

主动与被动一体化的汽车安全性能评测及智能防护

Assessment of vehicle safety and integrated protection of autonomous vehicle

周 青

清华大学车辆与运载学院

zhouqing@tsinghua.edu.cn

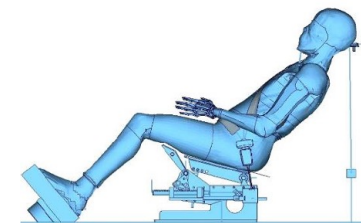
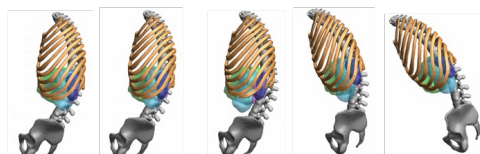


Ansys 汽车行业主动与被动安全技术研讨会 – 2025年5月20日 – 上海

内容

- 自动驾驶汽车的极端安全风险场景及防护策略
- 主被动一体化安全保护示例
 - 零重力坐姿碰撞安全保护
 - 基于行人姿态和行为判别的保护
- 虚拟安全测评

本文档部分图片
源自网络



汽车碰撞安全防护中尚未解决的问题

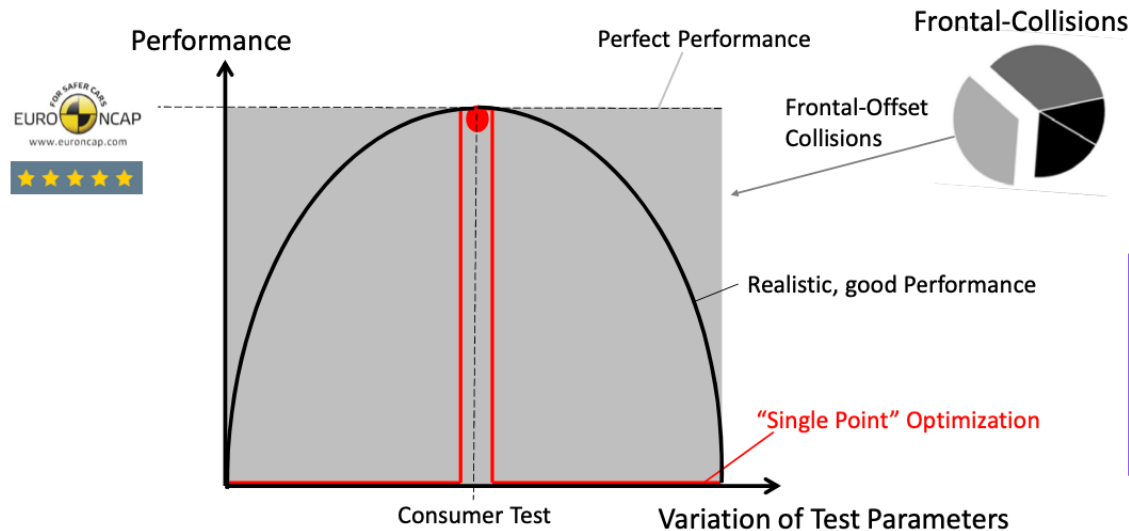
- 覆盖足够真实事故场景的多工况碰撞保护
- 考虑体型、坐姿、年龄、性别的最优保护
- 未来自动驾驶场景下的新事故形态
- 电动车高速碰撞下的电池安全保护

也缺失适当的评测方法和标准



The gap between design optimizations and realities

Excursus: Single Point-Optimization or Cycle Beating ?



Design optimization is only aimed at the “requirements” in regulations or consumer rating tests

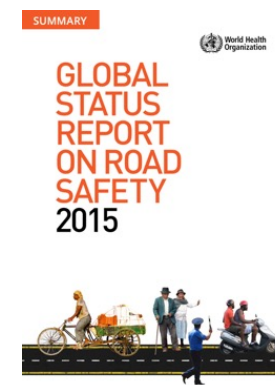


道路交通事故及风险的特点

- 道路交通事故导致全球每年约 130 万人死亡 – 不安全!
- 美国数据: 2014 年 每 1 亿英里行驶里程死亡 1.08人 – 挺安全!
- 目前 90% 以上的道路交通事故是由人的错误引起的
- 自动驾驶把司机从系统里去除, 能否大大降低事故的发生?
- 否! – 不外乎是把犯错误的主体从人换成电脑了

交通事故特点

- ✓ 单次出行风险极低
- ✓ 出行里程基数巨大
- ✓ 事故发生率相对出行里程极低
- ✓ 事故总量和人员损伤总量高



因此, 我们必须解决极端情况 (corner cases) 的安全问题!



