

文章编号:1005-0523(2011)05-0023-06

机械设备故障智能诊断技术的现状与发展

杨超,李亦滔

(华东交通大学机电工程学院,江西南昌 330013)

摘要:对机械设备故障智能诊断技术的主要理论和方法进行了归纳和分类,对基于模糊理论的诊断法、基于人工神经网络的诊断法、基于灰色系统理论的诊断法、基于支持向量机的诊断法、集成技术故障诊断法等智能诊断方法的概念、特点、原理、缺陷、主要改进及典型应用进行了介绍,指出将现代技术与多种诊断方法相互融合形成的集成化智能诊断技术是机械系统故障智能诊断技术未来的重要发展趋势。

关键词:机械设备;故障诊断;智能诊断技术

中图分类号:TH17;TP206+.3

文献标志码:A

随着科学技术的发展,机械设备正朝着大型化、复杂化、高速化、自动化及大功率方向发展。机械设备在现代工业生产中的作用和影响越来越大,其复杂程度、各设备间的关联程度也越来越高,一个零部件出现故障,可导致整个系统失效。这些故障或失效不仅会造成重大的经济损失,甚至还可能导致人员伤亡^[1]。因此,对机械设备进行可靠、准确的故障诊断具有非常重要的意义。

旋转机械等大型设备结构具有复杂性和耦合性,很难用传统的模式分类技术将其故障截然分开。多故障并发时,不同故障特征相互混杂呈现出耦合性、模糊性、随机性等复杂征兆,并非多个单故障的简单叠加,很难用准确的数学模型加以描述,也难以完全依靠确定性判据进行故障诊断^[2]。大型机械设备的故障诊断已经成为一门热门学科并得到迅速发展。在传统诊断技术的基础上,人们把计算机技术、传感器技术、小波分析、人工智能、识别技术进行结合并应用于机械系统,形成了很多新的机械故障诊断方法。智能诊断技术在知识层次上实现了辩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^[3],为构建智能化的机械设备故障诊断系统提供了坚实的基础。目前,基于人工智能的故障诊断方法主要有:基于模糊理论的诊断法,基于人工神经网络的诊断法,基于灰色系统理论的诊断法,基于支持向量机的诊断法,集成技术故障诊断法等。

1 基于模糊理论的诊断法

模糊(Fuzzy)理论是由 Zadeh 在 1965 年提出的,其目的是为描述与处理广泛存在的不精确的、模糊的事件和概念提供相应的理论工具。此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,它将各种故障及其症状视为两类不同的模糊集合,集合之间的关系用一个模糊关系矩阵来描述。由于机械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症状,不同的故障也可能引起同样的故障症状,多故障并发时故障症状更加复杂。当确定性故障和模糊性故障相互交织、密切相连时,就需要通过探讨机械系统故障的模糊性,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。

收稿日期:2011-05-30

作者简介:杨超(1969-),男,副教授,博士,研究方向为设备状态检测及故障诊断。

在机械设备的智能故障诊断研究中,诊断知识的获取是困扰机器智能诊断技术发展的“瓶颈”^[4-6]。尽管该难题一直受到国内外的关注,但目前仍未获得突破性的进展^[7-9]。因此,发展基于模糊理论的故障诊断法具有重要的意义。

机械系统状态和症状之间存在较为复杂的关系,必须尽可能利用多种症状进行综合才能正确诊断出系统所处的状态:模糊综合诊断。许宝杰等^[10]将模糊粗糙集理论应用于加工中心故障诊断技术,获得故障诊断等知识,发挥其“有效地分析和处理不精确、不完整等不完备信息,并从数据中发现隐含的知识”的特点,使机器故障诊断系统的知识获取瓶颈问题得以有效解决,并使知识的自动获取成为可能。高晓康等^[11]首次将小波包分析(WPA)与模糊粗糙集理论的决策模型相结合,提出了适应于现代机械设备在线诊断的故障分析模型WRS。王胜春等^[12]结合全矢谱技术与模糊函数,提出了一种矢模糊函数的新概念;矢模糊函数在旋转机械故障诊断中是非常有效的。

模糊诊断由于模糊集合论尚未成熟,诸如模糊集合论中元素隶属度的确定和两模糊集合之间的映射关系规律的确定都还没有统一的方法可循,通常只能凭经验和大量试验来确定。另外因系统本身不确定的和模糊的信息,以及要对每一个征兆和特征参数确定其上下限和合适的隶属度函数,而使其应用有局限性。模糊故障诊断方法的优点在于计算简便、应用方便、结论明确直观,但用来进行趋势预测存在一定难度。特别是隶属度函数的构造、隶属度矩阵的建立都是根据经验、统计得来的,会有一定的主观因素,对特征参量的选择也是人为的,如果选择不当,就会造成诊断失败。

