

# 随行装药的响应面分析

祁臣勇<sup>1</sup>, 朱林<sup>2</sup>

(1. 中北大学, 太原 030051; 2. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646003)

**摘要:** 研究目的是优选出 30 mm 火炮随行装药结构的点火延迟时间、随行药燃速和随行药量三者的优化组合, 保证在最大膛压不超出指标的条件下获得较高的弹丸初速。采用固体随行装药零维内弹道模型编写程序求模型数值解, 在此基础上利用响应面法在点火时间 1.71 ~ 1.83 ms, 随行药压力全冲量在 20 ~ 100 kPa · s, 随行药量 25 ~ 35 g 范围内分析三种因素对弹丸初速和最大膛压的影响以及这些影响因素之间的交互作用, 求出了局部最优解并用模拟实验验证。结果表明: 响应面法的预测值与模拟实验值吻合较好, 通过响应面法得到的随行装药弹丸初速比相同膛压水平下非优化实验的结果提高约 5%。

**关键词:** 随行装药; 数值模拟; 响应面法

**本文引用格式:** 祁臣勇, 朱林. 随行装药的响应面分析[J]. 四川兵工学报, 2015(3): 45-49.

**Citation format:** QI Chen-yong, ZHU Lin. Analysis on Response Surface of Traveling Charge[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(3): 45-49.

中图分类号: TJ410.52

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2015)03-0045-05

## Analysis on Response Surface of Traveling Charge

QI Chen-yong<sup>1</sup>, ZHU Lin<sup>2</sup>

(1. North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Luzhou North Chemical Industry Co., Ltd., Luzhou 646003, China)

**Abstract:** The purpose of this study is to select the optimization results of delay time, burning rate and charge of 30 mm traveling charge structure, in order to have a higher muzzle velocity of projectile under the condition of maximum bore pressure. According to the adoptive traveling charge scheme in 30 mm cannon, a zero dimension interior ballistic model of solid traveling charge was used and a program for numerical solution was wrote, based on which the effect and the interaction between the operation factors were systematically discussed and the process was optimized by RSM under the following condition: the delay time should be 1.71 ~ 1.83ms, and the impulse should be 20 ~ 100 kPa · s, and the charge should be 25 ~ 35 g. Additional experiments were performed to check the model, which shows that the predicted values agree well with the experimental results, and the velocity improved almost 5% under the optimized operation conditions by RSM.

**Key words:** traveling charge; numerical simulation; response surface methodology

弹丸初速是火炮的重要弹道指标之一, 提高初速可以增加火炮射程、提高火炮的威力。随行装药技术是一种能有效提高弹丸初速的技术, 其结构与现有火炮结构兼容, 只需要改变弹药结构, 一旦关键技术取得突破, 可很快进入工程应用。随行装药的关键技术包括: 随行技术、点火延迟时间的

控制技术和高燃速火药技术<sup>[1]</sup>。目前, 随行装药的关键因素研究主要采取单因素法<sup>[2-4]</sup>, 不能很好的预测最佳条件, 更无法揭示因素之间的交互作用。

响应面法是数学和统计学结合的产物<sup>[5]</sup>, 目前已广泛应用于生物学和统计学专业研究中, 但在随行装药领域少见报

收稿日期: 2014-12-15

基金项目: 火炸药研究基金(404060202)

作者简介: 祁臣勇(1981—), 男, 研究生, 主要从事火药装药研究。

道,响应面法能根据某些点的值绘制出相应曲面,通过对模型的数学解析得出最优的参数组合,而传统方法得出的最优组合只是正交中所列元素各水平的最优组合,并不是全局的真正最优组合<sup>[6]</sup>。

本文使用 design expert 软件中的响应面法研究随行装药结构的关键因素和他们之间的交互作用。利用固体随行装药零维内弹道模型进行数值模拟计算,研究弹丸初速和最大膛压随点火延迟时间、随行药燃速和随行药量的变化趋势,计算出点火延迟时间、随行药燃速和随行药量的最优解。

