

6-4-2020

## Research of Impact Point Accuracy of One-dimensional Trajectory Correction Projectile Based on Monte Carlo

Xiaoyun Lei

*ZNDY of Ministerial Key Laboratory, NUST, Nanjing 210094, China;*

Zhian Zhang

*ZNDY of Ministerial Key Laboratory, NUST, Nanjing 210094, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Research of Impact Point Accuracy of One-dimensional Trajectory Correction Projectile Based on Monte Carlo

## Abstract

**Abstract:** After the one-dimensional trajectory correction projectile out of the muzzle, various disturbance factors caused the impact point dispersion. Monte Carlo method was utilized on the shooting accuracy analysis. Based on the practical test datasets, three major factors were determined, namely, time delay of opening-damper mechanism, error of drag coefficient and measurement error of target. *As to the disturbances, function randn was used for the analysis of the three major factors on the flat of Matlab. According to error distribution of the factors, the probability distribution and dispersion of the impact point were obtained. The maximum and minimum ranges of allowable errors were determined.* Simulation results show that, the minimum range of the errors can meet the requirement of the shooting accuracy, which provides some basis for further improvement of correction accuracy.

## Keywords

one-dimensional trajectory correction projectile, Monte Carlo study, error analysis, impact point accuracy

## Recommended Citation

Lei Xiaoyun, Zhang Zhian. Research of Impact Point Accuracy of One-dimensional Trajectory Correction Projectile Based on Monte Carlo[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1685-1692.

# 基于蒙特卡罗法的一维弹道修正弹落点精度分析

雷晓云, 张志安

(南京理工大学智能弹药国防重点实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 一维弹道修正弹出口后会因各种扰动因素影响形成落点散布, 利用蒙特卡罗法研究影响射击精度的因素。根据实际试验数据, 确定了 3 个主要扰动因素: 阻尼片张开延时误差、阻力系数误差和目标测距误差。针对扰动因素, 利用 *randn* 函数在 Matlab 软件平台下, 进行弹道仿真研究; 基于确定的各因素误差分布, 得到各个因素对落点影响的概率分布以及落点密集度, 确定了各项误差的最大、最小允许范围, 仿真研究表明, 在最小误差源条件下可以保证落点精度要求, 为提高修正精度提供依据。

**关键词:** 弹道修正弹; 蒙特卡罗法; 误差分析; 落点精度

中图分类号: TJ013.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 07-1685-08

## Research of Impact Point Accuracy of One-dimensional Trajectory Correction Projectile Based on Monte Carlo

Lei Xiaoyun, Zhang Zhian

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** After the one-dimensional trajectory correction projectile out of the muzzle, various disturbance factors caused the impact point dispersion. Monte Carlo method was utilized on the shooting accuracy analysis. Based on the practical test datasets, three major factors were determined, namely, time delay of opening-damper mechanism, error of drag coefficient and measurement error of target. *As to the disturbances, function randn was used for the analysis of the three major factors on the flat of Matlab. According to error distribution of the factors, the probability distribution and dispersion of the impact point were obtained. The maximum and minimum ranges of allowable errors were determined.* Simulation results show that, the minimum range of the errors can meet the requirement of the shooting accuracy, which provides some basis for further improvement of correction accuracy.

**Keywords:** one-dimensional trajectory correction projectile; Monte Carlo study; error analysis; impact point accuracy

## 引言

普通弹丸的引信增加距离修正功能可在一定程度上提高弹丸的毁伤概率。修正后的弹丸在空中无控飞行时仍会受到诸多扰动因素影响, 使

得最终的弹丸落点形成一定程度的散布<sup>[1]</sup>。对修正弹的精度和误差分析, 可为进一步提高弹丸落点精度提供依据。若采用实际弹丸发射试验做统计分析各个误差源影响, 所耗费人力物力将是不能承受的。本文采用计算机蒙特卡罗仿真的方法, 利用实际发射的弹丸上的回收数据, 进行了足够次数的仿真研究, 可大大提高研究结论的精确性。对于非线性的一维弹道修正弹系统模型, 采用蒙特卡罗法可直接对弹丸落点精度进行分



收稿日期: 2015-01-20      修回日期: 2015-04-02;  
作者简介: 雷晓云(1990-), 女, 湖北荆州, 博士生, 研究方向为智能弹药和机电一体化; 张志安(1979-), 男, 黑龙江绥化, 博士, 讲师, 研究方向为智能弹药与飞行控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1685 •

