

基于人一车一路协同的山区道路符合性仿真研究

高伟嘉¹, 束海波²

(1.重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2.重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要:为研究大型车辆在复杂山区道路中的符合性,通过 Truksim 构建人一车一路耦合的仿真试验场景,分别对 2 条实际山区道路的通过性、设计符合性、车辆行驶安全性进行多维度分析。结果表明,山区道路的连续回头弯路段、弯坡组合路段的通过性较差,大型车辆会出现被卡、侵占对向车道或路肩等现象;超载对大型车辆的横向稳定性影响较大,但在复杂山区道路中,由于弯道较多,车速是侧翻的主要影响因素,大型车辆的行驶速度为 50~60 km/h 时,其横向载荷转移率 LTR 会陡增至侧翻阈值,即接近于 1;附着系数降低会提升大型车辆的侧滑可能性,当路段为雨雪路面(附着系数为 0.4)时,大型车辆在小半径弯道等危险路段会发生侧滑。

关键词:交通安全;山区道路;大型车辆;道路符合性;人一车一路协同;Truksim 仿真

中图分类号:U469.2

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)05-0020-05

当前中国主要干线公路上大型车辆占比高达 40%~60%,源于美国的以小型车辆为主导所制定的道路设计速度及安全性检验不能适应中国复杂山区道路。大型车辆载重大、质心高,极易在道路线形较复杂的路段产生侧滑或侧翻,而这种地形条件和驾驶环境较差的路段在山区道路中屡见不鲜。而且为提高经济效益,大型车辆在运载过程中往往会超载行驶或高速行驶,进一步提升了事故发生率。

目前针对大型车辆行驶安全性的分析主要集中在道路线形普通且坡度起伏较小的高速公路上,而中国山地和丘陵占总国土面积的 43%,且越来越多的大型车辆承担了偏远山区的运输工作,研究大型车辆在山区道路危险路段的侧翻、侧滑风险并检验道路的符合性从而降低事故发生率具有现实意义。该文运用车辆动力学仿真软件 Truksim 对真实环境下驾驶行为进行仿真模拟,通过车辆数学模型求解器在仿真动画显示器上表征仿真结果和车辆实时动态,检验实际道路的符合性和通过性,并利用输出的动态响应参量对多种试验工况进行分析,模拟不同速度、载重、路面附着系数条件下大型车辆在山区道路上的运行情况。

1 人一车一路耦合仿真试验设计

1.1 道路建模

选择 G320 贵州省晴隆回头弯至普安江西坡桥头路段(道路 1)、G320 贵州省新盘江桥关岭岸桥头至晴隆五里公路(道路 2)作为仿真试验道路。道路

1 全长 23.859 km,共有 8 处回头弯,且道路起伏较大,设计速度 40 km/h,路基宽度 8.5 m。道路 2 为全程连续纵坡路段,全长 21.658 km,设计速度 40 km/h,路基宽 8.5 m。

1.2 车辆建模

根据 2 条道路的等级、实际运行情况和汽车载荷等级,选用二轴大客车、三轴自卸车(渣土车)、7 座小客车为主要分析车型,其中 7 座小客车作为仿真分析的对照组。二轴大客车整车参数为簧上质量 6.36 t、整备质量 7.62 t,三轴自卸车(渣土车)整车参数为簧上质量 6.31 t、整备质量 8.53 t。图 1 为车辆模型。



