

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.015

基于统计学的高原环境下特种车辆油液监测数据标准化研究

刘海亮^{1,2}, 葛开颜², 黄大山², 王炳奇², 冯辅周¹

(1. 陆军装甲兵学院车辆工程系, 北京 100072; 2. 中国人民解放军 32272 部队, 四川 德阳 618000)

摘要: 针对海拔、温湿度、空气密度、大气压强、光照强度等环境特点, 对高原环境下特种车辆的油液监测数据标准化进行研究。提出油液监测元数据处理的概念, 利用主成分分析法, 通过监测数据相关性分析, 计算出数据界限阈值, 确立某型特种车辆油液状态参考标准和故障诊断界限标准。结果表明: 该研究为高原油液监测工作建立了一个基本框架, 可为其他同类车型提供有效参考。

关键词: 油液监测; 状态参考标准; 故障诊断界限标准; 高原环境; 数据标准化

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A

Research on Standardization of Oil Monitoring Data of Special Vehicles in Plateau Environment Based on Statistics

Liu Hailiang^{1,2}, Ge Kaiyan², Huang Dashan², Wang Bingqi², Feng Fuzhou¹

(1. Department of Vehicle Engineering, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. No. 32272 Unit of PLA, Deyang 618000, China)

Abstract: According to the environmental characteristics of altitude, temperature and humidity, air density, atmospheric pressure, light intensity and so on, the standardization of oil monitoring data of special vehicles in plateau environment was studied. The concept of oil monitoring metadata processing is proposed, by using the principal component analysis method and analyzing the correlation of monitoring data, the data threshold is calculated, and the oil condition reference standard and fault diagnosis threshold standard of a certain type of special vehicle are established. The results show that the study has established a basic framework for plateau oil monitoring, and can provide an effective reference for other similar vehicles.

Keywords: oil monitoring; state reference standard; fault diagnosis limit standard; plateau environment; data standardization

0 引言

特种车辆油液监测是以油液分析为手段, 通过在用油液的磨粒监测、光谱分析、理化性能监测等, 对车辆实施动态监控、预测和故障诊断, 并提出管理措施和维修决策的技术。实践证明: 油液监测技术能降低事故发生率、减少维修工时、延长车辆及油液的寿命, 是实现状态监控维修、促进以可靠性为中心的现代维修理论的推广和应用, 提高装备全寿命效益的一项重要技术^[1]。

油液监控从长期看是对海量油样数据进行分析、管理、有效使用的过程, 与元数据概念紧密相连。元数据是用来描述数据的数据, 是对数据的更高层级抽象, 是认识和管理数据的一种媒介和途径, 其使用目的在于识别资源、描述资源、评价资源、追踪资源等, 实现数据资源的有效发现、理解、组织和管理等^[2]。油液监测分析数据类型繁多, 包括光谱元素、铁谱和理化性能指标、闪点、水分粘度、污染度颗粒计数等分析指标等, 其中蕴含的大

量信息对特种车辆预测维修和车辆管理有很强的指导作用^[3]。

近年来, 油液监测数据的采集、处理与分析, 运用到航空、船舶、采矿等大型装备的故障预测与健康管理中^[3-7]。随着其对装备维修的指导作用愈发明显, 针对地面特种车辆的油液监测研究越来越多^[8-11]; 但是, 针对高海拔地区高寒、低压、缺氧、风沙大等恶劣条件, 润滑油脂、齿轮油、变速箱油等油液的特性变化情况进行监控的研究较少。笔者对高原环境条件下油液性能变化和某型特种车辆动力装置、传动装置的状态变化关系开展研究, 并对油液数据进行标准化分析、管理和有效使用。

1 油液监测技术和监测数据指标

油液监测是一门涉及摩擦学、机械设计、油液化学、分析化学等学科并具有显著的行业指向性、综合性和目的性的应用技术。由于各行业设备结构、使用环境存在较大的差异, 因此在航空、船舶

