

原子发射光谱仪作油液分析故障诊断的界限值问题^{*}THRESHOLD PROBLEMS ON FAULT DIAGNOSIS OF THE
ATOMIC EMISSION SPECTROMETER OIL ANALYSIS万耀青^{**} 郑长松 马彪

(北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081)

WAN YaoQing ZHENG ChangSong MA Biao

(College of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要 研究油液分析界限值的重要性和制定方法。界限值分为浓度和趋势两类,分别包括正常、临界和异常 3 个等级。着重对原子发射光谱仪油液分析的界限值制定提出具体方法,并已在实际中应用。

关键词 油液分析 界限值 故障诊断

中图分类号 TH165.3 TH117.1

Abstract The importance and formulation method of the oil analysis for threshold have been researched. The threshold differentiate two classes, that is concentration and trend, they contain normal and margin and abnormal separately. Mainly for to determine the threshold of the atomic emission spectrometer oil analysis, the method is researched and has been used in practice.

Key words Oil analysis; Threshold; Fault diagnosis

Corresponding author: WAN YaoQing, E-mail: mabiao@bit.edu.cn, Tel: +86-10-68914037, Fax: +86-10-68911913

The project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University, China (No. NCET-04-0200).

Manuscript received 20050508, in revised form 20050614.

1 引言

对于大中型、精密、复杂、昂贵、安全性要求高的机械设备或装备,利用油液(包括润滑和液压油)分析对磨损类故障诊断是非常有效的手段,这已为世界各国实践所证实。磨损类故障占机械设备总故障率的 60%~70%。本文主要研究应用原子发射光谱仪进行油液分析故障诊断的界限值问题。

界限值亦称门槛值或阈值。在用油中包含多种磨损金属元素的故障信息,对每种元素必须科学地制定其界限值,才能预报机器的故障或油品的衰变状态。用户购置了多种仪器,如不根据机器特点去研究和制定各种界限值,就难以发挥仪器的功能和诊断效果。界限值没有通用性,尽管用相同仪器和相同油品,而不同种类机器的界限值不同,因为其磨损情况、载荷、运行工况及环境条件等不同。

2 原子发射光谱仪分析结果的特点

此仪器可快速、准确定量分析各磨损金属元素的重量含量($\mu\text{g/mL}$)。机器的磨损程度是渐变和突变并

存,为要根据元素含量去判断磨损状态,一般需要 3~4 种不同程度级别的界限值。

美军全部装备,均制定正常、临界、偏高和异常 4 种界限值,我国大多用正常、临界和异常 3 种界限值,以及趋势的界限值,为预报有无故障和故障程度的依据。

原子发射光谱仪只能分析 $10\mu\text{m}$ 的磨损颗粒尺寸,但磨粒的浓度能揭示早期故障征兆,而故障诊断的积极意义在于预知性和早期预报。

3 定量界限值的类别和模糊性

3.1 类别

机器出现的故障征兆,常常并非某一个界限值所能全面揭示反映。例如原子发射光谱仪,根据多年应用实践经验,需有磨损含量与取样频率关系统计的浓度界限值,相邻两个油样中含量变化统计的趋势界限值,两者必须相辅相成去捕捉故障征兆,而趋势界限值往往可灵敏反映磨损变化烈度。在某些行走机器中,为直观方便,还制定磨损含量与运行小时或走行公里关系的界限值。

^{*} 20050508 收到初稿,20050614 收到修改稿。新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0200)。

^{**} 万耀青,男,1931 年 10 月生,江苏常州市人,汉族。北京理工大学教授。发表论文 100 多篇,出版著作 10 多部。曾获国防工业基金奖、省部级科技进步奖 10 多项,享受国务院特殊津贴。主要研究领域为车辆工程、综合传动、液压与控制、优化设计、状态监测与故障诊断、AI/ES 等。

3.2 定量界限值边界的模糊性

以原子发射光谱仪为例,国内外所制定的 3 种或 4 种界限值,其边界仅相差 1 $\mu\text{g/mL}$ 。例如表 1a 和表 1b 分别为美国军用车辆某行星变速箱 5R6192 和美国某军用飞机燃气轮发动机的主要磨损元素界限值和异常趋势值^[1];表 2 为我国某内燃机车柴油机的磨损元素界限值和趋势界限值。

