

# 电网故障诊断的一种完全解析模型

刘道兵, 顾雪平, 李海鹏

(华北电力大学电气与工程学院, 河北省保定市 071003)

## A Complete Analytic Model for Fault Diagnosis of Power Systems

LIU Daobing, GU Xueping, LI Haipeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** Interconnections of the modern bulk electric power systems, while contributing to the operating economy and reliability, result in an increased complexity of fault diagnosis. In this paper, a complete analytic model of fault diagnosis was presented by analyzing principles of protective relay setting and circuit breaker trip, and an effective solving method for the proposed model was developed. In the complete analytic model, the fault hypothesis-the actual states of the suspected fault equipment, as well as the malfunction of protective relays and circuit breakers, was treated as logic variables, and the principles of protective relay setting and the rules of the circuit breaker trip were completely expressed with a set of logic equations. Each solution of the complete model represents a mode of fault information (the faulty states of the equipment, operations of protective relays and circuit breakers), which can completely describe the fault scenarios. The operation rules of protective relays and circuit breakers were fully analyzed and the coupling relations between the fault equipment and operation of protective relays/circuit breakers are intactly reserved in the complete analytic model, removing the defects of the previous analytic models. Several examples had showed that the complete analytic model with the intact coupling relations can improve the accuracy and error-tolerant ability of the current fault diagnosis methods.

**KEY WORDS:** power systems; fault diagnosis; analytic model; principles of diagnosis; protective relays; alarms

**摘要:** 现代大规模互联电网提高了电力系统运行的稳定性和经济性,同时也给电网的故障诊断增加了难度。对电网保护配置和断路器动作规则进行深入分析,提出一种新的电网故障诊断模型——完全解析模型,并为基于此模型的故障诊断提出一种实用有效的求解方法。在完全解析模型中,故障假设(即可疑故障设备的故障情况)与保护、断路器的动作情况

及拒动和误动情况一同表示成逻辑变量,而保护配置和断路器动作规则以逻辑方程组形式进行充分表达,逻辑方程组的每个解析解对应一个故障模式(设备故障状态和保护动作、断路器跳闸状态及拒动/误动情况),是对故障情形的完整解释。本模型对故障诊断规则和保护、断路器的动作逻辑进行完全解析,并完整保留了故障设备、保护动作和断路器跳闸之间的耦合关系,克服了已有解析模型的缺陷。算例表明,保留完整耦合关系的完全解析模型可有效提高故障诊断的准确性和容错能力。

**关键词:** 电力系统; 故障诊断; 解析模型; 诊断规则; 继电保护; 报警信息

## 0 引言

现代电网规模的扩大和互联性的增强,在提高电力系统可靠性与经济性的同时,也给电网故障的在线诊断增加了难度。目前电网故障诊断的方法主要有专家系统方法<sup>[1-4]</sup>、人工神经网络方法<sup>[5-7]</sup>和解析模型方法,另外还有基于 Petri 网<sup>[8-10]</sup>、粗糙集理论<sup>[11]</sup>和信息理论<sup>[12]</sup>的新方法。专家系统逻辑推理能力较强,但学习能力和容错能力弱,在信息不完整或存在错误的情况下很难得到正确的诊断结论;神经网络法原理相对简单,诊断速度快,有很强的容错能力,但事先需要对大量的故障样本进行离线训练,而对于大规模电网,建立完备故障样本集是非常困难的;基于解析模型的故障诊断方法<sup>[13-17]</sup>是在对故障诊断规则解析化的基础上,将故障诊断问题转化成使目标函数最小化的 0-1 整数规划问题,然后采用优化技术求解,有着严密的数学基础和理论依据。文献[13-14]将电网元件的故障情况与保护、断路器动作之间关系引入目标函数,把故障诊断表示成目标函数的最小化问题,然后采用遗传算法和模拟退火算法求最优解;文献[15-16]先对故

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(10QX34)。

Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (10QX34).

