



胡远志 曾必强 谢书港 编著

基于 LS-DYNA 和 HyperWorks 的汽车安全仿真与分析

清华大学出版社

基于LS-DYNA和 HyperWorks 的汽车安全仿真与分析

胡远志 曾必强 谢书港 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要针对汽车被动安全仿真的关键技术进行了详细介绍和阐述,其内容涵盖了汽车被动安全所涉及的结构耐撞性、约束系统、行人保护、车辆翻滚、儿童保护和后碰鞭打等各方面内容。本书采用HyperWorks和LS-DYNA相结合的仿真分析手段,对仿真分析面临的各个步骤和流程,使用基本原理说明加实例演示的方式进行了阐述。书中所涉内容不但融汇了汽车安全开发一线工程师多个实车项目的分析经验,还结合了目前国内外汽车被动安全设计方面最前沿的研究成果和分析流程。书中原理通俗易懂,算例计算模型准确,步骤清晰,可操作性强。一方面能为读者提供对整车安全性仿真分析较为全面的了解和认识,另一方面能使有关机构通过对本书实例的模仿迅速培养出合格的汽车安全仿真工程师和分析工程师。

本书可以作为汽车企业技术中心和零部件供应商技术人员的学习参考教程,也可供国防军工、航空航天、船舶、制造等相关行业的工程技术人员参考。本书还可以作为理工科院校和研究所的相关专业高年级本科生、研究生及教师学习使用的教材和参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于LS-DYNA和HyperWorks的汽车安全仿真与分析/胡远志,曾必强,谢书港编著. —北京:清华大学出版社,2011.9

ISBN 978-7-302-26305-0

I. ①基… II. ①胡… ②曾… ③谢… III. ①汽车—安全装置—系统仿真 ②汽车—安全装置—系统分析 IV. ①U472.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第142774号

责任编辑:庄红权 杨倩

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:13.5

字 数:328千字

版 次:2011年9月第1版

印 次:2011年9月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:28.00元

产品编号:041438-01



自中国汽车技术研究中心推出 C-NCAP 新车评价规程以来,汽车的被动安全性能越来越被消费者所关注。但目前国内自主品牌汽车企业被动安全方面的工程师严重不足,被动安全从业工程师也迫切希望提升自身的水平。市面上可见的汽车安全相关书籍大多侧重于理论研究,工程师很难从中获得直接的项目经验。另外部分企业通过招聘海外专家建立的分析流程和培训资料,仍处于保密阶段。作为汽车行业独立公正的第三方研究机构,中国汽车技术研究中心具有多年的汽车碰撞安全研究经验和实测数据,目前还建立起了一支由多位海外归国专家领军,数十位博士和具有丰富被动安全性能开发经验工程师组成的队伍。中国汽车技术研究中心结合自身优势承担起行业责任,根据多年的项目经验和数据积累出版这本书,希望能为行业从业工程师提供参考,也为高校学生和有志于从事相关工作的人员提供教材和教辅资料。

本书的作者均为直接参与多个汽车被动安全性能开发项目的工程师,有十分丰富的实战经验和项目经验,同样也有着深厚的理论基础。因此本书对汽车被动安全性能分析及其在工程实际中的运用具有比较直接的指导和推动作用。

本书用最直接的方法引导读者解决和分析复杂的汽车碰撞响应问题,能够让初学者以最快的时间进入汽车碰撞分析领域。同时也在复杂结构力学的简化方面为军工和航空航天专业提供了参照对象。本书对汽车被动安全仿真分析方法的发展历程进行了介绍和回顾,对目前常用的仿真分析方法和流程进行了介绍,可使读者对汽车安全研究的内容和方法有比较明确的认识。结合 HyperMesh 软件提供了汽车结构、约束系统的建模流程和复杂力学结构的简化方法,可使读者学习并掌握了相关类似结构的力学简化模型和有限元分析方法。通过对这一部分的学习可以独立熟练地掌握复杂结构的力学简化和建模能力,并可以使用 LS-DYNA 求解器对该模型进行有限元求解。本书通过汽车被动安全分析实例来帮助读者建立起相关的分析流程,通过对本书的学习能够掌握其中基本的分析评价方法和相关的分析技术,并对汽车被动安全研究发展趋势有一定的了解。通过对本书相关章节的学习,工程师或者学者能够独立地对整车被动安全性能进行仿真计算和结果分析,能够迅速提升参与相关汽车安全性能开发项目的工作能力。



