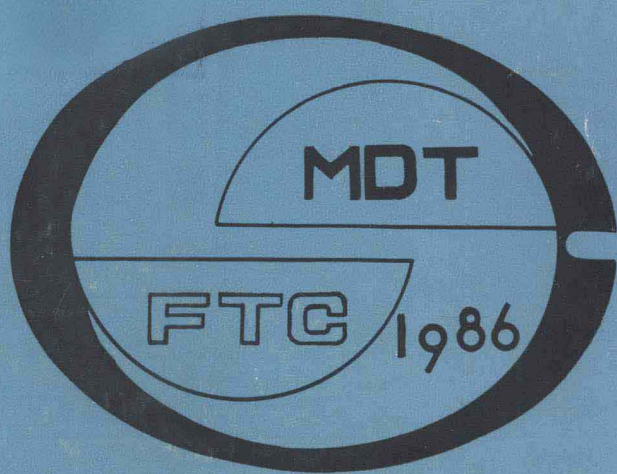


PROCEEDING OF
FTC'86 CONFERENCE

第一届铁谱技术学术交流会

论文集



中国机械设备故障诊断学会
铁谱技术专业委员会（筹）

1986年10月

目 录

1. 铁谱技术的现状与展望	胡大樾 (6)
2. 铁谱技术的定量分析	金锡志 (11)
3. 铁谱监测技术的评价与摩擦学诊断技术	丁光健 (17)
4. 应用铁谱技术研究滑动轴承的摩擦损伤	凌家杭 (24)
5. 用铁谱技术观察T405添加剂在 FZG 齿轮机中的作用过程	杨家雷 汝承贵 (30)
6. 液压系统典型故障的监测与诊断	丁光健 胡大樾 (39)
7. 中小型农用柴油机活塞环-缸套摩擦副快摩条件下磨损机理的铁谱分析	桂长林 叶 敏 尹延国 黄雪英 (53)
8. 蜗轮减速箱磨损工况铁谱监测方法的研究	胡大樾 丁光健 (60)
9. 应用铁谱技术监测船舶柴油机工况	肖汉探 季雅珍 (72)
10. 铁谱技术应用于YBD-25叶片泵液压油台架试验的磨损分析	丁光健 胡大樾 (77)
11. 机车牵引齿轮磨损研究	曾昭翔 宋登轩 (84)
12. 铁谱观察高档柴油机油中清净分散剂的变化	杨家雷 阎邱祈鸣 翟绪茂 (91)
13. 铁谱技术在采煤机液压传动系统故障诊断方面的应用研究	荆元昌 朱光模 (98)
14. 铁谱和光谱技术应用于柴油机状态监测的几个实例	丁光健 胡大樾 (102)
15. 用铁谱技术修订大功率柴油机的磨合规范	董继官 金元生 孙连志 (107)
16. 应用铁谱分析技术于齿轮箱的改进设计	黄钟骅 (114)
17. 利用铁谱分析方法研究缩短E Q6100发动机调试磨合时间	李逸民 彭光华 (121)
18. 应用铁谱技术监测机床节能油的润滑性能	曾昭翔 宋登轩等 (126)
19. 柴油机磨损的铁谱监测	谭丕勇 陈震霖 (131)
20. 滚动轴承疲劳失效的铁谱分析	郑培斌 曲廷敏 丁 玮 (138)
21. 压力表磨损机理的铁谱分析	陆培德 (142)
22. 铁谱-光谱连用研究柴油机油的衰败过程	马汉卿 (146)
23. 柴油机油抗磨性能的研究	舒玉荣 葛乃瑜 (152)
24. 一种新型的磨屑收集和分离装置——气动式铁谱仪及其应用	金占明 周平安 康文秀 (160)
25. 回转式微粒沉淀器的原理及应用	严新平 (167)
26. TPF-1 分析式铁谱仪和TPD-1 直读式铁谱仪主要性能的测试与评价	丁光健 胡大樾 (173)
附 录	
27. 铁谱技术名词术语	胡大樾 丁光健 (181)

前 言

本论文集是“第一届全国铁谱技术学术交流会”会议文献，由中国机械设备故障诊断学会铁谱技术专业委员会（筹）选编，收入国内铁谱技术研究、应用及其测试仪器等方面的论文共27篇，约28万字。较全面地反映了近年来国内铁谱技术研究与应用方面所取得的成果。

铁谱技术是七十年代出现的一种机器工况监测和磨损分析的新技术。八十年代以来，这一技术在我国引起了广泛的兴趣。近几年，国内对铁谱技术的研究和应用有了很大的进步，从事这一技术工作的人员迫切希望互相交流并共同促进其发展。

本文集内容包括下列四个方面：①铁谱技术及其发展；②铁谱技术应用研究；③铁谱技术的工业应用；④铁谱技术仪器。

本文集的论文经“铁谱技术专业委员会（筹）”论文编审组分送有关专家审阅，再经论文集审稿会认真讨论审定，汇编成册。但由于时间短促，条件局限，难免“挂一漏万”、“沧海遗珠”，不足之处，恳请铁谱技术工作者与广大读者提出批评指正。