图 1 3A Dump Truck 模型

1.3 驾驶员建模

试验速度控制选择定速巡航和自由变速 2 种方式,并将行驶速度划分不同速度区间;制动控制和换挡控制选择为闭环自动控制;转向控制选择驾驶员速度预瞄控制(见图 2)。

2 山区道路设计安全性检验

山区道路具有山高、坡陡、路窄、弯急等地形特

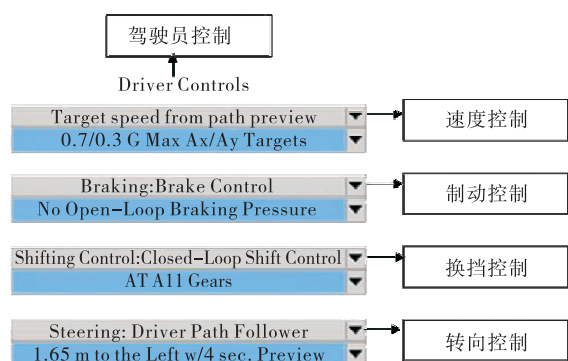


图 2 驾驶员模型

点,地势复杂,驾驶难度大,大型车辆如大客车、自卸车和半挂车在复杂山区道路行驶时产生险态的概率较高,因而对道路自身线形设计协调性提出了要求,以使在保证道路通过性和符合性的条件下大型车辆能平稳且安全地运行。

2.1 道路线形设计符合性检验

仿真试验时,使用道路设计速度(道路 1 和道路 2 均为 40 km/h)作为车辆的仿真设计速度,将道路中线作为驾驶员预瞄轨迹,且大型车辆均为满载定速行驶。试验中发现:1) 小客车、大客车、自卸车均能以设计速度安全通过道路 2,且左线行驶、右线行驶均满足安全性。2) 满载的自卸车在道路 1 上定速行驶时在连续回头弯等危险路段发生侧翻,侧翻位置为图 3 中 A1、A2。



图 3 道路 1 平面线形及侧翻位置和安全车速

对发生侧翻路段进行仿真分析,得出临界安全车速是提高其行驶安全性的关键因素。在道路 1 中,以 0.5 km/h 的梯度降低道路设计速度,直到自卸车能安全通过侧翻危险路段,得到侧翻位置的临界安全车速(见图 3),其中 v_{BL} 为自卸车左线行驶的临界安全速度, v_{BR} 为自卸车右线行驶的临界安全速度。道路 1 中 A1 为晴隆回头弯路段, K0+000—K5+080 存在多处 S 弯和小半径弯道,以设计车速行驶时,大型车辆在出弯位置存在侧翻风险; A2 为连续回头弯路段,且从连续回头弯起点 K18+220 至终点 K23+859 均为下坡路段,实际车速高于设

计车速,在该路段也存在侧翻风险。综上,在道路 1 的侧翻危险路段应有限速标识以防大型车辆反生侧翻风险。

2.2 回头曲线大型车辆通过性检验

当大型车辆通过山区道路的回头曲线时,大部分驾驶员会采用切弯方式快速通过,以提高车辆的运载效率、节省时间。但在山区道路的急弯等危险路段进行切弯行驶,会大幅提高半挂汽车列车等超长车辆卡死等风险。

如图 4 所示,当大型车辆驾驶人采用切弯行驶方式右转通过回头弯时,车辆会侵占急弯内侧的路肩,大型车辆存在碰撞山体或碰撞道路护栏的风险;大型车辆左转通过回头弯时,侵占对向车道及外道路肩的可能性较大,致使车辆驶出路外或碰撞外侧护栏。低通过性路段位置见图 5。

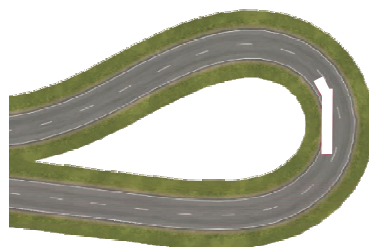


图 4 大型车辆侵占路肩

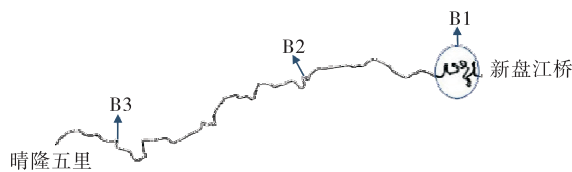


图 5 道路 2 平面线形及大型车辆低通过性路段

3 大型车辆行驶安全性检验

通过动力学仿真试验,模拟在不同山区道路上行驶的常用大型车辆的行驶状态,由模型反馈的车辆运行状态参数分析车辆的侧滑、侧翻风险。

3.1 侧滑稳定性检验

车辆侧滑是山区小半径弯道常见的现象。道路 1 小半径弯道多,坡度变化大,选用道路 1 作为侧滑稳定性分析的试验道路。根据现有研究,车辆侧滑与车速、弯道半径及路面摩擦系数有关,仿真分析时,车速选用 30~40、40~50、50~60 km/h,道路附着系数选为 0.6(正常路面)、0.5(潮湿路面)、0.4(雨雪路面),选用大客车和自卸车作为仿真车型。

