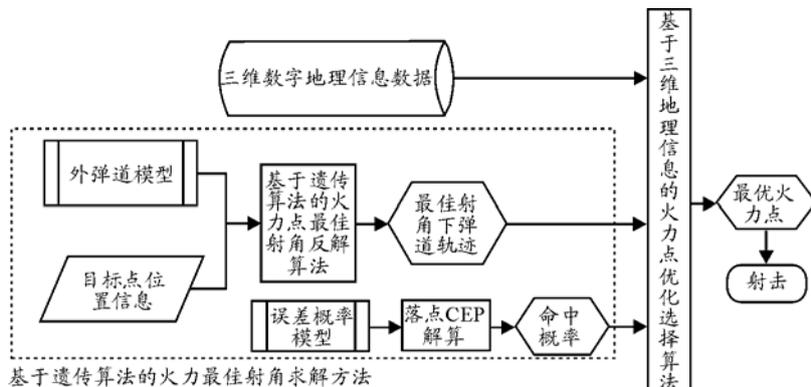


图 1 三维地理信息下坦克火控优化射击流程图

### 2.1 4D 外弹道模型

外弹道模型是在已知射角等初始条件下, 综合考虑阻力、升力、重力、科氏力, 而建立的质心运动方程, 旋转方程和动力平衡角方程。对于外弹道模型, 一旦初始条件确定, 弹道就是固定的, 是对弹丸确定运动轨迹的描述。

1) 对弹丸在整个飞行过程中的受力情况做以下假设:

- (1) 弹丸所处的环境为标准射击环境;
- (2) 弹丸不受随机干扰;
- (3) 弹丸为轴对称体;
- (4) 弹丸为旋转稳定弹丸;
- (5) 弹丸的起始点为 (0,0,0), 起始点可以直视目标。

2) 应用牛顿第二定律和动量矩定理, 建立旋转稳定弹丸 4D 模型<sup>[3]</sup>:

质心运动方程为:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\rho S}{2m} [F_D C_{D_0} + C_{D_{\alpha^2}} (\alpha_D^2 + \alpha_e^2)] V \bar{V} + \frac{\rho S}{2m} F_L [C_{L\alpha} + C_{L\alpha^2} \alpha_e^2] V^2 \bar{\alpha}_e - \frac{\rho S d P}{4m} C_{y\beta\alpha} (\bar{\alpha}_e \times \bar{V}) + \bar{g} + \bar{\Lambda} \quad (1)$$

旋转方程为:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{4J_x} \rho S d^2 V P C_{I_p} C_{I_p} < 0 \quad (2)$$

动力平衡角方程为:

$$\bar{\alpha}_e = (\alpha_b - \alpha_a) (\bar{V} \times \bar{u}) - \alpha_b (\bar{V} \times \bar{g}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_a &= \frac{J_x}{d^2} \cdot \frac{C_3}{C_2} C_1, \alpha_b = -\frac{m}{2} \cdot \frac{C_3}{C_2} C_{mp\alpha} \\ C_2 &= C_m C_l V^2 + \frac{1}{4} d^2 P^2 C_{y\beta\alpha} C_{mp\alpha} \\ C_3 &= \frac{Pd}{qS}, q = \frac{1}{2} \rho V^2 \\ C_m &= C_{m\alpha} + C_{m\alpha^2} \alpha_e^2, C_l = C_{l\alpha} + C_{l\alpha^2} \alpha_e^2 \\ \bar{V} &= \bar{u} - \bar{W} \end{aligned} \quad (4)$$

由于射角、初速等初始条件已知, 运用四阶龙格库塔法可以求出上述常微分方程组的数值解, 得到一条弹丸轨迹。在 MATLAB 中使用函数 ODE23 或 ODE45 进行数值积分, 便可得到理想结果; 如果用 ODESET 对 ODE23 或 ODE45 进行适当设置, 便可得到弹丸经过确定坐标 z 时, 坐标 x、y 及飞行时间 t 的值。

### 2.2 火力点最佳射角反解算法

上述求解均是在已知初射条件下获取落点的信息, 而笔者要求得到在已知目标点前提下的初射信息, 并且上述外弹道微分方程难以得到 3 个轴向的准确表达式, 不能直接进行方程的反解, 但可以利用不同射角下的弹道轨迹进行搜索, 得到最优射角。故采用遗传算法, 从一组初值点出发对该问题进行并行搜索, 快速得到最优解。

