

基于聚类算法的车辆数据挖掘及可视化研究

宋冬冬¹, 王楠², 田树耀¹, 刘付勇²

(1. 河北科技师范学院 机电工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 秦皇岛九然清洁能源科技有限公司, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 车辆运行工况决定了承载人员的生命安全, 影响了整车工作效率, 同时也是分析驾驶人员行为及构建 UBI 保险业务的数据基础。基于车联网技术, 为构建车辆及周边环境的评价系统, 以 50 辆不同型号私家车作为研究对象, 在固定路段及时间段内, 利用车载 OBD 终端采样车辆行驶数据。对各车辆的行驶速度、进气量、瞬时油耗、发动机转速等运行数据进行汇总与清洗, 利用 k-means 聚类算法对样本数据进行了分布计算, 并通过最小二乘拟合获得发动机各数据间运行曲线, 与理论模型相一致, 实现对车、人、路况的客观评价。进一步开发了车辆数据信息管理系统平台, 经 TCP/IP 协议获取车载终端 GPS 数据, 实现了行驶轨迹及车况数据的动态显示, 方便了对车辆的跟踪与查询。该研究工作可为构建驾驶行为及 UBI 保险营销模型提供理论依据, 同时为车联网的功能完善提供参考。

关键词: 公路运输; 车联网; 聚类算法; 数据挖掘; 数据通信; 车况数据

中图分类号: U495; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2020)10-0204-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2020.10.036

Research on Vehicle Data Mining and Visualization Based on Clustering Algorithm

SONG Dong-dong¹, WANG Nan², TIAN Shu-yao¹, LIU Fu-yong²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Normal University of

Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China;

2. Qinhuangdao Jiuran Clean Energy Technology Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The operating condition of the vehicle determines the life safety of the carrying personnel, affect the work efficiency of the vehicle, and serve as the data basis for analyzing the behavior of the driving personnel and constructing UBI insurance business. Based on the Internet of vehicles technology, in order to construct the evaluation system of vehicles and surrounding environment, fifty private cars of the different model are taken as research objects, and vehicle condition data obtained from vehicle OBD terminal are sampled in selected road sections and fixed periods. We summarize and clean the driving speed, air intake, instantaneous fuel consumption, engine speed and other operation data of each vehicle, use the k-means clustering algorithm to calculate the distribution of sample data and the least square fitting to obtain the running curve between the engine data, which is consistent with the theoretical model, so as to realize the evaluation of vehicle, human and road conditions. Furthermore, the upper computer platform of vehicle information management system is developed, and the vehicle terminal GPS positioning is obtained through TCP/IP protocol to realize the dynamic display of vehicle trajectory and vehicle condition data, which facilitates the tracking and query of vehicles. This study can provide theoretical basis for the construction of driving behavior and UBI insurance marketing model, as well as provide reference for the improvement of functions of Internet of vehicles.

Key words: highway transportation; internet of vehicles; clustering algorithm; data mining; data communication; vehicle condition data

0 引言

随着 5G 网络的渗透作用, 物联网技术即将步入新的发展阶段, 车联网作为物联网典型应用领域, 将被进一步推广与应用。车联网应用技术在交通、保险、消

费、车企等多领域的融合度会更加深入, 巨大商机蕴含其中, 同时也为科学研究提供了丰富的素材^[1]。现有对车联网系统的研究思路在车况监测、驾驶习惯及外部环境数据的获取和分析等方面均有涉及。

收稿日期: 2019-12-10

修回日期: 2020-04-13

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (18210801D)

作者简介: 宋冬冬 (1981-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为汽车物联网关键技术、大数据挖掘算法设计。

