

免疫克隆选择算法在船舶电力系统故障恢复中的应用研究

王 敏, 刘维亭

(江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 实现船舶电力系统的快速供电恢复是一个复杂的多目标非线性组合优化问题。为了解决船舶电力系统发生故障时供电恢复问题, 采用了免疫克隆算法, 并对算法的变异算子进行了改进, 改进后的变异算子把高频变异和柯西变异有效的结合在一起, 兼顾全局搜索和局部搜索, 吸取了遗传算法并行搜索优点, 提高了搜索效率和收敛性。船舶电力系统典型故障恢复算例表明, 该算法具有很高的搜索效率和寻优性能, 能有效地提高供电恢复的速度及精度, 较好地实现船舶电力系统的故障恢复。

关键词: 船舶电力系统; 故障恢复; 克隆选择; 高频变异

Immune clone selection algorithm for shipboard power system service restoration

WANG Min, LIU Wei-ting

(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Fast restoration of supply to the faulted sections of the shipboard power system (SPS) is a complex and multi-object combination optimization problem. To restore power supply to the faulted sections of the shipboard power system, in this paper a clone selection algorithm is presented. The algorithm used the natural immune systems as reference. In order to improve the searching efficiency and the convergence, the modified mutation operator combines the Gauss Mutation with Cauchy Mutation effectually, and has the advantages of both the local search and large-scale search. The proposed approach is illustrated with typical SPS fault restoration tests. The results show that the clone selection algorithm has the prominent efficient and significant global optima searching performance, improve speed of convergence and precision of restoration, avoid premature convergence and the SPS service restoration is well realized.

Key words: shipboard power system; service restoration; clone selection; gaussian mutation

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)01-0019-05

0 引言

船舶电力系统作为一种高阶、非线性、强耦合和多变量的复杂系统, 是现代船舶的重要组成部分。它的安全性和抗扰性对于船舶, 特别是船舶的生命力和战斗力意义重大。随着船舶电气化、自动化程度的日益提高, 对船舶电力系统供电的可靠性和生命力提出了更高的要求, 要求系统在出现故障时快速地重构系统, 以最大限度地恢复供电。目前, 对船舶电力系统的故障恢复的研究还处于起步阶段, 文献[1]运用启发式方法—贪婪式算法进行故障区域的重构, 尽管运算简单, 但不能保证最大限度地恢复重要负载的供电; 文献[2]应用专家系统的方法恢复故障区域的供电, 其处理恢复控制时需要建

立庞大的专家知识库, 而且知识的全部获取也非常困难; 文献[3]用网络流法研究系统的恢复, 但没有考虑负载的优先性。由于船舶电力系统的故障恢复属于典型的非线性、组合优化问题, 而遗传算法以其良好的鲁棒性、并行性、高效性等优点被广泛应用于求解大规模组合优化问题, 故文献[4]中提出了一种启发式遗传算法对系统进行故障恢复, 考虑了负载优先性以及最大限度恢复负载供电等条件, 实现了供电恢复。但由于遗传算法本身还存在着一些缺陷, 如易出现未成熟收敛而陷入局部最优、进化过程中不能很好地利用系统信息、进化后期易出现振荡现象等, 因此, 其算法不能保证以最大概率收敛到全局最优解。

本文将免疫克隆选择算法应用到船舶电力系统故障恢复中, 通过克隆亲和力高的抗体放入记忆细胞, 在克隆抗体放入记忆细胞前, 由于亲和力高

基金项目: 船舶工业国防预研基金项目(2006DX010G)

的抗体接近最优解,因此在克隆的同时,对克隆抗体的基因进行变异,针对船舶电力系统的特点和系统重构对快速性的要求,并对算法的变异算子进行了改进,使其有效地利用了高频变异和柯西变异两种变异算子各自的特点,以用来提高算法的搜索能力和收敛速度,防止了抗体浓度过早饱和同时增加了找到最优解的概率,由于克隆算子的作用,不断更新种群克隆的规模,因而具有更好的种群多样性。理论分析及算例结果表明,克隆选择算法作为一种新的优化搜索算法,在其算法实现上兼顾全局搜索和局部搜索,吸取了遗传算法并行搜索优点,通过接种疫苗和计算亲和力,使得算法快速收敛,同时保持一定的多样性,抑制了早熟现象,较好地实现了船舶电力系统的故障恢复。