论文集由广州机床研究所《润滑与密封》编辑部编辑出版，广州三联科技材料公司发行，谨致谢意！

中国机械设备故障诊断学会
铁谱技术专业委员会（筹）

一九八六年十月于广州

目 录

1. 铁谱技术的现状与展望.....	胡大樾 (6)
2. 铁谱技术的定量分析.....	金锡志 (11)
3. 铁谱监测技术的评价与摩擦学诊断技术.....	丁光健 (17)
4. 应用铁谱技术研究滑动轴承的摩擦损伤.....	凌家杭 (24)
5. 用铁谱技术观察T405添加剂在 FZG 齿轮机中的作用过程.....	杨家雷 汝承贵 (30)
6. 液压系统典型故障的监测与诊断.....	丁光健 胡大樾 (39)
7. 中小型农用柴油机活塞环-缸套摩擦副快摩条件下磨损机理的铁谱分析	桂长林 叶 敏 尹延国 黄雪英 (53)
8. 蜗轮减速箱磨损工况铁谱监测方法的研究.....	胡大樾 丁光健 (60)
9. 应用铁谱技术监测船舶柴油机工况.....	肖汉探 季雅珍 (72)
10. 铁谱技术应用于YBD-25叶片泵液压油台架试验的磨损分析.....	丁光健 胡大樾 (77)
11. 机车牵引齿轮磨损研究.....	曾昭翔 宋登轩 (84)
12. 铁谱观察高档柴油机油中清净分散剂的变化.....	杨家雷 阎邱祈鸣 翟绪茂 (91)
13. 铁谱技术在采煤机液压传动系统故障诊断方面的应用研究.....	荆元昌 朱光模 (98)
14. 铁谱和光谱技术应用于柴油机状态监测的几个实例.....	丁光健 胡大樾 (102)
15. 用铁谱技术修订大功率柴油机的磨合规范.....	董继官 金元生 孙连志 (107)
16. 应用铁谱分析技术于齿轮箱的改进设计.....	黄钟骅 (114)
17. 利用铁谱分析方法研究缩短E Q6100发动机调试磨合时间.....	李逸民 彭光华 (121)
18. 应用铁谱技术监测机床节能油的润滑性能.....	曾昭翔 宋登轩等 (126)
19. 柴油机磨损的铁谱监测.....	谭丕勇 陈震霖 (131)
20. 滚动轴承疲劳失效的铁谱分析.....	郑培斌 曲廷敏 丁 玮 (138)
21. 压力表磨损机理的铁谱分析.....	陆培德 (142)
22. 铁谱-光谱连用研究柴油机油的衰败过程	马汉卿 (146)
23. 柴油机油抗磨性能的研究.....	舒玉荣 葛乃瑜 (152)
24. 一种新型的磨屑收集和分离装置——气动式铁谱仪及其应用.....	金占明 周平安 康文秀 (160)
25. 回转式微粒沉淀器的原理及应用.....	严新平 (167)
26. TPF-1 分析式铁谱仪和TPD-1 直读式铁谱仪主要性能的测试与评价.....	丁光健 胡大樾 (173)
附 录	
27. 铁谱技术名词术语.....	胡大樾 丁光健 (181)

Contents

1. Current Status and Prospects of Ferrography Technology	<i>Hu Dayue</i> (6)
2. Quantitative Analyses of Ferrography	<i>Jin Xizhi</i> (11)
3. The Evaluation of Ferrography Monitoring Technique and Tribology Diagnosis Technology.....	<i>Ding Guangjian</i> (17)
4. The Application of Ferrography to the Study of Frictional Failure in Journal Bearings.....	<i>Lin Jiahang</i> (24)
5. Observing The Process of The Action of T405 Additives in FZG Gear Tester by Ferrography Technology	<i>Yang Jialei Ru Chenggui</i> (30)
6. Monitoing and Diagnosis of Typical Faults of Hydraulic System.....	<i>Ding Guangjian Hu Dayue</i> (39)
7. Ferrographical Analysis of Wear Mechanism of Piston Ring-Cylinder Liner in Medium and Small Agricultural Diesel Engine under Fest Friction Condition	<i>Gui Changling Ye Min Yin Yanguo Huang Xueying</i> (53)
8. Investigation on the Ferrographic Monitoring Method of Wear Condition in Worm Gear Reducer Casing	<i>Hu Dayue Ding Guangjian</i> (60)
9. The Application of Ferrography to Condition Monitoring of Marine Diesel Engines.....	<i>Xiao Hanliang Ji Yazhen</i> (72)
10. Ferrography Applied to Wear Analysis of Hydraulic Oil	<i>Ding Guangjian Hu Dayue</i> (77)
11. Wear Study of Locomotive Tractive Gear	<i>Zheng Zhaoxiang Shueng Dengxuan</i> (84)
12. Ferrography Observation of Changes of Clean Dispersant in High Grade Diesel Oils.....	<i>Yang Jialei Luqiu Qiming Zhai Xumao</i> (91)
13. The Application of Ferrography to the Study of Fault Diagnosis for Hydraulic Transmission System in Coal-cutting Machine.....	<i>Jing Yuanchang Zhu Guangmo</i> (98)
14. Several Field Examples Applying Ferrography and Spectyometric Oil Analysis (SOA) to Diesel Engine Condition Monitoring.....	<i>Ding Guangjian Hu Dayue</i> (102)
15. Revising Running-In Standard of High Power Diesel Engine by Ferrography Technology	<i>Dong Jiguon Jin Yuansheng Sun Liazhi</i> (107)
16. Applying Ferrography Technology to Improved Design of A Gearbox.....	<i>Huang Zhonghua</i> (114)
17. Investigation of Shortening Run-In Time for Engine Test by Using Ferrography Analysis	<i>Li Yimin Peng Guanghua</i> (121)

