

液压系统故障诊断方法综述

范士娟, 杨超

(华东交通大学机电工程学院, 江西南昌 330013)

摘要: 对液压系统故障诊断的主要理论和方法进行了归纳和分类, 对各种方法的局限性和适用范围进行了定性分析, 指出了将多种智能诊断方法及其它现代技术相互融合是液压系统故障诊断技术未来发展的趋势。

关键词: 液压系统; 故障诊断; 智能诊断法

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2009)5-188-5

A Survey of Fault-diagnosis Methods for Hydraulic System

FAN Shijuan, YANG Chao

(School of Mechatronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract Main fault-diagnosis theories and methods for hydraulic system were summed up and classified. Limitation and applicability of each method was analyzed qualitatively, and it was pointed out that the important development trend of fault-diagnosis technology for hydraulic system in the future is to combine different intelligent diagnostic methods and other modern technologies.

Keywords Hydraulic system; Fault diagnosis; Intelligent diagnostic method

0 引言

液压系统具有容量大、结构紧凑、安装灵活、反应快、易控制、输出力(或力矩)大等诸多独特的优点,在现代机械设备尤其是大型、特大型设备中得到越来越广泛的应用。但由于系统中元、辅件以及工作液体性能的不稳定和使用、维护上的不当,造成液压系统容易出现故障。随着液压工业的发展,液压系统及设备的功能越来越复杂,发生故障的概率也随之增加。由于液压系统中各元件和工作液体都是在封闭油路内工作的,属于封闭的管路循环系统,其故障不直观,既不方便、也不容易检查,造成诊断困难。因此,近几十年来,液压系统的故障诊断成为一门热门学科,并得到迅速发展。

液压系统是机、电、液耦合的复杂系统,其故障也是复杂的问题。在传统诊断技术的基础上,人们把液压控制理论、信息理论和电子技术、传感器技术以及识别技术等进行结合并应用于液压系统,形成了很多新的液压故障诊断方法。作者将液压系统故障诊断方法归为三大类:主观诊断法、基于数学模型与信息处理诊断法和智能诊断法。

1 主观诊断法

主观诊断法是设备维修部门普遍采用的方法,主要是依靠人的感官或简单的诊断仪器,凭借领域专家的实践经验,判断产生故障的部位和原因,并提出相应的排除方法。主观诊断法主要包括感官诊断法、逻辑逼近分析法、参数测量比较法、方框图分析

法、鱼刺图分析法等。

1.1 感官诊断法

感官诊断法简单易行,类似中医为病人看病,采用“望、闻、问、切”等方式,对液压系统的实际工作状况是否异常给出定性判断。

(1) 望:观察系统各运动部件有无跳动、冲击等异常现象;油液是否清洁和变质、油量是否满足要求、油面是否有泡沫;各接头、结合面及密封处是否泄漏;执行机构有无速度变化;系统各测点压力、流量有无波动现象等。

(2) 闻:液压系统工作时的噪声是否过大;执行部件换向时冲击声是否过大;液压泵和管路中是否有敲打撞击声等。通过“闻”可以初步判断系统是否存在联接处松动、密封不严、共振和液压冲击等现象。

(3) 问:询问设备操作者,了解设备平时运动情况。例如何时换油、清洗或更换滤芯,液压泵有无异常现象,发生事故前调压阀和流量阀是否调节过,发生事故前后是否更换过密封件或液压元件、出现过哪些不正常现象,过去常出现的故障是怎样排除的。

(4) 切:用触觉来判别液压系统的工作是否正常。摸泵体、阀体和油箱外壁,感受温度是否过高;摸运动部件、管道和压力阀等,感受是否有振动、振动的强烈程度,以及是否存在高频振动;感受运动部件低速运动时是否有爬行现象;摸挡块、电磁阀的紧固螺钉,感受是否松动。

收稿日期: 2008-05-05

作者简介: 范士娟(1969—),女,吉林东丰人,硕士,副教授,主要从事液压传动与控制方面的教学与科研工作。电话:

0791-7046134, E-mail: fanshijuan_69@163.com.

