

DOI: [10.16078/j.tribology.2019154](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019154)

基于实车试验数据的发动机油换油周期预测模型

马利欣¹, 魏雷¹, 刘建芳^{1,2}, 贾丹¹, 段海涛¹, 李健^{1*}

(1. 武汉材料保护研究所 特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430030;

2. 武汉轻工大学 生物与制药工程学院, 湖北 武汉 430023)

摘要: 车用发动机油的不合理更换导致我国润滑油消耗量不断升高, 使用成本增加, 并造成环境污染等问题. 本文中通过对7辆在常规城市工况条件下运行的民用轿车进行多个换油周期行车测试, 定期采集润滑油样并应用PDSC方法检测试验油样的起始氧化温度, 依据测试获得的312组试验数据样本, 采用多重线性回归分析方法建立了润滑油起始氧化温度与车辆运行里程和运行时间之间的关系模型. 结果表明: 现行换油周期偏于保守, 换油时的润滑油的起始氧化温度值较高, 仍具有优良的氧化安定性, 属于过度更换. 因此, 我国车用润滑油的换油周期有进一步提升的空间. 数据分析发现, 所建立的模型简洁直观, 具有较好的拟合性以及预测精度, 可供车主在决定更换润滑油时进行简单、方便和直接的判断.

关键词: 车用润滑油; 行车测试; 换油周期; 多重线性回归; 关系模型

中图分类号: TE626.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2020)02-0218-07

Drain Interval Prediction Models of Motor Oils Based on Vehicle Road Test Data

MA Lixin¹, WEI Lei¹, LIU Jianfang^{1,2}, JIA Dan¹, DUAN Haitao¹, LI Jian^{1*}

(1. Wuhan Research Institute of Materials Protection, State Key Laboratory of Special Surface Protection Materials and Application Technology, Hubei Wuhan 430030, China

2. College of Biological and Pharmaceutical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Hubei Wuhan 430023, China)

Abstract: The irrationality changes of motor oil has caused various problems, such as excessive consumption of lubricating oil, high maintenance costs and enduring environment pollution. Multiple road tests of 7 civilian cars were studied in this paper, which were operated under normal urban conditions. The oil samples during experimental process were regularly collected and the oxidation onset temperature (OOT) was tested by using PDSC method. The multiple linear regression method was used to establish the relationship model between the OOTs of the lubricants and vehicle parameters, including service mileage and service time based on the 312 samples. The results showed that the replaced lubricant exhibited high OOTs and still retained excellent oxidation stability, which suggested the current oil drain interval is conservative. Therefore, the level of oil drain interval in our country need to be further improved. The data analysis showed that the established models were concise with good fitting and prediction accuracy. Meanwhile, the models can be used for end users to judge the changing of lubricating oil easily and conveniently.

Key words: lubricating oil; vehicle road test; oil drain interval; multiple linear regression; relationship model

Received 21 August 2019, revised 29 October 2019, accepted 14 November 2019, available online 28 March 2020.

*Corresponding author. E-mail: lijianwuhan@tom.com, Tel: +86-27-83641630.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51575402).

国家自然科学基金项目(51575402)资助.

车用润滑油主要指发动机润滑油,是保持发动机可靠行驶、减小发动机摩擦能量损耗和防止发动机部件早期磨损的关键^[1]。润滑油更换也是汽车保养中最频繁的项目。按照4S店和汽车销售商的要求,目前我国民用轿车常用的换油周期基本是行车5 000 km或者6个月。对目前国内市场上278款不同品牌的民用轿车的推荐换油周期进行统计^[2-3],约有56.1%的民用汽车推荐5 000 km进行发动机油更换,109款不同品牌民用轿车中,有78款车型推荐换油时间为6个月,6款车型推荐以3个月,约77%民用轿车要求在6个月以内进行润滑油更换。由于汽车保有量巨大,车用润滑油的大量使用与更换,导致车用润滑油消耗量已经占据我国润滑油年消耗总量的一半以上^[4]。车用润滑油的过度使用不仅造成石油资源的浪费,而且废油回收困难,容易造成环境污染^[5]。因此,合理科学地更换车用润滑油已经受到相关人士与广大车主关注^[6]。国外已经提倡将换油周期提高到1万公里以上。日本日石三菱润滑油研究所^[7-8]提出以硝酸酯为主要劣化指标,推测行车15 000 km后润滑油才完全失效;通用汽车公司的专利^[9]表明,美国本土通用品牌车辆可以每12 000 km(根据运行条件,可延长至16 000 km)或12个月进行发动机油更换。我国的路况和空气质量等因素与国外有差别,因此,尽管我国采用的汽车发动机及其润滑油与国外基本相同,延长换油周期依然存在疑虑,进展较缓慢。针对我国典型城市工况条件下运行的民用轿车进行了多组长时间的行车监测实验表明^[10-11],当运行时长达到6个月时,各组润滑油的理化指标均远未达到国家现行换油标准(GB/T 8028-2010),试验用油仍然具有良好的润滑分散能力。因此,我国现行换油周期可以延长是肯定的。

