

磨粒直接成像技术在设备润滑状态监测领域的应用

摘要：润滑油中的磨粒是判断设备是否正常运转以及失效的重要依据。斯派超建立了一种基于神经网络和直接成像技术进行磨粒分析的新方法，并获得最新的 ASTM D7596 标准。这种方法结合了颗粒计数和磨粒分类两方面的信息，不仅能通过磨粒的数量、尺寸、尺寸分布等，检测设备是否正常运转及磨损程度，而且可以根据磨粒磨损类型诊断设备故障的可能原因。相比与其他方法，这种方法检测速度快，对操作人员要求低，所得结果全面、客观，可广泛应用于离线实验室和现场在线油液检测。

关键词：油液分析，颗粒计数，磨损分类，智能铁谱，激光成像

前言

设备运行过程中，摩擦副的相互作用会产生磨粒，磨粒的尺寸、数量及形貌特征携带着的大量信息：磨损原因、磨损位置、磨损程度和磨损类型等，是判断设备运行状态，预测设备失效，是设备磨损原因溯源分析以及故障诊断的重要依据。当前磨粒分析已经成为设备故障监测的重要方法。

目前磨粒分析主要包括：光阻法颗粒计数器和分析铁谱仪。

光阻法颗粒计数器主要通过磨粒的遮光作用使得光电元件受光量减少，使其输出电压产生脉冲信号，脉冲电压的幅值直接反应了磨粒的大小，故可测出磨粒的尺寸、分布和数量。但是颗粒计数器不能检测磨粒的形貌，而且，因为其磨损状态监测的原理主要是基于数据的统计分析。因此，仅利用颗粒计数器，如果没有此前基于大量统计数据建立的界限值作参照，实际上是不可能真正实现磨损状态监测。

分析铁谱是利用高梯度磁场将润滑油中所含磨损颗粒及其他微粒从液相中分离出来，并通过对各种微粒的形态、大小、成分、数量和粒度分布等特性的观察和定量测量。分析铁谱是根据磨粒的直观分析对摩擦副的磨损性质和严重程度做出判断的，是设备磨损原因溯源分析以及故障诊断的最直接准确的检测手段。但由于分析铁谱实验难度较大，产出率较低，且为非定量分析，对分析人员的主观判断和经验依赖性强，作为常规监测手段并不适宜。

因为这些传统方法的局限性，因此迫切需要一种检测方法能够同时给出颗粒计数和形貌分类，并且结果客观可靠，检测时间短，价格适中。最新的 ASTM D7596 标准——使用直接成像技术自动进行颗粒计数和颗粒形貌分类满足这种需求。

1、直接成像技术检测磨粒的原理

直接成像技术是基于激光投影和人工智能识别技术，记录和识别磨损颗粒。如图 1 所示，当油样进入系统后，穿过样品池时，此时脉冲激光照射此样品池，所得到的信号由 4 倍放大器放大之后，投影到 CCD 上，然后由一个高速照相机对其进行拍照，然后经由神经网络技术对其进行分析，从而得出该油样的磨损颗粒计数以及形态的信息。

直接成像技术通过人工神经网络对大于 $20\mu\text{m}$ 的磨粒进行自动分类。铁谱专家使用传统的分析铁谱对大量磨损颗粒进行辨别，然后培训人工神经网络识别常见的磨损类型。人工神经网络将磨粒分为：切削磨损、接触磨损（滑动磨损）、疲劳磨损、非金属、纤维、水珠等，见图 2。

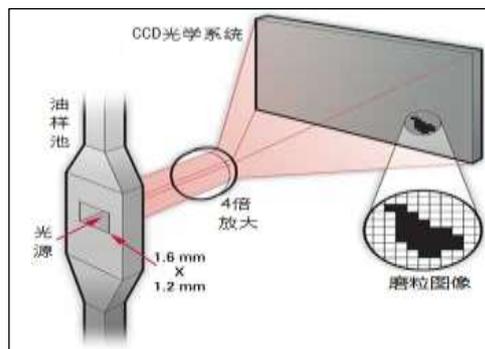
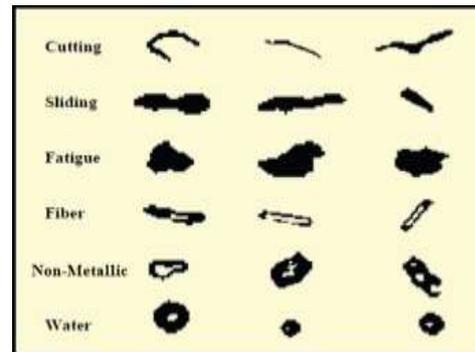


