

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.08.065

山地城市螺旋匝道驾驶仿真与关键设计指标

黄博亚^{1,2}, 龚华凤^{1,2}, 赵聪霄^{1,2}, 刘庆^{1,2}

[1.林同棧国际工程咨询(中国)有限公司,重庆市401121; 2.重庆市山地城市可持续交通工程技术研究中心,重庆市401121]

摘要:山地城市受道路资源等因素的制约,常将螺旋匝道作为衔接两侧道路高差的方案。由于目前缺乏针对螺旋匝道的设计标准,导致螺旋匝道在设计时往往沿用环形匝道甚至支路的线形标准。选择重庆市主城区的7个螺旋匝道开展自然驾驶实验,并通过Carsim仿真软件建立道路环境模型,分析比较导致车辆轨迹偏移的关键影响因素。研究表明:在利用Carsim进行驾驶员仿真模型建立时,采用闭环控制模式仿真结果可信度较高;当仿真运行速度超过实测运行速度62.5%以上时才会出现轨迹偏离的现象,建议适当提高螺旋匝道设计速度;部分螺旋匝道设计最小圆曲线半径可根据实际情况适当下调;对于设计速度较低的螺旋匝道,可通过提升超高值以保证实际运行速度的提升。

关键词:道路工程;螺旋匝道;Carsim;仿真模型;设计参数

中图分类号:U491.1

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)08-0256-06

0 引言

山地城市受用地条件、道路环境和工程投资等因素的限制,存在大量相交道路因高差过大而无法衔接的情况。螺旋匝道作为一种小半径、连续上、下坡的多圈层结构,能够有效解决高差下的道路衔接与交通转换,节约城市用地资源,因而被广泛应用于山地城市市政工程中。由于当前尚无针对螺旋匝道的设计标准,导致螺旋匝道往往只能沿用环形匝道甚至支路的线形标准进行设计。使得立交在投入运营后,容易出现因设计参数取值不合理而导致的车辆超速、通视条件差等一系列问题,严重情况下还可能造成交通事故。

当前针对螺旋匝道线形的研究较少,大多数研究是基于立体交叉匝道线形指标开展的相关研究。Hunter.M^[1]通过视频记录的方式采集车速数据,对美国公路及运输协会(AASHTO)和德州交通部(TxDOT)道路设计标准中的互通式立交匝道设计速度进行了重新评价。根据车速调查结果显示,立交匝道上车辆平均运行速度高于设计速度至少50%,导致在匝道行车存在安全隐患。成鑫^[2]在实地观测车速数据的基础上,对比了不同线形指标下互通立交匝道运行车速的变化,得出了车辆在匝道和变速

车道上的运行车速变化规律。刘永胜^[3]以速度变化率为评价指标,采用Carsim仿真软件研究不同交通量及交通组成下匝道的安全性,得到匝道安全性较差的路段,指导匝道相关的设计和后期的运营管理。

近年来,随着数字仿真技术的广泛普及和算法的进一步优化,越来越多的研究学者利用仿真软件开展道路线形及安全评价的相关研究。Li Tieqiang和Tong Can等^[4-5]利用ADAMS/Car软件建立了车路耦合模型,通过改变路面摩擦系数,模拟冰雪天路面条件,获取不同车速和转向角度下,车辆侧向位移与正常天气条件下的偏差值,从而确定冰雪天气条件下的城市道路安全等级划分。刘晨^[6]以陕西省某二级路为研究对象,基于Carsim仿真提出了反映道路安全性的评价指标即车辆运行速度、汽车操作稳定性及驾驶员感受标准,为相关研究评价指标的选取提供了参考价值。白钢^[7]以车辆侧滑和侧倾失稳为临界条件,应用Carsim仿真研究不同道路线形组合下车辆行驶的稳定性,验证了规范相关参数取值的合理性。张作胜^[8]研究了螺旋匝道的展线条件,通过方案对比和结构分析提出了螺旋匝道在用地紧凑城市道路中的应用合理性。但当前针对螺旋匝道道路线形指标的研究成果较少,且无相关设计规范。