18. The Application of Ferrography to Monitoring the
Lubrication Characteristics of Machine Tool
Energy-saving Lubricant *Zheng Zhaoxiang Shueng Dengxuan*
Sha Suhua Li Xinrueng Feng Chengze (126)
19. Wear Monitoring of Diesel Engine Using Ferrography
.....*Tan Piyong Chen Zhenlin* (131)
20. A Ferrographical Analysis to Fatigue Failure of
Rolling Bearings *Zheng Peibin Qu Tingmin Ding Wei* (138)
21. Wear Analysis to Pressure Meter by Ferrography *Lu Peide* (142)
22. Investigation of Failure Process of Diesel Oil by Ferrography
and Spectrum Technique.....*Ma Hanqing* (146)
23. Investigation of Diesel Oil Performance
.....*Shu Yurong Ge Naiyu* (152)
24. A New Device for Collection and Separation of Wear
Debris—Pneumatic Ferrography and Its Application
.....*Jin Zhanming Zhou Pingan Kang Wenxiu* (160)
25. The Principle and Application of Rotary Particle Depositor
..... *Yan Xinping* (167)
26. Measurement and Evaluation of Main Performances
of Domestic Ferrograph.....*Ding Guangjian Hu Dayue* (173)
27. Ferrography-Technical Terminology.....*Hu Dayue Ding Guangjian* (181)

铁谱技术的现状与展望

机械工业部广州机床研究所 胡大樾

摘要 本文分析了铁谱技术的发展与现状,认为铁谱技术作为机器工况监测和磨损研究的一种有效手段,在仪器、基础技术和应用等方面的研究工作已为该技术的发展和工业应用奠定了基础,建议国内加强应用研究工作,以促进我国铁谱技术的应用和发展。

Current Status and Prospects of Ferrography Technology

Hu Dayue

(Guangzhou Machine Tool Research Institute)

This paper analyzes the development and current status of ferrography technology, and holds that ferrography technology is an effective means of monitoring machinery operating condition and studying wear, and investigations on instruments, basic techniques, and uses have laid a foundation of the development and industrial application of this technology. It is suggested that strengthening applied investigation promotes applications and developments of ferrography technology in our country.

铁谱技术作为机器故障诊断和工况监测的一种有效手段,目前已被不少工业部门所接受。同时,它作为研究磨损问题的一种方法,也已被越来越多的学者所承认。我国在铁谱技术方面的实践,仅仅是几年前才开始,但是发展很快。

1979年,国内仅少数单位开始进行仪器研制工作的探讨。1981年,我国引进了两台美国Foxboro公司生产的铁谱仪。1982年,我国代表团参加了在英国斯旺西举行的国际铁谱技术会议。1988和1985年,国内分别生产了分析式和直读式铁谱仪,这期间,国内铁谱仪数量由两台迅速增加至近100台。表1是1979和1988年世界各国铁谱仪数量的统计资料。由表可见,1979年世界各国铁谱仪69台,美国约占一半(34台),1988年,总数增至166台(比1979年增加1.4倍),有铁谱仪的国家(或地区)由12个增至25个,美国的仪器数仍占近半数(约48%),而欧美、日本等技术发达国家则几乎集中了仪器总量90%以上。由于我国1988年开

表1 世界各国铁谱仪数量

国别	1979年 〔台〕	1983年 〔台〕	国别	1979年 〔台〕	1983年 〔台〕	国别	1979年 〔台〕	1983年 〔台〕	国别	1979年 〔台〕	1983年 〔台〕	国别	1979年 〔台〕	1983年 〔台〕
美国	34	72	意大利	3	5	丹麦	1	2	挪威		3	朝鲜		1
英国	14	20	印度	3	5	芬兰	1	1	西班牙		1	香港		1
西德	3	6	日本	2	11	比利时		2	瑞士		1	西非		1
法国	3	9	瑞典	1	2	匈牙利		1	巴西		1	中东地区		3
加拿大	3	9	澳大利亚	1	2	荷兰		4	中国		2	委内瑞拉		1

总计 1979年为69台;1983年为166台

始生产铁谱仪, 1985年我国的铁谱仪数量已超过1983年美国的数量, 这反映了近几年铁谱技术在我国引起了相当广泛的注意。近一、二年, 随着国内仪器数量的增多, 铁谱技术应用研究工作逐步深入, 某些工业部门在研究和应用方面取得了不少进展和成效, 但也有不少单位在应用上碰到了一些技术上的困难或者其他方面的问题。据了解, 有相当一部份仪器目前处于“闲置”或使用率不高的状态。当前, 国内铁谱仪总值估计约800~500万元以上, 但由于使用率不高, 其中潜藏着很大的技术经济力量没有发挥出来。另一方面, 随着近年来国内机械设备管理水平的提高和设备维修制度的改革, 对故障诊断、工况监测与状态维修技术越来越重视, 上述这些原因都促使从事铁谱技术工作的人员迫切希望互助交流、组织并推动这一技术在国内进一步发展。因此, 检查这一技术的发展现状, 对它作出恰当地评价, 展望国内对铁谱技术开展研究、应用工作的前景并作出适当的规划便很有必要。笔者由此提出一点不成熟的看法, 以供讨论。