图 1. 直接成像法原理图



2. 颗粒几何形态分类

直接成像是作为智能铁谱设计的，但是因为它的直接成像能力，也可以作为一个精确、可靠的颗粒计数使用，结果满足 ISO4406:99 标准。而且，因为它是直接对颗粒拍照，因此它在使用过程中不需要进行年度校正。为验证精确度，用户可以定期使用检查液进行 u 行检测。

2、直接成像法与传统法的对比

直接成像法主要是与传统分析铁谱仪和遮光法颗粒计数器，进行磨粒分类及数量、分布进行对比。

2.1 直接成像法与分析铁谱法比较

铁谱技术一直是确定磨损机制和润滑机械故障严重程度的标准方法，但是是

定性检测，为判定直接成像法与铁谱的相关性，斯派超公司的 Thomas 等人使用光谱仪、直接成像法 LNF 以及分析铁谱三种方法对发动机连续监测 540 个小时，包含了设备的磨合期、平稳期和失效期，共取样 31 次，进行元素分析(图 3)和直接成像法分析(图 4)，从中选取 5 个代表样品进行铁谱分析。

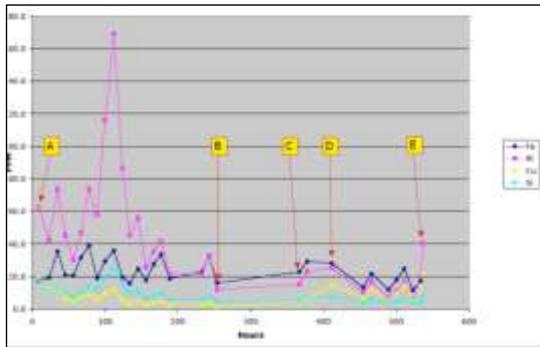


图 3.发动机整体元素分析曲线图

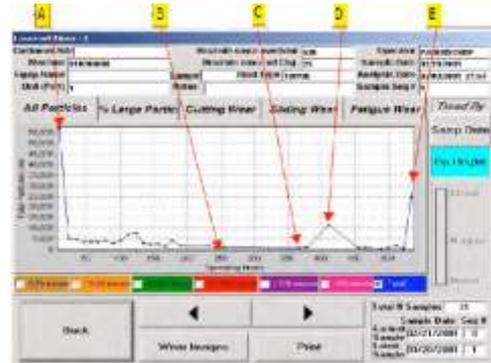


图 4.发动机整体污染度分析曲线图

A 点发动机运行 8.8 小时，此时设备处于磨合期，大于 4um 的颗粒为 57,278 个/ml，磨损以接触（滑动）磨损为主，直接成像法与铁谱法一致，见图 5 和图 6。

