



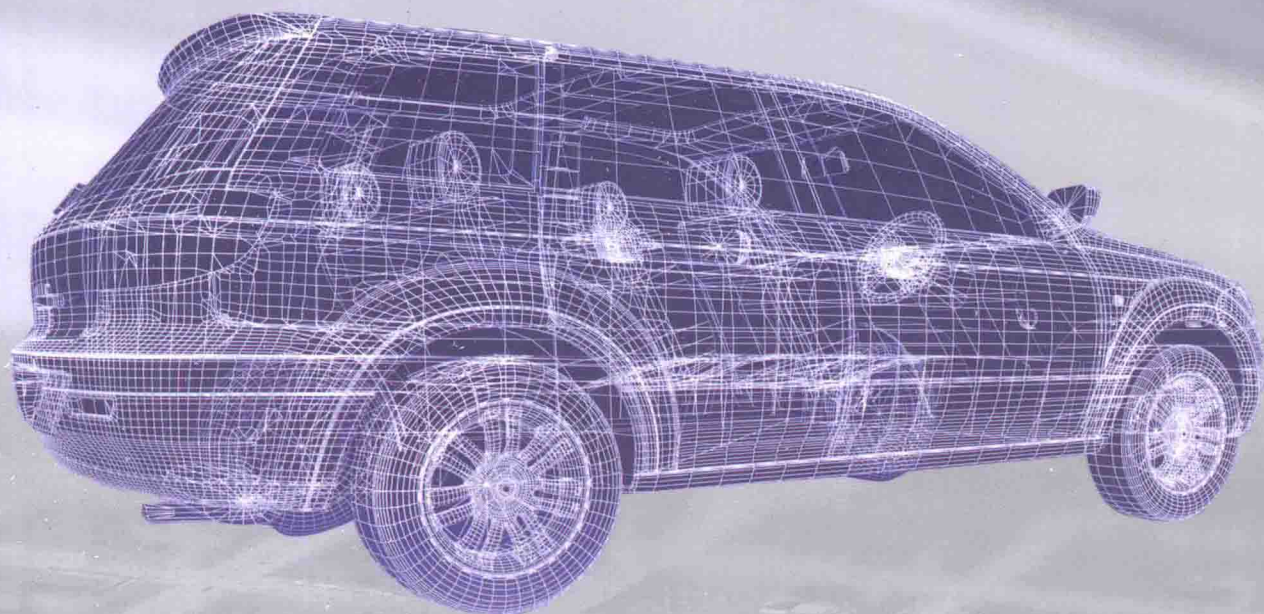
“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

汽车有限元法

QICHE YOUXIANYUANFA

(第二版)

谭继锦 主编



人民交通出版社
China Communications Press



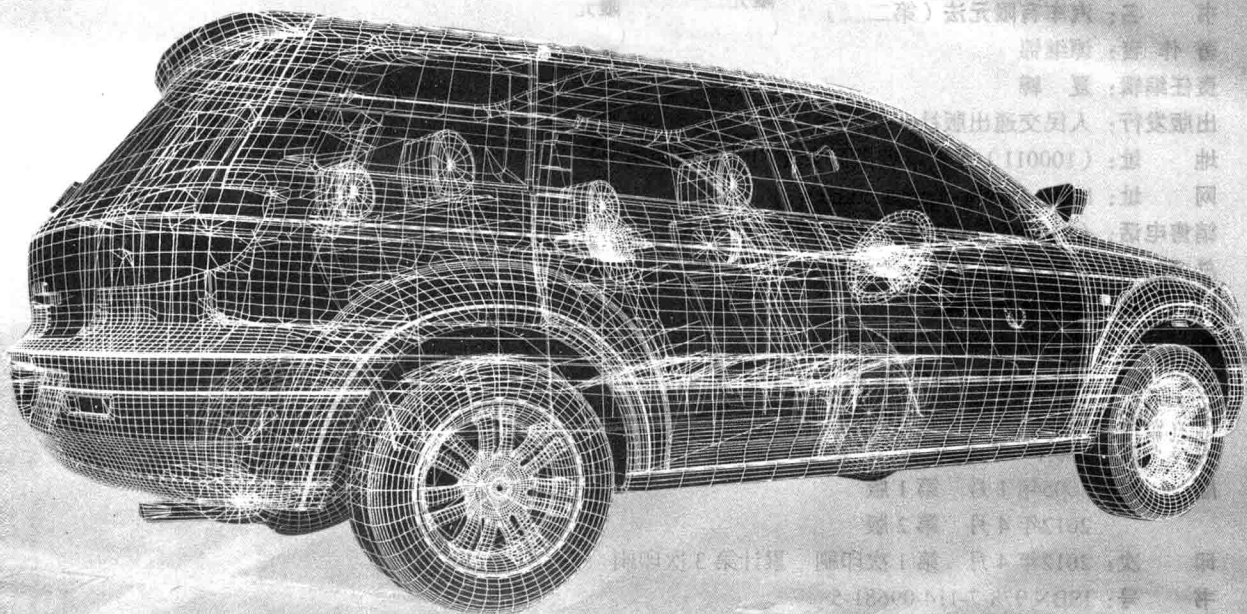
“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