(一) 现状与展望

分析铁谱技术当前的现状与发展, 可以看到:

1. 铁谱仪器不断改进及更新

1971年, 英国D.Scott和美国W.W.Seifert及V.C.Westcott提出铁谱技术理论的初步概念后, 1972年, V.C.Westcott取得了专利权^[1,2], 并由Foxboro公司制成了第一台铁谱仪。到1985年, 根据铁谱技术原理制成的仪器已有分析式、直读式(I型、II型)以及“在线铁谱仪”、“旋转式铁谱”(旋转式颗粒沉降器), 此外, 还有配合旋转式铁谱仪使用的微粒定量分析器(PQ)以及图象分析系统、配合分析铁谱使用的铁谱显微镜, 等等。国内除了生产分析式、直读式(I型、II型)之外, 还研究了用于干磨料磨损分析用的“气动式铁谱”、采用电磁铁的“电磁式铁谱仪”等等。铁谱仪器的不断改进及更新, 为铁谱技术的发展与应用提供了必不可少的条件。但是, 目前已有的这些仪器, 显然还不够完善, 国内外必然还要研制新的、更完善的仪器。

目前的铁谱分析仪器还存在下列缺点:

- (1) 手动操作多, 繁琐、速度慢、花费时间长;
- (2) 分析判断和识别要求有比较丰富的经验, 不能适应工矿企业现场分析判断的要求;
- (3) 随机性大, 定量误差大。

因此, 铁谱技术要进入大量工业应用就必须解决现场使用问题, 开发操作方便、迅速、准确并高度自动化的现场检测装置。

2. 基础性研究工作已为铁谱技术的发展及应用打下了基础。

1976年, 美国E.R.Bowen和V.C.Westcott编制了“磨损颗粒图谱”第一册, 对钢铁材料的磨损颗粒作了分类, 成为磨损颗粒识别的指南^[3]; 1984年, 美国海军航空工程中心汇集英美铁谱技术工作中积累的资料, 编制了更完整的“磨损颗粒图谱”^[4], 它在第一册“图谱”的基础上, 增加了有色金属和其他非金属以及污染物等颗粒的图谱, 并且列举了柴油机、燃气轮机、齿轮、液压系统、滑动轴承等工况监控与磨损分析的实例, 对于磨损颗粒材质的识别, “谱片加热法”和“化学浸蚀法”为几种常用钢、铁和有色金属的识别提供了一种较为简便的方

法。这些都为铁谱技术的发展与应用奠定了基础。但是,对于各种机器在实际工况下磨损颗粒的种类、特征以及识别,目前仍然是实际工业应用中的主要困难,工作人员必须凭借丰富的经验才能从千万个混杂在一起的大大小的颗粒中识别出具有典型代表性并能判断机器工况的颗粒。同时,铁谱技术对磨损产物的研究结果也在磨损理论领域中提出了一些新的概念和问题,这些都要求对铁谱技术的基础研究工作必需继续进行下去。

3. 铁谱技术的发展始终与工业与应用紧密结合

国外铁谱技术的发展从一开始就与工业应用紧密结合。1971年申请的“铁谱仪”发明专利就是“流体介质中微粒监控的装置和方法^[1]”和“微粒监控方法和装置^[2]”。十几年来,铁谱技术工业应用的主要发展方向仍为机器工况监测与故障诊断。

随着铁谱技术逐渐趋于成熟,国外铁谱仪用户中用于工况监控的比例增加。例如1979年各国铁谱仪用途统计(表2),用于研究开发目的占68%,直接用于工况监控占17%,还有12%用于服务(如油分析服务等,其中部分也可归属工况监控服务)。表3为其部门分布:工业部门(不包括油品工业)占45%,军工部门占26%,油品工业占15%。1983年,美国铁谱仪工业部门所占比例增至约70%,军工部门约占16%(表4)。表5为1985年我国铁谱仪所在部门的分布:其中厂矿约占55%,学校占23%,研究院所占20%。上述数字中,厂矿、工业部门所属铁谱仪基本上用于机器设备的工况监测,研究部门和高等学校则有相当部份用于研究工况监测与故障分析应用。此外,从1983年在英国召开的国际铁谱技术会议上所发表的论文中有50%以上是有关机器工况监测和故障分析方面的文章以及本次会议的论文中有关

表2 1979年各国铁谱仪用途统计

研究开发	44台	68%
工况监控	11台	17%
用户服务	8台	12%
教 育	1台	2%

表3 1979年各国铁谱仪部门分布

工业部门	30台	45%
军工部门	17台	26%
学 校	9台	11%
油品工业	10台	15%

表4 1983年美国铁谱仪部门分布

工业部门	49台	7%
军工部门	11台	16%
研究部门	8台	11%
大 学	2台	3%

表5 1985年我国铁谱仪分布

学 校	19台	23%
研究部门	17台	20%
厂 矿	45台	55%

这方面的文章约占45%也可看出,铁谱技术工业应用的发展方向主要是工况监测。

铁谱技术应用于工况监测的结果,促进了设备维修制的变革和状态维修制的建立,由此而取得了明显的技术经济效益。丹麦海军从1977年开始应用铁谱技术对舰队发动机进行监测,到1988年,对17条舰艇的燃气轮机、柴油机、齿轮箱由于监测并采用状态维修的结果已节约了几十万磅的维修费^[5]。