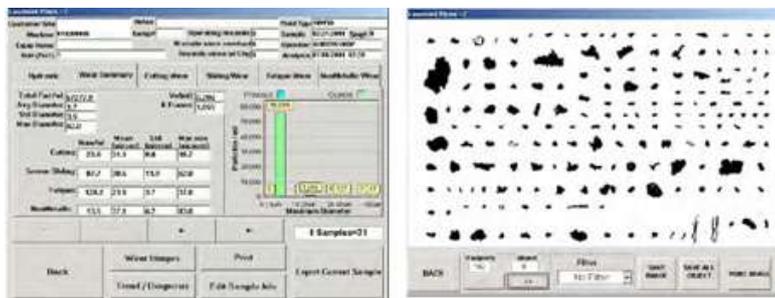


图 5. A 点 LNF 自动分类结果



图 6. A 点铁谱分析结果

B 点发动机运行 254 小时，因为已过磨合期，并且经过几次换油，因此颗粒总数有所下降为 1,070/ml，以正常磨损颗粒为主，与铁谱得到的结果相似，见图 7

和图 8。C 点发动机运行 366.7 小时，与 B 点一样，也处于平稳期，颗粒总数和磨损颗粒类型和数目没有明显变化。

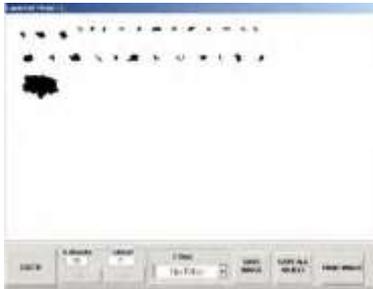


图 7. B 点 LNF 直接成像图片

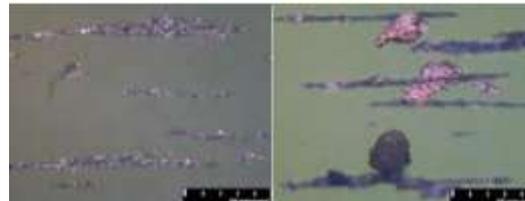


图 8. B 点铁谱分析结果

D 点发动机运行 411.3 小时，开始出现异常磨损，颗粒总数上升到 11367.2/ml，大于 20um 的颗粒总数也显著升高，滑动磨损（接触）和疲劳磨损颗粒显著升高，与铁谱结果一致，见图 9 和图 10。

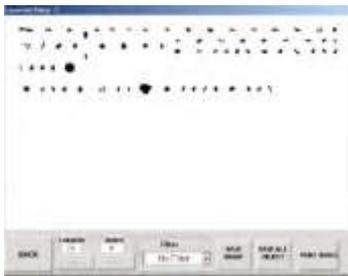


图 9. D 点 LNF 直接成像图片



图 10. D 点铁谱分析结果

E 点发动机运行 534 小时，颗粒总数达到 24,493/ml，大于 20um 的颗粒数激增，以疲劳磨损为主。而此时磨损元素含量升高并不明显，见图 11 和图 12。

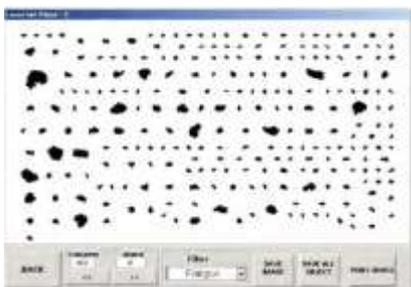


图 11. E 点 LNF 直接成像图片



图 12. E 点铁谱分析结果

2.2 直接成像法与遮光法颗粒计数器比较

美国国家可再生能源实验室 ShawnShen 等人做了直接成像法与遮光法颗粒计数器对比的相关实验。分别使用直接成像法、颗粒计数器、扫描电镜对 750-kW 的风机涡轮机齿轮箱进行检测，共检测 9 个样品， $4\mu\text{m}$ ， $6\mu\text{m}$ ， $14\mu\text{m}$ 的结果进行比较，结果发现三种方法的趋势是一致的。

但是有些油样，直接成像法的结果会与遮光法结果有所区别：

当干扰软颗粒出现在油样中时（例如水滴，反型添加剂中的硅氧烷颗粒）LNF 和传统颗粒计数器之间的相关性低。密尔沃基大学 Paul W. Michael 等人分别使用 2 款遮光法自动颗粒计数器和直接成像法检测添加剂对颗粒计数结果的影响，发现遮光法将聚二甲基硅醚防泡添加剂误判为颗粒，因此产生大量的幽灵颗粒，造成结果虚高，而直接成像法颗粒计数器能大大减小硅质防泡剂的干扰。

另外，因为直接成像法时自动计算图像尺寸，因此 LNF 能直接检测严重污染的油样计数（ ≤ 500 万个颗粒/毫升），而无需稀释，而对于传统的颗粒计数器来说，很难对如此脏的油样进行计数（油样须被大量稀释）。直接成像法独带的激光增益功能，使得直接成像法能够检测烟炱含量高达 2% 的油样，而无需稀释。

