

## 基于傅里叶变换近红外透射光谱的汽车用 无水冷却液和制动液掺水检测

张瑜<sup>1</sup>, 谈黎虹<sup>1</sup>, 何勇<sup>2, 3\*</sup>

1. 浙江经济职业技术学院, 浙江 杭州 310018
2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058
3. 农业部光谱检测重点实验室, 浙江 杭州 310058

**摘要** 冷却液和制动液是车辆工作过程中非常重要的油品, 对车辆的正常运行具有非常重要的作用。在冷却液和制动液中掺水是掺假的主要手段之一, 掺水后的冷却液和制动液, 其有效成分会减少, 从而影响了冷却液和制动液本来的功能, 对车辆造成危害, 从而影响车辆的正常运行。实现对冷却液和制动液含水率的快速准确检测, 是保证冷却液和制动液品质的关键。采用傅里叶变换近红外光谱对不同品牌的掺水的汽车无水冷却液和制动液含水率检测进行了研究。分别采集了3个不同品牌无水冷却液和4个不同品牌制动液在掺入不同含水率(0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%)下的近红外透射光谱, 并基于 $10\,067\sim 5\,442\text{ cm}^{-1}$ 范围内的光谱进行了研究。不同含水率的无水冷却液和制动液近红外透射光谱存在差异。单个品牌不同含水率的无水冷却液及制动液的主成分分析(PCA)表明不同含水率样本之间存在差异。采用二阶导数(Second derivative)对单个品牌以及包含有不同品牌的无水冷却液及制动液(不同含水率)的特征波数进行了选择, 发现不同品牌之间选择的特征波数相近, 且单个品牌与包含不同品牌之间选择的特征波数也相近, 而经过特征波数选择后波数减少了至少98.67%。基于单个品牌样本的全谱以及包含有不同品牌样本的全谱和特征波数, 分别建立偏最小二乘(PLS)和最小二乘支持向量机(LS-SVM)模型, 所有模型的建模集和预测集决定系数均高于0.9, 剩余预测偏差(RPD)均高于3, 含水率预测模型取得了较好的预测结果。基于全谱的模型预测效果与基于特征波数的模型预测效果相当, 表明特征波数选择可用于无水冷却液和制动液中含水率的检测。基于单个品牌样本的模型预测效果与包含不同品牌样本的模型预测效果相近, 表明包含品牌差异, 建立基于多个品牌的无水冷却液和制动液掺水量的预测模型是可行的。研究结果表明, 近红外透射光谱结合化学计量学方法可用于不同品牌汽车无水冷却液和制动液掺水量检测, 为研究开发在线检测仪器奠定了基础, 也为其他类型的车用液体制品中含水率的检测提供了技术和方法参考。

**关键词** 近红外透射光谱; 含水率; 制动液; 无水冷却液; 品牌

**中图分类号:** O657.3   **文献标识码:** A   **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)07-2128-08

### 引言

随着经济和科技的发展, 全球汽车的消费量得到了显著的增长, 而庞大的汽车保有量使得对汽车相关产品的需求量维持在较高的水平。冷却液和制动液是汽车使用中不可或缺的产品, 冷却液中的主要成分是防冻液和其他添加剂。防冻液主要保证汽车发动机在正常的温度范围内工作, 制动液主

要是用于汽车液压制动系统之间传递压力、制止车轮转动。

目前所使用的冷却液主要包括含水冷却液和无水冷却液。与含水冷却液相比, 无水冷却液中没有水分, 从而减少了对部件的腐蚀, 减少油耗, 提升了对发动机的保护作用。相比于含水冷却液, 无水冷却液具有更高的价格, 因此掺水的无水冷却液代替无水冷却液是目前掺假的主要手段之一。制动液中掺水也是制动液掺假的主要手段之一。掺水的制动液对车辆的正常运行造成严重的影响, 容易造成交通事故。

收稿日期: 2018-05-22, 修订日期: 2018-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31402318)资助

作者简介: 张瑜, 女, 1977年生, 浙江经济职业技术学院副教授

e-mail: zy7739@126.com

\* 通讯联系人   e-mail: yhe@zju.edu.cn

因此冷却液和制动液中含水率的检测对于保证冷却液和制动液的质量及车辆运行安全十分重要。

传统的汽车用油含水率检测方法主要基于实验室物理化学方法,操作复杂,耗时费力,无法满足大批量的在线检测。近红外光谱作为一种快速无损的检测方法,可以在不接触检测样本的前提下实现无损检测,已广泛用于农业,食品,医药,纺织品,油品等领域。在车用油方面,近红外光谱也进行了相关的研究。Lima 等<sup>[1]</sup>基于近红外光谱技术对润滑油品质检测进行了研究。蒋璐璐等<sup>[2]</sup>提出了一种基于可见近红外光谱技术的汽车润滑油黏度测定新方法。胡碧霞等<sup>[3]</sup>采用近红外光谱对汽油辛烷值进行检测。近红外光谱技术还可用于车用油相关品牌和掺假的鉴别。Balabin 等<sup>[4]</sup>利用近红外光谱技术结合 7 种不同的分类方法对润滑油的种类实现了鉴别。张瑜等<sup>[5]</sup>采用近红外透射光谱对制动液的品牌和新旧使用程度进行了判别分析。对于无水冷却液和制动液品质的检测,由于品牌之间存在一定的差异,品牌对检测结果会存在一定的影响。

