

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.005

基于相关系数的柴油机润滑油监测研究^{*}

田洪祥,李 婧,孙云岭,吴向君
(海军工程大学 动力工程学院,湖北 武汉 430033)

摘要:针对船舶主机用柴油机润滑油的监测问题,对某一船舶 4 台均连续工作了 1 900 h 以上的柴油机进行了润滑油的取样。利用油料发射光谱仪对所取得的 36 个油样进行了分析,获得了磨损和添加剂元素的浓度;利用铁量仪和磁力方法对油样进行了检测,获得了铁磁性磨粒的总量;利用现场快速粘度计对油样进行了分析,获得了 40℃ 的运动粘度;借助于快速水分仪判断了油样水分含量是否超标;运用统计数学中的相关系数方法对数据进行了挖掘研究,在 99% 的置信概率下,研究了参数之间的显著相关性。研究表明:润滑油的粘度与柴油机工作时间的负相关系数揭示了润滑油被燃油稀释的故障,油样中元素铁、铬和铜的正相关反映了产生磨损的主要摩擦副机件有活塞组件与气缸套、曲轴与轴承、凸轮轴和轴承等。

关键词:柴油机;润滑油;监测;发射光谱;相关系数;磨损

中图分类号:TH117.1;U262.11

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)10-1042-06

Oil monitoring for diesel engine based on correlation coefficient

TIAN Hong-xiang, LI Jing, SUN Yun-ling, WU Xiang-jun
(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problems of oil monitoring for diesel engine used as marine main engine, 36 routine oil samples were taken from 4 same model diesel engine of a ship. Each diesel engine worked continuously for more than 1 900 hours. By means of the instrument of atomic emitting spectroscopy, lubricating oil field rapid viscometer, magnetic debris monitor and crack moisture meter, all oil samples were analyzed. The analysis data were mined based on correlation coefficient method. The significant correlations between parameters were studied at 99% confidence probability. The results show that the negative correlation coefficient between the viscosity of the lubricating oil and the working time of the diesel engine, reveals the failure of the lubricating oil diluted by fuel and the positive correlation of element iron, chromium and copper in the oil samples reflects the main friction pairs, such as piston assembly and cylinder sleeve, crankshaft and bearing, camshaft and bearing, etc.

Key words: diesel engine; lubricating oil; monitoring; atomic emitting spectroscopy; correlation coefficient; wear

0 引 言

装备在用润滑油的监测是视情维修的重要技术手段之一,可以提高装备的可用性,降低装备的运行成本和维修费用^[1]。在 ASTM D6224 关于电站辅助装备在

用润滑油监测中^[2],柴油机润滑油优先监测的参数指标是 100℃ 下的运动粘度、水分、碱值和元素浓度分析,可选的是 40℃ 下的运动粘度、闪点、不溶物、醇含量、燃油稀释、磨粒浓度和微生物污染(该项目仅仅适用于润滑油工作温度小于 50℃ 的低、中速柴油机,或

收稿日期:2018-01-17

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2010CDB01505)

作者简介:田洪祥(1965-),男,江苏如东人,博士,教授,博士生导师,主要从事船舶机电设备监测诊断方面的研究。E-mail:hxtianwuhan@aliyun.com

