

101110111101001
110010101100001
001000111010110
00111010000011
101111111001010
11111010101001
00011010100001
11111010100101

吕植勇 著

磨粒图像数字化检测方法



科学出版社

www.sciencep.com

磨粒图像数字化检测方法

吕植勇 著

“武汉理工大学研究生教育创新基金”资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分9章,主要包括:绪论、磨粒图像采集影响因素分析、磨粒图像辨识数字特征表达与获取、磨粒边界轮廓特征分析、磨粒表面图像纹理和颜色分析、磨粒三维表面形貌测量与重构、磨粒覆盖面积定量分析、磨粒类型辨识特征与识别、磨粒图像数字化检测方法存在的问题与发展趋势。

本书可供从事油液检测、图像处理、数据挖掘的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

磨粒图像数字化检测方法/吕植勇著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029231-5

I. 磨… II. 吕… III. 图像数字化系统-应用-磨粒磨损-检测
IV. TH117.1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 199868 号

责任编辑:裴 育 王志欣 / 责任校对:钟 洋
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2010年10月第 一 版 开本 B5(720×1000)

2010年10月第一次印刷 印张:12 3/4

印数:1—2 500

字数:242 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,摩擦学系统状态特性的描述与辨识日益引起学术界与工业界的重视与关注。在机械设备运行过程中,摩擦学系统的状态特性与机械设备的运行状况密切相关。摩擦学研究依赖于对磨损量、表面形貌、磨粒特征等参数的输出量分析,通过大量的、科学的、动态的测量、描述和分析,确定磨损机理。其中,磨粒一些特征的采集与分析是机械磨损的一个重要研究方面。

本书根据油池中的磨粒运动数字录像,对磨粒在油池中的运动、沉淀、翻滚、自锁等特性进行了定性的研究,分析了产生四种磨粒状态的条件;在此基础上,提出油池竖直放置方法,解决了磨粒图像采集时视景中的磨粒堆积问题。

本书重点着眼于磨粒图像数字化的工作。从图像采集的过程入手,编制了大量的程序,实现了磨粒图像的视频采集,磨粒图像的预处理、滤波、分割、标号,以及磨粒参数的采集等功能,并根据国内外文献对磨粒图像数字形态参数进行了梳理;在此基础上,对磨粒的轮廓、纹理和颜色进行更深一步的研究。在磨粒的轮廓特征分析中,编制通过搜索磨粒边缘轮廓得到轮廓点坐标的定位程序。为分析方便,对轮廓点序列进行傅里叶变换得到其频域信号,进而计算不同频率的功率谱,建立边缘轮廓和频谱之间的计算关系。根据连续函数的曲率表示方式,分析适合于计算机程序表示的轮廓曲率表示方法,建立曲率表示模型,确定磨粒分析指标,即曲率的峰度、偏度、均方差和差分均值等,采用模糊数学分析四种磨粒与这些参数的关系。在磨粒表面纹理分析中,应用检测磨粒表面纹理法线上亮度极小值、极大值的纹理分析方法分析滑动磨粒与疲劳磨粒差别,应用灰度共生矩阵对四种不同类型的磨粒图像进行纹理分析,并通过主成分分析方法对磨粒颜色特征进行识别,根据磨粒轮廓方向判断磁性磨粒和非磁性磨粒。

在磨粒三维形貌的研究中,本书通过分析显微镜的景深对成像的影响,提出显微镜的景深内图像信号与景深外图像信号的比较方法。该方法基于一阶和二阶微分算子及小波图像处理原理对视频图像进行预处理,对处理后的视频图像通过设定阈值划分景深范围,分割出每帧图像的景深内部分,然后

通过布尔代数运算将不同景深成像拼接成多层次的磨粒图像,进而建立磨粒的三维表面。该方法可以弥补电子扫描显微镜只能采集单色图像的缺陷。

在铁谱定量分析研究方面,本书结合 EQD210-10 柴油机 1000h 台架可靠性试验油样,在图像处理的基础上,通过研究铁谱图片的二值化方法,根据显微镜成像特点,提出了基于背景补偿的分割方法,得到磨粒的分布二值图。在此基础上,对磨粒的覆盖面积率进行定量分析,并与 PQP 磨粒测量指数进行对比分析。试验表明二者具有较好的相关性。