该诊断法只能对简单液压设备的故障进行定性判断, 难以对复杂液压设备的故障进行判断。

1.2 逻辑逼近分析法

液压设备的故障具有扩散性, 即系统中某一元件发生了故障, 往往会导致一系列元件异常。对于复杂的液压系统, 一旦发生故障, 常常不易立即找出故障部位和根源。为了避免盲目, 必须根据液压系统图, 按一定的思考方法, 合乎逻辑地分析故障所在, 减少怀疑对象, 逐渐逼近, 逐步缩小故障分析和检查工作范围, 找出故障发生部位 (发生故障的部件和元件), 达到快速诊断和及时排除故障的目的, 这种方法就是逻辑逼近分析法, 也叫逻辑分析法, 是复杂液压系统故障诊断的常用方法。

这种诊断法实践性较强, 欲熟练运用这一方法, 要求使用者掌握该专业的理论知识; 熟悉设备的性能、原理、结构以及技术参数; 有较强的动手能力, 熟练掌握系统原件的拆装工艺、调试检测方法。该分析法只能定性分析, 若将该分析法与专用检测仪器的测试相结合, 就可显著地提高故障诊断的效率及准确性。

1.3 参数测量比较法

参数测量比较法通过检测液压系统的主要工作参数, 找出系统中工作参数值与设备正常工况值不符合的液压元件, 从而判断故障的所在。该方法常采用液压诊断器来对液压故障进行诊断: 将液压系统的性能参数、压力、流量、温度等参数通过液压诊断器的加载装置、传感器、仪器仪表集成在一起显示出来, 如果这些参数偏离了预定值就会出现故障或有可能出现故障。因此, 用测量这些参数的方法不但可以诊断液压故障, 还能预报可能发生的故障。

1.4 其它分析法

方框图分析法根据故障现象, 罗列出可能发生这种故障的所有原因, 然后根据现场实际工况, 逐步找出故障原因。鱼刺图分析法是一种因果关系分析法, 根据液压设备出现的故障进行分析, 找出故障的主要因素。这种方法既能较快地找出故障主次原因, 又能积累排除故障的经验。罗建明^[1]采用方框图分析法对铸造流水线中“型砂压实机”液压缸故障进行了分析; 利用鱼刺图分析法分析了磨床工作台爬行的故障。

2 基于数学模型与信息处理的诊断法

随着诊断理论、传感器技术的发展, 其它领域成熟的诊断方法也很快在液压领域中得到应用, 逐步形成了基于数学模型与信息处理的诊断法。这种诊断方法是用一定的数学手段描述系统某些可测量特征量在幅值、相位、频率及相关性上与故障源之间的联系, 通过测量、分析、处理这些可测量特征量的信号, 来

判断故障源所在。基于数学模型与信息处理的故障诊断方法通常有状态估计方法、参数估计方法、时域分析法、频域分析法、时频域分析法、多传感器信息融合法等。

2.1 状态估计方法^[2]

状态估计方法的基本思想: 重构被控过程的状态, 通过可测变量的比较构成残差序列, 再构造适当的模型并用统计检验法, 从残差序列中把故障检测出来。因此, 这种方法要求系统可观测或部分可观测, 通常用各种状态观测器或滤波器进行状态估计。

2.2 参数估计方法

与状态估计方法不同, 参数估计方法不需要计算残差序列, 而是根据参数变化的统计特性来检测故障的发生。液压系统工作状态的参数主要是工作压力与温度, 以及系统的流量和泵组功率等, 系统工作过程中出现的任何问题直接或间接地与这几个参数有关, 因此根据液压系统工作状态参数来诊断系统故障是可行的。参数估计方法不但可以诊断液压故障, 还能预报可能发生的故障。

