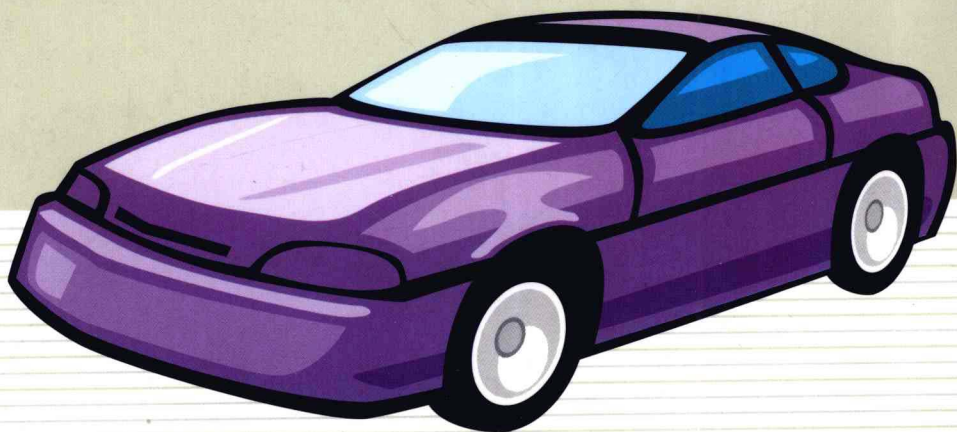


普通高等院校汽车工程类规划教材

汽车结构 有限元分析

主 编 谭继锦 张代胜
主 审 陈朝阳



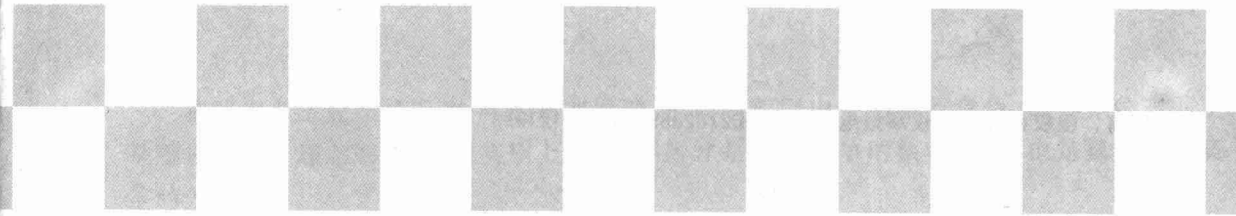
1-43

清华大学出版社



普通高等院校汽车工程类规划教材

48



汽车结构有限元分析

主 编 谭继锦 张代胜
主 审 陈朝阳

U461.1-43
T102

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了有限元法的基础理论和基本方法,介绍了单元分析以及结构分析有限元法的实现,阐述了汽车结构有限元分析的内容、流程及方法,论述了汽车结构模型的建立原则、模型验证方法及结构分析指南,讲述了汽车结构分析的各种实例。本书面向汽车工程,注重理论与实践。

全书共分9章,内容系统完整,以车辆工程等工科专业本科生与研究生为读者对象,亦可供汽车行业从事结构分析的工程技术人员参考。

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

图书在版编目(CIP)数据

汽车结构有限元分析/谭继锦,张代胜主编. —北京:清华大学出版社,2009.11

(普通高等院校汽车工程类规划教材)

ISBN 978-7-302-21097-9

I. 汽… II. ①谭… ②张… III. 汽车—结构力学—有限元法—高等学校—教材

IV. U461.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第169005号

责任编辑:庄红权

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

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

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:13.5

字 数:327千字

版 次:2009年11月第1版

印 次:2009年11月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:25.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:028925-01

前 言

我国汽车工业经过近 20 年的高速发展,正面临着国内外的激烈竞争,这种竞争表面上是质量和设计理念的竞争,但实质上,技术创新才是这种竞争的核心力量,也是赢得市场竞争的关键。

有限元分析方法作为汽车数字化设计的一项核心技术,不仅可以带来产品竞争力的提升,而且也为企业的自主创新带来了新的契机。随着以有限元法为代表的 CAE 技术越来越快地融入汽车整个设计流程,各企业在产品设计流程中明确规定了分析环节,规定没有分析的设计不能进入到下一个技术环节,从而真正做到基于分析的设计,实现产品设计的创新。目前有限元法正向着流程化、标准化、规模化、集成化方向发展,分析功能日益全面,应用范围不断扩大。

图书本身需要不断更新,以反映本领域的发展状况,适应汽车工程创新人才培养的教学需求。以有限元技术为代表的现代设计理论与方法已经对产品研发产生了巨大的影响,为了使读者能够学好、用好这一技术,本书比较系统地介绍了有限元基础理论,重点突出在单元分析与有限元法的实现过程上。本书以汽车结构为研究对象,系统阐述了汽车结构有限元分析流程、分析内容与分析实例,重点突出在结构建模方面。本书给出了汽车结构分析指南,为分析设计提供了思路和方法,指出了分析中应注意的问题,强调理论学习、程序运用与工程实践应紧密结合。

