

Research on Simulation Optimization Algorithms of Weapon Equipment Systems Based on RSM Surrogate Model

Bo Du, Xiaolong Cui, Qi Zhao

Urumqi Command College of Chinese People's Armed Police Force, Urumqi
Email: pladubo@sina.com

Received: Nov. 3rd, 2014; revised: Dec. 5th, 2014; accepted: Dec. 13th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

System optimization is one of the core issues in research of the weapon equipment systems. However, to overcome low efficiency and high cost of optimization methods of equipment systems based on simulation, an optimization algorithm of weapon equipment systems based on RSM surrogate model and uniform design was presented, in which the surrogate model was updated by the minimization response surface method, and gradient descent algorithm was using in the optimization algorithm. The optimization algorithm put forward in this paper had a high precision and high speed of convergence, and it also had high theoretical and practical value on solving non-linear problems that were proved in an experiment.

Keywords

Uniform Design, RSM Surrogate Model, Optimization Algorithms

基于RSM代理模型的武器装备体系仿真优化算法研究

杜波, 崔翊龙, 赵琪

武警乌鲁木齐指挥学院, 乌鲁木齐
Email: pladubo@sina.com

收稿日期：2014年11月3日；修回日期：2014年12月5日；录用日期：2014年12月13日

摘要

体系优化是装备体系研究的核心问题，但是基于仿真的武器装备体系优化方法存在寻优效率低、费用高昂的缺陷。本文结合武器装备体系优化问题的特点，提出基于RSM (Response Surface Methodology)，代理模型的武器装备体系优化算法。其中，选用响应面模型作为代理模型，通过均匀设计方法生成初始样本点，运用最小化响应面法进行代理模型更新，采用梯度下降法进行迭代优化。实例分析表明，较之仿真方法，该算法具有较高的寻优精度和收敛速度，对提高武器装备体系优化的效率具有较高的理论和实用价值。

关键词

均匀设计，响应面代理模型，优化算法

1. 引言

武器装备体系是由功能上相互联系、性能上相互补充的各种武器装备系统，按照一定结构综合集成而成的更高层次的武器装备系统。武器装备体系优化是武器装备体系研究的核心问题之一。目前，武器装备体系优化方法可分为两类：一类是解析方法，属于静态优化方法，该方法利用体系能力指标与体系效能、费用之间的解析模型进行优化求解。由于建模过程中忽略了很多细节，难以精确描述武器装备体系的动态性、非线性及涌现性等复杂特征。另一类是目前研究和应用较多的仿真优化方法，包括多方案优选方法[1]和探索性仿真分析方法[2]-[4]。其基本思想是通过“枚举-比较-选择”实现体系优化。随着武器装备体系规模和复杂度的提高，搜索空间规模成指数增长，仿真优化方法寻优效率低、费用高昂的缺陷越来越突出。

基于代理模型(Surrogate Model)的仿真优化方法，是一种利用代理模型代替或部分代替仿真模型的优化方法，已在机械设计、多学科优化等领域得到成功应用[5]-[7]。由于代理模型的计算量远小于仿真模型，因此在满足精度要求的条件下，可以大大减少计算时间、提高优化效率。本文针对武器装备体系的非线性、非可加性等复杂性特征，以及武器装备体系规模增大、搜索空间急剧增长的特点，提出一种基于代理模型和实验设计相结合的武器装备体系仿真优化方法。算法首先采用敏感性分析方法进行设计变量筛选；而后运用均匀设计结合遗传算法进行仿真预优化；最后在最优解邻域内构建响应面代理模型(Response Surface Methodology, RSM)结合寻优算法进行高精度寻优，得出优化方案。示例分析表明，该算法较之仿真优化方法具有较高的寻优精度和寻优效率，为解决武器装备体系优化问题提供了一种新思路。

2. 基于代理模型的优化算法

2.1. 算法基本原理

基于代理模型的武器装备体系仿真优化算法原理如图 1 所示。算法分为因子筛选、仿真预优化、代理模型拟合与更新、以及代理模型方案寻优四个部分。本算法首先分析体系方案，对设计变量进行筛选，选择那些对于体系作战效能影响较为显著的设计因素，进行试验设计，并在设计空间中进行初步仿真优化搜索，逼近体系最优方案；根据第一步分析结果，将设计空间范围缩减到最优方案的较小邻域内，并在该设计空间内进行中心复合试验设计，获取试验数据，确定高精度寻优的设计空间；利用试验设计获

