

智能交流接触器全过程动态优化设计

许志红, 张培铭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建省福州市 350002)

DYNAMIC OPTIMAL DESIGN OF INTELLIGENT AC CONTACTOR IN THE WHOLE COURSE

XU Zhi-hong, ZHANG Pei-ming

(Institute of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian Province, China)

ABSTRACT: A novel concept of the dynamic optimum design of intelligent AC contactor has been developed and investigated in the whole course, based on Ant Colony Algorithm and Artificial Neural Network. Ant colony algorithm is applied to optimal design of the control and structure parameters of intelligent AC contactor in closing course, realizing saving-energy and saving-material, the core striking energy has been reduced, the contacts bounce have been lightened greatly. A lot of experiments to survey the curve of the coil potential have been done. As the excitation coil potential is too big to survey easily, the testing coil, which includes less number of windings, is been circled on the excitation coil. Through surveying the testing coil potential to reflect the excitation coil potential, the algorithm has been successfully used in the optimal design of intelligent AC contactor, and this method provides the foundation of designing the high performance of the intelligent AC contactor.

KEY WORDS: Intelligent AC contactor; Ant colony algorithm; Dynamic optimal design; Neural network

摘要: 提出一种基于蚁群算法和人工神经网络的智能交流接触器全过程动态优化设计方案。在接触器吸合阶段, 通过建立蚁群算法的动态优化计算程序, 寻找最佳的控制参数与结构参数, 实现合闸过程的最优控制, 大大减少了触头的弹跳, 降低了铁心之间的撞击, 从而优化铁心结构。在分断过程中, 通过建立测试线圈上感应电压变化规律神经网络曲线库, 预测相应磁路中磁通变化规律, 由此建立分断过程动态计算数学模型, 进一步进行全过程动态优化设计, 加快智能交流接触器的产品化进程。

关键词: 智能交流接触器; 蚁群算法; 动态优化; 神经网络

1 引言

电磁电器的动态优化问题直接影响电器产品

的性能指标。以往许多优化算法常见于电磁机构的吸合过程动态优化计算中, 而基于电磁电器运行全过程的综合优化设计(尤其是考虑分断过程的动态优化), 未见报道^[1-2]。

智能交流接触器由于采用了以单片机为核心的智能控制模块, 实现了接触器全过程的优化控制。接触器的各项性能指标大大提高, 尤其实现了零电流分断控制, 使接触器无弧或少弧分断电路电寿命得到大幅度提高。对交流接触器的电磁机构进行全过程动态优化设计, 是充分发挥智能交流接触器优势、提高产品性能的重要手段。本文采用蚁群算法对智能交流接触器进行全过程动态优化计算, 以便全面提高产品的动态品质。

2 蚁群算法简介

20世纪90年代以来, 一种新型的分布式智能模拟算法——蚁群算法(Ant Colony Optimization——ACO), 开始引起人们的注意并得到越来越多的应用。这种算法同其他模拟进化算法一样, 都是从对自然界的观察中受到启发而产生的。蚁群算法的基本思想是模仿蚂蚁依赖信息素(pheromone)进行通信而显示出的社会性行为。由意大利学者Dorigo.M等首先提出, 是一种随机搜索算法, 通过由候选解组成群体的进化过程来寻求最优解。蚁群算法已经在若干领域应用并取得成功。

求解连续优化问题的蚁群算法思路如下: 首先根据估算最优解的范围, 定出各变量的取值范围

$$x_{jl} \leq x_j \leq x_{ju}, j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

在变量区间内打网格, 空间的网格点上对应于一个状态, 人工蚂蚁在各个空间网格点之间移动,

根据各网格点的目标函数值，留下不同的信息量，以此影响下一批人工蚂蚁的移动方向。循环一段时间后，目标函数值小的网格点信息量比较大。根据信息量找出信息量大的空间网格点，缩小变量的范围，在此点附近进行人工蚁群移动，重复前述过程，直到网格间距小于预先给定的精度，算法终止^[3]。

设将各优化变量分成 N 等份， n 个变量变成 n 级决策问题，每一级有 $N+1$ 个节点，共有 $(N+1) \times n$ 个节点。从第 1 级到第 n 级之间的连接组成一个空间解。蚂蚁从第 1 级到第 n 级之间的转移概率为

$$P_{ij} = t_{ij} / \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad (2)$$

