

内燃机主运动副振动 监测技术的研究

张雨 张志沛 著
周轶尘 审

中国铁道出版社

PDG

TK407
229

414553

内燃机主运动副 振动监测技术的研究

张 雨 张志沛 著

周轶尘 审



00414553

中 国 铁 道 出 版 社

1998年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

内燃机主运动副至今仍是内燃机的主要故障源。本书选取故障率较高,对内燃机运行影响较大,且自身承受较重负荷,处于整体可靠性链薄弱环节的三组主运动副:活塞-缸套组件、主轴承、排气门-阀座作为研究的对象,采用振动诊断技术进行分析和研究。通过设立专用试验台架对有关故障实施了模拟实验,建立了主运动副(缸套-活塞-活塞环组;主轴承)运行工况数值计算模型,运用 FFT 方法、AR(n)时序分析、分形几何中的关联维数、模糊贴近度和模糊聚类原理、BP 神经网络等手段对上述主运动副工况监测与故障诊断的方法和措施进行了较为深入的研究。

本书可作为从事机械设备工况监测与故障诊断的工程技术人员,以及进行这方面内容学习的高校研究生和本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)

内燃机主运动副振动监测技术的研究/张雨,张志沛著。

北京:中国铁道出版社,1998.5

ISBN 7-113-02947-7

I. 内… II. ①张…②张… III. 内燃机车—列车振动—监测—研究 IV. U260.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 06180 号

书 名:内燃机主运动副振动监测技术的研究

著作责任者:张雨、张志沛

出版·发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:刘波

责任编辑:刘波

封面设计:李艳阳

印 刷:北京市燕山联营印刷厂

开 本:850×1168 1/32 印张:4.125 字数:91千

版 本:1998年9月第1版 1998年9月第1次印刷

印 数:1-1000册

书 号:ISBN7-113-02947-7/TK·20

定 价:10.80元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

序

内燃机工况监测和故障诊断一直是机械设备故障诊断技术中的重要研究内容之一。内燃机是在国民经济中产值大、数量多、应用广泛的一种动力机械,因此它的运行经济性和可靠性历来受到相当的重视。但由于往复机械各部件的热力状态和动力状态既不均匀又不稳定,再加上结构复杂,在不解体情形下识别其故障存在许多困难,有许多问题尚待深入研究。本书作者选择内燃机的主运动副为典型对象进行研究,把握住了往复机械诊断的研究关键;以当代前沿科学技术为理论工具,体现了当代学科发展的特点,既对国民经济有较大的实际意义,也有一定的学术价值,对其他类型的机械和工程结构的故障诊断亦有借鉴与参考作用。

本书采用振动诊断技术进行分析和研究,通过理论分析、数值计算、实验研究和状态辨识,对内燃机的三组主运动副:活塞-缸套组件、主轴承、排气门-阀座,在以下几方面取得了进展:

1. 在对内燃机活塞-缸套间的撞击分析中,深入研究了活塞环、活塞、缸套间的摩擦力和油膜状态,建立了考虑油膜与摩擦力影响的活塞-活塞环-缸套撞击数值计算模型,提出了从机身表面振动信号中提取内燃机活塞环胶结失效信息的方法,对内燃机活塞环故障诊断工作,在理论上有所推进,具有一定指导意义;

2. 用“准二维”简化及平均因子的多项式逆解法,将

有限长动载荷滑动轴承的雷诺方程数值解应用于内燃机主轴轴承的工况计算,以评价主轴承润滑状况和工作性能;

3. 以小孔阻塞喷注特性解释排气门的漏气性质,并在内燃机所具有的严格正时性的基础上提出了从缸盖表面振动信号中提取内燃机排气门漏气信息的方法;

4. 分析了快速傅里叶变换(FFT)的功率谱密度(PSD)与 $AR(n)$ 时间序列模型各自的优缺点,及噪声干扰与检测系统固有频率对使用 $AR(n)$ 时序模型的影响;

5. 用分形几何的关联维数,探讨了内燃机缸内部件工况的监测特征指标;利用模糊聚类原理,探讨了减少模拟实验的可能性;利用 BP 网络方法建立多机型的神经网络诊断模型,初步论证了共性诊断模型理论的可行性。