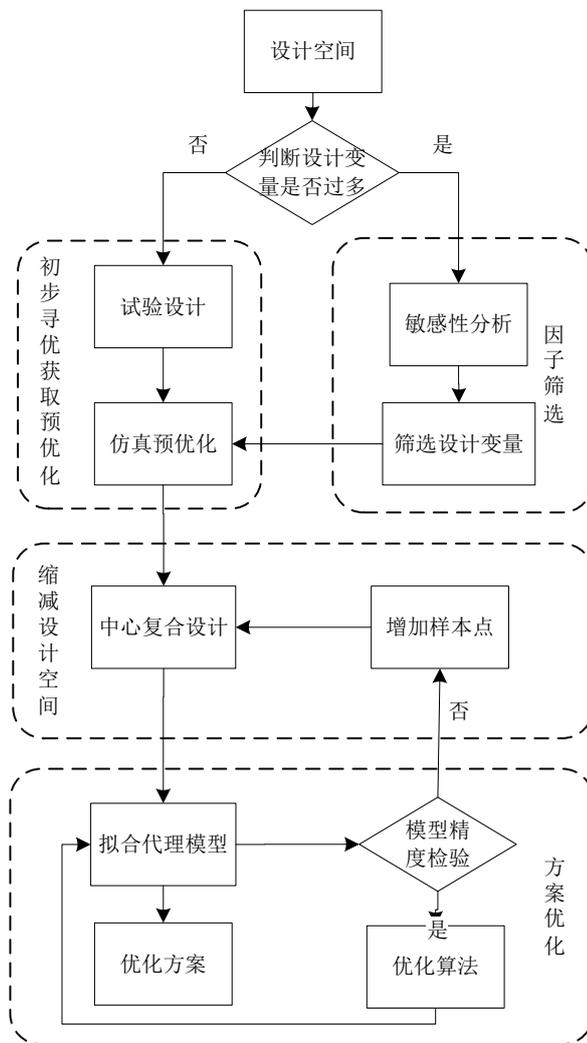


Figure 1. The fundamental of algorithms
图 1. 算法基本原理

取的数据，拟合多项式代理模型，并进行精度分析和检验，判断代理模型是否满足精度要求，若满足要求，则运用优化算法进行迭代优化，否则需要增加样本点，对代理模型进行更新，以提高代理模型精度。

从算法原理可以看出，为提高基于代理模型的仿真优化算法的精度和效率，最关键的是要利用较少的实验数据构造较高精度的代理模型。因此需要选择合适的代理模型方法和试验设计方法。

2.2. RSM 代理模型

代理模型是根据仿真模型的输入、输出结果，运用数学方法拟合而成的新的、简化的、近似模型，是仿真模型的一个替代模型。通过代理模型替代、或部分替代仿真模型模型进行优化，在满足精度要求的条件下，可以大幅减少计算量，从而提高优化效率。常见的代理模型包括响应曲面模型、Kriging 模型、径向基模型、神经网络模型以及 SVM 模型等。其中多项式响应面模型与 Kriging 模型最为常用。与 Kriging 模型相比，响应面代理模型是目前研究最为深入，应用最为广泛的一类代理模型。

运用响应面代理模型解决武器装备体系优化问题的优势在于：1) 模型简明、收敛速度快，运用该模型进行优化设计，可以很快收敛于目标极值点；2) 拟合精度高，对于设计变量较少(一般为 10~15 个设

计变量), 且非线性程度不高的体系仿真模型具有很高的拟合精度; 3) 模型具有透明性, 从拟合模型的系数可以判断设计变量对响应变量的影响大小, 从而可以判断武器装备体系各配置要素的重要性。因此, 本文采用二次响应面模型作为高精度代理模型, 结合仿真预优化, 用于解决武器装备体系优化问题。模型及参数估计方法见文献[8]。

2.3. 因子筛选的敏感性分析方法

需要指出的是响应面代理模型在处理高阶优化问题上存在的拟合不足的问题, 为了提高响应面模型的拟合精度和算法的优化效率, 需要通过因子筛选达到降维的目的。敏感性分析是一种分析重要因素的方法[9]。敏感性分析, 就是通过一定方法, 对响应变量相对于设计变量的敏感程度进行检验, 用于分析各个设计变量的作用方式和作用大小, 进而根据各个设计变量的相对重要性进行排序和筛选。