通常,仅根据磨粒的一种特征参数不能完全识别磨粒的磨损特征,因此必须从信息融合角度,对油液中磨粒的形态、轮廓、表面纹理、颜色、大小与磨损的关系进行多角度融合分析,通过不同类型的参数取长补短,建立磨粒数字特征与磨损的关系。在磨粒类型分类方面,一方面对磨粒的几个参数进行聚类分析,另一方面采用模糊数学中的模糊推理对磨粒轮廓的曲率参数进行分类,二者都取得了满意的效果。通过以上研究,本书开发了集磨粒采集、预处理、分割、磨粒参数计算、纹理分析、磨粒识别等功能于一体的分析软件,为进一步研究磨粒磨损提供帮助。

本书在撰写过程中,得到了萧汉梁教授、周劲南教授、周新聪教授、刘正林教授热情的帮助和指导,在此表示诚挚的谢意!感谢赵辉老师、杨世柏高级实验员在试验中所给予的鼓励和帮助!

在课题研究的过程中,作者得到课题组老师和同学的大力协助,正是在他们的相互配合和帮助下,课题中的一个个难题才得以解决,其中肯的建议和激烈的讨论使作者获益匪浅。感谢袁成清博士、赵新泽博士,盛晨兴、刘杰等博士生,以及何晓昀、李大光、杨勇、王峰、宗成强、吴刚、高慧良等研究生的帮助。特别是,何晓昀、李大光、王峰、杨勇等研究生进行了大量的编程和试验工作,使得有些研究方法得以实现。感谢书中所有参考文献的作者。

谨以此专著献给敬爱的导师严新平教授,本书的撰写过程得到严教授精心的指导和帮助。在此,致以崇高的敬意!

磨粒图像数字化检测方法属于摩擦学和信息学的边缘学科,所有的研究都处于探索过程中,由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请各位读者指正。

作者

2010年6月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 油液磨粒数字化检测方法的重要性	1
1.2 磨粒检测的复杂性	1
1.3 磨粒磨损模式识别	3
1.4 油液磨粒在线检测	5
1.5 磨粒三维形貌分析技术	6
1.6 磨粒图像检测数字化方法的研究思路	6
第 2 章 磨粒图像采集影响因素分析	10
2.1 油液磨粒图像采集方法	10
2.1.1 采集装置的总体设计	10
2.1.2 油池的结构设计	11
2.1.3 光散射对油池成像的影响	12
2.1.4 显微镜条件下的油池作用	12
2.2 油液的运动特性	13
2.2.1 流体黏度	13
2.2.2 腔体中油液流速分布	13
2.2.3 油液中磨粒沉淀	13
2.2.4 固液两相流体中磨粒受到的力	15
2.3 磨粒沉积机理	15
2.3.1 理想假设条件	16
2.3.2 油池中试样的流动模型	16
2.3.3 磨粒动力学	17
2.4 水平油池中的磨粒受力分析	18
2.4.1 竖直油池中的磨粒受力分析	20
2.4.2 磨粒动力性能观察试验	20

2.4.3	油池的放置方法对磨粒运动状态的影响	22
第3章	磨粒图像辨识数字特征表达与获取	24
3.1	磨粒图像计算机处理的发展	24
3.2	磨粒图像处理的一般步骤	25
3.2.1	图像预处理	26
3.2.2	人工构建背景光的校正	35
3.3	图像分割	39
3.3.1	阈值法分割	39
3.3.2	彩色图像的分割	40
3.3.3	磨粒标号	41
3.4	磨粒形貌基本数字特征	42
3.4.1	磨粒图像的数字化特征提取	42
3.4.2	磨粒参数优化	47
3.5	磨粒数字二维特征参数的图像处理与计算	49
第4章	磨粒边界轮廓特征分析	52
4.1	磨粒边缘信息的表达	52
4.1.1	磨粒边缘信息坐标采集	52
4.1.2	磨粒边缘搜索坐标顺序计算方法	54
4.1.3	磨粒图像边缘的分析处理	55
4.2	磨粒的轮廓谱	56
4.2.1	磨粒重心与磨粒轮廓的距离谱分析方法	57
4.2.2	连续函数的傅里叶变换	57
4.2.3	离散傅里叶变换	58
4.2.4	边缘轮廓的谱估计与分析	59
4.3	磨粒的边缘曲率分析方法	62
4.3.1	曲率半径	62
4.3.2	Spike 参数磨粒分析法	63
4.3.3	图像曲率的计算图像处理的改进模型	64
4.3.4	轮廓边缘凸凹性特征	65
4.3.5	边缘曲率对边缘凹进的感知	67
4.3.6	统计的峰度和偏度对轮廓评价的意义	68
第5章	磨粒表面图像纹理和颜色分析	71
5.1	表面纹理识别的基本方法	71