## 1 数值模拟的模型和计算方法

数值模拟计算采用固体随行装药零维内弹道模型。经试验验证,此模型计算结果与实验结果吻合较好,可预测随行装药的内弹道性能<sup>[3]</sup>。假设随行装药试验在 30 mm 火炮上进行,使用四阶龙格库塔法编写随行装药零维内弹道模型计算程序,利用程序进行数值模拟计算。

### 1) 主装药药型函数

$$\psi_s = \begin{cases} \chi^{z_s}(1 + \lambda z_s + \mu z_s^2) & z_0 \leq z_s \leq 1 \\ \chi_{s,z_s}(1 + \lambda_s z_s) & 1 \leq z_s \leq z_k \end{cases}$$

### 2) 主装药燃速方程

$$\frac{dz_s}{dt} = u_s p^{n_s}$$

### 3) 随行药药型函数

$$\psi_t = \begin{cases} \chi_t z_t (1 + \lambda_t z_t + \mu_t z_t^2) & z_{0t} \leq z_t \leq 1 \\ \chi_{ts,z_t} (1 + \lambda_{ts} z_t) & 1 \leq z_t \leq z_{kt} \end{cases}$$

### 4) 随行药燃速方程

$$\frac{dz_t}{dt} = u_t p^{n_t}$$

### 5) 弹丸行程与速度的关系式

$$\frac{dl}{dt} = v$$

### 6) 弹丸运动方程

$$\phi(m + \omega_t - \omega_t \psi_t) \frac{dl}{dt} = sp$$

### 7) 内弹道基本方程

$$sp(l + l_\psi) = f_s \omega_s \psi_s + f_t \omega_t \psi_t - 0.5\theta\phi(m + \omega_t - \omega_t \psi_t)v^2$$

其中:

$$l_\psi = l_0 \left[ 1 - \frac{\Delta\omega_s}{\rho_{ps}(\omega_s + \omega_t)} - \frac{\Delta\omega_s}{(\omega_s + \omega_t)} \left( \alpha - \frac{1}{\rho_{ps}} \right) \psi_s - \frac{\Delta\omega_t}{\rho_{pt}(\omega_s + \omega_t)} - \frac{\Delta\omega_t}{(\omega_s + \omega_t)} \left( \alpha - \frac{1}{\rho_{pt}} \right) \psi_t \right]$$

$$l_0 = \frac{V_0}{S}, \quad \Delta = \frac{\omega_s + \omega_t}{V_0}$$

## 2 结果与分析

### 2.1 响应面法方案设计及其结果

根据国内外学者在随行装药试验和理论研究所取得的

成果<sup>[2-4,7]</sup>,选取点火延迟时间、随行药燃速和随行药量作为考察因素,为了计算方便使用随行药压力全冲量来表征随行药燃速系数。使用 Box-Behnken 法(BBD)设计优化分析方案,利用程序进行数值模拟计算。试验方案和模拟计算结果如表 1 所示。

表 1 BBD 试验方案及模拟结果

试验编号	点火延迟时间 A/ms	随行药压力全冲量 B/(kPa·s)	随行药装药量 C/g	弹丸初速/(m·s <sup>-1</sup> )	最大膛压/MPa
1	1.71	100.00	30.00	929.798	313.961
2	1.71	60.00	35.00	960.457	380.160
3	1.71	20.00	30.00	950.006	445.543
4	1.71	60.00	25.00	920.709	315.697
5	1.77	60.00	30.00	936.264	314.952
6	1.77	60.00	30.00	936.264	314.952
7	1.77	60.00	30.00	936.264	314.952
8	1.77	20.00	35.00	965.529	455.006
9	1.77	60.00	30.00	936.264	314.952
10	1.77	100.00	35.00	944.095	317.25
11	1.77	60.00	30.00	936.264	314.952
12	1.77	20.00	25.00	926.345	379.394
13	1.77	100.00	25.00	906.038	300.357
14	1.83	60.00	35.00	950.337	319.619
15	1.83	20.00	30.00	941.859	386.638
16	1.83	60.00	25.00	913.141	300.357
17	1.83	100.00	30.00	905.004	305.796