者长久不用的备用柴油机),根据需要进行的是泡沫特性和磨粒浓度分析。国内柴油机换油标准是 GB/T7607—2010^[3],在该标准中,柴油机换油涉及的参数和指标有:100 ℃ 下的润滑油运动粘度变化百分率、闪点下降、碱值下降率、酸值增加、正戊烷不溶物质量分数、水分含量以及基于光谱分析的铁、铜、铝和硅元素浓度。实际工程应用中,受制于分析所需的人员、设备、时间或环境的制约,无法对标准中所列项目进行全面分析,这就需要从部分分析数据中仅可能多地挖掘可靠、有用信息,从而科学和经济地管理设备的运行和维修。研究和实践表明:柴油机润滑油常受到冷却液和柴油的污染,冷却液的污染可用快速水分仪监测^[4],柴油污染导致润滑油粘度下降^[5]。柴油机摩擦副易于磨损的摩擦副有缸套—活塞组件、曲轴—轴承和气缸盖组件等^[6],润滑油中携带有摩擦副的磨损信息,可通过原子发射光谱、分析式铁谱、铁量仪等进行分析^[7]。原子发射光谱技术因为分析速度快、重复性好和数字化表达等优点而获得了广泛地应用^[8],然而,无论是转盘电极还是等离子耦合,对于油样中大于 10 μm 的金属颗粒检测效率低^[9-10];分析式铁谱可以有效获得油样中铁磁性磨粒的尺寸、形貌和密度等信息,然而分析时间长和对人员要求高的特点限制了该技术的应用范围^[11];铁量仪可以快速分析油样中铁磁性磨粒的总量^[12],但是如果油样中有大尺寸的非铁磁性磨粒,对铁磁性读数有减少的影响^[13]。

本文将对某船舶连续工作 1 900 h 以上的 4 台柴油机润滑油样进行分析,并利用相关系数方法分析有关数据的有效关联性。

1 日常油样和分析仪器

1.1 日常油样

某船舶 4 台用作主机的柴油机,自 2016 年 4 月 15 日开始取第一个油样,至 2016 年 10 月 6 日最后取样,第 1 台主机工作了 2 480 h,取样 9 个;第 2 台工作了 2 635 h;取样 9 个;第 3 台工作了 1 920 h;取样 9 个;第 4 台工作了 1 920 h;取样 9 个;获得油样共计 36 个。

1.2 分析仪器

本研究利用爆裂法快速水分仪监测油样中的水分含量是否超过国标规定值;使用基于 Hele-Shaw 原理的油液粘度计,测量油样在 40 ℃ 下的运动粘度;利用美国超谱公司的 SPECTRO M 型转盘电极油料发射光谱仪测量油样中 21 个常见元素的浓度;借助于铁量仪测量油样中的铁磁性磨粒总量;同时还使用磁力方法

的装置测量油样中的铁磁性磨粒总量。

2 相关系数的数学模型

相关系数用于定量描述变量之间的相关程度。利用 Matlab 软件计算得到相关系数 R ,其语句为 $R = \text{corrcoef}(X)$, X 是一矩阵,其列表示与油样分析有关的参数,包括油料发射光谱数据,油样的粘度、铁量仪读数、磁力法的读数、水分含量和润滑油使用时间等,其行表示各个油样。

R 与 X 的协方差(矩)阵 $C = \text{cov}(X)$ 有关,其数学表达式如下:

$$R(i,j) = \frac{C(i,j)}{\sqrt{C(i,i)C(j,j)}} \tag{1}$$

计算得到的 P 值是基于测试参数之间是随机无关的假设,如果 $P(i,j)$ 小于某一值(最为常用的为 0.05 或 0.01),就认为相关系数 $R(i,j)$ 具有显著性。

$$\text{Cov}(i,j) = E\{[i - E(i)][j - E(j)]\} \tag{2}$$

式中: $E(i)$ —油样分析数据中的第 i 列的平均值,其余与此有关的表达,可类推。

分析参数中,包括 11 个发射光谱元素浓度,其单位是 μg/g;润滑油工作时间,单位是 h;还有润滑油粘度,单位是 40 ℃ 下的运动粘度 cSt。需要对参数进行归一化处理,以消除量纲和数量级对分析结果的影响,以利于后续的统计分析。

本研究对所分析的原始数据采用了标准化变换,标准化变化的公式如下:

设 p 维向量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ 的观测值矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \tag{3}$$

标准化变换后的观测值矩阵为:

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & x_{12}^* & \cdots & x_{1p}^* \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \cdots & x_{2p}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1}^* & x_{n2}^* & \cdots & x_{np}^* \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{s_{ij}}}, \tag{5}$$
$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, \tag{6}$$
$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$$

$$\sqrt{s_{ij}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2},$$
$$i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, p \quad (7)$$

式中: $\bar{x}_j$ — 变量 X_j 的观测值的平均值; S_{ij} — 变量 X_{ij} 的观测值的方差; $\sqrt{s_{ij}}$ — 标准差。

经过标准化变换后,矩阵 X^* 的各列的均值都是 0,标准差都是 1。

3 实验及结果分析

元素浓度是油料发射光谱分析所得,铁磁性磨粒由铁量仪和磁力方法分别得到共计 2 个测量值,水分含量由快速水分仪定性半定量测得,运动粘度由快速粘度计测得。

1 号柴油机 9 个油样的检测参数如表 1 所示。

表 1 1 号柴油机 9 个油样的测量参数

序号	元素浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)							
	Fe	Cr	Pb	Cu	Al	Si	Na	Mg
1	8.7	0.8	1.7	9.6	0.7	2.2	104.7	16.4
2	10.1	0.8	1.1	12.4	1.1	7.2	99.7	17.2
3	8.7	0.7	1.1	11.0	1.1	7.4	95.5	17.3
4	10.3	0.8	3.8	12.6	1.4	6.6	89.1	17.1
5	8.7	0.8	4.2	10.3	1.4	1.4	98.9	16.4
6	18.7	1.4	1.9	19.5	1.8	11.3	122.1	19.4
7	8.9	0.6	0.7	10.9	1.4	4.8	95.6	16.8
8	10.0	0.8	1.5	12.8	1.4	5.4	106.6	17.8
9	11.3	0.8	1.3	13.5	1.3	5.6	104.1	19.2

续表 1

序号	元素浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)			滑油使用时间/ h	铁量仪均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	磁力方法均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	水分测量/ ($\text{w} \cdot \text{w}\%^{-1}$)	实际粘度值/ cst@ 40 $^{\circ}\text{C}$
	Ca	P	Zn	T	FR	MR	W	η
1	2 257	912.8	840.6	300	-6.8	0	<0.2	120.2
2	2 333	769.6	947.7	432	-8.3	-0.001 6	<0.2	117.4
3	2 315	748.1	900.6	700	-8.8	0	<0.2	116.8
4	2 177	755.3	926.4	700	-6.0	0	<0.2	112.1
5	2 220	820.5	878.7	980	-7.3	0	<0.2	112.3
6	2 173	785.7	919.8	1 200	-3.5	-0.000 6	<0.2	108.0
7	2 291	749.9	930.2	870	-5.5	0	<0.2	104.5
8	2 361	706.9	956.6	920	-5.8	-0.001	<0.2	104.2
9	2 502	718.0	1 123.0	1 280	-7.0	0	<0.2	104.5

油料发射光谱共获得 23 个元素的浓度,但是许多元素浓度对监测润滑油是无意义或者意义不大,故略去,例如:C、H 元素浓度作为仪器参考通道之用;Sn、Ni、Ag、B、Mo、Ti、V、Mn 和 Cd 元素浓度很小,一方面是机器零部件中没有相关元素的材料或者润滑油中没有该元素,很少的读数常常是仪器的本底噪音读数(作为测量仪器,是被允许的),故略去。

若油样中有铁磁性磨粒,则铁量仪的读数为正值;纯润滑油没有使用时,铁磁性读数是负值。铁量仪对铁磁性大颗粒敏感,对于柴油机而言,读数大于 30 $\mu\text{g}/\text{g}$ 时,引起注意;读数大于 60 $\mu\text{g}/\text{g}$ 时,报警。铁

