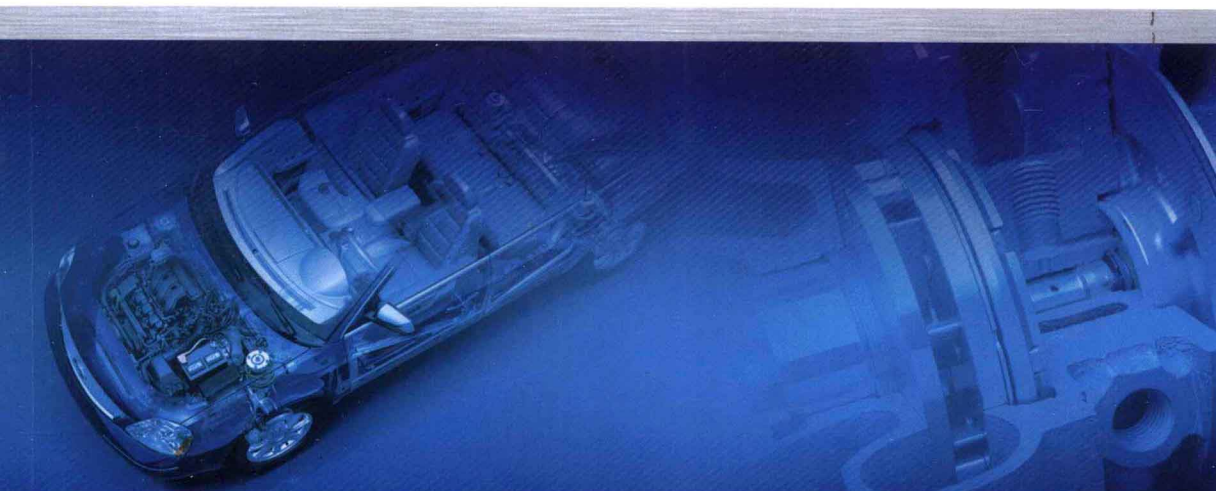


齿轮箱故障诊断的 油液、振动信息融合方法



张培林 李兵 徐超 高经纬◎著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

齿轮箱故障诊断的油液、 振动信息融合方法

张培林 李 兵 徐 超 高经纬 著

机械工业出版社

本书首次系统而深入地研究了油液、振动信息融合方法在齿轮箱故障诊断中的应用。本书结合摩擦振动物理模型探讨了油液和振动之间的内在联系,在齿轮箱试验台架进行了700余小时磨损试验的基础上,对油液和振动参数内在的耦合关系进行了深入探讨,引入并提出了Vague集、单位圆和人工免疫算法等方法,实现对油液振动融合信息的特征提取、选择和分类,提高了齿轮箱故障诊断的可靠性和准确性,为齿轮箱状态监测和故障诊断提供了一条新的理论和技术途径。

图书在版编目(CIP)数据

齿轮箱故障诊断的油液、振动信息融合方法/张培林等著. —北京:机械工业出版社, 2011. 12
ISBN 978 - 7 - 111 - 36153 - 4

I. ①齿… II. ①张… III. ①齿轮箱—故障诊断 IV. ①U260.332

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第212859号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:何士娟 责任编辑:何士娟 版式设计:霍永明
责任校对:刘志文 封面设计:路恩中 责任印制:杨曦
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2011年12月第1版第1次印刷
169mm×239mm·12.25印张·242千字
0001—2500册
标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 36153 - 4
定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者购书热线:(010)88379203

前 言

齿轮箱具有传动转矩大、结构紧凑等优点，因此齿轮箱是机械设备中最主要的传动部件之一。其零部件，如齿轮、轴承和轴的加工工艺复杂，装配精度高，又常常在高速重载荷下连续工作，其状态往往直接影响到机械设备是否正常工作。自故障诊断技术问世以来，齿轮箱的故障诊断一直是业内普遍关注的课题之一。

针对齿轮箱故障诊断，现有故障诊断方法主要包括：性能测试法、振动测试法、油液分析法和声学测试法。上述诊断方法各有优缺点，性能测试法测试简单，但故障诊断效果较差；振动测试法最为常用，但需要进行复杂的信号处理，且受到检测位置的限制；油液分析法能够有效分析磨损故障，但对瞬时突发故障无能为力；声学测试法能够实现非接触式检测，但容易受到背景噪声的影响，且不能进行准确故障定位。

考虑到上述诊断方法各有优缺点，本书提出融合齿轮箱油液、振动等多种状态参数，各取所长，切实提高齿轮箱故障诊断的精度和故障的准确定位。

研究油液、振动之间的耦合关系，将信息融合理论引入齿轮箱故障诊断领域有着重要的意义。

(1) 信息融合将切实提高故障诊断的准确性

现有研究表明，使用单一方法的故障诊断准确性为40%~60%，而如果采用信息融合，充分提取多方面信息，将大大提高故障诊断的准确性。有文献研究表明，经过油液和振动的信息融合，针对美军某型直升机的蜗轮蜗杆传动装置的故障诊断准确率在80%~90%，大大降低了故障的误报和漏报。

