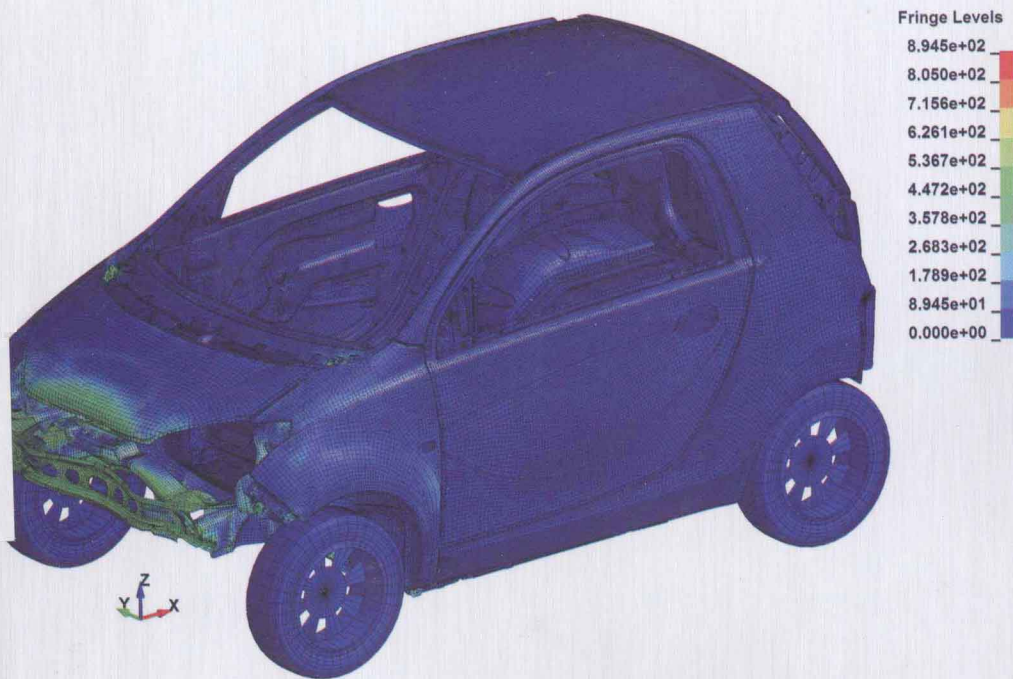


# 车辆结构 有限元分析

Finite Element Analysis of Vehicle Structures

柴山 刚宪约 焦学健 李丽君 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 车辆结构有限元分析

Finite Element Analysis of Vehicle Structures

柴 山 刚宪约 著  
焦学健 李丽君

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

车辆结构作为复杂的机械系统,其力学特性分析一直是车辆设计中的关键问题,有限元法为解决这一问题提供了一个强有力的工具。本书在总结车辆结构有限元分析应用成果的基础上,结合作者二十多年来应用有限元法解决车辆结构分析问题的实践与经验,针对车辆结构和工作特点,重点讨论和介绍了在车辆结构有限元建模技术、车辆结构有限元分析的边界条件与载荷、车辆结构的有限元动态分析、车辆碰撞安全性分析、车辆结构的非线性有限元分析和车辆噪声的有限元分析等方面的研究成果和工程实例。

本书可作为车辆行业 CAE 分析师及设计人员的参考资料,也可作为机械与车辆工程专业研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

车辆结构有限元分析/柴山等著. —北京:国防工业出版社,2013.12

ISBN 978-7-118-09188-5

I. ①车... II. ①柴... III. ①汽车—结构分析—有限元分析 IV. ①U463

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 283806 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售



\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 字数 279 千字

2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

有限元法是在 20 世纪中期发展起来的一种强有力的数值分析方法,它可以对工程实际中几何形状不规则、载荷和支撑情况复杂的各种结构进行变形计算、应力分析和动态特性分析,它的出现使复杂的工程分析问题迎刃而解。

车辆结构作为复杂的机械系统,其力学特性分析一直是车辆设计中的关键问题,有限元方法为解决这一问题提供了一个强有力的工具。国外从 70 年代起就开始了车辆结构有限元分析的研究与应用,1977 年长春汽车研究所的谷安涛、常国振在《汽车技术》上发表了“汽车车架设计计算的有限元方法”,揭开了中国汽车工业应用有限元法进行结构分析的序幕。