式中 t_{ij} 为第 j 级第 i 个节点的吸引强度；吸引强度的更新方程为

$$t_{ij}(t+1) = rt_{ij}(t) + Q/f \quad (3)$$

式中 $r \in (0,1)$ 表示强度的持久性系数，由于蚁群算法是近年发展的一种新型算法，算法中的参数目前尚无理论上的依据，根据大量参考文献及计算验证，一般取 $0.5 \leq r \leq 0.99$ ，在此范围计算收敛性好，可以避免路径上信息素物质的数量无限制地累加。 Q 为一正常数，取值范围在 $1 \leq Q \leq 10000$ ，根据目标函数值的大小取 Q 值； f 为目标函数。以此思路为基础编制动态优化计算程序^[4-5]。

3 吸合过程动态优化计算

3.1 智能交流接触器工作原理

以最常见的三相中线不接地电感性负载系统为例，讨论智能交流接触器的首相开断问题。三相平衡工作系统电压、电流波形示意图见图 1。

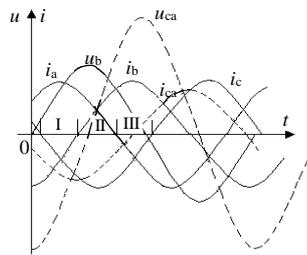


图 1 三相电路电压、电流波形图
Fig.1 Voltage and current waveforms in three-phase circuit

由图 1 得知，在三相平衡系统工作过程中，必有一相电流最先过零点。如果假设接触器触头在图中的第 I 相角区分开，那么 B 相电流首先过零点，B 为首开相。如果 B 相触头电弧在电流零点开断，B 相电路中的电流变为线电流 i_{ca} ， i_b 的零点正好为

i_{ca} 的峰值，即再过 5ms 时间 i_{ca} 过零，所以 A、C 两相燃弧时间等于 B 相燃弧时间加上 5ms。

按照上述思路，设计了智能交流接触器的触头系统，使首开相（B 相）的开距大于其余两相，在结构上实现非首开相的分断时间比首开相滞后 5ms 左右，从而只要控制好首开相的分断时刻，就可以实现三相触头系统的零电流分断控制。图 2 为新型接触器的结构示意图。

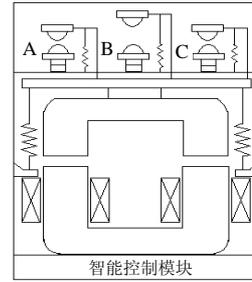


图 2 接触器结构示意图

Fig.2 Sketch map of contactor structure

控制好首开相（即 B 相）触头的动作时间是能否实现智能交流接触器零电流分断控制的关键。当接触器激磁线圈得电以后，随着磁路中的电磁吸力的增加，衔铁开始吸合，A、C 相触头首先接触，A、C 相具有较大的一个超程；B 相最后闭合，最先打开，具有一个较小超程，又是首相开断电路，所以 B 相触头系统工作任务最为繁重。接触器的反力特性及动态过程与普通交流接触器大不相同^[6-7]。

3.2 接触器动态计算方程

当电源电压（交流 220V 或 380V）加到电路上时，单片机选择一个最佳合闸相角及吸合过程，使电磁机构线圈得电，动态方程如下

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = k |U_m \sin(wt + q)| - IR + U_0 \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_x - F_f}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (4)$$

式中 y 为磁路中磁链； V 为铁心运动速度； U_m 为电源电压幅值； I 为线圈电流； R 为线圈电阻； F_x 为电磁吸力； F_f 为电磁系统反力； m 为电磁系统运动部分质量； t 为时间； w 为电源角频率； q 为电源电压合闸初相角； x 为衔铁运动行程； U_0 为吸持电压（直流低电压）。

经过一定时间后，单片机发出指令，将强激磁回路切断，关断主控元件，使电路进入直流低电压、小电流的吸持工作状态。动态控制方程式如下

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = -IR + U_0 \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_x - F_f}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (5)$$

在吸持阶段,低电压直流吸持电路提供接触器吸持能量,实现节能无声运行。采用四阶Runge-Kutta法,进行动态方程的求解计算。

3.3 确定优化变量和目标函数

智能交流接触器为直流起动、直流保持的工作状态,可采用不加装分磁环的铁心结构,见图2。由于智能交流接触器工作的特殊性,在进行优化设计^[8]时,可以选择控制参数(不同的合闸相角、不同的强激磁时间、不同的分断控制时间);结构参数(电磁机构、激磁线圈参数等);系统反力作为优化设计变量。

