

电磁发射深水炸弹空中弹道性能仿真分析

戴文留, 昌铁强, 廖欢欢, 李永锋, 杨 剑, 万小辉
(中国兵器工业集团有限公司第282厂, 湖南湘潭411207)

摘要 为了探讨电磁发射深水炸弹的弹道性能, 采用六自由度刚体弹道模型和地面密集度仿真预测模型, 研究了基于最大发射动能下电磁发射深弹的射程覆盖范围, 计算了电磁发射深弹最大射程、最小射程下的落点误差, 分析了各误差因素对电磁发射深弹射程、方向中间误差的影响情况。结果表明: 1) 电磁发射深弹的射程覆盖范围由发射装置最大发射动能和电磁发射深弹性能指标共同决定; 2) 电磁发射深弹的落点误差因素主要为初速误差、横向起始偏角误差以及风速误差。

关键词 弹道性能; 最大发射动能; 密集度; 落点误差

中图分类号 TJ866; E932 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2020)02-0123-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.02.006

Simulation and Analysis on Air Ballistic Performance of Electromagnetic Launching Depth Charge

DAI Wenliu, CHANG Tieqiang, LIAO Huanhuan, LI Yongfeng, YANG Jian, WAN Xiaohui
(Jiangnan Industrial Group Co., Ltd., Xiangtan 411207, China)

Abstract In order to study the ballistic performance of electromagnetic launching depth charge, this paper studies the firing-range of the electromagnetic launching depth charge under the maximum kinetic energy using the 6-DOF rigid body trajectory model and ground-dispersion simulation prediction model. The errors of impact point of the electromagnetic launching depth charge under maximum firing-range and minimum firing-range are calculated. In addition, the influence of various error factors on firing-range and directional intermediate error of electromagnetic launching depth charge is studied. The result shows that: 1) the firing-range of electromagnetic launching depth charge is determined by the maximum kinetic energy of launcher and performance index of electromagnetic launching depth charge; 2) the impact point error of electromagnetic launching depth charge is mainly caused by initial velocity error, lateral initial deflection error and wind speed error.

Key words ballistic performance; maximum kinetic energy; dispersion; impact point error

0 引言

电磁发射技术及相关设备的研究是近年来兴起的一个研究热点, 是一项正在逐步发展、完善的尖端推进技术^[1]。电磁发射技术借助电磁力做功, 可以将电磁能转化为弹丸的飞行动能, 与传统的化

学推进发射方式相比具有明显的技术优势^[2]。

电磁线圈发射方式作为电磁发射技术的重要分支, 可实现电枢与驱动线圈无电气和机械直接接触, 还具有可控性好、效率高、寿命长等诸多优点^[3], 可达到较高发射初速、易发射大质量物体, 与舰载深弹武器系统有着很高的契合度, 在海洋攻

防上具有良好的应用前景^[4]。

弹道性能仿真在方案设计、射表编制、模型验证、作战仿真中都有广泛而重要的应用^[5]。因此，分析电磁发射深弹弹道性能对开展电磁发射深弹的研制工作具有重要的参考意义。

本文利用 MATLAB/Simulink 软件建立了六自由度刚体弹道方程，运用蒙特卡洛方法建立了地面密集度的仿真预测模型，着重论述了电磁发射深弹在一定发射动能条件下的射程覆盖范围。同时，综合考虑影响电磁发射深弹地面密集度的各种误差因素，对深弹最大射程、最小射程下的落点误差进行了仿真，分析了各种误差因素对电磁发射深弹射程、方向中间误差的影响程度。仿真结果可为电磁发射深弹及类似电磁发射弹的论证研究提供一定的技术参考价值，其弹道算法可用于电磁发射深弹方案研究。

1 数学模型与分析

1.1 弹道模型

本文弹道模型选用文献[4]给出的六自由度刚体弹道方程。该方程具有精度较高的特点，能完整描述电磁发射深弹在空中的各种动态过程，可用于弹道射程及落点误差的影响因素分析。

为简化模型，对深弹及飞行条件作如下假设^[6]：

- 1) 电磁发射深弹是一个外形和质量分布均匀且轴对称的刚体；
- 2) 气象条件是标准的，风速恒定；
- 3) 重力加速度恒定不变；
- 4) 忽略科式惯性力的影响。