经过几十年的发展,车辆结构有限元分析已经从最早的应用梁单元建立车架的有限元模型,发展到目前应用板壳、实体、梁、杆等单元组合建立能全面、真实反映实际车辆结构几何形状、物理特性的有限元模型;从进行车架的结构静强度分析,发展到目前从车辆整车及零部件结构的成形、装配到各种运行工况的全面分析、仿真;从车辆结构的线性分析到目前包含材料非线性、几何非线性、状态非线性的乘用车碰撞过程仿真、大客车侧翻安全性仿真以及乘员安全性仿真等各种非线性动力学问题。可以说,有限元现在已经不仅是对车辆设计、工艺过程进行验证校核的重要手段,更是推动车辆产品技术创新的重要工具。

目前有限元法无论是数学基础还是计算方法都已经很成熟了,各种应用软件也已广泛地应用于各个行业和领域,与此相对应的,有限元法的专著、论文和教材以及各种软件的使用指南、操作手册也是应有尽有。有鉴于此,本书既不去具体讲述有限元的理论与算法,也不针对某一软件介绍具体的软件应用与操作,而是在总结车辆结构有限元分析应用成果的基础上,结合作者二十多年来应用有限元法解决车辆结构分析问题的实践与经验,针对车辆结构和工作特点,重点讨论和介绍了在车辆结构有限元建模技术、边界条件与载荷、车辆结构的有限元动态分析、车辆碰撞安全性分析、车辆结构的非线性有限元分析和车辆噪声的有限元分析等方面的研究成果和工程实例。

本书第1章、第2章和第6章由柴山执笔,第3章和第4章由刚宪约执笔,第5章由焦学健执笔,第7章由李丽君执笔,王友刚、王孟、张帆、牛恩拂、张强、胡宝洋、葛云飞、林海、丁兆磊、崔海伟、董银飞、郭明等研究生也参与了本书内容的研究与写作工作。

本书可作为车辆行业CAE分析师及设计人员的参考资料,也可作为机械与车辆工程专业研究生的教学参考书。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 有限元法概述 .....	1
1.2 车辆结构有限元分析的特点 .....	4
1.2.1 车辆结构有限元模型的特点 .....	4
1.2.2 车辆结构有限元分析的边界条件 .....	6
1.2.3 车辆结构有限元分析的载荷 .....	7
1.3 车辆结构有限元分析的内容 .....	8
第 2 章 车辆结构有限元建模技术 .....	11
2.1 车辆常用连接方式的自由度耦合方法 .....	11
2.1.1 焊接的自由度耦合 .....	11
2.1.2 铰接连接的自由度耦合 .....	13
2.1.3 加强板的自由度耦合 .....	16
2.2 基于位移协调条件的多点自由度约束方程方法 .....	16
2.2.1 不同连接方式的位移协调条件 .....	16
2.2.2 基于位移协调条件的多点自由度约束方程方法 .....	18
2.2.3 目标点及相关单元的确定 .....	19
2.2.4 基于形函数的目标点位移自由度 .....	20
2.2.5 单元局部坐标系下源点与目标点的自由度耦合方程 .....	22
2.2.6 整体坐标系源点与目标点的自由度耦合方程 .....	24
2.2.7 实例验证 .....	24
2.3 三维实体单元与板壳单元的组合建模方法 .....	28
2.3.1 三维实体单元与板壳单元的组合建模概述 .....	28
2.3.2 基于约束方程的实体单元与板壳单元组合建模方法 .....	30
2.3.3 实体单元与板壳单元的组合单元 .....	34
2.4 车架结构参数化建模 .....	39
2.4.1 参数化设计与建模 .....	39
2.4.2 载货车车架参数化设计 .....	41

