

文章编号: 1674—8247(2022)04—0024—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.004

200 km/h 中速磁浮最小竖曲线半径取值研究

易思蓉¹ 杨冬营¹ 吴跃成²

(1. 西南交通大学, 成都 610000; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院, 成都 610041)

摘要:中车集团已推出新一代200 km/h级新型中速磁浮列车,但相应的线路技术标准未做系统性研究。本文利用SIMPACK软件建立车-线动力学模型,依据列车运行的舒适性、安全性评价指标,兼顾静力学计算结果,确定中速磁浮最小竖曲线半径,结果表明:(1)垂向加速度最大允许值决定最小竖曲线半径取值,且仿真分析结果较静力学计算结果大;(2)推荐凹型竖曲线最小半径在一般情况下取5 000 m,困难情况下取4 000 m;(3)凸型竖曲线最小半径在一般情况下取12 000 m,困难情况下取9 000 m。

关键词:中速磁浮;最小竖曲线半径;车-线动力学模型

中图分类号:U212.32 文献标志码:A

Study on Determining Minimum Radius of Vertical Curve for 200 km/h Medium Speed Maglev Railway

YI Sirong¹ YANG Dongying¹ WU Yuecheng²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China;

2. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: CRRC has launched a new generation of 200 km/h class new medium-speed maglev train, but has not systematically studied the corresponding line technical standards. Based on SIMPACK software, a dynamic model of train-line is established, and the minimum radius of the vertical curve for medium-speed maglev is determined according to the comfort and safety evaluation index of train running and the static computation results. The results show that: (1) The maximum allowable value of vertical acceleration determines the minimum the radius of vertical curve, and the result of simulation analysis is larger than that of static computation. (2) It is recommended that the minimum radius of concave vertical curve should be 5 000 m in general and 4 000 m in difficult cases. (3) The minimum radius of convex vertical curve is 12 000 m in general, and 9 000 m in difficult cases.

Key words: medium-speed maglev; minimum radius of vertical curve; vehicle-line dynamics model

磁浮轨道交通系统噪声低、转弯半径小,爬坡能力强,且最具速度拓展优势,契合轨道交通系统的技术发展需求,因此国内外就相关技术的研究一直在持续。与德国、日本的高速磁浮系统发展研究不同,国内学者重点研究和推广低速磁浮技术。已投入运营的磁浮线

有长沙磁浮线、北京磁浮线和广东清远磁浮线。长沙磁浮线的最高运营速度为140 km/h,其它线路最高运营速度只有100 km/h。目前,对160~250 km/h中速磁浮系统的技术研究在稳步推进。王国静^[1]等对中速磁浮列车的车体强度进行了验证;梁潇^[2]等分析了

收稿日期:2022-03-07

作者简介:易思蓉(1957-),女,教授。

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB1200601-A21-2)

引文格式:易思蓉,杨冬营,吴跃成. 200 km/h中速磁浮最小竖曲线半径取值研究[J]. 高速铁路技术,2022,13(4):24-29.

YI Sirong, YANG Dongying, WU Yuecheng. Study on Determining Minimum Radius of Vertical Curve for 200 km/h Medium Speed Maglev Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):24-29.

实时获取悬浮间隙,悬浮控制系统利用电流调节装置将悬浮间隙控制在 $8\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ 范围。利用悬浮架与轨道间的垂向耦合力,可以建立式(1)所示的关联方程,并据此完成悬浮控制系统建模。

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \times \left(\frac{i}{\delta}\right)^2 \quad (1)$$

式中: F ——电磁力(N);

μ_0 ——真空磁导率;

N ——电磁铁线圈匝数;

A ——有效磁极面积(mm^2);

i ——电磁铁电流(A);

δ ——悬浮间隙(mm)。

1.4 线路建模

线路模型包括几何线形和轨道不平顺两个部分。SIMPACK 的线路模块可定义仿真分析时的各类几何线形,轨道谱模块可定义轨道不平顺参数。本文采用的轨道谱公式为:

$$S(\Omega) = \frac{P}{(c + \Omega^n)} (m^2 \times m/\text{rad}) \quad (2)$$

式中: Ω ——空间波数(rad/m);

n ——频率特制参数(一般取 1.5~4.5);

