

Design Theory & Method
of Controlling Structures
for Longitudinal
Impact of Automobiles

汽车纵向 碰撞控制结构设计 的理论与方法

雷正保 著



039

91

湖南大学出版社

汽车纵向碰撞控制结构设计的方法

雷正保 著

湖南大学出版社

2001年·长沙

内 容 简 介

本书系统而全面地阐述了汽车纵向碰撞控制结构设计的新理论与新方法。对汽车纵向碰撞的纯一次碰撞研究模式、汽车纵向碰撞控制结构设计准则及其应具备的理想力学特性与加权最优力学特性、求解大变形接触碰撞问题的动态显式有限元方法的几个关键环节及有限元模型的建立、大变形弹塑性结构模型试验方法、大变形弹塑性相似结构动力响应的外推方法及精度特性、典型纵向碰撞控制结构的大变形力学特性及其对车内人体冲击响应的影响等方面作了详细的论述。

本书不仅理论方法新颖,而且工程应用性强,适合于车辆工程和交通工程专业的科研人员和工程技术人员阅读参考,也可供高等院校有关师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车纵向碰撞控制结构设计的理论与方法/雷正保著.

长沙:湖南大学出版社,2000.11

ISBN 7-81053-279-0

I. 汽… II. 雷… III. 汽车-碰撞(力学)-纵向稳定性-结构设计 IV. U461.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 77476 号

汽车纵向碰撞控制结构设计的理论与方法

Design Theory & Method of Controlling Structures for Longitudinal Impact of Automobiles

雷正保 著

-
- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| ☐ 责任编辑 | 黄宁军 罗素蓉 |
| ☐ 出版发行 | 湖南大学出版社 |
| | 社址 长沙市岳麓山 邮编 410082 |
| | 电话 0731-8821691 0731-8821315 |
| ☐ 经 销 | 湖南省新华书店 |
| ☐ 印 装 | 长沙县新华彩印厂 |
-

- | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--|---|-----------------------------|-------|
| ☐ 开本 | 850×1168 32 开 | ☐ 印张 | 6 | ☐ 字数 | 150 千 |
| ☐ 版次 | 2001 年 2 月第 1 版 | ☐ 2001 年 2 月第 1 次印刷 | | | |
| ☐ 印数 | 1-600 册 | | | | |
| ☐ 书号 | ISBN 7-81053-279-0/U·4 | | | | |
| ☐ 定价 | 12.00 元 | | | | |
-

(湖南大学版图书凡有印装差错,请向承印厂调换)

前 言

公路交通运输在综合运输体系和国民经济体系中正发挥着越来越重要的作用。据统计,在50年代初,铁路的货运量占货运总量的40%~60%,并享有“铁老大”的美誉,但到70年代却已下降到36.1%,而在同一时期,公路货运比重已从20%左右上升到30%~40%,位居各类运输手段中的首位,公路客运量也于1996年超过了铁路而位居第一。高速公路的修建,将更有利于公路交通运输产业的发展。据统计,日本仅占全国公路里程0.31%的高速公路,却承担了占总货运量的25.6%的货运周转量;美国占全国公路里程1.35%的高速公路,却担负着20%~25%的总运输量。事实上,国内外的运输经验一直表明,只有汽车的高速安全运行才能实现高效低耗的运输目的。因此,发展高速公路及高等级公路已成为进一步发展我国公路交通产业的重要途径,一个以国道主干线“五纵七横”为核心,辅以各种地方高等级公路的建设规划正在展开之中。

然而,我国的公路交通安全状况不能不令人担忧。据统计,从1970年到1985年的15年中,车祸导致132万人受伤、27万人死亡。1985年后,由于汽车拥有量急剧增加,车祸也逐步增多。1985年死亡人数超过4万,1987年超过5万,1992年超过6万,1995年超过7万,1999年超过8万,达到83 529人。平均每天:发生交通事故1 131起、死亡229人、受伤784人、直接经济损失582万元。目前,我国的汽车总拥有量只占世界的2%,而交通事故死亡人数却占世界的1/7。公路交通事故致死率达万车15.5,高于美国、日本、欧洲国家13倍多!