2.4.3	载货车车架参数化建模系统 .....	43
<b>第3章</b>	<b>边界条件与载荷 .....</b>	<b>50</b>
3.1	钢板弹簧悬架的有限元模型 .....	50
3.1.1	钢板弹簧悬架模型的基本要求 .....	50
3.1.2	常用的几种钢板弹簧悬架有限元模型 .....	52
3.1.3	钢板弹簧悬架的有限元模型小结 .....	60
3.2	油气弹簧悬架的有限元模型 .....	61
3.2.1	油气弹簧悬架的力学特点 .....	61
3.2.2	基于优化方法的等轴荷算法 .....	61
3.2.3	油气弹簧悬架的载荷等效与辅助约束法 .....	68
3.3	基于位移法的轮胎载荷计算方法 .....	81
3.3.1	弯曲工况轮胎载荷计算 .....	81
3.3.2	扭转工况轮胎载荷计算 .....	83
3.3.3	起动/制动工况轮胎载荷计算 .....	84
3.3.4	转弯工况轮胎载荷计算 .....	84
3.3.5	数值算例 .....	85
3.4	制动工况下载货汽车车架垂直载荷计算方法 .....	86
3.4.1	模型假设与纵梁分布载荷模式 .....	87
3.4.2	不同制动强度的车架纵梁载荷模型 .....	89
3.4.3	制动工况车架纵梁载荷的求解算法 .....	93
3.4.4	算例 .....	93
3.5	整体式车桥有限元分析的位移边界模型 .....	94
3.5.1	轴头直接约束法 .....	95
3.5.2	辅助支承法 .....	99
3.5.3	RBE3 约束法 .....	100
3.5.4	主要结论 .....	101
<b>第4章</b>	<b>车辆结构的有限元动态分析 .....</b>	<b>102</b>
4.1	车辆模态分析 .....	102
4.1.1	模态分析基本理论 .....	102
4.1.2	车辆模态分析实例 .....	104
4.2	车辆结构的谐响应分析 .....	108
4.2.1	谐响应分析的计算方法 .....	109
4.2.2	发动机不平衡激励下的谐响应分析实例 .....	110
4.3	悬架刚度和阻尼对载货车振动特性的影响 .....	112

4.3.1	弯曲工况	115
4.3.2	扭转工况	117
4.4	运动激励下结构动态响应分析的模态叠加法	118
4.4.1	传统的转换方法——自由边界法	119
4.4.2	一种新的运动激励转换方法——固定边界法	122
4.4.3	算例一:平面应力薄板的频率响应分析	125
4.4.4	算例二:轻型货车车架在路面不平度激励下的频率响应	128
4.4.5	算例三:轻型货车车架过减速带时的瞬态响应	129
4.4.6	主要结论	132
<b>第5章</b>	<b>车辆碰撞安全性分析</b>	<b>133</b>
5.1	动态显式有限元方法	133
5.1.1	动态显式有限元求解控制方程	133
5.1.2	空间有限元离散	135
5.1.3	显式中心差分算法	136
5.1.4	时间步长的控制	138
5.1.5	沙漏控制	138
5.1.6	接触算法	140
5.2	国内外汽车碰撞安全法规及标准简介	141
5.2.1	美国 NHTSA	142
5.2.2	美国 IIHS	143
5.2.3	日本 J-NCAP	144
5.2.4	欧洲 E-NCAP	144
5.2.5	中国 C-NCAP	145
5.3	电动汽车碰撞安全仿真分析	145
5.3.1	几何模型简化	145
5.3.2	网格划分	146
5.3.3	材料模型的建立	147
5.3.4	悬架模型的建立	147
5.3.5	轮胎模型的建立	148
5.3.6	整车有限元模型的建立	149
5.3.7	碰撞仿真结果分析	149
5.4	大客车翻滚安全性有限元仿真	154
5.4.1	客车侧翻有限元模型的建立	155
5.4.2	基于刚体车身假设的碰撞初始条件分析	158
5.4.3	客车侧翻试验特点及主要影响因素	160



