

汽车—电动自行车与汽车—自行车碰撞中 骑车人动力学响应对比研究^{*}

薛海涛¹, 李海波², 赵小羽¹, 胡林², 林森³

(1.上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州 545007; 2.长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114;

3.中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要: 电动自行车数量的持续增长给中国道路交通安全带来新的挑战。文中考虑电动自行车与自行车在外形、质量等方面的异同, 探究汽车—电动自行车与汽车—自行车碰撞中骑车人动力学响应差异。由中国交通事故深入研究(CIDAS)数据库分别选取 1 例汽车—电动自行车事故、汽车—自行车事故验证 PC-Crash 软件进行多刚体建模和事故再现分析的可靠性, 分析汽车—电动自行车、汽车—自行车碰撞中汽车车型、速度及碰撞类型对骑车人动力学响应的影响。结果表明, 汽车车型对自行车骑车人动力学响应有显著影响, 但对电动自行车影响较小; 骑车人头部损伤 HIC 值与汽车、两轮车速度及碰撞类型明显相关; 侧面碰撞及追尾碰撞是风险最高的两类碰撞类型; 碰撞过程中, 自行车骑车人的头部损伤风险高于电动自行车骑车人。

关键词: 交通安全; 汽车; 电动自行车; 自行车; 碰撞事故; 头部损伤 HIC; 动力学响应

中图分类号: U491.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0037-06

近年来, 受政策推广、低碳观念广泛普及等的影响, 中国电动自行车数量快速增长, 2019 年电动自行车产量为 2 273.8 万辆, 2020 年产量已达 2 548 万辆, 年增幅超过 12%。电动自行车在为居民出行带来便捷的同时, 也为道路交通安全带来了新的挑战。电动自行车与两轮车从质量、外形、行驶速度等方面与传统自行车均存在差异, 导致电动自行车事故后的动力学响应、驾驶员损伤情况等都可能与传统自行车存在差异。

奥地利 DSD 公司基于动量和冲量守恒等动力学与运动学的基本理论, 研发出 PC-Crash 事故再现仿真软件, 该软件是目前事故再现分析领域应用最广泛的软件, 能模拟多种类型事故包括二维、三维的碰撞过程, 可输入车辆速度、车辆位置、制动延迟时间及驾驶员对车辆制动踏板和加速踏板的控制数据等, 输出车辆轨迹、撞击速度、停止位置等, 具有计算时间短、建模效率高、建模结果可靠率高等特点。该文针对中国交通事故深入研究(CIDAS)数据库中的 2 起案例, 运用 PC-Crash 进行事故重建, 分析汽车—电动自行车、汽车—自行车碰撞中汽车车型、速度及碰撞类型对骑车人动力学响应的影响, 并进行差异性分析。

1 事故重建

1.1 构建重建模型

人体模型选用 PC-Crash 软件中调用的多刚体动力学模型, 该模型可对人的身高、体重、年龄, 车的外形、质量及骑车人的姿态等多方面参数进行调节。汽车模型各部分的机械特性参数分别根据欧洲新车安全评价协会(European New Car Assessment Program, E-NCAP)相似车型的碰撞试验定义, 在软件中根据车辆的型号直接调用, 并可根据实际车辆参数对其进行修改, 对于软件中无法查询的车辆, 则可根据其参数找到类似车型并修改其参数。图 1 为汽车—电动自行车、汽车—自行车的事故重建模型。



图 1 汽车—电动自行车、汽车—自行车事故重建模型

1.2 碰撞参数定义

汽车、电动自行车的最终位置由事故现场调查

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52172399; 51875049); 湖南省重点研发计划项目(2020SK2099)

得出,碰撞速度、形态、位置则由事故现场调查提供的

数据计算得到。对于汽车与两轮车重心的侧面碰撞,参考 GB/T 33195—2016 中的公式得出汽车及两轮车碰撞时刻的行驶速度,计算公式如下:

$$v_1 = \frac{m_1 \cos \theta_1 \sqrt{2g\phi_1 s_1} + \sqrt{2g} m_p \phi_p \cos \theta_p (\sqrt{h + s_p/\phi_p} - \sqrt{h})}{m_1 + m_p} \times 3.6 \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{m_1 \sin \theta_1 \sqrt{2g\phi_1 s_1} + \sqrt{2g} m_p \phi_p \sin \theta_p (\sqrt{h + s_p/\phi_p} - \sqrt{h}) + m_2 \sqrt{2g\phi_2 k_2 s_2}}{m_2} \times 3.6 \quad (2)$$