目前评估换油周期的方法主要是基于对润滑油的测试,有润滑油斑点试验法、红外光谱法以及传感器在线监控等。美国学者Jagammathan^[12]运用微传感器技术和神经网络算法,提出了一种通过监测发动机与润滑油运行状况以预测发动机油使用寿命的方法;Kauffman^[13]利用循环伏安方法测定润滑油中抗氧化剂含量随时间的消耗量,来判断润滑油的换油周期。我国学者也对发动机油寿命评估进行了研究^[14],通过测定车用发动机油介电常数表征其理化性能,红外光的透射值及散射值表征润滑油劣化程度等。但是,这些评估方法均要求对车用润滑油进行检测,相对复杂,成本较高,同时仅仅能够预测被测试润滑油的换油周期,没有给出简洁明了、直接可用的通用预测模型,不

便于一般车主参考。

本文作者在定期采集试验车辆润滑油并进行理化数据检测的基础上,根据获得的大量润滑油样品理化性能及其对应的运行工况数据,通过多重线性回归分析方法,研究三类车用润滑油的起始氧化温度变化与运行里程、运行时间之间的关系,尝试建立基于起始氧化温度的车用润滑油换油周期数学模型,便于用户直接在决定换油时参考与借鉴。

1 试验方法

选取常规城市工况下运行的7台民用轿车为测试对象,进行长时间运行状况和润滑油性能跟踪监测。试验车辆基本信息、所用润滑油品牌及种类、总运行里程以及总运行时间列于表1中。试验车辆完全按照车主的意愿使用,无任何附加要求。根据车辆具体的运行状况定期(约1个月取1次)从试验车辆曲轴箱中采取试验油样,直至测试结束。利用NETZSCH HP204高压差式扫描量热仪(PDSC)测定试验油样的起始氧化温度(升温速率为10 ℃/min,氧气流量为100 mL/min,氧气压力3.5 MPa),分析润滑油氧化安定性随服役时间延长的变化特征。试验时间跨度为2015~2018年,总数据样本为312组。

2 数据分析方法

研究表明^[15],在众多的润滑油理化指标中,润滑油的起始氧化温度变化最能够表征车用润滑油性能的衰退规律,根据润滑油的起始氧化温度来确定是否必须更换车用润滑油是比较科学的,其他指标如酸性物质生成,不溶混合物累积或抗磨性能的下降低均与润滑油抗氧能力下降密切相关。对于车主而言,润滑油的运行里程(俗称公里数)与润滑油使用时间是最直接和最直观的决定换油周期的参数。因此,以起始氧化温度为指标,在大量试验数据基础上,建立我国典型城市运行工况下润滑油起始氧化温度与运行里程、运行时间关系模型,最容易被车主采用。

本文作者分别针对采用单一矿物油、半合成油以及全合成油的车辆,以起始氧化温度为被解释变量,以运行里程及运行时间为解释变量(见表2),建立多重线性回归模型,并通过岭回归分析得出更加符合实际的方程,分析车用润滑油氧化安定性随运行里程以及运行时间的变化特征。

