

基于改进粒子群算法的牵引变电所维修优化研究

刘欢, 刘志刚

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 牵引变电所维修优化方案的合理制定是保证铁路电力运输重要的一部分, 维修要兼顾系统的可靠性和维修的经济性。采用故障树法、GO 法对牵引变电所进行定性分析和定量分析, 得到了其定性维修策略和定量可靠度的推导公式。以文献中调研数据为基础, 对周期性维修策略进行改进, 建立了考虑牵引变电所维修经济性和满足系统可靠度的维修优化模型, 根据改进粒子群算法求解模型, 制定分别从考虑单个设备可靠度和整体可靠度两个方面的维修优化策略。仿真结果表明, 基于改进粒子群算法的牵引变电所维修优化模型是客观有效的。该模型能反映系统可靠度越高, 维修费用越高的特性, 并且可根据不同维修费用限制选择系统可靠度的最低值。

关键词: 牵引变电所; 可靠性; 周期性维修; 粒子群算法; 维修优化

An improved particle swarm algorithm study on optimization model of maintenance schedules for railway traction substations

LIU Huan, LIU Zhigang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A reasonable maintenance schedule for railway traction substations is an important part of railway electric transports. It should take the reliability and the maintenance costs of the system into account. The fault tree analysis is applied to qualitative analysis and the GO method is used to quantitative analysis. Formula derivation of the railway substations' reliability is got. Simulating the model through the survey data from the literature and improving the periodic maintenance means, establishing an optimized maintenance model of the railway traction substations based on reliability and the cost. Through two aspects of single equipment reliability or overall reliability, the model is solved with improved particle swarm algorithm. The result indicates that the model is objective and effective, that the model can reflect that the reliability of the system is higher, the maintenance costs are higher. And the minimum reliability of the system can be selected according to different maintenance cost.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134205 and No. 51377136).

Key words: railway traction substations; reliability; periodic maintenance; particle swarm algorithm; maintenance optimization

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0087-08

0 引言

电力牵引系统发展地越来越迅速, 其安全可靠^[1-3]问题非常突出。在这种形势下, 对于牵引变电所的可靠性研究及维修方案的制定就显得尤为必要。本文从可靠性方面对牵引变电所进行研究, 寻求实用性强的维修方案。

牵引供电系统的重要部分之一是牵引变电所。变电所是将 220 kV 或者 110 kV 的三相交流电转换成 55 kV 或 25 kV 的单相交流电, 通过接触网供给

动力车。2003 年全年因为变电所的故障导致系统停电次数累计 41 次, 停电 1 896 min, 给社会带来了重大经济损失^[4]。如何在保证可靠度的前提下, 制定维修方案使维护费用较小, 是值得深入研究的课题。可靠性分析方法一般分为解析法和模拟法。文献[5]中采用可靠性框图法对系统进行分析。比较经典的解析法还有故障树分析法^[6]、故障模式后果分析法^[7]、GO 法^[8]等。模拟法主要是指蒙特卡罗法^[9]。文献[10]针对地铁典型牵引供电系统结构, 利用故障树和故障模式与后果分析法对其进行可靠性分析。维修方法国内外的研究成果较少。陈绍宽考虑铁路牵引变电所的可靠性和维修费用, 建立了基于可靠性最大, 维修费用最小的优化方案^[11]。文献[12]

基金项目: 国家自然科学基金(U1134205, 51377136); 铁道部科技研究开发计划(2013J010-B)

建立了以系统可靠性为约束条件，基于维修费用最小的接触网维修计划优化模型。Moudani 研究了基于启发式解法的航空运输维修计划动态规划模型^[13]。文献[14]中将启发式算法运用于航空运输中飞机的维修优化。文献[15]建立了基于费用、可靠性的维修模型，通过遗传算法来搜索模型的最优解。

本文结合故障树分析法和 GO 法，以维护费用最小，可靠度满足设定要求从单个设备和整体两方面分别制定了维修计划。

1 牵引变电所可靠性模型

牵引变电所的可靠性分析包括定性分析和定量分析。文中定性分析采用故障树分析法，定量分析采用 GO 法。

1.1 定性分析

故障树分析法(FTA)是用于大型系统可靠性分析和安全性分析的一个有力工具。通常进行 FTA 的

程序是：选择顶端事件，建立故障树，以及定性或定量地评定故障树。一般而言，次级事件的发生与顶端事件发生事件是有一定的逻辑关系的。例如，当两个次级事件 A、B 中有一个发生就造成 T 出现，则 T 与 A、B 之间是逻辑或的关系。因此，若用同一字母表示该事件发生，则 T 与 A、B 可表示成 $T = A \cup B$ 。相仿，当 A、B 同时出现才使 T 出现，则是逻辑与关系， $T = AB$ 。在对顶事件 T 进行第一步分解之后，再对每个次级事件进行类似分析，逐次下去，最终一直到不能进行分解为止。在引进一些适当的记号之后，就可具体地把故障树图画出。变电所主接线如图 1 所示。