2 基于人工神经网络的诊断法

神经网络故障诊断法在20世纪80年代末90年代初才真正具有实用性。由于神经网络具有原则上容错、结构拓扑鲁棒、联想、推测、记忆、自适应、自学习、并行和处理复杂模式的功能,使其在工程实际存在着大量的多故障、多过程、突发性故障、庞大复杂机器和系统的监测及诊断中发挥较大作用^[13]。神经网络在故障诊断领域的应用主要集中于3方面:①从模式识别角度应用神经网络作为分类器进行故障诊断;②从预测角度应用神经网络作为动态预测模型进行故障预测;③从知识处理角度建立基于神经网络的诊断专家系统。但其缺点也是明显的,训练需要大量的样本,当样本较少时,效果不理想,忽视了领域专家的经验知识,网络权值表达方式也难以理解,及训练时间较长和识别精度不高等不足,因而需要对该诊断法进行改进或结合其他诊断法,构造新的诊断方法,来克服传统神经网络诊断的缺点。

很多学者对基于人工神经网络的诊断法进行了研究。王璐等^[14]提出可将RBF函数中心参数和网络权重的训练作为系统参数,进行故障辨识,用扩展Kalman滤波算法(EKF)进行参数估计,Kalman算法训练的RBF网络,不仅具有较好的精度,而且提高网络的收敛速度。张大志等^[15]为确定多层人工神经网络的权值和阈值建立了混合求解方法,即迭代前期采用BP算法,而迭代后期采用梯度优化法进行计算。彭斌等^[16]根据旋转机械复杂的故障特点,提出了结合第2代小波分析、模糊理论和神经网络形成的改进小波神经网络。王光研等^[17]论述了RBF神经网络的基本网络结构和网络的学习及运行过程,结果表明:RBF神经网络具有极快的学习收敛速度。张新海等^[18]研究了BP神经网络在机械故障诊断中的应用,理论分析和测试结果表明,应用神经网络技术确定并进行齿轮故障诊断判据是切实可行的。姜万录^[19]提出了神经网络和证据理论融合的故障诊断方法,提高了故障诊断的准确率。张忠奎等^[20]提出了一种基于最近邻聚类学习算法的改进型RBF神经网络模型,并将该模型应用于旋转机械的故障诊断中。应用结果表明,改进型RBF网络训练速度快、分类性能良好,在设备故障诊断领域具有很好的实用性。彭滔等^[21]提出一种基于L-M算法的神经网络应用于机械设备故障诊断的专家系统,基于该算法的故障诊断模型显著缩短了训练时间,具有较高的准确性。

3 基于灰色系统理论的诊断法

灰色系统理论是邓聚龙教授于1982年创立的,并在社会经济系统中已得到广泛的应用,取得了较好

的成果。由于其理论上的简洁和思想方法的新颖,灰色理论中的灰色预测、灰色关联度分析、灰色聚类 and 灰色决策都成为设备故障诊断的有力工具。故障诊断过程是利用有限的已知信息,通过信息处理对含有不可知信息的设备进行诊断、预测、决策的过程^[22]。灰色关联分析方法可在不完全的、随机的因素序列中,对所分析研究的各因素,通过一定的数据处理,找出它们的关联性,发现主要矛盾,找到主要特性和主要影响因素,在故障诊断中主要用于多参数诊断,用表征设备状态的多个参数组成该设备的状态模式向量;建立标准状态模式向量;通过比较各待检状态模式向量与各标准状态模式向量之间的关联度判断所属的状态。

诸多学者对传统灰色关联分析进行了多种不同的改进研究。由于故障征兆和故障类型之间存在的非线性关系,王启志等^[23]提出一种改进面积广义灰色关联度来分析序列之间的相似性与相近性,用于诊断冷冻压缩机的故障类型,取得较好效果。东亚斌等^[24]根据灰色关联分析的基本思想,提出一种改进的灰色关联度量化模型,并将其应用于机械故障诊断中,并以国内某著名汽车厂离心式风机为例进行故障诊断,结果表明改进关联度可提高故障诊断精度;在改进关联度计算中,避免了常规关联度计算中分辨系数难以确定的问题,这也为灰色诊断在在线诊断中的应用提供了方便。吴冉^[25]将灰色系统理论中的灰色关联分析方法引入到机械故障诊断模式识别中,判断各种故障模式出现的可能性,在分析吊车常见的故障实践中的应用,大大减少了事故的发生率。林云等^[26]结合信息熵和灰色关联算法,从信息融合的思想出发,提出基于灰色关联和证据理论的机械故障诊断方法,通过旋转机械故障的典型实例证明,是故障模式定量识别的一种可行的新方法。