对于象内燃机这样的复杂机电设备,一个完整的工况监测与故障诊断策略应当有五个内容,即:a. 分析故障产生的机理及其特征;b. 确定表征故障的特征参数族;c. 选择故障样本数据的获取手段;d. 选择合适的状态识别方法;e. 实现智能化的计算机辅助在线监测。上述策略的实现有赖于构成内燃机故障诊断技术之相关近代科技间的互相渗透和互相促进,本书作者所做的研究说明了这一点。需要特别指出的是,作为工程应用技术的研究,关键是要能正确应用有关理论来解决工程实际问题,作者对此做了许多有益的工作,并努力向本领域的前沿发展,取得了可喜的进展,为从事本领域工作的科技人员提供了一本有意义的参考书籍。

周轶尘

1997.12 于武汉交通科技大学

目 录

第一章 绪 论	(1)
1. 历史回顾	(1)
2. 振声诊断技术现状	(3)
3. 振声诊断技术在近期的发展方向	(8)
4. 本书主要内容	(10)
本章参考文献	(12)
第二章 内燃机主运动副结构响应与运行工况实验台的研制	(16)
1. 概 述	(16)
2. 试验台总体结构	(17)
3. 主运动副运行工况测试与试验数据处理系统	(17)
4. 用机身表面振动信号进行缸内部件故障诊断的可行性	(23)
本章参考文献	(27)
第三章 考虑油膜与摩擦力影响的内燃机活塞-缸套撞击情形研究	(28)
1. 概 述	(28)
2. 活塞-缸套撞击计算模型	(28)
3. 有气环失效时的活塞-缸套撞击模型	(38)
4. 小 结	(39)
本章参考文献	(40)
第四章 利用机身振动信号诊断活塞环失效的研究	(41)
1. 概 述	(41)

2. 通过机身振动信号进行诊断的机理分析	(42)
3. 活塞环的径向振动频率	(55)
4. 活塞环失效故障诊断的模拟试验	(57)
5. 活塞环失效的振动辨识方法	(63)
本章参考文献	(64)
第五章 内燃机滑动主轴承运行工况的研究	(65)
1. 内燃机主轴承运行工况的数值计算	(65)
2. 内燃机主轴承运行工况的实验研究	(74)
本章参考文献	(77)
第六章 内燃机排气门漏气时的高压气体阻塞喷注声振特性实验研究	(78)
1. 排气门漏气声学特性	(79)
2. 内燃机排气门漏气故障模拟实验	(83)
3. 小 结	(86)
本章参考文献	(87)
第七章 有关 $AR(n)$ 时序模型处理方法的讨论	(88)
1. $AR(n)$ 时序模型处理方法	(88)
2. 定阶问题对 $AR(n)$ 时序模型的影响	(90)
3. 随机干扰对 $AR(n)$ 时序模型的影响	(94)
4. 检测系统固有频率对 $AR(n)$ 时序模型的影响	(96)
5. 小 结	(99)
本章参考文献	(99)
第八章 关联维分形在内燃机活塞-活塞环-缸套运动副故障诊断中应用的探讨	(100)
1. GP 法关联维	(100)
2. 基于关联维的活塞-活塞环-缸套-机身系统故障	

分析.....	(101)
3. 小 结	(103)
本章参考文献.....	(104)
第九章 模糊监测方法与 BP 神经网络在内燃机故障	
诊断中的应用	(105)
1. 模糊动态监测方法	(106)
2. BP 神经网络的应用	(112)
3. 模糊贴近度、模糊聚类与 BP 神经网络三种方法相	
互间的比较	(117)
4. 小 结	(118)
本章参考文献.....	(119)
结束语	(120)

第一章 绪 论

本章提要 本章对内燃机工况监测和故障诊断研究中应用广泛的振声诊断技术的发展历程、目前国内外的应用状况和研究水平、所面临的难题、以及未来一段时期内的动向作了分析；并对书中的主要研究内容作了介绍。

