

中文摘要

近年来,随着我国汽车保有量和高速公路里程的不断增加,公路上发生的交通事故也在逐年增加,其中近 1/3 的事故是由汽车与护栏碰撞造成的,每年造成巨大的人员伤亡和财产损失,所以分析汽车与高速公路护栏碰撞的事故,研究人体损伤防护以及护栏和车辆防护性能的改进具有非常现实而重大的意义。

本文主要从车和护栏的角度,用计算机仿真的方法系统研究了轿车与高速公路护栏的碰撞。文章先对国内外高速公路发展情况和高速公路交通事故进行了统计分析,并对国内外汽车-高速公路护栏碰撞事故的研究情况进行了对比分析。然后,文章对高速公路护栏的种类、设计方法和性能评估等方面进行了全面讨论。

文章基于多刚体动力学碰撞仿真软件 MADYMO,建立了多刚体轿车-有限元双波形护栏碰撞系统仿真模型。通过研究车辆和护栏在碰撞中的动态响应来揭示乘员的损伤与交通事故中的相关因素,如碰撞角度、碰撞速度等,之间的内在关系,对比在不同碰撞角度和碰撞速度时,车辆与护栏的动态响应来研究轿车与护栏之间的碰撞规律,并取得一些有意义的结论。

在对影响护栏防护性能的外在因素进行了研究之后,本文接下来还对影响护栏防护性能的内在因素——护栏横梁板的设计参数 m 、 h_1 和 r_1 与护栏整体防护性能的相互关系进行了研究,结果分别从护栏的吸能特性和护栏作用在轿车上的加速度两个方面进行分析。研究表明,对于设计参数 m ,从护栏的吸能特性来看,现役护栏吸收的碰撞能量最多的,所以对应的三个设计量都是最优的;从护栏作用在轿车上的加速度来看,现役护栏作用在车体 X 方向上的加速度相对较小,在 Y 方向上加速度却较大, Z 方向几乎差别不大,设计参数 h_1 和 r_1 也得到相似的结论。

最后,本文在总结了轿车与高速公路波形护栏碰撞中轿车的动态特性及护栏防护特性的基础上,提出了当前研究所遇到的若干问题和解决方案,并展望了进一步的研究目标。

关键词: 高速公路, 波形护栏, 碰撞仿真, 防护性能, 设计参数

Abstract

In recent years, with the total number of motor vehicles and highway mileage expand continuously in our country, traffic accidents that happen on the highway are increasing year by year. Among them nearly 1/3 accidents are due to the impact between vehicles and guardrails, and bring a large number of losses to human's life and property. The study on vehicle-guardrail impact is still at the starting stage at present in our country, so the research work that carries on in this aspect has a very realistic and great meaning.

From views of vehicle and barrier, car crash with highway barrier was studied systematically in this paper by using computer simulation. Firstly, background of highway development and data collecting and statistics analysis of highway accidents at home and abroad were carried out. Researches of vehicle-barrier crash accidents on highway were compared between in and outside China, and several significant conclusions were acquired. The category, design and guidelines of highway barriers were then described.

Based on dynamics simulation software MADYMO, a multi-body car and finite element W-beam guardrail impact model has been established. By studying the dynamic response of vehicle and guardrail in collision, this paper announced the inherent relation between the damage of the persons and relevant factors of traffic accident, such as the impact angle, impact speed and so on.

After analyzing the external factors, this paper went on to study the inherent relation between the guardrail's protective performance and its internal factors, such as the guardrail's design parameters m , h_1 and r_1 . The results were analyzed from the time history of energy absorbed by the guardrail and acceleration on the car's mass center. From the results we can see, the active barrier can absorb much more impact energy than the other two, and the three corresponding design of the active barrier are optimal. And the active barrier has a lowest acceleration in the X direction, but a highest one in the Y direction, and too little difference in Z direction to be considered, the design parameters m , h_1 and r_1 have come to the similar conclusions.

Finally, on the basis of summarizing dynamics of car and protection behavior of guardrail in car-highway barrier crash, many problems solutions confronted in the current research were presented, and the prospect objectives of further work were also given.

Key words: Highway; W-beam guardrail; Impact simulation; Protective performance; Design parameter

独创性声明

本人声明，所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名：周政权 日期：2008.5.1

关于论文使用授权的说明

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即学校有权保留、送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签名：周政权 导师签名：周政权 日期：2008.5.1

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

汽车自诞生以来的 100 多年间，以其特有的优越性为现代社会发展和人类生活条件的改善做出了巨大的贡献，但是汽车的大量普及不可避免的带来了交通拥挤、环境污染和事故伤害等许多问题，尤其是道路交通事故发生率居高不下，对人们的人身财产安全造成了难以估计的伤害。1970 年以前，世界上一些经济发达国家随着汽车保有量的增加，交通事故也相应增多，到 1970 年交通事故数达到最高峰。例如日本，1970 年死于车祸的人数达到 16765 人，伤于车祸的人数达到 981096 人，死、伤总人数达到全国人口的 1%。但在这之后，发达国家开始对公路护栏的安全性能进行了大量的研究工作，各种新型护栏不断出现并被广泛使用，这些国家的交通事故正在逐年减少，由事故造成的损失也随之大为减轻。据不完全统计，在 1987-1992 年这 5 年中，西欧交通流量上升了 16%，然而在 1988-1992 年间德国的事故率却下降了 70%；法国和西班牙均下降了 20% 左右；英国的车祸死亡率由每公里 1.8 人/亿辆降低到 1.1 人/亿辆^[1]。

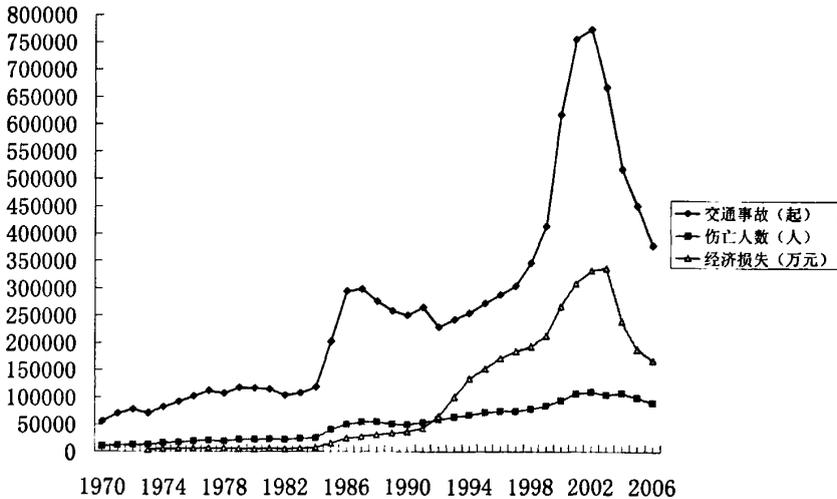


图 1 1970-2006 年全国道路交通事故统计

我国的交通事故基本是随着国民经济的发展而逐步上升的，交通事故死亡人数列世界第一。根据资料表明，在道路交通事故中，发生在普通干线公路上的事故约有 45%，发生在高速公路上的事故约有 30%。其中由于汽车越出道路而造成的特、重大恶性交通事故占该类事故总数的比例高达 62% 以上。同时我

国每年因交通事故而导致的死亡事故中有 1/3 是汽车与路侧碰撞的单车事故。图 1 为我国 1970-2006 年历年道路交通事故以及由此造成的人员伤亡和直接经济损失的情况^{[2] [3]}。从图中可以观察到, 从 70 年代以来, 我国道路交通事故总数和伤亡人数总体呈现上升趋势, 特别是 90 年代中后期增长非常迅速。但从 2002 开始, 我国道路交通事故总数有了明显的下降, 但由此造成的人员损伤总数却远远高于世界上其他国家。2004 年 10 月世界卫生组织公布, 我国汽车保有量仅占世界汽车保有量的 2%, 可道路交通事故的死亡人数却占世界交通事故死亡人数的 17%, 万车死亡率是美国的 35 倍, 日本的 22 倍, 成为世界交通事故死亡人数最多的国家。据世界银行的报告预测, 到 2020 年, 中国因道路交通造成的死亡还会再上涨 92%。由此造成的经济损失将占到 GDP 的 1.5%, 相当于 210 亿美元。

分析我国道路交通事故伤亡人数居高不下的诸多因素中, 其中非常重要的一个方面就是我国的公路设施, 特别是高速公路设施, 与发达国家相比, 无论从实质的合理性, 还是从设施的总体品质均远比不上。在所有道路交通事故中, 高速公路交通事故(主要是护栏碰撞事故)占了很大的比例, 而且随着我国高速公路里程和汽车保有量的增加有上升的趋势。特别是随着汽车行驶速度的不断提高, 现有的护栏将有可能无法满足安全行驶的需要。因此进一步开展汽车与道路护栏碰撞事故的研究, 具有非常重要的意义。

1.2 研究现状

1.2.1 国外研究现状

护栏作为高速公路上的主要安全设施, 在世界范围内很早就受到了人们的广泛重视。国外公路交通较发达的国家在高速公路出现的初期就着手于护栏结构的研究。例如, 美国从 1920 年起就开始了护栏的研究与使用, 在理论分析和模拟实验的基础上, 通过实车足尺护栏碰撞验证实验和公路上的应用实践, 积累了大量的资料和丰富的经验, 制定了有关护栏形式的选择、结构设计、试验方法、手段以及护栏的生产制造、运输安装和维修等一系列的标准。如 1966 年美国首先制定实施了国家交通、汽车安全法及公路安全法, 1968 年又实施了安全标准 FMVSS, 1970 年美国运输部公布了开发试验安全车 (ESV) 的计划。美国国家研究会交通研究所在 1981 年制定了高速公路安全设施的评价标准, 在 1970 年和 1986 年前后组织了高速公路护栏结构及各种安全设施的一系列的研究工作以及编写各种设计规范。法国、英国、德国等国家也在很早就开始护栏结构的研究工作, 建立健全了一整套的实验设施和相应的实验规程, 从理论和

实验上研究了多种类型的护栏结构。日本于 50 年代开始这方面的研究工作，并在名神高速公路开始正规使用护栏。在短短十几年中，日本的众多研究机构对各种护栏结构进行了广泛深入的开发研究，于 1965 年制定了护栏设置纲要，对护栏的适用范围，结构设计，功能要求、施工安装等方面做出了明确的规定。至此形成了美、日两种典型的护栏形式。其它许多国家，大致在 50、60 年代，也相继开展了各自国家的护栏结构的设计标准的研究。

国外不少设施的碰撞研究人员对汽车与路侧撞进行了广泛而深入的研究，并将碰撞试验所得的结果与用计算机仿真模拟得到的结果进行比较分析。Miller 和 Carney III 介绍了使用 LS-DYNA 程序模拟在重型车和轻型车的高速碰撞下，美国康涅狄格州碰撞衰减系统 NCIAS 的吸能特性，并将有限元仿真和足尺寸碰撞试验的结果进行了比较，如加速度—时间曲线、速度—时间曲线、位移—时间曲线，结果非常一致。并建议将这种计算机仿真工具更广泛地用于道路安全性能的研究^{[4] [5]}。Robert Thomson 对路侧和中央分隔带护栏系统的安全性以及评价标准进行了详细的说明。对路边设施进行标准化试验的要求始于 20 世纪 60 年代，随着路侧硬件设施的研究和试验技术的进步，很多文献都报告了非常详细的评价系统，如 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 230 报告 (1981) 和 350 报告 (1993)，欧洲的试验条件，在 prEN1317 标准中进行了说明。

1.2.2 国内研究现状

我国在七五期间开始针对高速公路护栏的设计、生产与施工等方面的开展研究工作。交通部公路科学研究所从 1984 年开始对波形梁护栏进行了系统的研究，之后不久便提出了一种适合我国当时国情的护栏结构形式。该结构采用厚度 3mm 的深波纹横梁，Z 字形开口型钢立柱的形式，并从 1989 年起在全国推广应用。但根据随后几年工程实践得出，Z 形柱强度太弱，损坏严重，不利于行车安全，故于 1994 年 5 月停止使用波形梁护栏 Z 形柱。1992 年前后，中国公路工程咨询监理总公司组织有关人员在全国已通车高速公路护栏的使用情况做了调查，据此拟定了波型梁护栏实车碰撞试验方案，联系了近十个单位组织了近百人的试验研究课题组，进行了一年多的工作，完成了我国第一次实车足尺寸碰撞试验的研究任务，建立了一套试验方法和设施。1992 年底，交通部公路科学研究所总结全国护栏实际应用的基础上，推出了新型的变截面波形梁护栏结构形式。该结构由于横梁采用变截面形式，横梁在搭接处结合紧密，使高强螺栓的性能得以充分发挥，横梁在搭接处产生断裂的可能性大为减小，从而保证了横梁的连续梁作用，并使线形更加顺适美观，造价降低。该结构形

式已应用于首都机场和成渝高速公路，并将作为我国公路护栏的基本结构形式列入交通行业标准，在全国推广应用。到 1994 年初我国制定了行业标准（JTJ074-94）《高速公路交通安全设施设计及施工技术规范》。1995 年制订了《高速公路波形梁钢护栏（产品标准）》。到 1997 年，交通部公路科学研究所就开发了可用于高速公路设施碰撞研究的试验手段，为防撞护栏的试验研究创造了更好的条件。2000 年交通部编写发布了《公路三波形梁钢护栏》行业标准并推广应用，主要用于重型车、大型车比例高的路段和山区高速公路等地形不利之处。2004 年我国又针对高速公路制订了《高速公路护栏安全性能评价标准》（JTJ/T F83-01-2004）。2006 年，在对《高速公路交通安全设施设计细则》（CJTJ 074-94）借鉴和修改的前提下，我国重新统一制订了《公路交通安全设施设计及施工技术规范》（JTJ/T D81-2006）^{[6][7][8]}。

虽然我国的公路防撞护栏在研究和实践上都取得了一定的进步，但从整体水平上与国外相比仍然存在很大的差距。主要表现为：一方面虽然我国高速公路上已经安装了各种结构形式的护栏，但其设计基本都是参照国外的有关标准和规范进行的，严重缺乏实验过程和技术数据，更没有自主知识产权，这与我国所面临的 WTO 规则是严重相背的。另一方面，实际上各国交通环境条件及车型不尽相同，针对我国的具体情况，研究开发适合我国国情的新型高速公路护栏，充分开展护栏冲击过程的吸能导向特性及其反应的研究，为我国护栏设计积累必要的技术数据，是目前亟须解决的课题。

1.3 研究目的和内容

1.3.1 研究目的

统计结果进一步表明，在我国的道路交通事故中，发生在普通干线公路上的约有 45%、发生在高速公路上的约有 30% 是车辆越出路外造成的，且由此造成的特、重大恶性交通事故占该类事故总数的比例达 62% 以上^[9]。我国每年有 1/3 的死亡事故发生在车辆与路侧碰撞的单车事故中，且呈逐年上升趋势。因此有必要对汽车与高速公路护栏碰撞的规律进行研究，对护栏结构进一步综合优化。

本文将建立 轿车-护栏 碰撞的仿真系统，基于这样的系统用各种不同的碰撞参数来进行不同的实验研究，根据实验结果来分析这些参数与人体遭受的损伤之间的关系，通过这种关系可以明确将来需要进一步研究的方向。

本文研究的目的是通过改变护栏横梁的某些设计参数，对比分析各个参数与护栏防护性能的相互关系，为以后对护栏进行优化设计提供参考。

1.3.2 研究内容

本文的研究内容主要包含以下三个方面：

(1) 建立轿车与波形梁护栏的碰撞仿真系统

建立准确的模型是进行计算机仿真研究工作的前提和关键。本仿真试验使用的汽车多刚体模型的结构和尺寸均参照天津一汽夏利 2000 三厢轿车。护栏模型根据现行的《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81 2006) 中的 Cr-A-4C 护栏系统来设计, 其组件包括护栏立柱、防阻块和波形栏板。

(2) 研究不同碰撞条件下护栏对事故车辆的防护性能

高速公路上轿车和护栏的碰撞可能在不同的碰撞速度, 不同的碰撞角度下发生。碰撞的角度、速度不同, 护栏对事故车辆所起到的防护作用也会不同, 乘员在事故中受到的伤害及伤害的程度也有差异。通过本文的研究探索在不同的碰撞条件下, 护栏防护能力以及乘员所受的伤害之间的规律, 从而为护栏设计和安全法规制订提供依据。

(3) 对比研究护栏的不同设计参数与其防护性能的相互关系

选取波形护栏栏板的某些设计参数作为研究对象, 对比分析在相同的碰撞条件下, 不同设计量与护栏整体防护性能之间的相互关系, 为以后对护栏进行优化设计提供参考。

1.4 研究方法

目前国内外对车辆碰撞护栏的研究主要采用三种方法: 实车足尺试验法、缩尺模型试验法和计算机仿真法。

1.4.1 实车足尺试验法

实车足尺撞击试验是用实际车辆冲撞护栏来模拟现实交通事故的一种研究方法。它可以得到车辆在撞击过程中的运动轨迹和运动姿态、车辆与护栏的变形和损伤特征以及碰撞冲击力等真实可信的技术参数, 是护栏结构设计和验证其他研究方法的直接依据。

目前 汽车-护栏 碰撞试验较有影响力的标准主要有欧洲 EN1317 标准和美国标准 NCHRP350 报告^{[10][11]}。早在 1974 年, 美国国家合作高速公路研究项目(NCHRP) 153 报告就出版了。这个文件是第一个比较全面的标准, 涉及到范围很广的道路硬件设施, 包括: 纵向护栏、护栏端部、过渡段和碰撞缓冲器等, 提出了具体的评价标准。主要包括以下三个方面:

(1) 结构的可靠性:

- (2) 乘员安全的危险程度；
- (3) 碰撞后汽车的行驶轨迹。

后期陆续出现的 NCHRP230 报告和 NCHRP350 报告则对高速公路硬件安全设施规定了详细的足尺碰撞试验程序。试验碰撞条件由汽车的重量、碰撞速度和碰撞角度组成^[12]。

汽车与护栏的足尺寸碰撞试验需要大量的试验设备。表 1.1 中列出了碰撞试验的仪器^[13]。

表 1.1 碰撞试验仪器

参数	NCHRP230	UBC
碰撞速度	高速胶卷 (200fps) 超速监视区 备用轮	警用无线电装置 高速录像机 (500-1000fps)
碰撞角度	高速胶卷 (200fps)	高速录像机 (500-1000fps)
驶出路线	高速胶卷 (200fps)	汽车路线/护栏校准仪
护栏偏转	高速胶卷 (200fps) 位移电压计	高速录像机 (500-1000fps) 总体情况监测系统
汽车转动速度	速度陀螺仪	3-D 录像分析
汽车加速度	加速度仪	加速度仪

为了提高高速公路的行车安全性，使高速公路的护栏设置更加安全合理、经济适用，中国在参照国外标准的基础上于 2004 年 12 月 14 日发布了《高速公路护栏安全性性能评价标准》(JTG/T F83-01 2004, 推荐性)。该标准为检验各级高速公路护栏的实际防护能力和安全性能提供参考。表 1.2 给出了该标准中规定的我国实车碰撞的试验条件^[14]。

表 1.2 实车碰撞试验条件

序号	车辆质量 (t)	碰撞速度 (km/h)	碰撞角度 (-)	碰撞能量 (kJ)
1	1.5	100	20	
2	10	60	20	160 以上
3	10	80	20	280 以上
4	14	80	20	400 以上
5	18	80	20	520 以上
6	特殊设计护栏：需要特殊设计的公路，如集装箱占有率相当高、跨越非常重要建筑区（通航等级高、繁忙的河道、干线高速铁路）等，各项指标可根据公路设计的实际情况具体确定。			

