Exploring the Influence of Vehicle Front-End Shape on Pedestrian Head Injuries Caused by Rround Impact

JianiLI^{1, 2}, Sha YIN^{1, 2}, Jun Xu^{1, 2*}

¹Department of Automotive Engineering, School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing, China, 100191

²Advanced Vehicle Research Center, Beihang University, Beijing, China, 100191 Email:junxu@buaa.edu.cn, shayin@buaa.edu.cn, jianili@buaa.edu.cn

Abstract: In pedestrian-vehicle accidents, pedestrians usually suffer secondary impact with the ground after the primary contact with vehicles, but little is known about the fundamental pedestrian head injury causations from the ground impact, hindering further improvement of pedestrian safety. This paper addresses this question using multi-body modelling and computation to investigate the influence of vehicle front-end shape on pedestrian safety. The results reveal that the top governing factor should be bonnet top-edge height. The bonnet angle is the second factor to affect the head-ground injury, followed by the bonnet length and windshield angle.

Keywords: pedestrian-vehicle accident, front-end shape, head injury, head-ground impact

车辆前部结构参数对行人与地面碰撞时 头部损伤的影响研究

李佳妮^{1,2}, 殷莎^{1,2}, 许骏^{1,2}

¹北京航空航天大学交通科学与工程学院汽车工程系,北京,中国,100191 ²北京航空航天大学先进载运科学研究中心,北京,中国,100191 Email: junxu@buaa.edu.cn, shayin@buaa.edu.cn, jianili@buaa.edu.cn

摘 要: 交通事故中, 行人受到车辆撞击后会与地面产生二次碰撞, 但人地碰撞机理却不甚清晰, 阻碍了行人保护的进一步发展。对此, 本文建立了多刚体模型模拟人车碰撞, 进而探究车辆前端形状对于二次碰撞中行人头部损伤的影响。结果表明, 发动机罩前缘高度是影响行人落地姿态的主要原因, 其次是发动机罩角度, 而发动机罩长度与风挡玻璃角度对行人落地姿态并没有明显的影响。

关键词:行人与车辆碰撞;车前廓形状;头部损伤;头部与地面碰撞

1 引言

世界卫生组织道路安全全球现状报告2015^[1]指出,全世界每年约有125万人死于道路交通,其中半数是由行人、 骑车人、摩托车驾驶者组成的弱势道路使用者。由于缺乏保护,弱势道路使用者更容易在交通事故中受伤。其中, 行人保护问题是关注的重点,各国政府都对行人保护措施进行相当程度的研究。

行人头部损伤主要来源于人车碰撞以及人地碰撞,对于这两大方面的行人头部损伤都有相应的研究探索其中的 损伤机理。对于人车碰撞中行人损伤机理以及影响因素的研究比较全面详细。韩勇等^[2]应用了 THUMS 行人有限元 模型,采用了中型轿车、微型轿车、1Box 和 SUV 四种车型以及 20 km/h,30 km/h,40 km/h,50 km/h 四种碰撞速 度,分析行人动力学响应,并以头部 HIC 值和胸部压缩量为损伤标准探讨了致命损伤风险。Lyons 和 Simms^[3]利用 MADYMO 软件研究了风挡玻璃角度、风挡玻璃刚度参数以及风挡玻璃摩擦系数对于头部与风挡玻璃碰撞时头部损 伤的影响。结果表明,当采用真实风挡玻璃刚度参数时,增加风挡玻璃角度会降低头部线加速度峰值(7%)以及 头部角加速度峰值(18%),从而减小行人头部损伤风险。Sankarasubramanian 等人^[4]在车辆前部结构中提取了 14 个结构参数,在 MADYMO 中建立了车辆与三种行人的碰撞模型,并以 WIC 为损伤指标来评估行人损伤风险。在 考虑了车辆前部某些尺寸约束的同时,利用基于遗传算法的全局优化,以减小 WIC 值为目标对于车辆前部结构进行了优化,并得到至少一种不同于现实生活中已有车辆造型、但具有良好的行人保护功能的汽车前端结构。

