

文章编号:1000-582X(2001)06-0134-05

·研究综述·

柴油机故障诊断技术的现状及展望

曹龙汉¹, 曹长修¹, 孙颖楷¹, 景有泉², 郭振²

(1. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044; 2. 重庆通信学院, 重庆 400035)

摘要:柴油机作为一种复杂动力机械,其运行状态监测和故障诊断技术越来越受到人们的关注。在柴油机故障诊断领域,信号处理、故障特征提取及识别方法已初具雏形,但离实用化还有一定距离。笔者分析了柴油机常见故障及影响因素,综述了现代柴油机故障诊断技术中常用的各种基于振动信号的时频分析法、瞬态转速波动法、铁谱及光谱分析法、灰色系统理论诊断法、神经网络诊断法及专家系统诊断法的原理、特点及不足,最后指出了柴油机故障诊断的难点和发展方向。

关键词:柴油机;故障诊断;诊断技术

中图分类号:TH 165.3

文献标识码:A

柴油机广泛应用于石油钻井、动力发电、铁路牵引、工程机械及各种船舶动力等领域,其运行状态的好坏,直接影响到整个机组的工作状况。因此,对其进行状态监测和故障诊断,确保系统正常、安全运行,处于最佳运行工况,提高设备的维修质量和效率是十分必要的。

柴油机是一种复杂的往复式动力机械,由于结构复杂,运动部件多,使柴油机故障诊断十分困难。随着现代科学技术的发展以及自动化程度的提高,柴油机故障诊断技术已从最开始的事后维修发展到定时检测、再到现代故障诊断技术的视情维修。和其它类型机械的故障诊断一样,柴油机故障诊断首先必须对故障机理进行研究,并以故障信号的检测及处理为基本技术,以故障信号处理和特征提取理论为基本理论,以基于信号处理及特征提取的故障类型识别为基本方法。笔者对目前常用的柴油机故障诊断技术的研究内容、特点和存在的问题进行评述,并对其发展方向进行讨论。

1 柴油机常见故障及影响因素

按机理分类,柴油机故障常见的有磨损、变形、穴蚀和腐蚀等。

1.1 磨损

据统计^[1],大约80%的机件损坏是由于磨损引起

的。在柴油机中,磨损机件的失效常常会导致故障,严重时危及柴油机的安全。

异常磨损的常见故障有:拉缸、烧轴瓦、抱轴、气阀与阀座间隙过大而引起漏泄、活塞组件与气缸套的过度磨损导致间隙增加,压缩压力下降,燃烧不良,功率下降,废气窜入曲柄箱,滑油蒸发和劣化,严重时会导致曲柄箱爆炸;高压油泵及喷油嘴的磨损会导致不能产生额定的高压燃油,使喷油提前角及喷油时间偏离最佳值,喷油嘴结焦;滑油泵异常磨损会降低滑油输出压力;曲轴和轴承间隙增大会加剧振动和噪声,严重时曲轴因疲劳而断裂。

过渡磨损的影响因素有以下几种^[2]:一是润滑油压力过低。常见原因有滑油泵齿隙过大产生不了足够压力的滑油,滑油过滤器及管路堵塞,压力润滑摩擦副间隙过大。二是润滑油中含有磨粒特别是硬质磨粒将会造成摩擦副机件的磨料磨损。磨粒一般来源于空气(因空滤器失效),燃烧不完全的碳粒,摩擦副产生的粒子等。三是润滑油变质。如滑油中进水、混入燃油、添加剂失效等。四是环境影响,如滑油温度过高会使粘度急剧下降,柴油机断冷却水必将使柴油机拉缸而最终停机。

1.2 变形

由于受力不均、磨损不均或拆装不正确常导致柴油机机件变形。如轴瓦磨损不均会导致曲轴变形,缸

· 收稿日期:2001-06-14

基金项目:总参军训部资助项目、国家教育部博士点基金项目(98061117)

