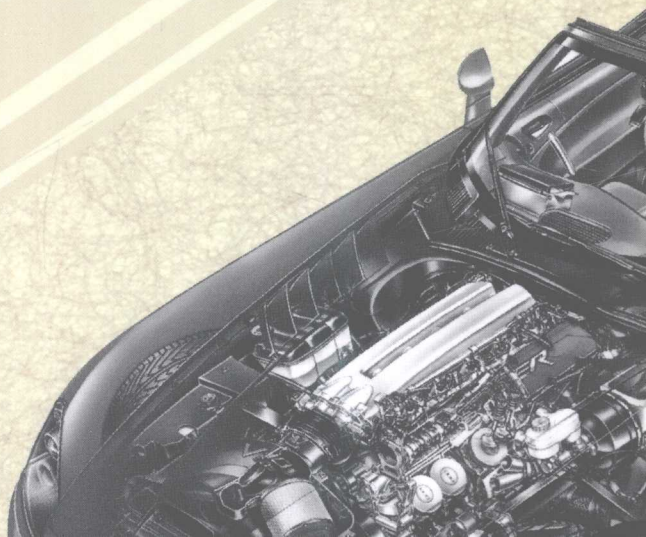


汽车正面碰撞组合拟合 设计理论及安全性研究

田 晟 著



科学出版社



汽车正面碰撞组合拟合设计理论 及安全性研究

田 晟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

近年来,我国汽车工业取得长足发展,汽车产量和保有量迅速增加。与此同时,由车辆设计、驾驶人员素质以及交通管理等因素导致的交通事故也大幅度增加,造成了巨额的财产损失和人员伤亡。因此,车辆的安全性设计问题得到政府、企业和社会的高度关注,尤其是对于尚在发展进程中的国产自主品牌轿车。本书以某自主品牌轿车为研究对象,采用实验、理论建模与仿真分析有机结合的方法,研究汽车正面碰撞的安全性设计问题,具有重要的理论价值和工程应用背景。

本书体系完整,理论充分联系实际,具有明显的汽车行业特色,可作为车辆工程、载运工具运用工程等专业研究生以及相关学科领域研究人员的参考用书,也可以供汽车企业和汽车研发部门中从事汽车碰撞安全设计的专家和工程师使用。

图书在版编目(CIP)数据

汽车正面碰撞组合拟合设计理论及安全性研究/田晟著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049831-1

I. ①汽… II. ①田… III. ①汽车试验-碰撞试验-研究
IV. ①U467.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 212418 号

责任编辑:姚庆爽 张海娜/责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016年8月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 220 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

汽车正面碰撞是一个复杂的过程，如何选择适当的方法表示汽车正面碰撞一直是国内外学者和工程技术人员研究的问题。本书结合作者近些年来教学和科研方面积累的成果，参考国内外最新科技文献，通过建立完整的正面碰撞模型深入研究胸部减速度与车体结构和乘员约束系统的关系，通过拟合波形的组合由关系式 $\ddot{x}_0 = A\sin(\omega t' + \phi) + \ddot{x}_v$ 得出优化后的胸部减速度和合理的加权伤害准则值 WIC，在此基础上形成理论体系指导实车的正面碰撞安全设计。

本书结合国内某自主品牌汽车的开发过程，基于 C-NCAP 对 100%FRB 正面碰撞进行理论推导与建模，比较计算不同拟合波形的胸部减速度，发现基于 TESW 的胸部减速度峰值和实际胸部减速度峰值吻合较好，而在车体结构设计时可以利用 EDTW。基于此，本书提出组合拟合的方法，采用现有的星级车 EDTW 包络线进行车体结构设计和能量载荷分布。首先在此基础上得到目标车的 EDTW，以该 EDTW 为基础通过能量法并且考虑三大控制原则设计出纵梁等主要吸能结构的截面尺寸和材料，接着仿真出目标车体减速度 $\ddot{x}_v$ ；其次采用现有星级车的 t^* 、 k 等的平均值作为目标车的 t^* 和 k ，利用仿真出的目标车体减速度 $\ddot{x}_v$ 结合目标车的 t^* 和 k 设计计算出目标车的 TESW 波形，在此基础上计算出基于 TESW 的目标车假人胸部减速度峰值，同时采用 MADYMO 软件对目标车乘员约束系统进行优化。

最后通过试验从车身结构碰撞性能和乘员约束系统性能两个方面评价目标车的碰撞安全性，验证正面碰撞组合拟合安全设计方法的可行性，试验也表明目标车正面碰撞得分有了明显的提高。

本书由华南理工大学的田晟编写，得到中华人民共和国科学技术部国家 863 计划重大项目“增程式纯电动轿车研发与产业化技术攻关”（项目批准号：2011AA11A218）、广东省省级科技计划项目“广州市新能源汽车产业技术路线图编制研究”（项目批准号：2015A080803001）和广州市科技计划项目“青少年交通安全科普活动开展——交通事故再现模型及数字化仿真”（项目批准号：2014KP000105）的资助，集中体现了这些项目的最新研究成果。