析而无需对系统进行线性化。该方法直观明了，可信度高<sup>[2]</sup>。

本文在仿真的基础上根据各种主要的扰动误差统计分析结果定量地对落点精度进行分析、评估和预测。可据此对弹丸的结构和引信装置进行改进，可进一步提高修正弹的打击效率。

## 1 基于 GPS 的一维弹道修正弹修正原理及弹道模型

### 1.1 修正原理

本文以新 40 弹道修正弹为平台进行分析验证。新 40 修正弹的修正机构是具有可控张开式翼片浆型阻力器。弹丸发射前，系统上电，GPS 机自动搜索 GPS 定位信号，目标信息被预装，星历装订器按一定通信协议完成星历装订。弹丸发射后，弹载 GPS 接收系统实时接收弹丸的 GPS 信息，并完成由 WGS-84 坐标系到弹道坐标系的转换，将最后弹丸的实时射程、射高、弹道倾角、飞行速度发送给 DPS 核心控制器进行弹道解算，判断解算条件，当满足判断条件时，即阻力器张开的合理时间以计算出，此时 DSP 发出控制指令给升压起爆电路使拔销器动作，阻力片解除锁定而张开，弹丸飞行阻力增大，最终完成距离修正<sup>[3-5]</sup>。

### 1.2 弹道数学模型

根据一维修正弹“打远修近”的修正原理，当阻尼片未展开时，弹丸的空气阻力系数为  $C_{x0}$ ，当阻尼片接到控制系统指令展开时弹丸的空气阻力系数增加了  $\lambda$  倍，变为  $\lambda \cdot C_{x0}$ 。增程火箭弹一维弹修正方程组见式(1)，(2)和(3)。

$$\begin{cases} m_{f\_ave} = \frac{M_{fuel}}{t_{end} - t_{st}} \\ Mass = \begin{cases} m + m_{lose} - m_{f\_ave}(t - t_{st}) & t_{st} < t \leq t_{end} \\ m + m_{lose} & t \leq t_{st} \\ m & t > t_{end} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)是火箭弹飞行过程质量变化式；其中

$M_{fuel}$  为火箭发动机燃料质量 kg； $m_{f\_ave}$  为发动机燃料燃烧的平均速度 kg/s； $t_{st}$ 、 $t_{end}$  分别为燃料燃烧开始时间和燃料燃烧结束时间 s； $m_{lose}$  为增程段结束后弹丸总脱落质量 kg； $m$  为弹体在弹道段的质量 kg； $Mass$  为火箭弹的动态质量 kg。

$$\begin{cases} \dot{v}_x = v \cos \theta \\ \dot{v}_y = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{-g \cos \theta}{v} \\ \dot{v} = \begin{cases} \frac{m_{f\_ave} \cdot u_{eff}}{Mass} - \frac{\rho v^2 \cdot S_m \cdot C_{x0}}{2 \cdot Mass} - g \sin \theta & t \leq T_c \\ \frac{m_{f\_ave} \cdot u_{eff}}{Mass} - \frac{\rho v^2 \cdot S_m \cdot \lambda \cdot C_{x0}}{2 \cdot Mass} - g \sin \theta & t > T_c \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$C = \begin{cases} i_{43} \cdot C_{x0}(\text{Ma}), & t \in [0, t_c) \\ \lambda \cdot i_{43} \cdot C_{x0}(\text{Ma}), & t \in [t_c, T] \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中  $U_{eff}$  为火箭发动机燃料燃烧产生的有效排气速度 m/s； $T_c$  为阻尼片展开时刻 s； $T_c$  为阻尼器展开时刻； $t$  为弹丸飞行时间； $\rho$  为空气密度； $S_m$  为弹丸的特征面积； $S = \pi d^2 / 4$ ； $d$  为弹丸最大横截面直径。

式(3)中  $C$  为阻力系数， $i_{43}$  为弹形系数， $C_{x0}(\text{Ma})$  为零升阻力系数， $\lambda$  为增阻系数，即阻尼器展开前后弹丸空气阻力系数增大的倍数。