随着高速公路及高等级公路的快速发展，道路条件落后的状况正在不断得到改善，为快速、高效进行公路交通运输提供了前所未有的条件，而公路条件的改善又对汽车的行驶速度提出了较高的要求，如车速低于 70km/h 的汽车已被禁止进入高速公路等。由于汽车运动时所具有的动能与行驶速度的平方成正比，高速行驶的汽车一旦发生碰撞事故，由于冲击动能的迅速增加，其冲击的剧烈程度会明显提高，从而对乘员构成更大的危险。而出于以往技术水平的无奈，我国还缺乏足够的汽车碰撞安全性技术，一些碰撞安全性低下的汽车还在涌入市场、流向社会；同时，在用汽车中的一部分，在设计制造阶段可能根本就没有考虑过碰撞安全性这个问题。而对道路交通事故的调查结果表明，在汽车的主动安全性日趋完善的今天，汽车的被动安全性（即碰撞安全性）已上升为主宰汽车安全水平的第一因素。因此，如不尽快发展汽车碰撞安全新技术，汽车的碰撞安全性不仅仍将继续危害人们的生命财产安全，而且还将成为严重妨碍高速公路及高等级公路有效利用的不利因素，以致不能充分发挥高速运输的优势。在国外，高速公路与普通公路相比，美国交通事故减少 55%，英国减少 62%，日本减少 89%，而在我国，事故不是减少，而是大量增加，达到普通公路的十多倍，这一事实不能不为我们敲响警钟。因此，要实现公路高速安全运输的目的，就必须先提高汽车的碰撞安全性水平，就必须发展汽车碰撞安全性技术！

汽车的碰撞安全性技术包括两大部分的内容，其一是车体结构的研制，通过车体结构的作用使一次碰撞中的冲击能量得以最佳分布，以使碰撞过程中汽车的整体运动规律最有利于乘员的安全保护；其二是乘员保护系统的研究，通过乘员保护系统的作用使一次碰撞中乘员所分得的能量在二次碰撞中得以有效释放，从而达到保护乘员的目的。

II

与汽车的车体结构相比，乘员保护系统虽然对乘员能够提供更直接的保护，但由于乘员保护系统制造材料及结构形式的制约，更由于乘员本身耐冲击阈值的限制，使它只能也只允许吸收汽车碰撞系统中的极少部分能量。碰撞系统中的绝大部分能量，必须由汽车的车体结构承受，大量的统计资料也表明，碰撞过程中汽车车体结构的变形特性对碰撞系统中乘员的安全具有至关重要的作用。可见，能否使碰撞过程中的冲击动能在汽车车体结构中得以最优分布，不仅关系到乘员保护系统的承受能力，而且是影响乘员安全的第一因素，汽车的高速碰撞情形则更是如此。事实上，现代汽车设计的一个最重要的内容也就是究竟应该采用什么样的车体结构才能保证碰撞过程中汽车的变形特性能够始终使传递到乘员保护系统中的能量处于最有利的位罝。

统计资料表明，在汽车碰撞事故中，碰撞部位发生在汽车纵向的情况占事故总数的 58%，由此造成的乘员死亡人数、受伤人数及直接经济损失分别占总数的 66%、57% 和 64%。可见，纵向碰撞不仅是碰撞事故发生频率最高的一种碰撞形式，而且危害也最大。因此，开展汽车纵向碰撞安全技术研究具有重要的意义。

本书从工程实际的角度出发，应用汽车碰撞动力学研究成果，采用纯一次碰撞研究模式，针对汽车纵向碰撞工况，开展了汽车纵向碰撞控制结构设计的理论与方法研究。

全书共分九章。第一章阐述了汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法的思想基础、研究范畴和研究方法。第二章研究了纵向碰撞工况下，为确保车内司乘人员的安全水平处于最有利的状况，汽车本身应具备的理想力学特性，并提出了汽车纵向碰撞控制结构设计的四准则，即：控制结构应使汽车的碰撞过程平稳、应具有良好的吸能能力、应使碰撞过程中汽车的回弹速度与回弹位移尽可能地小、应具有较好的制造工艺性与较低的制造成本。

