

翻滚安全性研究方法综述

彭湃, 王军评, 张军

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 首先对翻滚事故的分类、场景特征进行了归纳总结, 然后从整车翻滚安全性试验方法、翻滚试验与翻滚事故场景的关联性、翻滚数值模拟方法等几个方面, 对翻滚安全性的研究现状进行了阐述。目前研究认为, 绊翻、抛翻、坠翻是发生比例最高的几类翻滚事故, 绊翻试验(路缘绊翻及沙地翻滚)、螺旋翻滚试验、边坡翻滚试验方法能够覆盖大部分的翻滚事故场景。最后, 分析了目前国内该领域研究存在的问题, 未来还需在建立完整详细的翻滚事故数据库、形成科学合理的翻滚试验方法与规范、实现翻滚全过程的精细化数值模拟能力等方面加强研究。

关键词: 翻滚; 安全性; 事故场景; 试验方法; 数值模拟

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0034-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.006

Review on Research Methods of Rollover Safety

PENG Pai, WANG Jun-ping, ZHANG Jun

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: Firstly, the classification and scene characteristics of rollover accident were summarized. Then, the development of the rollover safety study was introduced in various aspects, such as the rollover safety test methods, the relevance between rollover safety tests and rollover accident scenes, and the rollover safety numerical simulation methods. The current conclusions were that trip-over, flip-over and fall-over were the dominant rollover accidents, and Curb-trip, Soil-trip, Corkscrew and Embankment rollover test methods could reflect most of the rollover accident scenes. Lastly, the current problems of rollover safety were analyzed, and there is a need to strengthen the research in establishing a complete and detailed rollover accident database, forming a scientific and reasonable rollover test method and specification, and realizing the refined numerical simulation capability of the whole process of rollover in the future.

KEY WORDS: rollover; safety; accident scenes; test method; numerical simulation

汽车行驶过程中, 可能发生各种意外碰撞事故, 其中翻滚事故的比例不高, 但是造成的后果相比其他

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-04-08

Received: 2021-03-29; Revised: 2021-04-08

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSHS2019212C001)

Fund: Supported by the National Defense Technology Foundation Project(JSHS2019212C001)

作者简介: 彭湃(1990—), 男, 工程师, 主要研究方向为冲击动力学试验与应用。

Biography: PENG Pai(1990—), Male, Engineer, Research focus: impact dynamics test and application.

通讯作者: 王军评(1983—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为冲击动力学试验与应用。

Corresponding author: WANG Jun-ping(1983—), Male, Senior engineer, Research focus: impact dynamics test and application.

引文格式: 彭湃, 王军评, 张军. 翻滚安全性研究方法综述[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 034-040.

PENG Pai, WANG Jun-ping, ZHANG Jun. Review on research methods of rollover safety[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 034-040.

事故更为严重。据统计，在澳大利亚及欧洲，每年因翻滚事故导致的死亡人数在 20%以上^[1-2]。美国每年翻滚事故比例不到 3%，但死亡人数却达到 33%^[3]，经济损失超过 500 亿美元^[4-5]。在我国，以 2013 年为例，共发生单车翻滚事故 5910 起，占交通事故总数的 2.98%，由此导致 3851 人死亡，占死亡总数的 6.58%^[6]。翻滚事故不仅会造成严重的人员伤亡，还可能会造成其他严重的后果与社会影响。比如对于武器装备、放射性物质等专用物品的运输车辆（一般为中大型运输车），若发生了翻滚事故，可能还会造成化爆反应、放射性污染等严重的安全事故。因此，有必要开展翻滚事故场景下的安全性研究。其研究目的主要有 2 个：评估翻滚事故下车载人员的安全性，为乘客安全性设计的改进与优化提供支撑；评估翻滚事故下车载专用物品的安全性，为专用运输车辆的结构强度改进，以及武器装备、放射性物品及其运输容器的抗冲击防护优化提供支撑。