横摆角速度 ω 和侧向加速度 a_y 可表征车辆的

行驶稳定性。根据已有研究,侧向加速度 $a_y < 1.8 \text{ m/s}^2$ 时稳定性较好, $1.8 \text{ m/s}^2 < a_y < 3.6 \text{ m/s}^2$ 时稳定性普通, $3.6 \text{ m/s}^2 < a_y < 5 \text{ m/s}^2$ 时稳定性较差, $a_y > 5 \text{ m/s}^2$ 时稳定性极差。通过横摆角速度和侧向加速度之间的关系式 $\omega = a_y/v$ 和道路1的设计速度40 km/h计算所得横摆角速度的稳定性阈值见表1。

表1 横摆角速度与横向稳定性的相关性

$\omega/(\text{deg} \cdot \text{s}^{-1})$	横向稳定性
$\omega < 9.3$	较好
$9.3 < \omega < 18.6$	一般
$18.6 < \omega < 25.8$	较差
$\omega > 25.8$	极差

仿真得出满载的自卸车以30~40 km/h的速度行驶时,在图3中A1和A2处发生侧滑,侧滑时自卸车的具体位置和横摆角速度见表2。

表2 自卸车侧滑位置与侧滑时横摆角速度的绝对值

侧滑位置	横摆角速度/(deg·s ⁻¹)
K3+402	25.79
K3+588	25.03
K3+853	28.29
K20+039	23.84

由于超速行驶的自卸车侧滑风险较高,在道路1上行驶的自卸车应尽可能不超过道路设计速度。在自卸车侧滑路段对大客车进行同工况仿真,大客车以3种速度通过图3中A1处时的横摆角速度见图6。从图6可看出:在设计速度下行驶的大客车的横摆角速度没有超过25 deg/s;车速达到50~60 km/h时,横摆角速度的绝对值在K2+350连续弯道处发生剧烈波动并增加至28 deg/s,大客车的横向稳定性极差,产生侧滑风险。因此,在该路段行驶时应尽量减少超速驾驶行为。

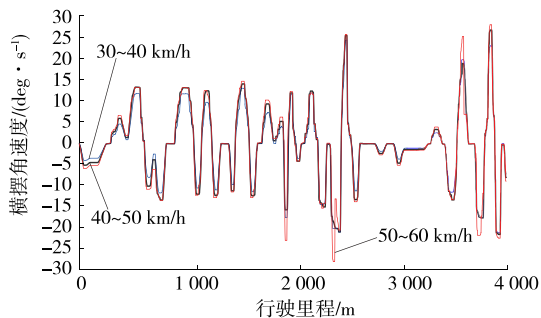


图6 大客车在道路1 A1路段超速行驶时横摆角速度的变化

路面附着系数也影响车辆的行驶稳定性。图7为大客车在3种附着系数路面上行驶时的横摆角速

度值。从图7可看出:路面附着系数为0.5和0.6时,横摆角速度值仅有微小波动;附着系数为0.4时,大客车的横摆角速度值波动极大,且在K20+867处即图3中A2产生侧滑。该位置处于弯坡组合路段,当出现雨雪天气时,在该路段行驶的大型车辆需减速慢行,以免产生侧滑。