设有 m 个相互独立的待筛选变量 x^1, x^2, \dots, x^m , 假设待筛选变量与响应变量间存在映射关系 $y = f(x^1, x^2, \dots, x^m)$ 。将自变量 x^i 在其定义域上划分为 $n_i + 1$ 个区间, 其中 $i = 1, 2, \dots, m$ 。考察变量 x^i , 计算 y 关于 x^i 方向上的差分:

$$g_i(x_{j_1}^1, x_{j_2}^1, \dots, x_{j_i}^i, \dots, x_{j_m}^m) = \frac{f(x_{j_1}^1, x_{j_2}^1, \dots, x_{j_{i+1}}^i, \dots, x_{j_m}^m) - f(x_{j_1}^1, x_{j_2}^1, \dots, x_{j_i}^i, \dots, x_{j_m}^m)}{x_{j_{i+1}}^i - x_{j_i}^i} \quad (1)$$

计算 $|g_i|$ 的数学期望:

$$E(|g_i|) = \sum_{j_1, \dots, j_m} p(x_{j_1}^1, x_{j_2}^1, \dots, x_{j_i}^i, \dots, x_{j_m}^m) |g_i(x_{j_1}^1, x_{j_2}^1, \dots, x_{j_i}^i, \dots, x_{j_m}^m)| \quad (2)$$

其中 $P(\bullet)$ 表示取得该点的权重值。 $E(|g_i|)$ 的大小反映了变量 x^i 对响应变量 y 的重要程度, 按照 $E(|g_i|)$ 对各因素进行排序, 根据实际情况给定阈值 ξ_0 , 当 $E(|g_i|) < \xi_0$ 时, 将该设计变量剔除。

2.4. 试验设计

在基于代理模型的武器装备体系优化算法中, 试验设计(DOE)是一个重要的关节, 其目的在于, 通过合理的试验设计, 从设计空间抽取尽可能少的具有代表性的样本点, 来反映体系效能在整个设计空间的变化规律, 并为构造代理模型提供所需数据。目前常用的仿真试验设计方法, 包括正交设计、均匀设计、拉丁超方设计、中心复合设计等, 其中均匀设计和中心复合设计最为常见。与其他试验设计方法相比, 均匀设计具有均匀分散性和良好的空间填充特性, 能够以较少的样本点提供足够的设计空间信息。汪文俊[10]等人的研究还表明, 在处理不确定性问题时, 均匀设计的性质明显优于其他试验设计方法。中心复合设计(Central Composite Experiment Design, CCD)则是一种进行批量试验的设计方法, 常用于回归建模中。

由于武器装备体系结构不是固定不变的, 而是随着作战任务、作战环境的变化而不断发展变化的。换言之, 武器装备体系具有不确定性特征, 而均匀设计方法较之其他方法而言, 在处理不确定性问题上具备更为优良的空间特性。因此, 本文采用均匀设计方法生成初始样本点, 用于仿真预优化, 在此基础上采用中心复合设计构建响应面模型。

2.5. 代理模型更新

正如文献[11]中所述, 代理模型的更新是提高代理模型逼近能力的关键, 直接影响到优化的精度和效率。本文采用最小化响应面方法进行代理模型更新, 最小化响应面方法的实质是, 将每次迭代后的当前最优设计加入训练样本集, 进行下一次迭代建模优化, 直至满足收敛准则为止。最小化响应面方法是针对最小化问题提出的代理模型更新方法, 如果是最大化问题, 则为最大化响应曲面法。

该方法的收敛准则为同时满足或满足式(3)和式(4):

$$|y_k - y_{k-1}| \leq \xi_1 \quad (3)$$

$$|y_k - \hat{y}_k| \leq \xi_2 \quad (4)$$

其中 k 为优化迭代指数, y_k 为当前最优设计的响应值, \hat{y}_k 为当前最优设计的多项式估计响应值, 这两个准则保证了最优解的精度。这种代理模型更新方法, 对于单峰值问题能够快速收敛于最优解。但是由于该方法仅仅考虑了预测值精度, 忽略了对于样本稀疏区域的搜索, 所以很难在迭代过程中提高模型的全局精度, 对于复杂的多峰值问题容易陷入局部最优解。因此, 该方法适合于局部高精度寻优过程中的模型更新。