本研究的主要目的是探讨采用近红外透射光谱技术实现对汽车冷却液和制动液的含水率的快速检测的可行性,并研究品牌因素对无水冷却液和制动液含水率检测的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 材料

针对无水冷却液中含水率的检测,分别采集品牌为大黄蜂(BumbleBee),点睛(Keypoint)和好顺(Haoshun)的无水冷却液(生产年份统一为 2016 年)。掺入蒸馏水的体积比分别为 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 和 35%。每个样本溶液体积为 10 mL,装入 10 mL 试管中混匀备用。每个品牌无水冷却液每个掺水梯度制备 30 个样本,即每个品牌制备 240 个样本。

针对制动液中含水率检测,分别采集品牌为宝马(BMW),嘉车宝(Jiachebao),路虎(Landrover)和沃尔沃(Volvo)的制动液(生产年份统一为 2016 年),并采用相同的实验样本准备方法,每个品牌制备 240 个样本。

### 1.2 光谱采集

本研究中液体样本的光谱采用多功能傅里叶变换近红外光谱仪(Bruker optics, Germany)进行采集,光谱采集模式为透射。在室温下(25 °C)将混匀的液体转入测量瓶中,采集样本的近红外透射光谱。采集光谱时,光谱仪分辨率设置为  $8\text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数设置为 32 次,保存 32 次扫描的平均结果为该样本最终光谱,光谱保存范围为  $12\ 000\sim 4\ 000\text{ cm}^{-1}$ 。光谱采集操作由光谱仪配套软件 OPUS 6.5 software(Bruker Optics, Germany)完成。

### 1.3 数据处理

在本研究中,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)对不同含水率样本进行定性分析,以研究不同含水率的无水冷却液和制动液之间的差异<sup>[6]</sup>。分别采用偏最小二乘(partial least squares, PLS)<sup>[7-8]</sup>和最小二乘支持向量机(least-squares support vector machine, LS-SVM)<sup>[9-10]</sup>对冷却

液和制动液含水率进行定量分析。为了减少共线性信息和冗余信息的影响,采用二阶导数光谱(Second derivative spectra)对特征波数进行选择<sup>[11-12]</sup>。

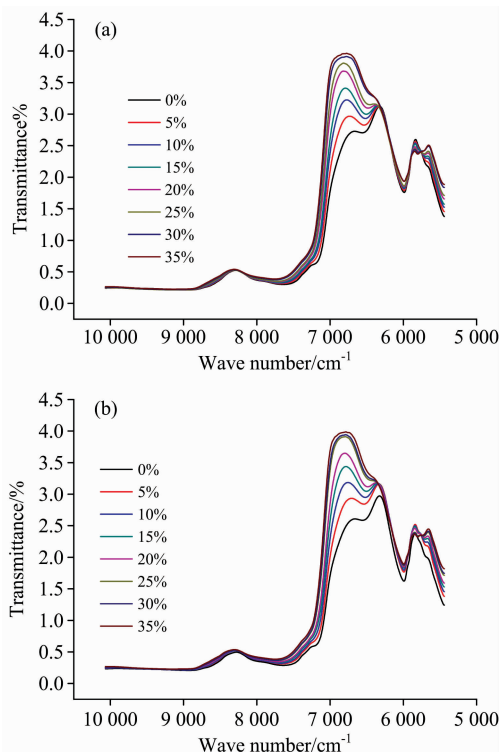
光谱数据处理中 PCA, PLS 和 LS-SVM 在 Matlab R 2014b(The Math Works, Natick, USA)上进行,二阶导数光谱在 Unscrambler 10.1(CAMO AS, Oslo, Norway)上进行。模型的预测效果由建模集和预测集决定系数(determination of coefficient,  $R^2$ ),建模集和预测集均方根误差(root mean square error, RMSE)以及剩余预测偏差(residual prediction deviation, RPD)决定。较好的预测模型,一般具有较高的  $R^2$  和 RPD,较低的 RMSE。由文献<sup>[13]</sup>可知, $R^2$  大于 0.9 或 RPD 大于 3 表明模型预测效果非常好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同含水率无水冷却液和制动液的光谱特征