自从 100 多年前首台内燃机诞生以来，对内燃机的维护（修）方式已经经历了事后维护、计划维护、按需维护三个阶段。每一阶段的维护指导思想无不与当时诊断方法的技术水平和应用状况密切相关。尤其是二战之后，系统论、信息论、控制论对大工业生产的冲击和推动，机械设备的复杂与精密化，以及计算机软硬件技术和传感器技术的长足进步，使机械设备状态监测与故障诊断技术，尤其是振声诊断技术，得到了迅速发展。内燃机高速、高负荷、高功率的倾向，加上大型海难、空难、陆难（铁路、汽运）事故的频发，也促使振声诊断技术在内燃机故障诊断工作中开始得到应用。时至今日，振声诊断技术已成为既有诊断理论，又有应用方法；既有成熟的相关学科理论支持，又有自身特有的故障机理研究；既与高新技术发展密切相关，又是工程应用性极强的高精尖实用技术，在内燃机运行与维护保障中发挥着重要作用。

1. 历史回顾

早期的内燃机主要用于陆地车辆，之后由于制造技术的改进和实际需要，功率得到提高，其应用范围扩大到飞机、舰船、机车。那时尽管人们认识到内燃机需要保养，但其认识水平也仅仅是从事后维护方式过渡到计划维护方式，认为按事先订好的维护

计划一步步地去做,则机器可保无虑,运行正常。于是,按班保养,定时例检,按时厂修,已成了信条。一切都有条不紊地运转着。此时用振声参数来诊断内燃机,大概就是技工们用人体感官去感知机器的声音和振动,以判断故障的所在和程度。应该说这种状况是符合早期,尤其二战前后相对低水平的较大规模机械化生产的需要,便于对维修工作作出计划性安排的要求,和当时的计算机-电子-传感器技术水平相对应。更重要的,也和当时人们对机械设备维护诊断工作的认识程度相对应。其典型代表就是前苏联曾广泛实行的计划维护修理体制。

然而事实却不如想象的那样好。除了固然造成人力和物力等浪费的过剩维修情形外,同时尽管强制性地按计划修理了机器,但仍不断出现因突发性故障而导致的机务事故,严重者造成车(飞机、舰船、机车)毁人亡。现实使人们对维修体制和机械状况监测手段进行反思和改进。这中间以英国的设备工程学,日本的预防维修理论(TPM),美国的以可靠性理论和系统工程为基础的按需维护思想为典型代表,并应用于实际^[1]。简易振动检测仪表开始引入内燃机的维护保养诊断中,以拓延人的感官。到了本世纪70年代,内燃机维护管理的局面已得到进一步的发展^[2]。

我国自70年代末开始引入了国外先进的设备管理理论,消化吸收后逐步形成了中国的机械设备管理方法,其中的四大支柱是:微电子技术、表面工程技术、诊断技术和计算机辅助设备管理,而又以用振声参数为主要特征的诊断技术更为活跃。到现在,振声诊断技术已经在使用大型柴油机的场合如长江和远洋船舶、铁路机车、陆地电站等方面得到应用^[3~9],同时也在内燃机性能的改善(如爆振控制、燃油消耗及排放最佳化)和对小型车辆内燃机(如摩托车发动机)制造与装配质量的检测等方面得到了应用^[10~15]。

2. 振声诊断技术现状

自 70 年代末至今,短短 20 余年,内燃机振声诊断技术得到了长足的发展。从简单的电子听诊器,到以 8098 单片机为核心的便携式诊断仪^[16]以及与之相配套的诊断技术,这中间的跨越,体现了振声诊断技术牢固的理论基础,丰富的研究手段,灵活的监测方法和坚实的技术背景,这一切赋予了振声诊断技术蓬勃的生命力。

2.1 振声诊断技术的理论和技术体系

图 1-1 给出了振声诊断技术知识理论体系的层次概要。它是随着人类对自然对象的认识深度和理论的丰富而逐层递升的。第Ⅰ层是经典理论,已有两世纪多的历史;第Ⅱ层是吸收前人的成就后发展起来的,亦是目前应用的热点,在发达国家将计算机技术、振声检测技术和信号分析技术运用于机械运行工况监测已较普遍,而我国尚不普及;第Ⅲ层次国外有运用的例子,国内处于应用的初级阶段;第Ⅳ层次的新型数学工具和方法支持了现代诊断理论,在国内处于研究阶段。

