

仙人掌仿生结构的耐撞性研究

葛平政, 胡雄杰, 强薇

(江西交通职业技术学院 汽车工程系, 江西 南昌 330013)

摘要: 车辆碰撞时冲击产生的能量主要通过自身的吸能盒、前保险杠、门槛梁和底盘梁进行消散, 为提高车辆的安全性, 需设计具有良好能量吸收特性的金属管件。文中采用具有良好力学性能的巨型仙人掌进行仿生设计, 通过有限元模拟分析具有不同折角数的金属仿生薄壁管的耐撞性, 并与方管进行对比。结果表明, 金属仿生薄壁管的吸能特性优于方管, 最大高出 46.1%, 且随着金属仿生薄壁管折角数量的增加, 耐撞性呈现先增加后下降的趋势; 在质量相等的条件下, 各金属仿生薄壁管的峰值力 PCF 近似相等; 六角仿生薄壁管具有出色的综合耐撞性, 可用于车辆的吸能部件。

关键词: 汽车; 金属管; 仿生设计; 碰撞吸能; 仙人掌

中图分类号: U467

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0004-05

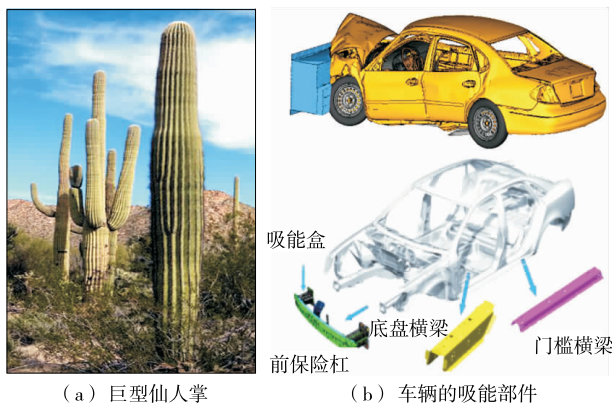
汽车碰撞发生时, 薄壁管可通过自身的弯曲、折叠耗散和吸收撞击能, 故常被用作车辆的吸能部件。为设计具有优异耐撞性的薄壁管件, 国内外学者进行了广泛研究。在国外, Langseth M. 对方形管件进行静态与动态撞击实验, 得出方管在动态条件下的能量吸收能力高于静态; 同时对方管进行不同尺寸参数下的有限元仿真分析, 发现方管在压缩耗散能量的过程中有 3 种变形模式, 随后 Abramowicz W.、Jensen Ø.、Fyllingen Ø. 等对这个结果进行了实验验证。Abramowicz W. 对方形管和圆形管进行数次实验, 提出了圆形管和方形管的理论公式。在国内, 荆友录等对不同截面形状的薄壁管件进行耐撞性分析, 发现方形和圆形截面管具有较好的耐撞性; 李志斌等对不同参数下的方形和圆形管件进行模拟和实验研究, 得出圆管的耐撞性优于方管; 胡俊等对多胞管的耐撞性进行分析, 并把管件的厚度作为优化设计方案; 亓昌等对多胞方管进行不同角度的撞击, 发现锥形管在不同角度下都表现出优异的耐撞性; 魏启永等通过增加肋板设计逐级吸能结构, 以提高吸能部件的耐撞性; 张涛、修瑞仙等采用不同截面形状的组合管来增加结构的能量吸收能力。以上研究主要关注薄壁吸能管件的力学性能, 对碰撞能量吸收的研究较少; 主要对方管和圆管进行分析, 截面形式较单一, 缺乏对截面形状多样性的探究; 且目前吸能构件的研究主要集中在常见形状的构件, 仿生结构设计相对较少。为获得具有优异耐撞性的新型薄壁管件, 该文对具有良好力学性能结构的仙

人掌进行仿生设计。

1 巨型仙人掌结构仿生设计

1.1 仙人掌结构分析

巨型仙人掌的生物结构在自然界中具有良好的机械性能。就结构而言, 巨型仙人掌是一种具有折角的柱状结构[见图 1(a)]。在功能方面, 巨型仙人掌生长在沙漠中, 其高度 20 m, 可达数吨, 因经常受到风沙的冲击, 具有耗散轴向和径向冲击的功能, 而车辆吸能部件也需要削弱轴向和径向的冲击能[见图 1(b)], 二者在功能上存在一定的相似性。巨型仙人掌的折角结构可承受其自身负载和外部负载的影响, 确保其稳定性, 而车辆中的吸能部件也需要承受和耗散这两种载荷, 在载荷方面两者也存在一定的相似性。