### 2.2 数据处理和显著性分析

将参数进行编码转换,使因子区域转化为中心在原点的“立方体”,实现参数的无量纲化。设第  $i$  个变量  $z_i$  的变化范围是  $[z_{1i}, z_{2i}]$ ,  $z_{0i}$  为区间中心点,编码转换为

$$x_i = \frac{z_i - z_{0i}}{z_{2i} - z_{1i}} \times 2 \quad (1)$$

经过编码转换后,各变量的编码如表 2 所示。

表 2 各因素编码

编码 X	-1	0	1
点火延迟时间/ms	1.71	1.77	1.83
随行药压力全冲量/(kPa·s)	20	60	100
随行药装药量/g	25	30	35

采用二阶模型对数值计算结果的编码进行多元回归拟合,得到以弹丸初速  $V$  和最大膛压  $P$  为目标的两个二次回归多项式:

$$V = 936.26 - 4.45A - 10.48B + 19.27C - 0.41AB -$$

$$0.644C - 0.28BC - 0.095A^2 - 0.75B^2$$

$$P = 314.95 - 18.12A - 55.15B + 20.78C + 12.19AB - 11.30AC - 17.18BC + 7.99A^2 + 39.54B^2 + 6.01C^2$$

上述方程中的变量取值为实际值的编码,编码取值区间为 $(-1, 1)$ 。对回归多项式进行方差分析,检验多项式和各因子的显著性,结果如表3、表4所示。

表3 弹丸初速多项式方差分析表

来源	总和	自由度	均方	F值	P值
模型	4 013.29	8	501.66	1.237E+005	< 0.000 1
A	158.67	1	158.67	39 117.36	< 0.000 1
B	877.89	1	877.89	2.164E+005	< 0.000 1
C	2 971.63	1	2 971.63	7.326E+05	< 0.000 1
AB	0.68	1	0.68	167.07	< 0.000 1
AC	1.63	1	1.63	401.75	< 0.000 1
BC	0.32	1	0.32	78.31	< 0.000 1
A <sup>2</sup>	0.038	1	0.038	9.31	0.015 8
B <sup>2</sup>	2.40	1	2.40	591.51	< 0.000 1
残差	0.032	8	4.056E-003		

表4 最大膛压多项式方差分析表

来源	总和	自由度	均方	F值	P值
模型	40 027.61	9	4 447.51	1 239.93	< 0.000 1
A	2 626.33	1	2 626.33	732.20	< 0.000 1
B	24 334.11	1	24 334.11	6 784.14	< 0.000 1
C	3 454.03	1	3 454.03	962.95	< 0.000 1
AB	593.92	1	593.92	165.58	< 0.000 1
AC	510.79	1	510.79	142.40	< 0.000 1
BC	1 180.56	1	1 180.56	329.13	< 0.000 1
A <sup>2</sup>	269.12	1	269.12	75.03	< 0.000 1
B <sup>2</sup>	6 582.13	1	6 582.13	1 835.04	< 0.000 1
C <sup>2</sup>	152.20	1	152.20	42.43	0.000 3
残差	25.11	7	3.59		

注: $P < 0.05$  为差异显著, $P < 0.01$  为差异高度显著, $P < 0.001$  为差异极显著。

分析结果显示:分析方案所设定的3个因素均为影响弹丸初速和最大膛压的关键因素。在设计范围内,速度模型的 $P < 0.000 1$ ,校正决定系数为1.000 0,预测相关系数为0.999 9,说明选用的模型回归显著,速度多项式可以解释100%响应值的变化<sup>[8]</sup>。最大膛压模型的 $P < 0.000 1$ ,校正决定系数为0.998 6,预测相关系数为0.990 0,说明最大膛压选用的模型回归显著,膛压多项式可以解释99.86%响应值的变化<sup>[8]</sup>。图1、图2分别为弹丸初速和最大膛压的内学生化残差正态分布图,两图中数据分布接近于对角线,说明残差的分布接近于正态分布。由图可知,真实值都落在预测值上或对称分布在预测值两侧,说明2个模型与真实值拟合

