

基于 K 均值聚类分析的车辆 横向稳定性判定方法*

刘宏飞,徐强[†],许洪国,包翠竹,王郭俊

(吉林大学 交通学院,吉林 长春 130022)

摘要:针对既有车辆失稳判定方法存在的不足,开展了车辆横向稳定性关于模式识别的研究,提出了一种基于 K 均值聚类分析的车辆横向稳定性判别方法.利用 CarSim 建立整车动力学模型,采用 K 均值聚类算法对车辆行驶状态数据进行离线聚类分析,得到离线聚类质心及其危险等级.搭建 CarSim 与 Simulink 联合仿真平台,计算车辆实时行驶数据点与离线聚类质心之间的欧氏距离,设计了车辆横向稳定性判定指标,对车辆行驶稳定性进行了在线识别.该判定方法充分利用车辆离线数据和实时数据,对车辆行驶状态数据进行数据挖掘.仿真结果表明,该判定方法能够准确实时量化车辆的行驶稳定性,为控制系统的介入时机与程度提供判据.

关键词:无监督学习;车辆工程;车辆稳定性辨识;K 均值聚类算法;离线聚类;在线识别
中图分类号:U461.6 **文献标志码:**A

Judgment Method of Vehicle Lateral Stability Based on K Means Clustering Analysis

LIU Hongfei, XU Qiang[†], XU Hongguo, BAO Cuizhu, WANG Guojun

(College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: As for the shortcomings of the existing methods of vehicle instability determination, the study on pattern recognition of vehicle running stability was carried out, and a new method of judging the vehicle lateral stability based on K means clustering algorithm was proposed. The vehicle dynamics model was established by CarSim, and the offline clustering centers and its danger level were obtained by offline clustering analysis of vehicle running state data through K means clustering algorithm. Then, the CarSim and Simulink co-simulation platform was built and Euclidean distance between data points and cluster centroids was also calculated. Vehicle running stability criterion in Simulink was designed, and the vehicle running stability online was identified. This identification method made full use of the comparison of offline data and real time data for data mining of the vehicle running data. The simulation results show that the method can accurately and real-timely quantify the vehicle's lateral stability considering various parameters, which can provide the criterion for intervention timing and degree of control system.

* 收稿日期:2017-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475199), National Natural Science Foundation of China(51475199); 运输车辆运行安全技术交通运输行业重点实验室开放课题资助项目(KFKT2016-01), Open Project of Key Laboratory of Transportation Industry for Safe Technology in Vehicle Operation(KFKT2016-01)

作者简介:刘宏飞(1971—),男,吉林白城人,吉林大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail:1219110352@qq.com

Key words: unsupervised learning; vehicle engineering; vehicle stability identification; K-means clustering algorithm; offline clustering; online identification

车辆稳定性判据决定了车辆稳定性控制系统的介入与退出时机,是车辆稳定性控制的基础^[1]. 提高车辆行驶安全性、降低交通事故发生率已成为汽车界亟待解决的关键问题^[2]. 其中,对车辆行驶稳定性的判定与辨识是车辆稳定性控制系统的基礎.

余卓平等^[1]提出了双线法与横摆角速度法联合的车辆稳定性判定方法,协调对质心侧偏角和横摆角速度的控制,并获取稳定性判据的相应阈值数据库,用于在控制过程中查表获得车辆的稳定区域边界.熊璐等人^[2]提出了在极限工况下,选取质心侧偏角-质心侧偏角速度的相平面分析车辆行驶稳定性,以此作为基于非线性车辆模型的稳定性判据.刘飞等人^[3]提出改进的五特征值菱形稳定区域划分方法,根据相图的变化规律选用了随平衡点移动的菱形区域作为稳定区域;通过大量仿真建立了全工况下稳定区域特征值的查表数据库.罗玉涛等人^[4]建立了 7 自由度车辆动力学模型,根据相平面法设计了基于失稳能量比的车辆稳定性判断公式.采用能量法推导了车辆失稳动能与纵向运动动能方程式,基于相平面法提出了车辆稳定性判据,以判断车辆的行驶稳定状态.石文等人^[5]建立了 3 自由度非线性车辆动力学模型,通过对轮胎力非线性范围内车辆瞬态稳定性变化过程的分析,研究了相空间轨线在非稳定中心平衡点连续统邻域内的变化细节,分析了车辆临界稳定状况与轨线变化细节之间的关系.

