

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.05.020

# 基于改进遗传算法的断路器温控问题研究\*

李 洪,徐丽丽,李 劲\*

(昆明理工大学 质量发展研究院,云南 昆明 650093)

**摘要:**针对控制断路器在制造过程中温度变化的问题,对各工艺参数进行了优化。首先利用均匀设计与正交设计,在对试验次数相近时,均匀性更好的、更具代表性的特点进行了试验分析;然后通过响应面法(RSM)构建了断路器温度变化的回归模型,并且利用残差进行了插值拟合,构建了基于径向基函数的响应面模型;最终提出了一种改进的非线性遗传算法(INGA),在遗传算法的选择操作时,首先采用精英策略,选取了最大适应值种群,然后在剩下的种群中采取轮盘赌法选择,通过改进的变异算子不断调整搜索区域,再利用非线性规划算法具有很强的局部搜索能力提高了解的精度。研究表明:改进后的非线性遗传算法具有较好的全局优化能力,且比传统的遗传算法和非线性规划算法更优。

**关键词:**优化设计;径向基函数;响应面法;非线性遗传算法

中图分类号:TM561;TP301

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)05-0550-05

## Temperature control of circuit breaker based on improved genetic algorithm

LI Hong, XU Li-li, LI Jin

(Quality Development Institution, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Aiming at the control circuit breaker temperature change in the manufacturing process, the process parameters were designed optimally. First, based on the uniformity of the better, more representative of the characteristics in the case that the number of uniform design and orthogonal design trials was similar, the test analysis was conducted. Then the regression model of temperature variations of circuit breaker was constructed by response surface methodology (RSM), and the residuals was utilized for interpolant fitting, which in turn to construct the response surface model based on radial basis function. Finally, an improved nonlinear genetic algorithm (INGA) was proposed. In the selection of genetic algorithm, the elite strategy was firstly adopted to select the maximum fitness population, and then the roulette method was selected in the remaining population. The improved region was adjusted by the improved mutation operator, and using strong local search ability of the nonlinear programming algorithm, the accuracy of solution was upgraded. The results indicate that the improved nonlinear genetic algorithm has good global optimization capability, and it better than others.

**Key words:** optimize design; radial basis function(RBF); response surface methodology(RSM); nonlinear-genetic algorithm(NGA)

## 0 引 言

在断路器的制造过程中,如何控制电阻值、镀银厚度等关键影响因素已成为人们关注的问题,控制影响

因素水平成为关注的焦点。因而,需要构建径向基响应面函数并利用改进的非线性遗传算法优化因素水平,使温控值达到最优。

而由于响应面法能够在最优区域内通过二次多项

收稿日期:2017-09-18

基金项目:云南省自然科学基金资助项目(2012ZC012X);昆明理工大学人才培养基金资助项目(14118310)

作者简介:李 洪(1990-),男,湖北十堰人,硕士研究生,主要从事质量统计和质量管理方面的研究。E-mail:2506617532@qq.com

通信联系人:李 劲,男,博士,副教授。E-mail:1286903026@qq.com

式拟合一个响应曲面代替未知的真实曲面。如:张亚南等<sup>[1]</sup>利用响应面优化法进行复配稳定剂的优化,以此改善了乳清雪菊酒的不稳定性;程军圣等<sup>[2]</sup>为了改善听小骨消声器的消声性能,利用响应面法构造二次多项式响应面模型,并且验证了其方法的有效性。

但是响应面法并未对残差进行处理,并且其核心之一就是输入变量试验点选取的随机性,而采用均匀设计筛选试验点后所构建的响应面便可以使结果更加精确,并且均匀设计更加适用于多水平试验,也多有应用。如:周敏等<sup>[3]</sup>将均匀设计用在汽车前轮罩板成形参数设计中,明显节省了工艺制造的时间,提高了工艺设计的工作效率;李子轩等<sup>[4]</sup>利用均匀试验设计的方法研究多水平工艺参数对C型钢成形质量的影响,结果表明合理的试验设计方案所得到的工艺参数有效地改善了冷弯产品的质量。