5.1.1 表面纹理描述	71
5.1.2 磨粒图像纹理产生的原因	71
5.2 基于纹理法线上亮度极小值、极大值的边缘检测	72
5.2.1 滑动磨粒与疲劳磨粒的纹理	72
5.2.2 极小值变尺度边界切线数学模型和方法	73
5.2.3 边界切线纹理边缘检测试验	76
5.2.4 基于极小值、极大值纹理处理方法的分析	76
5.3 滑动磨粒表面纹理分析	77
5.3.1 纹理骨架化方法	78
5.3.2 除去曲线的交点	78
5.3.3 磨粒的纹理方向	79
5.3.4 直线度或曲线度的表现方法研究	81
5.3.5 滑动磨粒与疲劳磨粒的表面纹理对比分析	82
5.4 基于共生矩阵磨粒表面纹理分析方法	84
5.4.1 灰度共生矩阵	84
5.4.2 共生矩阵试验与磨粒特性	86
5.4.3 磨粒图像表面灰度共生矩阵特征参数分析	90
5.5 基于主成分分析算法的磨粒分类	92
5.5.1 HSV 颜色模型颜色特征	92
5.5.2 试验数据采集	92
5.5.3 分析方法	95
5.5.4 基于主成分共生矩阵表面纹理分析	97
5.6 基于铁谱磨粒磁化方向的自动识别方法	98
5.6.1 磨粒方向确定	98
5.6.2 磨粒方向统计分析	99
5.6.3 磨粒方向与磨粒磁性和非磁性分析	99
5.7 磨粒纹理方向应用价值	100
第 6 章 磨粒三维表面形貌测量与重构	101
6.1 显微镜三维表面测量的理论方法	101
6.1.1 基于显微镜的三维表面数据采集	101
6.1.2 导致三维表面模糊的原因	102
6.1.3 三维表面多层图像采集	105
6.1.4 显微镜的分辨率	105

6.1.5	焦点深度	107
6.2	显微镜在不同焦平面的测量方法	108
6.2.1	显微镜不同焦平面的标定方法	108
6.2.2	球的直径测量	109
6.2.3	球的高度与直径的关系	110
6.3	光学显微镜三维图像重构原理分析	110
6.3.1	焦平面范围内的纹理滤波	111
6.3.2	不同算子处理的效果	112
6.3.3	小波焦平面处理方法的研究	112
6.4	焦平面二值图像形态学处理方法	115
6.4.1	膨胀	115
6.4.2	腐蚀	116
6.4.3	开启运算和闭合运算	116
6.4.4	其他二值图像形态学处理方法	117
6.4.5	形态学处理在焦平面分析中应用	118
6.5	不同焦平面的图像拼接方法	120
6.5.1	不同焦平面的图像采集	120
6.5.2	不同焦平面表面纹理的合成	120
6.5.3	物体表面的三维信息的采集	123
6.5.4	焦平面的漏洞和补救	125
6.5.5	其他焦平面的图像的合成方法及其改进	127
第7章	磨粒覆盖面积定量分析	130
7.1	磨粒覆盖面积测量方法	130
7.1.1	铁谱片光电光度计定量分析	130
7.1.2	谱片磨粒覆盖面积采集	131
7.2	磨粒覆盖面积的分析方法	134
7.3	磨粒覆盖面积趋势分析与 PQ 指数测量对比	136
7.3.1	磨损趋势图	136
7.3.2	铁谱趋势定量分析方法修订	137
7.3.3	磨粒的大小对覆盖面积的影响	140
7.3.4	磨粒大小对磨粒特征分析影响	141
7.3.5	PQ 指数测量的基本原理及试验数据采集	142
7.3.6	磨粒覆盖面积图像分析方法与 PQ 指数测量分析方法的对比	143