在标准气象条件下，攻角  $\delta$  为小量忽略不计，同时忽略弹道扰动噪声，其中  $i_{43}$ 、 $d$ 、 $m$  及  $\lambda$  表征的是弹丸本身的特征量，统称为弹道系数。对于特定的弹丸和阻尼器而言，在亚音速范围内， $\lambda$  的值近似为常数。从修正方程组中可以看出，只要能够解算出合适的阻尼片展开时刻  $T_c$  就可以对弹丸的射程进行修正<sup>[6]</sup>。

## 2 落点精度分析

### 2.1 分析方法和原理

蒙特卡罗方法的基本理论是大数定律和中心极限定理<sup>[7]</sup>，由大数定理可知提高模拟次数可以提

高估值精度, 这里可根据仿真精度需求选取合理的蒙特卡罗模拟次数。在应用蒙特卡罗方法时, 要求产生的随机数序列应符合该随机变量特定的概率分布。而产生各种特定的、不均匀的概率分布的随机数序列, 可行的方法是先产生一种均匀分布的随机数序列, 然后再设法转换成特定要求的概率分布的随机数序列, 以此作为数字模拟试验的输入变量序列进行模拟求解。

可以认为确定性影响因素是对弹丸固有的影响因素, 始终存在, 只是在量值上有范围变化, 在设计过程中首先要确定它们的范围和规范值, 如弹丸阻力系数。而随机影响因素根据弹道和外界条件, 它们的存在是随机的, 如随机横风的影响。各个干扰因素服从正态分布, 利用 `randn` 函数可在 `Matlab` 仿真环境中获得一组已知分布的标准正态分布随机变量值。在建立的弹道模型下进行弹道仿真, 每次仿真就可获得一组落点射程的值, 及其落点散布的平均值, 标准差和圆概率误差值(CEP)。炮弹落点精度定义为炮弹落入以目标为中心, 以  $R$  为半径的圆内的概率, 即 CEP 值<sup>[8-9]</sup>。

根据中心极限定理, 炮弹射程散布可视为以试验图定条件为中心的正态分布, 理论上用标准偏差  $\sigma$  和中间概率误差  $B$  反映散布特征。中间概率误差与标准偏差的关系为<sup>[10]</sup>:

$$B = 0.6745\sigma \quad (4)$$

则距离散布误差的标准偏差  $\sigma_x$  与距离中间概率误差  $B_x$  的关系为:

$$B_x = 0.6745\sigma_x \quad (5)$$

实际常用距离散布密集度  $P$  表示弹着点在距离方向上的散布特征, 表达式为:

$$P = 0.6745\sigma_x/x_{avr} \quad (6)$$

其中  $x_{avr}$  为平均射程<sup>[11]</sup>。

利用加入随机量的初始参数获取的弹丸运动轨迹即可作为引入误差干扰的实际弹道。

新40火箭弹经过多次实地试验验证, 相关参数的标准值如下, 质量  $m=3$  kg, 直径  $d=85$  cm, 弹型系数  $i_{43}=4$ , 增阻系数  $\lambda=7$ , 阻力系数  $C_{x0}=0.157$ 。文

章主要针对不同的确定性误差源, 研究单个误差变化对落点精度的影响。根据已知各影响因素的分布参数通过仿真得到一组落点数据样本, 评估样本。根据落点精度要求, 要求各单项误差的允许范围为  $<1$  m, 由此需要根据每次仿真结果不断缩小误差的允许范围, 多次仿真后得到最终的可靠的并与实际相符合的结论。

## 2.2 仿真研究

在仿真前需去除程序本身误差, 将参数设置为标准值, 并改变目标距离时, 程序本身拟合出现的误差。拟合结果表明目标距离设为 800 m 时, 程序在解算过程中出现的误差最小, 近似为 0.177 6 m, 可以忽略不计。因此, 一般情况下, 在分析各种误差对落点精度的影响且不需要改变目标距离时, 就将目标距离设置为 800 m。对于解算的初始条件的确定则是选取一发实际实验的并获得了优质的全弹道数据的弹丸, 鉴于选择 GPS 坐标点的位置越靠前, 分析弹丸的落点范围就越大, 因此选取弹丸 GPS 位置数据中的出炮口处的位置点作为误差分析的初始条件, 并将每次仿真的非误差参数变量设为标准值。

