装备油液智能监控原理

Theory of Equipment Oil Intelligent Monitoring

仟国全 张培林 张英堂 编著

北京国防工业出版社
http://www.ndip.cn

装备油液智能监控原理

Theory of the Equipment Oil Intelligent Monitoring

任国全　张培林　张英堂　编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

装备油液智能监控原理 / 任国全等编著. —北京:国防工业出版社, 2006.1

ISBN 7-118-03909-8

Ⅰ.装... Ⅱ.任... Ⅲ.①军事－装备－燃料－计算机监控②军事－装备－润滑油－计算机监控

Ⅳ.TJ

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 053707 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 251 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:33.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，原国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金
第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海
副主任委员	王 峰　张涵信　张又栋
秘书长	张又栋
副秘书长	彭华良　蔡 镭
委员 (按姓名笔画排序)	于景元　王小谟　甘茂治　刘世参 杨星豪　李德毅　吴有生　何新贵 佟玉民　宋家树　张立同　张鸿元 陈冀胜　周一宇　赵凤起　侯正明 常显奇　崔尔杰　韩祖南　傅惠民 舒长胜

序

科学技术日新月异，突飞猛进。随着现代科学技术的发展，不少机械装备日趋大型化、高速化、自动化。在装备的功能完善的同时，其结构也更加复杂，乃至牵一发而动全身，因而，装备发生故障和失效的潜在可能性越来越大。据统计，在相当多的领域中，断裂、腐蚀和磨损是机械装备失效的三种主要形式，60%～80%的机械装备损坏是由各种形式的磨损所引起的。因此，机械装备的磨损故障诊断在整个机械装备故障诊断领域占有十分重要的地位。油液监控技术是装备磨损状态监测和故障诊断中一种十分有效的方法，主要包括光谱分析技术、铁谱分析技术、红外光谱分析技术、颗粒计数技术和润滑油理化性能测试技术等几个分支。它们通过分析装备磨损颗粒的信息和润滑油的性能变化，获得装备的磨损状态，以便于及时诊断与监控，这对于保障装备安全可靠运行有着重要意义。

美国早在20世纪中期就成立了三军联合油液分析机构，该机构的主要任务是研究开发油液分析设备，提出军用装备油液分析标准和实施规范。后来，北约集团也颁布了油液光谱分析计划。我国从20世纪70年代末开始开展油液监控的工作。目前，油液监控技术作为装备性能状态监测的有效手段，已广泛应用于航空、铁路、矿山、石化、电力、舰船和国防等部门，并取得了良好的经济、军事和社会效益。

本书系统论述了装备油液智能监控的基本原理。首先介绍了油液监控技术的国内外现状和发展趋势，并在摩擦学基础理论之上，对油液智能监控的原理进行了阐述。然后，对光谱分析、铁谱分析、红外光谱分析的原理、数据处理方法和建模以及图像处理、

图像识别进行了详细的研究。最后，紧紧围绕装备油液智能监控中的综合诊断系统的研制，进行了深入浅出的论述，为大型装备的油液综合诊断提供了颇有价值的思路。纵观全书，可知本书内容系统，思想新颖，特点鲜明，既具有一定的理论基础，又具有很强的实践性，对于从事机械设备故障诊断领域的专家和工程技术人员具有很好的参考价值。

“芳林新叶催陈叶，长水前波让后波”。我欣喜看到本书作者这一代茁壮成长。作者在本书编著过程中，广泛吸取了国内外有关文献著作中的精华与本研究领域的最新理论、技术和方法，又融入了作者的科研与教学的创见，努力做到集思广益，博采众家。本书体现了作者多年来在装备油液监控领域教学和科研成果的结晶。诚然，金无足赤，本书难免存在错误与不足之处，作者也期望得到广大读者的批评指正，从而为本书的进一步完善做好准备工作。

最后，相信《装备油液智能监控原理》一书的出版，能为我国油液监控技术水平的提高和装备的科学管理与维修起到积极的推动作用。

谨为之序。

中国科学院院士
华中科技大学教授

二〇〇五年六月十四日

前　言

随着现代工业的发展，机械装备日趋大型化、高速化、自动化和智能化，在装备功能完善的同时，其结构也更加复杂，因而，装备发生故障和失效的潜在可能性越来越大，这些故障或失效造成的损失更为严重。对这些装备如果不能做到良好的功能监测和故障诊断，产品就不能发挥应有的效益。因此，对现代化的装备进行有效的功能监测和故障诊断日益受到人们的重视。

