

基于 MATLAB 遗传算法的优化断路器温控工艺

李 洪 徐丽丽 李 劲

(昆明理工大学质量发展研究院 昆明 650093)

摘 要 在研究断路器温度变化的过程中,控制其温度变化是一项极为重要的工作。实验分析由于在温度变化过程中会受到各种影响因素的干扰,因此需要利用实验设计筛选出关键影响因子进行重点改进。在结合一次对断路器温变过程的全面调查所获得的实际数据的基础之上,首先在实验次数相近时,利用均匀设计与正交设计对均匀性更好、更具代表性的特点进行实验分析;然后通过响应面法(RSM)构建断路器温度变化的回归模型,并且利用带惩罚函数的遗传算法(GA)进行优化,找到一组能够获得最佳温控值的数据组合。

关键词 优化设计,响应面法,惩罚函数,遗传算法

中图分类号 TP301 **文献标识码** A

Optimizing Circuit Breaker Temperature Control Technique Based on GA Toolbox of MATLAB

LI Hong XU Li-li LI Jin

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

Abstract The control of temperature change is a very important work in the process of studying circuit breaker temperature change. Because the test analysis of temperature change process are influenced by various factors, we need to use design of experiment method to screen out the key influence factors to improve. Based on the actual data obtained from a comprehensive survey of the circuit breaker temperature change process, this paper used uniformity and the more representative characteristics to perform an experiment when uniform design and orthogonal design when their number of experiment is similar. Then it applied response surface methodology to build a regression model about circuit breaker temperature change and used the genetic algorithm with penalty function to optimize, finding out a group of factors which get the best temperature control value.

Keywords Optimization design, Response surface methodology, Penalty function, Genetic algorithm

1 引言

随着制造业的发展和技术的提高,人们对断路器成品质量的要求越来越高,而在断路器的制造过程中如何控制影响温变因素,这个问题越来越受到人们关注。

响应面法能够在最优区域内通过二次多项式拟合一个响应曲面来代替未知的真实曲面,但是响应面法的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实验。而基于孟德尔遗传变异理论提出的遗传算法是将自然遗传学和计算机科学相结合渗透而形成的一种更为新兴的优化方法,其算法可实现全局搜索,但传统的遗传算法无法解决带有约束条件的非线性问题,而惩罚函数刚好可以满足此要求,因此利用带有惩罚函数的遗传算法对回归模型作进一步优化是一种不错的选择。并且针对这一领域的研究已有不少,如王伟昌等^[1]在探究优化噻虫胺悬浮剂配方时,利用均匀设计与响应面相结合的优势,建立偏最小二乘的二次多项式回归和二次多项式逐步回归模型对制剂配方进行分析;吕大刚等^[2]在探究结构可靠度时,通过与正交设计、传统模拟方法相比较,得出利用均匀设计响应面法模拟的精确度更高、偏差更小的结论;吴政治等^[3]在探讨清酒质量等

级时,利用 Logistic 回归构建预测模型,并利用带惩罚函数的遗传算法进行优化;于靖博等^[4]在对燃油机喷射参数进行优化研究时,建立了多项式响应面模型,并通过遗传算法进行优化,得到最优参数组合;骆志高等^[5]针对锥辊辗扎成形工艺时,利用惩罚函数将多约束的目标函数转化为无约束的目标函数,并利用遗传算法结合内点惩罚进行优化。虽然利用均匀设计、响应面法建立回归模型并结合带有惩罚函数的遗传算法解决多水平问题的研究已有不少,但遗憾的是在对控制断路器温变分析方面的应用还很少。

本文通过 Design-Expert 和 MATLAB 工具,首先对实验数据进行分析;然后利用响应面方法构建控制断路器温度变化的优化模型;最后通过带有惩罚函数的遗传算法对模型进行优化,期望得到最优参数组合。

2 研究方法

2.1 响应面法

响应面(Response Surface Methodology, RSM)最早是由 Box 和 Wilson 提出的,并且早于田口玄一提出的三次设计法。它是数学和统计学结合的产物,其目的是优化响应变量与自变量之间的潜在规律。