作者简介:曹龙汉(1966-),男,四川安岳人,重庆大学博士生、解放军重庆通信学院四系教授。主要从事智能化通信电源、故障诊断专家系统的研究。

盖安装时受力不均或热负荷作用下都会产生变形,工作时气缸盖和机体之间将会产生漏泄。

1.3 穴蚀

穴蚀是在流体系统中,液体内部空化而产生空泡,空泡的破裂产生微射流,并对固体壁面产生破坏现象。柴油机一般均存在穴蚀现象,特别是在气缸套外侧和机体水腔内侧。合适的冷却水添加剂能有效地抑制冷却系统的穴蚀和腐蚀。

2 现代柴油机故障诊断技术的方法及特点

2.1 基于振动信号的时频特征提取分析法

柴油机是一种高速的往复式动力机械,缸盖振动信号是反映柴油机内部各部件之间关系的极其敏感的参数,它是缸内气体燃爆压力、进排气门落座冲击和进排气门开启气流冲击等多种激励力综合作用的结果,同时还受到机身整体振动等其它因素的影响,其表现形式既具有与工作循环有关的周期性特性,又具有非平稳时变及某些冲击特性^[3],这给信号分析和诊断征兆提取带来了很大的难度。振动信号特征提取分析法的依据是振动中包含有振源信息和状态等信息,振动监测及故障诊断的出发点是在机械动力特性分析及谱分析基础上,研究柴油机运行过程中的故障原因与对应的状态,主要分析方法有:

2.1.1 时域分析法

振动信号的时域特征参数主要有峰峰值、均值、均方幅值、方差、标准差、三阶距、四阶距、波形因子、脉冲因子、裕度因子等。这些特征参数由于测量比较直接,可以用于在线监测,同时也可以作为其它诊断方法的特征提取参数。

2.1.2 频域分析法

频域分析主要是通过某种变换,将振动信号从时域变换到频域,然后再进行特征提取的一种方法。处理方法有古典谱估计法和现代谱估计法。古典谱法基于FFT快速算法,包括周期图法、相关分析、相干分析、自谱、互谱、细化谱、倒频谱、传递函数、谱趋势分析等等。现代谱法包括最大熵谱估计、ARMA时序分析以及最小方差法等。古典法的优点是可以利用FFT快速计算,物理意义明确;缺点是谱分辨率偏低,需要的数据量大,加窗后会产生泄露,方差性能不好。现代谱分析法具有较高的分辨率,对数据量的要求较少,但是容易产生波形失真,信噪比低。

2.1.3 现代时频分析法

时域和频域分析适用基于平稳或准平稳过程的振动信号,对柴油机而言,由于其结构复杂,震源众多,其振动信号在通频带范围内均有大量能量分布,单纯用时域或频域分析法则存在分辨率不足的问题。时频分析法弥补了这一缺点。主要方法有:

1) 短时傅里叶变换(STFT)

其数学表达式为:

$$W(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g^*(t - \tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

它具有时频局部化的功能,在时频中相当于带通滤波器。当变化时可以使窗函数在整个时域上滑动,因而具有时间局部化的特点。STFT可分析非平稳信号,但对准平稳信号效果更佳,当选定 $g(t)$ 后,时域分辨率不变,缺乏细化功能,反映强烈瞬变非平稳信号的能力不足。

2) Wigner时频分布

数学表达式为:

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

其加窗离散形式为:

$$W_x(n, m) = 2 \sum_{k=-M/2}^{M/2} g(k) x(n+k) x^*(n-k) \quad (3)$$

Wigner时频的分布特点是信号在时频上的分布,由于窗函数 $g(k)$ 的局部化性质以及 $x(n+k)x^*(n-k)$ 的关系,它具有对准平稳信号及非平稳信号分析的能力。

3) 小波变换(Wavelet Transform)

小波变换在振动信号分析中属于一种多分辨率的时频分析方法,具有多分辨率的时频局部化、快速线性多通道带通滤波等优点,为非平稳信号的分析提供了一个有价值的工具^[4]。在实际工程应用中,常使用简单方便的二进小波变换。小波变换的数学表达式为:

$$(W_{\psi}f)(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi}[\frac{t-b}{a}] dt \quad (4)$$