1 免疫克隆选择算法

1.1 免疫克隆算法的原理

克隆选择是人体免疫系统的重要学说,克隆选择原理最先由 Burnet 在 1959 年提出,后来 1978 年 Burnet 又予以完整阐述^[5]。总的来说,克隆选择原理的基本思想为:只有那些能够识别抗原的细胞才进行扩增,只有这些细胞才能被免疫系统选择并保留下来,而那些不能识别抗原的细胞不被选择,也不进行扩增。克隆算法,正是基于免疫学中的克隆选择原理而提出的一种人工免疫算法,该方法对具有较高亲和力的抗体(可行解)进行克隆,以贪婪搜索为特征,通过累积的盲目变异以及受体编辑方法保持抗体的多样性,从而更有利于产生复杂优化问题的最优解。克隆选择算法中应用了人体免疫系统中克隆选择的几个特点:选择亲和力最大的细胞进行克隆;淘汰没被激活的细胞;对克隆的细胞进行变异并且根据亲和力进行重新选择。

1.2 免疫克隆算法

免疫克隆算法的实质是在一代的进化过程中,在候选解的附近,根据亲和力的大小产生一个变异解的群体,以扩大搜索范围,从而能同时进行全局搜索和局部搜索,算法中主要提出了克隆算子,包括三个步骤:克隆、克隆变异和克隆选择^[6]。其抗体群的状态转移情况可以表示成如下的随机过程:

$$C_m : A(k) \xrightarrow{\text{clone}} A'(k) \xrightarrow{\text{mutation}} A''(k) \xrightarrow{\text{selection}} A(k+1)$$

1.2.1 抗体克隆

设 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 是大小为 m 的初始抗体群,对当前代初始群体中的抗体进行克隆,生成一

个临时的克隆群体。每个抗体的克隆规模可以根据抗体与抗原的亲合力大小按比例分配,与抗原的亲合力越大,抗体的克隆规模也就越大。每个抗体的克隆规模为:

$$C(a_i) = \text{int} \left(M * \frac{f(a_i)}{\sum_{i=1}^m f(a_i)} \right) \quad (1)$$

其中: $\text{int}()$ 为上取整函数, M 为克隆后的群体规模, $f(a_i)$ 是抗体与抗原的亲合力函数。克隆后的临时抗体群为 $A' = \{A'_1, A'_2, \dots, A'_i, \dots, A'_m\}$, 其中 $A'_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\}$, $a_{i1} = a_{i2} = \dots = a_{in} = a_i$, n 为抗体 a_i 的克隆数量。

1.2.2 抗体变异

通过克隆扩大了群体的规模后,对克隆后的临时群体中每个抗体进行变异可以提高群体中抗体的多样性,扩大搜索的范围,以用来寻找更优秀的抗体。为了扩大算法的搜索范围,增强算法的全局收敛性,防止过早收敛,同时还要保证算法精确的局部搜索能力,本文采用了高频变异和柯西变异相结合的变异方法,根据抗体亲和力的大小而实行不同的变异,当抗体的亲和力大于当前抗体群的平均亲和力时,则对抗体进行如式(2)的高频变异操作:

$$a'_i = a_i + \rho \frac{f(a_i)}{\max(f(a_i))} * N(0,1) \quad (2)$$

当抗体的亲和力小于当前抗体群的平均亲和力时,则对抗体进行如式(3)的柯西变异操作:

$$a'_i = a_i + \rho \frac{f(a_i)}{\max(f(a_i))} * \sigma_i \quad (3)$$

其中: a_i , a'_i 分别表示变异前后的基因位值, $N(0,1)$ 是一个服从标准正态分布的随机数, σ_i 为尺度参数 $t=1$ 时的柯西随机变量, ρ 为变异常数,用来控制子群中个体进行局部搜索的范围,其大小根据种群中的个体数量选取,通常取 0.1 即可。

1.2.3 抗体选择

首先对克隆变异后临时群体中的抗体进行亲和力的计算,设 $A'_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\}$ 中亲和力最大的抗体为 a_{ij} , $i=1, 2, \dots, m$, 如果 $f(a_{ij}) > f(a_i)$, 则用克隆变异后亲和力更大的抗体 a_{ij} 代替初始抗体群 A 中它的父抗体 a_i , 从而使初始抗体群得以更新。因此抗体选择实际是从抗体各自克隆后的子代中选择优秀的个体,从而形成新的种群。