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-01-20

第一作者: 刘海亮(1988—), 男, 河南人, 硕士

通信作者: 冯辅周(1971—), 男, 湖北人, 博士。

及矿业等行业的监测体系，可以参考使用，但不能照搬照抄。根据某型特种车辆的管理特点和对维修可靠性的要求，结合大量监测数据分析，采用 3 维油液监测方法对该特种车辆进行监测，流程如图 1 所示。

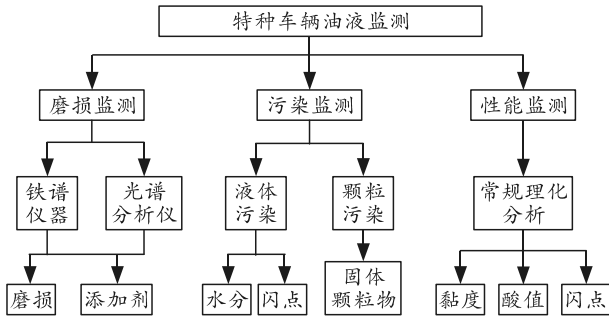


图 1 3 维油液监测方法

1.1 油液监测技术

1.1.1 基地化监测项目

1) 光谱分析。润滑油的光谱分析是指利用光谱分析的方法，鉴别润滑油中磨粒的成分和数量，据此预测被监测对象的磨损状态的方法。目的是根据润滑油中的磨粒所含元素的种类、含量以及变化趋势来识别特种车辆磨损状态。

2) 铁谱分析。目前广泛使用的油液监测技术。铁谱技术是利用高梯度、强磁场，将润滑剂中所包含的磨粒按其粒度大小有序地沉积下来，然后借助于其他各种分析方法对磨粒进行定性和定量分析的技术。

3) 常规理化分析。润滑油常规理化性能分析是根据润滑剂本身性能的变化来判断特种车辆的磨损状态，可以防止因润滑不良而导致的故障。包括粘度、水分、污染度、闪点等内容。

1.1.2 野外监测项目

1) 油液常规理化分析。对特种车辆使用的机油、液压油、传动油等进行基地化监测水分、粘度及闪点等项目。

2) 新品油常规理化分析。对新接收的油液及库存油进行基地化监测水分、粘度及闪点等项目。

1.2 主要数据指标

本次油液针对某特种车辆，历时 7 个月，共收集 120 台车辆 389 瓶油样 27 个采集参数。这些数据中，包含磨损、污染及常规理化性能 3 个状态属性。这些数据可能相互独立，也可能相互影响，需进一步挖掘其内在联系。

油液监测数据种类有很多，分为管理数据和技术数据，管理数据包含共性数据和参考数据，技术数据包含直接数据和间接数据^[3]。

1.2.1 管理数据

管理数据包括特种车辆所属单位、车型、车体号、车类别、部组件类型、取样部位、采样人员信息、采样时间及周期等，参考数据包括维护保养内容、故障集、油液标准状态(包含状态参考标准和故障诊断界限标准)及其他数据，如表 1 所示。

表 1 管理数据

管理数据	参数管理
所属单位	一级单位/二级单位/三级单位
车型	特种车辆型号
车体统一编号	XXXX-XXXX
取样部位	传动系统/动力系统/
采样人员	X 某某
采样周期/h	XX
油品名称	齿轮油/柴油/传动油
取样时间	20XX-XX-XX XX:XX:XX
监测性质	专项监测/日常维护

1.2.2 技术数据

1) 直接数据主要包括：① 光谱分析，测量油液中的铁、铬、铅、铜、铝、硅、镍等元素判断零部件的磨损状态；钙、钡、磷、锌、镁等元素判断油液的添加剂成分。② 铁谱分析，主要是油液中磨粒的尺寸大小、数量等判断零部件的磨损性质。③ 理化性能指标，包括固体污染颗粒物含量、浓度，运动粘度、水分、闪点及酸值。