灰色诊断法的难点,在于要先建立典型故障参考模式,然后计算待识别故障模式与典型故障参考模式的关联度。一旦参考模式的特征矩阵不准确,诊断就会失败。

4 基于支持向量机的诊断法

统计学习理论是一种专门研究小样情况下机器学习规律的理论。由CORTES等人在统计学习理论的VC维理论和结构风险最小原理基础上建立起来的一种机器学习新方法^[27]:支持向量机(support vector machine, SVM),已表现出许多优于现有模式分类方法的性能。SVM是从线性可分情况下的最优分类面发展而来的^[28],为解决二类分类问题而提出来的,不能直接运用于多类分类。将SVM算法应用于机械故障诊断领域的研究也已经引起了工程界的关注。SVM方法具有利用小样本数据集就可进行故障诊断、采用结构风险最小原理、易于实现模型结构和参数都接近最优的故障诊断模型等优点。SVM是依靠特征参量描述的相似度来进行故障分类的方法,特征参量对故障描述得越准确,其分类性能就越好,泛化能力也就越强。其缺点也是明显的,SVM不能诊断出没有学习过的故障,因此对故障分类时参数的选择非常重要。

有学者进行了SVM相关的研究。李凌均等^[29]以滚动轴承的故障分类为例,研究了SVM分类算法在故障诊断领域中的应用,并与BP神经网络分类方法进行了对比研究,结果表明SVM方法在少样本情况下的分类效果优于BP神经网络。张龙等^[30]针对存在非平稳性的振动信号和已有的故障样本非常有限等问题,提出一种基于时变参数自回归模型和SVM相结合的旋转机械故障诊断方法。曹冲锋^[31]等利用超参数相关理论和先验知识界定模型超参数选择区间,改进了SVM模型,提高了故障诊断的精度。张金敏等^[32]提出了一种基于小波分解和最小二乘支持向量机(LS-SVM)相结合的齿轮箱故障诊断方法,实验结果表明,该方法能够准确地识别故障类型。王晴晴等^[33]提出了SVM和一种根据故障数据的空间分布来优化结点排布的方法,它能够提高SVM诊断的正确率,在故障诊断中取得良好的效果。Zhang X. L.等^[34]提出了一种基于SVM的全新的故障诊断方法,具有参数优化问题的蚁群算法,为了达到一个理想的故障诊断结果,进行了机车滚子轴承实验,验证了其可行性和准确性。实验表明该算法与蚁群优化相结合,取得良好的故障诊断结果。

5 集成技术故障诊断法

集成技术故障诊断法是一种集成多种故障诊断方法策略,对复杂故障进行诊断和监控的有效方法。尽管基于传统结构框架和组织策略下的智能故障诊断系统能够对设备某些特定部位发生的故障进行有效诊断,但面对故障征兆多样、诱因复杂的诊断问题,有时用单一方法很难做出全面正确的判断,这就需要将多种诊断信息、诊断知识、诊断方法等进行集成,由于各个诊断方法各有特点和优势,也存在各自的缺点和不足,可以综合各方法的优点,克服其局限性,更有利于提高故障诊断的可靠性和诊断效率。因此,集成技术为解决复杂设备故障诊断提供了一条新的途径。