多重线性回归分析的一般模型形式为

表 1 试验车辆及试验润滑油类型
Table 1 Types of test cars and motor oils

No	Test cars	Displacement, L	vehicle age/year	Motor oils	Service mileage/km	Service time/day
1	Citron C-Triomphe	2.0	10	Mobil super 2000 10W-40 (semisynthetic oil)	4 654	216
				API SL, SAE 10W-40 special for Citroen engine (mineral oil)	5 723, 8 720	410, 449
				Engine oil for DPCA(C2) 0W-30 (synthetic oil)	2 358	55
2	Volkswagen Golf	1.4	5	API SM, SAE 5W-40 special for Volkswagen engine (semisynthetic oil)	5 916	538
				API SL, SAE 5W-20 special for Hyundai engine (mineral oil)	5 396, 5 062	156, 123
3	Hyundai Verna	1.4	5	Castrol Ultra Clean API SN, SAE 10W-40 (mineral oil)	8 337, 6 028	167, 108
				Havoline API SL, SAE 5W-30 (mineral oil)	6 317	156
				Shell Helix Ultra API SN, SAE 5W-30 (synthetic oil)	7 816, 6 069	356, 352
4	Nissan Teana	2.5	2	Castrol Magnatec API SN, SAE 5W-40 (synthetic oil)	6 186	448
				Shell Helix Ultra API SN, SAE 5W-30 (synthetic oil)	6 419	356
				Castrol Magnatec API SN, SAE 5W-40 (synthetic oil)	5 081	448
5	Nissan Teana	2.5	2	Mobil No.1 API SN, SAE 0W-40 (synthetic oil)	7 625	271
				API SN, SAE 5W-30 special for General engine (synthetic oil)	4 938, 5 020	147, 161
				Castrol EDGE Professional API SN, SAE 5W-30 (synthetic oil)	6 889, 6 471	182, 154
6	General Regal	2.0	0.5	API SN, SAE 5W-40 special for Fengshen engine (synthetic oil)	5 291	200
7	Fengshen AX7	2.0	0			

表 2 SPSS分析模型变量表
Table 2 The variables in SPSS analysis model

Variables	Name
Explained variable	Oxidation onset temperature (OOT)/℃
Explanatory variables	Service mileage/100 km
	Service time/month

$$Y = \hat{y} + \mu = \alpha + \sum_1^i \gamma_i x_i + \mu \tag{1}$$

式中: Y 为被解释变量; $\hat{y}$ 表示给定自变量取值时因变量 y 的估计值; μ 为随机误差, 表示具体取值与平均取值间的差异, 也称为残差; α 为常量, 表示当所有自变量取值均为0时因变量的估计值; x_i 为解释变量; γ_i 为偏回归系数, 表示当其他自变量取值固定值, 自变量 x_i 每改变1个单位时 $\hat{y}$ 的变化量。

试验车辆润滑油的起始氧化温度随运行里程与运行时间变化的典型规律如图1~6所示, 散点分布整体呈指数下降的趋势. 由于多重线性回归分析要求自变量与因变量之间为线性关系. 因此, 需要对原始数

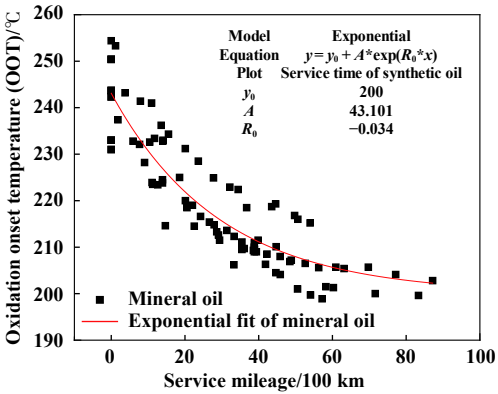


Fig. 1 Relationship between OOT and service mileage of mineral oil

图 1 矿物油起始氧化温度与运行里程的关系

据进行变量变换, 使其满足多重线性回归分析要求。

对原始数据进行变量变换的方法如下. 首先对原始变量(运行里程、时间)和起始氧化温度数据分别进行非线性拟合, 拟合模型选取指数函数, 模型形式如式(2)所示。

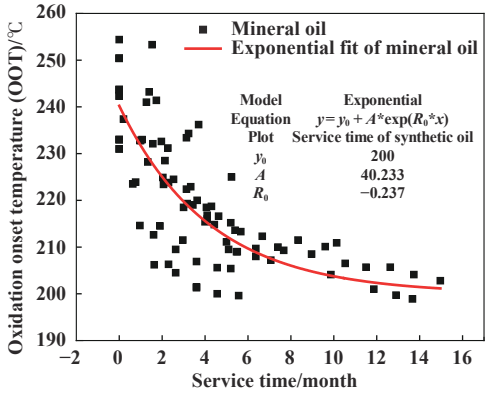


Fig. 2 Relationship between OOT and service time of mineral oil

图2 矿物油起始氧化温度与运行时间的关系

$$y = y_0 + Ae^{R_0x} \tag{2}$$

式中 y_0 、 A 和 R_0 均为常数. 在拟合过程中, y_0 的拟合值均处于200附近(近似等于基础油的起始氧化温度), 因此固定 y_0 为200.

