

轻型汽车实际行驶排放普适性严苛场景的统计识别

薛浩洋¹, 王坤², 杜宝程², 王英章¹, 吴冬梅¹, 付明明¹, 张力^{1*}

(1. 重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044; 2. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

Statistical Identification of Universal Harsh Scenarios for Real Driving Emissions of Light Vehicles

Xue Haoyang¹, Wang Kun², Du Baocheng², Wang Yingzhang¹, Wu Dongmei¹,
Fu Mingming¹, Zhang Li^{1*}

(1.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, 400044, China; 2.
China Automotive Engineering Research Institute Co Ltd, Shanghai 200438, China)

Abstract: Based on a large amount of light-duty fuel vehicle real driving emissions (RDE) test data, the RDE test second-by-second sampling data were divided into a large number of class trip data window subsets using the time-series moving average window method with a window time length of 300 seconds. Then, factor analysis was applied to reduce the multifactorial metrics affecting the RDE test to two metrics, trip dynamics factor and terrain factor, and cluster analysis was used to characterize the statistical class trip data window and to identify and extract a generalized and representative window of severe emissions data. The method is able to eliminate the interference of occasional anomalously high emission values in the RDE test with a high level of confidence, resulting in 41 prescriptive real driving emission severity scenarios. Speed profile and terrain profile data from the scenarios can be accurately reproduced on a laboratory chassis dynamometer to support laboratory calibration of real-world vehicle emissions.

摘要:基于大量轻型燃油车辆实际行驶排放(RDE)试验数据,以300秒为窗口时间长度,采用时序移动平均窗口法将RDE试验逐秒采样数据划分为大量类行程数据窗口子集。再运用因子分析方法将影响RDE试验的多因素指标缩减为行程动力学因子和地形因子两个指标,并使用聚类分析统计类行程数据窗口特征,识别和提取具有普适性和代表性的排放严苛数据窗口,该方法能够消除RDE试验中偶然性异常高排放值的干扰,具有较高的置信度,最终形成41个具有规范性的实际行驶排放严苛场景工况。实际行驶排放严苛场景工况的速度轮廓和地形轮廓数据可在试验室底盘测功机上进行精确再现,从而支持车辆实际行驶排放的试验室校准。

关键词: 实际行驶排放; 移动平均窗口法; 因子分析; 二阶聚类分析; 排放严苛场景

Key words: real driving emissions; moving average window method; Factor analysis;

Second-order cluster analysis; emission severity scenarios

中图分类号: U448.213

文献标识码: A

0 概述

世界人口的快速增长和社会经济的高速发展大幅增加了个人机动性活动,且显著增加道路交通排放所产生的空气污染(Anenberg et al. 2017)。减少道路交通排放是未来打造可持续发展城市的主要挑战之一。为更有效地在源头上控制道路交通污染物

排放、改善城市空气质量,过往数十年里车辆排放法规体系不断发展、推进(Hooftman et al. 2018; Ribeiro, Rodella, and Hoinaski 2021; Wallington et al. 2016)。在欧6排放标准中,全球统一轻型车辆测试程序(WLTP)取代新欧洲驾驶循环(NEDC)成为欧洲现行的标准驾驶循环;同时,考虑到试验

收稿日期: 2023-07-24

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0139)

作者简介: 薛浩洋(1998-),男,重庆大学硕士生,主要研究方向为实际行驶排放控制, E-mail:675945104@qq.com

通讯作者: 张力(1968-),男,重庆大学教授, E-mail: zhangli20@cqu.edu.cn

室条件下的标准驾驶循环无法完整代表车辆的实际行驶工况特征(Pavlovic et al. 2018; Bielaczyc and Woodburn 2019), 实际行驶排放(RDE)测试程序被首次纳入现行排放标准(Giechaskiel et al. 2016; Joshi 2020)。

RDE 测试采用便携式排放测量系统(PEMS)测量车辆在实际道路行驶条件下的排放和能源消耗情况。由于没有像实验室标准测试循环那样预设的行驶时间-速度曲线, RDE 测试中会涵盖更广泛的车辆和发动机运行工况(Ricardo et al. 2019)。然而, 更大的挑战在于 RDE 试验中环境温度、交通状况、道路坡度等试验边界条件的不确定性(Du et al. 2020)。受此影响, 即使相同的车辆在相同的行驶路线上重复测量, RDE 试验排放结果也往往存在明显的差异。因此, 为使车辆的 RDE 试验结果能满足排放法规中的限值的要求, 开发工程师需要用多样化的测试方案来覆盖所有可能会出现 RDE 测试情况, 这大大增加了标定工程师的工作负担和对测试资源的要求(Claen et al. 2020)。

应对如此挑战, 以事件为目标的排放标定策略被提出(Claen et al. 2020)。实际上, 在 RDE 试验过程中只存在少数排放严苛的时间序列(事件)与改进排放校准有关, 如果能在底盘测功机上准确再现这些严苛排放事件, 则可在实验室条件下更系统性地针对这些事件进行排放校准及控制优化, 完成整车 RDE 性能优化的目标(Wasserburger, Schirrer, and Hametner 2023)。然而, 影响车辆 RDE 试验的边界条件有强随机性, 即使相同车辆在不同的 RDE 试验过程中所呈现的严苛排放事件的场景都会呈现出相当大的差异性; 如果再涉及到不同的车辆, 识别具有普适性的严苛排放事件的场景则更为困难。

为此, 中国汽车工程学会以中国汽车行驶工况(CLTIC-P)曲线作为推荐基本工况, 并挑选相对正加速度排序 80%分位值以上的短行程片段作为激烈驾驶工况的补充。但其仅关注驾驶激烈程度高的速度-时间数据分布, 对道路地形状况等因素的考虑存在不足。

