

doi: 10.7690/bgzd.2015.09.021

基于响应面法的某火箭炮结构参数优化

岳 炯, 于存贵, 汪国梁, 向维成
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为提高火箭炮的射击密集度和射击稳定性, 对基于响应面法的某火箭炮结构参数进行优化。引入响应面法, 建立以弹管间隙、发射时间间隔以及闭锁力为设计参数, 高低、水平方向的中间偏差为多重响应目标的响应面近似模型。模拟设计参数与响应目标强非线性关系, 对近似模型进行回归检验, 确定近似模型的可行性。利用建立的近似模型结合满意度函数法优化高低、水平方向的中间偏差, 使其综合最优。结果表明: 该方法能大大缩短仿真优化时间, 且误差非常小, 能达到提高射击密集度的目的。

关键词: 火箭炮; 射击密集度; 响应面法; 回归检验; 满意度函数法

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Structural Parameters Optimization of MLRS Based on Response Surface Method

Yue Jiong, Yu Cungui, Wang Guoliang, Xiang Weicheng
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the firing accuracy and stability of multiple launch rocket system(MLRS), the response surface method is applied to structural parameters optimization for MLRS, and built the approximated response surface model, which used windage, launch time interval and locking force as design parameter, and used the central bias of vertical and horizontal direction as multi-response target. The strong nonlinear relationship between the design parameter and the response target is simulated, and regression test has been done on approximate model, to make sure the approximate model is workable. Finally, check out the most reasonable solution of the optimization on central bias of vertical and horizontal direction, which combined approximate model and satisfaction function method, to improve the dispersion. The results show that the method can greatly shorten the simulation time and the error is very small, and can achieve the purpose of improving the fire accuracy.

Keywords: multiple launch rocket system; shooting dispersion; response surface method; regression test; satisfaction function method

0 引言

火箭武器的射击密集度是评价武器性能的一个重要方面, 它表征了弹着点对于平均弹着点的密集程度。在无控火箭炮中, 影响最大、最有效的提高密集度的方式就是减少起始扰动。起始扰动的大小与火箭炮自身结构以及发射条件(发射时间间隔、弹管间隙、闭锁力等设计参数)有着密切的联系, 而对于这些重要设计参数大小进行合理的匹配研究分析是减小初始扰动的重要手段。传统的以减小初始扰动为目标的火箭炮多体动力学仿真优化分析, 由于影响因素与初始扰动之间存在强非线性关系, 隐藏的函数关系难以显示出来, 且优化迭代过程中需要不断调用仿真程序, 优化后的数据处理都将是个庞大的工作量, 因此整个优化过程时间漫长, 且求解误差较大容易陷入程序中断。

笔者将多体仿真分析与数理统计相结合, 利用 Box-Behnken 试验设计^[1-3]以及响应面法构建出设

计参数与初始扰动的多项式拟合模型, 来逼近模拟真实的非线性关系, 并寻找初始扰动最小的最优方案, 达到提高射击密集度的目的。

1 响应面法简介

响应面法最初被英国科学家提出并用于化学工业中。伴随响应面理论的不完善与发展, 响应面法在生物学、工程学等学科中都有广泛的应用^[4-7]。响应面法结合试验设计以及数理统计理论来考察改变设计变量引起的响应结果对目标影响的趋势, 并对响应及影响目标之间的关系进行数学建模分析, 将试验性的仿真数据转化成通用数据处理问题。

响应面法的优化设计流程可归纳为: 首先选取对目标响应有较高的敏感性的设计变量, 在满足实际情况的条件下确定设计变量的取值范围, 再选取合适的试验设计方法对设计变量进行合理的采样试验, 构造响应面近似模型并对其进行样本检测, 判断响应面模型的合理性, 最后在构建的响应面多项

收稿日期: 2015-04-28; 修回日期: 2015-06-09

作者简介: 岳 炯(1987—), 男, 江苏人, 硕士, 从事兵器发射理论与技术研究。

式模型基础上对响应值进行优化，并将优化值对应的设计变量值带入到原仿真模型中进行计算，对比优化结果，确定优化的正确性，响应面法对多变量影响的响应问题优化流程图如图 1 所示。

