

武器系统高射精度试验弹道模型的确定

单永海

王国华

(西安交通大学 陕西西安)

(白城兵器试验中心)

摘要：本文在试验、测试数据基础上，运用均匀设计理论，对武器高射精度试验方案进行了系统的设计和分析，确定并优选出了高射精度试验中弹丸弹道计算模型及实测模型。

关键词：武器系统；高射精度试验；弹道模型；均匀设计

1 引言

为进行武器高射精度试验方法研究，我们选用了**型号高射武器，在不同温度条件下，使用##型号弹药，进行了不同射角（ 5° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° ）的跳角试验、弹丸初速测试试验等，在此基础上，采用相应的射表计算方法，对弹丸自出膛口瞬间不同时刻或不同距离处的坐标位置进行了计算；进行了不同射角条件下的弹道坐标测试试验，得到了与不同射角条件、不同射击时间（或射击距离）相对应的弹丸坐标值。本文将利用上述计算及实测数据，运用均匀设计方法，确定出几种不同的试验设计方案，在数据分析基础上建立相应条件下的弹道坐标计算模型及实测模型，通过各模型间的精度对比，寻求其最优模型，为该武器高射精度试验方法研究提供一定的理论依据和研究方法。

2 弹道模型的确定

依据均匀设计理论，为便于分析研究，本文抛开弹丸初速、阻力系数、相应诸元等不变因素，只选取射角（含跳角）及射距这两个可变因素，分别各取四个水平，经过相应的试验及计算，得到了与各因素相对应的弹道坐标计算与实测结果（见表 2.1）。

表 2.1 不同射角及射距条件下弹道坐标计算与实测结果

射角 \ 跳角		m							
		5°		15°		30°		45°	
		$\gamma_y = 7.15$ $\gamma_z = 14.39$		$\gamma_y = 7.15$ $\gamma_z = 14.39$		$\gamma_y = 7.15$ $\gamma_z = 14.39$		$\gamma_y = 7.15$ $\gamma_z = 14.39$	
射距		计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
200m	y	12.62	17.57	41.38	46.52	92.632	99.54	161.47	169.85
	z	-0.063	-4.28	-0.74	-4.22	0.03	-4.84	0.38	-4.65
500m	y	27.44	36.87	94.45	103.99	196.63	201.05	354.02	361.07
	z	-0.22	-4.73	-1.21	-4.7	0.04	-6.05	1.31	-5.41
1000m	y	75.18	76.59	254.5	248.85	520.54	517.7	805.09	806.36
	z	-2.00	-5.87	-2.00	-5.76	0.962	-9.02	2.27	-3.12
1500m	y	105.37	107.95	373.67	367.44	775.81	768.6	1433.35	1438.92
	z	-3.73	-7.0	-2.49	-6.25	0.21	-9.75	5.311	-0.402

下面，在此表基础上进行方案设计、数据分析以及确定弹道计算模型。

根据本文两因素、四水平特点可设计成四点、八点、十二点、十六点设计方案^[1]。下面逐一进行设计和分析。

表 2.1.1 方案一

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

表 2.1.2 方案二

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

2.1 四点设计

根据均匀设计原理，可生成两种四点设计方案（详见表 2.1.1、2.1.2）。

2.1.1 方案一

按方案一（表 2.1.1）进行设计，并将相应方向（y、z）上的跳角值（ X_3 、 X_4 ）坐标计算结果（ Y_{10} 、 Y_{20} ）及坐标实测结果（ Y_{30} 、 Y_{40} ）代入如下设计表（见表 2.1.1.1）。其中， X_1 、 X_2 分别表示射

角与射距。

表 2.1.1.1 方案设计及数据分析表

N_o	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{10}	Y_{20}	Y_{30}	Y_{40}
1	5	500	7.15	14.39	27.44	-0.22	36.87	-4.73
2	15	1000	2.79	3.00	254.5	-2.00	248.85	-5.76
3	30	1500	14.96	-5.06	775.81	0.21	768.6	-9.75
4	45	200	6.48	1.73	161.47	0.38	169.85	-4.65