汽车翻滚事故与其他碰撞事故相比，具有明显的不同。首先，翻滚事故的类型多样，成因复杂，与地

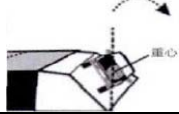
形地貌、气候环境、道路交通结构要素（如路缘、坡地、护栏等）、汽车行驶状态（车速、行驶角度）等息息相关。其次，翻滚运动过程复杂，汽车的碰撞位置、姿态及碰撞物不确定性大。这给预测与复现汽车的翻滚运动带来了很大的挑战，很难用较少的试验方法对各种翻滚事故场景与事故特征进行完全覆盖与复现。文中将从翻滚事故场景的基本特征、翻滚试验技术与方法、数值模拟仿真技术等方面介绍目前国内外翻滚安全性的发展现状，并提出未来该研究领域需解决的问题与发展方向。

1 翻滚事故场景的特征

1.1 翻滚事故的分类及定义

翻滚是指汽车绕其纵轴或横轴旋转 90°或 90°以上的运动^[7-8]。美国事故样本观察-碰撞数据系统（NASS-CDS）自 20 世纪末以来，在统计分析了大量翻滚事故与复现试验的基础上，从翻滚事故成因的角度来定义各种翻滚事故类型，详见表 1^[9-11]。

表 1 翻滚事故类型的定义及所占比例
Tab.1 The definition and percentage of various rollover accidents

翻滚类型	示意图	所占比例/%	
		乘用车	轻型货车
绊翻（Trip-over）：汽车的横向运动受外界影响而突然减速或停止（如路缘、软地面、爆胎或其他阻挡物）而引起的绕纵轴翻滚		56.8	51.2
抛翻（Flip-over）：汽车一侧驶上坡状物（如壕沟背坡、护栏）而引起的绕纵轴翻滚		11.6	15.4
坠翻（Fall-over）：汽车沿着边坡运动，重心偏离车轮支撑而引起的绕纵轴翻滚		12.9	15.4
爬翻（Climb-over）：汽车爬过障碍物而引起的绕纵轴翻滚		1.5	0.9
转翻（Turn-over）：由高速急转弯时离心力过大造成的绕纵轴翻滚		5.2	9.7
弹翻（Bounce-over）：汽车因与障碍物碰撞反弹而引起的绕纵轴翻滚		8.4	7.6
空翻（End-over-end）：汽车绕其横轴的翻滚		0.6	0.1
汽车相撞引起的翻滚（Collision with other vehicle）		2.3	7.3
其他翻车引发类型（Other rollover initiation type）	—	0.7	0.3

根据美国的统计结果,绝大部分翻滚事故都是汽车绕自身纵轴旋转的翻滚。无论对于普通乘用车还是轻型货车,绊翻是所有翻滚事故中概率最大的翻滚形式,比例超过 50%。德国深度事故调查机构(GIDAS)的统计数据也显示,绊翻事故概率最大,超过 60%^[8],其次为抛翻、坠翻事故。可见,绊翻、抛翻、坠翻这 3 种事故类型的研究是翻滚安全性研究的重点。

1.2 翻滚事故特征统计结果

美国、欧洲等国家基于多年的汽车翻滚事故数据库分析,得出了一些共性的较为普遍的结论如下^[12-13]: 绊翻是概率最高的一种翻滚事故; 75%以上的翻滚事故为单车事故; 车顶与地面的碰撞对乘员造成的伤害最大; 接近 90%的翻滚事故中,车辆翻滚 90°不多于 5 次(车顶与地面碰撞次数为 1),接近 99%翻滚事故中,车辆翻滚 90°不多于 9 次(车顶与地面碰撞次数为 2),统计数据如图 1 所示。