3、直接成像法的重复性和再现性

重复性是指使用相同方法、同一设备和同一样品检测所得检测结果。

再现性是指使用相同方法和同一样品在不同设备上检测所得检测结果。

以斯派超 LNF 多功能磨粒分析仪为例，使用 5 台新旧程度不同的 LNF 分别检测制备样品，其中：s/n0226 和 S/N0239 是完全新的仪器，S/N0021 是使用时间最长的仪器，使用了 6 年，S/N0077 和 S/N0186 被使用了 2、3 年。样品为 MTD 粉尘与粘度 63cSt(40℃) 精炼矿物油（洁净等级为 ISO 13/11/6, 每毫升只含有 48 个大于 $4\mu\text{m}$ 颗粒），制备同一样品 5 瓶。

3.1 直接成像法颗粒计数的再现性和重复性

分析 25 次颗粒计数结果的再现性和重复性，对每个尺寸范围，计算 25 次检测算平均值、标准偏差和相对标准偏差。

如表 1 所示，大于 $4\mu\text{m}$ 的相对标准偏差在 3.2%，大于 $6\mu\text{m}$ 的相对标准偏差在 6.6%，大于 $14\mu\text{m}$ 的相对标准偏差在 12.3%，大于 50 微米的检测结果重复性比较差，这是在预料之中的，主要因为大颗粒比较少，取样不可能完全均匀。

单台设备颗粒计数的重复性，大于 $4\mu\text{m}$ 的相对标准偏差在 2.7%，大于 $6\mu\text{m}$ 的相对标准偏差在 2.2%，大于 $14\mu\text{m}$ 的相对标准偏差在 5.96%，重复性的结果比再现性更好，主要因为少了设备这个变量。

表 1. 直接成像法进行颗粒计数的再现性比较

油 样	设备 编码	编 号	>4um	>5um	>6um	>10um	>14um	>15um	>20um	>21um	>25um	>50um	>70um
1	21	1	73646	44431	28957	8663	2584	2018	708	596	292	14	0
1	226	2	79117	46927	29928	9221	2787	2245	829	699	373	23	5
1	239	3	72897	40428	24693	8067	2740	2238	762	637	262	11	0
1	186	4	74304	45546	29992	9102	2422	1876	723	618	313	15	2
1	77	5	74295	45196	29476	8624	2223	1733	638	541	273	8	0
2	226	6	75743	43954	27628	8063	2228	1793	640	524	265	12	5
2	239	7	74438	40880	24607	8411	3197	2594	924	753	386	19	6
2	186	8	73822	45658	30156	9629	2562	1953	735	642	373	17	6
2	77	9	78763	45951	29133	8685	2286	1774	668	582	310	14	0
2	21	10	75907	45561	29508	9036	2806	2180	801	663	315	8	2
3	239	11	73703	41242	25308	8952	3329	2684	930	792	445	15	3
3	186	12	76434	45951	30023	9610	2617	2007	745	614	326	9	3
3	77	13	73934	45471	29841	8485	2107	1648	624	524	271	11	2
3	21	14	78449	47124	30390	9060	2696	2153	791	652	366	18	3
3	226	15	76725	45736	29344	8645	2380	1823	699	594	277	12	0
4	186	16	71917	43948	29020	9206	2480	1881	719	599	311	20	0
4	77	17	74869	45561	29957	8850	2256	1773	725	600	305	6	2
4	21	18	70252	43042	28397	8524	2410	1899	719	571	257	12	3
4	226	19	75322	45270	29114	8527	2404	1898	703	595	310	18	2
4	239	20	75205	42094	25890	8611	3047	2465	860	703	329	11	0
5	77	21	75997	46210	30314	8663	2281	1789	679	564	268	9	0
5	21	22	74094	44591	28859	8582	2476	1939	698	603	602	8	2
5	226	23	80084	46931	29779	8860	2631	2026	730	594	299	11	2
5	239	24	72243	40728	25026	8340	2955	2348	830	662	310	9	2
5	186	25	72480	44378	29236	9076	2372	1818	691	580	306	17	3
平均值			74986	44152	28583	8780	2571	2022	743	620	314	13	2
标准偏差			2372	2012	1889	402	315	276	82	65	45	4	2
相对标准偏差			3.2	4.5	6.6	4.6	12.3	13.6	11	10.6	14.4	34.1	97.1