Verschuren^[6]提出了使用赫尔维茨定理(Hurwitz Criterion)快速寻找车辆稳定性临界值.Sadri 等人^[7]提出了 2 个新的 Lyapunov^[8]函数,当车辆匀速直线运动时,将李亚普诺夫直接法应用于非线性车辆的横向稳定性分析.Dandach 等人^[9]提出了利用间隔分析方法计算并预测车辆稳定域,通过轮胎载荷转移率 LTR、纵向滑移率和车轮侧向滑移角给出了保证车辆安全的稳定域的临界值,并使用模拟数据进行了验证.Chen 等人^[10]建立了 4 自由度车辆动力学模型,通过对固定速度下转向特性的研究,分析了不同转向盘转角输入下横摆角速度和侧倾角变化的根轨迹,进而分析、评价了车辆侧倾稳定性.Sun 等人^[11]建立了 7 自由度车辆动力学模型,使用轮胎垂直载荷转移率来评价车辆侧倾稳定性,分析了车辆结构参数和使用参数对车辆侧倾稳定性的影响.

目前常用的车辆稳定性判定方法中,存在所建车辆模型不精确、对车辆的状态参数考虑不全面、仅

依靠部分车辆行驶状态参数(如质心侧偏角或横摆角速度)衡量车辆行驶稳定性等问题.本文充分考虑了车辆行驶过程中的多项横向稳定性状态参数,基于对车辆行驶状态数据的挖掘分析,提出了一种车辆横向稳定性判据,即利用 K 均值聚类分析对车辆所处的危险程度进行等级划分,旨在为车辆稳定性控制策略的设计提供科学依据.

1 构建车辆模型

利用车辆仿真软件 CarSim 建立车辆模型的过程如下.

1.1 选择车辆类型

从 CarSim 的主要界面选定车辆模型“C-Class, Hatchback, 2012”,为掀背式两厢轿车,车辆参数详见表 1.

表 1 车辆参数
Tab. 1 Vehicle parameters

符号	名称	大小	单位
m_s	簧上质量	1 270	kg
m_{u1}	前悬架下质量	71	kg
m_{u2}	后悬架下质量	71	kg
a	质心到前轴的距离	1 015	mm
b	质心到后轴的距离	1 895	mm
d	轮距	1 675	mm
h	质心高度	540	mm
I_{xx}	绕 x 轴的转动惯量	536.6	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
I_{yy}	绕 y 轴的转动惯量	1 536.7	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
I_{zz}	绕 z 轴的转动惯量	1 536.7	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

轮胎选择 CarSim 内置非线性轮胎 215/55 R17,轮胎特性如图 1 所示.

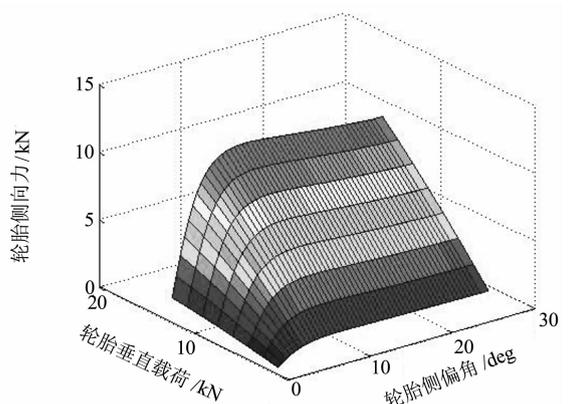


图 1 轮胎特性曲线

Fig. 1 Tire characteristic curve

1.2 设置车辆的输入参数

本文仿真试验条件为转向盘 180° 斜阶跃输入, 需设置车辆速度、转向盘转角及其变化规律, 其他项目保持系统默认即可, 建立车辆纵向速度为 $40 \sim 120$ km/h, 步长为 5 的匀速行驶工况, 每种速度下的仿真时间均为 10 s.