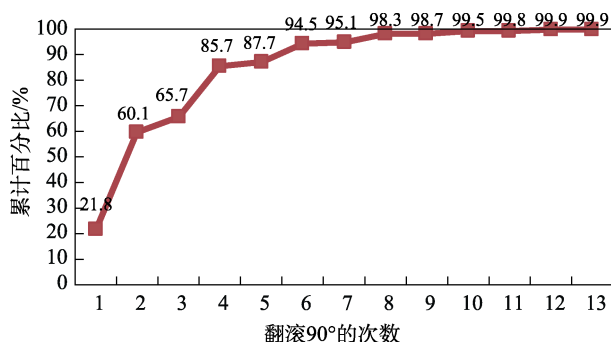


图 1 车辆翻滚 90°次数累计概率统计

Fig.1 Cumulative probability statistics of the number of 90° rollover

与欧美发达国家相比,我国车辆类型构成比例(如我国的大型客车、卡车比例较高)、公路等级、道路条件、地形等都有较大区别,因此造成的翻滚事故特征更具中国特色。根据我国公安部《中华人民共和国道路交通事故统计年报》数据^[6]及文献^[8,14-16]中的分析结果,可得出我国汽车翻滚事故的一些共性特征。

首先,翻滚事故主要以单车事故为主,其诱因与道路交通状况密切相关。翻滚事故主要发生在二级以

下公路上,这些道路条件较差(仅双车道或单车道、弯道多)、防护设施较少、交通标志不明显。高速公路、一级公路虽然发生概率相对较低,但由于车速较快,其翻滚事故死亡率较高。发生在平直道路上的翻滚事故远高于弯道及坡道。

其次,汽车翻滚事故与路边安全设施(如护栏、路缘、边坡等)有密切关系。例如,导致绊翻的主要原因是汽车与路缘的碰撞,或驶入边坡,发生软地面绊翻;导致抛翻的主要原因是护栏和路沟背坡;导致坠翻的主要原因是汽车驶入坡度较大、高度较高的边坡。

第三,发生概率最大的集中翻滚事故类型是绊翻、抛翻、坠翻。其中绊翻发生的概率最高,但坠翻(边坡翻滚、坠河、坠崖、坠桥等)造成的后果最严重。

2 翻滚试验方法发展现状

为了进一步研究车辆及车载人员在翻滚事故场景下的动力学特征,提升翻滚事故下的安全性,自 20 世纪 30 年代以来,各国就已开展了复现翻滚事故的试验方法研究。通用汽车公司将汽车从小山坡顶端推翻下去,这是最早的汽车翻滚试验^[17]。此后,各种各样的翻滚试验方法不断涌现,经多年的发展与改进,具有较大代表性的翻滚试验方法介绍如下。

2.1 车顶试验(美国 FMVSS 216 法规)

车顶试验的标准要求:总质量 2.7 t 以下的车辆,在车顶梁处施加 1.5 倍汽车质量的载荷,车顶变形量不大于 5 mm^[18]。2010 年对该法规进行了改进,适用范围扩展到 4.5 t 以下的车辆,施加载荷提升至 2.5 倍汽车质量。但是该方法只反映了车顶的静态承载能力,与翻滚时车顶与地面碰撞的动态过程差别较远。

2.2 台车翻滚试验(美国 FMVSS 208 法规)

FMVSS 208 台车翻滚试验(如图 2 所示)是由 SAE J2114 台车试验发展而来,它的台车斜角为 23°,台车与试验车运动速度为 48 km/h。台车在短距离内制动,制动加速度为 20g,持续时间为 40 ms^[19]。