智能交流接触器是在原CJ20-63A交流接触器本体上加装智能控制模块形成的100A接触器,在体积小、重量轻、速度快等方面全面提高了接触器的各项性能指标。

在吸合阶段,选用最能体现智能交流接触器综合经济技术要求的三个指标并满足其动作特性的吸合时间作为优化设计的多目标函数

$$\min f(x) = [V(x), E_k(x), T(x)]^T \quad (6)$$

式中 $V(x)$ 为铁心体积与线圈有效体积;

$E_k(x) = \frac{m \cdot v_{20}^2}{2 \cdot A_1 \cdot A_2}$ 为铁心端面单位面积所承受的撞击能量; $T(x)$ 为电磁机构吸合时间。

约束条件由接触器在工作中的技术要求和特性所决定,并且结构尺寸小于原样机。将目标函数加权求和构成一个极值函数,再用单目标函数的优化方法求解。极值函数如下

$$F(x) = w_1 [aV_{Fe}(x)/V_{Fe0} + bV_{Cu}(x)/V_{Cu0}] + w_2 T(x)/T_0 + w_3 E_k(x)/E_{k0} \quad (7)$$

式中 V_{Fe0} 、 V_{Cu0} 、 T_0 、 E_{k0} 为优化前各目标函数值; a 、 b 分别为用铁量与用铜量的权重系数, $a+b=1$; w_1 、 w_2 、 w_3 为各目标函数的加权因子, $w_1+w_2+w_3=1$ ^[9]。

4 分断过程的动态优化计算

4.1 电磁机构分断过程动态方程

根据智能交流接触器分断过程准确控制的需要——快速分断,导致在分断过程电磁机构储存的磁能无法通过线圈泄放,即无泄放回路,在线圈两

端将产生一个变化迅速、幅值很高的感应电势,直接影响接触器的分断过程。磁路动态微分方程如下

$$\begin{cases} N \frac{df}{dt} = -e \\ \frac{dV}{dt} = \frac{F_f - F_x}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (8)$$

式中 f 为磁路中磁通; V 为铁心返回运动速度; F_x 为电磁吸力; F_f 为电磁系统反力; m 为电磁系统运动部分质量; N 为测试线圈匝数; t 为时间。

根据感应电势 e 的变化规律,可以确定磁路中磁通的变化规律,从而计算分断动态过程的铁心行程、速度、吸力、反力等参量的变化规律,并进行动态分析。

提高电磁机构的返回运动速度,将提高智能交流接触器的零电流分断控制的准确性,从而提高无弧分断的成功率。弹簧反力直接影响触头的打开速度,是实现零电流分断控制的关键参数。本文将分断过程中衔铁返回运动时间作为目标函数进行分断过程的动态优化设计。

4.2 建立基于人工神经网络的线圈感应电势预测模型

电磁机构的返回运动时间越快,智能交流接触器的零电流分断控制越准确,从而提高无弧分断的成功率。同时也将激磁线圈两端造成更大的感应电势。

图3为某型号交流接触器测试线圈上实测感应电势的变化规律。根据图中曲线变化可知,线圈两端的感应电势变化规律复杂,无法采用准确的数学计算公式。

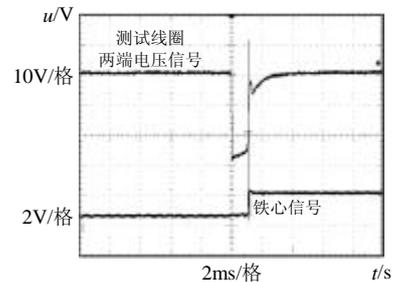


图3 测试线圈两端感应电压的变化规律
Fig 3 Reaction voltage change between testing coil

用神经网络可以解决许多复杂的工程问题。如果将实测值和众多影响因素,作为神经网络的输入值,进行网络训练,得出相应的计算网络,从而可以得到满意的计算结果。

在不同铁心结构、不同激磁线圈参数、不同吸持电压、不同反力特性等条件下进行了 101 条实验曲线测试，取其中 91 条曲线作为神经网络的训练样本，建立神经网络预测模型；取另外 10 条曲线作为测试样本，进而预测不同样机的分断过程感应电势变化规律，进行分断过程动态计算。

