

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.12.006

通用飞机航迹生成技术

苏春梅, 冯朝阳, 王力军

(中国人民解放军 63680 部队 技术部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 为建立逼真空情, 实现复杂空袭动作模拟的正确性, 建立飞机目标典型航迹模型并进行仿真。分析了飞机目标运动航迹及其特点, 给出了七种典型的、通用的飞机目标运动航迹想定设计方法和数学模型, 对飞机航迹生成仿真实现的流程和几项关键技术进行分析并给出了解决方法。仿真应用证明, 该方法是正确和有效的, 并已应用到实际操作中。

关键词: 飞机航迹; 航迹模拟; 想定编辑; 数学模型

中图分类号: N945.13; TP391.9 **文献标识码:** A

Automatic Creating Technique of Universal Flight Track

Su Chunmei, Feng Zhaoyang, Wang Lijun

(Dept. of Test Technology, No. 63680 Unit of PLA, Jiangyin 214431, China)

Abstract: In order to set up the virtual air simulation, and realize the correctness of complex air-attacking action simulation, the paper designs the typical flight target track model and performs the simulating of flight. Analyzing moving track and characteristics of flight target, seven kinds of typical and universal scenario design method and mathematical model are given to describe flight track of moving target. At the same time, analyses the process flow of flight track simulation, and provide resolve method of several key technique for flight track simulation. Practice proves that the model and method show correct and good effect in Simulation application.

Keywords: flight track; track simulation; scenario; mathematical model

0 引言

防空指挥控制系统的主要打击对象是敌空中目标, 利用计算机及其相关技术仿真全方位、多批次、多架数、多层次的飞机进袭空情对于高效地研制和评估防空指挥控制系统起着十分重要的作用, 也是部队训练演练的一个基本前提。构建飞机目标运动航迹的数学模型是空情产生仿真平台的核心。要逼真地模拟多目标的航迹, 客观地反映空情态势是一个十分复杂的问题。为了降低问题的难度及方便使用, 在飞机航迹仿真中忽略飞机驾驶员的无意机动、空气扰动等随机因素的影响, 并把多目标的航迹生成问题简化为单目标及单编队航迹的生成问题, 然后在单目标航迹的基础上再组成含有多目标航迹的能反映敌方进攻态势的空情, 以满足仿真和部队训练的要求。

1 飞机航迹分析及数学模型

1.1 坐标模型

仿真平台中采用地理信息系统 (Geography Information System, GIS) 实现战场态势的可视化编辑显示, 方便空情可视化想定编辑和实时运行显

示。为了匹配 GIS 的二维、三维态势显示接口, 飞机航迹模型参考坐标系选用 WGS84 大地坐标 (B, L, H) 和高斯投影坐标 $(X, Y, Z(H))$ ^[1]。目标航向 (θ) (北偏东度数) 是以正北为 0° 沿顺时针方向度量的角度^[1]。模型处理约定: 水平面上, 正北方向为 X 轴正向, 正东方向为 Y 轴正向; 垂直于水平面的方向为 $Z(H)$ 轴方向, 向上为正, 向下为负。在模型建立时, 要把经纬度坐标转化为高斯投影坐标处理, 处理完成后转换为经纬坐标发送并态势显示。

1.2 几种典型目标运动航迹模型

对飞机目标的运动航迹进行细化分析可以得出, 飞机对地攻击的航迹不外乎由直线航路段、圆弧拐弯航路段、爬高或俯冲航路段等基本航迹段组合而成。因此, 上述几种典型航迹模型的建立是真实模拟空袭目标的基础和核心, 其他各种战术动作可由它们组合得到。

总结多年来靶场系统鉴定和训练对目标航迹的要求, 作为一个通用的空情产生模拟器必须能方便编辑和模拟生成飞机目标直线航迹、直线或拐弯俯冲航迹、盘旋航迹、 ∞ 字航迹、跑道航迹、圆周航迹、S 线航迹、分批航迹、合批航迹等基本航迹^[2],

