

滚动轴承故障诊断专家系统的研究*

施敏芳^① 吕俊白^②

(^①华侨大学精密机械工程系, ^② 华侨大学计算机科学系, 泉州 362011)

摘要 对专家系统技术在滚动轴承故障诊断中的应用进行了探索和研究. 文中介绍了开发滚动轴承故障在线诊断专家系统的设计思想和实现方法, 并重点讨论知识库的开发以及实时数据库的建立.

关键词 在线故障诊断, 滚动轴承, 专家系统, 故障树

分类号 TH 165.3

随着计算机技术在实时监测与诊断领域应用的不断深化, 将基于知识的专家系统技术应用于诊断领域已成为现代诊断技术发展的重要方向. 滚动轴承是旋转机械中最常采用的部件之一, 也是容易产生故障的部件. 近年来, 国内外有关轴承的研究表明, 轴承的振动与噪声对机电设备的振动、噪声及寿命有重要的影响. 因此, 对滚动轴承的故障预测和诊断技术是当今国内外研究的重点. 本文所介绍的滚动轴承故障诊断专家系统是我们研制“旋转机械故障集成诊断专家系统”的一个子系统. 它可用于对滚动轴承的运行工况进行在线监测; 能及时预报轴承在运行中出现的异常现象并对其故障进行诊断, 同时分析故障原因和提出处理对策.

1 诊断特征提取

为正确识别、诊断滚动轴承的故障, 必须合理地提取诊断特征. 滚动轴承由于使用条件和环境的不同, 会出现磨损、压痕、裂纹、表面剥落、胶着、烧损、锈蚀、变色等各种异常现象, 这些异常现象将引起设备振动. 因此, 采用振动诊断法, 通过监测旋转机械运行时轴承处的振动信号, 然后进行数据处理、信号分析, 就可判定滚动轴承的工况是否正常, 进而诊断其故障. 为此, 我们提取特征频率和固有频率作为诊断特征.

1.1 特征频率

滚动轴承产生故障时, 其内、外滚道、滚动体和保持架可能会有缺陷. 当滚动体通过缺陷位置时, 将发生冲击而产生周期性故障冲击脉冲, 从而引起轴承振动. 而冲击脉冲的周期 T 是由产生缺陷的部位决定的, 其周期 T 的倒数为 f_r ($f_r = 1/T$). f_r 反映了故障特征, 称 f_r 为特征频率^[1]. 当机器在匀速状态下运行, 若轴承出现故障, 则在其振动频谱是会出现特征频率的谱峰(振幅增大). 因此, 可以用故障的特征频率作为诊断特征.

* 本文 1996-02-06 收到; 福建省自然科学基金资助项目

根据几何学的条件,轴承旋转时由于故障而产生的特征频率求法如下:设 n 为机器转速, D 为轴承节圆直径, d 为滚动体直径, N 为滚动体个数, α 为接触角,则保持架故障特征频率 $f_c = \frac{n}{120}(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha)$; 外环的故障特征频率 $f_o = \frac{Nn}{120}(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha)$; 内环的故障特征频率 $f_i = \frac{Nn}{120}(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha)$; 滚动体故障特征频率 $f_b = \frac{n}{120}[1 - (\frac{d}{D}\cos\alpha)^2]$.

1.2 固有频率

为避开流体动力噪声的干扰,提高诊断信号的信噪比,目前多采用 20~60 kHz 的频带作为诊断频带. 轴承元件的固有频率(一般为 20~40 kHz)就在这一频带内,轴承元件出现缺陷或结构不规则时,激发各个元件以其固有频率振动(振幅增大). 由于各轴承元件的固有频率取决于本身的材料、外形和质量,因此其振动与轴的回转频率无关. 例如,滚动体(钢球)固有频率为 $f_b = \frac{0.424}{r} \sqrt{E/2\rho}$ Hz^[2]. 式中 r 为半径(m), ρ 为材料密度(kg·m⁻³), E 为弹性模量(N·m⁻²). 由轴承故障产生的冲击,会激起轴承的共振,振动信号的幅度值大小体现了冲击力的大小,直接反应了轴承的损坏情况. 因此,可提取固有频率作为诊断特征参数.

2 系统组成

图 1 为滚动轴承故障诊断专家系统的结构框图.

