

主成分分析在某型柴油机光谱数据分析中的应用

刘 韬, 田洪祥*, 郭文勇

海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033

摘要 通过改变气缸套和活塞间隙, 设计了6种工作状态, 获得了某型6缸柴油机在每种工作状态下不同负荷时的润滑油样本共计69个, 采用超谱M型原子发射光谱仪分析21种元素浓度。应用主成分分析法, 分别以分析元素和润滑油样本为研究对象, 基于权系数和主成分得分, 对光谱数据进行了元素分类和样本分类。发现应用主成分分析法分析油液光谱数据能比较理想地对元素进行分类, 该分类的3种主成分反映了5种类型的元素组合即磨损元素Fe, Cr, Cu, Al和Pb, 含量较高的添加剂元素Na, Zn, P, Ca和Mg, 含量较低的添加剂元素Ba和B, 润滑油主成分元素C和H和干扰元素Ni, Ti, Mo, V和Ag等。不仅如此, 主成分分析法对样本的分类较好地地区分了来自柴油机不同的气缸套—活塞设计间隙的油样。研究表明应用主成分分析法分析润滑油光谱分析数据可揭示不同元素的来源、监测工况和诊断磨损故障。

关键词 油液光谱分析; 主成分分析; 柴油机; 润滑油

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)03-0779-04

引言

机械装备零件的磨损是伴随相对运动中相互作用表面的摩擦而产生的必然结果, 它不仅带来材料损耗, 而且影响装备的使用可靠性和使用寿命^[1]。通过检测油液、过滤器、磁塞上由于磨损产生的磨粒获得其成分、数量、形状和体积等信息能有效地分析机械装备零部件的磨损机理、判断磨损部位并预测磨损发展趋势^[2]。油液光谱分析技术是应用最早且行之有效的检测手段之一。

1 分析仪器

实验采用的超谱M型原子发射光谱仪是一种专为分析润滑油成分而设计的发射光谱仪, 可一次分析21个元素, 具有较高的精度和重复性。实验前通过完全标准化和日常标准化使光谱仪处于标定状态。

2 主成分分析原理

深入挖掘润滑油光谱数据常采用的数学方法主要有灰色理论、神经网络、遗传算法、回归分析、特征参数、支持向量

机^[3-6]等。本文采用主成分分析法。

主成分分析是将多指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法。在润滑油光谱分析中, 由于分析元素较多, 且彼此存在着一定的相关性, 数据在一定程度上反映的信息有所重叠。主成分分析在保证尽可能多的反映原始信息的基础上, 用较少的互不相关的综合变量代替原来较多的分析元素, 将光谱数据进行简化。步骤如下^[7]:

① 不同的分析元素有不同的量纲, 将原始数据矩阵 $X_{m \times n} = (X_1, X_2, \dots, X_n)'$ (其中 m 表示油样样本, n 表示分析元素) 标准化: $X_i^* = \frac{X_i - \text{mean}(X_i)}{\sqrt{\text{std}(X_i)}}$, ($i = 1, 2, \dots, n$),

并计算 $X_{m \times n}^*$ 的协方差矩阵 $Y_{n \times n}$;

② 由特征方程 $(\lambda I - Y_{n \times n}) \times \mu = 0$, 求出 $Y_{n \times n}$ 各特征值 λ_i (从大到小排列) 和对应的特征向量 μ_i ($i = 1, 2, \dots, n$);

③ 计算主成分 $Z_i = \mu_i \times X^*$ ($i = 1, 2, \dots, n$); 主成分 Z_i 的贡献率 $\lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$; 主成分 Z_1, \dots, Z_k ($k < n$) 的累计贡献

率 $\sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$;

④ 通常取 k , 使累计贡献率达到 80% 以上, 研究主成分 Z_1, \dots, Z_k , 分析对象由 n 维降为 k 维。

收稿日期: 2009-04-02, 修订日期: 2009-07-06

基金项目: 预研基金项目(9140A27020107JB1107)资助

作者简介: 刘 韬, 1983年生, 海军工程大学船舶与动力学院硕士研究生 e-mail: lotuslau@126.com

* 通讯联系人 e-mail: hxtianwuhan@yahoo.com.cn

3 数据分析与讨论

3.1 元素分析

对某型船舶 6 缸柴油机, 全部更换新活塞, 通过调整气缸间隙, 使柴油机在包括正常状态在内的 7 个不同工况状态

下运行, 取样进行光谱分析, 气缸间隙见表 1。

以分析元素为对象, 基于 MATLAB 对光谱数据进行主成分分析, 得到特征值及其变差贡献累积百分数。其中起明显作用的是前 3 个主成分, 占总变差的 81.61%, 计算各分析元素关于前 3 个主成分的权系数 $\sqrt{\lambda_i} \mu_{ji}$, 计算结果见表 2。

