

基于摩擦系数优化的车人碰撞事故再现研究

柴象海¹, 金先龙¹, 张晓云¹, 侯心一²

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海市公安局 交通警察总队, 上海 200070)

摘 要: 行人摩擦生物力学特性对车人碰撞事故再现结果有直接的影响, 但由于人体结构的复杂性和交通事故的突发性特点, 导致行人与汽车、道路的接触特性很难通过试验的方式获取, 本文探讨了基于仿真试验的车人碰撞事故行人摩擦生物力学特性分析方法, 并通过蒙特卡罗方法验证摩擦特性的可靠性. 将该特性应用于车人碰撞类型的交通事故过程再现进行验证, 仿真结果表明: 所得到的摩擦特性精度高、可靠性高, 能够满足车人碰撞交通事故再现对行人摩擦特性精度要求, 为交通事故中所涉及的行人摩擦生物力学特性分析提供了新的途径.

关键词: 事故再现; 摩擦生物力学特性; 可靠性分析; 数值仿真

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1004 - 0595 (2009) 02 - 0168 - 06

车人碰撞类型交通事故再现的核心是通过汽车的刹车距离和行人抛落位置, 预测碰撞点位置及碰撞时刻汽车车速和行人的行为, 为交通事故责任认定提供科学依据^[1]. 其中行人摩擦生物力学特性是车人碰撞事故再现的关键因素, 直接影响行人与汽车、行人与道路的接触状态, 进而影响到行人与汽车碰撞后的运动轨迹, 以及行人的运动形态和滑移距离. 车人碰撞交通事故再现中的行人摩擦生物力学特性主要包括行人与汽车、行人与道路的摩擦系数, 行人接触特性曲线定义等.

美国国家高速公路安全局 (NHTSA) 和日本汽车研究所 (JARI) 给出了各自在进行车人碰撞仿真时所采用的标准百分位行人假人模型^[2-3]. 标准假人定义了行人假人的接触和摩擦生物力学基本特性, 符合道路交通事故普遍统计规律, 但针对特定交通事故案例, 标准假人与汽车和道路的摩擦系数没有统一的定量标准^[4].

传统车人碰撞交通事故数值模拟, 首先要基于实践经验或判断确定假人与汽车和假人与道路的摩擦系数数值, 然后根据这些参数对碰撞问题进行建模及数值求解, 从而得到事故发生过程和碰撞终止状态, 如果在模拟过程中发现问题, 通过改变输入参数来修正模型, 重新进行模拟, 直至得到满意的仿真

结果, 但远远不是真实事故过程^[5]. 同时, 仿真通常无法考虑和评价摩擦特性数值变化所造成的某些不可避免的不定性和变化性.

本文以标准行人假人模型为基础, 通过仿真试验 (Design of Experiment, DOE) 的方法, 对假人与汽车和假人与道路的摩擦特性进行分析. 首先由经验取值作为输入变量, 进行仿真试验, 构建响应面模型 (Response Surface Modeling, RSM), 在响应面模型上分析满足优化目标的摩擦系数取值, 以此为输入重新进行事故仿真; 然后对新的仿真结果进行可靠性分析, 定量描述摩擦系数变动引起仿真输出变化范围, 以此确定所得到的行人摩擦特性的可靠性; 最后通过仿真结果与真实交通事故案卷对比分析, 验证车人碰撞事故行人摩擦特性分析所得到的摩擦系数的精度.

1 生物力学假人模型摩擦特性定义

生物力学假人摩擦特性包括行人与汽车、行人与道路的摩擦系数、行人接触特性曲线定义等. 其中标准行人假人模型选用椭球体假人, 预先定义了身体各部位的接触特性, 即身体各部位的变形与受力响应曲线^[6]. 而假人模型与外部环境之间的摩擦特性则需要根据不同的情况进行相应的定义.

收稿日期: 2008 - 10 - 14; 修回日期: 2008 - 12 - 15; 联系人: 柴象海, e-mail: chaixianghai@sjtu.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2007AA11Z234); 国家自然科学基金资助项目 (50705058, 50875166); 教育部博士点基金资助项目 (20070248113).

作者简介: 金先龙 (1961 -), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事汽车被动安全性及高性能计算研究.