汽车有限元法

QICHE YOUXIANYUANFA

(第二版)

谭继锦 主编



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书系统地介绍了有限元法的基础理论、基本方法及其在汽车结构分析中的应用。主要内容包括有限元法的力学基础理论,汽车结构有限元分析内容、流程及方法,汽车连续体、杆系、板壳、动力学和非线性等问题的有限元法,汽车结构模型的建立原则、模型验证和结构分析方法,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,内容翔实且简明扼要,是高等院校车辆工程专业本科生及研究生教材,也可作为汽车行业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽车有限元法 / 谭继锦主编. — 2 版. — 北京 :
人民交通出版社, 2012. 4

ISBN 978-7-114-09681-5

I. ①汽… II. ①谭… III. ①有限元法 - 应用 - 汽车
- 构造分析 IV. ①U463

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 039382 号

“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

书 名: 汽车有限元法(第二版)

著 者: 谭继锦

责任编辑: 夏 韡

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13

字 数: 300千

版 次: 2005年1月 第1版

2012年4月 第2版

印 次: 2012年4月 第1次印刷 累计第3次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09681-5

印 数: 0001-3000册

定 价: 25.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

编委会名单

编委会主任

龚金科(湖南大学)

编委会副主任(按姓名拼音顺序)

陈 南(东南大学) 方锡邦(合肥工业大学) 过学迅(武汉理工大学)
刘晶郁(长安大学) 吴光强(同济大学) 于多年(吉林大学)

编委会委员(按姓名拼音顺序)

蔡红民(长安大学) 陈全世(清华大学) 陈 鑫(吉林大学)
杜爱民(同济大学) 冯崇毅(东南大学) 冯晋祥(山东交通学院)
郭应时(长安大学) 韩英淳(吉林大学) 何耀华(武汉理工大学)
胡 骅(武汉理工大学) 胡兴军(吉林大学) 黄韶炯(中国农业大学)
兰 巍(吉林大学) 宋 慧(武汉科技大学) 谭继锦(合肥工业大学)
王增才(山东大学) 阎 岩(青岛理工大学) 张德鹏(长安大学)
张志沛(长沙理工大学) 钟诗清(武汉理工大学) 周淑渊(泛亚汽车技术中心)

教材策划组成员名单

顾炳鲁 黄景宇 林宇峰 张 兵 夏 韡

前 言

本书为2005年出版的《汽车有限元法》的第2版。本书第1版自2005年出版至今已有7年时间,期间重印1次。随着汽车工业的发展,有限元法在汽车产品研发过程中的应用越来越广泛,汽车结构有限元分析的要求也越来越迫切。如何把它作为一种先进的辅助手段进行优化设计,是广大汽车设计工作者与工程技术人员以及高校在读学生面对或正要面对的问题。作者结合所掌握的有限元分析理论、模型建立技术和工程分析经验,从理论、建模、分析三个方面对汽车结构有限元方法及分析技术要点进行了系统地阐述,希望能对广大读者提供借鉴或帮助。大型有限元通用程序的推广与普及,为广大使用者提供了一个解决各种结构问题的平台。但使用者应该切记,强大的程序功能只有与对结构正确的认知和模拟相结合,才能保证分析结果的正确。

通过多年教学与科研实践,作者对汽车有限元分析方法各章节的内容有了更进一步的认识。在突出力学理论的基础上,总结归纳了该领域一些新的研究成果,加之汽车有限元法在整个汽车产品研发中的重要性不断提高,促使我们感到有必要对第1版进行适当的修订。

本书在保持第1版基本结构与内容的基础上,主要在以下方面进行了修改:

1. 充实和调整了第二章的内容,将原先分散在第五~第七章全部力学基础理论归并在第二章内,使得有限元的力学基础理论介绍更具系统和条理性。
2. 重新编写了第三章的内容,将原平面问题和空间问题的有限元法归并为连续体问题的有限元法。
3. 适当调整了第四~第七章内容,使得全书前后衔接一致。
4. 调整并补充了第八章的内容,删减了“互联网在有限元分析中的应用”一节。
5. 重新编写及调整了第九章的内容,将原第九章和第十章整理修改成新的一章,加强了实例的系统讲述。