1.2 发射动能

电磁发射深弹依靠发射装置产生电磁力加速运动，受到发射装置电源系统^[7]的制约，电磁发射深弹存在最大的发射动能 E_{\max} 。

$$E_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

式中： m 为电磁发射深弹设计质量； v_{\max} 为电磁发射深弹的最大发射速度。

在最大发射动能 E_{\max} 条件下，可以根据总体设计需求，合理匹配深弹设计质量 m 和最大发射速度 v_{\max} ，来实现深弹的最大射程。同时，在深弹设

计质量 m 确定的情况下，可以通过调节发射动能，改变发射初速，来实现不同的弹道射程，而不需要改变发射射角。

1.3 弹道密集度

根据概率论中心极限定理，弹道射程和侧偏的概率密度服从正太分布。

在弹道学中，通常用中间误差 E 表示射程和侧偏的分布。随机变量出现在均值 μ 左右各1个 E 范围内的概率为50%，这个 E 被称为中间误差。在均值左右 $4E$ （共 $8E$ ）或 3σ （共 6σ ）范围内，随机变量出现的概率大于99%，近似为1。

n 发弹中第 i 发弹的射程和侧偏分别为 x_i 、 z_i ，密集度为 Ex/x_a 、 Ez/z_a 。其均值 x_a 、 z_a ，均方差 σ_x 、 σ_z 和中间误差 Ex 、 Ez 的计算公式分别为

$$x_a = \sum_{i=1}^n x_i / n, \quad \sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_a)^2 / (n-1)}$$

$$z_a = \sum_{i=1}^n z_i / n, \quad \sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - z_a)^2 / (n-1)}$$

$$E_x = 0.6745\sigma_x, \quad E_z = 0.6745\sigma_z$$

根据外弹道学理论，由初速、射角及弹道系数这3个参量即可得到1条确定的弹丸质心弹道。在弹丸发射过程中，各种随机因素使得各发弹之间的初速、射角及弹道系数的值存在微小的随机差异，这是形成弹丸散布的根本原因^[8]。其中，弹道系数的随机变化是由弹丸质量、弹径和弹形系数引起的，而后者又与弹表光滑程度及攻角的大小和变化情况有关。本文对影响电磁发射深弹落点散布的随机因素进行了一些简化，同时根据实际情况引入了横向起始偏角和风的影响^[9]。

