

基于光谱分析的综合传动空载磨合磨损规律研究

李和言, 王立勇, 马彪, 郑长松, 陈漫

北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081

摘要 油液光谱分析是当前研究复杂传动装置磨合过程磨损规律的重要方法, 利用原子发射光谱分析技术可以在不改变原有配合状态的条件下方便及时地对综合传动磨合过程磨损量变化规律进行研究。文章基于综合传动的结构特征和磨合机理, 进行了台架空载磨合对比试验。根据磨合试验油液光谱分析数据, 得出了磨合期磨损量变化与油液初始浓度、磨合转速的函数关系, 建立了综合传动磨合期磨损量计算模型。经验证明, 基于初始浓度、磨合转速、磨合时间和换挡间隔时间等参数的综合传动磨损量计算模型能够较准确地对磨合期 Cu 元素磨损量进行计算。磨合期磨损量模型为磨合质量评判和制定磨合试验规范提供了重要参考依据。

关键词 综合传动; 光谱分析; 磨合; 磨损

中图分类号: U461.2, TH117 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-1013-05

引言

磨合是个非常复杂而又精细的过程, 它是在大量各种不同因素作用下进行的, 磨合在机器的制造和使用过程中占有非常重要的地位。合理的磨合有助于修正在制造和修理机器时所容许的某些误差, 并在一定程度上提高机器设备的使用可靠性和质量; 不正确的磨合, 有可能使旨在提高机器设计、制造和安装质量所做的全部努力化为泡影^[1]。

目前国内对磨合问题的研究主要集中在大功率柴油发动机和齿轮、轴承等摩擦零件上^[2], 而对于复杂传动装置还无相关报道; 相比而言, 国外很早就开始了相关研究, 其中美国的卡特比勒公司曾经把传动装置出厂磨合试验结果作为出厂检验的最后一项指标(可参考郑长松的博士论文)。磨合过程摩擦副表面变化较大, 一般研究方法是通过拆检后测量摩擦表面状态来实现对磨合质量的检测^[3], 但这种方法往往会破坏摩擦副原有的配合关系, 对后续研究产生影响。

原子发射光谱分析法是利用物质受电能或热能激发后发射出特殊光谱的性质来判断物质组成的方法。任何物质都有特定的发射光谱, 通过测定物质的发射光谱就可以相应测定出物质的成份和含量^[4]。从机械设备润滑系统中, 定期地、持续地采取油样并进行光谱分析, 可以获得反映设备工作状态及其变化的各种信息。目前光谱分析技术已广泛应用于航

空、铁路、军事等许多重要部门机械设备的故障诊断^[5]、磨损趋势预测^[6]和模型数据建模中^[7]。采用原子发射光谱技术, 通过分析磨合油液中磨损元素含量变化, 就可以在不用停车和拆检的情况下, 持续地获得磨损量变化的定量信息。油液光谱分析技术作为当今先进的磨损元素分析技术, 其研究结果可以为改善磨合试验方法、为提高磨合质量提供重要参考依据。

1 综合传动结构特征与磨合机理分析

综合传动是集机械、液力、液压、电子、控制等多学科, 实现多挡、无级转向于一体的复杂三自由度传动系统, 其结构紧凑、传动效率高、操作方便, 广泛应用于军用履带装甲车辆、大型工程机械等行业^[8]。某型号综合传动直驶变速机构如图1所示^[9], 主要包括多个湿式换挡离合器和啮合齿轮副, 离合器分别布置在轴和轴上, 动力从轴输入, 经轴传递由轴输出, 离合器的两两结合可以形成多个前进挡和倒挡^[10]。

综合传动作为履带装甲车辆的重要传动装置, 其典型特征是摩擦副类型多样。综合传动一般有4~6个前进挡, 不同的工作挡位对应不同的摩擦副。其中有滚动摩擦副, 还有滑动摩擦副。不同摩擦副需要的磨合时间不一样, 滚动摩擦副磨合需要的时间短, 很快就可以达标(如滚动轴承类), 但是

收稿日期: 2007-12-02, 修订日期: 2008-03-06

基金项目: 部级预选研究项目(40402060104, 40402020102), 高等学校学科创新引智计划项目(B08043)和车辆传动国家重点实验室基金项目(9140C3406070705, 9140C3406010606)资助