### 2.2.1 阻尼片张开时刻误差

增阻式射程修正弹主要采用阻尼器方式修正的弹道修正系统, 最关键的一个指标就是确定阻尼器张开时刻  $T_c$ , 而弹道解算时间是阻尼器张开时刻的误差量的主要占有量, 故弹道解算时间的长短, 决定了阻尼器张开时刻的延迟度, 该时间段的误差在实际试验中已通过时间补偿的方法解决, 即在确定张开时间后除了解算时间, 而解算时间是由解算开始时定时器启动记录下来的。另一方面机械动作的延时是无法避免的, 所以仍需要考虑该误差对落点精度的影响。根据实际试验经验, 考虑机械动作延时时间分别在 10 ms, 20 ms 内波动张开对落点影响。仿真得到如图 1,  $\xi$  表示仿真模拟第  $\xi$  发弹丸落点, 其中 “\*” 代表最大延时 10 ms 时的随机落点散布, “•” 代表最大延时 20 ms 时的随机落点散布。

结果表明当最大延时 10 ms 时, 落点距离平均值 799.98 m; 标准偏差 0.58; CEP 为 0.39; P 为 0.000 49; 落在 CEP 以内点数比例 71.5%, 落点最大误差在 1.5 m 以内; 当最大延时 20 ms 时, 落点距离平均值 799.61 m; 标准偏差 1.17; CEP 为 0.79; P 为 0.000 99; 落在 CEP 以内点数比例 57.0%; 落点最大误差达到 2 m 多。在平均值上两者差距甚少, 但标准偏差相差还是很大的, 从落点比例的值比较也可以看出后者散布范围更大, 最大落点误差也大, 所以, 减小延时误差可以在一定程度上控制该误差引起的落点误差。根据可能的引起延时误差的来源, 要减小该误差带来的落点精度影响, 可从以下几个方面考虑: 一方面是点火具的选用, 阻尼片在拔销器动作后张开, 而拔销器的动作是由于其内部点火具被起爆电路引爆后才实现的。目前, 由于实际试验中用到的点火具是毫秒级的, 由此点火具的时间误差可能成为阻尼片动作延时误差的一部分, 市场上还存在微秒级的点火具, 若改用激发时间精度更高的点火具可以在一定程度上减小延时误差; 另一方面对于阻尼片张开过程中传动机构的设计缺陷引起延时, 需要在结构设计中选择张开时间短且误差小的机构。

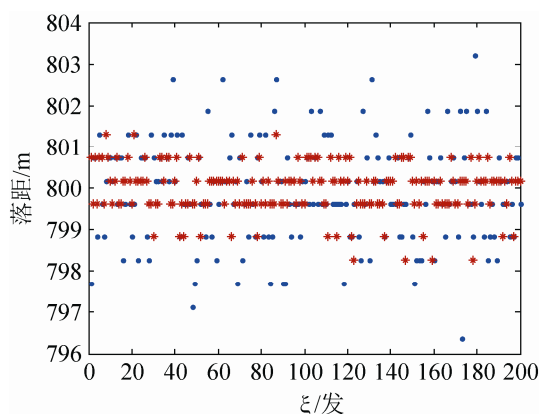


图 1 阻尼片张开延时偏差对落点影响

## 2.2.2 阻力系数误差

阻尼系数对落点影响在于两方面增阻系数  $\lambda$  和弹形系数  $i_{43}$ 。

弹形系数  $i_{43}$  是指弹丸的阻力系数与标准弹丸的阻力系数在相同马赫数下的比值, 它反应了弹丸气动外形的优劣。本实验火箭弹弹形系数标准值为 4, 而由于弹丸的加工工艺等原因而导致加工误差, 使得实际弹丸的弹型系数都有所偏差。本文对弹形系数变化率在 4.5%~14.5% 范围内, 目标距离 800 m 情况下对落点的影响进行了仿真, 并得到如图 2 两条曲线。从图 2 的仿真结论可见, 弹型系数误差量的增大, 落点距离值的标准偏差是增大的, 表明距离值的离散程度是增大的, 即随机落点分散度增大, 所以满足精度条件的随机落点数是减少的, 这点从图中 CEP 的变化也可以看出。但是从图中也可以看出标准偏差和 CEP 的变化率在不同的弹型系数偏差区间具有不是非常明显差别, 但是不难看出在弹型系数可能的出现的误差范围内, 在其误差量大于 13% 后标准偏差和 CEP 值具有明显的加快增大趋势, 所以随机落点的散布范围也是增大较快的。根据式(3)可知弹型系数的误差会影响空气阻力系数值, 而空气作用在弹箭上的力与弹箭相对于空气的运动速度有很大的关系, 所以对落点的精度有很大的影响, 且其影响成增大的趋势。在 8.5%~12.5% 区间, 曲线斜率相对平缓, 考虑减小误差的可能性, 以及各参数变化趋势的突变性选取两个极致区间端点做仿真分析, 所以选取弹形系数变化 7.5% 和 12.5% 来进行仿真研究。得到如下结果, 如图 3 所示, 其中圆点代表弹形系数在  $4 \pm 7.5\%$  范围波动时的随机落点散布, 方点代表弹形系数在  $4 \pm 12.5\%$  范围波动时的随机落点散布。