障前后的网络拓扑进行分析,找出停电区域,生成可疑故障设备集,然后基于可疑故障设备集构建故障解析模型,从而减小了寻解的范围和提高了求解速度。然而,文献[15-16]的方法在保护和/或断路器发生拒动尤其是误动的情况下难以保证诊断结果的正确性,且不能对保护和断路器的动作进行评价,无法区分误动和误报及拒动和漏报情况。文献[17]在文献[15-16]的基础上,把保护和断路器的拒动和误动情况均表示成逻辑变量,并与可疑故障设备集中的元件故障情况假设(故障假说)一同当作待优化的参数来求解,模型相对完备,且能对保护和断路器的动作情况(拒动、误动与否)进行评价,然而其扩大了优化参数的维度,增加了求解的时间和难度;另外,在优化参数间的冲突处理机制上,采用在优化模型求解中以查表的方式来规避矛盾的逻辑,这样不便于解析模型的泛化。更重要的是,上述几种解析模型都是把保护和断路器动作的期望表示成实际告警信息与待优化参数的规则函数,通过优化算法使得保护和断路器的动作期望与实际告警信息尽可能地接近,以求得最优参数。当实际告警信息有错误时,如保护或断路器动作的漏报和误报情况,错误的信息会在动作期望的求解中进一步扩散,诊断结论的正确性难以保证。

针对上述模型存在的不足,本文从故障元件、保护动作和断路器跳闸的整体关联性出发,基于诊断规则并考虑保护与断路器的误动和拒动情况,构建一种对故障模式进行整体解析的电网故障完全解析模型。所谓故障模式,就是对故障场景进行完整描述,包括可疑故障设备的故障情况、保护和断路器动作情况以及其拒动和误动情况。故障模式完全由诊断规则来整体刻画,而诊断规则表达为模型参数之间关联关系的逻辑方程,告警信息不体现在模型中,模型参数之间固有的耦合关系得以完整保留。另外,本文通过添加逻辑约束方程,将逻辑矛盾处理机制一同纳入到解析模型设计中。通过上述设计,可降低模型对错误告警的敏感度,提高模型的通用性和泛化程度。

## 1 故障诊断完全解析模型

### 1.1 模型的定义

当电网元件发生故障时,根据保护原理和保护

配置规则,与此元件相关的保护因监测到故障征兆信息而动作,驱动对应的断路器跳闸。如果主保护拒动,则由近后备保护动作;当断路器拒动,则由元件的远后备保护及断路器动作,直至将故障元件隔离,并上报保护动作和断路器跳闸的告警信息。故障诊断的解析模型就是把上述的保护原理和规则用逻辑方程组的形式进行表达,以求解故障模式。故障诊断的完全解析模型可抽象表达成

$$\begin{cases} R = P(S, R, C, M, D) \\ C = Q(S, R, C, M, D) \\ H(S, R, C, M, D) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$  为可疑故障设备集,且  $s_i = 1$  或  $s_i = 0$  分别表示  $S$  中第  $i$  个元件处于故障状态或正常状态,  $N$  为元件的数量;  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$  为与  $S$  相关保护集合,且  $r_i = 1$  或  $r_i = 0$  分别表示  $R$  中第  $i$  个保护动作或未动作,  $Z$  为中保护的数量;  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$  为与  $S$  相关的断路器集合,且  $c_i = 1$  或  $c_i = 0$  分别表示  $C$  中第  $i$  个断路器跳闸或未跳闸,  $K$  为断路器的数量;  $M = \{M_R, M_C\} = \{m_{r_1}, \dots, m_{r_z}, m_{c_1}, \dots, m_{c_k}\}$ ,  $m_{r_i} = 1$  ( $m_{c_i} = 1$ ) 或  $m_{r_i} = 0$  ( $m_{c_i} = 0$ ) 分别表示保护  $r_i$  (断路器  $c_i$ ) 误动或正常;  $D = \{D_R, D_C\} = \{d_{r_1}, \dots, d_{r_z}, d_{c_1}, \dots, d_{c_k}\}$ ,  $d_{r_i} = 1$  ( $d_{c_i} = 1$ ) 或  $d_{r_i} = 0$  ( $d_{c_i} = 0$ ) 分别表示保护  $r_i$  (断路器  $c_i$ ) 拒动或正常。

在式(1)中,第1个方程(组)的  $P$  是保护动作解析类;第2个方程(组)的  $Q$  为断路器跳闸解析类;第3式为矛盾逻辑( $H$ )的约束方程(组)。式(1)的每一个解对应一个故障模式。完全解析模型的构建按保护规则解析和动作状态解析来分层实现。

