

Study on the Impact of Vehicle Pitch on Leg Injuries of Children During Braking

Zhenfei ZHAN¹, Cheng HONG¹, Bin YE², Yu LIU², Hailian CHEN¹

¹Chongqing Jiaotong University, Faculty of Mechatronics and Automotive Engineering, Chongqing, China

²China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd, Chongqing, China

Email: zhenfei_zhan@163.com

Abstract: With the increasing penetration rate of automatic emergency braking system (AEB) in vehicles, its performance in actual collision accidents has attracted more and more attention. Children are not easily observed by the vehicle driver, so the AEB system plays a crucial role when the child appears around the vehicle. The elevation Angle of the vehicle under the action of AEB will lead to the change of the type of collision between the vehicle and children. In them, the children's legs often contact with the front structure of the vehicle when the collision with the vehicle, and the collision position changes significantly. Therefore, in order to explore the difference of different pitch Angle under AEB, this paper adopts the finite element model of the finite element model based on the advanced pedestrian leg type (aPLI) impactor, and compare the damage indexes of thigh, calf and knee joint. The results show that the elevation angle of the car will increase the medial knee joint and the maximum bending moment of the thigh of 40 km/h and the elevation angle of 30 km/h; the maximum bending moment of the thigh and reduce the maximum bending moment of the calf. This study is instructive for optimizing vehicle design, improving the effectiveness of AEB systems, and developing more stringent pedestrian protection standards.

Keywords: AEB; Children's leg; Pitch angle; THUMS; Damage index; Pedestrian protection

制动状态下汽车俯仰对儿童腿部损伤研究

詹振飞¹, 洪程¹, 叶彬², 刘煜², 陈海量¹

¹重庆交通大学, 机电与车辆工程学院, 重庆, 中国 404100

²中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国 404100

Email: zhenfei_zhan@163.com

摘要: 随着自动紧急制动系统 (AEB) 在车辆中的普及率不断提高, 其在实际碰撞事故中的表现越来越受到关注。车辆驾驶员不易观察到儿童, 因此当儿童出现在车辆周围时, AEB 系统起着至关重要的作用。车辆在 AEB 作用下产生俯仰角会导致车辆与儿童碰撞类型发生变化, 其中儿童腿部在与车俩碰撞时往往首先与车辆的前部结构接触, 碰撞位置发生明显的变化。因此, 为了探究了 AEB 作用下车辆不同俯仰角对儿童腿部的损伤差异, 本文采用了 THUMS 儿童有限元模型并根据先进行人腿型 (aPLI) 冲击器在腿部位置等比例建立传感器和车辆有限元模型进行仿真, 分析了轿车和运动型多功能车 (SUV) 两种车型不同俯仰角度下儿童有限元模型的动力学响应; 对比了大腿、小腿、膝关节的损伤指标。结果表明: 轿车存在俯仰角会增大儿童膝关节内侧副韧带 (MCL) 伸长量和增大大腿最大弯矩, 速度为 40km/h、30km/h 时会增大小腿最大弯矩; SUV 存在俯仰角时会减小儿童的 MCL 伸长量、增大大腿最大弯矩、减小小腿最大弯矩。本研究对优化车辆设计、提高 AEB 系统的有效性以及制定更严格的行人保护标准都具有指导意义。

关键词: AEB; 儿童腿部; 俯仰角; THUMS; 损伤指标; 行人保护

1 引言

随着中国汽车工业的发展，2023 年中国的民用汽车拥有量已高达 3.36 亿辆，交通事故也随着车辆的增加而频繁发生^[1]。根据中国国家统计局数据可知，2022 年行人与车辆交通事故有 3907 起，其中行人死亡人数为 140 9 人^[1]，死亡率占比在 30% 左右。在车辆与行人碰撞中，行人腿部损伤占所有 AIS2+ 损伤的比例最高，为 32.6%^[2]。行人的腿部损伤主要包括胫骨和股骨骨折、膝盖韧带损伤，导致下肢损伤产生的主要原因是行人被汽车前部横向撞击^[3]。统计表明，近 95% 的行人与车辆交通事故的撞击速度低于 60km/h^[4]。Lalwala 等^[5]使用 THUMS 行人模型对英国 RAIDS 数据库中的三起真实世界行人事故进行了重建，结果表明 THUMS 下肢模型的运动学和损伤反应方面都显示出与实际碰撞数据的良好一致性。Jacques Saadé 等^[6-7]研究了车辆撞击速度、引擎盖前缘高度、车辆型号年份、撞击角度和车辆前端首次撞击位置等风险因素。结果显示，下肢是最容易受伤的部位，其次是头部、胸部和上肢。

AEB 技术可以在车辆发生碰撞前主动介入制动系统使车辆减速或刹停，以减少或避免碰撞事故的发生，尤其对于驾驶员视线盲区内的儿童，其作用尤为关键^[8]。儿童由于身高较低，其在车辆周围的可见性较差，使得他们更容易成为车辆碰撞的受害者。有研究表明，处于 4-6 岁和 7-9 岁年龄段的儿童下肢损伤占据了最大比例的 AIS3+ 损伤，分别为 58% 和 48%^[6]。尽管已有研究关注了车辆碰撞对儿童腿部损伤的影响，但关于 AEB 作用下车辆俯仰角对儿童腿部损伤差异的研究还相对有限。Cicchino 等^[9-10]研究表明低速自动紧急制动（AEB）将前后碰撞率降低了 43%，前后受伤事故率降低了 45%，得出通过 AEB 系统检测，行人碰撞风险显著降低 25%-27%，行人伤害碰撞风险显著降低 29%-30%。刘树伟、刘念松等^[11-12]研究发现 AEB 作用下汽车俯仰角在 1.5°-3.3°。Kullgren^[13]得出行人检测的 AEB 碰撞风险总体降低 8%，然而，在白天和黄昏的条件下，行人检测的 AEB 将行人碰撞风险降低了 18%。Tian^[14]提出了一种基于模糊逻辑控制的碰撞风险评估模型，表明内部开发的 AEB 控制策略能够准确评估碰撞风险，并采取有效的对策，以避免与正在以恒定速度穿越道路的行人发生碰撞。Haus^[15]的研究指出，与人类驾驶员相比，具有行人探测能力的 AEB 系统在预期设计参数范围内降低了死亡风险。降低目标人群的死亡风险在 84% 和 87% 之间，损伤风险降低至在 83% 和 87% 之间，虽然不是所有的碰撞都可以避免，但 AEB 显著降低了行人的风险。