量仪读数和磁力方法读数具有较好的相关性^[14],油样铁量仪读数和磁力方法的读数均在正常范围之内,不再做深入研究。

本研究利用上述所介绍的归一化对表 1 中的 11 个元素浓度、润滑油工作时间和粘度进行处理,并计算相关性,如表 2 所示。

表 2 中第一行表示元素(元素符号和元素名称在表 3 中有一一对应)、柴油机工作时间 T 和润滑油 40 $^{\circ}\text{C}$ 下的运动粘度 η 。表 2 中数据为各参数之间的相关系数(未考虑置信概率)。

表 2 中润滑油中典型元素的来源如表 3 所示^[15]。

表 2 1 号柴油机典型元素和润滑油粘度及工作时间之间的相关系数

相关因素	元素浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)											工作时间 /h	40 ℃ 粘度 /cst
	Fe	Cr	Pb	Cu	Al	Si	Na	Mg	Ca	P	Zn	T	η
Fe	1.00	0.96	-0.04	0.98	0.69	0.78	0.80	0.80	-0.26	-0.10	0.18	0.53	-0.31
Cr	0.96	1.00	0.10	0.91	0.63	0.70	0.80	0.66	-0.45	0.09	-0.07	0.40	-0.13
Pb	-0.04	0.10	1.00	-0.07	0.26	-0.31	-0.22	-0.28	-0.56	0.26	-0.28	0.09	0.12
Cu	0.98	0.91	-0.07	1.00	0.75	0.84	0.74	0.86	-0.17	-0.29	0.29	0.58	-0.40
Al	0.69	0.63	0.26	0.75	1.00	0.54	0.39	0.54	-0.30	-0.48	0.21	0.75	-0.67
Si	0.78	0.70	-0.31	0.84	0.54	1.00	0.43	0.70	-0.12	-0.44	0.22	0.29	-0.18
Na	0.80	0.80	-0.22	0.74	0.39	0.43	1.00	0.67	-0.03	0.13	0.08	0.41	-0.24
Mg	0.80	0.66	-0.28	0.86	0.54	0.70	0.67	1.00	0.33	-0.47	0.68	0.72	-0.53
Ca	-0.26	-0.45	-0.56	-0.17	-0.30	-0.12	-0.03	0.33	1.00	-0.48	0.78	0.22	-0.32
P	-0.10	0.09	0.26	-0.29	-0.48	-0.44	0.13	-0.47	-0.48	1.00	-0.68	-0.54	0.68
Zn	0.18	-0.07	-0.28	0.29	0.21	0.22	0.08	0.68	0.78	-0.68	1.00	0.60	-0.61
T	0.53	0.40	0.09	0.58	0.75	0.29	0.41	0.72	0.22	-0.54	0.60	1.00	-0.82
η	-0.31	-0.13	0.12	-0.40	-0.67	-0.18	-0.24	-0.53	-0.32	0.68	-0.61	-0.82	1.00

表 3 润滑油中典型元素的来源

元素/符号	磨损金属	添加剂	污染物	主要原因	次要原因
铁/Fe	✓		✓	气缸、轴、齿轮、轴承滚动体、保持架、箱体。	锈、腐蚀磨损。
铬/Cr	✓			活塞环、活塞销、含铬气缸。	滚动轴承的铸铁滚动体、硬钢轴颈。
铅/Pb	✓		✓	滑动轴承、主轴承、电镀、泵。	油漆、焊料、铅封件。
铜/Cu	✓	✓		轴承、连杆衬套、保持架、轴射、推力轴承阀导管、润滑油中冷器泵、壳体。	润滑剂添加剂。
铝/Al	✓	✓		活塞、径向轴承、吹风机、涡轮增压叶片、推力轴承、扭矩转换器、泵叶片。	灰尘、铜铝合金流动部分,保持架、轴承座、箱体。
硅/Si	✓	✓	✓	砂、污垢、尘土、消泡剂。	铸铁合金。
钠/Na		✓	✓	可在一些新油中发现冷却水添加剂。	冷却液缓蚀剂、海水、润滑脂。
钙/Ca		✓	✓	添加剂。	水、润滑脂。
镁/Mg		✓		添加剂。	海水。
磷/P	✓	✓		添加剂。	齿轮的表面抛光。
锌/Zn		✓	✓	添加剂。	镀锌钢板、电镀层、油脂。