例如，齿轮在某一齿面或少量齿面发生点蚀故障初期，振动信号将发生细微变化，经过短期运行后，齿面点蚀故障将发展到其他齿面，而此时振动信号将重新趋于平稳。如果错过故障初期，振动监测将失去报警的最佳时机，直接导致故障的漏判。而如果同时引入油液监测，将会发现润滑油中逐渐出现异常磨损信息，提示系统内部出现了异常磨损。这样，在诊断监测中引入油液监测将有着重要意义。

(2) 信息融合将提高故障的早期发现能力

在进行故障诊断时，越早发现故障将意味着损失的大大降低，甚至可以避免严重故障的发生。严重故障发生前，都会在多种状态参数上有所反映，只是可能由于参数提取困难或背景噪声的影响而导致没有及时报警。采用多传感器信息融

合，将从多方面进行状态参数的提取，可以在故障早期及时发现异常。

例如，振动监测对断齿等突发故障能够及时报警，油液监测能够在强背景噪声下对细微异常磨损进行早期有效监测，这样如果融合两种监测方法，就能够在早期及时发现故障，避免严重故障的发生。

(3) 信息融合将提高故障的准确定位能力

振动监测是通过提取外在的振动信号进行状态监测与故障诊断，而油液监测则是通过分析内在的润滑油进行状态判别和异常磨损判断。在故障定位时，振动监测能够准确定位到故障的部件，但容易受到背景噪声的影响。油液监测能够通过材质分析发生故障的部位和严重程度，但在同材质故障定位时精度不高。将两者融合，将弥补各自故障定位的不足，着实提高故障的定位精度。

(4) 信息融合将提高复合故障的诊断能力

从现有文献来看，大部分故障诊断研究是针对单一故障，对复合故障缺乏有效的通用性。尤其是振动监测，如果多处出现故障，将在振动信号中带来解调信号，给故障信号的提取增加了很多困难，直接影响到故障类型的识别。同样，如果相同材质的材料同时发生异常磨损，油液监测也无法准确判断。这样，融合两者信息，将在复合故障诊断领域提出更为有效的故障诊断方法。

综上所述，本书通过故障机理分析，分析油液和振动信息的内在联系，并引入信息融合理论和方法，探索提高齿轮箱状态监测与故障诊断可靠性和准确性的有效途径，解决齿轮箱性能检测与故障诊断问题。

全书共分为9章。第1章给出了本书的选题背景和意义，归纳了现有齿轮箱故障诊断及研究现状，详细讨论了信息融合技术以及油液和振动融合诊断技术在国内外的研究现状和应用概况。

第2章针对油液和振动融合诊断的理论基础问题，分析了摩擦、磨损和振动三者之间的密切联系，并结合摩擦振动物理模型探讨了油液和振动之间的内在联系，定性研究了磨损条件下油液和振动的融合特征，为齿轮箱油液和振动融合诊断奠定了理论基础。

第3章介绍了油液光谱分析的原理和光谱分析的数学处理方法。

第4章介绍了油液铁谱分析技术的基本原理，重点阐述了铁谱磨粒图像识别及其发展过程，如典型磨损磨粒及其特征及磨粒图像的预处理、分割、滤波、特征提取和识别等关键问题。

第5章阐述了齿轮箱振动信号分析技术，介绍了齿轮箱的动力学模型，研究了振动信号提升小波包在线降噪方法，提出了一种提升小波包先序分解后序搜索最优基分解算法，提高了提升小波包最优基分解的空间效率；依据提升小波包分解结构，提出了一种渐变式阈值选择与量化策略，实现了全频内消除噪声并保留有用信息；用特征类间可分离性度量对实测振动信号降噪效果进行量化评价。

第6章针对油液和振动融合诊断的参数选取问题,利用 Vague 集理论和粗集理论对油液和振动参数进行了筛选和简约,得到了齿轮箱油液和振动融合诊断中需要重点监测的15种参数,为齿轮箱油液和振动参数磨损规律研究提供了基本条件。

第7章针对油液和振动参数的磨损规律问题,结合磨损试验数据重点分析了选取的15种参数在齿面磨损故障条件下的变化规律,并对油液和振动参数内在的耦合关系进行了探讨,给出了齿面磨损故障条件下的油液和振动参数近似耦合关系,既验证了油液和振动融合诊断在实际故障诊断中的可行性,又为齿轮箱故障诊断提供了试验依据。

第8章针对油液和振动参数的特征提取问题,提出了单位圆特征提取方法,给出了单位圆特征提取方法的基本概念和实现步骤,并验证了两个重要的算法原理。利用遗传算法对油液和振动参数的基准点进行训练优化,有效提取了油液和振动高维数据中的特征信息,为齿轮箱油液和振动融合诊断提供了有效特征参数,解决了齿轮箱故障诊断中的特征提取问题。