2.6. 基于 RSM 代理模型的仿真优化算法

根据以上分析, 可以得到基于多项式代理模型的武器装备体系优化算法基本步骤为:

- 1) 根据设计变量集 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 与其对应的响应集 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ 进行敏感性分析, 根据公式(2)计算期望值大小, 对设计变量进行排序, 进行变量筛选得到新的设计变量集;
- 2) 运用拉丁超方抽样对筛选变量组成的设计空间进行采样, 得到样本集 X' , 结合遗传算法在该设计空间中进行低精度寻优, 逼近全局最优解 x_0 ;
- 3) 在 x_0 的邻域内采用中心复合设计进行采样, 拟合响应面代理模型;
- 4) 运用梯度下降法进行局部寻优, 得到当前最优解 x_k ;
- 5) 判断是否满足收敛条件, 是则输出 x_k 及其响应值 y_k , 否则在 x_k 处采样, 得对设计空间进行更新 $X' = X' \cup x_k$, 转 3)。

3. 实例分析

运用本文提出的基于代理模型的优化算法, 以作战机群的突防能力为优化目标, 对空中进攻作战武器装备体系进行优化设计。

作战想定

红方空袭编队由突击飞机、隐身飞机, 支援飞机, 巡航导弹以及机载武器系统组成。采用多波次空袭战术, 首先由巡航导弹和隐身飞机等组成机群, 对防空系统及空袭目标进行突击。奏效后, 采用突击机群, 对选定重要目标进行分批全面突击, 突击机群采用泊松流进行突防, 在突防过程利用飞机敷设箔条干扰走廊掩护攻击机群突防对预定目标进行攻击。空袭编队的相关战计指标[12]如表 1 所示。

蓝方防空武器系统由雷达系统, 导弹系统和发射系统编成。其相关战计指标[13]如表 2 所示。蓝方是由具有网络中心化能力的 3 套防空导弹系统组成, 执行区域防空作战任务。每套防空系统由一个雷达系统和 8 辆防空导弹发射车组成, 每车 4 枚导弹, 采用垂直发射方式, 以雷达为中心, 每 2 辆发射车为一组进行布防, 最大拉开距离为 30 km。雷达系统可以精确跟踪 4 个目标并制导 8 枚导弹拦截精确跟踪目标。防空作战区域为平原无障碍地区, 防空导弹拦截目标采用的战术为包概率拦截, 即每次发射 2 枚导弹拦截一个目标。

3.1. 试验设计

运用敏感性分析方法进行因子筛选, 得到能力指标集, 记为 $X = \{N_0, V_0, C_0\}$, 分别表示突击机群的攻击强度, 机动能力和隐身能力。为了方便描述, 将这些能力指标值规范化到 $[0, 1]$ 区间内, 运用均匀试验设计方法在设计空间内采样, 使用 U_{18}^* (18^{11}) 均匀设计表进行试验设计, 由于本试验设计 3 个设计变量, 根据均匀设计表的使用表, 采用设计表的第 1、4、8 列进行试验设计, 得到试验设计方案如表 3 所示,

该设计的偏差为 $D = 0.1394$ 。

3.2. 仿真实验

对抽样结果进行效能仿真，运用本文提出的基于多项式响应面代理模型的武器装备体系仿真优化方法，根据式(3)(4)收敛准则，设 $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ [14]， $\varepsilon = 0.001$ ，经过 27 次迭代得到优化结果如图 2~4 所示。当设计变量 $X = \{N_0, V_0, C_0\} = (0.8708, 0.96639, 0.97216)$ 时，突防概率取得极值为 $P_0 = 0.88899$ 。

3.3. 结论分析

将基于代理模型的优化算法与直接仿真优化方法进行比较。在本例中基于代理模型的优化算法中所涉及的遗传算法，其参数设置如表 4 所示。

算法的结果比较如表 5 所示。

从以上优化结果可见，运用两种方法所得的优化设计结果基本一致，其中基于 RSM 模型的仿真优化算法共进行了 45 次迭代，在保证寻优精度的同时，其收敛速度上明显高于的仿真优化算法。

