

文章编号:1000-582X(2010)05-062-10

滚齿机网络化故障诊断专家系统的设计及应用

陈国荣^{1,2}, 鄢萍¹, 刘飞¹, 易润忠¹, 赵静¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院电子信息工程学院, 重庆 401331)

摘要:针对滚齿机生产厂商和用户对提高故障诊断服务质量,降低故障诊断成本的迫切要求,提出了一种滚齿机网络化故障诊断专家系统。探讨了系统的网络化故障诊断运行模式、专家系统的体系结构;分析了系统实现的关键技术,包括系统实现的多源数据采集方法、知识表达和推理机制以及基于 P2P(Peer-to-Peer)的网络体系结构,重点研究了基于 SPF(System-Phenomenon-Fault)树的滚齿机网络化故障诊断系统的知识表达和推理机制实现方法,包括 SPF 树的定义、生成方法、树中元件的描述和树干的成长、树的数学描述、自学习过程、SPF 树的检索和故障统计方法等。基于上述研究成果的原型系统在某滚齿机生产企业的初步应用表明,系统能够大幅度降低其售后服务成本,提高生产效率。

关键词:专家系统;诊断;滚齿机;知识工程;SPF 故障树

中图分类号: TH17

文献标志码: A

Networked fault diagnosis expert system of hobbing machine

CHEN Guo-rong^{1,2}, YAN Ping¹, LIU Fei¹, YI Run-zhong¹, ZHAO Jing¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China)

Abstract: Aiming at the urgent needs of those manufacturing factories of hobbing machine and their consumers, who want to improve the quality of fault diagnosis in their after services, and reduce the costs of seeking for faults, a networked fault diagnosis expert system for hobbing machine tools based SPF tree (System-Phenomenon-Fault) is put forward. The operation model of this web-based system and the architecture of expert system are brought out firstly. Based on them, some key technologies are discussed, such as the methods of multi-source data acquisition, knowledge representation, the reasoning mechanism of the knowledge system, and the network architecture based on P2P (Peer-to-Peer). Above all, the implementation methods of knowledge representation and reasoning mechanism based SPF tree are the points, which include the SPF's definition, birth, description of elements, growth of tree trunk, mathematics description, learning-self process, statistic, retrieving and et al. A prototype system based on this study is tried out in a hobbing machine company and its feasibility has been verified in the application.

Key words: expert systems; diagnosis; hobbing machine; knowledge engineering; SPF tree

收稿日期:2009-12-10

基金项目:国家 863 重点项目(2007AA040701);重庆市教委自然科学基金项目(KJ091404);教育部春晖计划合作研究项目(Z2007-1-63015)

作者简介:陈国荣(1974-),男,重庆大学博士研究生,重庆科技学院讲师,主要从事制造系统工程、制造业信息化等方向的研究。

鄢萍(联系人),女,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)yp@cqmi.cn。

滚齿机是齿轮加工的重要设备,数量约占整个齿轮加工机床的 45%^[1],因此,其在齿轮生产产业中占有重要的地位,但是,机械故障与滚齿机的应用相生相伴,不仅增大了滚齿机的维护和维修成本,而且严重影响着其产品的质量。所以,对滚齿机故障诊断问题的研究具有重要的价值。为了解决滚齿机的故障诊断问题,国内外许多学者对此进行了大量的研究。一方面,提高维修人员业务技能,利用其专业的个人能力来提升滚齿机的故障诊断能力;另一方面,利用故障树等方法,对故障现象进行直观描述^[2-9];近年来,利用知识推理、神经网络^[10-11]、数据挖掘^[12-16]、专家系统^[17-20]等方面的知识建立故障诊断算法,提升历史故障分析能力的方法也得到了快速发展。

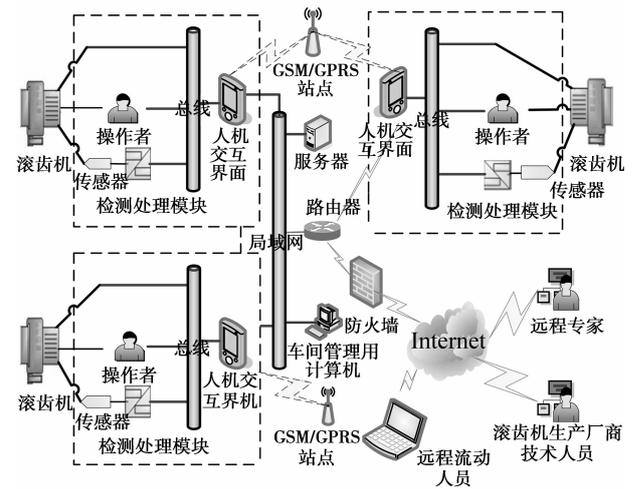
但是,第 1 种方法对维修人员个人能力的依赖非常严重,不适合大规模的经验推广;后 2 种方法对于现代加工技术中的故障诊断具有进步意义,提高了滚齿机故障诊断的效率,也出现了相关方法用于异地、现场、协作的故障检测和故障诊断的案例,但上述方法在滚齿机的故障诊断应用方面鲜有报道。笔者在上述故障诊断方法的基础上,提出了一种滚齿机网络化故障诊断专家系统,以满足滚齿机故障检测和故障诊断的异地、现场、协作需要。

1 滚齿机网络化故障诊断运行模式

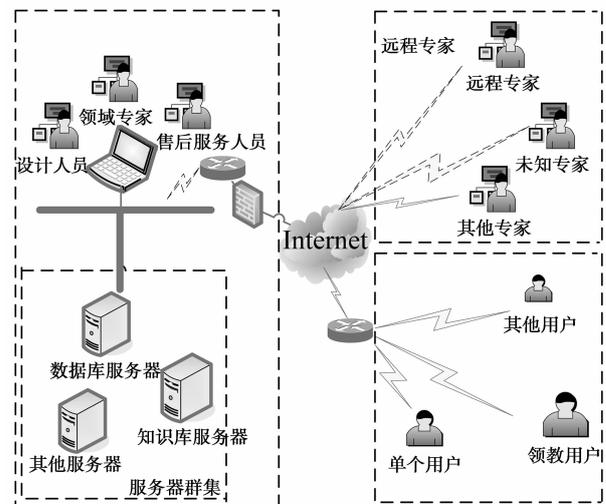
现行的故障诊断模式由于无法在分布式网络环境下真正实现知识的共享和重用,但是,这却是故障诊断系统得以实现的基础。为了解决滚齿机生产企业和用户企业对网络化的故障诊断系统的迫切需要,笔者提出了一种新的“滚齿机网络化故障诊断专家系统”运行模式,其用户端如图 1(a)所示,服务提供端如图 1(b)所示。