1.4.2 缩尺模型试验法

缩尺模型试验法是一种将实际汽车护栏或其中的一部分构件按一定比例缩小进行模拟试验的方法。它可以在实验室进行，具有试验成本低、试验过程易于控制、变换参数容易、可采用多组试件反复进行等众多优点，是对护栏进行撞击特性、撞击刚度、能量吸收能力等物理力学特性研究的一种经济有效的试验方法。但在应用该方法时，需解决缩尺模型与实际模型的动力模拟相似性的问题。

1.4.3 计算机仿真法

虽然实车碰撞试验是最主要的研究方法，但是人们也在逐渐使用计算机模拟分析工具在这一领域里展开研究工作。60年代早期 Cornell 航空实验室的研究人员用有限元研究了纽约公共事业部的汽车-护栏碰撞事故机制，开发出了简单的分析模型，使用弹簧、阻尼器、杆和连接器检测汽车的动态特性和护栏的强度。这个研究是相当成功的，得出了许多当时通用护栏系统的评价结果^{[15][16]}。许多现在公认的护栏安全问题是这次研究中发现的，如：

- (1) 护栏板与立柱的分离以防止汽车钻入的重要性；
- (2) 轮胎挂在强度高的护栏立柱上的可能性；
- (3) 强立柱与相对较弱的立柱护栏组合时压窝的可能性。

这些研究结果在改善波形梁护栏性能、对目前仍在美国纽约州使用的箱型梁护栏进行设计时确实起到了作用。通过计算机仿真方法，可以预先得到碰撞的结果。从经济上考虑，这一点能够极大的减小护栏的设计成本。

从60年代开始，随着汽车使用人数的增加，发生的交通事故数量也不断的增加，人们对汽车的安全性越来越重视，这就迫使汽车生产厂家和设计者进行大量的试验，找出有关结构和零部件的各类缺陷，提高产品的质量、性能。现在随着计算机技术的迅速发展，其它相关领域的新技术和新理论的不断发展和完善，实现复杂结构的模拟计算已经成为可能。

汽车发生碰撞时，其运动轨迹以及车内乘员的运动状态往往十分复杂，因此运动方程式的建立和求解也都很复杂。再加上碰撞时车身发生大变形并引起仪表板、前围板等零件缩入乘客室内，减少了人体与室内物体的距离，也使得问题求解复杂化。因此，汽车碰撞的计算机模拟研究一般包括以下三方面的内容：

- (1) 用有限元方法研究汽车碰撞过程中车身、车架变形及动态响应；
- (2) 研究人体在多种碰撞条件下的响应；

(3) 仿真计算。

与之相关的最基本的也是最复杂的工作是建立能真实反映实际碰撞过程的数学模型, 现有的数学模型大体上可分为集中质量模型, 多体系统模型和有限元模型。目前, 数学建模主要涉及以下的研究领域:

(1) 建立适用于不同碰撞条件(正面碰撞、侧面碰撞、尾部碰撞等)的车体动力学模型, 包括各种汽车部件模型;

(2) 建立体现不同人体特征和动力响应特性的假人模型;

(3) 建立人体局部结构的生物力学模型;

(4) 建立汽车安全系统模型。

计算机模拟研究汽车碰撞过程中车身、车架变形及动态响应的重要前提是建立正确的汽车结构数学模型, 根据研究对象的不同, 建立的数学模型可以是整车模型, 也可以是汽车的某一部分。

目前应用于汽车碰撞模拟的计算机仿真软件主要有 LS-DYNA、PAM-CRASH、MADYMO 等等。

(1) LS-DYNA

LS-DYNA 是世界上著名的通用显式动力分析程序。它以 Lagrange 算法为主, 兼有 ALE 和 Euler 算法; 以显式求解为主, 兼有隐式求解功能; 以结构分析为主, 兼有热分析、流体-结构耦合功能; 以非线性动力分析为主, 兼有静力分析功能(如动力分析前的预应力计算和薄板冲压成形后的回弹计算); 特别适合求解各种结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等高度非线性瞬态动力学问题。在工程界得到广泛应用并被认为是最佳的显式分析软件包, 与实验结果的无数次对比证实了其计算的可靠性和准确性。

(2) PAM-CRASH

PAM-CRASH 是基于显式有限元算法的计算机三维碰撞冲击仿真模拟系统, 能够对大位移、大旋转、大应变、接触碰撞等问题进行十分精确的模拟。主要有以下显著特点:

- ① 能够简便地处理异常复杂的边界约束;
- ② 支持多 CPU 并行计算 (DMP 和 SMP), 运算效率高;
- ③ 三维图形显示属性灵活控制, 色彩多样逼真;
- ④ 动态分配内存, 无须用户设置, 灵活控制计算的时间步长;
- ⑤ 可设置阻尼以加快求解弹性接触时的收敛;
- ⑥ 自动消除初始穿透, 灵活搜寻接触区间;
- ⑦ 针对大变形材料可采用特有的 Adaptive Mesh、Frozen-Matrix、Non-linear Contact Stiffness 等措施来保证求解的稳定性和精确性;

- ⑧ 可设定材料的断裂失效条件;
- ⑨ 简便地定义焊点、铆钉等约束及其断裂条件;
- ⑩ 针对汽车碰撞而特设指标整形、输出、比较模块。

(3) MADYMO

MADYMO (Mathematic Dynamic Model) 多刚体动力学分析软件是最初在 1975 年由荷兰的 TNO 公路汽车研究学会完成。MADYMO 软件由二维版本和三维版本组成, 两个版本有几乎相同的格式。MADYMO 到 1983 年形成了 3.0 版, 到 1988 年形成了 4.2 版, 目前, MADYMO 已发展到 6.32 版, 并成功地将有限元融入多刚体系统分析中, 成为了一个多刚体与有限元结合的数学模拟软件, 主要用于汽车碰撞安全性研究, 可以做乘员约束系统分析^[17]。MADYMO 软件中有着全世界最好的机械假人数学模型和欧洲人体模型项目最新开发的 HUMO2 数学模型。广泛应用于车身结构设计、悬架系统分析、安全气囊、安全带、座椅、仪表板、方向盘转向柱等开发, 是乘员约束系统整合及优化设计的首选工程软件和工业标准。

1.4.4 研究方法对比

足尺寸碰撞试验是综合评价汽车碰撞安全性能的最基本、最有效的方法。只要试验条件符合实际碰撞条件, 试验设备达到一定的精度, 其结果是最直观的, 因此该方法已为国内外很多研究人员使用, 是一种不可替代的方法。但是, 由于足尺寸试验的费用非常昂贵, 进行试验准备的时间也很长, 从而限制了这种方法的广泛应用。另外, 即使花费大量的资金对安全设施进行一系列的足尺寸碰撞试验, 以确保可靠的安全特性, 但是这些试验装置和实际路旁设施之间依然存在差别。另一方面, 进行足尺寸碰撞试验的范围是非常有限的, 从目前国内外研究人员所做过的试验看, 进行的试验主要是针对频发事故而设计的, 而且几乎所有的足尺寸碰撞试验都是在平地上进行的, 而这种条件与实际情况并不完全相符。最后一点, 足尺寸碰撞试验的再现性不是很好, 其结果会受到试验地点、试验环境等条件的影响。

近年来, 非线性有限元程序的发展, 极大地推动了计算机建模和汽车碰撞仿真技术的发展。随着计算机模拟汽车与路旁设施碰撞能力的提高, 研究道路安全特性将变得更加经济。由于减少了所需足尺寸碰撞试验的数量因而能大大降低研究费用, 研制新的硬件设施的成本也就随之大大减小。对于那些无法通过足尺寸碰撞试验来进行研究的情况, 却可以利用计算机仿真来很好地模拟, 从而有助于改进和提高汽车安全和道路安全。只要模型建立得准确, 得出的结果就会与实际的结果接近。计算机仿真其结果的再现性很好, 只要输入条件相

同，计算精度相同，得到的结果就会一致。

由于计算机仿真是对真实事件的简化，并且计算结果受计算精度的限制，因此有必要验证仿真模型的正确性。往往通过做足尺寸碰撞试验来验证计算机仿真模型的正确性。通过对比分析这两种方法得到的试验结果，来确定模型是否准确，找出还存在的问题，为模型的修正提供依据。尽管计算机仿真已经表现出很强大的生命力和适应性，但是目前还是无法完全取代费用昂贵的足尺寸试验。

第 2 章 护栏装置

众所周知，护栏作为高速公路上重要的安全设施，对交通事故的防治尤其是对特、重大恶性交通事故的防治具有相当重要的意义。高速公路护栏主要作用有：

- (1) 防止失控汽车冲出路外或越过中央分隔带的功能；
- (2) 具有较强的吸收碰撞能量的能力；
- (3) 具有导向功能，使碰撞汽车改变行驶方向；
- (4) 具有诱导视线的功能等。

2.1 护栏类型

护栏作为一种纵向吸能结构，通过自体变形或车辆爬高来吸收碰撞能量，从而改变车辆行驶方向、阻止车辆越出路外或进入对向车道、最大限度地减少对成员的伤害。按其在公路中的纵向设置位置，可分为路基护栏和桥梁护栏；按其在公路中的横向设置位置，可分为路侧护栏和中央分隔带护栏；根据碰撞后的变形程度，可分为刚性护栏、半刚性护栏和柔性护栏^[18]。

2.1.1 刚性护栏

刚性护栏是一种基本不变形的护栏结构。混凝土护栏是刚性护栏的主要形式，它是一种以一定形状的混凝土块相连接而组成的墙式结构，它利用失控车辆与墙碰撞后爬高并转向来吸收碰撞能量。混凝土护栏分为整体式和分离式两种形式。整体式护栏适合设置在中央分隔带较窄路段，分离式护栏适合设置在中央分隔带较宽路段，这样就使得易于在中央分隔带内埋设通信和供电管线。混凝土安全护栏的高度一般设计为 810mm，当存在危险的坡道和弯道时，则将其加高。

由于汽车与混凝土相撞时，护栏在瞬间冲击荷载的作用下，基本上不移动不变形，碰撞过程中的能量主要是依靠汽车与护栏面接触并沿着护栏面爬高和转向来吸收，并使碰撞汽车恢复到正常行驶方向，所以混凝土护栏的截面形状和尺寸（高度、宽度等）直接影响碰撞作用效果。目前，国内外混凝土护栏一般都采用上、下双斜面的结构型式，见图 2.1。其下斜面较缓用于抬升汽车，将动能转化为势能，减缓冲击速度，而其上斜面较陡用于拦阻汽车^[19]。

混凝土护栏的施工可采用滑模成型、预制和现浇三种方法进行。采用预制方法可保证护栏混凝土的整体质量和线形较美观，可在其他工程施工时，进行

护栏预制，最后可加快护栏施工，但需要较大的预制场地。采用现浇法施工时，混凝土表面质量及护栏线形较难保证，施工工艺段加强控制，进度较慢。对于整体式的混凝土护栏，若通信管线埋于中央分隔带护栏内，则只能使用现浇法施工。采用滑模成型法，成本低，因为可以放置很长的路段而不必截断^[20]。

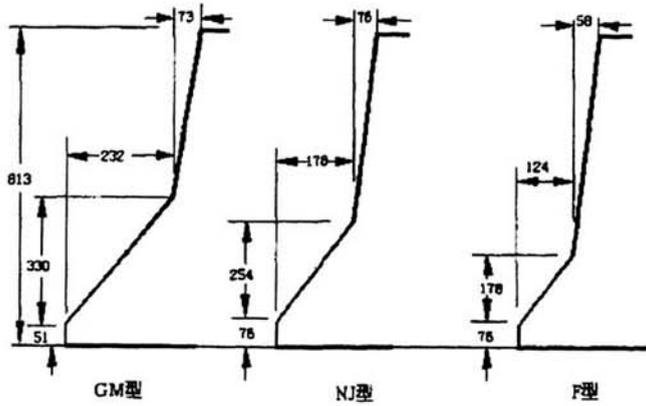


图 2.1 混凝土护栏

2.1.2 半刚性护栏

半刚性护栏是一种连续的梁式护栏结构，具有一定的刚性和柔性。波形梁钢护栏是半刚性护栏的主要代表形式，它是一种以波纹状钢护栏板相互拼接并由立柱支撑而组成的连续结构，它利用土基、立柱、波形梁的变形来吸收碰撞能量，并迫使失控车辆改变方向。波形护栏按照护栏栏板的波数，又分为双波护栏和三波护栏。图 2.2 所示为我国高速公路较常见的路侧双波护栏。

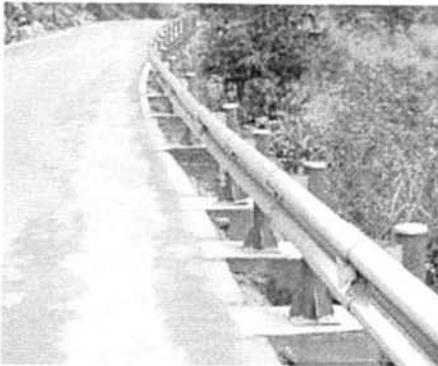


图 2.2 路侧波形护栏



图 2.3 路侧缆索护栏

波形梁护栏既可用于路侧护栏，也可用在中央分隔带，当用作中央分隔带护栏时，可采用分设形和组合形两种形式。分设型相对于组合型适合于中央分隔带较宽的路段，组合型护栏一旦受到碰撞后，维修量较大。我省高速公路防

撞护栏一般采用波形梁钢护栏作为路侧护栏及中央分隔带护栏，中央分隔带护栏采用分设型，目前这种护栏使用较为广泛。

对波形梁护栏的设计主要是其高度的确定。合理的高度应使失控汽车与护栏碰撞时，能作用于汽车的有效部位，即不使汽车越出栏杆，又不致使汽车钻入护栏下面，目前规范中规定护栏安装高度即连接螺栓中心至路面的距离为60cm。通信管道可埋在中央分隔带下，埋深超过护栏柱，以免发生交通事故时，受撞击的护栏柱对通信管道造成破坏。波形梁护栏工程总造价一般不超过整体式混凝土护栏。

2.1.3 柔性护栏

柔性护栏是一种具有较大缓冲能力的韧性护栏结构。缆索护栏是柔性护栏的主要代表形式，它是一种以数根施加初张力的缆索固定于立柱上而组成的结构，它主要依靠缆索的拉应力来抵抗车辆的碰撞，吸收碰撞能量。

缆索护栏由缆索、立柱和托架组成，缆索一般通过钢丝绳经过防锈处理镀锌（铝）制作而成。如图 2.3 为国内某条高速公路上所装配缆索护栏。缆索护栏可适用于路侧护栏和中央分隔带护栏。当用于中央分隔带护栏时，两侧缆索通过一根立柱相联，可用于中央分隔带较窄的路段。最早的缆索安全护栏是由美国纽约州和加利福尼亚州于 20 世纪 50 年代晚期开发的，缆索的数量由 2 索增加到目前的 3 索和 4 索^[21]。目前使用比较多的是三索护栏。

缆索护栏的施工一般安排在路面施工完成后进行，包括立柱埋设安装托架和架设缆索，其中端部及中间端部施工较复杂，立柱的埋设可通过钻孔法或打桩法施工。同时，缆索护栏用于中央分隔带时，高速公路通信管线可在立柱之间埋设。

2.1.4 几种护栏特性对比

(1) 混凝土护栏防止车辆越出路外的效果好，车辆撞时几乎不变形，整体式混凝土护栏适合于中央分隔带较窄的路段和较危险的路侧护栏。混凝土护栏的维修量小，行车时噪音较大有压迫感，施工速度慢，整体线形较难顺直。整体式混凝土护栏防眩造价高，不易埋设通信管道且不能在以后新增管道。

(2) 波形梁护栏具有一定的刚性和韧性，损坏时容易更换，便于维修，且有较好的视线诱导功能，能与道路线形相协调，外形美观。用于中央分隔带时，一般采用植物防眩，可美化环境和公路景观，且节省造价。波形梁护栏施工工艺简单，速度较快，目前生产厂家及施工单位较多，易于选择。

(3) 缆索护栏具有最美观的外形，适合于风景区的高速公路，由于在弹性

范围内工作，可以重复使用，容易修复，适用于北方积雪地区，支柱间距比较灵活，受不均匀沉陷的影响小。但缆索护栏施工复杂，端部立柱损坏时修理困难，不适合在小半径路线路段使用，视线诱导性差，架设长度短时不经济。

2.2 护栏设计方法

护栏作为公路的重要安全附属设施，只有进行正确的设计和设置，才有可能直接削减交通事故的伤亡率。因此，护栏的设置对提高公路运营的经济效益和社会效益有至关重要的作用，对于行车安全、行车舒适度、公路沿线景观和工程造价都具有一定的影响。所以，必须充分认识各种护栏的特性，合理选择和设置护栏。

2.2.1 设置原则

按照护栏设置的位置的不同，护栏的设置原则也不同，主要分为：路侧护栏和中央分隔带护栏。

2.2.1.1 路侧护栏

凡符合以下任一种情况的路段都应该设置路侧护栏。

(1) 车辆驶出路外有可能造成二次特大事故的路段必须设置路侧护栏。

(2) 凡符合下列情况之一、车辆驶出路外有可能造成单车特大事故或二次重大事故的路段必须设置路侧护栏：

① 二级及以上等级公路边坡坡度和路堤高度在图 2.4 的 I 区方格阴影范围之内的路段^[22]；

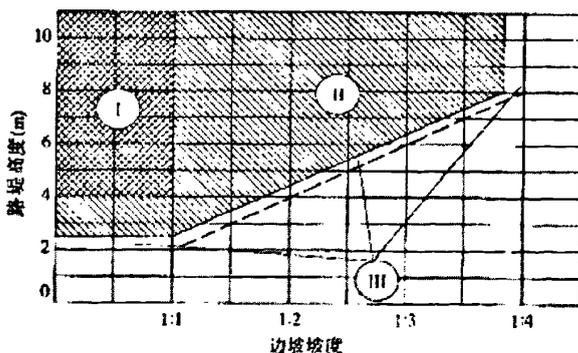


图 2.4 边坡坡度、路堤高度与设置护栏的关系

② 路侧有江、河、湖、海、沼泽、航道等水域的路段。

(3) 凡符合下列情况之一、车辆驶出路外有可能造成重大事故的路段, 应设置路侧护栏:

① 二级及以上等级公路边坡坡度和路堤高度在图 2.4 的 II 区斜线阴影范围以内的路段;

② 高速公路、一级公路路侧安全净区内设有车辆不能安全穿越的照明灯、摄像机、可变信息标志、交通标志、路堑支撑壁、声屏障、上跨桥梁的桥墩或桥台等设施的路段;

③ 二级及以上等级公路路侧边沟无盖板、车辆无法安全穿越的挖方路段;

④ 三、四级公路路侧有悬崖、深谷、深沟等的路段。

(4) 凡符合下列情况之一、经论证车辆驶出路外有可能造成一般或重大事故的路段宜设置路侧护栏:

① 二级及以上等级公路边坡坡度和路堤高度在图 2.4 的 III 区内的路段, 三、四级公路边坡坡度和路堤高度在图 2.4 中 I 区内;

② 二级及以上等级公路纵坡大于或等于现行《公路工程技术标准》(JPG B01) 规定的最大纵坡值的下坡路段和连续长下坡路段;

③ 二级及以上等级公路平曲线半径小于现行《公路工程技术标准》(JPG B01) 一般最小半径的路段外侧;

④ 在高速公路、一级公路用地范围内存在粗糙的石方开挖断面、高出路面 30cm 以上的混凝土基础、挡土墙或大孤石等障碍物时;

⑤ 高速公路、一级公路互通式立体交叉出口匝道的三角地带及匝道小半径圆曲线外侧。

(5) 根据车辆驶出路外有可能造成的交通事故等级, 应按表 2.1 的规定选取路侧护栏的防撞等级。因公路线形、运行速度、填土高度、交通量和车辆构成等因素易造成更严重碰撞后果的路段, 应在表 2.1 的基础上提高护栏的防撞等级。

