

汽车碰撞与安全

黄世霖 张金换 王晓冬等 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书由清华大学汽车碰撞试验室编著。该试验室已完成了 50 辆整车和 300 多次模拟碰撞试验，其范围覆盖了众多的国产轿车、吉普车和面包车，积累了丰富的第一手汽车碰撞的试验经验。本书主要阐述汽车被动安全性研究与汽车碰撞试验的一整套技术，内容新颖、实用，图文并茂。全书共 5 章，第 1 章分析汽车交通事故；第 2 章对比、综述各国汽车碰撞安全法规；第 3 章介绍了整套撞车试验方法；第 4 章专门论述乘员保护；第 5 章展示模拟计算技术在被动安全性研究的最新应用实例。本书适合作为汽车相关专业的教材，各汽车厂家、研究机构的技术参考资料，也是爱车一族增强对汽车安全性能了解的必备指南。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车碰撞与安全/黄世霖等编著.—北京：清华大学出版社，2000.7

ISBN 7-302-04187-3

I. 汽… II. 黄… III. ①汽车—碰撞试验 ②汽车—安全—性能 IV. U461.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 82252 号

出版者：清华大学出版社（北京清华大学学研大厦，邮编 100084）

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者：北京市丰华印刷厂

发行者：新华书店总店北京发行所

开 本：850×1168 1/32 印张：6.125 字数：158 千字 彩插 2

版 次：2000 年 12 月 第 1 版 2000 年 12 月 第 1 次印刷

书 号：ISBN T-302-04187-3/TH·88

印 数：0001~4000

定 价：15.00 元

参加编著人员：

黄世霖、张金换、王晓冬、
裘 新、陆秋明、黄存军、
王晓泉、崔新宇、刘学军、
杜汇良、熊 文、杨天伟

“汽车安全与节能”国家重点实验室

清华大学汽车碰撞试验室

1999年12月

—◆ I ◆—

序 言

在 20 世纪 70 年代前汽车技术的发展，主要集中在提高动力性、操纵稳定性、舒适性、制动性以及提高灯光、视野等方面，这些均可以称为主动安全性。但是各种汽车交通事故仍然会频繁发生，研究在汽车发生碰撞事故之后，如何减少人员伤亡就成为很重要的课题，这称为汽车碰撞（被动）安全性。

发达国家在 20 世纪 70、80 年代后期就开始制定和执行有关汽车碰撞（被动）安全性的技术法规，在以后，这些法规不断地得到了改善和发展。由于执行了安全法规，有的国家每年汽车事故死亡人数下降了约 20%，而且不再出现死亡人数逐年增长的情况。而我国汽车交通事故死亡人数逐年不断增长，每年万车死亡人数已达到发达国家的 10 倍以上。

我国早在 1989 年就公布了有关汽车碰撞（被动）安全性的国家标准，但由于种种原因，未能强制执行。主要原因一是我国汽车行业对汽车碰撞（被动）安全性了解较少，缺乏在这方面独立自主开发和研究能力；二是我国汽车工业缺乏这方面的试验测试能力。所以本书将较为系统地介绍这方面的工作，从交通事故和安全法规入手，介绍试验方法、乘员保护、安全性设计和最先进的模拟碰撞计算方法。

由于近十年来有关部门和领导的重视及各方面的努力，我国已经开展了这方面的研究工作，特别是在清华大学黄世霖教授领导下进行的汽车碰撞（被动）安全性研究，在十分艰苦的条件下，探索出了一条适合我国开展汽车碰撞试验研究的途径。迄今为止，试验室已经对国内的很多车型进行了整车碰撞试验，如北京吉普、上海桑塔纳、神龙富康、一汽红旗以及一汽长安、南汽、哈飞等