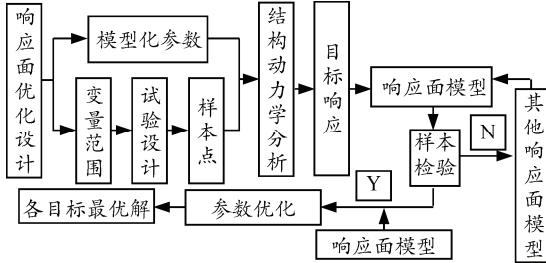


图 1 响应面优化流程

2 优化过程及结果分析

2.1 火箭炮参数及响应的试验设计

为了减小火箭弹的起始扰动，确定对定向器束振动有较大影响的闭锁力、发射间隔及弹管间隙参数大小的合理匹配^[8]。笔者利用 Design-Expert 软件建立设计参数与目标的响应面模型来代替火箭炮的多体动力学模型进行优化分析，取参数弹管间隙、发射时间间隔以及闭锁力作为设计变量，高低和水平方向的中间偏差为响应目标。考虑到设计参数的因子数与水平数，这里采用 Box-Behnken 设计 (BBD) 选取样本试验点构建设计参数与高低中间偏差、方向中间偏差的近似函数关系，设计参数的取值范围由试验分析而定，如表 1 所示，根据 BBD 试验设计方法构建 17 个试验样本点如表 2 所示，试验设计表的创建为响应面模型的构建创造条件。

表 1 设计参数取值水平

设计参数	-1(最小值)	0(中间值)	1(最大值)
弹管间隙 e/mm	0.3	0.6	0.9
时间间隔 T/s	0.4	0.55	0.7
闭锁力 F/N	3 000	5 000	7 000

表 2 BBD 构建样本空间

试验号	弹管间隙 e/mm	时间间隔 T/s	闭锁力 F/N	高低方向	水平方向
				中间偏差 $E_{\phi_0}/(\text{mrad/s})$	中间偏差 $E_{\phi_20}/(\text{mrad/s})$
1	0.6	0.40	7 000	3.12	2.77
2	0.9	0.70	5 000	3.21	2.86
3	0.9	0.40	5 000	3.39	3.02
4	0.6	0.55	5 000	2.80	2.36
5	0.6	0.55	5 000	2.83	2.39
6	0.6	0.70	7 000	2.88	2.47
7	0.6	0.40	3 000	3.03	2.64
8	0.3	0.40	5 000	3.32	2.89
9	0.3	0.55	7 000	2.98	2.58
10	0.6	0.55	5 000	2.85	2.42
11	0.6	0.70	3 000	2.81	2.39
12	0.6	0.55	5 000	2.79	2.34
13	0.6	0.55	5 000	2.82	2.41
14	0.3	0.70	5 000	3.08	2.63
15	0.9	0.55	3 000	2.82	2.39
16	0.3	0.55	3 000	2.91	2.49
17	0.9	0.55	7 000	3.14	2.74

2.2 响应面模型的构建及误差分析

根据火箭炮多体动力学仿真分析获得的试验数据，合理安排 Box-Behnken 试验设计表，由 Design-Expert 软件利用最小二乘法构造二阶多项式响应面拟合方程来逼近真实的设计变量与目标响应的函数关系，其中初步拟合的高低中间偏差函数表达式为

$$E_{\phi_0} = 6.665 - 3.505 \times e - 11.338 \times T + 1.621 \times 10^{-4} \times F + 0.333 \times e \times T + 1.042 \times 10^{-4} \times e \times F - 8.333 \times 10^{-6} \times T \times F + 2.428 \times e^2 + 9.489 \times T^2 - 1.85 \times 10^8 \times F^2。$$

方向中间偏差函数表达式为

$$E_{\phi_{20}} = 6.697 - 3.662 \times e - 12.752 \times T + 1.442 \times 10^{-4} \times F + 0.556 \times e \times T + 1.083 \times 10^{-4} \times e \times F - 4.167 \times T \times F + 2.492 \times e^2 + 10.744 \times T^2 - 1.456 \times 10^8 \times F^2。$$