表 2.1 路基护栏防撞等级的适用条件

公路等级	设计速度 (km/h)	车辆驶出路外或进入对向车道有可能造成的交通事故等级		
		一般或重大事故	单车特大或二次重大事故	二次特大事故
高速公路	120	A、Am	SB、SBm	SS
	100、80			SA、SAm
一级公路	60		A、Am	SB、SBm
二级公路	80、60	B	A	SB
三级公路	40、30		B	A
四级公路	20			

表 2.2 护栏防撞性能

防撞等级	碰撞条件			碰撞加速度* (m/s ²)	碰撞能量 (kJ)
	碰撞速度 (km/h)	车辆质量 (t)	碰撞角度 (-)		
B	100	1.5	20	≤200	—
	40	10	20	—	70
A、Am	100	1.5	20	≤200	—
	60	10	20	—	160
SB、SBm	100	1.5	20	≤200	—
	80	10	20	—	280
SA、SAm	100	1.5	20	≤200	—
	80	14	20	—	400
SS	100	1.5	20	≤200	—
	80	18	20	—	520

注：* 指碰撞过程中，车辆重心处所受冲击加速度 10ms 间隔平均值的最大值，为车体纵向、横向和铅直加速度的合成值。

(6) 路侧护栏最小设置长度应符合表 2.3 的规定，相邻两段路侧护栏的间距小于表 2.3 中规定的最小长度时宜连续设置。

表 2.3 路侧护栏最小设置长度

公路等级	护栏类型	最小长度	公路等级	护栏类型	最小长度
高速公路、一级公路	波形梁护栏	70	三、四级公路	波形梁护栏	28
	混凝土护栏	36		混凝土护栏	12
	缆索护栏	300			
二级公路	波形梁护栏	48			
	混凝土护栏	24			
	缆索护栏	120			

2.2.1.2 中央分隔带护栏

凡符合以下任一种情况的路段都必须设置中央分隔带护栏。

(1) 当整体式断面中间带宽度小于或等于 12m 时，必须设置中央分隔带护栏；大于 12m 时，应分路段确定是否设置中央分隔带护栏。

(2) 公路采用分离式断面时，行车方向左侧应按路侧护栏设置；上、下行路基高差大于 2m 时，可只是在路基较高的一侧按路侧护栏设置。

(3) 高速公路和禁止车辆掉头的一级公路中央分隔带开口处, 必须设置活动护栏。

(4) 根据车辆驶入对向车道有可能造成的交通事故等级, 应按表 2.1 的规定选取中央分隔带护栏的防撞等级。因公路线形、运行速度、交通量和车辆构成等因素易造成更严重碰撞后果的路段, 应在表 2.1 的基础上提高护栏的防撞等级。

2.2.2 型式选择

在选择护栏型式是, 需要综合考虑一下诸多因素:

(1) 防撞等级的选择

护栏在结构上必须能阻挡并使设计车辆转向。选择防撞等级时, 应综合考虑道路条件(平纵线形、中央分隔带宽度、边坡坡度、路侧障碍物等)和交通条件(车型构成、交通量、运行车速等)。

(2) 变形量

护栏的变形量不应超过容许的变形距离: 柔性护栏变形最大, 刚性护栏变形最小, 半刚性护栏变形居中。如果护栏与被保护物体间距离较大, 则可选择对车辆和乘员产生冲击力最小的方案。如障碍物正好临近护栏, 则只能选择半刚性或刚性护栏。大多数护栏可通过增加立柱或增加板的强度来提高整体强度。4.5m 以下的中央分隔带不宜设置柔性护栏。

(3) 现场条件

边坡的坡度、与行车道的距离可能会限制某些护栏的使用:

在边坡上设置护栏时, 如边坡坡度陡于 1:10 时, 应采用柔性或半刚性护栏; 如边坡坡度陡于 1:6, 则任何护栏均不应在边坡上设置。如土肩较窄, 则立柱所受土压力减少, 则需要增加埋深、缩短立柱之间的距离或土中增加钢板。

(4) 通用性

护栏的型式及其端头处理、与其他型式护栏的过渡处理应尽量标准化, 中央分隔带护栏型式还应考虑与其他设施(如灯柱、标志立柱和桥墩等)的协调性。当采用标准护栏不能满足现场要求时, 才需要考虑非标准或特殊护栏的设计。

(5) 寿命周期成本

在最终确定设计方案时, 考虑最多的可能是各种方案的初期建设成本和将来的养护成本。一般情况下, 护栏的初期建设成本会随着防撞等级的增加而增加, 但养护成本会减少。相反, 初期建设成本低, 则随后的养护成本会大大增加。发生事故后, 柔性或半刚性护栏比刚性或高强度护栏需要更多的养护。交

通量大、事故频发的路段，事故养护成本将成为必须考虑的因素，刚性护栏是较好的选择方案。

(6) 养护

应综合考虑常规养护、事故养护、材料储备和养护方便性等因素。一般情况下，事故后柔性或半刚性护栏或刚强度护栏需要更多的养护。在交通量大、事故频率较高处，事故养护成本可能会变为最需要考虑的因素，这种情况通常发生在城市高速公路沿线。在这种位置处，刚性护栏通常作为选择方案。

(7) 美观、环境因素

美观通常不是选择护栏型式的控制因素，但旅游公司或对景观要求高的公路除外。这种情况下，可选择外观自然、能与周边环境融为一体而又具有相应防撞等级的护栏型式。护栏的选择还要考虑沿线的环境腐蚀程度、气象条件和其对视距的影响等，如积雪地区应考虑除雪的方便性。

(8) 实践经验

应对现有护栏的性能和养护需求进行监测，以确定是否需要通过改变护栏型式来减少或消除已发现的问题。

另外，由于设置护栏对提升公路景观没有任何作用，因此旅游公路或对景观要求高的公路，应尽量寻找可以替代护栏的措施，如设置浅碟型边沟或挖方路段边沟上设置盖板等。经论证需要设置护栏时，护栏型式应能体现地区特性和景观特点，外观力求简洁、减少装饰并充分考虑通透性，护栏色彩应与构造物及周边环境相协调。采用刚性护栏时，应采取措施尽量降低刚性护栏的存在感。任何情况下，护栏防撞等级不得降低。

2.3 护栏性能的评估

2.3.1 评估标准

评估标准是判断护栏是否满足安全评价指标要求的指标，是界定护栏性能优劣的根本依据。目前国际上普遍认同的对护栏安全性能的评估应遵循以下三个基本原则：

(1) 结构完整标准

结构标准是指护栏要达到防护功能的要求，工程结构上要满足的指标。评价护栏的结构完整性主要从结构和力学角度衡量护栏本身是否具有合适的几何尺寸、足够的结构强度和良好的力学性能如刚度、变形、屈服、断裂、能量的吸收和耗散能力等；是否能在事故中有效控制指定范围内各种型号肇事车辆的行为，回正车辆行驶方向；是否能够避免护栏及其零、部件刺穿车体，危及乘

员；是否能够防止车辆穿越护栏或倾覆于护栏上。

(2) 乘员风险标准

乘员风险标准是指事故过程中乘员所受到的伤害程度指标。主要依据碰撞过程中车辆在特定时间长度内的平均加、减速度及乘员的速度改变量来确定其大小。NCHRP (National Cooperative Highway Research Program)153 规范的评估标准仅依据车辆的平均加、减速度，即：

$$|A_{\text{long}}| < G_{\text{long}} = 5g \quad (\text{最大不得超过 } 10g) \quad (2.1)$$

$$|A_{\text{lat}}| < G_{\text{lat}} = 3g \quad (\text{最大不得超过 } 15g) \quad (2.2)$$

$$|A_{\text{total}}| < G_{\text{total}} = 6g \quad (\text{最大不得超过 } 12g) \quad (2.3)$$

$|A_{\text{long}}|$ 、 $|A_{\text{lat}}|$ 和 $|A_{\text{total}}|$ 分别为车辆实际承受的纵向、横向及总的最大 50 毫秒内的平均加速度； G_{long} 、 G_{lat} 和 G_{total} 分别为相应的槛值。

(3) 车辆轨迹标准

轨迹标准是指车辆在碰撞护栏之后，车辆驶出时的轨迹状况。要求一般不驶出相邻于护栏的车道，不与同向车辆相撞或影响同向车辆的行驶。该项指标在实际中很难控制，因此不同国家采用了不同的评价办法，如美国要求“车辆一般不驶出相邻于护栏的车道”，日本要求“车辆驶出速度不小于驶入速度的 60%、驶出角度不大于驶入角度的 60%”，欧盟要求车辆“不能驶出规定的控制线”等。

除了上述 3 项标准外，根据护栏的实际要求一般会有一些特殊的要求，如护栏的最大冲入距离，护栏部件的散落情况等。

2.3.2 评估手段

要对护栏在拦阻车辆过程中施加于车辆的作用，及由此引发的车辆动力学行为有准确的掌握和了解，就是评估手段所涉及的范畴。评估标准提出了护栏安全性能所需达成的目标，评估手段就应为实现这一目标尽可能准确而全面地提供相关信息；而评估标准一旦确立，如何准确而全面地提供标准所需的信息，即评估手段就成为了关键问题。因此，可以说评估标准和评估手段既相互关联又相对独立。

第 3 章 轿车-护栏碰撞仿真模型的建立

应用计算机仿真软件 MADYMO 建立轿车与护栏的模型来研究高速公路上汽车与波形护栏的碰撞事故，通过改变不同的碰撞参数来对比“汽车-护栏”碰撞的结果。下面将分别对模型系统的建立进行说明。

3.1 MADYMO 介绍

MADYMO (Mathematical Dynamic Model) 是模拟物理系统动力学响应的计算程序，重点应用在车辆碰撞和乘员损伤分析。MADYMO 适用于研究汽车碰撞过程中乘员的响应，评价各种约束系统的设计参数的影响，如座椅、安全带和安全气囊；而且也广泛用于分析其它交通工具的碰撞，如火车、飞机、摩托车、自行车。

MADYMO 将多体系统和有限元完美结合，其中多体系统适用于模拟通过运动铰连接的多刚体运动，有限元适用于模拟结构的变形。MADYMO 模型可以只包含有限元系统，也可以只有多体系统，或两者兼而有之。如图 3.1 所示^[23]：

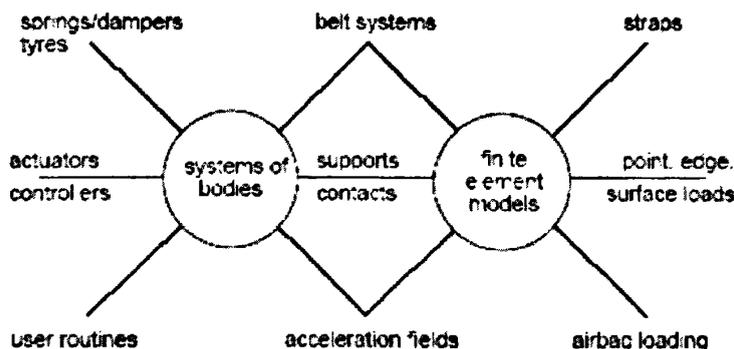


图 3.1 MADYMO 结构图

MADYMO 中多刚体模型与有限元模型之间的相互作用关系如图 3.2 所示，这两种相互作用方式是：支撑(support)与接触 (contact)，从而在有限元模型与多刚体系统之间产生力的作用。

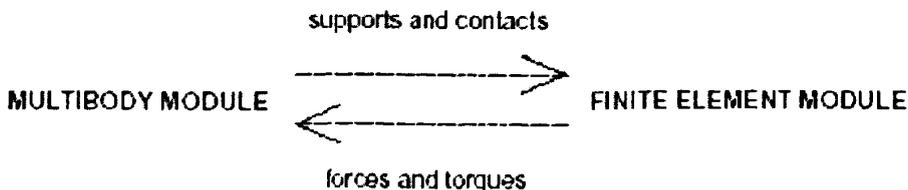


图 3.2 多刚体模块与有限元模块之间的相互作用关系

MADYMO模型库除提供丰富的假人模型以及一些标准模型外，还提供了一系列标准作用力模型，例如Kelvin和Maxwell单元，安全带和气袋等，各模型相互作用关系如图3.3所示。

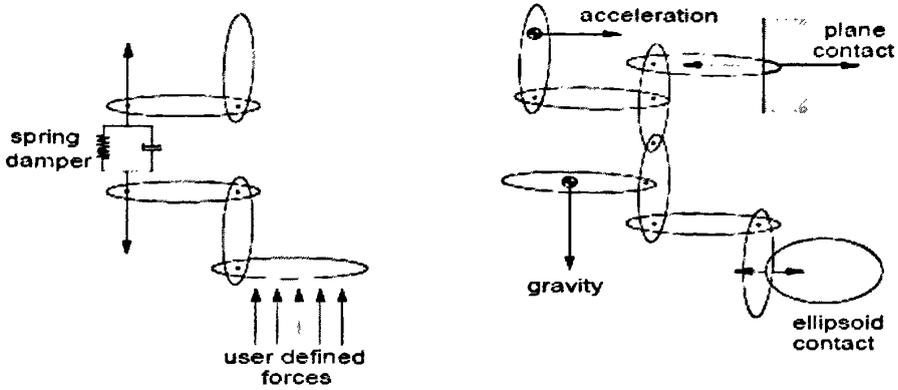


图3.3 多体系统相互作用力示例

MADYMO 中对有限元和多刚体模型的运动方程求解可以使用不同的时间积分算法，对于时间较短的高速碰撞分析，一般采用显式积分算法。在MADYMO 耦合模型的分析中，多刚体模块运动方程的时间积分采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)或欧拉 (Euler) 法，而对有限元模型运动方程的时间积分则采用中心差分法。

3.2 轿车和护栏模型

建立轿车-护栏碰撞的模型包括汽车和护栏模型系统的建立、假人模型、加速度场模型、约束、安全带模型、安全气囊模型和损伤参数等的定义。建模的主要目的是通过研究汽车-护栏碰撞的相互作用，得到乘员的动态响应参数，从护栏这个方面进行改善和改进，保护乘员安全并将事故损失降至最低。建模主要考虑这些内容：

(1) 护栏运动学模型。护栏段数（长度）、护栏之间的连接方式、立柱与地面的连接方式等是待考虑的几个因素；

(2) 模型之间的摩擦力。包括汽车与护栏接触的摩擦力，及汽车车轮与路面接触的摩擦力；

(3) 汽车模型。汽车的尺寸、质量、转动惯量、重心位置和初始参数的输入；

(4) 模型之间的相互作用。定义汽车与护栏、假人与车内部件的相互作用；

(5) 乘员与汽车车厢内部碰撞的模型。对假人、安全带和安全气囊进行定

位。

在使用多刚体动力学软件 MADYMO 模拟汽车与护栏的碰撞时，使用的动力学方程采用拉格朗日方程，求解方法采用显式差分算法的四阶龙格-库塔（Runge-Kutta）法，以节省计算时间，提供较高的时间分辨率。

3.2.1 系统运动特性

3.2.1.1 运动方程

一个模型往往包含多个系统，而每个系统又包含多个刚体。以刚体 i 为例，其质心的运动方程（牛顿-欧拉）可表达为：

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{F}_i \quad (3.11)$$

$$\mathbf{J}_i \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{J}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i = \mathbf{T}_i \quad (3.12)$$

其中， m_i 为 i 的质量， \mathbf{J}_i 是对于质心的惯性张量； $\boldsymbol{\omega}_i$ 是角速度矢量； \mathbf{F}_i 是合力矢量； \mathbf{T}_i 是相对质心的合成扭矩矢量。对于系统中的任一体， \mathbf{F}_i 和 \mathbf{T}_i 都包括了铰作用的约束力和扭矩，并且只有已知系统加速度时，才能确定它们的大小，与其他只与位置或速度有关的力或扭矩不同。

利用虚功原理可以消除未知的铰约束力和扭矩。首先对公式(3.11)和(3.12)乘以位置矢量的变化量 $\delta \mathbf{r}_i$ 和方向的变化量 $\delta \boldsymbol{\pi}_i$ ，把系统中所有体的相加可得：

$$\sum \delta \mathbf{r}_i \cdot \{m_i \ddot{\mathbf{r}}_i - \mathbf{F}_i\} + \delta \boldsymbol{\pi}_i \cdot \{\mathbf{J}_i \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{J}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{T}_i\} = 0 \quad (3.13)$$

在连接体的 $\delta \mathbf{r}_i$ 和 $\delta \boldsymbol{\pi}_i$ 不违背铰约束类型的情况下，铰的约束力和约束扭矩可以消除（虚功原理）。公式（3.13）可以取代这些表达式。从外围的体开始，可以得到铰自由度对时间的二阶导数：

$$\ddot{\mathbf{q}}_{ij} = \underline{\mathbf{M}}_{ij} \dot{\mathbf{Y}}_i + \underline{\mathbf{Q}}_{ij} \quad (3.14)$$

$\dot{\mathbf{Y}}_i$ 是一个 6×1 列矩阵，它包含了父体 i 坐标系的线性和角加速度分量。 $n_{ij} \times 6$ 矩阵 $\underline{\mathbf{M}}_{ij}$ 和 $n_{ij} \times 1$ 矩阵 $\underline{\mathbf{Q}}_{ij}$ 取决于体的惯性和系统的瞬时几何形状。此外， $\underline{\mathbf{Q}}_{ij}$ 还依赖于系统的瞬时速度和所承受载荷。可以从外围体开始，连续计算矩阵 $\underline{\mathbf{M}}_{ij}$ 和 $\underline{\mathbf{Q}}_{ij}$ ，然后从参考空间和参考体之间的铰开始，铰自由度对时间的二阶导数可由公式（3.14）计算得到。注意，对于这个铰， $i=0$ ， $j=1$ ，参考空间的加速度 $\dot{\mathbf{Y}}_i = 0$ 。

这个算法产生了铰自由度对时间二阶导数的显示形式。如果铰有同样的自由度数，计算机的计算量和体的数目成正比。对于大型多体系统，这种算法效率很高。

3.2.1.2 数值积分法

系统的各个体的运动方程构成了一组非线性二阶偏微分方程，它可以写成下面的形式：

$$\ddot{\underline{q}} = \underline{h}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, t) \quad (3.15)$$

\underline{q}_0 和 $\dot{\underline{q}}_0$ 是初始值。 \underline{h} 定义了运动方程； \underline{q} 为普通坐标系下的列向量，是铰的位置自由度； $\dot{\underline{q}}$ 和 $\ddot{\underline{q}}$ 为铰的速度自由度及它们对时间的一阶导数。列向量 \underline{q} 包含 m 个行，代表模型的 m 个自由度。

对于运动方程 (3.15) 的求解使用单步显式方法，即在时间点 t_{n+1} 的解可以根据前一个时间点 t_n 的解得到。对大多数问题，可以通过减少时间步长来减少解的误差。如果使用一个固定或可变时间步长的方法，推荐使用不同的时间步长来求解该问题，目的是可以评估解的误差。求解运动方程可以选择下面三种数值方法：

(1) 欧拉方法

改进的欧拉方法是具有固定或可变化的时间步长的单步方法。运动方程时间积分的开始点是通过方程 (3.15) 给定的一个二阶微分方程。该加速度方程使用显式欧拉方法进行积分就可以获得在时间点 $t_{n+1} = t_n + t_s$ 时的速度变量的解。

$$\dot{\underline{q}}_{n+1} = \dot{\underline{q}}_n + t_s \ddot{\underline{q}}_n \quad (3.16)$$

应用隐式欧拉法对速度变量积分，可得到 t_{n+1} 时刻的位移变量

$$\underline{q}_{n+1} = \underline{q}_n + t_s \dot{\underline{q}}_{n+1} \quad (3.17)$$

(2) Runge-Kutta 方法

固定或可变化的时间步长的四阶 Runge-Kutta 是一种简单直接的方法。如果使用 Runge-Kutta 法， m 个二阶微分方程的系统就会降低至 $2m$ 个一阶微分方程。引入列矩阵 \underline{x} ，由下式定义：