用户端在滚齿机网络化故障诊断专家系统运行模式中主要起到 3 个方面的作用,首先是通过系统收集用户滚齿机在运行过程中出现的各种问题及其解决方案,补充到现有的系统中,对知识库和数据库进行动态更新。信息收集方法采用传感器采集、人工输入等多源数据采集和知识获取方法。其次,在故障发生时,操作人员通过内置于人机交互终端的滚齿机网络化故障诊断专家系统,按照网络化专家系统提供的诊断结果,对滚齿机的故障进行诊断即可解决大部分故障。对于少量操作者通过本地无法直接解决的故障,在主管部门同意的前提下,可通过网络发起专家会诊,从而解决这些复杂的故障。另外,系统的使用方,在授权许可的范围内,可对滚齿

机的运行状态进行本地或异地的监视和维护。



(a) 用户端



(b) 服务提供端

图 1 滚齿机网络化故障诊断专家系统运行模式

从滚齿机生产者和服务提供方的角度,服务提供端主要由 3 部分组成:1)有助于解决各种滚齿机疑难问题的专家,例如精通滚齿机的领域专家、滚齿机设计人员和专业的滚齿机售后服务人员。2)知识库和数据库,前者提供了用于故障诊断的各种规则,通过这些规则用户可以方便地从纷繁复杂的各种故障信息中获取其想要的知识;后者主要存放已有的各种故障记录,这些记录是用户进行故障诊断的原始资料。3)远程专家系统,包括各种登记在册的远程专家,以及未知的、隐藏于 Internet 之中的、有助于解决问题的各类专家。服务提供端基本功能包括以下 2 个方面:一是接收来自各用户单位采集到的有关滚齿机的运行参数、故障现象和解决方案,进而

对这些数据进行加工,提炼出故障诊断的规制和知识,更新数据库和知识库。二是向用户端提供服务,对于较为简单的问题,用户通过查阅知识库和数据库即可找到问题的解决方法;对于复杂的故障,服务提供端接收用户发起的专家会诊;对于特别困难的故障,不仅需要服务提供方提供的专家,还需要远程专家的参与。

2 滚齿机网络化故障诊断专家系统体系结构

为了实现滚齿机网络化故障诊断系统的运行模式,可将滚齿机网络化故障诊断专家系统体系结构从总体上划分成 3 个层次,从下到上依次为支撑层、业务层和应用层,如图 2 所示。