大部分研究致力于减小行人与汽车第一次碰撞时造成的损伤,然而由于行人与地面碰撞而造成的损伤同样很值 得关注。Kendall^[5]等人为了探究人车碰撞以及人地碰撞造成的损伤差异,采用了两种有限元车模型、四种行人初始 姿态以及五种车速进行仿真模拟。他们发现人车碰撞以及人地碰撞中的损伤风险都与车速成正相关,然而与地面碰 撞时的损伤更不可预测。为了探究不同车前廓形状对人地二次碰撞中损伤的影响,Gupta 和 Yang⁶⁰建立了 30 km/h 和 40 km/h 车速下,三种行人模型与轿车、SUV 有限元车模型相撞的仿真模拟,结果发现前缘较低的轿车以及前缘 较高的 SUV 能够预防头地直接碰撞。与此相反,前缘较高的轿车以及前缘较低的 SUV 总是会导致头部与地面直接 碰撞,但其中的原因并不清楚。Simms 等人针对行人与地面碰撞过程中的损伤进行了一系列的研究。为了探究行人 初始运动姿态以及行人速度对于人地碰撞时头部损伤的影响。Simms⁽⁷⁾等人建立了车辆与行人的碰撞模型,预置行 人在碰撞前具有不同的初始姿态以及初始速度进行仿真模拟。数据表明,人车碰撞时头部碰撞位置容易预测,由于 行人初始姿态造成的损伤变化范围在 30%以下。相较之下,人地碰撞的结果不可预测。之后,为了探究发动机罩前 缘高度对行人的运动姿态以及损伤值的影响。Simms^[8]等人在MADYMO中建立了六种车型与两种行人的碰撞模型, 采用 25~35 km/h 的车速进行碰撞仿真。结果表明,相较于前缘较低的车辆而而言,具有较高前缘的车辆例如 SUV 更有可能导致头部与地面的直接碰撞。此外,他们提出了六种循环的碰撞机制,探究了不同碰撞机制下的行人损伤 特点。然而,在该研究中存在一些不足,例如没有考虑其他车前廓尺寸的影响,车速范围有一定限制,并且只考虑 了两种行人初始姿态。为了使研究更为全面,同时进一步验证之前提出的六种碰撞机制的可用性,Simms⁹⁹等人采 用了更有代表性的汽车形状、范围更大的车速以及初始姿态,探究六种碰撞机制是否仍能被清楚地辨认

可以发现,当前研究多集中于探究车前缘高度对人地碰撞中头部损伤的影响,很少关注其他车前廓形状参数。 对此,本文对车前廓形状进行了参数化研究,进一步探索行人与参数化车头碰撞后的动态响应及其损伤机理。

2 研究方法

2.1 行人模型

本文采用的中等尺寸男性人体模型由 52 个刚体、69 个椭球面和 2 个平面组成,身高为 1.74 m,体重为 75.7 kg。杨济匡等人^[10]通过比较整车碰撞以及碰撞仿真过程中行人与保险杠之间的作用力以及身体各部分的加速度,进一步验证了该行人模型的可用性。该行人模型被广泛应用于事故分析以及事故重现,尤其是行人损伤分析领域。

2.2 车模型

本文以某丰田车型的多刚体模型作为基础模型,设质量为 1800 kg,其车前廓基本参数如下:发动机罩前缘 高度 0.8 m,发动机罩长度 1.1 m,发动机罩角度 π/18,风挡玻璃角度 5π/36。保险杠、发动机罩等部件的刚 度参数来自于 Euro NCAP 的子系统碰撞试验结果^[11],风挡玻璃(上部、中部、下部框架)的刚度参数来自于文 献^[12]。行人与车辆的接触类型设置为"COMBINE",除了头部与车辆的接触类型设置为"SLAVE"。行人与 车辆之间的摩擦系数定义为 0.2^[7]。行人与地面的接触类型设置为"SLAVE"。基于文献^[13]的试验结果,行人与 地面的摩擦系数定义为 0.58。

2.3 碰撞场景

本文中采用行人右侧受车辆碰撞,该碰撞模式在所有人车碰撞事故中占了 90%^[14, 15],是最为典型的碰撞形 式,参见图 1。



Figure 1. Typical impact scenario and coordinate system of the impact model 图 1. 典型碰撞场景以及碰撞模型的坐标系