### 1.2 保护和断路器动作规则解析

保护(断路器)动作的规则解析,即对保护(断路器保护跳闸)的设计初衷进行逻辑表达,是根据继电保护原理要求保护(断路器)作出动作(跳闸)响应的激励,在本解析模型中称之为动作期望。在下文的逻辑运算中:逻辑运算与、或、非分别以符号  $\otimes$ 、 $\oplus$ 、 $\neg$  来表示,且在不影响表达的情况下,  $\otimes$  通常省略。

#### 1) 保护规则解析。

##### ① 主保护。

设  $r_i$  为设备  $s_n$  的主保护,如果设备  $s_n$  故障 ( $s_n = 1$ ),保护  $r_i$  应该动作,其动作期望  $f_{r_i}$  为

$$f_{r_i} = s_n \quad (2)$$

②第 1 后备保护(近后备)。

设  $r_j$  为设备  $s_n$  的第 1 后备保护，如果设备  $s_n$  故障( $s_n=1$ )且其主保护  $r_i$  未动，则  $r_j$  应动作。其动作期望  $f_{r_j}$  为

$$f_{r_j} = s_n \bar{r}_i \quad (3)$$

③第 2 后备保护(远后备)。

设  $r_l$  为设备  $s_n$  的第 2 后备保护，在其保护范围内也为  $s_n$  的邻近设备  $s_x$  提供远后备保护，有 2 种情况  $r_l$  应该动作： $s_n$  故障( $s_n=1$ )且其主保护( $r_i$ )和第 1 后备保护( $r_j$ )未动；设备  $s_x \in Z(r_l, s_n)$  故障，且  $r_l$  到  $s_k$  的关联路径上的所有断路器均处于闭合状态。 $Z(r_l, s_n)$  是  $r_l$  保护范围内  $s_n$  邻近设备的集合， $p(r_l, s_x)$  是沿供电路径从保护  $r_l$  安装处到设备  $s_x$  处的所有断路器的集合。

为此，第 2 后备保护  $r_l$  的动作期望  $f_{r_l}$  为

$$f_{r_l} = s_n \bar{r}_i \bar{r}_j \oplus \sum_{s_x \in Z(r_l, s_n)} (s_x \prod_{c_i \in p(r_l, s_x)} \bar{c}_i) \quad (4)$$

式中： $\Sigma$ 表示逻辑连 $\oplus$ 运算； $\Pi$ 表示逻辑连 $\otimes$ 运算。下同。

④断路器失灵保护。

220 kV 及以上电网的断路器一般装设失灵保护，当有保护  $r_x$  动作并驱动断路器  $c_k$  跳闸，如  $c_k$  未跳，此时断路器失灵保护  $r_k$  应该动作，其动作期望  $f_{r_k}$  为

$$f_{r_k} = \bar{c}_k \sum_{r_x \in R(c_k)} r_x \quad (5)$$

式中  $R(c_k)$  为所有能驱动断路器  $c_k$  跳闸的保护集合。

2) 断路器动作规则解析。

任何能驱动断路器  $c_k$  跳闸的保护  $r_x$  动作，断路器  $c_k$  应该跳闸，其动作期望为

$$f_{c_k} = \sum_{r_x \in R(c_k)} r_x \quad (6)$$

为简化表达式，下文在不引起混淆的前提下，对任意给定保护(断路器)，用  $r(c)$  来表示，下标省略。从式(2)–(6)可看出，保护的期望( $f_r, r \in R$ )和断路器的期望( $f_c, c \in C$ )都是  $S$ 、 $R$ 、 $C$  的显式函数。即  $f_r, f_c \in J, J = \{f | f: (S, R, C) \rightarrow \{0, 1\}\}$ 。式(2)–(6)是按通用的保护和断路器动作规则进行解析的，对于具体的电网，保护和断路器的动作逻辑(规则)可能存在特殊性，需要根据具体的保护配置情况进行解析。例如，对于先进的数字化变电站，可通过解析变电站的配置文件来获取保护和断路器的动

作逻辑。

### 1.3 保护和断路器的动作状态解析

在上述保护规则解析的基础上，考虑保护的拒动和误动情况，并对矛盾的逻辑进行约束。矛盾的逻辑有拒动又误动、动作又拒动、未动又误动、有激励(即动作期望)又误动、无激励又拒动。为此，对任一保护  $r \in R$ ，其动作状态解析为

$$\begin{cases} r = f_r \bar{d}_r \oplus m_r \\ d_r m_r \oplus r d_r \oplus \bar{r} m_r \oplus f_r m_r \oplus \bar{f}_r d_r = 0 \end{cases} \quad (7)$$