#### 2.2.1 对初始种群和搜索范围的处理

由于遗传算法依赖于初始种群的选取, 以及合理的搜索范围, 因此, 对遗传算法在初始种群和搜索范围上做适当处理:

- 1) 对于某一特定目标 (x,y,z), 根据经验可知其垂直方向上的射角  $\alpha \in (\arcsin(\sqrt{2s/g}), \arcsin(\sqrt{2s/g}) + 10)$ , 由旋转弹丸的偏流特性知水平

方向上的射角  $\beta \in (\arcsin((x - \mu_y) / y), \arcsin((x - \mu_y) / y) + 5)^\circ$ 。  
 $\alpha, \beta$  如图 2。

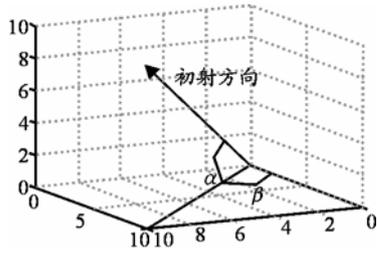


图 2 初射图

2) 初始种群的量在 20 左右, 在做复制、交叉、选择运算时仅考虑 2 个方向上射角的基因即可, 不需加入其他因素, 以便得到高精度射角值。

### 2.2.2 采用遗传算法获取最佳射击角度流程

做适当的约束后, 就可用遗传算法搜索最优解, 运用外弹道模型获取最优解的流程如图 3。

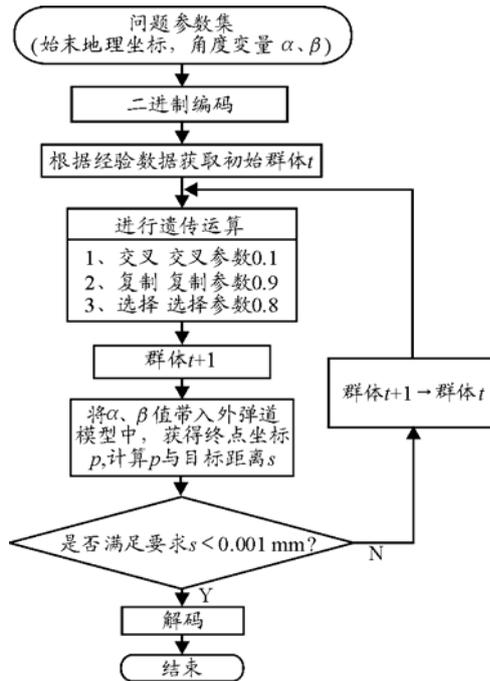


图 3 运用外弹道模型获取火炮  $i$  最佳射击角度流程图

1) 当火炮初速, 目标点位置  $(x, y, z)$  等信息确定之后, 根据经验取定种子  $(\alpha_{seed}, \beta_{seed})$ , 通过外弹道求解得到固定  $z$  坐标的一个弹丸落点  $(x_j, y_j, z)$ ;

2) 使用弹丸落点  $(x_j, y_j, z)$  与目标坐标  $(x, y, z)$  的距离作为选择函数, 进行复制、交叉、选择运算, 得到优选的若干种子  $(\alpha_{seed}, \beta_{seed})$ ;

3) 若种子  $(\alpha_{seed}, \beta_{seed})$  满足精度要求, 或遗传次数已满, 则  $(\alpha_{best}, \beta_{best}) = (\alpha_{seed}, \beta_{seed})$ ; 否则转第 1) 步。

通过计算可以得到火力点的最佳初射角以及最

佳初射角下的弹道轨迹。实验表明, 使用上述遗传算法, 轨道精度在毫米级, 射角误差小于  $0.0001^\circ$ , 其误差曲线如图 4。

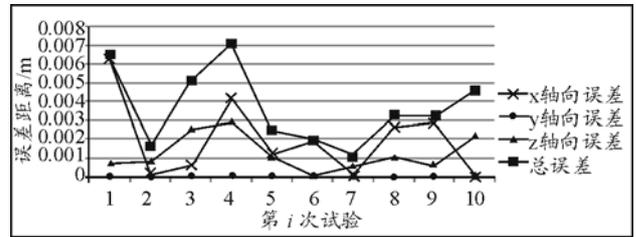


图 4 误差曲线

### 2.3 误差概率模型及落点 CEP 解算模型

圆概率误差 (CEP) 表示一个圆的半径  $R_{0.5}$ , 该圆以期望弹落点 (或瞄准点) 为圆心, 弹落点有一半的可能落入该圆内。假定方向误差与距离误差独立分布<sup>[8]</sup>, 且弹落点满足“圆形”正态分布 (即  $\sigma = \sigma_x = \sigma_y$ ) 有:

$$\begin{cases} \iint_{x^2+y^2 \leq R_{0.5}^2} \varphi(x, y) dx dy = 0.5 \\ \varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-(x^2 + y^2) / (2\sigma^2)) \end{cases} \quad (5)$$

将式 (5) 作变量替换得:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta & 0 \leq \theta \leq 2\pi \\ y = r \sin \theta & 0 \leq r \leq R_{0.5} \end{cases} \quad (6)$$

计算得:

$$1 - \exp(-R_{0.5}^2 / (2\sigma^2)) = 0.5 \quad (7)$$

从而, 圆概率误差 CEP 为:

$$CEP = R_{0.5} = \sqrt{2 \ln 2} \sigma = 1.1774 \sigma \quad (8)$$

假设弹丸的 CEP 与弹丸的射程正相关。射程越大则 CEP 越大; 射程越小则 CEP 越小。因此, 收集该型坦克炮各射程的统计 CEP, 再将 CEP 通过式 (8) 转化为  $\sigma$ , 数据形式如表 1。

表 1 试验中各射程对应 CEP 与  $\sigma$  数据

射程 $(x) / (m)$	$R_{0.5} (y') / (m)$	$\sigma_i (y)$
$x_0$	$y_0'$	$y_0 = f(x_0)$
...	...	...
$x_i$	$y_i'$	$y_i = f(x_i)$
...	...	...
$x_n$	$y_n'$	$y_n = f(x_n)$

根据表 1 数据, 当已知弹丸此时的射程  $x_s$  时, 通过埃特金逐步插值可以得到弹落点的方差  $\sigma$ 。埃特金逐步插值法的递推公式为<sup>[9]</sup>:

$$f_k(x_i) = \frac{x - x_i}{x_{k-1} - x_i} f_{k-1}(x_{k-1}) + \frac{x - x_{k-1}}{x_i - x_{k-1}} f_{k-1}(x_i), i \geq k \quad (9)$$

埃特金逐步插值法的流程图用图 5 表示, 根据需

要可以求出所需的  $y(x) = \sigma$ 。

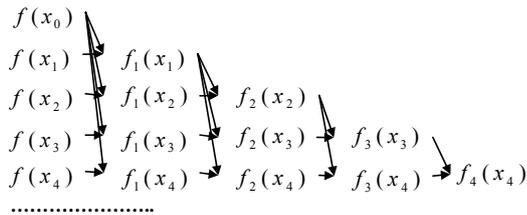


图 5 埃特金逐步算法流程

之后将方差  $\sigma$  带入式 (10), 对表面积为  $S$  的目标进行积分, 得到命中概率  $P$ 。

$$\begin{cases} \iint_{x^2+y^2 \leq S} \varphi(x, y) dx dy = P \\ \varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2)) \end{cases} \quad (10)$$

经过弹道反解、CEP 解算, 得到了各火力点的最佳射角下的弹道轨迹和命中率, 为下一步火力点优化选择提供了条件。

### 3 基于三维地理信息的火力点优化选择算法

不同地理位置的坦克打击同一个目标, 命中率有所不同, 选取命中率最高的火力点是最终目的。而影响命中率的主要因素有射击误差和地形。而起伏地形的影响表现为对弹道轨迹的阻挡。

将某火力点最佳射角下的弹道轨迹转化为离散点的序列  $(X, Y, Z)$ , 且有  $X = \{x(1), x(2), \dots, x(i), \dots\}$ ,  $Y = \{y(1), y(2), \dots, y(i), \dots\}$ ,  $Z = \{z(1), z(2), \dots, z(i), \dots\}$ ,