2 仿真流程及仿真结果分析

电磁发射深弹弹道性能仿真流程如图1所示。

2.1 仿真条件

假设电磁发射装置最大发射动能为 1.5 MJ，对电磁发射深弹的弹道性能进行仿真分析。

2.2 最大发射动能下的弹道射程

根据最大发射动能公式，计算出电磁发射深弹的设计质量与最大速度的变化关系，如图2(a)所示。随着设计质量的增加，电磁发射深弹可获得的最大速度呈二次方关系衰减。

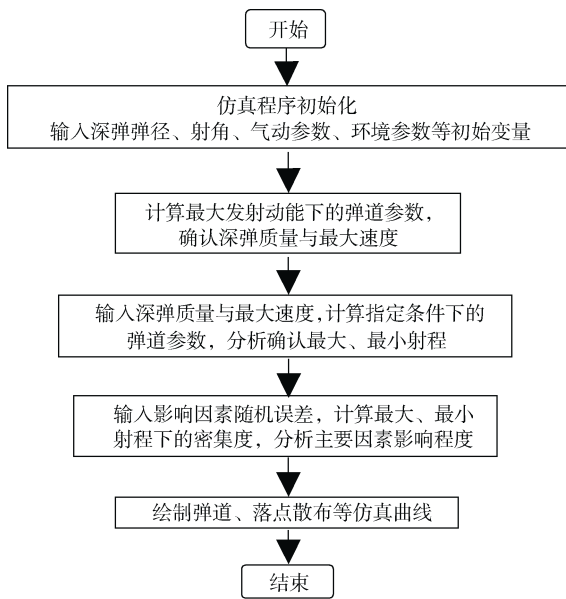


图 1 仿真分析流程
Fig. 1 Simulation analysis process

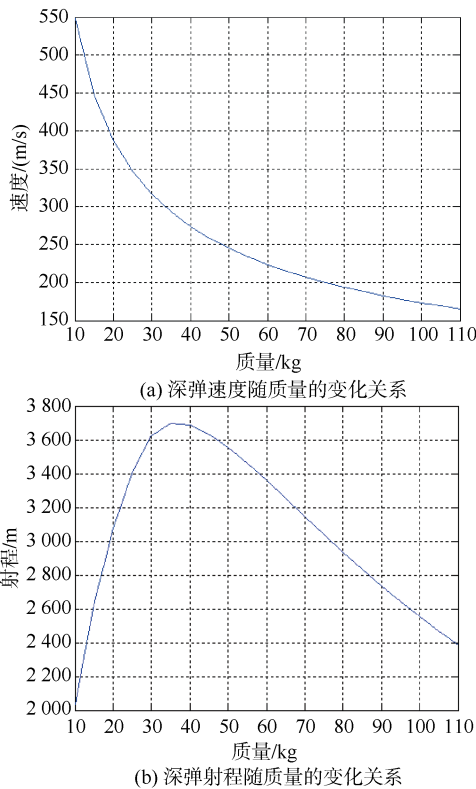


图 2 最大发射动能时深弹速度、射程随质量的变化关系
Fig. 2 Variation of depth charge's velocity and range with mass under maximum kinetic energy

将图 2 (a) 所示的电磁发射深弹设计质量、最大速度以及传统火箭发射深弹的相关设计参数代入弹道方程, 计算出电磁发射深弹不同设计质量下的弹道射程, 如图 2 (b) 所示。

根据计算, 电磁发射深弹在最大发射动能的限制下, 随着自身设计质量的增加, 其弹道射程先增大后减小, 存在最优值。如图 2 (b) 所示, 深弹设计质量为 35 kg、最大速度为 292.8 m/s 时, 弹道射程最大, 约 3 695 m。

结合电磁发射深弹总体性能设计要求, 可以基本确定电磁发射深弹的设计质量和最大速度。本文取设计质量为 70 kg、最大速度为 207 m/s 进行研究。

2.3 最大射程、射角的确定

将 2.2 节确定的电磁发射深弹设计质量和最大速度代入弹道方程, 计算出不同射角下的弹道射程和飞行时间, 如图 3 所示。

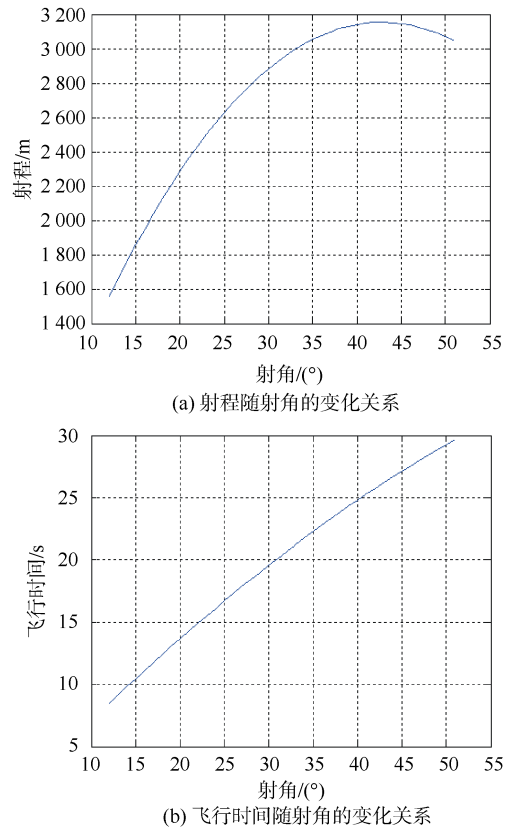


图 3 深弹射程和飞行时间随质量的变化关系
Fig. 3 Variation of depth charge's range and flight time with mass

根据计算，深弹的弹道射程随着角度的增加，先增大后减小。射角在 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间，弹道射程的变化最小；射角约 43° 时，射程最大，约为 3 154 m。深弹的飞行时间与射角的变化曲线基本呈一次线性的正比例关系。

为了尽量减少电磁发射深弹的作战反应时间，本文选定 40° 射角作为电磁发射深弹的固定射角进行研究。通过仿真计算可得，电磁发射深弹的最大射程为 3 141 m，最大射高为 756 m，飞行时间为 24.8 s，落点速度为 152.4 m/s，落点角度为 -47.9° ，最大攻角为 0.34° 。图 4 为 40° 射角下的最大射程弹道速度及俯仰角曲线。

