

基于随机森林的高强化柴油机关键摩擦副磨损 诊断方法

刘杰¹,冯海波¹,刘峰春¹,谢俊¹,陈创¹,董红霞²,李闯¹,毛玉欣¹

1. 中国北方发动机研究所,天津 300406;2. 山西柴油机工业有限责任公司,山西 大同 037000

摘要:为明确柴油机润滑油中包含的摩擦副磨损信息,对某强化柴油机耐久试验过程中的170组润滑油液进行光谱分析,运用非线性拟合方法分析油液中Fe、Cu、Al元素的质量分数与关键摩擦副磨损的相关性;采用Python编程软件构建基于Fe元素的随机森林预测模型,并结合受试者工作特征(receiver operating characteristic,ROC)曲线评价预测模型的准确性。结果表明:与关键摩擦副磨损关联的主要元素Fe、Cu、Al的质量分数显著集中于特定区间,Fe-Al元素的质量分数可用来关联活塞-活塞环-缸套摩擦副磨损,Fe-Cu元素的质量分数可用来关联曲轴-曲轴瓦摩擦副磨损;根据Fe、Cu、Al元素的质量分数设置磨损正常区间和磨损预警区间,构建的Fe元素随机森林预测模型的准确率为88.24%;与关键摩擦副磨损关联的3种主要金属元素Fe、Cu、Al的质量分数存在强非线性相关关系,磨损预警区间可作为诊断高强化柴油机活塞-活塞环-缸套和曲轴-曲轴瓦这两类关键摩擦副异常磨损的补充依据。

关键词:摩擦副;光谱分析;磨损区间;磨损预警;非线性相关;ROC

中图分类号:TK422

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)06-0058-07

引用格式:刘杰,冯海波,刘峰春,等.基于随机森林的高强化柴油机关键摩擦副磨损诊断方法[J].内燃机与动力装置,2025,42(6):58-64.

LIU Jie, FENG Haibo, LIU Fengchun, et al. Wear diagnosis method for key friction pairs of high-strengthened diesel engines based on random forest method[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025,42(6):58-64.

0 引言

柴油机是一种动力输出装置,其内部结构复杂,包含多种不同类型的摩擦副形式,若摩擦副异常磨损,会显著影响整机性能及可靠性,甚至引发烧瓦、抱轴等严重故障,严重时导致整机报废^[1]。高强化柴油机具有单位体积小、但输出功率较大的显著特征,这一特征使得摩擦副的单位载荷显著增加、异常磨损加剧;因此在台架耐久性试验阶段,应重点考察关键摩擦副的磨损状态,尤其是摩擦副由稳定磨损转化为剧烈磨损的临界特征信息。在稳定磨损阶段,摩擦副各部件处于弹性接触状态,表面粗糙度基本保持均衡;在剧烈磨损阶段,各部件精度下降,接触界面间隙增大,使得工作条件恶化,相对运动不稳定,导致磨损率急剧升高^[2]。

高强化柴油机的关键摩擦副主要为活塞-活塞环-缸套摩擦副和曲轴-曲轴瓦摩擦副^[3]。柴油机运行过程中,摩擦副磨损产生的金属颗粒随润滑系统循环至润滑油^[4],油液中包含丰富的摩擦副磨损信息,能够表征磨损的典型特征。原子发射光谱分析技术是柴油机研发试验阶段油液检测的重要手段^[5]。近年来,随着光电集成技术的发展,铁谱、扫描电镜等检测方法显著提升了微观磨损特征的表征能力,在柴

收稿日期:2025-08-15

基金项目:DEDP(2023029)

第一作者简介:刘杰(1994—),男,山西大同人,工学硕士,工程师,主要研究方向为柴油机试验测试技术,E-mail:15536608548@163.com。

油机研发试制工程领域,光谱分析因其检测结果直观、操作简便、人为干扰小的优势,得到广泛应用^[6]。

目前,国内外摩擦副磨损的相关研究主要集中在光谱数据模型分析和元素质量分数预测。高经纬等^[7]在构建数据分析模型的基础上,提出了适合光谱数据预测的灰色模型和时间序列模型;冀树德等^[8]针对 Fe 元素光谱分析数据中存在的野点、漏点等不利于柴油机磨损状态判别的问题,提出了不同的修正处理方法,实现了光谱数据的预处理。