假人摩擦特性由内部摩擦特性和外部摩擦特性构成,其中所有内部摩擦接触特性标准假人模型已经在试验的基础上做了定义;外部摩擦特性,即假人模型和环境之间的摩擦特性则需要根据事故案卷描述进行定义。

为方便假人模型与外界摩擦特性的定义,不同类型的标准假人模型统一预定义了身体各部位的组件,作为与外界接触的响应单元,可以与接触特性类似,定义假人模型各部位与环境之间的摩擦特性。对于车人碰撞类型的交通事故再现,行人与外界环境之间的摩擦特性在 CONTACT 函数中定义,行人与汽车之间的摩擦特性定义,需要选取行人与汽车接触部位来定义行人和汽车的接触组件;行人与道路之间的摩擦特性,假人模型都是作为一个整体发挥作用,通常情况下,只对整体摩擦特性进行定义。

椭球体假人模型与外界摩擦特性定义随着应用场景的不同而有所差别,对假人与外界环境之间的摩擦系数选取原则:

假人模型和多刚体环境或有限元体环境之间的摩擦特性,均采用假人表面特征类型定义。

假人模型与可变形柔性多体环境之间的摩擦特性,应该采用组合式特征定义。

假人模型与外界环境之间的接触函数用于取代假人模型与环境之间的摩擦特性,因此车人碰撞事故再现应用中,通常使用假人接触特性函数,它可能会导致不准确的接触载荷转移。

2 行人摩擦特性对事故再现的影响

2.1 行人摩擦特性对仿真结果贡献度分析

以经验取值作为输入变量,对事故过程进行仿真计算,以初步的仿真计算结果作为初始条件,建立优化分析流程,通过仿真试验,进行行人摩擦特性与仿真结果相关性分析,并构建响应面模型,在响应面模型上分析行人摩擦特性对事故仿真结果的贡献度和分布特性,最终得到满足优化目标的摩擦系数最可能的取值及取值范围。

车人碰撞事故仿真输出为汽车停止位置和行人抛落位置,其中由于汽车质量远大于行人,受行人摩擦特性影响可以忽略,相关度为零,理论上汽车刹车距离随行人摩擦特性变化为定值。

行人抛落位置由横向抛距和纵向抛距组成,横向抛距非行人受力方向,其值大小与摩擦系数相关度较小,所以行人摩擦系数变化对行人横向抛距影响较小。行人纵向抛距为车人碰撞事故仿真的主要

输出,也是交通事故案件分析和责任认定的主要依据,其值直接受行人摩擦系数变化影响,精确的摩擦系数取值成为影响整个仿真过程的关键因素。

2.2 行人摩擦系数蒙特卡罗分析

以仿真试验分析得到的精确行人与地面和行人与汽车摩擦系数为初始输入条件,重新定义某个或某几个输出变量的取值范围,输入变量在以最可能取值为中心,以与取值范围重合的 3 σ 为取值范围,按照正态分布取点,进行仿真运算,以此定量分析摩擦特性数值变化所造成的仿真结果的变动,通过计算结果中可行输出变量的比例,验证行人摩擦系数取值对仿真结果的可靠性^[7]。

可靠性分析以通过仿真试验构建的响应面模型分析得到的行人摩擦特性为输入,以汽车刹车距离和行人抛落距离为输出的仿真计算结果,因此,通过可靠性分析得到的是在特定的行人摩擦特性下,车人碰撞事故仿真计算的可靠性。

通过可靠性分析,可以验证通过仿真试验得到的行人摩擦特性对仿真结果影响的可靠性,为行人摩擦特性取值精度提供科学的判定依据。如果可靠性不能满足交通事故仿真要求,添加 $y+3\sigma$ 作为输出变量,以此为约束,以原优化结果为输入,进行新的仿真计算,对新的仿真结果进行 FOSM 可靠性分析,重新定义行人摩擦系数中心点及取值范围,在最优结果的基础上保证结果的可靠性。

3 实例与分析

事故再现是一个逆向动力学推导问题,也可以看成一个不断反馈优化的问题^[8]。一般可根据事故现场遗留信息和人体伤害做初步反向推断得到碰撞初始时刻的一个假定情形;然后将此假定的正向仿真碰撞结果与事故实际情况相比较;修正初始假定后重复上述步骤至结果最符合事故现场实际。