根据统计，断裂、腐蚀和磨损是机械装备失效的三种主要形式。其中，以磨损最为常见。有关资料表明：60%～80%的机械装备损坏是由各种形式的磨损引起的。因此，机械装备的磨损故障诊断在整个机械装备故障诊断领域占有极其重要的位置。油液分析检测技术是装备磨损状态监测和故障诊断中一种十分有效的技术方法，它主要是通过分析被监测设备润滑油的性能变化和其携带磨损颗粒的信息，来获得机械设备摩擦学系统的润滑和磨损状态，对于保障装备可靠运行及人身安全有着重要意义。因此，世界各国对此都十分重视，多年来一直投入大量的人力和财力进行研究。迄今为止，油液分析技术作为一种有效的状态监测手段已广泛地应用于航空、铁路、矿山、石化、舰船和国防等部门。

美军在20世纪就成立了三军联合油液分析机构JOAP(Joint Oil Analysis Program)，JOAP的主要任务是研究开发油液分析设备，提出军用装备油液分析标准和实施规范。联合油液分析计划的执行，为美军军种之间实现了联合保障，促进了信息交流，美国国防部认为油液分析的经济效益比可高达1:11。2001年11月，北约集团颁布了油液光谱分析计划SOAP(Spectrographic Oil Analysis Program)，开始在其各军种内实施油液分析。我国从20世纪70年

代末才开始开展油液分析工作。油液分析技术作为一种有效的状态监测手段已广泛地应用于各个部门，并成立了各具特色的油液分析实验室，针对不同的装备开展了一系列的研究，取得了良好的经济、军事和社会效益。

目前，油液分析技术已经包括光谱分析技术、铁谱分析技术、红外分析技术、颗粒计数技术和润滑油理化性能测试技术等几个分支。这些分析技术有着自身的特点和应用范围：光谱分析技术分析速度快，定量分析精度高；铁谱分析技术重在设备磨损产生机理的分析；红外分析技术可以较全面地分析润滑油的各种性能指标，对设备的视情换油具有很强的指导作用；颗粒计数分析对液压系统的污染监测较为实用；而润滑油理化性能测试主要分析其常规的理化指标等，这些分析技术之间既相互区别又相互联系。尤其对于大型复杂机械装备，仅仅凭借某种单一的分析技术和方法很难取得满意的检测效果，因此，研究联合多种分析技术及多传感器信息融合的油液分析诊断方法是机械装备油液监测的发展趋势。

本书主要阐述了油液监控的基本原理以及油液监控技术在大型复杂武器装备状态监测中的应用。近年来，作者围绕着大型复杂武器装备的油液监测问题开展了许多研究工作，同时为研究生讲授相关的课程。本书是作者教学和科研成果的结晶。因此，它既适合于从事机械故障诊断领域的专家、工程技术人员阅读和参考，也可作为高等院校有关专业的研究生教材。

全书共分 7 章。第 1 章绪论，讲述了油液分析技术的国内外发展过程、工程应用情况及其发展趋势。第 2 章摩擦学与装备油液监控基础，重点阐述了摩擦学基础、摩擦理论、磨损理论、润滑理论以及装备摩擦磨损的油液监控原理。第 3 章油液光谱分析，阐述了油液光谱分析的原理和数学处理方法，具体包括基于比例模型的数据处理、磨损元素的模糊聚类分析、模糊综合评判、灰色模型预测和基于时间序列分析的摩擦学系统建模以及上述方法在履带车辆油液光谱分析中的应用。第 4 章油液铁谱分析，分析了磨

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

损颗粒的沉积原理，同时对铁谱仪的种类及其特点、铁谱磨粒分布规律及其定量分析方法等进行了阐述。第5章铁谱磨粒图像的识别，重点讲述了铁谱磨粒图像识别及其发展过程，典型磨损磨粒及其特征，磨粒图像的预处理，磨粒图像的特征提取，基于神经网络的铁谱磨粒图像的识别等。第6章润滑油及其性能分析，着重阐述了润滑油的性能参数，润滑油的添加剂，履带车辆在用润滑油及其衰变规律分析和基于红外光谱分析的润滑油性能检测与评价。第7章装备油液智能诊断综合系统，本章是前面章节内容的具体应用，阐述了智能诊断专家系统的理论与方法、深浅知识集成的诊断策略、基于多传感器信息融合的故障诊断和基于远程油液分析诊断专家系统，并结合油液综合诊断专家系统的研制过程，对每一部分进行了深入的分析和阐述。