与传统数据拟合方法相比,神经网络、随机森林(random forest, RF)等人工智能算法能够较好地处理非线性问题,但缺乏普遍适用于诊断高强化柴油机活塞-活塞环-缸套和曲轴-曲轴瓦这两类关键摩擦副异常磨损的边界条件,无法直观评估关键摩擦副磨损状态;同时,光谱检测过程还存在多项干扰因素,如不规范取样、油样泄漏和污染、光谱分析仪误差等都会影响检出结果,若不结合测量阈值进行区分,会干扰现场状态辨识,降低试验效率。

本文中利用某强化柴油机耐久试验的 170 组润滑油液光谱数据,排除了检测过程的干扰因素,对关键摩擦副关联的 3 种主要金属元素(Fe、Cu、Al)的质量分数进行概率密度统计,得到数据分布规律;通过 RF 算法分析 3 种元素的非线性相关关系,得到诊断活塞-活塞环-缸套和曲轴-轴瓦这两类关键摩擦副异常磨损的补充依据,从而科学预测关键摩擦副磨损状态。

1 关键摩擦副磨损金属元素分析

1.1 金属元素分析

摩擦副的基本功能是确保柴油机内部相对运动部件能够平稳、高效地运转,同时最大限度地减少能量损耗。摩擦副剧烈磨损使柴油机性能劣化和可靠性降低,且耐久试验中摩擦副磨损状态影响整机大修期鉴定试验^[9-11]。

摩擦副材料中包含金属材料、非金属材料及复合材料,选取某强化柴油机耐久试验后的 170 组润滑油液,进行光谱数据统计分析,发现油液中与摩擦副磨损关联的主要金属元素包含 Fe、Cu、Al、Ni、Pb、Cr、Ag 等,其中 Fe、Cu、Al 元素的质量分数约为油液中主要金属元素的 49.5%、9.8%、9.3%,Fe、Cu、Al 元素在摩擦副关联金属元素中占比较大,因此,准确分析润滑油液中 Fe、Cu、Al 元素的质量分数对于获取摩擦副磨损信息具有重要意义。

进一步分析与关键摩擦副磨损关联的金属元素及该强化柴油机材料:在活塞运动摩擦副中,活塞环材料硬度较大,活塞材料力学性能较小,缸套和活塞容易磨损,由于该柴油机活塞中 Al 元素的质量分数高达 80%,认为 Al 元素可用于表征活塞磨损;在曲轴运动摩擦副中,曲轴材料硬度较高,曲轴瓦材料硬度较小,较易磨损,由于曲轴瓦主要由 Cu、Pb 等元素组成,且 Cu 的质量分数达 75%,认为 Cu 元素可用于表征曲轴瓦磨损;Fe 元素在多个摩擦副部件中均有表征,但 Fe 元素的质量分数超出监测阈值时,由于系统部件(如齿轮、轴承等)故障易排除,故采用 Fe 元素关联关键摩擦副,将其作为缸套、活塞环以及曲轴的主要特征元素。

综上所述,Fe-Al 元素的质量分数可用来关联活塞-活塞环-缸套摩擦副磨损,Fe-Cu 元素的质量分数可用来关联曲轴-曲轴瓦摩擦副磨损。

1.2 油液光谱分析

贝尔德公司的 MOA 原子发射光谱仪利用原子吸收或发射光谱,分析润滑油中金属元素的质量分数,油液在激发室中棒电极与盘电极之间的间隙激发,发射光分解为不同波长的谱线,通过光电转换技术将光信号转换为电压信号,计算油液中各元素的质量分数^[12]。

某强化柴油机采用干式油底壳,对其进行台架耐久试验,将柴油机与实验室机油箱通过管道连接,润滑油经进油管道进入柴油机冷却、润滑后,经回油管道回流至实验室机油箱。

为了准确分析柴油机运行状态下磨损金属元素的质量分数,在润滑油回油管道距离柴油机回油接口约 20 cm 处设置取样阀,台架取样位置如图 1 所示。试验以每运转 10 h 为一个循环,在柴油机外特性工