通过回归分析及变量筛选，得到了在不同射角、跳角、射距条件下在 y 、 z 方向上的坐标计算预报模型 (Y_1 、 Y_2) 与坐标实测预报模型 (Y_3 、 Y_4)：

$$Y_1 = 12.2451829 - 1.8984351X_4 + 0.0167403X_1X_2 \quad (2.1.1.1)$$

$$Y_2 = -2.5495306 + 0.0093724X_1X_3 - 0.0192739X_3X_4 \quad (2.1.1.2)$$

$$Y_3 = 31.5963162 + 0.0155530X_1X_2 - 0.00048295X_3X_4 \quad (2.1.1.3)$$

$$Y_4 = -7.1138177 + 0.0791351X_3 + 0.0251631X_1X_4 \quad (2.1.1.4)$$

为检验上述模型的有效性，现将各点预报结果与相应的计算及实测结果的比较值除以相应的射程，以此作为模型预报精度，形成下表所示结果（见表 2.1.1.2）。

表 2.1.1.2 预报精度表

N_o	X_1	X_2	$\frac{ Y_1 - Y_{10} }{X_2}$	$\frac{ Y_2 - Y_{20} }{X_2}$	$\frac{ Y_3 - Y_{30} }{X_2}$	$\frac{ Y_4 - Y_{40} }{X_2}$
1	5	200	0.055	0.0008	0.078	0.0023
2*	5	500	0.001	0.00002	0.0023	0.00001
3	5	1000	0.007	0.0018	0.037	0.0015
4	5	1500	0.004	0.0023	0.043	0.0015
5	15	200	0.077	0.0063	0.144	0.0077
6	15	500	0.075	0.0016	0.074	0.0021
7*	15	1000	0.003	0.000004	0.0016	0.0000007

8	15	1500	0.006	0.0003	0.005	0.0003
9	30	200	0.148	0.0008	0.151	0.0246
10	30	500	0.153	0.0003	0.152	0.0074
11	30	1000	0.004	0.0008	0.005	0.0007
12*	30	1500	0.0004	0.000008	0.0003	0.0000002
13*	45	200	0.009	0.0001	0.0002	0.00004
14	45	500	0.063	0.0018	0.033	0.0015
15	45	1000	0.043	0.0018	0.083	0.0015
16	45	1500	0.196	0.0033	0.247	0.0028

2.1.2 方案二

按方案二进行设计与分析，同理可得在该设计条件下的相应的计算及实测模型为：

$$Y_1 = 3.2624764 - 5.6906467X_3 + 0.0186382X_1X_2 \quad (2.1.2.1)$$

$$Y_2 = -2.6320206 + 0.1320674X_1 - 0.0001655X_2X_3 \quad (2.1.2.2)$$

$$Y_3 = 7.5405881 - 5.6424807X_3 + 0.0185642X_1X_2 \quad (2.1.2.3)$$

$$Y_4 = -3.7518573 + 0.0003750X_2X_4 - 0.0547769X_4^2 \quad (2.1.2.4)$$

利用该模型同样可得到各试验点的预报精度（略）。

2.2 八点设计

可生成如下三种八点设计方案（详见表 2.2.1、2.2.2、2.2.3），显然，方案三的试验设计点的分布情况不理想，本文不予考虑。

表 2.2.1 方案一

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

表 2.2.2 方案二

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

表 2.2.3 方案三

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

2.2.1 方案一

按该方案（表 2.2.1）进行设计与分析得知，无论采用何种回归

分析方法，均得不到 z 方向上的坐标实测值 Y_4 的计算模型。故这种设计方案（即方案一）无效。略

2.2.2 方案二

按方案二进行设计和分析，所得到的在该设计条件下的相应的计算及实测模型为：

$$Y_1 = -57.51114766 + 0.0209514X_1X_2 \quad (2.2.2.1)$$

$$Y_2 = -1.6088028 + 0.0024802X_1^2 \quad (2.2.1.2)$$

$$Y_3 = -70.9981815 + 0.0211064X_1X_2 \quad (2.2.2.3)$$

$$Y_4 = -6.2010145 + 0.0021155X_1^2 + 0.0124112X_3X_4 \quad (2.2.2.4)$$

利用该模型同样可得到各试验点的预报精度（略）。

2.3 十二点设计

可生成以下三个设计表（表 2.3.1、2.3.2、2.3.3）。

因表 2.3.2、2.3.3 均存在重复试验问题，所以本文选表 2.3.1 为待选方案。

以射程或射角任一因素为第一因素，由表 2.3.1 可衍生出两个不同的设计方案（见表 2.3.4、2.3.5）下面分别对这两个方案

（表 2.3.4、2.3.5）进行分析

表 2.3.1

N_o	X_1	X_2
1	1	2
2	1	4
3	1	1
4	2	3
5	2	4
6	2	2
7	3	3
8	3	1
9	3	2
10	4	4
11	4	1
12	4	3