生产的轿车累计五十余辆整车，试验类型可以分为正撞、横撞和追尾碰撞试验。同时，还建立了台车模拟碰撞试验台，对座椅、安全带、安全气囊等进行了三百多次试验。在试验的基础上，又开展了先进的汽车碰撞模拟计算技术，为国产汽车在设计阶段进行了模拟计算预测，与国外著名的汽车厂家和有关单位开展了多项合作项目。通过各项研究工作，不仅出色完成各项任务，而且培养出了 28 名博士生和硕士生，他们已经分别成为了汽车行业中的骨干。由于出色的成绩，在 1996 年，“汽车碰撞试验与测试分析处理系统研究”获得第一机械工业部和汽车行业的科学技术进步一等奖，并在 1997 年获得国家科学技术进步二等奖。现在将多年来的工作进行系统的整理和总结，并付诸发表，这是很有价值的。

在 21 世纪，汽车安全性的研究将是发展我国汽车技术领域首要考虑的问题之一。1999 年底已发布新的中国汽车设计法规，本书的出版将配合和促进汽车碰撞安全法规的贯彻和执行。这方面的研究，也将会提高国产汽车的碰撞安全性，减少交通事故的人员伤亡，具有重大的社会和经济意义。

作者

目 录

第 1 章	汽车交通事故与事故分析	1
1.1	汽车交通事故概述.....	1
1.1.1	交通事故统计.....	2
1.1.2	我国交通事故的特征.....	4
1.2	汽车交通事故分析.....	7
1.2.1	汽车对汽车的一维碰撞.....	8
1.2.2	汽车与汽车的二维碰撞分析.....	10
第 2 章	国际汽车碰撞安全法规及我国的法规现状	24
2.1	美国法规与欧洲法规.....	24
2.2	欧洲各安全法规间关系分析.....	30
2.3	美国各法规关系分析.....	32
2.4	我国被动安全法规的现状.....	33
2.4.1	法规项目.....	33
2.4.2	法规试验内容.....	33
2.4.3	参考欧洲法规制定汽车撞行人的有关法规.....	34
第 3 章	汽车碰撞安全试验方法	35
3.1	实车碰撞试验方法.....	35
3.1.1	固定壁碰撞试验方法.....	35
3.1.2	移动壁碰撞试验.....	39
3.1.3	车对车碰撞试验.....	40
3.1.4	翻车试验.....	42
3.2	撞车模拟试验.....	43
3.2.1	台车模拟试验.....	43

3.2.2	台架冲撞试验	47
3.2.3	静态模拟试验	49
3.3	行人保护实验方法简介	51
3.4	测试用人体模型	53
3.4.1	假人	53
3.4.2	头部模型和胸部模型	64
3.5	电测量系统	64
3.5.1	电测量系统的频率响应的要求	65
3.5.2	传感器和放大器	66
3.5.3	数据采集和处理	68
3.6	序列图像运动分析系统	69
3.6.1	数字图像运动分析技术在汽车碰撞试验中 的应用	69
3.6.2	图像运动分析系统应用实例	72
3.6.3	室内摄像灯光照明系统的分析和运算	77
第 4 章	乘员保护	81
4.1	概述	81
4.1.1	汽车被动安全性概念	81
4.1.2	碰撞事故中乘员伤害原因及相应对策	81
4.1.3	国内外研究概况	82
4.1.4	研究乘员保护系统的有关试验及假人伤害 评价指标	84
4.2	安全带	86
4.2.1	安全带的种类	86
4.2.2	预紧式安全带的工作原理	87
4.2.3	限力式安全带工作原理	90

4.2.4	有关法规及试验方法	90
4.3	安全气囊技术	91
4.3.1	国内外气囊的研究发展状况	91
4.3.2	气囊工作原理、组成与分类	92
4.3.3	气囊控制系统关键技术要求	101
4.3.4	气囊点爆控制算法介绍	104
4.3.5	气囊的试验方法	107
4.3.6	气囊系统试验	111
4.3.7	气囊模拟计算技术	117
4.3.8	智能化保护系统	120
第 5 章	汽车碰撞和乘员响应的模拟计算	123
5.1	概述	123
5.2	非线性有限元法	124
5.2.1	有关接触碰撞问题模拟计算的发展过程	125
5.2.2	非线性有限元法的基本理论和计算方法	125
5.2.3	目前在汽车被动安全研究中常采用的有限元 软件	130
5.2.4	动态非线性有限元法在汽车被动安全上的 应用	132
5.3	多刚体动力学法及多刚体有限元耦合模拟计算	140
5.3.1	多刚体运动学的基本理论和计算方法	141
5.3.2	多刚体系统运动学的理论基础	141
5.3.3	多刚体系统动力学基本原理和计算方法	145
5.3.4	应用实例	163
5.4	汽车碰撞人体的运动响应模拟计算及初步验证	168
5.4.1	系统定义	168
5.4.2	参数值设定	171