本文中对车辆施加 20, 30, 40 km/h 三种典型碰撞速度^[16]以及 0.75 g 的减速度来表示刹车作用^[17, 18]。

2.4 损伤参数

HIC₁₅被广泛用于评价头部损伤。它的安全界限为 700,当 HIC₁₅达到 700 时头部有 5%的可能性遭到严重损伤。图 2 是基础模型以 40 km/h 的速度撞击行人模型期间,行人头部质心合成加速度-时间曲线。对比动画可以确定头部与发动机罩碰撞以及头部与地面碰撞的时间点分别为 122.9~135.7 ms 以及 1144~1158.4 ms,在头部质心合成加速度的曲线上对这两个时间点处的峰值数据进行计算可以得到两次碰撞的 HIC₁₅ 分别为 664.132 以及 409.701。



Figure 2. Resultant head acceleration of pedestrian when struck by the baseline vehicle at 40 km/h 图 2. 行人被基础车辆模型以 40km/h 撞击后头部质心合成加速度

2.5 参数化研究

影响车前廓形状的结构参数有很多,为了简化建模以及研究,本文提取了其中较为关键的四个参数:发动 机罩前缘高度 H、发动机罩长度 L、发动机罩角度 α 以及风挡玻璃角度 θ。这四个结构参数基本上能够描述车前 廓的形状。具体参见图 3。



图 3. 汽车前部结构的尺寸参数

对于这四个结构参数在一定范围内取值,进行扩展,可以形成参数化矩阵如表 1。其中, *H*、α 以及 *L* 的范围确定参考了文献^[9], θ 的范围参考了文献[19]。依照表 1 总计建立了 105 组车模型。

INFATS Conference in Hangzhou, November 24-26, 2016

发动机罩前缘	F 发动机罩长	发动机罩角度	风挡玻璃角度
高度 H (m)	度 L (m)	α	θ
0.5	3	$\pi/36$	$\pi/9$
0.6	4	$\pi/18$	$5\pi/36$
0.7	7	$\pi/12$	$\pi/6$
0.8	4	$\pi/9$	$7\pi/36$
0.9	4	$5\pi/36$	$2\pi/9$
1.0	4	$\pi/6$	$\pi/4$

Table 1. Parametric matric consisting of dimension parameters of vehicle front-end 表 1. 车前阔尺寸参数组成的参数化矩阵

3 结果

3.1 行人运动轨迹

本文中所有车辆的发动机罩前缘高度均小于行人的质心高度 1.08 m, 行人运动轨迹过程参见图 4。行人被 车辆撞击时, 行人腿部最先与车辆保险杠接触, 在车头的推进作用下行人腿部随车头移动, 然而人体上半身由 于惯性效应仍在原处, 导致人体模型绕着碰撞点发生弯曲, 上半身发生旋转倒向车辆前部, 行人手臂、躯干、 肩颈部和头部等位置相应与发动机罩、风挡玻璃等位置发生碰撞, 此时车前廓的结构对运动姿态有一定的影响。 当车速降至小于行人速度时, 行人将与车辆发生分离, 随后被抛向空中。行人将在空中旋转, 在重力作用下跌 至地面, 最后以一定的落地姿态以及速度与地面发生碰撞, 在地面滑行一段时间后, 行人将停止运动。



Figure 4. The typical trajectory of pedestrian when struck by the baseline vehicle model at 40 km/h 图 4. 行人被基础车辆模型以 40km/h 撞击后的运动轨迹

3.2 落地旋转角

从 t=0 ms 开始,直到人地碰撞瞬间为止,这期间人体上半身绕 y 轴旋转过的角度定义为落地旋转角度γ。 该角度一定程度上描述了落地瞬间的人体模型姿态,与落地时头/地碰撞的损伤有着一定的关系。如图 5 所示, 将仿真结果中的落地旋转角度分为四个区间,分别为区间一、区间二、区间三以及区间四。