1.3 设置车辆的输出参数

综合考虑车辆输入参数以及表征车辆横向稳定性的各状态参数, 包括: 纵向速度 u 、方向盘转角 δ_s 、侧向速度 v 、质心侧偏角 β 、侧倾角 ψ 、侧倾角速度 $\dot{\psi}$ 、横摆角速度 ω 、侧向加速度 a_y 、左前轮胎垂直载荷 F_{ZL1} 、左后轮胎垂直载荷 F_{ZL2} 、右前轮胎垂直载荷 F_{ZR1} 、右后轮胎垂直载荷 F_{ZR2} . CarSim 输出参数矩阵为:

$$D = [u, \delta_s, v, \beta, \psi, \dot{\psi}, \omega, a_y, F_{ZL1}, F_{ZL2}, F_{ZR1}, F_{ZR2}] \quad (1)$$

式中:

$$\beta = v/u \quad (2)$$

$$LTR = (F_{ZLx} - F_{ZRx}) / (F_{ZLx} + F_{ZRx}), x = 1, 2 \quad (3)$$

2 离线聚类分析

2.1 数据处理

将 CarSim 仿真结果经格式转换后读入 MATLAB, 由于轮胎垂直载荷与其他参数在数量级上差别较大, 因此将轮胎垂直载荷从聚类参数中剔除, 并增加表征车辆横向稳定性的间接运算参数: 载荷转移率 LTR_1, LTR_2 . 离线聚类参数矩阵为:

$$D_c = [u, \delta_s, v, \beta, \psi, \dot{\psi}, \omega, a_y, LTR_1, LTR_2] \quad (4)$$

2.2 离线聚类与分析

聚类是将数据划分到不同类或簇的过程, 使得同一个簇中的对象有很大的相似性, 不同簇间的对象有很大的相异性. 聚类分析是一种探索性的分析, 属于无监督学习, 在分类的过程中, 不必事先给出一个分类的标准, K 均值聚类能够从样本数据出发, 自动进行分类^[12].

聚类分析常用的指标为“距离”和“相似系数”, 假定研究对象均用所谓的“点”来表示, 在聚类分析中, 一般的规则是将“距离”较小的点或“相似系数”较大的点归为同一类, 反之归为不同的类, 聚类结果需要研究者进行主观判断和后续分析.

离线聚类的目的是通过对离线数据的聚类, 得到离线聚类质心. 本文将车辆横向稳定性划分为 4

个等级, 即得到 4 个聚类质心, 每个聚类质心代表一种横向稳定状态. 4 个危险等级所代表的含义如表 2 所示.

表 2 危险等级含义
Tab. 2 Meaning of hazard level

危险等级	含义
1	安全
2	存在安全隐患
3	典型潜在危险
4	危险

2.2.1 K 均值离线聚类

K 均值聚类算法是基于划分法的聚类方法, 也是最常用、最知名的聚类算法. K 均值聚类方法过程如下:

1) 根据需要确定聚类个数为 4;

2) 初始化聚类质心, 本文以等间距取点确定初始聚类质心;

3) 设置最大迭代步数 $J_{\max} = 1\ 000$;

4) 设置质心偏移量 $\Delta d = 0.000\ 1$;

5) 点的分配, 即根据每个对象与聚类质心的欧氏距离, 将每个对象分配给最相似的簇;

6) 更新聚类质心, 即重新计算每个簇中对象的平均值点作为新的聚类质心;

7) 重复执行第 5) 和第 6) 步, 直到各个簇不再发生变化, 即满足 3) 或 4)。

假设两个 n 维数据点为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 和 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 则 A 和 B 两点之间的欧式距离为:

$$\rho(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

随着迭代次数的增加, 当前聚类质心为新质心 C_N , 上次迭代的质心为旧质心 C_O , 那么质心的偏移量为 $\Delta d = |C_N - C_O|$.

2.2.2 聚类结果分析

当车速分别为 40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95、100、105、110、115、120 km/h 时, 以其对应的转向盘斜阶跃输入仿真工况数据进行离线聚类. 其中, 转向盘转角输入如图 2 所示, 0.5 s 时开始匀速转动转向盘, 1.5 s 时转到 180° , 之后保持该角度.

同一速度下的仿真时间为 10 s, 17 种速度仿真时间共计 170 s, 通过 K 均值聚类将车辆离线数据划分为 4 种行驶状态, 分别为 A、B、C 和 D, 如图 3 所示.