作者简介: 李和言, 1977年生, 北京理工大学机械与车辆工程学院讲师 e-mail: lheyang@sohu.com

滑动摩擦副需要的磨合时间长, 要想达到好的磨合效果就必须分配多的磨合时间(如离合器摩擦片、铸铁密封环等)。磨合时应综合考虑各种摩擦副的均匀搭配, 保证各个摩擦副在有限的时间内都能得到有效磨合。

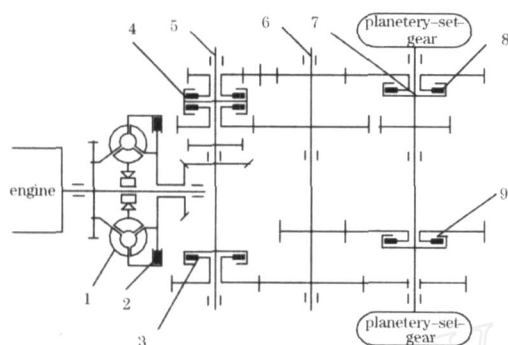


Fig 1 Sketch map of power-shift steering transmission

磨合是指相对运动的摩擦副表面受到有控磨损, 使摩擦表面能相互适应, 降低摩擦功, 增加密封性^[11], 使之表面性质从初始状态过渡到使用状态。磨合可以弥补由于加工引起的形状及微观结构缺陷, 提高寿命和可靠性。综合传动在磨合初期, 相对运动的摩擦副表面接触面积较小, 局部接触压力较高, 且高于临界压力, 润滑油膜难于形成, 相邻两表面的压力主要通过边界膜或金属的直接接触承担。随着磨合过程的不断进行, 摩擦副接触面积的弹性部分逐渐增加, 塑性部分逐渐减少, 摩擦副表面接触面积逐渐增加, 接触压力逐渐下降, 润滑油膜得以形成, 两摩擦表面间的压力主要由油膜和边界膜承担。而当边界膜形成速度与磨损速度趋于动态平衡时, 这时的边界膜就起着稳定的减磨抗磨作用, 磨合过程结束。实践证明, 良好的磨合能够使摩擦副的正常工作寿命提高 1~2 倍^[12]。

2 磨合期磨损量建模

2.1 磨损量影响因素分析

综合传动台架磨合过程牵涉众多内部因素和外部因素, 是一个复杂的系统过程。磨合期不同摩擦副磨损量不同, 齿轮、轴承、铸铁密封环在磨合期磨损量变化不大, 而换挡离合器在磨合期由于不断的结合分离, 摩擦片不断的滑摩擦, 其磨损量变化较大。根据综合传动工作原理和摩擦副基本特征, 可以将影响磨合期磨损量的主要因素分为磨合负荷、磨合转速、磨合时间、换挡次数和磨合油初始浓度。

2.1.1 磨合负荷

台架空载磨合是输出端无外加载荷工况下的磨合, 此时的磨合负荷主要是综合传动内部旋转部件(离合器、齿轮、轴承等)搅油损失和离合器摩擦片带排损失, 在结构参数和装配尺寸一定的情况下, 其大小主要取决于转速、时间和油温高低。

2.1.2 磨合转速

磨合转速越高, 搅油损失和带排转矩增大, 磨损加剧; 油温升高, 油液粘度下降, 搅油损失和带排转矩降低。对于

常啮合摩擦副来说, 高的磨合转速会增大单位时间内摩擦副的受力时间^[13], 且摩擦副表面温升有所加剧, 磨损量有所增加。对于湿式换挡离合器, 在结合油压一定的情况下, 结合前主被动摩擦片相对转速越高, 滑摩时间越长, 导致发热加剧, 磨损量增大。

2.1.3 磨合时间

综合传动台架磨合磨损量随时间变化较大, 磨合时间越长, 磨损量越大, 磨损率越小。可以将磨合时间划分为小的时间间隔, 且视每一间隔时间内磨损量与磨合时间互为线性变化规律。

2.1.4 磨合油温

磨合油温度对磨损量的影响问题比较复杂, 油温高, 油液粘度下降, 搅油损失和带排转矩减小^[14], 磨合负荷降低, 磨损量减小; 但油温高会使得润滑油膜难于形成, 摩擦副表面直接接触面增大, 有可能使磨损加剧。