2.3 时域分析法

时域分析方法从时间波形、幅值上直接观测状态信息的波形和强度, 利用示性指标如峰-峰值、均值、方均根幅值及波形因素, 判断泵源是否有故障。

2.4 频域分析法

液压泵状态信号的频谱分析可揭示泵源工作的频率结构, 是液压泵故障诊断的重要途径。振动、噪声等是液压系统在运行过程中所发生的必然现象, 提取这些信号并进行频谱分析, 根据待检谱与正常时的标准谱之间的差异也可确定故障的部位、程度、类别和原因。通过频谱分析, 找出振动的特征频率, 与动力系统的工作频率进行比较, 可以检查系统是否共振, 为故障的处理提供依据。常用频域分析方法主要有^[3-7]自功率谱、高阶谱、倒谱包络等方法。

2.5 时频域分析法

泵源壳体振动信号包含丰富的冲击成分, 呈现典型的非平稳时变特征, 需要从时域和频域综合描述振动信号, 才能有效提取故障特征信息, 这是小波分析的重要特性。小波变换在时域和频域均具有良好的局部化性质, 可用多重分辨率来刻画信号局部特征, 适合于探测正常信号中夹带瞬态反常现象并展示其成分, 对于液压泵轴承损伤、泄漏等微弱特征信号, 小波分析是行之有效的方法^[8-13]。

小波分析法利用可检测信号的奇异性 (对于随机信号则是频率结构的突变) 的特点来实现故障诊断。因为噪声的小波变换的模极大值随着尺度的增大迅速衰减, 而信号的小波变换在突变点的模极大值随着尺度的增大而增大 (或由于噪声的影响而缓慢衰

减), 所以, 可以用连续小波变换区分信号突变和噪声, 剩下的就对应于系统故障。

2.6 多传感器信息融合法^[14-21]

液压系统工作环境恶劣, 监测信号通常杂乱无章, 容易被干扰信号淹没, 单一传感器提取的信息, 其时、频特征信息常呈现出较强的模糊性, 采用常规信号处理方法难以有效提升故障特征。从故障诊断学角度来看, 任何一种诊断信息都是模糊的、不精确的, 对任何一种诊断对象, 用单一信息来反映其状态行为都是不完整的。如果从多方面获取同一对象的多维故障冗余信息, 加以综合利用, 就能对系统进行更可靠、更精确的监测和诊断。多传感器从不同角度提取不同类型的冗余故障信息, 最后在数据层、特征层或决策层综合, 避免单一故障信号诊断时出现的误警及虚警现象, 提高诊断结果的可靠性。

基于数学模型与信息处理的故障诊断方法需要提取系统特征参数或对系统建模, 而液压系统由于元件工作在封闭油路中, 影响液压系统特性的因素多种多样且相互之间产生耦合影响, 不易得到能准确反映故障的特征参数; 同时, 液压系统一般都是由机、电、液耦合而成, 存在着非线性时变环节, 对系统建模也显得相当困难。所以基于数学模型与信息处理的故障诊断方法在液压系统故障诊断的应用中有待于进一步改进。

3 智能诊断法

液压故障的多样性、突发性、成因的复杂性和进行故障诊断所需要的知识对领域专家实践经验和诊断策略的依赖, 使研制智能化的液压故障诊断系统成为当前的趋势。智能诊断技术在知识层次上实现了辨证逻辑与数理逻辑的集成、符号逻辑与数值处理的统一、推理过程与算法过程的统一、知识库与数据库的交互等功能, 为构建智能化的液压故障诊断系统提供了坚实的基础。目前, 基于智能技术的故障诊断法主要有基于神经网络的诊断法、基于专家系统的诊断法、基于模糊逻辑的诊断法、基于故障树分析的诊断法和基于实例推理的诊断法等。

3.1 基于神经网络的诊断法^[22-29]

基于神经网络的诊断法是利用神经网络具有非线性性和自学习以及并行计算能力, 对液压系统的故障进行诊断。其具体应用方式有: 从模式识别角度应用神经网络作为分类器进行液压系统故障诊断; 从故障预测角度应用神经网络作为动态模型进行液压系统故障预测; 从检测故障的角度应用神经网络得到残差进行液压系统故障检测。由于液压系统故障的特征、原因普遍存在不确定性, 而神经网络诊断方法存在故障判断中非此即彼的绝对性, 往往与实际不符, 需要对诊断法进行改进或结合其它诊断法, 构造新的诊断方