第三章研究了纯阻尼式控制结构用于汽车纵向碰撞控制时设计参数的确定方法。随后,研究了与弹簧—阻尼式控制结构的运动学/动力学规律相适应的最优力学特性。以汽车行驶速度分布的实测数据为基础,在充分考虑汽车碰撞初速度对冲击危险程度的影响的前提下,构造了加权函数,采用幂级数与指数函数的复合函数,建立了满足定性分析要求的数学模型,利用外点罚函数方法,实现了汽车纵向碰撞力学特性的加权优化设计。最后,针对加权优化设计的结果是以数值形式给出的,缺乏明确的物理意义的不足,本书从机械振动的角度出发,将汽车碰撞过程当成弹簧—质量—阻尼系统的瞬态振动过程,提出了求解加权最优力学特性的等效特性的振动学模型。第四章介绍了用于确定已知结构力学性能的动态显式有限元方法。针对汽车碰撞控制结构所具有的大位移、大转动、大应变特性,重点论述了求解这类问题的动态显式有限元方法的几个关键环节,即增量运动方程的表述形式、材料的本构关系、单元理论、有线元方程的一般形式、时间积分格式及应力更新方法等。随后,给出了动态显式有限元方法在受冲方管大变形过程分析中的应用实例,演示了动态显式有限元方法的能力与潜力。最后,指出了今后在研究中值得注意的几个问题。第五章将试验研究中使用十分普遍的相似原理引入强非线性相似结构动态响应分析,导出了复杂结构动态响应分析的相似准则,并在此基础上,提出了大位移、大转动、大应变、弹塑性相似结构动力响应显式有限元分析结果的外推方法并分析了其精度特性。以 Buckingham Pi 定理为基础,运用量纲矩阵法,导出了动态大位移大转动弹塑性相似结构的相似关系。根据有限元法分块近似的基本思想及显式有限元法的积分格式,分析了外推法的精度特性。为大变形接触碰撞问题的模型试验研究及相似结构间动力响应有限元分析结果的外推,奠定了新的基础。应用实例表明,本书方法切实可行。第六章采用法向方向 5 点积分的 4 节点

Hughes-Liu 壳单元, 前置参数法砂漏控制技术, 等向强化弹塑性材料模型, 分步增量应力回映方法, 一体化接触搜寻算法, 罚参数接触力计算方法及经典摩擦定律, 建立了一种计算受冲薄壁结构大变形力学特性计算的有限元模型, 通过对汽车 A 传动轴及汽车纵向方形吸能梁的大变形力学特性分析, 验证了该有限元模型的正确性。根据汽车 A 传动轴及汽车纵向方形吸能梁的大变形力学特性所具有的特征, 在分析了它们的变形机理的基础上, 提出了汽车纵向碰撞预变形控制结构设计思想, 并利用建立的受冲薄壁结构大变形力学特性计算的有限元模型, 分析了预变形 A 传动轴及预变形方形吸能梁的大变形力学特性, 证实了预变形控制结构设计思想的可行性。第七章从工程实际的角度出发, 应用数值分析方法, 比较研究了典型纵向碰撞纵向吸能结构的大变形力学特性, 并探讨了纵向碰撞横向吸能结构设计思想在汽车纵向碰撞控制结构设计中应用的可能性。结果表明: 纵向碰撞纵向吸能结构设计思想确实能够设计出许多性能相当好的汽车纵向碰撞控制结构, 且本书提出的预变形控制结构设计思想是纵向碰撞纵向吸能结构设计思想的高级形式; 纵向碰撞横向吸能结构设计思想开拓了人们的视野, 其优良的大变形力学特性能够满足汽车纵向碰撞控制结构设计的要求, 从而为汽车纵向碰撞安全性能的提高闯出了一条新路子。第八章利用刚体动力学方法分析了汽车纵向碰撞控制结构的力学特性对车内人体冲击响应的影响。车内人体模型的建立采用了由四节点壳单元构成的有限元网格模型, 研究表明, 采用刚体材料模型能够有效地模拟碰撞过程中车内人体的运动学/动力学关系, 并在此基础上, 分析了汽车纵向碰撞控制结构力学特性对人体冲击响应的影响, 证明了预变形控制结构设计思想的正确性。同时, 进一步验证了横向受压加撑圆管组合结构的理想力学特性, 从而证实了在汽车纵向碰撞控制结构设计中应用纵向碰撞横向吸能碰撞控制结构设计思想的可

行性。第九章总结了全书。

本书内容是交通部重点科技攻关项目《在用汽车高速碰撞安全性改进技术研究》之主要研究成果，研究工作得到了国家自然科学基金、中国博士后科学基金、国家教委博士点基金及机械工业技术发展基金资助。