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} \dot{\underline{q}} \\ \underline{q} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

把 (3.18) 代入式 (3.15)，变成

$$\dot{\underline{x}} = \begin{pmatrix} \ddot{\underline{q}} \\ \dot{\underline{q}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{h}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, t) \\ \dot{\underline{q}} \end{pmatrix} = \underline{f}(\underline{x}, t) \quad (3.19)$$

初始条件为，

$$\underline{x}(t_0) = \begin{pmatrix} \underline{\dot{q}}_0 \\ \underline{q}_0 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

对于方程(3.19)在时间点 $t_{n+1} = t_n + t_s$ 的 4 阶 Runge-Kutta 解可以写成:

$$\underline{X}_{n+1} = \underline{X}_n + \frac{1}{6} t_s (\underline{k}_1 + 2\underline{k}_2 + 2\underline{k}_3 + \underline{k}_4) \quad (3.21)$$

式中 t_s 为固定时间积分步长, 并且

$$\begin{aligned} \underline{k}_1 &= \underline{f}(t_n, \underline{x}_n) \\ \underline{k}_2 &= \underline{f}\left(t_n + \frac{1}{3} t_s, \underline{x}_n + \frac{1}{3} t_s \underline{k}_1\right) \\ \underline{k}_3 &= \underline{f}\left(t_n + \frac{1}{2} t_s, \underline{x}_n + \frac{1}{2} t_s \underline{k}_2\right) \\ \underline{k}_4 &= \underline{f}(t_n + t_s, \underline{x}_n + t_s \underline{k}_3) \end{aligned} \quad (3.22)$$

(3) Runge-Kutta Merson 方法

五阶 Runge-Kutta Merson 方法使用固定的时间步长。方程 (3.19) 在时间点 $t_{n+1} = t_n + t_s$ 的五阶 Runge-Kutta Merson 的解可以写成下式:

$$\underline{x}_{n+1} = \underline{x}_n + \frac{1}{6} t_s (\underline{k}_1 + 4\underline{k}_4 + \underline{k}_5) \quad (3.23)$$

这里 t_s 是当前积分时间步长, 并且

$$\begin{aligned} \underline{k}_1 &= \underline{f}(t_n, \underline{x}_n) \\ \underline{k}_2 &= \underline{f}\left(t_n + \frac{1}{3} t_s, \underline{x}_n + \frac{1}{3} t_s \underline{k}_1\right) \\ \underline{k}_3 &= \underline{f}\left(t_n + \frac{1}{3} t_s, \underline{x}_n + \frac{1}{6} t_s \underline{k}_1 + \frac{1}{6} t_s \underline{k}_2\right) \\ \underline{k}_4 &= \underline{f}\left(t_n + \frac{1}{2} t_s, \underline{x}_n + \frac{1}{8} t_s \underline{k}_1 + \frac{3}{8} t_s \underline{k}_3\right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

在时间步长减小时, Runge-Kutta Merson 方法不允许在同一个时间间隔上重复时间积分, 因此这种方法不能应用到有限元模型当中。

(4) MATLAB 方法

该数值积分方法仅限于 MADYMO 与 MATLAB 进行耦合运算时使用。

3.2.2 轿车模型

建立正确的汽车模型对整个模拟过程有着非常重要的意义, 模型建立得是否恰当, 直接影响仿真的结果。根据研究对象的不同, 建立的汽车模型可以是整车模型, 也可以是汽车的某一部分(如汽车车厢或汽车尾部模型)。本文在研究汽车与护栏碰撞时建立的是整车模型, 而在求解乘员的碰撞输出参数时则只建立了汽车的车内模型。从国内外的研究情况看, 因为涉及到一些重要参数的确定, 如汽车部件的刚度, 建模工作仍需要以大量的试验为基础。此外, 根据研究的对象和目的的不同, 所建立的汽车模型也是不一样的, 需要确定不同的结构参数。

在汽车模型的建立过程中, 为了简化建模过程, 可以通过将轿车某些零部件建模成具有适当惯性的单个刚体^[24]。本仿真实验中的轿车模型的几何结构和尺寸均以天津一汽夏利 2000 三厢轿车为依据, 具体几何参数和图解见表 3.1 和图 3.4。

表 3.1 夏利 2000 轿车主要技术参数

项 目	单 位	参 数
长×宽×高(空载)	mm	4145×1660×1510
轴距(空载)	mm	2370
轮距, 前/后(半载)	mm/mm	1450/1430
整车总质量	kg	970
最高车速	km/h	170

本文在研究轿车与护栏碰撞时建立的是整车模型。模型包含 15 个刚体, 由 68 个椭球组成, 如图 3.5 所示。轿车模型各个零部件的重心位置和转动惯量根据有关文献资料取近似值。由于轿车与波形护栏碰撞过程中, 变形主要发生在护栏上, 汽车的变形相对较小, 所以在一定计算误差范围内可以近似把轿车作为刚体处理。在定义汽车与护栏的接触时, 采用基于运动学接触模型(Kinematic Contact Model)计算汽车与护栏的相互作用力, 这样只需要定义护栏有限元模型的材料特性, 而避免定义汽车模型的刚度特性。



图 3.4 夏利 2000 轿车实车图

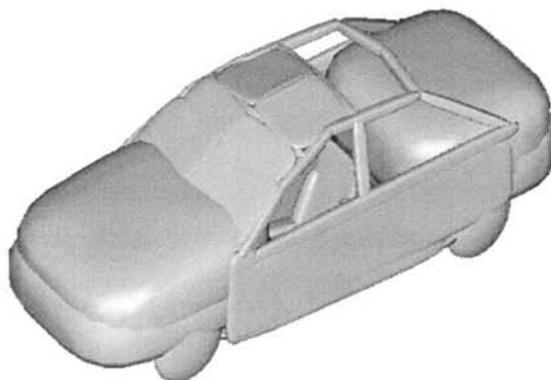


图 3.5 多刚体轿车模型

3.2.3 护栏模型

本文借助 CATIA、HYPERMESH 和 MADYMO 建立了波形梁护栏的有限元模型。该护栏模型完全依照我国交通部于 2006 年发布的《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81 2006) 中规定的 Gr A 4C 型号路侧护栏设计参数来建模, 主要包括圆柱型钢立柱、防阻块、波形护栏板, 护栏的有限元模型如图 3.6 所示。该护栏适用于高速公路或一级公路, 设计速度: 100、80; 适用范围: 无路缘石, 混凝土路基。这种形式的护栏在我国使用得较多, 所以对它进

行研究具有重要的现实意义。



图 3.6 有限元护栏模型

本护栏模型由 4 段波形梁, 5 个防阻块和 5 个圆柱形立柱组成, 总共有 20685 个单元, 21350 个节点, 相邻两段立柱的中心距是 4000mm, 护栏材料模型参数如表 3.2 所示^{[25][26]}。

表 3.2 护栏材料模型参数

材料类型	MATERIAL_ISOPLA
单元类型	Shell
弹性模量	210GP
泊松比	0.28
屈服应力	0.21GP
密度	7850kg/m ³

3.2.3.1 波形护栏板

目前世界上主要有日式护栏和美式护栏两种结构。美式护栏与日式护栏相比较, 具有结构简单, 刚度适中, 节省材料等特点, 所以除了日本等少数国家外, 世界上大多数国家都以美式护栏结构机理来指导本国波形梁护栏设计。其结构设计中要求采用深波纹圆弧形端面横梁以增加横梁的截面惯性矩, 提高横梁的刚度和吸能效果。同时深波纹可以减少汽车和横梁的接触面, 降低汽车与护栏之间的摩擦力, 即相应减小了作用于汽车的纵向力, 有利于汽车运动轨迹的校正。

根据这种结构机理, 我国制定了自己的设计标准, 本文根据这个标准建立了波形护栏板的有限元模型。波形栏板的截面形状如图 3.7 所示, 表 3.3 中是对

应的几何尺寸^[27]。

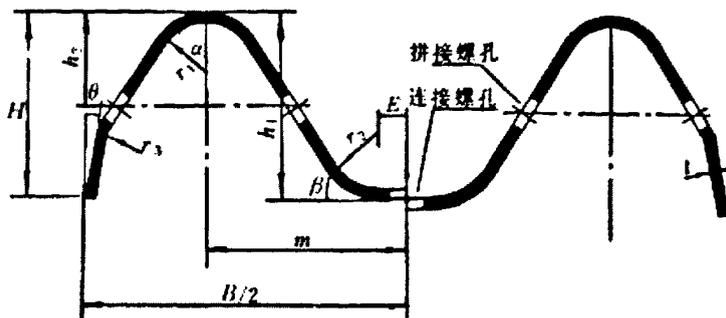


图 3.7 波形梁的断面图

表 3.3 波形梁的断面图几何尺寸

代号	B	m	H	h_1	h_2	E	r_1	r_2	r_3	t	α	\downarrow	θ
尺寸 (mm)	310	96	85	83	39	14	24	24	10	3	55°	55°	10°

3.2.3.2 护栏立柱

根据我国现行的《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81 2006)规定, Gr-A-4C 型号护栏立柱的总高是 1150mm, 其中 400mm 是埋在地底下的。护栏的立柱模型是以外径 140mm, 厚度 4.5mm 的圆柱型钢管为原型建立的。由于本文模拟的护栏安装于混凝土当中, 所以立柱建模时只建立了位于路面以上的部分, 并约束立柱底端节点的所有自由度以模拟立柱与混凝土接触。由于钢管的壁厚相对于钢管直径要小得多, 所以在 MADYMO 中使用壳单元来建模。立柱使用的材料模型与波形护栏板相同。

3.2.3.3 防阻块

在波形护栏板与立柱之间加入防阻块后有很多好处:

(1) 防阻块本身就是一个吸能机构, 因此可以使护栏在受到碰撞后逐渐变形有利于能量吸收减少乘员伤亡;

(2) 防阻块固定在立柱和波形护栏板之间, 使得波形护栏板从立柱上悬置出来。失控汽车一旦于护栏发生碰撞, 不会因为被波形护栏板紧靠立柱而使前轮在立柱处绊阻;

(3) 防阻块参与护栏整体作用后, 可以使碰撞力分配到更多跨结构上, 从

而使护栏受力更加均匀，使护栏的碰撞轨迹比较圆滑有利于汽车的导向和增加护栏的整体强度。

防阻块可以用各种形状的型钢来制造。我国行业规范中推荐用 A 型、B 型两种。A 型适用于圆形立柱，是一种六角形的结构。B 型是参照法国标准设计的，适用于槽形立柱或其他型钢立柱。本文采用 A 型防阻块，几何尺寸如图 3.8 所示。防阻块使用的材料模型与波形护栏板相同。

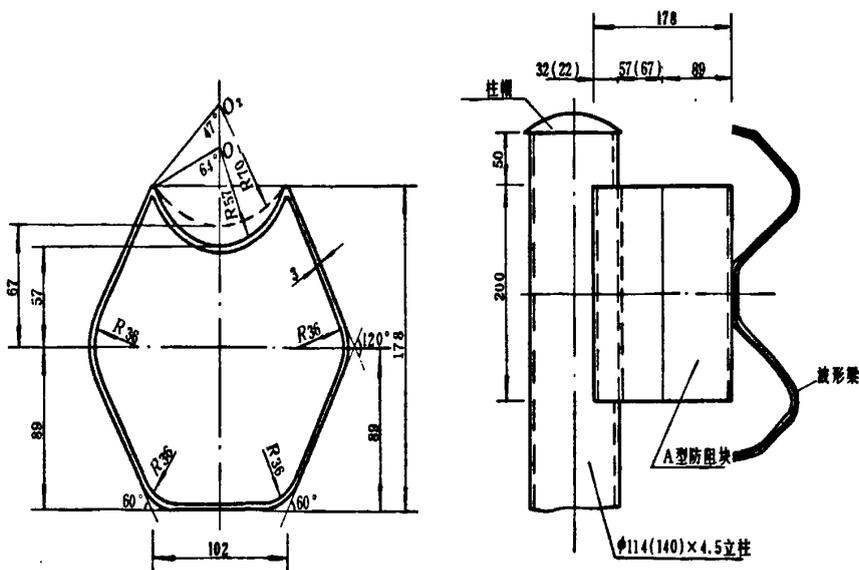


图 3.8 A 型防阻块构造图

3.2.3.4 护栏之间的连接

本文对波形护栏板与防阻块和防阻块与立柱之间的螺栓连接采用焊接方式（两节点焊接）来模拟，通过定义焊点失效时的最大容许法向力和最大容许剪切力来模拟螺栓连接失效。当焊点受到的法向力或剪切力超过焊点的最大容许法向力或最大容许剪切力时，该焊点就失效，波形护栏板与防阻块或防阻块与立柱就会发生脱离^[28]。

第 4 章 模型验证及结果分析

对于任何计算机仿真模型，在利用其进行研究之前，都必须先要验证该模型的正确性和可靠性。任何理论模型的验证都可以通过将其输出结果与试验数据进行对比来进行。本章首先验证了在前面所建立的汽车-护栏碰撞仿真模型的可靠性，然后在此基础上对比分析汽车和护栏在不同的初始碰撞条件下的动态响应特性。

4.1 模型验证

任何理论模型的验证都可以通过将其输出结果与试验数据进行对比来进行。计算机仿真结果的验证主要有以下三种方法：

(1) 将仿真结果与汽车-护栏的碰撞试验测得的数据进行对比，分析两种方法的加速度时间历程曲线和碰撞后汽车和护栏的变形等。

(2) 利用已有的研究所提供的一系列碰撞试验采集到的数据，来进行分析比较。

(3) 将仿真结果与典型事故进行对比，以此来验证模型的正确性和有效性。

由于条件的限制，直接碰撞试验的数据几乎不可得。同时由于很难得到事故的详细数据，所以本文采用将仿真结果与文献提供的试验进行对比，来验证模型的正确性和准确性。

本文中用 MADYMO 软件建立的汽车-护栏碰撞模型的整个模拟过程包括两个步骤：首先是汽车模型与护栏模型的碰撞，得到了汽车的减速度场，然后将汽车的减速度场作为加速度等效地作用于乘员，使其与汽车内部碰撞，得到乘员的各个部位的加速度值和其它参数。模型还作用有重力加速度场 $\mathbf{a}(t)$ ，加速度场以函数对的形式定义，是时间的函数。 $\mathbf{a}(t)$ 的分量必须相对于惯性空间坐标系 (X, Y, Z) 来说明，加速度场并不需要加载在所有刚体上或所有系统上，只需加载在要研究的刚体或系统上即可。

如前所述，本节将通过比较从物理试验和仿真实验获得的轿车质心处的合成加速度来验证前面建立起来的仿真模型。通常定性的验证是指比较试验和仿真结果在如下几个方面的一致程度：碰撞区域大致的变形轮廓，模型中主要部件的碰撞特性；而定量的验证主要是比较试验和仿真中不同位置的加速度和冲击载荷。

图 4.1 是从参考文献获得的轿车质心处的合成加速度曲线，初始碰撞角度

为 15° ，初始碰撞速度为 $80\text{km/h}^{[29]}$ ；图 4.2 是相同碰撞条件下通过仿真获得的轿车质心处的合成加速度曲线。通过比较不难发现两者在峰值和曲线走势上基本上是一致的，这说明本文中建立的碰撞模型能比较好的反映真实碰撞的情况。

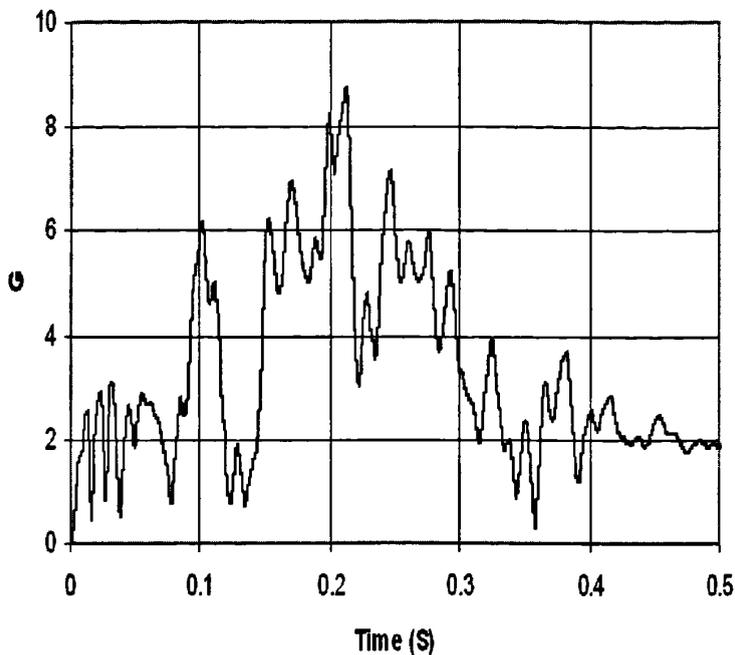


图 4.1 从试验中取得的加速度

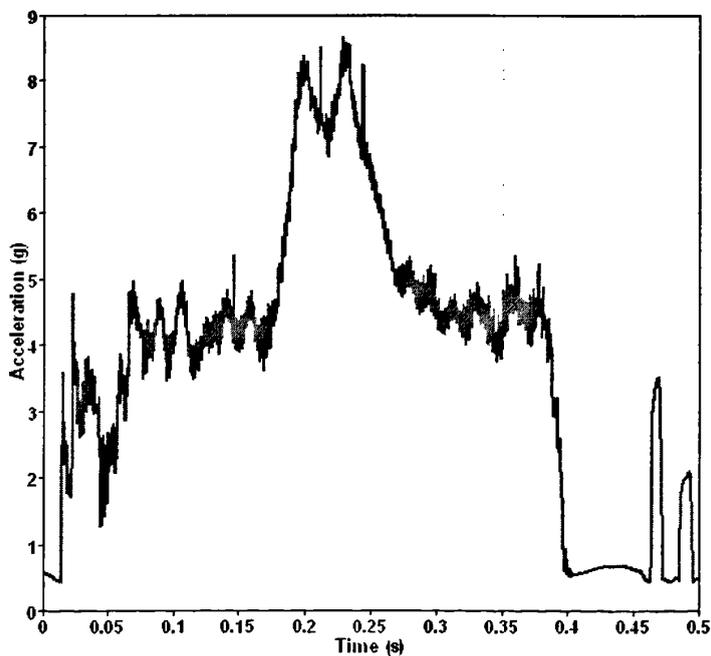


图 4.2 从仿真中取得的加速度

4.2 结果分析

使用 MADYMO 模拟轿车-护栏的碰撞过程分两步：汽车-护栏的碰撞；乘员-车厢内部的碰撞。建立了汽车和护栏系统模型之后，确定两个系统的接触关系，输入汽车的初始碰撞速度和碰撞角度条件，将得到的汽车质心合成加速度场直接作为第二步的输入，加载在乘员身上，从而可以得到乘员各个部位的动力学响应参数，包括头部、胸部和臀部，和乘员头部的加速度和乘员的伤害指数如 HIC 值等。仿真由于过程中车体受到的三个方向加速度峰值均小于或等于 20g，基本上不会对车内乘员造成严重伤害^[30]，所以这里将不再对乘员的损伤特性做研究。这里主要是讨论前面所建立的汽车-护栏碰撞模拟模型的输出结果，通过改变不同碰撞参数观察其结果的变化，进行相互比较，从中得出一定的规律，为更好地改善汽车与高速公路护栏碰撞的安全性提供依据。

轿车的动力响应受到以下参数：汽车的质量，结构刚性，与地面的摩擦力，碰撞速度和碰撞角度等的影响，它们对汽车在碰撞过程中的动态响应起着很大的作用^{[31][32]}。在仿真研究过程中，根据我国高速公路的交通实际情况，采用了 4 个汽车的初始碰撞速度：70km/h，80km/h，90km/h，100km/h 和 4 个初始碰撞角度：15°，20°，25°，30°，研究汽车与波形梁护栏的碰撞，如图 4.3 为汽车-波形护栏碰撞的时间历程。