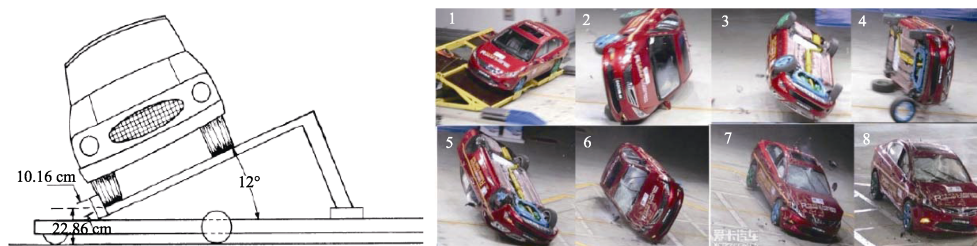


图 2 FMVSS 208 翻滚试验方法

Fig.2 FMVSS 208 rollover test method

该方法的缺点是台车制动加速度波形难以控制, 重复性差。此外, 研究表明, 该试验方法与翻滚事故的关联性差, 因此未作为强制执行的法规^[21]。但是, 由于该试验方法建立时间较长, 其试验结果可用于改进相关的数值仿真模型, 验证汽车的车顶强度, 目前仍被很多厂商与科研机构采用。比如近年来, 沃尔沃 XC60、宝马 X6、长安逸动、哈弗 H6、国外专用救护车等均采用了该方法开展翻滚验证试验。

2.3 螺旋翻滚试验 (Corkscrew)

螺旋翻滚试验 (如图 3 所示) 用于复现汽车冲上背坡或护栏等坡状物结构导致的翻滚事故, 被称为 Corkscrew 试验。试验斜坡: 一种是普通斜坡 (坡度为 8° 、高度为 861 mm), 另一种是阶梯斜坡 (第一

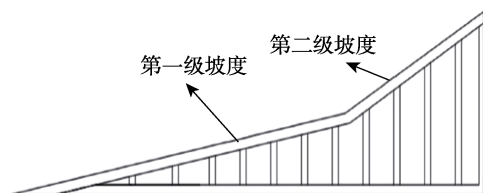


图 3 螺旋翻滚试验方法
Fig.3 Corkscrew rollover test method

级坡度为 8° , 高度为 700 mm; 第二级坡度为 21° 、全高 1150 mm)。试验车速为 70~80 km/h, 试验车一侧沿斜坡快速爬升, 从而产生绕纵轴的翻滚, 并车顶触地^[21]。近年来, 宝马 7 系、长安逸动、领克 06 等均采用了该方法开展了翻滚验证试验。

2.4 车辆绊翻试验

路缘绊翻试验 (Curb-Trip) 是用来复现汽车与路缘碰撞导致的绊翻事故 (据统计, 超过 50% 的翻滚事故是汽车与路缘的碰撞, 或驶入边坡发生软地面造成的绊翻事故)。试验时试验车与台车一起横向运动, 速度为 42 km/h。台车制动后, 试验车轮胎与模拟路缘 (路缘高度为 152 mm) 碰撞发生绊翻, 如图 4 所示。



图 4 路缘绊翻试验方法
Fig.4 Curb-Trip rollover test method

另一种绊翻试验方法是沙地翻滚试验 (Soil-Trip), 用于模拟汽车从硬质路面倒向软质地面发生的绊翻事故 (据统计, 该种翻滚形式占有绊翻事故的 90%)。试验方式与路缘绊翻类似, 速度为 42 km/h, 台车制动后, 试验车直接冲向模拟沙床, 由于轮胎与

沙床摩擦而导致翻滚, 如图 5 所示。

2.5 边坡翻滚试验 (Embankment)

边坡翻滚试验 (图 6) 用来复现汽车驶入边坡, 发生坠翻的事故场景。试验中, 边坡高度至少为 2 m、

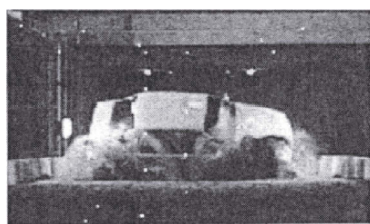


图 5 沙地翻滚试验方法
Fig.5 Soil-Trip rollover test method

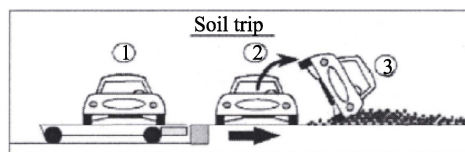




图6 边坡翻滚试验方法
Fig.6 Embankment rollover test method

坡度为 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、长度为 11 m, 汽车行驶速度为 16~24 km/h, 行驶方向与边坡的角度为 18° 。试验中边坡的坡度、驶入角度、车速等参数均可适当调整, 以使试验车发生侧向翻滚。