在 99% 置信概率条件下具有显著性相关的相关系数如表 4 所示。

表 4 1 号柴油机油液监测参数有显著性的相关系数

相关因素	元素浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)					工作时间 /h
	Cr	Cu	Si	Na	Mg	T
Fe	0.96	0.98		0.80	0.80	
Cr		0.91		0.80		
Cu			0.84		0.86	
η						-0.82

表 4 中第一行表示金属元素铬/Cr、铜/Cu、硅/Si、钠/Na、镁/Mg 和柴油机工作时间/ T ;表 4 中第一列表示金属元素铁/Fe、铬/Cr、铜/Cu、润滑油 40 ℃ 运动粘度/ η 。为简化表达,表 4 仅仅列出了具有显著相关的数据。

在置信概率 99% 时,具有显著相关性的参数及其相关系数如表 4 所示。

从表 4 中可以看出:铁元素与铬、铜、钠和镁元素具有高的相关系数,根据元素的来源结合柴油机的工作原

理,可以解释为:活塞环中含有铬,气缸套为铸铁机件,活塞环与气缸套的磨损同步;曲轴中含有铁,主轴承、推力轴承含有铜,工作时同步磨损;钠和镁一方面是添加剂元素,另外一方面冷却水中含有钠,海水中还有钠和镁,二者同步增加时,一般认为海水了;即推理认为该柴油机在工作中进了少量海水,虽然没有超过0.2% 质量比例的报警浓度,但是明显增加了含铁机件的磨损。

铬元素除了与铁元素相关外,还与铜、钠元素相关,连杆衬套为铜合金,活塞销表层含铬,这一对摩擦副在工作中同步磨损,且占比比较大;同时铬元素受海水影响。

铜元素除了与铁、铬元素相关外,还与硅和镁元素相关,硅元素一般来源与灰尘、砂砾,还有肯呢个来自铸铁机件,可以推论润滑油中进了一定的灰尘,或者铁元素来自铸铁,铸铁中的硅与铜增加,同时铜元素受海水影响。

润滑油工作时间与润滑油粘度存在负相关,即随

着润滑油工作时间的增加,润滑油的粘度呈现下降趋势,是由于润滑油中进柴油引起的。具体原因可能是:回油管的油通过气缸盖表面的摇臂机构随同润滑油一起流入曲柄箱;或者燃烧室燃油雾化不良或没有燃烧,

燃油顺着汽缸壁流入曲柄箱。
将 4 台柴油机 36 个油样进行归一化处理和相关系数分析,并在 99% 置信概率下具有显著相关的参数,如表 5 所示。

表 5 4 台柴油机油液监测参数有显著性的相关系数

相关因素	元素浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)							工作时间/h
	Cr	Cu	Si	Na	Mg	Ca	Zn	T
Fe	0.81	0.91	0.51	0.61	0.64			
Cr		0.72	0.47	0.51				
Cu			0.48	0.42				
Al								0.56
Na					0.62			
Mg						0.64	0.69	
Ca							0.74	
P							-0.46	
η								-0.42

4 台柴油机具有显著性的相关系数与 1 号柴油机相比,除了相关系数的具体值稍有差异外,揭示的相关性更加丰富,增加的有 4 个部分:

(1) 硅元素与铁、铬元素相关,这可解释硅元素来源与铸铁机件,且铁元素来自铸铁机件,因为铁与铬高度相关,硅也与铬相关;