2) 间接数据包括中间数据和处理分析结果，例如同类车型历史磨损元素和添加剂情况对比数据。

表 2 列出了高原环境下某型特种车辆 47 个油液样品，共分发动机、变速箱、发动机 3 个组别，共 27 个采集参数技术测试数据。

表 2 技术数据

样品	编号	Fe(铁)	Cr(铬)	Pb(铅)	Cu(铜)	...	Na(钠)	含水量	水活性	...	总磨损量
发动机	1	12	0	15	83	...	0	0.003 936	0.215	...	0.03
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
变速箱	19	8	0	10	11	...	18	0	0	...	0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
传动箱	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	47	21	0	6	9	...	44	0.001 391	0.124	...	0

2 油液监测数据数学处理

2.1 数据标准化

设某油样数据集为 $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ ；油样属性集为 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ；第 i 个油样的第 j 个属性为 $v=(d_i, a_j)$ ，简化为 $a_j(d_i)$ 。由于本文中对该车型采用 3 维油液监测方法，可将属性集 A 分类为 3 个属性子集 $A=\{M, W, X\}$ ，即磨损监测属性集 M ，污染属性集 W ，常规属性集 X 。

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1j} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{i1} & m_{i2} & \dots & m_{ij} \end{bmatrix} = m_j(d_i) \quad (1)$$

式中行为第 i 个油样的 j 种属性，包括磨损元素铁 (Fe)、铜 (Cu) 等，添加剂元素钙 (Ca)、硼 (B)、钠 (Na) 等及铁谱属性 (小磨粒数量、大磨粒数量、总磨损量) 共 26 种数据属性。同理可得出属性集 W 和 X 。

将样本属性集 A 的统计数据进行标准化：

$$a = (a_j(d_i) - \bar{a}_j) / s \quad (2)$$

式中： \bar{a}_j 为油样第 j 个属性的原始数据的平均值； s 为原始数据的标准差。若把标准化数据压缩在 $[0, 1]$ 区间，可用标准化公式进行处理。

$$a = (a_j(d_i) - a_j(d_i)_{\min}) / (a_j(d_i)_{\max} - a_j(d_i)_{\min}) \quad (3)$$

当 $a_j(d_i)=a_j(d_i)_{\max}$ 时， $a=1$ ；当 $a_j(d_i)=a_j(d_i)_{\min}$ 时， $a=0$ 。

2.2 主成分分析法

主成分分析法的原理是通过线性变换将原数据变换为一组各维度线性无关的数据，本质是将方差最大的方向作为主要特征，并且在正交方向上将数据“离相关”，消除数据之间的隐藏相关性，是常用的数据降维方法^[12]。该方法可以将高维空间数据降为低维特征空间，针对提取的时域参数过多，解决数据处理速度慢、实时性差等问题^[13]。其协方差为：

$$\text{Cov}(a_x, a_y) = \frac{\sum_{i=1}^m (a_{x_i} - \bar{a}_x) - (a_{y_i} - \bar{a}_y)}{m - 1} \quad (4)$$

当 $\text{Cov}(a_x, a_y) > 0$ 时，说明 2 组数据正相关；当 $\text{Cov}(a_x, a_y) < 0$ 时，则负相关。

油液监测的各数据不是相互独立，而是一个相互联系的整体。通过相关性分析，可以发现监测数据之间的内在联系，便于找出设备维护的关键控制点。

根据主成分分析和专家权重赋予，可以将数据中类似的数据做区间区分，相关性大的属性可以归

于一类，选出具有代表性的属性进行分析，剔除冗余属性，属性类似度为：

$$r(a_x, a_y) = \text{Cov}(a_x, a_y) / \sqrt{S_{a_x} S_{a_y}} \quad (5)$$

式中 S_{a_x}, S_{a_y} 分别为 2 种属性的方差， $r \in [-1, 1]$ ，某两项属性越接近， r 越接近于 1。用式(5)进行属性区间分类，即：当 $i \in [k, 1]$ 时，将接近的属性进行分组，根据相关性和专家权重赋予，标记出关键属性，这样可以提出冗余属性，降低数据的复杂度。