拟合结果如下:

$$y_1 = 200 + 43.101e^{-0.034x_1}, y_2 = 200 + 40.233e^{-0.237x_2} \tag{3}$$

其中 x_1 、 x_2 分别代表运行里程/100 km(百公里数)和运行时间/month(运行月数).

经过线性变换可得式(4), 如图3~4所示:

$$\begin{aligned} \ln(y_1 - 200) &= \ln 43.101 - 0.034x_1, \\ \ln(y_2 - 200) &= \ln 40.233 - 0.237x_2 \end{aligned} \tag{4}$$

令 $Y = \ln(y - 200)$ 并替换上式:

$$Y = \ln 43.101 - 0.034x_1, Y = \ln 40.233 - 0.237x_2 \tag{5}$$

此时过渡变量 Y 与 x_1 、 x_2 为线性关系. 同理可将半合成油以及全合成油进行变量变换, 将过度变量 Y 与 x_1 、 x_2 数据导入数据分析软件进行多重线性回归分析, 将计算结果进行变量置换, 即可实现车用润滑油起始

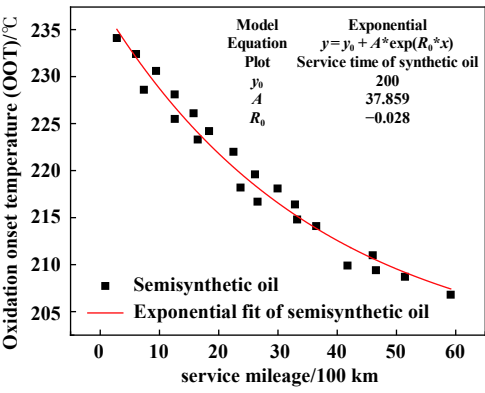


Fig. 3 Relationship between OOT and service mileage of semisynthetic oil

图3 半合成油起始氧化温度与运行时间的关系

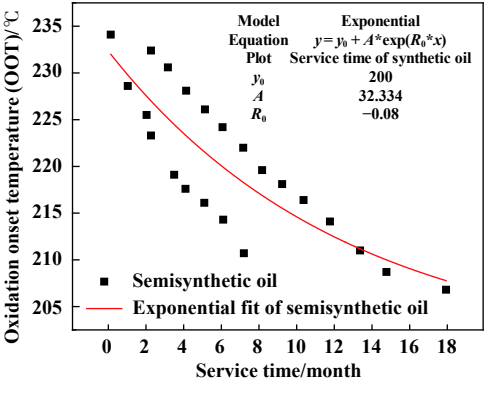


Fig. 4 Relationship between OOT and service time of semisynthetic oil

图4 半合成油起始氧化温度与运行里程的关系

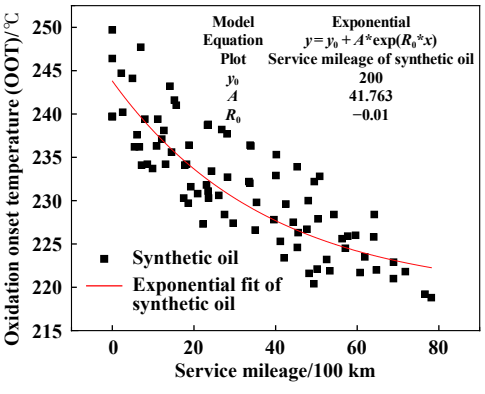


Fig. 5 Relationship between OOT and service mileage of synthetic oil

图5 合成油起始氧化温度与运行里程的关系

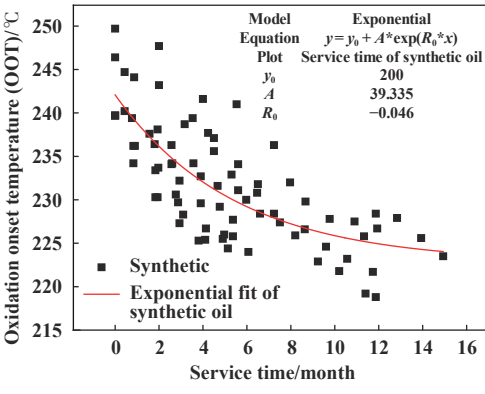


Fig. 6 Relationship between OOT and service time of synthetic oil

图6 合成油起始氧化温度与运行时间的关系

氧化温度随运行里程以及运行时间变化特征的回归分析.