第9章针对油液和振动融合诊断方法问题,在齿轮箱故障诊断中引入免疫原理,并对现有免疫算法进行了改进,提出了基于免疫改进算法的油液和振动融合诊断方法。通过磨损试验数据分析,对油液单一诊断方法、振动单一诊断方法以及油液和振动融合诊断方法进行了对比研究。分析结果表明,与油液、振动单一诊断方法相比,油液和振动融合诊断能够有效提高故障诊断中的故障识别能力。

著 者

目 录

前言	
第 1 章 齿轮箱故障诊断技术	
概述	1
1.1 齿轮箱故障诊断技术	1
1.2 齿轮箱振动分析故障诊断技术	3
1.3 齿轮箱油液分析故障诊断技术	4
1.4 油液和振动信息融合技术	5
1.4.1 信息融合技术的研究现状	5
1.4.2 油液和振动融合的研究现状	7
第 2 章 齿轮箱油液和振动融合诊断理论基础研究	10
2.1 齿轮箱常见故障及原因分析	10
2.1.1 齿轮常见故障	10
2.1.2 轴承常见故障	11
2.2 齿轮箱油液和振动之间内在联系分析	12
2.2.1 摩擦和磨损之间的相互联系	12
2.2.2 摩擦和振动之间的相互联系	13
2.2.3 齿轮箱油液和振动融合的定性分析	15
2.3 齿轮箱磨损试验台架构建	15
2.4 齿轮箱磨损试验方案设计	16
2.4.1 故障机理分析	17
2.4.2 试验方案设计	19
第 3 章 油液光谱分析	20
3.1 光谱分析的原理	20
3.2 光谱分析中常用的数学方法	22
3.2.1 磨损元素界限值的制定方法	23
3.2.2 基于灰色模型的磨损元素浓度值预测	26
3.2.3 时间序列分析方法	30
第 4 章 油液铁谱分析	37
4.1 磨损颗粒沉积原理	38
4.1.1 物质的磁性特征	38
4.1.2 铁谱仪磁场特征	39
4.1.3 磨粒的沉积规律分析	41
4.2 铁谱仪的种类	44
4.3 铁谱磨粒的定量分析	49
4.3.1 磨损颗粒尺寸分布	49
4.3.2 磨损定量分析方法	51
4.4 铁谱磨粒图像的自动处理	55
4.5 磨粒图像分割	60
4.5.1 基于量子化粒子群与模糊 C 均值融合的铁谱图像分割算法	61
4.5.2 基于区域生长的自适应铁谱图像分割算法	66
4.6 铁谱磨粒图像特征参数的分类	70
4.6.1 磨粒的形状特征参数	70
4.6.2 磨粒的表面纹理特征参数	73
4.7 基于 D-S 证据理论的磨粒组合智能识别	76
4.7.1 模糊灰色信息集成模型	76

4.7.2	加权模糊优选模型	79	6.2.1	Vague 集基本概念	118	
4.7.3	对称交互熵模型	80	6.2.2	Vague 集的相似度量	118	
4.7.4	基于 D-S 证据理论的磨粒 组合智能识别	81	6.3	Vague 集在油液和振动参数 筛选中的应用	119	
第 5 章 振动信号分析技术			85	6.3.1	油液和振动参数筛选的 评价指标	119
5.1	齿轮箱动力学建模	85	6.3.2	建立各参数的 Vague 集	122	
5.1.1	齿轮箱的子系统建模 方法	85	6.3.3	建立理想期望参数的 Vague 集	123	
5.1.2	箱体的动力学模型	86	6.3.4	确定各评价指标的权重	123	
5.1.3	主动轴系的动力学模型	88	6.3.5	计算各参数与期望参数 之间的相似度量	123	
5.1.4	从动轴系的动力学模型	89	6.4	基于粗集理论的油液和振动 参数简约	126	
5.1.5	轴承座对箱体的瞬时激 励力	91	6.4.1	粗集理论	126	
5.2	降噪	92	6.4.2	粗集理论在油液和振动 参数简约中的应用	127	
5.3	提升小波包变换基本理论	92	第 7 章 齿轮箱油液和振动融合 诊断磨损规律研究			
5.3.1	小波包变换与 Mallat 算法	92	7.1	齿轮箱磨损试验过程介绍	131	
5.3.2	提升小波变换原理	93	7.2	油液参数磨损规律研究	133	
5.3.3	提升小波包变换算法	95	7.2.1	油液光谱参数磨损规律	133	
5.3.4	提升小波包变换的移 频算法	96	7.2.2	油液铁谱参数磨损规律	137	
5.4	提升小波包阈值降噪方法 研究	98	7.3	振动参数磨损规律研究	140	
5.4.1	提升小波包分解的信噪 分离	99	7.3.1	振动时域参数磨损规律	140	
5.4.2	一种次优基提升小波包 分解算法	99	7.3.2	振动频域参数磨损规律	141	
5.4.3	一种渐变式阈值选择与 量化策略	103	7.3.3	振动时频域参数磨损 规律	142	
5.4.4	算法测试与应用	105	7.4	油液和振动参数内在耦合 关系探讨	143	
第 6 章 基于 Vague 集的油液和 振动参数筛选			113	7.4.1	油液和振动参数相关 系数分析	143
6.1	油液和振动特征参数	113	7.4.2	油液和振动参数耦合 关系探讨	145	
6.1.1	油液参数	113	7.4.3	油液和振动参数耦合 关系验证	147	
6.1.2	振动特征参数	114				
6.2	Vague 集理论	117				