本研究基于重庆市主城区7个螺旋匝道的小汽车自然驾驶实测数据,通过Carsim仿真软件建立道路环境模型,基于实测驾驶结果对模型进行验证。同时,通过改变车辆运行速度、设计圆曲线半径、超高、

收稿日期:2022-10-4

基金项目:重庆市建设科技计划项目(城科字2020第3-14)

作者简介:黄博亚(1990—),男,硕士,高级工程师,从事可持续交通和韧性交通相关领域的规划及研究工作。

纵坡等关键指标,确定各项指标的设计临界值,为现行设计标准的优化提供数据支撑。

1 仿真建模

1.1 驾驶员模型

Carsim 驾驶员模型中包括所有驾驶员常见的操作控制:转弯(Steering)、刹车(Braking)、油门(Throttle)、换挡(Gear Shifting)和离合器的控制(Clutch Control)。本研究采用驾驶员速度控制模型(Driver Speed Control Model),此模型主要模拟在既定路线/既定速度/既定规则下驾驶员的典型驾驶行为,能够根据道路条件、车辆状态调整车辆速度及方向,可以较为真实的反映人一车一路的协同状态。

对于方向控制,本研究采用方向控制模型中的闭环控制模式(Steering by the Closed-Loop Driver Model)。该模型轨迹跟随程度较高,车辆会根据给定的信息以最小误差完成转向活动。根据 Xing^[9]的研究成果,驾驶员在弯道路段的预瞄时间(Preview Time)可设为 1.5 s,路段上的横向偏移量(Lateral Offset)设为 0。

对于速度控制,本研究采用 Speed (Closed Loop) Using Path Preview,作为最符合自然驾驶特性的模型选择,此模型可以将目标速度作为道路曲率的函数进行计算,结合考虑驾驶员的“驾驶侵略性(Driver Aggressiveness)、技能参数(Skill Parameters)以及路面属性(Surface Properties)”。方向控制模型和速度控制模型的其他参数设置情况见表 1。

表 1 驾驶员模型参数设置

方向控制模型		速度控制模型	
预瞄时间	1.5 s	加速度模型	Skill 2
反应延迟时间	0.15 s	曲率计算长度	实际曲率
方向盘最大转角	720°	预瞄起点桩号	0
最大转向角速度	1 200°/s	预瞄间隔长度	2 m

1.2 汽车模型与参数标定

本研究主要仿真分析不同道路条件下的小汽车行车安全性和舒适性,对车辆本身特征不做过多考虑。本研究基于测试车辆参数在 Carsim 车辆模型数据库中分别选择特定车辆类型,对车辆规格、传动系统、转向系统、制动系统、轮胎、悬架以及空气动力学等设置进行明确。

其中,转动惯量参考与车辆相匹配的经验公式计算而得:

$$I_{yy} = m_1 a^2 + m_2 a^2 \tag{1}$$

$$I_{zz} \approx I_{yy} \tag{2}$$

$$I_{xx} \approx 2(\frac{B}{L})I_{yy} \tag{3}$$

式中: I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 分别为绕 x, y, z 轴的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; m_1, m_2 为汽车前、后轴上的轴载质量, kg ; a, b 为汽车质心至前后轴距离, m ; B 为汽车车辙宽度,可取前后轴的最大轮距或取两者平均值, m ; L 为汽车外形总长度, m 。

对于前轮驱动的小轿车来说,考虑其安全性,在设计时按照前后轴轴载均匀分布进行计算。测试车辆 2017 款长安 CS35 PLUS 的前、后轴轴载 $m_1=m_2=1\ 380/2=690\ \text{kg}$; 汽车质心距前、后轴距离 $a=b=2\ 600/2=1\ 300\ \text{mm}$; 车辙宽度去前后轮距 $B=1\ 570\ \text{mm}$; 汽车总长度 $L=4\ 330\ \text{mm}$; 然后可根据式 1 至式 3 计算车辆整车转动惯量。具体参数取值见表 2。