综上所述，目前在 AEB 对行人保护的研究以及车辆外形、结构对行人保护的研究都很多，目前各国针对主动安全和被动安全的测试法规都是分开进行的。在真实的交通事故中行人损伤往往是主动安全和被动安全共同作用，在 AEB 作用下车身姿态会发生变化，从而导致与行人碰撞位置发生变化，最终导致行人损伤发生变化。

本文针对这些问题，选择了轿车和 SUV 两款车型，运用整车动力学软件 CarSim 模拟了汽车 AEB 制动过程，获取了不同汽车类型在不同制动强度下的俯仰角度和前悬架压缩量，如附录图 1。结合仿真数据和参考文献设置车辆 0°、2°、3° 的俯仰角度。由于现在的行人保护被动安全部分是在 40km/h 下进行的，考虑 AEB 减速作用，设置人一车碰撞速度为 20km/h、30km/h、40km/h，以研究在 AEB 作用下车辆产生俯仰角对行人腿部的损伤变化，对比了大腿、小腿、膝关节的损伤指标。

2 研究方法

2.1 模型设置

为了更好的反映实际交通事故中车辆对儿童腿部的损伤影响，采用具有车辆前部结构的有限元模型来研究 AEB 制动下车辆俯仰角对儿童腿部的影响。本研究用到的轿车模型为 2012 年丰田凯美瑞、SUV 模型为 2020 年日产 Rogue，这两款汽车模型均是由美国乔治梅森大学(George Mason University)碰撞安全与分析中心(Center for Collision Safety and Analysis, CCSA)建立。模型包括保险杠、保险杠横梁、引擎盖、进气格栅、前防撞梁等部件，为简化车辆模型，对车辆后部进行简化，将去除的部件质量加到车辆被去除部分的质心位置，轿车总质量为 1473kg，SUV 总质量为 1663kg。车辆俯仰角以车辆质心为中心，向车头方向旋转，简化车辆模型及俯仰角调整方式如图 1。

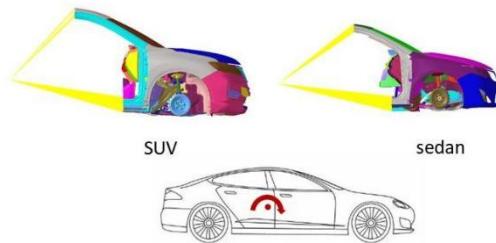


Figure 1. Vehicle model and pitch angle adjustment method
图 1 车辆模型及俯仰角调整方式

儿童模型采用 THUMS 6YO，儿童姿态为 TB024 的标准姿态，儿童状态为静止，如图 2 所示。不同速度和不同俯仰角下的车辆模型与儿童右侧碰撞，设置车辆表面与行人皮肤、鞋子与地面的摩擦系数分别为 0.3^[16]、0.58^[17]。

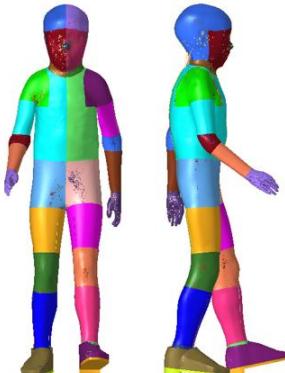


Figure 2. Child TB024 posture (left front view, right side view)
图 2 儿童 TB024 姿态（左 正视图，右 侧视图）

2.2 输出设置

首先在儿童右腿定义传感器，根据 APII 腿型弯矩传感器到膝部质心的距离在儿童右腿等比例位置上定义弯矩传感器，在 MCL 上建立弹簧单元并以弹簧长度的变化量来表示 MCL 的长度变化量，如图 3 所示。其次定义腿部在车辆纵向垂直平面内顺时针旋转为正、逆时针旋转为负，大、小腿旋转角度差值即为膝关节的弯曲角度 θ ^[18]，如图 4 所示。分别输出股骨和胫骨上的最大弯矩值以及 MCL 的最大伸长量；输出股骨和胫骨弯矩值、MCL 伸长量、膝关节弯曲角度随时间变化的曲线。

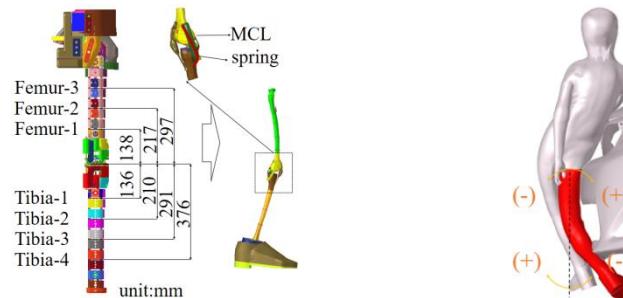


Figure 3. Definition of leg output
图 3 腿部输出定义

Figure 4. Definition of leg rotation angles
图 4 腿部旋转角度定义

2.3 仿真矩阵设置

为分析 AEB 作用下俯仰角对行人腿部损伤的影响，统计了 Future mobile traffic Accident Scenario Study (FASS) 数据库中行人车辆碰撞事故数据，结果显示共有 1150 起行人车辆碰撞事故，其中轿车参与 575 起事故，占比 50.0%，SUV 参与 284 起事故，占比 24.7%，轿车和 SUV 的占比最高。设置车辆的不同俯仰角度以及不同的行驶速度进行仿真，构建了 18 个案例的仿真矩阵，如下表 1 所示。

Table 1. Simulation Matrix Configuration

表 1 仿真矩阵设置

因子	水平
车辆速度 (km/h)	20、30、40
车辆俯仰角度 (°)	0、2、3
行人模型	THUMS 6YO
车辆类型	轿车、SUV

3 研究结果

3.1 行人运动学响应

图 5、图 6 展示了轿车、SUV 在不同速度和不同俯仰角度下与儿童腿部的碰撞过程，为了清楚的展示轿车与儿童碰撞过程中腿部的运动，对轿车前部结构进行隐藏处理，每个速度下车辆俯仰角为 0°、2°、3° 对应的儿童腿部颜色为红、黄、蓝。轿车和 SUV 速度为 40km/h 和 30km/h 与行人在 10ms 左右开始接触，速度为 20km/h 与行人在 20ms 左右开始接触，随后大腿接触到进气格栅，人体开始发生绕转；随后，行人脚底离开地面，脚掌绕踝关节发生旋转，儿童小腿随着车辆俯仰角的增大，反弹越快；车辆的俯仰角导致车辆在三个速度下与行人接触的位置发生变化。