2.1.5 换挡次数

换挡次数正比于换挡频率, 频率高, 单位时间内换挡间隔时间小, 换挡次数就多, 磨损量就大。换挡次数多少主要影响换挡离合器摩擦片磨损量, 在换挡转速和油温一定情况下, 磨损量与换挡次数成正比关系。

2.1.6 磨合油初始浓度

综合传动磨合油初始浓度不同, 磨损量变化不同, 试验证明, 初始浓度高的磨合油, 其内部含有的元素微粒数量较多, 磨合过程的磨损量会加剧。

2.2 磨损量计算模型

综合传动磨合油液中金属元素浓度变化反映了其内部摩擦副的磨损量变化, 可以通过对油液中金属元素浓度变化规律的研究来进行磨合过程磨损量的研究。因此, 本文磨损量统一用磨损元素浓度值表示。

根据综合传动台架磨合期磨损量影响因素分析, 可以将磨损元素浓度值表示为

$$c = f(P_L, n, t_r, T, T_c, c_0) \quad (1)$$

式中: c 为磨损元素浓度, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; P_L 为磨合负荷; n 为磨合转速; t_r 为磨合时间; T 为磨合油温度; T_c 为换挡间隔时间; c_0 为磨合油中磨损元素初始浓度。

设润滑油量为定值, 磨合过程没有漏油补油, 油液中元素浓度分布均匀, 在规定的换挡间隔、磨合时间和磨合油温度情况下, 影响空载磨合磨损量变化快慢的主要因素为磨合转速。设单位时间内磨损元素浓度梯度均值为 \bar{c} , 则可将其表示成转速的线性函数, 即

$$\bar{c} = k_n \cdot n \quad (2)$$

式中 k_n 为浓度梯度均值 \bar{c} 与转速 n 的作用系数, 数值大小由试验结果确定。考虑到磨合过程油温基本维持在规定的温度状态, 其上下波动不大, 可以将其对磨损量的影响也统一由系数 k_n 表示; 对应于一定换挡间隔时间 t_c 的磨损浓度变化值 c 可以用浓度梯度均值 \bar{c} 和磨合时间 t_r 的乘积表示, 即

$$c = c_0 + \bar{c} \cdot t_r / t_c \quad (3)$$

3 磨合试验方法

磨合试验对象为 4 台份某综合传动, 编号分别为 A1,

A2, A3 和 A4, 其中 A1 和 A2 用于磨损规律建模, A3 和 A4 用于磨损模型验证。每台综合传动规定加油量为 60 L, 试验中途不得加减速。油样的取样位置为综合传动精滤入口处, 磨合试验开始前首先取一瓶初始油样, 磨合试验过程中换挡间隔时间为 15 min, 取样间隔时间为 30 min; 试验过程控制油温在 (85 ± 5) 范围内。用于建模的综合传动 A1 和 A2 按照 800, 1 500 和 2 000 r · min⁻¹ 等 3 个转速由低到高依次进行各档磨合。用于模型验证的综合传动 A3 和 A4 磨合过程同样分为 3 个不同的磨合转速, 具体转速和磨合时间分配方法如表 1 所示。

Table 1 Distinguishing of model precision

编号	转速/(r · min ⁻¹)		时间/min
A1	800	1 500	2 000
A2	800	1 500	2 000
A3	800	1 200	1 600
A4	800	1 500	1 800