本书目标读者为具有一定车辆基础知识和力学分析能力,有意或已经进入汽车安全分析领域的学生或工程师。本书对具有一定汽车安全分析经验的工程师具有参考意义。完成对本书的系统学习后将汽车安全分析设计领域具有比较全面的了解,能够熟练进行整车建模、仿真和分析仿真计算结果,并能够对车辆的基本碰撞安全性能进行评价。本书对在军工和航空航天领域进行仿真计算的学生和工程师也具有参考借鉴意义。

由于水平有限,书中难免有不足之处,欢迎读者批评指正。

作者

2011年1月于天津

CONTENTS

目

录

第 1 章 汽车被动安全仿真简介	1
1.1 汽车安全法规	1
1.2 汽车被动安全分析方法发展	4
1.3 被动安全仿真分析方法介绍	7
1.3.1 弹簧/阻尼质量单元分析方法	7
1.3.2 多刚体仿真分析方法	8
1.3.3 有限元仿真分析方法	9
1.4 常用软件简介	10
1.4.1 HyperWorks 简介	10
1.4.2 LS-DYNA 简介	11
1.4.3 MADYMO 简介	12
1.5 LS-DYNA 的汽车碰撞分析	12
1.5.1 K 文件	13
1.5.2 材料模型	14
1.5.3 单元属性	16
1.5.4 沙漏控制	16
1.5.5 接触控制	17
1.5.6 时间步长控制	17
第 2 章 HyperMesh 前处理	18
2.1 HyperMesh 基本操作	18
2.1.1 HyperMesh 界面	18
2.1.2 快捷键与工具栏	19
2.1.3 子面板菜单	20
2.1.4 对象选择器	21
2.1.5 方向选取器	21
2.1.6 Model 功能菜单	22
2.1.7 Mask By Config 功能菜单	23
2.1.8 Import 和 Export 功能菜单	24

2.2	几何清理与网格划分	24
2.2.1	模型导入	24
2.2.2	几何清理	25
2.2.3	二维网格划分	27
2.2.4	三维网格划分	28
2.2.5	无几何网格划分	30
2.2.6	网格检查与优化	31
2.2.7	整车网格划分流程	32
2.2.8	实例	33
2.3	HyperMesh 的模型搭建	35
2.3.1	零部件定位	35
2.3.2	材料和属性设置	35
2.3.3	简单连接设置	38
2.3.4	加载和约束设置	38
2.3.5	计算设置和输出	39
2.4	汽车保险杠低速碰撞仿真实例	40
2.4.1	概述	40
2.4.2	网格模型检查	40
2.4.3	连接设置	40
2.4.4	配重和接触设置	42
2.4.5	约束和加载设置	43
2.4.6	计算参数设置	44
2.4.7	提交计算	46
第 3 章	HyperWorks 后处理	47
3.1	HyperMesh 后处理	47
3.2	HyperView 后处理	47
3.2.1	基本界面	47
3.2.2	实例分析	48
3.3	HyperGraph 后处理	54
3.3.1	基本界面	54
3.3.2	实例分析	55
3.4	MediaView 和 HyperGraph 3D 后处理	59
3.4.1	MediaView 简介	59
3.4.2	HyperGraph 3D 简介	60
3.5	HyperWorks 后处理平台	60
第 4 章	模型结构及车身建模方法	62
4.1	整车碰撞建模方法概述	62