本书的全部工作是在钟志华教授的精心指导下完成的。在写作过程中，得到了李光耀教授的指导；得到了杨应龙、杨翠萍夫妇的热情帮助；得到了刘广生、孟霞龙、黄岳林三位高级工程师的大力支持。在试验研究工作中，得到了曾爱民厂长、谭柯工程师、崔宏工程师及赵又怡高级工程师的热情支持与合作。本书由长沙交通学院专项基金资助出版。本书著者对曾经支持、帮助和关心过本书出版的各位同行、参考文献作者、审稿者和出版者致以诚挚的谢意！感谢妻子侯石静的全力支持与帮助。

限于著者水平，书中错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

雷正保

2000年8月18日于长沙

目 次

第一章 汽车纵向碰撞控制结构设计的理论与方法研究导论

- 第一节 汽车的碰撞安全性及其研究概况…………… (1)
- 第二节 汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法的思想基础…………… (4)
- 第三节 汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法的基本内容…………… (7)
- 第四节 汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法的应用前景…………… (13)
- 第五节 汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法的研究策略…………… (15)
- 第六节 本章小结…………… (17)

第二章 汽车纵向碰撞理想力学特性的确定

- 第一节 汽车碰撞安全标准概况与汽车碰撞安全性研究发展动向…………… (18)
- 第二节 汽车纵向碰撞控制结构设计准则及其理想力学特性…………… (24)
- 第三节 本章小结…………… (29)

第三章 弹簧—阻尼式及纯阻尼式碰撞控制结构研究

- 第一节 纯阻尼式碰撞控制结构研究…………… (30)

第二节	弹簧—阻尼式控制结构力学特性的加权 优化设计	(33)
第三节	弹簧—阻尼式控制结构最优力学特性的 等效模型	(39)
第四节	本章小结	(44)

第四章 求解大变形接触碰撞问题的动态显式有限元方法

第一节	引言	(45)
第二节	控制方程	(47)
第三节	数值分析方法	(56)
第四节	动态显式有限元方法在接触碰撞问题中的 应用	(64)
第五节	本章小结	(71)

第五章 大变形弹塑性相似结构动力响应的外推方法

第一节	概述	(73)
第二节	动态大位移大转动大应变相似结构的相似 准则	(79)
第三节	相似薄壁结构动力响应外推的精度特性	(85)
第四节	本章小结	(91)

第六章 有限元模型的建立与预变形控制结构研究

第一节	受冲薄壁结构大变形力学特性计算的有限 元模型	(93)
第二节	汽车 A 传动轴及纵向方形吸能梁的大变形 力学特性	(104)
第三节	预变形控制结构设计的基本思想	(109)

第四节	预变形 A 传动轴及预变形方形截面吸能梁 的力学特性	(114)
第五节	本章小结	(116)
第七章	典型结构的大变形力学特性研究	
第一节	典型纵向碰撞纵向吸能结构的大变形力学 特性研究	(118)
第二节	纵向碰撞横向吸能结构的大变形力学特性 研究	(135)
第三节	横向受压圆管组合结构力学特性的数值及 试验结果对比	(148)
第四节	本章小结	(152)
第八章	汽车纵向碰撞控制结构力学特性对人体冲击响应的 影响	
第一节	车内人体运动学/动力学分析的基本原理 ...	(154)
第二节	力学特性对人体冲击响应的影响	(159)
第三节	本章小结	(169)
第九章	总 结	(171)
参考文献		(175)

第一章 汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法研究导论

本章阐述了汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法的思想基础、研究范畴和研究方法。

第一节 汽车的碰撞安全性及其研究概况

交通安全问题不仅与环境污染、能源消耗一起构成汽车文明带给人类社会的三大负面效应，而且还是决定公路运输产业市场竞争力与市场寿命的主要因素之一，是决定行业形象的关键环节，已经成为当今社会的一个工作重点。据测算，自 1886 年世界上第一辆汽车问世以来，全世界已有 3200 多万人死于车祸，有 1 亿多人伤残，而同一时期死于战争的人数为 2350 多万。车辆致死的人数，居然超过了蔓延几大洲、残害几代人的第二次世界大战，是世界局部战争死亡人数的几十倍！目前，在每年的车祸中有 70 多万人死亡，1200 多万人伤残，5 亿多美元的直接经济损失，相当于每年发生两次日本广岛核爆炸。国外将汽车描述为“能行驶的棺材”由来已久，并将之与战争、癌症同列为当今威胁、残害人类生命的三大公害。