况下,设置各运行工况的转速依次为额定转速的80%、85%~90%、100%及最大转矩工况,运行时间分别为100、420、60、20 min,采集170组润滑油液进行光谱分析。

1.3 金属元素质量分数分布

元素质量分数正态分布概率密度

$$f(w) = \exp\left[-\frac{(w-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] / (\sqrt{2\pi}\sigma),$$

式中: w 为某元素质量分数, μ 为某元素平均质量分数, σ 为某元素质量分数标准差。

对170组油液样本进行光谱分析,选择Fe、Cu、Al3种元素的质量分数构成数据集。通过Shapiro-Wilk检验方法对数据进行正态性检验。

采用显著性水平 p_y 评价元素质量分数分布, p_y 越大,元素的质量分数越接近正态分布,各元素的质量分数概率密度分布如图2所示,数据检测结果如表1所示。

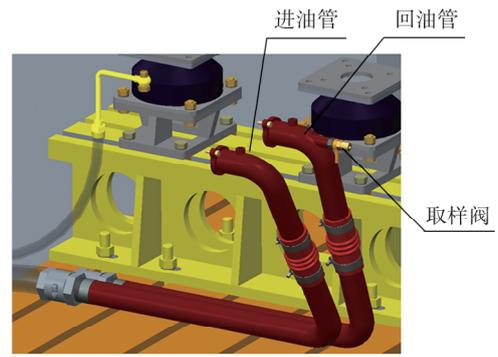


图1 台架取样示意图

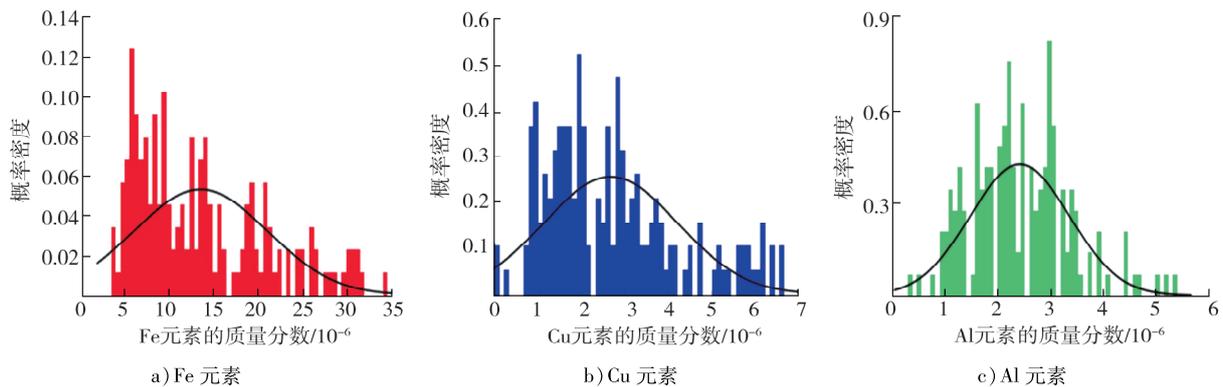


图2 油液中各元素的质量分数概率密度分布

表1 数据检测结果

元素	$\mu / 10^{-6}$	$\sigma / 10^{-6}$	$[\mu-\sigma, \mu+\sigma] / 10^{-6}$	p_y
Fe	13.57	7.50	[6.07, 21.07]	1.6×10^{-8}
Cu	2.68	1.55	[1.13, 4.23]	2.3×10^{-7}
Al	2.42	0.94	[1.48, 3.36]	1.0×10^{-2}

由图2和表1可知:对比其他元素,Al元素 p_y 最大,最接近正态分布,表明本机型耐久试验中活塞无异常磨损;各元素的质量分数集中在 $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$,表明耐久试验无拉缸、曲轴瓦异常磨损等异常情况;关键摩擦副关联的3种主要金属元素Fe、Cu、Al相互关系不清晰,质量分数分布特点不明显。