5.4.3	计算结果分析	174
5.4.4	模拟计算结果与真实的车撞行人事故对比	177
5.4.5	模拟计算结果与 MADYMO3D 模拟计算结果 的对比	179
5.4.6	小结	180
参考文献		181

第 1 章 汽车交通事故与事故分析

在汽车交通事故中每年的死伤人数，常常超过世界的局部战争，所以交通事故已经成为人类社会的重大公害之一。因此，如何加强交通管理，改善交通设施和改进车辆的设计，从而不断提高运输效率，降低交通事故的伤亡，是各国汽车行业研究的重要课题。

我国的交通事故，明显地分为了两个阶段。在 20 世纪 50 年代到 70 年代，由于车辆数比较少，公路也不够发达，使得平均行驶车速较低，所以事故伤亡人员主要是行人为主。当时主要的研究问题是交通管理和公路设施的改进。但是到了 20 世纪 80 年代和 90 年代，由于公路条件的改善和一批高速公路的建成使用，使得平均车速有了很大的提高，交通事故中的死亡人员比例发生了很大的变化。据 1997 年交通事故死亡人员统计数字，汽车乘员占 32.6%，行人占 26.5%，自行车使用者占 21%，摩托车使用者占 14%。由此可以看出汽车乘员与行人的死亡已近总人数的 60%。所以汽车乘员保护和汽车与行人碰撞是汽车碰撞（被动）安全性研究的主要内容。

1.1 汽车交通事故概述

从全世界的统计数字来看，每年因道路交通事故而死亡的人数已高达 50 万人之多，伤 1 000 万人以上。我国是世界上交通事故最多的国家之一，近几年，每年的交通事故都有数十万起，直接经济损失十几亿元（见表 1-1）。从图 1-1 中可以看出，自 1985 年以来，我国交通事故呈上升趋势，死亡事故每年均在递增。

表 1-1 1995 年后我国交通事故统计

年份	交通事故数	死亡人数	受伤人数	直接经济损失/亿元
1995	271 843	71 500	159 000	15.2
1996	287 685	73 655	174 447	17.2
1997	304 217	73 861	190 128	18.5
1998	346 129	78 067	222 721	19.3

◆汽车碰撞与安全◆

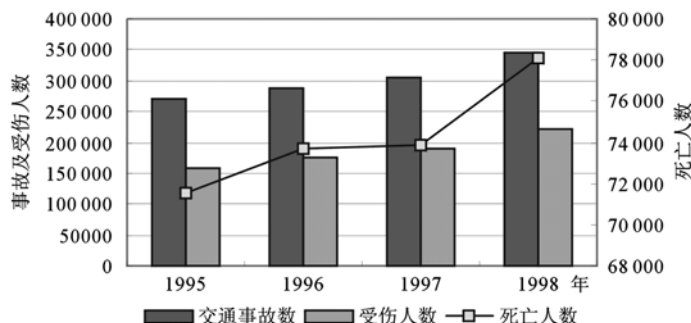


图 1-1 我国 1995 年后交通事故趋势

交通事故不仅造成巨额的直接经济损失，而且导致残疾人口上升和家庭不幸等诸多社会问题。

发生事故的原因包括驾驶员、行人、车辆、气候和道路环境等一系列复杂因素，需要全面、综合地考虑和解决。世界各国已经从法律法规的建立、道路设施的建设、交通安全教育、交通管理系统完善、提高汽车产品安全性等多方面采取措施，并在减少交通事故和人员伤亡等方面取得了一些良好的效果。

1.1.1 交通事故统计

评价一个国家交通事故的严重程度，一般可以用年万车死亡人数（平均每年每万辆机动车的致死人数）和年 10 万人死亡数（平均每年每十万人在交通事故中的死亡人数）来衡量，表 1-2 列出一些国家道路交通事故的有关数据。