对以上变电所进行故障树分析。其中，故障树中 G_i 表示次级事件导致的故障事件，设备代号表示此设备发生故障的事件。故障树图如图 2~图 6 所示。

牵引变电所的主要设备及可靠性参数^[8]如表 1 所示。

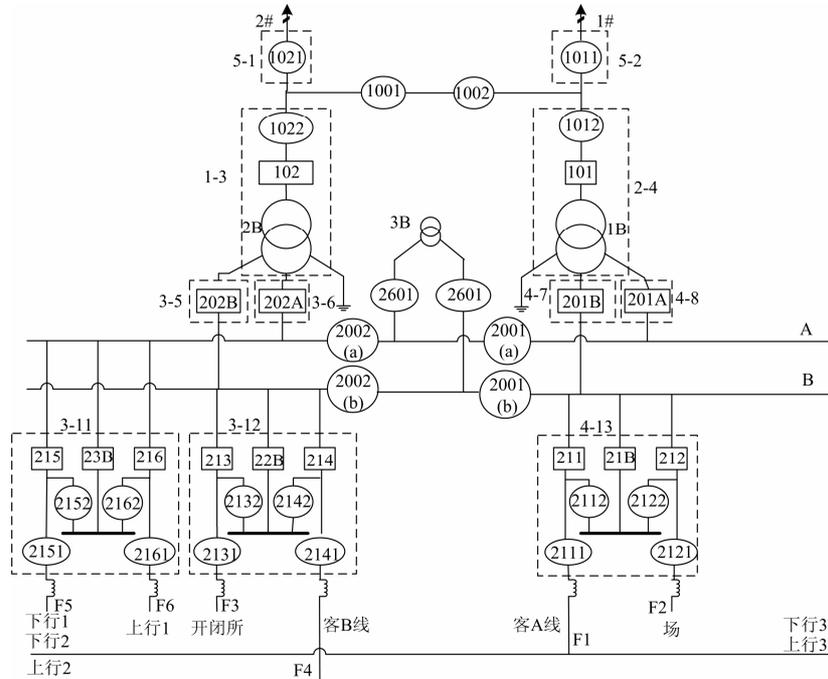


图 1 某牵引变电所主接线示意图
Fig. 1 Scheme of traction power supply system

表 1 设备种类及参数

Table 1 Reliability parameters and types of equipments

设备种类	设备代号	设备名称	尺度参数	形状参数
1	1011, 1021, 1001, 1012, 1022, 1002	隔离开关 110 kV	172	7.5
2	102, 101	断路器 110 kV	178	7.8
3	2B, 1B	主变压器 110 kV / 55 kV	167	16.6
4	202A, 202B, 201A, 201B, 215, 23B, 216, 213, 22B, 214, 211, 21B, 212	断路器 55 kV	180	8.2
5	2002(a), 2001(a), 2002(b), 2001(b)	手动隔离开关	175.5	11.7
6	2152, 2162, 2132, 2142, 2112, 2122, 2151, 2161, 2131, 2142, 2111, 2121	隔离开关 55 kV	176	11.7