第 8 章 磨粒类型辨识特征与识别	145
8.1 磨粒类型识别方法	145
8.2 磨粒的分类与特征	146
8.2.1 磨粒的特征	146
8.2.2 磨粒形态边缘辨识特征与识别框架	149
8.2.3 磨粒表面纹理辨识特征与识别框架	150
8.2.4 磨粒颜色辨识特征与识别框架	150
8.2.5 磨粒大小辨识特征与识别框架	151
8.3 磨粒形态参数聚类分析	152
8.3.1 聚类分析基本规则	152
8.3.2 单参数聚类分析	153
8.3.3 磨粒形态多参数聚类分析	154
8.3.4 磨粒识别主成分聚类分析	157
8.4 基于磨粒轮廓曲率的磨粒类型模糊识别	158
8.4.1 评判集的构造	158
8.4.2 因素集的构造	158
8.4.3 参数模糊评价标准	158
8.4.4 隶属函数的确定	159
8.4.5 分析不同磨粒与其他磨粒的各种参数之间的距离	159
8.4.6 模糊推理规则	165
8.4.7 建立因素的模糊关系	166
8.4.8 模糊综合评判	168
8.5 磨粒识别的相互关系	170
8.5.1 磨粒识别次序	170
8.5.2 磨粒识别各参数的优先权分配	171
8.6 模糊神经网络样本参数的聚类分析	172
第 9 章 磨粒图像数字化检测方法存在的问题与发展趋势	176
9.1 磨粒图像检测数字化方法目前存在的问题	176
9.2 三维形貌数字图像测量的潜能	176
9.3 目前几种主要类型的显微镜在图像处理中存在的问题	177
9.4 磨粒三维图像研究发展趋势	178
参考文献	182

第 1 章 绪 论

1.1 油液磨粒数字化检测方法的重要性

磨损导致材料和能源的消耗,影响机器的使用寿命和可靠性。统计分析表明,造成机械设备的故障和失效的主要因素是机械零件的磨损^[1]。磨损、疲劳和腐蚀是机械零件失效的三种主要形式和原因^[2]。油液分析方法是一种有效的磨损工况监测方法,目前已在各个领域的机械设备故障诊断中得到应用。例如,在海湾战争期间,美国动用两千多架飞机、数万艘舰艇、上千辆坦克及装甲车等,并在战地安排了近 60 台分析直读光谱仪(MOA)油液分析仪,累计测定飞机油样 20566 个、地面装备油样 12474 个^[3]。采用手工操作测试油样的工作量非常大,计算机的发展为计算机图像识别提供了数字化识别方法的可能,通过现代模式识别方法,将油液中的磨粒进行分类和统计,为在线油液分析技术提供快捷的方法和可能。

目前应用的主要手段是采用人工方法对铁谱图片进行分析、对照,从而判断设备或系统的状态,但该方法存在明显的不足,它过分依赖于分析人员的知识和经验。因此,磨粒的自动识别研究就成了铁谱技术发展和应用的重要方向之一。磨粒识别是铁谱分析的重要内容,通过对磨粒表面和轮廓等形貌特征的观察,磨粒长、宽和厚度尺寸的测定,磨粒成分的鉴别(包括金属或非金属、黑色金属或有色金属),可以达到确定磨损类型、分析磨损原因、判别磨损程度和找出磨损零件种类的目的。油液磨粒智能检测方法,应该以数字图像处理、模式识别等理论及算法为基础,从铁谱磨粒的形状、大小、颜色和纹理等特征出发,对计算机铁谱图像处理和识别的方法、步骤和有关算法进行研究。不同的步骤对计算机的计算量影响非常大,并且直接影响对故障维修的响应能力。