法, 来克服传统神经网络诊断的绝对性。

3.2 基于专家系统的诊断法^[30-33]

专家系统是一种基于知识的应用软件系统, 从领域专家那里获得专业知识, 用来解决只有专家才能解决的困难问题, 主要用于没有精确数学模型或很难建立数学模型的复杂系统。基于专家系统的诊断法, 利用知识的永久性、共享性和易于编辑等特点, 以及知识的解释能力, 结合神经网络所具有的容错能力、学习功能、联想记忆功能、分布式并行信息处理。

液压系统的故障诊断和排除需要应用大量独特的专家实践经验和诊断策略, 而且某些故障的外在表现往往与多种潜在故障有关, 症状与原因之间存在各种各样的重叠和交叉, 很难实现量化测量, 再加上液压系统本身结构、原理复杂, 往往给故障诊断带来不便。将专家系统应用于液压系统的故障诊断则是非常有效的措施。

液压系统故障诊断专家系统以先进传感技术与信号处理技术为基础, 通过用户接口将故障现象输入计算机, 由计算机根据输入的故障现象及知识库中的知识, 按推理机中存放的推理方法, 推理出故障原因, 并提出维修和预防措施。

3.3 基于模糊逻辑的诊断法^[34]

基于模糊逻辑的诊断法是借助模糊数学中的模糊隶属关系提出的一种新的诊断方法。由于液压系统故障既有确定性的, 也有模糊性的, 表现为同一故障可能由不同的原因造成, 同一故障可能会产生不同的故障特征, 不同的故障也可能引起同样的故障特征, 多故障并发时故障特征更加复杂, 即诊断结果可能不唯一。当确定性故障和模糊性故障相互交织、密切相连时, 就需要通过探讨液压系统故障的模糊性, 寻找与之相适应的诊断方法, 才能有利于正确描述故障的真实状态, 揭示其本质特征。例如, 将模糊逻辑与神经网络融合为模糊神经网络, 就可以充分发挥两者的优势。模糊神经网络的输入、输出都是隶属度, 既可以处理语义形式的输入, 又可以适应模糊性质的数据, 其诊断结果不再是单一的分类结果, 而是各类故障的隶属度, 从而克服传统神经网络诊断的绝对性。

3.4 基于故障树分析的诊断法^[35-36]

故障树分析法是一种图形演绎方法, 通过对可能造成系统故障的各种因素进行分析, 画出逻辑框图(故障树), 再对系统中发生的故障事件, 由总体至部分按树枝状逐级细化的分析, 其目的就是判明基本故障、确定故障原因、故障影响和发生概率等。故障树分析诊断法的关键是建立故障树, 故障树完善与否直接影响到分析结果的准确性。因而, 需要分析人员对液压系统的设备及运行环境有透彻的理解, 将故障症状作为树顶, 将发生故障的各种因素逐一排列; 然

后建立故障树的数学模型, 对故障树进行定性分析和定量计算, 给出分析结果。故障树分析法具有直观性和理论性强、逻辑严密等特点, 可用于对液压系统的可靠性、安全性等进行定性分析和定量计算, 是一种简单而有效的分析方法。

3.5 基于案例推理的诊断法^[37-40]

案例是能导致特定结果的一系列特征属性的集合, 其表示就是对一次故障的具体情况尽可能地进行详细描述, 对故障的各种属性进行合理划分, 以便获得故障的完整资料。案例的组织是在案例表示的基础上, 根据案例的特征和检索的需要, 对案例进行整理和归类。基于案例推理是用案例来表达知识并把问题求解和学习相融合的一种推理方法。由于案例推理接近于人类认识、解决问题最原始的思维方式, 具有在无法获取机理模型、确定规则或统计模型时, 采用历史相似性实现问题的定量求解和预测的特点。因此, 将基于案例推理的技术用于故障诊断, 通过回忆以前曾经成功解决过的相似问题, 比较新、旧问题发生背景和条件等差异, 经过一系列的调整、修改后, 重新使用以前的知识和信息, 提出解决当前问题的方案, 可以在一定程度上弥补目前多数智能诊断系统的不足, 为解决复杂设备故障诊断提供了一条新的途径。