文献[2]搭建了车辆运行状态监测系统,选用传感器测量方案实现对车况数据的采集与上传,采集数据类型受到传感器组件限制,无法获得发动机等数据,且上位机算法较为单一,不具备驾驶行为分析等功能。文献[3]针对营运客车搭建了远程监控系统,可实现对客车制动、油压等参数的提取和分析,但上位机算法未体现对发动机状态的分析。文献[4]提出基于车联网技术的车辆发动机远程故障诊断系统,结合小波去噪及 BP 神经网络等算法,对发动机 ECU 数据流进行了分析与计算,提高了发动机故障诊断的准确率。但针对车辆运行数据的解析未做深入介绍。文献[5]利用车速超限、车速平均值、加速度标准差、减速度平均值四个特征参数,对驾驶行为样本数据进行了聚类分析。类似文献还有文献[6-7],分别利用 k-means 和 DBSCAN 聚类方法,对车辆在不同时间段、不同环境的车速、加速度等参数进行了分析,得到了车辆驾驶稳定程度评判指标及依据。文献[8]从交通信号控制系统出发,介绍了车联网技术在降低交通拥堵、缓解路况方面的优势。文献[9-11]分别介绍了车联网技术在智能交通及车辆行驶监控方面的应用。此外,还有大量文献研究基于车联网技术的 UBI 车险策略^[12-14]。文献[15]提出了基于驾驶行为的 UBI 车险数学模型,在考虑了索赔次数因素的影响下,构建了有序分类的 logistic 模型。通过对实测数据的分析与计算,可实现较现行的 NCD 保险价格更为优越的车险定价。为确定驾驶行为与 UBI 业务的相关性,提供了理论基础。

以上相关研究在车联网的局部功能领域具有较好的示范作用,但从应用角度,缺乏整体性研究。基于车联网技术,对整车的运行状态进行评估及对车辆行驶过程中关键部件的监测,不仅可在一定程度上提高安全系数,而且有助于对车主提出优化驾驶的建议,同时数据分析可供后期 UBI 业务拓展。

该文通过对样本数据的前期采集、清洗以及后期利用数据挖掘等算法分析,实现对不同驾驶员在特定路段下车辆工作数据的统计。同时,通过构建车辆综合信息管理平台,实现对车、人、路况等综合信息查询等功能。研究结构如图 1 所示。

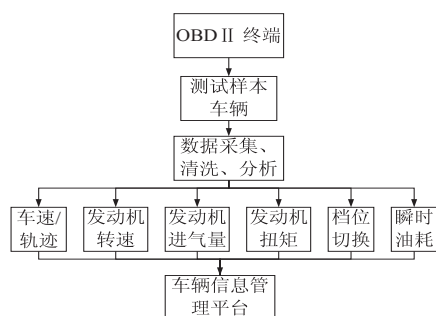


图 1 研究结构

1 聚类 k-means 算法原理

聚类算法属于数据挖掘领域中的重要分支,是对复杂结构数据集的优化搜索过程,广泛应用于生物、统计、社会等学科。一般可归为层次法和划分法。k-means 聚类算法属于典型的划分聚类方法,基本思想是最小化全部数据与参考数据之间的差异度之和。设定某数据集为 $S = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, n 为数据点个数,某一个数据点具有 m 维度参数,即 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。在 n 个数据点中,选取 k 个集中位置 V_i ($i = 1, 2, \dots, k$) 为簇中心,使得该数据集 S 中每个数据点距离最近簇中心位置的平方和为最小,即满足的优化目标函数:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{X \in C_i} \|X - V_i\|^2 \Rightarrow \min \quad (1)$$

其中, E 为全部数据点距离簇中心的偏差平方总和, V_i 为簇点 C_i 的平均值。空间距离的求取可采用欧氏法、曼哈顿法和明氏法等,其中欧氏法使用较为普遍。算法基本流程为:

(1) 确定 k 个分布中心,并随机选取对象。 k 的选取原则依据各维度的特征值;

(2) 计算 k 个中心点至各全部数据点的欧氏距离,将各数据点划归至距离最近的簇点区域;

(3) 重复步骤(2),并更新簇点中心位置;