对多项式拟合方程进行方差分析如表 3、表 4。

表 3 高低中间偏差方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	0.59	9	0.065	42.61	<0.000 1
A-e	9.112E-003	1	9.112E-003	5.93	0.045 1
B-T	0.099	1	0.099	64.44	<0.000 1
C-F	0.039	1	0.039	25.51	0.001 5
AB	9.00E-004	1	9.00E-004	0.59	0.469 1
AC	0.016	1	0.016	12.04	0.000 71
BC	2.50E-005	1	2.5E-005	0.016	0.902 1
A ²	0.20	1	0.2	130.84	<0.000 1
B ²	0.19	1	0.19	124.92	<0.000 1
C ²	0.023	1	0.023	15.01	0.006 1
残差	0.011	7	1.536E-003	—	—
失拟项	8.475E-3	3	2.825E-003	4.96	0.078 1
纯误差	2.28E-003	4	5.700E-004	—	—
总离差	0.60	16	—	—	—

表 4 方向中间偏差方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	0.7	9	0.078	22.23	0.000 2
A-e	0.022	1	0.022	6.30	0.040 4
B-T	0.12	1	0.12	33.61	0.000 7
C-F	0.053	1	0.053	15.09	0.006 0
AB	2.5E-003	1	2.5E-003	0.71	0.425 9
AC	0.017	1	0.017	4.83	0.035 8
BC	6.25E-004	1	6.25E-004	0.18	0.685 3
A ²	0.21	1	0.21	60.51	0.000 1
B ²	0.25	1	0.25	70.32	<0.000 1
C ²	0.014	1	0.014	4.08	0.008 3
残差	0.024	7	3.499E-003	—	—
失拟项	0.020	3	6.658E-003	5.89	0.059 8
纯误差	4.520E-003	4	1.130E-003	—	—
总离差	0.72	16	—	—	—

在方差分析表中， P 值是一个非常重要的参考量，各项参数对应的 P 值表达含义也不同，模型项中的 P 值反映了响应值与设计参数间的回归关系，若 P 值小于 0.05，表明响应值与设计参数之间多项式回归关系具有显著性，若 P 值小于 0.01，表明响应值与设计参数回归关系极其显著，若 P 值大于 0.05，说明回归关系不显著，拟合的多项式回归方程误差太大，不能使用；失拟项的平方和越小越好，其对应的 P 值越大，回归方程的拟合越好，失拟项的 P 值若大于 0.05，表明拟合回归方程与实际情况的异常误差比重小，方程拟合效果好，若 P 值小于 0.05，可能某些因素未考虑完全，需检验原样本点。

从表 3 中可见：火箭炮高低方向中间偏差响应面模型的 P 值小于 0.01，表明各设计参数(时间间隔、弹管间隙、闭锁力)与高低方向中间偏差的响应值之间的多项式回归关系极其显著，具有较高的可靠性；而各单一设计参数的 P 值均小于 0.05，表明各设计参数对于高低方向中间偏差的结果有重要的影响。同理，设计参数的二次项对响应结果影响也极其显著，在考虑对目标响应的影响过程中，各设计变量之间的交互作用也有可能对结果产生影响，弹管间隙与闭锁力之间的交互作用对应的 P 值小于 0.01，因此其交互作用对响应影响显著，弹管间隙与时间间隔、时间间隔与闭锁力之间的交互作用对应的 P 值均大于 0.05，因此对响应结果影响不太显著，而失拟项对应的 P 值大于 0.05，因此多项式拟合值与实际值相当吻合，误差小。同理，在表 4 中对水平方向中间偏差响应面方程进行方差分析可知，水平方向中间偏差响应面模型 P 值也远小于 0.01，设计参数与响应值回归关系显著，弹管间隙与时间间隔、时间间隔与闭锁力间的交互作用对响应结果影响不太显著，其他参数的 P 值虽与高低方向中间偏差响应面模型不同，但都在理想的 P 值内。