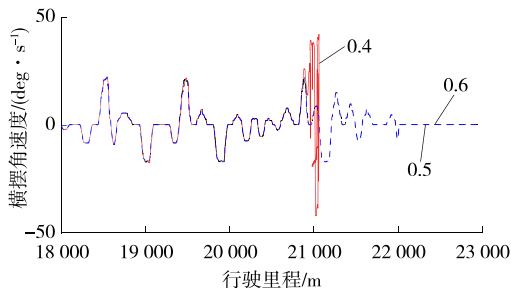


图7 道路1 A2路段上大客车横摆角速度随附着系数的变化

综上,大型车辆在道路1上行驶时应注意当前道路条件,若道路或天气条件较差,应适当降低行驶速度确保安全行驶,并在A1、A2等位置设立限速标识,提醒大型车辆不要超速行驶,以免发生侧滑。

3.2 侧翻稳定性检验

在量化车辆侧翻的指标中,车身侧倾角和车辆横向载荷转移率LTR是表明车辆进入侧翻状态的重要指标,其表达式为:

$$LTR = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{li} - F_{ri})}{\sum_{i=1}^n (F_{li} + F_{ri})}$$

式中: F_{li} 为车辆左侧车轮上的垂直载荷(N); F_{ri} 为车辆右侧车轮上的垂直载荷; i 为车轴的位置; n 为总车轴数。

LTR的取值范围为[0,1],正常行驶条件下LTR趋于零,LTR逐渐逼近1时车辆状态趋近为侧翻, $LTR \leq 0.2$ 时车辆处于安全状态, $0.2 < LTR \leq 0.6$ 时车辆处于低侧翻倾向状态, $LTR > 0.6$ 时车辆处于高侧翻倾向状态。

道路2为长大纵坡,易发生侧翻事故,选用道路2作为侧翻稳定性分析的试验道路。仿真分析所得小客车、大客车、自卸车在道路2上的侧倾角随坡度和里程的变化见图8。由图8可知:小客车和大客车处于安全行驶状态,均能在满载的情况下在道路2上安全行驶;自卸车由于载重量较大且载荷质心较高,在图5中B1、B2、B3处侧倾角出现剧烈波动,处于危险行驶状态。

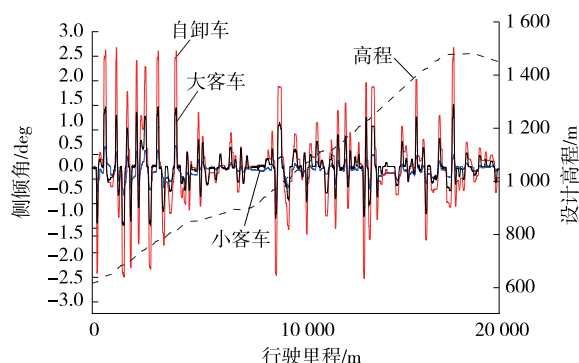


图8 道路2上车辆侧倾角随里程和坡度的变化

如图9所示,小客车的 LTR 峰值为0.32,82%行驶里程中 LTR 均低于0.2,处于安全稳定行驶状态;大客车的 LTR 峰值为0.51,在连续回头弯如B1等路段处于低侧翻倾向状态;自卸车的 LTR 峰值为0.56,接近于高侧翻倾向状态的临界值0.6,若超速或超载, LTR 值将超过临界值,车辆将进入高侧翻倾向状态。

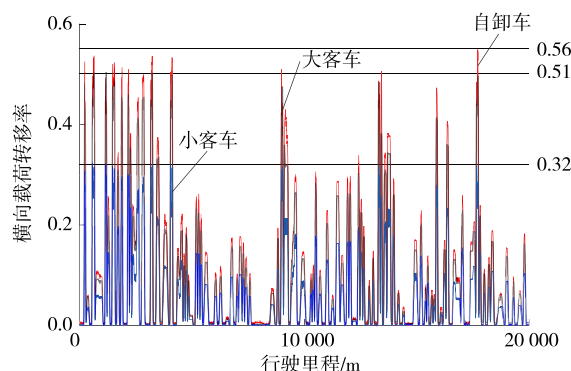


图9 道路2车辆横向载荷转移率的变化

受驾驶人行为习惯和道路复杂程度的影响,大型车辆在复杂山区道路上行驶时往往不会以设计速度行驶,且变速超载的情况屡见不鲜。选取30~40、40~50、50~60 km/h 3种车速区间及满载、超载50%、超载80% 3种载重情况,分析不同道路条件下自卸车的侧翻稳定性。