P ——表面粗糙性洗漱;

C ——修正等比级数。

以单节车体下的 5 个悬浮架为 1 组,建立相应的车-线动力学模型,如图 4 所示^[11]。

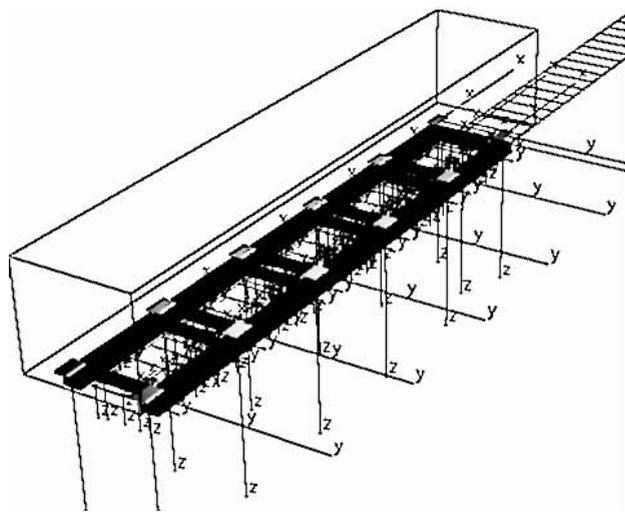


图4 单节车整体模型示意图

2 静力学分析

对于常规低速轨道交通系统,可依据舒适度指标所规定的垂向加速度最大允许值,采用传统静力学计算方式确定最小竖曲线半径值:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{3.6^2 \times a_{\max}} \quad (3)$$

式中: V ——设计速度(km/h);

a_{\max} ——垂向加速度最大允许值(m/s^2)。

由于新一代中速磁浮模型与上海高速磁浮示范运营线系统模型基本相似,因此,本文借鉴高速磁浮垂向加速度允许值,即凹型竖曲线一般情况下取 1.0 m/s^2 ,困难情况下取 1.2 m/s^2 ;凸型竖曲线一般情况下取 0.5 m/s^2 ,困难情况下取 0.6 m/s^2 ^[12]。参照上述指标和静力学计算公式可计算出中速磁浮最小竖曲线半径参考值,计算结果如表 2 所示。

表2 静力学要求的最小竖曲线半径表(m)

项目	一般地段	困难地段
凹形竖曲线	3 100	2 600
凸形竖曲线	6 200	5 200

注:向上取 100 m 整倍数

静力学分析方法将车体视为刚体,无法考虑列车与轨道梁间冲击振动对垂向加速度的影响。当列车运行速度较高时,应进行动力学仿真分析和验证。

3 动力学仿真分析

磁浮系统纵断面线形的动力学评价指标包括垂向加速度、悬浮间隙、垂向力和减载率。其中第一项为舒适性指标,后三项为安全性指标。动力学仿真分析能够模拟出 4 项指标随竖曲线半径变化的规律,得出更合理的最小竖曲线半径取值。

3.1 垂向加速度变化规律

竖曲线起点是纵断面线形的振动敏感点^[13]。当磁浮列车高速进入竖曲线时,线形曲率的突变会引起悬浮间隙的改变,列车控制系统调整悬浮间隙时将引发悬浮架的振动,产生垂向加速度的最大值,然后逐步消减为与竖曲线半径和轨道不平顺相关的垂向加速度稳态值,如图 5 所示。