- ↑ V. 小波分析、分形理论、协同论理论
- IV. 现代诊断理论、系统仿真、专家系统、灰色系统、神经网络、模糊理论
- III. 信号处理与模式识别、动态检测技术、计算机技术、非线性振动
- II. 振动、润滑、声学、机械、数学等方面的知识
- I. 工程上的故障诊断问题

图 1-1 振声诊断技术的知识理论体系

有人把信号处理与模式识别比喻为振声诊断得以存在的前提和基础。事实上,如果没有有效的手段提供高灵敏度、高识别能力的特征量,则工况监测与故障诊断时所作的工作将会事倍功半甚

至前功尽弃。因此就不断吸引人们对信号处理与模式识别方法做更深入的研究与探索。除了惯用的信号处理函数(如时域:时间历程波形形态、概率分布、AR 模型;时延域:相关函数、相干函数;幅值域:均方根值、高次矩;频域:谱分析、传递函数、倒谱等)之外,新的方法不断出现。如考虑了非确定影响因子的模糊诊断法^[17~19],考虑了非平稳信号特点的时间-频率三维分布频谱-维纳谱^[20],考虑了冲击信号特征的沃尔什谱诊断法等等^[21]。但尽管如此,人们对于内燃机振动信号的本质性征,如是否是线性振动,是否是平稳随机各态历经等问题,仍然不太清楚。

计算机体积微型化和功能强化化,传感器技术的发展,使内燃机振声诊断技术日臻完善。尤其是单片机的应用,振声传感器上限频率提高,内装前置放大器式传感器的出现,对内燃机的各个部分有可能进行有效的振声监测,其中以对气门和活塞的监测最为成熟^[22,23]。以单片机为核心的振动监测仪表是运输生产第一线应用最广泛最易于上手的诊断设备,可在维修站场、车船机队使用,同时以微机为主体的诊断系统在机械设备密集的地方(如船舶机舱,大型化工企业)和各级机务管理部门找到了用武之地^[3,16,24]。在中国,将微机、单片机用于现场实时故障监测乃是当前热点之一。

由中国机械设备管理协会牵头酝酿了近两年的机械设备诊断工程已批准立项,开始启动。其中由石家庄铁道学院和武汉交通科技大学为主研单位的“中国往复机械设备诊断工程箱”方案已于1994年10月通过专家论证并开始研制,计划于1996年左右完成,将经国家鉴定后在国内推广。该工程箱的主要内容之一便是应用振声诊断技术对16V240 铁道机车内燃机,8NVD 船舶内燃机,3400 系列推土机用内燃机和大型往复空压机实施全过程监控。交通部已将包含着振声诊断技术在内的机械故障监测方法作为在全国推广的26项新技术之一。这些都标志着振声诊断技术在我国将开始大范围应用。

2.2 内燃机振声诊断技术的国外现状

国外于 60 年代开始重视监测与诊断技术,其中尤以振声诊断为主,主要应用和研究对象是航空航天飞行器、核电站及大型机电设备。70 年代末开始应用于内燃机,在日本、英国、美国、奥地利等国都有成功范例见诸报端^[25,26]。但由于内燃机往复运动的复杂性,成熟的大范围应用于内燃机维护工作的局面仍未出现。可以说,国内在这方面,尤其是对内燃机主运动件激励力的分离和识别方面,处于国际领先水平。实际上,国外对于振声技术应用的研究,从来没有把内燃机(往复机械)单独划开予以特别的考虑,而是将其与其它机电设备和运载工具一同作为复杂设备来看待的。

目前国外对于振声诊断技术在内燃机工程方面的应用大致有五个方向:

(1)智能型故障诊断系统。这是在大量试验数据或故障范例的基础上,通过神经元理论、灰色系统、模糊类聚、小波理论、分形几何等数学工具,建立具有知识推理能力的专家系统。文献[27,28,29,30]均介绍了这方面的情况。

(2)智能诊断仪器的开发与应用。这是在计算机体积微型化、功能强大化,传感器性能优越化的基础上实现的。对于大型重要设备及船用主机的工况监测已可实现计算机实时控制^[4];简便灵活、性能价格比优越的通用诊断仪器亦已出现。