4. 在工况监测和状态维修中的应用尚需继续研究

铁谱技术在齿轮、柴油机、液压系统的工况监测和故障诊断中的应用已被证明是有效的,并取得了较为成熟的经验。但是,它在其他各类不同机械系统中的应用仍需继续研究。由于各种机械在不同工况下所产生的磨损颗粒的类型、形态、尺寸分布虽然有共同的规律性,但也有其特殊的规律性,某些规律目前还未能被掌握,加上取样、分析过程中的各种随机因素,造成铁谱技术对不同机械设备磨损工况进行监测和诊断的有效性和方法都必须加以研究才能在生产实践中使用。诚然,由于铁谱技术本身的局限性,不见得所有机械系统都能使用,也不见得对每一类能使用的机械系统都能建立一套标准方法与“图谱”,但是,如果没

有一套比较成熟并容易掌握的方法和判断标准,则每个希望应用这一技术的企业工作人员都必须花费很大精力才能建立自己的评判标准,这一技术的广泛使用就会发生困难。这恐怕也是目前国内外铁谱技术未能在广大工矿企业中普遍应用,不少仪器被“闲置”的主要原因。因此,对于铁谱技术的应用,国内必需有组织地进行广泛深入的研究,才能适应工矿企业实际应用的需要。

5. 铁谱定量技术尚需有新的突破

铁谱技术目前只能称为定性和半定量的分析方法,无论是直读铁谱或分析铁谱,由于仪器和方法本身的缺点,其数据分散性很大,同一样品,直读铁谱数据的标准误差系数在6~15%之间,分析铁谱复盖面积百分数误差则更大(一般在10~20%,当复盖面积大于10%时标准误差系数为5%~88%)⁽⁶⁾,若再考虑取样、稀释等环节,误差可能更大。旋转式铁谱在消除由于稀释和重叠所带来的误差方面将能提高铁谱分析的精确度,微粒定量分析器(PQ)在铁谱定量技术方面有了很大改进,图象分析系统的采用(尤其是价格低廉的图象分析系统的出现)可能使铁谱定量技术出现新的突破⁽⁷⁾,从而大大提高定量精度,为磨损工况铁谱监控的自动化开辟道路。国外当前已在开展这方面的研究工作,但国内目前尚未开始。

6. 我国铁谱技术与国外的差距

由于国际上铁谱技术的历史比较短,国内在1979年即开始起步,经过近几年的努力,国产分析式与直读式铁谱仪的性能已基本上与国外仪器相近,仪器数量的增多使国内逐步形成了一支由研究部门、高等院校和工矿企业组成的研究和应用技术力量。1985年国内已有几项以铁谱技术为主要研究内容的研究项目完成并通过了鉴定。在1984年召开的国际工况监测会议上,我国代表发表了两篇有关应用铁谱技术进行工况监测与磨损失效分析的论文^(8,9),本次会议所发表的论文也表明,国内不少单位不单在柴油机、齿轮、液压系统工况监测方面,而且在油品研究、磨损分析等方面,铁谱技术应用研究工作已取得了相当成效。我们若能充分利用现有的仪器和力量,有组织地开展研究和应用,完全可以赶上和超过先进国家的水平。

(二) 结论与建议

铁谱技术产生以来十几年的发展已经证明,这是一种机械设备工况监测与磨损研究的有效技术。铁谱仪器和基础技术的研究工作已为该技术的应用与发展奠定了基础,但无论在仪器、基础技术和应用方面都还必须继续研究开发才能达到广泛工业应用的地步。我国近年来在铁谱技术的研究和应用方面均已取得了很大的进展,为了进一步促进国内铁谱技术的发展,建议:

(1) 提高并稳定国产分析式和直读式铁谱仪的质量,并改善配套零件的供应,不再进口分析式和直读式铁谱仪,必要时可进口少量旋转式铁谱仪和微粒定量分析仪及图象分析系统,以研究提高铁谱定量精度问题。

(2) 组织力量研制结构先进、自动化程度高的现场监控用铁谱分析系统,避免抄袭外国产品,下图是笔者综合某些建议和联想提出的一种可能的监控装置方框图设想。

(3) 广泛开展铁谱技术应用研究工作。当前工作的重点是研究解决广大工矿企业应用铁谱技术进行工况监测建立状态维修的程序问题,为此,研究部门应与工矿企业合作,分

别对各种不同类型机械磨损工况的铁谱监测方法和状态维修程序进行研究,有关主管部门应将上述研究工作列入国家研究计划。

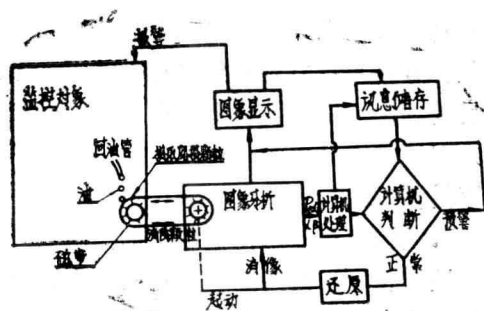
(4) 在工业集中地区可分别设立铁谱技术监测中心,为本地区工矿企业服务并开展监测技术研究,同时举办各种类型机器工况监测技术培训班,加强工况监测和状态维修技术训练和知识普及。

