

文章编号:1671-6833(2009)04-0076-05

齿轮磨损试验光谱油样分析及建模研究

冯伟^{1,2}, 谢小鹏¹, 刘 燊¹

(1. 华南理工大学 汽车摩擦学与故障诊断研究所, 广东 广州 510641; 2. 广州航海高等专科学校 轮机系, 广东 广州 510725)

摘 要: 齿轮疲劳磨损试验油样光谱分析研究表明: Fe、Cr 元素质量分数表现磨损规律不明显, Cu 元素表现明显, 元素质量分数梯度参数更能反映齿轮的磨损变化规律; 齿轮疲劳磨损试验大约在 50 h 后进入正常磨损期. 在此基础上, 提出了把 Cr 元素质量分数拆分为线性趋势项和残差序列项, 并对其进行 AR 时序组合建模和预测分析, 经光谱试验数据检验, 取得了满意的效果. 该研究为机械设备的摩擦磨损分析、状态监测和故障预测诊断提供了有益的途径.

关键词: 齿轮; 磨损试验; 光谱油样分析; 时序建模

中图分类号: TH 171.1

文献标识码: A

0 引言

光谱分析技术是最早应用于机械设备状态监测和故障诊断并取得成功的油液检测技术之一^[1-3]. 它主要是根据油样中各种元素在受到激发时所发射的特定波长的光谱来检测油样元素类型和含量的. 齿轮箱传动是目前现代机械设备广泛采用的主要运动形式之一. 与此同时, 相关的统计分析也表明^[4-5], 造成机械设备故障和失效的主要原因是由于机械设备的磨损, 约占 80% 左右. 基于油液光谱分析的齿轮箱磨损状态监测, 正是利用油液光谱分析技术, 监测齿轮箱在磨损试验时用润滑油中磨损金属颗粒浓度数据的变化, 分析判断齿轮箱的磨损状态及特点, 并通过时序建模方法准确地预报磨损趋势^[6], 则在一定程度上掌握齿轮箱以后的运行状况, 为将来的检测与维修提供重要的信息. 因此, 对润滑油中磨损颗粒的浓度变化规律进行有效合理的建模, 预测油料光谱数据的变化趋势, 是准确反映机械设备摩擦副磨损特征和磨损规律的关键.

1 试验齿轮磨损特点

1.1 试验装置及方案

齿轮箱采用韶关宏大齿轮厂生产的 SG135 -

2 系列的 K727840ZW 型号汽车齿轮变速箱, 该变速箱为 5 级变速箱, 具有 6 个档位 (包括一个倒档位), 试验采用 3 档. 图 1 为试验用的齿轮箱传动简图及润滑油取样位置. 齿轮、轴承基本参数如表 1, 润滑油采用普通车辆齿轮油, 根据国标 GB7631-89 的质量分类原则, 为 L-CLC 级, 实测润滑油的 100 ℃ 运动黏度为 6.457 mm²/s. 试验输入扭矩为 250 N·m, 输入转速 1 800 r/min.

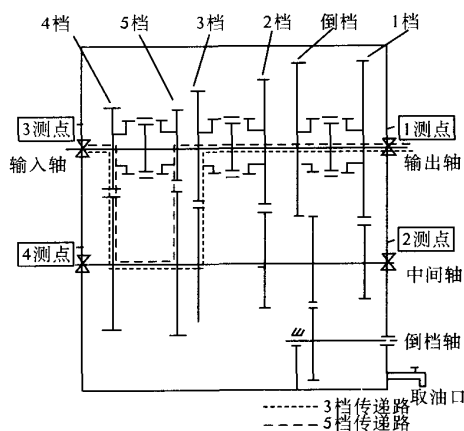


图 1 变速器传动简图及测点分布

Fig. 1 The driving system diagram of gearbox and testing Point distribution

收稿日期:2009-04-03; 修订日期:2009-07-16

基金项目:广东省汽车工程重点研究实验室项目(2007A03013)

作者简介:冯 伟(1976-),男,四川达州人,华南理工大学博士研究生,主要研究方向为摩擦学原理与应用,故障诊断分析方法.