(1) 知识获取机构. 为获取和管理知识提供各项操作,本系统为用户提供动态编辑知识库的功能,能对知识进行动态编辑,即实现知识的录入、添加、删除与修改.

(2) 解释机构. 用于提供关于推理过程的解释,用“HOW?”解释系统如何得到结论;用“WHY?”解释系统为什么要提问有关数据;用“HELP”提供帮助信息等.

知识库中包含关于滚动轴承诊断方法与策略的知识,以及诊断对象的征兆与故障之间的各种因果关系知识等. 它具有知识存储、检索、编排和修改等功能.

为了便于对知识库的应用和管理,我们将诊断知识分类和分级,以构造模块化的知识库. 数据库中存放着用户咨询时输入的数据、系统运行所需的初始数据、判断轴承工况的诊断标准数据,以及通过在线监测模块得到的机器运行状况的动态数据;同时还存放着系统推理过程根据规则得到的结论及解释系统回答提问的运行记录. 推理机根据当前用户输入的信息或在线监测所得到的振动信息,利用知识库中的知识,按一定的推理策略进行推理,最后得出诊断结论,做出维修对策. 本系统推理机具有正向推理、反向推理及正反向混合推理. 诊断中采用正反向混合推理为主,先通过正向推理选择初始目标,然后通过反向推理求解释验证这个目标,从而增加诊断的可靠性.

在线监测模块用于对滚动轴承的运行工况进行监测. 它由加速度传感器、电荷放大器、滤波器及 HY6070A/D 转换接口板组成. 在软件支持下,实现微型机对振动信号的在线采集、数据处理和频率分析.

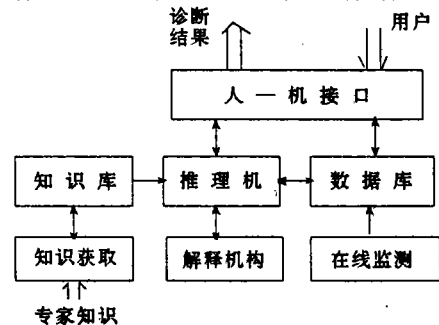


图1 滚动轴承故障诊断专家系统框图

(3) 人-机接口. 本系统采用多窗口方式显示咨询信息、跟踪推理过程和诊断结论, 用下拉式菜单供用户可方便地选择相应的操作, 系统在咨询中可自动生成一个以菜单形式给出的屏幕提示信息. 因此, 用户可以通过菜单选择和屏幕提示, 方便地进行问诊、咨询和诊断并直观地看到诊断结论.

3 诊断知识模型

专家系统的质量在很大程度上取决于它存储知识的完备性、有效性、正确性和可维护性; 其次, 知识的表达和存贮形式还应当有利于推理的检索、匹配. 为此, 本系统采用建立故障树、形成诊断模型以及用产生式规则为主的知识表示方法. 故障树分析法是故障分析中之有效的经典方法. 我们把滚动轴承运行中出现异常现象而产生振动作为顶事件(最不希望发生的事件), 而后按产生故障的类型、原因等由总体到各部分按树枝状逐渐细化, 构成能描述滚动轴承故障的故障树, 其结构如图2所示. 图2仅表示某一故障树的部分知识.