式中: v_1 为两轮车的行驶速度(km/h); m_1 、 m_2 、 m_p 分别为两轮车、汽车、骑车人的质量(kg); θ_1 、 θ_p 分别为两轮车、骑车人被抛出的角度; ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_p 分别为两轮车、汽车、骑车人的纵滑附着系数; s_1 、 s_2 、 s_3 分别为两轮车、汽车、骑车人碰撞后的滑移距离(m); v_2 为汽车的行驶速度(km/h); k_2 为汽车附着系数修正值。

针对不同接触情况,汽车、两轮车(包含电动自行车及自行车)、路面、骑车人之间会有不同摩擦系数,具体取值依据车辆外形、材料及路面实际情况确定(见表1)。

表1 不同路面的接触面摩擦系数

工况	摩擦系数
车辆—地面	0.55~0.75
汽车—两轮车	0.3~0.5
骑车人—汽车	0.3~0.5
骑车人—两轮车	0.4~0.5
骑车人—地面	0.5~0.7

根据 CIDAS 数据统计得到骑车人头部是最容易受伤的位置。头部损伤采用头部损伤标准 HIC 进行评价, $HIC = 1\ 000$ 为人头部的耐受界限。计算公式如下:

$$HIC = \left[(t_1 - t_2) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} \right]_{\max} \quad (3)$$

式中: $t_2 - t_1$ 为 HIC 从碰撞接触开始到达最大值时的时间间隔; $a(t)$ 为头部重心位置的合成加速度。

2 重建可行性验证

2.1 案例描述及初步分析

从 CIDAS 数据库中分别选出 1 起汽车—电动自行车、汽车—自行车正面碰撞事故进行 PC—Crash 可行性验证。

2.1.1 汽车—电动自行车事故案例

电动二轮车由东北往西南沿道路 A 行驶,行至道路交叉口时,由于未按照交通指示闯红灯行驶,车辆右侧前部与由西北往东南沿道路 B 行驶的轿车

前部左侧发生碰撞,造成两车受损、电动自行车骑车人受伤。

事故电动自行车不带脚蹬,后驾座无载人现象。事故发生发生在城市交叉口,汽车驾驶者周围无障碍物遮挡视野,汽车驾驶员驾驶前后无饮酒现象。事故发生前后,天气良好,可见度高,路面平直潮湿。根据 2 名驾驶者的回顾,事故发生时轿车采取了刹车及右转的制动措施,电动自行车餐区刹车制动。碰撞前汽车行驶速度约为 50 km/h,电动自行车的行驶速度约为 30 km/h。事故现场见图 2(a)。



(a) 汽车—电动自行车事故现场



(b) 汽车—自行车事故现场

图2 事故现场示意图

2.1.2 汽车—自行车事故案例

面包车由东向西沿 A 路左转,由于视线遮挡,车辆左侧前部与沿 B 路由南向北右转自行车前部发生碰撞。造成两车损坏、自行车骑车人受伤。

事故自行车为脚蹬自行车,后座无载人现象。路口有树林遮挡汽车驾驶者视野,汽车驾驶员驾驶前后无饮酒现象。事故发生地点为乡间,天气良好,可见度高,路面平直粗糙。根据 2 名驾驶者的回顾,

事故发生时未采取任何安全防护措施防止事故发生。碰撞前汽车行驶速度约为 20 km/h,自行车的行驶速度约为 15 km/h。事故现场见 2(b)。

2.2 人员损伤及车辆受损情况

2.2.1 汽车—电动自行车事故案例

电动自行车骑车人左锁骨肩峰端骨质断裂,临近软组织肿胀;右侧腓骨近端骨折断裂,断端稍位移。汽车挡风玻璃中部偏左的位置明显可见由中心向四周扩散的裂纹[见图 3(a)];电动自行车前部外壳脱落,左右后视镜脱落,右侧中部靠后外壳脱落并严重受损[见图 3(b)]。



(a) 汽车-电动自行车事故中汽车受损情况



(b) 汽车-电动自行车事故中电动自行车受损情况



(c) 汽车-自行车事故中汽车受损情况



(d) 汽车-自行车事故中自行车受损情况

图3 人员损伤及车辆受损情况

2.2.2 汽车—自行车事故案例

自行车骑车人右锁骨粉碎性骨折,头面部擦伤。汽车左前大灯上面发动机盖见明显凹陷痕迹,左前轮外壳见明显刮擦痕迹[见图 3(c)];自行车前轮及后轮均见明显凹陷弯折,前叉见明显凹陷,链条外壳见弯折[见图 3(d)]。