(a) 巨型仙人掌

(b) 车辆的吸能部件

图 1 车辆的吸能部件和巨型仙人掌

综上,巨型仙人掌和车辆的能量吸收组件在结构、功能和载荷方面具有相似性,可对车辆的吸能部件进行仿生设计。此外,巨型仙人掌的折角结构可有效消除冲击负荷,故重点进行巨型仙人掌的折角结构仿生设计。

1.2 仙人掌仿生薄壁管的几何模型

图 2 为巨型仙人掌的切面结构,通过观察和前面的分析可知,仿生结构的设计重点在折角结构上,故设计不同折角数量的仿生结构进行耐撞性分析。



图 2 巨型仙人掌切面结构

图 3 为参考乘用车的能量吸收部件的尺寸设计的仿生结构几何模型,其直径分别为 $D=64\text{ mm}$, $d=34\text{ mm}$,所有金属仿生薄壁管质量相同。金属仿生薄壁管的底部固定在刚性壁上,顶部冲击块的质量为 600 kg 。以 20 m/s 的速度移动,模拟外部冲击载荷对薄壁金属管模型的影响。仿生结构件均采用 AA6061-T4 铝材,材料参数见表 1,应力—应变曲线见图 4。

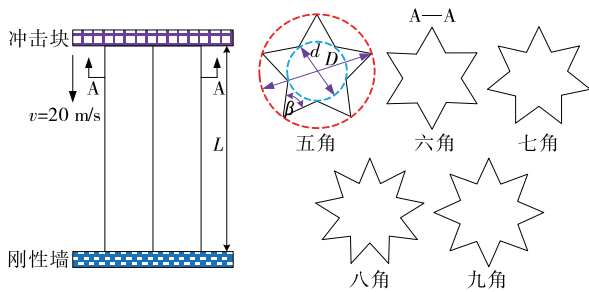


图 3 仿生结构几何模型

表 1 AA6061-T4 材料参数

| 项目 | 参数值 | 项目 | 参数值 |
|---|-------------------|--------------------------|-----|
| 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 2.7×10^3 | 屈服应力 σ/MPa | 116 |
| 弹性模量 E/GPa | 68.2 | 泊松比 ν | 0.3 |

1.3 薄壁金属管的有限元模型及实验验证

根据图 3 所示金属仿生薄壁管件几何图建立仿生结构有限元模型(见图 5)。建模和网格划分采用

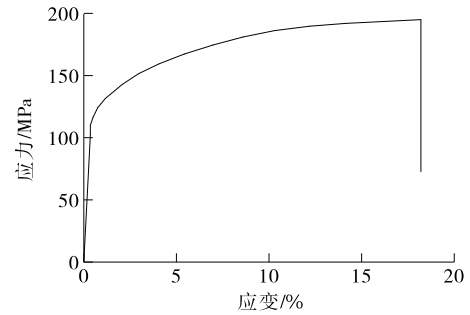


图 4 AA6061-T4 的应力—应变曲线

Belytschkoe-Tsay 壳单元,分别使用 LS-DYNA 中的 MAT_24 线弹性材料模型、MAT_20 刚性材料模型定义仿生薄壁管与刚性壁。综合考虑仿真结果的精确度和计算时间,仿生薄壁管的网格尺寸选为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。金属仿生薄壁管在碰撞过程中的接触形式如下:金属仿生薄壁管本身的接触为单侧约束,与冲击块之间为点面接触,与刚性壁的接触为固定约束。压缩时各种结构之间的静摩擦系数和动摩擦系数分别为 0.2、0.3。