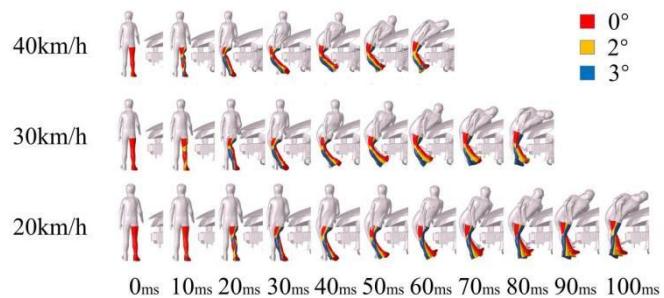


Figure 5. Collision process between different speeds and pitch angles of a sedan and a pedestrian

图 5 轿车不同速度、俯仰角度与行人碰撞过程

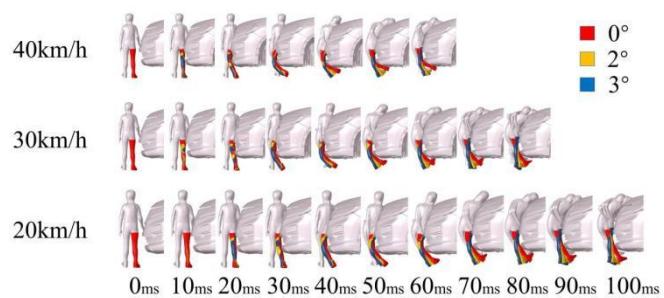


Figure 6. Collision process between SUVs at different speeds and pitch angles and pedestrians.

图 6 SUV 不同速度、俯仰角度与行人碰撞过程

轿车与行人碰撞时膝关节弯曲角度 θ 与时间关系如图 7 所示。可以看出，轿车速度为 40km/h，车辆俯仰角度为 0°，与行人碰撞后的约 35ms 处达到行人关节弯曲角度的最大值。在同样的速度，轿车的俯仰角度为 2°、3°的情况下，行人膝关节弯曲角度出现最大值的时间提前且大于 0°时的最大值。同理，轿车以 30km/h、20km/h 的速度完成上述仿真，得出的结论依然是车辆俯仰角度增加，行人膝关节弯曲角度就会有所上升。

SUV 与行人碰撞时膝关节弯曲角度 θ 与时间关系如下图 8 所示。SUV 以 40km/h 的速度与行人碰撞，车辆俯仰角度为 0°时，与行人碰撞后的约 45ms 处达到行人关节弯曲角度的最大值。在同样的速度，SUV 的俯仰角度为 2°、3°的情况下，行人膝关节弯曲角度出现最大值的时间提前且小于 0°时的最大值。SUV 速度为 30km/h，车辆俯仰角度为 0°、2°、3°时关节弯曲角度最大值基本一致，2°和 3°与 0°相比最大值出现时间提前。SUV 速度为 20km/h，车辆俯仰角为 2°和 3°时最大值出现时间提前且大于 0°的最大值。

在轿车与行人的碰撞过程中，AEB 介入改变车辆的俯仰角度，有俯仰角度时，都会增加膝关节弯曲度；SUV 在三个速度下表现不一致，在有俯仰角度时，速度为 40km/h 会减小膝关节弯曲度，速度为 30km/h 对膝关节弯曲度影响不大，速度为 20km/h 会增大膝关节弯曲度。

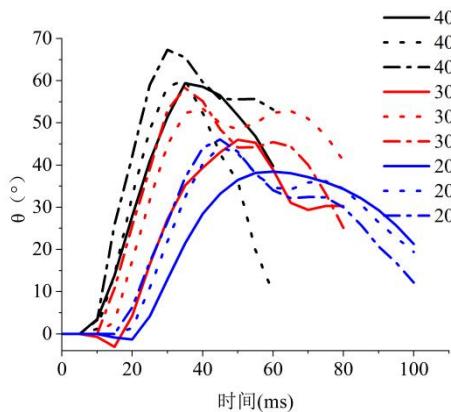


Figure 7. Sedan-θ

图 7 轿车-θ

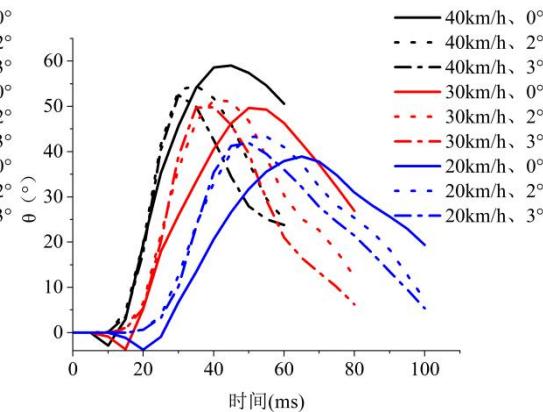


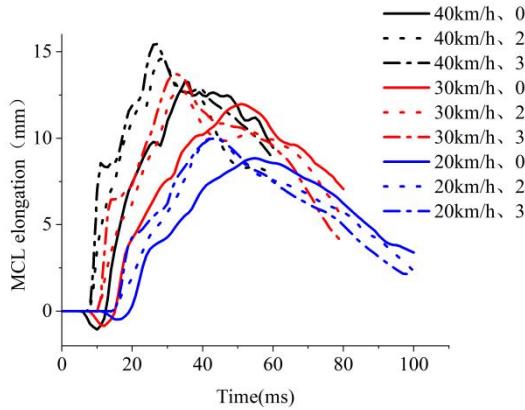
Figure 8. SUV-θ

图 8 SUV-θ

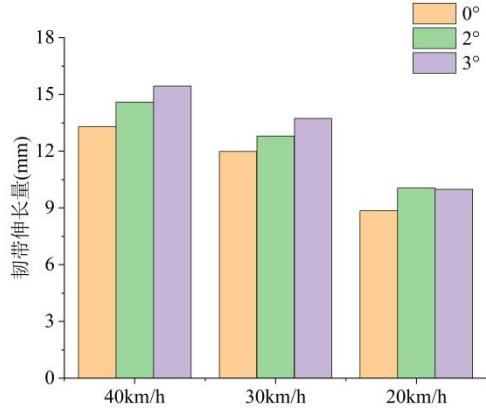
3.2 行人损伤分析

3.2.1 行人 MCL 损伤分析

本文分析了车辆不同速度下俯仰角度对行人膝部 MCL 的伸长量。轿车对行人 MCL 的影响如下图 9、图 10 所示。轿车在没有俯仰角度，速度在 40km/h 时，MCL 在 35ms 左右达到最大值 13.29mm，而当车辆存在俯仰角度时，出现最大值的时刻提前，在 2°和 3°时最大值分别为 14.59mm、15.44mm。同理，在轿车速度为 30km/h，没有俯仰角度时，MCL 的最大伸长量为 11.98mm，在 2°和 3°时最大值分别为 12.80mm、13.72mm，出现最大值的时刻提前。同理，在轿车速度为 20km/h 时，没有俯仰角度时，MCL 的最大值为 8.84mm，在 2°、3°时最大值分别为 10.06mm、9.98mm，车辆有俯仰角时儿童的 MCL 损伤增加。