2.3 事故重建

2.3.1 汽车—电动自行车事故重建

根据 CIDAS 数据,轿车在制动并右转后发生碰撞。仿真中设定汽车碰撞时刻的速度为 46 km/h,电动自行车碰撞时刻的速度为 30 km/h,汽车左侧与车辆右侧发生碰撞。仿真结果中电动自行车及骑车人的抛距与实际情况的比较见表 2。电动自行车、骑车人抛距的仿真结果与实际结果的误差小于 5%,说明仿真模型与实际情况吻合。

2.3.2 汽车—自行车事故重建

根据 CIDAS 数据,轿车在碰撞前未采取制动措

表2 汽车—电动自行车碰撞中抛距及仿真误差

项目	电动自行车抛距/m	骑车人抛距/m
仿真结果	11.25	19.36
实际结果	11.38	18.95
误差/%	1.14	2.16

施。仿真中设定汽车碰撞时刻的速度为 20 km/h,自行车碰撞时刻的速度为 15 km/h,汽车左侧大灯处与自行车前部发生碰撞。仿真结果中自行车及骑车人的抛距与实际情况的比较见表 3。自行车、骑车人抛距的仿真结果与实际结果的误差小于 5%,说明仿真模型与实际情况吻合。

表3 汽车—自行车碰撞中抛距及仿真误差

项目	自行车抛距/m	骑车人抛距/m
仿真结果	0.5	1.49
实际结果	0.5	1.43
误差/%	0	4.2

3 碰撞参数对重建结果的影响分析

3.1 汽车车型对骑车人动力学响应的影响

根据汽车结构及统计数据,常见的 3 种汽车车型分别为普通三厢轿车(Sedan)、多功能汽车(Multi-purpose Vehicle, MPV)、运动型多功能汽车(Sport Utility Vehicle, SUV),其外形见图 4。



(a) Sedan



(b) MPV



(c) SUV

图4 常见汽车车型的外形

分别基于三类不同车型进行汽车—电动自行车、汽车—自行车事故重建,骑车人头部碰撞速度与汽车碰撞速度的关系见图 5。由图 5 可知:无论是电动自行车,还是自行车,骑车人头部碰撞速度均随

着汽车碰撞时刻速度的增加而增加;对于不同车型,两者间拟合线性趋势相近,且汽车碰撞速度与骑车人头部碰撞速度呈线性相关,汽车—电动自行车拟合直线的决定系数 R^2 分别为 0.979 09、0.998 67、0.998 16,汽车—自行车拟合直线的 R^2 分别为 0.995 71、0.999 81、0.998 77。不同汽车车型在汽车—电动自行车与汽车—自行车骑车人头部碰撞速度与汽车碰撞速度的相关性方面表现出一致性,相关强度为 $\text{SUV} > \text{MPV} > \text{Sedan}$,但差别较小。