表 1a 美国军用车辆某行星变速箱 5R6192 的界限值
Tab. 1a The planetary gear box 5R6192 threshold for America military vehicle

元素 Element	Fe	Al	Cu	Si	Pb
界限值 Threshold/($\mu\text{g/mL}$)					
正常 Normal	0 ~ 154	0 ~ 15	0 ~ 202	0 ~ 69	0 ~ 14
临界 Margin	155 ~ 189	16 ~ 19	203 ~ 248	70 ~ 86	15 ~ 17
偏高 High	190 ~ 236	20 ~ 24	249 ~ 310	87 ~ 107	18 ~ 21
异常 Abnormal	237	25	311	108	22
异常趋势值 (10 小时的增加量) Abnormal trend value (The increase value of 10 hours)	47	4	62	21	4

表 1b 美国军用飞机某燃气轮发动机的界限值
Tab. 1b The gas turbine engine threshold for America air force

元素 Element	Fe	Ag	Al	Cr	Cu	Mg	Si
界限值 Threshold/($\mu\text{g/mL}$)							
正常 Normal	0 ~ 13	0 ~ 3	0 ~ 10	0 ~ 5	0 ~ 8	0 ~ 10	0 ~ 33
临界 Margin	14 ~ 16	无	11 ~ 12	6	9	11 ~ 12	34 ~ 40
偏高 High	17 ~ 19	4	13 ~ 14	7	10 ~ 11	13 ~ 14	41 ~ 49
异常 Abnormal	20	5	15	8	12	15	50
异常趋势值 (10 小时的增加量) Abnormal trend value (The increase value of 10 hours)	4	2	4	2	3	4	10

表 2 我国某内燃机车柴油机的界限值
Tab. 2 The diesel engine threshold of China diesel locomotive

元素 Element	Fe	Cu	Pb	Cr	Ni	Al
界限值 Threshold/($\mu\text{g/mL}$)						
正常 Normal	0 ~ 28	0 ~ 12	0 ~ 10	0 ~ 2	0 ~ 5	0 ~ 5
临界 Margin	29 ~ 33	13 ~ 17	11 ~ 14	2 ~ 3	6 ~ 8	6 ~ 7
异常 Abnormal	34	18	15	4	9	8
趋势警告值 Trend warning	13	8	9	3	6	6
趋势异常值 Trend abnormal	20	13	15	5	11	10

由表 1 和表 2 可见,各边界仅相差 1 $\mu\text{g/mL}$,对磨损类故障是否会这么灵敏,这要具体分析和采取应对策略。

(1) 界限值是为保证机器安全运行或有无故障征兆的一种预报或提示,是根据统计规律、置信度和实际运用经验来划分的,它不可能像精确数学计算那样准确无误。根据这种定量预报,如果能达到 95 % 的准确率,就可显著减少重大故障的概率。

(2) 磨损是渐变发展过程,界限值边界实际是一个小的模糊区,制定的界限值既能预报故障征兆,而且要留有一定保守裕度。例如当发现异常征兆时,还允许再作一次加密取样的时间间隔,确认抽样分析是否仍处于异常状态,而必须停机维修,这是应对各边界仅差 1 $\mu\text{g/mL}$ 的策略;若降到临界或正常范围,可继续运行,证明取样或分析中有偶然性。为安全计,还需作一次加密取样,这对连续运行机器或作战飞机不能轻易停机是必要的,是处理模糊区间的一种策略。美国三军装备的这种界限值和加密取样的逻辑程序,至今已应用近 40 年,实践证明有重大成效。关于如何研究处理这种模糊性,这是另一类问题。

(3) 故障诊断关键在于预报故障征兆,是预知性维修的先进策略。原子发射光谱仪的油液分析是一种单技术,可以确认故障程度,极大地避免预防维修(计划维修)制中该修而不修、不该修而过度维修的缺陷,界限值是必不可少的技术手段。