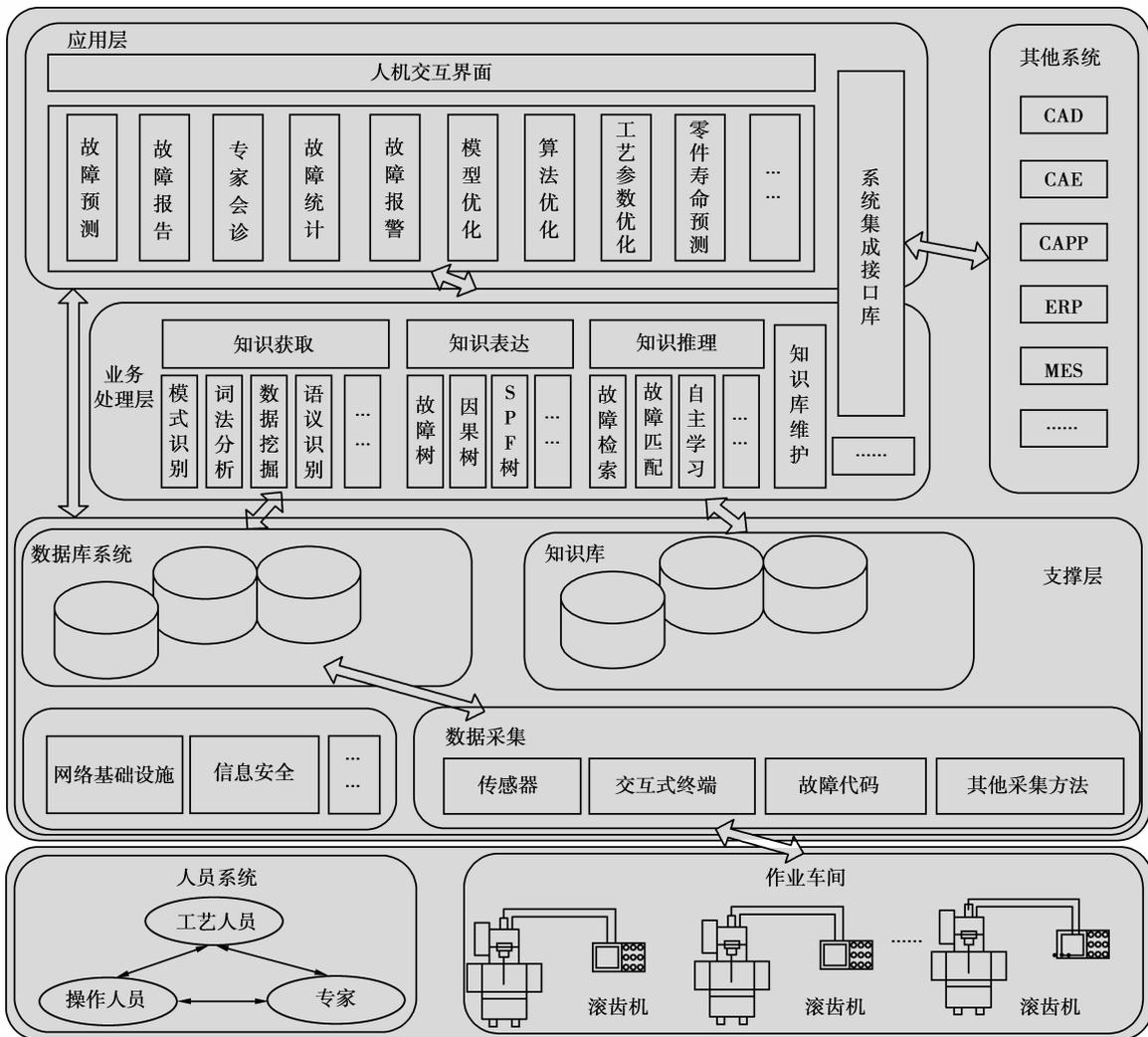


图 2 滚齿机网络化故障诊断专家系统体系结构

2.1 支撑层

支撑层是基于作业车间和人员系统之上的第 1 个层次,涉及到专家系统和具体的操作者及操作对象的接口。数据的输入输出是其最基本的功能,为了能获得尽可能详尽、真实的故障信息,通常采用多源信息获取方法。支撑层的另一个重要内容是故障库和知识库,分别用于存储故障记录以及提取故障的规则;另外,本层还涉及到网络基础设施,信息安全基础设计等方面的内容。

2.2 业务处理层

业务处理层是将支撑层中的各种数据,包括存储在关系数据库和实时数据库中的数据进行处理,进而为用户提供应用基础数据的一个中间层,包括滚齿机故障知识的获取、知识表达、知识推理和知识库的维护等方面的内容。

其中,针对不同的数据来源,知识获取可采用模式识别、词法分析、数据挖掘、语义识别等方法。多元故障知识的表达方式包括 3 个方面的内容:首先

是滚齿机故障的规范化描述和分类方法,例如滚齿机本身设备的层次结构划分,故障现象的划分,故障解决方法的描述等,进而绘制滚齿机的故障树图。滚齿机故障的规范化描述是故障表达式提取的基础。其次是多元故障信息的表达方式,包括基于自然语言、错误代码、测量信号等不同表现形式的故障信息,从而得到故障推理的规则;第 3 是各类故障信息在知识库的存储方式和故障信息表达的数据结构。知识推理机制则采用故障检索、知识匹配等方法,通过有关知识的规则描述,获取故障库中的特定故障信息,为故障诊断提供服务。

2.3 应用层

应用层一方面面向操作者、专家和维修人员等用户,另一方面面向其他有关系的集成需求,因此,应用层需要提供具体的功能,以满足用户的应用需求,例如故障信息的检索、故障数据的匹配、故障的诊断等方面的内容。

滚齿机网络化故障诊断专家系统在功能内聚的同时,还很好地考虑了与其他系统的集成,例如与 ERP、MES 和 Control 等各层面的集成。底层的硬件和人员系统对整个系统也起到重要作用。另外,本系统还涉及到网络基础设施,包括车间的现场总线、企业内部的局域网、企业联盟之间的 Extranet 和企业之外的 Internet 等。

3 关键技术分析

3.1 多源故障信息的获取方法

故障信息的获取主要解决支撑层的信息来源问题。为了提高信息获取的有效性和准确性,本课题研究采用了多源信息采集方法,例如采用传感器(包括功率传感器、转速传感器、位移传感器、声波检测传感器、振动传感器、力矩传感器等)和滚齿机系统提供的操作代码,同时,为了体现操作者的重要性,基于操作者的交互式输入也作为本专家系统信息采集的重要环节。

滚齿机的多源故障信息的获取方法如图 3 所示。滚齿机正常运行时,各种传感器采集的信号以及滚齿机系统提供的操作代码均被实时存储到位于服务器的知识库中,形成基础数据;当滚齿机出现隐性故障时,由于采用了基于传感器、人机交互和滚齿机操作代码等多源信息采集方式,至少其中之一能采集到异常;当滚齿机出现明显故障时,多源信息采集措施同样有效,这样就保证了数据采集的有效性。

另外,由于信息来源的不同,多源信息采集方案获得的数据有可能是不一致的,因此在本系统中还

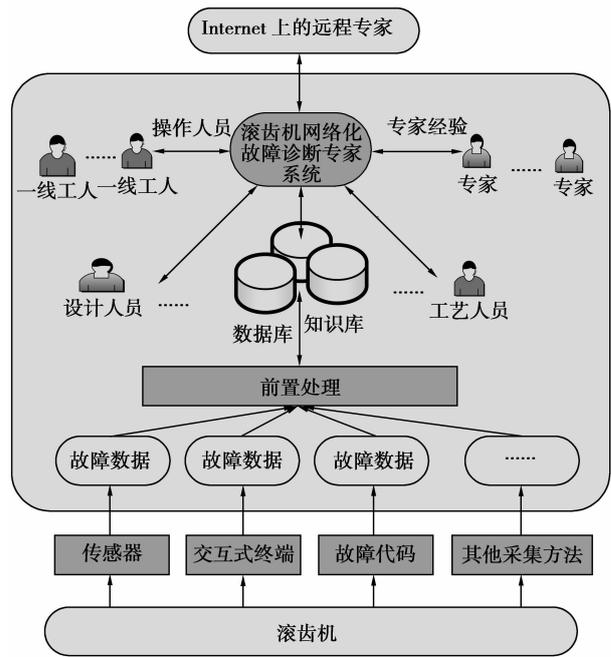


图 3 多源故障信息的获取方法

设置了前置处理功能。

在滚齿机网络化故障诊断专家系统的开发过程中,为了实现多源故障信息的获取,采用了多项专利技术,例如使用“机床功率信息自动采集”装置和方法^[21],采集滚齿机加工过程中的加工进度参数和功率信息。除了使用传感器技术之外,使用“网络化制造系统中的多功能交互式信息终端”^[22]也是一条重要的途径,操作者将滚齿机操作过程中发现的各种非正常现象通过联网的多功能交互式信息终端直接提交到专家系统中,一方面可以实现故障信息的采集,另一方面也有助于诊断故障问题和维修发生故障的滚齿机。另外,如果操作者对发现的问题不进行上报,那么他的生产进度势必就比别人慢,但是,车间的实时生产数据由于使用“基于复杂网络的制造系统生产进度的提取方法”^[23]而不断更新,很快车间管理人员就会发现滚齿机出现了故障,进而滚齿机的状态信息就得到强制性的收集和更新。另外,课题组还研究了基于滚齿机故障代码的信息采集方法。