本书编写的指导思想与追求的目标是:力求既包含理论知识又具有工程指导意义;既可作为教材,又可作为设计分析的参考书。但是有限元分析的内容十分广泛,本书仍然在许多方面没有论述到,而只重点讨论了结构方面的问题。有限元法具有严密的力学理论基础和可靠的工程应用背景,已经形成了庞大的理论与应用体系,各种著作、教材、文章以及程序难以计数。为了尽量保证本书的系统完整及知识覆盖面,本书参考了大量文献资料,吸收了许多研究成果,有些资料直接索引自网络,在此对这些作者表示衷心感谢,参考文献可能会有所遗漏,在此也表示诚挚的歉意。

如何由传统的依赖于经验设计的简化分析方法过渡到以有限元分析为基础的优化方法,如何做好有限元分析,如何实现产品技术创新。回答这些问题首先要从观念上解决是先做还是先算的理念。有限元分析入门容易,学精很难,而准确分析并指导设计则更需要掌握一定的理论基础与实践经验。学好有限元分析,一半在理论,另一半在实践。建议有限元分析人员要掌握力学分析及有限元法的基本理论,结合所学专业,在利用程序进行分析计算时,要勤于思考、善于思考,对分析的每个环节、对处理的每个数据仔细核对,认真负责。通过本书的学习,可以了解有限元理论,掌握有限元方法。尤其是针对汽车结构,可以了解分析流程、知晓分析对象、掌握建模方法、学习分析准则,使我们在理念上、技术上做好迎接未

来分析设计工作挑战的充分准备!

全书共分9章,第1章是有限元法概述,介绍了汽车结构有限元分析的内容和流程;第2章介绍了有限元分析的基础理论;第3~7章全面介绍了有限元法,包括平面问题、单元类型、非线性及动力学问题,详细说明了有限元法的建模与分析过程;第8章与第9章则围绕汽车结构分析各个方面的问题,如分析方案制定、结构简化原则、结构建模方法、结构设计准则、结构分析指南、结构分析实例等,向读者提供汽车结构有限元分析的全面解决方案及一些具有实用参考价值的思路。

考虑到不同层次的读者需求,以及教学时数的限制,教学内容可以结合有限元软件的使用,对相关章节作适当取舍,其余内容可以自行学习。

本书第3章、第7章、9.8节由张代胜教授编写,其余章节由谭继锦执笔,全书由谭继锦统稿,陈朝阳教授认真审阅了全文。编写过程中得到许多同事及历届研究生的帮助,在此谨向他们表示衷心的感谢。限于作者水平,本书肯定存在不足和需要进一步改进之处,竭诚希望广大读者批评指正。

编者

2009年10月于合肥

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 有限单元法的概念	1
1.2 汽车结构有限元分析的内容	3
1.3 汽车结构有限元分析的流程	8
1.4 汽车结构有限元分析实例	9
思考题	11
第 2 章 有限元分析的基础理论	12
2.1 有限元分析的弹性力学基础	12
2.1.1 空间问题	13
2.1.2 平面问题	16
2.1.3 弹性力学问题经典解法	18
2.1.4 弹性接触问题	19
2.1.5 有限元法的变分原理基础	21
2.2 弹性小挠度薄板弯曲基本理论	22
2.3 动力学问题基本方程	25
2.4 塑性力学基础	26
思考题	30
练习题	30
第 3 章 平面结构问题的有限单元法	32
3.1 平面三角形常应变单元位移模式	33
3.2 单元应变和应力	34
3.3 单元平衡方程与单元刚度矩阵	35
3.4 单元等效节点力	37
3.5 整体平衡方程与总刚度矩阵	40
3.6 边界条件处理	41
3.7 解题步骤与算例	42
3.8 计算结果分析	46
思考题	47

练习题	47
第 4 章 单元类型及单元分析	49
4.1 一维单元分析	50
4.1.1 杆单元	50
4.1.2 梁单元	51
4.2 二维单元分析	55
4.2.1 三角形六节点单元	55
4.2.2 矩形四节点单元	59
4.2.3 曲边等参数单元	62
4.3 三维单元分析	66
4.3.1 四节点四面体单元	66
4.3.2 八节点六面体单元	69
4.3.3 20 节点六面体等参元	70
4.3.4 空间轴对称环形单元	73
4.4 板壳单元	75
4.4.1 薄板矩形单元	75
4.4.2 三角形薄板单元	78
4.4.3 矩形平板壳单元	80
4.4.4 三角形平板壳单元	83
4.5 单元测试与单元精度比较	84
4.6 其他各种单元简介	85
思考题	87
练习题	87
第 5 章 非线性问题的有限单元法	89
5.1 概述	89
5.2 弹塑性增量有限元分析	90
5.3 几何非线性问题的有限元法	91
5.4 接触问题的有限元法	93
5.5 非线性问题的基本算法	95
思考题	98
第 6 章 动力学问题的有限单元法	99
6.1 动力学有限元分析的基本方程	99
6.1.1 一致质量矩阵	101
6.1.2 集中质量矩阵	101
6.1.3 阻尼矩阵	102
6.2 结构的固有频率及振型	103