由图 3 分析可知, 弹形系数偏差在  $\pm 7.5\%$  范围内时最大正向误差约 0.6 m, 最大负向误差约 0.8 m, 均在 1 m 内; 平均值为 800.22 m; 标准偏差 0.28; CEP 为 0.19; P 为 0.000 24; 落在 CEP 以内点数比例 44.0%; 弹形系数偏差在  $\pm 12.5\%$  范围内时最大正向误差约 1.2 m, 最大负向误差约 1.1 m, 已超过 1 m; 平均值为 800.21 m; 标准偏差 0.25; CEP 为 0.17; P 为 0.000 22; 落在 CEP 以内点数比例 38.0%。从图亦可以看出小的偏差下落点分布相对集中在小

的范围内。由此可以得出结论: 落点精度会随着弹型系数偏差的增大而降低。综上所述, 在不考虑其他误差情况下, 若要使弹丸的落点精度保持在 1m 以内, 就需要将弹型系数  $i_{43}$  的值保持在  $4(1\pm 7.5\%)$  之内, 而这样所得弹丸的气动外形才算良好。

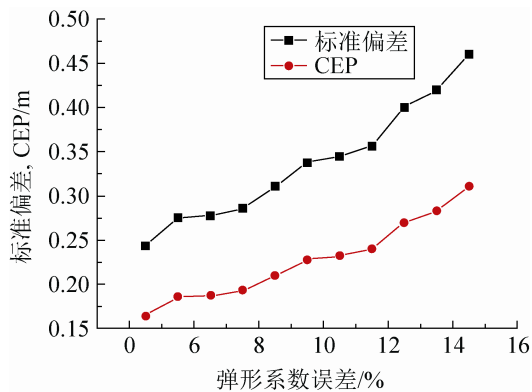


图 2 随机落点标准偏差和 CEP 随  $i_{43}$  偏差变化趋势

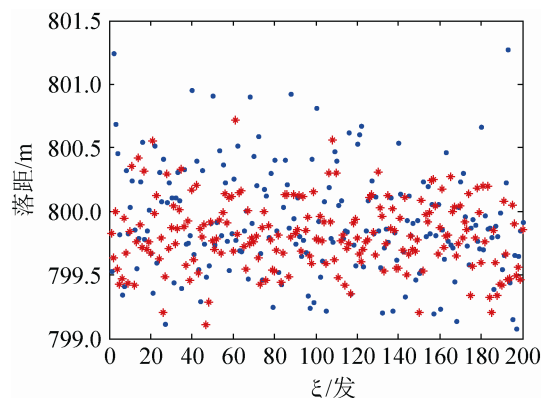


图 3 弹形系数偏差对落点影响

对特定的弹丸及阻力机构, 增阻系数  $\lambda$  在一定速度范围内近视为常数, 但是由于弹丸的加工工艺等原因而导致加工误差, 使得实际弹丸的增阻系数都有所偏差。本文同样对增阻系数的偏差做了简要分析, 分析了偏差在  $\pm(1\% \sim 20\%)$ , 即  $\pm(0.07 \sim 1.4)$  范围内, 目标距离 800 m 情况时对落点精度各个评估参数的影响, 见图 4。同对弹形系数偏差的分析方法, 确定选取最合适的增阻系数偏差 2 个极致点, 即  $\pm 7\%(\pm 0.5)$  和  $\pm 14\%(\pm 1.0)$  来进行仿真分析。取标准增阻系数的值为 7, 偏差分别取  $7\%(\pm 0.5)$  和  $\pm 14\%(\pm 1.0)$  来进行仿真分析,  $i_{43}$  的值保持 4 内, 同样的标准初始条件, 取目标距离为 800 m, 仿真得