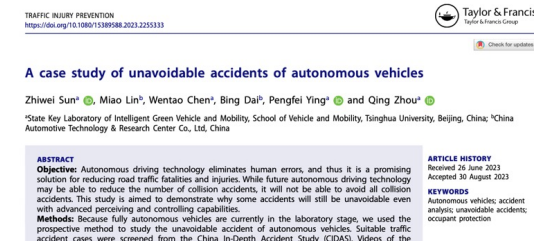
智能交通环境下智能汽车无法避免的碰撞事故

- 假设未来的自动驾驶车辆具备**近乎完备**的感知、判断和决策能力
- 从车辆动力学干预的物理极限和交通环境约束的角度分析
- 因为碰撞规避时间不足，**仍有碰撞事故不可避免**
- 从危险源出现到碰撞发生的时间通常**少于 1.8s**



- 车流速度大约 **100km/h**
- 从货车失控到发生碰撞时间为 **0.6s**

- 换道后感知到危险时车速约为 **70km/h**
- 与障碍物距离约为 **29m**
- 最大制动将碰撞时车速降到 **14km/h**



自动驾驶汽车的动力学响应与控制边界

- 机械故障、设计缺陷、道路缺陷、算力不足、传感器故障、软件错误、通讯延迟、误报漏报迟报、黑客攻击 …
- 自动驾驶技术面临的挑战：
- 临撞情况下预警、预判和实施防护只有 **2秒** 的时间窗口

感知、融合、通讯需要时间！
预判和决策需要时间！
车辆控制和响应需要时间！

复杂的交通环境和系统



智能汽车应对极端安全风险的策略

假设目前自动驾驶技术在安全性方面已经达到 60% 的满意度，那最终能达到 99% 吗？

如何处理未知安全因素？(Unknown unsafe)