本文针对真实车人碰撞事故案例,首先通过上述过程进行初步事故再现,以此为初始输入,由仿真试验获取假人与汽车和假人与道路的摩擦特性,然后通过可靠性分析,对摩擦系数变动引起仿真输出变化范围进行定量描述,确定所得到的行人摩擦特性的可靠性,并通过仿真结果与真实交通事故案卷进行对比分析,与事故再现结果进行相互验证。

3.1 案情简介

以某起大客车与行人碰撞事故为例,事故车辆由北向南行驶,至事发地点,大客车车头正面撞倒在人行横道由东向西行走的某行人,致行人死亡。

现场勘测结果包含大客车左前轮长 11.54 m 制动印,右前轮长 11.74 m 制动印,车辆停止位置和行人倒地位置如图 1 所示.事故造成一名男性行人死亡

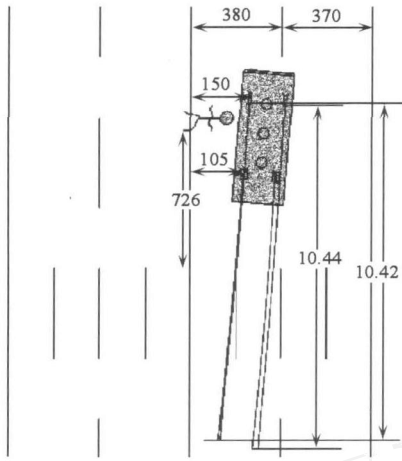


Fig 1 Scene of the accident

图 1 事故现场图

亡,行人头部撞击大客车前挡风玻璃左侧,下肢、躯干与前保险杠接触.汽车前保险杠明显变形,前挡风玻璃左侧呈放射状破损.事发地点限速 50 km/h

3.2 事故仿真建模与计算

事故仿真焦点为碰撞时刻汽车车速,及碰撞点位置.交通事故勘测现场图所示,大客车刹车印记经过人行横道线,碰撞点位置是否在人行横道范围内是本起事故责任认证的重要依据,此外碰撞时刻大客车车速是否超过 50 km/h,作为判定大客车是否超速行驶的依据.

碰撞中,大客车质量 15 800 kg 与行人质量 63 kg 相比,具有质量大、动态惯量大等特点,在充分制动后与行人碰撞时运动状态改变小.因此,汽车模型可以简化为由多刚体和铰链组成.如图 4 所示,建立大客车七自由度多刚体模型,4 个轮胎垂直方向及整车质心的三个平移方向,包括前挡风玻璃、前保险杠及车灯、车身和车轮等部分.

根据车辆鉴定报告事故汽车制动试验,车轮与水平路面摩擦系数取 0.75.行人与汽车摩擦系数和行人与道路摩擦系数根据经验取值,根据事故案卷事发地点为干沥青路面,行人与道路摩擦系数取值范围 0.4~0.8,例中取 0.5,行人与道路摩擦系数取值范围 0.3~0.7,例中取 0.435.建立三维路面多刚体模型,采用 TNO 成人有限元头部撞击器测取路面接触刚度特性^[9],路面接触特性参数为变形 0.000~0.035 mm 对应受力 0~10 000 N,将此刚度特性添

加在多刚体路面模型上,利用多刚体动力学计算方法计算刚体间接触产生的穿透模拟变形.

该起交通事故碰撞初始时刻根据汽车风挡玻璃左前侧碰撞痕迹和停止位置重心坐标 (3.15, 8.96),行人受撞击伤害部位和行走方向等信息综合判定,经多次修正,取大客车碰撞时刻车速 11.84 m/s.行人由东向西行走、车人摩擦系数经验由取值 0.45、人地摩擦系数由经验取值 0.75,使仿真再现结果能与事故实际情况初步吻合,其碰撞初始时刻人车位置和行人初始形态如图 2 所示.

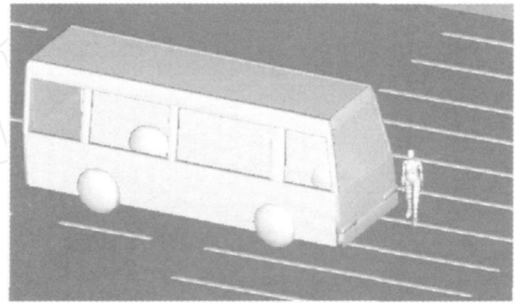


Fig 2 Initial points of vehicle and pedestrian

图 2 车人初始位置

3.3 行人摩擦生物力学特性影响分析

以大客车与行人碰撞初步仿真参数设置为初始条件,定义人与地面摩擦系数、车与人摩擦系数为优化输入变量,进行行人摩擦生物力学特性分析,建立优化分析流程.其中,优化输出变量包括汽车刹车距离、行人纵向抛距、行人横向抛距,以行人头部损伤 HC 值为约束条件,优化目标函数为汽车刹车距离、行人纵向抛距、行人横向抛距与现场勘测实际距离偏差最小,即:

$$MN\{((\$ \text{mandispy} \$ - 0.75)/0.75)^2 + ((\$ \text{mandispx} \$ - 10.16)/10.16)^2 + ((\$ \text{cardisp} \$ - 10.42)/10.42)^2\} \quad (1)$$

其中, $\$ \text{mandispy} \$$ 和 $\$ \text{mandispx} \$$ 为行人纵向和横向抛距, $\$ \text{cardisp} \$$ 为汽车刹车距离.

对行人摩擦特性优化分析采用拉丁超立方抽样方法 (Latin - Hypercube Design, LHD) 进行仿真试验. LHD 是一种多维分层抽样方法,首先定义参与计算的抽样数目为 100 次;然后把人与地面摩擦系数、车与人摩擦系数的取值区间等概率分为 100 列,对每一列仅抽取一个样本,各列中样本位置随机.

拟合 100 组仿真试验结果,采用最小二乘法建立响应面模型,如图 3 所示.图中水平坐标为人与地面摩擦系数、车与人摩擦系数,垂直坐标分别为行人

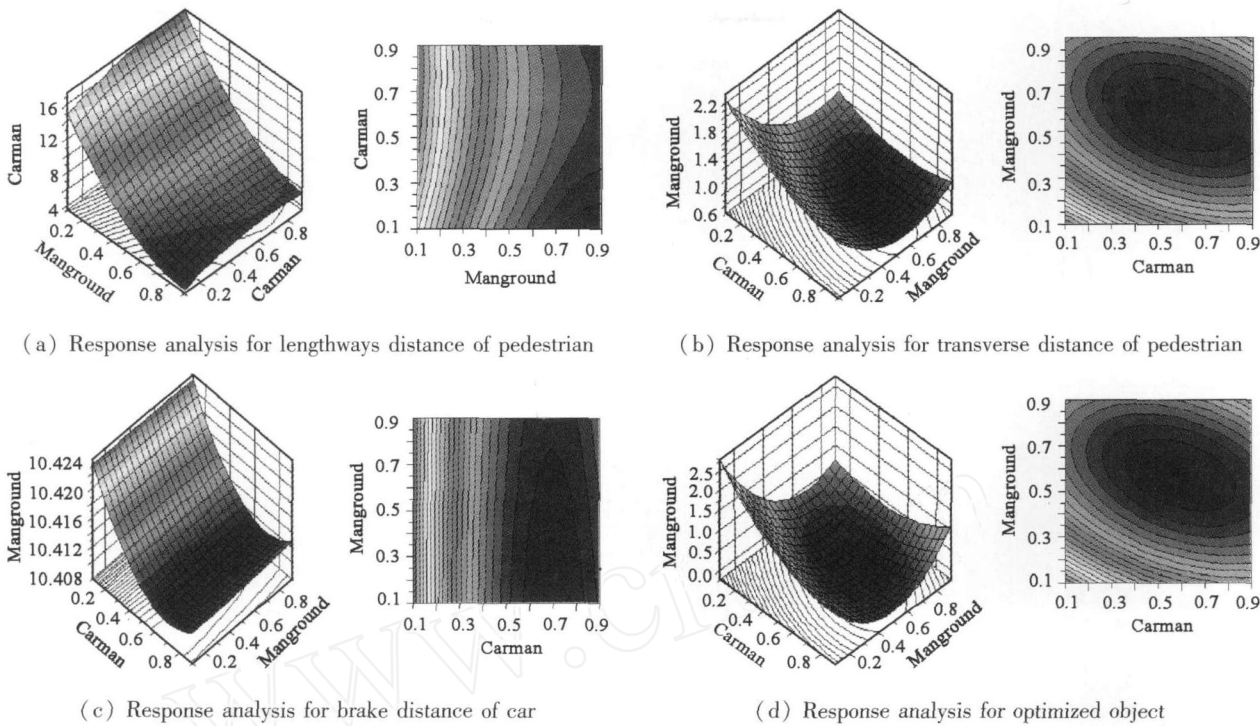


Fig 3 Pedestrian response surface model of friction

图 3 行人摩擦特性响应面模型

抛距、汽车刹车距离和优化目标,图示响应面模型即优化目标随行人摩擦特性变化情况。

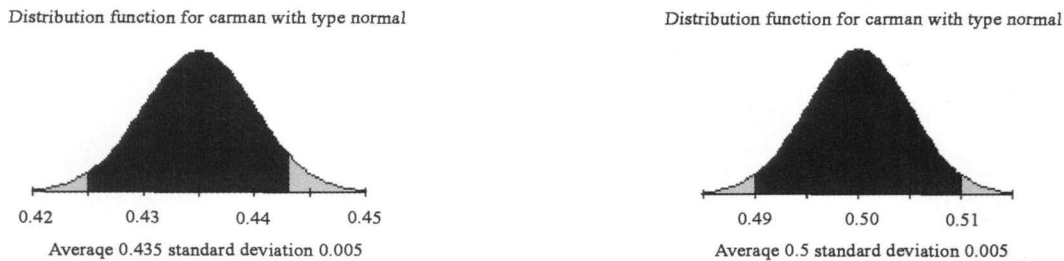
对行人摩擦特性响应面模型进行分析,行人与地面摩擦系数影响行人纵向和横向抛距,由图 3 (a)、(b)得到行人与地面摩擦系数取值区间,理论上不会对汽车刹车距离产生影响,与图 3 (c)汽车刹车距离响应面模型相符;行人与汽车摩擦系数主要影响行人横向抛距,由图 3 (b)得到行人与汽车摩擦系数取值区间,同时与汽车刹车距离呈线性关系,但相关度较小,对行人纵向抛距影响可以忽略,与图 3 (a)、(c)相符;图 3 (d)优化目标响应面模型是对前三个响应面模型的叠加。对行人摩擦特性响应面模型进行综合分析,得到使优化目标函数值最小的人