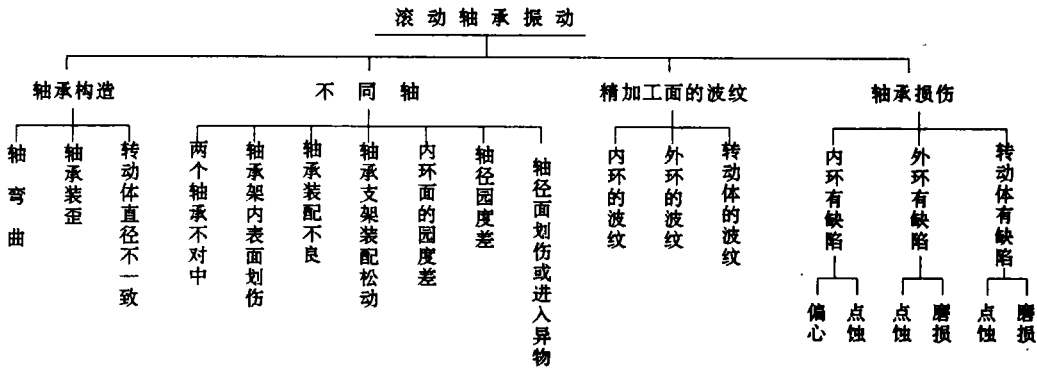


图2 滚动轴承振动诊断故障树

在知识库总体设计中, 采用分层设计, 以模块为单位, 建立模块故障树, 形成诊断模型. 对于滚动轴承的故障事件, 按不同层次的范畴(如故障类别集合、故障原因集合、故障维修对策集合等)建立若干棵故障树. 这样, 每一模块对应于一棵故障树的知识描述, 而在一个模块内的知识则按树状组织. 在故障树中的每一结点事件都包含有判断其是否发生故障的滚动轴承状态监测信息、专家诊断经验信息或维修决策信息等. 而后对故障树进行知识编码, 存入知识库, 以便于对知识库的检索、调用和扩充.

本系统知识表示采用以产生式规则为主的方法, 每条产生式规则均由前项和后项组成. 前项表示引发事件的条件, 后项表示引发的结论. 规则与结论既可是进入下层结点的入口, 又可激活另一棵故障树, 从而体现了针对同一故障事件, 从不同侧面所建立的故障树之间的联系. 例如, 根据利用低频振动诊断滚动轴承损伤, 用相对值判定标准, 其对应的一组规则(Rule₁)为

1F 转速 $n=1480 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ AND 振幅值 $A=0.048 \text{ V}$
 AND 故障频率 $f_r=217 \text{ Hz}$ then Falt₁(轴承出现故障)

在故障诊断过程中, 采用产生式规则表示知识, 并对规则与结论进行编码, 这有利于知识的管理与推理, 加速推理过程各规则的搜索与匹配, 从而提高诊断效率.

4 数据库的建立

本专家系统的数据库由静态数据库和动态数据库组成。静态数据库收集了判定滚动轴承工况及诊断故障的有关数据、图表及曲线,可利用数据库软件 lotus 1-2-3 编写静态数据库文件。动态数据库存放着在线监测滚动轴承工况变化的数据信息,以及解释机构运行信息和诊断推理结果等。现着重讨论在线监测与动态数据库的建立。为了保证系统能进行在线故障诊断,必须确保被测数据的实时性^[3]。为此,动态数据库中数据的存取、更新及查询速度是设计中的关键,本设计主要采取下列措施。

(1) 利用 HY6070 接口板作为 A/D 转换板。它具有 16 个模拟量单端输入,通过微型机的 RS232 总线接口直接与在线检测方框中的滤波器输出端连接,从而实现在线检测信号的直接传送。

(2) 利用 8086 汇编语言编写数据采集程序,将 A/D 转换后的数据读入内存并形成数据文件,如图 3 所示。而后由软件进行数据处理及频率分析。由于采集的实时数据存放在特定内存区中,CPU 可直接访问,从而避免了系统读写磁盘数据库文件所产生的时延,提高了系统的响应速度,以满足在线诊断的需求。

(3) 在振动诊断中,我们将故障特征数据存放在动态库中,系统在推理诊断过程为完成动态数据与静态标准数据的比较,理论上必须要求每对被比较的数据均应对应同一频率。这在实际上是很难完全实现。所以,在数据处理程序模块中,增加

一子块,其功能是将动态数据库中取出的数据,根据其频率归类入某一频率范围,而后取在这频率范围内的信号幅值最大者作为该频率的幅值。设计中频率范围定为 ± 5 Hz,例如, $f_r = 100$ Hz,取频率为 95~105 Hz 中幅值最大者为该点的幅值。这种将某频率邻近范围内的值定为该频率点幅值的方法,解决了动态数据的不确定性与静态数据确定性之间不易比较的矛盾,从而使系统能实现对滚动轴承故障的在线诊断。