1.3 克隆选择算法的详细步骤

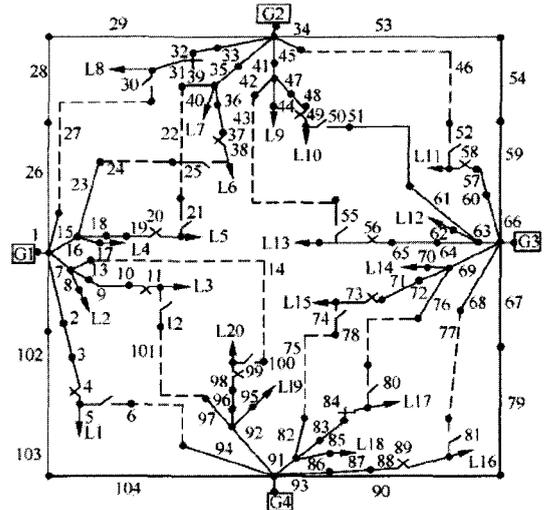
- 1) 随机初始化种群, 种群大小为 n 。
- 2) 根据目标函数计算所有抗体的亲和力。
- 3) 从 A_n 中选择 m 个亲和力最高的抗体构成一个新的关于抗原的高亲和力抗体集合 A_m 。
- 4) 对于 3) 所选择的抗体种群 A_m 中的抗体分别进行克隆。
- 5) 克隆抗体种群发生变异, 产生一个变异的克隆抗体种群 C' 。
- 6) 确定变异克隆抗体种群 C' 中每个抗体关于抗原的亲和力 f 。
- 7) 从变异克隆种群 C' 中重新选择 n 个亲和力最高的抗体 A_n 。
- 8) 随机产生 d 个全新抗体构成新抗体种群 A_d , 并用 A_d 中的 d 个新抗体替换此时 A_n 中 d 个亲和力较低的抗体构成下一代的抗体种群 A_n 。
- 9) 重复 2)~8), 循环中止的条件应该满足使抗体种群的平均亲和力达到一个稳定值。这时从循环最终产生的抗体种群中选择出亲和力最高的抗体作为最优解。

2 基于克隆算法的故障恢复策略

2.1 系统故障恢复的数学模型

船舶电力系统的发电机一般通过主配电板以环形相互联接, 通常重要负载直接接在主配电板上, 其它负载由区段配电板即负载中心供电, 允许任意一台发电机向任一负载供电。对于重要负载, 经过自动转换开关 (ABT) 或手动转换开关 (MBT), 提供两路电源供电, 以保证其供电的可靠性, 此外重要负载和非重要负载是相互隔离的, 如果电路发生故障, 由断路器或其它保护装置隔离故障负载或发电机, 通过调整 ABT 或 MBT, 保证重要负载在满足系统约束条件下, 最大程度得到恢复供电, 并在必要时切除非重要负载。

图 1 为一船舶电力系统简化结构图, 其中, 实线代表正常供电路径, 虚线表示备用路径^[4]。船舶负载一般分为三级: 一级负载, 也就是最重要负载; 二级负载即较重要负载; 三级负载, 为不重要负载。在任何情况下, 一定要保证一级负载的供电。图中共 20 个负载, 其中: 8 个一级负载: L1、L5、L6、L8、L11、L13、L16、L17; 4 个二级负载: L3、L10、L15、L20, 其余的 8 个为三级负载: L2、L4、L7、L9、L12、L14、L18、L19。



注: 图中×为自动转换开关的常闭开关; —为自动转换开关的常开开关; ↓为负荷; •为设备或线路端点; 1-104 为线路 $B_1 \sim B_{104}$

图 1 供电系统的符号示意图

Fig.1 Signal representation of the power supply system

2.1.1 目标函数

故障恢复的主要任务是在战损、故障时, 确定网络中哪些开关需要闭合, 哪些开关需要打开, 以使重要负载快速恢复供电, 且失电负荷最少。同时还要保证系统恢复供电的快速性, 为此要尽量减少开关操作的次数。因此它是多目标决策问题。

(1) 负载的供电恢复

船舶负载按重要程度可分为三级, 其中, 一、二级负载为重要负载, 考虑这些负载的恢复, 其目标函数为:

$$\max(L_{g1} + L_{g2}) = \sum_{i=1}^k x_i L_{g1i} + \sum_{j=1}^t x_j L_{g2j} \quad (4)$$