3 分析结果与讨论

经过非线性拟合和变量变换计算, 将过渡变量

Y 与解释变量(x_1 : 运行里程/100 km; x_2 : 运行时间/month)导入数据分析软件, 回归运算得到结果列于表3~4中, 对应的三种润滑油的线性拟合方程为式(6~8).

当润滑油种类为矿物油时, 线性拟合方程为

$$Y = 3.685 - 0.013x_1 - 0.104x_2 \tag{6}$$

当润滑油种类为半合成油时, 线性拟合方程为

$$Y = 3.803 - 0.014x_1 - 0.056x_2 \tag{7}$$

当润滑油种类为全合成油时, 线性拟合方程为

$$Y = 3.971 - 0.012x_1 - 0.031x_2 \tag{8}$$

表3中拟合模型的3个非标准化系数分别表示模型中的常数项以及两个自变量的偏回归系数. 由非标准系数经过换算(消去了各个变量之间的量纲影响)得到标准系数, 能够更加直观地反映自变量对模型的影响程度.

标准系数的绝对值越大, 对模型的影响越大. 由此可见, 车辆运行里程对整个模型的影响程度大于运行时间的影响.

表4为各个模型的拟合误差汇总. 其中 R 值表示拟合优度, 用来衡量估计的模型值对观测值的拟合程度; R^2 是模型的决定系数, 表示自变量对因变量的解释程度. 由表4中可得, 四种模型的 R 值分别为0.938、0.990以及0.915, 对应的 R^2 值为0.880、0.980和0.837, 均处于拟合程度较高的范围内, 说明这3个模型对因变量均有比较好的解释程度. 而 K 值代表岭参数, 观察在不同 K 的取值时方程的变动情况, 然后取使方程基本稳定的最小 K 值. 另外, Sig表示显著性, 由表3~4可见, 3个模型Sig的取值均小于0.05, 表明模型中自变量与因变量之间保持良好的线性关系.

表 3 各种润滑油多重线性回归模型的主要系数

Table 3 Main coefficients of multiple linear regression models for various lubricants

Models	Unstandardized Coefficients			Standardized Coefficients			Sig of Components(x_1/x_2)
	Constant	Service mileage	Service time	Constant	Service mileage	Service time	
Mineral oil	3.685	-0.013	-0.104	-	-0.569	-0.390	0.000/0.000
Semisynthetic oil	3.803	-0.014	-0.056	-	-0.537	-0.459	0.000/0.000
Synthetic oil	3.971	-0.012	-0.031	-	-0.574	-0.385	0.000/0.004

表 4 模型误差分析汇总

Table 4 Summary of model error analysis

Models	R	R^2	Sig	K of ridge regression
Mineral oil	0.938	0.880	0.000	0.02
Semisynthetic oil	0.990	0.980	0.000	0.01
Synthetic oil	0.915	0.837	0.000	0.02

将过渡变量 Y 换算为 y , 带回方程可得到采用不同润滑油条件下润滑油的起始氧化温度 y ($^{\circ}\text{C}$)与运行里程 x_1 (百公里)及运行时间 x_2 (月)的回归方程式:

矿物油润滑 $y = 200 + e^{3.685-0.013x_1-0.104x_2}$ (9)

半合成油润滑 $y = 200 + e^{3.803-0.014x_1-0.056x_2}$ (10)

全合成油润滑 $y = 200 + e^{3.971-0.012x_1-0.031x_2}$ (11)

由拟合方程可以得出, 润滑油的起始氧化温度随运行里程与运行时间的延长而呈现逐步降低的趋势, 其中矿物油下降最明显, 半合成油次之, 全合成油最慢, 与试验测试结果保持一致. 其主要原因^[16]一方面是润滑基础油(即不含添加剂的油品)因为纯度、分子量分布以及制备方法的不同而具有不同的性质; 另一方面是抗氧化剂的作用, 在氧气、高温以及发动机金属部件催化条件下, 车用润滑油将加速自氧化过程, 而

抗氧化剂通过消耗自身的抗氧活性基团可有效地终止车用润滑油的链式氧化反应, 以确保润滑油良好的氧化安定性.