3.2 直接成像法磨粒形貌分类的再现性和重复性

分析 25 次检测颗粒形貌分类结果的再现性和重复性。由表 2 可知，形貌分类结果的再现性不如表 1 中颗粒计数结果的再现性，这主要是因为 LNF 只对大于 20 μm 的颗粒进行形貌识别。表 1 大于 20 μm 颗粒的颗粒计数的再现性是 11%，表 2 所有磨粒总和 (C+S+F+N) 的再现性为 8.5%，因此，实际上两者的再现性是一致的。

表 2 直接成像法 LNF 磨粒分类的再现性

样品瓶编号	代号	检测次	切削磨粒	滑动磨粒	疲劳磨粒	非金属磨粒	>20um	总合
1	21	1	378	87	170	1586	708	2221
1	226	2	333	100	110	1898	829	2441
1	239	3	297	46	107	1608	762	2058
1	186	4	418	84	179	1463	723	2144
1	77	5	459	61	124	1398	638	2041
2	226	6	289	58	114	1504	640	1964
2	239	7	362	69	108	2070	924	2610
2	186	8	438	102	231	1580	735	2352
2	77	9	414	83	147	1470	668	2114
2	21	10	382	88	174	1735	801	2378
3	239	11	325	54	144	2166	930	2689
3	186	12	446	85	176	1582	745	2290
3	77	13	449	82	117	1395	624	2043
3	21	14	353	92	150	1681	791	2277
3	226	15	319	65	97	1535	699	2016
4	186	16	362	91	176	1480	719	2108
4	77	17	475	67	120	1469	725	2132
4	21	18	406	76	141	1525	719	2148
4	226	19	310	83	106	1573	703	2072
4	239	20	330	52	113	1942	860	2437
5	77	21	466	81	135	1402	679	2083
5	21	22	354	69	132	1506	698	2061
5	226	23	369	62	89	1724	730	2244
5	239	24	329	54	125	1812	830	2319
5	186	25	420	71	203	1427	691	2120
平均值	379.3	74.4		139.6		1621.2	743	2214
标准差	56.4	15.5		35.4		211.2	82	187
相对标准差	14.9	20.9		25.4		13	11	8.5

另外，表 1 中大于 20 μ m 的颗粒总数是表 2 所有磨粒总和 (C+S+F+N) 的三分之一，这主要是因为颗粒计数使用的是等效直径进行计算，而磨粒分类是按照最大直径进行分类。因为一般颗粒都不是精确的圆形，因此，最大直径大于等效直径。例如，最大直径为 30 微米的银质磨粒的等效直径只有 10 μ m。

从以上实验可以看出，不论颗粒计数，还是磨粒识别，直接成像法展现了非常好的再现性和重复性。

4、案例分析

4.1 发动机磨合期分析

在用油样取自磨合期的发动机，分别使用直接成像法、元素分析油料光谱仪和分析铁谱对油样进行检测。LNF 结果能非常清晰的展现磨合期典型的磨粒。从图 13 中可以看出磨损总体情况，磨损集中在小于 15 微米的颗粒，大于 20 微米的磨损颗粒主要是滑动和疲劳磨损（图 15），这与分析铁谱的结果一致（图 14）。油料光谱仪的结果也显示存在高浓度的磨损元素，如铝、铜和硅。

因此，我们可以得出结论，发动机处在正常的磨损期，直接成像法的数据与油料光谱仪和分析铁谱结果一致，在这种情况下，我们不需要进行复杂的铁谱分析就可以得到磨损类型和磨损机制结果。