而径向基函数对于任意维的离散观察点的处理较为简单,并且径向基函数具有良好的拟合性和较高的精确值,同时利用插值拟合处理残差,并建立基于径向基函数的响应面模型能够更好地表达真实曲面的模拟信息。如:潘雷等<sup>[5]</sup>采用径向基函数方法对多项式响应面法的残差进行处理,有效地提高了多项式响应面的近似精度。

纵观均匀设计、响应面优化和径向基函数等的发展与应用,越来越多的学者将各种方法有机地结合在一起,以此来改善传统单一的使用一种方法来研究某个领域的相关问题,因此将径向基函数与响应面优化和均匀设计相结合是一种不错的选择,并且针对这一领域的研究已有不少,如:秦玉灵等<sup>[6]</sup>在对机翼进行有限元分析时,首先利用均匀设计分析其结构参数,然后在建立基于高斯径向基函数的响应面模型,并且利用最小二乘得出系数;马伟标等<sup>[7]</sup>在研究优化履带车辆悬挂系统的参数时,利用径向基函数构建了其主要参数与平顺性评价指标之间的响应面模型,并且利用退火优化算法对参数进行优化,证明了其方法的可行性;安治国等<sup>[8]</sup>在讨论板料成形时,首先通过超拉丁立方的抽样设计,然后建立基于径向基函数的响应面模型,分析了板料在冲压成形过程中的可靠性,证实了径向基响应面模型的有效性;陈磊等<sup>[9-10]</sup>利用改进的浮点遗传算法求解非线性方程组,结果表明该方法具有较好优化能力,也提高了解的精度和搜索速度;李峰平等<sup>[11]</sup>将经典的非线性规划算法和遗传算法相结合用于探讨瞬变电磁反演,并取得了很好的效果;成志伟等<sup>[12]</sup>在对汽车动力系统的参数优化时采用非线性规划遗传算法,结果表明此方法的可行性。虽然利用均

匀设计、响应面优化并结合径向基函数建立模型,再通过非线性遗传算法进行寻优,用来解决解决多水平、非线性问题的研究已有不少,但遗憾的是在控制断路器的制造过程中分析其温度变化的应用还很少。

本文先对试验数据进行分析,再构建控制断路器温控回归模型,然后构建基于径向基函数的响应面优化模型<sup>[13]</sup>,最终进行优化处理。

## 1 均匀设计 RBF-RSM 实现原理

### 1.1 响应面法

响应面法(RSM)由 Box 和 Wilson 提出,用于优化响应变量和响应之间的潜在规律。

本文在构建断路器温控优化模型时则是利用恰当的试验点,在确定稳定区域后,通过拟合二阶响应面回归模型,并利用非线性遗传算法进行优化、分析,找到最佳的参数组合。

### 1.2 均匀试验设计

从早期的单因素试验设计发展至今,在响应面优化方法中人们通常都会使用试验设计,如正交设计、中心复合设计、拉丁方等。但是对于多因素、多水平问题,这些方法总存在缺陷,而均匀设计在安排较少试验次数的同时也使得试验数据更适合建立模型,在合理均匀排列试验点的同时也可以保证响应面模型的精确度。

### 1.3 径向基函数

径向基函数(RBF)是由 Hardy 提出的某种沿径向对称的标量函数,通常定义为  $n$  维空间中任一点到  $x$  某一中心  $x_i$  之间距离的单调函数<sup>[14]</sup>,可记为:

$$H(\|x - x_i\|) \quad (1)$$

式中:  $\|x - x_i\|$  —  $x$  到  $x_i$  之间的 Euclidean 距离。

### 1.4 径向基响应面模型

传统的多项式响应面法精度有限,而径向基函数和响应面优化构造和计算简单,但不能较好提供插值曲面的近似连续拟合曲面。并且响应面法由于不能对其结果中的残差进行处理而导致不能够随样本容量的增大而有效地提高精度。