6.3 结构的动力响应	104
6.3.1 直接积分法	104
6.3.2 振型叠加法	105
6.3.3 非线性动力分析的若干问题	106
思考题	108
练习题	108
第7章 结构分析有限元法的实现	109
7.1 概述	109
7.2 有限元软件前处理	111
7.3 有限元软件计算	116
7.4 有限元软件后处理	118
7.5 有限元分析的其他一些问题	120
7.5.1 网格划分问题	120
7.5.2 节点位移约束	124
7.5.3 有限元模型的装配	126
7.5.4 有限元程序中的材料库	128
7.5.5 模型检验与验证及结果评价	129
思考题	132
练习题	132
第8章 汽车结构有限元分析指南	135
8.1 概述	135
8.2 汽车结构有限元建模	136
8.2.1 制定分析方案	136
8.2.2 汽车结构有限元建模	137
8.3 单元选用及网格划分标准	145
8.4 边界约束条件处理	148
8.5 受力分析与载荷处理	150
8.6 汽车结构分析指南概要	152
思考题	159
练习题	160
第9章 汽车结构有限元分析实例	161
9.1 汽车结构设计准则与目标	161
9.2 汽车结构有限元模型	166
9.3 汽车结构强度分析	169
9.3.1 汽车桥壳有限元分析	169
9.3.2 轿车白车身建模与应力分析	174

9.3.3	客车骨架有限元分析	175
9.3.4	车架建模及应力分析问题	179
9.3.5	应力集中和局部分析	180
9.4	汽车结构刚度分析	181
9.4.1	轿车车身扭转刚度与弯曲刚度分析	181
9.4.2	客车车身变形和车身刚度分析	184
9.4.3	车架刚度分析若干问题	185
9.5	汽车结构动态分析	185
9.5.1	白车身模态分析	187
9.5.2	汽车结构动力分析若干问题介绍	191
9.6	汽车结构疲劳分析	193
9.7	汽车结构碰撞分析	196
9.8	汽车结构有限元优化设计	200
9.8.1	白车身灵敏度分析	202
9.8.2	白车身轻量化设计	205
	思考题	206
	参考文献	207

第 1 章 绪 论

1.1 有限单元法的概念

有限单元法 (finite element method, FEM), 简称有限元法, 是以力学理论为基础, 是力学、数学和计算机科学相结合的产物 (目前已经形成了现代计算力学这门学科), 是随着计算方法和计算机技术的发展而迅速发展起来的一种数值计算方法, 是一种解决工程实际问题的有力的数值计算工具, 它几乎适用于求解所有连续介质和场的问题。经过近 60 年的发展, 有限元法的基本理论已相对成熟, 一大批通用和专用有限元软件纷纷面市。伴随着广泛的学术交流和大量期刊文献的出版, 借助于互联网信息的传递, 有限元法从高端走向普及, 成为工程结构分析中最为成功、最为广泛和最为实用的重要工具。借助有限元分析技术已经成功地解决了众多领域的大型科学和工程计算问题, 几乎所有工程领域都在使用有限元法, 汽车工程也不例外。

有限单元分析 (finite element analysis, FEA), 简称有限元分析, 是更广泛意义上的计算机辅助工程 (computer aided engineering, CAE) 的重要组成部分, 事实上 CAE 的应用首先就是从有限元分析开始的。基于有限元技术的 CAE 软件, 无论在数量、规模上, 还是在应用范围上都处于主要地位。作为数值分析的代表, 有限元分析已经成为继汽车结构力学分析和汽车结构实验研究之后的另一个重要手段, 由此形成了现代汽车产品设计方法, 即设计—计算—试验的三步法。有限元分析不仅能够解决和验证传统的汽车结构问题, 而且极大地扩大了结构分析的研究范围, 成为解决汽车结构问题的新的主要手段。

作为结构分析的一种计算方法, 从数学角度看, 其基本思想是通过离散化的手段, 将偏微分方程或者变分方程变换成代数方程求解。从力学角度看, 其基本思想是通过离散化的手段, 将连续体划分成有限个小单元体, 并使它们在有限个节点上相互连接。在一定精度要求下, 用有限个参数来描述每个单元的力学特性; 而整个连续体的力学特性, 可认为是这些小单元体力学特性的总和, 从而建立起连续体的力的平衡关系。

图 1.1 和图 1.2 所示为一个圆盘和一个带孔圆柱体的单元网格划分方式, 单元之间以节点相连并传递求解信息。这样通过有限个单元组合而构成的结构就可以近似代替原来的连续体结构, 从而将一个无限连续体离散成有限个单元体的组合结构进行求解。