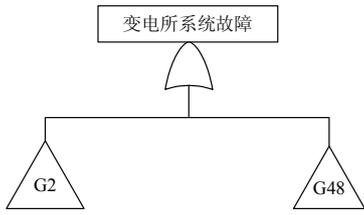


图 2 总故障树图
Fig. 2 Scheme of the total fault tree

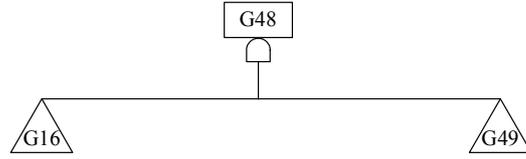


图 3 G48 故障树图
Fig. 3 Scheme of G48 fault tree

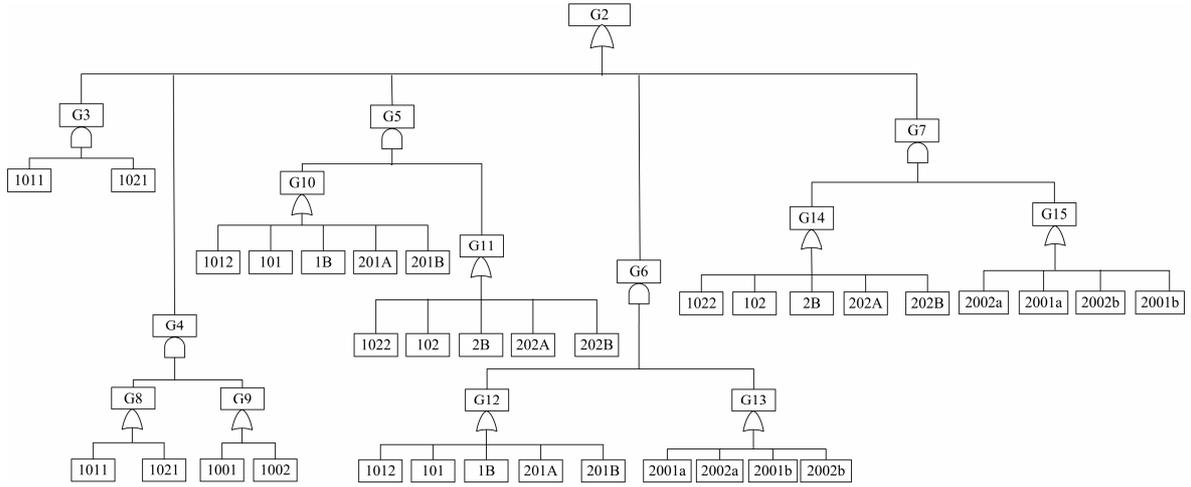


图 4 G2 故障树图
Fig. 4 Scheme of G2 fault tree

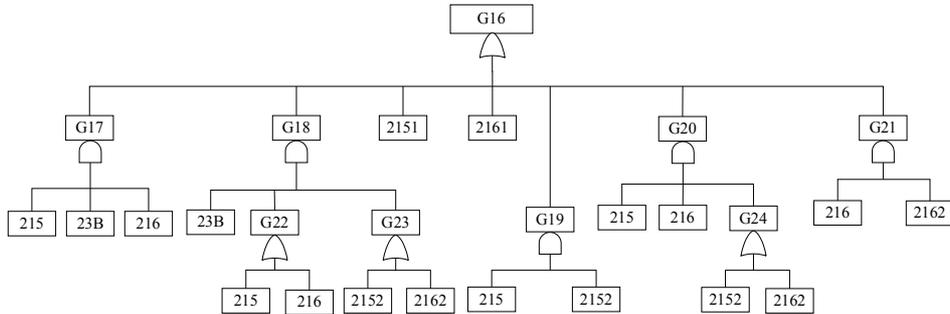


图 5 G16 故障树图
Fig. 5 Scheme of G16 fault tree

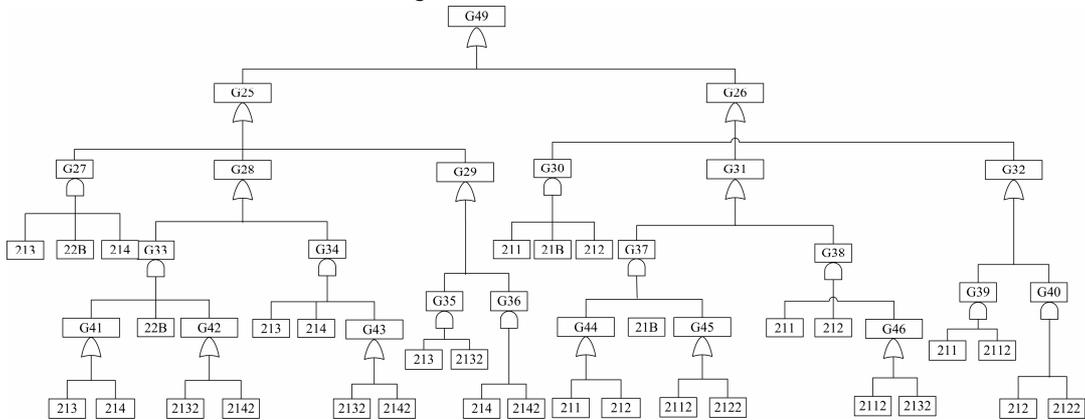


图 6 G49 故障树图
Fig. 6 Scheme of G49 fault tree

逻辑与和逻辑或符号如图 7。



图 7 “逻辑与”和“逻辑或”符号

Fig. 7 Sign of “logical and” and “logical or”

建立好牵引变电所的故障树图后，就是求出整个系统的最小割集。最小割集的方法常见的有上行法、下行法和质数法等。本文采用下行法来求解。根据下行法，此牵引变电所的故障树最小割集共有 87 个。其中，一阶割集 2 个，二阶割集 76 个，三阶割集 9 个。最小割集如下：