光谱采集范围为  $12\ 000\sim 4\ 000\text{ cm}^{-1}$ ,考虑到仪器、样本和测量环境的因素,采集得到的光谱首尾包含有噪声,为去除噪声的影响,仅对  $10\ 067\sim 5\ 442\text{ cm}^{-1}$  范围内的光谱进行研究,同时采用移动平均平滑(moving average smoothing)对透射光谱进行预处理,平滑窗口为 7 点。

由图 1 可知不同品牌的无水冷却液具有相同的趋势,但对于同一个品牌的无水冷却液,其透射率随着含水率的变化而变化,尤其是在  $7\ 757\sim 6\ 330\text{ cm}^{-1}$  范围内,随着含水率的升高,其光谱透射率增加。由图 2 可知不同品牌的制动液具有相同的趋势,但对于同一个品牌的制动液,其透射率随着含水率的变化而变化,尤其是在  $7\ 757\sim 5\ 867\text{ cm}^{-1}$  范围内,随着含水率升高,其光谱透射率增加。



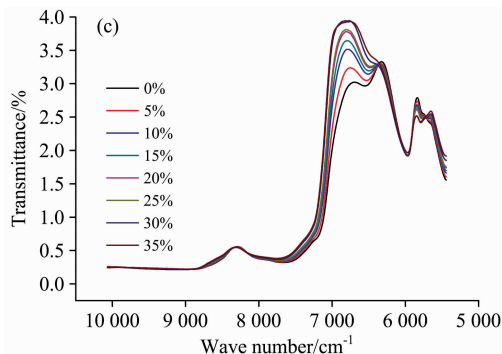


图 1 不同品牌不同含水率的无水冷却液平均光谱  
(a): 大黄蜂; (b): 点睛; (c): 好顺

Fig. 1 Average spectra of different brands of anhydrous coolant liquid with different water contents

(a): BumbleBee; (b): Keypoint; (c): Haoshun

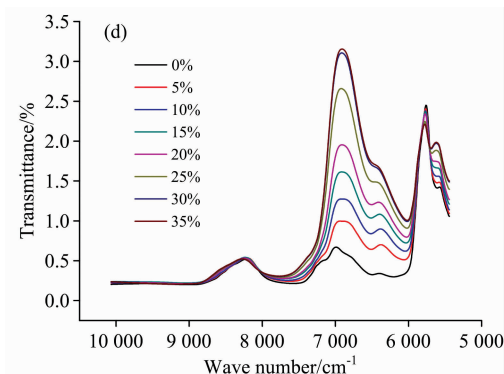


图 2 不同含水率的制动液平均光谱

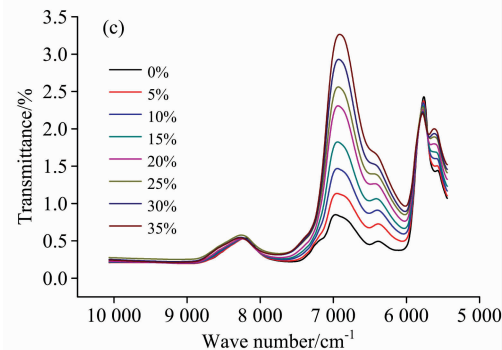
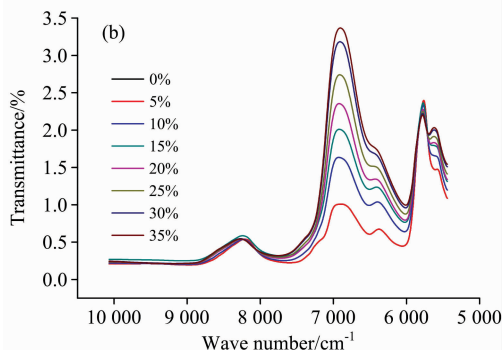
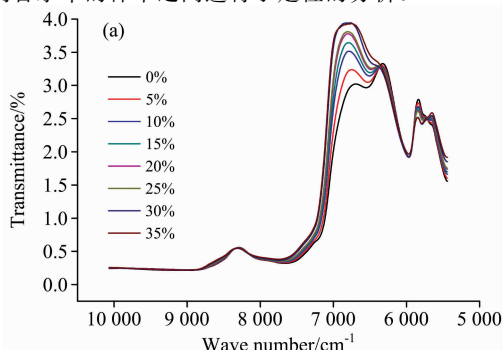
(a): 宝马; (b): 嘉车宝; (c): 路虎; (d): 沃尔沃

Fig. 2 Average spectra of different brands of brake fluid with different water contents