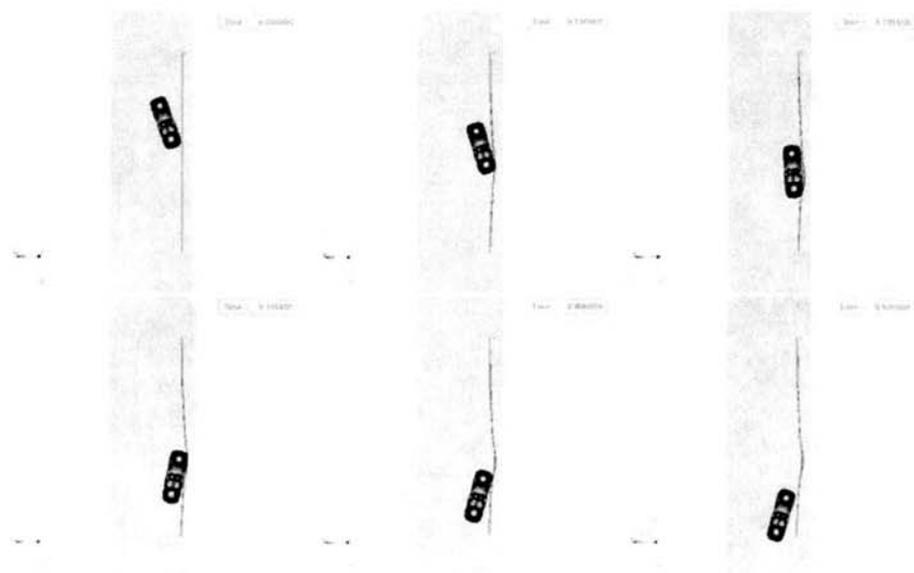


图 4.3 汽车与波形梁护栏的碰撞过程

与波形护栏碰撞后得到汽车的加速度曲线如图 4.4~4.13，其中图 4.4~4.7

分别为 80km/h 碰撞速度不同碰撞角度的汽车加速度分量，图 4.8 为它们的合成加速度；图 4.9~4.12 分别为 20°碰撞角度不同碰撞速度的汽车加速度分量，图 4.13 为它们的合成加速度。

4.2.1 碰撞角度

在轿车的初始碰撞速度相同，轿车与护栏最初的接触位置不变，但初始碰撞角度不同的情况下护栏对车辆的防护作用存在差异。本文将通过下面的碰撞仿真实验来进行研究。实验的碰撞条件如下：轿车的初始碰撞速度都是 80km/h，初始碰撞角度分别是 15°、20°、25°和 30°，碰撞后得到的轿车质心处的加速度时间历程曲线如图 4.4~4.7 所示。

从图 4.4~4.7 可以看出，轿车质心三个方向加速度的作用并不是一样的，X 向和 Y 向的影响最大，它们的加速度峰值明显比 Z 向的要大。其中 X 向、Y 向和 Z 向加速度对应的是汽车的横向、纵向和垂直方向加速度，因此横向和纵向加速度是需着重考虑的参数，作为以后衡量事故严重度的一个指标。同时，从图 4.8 可以看出，随着轿车与波形护栏碰撞角度的增加，护栏作用在轿车质心处的合成加速度也越来越大。

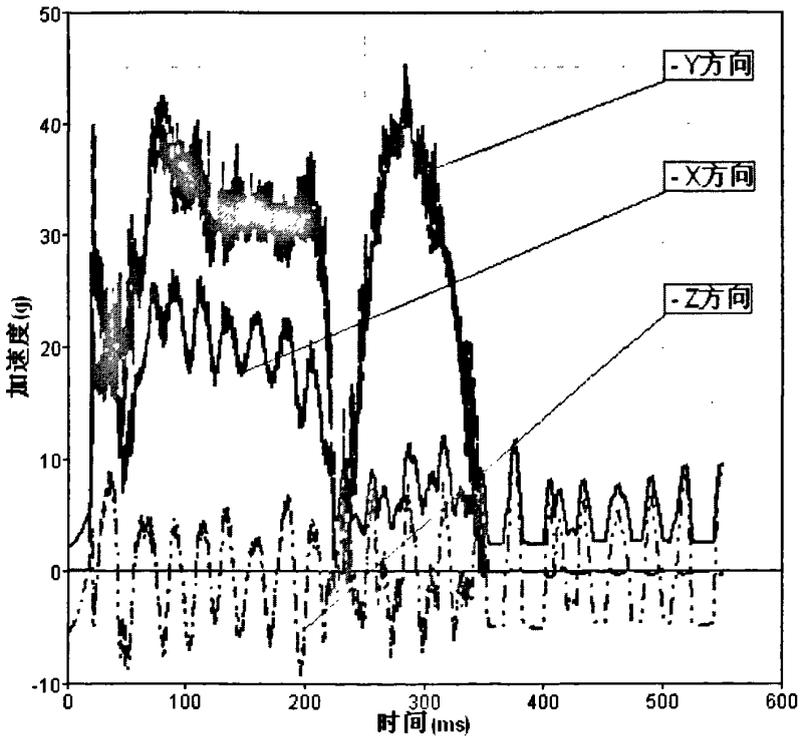


图 4.4 轿车三向加速度（15°）

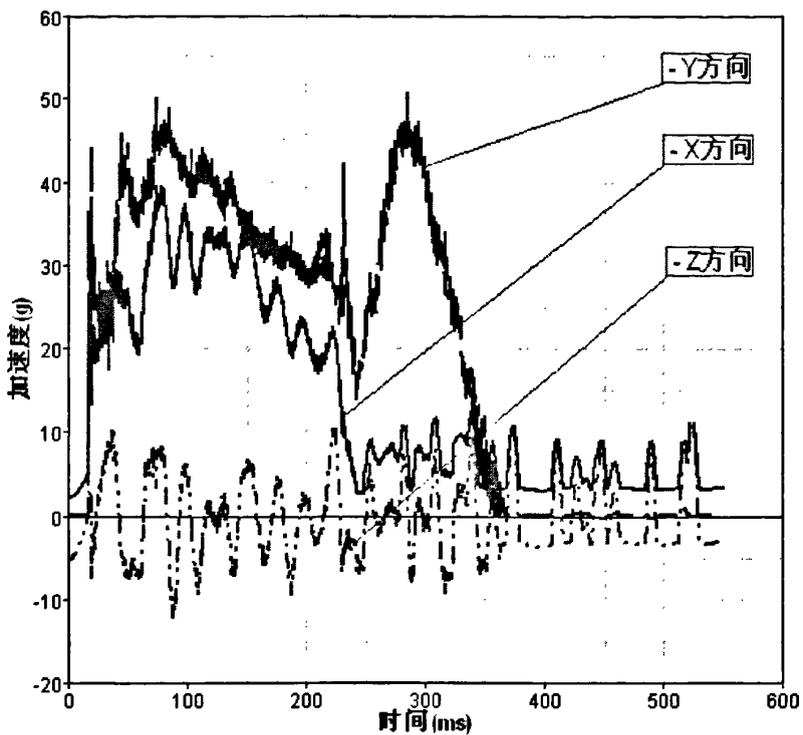


图 4.5 轿车三向加速度 (20°)

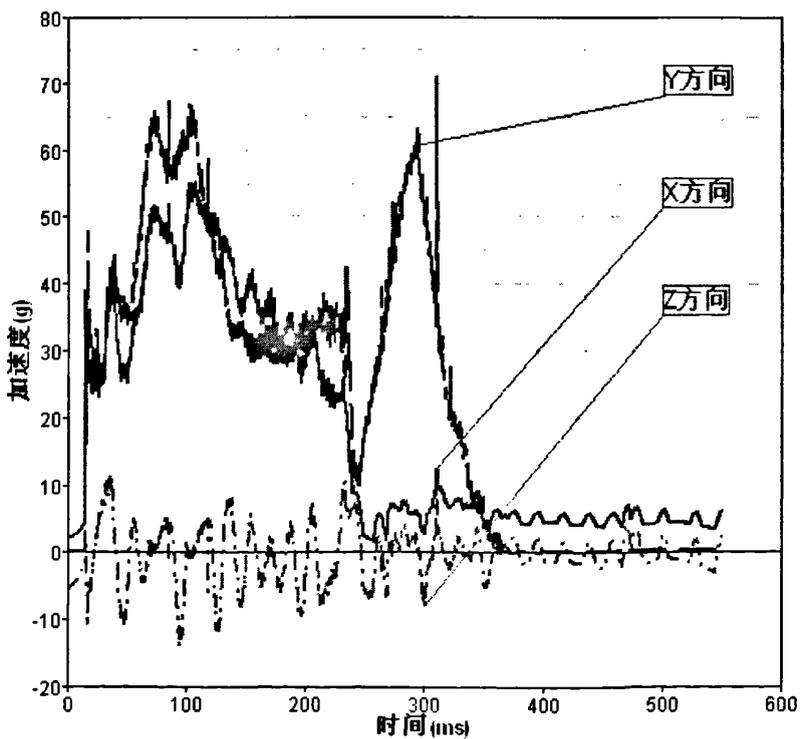


图 4.6 轿车三向加速度 (25°)

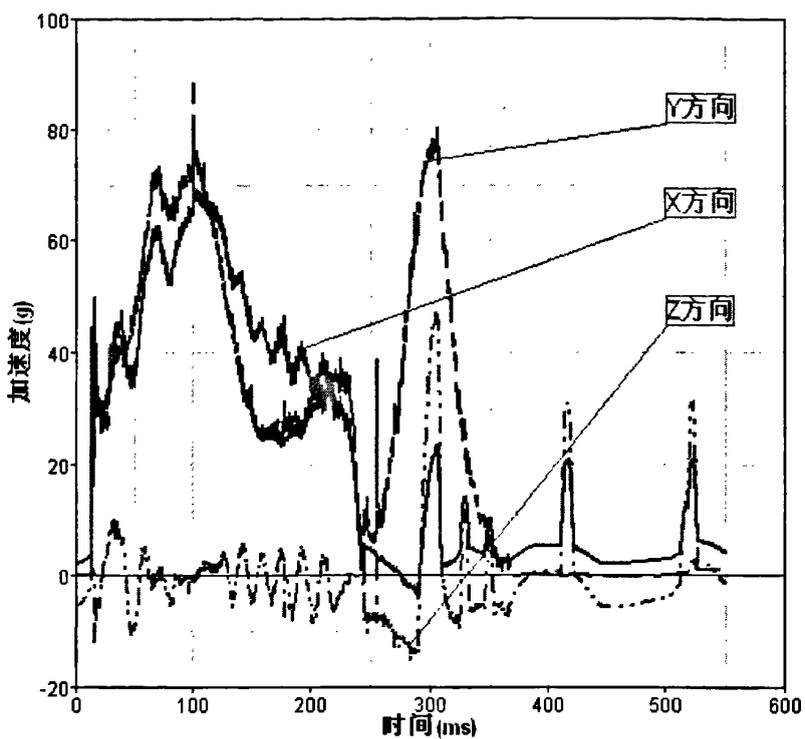


图 4.7 轿车三向加速度 (30°)

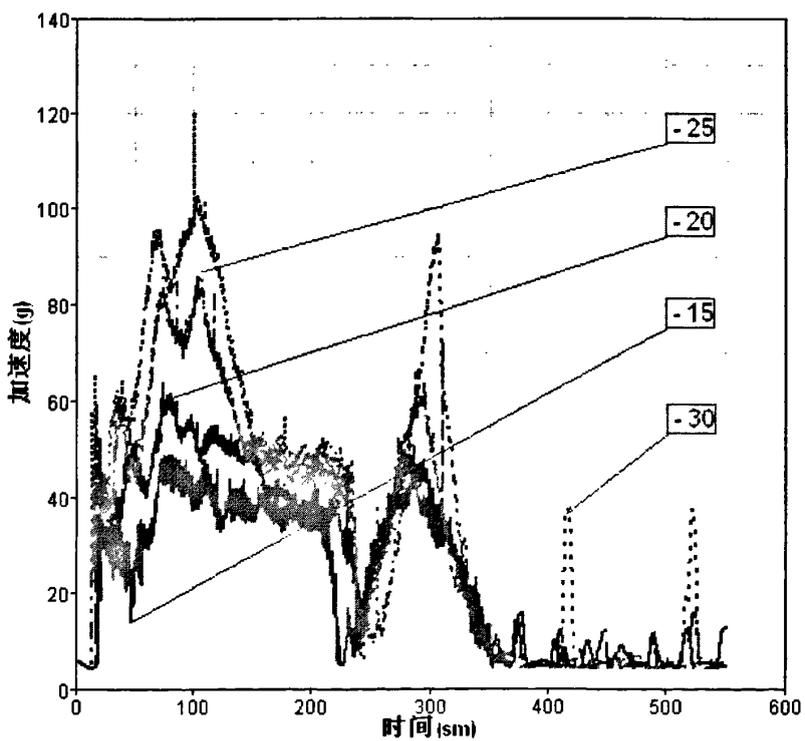


图 4.8 不同碰撞角度轿车合成加速度

4.2.2 碰撞速度

在轿车的初始碰撞角度相同，轿车与护栏最初的接触位置不变，但初始碰撞速度不同的情况下护栏对车辆的防护作用存在差异。本文将通过下面的碰撞仿真实验来进行研究。实验的初始碰撞条件如下：轿车的初始碰撞角度都是 20° ，初始碰撞速度分别是 70km/h 、 80km/h 、 90km/h 和 100km/h ，碰撞后得到的轿车质心处的加速度时间历程曲线如图4.9~4.13所示。

从图4.9~4.12可以看出，轿车质心处的三个加速度分量的作用并不是一样的，X向和Y向的影响最大，它们的加速度峰值明显比Z向的要大。其中X、Y和Z对应的是汽车的横向、纵向和垂直方向。同时，从图4.13可以看出，随着轿车与护栏碰撞速度的增加，护栏作用在轿车质心处的合成加速度峰值也在增大，这表明随着碰撞速度的增大碰撞的剧烈程度在增加，事故车辆中乘员受到损伤的危险在增大。

值得一提的是，当轿车的初始碰撞速度为 100km/h 时，护栏作用在轿车质心处的加速度峰值急剧增加（图4.12），而且通过仿真动画显示，此时的轿车发生侧翻。观察发现，这是由于轿车的前轮和护栏立柱发生了碰撞，产生绊阻现象。一旦发生绊阻，轿车受到的加速度会急剧的增加，而且轿车的运动也会变得不稳定，可能会出现侧翻、悬空等现象，对轿车和乘员的损伤风险也会相应的增加^{[33][34][35]}。

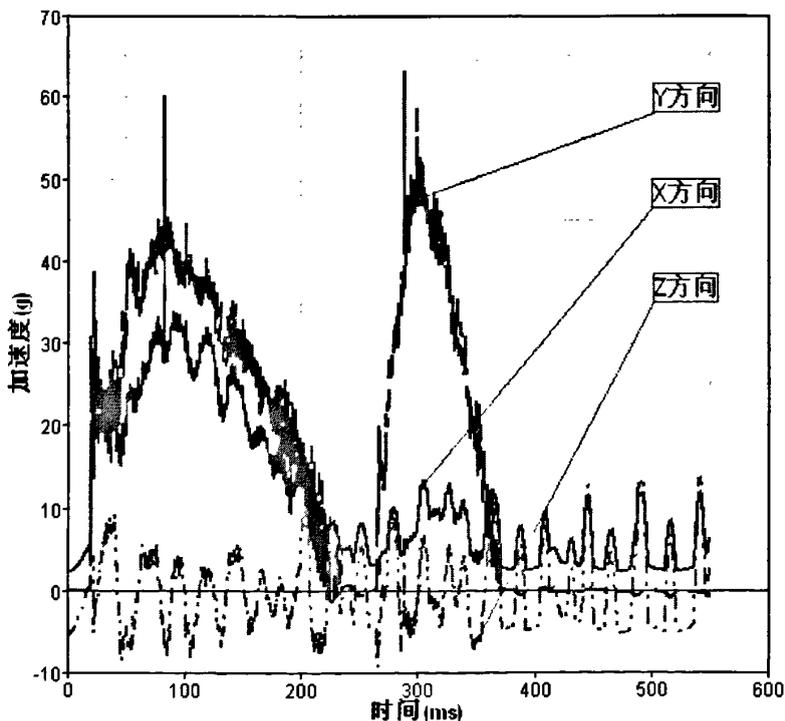


图 4.9 轿车质心三向加速度（ 70km/h ）

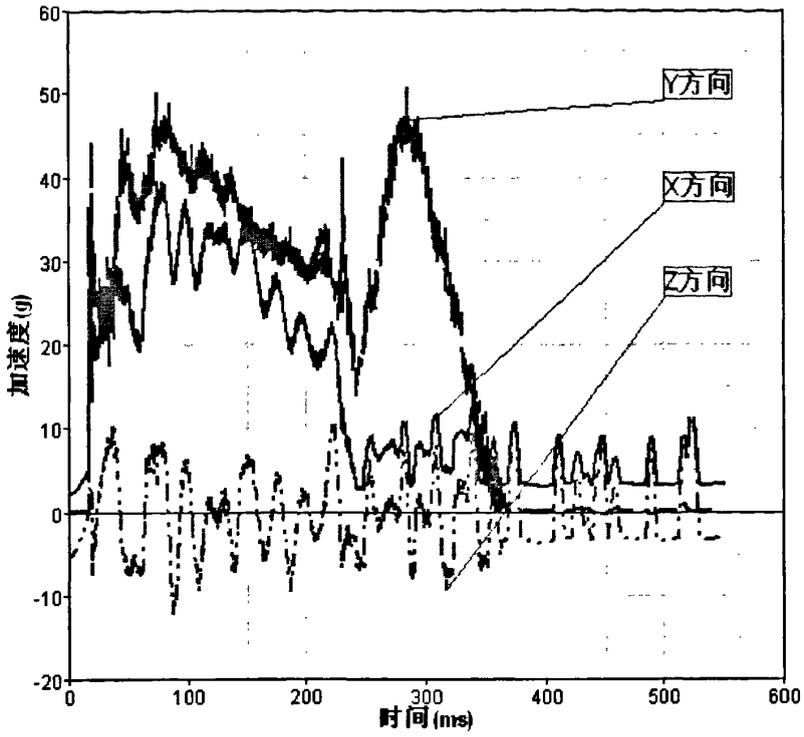


图 4.10 轿车质心三向加速度 (80km/h)

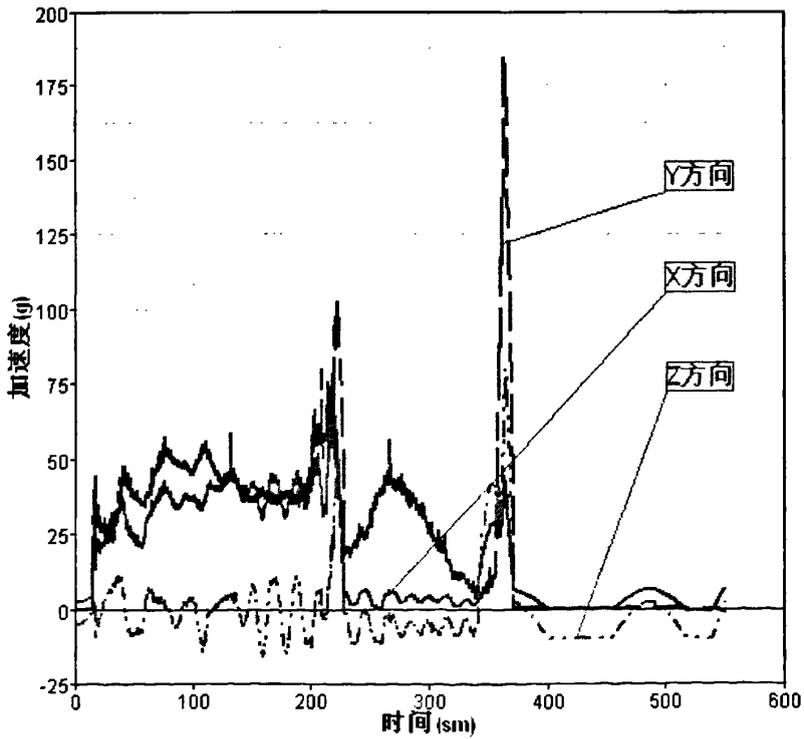


图 4.11 轿车质心三向加速度 (90km/h)