4.1.1	概述	62
4.1.2	模型结构	62
4.1.3	建模原则	63
4.2	基础操作	64
4.2.1	网格划分及孔洞处理	64
4.2.2	网格的创建、分割和合并	64
4.2.3	查找、隐藏和删除	65
4.2.4	旋转、对称、平移和复制	66
4.2.5	节点的替换、重合、分离、对齐	67
4.2.6	定位和坐标轴置换	68
4.2.7	单元编号	68
4.2.8	网格和节点穿透检查	69
4.2.9	材料和属性设置	69
4.2.10	曲线创建与查看	71
4.2.11	模型统计	71
4.2.12	Components 与材料、属性对应关系	72
4.3	车身相关部件建模	73
4.3.1	相对静止部件的连接建模	73
4.3.2	运动件的连接建模	78
4.3.3	焊点的连接建模	80
4.3.4	一维质量单元建模	85
4.3.5	box 和 set 的设置	86
4.3.6	接触设置	86
4.3.7	Contactsurfs 接触面生成	88
4.3.8	部件沙漏控制	92
4.4	常用材料和属性关键字	93
4.4.1	MAT3 关键字	93
4.4.2	MAT98 关键字	94
4.4.3	MAT100 关键字	94
4.4.4	MAT S01 和 MAT S02 关键字	95
4.4.5	SECTION_BEAM 关键字	95
4.4.6	SECTION_DISCRETE 关键字	96
4.4.7	SECTION_SOLID 关键字	96
第 5 章	底盘建模及整车仿真	98
5.1	底盘建模	98
5.1.1	转向及前副车架系统	98
5.1.2	悬架	99
5.1.3	轮毂	103

5.1.4	轮胎	105
5.1.5	动力总成	106
5.1.6	悬置	107
5.1.7	散热器	110
5.1.8	排气系统	110
5.1.9	局部坐标系	111
5.1.10	矢量	112
5.2	整车碰撞仿真	112
5.2.1	刚性墙和地面建模	112
5.2.2	初始速度设置	113
5.2.3	重力加速度设置	114
5.2.4	约束设置	115
5.2.5	输出控制设置	116
5.2.6	加速度传感器	118
5.2.7	位移和转角变化输出	119
5.2.8	力和弯矩输出	119
5.3	计算控制参数	121
5.3.1	CONTROL_HOURLASS 关键字	121
5.3.2	CONTROL_CONTACT 关键字	122
5.3.3	CONTROL_ENERGY 关键字	123
5.3.4	CONTROL_OUTPUT 关键字	123
5.3.5	CONTROL_SHELL 关键字	124
5.3.6	CONTROL_SOLID 关键字	124
5.3.7	CONTROL_TERMINATION 关键字	124
5.3.8	CONTROL_TIMESTEP 关键字	125
5.3.9	DATABASE_BINARY_D3PLOT 关键字	125
5.3.10	DATABASE_BINARY_D3THDT 关键字	125
5.4	整车碰撞模型	126
第 6 章 正面碰撞仿真分析		127
6.1	正面 100% 刚性壁碰撞	127
6.1.1	概述	127
6.1.2	模型检查和状态确认	130
6.1.3	材料和零部件试验	133
6.1.4	仿真结果分析	135
6.2	正面 40% 可变形壁障偏置碰撞	144
6.2.1	概述	144
6.2.2	模型检查和状态确认	145
6.2.3	仿真结果分析	146