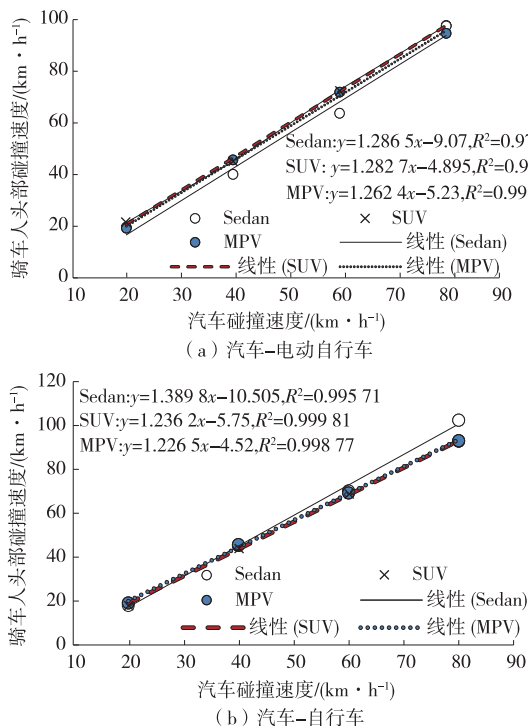


图5 骑车人头部碰撞速度与汽车碰撞速度的关系

骑车人头部 HIC 值见图6。骑车人的损伤来源主要是碰撞过程中汽车的撞击及骑车人落地后地面的撞击。由图6可知:骑车人头部损伤 HIC 值随着汽车碰撞速度的增加而增加。对于不同车型,无论是低速还是高速状态,Sedan 车型对骑车人头部 HIC 值的影响均更大;低速行驶的 MPV 与 SUV,骑车人头部 HIC 值相近,但速度大于 60 km/h 时,SUV 会对骑车人头部造成更大的损伤;对于电动自行车与自行车,SUV 会对电动自行车骑车人头部造成更严重的伤害,Sedan 及 MPV 车型更易对自行车骑车人造成更严重的伤害;汽车行驶速度为 55~70 km/h 时,各类车型碰撞骑车人头部 HIC 值均达到 1 000 的安全界限。

3.2 两轮车速度对骑车人动力学响应的影响

选用最典型的 Sedan 汽车与两轮车碰面碰撞的

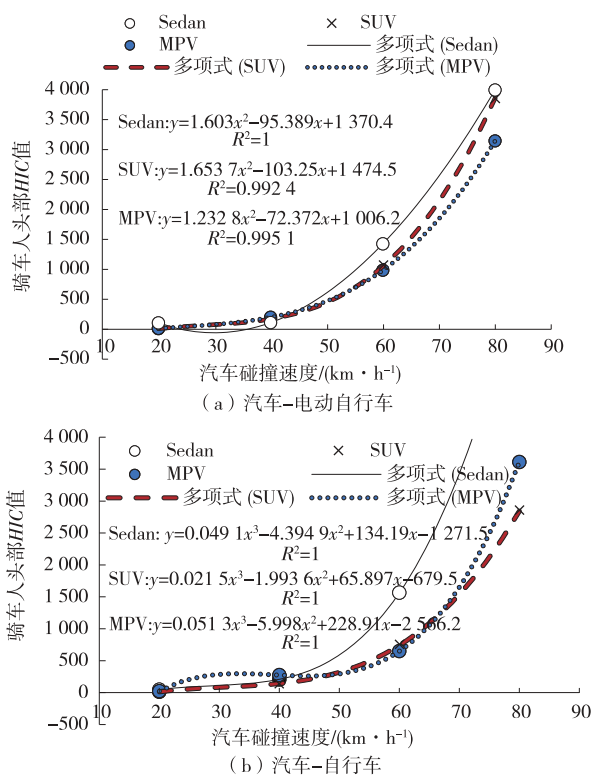


图6 骑车人头部损伤 HIC 值与汽车碰撞速度的关系

工况进行事故重建,探究自行车与电动自行车在不同行驶速度条件下骑车人头部损伤 HIC 值与两轮车碰撞时刻速度之间的关系。根据文献[11—12],自行车的一般行驶速度为 5~30 km/h,国内 48 V 电动自行车的一般最高行驶速度可达 45 km/h。中国城市机动车辆限速为 40~60 km/h,故将 Sedan 速度设置为 50 km/h。重建结果见图7。由图7可知:骑车人头部 HIC 值随着两轮车碰撞速度的增加而增加;同一速度下,自行车骑车人头部 HIC 值比电动自行车骑车人头部 HIC 值更大;自行车碰撞速度在 10 km/h 时,骑车人头部 $HIC > 1\,000$;电动自行车碰撞速度约为 12 km/h 时,骑车人头部 HIC 值也达到 1 000。