Table 1 Clearances between cylinder and piston of diesel engine

工况	1	2	3	4	5	6
气缸套和活塞间隙	第二缸间隙 0.7 mm, 第五缸间隙 0.6 mm, 第六缸间隙 0.87 mm	第二缸间隙 0.7 mm, 第六缸间隙 0.87 mm	第二缸间隙 0.7 mm	第六缸间隙 0.87 mm	第二缸间隙 0.7 mm, 第五缸间隙 0.6 mm	第六缸间隙 0.60 mm

Table 2 Comprehensive appraisal value and the weighted coefficients for principal components

主成分	特征值	变差贡献百分数	变差贡献累积百分数	分析元素	权系数主成分 1	权系数主成份 2	权系数主成份 3
1	11.330 4	53.954 4	53.954 4	Fe	-0.922 5	-0.325 7	0.026 8
2	3.663 7	17.446 4	71.400 7	Cr	-0.795 6	-0.297 9	-0.214 7
3	2.143 9	10.209 3	81.610 0	Pb	-0.934 7	0.071 7	0.042 1
4	1.417 5	6.750 0	88.360 1	Cu	-0.911 9	-0.359 2	-0.059 9
5	0.985 0	4.690 5	93.050 6	Sn	-0.348 5	0.695 9	-0.206 5
6	0.636 8	3.032 3	96.082 9	Al	-0.823 6	-0.367 6	-0.172 6
7	0.364 0	1.733 2	97.816 1	Ni	-0.756 4	0.621 5	-0.054 3
8	0.137 5	0.655 0	98.471 1	Ag	-0.581 0	0.645 0	0.013 1
9	0.091 0	0.433 4	98.904 4	Si	-0.941 7	-0.310 0	-0.005 7
10	0.068 4	0.325 8	99.230 3	B	-0.034 7	0.141 3	-0.929 9
11	0.057 0	0.271 5	99.501 8	Na	-0.936 3	-0.215 4	-0.028 1
12	0.032 5	0.154 7	99.656 5	Mg	-0.933 1	-0.290 0	0.034 2
13	0.023 2	0.110 7	99.767 2	Ca	-0.935 6	-0.164 3	0.220 7
14	0.018 5	0.088 3	99.855 5	Ba	-0.178 4	-0.277 7	-0.876 2
15	0.010 0	0.047 4	99.902 9	P	-0.920 8	-0.146 2	0.251 4
16	0.007 7	0.036 6	99.939 5	Zn	-0.898 4	-0.090 9	0.343 0
17	0.005 5	0.026 2	99.965 8	Mo	-0.704 8	0.652 8	-0.063 0
18	0.002 9	0.013 8	99.979 6	Ti	-0.709 2	0.628 4	0.002 5
19	0.001 9	0.009 0	99.988 6	V	-0.444 3	0.679 3	-0.138 4
20	0.001 4	0.006 8	99.995 3	H	0.143 7	-0.268 2	-0.007 6
21	0.001 0	0.004 7	100.000 0	C	0.127 6	0.422 2	0.359 3

以主轴 μ_i 为坐标轴, 分别作分析元素在主轴 1 和 2、1 和 3、2 和 3 上的平面投影, 即主坐标 $(\sqrt{\lambda_1} \mu_{i1}, \sqrt{\lambda_2} \mu_{i2})$, $(\sqrt{\lambda_1} \mu_{i1}, \sqrt{\lambda_3} \mu_{i3})$, $(\sqrt{\lambda_2} \mu_{i2}, \sqrt{\lambda_3} \mu_{i3})$, 如图 1~图 3 所示。