为了验证拟合方程的准确性, 随机从每组样本数据中各抽出1个样本作为模型的校验值, 与对应的回归方程式计算结果进行对比(表5). 由表5中可得, 4组数据的拟合值分别为218.6、208.0及220.9, 其相对误差分别为1.48%、0.34%和0.41%, 拟合相对误差较小, 说明模型具有良好的拟合精度与预测能力.

前期研究表明^[17], 矿物油基础油与合成油基础油的起始氧化温度均接近200 $^{\circ}\text{C}$ (198.6和196.4 $^{\circ}\text{C}$), 因此当成品油的起始氧化温度下降到200 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 即表明油中的抗氧化剂含量极低, 对润滑油的保护作用基本失效, 因此, 可将起始氧化温度200 $^{\circ}\text{C}$ 设定为车辆的换油临界值. 按照现行换油要求, 当车辆在6个月内运行5 000 km时, 三种模型计算出的起始氧化温度分别为211.2、215.9和224.2 $^{\circ}\text{C}$, 均高于油品完全失效的临界值, 还具有较好的氧化安定性, 显然是没有必要换油的.

鉴于润滑油性能变化的特殊性^[18], 因此在计算临界换油周期时, 可设定适当的保险系数, 即将公式中的 y 值设定为205 $^{\circ}\text{C}$, 保证车辆运行有1个缓冲区间, 防

表 5 模型预测值与试验测量值的误差校验

Table 5 Error calibration between models prediction value and experimental measurement value

Models	Service mileage/ 100 km	Servicetime/ month	Experimental measurement value of OOT/℃	Experimental measurement value of OOT/℃OOT/℃	Relative error
Mineral oil	26.64	4	215.4	218.6	1.48%
Semisynthetic oil	51.44	18	208.7	208.0	0.34%
Synthetic oil	64.71	5	220.0	220.9	0.41%

止润滑油过度使用造成发动机损伤. 由此可以根据式(9~11)推算出在设定运行时间下的临界运行里程(公里数), 或者设定运行里程下的临界运行时间. 根据拟

合模型推算(见表6), 在城市工况下, 矿物润滑油可在12个月内运行6 366 km; 半合成润滑油在18个月内可运行8 468 km, 而全合成油在18个月内可运行15 030 km.

表 6 模型换油周期预测表

Table 6 Table of predicted oil drain intervals

Lubricants	Service mileage threshold in varied setting month/km						
	12	13	14	15	16	17	18
Mineral oil	6 366	5 566	4 766	3 966	3 166	2 366	1 566
Semisynthetic oil	10 868	10 468	10 068	9 668	9 268	8 868	8 468
Synthetic oil	16 580	16 321	16 063	15 805	15 546	15 288	15 030

4 结论

a. 运用多重线性回归分析方法, 在7台车312组实车润滑油测试数据的基础上分别建立了针对矿物油、半合成油、全合成油以及混合用油条件的润滑油起始氧化温度与行车里程和运行时间回归分析模型. 拟合模型精度高, 公式简洁, 能够较好地反应车辆运行里程和运行时间对起始氧化温度的影响, 便于用户在确定更换车用润滑油时参考和借鉴, 为科学评估换油周期提供一定的依据.

b. 将拟合模型用于现行民用轿车典型的换油周期(5 000 km、6个月)校核, 得到的起始氧化温度预测值均远远高于添加剂完全消耗时的临界值, 说明此时换油是一种浪费; 根据模型推算, 在12个月内, 矿物油可运行6 366 km, 而半合成油及全合成油在18个月内分别可运行约8 468 km及15 030 km, 在实际应用中适当的延长换油周期是有试验依据的.

c. 本文中仅针对典型城市工况下运行的车辆进行分析, 因此, 预测模型尚不能涵盖高速公路、山路、郊区等特殊运行条件, 具有一定的局限性. 为了寻求更加具有普适性的模型, 还需要增加其他运行工况测试数据, 并运用机器学习的方法不断地对数据进行整合、优化、训练, 得到精度更高并符合实际情况的模型.

参考文献

[1] Macian V, Tormos B, Miró G, et al. Assessment of low-viscosity oil performance and degradation in a heavy duty engine real-world fleet

test[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2016, 230(6): 729–743. doi: 10.1177/1350650115619612.