同样，考虑到断路器的拒动和误动情况以及对矛盾逻辑的约束。对任一断路器  $c \in C$ ，其跳闸状态解析为

$$\begin{cases} c = f_c \bar{d}_c \oplus m_c \\ d_c m_c \oplus c d_c \oplus \bar{c} m_c \oplus f_c m_c \oplus \bar{f}_c d_c = 0 \end{cases} \quad (8)$$

联立式(7)、(8)，即得到式(1)的完全解析模型的详细表达：

$$\begin{cases} r = f_r \bar{d}_r \oplus m_r \\ d_r m_r \oplus r d_r \oplus \bar{r} m_r \oplus f_r m_r \oplus \bar{f}_r d_r = 0 \\ c = f_c \bar{d}_c \oplus m_c \\ d_c m_c \oplus c d_c \oplus \bar{c} m_c \oplus f_c m_c \oplus \bar{f}_c d_c = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $r \in R; c \in C; f_r, f_c \in J$ 。

显然，完全解析模型包含了保护规则解析和动作状态解析这 2 个层面的解析，它是对故障诊断规则的完整描述。在模型中，保护动作状态( $R$ )、断路器跳闸状态( $C$ )以及他们的拒动( $D_R, D_C$ )和误动( $M_R, M_C$ )通过规则解析( $f_r, f_c$ )而充分耦合。这种耦合关系对提高模型的鲁棒性和故障诊断的容错能力非常有利。完全解析模型能完整保留这种耦合关系，这是与文献[13-17]的几种解析模型的主要不同之处。

### 1.4 S、R 和 C 元素的选定

在完全解析模型中，确定  $S$ 、 $R$ 、 $C$  的内元素十分关键，这影响着模型的维度和求解的效率。电网发生故障后，故障元件对应的保护应该动作，并触发断路器跳闸，形成一片或多片停电区域，故障元件被隔离在停电区域中。因此，停电区域内的电网元件(发电机、母线、变压器、线路、负荷线和电容器等)均有可能是故障元件，即可疑故障设备。故  $S$  取停电区域内的所有电网元件的集合。而对故障元件作出跳闸响应(包括拒动和误动)的断路器是需要分析的对象，其应分布在停电区域内及边界上，边

界一定是跳闸的断路器,故  $C$  取停电区域内及边界上所有的断路器。

为了确定  $R$ , 先定义:  $\mathcal{R}$  为系统中所有保护的集合, 并引入  $S \times \mathcal{R}$  上的二元关系  $v$ :

$$v = \{(s, r) | s \text{ 故障, 可能使 } r \text{ 动作, } s \in S, r \in \mathcal{R}\}$$

再定义:  $C(r) = \{c | r \text{ 动作, 驱动 } c \text{ 跳闸, } c \in C\}$  和  $r \in \mathcal{R}$  为保护  $r$  驱动跳闸的断路器的集合。

令  $R_1 = \{r | (s, r) \in v, s \in S, r \in \mathcal{R}\}$ ,  $R_2 = \{r | r \text{ 是 } c \text{ 的失灵保护, } c \in C, r \in \mathcal{R}\}$ , 则  $R = \{r | C(r) \subseteq C, r \in R_1 \cup R_2\}$ 。

可以看出, 由于  $S$ 、 $R$ 、 $C$  只与停电区域中的设备及其配置的保护有关, 不受电网规模大小的影响。在实际系统应用时, 首先采用电网拓扑分析技术确定故障停电区域, 再运用本文方法进行故障诊断。

## 2 完全解析模型的求解分析

根据文献[18]对逻辑方程组的求解方法, 式(1)可等价变化为

$$\begin{cases} R \otimes \bar{P}(S, R, C, M, D) \oplus \bar{R} \otimes P(S, R, C, M, D) = 0 \\ C \otimes \bar{Q}(S, R, C, M, D) \oplus \bar{C} \otimes Q(S, R, C, M, D) = 0 \\ H(S, R, C, M, D) = 0 \end{cases}$$