小波变换相当于一个带通滤波器和一个低通滤波器,在高频范围时间分辨率高,在低频范围频率分辨率高;信号的分解和重构可有针对性地选择有关频带信息;全频带分析的结果,信息量既无冗余,也无疏漏。

近年来,国内外通过振动信号提取柴油机故障特征的研究已取得了较大进展,研究的重点是通过缸盖或缸体振动信号,提取燃烧激振力及排气门落座响应的频率特征,对柴油机工作过程故障进行诊断。但是,这种方法大多局限于在实验室对零部件单一模拟故障的诊断方面,距实际应用还有一定距离。主要困难有^[5]:

① 柴油机是一类复杂设备,表现在:柴油机是一个由曲柄连杆机构、气门机构、燃烧系统、润滑系统、冷却系统等组成的多层系统,具有系统级、子系统级、部件级及零件级4个层次;柴油机的结构异常复杂,加之输入、输出不明显,因而无论是定量还是定性都难以用比较完备、准确的模型对其结构、功能、以及状态等进行有效的表达;柴油机的故障及产生故障的原因

有时是模糊不清的,一个故障可能是多种因素综合作用的结果,这比简单的因果对应关系复杂得多。

② 柴油机的结构、运动状态复杂、型号众多,而共性归纳不够,所以适应于某台、某型号柴油机振动信号的分析法,对另一型号的柴油机未必可行;对同一机型取不同的测点进行测量,即使故障类型相同,所测量的结果都有可能是矛盾的。

③ 柴油机振源多,系统传递路径复杂,故障既有“纵向性”,又有“横向性”,这一特性带来了柴油机这一复杂系统中多个故障并存的现实,多故障的同时诊断导致对故障能否准确定位这一十分困难的诊断问题。

④ 柴油机各类故障所对应的振动频率,无论从理论上还是实践中都较难准确确定,目前所采用的谱分析故障诊断方法,只是根据功率谱的形状特征,用相似比较的办法进行确定。在不同的故障形式产生相似形状功率谱图时,有可能发生误诊,给实际判断工作造成很大困难。

2.2 瞬时转速波动诊断法^[6]

柴油机曲轴的瞬时转速波动信号能反映机器的工作状态,通过对瞬时转速波动信号的分析可以得到机器运行状态和相关故障的丰富信息。正常工况下,各缸的动力性能基本一致,柴油机运转平稳,各缸瞬时转速波动虽有差异,但总在一个不大的范围内,并呈现某种规律性;但当某个气缸工作不正常时,动力的一致性遭到破坏,柴油机运转平稳性变差,转速波动信号会产生严重变形,据此可以判断其缸内工作过程的好坏。存在的不足之处在于:

1) 利用瞬时转速波动虽然能够确定工作不正常的缸位,但不能确定造成故障的原因。例如,缸内压力降低造成曲轴瞬时转速变化,可能是活塞环或缸套磨损引起气密性变差所致,也可能为燃油系统故障造成燃烧不充分所致等等。

2) 由于要反映一周内角速度的变化,瞬时转速测量仪就要求高频率响应,高精度,设备费用会很高;另外,现场安装、调试使用均较困难。

2.3 应用铁谱和光谱技术监测柴油机磨损状况^[7]

在机械故障诊断中,检测润滑油中铁的含量可以间接判定金属部件的磨损。在柴油机状态监测中,润滑油的铁谱及光谱分析是可行而有效的方法。铁谱和光谱在其监测功能上有各自的优势和不足,这是因为柴油机运动件含有多种材料的摩擦副,而每一对摩擦副又会出现各种不同的磨损状态。产生于不同摩擦副在不同的磨损状态下的磨粒,是以不溶的颗粒形式存在于润滑油中的。光谱可以准确地测定润滑油中磨损元素的含量,但不能了解其存在的形状,而且其监测灵敏度又受到磨粒本身粒度的影响,因此无法判断磨损的类型。铁谱可以直观地了解磨粒的形状、大小和成份等