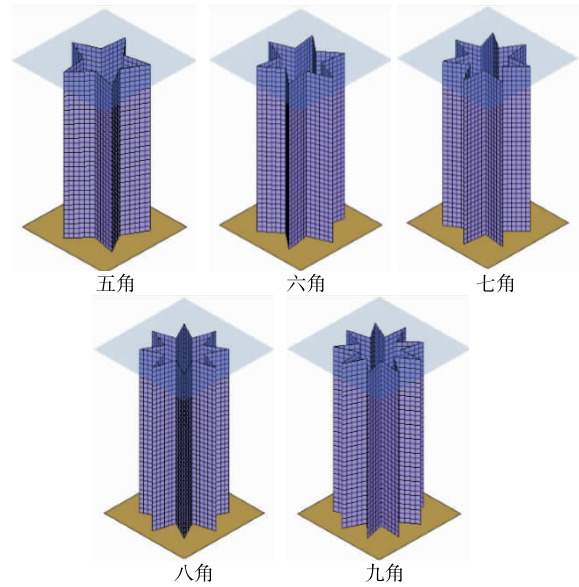


图 5 仿生结构有限元模型

为保证仿真分析的准确性,分别对六角金属仿生薄壁管和方管进行实验验证。实验时,机器设备的压缩速度为 2 mm/min ,金属管的压缩距离为 140 mm 。图 6、图 7 为实验和仿真分析结果。由图 6、图 7 可知:六角仿生薄壁管和方管的力—位移曲线实验值和仿真值的吻合程度较高;方管和金属仿生薄壁管的变形模式实验结果和仿真分析结果的相似度较高。说明所建立的有限元模型能较好地模拟实际条件下结构件的碰撞性能,可用于后续仿真研究。

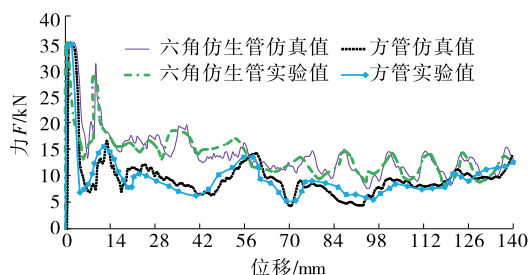


图6 仿真与实验所得管件的力-位移曲线

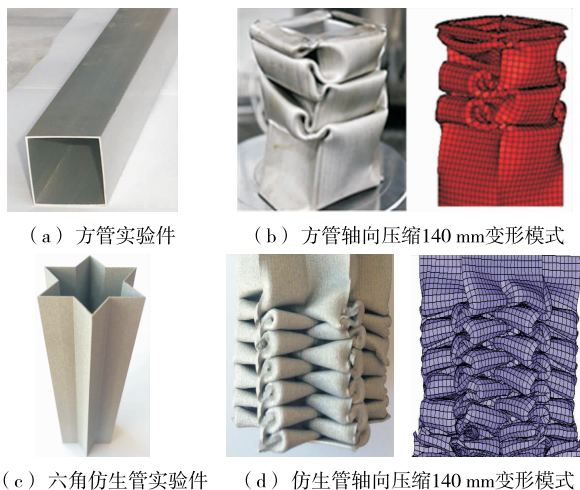


图7 仿真与实验所得管件的变形模式

1.4 薄壁管件的耐撞性评价指标

车辆碰撞期间,车身中的能量吸收构件通过挤压变形吸收冲击产生的能量,从而确保车辆内部人员的安全。常采用比吸能(Specific Energy Absorption, SEA)、峰值力(Peak Crushing Force, PCF)及碰撞力效率(Crash Load Efficiency, CLE)作为能量吸收构件耐撞性评价指标。

比吸能 SEA 为碰撞过程中由能量吸收构件吸

收的总能量 EA 与构件质量 m 的比,即 $SEA = EA/m$,是表征构件吸收能力的重要参数,其中 EA 定义为:

$$EA = \int_0^x F(x) dx \quad (1)$$

式中: $F(x)$ 为撞击时的瞬时力; x 为撞击时产生的位移。

通常,瞬时力的最大值称为峰值力 PCF ,即 $PCF = \max(F(x))$ 。较大的峰值力会对车内乘员的安全构成威胁,故应严格控制峰值力。

碰撞力效率 CLE 为平均冲击力载荷 MCP 与最大冲击力载荷之比,即 $CLE = MCP/PCF$ 。 CLE 值越大,管件的承载能力越好。

2 仙人掌仿生结构与方管耐撞性比较

根据前面的分析,仙人掌结构的折角可有效吸收冲击载荷。基于图5有限元模型,从变形模式、比吸能 SEA 、峰值力 PCF 和碰撞力效率 CLE 四方面对具有不同折角数的金属仿生薄壁管的耐撞性进行分析,并与方管结构进行对比。