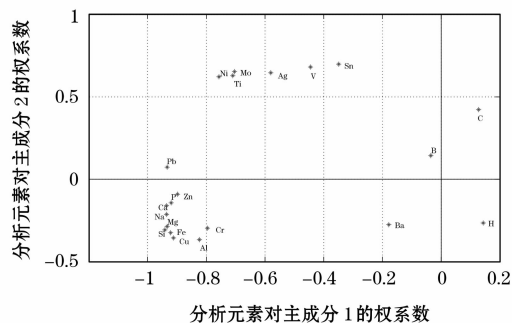


Fig. 1 Projection of principal component 2 to principal component 1

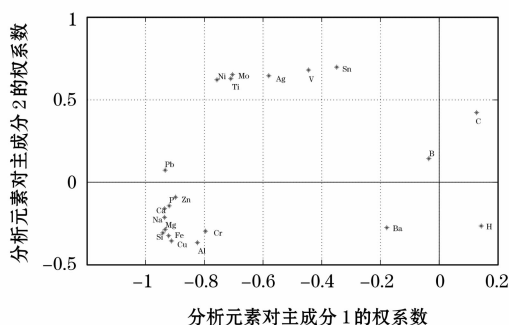


Fig. 2 Projection of principal component 3 to principal component 1

① 从图 1 和图 3 可以看出, 干扰元素 Ni, Ti, Mo, V, Ag 和 Sn 等始终聚集在一起, 处于主轴 2 正向一侧。这些元

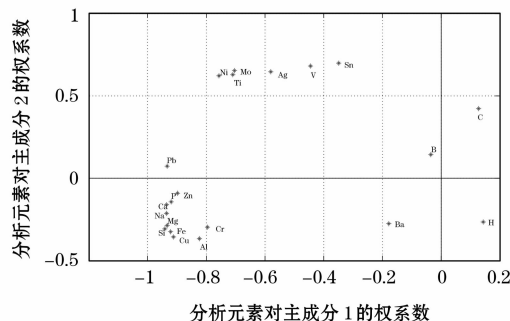


Fig. 3 Projection of principal component 3 to principal component 2

素在本型柴油机润滑油中本不应出现，主要是由于光谱仪的测量误差引起的。此类元素始终聚集在一起，通过主成分分析能有效地判断某种元素是否为干扰元素；

② C 和 H 为组成润滑油的主要元素，与其他分析元素相关性很小，处于主轴 1 正向一侧，图 1 和图 2 表述了这一点；

③ Ba 和 B 为含量较低的添加剂元素，它们之间存在一定的相关性，且与其他分析元素相关性很小，处于主轴 3 负向一侧，图 2 和图 3 表述了这一点；

④ Na, Zn, P, Ca 和 Mg 为含量较高的添加剂元素，元素之间关系密切，处于主轴 1 负向一侧，图 1 和图 2 表述了这一点；

⑤ Fe, Cr, Al, Cu 和 Pb 为磨损金属元素，元素之间关系密切，处于主轴 1 负向一侧，图 1 和图 2 表述了这一点。

3 种主成分反映了 5 种类型的元素组合，见表 3。

Table 3 Classification of elements

主成分	特征值	元素组合	元素类型
1	11.330 4	Fe, Cr, Al, Cu, Pb Na, Zn, P, Ca, Mg C, H	磨损元素 含量较高的添加剂元素 润滑油主成分元素
2	3.663 7	Ni, Ti, Mo, V, Ag, Sn	干扰元素
3	2.143 9	Ba, B	含量较低的添加剂元素

3.2 样本分析

以油液样本为对象，仅取 Fe, Cr, Al, Cu 和 Pb 等磨损

元素和主要污染元素 Si 的光谱数据，进行主成分分析。由于前两个主成分的累计贡献率已达 96% 以上，只需第一主成分和第二主成分就能很好的概括此组数据。计算第一主成分得分 $(X_i^*)' \times \mu_1$ 和第二主成分得分 $(X_i^*)' \times \mu_2$ ，画出第二主成分得分对第一主成分得分的散布图，如图 4。

