

船舶柴油机故障诊断现状及发展趋势

张百慈

摘要: 论述了船舶柴油机故障诊断的意义, 针对国内外一些常见的柴油机状态监测与故障诊断的方法及其原理和特点, 总结出船舶柴油机故障诊断中新技术的应用, 并对柴油机故障诊断技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 故障诊断 船舶柴油机 发展趋势

中图分类号: U664.121

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2006) 09-0006-04

柴油机是一种重要的往复式动力机械, 在国民经济和日常生活中起着举足轻重的作用, 广泛应用于工业、农业、军事、建筑、交通运输等各个行业。它具有零部件多且相互关联、运动复杂、工作环境恶劣等特点, 并且柴油机在向高速、高功率的方向发展, 强载程度越来越高, 使柴油机发生故障的可能性增大。据日本对某油田在野外工作的小型柴油机的故障统计分析, 目前故障率大约每小时 0.4×10^{-3} 次; 而 M.Hernqvist 从保险的角度对海难予以统计, 在众多海难的起因中, 机械故障位居第一 (占 22%), 在机械故障中主机故障又占了 45%, 可见船舶柴油机的运行状况严重影响航运企业的经营效益, 由内燃机故障引起的大型海难、空难、公路交通事故、工业事故等的频繁发生, 促使人们想方设法了解柴油机实际运行状况从而降低柴油机的故障率和故障的破坏程度。故障诊断技术因而受到人们的关注。

一、传统的故障诊断技术

对于柴油机这一复杂的机械系统来说, 每一个零部件发生故障都可能影响柴油机的正常工作, 因此造成故障种类繁多, 这也要求我们探讨更多的故障诊断方法来准确地定位故障源。柴油机系统在其实现其特定功能——将热能转变为机械能时, 直接输出扭矩、功率等, 称为功能性输出, 同时还伴随产生一些中间输出和附加输出, 如排气温度、气缸压力、振动、噪声、油液污染、尾气排放和瞬时转速等, 在柴油机的状态检测与故障诊断中, 直接利用其功能输出来判断系统的运行状态和设备状态虽然是一种较简捷、直观的方法, 但是对于故障部位和故障类型的确定却十分困难。研究表明利用柴油机中间输出和附加输出对柴油机进行不解体故障诊断更具有方便性和普遍性。目前国内外对柴油机故障特征提取的研究一般基于这些中间和附加输出信息。船舶柴油机状态监测与故障诊断的方法是多种多样的, 传统的方法主要有振动分析法、性能参数分析法、油液分析法、压力波分析法、瞬时转速法、温度分布法及红外测温法等, 但最常用的是性能参数分析法、油液分析法、振动分析法和瞬时转速法。

1. 性能参数分析法

性能参数分析法是利用船舶柴油机工作时性能参数的变

化来判断其工作状态的, 这些参数包括气缸压力示功图、排气温度、转速、滑油温度、冷却水进出口温度及排放等。性能参数分析法着重对柴油机性能好坏做出判断, 在这些参数中, 示功图包含的信息量最多, 根据示功图可以计算指示功、压力升高率和压缩压力, 可以判断燃烧质量的好坏及各缸功率是否平衡。但测量用压力传感器的寿命及可靠性是影响示功图诊断柴油机性能的主要问题。

在性能参数诊断方面, 法国、德国、日本、美国和挪威等航运业先进的国家先后开发了船舶柴油机性能诊断系统, 如挪威 KYMA 公司研制的“MarinePerformance Monitoring”已先后在十余艘船舶主机上得到应用, 取得了良好的监测与诊断效果。我国的许多高校和研究单位, 如天津大学、上海内燃机研究所等单位开展了利用柴油机示功图判断其性能状态的基础研究。

2. 油液分析法

油液分析法是综合利用油品化验、铁谱分析、含铁量检查, 通过对润滑油中磨粒浓度、磨粒形状及大小的变化、油质的变化、含铁量的变化进行整体磨损状态分析, 来判断柴油机的磨损状态及故障状态。油液分析主要分为两大类: 一类是油液本身物理化学性能的分析; 另一类是油液中不洁物质的分析技术, 包括铁谱分析、光谱分析和颗粒计数法等。在具体实施中, 油液分析提取信息十分方便, 可以避免声振技术存在的频谱干扰等不足。但光谱技术诊断的价格昂贵, 铁谱技术手动操作较多, 速度慢, 分析判断和识别要求有丰富经验的技术人员, 其使用受到一定限制, 且标准图谱积累需时较长。

1989 年美国 CARBORUDUM 公司制作了一套铁谱分析软件系统 (FAST 系统); 1992 年, ROYLANCE 等人开发出了计算机辅助微粒分析的 CASPA 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、武汉理工大学、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 OLF1 型在线式铁谱仪, 东风汽车工程研究所也研制出了新型的 ZX21 智能化在线铁谱仪, 能有效检测到大于 5μ