具有不同折角数的金属仿生薄壁管和方管的变形模式见图8。由图8可知:1) 在140 mm压缩位移下,不同折叠角数的金属仿生薄壁管具有比方管更多的折叠层数,且其折叠变形比方管更规则。原因是仿生结构的折叠角可有效消散冲击力,使折叠波形规则堆叠,折叠波长也缩短,最终形成更好的变形模式。2) 随着金属仿生薄壁管折角数量的增加,其变形模式的规则程度先增加后降低。六角金属仿生薄壁管的变形模式最佳;九角金属仿生薄壁管的折叠层数最少,变形模式最差,导致整个管件的材

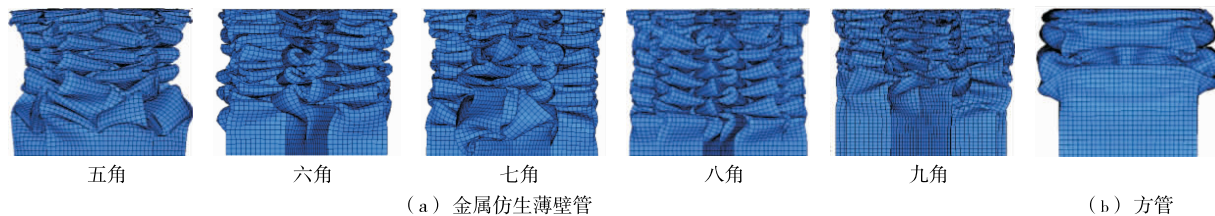


图8 具有不同折角数的仿生薄壁管和方管的变形模式

利用率低,能量吸收能力也逊色于其他仿生薄壁管。

具有不同折角数的金属仿生薄壁管和方管的比吸能 SEA 见图9。由图9可知:1) 不同折角数的金属仿生薄壁管比方管具有更高的能量吸收能力,最大高出46.1%,意味着仙人掌金属仿生薄壁管的设计可大大提高构件的能量吸收能力,也表明生物的

进化使自身结构能更好地适应自然环境。2) 不同折角数的金属仿生薄壁管中,六角仿生薄壁管的 SEA 最大,为13.8 kJ/kg;九角仿生薄壁管的 SEA 最小,为10.6 kJ/kg,在能量吸收特性方面相差21.4%。证实了图8的分析结论,也说明仿生薄壁管件的折角数量对提高其能量吸收性能至关重要。

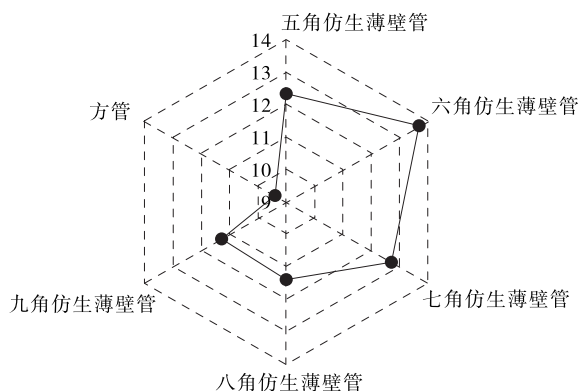


图9 具有不同折角数的仿生薄壁管与方管的比吸能
SEA(单位: kJ/kg)

具有不同折角数的金属仿生薄壁管和方管的峰值力 PCF 见图10。由图10可知:在各构件质量相同的前提下,金属仿生薄壁管和方管的 PCF 值差别不大,表明发生碰撞时金属仿生薄壁管和方管的碰撞减速度大致相等。