(a): BMW; (b): Jiachebao; (c): Landrover; (d): Volvo

2.2 主成分分析

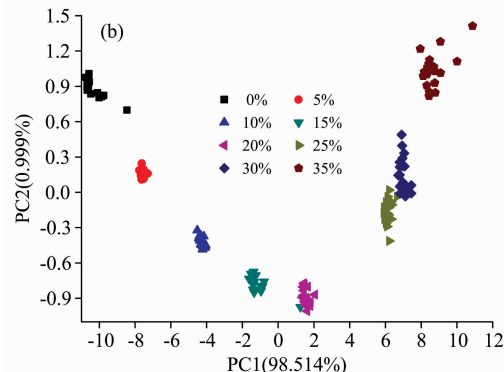
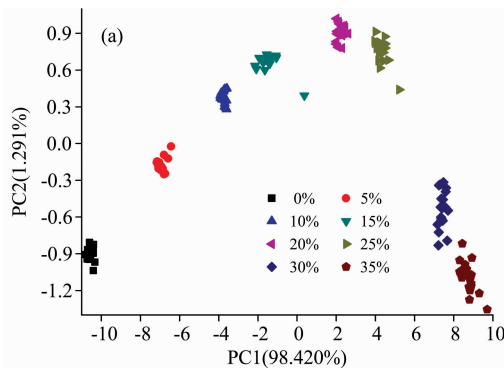
为了进一步研究添加不同含水量无水冷却液或制动液的差别, 采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 对不同含水率的样本之间进行了定性的分析。



由图 3 可知, 对于同一品牌的无水冷却液, 前两个主成分解释了超过 99% 的变量信息, 不同含水率的样本能够较好的区分, 而同一含水率的样本能够非常好的聚合到一起, 表明不同含水率样本之间的透射光谱存在较为明显的差异。而从不同品牌的 PCA 得分分布图可知, 傅里叶变换近红外光谱可用于掺假的不同含水量的无水冷冻液的定性识别。图 4 所示的制动液不同含水率样本取得了与图 3 中无水冷却液不同含水率样本相似的结果, 表明傅里叶变换近红外光谱可用于掺假的不同含水率的制动液的区分。

2.3 基于全谱的无水冷却液和制动液含水率预测模型

为了实现对无水冷却液和制动液中含水率的检测, 分别基于不同含水率的无水冷却液和制动液的全谱, 建立 PLS 和



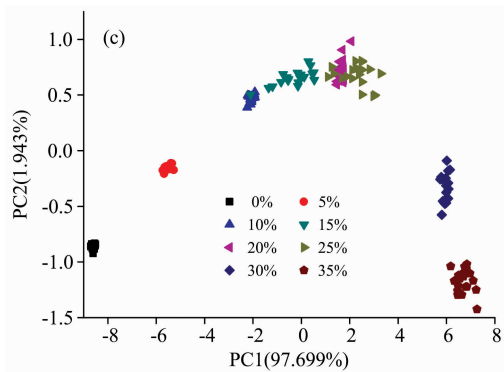


图 3 不同含水率的无水冷却液的主成分得分分布图

(a): 大黄蜂; (b): 点睛; (c): 好顺

Fig. 3 PCA scores scatter plots of anhydrous coolant liquid with different water contents

(a): BumbleBee; (b): Keypoint; (c): Haoshun

LS-SVM 的回归分析模型。每个品牌每个含水率梯度的样本,按照 2 : 1 的比例,随机划分为建模集和预测集。基于全谱的 PLS 和 LS-SVM 回归模型对无水冷却液含水率和制动液含水率的预测结果分别如表 1 和表 2 所示。本研究中,采用留一法交叉验证确定 PLS 模型的最优隐含变量数(latent variables, LVs);LS-SVM 模型以径向基核函数,本研究中采用网格搜索(grid-search)对核函数参数  $\sigma^2$  和正则化参数  $\gamma$  的值进行寻优,其寻优范围均为  $2^{-10} \sim 2^{10}$ 。

由表 1 可知,针对不同品牌的冷却液,所有的回归模型均取得了较好的预测效果,所有模型的建模集和预测集的决定系数均高于 0.96,且所有模型的 RPD 均高于 6,表明近红外光谱可用于无水冷却液中掺水量的检测。对于不同品牌的