第 8 章 齿轮箱油液和振动融合	诊断方法研究	165
诊断特征提取研究	149	
8.1 单位圆特征提取方法的提出	149	
8.2 单位圆特征提取方法的基本概念	150	
8.3 单位圆特征提取方法的实现步骤及算法验证	152	
8.3.1 单位圆特征提取方法的实现步骤	152	
8.3.2 单位圆特征提取映射方法的验证	153	
8.3.3 单位圆特征基准点聚类的验证	155	
8.4 基于遗传算法的油液和振动高维数据基准点的训练优化	158	
8.4.1 遗传算法的基本实现步骤	159	
8.4.2 基准点的训练优化结果分析	161	
8.4.3 油液和振动高维数据的特征提取	163	
第 9 章 齿轮箱油液和振动融合		
	9.1 现有故障诊断方法对比分析	165
	9.2 免疫原理的基本概念和实现步骤	166
	9.2.1 免疫原理的基本概念	166
	9.2.2 免疫原理的实现步骤	166
	9.3 免疫原理的算法改进	168
	9.3.1 免疫算法的不足	168
	9.3.2 免疫算法的改进	169
	9.3.3 免疫算法改进前后对比分析	170
	9.4 基于免疫改进算法与单位圆的油液和振动融合诊断方法	174
	9.4.1 齿轮箱工作状态特征向量的定义	174
	9.4.2 检测器的生成	175
	9.5 油液和振动融合诊断与单一诊断的对比分析	176
	结束语	182
	参考文献	184

第1章 齿轮箱故障诊断技术概述

齿轮箱具有传动力矩大、传动精度高、结构紧凑等优点，是机械设备中必不可少的动力传递部件，在工业、航空运输、冶金等领域得到了极为广泛的应用，其运行状态往往直接影响到机械设备是否正常工作。齿轮箱是一种使用量大、应用面广的基础性部件，其零部件如齿轮、轴承和轴的加工工艺复杂，装配精度高，又常常在高速重载荷下连续工作，因此故障率较高，是造成机械设备不能正常运转的常见原因之一，一旦设备出现故障，就可能中断生产，造成巨大经济损失，甚至带来危害生命等灾难性后果。据日本新日铁会社的统计，齿轮箱故障约占机器总故障次数的10.3%左右。1956~1986年，在美国导致人员伤亡或飞机损坏的直升机重大飞行事故中，齿轮箱是最主要的故障源，约占22%。为了防止此类事故的发生，美国军方和国家宇航局(NASA)投入大量的人力物力研究各种齿轮传动的故障诊断方法，使维修费用达到了直升机飞行成本的30%。1988年秦岭电厂5号机组转子飞车，直接经济损失达一亿元之多，严重影响西北电网供电，间接损失难以计数。因此，研究快速有效的齿轮箱故障诊断方法对于防止突发性事故、降低设备维修费用、提高经济效益具有非常重要的现实意义。

近年来，齿轮箱故障诊断技术得到了迅猛发展，齿轮箱也由最初的事后维修到定时维修、再到视情维修，最后发展到基于状态的维修，减少一些不必要的经济损失，创造更大的经济效益和社会效益。

1.1 齿轮箱故障诊断技术

齿轮箱是用来改变转速和传递动力的常用机械传动装置，由于其工作环境恶劣，容易受到损害和出现故障，同时，齿轮箱中的零部件如齿轮、轴、轴承等加工工艺复杂，装配精度要求高，又常常在高速度、重载荷下连续工作，导致故障率相对较高。因此，齿轮箱的故障诊断研究一直是学者们重点研究的课题之一。

目前，针对齿轮箱的故障诊断方法主要有性能参数分析法、振动分析法、油液分析法、噪声分析法和声发射分析法等。

1. 性能参数分析法

齿轮箱的作用是传递动力，一旦齿轮箱内部的某个零部件或某些零部件发生故障，将直接导致齿轮箱的输出性能参数发生变化，因此，可以根据齿轮箱性能参数的变化来判断其工作是否正常。但是，性能参数对齿轮箱中零部件的早期失

效往往很不敏感，当指标劣化时，故障往往已经发展到很严重的程度，因此性能参数分析法已经逐渐成为故障诊断的辅助手段。

2. 振动分析法

基于振动分析技术的齿轮箱故障诊断法起始较早，技术也较成熟。振动分析法利用的信息载体是齿轮箱箱体的振动信号。箱体振动信号中蕴含了箱体内部设备运行状态的丰富信息，是设备运行状态特征的主要载体之一，当箱体内部的设备发生异常或故障时，箱体振动信号的频率成分和幅值等会发生相应的变化。振动分析法具有诊断速度快、精度较高、故障定位较准确以及能够在线检测等优点，目前已经成为齿轮箱故障诊断研究中使用最广泛且行之有效的方法。