鉴于汽车结构几何形状复杂、连接关系多样, 而且往往呈现非线性特征, 很难用解析方法求出其精确解, 因此借助于数值模拟技术来获得满足工程要求的数值解是极其必要的。由于有限单元的网格划分和节点配置非常灵活, 可以适用于任意复杂的几何形状, 处理不同的边界条件和连接关系; 而且有限元法的物理概念十分清晰, 易于理解, 在工程设计中的

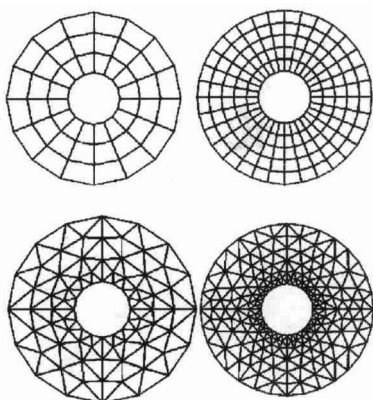


图 1.1 圆盘有限元不同网格划分

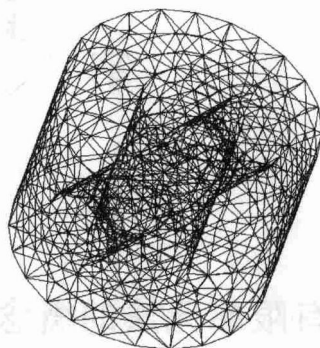


图 1.2 带孔圆柱有限元网格

作用十分显著,使得有限元法作为一种具有广泛应用前景和效率的数值计算工具,在工程结构分析等众多领域发挥着越来越重要的作用。

工程结构有限元分析涉及力学原理、数学方法和程序设计等多个方面,诸方面相互结合才能形成这一完整的分析方法。工程实际的大量需求带动了有限元法的飞速发展,使得有限元分析程序早已进入了商业化阶段。当前流行的各种商业化大型通用有限元软件都具备较强的静动态分析能力,很多软件系统已开发升级成多代产品,形成了功能强大的有限元分析系统,从而也大大促进了结构静动态分析的普及。随着 CAE 融入设计过程的进程加快,立足于设计前期的 CAE 技术,将有限元软件集成于计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 环境中,面向 CAD 软件的使用者,引导用户按一定步骤完成整个分析流程,形成产品分析、设计、制造、试验一体化,这也是工业产品生产的发展方向,有限元法在其中起着重要的作用。

有限元分析还需要计算机软硬件平台的支持。计算机技术的发展推动了有限元法的应用,大型集成化通用有限元软件的推广与普及,使得人们逐渐将有限元分析纳入产品设计的常规环节。但也存在着对力学概念和有限元原理的理解淡化的现象,而这对于完整理解并掌握有限元法是不利的。整个有限元程序可简单看成由三大部分组成,即数据前处理、计算求解和结果后处理。目前大部分有限元软件的前后处理功能十分强大,部分替代了人工数据处理工作,通过一定阶段的学习,也容易掌握这些环节。通过建立零部件、总成或整车的有限元计算模型,或将 CAD 模型进行转换,就可以实现有限元的建模。但是一个有限元分析项目的成功与否,并不是简单地划分网格,而是取决于分析者对分析对象的把握和对有限元技术的全面理解。应用中的主要难点已经转换成如何精确的建立计算模型;如何实现计算模型中各种支承、连接与实际结构相符;如何确定载荷,尤其是各零部件之间传递的静动态载荷;如何施加载荷,以反映汽车各种行驶状态等。解决好上述问题,就需要通过学习有限元基本理论,结合专业知识,将学习有限元理论和上机实践结合起来,掌握程序操作技巧,掌握有限元技术的诀窍和原理。另外,还应注意软件只是一个工具,它提供了一个加快学习有限元法的平台。程序使用地再好,如果不懂有限元基本原理,是做不好、做不深、做不透结构有限元分析的,更谈不上为产品设计服务,这也是学习中要特别注意的问题。

目前有限元分析已经成为汽车结构设计与改进的重要方法和主要手段。因此,如何保

证有限元分析的精度和可靠性对汽车工程应用至关重要。这其中很大程度上依赖于有限元模型建立的精准度。学习并掌握有限元法可以按照如下十六字诀去把握：即“精确建模、准确加载、正确约束与明确分析”。

精确建模就是要能够从实际问题提炼出力学模型，并且将复杂问题简化，保证有限元模型与原结构等效，单元选用恰当，网格划分合理，算法参数控制得当，从而使所建模型符合工程结构实际，有限元模型的好坏直接影响计算结果的误差和分析结论的正确性。

准确加载就是要对所研究的对象，无论是零部件、分总成、大总成或者整车，要千方百计地从分析、计算、试验，多方面确定载荷分布、载荷大小、载荷位置、载荷工况、载荷验证等，确保载荷值可靠。