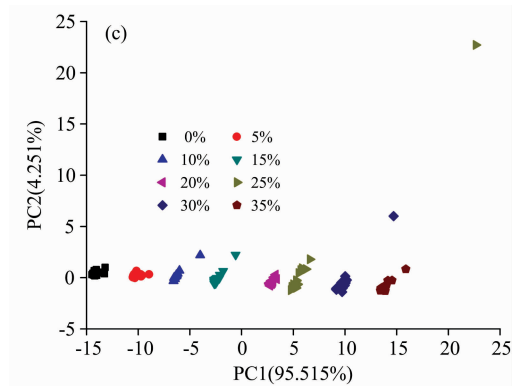


图 4 不同含水率的制动液的主成分得分分布图

(a): 宝马; (b): 嘉车宝; (c): 路虎; (d): 沃尔沃

Fig. 4 PCA scores scatter plots of brake fluid with different water contents

(a): BMW; (b): Jiachebao; (c): Landrover; (d): Volvo

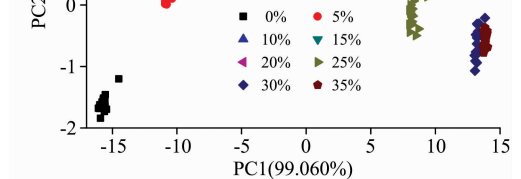


图 4 不同含水率的制动液的主成分得分分布图

(a): 宝马; (b): 嘉车宝; (c): 路虎; (d): 沃尔沃

Fig. 4 PCA scores scatter plots of brake fluid with different water contents

(a): BMW; (b): Jiachebao; (c): Landrover; (d): Volvo

无水冷却液,LS-SVM 模型的预测效果优于 PLS 模型,原因可能是不同含水率无水冷却液在近红外透射光谱包含有线性和非线性的信息,LS-SVM 可同时处理线性和非线性信息。

由表 2 可知,针对制动液中含水率的检测,基于不同品牌制动液的模型均取得了较好的预测效果,所有模型的建模集和预测集的决定系数均高于 0.97,且所有模型的 RPD 均高于 5。与无水冷却液相似,对于不同品牌的制动液,LS-SVM 模型的预测效果要优于 PLS 模型的预测效果。

由表 1 和表 2 可知,不同品牌的无水冷却液之间,不同品牌的制动液之间的预测结果存在差异,表明品牌差异对含水率的预测存在一定的影响。分别基于全部 3 个品牌的无水冷却液和全部 4 个品牌的制动液建立含水率检测的 PLS 和 LS-SVM 模型,均取得了较好的预测效果,其建模集和预测集的决定系数均高于 0.96,RPD 均高于 5。

### 2.4 特征波数选择

基于全谱的 PLS 模型和 LS-SVM 模型取得了较好的预测效果,而全谱包含有 1 200 个波数,这些数据中可能包含有共线性和冗余的信息,可能造成模型的复杂性和不稳定。考虑到不同含水率无水冷却液之间、不同含水率制动液之间的差异,采用二阶导数光谱进行特征波长选择。表 3 所示为不同品牌不同含水率无水冷却液、不同品牌不同含水率制动液平均光谱的二阶导数光谱和选择的特征波数。

由表 3 可知,不同品牌的制动液(不同含水率)的二阶导

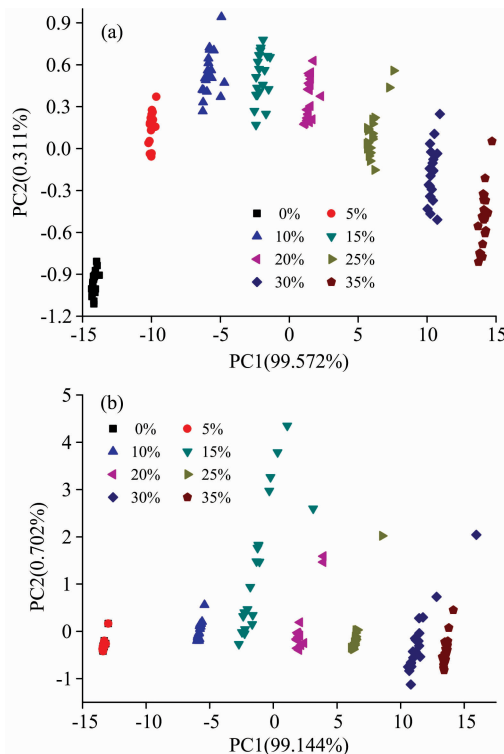


表 1 基于全谱的无水冷却液含水率预测模型预测结果

Table 1 Prediction results of water content in anhydrous coolant liquid using full spectra

品牌	模型	模型参数 <sup>a</sup>	建模集		预测集		
			$R_c^2$	RMSEC/%	$R_p^2$	RMSEP/%	RPD
大黄蜂	PLS	1	0.990	1.140	0.988	1.266	9.106
	LS-SVM	(3.285 7×10 <sup>8</sup> , 3.859 5×10 <sup>8</sup> )	0.999	0.390	0.997	0.604	19.087
点睛	PLS	1	0.981	1.592	0.981	1.578	7.306
	LS-SVM	(9.992 9×10 <sup>8</sup> , 9.907 8×10 <sup>8</sup> )	0.996	0.697	0.996	0.797	14.465
好顺	PLS	1	0.969	2.016	0.975	1.824	6.321
	LS-SVM	(373.234 7, 6.267 8×10 <sup>3</sup> )	0.989	1.204	0.984	1.496	7.706
全部	PLS	2	0.979	1.668	0.981	1.620	7.087
	LS-SVM	(5.711 6×10 <sup>3</sup> , 1.100 1×10 <sup>4</sup> )	0.993	0.953	0.987	1.299	8.838

注: a: 模型参数为 PLS 模型和 LS-SVM 模型的参数, 其中 PLS 模型为最优的主因子数, LS-SVM 模型参数为最优的 $(\gamma, \sigma^2)$ 组合