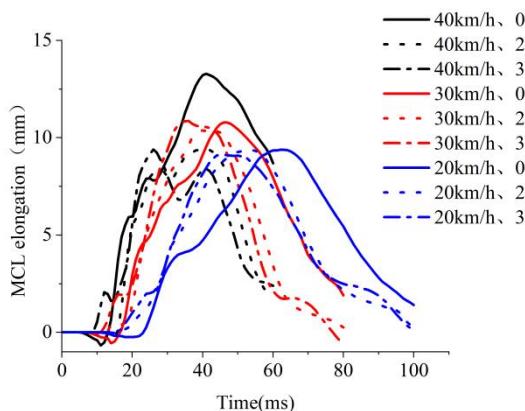


**Figure 9. Sedan MCL Elongation
图 9 桑塔纳 MCL 伸长量**

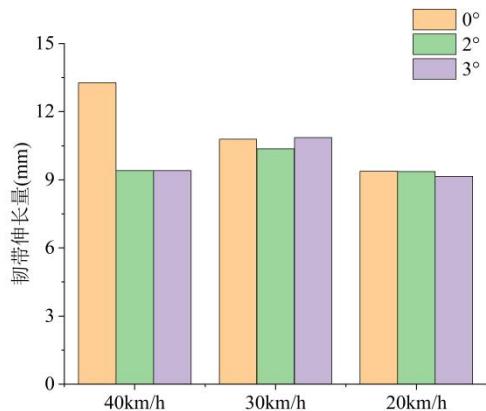


**Figure 10 .Sedan MCL Maximum Elongation
图 10 轿车 MCL 最大伸长量**

SUV 对行人 MCL 的影响如下图 11、图 12 所示。SUV 在速度在 40km/h 时，没有俯仰角度时，MCL 在 40ms 左右达到最大值 13.28mm。当车辆俯仰角度为 2°、3° 时 MCL 最大值分别为 9.41mm、9.40mm。SUV 的速度为 30km/h 时，车辆俯仰角为 0°、2°、3° 时最大值分别为 10.79mm、10.37mm、10.87mm，有俯仰角度时最大值出现时刻会提前。SUV 的速度为 20km/h 时，车辆俯仰角为 0°、2°、3° 时最大值分别为 9.39mm、9.37mm、9.15mm，有俯仰角度时最大值出现时刻会提前。



**Figure 11. SUV MCL Elongation
图 11 SUV MCL 伸长量**



**12. Maximum Elongation of SUV MCL
图 12 SUV MCL 最大伸长量**

综上所述，SUV 车型对行人 MCL 的伤害在车辆存在俯仰角度时普遍小于车辆正常姿态，轿车车型对行人 MCL 的伤害在车辆存在俯仰角度时普遍大于车辆正常姿态。

3.2.2 股骨损伤分析

本文对比大腿股骨最大弯矩变化情况，以此分析行人股骨损伤情况。轿车和 SUV 对行人造成股骨最大弯矩情况如下图 13、14 所示。在轿车速度 40km/h 的速度时，车辆俯仰角度为 0° 时，大腿最大股骨弯矩为 48.31Nm，车辆俯仰角为 2°、3° 时，大腿最大股骨弯矩分别增加至 58.67Nm、54.14Nm。在轿车速度为 30km/h 时，车辆俯仰角度为 0° 时，行人的最大股骨弯矩为 48.02Nm，车辆俯仰角为 2°、3° 时，大腿最大股骨弯矩分别增加至 51.72Nm、48.50Nm。而在轿车速度为 20km/h 时，车辆俯仰角度为 0° 时，行人的最大股骨弯矩为 42.84Nm，车辆俯仰角为 2°、3° 时，大腿最大股骨弯矩分别为 46.89Nm、42.28Nm。从附录图 2 中可以看出股骨最大弯矩出现的位置发生变化，轿车 40km/h 时，由轿车正常姿态的 Femur-3 位置变化到 2°、3° 的 Femur-2 位置；轿车 30km/h 时，由轿车正常姿态的 Femur-3 位置分别变化到 2°、3° 的 Femur-2 和 Femur-1 位置；轿车 20km/h 时，由轿车正常姿态的 Femur-3 位置分别变化到 3° 的 Femur-1 位置，2° 保持不变。

SUV 速度为 40km/h，车辆俯仰角度为 0° 时，最大股骨弯矩为 41.95Nm，车辆俯仰角为 2°、3° 时，最大股骨弯矩分别增加至 45.89Nm、47.12Nm。SUV 速度为 30km/h 时，车辆俯仰角度为 0° 时，最大股骨弯矩为 39.06Nm，俯仰角度为 2°、3° 时，最大股骨弯矩分别增加至 46.13Nm、43.59Nm。在 SUV 速度为 20km/h 时，俯仰角度为 0° 时，行人最大股骨弯矩为 36.19Nm，俯仰角度为 2°、3° 时，最大股骨弯矩分别为 39.19Nm、29.68Nm。从附录图 3 中可以看出股骨最大弯矩出现的位置发生变化，SUV 速度为 40km/h、30km/h、20km/h 时，SUV 正常姿态 (0°) 和 2° 最大弯矩出现的位置都是 Femur-3；当车辆俯仰角度为 3° 时，SUV 速度为 40km/h、30km/h、20km/h 对应最大弯矩值分别出现在 Femur-2、Femur-2、Femur-1 位置。

综上，除较少工况由于碰撞过程中碰撞位置的变化导致儿童的股骨损伤减小，大多数工况随着车辆俯仰角度的增加，会增加儿童股骨最大弯矩。在同一速度下随着车辆姿态的变化，股骨最大弯矩出现的位置也随之发生变化，轿车与儿童碰撞股骨最大弯矩出现位置比 SUV 变化大，这是由于轿车前部在竖直方向上较窄，俯仰角变化后，轿车前部和儿童大腿部分重叠部分减小。