到图 5。其中 “\*” 代表增阻系数在  $7\pm 7\%$  范围波动时的随机落点散布, “•” 代表弹形系数在  $7\pm 14\%$  范围波动时的随机落点散布。

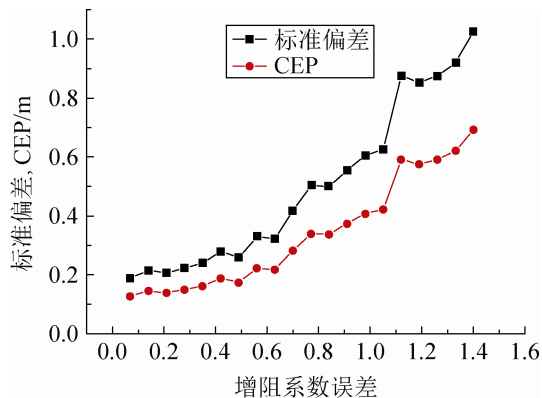


图 4 随机落点标准偏差和 CEP 随  $\lambda$  偏差变化趋势

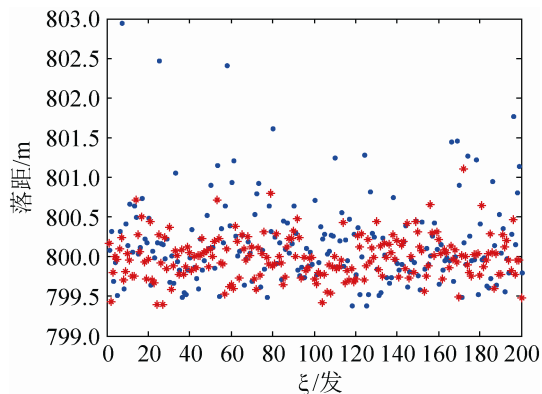


图 5 增阻系数误差对落点精度影响

从图 5 可知: 不考虑其他因素的影响时, 在理想情况下能保证弹丸的弹形系数  $i_{43}$  的值为 4 的前提下, 增阻系数  $\lambda$  的误差在  $\pm 7\%$  之间时, 弹丸的落点精度在 1.0 m 以内, 平均值 800.29 m; 标准偏差 0.42; CEP 为 0.29; P 为 0.000 36; 落在 CEP 以内点数比例 49.0%; 而偏差达到  $\pm 14\%$  时, 这种情况是可能存在的, 因为  $\lambda$  的值是通过大量实验得到的, 具有一定的试验条件限制, 此时落点最大偏差达到 2 m 以上, 平均值为 800.44 m; 标准偏差为 0.73; CEP 为 0.49; P 为 0.000 61; 落在 CEP 以内点数比例 60.0%; 可知, 虽然落在 CEP 以内的点数增加, 但是这是 CEP 值增大带来的, 标准偏差值的增大, 表明散布范围增大, 此时, 需要保持  $\lambda$  值在  $\pm 0.5$  偏差内最好。

将弹形系数偏差考虑在内, 即保证弹型系数误差在 $\pm 7.5\%$ 内, 增阻系数  $\lambda$  误差在 $\pm 0.5$  之间时, 仿真结果表明, 弹丸的落点精度在 1.0 m 以内, 平均值 799.92 m, 标准偏差 0.40; CEP 为 0.27; P 为 0.000 34; 落在 CEP 以内点数比例 54.0%。可见, 弹形系数对落点精度的影响相较于增阻系数来说比较小, 即使在存在弹形系数的误差下,  $\pm 0.5$  的增阻系数误差仍然可以保证单项误差影响范围在 1.0 m 以内。

综上所述, 一维弹道修正弹的阻力系数的误差对弹丸的落点精度影响很大, 若想要从这个方面增大弹丸的落点精度, 则必须提高弹丸的气动外形和阻力机构的加工精度。

### 2.2.3 目标距离测量误差

目前应用的激光测距测目标距离存在误差范围为 $\pm 1.5\text{m}$ 。设置各个仿真参数分析目标距离在 $800\pm 1.0\text{m}$ ,  $800\pm 1.5\text{m}$  服从标准正态分布误差时的落点精度。得到结果如图 6 所示。图中“\*”代表目标距离在  $800\pm 1.0\text{m}$  范围波动时的随机落点散布, “.”代表目标距离在  $800\pm 1.5\text{m}$  范围波动时的随机落点散布。