(4) 确定结果是否收敛,并得到分类结果,或重复(2)步骤。

为判断聚类效果,定义评判聚类效果指标为:

$$SCR = 100\% * C_n / S_m \quad (2)$$

其中, C_n 为分类正确的样本数, S_m 为总样本数。

2 车辆行驶数据分析过程

基于 k-means 聚类算法原理,对被测车辆的采集数据 $X_1 \sim X_{20}$ 进行了整理。每台车的数据维度 $m = 7$,包括车速、轨迹、发动机转速、发动机进气量、发动机扭矩、瞬时油耗和油门踏板开度,档位数据依据车速和发动机转速的分布关系辨识。前期对各维度数据进行了排序与清洗,去除了相异度较大的奇异点。针对各维度数据进行了数据分析如下:

(1) 档位分布重构。操作车辆档位直接改变车辆的动力传输比例,决定了变速箱工况,影响了车速及发动机转速数据,故通过考察车速及发动机转速可以反映档位信息。被测车辆均为手动档操作,档位排列顺序为 1-2-3-4-5-R。档位切换依据车速及发动机转速数据判断,根据车辆发动机转数、车速、主减速比和档位速比之间的数量关系,构建数学模型为:

$$v_{\text{KPH}} = \frac{2 * 3.6 \pi r N_e}{60 i_0 i_g} \quad (3)$$

其中, v_{KPH} 为车速, N_e 为发动机转速, r 为车轮半径, i_0 为主减速比, i_g 为档位速比。通过采样数据可以计算车辆各档位的传动比数据。取 $r = 0.3154 \text{ m}$, i_0 一般为 $3.5 \sim 5$ 之间, 设定为 4.15 。对式(3)分析可知, 某固定车辆的车速与发动机转速满足线性比例关系。故可通过该式求取档位速比, 即确定档位信息。

依据以上分析, 汇总全部车辆发动机转速及车速数据后, 建立其间对应关系 $v_{\text{KPH}} = f(N_e)$, 如图2所示, 为两变量函数对应关系。图中可以较为清晰地辨识数据的归属区间, 划分了四条带状区域, 分别为 A、B、C、D。从直观角度而言, 该数据集完全具备聚类算法特性, 但因各类分布形状呈带状, 采用无监督聚类模式计算或出现不收敛现象。故利用监督的 k-means 聚类方式, 通过手动调节初始簇心标记的位置, 可以确保计算收敛, 直至满足要求。因采集数据已经具有较高的分类辨识度, 故监督聚类算法无碍数据分析。

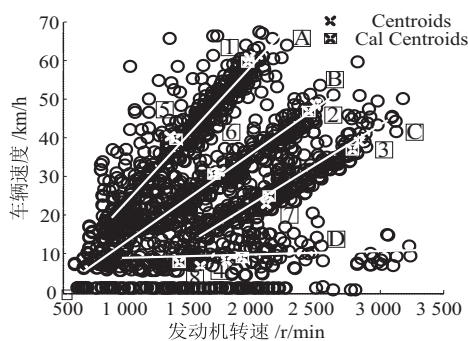


图2 某型号车辆速度与发动机转速关系

计算过程先后标记了1~8点作为四个区域的簇心, 分别位于 A、B、C、D 区域的端部及近中心位置。每次计算簇心数 $k = 4$, 分别对各区域的两簇心进行了计算, 结果如标记所示。可以看出, 初始簇心与优化结果相差不大。仅 D 区域中心位置偏差较大。计算得到的聚类效果指标如表1所示。

表1 车辆速度与发动机转速聚类效果指标数据

区域	迭代次数	SCR/%
A	11/11	41.7/40.5
B	12/11	20.2/19.7
C	14/13	18.8/19.4
D	17/17	10.5/6.8

表中迭代次数和 SCR% 数据斜线前后分别为端部簇点和中部簇点对应结果。可以看出, 因 D 区数据较少且分散性强, 迭代计算次数偏高, 且正确分类样本比例偏低。A 区域数据较为集中, 计算次数及正确样本比例较高。B 和 C 两区域存在交叉区域, 相对计算误差较大。

