

# 基于混沌遗传算法的舰船电力系统故障恢复

庄肖波, 孟思齐, 刘维亭  
(江苏科技大学, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 为了解决舰船电力系统故障恢复的问题, 根据故障恢复快速性的要求提出了一种新的混沌遗传算法, 尝试改进遗传算法, 采用遗传算法代替混沌优化算法中的“细搜索”; 同时用混沌优化算法中的“粗搜索”来初始化遗传算法的种群, 以保证初始种群含有较丰富的模式, 从而增加搜索快速收敛于全局最优解的可能。对典型的模型仿真结果表明, 该算法具有更好的收敛性能, 有效提高了故障恢复的速度和精度, 避免了陷入局部最优的可能。

**关键词:** 混沌; 遗传算法; 舰船电力系统; 故障恢复

## Shipboard power system service restoration based on the chaos genetic algorithm

ZHUANG Xiao-bo, MENG Si-qi, LIU Wei-ting  
(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** To deal with problems of shipboard power system service restoration, the paper presents a new chaos genetic algorithm according to the service restoration's request of speediness. The paper improves genetic arithmetic, uses genetic algorithm to replace "thin search" in the chaos optimization, and uses "thick search" in the chaos optimization to initialize the population of the genetic algorithm, which assures the population diversity and avoids get to stuck in local minima. Typical SPS service restoration tests show that the chaos genetic algorithm can improve speed of convergence and precision of restoration and avoid premature convergence.

**Key words:** chaos; genetic algorithm; shipboard power system; service restoration

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0039-04

## 0 引言

目前, 我国舰船电力系统的规划还停留在小型舰船电力系统的规划基础上, 即前后两电站互为备用, 对称分布, 供电量为 100% 冗余<sup>[1]</sup>。国外一些大型舰船已经由原来两个电站的干馈混合式供电发展为多电站环形供电, 多电站环形网络是电源之间利用纵向横向连接线或母线构成闭环, 向用电设备供电的网络, 其优点是可以构成较多的电源至负载的通路, 电源母线闭环网络能解决靠近负载端的多路径供电问题, 它可以提高供电可靠性和生命力, 但是这种结构的电力系统也对系统的规划和安全运行, 即故障后的恢复供电提出了更高的要求。目前对舰船电力系统网络重构技术的研究尚处于起步阶段, 文献[2]运用启发式算法尽管运算简单, 但不能保证最大限度恢复重要负载的供电; 文献[3]运用网络流法研究系统的恢复, 但没有考虑负载的优先性; 文献[4]应用启发式遗传算法来恢复故障区域的供

电, 但易于出现未成熟收敛而陷入局部最优解。文献[5]运用在遗传算法的基础上引入免疫算子的方法改进了遗传算法的性能, 较好地实现了舰船电力系统的供电恢复。

本文在考虑供电网络的拓扑结构、发电机的容量限制、负载的优先性、系统稳定性以及最大限度恢复负荷供电等约束条件下, 将供电网络的故障恢复看作是一个多目标、非线性的复杂优化问题。应用混沌自适应遗传算法得出优化的故障恢复策略, 采用自适应遗传算法代替混沌优化算法中的“细搜索”; 同时用混沌优化算法中的“粗搜索”来初始化遗传算法的种群, 从而提高获得最优解的概率并加快算法的收敛速度。

## 1 舰船故障恢复问题的描述

本文用图 1 所示的典型的舰船电力系统的网络拓扑结构, 各电站之间采用环形连接方式, 发电机下接主配电板, 主配电板下以辐射状连接负载, 图中实线表示正常路径供电, 虚线代表备用路径供电。

### 1.1 目标函数

故障恢复的主要任务是在战损、故障时, 确定

**基金项目:** 海军装备部预研项目 (A3820061202); 江苏省高校自然科学基金项目 (06KJB510030)

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。

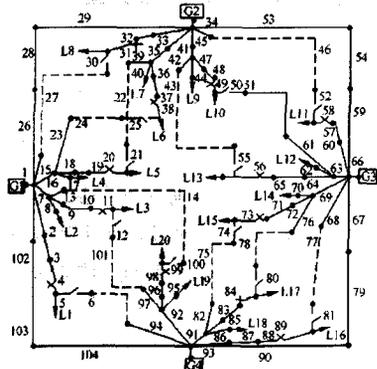


图1 供电系统的符号示意图

Fig. 1 Signal representation of the power supply system

### (1) 重要负载的供电恢复

舰船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

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

式中:  $i=1, 2, \dots, k$ ;  $j=1, 2, \dots, l$ ;  $L_{g1}$  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。系数  $\alpha > \beta > 1$ , 来保证优先考虑重要负载,  $\gamma=1$  或  $0$ , 表示非重要负载的考虑与不考虑。