由于齿轮箱中部的检视口装有温度传感器,润滑油取样口设置在放油口处.每次取样时设备至少运行 1 h,油温 70 ~ 80 ℃,取样前先放掉一部分油样,取样周期为前 30 h 每 2 h 一次,后每 5 h 取样一次,每次所取油样量为 20 mL 左右,并贴上标签,注明取样编号、时间及油温.试验运行到 520 h 左右时,齿轮箱运转振动加剧,噪音增大,开箱检查发现滚动轴承保持架发生碎裂而终止试验,齿表也出现一定程度的磨损、划痕.光谱分析采用的仪器为美国 Baird 公司生产的 MOAII 型发射光谱仪,元素的测量精度是 $0.01 \times 10^{-6} \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$,分析时间是 30 s.

表 1 齿轮轴承基本参数

Tab.1 Basic parameters of gear and bearing

项目	齿轮	轴承
材料	20CrMnTi	20Cr
硬度/HRC	58 ~ 64	58 ~ 64
渗碳深度/mm	1.1 ~ 1.5	1.2 ~ 1.6

1.2 光谱分析的齿轮磨损特点

通过光谱仪测得润滑油中的磨损元素,选取的 Fe、Cu、Cr 元素的质量分数值随运转时间变化情况如图 2 ~ 图 4 所示.图 5 是 Cr 元素质量分数梯度变化图.元素质量分数梯度能表示机械摩擦副的磨损率,是反映齿轮和轴承磨损程度和趋势变化的一个重要指标.因为在闭式齿轮箱润滑油光谱检测过程中,Fe、Cu、Cr 元素质量分数均很高,尤其以 Fe 为最高,在 520 h 的取样测试时,测试结果显示大于 $1\,200 \times 10^{-6} \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$.如果单考虑磨损元素质量分数就很难判断齿轮箱出现异常,因此应综合考虑元素质量分数的变化率,即元素质量分数梯度,其表达式可表示为

$$g_i(t) = \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \tag{1}$$

式中: $g_i(t)$ 为 i 元素在齿轮箱运转 t 小时的质量分数增长量; x_i 、 x_{i-1} 分别为相邻两次被测油样的质量分数; Δt 相邻两次油样的取样时间间隔.

从 Fe、Cu、Cr 的质量分数变化图分析可知,当齿轮箱运行大约 50 h 后,摩擦副结束磨合阶段而进入正常磨损阶段,此时图 3 中 Cu 元素质量分数表现为一个平缓的发展趋势,而 Fe、Cr 元素质量分数随着运转时间增加,两元素的质量分数持续增长,且 Fe 元素质量分数增长迅速.综合考虑元素质量分数梯度的变化,如图 5 所示,Cr 元素质量分数梯度在运行前 50 h 左右时波动范围较大,50 h 左右后波动变化趋于平稳,表明摩擦副确实进入稳定的磨损期.图 2 ~ 图 4 中,在 350 h 处,Fe、Cu、Cr 元素质量分数出现明显下降,图 5 中 Cr 元素质量分数梯度出现一个大范围的负波动,这是由于一段时间的取样,检查发现齿轮箱润滑油液面已低于规定的最低刻度线,在此刻添加了 2 L 新油稀释了齿轮箱试验在用油,导致润滑油磨粒浓度下降的原因.之后 Fe、Cu、Cr 元素质量分数继续上升,但 Cu 元素质量分数上升有限,从 400 h 之后,Cu 元素质量分数维持在 $70 \sim 80 \times 10^{-6} \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$.由于 Cu 元素在润滑油中的沉积率较高,而采样又是从齿轮箱箱底放油口采集,分析原因是由 Cu 合金做成的保持架的磨损在齿轮箱这个摩擦学系统内处在一个恒定状态,就如处在图 3 中 250 ~ 350 h 运行阶段一样,添加的新油稀释了 Cu 磨粒的浓度,使其维持在一个水平,但到 500 h 左右后,又开始增长.从图 5 的 Cr 元素质量分数梯度变化看,齿轮的磨损仍处在正常磨损期.