正确约束就是要完整地理解结构边界条件及各部件之间的约束关系，明确决定连接性质的主要因素，找出约束替换的等效方式，确定连接关系的合理判据，保证计算模型中的边界条件和连接关系与实际结构相符。

明确分析就是要具备分析方案的制定能力、运算误差的控制能力、模型检验与验证的能力、计算结果的评价能力以及工程问题的研究能力，帮助指导产品结构的设计。

上述四个方面相互关联，精确建模依赖于对汽车结构特性全面信息的掌握程度，这就包括了模型几何信息、载荷数据、约束条件以及检验和验证有限元模型的技术。有限元模型的建立是有限元分析的关键环节。通过力学分析，把实际工程问题简化为有限元分析的问题，提出建立有限元模型的策略，确定载荷和位移边界条件，使得有限元分析有较好的模拟结果。需要强调的是模型验证是整个分析工作中一个非常重要的环节，需要借助各种方法，从多个方面对所建立的模型加以全面细致的检验，不但要检验分析模型，还要检验分析结果，只有这样才能确保结构分析的可靠性和可用性，才能真正做好结构分析工作。

1.2 汽车结构有限元分析的内容

随着我国汽车工业的发展，设计与制造能力的不断提升，对缩短产品开发周期、降低整车开发成本、提高产品开发质量有着越来越高的要求。在提升汽车研发能力的众多因素中，CAE技术是汽车数字化产品开发过程中极为重要的技术手段。CAE技术，是一项涉及面广、集多种学科与工程技术于一体的综合性、知识密集型技术，这其中有限元法占据重要地位。汽车设计开发过程中的CAE分析是多学科、多方位、多层次、多角度的，分析的对象涉及零部件、总成、系统和整车，主要包括整车多体动力学分析，整车性能分析，结构强度、刚度、模态分析，结构疲劳及可靠性分析，振动噪声(NVH)分析，结构部件动力学分析，汽车碰撞安全性分析，部件冲压成形分析，热结构耦合分析，流体力学分析等。随着计算机技术的迅猛发展，有限元分析技术已经得到了广泛的应用，并且向着普及化的方向发展。通过运用CAE技术，无需制造大量试验样车，降低了原型车制造和试验成本，降低了汽车及零部件开发费用。

有限元法在汽车结构设计中的应用，使得汽车产品设计产生革命性的变化，现代产品设计已经进入了CAD/CAE/CAT等多种工具相结合的阶段，传统的设计方法已越来越不能适应产品研发的需要。设计领域正在进行一场深刻的变革，如用理论设计代替经验设计，用

精确设计代替近似设计,用优化设计代替一般设计,用动态设计代替静态设计等,而有限元法正是实现上述设计变革的强有力工具。

汽车产品设计流程已经发生了变化,由传统的人工反复进行设计的过程,加入了基于CAD模型的对产品性能进行虚拟试验的过程,强调以优化驱动产品设计的全过程,形成了以有限元分析、优化设计为中心的现代产品设计新阶段,图1.3所示说明了CAE分析从无到有进入了产品研发阶段的过程。有限元法的出现,带动了汽车产品的设计,使得传统的结构分析向着分析、设计、优化、制造、试验和控制的综合化方向发展,有限元模型更接近工程实际,计算结果更加准确,分析对象形成了零部件-总成-整车的系列化模型。今天各种CAE软件系统的功能越来越强大,使用越来越方便,已经成为产品设计中的必然环节,有限元技术正驱动着产品研发及设计工作。

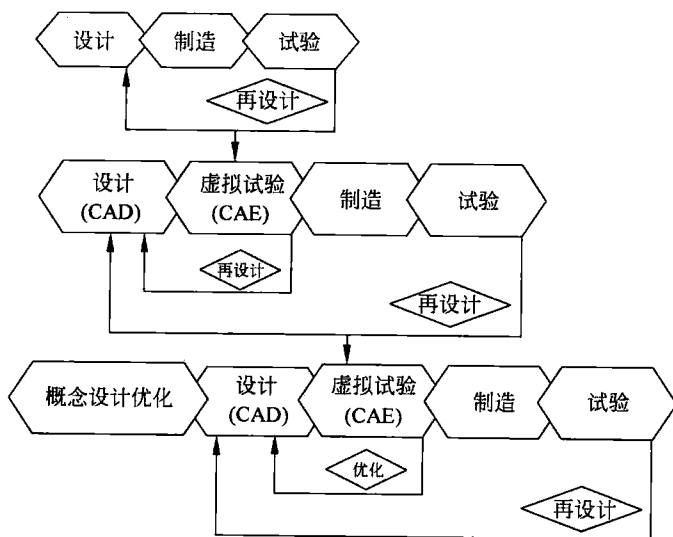


图 1.3 产品研发流程变化

有限元分析已经在汽车工业得到广泛的应用。在没有建立物理样机之前采用有限元法来预测评价汽车结构性能并对设计方案进行优化,可以提高汽车结构性能并减少试验次数。按照一般汽车产品开发过程,汽车结构分析可以划分成三个阶段来看,即概念设计阶段分析、结构设计阶段分析、样车试验后的结构改进验证以及产品投产后结构改进分析等。采用部件、总成、整车多个层次的设计分析,来保证系统结构的完整性与可靠性。多层次的分析与验证有助于使部分技术难点在产品开发阶段就通过分析研究得到解决,避免整车试验的复杂性和实施困难,降低研制成本,确保整车试验验证顺利通过。