因此有必要结合我国道路实际行驶数据开发出符合中国道路交通环境的严苛排放场景工况, 若直接选取排放值最高的事件作为排放场景工况往往会受到采样数据偶然性的影响, 不具备典型性和普适性, 因此研究基于多元数据分析对实际行驶排放普适性严苛场景的统计识别方法具有重要意义。

1 试验及方案

本文使用 10 辆不同型号的轻型燃油车, 依照国 6 标准 II 型试验中对车辆载荷、测试设备、环境、路线等要求共开展 10 次 RDE 试验。

1.1 测试车辆与设备

测试车辆为 10 辆不同品牌且符合国六排放标准的轻型燃油车, 编号为 A—J 车, 为使研究车型结果具备普适性, 故所选车型均被定位为轻型燃油车。且发动机排量、功率、工作方式等具有多样性, 具体技术参数如表 1 所示。10 辆车均装配三元催化器(TWC), 缸内直喷车型则加装颗粒物捕集器(GPF), 燃油标号为 92 号汽油, 且均具备发动机的自动启停功能。

表 1 测试车辆主要技术参数

编号	排量 /L	功率 /kW	质量 /kg	供油 方式	变速 箱	进气方式
A	1.5	78.5	1235	MPI	DCT	自然吸气
B	2.0	185	1920	GDI	AT	涡轮增压
C	1.5	115	1541	MPI	DCT	涡轮增压
D	1.5	133	1972	GDI	DCT	涡轮增压
E	2.0	137	1625	GDI	DCT	涡轮增压
F	2.0	113	1548	GDI	CVT	自然吸气
J	2.0	137	1665	GDI	DCT	涡轮增压
H	1.5	147	1495	GDI	AT	涡轮增压
I	1.5	118	1675	GDI	DCT	涡轮增压
J	2.0	175	1655	GDI	AT	涡轮增压

车载排放测试系统为日本 HORIBA 公司生产的 OBS-ONE 便携式排放测试系统(PEMS), 主要由中央控制模块、总碳氢分析模块(HORIBA-FA)、气态污染物分析模块(HORIBA GS)、颗粒物计数模块(HORIBA PN)、电源、气象站、全球定位系统(GPS)和排气流量计等组成如图 1 所示。

其可以测得车辆尾气污染物相关参数、经度、纬度、海拔等信息。另外, 测试系统通过车载诊断系统(OBD)获取发动机和车辆的运行数据, 包括发动机转速、发动机冷却剂温度、节气门位置、进气质量流量、进气压力等; 并通过测量排气流量管的压力差、排气压力和温度计算出排气流量。测试系统还配置大气压力传感器, 环境温度、湿度传感器, 通过结合 GPS 输出信息, 获取试验过程中的环境信息。该排放测试系统测量精度满足 RDE 试验要求, 并且被美国 EPA 认证。

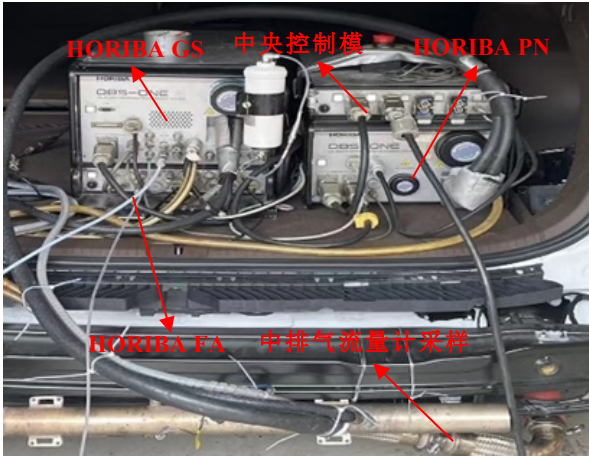


图1 便携式排放测试设备安装示意图

1.2 试验路线

试验路线的选取严格遵守 RDE 的测试规范,在中国区域共选择 4 条测试路线,分别记为 Route1—Route4,其通过 GPS 经纬度信息获得的卫星路径图如图 2 所示。其中 Route1 和 Route4 道路相对平缓,平路路段占比超过 80%,然而 Route2 和 Route3 道路相对陡峭,有较高比例的路线处于坡度较大的上下坡路段,但以上所有路线总行程累计海拔增量均在法规边界条件的 1200m/km 以内,多路线的选择有助于消除单条路线试验结果偶然性对结论造成的影响,同时多类路线选择丰富了排放严苛场景识别的原始数据集,使结论更具有普适性。

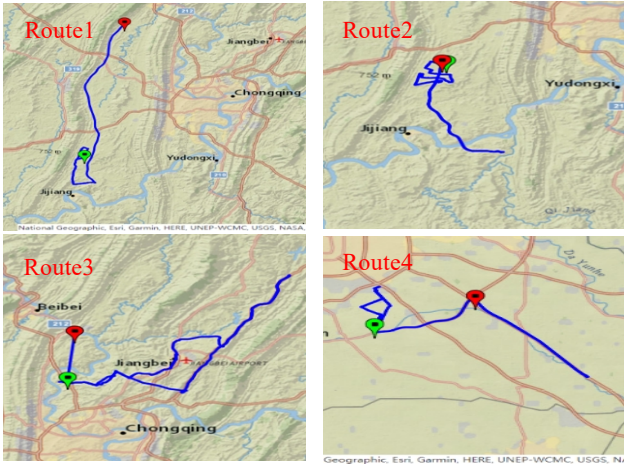


图2 RDE 测试路线图

2 数据处理

2.1 数据预处理

2.1.1 数据的窗口化处理

根据国六法规要求,在窗口处理前需在逐秒采样的原始数据中剔除设备零点校验、冷启动、地面车速低于 1km/h、发动机熄火工况的数据。本文采

用固定时长 300S 的移动平均窗口法 (MAW) 将 10 次 RDE 试验连续逐秒采样的测试原始数据划分为一系列短行程数据窗口。划分数据窗口时向前 (或向后) 以 1S 时间步长移动,与 PEMS 数据取样周期一致,窗口的时间宽度固定为 300S,直到最后一个窗口末尾数据为最后一个处理数据为止。