4 界限值需动态修改

机器在使用和维修过程中,由于以下原因需动态修改界限值^[2]。

(1) 机器在正常寿命期内运行,一般说来其磨损是渐增的;但在接近大修期前,磨损量值会较明显大于早期的磨损含量,故应将早期的油样分析结果淘汰,按中、后期的油样重新修改界限值。

(2) 机器大修后摩擦副配合总不如新机器,特别是更换进口配件或国产配件后。

(3) 机器的型号随科技发展而常常会更新,老型号与新型号的界限值不同。

(4) 机器所用的油品牌号允许在几种油品中选择,不同油品的性能总有一定差别,最好制定不同界限值。

美国三军全部装备都分别有详细的界限值,而且每 2 年修订一次,印发给各军用基地。

5 原子发射光谱仪界限值制定理论

5.1 基本理论

概率论和数理统计是研究随机现象规律的有效工具。概率论是根据大量同类随机现象的统计规律,对

随机现象出现的某一结果的可能性概率,作出客观的科学定义,对各种可能性出现的大小作出数量上的描述,比较它们的大小,研究它们之间的关系。而以概率论为基础的数理统计,是研究随机现象数据的整理、分析和推断,确定应有的定量值。

针对某一机器的多个油样分析结果,具有随机性,利用概率论和数理统计,可以确定正常、临界和异常的界限值,配以置信度设置,估计可能出现的概率。

5.2 磨损金属元素浓度 C 的界限值制定方法^[3]

采用以下符号, i 为 n 个油样号序列, $i = 1, 2, \dots, n$; j 为 m 种标志故障的主要金属元素种类, $j = 1, 2, \dots, m$; X_{ij} 为第 i 个油样中第 j 种金属元素的磨损浓度 ($\mu\text{g/mL}$),则磨损元素的浓度均值为

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

上标 c 表示与浓度有关的量

均方偏差为

$$c_j(x_{ij}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2} \quad (2)$$

按正态分布理论,各浓度界限值如表 3 所示。

表 3 正常、临界和异常界限值统计计算

Tab.3 The threshold statistical calculation of the normal, margin and abnormal

正常趋势界限 值上界 T_N	临界趋势界限 值上界 T_M	异常趋势界限 值上界 T_A
The upper limit of normal trend threshold	The upper limit of margin trend threshold	Abnormal trend threshold
$T_N = \bar{x}_{ij} + c_j(x_{ij})$	$T_M = \bar{x}_{ij} + 2 c_j(x_{ij})$	$T_A = \bar{x}_{ij} + 3 c_j(x_{ij})$

据此可确定正常界限值的区间 $T_{NA} = 0 \sim T_N$; 临界界限值的区间 $T_{MA} = (T_N + 1) \sim T_M$; 异常界限值的区间 $T_{AA} = T_A \sim T_M + 1$ 。

5.3 磨损金属元素浓度趋势值 G 的界限值制定方法^[2]

趋势值 G 定义,取样间隔时间 t 内相邻两个油样浓度之差 c 的平均变化率,则第 j 个元素,第 i 次相邻油样的趋势值为

$$T_{ij} = \frac{c}{t} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

上标 T 表示趋势有关量浓度趋势的均值

$$\bar{G}_j^T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{ij}^T \quad (4)$$

浓度趋势的均方偏差

$$T_j(G_j) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [G_{ij}^T - \bar{G}_j^T]^2} \quad (5)$$

按正态分布理论,各浓度趋势界限值如表 4 所示。

据此可确定正常趋势界限值的区间 $T_{NGA} = T_{AG} =$

$0 \sim T_{NG}$; 临界趋势界限值的区间 $T_{MGA} = T_{NG} + 1 \sim T_{MG}$; 异常趋势界限值区间 $T_{AGA} = T_{AG} \sim T_{MG} + 1$ 。

美国在国内和国外驻军共有近 400 个军用基地,三军装备均共用实验室分析仪器。为统一趋势界限值的统计规范,均将实际取样间隔转化为 10 小时的增加量,即趋势值(见表 1a 和表 1b)。

表 4 正常、临界和异常趋势界限值统计计算

Tab.4 The trend threshold statistical calculation of the normal, margin and abnormal