在 RSM 分析时,设生成的近似曲面为  $F$ ,试验点和拟合点间的差值为残差  $R$ 。首先利用 RBF 对  $R$  进行处理,提取  $R$  中的信息加入到近似结果中去,这样可以有效地避免 RBF 和 RSM 的缺点。

其具体流程如图 1 所示。

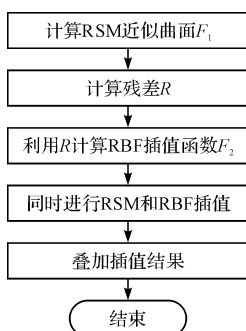


图 1 计算流程图

## 2 非线性遗传算法

### 2.1 非线性遗传算法

非线性算法全局搜索能力较弱,而遗传算法全局搜索能力较强,但是局部搜索能力较弱,一般只能得到问题的次优解,而不是最优。因此,本研究将遗传算法的全局搜索能力和非线性算法的局部搜索能力相结合,用来求解影响断路器温控问题最优解<sup>[15]</sup>。

非线性遗传算法的流程如图 2 所示。

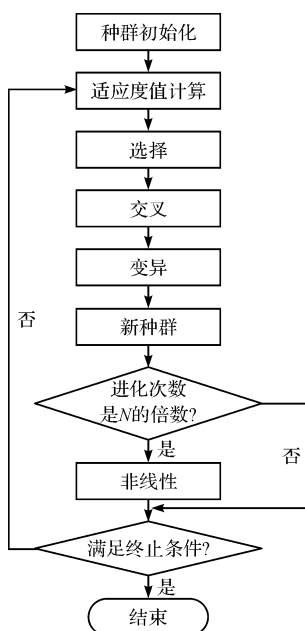


图 2 非线性遗传算法流程图

### 2.2 改进的非线性遗传算法(INGA)实现

改进的非线性遗传算法的改进主要表现在以下几个方面:

(1) 初始化种群。遗传算法必须通过编码把要求问题的可行解表示成遗传空间的染色体或者个体,而诸多编码方法中实数编码不必进行数值转换,可以直接在解的表现型上进行遗传算法操作,故本研究采用该方法将每个染色体表示为实数向量;

(2) 适应度函数。适应度函数是用来区分群体中

个体好坏的标准,一般是由目标函数加以变换得到,本研究需要求得函数的最小值,即温控的最小值,而函数值越小的个体,适应度值越大,个体越优,因此,笔者采用将函数值的倒数作为个体的适应度值:

$$F[f(x)] = \frac{1}{f(x)} \quad (2)$$

(3) 选择操作。选择操作是从旧群体中以一定概率选择优良个体组成新的种群,以繁殖得到下一代个体。个体被选中的概率跟适应度值有关,个体的适应度值越高,被选中的概率就越大。本研究首先采用精英策略<sup>[16]</sup>,选取最大适应值种群,然后在剩下的种群中采取轮盘赌法选择,其中轮盘赌法即基于适应度比例的选择策略,个体  $i$  被选中的概率为:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^N F_j} \quad (3)$$

式中: $F_i$ —个体  $i$  的适应度值; $N$ —种群个体数目。

(4) 交叉操作。交叉操作是指从种群中随机选择两个染色体进行交换组合,把父代的优良基因遗传给子代,从而产生新的优秀个体。由于个体采用的是实数编码,所以交叉操作采用实数交叉法,第  $k$  个染色体  $a_k$  和第  $i$  个染色体  $a_i$  在  $j$  位的交叉操作为:

$$\begin{aligned} a_{kj} &= a_{ij}(1-b) + a_{ij}b \\ a_{ij} &= a_{kj}(1-b) + a_{kj}b \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $b$ — $[0,1]$  区间的随机数<sup>[17]</sup>。