根据窗口各污染物累积排放量以及累积行驶距离,计算得到每个窗口 4 种污染物 (CO₂、CO、NO_x、PN) 的单位距离排放量来衡量短行程排放水平,即排放因子 (g/km)。

不同车型之间由于发动机结构、排量及标定方法,变速箱类型,整车质量等因素的影响,会使得相同行驶工况下污染物排放量有所差异。为在一定程度上消除该差异性对结果造成的影响,故对每个车型数据窗口的各排放因子进行无量纲化处理,以各车型在试验室 WLTC 循环工况下的各污染物排放因子为基准做比值处理,从而得到的无量纲排放因子数值,其大小代表该工况下的排放严苛程度。该无量纲化处理方法也有利于后续网格聚类中不同车型之间排放因子进行算术平均叠加,从而更具普适性确定排放严苛场景区域。

2.1.2 数据窗口的行程属性计算

在上述数据窗口集的基础上,除计算污染物无量纲排放因子外,还需进一步计算表征每个窗口行程属性的相关参数,用以表征数据窗口的动力学特征和道路地形特征,具体计算参数如下所示。

除平均车速外,排放法规中还定义了用于描述驾驶激烈程度的两个行程动力学参数: $v \cdot a_{pos}[95]$ (车速与大于 0.1m/s² 正加速度乘积升序排列的第 95 百分位值) 和 R_{PA} (相对正加速度); 本文同时补充表征数据窗口动力学特征参数平均正加速度 M_{PA} 和 $Vsp_pos[95]$ (整车比功率升序排列的第 95 个百分位值),计算方法见公式(1)~(7)。

$$d_i = v_i / 3.6, i = 1 \sim N \quad (1)$$

$$a_i = (v_{i+1} - v_{i-1}) / 7.2, i = 1 \sim N \quad (2)$$

$$(v \cdot a_{pos})_i = v_i \cdot a_{pos,i} / 3.6 \quad (3)$$

$$R_{PA} = \sum_{j=1}^M ((v \cdot a_{pos})_i \cdot \Delta t) / \sum_{i=1}^N d_i \quad (4)$$

$$M_{PA} = \sum_{j=1}^M a_i / M \quad (5)$$

式中, d_i 表示单位采样时间内行驶距离, m; v_i 表示单位采样时间内的实际车速, km/h; N 表示窗口

数据样本总数, 此处 $N=300$; a_i 表示单位采样时间内的加速度, m/s^2 ; $(v \cdot a_{pos})_i$ 表示单位采样时间内车速与大于 0.1m/s^2 正加速度乘积 (m^2/s^3); M 表示具有正加速的样本个数。

在计算数据窗口的 $V_{sp_pos}[95]$ 时, 参照轻型汽油车的比功率经验公式计算每个采样时间的 V_{sp} 值, 如下所示:

$$V_{sp} = v(1.1a + 9.81r + 0.132) + 0.000302v \quad (6)$$

式中, r 为道路坡度, m/m 。本文中每个时刻的瞬时坡度是通过 1Hz 频率记录的 GPS 海拔高度数据、瞬时车速和测试时间等参数通过插值处理并光滑滤波的方式获得的。在计算之前需要对设备采样得到的海拔数据进行校正, 若数据某时刻数据与高精地图数据差距超过 40m , 则使用高精地图数据进行校正替换, 具体校正计算过程参照 GB18352.6-2016 中的 DH 附件。

本文以累计正海拔增量作为表征数据窗口道路地形特征的参数, 其计算方法见公式(7)。

$$CPEI = 10^5 \times \sum_{d_j}^{d_{j+1}} r^+ / (d_{j+1} - d_j) \quad (7)$$

式中 d_j 为第 j 个窗口其实计算点之前车辆的累计行驶距离, m , r^+ 为正的的道路坡度, m/m , $CPEI$ 为累计正海拔增量, $\text{m}/100\text{km}$ 。

将上述行程特征参数及各污染物的无量纲排放因子作为行程属性赋予数据窗口, 使数据窗口具有路段属性。再根据数据窗口的平均车速将其划分为市区、市郊和高速三类窗口。其中, 平均车速小于 45km/h 划分为市区窗口, 平均车速大于或等于 45km/h 且小于 80km/h 划分为市郊窗口, 平均车速大于或等于 80km/h 且小于 145km/h 划分为高速窗口。

因此共得到 12 种不同路段、不同污染物的数据窗口集, 这些数据窗口集作为后续排放普适性严苛场景研究的数据基础。

2.2 因子分析

由于对 RDE 试验的影响因素过多, 主要有平均车速、 $v \cdot a_{pos}[95]$ 、 $V_{sp_pos}[95]$ 、 R_{PA} 、 M_{PA} 以及 $CPEI$, 且这 6 个变量因素之间不独立, 为了选取排放严苛场景, 首先将数据窗口的特征参数进行因子分析, 利用降维思想把多参数指标转化为少数具有代表性的综合指标, 根据得到的成分因子及其所占的方差百分比, 构造适当的价值函数从而将多个特

征参数转化为一维描述, 从而得到一个新的综合参数指标来表征该类特性。由于不同路段筛选出的窗口数据之间有特性差异, 所以按照路段分成市区、市郊及高速数据窗口集 3 种情况分别使用因子分析法进行处理。

因子分析可以把具有错综复杂关系的变量归结为少数不可观测的潜在变量来解释原变量间的相关性或协方差关系, 计算得到因子得分矩阵以及方差贡献率并通过线性组合的方式得到新的潜在变量, 从而达到数据系统维度降低的目的, 增强了数据系统的可解释性。

为此, 首先对不同路段的数据窗口集采用 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 法和 Bartlett 法进行了适用性检验, 在平均车速、 $v \cdot a_{pos}[95]$ 、 $V_{sp_pos}[95]$ 、 R_{PA} 、 M_{PA} 以及累计正海拔增量这 6 个原始变量中, 累计正海拔增量与其它变量具有较强的正交性, 无法通过主成分分析的可行性检验。故将原始变量划分为地形因素以及行程动力学因素两类, 除地形因素 $CPEI$ 外, 对其它 5 个因素按照路段分别进行因子分析。市区、市郊及高速 3 个路段的样本数据 KMO 值分别为 0.627、0.643、0.686, 大于标准值 0.5; Bartlett 球形检验统计量的值分别为 143304、84463、47844, p 值均为 0, 小于 5% 的显著性水平。因而各路段数据窗口集经检验满足进行因子分析的条件, 可采用因子分析方法对 5 个因素进行降维处理。

因子分析通过坐标变换转换 5 个原始变量 (f_1-f_5) 得到 2 个成分因子, 记为 F_1 和 F_2 , 再求取相关系数矩阵的特征值和相应的标准正交的特征向量, 根据相关系数矩阵的特征值计算成分因子的方差贡献率与累积贡献率, 各路段数据窗口的因子分析总方差解释贡献率分别为 92.176%、91.447%、90.471%, 均超过 80%, 可得这一处理过程效果较好, 所产生的信息损失是少量的, 如图 3 所示。

对于各路段数据窗口样本集, 采用回归法得到原始变量在不同成分因子上的载荷, 即因子得分系数, 各路段数据窗口原始变量在成分因子上的得分系数如表 2 所示。据此将降维得到的两个成分因子表示为原始变量的线性组合, 以因子得分系数为权, 在此基础上, 根据旋转方差贡献率将两个成分因子线性加权组合以构成一个新的综合变量, 称为数据窗口样本集的综合行程动力学因子, 从而分别对应计算每个数据窗口的综合行程动力学因子, 并将其作为属性赋予窗口。

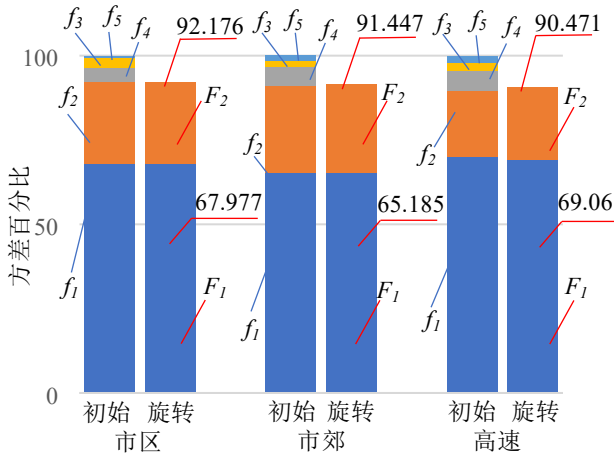


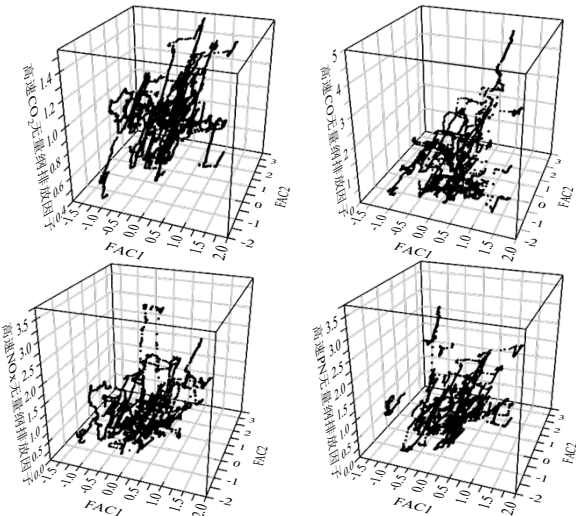
图3 各路段因子分析总方差解释

表2 各路段窗口原始变量得分系数

路段	市区		市郊		高速	
成分因子	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2
v	-0.03	0.69	-0.01	0.76	-0.19	0.73
$v \cdot a_pos[95]$	0.28	0.26	0.28	0.17	0.23	0.43
$Vsp_pos[95]$	0.28	0.26	0.28	0.27	0.23	0.52
R_{PA}	0.26	-0.27	0.27	-0.22	0.27	-0.19
M_{PA}	0.29	-0.19	0.29	-0.21	0.27	-0.10

2.3 网络聚类

按路段分别进行因子分析之后,得到的综合行程动力学因子,记为 $FAC1$;另将窗口的 $CPEI$ 标准化得到的地形特征因子用于表征行驶路线的地形特性,记为 $FAC2$ 。本文将 $FAC1$ 和 $FAC2$ 视为 RDE 试验边界的完整描述。以高速路段为例,降维后数据窗口无量纲排放因子散点图如图4所示,在此基础上,利用网络聚类的算法思想,对该边界平面上数据划分有限数目的网格区域单元。

图4 高速路段降维后数据窗口无量纲排放因子散点图
每个网格区域单元内的所有数据窗口样本均视

为具有同类试验边界条件的数据簇类,故对同一数据簇类内所有数据窗口的无量纲排放因子进行算数平均叠加,从而表征该类试验边界下污染物排放水平。针对各路段各污染物各车型的数据窗口,分别以对应的 $FAC1$ 和 $FAC2$ 为横纵坐标,以对应排放物算数平均叠加的无量纲排放因子为 bar 坐标绘制 3D 柱状图,如图6所示。

通过相同网络结构上的聚类统计,将各种车型的数据窗口叠加在一起,从而反映该网络聚类上所有车型的污染物排放的代表性特征。从另一个角度来看,其体现了相同特征试验边界条件下不同车型的数据窗口样本群的污染物排放的均值,网络单元所得无量纲污染物排放均值越大,则指示该同类型试验边界条件下具有更为严苛的污染物排放,并且该指征是 10 辆不同轻型燃油车的 RDE 试验的综合表现,更具有普适性。

2.4 二阶聚类分析

按不同路段(市区、郊区和高速)和不同污染物(CO_2 、 NOx 、 CO 、 PN)进行分组,筛选出网络聚类中无量纲排放因子位列前 10% 的网络单元,并将其中的数据窗口作为新的研究对象,称之为精简数据窗口集;再以各自窗口综合行程动力学因子 $FAC1$ 、窗口累计正海拔增量标准化后的地形因子 $FAC2$ 以及对应的无量纲排放因子作为输入进行聚类统计,选取每类中具有代表性(最接近类质心)的窗口数据作为该簇类严苛场景工况的典型特征代表,本文在聚类分析时采用二阶聚类的方法。

二阶聚类法(Two-Step-Cluster, TSC)与其他传统的聚类方法有显著的区别,其可自动确定最佳聚类个数,同时处理离散型数据和连续型数据的聚类问题,适用于大型数据的聚类。二阶聚类分为两个阶段,第一阶段称之为预聚类(Pre-Cluster),对记录数据进行距离计算,构建特征分类树(Cluster-Feature-Tree, CF),根据节点内相似度程度生成节点;第二阶段使用第一阶段的聚类结果再次进行聚类,然后将聚类结果用赤池信息准则(Akaike-Information-Criterion, AIC)指数或者贝叶斯信息准则(Bayesian-Information-Criterion, BIC)来进行判断,本文将使用 BIC 指数来判断,最后得出最佳聚类结果。区别于系统聚类和 K-means 聚类,二阶聚类在满足数据量大的前提下还能自动寻找最佳聚类数目。二阶聚类根据前后两次数据处理方式的组合,聚类效果精确且拥有很好的可扩展性。

其中距离使用对数似然函数来表征,计算方法

见公式(8)~(9)所示:

$$\xi = -N \left(\sum_{k=1}^{k^A} \frac{1}{2} (\hat{\delta}_k^2 + \hat{\delta}_{jk}^2) + \sum_{k=1}^{k^B} \hat{E}_k \right) \quad (8)$$

$$\hat{E}_k = - \sum_{L=1}^{L_k} \frac{N_{jkl}}{N} \log \frac{N_{kl}}{N} \quad (9)$$

式中: k^A 表示连续型变量; k^B 表示分类型变量; L_k 表示分类变量的个数; N_k 表示第 k 组的样本个数; $\hat{\delta}_k^2$ 表示第 k 个连续变量的方差; $\hat{\delta}_{jk}^2$ 表示 j 组中第 k 个连续变量的方差; N_{jkl} 表示 j 组中 k 个定类变量取出第 l 个分类的个数。

进而根据 BIC 来判断聚类效果, BIC 指数的计算方法及含义如公式(10)所示:

$$BIC(J) = -2 \sum_{j=1}^J \xi_j + 2m_J \log(N) \quad (10)$$

式中 $m_J = J\{2k^A + \sum_{k=1}^{k^B} L_k - 1\}$ 表示参数的个数,

极大似然函数的最大值用 $\sum_{j=1}^J \xi_j$ 表示。

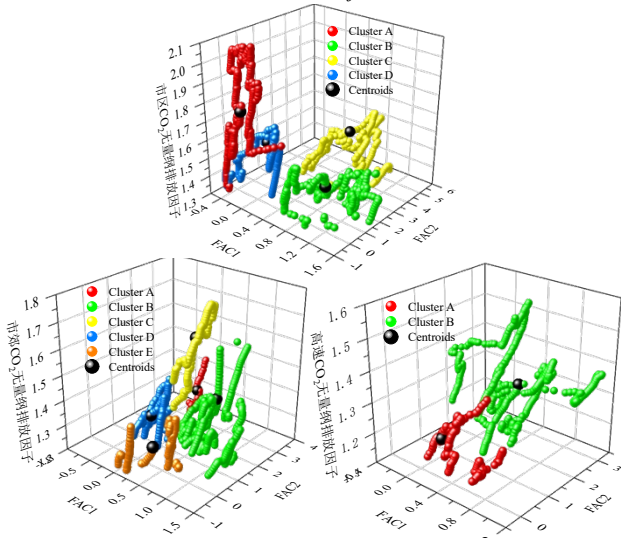


图5 各路段 CO₂ 精简数据窗口二阶聚类结果

各组数据在聚类前的凝聚和分离轮廓测量检验均达到良好水平,如图5所示为各个路段 CO₂ 精简数据窗口的聚类结果,选出得每类中具有代表性(欧几里得距离最接近类质心)的窗口数据作为所在路段污染物的排放严苛场景工况,其虽不是该簇类中污染物排放因子最大的数据窗口,但体现了排放严苛簇类的总体数据特征,它排除了 RDE 试验中偶然性异常排放值对结果的干扰,具有较高的置信度和普适性。经过二阶聚类分析处理,共得到 41 个排放