作 者

2016 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 研究思路和框架	7
1.4 小结	8
参考文献	9
第 2 章 动态显式非线性有限元理论	12
2.1 有限元概述	12
2.2 物质描述与非线性动态方程	13
2.3 大变形动力学有限元求解中的关键技术	17
2.4 中心差分法与时间步长控制	20
2.5 单元算法	23
2.6 接触碰撞的数值算法	27
2.7 小结	30
参考文献	30
第 3 章 正面碰撞建模与动力学方程	32
3.1 基于 ESW 的胸-车动力学方程	32
3.2 基于 TESW 的胸-车动力学方程	38
3.3 基于一般车体减速度的胸-车动力学方程	46
3.4 小结	48
参考文献	49
第 4 章 基于拟合波形的正面碰撞胸部减速度比较计算	50
4.1 基于 ESW、TESW 和 EDTW 的波形拟合计算	53
4.2 基于 ESW、TESW 和 EDTW 的胸部减速度比较	59
4.3 基于组合拟合的目标车正面碰撞安全初步设计	64
4.4 小结	68
参考文献	68
第 5 章 基于 EDTW 包络线的目标车体结构设计	70
5.1 轴向溃缩与失稳弯折的吸能模式的区别	72

5.2	基于能量分布的传力路径分配	74
5.3	管梁截面尺寸设计原则	79
5.4	兼顾轻量化要求的具体截面的尺寸设计	92
5.5	小结	101
	参考文献	102
第 6 章	目标车体结构正面碰撞仿真分析	104
6.1	纵梁具体方案设计	104
6.2	基于有限元方法的轿车正面碰撞仿真分析	107
6.3	小结	120
	参考文献	120
第 7 章	乘员约束系统建模仿真与优化	122
7.1	目标车假人胸部减速度的设计计算	122
7.2	乘员约束系统建模	126
7.3	乘员约束系统仿真优化	139
7.4	小结	154
	参考文献	154
第 8 章	目标车正面碰撞试验对比分析	156
8.1	目标车的碰撞安全性能试验及其结果总体概述	157
8.2	车身结构性能的试验验证	160
8.3	乘员约束系统性能的试验验证	167
8.4	小结	172
	参考文献	172

第 1 章 绪 论

近些年，我国汽车工业快速发展，汽车碰撞安全性越来越得到汽车厂商、汽车研发机构和交通部门的高度重视。国内外汽车“召回”制度也突显出汽车安全是世界汽车行业普遍面临和关注的问题。有限元理论、计算机仿真技术不断完善和丰富，碰撞试验技术不断创新，一些新的方法和手段可以应用到汽车安全设计中。美国、日本、欧洲等发达国家和地区不仅制定了新车上市必须强制执行的严格安全法规，并且由政府或权威机构以比国家法规更严格的方法实施 NCAP (new car assessment program)，进行碰撞安全性能测试、评分和划分星级，向社会公开评价结果。我国汽车行业也已与国际安全法规接轨，并已实施中国新车评价规程 C-NCAP (China NCAP)。结合我国汽车工业不同发展阶段的特点，开发研究符合我国国情的自主品牌汽车安全结构显得十分重要。

1.1 研究意义

汽车正面碰撞是一个复杂的过程，如何选择适当的方法表示汽车正面碰撞一直是国内外学者和工程技术人员研究的问题^[1,2]。在汽车发生正面碰撞时，车体首先减速，由于乘员系上安全带等，即存在乘员约束系统间隙 δ ，乘员并不是立即减速而是保持一定的惯性继续自由飞行，由此，乘员速度会大于车体速度，两者之间存在速度差和位移差。在飞行了一段时间 t^* 后，乘员消除了约束系统间隙 δ 后便受到约束系统的减速作用。车体和乘员速度先后减少到 0，然后车体开始反弹直到车体和乘员静止，图 1.1 为正面碰撞简化模型。