(5) 变异操作。利用 Particle Swarm 优化算法的速率更新提出改进的变异操作<sup>[18]</sup>。假定个体  $x_1, x_2, \dots, x_n$  中某元素  $x_i$  产生变异,通过下述方法变异成新元素:

$$x'_i = c_1 r_1 (x_i^b - x_i) + c_2 r_2 (x_i^b - x_i) \quad (5)$$

式中: $c_1, c_2$ —大于 0 的常数; $r_1, r_2$ — $[0,1]$  区间的随机数, $b$ —参数。

变异操作的主要目的是维持种群的多样性,避免算法陷入搜索空间的某个局部区域,保证算法的全局收敛性。

(6) 非线性寻优。本研究将遗传算法每进化一定代数(10代)后所得的结果作为初始值,采用 Matlab 工具箱中的线性规划函数 fmincon 进行局部寻优,并把找到的局部最优值作为新的个体染色体继续进化。

## 3 基于均匀设计 RBF-RSM 温控工艺模型

本文的数据源于某公司 QC 小组对于分析断路器时温度变化的一次全面的调查,采集了在试验分析过程中影响温度变化的 3 项指标:熔焊面积、镀银厚度和电阻值。

### 3.1 均匀设计试验方案

通过3因素4水平共16个试验点进行分析,均匀设计因素水平表如表1所示(试验序号来自均匀设计表 $U_{16}^*(16^{12})$ 及其使用表)。

表1 试验因素及水平

因子	水平			
熔焊面积 $X_1$	13.07	14.08	14.94	15.42
镀银厚度 $X_2$	4.05	4.25	4.45	4.55
电阻值 $X_3$	1.56	1.64	1.74	1.78

### 3.2 均匀设计试验结果

按照试验设计方案安排试验,得到结果如表2所示(温度变化为响应值)。

表2 均匀试验设计方案及结果

序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	熔焊面积	镀银厚度	电阻值	温度
1	1	5	8	14.08	4.25	1.56	58.0
2	2	10	16	14.94	4.55	1.56	60.8
3	3	15	7	15.42	4.25	1.56	57.5
4	4	3	15	13.07	4.55	1.56	58.6
5	5	8	6	14.08	4.25	1.64	56.8
6	6	13	14	15.42	4.55	1.64	62.4
7	7	1	5	13.07	4.05	1.64	53.7
8	8	6	13	14.08	4.45	1.64	58.8
9	9	11	4	14.94	4.05	1.74	53.9
10	10	15	12	15.42	4.45	1.74	56.8
11	11	4	3	13.07	4.05	1.74	52.2
12	12	9	11	14.94	4.45	1.74	56.8
13	13	14	2	15.42	4.05	1.78	50.1
14	14	2	10	13.07	4.45	1.78	57.1
15	15	7	1	14.08	4.05	1.78	52.6
16	16	12	9	14.94	4.45	1.78	56.4

### 3.3 径向基响应面模型的建立

将温度变化作为响应变量,熔焊面积( $X_1$ )、镀银厚度( $X_2$ )和电阻值( $X_3$ )作为自变量,根据均匀试验设计结果建立不含交叉项的响应面模型:

$$Y_1 = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (6)$$

式中: $Y_1$ —响应值; $\beta_0$ —常数项; $\beta_i$ —一次项系数; $X_i$ —各因素。

根据表2的结果,利用Matlab工具拟合,得到其响应面模型的方程:

$$Y_1 = -321.36 + 13.79X_1 + 10.66X_2 + 290.27X_3 - 0.48X_1^2 + 0.12X_2^2 - 91.13X_3^2$$

残差就是真实值与拟合值之间的差值,即为:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (7)$$

式中: $y_i$ —真实观测值, $\hat{y}_i$ —拟合值。

二次响应面回归方程中各试验点的真实值与拟合值之间的差值如表3所示。

表3 各试验点残差

试验点	1	2	3	4	5	6	7	8
残差值	0.689	-0.049	0.46	-1.31	-0.41	1.95	-0.25	-0.75
试验点	9	10	11	12	13	14	15	16
残差值	0.781	-0.699	0.02	-0.99	-1.51	1.47	0.72	-0.17