通过对数据进一步分析, 该四区域满足一定的传动比规律, 反映了车辆行驶的档位数据。结合式(3),

A、B、C、D 区域依次代表 4 档、3 档、2 档和 1 档位置。数据分析未得到 5 档信息, 分析原因在于该路段车况较为复杂, 较少使用高速档位, 4 档位速度已经达到要求, 故 4 档数据较为密集。2、3 档位数据也反映了该路况的复杂程度, 使用较为频繁。1 档附近存在较多奇异点, 对应转速较高, 或存在驾驶不当等问题。横坐标轴反映了怠速车况, 因气温低等原因, 存在怠速偏高的可能, 数据分析结果符合实际车况。依据档位传动比公式(3), 取 $r = 0.3154 \text{ m}$, $i_0 = 4.15$, 取图2中 5~8 点计算得到 1~4 档位的传动比 i_g 分别为: 7.1, 4.3, 2.9, 2.0。经对比, 该计算数据与车辆出厂数据存在一定偏差, 误差原因与数学模型参数选取以及聚类算法精度均有关系, 但整个分析过程是有效的。在区分档位区域的基础上, 对各档位区域数据分别进行了最小二乘法拟合计算, 得到各档位区域的拟合直线。如图中所示。该直线可定义为满足式(3)的函数曲线。

(2) 发动机转速分布重构。发动机转速受节气门进气量及进气压力控制, 通过考察进气量对发动机转速的影响, 可以判断发动机工作状态, 进而实现对机器性能的评价。发动机转速与节气门进气量的函数关系为 $N_e = f(V_{\text{Throttle}})$, 其中 V_{Throttle} 为节气门进气量。通过实测得到两变量关系数据, 如图3所示。两数据在发动机转速为 $1000 \sim 2500 \text{ r/min}$ 、进气量在 $200 \sim 2500 \text{ L/min}$ 区间较为密集。对比图2, 车辆驾驶档位分布对应的发动机转速也位于此区间, 具有较好的一致性。图中圈出的数据点对应发动机转速偏低, 疑似异常工作点, 考虑因过载或者节气门积碳过多所致。

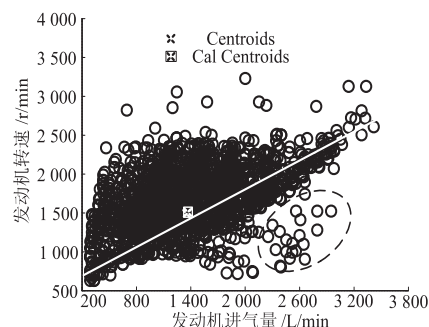


图3 某型号发动机进气量与发动机转速关系

因数据基本为一整体, 无分类倾向, 为确定数据中心点, 设定 $k = 1$ 。初步选定簇心位于整个区域近中心位置, 计算结果如图标记, 结果偏差较小。对数据集合并进行拟合计算, 得到近似描述发动机转速和进气量的曲线, 可作为分析被测车辆发动机工作是否异常的判据。

(3) 进气量分布重构。发动机进气量决定于进气门开度大小, 而进气门与油门踏板可视为刚性连接, 无相对运动, 即后者的转角决定了前者的开度。故油门

踏板的变化决定了发动机进气量的数值。由文献[16]可知,发动机进气量与油门踏板开度为非线性正相关函数,同时受到节气门前气体压力及温度等多参数的影响。其数学模型为:

$$m = m_1 \frac{1.35 p_0}{\sqrt{T_0}} (1 - 1.4073 \cos A + 0.4087 \cos^2 A) \sqrt{\left(\frac{p_i}{p_0}\right)^{0.4404} - \left(\frac{p_i}{p_0}\right)^{2.3143}} \quad (4)$$

其中, m 为节气门流量, m_1 为发动机型号常数, A 为节气门开度, p_i 为进气压力, p_0 为节气门前压力, T_0 为节气门前温度。两数据分布如图4所示。图中可以得到两参数变化呈正相关性,与数学模型公式(4)变化趋势一致。