2.3 油液参考状态标准的确立

油液参考标准状态，是针对大量油液监测数据的数据处理，通常采用均值定义为参考标准状态。高原环境油液数据样本量较小，受异常值的影响较大，造成建议标准不合理。根据实际情况，需对数据进行处理，得出更加严谨符合实际情况的油液状态建议参考标准。

一般采取截尾法对油液数据进行处理，根据文献[14]的研究，由于传统的平均值计算会受异常值的影响，为了消除这种影响，可将数据按从小到大进行排序，并按照一定规则去掉两端的数据，对剩下的数据求平均值。这种方法随机性太大，可能会删除掉关键数据，因此可采用箱线法进行异常值判断，如图 2—3 所示。

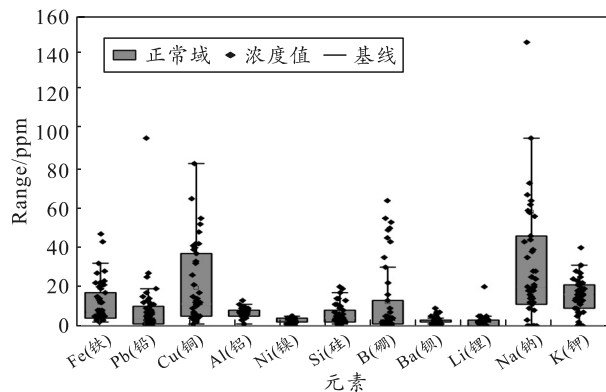


图 2 箱线法判断磨损元素异常值

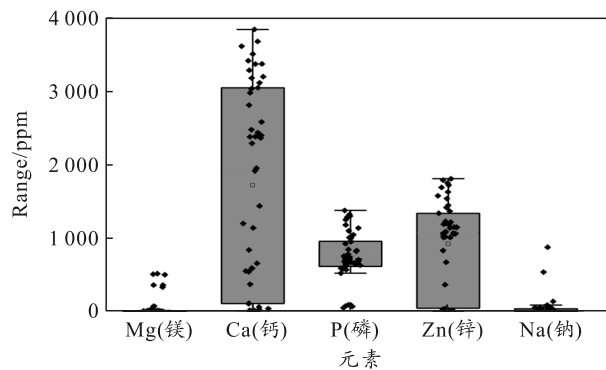


图 3 箱线法判断污染、添加剂元素异常值

油液参考状态标准可以在剔除异常值后，采用基于正态分布的 3σ 法则来确定正常区间、报警区间和报告区间。

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i ;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} .$$

根据 3σ 法则，建立界限区间为：

正常区间： $[0, \bar{a} + 2\sigma]$ ；

报警区间： $[\bar{a} + 2\sigma, \bar{a} + 3\sigma]$ ；

报告区间： $[\bar{a} + 3\sigma, +\infty)$ 。

3 油液监测数据分析和参考标准状态

我国高原地区主要以青藏高原为主，平均海拔 4 000 m 以上，日照充足，气压、气温变化大、含氧量较平原地区低，风大风频，雨量较少，但降水集中^[15]。其主要可能影响油液性能变化的参数主要有大气压强、低温和温度变化、水和湿度及空气含沙量等。

3.1 油液监测数据分析

由于某型特种车辆油液监测大量数据来源于平原环境，高原环境下所采样品，和前者相比具有：

- 1) 样品容量小；
 - 2) 数据经多次重复采样试验平均得出，可靠性较高；
 - 3) 样品没有缺失；
 - 4) 采样周期短，采样时间较为集中。
- 在数据分析和参考标准状态建立上，要建立动态调整分析数据模型，预留调整和动态变化数据接口。