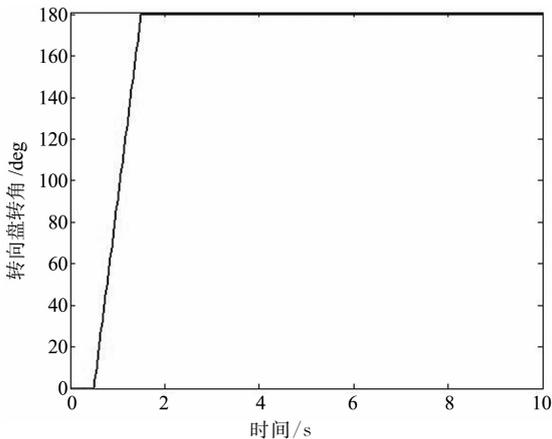


图 2 转向盘转角输入图
Fig. 2 Steering wheel angle input

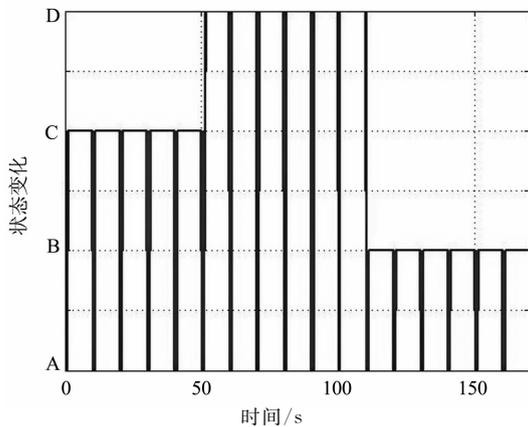


图 3 离线聚类结果
Fig. 3 Offline clustering results

由离线转向盘斜阶跃输入工况特点及图 2 转向盘转角可知, (0 s, 0.5 s) 直线行驶状态的危险等级对应图 3 中的状态 A; 0.5 s 时开始转动转向盘, 车辆开始产生横向位移及摆动, 车辆稳定性降低, 对应图 3 中的状态 C; 由于离线数据为速度逐渐增大的斜阶跃响应, 后续对应的稳定性逐渐降低, 最后可

能会发生失稳, 因此, 结合图 3 可知, 最安全的行驶状态为 A, 最不稳定的行驶状态为 B, 次不稳定的行驶状态为 D. 综上所述, 车辆各行驶状态的危险性由低到高排序为: $A < C < D < B$.

离线聚类的程度, 可由聚类质心偏移量随迭代步数的变化曲线来反映, 如图 4 所示.

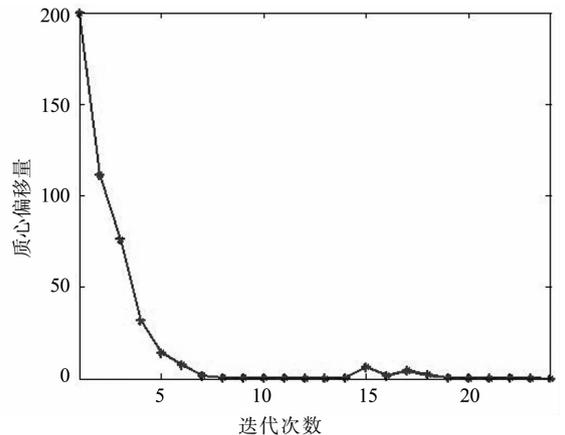


图 4 质心偏移量随迭代步数的变化曲线
Fig. 4 The variation curve of centroid offset with the increase of iterations

由图 4 可知, 质心偏移量 Δd 总体是随着迭代步数的增加而减小, 当迭代到第 24 步时, 质心偏移量 Δd 减小至零 (达到设定质心偏移量 0.000 1), 聚类结束.

表征车辆横向稳定性的状态参数包括: 侧向速度 v 、质心侧偏角 β 、前轴轮胎垂直载荷转移率 LTR_1 , 这些参数越大车辆行驶状态越危险, 据此对离线聚类结果进行危险等级的划分, 将危险等级由低到高排序为: $A < C < D < B$ (分别与危险等级 1、2、3、4 相对应), 与根据工况特点判定结果一致, 说明了本聚类结果的正确性. 为了使在线聚类结果易于观测和理解, 需对聚类质心进行调整, 得到危险等级逐渐升高的序列 1、2、3、4, 如表 3 所示.