良好。综上所述,在设定区间内多项式的预测值与实际值吻合良好。多项式的设定区间如表5所示。

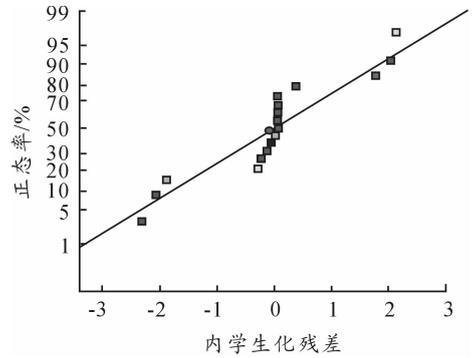


图1 弹丸初速的内学生化残差正态分布

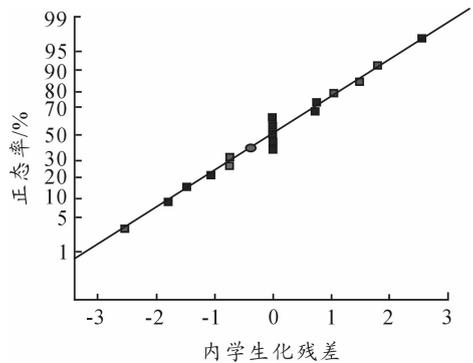


图2 最大膛压的内学生化残差正态分布

表5 多项式的设定范围

	点火延迟 时间/ms	随行药压力全 冲量/(kPa·s)	随行药装 药量/g
实际值	1.71 ~ 1.83	20 ~ 100	25 ~ 35

### 2.3 分析单因素对内弹道性能的影响

图3、图4分别表示3种因素在设计中心点附近变动时弹丸初速和最大膛压的变化趋势。由图3、图4可看出:

1) 点火延迟时间减小,最大膛压和弹丸初速逐渐增高。主要原因是:第一,随行药点火越早,火药燃气做功时间越长,弹丸初速越高;第二,随行药点火越早,主装药与随行药燃烧的压力叠加效应越显著,最大膛压越高;第三,随行药点火越早,膛内压力越高,随行药燃速越快,膛内压力增加越快,装药利用系数越高,弹丸初速越大。

2) 随行装药压力全冲量越大,弹丸初速越低,最大膛压越低。当火药弧厚一定时,压力全冲量越小,火药燃速越快。由此可知随行药燃速越快,弹丸初速越高。主要原因是:第一,随行药燃速越快,填充弹后真空的燃气越多,弹后空间的压力差越小,弹后压力越高,火药燃气对弹丸做功越多,弹丸初速越高;第二,高燃速随行药燃烧生成的气体,在气固交界面上形成较大的推力,该推力与弹丸底部附近的气体压力相结合,对弹丸的做功能力增强,弹丸初速提高。