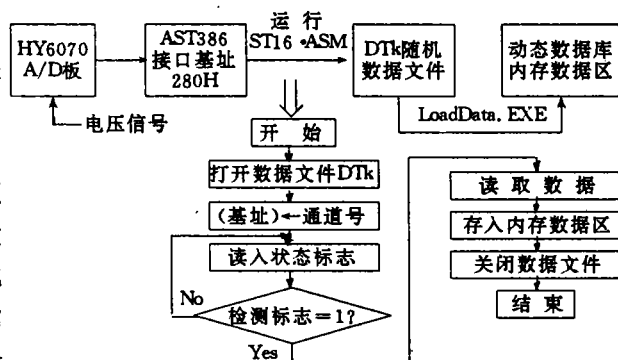


图3 实时数据采集流程框图

5 诊断实例

在诊断推理过程中,推理机根据在线监测滚动轴承工况所得到的故障信息,在激活的知识库中搜索合适的知识,完成故障信息与假设间的匹配过程,并通过动态数据库记录与诊断有关的各种初始数据、中间结果和最终诊断结果,最后显示并打印诊断结果。

现以压缩机的滚动轴承故障诊断为例说明之。压缩机在运行中发现振动及噪声很大,用本系统进行在线监测与诊断。压缩机的主动轴及从动轴上各有两个相同规格的滚动轴承,主动轴的轴承型号为 7315,其参数为:滚动体个数 N 为 11;节径 D 为 132.5 mm;钢球直径 d 为 26 mm;接触角 α 为 10° 。其诊断步骤如下:(1) 系统启动后,从屏幕主菜单选择“滚动轴承故障在线诊断”项,并调入相应的知识库模块,然后开始诊断;(2) 根据屏幕窗口提示,键入被测滚动

轴承参数后,按“回车”键,系统自动算出特征频率(本例 $f_0=109\text{ Hz}$)并显示;(3) 读入实时检测数据并显示: $n=1480\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,故障频率 $f=217\text{ Hz}$,幅值 $A=0.048\text{ V}$;(4) 推理机根据实测数据激活知识库中的相应规则以进行匹配诊断、搜索并判定故障点;(5) 诊断结果确定的故障频率 217 Hz 相当于 2 倍的 f_0 (本例 $f_0=109\text{ Hz}$ 是轴承外圈点蚀产生振动的特征频率),故判定轴承外环有缺陷;(6) 调用故障原因分析的知识模块,说明故障原因,并提出维修建议。(7) 显示并打印出诊断报告如图 4 所示。

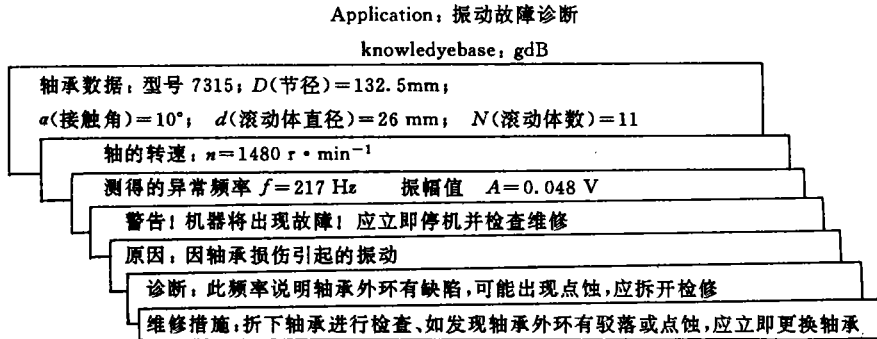


图 4 压缩机的滚动轴承故障诊断报告

6 结束语

本文所介绍的“滚动轴承故障诊断专家系统”的软、硬件已研制成功,实践运行效果良好。它为滚动轴承工况在线监测与故障诊断提供了一种较好的方法,具有实用推广价值。

参 考 文 献

- 1 袁宏义,牛明忠. 设备振动诊断技术基础. 北京:国防工业出版社,1991. 122~125
- 2 屈梁生,何正嘉. 机械故障诊断学. 上海:上海科学技术出版社,1986. 87~88.
- 3 汤 和,徐滨宽. 机械设备的计算机辅助诊断. 天津:天津大学出版社,1992. 65~67

A Study of an Expert System for Fault Diagnosis of Rolling Bearing

Shi Minfang^① Lu Junbai^②

(① Dept. of Precis. Mech. Eng., Huaqiao Univ., ② Dept. of Computer Science, Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A study is made on the application of expert system technology to the fault diagnosis of rolling bearing. For the on-line fault diagnosis of rolling bearing, the design principle of an expert system and the method to carry it out are described, with emphasis on the development of a knowledge base and the establishment of a real-time database.

Keywords on-line fault diagnosis, rolling bearing, expert system, fault tree