由于不同院校讲授课时安排不同,上机学时可能也不一样,主讲教师可以根据实际情况,决定取舍。在巩固基础、有利教学的原则下,对课堂教学内容妥善处理,无需束缚教与学的灵活性,尤其是对有限元法这门课程。

本书的完成得益于多年来国内外同行的广泛学术交流与探讨,以及合肥工业大学车辆工程系项目团队教师和研究生们深入的讨论,在此一并表示感谢。

限于编者的水平,修订后的第2版教材难免还有疏漏和不妥之处,深望广大教师和读者继续提出批评和指正,使本书今后能不断得到改进。

编 者

第 1 版前言

汽车工业的发展已有百年历史,而有限元法诞生于 20 世纪中叶,将有限元法应用于汽车结构分析一般认为是在 20 世纪 70 年代之后。迄今为止,有限元法已经有了很大的发展,这表现在大量的文献及各种专用和通用程序的出现上。随着计算机辅助工程(CAE)融入汽车设计过程的进程加快,有限元法为汽车设计工程师应用后,在产品设计阶段对 CAD 中生成的模型进行静态分析、模态分析和动态分析等,已成为设计和分析的必不可少的工具。然而,掌握有限元方法和原理,使用大型通用程序解算问题,以及读懂期刊上的文献资料,尤其是将计算结果应用于汽车设计中,都需要在专业知识和有限元理论方面具备更深入和更广泛的基础知识,这样才能结合专业实践学好用好有限元程序。

一般而言,有限元理论的发展已趋于成熟,大型通用有限元程序的开发支持和推动了有限元方法的应用与普及,有限元法不仅被应用于传统的机械与汽车领域,而且在温度场分析、流体动力学分析、电磁场分析和声学分析及其上述多物理场耦合分析等领域得到广泛应用。汽车设计正在借助有限元法,向着有限元优化设计、概率有限元设计、有限元疲劳设计和有限元参数设计的方向深入发展,应用范围大大拓宽。汽车虚拟设计概念的提出,更进一步推动了作为其技术支撑内容的有限元理论和计算方法的研究与发展,也使得汽车设计上了一个新的台阶。这恰好说明了有限元法作为应用技术和理论科学的两个方面,而且这两个方面正在相互促进相互发展。

作者结合多年的教学经验和科学实践,编写了此书,介绍有限元基本理论,指导汽车结构分析。全书共分十章,一部分阐述弹塑性力学基础知识和有限元基本理论,包括平面问题、空间问题、杆系结构、板壳结构、动态分析及非线性问题,力求讲清有限元基本理论和在实际应用中涉及到的相关概念;另一部分着重讲授有限元法在汽车结构中的应用,包括数据的前后处理、计算模型的建立、边界约束的处理以及汽车结构有限元分析实例,有许多是结合作者与企业合作地科研实践。由于篇幅有限,非线性有限元法等内容只作了简单介绍。教学内容可结合有限元程序的使用,根据教学时数及层次对相关内容做适当取舍。

本书将有限元法与汽车结构分析相结合,面向汽车工程,实用性强。本书既可作为高等院校车辆工程专业本科生及研究生的教学用书,也可作为汽车行业广大工程技术人员学习和应用有限元法的参考书。由于有限元法是一门实用性很强的学科,必须通过上机实践,才能更好地理解其中的一些概念。因此,本书强调理论与实践并重,一定要两手抓,既要掌握有限元基本理论,也要熟练应用有限元程序。我们期望,读者在学习并掌握了本书内容之后,将有助于增强使用有限元程序解决实际问题的能力。希望在校学生和广大工程技术人员接受并应用有限元法于生产实际中,为我国汽车工业的发展出力。

本书由谭继锦主编,钱立军参加编写部分章节。限于作者水平,书中难免有不足之处,竭诚希望广大读者指正!