一阶：{2151}，{2161}；

二阶：{1011,1021}，{1011,1001}，{1011,1002}，
{1021,1001}，{1021,1002}，{1012,1022}，
{1012,102}，{1012,2B}，{1012,202A}，
{1012,202B}，{101,1022}，{101,102}，{101,2B}，
{101,202A}，{101,202B}，{1B,1022}，{1B,102}，
{1B,2B}，{1B,202A}，{1B,202B}，{201A,1022}，
{201A,102}，{201A,2B}，{201A,202A}，
{201A,202B}，{201B,1022}，{201B,102}，
{201B,2B}，{201B,202A}，{201B,202B}，
{1012,2001(1)}，{1012,2002(1)}，{1012,2001(2)}，
{1012,2002(2)}，{101,2001(1)}，{101,2002(1)}，
{101,2001(2)}，{101,2002(2)}，{1B,2001(1)}，
{1B,2002(1)}，{1B,2001(2)}，{1B,2002(2)}，
{201A,2001(1)}，{201A,2002(2)}，{201A,2001(2)}，
{201A,2002(2)}，{201B,2001(1)}，{201B,2002(1)}，
{201B,2001(2)}，{201B,2002(2)}，{1022,2002(3)}，
{1022,2001(3)}，{1022,2002(4)}，{1022,2001(4)}，
{102,2002(3)}，{102,2002(4)}，{102,2001(4)}，
{2B,2002(3)}，{2B,2001(3)}，{2B,2002(4)}，
{2B,2001(4)}，{202A,2002(3)}，{202A,2001(3)}，
{202A,2002(4)}，{202A,2001(4)}，{202B,2002(3)}，
{202B,2001(3)}，{202B,2002(4)}，{202B,2001(4)}，
{215,2152}，{216,2162}，{213,2132}，{214,2142}，
{211,2112}，{212,2122}；
三阶：{215,23B,216}，{23B,215,2162}，
{23B,216,2152}，{213,22B,214}，{213,22B,2142}，
{214,22B,2132}，{211,21B,212}，{211,21B,2122}，
{212,21B,2122}。

由最小割集可看出，最脆弱的为一阶割集中的设备 2151 和 2161，即设备 55 kV 的隔离开关。在

实际系统设计中，在 2151 和 2161 处应采用可靠性较高的隔离开关，尽可能避免最小割集事件的发生，导致系统发生故障。

1.2 定量分析

由于本文考虑的系统庞大，再进行最小割集不交化非常复杂，所以采用 GO 法对牵引变电所定量分析。GO 法是一种以成功为导向的系统概率分析方法。GO 图中用操作符代表具体的部件，或者代表逻辑关系，用信号流连接操作符，代表具体的物，或者代表逻辑上的进程。它的主要步骤为：系统分析，建立故障图，输入数据，进行 GO 运算。根据图 1，把牵引变电所划分成如图的几部分，则可得到牵引变电所的可靠度 P_Z 为

$$P_Z = [P_{5-1}P_{1-3}(1-P_{5-2}P_{2-4})P_{3-5}P_{3-6} + P_{5-2}P_{2-4} \cdot (1-P_{5-1}P_{1-3})P_{4-7}P_{4-8} + P_{5-1}P_{1-3}P_{5-2}P_{2-4} \cdot (P_{3-5} + P_{4-7} - P_{3-5}P_{4-7})(P_{3-6} + P_{4-8} - P_{3-6} \cdot P_{4-8})]P_{2001a}P_{2002b}P_{2001b}P_{2002a}P_{3-11}P_{3-12}P_{4-13} \quad (1)$$

$$P_{3-11} = P_{215}P_{2151}P_{216}P_{2161} + P_{215}P_{2151}(1-P_{216}) \cdot P_{23B}P_{2162}P_{2161} + P_{216}P_{2161}(1-P_{215})P_{23B} \cdot P_{2152}P_{2161} \quad (2)$$

$$P_{3-12} = P_{213}P_{2131}P_{214}P_{2141} + P_{213}P_{2131}(1-P_{214}) \cdot P_{22B}P_{2142}P_{2141} + P_{214}P_{2141}(1-P_{213})P_{22B} \cdot P_{2132}P_{2131} \quad (3)$$

$$P_{4-13} = P_{211}P_{2111}P_{212}P_{2121} + P_{211}P_{2111}(1-P_{212}) \cdot P_{21B}P_{2122}P_{2121} + P_{212}P_{2121}(1-P_{211})P_{21B} \cdot P_{2112}P_{2111} \quad (4)$$

式中： $P_{5-1} = P_{1021}$ ； $P_{5-2} = P_{1011}$ ； $P_{1-3} = P_{1022}P_{102}P_{2B}$ ； $P_{2-4} = P_{1012}P_{101}P_{1B}$ 。

2 维修优化模型

2.1 维修策略的基本假设

本文的维修策略是以周期性维修为前提的，包括更换维修、预防性维修和最小维修。对周期性维修做出了以下假设：

(1) 各个设备在初始状态时为全新，更换维修后设备状态也为全新，各个设备寿命分布相互独立，同种设备寿命分布相同。

(2) 系统预防性维修在系统非工作时间进行，更换维修利用倒闸操作完成，也不影响系统的正常工作，预防性维修和最小维修占用系统运行时间，平均到每个设备的时间为 Δm_i 。