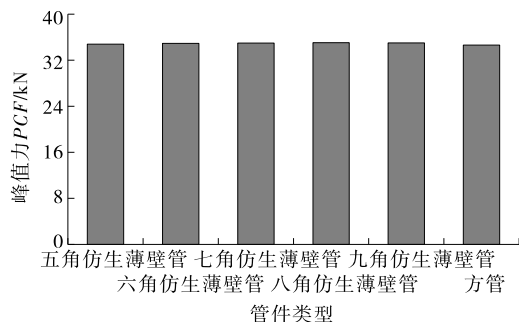


图10 具有不同折角数的仿生薄壁管与方管的峰值力 PCF

具有不同折角数的金属仿生薄壁管和方管的碰撞力效率 CLE 见图11。由图11可知:1) 金属仿生薄壁管的碰撞力效率远高于方管,最大高出45.9%。2) 金属仿生薄壁管的 CLE 随着折角数的增加呈现先增加后减小的趋势,八角、九角金属仿生薄壁管的 CLE 最小,为0.32,六角仿生薄壁管的 CLE 最大,

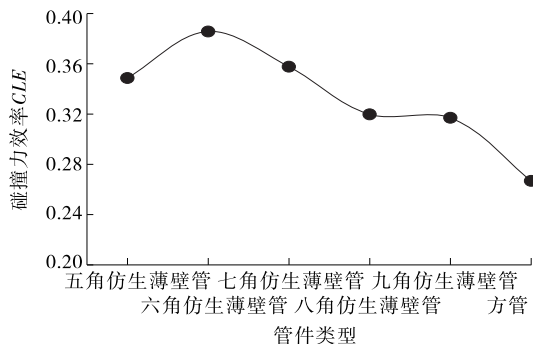


图11 具有不同折角数的仿生薄壁管与
方管的碰撞力效率 CLE

比八角、九角仿生薄壁管的高21.9%。这意味着六角金属仿生薄壁管发生碰撞时其变形最为规整,与图8的分析结论一致。

综上,六角仿生薄壁管在能量吸收、变形模式和碰撞效率方面都最佳,具有更好的耐撞性。

3 结论

通过对仙人掌结构的仿生设计,开展折角数目的耐撞性研究,通过数值分析得到以下结论:

(1) 随着金属仿生薄壁管折角数量的增加,变形模式的规则程度先增大后减小,六角金属仿生薄壁管具有最佳的变形模式。

(2) 金属仿生薄壁管的比吸能 SEA 都远高于方管,最大高出46.1%,其中六角金属仿生薄壁管的 SEA 最大。

(3) 金属管质量相同的条件下,其峰值力 PCF 相差不大。随着折角数量的增加,仿生薄壁管的碰撞力效率 CLE 先增大后减小,其中六角仿生薄壁管的 CLE 最大。

(4) 六角仿生薄壁管具有最佳的综合耐撞性,可用于车辆的能量吸收部件。

参考文献:

- [1] Langseth M, Hopperstad O S. Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions [J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(7).
- [2] Langseth M, Hopperstad O S, Berstad T. Crashworthiness of aluminium extrusions; validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9).
- [3] Fyllingen Ø, Hopperstad O S, Langseth M. Stochastic simulations of square aluminium tubes subjected to axial loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(10).
- [4] Abramowicz W, Jones N. Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5).
- [5] Jensen Ø, Langseth M, Hopperstad O S. Experimental investigations on the behaviour of short to long square aluminium tubes subjected to axial loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8).
- [6] Fyllingen Ø, Langmoen E C, Langseth M, et al. Transi-

tion from progressive buckling to global bending of square aluminium tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 48.

- [7] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 1986, 4(4).
- [8] 荆友录. 矩形截面薄壁梁轴向耐撞性的结构研究 [J]. 山东交通学院学报, 2009, 17(1).
- [9] 荆友录, 温卫东, 魏民祥. 不同截面结构薄壁直梁的轴向耐撞性研究 [J]. 机械科学与技术, 2009, 28(4).
- [10] 李志斌, 虞吉林, 郑志军. 薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究 [J]. 实验力学, 2012(1).
- [11] 胡俊, 王飞虎. 多种截面形状薄壁管轴向冲击吸能特性对比研究及优化设计 [J]. 计算力学学报, 2016, 33(1).
- [12] 亓昌, 董方亮, 杨姝. 锥形多胞薄壁管斜向冲击吸能特

性仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(24).