6.3	正面碰撞工况对车辆结构设计的要求	147
第7章	侧面碰撞仿真分析	148
7.1	侧面移动障碍壁碰撞	148
7.1.1	法规试验	148
7.1.2	C-NCAP 侧碰试验	149
7.1.3	试验分析	150
7.1.4	模型检查和状态确认	151
7.1.5	侧碰测量单元位置	152
7.1.6	材料和零部件试验	154
7.1.7	侧碰仿真结果分析	154
7.2	侧面刚性柱碰撞	161
7.2.1	试验内容	162
7.2.2	仿真分析	163
7.2.3	测量单元设置	164
7.2.4	仿真结果分析	164
第8章	整车翻滚、追尾、儿童保护、行人保护仿真分析	165
8.1	整车翻滚试验	165
8.1.1	车顶静态压溃试验	165
8.1.2	平台翻车试验	167
8.1.3	螺旋翻滚试验	168
8.2	翻滚仿真分析	168
8.2.1	测试单元设置	169
8.2.2	车顶静态压溃试验仿真	170
8.2.3	整车翻滚试验仿真	172
8.3	追尾(鞭打)试验仿真	173
8.3.1	鞭打试验	173
8.3.2	鞭打试验评测方法	174
8.3.3	鞭打试验仿真计算	177
8.4	儿童保护	178
8.4.1	试验方法概述	178
8.4.2	欧洲 NCAP 儿童保护评价	179
8.4.3	儿童保护仿真分析	180
8.5	行人保护	180
8.5.1	行人保护冲击器简介	181
8.5.2	欧洲 NCAP 行人保护评价	183
8.5.3	行人保护仿真分析	186
8.5.4	行人保护优化	187



第 9 章 乘员约束系统仿真分析	189
9.1 乘员约束系统仿真	189
9.1.1 乘员假人模型	190
9.1.2 安全带建模	191
9.1.3 气囊建模	195
9.1.4 转向管柱建模	196
9.1.5 座椅和车身模型	196
9.2 约束系统零部件试验	197
9.2.1 气囊零部件试验	197
9.2.2 安全带零部件试验	198
9.2.3 转向管柱压溃试验	198
9.3 计算结果查看	199
9.3.1 动画效果查看	199
9.3.2 安全带数据的查看	200
9.3.3 假人头部伤害值查看	200
9.3.4 假人颈部伤害值查看	200
9.3.5 假人胸部伤害值查看	202
9.3.6 假人大腿部伤害值查看	202
9.3.7 假人小腿伤害值查看	203
9.3.8 假人腰部伤害值查看	204
9.4 侧碰、鞭打和儿童约束系统建模	205
参考文献	206

汽车被动安全仿真简介

在 1766 年瓦特改进蒸汽机拉开了工业文明的大幕之后,1769 年法国工程师古诺(Nicholas Joseph Cugnot)制造出了第一辆蒸汽机驱动汽车。但在试车时转向系统失灵,撞到般圣奴兵工厂的墙壁上粉身碎骨,发生了世界上第一起机动车事故。由此可见,伴随着工业文明而出现的汽车是工业文明的标志之一,而汽车碰撞安全问题从汽车诞生开始就成为制约汽车发展的关键问题之一。继蒸汽汽车之后,电动汽车和汽油汽车先后诞生,汽车的保有量日益增加,汽车事故也不断出现。

在我国随着道路交通状况的改善,汽车保有量的不断增加和车速的逐渐提高,交通事故总量和所造成的人员伤亡与财产损失近年来仍然严峻。因此汽车的运行安全性正日益受到关注。如何提高汽车在碰撞过程中的被动安全性能,最大限度地避免或减轻乘员在汽车碰撞中的伤亡已成为我国汽车被动安全研究的重要课题。

1.1 汽车安全法规

为降低汽车事故中的人员和财产损失,英国从 1929 年开始实施道路车辆照明法,1931 年开始实施《汽车构造和使用》法规,1977 年以后开始执行车型认证制度。日本在 1951 年颁布了《道路运输车辆法》。德国于 1952 年颁布了包含汽车及其零部件安全法规的道路交通法。欧洲各国为消除贸易壁垒,大力推行法规的国际化,制定了统一的欧洲经济共同体指令和欧洲经济委员会法规,对汽车的安全性做出了相应的规定。美国也在 1966 年通过了《国家交通和汽车安全法》,对汽车安全性做出了要求。目前在美国、澳大利亚、欧洲、日本、韩国等国家和地区均制定了完整的车辆安全相关法规。