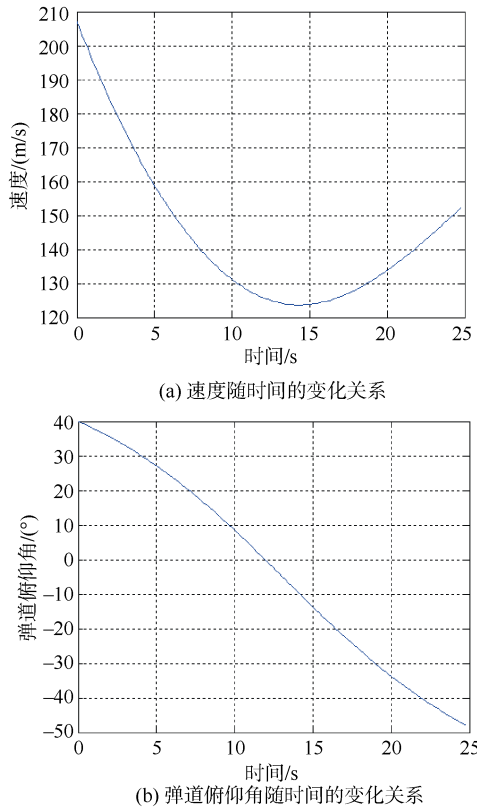


图 4 最大射程弹道速度及俯仰角曲线

Fig. 4 Depth charge's velocity and angle of pitch at maximum firing-range

2.4 最小射程、射速的确定

电磁发射深弹在飞行过程中，仅依靠气动力矩稳定飞行。由于气动力矩与飞行速度的二次方成正比，速度减小会大幅降低气动稳定力矩，因此深弹的最小射程发射速度必须设定下限，以免飞行速度过低、气动稳定力矩不足而导致飞行失败，或者攻

角太大导致引信击水机构工作失败、可靠性降低。

根据以上原因，仿真计算了深弹在射角为 40° 时，不同发射速度下的弹道攻角、弹体俯仰角的变化曲线，如图 5 所示。

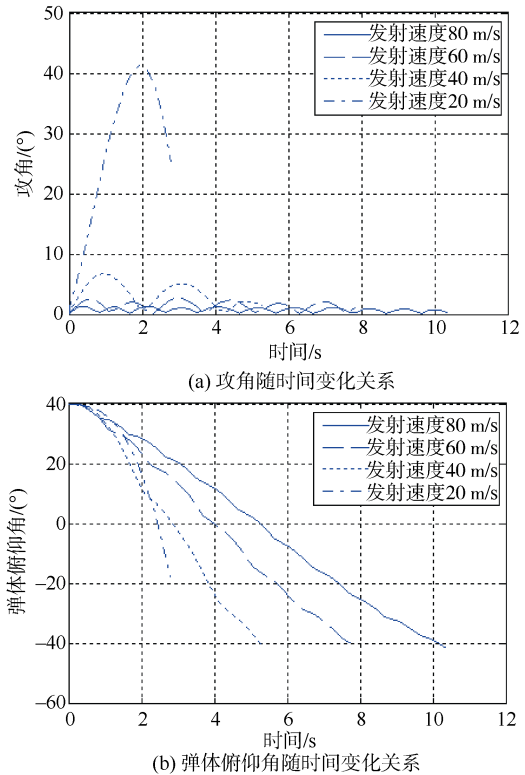


图 5 不同发射速度下，攻角和弹体俯仰角随时间变化关系

Fig. 5 Variation of depth charge's angle of attack and angle of pitch with flight time at different launching speed

根据计算，深弹发射速度降低时，其弹道攻角幅值逐渐增大，弹体俯仰角变化越来越剧烈。发射速度在 80 m/s、60 m/s、40 m/s、20 m/s 时，弹道攻角的最大值分别达到了 1.3° 、 2.6° 、 6.7° 、 41.3° ，弹体俯仰角的最终值在发射速度为 20 m/s 时仅达到 -19° 左右，入水条件对深弹水下工作性能非常不利。不同发射速度下的深弹入水角度和速度如表 1 所示。

本文选定 60 m/s 作为电磁发射深弹的最小射程发射速度，通过仿真计算可得：电磁发射深弹的最小射程为 355 m，最大射高为 77 m，飞行时间为 7.9 s，落点速度为 58.2 m/s，落点角度为 -41.5° ，最大攻角为 2.6° 。图 6 为 60 m/s 条件下的最小射程弹道速度及俯仰角曲线。

表 1 不同发射速度下深弹入水角度和速度统计表
Table 1 Depth charge's water entry angle and velocity under different launching speed