继续等价变换如下:

$$\begin{aligned} & R \otimes \bar{P}(S, R, C, M, D) \oplus \bar{R} \otimes P(S, R, C, M, D) + \\ & C \otimes \bar{Q}(S, R, C, M, D) \oplus \bar{C} \otimes Q(S, R, C, M, D) + \\ & H(S, R, C, M, D) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)左边为一逻辑命题公式, 对此命题公式求主析取范式, 主析取范式中的每一个极小项, 均为式(1)的解析解。解析解可写成  $(S, R, C, M, D)$  的形式, 于是式(1)的解集为 ( $n$  为极小项数量)  $\{(S_i, R_i, C_i, M_i, D_i) | 1 \leq i \leq n\}$ 。

如果保护动作和断路器跳闸情况已知, 对应为  $R'$ 、 $C'$ , 且不考虑告警信息中误报和漏报情况, 则故障的解析模式为

$$\Phi = \{(S_i, R_i, C_i, M_i, D_i) | R_i = R', C_i = C', 1 \leq i \leq n\}$$

式中  $\Phi$  为已知保护和断路器动作情况  $R'$ 、 $C'$  后, 完全解析模型(式(1))的解析解的集合。

理论上, 逻辑命题公式的主析取范式是唯一的, 故通过上述方法得到的解集  $\Phi$  即为完全解析模型的完备解集, 即所有可能的故障模式。然而, 将上述方法用于电网故障诊断会面临下述问题:

1) 当可疑故障设备较多时, 解  $(S, R, C, M, D)$  的维数很高(即:  $N+3Z+3K$ ), 求取式(10)左式的主析取范式非常困难。

2) 解析模型存在严重的多解现象。如, 一个可疑故障设备中的非故障设备, 可以通过模型解析为与其相关保护和断路器都拒动的故障设备; 而一个故障设备, 可以解析为与其相关的保护和断路器误动的非故障设备。

针对上述问题, 本文采用优化技术, 将故障诊断问题转换成最能解释告警信息的规划问题, 为描述方便, 把式(9)写成统一的形式:

$$F(S, R, C, M, D) = 0 \quad (11)$$

可见,  $F$  的维数为  $2(Z+K)$ 。以  $G = \{S, R, C, M, D\}$  为参变量, 规划的目标函数为

$$\begin{aligned} E(G) = & \sum_{i=1}^Z \|r_i = r'_i\| + \sum_{i=1}^K \|c_i = c'_i\| + w_1 \sum_{i=1}^{Z+K} \|d_i\| + \\ & w_2 \sum_{i=1}^{Z+K} \|m_i\| + w_3 \sum_{i=1}^{2Z+2K} \|F_i(S, R, C, M, D)\| \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\|\cdot\|$  为逻辑变量的范数 ( $\|1\|=1$ 、 $\|0\|=0$ ); 等式右侧的第 1、2 项分别为保护、断路器的动作状态与实际告警值的差异, 反映告警信息的误报和漏报情况; 等式右侧的第 3、4 项为保护和断路器的拒动、误动情况, 第 5 项模型约束;  $w_1$ 、 $w_2$  分别为保护和断路器的拒动、误动相对权值(相对于告警信息误报和漏报);  $w_3$  为解析模型的保障系数, 其取值须满足  $w_3 \gg 1$  且  $w_3 \gg w_1, w_2$ 。

利用优化技术使目标函数  $E(G)$  最小化以求得最优解  $G$ ,  $G$  即为诊断出的故障模式。 $G$  中  $S$  用作诊断结果;  $M$ 、 $D$  用作对保护、断路器的动作评价; 将保护、断路器动作的状态  $R$ 、 $C$  与收到的告警信息  $R'$ 、 $C'$  比照, 可得出对告警信息的评价: 对于  $r'_i \in R'$  (对于  $c'_i \in C'$ , 亦同), 如果  $r'_i = 1$  且  $r_i = 0$ , 则  $r'_i$  为误报; 如果  $r'_i = 0$  且  $r_i = 1$ , 则  $r'_i$  为漏报; 如果  $r'_i = r_i = 1$  或者  $r'_i = r_i = 0$ , 则  $r'_i$  为正确。

另外, 在实际应用中, 对同一个保护或断路器, 发生误动同时其告警信息漏报, 或者发生拒动时告警信息误报, 这 2 种情况均为小概率事件。为了降低优化参量  $G$  的维度, 可做如下假设:

根据实际告警信息  $R'$ 、 $C'$ , 对于保护  $r_i \in R$ , 有

$$\begin{cases} m_{r_i} = 0, & r'_i = 0 \\ d_{r_i} = 0, & r'_i = 1 \end{cases} \quad (13)$$

同理，对于断路器对于  $c_i \in C$ ，有

$$\begin{cases} m_{c_i} = 0, & c'_i = 0 \\ d_{c_i} = 0, & c'_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

经过式(13)、(14)的处理后，则在参变量  $G$  的  $M$  和  $D$  中，分别有  $Z$  和  $K$  个值可以确定，相应地降低了优化参数的维度。

### 3 采用改进离散粒子群算法的模型求解

#### 3.1 改进的离散粒子群算法

粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)<sup>[19]</sup>是一种由 Kennedy 和 Eberhart 博士根据鸟群觅食的仿生原理而提出的智能优化算法，具体鲁棒性好、收敛速度快、寻优效率高等特点。该算法先初始化一群(个数为  $N$ )随机粒子(维数为  $D$ )，然后用适应度函数衡量粒子的优劣，并进行迭代寻优，在每一次迭代中，粒子  $i(1 \leq i \leq N)$  根据式(15)来调整自己的速度  $v_i=(v_{i,1}, \dots, v_{i,d}, \dots, v_{i,D})$  和位置  $x_i=(x_{i,1}, \dots, x_{i,d}, \dots, x_{i,D})$ ：

$$\begin{cases} v_{i,d}(t+1) = v_{i,d}(t) + \varphi(p_{i,d} - x_{i,d}) + \varphi(p_{g,d} - x_{i,d}) \\ x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \end{cases} \quad (15)$$

经  $t$  次迭代后，粒子  $i$  所找到过的最佳位置  $(p_{i,1}, \dots, p_{i,d}, \dots, p_{i,D})$  为个体极值；所有粒子找到过的最佳位置  $(p_{g,1}, \dots, p_{g,d}, \dots, p_{g,D})$  为群体极值，粒子通过跟踪这 2 个“极值”来更新自己的速度和位置。粒子的位置对应于问题的解，群体极值就是问题的最优解。但在离散型解空间中，由于位置只能取值“0”或“1”， $v_{i,d}$  不再具有类似在连续型解空间中的速度意义，而是被引申为粒子位置进一步演化的概率<sup>[20]</sup>。显然， $v_{i,d}(t)$  与  $v_{i,d}(t+1)$  并不相关。

参照离散粒子群算法<sup>[20]</sup>的思想，同时考虑到本文的求解特点，引入遗传算法中的变异操作，以增强局部搜索能力。对 PSO 算法进行部分修改如下：

$$v_{i,d}(t+1) = a_1 h_{1,d}(t) [p_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)] + a_2 h_{2,d}(t) [p_{g,d}(t) - x_{i,d}(t)]$$

1) 如果  $S[h_{1,d}(t) < v_{i,d}(t+1)]$ ，那么  $x'_{i,d}(t+1) \neq x_{i,d}(t)$ ；否则， $x'_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t)$ 。

2) 如果  $h'_{1,d}(t) < R[x'_{i,d}(t+1)]$ ，那么  $x_{i,d}(t+1) \neq x'_{i,d}(t+1)$ ；否则， $x_{i,d}(t+1) = x'_{i,d}(t+1)$ 。

上述算法中： $a_1$ 、 $a_2$  是加速系数，通常  $0 \leq a_1$ ， $a_2 \leq 2$ ； $h_{1,d}(t)$ 、 $h_{2,d}(t)$ 、 $h'_{1,d}(t)$ 、 $h'_{2,d}(t)$  是介于(0,1)之间

的伪随机数，用来调节算法的随机过程； $S(v)=1-1/e^{|v|}$ ，为粒子的演化概率； $T(x)=1-1/\{1+\ln[1+f(x)]\}$  为突变概率， $f(x)$  是粒子的适应度函数，适应度函数取式(12)，粒子  $x$  取  $(S,R,C,M,D)$ ，经过式(13)、(14)处理后的部分值保持不变。