表 1-2 1995 年一些国家道路交通事故状况

	美国	德国	法国	意大利	日本	韩国	中国
交通事故次数	—	2 220 000	19 926	170 000	760 534	248 865	271 843
死亡人数	41 798	9 700	8 412	6 600	10 679	10 323	71 494
受伤人数	3 386 000	530 000	181 403	240 000	922 677	331 747	159 308
年万车死亡人数	2.13	1.9	3.5	1.9	1.6	12.2	22.5
年 10 万人死亡数	15.91	12.0	14.5	12.0	8.5	23.0	5.9

世界各国对交通事故死亡的定义也是有差别的,如表 1-3 列出了几个国家对交通事故死亡的定义,只有在交通事故后规定的时间范围内死亡,才被定义为并计入交通事故死亡。

表 1-3 一些国家对交通事故死亡的定义

国 家	美国	德国	法国	意大利	日本	英国	中国
事故发生后时间/天	30	30	6	7	1	30	7

近年来,我国各种机动车的保有量增长很快,1997 年已达 4 209.3152 万辆,机动车驾驶员 5 206 万名,比 1996 年分别增长 16.61%和 22%;道路交通事故的数量和死亡人数也不断增加,从 1987 年至 1997 年的 10 年间,事故数量和死亡人数分别增加了 20.4%和 38.2%,1997 年已分别达到 304 217 起和 73 861 人(图 1-2),交通事故死亡总数比上年增加 0.3%。

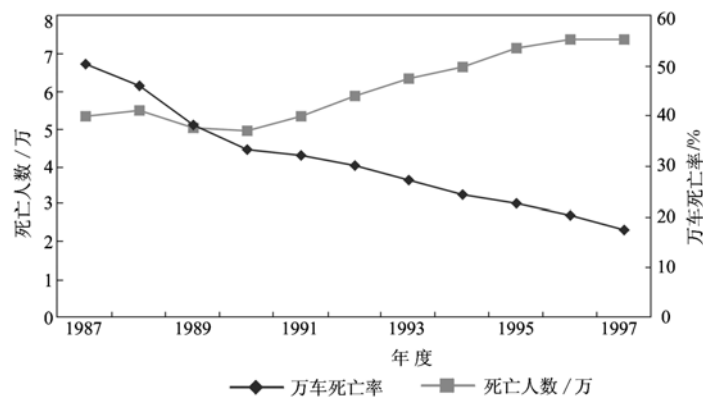


图 1-2 1987~1997 年我国道路交通事故死亡人数和万车死亡人数的变化

虽然我国年万车死亡人数由 1996 年的 20.4 人/万车下降到 17.3 人/万车,但平均每天仍有 203 人死于交通事故,是世界上交通事故最多的国家之一。1998 年交通事故所造成的直接经济损失高达 19.3 亿元。

◆汽车碰撞与安全◆

1.1.2 我国交通事故的特征

可以从以下几个方面分析我国交通事故的主要特征。

1.1.2.1 各种交通方式的死亡人数分布

表 1-4 列出 1997 年我国交通事故中使用不同交通工具死亡人数及其比例，并与美国(1995)、日本(1986)、德国(1986)的相应数据进行对比，从中找出我国交通事故的特点。

表 1-4 4 国道路交通事故中不同的交通方式死亡人数的情况

项 目	中 国 (1997)	美 国 (1995)	日 本 (1986)	原联邦德国 (1986)	
死亡人数/人	73 861	41 798	12 458	8 948	
死亡 人员 比例 /%	汽 车	32.6	76.3	35.7	53.1
	摩托车	14.0	5.3	24.8	13.8
	自行车	21.1	2.0	10.3	9.2
	行 人	26.5	13.4	28.9	22.9
	其 它	3.4	3.0	0.3	1.0

由此可以看出，在我国驾乘汽车、骑自行车和步行者占交通事故死亡人数的比例较高，反映出我国道路的混合交通现象十分严重；其次是骑乘摩托车和采取其它交通方式（拖拉机、农用车、畜力车等）的人员死亡人数亦不容忽视，这些都是交通事故的重要研究对象。