$i=1, 2, \dots, N$ , 则其在地面投影为  $(X, Y)$ , 同时设定一个合适的阈值  $k$ , 再将高  $Z$  与数字地理环境中相同  $(X_e, Y_e)$  的标高  $z_e$  一一比较。当  $(X, Y)$  中  $(x(i), y(i))$  与  $(X_e, Y_e)$  中  $(x_e(i), y_e(i))$  相等时, 若  $z(i) > z_e(i) + k$ , 弹丸可以通过, 反之, 弹丸不可通过。对整个序列比较之后, 就得到最终的打击概率  $P_j$ 。如图 6。

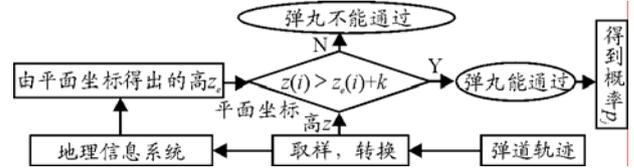


图 6 地理信息对弹道约束的处理图

### 4 案例分析

根据现有资料, 以 3 辆某 122 mm 型坦克炮火控优化为例, 验证本模型。射击初始条件如表 2、表 3、表 4。其中各类系数单位复杂, 详见参考文献 [3]。射击数据如表 5、图 7。

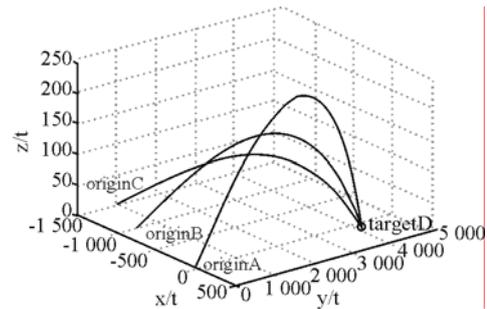


图 7 无地形影响下各火力点射击结果

表 2 射击主要初始条件参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
初速/m·s <sup>-1</sup>	897	诱导阻力系数	3.5	一次项升力系数	1.55
表定弹重/kg	7.5	阻力符合系数	1.003 1	一次项马格努斯力系数	-2.11
弹丸直径/mm	122	升力符合系数	0.993 5	一次项静力矩系数	4.19

表 3 3 个火力点与目标点坐标信息

坐标点	坐标 x/m	坐标 y/m	坐标 z/m	坐标点	坐标 x/m	坐标 y/m	坐标 z/m
火力点 A	0	0	0	火力点 C	-1 500	1 000	0
火力点 B	-1 000	500	0	目标点 D	100	4 000	0

表 4 某型弹丸各射程圆概率误差

射程/m	CEP/m	射程/m	CEP/m	射程/m	CEP/m
1 000	0.09	2 500	0.97	4 000	5.70
1 500	0.20	3 000	1.58	4 500	6.90
2 000	0.41	3 500	3.40	5 000	8.40

表 5 3 个火力点 A、B、C 射击结果

	竖直角 $\alpha/^\circ$	水平角 $\beta/^\circ$	CEP $R_{0.5}/m$	命中率 P	最高点 H/m	与目标距离 S/m
火力点 A 射击结果	7.743 7	1.413 1	6.910 9	0.366 9	239.1	4 001.2
火力点 B 射击结果	5.679 7	17.625 3	5.367 8	0.528 9	135	3 668.8
火力点 C 射击结果	4.346 3	28.414 7	3.554 1	0.814 2	130.7	3 400

通过地理信息系统提取各路径上的 DEM 数据, 进行弹丸轨道高与地形高程的比较, 如图 8。火力

点 C 的弹道轨迹被山阻挡, 无法通过。再比较火力点 A 与 B 的命中率, 可知火力点 B 为最佳选择。

(下转第 25 页)

标属性编辑界面, 进行目标属性编辑并确认, 软件调用相应模型算法进行目标拐点平滑并计算该圆弧拐弯段半径等特征参数, 并在态势图自动显示该目标航迹; 2) 也可选择选中飞机图标在二维态势图上拖动进行拐点定位, 软件调用模型算法进行拐点平滑和拐弯半径计算, 并自动刷新态势图目标航迹显示。想定编辑完成, 选择保存选项, 软件自动将想定编辑完成的目标航迹保存为 XML 想定文件。仿真开始后空情产生模拟器自动下载数据库配置的 XML 想定文件, 按照想定文件要求实时推算并产生飞机目标航迹数据发送。

### 3 结论

该研究成果已成功应用于某指挥控制仿真测试系统项目中, 成功保障了多次靶场仿真试验和部

\*\*\*\*\*

(上接第 15 页)