2 元素相关性检验

结合柴油机耐久试验光谱分析结果,设置各元素磨损正常区间和磨损警觉区间,通过非线性拟合方法验证磨损元素质量分数的相关性。拟合过程为:1)将磨损正常区间下限设定为0,磨损警觉区间上限为数据集单一元素最大质量分数 w_{\max} ,得到Fe、Cu、Al元素的质量分数磨损正常区间和磨损警觉区间;2)通过集成机器学习算法——RF算法拟合3种元素的非线性关系,评估高强度柴油机关键摩擦副磨损的光谱分析结果与随机森林融合诊断效果,为诊断活塞-活塞环-缸套和曲轴-曲轴瓦两类关键摩擦副异常磨损提供补充依据。

2.1 RF 算法

RF 算法是建立在决策树上的集成机器学习方法,可分析复杂且相互作用的分类特征,具有准确性高、泛化能力强、鲁棒性好、学习速度快的优点^[13-14],本文中采用 RF 算法验证关键摩擦副关联的 3 种主要金属元素质量分数间的相互关系。

RF 算法构建流程:1)构建数据训练集 T_1, T_2, \dots, T_k ; 2)在数据训练集中通过随机采样和节点随机分裂技术构建多棵决策树,每棵决策树独立参与预测,自上而下以条件语句规则抽象数据分类,直到确定每个数据样本的标签路径;3)每棵决策树的输出为 $H_1(x), H_2(x), \dots, H_k(x)$,采用多数投票法,以最高票数结果 $H_k(x)$ 作为最终输出^[15]。RF 算法构建示意如图 3 所示。

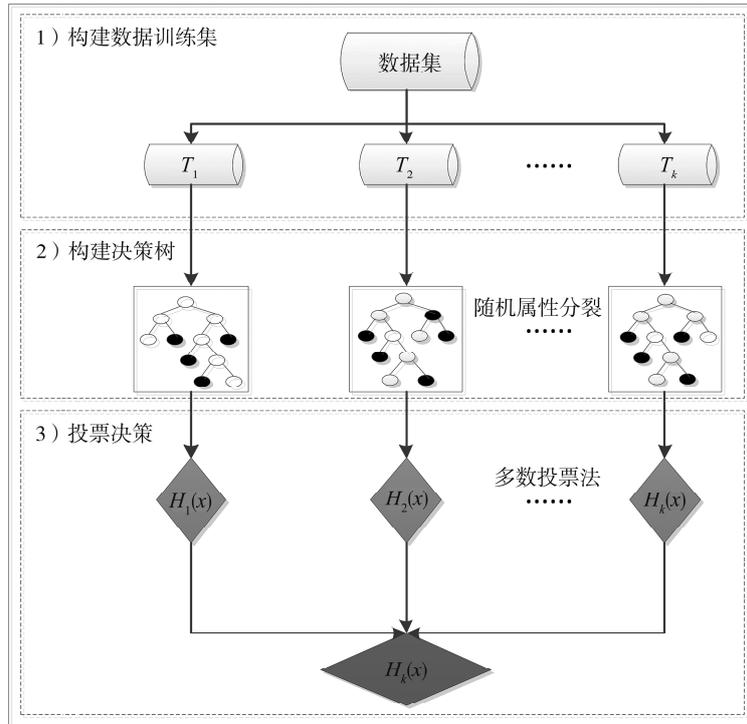


图 3 RF 算法构建示意图

2.2 构建二分类模型

综合相关研究和工程应用经验,设置金属元素的质量分数磨损正常区间为 $[0, \mu + \sigma]$, 磨损警觉区间为 $(\mu + \sigma, w_{\max}]$ 。在原始数据集中,将磨损正常区间和磨损警觉区间分别设置特征标签 0 和 1,完成原始数据集向特征数据集的转换,不同元素的质量分数磨损正常区间和磨损警觉区间对应的特征标签如表 2 所示。

表 2 各元素的质量分数磨损正常区间和磨损警觉区间对应的特征标签

特征标签	$w(\text{Fe})/10^{-6}$	$w(\text{Cu})/10^{-6}$	$w(\text{Al})/10^{-6}$
0	$[0, 21.07]$	$[0, 4.23]$	$[0, 3.36]$
1	$(21.07, 35.00]$	$(4.23, 8.00]$	$(3.36, 8.00]$