表 2 车辆模型参数值选取

模块	参数	D 级轿车(测试车辆)
车体参数	总长/mm	4 430
	总宽/mm	1 825
	总高/mm	1 660
	质心高度/mm	676
	整车质量/kg	1 380
	轴距/mm	2 600
	轮距/mm	1 570
	转动惯量 $I_{xx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 691
	$I_{yy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 332
	$I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 332
转向系统	最大功率/kW	118
	主销内倾角/(°)	14.4
悬架	主销后倾角/(°)	3.4
	轮距/mm	1 570
轮胎	车轮有效半径/mm	275.1/279.2
	轮胎宽度/mm	215/225

1.3 车路耦合模型建立

在 CarSim 软件的仿真环境中,可以很方便地实现道路三维几何线形模型和三维路面模型的建立,以及路面摩擦系数的输入等模拟。主要步骤如下:

(1)调试驾驶员模型

选用 Driver Controls → Constant Target Speed, 目标车速的选取主要依据螺旋匝道设计速度以及实测运行速度确定; 由于外部接入制动, Braking 选项为空; 设置无侧向偏移量 Steering: Driver Path Follower 为 No Offset, 0.15s Preview。

(2)设置道路环境模型

选用 Geometry→3D Road→Path Segment Builder,

依次输入逐桩坐标、圆曲线、竖曲线半径、超高、超高渐变、风阻系数(取重庆地区累年平均风速 1.12 m/s)、恒定摩擦系数(恒定 0.85 μ)等参数,生成螺旋匝道路面模型,如图 1 所示。

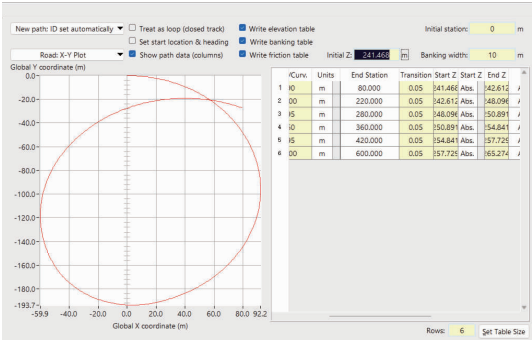


图 1 道路环境模型界面及设置

(3)设置路面横断面

可根据实际情况设置道路横断面数据库,包括护栏、植草沟、路缘石等附属设施,以及冰雪、雨雪等特殊天气条件,L Start 和 L Stop 用于设置路面的宽度和在整改道路上的起始和终止坐标。

2 模型验证

2.1 试验对象

本研究以重庆辖区内 7 个螺旋匝道作为试验对象,选用 VBox3i 数据采集系统采集了车辆在自然驾驶情况下的运行速度和轨迹。7 个螺旋匝道的线形数据作为 Carsim 中的基础输入值完成道路环境模型的建立。螺旋匝道线形数据与车辆驾驶数据如表 3 所示。

表 3 螺旋匝道线形数据与实测速度

螺旋匝道名称	行驶方向	单向车道数	转弯半径 /m	方向	匝道转角 /($^{\circ}$)	最大纵坡 /%	最大超高 /%	设计车速 / ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	实测 V_{85} 速度 / ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
苏家坝立交匝道	双向	2	60	上行	360	5.0	6.0	40	44
			60	下行					46
融侨半岛立交匝道	双向	2	55	上行	720	6.0	2.0	40	38
			55	下行					39
乌江大桥西桥头匝道	双向	1	38	上行	720	5.0	1.5	20	36
			38	下行					36
乌江二桥西桥头匝道	双向	2	45	上行	900	4.5	4.0	30	42
			45	下行					37
长江一桥南桥头匝道桥	双向	1	45	上行	720	4.5	6.0	20	35
			45	下行					34
五里店立交匝道	单向	2	35	上行	360	3.4	5.0	30	33
庐山立交匝道	双向	2	40	上行	360	5.8	2.0	30	36
			40	下行					35

2.2 验证分析

完成以上设置后,本研究对以上螺旋匝道展开仿真模型可靠度测试。为了保证模型的精确性,本研究分别以 30 km/h、40 km/h、60 km/h 的均匀车速进行仿真试验,整个过程设置尽量与实测试验保持一致。通过运行模型,模拟在实测运行速度下,测试车辆在匝道上的行驶轨迹并与实际行驶轨迹进行比较。比较结果如图 2 所示,车辆行驶轨迹和路径偏移轨迹误差在允许范围内,证明了综合仿真模型可靠度满足要求。