表 3 聚类质心及其危险等级
Tab. 3 Clustering centroid and its hazard level

危险等级	$u/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$\delta_s/$ deg	$v/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$\beta/$ deg	$\psi/$ deg	$\dot{\psi}/$ ($\text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\omega/$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	$a_y/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	LTR_1	LTR_2
1	79.408	26.610	-0.131 80	-0.022 912	0.466 27	2.254 3	5.871 9	0.201 97	-0.111 35	-0.161 71
2	50.055	177.58	0.747 81	1.039 2	3.488 2	0.035 229	33.455	0.814 14	-0.412 78	-0.764 08
3	77.572	178.39	-2.015 9	-1.451 0	3.527 7	-0.009 178 9	21.395	0.808 95	-0.429 40	-0.727 82
4	107.23	177.96	-4.054 6	-2.159 0	3.400 5	0.012 331	14.916	0.785 58	-0.436 58	-0.678 57

3 在线识别

3.1 CarSim 与 Simulink 联合仿真平台的搭建

为了实时判断车辆横向稳定性, 在离线聚类得

到聚类质心的基础上, 搭建 CarSim 与 Simulink 联合仿真平台. 本文将 CarSim 的输出与 Simulink 的输入相连接, 对车辆行驶状态在线识别, 由于没有对车辆进行控制, 因此, 本文搭建的联合仿真平台属于开环系统.

建立 CarSim 与 Simulink 联合仿真平台,在 CarSim 中选定车辆模型、设置仿真工况及输出参数,再将车辆模型发送到 Simulink,并根据需要建立相应的 Simulink 模型,即可进行在线联合仿真. CarSim 可以为 Simulink 提供在线聚类所需的车辆状态参数,包括由传感器直接测量的参数和经过 Simulink 运算得到的间接参数如 LTR_1 和 LTR_2 ; 在线识别根据在线联合仿真输出数据与聚类质心的欧氏距离判定车辆横向稳定性,输出车辆行驶状态的危险等级,其过程原理如图 5 所示.

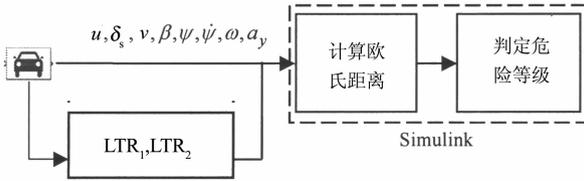


图 5 在线识别车辆危险等级

Fig. 5 Online recognition of vehicle running stability

3.2 在线识别结果分析

在线识别的仿真工况为车速 77.5 km/h 的转向盘斜阶跃输入,联合仿真得到的车辆实时行驶状态数据点与聚类质心的欧氏距离如图 6 所示,相应的危险等级如图 7 所示.

图 6 中点线 Ed1 表示车辆实时行驶状态数据与第 1 危险等级聚类质心之间的欧氏距离,虚线 Ed2 表示车辆实时行驶数据与第 2 危险等级聚类质心之间的欧氏距离,点画线 Ed3 表示车辆实时行驶数据与第 3 危险等级之间的欧氏距离,实线 Ed4 表示车辆实时行驶数据与第 4 危险等级聚类质心之间的欧氏距离.

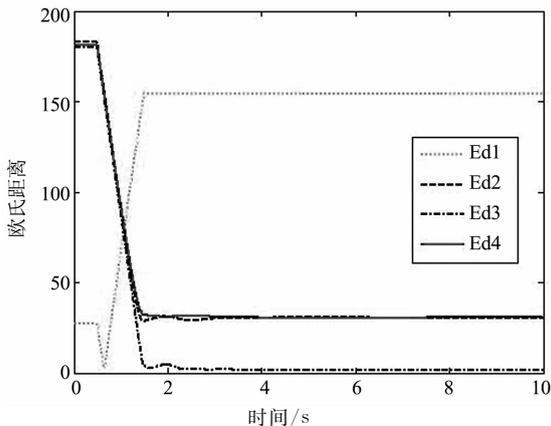


图 6 在线识别欧氏距离

Fig. 6 Online recognition of Euclidean distance

由图 2 可知,在转向盘斜阶跃输入下的(0 s, 0.5 s)属于直线行驶,车辆处于稳定状态,对应图 6 中车辆行驶状态参数与各聚类质心的欧氏距离处于

稳定阶段,此时车辆行驶状态数据与第 1 危险等级聚类质心的欧氏距离最小,车辆行驶状态属于第 1 危险等级(见图 7);0.5 s 时开始匀速转动转向盘,1.5 s 转角达到 180° ,此后维持该转角不变,车辆实时行驶状态数据与离线聚类质心之间的欧氏距离处于波动状态,车辆行驶稳定性下降;由图 7 可知,在 1.065 s 时车辆行驶状态由第 1 危险等级(安全状态)直接上升到第 3 危险等级(典型潜在危险),安全性降低,后续一直处于第 3 危险等级.