随着车辆安全相关法规的制定、改进和完善,目前已经形成了美国 FMVSS 系列和欧洲 EEC 和 ECE 系列为代表的两大车辆安全法规体系。其中提出了包括关于事故预防、碰撞伤害保护、事故救援及其他用以帮助提高汽车碰撞安全性的规则,并对具体测试方法和检测标准进行了详细规定。如 FMVSS 201 关于车内撞击的乘员保护法规中要求头部冲击器以 24 km/h 的速度撞击仪表板或者座椅靠背,其加速度超过 80g 的持续时间不能大于 3 ms; FMVSS 208 关于汽车乘员撞击保护法规中规定了车辆在前碰撞、侧面碰撞以及侧翻试验中人体损伤的指标及限值要求。

汽车碰撞安全法规的制定和实施有力地促进了世界汽车工业发达国家汽车碰撞安全性能的普遍提高。政府制定的安全法规是对汽车产品的最低要求,一些评价规程,如在欧洲、

美国、中国、日本、澳大利亚、韩国等国家和地区日益盛行的“新车评价程序”——NCAP (new car assessment program) 则在一定程度上进一步促进了汽车生产厂家对汽车安全性能的更高要求。与汽车碰撞安全法规不同,NCAP 是由政府、保险公司、消费者组织、汽车俱乐部等机构共同制定的汽车碰撞安全性评价体系,并且评价测试条件往往较国家制定的安全法规更为严格。NCAP 根据评测结果对测试车型安全性进行分级,星级越高表示该车安全性越好。组织者将这些信息公布给消费者,以引导消费者购车,所以 NCAP 得到汽车生产厂商的高度重视。目前欧洲、美国、日本、中国、澳大利亚、韩国、墨西哥等国家和地区均根据 NCAP 相关要求结合自身实际制定了或者正在制定相应的 Euro-NCAP、US-NCAP、J-NCAP、C-NCAP 等测试标准,如图 1.1 所示。

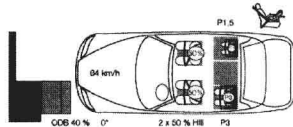
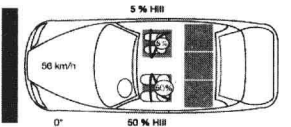
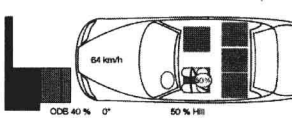
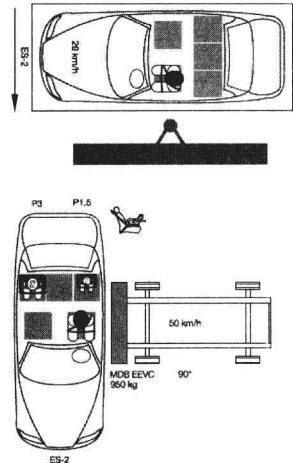
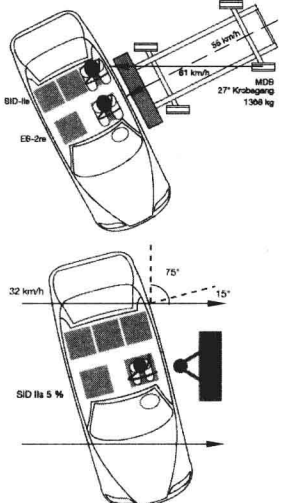
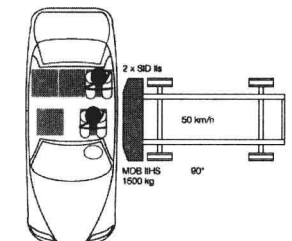
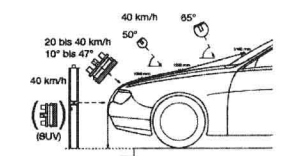
	欧洲 NCAP	美国 NCAP	美国 IIHS
正面碰撞			
侧面碰撞			
行人保护			
其他测试内容	鞭打试验、儿童约束系统、主动安全	儿童约束系统的易用性、静态稳定系数、鱼钩操稳试验	保险杠的维修性试验、车顶静压试验、鞭打试验