智能交流接触器为直流吸合、直流吸持的节能无声工作状态，所以在吸持阶段保持电压为一个稳定的直流小电压，其直接影响磁路中的磁状态。选取吸持电压为 8V、6V、10V、12V 四种直流电压，进行感应电势的曲线测试和网络训练，同时改变系统反力，建立神经网络曲线库。

通过大量训练样本建立的神经网络预测模型，经测试样本检验后，证实预测样本与实测样本的变化规律非常接近，误差小于 0.001%。说明该预测网络的正确性。

将预测的感应电势作为电磁机构分断过程的输入参数，根据式(8)计算磁路中磁通、电磁吸力、速度、位移等参数随时间的变化规律^[10-12]。

4.3 分断过程优化设计目标函数的确定

4.3.1 恢复电压的确定

当弧隙开断感性负载电路时，电流过零瞬间工频恢复电压瞬时值为

$$U_g = \sqrt{2} \cdot g \cdot K \cdot U_f \cdot \sin j \quad (9)$$

式中 振幅系数 g 为 1.1，线路因数 K 取 1.5（首开相），电源电压相电压的有效值 $U_f = 220\text{V}$ ，试验线路的功率因数 $\cos j = 0.35$ ，相角 $j = 69.5^\circ$ 。故电流过零后，弧隙上的恢复电压为 480.7V。

4.3.2 电流过零点时触头间隙的确定

实现智能交流接触器零电流分断的关键是通过控制模块，使首开相（B 相触头）在电流过零前的某一时刻（零前 0.5ms 左右）分开，同时保证衔铁具有一定的返回运动速度，使首开相触头在通过电流零点时，具有一定的开距，能够承受相应的恢复电压，不发生电弧重燃。所以，分闸速度和电流过零时刻触头之间的距离大小直接影响零电流分断的可靠性。

为了确定电流过零点时，在恢复电压作用下不发生触头间隙电弧重燃的最小触头间隙，本文采用 2 种测试方法测量触头间隙的介质恢复电压。

首先在福州大学低压电器检测中心，应用工频耐压仪，在自制的实验样机上，调整触头开距，测量相应的击穿电压值。图 4 为该测试装置。图 5 为



图 4 测试装置
Fig.4 Testing device

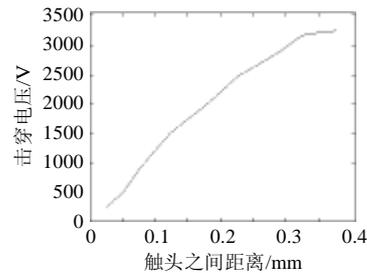


图 5 实测参数
Fig.5 Testing data

实测参数值。

其次，在福州大学低压电器检测中心电寿命试验系统上进行带负载击穿试验。额定电流为 100A，调整触头间隙，当触头之间的间隙为 0.05mm 时，触头间隙发生击穿，对应击穿电压为 500V（冷态）。两种测试方法所测得的冷态击穿电压和击穿间隙结果相同。

由于在正常工作情况下，触头间隙的击穿情况为热态。故在福州大学低压电器检测中心电寿命试验系统上，进行触头热态带负载击穿试验。额定电流为 600A，调整触头间隙，当触头之间的间隙为 0.16mm 时，触头间隙发生击穿，对应击穿电压为 479V。如果通过控制模块控制接触器的分断过程，使首开相触头，在主电路电流过零之前 0.5ms 左右分开，同时加快机构运动速度，使接触器触头运动到电流零点时触头间隙超过上述对应值(0.16mm)，将可以承受相应的恢复电压，而不发生电弧重燃的现象。

5 智能交流接触器整体动态寻优

将吸合过程动态优化和分断过程动态优化程序作为子程序，编制智能交流接触器整个运动过程动态寻优计算程序，见图 6。

首先，根据需要设定优化变量的取值范围：参考原 CJ20-63A 交流接触器本体取各优化变量的设计范围。然后在变量区间内设置网格：选取最能够影响磁路中磁状态的 8 个物理量作为结构参数的优