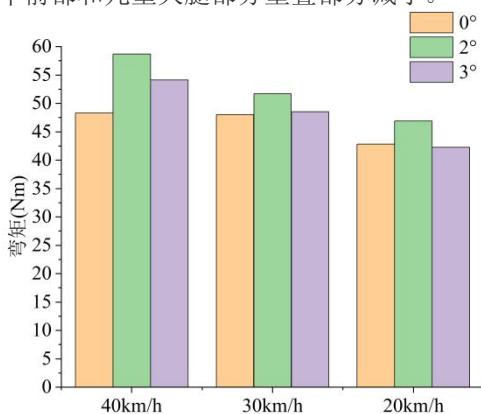


Figure 13. Sedan Maximum F-MAX Elongation

图 13 轿车 F-MAX

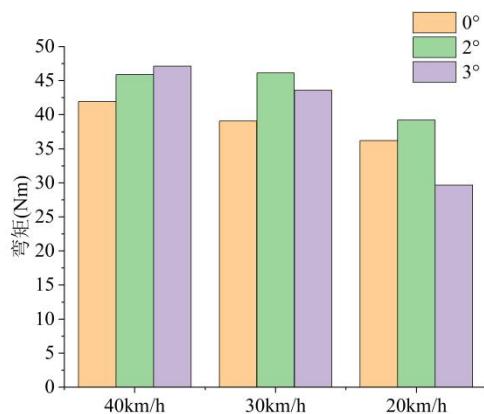


Figure 14. SUV Maximum F-MAX Elongation

图 14 SUV 车型 F-MAX

3.2.3 胫骨损伤分析

本文对行人腿部胫骨最大弯矩变化情况，以此分析行人胫骨损伤情况。轿车对行人造成胫骨最大弯矩情况如下图 15、16 所示。在轿车速度 40km/h 时，俯仰角度为 0° 时，胫骨最大弯矩为 23.18Nm，俯仰角度为 2°、3° 时，胫骨最大弯矩分别增加至 28.89Nm、40.79Nm。在轿车速度为 30km/h，俯仰角度为 0° 时，行人胫骨的最大弯矩为 26.69Nm，俯仰角度为 2°、3° 时，胫骨最大弯矩分别增加至 33.32Nm、31.77Nm。在轿车速度为 20km/h，俯仰角度为 0° 时，行人胫骨的最大弯矩为 20.83Nm，俯仰角度为 2°、3° 时，胫骨最大弯矩分别减小至 18.64Nm、19.58Nm。从附录图 2 中可以看出胫骨最大弯矩出现的位置没有发生变化，最大弯矩位置始终在 Tibia-1 位置。

SUV 速度为 40km/h 时，俯仰角度为 0° 时，胫骨最大弯矩为 37.91Nm，俯仰角度为 2°、3° 时，胫骨最大弯矩分别减小至 33.23Nm、33.26Nm。SUV 速度为 30km/h 时，俯仰角度为 0° 时，胫骨最大弯矩为 33.41Nm，俯仰角度为 2°、3° 时，胫骨最大弯矩分别减小至 29.51Nm、26.42Nm。SUV 速度为 20km/h 时，俯仰角度为 0°、2°、3°，胫骨最大弯矩分别为 24.53Nm、25.09Nm、23.01Nm。从附录图 3 中可以看出 SUV 速度为 40km/h 时，胫骨最大弯矩出现位置由俯仰角为 0° 的 Tibia-1 位置变化到俯仰角为 2° 的 Tibia-2 位置和 3° 的 Tibia-3 位置；SUV 速度为 30km/h 时，俯仰角度 0°、2°、3° 对应的胫骨最大弯矩位置分别为 Tibia-1、Tibia-2、Tibia-1；SUV 速度为 20km/h 时，俯仰角度 0°、2°、3° 对应的胫骨最大弯矩位置分别为 Tibia-1、Tibia-1、Tibia-2。

综上，轿车有俯仰角时，行人的胫骨最大弯矩在车辆速度为 40km/h、30km/h 增大，车辆速度为 20km/h 减小；SUV 有俯仰角度时，会减少胫骨最大弯矩。轿车与儿童碰撞最大弯矩出现的位置基本不会变化，SUV 与儿童碰撞最大弯矩出现的位置会变化，这是由于轿车的底盘底，俯仰角的变化对轿车前部和儿童小腿重叠部分改变较小，SUV 底盘较高，俯仰角的变化对 SUV 前部和儿童小腿重叠部分改变较大。

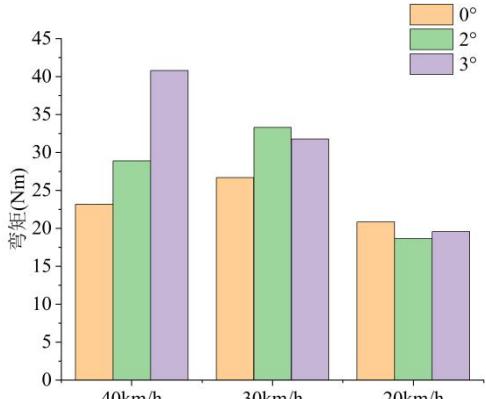


Figure 15. Sedan Maximum T-MAX Elongation
图 15 轿车 T-MAX

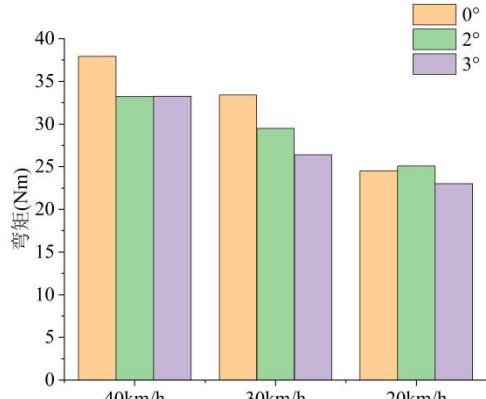


Figure 16. SUV Maximum T-MAX Elongation
图 16 SUV 车型 T-MAX

3.2.4 损伤偏差分析

定义损伤偏差百分比 S 以表征车辆存在俯仰角度时对儿童腿部损伤影响，用平均损伤偏差百分比 \bar{S} 表征车辆存在俯仰角度时对儿童腿部的整体影响，公式如下（1）（2），其中 V_i 表示车辆速度。

$$S = \left| \frac{H_{V_i, \text{存在俯仰角度}} - H_{V_i, 0^\circ}}{H_{V_i, 0^\circ}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{n=1}^{12} S_n}{n} \quad (2)$$

对 MCL 的最大损伤偏差为 29.2%，平均损伤偏差 11.6%；对股骨的最大损伤偏差为 21.4%，平均损伤偏差为 10.9%；对胫骨的最大损伤偏差为 76.0%，平均损伤偏差为 18.9%。表明车辆存在俯仰角度时，对儿童腿部损伤有明显的影响。