3.2 基于 SPF (System-Phenomenon-Fault) 树的多元故障知识表达方式和推理机制

3.2.1 SPF 树的生成

为了实现图 2 所示体系结构中的多元故障知识表达方式和推理机制,课题组提出了一种基于 SPF 树的多元故障知识表达方式和推理机制。SPF 树是一种按照故障现象的隶属关系绘制的树状结构故障图。假定在一个滚齿机系统 S 中,故障原因 F 和故

障现象 P 在转换矩阵 R 的作用下为一一对应关系, 那么, SPF 树可看成一个四元组 $\{S, P, F, R\}$ 的集合。

要得到有效的知识表达方式和推理机制, 必须首先构建出 SPF 树。其生成步骤如下。

第 1 步, 生成树根结点 S (System)。

对于给定的滚齿机系统, 首先生成一个结点 S , 作为整个 SPF 树的树根, 在图 4 中, 树根结点 S 用“☆”表示。

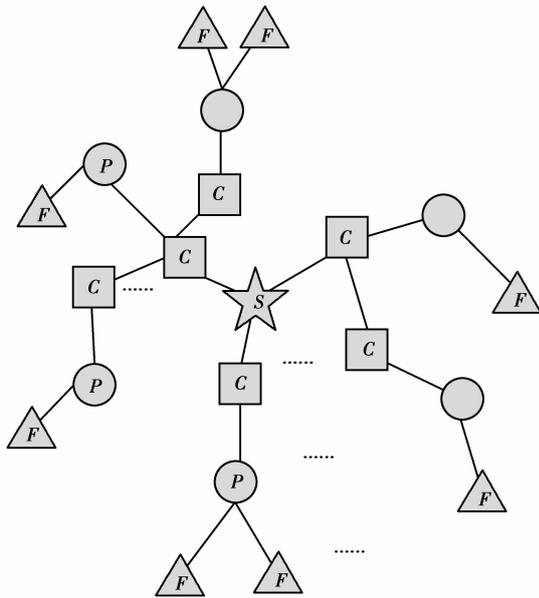


图 4 SPF 树的结构

第 2 步, 生成树干结点 C (Component)。

按照滚齿机 S 本身的逻辑关系或构成关系, 将系统分解成不同的元件组成树干。元件按照隶属关系构成元件树, 其顶层结点与 S 相连。图 4 中, 元件用“□”表示。

图 5 为一个元件内部组成关系示意图, 可以看出, 系统内部的元件之间最重要的关系为隶属关系(纵向来看)和兄弟关系(水平来看), 并且一个元件内部还可能存在着复杂的结构。为了问题研究方便, 可将这种复杂元件的内部组织关系忽略, 进行抽象化处理形成图 6 所示的具有抽象 3 层结构的 SPF 树。

在故障分析时, 一旦确定了故障原因, 则对故障经过的路径上的边权重分别加 1。

第 3 步, 生成树枝结点 P (Phenomenon)。

根据用户提供的故障现象, 提取故障现象关键字, 在数据字典中检索, 如不存在用户提供的故障现象, 则生成一个新的故障现象结点, 在图 5 中用“○”

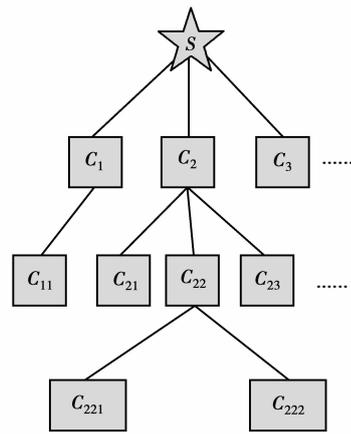


图 5 元件的层次结构示意图

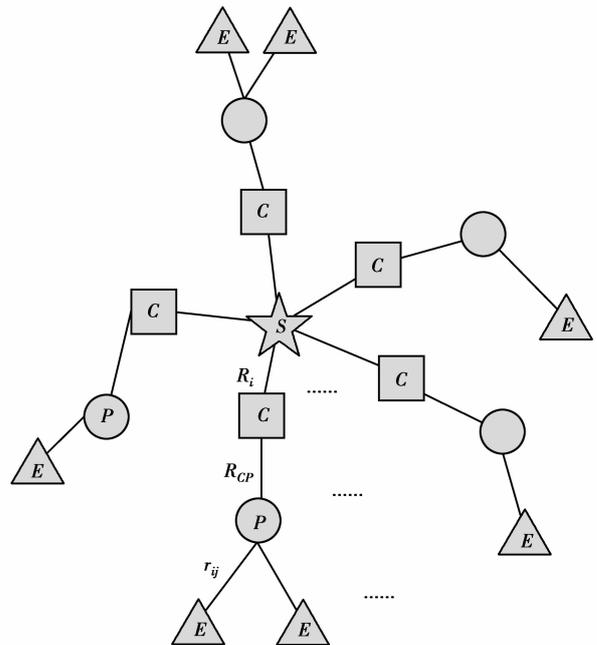


图 6 具有抽象 3 层结构的 SPF 树

表示, 并和树干结点“□”连接起来, 赋予其连接边的权重 R 为 1; 如果存在相同的结点, 则不需要生成新的结点, 而是在该结点和起始结点之间的边权重 R 加 1。