在有限元分析问题研究中,理论分析、数值计算和试验验证这三方面是相辅相成的。理论分析告诉我们问题的来龙去脉,而试验验证则是检验理论分析和有限元计算的根本手段。尽管本书着重讨论有限元法的数值计算问题,但鉴于理论分析和试验验证的重要性,本书对有限元法所涉及的基本理论还是作了全面扼要的介绍,以便读者能对有限元法的应用有一个全局性的了解。至于试验测试方法本身,不在本书讨论范畴,本书主要强调试验对模型验证的重要性,有限元分析和试验分析互为验证、互为补充,两者结合才能形成完整的结构综合分析评价。

结构设计是指零件尺寸大小和几何外形的设计。结构零部件失效的原因往往不是单一的,而且各因素之间相互影响和关联。例如,由于对外部损害作用估计不足,零件承受应力过大,往往在受力最大而截面最弱的位置产生变形或断裂;或由于截面过渡区的圆角、开孔等几何形状和位置设计不合理,造成应力集中,成为疲劳破坏的发源地。

结构分析的目的就是根据对失效零件调查研究所取得的资料,判明失效的类型,分析内外因素与失效的关系,找出导致部件失效的主要原因。要对零部件进行结构分析、预测并提高零部件质量,就要综合运用力学、材料、工艺、性能等多方面的知识,进行综合分析,使理论和实际相结合,解决产品结构设计的实际问题。

对汽车产品性能的要求是多方面的,不仅仅是一般机械产品的失效,如过量变形、断裂、疲劳、磨损等。以车身结构为例,除了常规的强度、刚度、疲劳分析之外,还有振动、噪声、碰撞安全、车身流线等一系列相关问题。目前 CAE 技术可以对汽车结构的强度、刚度、振动噪声(NVH)、舒适性、耐久性、多刚体动力学、碰撞、乘员的安全性以及动力总成的性能等方面进行模拟(仿真)分析、预测结构性能、判断设计的合理性、优化结构设计等。此外,用 CAE 技术还可以对冲压成形、铸造和锻造的工艺过程进行模拟分析,解决产品质量问题。

由于汽车在批量生产以后改进设计的成本明显高于汽车在研发初期阶段改进设计的成本,CAE 的模拟分析主要应用在工艺设备、模具和样车制造之前,也就是从汽车产品研发初期就开始用 CAE 进行模拟分析,及时发现产品设计中的隐患,优化结构设计,使汽车产品满足国家的法规和用户的需求。通过 CAE 的优化分析,确定优化的设计方案并进行试制和试验,从而减少试制费用,缩短新产品的研发周期,使新产品早日投入市场,增强企业的竞争力。在汽车产品批量生产以后,CAE 分析主要用于解决汽车在使用过程中发生的质量问题。CAD/CAE/CAT 相互结合,显著地提高了汽车产品研发的水平。有限元分析在产品研发的不同阶段有不同的分析目的和分析内容,人们根据汽车产品研发流程将有限元分析划分成同步的 5 个阶段,即:

第 0 阶段:对样车进行试验和分析;

第 1 阶段:概念设计阶段的分析;

第 2 阶段:详细设计阶段的分析;

第 3 阶段:确认设计阶段的分析;

第 4 阶段:产品批量生产后改进设计的分析。

汽车结构的常规分析一般包括强度分析、刚度分析、NVH 分析、设计优化分析等内容。

1. 整车及零部件强度和疲劳寿命分析

强度和疲劳寿命分析是汽车结构分析的传统内容,分析对象已从零部件、总成向整车发展。通过对零部件进行静态或动态分析,了解零部件应力分布状况,从而对零部件性能做出正确评价。通过对车身等总成结构分析,对车身部件选材及优化提供设计指导。通过对底盘或整车产品进行分析,以实现部件优化和轻量化设计、可靠性设计等。汽车产品设计已进入有限寿命设计阶段,要求汽车在设计的使用期内整车和零部件完好,不产生疲劳破坏;而达到使用期后,零部件尽可能多地达到损伤,以求产品轻量化,节约材料和节省能源。在分析具体结构时,要根据分析目的和分析对象的受力状态,选择代表该分析对象力学性能的应力指标,并以这个指标进行强度分析,并非一切问题都用 Mises 等效应力。指导原则是有限

元分析输出的应力或应变与试验分析时测试的应变要对应,以便于试验验证。由于结构部件可以进行静动态应力应变测试,有限元的分析结果往往需要与测试结果进行比较,这也是试验验证模型的重要方面。