2.6 ECE R66 客车翻滚测试

该试验方法用于评估超过 22 人的大客车的侧翻安全性, 是目前欧洲要求强制实施的法规。我国参考该法规颁布了 GB 17578—2013《客车上部结构强度要求及试验方法》。ECE R66 法规从酝酿到最终颁布, 欧洲专家经历了大致 3 个阶段的摸索, 如图 7 所示^[22]。他们先后开展了 3 个阶段的验证试验: 由最初 9 m 高度的 2 级斜坡平台试验, 到后来的 5.5 m 高度斜坡平台试验, 再到最终的 0.8 m 无斜坡平台试验。试验结果证明, 第 3 种试验方式最严酷, 造成客车受损最严重的地方都在客车顶部。

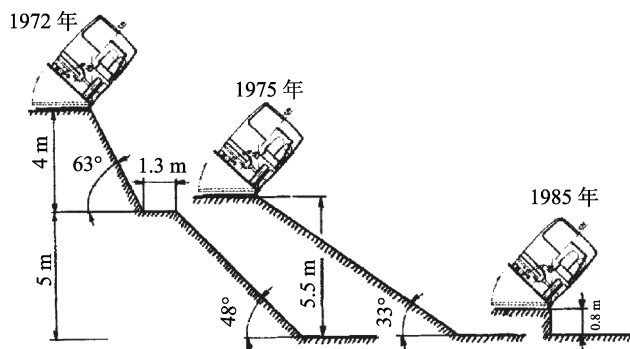


图7 ECE R66 客车侧翻试验方法
Fig.7 ECE R66 rollover test method for buses

3 翻滚试验与事故场景的关联性

目前的翻滚试验方法种类繁多, 但尚未形成统一的试验考核标准或法规。为了进一步提高研究效率, 减少试验种类, 就必须开展翻滚试验与翻滚事故场景的关联性研究, 即翻滚试验条件是否能覆盖或包络相应的翻滚事故场景, 以及试验中的运动学特征与动态响应与真实事故是否类似。

国外研究团队在研究了美国、英国、澳大利亚、德国的交通事故后, 对各种事故所占比例及各种试验方法对实际事故的代表性做了分析, 结论如下^[8]: 沙

地翻滚试验(Soil-Trip)代表了乘用车 91%(轻卡 93%) 的绊翻事故和乘用车 100%(轻卡 100%) 的转翻事故, 也即乘用车 56.9%(轻卡 57.3%) 的翻滚事故; 路缘绊翻试验(Curb-Trip)代表了乘用车 8%(轻卡 6%) 的绊翻事故和乘用车 35%(轻卡 31%) 的弹翻事故, 也即乘用车 7.5%(轻卡 5.5%) 的翻滚事故; 螺旋翻滚试验(Corkscrew)代表了乘用车 83%(轻卡 74%) 的抛翻事故, 也即乘用车 9.6%(轻卡 5.4%) 的翻滚事故; 边坡翻滚试验(Embankment)代表了乘用车 100%(轻卡 100%) 的坠翻事故, 也即乘用车 12.9%(轻卡 15.4%) 的翻滚事故; FMVSS 208 台车翻滚试验仅代表了不到 1% 的翻滚事故。

由此可见, 根据国外的统计研究结果, 绊翻试验方法(包括路缘绊翻试验与沙地翻滚试验)、螺旋翻滚试验方法、边坡翻滚试验方法代表了乘用车及轻卡 80% 以上的翻滚事故, 因此这几种试验方法是最具代表性, 与翻滚事故场景关联性最高的翻滚试验方法。