3) 随着随行药量的增加,弹丸初速和最大膛压增高。

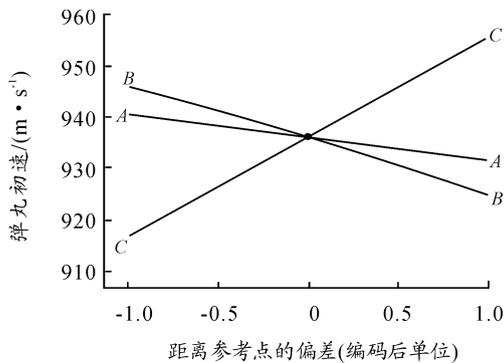


图3 因素对弹丸初速扰动图

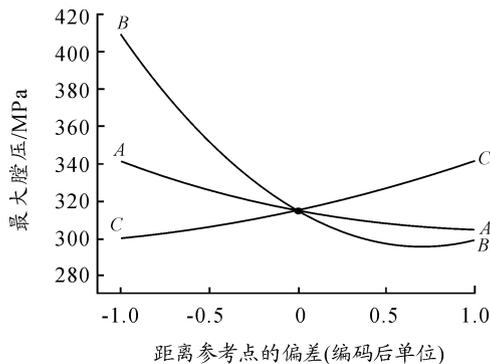


图4 因素对最大膛压扰动图

#### 2.4 分析因素间交互作用对内弹道性能的影响

根据表1和表2,结合方程(2)和方程(3),对各操作因素之间关系两两作图,平面和三维结果分别如图5~8所示,图中未出现的参数均设为0水平。

图5~8反映了分析因素之间的交互作用。图5(a)、图7(a)反映延迟点火时间和随行药压力全冲量对弹丸初速的交互作用。由图可知,点火延迟时间和随行药压力全冲量均与弹丸初速负相关,但压力全冲量方向等值线斜率更大,表明压力全冲量的变化对弹丸速度的影响比点火延迟时间对弹丸初速的影响大。图5(b)、图7(b)反映了点火延迟时间和随行药量对弹丸初速的交互作用。结果显示,弹丸初速随着点火延迟时间增加而减小,随着随行药量的增加而增大,但随行药量的影响更显著。若点火延迟时间取1.77 ms且其他因素取零水平,随行药量27 g时弹丸初速为923.719 m/s,随行药量增加到33 g时弹丸初速接近950 m/s。说明随行药量对弹丸初速影响大。图5(c)、图7(c)反映了随行

药压力全冲量和随行药量对弹丸初速的交互作用。图中响应面方程的平面等值线的变化趋势与图5(b)、图7(b)相似,可知弹丸初速与随行药量正相关,与随行药压力全冲量负相关,且随行药量对弹丸初速的影响比压力全冲量的影响大。由上述分析可知,点火延迟时间、随行药压力全冲量和随行药量对随行装药结构的弹丸初速均有显著的影响,按影响大小的排序:随行药量>随行药压力全冲量>点火延迟时间。图6(a)、图8(a)反应了点火延迟时间和随行药压力全冲量对最大膛压的交互作用。结果表明,最大膛压随点火延迟时间的增大而减小,随着随行药压力全冲量的逐渐减小,最大膛压先略有减小后逐渐增大,且增加趋势越来越显著。这说明两因素之间有明显的交互作用,且最优值位于点火延迟时间 $A > 1.76$  ms,随行药压力全冲量 $B > 66$  kPa·s的范围内。图6(b)、图8(b)反映点火延迟时间和随行药量之间的交互作用。结果表明,点火延迟时间和随行药量对最大膛压都有影响,但随行药量的影响更大。当随行药量逐渐增加时,最大膛压逐渐增大,且增加的速度越来越快。随行药大于27 g时最大膛压随着点火延迟时间的增加而减小,当随行药量小于27 g时随着点火延迟时间的增加,最大膛压先减小后逐渐增加。这说明两因素之间有较强的交互作用。图6(c)、图8(c)反映随行药压力全冲量和随行药量之间的交互作用。图中响应面方程平面等值线的分布规律与图6(b)、图8(b)相同,可看出两因素之间有较强的交互作用,随行药压力全冲量对最大膛压的影响大于随行药量对最大膛压的影响。由以上分析可知,点火延迟时间、随行药压力全冲量和随行药量对随行装药的最大膛压均有较大影响,且因素之间的交互作用显著。按影响大小的排序为:随行药压力全冲量>随行药量>点火延迟时间。