步行、骑自行车和骑摩托车者都是交通事故中的“易受伤害者”，占全部死亡人数的 61.6%，这说明汽车与行人、骑车人的共存性问题同样十分重要。

1.1.2.2 各年龄段死亡人数比例

图 1-3 显示 1997 年中国道路交通事故死亡者的年龄比例。

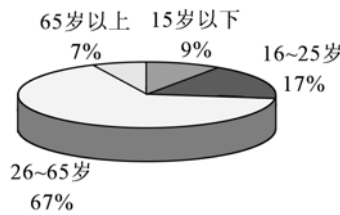


图 1-3 我国 1997 年交通事故死亡者的年龄比例

图 1-4 为美国、日本和德国等类似年龄段死亡人数的情况。

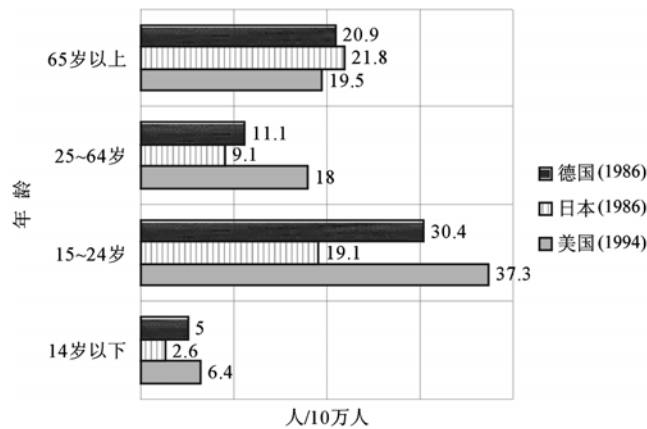


图 1-4 各国家不同年龄段交通事故死亡人数总人口比例(单位 :人/10 万人)

从图中可以看出，16~25 岁、26~65 岁是我国交通事故死亡比例较高的两个年龄段，除 15 岁以下年龄段外，各年龄段交通事故死亡人数占人口的比例大体相当，均明显低于其它 3 国；美、日、德国等 3 国的 25~64 岁年龄段的死亡人数占人口的比例都较低，而 15~24 岁和 65 岁以上则要高许多。近年来，由于社会老龄化趋势，高龄人口的交通事故愈来愈引起世界各国的重视；婴幼儿身体较弱，发生交通事故时死亡率也较高，这也是各国注意对婴幼儿采取特殊乘员保护装置的原因。

◆汽车碰撞与安全◆

1.1.2.3 城市道路和公路上的交通事故数量与死亡人数比例

从图 1-5 可以看出，1997 年我国交通事故的 63.84%发生在公路上，公路交通事故的死亡人数占 78.10%，这说明由于公路上车辆行驶速度快，更容易导致事故的发生。