根据表 2 提供的技术参数，光谱属性参数 23 种元素，主成因分析包括各项指标变化趋势分析、数学统计分析、在用某型特种车辆油液参考维护标准。各项指标变化趋势分析，是指对于有明显变化趋势的指标，将其初步筛选为某型特种车辆主成因指标；无明显变化趋势的指标，则不作为主成因指标。按照这条原则，根据图 4 某型特种车辆的主成因元素指标是 Zn、Ca、Pb、Pd、Fe、Cu 和 Na 这 7 项元素指标，同理推出某型特种车辆主成分指标为 7 项元素指标和含水量、运动粘度、总磨损量、闪点、污染颗粒数。

3.2 油液参考状态标准

选择元素指标和含水量、运动粘度、总磨损量、闪点、污染颗粒数等 12 种属性指标。如图 5 所示，以钠元素为例，采用基于正态分布的 3σ 法则来确定

正常区间、报警区间和报告区间。

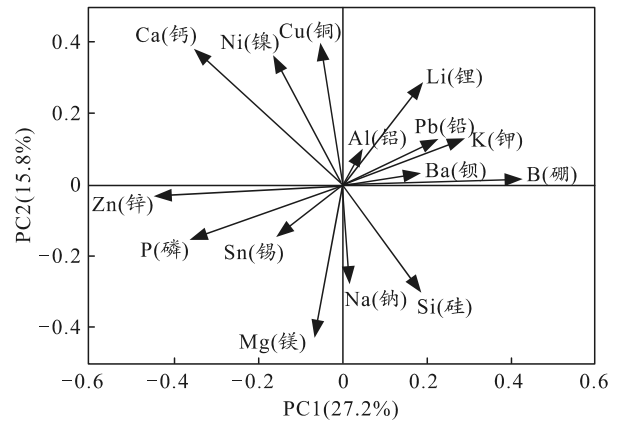


图 4 占比前 2 位的主成分分析

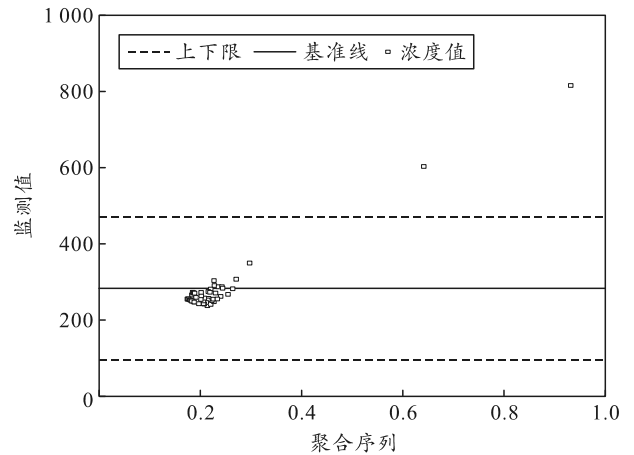


图 5 钠元素油液参考标准

经过分析发现：该批车辆未过质保期，油液整体情况较好，因为高原干燥环境，部组件含水量相比平原地区很少，现行监测值满足实际情况；元素指标中磨损元素均在正常值范围内，但总磨损量相较平原地区有较大差异，整体在高位监测运行。由于磨损加剧，造成添加剂元素 Ca 等超限，部分车辆经铁谱分析发现，出现磨损加剧等情况。

3.3 故障案例分析

某型特种车辆，发动机已使用 400 h，近期使用环境为西藏某地，30 天内风沙天气占一半以上，故障前正常启动，启动 30 min 后发现水温、油温偏高，发动机声音异常。通过抽取油液，光谱元素分析结果如表 3 所示。