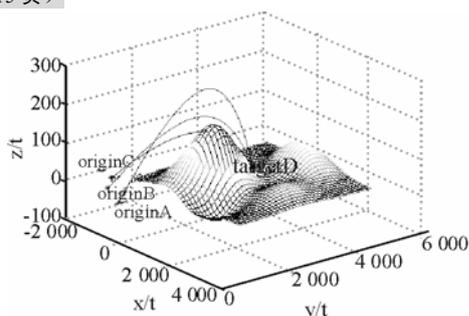


图 8 地形影响下各火力点射击结果

运用统计学方法, 对火力点 B 进行弹丸落点散布仿真分析<sup>[10]</sup>, 得到目标点附近弹着点分布图, 如图 9。

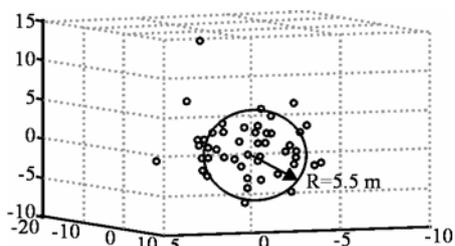


图 9 弹着点分布图

由图 9 可知, 其 CEP $\approx$ 5.5 m, 与计算结果 CEP $\approx$ 5.37 m 相近, 表明文中提出的方法是有效的。

### 5 结论

该方法弹道模型精确, 可为选择最优射击点提供辅助决策; 其完成火力点的选择平均仅需要 3~4 s, 对战机稍纵即逝的战场来说, 赢得了宝贵的准备时间, 能为实际作战提供一种切实有效的作

队训练。实践证明, 该模型及仿真实现方法是正确和有效的。

### 参考文献:

- [1] 朱华统. 常用大地坐标及其转换[M]. 北京: 解放军出版社, 1990.
- [2] 王霄红. 一种通用型的目标数据仿真[J]. 现代雷达, 2004, 26(4): 32-34.
- [3] 范跃华, 刘白林. 空中目标运动轨迹的数学模型[J]. 西安工业学院学报, 2003, 23(4): 283-288.
- [4] 刘帅, 李俊山, 李智生. 空袭目标典型航迹模型的设计与仿真实现[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 128-130.
- [5] 康凤举. 现代仿真技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] 何荣茂, 邱超, 王敏. 平面假设条件下基于运动方程的飞机航迹仿真[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(1): 122-124.
- [7] 赵春宇, 高伏, 韦猛. 电子装备故障诊断训练中虚拟仪器仿真及应用[J]. 四川兵工学报, 2009(10): 107-110.

战模式。虽然该方法所涉及的是静止火力打击静止目标, 可以适当改进模型, 将其转化为机动火力打击运动目标; 同时, 还可以对坦克实体群的网络组织结构简单、抗毁性较差等进行改进, 从而增加网络的抗毁性。

### 参考文献:

- [1] 郑慕侨, 冯崇植, 蓝祖佑, 等. 坦克装甲车辆[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.
- [2] 周启煌, 于凉, 邱晓波. 战车火控外弹道实时解算的研究[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(4): 14-18.
- [3] 闫章更. 射表编拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 韩志军, 杨宏军, 王润岗. 虚拟环境中坦克实体火力行为仿真研究[J]. 计算机仿真, 2003, 20(12): 6-9.
- [5] 王旭智, 孙中森, 宋建中. 利用外弹道微分方程组实时快速解算高炮理论弹道的研究[J]. 电子器件, 2007, 30(6): 2297-2300.
- [6] CHANG CB. Ballistic Trajectory Estimation with Angle-Only Measurements[J]. IEEE Transactions on Automatic Control June, 1980, 225(3): 474-480.
- [7] Fleming E L, Chandra S, Barnett JJ, et al. Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as functions of latitude[J]. Adv Space Res, 1990, 10(12): 11-59.
- [8] 凌云翔, 马满好, 王卫卫, 等. 作战模拟基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
- [9] 王能超. 数值分析简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [10] 孙艳霞, 袁志华, 王欣. 随机风扰动下的弹丸落点散布仿真分析[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 209-211.
- [11] 傅建平, 张培林, 焦文生. 基于故障树与专家系统的自行火炮火控系统故障诊断[J]. 四川兵工学报, 2009(9): 32-34.