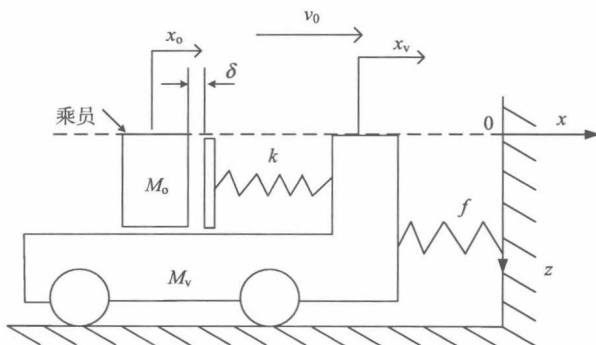


图 1.1 “乘员-车体”正面碰撞模型

在汽车正面碰撞设计开发的初级阶段, 需要寻找汽车发生碰撞时车体结构、乘员约束系统和乘员响应之间的关系。乘员胸部减速度 $\ddot{x}_0$ 经两次积分后得到胸部和车体的相对位移与胸部减速度构成近似的线性比例关系, 如图 1.2 所示, 也就是可以近似表示为线性弹簧的作用, k 就是通过线性回归之后得到的乘员约束刚度。这种作用是乘员约束系统(安全带、气囊、卷收器等)施加于乘员的, 事实上反映了乘员约束系统的综合作用。以线性弹簧刚度 k 来模拟乘员约束系统的作用是合理的且具有相应的物理意义。因此, 以胸部减速度 $\ddot{x}_0$ 为研究重点, 把车体减速度 $\ddot{x}_v$ 和车体前部结构变形量与乘员约束系统、乘员响应串联起来。尽管 Huang 假设乘员与车体减速度存在关系式 $\ddot{x}_0 = A \sin(\omega t' + \varphi) + \ddot{x}_v$ [2], 但没有从正面碰撞建模开始一步步建立胸-车耦合动力学方程, 通过详细求解齐次线性方程和非齐次线性方程推导出关系式 $\ddot{x}_0 = A \sin(\omega t' + \varphi) + \ddot{x}_v$, 也没有见到其他文献做过类似推导。本书作者对正面碰撞的前期研究工作, 第一次完善和填补了基于简化拟合波形的关系式 $\ddot{x}_0 = A \sin(\omega t' + \varphi) + \ddot{x}_v$ 的由来 [3, 4]。

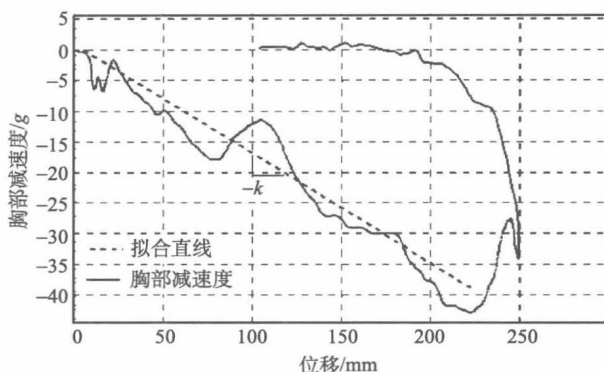


图 1.2 胸部减速度-胸部车体相对位移曲线

在正面碰撞安全设计中, 由于实际车体减速度波形的复杂性 [5], 在保留特征参数的前提下经常采取拟合波形的方式简化实际车体减速度来研究胸部减速度和指导乘员约束系统的初步设计。简化的拟合波形应该尽可能多地描述实际车体减速度的响应参数 [1-4], 如最大动态变形量、速度变化量, 达到最大动态变形量的时间、反弹速度等。如图 1.3 所示, 实际工程中经常采用的拟合波形包括等效方形波 (equivalent square wave, ESW)、尖顶等效方形波 (tipped equivalent square wave, TESW) 和等效双梯形波 (equivalent dual-trapezoids wave, EDTW)。作者通过基于拟合波形的正面碰撞胸部减速度比较计算得到基于 TESW 的胸部减速度值与实际获得的试验胸部减速度峰值十分接近 [6], 如图 1.4 所示。该比较结果非常重要, 对本书提出的组合拟合思路具有关键的指导作用。

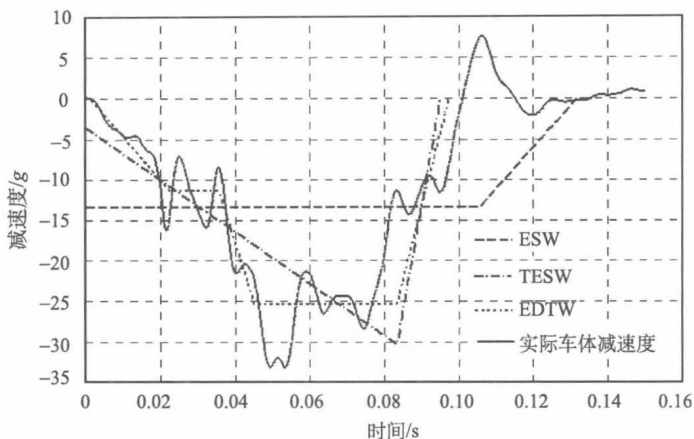
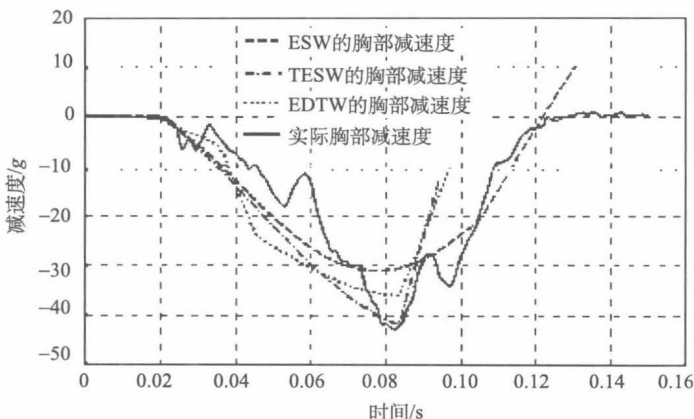
图 1.3 实际车体减速度 $\ddot{x}_v$ 与拟合波形