但是，随着齿轮箱结构复杂程度的不断增加和运行工况的不断恶化，振动分析法在强背景噪声条件下的诊断精度还有待于进一步提高。

3. 油液分析法

油液分析法利用的信息载体为齿轮箱内部的润滑油。在齿轮箱的运行过程中，发生故障的部件表面会有细小的金属微粒脱落并进入到润滑油中，通过分析润滑油中这些颗粒的浓度、粒度、形貌和成分可以诊断齿轮箱各部件的磨损状况以及润滑油本身的状态。目前油液分析按工作原理可分为理化分析、光谱分析和铁谱分析三个部分。

作为一门新兴技术，油液分析技术已经在许多领域得到了广泛应用。但是该项技术应用于故障诊断领域仍然有着一定的局限性，如检测成本较高、故障准确定位困难、对操作人员要求较高、在线监测技术还不成熟等。

4. 噪声分析法

噪声分析法是以齿轮箱运行中的噪声作为信息源，在齿轮箱运行过程中，通过噪声参数的变化特征判别齿轮箱的运行状态。此方法的本质与振动分析法是一致的，因为噪声主要是由振动而产生的。噪声分析法始于 20 世纪 80 年代中期，90 年代发展较快，目前已在许多领域获得应用。该方法虽然简便，但易受环境噪声的影响。

5. 声发射分析法

由于齿轮箱的金属零件在磨损和变形过程中产生弹性波，声发射分析法就是以此弹性波为信息源，在齿轮箱运行过程中，通过分析弹性波的频率变化特征判别齿轮箱的运行状态。但目前该方法只能对一些明显的故障进行诊断，对于一些复杂的、不明显的故障诊断准确率较低。

从上述分析可知，用于齿轮箱故障诊断的方法各有优缺点，应用场合也不尽相同。本书选取当前使用最为广泛和有效的振动分析法和油液分析法作为齿轮箱故障诊断的主要方法，引入信息融合理论对油液和振动信息进行有效融合，更为准确有效地识别故障。

1.2 齿轮箱振动分析故障诊断技术

齿轮箱振动分析故障诊断研究始于20世纪60年代。随着现代测试技术和信号处理技术的迅速进步,振动分析法得到了快速发展和广泛应用。目前齿轮箱的振动分析故障诊断研究主要集中在故障机理、信号降噪、参数提取、故障诊断方法和智能诊断专家系统等几个方面。

在故障机理研究方面,汕头大学的丁康研究了齿轮箱齿形误差、齿轮均匀磨损、箱体共振、轴轻度弯曲、断齿、轴不平衡、轴严重弯曲、轴向窜动及轴承疲劳剥落和点蚀十种典型故障的振动特征。崔玉杰总结了某水磨机减速器在齿形误差、箱体共振、断齿、轴严重不平衡、轴承疲劳剥落和点蚀等六种典型故障时的振动特征。

在信号降噪方法方面,小波分析是振动信号分析中迅速发展的一种降噪方法,具有良好的时频局部化特性和特别的降噪能力,在故障诊断中得到了广泛应用。Meltzer G.、北京工业大学、西安交通大学等都有人详细研究了小波分析的实现过程和在故障诊断中的具体应用。近年来,一些新的分析方法例如局域波分解、经验模态分解、数学形态滤波器和神经网络等也开始应用于信号的降噪,并取得了良好效果。

在参数提取方面,早期的齿轮箱故障诊断主要局限于直接测量一些简单的振动参数,如振动峰值、均方根值和峰值系数等。这些参数常用于简易诊断。随着信号处理技术的不断发展,特别是FFT技术的广泛应用,频域分析方法被引入齿轮故障诊断和轴承故障诊断,在该方面的早期研究以James I. Taylor和Bridal的工作为代表。进入21世纪后,许多新的振动参数得到了应用。英国的W. J. Staszewski、上海交通大学的陈进教授、大连海事大学的王凤利等将时频分析技术应用到齿轮箱和旋转机械故障诊断领域。华南理工大学的陈忠提出用EMD关联维来辨识齿轮箱振动信号,取得了良好效果。北京科技大学的徐金梧教授将经验模态分解和分形维数应用到滚动轴承故障诊断中。美国的吴贤铭教授和中北大学的潘宏侠教授成功地把时间序列分析理论应用到滚动轴承故障诊断中。另外,人工神经网络也得到了广泛应用,其中较为成功的神经网络有Hopfield模型、MLP模型、ART模型和SOM模型等。