4 磨合试验结果分析

4.1 磨合试验结果

综合传动内部油液中的 Cu 元素主要来自于换挡离合器内齿摩擦片, 因此下文主要分析油液中 Cu 元素的浓度变化规律。

根据磨合后油液分析结果, 可以得到综合传动 A1 和综合传动 A2 油液中 Cu 元素浓度变化趋势, 如图 2 所示。

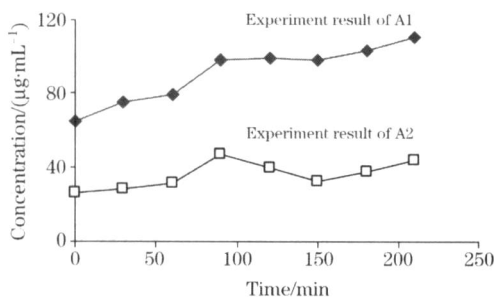


Fig 2 Cu element test result of A1 and A2

根据光谱分析数据结果, 可以统计计算出每台综合传动油液中 Cu 元素含量的数值变化特征, 如表 2 和表 3 所示。

如表中所示, A1 和 A2 油液中 Cu 元素梯度均值和浓度增长斜率随磨合转速升高而增大, 这说明浓度梯度与磨合转速大小有密切关系。

4.2 磨损量变化与初始浓度的关系

由表 2 和表 3 可知, 在同样的磨合方法下, 磨合前后的

Table 2 Numerical value character of Cu element in A1

转速/(r · min ⁻¹)	800	1 000	1 200
初始浓度/(µg · mL ⁻¹)	64.4	79	98.19
平均浓度/(µg · mL ⁻¹)	72.73	91.81	104.20
平均梯度/(µg · mL ⁻¹)	7.30	9.81	12.01
梯度方差	3.10	8.99	4.00

浓度差值与初始浓度有关, 初始浓度越高, 磨合前后的浓度差越大, 这说明磨合油的初始浓度值对磨合过程的磨损量有较大影响。因为初始浓度值高的磨合油, 单位体积内所含的金属颗粒数较多, 这犹如给润滑油添加了加快磨损的添加剂, 加速了摩擦副磨损的速度, 单位时间内产生的磨损颗粒数增多, 使得磨合结束时油液浓度偏高。为消除初始浓度对磨损量建模计算的影响, 可以对初始浓度进行转化。

Table 3 Numerical value character of Cu element in A2

转速/(r · min ⁻¹)	800	1 000	1 200
初始浓度/(µg · mL ⁻¹)	26.481	31.628	32.8
平均浓度/(µg · mL ⁻¹)	28.70	39.48	37.98
平均梯度/(µg · mL ⁻¹)	2.57	4.09	5.52
梯度方差	1.05	11.29	1.00

设初始浓度为 x , 终止浓度为 y_i , 初始浓度增量为 x_i , 终止浓度增量为 y_i , 只要得到 y_i 与 x_i 的函数关系, 就可以将不同初始浓度的油液分析结果转化为同一初始浓度下的结果。设 $y_i = k x_i$, 根据磨合试验数据统计结果可得

$$k = 0.3051t + 0.8577 \quad (4)$$

根据 (4) 式, 对于任一初始浓度值 (x_i, y_i), 可以将其转化为想要的对应初始浓度为 x 时的终止浓度值 y , 即

$$y = k(x - x_i) + y_i \quad (5)$$

根据 (5) 式, 可以对试验数据进行转化, 图 3 为利用 (5) 式将综合传动 A1 初始浓度转化与 A2 初始浓度一致后的磨合试验结果。

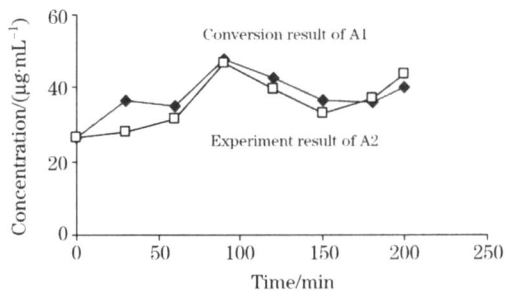


Fig 3 Date A2 and conversion date of A1

如图 3 所示, A1 初始浓度转化为与 A2 一致后, 二者的浓度变化规律具有相似性, 这说明了在同样的磨合方法下, 同样型号的综合传动 Cu 元素磨损量变化规律基本一致。