图 1.4 胸部减速度的比较

由此可见，通过建立完整的正面碰撞模型深入研究胸部减速度 $\ddot{x}_0$ 与车体结构和乘员约束系统的关系，通过拟合波形的组合由关系式 $\ddot{x}_0 = A \sin(\omega t' + \varphi) + \ddot{x}_v$ 得出优化后的胸部减速度和合理的加权伤害准则(weighted injury criterion, WIC) 值，在此基础上形成理论体系指导实车的正面碰撞安全设计，对整车正面碰撞安全得分具有重要的意义。

同时，在理论体系中希望把正面碰撞安全设计变“被动设计”为“主动设计”。目前国内自主品牌汽车的正面碰撞安全设计，往往都处在“被动”地位，充当着“亡羊补牢”的角色。一般都是发动机舱结构已经布置好了，车体结构也是模仿其他车型，然后利用仿真和试验不停地在局部修改车体结构，这显然会增加工程对标样车的批次和开发费用。我们可以在发动机舱结构还没有布置好之前或在发动机舱结构

布置的同时,通过该理论和方法,设计出具有较好碰撞潜能的车体结构尺寸,然后用仿真和试验进行优化和验证,尽量减少工程对标样车的批次和开发费用。

1.2 国内外研究现状

汽车正面碰撞安全性的研究主要集中在正面碰撞减速度拟合波形的分析、车体结构设计、乘员约束系统优化三个方面。

1.2.1 正面碰撞减速度拟合波形的分析

前面提到,实际中应用较多的拟合波形包括 ESW、TESW 和 EDTW。ESW 是指在一定的时间范围内把实际车体减速度 $\ddot{x}_v$ 简化成一个常数 ESW 表示的方形波,其主要特点是与实际车体减速度具有相同的最大碰撞变形量 C 。TESW 与实际车体减速度相比,不仅最大动态变形量 C 相等,速度为 0 的时刻 t_m 也相等。EDTW 的两个特征就是,第二台阶终点对应的时间点即车体速度为零的时间点;第一台阶终点对应的时间点即发动机开始碰撞的时间点。

ESW 在拟合实际车体减速度时具有简单、直观、计算方便等优势,在乘员约束系统匹配设计方面,尤其是概念开发设计阶段,采用 ESW 指导实车的开发,其中会运用到乘员胸部减速度峰值 $\ddot{x}_{o\max}$ 和乘员最大响应时间 t_g 两个重要公式^[2,3]:

$$\ddot{x}_{o\max} = -|\text{ESW}| \left[1 + \sqrt{1 + (\omega t^*)^2} \right] \quad (1.1)$$

$$t_g = t^* + \frac{\pi - \arctan \omega t^*}{\omega} \quad (1.2)$$

式中, $\omega = \sqrt{k}$, ω 为乘员约束系统角频率, k 为乘员约束系统刚度; t^* 为乘员自由飞行时间。

但 ESW 与 TESW 和 EDTW 相比,由 ESW 积分得到的速度曲线和位移曲线与实际的车体速度曲线和位移曲线吻合较差,基于 ESW 的胸部减速度峰值与实际获得的试验胸部减速度峰值相差也较大^[6],因此,在实际正面碰撞安全设计中的应用范围有限。

TESW 不仅具有简单、仿真程度高的优点,而且保证拟合积分出的车辆的位移和速度接近原始波形,重要的是基于 TESW 的胸部减速度峰值最靠近实际获得的试验胸部减速度峰值^[6]。TESW 可通过确定特征参数、判断车体的响应状况,从而分析车辆碰撞减速度变化对乘员伤害的影响。通过 TESW 可以研究在同一类型约束系统下乘员伤害值对不同 TESW 特征参数的敏感程度,以及对于同一 TESW 特征参数在不同约束系统对乘员伤害的响应^[7]。

EDTW 一直以来被认为是整车概念设计阶段的有效方法和手段。“前高后低”

的 EDTW 即抬高第一平台的 G_1 和降低第二平台的 G_2 有利于乘员的保护和胸部减速度峰值的减少^[6]。为此,可以通过改变 EDTW 波形中的特征参数,研究不同碰撞波形对乘员胸部减速度的影响^[8],例如,运用非劣分层遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithms, NSGAI) 优化出合理的正面碰撞波形^[9],合理控制碰撞波形和侵入量,可以有效降低乘员胸部减速度;同时有必要研究假人伤害值响应对 EDTW 波形特征参数变化的反应程度,将车辆约束系统的匹配纳入车辆的概念设计阶段,使设计人员在概念设计阶段即可根据不同的约束系统匹配方式进行相关参数的调整和控制^[10]。