(5) 加强国内外技术交流与协作,增强高等院校、研究部门与厂矿的联系,为工矿企业解决技术疑难问题和技术咨询架设桥梁并组织为厂矿技术服务。

(6) 统一铁谱技术名词术语,研究制定某些铁谱监测与状态维修规范或标准程序。

参 考 文 献

- [1] B.P. 1415311 Method and Apparatus For Monitoring Hyperfine Particles in a Fluid Medium
- [2] B.P. 1415312, Method and Apparatus For Monitoring Particles
- [3] E.R.Bowen and V.C.Westcott, "Wear Particle Atlas"
- [4] SOHIO predictive Maintenance Services, "Wear Particle Atlas (Revised)"
- [5] S.Schoenthal, "Use of Ferrography in the Danish NAVY." International Conference Advances in Ferrography, Sep. 1982
- [6] 胡大樾、丁光健,《铁谱技术》,广州机床研究所,1986.5, P.80
- [7] 金锡志,“铁谱技术的定量分析”(本次会议论文)
- [8] D.Y.Hu, G.J.Ding, and D.T.Zu: "Condition Monitoring of Worm Gearing-An Exploratory Investigation of Ferrographic Trend Analysis", Condition Monitoring 84, pp563—578
- [9] G.J.Ding and D.Y.Hu, The Applications of Ferrography Technology To the Failure Analysis of Oil Drill Bearing and the Evaluation of Reliability of Wear Tests. Condition Monitoring 84, pp550~563



现场铁谱监控装置框图

铁谱技术的定量分析

杭州轴承试验中心 金锡志

摘要 本文介绍了目前国内外正在应用的各种铁谱定量分析方法。其中重点阐述了磨损颗粒的图像分析原理,对磨损颗粒的大小分布规律详细介绍了韦布函数拟合和中心矩两种方法。并在参考文献中列出介绍和应用这些定量分析方法的文章

Quantitative Analyses of Ferrography

Jin Xizhi

(Hangzhou Bearing Test & Research Center)

Varieties of method of quantitative analysis of ferrography are outlined with the emphasis on the principle of image analysis of wear particles, and their size distributions which are fitted, with a Weibull distribution function and described by moment methods. A bibliography of the methods mentioned and their application is also presented at the end of the paper.

铁谱技术的发明^[1]给研究机器零件的磨损提供了一种重要手段,即通过对磨损颗粒的分析来判断机器的运行状态,还可以诊断和预报机器的故障,因此铁谱技术在机器工况监测方面得到越来越广泛的应用。借助于铁谱显微镜和扫描电子显微镜可以对磨损颗粒的形态、大小和成分作较为详细的分析,以获取大量磨损过程中的信息。这种定性和半定量的分析方法有较好的直观效果和较高的可靠性,但是其缺点是手续繁琐、花费时间长而且要求操作者具有比较丰富的经验。而在实际工业应用中人们更习惯于用一个或几个参数值来表征磨损特征并以此反映机器零件的磨损工况。这就是铁谱技术中定量分析的意义^[2]。下面一一介绍各种常用的定量分析方法,并着重阐述磨粒大小分布的规律性和分析方法。有关这方面的数据处理方法、计算机程序及输出形式可进一步参考文献^[3]。

(一) 光密度法^[1]

利用铁谱显微镜测定铁谱片上分别代表大小颗粒的两个视场的光密度数 A_L 和 A_S ,由此再进一步计算出下列参数值。

(1) 磨损颗粒浓度 (Wear Porticle Concentration)

$$WPC = \frac{A_L + A_S}{\text{油样用量[ml]}}$$

(2) 大颗粒百分比 (Percent Large Particles)

$$PLP = \frac{A_L - A_S}{A_L + A_S} \times 100\%$$

(3) 磨损严重度指数 (Wear Severity Index)

$$I_S = (A_L + A_S)(A_L - A_S) = A_L^2 - A_S^2$$

该指数也可以定义为:

$$I_S = A_L(A_L - A_S)$$

在使用参数WPC时,对采用不同稀释比的油样必须换算成相同的稀释比的油样量计算才可进行比较。

由于在进行光密度测定时必须先制成谱片,而且选择测定视场时又易受操作者的主观因素影响,这种方法随机性较大而可靠性较差。目前已逐渐为直读法所代替。

(二)直 读 法^[4]

让油样直接通过处于强磁场梯度的沉淀管,并在该管上相距一定间隔的两点上测定由颗粒沉淀引起的光密度读数 D_L 和 D_S ,分别代表大小颗粒的读数。用 D_L 和 D_S 分别代替 A_L 和 A_S 就可以按照上节中介绍的公式进行计算,得出直读法的磨损颗粒浓度、大颗粒百分比和磨损严重度指数等参数。