去除对响应面模型响应值影响不显著的因素，得出最终高低方向、水平方向的二次多项式响应面方程：

$$E_{\varphi 10} = 6.578 - 3.32 \times e - 11.179 \times T + 1.575 \times 10^{-4} \times F + 1.042 \times 10^{-4} \times e \times F + 2.428 \times e^2 + 9.489 \times T^2 - 1.85 \times 10^{-8} \times F^2;$$

$$E_{\varphi 20} = 6.629 - 3.357 \times e - 12.627 \times T + 1.213 \times 10^{-4} \times F + 1.083 \times 10^{-4} \times e \times F + 2.492 \times e^2 + 10.744 \times T^2 - 1.456 \times 10^{-8} \times F^2.$$

通过火箭炮系统仿真值与多项式拟合值对比如图 2、图 3 可知，预测值与实际仿真值基本在一条直线上，说明响应面拟合效果较好。

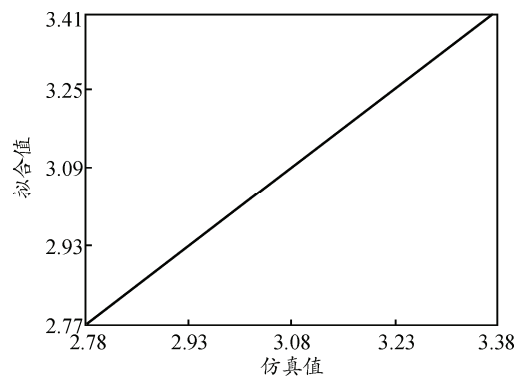


图 2 高低方向仿真值与拟合值对比

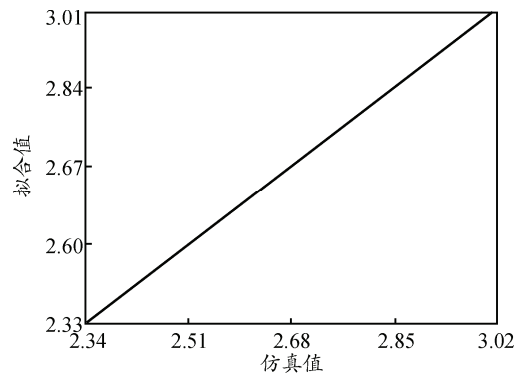


图 3 水平方向仿真值与拟合值对比

对高低方向中间偏差响应面模型进行相关性分析如表 5 所示，由相关性理论可知相关系数以及修正系数的值越接近于 1，模型拟合越可靠，同时“Adeq prediction”反映响应范围与平均误差的比率，其量值越大越好，通常其值超过 4 被认为是理想的。由表可知相关系数 $R^2=0.980 5$ ，修正相关系数 $R^2Adj=0.965 4$ ，足够精度值达到 25.038，因此高低方向中间偏差响应面近似模型具有较好的拟合度，同理分析表 6 可知，水平方向中间偏差响应面近似模型拟合度较好。

表 5 高低方向相关性分析

名称	数值	名称	数值
Std.Dev	0.036	R-Squared	0.980 5
Mean	2.99	Adj R-Squared	0.965 4
C.V.%	1.21	Pred R-Squared	0.849 8
PRESS	0.09	Adeq Precision	25.038

表 6 水平方向相关性分析

名称	数值	名称	数值
Std.Dev	0.055	R-Squared	0.961 9
Mean	2.58	Adj R-Squared	0.932 2
C.V.%	2.15	Pred R-Squared	0.714 8
PRESS	0.21	Adeq Precision	17.334

2.3 响应面优化结果分析

减少火箭炮发射的初始扰动是提高射击密集度的重要途径，而一组弹的初始扰动可量化为高低方向中间偏差 $E_{\phi_{10}}$ 与水平方向中间偏差 $E_{\phi_{20}}$ 来衡量^[9]。