1.2 磨粒检测的复杂性

摩擦学系统具有显著的时变性和系统依赖性^[4]。近年来,摩擦学系统状态特性的描述与辨识日益引起学术界与工业界的重视与关注。在机械设备运

行过程中,摩擦学系统的特性是机械设备正常运行的标志。因此,捕捉摩擦学系统的特征信息,正确予以解释是保证机械设备安全、可靠和高效运行的基础。摩擦学系统状态特性的辨识与描述方法多样,其中油液监测技术(oil monitoring)是针对机械设备的摩擦学系统,从油液中获取机械摩擦副运行的信息,诊断磨损故障,实现摩擦学系统的状态辨识。实践表明,利用油液监测技术辨识摩擦学系统的状态特性,在磨粒检测处理方法存在问题:①油液监测的隐性信息多,造成了对操作者经验和水平的过分依赖;②油液监测获得的信息种类多,表达形式各异,很难用单一的方法与模型加以描述;③油液监测信息处理的智能化水平低。这些问题影响了利用油液监测数据描述摩擦学系统状态特性的准确性,严重制约了油液监测技术的工业应用^[5]。磨损模式识别技术不仅可以应用于设备磨损故障的诊断,还可以用于磨损状态的趋势分析、故障预报,从而实现状态检测。另外,由于磨损现象十分复杂,虽然人们已经对磨损进行了大量的研究,但对于磨损机理的了解仍然不够,远远没有达到人们对摩擦机理所了解的程度。磨粒检测的复杂性主要表现在两个方面。

(1) 摩擦学系统本身是一个复杂系统,从而导致了磨粒检测手段和方法的复杂性。

摩擦学研究依赖于对磨损量、表面形貌、磨粒等系统输出量的分析,进而确定磨损机理,这是摩擦学测试及摩擦学研究的关键之一。然而,实际情况并不尽如人意,在近 40 年的文献中已发表了 300 多个各种形式的磨损公式^[6],其中即使是最完备的公式,在实际应用中也有很大的局限性。一方面,影响摩擦磨损的因素很多,至今人们提出的与磨损有关的变量有 600 余个^[7],而最基本的也有 100 多个,这表明摩擦学研究的困难程度是非常大的。在零件运动中起作用的界面磨损机理主要可分成四类:表面疲劳磨损、磨粒磨损、黏附磨损和摩擦化学磨损。另一方面,在 Archard 发表磨损经验法则^[8]的前后,Burwell 按磨损的主要物理机理进行了分类^[9,10]。根据这个分类法,至少有四种不同的主要物理机理应加以区别,即黏附磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损和表面疲劳磨损。著名物理学家 Planck 曾经用“上帝创造了固体,而魔鬼创造了表面”来描述固体表面极为复杂的现象,这也导致数字化描述固体表面变得非常困难。在数字化描述的方法中,最经济的方法还是通过光学显微镜获取磨粒图像。磨粒图像表达了不少摩擦学中的信息,有些摩擦学信息可以通过专家的分析得出,有些还不能为人们认识,因此借鉴图像形态学方法,探索油液磨粒的数字化参数方法是当前摩擦学研究很重要的研究方向,要着力研究各种特征之间的相互关系及各种特征在实际磨粒表达中的意义。有些参数不能全

面描述磨粒形态特征与状态特性,需要将众多参数进行信息融合共同描述摩擦学行为。信息融合的方法和理论为问题的求解提供了方法。但是,图像学也不能包揽一切,也要与其他方法一起表述磨粒特性,特别是光谱、磨粒的铁磁性分析可以加强对磨粒的摩擦学特性的认识。

(2) 磨粒检测的复杂性表现在磨粒参数的多样性,以及各个相关度和差别导致的识别模型的复杂性。

吴振锋^[11]以傅氏参数为主线,根据磨粒特征描述问题的需要共引入或提出了近 200 个特征参数,如果再加上一些纹理参数,这将是一个庞大的参数体系。从组合的角度来看,分析各个参数之间的关系将是天文数字,即使使用计算机来处理也是无能为力的,所以说磨粒数字检测方法模型也是比较复杂的。不同种类的磨粒参数可能也含有相同或者类似的特征信息,即存在着信息冗余度。磨粒特征参数信息冗余不但会降低磨粒特征信息描述与磨粒识别的效率,而且对于磨粒的某一种形态特征,应用不同的磨粒参数来描述可能有不同的结果,甚至有可能相互矛盾、相互抵触,这会大大降低磨粒识别的准确性。特征提取涉及面很广,同识别对象的各种物理的、形态的性能有很大关系,因此有各种各样的特殊方法,特征提取就显得相当复杂。所以在识别方法中一般采用黑箱或者灰箱识别体系,如神经网络、模糊数学、灰色理论等,而很难采用白箱体识别系,将摩擦学的磨损问题因果关系一一分清。