收稿日期: 2010-07-08; 修回日期: 2010-08-17

基金项目: 军队专项建设经费资助项目 (2005ZS1303)

作者简介: 苏春梅 (1979-), 女, 宁夏人, 硕士, 工程师, 从事靶场仿真试验技术研究。

并能逼真模拟不同型号飞机的飞行特征, 其中, 对于目标分、合批航迹的模拟可简化为单目标航迹的组合。

目标运动的典型航迹可以分解为直线、圆、弧线近似描述。一条三维的目标航迹可按平面层和高度层来组合形成, 分段描述。空情想定编辑时, 首先在二维态势图上通过直线与圆弧, 圆弧与圆弧相连, 形成二维可视化航迹; 通过编辑连接点的属性, 分段定义目标的速度、高度等参数; 再根据连接点高度的落差, 对拐弯处用弧线平滑过渡, 以达到综合描述一条运动航迹的目的。

为了使空情产生模拟器能逼真地仿真不同型号飞机的飞行特性, 建立了飞机特性数据库, 用以提高飞机目标航迹模拟的逼真度。飞机特性数据库中包含不同型号飞机不同高度层常用加速度、最大平飞速度、最小平飞速度, 及飞机最小拐弯半径等典型参数。在空情产生模拟器模型处理时可依据想定设计要求查询飞机特性数据, 使软件生成的飞机航迹数据更接近真实飞机特性。

下面给出几种典型目标航迹的想定设计方法和运动航迹模型。

1.2.1 直线运动

直线运动是飞机采用最多的运动方式。在想定设计时顺序输入起点、终点 2 个拐点(也叫特征点), 其两点连线即为直线运动航迹。如图 1 中 AB 直线段所示, A 、 B 坐标为 $A(X_A, Y_A, H)$, $B(X_B, Y_B, H)$ 设空情目标在第 $i-1$ 个仿真步长时间结束时位于点 A_{i-1} , 沿航向 θ 方向作匀速运动, 速度为 v , 经过一个仿真步长时间 Δt , 到达 A_i , 则 A_i 点坐标为:

$$\theta = a \tan[(X_B - X_A) / (Y_B - Y_A)] \quad (1)$$

$$X_i = X_{i-1} + v \times \sin(\theta) \times \Delta t \quad (2)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + v \times \cos(\theta) \times \Delta t \quad (3)$$

其中: $\theta \in [0, 360^\circ]$ 。

假设目标从拐点 A_i 处开始加速, 设置增速后速度为 vv , 则模型自动查询数据库所设定型号飞机该高度层常用加速度 a , 按照仿真步长 Δt 推算目标飞行位置, 其推算模型为:

$$v_{i+1} = v_i + a \times \Delta t \quad (4)$$

$$X_{i+1} = X_i + (v_i + a \times \Delta t / 2) \sin(\theta) \times \Delta t \quad (5)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + (v_i + a \times \Delta t / 2) \cos(\theta) \times \Delta t \quad (6)$$

在基于仿真步长推算过程中, 需要在每一个周期判断当前速度 v_{i+1} 是否大于或等于 vv , 是, 则改变状态, 以 vv 速度匀速运动并按照匀速运动模型推

算, 否则, 继续按照加速运动航迹模型推算。

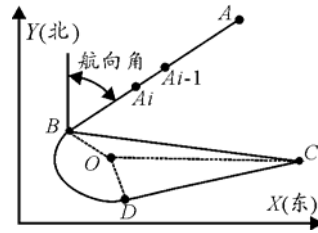


图 1 平面层直线—圆弧航迹示意

1.2.2 圆弧运动

圆弧运动^[3]是飞机在转弯时经常采用的运动方式。在想定设计过程中, 给定了飞机的飞行关键点 (A 、 B 、 C 三点), 如图 1, 飞机要从 A 点经过 B 点飞向 C 点, 中间要经过圆弧转弯运动进行过渡。飞机最终的运行航迹为由 A 经直线飞行到 B , 经 B 圆弧飞行到 D , 再由 D 直线飞行到 C 点。其中 AB 、 CD 段运动模型见直线运动航迹模型。 BD 段圆弧运动的相关参数计算如下:

- 1) 计算转弯半径: $R = \frac{v^2}{g \times \tan(b)}$, 其中, v 为飞机飞行速度, g 为重力加速度, b 为飞机转弯坡度;

2) 根据航线关键点判断飞机转弯方向(左转或右转);

3) 根据 B 点位置、半径 R 和 AB 的矢量方向求圆心 O 位置;

4) 求 $\angle DOC = a \cos(R/CO)$, 其中, CO 为 O 到 C 点距离;

- 5) 求 OC 矢量方向 $K1 = \text{atan}(\frac{Y_C - Y_O}{X_C - X_O})$;

6) 求 OD 的矢量方向 $K2 = K1 + \angle DOC$ (左转) 或 $K2 = K1 - \angle DOC$ (右转);

7) 根据 $K2$ 、半径 R 和圆心 O 的位置求 D 点位置。

在计算运动航线第五步中, 如果 OC 的距离小于半径 R , 此时飞机不能在 B 点转弯, 需根据 AB 的航向继续外推一段距离, 以满足转弯半径的要求。

为了简化圆弧运动模型处理, 设定飞机转弯坡度为 45° , 设目标在第 $i-1$ 个仿真步长时间结束时位于点 A_{i-1} , 经过一个仿真步长时间 Δt , 到达 A_i , 当前点航向为 θ_{i-1} , 切向速度为 v , 则 A_i 点坐标为:

$$\text{转弯方向: 左转}$$

$$\text{如果目标匀速运动:}$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} - v \times \Delta t / R \quad (7)$$

$$R = R' \quad (8)$$

$$X_i = X_{i-1} - R \cos(\theta_{i-1}) + R' \cos(\theta_i) \quad (9)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + R \sin(\theta_{i-1}) - R' \sin(\theta_i) \quad (10)$$

如果目标以加速度 a 变速运动:

$$v_i = v_{i-1} + a \times \Delta t \quad (11)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} - (\log v_i - \log v_{i-1}) \times g \times \text{tg}(b) / a \quad (12)$$

$$R_i = R_{i-1} \times \cos(0.5 \times \pi - a \tan(g \times \text{tg}(b) / (2 \times a))) \quad (13)$$

$$R_i' = R_i \times v_i^2 / v_{i-1}^2 \quad (14)$$

$$X_i = X_{i-1} - R_i \cos(\theta_{i-1}) + R_i' \cos(\theta_i) \quad (15)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + R_i \sin(\theta_{i-1}) - R_i' \sin(\theta_i) \quad (16)$$

转弯方向: 右转

如果目标匀速运动:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + v \times \Delta t / R \quad (17)$$

$$R = R' \quad (18)$$

$$X_i = X_{i-1} + R \cos(\theta_{i-1}) - R' \cos(\theta_i) \quad (19)$$

$$Y_i = Y_{i-1} - R \sin(\theta_{i-1}) + R' \sin(\theta_i) \quad (20)$$

如果目标以加速度 a 变速运动:

$$v_i = v_{i-1} + a \Delta t \quad (21)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + (\log v_i - \log v_{i-1}) \times g \times \text{tg}(b) / a \quad (22)$$

$$R_i = R_{i-1} \times \cos(0.5 \times \pi - a \tan(g \times \text{tg}(b) / (2 \times a))) \quad (23)$$

$$R_i' = R_i \times v_i^2 / v_{i-1}^2 \quad (24)$$

$$X_i = X_{i-1} + R_i \cos(\theta_{i-1}) - R_i' \cos(\theta_i) \quad (25)$$

$$Y_i = Y_{i-1} - R_i \sin(\theta_{i-1}) + R_i' \sin(\theta_i) \quad (26)$$

1.2.3 圆周运动

对于圆周运动航迹, 在想定设计时设置初始参数有 2 种方式: 一种是输入不同线三点, 求得三点的外接圆为其航迹, 其圆周运动起始航迹为顺序输入的第一点, 运动方向为三点的顺序方向; 另一种是输入两点和旋转方向, 其中第一点为圆心, 第二点为圆周航迹起始点。基于三点的圆周航迹示意图如图 2, 其中, A 点为航迹起点, AB 段为飞机直线进入段, 运动航迹参见直线运动航迹模型, 飞机从 B 点进入圆周运动, 方向为 AB 切线方向进入。圆周运动计算模型如下:

设 A 、 B 、 C 三点的坐标为 (X_A, Y_A, H) , (X_B, Y_B, H) , (X_C, Y_C, H) , 首先计算圆周运动圆心和半径。

圆心 O 为 BC 中垂线与 AB 垂线 OB 的交点。

BC 中垂线方位角:

$$k1 = \arctan[(X_C - X_B) / (Y_C - Y_B)] + \pi / 2, k1 \in [0, 2\pi] \quad (27)$$

OB 方位角:

$$k2 = \arctan[(X_B - X_A) / (Y_B - Y_A)] + \pi / 2, k2 \in [0, 2\pi] \quad (28)$$

BC 中垂线斜率:

$$t1 = 1 / \tan(k1) \quad k1 \neq 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, \text{ 否则 } t1 = 0 \quad (29)$$

OB 斜率:

$$t2 = 1 / \tan(k2) \quad k2 \neq 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, \text{ 否则 } t2 = 0 \quad (30)$$

圆心坐标:

$$X_o = [(Y_B - Y_C) / 2 + t1 \times (X_B + X_C) / 2 - t2 \times X_B] / (t1 - t2) \quad (31)$$

$$Y_o = t2 \times (X_o - X_B) + Y_B \quad (32)$$

圆半径:

$$R = \sqrt{(X_B - X_o)^2 + (Y_B - Y_o)^2} \quad (33)$$

其中, $R \geq \sqrt{\frac{v^2}{g \times \text{tg}(b)}}$ (v 为飞机飞行速度, g 为重

力加速度, b 为飞机转弯坡度), 如果 $R < \sqrt{\frac{v^2}{g \times \text{tg}(b)}}$, 则提示设定半径过小, 请重新输入。重新输入坐标使计算的圆半径满足条件。已知 R 和初始航向 θ (AB 直线航路), 则基于仿真步长推算的圆周运动目标位置坐标计算模型, 同圆弧运动航迹模型处理。

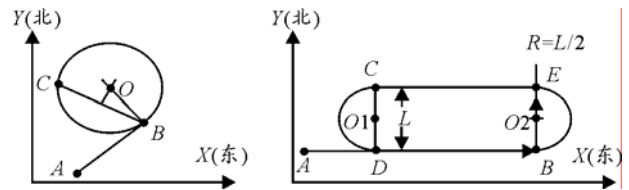


图 2 平面层圆周航迹示意

1.2.4 跑道线运动

飞机跑道线运动也是一种典型的飞行航路, 跑道线典型航迹示意图如图 3, 在想定设计时选择输入跑道线, 并依次输入 A 、 B 、 C 三个不同线的特征点, 即可确定跑道线的航迹, 跑道线运动可分解为直线运动与圆弧运动的组合, AB 段为飞行直线进入段, 飞机由 B 点进入跑道线, 其飞行方向为 $A \rightarrow B$ 直线运动, $B \rightarrow E$ 圆弧运动, $E \rightarrow C$ 直线运动, $C \rightarrow D$ 圆弧运动, $D \rightarrow B$ 直线运动。在计算目标位置时可基于航线属性分段处理, 直线运动参见直线运动航迹模型, 圆弧运动参见圆弧运动航迹模型。

1.2.5 S 线运动

在飞机实际飞行中, 还有一类比较典型的运动方式, 即 S 线运动^[3], 是爬高、下滑抛物段及总体飞行规划时经常采用的一种运动方式, 典型航迹如图 4。其中, AB 、 CD 、 EF 为直线段, BC 、 DE 为飞机拐弯调整航向段。所谓 S 线运动并不是指飞机