表 2.3.2

N_o	X_1	X_2
1	1	4
2	1	3
3	1	2
4	<u>2</u>	<u>1</u>
5	2	4
6	<u>2</u>	<u>1</u>
7	3	3
8	3	2
9	3	1
10	4	4
11	4	2
12	4	3

表 2.3.3

N_o	X_1	X_2
1	1	2
2	3	2
3	4	4
4	<u>2</u>	<u>3</u>
5	2	4
6	4	1
7	3	1
8	4	2
9	1	3
10	1	1
11	<u>2</u>	<u>3</u>
12	3	4

表 2.3.4 方案一

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

表 2.3.5 方案一

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

2.3.1 方案一

按方案一进行设计和分析，所得到的在该设计条件下的相应的计算及实测模型为：

$$Y_1 = -55.3248766 + 0.0207512X_1X_2 \quad (2.3.1.1)$$

$$Y_2 = -0.5784545 - 0.0038315X_2 + 0.0001657X_1X_2 + 0.0070160X_4^2 \quad (2.3.1.2)$$

$$Y_3 = -50.7908689 + 0.0206809X_1X_2 \quad (2.3.1.3)$$

$$Y_4 = -3.1471568 - 0.0438861X_1 - 0.0045149X_2 + 0.0002151X_1X_2 - 0.0054776X_1X_4 - 0.0003883X_2X_3 + 0.0002829X_2X_4 \quad (2.3.1.4)$$

利用该模型同样可得到各试验点的预报精度（略）。

2.3.2 方案二

按方案二进行设计和分析，所得到的在该设计条件下的相应的计算及实测模型为：

$$Y_1 = -72.7411663 + 4.9865508X_4 + 0.0226826X_1X_2 - 0.0058155X_2X_3 \quad (2.3.2.1)$$

$$Y_2 = -0.6509804 - 0.0054768X_2 - 0.0005483X_1^2 + 0.0002037X_1X_2 + 0.0001044X_2X_4 \quad (2.3.2.2)$$

$$Y_3 = -66.8705154 + 5.0306656X_4 + 0.0227501X_1X_2 - 0.0064690X_2X_3 \quad (2.3.2.3)$$

$$Y_4 = -3.6403523 - 0.0051784X_2 - 0.0012461X_1^2 + 0.0002232X_1X_2 - 0.0002524X_2X_3 - 0.0002532X_2X_4 \quad (2.3.2.4)$$

利用该模型同样可得到各试验点的预报精度 (略)。

2.4 十六点设计

可生成以下三种设计表, 即: 表 2.4.1、2.4.2、2.4.3。

表 2.4.1

N_o	X_1	X_2
1	1	1
2	1	2
3	1	4
4	1	3
5	2	4
6	2	1
7	2	3
8	2	2
9	3	2
10	3	4
11	3	3
12	3	1
13	4	3
14	4	2
15	4	4
16	4	1

表 2.4.2

N_o	X_1	X_2
1	1	2
2	1	3
3	1	4
4	1	1
5	<u>2</u>	<u>2</u>
6	2	4
7	2	1
8	<u>2</u>	<u>2</u>
9	<u>3</u>	<u>3</u>
10	3	4
11	3	1
12	<u>3</u>	<u>3</u>
13	4	4
14	4	1
15	4	2
16	4	3

表 2.4.3

N_o	X_1	X_2
1	1	4
2	<u>3</u>	<u>3</u>
3	2	4
4	1	3
5	<u>4</u>	<u>2</u>
6	<u>2</u>	<u>1</u>
7	<u>2</u>	<u>1</u>
8	3	4
9	4	1
10	<u>3</u>	<u>3</u>
11	<u>4</u>	<u>2</u>
12	3	1
13	2	4
14	<u>1</u>	<u>2</u>
15	<u>1</u>	<u>2</u>
16	4	3