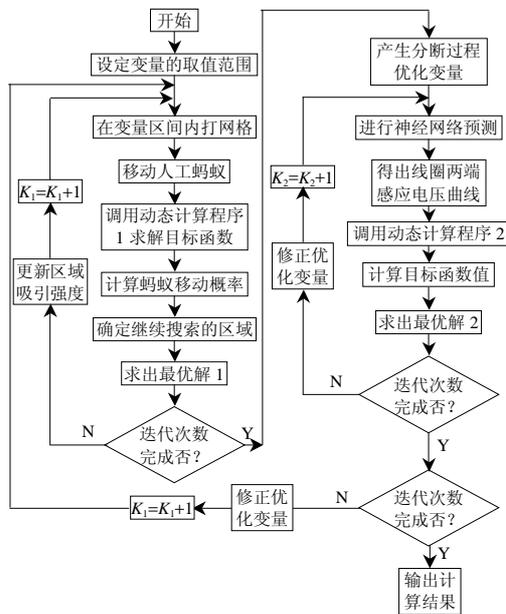


图6 整体寻优程序流程图

Fig.6 Flow chart of optimal design

化变量，与激磁电压、反力参数、控制参数共同构成设计时的优化变量，将各优化变量分成20等份，共取17个优化变量。在网格内移动人工蚂蚁，调用动态计算程序1（吸合过程动态计算程序）计算吸合过程的目标函数，寻找最优解，经过预先设定的迭代次数，寻找出吸合过程满意解和各优化变量值^[13-16]。

以吸合过程满意解和优化变量为基础，取得分断过程所需优化参数，调用预先训练好的人工神经网络曲线，预测相应的线圈两端感应电压变化规律，计算分断过程动态参数，得出分断过程的目标函数值，经过设定的计算次数之后，取得分断动态计算满意解和优化变量。

在分断优化变量基础上，修正吸合过程变量取值范围，重新进行吸合过程动态优化与分断过程动态优化计算，在预设迭代次数之后，得出整体满意解。

经计算可知，控制首开相触头在电流零点之前0.5ms左右分开（试验得出的零电流分断最佳控制区域为电流过零之前的0.2~0.6ms），如果不考虑摩擦力和电动力的影响，认为触头行程与铁心同步，那么当电流过零时刻，动静触头之间的距离为0.168mm；在福州大学低压电器检测站进行接触器AC4电寿命试验时，偶尔会出现电弧重燃的现象，说明该接触器零电流分断处于临界状态。在优化设计之后，衔铁返回运动速度加快，电流过零时刻，其动静触头之间的距离可以增加至0.345mm，将可

以实现完全的零电流分断控制。

6 计算结果分析

本文以CJ20-63A交流接触器的电磁机构作为额定电流为100A智能交流接触器设计基础，并进行优化计算与分析。图7为智能交流接触器优化设计后参数，动态计算的吸合过程中铁心行程、衔铁运动速度、吸反力特性配合曲线。表1是优化参数的计算值。

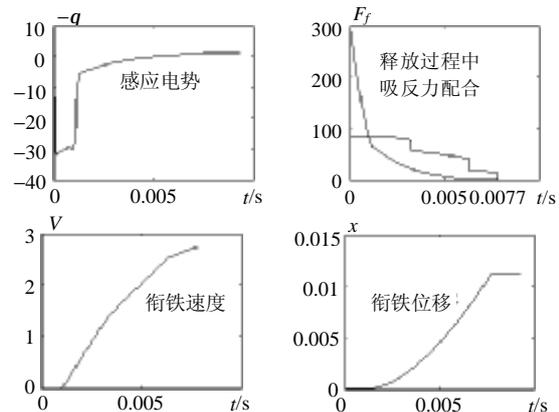


图7 优化设计后动态过程计算值

Fig.7 Calculating value of dynamic course for the optimization-design-contactor

表1 计算结果

Tab.1 The result

参 数	优化前	优化后
结 构		
铁心宽度/mm	18.15	17.18
铁心厚度/mm	28.17	22.04
变 量		
线圈线径/mm	0.31	0.25
线圈匝数	2820	1823
控制 变量		
合闸相角/(°)	35	46
强激磁时间/ms	45	22
目 标 函 数		
用铜量/cm ³	17.68	14.14
用铁量/cm ³	78.76	63.04
撞击能量/(kJ/m ²)	4.934	1.912
吸合时间/ms	22.2	19.2
释放时间/ms	9.97	7.7
触头间隙(电流零点)/mm	0.168	0.345

7 结论

本文根据智能交流接触器运行的特点，通过对电磁机构运动全过程的动态分析，提出智能交流接触器工作全过程优化设计的新思路和新方法，得到较为满意的设计参数。尤其是针对智能交流接触器的零电流分断控制，进行相应的研究和计算，从而提高了智能交流接触器的整体性能指标。显然，本文提出的全过程的设计思路对智能电磁电器及其它电器的设计具有一定的启发。