在优化设计时,响应面法通过合理的实验设计方法解决

如何建立目标、约束和设计变量之间近似函数的问题。而在优化设计中,响应变量和自变量之间的关系形式是未知的,因此,通常在自变量的某个范围内(稳定区域)构建近似模型。在实际应用中则是利用恰当的试验点,在确定稳定区域后,通过拟合一阶或二阶响应面回归模型,以及模型分析结果,找到最佳的参数组合。一阶模型的表达式如下:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \epsilon \quad (1)$$

二阶模型的表达式如下:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2)$$

其中, Y 代表响应值, β_0 代表常数项, β_i 代表线性系数, β_{ii} 代表二次项系数, β_{ij} 代表交互作用项系数, ϵ 代表误差项, X_i 和 X_j 代表各因素。

几乎所有的响应面问题都可以用以上两个模型中的一个或者两个解决。而未知系数可通过已观测到的实验数据 $(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1}, y_1), \dots, (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}, y_k)$ 用最小二乘法来估计,即拟合值与样本值在各点的残差平方和最小来确定响应系数,然后在拟合曲面上做响应面分析。系数估计以一阶为例:

$$\hat{\beta} = [\hat{\beta}_0 \ \hat{\beta}_1 \ \dots \ \hat{\beta}_n]^T = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

$$= \left[\frac{1}{k} \sum_j y_j \quad \frac{\sum_j x_{1j} y_j}{\sum_j x_{1j}^2} \quad \dots \quad \frac{\sum_j x_{nj} y_j}{\sum_j x_{nj}^2} \right]^T \quad (3)$$

$$\text{其中, } X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1k} & x_{2k} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}$$

于是得到一阶响应面模型:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_i x_i \quad (4)$$

2.2 均匀实验设计

从早期的单因素实验设计发展至今,人们对于实验设计的运用已经相当成熟。在响应面优化方法中通常都会使用实验设计,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实验次数的同时也使得实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。

2.3 遗传算法

遗传算法是基于自然界生物进化原理构想出来的随机全局搜索最优解的仿生算法,借鉴达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说,模拟生物基因重组与进化的自然过程,把待解决的问题参数编成二进制或十进制的,即基因。若干基因组成一个染色体,许多染色体进行类似于自然选择、配对交叉和变异的运算,经过多次重复迭代(世代遗传)直至得到最后的优化结果,其本质是一种高效、并行、全局搜索的方法。并且在具有进化计算特征的同时也有着自身的特点:1)具有高度的隐含并行性,可以提高计算速度;2)其选择、交叉和变异等运算是以概率的方式进行的,增加了搜索的灵活性,具有较好的全局优化求解能力;3)直接以目标函数值为搜索信息,对函数的性态没有要求,具有较好的适应性和易扩充性。

本文利用遗传算法对所构建的响应面回归模型进行优化,期望在稳定区域内找到最优解。

3 均匀设计响应面优化模型

本节将应用均匀设计理论,对影响温度变化的各项因素

进行分析。本文的数据源于浙江H公司QC小组分析断路器时温度变化的一次全面的调查,采集了在实验分析过程中影响温度变化的3项指标,它们分别是熔焊面积、镀银厚度和电阻值。

3.1 均匀设计实验方案

均匀设计需要科学合理地选取因素水平、恰当地安排实验,如此才能更好地分析出各因素对升温变化的影响。通过对3因素4水平共16个实验点进行分析,均匀设计因素水平表如表1所列。实验序号来自均匀设计表 $U_{16}^{3*}(16^{12})$ 及其使用表。

表1 实验因素及水平

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 均匀实验设计结果

按照3因素4水平上的实验设计方案安排实验,得到的结果如表2所列,温度值为响应值。

表2 均匀实验设计方案及结果

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 响应面优化模型建立

将温度变化值作为响应变量,熔焊面积(X_1)、镀银厚度(X_2)和电阻值(X_3)作为自变量,根据均匀实验设计结果建立响应面模型:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (5)$$

其中, Y 代表响应值, β_0 代表常数项, β_i 代表一次项系数, β_{ii} 代表二次项系数, β_{ij} 代表交互作用项系数, ϵ 代表误差项, X_i 和 X_j 代表各因素。