Table 1. Air attack formation tactical index

表 1. 空袭编队战计指标

| 类型 | 战技指标 | 指标值 |
|---------|-----------------------|----------|
| 突击飞机 | RCS (m ²) | 0.2~2 |
| | 飞行速度(m/s) | 180~360 |
| | 进入高度(km) | 8~12 |
| 隐身飞机 | RCS (m ²) | 0.02~0.2 |
| | 飞行速度(m/s) | 180~360 |
| | 进入高度(km) | 3~5 |
| 巡航导弹 | RCS (m ²) | 0.01~0.1 |
| | 飞行速度(m/s) | 300~600 |
| | 进入高度(m) | 50~100 |
| 机载空地导弹 | RCS (m ²) | 0.1 |
| | 飞行速度(m/s) | 300 |
| | 攻击距离(km) | 0~30 |
| 机载反辐射导弹 | RCS (m ²) | 0.01 |
| | 飞行速度(m/s) | 900 |
| | 攻击距离(km) | 0~50 |

Table 2. Air defense weapons tactical index

表 2. 防空武器系统战计指标

| 战技指标 | 指标值 |
|--------------|----------|
| 作战高度(km) | 0.03~24 |
| 作战距离(km) | 3~80 |
| 单发导弹杀伤概率 | 0.7 |
| 防空系统反应时间(s) | 10~25 |
| 雷达系统精跟距离(km) | 31.9~373 |
| 雷达高度(m) | 3.5 |
| 探测范围(度) | 0~180 |
| 导弹射程(km) | 0~80 |

Table 3. Air attack U_{18}^* (18^{11}) uniform design DOE

表 3. 空袭作战 U_{18}^* (18^{11}) 均匀试验设计表

| 实验号 | 攻击强度 N_0 | 机动能力 V_0 | 隐身能力 C_0 |
|-----|------------|------------|------------|
| 1 | 0.1 | 0.618 | 0.55 |
| 2 | 0.15 | 0.765 | 0.1 |
| 3 | 0.2 | 0.912 | 0.6 |
| 4 | 0.25 | 0.5 | 0.15 |
| 5 | 0.3 | 0.647 | 0.7 |
| 6 | 0.35 | 0.793 | 0.2 |
| 7 | 0.4 | 0.942 | 0.75 |
| 8 | 0.45 | 0.53 | 0.25 |
| 9 | 0.5 | 0.677 | 0.8 |
| 10 | 0.55 | 0.823 | 0.3 |
| 11 | 0.6 | 0.97 | 0.85 |
| 12 | 0.65 | 0.558 | 0.35 |
| 13 | 0.7 | 0.707 | 0.9 |
| 14 | 0.75 | 0.85 | 0.4 |
| 15 | 0.8 | 1 | 0.95 |
| 16 | 0.85 | 0.588 | 0.45 |
| 17 | 0.9 | 0.735 | 1 |
| 18 | 0.95 | 0.882 | 0.5 |

Table 4. Genetic algorithms parameters setting

表 4. 遗传算法参数设定

| 相关设置 | 设置值 |
|----------|----------|
| 编码方式 | 实数编码 |
| 收敛准则 | 迭代 100 代 |
| 初始种群大小 | 18 |
| 选择概率 | 0.08 |
| 变异概率 | 0.06 |
| 交叉算子中的参数 | 取默认值 |

Table 5. Optimization results

表 5. 优化结果比较

| | 初始 采样 | 迭代 优化 | N_0 | V_0 | C_0 | P_0 |
|-----|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| RSM | 18 | 27 | 0.87080 | 0.96639 | 0.97216 | 0.88899 |
| 仿真 | | 100 | 0.8 | 0.98 | 0.97 | 0.8889 |