(3) 预防性维修可以恢复设备的功能，但不是恢复如新，只是相当于将设备的役龄时间往前推移了一定量，性能得以提高。

(4) 基本时间段为 T , 设备预防性维修周期为 T_{pi} , $T_{pi} = b_{yi} \cdot T$, 更换周期为 G_i , $G_i = b_{gi} b_{yi} T$, 系数均为整数^[8,16]。

预防性维修降低了设备的故障率, 提高了设备的性能, 相当于设备的役龄时间向前推移了一段时间。设备 i 在更换周期 G_i 内, 第 j 个维修周期后, 它的役龄向前推动了 αT_{pi} , 相当于设备在第 j 个周期内只使用了 $T_{pi} - \alpha T_{pi}$ 。

采用预防性维修时, 等效役龄关系为

$$\begin{aligned} t_{i1} &= T_{pi} - \alpha T_{pi} = (1 - \alpha) T_{pi} \\ t_{i2} &= t_{i1} + T_{pi} - \alpha T_{pi} = 2(1 - \alpha) T_{pi} \\ t_{i3} &= t_{i2} + T_{pi} - \alpha T_{pi} = 3(1 - \alpha) T_{pi} \\ &\dots \\ t_{ib_{gi}} &= t_{ib_{gi-1}} + T_{pi} - \alpha T_{pi} = b_{gi}(1 - \alpha) T_{pi} \end{aligned} \quad (5)$$

则基本时间段 T 内的可靠度计算流程如图8所示。

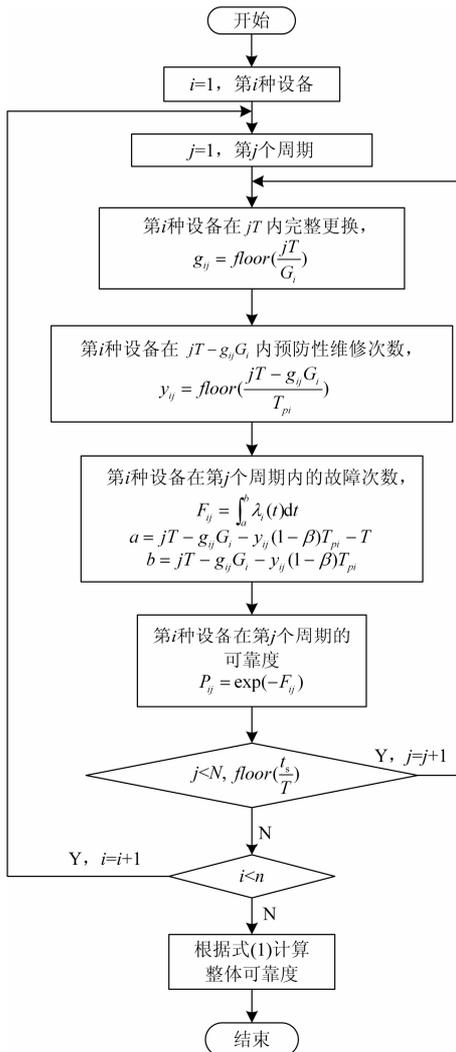


图8 维修策略流程图

Fig. 8 Flow of maintenance strategy

2.2 维修优化模型

牵引变电所的正常运行需要较高的可靠度, 铁路部门希望同时它的维修费用尽可能的少。本文维修优化模型主要考虑使维修费用最小, 可靠度在设定的最低值以上的情况。将基本时间段 T , 以及6种设备的更换周期和预防性维修周期作为变量, 以总维修费用最小为目标函数, 分别从总体可靠度和单个设备的可靠度最优两个方面, 制定不同的维修方案。

目标函数为

$$\begin{aligned} \min F &= \sum_{i=1}^n n_i [c_{1i} \text{floor}(\frac{\text{floor}[\frac{t_s}{T} + 1]T}{T_{pi}} - g_{ij}) + \\ &\quad c_{2i} g_{i[\text{floor}(\frac{t_s}{T}) + 1]} + c_{3i} \text{floor}(F_{i[\text{floor}(\frac{t_s}{T}) + 1]}) + c_{4i} \Delta m_i] \end{aligned} \quad (6)$$

约束条件为

- (1) 从总体可靠度方面考虑, $P_z(j) > R_0$;
- (2) 从单个设备方面考虑, $P_{ij} > R'_0$ 。

其中, c_{1i} 为第 i 种设备的预防性维修费用; c_{2i} 为第 i 种设备的更换维修费用; c_{3i} 为第 i 种设备故障时最小维修费用; c_{4i} 为平均到第 i 个设备的单位时间损失费用。