重要的磨损信息,但对有色金属就不具有与铁系磨粒相同的灵敏度,而且分辨能力不如光谱分析仪。所以联合采用铁谱及光谱技术,获得了取长补短的效果。

此外,由于利用铁谱及光谱进行监测的数据多,各个指标数据的重要程度也不相同,致使诊断结果可信度较低。为达到对柴油机综合监测的目的,人们一直在探索一种既方便又实用的方法。利用铁谱及光谱技术获得的数据基础上,应用多元统计分析的动态聚类分析法、模糊聚类分析法、灰色关联分析法等对柴油机磨损情况和润滑油质量进行分析,取得了一些有益的结论。但铁谱及光谱分析法无法确定有问题的缸位,且不易实现实时监测;油液分析的结果只是定性地描述,存在一定的随机性。

2.4 基于灰色系统理论的故障诊断方法

灰色系统理论以其新颖的思路和广泛的适用性在理论及工程界引起广泛关注并迅速在许多领域获得广泛应用。灰色理论用于柴油机故障诊断的原理是把柴油机系统看成是一个复杂的灰色系统,利用存在的已知信息去推知含有故障模式的不可知信息的特性、状态和发展趋势,并对未来的发展作出预测和决策,其过程即是一个灰色过程的白化过程。灰色理论在故障诊断中的应用包括灰色系统建模、关联度分析、灰色模型预测等。利用灰色系统可以实现故障的预测,其准确率高,计算量小、易于微机实现。

2.5 基于神经网络的故障诊断法^[8]

神经网络在柴油机故障诊断中的应用主要有:

1) 神经网络直接用于故障诊断,通过选择关键参数作为网络的输入层,故障类型在输出层给出。BP神经网络由于具有较强的非线性映射能力而被广泛应用于故障诊断领域。它通过对故障实例的训练和学习,用分布在神经网络中的连接权值来表达所学习的故障诊断知识,具有对故障的联想记忆、模式匹配和相似归纳的能力,可以实现故障和征兆间的复杂的非线性映射关系。但是,基本BP算法存在着局部极值和收敛速度慢等缺点。在神经网络中引入模拟退火法和遗传算法,可以有效地解决局部极值,提高算法的收敛速度。

2) 自适应神经网络模式识别。传统模式识别过程在特征提取上具有很大的盲目性,效率低。而自适应神经网络利用神经网络分布式信息存储和并行处理,避开了模式识别中建模和特征提取的麻烦,从而消除了模式不符和特征提取不当所带来的影响,使故障状态易于识别。

3) 模糊神经网络在故障诊断应用中具有广阔的前景。由于柴油机状态信号传播路径复杂、故障与特征参数的映射关系模糊,再加上边界条件的不确定性、运行工况的多变性,使故障征兆和故障原因之间难以建立准确的对应关系。模糊神经网络应用模糊集合论、

模糊语言变量及模糊逻辑推理来模拟人的模糊思维方法,采用多层前向网络结构,结合人们的先验知识进行模糊推理,使之具有准确的非线性拟合和学习能力。由于权值初始化可根据先验知识人为选择,因此,网络的学习速度大大加快,并在一定程度上回避了梯度下降法存在的局部极值问题。

4) 神经网络与专家系统相结合。主要有两种策略:一是将专家系统构成神经网络,把传统专家系统的基于符号的推理变成基于数值运算的推理,以提高专家系统的执行效率并利用其学习能力解决专家系统的学习问题;二是将神经网络视为一类知识源的表达和处理模型,与其它知识表达模型一起去表达领域专家的知识。实践证明,神经网络和专家系统结合,互补长短,克服了神经网络存在的诊断推理不清楚、诊断解释机制不强以及专家系统的知识“瓶颈问题”等缺陷,达到一种较完美的组合。

此外,粗糙集(Rough Sets)理论方法用于刻划不完整数据和不完全知识的表达、学习和归纳十分有效。它能有效地分析和处理不精确、不完整、不一致等不完备性,发现数据间隐藏的关系,从而提取有用信息,简化信息的处理。用粗糙集理论优化条件属性和决策属性,再用神经网络对属性进行聚类分析,可以减少神经网络的输入节点数,提高学习效率。

2.6 基于专家系统的智能化诊断方法^[9,10]