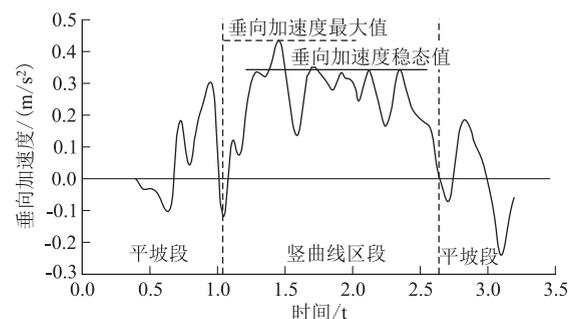


图5 垂向加速度最大值与稳态值图

利用车-线动力学模型,仿真分析磁浮列车在凹型竖曲线上,半径位于 3 000~8 000 m 区间的垂向加

速度变化,如图6所示。

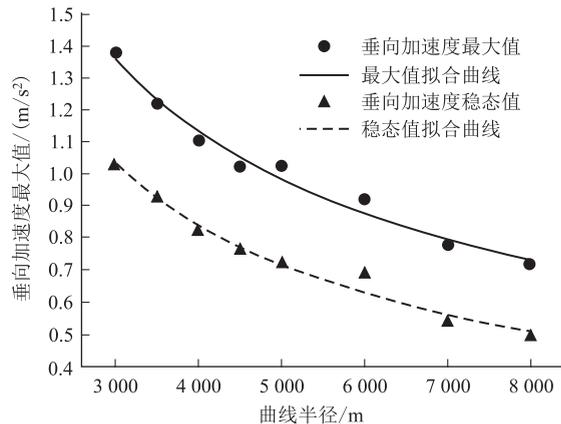


图6 凹型竖曲线上垂向加速度变化曲线图

基于异速生长函数可拟合出垂向加速度最大值曲线公式为:

$$a = 210.265 \times R^{-0.629} \quad (4)$$

式中: R ——设计速度 (km/h)。

垂向加速度稳态值曲线公式为:

$$a = 331.795 \times R^{-0.721} \quad (5)$$

依据垂向加速度允许值,按照式(4)和式(5)可计算出凹型竖曲线最小曲线半径,计算结果如表3所示。

表3 凹型竖曲线最小曲线半径表(m)

项目	垂向加速度最大值	
	一般地段(1.0 m/s ²)	困难地段(1.2 m/s ²)
最大值曲线	5 000	3 700
稳态值曲线	3 200	2 500

注:向上取100 m 整倍数

将计算结果对比可知,满足舒适度要求的凹型竖曲线最小半径,一般情况下可取5 000 m,困难情况下可取3 700 m。

利用车-线动力学模型,仿真分析磁浮列车在凸型竖曲线上,半径位于3 500~26 000 m区间的垂向加速度变化,如图7所示。

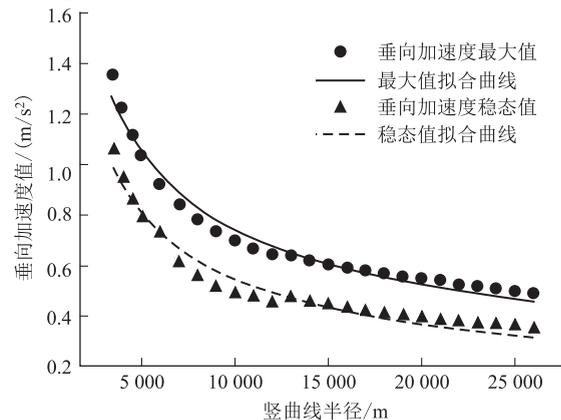


图7 凸型竖曲线上垂向加速度变化曲线图

基于异速生长函数可拟合出垂向加速度最大值曲线公式为:

$$a = 80.963 \times R^{-0.510} \quad (6)$$

垂向加速度稳态值曲线公式为:

$$a = 101.901 \times R^{-0.569} \quad (7)$$

依据垂向加速度允许值,按照式(6)和式(7)可计算出凸型竖曲线最小曲线半径,计算结果如表4所示。

表4 凸型竖曲线最小曲线半径表(m)

项目	垂向加速度最大值	
	一般地段(0.5 m/s ²)	困难地段(0.6 m/s ²)
最大值曲线	21 500	15 100
稳态值曲线	11 500	8 400

注:向上取100 m 整倍数

由计算结果可知,由垂向加速度最大值曲线确定的凸型竖曲线最小曲线半径,在一般地段已达到20 000 m以上,困难地段也达到15 000 m以上。如此大的竖曲线半径会对设计和施工造成不便:

(1)竖曲线长度过长,影响纵断面线形设计的灵活性,导致工程量的增加。

(2)轨道梁的曲率应与竖曲线一致,曲率过小的轨道梁难以进行施工控制。

(3)竖曲线起终点是空间线形的振动敏感点,轨道梁易产生沉降、偏移或变形,曲率过小则难以进行维修保养。

因此,在凸型竖曲线上,不建议采用垂向加速度最大值确定的最小曲线半径,而应采用垂向加速度稳态值确定的最小曲线半径。因此,满足舒适度要求的凸型竖曲线最小竖曲线半径,一般情况下可取11 500 m,困难情况下可取8 400 m。

3.2 悬浮间隙变化规律

为保证垂向悬浮力不影响钢轨和车辆结构的稳定性与耐久性,磁浮列车运行时的悬浮间隙需控制在 $8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ 区间。利用车-线动力学模型,可仿真分析磁浮列车在半径为1 500~10 000 m区间两种类型竖曲线上的悬浮间隙变化。动力学模型考虑了每个悬浮架下面的8个悬浮间隙控制器,按其中最大波动值进行统计,形成悬浮间隙变化如图8所示。

由拟合曲线可知,在凹型竖曲线上,悬浮间隙大于8 mm,且随着竖曲线半径的减小而增大,此时磁浮列车处于“下沉”状态;在凸型竖曲线上,悬浮间隙小于8 mm,且随着半径的减小而减小,此时磁浮列车处于“过浮”状态。当竖曲线半径大于2 500 m时,两种类型竖曲线上悬浮间隙均处于安全范围内。因此,竖曲线半径满足舒适度要求时,自然满足悬浮间隙安全值。

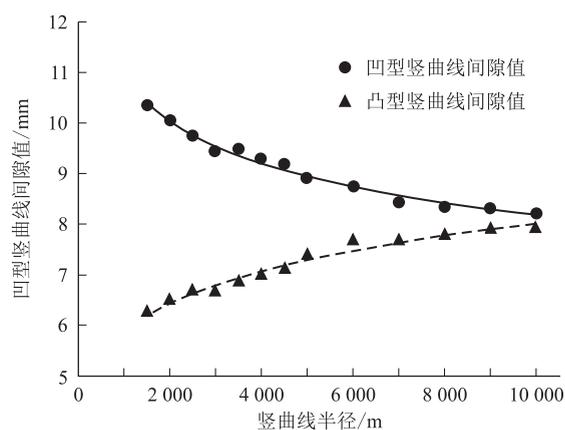


图8 悬浮间隙变化曲线图

3.3 垂向力变化规律

单节车体下的5个悬浮架上共有40个控制器,每个控制器的最大电磁力为11 kN。由于相同竖曲线半径条件下,凹型竖曲线较凸型竖曲线具有更大的垂向力,因此只需分析凹型竖曲线上的垂向力变化规律。利用车-线动力学模型,仿真分析磁浮列车在凹型竖曲线上,半径位于1 500~10 000 m区间的垂向力变化,如图9所示。

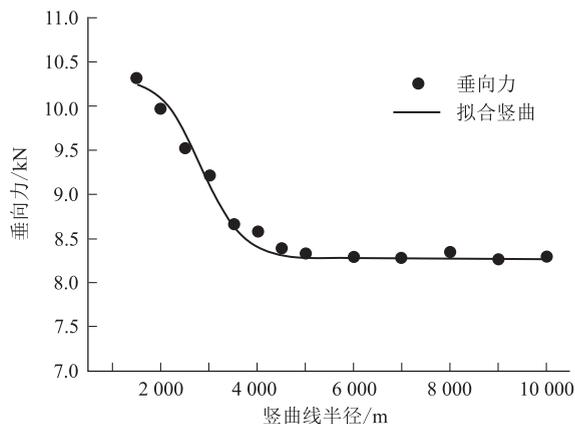


图9 凹型竖曲线上垂向力变化曲线图

由拟合曲线可知,当凹型竖曲线半径小于5 000 m时,垂向力逐渐增大,当凹型竖曲线半径大于3 000 m后,垂向力稳定在9.43 kN,小于控制器的最大电磁力值。因此,竖曲线半径满足舒适度要求时,自然满足垂向力安全值。