1.2.2 车体结构设计

车体结构主要是纵梁、吸能盒等前部溃缩吸能结构的设计,该薄壁梁结构的吸能特性和变形模式将决定车体在撞击时的减速度或力的响应^[11, 12],对乘员保护有非常重要的作用。

一方面,车体结构需要尽可能多地吸收碰撞能量^[13],使传递到乘员舱上的力和减速度尽可能小,避免乘员受到致命的伤害;另一方面,需要控制各结构和部件的变形形式。其变形形式有折弯和轴向溃塌两种形式,薄壁纵梁轴向溃塌变形模式不但能获得持续、稳定的压溃力,其平均值也比弯曲变形模式高得多。图 1.5 (a) 和 (b) 表明,轴向溃塌变形模式吸收的能量远比折弯吸收的能量大。轴向溃塌模式变形可以最大限度地吸收车体动能^[14],这是理想的变形模式。为了获得稳定的纵梁结构吸能特性且提高纵梁吸收碰撞能量的能力,应避免纵梁产生失稳折弯模式^[15]。

为了实现轴向溃塌和保持一定的变形次序,管梁的最大弹性承载力要高于平均压溃力,而平均压溃力必须大于平均通过力。由此,在设计轿车吸能盒和纵梁时,必须使截面的最大弹性承载力大于吸能盒和纵梁各段结构的平均压溃力和平均通过力^[16, 17],才可能使吸能盒和纵梁各段结构在碰撞中以平均压溃力的目标设定值溃塌变形。

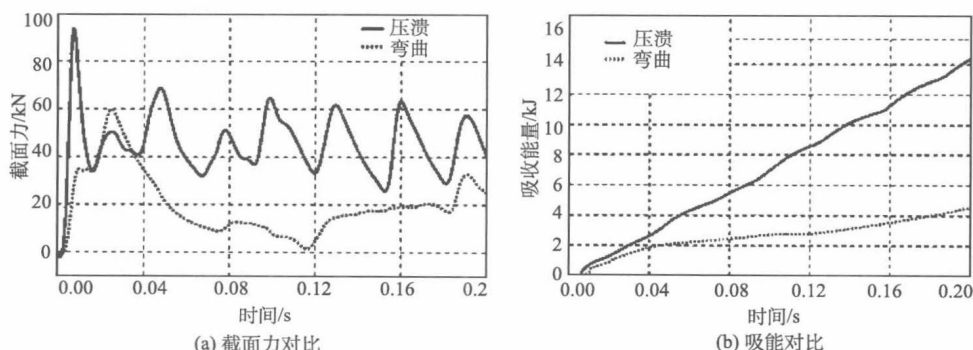


图 1.5 两种变形模式截面力和吸能对比

薄壁矩形截面梁具有较高的溃缩吸能比(吸收能量/溃缩长度),是当前轿车前纵梁的主流设计样式,因而得到广泛的研究^[11, 16, 18-20]。研究薄壁梁的范围涉及材料、不同的形状甚至几何参数、变形行为、吸能特性等^[21-25],并且已有学者推导出薄壁梁的轴向载荷和褶皱波长之间的关系等。

在前期的概念设计中,没有获得详细的有限元模型,因此无法对概念设计结构进行评判,吸能盒和纵梁的结构设计往往不符合要求,从而导致时间及资源的浪费,明确平均压溃力后,便可在概念设计阶段给出吸能盒和纵梁的平均承载情况,设计吸能盒和纵梁的截面尺寸和确定使用的材料,从而校核其吸能效率及其稳定性,减少潜在的设计缺陷。目前已有相关学者做了平均压溃力研究并总结出相关公式^[17],但这些研究或基于当时较差的试验技术条件或分析样本数量不足,拟合出的公式结果与试验偏差较大。

在车体结构具体尺寸设计过程中,经常采用多目标优化等设计方法。例如,采用近似模型方法与多目标遗传算法等相互结合,可以保证全局搜索能力以及对噪声的光顺能力,同时因为采用近似模型计算时间和效率也比过去快,并且有性能越来越高的计算机作为硬件保证^[26];将有限元技术、近似技术相结合,使用协同优化方法进行协同设计也是求解汽车抗撞性多目标设计优化问题的一种有效方法^[27, 28],使用该方法求解时不仅可以解决传统优化方法在求解高度非线性问题时所面临的困难,而且能够高效快速地找到多目标问题的 Pareto 解集;针对不同变形模式情况下出现较多的随机变量,可以采用鲁棒优化设计计算等^[29]。

1.2.3 乘员约束系统优化

乘员约束系统包括安全带、安全气囊、安全座椅、吸能式转向管柱与转向盘、软化的内饰件等。为了保护乘员舱的乘员需要避免乘员与舱内部件发生二次碰撞。研究表明,乘员伤害不仅与年龄、体重有关,还与身高甚至性别有关^[30]。正确使用乘员约束系统是保护乘员的一个有效方法^[31, 32],同时研究也证实,乘员约束系统的参数都存在一个合理的数值或范围,能显著减轻对乘员的伤害^[33]。