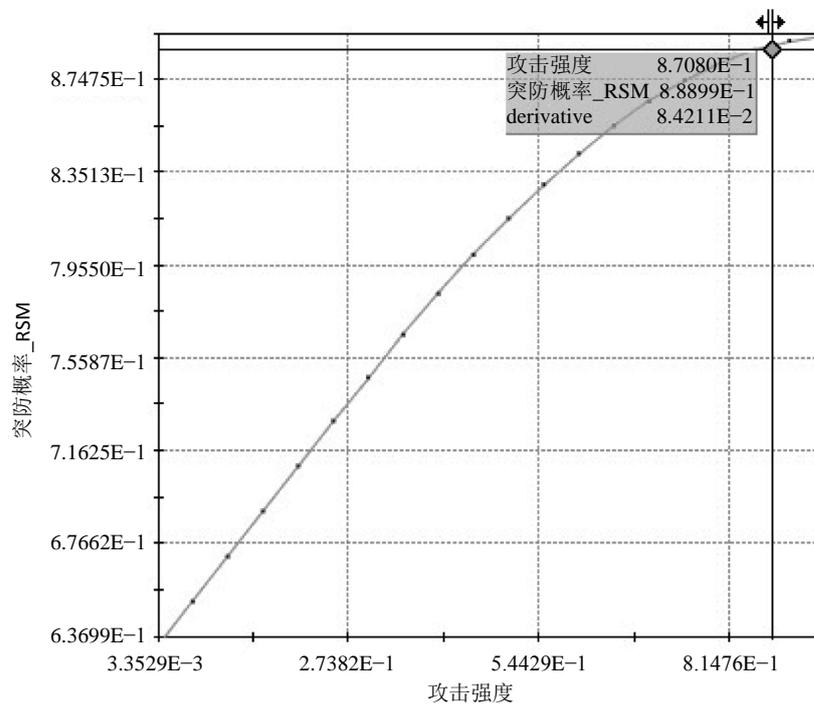


Figure 2. The relationship between attack strength N_0 and penetration probability P_0
图 2. 攻击强度 N_0 与突防概率 P_0 关系图

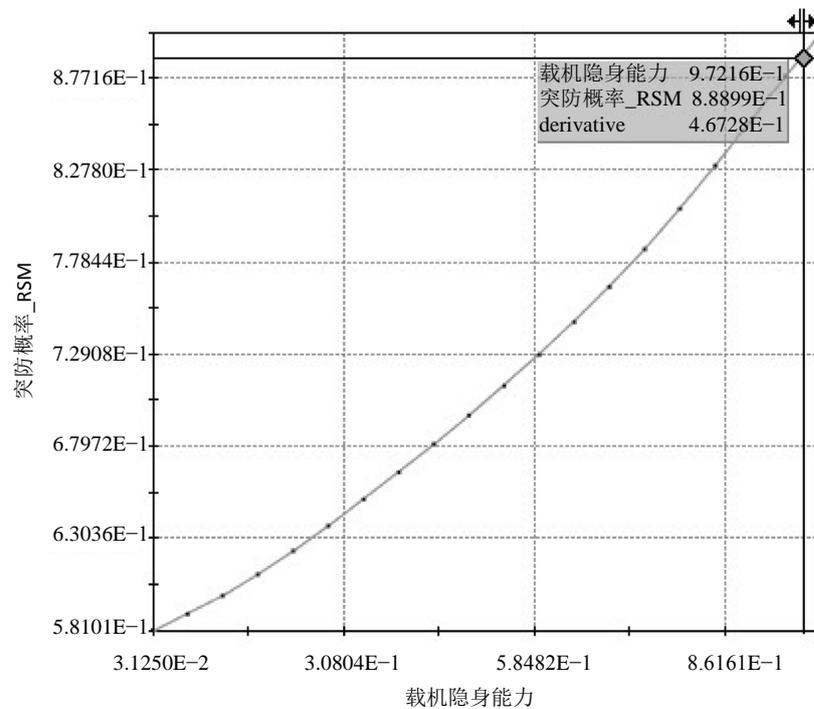


Figure 3. The relationship between stealth capability C_0 and penetration probability P_0
图 3. 隐身能力 C_0 与突防概率 P_0 关系图