表 3 油液分析结果

	Fe	Zn	Pb	Cu	Ca	Pd	Na
	2 670	319	137	123	2 095	114	10.4

通过表 3 可以看出：7 种磨损元素浓度值都远远超出某型特种车辆油液参考标准，在所有的监测特种车辆中非常罕见。对照发动机的分解鉴定结果，

机件的损坏与磨损金属元素含量两者一一对应。经铁谱分析后，如图 6 所示。拆检后情况如图 7—8 所示。

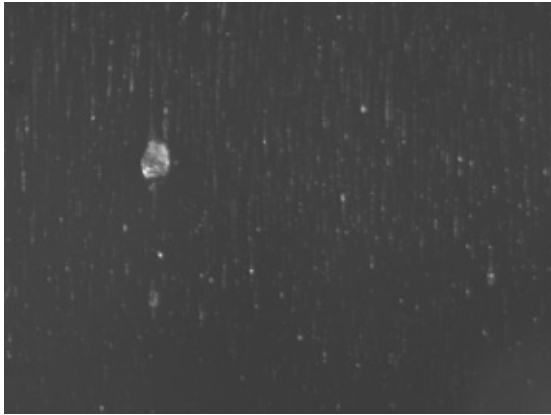


图 6 某样品铁谱分析



图 7 拆检后发现机油滤大量金属沫

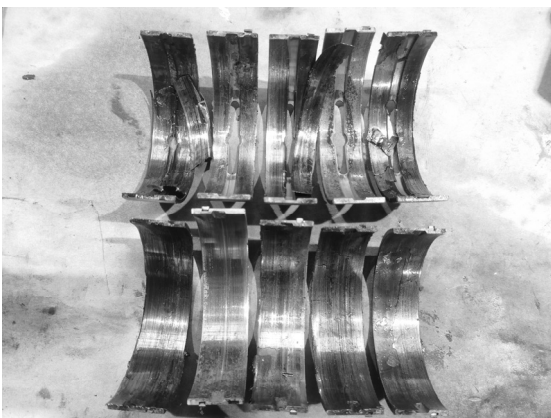


图 8 拆检后发现主轴瓦和止推片磨损情况

在高原环境下，尤其需加强油液监控，关注车辆状态，提前更换机油滤、柴油滤和空气滤，视情早换油脂或更换高标准油脂。

4 结论

笔者以某型车辆为切入点，利用元数据概念及统计学中相关性数据处理，建立其油液状态参考标准和故障诊断界限标准，并通过实例分析验证了其可参考性。笔者对高原环境下油液监测工作进行了初步的探索，为其他同类车型油液监测提供了有效参考和实践。

参考文献：

- [1] 毛美娟, 朱子新, 王峰. 机械装备油液监控技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 严红, 穆志勇, 李明哲, 等. 元数据标准化发展研究[J]. 信息技术与标准化, 2023(9): 25-29, 53.
- [3] 涂建军, 郭井加. 船舶装备油液监测的数据标准化[J]. 润滑与密封, 2018, 43(7): 131-135.
- [4] 舒畅, 汪定江, 秦宇飞. 航空油液监控技术应用现状分析及对策建议[J]. 航空维修与工程, 2022(8): 35-37.
- [5] 魏海军, 王增泰. 油液检测技术的应用[J]. 船舶物资与市场, 2004(3): 30-31.
- [6] 王凯. 油液监测技术的发展及其在设备管理中应用[J]. 设备管理与维修, 2018(22): 187-189.
- [7] 宋和义, 符豪. 船舶机械设备状态监测与故障诊断技术研究[J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(8): 84-86.
- [8] 郑长松, 马彪, 马源. 基于油液光谱分析的综合传动状态监测试验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 749-751.
- [9] 闫书法, 马彪, 郑长松. 基于油液光谱分析的综合传动视情维护研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3470-3474.
- [10] 靳莹, 江鹏程. 某型装甲车辆油液状态监测系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 27-30.
- [11] 邢志娜, 瞿军, 王菊香. 重载车辆发动机油液的多技术监测方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(5): 83-86.
- [12] 崔策, 贺石中, 李秋秋, 等. 基于 PCA-BP 神经网络的设备润滑状态评价应用[J]. 润滑油, 2019, 34(6): 54-57.
- [13] 雷亚飞. 工业互联网+油动机液压系统状态监测与故障诊断研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [14] 闫辉. 基于油液监测技术的设备润滑磨损状态评价方法的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2006.
- [15] 卢言利. 有机涂层高原环境影响参数分析及老化机理研究[J]. 涂料工业, 2012, 42(4): 12-16, 25.