良好的乘员约束系统通过优化设计后能够与假人和车体合理匹配,但由于乘员约束系统不确定优化问题^[34, 35],其设计变量具有一定的不确定性,传统的优化设计由于忽略了不确定因素的影响,当设计变量产生波动时,往往会导致目标超出约束边界或目标函数对设计变量的波动极为敏感,从而使设计失效。近年来,不少新的优化方法被用在乘员约束系统优化设计中,李方义等提出基于区间数规划法研究乘员约束系统不确定优化问题^[34]。

当前,各种方便的有限元分析和多刚体动力学软件被用在乘员约束系统计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)分析中。通过有限元方法详细建立人体生物模型^[36],提出一些新的乘员约束系统仿真方法,对有限元模型进行修正

提高乘员损伤值响应面的精度^[37],例如,采用有限点方法模拟气囊的质量气体流,通过 CAE 仿真认为骨盆的反弹对颈部的弯曲力矩有着重要的影响^[38],同时借助人体有限元模型结合碰撞试验提出新的伤害评价指标,例如, Song 等认为胸部压缩量应该包括两个伤害评价指标即总变形量(combined deflection, CD)和肋骨骨折数(number of fractured ribs, NFR),并给出了计算方法^[39]。

1.3 研究思路和框架

随着有限元方法的出现和各种有限元仿真与多刚体动力学软件的方便使用,人们在研究汽车碰撞等问题时过分依赖软件的使用致使“工程化”的痕迹越来越明显。相反,对各种碰撞理论的深入越来越少,或者说理论与工程结合得不好。本书以 100% FRB (frontal rigid barrier) 正面碰撞为研究对象,试图建立胸-车耦合动力学方程,寻找一种车辆开发初期阶段满足正面碰撞法规要求的思路和方法。在车辆正面碰撞安全设计的初期,运用推导出的胸-车耦合动力学方程就可以匹配车身结构和乘员约束系统,同时就同一车身结构匹配不同的乘员约束系统进行对比分析,达到节省开发时间和开发成本的目的。图 1.6 为研究思路框架。

在自主品牌轿车正面碰撞安全设计的早期阶段,由于缺乏相应的试验和数据,参考现有对应的星级对标样车是 CAE 仿真分析的一个手段,但是如何利用这些星级车的数据和资料也是一个值得研究的问题。例如,在目标车开发前期,为了达到规定的胸部得分值,希望车体能够吸收更多的能量,同时计算承载件能够传递的截面力,得到一个合理的能量载荷分布方案。本书也希望在利用现有星级车数据和试验结果方面做一些探索。

国内外研究中提到可以运用简化的波形如 ESW、TESW 和 EDTW 描述复杂的车体减速度。如何把胸-车耦合动力学方程与 ESW、TESW 和 EDTW 三种简化波形联系起来,进一步得出胸部减速度与 ESW、TESW 和 EDTW 三种简化波形的关系,从而提出一些新的理论和思路指导实车的正面碰撞安全设计是一个值得研究的问题。基于此,本书在详细推导了基于 ESW、TESW、EDTW 和一般车体减速度的胸-车耦合动力学方程后,得到胸部减速度 $\ddot{x}_0$ 和车体减速度 $\ddot{x}_v$ 的关系是 $\ddot{x}_0 = A \sin(\omega t' + \varphi) + \ddot{x}_v$ 。在此基础上详细计算了基于 ESW、TESW、EDTW 的胸部减速度且与实际胸部减速度进行了比较,得出基于 TESW 的胸部减速度峰值与实际胸部减速度峰值比较接近。因此,本书提出组合拟合的思路进行正面碰撞安全设计。“拟合”是指两种简化拟合波形 TESW 和 EDTW,“组合”是把公式 $\ddot{x}_0 = A \sin(\omega t' + \varphi) + \ddot{x}_v$ 等式右边的 $\ddot{x}_v$ 基于 EDTW 设计,然后计算出 TESW 和等式右边的 $A \sin(\omega t' + \varphi)$,得到一个组合的胸部减速度。

