

利用 CPLD 实现故障诊断专家系统高速逻辑推理

孙来军¹, 胡晓光²

(1. 黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 北京航空航天大学 电工电子中心, 北京 100083)

摘要: 专家系统的推理时间取决于问题的复杂程度, 难以满足系统实时性要求, 限制了其应用。对此, 提出一种利用复杂可编程逻辑器件(CPLD)实现故障诊断专家系统高速推理的方法。详细分析了一般故障诊断专家系统推理过程; 利用故障树的概念将专家知识转换为二值或多值推理, 并用一般门电路, 进而利用 CPLD 实现推理过程; 将其应用于高压断路器故障诊断系统, 代替原来的软件推理。经过实验验证, 该方法实现的专家系统推理过程迅速, 特别适用于基于单片机、数字信号处理器(DSP)等所实现的专家系统。

关键词: CPLD; 故障诊断; 专家系统; 高压断路器

中图分类号: TP 182; TP 277

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)10-0021-04

0 引言

故障诊断专家系统是一种人工智能的计算机诊断系统, 它能够模仿领域专家的思维方式, 运用已有的诊断技术知识和专家的经验, 对收集到的信息进行判断、推理, 从而对设备的状态作出决策。专家系统对于复杂设备的诊断十分有效, 也是当前故障智能诊断的发展方向之一^[1]。

然而, 专家系统本身的一些缺点也限制了它的应用, 其中一个就是专家系统的推理时间取决于问题的复杂程度。在实际应用中, 复杂问题的推理过程繁琐、推理时间较长, 不能满足系统实时性的要求。对于一些以单片机、数字信号处理器(DSP)等为核心的小规模系统, 实现推理比较困难, 甚至不可能, 即使一些相对简单的推理也会占用很长的系统时间。以高压断路器状态监测为例, 在断路器动作时, 由安装于断路器本体的数据采集器采集动作信息, 采集器一般是以单片机或 DSP 为主控制器。受主控制器处理能力的限制, 一般是将采集到的数据传输到位于主控室的上位机进行处理, 这就是断路器在线监测系统的“现场采集—远程处理”的结构^[2]。显然, 其最大缺点就是反应迟钝, 而且在没有形成网络时, 采集器基本上只能起到采集数据的作用, 即使对很简单的状态故障也很难作出及时的推理、判断。

对此, 本文提出了一种利用复杂可编程逻辑器件(CPLD)实现快速故障诊断推理的方法。文章在详细分析一般故障诊断专家系统推理过程的基础上, 首先根据传统故障树分析法提出了更接近人类思维方式的诊断推理树概念, 并举例分析了推理树的构造过程及利用 CPLD 实现的方法; 然后, 将其应用于高压断路器故障诊断系统, 利用 CPU+CPLD 的

高速硬件推理代替以往的单纯 CPU 软件推理。经实验验证, 该方法实现的专家系统推理过程十分迅速, 特别适用于基于单片机、DSP 等所实现的专家系统。

1 故障诊断推理

所谓的故障诊断就是利用一系列征兆识别被诊断对象所处的状态, 估计未来状态。针对故障诊断专家系统而言, 就是根据所提取的特征参量, 参考诊断对象的固有知识和领域专家的知识、经验等, 对对象的当前状态作出判断, 或确定其故障类型、部位等。建立诊断推理的过程也就是根据对象固有知识和专家知识、经验, 找出征兆与状态(包括正常、各种故障)对应关系的过程。理论上, 故障诊断就是系统识别, 目前所使用的识别方法很多, 其中比较简单的一种方法就是逻辑识别法。

逻辑识别法首先对所提取的参量进行逻辑变换, 将参量转换为逻辑量。具体办法就是设定一个门限值, 当连续变化的特征参量超过门限时定为逻辑状态“1”, 否则为“0”^[1]。这是一种最简单的变换方式, 这种方式在实际应用时由于过于粗糙, 而不能得到理想的使用效果, 需要改进。最简单的改进方式就是打破单一门限, 根据具体情况设计多个门限来反映参量或大或小的程度, 从而细化征兆。

故障树分析法(FTA)是逻辑诊断方法最成功的应用, 早在 20 世纪 60 年代初就已在美国使用, 现在则被广泛用于核电站、化工厂等设备安全分析与维修中^[3-4]。该方法利用各种元件故障推导部件故障, 进而推理得出系统故障, 其推理结构见图 1。故障树是以系统故障与元件、部件故障之间的对应关系为基础而建立, 整体上与系统结构相关, 较适用于结构和故障层次划分较清楚的系统, 而对于一些结构划分不明显的设备, 使用则比较困难。