#### 2.5 模型的参数优化和验证

根据表1的数据以及建立的数学模型,输入求优化解的限定条件和优化目标,利用 design expert 软件即可求出区域优化解。求各因素编码 $X_i \in [-1, 1]$ 且 $P < 310$  MPa时弹丸初速的最大值。Design expert 求出的优化解为延迟点火时间1.80 ms,随行药压力全冲量75.03 kPa·s,随行药量35 g。

为了验证响应面回归模型的有效性,变换因素水平利用内弹道程序进行模拟计算,结果如表6所示。可以看出,在设定区间范围内模型预测值与实验值的最大相对误差不超过1%,说明模型对实验结果具有良好的预测效果。依据实验2的结果,在优化条件下,弹丸初速为948.591 m/s,最大膛压307.25 MPa,这一结果比在同一随行药量下非优化实验的结果提高了接近5%,说明该模型对于实验具有较好的指导意义。

表6 响应面模型的验证

n	实验条件			弹丸初速/(m·s <sup>-1</sup> )		误差/ %	最大膛压/MPa		误差/ %
	A/ms	B/(kPa·s)	C/g	实验值	预测值		实验值	预测值	
1	1.77	60	30	936.264	936.26	<0.01	314.9516	314.952	<0.01
2	1.80	75.03	35	948.591	948.825	<0.01	307.250	310	0.895