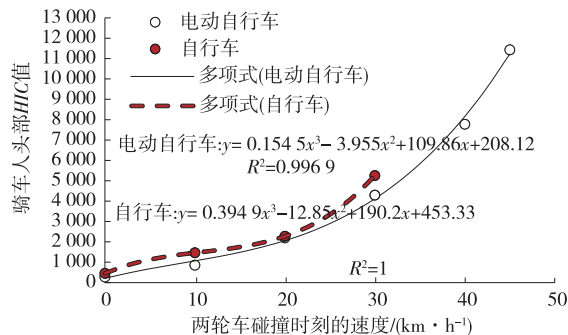


图7 骑车人头部损伤与两轮车碰撞速度的关系

3.3 碰撞类型对骑车人动力学响应的影响

选用最典型的 Sedan 车型进行不同碰撞类型碰撞过程中骑车人动力学响应研究,其中碰撞类型主

要有正面碰撞、侧面碰撞、追尾碰撞及迎面正碰(见图8)。以电动自行车为例,骑车人头部损伤与碰撞类型的关系见图9。



图8 碰撞类型示意图

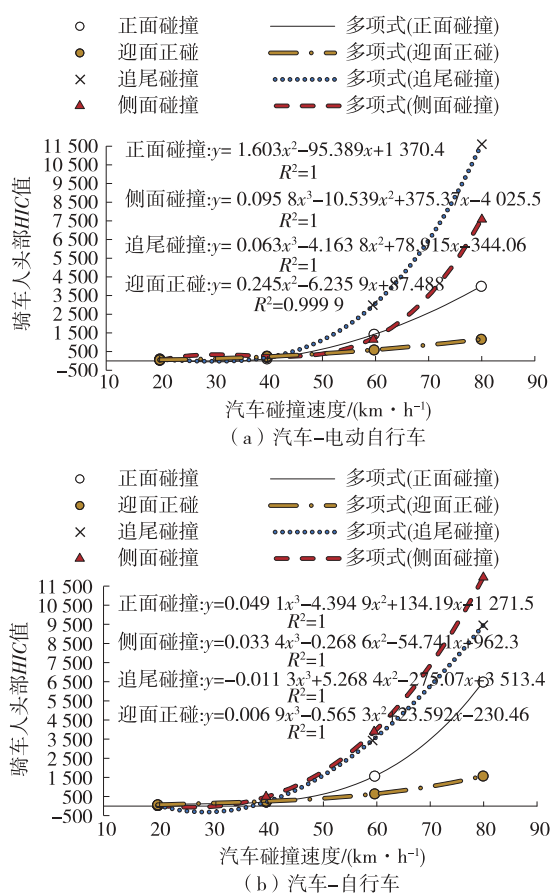


图9 骑车人头部损伤与碰撞类型的关系

由图9可知:不同碰撞类型下骑车人头部损伤HIC值与汽车碰撞速度正相关。对于电动自行车,汽车速度低于40 km/h时,碰撞类型对骑车人头部损伤的影响较小;汽车速度大于40 km/h时,追尾碰撞对骑车人头部造成的损伤明显高于其他类型,

且这种差异随着汽车速度的增加而增大;汽车速度大于60 km/h时,侧面碰撞头部损伤值逐渐高于正面碰撞及迎面正碰。对于自行车,车速大于20 km/h时,侧面碰撞对骑车人头部造成的损伤逐步大于其他碰撞类型,且这种差距随车速的增加而增大,其次分别是追尾碰撞、正面碰撞、迎面正碰。对于汽车—电动自行车及汽车—自行车,迎面正碰均是所有碰撞类型中损伤风险最低的碰撞形式。

3.4 讨论

通过对不同车型下汽车—电动自行车及汽车—自行车骑车人动力学响应的影响研究,发现不同车型条件下电动自行车和自行车骑车人头部碰撞速度与汽车碰撞速度近似正线性相关,且趋势均相近,但电动自行车与自行车骑车人头部HIC值存在差异;电动自行车不同车型碰撞下骑车人头部HIC值随汽车碰撞速度变化的趋势相近,但汽车—自行车骑车人头部HIC值曲线趋势速度为Sedan>MPV>SUV。汽车行驶速度为55~70 km/h时,各车型碰撞骑车人头部HIC≥1000,为确保两轮车骑车人的安全,汽车正常行驶速度建议不超过50 km/h。除SUV车型外,电动自行车骑车人头部损伤风险更低。

根据两轮车行驶速度对骑车人动力学响应影响的研究结果,同一速度碰撞条件下自行车骑车人头部损伤值更大,且当两轮车碰撞速度>30 km/h时差异更明显。自行车碰撞速度为10 km/h、电动自行车碰撞速度约为12 km/h时,骑车人头部HIC值均达到头部耐受极限1000,建议两轮车骑车人出

行佩戴头盔,且行驶速度控制在 15 km/h 内,速度越低,碰撞发生后头部损伤 HIC 值越低。

不同碰撞类型对两轮车骑车人头部损伤 HIC 值有显著影响。侧面碰撞及追尾碰撞是风险最高的碰撞类型,且侧面碰撞在汽车—自行车事故中变化趋势最明显;除迎面正碰外,在汽车—电动自行车及汽车—自行车事故中,其他三类碰撞类型均在汽车碰撞速度为 50 km/h 左右时骑车人头部 HIC 达到 1 000 的耐受极限,故汽车正常行驶速度建议不要超过 50 km/h。除迎面正碰外,自行车骑车人头部损伤均大于电动自行车骑车人。