发射速度 / (m/s)	入水角度 / (°)	入水速度 / (m/s)
80	-41.9	75.4
60	-41.5	58.2
40	-31.6	39.9
20	-19	21.0

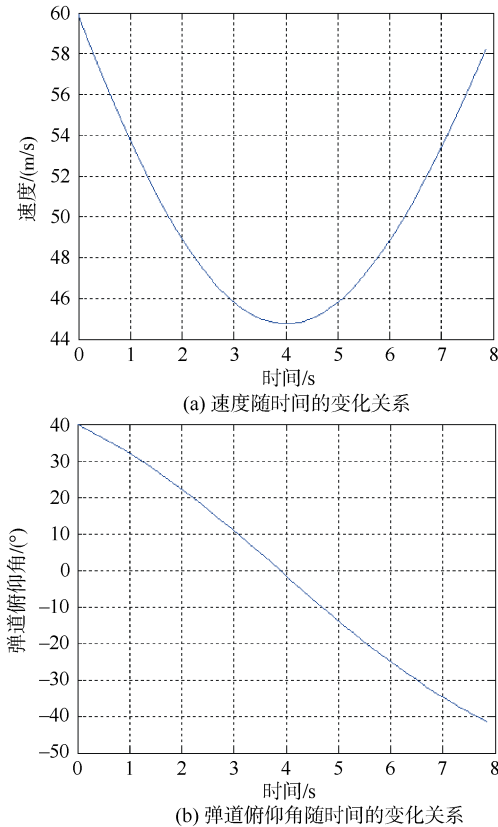


图 6 最小射程弹道速度及俯仰角曲线
Fig.6 Depth charge's velocity and angle of pitch at minimum firing-range

2.5 密集度性能

影响电磁发射深弹地面密集度的主要因素有:

初速误差、初始射角误差、质量误差、横向起始偏角误差、风速误差等。假设各误差因素均服从正态分布, 中间误差选取如下:

- 1) 初速由电磁发射装置性能决定, 假定初速中间误差 E_{v_0} 是初速的 0.3%;
- 2) 初始射角与横向起始偏角误差取决于发射装置性能, 假定两者中间误差 E_{θ_0} 与 E_{ν_0} 均为 0.2°;
- 3) 质量由装配工艺决定, 中间误差 E_{m_0} 取 0.15 kg;
- 4) 风速中间误差 E_w 取 2 m/s。

利用蒙特卡洛法地面密集度仿真模型, 按上述误差因素的分布规律生成伪随机数, 分别仿真 1 000 次, 计算电磁发射深弹最大、最小射程中间误差及各误差因素的影响程度, 如表 2 和表 3 所示。

由表 2 和表 3 所示, 电磁发射深弹最大射程落点误差主要受初速误差、横向起始偏角误差、风速误差影响。初速误差对射程中间误差的影响程度最大, 达到了 77.1%; 横向起始偏角误差对方向中间误差的影响程度最大, 达到了 87.2%; 风速误差对射程、方向中间误差的影响程度分别达到了 28.1% 和 10.5%。电磁发射深弹最小射程落点误差主要受初速误差和横向起始偏角误差影响。与大射程各误差因素影响程度相比, 初速误差和横向起始偏角误差的影响程度明显增大。其中, 初速误差对射程中间误差的影响程度达到了 96.2%; 横向起始偏角误差对方向中间误差的影响程度达到了 105.2% (此处计算值超过 100%是由于不同射程下的射程、方向中间误差均采用蒙特卡洛方法独立计算, 存在随机统计误差的原因, 真实值应小于 100%); 风速误差的影响程度明显减小, 其对射程、方向中间误差的影响程度分别下降至 3.4%和 1.6%。

表 2 不同射程下射程中间误差及各因素所占比例
Table 2 The ratio of firing-range intermediate error and various error factors at different ranges

射程 x_a/m	单个误差因素影响下的射程中间误差				射程中间误差 E_x/m	单个误差因素对射程中间误差的影响程度			
	E_{v_0}/m	E_{θ_0}/m	E_{m_0}/m	E_w/m		$E'_{v_0}/\%$	$E'_{\theta_0}/\%$	$E'_{m_0}/\%$	$E'_w/\%$
3 139.1	14.4	1.9	1.6	8.7	16.4	77.1	1.3	1.0	28.1
355.0	2.03	0.38	0.024	0.38	2.07	96.2	3.4	0.01	3.4

表 3 不同射程下方向中间误差及各因素所占比例

Table 3 The ratio of directional intermediate error and various error factors at different ranges