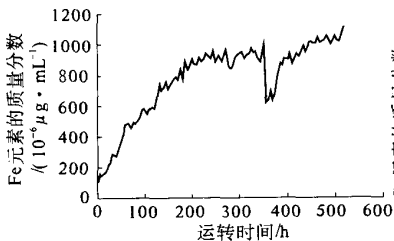


图 2 Fe 元素质量分数变化图
Fig.2 Change diagram of Fe mass fraction

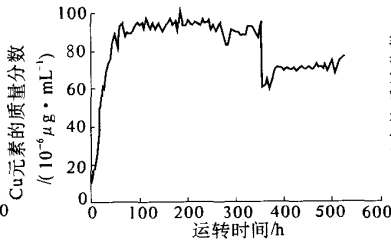


图 3 Cu 元素质量分数变化图
Fig.3 Change diagram of Cu mass fraction

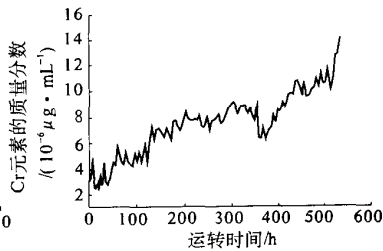


图 4 Cr 元素质量分数变化图
Fig.4 Change diagram of Cr mass fraction

2 磨损元素含量的数据处理

由表 1 齿轮轴承材料分析,用 Ti 元素表现齿轮磨损最好,但 Ti 元素在光谱检测中含量非常少,有时连续一段时间都未检测到.又由于轴承亦形成弹流润滑,其磨损量相比齿轮较少,因此采用 Fe、Cr 元素具有较好的代表性,此处分析选择 Cr 元素.由图 4 可知,试验运行到在 350 h 时由于添加了新油,Cr 元素的质量分数明显下降,分析可知,此时齿轮与轴承的磨损均处于稳定磨损阶段,润滑油中的 Cr 元素的质量分数应稳定地增长.如果以此数据变化做分析,便表现不出齿轮箱润滑油中磨粒元素质量分数的真实变化.要想通过 Cr 的质量分数正确反映齿轮箱摩擦副的磨损情况,就必须排除换油对 Cr 浓度的影响^[7].

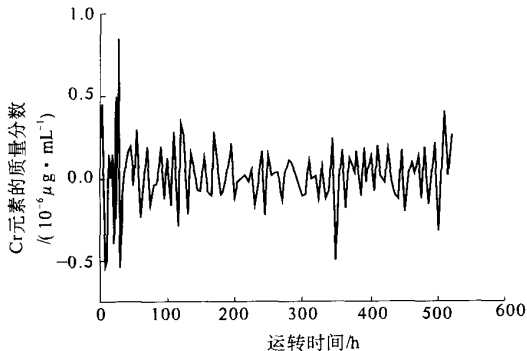


图 5 Cr 元素质量分数梯度变化图

Fig. 5 Change diagram of Fe mass fraction gradient

图 6 是根据图 2 中 Cr 元素的质量分数变化做出的消除添油影响的原理图, t_1 为加油前最后一个光谱测量点, t_2 加油后第一个光谱测量点.从图 6 看出:添加润滑油对 Cr 元素的质量分数变化有很大影响.消除添油对 Cr 元素的质量分数影响方法就是对添油前和添油后的 Cr 元素质量分数做回归分析处理,得到 Cr 元素质量分数随时间变化关系.加油前的数据回归关系式在 t_1 时刻对应的 Cr 元素质量分数值 y_2 ,对添加油后的时间关系做外推计算,得到加油时刻 t_1 时的 Cr 元素质量分数值 y_1 ,如图 6 所示,由此求出添油后 Cr 元素质量分数变化量 ΔW ,将加油后从第一个光谱测量点到整个试验最后一个测量点的元素质量分数值相应的加上 ΔW ,就可以得到 Cr 元素在系统中消除加油后的质量分数值.根据图 2 曲线特点,修正后的曲线如图 7 所示.