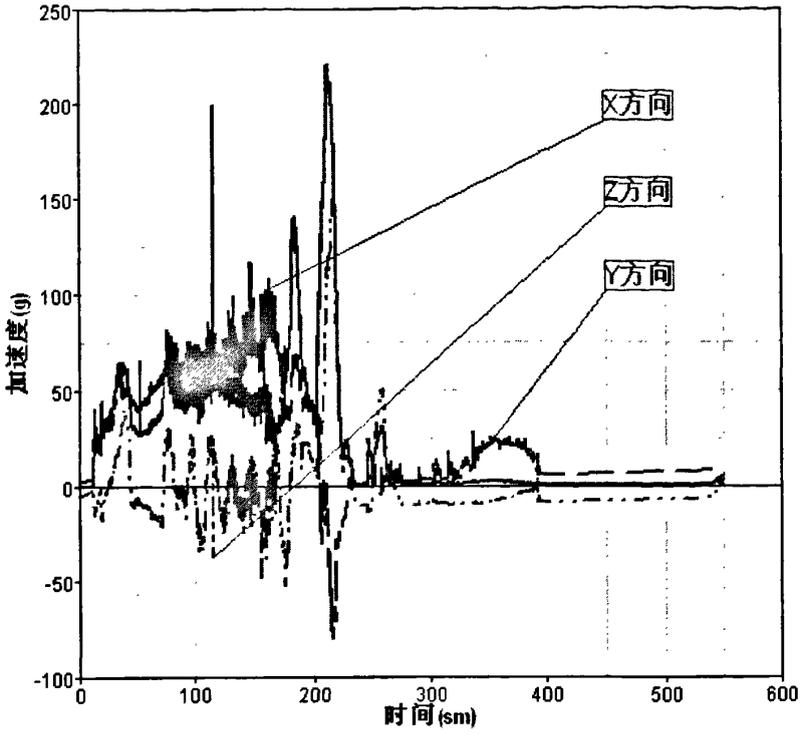


图 4.12 轿车质心三向加速度 (100km/h)

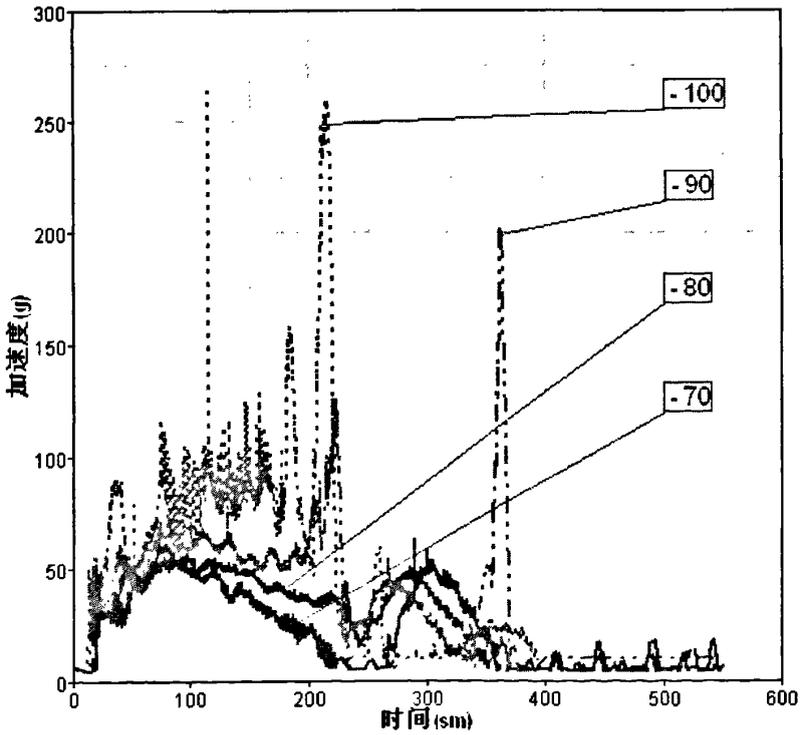


图 4.13 不同碰撞速度轿车质心合成加速度

第 5 章 护栏设计参数的研究

护栏作为高速公路上重要的安全防护设施,对防治道路交通事故,降低人民的生命和财产损失有非常重要的作用,所以对护栏防护性能的研究也显得意义重大。影响护栏防护性能的因素可以分为外在因素和内在因素,外在因素包括车辆的初始碰撞角度和碰撞速度;内在因素包括护栏的材料属性、结构、设计参数以及连接形式等。当一个护栏系统建成并投入使用后其固有的防护性能就已经确定,但是对于不同初始碰撞条件的碰撞事故,护栏就会表现出不同的防护性能,这种性能上的差异主要是由初始碰撞速度和初始碰撞角度来决定的,这些本文已经在上一章进行了讨论。设计护栏的目的是为了在碰撞事故中保护乘员免受伤害,最理想的护栏应该能在最坏的碰撞条件下保证乘员免受伤害。护栏的这种防护性能是其固有的性质,主要与它的内在因素有关。本章就对影响波形护栏防护性能的内在因素——护栏板的设计参数与护栏的防护性能之间的关系进行对比研究。

保持原有护栏系统的立柱和防阻块的设计条件不变,分别选取波形护栏板横截面的 m 、 h_1 和 r_1 这三个设计参数(如图 3.7 所示)作为研究目标。对于每个设计参数分别取三个不同的值(中间值为现役护栏设计量),建立相应的护栏有限元模型。在初始碰撞角度为 15° ,碰撞速度为 80km/h 的条件下,通过对轿车与护栏碰撞后的动态响应特性进行研究,对比分析波形护栏板横截面这三个设计参数与护栏整体防护性能之间的相互关系。对于一个合格的护栏系统而言,它不仅应该能够吸收尽量多的碰撞能量,而且应该使其作用在汽车上的加速度降到最低^{[36][37]}。基于此,本章主要从护栏的吸能特性(考虑到护栏受到撞击后,防阻块和立柱条件下变形几乎差别不大,所以本文只对护栏横梁板的吸能特性进行比较)和护栏作用在轿车上的加速度两个方面对仿真结果进行分析。

5.1 波峰到螺栓安装点的垂直距离

把波形护栏横梁横截面中的波峰到横梁与防阻块螺栓安装点之间的垂直距离(如图 3.7 所示的 m)作为研究目标,分别选取 86mm 、 96mm (现役护栏)和 106mm 三个值并建立相应的护栏模型。然后,在初始碰撞角度为 15° ,碰撞速度为 80km/h 的条件下,分别对这三个护栏进行碰撞仿真分析。碰撞后得到的护栏横梁板吸收能量的时间历程曲线和轿车质心处的加速度时间历程曲线,如图 5.1~5.5 所示。

5.1.1 护栏吸能分析

由图 5.1 可以看出,随着碰撞时间的发展,护栏横梁板吸收的碰撞能量先是增加,然后有稍稍的停顿,之后又继续增加,最后基本保持不变。曲线上出现了两个转折点:第一个转折点是轿车与护栏发生初次碰撞造成的;第二个转折点则是由于轿车与护栏碰撞后车身打转,车尾与护栏发生二次碰撞造成的。从图中曲线来看,波形护栏横梁板设计参数 m 与护栏的吸能特性之间并不存在显著的关系。当波形护栏横梁板设计参数 m 为 96mm 时,即现役护栏设计量,护栏横梁最终吸收的碰撞能量最多,所以对汽车的防护性能也应当是最好。

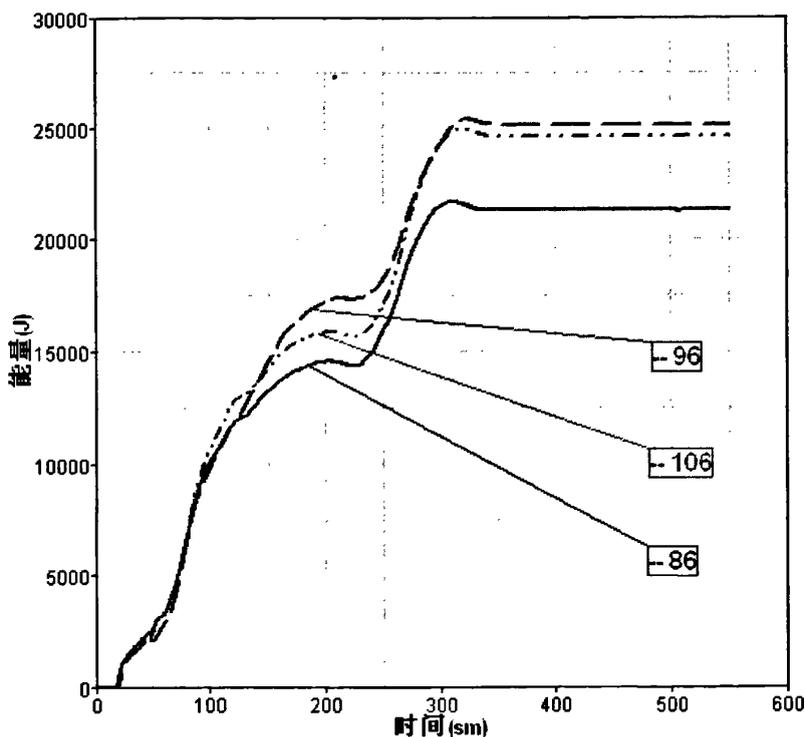


图 5.1 护栏横梁吸收能量的时间历程

5.1.2 轿车加速度分析

由图 5.2~5.5 可以看出,波形护栏横梁板设计参数 m 与护栏作用在轿车质心处的加速度之间并不存在显著的关系。很显然,当 m 为 96mm 时,即现役护栏设计量,护栏作用在轿车质心处的加速度在 X 方向上的分量相对较低,而 Y 方向分量却最高, Z 方向分量几乎变化不大。X 向、Y 向和 Z 向加速度对应的是汽车的横向、纵向和垂直方向加速度。但就合成加速度而言,三者之间的差别却不是很明显。

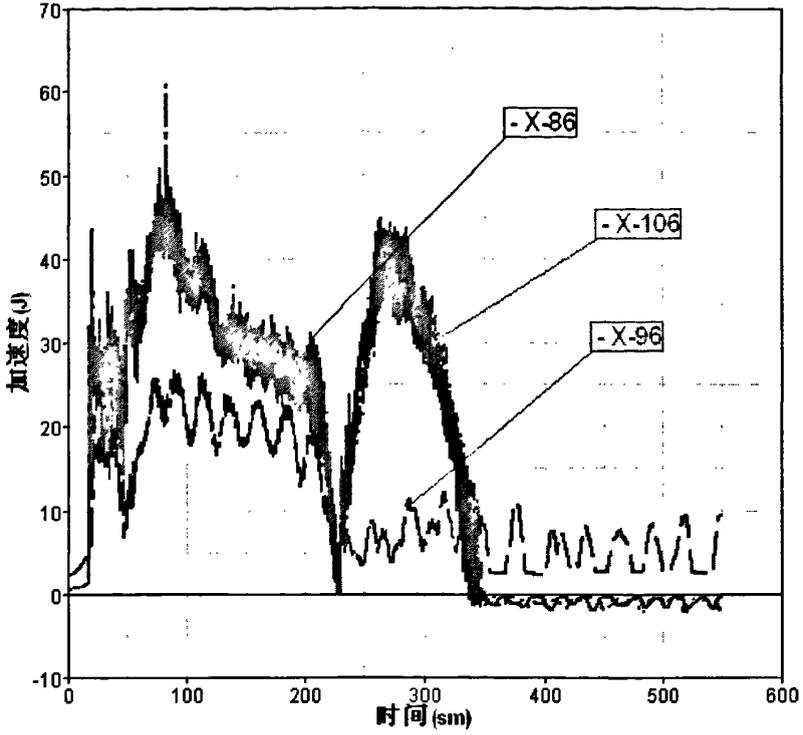


图 5.2 轿车质心 X 方向加速度的时间历程

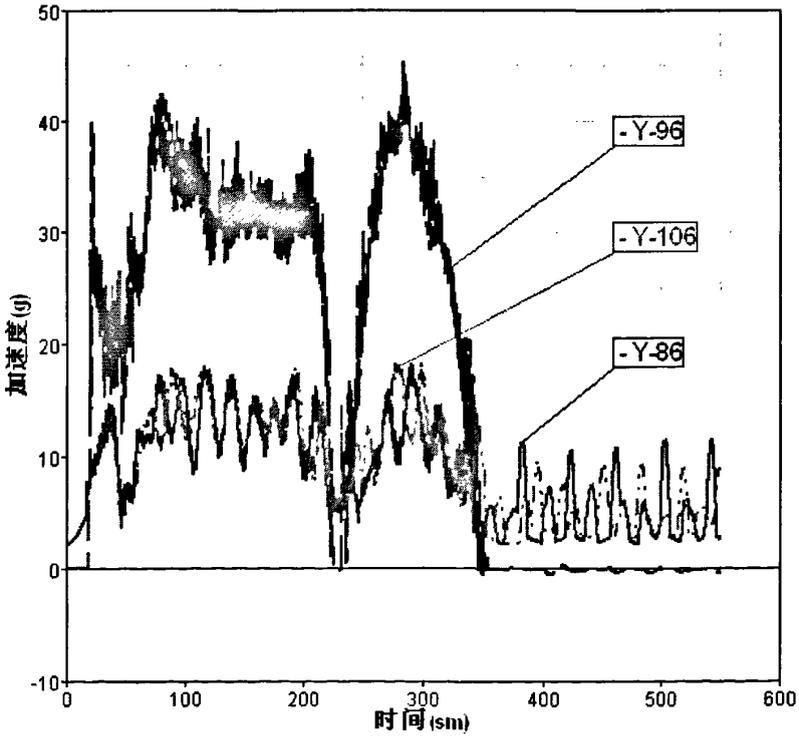


图 5.3 轿车质心 Y 方向加速度的时间历程

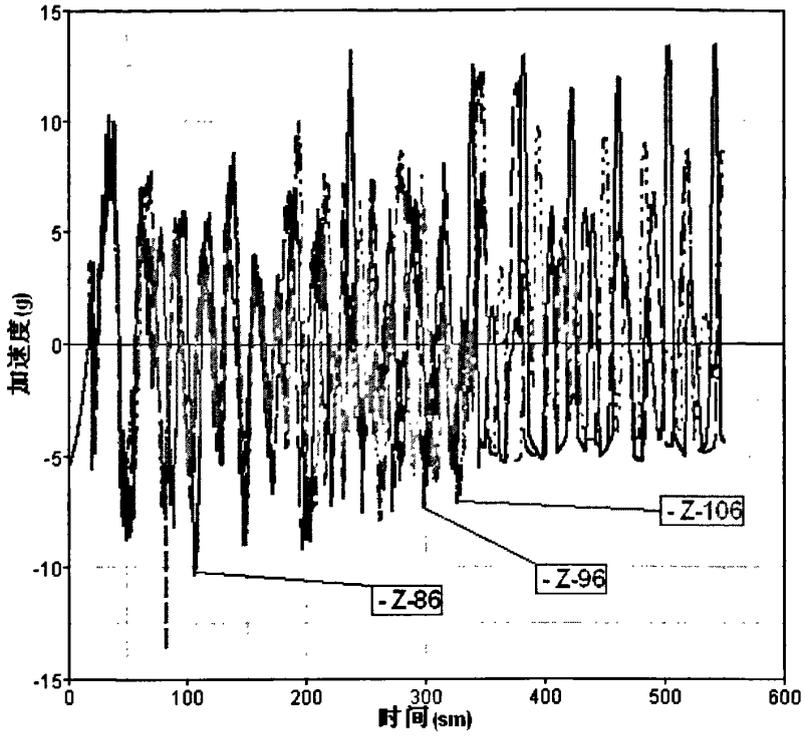


图 5.4 轿车质心 Z 方向加速度的时间历程

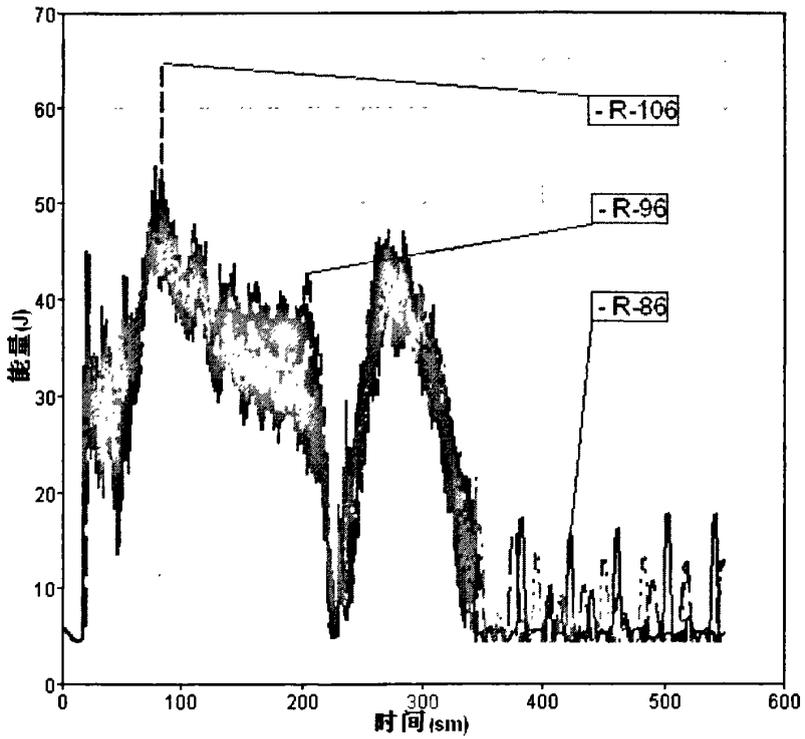


图 5.5 汽车质心合成加速度的时间历程

5.2 波峰到螺栓安装点的水平距离

把波形护栏横梁横截面中的波峰到横梁与防阻块螺栓安装点之间的水平距离（如图 3.7 所示的 h_1 ）作为研究目标，分别选取 73mm、83mm（现役护栏）和 93mm 三个值并建立相应的护栏模型。然后，在初始碰撞角度为 15° ，碰撞速度为 80km/h 的条件下，分别对这三个护栏进行碰撞仿真分析。碰撞后得到的护栏横梁吸收能量的时间历程曲线和轿车质心处的加速度时间历程曲线，如图 5.6~5.10 所示。

5.2.1 护栏吸能分析

由图 5.6 可以看出，随着碰撞时间的发展，护栏横梁板吸收的碰撞能量先是增加，然后有稍稍的停顿，之后又继续增加，最后基本保持不变。曲线上出现了两个转折点：第一个转折点是轿车与护栏发生初次碰撞造成的；第二个转折点则是由于轿车与护栏碰撞后车身打转，车尾与护栏发生二次碰撞造成的。从图中曲线来看，波形护栏横梁板设计参数 h_1 与护栏的吸能特性之间并不存在显著的关系。很显然，当波形护栏横梁板设计参数 h_1 取 83mm（现役护栏）时，护栏横梁吸收的碰撞能量最多，对汽车的防护性能也应当是最好的。