如果考虑非重要负载的故障恢复, 此时, 目标函数为:

$$\max(L_{g1} + L_{g2} + L_{g3}) = \sum_{i=1}^k x_i L_{g1i} + \sum_{j=1}^t x_j L_{g2j} + \sum_{f=1}^p x_f L_{g3f} \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, k$; $j=1, 2, \dots, t$; $f=1, 2, \dots, p$; L_{g1} 为一级负载, L_{g2} 为二级负载, L_{g3} 为三级负载, $x_i, x_j, x_f=1$ 或 0 , 表示负载的供电与不供电。

(2) 考虑开关操作次数最少的故障恢复^[7]

由于开关操作需要投入一定的时间和人力, 恢

复过程中, 开关操作数越少, 操作所需的时间越少, 因此开关操作越少越好, 且备用开关的转换尽量采用自动转换开关。此时, 目标函数可以表示为:

$$\min F(Y, Z_M, Z_A) = \sum_{i=1}^m (1 - y_i) + \sum_{j=1}^n z_{Mj} + \alpha_r \sum_{r=1}^s z_{Ar} \quad (6)$$

式中: $y_i = 1$ 或 0 , 分别表示仅有一路供电负荷开关 i 在重构中保持闭合状态或由闭合变为打开状态; z_{Mj} , $z_{Ar} = 1$ 或 0 , 分别表示转换开关在重构中由正常供电路径转换到备用路径或保持正常的供电路径供电; $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$, 为单路供电负荷开关在重构中的变化情况; $Z_M = [z_{M1}, z_{M2}, \dots, z_{Mn}]^T$, 为手动转换开关在重构中的变化情况; $Z_A = [z_{A1}, z_{A2}, \dots, z_{As}]^T$, 为自动转换开关在重构中的变化情况。对自动转换开关转换时, 可给以小于 1 的权重 α_r 。

2.1.2 约束条件

在故障恢复时需要满足以下约束条件:

(1) 系统的辐射状运行约束限制

对于能够恢复供电的重要负载, 正常供电路径或备用路径有且仅有一条连通。

(2) 系统的容量限制

容量限制指非故障断电区的负荷转移到待恢复负荷上时, 不能引起支路或发电机过载, 如果过载, 要考虑卸载。用公式表示为:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} S_i \leq M_j \quad (7)$$

式中: $x_{ij} = 0$ 或 1 表示负荷 i 支路 j 的连接开关或支路 i 与配电板 j 的连接开关的断或通; S_i 为负荷或支路的用电量。 M_j 为支路 j 的容量裕度。

(3) 系统电流限制

$$I_i \leq I_{i\max} \quad (8)$$

(4) 电压约束

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (9)$$

2.2 故障恢复的克隆选择算法及实现策略

克隆选择算法作为一种新的优化搜索方法, 由于它具有记忆功能并具有较好的收敛特性, 本文将其应用于船舶电力系统的故障恢复中, 算法实现的具体步骤如下:

(1) 抗体编码。结合船舶电力系统的特点, 对

本文所用模型的负载进行与上文相同的 0、1、2 编码。对只有一路供电的负载只需 0、1 编码, 对有备用路径的负载则用 0、1、2 编码。每一位编码对应一个负载, 则抗体长度为 20 位, 这样有效地缩短了编码长度。

(2) 种群初始化。通过模型把确定动作的开关所对应的编码定下来, 在此基础上随机产生种群, 从而提高原始种群的质量。

(3) 亲和力计算。亲和力是用来表明抗体与抗原之间的匹配程度, 亲和力越高, 说明抗体越接近抗原, 也就越接近所求问题的解。根据船舶的具体任务, 结合式 (4) (6) 所示的目标函数, 综合考虑重要负载的供电恢复以及开关操作的次数最少, 抗体关于抗原的亲和力可以表示为

$$F' = \max(L_{g1} + L_{g2}) + k \cdot \frac{1}{\min F(Y, Z_M, Z_A)} \quad (10)$$

(4) 选择。从已确定的 n 个抗体中选择 m 个亲和力最高的抗体构成一个新的关于抗原的高亲和力抗体集合。

(5) 克隆。在抗体克隆过程中, 对 m 个亲和力较高的抗体分别进行克隆, 这里本文首先对这 m 个抗体按照亲和力升序排列, 即亲和力最大的抗体其序号为 $i=1$, 亲和力最小的抗体其序号为 $i=n$, 根据克隆规模对种群进行克隆操作。