3 仿真分析

本研究利用已验证模型,采用控制变量法对 7 座螺旋匝道的行驶速度、圆曲线半径和超高进行敏感性分析。最后通过轨迹偏离度比较,得出不同线形条件下螺旋匝道的临界建议值,为螺旋匝道设计建

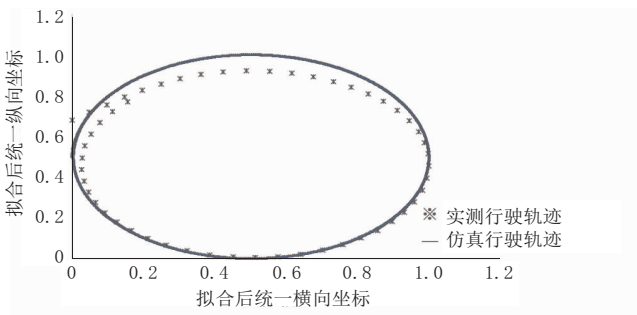


图 2 仿真行驶轨迹校验(40 km/h)

议值的优化提供佐证。

3.1 运行速度仿真分析

本研究利用已验证模型,采用控制变量法对 7 座螺旋匝道的行驶速度、圆曲线半径和超高进行敏感性分析。最后通过轨迹偏离度比较,得出不同线形条件下螺旋匝道的临界建议值,为螺旋匝道设计建议值的优化提供佐证。

在道路线形和驾驶员模块其他设置不改变的情

况下,通过每 5 km/h 为单位提高仿真模型的运行速度,观测车辆在螺旋匝道的模拟驾驶轨迹。当模拟车辆前轮的行驶轨迹与车道中心线发生重合时,即判定为轨迹“偏离”。“偏离”状态的前一个运行速度即为车辆在特定螺旋匝道环境下的速度临界值。螺旋匝道实测 V_{85} 运行速度与自然驾驶条件下的运行速度模拟比较结果如表 4 所示。

根据仿真结果可以看出,所测试 7 个螺旋匝道中,小汽车在自然行驶状态下,只有当仿真运行速度超过实测运行速度约 60% 以上时才会出现轨迹偏离的现象。考虑到仿真结果无法模拟所有实际因素的综合影响,其结果会更加保守(预测临界速度 > 实际临界速度)。结合各螺旋匝道仿真运行数据,所测螺

旋匝道中,乌江大桥西桥头匝道、长江一桥南桥头匝道、五里店立交匝道和融侨半岛立交匝道仍可一定程度上提高设计速。

3.2 圆曲线半径仿真分析

在驾驶员和道路线形其他设置不改变的情况下,通过每 5 m 为单位降低仿真模型的道路半径,观察在模拟车辆的行驶速度与轨迹。本研究在建立道路环境因素模型时统一考虑了圆曲线全加宽值。与上述章节一致,当模拟车辆前轮的行驶轨迹与车道中心线发生重合时,即判定为轨迹“偏离”。“偏离”状态的前一个圆曲线即为螺旋匝道的最小半径临界值。最小圆曲线半径与轨迹偏离的关系如表 5 所示。

表 4 平均 V_{85} 运行速度与轨迹偏离关系

螺旋匝道	V_{85} 平均运行速度 / (km·h ⁻¹)	模型测试运行速度 / (km·h ⁻¹)										
		设计速度 / (km·h ⁻¹)	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
苏家坝立交匝道	45	40	-	-	-	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离
融侨半岛立交匝道	38	40	-	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离	-
乌江大桥西桥头匝道	35	20	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离	-	-
乌江二桥西桥头匝道	40	30	-	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离	-	-
长江一桥南桥头匝道	35	20	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离
五里店立交匝道	33	30	-	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离	-
庐山立交匝道	35	30	-	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离	-	-