表 2 基于全谱的制动液含水率预测模型预测结果

Table 2 Prediction results of water content in brake fluid using full spectra

品牌	模型	模型参数	建模集		预测集		
			$R_c^2$	RMSEC/%	$R_p^2$	RMSEP/%	RPD
宝马	PLS	1	0.998	0.478	0.985	1.468	7.853
	LS-SVM	(7.713 2×10 <sup>7</sup> , 1.006 4×10 <sup>6</sup> )	0.999	0.211	0.990	1.169	9.862
嘉车宝	PLS	1	0.977	1.722	0.985	1.419	8.125
	LS-SVM	(7.744 6×10 <sup>7</sup> , 2.937 5×10 <sup>7</sup> )	0.987	1.327	0.986	1.354	8.515
路虎	PLS	2	0.997	0.648	0.995	0.837	13.774
	LS-SVM	(1.793 8×10 <sup>8</sup> , 7.616 3×10 <sup>7</sup> )	0.997	0.584	0.995	0.803	14.357
沃尔沃	PLS	1	0.983	1.499	0.978	1.721	6.699
	LS-SVM	(7.702 4×10 <sup>9</sup> , 1.539 4×10 <sup>10</sup> )	0.991	1.077	0.986	1.405	8.205
全部	PLS	1	0.972	1.912	0.968	2.047	5.605
	LS-SVM	(2.443 4×10 <sup>3</sup> , 1.114 7×10 <sup>3</sup> )	0.996	0.767	0.989	1.203	9.538

表 3 无水冷却液和制动液含水率预测特征波长选择

Table 3 Optimal wavenumbers selection for water content determination in anhydrous coolant liquid and brake fluid

品牌	个数	特征波数/cm <sup>-1</sup>
无水冷却液	大黄蜂	16 5 554, 5 589, 5 647, 5 701, 5 759, 5 805, 5 836, 5 894, 5 921, 5 948, 5 975, 6 283, 7 005, 7 213, 7 263, 7 305
	点睛	16 5 554, 5 593, 5 647, 5 705, 5 766, 5 805, 5 836, 5 894, 5 921, 5 948, 5 975, 6 283, 7 005, 7 213, 7 263, 7 305
	好顺	14 5 562, 5 589, 5 647, 5 685, 5 739, 5 793, 5 836, 5 874, 5 936, 6 283, 7 005, 7 213, 7 263, 7 305
	全部	16 5 558, 5 593, 5 639, 5 701, 5 755, 5 805, 5 836, 5 894, 5 921, 5 948, 5 975, 6 283, 7 005, 7 213, 7 263, 7 305
制动液	宝马	10 5 558, 5 697, 5 751, 5 813, 5 855, 5 901, 5 955, 7 005, 7 240, 7 263
	嘉车宝	9 5 558, 5 693, 5 755, 5 855, 5 901, 5 955, 7 005, 7 240, 7 263
	路虎	9 5 558, 5 697, 5 751, 5 863, 5 901, 5 955, 7 005, 7 240, 7 263
	沃尔沃	9 5 558, 5 697, 5 817, 5 859, 5 901, 5 955, 7 005, 7 236, 7 263
	全部	9 5 558, 5 697, 5 751, 5 859, 5 905, 5 955, 7 005, 7 240, 7 263

数光谱也具有较大的相似性, 选择的特征波长相近且部分特征波长完全相同, 且包含 4 个品牌的制动液(不同含水率)的二阶导数光谱与单个品牌的二阶导数光谱选择的特征波数相似, 部分特征完全相同。

## 2.5 基于特征波数的无水冷却液和制动液含水率检测模型

基于特征波数分别建立无水冷却液和制动液含水率检测的 PLS 和 LS-SVM 模型, 结果如表 4 和表 5 所示。由表 4 和表 5 可知, 基于特征波长的 PLS 和 LS-SVM 模型均取得了较好的预测结果。对于无水冷却液, 所有模型的建模集和预测集的决定系数均高于 0.97, 且 RPD 均高于 6。对于制动

液,除了沃尔沃品牌制动液外,其余所有模型的建模集和预测集的决定系数均高于 0.96,且 RPD 高于 5。整体而言,LS-SVM 模型的预测效果要优于 PLS 模型的预测结果,原因可能是二阶导数光谱选择特征波长是基于光谱特性的特征波数选择方法,选择出的特征波数中包含有非线性信息。

由表 1,表 2,表 4 和表 5 可知,与基于全谱的预测模型相比,基于特征波数的预测模型取得了相似的结果,结果表明选择的特征波数可用于无水冷却液和制动液含水率的检

测。全谱中包含有 1200 个波数数据点,而特征波数选择之后波数变量最多为 16 个,减少了 98.67% 变量数,极大的提高了建模效率,简化了模型。基于单个品牌无水冷却液或制动液选择的特征波数与包含不同品牌的无水冷却液或制动液选择的特征波数相近,表明基于单个品牌和包含不同品牌的预测模型和特征波数选择是可行的,未来可以建立基于更多品牌的模型,降低单个品牌模型建立和维护的成本。