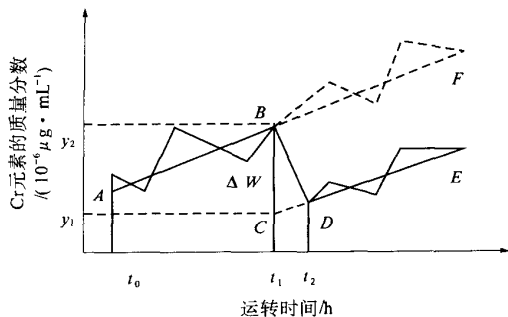


图 6 消除添油影响原理图

Fig. 6 Schematic diagram of eliminating the impact of adding oil

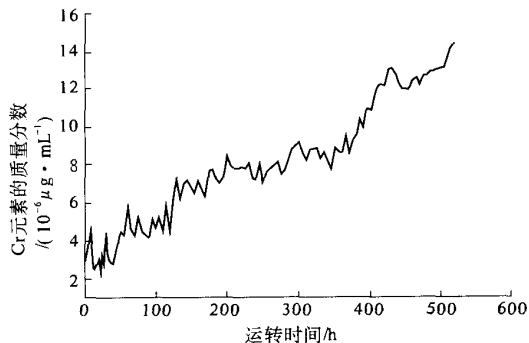


图 7 Cr 元素修正后的趋势图

Fig. 7 Trend diagram of Cr amended

3 齿轮磨损建模

3.1 时序建模方法

根据时间序列分析理论^[8],对零均值的平稳时序 $\{x_t\}$,若 x_t 的取值不仅与其前 n 步的各个取值 $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}$ ($n=1, 2, \dots$) 有关,而且还与前 m 步的各个干扰 $a_{t-1}, a_{t-2}, \dots, a_{t-m}$ ($m=1, 2, \dots$) 有关,该时间序列可表示为线性差分方程的形式,即

$$x_t - \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{t-i} = a_t - \sum_{j=1}^m \theta_j a_{t-j} \quad (2)$$

$$a_t \sim \text{NID}(0, \sigma_a^2)$$

式(2)即为 n 阶自回归、 m 阶滑动平均模型的表达式,简称 ARMA 模型.式中, φ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为自回归系数; θ_j ($j=1, 2, \dots, m$) 为滑动平均系数. a_t 为 m 个相互独立的白噪声序列, σ_a^2 为其方差.

引入延迟算子 B , 即 $Bx_{t+1} = x_t$, 则 ARMA(m, n) 模型可表示为

$$x_t = \frac{\theta(B)}{\varphi(B)} a_t \quad (3)$$

式中: $\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_n B^n$,

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \cdots - \theta_n B^n.$$

若 θ_j 全为 0, 而 φ_i 不全为 0, 则式(3)变为

$$x_t = \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{t-i} + a_t \quad (4)$$

式(4)为 n 阶自回归模型的表达式, 简称 AR (autoregressive) 模型. 若 φ_i 全为 0, 而 θ_j 不全为 0, 则式(3)变为

$$x_t = - \sum_{j=1}^m \theta_j a_{t-j} + a_t \quad (5)$$

式(5)为 m 阶滑动平均模型的表达式, 简称 MA (Moving Average) 模型. ARMA 模型或 MA 模型都可用高阶 AR 模型来逼近. 由于 AR 模型的估计得到的是线性方程, 在计算上 AR 比 ARMA 以及 MA 模型有明显优点, 因此 AR 模型的应用更为广泛. 针对光谱分析 Cr 元素质量分数即采用 AR 时序建模方法.

3.2 建立 AR 时序模型

由齿轮箱磨损特点知, 运行约 50 h 后齿轮箱进入稳定磨损阶段, 因此, 建模采用数据段为 50 ~ 450 h, 450 ~ 520 h 后的数据作为检验使用. 设图 7 中 Cr 元素质量分数组成一时间序列 $\{x_t\}$, 分析 $\{x_t\}$ 发现由 Cr 元素质量分数组成的时间序列是一非平稳时间序列, 但由于齿轮箱磨损处于稳定磨损阶段, 因此该序列中含有线性趋势项, 设为 d_t , 提取 $\{x_t\}$ 中所含的非平稳部分, 得到残差序列 $\{\varepsilon_t\}$, 即 $\varepsilon_t = x_t - d_t$. 然后对 $\{\varepsilon_t\}$ 建立 AR 模型. 对 $\{d_t\}$ 直接采用线性回归建模: $d_t = \beta_0 + \beta_1 t$, 并从 $\{x_t\}$ 中估计出, 最后将 d_t 与 ε_t 组合得到最终模型. 由此建立以下 Cr 元素质量分数趋势组合模型:

$$x_t = d_t + \varepsilon_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varphi_1 \varepsilon_{t-1} + \varphi_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \varphi_n \varepsilon_{t-n} + a_t \quad (6)$$

式中: $a_t \sim \text{NID}(0, \sigma_a^2)$, n 为序列 ε_t 的 AR 模型阶数.