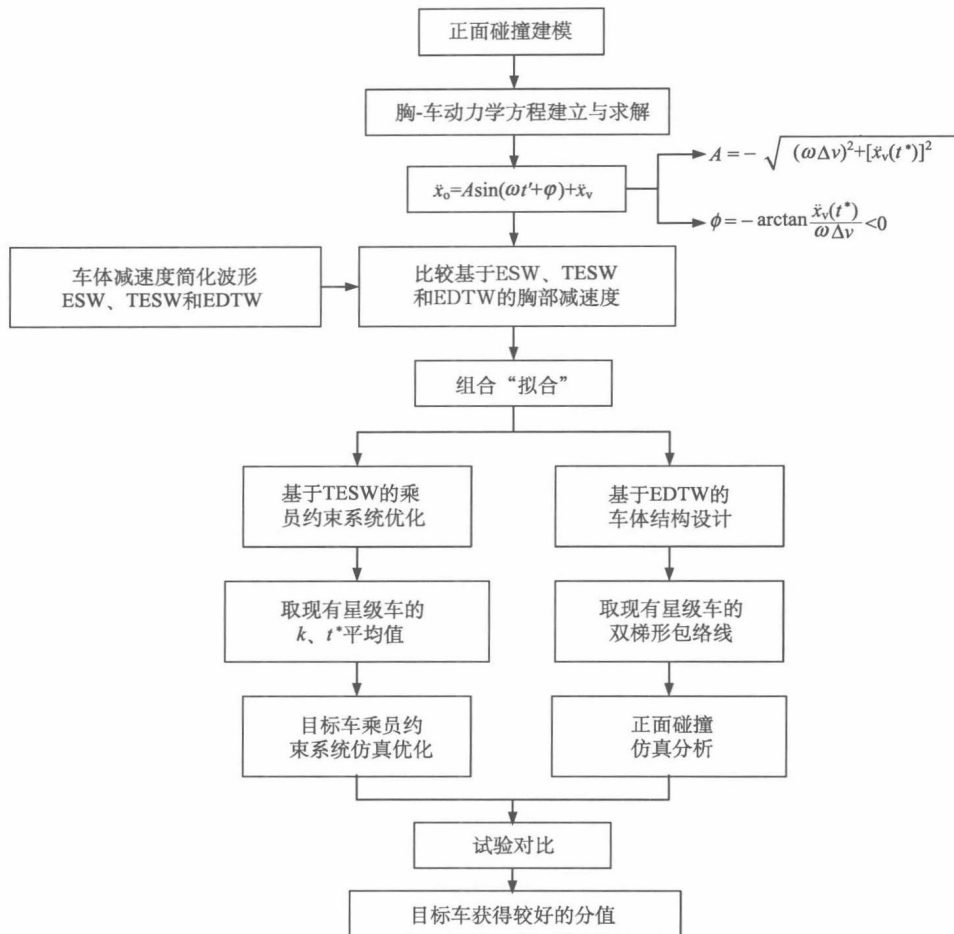


图 1.6 研究思路框架图

通常的正面碰撞安全设计确定了结构截面尺寸和材料之后,做一些局部强化,再用仿真和试验不停地比较修改。然而,本书提出基于星级车 EDTW 包络线和运用能量法去设计计算具有较好碰撞潜能的结构截面尺寸。在设计正面碰撞主要结构件时,综合考虑材料特性、轻量化要求、碰撞能量的吸收、最大碰撞力和平均压溃力等。在仿真基础上得到更好的结构方案,以组合计算出的胸部减速度为基础对整个乘员约束系统进行优化,最后进行实车碰撞试验验证,结合碰撞试验,对试验结果与仿真分析进行相应的讨论。

1.4 小 结

本章提出研究的意义,分析了自主品牌汽车安全开发过程中正面碰撞研究的

重要性;详细综述了正面碰撞理论、有限元仿真技术、车体结构和乘员约束系统优化设计的国内外研究现状,指出正面碰撞理论还有待进一步深化,避免出现过分依赖有限元软件而导致“工程化”的痕迹,正面碰撞理论需要与软件、优化设计较好地融合以指导实车的开发;简明阐述了研究思路和框架,后面的研究始终围绕该思路和框架展开。

参 考 文 献

- [1] 张金换, 杜汇良, 马春生. 汽车碰撞安全性设计. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [2] Huang M. Vehicle Crash Mechanics. New York: CRA Press, 2002.
- [3] Tian S. Dynamic equation research of occupant chest versus vehicle based on ESW for full frontal impact. 2011 International Conference on Future Computer Science and Application (FCSA 2011). Kota Kinabalu, Malaysia: International Industrial Electronic Center, 2011, II: 135-137.
- [4] 田晟, 黄向东, 杨蔓, 等. 基于TESW的正面碰撞建模理论与验证. 沈阳工业大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 153-158.
- [5] Lee E L, Hayes W C. Occupant accelerations and injury potential during an ambulance-to-curb impact. Forensic Science International, 2014, 237: 6-10.
- [6] 田晟, 黄向东, 杨蔓, 等. 基于拟合波型的正面碰撞胸部减速度比较计算. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 134-140.
- [7] 叶松奎. 基于尖顶等效方波的客车正面碰撞安全性结构优化. 客车技术与研究, 2014, (1): 7-10.
- [8] 李铁柱, 李光耀, 赵敏, 等. 基于乘员损伤的汽车正面碰撞减速度波形优化. 中国机械工程, 2013, 24(5): 690-695.
- [9] 李勇, 胡宁. 基于乘员胸部保护的正面碰撞波形多目标优化. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(1): 9-13.
- [10] 王斌, 包伟. 等效双阶梯形波法在正碰性能优化设计中的应用. 汽车科技, 2013, (6): 49-62.
- [11] Obradovic J, Boria S, Belingardi G. Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures. Composite Structures, 2012, 94(2): 423-430.
- [12] Ghannam M Y, Clark T, Reddy Y. A study of crash energy and severity in frontal vehicle-to-vehicle crash tests. SAE paper 2011-01-0541, 2011.
- [13] Jang H H, Lee H A, Yi S, et al. Cross-section design of the crash box to maximize energy absorption. SAE paper 2011-28-0110, 2011.
- [14] Trimiño L F, Cronin D S. Non-direct similitude technique applied to the dynamic axial impact of bonded crush tubes. International Journal of Impact Engineering, 2014, 64: 39-52.
- [15] Chen D H. The collapse mechanism of corrugated cross section beams subjected to three-point bending. Thin-Walled Structures, 2012, 51(2): 82-86.