会棱角分明地转折运动, 而是预先布置飞行线路时的一种取点考虑。因运动的物体是不可能按照折线航迹运动的, 视物体承载荷的能力, 从转弯处开始, 首先应沿一个同直航段相切的圆弧作机动运动, 待其运动方向对准终点位置后, 再改为至终点位置的直航运动。因此, 实际飞机航迹应由一段圆弧加上前后一段同圆弧相切的直线航迹组成。由于在机动时, 一般机动半径不会过大, 因此, 仍可利用前面直线与圆弧的处理方法, 将二者复合分段得到目标运动航迹。

得到平面上目标的运动航迹后, 再通过编辑特征点的速度来描述目标的运动特性; 通过编辑高度来描述目标的第三维特征。由于各个特征点的速度和高度可能不同, 造成了各段的加速度不同, 但由于各段通过特征点平滑连结, 可由速度和高度得到平滑过渡。如图 5 所示, 当相邻 2 个拐点的高度发生变化时, 由 H_1 下滑到 H_2 , 或由 H_2 爬升到 H_1 , 笔者先用折线连结, 再根据机动情况读取飞机特性数据最小拐弯半径和下滑或爬升改平速度, 计算飞机两拐点的过渡圆弧半径及相应需时, 用一段内切圆弧来实现平滑过渡。具体运动模型及算法与平面

相似。假设高度下降是均匀的, 高度可分段描述为时间的函数^[2]。

通过上述描述可得出, S 线运动平面上的航迹可通过直线与圆弧的相切来近似仿真。线的方向由 A 到 F, 与目标运动方向相同。目标的高度可通过时间与其在平面上的航迹对应。在实际的应用中, 根据具体仿真的要求, 可以通过更多的拐点来描述更为复杂的运动方式。

1.2.6 ∞字线运动

飞机∞字线运动也是考核防空指挥控制系统中常用的一种运动方式, ∞字线典型航迹示意图如图 6 所示, 在想定设计时选择输入∞字线, 并依次输入 A、B、D 三个不同线的特征点, 即可确定∞字线的航迹, 图 6 中, ∞字线运动可分解为直线运动与圆弧运动的组合, AB 段为飞行直线进入段, 飞机由 B 点进入∞字线, 其飞行方向为 A→B 直线运动, B→C 直线运动, C→D 圆弧运动, D→E 直线运动, E→B 圆弧运动, B→C 直线运动, C→F 直线运动退出段。在计算目标位置时可基于航线属性分段处理, 直线运动参见直线运动航迹模型, 圆弧运动参见圆弧运动航迹模型。