目前,通过各种磨粒特征之间的相互关系及各种特征在实际磨粒中的表达意义,尚无法全面描述磨粒形态特征与状态特性。解决这一问题不仅要从小磨粒参数入手,还要从小磨粒信息采集方法入手,积极利用计算机图像处理、光学显微镜技术、人工智能等研究成果,对油液中的磨粒从采集到分析,进行信息处理、加工。要达到这一目的:首先从仪器仪表着手,通过仪器仪表采集油液磨粒信息,并且将油液磨粒信息数字化;然后将获得的信息进行处理,采用一定的数学模型来描述这些信息;最后将这些摩擦学的信息进行融合^[12],为摩擦学系统的智能诊断的求解提供技术支持。

1.3 磨粒磨损模式识别

磨粒分析技术的应用开始于 20 世纪 40 年代,当时通过磁塞和回油管路上的滤网收集磨粒进行分析。70 年代初,第一台铁谱仪在美国问世后,出现了离线式分析铁谱仪和在线式铁谱分析仪^[13~16]。根据应用场合的需要,一些国家先后开发了多种形式的铁谱仪和与之配套的分析仪器。纵观近年的研究

报道,为了更好地实现利用油液监测技术描述摩擦学系统状态特性的目的,油液监测技术的智能化问题吸引了国内外研究者的积极开拓。80年代就出现了将数据库技术应用于铁谱诊断中,对铁谱分析中的大量定性和定量数据进行处理与管理。典型的有 Predict 公司在 1989 年推出了一套铁谱分析软件技术系统 FAST(ferrographic analysis software technology)系统^[17],并在 1993 年改进为 FASTPLUS 系统。该系统将磨粒图像存储于光盘数据库中,需要时可对其进行查看,并可与所观测到的磨粒图像进行比较,最终打印出铁谱分析报告单。1992 年,英国的 Roylance 等开发了计算机辅助磨粒分析 CASPA 的专家系统^[18,19],它综合领域专家的知识 and 经验将磨粒的形貌进行特征分类,每类特征包含几种形式,并为每种磨粒确定名称,以及按照形貌特征进行优先顺序排列。通过人工智能方法和专家系统,列出磨粒类型表以及相应的图形,给出磨损状态判断和推荐的处理建议。西澳大学的 Stachowiak^[20~23]、Kirk, 以及詹姆斯库克大学的 Peng 等^[24,25],开展了对磨粒的表面形貌和形态参数分析工作,取得了比较显著的成绩,其采用的工具也基本上是神经网络、模糊数学方法和分形^[26],主要在理论上进行研究。在实际应用和技术上比较成熟开始于 90 年代末。美国海军开发的 Laser Net Fines^[27]光学磨粒监测仪可用于离线分析,也可用于在线监测,激光二极管照射到油液后在电子照相机上生成图像,用于磨粒识别,全部图像用于确定油液所反映的特性。该仪器采用的激光二极管对有些纹理特征不能够完全反映,但可以在显微镜下进行采集^[24~26,28]。Laser Net Fines 通过分析润滑油和液压油中的良性和活性磨粒,可以提供关于机器失效类型、严重程度和发生速度的信息。Laser Net Fines 能够测定的尺寸界于 $5\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ 之间的所有磨粒的浓度,对 $20\mu\text{m}$ 以上的大磨粒采用神经网络技术,将采集到的磨粒划分为四种磨损类型:正常磨粒、疲劳磨损、严重滑动磨损、切削磨损,并能够鉴别氧化物、纤维和气泡。基于 Laser Net Fines 的间歇式处理器已由洛克希德-马丁公司战术防务系统部开发成功,并安装在 Rushmore 舰上。Spectro 公司将 Laser Net Fines 集成到 COAST 专家系统中,通过计算机处理对不同的检测方法(发射光谱、红外光谱、铁谱等仪器)进行信息融合分析。美国 CSI 公司 1984 年开发了 Oil View 仪器,同样可以测量磨粒大小的分布^[29],但是没有 Laser Net Fines 功能强大,不能对磨粒进行分类。

国内也有研究机构在对磨粒识别的专家系统进行研究,如南京航空航天大学^[30~35]、清华大学^[36~39]、中国矿业大学^[40]、西安交通大学^[41]和武汉理工大学^[42~49]等单位^[50~54]。其研究内容体现在:分形理论(fractal theory)、小波理