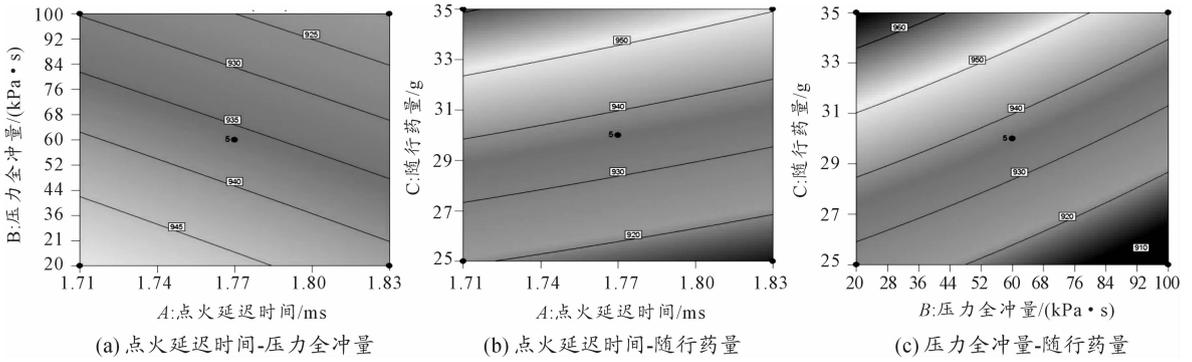


图5 弹丸初速的响应面方程的平面等值线

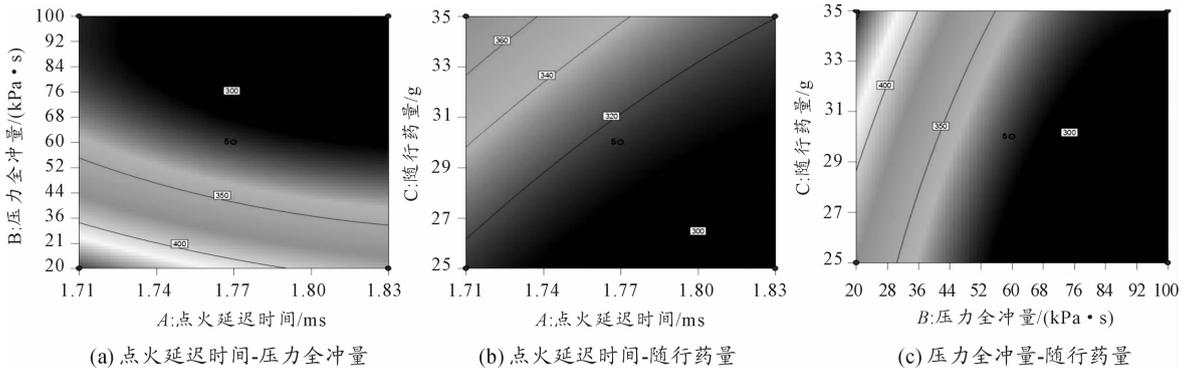


图6 最大膛压的响应面方程的平面等值线

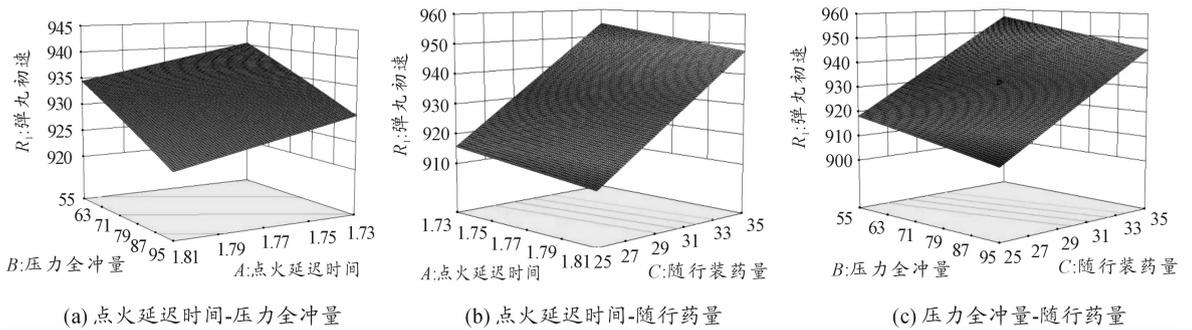


图7 弹丸初速的响应面方程的等值曲面图

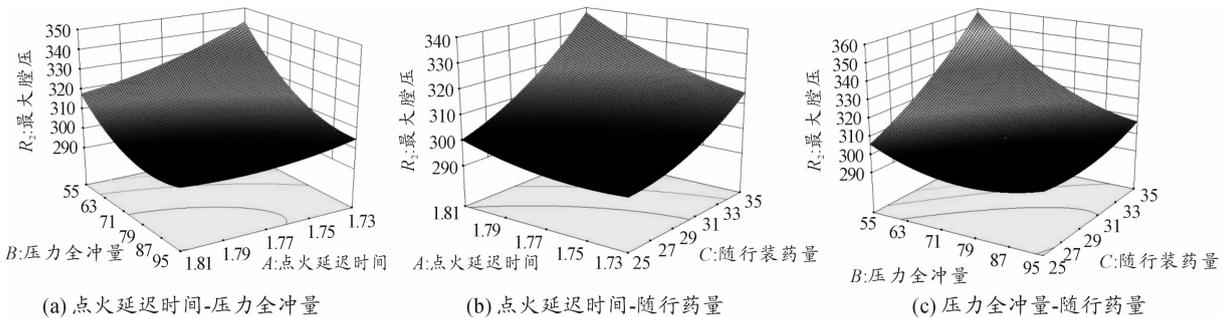


图8 最大膛压的响应面方程的等值曲面图

电流迅速升至峰值,高转速平稳后 A 相电流稳定在固定范围内, B 相电流变化过程相似。由转速曲线和相电流曲线趋势可知该驱动控制器有良好的性能。

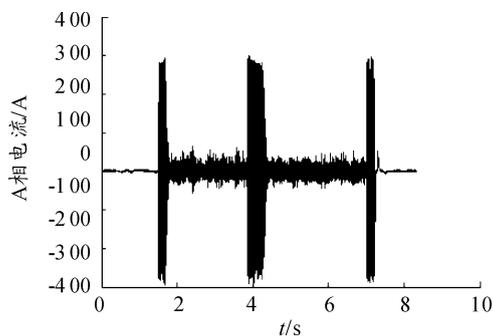


图5 转速 3 500 ~ -3 500 r/min 对应 A 相电流图形

## 5 结论

高性能永磁同步电机实验平台可以由浅入深系统全面地提供电机转子位置检测、驱动控制器设计、DSP 编程等多种类型的实验,具有综合性、多功能性、易于连线 and 调试等特点。该实验平台已在某预研项目随动系统设计开发过程中投入使用,取得了良好的效果。实验平台具有良好的可扩展性,对永磁同步电机控制系统相关领域的科研探索有很好的利用价值。