通过获取新知识并作为案例来进行学习, 不需要详细地诊断对象模型。关键是如何建立一个有效的案例索引机制与案例组织方式。案例诊断方法的优点是根据过去液压系统故障案例解决新问题, 它可以缩短问题求解途径, 提高推理效率。

4 液压系统故障诊断方法的综合应用

任何一种诊断方法, 不论多么先进, 总存在一定的局限性; 所以, 在实际应用中, 为了保证诊断结果的准确性, 往往是通过综合运用多种方法来对液压系统的故障进行诊断。

张建华^[41]把模糊逻辑、神经网络、专家系统等智能诊断方法结合起来, 通过发挥各种智能诊断方法各自的优点, 并应用于液压系统的故障诊断之中。黄荣富等^[42]利用神经网络研制开发了一套专家系统。该专家系统通过建立液压设备的故障、修理记录等的数据库和用以分析判断故障原因的知识库, 根据故障现象来判断故障发生的原因、部位, 并找到相应解决措施的目标。郭华伟等^[31]也将专家系统和神经网络技术结合起来, 开发了液压系统故障诊断专家系统。戴智华等^[43]针对液压系统故障的多发性、故障在封闭回路中的传递性、设备构造的复杂性等特点, 提出了基于模糊故障树理论的故障诊断方法。并以印刷切纸机液压系统为研究对象对该法进行了研究, 表明该方法较传统方法实用、有效。胡良谋等^[44]提出了一种基于模糊诊断法和神经网络诊断法的专家系统故障

诊断方法。根据实际需求, 将系统分为元件、部件及系统 3 种不同层次的故障诊断问题, 分别建立了模糊故障诊断模型和 BP 神经网络故障诊断模型。周勇^[45]将遗传算法和神经网络结合起来对液压 AGC 系统常见故障进行了分析, 通过实验证明了该算法的有效性。

此外, 还有不少文献和实例^[46-54]把智能诊断法单独或综合应用于液压系统故障诊断之中, 取得了一定的应用成效。

5 结束语

液压系统故障具有隐蔽性、复杂性、随机性、模糊性及分散性等特点, 尽管国内外学者对液压系统故障诊断进行了深入广泛的研究, 但实际诊断过程中仍面临许多问题。

随着相关学科的新技术、新理论的不断引入和融合, 结合传统诊断方法, 探索和发展更多的智能诊断技术, 液压系统的故障诊断技术必将得到进一步完善和发展。将多种智能诊断方法相互融合, 相互取长补短, 并结合与多媒体技术、网络技术、多传感器信息融合技术、虚拟现实技术等技术, 对液压系统故障进行综合评判和诊断, 将是今后液压系统故障诊断技术发展的趋势。

参考文献

- 【1】罗建明. 液压系统故障产生原因分析方法 [J]. 中国设备管理, 2001 (3): 34-35
- 【2】L AN, N SEPEHR I Hydraulic actuator circuit fault detection using extended kahn filter [C]. Proceedings of the American Control Conference, Denver Colorado 2003 (5): 4261-4266
- 【3】麻健, 权龙, 陆世鑫. 倒频谱在液压泵故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 1998 (2): 55-56
- 【4】袁建畅. 液压泵故障的频谱诊断及排除 [J]. 西北纺织工学院学报, 2000 14 (4): 382-385
- 【5】周瑞祥, 沈燕良, 林廷圻, 等. 飞机液压泵故障研究 [J]. 机床与液压, 2001 (5): 129-130
- 【6】陈季萍, 杨瑞军. 利用倒频谱诊断液压泵早期故障 [J]. 机械设计与制造, 2005 (9): 94-95
- 【7】刘泽华, 谷立臣. 基于频域能量特征的故障分类方法研究 [J]. 液压与气动, 2007 (3): 67-70
- 【8】潘宏, 傅周东, 陈章位. 基于小波分析的液压系统泄漏检测 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17 (4): 636-638
- 【9】姜万录, 张淑清, 王益群. 液压泵故障的小波变换诊断方法 [J]. 机械工程学报, 2001, 37 (6): 34-37
- 【10】杜文正. 基于小波多尺度边缘检测的液压缸内泄漏故障诊断 [J]. 液压与气动, 2003 (3): 52-53
- 【11】罗守华, 颜景平, 王积伟. 基于小波包分析的液压系统泄漏故障诊断新方法 [J]. 制造业自动化,