在故障诊断方法研究方面,军械工程学院的张中民博士提出了基于等角度平均的齿轮故障诊断方法,并取得了很好的应用效果。在时域同步平均的基础上,P. D. McFadden提出了通过检测有缺陷的齿轮啮合时产生的低频共振和调幅、调相特性来诊断齿轮故障。同一时期,频谱分析法在齿轮故障诊断中的应用发展很快,David和B. Szrom用FFT和细化FFT对齿轮工况进行了监测。当前,振动故

障诊断方法主要采用小波分析、神经网络、灰色理论、模糊理论、共振解调、独立向量分析、高阶累计量、分形理论、随机共振、循环双谱、免疫原理、盲源分离等新兴技术对振动信号进行有效的故障诊断。

在智能诊断专家系统开发方面, S. C. Liu 等研究开发了用于机械故障诊断的有效专家系统。该系统由故障树、模糊群多属性决策(Fuzzy group attribute decision making)、知识库和推理机 4 个模块组成。在实际诊断中, 采用了 100 个样例, 通过有效的搜索, 找出可能出现的故障原因, 使整体故障查询数下降 12%。曹建平等把基于 BP 神经网络的专家系统应用到齿轮箱的故障诊断中。这种基于神经网络的专家系统由知识获取、知识库、推理机、解释、输入输出 5 个部分组成。在齿轮箱诊断实例中, 选用频谱中一倍频显著、二倍频显著等 6 项指标作为征兆, 解调谱中选用细化包络谱与倒频谱中 10 项指标作为征兆, 故障输出包括轴不对中、齿轮偏心、齿轮点蚀、齿轮磨损 4 项。用典型的齿轮箱故障与征兆关系对 14 批数据进行训练, 由此建立了对这 4 类故障进行确诊的知识库, 经过诊断得到较合理的输出结果。中北大学的潘宏侠针对神经网络和传统故障诊断专家系统的不足, 提出了一个把神经网络与专家系统相结合、发挥各自优点的基于神经网络的齿轮箱故障诊断专家系统设计方案, 介绍了该系统的结构功能和主要特点, 并阐述了该系统重要模块的实现方法。武汉钢铁股份有限公司的雷迅将典型故障特征规则与现场技术人员的经验总结进行信息规则化后存储至诊断规则库, 利用计算机将自动频率计算和自动搜索与故障诊断推理规则相结合, 开发出轧机齿轮箱故障诊断专家系统, 为现场的技术人员提供了快速轧机齿轮箱智能诊断工具。南京航空航天大学的赵淳生教授等人开发了 MDS(Mechanical Diagnosis System) 系列仪器和系统, 并成功地应用于轧钢系列轴承的在线故障诊断等。

1.3 齿轮箱油液分析故障诊断技术

油液分析技术是通过分析被监测设备的在用润滑油(润滑剂或工作介质)的性能变化和携带的磨粒, 获得机器摩擦学系统的润滑和磨损状态的信息, 评价机械设备的工况和预测故障, 并确定故障部位、原因、类型的技术。近 20 年来, 随着油液分析技术的迅速发展, 油液监测诊断成为设备状态监测与故障诊断的支柱之一, 广泛地应用于矿山、冶金、电力、化工、石油、航空、机车和港航等大中型企业。这种技术是其他技术所无法取代的, 并且在工业领域中发挥着愈来愈大的作用。其中应用广泛且应用效果较好的是油液铁谱分析技术和油液光谱分析技术, 有关状态监测与故障诊断的研究也大多数集中在这两个领域。

随着油液分析技术的逐步成熟和完善, 齿轮箱油液故障诊断研究得到了广泛使用, 已经成为故障诊断领域里的一个重要分支, 在许多场合有着振动分析法等

其他诊断方法无法比拟的优势。

目前, 齿轮箱油液故障诊断研究主要集中在油液磨损规律研究、油液参数提取、油液故障诊断方法和油液故障诊断专家系统等领域。

在油液磨损规律研究方面, 西安科技大学的胡元哲概括了齿轮箱齿轮、滚动轴承、滑动接触三种主要摩擦副在磨合磨损、正常磨损、异常磨损(过载、超速、疲劳)三个阶段磨粒的主要识别特征, 包括尺寸、尺寸分布、数量、成分和形貌等。武警工程学院的战仁军通过齿轮箱的磨损试验, 获得机械设备运行过程中的磨损曲线, 并在铁谱定量分析的基础上建立推断机械设备新旧程度的评定指标。大连海事大学的孟歆利用油液分析技术, 对某型柴油机实船磨合过程进行了研究, 并利用油液分析技术有效监测了实船磨合过程, 降低了磨合过程的故障率和提高了磨合质量。

在油液参数提取方面, 齿轮箱的主要参数包括光谱数据浓度[⊖]、梯度和比例值、润滑油中磨粒的总量、磨粒的平均尺寸、严重滑动磨粒、切削磨粒、疲劳剥块磨粒、层状磨粒、球状磨粒和氧化物磨粒的磨损情况等。