与地面摩擦系数和人与汽车摩擦系数取值为 0.60 和 0.55,即为行人摩擦特性取值。以行人摩擦特性取值为中心,取值范围为 0.55 ~ 0.65 和 0.50 ~ 0.60。

3.4 仿真可靠性分析

以分析得到的行人摩擦特性为中心,根据行人摩擦特性取值范围取值,定义输入变量取值正态分布曲线如图 4 所示,通过设置上下限定行人摩擦特性取值范围与通过响应面模型分析结果一致。

以交通事故现场勘测误差允许范围为基准,限定汽车刹车距离、行人抛落 x 距离、行人抛落 y 距离的最大值和最小值。建立行人摩擦特性可靠性分析流程,应用蒙特卡罗可靠性分析方法进行可靠性分



(a) Vehicle and person friction coefficient value distribution

(b) Person and ground friction coefficient value distribution

Fig 4 Pedestrian friction characteristic value setting

图 4 行人摩擦特性取值设置

析计算.

通过可靠性分析,得到各输出变量取值分布,可通过分布直方图查看汽车刹车距离、行人纵向抛距、行人横向抛距三个输出变量落在所定义的最大值和最小值范围内的比例.其中优化目标取值分布如图 5 所示,在 100 组可靠性分析试验中,有 5 组试验超出输出误差允许范围,其余均符合误差允许范围,说明行人摩擦特性取值满足本案例事故仿真要求.

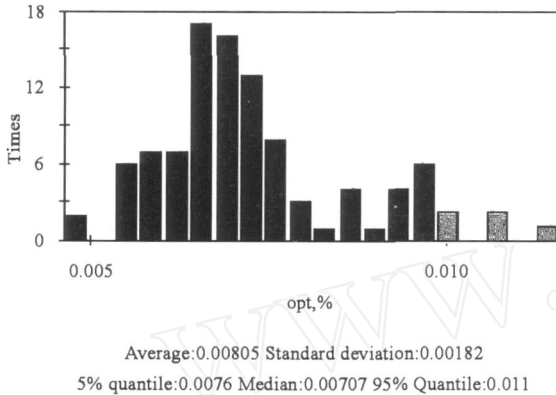


Fig 5 Optimize object reliability analysis result
图 5 优化目标可靠性分析结果

事故仿真结果表明,在保证足够可靠性的情况下,碰撞时刻汽车车速 11.32 m/s (40.725 km/h),碰撞时刻不存在超速,碰撞点位置在人行横道范围内,大客车司机对本起事故应负有主要责任,与交警部门对该起事故责任认证结果相一致.