参考文献

- [1] 李兴文, 陈德桂, 孙志强, 等. 交流接触器动态过程及触头弹跳的数值分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 229-233.
Li Xingwen, Chen Degui, Sun Zhiqiang *et al.* Numerical analysis and experimental investigation of dynamic behavior and contact bounce of ac contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 229-233.
- [2] 荣命哲, 娄建勇, 王小华. 永磁式接触器触头动作特性仿真分析与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 109-113.
Rong Mingzhe, Lou Jianyong, Wang Xiaohua. Simulation analysis and experimental research of operating characteristic for moving contact of contactor with permanent magnet actuator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 109-113.
- [3] 高尚, 钟娟. 连续优化问题的蚁群算法[J]. 微机发展, 2003, 13(11): 12-13.
Gao Shang, Zhong Juan. Research on ant colony algorithm for continuous optimization problem[J]. Microcomputer Development, 2003, 13(11): 12-13.
- [4] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[C]. Proc of 1st European Conf: EI-sever Artificial Life Pans, France, 1991.
- [5] A kind of ant colony algorithm for function optimization [C]. Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Beijing, China, 2002: 552-555.
- [6] 许志红, 张培铭. 智能交流接触器零电流分断控制技术[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(4): 54-57.
Xu Zhihong, Zhang Peiming. Zero current interrupt control of intelligent AC contactor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(4): 54-57.
- [7] 娄建勇, 荣命哲, 邹洪超, 等. 单线圈单稳态永磁式接触器机构动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 120-124.
Lou Jianyong, Rong Mingzhe, Zou Hongchao *et al.* Simulation on mechanism dynamic characteristics of single coil and single stable position contactor with permanent magnet[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 120-124.
- [8] 李兴文, 陈德桂, 向洪岗, 等. 低压塑壳断路器中电动斥力的三维有限元非线性分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 150-155.
Li Xingwen, Chen Degui, Xiang Honggang *et al.* 3-D Finite element nonlinear analysis and experimental investigation of electro-dynamic repulsion force in molded case circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 150-155.
- [9] Xu Zhi-hong, Zhang Peiming, Chen Lian. New-type explosion-proof electric apparatus-intelligent hybrid ac contactor, progress in safety science and technology[C]. Proceedings of the 2004 International Symposium on Safety Science and Technology, Shanghai, China, 2004: 1229-1234.
- [10] 司听, 安燮南. 优化计算的神经网络模型[J]. 电路与系统学报, 1999, (1): 58-63.
Si Xin, An Xienan. The neural network models for optimization [J]. Journal of circuits and systems, 1999, (1): 58-63.
- [11] 刘骏跃. 最优控制理论的现状与发展[J]. 机电工程, 2000, 17(5): 4-6.
Liu Junyao. Advance and prospect of the optimal control [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2000, 17(5): 4-6.
- [12] 任晓娟, 邓佑满, 赵长城, 等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 31-36.
Ren Xiaojuan, Deng Youman, Zhao Changcheng *et al.* Study on the algorithm for dynamic reactive power optimization of distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36.
- [13] 杨小安. 基于 BP 网络的曲线拟合法的线图处理[J]. 现代制造工程, 2003, (8): 33-34.
Yan Xiaoan. Methods of handled of line in drawing bases on BP net[J]. CAD/CAPP/CAM/CAE, 2003, (8): 33-34.
- [14] 黄弦超, 舒隽, 张粒子, 等. 免疫禁忌智能优化算法在配电网检修优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 96-100.
Huang Xianchao, Shu Jun, Zhang Lizi *et al.* Distribution maintenance scheduling using an intelligent optimal approach mixed with immune algorithm and tabu search[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 96-100.
- [15] 高炜欣, 罗先觉. 基于蚂蚁算法的配电网网络规划[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 110-114.
Gao Wei-xin, Luo Xianju. Improved ant algorithm for distribution network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 110-114.
- [16] 李庆民, 钱家骊, 黄瑜珑, 等. 高压开关操作电磁铁动态特性逆分析的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 128-131.
Li Qingmin, Qian Jiali, Huang Yulong *et al.* Converse analysis on dynamic characteristics of operating electromagnets in high voltage circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 128-131.

收稿日期: 2005-05-18。

作者简介:

许志红 (1963-), 女, 副教授, 在职博士, 主攻智能电器与在线监测;

张培铭 (1943-), 男, 教授、博导, 主攻智能电器与在线监测技术。