3.4 减载率变化规律

减载率是指磁浮列车运行时垂向力的减载量与静止状态垂向力的比值,且只在凸型竖曲线上存在。《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》要求减载率应小于0.8^[14]。利用车-线动力学模型,仿真分析磁浮列车在凸型竖曲线上,半径位于1 500~

10 000 m区间的垂向力变化,如图10所示。

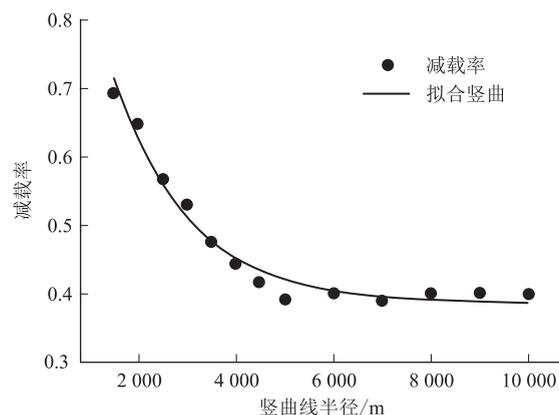


图10 凸型竖曲线上减载率变化曲线图

由拟合曲线可知,当凸型竖曲线半径大于1 500 m时,即可小于规范要求的减载率最大值。因此,竖曲线半径满足舒适度要求时,自然满足减载率安全值。

综上所述,当竖曲线满足垂向加速度最大允许值所对应的最小竖半径时,悬浮间隙、垂向力、减载率3项指标可满足要求。

4 结论

本文参照中国中车集团有限公司最新研制的中速磁浮列车技术参数,建立相应的车-线动力学模型,在不同类型和半径取值的竖曲线上,仿真分析磁浮列车的垂向加速度、悬浮间隙、垂向力、减载率的变化规律,兼顾传统的静力学计算,依据相关规范要求确定最小竖曲线半径取值。

研究表明,对于中速磁浮系统,列车振动成为影响列车运行舒适度的重要因素,采用动力学模型计算得到的竖曲线半径较静力学计算大。当竖曲线半径值满足舒适性指标时,自然能够满足相关的安全性指标。为方便设计和施工,可将仿真分析结果向上取1 000 m整倍数,即凹型竖曲线的最小半径一般情况下取5 000 m,困难情况下取4 000 m;凸型竖曲线的最小半径一般情况下取12 000 m,困难情况下取9 000 m。

参考文献:

- [1] 王国静,张福李,徐亚之,等. 160 km/h 新型中速磁浮交通列车的车体强度分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 50-52.
WANG Guojing, ZHANG Fuli, XU Yazhi, et al. Car Body Strength Analysis for 160 km/h New Medium-speed Maglev Train[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(9): 50-52.