2.3 基于改进粒子群算法的维修优化模型

PSO是基于个体间的协作实现搜索空间中的寻优。在PSO中, 每一个粒子均为问题的一个可行解。在可行解空间中, PSO随机生成若干粒子, 进而各个粒子共同合作逐代搜索最优解。在每一代搜索中, 每个粒子的下一代移动的速度与位置由粒子当前的速度、位置以及各个粒子的个体最优位置 $pbest$ 与种群的全局最优位置 $gbest$ 决定。本文采用文献[17]中的改进粒子群算法。改进粒子群算法的流程图如图9所示。

然后, 根据改进的粒子群算法来求解为修优化模型。本文采用改进粒子群算法时, 选用 50 个粒子, 1 000 次迭代次数。

综上所述, 给出总体的维修优化的流程图, 如图 10 所示。

3 算例仿真

以图1中的牵引变电所为研究对象。牵引变电所各种设备的参数如表2所示^[8,11]。假设牵引变电所运行的时间 t_s 为1 000个月, $\beta = 0.1$ 。设备的其他参数如表2所示。

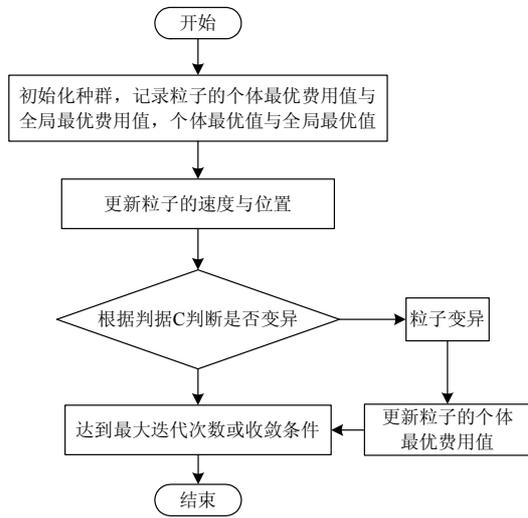


图9 改进粒子群算法流程图

Fig. 9 Flow of improved particle swarm optimization

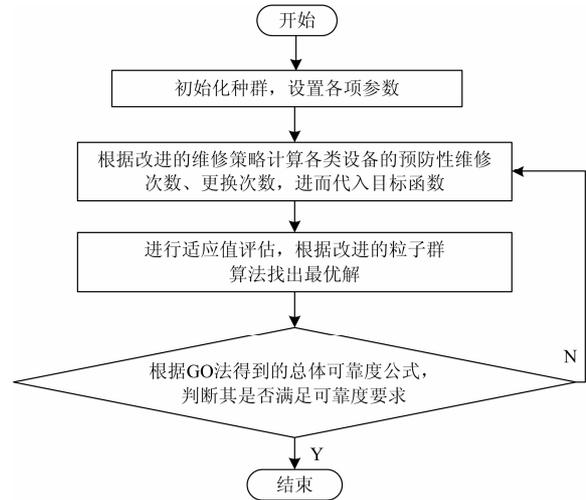


图10 维修优化流程图

Fig. 10 Flow of maintenance optimization

表2 各设备参数值

Table 2 Parameters of equipments

设备种类	个数	c_{1i} / 万	c_{2i} / 万	c_{3i} / 万	c_{4i} / 万
1	4	0.5	15	1.2	0.4
2	2	1.2	60	5.0	0.5
3	2	6.0	150	12.0	2.0
4	13	0.8	25	2.0	0.5
5	4	0.3	5	0.5	0.5
6	12	0.3	5	0.5	0.45

当考虑单个设备的可靠度时, 分别仿真可靠度大于 0.9 和 0.85 的情况。设备 4 的故障次数及可靠度曲线如图 11 所示。

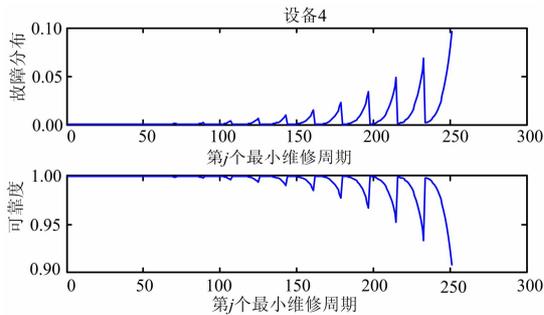


图11 设备4的故障次数及可靠度曲线

Fig. 11 Scheme of malfunction times and reliability curve of the fourth equipment

图11为设备4断路器(55 kV), 从图中可知, 由于更换周期较长, 设备4在运行的1 000个月内一直以预防性维修为主, 还没有进行更换维修。

单个设备可靠度不低于 0.9 的维修方案如表 3 所示。

单个设备可靠度不低于 0.85 的维修方案如表 4 所示。

表3 单个设备可靠度不低于0.9的维修方案

Table 3 Maintenance strategy of reliability more than 0.9 of a single equipment

设备种类	T /月	b_{yi}	b_{gi}	$\min R_i$	$\min F_i$ / 万
1	4	17	16	0.912 8	28.08
2	8	8	17	0.919 6	36.05
3	17	4	16	0.902 1	168.2
4	4	18	15	0.908 5	135.5
5	5	14	19	0.908 4	16.89
6	4	17	20	0.939 8	50.64