安全防护策略不能也不应仅依靠自动驾驶技术

智能碰撞保护

- ✓ 自动驾驶车辆安全的最后一道防线！
- ✓ 涵盖自动驾驶车辆技术开发中未能考虑到的极端情况



美国版解决方案



95%



5%

目前只承担车辆安全性中 1% 的任务

安全目标



智能安全保护系统为何能实现保护目标？

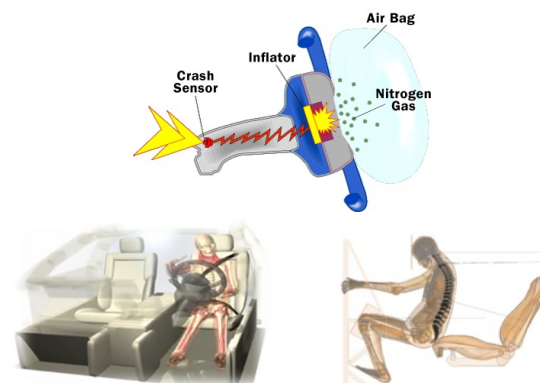
1. 具有更多的信息

- 监控车辆行驶环境和碰撞风险
- 检测乘员体型并获得乘员状态

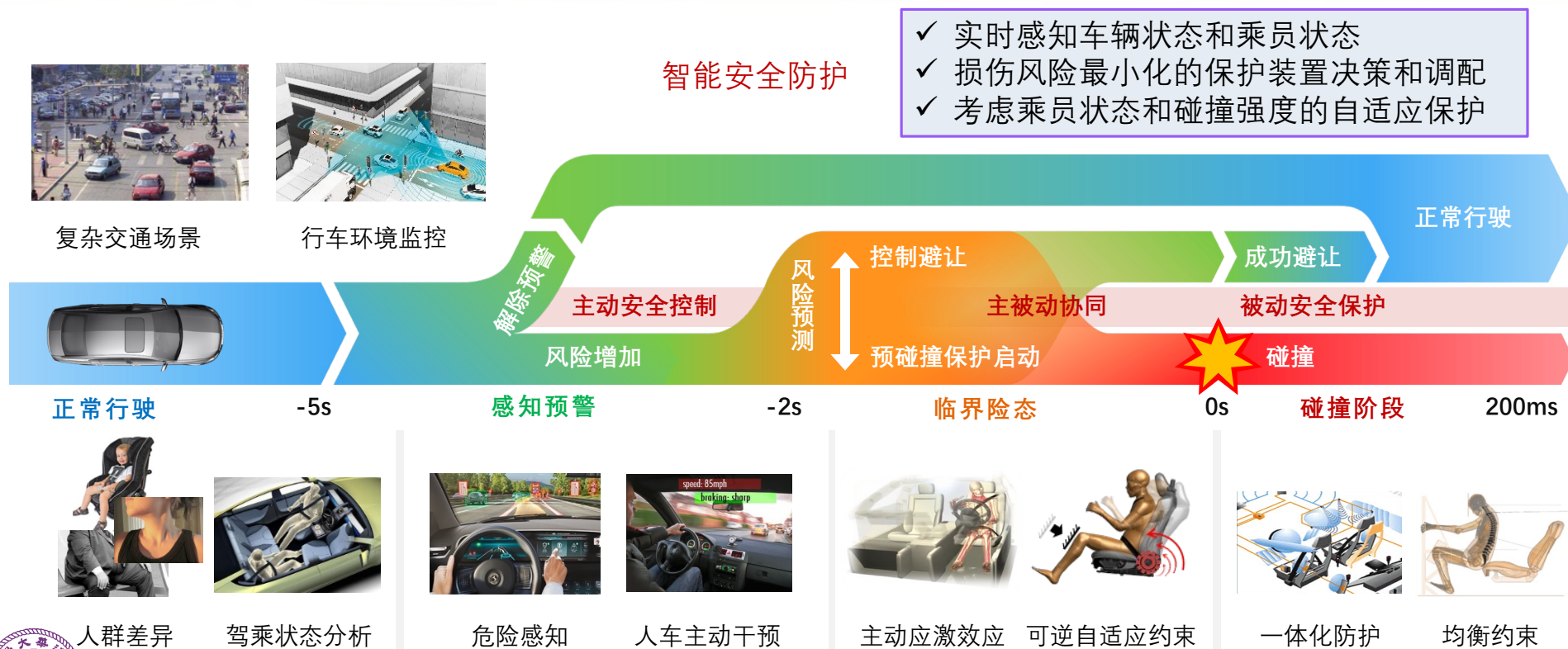
碰撞预警

2. 具有更长的时间

- 判断风险并启动和调整保护系统
- 发生碰撞前 1~2s 的预警时间虽然可能不足以规避碰撞
- 但比目前气囊感知和展开时间至少长50倍



一体化智能安全体系下的碰撞预警及保护



智能汽车的乘员安全保护原理

自适应及均衡乘员约束

- 约束载荷呈分布态配置于身体强壮部位
- 装置可调配载荷作用的大小、位置和时机
- 降低气囊、安全带的非均衡特性对损伤的影响

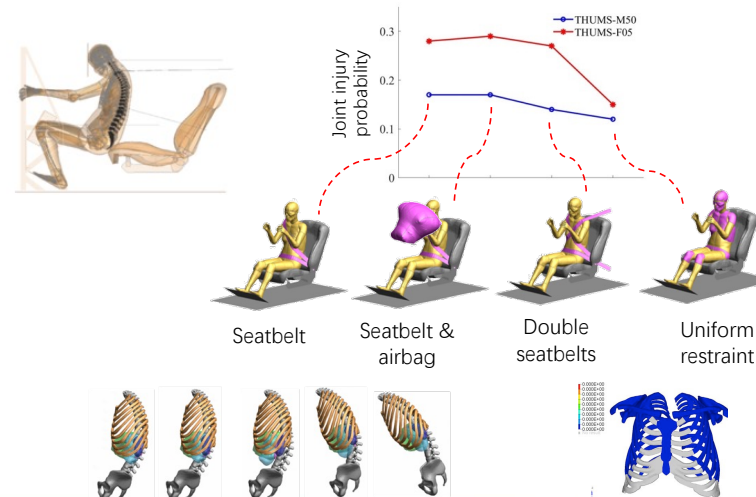


约束装置的智能特征

- 低行车风险时基本不约束
- 风险增加时启动并靠近乘员
- 碰撞前一两秒张紧并施加约束
- 风险消失后恢复初始状态

降低损伤并增强保护效果

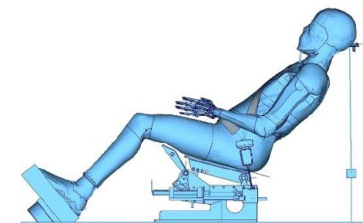
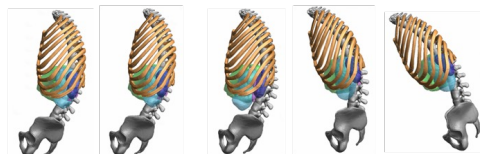
- 更好地控制碰撞前和碰撞中的乘员姿态
- 产生更对称和均匀的胸部变形
- 更好地控制和保护后倾坐姿乘员
- 更好地适配不同体型和多个碰撞强度



内容

- 自动驾驶汽车的极端安全风险场景及防护策略
- 主被动一体化安全保护示例
 - 零重力坐姿碰撞安全保护
 - 基于行人姿态和行为判别的保护
- 虚拟安全测评

本文档部分图片
源自网络



零重力座椅和后倾坐姿乘员的碰撞损伤风险

- 肩带与颈部发生干涉，造成颈部勒伤风险
- 普通后倾姿态易发生下潜，腹带嵌入腹部造成器官和肋骨损伤
- 碰撞方向与脊柱轴向形成夹角，产生沿脊柱方向的冲击分量
 - 造成脊柱的弯曲、压缩、剪切、扭转，增大腰椎损伤风险
 - 导致胸腹器官冲向骨盆，造成挤压受伤

目前的装置均无法在碰撞下给脊柱施加有益的约束载荷



中国汽研推出全球首个大倾角座椅乘员安全测评方案

中国汽研 2024-04-11 16:52 重庆

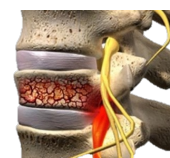
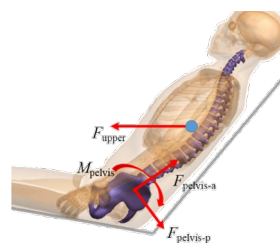
4人听过