收稿日期: 2006-8-12

作者简介: 张百慈 男 (1972-) 广东省船舶检验局广州分局、广州海事局 船舶轮机检验工程师 (511400)

m 的铁磁磨粒。

3. 振动分析法

振动分析法是利用船舶柴油机在工作时产生的振动信号,经测试、数据分析及处理,对内部零部件的状态进行诊断的方法。该方法具有诊断速度快、准确率高和能够实现在线诊断的特点。目前国外运用振动分析法的主要方向为:通过机体表面振动信号来识别柴油机气缸内的压力示功图;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。在国内,振动监测诊断柴油机故障在实验室已取得了许多研究成果。如在气缸头安装振动传感器,通过分析振动信号诊断缸内故障,利用振动信号诊断柴油机主轴承故障,利用润滑油管路内的压力波信号诊断柴油机轴承故障。在利用机器表面振动信号诊断活塞、气缸磨损,气阀漏气和主轴承状态等方面,武汉理工大学做了大量的实验研究,并研制出柴油机智能诊断仪 DCM—II,可不解体诊断船舶柴油机活塞—缸套磨损和气阀漏气等故障。

4. 瞬时转速法

对于多缸柴油机来说,柴油机曲轴的瞬时转速波动信号能反映机器各缸的工作状态,因此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。正常情况下,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;但当某个气缸由于故障引起工作不正常时,动力的一致性遭到破坏,柴油机运转平稳性变差,瞬时转速波动信号就会产生变形,据此可以判断柴油机缸内工作过程的好坏。但是这种方法存在着以下不足: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,可能是活塞环或者缸套磨损引起气密性变差所致,也可能是燃油系统故障造成燃烧不充分所致等等;缸数较多时,特别是缸数达到十六缸以上时,利用瞬时转速准确地诊断发动机是否有故障及定位故障缸均存在一定困难。主要是由于单缸对转速影响情况在循环瞬时转速波形中所占曲柄转角较小,相邻发火缸之间作功的重复曲柄转角较大,要提取单缸作功能力的信息比较困难。

二、现代的故障诊断技术

随着现代科学技术的发展及自动化程度的提高,柴油机故障诊断技术也经历着重大的变化。从最开始的事后维修发展到定时检测,到现代故障诊断技术的视情维修。其传统的诊断方法日益显现出不足和弊端,于是产生和发展了许多故障诊断的现代方法。

1. 基于专家系统的智能化诊断方法

专家系统是指利用研究领域专家的专业知识进行推理去解决专业的高难度的实际问题的智能系统。故障诊断专家系统作为专家系统中的一个分支,是人们根据长期的实践经验和大量的故障信息知识,设计出的一种智能计算机程序系统,以解决难以用数学模型来精确描述的系统故障诊断问题。专家系统的核心主要包括以下几部分:知识库、知识获取部分、

推理机、解释部分。在知识表达方面,大多数诊断型专家系统都是以产生式规则和框架进行知识表达的。利用产生式规则进行知识表达,一方面得益于现存的人工智能语言,如 LISP;另一方面受益于它的表达合乎人的心理逻辑,便于进行知识获取,利于人接受,如国外 Tecknowledge 公司推出的 M1 系统、斯坦福研究院的 ALPX 系统、Expert 系统、KES 系统、S1 系统等。在诊断推理方面,着重于对推理逻辑和推理模型的研究上。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的应用。值得注意的是,最近有学者提出了基于模型的知识库的理论,这也就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。对于船舶柴油机故障诊断专家系统的研究,从国内外开发的众多系统来看,都是在注重上述特点的同时,充分突出了对基于数字信号处理的深层诊断知识的研究。

2. 基于神经网络的诊断方法

基于神经网络的故障诊断技术,就是通过对故障实例和诊断经验的训练学习,用分布在网络内部的连接权值来表达所学习的故障诊断知识的技术,它具有对故障模式的联想记忆、模式匹配和相似归纳能力,从而实现故障与征兆之间复杂的非线性映射关系。目前,神经网络在柴油机故障诊断中的运用主要有:1)神经网络直接用于故障诊断。挑选关键参数作为输入层,故障参数作为输出层,利用典型样本——学习所得权值进行模式识别。2)自适应神经网络模式识别。它利用神经网络分布式信息存储和并行处理,避开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,使得故障易于识别。3)神经网络信号处理。神经网络用于信号处理主要是利用其最优化算法和其智能化识别的特点。4)模糊神经网络。具有准确的非线性拟合和学习能力。5)神经网络与专家系统结合识别。实践证明,神经网络只要和专家系统完全结合起来,互补长短,就能克服神经网络的缺乏经验、无推理性以及专家系统的知识“瓶颈问题”等缺陷,到达一种较完美的组合。