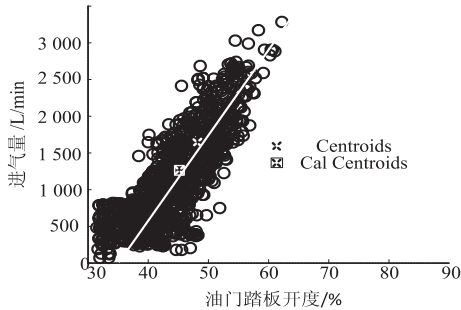


图4 某型号油门踏板开度与发动机进气量关系

利用非线性拟合工具得到油门踏板开度在30%~60%区间变化的近似曲线。与式(4)在该区间变化规律是一致的。对该区域数据的簇中心计算结果如图中标记所示。

(4) 瞬时油耗分布重构。发动机瞬时耗油量常用瞬时燃油经济性模型评定,受油门踏板开度、发动机转速以及两者变化率决定^[17]。数学模型为:

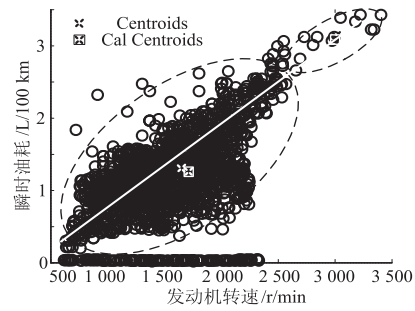
$$Q_{oil} = \sum_{i=0}^3 C_i (1 + k_1 \dot{P}_e^2) P_e \quad (5)$$

$$P_e = k_2 N_e T_e \quad (6)$$

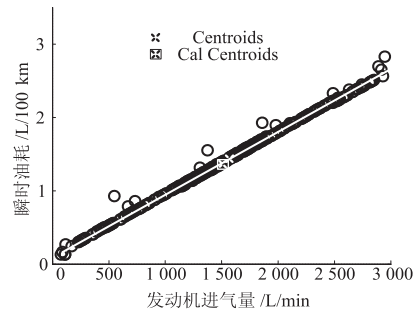
其中, Q_{oil} 为燃油经济性指标, C_i 、 k_1 和 k_2 为系数, P_e 和 \dot{P}_e 分别为发动机输出功率及其变化率, N_e 为发动机转速, T_e 为发电机扭矩。发动机输出功率直接受油门踏板开度影响。瞬时发动机油耗与发动机转速的函数关系 $G_T = f(N_e)$ 如图5(a)所示。因发动机输出功率与发动机转速近似呈正比例,故发动机转速与瞬时油耗呈正相关性。

利用算法对数据进行了聚类分析,通过观察数据分布,在发动机转速为2500 r/min位置存在间断,故设定初始簇心 $k=2$,计算结果如图中标记。两簇心分别对应发动机转速在500~2500 r/min和2500~3500 r/min区域。由于驾驶员驾驶技能的区别,导致控制油门踏板开度存在差异,可以在较高的转速下实现较低的油耗,实现良好的燃油经济性,依赖于驾驶员

经验。



(a) 发动机瞬时油耗



(b) 发动机转速和进气量关系

图5 某型号发动机瞬时油耗与发动机转速和进气量关系

对数据拟合曲线如图标记,近似为正比例关系。图5(b)为瞬时油耗与发动机进气量的关系,两参数函数关系近似呈线性分布,与文献[18]中实验数据相符。利用算法对数据集进行了簇中心筛选,如图标记所示。该数据分布满足线性拟合要求,易得到拟合曲线。