2.3 随机森林模型构建

基于 Windows 平台 Python3.8 环境完成程序开发,采用 Python 语言进行算法编制,调用 Random Forest、Numpy、Pandas、Matplotlib、pyplot 等程序包,通过 Excel 文件存储位置和 Pandas 库的 pd.read_excel 函数导入数据集;基于随机森林设计方法,将 Fe、Cu、Al 元素的质量分数特征标签数据集划分为训练集和

测试集,训练集与测试集的比为7:3;将Fe元素与Cu、Al元素的相关性预测问题转换为机器学习的二分类问题,即在训练集中构建多颗决策树,构造决策树节点时,随机抽取特征标签数据集,构成一个属性子集后进行节点分裂,分类模型选择Random Forest Classifier;在测试集中通过Cu、Al元素特征预测Fe元素特征。

为独立评估构建模型的性能,基于分割好的测试集进行指标测试。所有决策树均参与测试集预测,通过对比预测特征标签和实际特征标签,计算模型准确率,该过程优化了随机森林决策树的相关参数:决策树数为200,最大深度为6,最小样本数为2,最小叶子节点数为1。

2.4 模型计算

基于构建的RF模型,结合测试集完成相关预测,采用精确率、召回率、误报率、漏报率计算预测模型的分类效果。实际特征标签为0时,精确率

$$k_p = n_z / (n_z + n_f), \quad (1)$$

式中: n_z 为预测特征标签与实际特征标签一致且均为0的样本数, n_f 为预测特征标签为0且实际特征标签为1的样本数。

召回率

$$k_r = n_z / (n_z + n_a), \quad (2)$$

式中 n_a 为预测特征标签为1且实际特征标签为0的样本数。

误报率

$$k_w = 1 - k_p. \quad (3)$$

漏报率

$$k_s = 1 - k_r. \quad (4)$$

实际特征标签为1时,精确率

$$k_p = n_1 / (n_1 + n_a), \quad (5)$$

式中 n_1 为预测特征标签与实际特征标签一致且均为1的样本数。

召回率

$$k_r = n_1 / (n_1 + n_f). \quad (6)$$

Fe元素的样本总数为51,实际特征标签为0时的样本总数为44,实际特征标签为1的样本总数为7, $n_z=39$ 、 $n_f=1$ 、 $n_a=5$ 、 $n_1=6$,由式(1)(2)可得:Fe元素实际特征标签为0时, $k_p=0.975$ 、 $k_r=0.886$;由式(5)(6)可得:Fe元素实际特征标签为1时, $k_p=0.545$ 、 $k_r=0.857$ 。

综上所述,预测正确样本数为45,模型预测准确率为88.24%,预测和分类效果较好,验证了关键摩擦副关联的3种主要金属元素Al、Cu与Fe存在强的非线性相关关系。

根据特征标签划分意义及磨损警觉区间,关注Fe元素的质量分数不在警觉区间的误报率和落于警觉区间的漏报率。由Fe元素二分类结果可知:Fe元素实际特征标签为0,表明Fe元素的质量分数不在警觉区间内,模型误报率为2.5%;Fe元素实际特征标签1,表明Fe元素质量分数在警觉区间内,模型漏报率为14.3%。

2.5 模型评价

为了进一步描述模型准确率,采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线进行评价,结合ROC曲线下面积(area under the curve, AUC)量化ROC曲线。

AUC为1时,模型可以完美区分所有的正、负样本,是理想的最优模型曲线;AUC为0.8~1.0时,模型区分能力优秀,对正、负样本的识别准确性较高;AUC为0.5时,模型的区分能力和随机猜测没有区别,完全没有预测价值。ROC曲线如图4所示,图中假正率为被模型错误判断为正的样本负样本数与所有真实负样本数的比,真正率为被模型正确判断为正样本的数与所有真正样本数的比,红色虚线为无效参考线,此时AUC为0.5。本文中Fe元素随机森林预测模型的AUC为0.872,模型识别准确度较高。