- 2004, 26 (3): 70-72
- 【12】杨铁林, 高英杰, 孔祥东. 基于小波变换的柱塞泵故障诊断方法 [J]. 机械工程学报, 2005, 41 (2): 112-116
- 【13】李小波, 吴浩, 许朋. 基于 LabView 的超声波液压测量系统小波分析仪设计 [J]. 机床与液压, 2006 (3): 197-198, 201
- 【14】杨光琴. 多传感器航空液压系统信息融合故障诊断研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003
- 【15】潘伟, 王汉功. 基于多传感器信息融合的工程机械液压系统在线状态监测与故障诊断 [J]. 工程机械, 2004 (7): 42-45
- 【16】邓乐. 多传感器信息融合技术与液压系统状态监测、故障诊断 [J]. 机床与液压, 2004 (2): 160-162
- 【17】杨小强, 戴鹏飞, 李永新. 基于数据融合与虚拟仪器技术的液压系统故障诊断研究 [J]. 机床与液压, 2004 (7): 177-179
- 【18】万耀青, 郑长松, 马彪. 油液分析故障诊断中的信息融合问题 [J]. 机械设计, 2004, 21 (9): 1-3
- 【19】黄志坚, 裘丽华. 液压故障智能诊断技术探讨 [J]. 机床与液压, 2001 (3): 106-108, 127
- 【20】罗永顺, 吴运新, 范美芳. 数控机床故障诊断与预报系统研究 [J]. 机床与液压, 2005 (11): 194-197
- 【21】潘兵, 熊静琪. 多传感器信息融合在液压系统智能故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2006 (5): 190-192, 219
- 【22】JM F CALADO, JM G S COSTA. A hierarchical fuzzy neural network approach for multiple fault diagnosis [C]. UKACC International Conference on Control, Swansea, 1998 (6): 1498-1503
- 【23】N S HEAND, SEPEHRI. Online modeling and prediction of hydraulic servo actuators with neural networks [C]. Proceedings of the American Control Conference San Diego, California, 1999, 3708-3712
- 【24】S. Bailey. A neural network approach to transmission line modeling and fault diagnosis of hydraulic press control system [J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2002, 216, 357-367.
- 【25】D LINARIC, V KOROMAN. Fault diagnosis of a hydraulic actuator using neural network [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, Maribor, Slovenia, 2003 (1): 108-111.
- 【26】杜文正, 黄先祥, 周召发. 基于竞争网络的液压系统故障诊断方法 [J]. 液压与气动, 2003 (10): 55-57.
- 【27】郭堃, 陈欠根, 谭祖湘, 等. 神经网络在复杂液压系统故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2006 (10): 197-199.
- 【28】郑发泰, 叶建波, 翁正国. BP 神经网络在工程机械液压系统故障诊断中的应用研究 [J]. 工程机械, 2006, 37 (10): 1-5.
- 【29】刘海亮, 熊静琪. 基于 BP 神经网络液压制动故障诊断研究 [J]. 微计算机信息, 2007, 23 (2-1): 186-187, 219.
- 【30】Chr Angeli. An online expert system for fault diagnosis in hydraulic systems [J]. Expert Systems, 2001, 16 (2): 115-120
- 【31】郭华伟, 胡军科, 王华兵. 液压故障诊断专家系统研究 [J]. 机床与液压, 2002 (6): 217-219
- 【32】王芙蓉. 基于 Delphi7 的机床液压系统故障诊断专家系统的开发 [J]. 机床与液压, 2006 (6): 241-242, 253
- 【33】王学林, 贺耀文, 凌玲. 基于 ESP 平台的液压系统故障诊断专家系统的实现 [J]. 机床与液压, 2004 (9): 207-209.
- 【34】周曲珠, 芮延年. 模糊理论在液压系统故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2006 (11): 224-226, 233
- 【35】张龙, 熊国良, 何柏林. 机床液压系统故障树分析 [J]. 机床与液压, 2005 (2): 170-171, 185.
- 【36】余爱华. 故障树分析法在液压系统维护中的应用 [J]. 起重运输机械, 2006 (6): 60-62
- 【37】张琦, 孙幼文, 李文宏, 等. 基于案例推理的机械故障诊断方法探讨 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2004, 5 (5): 42-45.
- 【38】王东, 刘怀亮, 徐国华. 案例推理在故障诊断系统中的应用 [J]. 计算机工程, 2003 (12): 10-12
- 【39】李希红, 黄志坚, 谢文祥, 等. 案例推理在轧机液压故障诊断系统中的应用研究 [J]. 冶金丛刊, 2007 (1): 7-9.
- 【40】丁贤林, 吴百海, 龙建军, 等. 案例推理在大型轧钢活套液压系统故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2003 (5): 247-249
- 【41】张建华, 王占林. 基于模糊神经网络的故障诊断方法的研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 1997 (4).
- 【42】黄荣富, 朱荣生, 顾宏余. 液压设备故障诊断专家系统的研究 [J]. 液压与气动, 2003 (7): 46-48
- 【43】戴智华, 易建钢, 陈新元. 模糊故障树理论在液压系统故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2002 (5): 202-203, 205.
- 【44】胡良谋, 曹克强, 徐浩军. 四余度舵机智能故障诊断专家系统设计研究 [J]. 液压与气动, 2006 (10): 82-85.
- 【45】周勇, 胡诚. 基于遗传神经网络的液压厚度自动控制系统故障诊断研究 [J]. 液压与气动, 2006 (4): 81-83.
- 【46】朱学彪, 李明, 傅连东. 液压设备远程故障诊断技术的研究 [J]. 液压气动与密封, 2006 (3): 58-59