直读法的最大优点是分析简便迅速,适合于现场应用,因此在机器工况监测中得到比较广泛的应用。但是作为其基本原理的光密度读数实际上是颗粒数量(除了磨损颗粒之外,还包括了一定数量的其它杂质)及其大小的综合反映值,用它表征颗粒的大小特征是很粗略的,用它来探索大小分布规律与磨损特征之间的关系更是不可能的。所以不能满足研究磨损机理的要求。因此七十年代末期开始,有人利用数理统计方法对磨损颗粒的形状系数和大小分布规律进行仔细的研究,也取得了一定的成果。

(三)铁谱片图像的数值处理法^[5]

1. 图像分析系统(Image Analysis System)^[6]

图像分析系统是近20年来迅速发展起来的一种定量研究图形的仪器,目前已被广泛地应用于金相、生物、微粒物理、地理学和医学等学科上,它利用扫描摄像机将显微镜里的图像输入图像分析仪里,按照给定的灰度反差对几何图形进行定量分析。其测量的基本参数有面积、周长、弦长、方位、投影长度和计数等等,再利用软件对这些基本参数按照一定的数学模型进行处理,由此可以派生出一系列所需要的参数。这就为探索与磨损机理有关的磨损颗粒的几何形态的内在规律,进一步发现能反映磨损特征的参数提供充分的依据。图像分析系统自身带有微处理机,采集和处理数据可以一次进行,极为方便。需要时也可以把数据用磁盘输入更大容量的电子计算机里进行处理。当然使用这种复杂和昂贵的仪器则是这种方法的局限性。目前市场上已出现价格较为低廉的图像分析系统,这将为铁谱技术开辟一新的研究领域。

2. 磨损颗粒的分布规律 I——韦布分布函数^[7]

(1) 用韦布分布函数拟合数据 作为微粒的大小分布,累积性的韦布分布函数可以表达成为:

$$P(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d - d_0}{\alpha}\right)^{\beta}\right]$$

式中 d ——与所测定的颗粒数量相联系的在某一方位上的颗粒宽度(可以是 μm 也可以是以某一特定的长度为单位的单位数);

d_0 ——最小微粒宽度(单位与 d 相一致);

$P(d)$ ——宽度大小介于 d_0 与 d 之间的微粒占被测定到的微粒总数之比,即

$$P(d) = \frac{\text{大小介于 } d_0 \text{ 与 } d \text{ 之间的颗粒数}}{\text{被测定到的颗粒总数}};$$

α ——特征大（具有长度量纲）；

β ——直线斜率（无量纲系数）。

经过两次取对数后可以将上式化为：

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1 - P(d)} \right] = \beta \ln(d - d_0) - \beta \ln \alpha$$

$$\text{进一步令： } x = \ln(d - d_0); \quad y = \ln \ln \left[\frac{1}{1 - P(d)} \right]$$

代入原式可得线性方程如：

$$y = \beta x + \beta \ln \alpha$$

(2) 由原始测量数据求 α 和 β 的估计值 设已由图像分析仪测到大小介于 d_i 和 d_0 之间的颗粒数 n_i ($i = 1, \dots, N$) 的一系列数值，则不难用线性回归法求出 α 和 β 的估计值。即

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

$$-\beta \ln \alpha = \bar{y} - \beta \bar{x}$$

$$\text{式中 } x_i = \ln(d_i - d_0); \quad y_i = \ln \ln \left[\frac{1}{1 - P(d_i)} \right]$$

$$\text{而 } P(d_i) = \frac{n_i}{N_N + 1}$$

$$\text{并 } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

α 和 β 可以确定“用韦布分布函数拟合数据”一节里所列出的韦布分布函数，并且进一步求出其概率密度函数：

$$P(d) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{d - d_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{d - d_0}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$$

(3) 拟合性检验 线性回归法本身提供了一种评定拟合性的简便方法，可以把它作为一种标准化了的相关性的衡量。相关系数可以定义为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right)^{1/2}}$$

r 是一个绝对值小于1的无量纲数值，其绝对值越接近1，其相关性即拟合性越好。如给定一个 r_0 值作为评判拟合性的标准，当 $|r| \geq r_0$ 数据有效，反之数据无效，需要利用图像分析

仪重新选择视场再进行测量，必要时可以重制谱片。根据笔者的经验出现这样的情况是不多的，一般说来拟合性都是相当好的，相关系数都在0.9以上。不过在某些情况下可以对数据作截尾处理，详细可参考文献〔3〕。

克尔莫格洛夫-斯莫诺夫单试样试验方法(Kolmogrov-Smirnov. One-Sample Test)也可以用来检验分析结果。相关系数是用以衡量两个变量之间的线性化程度，而克尔莫格洛夫-斯莫诺夫单试样试验法可以判别一组试样的分布与某一特定的理论分布相符合的程度。它可以用来确定抽样能否被合理地认为是来自某一含有理论分布规律的试样母本。其方法如下：

$$D = M_{\max} |P(d_i) - S_N(d_i)|$$

此处 $P(d_i)$ 和 $S_N(d_i)$ 分别定义为：

$$P(d_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_i - d_0}{\alpha}\right)\beta\right]$$

$$S_N(d_i) = \frac{\text{大小介于 } d_0 \text{ 和 } d_i \text{ 之间的颗粒数}}{\text{颗粒总数}}$$