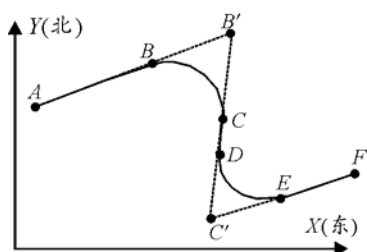


图 4 平面层 S 航迹示意

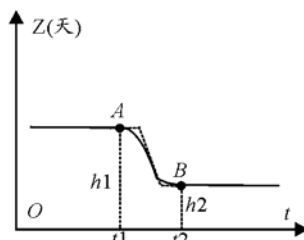


图 5 高度层下滑运动示意

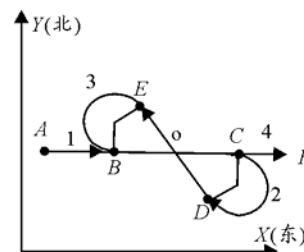


图 6 平面层∞字航迹示意

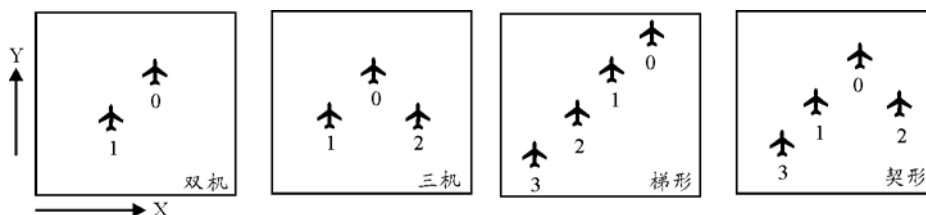


图 7 典型编队队形分布

1.2.7 编队运动航迹模型

目标编队飞行是空袭飞机常用的一种飞行组合模式, 飞机编队飞行比较典型的几种组合方式有: 双机、三机、梯形、契形等, 如图 7。在仿真实验中, 飞机编队多架飞机目标航迹发送只赋一目标编号, 另在发送结构中增加一字段描述编队中单机序号, 如图 7 中飞机图标下数字所示。编队中长机控制其编队的飞行属性, 其运动航迹模型同单机, 编

队中各僚机依照编队组合所设置的位置间隔 (ΔX)、距离 (ΔY)、高度 (ΔH), 分布在长机周围, 与长机同步飞行。例, 对于图 7 所示契形编队, 0 号机为长机, 基于单机运动模型计算得其 i 时刻的位置坐标为 (X_i, Y_i, H_i) , 则依据想定设置分别计算僚机位置, 1 号僚机的位置坐标为 $(X_i - \Delta X, Y_i - \Delta Y, H_i + \Delta H)$, 2 号僚机的位置坐标为 $(X_i + \Delta X, Y_i - \Delta Y, H_i + \Delta H)$, 3 号僚机的位置坐标为

$$(X_i - 2 \times \Delta X, Y_i - 2 \times \Delta Y, H_i + \Delta H)^{[4]}.$$

2 飞机航迹仿真技术

2.1 飞机航迹仿真流程

图 8 为空情产生仿真平台飞机航迹仿真的基本流程：1) 空情想定编辑；2) 配置想定，设置仿真步长；3) 仿真初始化，加载想定进行想定转换；4) 仿真开始，基于仿真步长推算飞机航迹，发送并显示；5) 仿真结束，将缓存中实时记录的飞机航迹信息写入硬盘文件，结束仿真。

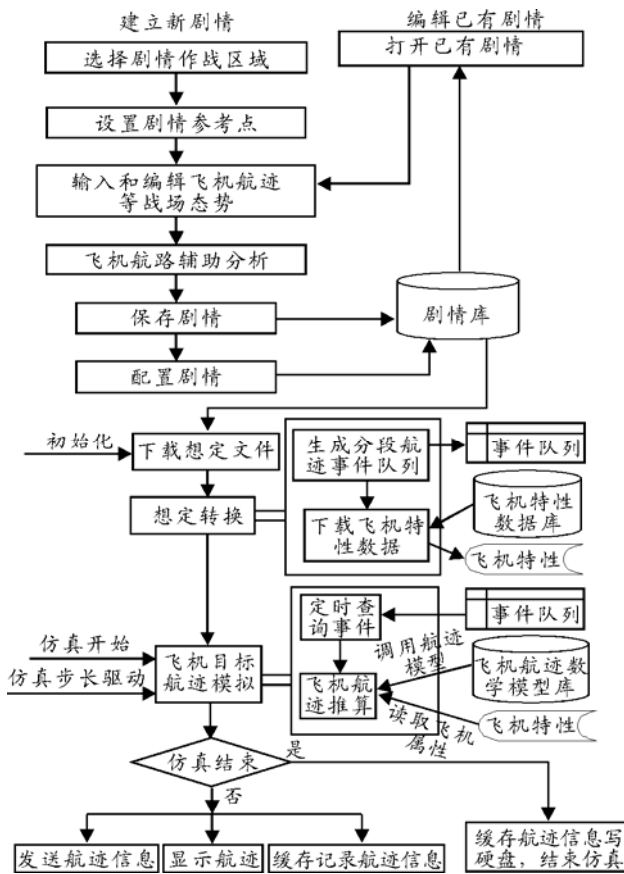


图 8 飞机航迹仿真流程

2.2 飞机航迹仿真推算方法

确定了目标的运动航迹和运动特征后，就可以通过模型计算将目标航迹分段处理，得到目标各特征段的特征参数及发生时间，将一条航迹离散成所需要的特征段集合。由于目标到达每个特征段的时间已知，所以可根据目标的离散时间基于离散事件仿真^[5]分段处理。