自卸车的 LTR 随车速的变化见图10。由图10可知:车速为40~50 km/h时, LTR 的峰值达到0.65,在危险路段极易发生侧翻,处于高侧翻倾向状态;车速达到50~60 km/h时,由于道路2在右线行驶时车辆首先进入的是小弯道半径的连续回头弯, LTR 值不断上升,在K2+221处发生侧翻, LTR 值达到1。因此,大型车辆在道路2上行驶时,应控制行驶速度,尽量不超过设计车速的30%即52 km/h。

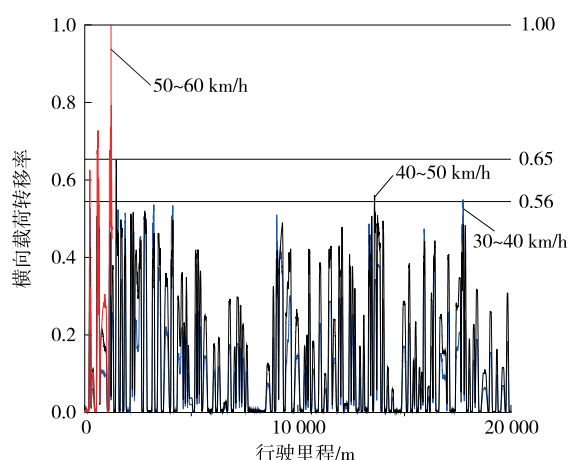


图10 车速对横向载荷转移率的影响

如图11所示,超载率达到50%时,自卸车达到高侧翻倾向状态的临界值,受车速和道路条件的影响,极易发生侧翻;超载率达到80%时,自卸车的 LTR 峰值为0.63,若不能控制好车速,极易产生非绊倒型侧翻。可见,载重对大型车辆的横向稳定性有较大影响。

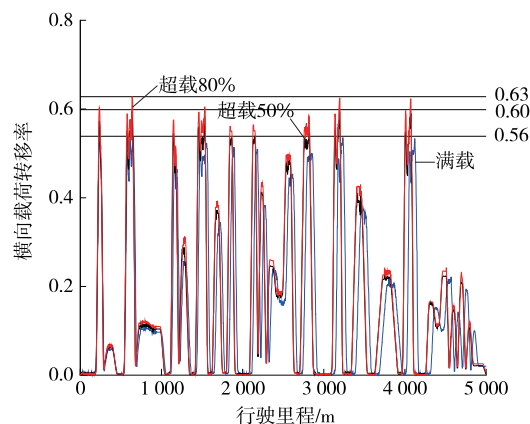


图11 载重对横向载荷转移率的影响

4 结论

通过 Trucksim 构建人一车一路耦合的仿真系统模型,对2条山区道路中3种常见行驶车辆即小客车、大客车、自卸车进行仿真分析。通过检验2条山区道路的符合性,得出不同车辆在通过危险路段时的临界安全车速及通过性较低的路段;雨雪天气对山区道路的安全性影响极大,在附着系数不断降低的条件下,大型车辆极易出现侧滑现象,附着系数降低到0.4时,急弯等危险路段处车辆的横摆角速度会超过阈值进而发生侧滑;超载行驶对大型车辆的横向稳定性具有负面影响,相对而言,在山区道路