(下转第 195 页)

C 和气穴故障 D，即 $n = 4$ 表示为 $Y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ 。网络隐含层神经元数目由经验公式 $h = \sqrt{m + n} + l$ ($l = 1 - 10$)，选取 $h = 13$ 。

神经网络的输出对应齿轮泵的 4 种状态，不同训练样本对应的网络理想输出如下：正常状态 (1 0 0 0)，齿轮磨损 (0 1 0 0)，侧板磨损 (0 0 1 0)，气穴故障 (0 0 0 1)。

3.2 网络训练与测试

在获得的 50 组振动信号中，选取 40 组数据作为训练样本，即 A_i, B_i, C_i 和 D_i ($i = 1, 2, \dots, 40$)，对 RBF 神经网络进行学习和训练。网络的部分训练结果如表 2 所示。

表 2 RBF 神经网络的训练结果

样本	理想输出	训练输出
1	1 0 0 0	0.990 18 0.001 39 0.020 15 - 0.000 50
2	0 1 0 0	- 0.000 11 1.006 26 0.001 62 0.033 65
3	0 0 1 0	0.001 50 0.000 33 0.995 06 0.000 37
4	0 0 0 1	0.003 97 - 0.003 28 0.000 25 0.990 18
⋮	⋮	⋮

另外选取剩余数据作为网络的测试样本。神经网络训练完毕后，从测试样本中任取一个样本，如气穴故障 B_{45} ，该输入样本为 $X = (0.031\ 87, 0.028\ 94, 0.045\ 83, 0.033\ 71, 0.065\ 24, 0.096\ 71, 0.172\ 46, 0.097\ 35, 0.100\ 23, 0.123\ 60, 0.050\ 02, 0.021\ 07, 0.014\ 63, 0.030\ 02, 0.021\ 46, 0.066\ 86, 23.571\ 73)$ 。