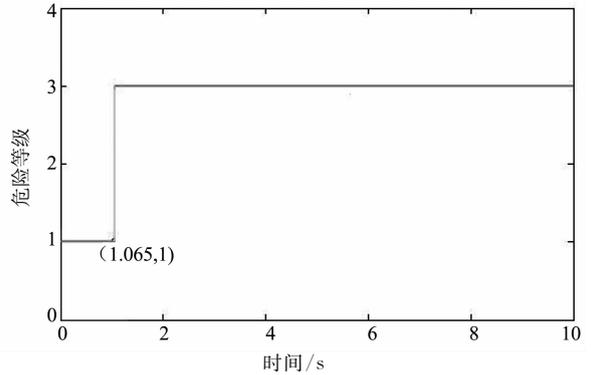


图 7 在线识别车辆危险等级

Fig. 7 Online recognition of vehicle hazard level

为了探究车辆在转向盘斜阶跃输入下车辆危险等级随车速和时间的响应规律,通过多组工况下的联合仿真试验,从中选择了具有代表性的几组数据进行绘图说明.图 8 为某速度区间内危险等级的变化趋势图,图 8 中每条线代表忽略响应时间的同一危险等级变化的多条线束.当速度为 40~60 km/h 时,车辆由第 1 危险等级变到第 2 危险等级;当速度为 67~90 km/h 时,车辆由第 1 危险等级突变到第 3 危险等级;当速度为 95~120 km/h 时,车辆由第 1 危险等级突变到第 4 危险等级.由此可知,车辆在转向盘斜阶跃输入下危险等级的响应会出现跳跃式的突变,且速度越高跳跃幅度越大.

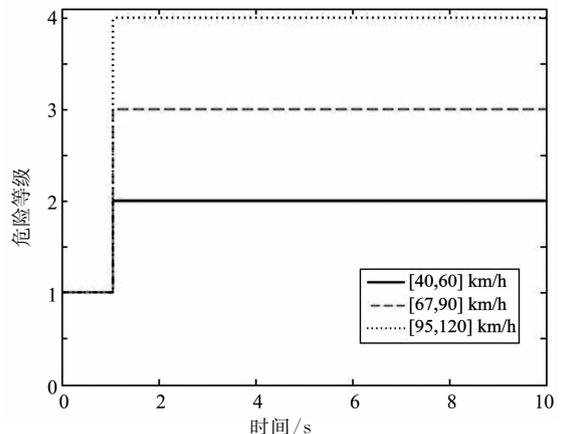


图 8 不同速度下危险等级的变化

Fig. 8 Changes of hazard levels at different speeds

图8中,3个速度区间的危险等级各变化了1次,都没有产生波动。其他速度区间60~67 km/h和90~95 km/h危险等级的变化分别选取速度为63、65、92和92.5 km/h进行分析,其危险等级变化趋势如图9所示。速度为63 km/h的危险等级变化趋势为1→2→3→2,在第2和第3危险等级之间产生了波动;速度为65 km/h的危险等级变化趋势为1→2→3,未产生波动;速度为92 km/h的危险等级变化趋势为1→3→4→3,在第3和第4危险等级之间产生了波动;速度为92.5 km/h的危险等级变化趋势为1→3→4,未产生波动。

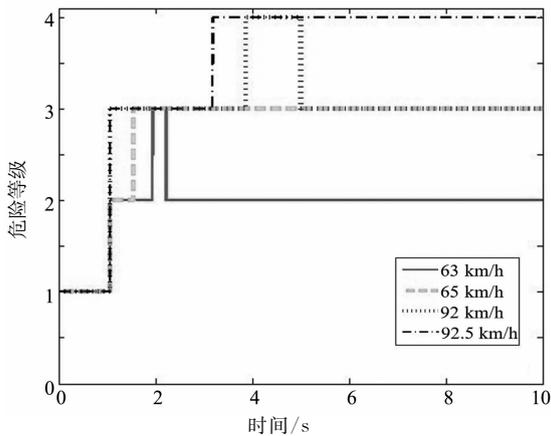


图9 不同速度下危险等级响应时间差异图
Fig. 9 Response time difference of hazard level at different speeds