国内谢伯元等人^[8,14]研究了我国道路交通状况与汽车翻滚事故的主要特征, 并结合我国的实际情况, 提出了更适用于我国的翻滚试验方法及加载参数设置。

1) 地面绊翻事故主要发生在二级、三级公路上, 一般最大车速为 80 km/h。根据我国翻滚事故统计数据显示, 事故碰撞角度最大为 33.8° 、最小为 4.2° 。绊翻试验中, 42 km/h 的横向速度可以代表汽车在 80 km/h、以车道线成 32° 冲出公路的情况, 该试验方法基本能够覆盖此类翻滚事故。

2) 路缘绊翻事故主要是由于路缘石引起的, 多发生在城市公路与等级公路上, 而我国城市道路路缘以 150 mm 最常见, 等级公路常设置为 120 mm。因此横向 42 km/h 的速度、150 mm 以上的路缘高度基本可以覆盖此类翻滚事故。

3) 螺旋翻滚事故主要源于汽车冲上护栏结构或者路沟背坡。基于我国目前的护栏现状, 斜坡高度应大于 800 mm, 角度应大于 15.1° , 因此阶梯斜坡的试验方式更适合我国的实际情况。

4) 边坡坠翻事故主要发生在没有护栏防护的边坡路段。我国二级以上公路中不设置护栏的条件为: 边坡坡度 1:1 (45°) 以上, 路堤高度 2.5 m 以下; 边

坡坡度 1:2 (26.6°)、路堤高度 4.5m 以下。因此考虑我国的实际, 边坡试验时, 坡度应设置为至少 45°, 坡高不小于 2.5 m。

4 数值模拟发展现状

除了采用实验室复现的方式开展翻滚安全性研究以外, 随着计算机技术的发展, 数值模拟逐渐成为研究翻滚安全性的重要手段。目前, 数值仿真模型主要分为 2 种类型, 多刚体模型及有限元模型。

多刚体模型主要采用 ADAMS、MADYMO 等多体动力学软件, 重建三维翻滚事故的运动场景, 以获得翻滚过程相关动力学参数的变化特征。例如, 西门子公司曾同时采用 ADAMS、MADYMO 对路肩绊翻、沙地绊翻、螺旋翻滚、边坡翻滚试验进行了研究, 预测了汽车翻滚的运动状况^[23]。McCoy 等人^[24]运用 MADYMO 建立了汽车翻滚多刚体模型, 模拟了车辆绊翻试验、螺旋翻滚试验和鱼钩翻滚试验, 仿真结果和试验吻合较好。但是, 多刚体模型无法准确模拟翻滚碰撞过程中的结构变形与响应, 只适用于定性分析, 因而对翻滚安全性评估的支撑有限。

有限元模型主要是采用以 LS-DYNA 为代表的非线性有限元分析软件, 来获取翻滚碰撞过程中车体结构、车载人员或产品的变形与动态响应情况。例如, 有文献中关于绊翻试验中假人动态响应的研究^[25], 以及翻滚碰撞初始参数对车体和乘员动态响应的影响研究等^[26-29]。但是, 翻滚事故全过程的持续时间较长, 由于计算规模的限制, 为了保证计算精度, 有限元模型一般仅用于分析车辆与地面碰撞接触这一短时间内车体结构的变形与响应情况。

目前依靠单个数值模型, 无法既保证计算精确度, 同时实现对翻滚过程运动学特征、结构变形和动态响应等结果在内的全过程模拟。因此, 目前的趋势是采用多刚体模型与有限元模型耦合、联合仿真技术, 即采用多刚体模型重现翻滚事故, 获得翻滚碰撞时刻的初始运动状态参数, 然后以此作为有限元模型的边界条件, 计算得出该状态下的结构变形与动态响应。例如, Parent^[26-27]、Yan^[28]、Jiang^[29]等人均采用 MADYMO 与 LS-DYNA 联合的仿真方式, 来研究翻滚过程中车辆结构的动态响应及乘员头部的损伤机理, 以及不同初始碰撞参数的影响分析。