由于径向基函数  $H \|x - x_j\|$  可以是任意形式的低阶多项式,本研究选取  $\|x - x_j\|^c$  作为径向基函数,其中  $0 < c < 1, x \in (50 \ 63)$ ,通过各试验点与拟合值间的残差拟合,并在0.1的显著性水平下通过检验,得到RBF插值函数:

$$Y_1 = 0.15 \|x - 57.5\|$$

因此,得到基于径向基函数的响应面模型为:

$$Y = -321.36 + 13.79X_1 + 10.66X_2 + 290.27X_3 - 0.48X_1^2 + 0.12X_2^2 - 91.13X_3^2 + 0.15 \|x - 57.5\|$$

改进后的径向基响应面模型是利用残差进行插值拟合后在进行叠加而形成的,通过模型可以看到,改进后的模型比原模型更优。

## 4 优化结果分析

根据遗传算法和非线性规划算法理论,在Matlab中编程实现了基本遗传算法和改进的非线性遗传算法对影响断路器温控的因素进行寻优。其中,遗传算法参数设置为:种群大小80,进化代数40,交叉概率0.7,变异概率0.01。

基本遗传算法和改进的非线性遗传算法优化过程中最优个体函数值变化分别如图(3,4)所示。

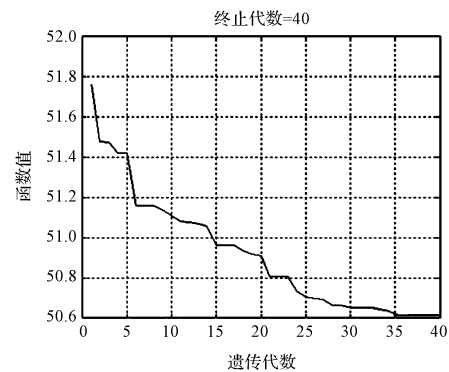


图3 基本遗传算法优化过程

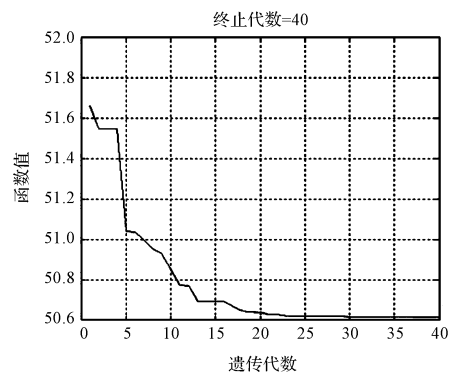


图4 改进的非线性遗传算法优化过程

比较图 3 和图 4 可见:基本遗传算法在种群进化到 35 代时开始收敛,而改进后的非线性遗传算法在种群进化到 20 代时开始收敛,而在 30 代已达到最优解。由此可见,基于改进的非线性遗传算法,在收敛的速度上明显优于基本遗传算法。

在相同的条件下,改进的非线性遗传算法与非线性规划算法及基本遗传算法的求解结果如表 4 所示。

表 4 文中之 INGA 与其他算法的求解结果比较

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x$	$y$
Nonlinear	13.070 2	4.05	1.76	57.5	50.612 2
GA	13.070 1	4.05	1.76	57.502 2	50.612 0
INGA	13.070 1	4.05	1.76	57.498 9	50.611 8

从各算法求解结果可见:改进的非线性遗传算法所优化的结果要优于非线性规划算法和基本遗传算法。综合图表可见:改进后的非线性遗传算法充分发挥了遗传算法的全局搜索能力和非线性规划算法的局部搜索能力。