集成技术的瓶颈就是怎样找到各种诊断方法的融合点,实现更精确的故障诊断。张扬等^[35]提出了一种基于智能互补融合的智能诊断方法,即采用蚁群算法(ACA)对反映运行工况的特征参数进行属性约简,剔除不必要的属性。根据约简结果,建立基于径向基函数(RBF)神经网络的故障诊断系统。网络的训练对比结果表明,基于蚁群算法的约简处理简化了输入神经网络的数据维数,提高了网络的训练效率和故障分类准确性。潘玉娜等^[36]结合矢功率谱和径向基函数网络,提出一种新的故障识别方法,该方法以矢功率谱为特征向量,径向基函数网络为分类器。周洁敏等^[37]结合多传感器融合技术和在数据融合处理中利用模糊神经网络,表明诊断结果更精确。朱永年等^[38]利用小波分析和BP神经网络相结合的方法对旋转机械的故障进行识别。实验表明,该方法在旋转机械故障诊断中切实可行,提高了故障诊断的准确率。孔莲芳^[39]结合单子神经网络信息融合在故障诊断中的不足不之处,提出了集成神经网络信息融合,结果表明,集成神经网络信息融合使系统信息具有更高的精度和可靠性,进而能够获得对故障状态的最优估计与判决。冯志鹏等^[40]采用广义粗糙集理论对旋转机械振动故障诊断的非完备决策系统进行了约简,得到约简结果,建立了基于神经网络的故障诊断系统;网络的训练对比结果表明,基于粗糙集理论的约简处理简化了神经网络结构,提高了网络的训练效率,验证了广义粗糙集理论与神经网络集成进行故障诊断的可行性。Yan C.等^[41]设计一个模糊小脑模型,利用关节控制器的神经网络来检测重要部件和识别故障,并将这种实时智能故障诊断系统应用于蒸汽轮机发电机组,结果表明,提出的实时故障诊断系统具有精度高、收敛速度快和抑制高噪声的能力。Y. T. Tsai^[42]提出了一种故障诊断系统,有助于识别潜在的系统故障,该系统是一个以互联网为载体的,并根据先前的维修经验基于事例的推理,发展为注射成型机(IMM)。通过故障树分析方法和信息流向,来分析系统故障和识别可能发生的故障,取得了较好的效果与潜在的支持远程IMM维护。

6 结束语

计算机网络技术、传感器技术、信号处理、人工智能、模式识别技术等快速发展,促进了机械故障诊断技术的发展。同时,综合多种诊断技术的故障诊断研究也取得可喜的成绩。目前理论研究方面有不少进展,但在实践过程中应用得不够成熟,还存在很多问题有待解决。因此,如何将先进的故障诊断理论与方法用到实际中去还有待深入研究和进一步发展。

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,机械设备的故障诊断技术必将得到进一步完善和发展。将现代技术与多种诊断方法相互融合形成集成化智能诊断技术,是机械设备故障智能诊断技术的重要发展趋势。

参考文献:

- [1] 夏希楼. 机械设备故障检测诊断技术的现状与发展[J]. 煤矿机械, 2007, 28(3): 183-185.
- [2] 李红芳, 张清华, 谢克明. 旋转机械的并发故障诊断技术研究进展[J]. 噪声与振动控制, 2008(3): 67-70.
- [3] 范士娟, 杨超. 液压系统故障智能诊断技术现状与发展趋势[J]. 液压与气动, 2010(3): 22-26.
- [4] TEO C Y, GOOI H B. Application of knowledge-based systems for fault diagnosis and supply restoration[J]. Engineering Ap-