图 1.1 各国 NCAP 测试内容

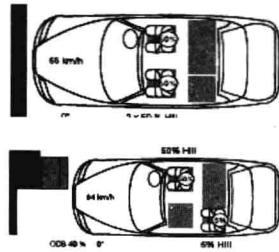
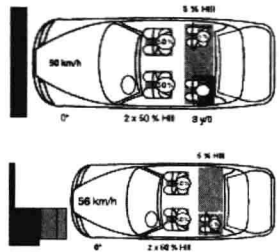
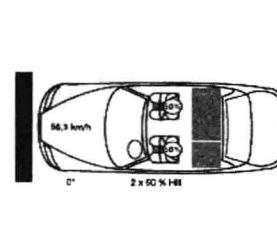
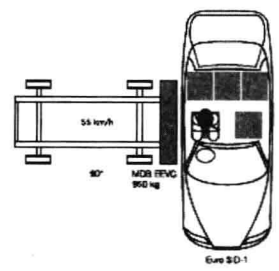
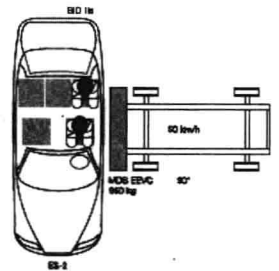
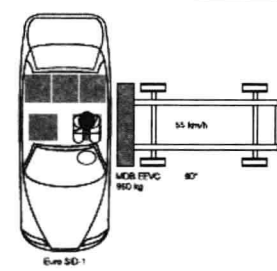
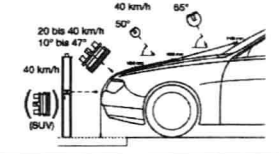
	日本 NCAP	中国 NCAP	韩国 NCAP
正面碰撞			
侧面碰撞			
行人保护			
其他测试内容	儿童约束系统(动态试验和易用性)、制动试验	燃油试验	制动试验、鞭打试验、行人保护、静态稳定系数、鱼钩操稳试验

图 1.1 (续)

在车辆安全性法规和 NCAP 等测试评估中使用了整车正面刚性壁碰撞、整车正面偏置可变形壁障碰撞、整车侧面可变形壁障碰撞、整车侧面圆柱碰撞、鞭打(追尾)碰撞、台架模拟碰撞试验、行人保护试验、零部件试验和其他相关方面的测试试验手段,如图 1.2~图 1.7 所示。