正常趋势界限 值上界 T_{NG}	临界趋势界限 值上界 T_{MG}	异常趋势界限 值上界 T_{AG}
The upper limit of normal trend threshold	The upper limit of margin trend threshold	Abnormal trend threshold
$T_{MG} = \bar{G}_j^T + T_j(G_j)$	$T_{NG} = \bar{G}_j^T + 2 T_j(G_j)$	$T_{AG} = \bar{G}_j^T + 3 T_j(G_j)$

转化方法如下

$$\frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \times 10 = 10 \text{ 小时的趋势值} \quad (6)$$

式中 x_{i+1} 、 t_{i+1} 分别为本次取样的浓度和取样时间; x_i 、 t_i 分别为前次取样的浓度和取样时间。例如 2 小时内增加 $2 \mu\text{g/mL}$, 相当于 10 小时增加 $10 \mu\text{g/mL}$; 25 小时增加 $15 \mu\text{g/mL}$, 相当于 10 小时增加 $6 \mu\text{g/mL}$ 。

5.4 应用示例

根据上述方法,结合现场经验,与某机务段合作,为进口内燃机车发动机近 4 000 个油样数据研制了界限值制定软件,结果如表 5。

表 5 发动机界限值

Tab.5 The engine threshold

元素 Element	Fe	Cu	Pb	Cr	Ni	Al	Na	B	Si
界限值 Threshold/ ($\mu\text{g/mL}$)									
浓度正常值 Normal concentration	< 29	< 12	< 10	< 2	< 5	< 6	< 87	< 16	< 7
浓度临界值 Margin concentration	30	13	11	2.1	6	6	88	17	8
浓度异常值 Abnormal concentration	34	17	14	2.6	8	7	107	27	10
趋势临界值 Trend margin	14	7	9	3	6	6	27	9	6
趋势异常值 Trend abnormal	20	14	15	5	11	11	36	15	10

这些界限值已在实际中应用多年,并根据运行时间和油样数的增多,动态修改界限值,预报准确率 85%。

6 结论与讨论

1) 在油液分析诊断方面,应用可定量分析的原

子发射光谱仪已有 50 多年的历史,经不断改进,在体积、重量上显著减小,功能、性能指标和操作软件的方便性有很大提高,至今仍为世界各国为预报机器磨损类早期故障征兆而广泛采用;而界限值的合理制定是能否发挥此仪器效能的关键。作者经多年研究与实践,已开发成可实用化的软件,已在多种机械装备上应用。

2) 制定界限值既离不开数学,又非纯数学问题。因不同机器的磨损规律有不同特征,需要对已制定的界限值在实际应用中根据诊断准确率的经验,设置合理的置信度去调整。如果准确率可达 85 % ~ 90 %,就相当满意。一般说来,除某些(例如内燃机漏水类故障)故障外,要达 100 % 是很难的。

3) 单技术的仪器,捕捉故障信息总有局限性,近代出现多种技术的仪器,可以捕捉和揭示多方面的征兆。多技术油液分析的信息融合,至今还无突破性的应用进展。此外,多技术分析中,有另几类的定量分析和

定性分析,如何分别去制定界限值,包括理论和经验等,这些信息处理问题,还需要深化研究。

References

- 1 Mechanical systems integrity management a new direction for SOAP. DOD JOAP naval air station. Pensacola ,Floride ,1990.
- 2 WAN YaoQing. The information fusion problems of the oil analysis in fault diagnosis. Journal of Machine Design ,2004 ,(9) :1 ~ 3 (In Chinese) (万耀青. 油液分析故障诊断中的信息融合问题. 机械设计,2004 (9) :1 ~ 3).
- 3 WANG WenQing. The threshold formulation and knowledge base in fault diagnosis by oil spectrometer [Master Degree]. Beijing: Beijing Institute of Technology ,1994 (王文清. 机械装备光谱油样分析故障诊断中界限值制定与知识库建立的研究与应用 [硕士学位论文]. 北京:北京理工大学,1994).
- 4 WAN YaoQing. The oil spectrometer analysis and fault diagnosis of the mechanical equipment. Journal of Machine Design ,1995 ,(9) :31 ~ 34 (In Chinese) (万耀青. 机械设备油液光谱分析与故障诊断. 机械设计,1995 ,(9) :31 ~ 34).