- plications of Artificial Intelligence, 1997, 10(6):631-638.
- [5] MAK B M T. Rule extraction from expert heuristics: a comparative study of rough sets with neural networks and ID3[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 136(1):212-229.
- [6] 韩西京,陈培林,史铁林,等.300MW 汽轮发电机组状态监测与故障诊断专家系统---知识获取与机器学习的研究[J]. 汽轮机技术, 1997, 39(1):9-14.
- [7] VENKAT V, RAGHUNATHAN R, KEWEN Y, et al. A review of process fault detection and diagnosis: part I: quantitative model-based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3):293-311.
- [8] VENKATA V, RAGHUNATHAN R, SURYA N K, et al. A review of process fault detection and diagnosis: part II: qualitative models and search strategies[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3):313-326.
- [9] VENKATA V, RAGHUNATHAN R, SURYA N K, et al. A review of process fault detection and diagnosis: part III: process history based methods [J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3):327-346.
- [10] 许宝杰,张建民,徐小力,等.粗糙集理论在旋转机械故障诊断技术中的应用[J]. 机械设计与制造, 2006(12):95-97.
- [11] 高晓康,齐从谦,赵荣泳,等.粗糙集理论在旋转机械实时故障诊断中的应用[J]. 制造业自动化, 2006, 28(12):23-26.
- [12] 王胜春,韩捷,李志农,等.基于矢模糊函数的旋转机械故障诊断方法的研究[J]. 中国机械工程, 2006(17):74-77.
- [13] 张斌,张薇薇. 机械设备故障诊断技术概述[J]. 建筑机械化, 2005(8):14-36.
- [14] 王璐,潘紫薇,叶金杰.基于EKF训练的RBF神经网络及其故障诊断应用[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(4):358-361.
- [15] 张大志,李永强.人工神经网络的混合算法及其在机械故障诊断中的应用[J]. 机械与电子, 2007(4):63-65.
- [16] 彭斌,刘振全. 基于改进小波神经网络的旋转机械故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(1):32-35.
- [17] 王光研,许宝杰. RBF神经网络在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 机械设计与制造, 2008(9):57-58.
- [18] 张新海,雷勇. BP神经网络在机械故障诊断中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2008(5):95-97.
- [19] 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):760-764.
- [20] 张忠奎,王效岳,丁晓坤. 旋转机械故障诊断中的改进型RBF神经网络算法研究[J]. 山东理工大学学报:自然科学版, 2010, 24(4):81-83.
- [21] 彭滔,汪鲁才,吴桂清,等.一种改进的神经网络机械故障诊断专家系统[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(1):232-234.
- [22] 靳春梅,樊灵,邱阳,等.灰色理论在旋转机械故障诊断与预报中的应用[J]. 应用力学学报, 2000, 17(3):74-80.
- [23] 王启志,王晓霞. 基于改进灰色关联度的机械故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2010(2):111-113.
- [24] 东亚斌,张小龙. 基于改进灰色关联度分析的机械故障诊断[J]. 煤矿机械, 2009, 30(2):218-220.
- [25] 吴冉. 基于灰色关联法分析吊车的机械故障[J]. 煤矿机械, 2008, 29(8):195-197.
- [26] 林云,郜丽鹏. 基于灰色关联和证据理论的故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(7):68-72.
- [27] CORTES C, VAPNIK V. Support vector network [J]. Machine Learning, 1995, 20(2):273-297.
- [28] CHEN S, SAMINGAN A K, HANZO L. Support vector machine multi-user receiver for DSCDMA signals in multi-path channels [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 12(3):604-611.
- [29] 李凌均,张周锁,何正嘉. 基于支持向量机的机械故障智能分类研究[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(4):667-670.
- [30] 张龙,熊国良,柳和生,等. 基于时变自回归模型与支持向量机的旋转机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9):99-103.
- [31] 曹冲锋,杨世锡,周晓峰,等.改进支持向量机模型的旋转机械故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(3):270-273.
- [32] 张金敏,翟玉千,王思明. 小波分解和最小二乘支持向量机的风机齿轮箱故障诊断[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(1):41-43.
- [33] 王晴晴,汪正东,黄衍法,等. 基于节点优化的决策树支持向量机及在故障诊断中的应用[J]. 煤矿机械, 2010, 31(6):241-243.
- [34] ZHANG X L, CHEN X F, HE Z J. Fault diagnosis based on support vector machines with parameter optimization by an ant colony algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(1):217-229.
- [35] 张扬,曲延滨. 基于蚁群算法与神经网络的机械故障诊断方法[J]. 机床与液压, 2007, 35(7):241-244.
- [36] 潘玉娜,韩捷,李志农. 矢功率谱与RBF网络结合在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 机床与液压, 2007, 35(1):223-225.

- [37] ZHOU JIE MIN, LIN GANG, GONG SHU LI, et al. Application of multi-sensor data fusion based on fuzzy neural network in rotating mechanical failure diagnosis[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 18(1) : 91-96.
- [38] 朱永年, 赵君爱. 小波-BP神经网络在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 电子机械工程, 2011, 27(1): 56-59.
- [39] 孔莲芳. 集成神经网络信息融合技术在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 机械与电子, 2004(1): 12-15.
- [40] 冯志鹏, 宋希庚, 薛冬新. 基于广义粗糙集与神经网络集成的旋转机械故障诊断研究[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(5): 815-820.
- [41] YAN C, ZHANG H, PENG D, et al. Real-time fault diagnostic system for a steam turbine generator set by using a fuzzy cerebellar model articulation controller[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(5): 1253-1262.
- [42] TSAI Y T. Applying a case-based reasoning method for fault diagnosis during maintenance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(10): 2431-2441.

Status Quo and Development of Intelligent Diagnostic Techniques for Mechanical Equipment Faults

Yang Chao, Li Yitao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Main intelligent diagnostic theories and methods for mechanical equipment faults are summarized and classified. The paper introduces the concepts, characteristics, principles, defects, main improvement and typical applications of intelligent diagnostic methods including method based on fuzzy theory, artificial neural network, method, gray system theory, SVM (support vector machine) and integration techniques. It points out that the important developing trend of intelligent diagnostic techniques for mechanical system faults in the future is integrated intelligent diagnostic techniques by integrating modern technologies and different diagnostic methods.

Key words: mechanical equipment; fault diagnosis; intelligent diagnostic techniques