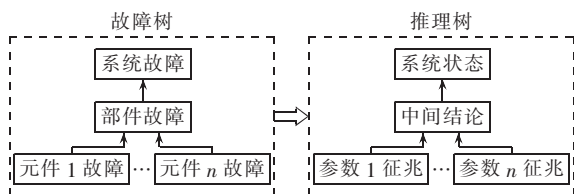


图 1 故障树与诊断推理树

Fig.1 Fault tree and diagnostic reasoning tree

不过可以按照故障树的构建模式,将各种征兆、中间推理结果及设备状态按照人的思维方式,以已知的各种状态为主线,构建各状态的诊断推理树,如图 1 所示。在每种状态的诊断推理树中,根据所提取的各参数征兆得出中间结论,进而判断设备是否处于该状态,这样按照人的思维方式一步一步分析,把传统专家系统中 IF-THEN 结构的推理规则转换为各种“与”、“或”、“非”逻辑的组合。

图 2 所示为一诊断推理树,按照逻辑分析法,如果能得出或存在某种结论或征兆,用逻辑“1”表示,否则为“0”,则图中结论 d_1 是由 2 个征兆中的 1 个存在时得出的,征兆之间是“或”的关系;结论 d_2 是由 2 个征兆同时存在时得出的,其关系为“与”;在 d_1 和 d_2 这 2 个结论中的 1 个成立时,设备处于状态 c 。

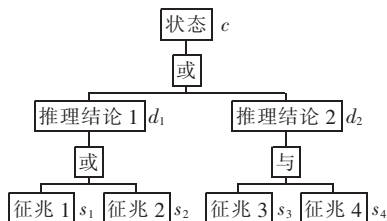


图 2 诊断推理树

Fig.2 Diagnostic reasoning tree

传统情况下,利用 C++ 语言将该推理过程的 IF-THEN 规则实现如下:

```
if (s1||s2) //IF
{d1;} //THEN
if (s3&s4)
{d2;}
if (d1||d2)
{c;}
```

将各 IF-THEN 规则转换为逻辑表达式如下:

$$d_1 = s_1 + s_2, \quad d_2 = s_3 s_4 \\ c = d_1 + d_2 = s_1 + s_2 + s_3 s_4$$

进一步用图 3 的基本逻辑门电路实现以上逻辑关系。在实际应用时设备可能会存在很多种状态,包括正常状态、各种故障等,用 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 分别表示各状态,假设征兆为 $s_1, s_2, \dots, s_m$,可分别将各状态的推理过程利用逻辑表达式表示如下:

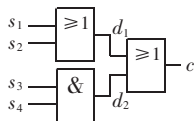


图 3 基本门电路实现推理过程

Fig.3 Reasoning process built with basic gates

$$c_1 = f_1(s_1, s_2, \dots, s_m) \\ c_2 = f_2(s_1, s_2, \dots, s_m) \\ \vdots \\ c_n = f_n(s_1, s_2, \dots, s_m)$$

2 推理的 CPLD 实现

在使用 CPLD 实现逻辑推理时,首先考虑输入/输出接口。使用 CPLD 实现的逻辑推理与系统主控制器,如单片机、DSP 等的接口有 2 种方式。

a. 并行接口,如图 4 所示,其优点是读/写速度快(比串行接口快 7 倍),缺点是占用系统端口较多^[5]。

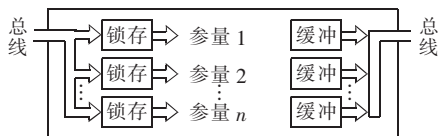


图 4 输入/输出接口

Fig.4 Interfaces of input and output

b. 串行接口,设计串入并出移位寄存器实现接口,最简单的如 74595、74165 等级连,其优点是占用系统端口少,但读/写速度慢^[6]。

输入 CPLD 的各特征数据经锁存后首先与设定的阈值比较,转化为逻辑量作为进一步推理的输入。阈值根据诊断对象基本知识和专家经验设定,可以只有 1 个,也可以很多个,以反映征兆的强烈程度;在有多阈值时应注意比较结果输出的唯一性。