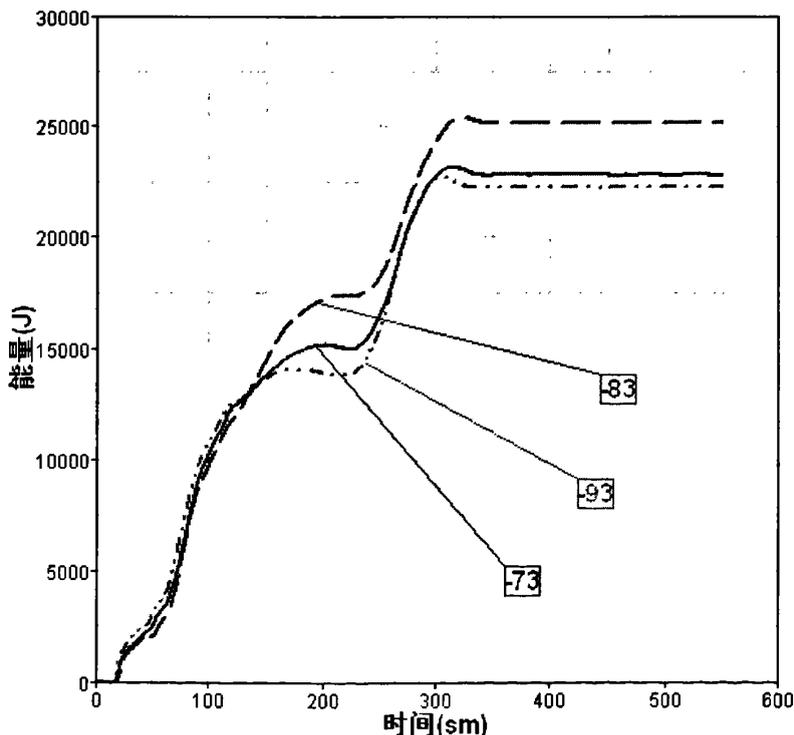


图 5.6 护栏横梁吸收能量的时间历程

5.2.2 轿车加速度分析

一般来说,当轿车与护栏发生碰撞时,护栏作用在轿车上的加速度曲线会出现两个明显的峰值。前一个为轿车头部初次与护栏碰撞产生的;后一个则是轿车与护栏碰撞后车身打转,轿车尾部与护栏发生第二次碰撞造成的。而且,由于护栏具有导向性,前者加速度值应该比后者要大,否则轿车就出现了严重的甩尾现象^{[38][39]}。

由图 5.10 可以看出,护栏作用在轿车质心处的合成加速度曲线确实出现了两个明显的峰值,但三者的整个时间历程之间却几乎差别不大。另外,从图 5.7~5.9 不难看出,当波形护栏横梁板设计参数 h_1 为 83mm (现役护栏) 时,护栏作用在轿车质心处的加速度在 X 方向的分量明显较小, Y 方向的分量却较大,而 Z 方向的分量几乎变化不大,可以不予考虑。同时,相对于后两者,前者在 X 方向上的加速度并没有出现明显的第二个峰值,相反在 Y 方向的第二个加速度峰值却较明显。X 向、Y 向和 Z 向加速度分别对应的是汽车的横向、纵向和垂直方向加速度。

总的来说,波形护栏横梁板设计参数 h_1 与护栏作用在轿车质心处的加速度之间并不存在显著的关系。

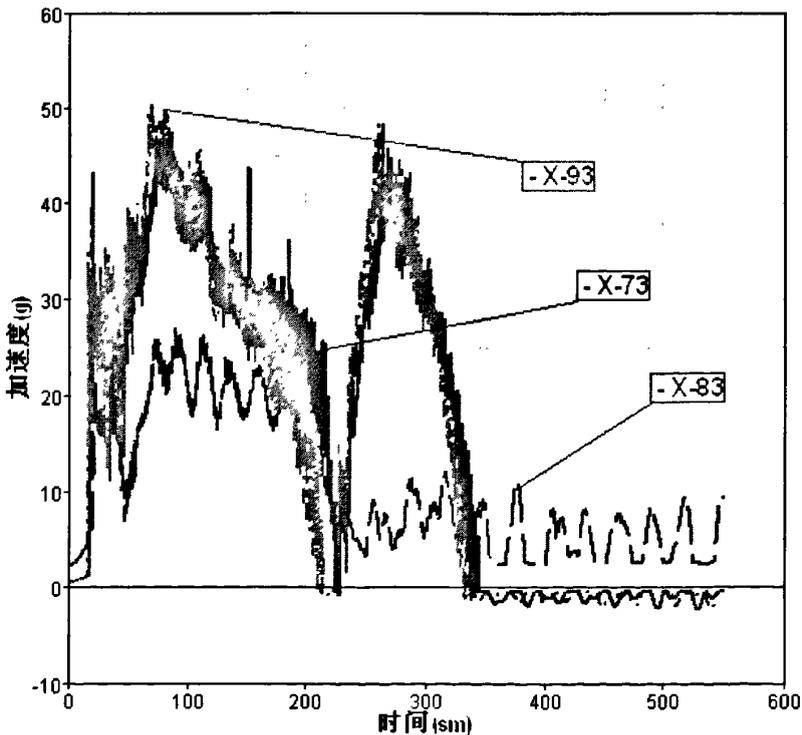


图 5.7 轿车质心 X 方向加速度的时间历程

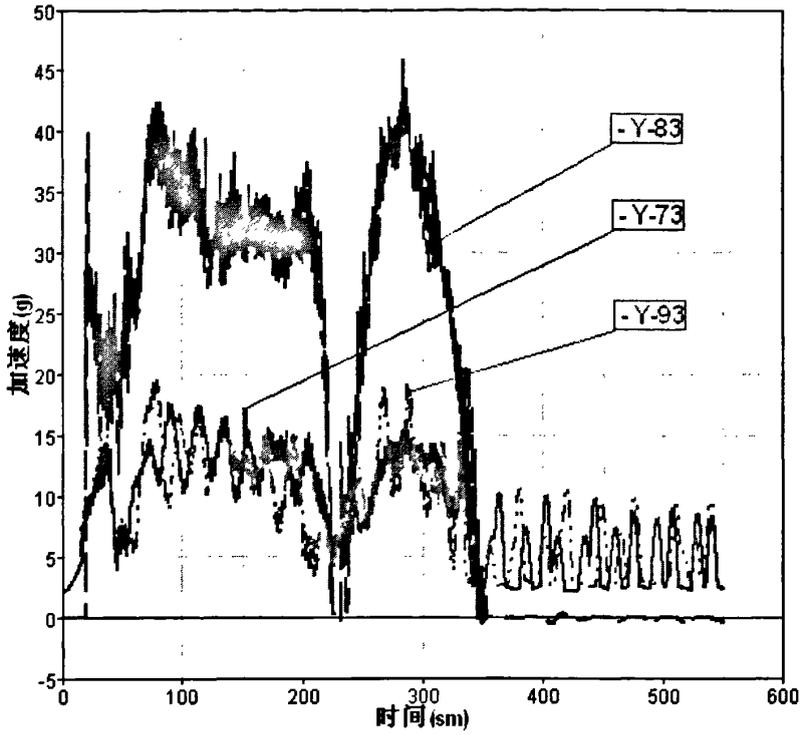


图 5.8 轿车质心 Y 方向加速度的时间历程

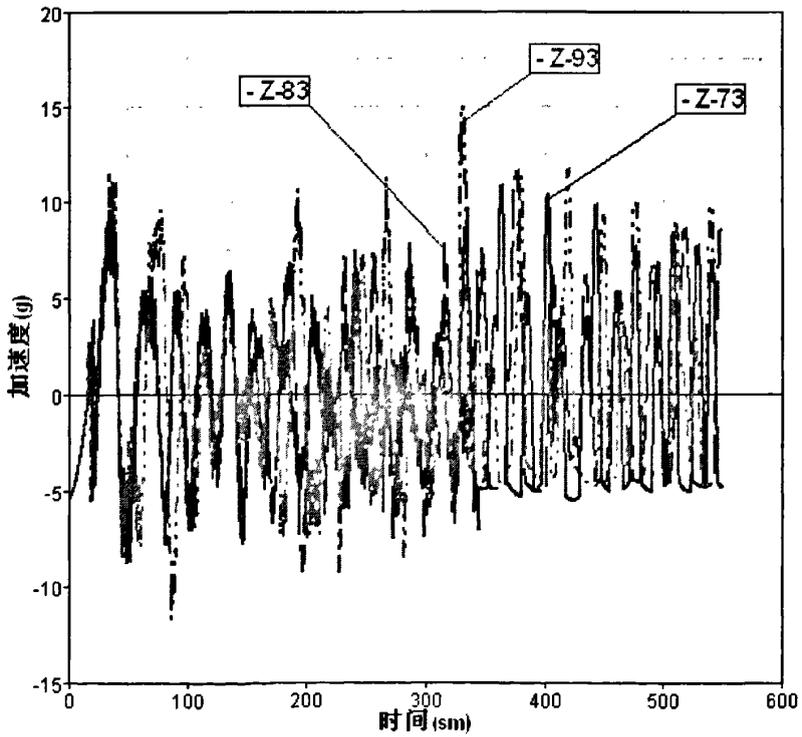


图 5.9 轿车质心 Z 方向加速度的时间历程

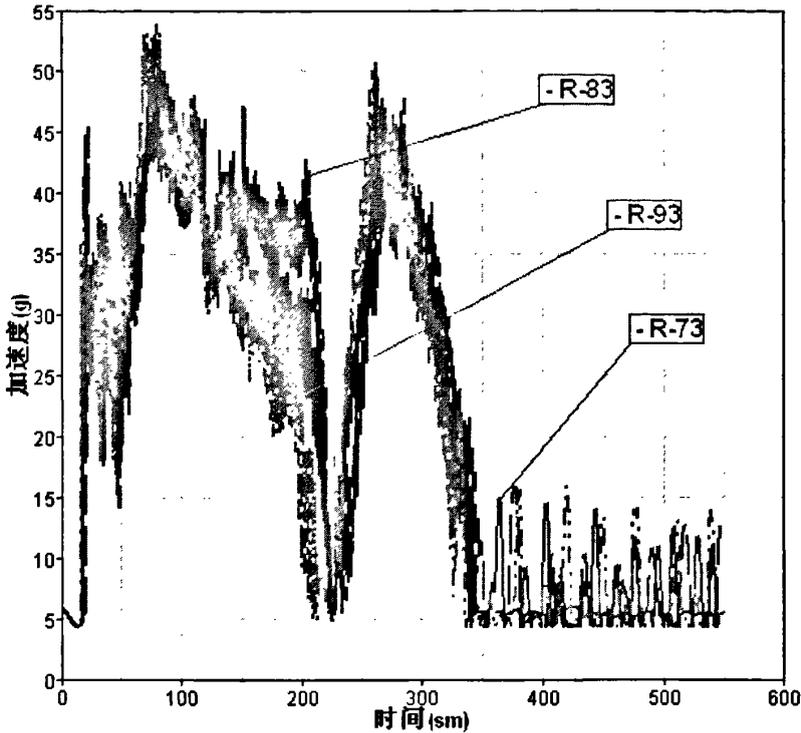


图 5.10 汽车质心合成加速度的时间历程

5.3 波峰倒角半径

把波形护栏横梁横截面中的波峰的倒角半径（如图 3.7 所示的 r_1 ）作为研究目标，分别选取 19mm、24mm（现役护栏）和 29mm 三个值并建立相应的护栏模型。然后，在初始碰撞角度为 15° ，碰撞速度为 80km/h 的条件下，分别对这三种护栏进行碰撞仿真分析。碰撞后得到的护栏横梁板的吸收能量的时间历程曲线和轿车质心处的加速度时间历程曲线，如图 5.11~5.15 所示。

5.3.1 护栏吸能分析

由图 5.11 可以看出，护栏的吸能特性与波形护栏横梁板设计参数 r_1 之间并不存在显著的关系。随着碰撞时间的发展，护栏横梁板吸收的碰撞能量先增加，然后降低，最后基本保持不变。曲线上出现了两个转折点：第一个转折点是轿车与护栏发生初次碰撞造成的；第二个转折点则是由于轿车与护栏碰撞后车身打转，车尾与护栏发生二次碰撞造成的。

一般来说，在满足安全碰撞的（波形护栏横梁板的最大横向动态变形量小于或等于 100mm，车体的运动没有出现不稳定等）的条件下，波形护栏吸收的

碰撞能量越多，则护栏对碰撞车辆的防护效果就越好^[40]。不难看出，当 r_1 为 24mm（现役护栏）时，护栏横梁吸收的碰撞能量最多，对汽车的防护性能也应当是最好的。

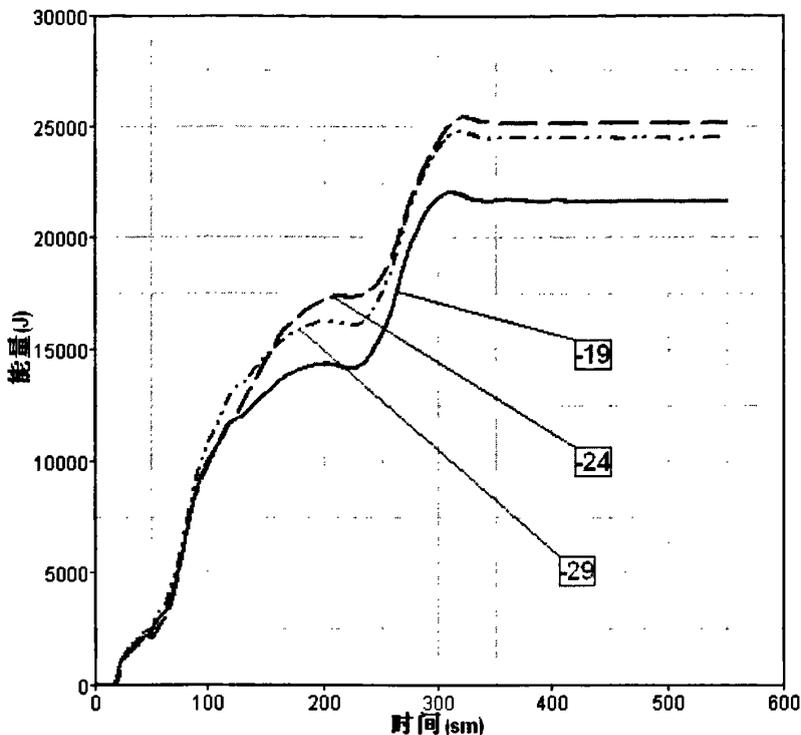


图 5.11 护栏横梁能量吸收的时间历程

5.3.2 轿车加速度分析

从图 5.12~5.14 不难看出，当波形护栏横梁板设计参数 r_1 为 24mm（现役护栏）时，护栏作用在轿车质心处的加速度在 X 方向的分量明显较小，Y 方向的分量却较大，而 Z 方向的分量几乎变化不大，可以不予考虑。同时，相对于后两者，前者在 X 方向上的加速度并没有出现明显的第二个峰值，相反在 Y 方向的第二个加速度峰值却较明显。X 向、Y 向和 Z 向加速度分别对应的是汽车的横向、纵向和垂直方向加速度。另外，由图 5.15 可以看出，护栏作用在轿车质心处的合成加速度曲线都出现了两个明显的峰值，但三者的整个时间历程之间却几乎差别不大，很难做出比较。