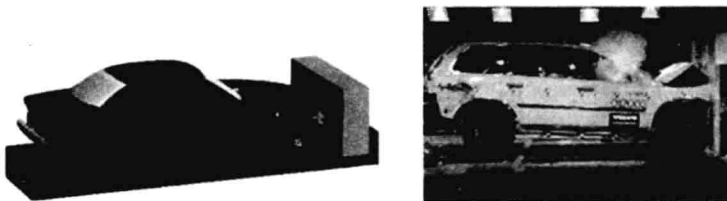


图 1.2 整车正面刚性壁碰撞

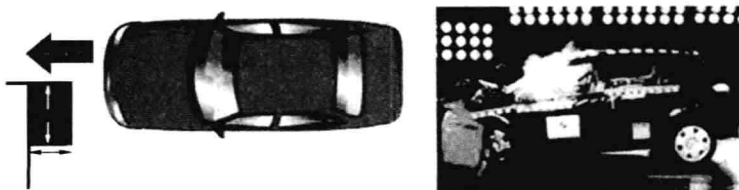


图 1.3 整车正面偏置可变形壁障碰撞

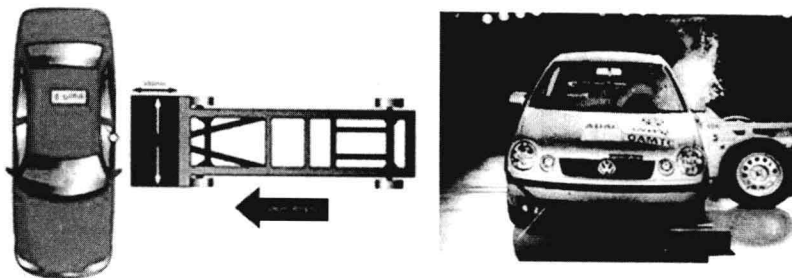


图 1.4 整车侧面可变形壁障碰撞

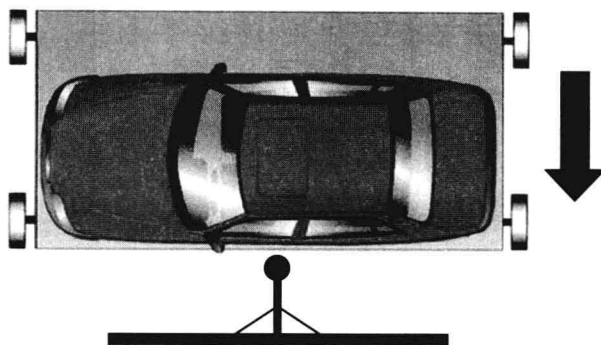


图 1.5 整车侧面圆柱碰撞

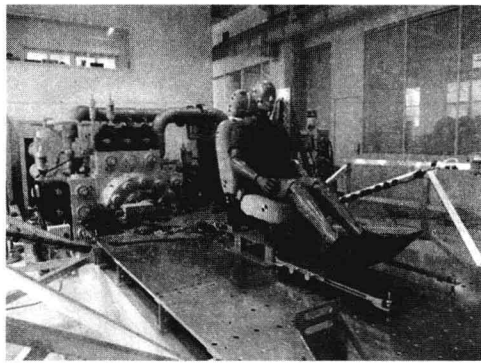


图 1.6 台车模拟碰撞试验



图 1.7 行人保护试验

1.2 汽车被动安全分析方法发展

早期汽车碰撞研究主要是在经验的指导下进行包括实车碰撞和模拟碰撞的试验。通过碰撞试验获得的数据来对新车进行设计或对已有车型进行改进,以便达到相关法规的要求和满足社会公众的需求。汽车碰撞试验主要是通过模拟或再现汽车碰撞事故中的一些典型和重要的碰撞过程来获取对不同结构相应的受力模式,然后以此为依据来改进或检验汽车零部件在汽车碰撞中的安全性,并对汽车碰撞损伤情况进行预估。该方法对汽车安全性的评估准确率和改进能力取决于试验手段的先进性和测量装置的准确性。涉及的零件越多、

受力情况越复杂,测得结果误差越大,所需的试验测量设备则越先进,试制和试验所需周期越长,经费越庞大。

为解决周期长成本高的缺点,人们在汽车碰撞安全研究中逐步引入了数学和力学的方法进行研究。最初将汽车主要部件简化为质量件,使用弹簧和阻尼单元对这些简化质量件进行连接,使用力学分析和数学求解的方法得到能够反映碰撞特征主要参数的解析解(如图 1.8 所示)。这种解析方法的引入为汽车安全性研究和改进提供了宏观的指导方向,较大程度地减小了试验量,降低了研究成本、缩短了开发周期。

随着计算机的推广和使用,20 世纪 60 年代开始计算机也逐步运用到汽车安全的设计开发中。最初,计算机被用于在汽车碰撞分析的解析方法中求取解析解。随着计算能力的提升和力学模型的复杂化,逐步发展和建立起了多刚体动力学理论。多刚体动力学来源于对解析法中简化件的结构细分化和连接复杂化。与解析法所建立的模型相比,多刚体动力学所建立的力学模型与实际情况更接近,但求解更困难,计算机的出现和发展将对多刚体动力学进行求解变为了现实,并推动了多刚体动力学的发展,并用于乘员的伤害保护计算(如图 1.9 所示)和车辆的碰撞分析。