根据表2的结果,利用MATLAB工具拟合,得到其响应面优化模型的方程:

$$Y = 670.82 + 44.19X_1 - 389.88X_2 - 126.08X_3 - 1.05X_1^2 + 36.45X_2^2 - 8.26X_1X_3 + 52.99X_2X_3$$

二次响应面回归方程的方差分析如表3所列。

表3 回归方程的方差分析

	F值	Prob>F	变异系数	信噪比
模型	23.14	<0.0001	1.27	22.156
	决定系数	调整系数	预测系数	均方
模型	0.9529	0.9503	0.9542	21.70

其中模型 p 值 ($Prob>F$) < 0.0001 , 远小于 0.5, 说明模型是显著的。其决定系数 $R^2 = 0.9529$ 、调整系数 $Adj R^2 = 0.9503$ 、预测系数为 0.9542, 说明模型的拟合度很高, 实验误差较小; 变异系数 C. V. % 为 1.27, 远小于 10, 以及信噪比为 22.156, 远大于 4, 说明均匀设计实验的可信度和精确度较好。

对模型进行显著性检验可以判断模型的优良性, 通常使用 t 检验和 F 检验, 通过构造检验统计量, 并与给定的显著性水平相比较。本文使用 F 检验, 直接从回归效果检验回归方程的显著性。

二次响应面回归方程系数的显著性检验如表 4 所列。

表 4 回归系数显著性检验

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Prob>F
X_1	1	1.51	1.51	2.92	0.1261
X_2	1	71.82	71.82	138.96	< 0.0001
X_3	1	3.45	3.45	6.68	0.0324
X_1^2	1	5.33	5.33	10.32	0.0124
X_2^2	1	3.56	3.56	6.89	0.0304
$X_1 X_3$	1	4.67	4.67	9.03	0.0170
$X_2 X_3$	1	6.84	6.84	13.24	0.0066
残差	8	4.13	0.52		
总和	15	156.01			

从表 4 中可以得出, 模型中系数 $X_2, X_3, X_1^2, X_2^2, X_1 X_3$ 以及 $X_2 X_3$ 的 p 值均小于 0.05, 说明各项对温度变化的影响显著。