D ——最大偏差值，即 $P(d_i)$ 和 $S_N(d_i)$ 之间的最大差值。

文献〔8〕中的表E给出了具有不同试样数目在不同的显著性水平上的最大偏差值的临界值 D_α 。

当 $D < D_\alpha$ ， D 与 D_α 相比较就是不显著的，换言之，下面这样一种所谓“零假设”是可以被接受的：在所测量到的累积性数据分布同其相应的理论分布的累积性数值之间的差别只不过是一种在符合理论累积性分布规律的母本的随机抽样中可以预期到的机遇性差别。

当 $D > D_\alpha$ ，则被判别为显著的，也即上述零假设被拒绝接受。

(4) 参数 α 和 β 的物理意义及其应用 由韦布分布函数可以看出：当 $d - d_0 = \alpha$ 时或者当 d_0 取得足够小，则 $d \approx \alpha$ 时，

$$P(d) = 1 - \exp(-1) = 1 - \frac{1}{e} \approx 63\%$$

由此可见， α 是一个具有长度量纲的参数，而且其意义是：小于 α 值的颗粒占全部颗粒数的概率为63%。而 β 值则代表了颗粒从小到大的变化率，即 β 值越大，则大颗粒的相对含量越少。于是，任何一组颗粒的大小分布最后都可以用 α 和 β 两个参数来描述。它一方面可以定性地研究数据分布在韦布坐标系统中所占的位置，另一方面也可以定量地研究在磨损过程中 α 和 β 的变化情况。B.J.Roylance等人通过研究发现在不同的磨损工况和机理下产生的磨损颗粒大小分布在韦布坐标系统里占据了不同的区域〔9〕。

3. 磨损颗粒的分布规律 II —— 中心取矩法〔10〕

通过取矩可以得到一系列参数，如中值（即数学期望值）、方差、歪斜度、陡度及相对歪斜度和相对陡度，从而不再需要预先用某一函数来拟合数据。

根据中心取矩法的定义，中值在离散性数据的条件下可以表达成：

$$\bar{d} = \sum_{j=1}^N d_j P(d_j)$$

$$\text{式中 } d_j = \frac{d_i + d_{i+1} - 1}{2}$$

$$P(d_j) = \frac{\text{大小介于 } d_i \text{ 和 } d_{i+1} \text{ 之间的颗粒数}}{\text{测定到的颗粒总数}}$$

d_i 和 N 的意义同前。

显然，与前面韦布分布函数相比较，概率 $P(d_j)$ 是非累积性的。然后分别对中值取 2、3 和 4 次矩。它们分别为数据 $d_j (j = 1, \dots, N)$ 的方差、歪斜度和陡度。如：

$$\text{方差} = \sum_{j=1}^N (d_j - \bar{d})^2 P(d_j)$$

$$\text{歪斜度} = \sum_{j=1}^N (d_j - \bar{d})^3 P(d_j)$$

$$\text{陡度} = \sum_{j=1}^N (d_j - \bar{d})^4 P(d_j)$$

为了衡量微粒分布相对于离散程度的歪斜度和陡度，还可以采用相对歪斜度和相对陡度。笔者在对齿轮磨合阶段的磨损特征的研究中发现中心取矩法，尤其是高次矩可以把磨粒大小在磨损过程中的变化相当敏感地反映出来。而且同磨损表面的高度分布对中心线平均值 CLA 的取矩有着较为令人满意的一致性^[11]。

四、颗粒定量分析仪^[12] (Particle Quantifier)

一种由英国斯旺西大学新近研制成功的磨损颗粒定量分析仪，它特别适合于对由离心式铁谱仪所制备的谱片进行定量分析。

它利用磁强仪把磁性颗粒在其磁头上的磁矩经过转化变成表达颗粒含量的数值。同时仪器经过自动标定零点之后由操作者在代表谱片上的颗粒从少到多的三个范围（其因子依次为 1、3 和 10）中选择一个。最后把得到的读数乘以相应于所选范围的因子，就是仪器所测的结果，即颗粒定量指数（PQ 指数）。

同样用于谱片分析，与光密度法相比较，颗粒定量分析速度快而且避免在谱片上选择视场的困难。如果采用油罐法还可以直接把油样倒入一种专用的塑料罐里，再把它放在颗粒定量分析仪的磁头上，按照同样的方法测量就可以得到结果。这样大大简化了分析手续。

除了上面介绍的几种定量分析方法之外，还有其他方法如在线铁谱仪、光谱和颗粒计数器等。第一种是按照一定的时间间隔自动报出数值，一般不需要对数据作进一步的处理，只须画出它对机器运行时间的变化图就可以了。后两种因为不属于铁谱技术的原理，所以不在本文的讨论范围之内。

（五）结 论

铁谱技术经过 10 多年的发展和推广应用，已作为一种很好的监测手段，被不少工业部门所接受，同时也作为一种很有效的研究摩擦磨损的手段为越来越多的学者所承认。目前要进一步开发这一技术和开拓它在实际中的应用，必须在定量分析方面取得新的突破。从已经取得的成果来看，颗粒的大小分布是一个很有潜力和希望的研究方向。它提供了为研究磨损颗