表 4 基于特征波长的无水冷却液含水率预测模型预测结果

Table 4 Prediction results of water content in anhydrous coolant liquid using optimal wavenumbers

品牌	模型	模型参数	建模集		预测集		
			$R_c^2$	RMSEC/%	$R_p^2$	RMSEP/%	RPD
大黄蜂	PLS	1	0.995	0.836	0.992	1.065	10.825
	LS-SVM	( $9.78 \times 10^4$ , 162.196 8)	0.998	0.411	0.996	0.622	18.535
点睛	PLS	1	0.985	1.403	0.984	1.428	8.073
	LS-SVM	( $8.319 2 \times 10^4$ , 327.678 9)	0.997	0.654	0.994	0.926	12.45
好顺	PLS	1	0.975	1.804	0.980	1.667	6.916
	LS-SVM	(646.627 3, 42.974 3)	0.990	1.150	0.984	1.451	7.945
全部	PLS	2	0.981	1.593	0.982	1.582	7.257
	LS-SVM	(563.254 6, 10.738 3)	0.996	0.691	0.994	0.915	12.547

表 5 基于特征波长的制动液含水率预测模型预测结果

Table 5 Prediction results of water content in brake fluid using optimal wavenumbers

品牌	模型	模型参数	建模集		预测集		
			$R_c^2$	RMSEC/%	$R_p^2$	RMSEP/%	RPD
宝马	PLS	1	0.998	0.549	0.985	1.437	8.023
	LS-SVM	( $4.564 \times 10^4$ , 27.732 4)	1.000	0.193	0.983	1.510	7.635
嘉车宝	PLS	1	0.977	1.746	0.985	1.451	7.945
	LS-SVM	(636.839 9, 43.960 0)	0.987	0.994	0.987	1.291	8.930
路虎	PLS	2	0.995	0.771	0.994	0.922	12.504
	LS-SVM	( $1.442 9 \times 10^{10}$ , $5.012 0 \times 10^7$ )	0.997	0.620	0.995	0.807	14.286
沃尔沃	PLS	1	0.975	1.808	0.969	2.021	5.704
	LS-SVM	( $1.701 4 \times 10^6$ , 166.397 1)	0.997	0.649	0.936	2.951	3.907
全部	PLS	1	0.972	1.914	0.966	2.117	5.420
	LS-SVM	( $1.091 1 \times 10^4$ , 4.769 8)	0.997	0.668	0.978	1.717	6.683

### 3 结 论

通过采集不同品牌下掺入不同含水量的无水冷却液和制动液样本的傅里叶变换近红外透射光谱,结合化学计量学方法研究了对无水冷却液和制动液中含水率的检测。基于全谱的 PCA 得分散点分布图表明不同含水率样本之间存在有较为明显的差异。针对单个品牌的无水冷却液和制动液以及包含不同品牌的无水冷却液和制动液的含水率预测,分别建立了基于全谱的 PLS 和 LS-SVM 模型,取得了较好的效果。针对单个品牌和包含不同品牌的样本光谱,采用二阶导数光谱

选择的特征波长相近,且基于特征波数的 PLS 和 LS-SVM 模型的也取得了较好的效果。基于全谱和基于特征波长的模型中,绝大部分模型建模集和预测集的决定系数均高于 0.96,RPD 高于 5,表明采用近红外透射光谱结合化学计量学方法可用于无水冷却液和制动液中含水率的检测。基于单个品牌和不同品牌无水冷却液和制动液的预测模型结果表明,建立基于单个品牌和不同品牌无水冷却液和制动液含水率检测模型,可为掺水无水冷却液和制动液含水率在线检测平台的开发提供了技术和方法支撑,也为其他车用液体含水率检测提供了新研究思路。

## References

- [ 1 ] Lima F S G, Araujo M A S, Borges L E P. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2004, 12(3): 159.
- [ 2 ] JIANG Lu-lu, ZHANG Yu, LIU Fei, et al (蒋璐璐, 张 瑜, 刘 飞, 等). *Acta Petrolei Sinica • Petroleum Processing Section (石油学报 • 石油加工)*, 2011, 27(1): 112.
- [ 3 ] HU Bi-xia, ZHANG Hong-guang, LU Jian-gang, et al (胡碧霞, 张红光, 卢建刚, 等). *Journal of Nanjing University of Science and Technology (南京理工大学学报)*, 2017, 41(5): 660.
- [ 4 ] Balabin R M, Safieva R Z, Lomakina E I. *Microchemical Journal*, 2011, 98(1): 121.
- [ 5 ] ZHANG Yu, TAN Li-hong, HE Yong (张 瑜, 谈黎虹, 何 勇). *Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析)*, 2016, 36(10): 3179.
- [ 6 ] Zhao Y, Zhu S, Zhang C, et al. *RSC Advances*, 2018, 8(3): 1337.
- [ 7 ] Zhang C, Liu F, Kong WW, et al. *Sensors*, 2015, 15(7): 16576.
- [ 8 ] Cheng J H, Sun D W. *Food Engineering Reviews*, 2017, 9(1): 36.
- [ 9 ] Bao Y D, Liu F, Kong W W, et al. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(1): 54.
- [ 10 ] Cui C, Fearn T. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2017, 25(1): 5.
- [ 11 ] Zhang C, Jiang H, Liu F, et al. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(1): 213.
- [ 12 ] Siedliska A, Baranowski P, Zubik M, et al. *Postharvest Biology & Technology*, 2018, 139: 115.
- [ 13 ] Zornoza R, Guerrero C, Mataix-Solera J, et al. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7): 1923.