表 5 最小圆曲线半径与轨迹偏离关系

螺旋匝道	设计速度 / (km·h ⁻¹)	最大超高 / %	模型测试圆曲线半径 R/m						
			40	35	30	25	20	15	10
苏家坝立交匝道	40	6	正常	正常	正常	偏离	-	-	-
融侨半岛立交匝道	30	2	正常	正常	正常	正常	偏离	-	-
乌江大桥西桥头匝道	20	1.5	正常	正常	正常	正常	正常	偏离	-
乌江二桥西桥头匝道	30	4	正常	正常	正常	正常	偏离	-	-
长江一桥南桥头匝道	20	6	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离
五里店立交匝道	30	5	正常	正常	正常	正常	偏离	-	-
庐山立交匝道	30	2	正常	正常	正常	正常	正常	正常	偏离

表 6 匝道最小圆曲线半径取值建议

城市道路交叉口设计规程(CJJ-152)									
匝道设计速度 / (km·h ⁻¹)	80	70	60	50	40	35	30	25	20
不设超高	420	300	200	130	80	60	45	30	20
$i_{\max} = 0.02$	315	230	160	105	65	50	35	25	20
$i_{\max} = 0.04$	280	205	145	95	60	45	35	25	15
$i_{\max} = 0.06$	255	185	130	90	55	40	30	25	15
AASHTO 低速街道最小圆曲线和超高建议值(表 3-13)									
匝道设计速度 / (km·h ⁻¹)	80	70	60	50	40	35	30	25	20
$i_{\max} = 0.02$	-	227	149	94	50	-	24	-	9
$i_{\max} = 0.04$	-	203	135	86	47	-	22	-	8
$i_{\max} = 0.06$	-	184	123	79	43	-	21	-	8

表7 设计超高与横向摩阻力系数关系

螺旋匝道名称	模型测试超高 /%							
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
苏家坝立交匝道	0.200	0.190	0.180	0.170	0.160	0.150	0.140	0.130
	0.200	0.190	0.180	0.170	0.160	0.150	0.140	0.130
融侨半岛立交匝道	0.219	0.209	0.199	0.189	0.179	0.169	0.159	0.149
	0.219	0.209	0.199	0.189	0.179	0.169	0.159	0.149
乌江大桥西桥头匝道	0.073	0.063	0.053	0.043	0.033	0.023	0.013	0.003
	0.073	0.063	0.053	0.043	0.033	0.023	0.013	0.003
乌江二桥西桥头匝道	0.147	0.137	0.127	0.117	0.107	0.097	0.087	0.077
	0.147	0.137	0.127	0.117	0.107	0.097	0.087	0.077
长江一桥南桥头匝道桥	0.060	0.050	0.040	0.030	0.020	0.010	0.000	-0.010
	0.060	0.050	0.040	0.030	0.020	0.010	0.000	-0.010
五里店立交匝道	0.192	0.182	0.172	0.162	0.152	0.142	0.132	0.122
庐山立交匝道	0.167	0.157	0.147	0.137	0.127	0.117	0.107	0.097
	0.167	0.157	0.147	0.137	0.127	0.117	0.107	0.097

根据仿真结果可以看出:在道路条件复杂、用地紧张的情况下,设置超高、设计时速为 40 km/h 和 30 km/h 的匝道对应最小圆曲线半径值可根据实际情况适当进行调整。同时,将测试结果与《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)以及 AASHTO 中低速街道最小圆曲线半径的取值建议(表 6)进行对比和分析。结果显示,当螺旋匝道设计时速为 40 km/h,设计超高为 6%时,设计最小圆曲线半径可取 45 m;设计时速为 30 km/h,设计超高为 2%时,设计最小圆曲线半径可取 30 m;设计时速为 30 km/h,设计超高为 4%时,设计最小圆曲线半径可取 30 m。

3.3 超高仿真分析

在驾驶员和道路线形其他设置不改变的情况下,通过每 1%为单位提高道路超高值,研究螺旋匝道超高与横向摩阻力系数 μ 之间的关系。横向摩阻力系数即轮胎与路面的横向摩阻系数,与轮胎侧向力、法向力、侧滑角以及车辆的侧偏刚度相关^[10]。通过 Dugoff 轮胎模型公式^[11],得出最大横向摩阻力系数与轮胎-路面受力的关系式:

$$\mu_{\max,y} = \frac{2C_a |\tan(\alpha)| \pm 2\sqrt{C_a |\tan(\alpha)| [C_a |\tan(\alpha)| - F_y]}}{F_z}$$