- [2] 梁潇,陈峰,傅庆湘. 160 km/h 中速磁浮交通系统的关键技术问题[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 21-26.
LIANG Xiao, CHEN Feng, FU Qingxiang. Key Technical Issues on 160 km/h Medium-speed Maglev Transit System[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(9): 21-26.
- [3] 王家恒,罗华军,高峰,等. 中速磁浮车辆设备连接箱结构设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(3): 20-23.
WANG Jiaheng, LUO Huajun, GAO Feng, et al. Structural Design of Equipment Connection-Chassis of Medium Speed Maglev Vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2021, 44(3): 20-23.
- [4] 杨颖,罗华军,高峰,等. 中速磁浮交通系统关键技术与特征[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(1): 1-7.
YANG Ying, LUO Huajun, GAO Feng, et al. Key Technologies and Characteristics of Medium Speed Maglev Transportation System[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2022, 45(1): 1-7.
- [5] 侯圣杰,刘先恺,汤凯谊,等. 高速磁浮交通环境与灾害监测预警系统方案研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 7-11.
HOU Shengjie, LIU Xiankai, TANG Kaiyi, et al. Study on Plan of High-speed Maglev Traffic Environment and Disaster Monitoring and Early Warning System[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 7-11.
- [6] 易思蓉. 上海磁悬浮示范运营线路技术条件[J]. 中国铁路, 2001(8): 42-43.
YI Sirong. Alignment Technique Specification of Maglev Demonstration Line in Shanghai [J]. Chinese Railways, 2001(8): 42-43.
- [7] 赵树森. 高速铁路平面曲线和竖曲线重叠设置条件研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
ZHAO Shusen. Study on the Overlapped Setting of Plane Curves and Vertical Curves of High-speed Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [8] 王代富. 基于动力分析的高速铁路竖曲线技术条件研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
WANG Daifu. Study on Technological Conditions of the Vertical Curve of High-speed Railway Based on Dynamic Analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [9] 葛岱. 基于动力学分析的中低速磁悬浮竖曲线参数标准研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
GE Dai. Study on the Vertical Curve Parameter Standard of Low-Medium Speed Maglev System Based on Dynamics Analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [10] 郑亚龙. 基于动力学分析的中速磁悬浮平面曲线参数研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHENG Yalong. Study on the Parameters of Plane of Mid-speed Maglev Based on Dynamics Analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [11] 吴跃成. 基于动力学分析的中速磁浮线路纵断面技术参数研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WU Yuecheng. Research on the Medium-speed Maglev Line Technical Parameters Based on Dynamics Analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [12] 时瑾,魏庆朝,赵金顺,等. 高速磁浮交通线路平竖曲线主要技术参数研究[C]//可持续发展的中国交通——2005 全国博士生学术论坛(交通运输工程学科)论文集,2005:391-396.
Shi Jin, Wei Qingchao, Zhao Jinshun, etc. Research on Alignment Parameters of High-speed Maglev Railway Route [C]//National Doctoral Academic Forum 2005 (Transportation Engineering), 2005: 391-396.
- [13] 刘阳光,易思蓉,许健雄. 基于动力学分析的高速铁路空间线型振动敏感点分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(1): 61-64.
LIU Yangguang, YI Sirong, XU Jianxiong. Research on Vibration Sensitive Point of High-speed Railway Space Route Based on Dynamics Analysis[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(1): 61-64.
- [14] GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
GB/T 5599-2019 Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock [S].

(上接第23页)

- [14] 陈杨林,刘业. AR(p)模型参数估计方法比较和实证分析[J]. 南昌大学学报(理科版), 2014, 38(2): 124-127.
CHEN Yanglin, LIU Ye. On Comparison and Empirical Analysis of AR(p) Model Parameter Estimation Methods [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2014, 38(2): 124-127.
- [15] 罗丰,段沛沛,吴顺君. 基于 Burg 算法的短序列谱估计研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(5): 724-728.
LUO Feng, DUAN Peipei, WU Shunjun. Research on Short Sequence Power Spectrum Estimates Based on the Burg Algorithm [J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(5): 724-728.
- [16] 何晓群. 多元统计分析[M]. 京: 中国人民大学出版社, 2015.
HE Xiaqun. Multivariate Statistical Analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2015.
- [17] 秦鸣,宁建标,邓明君. 系统聚类法在机动车司机违法驾驶行为中的应用[J]. 公路与汽运, 2017(4): 45-51.
QIN Ming, NING Jianbiao, DENG Mingjun. Application of System Clustering Method in Illegal Driving Behavior of Motor Vehicle Drivers [J]. Highways & Automotive Applications, 2017(4): 45-51.
- [18] BEZDEK J C, EHRLICH R, FULL W. FCM: The Fuzzy C-Means Clustering Algorithm[J]. Computers & Geosciences, 1984, 10(2/3): 191-203.
- [19] 李旭超,刘海宽,王飞,等. 图像分割中的模糊聚类方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 447-458.
LI Xuchao, LIU Haikuan, WANG Fei, et al. The Survey of Fuzzy Clustering Method for Image Segmentation [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(4): 447-458.
- [20] 史彦丽. 模糊聚类和模糊聚类有效性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
SHI Yanli. The Research on Fuzzy Clustering and Fuzzy Cluster Validation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [21] MAHARAJ E A, D'URSO P. Fuzzy Clustering of Time Series in the Frequency Domain[J]. Information Sciences, 2011, 181(7): 1187-1211.