## 5 结束语

本研究以温度变化值作为响应变量,以熔焊面积、镀银厚度和电阻值作为参数,利用均匀设计进行试验,通过建立响应面优化模型,并且利用传统响应面优化模型没有对残差进行处理的缺陷进行改进,通过利用残差进行径向基函数的插值拟合,最终构建了基于径向基函数的响应面优化模型,找到了最佳的参数组合,并与传统的非线性规划算法和基本遗传算法相比较,结果表明:文中所提出的改进非线性遗传算法的搜索性能更好。

本文的不足之处在于,只是选择了不含交叉项的响应面优化模型,也可以选择全模型等,不同的选择构建的模型是不一样的;径向基函数的选取不同,其构建的优化模型也是不一样的;改进遗传算法的方法和参数设置不同其优化结果也会不同,以上这些都会导致最终优化结果的不同。

## 参考文献 (References):

- [1] 张亚南,付二冬,王 威,等. 响应面优化乳清雪菊酒稳定剂的研究[J]. 食品工业科技,2017,38(5):252-257.
- [2] 程军圣,余 溟. 基于响应面法的听小骨消声器的优化设计[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2017,44(2):60-65.
- [3] 周 敏,何 进. 汽车前轮罩板成形参数的均匀试验设

计和应用[J]. 重庆电子工程职业学院学报,2010,19(3):142-144.

- [4] 李子轩,束学道,郭德林,等. C 型钢的冷弯成形工艺参数分析及优化[J]. 哈尔滨工程大学学报,2017,38(3):446-451.
- [5] 潘 雷,谷良贤,阎代维. 改进响应面法及其近似性能研究[J]. 宇航学报,2009,30(2):806-810.
- [6] 秦玉灵,孔宪仁,罗文波. 基于径向基函数响应面的机翼有限元模型修正[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(11):1465-1470
- [7] 马伟标,王红岩,王良曦,等. 基于径向基函数响应面的履带车辆悬挂系统参数优化方法[J]. 兵工学报,2011,32(9):1053-1058.
- [8] 安治国,周 杰,赵 军,等. 基于径向基函数响应面法的板料成形仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(6):1557-1561.
- [9] 陈 磊,霍永亮. 利用改进的遗传算法求解非线性方程组[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2015,40(1):23-27.
- [10] 贺森森,宣永梅,胡长兴. 某空调系统运行参数的遗传算法优化[J]. 流体机械,2016(12):65-70.
- [11] 李锋平,杨海燕,刘旭华,等. 瞬变电磁反演中的非线性规划遗传算法[J]. 物探与化探,2017,41(2):347-353.
- [12] CHENG Zhi-wei, SUN Yue-dong, LIU Bin, et al. Parametric optimization of automobile powertrain based on nonlinear programming genetic algorithm [J]. **Journal of University of Shanghai for Science & Technology**, 2014, 36(1):44-48.
- [13] ZHOU L R, YAN G R, OU J P. Response surface method based on radial basis functions for modeling large-scale structures in model updating [J]. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, 2013, 28(3):210-226.
- [14] 郁 胜,周林仁,欧进萍. 基于径向基函数响应面方法的超大跨悬索桥有限元模型修正[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(1):1-9.
- [15] QIN B Y. Genetic algorithms combined with nonlinear programming for multimodal function optimization [J]. **Journal of Guangxi University of Technology**, 2013, 24(2):25-31.
- [16] LIANG Y, LEUNG K S. Genetic algorithm with adaptive elitist-population strategies for multimodal function optimization [J]. **Applied Soft Computing**, 2011, 11(2):2017-2034.
- [17] 覃柏英. 非线性规划的遗传算法在多峰函数优化中的应用[J]. 广西工学院学报,2013,24(2):25-31.
- [18] IOANNIS G T. Modifications of real code genetic algorithm for global optimization [J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2008, 203(2):598-607.

[编辑:李 辉]

## 本文引用格式:

李 洪,徐丽丽,李 劲. 基于改进遗传算法的断路器温控问题研究[J]. 机电工程,2018,35(5):550-554.

LI Hong, XU Li-li, LI Jin. Temperature control of circuit breaker based on improved genetic algorithm [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(5):550-554.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn