

重型柴油机代表性瞬态循环的开发及排放特性研究

刘庚非, 徐怀民, 曾鹏霏, 郭斌扬, 苏万华*

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Research on development and emission characteristics of representative transient cycle of heavy-duty diesel engine

LIU Gengfei, XU Huaimin, ZENG Pengfei, WU Binyang, SU Wanhua*

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Aiming at the problem that the WHTC condition is difficult to accurately reflect the real road operation of heavy-duty diesel engines, which leads to a significant difference between the laboratory emission certification results and the actual driving emissions, a two-step representative transient cycle development process was proposed. Firstly, the actual driving cycle HRDC of heavy-duty diesel vehicle was established, and the actual transient cycle HRTC of heavy-duty diesel engine was developed accordingly. The test results showed that compared with WHTC, the NO_x, soot and PN emissions of heavy-duty diesel engines running at HRTC increased by 36.69%, 4.57% and 76.28%, respectively. WHTC significantly underestimates the emission level of real roads. The transient soot emission of HRTC increased by 155.74% compared with the steady-state interpolation. Starting with idle or reverse drag conditions, and the sudden torque process with a torque increase of more than 40 %/s is the main scenario that causes deterioration of transient soot emission.

摘要: 针对因 WHTC 工况难以准确的反映重型柴油机真实道路的运行情况, 从而导致实验室的排放认证结果与实际行驶排放间出现显著差异的问题, 提出了一种两步法的代表性瞬态循环开发流程, 首先建立了重型柴油车实际驾驶循环 HRDC, 并据此开发了重型柴油机实际瞬态循环 HRTC。试验结果表明, 相较于 WHTC, 运行在 HRTC 的重型柴油机 NO_x, 碳烟与 PN 比排放分别增大了 36.69%, 4.57%和 76.28%, WHTC 显著的低估了真实道路的排放程度; HRTC 瞬态碳烟排放相较稳态插值增加了 155.74%, 以怠速或倒拖工况为起始, 扭矩增幅大于 40%/s 的突加扭矩过程是造成瞬态碳烟排放恶化的主要场景。

关键词: 重型柴油机; 实际道路; 驾驶循环; 代表性瞬态循环; 瞬态排放

Key words: heavy-duty diesel engine; realistic road; driving cycle; representative transient cycle; transient emission

中图分类号: TK423.2

文献标识码: A

0 概述

大众汽车的“柴油门”(Volkswagen Emissions Scandal)事件^[1]在世界范围内引发了对于真实道路场景污染物排放的强烈关注, 机动车在实际行驶过程,

即连续复杂的瞬变工况下的燃烧与排放控制能力面临着更为严峻的挑战^[2-3], 这一情况在重型柴油车上体现的尤为明显^[4-5]。排放法规的升级迭代是加强在用柴油车污染物治理的重要途径, 而重型柴油车在真实道路环境下的排放是否符合标准, 则主要取决

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 重型车用柴油机 RDE 法规技术研发项目 (2021GKF-0109)

作者简介: 刘庚非(1995-), 男, 博士生, 主要研究方向为重型柴油机实际驾驶排放控制, E-mail:lgftju@163.com;

苏万华(联系人), E-mail: whsu@tju.edu.cn.

于用作测试的瞬态循环能否贴切的反应实际行车时发动机的运行情况^[6]。

瞬态循环作为描述发动机状态随时间变化的工况曲线^[7],是直观评价燃油经济性与排放水平,以及进行参数标定和产品开发的重要基准与先决条件。我国从国VI阶段^[8]引入世界统一瞬态循环(World Harmonized Transient Cycle, WHTC)作为发动机的测试标准,却有大量的研究表明其难以代表中国柴油机的道路运行情况^[9-10],其原因首先在于作为WHTC原型的世界统一瞬态车辆循环(World Transient Vehicle Cycle, WTVC)数据取自美国、欧洲、日本与澳大利亚,并不含有中国道路,其数据库特征不能完全代表中国道路的行驶状态;其次,WTVC的构成片段来源于行驶片段的随机抽取组合,这种方式解离了驾驶行为的连续性^[11],同时也难以保障完整涵盖主要的运动学场景。由此可知,开发典型的重型柴油车驾驶循环,是制定准确且具有代表能力的瞬态循环的前提。

短行程法与马尔科夫链法是当前开发驾驶循环的主流方法。短行程定义为车辆两次停车间的连续行驶过程^[12],通常以车速为零作为起始与结束的标志从实际行驶数据中提取,是组成驾驶循环的基础单元。传统的短行程法又被称作随机短行程法^[13],主要通过行驶片段随机抽样拼接的方式进行驾驶循环的编制,已在美国^[14],欧洲^[15],印度^[16-17],香港特别行政区^[18-19]以及大陆部分城市^[20]获得了应用。随机短行程法的优势在于结构简单,不需要复杂的构建流程,但计算耗时较长,难以对大规模的数据样本进行处理,同时由于其不确定性,所构建驾驶循环的代表能力也无法保证^[21-22];随着研究的不断深入,聚类算法逐渐被集成于短行程法的开发步骤中^[23-24],用以区分不同的行驶状态,进而按比例执行抽样。相比随机短行程法,这种半随机的模式确保了循环中动力学特征的多样性,但是仍未避免短行程法因行驶片段的无序组合导致的不合理速度趋势^[25];同时虽然行驶在城市地区的车辆因频繁起停而产生了大量的短行程,但在高速等交通顺畅的条件下却很少存在着时间接近的停车记录,从而难以提供足够且合理的短行程样本,上述问题均会导致驾驶循环丧失代表性。

马尔科夫链法最初由Kolmanovsky等^[26-27]在研究中使用,目的是优化车用动力总成的运行策略。如今,马尔科夫链经常结合蒙特卡洛抽样一起使用,相较短行程法而言,马尔科夫蒙特卡洛法因为能够模拟司机的自然驾驶行为,呈现出真实的速度变化规律而逐渐获得了更多的认可^[25]。Zhang等^[28]以1Hz

的频率收集了40辆电动出租车6个月的运行数据,结合考虑不同道路特征的马尔科夫蒙特卡洛法,搭建了精度优于新欧洲驾驶循环(New European Driving Cycle, NEDC)的北京电动车行驶工况;He等^[29]基于马尔科夫蒙特卡洛法为插电式混合动力汽车能量流管理开发了参考循环,并实现了5.79%燃油经济性的提升;Bhatti等^[30]针对伊斯兰堡的丘陵城市地形,使用马尔科夫蒙特卡洛模拟研制了代表实际道路的驾驶循环,结果表明路面坡度对于电动汽车的续航里程有较大影响。Gong等^[31],Brady等^[32],Tao等^[33]的研究同样验证了马尔科夫蒙特卡洛法在构建高精度驾驶循环方面的优越性。由此可知,马尔科夫蒙特卡洛法是建立代表性驾驶循环的可靠方法,不过,当前已有的研究主要针对于各类轻型乘用车,并未涉及重型柴油车领域,代表性的重型柴油车驾驶循环仍有待开发。

此外,在将WTVC转化为WHTC时使用了当时主流的8档位(含6个前进档)传动系统,相较于国内重型柴油车通常使用的14档位(含12个前进档)变速箱速比差异较大,这也是造成了WHTC失真的重要因素。

综上所述,为了解决用于重型柴油机排放认证的WHTC工况代表能力不足的问题,提出了如图1所示两步法重型柴油机瞬态循环开发流程,该流程的第一步是构建一条代表性的重型柴油车驾驶循环:首先将采集得到的重型柴油车道路运行数据划分为短行程并计算特征,依据平均行驶速度分为城市、郊区和高速三个区段,分别建立数据库,从数据来源层面保障了代表性;然后在每一个区段中使用基于粒子群优化的k均值聚类方法,锁定各路段中涵盖的主要场景数目,并根据各场景包含短行程样本的总时长占比来确定需要生成各驾驶循环片段的时长,确保了驾驶循环对于行驶场景的概括能力;进而采用马尔科夫-蒙特卡洛方法生成与每个场景特征一致的驾驶循环片段,不仅可以避免数据低频噪声的影响,也极大程度的保留了真实的行车规律;在此基础上,将生成的驾驶循环片段按照所属聚类类别在行驶过程中的相对顺序进行排布,防止排温、后处理系统温度变化失真,保障了驾驶趋势的合理性。在流程的第二部分,基于重型柴油车通常使用的12前进档变速箱,匹配统计得到的各档位常见的车速范围对重型柴油车驾驶循环进行转化,最终得到具有真实道路代表能力的重型柴油机瞬态循环。

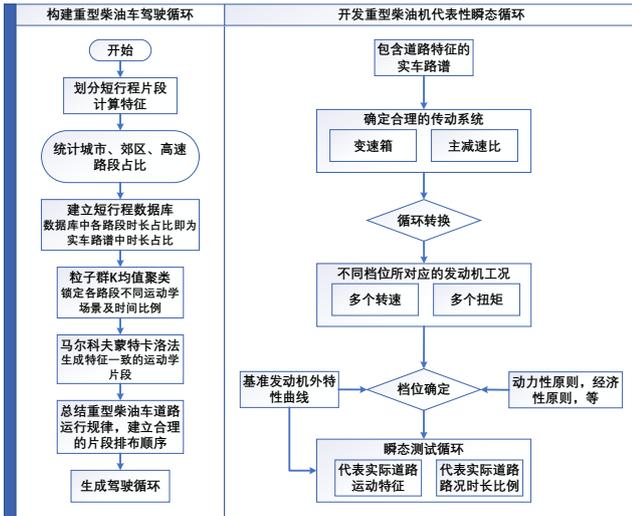


图 1 重型柴油机代表性瞬态循环开发流程

1 数据预处理与实验平台

1.1 数据采集

常见的驾驶数据收集方法主要包括追车法，车载测量方法以及二者的结合^[33]，由于追车法需要使用配置有车载记录仪的汽车以近似恒定距离跟随被测车辆，并不适合进行长时间大样本规模的数据采集，因此选择车载测量法作为数据的获取方式。研究中使用的数据来源于如图 2 (a) 所示的 9 辆重型柴油车全年的自然行驶情况，采集设备为图 2 (b) 中的车载智能通信终端 (Telematic BOX, T-box)，其以 1Hz 的采样频率记录日期，时间，车速，累计运行里程，以及发动机的转速和扭矩等参数，并上传至云端服务器作为原始数据存档，待满足样本量的需求后一并提取。



(a) 被测重型柴油车



(b) 车载智能通信终端

图 2 重型柴油车及数据采集设备

从图 3 中可以看出，所涉及重型柴油车的行驶路线涵盖了华北平原，长江中下游平原，东南丘陵，云贵高原，黄土高原以及河套平原各部分区域，道路类型则包含有大量城市，郊区和高速路段，是求解重型柴油车实际的运行规律，构建典型驾驶循环的可靠保障。

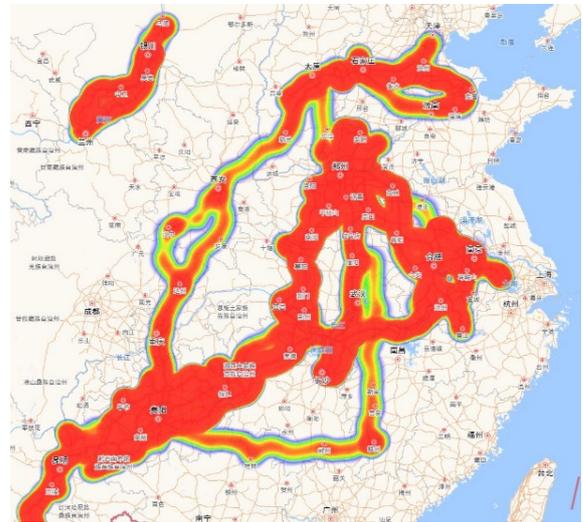


图 3 重型柴油车典型行驶路线

1.2 数据预处理

首先根据实车运动学数据划分短行程并计算特征，其中每一个短行程均从车速为零，发动机为怠速的状态起始，持续至下一次怠速时为止，如图 4 所示。其中车速为零的部分称为怠速片段，车速不为零的部分称为行驶片段^[34]。特征参数是描述车辆行驶状态的直观因素，参照现有研究结果^[28,32]，在表 1 中给出了设定用以描述短行程特征的 14 维特征参数，其中既包含了平均速度、平均加速度等统计值，也有速度、加速度标准差（方差的算术平方根，表达了短行程中速度与加速度的离散情况），和代表

着驾驶激烈程度的，如速度与正加速度乘积的 95 分位值（指 95% 的速度与加速度的乘积均小于这个数）、速度与减速度乘积的 5 分位值等这种偏向瞬态性的评价指标。

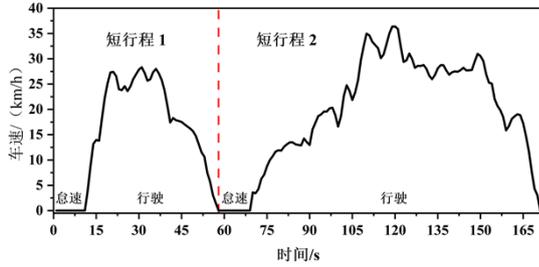


图 4 短行程示意

表 1 描述短行程特征的 14 维参数

特征参数	特征参数	特征参数
行驶距离/m	行驶时间/s	减速段平均减速度/ (m/s^2)
加速占比/%	平均速度/(km/h)	加速度标准差
减速占比/%	平均行驶速度/(km/h)	速度与正加速度乘积 95 分位 va_{+95}
匀速占比/%	速度标准差	速度与负加速度乘积 5 分位 va_{-5}
怠速占比/%	加速段平均加速度/ (m/s^2)	

研究中使用的数据共计包含 65865 个短行程，累计时长超过 1960 万秒，参照 PEMS 测试中的各路路段判别准则，对这些短行程按照平均行驶速度（即总路程除以不含怠速片段的运行时间）进行了归类，取平均行驶速度 0-30km/h 为城市，平均行驶速度 30-70km/h 为郊区，平均速度大于 70km/h 的为高速。城市，郊区和高速路段分别占总数据时长的 27.47%，50.94% 和 21.59%，对应数据库的特征参数分别在表 2 中给出。

表 2 城市、郊区和高速数据库特征参数对比

特征参数	城市	郊区	高速
加速占比 /%	16.17	32.69	18.19
匀速占比 /%	24.65	32.01	64.72
减速占比 /%	15.13	28.98	15.58
怠速占比 /%	44.06	6.32	1.51
平均速度 /(km/h)	9.30	43.99	74.22
平均行驶速度 /(km/h)	16.50	46.87	75.40
速度标准差	12.52	21.14	18.09
加速段平均加速度 /(m/s ²)	0.33	0.39	0.32
减速段平均减速度 /(m/s ²)	-0.47	-0.59	-0.36

加速度标准差 0.29 0.26 0.15

1.3 重型柴油机试验平台

为了探究所构建的瞬态循环与 WHTC 的排放差异，在研究中首先搭建了重型柴油机试验平台，为后续的试验内容完成准备工作，柴油机具体参数和试验台架整体构型分别如表 3 和图 5 所示。

表 3 重型柴油机技术参数

参数名称	数值
发动机型号	WP13.480
缸径 /mm	127
行程 /mm	165
排量 /L	12.54
压缩比	18
进气涡流比	1.6
燃烧室形状	ω 型燃烧室
进气方式	增压中冷
喷油器孔数×孔径×锥角	8×0.217×14
额定功率 /kW	352.8
最大扭矩 /Nm	2300
最高爆压 /Mpa	18

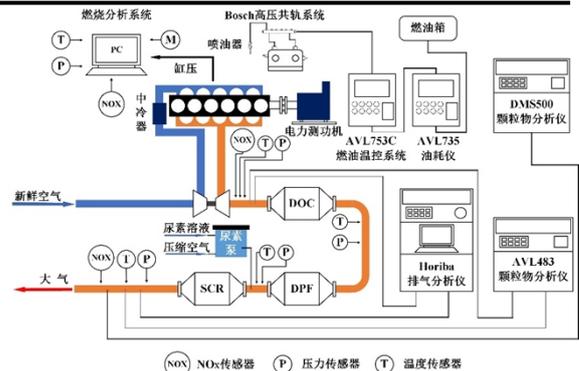


图 5 重型柴油机试验平台

为了实时掌握发动机的运行情况，记录燃烧边界条件与排放信息，试验台架在发动机进排气管路上配备了大量高精度的温度、压力传感器以便收集发动机运行特性参数并监测其运行状态。在此基础上利用如表 4 所示的测试设备对发动机的瞬变过程进行了测量，并采集试验台架在瞬态工况下的性能与排放特性参数用于后续研究的分析工作。

表 4 试验台架测量系统

测试设备	测量参数
Horiba MEXA-7100DEGR	THC、CO、NO _x
AVL 483 烟度计	PM
DMS500 颗粒物测试仪	PN

AVL 735 瞬态油耗仪

瞬时油耗

ABB 瞬态空气流量计

瞬态进气量

2 重型柴油机代表性瞬态循环

代表真实驾驶特征的重型柴油机瞬态循环的开发共需要 4 个步骤，(1) 数据降维；(2) 数据分类；(3) 构建重型柴油车驾驶循环；(4) 开发重型柴油机瞬态循环。

2.1 数据降维

前文提到，当前用以描述短行程特征的特征参数共有 14 个，这些变量中每一个都含有一定量的信息，但彼此之间并非严格独立^[35]，为避免在后续的计算中发生维度灾难，需要将短行程的特征参数进行降维处理，合并其中变化规律一致的特征。

数据的降维等价于将高维数据投影到参数相互正交的低维空间中，为保存更多的信息，要求投影后的数据彼此差异最大，这一差异常用累计方差的形式描述。研究中使用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 进行数据降维，将相关的参数以主成分的形式合并，在使用时确保每一个主成分至少能够代表 1 个以上的原始特征，即各主成分对应的特征值均大于 1。以图 6 中的高速数据库降维结果为例，前 4 个主成分的特征值均大于 1，因此特征参数最多可降至 4 维；当主成分取 4 时，数据降维后的累计方差达到了原数据的 85.04%，因此可以代表原数据 85.04% 的特征。

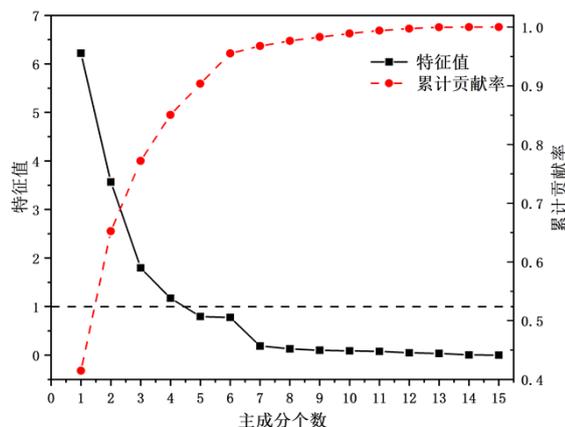


图 6 高速数据库各主成分累计贡献率

主成分 1-4 的实际意义在表 5 中给出，各数字的绝对值代表了各主成分对于原始特征参数的表达能力，其中绝对值越接近于 1，表明该主成分对这一项

原始特征的表达能力越强，由此可知主成分 1 主要包含了原数据的平均速度，平均行驶速度，速度标准差，速度与正加速度乘积的 95 分位值以及速度与减速度乘积的 5 分位值共计 5 项特征，主要代表了原始数据特征中的速度特性与驾驶激烈程度；依次类推，主成分 2 代表了原特征参数中的加速度特征；主成分 3 代表了原特征参数中行驶情况比例；而主成分 4 代表了原特征参数中的行驶时长与行驶距离特征。此时，原始数据库中用以描述短行程特征的 14 维参数已被合并为 4 类主成分。

表 5 各主成分对原始特征的代表能力

原始特征参数	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
行驶距离	0.171	-0.087	0.036	0.950
行驶时间	0.212	-0.144	0.003	0.939
加速比例	0.581	-0.018	0.590	-0.125
匀速比例	-0.142	-0.523	0.550	0.259
减速比例	0.415	0.192	0.782	-0.062
怠速比例	-0.362	0.251	-0.879	-0.079
平均速度	0.845	-0.165	0.284	0.325
平均行驶速度	0.896	-0.122	0.181	0.301
速度标准差	0.937	-0.045	0.161	0.073
加速段平均加速度	-0.182	0.914	-0.021	-0.011
减速段平均减速度	-0.429	-0.504	0.162	0.172
加速段加速度标准差	-0.105	0.922	-0.023	-0.039
va ₉₅	0.844	0.309	0.211	0.137
va ₅	-0.944	-0.085	-0.122	-0.072

2.2 数据分类

为保证所构建的驾驶循环可以囊括并合理代表重型柴油车的主要行驶场景，同时避免由人工选择带来的主观误差，使用聚类算法对城市，郊区和高速路段中包含的主要场景类型进行求解。k 均值聚类是常见的聚类方法，其首先随机生成 k 个聚类中心，然后将每一个数据点划分给最邻近的中心，对分类后的样本求均值，以均值作为新的聚类中心并聚类，反复迭代，直至聚类中心位置不再发生变化。但是传统的 k 均值聚类法通常面临着因初始聚类中心的随机生成而造成的局部最优问题。为了避免结果出现误差，使用自适应粒子群优化算法，将聚类问题转化为找到 k 个聚类中心，并使得所有的数据点到各自聚类中心的距离和最小的寻优问题。计算时首先依次设定 2-20 个初始聚类中心，使用传统的 k 均值聚类方法进行数次计算，同时统计每一次结果对应的 DB 指数 (Davies-Bouldin Index)，即聚类后样

本类中距离与类间距离的比值，从而确定适宜的聚类中心数目；然后初始化 n 组粒子，其中每组粒子的个数都与最佳聚类中心数目相同；随着迭代计算的开始，粒子的位置逐渐改变，其运动方向来源于惯性，个体最优位置修正与全局最优位置修正的耦合，具体计算过程如式 (1) 至式 (3) 所示：

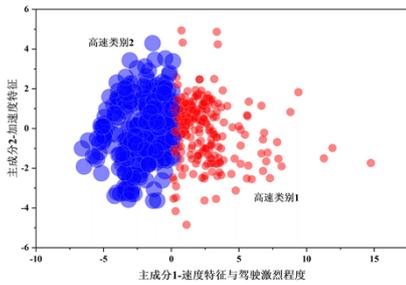
$$v_{i+1} = w' v_i + c_1' rand() (pbest_i - x_i) + c_2' rand() (gbest_i - x_i) \quad (1)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (2)$$

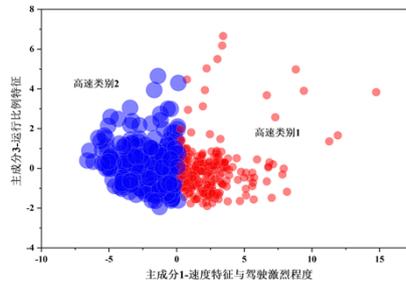
$$w^{(t)} = (w_{ini} - w_{end})(G_k - g) / G_k + w_{end} \quad (3)$$

表 6 高速行驶场景聚类结果

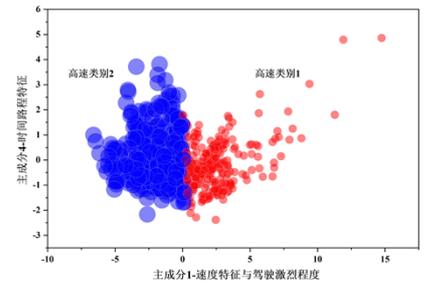
	平均速度 /(km/h)	加速占比 /%	减速占比 /%	匀速占比 /%	怠速占比 /%	平均行驶 速度 /(km/h)	速度标准 差	加速度标 准差	平均正加 速度
类别 1	72.99	27.44	22.89	47.22	2.45	74.90	22.88	0.15	0.38
类别 2	75.52	16.70	14.39	67.61	1.30	76.60	16.93	0.09	0.26



(a) 高速两类场景在主成分 1-2 面投影



(b) 高速两类场景在主成分 1-3 面投影



(c) 高速两类场景在主成分 1-4 面投影

图 7 高速两类场景在各主成分面上的投影

仿照相同流程，分别将城市区段与郊区区段中的短行程样本划归为 5 类和 7 类，其中每一个类别都对应着不同的行驶场景。由此可知，为保证对真实道路的代表能力，典型的重型柴油车驾驶循环应当至少涵盖这 14 种主要的场景类型。

2.3 构建重型柴油车代表性驾驶循环

马尔科夫蒙特卡洛法是一种基于概率的随机抽样技术，该方法使用马尔科夫链模拟真实驾驶过程中的状态变化，并通过蒙特卡洛抽样构建高代表性的驾驶循环。其中马尔科夫链的原理需要车辆在行驶时，下一时刻的状态仅与当前时刻有关，而与之

其中 v_i 为粒子的速度， x_i 为粒子的位置， $\omega \times v_i$ 为粒子的惯性， ω_{ini} 为初始惯性系数， ω_{end} 为最终惯性系数； c_1, c_2 分别为个体最优解 $pbest$ 与全局最优解 $gbest$ 的系数； G_k 为总迭代次数， g 为当前迭代次数。

从表 6 中可以看出，高速区段中所有的短行程可被分为两类，虽然第一类与第二类在平均速度与平均行驶速度上的差异较小，但第一类有着更高的加减速比例与速度/加速度波动，因此可知高速第一类为激进的行驶场景，而第二类行驶场景则相对温和；在图 7 中给出聚类结束后两类场景所对应的短行程分别在主成分 1-2, 1-3 以及 1-4 面上的投影，可见样本的类间区别显著，聚类效果良好。

前间隔较远的状态与变化过程无关，即满足式 (4) 中的数学关系：

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n) \quad (4)$$

与轻型乘用车不同，重型柴油车经常处于载货的情况，其发动机功率变动更加频繁且幅度较大，仅通过车速描述重型柴油车的特征属性并不全面；此外，为生成代表性的重型柴油机瞬态循环，也需要获得与车速逐秒对应的功率变动情况。因此，在研究中并未采用常见的速度-加速度，而是选择速度-发动机功率百分比（后简称为功率百分比）两个参数来共同描述车辆的行驶状态并进行了编号，如表 7 所示。

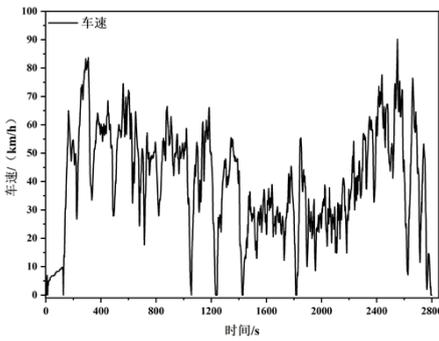
表 7 基于车速/功率百分比划分的不同状态及编号

状态	≤0	0-10%	10%-20%	……	90%-100%
0	1	-	-	-	-
(0-5]	2	3	4	…	12
(5-10]	13	14	15	…	23
(10-15]	24	25	26	…	34
(15-20]	35	36	37	…	45
……	…	…	…	…	…
(115-120]	255	256	257	…	265

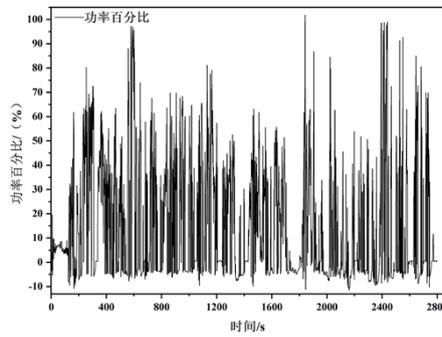
为了探究该状态分类形式在马尔科夫链计算中的合理性, 首先对图 8 (a), (b) 中重型柴油车的一段真实行驶过程进行了状态编码, 并对图 9 (c) 中通过车速/功率百分比状态所描述的行驶过程的马

尔科夫性进行了验证^[25]。

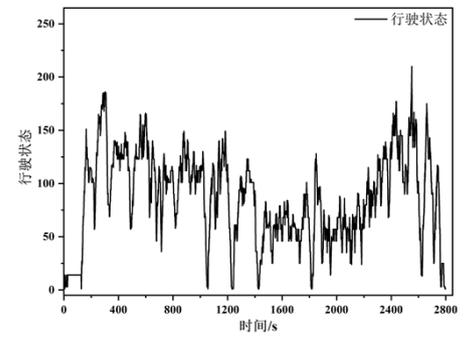
从图 9 中可以看出, 在重型柴油车的行驶过程中, 1s 内状态的相关性可以达到 0.98, 表明当前时刻与下一时刻的状态之间具有良好的线性关系; 随着时间间隔的增加, 相关性逐渐减小, 10s 后的状态与当前状态的相关程度仅有 0.71, 而 60s 后的状态与当前状态已近乎无关。由此可知, 当前状态仅与时间间隔较小 (如 1s 后) 的下一状态之间存在着相对确定的概率转移, 而与相隔较远的状态并不具有直接的联系, 因此用车速与功率百分比描述的行驶过程属于具有马尔科夫性质的随机过程, 符合马尔科夫链的定义。



(a) 重型柴油车行驶车速

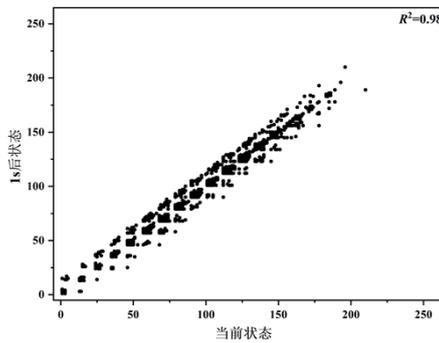


(b) 重型柴油车行驶功率百分比

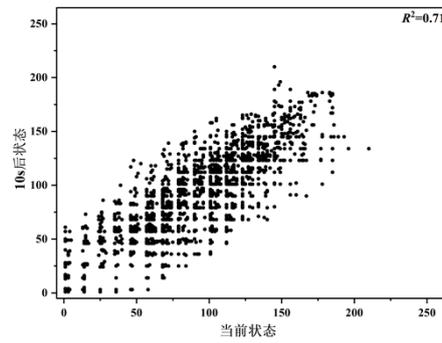


(c) 重型柴油车行驶状态

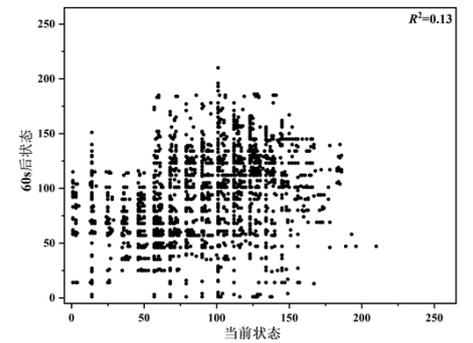
图 8 重型柴油车行驶过程



(a) 当前状态与 1s 后状态



(b) 当前状态与 10s 后状态



(c) 当前状态与 60s 后状态

图 9 状态分类的马尔科夫性验证

在马尔科夫链中, p_{ij} 定义为由当前所处状态 i 转移到下一状态 j 的概率, 可经由统计方法得到, 计算方法如式 (5) 所示。

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{j=1}^n N_{ij}} \quad (5)$$

其中 N_{ij} 是由状态 i 转化至状态 j 的总次数, n 是所有状态类型的数目, 在文中取值为 265。

将所有的状态转移情况及各自对应的概率计算并填充至一个矩阵当中, 即可得到关于行车过程的转移概率矩阵 P , 该矩阵中的每一个元素均代表着由当前状态发展至下一时刻某状态的可能性大小, 如式 (6) 所示, 是模拟道路运行过程的核心, 也是进行蒙特卡洛抽样的基础。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & L & p_{1n} \\ L & O & L \\ p_{n1} & L & p_{nn} \end{pmatrix} \begin{matrix} \ddot{O} \\ \vdots \\ \ddot{O} \end{matrix} \quad (6)$$

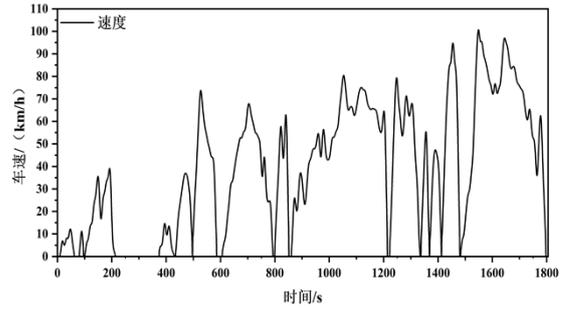
上文提到，为了使构建的驾驶循环代表真实道路重型柴油车行驶条件，其应当合理涵盖城市、郊区以及高速区段的主要行驶场景，即需要针对每一个场景类型建立对应的转移概率矩阵，并通过蒙特卡洛抽样搭建特征一致的驾驶循环片段。计算时首先在各区段中分别建立子数据库，如城市第一类库，城市第二类库……直至高速第二类库，并分别将属于该场景的短行程存储其中，根据各子数据库内样本的总时长即可得出重型柴油车运行在每个驾驶场景中的时间比例，进而明确需要生成的代表各场景的驾驶循环片段的时长，计算方法在式(7)中给出[28]。

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^{m_k} T_{k,i}}{\sum_{k=1}^s \sum_{i=1}^{m_k} T_{k,i}} \times T_{DC} \quad (7)$$

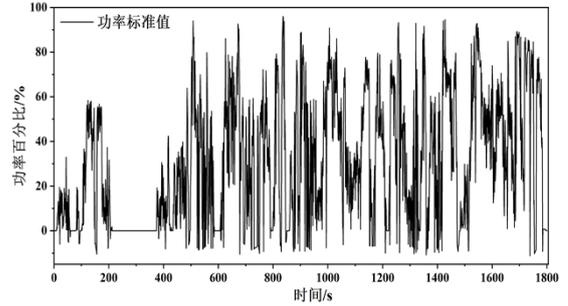
其中 T_k 是行驶场景 k 对应的驾驶循环片段时长； $T_{k,i}$ 是数据库中属于场景 k 的短行程 i 的时长； m_k 是场景 k 中包含的所有短行程的数目； s 是所有场景的总数； T_{DC} 是所构建驾驶循环的总时长，考虑试验测试的可行性，与 WTVC 设定一致为 1800s。

与短行程类似，每一个驾驶循环片段中都含有着怠速片段与行驶片段两部分，其中怠速片段的时长占比直接由统计确认，而行驶片段则基于各子数据库的转移概率矩阵，参照实际行车过程，以初始状态 3（即车速 $\in (0,5]$ ，功率 $\in (0,10\%]$ ）为起始，使用蒙特卡洛抽样从真实行驶数据中抽取符合状态变化特征的工况点逐一拼接得到。统计实车行驶过程中各场景的相对顺序，对这些片段依次进行拼接，即可得到一条由车速和功率百分比共同组成的，可以代表重型柴油车实际道路运行情况的驾驶循环（Heavy-Duty Real Driving Cycle, HRDC）。具体构建流程在图 10 中给出，HRDC 则如图 11 所示。

图 10 重型柴油车实际驾驶循环 HRDC 构建流程



(a) 重型柴油车实际驾驶循环 HRDC-车速



(b) 重型柴油车实际驾驶循环 HRDC-功率百分比

图 11 重型柴油车实际驾驶循环 HRDC

图 11 中所开发的 HRDC 依据真实路段的时长占比，由 495s 的城市，916s 的郊区以及 389s 的高速道路组成；共计包含 14 个驾驶片段，其中城市 5 个，郊区 7 个，高速 2 个；城市，郊区各片段的运动学特征与所属场景保持一致，而高速路段则考虑到场景中较高的平均速度，同时在接近稳态的行车过程中排放控制难度相对较低等实际情况，适当缩减了匀速阶段的时长占比[23]。

从图 12 和表 8 中的各项统计性参数中可以看出，所开发 HRDC 在怠速占比，平均速度，行驶平均速度与速度标准差上对实际道路的代表能力较好，同时在其余各项参数上与道路数据的差异均不超过 10%，所有特征的平均差异为 5.58%，相较于 WTVC 的 12.75% 下降了 7.16%，精度有了显著的提升，可以更为贴切的反映真实道路的运行规律。

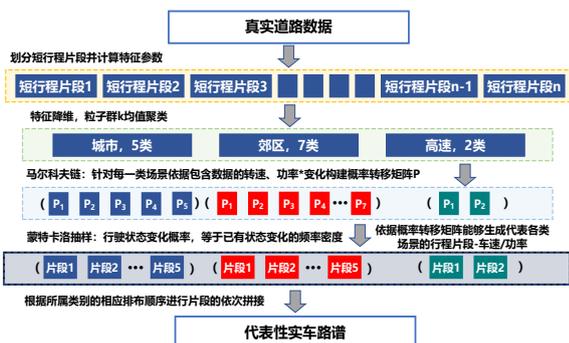


图 12 HRDC 与 WTVC 相对道路数据的差异

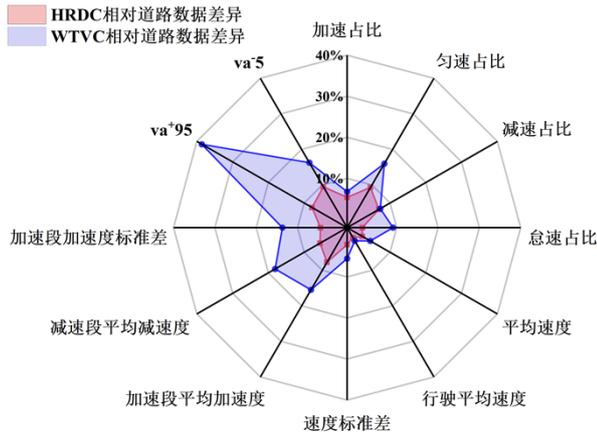


表 8 HRDC 与 WTVC 特征参数对比

道路数据	HRDC	相对真实道路 差异*/%	WTVC	相对真实道路 差异*/%	
加速占比 /%	28.84	30.39	5.37	26.89	6.77
减速占比 /%	24.38	26.06	6.87	22.61	7.26
匀速占比 /%	31.80	28.83	-9.33	36.89	-16.00
怠速占比 /%	14.98	14.72	-1.71	13.61	9.13
平均速度/(km/h)	38.43	39.29	2.25	40.14	-4.47
行驶平均速度/(km/h)	45.69	46.07	0.84	46.47	-1.71
速度标准差	27.95	28.55	2.16	29.49	-5.54
加速段平均加速度/(m/s ²)	0.36	0.39	7.73	0.42	-15.48
减速段平均减速度/(m/s ²)	-0.44	-0.46	5.55	-0.52	-18.12
加速段加速度标准差	0.28	0.25	-4.43	0.24	13.66
va+95	11.28	12.16	7.82	6.93	38.60
va-5	-13.45	-14.73	9.49	-11.27	16.25

在实际行驶过程中存在有大量的因车辆制动而出现的负功率情况，此时发动机停止喷油，不会产生排放问题，并非是道路排放控制的重点。为了验证 HRDC 车速与功率的合理性，按照表 7 中的车速功率状态划分方式，对实际道路，HRDC 与 WTVC 的工况进行了归类，并在图 13 中给出了去除负功率的状态后，实际道路，HRDC 和 WTVC 的状态频率分布图。其中 HRDC 与实际道路数据的状态频率分布相关性程度为 0.70，远大于 WTVC（其功率百分

比基于 WHTC 计算）的 0.43，可见 HRDC 的车速与功率分布更加接近实际行驶情况。

此外，分别计算了速度以 5km/h 为间隔，加速度 -4m/s^2 到 4m/s^2 下的实际道路，HRDC 和 WTVC 的速度-加速度概率分布，并在图 14 中进行展示，从中可以看出 HRDC 与实际道路的速度-加速度分布特征更加一致。综上所述，所构建的 HRDC 循环相较 WTVC 具有更高的重型柴油车实际道路特征的表征能力，可进一步用于代表性瞬态循环的开发。

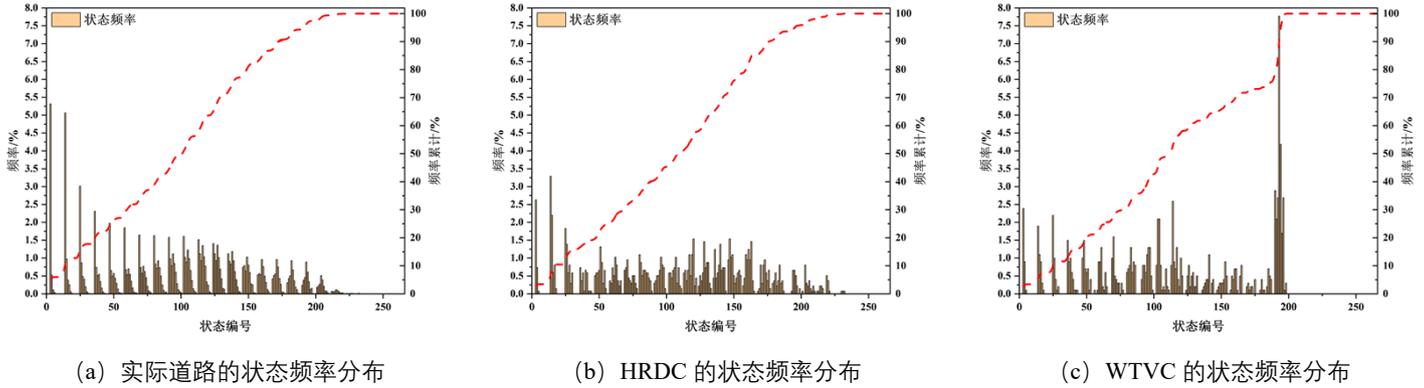


图 13 实际道路, HRDC, WTVC 状态频率分布图

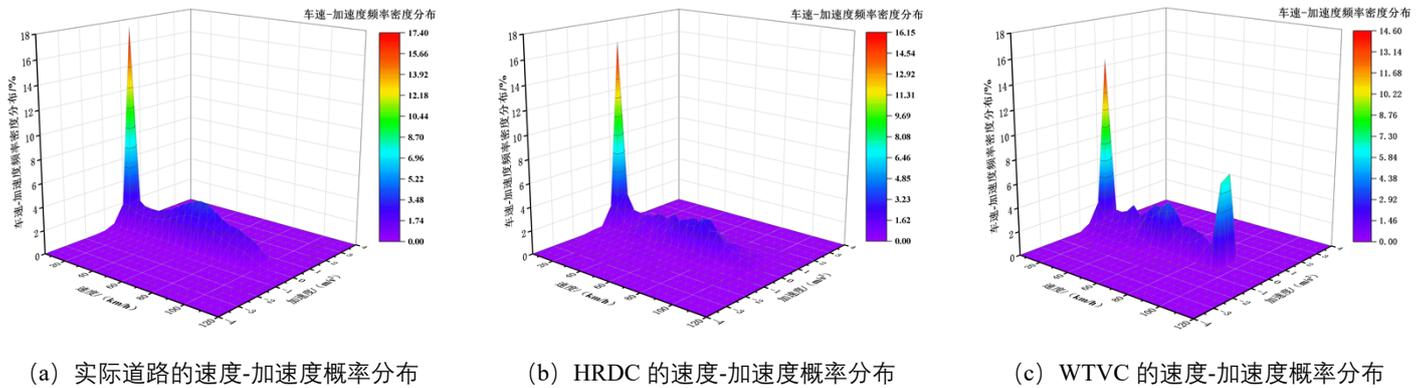


图 14 实际道路, HRDC, WTVC 速度-加速度概率分布图

2.4 开发重型柴油机瞬态循环

根据研究中使用的车辆基础参数, 设定重型柴油车驱动桥主减速比为 3.7, 轮胎规格为 12R22.5 18PR, 其外直径 1080mm。根据统计的 12 档变速箱各档位的速比与对应的主要车速范围, 可基于式 (8), 将 HRDC 的车速、发动机功率转化为发动机的转速, 进而计算出扭矩。考虑到转化后的转速, 扭矩均不应超出发动机外特性区域, 最终确定的 HRDC 车速与档位的匹配情况如图 15 所示。

$$n = \frac{V}{\pi D} \times \frac{1000}{60} \times i_g \times i_0 \quad (8)$$

其中: n 为发动机转速, rpm; V 为实际车速, km/h; D 为轮胎直径, m; i_g 为变速箱传动比, i_0 为主减速器传动比。

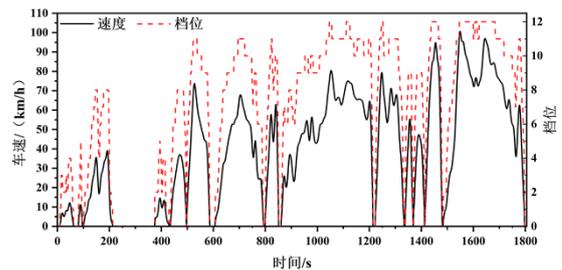


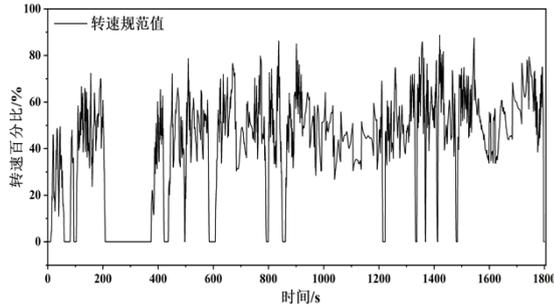
图 15 HRDC 车速与对应的档位示意

将计算得到的转速, 扭矩曲线依据式 (9), (10) 进行规范化处理为百分比的形式, 即可生成图 16 中的代表性重型柴油机实际瞬态循环 (Heavy-Duty Real Transient Cycle, HRTC)。

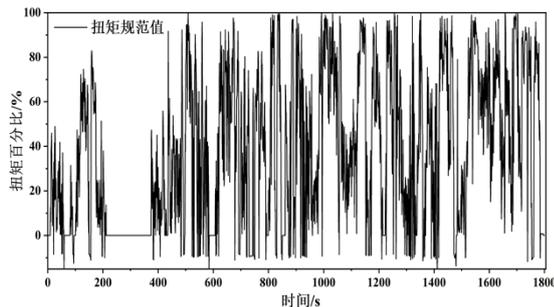
$$n_{norm}(t) = \frac{n(t) - n_{idle}}{n_r - n_{idle}} \quad (9)$$

$$M_{norm}(t) = \frac{Ttq(t)}{Ttq_{max}(n(t))} \quad (10)$$

其中 $n_{norm}(t), M_{norm}(t)$ 为 t 时刻的转速, 扭矩的规范值; $n(t), Ttq(t)$ 为 t 时刻转速, 扭矩的实际值; n_r 为额定转速, 在文中取 1900rpm; n_{idle} 为怠速转速, 在文中取 600rpm; $Ttq_{max}(n(t))$ 为 $n(t)$ 转速下的发动机外特性扭矩。



(a) 重型柴油机实际瞬态循环 HRTC-转速规范值



(b) 重型柴油机实际瞬态循环 HRTC-扭矩规范值

图 16 重型柴油机实际瞬态循环 HRTC

HRTC 相较于 WHTC 而言, 在数据库的组成, 驾驶循环的开发方法, 驾驶循环片段的排布, 传动系统的参数选择等各个层面均有着更高的适应能力, 是重型柴油机实际道路运行工况的良好表征, 可为缩小实验室台架与真实道路驾驶条件下的排放差异, 研制高效稳定的瞬态排放控制策略, 进一步的降低实际道路排放超标风险提供技术储备。

4 重型柴油机代表性瞬态循环排放特性

为了探究重型柴油机运行在 HRTC 与 WHTC 工况时的排放差异, 基于 2.3 节所搭建的重型柴油机试验平台, 分别进行了 HRTC 与 WHTC 的冷、热启动试验, 其中冷启动的试验条件为常温静置发动机与

后处理总成 24h 以上, 直至冷却水, 机油与后处理器各装置的温度均降至室温; 待冷启动试验结束后, 关停发动机进行 10min 的热浸, 然后直接开始热启动试验^[8]。试验时分别采集了后处理器前后的 HC、CO、NO_x 以及碳烟的排放值, 而 PN 则仅在后处理后进行测量, 相关试验结果在表 9 中给出。

表 9 重型柴油机 HRTC 与 WHTC 排放对比

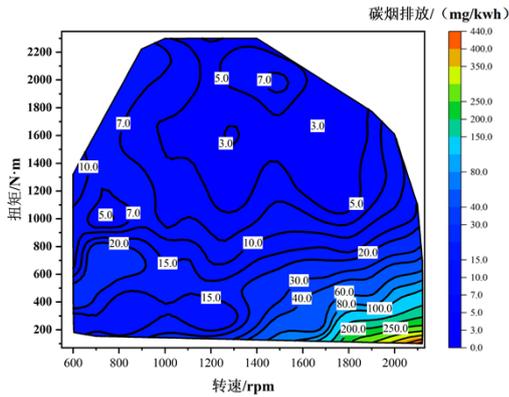
		总功	油耗率	HC 排放	CO 排放	NO _x 排放	碳烟排放	PN 排放
		kwh	g/kwh	mg/kwh	mg/kwh	mg/kwh	mg/kwh	n/kwh
后处理前原 机排放	冷启动 HRTC	57.01	217.33	70.49	286.30	4214.14	18.06	/
	冷启动 WHTC	34.05	227.28	100.49	342.82	3083.00	17.27	/
	热启动 HRTC	56.84	212.78	101.51	288.33	4555.83	16.91	/
	热启动 WHTC	33.99	219.59	106.46	289.35	3424.08	16.54	/
后处理后排 放	冷启动 HRTC	56.97	218.76	5.56	22.77	76.30	0.20	5.470E+12
	冷启动 WHTC	34.07	233.72	14.09	37.77	79.94	0.09	3.103E+12
	热启动 HRTC	56.87	213.30	10.36	28.71	37.64	0.17	4.864E+12
	热启动 WHTC	33.94	220.33	11.59	34.32	52.00	0.19	3.091E+12

NO_x 与碳烟颗粒物是重型柴油机的主要空气污染物。对比 WHTC 而言, 当运行在更加接近道路情况的 HRTC 时, 重型柴油机产生了更高的 NO_x, 碳烟与 PN 排放; 相较于热态试验而言, 这一趋势在含有冷启动过程的试验循环中更为显著, 未经后处理器的原机 NO_x, 碳烟的比排放分别增大了 36.69% 和 4.57%, 而后处理后同样作为碳烟评价指标的颗粒物

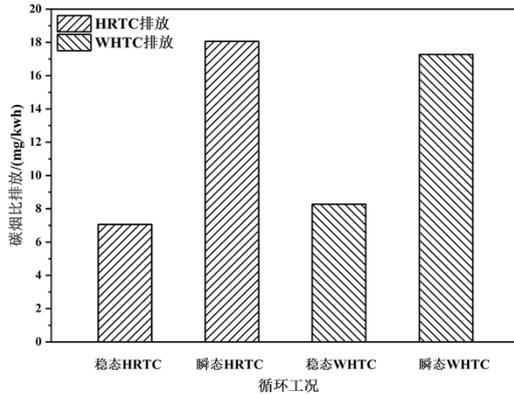
数量 PN, 其比排放量也上升了 76.28%。

重型柴油机的实际道路运行过程是连续复杂的瞬变过程, 此前课题组的研究结果表明, NO_x 排放量对瞬态过程并不敏感, 部分工况下由于相对较低的缸内燃烧温度, 瞬时排放低于稳态值^[36]; 但瞬态加载过程中, 因涡轮的响应迟滞而导致的进气量不匹配, 却往往造成了碳烟排放的大幅增加。从图 17

中可以看出，相较于基于万有实验插值得到的稳态碳烟排放情况，通过冷起动 HRTC 与 WHTC 试验测得的瞬态碳烟排放量均有明显提升，排放增幅分别为 155.74%和 108.55%，HRTC 的瞬态碳烟排放恶化现象更为明显，可见 WHTC 工况显著的低估了重型柴油机真实道路的排放程度。



(a) 重型柴油机稳态万有碳烟排放

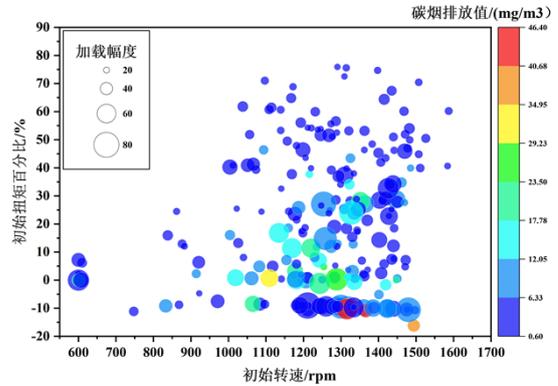


(b) HRTC,WHTC 稳态瞬态碳烟比排放对比

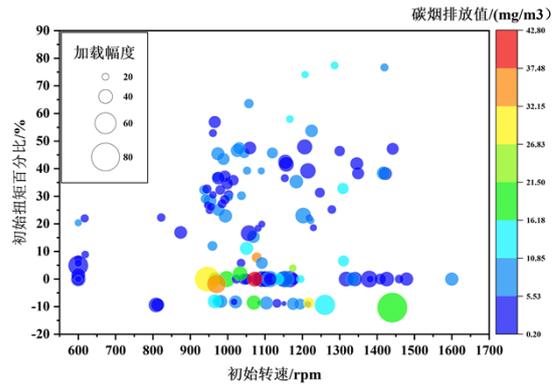
图 17 重型柴油机万有碳烟排放及 HRTC,WHTC 稳态/瞬态碳烟比排放对比

由于 PN 仅在后处理器后测量，其瞬态规律受 DPF 干扰较大，因此在研究中通过后处理前原机的碳烟排放来描述不同工况碳烟的变化规律，并探究其生成的主要瞬态场景。由于当瞬变突加油量至满负荷的变化周期超过 5s 时，该瞬态过程的排放水平已与稳态无异^[37]，因此统计了 HRTC 与 WHTC 工况中加扭矩幅度大于 20%/s 时的碳烟排放情况，并在图 18 中给出。可以看到相较于 WHTC，HRTC 中存在着更多的突加扭矩工况点，这些工况的分布范围相对更广；高碳烟排放点主要集中在从怠速或倒拖（此时发动机断油，扭矩为负值，常见于行车中的制动或换挡过程）工况开始的，一秒内扭矩增加量大于 40%的瞬态过程中，这是因为怠速或倒拖发动机时废气能量极低，涡轮增压器近乎不工作，缸内每循环的新鲜进气量较少，此时迅速喷入大量燃油，

由于增压器响应迟滞导致缸内瞬时当量比严重恶化，燃烧相位滞后且速率降低，不完全燃烧产物增加，这样的瞬态场景是需要进行实际道路排放优化与控制策略开发的核心。



(a) HRTC 瞬态突加扭矩工况碳烟排放特征



(b) WHTC 瞬态突加扭矩工况碳烟排放特征

图 18 HRTC,WHTC 瞬态突加扭矩工况碳烟排放特征

5 结论

(1) 以 1Hz 的频率采集了 9 辆重型柴油车一年的自然行驶记录，在完成短行程划分与异常值清理后，根据平均行驶速度将测量数据划分为城市，郊区和高速三个路段，并通过自适应粒子群优化的 k 均值聚类方法锁定了各路段中的主要运动学场景，明确了为保证具有充分的真实道路表征能力，典型的重型柴油车驾驶循环应当至少涵盖 5 种城市，7 种郊区和 2 种高速的行驶场景；

(2) 通过马尔科夫蒙特卡洛法生成了真实还原重型柴油车行驶特征的驾驶循环片段，并按照道路行驶规律排布，研制了代表实际道路运行情况的驾驶循环 HRDC，该循环与真实道路的各项特征参数差异均不超过 10%，相较 WTVC 在车速-功率，车速-加

速度分布层面也更加接近实际情况;

(3) 依据重型柴油车的常见车型与变速箱参数, 基于 HRDC 开发了重型柴油机代表性瞬态循环 HRTC, 相较 WHTC 而言, 其在数据库的组成, 驾驶循环的开发方法, 驾驶循环片段的排布, 传动系统的参数选择等各个层面均有着更高的适应能力, 是重型柴油机实际道路运行工况的良好表征;

(4) 通过试验探究了 HRTC 的排放特性, 当运行在更加接近道路情况的 HRTC 时, 重型柴油机 NO_x, 碳烟与 PN 比排放分别上升了 36.69%, 4.57% 和 76.28%, 同时 HRTC 瞬态碳烟排放的恶化程度也更加明显, 表明 WHTC 工况显著的低估了重型柴油机真实道路的排放程度; 在此基础上研究了瞬态碳烟的生成场景, 发现碳烟排放尖峰主要集中在从怠速或倒拖开始的, 扭矩增幅大于 40%/s 的瞬变过程中, 这样的瞬态场景是需要进行实际道路排放优化与控制策略开发的核心。

致谢

作者感谢潍柴动力股份有限公司为本研究提供的资助及重型柴油车实际道路运行数据。

参考文献:

- [1] Rik Oldenkamp, Rosalie van Zelm, Mark A.J. Huijbregts. Valuing the human health damage caused by the fraud of Volkswagen[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 212: 121-127.
- [2] Bart Degraeuwe, Martin Weiss. Does the New European Driving Cycle (NEDC) really fail to capture the NO_x emissions of diesel cars in Europe?[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 222: 234-241.
- [3] Fredy Rosero, Natalia Fonseca, José-María López, et al. Real-world fuel efficiency and emissions from an urban diesel bus engine under transient operating conditions[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114442.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴(2022) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [5] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报[R]. 北京: 生态环境部, 2022.
- [6] Ruoyun Ma, Xiaoyi He, Yali Zheng, et al. Real-world driving cycles and energy consumption informed by large-sized vehicle trajectory data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223: 564-574.
- [7] Luis F. Quirama, Michael Giraldo, José I. Huertas, et al. Main characteristic parameters to describe driving patterns and construct driving cycles[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 97: 102959.
- [8] GB17691—2018. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [9] WANG X, WANG C, GAO T, et al. Analysis of the engine test cycles from China VI heavy duty vehicle standard and China automotive test cycle[J]. *E3S Web Conf.*, 2021, 268.
- [10] KO S, PARK J, KIM H, et al. NO_x Emissions from Euro 5 and Euro 6 Heavy-Duty Diesel Vehicles under Real Driving Conditions[J]. *ENERGIES*, 2020, 13(1).
- [11] Justin D.K. Bishop, Colin J. Axon, Malcolm D. McCulloch. A robust, data-driven methodology for real-world driving cycle development[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(5): 389-397.
- [12] Yuepeng Cui, Hao Xu, Fumin Zou, et al. Optimization based method to develop representative driving cycle for real-world fuel consumption estimation[J]. *Energy*, 2021, 235: 121434.
- [13] Yuepeng Cui, Fumin Zou, Hao Xu, et al. A novel optimization-based method to develop representative driving cycle in various driving conditions[J]. *Energy*, 2022, 247: 123455.
- [14] Jie Lin, Debbie A Niemeier. An exploratory analysis comparing a stochastic driving cycle to California's regulatory cycle[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(38): 5759-5770.
- [15] Michel André. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions[J]. *Science of The Total Environment*, 2004, 334-335: 73-84.
- [16] Sanghriya H. Kamble, Tom V. Mathew, G.K. Sharma. Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14(2): 132-140.
- [17] Sai Kiran Mayakuntla, Ashish Verma. A novel methodology for construction of driving cycles for Indian cities[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 65: 725-735.
- [18] W.T. Hung, H.Y. Tong, C.P. Lee, et al. Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2007, 12(2): 115-128.
- [19] H.Y. Tong. Development of a driving cycle for a supercapacitor electric bus route in Hong Kong[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 48: 101588.
- [20] Qidong Wang, Hong Huo, Kebin He, et al. Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in

- Chinese cities[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2008,13(5): 289-297.
- [21] D.P. Yang, T. Liu, X.M. Zhang, et al. Construction of high-precision driving cycle based on Metropolis-Hastings sampling and genetic algorithm[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023,118: 103715.
- [22] Zeyu Chen, Qing Zhang, Jiahuan Lu, et al. Optimization-based method to develop practical driving cycle for application in electric vehicle power management: A case study in Shenyang, China[J]. *Energy*, 2019,186: 115766.
- [23] Sze-Hwee Ho, Yiik-Diew Wong, Victor Wei-Chung Chang. Developing Singapore Driving Cycle for passenger cars to estimate fuel consumption and vehicular emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2014,97: 353-362.
- [24] C. Chandrashekar, Prashansa Agrawal, Pritha Chatterjee, et al. Development of E-rickshaw driving cycle (ERDC) based on micro-trip segments using random selection and K-means clustering techniques[J]. *IATSS Research*, 2021,45(4): 551-560.
- [25] Shuming Shi, Nan Lin, Yan Zhang, et al. Research on Markov property analysis of driving cycles and its application[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016,47: 171-181.
- [26] I. Kolmanovsky, I. Siverguina, B. Lygoe. Optimization of powertrain operating policy for feasibility assessment and calibration: Stochastic dynamic programming approach: PROCEEDINGS OF THE 2002 AMERICAN CONTROL CONFERENCE, VOLS 1-6[Z]. 20th Annual American Control Conference (ACC): 2002: 1-6, 1425-1430.
- [27] Xinyi Jia, Hewu Wang, Liangfei Xu, et al. Constructing representative driving cycle for heavy duty vehicle based on Markov chain method considering road slope[J]. *Energy and AI*, 2021,6: 100115.
- [28] Jin Zhang, Zhenpo Wang, Peng Liu, et al. Driving cycles construction for electric vehicles considering road environment: A case study in Beijing[J]. *Applied Energy*, 2019,253: 113514.
- [29] He Hongwen, Guo Jinqun, Peng Jiankun, et al. Real-time global driving cycle construction and the application to economy driving pro system in plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Energy*, 2018,152: 95-107.
- [30] Ali Hussain Umar Bhatti, Syed Ali Abbas Kazmi, Asad Tariq, et al. Development and analysis of electric vehicle driving cycle for hilly urban areas[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021,99: 103025.
- [31] Huiming Gong, Yuan Zou, Qingkai Yang, et al. Generation of a driving cycle for battery electric vehicles: A case study of Beijing[J]. *Energy*, 2018,150: 901-912.
- [32] John Brady, Margaret O' Mahony. Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas[J]. *Applied Energy*, 2016,177: 165-178.
- [33] Siyou Tao, Ke Ding, Zhuoyun Li, et al. Development of a representative driving cycle for evaluating exhaust emission and fuel consumption for Chinese switcher locomotives[J]. *Applied Energy*, 2022,322: 119499.
- [34] Omar A. Huzayyin, Hindawi Salem, Muhammed A. Hassan. A representative urban driving cycle for passenger vehicles to estimate fuel consumption and emission rates under real-world driving conditions[J]. *Urban Climate*,2021(36):100810.
- [35] 姜平. 城市混合道路行驶工况的构建研究[D].合肥工业大学,2011.
- [36] 周小波.重型柴油机瞬态工况排放控制策略的研究[D].天津大学,2016.
- [37] 顾文钰.基于多参数协同控制的重型柴油机瞬态过程性能优化[D].天津大学,2023.