#### 3.2 基于完全解析模型的故障诊断过程

根据上文的建模和求解思路，将故障诊断的流程归纳如下：

- 1) 从故障后停电区域中，选出可疑故障设备集  $S$  和待解析的断路器集合  $C$ 。
- 2) 根据  $S$ 、 $C$  确定待解析的保护集合  $R$ 。
- 3) 对  $R$ 、 $C$  内的保护规则进行解析，得  $f_r$  及  $f_c$ 。其中  $r \in R$ ， $c \in C$ ， $f_r$ ， $f_c \in J$ 。
- 4) 构建故障诊断完全解析模型式(9)，并转换成式(11)的形式。
- 5) 根据收到的告警信息  $R'$ 、 $C'$ ，按式(13)、(14)处理以降低参变量的维度。
- 6) 以式(12)为目标函数，用改进离散粒子群优化算法进行求解。
- 7) 求得的最优解  $(S^*, R^*, C^*, M^*, D^*)$  即为诊断出的故障模式，其中  $S^*$  为故障诊断结论， $M^*$  和  $D^*$  为对保护、断路器的动作评价。
- 8) 对比  $R^*$ 、 $C^*$  和  $R'$ 、 $C'$ ，并对保护和断路器的告警信息进行评价。

### 4 算例分析与验证

#### 4.1 算例系统

以图 1 的测试系统为例，系统中有 28 个元件、40 个断路器、124 个保护：

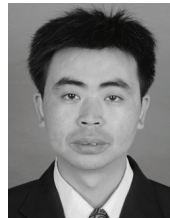
- 1) 28 个元件。A1, ..., A4; T1, ..., T8; B1, ..., B8; L1, ..., L8。
- 2) 40 个断路器。QF1, QF2, ..., QF40。
- 3) 124 个保护中有 36 个主保护(A1m, ..., A4m; T1m, ..., T8m; B1m, ..., B8m; L1Sm, L1Rm, ..., L8Sm, L8Rm)、48 个后备保护(T1p, ..., T8p; L1Sp, L1Rp, ..., L8Sp, L8Rp; L1Ss, L1Rs, ..., L8Ss, L8Rs)和 40 个断路器失灵保护(QF1f, QF2f, ..., QF40f)。

其中：A、B 表示母线，T 表示变压器，L 表示线路，S、R 分别表示线路的首、末端(从上到下，从左到右来定义线路首、末端)，m 表示主保护，p 表示第 1 后备保护，s 表示第 2 后备保护，f 表示断





- fault diagnosis modeling techniques based on encoded Petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 44-49(in Chinese).
- [10] 孙静, 秦世引, 宋永华. 模糊 Petri 网在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 74-79.  
Sun Jing, Qin Shiyin, Song Yonghua. Fuzzy Petri nets and its application in the fault diagnosis of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 74-79(in Chinese).
- [11] 袁文杰, 曲朝阳, 李月玲, 等. 基于 Tabu-Roughset 的电网故障诊断系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 32-35.  
Yuan Wenjie, Qu Zhaoyang, Li Yueling, et al. Research on fault diagnosis system of power network based on Tabu-Roughset[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 32-35(in Chinese).
- [12] 汤磊, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于信息理论的电力系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 5-11.  
Tang Lei, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Online fault diagnosis for power system based on information theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 5-11(in Chinese).
- [13] Dy Liacco T E, Kraynak T J. Processing by logic programming of circuit-breaker and protective-relaying information[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(2): 171-175.
- [14] 文福拴, 韩祯祥. 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(3): 29-35.  
Wen Fushuan, Han Zhenxiang. Fault section estimation in power systems using genetic algorithm and simulated annealing[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(3): 29-35(in Chinese).
- [15] 文福拴, 韩祯祥, 钱源平. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(3): 1-7.  
Wen Fushuan, Han Zhenxiang, Qian Yuanping, et al. An analytic and genetic algorithm based methods for fault diagnosis in power systems[J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10(3): 1-7(in Chinese).
- [16] 刘青山. 电力系统故障诊断及故障恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 89-100.  
Liu Qingshan. Power system fault diagnosis and fault recovery[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 89-100(in Chinese).
- [17] 郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 计及保护和断路器误动与拒动的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 6-10.  
Guo Wenxin, Wen Fushuan, Liao Zhiwei, et al. A analytic model for power system fault diagnosis with malfunctions of protective relays and circuit breakers taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 6-10(in Chinese).
- [18] 王道林. 线性逻辑方程组的解[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(5): 1195-1198.  
Wang Daolin. Solutions of linear logical equations [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(5): 1195-1198(in Chinese).
- [19] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [20] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Computational Cybernetics and Simulation. New York, USA: IEEE, 1997: 4104-4108.



刘道兵

收稿日期: 2011-07-27。

作者简介:

刘道兵(1975), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用, liudb@sohu.com;

顾雪平(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、在线稳定评估与决策、智能电网;

李海鹏(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用。

(责任编辑 谷子)