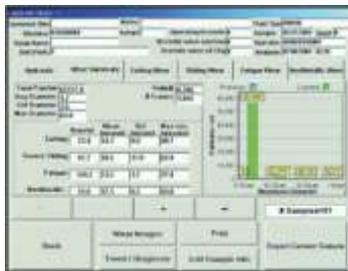


图 13. 磨损总体情况

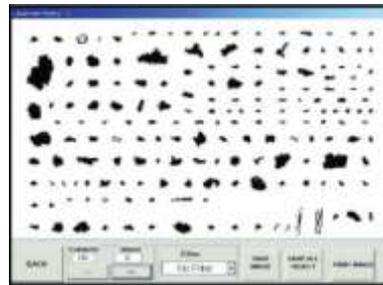


图 14.LNF 直接成像图片

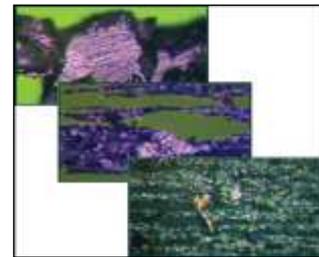


图 15. 铁谱结果

4.2 齿轮箱失效测试

宾夕法尼亚州立大学在机械诊断试验台（MDTB）上对单级减速齿轮箱进行失效测试。齿轮箱在最大许可载荷下运转 4 天，然后在 3 倍扭矩力下运行，最后导致发动机故障，系统每 2 小时进行一次油液检测。由图 16 颗粒总数分布图可以看出，在整个运转过程中 5-15 μ m 的颗粒逐渐减小，因为油样不断的被吸出检测，并换上了干净的油液，在运行过程中产生的磨粒也随之逐渐移出系统。但是在磨粒分类的分布图中，我们发现，虽然接触磨损（滑动磨损）和切削磨损却没有显著升高，这是因为在超过扭矩的情况下，但疲劳磨粒的数目是不断增加，因为多余的应力集中在齿轮节线引起疲劳磨损，最后导致失效。

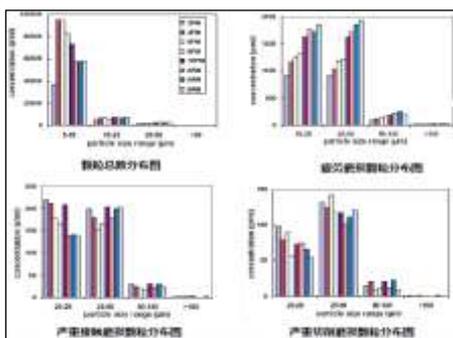


图 16. 齿轮箱油不同磨粒分布图

4.3 某传动系统失效

使用 LNF 检测此设备油样，发现 ISO 清洁等级很高为 22/17，并且磨损颗粒的数目和严重程度都显示设备处于严重磨损状态中，设备在不久后就停工了，也验证了这一点。

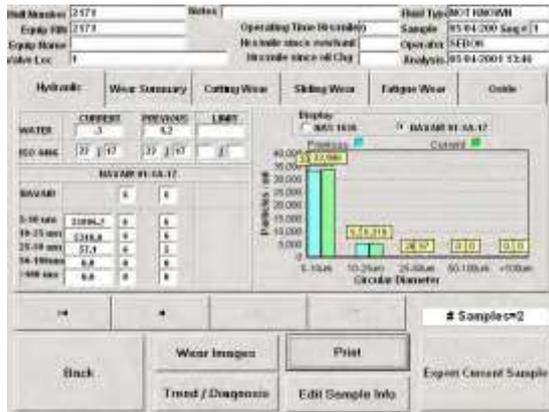


图 17 传动系统磨损总体情况

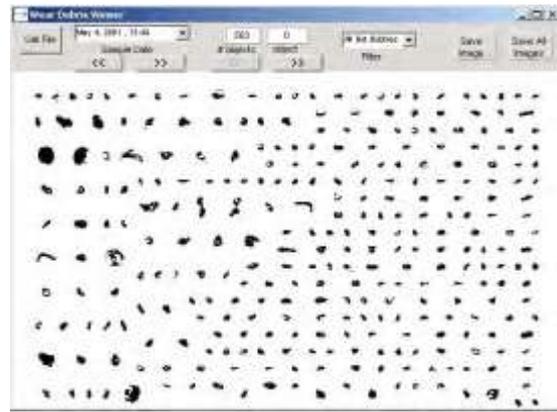


图 18 磨损颗粒

5、小结

直接成像法能够同时检测磨粒的大小、数目、分布以磨损类型等指标，因此能够在设备发生异常的初期检测到，找到问题的根源。而且直接成像法自动分类功能可部分取代分析铁谱仪，可以降低长期以来设备磨损检测行业对分析铁谱仪的依赖，同时具有分析速度快、操作简便、检测费用低等特点，是第三方检测机构及工业现场油液检测实验室的理想选择，目前使用直接成像法最成熟的商用检测设备是斯派超公司生产的 LNF Q200 多功能磨粒分析仪。