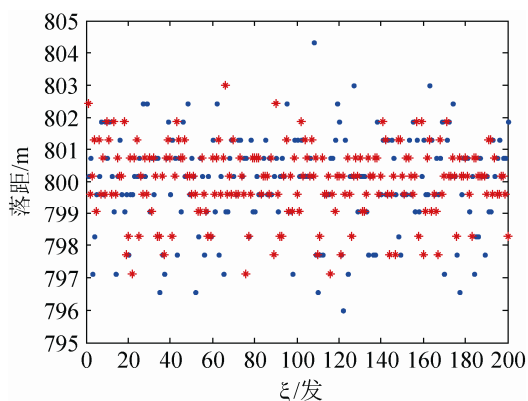


图 6 目标测距误差对落点精度影响

由图 6 可知目标距离 800 m 加入 $\pm 1.0\text{m}$  的误差后, 平均值为 800.28 m; 标准偏差 1.01; CEP 为 0.68; P 为 0.000 85; 落在 CEP 以内点数比例 47.0%; 落点最大正向误差约 2.5 m, 最大负向误差约 2.2 m; 在目标距离 800 m 加入 $\pm 1.5\text{m}$  的误差后, 落点距离平均值为 799.33 m; 标准偏差 1.75, CEP 为 1.18;

P 为 0.001 5; 落在 CEP 以内点数比例 47.0%。落点最大正向误差约 4.0 m, 最大负向误差约 4.0m, 目标测距误差将对落点精度带来很大的影响, 30%左右误差源变化将引起 CEP 值两倍的差距, 而且落点散布的范围将更大。但是即使在 1 m 误差条件下, 由单项目标距离误差引起的落点精度误差仍不满足单项误差 $<1.0\text{m}$  的要求, 经过调整, 只有在该误差 $<0.3\text{m}$  时才使得落点误差降低在 1.0 m 一下, 但是现在实际的 GPS 测量技术, 无法做到这样的精确定位。所以, 为了改善该项误差影响, 最好采用高精度的目标位置信息的测量, 这方面可以考虑利用 GPS 测量技术, 在通过一定的算法转换为解算所需要的信息, 至少保证测距误差最好在 1 m 偏差内。

## 3 综合误差分析

分析各个单项误差的影响后, 确定单项误差对落点的精度影响至少在 1 m 以内的误差范围后, 对落点精度进行综合误差分析, 即在弹道解算过程中加入所有误差项的误差, 对最后综合影响下的落点精度进行分析, 单项误差源的误差范围如表 1。

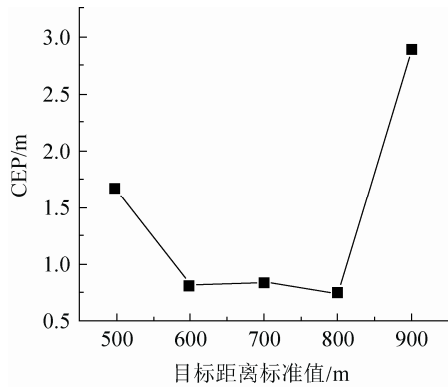
表 1 最小、最大误差源范围

误差类型	弹形系数%	增阻系数%	阻力器张开 延时/ms
Min	7.5	7	10
Max	12.5	14	20

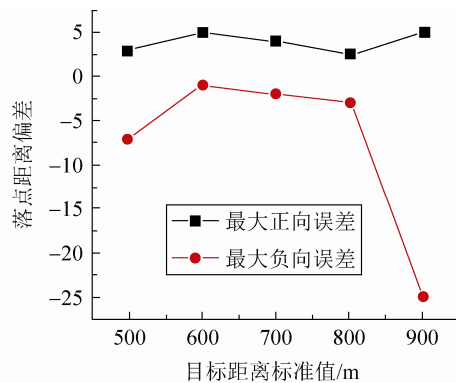
分别在最大、最小误差源条件下, 目标距离标准值分别取 500 m, 600 m, 700 m, 800 m, 900 m 时分别进行仿真分析, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出在最小误差源条件下, 并有合适的目标距离时, 落点的 CEP 值和最大正、负向误差值水平都很低, 且最大正、负向误差大小之和是小于 10 m 的, 由此可见, 当弹丸各种参数满足最小误差源条件时, 最终的精度满足本文要求。在最大误差源条件下, 并在合适的目标距离情况下, 落点的 CEP 值和最大正、负向误差值水平相对最小误差源条件还是高出很多, 且最大正、负向误差大小之和和近 12 m, 接近 10 m, 未能满足本文的精度条件。