4 结论

本文探究了轿车和 SUV 车型在不同速度下由 AEB 作用引起的车辆俯仰角对儿童腿部损伤影响，当车辆存在不同俯仰角度时，车辆与儿童腿部的碰撞位置发生变化，从而导致儿童腿部损伤发生变化。首先，从数值上来看，轿车存在俯仰角会增大儿童膝关节内侧副韧带 (MCL) 伸长量和增大大腿最大弯矩，速度为 40km/h、30km/h 时会增大小腿最大弯矩；SUV 存在俯仰角时会减小儿童的 MCL 伸长量、增大大腿最大弯矩、减小小腿最大弯矩。其次，通过最大损伤偏差分析和平均损伤偏差分析表明车辆存在俯仰角度时对儿童腿部损伤有明显的影响。最后，股骨最大弯矩随着车辆姿态的变化出现的位置会发生变化，车辆与行人碰撞时股骨最大弯矩位置在有俯仰角时会向下移；胫骨最大弯矩位置在轿车车型中基本不会变化，在 SUV 车型中有向下移动的趋势。本文未考虑到除 SUV、轿车以外的车型以及不同儿童年龄和身高等因素，存在一定的局限性。综上，该研究将为行人安全法规制定、行人保护装置研发、AEB 系统设计和数字化测评提供科学依据。本文未不同车型、不同儿童年龄和身高、不同道路条件等都会影响到结果。

参考文献

- [1] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Data Query [EB/OL]. (2024-2-29) [2024-05-06]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. 中华人民共和国国家统计局.数据查询[EB/OL].(2024-2-29)[2024-05-06].<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] Wang Bingyu, Liu Tianquan, Han Yong, et al. Research on the Impact of Front-end Design Modifications of Passenger Cars on Pedestrian Lower Limb Injury [J]. Journal of Vibration and Shock.
- 王丙雨,刘天泉,韩勇,等.乘用车前部造型的改变对行人下肢损伤的影响研究[J].振动与冲击,2024,43(09):291-297.
- [3] Yang Yu. Research on the Inverse Calculation of Material Parameters and Bio-fidelity of the Advanced Pedestrian Legform Impactor (aPLI) [D].

- Tianjin University of Science and Technology.2023.
 杨宇.aPLI 柔性腿型冲击器的材料参数反求及生物仿真度研究[D].天津科技大学,2023.
- [4] Li Haiyan, Huang Shengyi, Li Kun, et al. Analysis and Prediction of Lower Limb Injury in Pedestrian-Vehicle Collisions for Six-Year-Old Children [J]. Automotive Engineering.,2023,45(06):1050-1061.
 李海岩,黄盛一,李琨,等.行人-车辆碰撞中六岁儿童下肢损伤分析及预测[J].汽车工程,2023,45(06):1050-1061.
- [5] Lalwala, M., et al. "Finite element reconstruction of real-world pedestrian accidents using THUMS pedestrian model." International journal of crashworthiness (2020).
- [6] Saadé, Jacques, et al. "Pedestrian injuries and vehicles-related risk factors in car-to-pedestrian frontal collisions." 2020 IRCOBI conference proceedings. Farmington Hills: International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI), 2020.
- [7] Miao, Qi, et al. "Analysis of pedestrian fractures in collisions between small cars and pedestrians based on surveillance videos." The American Journal of Forensic Medicine and Pathology 43.1 (2022): 11-17.
- [8] Ji Zhonghao, Zhou Jingyan, Yang Tiandong, et al. Research on the Test and Evaluation Method of AEB System Based on Real Vehicle Test [J]. Automotive Technology.2020,(05):13-20.
 季中豪,周景岩,杨天栋,等.基于实车测试的AEB系统测试评价方法研究[J].汽车技术,2020,(05):13-20.
- [9] Cicchino, Jessica B. "Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates." Accident Analysis & Prevention 99 (2017): 142-152.
- [10] Cicchino, JB. Effects of automatic emergency braking systems on pedestrian crash risk. ACCIDENT ANALYSIS AND PREVENTION [J]. 2022. Volume172.
- [11] Liu Shuwei, Zhou Wu Kui, Hao Liang. Research on Simulation of Safety and Comfort Control of Emergency Braking System for Automobiles [J]. Modern Manufacturing Engineering.2018,(10):76-81.
 刘树伟,周武奎,郝亮.汽车紧急制动安全与舒适性控制仿真研究[J].现代制造工程,2018,(10):76-81.
- [12] Liu Niansong. Research on Head Injury of Pedestrians in Collision Considering the Pitching of Automobiles under Braking State [D]. Hunan University, 2020.
 刘念松.考虑制动状态下汽车俯仰对行人碰撞的头部损伤研究[D].湖南大学,2020.
- [13] Kullgren, A, Amin, K , Tingvall, C . Effects on crash risk of automatic emergency braking systems for pedestrians and bicyclists. TRAFFIC INJURY PREVENTION [J]. Volume24; PageS111-S115;Supplement1; Special Issue:SI. 2023.
- [14] Tian, ZW; Wang, YM. Research on Autonomous Emergency Braking System Strategy Based on Pedestrian Crossing the Road. SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL CONTROL TECHNOLOGY AND TRANSPORTATION [J]. Volume:12081. 2022.
- [15] Haus, SH; Sherony, R; Gabler, HC. Estimated benefit of automated emergency braking systems for vehicle-pedestrian crashes in the United States. TRAFFIC INJURY PREVENTION [J]. 2019. Volume20; PageS171-S176.
- [16] Klug C,Feist F, Raffler M, Sinz W, Petit P, Ellway J,van Ratingen M.2017.Development of a Procedure to Compare Kinematics of Human Body Models for Pedestrian Simulations.Paper presented at:IRCOBI.2017 IRCOBI Conference Proceedings.pp.509-30;Antwerp,Belgium.
- [17] Wood D, Simms C. Coefficient of friction in pedestrian throw[J]. Impact, 2000, 9(1): 12-15.
- [18] Long Yongcheng, Hao Haizhou, Li Fan, et al. Study on the Bio-fidelity of Current Legform Impactors in Pedestrian Safety Testing [J]. Journal of Automotive Safety and Energy,2021,12(04):475-482.
 龙永程,郝海舟,李凡,等.行人安全测试现行腿型冲击器的生物逼真度[J].汽车安全与节能学报,2021,12(04):475-482.