(5) 发动机扭矩分布重构。发动机扭矩与发动机转速及油门踏板开度有关,即:

$$T_e = \sum_{i+j=0}^3 k_{(i,j)} N_e^i A^j \quad (7)$$

其中, $k_{(i,j)}$ 为多项式系数,其他参数同上。绘制了发动机扭矩百分比和油门踏板开度数据,如图6所示。由图3可知,进气量与发动机转速呈正相关性,而油门踏板开度与进气量近似为正比例变化,故式(7)随油门踏板开度呈增大趋势。发动机扭矩百分比为发动机输出扭矩占最大输出扭矩的值。因负荷较大时,油门踏板开度增大将导致在相同发动机转速下得到的扭矩会增大,故数据分布随油门开度增大呈上升趋势。利用非线性最小二乘拟合工具,可得到非线性拟合曲线,如图标记。该曲线可作为两变量间的近似数量关系。对选定的簇点进行了算法分析,得到了修正的中心位置。

通过对采集数据的聚类分析,可定位各簇中心点,进而获取车辆的平均工况,确定各工况数据与平均数据的空间距离,实现对边缘数据的评价与判断。能够得到车辆工作性能、驾驶员操作习惯、路况环境基本信

息。通过对以上信息的进一步融合,可作为扩展车联网系统功能和完善系统结构的基础数据,具有一定的应用价值。

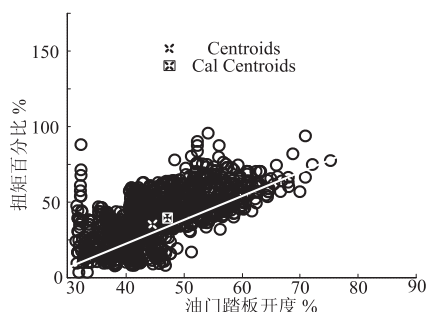


图6 某型号发动机扭矩百分比与油门踏板开度关系

3 车辆数据可视化平台

为实现对车辆信息的图像显示和监测,便于数据维护与信息的管理,开发了基于 C#. NET 平台的车辆数据可视化系统,其基本结构如图7所示,包括用户管理、车辆信息、算法分析等五个模块。用户管理模块可实现用户角色切换及登录权限设定;车辆信息模块负责接收下位机 OBD 上传的车辆及环境等基础数据(时间、天气、路况等);算法分析模块可完成数据挖掘算法计算与分析,实现车辆、环境及司机的状态分类与评价,并给出评价结果;数据管理模块完成对平台全部数据的存储与更新,实现底层数据管理及表单操作;消息管理模块可对车辆状态、环境参数以及驾驶行为建议等提示信息以短信方式下发至车载终端及用户手机 APP 中,实现上位机与下位机之间的信息互传。整个系统为 B/S 结构,数据库采用 SQL Server 平台实现系统数据管理与存储,管理平台与 OBD 终端采用网络 TCP/IP 协议通讯,可满足通讯的实时性及有效性。

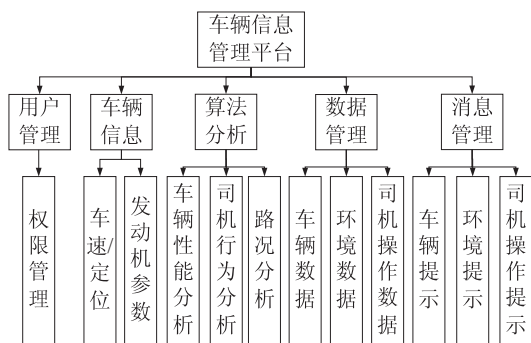


图7 车辆数据可视化平台整体结构

(1) 行车轨迹信息。图8所示为被测车辆的行车轨迹可视化界面,通过车载终端 GPS 模块的实时定位,将位置信息上传至管理平台,实现对车辆位置的定位与跟踪。系统设置了自定义时间段内的里程/停留和轨迹回放等功能,可查看被测车辆在固定时间内的行驶路径及停留信息。为防范车辆盗抢提供了有效的数据保证。另外该功能也有助于对公交车及营运车辆