(3)故障机理的研究。尽管这部分工作主要仍建立在经典和成熟的知识体系上,但计算机技术、信号分析技术和仿真实理论使其能更深入地进行故障机理本质的辨析。对于内燃机这样的复杂机械,如何尽可能多地考虑各影响因素对于主运动副运行工况的作用,动态地模拟和分析部件故障产生与发展的过程,综合地研究部件故障机理和整机故障机理,并对整机故障程度作出综合评判,是振声诊断技术在内燃机中应用的基础性的工作。

(4)故障特征信息的提取与分析。尽管信号分析与处理知识

已相当完备,基于这些知识而制成的信号分析仪器也很完美,但由于内燃机结构的复杂性和传递途径的多向性,还存在许多问题^[31]。因此,寻求更准确更方便的故障特征信息的提取与分析方法,有待进一步去探索^[32,33]。

(5)内燃机,尤其是汽油发动机性能的监测与改善。汽油机的爆振和工作粗暴是限制其功率提高及排放质量的一个主要障碍,同时又是造成主运动部件结构损伤和破坏的一个原因。目前控制爆振的常用方法是推后点火提前角、降低压缩比、燃用高标号汽油,但这是以牺牲功率和排放质量、降低使用经济性为代价的。如果能将点火提前角控制在临界点,此时汽油机将处于最佳状态(指汽油机其它方面都完好时),功率发挥最大,排放下降最多。国外许多研究机构和厂商如德国 FEV 机动车公司^[11]、德国技术大学热动力应用研究所^[11]、日本日立公司^[12]、韩国大宇汽车公司^[13]、奥地利 AVL 公司^[14]、美国福特公司^[15]等,均期望通过这样的途径来改善汽油发动机的性能,并不约而同地认为可以通过机身振动参数的检测与诊断来判断并控制发动机的爆振状况。其关键技术是:①选择对检测参数的处理方法和故障特征的提取手段。②获得合适的爆振阈值。③研制由爆振临界点控制的自适应电子点火系统。

国外在这个研究方向已开展了一些工作,以火花点燃式(spark ignition-SI)车用汽油发动机为主。而国内这方面的研究(无论对摩托车发动机或汽车发动机)目前尚处于起步阶段。可以预期这一方面的研究成果所带来的效益将是使汽油发动机在提高功率和降低排放两方面,在整机机械结构不变动的情形下,通过安装爆振临界点自适应装置,将会有较明显的改善效果。

2.3 内燃机振声诊断技术面临的困难

目前国外发达国家的内燃机振声诊断水平大致处于简易诊断-精密智能诊断之间。国内大型企业,如石油化工企业和冶金企业的应用水平较高,运输部门(铁路、航运、公路)的水平不一致,以

铁路部门的状况较好些。振声诊断技术的应用状况除了经济因素制约外,尚与其自身遇到的一些难题有关:

(1)内燃机各运动部件激励力的分离与识别,从而获得不同部件激励力的特征量和门限值。由于内燃机运动部件多且形状复杂,这些运动部件又包含在机身里面,在工作状态下难于接近,加之激励力的传递途径多而复杂,给理论建模和实验测试带来了较大难度;

(2)如何打破当前主要通过实验获得内燃机故障诊断特征参数的局面,对不同型号结构的发动机,找出其动力学系统的共性,把握各运动部件激励力的变化规律,从而在对内燃机表面振声信号研究的同时深入到对相应激励力产生的故障机理的研究。这样做,将使振声诊断技术在理论上有质的飞跃,最终要能达到少量试验加理论分析,能诊断相当多系列的内燃机的某一类型故障,如连杆的大端轴承冲击问题的辨识诊断,活塞环失效故障的诊断等。文献^[34]对内燃机主轴承故障的理论建模和辨识等问题作了尝试。同时伴随的问题是,确定内燃机故障诊断特征参数究竟能否摆脱对故障模拟试验的依赖?

