

诊断专家系统在开关柜状态监测中的应用

廖力清, 曹强, 凌玉华, 蔡素雄

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 状态监测是开关柜智能化的重要内容, 而智能化日渐成为开关柜的一个重要发展方向。首先探讨了智能化状态监测的重要意义; 然后将诊断专家系统引入到了开关柜状态监测中, 并分析了应用中的一些关键技术; 最后以温度监测为例, 说明了诊断专家系统建立的过程。

关键词: 诊断专家系统; 开关柜; 状态监测; 智能化

中图分类号: TM643 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)12-0043-05

0 引言

开关电器在电力系统中起着控制和保护等重要作用。随着电力系统自动化水平的不断提高, 要求开关电器逐步实现智能化, 能够与变电站综合自动化、配电自动化的发展相适应和配套。智能化开关电器是在传统的开关设备中引入计算机技术、数字处理技术和网络通信技术而发展起来的新一代开关电器。智能化日渐成为开关电器的一个重要发展方向。无论是高压电器还是低压电器, 无论是电器元件还是成套开关设备, 都出现了智能化的发展趋势。开关柜是机、电、磁三种相结合的复杂装置, 为了提高其工作的可靠性, 对柜体自身工作状态的监测与控制就变得十分重要, 它是开关柜智能化的重要内容。但是开关柜本身、开关柜控制对象和开关柜组成的电力网三者都具有物理过程的复杂性、不确定性和模糊性, 难以有精确的数学模型, 所以开关柜的状态监测需要采用各种先进理论和技术, 通过感知、学习、记忆和大范围的自适应手段来进行有效的处理和控制, 以便各方面都基本达到最佳性能指标。

1 智能化状态监测的重要意义

状态监测是以设备当前的实际工作状况为依据, 通过先进的状态监测和诊断手段、可靠性评价手段以及寿命预测手段, 判断设备的状态、识别故障的早期征兆、对故障部位及其严重程度和故障发展趋势做出判断, 并根据分析诊断结果, 在设备性能下降到一定程度或故障将要发生之前主动实施维修。为电气设备安全、稳定、长周期、全性能、优质运行提供了可靠的技术和管理保障。

状态检测的主要工作就是对状态数据、判据、规程以及运行经验等进行分析比较, 对设备的状态及

故障部位做出判断, 为采取进一步措施 (如是否退出运行、安排维修计划等) 提供依据, 必要时提供预警。状态监测的关键是对设备状态的判断, 不仅要识别已经发生的故障, 而且预测未来可能发生的故障。在诊断单元中, 对于简单的故障, 只用一般的判断方法就可以达到目的。如果对于比较复杂的问题, 简单的判断是不能满足要求的, 特别是复杂的设备, 如发电机、变压器、大型开关柜出现故障时, 故障关系比较复杂。解决这些问题, 需要大量的规则、知识, 甚至还伴随着许多模糊关系, 这样常规的推理判断就很难达到预期的目的。一些常规的计算程序和分析程序无能为力或不够有效。因为在这些问题中, 人类专家的经验起着主导作用。而专家系统正是产生于这种需求, 它能综合应用人类专家的知识, 又能不受地域和时间的限制, 快速、准确地诊断出故障。目前, 专家系统技术已经成功运用到了电力设备和发电设备的状态检修中, 对电力设备的智能化产生了深远的影响。

2 诊断专家系统的知识表示

专家系统是利用知识和推理过程来解决需要大量的经验才能求解的复杂问题。一般的专家系统包括四个部分: 知识库、推理机、综合数据库、人机界面。归纳来说诊断专家系统的工作过程为: 系统对所采集的状态信息数据进行处理, 将特征数据送入综合数据库, 然后依据知识库中对应的诊断知识, 由推理机采用其相应的推理方式, 对设备的运行状态做出判别, 并由解释模块按照其对应解释性知识对其诊断结果做出解释。典型的专家系统结构如图 1 所示。

专家系统必须具备有丰富的知识, 而且知识必须以一定的模式表示出来并存储到计算机中, 才能

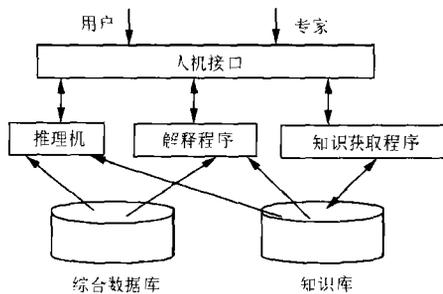


图 1 典型专家系统结构图

Fig 1 Typical expert system architecture

被专家系统运用。合理的知识表示与专家系统解决问题的能力密切相关,它不仅能提高专家系统知识库结构的紧凑性、程序模块设计的简便性、知识库的易维护性,而且也影响专家系统解决问题的效率,因此知识表示是构造专家系统最关键、最基本的问题。

目前比较成功应用于诊断领域的知识表示形式包括产生式表示法和框架表示法。但每一种表示方法都有局限性。产生式表示法是基于规则的表示形式,适合表层知识的有效表达,但对其前提和结论之间联系不能做出原理性解释。框架表示法是以物体和状况等为对象,用一定的结构表示的数据结构,由槽元素集合组成,能对所表达的有关事项的各种知识进行有效描述。

产生式表示法将任何一种故障与某种或某几种症状存在的确定或不确定的对应关系描述出来,并将诊断知识的内涵有效表达出来。而框架表示方法能从不同的侧面对各种事物及知识进行全面描述,对于产生式表示方式是一个很好的补充。它不但能对所描述的每一条规则做出原理性的解释,而且可以通过框架的指针按照知识库结构要求将诊断知识连接成一个完整的网络系统。采用诊断知识的“规则+框架”复合表示形式,可以将框架和规则联合起来,把规则作为框架的数据,以规则为主,框架为辅。利用规则表示经验性诊断知识的基本内容,利用框架其它槽来说明知识的归属并对规则性知识做出原理性解释。并通过知识归属性的说明将所有知识相互连接,形成有效的树状框架网络知识库,如图 2 所示。

框架知识包括框架名、父槽、子槽、类型槽和 rule 槽等,其中框架名是该框架的说明及标志符;父槽的槽值等于其父事件的框架名(槽值用框架名的标志符表示);子槽的槽值等于其各子事件框架的框架名(槽值用框架名的标志符表示),中间用逗号隔开;类型槽表示该事件与子事件间的逻辑连接关

系,若该事件为底事件,则其槽值为叶节点,否则用逻辑门表示(与门、或门);rule 槽能推导出该事件的产生式规则。另外,为了将扩展故障树知识转化成产生式规则知识,先将扩展故障树转化成一组“最小故障树,即每个故障树仅含有一个逻辑门(与门、或门),然后将每个最小故障树转换成诊断知识库中的一条或多条产生式规则。

诊断系统知识库中的知识采用了产生式规则、框架和树结构相结合的多知识表示,取长补短,能明确区分和表示各种不同类型的知识,咨询过程更贴近专家推理,最大限度地提高知识的表达能力和系统的效率。实现了树结构向产生式规则的自动转化,解决了系统诊断知识库的知识获取问题。系统层次分明,各模块相互独立,通用性好,易于扩充和移植。

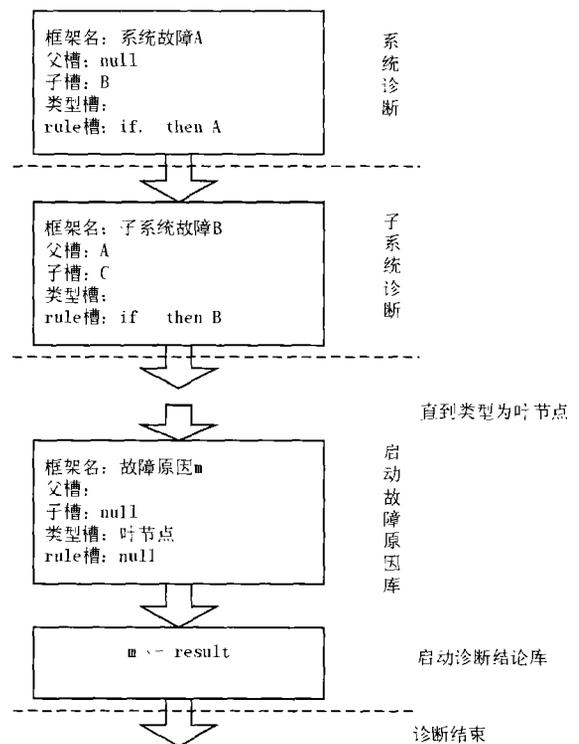


图 2 诊断系统知识框架表示

Fig 2 Knowledge architecture of diagnosis system

3 诊断专家系统的故障树模型

基于规则的诊断专家系统具有表达直观、形式统一、模块性强和推理机制简单等特点,一直是诊断专家系统中应用最广泛的一种模式。而采用这种模式的专家系统非常不利于扩充,基于规则的诊断专家系统最突出的弱点就是知识获取的“瓶颈”问题。将故障树分析法和基于规则的诊断专家系统有机地

结合起来,能很好地解决基于规则的诊断专家系统的知识获取问题。

故障树模型是描述对象结构、功能和关系的一种定性因果模型,它体现了故障传播的层次性和子节点(即下层故障源)与父节点(即上层故障现象)之间的因果关系。故障树分析法(FTA)是一种自上而下逐层展开的图形演绎分析法,其定性分析的主要目的在于找出导致顶事件发生的所有可能的故障模式,即寻找故障树的全部最小割集。通过最小割集可判断系统最薄弱环节,指明故障源及故障原因,提供改进方案和维修建议。

故障树的顶事件对应于专家系统要分析解决的任务,其底事件对应于专家系统的推理结果,故障树由顶到底的层次和逻辑关系对应于专家系统的推理过程,而割集则是故障树与专家系统诊断知识库的联系纽带。故障树的一个割集就是系统的一种失效模式,它对应于知识库中一条规则。具体地说,割集中的基本事件对应于知识库中规则的结论(故障源或故障原因);割集中顶事件到底事件的路径,对应于知识库中规则的前提。

在故障诊断过程中,简单的故障描述是不够的,需要在知识库中增加部分信息——故障现象的描述、故障的检查方式或方法、诊断建议和维修对策等。其中故障现象的描述包括图形说明和文字描述两部分,是诊断专家系统进行推理的依据,构成知识库规则的前件;故障的检测方式或方法是属于故障模式判别的辅助描述部分,指出系统的检测方法;诊断建议和维修对策属于故障结论描述部分,是专家系统推理的结果。

基于故障树的诊断知识库中的结论知识体现了故障树所独有的层次或逻辑关系,也就是说,知识库中的一个结论性知识可能是另一个结论知识的前件;也可能是其后件,或者两者之间存在着逻辑“与”或是“或”的关系。所以,诊断知识采用产生式规则和框架相结合的多知识表示,更直观、明了、完善。把扩展故障树知识转化为框架和产生式规则相结合的知识,需将扩展故障树的每一个节点转换成一个框架。

4 诊断专家系统开发实例

4.1 专家系统知识库的建立

在状态诊断专家系统中建立一个易于检索、查询、增加新知识、删除老化知识、不断丰富的知识库,其知识表示方法是极为关键的一步。对于确定性知

识的表示采用基于层次结构模型的产生式规则表示法,即:IF <条件> THEN <结论>的形式;对于多因素判断,使用故障树来表示。将各框架以结构(struct)的形式在程序的数据段表示。子槽和其上一级槽通过指针的形式来进行链接,因此在修改知识库时,只需对框架中子槽的数目和其所指向子槽的指针进行修改即可。

在开关柜内的检测设备主要包括真空灭弧室真空度检测装置、高温母线/电缆头连接点温度检测装置、柜内环境温度/湿度检测装置和线路电压/电流检测装置等。对于柜内状态的检测不仅要及时发现各主要装置的故障,还应具备一些预测的功能。如高温母线/电缆头连接点的温度与所通过的电流有关,当检测到有持续小电流通过时连接点的发热已经过大,此时应发出报警信号,以避免大电流通过时造成的严重发热而危及柜体的安全运行。下面以高温母线/电缆头连接点的温度(以下称“连接点温度”)的知识表示来说明开关柜的状态知识表示的结构,如图3所示。

高压母线/电缆头连接点温度异常其知识规则表示如下:

```
if(连接点温度大于 80 ) and (同路母线/电缆头温度相差 10 以上)
```

```
then 连接点温度异常
```

高压母线/电缆头连接点温度故障原因的知识规则表示:

```
if (温度与电流的比例大于预设值), then 接触电阻大。
```

```
if (温度与电流的比例小于预设值), then 传感器安装不良。
```

```
if (温度传感器的数据 < crc 0), then 检测电路故障。
```

4.2 专家系统推理策略

故障推理的过程就是由已知的故障现象来寻找故障原因的过程,即在知识库的网络图中,从源结点(故障现象)出发,按照一定的搜索策略,沿着知识网络图中的有向弧进行推理搜索,最后到达目标结点(故障原因)的过程。

通常,推理策略分为盲目搜索和启发式搜索两大类。在盲目搜索过程中不需要前后相关的或有关问题的专门信息,盲目搜索的常用方法有穷尽式搜索、宽度优先搜索和深度优先搜索3种。穷尽式搜索是沿着决策网络中的每一条可能的途径进行搜索,其时间开销大,仅适合于那些将精确性放在最重

要的位置而不考虑时间的问题解决中;宽度优先搜索是首先搜索与起始节点直接相连的下一层节点,然后再搜索所有与下层节点直接相连的更下层的节点,依次类推。宽度搜索的缺点是随着搜索深度的增加,下一步的搜索节点可能会呈指数增长,因而所耗费的时间将很多;深度搜索克服了宽度搜索的不足,但有可能出现无穷递归的情况,从而搜索不到需要的解。启发式搜索大都是在深度优先搜索和宽度优先搜索的基础上发展起来的,需要分析问题域的专门信息(即启发性知识),从而缩小了搜索空间,因此,本专家系统采用启发式深度优先搜索策略。所谓启发式深度优先搜索是指系统根据启发性信息,首先沿一条路径一直向下搜索,直至找到最终结果或者遇到终结点(不满足 rule 条件),若是后者则

退回到一个还未搜索的路径的节点继续进行深度搜索。对于搜索成功的支路,将其权值加 1,这样在下次对同类故障进行搜索时,则优先搜索此支路,以达到专家学习的目的。

解释系统是专家系统的一个重要组成部分,是专家系统区别于其它计算机系统的重要标志之一,它负责向用户解释专家系统故障诊断行为的全部过程。对专家系统解释功能的实现有很多方法,如预置文本法、路径跟踪法、策略解释法、自动程序员法等。其中预置文本法、路径跟踪法是较为常用的。由于本专家系统采用正向推理模块进行推理,因此选用路径跟踪法,即通过对推理机推理过程的跟踪,说明系统是如何得出结论的。

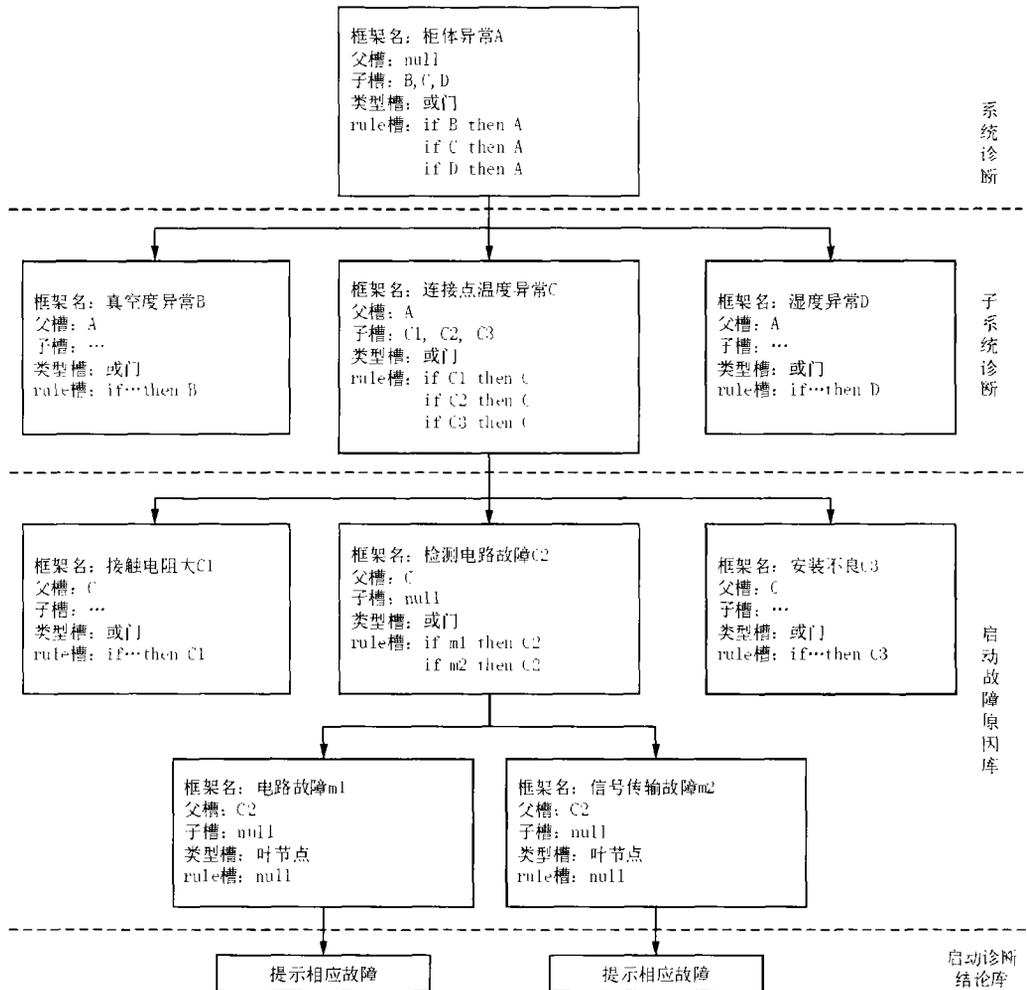


图 3 连接点温度诊断的知识框架表示

Fig 3 Knowledge architecture of contact temperature diagnosis system

5 结语

本文探讨了状态诊断技术对电气设备智能化的重要意义,分析了诊断专家系统在状态诊断技术应用中的特点。专家系统在设备诊断中发挥越来越大的作用,但是专家系统非常依赖于人的经验。当外界环境变化时,旧的规则可能已经不适用,而新的情况会不断出现。所以在以后的实际运行当中,专家系统还要不断修改旧规则,适时增加新规则,随着环境的变化及时更新,真正做到智能化诊断。

参考文献:

- [1] 尤龙. 智能化电器和智能化开关柜的现状与发展[J]. 西北电力技术, 2003, (4): 23-26
YOU Long Present Situation and Prospect of Intelligent Apparatus and Switchgear[J]. Northwest Electric Power, 2003, (4): 23-26
- [2] 张红先,陆佳政,曹一家. 状态监测中专家系统的开发[J]. 湖南电力, 2003, 23(2): 21-23
ZHANG Hong-xian, LU Jia-zheng, CAO Yi-jia Development of Expert System for Condition-based Maintenance[J]. Hunan Electric Power, 2003, 23(2): 21-23
- [3] Cepin M, Marko B. A Dynamic Fault Tree[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, (75): 83-91
- [4] 麻秀范,鲍海,张粒子,等. 智能化供电设备状态检修

决策支持系统设计[J]. 东北电力学院学报, 2002, 22(2): 43-44.

MA Xiu-fan, BAO Hai, ZHANG Li-zi Design of Intelligent Condition Based Maintenance Decision Support System for Power Supply Equipment[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2002, 22(2): 43-44.

- [5] 褚卫华,李岳,温熙森. 机械设备智能监测与诊断系统的研究与实现[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(2): 285-287.

ZHU Wei-hua, LI Yue, WEN Xi-sen Research and Implementation of an Intelligent Fault Diagnostic System Applicable to Mechanical Equipment[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(2): 285-287.

- [6] Giarratano J, Riley G 专家系统原理与编程[M]. 北京:机械工业出版社, 2000
Giarratano J, Riley G Principle and Program of Expert System[M]. Beijing: China Machine Press, 2000

收稿日期: 2004-10-14; 修回日期: 2005-01-20

作者简介:

廖力清(1965-),男,教授,从事电力系统自动化、智能电器方面的研究;

曹强(1979-),男,硕士研究生,从事电力系统分析、智能电器方面的研究。E-mail: caq2000@sina.com

Application of diagnosis expert system in switchgear condition monitoring

LIAO Li-qing, CAO Qiang, LANG Yu-hua, CAI Su-xiong
(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Condition monitoring is an important content of intelligent switchgear, while intelligency gradually becomes an important tendency of switchgear development. First, the important meaning of intelligent condition monitoring is discussed, then some key technologies of switchgear condition monitoring with diagnosis expert system is analysed. Finally, an example of temperature monitoring is introduced to illustrate the process building of the diagnosis expert system.

Key words: diagnosis expert system; switchgear; condition monitoring; intelligent

(上接第 35 页 continued from page 35)

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Electric Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

3. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: With the increasing of power cable application in transmission and distribution system, the higher demand to cable fault location accuracy is necessary. The error for cable location used in the traditional impulse-flesh experiment is analyzed and wavelet transform and autocorrelation analysis are introduced into the traditional impulse-flesh experiment in this paper. Signal filtration and singularity detection can be realized by wavelet transform, restriction can be achieved through autocorrelation analysis. Furthermore, the principle of automatic fault location and the flow chart of program can be realized by the method presented previously. The result of real experiment shows that the method has enough accuracy of power cable fault location.

Key words: power cable; fault location; wavelet transform; autocorrelation analysis