### (2) 考虑开关操作次数最少的故障恢复

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。

$$\min F(P + Z_A) = \sum_{i=1}^M (1 + p_i) + \sum_{j=1}^n z_{Aj} \quad (2)$$

其中:  $p_i=1$  或  $0$ , 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状态变为打开状态;  $z_{Aj}=1$  或  $0$ , 表示自动转换开关在重构中由正常供电路径转换为备用供电路径或保持正常的供电路径不变。

## 1.2 约束条件

(1) 系统的连接性约束及辐射状限制。对于能够恢复供电的重要负荷, 正常供电路径或备用路径有且仅有一条闭合。

(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。

(3) 考虑系统的电流限制  $I_i \leq I_{imax}$  和电压约束  $V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax}$ 。

## 2 基于混沌遗传算法的舰船电力系统故障恢复

### 2.1 混沌优化方法设计

混沌优化算法的基本思想就是把混沌变量通过线性变换映射到优化变量的取值区间, 然后利用混沌变量进行搜索。一般混沌优化算法分为“粗搜索”和得到较优解后以较优解为中心增加一小扰动而进行的局部“细搜索”。

#### (1) 混沌系统的选取

Logistic映射系统是截至目前为止被研究得最为深入的一个混沌系统模型之一, 它的模型如下:

$$y(k+1) = \mu y(k)(1 - y(k))$$

$$k=0, 1, \dots \quad 0 \leq y(k) \leq 1$$

其中:  $\mu$  为吸引子, 当  $\mu=4$  时, 有:

$$y(k+1) = 4y(k)(1 - y(k)) \quad (3)$$

$$k=0, 1, \dots \quad 0 \leq y(k) \leq 1$$

系统(3)的动力学行为表现为混沌状态, 混沌变量  $y(k)$  在  $(0, 1)$  范围内遍历。

其中  $y(k)$  为经过  $k$  代迭代后得到的混沌变量, 在此选用式(3)作为混沌映射模型, 产生混沌变量。

#### (2) 混沌变量与优化变量映射关系的确立

式(3)表明混沌变量的取值是一些实数值。选取  $m$  个异值的混沌变量, 通过式(4)的映射过程分别加载于上述的  $m$  个优化变量中。

$$t_i = \text{Int}(ny_i(k)), \quad (4)$$

$$i=0, 1, m-1 \quad (n \text{ 为目标数量})$$

#### (3) 混沌优化步骤

Step1 初始化。初始化  $m$  个混沌变量;

Step2 值的映射。将混沌变量映射为待优化变量, 计算解的评价函数;

Step3 迭代搜索。利用混沌变量进行迭代, 转 Step2。直到满足停止条件, 即达到最大迭代代数或者得到最优解。

## 2.2 混沌优化与改进的遗传算法相结合实现关联算法

在许多改进的遗传算法中, 初始种群的产生依然采用完全的随机方式, 而没有解决初始种群中各个个体在解空间中的分布情况。这有可能让许多个

体都集中在某一局部区域内, 不利于扩大搜索空间和收敛到全局最优解。同时, 从遗传算法群体规模的讨论得知, 若群体规模太小, 会使遗传算法的搜索空间分布范围有限, 增加未成熟收敛的概率, 而群体规模太大则会大大降低计算效率。因此, 在产生初始种群时既要尽可能控制较小的群体规模, 又要使各个体尽可能均匀地分布在整个解空间上。

为解决上述问题, 本文采用遗传算法代替混沌优化算法中的“细搜索”; 同时用混沌优化算法中的“粗搜索”来初始化遗传算法的种群, 这样有助于遗传算法跳出局部最优陷阱, 并且可以加快遗传算法的收敛速度。所得混沌遗传混合算法, 其步骤如下:

Step1  $k=0$ ;

Step2 对式(3)中的  $x(k)$  分别赋予  $m$  个具有微小差异的初值, 由于混沌系统具有对初值敏感的特性可得到  $m$  个轨迹不同的混沌变量 (与  $m$  个待优化的变量  $t_i$  相对应), 记为  $x_i(k)$ ,  $i=0, 1, \dots, m-1$ ;

Step3 通过式(4)将混沌变量映射为待优化变量, 根据约束条件通过合法化操作得到目标序号对应于量测的一个排列;

Step4 对混沌变量应用式(3)进行迭代, 转Step3。直到达到最大迭代代数或者得到满足条件的较优解;

Step5  $k=k+1$ , 若  $k < \text{popsize}$  (群体规模) 转Step2;

Step6 以混沌优化所得的  $\text{popsize}$  个互异较优解为初始群体, 采用本文论述的自适应遗传算法获得全局最优解。

### 3 算法实现的具体步骤

(1) 基因编码。结合舰船电力系统的特点, 对本文所用模型的负载进行 0、1、2 编码, 0 代表失电, 1 代表正常路径供电, 2 代表备用路径供电。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, 长度为 20 位, 这样有效地缩短了编码长度。