射程 x_0/m	单个误差因素影响下的方向中间误差		方向中间误差 E_z/m	单个误差因素对方向中间误差的影响程度	
	E_{v_0}/m	E_w/m		$E'_{v_0}/\%$	$E'_w/\%$
3 139.1	14.1	4.9	15.1	87.2	10.5
355.0	1.61	0.2	1.57	105.2	1.6

电磁发射深弹最大射程、最小射程各 1 000 发的落点散布情况分别如图 7 所示。根据计算，最大射程的纵向密集度为 1/191，横向密集度为 1/208，最小射程的纵向密集度为 1/171，横向密集度为 1/226。最大、最小射程密集度值相差不大，但由于小射程的射程近，其落点误差明显优于大射程。

1) 在电磁发射装置最大发射动能的限制下，电磁发射深弹的最大射程存在最大值。

2) 在电磁发射装置发射角限定的条件下，不能通过一味的降低发射速度来降低弹道射程。发射速度降低到一定程度后，会严重影响弹道稳定性。因此，电磁发射深弹也须设定最小射程。

3) 电磁发射深弹的落点误差主要与初速误差、横向起始偏角误差、风速误差有关。随着射程的降低，初速误差与横向起始偏角误差的影响程度增大，风速误差的影响程度减小。

参考文献

[1] 闵飞炎, 杨明, 王子才. 电磁发射技术的关键问题及其数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2009, 32 (3): 237-241.

[2] 邹本贵, 孙学锋, 曹延杰, 等. 舰载导弹电磁线圈垂直发射方案设计[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33 (5): 45-48.

[3] 王钊, 金洪波, 邹本贵, 等. 电磁线圈发射器垂直发射过程建模与仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28 (3): 271-275.

[4] 李伟波, 曹延杰, 曲东森, 等. 舰载导弹电磁垂直发射装置电源系统仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35 (6): 21-24.

[5] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[6] 王慧锦, 曹延杰, 王成学. 美国海军电磁导轨炮发展综述[J]. 舰船科学技术, 2010, 32 (2): 138-143.

[7] 张建革, 刘跃新, 路宏伟. 美国的舰载电磁炮研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31 (3): 154-159.

[8] DRIGA M D, WELDON W F, WOODSON H H, et al. Electromagnetic induction launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1986, 22 (6): 1453-1458.

[9] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.

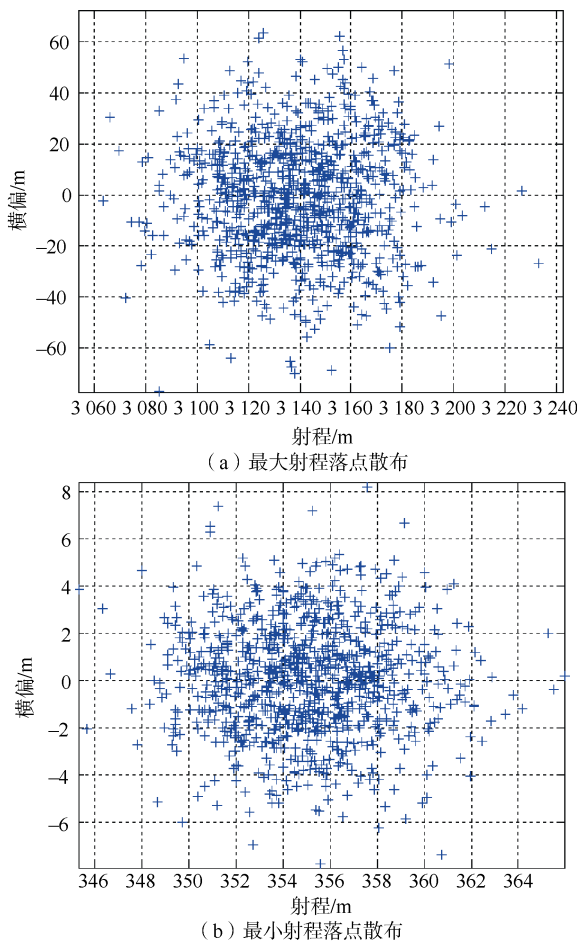


图 7 最大射程和最小射程落点散布

Fig.7 Dispersion of fall point at maximum firing-range and minimum firing-range

3 结束语

通过上述分析及仿真实验，可得到如下结论：

(责任编辑：曹晓霖)