总的来说，护栏作用在轿车质心处的加速度与波形护栏横梁板设计参数 r_1 之间并不存在显著的线性关系。

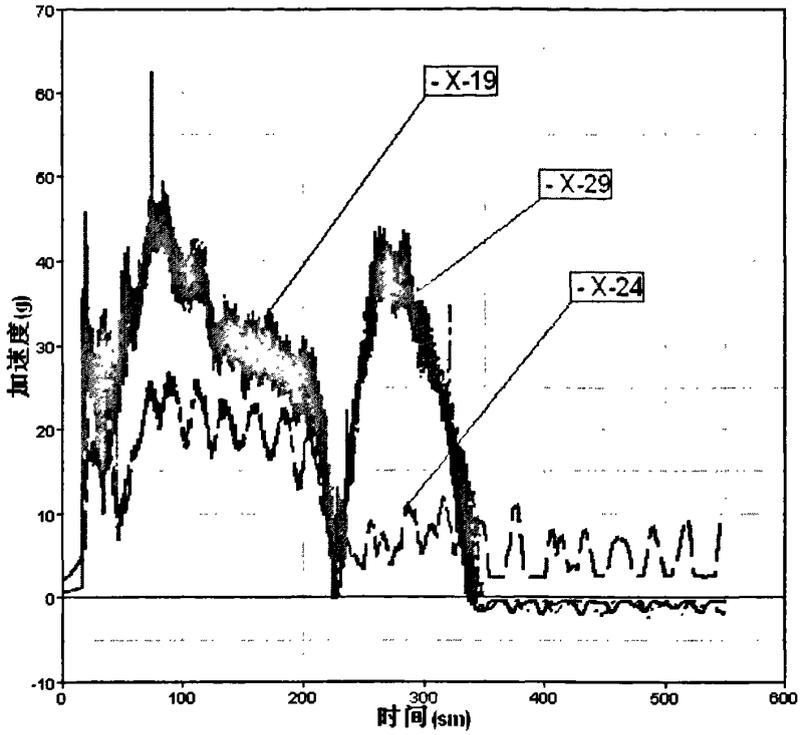


图 5.12 轿车质心 X 方向加速度的时间历程

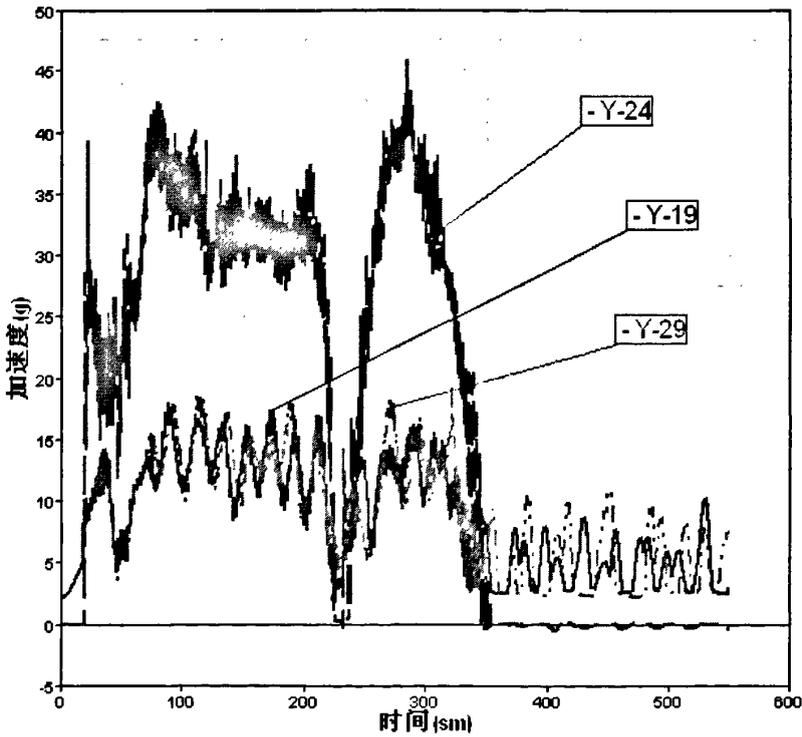


图 5.13 轿车质心 Y 方向加速度的时间历程

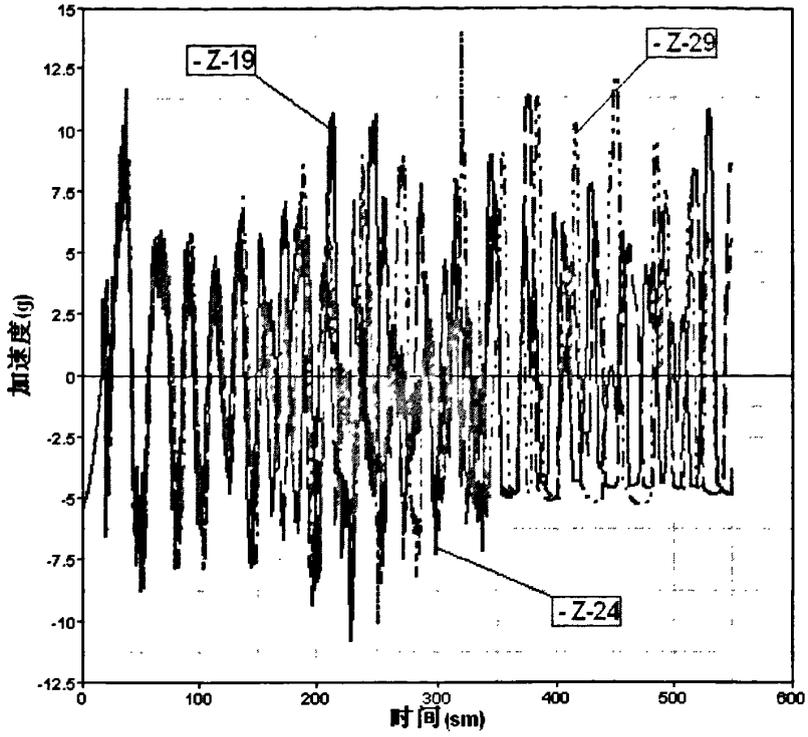


图 5.14 轿车质心 Z 方向加速度的时间历程

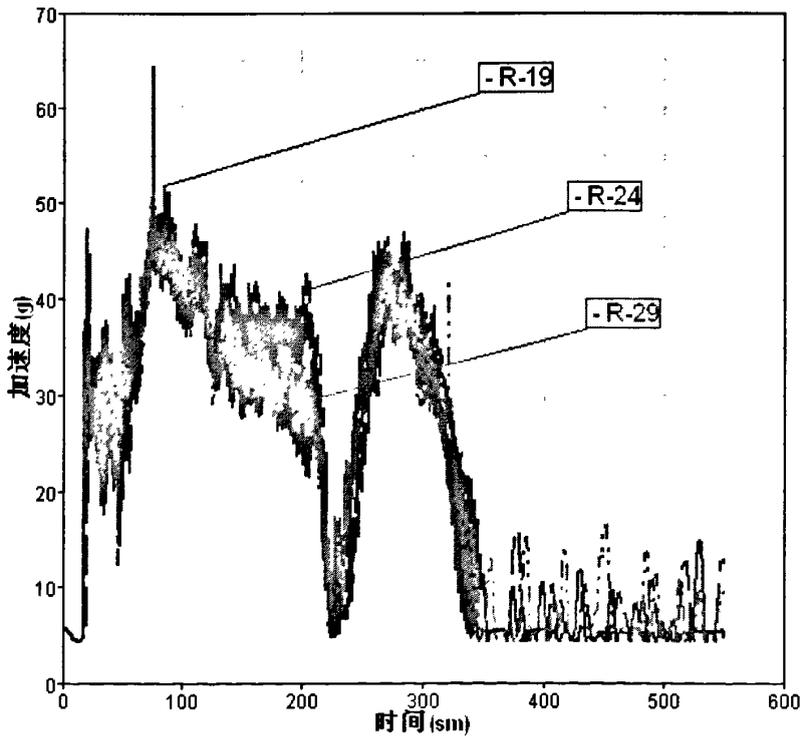


图 5.15 汽车质心合成加速度的时间历程

综上所述,护栏横梁板横截面的三个设计参数 m 、 h_1 和 r_1 与护栏的防护性能之间并不存在显著的线性关系。无论是从护栏的吸能特性还是轿车在 X 方向上的加速度分析,现役护栏的设计量都是最佳的。

由于受条件限制,本文只对这些参数进行了单参数分析,但是护栏各个设计参数之间可能存在着相互关系,所以以后的研究重点将集中在多参数分析上。

第 6 章 总结及展望

近年来,我国机动车保有量不断增长,随之而来的道路交通事故也在不断攀升。据最近统计资料显示,我国的道路交通安全形势依然十分严峻,交通事故严重威胁着社会经济发展和人们生命财产的安全。

高速公路护栏关系到人们的生命财产安全,同时对于塑造我国道路交通安全个新形象具有重大意义,理当大力开展相关方面深层次的研究。随着我国公路建设的蓬勃发展和西部大开发的高歌猛进,护栏的需求量将迅猛增长,而真正符合我国道路交通情况的安全防撞护栏才有根本意义和长远的生命力。这也是摆在我国道路交通安全科学工作者面前亟待解决的问题。

6.1 结论

本文使用 MADYMO 建立轿车-护栏碰撞的仿真模型,分别对不同碰撞条件下护栏的防护性能进行了仿真研究。从验证分析的结果看,本项研究所建立的轿车与高速公路护栏碰撞的计算机仿真模型是有效的。在仿真研究过程中,由于仿真得到的车体的三向加速度峰值都没有超出碰撞安全阈值,所以对于车内乘员的损伤研究可以忽略不计。

在建立多刚体模型的过程中,考虑了轿车的质量、惯性、重心高度和初始碰撞条件(碰撞速度和碰撞角度)和护栏的特性,包括护栏的材料、结构、质量、护栏的连接方式等参数的影响。碰撞过程中充分考虑了摩擦接触的影响,包括轿车与地面、轿车与护栏之间的摩擦接触^{[41] [42]}。通过 MADYMO 进行计算机仿真研究可以得出如下的结论:

(1) 作用在轿车上的加速度的三个分量呈现出不同的敏感性, X 方向和 Y 方向的加速度较大。

(2) 在初始碰撞速度(80km/h)相同的情况下,初始碰撞角度变化后依然保持轿车与护栏最初的接触位置不变,轿车质心处的合成加速度会随着碰撞角度的增大而增大。

(3) 在初始碰撞角度(20°)相同的情况下,初始碰撞角度变化后依然保持轿车与护栏最初的接触位置不变随着初始碰撞速度的增大,轿车质心处的合成加速度增大。

(4) 通过对碰撞过程的仿真研究发现,当轿车的初始碰撞速度达到某个水平时,轿车的前轮和护栏立柱就会发生碰撞,产生绊阻现象。一旦发生绊阻,轿车产生的加速度会急剧的增加,对轿车和乘员的损伤风险也会相应的增加。

同时,轿车的运动也很不稳定,可能会出现侧翻、悬空等现象。

设计护栏的目的是为了在碰撞事故中保护乘员免受伤害,最理想的护栏应该能在最坏的碰撞条件下保证乘员免受伤害。影响护栏防护性能的因素可以分为外在因素和内在因素,外在因素包括车辆的初始碰撞角度和初始碰撞速度,内在因素包括护栏的材料属性、结构、设计参数以及连接形式等。本文在对影响护栏防护性能的外在因素进行了研究之后,接下来又对其内在因素——护栏横梁板的设计参数 r_1 、 h_1 和 m 与护栏整体防护性能之间的相互关系进行了研究,通过对仿真结果的分析得出了以下一些结论:

(1) 从护栏吸收的碰撞能量时间历程来看,护栏设计参数 r_1 、 h_1 和 m 与护栏吸收的碰撞能量之间并不存在显著的线性关系。但是,很显然当前护栏吸收的碰撞能量都是最多的,换言之,当前护栏对应的三个设计量都是最优的。

(2) 从护栏作用在轿车质心处的加速度来看,对于护栏设计参数 r_1 ,相对于现役护栏的设计量而言,无论是增大还是减小,轿车碰撞后得到的车体质心处的合成加速度几乎差别不大。但是,如果从作用在轿车上的各加速度分量而言,现役护栏对车体在 X 方向上造成的加速度相对较小,在 Y 方向上造成的加速度却较大, Z 方向几乎差别不大,可以不予考虑。对于护栏横梁的设计参数 h_1 和 m 也得到相似的结论。

6.2 展望

本文只是基于轿车与路侧波形护栏碰撞进行了基本的仿真分析研究,绝大多数的的工作都还处于不完善阶段。随着人们安全意识的提高,交通安全研究也越来越多,尽管在过去几十年里,路侧安全取得了很大的进步,但是在许多方面依然存在着问题还有大量工作要需要完成。

6.2.1 试验方面

对于实车足尺寸碰撞试验来说,试验装置和实际护栏之间存在差别。从目前所做的试验看,几乎所有足尺寸碰撞试验都是在平地上进行的,而实际护栏却情况各异。另外,大多数试验装置安装在坚固的路基上,而实际护栏则变化很大,有的安装在坚固的水泥混凝土路基中,也有的安装在不牢固的路基上。还有,护栏的地理位置,也限制了用足尺寸碰撞试验进行研究的普遍性。根据碰撞事故资料,严重受伤事故和死亡事故的一半以上与这些护栏有关:边坡、路堤和沟渠等^[43]。这些设施是影响单车翻滚事故和越出道路事故的主要因素。因此,碰撞试验并不能反映所有护栏的实际情况。

汽车特性对护栏的安全特性的影响很大,如汽车质量、重心高度、保险杠

和发动机罩的几何结构等。汽车类型和所占比例在 5 到 7 年的时间里会发生很大变化,而护栏在设计时就假定其使用寿命为 20 年或更长,这两者之间的差异,使得大多护栏的使用特性受到很大的影响^[44]。

有关碰撞事故统计资料表明:在碰撞事故中,几乎有一半的事故汽车不在目前所进行的研究范围内。同时还发现,某些事故比实际研究的碰撞问题更严重。另外,由于试验条件和场地的限制,一些试验过的护栏,其特性在实际使用中并不总是令人满意。

由于我国在这方面尚处于起步阶段,所以今后还有很多工作需要进一步研究。

6.2.2 计算机仿真方面

高速公路轿车-护栏碰撞的计算机仿真模型必须详细描述轿车的所有零部件(碰撞中会承受很大的载荷)。碰撞可能发生在汽车的任意部位,所以汽车-护栏碰撞研究常超出了一般的范围,所以汽车模型中必须包括所有的零部件。再者,目前使用的汽车模型仍有很大的局限性,尤其是建立悬挂和轮胎的模型。这些方面对于越出道路的计算机仿真有很大影响,因为轮胎和悬挂直接影响轿车的翻滚。因此,应努力改进现有轿车模型,从而为高速公路路侧碰撞事故的分析提供更好的工具。

尽管在过去的几年中建立了大量的护栏模型,但是大部分模型缺乏充分的验证。护栏建模的主要问题有两类:材料的局限性和连接方式的确定。如很难建立木材和土壤之类的材料模型,因为设施之间,材料有很大的不同。各向异性材料,如普通硅酸盐水泥、沥青混凝土和纤维塑料,也很难建立模型。建立护栏中所使用的多种连接类型的模型也是很困难的。为了保证所建立的碰撞模型是合理而精确的,必须验证模型的每个零部件。

本文没有对仿真模型的建立进行更深入的研究和探讨,但是很显然仿真中使用的模型的精确度直接影响仿真结果的精度,所以建立精确的模型将会是未来这个领域研究的重点之一。国外在这方面研究得比较早,他们通过实验积累了很多的经验和数据,建立了具有代表性的可以在实际中应用的模型,如假人模型、轿车模型、护栏模型等。但是在我国,由于这项工作起步比较晚,还没有建立起足够精确并且具有代表性的模型,今后的研究重点将是如何建立具有我国人体特征的假人仿真模型,具有我国车辆构成特征的汽车仿真模型以及主要的交通安全设施仿真模型。而要做到这一点首先就需要对国内汽车的保有量、车辆的构成进行大量的统计调查,同时也还要对高速公路上发生的事故进行调查。通过调查为将来在这个领域开展进一步的工作准备好第一手的数据。

参考文献

- [1] 黄淑琴. 国外公路护栏. 国外公路, 1996, 16(2)
- [2] 黄永平主编. 汽车碰撞安全. 清华大学出版社, 1999
- [3] 许洪国主编. 交通事故分析与处理. 人民交通出版社, 2002
- [4] Charles. Oakley. A New Approach to Modelling Vehicle Interactions with Roadside Restraint Systems. TRL Limited, UK, Paper No. 159
- [5] L.Sicking, King K.Mak. Improving Roadside Safety by Computer Simulation. A2A04: Committee on Roadside Safety Features. 2000
- [6] 朱西产. 实车碰撞试验法规的现状和发展趋势. 汽车技术, 2001. (4): 5-10
- [7] 乔维高. 汽车碰撞研究现状与发展趋势. 湖北汽车, 2001. (1): 57-61
- [8] 谢玉洪, 雷正保, 李海侠. 高速公路防撞护栏的研究现状与发展趋势. 工程建设与设计, 2003. (12): 40-43
- [9] 高速公路丛书编委会. 高速公路交通工程及沿线设施. 人民交通出版社. 1999
- [10] Yang Jikuang. A Simulation Study on Design Parameters of Vehicle Front for Pedestrian Head Protection. 见: 第一届 MADYMO 中国用户会议论文集. 湖南大学学报, 2002 年第 4 期
- [11] A. K. Prasad. CRASH3 Damage Algorithm Reformulation for Front and Rear Collision SAE Paper No. 900098, 1990
- [12] P. Cooper. Roadside Barriers. Literature Review and Current Practice. B. C. Research, Vancouver, B. C., 1980
- [13] Robert William Thomson. Performance of Deflecting Concrete Highway. Barriers: [Ph. D. dissertation], 1996
- [14] 雷正保, 杨 兆. 汽车-护栏碰撞系统的安全性研究. 汽车工程, 2006, 28 (2): 152-159
- [15] 杨家勇, 周有平, 李海侠. 有限元法在汽车与护栏碰撞中的应用. 桂林电子工业学院学报, 2004, 24 (3): 82-85
- [16] L. Sicking, King K. Mak. Improving Roadside Safety by Computer Simulation. In: Committee on Roadside Safety Features, 2000
- [17] 黄存军, 黄世霖. MADYMO 软件在乘员约束系统建模中的应用. 设计·计算·研究, 1998 (10): 5-6
- [18] 肇恒友, 陈同初. 高速公路波形梁护栏. 辽宁交通科技, 1994. 22 (2): 43-44
- [19] 姜德伦, 周悦波. 浅谈高速公路防撞护栏. 东北公路. 1997 (2)
- [20] 中华人民共和国交通部. JTG F10-2006. 公路路基施工技术规范. 北京: 人民交通出版社, 2004-07-10
- [21] Malcolm H. Ray, P. E., Ph. D. Crashworthiness Functional Requirements of an Improved Barrier System. Worcester Polytechnic Institute, 100 Institute Road, Worcester, VIA 01609,

2001, 3

- [22] 中华人民共和国交通部. JTG D80-2006. 公路交通安全设施设计规范. 北京: 人民交通出版社, 2004-07-10
- [23] TNO. Theory Manual. TNO, 2003
- [24] 钟志华. 汽车碰撞安全技术. 人民交通出版社, 2003
- [25] 黄红武, 莫劲翔, 杨济匡. 有限元计算在护栏设计和乘员保护中的应用. 计算机仿真, 2003, 20 (11): 150-154
- [26] 黄红武, 莫劲翔, 杨济匡等. 影响护栏防护性能的相关因素研究. 湖南大学学报, 2004, 31 (2): 45-48
- [27] 中华人民共和国交通部. JTG/T D81 2006. 公路交通安全设施设计细则. 北京: 人民交通出版社, 2006-07-10
- [28] 薛量, 姜正旭, 林忠钦. 汽车碰撞仿真中的连接失效模拟. 机械科学与技术. 2000, 19 (2)
- [29] 黄红武. 轿车与高速公路护栏碰撞事故分析及仿真研究: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学车辆工程, 2003
- [30] 中华人民共和国交通部. JTG/T F83-01-2004. 高速公路护栏安全性能评价标准. 北京: 人民交通出版社, 2004-12-14
- [31] 周 炜, 张天侠, 乔希永等. 汽车与不同形式高速公路护栏碰撞的试验研究. 公路交通科技, 2006, 23 (7): 137-141
- [32] 舒 翔, 张晓晴, 黄小清等. 高速公路护栏系统的有限元优化分析. 公路交通科技, 2006, 23 (5): 121-125
- [33] 姚启明, 俞卫春, 靳欣华. 汽车与防撞护栏的碰撞运动研究. 交通与运输, 2005 (1): 94-96
- [34] H.S.Perera. Simulation of Vehicle Impacts into Concrete Safety Shaped Barriers. PhD Thesis, 1985
- [35] Atahan, AO. Finite element simulation of a strong-post W-Beam guardrail system. SIMUL-T SOC MOD SIM 78 (10). 2002, 587-599
- [36] 贾宏波, 黄金陵, 谷安涛等. 汽车车身碰撞建模影响因素的研究. 汽车技术, 1998. (1) : 12-15
- [37] 刘少源. 高速公路汽车与护栏碰撞的简化计算方法-柔性梁法. 公路交通科技, 1995, 6
- [38] Plaxico, CA, Patzner, GS, Ray, MH. Finite-element modeling of guardrail imber posts and the post-soil interaction. TRANSPORT RES REC (1647). 1998, 139-146
- [39] Lee, SM, Park, et al. An improvement study on guardrails. RAFFIC AND TRANSPORTATION STUDIES, VOLS 1 AND 2, PROCEEDINGS. 2002, 1156-1163
- [40] 黄柏, 张君媛. 应用MADYMO进行新型约束系统部件的开发. 第一届MADYMO中国用户大会论文集, 2005
- [41] 阎小平, 邱 欣, 索 智. 汽车冲击防撞护栏运动响应计算机仿真. 沈阳建筑工程学院

学报, 2002, 18 (2): 105-107

- [42] Ray, MH, Engstrand, et al . Improvements to the weak-post W-beam guardrail. TRANSPORT RES REC (1743) . 2001, 88-96
- [43] 申杰, 金先龙, 郭磊等. 基于MADYMO的乘员运动仿真再现研究. 第一届MADYMO中国用户大会论文集, 2005
- [44] Tilakasiri, A., Du Bois, P., Pitcher, E.J. A simulation of an automobile side impact with finite element dummies included in the analysis . Science and Engineering on Supercomputers, 1990
- [45] The Crash Analysis of a Passenger Vehicle Under Differing Frontal Crash Conditions [J].1993: SAE932910

致 谢

本文的研究工作自始至终是在我的导师乔维高教授悉心的指导、严格的要求、殷殷的督促和巨大的支持下完成的。乔教授作为一位治学严谨的老师，自身有十分繁重的教学、科研工作要做，尽管如此他也没有放松过对我的指导，而且总是竭尽全力为我解决困难，在鼓励我的同时也给我施加适当的压力，使我不敢对自己的学习、工作有丝毫的倦怠。我很庆幸自己能在这样一位治学严谨、为人谦和的老师的指导下度过自己的研究生生涯。从乔教授那里获取学术知识的同时，我还从他那里学到了很多做人的道理，这些将使我的一生受益。

除了导师之外，还有很多的同学和朋友也一直在关心和帮助我，为我解决了很多 MADYMO、CATIA 和 HyperMesh 应用技术上的问题，这为我此后的研究工作打下了良好的基础。我的同学徐学进、贾翠平以及师弟师妹们，在我遇到困难的时候，灰心沮丧的时候总是鼓励我，给我继续前进的勇气和力量，今天取得的成果与他们的帮助是分不开的。另外，我还要一并感谢所有给予我关心和帮助的同学和朋友们。

最后，我还要感谢我的家人，正是他们的理解和支持给了我无限的动力。

附 录

(攻读硕士学位期间发表的论文)

1. 乔维高, 周政权, 徐学进等. 气囊折叠方式对乘员损伤的影响. 武汉理工大学学报, (已录用)
2. 刘利华, 周政权, 乔维高. 汽车与护栏碰撞研究方法浅谈. 北京汽车, 2008, (1)