严苛场景工况。

3 结果与分析

3.1 聚类结果分析

针对各路段、各污染排放物网格聚类 3D 柱状图,整体分析综合行程动力学因子 $FAC1$ 和地形因子 $FAC2$ 对污染物排放的影响情况,并以字母形式表征不同场景工况类别在柱状图上进行标记,从而便于研究严苛场景工况在网格上的分布特征。各路段各污染物网格聚类 3D 柱状图及严苛场景工况标注如图6所示,分析结果如下:

就 CO₂ 排放物而言,其无量纲排放因子随着 $FAC2$ 的增大呈明显增大的趋势,其严苛场景工况主要分布在高累计海拔增量的试验条件,而 $FAC1$ 对 CO₂ 排放的影响在部分市郊路段下相对才有所体现,该路段下窗口 CO₂ 排放因子会随 $FAC1$ 的增大而增大。从二阶聚类结果来看,排放严苛场景工况在 3D 柱状图上的分布较为均匀,绝大多数出现在局部区域中无量纲排放因子最高的柱子上;在高速路段由于精简数据窗口特征种类较少,仅被划分为 2 个类别,得到 2 个排放严苛场景工况。

就 CO 排放物而言,其无量纲排放因子高的工况域主要集中在高累计海拔增量的试验条件或者高综合行程动力学因子的情况下。在市区路段,无量纲排放因子受 $FAC2$ 的影响较为明显;而在市郊和高速路段,无量纲排放因子受 $FAC1$ 影响较大,且从整体看无量纲排放因子的极差较大;从二阶聚类结果来看,排放严苛场景工况未出现在局部区域中无量纲排放因子最高的柱子上而是出现在其附近,原因是该高排放工况区域的数据窗口较少,经过二阶聚类与附近同类工况区域进行质心求解,从而在一定程度上也消除了某个工况排放异常高对结果造成的影响,增强了所选排放严苛场景工况的普适性;除了市郊路段所选取的排放严苛场景工况集中分布在 $FAC1$ 较高的工况区域,其他路段的排放严苛场景工况分布较为均匀。

就 NO_x 排放物而言,其无量纲排放因子高的工况区域也集中分布在高累计海拔增量的试验条件或者高综合行程动力学因子的情况下;与 CO 排放物不同,其在市区路段,其无量纲排放因子受到 $FAC1$ 的影响较为明显;而在市郊和高速路段,无量纲排放因子受 $FAC2$ 影响较大。其与 CO 排放物相同的是在高速路段高累计海拔增量条件下排放均

不严重。从二阶聚类结果来看,排放严苛场景工况分布较为均匀。

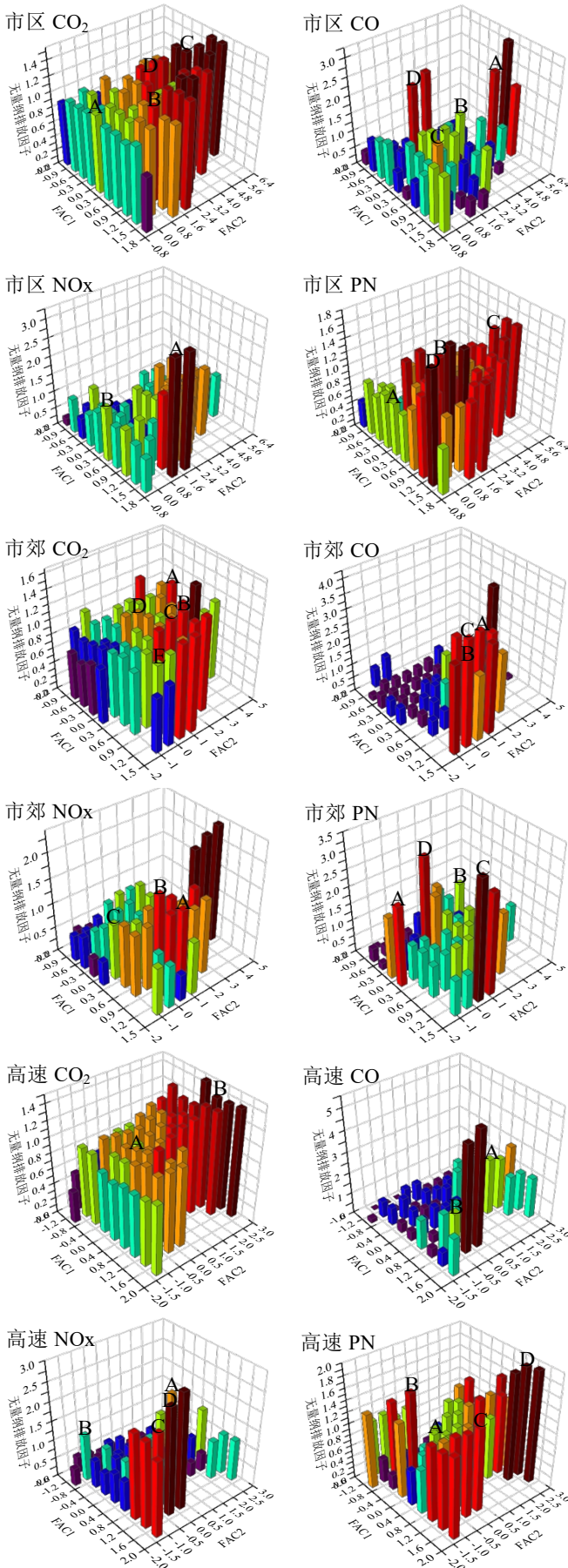


图6 各路段网格聚类 3D 柱状图及严苛场景工况分布

3.2 排放严苛场景工况分析

对于各路段各污染物的排放严苛场景工况,对其逐秒采样的数据进行整理,以便于更好的描述其特征。由于严苛场景工况数据片段特征参数中的平均车速、 $v \cdot a_{pos}[95]$ 、 $V_{sp_pos}[95]$ 、 R_{PA} 、 M_{PA} 与瞬时车速有紧密的直接关系,且特征参数累计正海拔增量 $CPEI$ 在道路的瞬时坡度上有直接体现,所以选取排放严苛场景工况中的瞬时车速和瞬时坡度来对严苛场景工况特性进行特征描述分析。