在我国，自 1901 年有人将 2 辆美国产的汽车运抵上海以来，汽车就逐步进入了国人的生活之中。汽车给国人带来了方便，但同时也带来了车祸。从 1970 年到 1985 年的 15 年中，我国发生的

车祸导致 132 万人受伤、27 万人死亡。1985 年后，由于汽车拥有量急剧增加，车祸也逐步增多。1985 年死亡人数超过 4 万，1987 年超过 5 万，1992 年超过 6 万，1995 年超过 7 万，1999 年超过 8 万，达到 83529 人。平均每天发生交通事故 1131 起、死亡 229 人、受伤 784 人、直接经济损失达 582 万元，分别比 1998 年增长 19.3%、7.0%、28.4% 和 10.1%。目前，我国的汽车总拥有量只占世界的 5%，而交通事故死亡人数却占世界的 10%，我国道路交通事故致死率达万车 15.5，是美国、日本、欧洲国家的 13 倍多^[4, 5, 8, 11, 74, 96]！

汽车的安全性分为主动安全性与被动安全性两个方面。汽车的主动安全性是指汽车防止或难于发生事故的性能，其内涵就是为驾驶员提供一个能适应人的生理特性的外部条件，以保证驾驶员能很好地完成感知→判断→操作 3 个过程的循环。其内容大体包括：视野性能、操纵性能、仪表信号系统和确保行驶安全的一些装置。在汽车的主动安全性中，人的因素占有十分重要的地位，只有当汽车的视野和操纵性能等与人的生理特性相适应，且驾驶员对汽车的性能有充分的了解并能正确地使用汽车时，汽车的主动安全性才会有保障。汽车的被动安全性是指事故发生时汽车本身对司乘人员及行人等提供安全保护的能力。事实上，这里所说的被动安全性，就是指汽车的碰撞安全性。汽车碰撞安全性研究的核心内容是对碰撞系统中司乘人员、行人、摩托车手及骑自行车者的安全保护，具体来说，就是对汽车车体结构的研究及对室内乘员保护系统的研究两大范畴。

在汽车发展的早期，人们主要着眼于改善汽车的性能，尽管早已采用了保险杠、前大灯、液压制动、安全玻璃、全钢车身及较好的轮胎等安全部件，但人们仍认为安全问题主要与操作有关，并未考虑占有比例大、后果严重的碰撞安全性。事实上，人们对公路交通事故原因的调查结果表明，95% 以上的事故是由于

人和环境因素造成的，也就是说，汽车预防事故的主动安全性能已相当好了，现在的主要问题是汽车的碰撞安全性能满足不了社会发展的要求。正是日益增加的交通事故及其导致的惨重伤亡迎来了汽车碰撞安全时期的曙光。

世界上最早关注、也最为重视汽车碰撞安全性的是美国。早在 1924 年，当时美国的商业部长 Hoover 就主持召开了首次全美街道与公路安全会议，并制定了世界上最早的公路安全法规，从而为制定统一的汽车安全法规奠定了基础。早在 20 世纪 30 年代，通用汽车公司就开始进行汽车的翻车和固定壁碰撞试验，随后，许多国家的汽车厂家也相继开展了汽车的碰撞试验研究。这些研究工作的结果是大大促进了车内乘员保护装置的发展。到 1949 年，Nash 就提出了可以减少汽车碰撞对司乘人员伤害程度的第一个成果——座位安全带。随后，加衬垫的安全仪表板、安全门锁及凹进去的仪表板按钮等安全措施被广泛采用。然而，当时人们对汽车安全问题的所有兴趣都集中在车内的乘员保护装置研究上，直到 20 世纪 60 年代，人们才真正认识到汽车车体结构的力学性能在汽车碰撞中的主导地位，但由于汽车的碰撞过程必然涉及结构的大位移、大转动、大应变及未知接触边界条件等强非线性因素，尽管传统的试验技术得到不断发展与完善，并发展了一些半解析技术，汽车的车体结构设计方法并未取得实质性的突破。直到 20 世纪 80 年代后期，在国内外一大批杰出科学家的不懈努力下，在动态显式有限元方法的基础上，才形成了较完整的可以处理具有大位移、大转动、大变形及未知接触界面等强非线性特征的汽车碰撞问题的汽车碰撞动力学^[1, 2, 7, 9, 12, 23~32, 47, 69, 88]。汽车碰撞动力学以数值分析为核心，着重研究汽车碰撞过程的动态响应及其相关问题，主要包括：多刚体系统动力学、动态显式有限元方法、接触搜寻方法、接触力计算方法、零能模式控制、剪切自锁控制、点焊模拟方法、摩擦力