根据特征标签划分及模型运算结果可知,磨损警觉区间划分合理,Cu、Al与Fe元素质量分数的非线性

性相关关系清晰,在关键摩擦副磨损警觉方面,Fe-Al 两种元素用来关联活塞-活塞环-缸套摩擦副磨损,Fe-Cu 两种元素用来关联曲轴-轴瓦摩擦副磨损。

当 $21.07 \times 10^{-6} < w(\text{Fe}) < 35.00 \times 10^{-6}$ 且 $3.36 \times 10^{-6} < w(\text{Al}) < 8.00 \times 10^{-6}$ 时,两种元素的质量分数同时位于磨损警觉区间,需警觉活塞-活塞环-缸套摩擦副磨损;当 $21.07 \times 10^{-6} < w(\text{Fe}) < 35.00 \times 10^{-6}$ 且 $4.23 \times 10^{-6} < w(\text{Cu}) < 8.00 \times 10^{-6}$ 时,两种元素的质量分数同时位于磨损警觉区间,需警觉曲轴-曲轴瓦摩擦副磨损。磨损警觉区间可以作为诊断活塞-活塞环-缸套和曲轴-曲轴瓦这两类关键摩擦副异常磨损的补充依据。

3 结论

1) 分析关键摩擦副磨损金属元素的材料特性,其中 Al、Cu 元素在关键摩擦副磨损表征方面为单一特征量,Fe 元素关联多种特征量,Fe-Al 元素的质量分数可用来关联活塞-活塞环-缸套摩擦副异常磨损,Fe-Cu 元素的质量分数可用来关联曲轴-曲轴瓦摩擦副异常磨损。

2) 选取某强化柴油机耐久试验中的 170 组油液光谱数据中 3 种元素的质量分数构成数据集,按照分布特点定义 Fe、Cu、Al 元素的质量分数的磨损正常区间和磨损警觉区间,构建了 Fe 元素随机森林预测模型,采用该分类方法的预测准确率为 88.24%,Fe 元素未处于磨损警觉区间的误报率为 2.5%,落于磨损警觉区间的漏报率为 14.3%。

3) 采用 ROC 曲线验证 Fe 元素随机森林预测模型,ROC 曲线下面积为 0.872,说明模型分类识别能力较好,通过非线性拟合验证了 Cu、Al 与 Fe 元素的质量分数之间的强相关性,磨损警觉区间可以用于诊断活塞-活塞环-缸套和曲轴-曲轴瓦这两类关键摩擦副异常磨损的补充依据。

参考文献:

- [1] 刘娜. 柴油机关键摩擦副的摩擦润滑性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [2] 乔玉鹏. 柴油机台架磨合过程摩擦学特性的实验室模拟研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [3] 冀树德, 孙学东, 郭旭宏, 等. 基于缸套-活塞环摩擦副的柴油机磨合规范研究[J]. 车用发动机, 2014(2): 31-35.
- [4] 俞峰, 杨成梧. 物元分析方法在基于油液光谱分析的发动机磨损状态监测中的应用[J]. 内燃机学报, 2006(3): 280-283.
- [5] 徐超, 张培林, 任国全, 等. 基于改进半监督模糊 C-均值聚类的发动机磨损故障诊断[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 55-60.
- [6] 周薇薇. 磨损过程中磨粒特征形识别研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [7] 高经纬, 张培林, 张英堂, 等. 某型柴油机磨损特点及油液光谱分析诊断研究[J]. 内燃机学报, 2004(6): 571-576.
- [8] 冀树德, 许世永, 刘新华, 等. 柴油机油液诊断中光谱分析数据的预处理[J]. 润滑与密封, 2011, 36(8): 105-108.
- [9] 刘亚美. 柴油机活塞环组润滑及动力学数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [10] 尹必峰. 内燃机关键摩擦副表面微织构润滑与摩擦机理及应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- [11] 张英堂, 任国全, 高经纬. 基于机油光谱分析的柴油机磨损规律建模研究[J]. 车用发动机, 2005(2): 20-22.
- [12] 姜旭峰, 费逸伟, 李华强, 等. 航空发动机滑油综合监测技术研究[J]. 润滑与密封, 2005(2): 110-112.
- [13] 魏东海, 王磊, 赵志超, 等. 随机森林算法在柴油机故障诊断中的应用[J]. 机械设计与制造, 2020(7): 63-66.
- [14] 杨贺雅, 邢纹硕, 陈聪, 等. 基于随机森林二分类器的模块化多电平换流器子模块开路故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3916-3928.
- [15] 程绍驰, 游光荣. 基于改进随机森林算法的评估指标精简方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(7): 2108-2113.