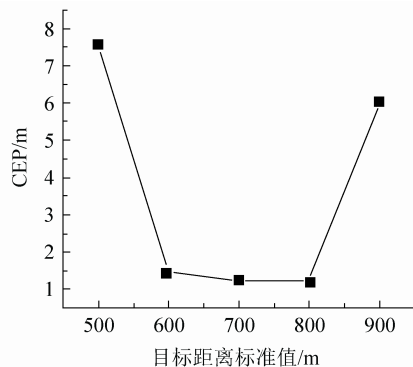




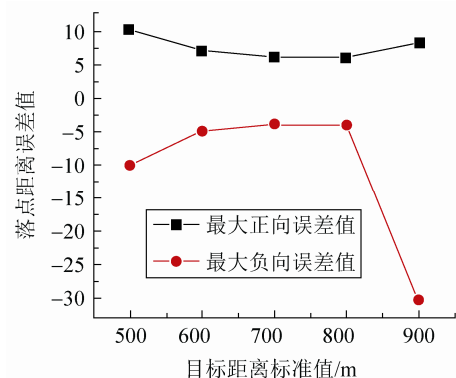
(a) 最小误差源条件下, CEP 随目标距离变化趋势



(b) 最大正、负向误差值随目标距离变化趋势



(c) 最大误差源条件下, CEP 随目标距离变化趋势



(d) 最大正、负向误差值随目标距离变化趋势

图 7 最大、最小误差源条件下的落点精度分析

## 4 结论

本文利用蒙特卡罗法以火箭弹为平台对一维弹道修正弹的落点精度进行了仿真分析。文章主要分析的 3 个影响因素: 阻尼片张开延时误差因素、阻力系数误差因素和目标测距误差因素是多次实际试验的结果, 不可否认, 还存在其他影响因素, 但是各种影响因素对落点的影响均是独立随机的, 可以采用文章中相同的分析方法, 并得出可靠的结论。根据分析, 当主要的影响因素满足: (1) 同样初始条件下阻尼片延时 10 ms, 即主要的解算时间在 20 ms 左右以内时, 可保证单项误差影响小于 1 m; (2) 弹形系数偏差在  $\pm 7.5\%$  范围内, 增阻系数偏差在 0.5 时, 也可保证单项误差影响  $< 1$  m; (3) 目标测距误差在 1 m 误差条件下, 由该误差引起的落点精度误差仍不满足单项误差小于 1.0m 的要求, 只有在该误差  $< 0.3$  m 时才使得落点误差降低在 1.0m 一下, 而现在实际的 GPS 测量技术, 无法做到这样的精确定位, 所以只能增大该误差的允许范围, 至少保证在 1.0m 以内。文章最后对所有单项误差进行了综合仿真研究, 结果表明当目标距离合适时, 最小误差源条件下可以很好保证落点精度, 而最大误差源条件下虽然不能保证本文要求的精度要求, 但是其误差范围还是能够容忍的。

## 参考文献:

- [1] 张永伟, 杨锁昌, 张敏, 等. 基于 GPS 的弹道修正弹落点预测算法误差分析 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(10): 19-21, 34.
- [2] 徐挺, 李斐, 王霞. 制导系统精度分析及误差分配方法 [J]. 四川兵工学报, 2014, 35(3): 18-20.
- [3] 申强, 葛膺, 彭博, 等. 基于 GPS 弹道测量的卡尔曼滤波参数估计算法 [J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(12): 1048-1051.
- [4] 黄建军, 张志安, 陈俊, 等. 基于铁电存储器的弹载数据高速存储系统研究 [J]. 测试技术学报, 2013, 27(1): 50-55.
- [5] 申强, 李世义, 罗会甫, 等. 基于 DSP 的弹道解算器设计与评估 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 203-208.
- [6] 陈俊. 一维弹道修正弹修正机构及控制算法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

(下转第 1700 页)

<http://www.china-simulation.com>