Figure 5. Description of the rotation angles in four sections 图 5. 落地旋转角度的四个区间

4 讨论

4.1 发动机罩前缘高度与发动机罩角度的耦合影响

图 6 描述了 $H = \alpha$ 对 γ 的耦合影响。从图中可以看出,H 对 γ 影响较大, α 对 γ 的影响较小。



Figure 6. The coupling effect of *H* and *a* on *y* at all impact speeds (20 km/h, 30 km/h, 40 km/h). 图 6. 碰撞速度在 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h 情况下, *H* and *a*对 *y*的耦合影响

H 与 α 对γ 影响程度的差异来源于不同的影响机制。如图 7 所示, H 较大时, 行人在倒向车前廓过程中的 弯折点位置较高,由于上半身自重而形成的旋转力矩较小,不利于人体转动,导致γ 偏小。但γ 并没有随着 H 的增加而逐步变小,随 H 增加,行人头部在车前廓上的碰撞位置由风挡玻璃移至发动机罩,碰撞位置材料参数 的不同导致碰撞后行人动力学响应不同,此外,碰撞点到发动机罩前沿的水平距离越小,车头的阻碍效果越小, 影响γ 的值。总之, H 通过控制人体弯折点的位置,碰撞点的位置来改变落地姿态。



Figure 7. Six kinematic processes of pedestrians when struck by the baseline vehicles varying in *H* at 40 km/h. 图 7. 行人被六组不同 *H* 的基础车辆模型以 40km/h 撞击后的动态响应

如图 8 所示,随 α 增加,行人头部与发动机罩碰撞点的高度增加,车头对于人体在空中旋转过程的阻碍减 小。 $\alpha = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 时,车头对于人体几乎无任何阻碍,人体被抛出后自由旋转。此时, γ 的变化与 α 有直接 关系。随 α 增加,行人在头部撞击发动机罩之前转过的角度减小,导致其后任意时刻的旋转角度都偏小,导致 γ 偏小。 $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 时,抛出后空中旋转过程受车头阻碍作用明显,因此 γ 变化并不规律。



Figure 8. Six kinematic processes of pedestrians when struck by the baseline vehicles varying in a at 40 km/h.图 8. 行人被六组不同 a 的基础车辆模型以 40km/h 撞击后的动态响应

4.2 发动机罩前缘高度与发动机罩长度的耦合影响

图 9 描述了 H 与 L 对 y 的耦合影响。从图中可以看出, H 对 y 影响较大, L 对 y 的影响较小。



Figure 9. The coupling effect of H and L on y at all impact speeds (20 km/h, 30 km/h, 40 km/h). 图 9. 碰撞速度在 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h 情况下, H和L对 y的耦合影响

如图 10 中 t=118 ms 截图所示,随着 L 增加,行人头部的碰撞位置从风挡玻璃慢慢移动至发动机罩,在此 过程中碰撞点距离发动机罩前缘的距离几乎保持不变,因此车头的阻碍效果类似。最终获得的γ 值基本不变。



Figure 10. Six kinematic processes of pedestrians when struck by the baseline vehicles varying inL at 40 km/h. 图 10. 行人被六组不同 L 的基础车辆模型以 40km/h 撞击后的动态响应

4.3 发动机罩前缘高度与风挡玻璃角度的耦合影响

图 11 描述了 $H 与 \theta$ 对 γ 的耦合影响。从图中可以看出,总体趋势上 H 对 γ 影响较大, θ 对 γ 的影响较小。



Figure 11. The coupling effect of *H* and θ on γ at all impact speeds (20 km/h, 30 km/h, 40 km/h). 图 11. 碰撞速度在 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h 情况下, *H* 和 θ对 γ的耦合影响

观察图 4-10 中 t=116 ms 的截图可以发现,随着θ 增大,行人头部与风挡玻璃接触点的高度有所增加,但这 对于其后的运动姿态并没有明显的改变,导致落地时的姿态以及γ 波动不大。



Figure 10. Six kinematic processes of pedestrians when struck by the baseline vehicles varying in θat 40 km/h. 图 10. 行人被六组不同 θ的基础车辆模型以 40km/h 撞击后的动态响应