根据分析, 对图 7 中 Cr 元素修正后的曲线图提取趋势项后, 得到 d_t 和 ε_t 趋势图, 如图 8 所示.

对图 8 的非平稳时间序列 $\{\varepsilon_t\}$, 求出自相关函数 $\hat{\rho}_k$ 与偏自相关函数 $\hat{\varphi}_{kk}$, 利用 $\hat{\varphi}_{kk}$ 对 AR 模型的截尾特性来判定模型形式及初步确定 AR 模型的阶数^[8]. 图 9 给出自相关函数 $\hat{\rho}_k$ 和偏自相关函数的估计值 $\hat{\varphi}_{kk}$ 随相关延迟 k 的变化规律. 由图可见 $\hat{\rho}_k$ 和 $\hat{\varphi}_{kk}$ 衰减迅速, 其偏自相关函数估计值在 $k > 4$ 后截尾. 故 $\{\varepsilon_t\}$ 的模型结构选定为 AR(4).

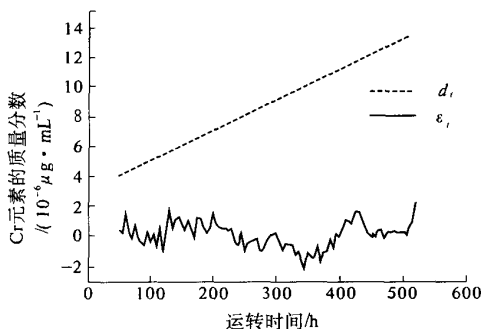


图 8 提取趋势项后的 d_t 、 ε_t 图

Fig. 8 d_t 、 ε_t diagram after trend extraction

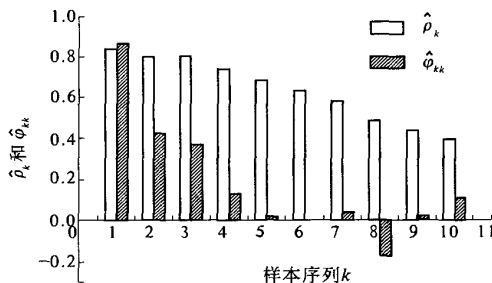


图 9 $\hat{\rho}_k$ 和 $\hat{\varphi}_{kk}$ 变化图

Fig. 9 Change diagram of $\hat{\rho}_k$ and $\hat{\varphi}_{kk}$

3.3 模型参数估计

对建立模型的参数采用最小二乘法估计, 令

$$S = \sum_t a_t^2 = \sum_t (\varepsilon_t - \varphi_1 \varepsilon_{t-1} - \cdots - \varphi_n \varepsilon_{t-n})^2$$

取极小值. 设 S 使取最小值的自回归系数值为 $\hat{\varphi}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$), 于是

$$\frac{\partial S}{\partial \varphi_i} \Big|_{\varphi_i = \hat{\varphi}_i} = -2 \sum_{t=1}^n (\varepsilon_t - \hat{\varphi}_1 \varepsilon_{t-1} - \cdots - \hat{\varphi}_n \varepsilon_{t-n}) \varepsilon_{t-i} = 0$$

整理可得如下线性方程:

$$\sum_{i=1}^n (\hat{\varphi}_1 \varepsilon_{t-1} + \hat{\varphi}_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \hat{\varphi}_n \varepsilon_{t-n}) \varepsilon_{t-i} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_t \varepsilon_{t-i}$$

对上式, 求解得 $\varphi_1 = -0.2769$, $\varphi_2 = 0.4564$, $\varphi_3 = -0.3915$, $\varphi_4 = 0.4787$, $\sigma_a^2 \approx 0$

于是建立的拟合参考模型为

$$\hat{x}_t \Big|_{Cr} = 3.0277 + 0.02t - 0.2769 \varepsilon_{t-1} + 0.4564 \varepsilon_{t-2} - 0.3915 \varepsilon_{t-3} + 0.4787 \varepsilon_{t-4}$$

用 x_{t-i} 表示即为

$$\hat{x}_t \Big|_{Cr} = 2.2203 + 0.0146t - 2.769x_{t-1} + 0.4564x_{t-2} - 0.3915x_{t-3} + 0.4787x_{t-4}$$

式中: $\hat{x}_t \Big|_{Cr}$ 为齿轮箱运行 t 时刻的 Cr 元素质量分数预报值, $\times 10^{-6} \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; x_{t-i} 为 t 时刻前每隔 5 h 采样所测得的 4 个 Cr 元素质量分数值, $\times 10^{-6} \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$.