状态推理过程是诊断系统的精华所在,也是设备基本知识、专家知识与经验的集中体现,它反映了状态与征兆的对应关系。在用 CPLD 实现设备的所有状态推理时有 2 种推理结构的构建模式。

a. 对各状态直接使用基本逻辑电路分别实现推理过程,这种方式推理结构明晰、便于改进,比较适用于状态较少的设备的诊断推理。

b. 对于较多状态的设备的复杂诊断推理,若使用方法 **a** 构件时会需要很多门单元,这对可编程器件的容量有要求,要解决这个问题,除了选用大容量器件外就是化简逻辑关系,使用最少的门电路实现推理。但需注意以下 3 个问题:化简后的电路很难输出推理中间结果,而对于大多数诊断系统,中间结果用处也很大;化简后的电路不如化简前具有条理性,一般不符合人的推理习惯,不利于后续的改进;逻辑表达式的最简不表示实现所使用的门电路最少。

以上 2 种构建方法各有利弊,具体使用哪种构建方法还需要视推理状态数目和推理规模具体选择。另外,根据个人习惯也可以使用 ABEL、VHDL 等语言编辑实现推理过程。

至此,利用 CPLD 实现故障诊断高速推理专家系统的开发过程如图 5 所示。

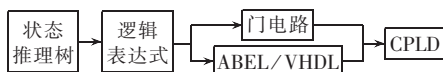


图 5 专家系统实现过程

Fig.5 Realization process of expert system with CPLD

3 在高压断路器故障诊断中应用

3.1 系统结构

一般情况下,高压断路器操作线圈电流波形可反映断路器铁芯行程、铁芯卡滞、线圈状态(如是否有短路匝)、铁门和阀门的状态、合/分闸线圈的辅助接点状况与转换时间等。通过监测合/分闸线圈电流,运行人员可大致了解断路器二次控制回路的工作情况及铁芯的运动等,为检修提供辅助判据^[7-12]。

笔者 2003 年与鹤岗电业局合作完成的断路器在线监测系统就利用操作线圈电流信号,辅以辅助触点转换信号,在断路器现场数据采集处理单元中初步诊断断路器故障^[13]。数据采集处理单元以 AT 89C 51 单片机为控制核心,主要用于控制信号采集,提取线圈电流信号、触点状态变换时间、电流等参数,并利用这些参数根据 IEEE 断路器诊断建议报告^[9,14-16]及断路器维护人员经验初步诊断断路器故障。系统实际在线运行时出现的最大问题是 CPU 处理数据、诊断推理耗时太长,以至于在断路器每次动作约 5 min 后,主控机才得到动作数据和推理结果,即系统反映的实时性很差。

在改进的方案中,首先设计以 Atmega128 单片机为主控制器的断路器动作信息采集系统,具有高速单周期指令系统的 Atmega128 使信号采集和处理的速度比以往提高了 7 倍多;采用 Xilinx 公司的 XC 95144 可编程逻辑器件实现断路器运行状态的初步推理诊断,利用硬件逻辑实现整个规则推理过程。其他还扩展有模/数转换器、通信接口、液晶等,采集系统总体结构如图 6 所示。Atmega128 与 XC 95144 采用并行接口通信,数据传输速度更快。

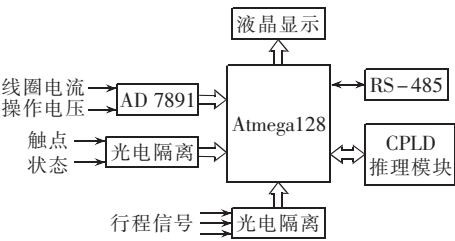


图 6 采集系统总体结构图
Fig.6 Overall structure of acquisition system

利用 Xilinx Foundation 3.1 中的原理图输入方式,根据 IEEE 推荐的诊断规范及有多年断路器检修经验的专家总结的检修规则^[9,15-16],分别编辑各主要状态推理过程,用基本门电路构建各状态诊断推理树;推理结果复合后以双 8-3 编码模式供 Atmega128 读取,共 6 位,11 种状态输出,其中包括正常状态“000000”、不能确定的异常状态“000001”及各种故障“000010~001010”。在断路器动作时 Atmega128 采集操作线圈电流信号、触点变换信号;动作后处理数据,提取时间、电流、纹波、斜率等 8 个参量,并通过并行接口为 XC 95144 的推理设定征兆参数,启动