(2) 种群初始化。采用上文所提出的算法, 采用自适应遗传算法代替混沌优化算法中的“细搜索”; 同时用混沌优化算法中的“粗搜索”来初始化遗传算法中的种群, 从而提高获得最优解的概率并加快算法的收敛速度。

(3) 适应度函数。根据舰船的具体任务, 设定

(2) 式所表示的目标函数即为适应度函数。

(4) 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。

(5) 选择。采用线性排序选择机制<sup>[6]</sup>, 将个体

按照适应度值从大到小排列。则第  $k$  个染色体的选择概率由下式给出。

$$p_s = q - (k-1) \frac{q - q_0}{S-1}, \quad k=1, 2, \dots, S$$

其中:  $S$  为群体规模,  $q$  为最好染色体的选择概率,  $q_0$  为最坏染色体的选择概率, 当设  $q_0=0$  时, 选择压力达到极大。

(6) 交叉与变异。采用部分匹配交叉法(PMX)和随机两点换位的变异算法, 并使用自适应交叉算子及变异算子<sup>[7]</sup>, 则交叉概率及变异概率分别按式(5)、式(6)自适应调整。

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c1}, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (5)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f - f_{\text{avg}})}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m1}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $f_{\text{max}}$  为群体中最大的适应度值;  $f_{\text{avg}}$  为每代群体的平均适应度值;  $f'$  为要交叉的两个个体中较大的适应度值;  $f$  为要变异个体的适应度值。

自适应的进化算子使得当种群各个体适应度趋于一致或者趋于局部最优时  $p_c$  和  $p_m$  增加。同时, 适应度值高于群体平均适应度值的个体, 对应于较低的  $p_c$  和  $p_m$ , 使该解得以保存从而进入下一代; 而低于平均适应度值的个体, 对应于较高的  $p_c$  和  $p_m$ , 使该解被淘汰掉。

### 4 算法仿真结果分析

本算法以图1系统进行仿真, 各负载属性见表1<sup>[5]</sup>。

仿真实验中, 遗传算法解决方案中参数:  $q=1$ ,  $q_0=0.08$ ,  $p_{c1}=0.9$ ,  $p_{c2}=0.6$ ,  $p_{m1}=0.1$ ,  $p_{m2}=0.001$ ,  $\text{popsize}=100$ 。设定限制遗传算法迭代次数为 100 次。将本文所提出的混沌遗传算法(CGA)与简单遗传算法(GA)、启发式遗传算法(HGA)、免疫遗传算法(DGA)在处理同一问题的结果进行比较。

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,  $L_{10}$  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。每种算法运行 50 次。计算结果见表 2,  $P$  代表收敛到最佳适应值的概率。通过比较可以发现, CGA 在收敛到最优代数方面比其他几种方法有了较大的改进, 同时开关的操作次数也很少。

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

表 2 恢复算法的比较

Tab. 2 The comparison of fault restoration results

算法	GA	HGA	DGA	CGA
$P/(\%)$	90	96	100	100
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	$L_6, L_{17}$ 改由备用路径供电	$L_{16}$ 改由备用路径供电
	$L_4, L_{12}, L_{14}, L_{19}$ 卸载	$L_2, L_{12}$ 卸载	$L_{12}$ 卸载	$L_{12}, L_{19}$ 卸载
最少开关次数	7	6	5	5
收敛的最早代数	87	54	35	18

## 5 结论

本文将混沌引入优化问题,使用混沌优化方法初始化遗传算法中的种群,以保证初始种群含有较丰富的模式,使得该混沌遗传算法具有更好的收敛性能,极好地避免了陷入局部最优的可能。将本文所改进的方法应用到典型的舰船电力系统的故障恢复中,算法表现出良好的仿真结果。同时本方法针对一般的优化问题的求解也是适用的。

## 参考文献

- [1] 王涣文. 舰船电力系统及自动装置[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
WANG Huan-wen. Shipboard Power System and Automatic Device[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 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.
- [3] Bulter K L, Sarma N D R, Prasad V R. A New Method of Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Power Systems[A]. In: 1999 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf[C]. 1999. 658-662.
- [4] 杨秀霞, 张晓锋, 等. 基于启发式遗传算法的舰船网络重构研究[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] 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.
- [6] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
XUAN Guang-nan, CHENG Run-wei. Genetic Algorithm and Project Optimization[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [7] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.  
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm Theory, Application and Soft Realization[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.

收稿日期: 2007-03-19;

修回日期: 2007-04-12

作者简介:

庄肖波 (1973-), 男, 讲师, 研究方向为舰船电力系统稳定性、智能监控;

孟思齐 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为舰船电力系统的智能控制; E-mail: mengsq\_just@sohu.com

刘维亭 (1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为舰船自动化、智能控制等方面。