2. 整车及零部件刚度分析

刚度是指结构抵抗变形的能力。车身、车桥、车架、车门、舱盖等部件及整车都有明确的刚度评价指标,通过对上述结构部件进行刚度分析,优化这些结构的刚度布局,使产品在设计阶段就可验证是否达到使用要求。一般车身结构(如驾驶室)设计的主要问题是刚度问题,其次才是强度问题。如果车身结构的刚度已满足要求,则车身结构的强度基本能满足要求。

3. 整车及零部件模态及动态分析

模态分析是结构动态特性分析的基础,其目的是为了了解和评价相关结构或部件的固有频率及振形是否合理,为汽车结构部件的动态设计提供依据。通过模态分析了解结构在某一易受影响的频率范围内的各阶模态特性,预测结构在此频率范围内的实际振动响应。汽车设计的评价是多方位多层次的。从汽车结构动力学设计角度而言,首先要提出汽车结构动态设计与分析要求,提出汽车结构试验与验证要求,确定结构动态设计原则,进行结构动态特性与动响应分析,进行整车频率规划,按照频率控制设计原则、响应控制原则以及噪声控制原则等进行动力学设计及优化,通过分析并根据动力学设计要求合理选择汽车结构形式,结构布局,以确保汽车在行驶中能避开干扰频率的共振区。按照防止共振、提高动刚度和改善结构阻尼特性的原则,做到调频、减振和降幅的目的。

4. 汽车 NVH 分析

NVH 是指噪声(noise)、振动(vibration)、声振粗糙感(harshness),由于它们在汽车中同时出现且相互关联,需要将其同步研究,以判明汽车在不同激励下噪声、振动和乘员感受的变化特性。汽车在外载荷(路面激励、发动机怠速以及工作转速激励)的作用下发生振动,用模态分析方法识别汽车结构的模态参数(频率、振形和阻尼),对汽车结构的振动噪声进行分析。在带内饰的整车环境下,分析转向盘、座椅、地板和顶篷以及其他设计所关心的结构的振动响应情况。通过车身内声模态与整机模态的耦合,评价乘员感受的噪声,实现车身的声学设计并进行噪声控制。

5. 整车碰撞安全性分析

随着汽车的普及与发展,汽车的碰撞安全性已经成为汽车产品性能的重要指标之一。从满足法规要求到碰撞星级评定;从安全带、安全气囊分析到为驾乘人员及行人提供更加安全的保障;从考虑汽车碰撞的巨额试验费用,到正面碰撞、侧面碰撞、后面碰撞等全面碰撞结构分析;汽车结构安全性已经得到大大提高。汽车模拟碰撞分析的目的就是为了提高汽车被动安全性能。对车辆结构的耐撞性及其乘员约束系统的有效性进行分析,并对车辆的被动安全法规符合性给予评价,从而有效提高车辆设计的安全性,同时大幅减少实车试验的费用。对于汽车被动安全性能的要求,一是在碰撞时,车身结构、驾驶系统、座位等能吸收较高能量,缓和冲击;二是发生事故时,确保车内乘员生存空间、安全气囊、座椅安全带等对

乘员的保护功能,以保证乘员安全并在碰撞后容易进行车外救助和脱险。

6. 设计优化分析

将优化设计方法与有限元法结合可以解决任意复杂结构的优化设计问题。汽车结构的设计优化分析一般是以轻量化为设计目标,以强度、刚度或频率等为约束条件,改变设计的形状和尺寸,进行多方案比较,选择较优的设计方案。在完成初步优化后,一定要用力学分析和设计的经验进行合理地解释,还要考虑制造工艺材料等限制要求,进一步确认设计优化结果的正确性与可行性。

7. 气动或流场分析

气动或流场分析包括车身空气动力学分析,发动机室的通风,乘客室内部流动分析,空调系统气流分析等。随着计算机技术的飞速发展,应用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)方法来预测汽车车身外部流场已成为可能。CFD在汽车领域中的绝大部分应用都集中于进行汽车外流场的数值模拟。在内燃机的设计和开发中,CFD也被作为一种重要而有效的工具加以利用。

8. 热结构耦合分析

热结构耦合分析包括发动机机体温度场分析、结构分析以及热-结构耦合分析等。

此外,还有复杂钣金件冲压成形过程分析、复杂塑料件注塑成形过程分析、刚柔耦合动力学分析等。目前有限元方法已从单纯结构分析发展到流体力学、温度场、电磁场、渗流和声场等多物理场问题的求解计算,以及求解几个交叉学科的问题,如“流固耦合”、“声固耦合”问题等。