编 者

目 录

第一章 概论	1
第一节 有限元法概述	1
第二节 有限元法在汽车工程中的应用	3
练习题	6
第二章 有限元法的力学基础理论	7
第一节 概述	7
第二节 弹性力学基础	7
第三节 弹性小挠度薄板弯曲基本理论	17
第四节 动力学问题基本方程	21
第五节 塑性力学基础	22
练习题	25
第三章 连续体问题的有限元法	28
第一节 概述	28
第二节 平面三角形常应变单元位移模式	29
第三节 单元应变和应力	31
第四节 单元平衡方程与单元刚度矩阵	32
第五节 单元等效节点力	34
第六节 整体平衡方程与总刚度矩阵	36
第七节 边界条件处理	37
第八节 解题步骤与算例	38
第九节 计算结果分析	42
第十节 平面高阶单元	43
第十一节 等参数单元	51
第十二节 4 节点四面体常应变单元	57
第十三节 8 节点六面体单元	60
第十四节 20 节点六面体等参数单元	62
第十五节 空间轴对称问题的有限元法	65
练习题	67
第四章 杆梁结构的有限元法	69
第一节 概述	69
第二节 拉压直杆的有限元分析	69
第三节 梁的有限元分析	71
第四节 刚架的有限元分析	73

练习题	76
第五章 板壳问题的有限元法	78
第一节 概述	78
第二节 薄板矩形单元	79
第三节 薄板三角形单元	81
第四节 矩形平板壳单元	83
第五节 三角形平板壳单元	86
练习题	88
第六章 结构动力学问题的有限元法	90
第一节 动力学有限元分析的基本方程	91
第二节 结构的固有频率及振型	94
第三节 结构的动力响应	95
练习题	98
第七章 非线性问题的有限元法	100
第一节 非线性问题的基本算法	101
第二节 弹塑性增量有限元分析	104
第三节 几何非线性问题的有限元法	105
第四节 接触问题的有限元法	107
练习题	108
第八章 有限元分析的基本过程	110
第一节 有限元软件介绍与使用	110
第二节 有限元分析的数据前处理	112
第三节 有限元问题的求解	121
第四节 有限元分析的数据后处理	122
第五节 有限元程序中的单元库和材料库	124
第六节 有限元程序中的单位制	125
第七节 有限元解的误差及模型检验与结果评价	126
练习题	129
第九章 汽车结构有限元建模与分析实例	130
第一节 概述	130
第二节 汽车结构有限元建模	131
第三节 单元选用及网格划分标准	141
第四节 边界约束条件处理	144
第五节 受力分析与载荷处理	145
第六节 汽车结构分析流程与目标	148
第七节 汽车结构强度分析	154
第八节 汽车结构刚度分析	166
第九节 汽车结构动态分析	170

第十节 汽车结构疲劳分析.....	177
第十一节 汽车结构碰撞分析.....	180
第十二节 汽车结构有限元优化设计.....	184
第十三节 有限元法在汽车分析中的广泛应用.....	189
练习题.....	191
参考文献.....	193

第一章 概论

本章介绍有限元法的基本概念与研究方法,即“结构离散—单元分析—整体求解”,概述有限元法在汽车工程中的应用,列举了若干图形实例。旨在使读者对有限元法及其在汽车工程中的应用有一个初步的了解。

第一节 有限元法概述

有限单元方法(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。有限元法诞生于20世纪中叶,随着计算机技术和计算方法的发展,已成为计算力学和计算工程科学领域里最为有效的计算方法,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,不仅使有限元方法的理论日趋完善,而且已经开发出了一批通用和专用有限元软件,这就为有限元法的普及提供了基础,使它成为结构分析中最为成功和最为广泛的分析方法。使用这些软件已成功地解决了众多领域的大型科学和工程计算问题,取得了巨大的经济和社会效益。

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。CAE技术是计算机技术和工程分析技术相结合形成的新兴技术。CAE软件是由计算力学、计算数学、结构动力学、数字仿真技术、工程管理学与计算机技术相结合,所形成的一种综合性、知识密集型信息产品。CAE的核心技术即为有限元技术与虚拟样机的运动学或动力学仿真技术。运用CAE软件对工程和产品的运行性能与安全可靠性进行分析,对其运行状态进行模拟,及早地发现设计中的缺陷,并证实未来工程、产品功能或性能的可用性和可靠性。简单地讲,CAE是指工程设计中的分析计算与分析仿真,具体包括工程数值分析、结构与过程优化设计、强度与寿命评估、运动学或动力学仿真等。工程数值分析用来分析确定产品的性能;结构与过程优化设计用来在保证产品功能、工艺过程的基础上,使产品、工艺过程的性能最优;结构强度与寿命评估用来评估产品的精度设计是否可行、可靠性如何以及使用寿命为多少;运动学或动力学仿真用来对虚拟样机进行运动学仿真或动力学仿真。具体地说CAE可包含如下几个方面:

- (1) 运用有限元等技术分析结构的应力、变形等,实现结构从线性、静态计算到非线性、动态的分析;
- (2) 运用过程优化设计的方法在满足工艺、设计的约束条件下,对产品的结构、工艺参数、结构形状参数等进行优化设计,使产品结构性能、工艺过程达到最优;
- (3) 运用强度、刚度与疲劳分析理论,对结构的安全性、可靠性以及使用寿命做出评价;
- (4) 运用运动学或动力学理论与方法,对机构、整车进行运动学或动力学仿真,给出机构、整车的运动轨迹、速度、加速度以及动反力的大小等。