式中: C_a 为车辆侧偏刚度; α 为轮胎侧滑角; F_y 为轮胎侧向力; F_z 为轮胎法向力。

利用 Carsim 模拟测试螺旋匝道在不同超高下横向摩阻力系数的变化,分析结果如表 7 所示。并根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)和周正伟^[12]的相关研究成果,结合《城市道路工程设计规范》(CJJ37)中横向摩阻力系数与驾驶舒适感的关系,认

为螺旋匝道横向摩阻力系数以不大于 0.15 为宜,相对应的临界超高值见表 7 中。

仿真结果显示,融侨半岛立交匝道、五里店立交匝道和庐山立交匝道均可以优先通过提升超高值来提升驾驶舒适性和安全性。同时,对乌江大桥、乌江二桥和长江一桥等设计速度较低的路段,也可以通过提升超高值为可能需要的运行速度提升预留空间。

4 结 语

(1)在利用 Carsim 进行驾驶员仿真模型建立时,采用闭环控制模式能够更加系统地考虑驾驶员、车辆及性质状态之间的配合,较为真实地反映人一车一路的协同状态。

(2)当前所研究螺旋匝道在小汽车自然行驶仿真测试中,只有当仿真运行速度超过实测运行速度 62.5%以上时才会出现轨迹偏离的现象。目前所研究螺旋匝道设计速度普遍偏低(20~40 km/h),建议适当提高匝道设计速度。

(3)参考对比《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)以及 AASHTO 中低速街道最小圆曲线半径的取值建议,在城市道路条件复杂、用地紧张的情况下,设置超高、设计时速为 40 km/h 和 30 km/h 的螺旋匝道所对应最小圆曲线半径值可根据实际情况适当进行下调。

(4)提升超高值可以提高驾驶舒适性和安全性。对于设计速度较低的螺旋匝道,也可以通过提升超高值为可能需要的运行速度提升预留空间。

参考文献:

- [1] Hunter M, Machemehl R · B . Reevaluation of Ramp Design Speed Criteria: Review of Practice and Data Collection Plan [J]. Design Speed, 1997
- [2] 成鑫.基于驾驶员心理特性的互通立交匝道安全设计技术研究[D].南京:东南大学,2011.
- [3] 刘永胜,王子滨,李嘉.基于交通仿真的互通式立交安全性评价[J].公路交通科技:应用技术版,2010(11):4.
- [4] Tie-Qiang LI. , Rong-Guo, M A. , Pei, X. Y. , et al. Road Traffic Safety Assessment Based on ADAMS/Car under Snow and Freezing Weather[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012.
- [5] Tong C , Li T Z . Car Driving Safety Analysis in Rainy and Snowy Weather Based on ADAMS/Car.[C]// Cota International Conference of Transportation Professionals, 2015.
- [6] 刘晨.基于 Carsim 仿真软件的公路线形安全评价方法研究[D].西安:长安大学,2014.
- [7] 白钢. 基于车辆行驶稳定性仿真的道路几何线形设计参数研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [8] 张作胜,赵桂娥,杨长清.螺旋形匝道结构设计[J].湖南交通科技, 2017,43(2):5.
- [9] Xing, D. W. , Li, X. S. , Zheng, X. L. , Ren, Y. Y. , & Ishiwatari, Y.. Study on driver's preview time based on field tests [C]//2017. 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2017.
- [10] Han, K. S., Lee, E., & Choi, S. (2015, October). Estimation of the maximum lateral tire-road friction coefficient using the 6-DoF sensor [C]//15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (pp. 1734-1738). IEEE, 2015.
- [11] Dugoff H, Fancher P S, Segel L. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance [J]. SAE transactions, 1970, 1219-1243.
- [12] 周正伟.道路几何设计部分设计指标适用性研究[D].南京:东南大学,2015.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smcdi.com