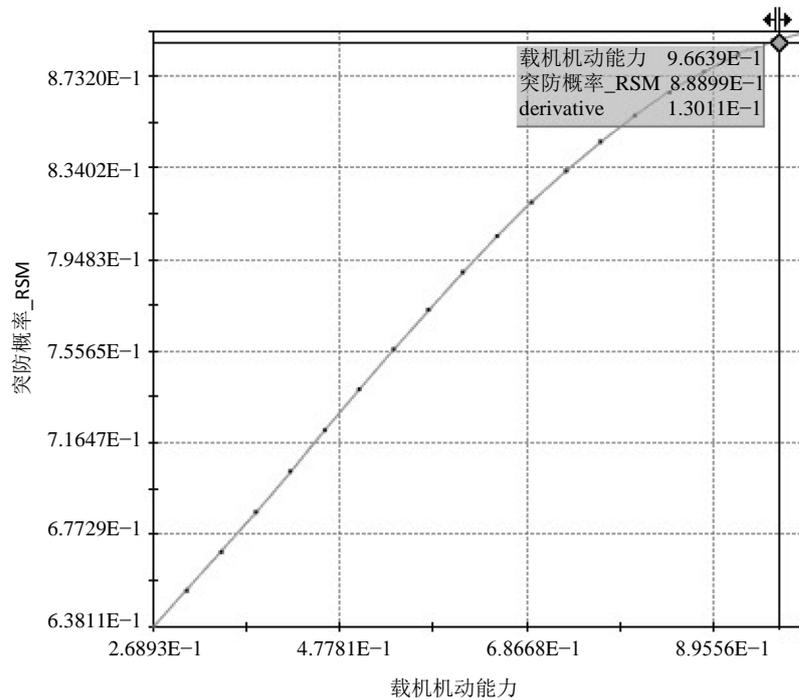


Figure 4. The relationship between maneuver capability V_0 and penetration probability P_0

图 4. 机动能力 V_0 与突防概率 P_0 关系

4. 结论

本文提出了一种基于 RSM 代理模型的优化算法。该算法运用均匀设计方法生成初始样本点，借助最小化响应面方法进行代理模型更新，能够有效的提高模型在极值点附近的逼近能力和全局收敛性。通过对作战机群的突防能力体系优化的实例分析，说明该算法在武器装备体系优化问题中的适用性，为克服仿真优化方法带来的费用高昂、寻优效率低的缺陷，提高武器装备体系的优化效率提供了一种新思路。

参考文献 (References)

- [1] 耿振余, 毕义明 (2006) 作战体系优化方法. *火力与指挥控制*, **7**, 27-29.
- [2] 胡晓峰, 杨镜宇, 吴琳, 司光亚 (2008) 武器装备体系能力需求论证及探索性仿真分析实验. *系统仿真学报*, **12**, 3065-3068.
- [3] 胡剑文 (2009) 武器装备体系能力指标的探索性分析与设计. 国防工业出版社, 北京.
- [4] 周少平, 李群, 王维平 (2007) 支持武器装备体系论证的探索性分析框架研究. *系统仿真学报*, **9**, 2066-2069.
- [5] 游海龙, 贾新章, 张小波 (2006) 试验设计与仿真相结合构造集成电路元模型的方法研究. *电子学报*, **6**, 1159
- [6] Jouhauda, J.-C., Sagautb, P., Montagnaca, M. and Laurenceaua, J. (2007) A surrogate model based multidisciplinary shape optimization method with application to a 2D subsonic airfoil. *Computers & Fluids*, **36**, 520-529.
- [7] Koch, P.N. and Wujek, B. (2002) Facilitating probabilistic multidisciplinary design optimization using Kriging Approximation Models. AIAA-2002-5415.
- [8] 杜波 (2010) 基于代理模型的武器装备体系优化算法研究. 学位论文, 国防科学技术大学, 长沙.
- [9] 傅攀峰 (2007) 空中进攻作战武器装备体系作战效能评估与分析方法研究. 学位论文, 国防科学技术大学, 长沙.
- [10] Wang, W.-J., Zhou, Y.D. and Fang, K.-T. (2009) Comparison between different types of experimental designs. *The*

10th Symposium on the Uniform Design Association of China and 2009 Xi'an Symposium on Applied Statistics, Xi'an, 11 July 2009, 97-105.

- [11] 王琦, 丁运亮, 陈昊 (2008) 基于多级代理模型的优化算法. *南京航空航天大学学报*, **4**, 501-506.
- [12] 娄寿春 (2009) 地空导弹设计指挥控制模型. 国防工业出版社, 北京.
- [13] 陈立新 (2007) 防空导弹网络化体系效能评估. 国防工业出版社, 北京.
- [14] Jones, D.R. (2001) A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces. *Journal of Global Optimization*, **23**, 345-383.