第 4 步, 生成树叶结点 F (Fault)。

根据维修的实际情况, 提取出实质性的故障原因, 在数据字典中检索, 如不存在相应的故障原因, 则生成一个新的故障原因结点, 在图 4 中用“△”表示, 并和故障现象结点“○”连接起来, 并赋予连接边的权重 r 为 1; 如果存在相同的结点, 则不需要生成新的结点, 而是在该结点和相应故障现象结点之间的边权重 r 加 1。

重复步骤 2-4, 即可构造出以 S 为中心, 以 C 、 P 为树枝, 以 F 为树叶的 SPF 故障树。

3.2.2 SPF 树中元件 C 的描述和树干的成长

比较图 4 和图 6,明显图 6 在处理上要简便得多。为了找到它们之间的对应关系,对元件 C 进行的描述如下。

定义 1 在 SPF 树中,任何结点 C 可用数据结构 $C = \{\alpha, \beta, \gamma, \eta\}$ 表示。其中 α 为该结点的父结点的序号; β 为该结点在 SPF 树中所处的层数; γ 为该结点在该层中的顺序号; η 为该结点与其父结点之间连线的故障命中次数。

通过上述定义,任何结点 C 均可用唯一的方式描述出来。例如图 5 中的结点 C_{21} ,可描述为 $C_{21} = \{2, 2, 1, 7\}$,即结点 C_{21} 的父结点序号为 2,该结点处于第 2 层,在该子树中,该结点序号为 1,号,该结点与其父结点之间的关联系数为 7。

如果元件不是原子结点,为了得到更细的划分,只需要将定义 1 中 C 的数据结构展开,或进行拆分和迭代,即可实现 SPF 树中元件(树枝)的成长。不将 $C = \{\alpha, \beta, \gamma, \eta\}$ 展开,SPF 树为图 6 所示的抽象结构,这种抽象描述方法可简化 SPF 树的描述。

3.2.3 SPF 树的数学描述

假定 N 为故障现象记录的总数, n_i 为某已知故障现象 p_i 对应的故障原因总数;由 SPF 树的描述 $\{S, P, F, R\}$ 集合知:

$$S = \{S\},$$

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}, 1 \leq m \leq N;$$

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\},$$

$$F_i = \{F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{il}\}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq l \leq n_i;$$

$$R = \{[R_i, r_{ij}]\}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n_i;$$

$$\sum_{i=1}^m R_i = N; \sum_{j=1}^l r_{ij} = n_i;$$

$$R_i = R_{CP}.$$

上面 SPF 树对应的四元组集合,对于机械故障分析具有重要的意义, P 为已知故障现象的集合, F 为已知的故障原因的集合; R 为从已知故障现象到历史故障原因记录的转换矩阵。通过上面的抽象描述,给定故障现象找原因的问题就转化成了在 SPF 树中由已知树枝结点 p_i 查找该结点下的树叶边权重最大值 $\max(E_{ij})$ 的问题,即

$$D = \{\max(F_{ij}) \mid p = p_i\};$$

$$1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n_i. \quad (1)$$

公式(1)为解决机械故障问题提供了简化的思路。

3.2.4 SPF 树的自学习过程

新的故障现象 p 及其故障原因 f 被输入后, SPF 树根据现有的结构和知识对故障原因进行推导,并按照如下步骤对 SPF 树进行学习。

1)更新故障记录总次数

$$N = N + 1.$$

2)判断故障现象是否已知,确定是否需要更新参数 m,即

$$m = \begin{cases} m, p \in P, \\ m + 1, p \notin P. \end{cases}$$

3)更新故障现象的分布矩阵

$$R_i = \begin{cases} R_i, p \notin P_i \text{ and } p \in P, \\ R_i + 1, p \in P_i, \\ 1, p \notin P. \end{cases}$$

4)更新故障现象 P_i 的故障原因矩阵

$$r_{ij} = \begin{cases} r_{ij}, f \notin F_{ij} \text{ and } f \in F_i, \\ r_{ij} + 1, f \in F_{ij}, \\ 1, f \notin F_{ij} \text{ and } f \notin F_i. \end{cases}$$

5)更新故障现象 P_i 时的故障原因数目

$$n_i = \begin{cases} n_i, f \notin f_i, \\ n_i + 1, f \in f_i. \end{cases}$$

3.2.5 SPF 树的检索

由于 SPF 树中树枝强健度和树叶强健度的存在,在故障检索过程中,充分利用这 2 个参数有利于提高检索的命中率和搜索时间代价。

为此,可构造如图 7 所示的故障现象(元件-故障现象)队列或故障现象环,作为一级检索对象。当找到某一具体的元件-故障现象时,再按照树叶强健度从大到小构造故障原因 F 的链表,从而可最快确定故障原因的位置。

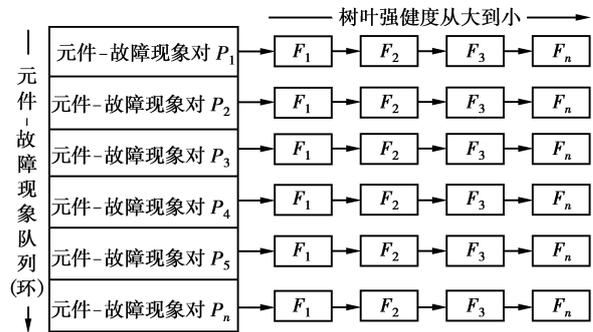


图 7 检索队列组织图

因此,SPF 树的检索过程必须划分成 2 个阶段:即位于树干的 1 级检索(故障现象队列层面)和位于树叶的 2 级检索(故障原因层面)。对于 1 级检索,采用广度优先搜索算法可在较短的时间内完成对故障现象面上的遍历,因此效率最高;对于 2 级检索,由于在构造树叶链表时,即采用了按照树叶强健度从大到小的次序,因此,采用最简单的顺序搜索即可得到理想的结果。

3.2.6 基于 SPF 树的故障统计

基于 SPF 树的滚齿机故障统计主要体现在以下方面:

1) 给定故障 F_{ij} 的发生率

$$F_{ij} = \frac{r_{ij}}{N} \times 100\%。 \quad (2)$$

2) 假定从树根到树干 C 的故障总次数为 R_i , 而故障 c 的父结点到该结点的故障次数为 η , 则元件 c 故障发生率

$$F_i = \frac{\eta}{N} \times 100\%。 \quad (3)$$

对于给定树干中元件 c 的故障发生率

$$F_c = \frac{\eta}{R_i} \times 100\%。 \quad (4)$$

3) 给定故障现象 P_i 下故障的发生率

$$F_{ij} = t_{ij} \times 100\% = \frac{r_{ij}}{n_i} \times 100\%。 \quad (5)$$

4) 故障命中率

$$F = \frac{\text{SPE 命中故障的次数}}{\text{故障的总次数}} \times 100\%。$$

3.3 基于 P2P (Peer-Peer) 的滚齿机网络化故障诊断服务的网络架构

大多数时候, 用户和生产企业之间传输的文件大小都比较小, 系统的网络服务器不会出现堵塞。但是, 当进行视频会议或需要传送通信量较大的文件时, 经常会造成服务器堵塞现象。为更好的开展滚齿机的网络化故障诊断服务, 课题组提出了一种新的开展滚齿机网络化故障诊断服务的网络架构。如图 8 所示。

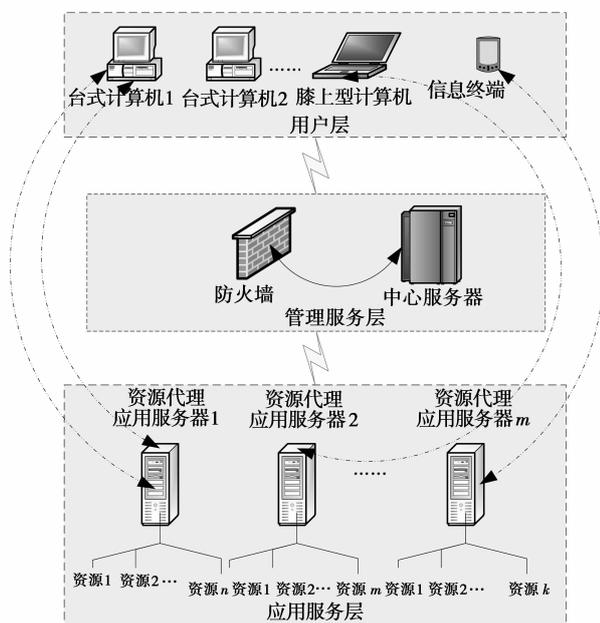


图 8 滚齿机网络化故障诊断服务的网络架构

该网络架构由 3 层组成:

用户层主要是各种台式机、笔记本电脑、信息终端用户等通过网络访问相应的服务器的各种资源。

管理服务层包括防火墙、中心服务器。中心服务器根据应用服务层中资源代理应用服务器划分功能的不同, 存储了用户需要的各种数据, 由用户的所有基本信息(包括网络信息、用户信息、访问权限)、搜索引擎、数据库及资源代理应用服务器内容的索引等组成。

应用服务层包括各种资源代理应用服务器, 如域名管理、产品协同开发、网络化销售、网络化分销等服务器。

上述网络架构的工作模式为: 用户在首次向服务中心发送请求的时候, 中心服务器首先根据用户权限判断用户是否可以得到服务中心的服务, 在通过判断之后, 中心服务器采集终端用户的请求, 并对消息进行分析、分类, 识别终端请求的类型, 通过请求类型来寻找服务中心的资源代理应用服务器, 确定资源代理应用服务器的位置, 提取该服务器的网络信息, 包括 IP 地址、权限等资料, 然后将用户的基本信息发送给所找到资源代理应用服务器, 与此同时将该服务器的资料发送给用户。

用户利用对等网络技术, 根据中心服务器所提供的资料会自动地直接地与该资源代理应用服务器建立连接, 完成信息的交互。

由上述工作步骤可看出, 该网络架构的特点为: 一旦用户资源代理服务器建立了联系之后, 不需要中心服务器的介入, 这样可有效地分担中心服务器的负载, 提供高效的服务。

4 应用实例分析

为了降低维护成本, 更好地为用户服务, 课题组结合重庆机床集团长期以来在滚齿机故障维修和维护方面积累起来的案例数据, 建立了“基于 SPF 故障树的网络化故障诊断专家系统”原型系统, 其体系结构如图 2。当滚齿机运行出现异常时, 启动如下故障诊断过程:

1) 操作人员启动故障诊断专家系统, 进行故障的初步检索。图 9 为滚齿机网络化故障诊断的一个案例, 在该案例中, 操作人员在加工过程中发现“加工的齿轮齿距均匀性变差”, 而能量监控传感器采集到的数据表明“机床的能量利用曲线波动变大”。为了诊断造成上述故障现象的原因, 操作人员在专家系统的检索界面中输入关键词, 例如“齿轮齿距不均匀”和“能耗波动加大”, 通过知识库中的 SPF 故障