4月10日，中国汽研安全与测评研究组（以下简称：研究组）2024年第一次工作会议之智能座舱安全技术研讨会在广州顺利召开，本次会议由中国汽研检测工程事业部、指数管理中心主办，来自车企、零部件及科技企业40余人出席本次会议，会议由中国汽研专家郑质博士主持。

重庆汽研和天津中心
准备出台零重力座椅
碰撞安全性评测



在专项报告环节，中国汽研介绍了研究组在智能座舱安全领域取得的最新成果及后续研究规划，同时邀请Cellbond、



清华方案：利用碰撞惯性触发座椅的可控滑动和吸能

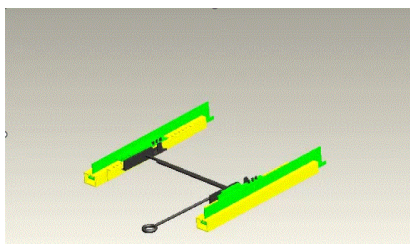
- 原理：充分利用车内空间，提升乘降（ride-down）效率
- 前碰撞下座椅朝前滑动，**释放臀部冲击，减小腰椎挤压**
- 尾撞下座椅朝后滑动，**降低头部和躯干的相对运动及颈部拉伸和挥鞭伤**
- 未来乘员防护的核心：集成于座椅的约束装置
- 复杂工况拓展：斜向碰撞滑动，座椅朝向变化、角度和软硬设置
- **智能化拓展**：针对乘员体征、碰撞强度、座椅位置预设不同的滑动约束力和滑动距离限位，实现有针对特定工况的保护



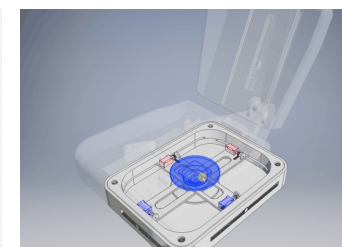
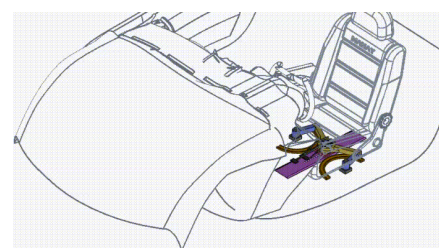
尾撞下滑动吸能座椅



滑轨套滑轨及钢片拉弯吸能



座椅可朝任何碰撞方向惯性滑动或锁止



周青 张晓伟 罗萌 Dima 黄毅 赖兴华 程锦 罗睿 黄媛 谭普元 戴睿 刘文博 葛宇龙 等. 清华大学专利, 2007-2024.



零重力座椅碰撞滑动对腰椎的保护效果

THOR 假人台车碰撞试验及人体模型仿真研究

Autoliv



Reducing Lumbar Spine Fracture Risk With an Adaptive Track Load Limiter

Martin Östling^{1*}, Christer Lundgren², Nils Lubbe¹ and Bengt Pipkorn¹

¹Autoliv Research, Vårgårda, Sweden, ²System and CAE Department, Autoliv Sweden, Vårgårda, Sweden

In future fully automated vehicles, sleeping or resting will be desirable during a drive. While a horizontal position currently appears infeasible, a relaxed seating position with a reclined seatback and an inclined seat pan which enables a safe, comfortable position for sleeping or resting is investigated. The influence of such a position on the forces and moments acting on the lumbar vertebrae during a sled crash test is investigated. When evaluating the injury reduction potential of a new restraint system as a STLL it is important to include variations in both occupant size and crash situation. Otherwise, there is a risk of sub-optimizing, that is, the restraint system is only working in a limited number of situations. The restraint systems addressing these variations should be investigated.

- ✓ THOR 假人, 50 km/h 碰撞, 60° 后倾
- ✓ 单一工况优化 vs. 多工况智能调配
- ✓ 峰值腰椎压缩力从 6 kN 降至 3.8 kN

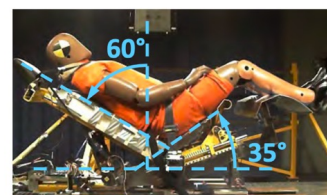


Fig. 5. THOR-50M relaxed position.

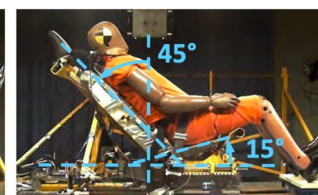


Fig. 6. THOR-50M reclined position.