在油液故障诊断方法研究方面, 研究人员主要采用灰色理论、分形理论、物元分析、支持向量机、粗糙集等技术, 对油液磨损故障进行模式识别, 判断故障的类型和发生部位。

1.4 油液和振动信息融合技术

1.4.1 信息融合技术的研究现状

信息融合亦称数据融合, 是将来自多个传感器或多源的信息进行综合处理, 从而得出更为准确、可靠的结论。信息融合技术是20世纪70年代末形成并发展起来的一门新兴的自动化信息综合处理技术, 它能够充分利用多源数据的互补性和电子计算机的高速运算与智能处理来提高结果信息的质量。

1. 信息融合概念的提出

随着科学技术的发展, 传感器性能获得了很大的提高, 各种面向复杂应用背景的多传感器系统大量出现。在多传感器系统中, 由于信息表现形式的多样性、信息数量的巨大性、信息关系的复杂性, 以及要求信息处理的及时性, 都已大大超出了人脑的信息综合处理能力。为此, 从20世纪70年代起, 一个新兴的学科——信息融合(Information Fusion)便迅速发展起来。目前, 已经在目标识别、图像处理、故障诊断、环境监测等众多领域得到了广泛应用。

⊖ 本书提到的这种光谱数据浓度均指体积分数。

在军事领域,自从1973年美国提出“数据融合”概念后,就引起各军事强国的重视,在C³I系统和学术界都成为一个重要的研究领域。在1991年海湾战争中,美国和多国部队使用的MCS(陆军机动控制系统)、NTDS(海军战术数据系统)、J-STARS(联合监视/目标攻击雷达系统),俄罗斯的ABAKC, XOKAN等是机动平台上安装多类传感器数据融合系统并成功应用的实例。装备韩国和驻韩美军的ATC²S(战区自动化指挥控制系统), NATOCCIS(北约指挥控制信息系统),俄罗斯的EANKAA(贝加尔战术C³I)、YHNBEPCAA(战役战术C³I)等都是多中心C³I系统上配置数据融合系统。

自海湾战争后,数据融合概念进入我国,立刻引起我国有关单位和专家的高度重视,原国防科工委在“八五”6A预研项目中设立“C³I数据汇集技术研究”课题,各国防工业研究所和院校纷纷起步,取得了一大批研究成果,但多数仍然处于原型、模型阶段。

按照信息融合系统中数据抽象的层次,信息融合可以分为三级:数据层融合、特征层融合以及决策层融合。上述三个层次的融合方法各有特点,数据层融合是最低层的融合,是在对信息未经处理或经过很少处理的基础上进行的;特征层融合可以实现可观的信息压缩,有利于实时处理,并且由于所提取的特征值与决策分析有关,使得融合结果能够最大限度地给出决策分析所需的特征信息;决策层信息融合是最高层次的融合方式,能有效地融合反映各个侧面的不同类型信息。对于故障诊断领域的应用而言,主要采用的是特征级融合与决策级融合。

2. 信息融合的研究重点

当前信息融合的大部分研究主要集中在信息融合的算法改进方面。信息融合算法主要是指信息融合所需要的实现方法。对于多传感器来说,信息具有多样性和复杂性,包含有同质信息和异质信息,对于异质信息常常需要先进行数据分解,使之成为同质信息。因此对信息融合方法的基本要求是具有鲁棒性和并行处理能力。此外还要求考虑方法的运算速度和精度,以及与不同技术和方法的协调能力等。目前在信息融合领域中的算法是多种多样的,广泛使用的信息融合算法主要有概率论方法、D-S证据理论、模糊集方法和神经网络方法。

(1) 概率论方法

概率论方法较早应用于信息的融合。这种方法首先对各种传感器信息作相容性分析,删除可信度很低的错误信息,在假设已知相应的先验概率的前提下,对有用的信息进行贝叶斯估计,以求得最优的融合信息。贝叶斯方法的优点是简洁,易于处理相关事件;缺点是不能区分不知道与不确定信息,而且与要求处理的对象相关。特别是在实际应用中很难知道先验概率,当假设的先验概率与实际矛盾时,推理的结果会很差,在处理多重假设和多重条件时会显得相当复杂。

(2) D-S证据理论

D-S 证据理论的发展始于 20 世纪 70 年代, 它是对概率论的扩展, 依据信任函数运算, 解决了一般的确定问题。它根据人的推理模式, 采用了概率区间和不确定区间来确定多证据下假设的似然函数, 还能计算任一假设为真条件下的似然函数值, 因而具有较大的应用前景。D-S 证据理论能融合不同层次上的属性信息, 能区分不确定性信息与未知性信息, 还能较好地解决报告冲突, 容错能力强, 在信息融合技术中已经得到了较广泛的应用。

(3) 模糊集方法

模糊集方法是用某种模型系统地反映数据融合过程的不确定性, 并通过模糊推理来完成数据融合。其中模糊聚类是按照一定标准对用一组参数表示的样本群进行分类的过程。模糊聚类的过程, 也就是样本中的特征参数被融合、样本按标准被分类的过程。当选定一种相似性度量、差别检验以及停止规则后, 就可以得到一种特定的聚类分析算法。自从模糊集方法提出以后, 作为乘积空间上模糊集的模糊关系得到了广泛的应用。用模糊性偏序关系进行决策、模糊序关系选择规则的一些性质、基于选择函数的序关系的结构、用模糊协调性与非不协调性对多准则备选对象的评估信息进行融合分类等课题相继被研究。