# Determination of Water Content in Watered Anhydrous Coolant Liquid and Brake Fluid of Automobile Using Fourier Transform Near-Infrared Spectroscopy

ZHANG Yu<sup>1</sup>, TAN Li-hong<sup>1</sup>, HE Yong<sup>2, 3\*</sup>

1. Zhejiang Technical Institute of Economics, Hangzhou 310018, China

2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3. Key Laboratory of Spectroscopy Sensing, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310058, China

**Abstract** Coolant liquid and brake fluid are important vehicle oils, and they are of great significance for the normal operation of vehicles. Adding water into the coolant liquid and brake fluid is the common adulteration method for coolant liquid and brake fluid. The active ingredients in adulterated coolant liquid and brake fluid will reduce, and function of coolant liquid and brake fluid will be influenced. This will result in the harm of vehicles, which will influence the normal operation of vehicles. Rapid and accurate detection of water content in coolant liquid and brake fluid is of importance for quality assurance. In this paper, Fourier transform near-infrared spectroscopy was used to determine water content in different brands of watered anhydrous coolant liquid and brake fluid. Three brands of anhydrous coolant liquid, and four brands of brake fluid were used. In addition, samples with water contents of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% and 35% were prepared. Fourier transform near-infrared transmittance spectra of the samples were acquired, and the spectral range of 10 067~5 442 cm<sup>-1</sup> were used for analysis. There were differences on near-infrared transmittance spectra among samples with different water contents. Based on each brand of anhydrous coolant liquid and brake fluid, principal component analysis (PCA) indicated the obvious differences among samples with different water contents. Besides, second derivative spectra were used to select optimal wavenumbers for each brand of anhydrous coolant liquid and brake fluid, as well as the combination of all brands. The selected optimal wavenumbers were similar among different brands of anhydrous coolant liquid as well as the combination of brands, and the selected optimal wavenumbers were similar among different brands of brake fluid as well as the combination of brands. The number of wavenumbers reduced at least 98.67% after selection. Based on the full spectra and the selected optimal wavenumbers, partial least squares (PLS) and least-squares support vector machine (LS-SVM) were built. All the models obtained quite good performances, with determination of coefficient ( $R^2$ ) over 0.9 and residual prediction deviation (RPD) over 3. These prediction models obtained good performances. The performances of models for single brands were similar to those for the combination of brands, indicating that it was feasible to build calibration models using the combination of brands which would benefit the practical application. The over-

all results indicated the feasibility of using Fourier transform near-infrared transmittance spectroscopy combined with chemometric methods could be used to determine water adulteration in different brands of anhydrous coolant liquid and brake fluid. The results would help to develop on-line detection systems for water adulteration in different brands of anhydrous coolant liquid and brake fluid, and would provide guidance for detecting water content other fluids for automobile.

**Keywords** Near-infrared transmittance spectroscopy; Water content; Anhydrous coolant liquid; Brake fluid; Brands

(Received May 22, 2018; accepted Oct. 30, 2018)

\* Corresponding author

---

(上接 2099 页)

**会务组联系方式**

李成辉(会议稿件)

四川大学分析测试中心

电话: 028-85410280; 18980877825

Email: atcpubs@scu.edu.cn

吴兰(会议咨询)

四川大学分析测试中心

电话: 028-85412512; 13688385033

Email: wulan@scu.edu.cn

王香凤(厂商联络)

北京师范大学分析测试中心

电话: 010-58807981; 13520034335

Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

**支持媒体:**

会议官网: 光谱网 <http://www.sinospectroscopy.org.cn>(会议各类信息发布以光谱网信息为准)

支持媒体:

分析测试百科网 <http://www.antpedia.com/>

仪器信息网 <http://www.instrument.com.cn>

**主办单位:**

中国光学学会

中国光学学会光谱专业委员会

中国化学会

**承办单位:**

四川大学分析测试中心

第 21 届全国分子光谱学学术会议暨 2020 年光谱年会组委会

2019 年 6 月 18 日