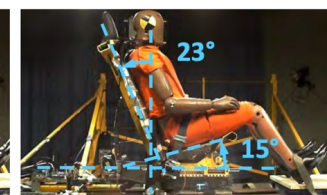
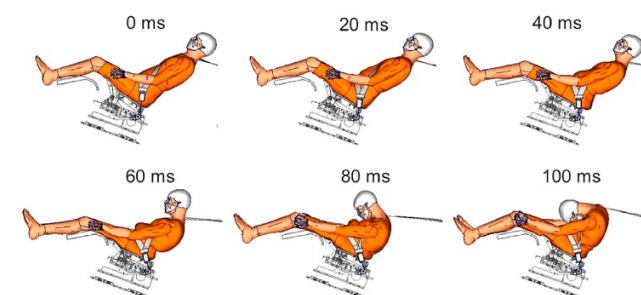


Fig. 7. THOR-50M upright position.



OPEN ACCESS

Edited by:

Yong Han,
Xiamen University of Technology,
China

Reviewed by:

Qing Zhou,
Tsinghua University, China



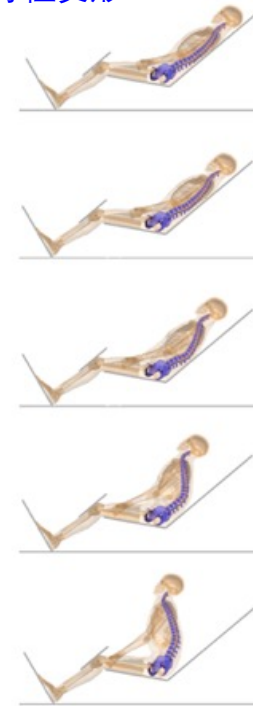
Östling, et al.

1. The Influence of a Seat Track Load Limiter on Lumbar Spine Compression Forces in Relaxed, Reclined, and Upright Seating Positions: A Sled Test Study using THOR-50M. IRCOBI 2021.
2. Reducing Lumbar Spine Vertebra Fracture Risk With an Adaptive Seat Track Load Limiter. Front. Future Transp. 3:890117. doi: 10.3389/ffutr.2022.890117

清华方案：智能调控膝部挡板位置和刚度

- 目的：降低后倾乘员的脊柱和其他碰撞损伤
- 预警阶段：风险增加时膝部挡板抵近下肢或变换腿托构型
- 碰撞约束
 - 通过约束膝部和下肢调控后倾乘员的碰撞响应姿态
 - 利用碰撞惯性将躯干回位
 - 延迟气囊和肩带的约束，协同控制下肢和躯干的运动姿态
- 主动被动一体化
 - 基于碰撞预警提前启动装置，匹配气囊和安全带设置
 - 根据座椅位置、乘员坐姿、身材匹配约束时间和约束载荷

抵近约束下肢以控制碰撞响应姿态和脊柱变形



正常膝部挡板位置下的后倾乘员脊柱碰撞变形



Ji, Huang, Zhou. Mechanisms of using knee bolster to control kinematical motion of occupant in reclined posture for lowering injury risk. Int. J. Crashworthiness, 2017.

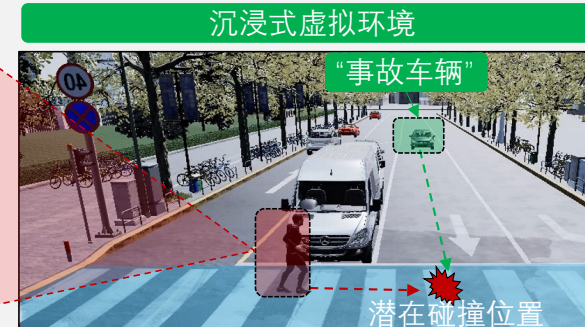


行人与车辆交互冲突中安全域的识别

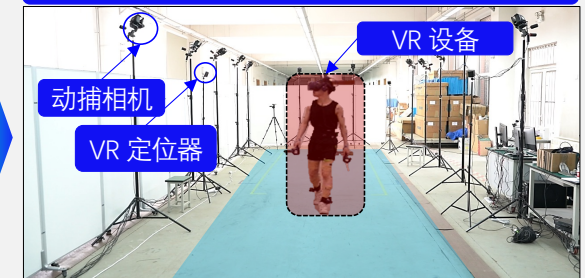
行人主动避让行为（真实事故）



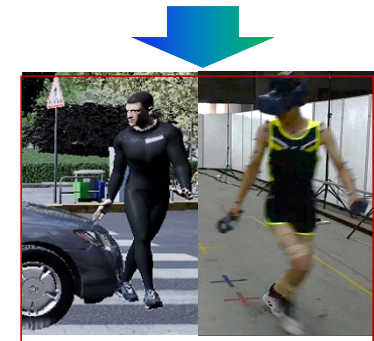
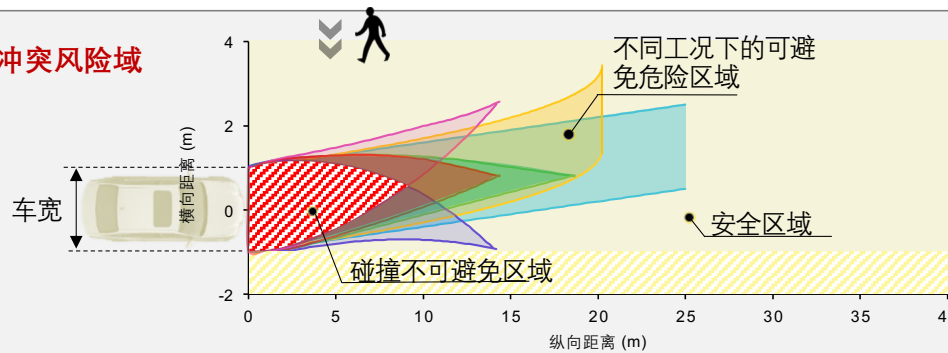
实验平台