上行时,大型车辆高速行驶的危险性高于超载的危险性,车速为 50~60 km/h 时大概率会发生侧翻。这是由于山区道路中小半径弯道、连续回头弯及弯坡组合路段较多,车速增加会使横向载荷转移率激增。山区道路线形复杂且天气多变,考量道路的符合性具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] GLASER S, MAMMAR S, SENTOUH C. Integrated driver-vehicle-infrastructure road departure warning unit[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2757—2771.
- [2] GALLER R, HAUTIERE N, CORD A, et al. Supporting drivers in keeping safe speed in adverse weather conditions by mitigating the risk level[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(4): 1558—1571.
- [3] 徐进, 邵毅明, 杨奎, 等. 基于人一车一路协同仿真的山区道路大型车辆行驶适应性分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 14—25.
- [4] 窦同乐, 向健, 徐进. 苜蓿叶形立交行驶安全性与舒适性仿真研究[J]. 中国科技论文, 2020, 15(2): 201—207.
- [5] 徐进, 崔强, 常旭, 等. 苜蓿叶形互通立交进/出口的纵向驾驶行为特征[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1205—1214.
- [6] 翟德. 半挂汽车列车侧向稳定性判定及控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [7] 李宇. 山区双车道二级公路弯道路段行驶特性与安全策略研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [8] 邓天民, 罗晓, 邵毅明, 等. 山区公路曲线路段汽车轨迹模式与切弯行为[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 388—396.
- [9] 岳雷, 姚红云, 王慧. 山区公路弯坡组合路段设计指标研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 520—528.
- [10] 岳雷, 王慧, 杜豫川, 等. 基于安全性分析的山区公路弯坡组合路段设计指标研究[J]. 工程力学, 2019, 36(11): 158—167.
- [11] 杨俊儒, 褚端峰, 王维峰, 等. 弯道安全车速建模及影响因素分析[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(6): 1—8.
- [12] 徐进, 邵毅明, 赵军, 等. 山区道路弯坡组合路段重载车辆行驶速度模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(2): 67—74.
- [13] 贺宜, 褚端峰, 吴超仲, 等. 路面附着条件对车辆横向稳定性影响的量化分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(4): 784—787.
- [14] 职雨风, 苏堪祥. 南方多雨地区 SMA 路面摩擦系数变化规律研究[J]. 公路工程, 2019, 44(3): 176—180.
- [15] 刘洪建. 基于 Trucksim 的罐式半挂汽车列车侧翻状态仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [16] 王宇宇. 基于 Carsim 的公路弯道路段车辆行驶稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [17] 陈静, 徐延海, 朱鹏兴, 等. 基于 Trucksim 整车操纵稳定性影响参数的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(1): 13—19.
- [18] 任秀欢, 何杰. 基于人一车一路虚拟试验的道路线形安全性评价[J]. 公路, 2011(9): 171—175.
- [19] 蒋生珍. 山区公路弯坡组合路段行车特性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [12] 杨良杰, 吴威, 苏勤, 等. 基于 SBM—Undesirable 模型的 1997—2010 年中国公路运输效率评价[J]. 地理科学进展, 2013, 32(11): 1602—1611.
- [13] 杨明, 唐攀. 基于 DEA 的长沙市公交运输运营效益综合评价[J]. 公路与汽运, 2011(6): 79—83.
- [14] 李洁, 左毅刚. 基于超效率 DEA 方法的公路运输效率评价与分析[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(1): 127—132.
- [15] 顾瑾, 陶绪林, 周体光. 基于 DEA 模型的江苏省道路运输效率评价与分析[J]. 现代交通技术, 2008(1): 69—72+80.
- [16] 刘宏伟. 基于 DEA 的公路运输业效率及其动态演化研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [17] 侯向辉. 基于 DEA 的区域公路运输效率评价方法研究[J]. 公路交通技术, 2013(2): 130—133+144.

收稿日期: 2020—12—17

(上接第 19 页)

[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.

- [6] 雷之田, 左大杰. 基于 DEA 模型的西部地区综合运输系统效率评价[J]. 综合运输, 2019, 41(11): 114—120.
- [7] 林芬. 可靠性交通网络均衡的帕累托效率研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [8] 丁俊雅. 中国各省铁路运输效率的时空演化及影响因素研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2017.
- [9] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078—1092.
- [10] 董彬, 任翠萍, 吴群琪. 基于效率视角的公路运输与国民经济动态发展关系研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(10): 152—158.
- [11] 刘畅. 我国省际货物运输效率及影响因素研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

收稿日期: 2021—02—19