(6) 变异。根据亲和力的大小对临时群体中的抗体进行变异, 变异常数 $\rho = 0.1$ 。

(7) 在变异后的临时群体中寻找更优秀的抗体代替初始群体中相应的父抗体, 以实现初始抗体群的更新, 跳转到第 (3) 步继续执行。

(8) 终止条件判断。当进化代数达到最大设定值时, 终止计算, 输出个体。

3 算法仿真结果分析与比较

针对图 1 所示的典型的船舶电力系统为算例, 各负载属性见表 1^[8]。

用本文提出的克隆选择算法对图 1 所示的船舶电力系统中几个典型故障的恢复在 Matlab 7.0 环境下运行仿真程序, 计算机为 P4 2.66G 256M 内存, Windows 操作系统, 并与简单遗传算法 (GA)、启发式遗传算法 (HGA) 以及混沌遗传算法 (CGA) 在处理上述同一问题的结果进行比较, 以相同的进化代数 $k=50$ 为结束条件, 取种群数 $N=100$, 个体编码长度为 20 位。

表 1 系统负载的工作电流值及负荷等级

Tab.1 Current magnitude and priority of all loads in the system given in Fig.1

| 编号 | 电流值/A | 等级 | 编号 | 电流值/A | 等级 |
|----------|-------|----|----------|-------|----|
| L_1 | 70 | 1 | L_{11} | 225 | 1 |
| L_2 | 120 | 3 | L_{12} | 205 | 3 |
| L_3 | 200 | 2 | L_{13} | 110 | 2 |
| L_4 | 150 | 3 | L_{14} | 72 | 3 |
| L_5 | 160 | 2 | L_{15} | 87 | 2 |
| L_6 | 100 | 1 | L_{16} | 100 | 1 |
| L_7 | 80 | 3 | L_{17} | 205 | 2 |
| L_8 | 325 | 1 | L_{18} | 200 | 2 |
| L_9 | 185 | 3 | L_{19} | 165 | 3 |
| L_{10} | 44 | 2 | L_{20} | 30 | 2 |

假设支路 B_{10} , B_{63} 发生故障, L_3 , L_{10} , L_{12} , L_{13} 为受损负载, 从图 1 中可以发现 L_{10} 只能由正常路径供电, L_{12} 失电, L_3 , L_{13} 只能由备用路径供电, 为了恢复重要负载的供电, 系统一定要进行全局优化, 计算结果见表 2, 表中所列结果是经过多次仿真后取得的最好结果。其中 $P\%$ 为收敛到最佳适应值的概率, 最优个体即最优染色体表示了开关动作的最佳组合, 0 表示对应的负载卸载, 1 表示开关不动作, 2 表示对应的负载由备用路径供电。恢复方法是对最优染色体具体内涵的进一步详细说明, 为了便于对上述几种方法的比较, 把恢复方案分成 3 类: 由备用路径恢复, 改由备用路径恢复, 以及卸载。

从仿真结果可以看出: 几种方法都能最大限度给重要负载恢复供电, 但最少开关操作次数和收敛代数不同, 最后的卸载量也不同。可以看出克隆算法比混沌遗传算法随着迭代次数的增加, 更容易接近最优解, 即收敛速度更快。这主要是因为克隆选择算法中, 是根据亲和度函数的大小来确定克隆种群的规模, 即亲合度函数值较大的个体其被克隆的种群规模较大, 亲合度较小的个体其被克隆的规模较小, 这样就可以使得个体种群始终在较优的种群中来寻找搜索空间的所有的局部最优。

表 2 几种恢复算法的比较

Tab.2 Comparison of restoration algorithms

| 算法 | GA | HGA | CGA | CA |
|---------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| $P\%$ | 90 | 96 | 100 | 100 |
| 最优个体 | 11201 | 10211 | 11211 | 11211 |
| | 21111 | 21111 | 11111 | 21111 |
| | 10201 | 10211 | 10211 | 10212 |
| | 11101 | 21111 | 21101 | 12111 |
| 恢复方案 | L_3, L_{13} 由备用路径恢复供电 | L_3, L_{13} 由备用路径恢复供电 | L_3, L_{13} 由备用路径恢复供电 | L_3, L_{13} 由备用路径恢复供电 |
| | L_6 改由备用路径供电 | L_6, L_{16} 改由备用路径供电 | L_{16} 改由备用路径供电 | L_6, L_{15}, L_{17} 改由备用路径供电 |
| | $L_4, L_{12}, L_{14}, L_{19}$ 卸载 | L_2, L_{12} 卸载 | L_{12}, L_{19} 卸载 | L_{12} 卸载 |
| 最少开关次数 | 7 | 6 | 5 | 6 |
| 收敛的最早代数 | 87 | 54 | 17 | 14 |