4.3 磨损量变化与转速的关系

根据综合传动 A1 和 A2 磨合试验油液光谱分析 Cu 元素浓度数据结果, 可以得到 Cu 元素浓度梯度值随转速的变化规律, 如图 4 所示。

从图中可以看出, 随着磨合转速的升高, 油液中 Cu 元素含量的梯度均值逐渐增大, 由式 (2), 利用试验数据, 可以得到

$$k_{n1} = 0.000110c_{10} \quad (6)$$

$$k_{n2} = 0.000112c_{20} \quad (7)$$

式中 k_{n1} 为 A1 作用系数, c_{10} 为 A1 初始浓度, k_{n2} 为 A2 作用系数, c_{20} 为 A2 初始浓度。

因此可以将单位时间内 Cu 元素浓度梯度均值与磨合转速的关系式表示为

$$\bar{c}_i = (11 + C) 10^{-4} c_0 n \quad C \quad (0 \sim 0.02) \quad (8)$$

式中, C 为调整系数, 本文取 0.01。

利用(8)式, 对综合传动 A1 和 A2 的 Cu 元素浓度梯度值进行计算, 计算结果如图 5 中虚线所示。

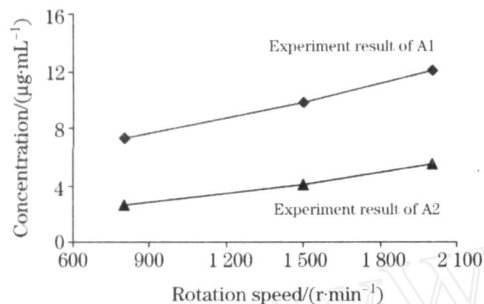


Fig. 4 Relationship between concentration and rotation speed

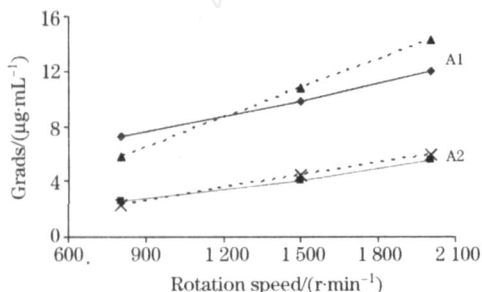


Fig. 5 Relationship between concentration and rotation speed

1: Calculation result; 2: Experiment result

如图 5 所示, 计算结果与试验结果基本吻合, (8) 式基本表达了综合传动空载磨合时 Cu 元素梯度值与转速的相互变化关系。

5 模型验证

根据(3)式和(8)式, 可以得到综合传动空载磨合过程中磨损量计算模型, 如下(9)式所示

$$c = c_0 + 1.111 \cdot 10^{-4} \cdot c_0 \cdot n \cdot t_c / t_c \quad (9)$$

按照表 1 的磨合试验方法, 综合传动 A3 和 A4 磨合后的磨损量光谱分析结果与模型计算结果如图 6 和图 7 所示。

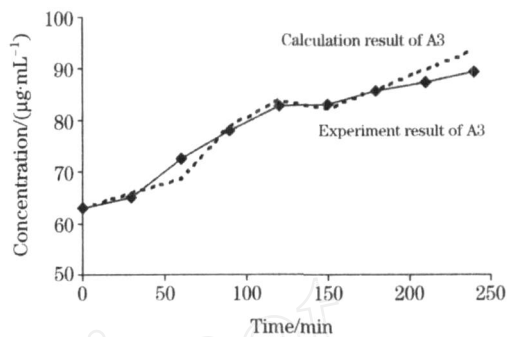


Fig. 6 Calculation result and experiment result of A3

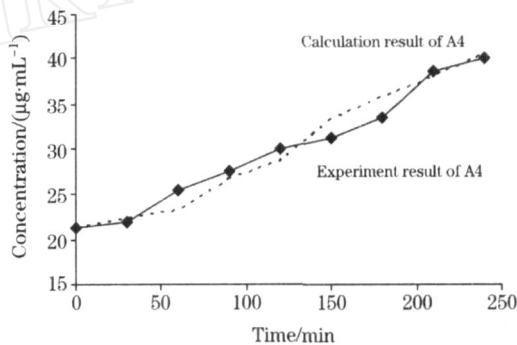


Fig. 7 Calculation result and experiment result of A4

从图中可以看出, 综合传动磨合期 Cu 元素磨损量计算结果与试验结果比较接近, 计算结果较好的反映了 Cu 元素磨损量的发展变化趋势, 从而验证了模型计算的准确性。

6 结论

(1) 综合传动台架空载磨合期磨合油液中金属元素浓度变化可以表征综合传动磨合期磨损量变化规律; 油液中 Cu 元素浓度变化反映了换挡离合器摩擦片的磨合量变化规律。