(4) 神经网络方法

神经网络方法是在现代神经生物学和认知科学对人类信息处理研究成果的基础上提出的, 具有良好的容错性、层次性、可塑性、自适应性、联想记忆和并行处理能力。近年来, 神经网络已经被成功地应用于信息融合中的状态估计问题。Rowley H. A. 等利用神经网络实现了景象匹配, 即利用神经网络对实时图像进行自动选取, 判断实时图像质量的优劣, 除去劣质图像, 再进行匹配计算, 从而提高了图像匹配算法的鲁棒性和稳定性。将神经网络与其他方法相结合进行信息融合技术的研究效果显著, 已经形成了一种趋势。例如, D-S 证据理论与神经网络、粗集与神经网络以及遗传算法与神经网络等的结合。

除了上述常见的四种融合方法外, 应用于信息融合的方法还很多, 比如卡尔曼滤波、支持向量机、遗传算法、小波分析理论以及一些简单的推理方法等。由于信息融合应用领域相当广泛, 单独采用一种方法往往具有一定局限性, 将各种方法进行优势集成逐渐成为信息融合算法研究的重点。

1.4.2 油液和振动融合的研究现状

目前, 国内外关于油液和振动信息融合的研究刚刚起步, 并且现有研究也仅仅是局限于油液和振动信息的综合。2002 年首次有国外学者提出利用油液和振动两种信息进行齿轮箱的故障诊断。The University of Toledo 的 Dempsey 采用蜗轮蜗杆试验台架进行磨损试验, 利用油液和振动信息对蜗轮蜗杆传动装置进行故障诊断, 提取了油液分析中的磨粒累计量和振动信号中的 NA4 这两个特征参数,

结合实际监测数据证实了油液和振动参数在故障条件下都出现异常，并得出了油液和振动两种分析手段的结合可以提高故障诊断准确性的结论。从现有文献来看，该研究是最早系统提出油液和振动融合思想，并给出具体试验数据的文献。但必须认识到，该研究中仅仅是油液和振动两种诊断结论的结合，并没有涉及油液和振动深层次的融合诊断。

2003年、2005年和2006年，James Cook University的Z. Peng等连续在国际权威杂志Wear上发表3篇学术论文，较为全面地介绍了该所大学在油液和振动融合诊断中的最新成果。在试验中，Z. Peng等人在建立直齿轮齿轮箱试验台架的基础上，着重研究了油液的磨损特点和振动信号的规律，并研究了试验过程中添加污染物对齿轮箱及状态监测的影响。同样，上述研究在进行故障诊断时也是油液和振动两种诊断结论的结合，也没有深入研究油液和振动两者之间的相互融合关系。

在国内方面，目前大多数研究仍然以单一诊断方法的融合为主。武汉交通科技大学的严新平利用D-S证据理论对光谱分析、铁谱分析和红外光谱分析的分析结果进行融合，给出摩擦学典型故障下的基本概率分配函数，确定各种分析方法对摩擦学故障的支持程度，并以拉缸故障为例进行了故障诊断。华中科技大学的陈红武应用多种油液分析设备，联合监测了柴油机气缸套-活塞在不同间隙条件下的磨损特征，并运用信息融合技术处理各种分析数据，提出了该柴油机异常磨损监测的判断方法。北京特种车辆研究所的宋文杰高工针对履带车辆齿轮箱的磨损特点和油液监测各种检测信息源的特征分析，提出了履带车辆油液监测诊断中的信息融合基本方法和油液监测融合要点，提高了履带车辆的油液监测水平和效率。

虽然国内关于油液振动融合诊断的研究还处于起步阶段，但令人可喜的是，许多学者已经认识到油液振动融合对于提高故障诊断精度和可靠性的意义，并开始进行相关的基础研究。2004年，北京理工大学的万耀青提出了信息综合和信息融合的概念，并提出油液信息和振动信息的融合将是故障诊断领域的研究热点之一；2006年，华南理工大学的曹一波博士就利用油液分析和振动分析对齿轮箱断齿故障的故障特征进行试验研究。在试验中采集正常状态和断齿状态下的振动信号和油液样本，对振动信号进行时域和频域分析，得到振动分析数据和频谱；对油液进行铁谱分析，得到直读铁谱读数和磨粒图谱。然后对两种状态的分析结果进行对比分析，得到了齿轮箱断齿状态下的故障特征，为齿轮箱故障诊断提供了依据。

国内外研究表明，信息融合理论已经在军事、图像处理、传感器设计、故障诊断等很多领域得到了很好的应用，但在故障诊断领域，信息融合仅仅应用于单一诊断方法的融合，在油液和振动两者之间的融合研究相对较少，主要存在如下