4 结论

针对船舶电力系统故障恢复问题, 本文采用了一种免疫克隆选择算法来优化开关操作。该算法兼顾了精确的局部搜索与全局搜索的优点, 由于克隆算子的作用, 因而具有更好的种群多样性, 而且克隆选择算法将变异算子作为其主要算子, 在一定代数内扩大了搜索空间。另外克隆算子本身具有记忆功能, 使得算法以概率 1 收敛于全局最优解。仿真实验表明, 免疫克隆选择算法能够以较小的迭代次数和较少的开关次数最大限度的给重要负载恢复供电, 应用于船舶电力系统故障恢复中是非常有效的。

参考文献

[1] Bulter K L, Sarma N D R. General Reconfiguration Methodology for AC Radial Shipboard Power Systems[A].In: IEEE 2000 Power Engineering Society Winter Meeting[C]. 2000.1226-1230.

(下转第 60 页 continued on page 60)

WANG Yuan-hu, ZHOU Dong-ming. Some Technical Problems of Satellite Clock Applied on Power Network [J]. Electric Power, 1998, 31(2): 10-13.

[5] 董绍武. 守时型原子钟及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(S1):490-493.

DONG Shao-wu. Atomic Clocks and their Application in Time Keeping[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2004, 18(S1):490-493.

[6] 杨国庆. 网络时间同步在电力系统的应用[J]. 华东电力, 2007, 35(4):55-58.

YANG Guo-qing. Application of Network Time Synchronization to Power systems[J]. East China Electric Power, 2007, 35(4):55-58.

[7] 冉懋海, 陈小川, 徐毅. 网络时间协议在电力监控系统时钟同步中的应用[J]. 电力系统通信, 2006, 27(159): 29-32.

RAN Mao-hai, CHEN Xiao-chuan, XU Yi. Application of Network Time Protocol in Clock Synchronization in Power SCADA System[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(159): 29-32.

[8] 孙蕴杰. 国家电网骨干时间同步网的技术探讨[J]. 电力系统通信, 2006, 27(170):31-35.

SUN Yun-jie. Discussion on the Time Synchronization Technology in National Backbone Telecommunication

network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(170):31-35.

[9] 陈飞, 孙云. 500kV变电站时间同步系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22):97-99.

CHEN Fei, SUN Yun, Design of 500kV Substation Time Synchronization System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22):97-99.

[10] 方开泰, 全辉, 陈庆云. 实用回归分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

FANG Kai-tai, QUAN Hui, CHEN Qing-yun. Practicality Regression Analysis[M]. Beijing: Science Press, 1988.

收稿日期: 2008-03-18

作者简介:

王晓芳 (1965-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统微机保护及变电站自动化的教学与研究工作; E-mail: bynum87@gmail.com

周有庆 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化;

袁旭龙 (1963-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统分析的教学与研究工作。

(上接第 23 页 continued from page 23)

[2] Srivastava S K, Butler-Purry K L, Sarma N D R. Shipboard Power Restored for Active Duty[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3):16-23.

[3] Bulter K L, Sarma N D R, Prasad V R. Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Power Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(4):653-661

[4] 杨秀霞, 张晓锋, 等. 基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):42-46

YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, et al The Study of Network Reconfiguration of the Shipboard Power System Based on Heuristic Genetic Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):42-46

[5] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003

MO Hong-wei. Principle and Application of Artificial Immune System[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003

[6] 刘若辰, 杜海峰, 等. 一种免疫单克隆算法[J]. 电子学报, 2004, 32(11):1880-1884.

LIU Ruo-chen, DU Hai-feng, et al. An Immune

Monoclonal Strategy Algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11):1880-1884.

[7] 陈根军, 李继洸, 唐国庆. 基于 Tabu 搜索的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10):28-33.

CHEN Gen-jun, LI K K, TANG Guo-qing. A Tabu Search Approach to Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10):28-33.

[8] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅, 等. 免疫遗传算法在舰船电力系统供电恢复中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9):80-86.

YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, ZHANG Yi, et al. Study on Immune Genetic Algorithm for Shipboard Power System Service Restoration [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9):80-86.

收稿日期: 2008-02-27; 修回日期: 2008-07-01

作者简介:

王敏 (1974-), 女, 讲师, 主要研究方向为智能信息处理和智能控制等; E-mail: wangmin94@163.com

刘维亭 (1966-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为船舶运动控制、非线性控制、船舶自动化等。