试验室物理环境



交互冲突风险域



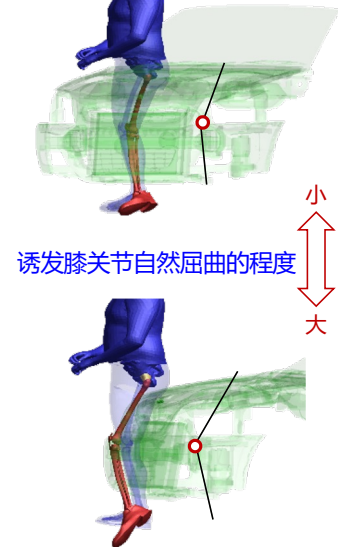
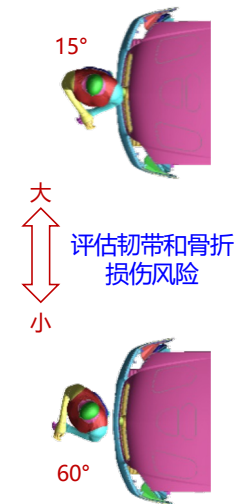
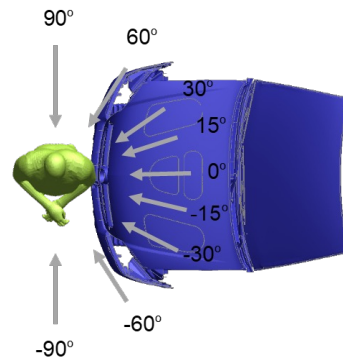
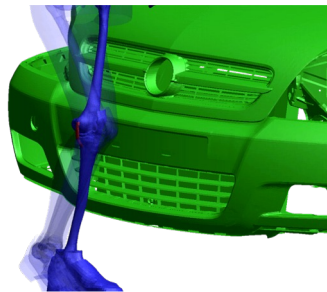
行人主动避让行为（试验结果）

Nie B, Li Q, Gan S, Xing B, Huang Y, Li SE. Safety envelope of pedestrians upon motor vehicle conflicts identified via active avoidance behaviour. Scientific Reports, 11 (2021) 3996.



复杂事故场景下的行人碰撞响应和下肢损伤研究

- 利用高生物逼真度人体有限元模型仿真复杂事故场景下的人车碰撞
- 在膝关节韧带和下肢长骨组织层面评估损伤
- 体型、姿态、步态、接触位置、碰撞角度和速度对下肢运动和损伤响应的影响



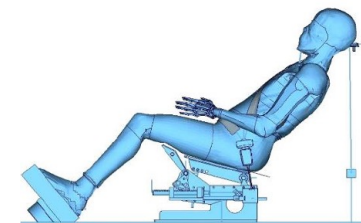
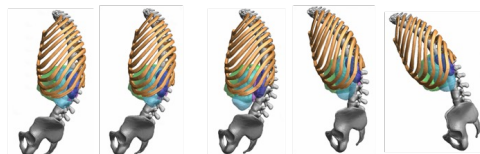
Tang J, Zhou Q. Intrinsic Relationship between Anatomy, Kinematics and Injuries of Knee Joint under Various Vehicle-to-Pedestrian Impact Orientations. IRCOBI Asia 2020.