论和颜色等方面^[55,56];对磨粒的研究逐步由二维形态转向三维形态,结合激光共焦扫描显微镜测量磨粒的三维表面形貌;采用小波理论分离摩擦副表面和磨粒表面的表面粗糙度、波纹度和形状误差;应用计算机图像分析技术自动计算出摩擦副表面和磨粒表面的表面粗糙度参数^[57~64]。这些研究主要采用定性研究和定量研究。定性研究是以磨粒识别方法为主,一般采用人工神经网络^[65]、模糊数学^[66,67]分析方法,将模糊推理决策树理论应用于典型磨粒识别上,依据磨粒识别过程中所依赖特征的层次关系,基于非单调模糊推理方法建立磨粒识别的模糊推理决策树,并建立磨损形式标准库、确定隶属函数和权值系数等,通过模糊理论、人工神经网络及对人工神经网络权矩阵、关联度、贴近度、学习因子的改善等,提高磨粒的识别率。定量研究一般采用基于大磨粒覆盖面积与小磨粒覆盖面积的分析方法,该分析方法采用铁谱片中的磨粒遮光率或者根据磁场强度来分析磨粒的分布范围^[50~54],受到很多因素的影响,还很少直接采用计算机图像处理技术分析铁谱中磨粒覆盖面积。

国内外铁谱故障诊断工作集中在两个方面:一是开发各类油液监测的计算机辅助系统,旨在管理数据和改变数据的人工处理方式;二是通过仪器的开发,结合图像分析、模式识别,试图解决磨粒特征提取和识别过程的自动化问题,减少这一分析环节对操作者经验和水平的依赖。铁谱技术应用于故障诊断所采用的方法归纳为三种:定性铁谱诊断法、定量铁谱诊断法、定性与定量相结合的铁谱诊断法。

1.4 油液磨粒在线检测

固液两相流体的颗粒动力学分析主要集中在河流颗粒动力学方面,大部分文献也集中在水中颗粒的受力分析,油液的固液两相动态分析理论也集中在油液的颗粒悬浮与沉淀的平衡上^[68~70],只有少数关于油液磨粒受力分析方面的文章。其中,Nair在制作铁谱仪谱片过程中,分析了铁磨粒在磁场作用下的磨粒沉淀力学问题^[71],但是还不能充分分析油池条件下的磨粒受力状况。为了实现从油槽中采集磨粒图像,更清楚地观察磨粒,需要研究磨粒在油槽运动的固液流体特性及这些特性对磨粒运动的影响。固液两相流体中颗粒所受的力为:粒间作用力、与流体颗粒相对运动无关的力(包括惯性力、重力和压差力)、与流体颗粒间相对运动有关的纵向力和侧向力(包括附加质量力、Basset力、升力、Magnus力和Saffman力),以及与颗粒运动状态有关的相间

阻力、作用于磨粒上的浮力、假想质量力等^[72~74]。多种力的综合作用引起的油液中磨粒在流动时的跳跃。磨粒与流体之间存在相对运动,因此产生阻力。磨粒的运动随磨粒的物理特性、混合物的浓度、管路等条件的变化而变化,导致磨粒的运动和沉淀,给油液磨粒在线检测造成很大的困难。为了防止磨粒在油槽中堆积,必须研究磨粒在流体中上下跳跃的运动规律,通过合理设计,消除磨粒在油池中的沉淀。

1.5 磨粒三维形貌分析技术

表面形貌是接触表面的摩擦、磨损和润滑的结果,它直接反映接触表面的摩擦学特性,因而是磨损状态评估和磨损趋势预测的重要依据。因此,建立磨损表面的评估模型是摩擦学研究和应用的基本问题之一。充分运用磨粒三维图像信息建立磨损表面的评估模型,是当前磨损理论和故障诊断理论研究的基础。