-
- [16] Bai Z H, Guo H, Jiang B H, et al. A study on the mean crushing strength of hexagonal multicell thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 2014, 80: 38-45.
- [17] Najafi A, Rohani M R. Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, muticorner crush tubes. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(1): 1-12.
- [18] Acar E, Guler M A, Gerceker B, et al. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(1): 94-105.
- [19] Alavi N A, Parsapour M. An investigation on the energy absorption characteristics of multicell square tubes. *Thin-Walled Structures*, 2013, 68: 26-34.
- [20] Zhang X, Zhang H. Energy absorption of multicell stub columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 2013, 68: 156-163.
- [21] Zhang Z H, Liu S T, Tang Z L. Comparisons of honeycomb sandwich and foam-filled cylindrical columns under axial crushing loads. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(9): 1071-1079.
- [22] Song J, Chen Y, Lu G X. Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns. *Thin-Walled Structures*, 2012, 54: 65-71.
- [23] Yi J S, William A, Li Z B. A parametric study on extrusion geometry and blade quantity during axial cutting deformation of circular AA6061-T6 extrusions under impact and quasistatic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 49: 165-178.
- [24] Trimiño L F, Cronin D S. Non-direct similitude technique applied to the dynamic axial impact of bonded crush tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 64: 39-52.
- [25] Zhang X, Zhang H. Energy absorption limit of plates in thin-walled structures under compression. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 57(7): 81-98.
- [26] Marzbanrad J, Ebrahimi M R. Multi-objective optimization of aluminum hollow tubes for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(12): 1605-1615.
- [27] 王文伟, 李邦国, 陈潇凯. 基于协同优化方法的汽车正面抗撞性优化设计. *北京理工大学学报*, 2011, 31(9): 1046-1048.
- [28] Yin H F, Wen G L, Hou S J, et al. Multiobjective crashworthiness optimization of functionally lateral graded foam-filled tubes. *Materials & Design*, 2013, 44(2): 414-428.
- [29] Lönn D, Fyllingen Ø, Nilsson L. An approach to robust optimization of impact problems using random samples and meta-modelling. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(6): 723-734.
- [30] Augenstein J, Digges K, Bahouth G, et al. Occupant injuries in frontal crashes by age, weight and BMI. *Proceedings of the 22th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2011: 11-0390.
- [31] Weaver A A, Danelson K A, Armstrong E G, et al. Investigation of pulmonary contusion extent and its correlation to crash, occupant, and injury characteristics in motor vehicle crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 50: 223-233.

- [32] Lu H Z, Andreen M, Faust D, et al. Safety belt and occupant factors influencing thoracic & upper abdominal injuries in frontal crashes. SAE paper2011-01-1129, 2011.
- [33] 李勇, 胡宁. 汽车正面碰撞驾驶员胸部损伤影响因素分析. 汽车工程, 2011, 33(7): 598-602.
- [34] 李方义, 李光耀, 张佳洪, 等. 基于区间数规划的汽车乘员约束系统不确定优化. 汽车工程, 2011, 33(1): 6-10.
- [35] Yang Y, Liou W W, Sheng J, et al. Shock wave impact simulation of a vehicle occupant using fluid/structure/dynamics interactions. International Journal of Impact Engineering, 2013, 52: 11-22.
- [36] Yue N, Shin J, Untaroiu C D. Development and validation of an occupant lower limb finite element model. SAE paper 2011-01-1128, 2011.
- [37] 肖志, 叶映台, 李凡, 等. 汽车正面碰撞中驾驶员侧约束系统的可靠性优化. 汽车工程, 2011, 33(8): 676-679.
- [38] Iyama J, Obayashi K, Wakana G. Appling CAE to understand the causality of dummy neck injury readings. SAE paper 2011-01-1069, 2011.
- [39] Song E, Lecuyer E, Trosseille X. Development of injury criteria for frontal impact using a human body FE model. Proceedings of the 22th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2011: 11-0330.