附录

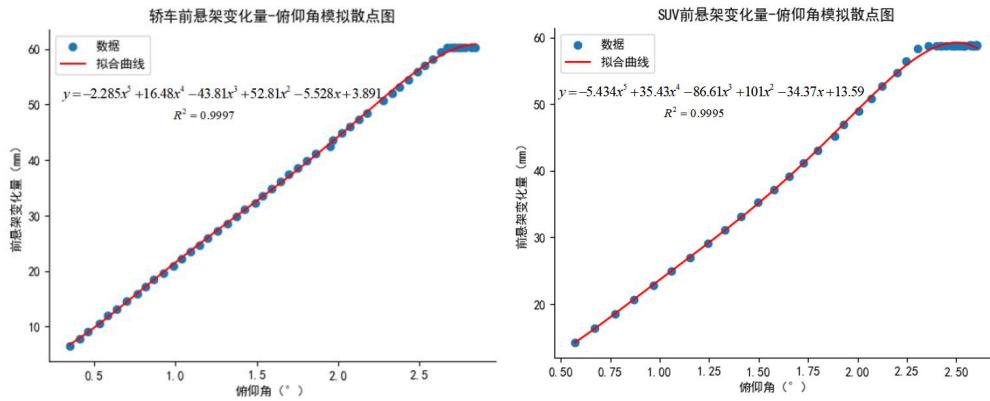
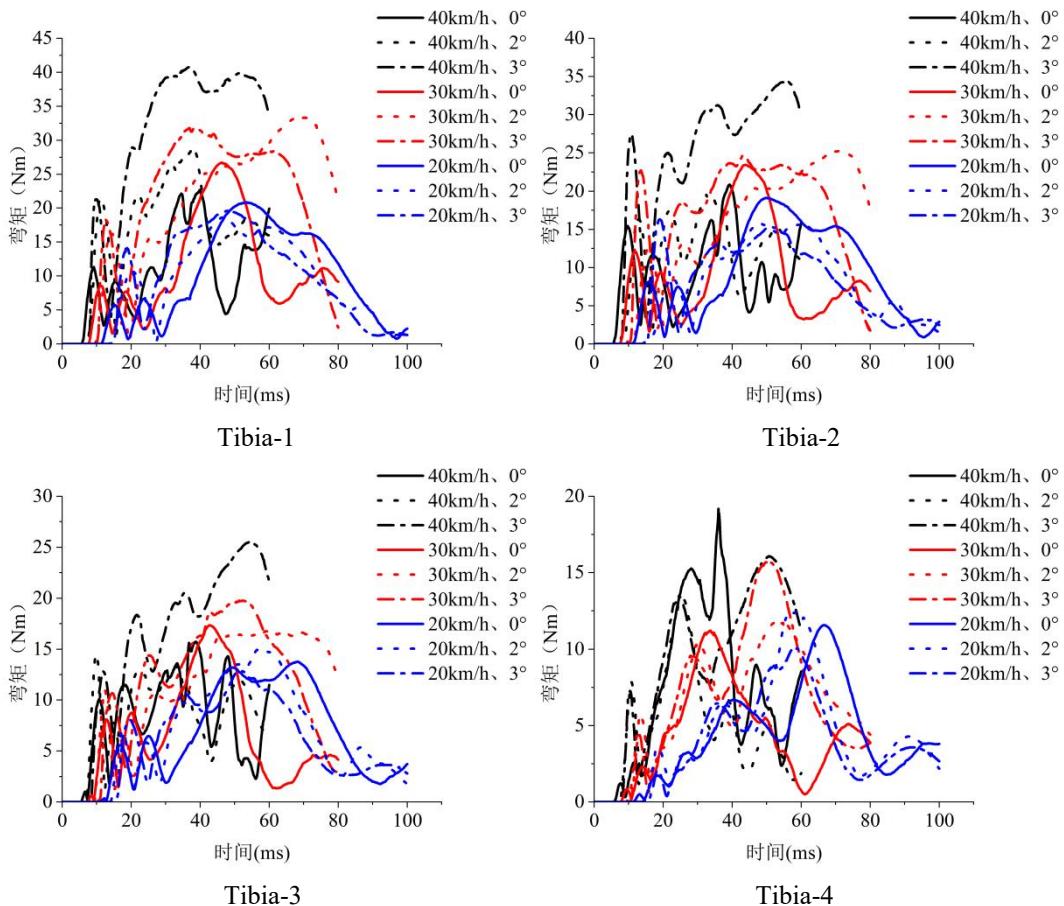


Figure 1. The variation of the vehicle's front - suspension and the change of the vehicle's pitch angle.

图1 车辆前悬架变化量与车辆俯仰角变化



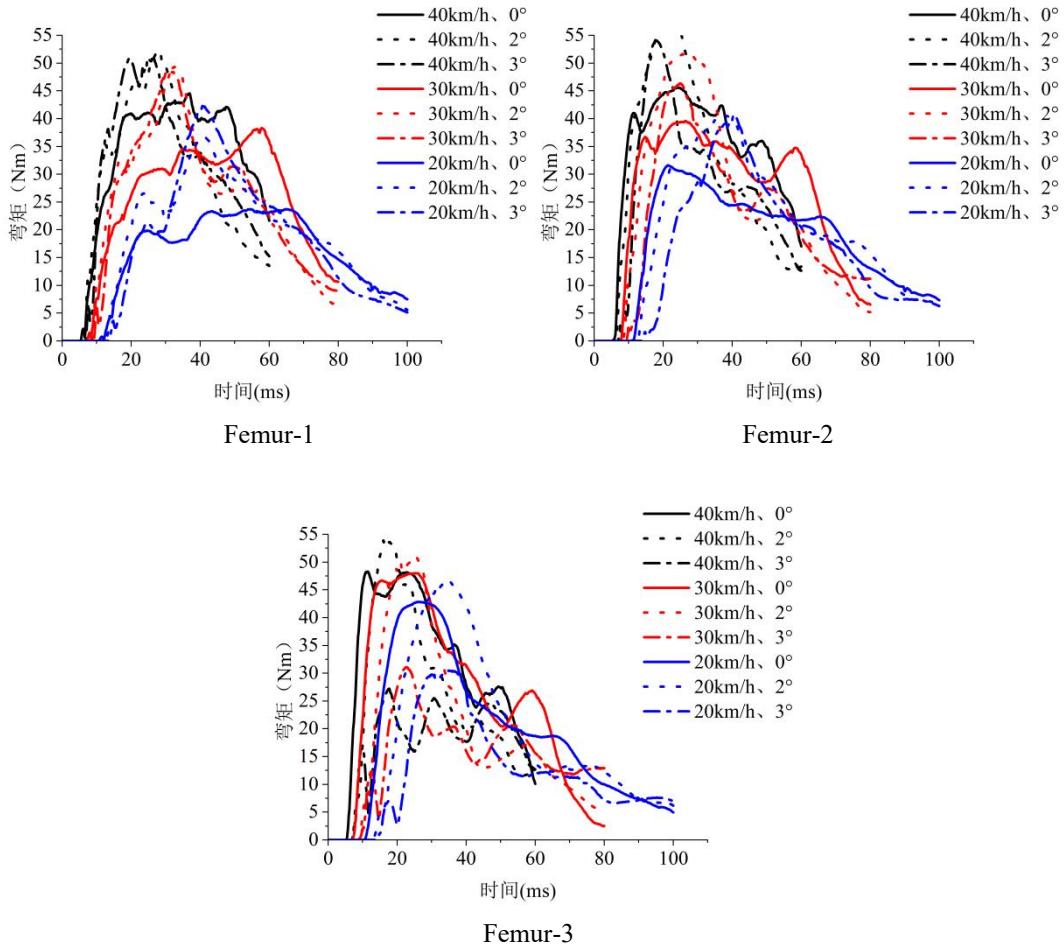
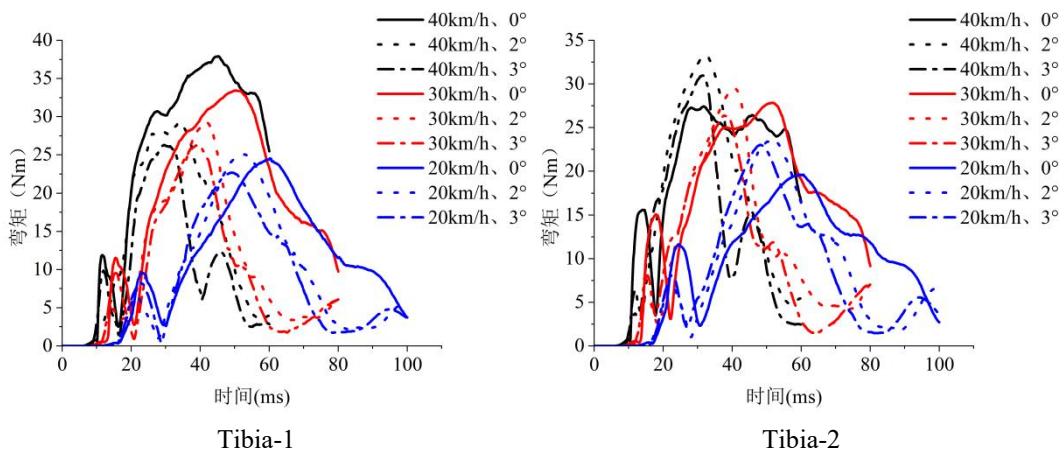