计算方法、材料的本构关系等。此后，人们对此进行了大量的研究与试验，丰富了汽车碰撞动力学的内容，为汽车的车体结构设计提供了新的手段，这对确保公路交通运输产业的可持续发展，具有重要的意义。据统计，我国机动车辆总数已达 3500 多万辆，是解放初期 5.1 万辆的 686 倍多，而公路里程还只从解放初期的 8 万公里延长到目前的 120 多万公里，仅增加了 14 倍多，而汽车的行驶速度却已从 1886 年的 13km/h 提高到现在低于 70km/h 的机动车已被禁止进入高速公路的状况。到 2010 年，我国要将汽车工业基本建成为国民经济的支柱产业，提出的生产总量目标是：汽车生产能力 600 万辆（其中轿车 400 万辆），摩托车 1 200 万辆。因此，今后的交通会更加拥挤，交通状况不容乐观，所以，进一步深入细致地研究汽车碰撞动力学理论，特别是汽车高速碰撞时的动力作用规律，显得十分必要。尤其是在我国公路交通面临大发展的今天，对这一问题的深入研究，更具有重要的战略意义和现实意义。只有以科学理论研究为基础，才有可能最大限度地发挥公路交通系统蕴藏的潜能，从而以尽可能少的投入，取得尽可能高的效益，最终发展出高速、低耗、安全的公路交通运输体系^[3,4,5]。

第二节 汽车纵向碰撞控制结构设计理论与方法的思想基础

在汽车碰撞安全性研究中，如何才能让汽车的碰撞过程能够以预定的方式进行的问题，也就是如何实现碰撞过程控制的问题，一直是人们十分关心的研究课题。

在研究中，人们将车与障碍物之间发生的碰撞称为一次碰撞，而将车内司乘人员与乘坐室内部物体之间的碰撞称为二次碰撞。

撞,显然,二次碰撞既可由一次碰撞引起,也可由汽车的紧急制动等其他因素引起,其根本原因就在于车内司乘人员与车体本身之间出现了相对运动,因此,二次碰撞本身就能够构成一个完整的研究领域。当二次碰撞是由一次碰撞引起时,从牛顿力学的观点来考察汽车的整体运动规律可知,在汽车碰撞这一事件中,二次碰撞只是汽车内部司乘人员与乘坐室内部构件之间的相互作用,是一种内力作用,不会影响汽车整体的运动规律,影响汽车整体运动规律的是一次碰撞。换言之,此时的二次碰撞是一次碰撞的产物,二次碰撞的情形并不会影响一次碰撞对汽车整体的力学效果。显然,二次碰撞过程的改变仅对车内司乘人员的保护效果有影响,而一次碰撞过程的改变,则不仅会影响车内司乘人员的保护效果,而且还会影响汽车的整体运动规律。因此,通过控制一次碰撞过程,同时实现对汽车整体运动过程的控制与优化二次碰撞环境是可能的。

长期以来,在有关汽车碰撞安全性的研究中,人们常采用如下两种研究模式,即纯粹的二次碰撞安全性研究与完整的整车碰撞安全性研究^[6~13]。纯粹的二次碰撞安全性研究只研究二次碰撞工况下车内司乘人员的安全性问题,汽车整体的运动规律则采用有关标准中假定的减速度曲线代替,或者根据有关标准,用一冲击块直接撞击乘坐室内构件以检验这些构件对人体的保护水平。台车碰撞试验、转向系统碰撞试验及其仿真分析,是纯粹的二次碰撞安全性研究的典型例子。完整的整车碰撞安全性研究则以装备完整的汽车为对象,在一次碰撞真正发生的同时,研究二次碰撞中司乘人员的安全性问题。实车碰撞试验及汽车整车碰撞仿真分析,则是完整的整车碰撞安全性研究的例子。这两种安全性研究模式,都是以直接考察二次碰撞中司乘人员的安全性水平为主要目的的。

诚然,二次碰撞的效果对汽车的整体运动规律并无影响,而