现代汽车对结构设计提出了越来越高的要求,汽车结构分析已不满足于结构线性弹性分析,线性理论已经远远不能满足设计的要求。实际上汽车结构系统中存在着大量非线性结构问题,例如发动机、驾驶室橡胶支承、悬挂大变形、零部件之间连接的能量缓冲、高温部件的热变形和热应力等,只有采用非线性有限元算法才能解决。在产品要求精益设计的条件下,只应用线性分析是不够的,产品开发要求CAE更多地考虑非线性影响,因此有限元分析已由求解线性工程问题发展到分析非线性问题。还有前面提到的“准确加载”问题,汽车零部件结构分析的一个难点是分析载荷的不确定,大量零部件结构实际所受到的载荷到底是多大,往往很难明确给出,因而不能适应越来越高的设计要求。所以需要结合多体动力学(MBD)分析来确定各部件之间的力的传递关系,采用MBD与FEA混合的方法加以仿真。同样汽车产品有限寿命设计,也对CAE分析提出了使用真实载荷的要求,即需要确定汽车路谱和工作载荷谱。其他汽车整车性能,如舒适性、操纵稳定性分析也不仅仅满足于结构刚性简化,仅仅采用多体动力学模型分析,还要求考虑结构变形的影响,采用刚柔耦合动力学分析方法,进行整车非线性系统分析,以达到整车动态参数设计的目标。随着对研究问题的深化以及计算机功能的强大,扩展到对整车级别性能分析评价与预测的层次,即从整车的角度对上述汽车的各种性能进行分析和预测,包括汽车的空气动力学特性、声学特性、振动特性、操纵稳定性、乘坐舒适性、碰撞安全性等。

通过以上对有限元方法的了解,对有限元发展及现状的认识,对有限元技术在汽车工业

中应用的总体情况的介绍,以及有限元在汽车工业中的重要作用,更加明确了有限元方法在现代产品设计中的重要地位,基于上述描述对未来有限元分析在汽车工业的发展及趋势有了清醒的认识,会增加学好有限元方法的动力。

最后简单谈一下有限元方法的学习。有限元方法发展至今,已经构成一个庞大的知识体系,是大型复杂结构分析的有力工具,其可供参考资料文献非常之多。一方面我们需要通过教材系统学习有限元法的基本理论,了解有限元法的发展和应用,通过有限元软件手册掌握有限元程序的操作使用;另一方面我们要通过期刊和专业文献了解有限元分析在汽车工程中的应用状况,了解所研究问题的当前进展情况,做好文献综述,这是一切研究的起点。再有我们今天身处在信息时代,有限元方法的学习也离不开信息时代的载体——互联网。互联网使信息的交流既方便又迅速,是人类知识的超级宝库,使得获取知识的途径更加便捷。我们要充分利用这一资源宝库,为学习和应用有限元方法服务。通过加强信息收集,全面增长知识,提高学习进度,增加有限元建模与分析的经验,就会对问题的了解逐渐深入,研究的范围会逐渐扩大,工作的重心会逐渐转移,向着有限元应用的深度问题和广度问题进军!

目前有限元法正与其他分析方法联合,与试验方法混合,与 CAD 模型集合,构成一个完整的 CAD/CAE/CAT 集成环境,为工程设计、工程分析、工程评估提供强大的服务。所有结构分析如同产品有设计标准一样,都应制定分析流程、分析标准与分析目标。这些标准将构成新研发车型的目标或指南。以竞争对手的整车、系统、总成和零部件的性能参数为研发汽车性能的参考依据,在产品研发中,将汽车性能指标分解成车身、底盘(车架)、动力总成等主要总成和系统的指标,总成和系统的指标又进一步分解为零部件与子系统的指标,从而形成汽车研发的庞大指标体系,为研发部门提供设计依据。

1.3 汽车结构有限元分析的流程

有限元法的基本研究思路是结构离散—单元分析—整体求解。有限元软件实施的过程则采用前处理—中处理—后处理三个阶段。前处理是建立有限元模型,完成单元网格划分;中处理就是构建刚度矩阵与分析计算;后处理则是分析与处理计算结果,对所分析的结构做出评价。

简单来说,有限元基本分析过程可以归纳为以下几个步骤。

- (1) 将连续体分割成有限大小的区域,这些小区域即为有限单元,单元之间以节点相连。
- (2) 选择节点的物理量(如位移、温度)作为未知量,对每一单元假设一个简单的连续位移函数(插值函数)来近似模拟其位移分布规律,将单元内任一点的物理量用节点物理量表述。
- (3) 利用有限单元法的不同解法,如根据虚功原理建立每个单元的平衡方程,即建立各单元节点力和节点位移之间的关系,形成单元性质的矩阵方程。
- (4) 将各个单元再组装成原来的整体区域,建立整个物体的平衡方程组,形成整体刚度矩阵。
- (5) 引入边界条件,即约束处理,求解出节点上的未知量。其他参数,如应力、应变等依次求出。

对汽车结构分析而言,其分析流程可以用图 1.4 简略表示,框图详细内容将在后续章节中讨论。读者在学习各章节时或是在解决实际问题时,可以参考这些流程,少走弯路。

随着汽车工业的不断发展,技术创新能力已经成为一个企业生存和发展的动力和源泉。