本书在撰写过程中，广泛汲取了国内外有关著作及文献中的精华，尽量反映出国内外在油液分析方面的新理论、新技术、新成果，做到集思广益和博取众长。在此，作者向本书中参考文献的著者表示诚挚的谢意。

军械工程学院的徐章遂教授、李国璋副教材、吕建刚教授、白鸿柏教授对作者的工作给予了关心、支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

同时，作者要特别感谢中国科学院院士、华中科技大学杨叔子教授为本书作序，并提出了许多宝贵的意见，在此向他表示深深的谢意。

本书能够得以出版，作者要特别感谢国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社对本书提出的宝贵意见和支持。

诚然，由于作者水平有限，加之时间紧促，书中定会存在许多缺点和错误，衷心期望得到读者的批评指正。

作　者

2004年12月

目　录

第 1 章　绪论 …… 1
1.1　设备维修及其概念体系 …… 2
1.2　油液分析监控技术 …… 3
1.2.1　油液分析的基本功能 …… 4
1.2.2　油液监控技术应用现状 …… 4
1.2.3　油液分析方法及其特点 …… 7
1.3　装备油液监控技术的发展趋势 …… 10
本章参考文献 …… 14
第 2 章　摩擦学与装备油液监控基础 …… 17
2.1　固体表面特性与接触 …… 17
2.1.1　固体表面形貌 …… 17
2.1.2　表面粗糙度评定参数 …… 19
2.1.3　表面粗糙度的统计特性 …… 23
2.1.4　金属表面的组成 …… 25
2.1.5　固体表面接触 …… 26
2.2　摩擦理论 …… 32
2.2.1　摩擦的概念与分类 …… 33
2.2.2　古典摩擦定律及其局限性 …… 35
2.2.3　粘着摩擦理论 …… 37
2.2.4　分子—机械理论 …… 40
2.2.5　影响摩擦系数的因素 …… 41
2.3　磨损理论 …… 42
2.3.1　磨损的概念 …… 42
2.3.2　一般机械设备的磨损过程 …… 43

2.3.3 磨损的分类及其特点 …… 45
2.3.4 磨合与磨损寿命分析 …… 51
2.4 流体润滑理论 …… 54
2.4.1 润滑及其分类 …… 55
2.4.2 牛顿粘性公式 …… 56
2.4.3 油膜压力的形成过程 …… 57
2.4.4 雷诺方程 …… 58
2.4.5 摩擦、磨损与润滑之间的关系 …… 63
2.5 装备摩擦学系统油液监控原理 …… 65
2.5.1 一般机械装备磨损元素的来源 …… 65
2.5.2 摩擦学系统油液监控原理 …… 66
2.5.3 发动机磨损的油液监测 …… 67
本章参考文献 …… 69
第3章 油液光谱分析 …… 71
3.1 光谱分析的原理 …… 72
3.2 光谱分析的数学方法 …… 75
3.2.1 磨损元素界限值的制定方法 …… 76
3.2.2 基于比例模型的数据处理 …… 81
3.2.3 磨损元素的模糊聚类分析 …… 87
3.2.4 浓度与梯度的模糊综合评判 …… 90
3.2.5 基于灰色模型的磨损元素浓度值预测 …… 95
3.3 磨损过程的时间序列分析 …… 103
3.3.1 时间序列分析方法 …… 103
3.3.2 磨损过程的时间序列分析 …… 104
3.3.3 磨损过程时间序列建模 …… 105
3.3.4 基于时间序列模型特征根的故障诊断 …… 112
本章参考文献 …… 115
第4章 油液铁谱分析 …… 117
4.1 磨损颗粒沉积原理 …… 118
4.1.1 物质的磁性特征 …… 118