的监督与管理部署,便于下达任务及实时调度。

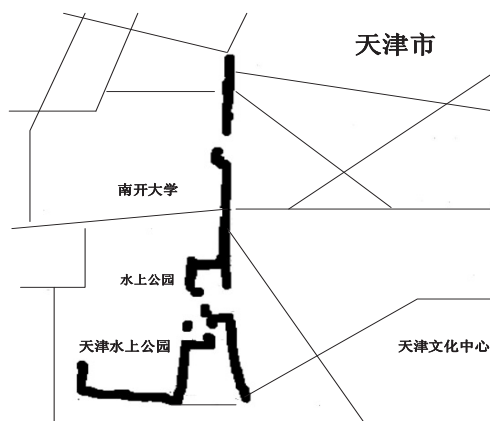


图8 行车轨迹可视化界面

(2) 车速及发动机转速信息。平台对车速及车辆发动机转速可视化图形如图9所示。通过车载终端对车速及发动机转速等信息的实时上传,平台可以捕获任意车辆在行驶区间的车辆控制情况。同时还可间接分析得到不同时间各路段交通状况,该功能亦可服务于交通管理部门,作为交通治理的重要数据。基于发动机转速监视界面,可通过聚类等算法得到发动机类型及性能,作为车辆工况诊断的基础数据。

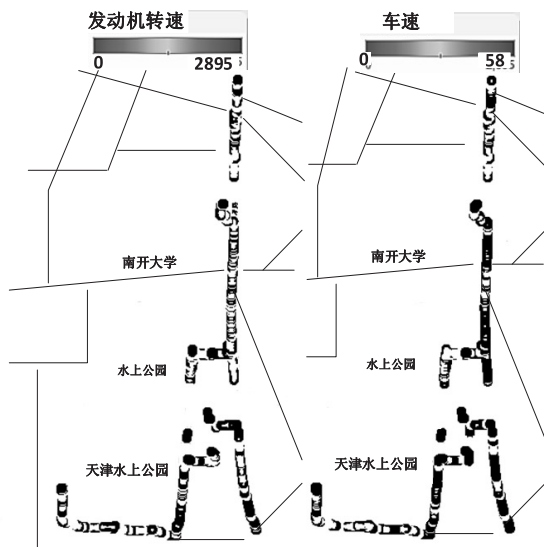


图9 车速及发动机转速可视化界面

4 结束语

研究车联网的最根本目的是实现对车辆的实时监控,达到为安全服务的目的。利用 OBD 终端采集样本车辆在特定背景下的行驶数据,完成了以下工作:

(1) 利用有监督的 k-means 聚类算法,实现对车辆档位分布的重构,计算了评价指标和各档位传动比,利用最小二乘法得到各档位区域的拟合直线,符合理论模型且计算结果与实际参数基本一致;

(2) 对发动机转速-进气量、进气量-油门踏板开度、瞬时油耗-发动机转速/进气量和扭矩百分比-油

门踏板开度等关系数据进行了聚类算法分析和拟合计算,确定了各簇数据中心,为后续制定评价标准提供了依据;

(3)开发了车辆数据分析平台,实现了车辆参数的可视化,便于车辆信息的监督与查询,为进一步分析驾驶行为及 UBI 保险策略提供数据基础。

参考文献:

- [1] KE G, HE D P, BO A, et al. 5-GHz obstructed vehicle-to-vehicle channel characterization for internet of intelligent vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 100-110.
 - [2] 杨志刚, 王险峰, 张 环, 等. 汽车运行状态远程监测系统开发[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(5): 77-80.
 - [3] 刘应吉, 曹庆富, 张学文, 等. 基于 CAN 总线与 GPRS 的营运客车运行状态远程监控系统研究[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(1): 90-93.
 - [4] 林素敏, 刘 方, 段少勇. 基于车联网的汽车发动机远程故障诊断研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2019, 48(1): 57-60.
 - [5] 孙 川, 吴超仲, 褚端峰, 等. 基于车联网数据挖掘的营运车辆驾驶速度行为聚类研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(6): 82-87.
 - [6] 郑恒杰, 熊 昕, 张 上. 基于车联网数据挖掘的驾驶员行为分析[J]. 信息通信, 2019(8): 52-55.
 - [7] 文江辉, 杨先敏, 吴超仲. 大数据环境下营运车辆驾驶行为特征分析[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(4): 42-50.
 - [8] 陈利红. 基于车联网技术的交叉口交通信号控制系统研究[J]. 计算机时代, 2019(1): 9-12.
 - [9] 徐侃春. 基于车联网的智能交通系统研究[J]. 铁路计算机应用, 2019, 28(3): 57-59.
 - [10] 王 亮, 王 欢. 交通拥堵智能监测的车联网环境构建[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(2): 51-54.
 - [11] 赵力萱, 程智峰, 詹承志, 等. 基于物联网的重点车辆监控平台及其关键技术研究[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(6): 145-149.
 - [12] 彭江琴, 刘南杰, 赵海涛, 等. 智能 UBI 系统研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(1): 142-146.
 - [13] 刘 剑, 张佳羽, 王书华. 基于商用车车联网的 UBI 车险研究与实践[J]. 成都工业学院学报, 2019, 22(1): 48-53.
 - [14] 韩家群, 刘南杰, 黄 波, 等. 基于车联网大数据的 UBI 系统研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(12): 26-29.
 - [15] 吴祥佑. 基于驾驶行为的 UBI 车险定价模型[J]. 电子科技大学学报: 社会科学版, 2020, 22(4): 67-76.
 - [16] FAN L, LI G, HAN Z, et al. Modeling fuel preparation and stratified combustion in a gasoline direct injection engine[J]. Journal of Engines, 1999, 108: 105-119.
 - [17] MCINTYRE M L, GHOTIKAR T J, VAHIDI A, et al. A two-stage lyapunov-based estimator for estimation of vehicle mass and road grade[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3177-3185.
 - [18] 刘春玲. 发动机负荷特性曲线研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- +++++
- (上接第 110 页)
- [4] 王文豪, 姜明新, 赵文东. 基于 Canny 算子改进的边缘检测算法[J]. 中国科技论文, 2017, 12(8): 910-915.
 - [5] HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ M, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ J L, MALDONADO E R, et al. Modern code applied in stencil in edge detection of an image for architecture Intel Xeon Phi KNL[M]. [s. l.]: Springer International Publishing, 2019: 10-13.
 - [6] NAINAN S, KULKARNI V. Lip tracking using deformable models and geometric approaches[M]. Berlin: Springer, 2018: 80-81.
 - [7] BISWAS R, ROY S, PURKAYASTHA D. An efficient content-based medical image indexing and retrieval using local texture feature descriptors[J]. International Journal of Multimedia Information Retrieval, 2019, 8(4): 217-231.
 - [8] 凌凤彩, 康 牧, 林 晓. 改进的 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(8): 309-312.
 - [9] ZHANG Kaijun, GUO Chenghao, NIU Zhonghan, et al. SCOD: dynamical spatial constraints for object detection[M]. [s. l.]: Springer International Publishing, 2018: 43-44.
 - [10] 陈若珠, 薛 彪. 基于 MATLAB 的改进 Canny 算子的图像边缘检测研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014(4): 113-116.
 - [11] HUSSAIN M F, WANG Haidong, SANTOSH K C. Gray level face recognition using spatial features[M]. Berlin: Springer, 2019: 110-112.
 - [12] WANG Ying, LIU Yiguang, XU Zhenyu, et al. Approximated scale space for efficient and accurate SIFT key-point detection[M]. [s. l.]: Springer International Publishing, 2019: 15-16.
 - [13] 王晓梅. 基于图像恢复问题的迭代算法设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
 - [14] 李志鹏, 于鸿彬, 邵宏宇. 基于改进 Canny 边缘检测算法的道路标线检测实验研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(9): 137-141.
 - [15] 徐衍鲁, 马 燕. 改进 Canny 算子的图像边缘检测算法[J]. 福建电脑, 2019, 35(5): 5-7.
 - [16] 林 卉, 赵长胜, 舒 宁. 基于 Canny 算子的边缘检测及评价[J]. 黑龙江工程学院学报, 2003, 17(2): 3-6.