结合前文求出的行驶路线的瞬时坡度以及原始数据中的瞬时车速,以时序 300S 绘制出排放严苛场景工况内瞬时车速以及瞬时坡度的变化情况。分析各路段、各污染物排放严苛场景工况的特征,具有典型特征的场景工况时序图如图 7 所示。

在 CO₂ 排放严苛场景工况中,整体上 CO₂ 的高排放与道路坡度和加减速工况占比分布相关密切;CO₂ 排放严苛场景工况多表现出长时间处于爬坡的行驶工况,多数场景工况爬坡工况占比超过 30%,最大占比达到 75%,但由于爬坡工况对 CO₂ 排放带来的影响会在一定程度上被下坡工况所抵消,故大多数场景工况下坡工况占比整体较低;同时 CO₂ 排放严苛场景工况也多表现出长时间处于加速工况,多数场景工况加速工况占比超过 40%;个别场景工况虽没有较高的爬坡工况占比,但其具备频繁启停工况的特征,尤其在市区路段中。在高速路段中,当场景工况爬坡工况占比低时,其存在幅度较大的急加速工况或者行驶在陡峭的坡度上。具有典型特征的 CO₂ 排放严苛场景工况时序图如图 7(a)所示。

在 CO 排放严苛场景工况中,整体上 CO 的高排放与道路坡度和加减速工况占比分布也密切相关;CO 排放严苛场景工况多表现出长时间处于爬坡的行驶工况,且爬坡工况、加速工况占比都较高;在市区路段,除爬坡因素外,其排放严苛场景工况车速变化频繁且启停次数较多,停车状态下燃料燃烧但未做工导致燃烧室温度更高,从而在一定程度上导致整体 CO 排放增多;在市郊路段,场景工况均存在坡度快速且大幅度下降的工况存在,坡度变化幅度较大,且会较多出现减速同时爬坡的工况;在高速路段,虽未出现长时间爬陡坡的工况,但其都存在车速 110km/h 幅度的急加减速工况。具有典型特征的 CO 排放严苛场景工况时序图如图 7(b)所示。

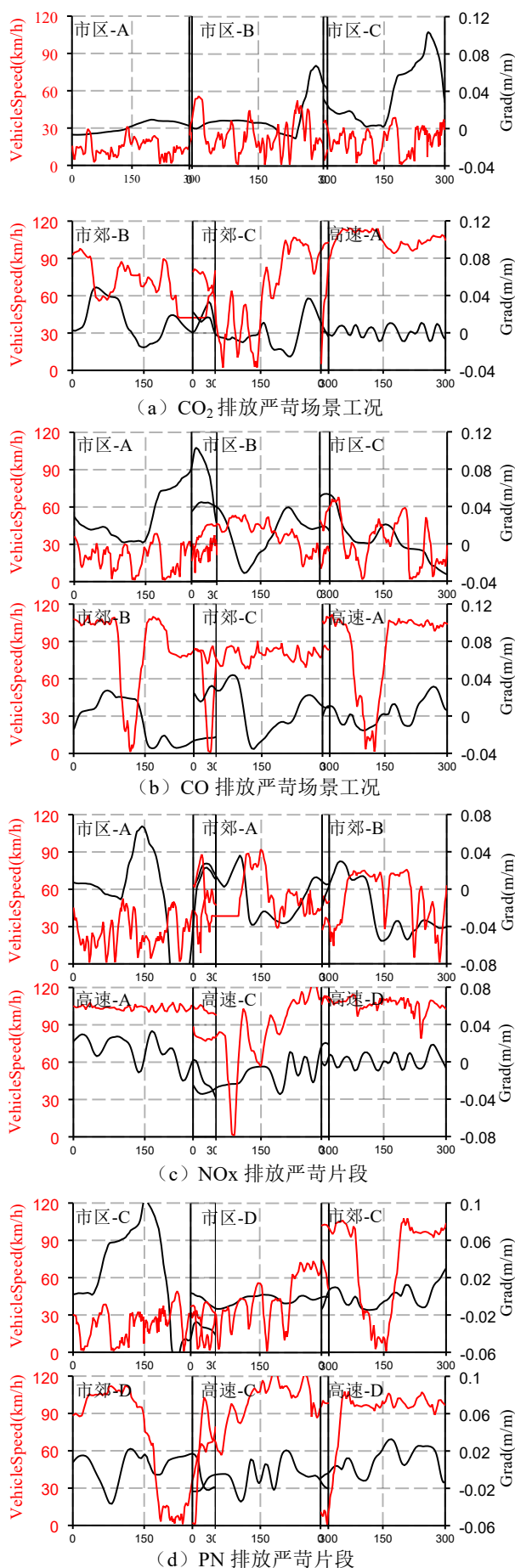


图7 各污染物排放典型特征严苛场景工况时序图

在 NO_x 排放严苛数据场景工况中,整体上与道路坡度和加减速工况占比分布有一定的相关关系,NO_x 排放严苛场景工况多表现出下坡工况占比相对较高,且通过对照严苛场景工况时序图发现其特征为具备多段坡度和车速同时增大的工况,其在一定程度上可能更容易出现加速爬坡或者由下坡转平路和爬坡的工况,该类工况下发动机功率需求往往增大,容易造成发动机喷油量不够从而导致内部 O₂ 含量高,排出的 CH 和 CO 过低,NO_x 无法得到及时还原而造成高排放;虽有个别片段未出现爬坡和下坡工况,但其存在相较更高频次的加减速工况。具有典型特征的 NO_x 排放严苛场景工况时序图如图 7(c)所示。