5 结语

通过大量文献的调研可知, 目前国内外对于翻滚事故的成因与场景特征有了一些关键性认识, 且经过多年的发展, 形成了与各种翻滚事故类型所对应的翻滚事故实验室模拟方法, 数值模拟技术也取得了较大的进步。这些成果都为翻滚碰撞安全性研究的发展起

到很大的推动作用, 但仍有很多的不足。

首先, 缺乏科学严谨的翻滚事故统计数据。国外目前对于翻滚事故数据统计与分析对象具有局限性, 主要针对乘用车与轻卡, 未尚涉及到中大型运输车辆。国内目前对翻滚事故的定义、分类则与国外有较大区别, 对于翻滚事故的样本采集也远远不够, 事故分析结果千差万别。

其次, 缺乏翻滚试验方法与事故场景相关性的科学评价机制。目前, 对于翻滚试验方法与事故场景的关联性分析不足, 很多结论来源于简单的主观分析与经验, 理论基础匮乏。这直接影响了翻滚试验方法及相关加载参数选择的合理性, 也可能是目前尚无针对整车动态翻滚试验强制性法规的原因之一。此外, 数值模拟能力仍不足。数值模型过于简化, 精细化程度不高, 对翻滚全过程的仿真能力有限, 对于翻滚碰撞过程中损伤机理的研究不够深入。

未来, 需进一步针对我国的实际情况, 建立更详细完整的翻滚事故数据库, 更加深入地开展数据分析, 以获得适用于我国的更为准确的翻滚事故场景特征。其次, 需建立翻滚试验方法与事故场景相关性的科学评价机制, 形成科学有效的翻滚试验方法与规范。数值模拟方面, 需以多刚体模型与有限元模型耦合为基本思路, 建立更精细化的数值仿真模型, 提高计算效率, 实现翻滚全过程的精确仿真能力。

参考文献:

- [1] GRZEBIETA R H, MCINTOSH A S, BAMBACH M. How stronger roofs prevent diving injuries rollover crashes[C]// International crashworthiness conference. Washington DC: [s. n.], 2010.
- [2] FRIMBERGER M, WOLF F, SCHOLPP G, et al. Influences of parameters at vehicle rollover[C]// International body engineering conference & exposition. United States: [s. n.], 2000.
- [3] STRASHNY A. An analysis of motor vehicle rollover crashes and injury outcomes[R]. United States: National Highway Traffic Safety Administration, 2007.
- [4] BEDEWI P, GODRICK D, DIGGES K, et al. An investigation of occupant injury in rollover:nasscds analysis of injury severity and source by rollover attributes[C]// 18th international technical conference on the enhanced safety of vehicles. [s. l.]: National Highway Traffic Safety Administration, 2003.
- [5] 中国汽车技术研究中心. 汽车翻滚安全性测试方法研究[R]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2016.
China Automotive Technology Research Center. Research on vehicle rollover safety test method[R]. Tianjin: China Automotive Technology Research Center, 2016
- [6] 公安部交通管理局. 道路交通事故统计年报[K]. 北京: 公安部交通管理局, 2014.