Figure 2. Curves showing the variation over time of injuries to various parts of the leg for a pedestrian in a collision with a sedan.

图 2 轿车与行人碰撞，行人损伤腿部各部位损伤随时间变化曲线



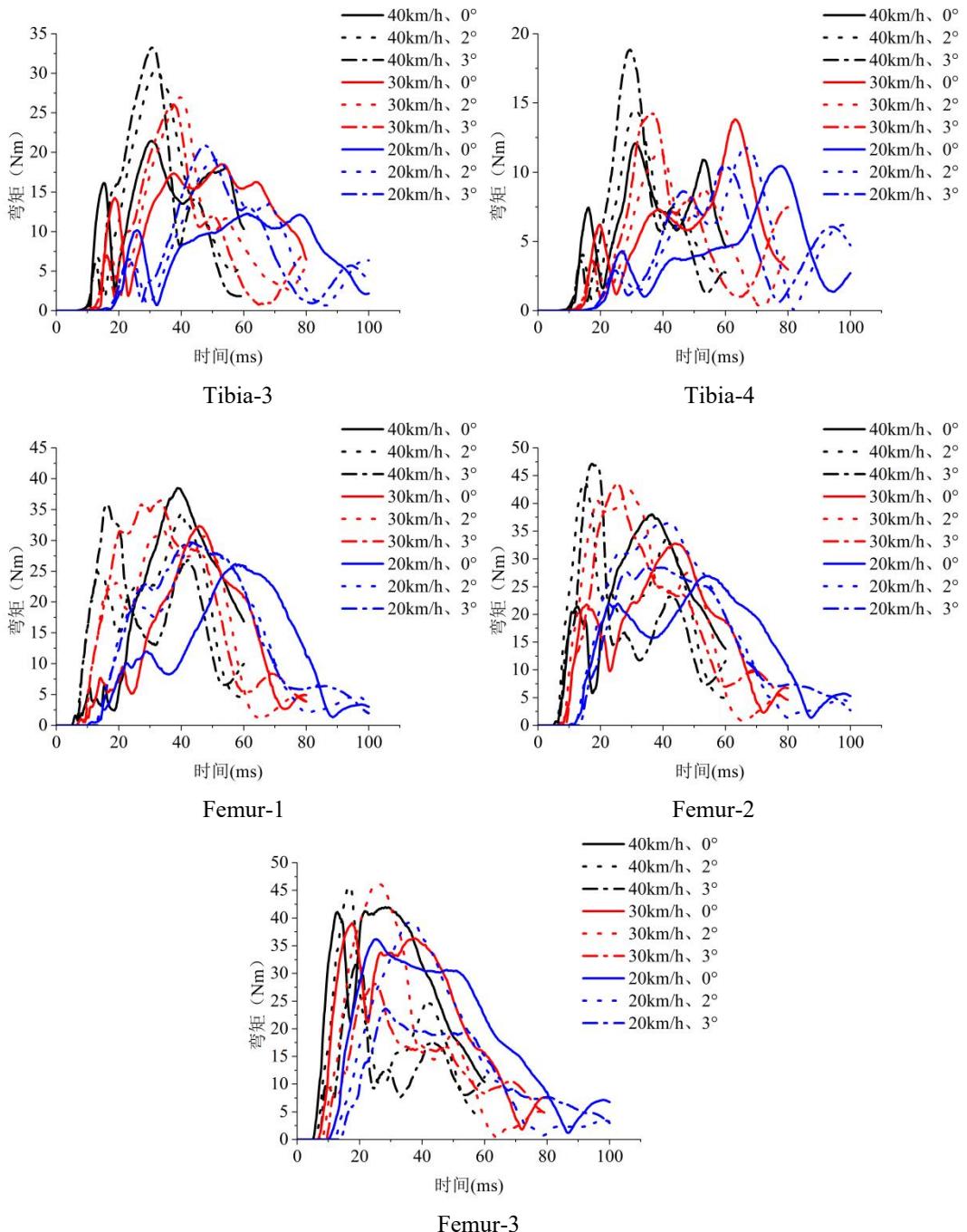


Figure 3. Curves showing the variation over time of injuries to various parts of the leg for a pedestrian in a collision with an SUV

图 3 SUV 与行人碰撞，行人损伤腿部各部位损伤随时间变化曲线