内容

- 自动驾驶汽车的极端安全风险场景及防护策略
- 主被动一体化安全保护示例
 - 零重力坐姿碰撞安全保护
 - 基于行人姿态和行为判别的保护
- 虚拟安全测评

本文档部分图片
源自网络

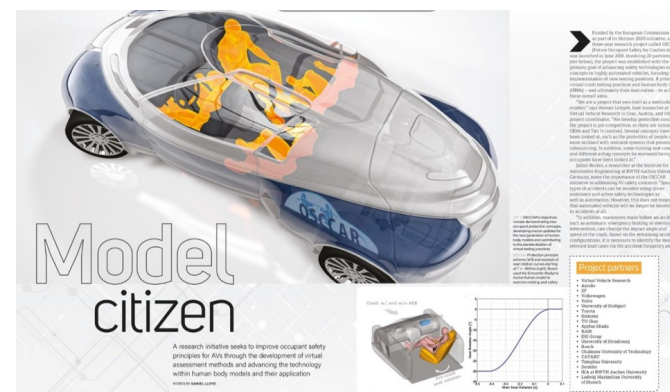


面向未来交通事故场景的汽车乘员安全保护



- ✓ 未来事故形态
- ✓ 新型乘员约束
- ✓ 虚拟安全测评
- ✓ 人体数字模型
- ✓ 评价工具链

欧洲版解决方案



研究资助

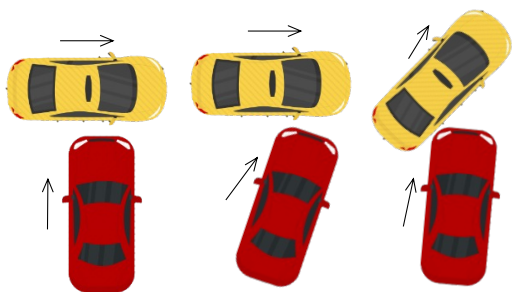
- ✓ 欧盟地平线计划 (768947)
- ✓ 科技部国家重点研发计划 (2017YFE0118400)
- ✓ 国家自然科学基金 (51675295)



自动驾驶车辆的新事故工况及防护要求

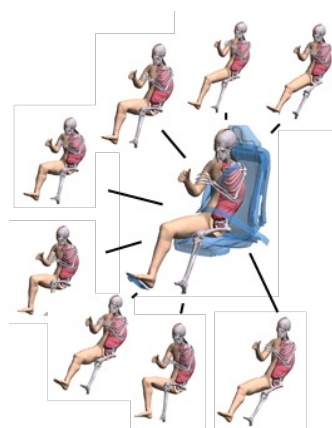
- ✓ 载荷：紧急制动 + 斜前向碰撞，包括高中低多个碰撞强度 …
- ✓ 乘员：正常坐姿 + 后倾坐姿，包括大中小多个身材 …
- ✓ 设计：基于人体损伤评估和数字模型的虚拟设计和测评

多场景
多身材
多姿态

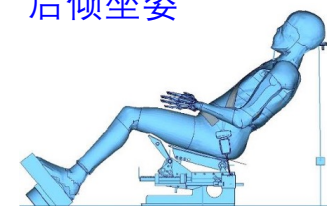


- 斜前向碰撞是一个典型工况，从碰撞波形层面能涵盖非典型座椅朝向，研发积累少
- 侧面碰撞依然重要

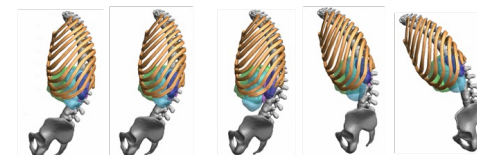
多种体型和坐姿



后倾坐姿

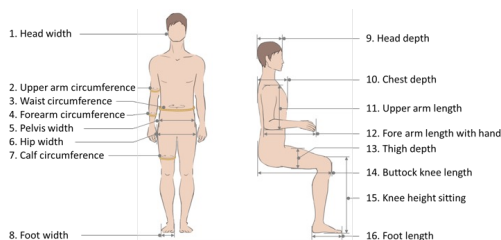


基于人体模型的损伤评价

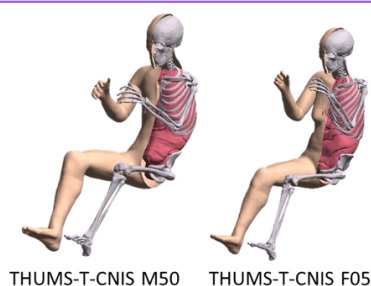


虚拟安全评测工具： 包括中国人群体征在内的多种体型和坐姿的乘员人体模型库

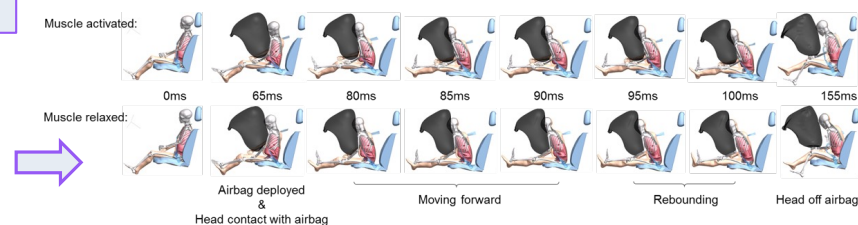
16 项中国人体测量尺寸
(中国标准化研究院)



THUMS-T-CNIS Models
M50 & F05



仿真碰撞肌肉效应的影响



Asian M50
THUMS AM50



多种体型和坐姿的人体模型库

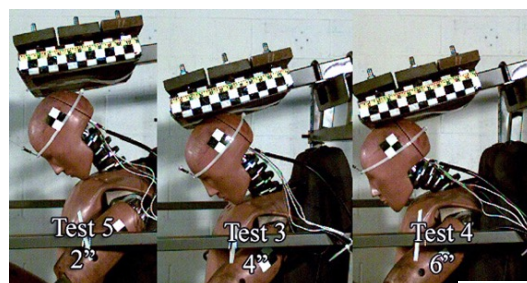


TOYOTA



虚拟安全评测工具： 下一代碰撞假人 THOR 及有限元模型

The first THOR FE model was developed by
Zhou & team in 1999-2003



116 *Int. J. Vehicle Safety*, Vol. 2, Nos. 1/2, 2007

Head-neck finite element model of the crash test dummy THOR

H Yu, M B Medri, Q Zhou, F P DiMasi* and F A Bandak*

doi:10.1533/jer.2004.0276

EG&G Technical Services, Cambridge, MA 02142, U.S.A.