将该样本特征向量输入训练好的 RBF 网络后，得到的诊断结果与理想输出如表 3 所示。

表 3 测试样本的诊断结果

神经网络输出	理想输出	诊断结果
0.096 12 0.934 17 0.054 97 - 0.026 842	0 1 0 0	正确

将所有测试样本输入诊断神经网络进行验证，测试的结果如表 4 所示。

表 4 振动信号诊断神经网络的性能

识别率 /%	误判率 /%	拒绝率 /%	诊断精度 /%
90	4.1	5.9	95.6

注：诊断精度 = 识别率 / (1 - 拒绝率)。

从表 4 可以看出基于振动特征信号的 RBF 神经网络具有较好的诊断性能。

4 结束语

根据齿轮泵振动信号的产生机制，进行了实验设计，采集了正常状态、齿轮磨损、侧板磨损、气穴故障 4 种振动信号。首先对信号进行了小波包能量谱分析，提取出了振动特征信号；然后重点应用 RBF 神经网络分析法，对特征信号进行学习和训练。从诊断结果来看，得到了较高的诊断精度，证明该方法可以应用于齿轮泵的故障诊断。

参考文献

【1】葛哲学，等. 神经网络理论与 MATLABR 2007 实现 [M]. 北京：电子工业出版社，2007
【2】黄志坚，等. 液压设备故障诊断与监测实用技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2005
【3】赵应樾，等. 齿轮泵故障分析及解决方法 [J]. 机械，2000 (3): 31- 34
【4】王洪杰，等. 齿轮泵的振动信号研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报，1996 (4): 57- 59
【5】吴蒙. 人工神经网络和机械故障诊断 [J]. 振动工程学报，1993 (2): 153- 163

(上接第 192 页)

【47】姜万录，李冲祥. 神经网络和证据理论融合的故障诊断方法研究 [J]. 中国机械工程，2004, 15 (9): 760- 763
【48】唐立平，王存堂，陈毅辉，等. 基于 RBF 网络的液压系统故障诊断方法 [J]. 工程机械，2005 (11): 52- 55
【49】洪沁. 铝铸轧机液压系统故障诊断 [J]. 液压与气动，2005 (9): 80- 82
【50】董选民. 鲁棒故障诊断及其在液压系统中的应用研究 [D]. 北京航空航天大学，1997.
【51】姜万录. 基于混沌性质和多分辨分析的故障诊断理论及试验研究 [D]. 燕山大学，2001.
【52】黄志坚. 轧机液压故障诊断与监测研究 [D]. 北京航空航天大学，2003
【53】ZHOU Ruixiang LN Tingqi HAN Jianding et al Fault diagnosis of airplane hydraulic pump [C]. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation AK, 2002 (4): 3150- 3152
【54】于文征. 柱塞泵泄漏故障智能诊断系统研究 [D]. 南京理工大学，2002

(上接第 134 页)

够推广应用于制造业中设备自动化的各个领域。

参考文献

【1】付小卫，唐厚君. 基于 PCI 型运动控制卡的 Windows 数控系统设计 [J]. 工业控制计算机，2005, 18 (8): 69- 70
【2】张剑，殷苏民. 基于运动控制卡的开放式数控系统研制 [J]. 机床与液压，2003 (3): 170- 173
【3】深圳市雷赛机电技术开发有限公司. DMC3000 PCI 多轴运动控制卡 技术介绍 V1.0 [EB/OL]. [http // www. leisai. com /cn /download. asp](http://www.leisai.com/cn/download.asp) 2002
【4】深圳市雷赛机电技术开发有限公司. DMC3000 PCI 总线 1-4 轴运动控制卡硬件使用手册 Version 1.1 [EB/OL]. [http // www. leisai. com /cn /download. asp](http://www.leisai.com/cn/download.asp) 2002
【5】武莹，彭文明. Visual C++ 开发实用编程 200 例 [M]. 北京：中国铁道出版社，2006. 319- 327