表4 单个设备可靠度不低于0.85的维修方案

Table 4 Maintenance strategy of reliability more than 0.85 of a single equipment

设备种类	T /月	b_{yi}	b_{gi}	$\min R_i$	$\min F_i$ / 万
1	4	2	14	0.862 5	24.08
2	5	17	17	0.867 8	26.45
3	19	4	15	0.876 0	156.2
4	5	17	18	0.877 0	114.73
5	4	20	17	0.867 5	14.49
6	16	5	18	0.869 3	43.44

当考虑牵引变电所整体可靠度时, 分别用标准PSO和改进PSO搜索维修费用最小的情况如图12所示。

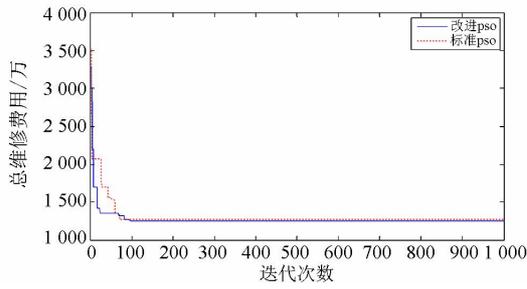


图12 变电所可靠度不低于0.95的曲线

Fig. 12 Curve of the reliability more than 0.95 of the railway traction substation

由图12可知, 改进的PSO算法比标准PSO算法先搜索到最优值, 表明改进的PSO能更迅速地寻到最优值, 更为有效。

整体可靠度和设备1的故障次数及可靠度如图13所示。

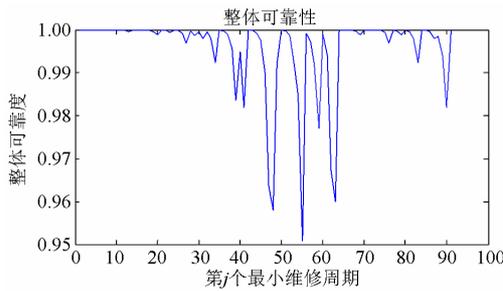


图13 变电所整体可靠度不低于0.95的曲线

Fig. 13 Curve of the reliability more than 0.95 of the railway traction substation

由图13可知, 牵引变电所的整体可靠性一直保持在0.95以上。

设备1的故障次数及可靠度曲线如图14所示。

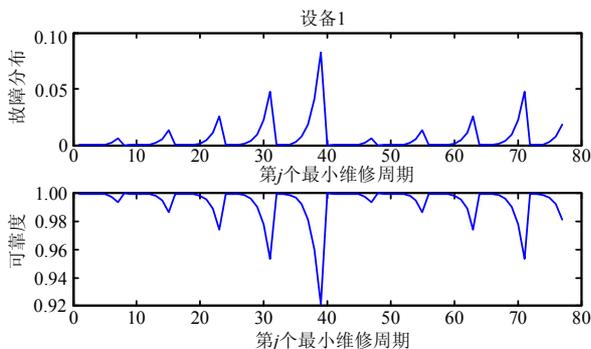


图14 设备1的故障次数及可靠度曲线

Fig. 14 Scheme of malfunction times and reliability curve of the first equipment

图14为设备1隔离开关(110 kV)在每个周期内的故障分布及可靠度。从图中可看出, 在第8、16、

24、32个周期时进行预防性维修, 在第40个周期时进行更换维修, 更换周期是预防性周期的5倍, 与表3中的结果符合。

此外, 还在变电所可靠度不低于0.9的时候进行了仿真, 结果如表5所示。

表5 整体可靠度不低于0.95的维修方案

Table 5 Maintenance strategy of the reliability more than 0.95 of the railway traction substation

设备种类	T/月	b_{yi}	b_{gi}	min R	min F /万
1	13	8	5	0.967 6	1 277.6
2	13	7	9		
3	13	6	9		
4	13	7	6		
5	13	6	7		
6	13	7	4		

在变电所可靠度不低于0.9的时候进行了仿真, 结果如表6所示。

表6 整体可靠度不低于0.9的维修方案

Table 6 Maintenance strategy of the reliability more than 0.9 of the railway traction substation

设备种类	T/月	b_{yi}	b_{gi}	min R	min F /万
1	7	12	7	0.910 5	1 082.0
2	7	14	13		
3	7	16	5		
4	7	10	12		
5	7	9	8		
6	7	12	7		

4 结论

本文首先对图1中的牵引变电所进行分析, 首次采用故障树法和GO法相结合的方法分别定性、定量分析牵引变电所。然后对一般周期性维修方案进行改进, 建立了基于改进粒子群算法的维修优化模型, 再依据调研数据, 分别从整体可靠度和单个设备可靠度两方面仿真了不同可靠度下的最优变量, 制定最优方案。在实际运用中, 铁路部分可根据总费用的预算和可靠度的不同要求下进行调整, 制定合理的维修方案。研究表明, 制定的维修方案可为牵引变电所的维修提供理论实际方面的依据, 效率高, 通用性强。根据实测数据, 铁路部门可以将其应用于实际维修护理活动中, 为牵引变电所的维修提供有力支持。

参考文献

[1] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-177.

- XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluating of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-177.
- [2] 汪兴强, 丁明, 韩平平. 互联电力系统可靠性评估的改进等效模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 201-207. WANG Xingqiang, DING Ming, HAN Pingping. An improved equivalent model for reliability evaluation in interconnected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 201-207.
- [3] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-64. HU Guowei, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operating reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-64.
- [4] 林飞, 罗君, 李志锋. 2003、2004 年全国电力牵引供电系统故障统计分析[J]. 工业科技, 2006, 35(3): 27-28. LIN Fei, LUO Jun, LI Zhifeng. The national traction power supply system fault analysis in 2003, 2004[J]. Industrial Science and technology, 2006, 35(3): 27-28.
- [5] GUO H T, YANG X H. A simple reliability block diagram method for safety integrity verification[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(9): 1267-1273.
- [6] 周宁, 马建伟, 胡博, 等. 基于故障树分析的电力变压器可靠性跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 72-77. ZHOU Ning, MA Jianwei, HU Bo, et al. Reliability tracing technique for power transformers using the fault tree analysis method[J]. Power System Technology, 2012, 40(19): 72-77.
- [7] CARMIGNANI G. An integrated structural framework to cost-based FMECA: the priority-cost FMECA[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(4): 861-871.
- [8] 陈民武. 基于 GO 法的高速铁路牵引变电所可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 56-61. CHEN Minwu. The reliability assessment of traction substation of high speed railway by the GO methodology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 56-61.
- [9] 陈怀艳, 曹芸, 韩洁. 基于蒙特卡罗法的测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 301-308. CHEN Huaiyan, CAO Yun, HAN Jie. Evaluating of uncertain in measurement based on a Monte Carlo method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(4): 301-308.
- [10] 胡海涛, 高朝辉, 何正友, 等. 基于 FTA 和 FMEA 法的地铁牵引供电系统可靠性评估[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 49-54. HU Haitao, GAO Zhaohui, HE Zhengyou, et al. Reliability evaluation of metro traction power supply system based on FTA and FMEA methods[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 49-54.
- [11] 陈绍宽, 彭宏勤, 毛保华, 等. 基于费用最小的铁路牵引变电所维修计划优化模型[J]. 铁道学报, 2011, 33(8): 39-44. CHEN Shaokuan, PENG Hongqin, MAO Baohua, et al. Optimization model of least-cost-based maintenance schedules for railway traction substations[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(8): 39-44.
- [12] 陈绍宽, 王秀丹, 柏赟, 等. 基于费用最小的铁路牵引接触网维修计划优化模型[J]. 铁道学报, 2013, 35(12): 37-42. CHEN Shaokuan, WANG Xiudan, BAI Yun, et al. Lowest costs-based optimum maintenance scheduling model for catenaries of railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12): 37-42.
- [13] MOUDANI W E, MORA-CAMINO F. A dynamic approach for aircraft assignment and maintenance scheduling by airlines[J]. Journal of Air Transport Management, 2000, 6(4): 233-237.
- [14] SRIRAM C, HANHANI A. An optimizing model for aircraft maintenancescheduling and re-assignment[J]. Transportation Research Part A, 2003, 37(1): 29-48.
- [15] LAPA C M F, PEREIRA C M N A, DE BARROS M P. A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability[J]. Reliability Engineering and Systems Safety, 2006, 91(2): 233-240.
- [16] 蔡景, 左洪福, 王华伟. 基于经济相关性的复杂系统维修优化模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 835-838. CAI Jing, ZUO Hongfu, WANG Huawei. Study on optimal model of complex systems with economic dependency[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(5): 835-838.
- [17] 刘志刚, 刘欢, 柳杰. 计及风电场概率模型的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 197-203. LIU Zhigang, LIU Huan, LIU Jie. Multi-objective reactive power optimization considering wind farm probabilistic model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 197-203.

收稿日期: 2014-08-05

作者简介:

刘欢(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事牵引供电系统的维修优化研究; E-mail: huanlahuanle@163.com

刘志刚(1975-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代信号处理及在电力系统中的应用和智能监控技术。

(编辑 张爱琴)