5.4.4	客车侧翻算例 .....	161
5.5	座椅—乘员安全性有限元仿真 .....	166
5.5.1	座椅抗前倾性能要求 .....	167
5.5.2	边界条件及假人 .....	168
5.5.3	计算实例 .....	170
<b>第 6 章</b>	<b>车辆结构的非线性有限元分析 .....</b>	<b>177</b>
6.1	车辆结构的弹塑性分析 .....	177
6.1.1	弹塑性分析概述 .....	177
6.1.2	挂车车轴弹塑性分析 .....	182
6.2	车辆结构的接触非线性分析 .....	185
6.2.1	接触非线性分析概述 .....	185
6.2.2	铆接车架有限元建模 .....	190
6.2.3	铆接车架强度分析 .....	193
6.3	校车座椅及固定件后倾非线性分析 .....	196
6.3.1	校车座椅后倾(静态加载)试验技术条件 .....	197
6.3.2	座椅后倾有限元模型 .....	198
6.3.3	显式求解结果分析 .....	201
6.4	拖拉机驾驶室安全性试验的非线性有限元仿真 .....	204
6.4.1	弹塑性材料特性 .....	205
6.4.2	仿真过程及结果 .....	206
<b>第 7 章</b>	<b>车辆噪声的有限元分析 .....</b>	<b>214</b>
7.1	车辆噪声概述 .....	214
7.1.1	车辆噪声的分类 .....	214
7.1.2	噪声的数值分析方法 .....	215
7.2	车辆乘坐室声学模态分析 .....	216
7.2.1	车辆乘坐室声学模态分析的意义 .....	216
7.2.2	声学模态分析基本原理 .....	216
7.2.3	车室声腔模态分析实例 .....	218
7.3	基于声固耦合的车辆声场频率响应分析 .....	219
7.3.1	声固耦合方法的选择 .....	220
7.3.2	声固强耦合 .....	221
7.3.3	声固弱耦合 .....	221

7.3.4 驾驶室声固耦合频率响应分析实例 .....	222
7.4 消声器的传声损失分析 .....	225
7.4.1 传递导纳理论 .....	226
7.4.2 消声器传声损失计算实例 .....	227
<b>参考文献</b> .....	<b>229</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 有限元法概述

有限元法是一种数值计算方法,它的基本思想是:将连续的求解域离散为由有限多个彼此只在节点处相互连接的单元组成的组合体,用在每个单元内假设的近似函数来分片地表示求解域上待求的未知场函数,近似函数通常由未知场函数及其导数在单元各节点的插值函数来表达,从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。

1943年,数学家 R·库朗(R. Courant)第一次尝试应用定义在三角形区域上的分片连续函数的最小位能原理求解 St. Venant 扭转问题<sup>[1]</sup>,开始了应用有限元法进行连续结构分析的研究。20世纪50年代因航空工业的需要,美国波音公司的专家首次采用三节点三角形单元进行飞机机翼的应力分析<sup>[2]</sup>,基于弹性力学方程导出了三角形单元的特性,并第一次介绍了今天人们熟知的确定单元特性的直接刚度法。以上研究工作探讨了早期有限元法的理论,促成了有限元法的诞生。同时,联邦德国斯图加特大学的 J. H. Argyris 教授在能量原理与矩阵分析方面为有限元法的理论基础做出了杰出的贡献<sup>[3]</sup>。1960年美国的 R. W. Clough 教授在题为《平面应力分析的有限元法》的论文<sup>[4]</sup>中首先使用“有限元法(Finite Element Method)”一词,此后这一名称得到广泛承认。20世纪60年代有限元法发展迅速,国内外学者对有限元法的数学基础进行了深入的研究,搞清了有限元法与变分法之间的关系,完成了基于变分原理的有限元法基础理论及公式推导,解决了线性问题有限元法的数学原理,奠定了有限元法的理论基础并进而发展了各种各样的单元模式,扩大了有限单元法的应用范围。另一方面,研究人员在固体力学领域内也通过能量原理、加权余量法以及伽辽金方法顺利地完成了有限单元法的公式推导。1967年 Ziellkiewicz 和 Cheung 等人出版了第一本论述有限元方法的专著,进一步推动了有限元法的发展<sup>[5]</sup>。

20世纪70年代以来,有限元法进一步得到蓬勃发展,由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题,由静力平衡问题扩展到动力问题、稳定性问题和波动问题,由线性问题扩展到非线性问题,分析的对象从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料等,由结构分析扩展到结构优化乃至设计自动化,从固体力学扩展到流体力学、传热学、电磁学等领域<sup>[6]</sup>。由于有限元法具有极强的适应性(对复杂的拓扑结构、边界条件、载荷工况以及材料特性而言)、通用性