[2] Wei Lei, Liu Jianfang, Jin Yongliang, et al. Effects of service time on properties of gasoline engine oil[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(9): 41–46 (in Chinese) [魏雷, 刘建芳, 金永亮, 等. 使用时间对汽油发动机润滑油性能的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(9): 41–46].

[3] Liu Jianfang, Wei Lei, Jin Yongliang, et al. Laboratory static experiments and vehicle road tests for engine lubricating oils[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(11): 37–44 (in Chinese) [刘建芳, 魏雷, 金永亮, 等. 发动机润滑油的实验室静置和行车试验研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(11): 37–44].

[4] Liu Jianfang, Wei Lei, Qian Xuzheng, et al. Quality degradation of the vehicle engine oil under urban conditions[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(3): 130–134 (in Chinese) [刘建芳, 魏雷, 钱绪政, 等. 市区工况车用发动机油质量衰变分析[J]. 中国测试, 2017, 43(3): 130–134]. doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2017.03.027.

[5] Liu Weimin, Xu Jun, Feng Dapeng, et al. The research status and prospect of synthetic lubricating oils[J]. Tribology, 2013, 33(1): 91–104 (in Chinese) [刘维民, 许俊, 冯大鹏, 等. 合成润滑油的研究现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(1): 91–104].

[6] Puckace J S, Redmon J J, Fitzgerald H, et al. Method of determining optimal change interval for a functional fluid[P]. U. S. Patent 9, 195, 964, 2015.

[7] Jinichi I. The long life technology of engine oil(I)[J]. Lubricating Oil, 2002, 17(3): 6–9 (in Chinese) [五十岚仁一. 发动机油的长寿命化技术(I)][J]. 润滑油, 2002, 17(3): 6–9]. doi: 10.3969/j.issn.

[1002-3119.2002.03.002.](#)

[8] Jinichi I. The long life technology of engine oil(II)[J]. Lubricating Oil, 2002, 17(4): 1–5 (in Chinese) [五十岚仁一. 发动机油的长寿命化技术(II)][J]. 润滑油, 2002, 17(4): 1–5]. doi: [10.3969/j.issn.1002-3119.2002.04.001.](#)

[9] Schwartz E S, Smolenski D J, Wischart A J, et al. Automatic engine oil change indicator system[P]. U S. Patent 4742476, 1988-5-3.

[10] Wei L, Duan H T, Chen S, et al. A field test method to quantitatively determine oxidation stability of gasoline engine oil[J]. Lubrication Science, 2018, 30(2): 57–64. doi: [10.1002/ls.1403.](#)

[11] Wei L, Duan H T, Chen S, et al. Discussion on the influence of driving parameters of civilian cars on motor oil degradation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(2): 281–288. doi: [10.1177/1350650118776567.](#)

[12] Jagannathan S, Raju G V S. Remaining useful life prediction of automotive engine oils using MEMS technologies[C]. Proceedings of the 2000 American Control Conference. Chicago: Automatic Control Council, 2000, 1: 3511-3512.

[13] Kauffman R E. Method for evaluating the remaining useful life of a hydrocarbon oil[P]. U S Patent 4764258, 1988-8-16.

[14] Li Xiwu. Study on monitoring methods of information fusion technique for qutomobil engine lubricating oil[D]. Changchun: Jilin University, 2012(in Chinese) [李喜武. 汽车发动机润滑油信息融合技术监测方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.].

[15] Qi B K, Zhang Q Z, Sui X N, et al. Differential scanning calorimetry study-assessing the influence of composition of vegetable oils on oxidation[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 601–607. doi: [10.1016/j.foodchem.2015.07.148.](#)

[16] Wang Lijuan, Liu Weimin. Mechanism of anti-oxidation agents for lubrication oil[J]. Lubricating Oil, 1998, 13(1): 55–58 (in Chinese) [王丽娟, 刘维民. 润滑油抗氧化剂的作用机理[J]. 润滑油, 1998, 13(1): 55–58].

[17] Wei L, Duan H T, Jin Y L, et al. Oil change interval evaluation of civilian cars in urban traffic condition[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(6): 956–964. doi: [10.1177/1350650118809772.](#)

[18] Kauffman RE. Rapid determination of remaining useful lubricant life. In: Booser ER (ed) CRC handbook of lubrication and tribology[M]. Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo: CRC Press Inc, 1993: 89-99.