树推理方法在故障数据库中进行匹配,并不断展开故障树进行搜索,故障现象匹配的结果给出了 5 种最大的故障结果,按照命中概率排序如下:1)轴向进

给主轴故障(46%);2)齿坯夹具松动(34%);3)齿轮滚刀损坏或角度不正确(8%);4)齿坯材质不均匀(7%);5)分度涡轮副故障(2%)。

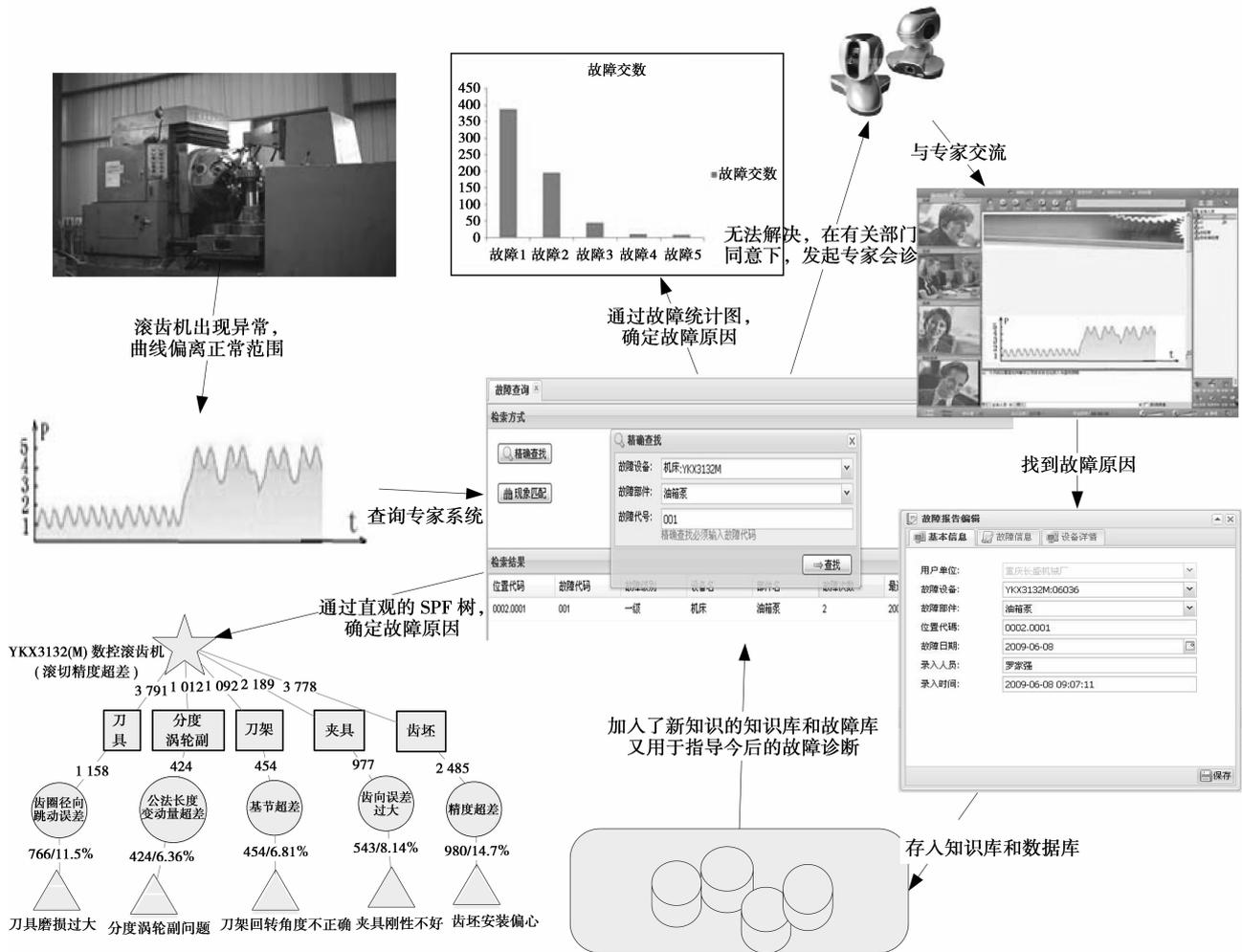


图 9 系统的故障诊断流程

2) 根据上述提示, 进行故障的初步排查工作。首先检查齿坯夹具是否松动, 齿轮滚刀是否损坏或角度是否正确, 但经过上述步骤后故障依旧。

3) 操作人员将上述故障及初步诊断的结果报告给上级部门, 并提出专家会诊请求, 预约专家。

4) 专家会诊。操作人员、主管部门和领域专家通过远程视频会议, 对上述问题进行诊断, 给出会诊结论为轴向进给主轴故障, 并给出相应的故障解决方案。

5) 故障解决后, 将上述故障现象、解决方案及相关信息加入到知识库和数据库中, 为今后类似故障的诊断提供依据。

试用结果表明, 通过系统给出的统计图、SPF 故障树及其它故障诊断结果, 大多数的简单故障可找

到相应的解决方案, 操作者只需要按照系统中提供的故障诊断帮助程序皆可解决这些问题。对于比较复杂或生僻的故障, 需要通过专家会诊才能排除。总之, 该系统的应用使得公司售后服务成本大为降低, 同时也为用户单位节约了大量的资金和时间, 提高了生产效率。

5 结 论

1) 提出了滚齿机网络化故障诊断系统运行模式, 并对其进行了基于用户端和服务提供端的应用模式分析, 该模式对于超越地域限制的系统应用提供了基础。

2) 提出了滚齿机网络化故障诊断专家系统的系统结构, 该结构包括支撑层、业务处理层和应用层等

3个主要层次,并和作业车间、人员系统以及其他系统进行交互,一方面实现数据和知识的实时采集,另一方面向用户提供多层次的故障诊断和解决方案。

3)研究了滚齿机网络化故障诊断专家系统的关键技术及其实现方法,重点分析了基于SPF树的多元故障知识表达方式和推理机制,解决了滚齿机网络化故障诊断专家系统的系统结构的主要技术难题,为系统的实现奠定基础。

4)将上述研究成果在滚齿机生产厂商及其用户单位进行试用,结果表明本系统能有效地提高了该公司及其用户企业的售后服务质量,降低其维修成本。

参考文献:

- [1] 齿轮手册编委会. 齿轮手册[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [2] 葛哲学,杨拥民,胡政,等. 非高斯噪声下基于U-粒子滤波器和似然比的非线性系统故障诊断[J]. 机械工程学报,2007,43(10):27-31.
GE ZHE-XUE, YANG YONG-MIN, HU ZHENG, et al. Unscented particle filter and log likelihood ration based fault diagnosis of nonlinear system in non-Gaussian noises [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(10):27-31.
- [3] 刘占生,窦唯,王东华,等. 基于遗传算法的旋转机械故障诊断方法融合[J]. 机械工程学报,2007,43(10):227-233.
LIU ZHAN-SHENG, DOU WEI, WANG DONG-HUA, et al. Rotating machinery fault diagnosis combination of method based on genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (10): 227-233.
- [4] 袁胜发,褚福磊,何永勇. 基于网格支持矢量机的涡轮泵多故障诊断[J]. 机械工程学报,2007,43(4):152-158.
YUAN SHENG-FA, CHU FU-LEI, HE YONG-YONG. Multi-fault diagnosis for turbo-pump based on mesh support vector machines [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(4): 152-158.
- [5] 邵延峰,薛红军. 故障树分析法在系统故障诊断中的应用[J]. 中国制造业信息化,2007,36(1):72-74.
SHAO YAN-FENG, XUE HONG-JUN. The application of fault tree analysis in system fault diagnosis [J]. Chinese Manufacturing Information, 2007,36(1):72-74.
- [6] 徐翔斌,周新建. 基于决策树和规则引擎的挖掘机液压故障诊断专家系统[J]. 液压与气动,2008(3):13-16.
XU XIANG-BIN, ZHOU XIN-JIAN. Excavator's fault diagnosis expert system based on decision tree and rule engine[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2008(3): 13-16.
- [7] KAREN A R, JOHN D A. A fault tree analysis strategy using binary decision diagrams[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 78(1):45-56.
- [8] VINCE A. A framework for the greedy algorithm discrete[J]. Applied Mathematics, 2002, 121(1/3):247-260.
- [9] SINGER D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems,1990,34(2):145-155.
- [10] JOHN S T, CRISTIANIMI N. Kernel methods for pattern analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [11] GOULERMAS J Y, LIATISIS P, ZENG X J, et al. Density-driven generalized regression neural networks (DD-GRNN) for function ap-proximation [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2007, 18 (6):1683-1696.
- [12] ESTIVILL-CASTRO V, LEE I. Clustering with obstacles forgeographical data mining [J]. ISPRS Journal of Photogramme-try and Remote Sensing, 2004,59(1/2):21-34.
- [13] SPIELMAN S E, THILL J C. Social area analysis, data mining, and GIS[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2008, 32 (2):110-122.
- [14] BEAUBOUEF T, PETRY F E, LADNER R. Spatial data methods and vague regions: a rough set approach[J]. Applied Soft Computing, 2007 (7):425-440.
- [15] WANG C H. Recognition of semiconductor defect patterns using spatial filtering and spectral clustering [J]. Expert Systems with Applications, 2008,34(3):1914-1923.
- [16] DEMSAR U. Investigating visual exploration of geospatial data: an exploratory usability experiment for visual data mining[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2007, 31 (5):551-571.
- [17] YANG J, MA X L, YANG D Q. Diagnosis and treatment expert system of Chinese traditional medicine using case-based reasoning [J]. The Applications of Micro-computer, 2008,24(2):37-39.
- [18] MALONE J, MCGARRY K, BOWERMAN C. Automated trend analysis of proteomics data usinganIntelligent data mining architecture[J]. Expert Systems with Applications, 2006, 30(1):24-33.
- [19] LEE A J T, HONG R W, KO W M, et al. Mining spatial asso-ciation rules in image databases [J]. Information Sciences, 2007, 177 (7):1593-1608.
- [20] 亢英英,习俊通,严隽琪. FDM快速成型机启动运行

- 状态的远程监测[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(9):771-775.
- HANG YING-YING, XI JUN-TONG, YAN JUN-QI. Remote monitoring & diagnosis of breaking-down fault for FDM rapid prototyping Machine [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(9): 771-775.
- [21] 刘飞, 鄢萍, 任海军, 等. 基于机床功率信息自动采集机械加工任务进度状态的方法: 中国, 200710078406. 1[P]. 2007-04-20.
- [22] 刘飞, 鄢萍, 贺德强, 等. 网络化制造系统中的多功能交互式信息终端: 中国, 02113585. 1[P]. 2002-04-06.
- [23] 鄢萍, 陈国荣, 易润中, 等. 一种基于复杂网络的制造系统生产进度的提取方法: 中国, 200910103062. 4 [P]. 2009-01-15.
- [24] 杨涛, 黄树红, 高伟, 等. 网络化汽轮机组远程监测及故障诊断系统的研究[J]. 动力工程, 2004, 24(6): 840-844.
- YANG TAO, HUANG SHU-HONG, GAO WEI, et al. Long-distance networked steam turbine group monitoring and fault diagnose systematic research[J]. Power Engineering, 2004, 24(6): 840-844.

(编辑 张 苹)

~~~~~

(上接第 61 页)

- [8] 肖新华, 史明华, 杨小凤, 等. 基于模块化产品实例的变型设计技术研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 803-807.
- XIAO XIN-HUA, SHI MING-HUA, YANG XIAO-FENG, et al. Research on variant design based on modular product case [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(7): 803-807.
- [9] 冯毅雄, 程锦, 谭建荣, 等. 面向大批量定制的配置产品变型设计[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(2): 315-318.
- FENG YI-XIONG, CHENG JIN, TAN JIAN-RONG, et al. Configuration product variant design for mass customization [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(2): 315-318.
- [10] LAU A, TSUI E, LEE W B. An ontology-based similarity measurement for problem-based case reasoning [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 6574-6579.
- [11] CHANG X, SAHIN A, TERPENNY J. An ontology-based support for product conceptual design [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(6): 755-762.
- [12] BRANDT S C, MORBACH J, MIATIDIS M, et al. An ontology-based approach to knowledge management in design processes [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(1/2): 320-342.
- [13] 阎春平, 范辉先, 刘飞. 基于表达式的产品资源本体建模技术[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(11): 2113-2119.
- YAN CHUN-PING, FAN HUI-XIAN, LIU FEI. Products resources ontology modeling technology based on the expression [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(11): 2113-2119.
- [14] 鲁玉军, 余军合, 祁国宁, 等. 基于事物特性表的产品变型设计[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(10): 840-853.
- LU YU-JUN, YU JUN-HE, QI GUO-NING, et al. Product variant design based on tabular layouts of article characteristics [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(10): 840-853.
- [15] BESHARATI B, AZARM S, KANNAN P K. A decision support system for product design selection: a generalized purchase modeling approach[J]. Decision Support Systems, 2006, 42(1): 333-350.

(编辑 张 苹)