由图9可知,通过危险等级跳跃点的位置,可探究车辆在不同速度下危险等级变化趋势的时间响应规律。当危险等级变化趋势为2→3时,速度为92.5 km/h和92 km/h的响应时间要明显早于速度为65 km/h和63 km/h的响应时间,速度为65 km/h的响应时间要早于速度为63 km/h的响应时间;当危险等级变化趋势为3→4时,速度为92.5 km/h的响应时间早于速度为92 km/h的响应时间。由此可得,在相同转向盘斜阶跃输入下,随着速度的逐步增大,车辆横向稳定状态发生变化所需的响应时间逐渐变短。

4 结论

针对车辆操纵稳定性控制系统中车辆的横向失稳判据进行了详细研究,使用K均值聚类分析方法对车辆行驶状态离线数据进行离线聚类,得到离线聚类质心及其危险等级;结合车辆行驶状态数据与聚类质心的欧氏距离设计了车辆实时稳定性判断准则,搭建了CarSim与Simulink联合仿真平台,对车辆转向盘斜阶跃输入工况的车辆横向稳定性进行在

线识别。结果表明,该判定准则能够根据车辆行驶状态参数将车辆横向稳定性分为4个等级,且划分的结果与实际车辆危险情况一致,该判定准则为后续控制系统的介入时机与程度提供理论依据。

后续需要进一步研究K均值聚类分析对不同车辆和不同工况的普适性,并进行相应的实车试验。

参考文献

- [1] 余卓平,冷博,熊璐,等. 双线法与横摆角速度法联合的车辆稳定性判据[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(12):1841-1849.
YU Z P, LENG B, XIONG L, *et al.* Vehicle sideslip angle and yaw rate joint criterion for vehicle stability control [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(12): 1841-1849. (In Chinese)
- [2] 熊璐,曲彤,冯源,等. 极限工况下车辆行驶的稳定性判据[J]. 机械工程学报,2015,51(10):103-111.
XIONG L, QU T, FENG Y, *et al.* Stability criterion for the vehicle under critical driving situation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 103-111. (In Chinese)
- [3] 刘飞,熊璐,邓律华,等. 基于相平面法的车辆行驶稳定性判定方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(11):63-70.
LIU F, XIONG L, DENG L H, *et al.* Judgment method of vehicle driving stability based on phase plane method [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(11): 63-70. (In Chinese)
- [4] 罗玉涛,来恩铭. 基于能量法的车辆稳定性判断研究[J]. 汽车工程,2014(12):1534-1538.
LUO Y T, LAI E M. A research on vehicle stability judgment based on energy method [J]. Automotive Engineering, 2014(12): 1534-1538. (In Chinese)
- [5] 石文,余卓平,熊璐. 车辆临界稳定情况下相关状态变量变化对稳定性判定准则的影响[J]. 汽车工程,2014(12):1520-1527.
SHI W, YU Z P, XIONG L. The influence of state variables variation on vehicle stability criteria under critical stable condition [J]. Automotive Engineering, 2014(12): 1520-1527. (In Chinese)
- [6] VERSCHUREN R M A F. Analysis of the lateral dynamic behaviour of articulated commercial vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(Sup1): 169-189.
- [7] SADRI S, WU C Q. Lateral stability analysis of on-road vehicles using Lyapunov's direct method[C]//Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares, Spain; IEEE, 2012: 821-826.
- [8] SADRI S, WU C Q. Lateral stability analysis of on-road vehicles using the concept of Lyapunov exponents[C]//Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares, Spain; IEEE, 2012: 450-455.
- [9] DANDACH H, MIRAS J D, CHARARA A. Approximation of the vehicle stability domain using interval analysis[C]//International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Hague, Netherlands; IEEE, 2013: 91-98.
- [10] CHEN X X, ZENG S H. Vehicle roll stability analysis based on root locus[C]//International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City. Halong Bay, Vietnam; IEEE, 2015: 977-980.
- [11] SUN C, SONG S, LIU Z. Vehicle roll stability analysis considering lateral-load transfer rate[C]//International Conference on Transportation Information and Safety. Wuhan; IEEE, 2015: 398-402.
- [12] 杨燕,张昭涛. 基于阈值和蚁群算法结合的聚类方法[J]. 西南交通大学学报,2006,41(6):719-722.
YANG Y, ZHANG Z T. Clustering method combining threshold algorithm with ant colony algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(6): 719-722. (In Chinese)