## 参考文献:

[1] 王宏佳,杨明,牛里,等. 永磁交流伺服系统速度控制器

优化设计方法[J]. 电机与控制学报,2012(2):25-31.

- [2] 王鑫,李伟力,程树康. 永磁同步电动机发展展望[J]. 微电机,2007(5):69-72.
- [3] 张莉松,胡祐德,徐立新. 伺服系统原理与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 舒志兵. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社,2006:2-11.
- [5] 纪洪明,富历新. 永磁同步电机全数字伺服系统硬件设计[J]. 机械与电子,2005(7):24-27,29.
- [6] 赵仁峰,何伟,姜朋昌,等. 永磁交流伺服系统实验台设计与研究[J]. 机械设计与制造,2010(1):23-24.
- [7] 刘日宝,王爱祥. 基于 DSP + FPGA 的交流伺服驱动器设计[J]. 微特电机,2011(11):21-23,29.
- [8] 刘陵顺,高艳丽,张树团,等. TMS320F28335 DSP 原理及开发编程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [9] TI. TMS320F28xx 和 TMS320F28xxx DSCs 的硬件设计指南[Z]. 2001.
- [10] 徐东,刘敬猛. 永磁同步电机伺服仿真系统关键技术研究[J]. 实验技术与管理,2012(4):321-324,29.
- [11] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计:Matlab 语言与应用[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2006.
- [12] 崔伟成,孟凡磊,刘林密. 导弹发射装置随动系统实验平台构建[J]. 实验技术与管理,2011(12):66-68,28.
- [13] 李海侠. 交流伺服系统无速度传感器模糊控制策略研究[J]. 机床与液压,2013(1):31-34.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 49 页)

## 3 结论

1) 点火延迟时间、随行药压力全冲量和随行药量对随行装药结构的弹丸初速均有显著的影响,按影响大小的排序为:随行药量 > 随行药压力全冲量 > 点火延迟时间。3 种因素间的交互作用对弹丸初速的影响不大。

2) 点火延迟时间、随行药压力全冲量和随行药量对随行装药结构的最大膛压均有较大影响,按影响大小的排序为:随行药压力全冲量 > 随行药量 > 点火延迟时间。3 种因素间的交互作用对最大膛压影响显著。

3) 利用响应面分析可以求得随行装药结构参数的局部最优解,对装药设计具有较好的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 金志明. 高速推进内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2001:286.
- [2] 王浩. 随行装药火炮经典内弹道模型与实验技术研究

[J]. 兵工学报,1996,17(40):298-302.

- [3] 杨京广. 固体随行装药内弹道实验及数值计算[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [4] 王浩. 随行装药效果与敏感性研究[J]. 弹道学报,1996,8(1):20-25.
- [5] MONTGOMERY D C. Design and analysis of experiments[M]. 3rd ed. New York:wiley,1991.
- [6] 戴启洲,周明华,雷乐成. 响应面法优化湿式氧化处理阳离子红 X-GRL 废水[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,40(11):1889-1894.
- [7] 杨京广,余永刚. 固体随行装药内弹道模型及数值模拟[J]. 火炮发射与控制学报,2006(2):1-5.
- [8] 熊晓莉,黄诚,耿嘎,等. 乙醇对硝酸锰热分解的影响[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2014,31(2):70-73.
- [9] 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法及数值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2012:310.
- [10] 崔军,赵海龙,皇才进. 基于发射装药技术提高穿甲弹初速研究[J]. 四川兵工学报,2014(5):4-6.

(责任编辑 周江川)