因表 2.4.2、2.4.3 均存在重复试验问题, 所以本文选表 2.4.1 为待选方案。

由表 2.4.1 所形成的设计方案如下 (见表 2.4.4), 不难看出, 这即为全面试验方案。

表 2.4.4 设计方案

	5	15	30	45
200				
500				
1000				
1500				

按此方案进行设计和分析, 所得到的在该设计条件下的相应的计算及实测模型为:

$$Y_1 = -63.9806960 + 0.0220069X_1X_2 - 0.0066997X_2X_3 + 0.3376899X_4^2 \quad (2.4.1)$$

$$Y_2 = -0.4786410 - 0.0039523X_2 + 0.0001623X_1X_2 + 0.0071211X_4^2 \quad (2.4.2)$$

$$Y_3 = -58.8966533 + 0.0220427X_1X_2 - 0.0073117X_2X_3 + 0.3517404X_4^2 \quad (2.4.3)$$

$$Y_4 = -2.5477117 - 0.0744579X_1 - 0.0050351X_2 + 0.0002079X_1X_2 - 0.0002269X_2X_3 + 0.0002383X_2X_4 - 0.0037709X_4^2 \quad (2.4.4)$$

利用该模型同样可得到各试验点的预报精度 (略)。

2.5 模型优选

为了从上述四种设计、六个方案中选出求取弹道中任意点的计算及实测坐标值的最佳模型，现对上述各模型进行归纳：

2.5.1 求取 y 方向上的坐标计算模型 Y_1 的确定

从上述各预报精度表中提取关于坐标计算模型 Y_1 的预报精度结果，并加以对比 (见表 2.5.1)。

2.5.1 精度汇总表 ($\frac{|Y_1 - Y_{10}|}{X_2}$)

相对理想方案	N_o	X_1	X_2	4 点设计		8 点设计 方案	12 点设计		16 点设计 方案
				方案 1	方案 2		方案 1	方案 2	
12.2	1	5	200	0.055	0.157	0.246	0.236	0.004	0.029
4.1	2	5	500	0.001	0.036	0.065	0.062	0.015	0.019
12.2	3	5	1000	0.007	0.019	0.028	0.027	0.004	0.007
12.2	4	5	1500	0.004	0.002	0.004	0.003	0.0009	0.004
4.2	5	15	200	0.077	0.010	0.180	0.172	0.172	0.200
16	6	15	500	0.075	0.065	0.010	0.012	0.019	0.0006
12.1	7	15	1000	0.003	0.012	0.040	0.002	0.012	0.004
4.1	8	15	1500	0.006	0.022	0.016	0.025	0.036	0.022
12.1	9	30	200	0.148	0.313	0.122	0.117	0.359	0.180
4.2	10	30	500	0.153	0.002	0.120	0.119	0.004	0.056
4.1	11	30	1000	0.004	0.043	0.050	0.047	0.025	0.016
4.1	12	30	1500	0.0004	0.013	0.073	0.068	0.011	0.006
4.1	13	45	200	0.009	0.137	0.152	0.150	0.145	0.175

4.1, 4.2	14	45	500	0.063	0.063	0.120	0.115	0.147	0.113
4.2	15	45	1000	0.043	0.00002	0.080	0.073	0.114	0.079
8, 16	16	45	1500	0.196	0.139	0.051	0.059	0.059	0.051
平均值				0.053	0.064	0.085	0.084	0.070	0.060
最大值				0.196	0.313	0.246	0.236	0.359	0.200
最小值				0.0004	0.00002	0.004	0.002	0.0009	0.0009

通过对比，选取 4.1 所示方案（即 4 点设计之方案 1）所对应的模型作为求取 y 方向上的坐标计算值 Y_1 的理想模型。

同理可得，z 方向上的坐标计算值 Y_2 及坐标实测值 Y_4 的理想模型均为 12 点设计之方案 1 对应的模型，y 方向上的坐标实测值 Y_3 的理想模型与 4 点设计之方案 1 的模型相对应。

综上所述，最终所确定的各模型如下：

y 方向上的坐标计算模型：

$$Y_1 = 12.2451829 - 1.8984351X_4 + 0.0167403X_1X_2$$

z 方向上的坐标计算模型：

$$Y_2 = -0.5784545 - 0.0038315X_2 + 0.0001657X_1X_2 + 0.0070160X_4^2$$

y 方向上的坐标实测模型：

$$Y_3 = 31.5963162 + 0.0155530X_1X_2 - 0.00048295X_3X_4$$

z 方向上的坐标实测模型：

$$Y_4 = -3.1471568 - 0.0438861X_1 - 0.0045149X_2 + 0.0002151X_1X_2 - 0.0054776X_1X_4 - 0.0003883X_2X_3 + 0.0002829X_2X_4$$

参考文献

- 1 方开泰. 均匀设计与均匀设计表. 北京：科学出版社，1994.