专家系统是人工智能的主要分支之一,其核心内容包括:知识库、知识获取、推理机和解释部分。专家系统按其知识表达方式的不同可分为基于规则的和基于框架的专家系统;按其推理方式的不同可分为正向推理和逆向推理。

在知识表达方面,利用产生式规则进行知识表达,一方面得益于现有人工智能语言,如LISP;另一方面是它的表达合乎人的心理逻辑,便于进行知识获取,利于人们接受。利用框架进行知识表达得到了越来越多的应用,这主要得益于以C语言为代表的面向对象的编程技术的兴起及普及,C语言对面向对象的数据结构极为支持,而框架正是一种面向对象的数据结构。

在诊断推理方面,主要表现在对推理逻辑和推理模型的研究上。在人工智能领域,存在着许多推理逻辑,较著名的有模态逻辑与动态逻辑、3-值逻辑、直觉主义逻辑的类型理论、时态理论、面向非单调推理的语义理论及不精确推理等。模糊逻辑作为一种降低系统复杂性的方法近期在专家系统的推理逻辑中得到了广泛应用,较成熟的有Zadeh的近似推理方法、Dempster和Shafer针对贝叶斯概率理论中先验概率难以获取而提出的证据理论等,国内的许多专家系统也对模糊逻辑进行了发展;对推理模型的研究则表现在如何对推理的知识进行划分及控制,从而使推理过程更为有效。

如Davis基于结构与功能的推理模型,Gallanti和Fink提出的集成诊断模型,Peng的层次因果模型等。值得注意的是,最近有学者提出基于模型的知识库理论,这使推理机制发生了根本改变,如神经网络模型、定性物理模型、可视觉模型等,这无疑给人工智能领域注入了新的活力。

上述各类方法,虽然在现场应用的难度上对柴油机故障诊断的准确性、可靠性、适用性等方面不同程度的存在一些缺陷,但是,它们丰富了柴油机故障诊断的手段。

3 柴油机故障诊断技术的现状及发展趋势

国外用声振诊断技术来研究柴油机的故障始于70年代后期,目前已取得突破性进展,世界航运先进国家,如瑞士、挪威、日本、丹麦、德国、英国和美国已逐步将此技术应用到船舶柴油机。美国1985年研制出机车柴油机故障诊断专家系统;Liogd's Register of Shipping、英国University of Newcastle Marconi Command and Control System Ltd等合作开发出Condition/Performance Monitoring and Predictive System for Diesel Engines(CPMPS)系统,其功能包含状态监测、故障诊断、性能优化,性能监测和预报维修。目前国外的研究动向主要有:通过机体表面振动信号来识别柴油机缸内的压力示功图;用瞬时转速推算缸内压力变化;利用时频分析、小波分析等新的信号分析与处理方法来处理柴油机表面振动信号。

我国从80年代初开始对往复式内燃机故障诊断作探索性研究,武汉交通科技大学、海军工程学院、华中理工大学等高校及研究机构在利用声振技术诊断故障方面做了大量的研究工作。其中,武汉交通科技大学对柴油机主要运动件的故障(如活塞-缸套磨损、气阀漏气、连杆大小端轴承和主轴承磨损等)进行研究,并研制出柴油机智能诊断仪DCM-II,可不解体诊断柴油机活塞-缸套磨损和气阀漏气等故障。

随着摩擦学应用技术的发展,人们对油液分析技术的研究日趋重视,近年来,这一领域发展迅速。1989年美国CARBORUDUM公司制作了一套铁谱分析软件系统(FAST);1992年,ROYLANCE等人开发出了计算机辅助微粒分析的CASP专家系统,可以对磨粒进行系统的形貌分析。我国的许多研究单位,如清华大学、武汉交通科技大学、北方交通大学、西安交通大学等都作了大量的研究工作,西安交通大学润滑理论与轴承研究所1990年推出了OLFI型在线式铁谱仪,东风汽车工程研究所也研制出了新型的ZX-1智能化在线铁谱仪,能有效检测到大于5 μm 的铁磁磨粒。