表 2 列出了对齿轮箱运行 450 h 后的 Cr 元素质量分数预测结果与测试结果的比较,从表中可看出该模型对 Cr 元素质量分数进行了很好的逼近,说明 450 h 后齿轮副的磨损仍呈线性变化,并没有表现出明显异常,但 520 h 时的油样分析测试值与预报值误差最大,有异常发展的趋势。

表 2 Cr 元素质量分数预测结果与测试结果值
Tab. 2 Forecasting spectral data and the testing data of Cr mass fraction

运转时间/h	455	460	465	470	475	480	485	490	495	500	505	510	515	520
测试值/ ($10^{-6}\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	12.0	12.5	12.7	12.2	12.8	12.8	13.0	13.0	13.1	13.2	13.2	13.8	14.3	14.6
预报值/ ($10^{-6}\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	12.4	12.3	12.1	12.3	12.4	12.3	12.9	12.4	12.9	12.9	13.0	13.1	13.0	13.3
误差/%	3.33	1.60	4.72	0.82	3.12	3.91	0.77	4.62	1.53	2.27	1.52	5.07	9.09	8.90

4 结论

- (1) Fe、Cr 元素质量分数持续增长,表现磨损规律不明显, Cu 元素质量分数曲线呈阶段性变化,表现磨损规律明显;
- (2) 油样光谱分析的元素质量分数梯度参数更能反映齿轮的磨损变化规律;
- (3) 齿轮油样光谱分析表明, 齿轮疲劳磨损试验大约经过 50 h 左右的磨合后进入正常磨损期;
- (4) 建立了 Cr 元素质量分数的 AR 分析模型,该模型的预测值与试验测试值非常吻合,同时也表明齿轮磨损试验仍具有呈时间线性序列关系变化,齿面的磨损异常表现并不明显。

参考文献:

[1] 杨其明,严新平,贺石中,等. 油液监测分析现场应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
[2] STUART A D, KIRK T B, STACHOWIAK G W.

Spectroscopic measurement of used lubricating oil quality[J]. Applied Spectroscopy, 1989,2(2):55-60.
[3] CANECA A R, PIMENTEL M F, ROBERTO KAWAKAMI HARROP GALVÃO, et al. Assessment of infrared spectroscopy and multivariate techniques for monitoring the service condition of diesel-engine lubricating oils[J]. Talanta, 2006,70(2):344-352.
[4] 屈梁生,何正嘉. 机械故障诊断学[M]. 上海:科学技术出版社,1986.
[5] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 第二版. 北京:清华大学出版社,2002.
[6] GAN M L, YANG Z H. Time-Series modeling and fault forecast study on spectral analysis of lubricating oil[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2001,18(1):70-86.
[7] 徐泰富,严新平,盛晨兴. 柴油机油液光谱分析中消除换油干扰的方法研究[J]. 润滑与密封,2006,(7):71-75.
[8] 杨叔子,吴雅,轩建平,等. 时间序列分析的工程应用[M]. 第二版. 武汉:华中科技大学出版社,2007.

Spectrographic Oil Analysis of and Modeling Study on Gear Wear Test

FENG Wei^{1,2}, XIE Xiao-peng¹, LIU Can¹

(1. Automobile Tribology and Fault Diagnosis Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;2. Department of Marine Engineering, Guangzhou Maritime College, Guangzhou 510725, China)

Abstract: The spectrographic oil analysis of gear fatigue wear test showed it was not obvious that the wear rule was reflected through using Fe and Cr mass fraction, but it was clear as using Cu mass fraction. At the same time, analysis showed element mass fraction gradient could represent more the wear rule of the testing gear, and gear wear entered normal wear stage after 50 h. On this basis, Cr mass fraction has been separated the linear trend item and the residual sequence item, which was used to establish the AR time-series combination model. And forecasting analysis was carried out. Satisfactory result was achieved after the spectrum experiment data examination. This study provides a powerful and efficient method for friction and wear analysis, state monitoring and fault forecasting of machine equipment.

Key words: gear; wear test; spectrographic oil analysis; time-series modeling