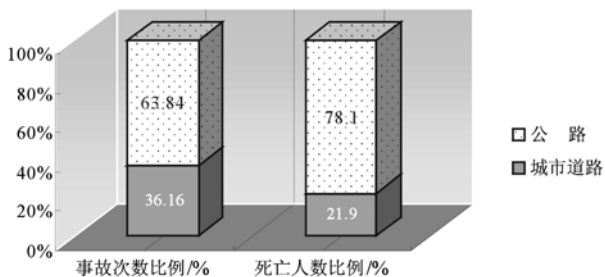


图 1-5 1997 年我国城市道路与公路交通事故比例

1.1.2.4 不同事故形态的比例

图 1-6 列出 1997 年我国道路交通事故中不同的事故形态次数、死亡人数的比例，从中可以看出，正面碰撞事故中死亡的人数占首位，侧面碰撞次之。

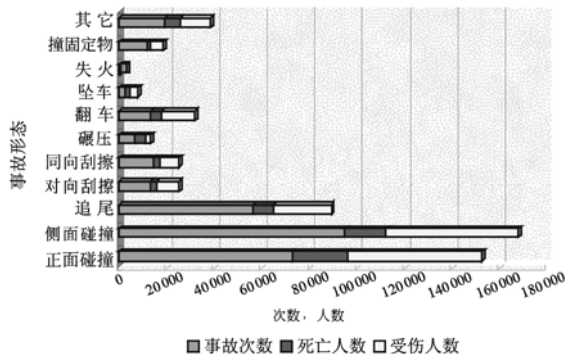


图 1-6 1997 年各类事故形态状况

1.1.2.5 气候与路面因素

气候、路面和车辆视野状况对交通事故影响也比较明显, 根据 1997 年统计数据, 夜间无路灯照明情况下发生交通事故的次数占总数的 16.85%, 死亡人数占总数的 26.79%; 沥青路面发生的事故数占总数的 61.93%, 死亡人数占总数的 62.01%; 雨天发生的事故数占总数的 13.52%, 死亡人数占总数的 11.01%; 潮湿路面发生的事故占总数的 7.55%, 死亡人数占总数的 6.34%。

1.2 汽车交通事故分析

汽车碰撞事故可分为碰撞前运动、碰撞和碰撞后运动三个连续阶段。碰撞前的运动, 通常是从发现对方车辆或障碍物等其它物体开始, 接着采取制动和操纵转向盘等回避事故的操作; 碰撞是指发生交通事故的车辆相互接触的过程, 或车与障碍物接触的过程, 持续时间大致为 0.1~0.2s 左右。在这个期间, 两车交换动量, 一部分动能以塑性变形的形式消耗掉。碰撞后, 两车成为一体, 或者回弹相互离开, 做平移运动或平移加旋转运动。由于路面等的摩擦, 碰撞后剩余动能被消耗掉, 最终停车。碰撞后的运动时间约为几秒。

汽车交通事故分析的任务是根据事故现场的证据, 例如, 碰撞后车辆相对位置、车轮拖印和车体碰撞变形等, 尽可能准确地分析事故发生前的车辆运动参数, 为认定事故责任、检验车辆的碰撞安全性能和安全装置的效能提供最直接的证据。

虽然汽车碰撞事故的形式纷繁多样, 但是从汽车碰撞动力学的角度来看, 基本可分为较简单的一维碰撞(如完全正面碰撞、追尾碰撞等)和比较复杂的平面二维碰撞(如垂直侧面碰撞、斜角碰撞等)。

1.2.1 汽车对汽车的一维碰撞

所谓一维碰撞是指在汽车纵轴线上发生的碰撞，并且车辆的变形和运动也是沿着纵轴线方向的，例如正面相撞和追尾碰撞便属于一维碰撞。

由于在碰撞过程中，碰撞力远远大于非碰撞力，如轮胎与地面的摩擦力、风阻等，所以可以认为该碰撞系统没有受到外力作用，则碰撞前后的动量守恒，即

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

式中 m_1 ， m_2 为车体 1，2 的质量， v_{10} ， v_{20} 为车体碰撞前的速度， v_1 ， v_2 为碰撞后的速度。规定恢复系数 e 为：

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \quad (1.1)$$

则碰撞前后速度的变化便可惟一确定，即

$$\begin{aligned} v_1 &= v_{10} - \frac{m_2}{m_1 + m_2} (1 + e) (v_{10} - v_{20}) \\ v_2 &= v_{20} + \frac{m_1}{m_1 + m_2} (1 + e) (v_{10} - v_{20}) \end{aligned} \quad (1.2)$$

由上式可知，尽管碰撞前两车体的速度差相同，但如果车体的质量和恢复系数 e 不同，速度的变化也不相同。恢复系数越大，或对方的质量越大，速度的变化越大。

对于汽车碰撞事故，速度变化很大而恢复系数几乎等于零。在上式中，如设 $e = 0$ ，则 $v_2 = v_1$ ，即碰撞后两车几乎是粘在一起运动的。一般来说，相撞的两车质量是不同的，即使以同样的车速发生正面相撞，相撞后的速度也不会完全等于零，质量小的汽车将沿着质量大的汽车的前进方向被顶回去。这样一来，在两车发生正面碰撞时，质量大的一方的速度变化要比质量小的一方小，受到的冲击也小。

在上述两种情况中，碰撞速度本身就是有效碰撞速度。