图 1 为建立模型所依据的实验值和预测值之间的关系, 由图 1 可见, 温变实验的实验数值大部分都分布在直线的附近, 表明模型的相关性良好。

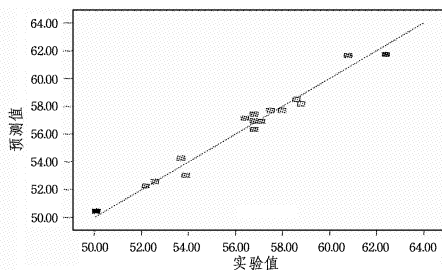


图 1 预测值与实验值间的关系

3.4 响应面分析

图 2 和图 3 是依据模型作出的 3D 等高图, 反映的是熔焊面积与电阻值之间、镀银厚度与电阻值之间的交互作用对温控值的影响。

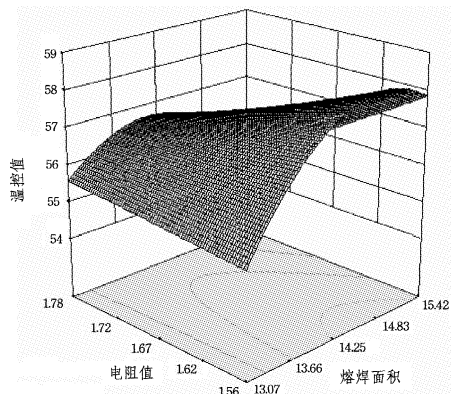


图 2 熔焊面积与电阻值对温控值影响的响应面图

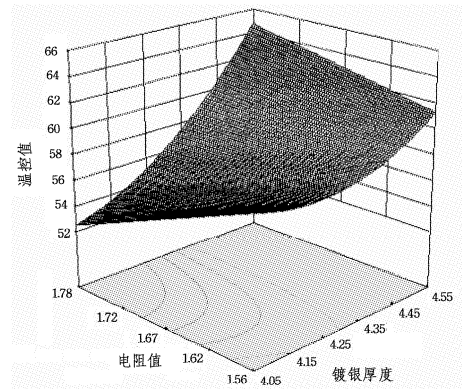


图 3 电阻值与镀银厚度对温控值影响的响应面图

图 2 和图 3 表明电阻值、熔焊面积和镀银厚度对温度有明显的影晌, 温控值随着 3 个因素的变化而改变。

4 实例及遗传算法设计

4.1 优化目标及约束条件

本文在第 3 节建立了响应面回归模型, 并进行了系统的分析, 确定了响应面回归方程的准确性。在实际问题中, 想要得到最佳配比, 仅仅通过对有限个实验点进行实验分析是无法达到我们所需要的结果的。根据对断路器温度变化的实验分析, 得到各项因素的取值范围, 我们需要在约束条件下获得响应面模型的最小值, 因此优化的目标为:

MIN

$$Y = 670.82 + 44.19X_1 - 389.88X_2 - 126.08X_3 - 1.05X_1^2 + 36.45X_2^2 - 8.26X_1X_3 + 52.99X_2X_3$$

$$s. t. 13.07 \leq X_1 \leq 15.42$$

$$4.05 \leq X_2 \leq 4.55$$

$$1.56 \leq X_3 \leq 1.76$$

直接以待解的目标函数 $f(x)$ 转化为适应度函数 $Fit(f(x))$, 令:

$$F(x) = Fit(f(x)) =$$

$$\begin{cases} f(x), & \text{目标函数为最大化问题} \\ -f(x), & \text{目标函数为最小化问题} \end{cases}$$

并且, 利用惩罚函数处理约束条件。

对于惩罚函数 $P(X)$, 采用外点法进行构造, 从而将带有约束条件的目标函数转化为无约束优化问题。

$$P(X) = M^{(k)} \sum_{j=1}^m (\max[G_j(X), 0])^T \quad (6)$$

其中, T 为构造惩罚项函数的指数, 一般取 $T=2$; m 为全部因子的个数; j 为约束条件的个数; M 为惩罚因子, 是一个大于 0 的递增数列, 即应满足:

$$0 < M^{(0)} < M^{(1)} < \dots < M^{(k)} < \dots \quad (7)$$

且 $\lim_{k \rightarrow \infty} M^{(k)} = +\infty$, 其中 $M^{(0)}$ 为初始惩罚因子, 可根据经验取值 (如取 2)。

遗传算法工具箱可以自动地寻找最小值, 本文的目标函数正是求最小值, 因此不需要再次进行转化。即:

$$F'(X) = \begin{cases} F(X) \\ F(X) - P(X) \end{cases} = \begin{cases} -f(x) \\ -f(x) - P(x) \end{cases} \quad (8)$$

根据本节的约束处理, 适应度函数只需要将惩罚函数加入构造完成的响应面模型中即可。

4.2 遗传算法参数设置

本文只对几个关键参数进行设置, 其余参数使用遗传算

法工具箱默认值即可,以下对几个关键参数进行说明。

1)初始种群范围。初始种群范围是指初始种群中的所有个体均处于的范围。

2)种群尺度。在“种群(Population)”参数域中“Size”决定每代种群的大小。增加种群的大小,遗传算法能够搜索更多的点,得到更加完美的结果,但是种群越大,遗传算法每代运行的时间越长,因此反复实验,将种群尺度设置为20,收敛的效果最好且花费的计算时间较合理。

3)终止条件。工具箱中包含的终止条件有:代数、时限、适应度限、停滞代数、停止时限。这里设置代数为100,停止代数为80,停止时间为50s,其余设置为默认值。

4.3 运行结果分析

首先需要目标函数进行M文件的编写,并将M文件命名并保存在相应的位置,以供优化时调用;然后再在Fitness function 栏里调用已经编好的M文件作为适应度函数,其格式为“@文件名”;接着在Number of variables 项填写适应度函数中变量的个数,在plots 选项卡中勾选Best fitness,并将initial range 改为[50;60];最后将其余的选项卡按上述要求进行设置,也可进行适当的更改,直至找到更为完备的优化值。