推理,经延时后按照固定地址读出推理结果。

3.2 应用分析

分闸锁构润滑不足是断路器运行过程中经常会出现的一种故障。这是一种缓变故障,但如果不能在其发展阶段及时检测出并作出相应的处理,其结果将是导致断路器拒分的恶性故障。不过这种故障可以通过对线圈电流信号和触点状态信号的分析检测出,其诊断推理树如图 7 所示。

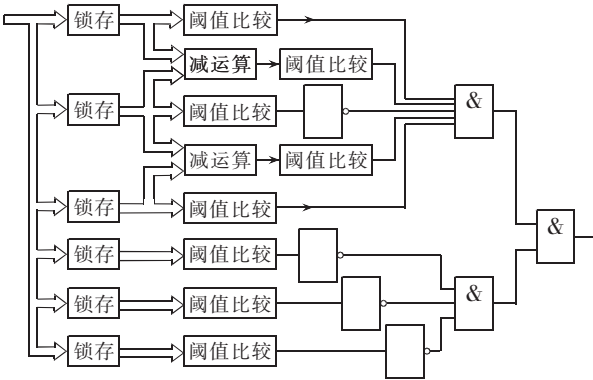


图 7 润滑不足故障诊断推理树
Fig.7 Fault diagnostic reasoning tree for poor lubrication

图 8 是一个典型润滑不足时的线圈电流信号波形,图中曲线 1 为正常信号,曲线 2 为故障信号。

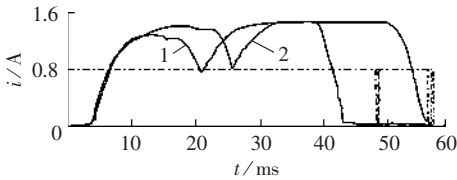


图 8 正常与故障状态线圈电流信号
Fig.8 Coil currents of normal and faulty conditions

从图 8 中可见:故障情况下电流维持时间明显增长,各段电流值基本保持不变。对正常信号和故障信号,Atmega128 提取时间、电流等 8 个参数。输入到 CPLD,经程序延时 0.5 ms 后读出推理结果,正常信号推理输出结果为“000000”,故障信号推理输出结果为“000101”,同人工分析结果一致。整个过程平均约为 1.1 ms(单片机晶振为 7.3728 MHz),其中包括数据处理、参数提取的时间。至此,CPLD 在 0.5 ms 的时间内完成了以往采集单元约 3 min 时间才能完成的软件逻辑推理。由此可见,以可编程逻辑器件实现的推理过程操作十分迅速,完全可以实现断路器在线监测系统电流信号、触点状态信号的本地处理,满足故障现场快速诊断的需要。

4 结论

故障诊断专家系统作为人工智能的一个门类,多年来已经在很多领域得到较好应用,但由于其推理速度慢、程序推理过程复杂等缺点的限制,很难在如在线检测、控制等要求推理及时准确的情况下应用。本文在分析一般专家系统推理的基础上,详细介绍了

按照人的思维方式、推理过程所形成的诊断推理树的概念及构造方法,利用可编程逻辑器件实现逻辑推理的原理、设计,并应用于高压断路器状态监测系统中,取得较好效果,为以单片机、DSP等为核心的小规模系统实现高速专家推理提供方案。但在应用过程中也发现,该方案实现的推理过程目前只局限于小规模、正向推理,对于目前应用较广的反向推理、组合式推理、模糊推理、大系统的复杂推理等有些无能为力。

参考文献:

- [1] 虞和济,陈长征,张省,等. 基于神经网络的智能诊断[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [2] 姚月娥,张挺,王章启,等. 断路器在线机械状态的信息处理[J]. 高压电器,2004,40(2):107-111.
YAO Yue-e,ZHANG Ting,WANG Zhang-qi,et al. Data processing of on-line mechanical condition for circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(2):107-111.
- [3] 张琳,李长俊. 矩阵算法在联合站仪器仪表故障树分析中的应用[J]. 石油工业计算机应用,2005,13(2):30-32.
ZHANG Lin,LI Chang-jun. The application of matrix algorithms in instrument and meter fault analysis at the combination station[J]. Computer Applications of Petroleum,2005,13(2):30-32.
- [4] 戴光,赵俊茹,张颖,等. 石化企业重大危险设备的模糊故障树分析及应用[J]. 压力容器,2005,22(2):50-52.
DAI Guang,ZHAO Jun-ru,ZHANG Ying,et al. Fuzzy fault tree analysis and application in the important equipment of petrochemical company[J]. Pressure Vessel Technology,2005,22(2):50-52.
- [5] 谢付正,郭树旭. 基于CPLD的8位总线接口设计[J]. 现代电子技术,2006(6):79-80,88.
XIE Fu-zheng,GUO Shu-xu. Design of 8-bits bus interface based on CPLD[J]. Modern Electronics Technique,2006(6):79-80,88.
- [6] 何永泰. 基于CPLD的SPI接口设计[J]. 电脑开发与应用,2004,17(10):27-28.
HE Yong-tai. Designing SPI interface based on CPLD[J]. Computer Development & Applications,2004,17(10):27-28.
- [7] 霍凤鸣,苏红梅,潘瑾,等. 高压断路器操作机构的电气动态特性[J]. 高压电器,2001,37(4):55-57.
HUO Feng-ming,SU Hong-mei,PAN Jin,et al. Electric dynamic characteristics of operating mechanism for HV circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2001,37(4):55-57.
- [8] 沈力,黄瑜琬,钱家骊. 高压断路器机械状态监测的研究[J]. 中国电机工程学报,1997,17(2):113-117.
SHEN Li,HUANG Yu-long,QIAN Jia-li. Research on mechanical condition monitoring for HV circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE,1997,17(2):113-117.
- [9] HENDERSON R,SEEDS D. Condition assessment of circuit breakers using a trip coil profiling approach[C]//Monitors and Condition Assessment Equipment. London:IEE,1996:811-813.
- [10] GLINKOWSKI M T,SCHMIDT L,VEERKA E F. Bibliography of switchgear literature[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1998,13(1):135-143.
- [11] 刘全志,师明义,王章启,等. 高压断路器在线状态监测与诊断技术[J]. 高电压技术,2001,27(5):29-31.
LIU Quan-zhi,SHI Ming-yi,WANG Zhang-qi,et al. On-line condition monitoring and diagnosis for high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Engineering,2001,27(5):29-31.
- [12] 王昌钧. SF₆高压断路器机械参量在线监测系统[J]. 电网技术,1999,23(7):34-37.
WANG Chang-jun. Mechanical parameter on-line monitoring system for SF₆ high voltage circuit breakers[J]. Power System Technology,1999,23(7):34-37.
- [13] 胡晓光,王芳. 高压断路器机械状态在线监测系统研究[J]. 电子技术杂志,2003(1):36-38.
HU Xiao-guang,WANG Fang. A research of an on-line monitoring system for HV circuit breaker[J]. Electrotechnical Journal,2003(1):36-38.
- [14] SAKAKIBARA K G T,KAMATA I,IKEDA S. On-line monitoring and diagnostic of gas circuit breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1989,4(1):375-381.
- [15] BERGMAN W J B. Selecting circuit breaker monitoring[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta:IEEE/PES,2001:1071-1076.
- [16] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std C37.10.1-2000 IEEE guide for the selection of monitoring for circuit breakers[S]. New York,USA:Switchgear Committee of the IEEE Power Engineering Society,2001.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

孙来军(1977-),男,山东嘉祥人,讲师,博士研究生,主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、无损检测技术(E-mail:slaijun@126.com);

胡晓光(1961-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电能计量装置、电气设备在线监测与故障诊断。

Fast logic reasoning of fault diagnosis expert system with CPLD

SUN Lai-jun¹,HU Xiao-guang²

(1. Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The reasoning time of the expert system lies on the complexity of the problem, which is difficult to meet the real-time requirement of the system. Thus the application of the expert system is limited. A new method to design expert system reasoning with CPLD (Complex Programmable Logic Device) for fault diagnosis is presented. The reasoning process of general expert systems is analyzed. The knowledge and experiences of experts are transformed into binary or multi-valued reasoning by using fault tree and the reasoning process is thus realized with simple gate circuit or CPLD. It is applied in the fault diagnosis of high voltage circuit breaker instead of original software reasoning. It is validated with test that the reasoning speed is faster, suitable for expert systems based on single-chip controller or digital signal processor.

Key words: CPLD; fault diagnosis; expert system; high voltage circuit breaker