(对各类力学问题及位势问题在计算格式及软件方面而言)以及良好的计算效率和精度,已成为复杂工程结构力学分析最重要的工具。

在开展有限元理论与算法研究的同时,国际上早在 20 世纪 50 年代末、60 年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析软件。经过几十年的发展,目前有限元软件已从固体力学、流体力学的各种线性与非线性静力学、动力学分析,发展到力学、热力学、电磁学等多物理场的耦合分析;从单纯的结构分析发展到与 CAD 软件的集成化,具有图形化前后处理功能。由于众多功能强大的有限元软件的出现,真正使有限元法从科学家的理论研究成果转化为解决工程技术问题的强有力工具。目前应用最广的有限元软件有 Ansys、Nastran、Abaqus、Adina、LS - Dya 等。

Ansys 软件是由美国 ANSYS 公司于 20 世纪 70 年代初开始开发的融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它能与多数 CAD 软件接口,实现数据的共享和交换,是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。Ansys 软件可以进行结构的各种线性与非线性静力学、动力学分析;可以进行结构包括传导、对流和辐射三种热传导形式的稳态和瞬态、线性和非线性热力学分析;可以进行稳态或瞬态的流体动力学分析;可以进行电磁场分析和压电分析,还可以进行声场分析。Ansys 软件的特色和优势是耦合场分析。

Nastran 软件是由美国国家宇航局(NASA)在 20 世纪 60 年代中期委托 MSC 公司和贝尔航空系统公司开发,发展至今已有多个版本,其系统规模大、功能强。在 70 年代初期,MSC 公司对原始的 Nastran 进行改进和完善后推出了 MSC. Nastran。作为世界最流行的大型通用结构有限元分析软件之一,MSC. Nastran 的分析功能覆盖了绝大多数工程应用领域,并为用户提供了方便的模块化功能选项。主要分析功能模块有基本分析模块(含静力、模态、屈曲、热应力、流固耦合及数据库管理等)、动力学分析模块、热传导模块、非线性分析模块、设计灵敏度分析及优化模块、超单元分析模块、气动弹性分析模块、DMAP 用户开发工具模块及高级对称分析模块。结构动力学分析和非线性分析是 MSC. Nastran 的主要特色。结构动力学分析包括正则模态及复特征值分析、频率及瞬态响应分析、(噪)声学分析、随机响应分析、响应谱及冲击谱分析、动力灵敏度分析等;非线性分析包括几何非线性分析、材料非线性分析、非线性边界(接触问题)分析,以及非线性瞬态分析。除几何、材料、边界非线性外,MSC. Nastran 还提供了具有非线性属性的各类分析单元,如非线性阻尼、弹簧、接触单元等。

Abaqus 是一套先进的通用有限元系统,也是功能最强的有限元软件之一,可以分析复杂的固体力学和结构力学系统。Abaqus 有两个主要分析模块: Abaqus/Standard(通用程序)提供了通用的分析能力,如应力和变形、热交换、质量传递等;Abaqus/Explicit(显式积分)采用显示积分求解方法,适合于分析短暂、瞬时的动态问题。Abaqus 软件在求解材料非线性、几何非线性和状态非线性

性问题时具有非常明显的优势。另外,由于 Abaqus/Standard 和 Abaqus/Explicit 同为 ABAQUS 公司的产品,它们之间的数据传递非常方便,可以很容易地考虑预紧力等静力和动力相结合的计算情况。

Adina 出现于 1975 年,在 K. J. Bathe 博士的带领下,其研究小组共同开发出 Adina 有限元分析软件。在 1984 年以前,Adina 是全球最流行的有限元分析程序,一方面由于其强大功能,被工程界、科学研究、教育等众多用户广泛应用;另一方面在 1986 年以前,Adina 软件的源代码是公开的,即著名的 Adina81 版本和 Adina84 版本的 fortran 源程序,后期很多有限元软件都是根据这个源程序所编写的。1986 年,K. J. Bathe 博士在美国马萨诸塞州 Watertown 成立 ADINA R&D 公司,开始其商业化发展的历程。经过 30 余年的持续发展,Adina 已经成为近年来发展最快的有限元软件及最重要的非线性求解软件之一,在求解结构、流体、流体与结构耦合等复杂非线性问题方面具有特色。