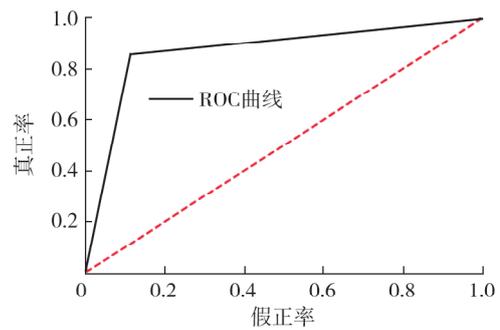


图4 模型 ROC 曲线

Wear diagnosis method for key friction pairs of high-strengthened diesel engines based on random forest method

LIU Jie¹, FENG Haibo¹, LIU Fengchun¹, XIE Jun¹,
CHEN Chuang¹, DONG Hongxia², LI Chuang¹, MAO Yuxin¹

1. China North Engine Research Institute, Tianjin 300406, China;

2. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037000, China

Abstract: To clarify the friction pair wear information contained in diesel engine lubricating oil, spectral analysis is performed on 170 groups of lubricating oil samples collected during the durability test of a high-strengthened diesel engine. The nonlinear fitting method is adopted to analyze the correlation between the mass fractions of Fe, Cu, and Al elements in the oil and the wear of key friction pairs. A Python programming software is used to construct a random forest prediction model based on Fe element, and the receiver operating characteristic (ROC) curve is combined to evaluate the accuracy of the model. The results show that the mass fractions of Fe, Cu, and Al elements, which are mainly correlated with the wear of key friction pairs, are significantly concentrated in specific intervals. The mass fractions of Fe-Al elements can be used to correlate the wear of piston-piston ring-cylinder liner friction pairs, while the mass fractions of Fe-Cu elements can be used to correlate the wear of crankshaft-crankshaft bearing friction pairs. The normal wear interval and wear alert interval are set according to the mass fractions of Fe, Cu, and Al elements, and the accuracy of the constructed Fe-element random forest prediction model reaches 88.24%. There is a strong nonlinear correlation among the three main metal elements of Fe, Cu, and Al, and the wear alert interval can be used as a supplementary basis for diagnosing abnormal wear of piston-piston ring-cylinder liner and crankshaft-crankshaft bearing friction pairs in high-strengthened diesel engines.

Keywords: friction pairs; spectral analysis; wear interval; wear alert; nonlinear correlation; ROC

(责任编辑:胡晓燕)

.....
(上接第 57 页)

on the pre-ignition characteristics of the E22 engine are further analyzed. The results show that under low-speed and high load conditions, the pre-ignition frequency of the E22 ethanol gasoline is 1–3 times that of pure gasoline (E0). The use of low calcium engine oil can reduce the frequency of pre-ignition. When the torque is 240 N·m, the pre-ignition frequency of the E22 engine is reduced by 65% compared to conventional engine oil. Increasing the number of fuel injector holes from 4 to 8 and shifting the injection, the pre-ignition frequency of the E22 engine is decreased by 61% compared to before optimization when the torque is 240 N·m. Reducing the excess air coefficient can gradually decrease the frequency of pre-ignition. By using low calcium engine oil combined with optimized fuel injection, the pre-ignition frequency of the E22 engine is significantly reduced, and it passed the pre-ignition test standard. The engine produces a peak torque of 240 N·m within the speed range of 1 750–4 000 r/min, and achieves a maximum power of 120 kW at 5 500 r/min.

Keywords: E22; pre-ignition; low-calcium engine oil; injector optimization; excess air ratio

(责任编辑:臧发业)