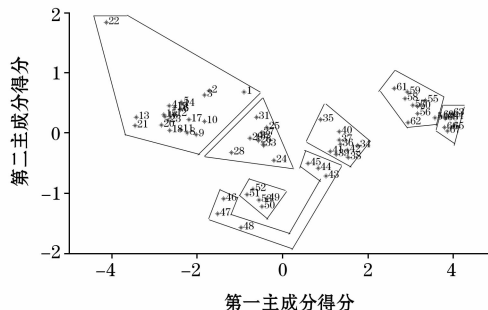


Fig. 4 Oil sample classification according to working conditions

图 4 很好地将油液样本进行了分类。除第四工况的 43~48 号油液样本聚类不甚理想外，其余样本均按照工况各自聚集在一起，依次代表了表 1 所示的 6 种工况。

利用特征向量值可以对主成分进行解释。第一大特征值对应的第一个特征向量的各个分量均在 -0.4 附近，因而第一主成分反映了柴油机整体磨损的剧烈程度；第二大特征值对应的第二个特征向量中第二个分量(元素 Cr 的系数)和第五个分量(元素 Al 的系数)为负值，其余分量均为正值。由于本实验是通过调整柴油机气缸间隙人为设定的工况，不同工况活塞和气缸磨损差异最为明显。元素 Cr 主要来源于活塞环，元素 Al 主要来源于活塞铝合金，因而第二主成分反映了活塞磨损与其他零部件磨损的相关程度。

4 结 论

(1) 以分析元素为对象，采用主成分分析能有效地对元素进行分类，排除干扰元素影响，按照磨损元素和润滑油添加剂元素有效地进行聚类；

(2) 以油液样本为对象，采用主成分分析能有效地按照工况对样本进行分类，有利于进一步分析机械装备零部件的磨损机理、判断磨损部位和预测磨损发展趋势。

参 考 文 献

[1] MAO Mei-juan, ZHU Zi-xin, WANG Feng(毛美娟, 朱子新, 王 峰). Technologies and Applications of Equipment Oil Monitoring(机械装备油液监控技术与应用). Beijing: National Defense Industry Press(北京: 国防工业出版社), 2006.

[2] YAN Xin-ping, WANG Zhi-fang, YUAN Cheng-qing(严新平, 王志芳, 袁成清). China Plant Engineering(中国设备工程), 2008; (8): 8.

[3] Peng Z, Kirk T B. Wear, 1999, 225-229: 1238.

[4] LI Bing, ZHANG Pei-lin, CAO Zheng, et al(李 兵, 张培林, 曹 征, 等). Lubrication and Engineering(润滑与密封), 2006, (4): 145.

[5] Miloslav Pouzar, Tomas Cernohorsky, Anna Krejcova. Talanta, 2001, 54: 829.

[6] Zhao C Y, Zhang H X, Zhang X Y, et al. Toxicology, 2006, 217: 105.

[7] ZHANG Run-chu(张润楚). Multivariate Statistical Analysis(多元统计分析). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2006. 165.

Application of PCA to Diesel Engine Oil Spectrometric Analysis

LIU Tao, TIAN Hong-xiang*, GUO Wen-yong

College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract In order to study wear characteristics of a 6-cylinder diesel engine, six different working statuses were arranged by altering the clearance between cylinder and piston. Sixty-nine oil samples were taken from engine at different loads under 6 working statuses and analyzed by Spectroil M Instrument made in US. Principal component analysis (PCA) was applied to analyzing spectrometric data of sixty-nine oil samples and clustering those data according to elements and oil samples separately based on the weighted coefficient and principal component scores. All 21 elements were used in element clustering and only 6 wear-related elements, namely iron, chromium, aluminum, copper, plumbum and silicon, were used in sample clustering. It is shown that PCA effectively clustered oil spectrometric data into three different principal components according to elements. The projection of two different principal components exhibited five types of elements combinations, namely wear elements (Fe, Cr, Cu, Al and Pb), high concentration additives elements (Na, Zn, P, Ca and Mg), low concentration additives elements (Ba and B), base constituent of lubricating oils (C and H) and interferential elements (Ni, Ti, Mo, V, Ag and Sn). Furthermore, PCA clearly clustered oil samples according to different clearance between cylinder and piston in the diesel engine. The study suggests that analyzing oil spectrographic data by PCA could find the sources of different elements, monitor engine conditions and diagnose wear faults.

Keywords Spectrometric oil analysis (SOA); Principal component analysis (PCA); Diesel engine; Lubricating oil

(Received Apr. 2, 2009; accepted Jul. 6, 2009)

* Corresponding author