(2) 铝元素与润滑油工作时间成正比,结合柴油机零部件的组成,铝元素来自连杆大端轴瓦和活塞,预示轴瓦正常工作,反映了随工作时间增加,铝元素浓度增加;

(3) 钠和镁元素相关,说明了润滑油中有少量进海水的情况,但是含水量没有超过 0.2% 的报警值;

(4) 锌与镁、钙、磷元素有相关性,且锌与镁、钙正相关,锌与磷负相关。润滑油中的钙、镁盐主要来源于清净分散剂,如磺酸钙盐或磺酸镁盐;锌盐主要来自氧化抑制剂,如二烷基二硫待磷酸锌,也称为锌盐 ZD-DP;磷元素还存在于极压抗磨添加剂,如三甲苯基磷酸酯、有机磷酸酯等。

通过具体的元素浓度值,可以看出:当润滑油刚加入时,磷元素浓度最高,随着工作时间的增加,磷元素浓度呈下降趋势,而镁、钙和锌呈现稳定或稍有增加的趋势,可解释为作为含磷的润滑油极压添加剂,使用过程中是耗损的。

4 结束语

本文对船舶柴油机的润滑油进行了取样和分析,测量数据表明:所有油样的水分都没有超过 0.2% 的换油门阈值;铁量仪和磁力方法的读数没有异常,说明油样中没有异常的铁磁性磨粒,磨损处于正常状态。

笔者借助于相关系数方法分析了油样的发射光谱数据中典型的元素浓度、粘度和工作时间之间的相关

系数,在 99% 置信概率下,润滑油的运动粘度与润滑油使用时间成负相关;钠和镁元素正相关,可推断润滑油中受到少量的海水的污染,但是其含量没有超过 0.2% 的换油指标值;铁与铬、铜、硅、钠、镁等元素正相关,表明即使少量的海水污染也显著增加了含铁元素机件(如气缸套、曲轴等)的磨损,气缸套、曲轴和活塞环同步磨损且占主要部分,含铜机件如连杆衬套、推力轴承等与含铁机件的磨损同步;活塞或连杆大端轴瓦的磨损与润滑油的工作时间正相关;添加剂元素中,锌与钙和镁元素正相关,锌与磷元素负相关,结合具体浓度值的变化,在润滑油刚刚加入时,磷元素浓度最高,使用中,其浓度值逐步下降,可解释为含磷的润滑油极压添加剂,使用过程中是耗损的。

参考文献 (References):

[1] LARRY A T , ALLISON M T. Machinery oil analysis—methods, automation & benefits: a guide for maintenance managers, supervisors & technicians [M]. 3rd Edision. Park Ridge:STLE,2008.

[2] ASTM D6224 - 16. Standard practice for in-service monitoring of lubricating oil for auxiliary power plant equipment [S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials,2016.

[3] GB/T 7606—2010. 柴油机换油指标 [S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[4] 田洪祥,刘 瑜,王 鑫. 船舶润滑油和液压油水分现场测量研究 [J]. 中国修船,2009,22(2):35-37.

[5] 龚小龙. 柴油机油被燃油稀释的监测研究 [D]. 武汉:海军工程大学动力工程学院,2016.

[6] 严新平,白秀琴,袁成清. 船舶摩擦学 [M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2014.