在 PN 排放严苛场景工况中,整体上与急加减速工况占比分布有一定的相关关系,多数片段急加速与急减速工况大多占比超过 30%,最大占比达到近 60%;通过对照严苛场景工况时序图发现多数片段存在幅度较大的加减速或者加速爬坡工况,可得 PN 排放一定程度上受驾驶激烈程度的影响,具有典型特征的 NO_x 排放严苛场景工况时序图如图 7(d)所示。

4 结论

(1) 采用固定时长 300S 移动平均窗口法将 RDE 试验逐秒采样数据划分为一系列数据窗口,并计算获取其行程属性,从而将试验逐秒采样数据转化为固定时长类行程数据对象,不仅能够更好地反映出局部行程特性,且便于满足在发动机台架上进行 RDE 试验工况模拟的应用要求,形成标准、易复现的严苛排放场景工况片段,可以从时间角度大大简化 RDE 试验程序。

(2) 基于因子分析方法(主成分方法提取主因子),将影响 RDE 试验的多影响指标降维转化为综合行程动力学因子和地形因子,从而在信息损失较少的情况下将 RDE 试验边界条件的多维数学描述转换至低维平面系统,并在此平面系统上利用网格聚类的算法思想,将同一网格单元下数据窗口视为具有同类试验边界条件的数据簇类来映射工况分布。

(3) 该严苛排放场景识别与提取方法在一定程度上消除了 RDE 试验中异常数据点以及不同车型

差异性对结果产生的影响，与直接选取排放最高的数据片段作为排放严苛场景工况相比，该方法所得到的排放严苛数据片段具备较高的普适性。

(4) 基于 10 辆不同轻型汽油车的大量 RDE 试验数据进行多元统计分析，按路段、污染物分类处理，共形成 41 个能够用于该车型测试的普适性排放严苛场景片段，且形成的严苛片段均能够反映出行程动力学和行驶路线地形两大类因素对 RDE 试验的耦合影响。该研究可对我国排放法规的进一步完善、参照实际驾驶排放特性指导发动机标定具有一定参考价值，同时对道路行驶排放严苛行驶工况的构建提供方法参考，并对于城市污染防治以及降低道路交通的实际排放量有重要现实意义。

参考文献：

- [1] Anenberg, Susan C., Kate R. Weinberger, Henry Roman, James E. Neumann, Allison Crimmins, Neal Fann, Jeremy Martinich, and Patrick L. Kinney. 2017. 'Impacts of oak pollen on allergic asthma in the United States and potential influence of future climate change', *GeoHealth*.
- [2] Bielaczyc, Piotr, and Joseph Woodburn. 2019. 'Trends in Automotive Emission Legislation: Impact on LD Engine Development, Fuels, Lubricants and Test Methods: a Global View, with a Focus on WLTP and RDE Regulations', *Emission Control Science and Technology*, 5: 86-98.
- [3] Claen, Johannes, Stefan Pischinger, Sascha Krysmon, Stefan Sterlepper, Frank Dorscheidt, Matthieu Doucet, Christoph Reuber, Michael Grgen, Johannes Scharf, and Martin Nijs. 2020. 'Statistically supported real driving emission calibration: Using cycle generation to provide vehicle-specific and statistically representative test scenarios for Euro 7', *International Journal of Engine Research*, 21: 146808742093522-.
- [4] Du, Baocheng, Li Zhang, Yangtao Geng, Yun Zhang, and Gan Xiang. 2020. 'Testing and evaluation of cold-start emissions in a real driving emissions test', *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 86: 102447.
- [5] Giechaskiel, Barouch, Theodoros Vlachos, Francesco Riccobono, Fausto Forni, Rinaldo Colombo, Francois Montigny, Philippe Le-Lijour, Massimo Carriero, Pierre Bonnel, and Martin Weiss. 2016. 'Implementation of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) for the Real-driving Emissions (RDE) Regulation in Europe', *Journal of Visualized Experiments*.
- [6] Hooftman, Nils, Maarten Messagie, Joeri Van Mierlo, and Thierry Coosemans. 2018. 'A review of the European passenger car regulations - Real driving emissions vs local air quality', *Renewable & sustainable energy reviews*: 86.
- [7] Joshi, Ameya. 2020. 'Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions', *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*: 2.
- [8] Pavlovic, J, B Ciuffo, G Fontaras, V Valverde, and A Marotta. 2018. 'How much difference in type-approval CO2 emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)?', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 111: 136-47.
- [9] Ribeiro, Cb., Fhc. Rodella, and L. Hoinaski. 2021. 'Regulating light-duty vehicle emissions: an overview of US, EU, China and Brazil programs and its effect on air quality', *Clean technologies and environmental policy*: 1-12.
- [10] Ricardo, Suarez Bertoa, Valverde Victor, Clairotte Michael, Pavlovic Jelica, and Astorga Covadonga. 2019. 'On-road emissions of passenger cars beyond the boundary conditions of the real-driving emissions test', *Environmental Research*, 176: 108572-.
- [11] Wallington, Timothy John, James E Anderson, Eric M Kurtz, and Paul J Tennison. 2016. 'Biofuels, vehicle emissions, and urban air quality', *Faraday Discussions*: 10.1039.C5FD00205B.
- [12] Wasserburger, Alexander, Alexander Schirrer, and Christoph Hametner. 2023. 'Stochastic Optimisation for the Design of Energy-Efficient Controllers for Cooperative Truck Platoons', *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*: 1-11.