- [13] 魏启永, 曹立波, 崔崇桢, 等. 逐级吸能薄壁结构的耐撞性优化研究 [A]. 第五届国际汽车交通安全会议论文集 [C], 2007.
- [14] 张涛, 刘土光, 肖汉林, 等. 高速冲击下薄壁组合结构吸能特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5).
- [15] 黎勇, 吴长风, 蓝平辉, 等. 大客车正面碰撞结构耐撞性分析与改进 [J]. 客车技术与研究, 2017(1).
- [16] 陈宗渝, 邓兆祥, 徐宗俊. 微型客车耐撞性的改进方法及应用 [J]. 客车技术与研究, 2001(1).
- [17] 修瑞仙, 刘艳文, 高允峰, 等. 非对称变形模式下薄壁组合结构耐撞性研究 [J]. 长春师范大学学报: 自然科学版, 2014, 33(6).

收稿日期: 2019-06-19

(上接第3页)

通过 Canny 边缘检测, 检测出行车图像中车道线、路边标志牌的边缘, 虽然右侧一些道路条纹也被检测出, 但这对后续 Hough 变换直线检测并没有影响; 检测出所有疑似车道线直线后, 对这些拟合直线进行斜率约束筛选, 进而准确拟合出内侧车道线。

根据上述两种不同道路情况下车道线检测结果, 文中提出的夜间行车内侧车道线检测方法在直线车道、车道线完整的情况下可排除前车、路侧较小标志牌的干扰, 对行驶车辆所在的车道线有较好的检测能力。

5 结语

该文针对夜间高速公路行车特点, 先用 Canny 边缘检测结合 Hough 变换检测出所有车道线, 再通过斜率约束的方法对内侧车道线进行筛选, 检测内侧车道线。该方法具有算法简单、鲁棒性好等优点, 对高速公路夜间行驶车辆适用。

参考文献:

- [1] 贾会群, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于神经网络与最小二乘法的车道线检测算法研究 [J]. 汽车工程, 2018, 40(3).
- [2] Chiu K Y, Lin S F. Lane detection using color-based segmentation [A]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium [C], 2005.
- [3] Mohamed Alaa El-Dien Aly. Real time detection of lane markers in urban streets [A]. IEEE Intelligent Vehi-

cles Symposium [C], 2008.

- [4] 李亚娣, 黄海波, 李相鹏, 等. 基于 Canny 算子和 Hough 变换的夜间车道线检测 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31).
- [5] 胡忠闯, 陈杰, 顾兆伦, 等. 单目视觉下结构化车道实时检测 [J]. 信号处理, 2017(4).
- [6] 刘衍琦, 詹福宇. MATLAB 计算机视觉与深度学习实战 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [7] 蒲浩, 詹振炎. 公路透视图 CAD 的开发 [J]. 长沙铁道学院学报, 1997, 15(4).
- [8] 叶云. 基于机器视觉的道路标线损坏智能检测设想 [J]. 公路与汽运, 2016(3).
- [9] 高岩, 舒强, 郑楚清. 基于小波分解的车道偏离预警算法研究 [J]. 公路与汽运, 2012(5).
- [10] 张振, 肖威, 郑琦巍, 等. 汽车直道超车道路试验方案 [J]. 客车技术与研究, 2018(3).
- [11] 徐建勋, 游国平, 丁良旭, 等. 客车车道偏离报警系统性能测试与评价 [J]. 客车技术与研究, 2017(3).
- [12] 刘富强, 张姗姗, 朱文红, 等. 一种基于视觉的车道线检测与跟踪算法 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2).
- [13] 姜良超, 李传友, 殷凡青. 基于 OpenCV 的车道线检测 [J]. 摩托车技术, 2018(8).
- [14] 任桐慧, 曹为政. 基于 opencv 的视频道路车道线检测方法研究 [J]. 科技创新, 2018(23).
- [15] 王玉萍, 张晨晨. 基于 OpenCV 的车道线识别与跟踪算法 [J]. 企业科技与发展, 2018(2).
- [16] 范海瑞. 一种基于车道线检测的自动驾驶预行驶区域判别方法 [J]. 激光杂志, 2018, 39(7).

收稿日期: 2019-03-18