在设置好各个参数以后,点击star 就可以开始运算,但是由于遗传算法的随机性强,因此不可能每次的运行结果都是一样的,故可以多次(如5次)运行取最好值。得到的Best fitness 如图4所示。

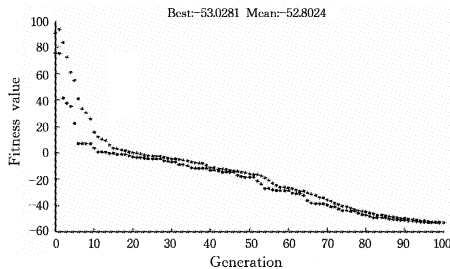


图4 Beat fitness 图

由图4可知,其收敛速度适中,没有出现过早收敛于稳定区域,在95代附近开始稳定并趋于最佳值,其最优值为53.0281。当最优值为53.0281时,获得的各因素的取值如表5所列。

表5 优化的各因素值

因素	X_1	X_2	X_3
取值	13.072	4.069	1.763

结束语 本文以温度变化值最小为优化目标,将熔焊面积、镀银厚度和电阻值作为参数,利用均匀设计进行实验,通过建立响应面优化模型,得到一组最佳参数组合。针对带有约束条件的目标函数,采用惩罚函数处理约束条件,从而将问题转变为无约束的优化问题,并利用遗传算法工具箱进行寻优搜索,通过多次实验,最后找出最优解值。但本文也存在着

诸多不足之处:

(1)由于遗传算法工具箱中的每次操作都是随机进行算法运算的,因此不可能重复无数多次取其最优解值,本文只是在尽可能多地进行反复运算,取其较为理想的最优值;

(2)本文选用了全模型的响应面优化方法,虽然模型通过了检验,但是将此模型作为遗传算法的适应度函数,可能会对优化结果有所影响,种群范围、尺度等参数的设置对遗传算法的性能也会有一定的影响;

(3)本文仅利用了遗传算法进行优化求解,并未与诸多优化算法相比较,如蚁群算法、粒子群算法、模拟退火法等,这将是今后探讨的重点;

(4)本文的实验数据仅采用了一家合作企业,而优化后的结果并不能代表所有的行业,并且也未再次进行制造来验证该方法的具体优势。

综上所述,优化后结果无法将其推广到每个制造断路器的企业之中,但是对于大多数产业来说仍具有较好的指导作用,特别是该合作企业。而本文的不足正是今后探讨的核心,特别是参数的设置和方法的比较。

参考文献

- [1] WANG W C, ZHANG X P, ZHANG D X, et al. Formula optimization of clothianidin 300SC based on the combination of uniform design and response surface method [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2016(2):249-257.
- [2] 吕大刚,贾明明,李刚. 结构可靠度分析的均匀设计响应面法[J]. 工程力学, 2011, 28(7):109-116.
- [3] 孙宝寿,吴真繁,陈哲. 响应面法与遗传算法相结合的注塑工艺优化[J]. 中国机械工程, 2010(9):1115-1118.
- [4] 吴政治,李劲. 基于MATLAB遗传算法的清酒质量等级优化[J]. 计算机科学, 2014, 41(11A):65-68.
- [5] 于靖博,段树林. 基于响应面与遗传算法的柴油机喷射参数优化[J]. 海军工程大学学报, 2015(3):19-22, 32.
- [6] 吕波,吴鹿鸣,潘亚嘉. 遗传算法与惩罚函数法相结合在约束优化问题中的应用[J]. 机械科学与技术, 1999(5):732-733.
- [7] LEUNG Y W, WANG Y. Multiobjective Programming Using Uniform Design and Genetic Algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2000, 30(3):293-304.
- [8] KURTARAN H, ERZURUMLU T. Efficient warpage optimization of thin shell plastic parts using response surface methodology and genetic algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27(5):468-472.
- [9] KIM D, RHEE S, PARK H. Modelling and Optimisation of GMA Welding Process by Genetic Algorithm and Response Surface Methodology[J]. International Journal of Production Research, 2010, 40(7):1699-1711.
- [10] NAIK S S, SETTY Y P. Optimization of parameters using response surface methodology and genetic algorithm for biological denitrification of wastewater [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(3):823-830.