- Traffic Administration of the Ministry of Public Security. Annual report on road traffic accidents[K]. Beijing: Traffic Administration of the Ministry of Public Security, 2014
- [7] DOT, NHTSA. National automotive sampling system—Crashworthiness data system coding and editing manual department of transportation[Z]. National Highway Traffic Safety Administration, 2009.
- [8] 谢伯元. 汽车翻滚事故再现及试验方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
XIE Bo-yuan. Research on the construction and test method of vehicle rollover accident[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [9] 曹立波, 颜凌波. 汽车翻滚安全性研究及试验概览[J]. 汽车工程学报, 2012(7): 20-25.
CAO Li-bo, YAN Ling-bo. Overview of rollover associated safety studies and tests[J]. Chinese journal of automotive engineering, 2012(7): 20-25.
- [10] 颜凌波. 乘用车的翻滚碰撞特性及防护措施研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
YAN Ling-bo. The research on the rollover characteristics of passenger vehicle and the countermeasures in rollover crashes[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [11] PARENTEAU C S, VIANO D C, SHAH M. Field relevance of a suite of rollover tests to real-world crashes and injuries[J]. Accident analysis & prevention, 2003, 35(1): 103-110.
- [12] 何恩泽. SUV 平台翻滚试验仿真研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.
HE En-ze. Simulation research of a suv rollover dolly test[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017.
- [13] MORRIS L M. Characteristics of fatal rollover crashes[J]. Annals of emergency medicine, 2003, 41(2): 271-272.
- [14] 谢伯元, 朱西产, 刁增祥. 汽车翻滚试验方法研究[C]// 第六届道路交通安全学术会议, 厦门, 2008.
XIE Bo-yuan, ZHU Xi-chan, DIAO Zeng-xiang. Study on vehicle rollover test[C]// The 6th int forum of automotive traffic safety. Xiamen: [s. n.], 2008.
- [15] 朱海涛. 乘用车翻滚性能及测试方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
ZHU Hai-tao. Passenger vehicle rollover characteristics and test method research[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [16] 王玮楠. 中国汽车翻滚安全性测试研究及影响分析[J]. 汽车与安全, 2018(4): 96-101.
WANG Wei-nan. Research on the car's rollover test and impact analysis[J]. Auto & safety, 2018(4): 96-101.
- [17] SKEELS P C. Automotive safety at GM[J]. Automotive industries, 1969(1): 62-66.
- [18] 汪明瑶. 汽车翻滚碰撞及乘员伤害保护的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
WANG Ming-yao. Research on car rollover and occupant injury[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [19] 何欢. 车辆翻滚仿真技术与应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
HE Huan. The simulation technique of application research of vehicle rollover[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [20] 刘战胜. 基于多刚体和有限元耦合建模的汽车翻滚仿真研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
LIU Zhan-sheng. Vehicle rollover research based on multi-body and finite element coupling simulation[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [21] 梁永彬. 基于 MADYMO 多刚体模型的微型汽车翻滚性能研究与优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
LIANG Yong-bin. Research and optimization on rollover performance of minivan based on madymo multi-rigid body model[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [22] 洪汉池. 大型客车侧翻碰撞安全性与乘员损伤研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015.
HONG Han-chi. Research on rollover crash safety and occupant injury of large buses[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015.
- [23] LINSTROMBERG M, SCHOLPP G, SCHERF O. Test and simulation tools in a rollover protection development process[R]. Washington DC: ESV, 2005.
- [24] MCCOY R, CHOU C, VAN DE VELDE R, et al. Vehicle rollover sensor test modeling[C]// SAE world congress & exhibition. Detroit MI, United States: Society of Automobile Engineers, 2007.
- [25] HU Jing-wen. Neck injury mechanism in rollover crashes - a systematic approach of improving rollover neck protection[D]. Detroit, MI, USA: Wayne State University, 2007.
- [26] PARENT D P, KERRIGAN J R, CRANDALL J R. Comprehensive computational rollover sensitivity study part I: Influence of vehicle pre-crash parameters on crash kinematics and roof-crush[C]// International crashworthiness conference. Washington, DC: [s. n.], 2010.
- [27] PARENT D P, KERRIGAN J, CRANDALL J. Comprehensive Computational Rollover Sensitivity Study PartII: Influence of Vehicle, Crash and Occupant Parameters on Head, Neck, and Thorax Response[C]// SAE 2011 World Congress and Exhibition, Detroit MI, United States: Society of Automobile Engineers, 2011.
- [28] YAN Ling-bo, CAO Li-bo, KAN C D. Comparison of Vehicle Kinematics and Occupant Responses between Jordan Rollover System and an Over-the-road Rollover[J]. International journal of crashworthiness, 2012, 17(2): 173-194.
- [29] JIANG C, STURGESS C E N. A study of the simulation of a front-crash-induced rollover crash[J]. Journal of automobile engineering, 2007, 221(2): 1487-1497.