(3)如何在数据分析与处理的方法上更多地考虑振动系统的非线性与时变性。这使得灰色系统、模糊数学、神经网络、分形几何、小波理论等非线性数学工具将被考虑应用到建立诊断模型、确定特征参数及其门限值等工作中去;

(4)维修体制与监测诊断手段不匹配。虽然我国在钢铁石化等行业已较广泛地推行简易诊断方法,对重点大型设备采用精密诊断并已取得了经济效益,但在其它行业却不尽然。如以交通部 13 号令形式颁布的、汽车运输业现行的《汽车运输企业车辆技术管理规定》中,虽规定了维护修理方针是强制维护、视情修理,但如何视情修理?是否要在发动机使用过程中采取跟踪监测诊断?用什么手段不解体判断发动机主运动副状况?都没有明确下来。水运企业的维修制度亦有类似情况。因此,如果把企业的维修制度比作上层建筑,它就约束了可比作生产力的诊断手段,使得推广先

进的诊断技术在实际运作时有阻力；人员培训、经费、器材均得不到保障。

3. 振声诊断技术在近期的发展方向

国家科委近期确定的国家自然科学基金在机械工程方面所要资助的四个研究大方向是：①设计；②制造；③试验；④监测。可见作为现代化大工业生产的需要和标志，对机械设备的故障监测和诊断，其中当然主要包括振声诊断技术，将更加受到重视。

振声诊断技术日趋完满、成熟，应用广泛，但也遇到了挑战。解决了难题，将会使这一学科走向更光明的未来。在近期一段时间内，内燃机振声诊断技术的发展大方向有两个：①应用方面的普及和提高；②诊断理论和方法的革新与突破。

3.1 普及应用

具体有下列一些工作：

(1) 维修管理制度与诊断技术措施相适应。应当将有关内燃机故障监测诊断的内容以行业标准的形式确定下来，从而使推广应用有动力和压力；

(2) 大力推广简易和较精密的诊断技术，在运输站(厂、队、公司)推广时要做到五定，即：定被监测的内燃机，定被监测的项目，定诊断仪器，定监测工作人员，定监测周期；

(3) 实施人员培训规划，使监测人员掌握下列知识：是什么造成了部件冲击振动？冲击振动是如何发生的？什么时候会发生机务事故？机器故障部位在何处？从而使监测人员根据诊断数据即可把握内燃机工作性能和运转趋势；

(4) 介于简易诊断和智能化诊断之间的振动监测仪器的研制、规模化生产和推广应用。以单片机为核心，使用高性能的振声传感器，做成性能价格比较高的检测仪器，具有一般的时域和频域内的数据处理功能。

3.2 诊断理论和方法的研究

具体有下列一些工作:

(1)突破以实验建模为基础的传统方法,运用运动学和动力学知识,建立内燃机主运动副磨损故障与内部冲击参数之间的关系,同时利用时域及频域激励力识别方法,从发动机表面振声信号中识别出冲击力。理论计算的普适性可以使这种诊断方法适用于不同机型、不同工况的发动机^[34]。

(2)内燃机主运动副工况仿真,以达到系统研究内燃机激励力的目的。内燃机主运动副主要有气门-气门座组,活塞-气缸组,连杆轴承组,主轴承组。至今为止,除了连杆轴承组外,其它各运动副的数值计算模型都已基本建立^[22~24,36,37]。

(3)目前看来,内燃机故障诊断专家系统有两大类,即被动型和主动型。被动型是将某行业专家组的知识收集起来,形成共享的计算机知识库,基本上由知识库、推理机、数据库、解释程序和知识获得程序组成。这类专家系统又分为基于规则的(Rule-Based)系统和基于框架的(Frame-Based)系统两种,以前者应用最广,在我国也有研究。国外成功的例子有美国GE公司的内燃机电力机车故障排除和修理咨询专家系统^[25],意大利米兰汽车工业大学的汽车电子故障诊断专家系统^[29],日本的汽车发动机诊断系统。但这些系统的共同特点是只拥有一个小群体的知识,无自动扩展的能力。所谓主动型是指专家系统具有自学习功能。如将神经元知识引入被动式专家系统,或利用已有的实验数据用神经元知识及模糊理论来建模,形成具有学习扩展能力的新的知识库,以适应不同类型发动机的诊断。这方面工作在我国刚刚开始有些初倪,有较好的前景^[35,38]。

(4)内燃机振动信号性质的研究。利用模糊分析、神经网络、分形理论、小波变换,时频分析等现代非线性数学工具,揭示其内在特征,并以此提高对故障信号的处理方法和故障特征提取手段的水平。其结果将可能使内燃机振动诊断方法产生革命性的飞跃。