**Volpe National Transportation Systems Center, U.S. Department of Transportation, Cambridge, MA 02142, U.S.A.*

Abstract: Development, calibration and validation of a three-dimensional finite element model of the head-neck sub-assemblies of the THOR 50th percentile male dummy are presented. The model provides, in conjunction with the use of the physical dummy, a computational tool for head-neck injury studies related to motor vehicle, rail, or aircraft crashes. Physical dummy CAD data is used to construct the finite element mesh. Mass and inertia properties of the model are consistent with those of the hardware. The THOR head spring-cable system, designed to produce a neck that gives more

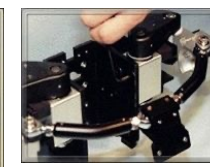
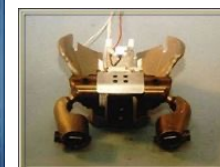
Three-dimensional finite element modelling of the torso of the anthropomorphic test device THOR

Hailing Yu*

Chenega Advanced Solutions and Engineering, LLC,
Volpe National Transportation Systems Center,
U.S. Department of Transportation,
55 Broadway, Kendall Square RTV-9M,
Cambridge, MA 02142, USA
E-mail: yu@volpe.dot.gov
*Corresponding author

Qing Zhou

State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy,
Department of Automotive Engineering,
Tsinghua University,
Beijing 100084, China
E-mail: zhouqing@tsinghua.edu.cn



Proceedings of IMECE2002
ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition
November 17-22, 2002, New Orleans, Louisiana

IMECE2002-39171

FINITE ELEMENT MODEL OF THOR DUMMY LOWER LEG

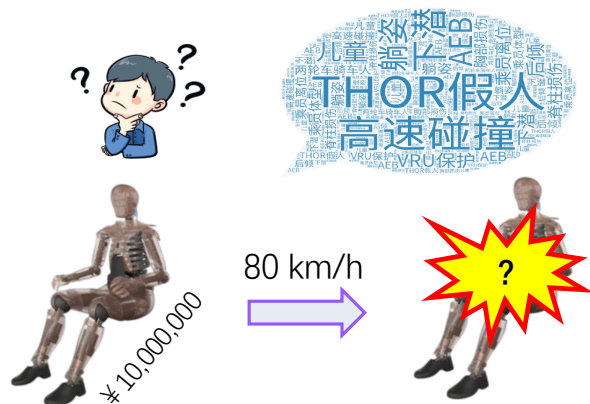
Qing Zhou
Hailing Yu
Marisol B. Medri
Frank DiMasi

Volpe National Transportation Systems Center

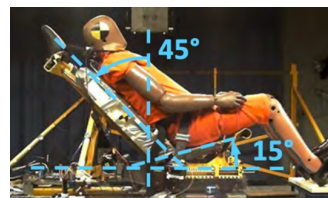


虚实结合测评非标工况和更多复杂场景

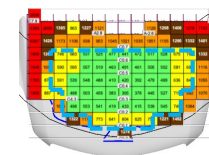
- ✓ 乘员安全评价需求多样化
- ✓ 车辆安全性要求复杂度增加



- 后倾碰撞下的脊柱损伤及下潜造成的腹部损伤
- 需自定义损伤输出，无适当的测评假人
- 采用人体数字模型虚拟测评
- 与 THOR 假人物理实验和虚拟仿真结果形成映射关系



- 标准工况下采用物理实验测评，同时验证模型
- 高速碰撞、非标体型等非常规场景采用虚拟仿真测评，以覆盖更多极端情况下的安全问题



- 行人保护头部冲击器实验测评点多
- 需降低实验成本，提升测评效率
- 物理测试 + 模型验证 + 虚拟测试



课题组研究方向：车辆一体化安全与人员碰撞防护



本团队持续招聘博士后学者

车辆一体化安全，结构和人员碰撞防护，汽车轻量化



人员保护

- ✓ 真实事故场景
- ✓ 人员损伤
- ✓ 智能防护



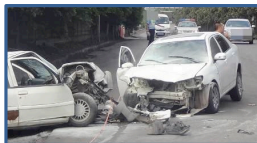
电池碰撞安全

- ✓ 机械滥用和热失控
- ✓ 失效阈值和安全范围
- ✓ 预测模型



材料失效和安全

- ✓ 大变形失效
- ✓ 失效预测模型
- ✓ 安全防护



清华大学汽车安全与轻量化团队



周青



夏勇



聂冰冰

中文版和英文版网络公开课
《汽车碰撞安全基础》

学堂在线



中文



英文



微信号: 汽车安全与轻量化



谢谢!