LS - Dyna 是一个通用显式非线性动力分析有限元软件,最初是 1976 年在美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Lab.) 由 J. O. Hallquist 主持开发完成的,主要目的是为核武器的弹头设计提供分析工具,后经多次扩充和改进,计算功能更为强大。此软件受到美国能源部的大力资助以及世界十余家著名数值模拟软件公司(如 Ansys, MSC. Software、ETA 等)的加盟,极大地加强了其前后处理能力和通用性,在全世界范围内得到了广泛的使用,是目前应用最广的求解各种三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等接触非线性、冲击载荷非线性和材料非线性问题的显式动力分析有限元软件。

有限元软件还有很多,不再一一介绍,表 1.1.1、表 1.1.2 简略地介绍了一些近年来国内外著名的分析软件,供读者参考。

表 1.1.1 有限元软件的单元配置

编号	软件名称	三维杆单元	三维梁单元	平面应力单元	平面应变单元	薄膜单元	剪切板单元	弯曲板单元	薄壳单元	厚壳单元	旋转壳单元	轴对称体单元	三维体单元
1	Ansys	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
		G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
		M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
2	Adina	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
		G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
		M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
3	MARC	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
		G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
		M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M

(续)

编号	软件名称	三维杆单元	三维梁单元	平面应力单元	平面应变单元	薄膜单元	剪切板单元	弯曲板单元	薄壳单元	厚壳单元	旋转壳单元	轴对称体单元	三维体单元
4	Nastran	L G	L G M	L G M	L G M	L	L G	L G	L G	L G M	L	L	L G M
5	Abaqus	L G M	L G M	L G M	L G M			L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M
6	LS-Dyna	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M
7	HAJIF 系列	L G M	L G M	L G M	L G M	L G M	L M	L G M	L G M	L G M	L	L	L G M

注:L—线性;G—几何非线性;M—材料非线性

表 1.1.2 有限元软件的应用领域

编号	软件名称	线性静力分析	固有振动分析	屈曲分析	非线性静力分析	后屈曲分析	非线性接触分析	非线性振动分析	非线性瞬态响应分析	波的传播分析	流体与结构耦合分析	热与机械耦合分析	粘塑性分析	动力粘塑性分析
1	Ansys	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		☆	☆		
2	Adina	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
3	Marc	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		☆	☆	☆	☆
4	Nastran	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
5	Abaqus	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
6	LS-Dyna	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
7	HAJIF 系列	☆	☆	☆	☆			☆	☆					

## 1.2 车辆结构有限元分析的特点

### 1.2.1 车辆结构有限元模型的特点

车辆一般由车架、车身(承载式车身为车架、车身一体式结构)、发动机、传

动系、转向系、行驶系、制动系等组成,在以上系统中,车架(或承载式车身)是车辆的主要承载结构,也是车辆结构有限元分析的主要对象。

大多数商用车和特种车都具有作为整车骨架的车架,其作用是支承连接汽车的各零部件,并承受来自车内外的各种载荷。车架是整个汽车的基体,汽车的绝大多数部件和总成都是通过车架来固定其位置的。目前,汽车车架的结构型式基本上有两种:边梁式车架和中梁式车架(或称脊骨式车架),其中尤以边梁式车架应用更广。

边梁式车架由两根位于两边的纵梁和若干根横梁组成,用铆接法或焊接法将纵梁和横梁连接成坚固的刚性结构。纵梁通常用钢板冲压而成,断面一般为槽形,也有的做成Z字形或箱形。根据汽车型式不同和结构布置的要求,纵梁可以在水平面内或纵向平面内做成弯曲形状的等截面或变截面梁。横梁不仅用来保证车架的扭转刚度和承受纵向载荷,而且还用以支承汽车上主要部件。通常货车约有五至七根横梁。边框式车架的结构特点是便于安装车身(包括驾驶室、车厢及一些特种设备)和布置其他总成,有利于改装变型车和发展多品种汽车,因此被广泛采用在货车和大多数特种汽车上。中梁式车架只有一根位于中央贯穿前后的纵梁,因此也称为脊骨式车架。中梁的断面可做成管形或箱形。这种车架有较大的扭转刚度并使车轮有较大的运动空间,因此被采用在某些轿车和货车上<sup>[7]</sup>。