4 结论

通过对两例 CIDAS 数据库事故案例的再现分析,运用 PC—Crash 进行汽车—电动自行车、汽车—自行车事故重建及骑车人动力学响应分析,得到以下结论:1) 汽车车型对自行车骑车人头部损伤有显著影响,但对电动自行车骑车人头部损伤的影响较小;汽车、两轮车行驶速度及碰撞类型对骑车人头部损伤均有显著影响。2) 汽车速度大于 55 km/h 时,碰撞极可能使骑车人头部损伤 HIC 值大于 1 000 的耐受极限。3) 自行车碰撞速度为 10 km/h、电动自行车碰撞速度约为 12 km/h 时,骑车人头部 HIC 值均达到头部耐受极限 1 000,两轮车驾驶员出行需佩戴头盔。4) 侧面碰撞及追尾碰撞是风险最高的两类碰撞类型。5) 碰撞过程中,自行车骑车人的头部损伤风险高于电动自行车骑车人。

文中仅对汽车车型、速度、碰撞类型等因素展开研究,但实际案例中影响骑车人动力学响应的因素很多。此外,研究中仅考虑了汽车前部与两轮车发生碰撞的事故,实际中存在两轮车追尾汽车、两轮车与汽车侧面发生碰撞等,这些碰撞形式都可能产生不同的结果输出。因此,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国工信部.2019 年及 2020 年自行车行业运行情况[EB/OL].https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/xfpgy/qg/art/2020/art_4feb60c784804a59ad8fd8fa6fc5c931.html.
- [2] 丁怡婷.消除电动自行车的安全隐患[N].人民日报,2021—10—21(7).
- [3] 邹铁方,易亮,尹若愚,等.PC—Crash 中 2 种车辆侧滑事故仿真方法对比研究[J].中国安全科学学报,2016,26(7):80—84.
- [4] MARTINEZ/ L, GUERRA L, FERICHOLA G, et al. Stiffness corridors of the European fleet for pedestrian simulations [C]//The 20th ESV Conference, Lyon France, 2007.
- [5] 公安部道路交通安全管理标准化技术委员会.道路交通事故车辆速度鉴定:GB/T 33195—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [6] 阳兆祥.交通事故力学鉴定教程[M].南宁:广西科学技术出版社,2002:122—123.
- [7] 胡林,程启寅,黄晶,等.轿车—自行车事故中骑车人头部损伤的影响因素研究[J].汽车工程,2018,40(11):1294—1301.
- [8] 王鑫,张道文,冉启林,等.电动自行车骑车人与汽车碰撞的动力学响应研究[J].中国安全科学学报,2016,26(6):152—156.
- [9] 孙航,孙悦,解瀚光.基于 CIDAS 数据库的先进驾驶辅助系统安全效果研究[J].中国汽车,2019(11):46—51.
- [10] 聂进,杨济匡.基于汽车—自行车碰撞事故重建的骑车人动力学响应和损伤研究[J].汽车工程,2015,37(2):160—167.
- [11] 付明春,林春江,刘文顺.小轿车与自行车侧撞的运动分析[J].焦作大学学报,2011,25(4):93—94.
- [12] 苏文.各国电动自行车最高车速与功率标准差异比较[J].电动自行车,2010(4):41.

收稿日期:2021—04—04

关于假冒杂志网站和邮箱的声明

目前互联网上出现以《公路与汽运》杂志名义建立的官方网站和投稿邮箱,它们盗用“公路与汽运”的名称,非法向外征稿并收取审稿费、版面费,严重损害了本刊的权益和声誉。为避免广大作者和读者上当受骗,本刊郑重声明:

1 本刊没有官网,也从未以任何方式授权其他单位和个人在互联网上建立网站,互联网上以“公路与汽运”名义建立的网站都是假冒的,此类网站上发布的信息及由此造成的一切后果均与本刊无关。

2 本刊唯一的投稿邮箱是 gongluyuqiyn@163.com,除此之外的任何以本刊名义设立的邮箱都是假冒的。本刊目前没有收取审稿费。

3 本刊强烈谴责这种假冒《公路与汽运》杂志名义、损害本刊和作者、读者权益的违法行为,并保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明。

公路与汽运