

计及警报信息时间特性的故障诊断模型

文福拴 韩祯祥

(浙江大学电机系 310027 杭州)

摘要 电力系统发生故障时的警报信息具有时间特性,如果能够充分与合理地利用这一特性,可以提高故障诊断结果的准确性和加快诊断速度。但至今,还没有一个电力系统故障诊断方法能够系统地处理警报信息的时间特性。以外展推理(abductive inference)和简洁覆盖集理论(parsimonious set covering theory)为基础,对计及警报信息时间特性的电力系统故障诊断问题做了一些初步的研究工作。采用时间图表示元件故障与警报信息及其时间特性之间的关系,时间图中的节点表示警报信息,节点间的有向支路表示这两个节点所代表的警报信息出现的先后次序。在此基础上,首次建立了描述这一问题的优化模型(0-1 整数规划模型),给出了用 Tabu 搜索技术求解该问题的算法。最后,用一个简单的例子说明了所建立的故障诊断模型的正确性和 Tabu 搜索方法的可行性。

关键词 电力系统 故障诊断 外展推理 Tabu 搜索 简洁覆盖集理论

分类号 TM 764 TP 18

0 引言

电力系统的故障诊断就是利用保护和断路器的动作信息识别发生故障的元件,识别误动作的保护与断路器。目前已有多种方法,如逻辑处理方法^[1]、专家系统方法^[2]、人工神经网络方法^[3]等。近几年来,我们在基于优化方法的电力系统故障诊断方面做了大量系统的研究工作^[4~12],构造了故障诊断的多种解析模型,提出了有效的求解方法,并开发了实用化的软件。

电力系统发生故障时的警报信息具有时间特性^[13]。如果能够充分利用这些时间信息,可以提高故障诊断结果的准确性和加快诊断速度。如何对我们所发展的故障诊断的数学模型^[4~12]进行改进,以计及警报信息的时间特性,是一个很值得研究的问题。本文为解决这一问题做了一些初步的、基础性的研究工作。基于外展推理和简洁覆盖集理论,构造了能够处理警报信息时间特性的故障诊断的一种解析模型,并将其描述为优化问题。虽然本文构造的诊断模型并不是直接面向电力系统的,但其方法框架可容纳电力系统警报信息的时间特性,且与我们以前发展的电力系统故障诊断的模型及方法^[4~12]是相容的。

1 外展推理与简洁覆盖集理论

近年来,以外展推理为基础的诊断方法在国际

上受到了比较普遍的重视。在这一领域中的一个引人注目的工作是由 Peng 和 Reggia 所发展的以简洁覆盖集理论为基础的方法^[14]。在这种方法的框架下,故障诊断问题被定义为一个四元组: $\langle D, M, C, M^+ \rangle$ 。该四元组中各符号的含义如下。

$D = [d_1, \dots, d_n]$ 为待诊断的系统中所包含的所有 n 个元件的集合。本文将 D 表示为有 n 个元素的向量的形式,用作诊断假说。 D 中的每个元素取值为 1(如果相应的元件被假定为故障元件),或 0(如果相应的元件被假定为无故障元件)。

$M = [m_1, \dots, m_k]$ 为待诊断的系统中所配置的所有 k 个警报的集合。本文将 M 表示为有 k 个元素的向量的形式。 M 中的每个元素取值为 1(如果相应的警报出现),或 0(如果相应的警报没有出现)。

C 表示元件故障和相应的警报信息之间的因果关系。本文将 C 表示为 $n \times k$ 矩阵形式。 C 中的每个元素 c_{ij} 取值为 1(如果 d_i 故障可直接引起警报 m_j 的出现),或 0(如果 d_i 故障不会直接引起警报 m_j 的出现)。

M^+ 是 M 的子集,表示实际出现的警报的集合。 M^+ 中不包括的警报被认为没有出现。

为便于介绍,先给出下面几个定义^[14]:

$$E(d_i) = \{m_j | c_{ij} = 1\}$$

$$U(m_j) = \{d_i | c_{ij} = 1\}$$

对于任何 $D_I \subseteq D, E(D_I) = \bigcup \{E(d_i), d_i \in D_I\}$ 。

对于任何 $M_J \subseteq M, U(M_J) = \bigcup \{U(m_j), m_j \in M_J\}$ 。

如果 $M_J \subseteq E(D_I)$,则称 D_I 为 M_J 的一个覆盖

(cover)。对于任给的 M_j , 可能存在很多它的覆盖。

前已述及, 诊断系统中发生故障的元件就是要找出最能解释警报信息的故障假说, 这样就需要定义一些指标来反映是否一个诊断假说可以解释所报道的警报。

Peng 和 Reggia 所发展的外展推理模型^[14]以简洁覆盖集理论为基础。这种方法的前提是任何合理的诊断假说必须是 M^+ 的一个覆盖 D_I , 也就是说必须能够解释 M^+ 中的所有故障。另一方面, 并非 M^+ 的所有覆盖所表示的诊断假说都同样合理。这样就需要一个指标来描述诊断假说的合理性。迄今已提出了多种指标, 如: ①单故障元件指标, 即一个合理的诊断假说 D_I 必须是 M^+ 的一个覆盖, 且只包含一个故障元件; ②相关性指标, 即一个合理的诊断假说 D_I 必须是 M^+ 的一个覆盖, 且 D_I 中所包含的每个故障元件必须能够引起 M^+ 中至少一个警报出现; ③不冗余指标, 即一个合理的诊断假说 D_I 必须是 M^+ 的一个覆盖, 且 D_I 的所有子集均非 M^+ 的覆盖; ④最小性指标, 即一个合理的诊断假说 D_I 是 M^+ 所有覆盖中包含最小数目的故障元件的那(些)个覆盖。

对于很多工业系统的故障诊断问题, 上述单故障元件指标不适用。这是由于两个以上的元件可同时发生故障。相关性指标不是一个好的指标, 它太松散, 会导致很多解(这样得不到明确的结论, 当然是不希望的)。不冗余指标和最小性指标是比较常用的两种指标。本文构造的模型中采用了最小性指标。

2 计及警报信息时间特性的故障诊断

2.1 故障诊断的外展推理模型

由 Peng 和 Reggia 所发展的上述外展推理模型不能处理警报信息的时间特性。以文献[15]的工作为基础, 本节构造了可以处理警报信息时间特性的故障诊断的数学模型, 并将其表示为优化问题。

警报信息的时间特性可以用图表示出来(下面将这种图称为时间图), 每个元件对应于一个时间图。在时间图中, 节点表示警报信息, 节点间的有向支路表示这两个节点所代表的警报信息出现的先后次序。如果两个警报信息间有一个时间间隔, 则在相应的两个节点之间的有向支路上用一个区间表示。

定义 1 每一个元件 $d_i \in D$, 其相应的时间图 $G_i = (V_i, A_i)$ 是一个有向图。其中, $V_i \subseteq M$ 是 d_i 发生故障时可引起的警报信息的集合, 在时间图中用节点表示; $A_i = \{(m_i, m_j) | d_i \text{ 发生故障时, 警报信息 } m_i \text{ 在 } m_j \text{ 前出现}\}$, 表示时间图中的有向支路(由 m_i 指向 m_j)。

在时间图中, 用 t_{DUR} 表示某个警报可持续的时间, t_{DIST} 表示两个警报出现的时间间隔。 t_{DIST} 是一个区间函数 $R = [R^-, R^+]$, 对应于 A_i 中的每个有向支路。对于 $(m_i, m_j) \in A_i$, $t_{\text{DIST}}(G_i, (m_i, m_j)) = R$, 缩写为 $t_{\text{DIST}_i}(m_i, m_j) = R$, 这表示在 G_i 中 m_j 和 m_i 出现的时间间隔必须在 R 之内。 $t_{\text{DUR}_i}(m) = J$ 表示 V_i 中的警报信息 m 可持续的时间在 J 之内。

定义 2 考虑警报信息的时间特性后, 故障诊断问题可表示为一个八元组: $\langle D, M, G, t_{\text{DIST}}, t_{\text{DUR}}, M^+, M_{\text{BEG}}^+, M_{\text{DUR}}^+ \rangle$ 。 D, M 和 M^+ 的含义已在第 1 节中定义。 G 为对应于 n 个元件的时间图的集合。与 M^+ 类似, M_{BEG}^+ 和 M_{DUR}^+ 表示故障案例的信息。 $M_{\text{BEG}}^+(m) = I$ 表示警报 m 在 I 表示的时间区间中出现。 $M_{\text{DUR}}^+(m) = L$ 表示警报 m 持续的时间区间为 L 。

定义 3 对于故障诊断问题 P , 其 d_i 的时间图为 $G_i = (V_i, A_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $(m_i, m_j) \in A_i$; $m_i, m_j \in M^+$ 。如果

$$(M_{\text{BEG}}^+(m_i) + t_{\text{DIST}_i}(m_i, m_j)) \cap M_{\text{BEG}}^+(m_j) = \emptyset$$

则称时间图 G_i 中的有向支路 (m_i, m_j) 与诊断案例中的警报信息的时间特性不一致。称这种不一致为 A_i 的不一致。

定义 4 对于故障诊断问题 P , 其 d_i 的时间图为 $G_i = (V_i, A_i)$, 诊断案例信息为 $CA = \langle M^+, M_{\text{BEG}}^+, M_{\text{DUR}}^+ \rangle$ 。如果 A_i 中至少存在一个有向支路, 例如 (m_i, m_j) , 与诊断案例中的警报信息的时间特性不一致; 或 V_i 中至少存在一个节点, 例如 $m, m \in M^+$ 且 $t_{\text{DUR}_i}(m) \cap M_{\text{DUR}}^+(m) = \emptyset$ (称此为 V_i 的不一致), 则称 d_i 与 CA 所表示的诊断案例中的警报信息在时间特性上不一致。

定义 5 当满足下述条件时, 称集合 D^* 为故障诊断问题 P 的解:

- D^* 是 M^+ 的一个覆盖;
- 对于所有 $d_i \in D^*$, d_i 与 CA 所表示的诊断案例中的警报信息在时间特性上不存在不一致问题;
- D^* 满足某种简洁性指标(本文采用最小性指标)。

至此, 故障诊断问题可以被描述为: 寻找一个用 D^* 表示的故障假说, 它同时满足定义 5 中的 3 个条件。数学上, 这个问题可以描述为一个无约束 0-1 整数规划问题:

$$\min f(D) = w_1 |\nabla M(D)| + w_2 T(D) + w_3 R(D) \quad (1)$$

式中 $\nabla M(D)$ 是一个 k 维向量, 其状态由另两个向量, 即 M_r 和 $M_s(D)$ 确定。

M_r 为警报的实际状态(即出现与否)。 M_r 中的

每个元素取值 0 或 1, 分别表示该警报没有出现和已经出现。 M_r 和 M^+ 之间的区别在于 M_r 是一个 k 维向量, 而 M^+ 则为出现的警报的集合。 M_r 中对应于 M^+ 中的元素为 1, 其他为 0。

$M_r(D)$ 为一个 k 维向量, 表示当 D 中取值为 1 的元素代表的元件发生故障后, 应出现的警报模式。 $M_r(D)$ 中每个元素的取值为 0 或 1, 分别表示相应的警报不应出现或应该出现。

$\nabla M(D)$ 用下述方法确定: 如果 $M_r(D)$ 中的第 j 个元素不小于 M_r 中的第 j 个元素, 那么赋给 $\nabla M(D)$ 中的第 j 个元素为 0, 否则为 1。 $|\nabla M(D)|$ 表示 $\nabla M(D)$ 中的非零元素的数目。

$|\nabla M(D)|$ 反映 D 是否为 M_r 的一个覆盖, 如果是, 则 $|\nabla M(D)|=0$, 否则 $|\nabla M(D)|$ 反映 D 与一个最邻近的 M_r 的覆盖的接近程度。 $|\nabla M(D)|$ 越小, D 越接近于 M_r 的一个覆盖。 $T(D)$ 是一个用于反映 D 所表示的诊断假说与诊断案例中的警报信息在时间特性上是否一致的指标。当两者一致时, $T(D)=0$ 。 $T(D)$ 用下述方法计算。

首先, 置 $T(D)=0$ 。

对于 D 中的每个 d_i (对应于 D 中元素为 1 的元件), 根据其时间图和上述的定义 3 与定义 4, 以及已知的诊断案例信息 $CA=\langle M^+, M_{\text{BEG}}^+, M_{\text{DUR}}^+ \rangle$, 重复下述步骤: ① 依次检查 A_i 中的每个有向支路与 CA 是否一致。如果不一致, 则置 $T(D)=T(D)+1$ 。② 依次检查 V_i 中的每个警报 m (对应于一个节点) 的 $t_{\text{DUR}_i}(m)$ 与 $M_{\text{DUR}}^+(m)$ 是否一致。如果不一致, 则置 $T(D)=T(D)+1$ 。

$R(D)$ 是一个用于反映 D 是否为 M^+ 的最小覆盖的指标, 其等于 D 中的非零元素的数目。

式(1)等号右边的 3 项依次反映了对故障诊断问题的解的 3 个要求, 即诊断假说的覆盖性、警报信息的时间特性的一致性和诊断假说的简洁性。 w_1, w_2, w_3 均为正的加权系数, 用以反映上述 3 个要求的相对重要性。这 3 个要求的重要性应依次下降, 因此, w_1, w_2, w_3 的取值应依次减小。我们给定 w_1, w_2, w_3 分别为 10 000, 100, 1。

剩下的问题是如何在 M^+ 已知的情况下, 利用式(1)求得使 $f(D)$ 最小的 D , 这是一个无约束 0-1 整数规划问题。可以采用一种有效的启发式方法, 即 Tabu 搜索(TS)方法, 来求解这一问题。

2.2 故障诊断的 Tabu 搜索方法

文献[16]对 Tabu 搜索方法的工作过程作了比较详细的介绍, 为节省篇幅, 不再重复。下面只给出用 Tabu 搜索方法求解使式(1)最小化的步骤。

a. 用随机方法产生初始(当前)解 D^* , 置迭代次数 $t=0$, 置最好解向量 $D^{\text{best}}=D^*$ 。

b. 如果 t 等于给定的最大允许迭代次数 t_{max} , 则输出 D^{best} 作为最终结果后停止; 否则, 置 $t=t+1$, 转步骤 c。

c. 计算 $f(D^*)$ 。

d. 将文献[16]中介绍的“移动”依次作用于 D^* , 产生一个试验解 D^{trial} , 并计算 $f(D^{\text{trial}})$ 。重复此过程, 直至给定的邻居抽样数(即每次迭代中产生试验解的数目) S_{max} 已经达到。

e. 如果 D^{best} 没有上一步产生的最好的试验解好, 则用该试验解更新 D^{best} ; 否则, 转步骤 f。

f. 如果步骤 d 中产生最好试验解的“移动”不在 Tabu 表中, 或虽在 Tabu 表中但已达到其释放水平, 则用该试验解更新 D^* 。之后, 将产生该最好试验解有关的“移动”的反方向“移动”存入 Tabu 表中, 并转步骤 b。如果产生该最好试验解的“移动”在 Tabu 表中且未达到其释放水平, 则考察仅次于该最好试验解的另一个试验解, 并重复此过程。

3 简单例子

下面用一个简单的例子来说明所构造的故障诊断模型的正确性和以 Tabu 搜索为基础的方法的可行性。该算例系统包含 10 个元件, 共配置了 10 个警报信息。图 1 列出了 10 个元件分别发生故障时相应的时间图。测试了多种情况, 结果全部正确。为节省篇幅, 这里给出下述 3 种测试情况的诊断结果。

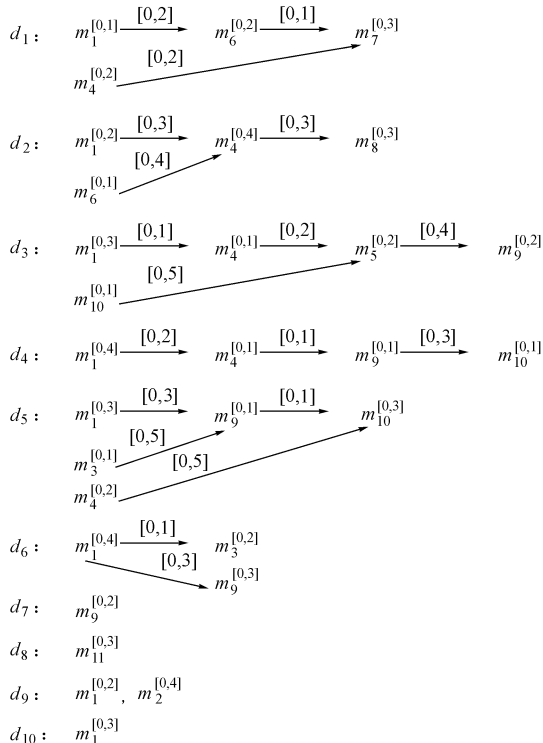
测试情况 1: 警报信息为 m_1 和 m_9 。 $M_{\text{BEG}}^+(m_1)=0, M_{\text{DUR}}^+(m_1)=2.5, M_{\text{BEG}}^+(m_9)=0, M_{\text{DUR}}^+(m_9)=1.5$ 。诊断结果为 d_7 和 d_{10} 故障。

测试情况 2: 警报信息为 m_1 和 m_9 。 $M_{\text{BEG}}^+(m_1)=0, M_{\text{DUR}}^+(m_1)=3.5, M_{\text{BEG}}^+(m_9)=2.5, M_{\text{DUR}}^+(m_9)=1.5$ 。诊断结果为 d_6 故障。

测试情况 3: 警报信息为 m_1, m_4 和 m_6 。 $M_{\text{BEG}}^+(m_1)=0, M_{\text{DUR}}^+(m_1)=1.5, M_{\text{BEG}}^+(m_6)=0, M_{\text{DUR}}^+(m_6)=1, M_{\text{BEG}}^+(m_4)=2, M_{\text{DUR}}^+(m_4)=3$ 。诊断结果为 d_2 故障。

4 结语

以外展推理和简洁覆盖集理论为基础, 本文构造了能够处理警报信息时间特性的故障诊断的一种新的数学模型, 并将其描述为 0-1 整数规划问题。采用了 Tabu 搜索方法求解这一优化问题, 并用一个简单的例子说明了所构造的故障诊断模型的正确性和以 Tabu 搜索为基础的方法的可行性。



对应于每个警报信号右上角的区间表示 t_{DUR} 函数, 而对应于各个支路的区间则表示 t_{DIST} 函数。

图 1 时间图
Fig. 1 The time chart

虽然本文构造的诊断模型相当初步, 也不是直接面向电力系统的, 但其方法框架可容纳电力系统警报信息的时间特性, 且与我们以前发展的电力系统故障诊断的模型及方法相容。以本文的工作为基础, 我们正在构造能够处理电力系统警报信息时间特性的故障诊断模型。

参考文献

- 1 Dy Liacco T E, Kraynak T J. Processing by Logic Programming of Circuit-Breaker and Protective-Relaying Information. IEEE Trans on PAS, 1969, 88(2): 171~175
- 2 Fukui C, Kawakami J. An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers. IEEE Trans on PWRD, 1986, 1(4): 83~90
- 3 Tanaka H, Matsuda S, Izui Y, et al. Design and Evaluation of Neural Network for Fault Diagnosis. In: Proceedings of Second Symposium on Expert System Application to Power Systems (ESAP'89). Seattle: 1989. 378~384
- 4 Wen Fushuan, Han Zhenxiang. Fault Section Estimation in Power Systems Using a Genetic Algorithm. Journal of Electric Power Systems

- Research, 1995, 34(3): 165~172
- 5 Wen Fushuan, Han Zhenxiang. A Refined Genetic Algorithm for Fault Section Estimation in Power Systems Using the Time Sequence Information of Circuit Breakers. Journal of Electric Machines and Power Systems, 1996, 24(8): 801~815
- 6 Wen Fushuan, Chang C S. A New Approach to Fault Section Estimation in Power Systems Based Upon the Set Covering Theory and a Refined Genetic Algorithm. In: Proceedings of 12th Power Systems Computation Conference (PSCC'96). Dresden (Germany): 1996. 358~365
- 7 Wen Fushuan, Chang C S. A New Approach to Fault Diagnosis in Electrical Distribution Networks Using a Genetic Algorithm. Journal of Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(1): 69~80
- 8 Wen Fushuan, Chang C S. Probabilistic Approach for Fault-Section Estimation in Power Systems Based Upon a Refined Genetic Algorithm. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(2): 160~168
- 9 Wen Fushuan, Chang C S. A Tabu Search Approach to Fault Section Estimation in Power Systems. Journal of Electric Power Systems Research, 1997, 40(1): 63~73
- 10 Wen Fushuan, Chang C S. Possibilistic Diagnosis Theory for Fault-Section Estimation and State Identification of Unobserved Protective Relays Using Tabu Search Method. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(6): 722~730
- 11 Wen Fushuan, Chang C S. A New Method for Diagnostic Problem Solving Based on a Fuzzy Abductive Inference Model and the Tabu Search Approach. Journal of Artificial Intelligence in Engineering, 1999, 13(1): 83~90
- 12 文福拴, 韩祯祥, 田磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法(一, 二, 三). 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(3): 1~14
- 13 Vale Z A, Ramos C. Temporal Reasoning Methodologies Used in AI Applications for Power System Control Centers. In: Proceedings of 1996 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP'96). Orlando (USA): 1996. 357~361
- 14 Peng Y, Reggia J A. Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving. New York: Springer-Verlag, 1990
- 15 Wainer J, Rezende A M. A Temporal Extension to the Parsimonious Covering Theory. Artificial Intelligence in Medicine. 1997, 10(2): 235~255