[7] 杨其明,严新平,贺石中. 油液监测分析现场实用技术

- [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [8] 田洪祥,李 婧,孙云岭,等. 在用润滑油发射光谱分析技术评述[J]. 润滑与密封,2017,42(9):129-133.
- [9] ASTM D 6595 – 00. Standard test method for determination of wear metals and contaminants in used lubricating oils or used hydraulic fluids by rotating disc electrode atomic emission spectrometry [S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials,2011.
- [10] ASTM D 5185 – 13. Standard test method for determination of additives elements, wear metals and contaminants in used lubricating oils and determination of selected elements in base oils by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials,2013.
- [11] 萧汉梁. 铁谱技术及其在机械监测诊断中的应用[M]. 北京:人民交通出版社,1993.
- [12] TIAN Hong-xiang , ZHANG Chun-hui , SUN Yun-ling . Development of sensor to monitor ferromagnetic debris based on electromagnetic induction principle[J]. **Applied Mechanics and Materials**,2013(336-338):388-391.
- [13] 王胜杰. 基于磁力和电磁感应的金属磨粒监测方法的研究[D]. 武汉:海军工程大学动力工程学院,2015.
- [14] 张 奇,田洪祥,何 伟,等. 在用润滑油金属磨粒快速检测研究[J]. 设备管理与维修,2017(6):125-128.
- [15] ASTM D 4378 – 13. Standard practice for in-service monitoring of mineral turbine oils for steam, gas, and combined cycle turbines [S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials,2013.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

田洪祥,李 婧,孙云岭,等. 基于相关系数的柴油机润滑油监测研究[J]. 机电工程,2018,35(10):1042 – 1047.

TIAN Hong-xiang, LI Jing, SUN Yun-ling, et al. Oil monitoring for diesel engine based on correlation coefficient[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(10):1042 – 1047.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1035 页)

- [6] 田文杰,牛文铁,常文芬,等. 数控机床几何精度溯源方法研究[J]. 机械工程学报,2014,50(7):128-135.
- [7] 刘 恩,曾 凯,何晓聪,等. 基于几何误差灵敏度的卧式数控镗床运动精度分析[J]. 机械设计,2017,34(10):68-74.
- [8] 韩飞飞. 数控精密制造中机床几何误差的理论建模与试验研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2013.
- [9] SCHWENKE H, KNAPP W. Geometric error measurement and compensation of machines-an update[J]. **CIRP Annals Manufacturing Technology**,2008,57(2):660-675.
- [10] 何振亚. 五轴数控机床几何与热致空间误差检测辨识及模型研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2014.
- [11] 余治民,刘子建,艾彦迪,等. 大型数控龙门导轨磨床几何误差建模与基于可靠性理论的精度分配[J]. 机械工程学报,2013,49(17):142-151.
- [12] 黄家贤. 导程精度指标($V_{2\pi}$ 、 V_{300} 、 V_u)的新算法[J]. 电子测量与仪器学报,1995,9(4):25-28.
- [13] GB/T17587. 4—2008. 滚珠丝杠副第4部分:轴向静刚度[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [14] 王淑坤. 滚珠丝杠进给系统定位精度分析[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2006.
- [15] 宋现春,张承瑞. 精密丝杠热变形误差的计算模型及其简化计算[J]. 山东工业大学学报:工学版,2000,30(2):160-163,168.
- [16] GB/T17587. 3—1998. 滚珠丝杠副第3部分:验收条件和验收检验[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [17] 潘柏松,谢少军,DU Xiao-ping,等. 随机变量和非独立区间变量下的可靠性序列迭代算法[J]. 中国机械工程,2015,26(12):1569-1575,1583.
- [18] 康 方,范晋伟. 数控机床制造精度的优化分配方法[J]. 机械科学与技术,2008,27(5):588-591.
- [19] HSIEH K L. The study of cost-tolerance model by incorporating process capability index into product lifecycle cost [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2006,28(5):638-642.
- [20] 邱 彪. 倒装芯片键合机精度优化设计方法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学机电工程学院,2014.
- [21] JI S, LI X, MA Y, et al. Optimal tolerance allocation based on fuzzy comprehensive evaluation and genetic algorithm [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2000,16(7):461-468.
- [22] 邢亚飞,金晓怡,季春云. 新型粉末包装机往复式横封机构设计[J]. 轻工机械,2017,35(6):68-71.
- [23] 赵 强,阎绍泽. 基于敏感度的运动模拟台精度综合[J]. 中国机械工程,2006,17(5):478-481.

[编辑:周昱晨]