因此为了在有限的发射条件下减小初始扰动，理想情况下应当使高低、水平方向的中间偏差都处于最小值，但实际上由于各设计参数的制约，往往优化一个目标需要牺牲另一个目标的最佳值，不能使得响应目标同时达到最佳值，因此需要对 $E_{\phi_{10}}$ 、 $E_{\phi_{20}}$ 2 个目标响应综合优化，使其综合最优。在响应面法中考虑多响应的问题，需要建立目标优化的运行条件并建立各个响应目标的响应面近似模型，对于文中的优化响应目标及约束条件如表 7。

表 7 优化模型的目标及约束条件

设计参数/响应	变化范围/目标	重要程度
弹管间隙 e/mm	$0.3 \leq e \leq 0.9$	—
时间间隔 T/s	$0.4 \leq T \leq 0.7$	—
闭锁力 F/N	$3\ 000 \leq F \leq 7\ 000$	—
高低方向中间偏差 $E_{\phi_{10}}/(\text{mrad}/\text{s})$	min	+++++
水平方向中间偏差 $E_{\phi_{20}}/(\text{mrad}/\text{s})$	min	+++++

Design-Expert 满意度函数法软件包在解决多响应目标优化时提供了 5 种响应重要度的机制(“+”到“+++++”),若其中一个目标重要程度高于另一个,则应选择更高重要度。在火箭炮近似响应面模型中,纵向密集度与横向密集度同等重要,其值分别是高低与水平方向的中间偏差与最大射程之比,因此将高低与水平方向的中间偏差重要程度都设置为“+++++”,在 Design-Expert 设置以后,得出响应面近似模型中高低、水平方向的综合最优解,同时也可以通过设置得出高低、水平方向中间偏差各自最小值如表 8 所示。

表 8 高低、水平方向中间偏差各自最优与综合最优

弹管间隙 e/mm	时间间隔 T/s	闭锁力 F/N	高低方向中间偏差 $E_{\phi_{10}}/(\text{mrad}/\text{s})$	水平方向中间偏差 $E_{\phi_{20}}/(\text{mrad}/\text{s})$	最优解
0.52	0.64	3 345	2.43	2.18	高低最优
0.67	0.49	4 328	2.72	1.76	水平最优
0.61	0.58	3 917	2.51	1.87	综合最优

将综合最优的设计参数带入到原火箭炮动力学模型中进行计算,其所得的结果与近似模型最优解进行对比如表 9 所示。

表 9 响应面近似模型与动力学模型目标对比 mrad/s

响应值	近似模型	原动力学模型
$E_{\phi_{10}}$	2.51	2.58
$E_{\phi_{20}}$	1.87	1.82

3 结论

1) 利用 Box-Behnken 试验设计以及响应面法构建出近似模型,并对近似模型进行回归检验,确定了近似模型的可行性。

2) 结合满意度函数法优化近似模型的高低、水平方向的中间偏差。寻找初始扰动最小的综合最优方案达到提高射击密集度的目的。

3) 采用响应面近似模型代替原火箭炮动力学模型进行计算。结果表明:近似模型计算得到的优化值与原动力学模型仿真的结果误差非常小,且大大缩短了仿真优化时间,有效地解决了工程优化时间长、效率低及对计算机配置要求高的问题。

参考文献:

- [1] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010:146-160.
- [2] 傅珏生,张健,王振羽,等. 实验设计与分析[M]. 北京:人民邮电出版社,2009:347-380.
- [3] 刘文卿. 试验设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005:47-63.
- [4] Mead R, Pike D J. A review of response surface methodology from AB: biometrics viewpoint[J]. Biometrics, 1975, 31: 803-851.
- [5] Mayers R H, Khuti A I. Response surface methodology: 1966-1988[J]. Technometrics, 1989, 31: 137-157.
- [6] 王永菲,王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 236-240.
- [7] 李善坡,隋允康. 响应面法在二维连续体形状优化中的应用[J]. 力学与实践, 2006, 28(2): 44-47.
- [8] 姚昌仁,唐国梁,宋廷伦,等. 火箭导弹发射动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996:8-21.
- [9] 李军,马大为,曹昕荣,等. 火箭发射系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2008:162-189.