近年来,机械故障诊断技术在国内外都得到了发展,其应用已深入到各个领域。但在柴油机故障诊断领

域,目前仍然没有一种通用的方法,可用来选择并获得柴油机工作状态的有效特征参数,仅仅是采取先依靠经验或设想去确定和试凑特征参数,然后再用实验进行验证。这种方法是不充分的,且不能找出最优特征参数,离实际应用尚有一定距离^[1]。

文献表明,柴油机故障诊断技术的发展趋势是实时在线诊断、多源信息融合和网络化。

在实时在线诊断方面,应重点研制适合柴油机故障诊断的专用新型集成化传感器,特别是长寿命的可预埋于柴油机内的传感器;在分析柴油机运动状态及振动机理的基础上,寻找各缸振动信号之间相互交叉影响最小的最佳测点;利用现代时频分析、模糊逻辑、小波分析、粗糙集理论等信号处理方法提取柴油机状态信息的故障特征;利用神经网络、专家系统等实现故障的自动诊断。充分利用神经网络等的自学习能力并对历史数据进行数据挖掘,最终实现在线故障诊断。

在柴油机故障诊断过程中,可以利用的状态信息很多,诸如机器振动、机器声响、机器运行过程中的如油温、水温、排气温、油压、输出功率、转速、扭矩等过程量及过程参数以及油样、烟色等机器残留物及排泄物信息等。如何对大量信息进行多源信息融合和综合利用,是今后柴油机故障诊断技术需要重点研究的课题。

网络化是新世纪故障诊断技术的发展方向,利用网络将多个故障诊断系统联系起来,实现资源共享,可提高诊断的质量和精度;将故障诊断系统与数据采集

系统结合起来组成网络,有利于机组的管理,减少设备投资,提高设备利用率,必要时可与企业的 MIS 系统相联结,促进企业管理的现代化。

参考文献:

- [1] 李国华,张永忠.机械故障诊断学[M].北京:化学工业出版社,1999.
- [2] 丁玉兰,石来德.机械设备故障诊断技术[M].上海:上海科学技术文献出版社,1995.
- [3] 金萍,陈怡然,白焯.内燃机表面振动信号的性质[J].天津大学学报,2000,33(1):63-68.
- [4] 沈松,应怀樵,刘进明.小波变换在振动信号分析中的工程解释与应用[A].第十一届全国振动与噪声技术会议论文集[C].北京:航空工业出版社,1998.
- [5] 王江萍.柴油机故障诊断技术的现状与展望[J].机械科学与技术,1997,16(5):878-882.
- [6] 刘世元,杜润生,杨叔子.利用转速波动信号诊断内燃机失火故障的研究[J].内燃机学报,2000,18(4):395-398.
- [7] 严永年.应用铁谱和光谱技术监测柴油机磨损状况[J].石油机械,1992,20(4):37-40.
- [8] TIMO S, HEIKKI N K, HANNU K, HANNU K. Neural networks in process fault diagnosis[J]. IEEE Trans. on SMC, 1991, 21(4):815-825.
- [9] 吴今培.智能故障诊断技术的发展和展望[J].振动、测试与诊断,1999,19(2):79-86.
- [10] 刘守道,张来斌,王朝晖.柴油机故障诊断的现代方法及展望[J].石油矿场机械,2000,29(1):32-35.

State and Prospects of Diesel Engine Fault Diagnosis Technique

CAO Long-han¹, CAO Chang-xiu¹, SUN Ying-kai¹, JING You-quan², GUO Zhen²

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: As a kind of complex power machinery, diesel engine is being paid more and more attention to its condition monitoring and fault diagnosis technology. In the fault diagnosis field of diesel engine, the technique of signal process, character abstraction and identification method have formed a system, but there is a certain distance away from practical. This paper analyzes the common faults and influencing factor of diesel engine. The principle, characteristic and disadvantage of modern fault diagnosis technology, such as various time-frequency methods based on vibration signal, speed fluctuation method, iron content and spectrometry, grey system theoretical diagnosis method, artificial neural network and expert system fault diagnosis method, were reviewed. The difficulties and the development direction of diesel engine fault diagnosis were put forward in the end.

Key words: diesel engine; fault diagnosis; diagnose technology

(责任编辑 吕蓁英)