4 结论

a 针对传统车人碰撞事故鉴定和再现方法在行人摩擦特性认证方面的不足,以标准行人假人模型为基础,通过仿真试验的方法,对行人摩擦系数进行优化分析,经实际案例验证,证明该方法仿真结果与事故现场能够更好吻合.

b 对行人摩擦生系数进行定量分析,显著提高了事故再现的可靠性,为深入分析碰撞前后车辆与行人的运动状态和车人损伤奠定了基础.

c 对车人碰撞事故中行人摩擦生物力学特性

的分析,尤其是在碰撞不同时刻,随行人与汽车、行人与道路接触位置不同所引起的摩擦特性的变动,需要对现场勘测和再现算法提出更高的要求,并对人体生物力学模型做进一步的细化和改进.

参考文献:

- [1] Hang E, Clinckemaillie J, Ni X M. 汽车碰撞仿真与设计的最先进展和发展趋势[J]. 机械工程学报, 1998, 34(1): 93 - 99.
Eberhard Haug, Jan Clinckemaillie, Xiaomin Ni Recent trends and advances in crash simulation and design of vehicles[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, 34(1): 93 - 99.
- [2] Wood D P, Simms C K, Walsh D G. Vehicle - pedestrian collision: validated models for pedestrian impact and projection[J]. Proceedings of Institution Mechanical Engineer, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2005, 21(9): 183 - 195.
- [3] Zhang X Y, Jin X L, Li Y Y. Improved design of the main energy absorbing automotive parts based on traffic accident analysis[J]. Material & Design, 2008, 29(2): 403 - 410.
- [4] 葛世荣, 王成焘. 人体生物摩擦学的研究现状与展望[J]. 摩擦学学报. 2005, 25(2): 186 - 191.
Ge S R, Wang C T. State - of - the - art and prospect of biotribology in human body[J]. Tribology, 2005, 25(2): 186 - 191.
- [5] Yang J K, Lovsund P J, Cavallero C, et al. A human - body 3d mathematical model for simulation of car - pedestrian impacts[J]. International Journal of Crash Prevention and Injury Control, 2000, 2(2): 131 - 149.
- [6] Zhang X Y, Jin X L, Qi W G. Parallel computing with domain decomposition for the vehicle crashworthiness simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(11): 1051 - 1064.
- [7] 金先龙, 张晓云. 交通事故数字化重构理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [8] Zhang X Y, Jin X L, Qi W G. Vehicle crash accident reconstruction based on the analysis 3 - D deformation of the auto - body[J]. Advanced in Engineering Software, 2008, 39(6): 459 - 465.
- [9] 郭磊, 金先龙, 申杰, 等. 人车碰撞事故的行人伤害研究[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(2): 262 - 267.
Guo L, Jin X L, Shen J, et al. A Study of pedestrian injuries in car - pedestrian collision accident[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(2): 262 - 267.

The Friction Biomechanics Characteristic Analysis for the Car - pedestrian Collision Traffic Accidents

CHAI Xiang - hai¹, JIN Xian - long¹, ZHANG Xiao - yun¹, HOU Xin - yi²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Traffic and Police Office of Shanghai, Shanghai, 200070, China)

Abstract: The characteristics of pedestrian - friction - biomechanics (PFI) have direct influence on the result of those traffic accidents in which car - pedestrian collision was involved. Because of the complexity of body constitution and emergency of traffic accident, it is difficult to acquire the contact characteristics of the pedestrian and the automobile as well as the pedestrian and the path by means of experimentation. The friction biomechanics characteristic of the car - pedestrian collision traffic accident based on simulation test was discussed and its validity was testified by Monte Carlo method. The characteristic is applied to the traffic accidents with car - pedestrian collision for confirmation. The simulation results showed that the friction characteristics have high precision and reliability and can meet the requirement to friction biomechanics characteristic in the car - pedestrian collision traffic accidents. The friction characteristic provided a new pathway for the friction biomechanics characteristic of pedestrian in traffic accidents.

Key words: accident reappearance, friction biomechanics characteristic, reliability analysis, numerical simulation

Author: JIN Xian - long, male, born in 1963, Ph. D., Professor, e - mail: jxlong@sjtu.edu.cn