4.1.2 铁谱仪磁场特征 …… 120
4.1.3 磨粒的沉积规律分析 …… 122
4.2 铁谱仪的种类 …… 127
4.2.1 分析式铁谱仪 …… 128
4.2.2 直读式铁谱仪 …… 129
4.2.3 旋转式铁谱仪 …… 131
4.2.4 在线式铁谱仪 …… 133
4.3 铁谱磨粒的定量分析 …… 134
4.3.1 磨损颗粒尺寸分布 …… 135
4.3.2 磨损定量分析方法 …… 138
本章参考文献 …… 142
第 5 章 铁谱磨粒图像识别 …… 144
5.1 铁谱磨粒图像识别的发展 …… 145
5.2 磨粒类型及其特征 …… 147
5.3 磨粒图像的预处理 …… 153
5.3.1 图像色系的转换 …… 153
5.3.2 磨粒图像的增强处理 …… 155
5.3.3 磨粒图像的分割 …… 158
5.3.4 磨粒图像的形态学滤波 …… 161
5.3.5 图像边缘检测与表示 …… 163
5.4 磨粒特征参数的提取 …… 166
5.4.1 磨粒的形状特征参数 …… 166
5.4.2 磨粒的纹理特征参数 …… 171
5.4.3 磨粒的颜色特征参数 …… 172
5.4.4 磨粒的分形维数描述 …… 174
5.5 磨损颗粒的模糊神经网络识别 …… 180
5.5.1 人工神经网络简介 …… 181
5.5.2 磨粒识别的模糊神经网络模型 …… 183
5.5.3 磨损颗粒的模糊神经网络识别 …… 188
本章参考文献 …… 191

第 6 章　润滑油及油品性能分析 …… 195
6.1　润滑油的性能参数 …… 196
6.2　润滑油的添加剂 …… 199
6.3　车辆用润滑油及其性能 …… 202
6.3.1　内燃机油 …… 202
6.3.2　齿轮油 …… 205
6.3.3　液压油 …… 206
6.4　履带车辆发动机润滑油的衰变分析 …… 208
6.4.1　一般润滑油的衰变分析 …… 208
6.4.2　履带车辆发动机润滑油衰变原因分析 …… 210
6.4.3　履带车辆发动机润滑油的衰变原理 …… 212
6.5　润滑油性能检测的红外光谱法 …… 216
6.5.1　红外光谱分析的概念 …… 217
6.5.2　红外定性分析 …… 222
6.5.3　红外定量分析 …… 225
6.5.4　傅里叶红外光谱仪基本原理 …… 229
6.5.5　在用油红外光谱分析参数 …… 233
6.5.6　基于红外光谱分析的在用油质量评价方法 …… 238
本章参考文献 …… 245
第 7 章　装备油液智能诊断综合系统 …… 248
7.1　装备故障智能诊断 …… 248
7.1.1　装备故障诊断概述 …… 248
7.1.2　装备智能诊断系统的研究与发展 …… 249
7.2　智能诊断专家系统的理论和方法 …… 251
7.2.1　专家系统知识库 …… 253
7.2.2　专家系统推理机 …… 256
7.3　深浅知识集成的诊断策略 …… 260
7.3.1　单一知识诊断的不足 …… 260
7.3.2　基于深浅知识的诊断推理 …… 261
7.4　基于多传感器信息融合的故障诊断 …… 263

7.4.1 基于多传感器信息融合的故障诊断研究现状 …… 264
7.4.2 多传感器信息融合技术的特点 …… 265
7.4.3 多传感器信息融合的基本原理 …… 266
7.4.4 油液分析多传感器信息融合模型 …… 267
7.5 油液分析综合诊断专家系统 …… 268
7.5.1 专家系统的总体设计 …… 269
7.5.2 专家系统知识库的建立 …… 270
7.5.3 光谱分析诊断系统 …… 272
7.5.4 铁谱磨粒智能识别系统 …… 275
7.5.5 红外光谱分析系统 …… 278
7.5.6 基于神经网络的摩擦学知识的获取 …… 280
7.6 基于遗传算法的专家系统自学习 …… 281
7.6.1 机器学习的模型与方法 …… 281
7.6.2 遗传算法的基本原理 …… 283
7.6.3 油液分析专家系统自学习的实现 …… 286
7.6.4 油液分析专家系统自学习应用实例 …… 289
7.7 基于油液分析的远程设备智能诊断系统 …… 291
7.7.1 远程诊断的必要性 …… 291
7.7.2 远程诊断的实现方法 …… 292
7.7.3 远程诊断专家系统中心 …… 293
7.7.4 远程诊断应注意的问题 …… 294
本章参考文献 …… 295

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com