20 世纪 80 年代以来,磨损状态监测与故障诊断技术将磨粒特征作为评估接触表面摩擦学行为的一种方法。从铁谱技术、光谱技术到电子显微镜分析,从磨粒的定性分析到磨粒二维图像的定量分析,国内外在这一领域所取得的巨大成功,使人们充分认识到了磨粒信息在磨损表面评估中的重要作用。目前,根据磨损颗粒的数量、质量和尺寸,基本上可以做到对磨损过程进行监测。同时,根据磨粒的二维图像计算机分析,也可以比较准确地完成对球状磨粒、切削磨粒和正常磨粒的识别和分类,从而能够定性地判断接触表面是否存在相应的磨损机理。但是,目前仅仅根据磨粒的二维形态特征,计算机尚无法准确识别疲劳剥块磨粒、滑动磨粒、层状磨粒及其他磨粒。

首先需要研究磨粒三维图像测量分析技术。当前,在磨粒分析研究领域,磨粒二维特征研究比较成熟,并已进入实用阶段。但是二维图像无法准确获取磨粒表面的三维形貌信息,应用二维图像分析磨粒的表面纹理误差很大,因此近来提出磨粒的三维图像分析问题^[22]。然而,国内外在磨粒三维图像分析方面还处于表面参数研究阶段,尚没有提出全面表征磨粒三维形貌特征的理论与方法。

1.6 磨粒图像检测数字化方法的研究思路

油液中的磨粒图像检测数字化方法的研究需要从研究数据采集装置着

手,通过采集装置,实现磨粒图像、磨粒浓度、磨粒三维表面等数据的采集,用模糊数学、统计回归方法、聚类分析、神经网络、主成分分析方法进行信息融合,为专家系统进行摩擦学故障种类的诊断提供依据。

首先对图片进行滤波、分割、二值化提取磨粒轮廓,分离单个磨粒,然后提取磨粒的颜色、纹理、大小、三维形貌、磨粒浓度等数字化参数。通过以上参数分析磨粒特征,从而提取表征摩擦学系统的状态特征参数,为描述磨损程度、形式提供依据,进而判别摩擦学故障的种类、预测磨损发展的趋势。

(1) 设计一个可水平、垂直放置的油槽,放置在显微镜下,利用注射器推动油液的流动,在各种力的作用下,带动油液中的磨粒通过油池,进入显微镜观察平台上。通过数字录像观察油池中的磨粒运动,定性分析磨粒运动中沉淀、翻滚、自锁等特性,并采用油池竖直放置方式,解决磨粒图像采集中磨粒堆积问题,为磨粒图像采集分割做好准备工作。

(2) 本书重点着眼于磨粒图像数字化的工作。数字化工作主要包括:图像的采集、预处理、滤波、分割、标号等过程,得到各种磨粒参数,并根据国内外文献磨粒图像形态参数进行了梳理,在此基础上,对磨粒的轮廓、纹理和颜色开展深入的研究。在磨粒的轮廓特征分析中,首先编制通过搜索磨粒的计算机边缘轮廓得到轮廓点坐标的定位程序;然后通过傅里叶变换,将轮廓谱从时域变换到频域谱,并进行了不同频率功率谱计算。研究工作主要包括:建立了曲率表示模型及其磨粒分析指标,即曲率的峰度、偏度、均方差和差分均值等,通过该模型分析了四种磨粒与这些参数的关系。通过磨粒表面纹理法线上亮度极小值、极大值的纹理检测,对磨粒图像的灰度共生矩阵进行纹理分析、磨粒颜色主成分分析算法分析,以及根据磨粒轮廓方向判断,比较几种不同的磨损磨粒差别,应用颜色、磨粒表面纹理共生矩阵的特征主成分分析法分析了铁磁磨粒和非铁磁磨粒等几种不同磨粒的识别方法。

(3) 在磨粒三维形貌的研究中,通过分析显微镜景深对成像的影响,建立显微镜的景深内图像信号与景深外图像信号的比较方法。该方法主要基于一阶和二阶算子对图像信号的处理,以及小波图像处理原理,通过阈值划分景深范围,并通过布尔代数运算将不同的显微镜景深成像拼接成多层次的磨粒图像,重构磨粒的三维表面。另外,通过显微镜采集彩色的表面纹理,能够在高倍显微镜下分析大磨粒的表面,可以弥补电子扫描显微镜只能采集单色图像的不足。

(4) 在铁谱定量分析研究方面,结合 EQD210-10 柴油机 1000h 台架可靠性试验,利用图像处理技术,对铁谱图片的进行二值化方法处理,得到磨粒的