(2) 利用初始浓度转化方法可以将不同初始浓度下的磨合试验结果转化为同一初始浓度下的磨合试验结果。

(3) 在一定换挡间隔时间和磨合时间条件下, 磨损量与磨合转速成线性变化关系。

(4) 将综合传动磨合期油液中金属元素浓度变化表示成初始浓度和磨合转速、磨合时间和换挡间隔时间的函数, 可以有效地对元素浓度变化规律进行计算。

参 考 文 献

- [1] Vladimirov B A (Soviet) (弗拉基米罗夫 B A (苏)). Running-in of Marine Diesel Engine (船舶柴油机磨合运转). Beijing: National Defense Industry Press (北京: 国防工业出版社), 1986. 3.
- [2] LI Zhu-guo, WEI Shi-ming, YU Wu-quan, et al (李柱国, 尉世明, 俞五全, 等). Chinese Internal Combustion Engine Engineering (内燃机工程), 2001, 22(1): 66.
- [3] WEI Hai-jun, SUN Pei-ting, YIN Feng (魏海军, 孙培廷, 尹峰, 等). Transactions of CSICE (内燃机学报), 2005, 23(1): 88.
- [4] YANG Yu-wei, CHEN Guo (杨虞微, 陈果). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2005, 25(8): 1339.
- [5] ZHANG Hong, LI Zhu-guo, CHEN Zhao-neng (张红, 李柱国, 陈兆能). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(5): 619.

- [6] WEI Hai-jun, WANG Hong-zhi, SUN Pei-ting, et al(魏海军, 王宏志, 孙培廷, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(7): 1125.
- [7] GAN Min-liang, ZUO Hong-fu, YANG Zhong, et al(干敏梁, 左洪福, 杨忠, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2000, 20(1): 64.
- [8] FENG Neng-lian, LI Ke-qiang, LIAN Xiao-min, et al(冯能莲, 李志强, 连小珉, 等). Journal of Tsinghua University(Science and Technology)(清华大学学报·自然科学版), 2003, 43(2): 254.
- [9] MA Hong-wen, MA Biao(马洪文, 马彪). Journal of Mechanical Strength(机械强度), 2002, 24(4): 489.
- [10] ZHENG Chang-song, MA Biao, WAN Yao-qing, et al(郑长松, 马彪, 万耀青, 等). China Mechanical Engineering(中国机械工程), 2006, 17(9): 975.
- [11] CHEN Shi-wei, LI Zhur-guo, XU Qi-sheng(陈士玮, 李柱国, 徐启圣). Chinese Internal Combustion Engine Engineering(内燃机工程), 2006, 27(1): 63.
- [12] WEN Shi-zhu(温诗铸). Friction Theory(摩擦学原理). Beijing: Tsinghua University Press(北京: 清华大学出版社), 2002. 341.
- [13] MA Biao(马彪). Journal of Beijing Institute of Technology(北京理工大学学报英文版), 2000, 4(9): 362.
- [14] TAN Da-jiang, MA Biao, WAN Yao-qing, et al(谭大江, 马彪, 万耀青, 等). Drive System Technique(传动技术), 2001, 15(1): 18.

Study on No-Load Running-in Wear of Power-Shift Steering Transmission Based on Oil Spectrum Analysis

LI He-yan, WANG Li-yong, MA Biao, ZHENG Chang-song, CHEN Man

School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The running-in process wear rule of power-shift steering transmission can be studied conveniently and timely by using spectral analysis of oil. The configuration characteristic and the running-in mechanism of power-shift steering transmission were introduced firstly in the present paper. According to the discussion of running-in wear factors such as load, rotation speed, time, oil temperature, shifting number and original concentration of running-in oil, the wear calculation mode was established. The no-load running-in experiments of two power-shift steering transmissions were done, with different rotation speed and time. Based on the spectrum analysis of experiment result, the function relation between running-in wear and the oil original concentration and running-in speed was obtained, so the no-load running-in process wear calculation mode of power-shift steering transmission was confirmed. Through the experiment of other two power-shift steering transmissions, it was validated that the Cu element concentration can be calculated accurately by the wear calculation mode, which included the parameters such as oil original concentration, running-in speed, running-in time and gear shift alternate time. So the reference to evaluate the running-in quality and to constitute running-in regulations was gained.

Keywords Power-shift steering transmission; Spectrum analysis; Running-in; Wear

(Received Dec. 2, 2007; accepted Mar. 6, 2008)