3. 基于灰色系统理论的诊断方法

灰色系统理论是 1982 年由华中理工大学学者邓聚龙教授创立并发展起来的,以其新颖的思路和广泛的适用性在理论与工程界引起广泛的注意,并迅速在社会、经济及工程等诸多领域获得广泛应用。灰色理论用于船舶柴油机故障诊断的原理: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,对未来的发展做出预测和决策,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。该方法的学习过程涉及人工干预较少,只需收集到一定数量典型状态的样本经过简单运算,即可构成典型状态模式向量,同其他的学习方法如人工神经网络方法相比,其学习方法不仅编程简单,便于调试,而且再学习容易实现。实践证明,灰色关联度分析法对大型复杂机械设备的故障诊

断是十分有效的,该方法是一种很有潜力的船舶柴油机故障诊断方法。

4. 基于信号处理技术的诊断方法

基于信号处理技术的诊断方法主要是指利用小波变换的诊断方法。小波变换是20世纪80年代后期发展起来的应用数学分支,它具有许多优良的特性。利用小波变换可以进行信号的随机去噪,即小波变换可以作为信号预处理方法用于故障特征信号的提取和信号去噪。适当地选取小波尺度,在这些尺度的小波基上对信号进行重构,去掉高频、工频噪声频段内的小波尺度,可以保证重构的信号只包含系统运行信息及故障信息。由于基于小波变换的故障诊断方法无需对象的数学模型,对输入信号的要求较低,计算量较小,可以进行在线实时故障检测,同时灵敏度高,抗干扰能力强,能够克服前面几种诊断方法的缺点,因此是一种很有发展潜力的故障诊断方法。

5. 基于混合系统的智能诊断方法

(1)神经网络方法与专家系统方法的结合传统的专家系统在开发研制过程中存在着知识维护难、推理能力弱、实时性差以及知识获取的“瓶颈”问题,而利用神经网络较好的容错性、响应快、自组织和自适应等优点可以弥补这些不足。神经网络与专家系统的结构有两种方法:一是使用神经网络来构造专家系统,即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,并解决专家系统的自学习问题;二是将神经网络理解成一类知识源的表达与处理模式,这类模式与其它知识表达方式,如规则、框架等一起来表达领域专家的知识,并面向不同的推理机制。

(2)人工神经网络方法与模糊推理的结合神经网络方法和模糊推理在诊断知识的表示、知识存储、推理速度等方面发挥了很大的作用。神经网络由于能模仿人脑神经元功能,具有强大的自学能力和数据的直接处理能力,而模糊推理则模仿人脑的逻辑思维,具有较强的结构性知识表达能力。通过比较两者的优缺点,可以将神经网络方法与模糊推理方法结合起来,实现故障诊断系统对不精确或不确定等模糊信息的处理,同时使得基于规则的结构知识能够得到学习和调整。神经网络方法与模糊逻辑方法结合的方式也有两种:一种是将传统神经网络模糊化,这种方式保留原来的神经网络结构,而将神经元进行模糊化处理,使之具有模糊信息的能力,即常规的模糊—神经网络。另一种是直接根据模糊规则或模糊分类算法构造相应的网络结构,即基于联结主义的神经—模糊推理协作系统。

三、船舶柴油机故障诊断技术发展的主要制约因素

随着现代科学技术的发展及自动化程度的提高,柴油机故障诊断技术也正发生着重大的变化,但是依然有众多因素制约着柴油机故障诊断技术的进一步发展。

(1)柴油机自身的结构:自柴油机问世的一百多年来,就以它复杂的结构而著称,随着高速、强载发动机的进一步紧凑化,传感器安装布置不易造成了信号测试上的困难;

(2)测试方法和测试设备:尤其在现场应用中,柴油机有效状态信息的获取面临着极大的困难,如止点信息,传

感器性能或者不能满足测试环境要求、或者价格昂贵,如气缸压力传感器;

(3)故障机理和故障特征:柴油机激励源众多,传递路径复杂,系统故障既有纵向性,也有横向性,且柴油机各类故障所对应的振动频率无论从理论上还是在实践中都较难准确地确定。另外由于柴油机型号众多,结构存在差异,导致故障特征的共性较差。