INFATS Conference in Hangzhou, November 24-26, 2016

5 结论

本文为了探究车前廓的尺寸参数对于行人与汽车碰撞后继而与地面碰撞时头部损伤的影响,提取了发动机 罩前缘高度、发动机罩角度、发动机罩长度以及风挡玻璃角度这四个主要的车前廓参数。对着四个参数取值后 进行参数化建模,利用 MADYMO 软件仿真模拟碰撞过程,分析各参数对落地姿态的影响。结果表明,发动机 罩前缘高度变化时,通过改变人体弯折点的高度、碰撞点的位置从而大范围地影响落地姿态;其次为发动机罩 角度;发动机罩长度和风挡玻璃角度对落地姿态影响较小。

致谢

本研究得到中央高校基本科研业务费项目支持。

参考文献 (References)

- [1] WHO, WHO global status report on road safety 2015. World Health Organization ed. 2015.
- [2] Han, Y., et al., Effects of Vehicle Impact Velocity on Pedestrian Fatal Injury Risk. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011. 1(4).
- [3] Lyons, M. and C.K. Simms. Predicting the Influence of Windscreen Design on Pedestrian Head Injuries. in IRCOBI ConferenceIRCOBI Conference. 2012.
- [4] Sankarasubramanian, H., et al., Optimisation study on multibody vehicle-front model for pedestrian safety. International Journal of Crashworthiness, 2015. 21(1): p. 63-78.
- [5] Kendall, R., M. Meissner, and J. Crandall. The Causes of Head Injury in Vehicle-Pedestrian Impacts: Comparing the Relative Danger of Vehicle and Road Surface. in SAE 2006 World Congress & Exhibition. 2006.
- [6] Gupta, V. and K.H. Yang, *Effect of vehicle front end profiles leading to pedestrian secondary head impact to ground.* Stapp Car Crash Journal, 2013. **57**(57): p. 139-155.
- [7] Simms, C.K. and D.P. Wood, *Effects of pre-impact pedestrian position and motion on kinematics and injuries from vehicle and ground contact*. International Journal of Crashworthiness, 2006. **11**(11): p. 345-355.
- [8] Simms, C.K., T. Ormond, and D.P. Wood, The influence of vehicle shape on pedestrian ground contact mechanisms. 2011.
- [9] Crocetta, G., et al., *The influence of vehicle front-end design on pedestrian ground impact.* Accident Analysis & Prevention, 2015. **79**: p. 56-69.
- [10] Yang, J.K., et al., A Human-Body 3D Mathematical Model for Simulation of Car-Pedestrian Impacts. Crash Prevention & Injury Control, 2000. 2(2): p. 131-149.
- [11] Martinez, L., et al. Stiffness corridors of the European fleet for pedestrian simulation. in Experimental Safety Vehicles Conference. 2007.
- [12] Mizuno, K. and H. Yonezawa, *Pedestrian headform impact tests for various vehicle locations*. Journal of Japanese Language Study & Research, 2001.
- [13] Wood, D., C. Simms, and D. Wood, Coefficient of friction in pedestrian throw. Impact J.ITAI, 2000. 9(1): p. 12–14.
- [14] Mclean, A.J., et al., Data collection and analysis of vehicle factors in relation to pedestrian brain injury. Proceedings of the International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 1996: p. 1408–1411.
- [15] Yao, J., J. Yang, and D. Otte, Investigation of head injuries by reconstructions of real-world vehicle-versus-adult-pedestrian accidents. Safety Science, 2008. 46(7): p. 1103-1114.
- [16] Simms, C. and D. Wood, Pedestrian and Cyclist Impact. Solid Mechanics & Its Applications, 2009. 166: p. 31-49.
- [17] Xu, J., et al., Are electric self-balancing scooters safe in vehicle crash accidents? Accident; analysis and prevention, 2015. 87: p. 102-116.
- [18] Xu, J., et al., *Simulative investigation on head injuries of electric self-balancing scooter riders subject to ground impact.* Accident; analysis and prevention, 2016. **89**: p. 128-141.
- [19] Lyons, M. and C.K. Simms. Predicting the Influence of Windscreen Design on Pedestrian Head Injuries. in IRCOBI Conference. 2012.