承载式车身具有质量小、高度低,装配容易,高速行驶稳定性好等优点,目前大部分轿车采用这种车身结构。承载式车身没有车架,而车身兼起车架的作用,将所有部件固定在车身上,所有的力也由车身来承受。承载式车身通过不同强度钢材的运用,发生碰撞时通过吸能、溃缩等方式保证车内人员安全,无论是在安全性还是在稳定性方面都有很大的提高。承载式车身如图 1.2.1 所示,非承载式车身如图 1.2.2 所示。

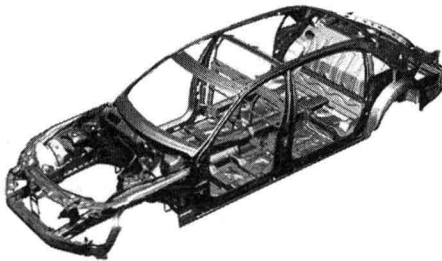


图 1.2.1 承载式车身结构

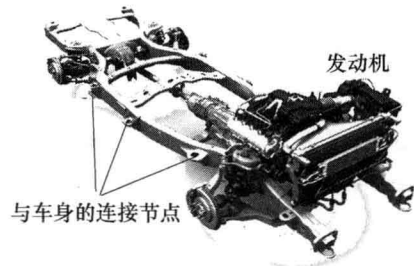


图 1.2.2 非承载式车身结构

载货车、特种车、客车等的车架一般是由钢板折弯成的槽钢通过铆接或焊接而组成的刚性结构,大客车的承载式车身一般是直接用型钢焊接而组成的空间刚架,而乘用车的承载式车身则是由薄钢板冲压的骨架、覆盖件经焊接而组成的

既能承受载荷又能为乘员提供乘坐空间的封闭式结构。车辆结构的这些特点,决定了车辆结构有限元模型具有以下特点:

(1) 车辆结构有限元分析模型一般是以板壳单元为主,少量实体单元为辅的组合模型结构。由于车架纵梁翼板的宽度一般是纵梁钢板厚度的 10 倍以上,型钢宽度一般也是钢板厚度的 10 倍以上,至于覆盖件其面内最小尺寸与钢板厚度之比就更大了,因此对于这些结构进行有限元分析时选用板壳单元,既可以减少单元数量,又能准确地建立各种复杂曲面形状的有限元模型,同时还能得到高精度的计算结果。在车辆结构中,除以上承载结构外,还有一些安装支座之类的铸造、锻造零件,这些零件往往三个方向尺寸相差不大,不能应用板壳单元建立其有限元模型,而要应用三维实体单元建立其有限元模型,这样就形成了以板壳单元为主,少量实体单元为辅的组合模型。

(2) 车辆结构的连接方式主要以焊接和铆接为主,体现在有限元模型中必须用不同的方式进行模拟。焊接结构可以运用布尔操作,将不同结构在焊接部位进行刚性连接,保证有限元模型结构连续性;铆接结构通常是用约束方程法和接触非线性分析进行模拟。

(3) 由于车辆结构正常工作时满足强度、刚度和稳定性条件,其工作应力一般应在弹性范围,除某些减振的弹性元件外,变形也是以小变形为主,因此实际工程中车辆结构的有限元分析主要是线弹性分析。车辆结构的某些非线性问题(例如铆接连接的状态非线性、钢板弹簧主副簧悬架的弹簧刚度分段线性、空气弹簧的刚度非线性等)往往是局部非线性,这些都属于弱非线性分析,可以采用近似线性的方法进行分析。当然若进行车辆零部件的冲压成型分析、车辆的碰撞安全性分析,则必须进行包括材料非线性、几何非线性和状态非线性的非线性分析。