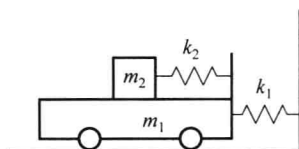


图 1.8 解析法的基本模型

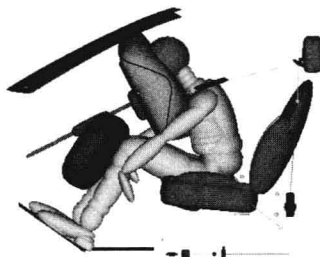


图 1.9 多刚体动力学仿真模型

20 世纪 80 年代随着计算能力更强的计算机的推广运用,有限元理论被运用于工程计算。通过有限元计算可对由网格划分建立起的模型进行较高精度的求解,其力学模型和求解方法远比前两种方法复杂和完善,能够真实的反应模型中各部件及其连接的真实力学性能和运动方式,借助计算机强大的计算能力可对车辆碰撞问题进行系统准确的求解计算,如图 1.10 所示。



图 1.10 有限元仿真模型

解析法、多刚体动力学法和有限元法都是使用力学建模和数学求解来减小试验数量,降低研究成本,缩短开发周期的数学物理分析方法。这三种方法对车辆碰撞的计算准确性和有效性依次提高,在汽车被动安全研究中的重要性也依次提升。数学物理分析方法虽然有

成本低、周期短的优点,其有限元计算精度也较高,但汽车碰撞过程是一个十分复杂的综合系统的瞬时冲击响应过程,不但涉及复杂的接触、变形、失效、断裂等多种物理变化,还涉及乘员和行人保护装置的触发及动作、人体伤害等各方面的问题,要完全抛开试验仅用数学物理分析方法对汽车被动安全进行设计和改进还不现实。目前虽然有限元计算广泛应用于汽车的被动安全研究开发,并节约了大量汽车开发成本,但在使用有限元对汽车被动安全进行分析的同时仍然需要进行一定数量的试验,并通过试验结果修正和验证仿真计算结果,如图 1.11 所示。

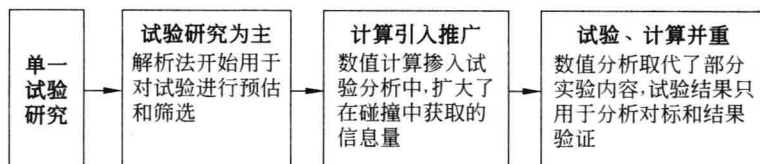


图 1.11 汽车被动安全研究手段的发展路线

随着数值分析方法大量运用于汽车安全研究,目前形成了如图 1.12 所示的整车被动安全开发流程。

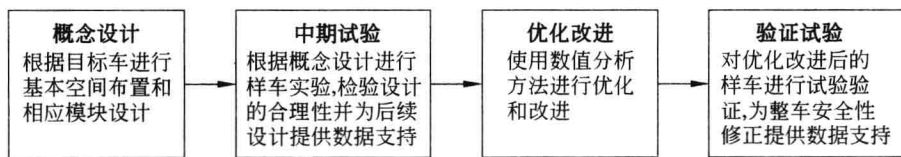


图 1.12 汽车被动安全的设计开发流程

数值仿真计算目前在概念设计和优化改进过程中被大量使用。在概念设计中数值模拟主要用于对简化模型的基本结构件在各种工况下安全响应的评估和计算。在优化改进中数值模拟主要用于整车在不同工况下的碰撞仿真模拟,根据仿真结果进行整车或某一部件的优化和改进工作。数值模拟方法用在每一轮仿真-优化改进中的分析过程,如图 1.13 所示。

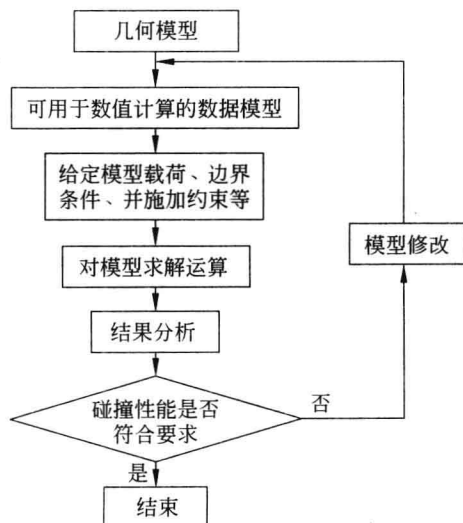


图 1.13 汽车安全性能优化仿真分析流程