想定设计明确了目标运动航迹和运动特征，并给出了相应运动特征参数，就可以在软件想定编辑界面进行目标航迹编辑并保存，软件读取目标信息基于模型计算得到目标分段航线属性，并顺序将各

航线段属性压入目标事件队列。仿真开始，软件处理线程基于仿真步长 Δt ，定时查询目标事件队列是否有该时间发生的事件，到达相应航线段发生的时间，软件读取其特征参数，再根据目标运动航迹模型公式，依次定时推算 Δt 后的目标位置及航向信息并发送。

目标事件包含：1) 平面维：匀速平飞、加速平飞、减速平飞、返航、转弯、巡逻、击毁；2) 高度维：爬高、下滑。

2.3 时钟同步和仿真时钟推进方式

采用时钟同步 C/S 模式进行对时，保证仿真平台的时间一致，其中，时钟同步服务器取 GPS 或时统中心站精准时间给仿真平台其它软件进行时间对齐。时钟同步客户端加载于平台各软件的底层，为各上层应用软件提供时间服务。空情产生基于仿真步长（步长大小可任意给定）推进，基于仿真控制命令同步各软件的仿真进度，以仿真开始所对应的时刻为仿真时钟的零点；空情产生根据想定设计产生空情目标发送，以仿真结束所对应的仿真时间为终点结束仿真。按照设定的仿真步长实时地记录目标航迹参数并存储，以备事后仿真重演和评估。

2.4 航迹参数的发送与目标的航向改变

航迹参数主要包括飞机在各飞行时刻的经纬度坐标、航向、航速等，经纬度坐标可由目标推算高斯坐标转化而得。航迹参数能否实时发送和正确记录，将直接影响到发送数据的正确性及作战效能评估的有效性。航迹参数的发送基于仿真步长定时推算发送，由于数据写文件比较耗时，可能会影响 CPU 处理效率，为了不影响发送数据的实时性，航迹数据的记录为发送并写本地缓存，在仿真结束时统一写记录文件的实现方式。直线飞行时，航向没有变化，但弧线运动和大 S 线运动时，由于目标位置和航向在不断变化，且变化率比较快，因此，要根据航线要求实时计算航向角。对于飞机航向角的确定，在软件实现时根据飞机分段属性分别处理，对于航线属性直线运动航向没有变化，只计算一次即可。对于航线属性为圆弧运动的航向角计算可参见 1.2.2 节 θ 的计算公式。

2.5 航迹的编辑、生成与军标显示

空情产生是依据想定剧本编辑的，空情产生前首先要进行想定设计，想定设计流程如下：1) 在想定编辑界面选择符合特征的相应飞机图标，弹出目

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)

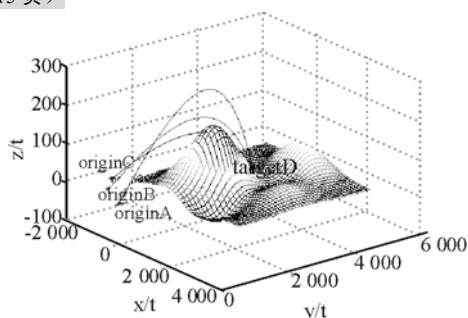


图 8 地形影响下各火力点射击结果

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

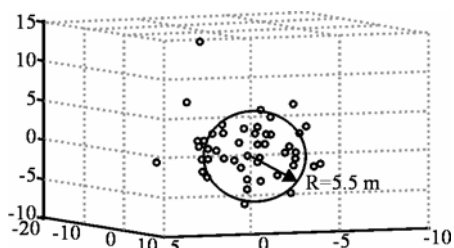


图 9 弹着点分布图

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] 孙艳颖, 袁志华, 王欣. 随机风扰动下的弹丸落点散布仿真分析[J]. 火箭与制导学报, 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.