### 1.2.2 车辆结构有限元分析的边界条件

按照固体力学的观点,结构的边界条件分为力的边界条件与位移边界条件两种。关于力的边界条件将在下节中进行讨论,本节所说的边界条件是指车辆结构的位移边界条件。车辆结构分析一般可分为三种情况:一种分析车辆悬架以上结构,此时边界条件由悬架的边界条件决定;一种分析车桥以上结构,边界条件由车桥的边界条件决定;一种分析包含轮胎、悬架、车架和车身的整车,此时的边界条件就是路面的边界条件。

车辆悬架按与车桥的连接方式不同,可分为独立悬架与非独立悬架两种;按弹簧形式又可分为钢板弹簧悬架、油气(空气)弹簧悬架、螺旋弹簧悬架。不同形式的悬架有不同的特点,其边界条件也不尽相同。例如,钢板弹簧悬架与车架、车桥有两种连接方式:一种是钢板弹簧中点与车桥相连,两端与车架相连的单桥平衡悬架,其与车架相连的两点的铅垂约束反力是相等的,即车架施加给钢



板弹簧的两个约束反力对于钢板弹簧与车桥连接点的力矩是平衡的;另一种是钢板弹簧中点与车架相连,两端分别与两个车桥相连的双桥平衡悬架,其与两个车桥相连的两点的铅垂约束反力是相等的,两个车桥施加给钢板弹簧的两个约束反力对于钢板弹簧与车架连接点的力矩是平衡的,即两个车桥的轴荷是相等的。再如通过并联方式相连的多个油气(空气)弹簧,其油(汽)缸压强是相同的,若油(汽)缸直径相同,则不管各油(汽)缸的位移大小,在准静态情况下,其支反力是相同的,其对车辆结构施加的实际上是一种等应力边界条件。车辆结构的静强度分析一般都要进行弯曲、扭转、转弯、制动这样几个不同工况的分析,与一般边界条件相同、载荷不同的多工况结构分析不一样的是在车辆结构分析的这几个工况,其边界条件也不相同,因此不能用一般的结构有限元模型相同、边界条件相同的结构多工况分析方法进行车辆结构的多工况静强度分析,而只能在不同的工况施加不同的边界条件分别进行分析。

在车辆结构的有限元模型中包括车桥时,有限元模型的边界条件就由车桥的边界条件所决定。车桥受到轮胎的约束,一方面轮胎约束了车桥的铅垂位移,另一方面,由于轮胎的侧偏刚度远小于车桥的弯曲刚度,轮胎无法约束车桥的弯曲,单侧轮胎对车桥的约束相当于铰支座约束。另外,轮胎的侧偏刚度也远小于车桥的轴向刚度,轮胎无法约束车桥的轴向位移。因此车桥的边界条件就是简支梁的边界条件。

在进行包含轮胎、悬架、车架和车身的整车有限元分析时,有限元模型的边界条件就是路面的边界条件。由于路面的不平,其位移边界条件可以表示为  $w = w(x)$ ,当车辆以一定速度运动时,其边界条件又可以表示为坐标、速度与时间的函数  $w = w(x, \dot{x}, t)$ ,且这种边界条件还是一种随机边界条件,无法用确定的数值进行描述,只能用统计的方法进行描述。

### 1.2.3 车辆结构有限元分析的载荷

车辆结构所受的载荷主要有以下几种。

(1) 重力载荷:重力载荷等于质量与重力加速度的乘积,竖直向下,一般情况下,车辆结构的质量不随时间变化,因而可以认为重力载荷是静载荷。在进行簧上结构的有限元分析时,质量主要由车辆结构自身的质量、发动机和传动系的质量、乘员质量、载质量以及油箱和燃油、电瓶等零部件的质量组成。若进行整车结构有限元分析时,除以上质量外还要包括车桥质量、悬架质量、轮胎质量。重力载荷是分布载荷,其具体的分布状态由各部分的质量分布决定。

(2) 惯性载荷:惯性载荷是车辆在非匀速直线运动时由于加速度所产生的动载荷,其大小等于质量与加速度的乘积,方向与加速度方向相反。与重力载荷相似,惯性载荷也是分布载荷,其具体的分布状态由各部分的质量分布决定。常见的具有惯性载荷的工况有①加速工况:车辆加速前进,加速度方向朝前,惯性