(4)故障诊断方法:目前柴油机的故障诊断方法很多,比较凌乱,还不存在一种较为通用性的方法。这也是制约柴油机故障诊断技术发展的主要因素。

此外,外界环境的影响也是不可忽略的制约因素。

四、船舶柴油机故障诊断技术的发展趋势

1. 以人工智能技术为核心的智能化诊断

传统的基于检测数据处理的诊断方法是通过检测信号的处理,来实现船舶工况监视与故障诊断的,但当故障类型比较复杂时,为了能把故障比较细致地区分出来,一方面需要增加检测手段,另一方面需大大增加计算量,从而使诊断时间延长,另外对于一些难以通过数据测得的事实,它就显得无能为力。以专家系统、人工神经网络、模糊逻辑、进化算法为代表的人工智能技术代表了一种新的方法体系,它的应用为解决船舶故障诊断问题开辟了一条新的途径。尤其船舶结构复杂,导致故障原因种类繁多,该领域专家缺乏,应用专家系统,可以直接到知识库中搜索专家经验,凭借专家知识很快找到故障源;应用人工神经网络,可以训练网络从定量的历史故障信息中进行学习,训练过的网络就具备了分辨故障原因与故障类型的能力。随着船舶的日益现代化,基于人工智能的诊断将是船舶故障诊断的发展方向。在大型复杂设备的故障诊断中,通常要涉及到不同的知识源、信息源,这就要求有不同的知识表达方式,不同的知识组织模型和不同的诊断推理策略。研究符号推理与非符号推理相结合,生成既具有形象思维又具有逻辑推理能力的集成专家系统,将是人工智能研究的一个必然方向。目前应用的混合技术有:专家系统与神经网络的结合;神经、模糊与专家系统的结合;神经网络与小波技术的结合,遗传算法与神经网络的结合等。基于融合的综合诊断技术也是船舶故障诊断领域一个新的发展方向。

2. 数据库技术与船舶诊断技术的结合

船舶系统是一个相当复杂的系统,对于船舶故障诊断来说,采用基于知识的诊断方法,知识库是非常庞大的,这已经成为阻碍船舶故障诊断技术发展的障碍性问题。因此,我们可以借鉴数据库中关于信息存储、共享、并发控制和故障恢复的技术,为吾所用,改善诊断系统的性能。如:数据库的基本范例(输入、检索、更新等)可作为新的知识库范例,数据库的基本目标(共享性、独立性、分布性)可作为新的知识库基本目标,数据库的三级表示与设计方法可用作新知识库的设计方法。船舶诊断技术的进一步发展和应用越来越表明,结合数据库技术可以克服其自身不可跨越的障碍,这将成为船舶故障诊断这样复杂系统成功的关键。

3. 网络化的故障诊断技术

网络化是21世纪故障诊断技术的发展方向,随着计算

机网络技术的发展及通讯技术的进步,利用各种通讯手段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,有利于对主机的管理,减少设备的投资,提高设备的利用率,必要时可与企业的 MIS 系统相联结,促进管理的一体化、现代化。上海船舶运输科学研究所研制的“船舶集成平台管理系统 (IPMS)”即为网络化故障诊断的平台系统。该平台的信息集成将为数据的进一步分析处理提供基础,船舶柴油机的监控水平将得以提高。柴油机的故障将不像信息集成前只有故障出现才报警,而是能够做到故障的智能化诊断、提前发现故障并及时诊断故障原因,这将使监测技术发生质的变化,有效避免事故的发生。在船舶信息集成的基础上,船岸连接还能够使岸上人员协助船上人员实现对船舶的实时动态监听、调试,诊断及维护,利用远程故障诊断中心的人类专家或专家系统软件作出故障判断和排除对策,有效地提高船舶的整体战斗力。

参考文献

- [1] 伍学奎. 基于信息融合的故障诊断理论与方法及其在内燃机中的应用. [博士学位论文]. 武汉. 武汉交通科技大学. 1998.
- [2] 陈怡然. 现代信号处理技术在内燃机振动诊断中的应用. [博士学位论文]. 武汉. 武汉交通科技大学. 1998.
- [3] 王志华. 基于模式识别的柴油机故障诊断技术研究. [博士学位论文]. 武汉. 武汉理工大学. 2004.
- [4] Johns N B , Li Yu-hua . Review of condition monitoring and fault diagnosis for diesel engines , University of Leicester , Leaf Coppin Publ Ltd . 2000. 6. 267~292.
- [5] Jianguo Yang , Lijun Pu , Zhihua Wang . Fault detection in a diesel engine by analyzing the instantaneous angular speed . Mechanical Systems and Signals Processing. 2001. 15. 3 : 549~564.
- [6] 曹龙汉, 曹长修, 孙英楷等. 柴油机故障诊断技术的现状及展望. 重庆大学学报 (自然科学版) . 2001. 24. 6 : 134~138.

The ships diesel engine breakdown diagnosis present situation and the trend of development

Zhang Baici

Abstract: The significance of fault diagnosis on marine diesel is stated. Aiming at some domestic and foreign conventional methods of diesel condition monitoring and fault diagnosis and their principles as well as features, the application of new fault diagnosis technology is summarized and also the development trend of marine diesel fault diagnosis technology is forecasted.

Keywords: fault diagnosis marine diesel engine development trend