这其中基于有限元技术的CAE软件,无论在数量、规模上,还是应用范围上都处于重要地

位。作为数值分析的典型代表,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设计理论与方法。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。

用经典弹性力学等理论求解具体问题,从数学角度看就是求解高阶偏微分方程的边值问题。但由于物体几何形状、结构特点及外部载荷的复杂性,对于许多问题不能得到满足全域条件的解析解,为了解决复杂的工程问题,人们研究了各种数值方法,有限元法就是其中最重要的一种方法。

有限元法将连续体离散化为有限个单元集合而成,这些单元仅在有限个节点上相连接,亦即用有限个单元的离散体来代替原来具有无限个自由度的连续体,通过单元分析与集合,最后得到求解离散体运动状态的有限个代数方程。由于单元的分割和节点的配置非常灵活,它可适应于任意复杂的几何形状,处理不同的边界条件。单元有各种类型,包括线、面和实体或称为一维、二维和三维等类型单元。节点一般都在单元边界上,单元之间通过节点连接,并承受一定载荷,这样就组成了有限单元集合体,如图 1-1 所示。在此基础上,对每一单元假设一个简单的位移函数来近似模拟其位移分布规律,通过虚位移原理求得每个单元的平衡方程,即是建立单元节点力和节点位移之间的关系。最后把所有单元的这种特性关系集合起来,就可建立整个物体的平衡方程组。考虑边界条件后,解此方程组求得节点位移,并计算出各单元应力和应变。

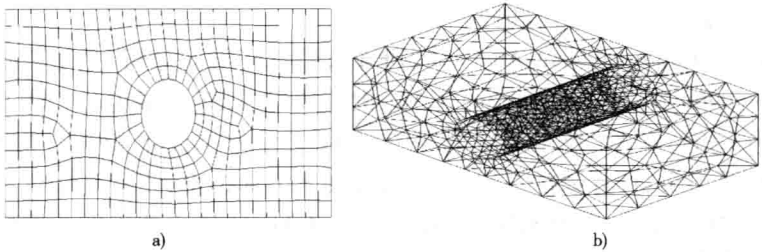


图 1-1 有限单元集合体

有限元法直接为产品设计服务,与工程应用密切相关。而且有限元法的物理概念十分清晰,容易为工程技术人员所理解。大型集成化通用软件的普及与推广,使我们不必自行编写软件,只要选择合适的软件计算即可。应用有限元法进行一般工程结构分析成为相对容易的技术工作。用户交互式地进行结构离散、定义载荷、施加约束,并可以动态地观看计算结果,实现了计算可视化。但是,为了正确地使用通用程序,做好数据前后处理工作,掌握分析方法,都需要对有限元基本理论有一定程度的理解。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 CAD 环境中,面向 CAD 软件的使用者,引导用户一步一步完成整个分析流程,形成产品分析、设计、制造一体化,这也是工业生产的发展方向,有限元法在其中起到重要的作用。

有限元法的基本思想是“分与合”,分是为了划分单元,进行单元分析;合则是为了集合单元,对整体结构进行综合分析。无论对什么样的结构,有限元分析过程都是类似的。其基本步骤为:

- (1) 研究分析结构的特点,包括结构形状与边界、载荷工况等;
- (2) 将连续体划分成有限单元,形成计算模型,包括确定单元类型与边界条件、材料特

性等;

(3)以单元节点位移作为未知量,选择适当的位移函数来表示单元中的位移,再用位移函数求单元中的应变,根据材料的物理关系,把单元中的应力也用位移函数表示出来,最后将作用在单元上的载荷转化成作用在单元上的等效节点力,建立单元等效节点力和节点位移的关系,这就是单元特性分析;

(4)利用结构力的平衡条件和边界条件把各个单元按原来的结构重新连接起来,集成整体的有限元方程,求解出节点位移。

对不同的结构,要采用不同的单元,但各种单元的分析方法又是一致的。按照这一思想,本书从最简单的平面结构入手,由浅入深,介绍有限元理论以及在汽车结构分析中的应用。

第二节 有限元法在汽车工程中的应用

随着大型有限元通用程序的推广与普及,计算机硬件技术的飞速发展,高校、企业和科研单位在汽车分析设计中都广泛采用了有限元技术,取得了巨大的经济效益。由于有限元通用程序使用方便、计算精度高,其计算结果已成为汽车产品设计和性能分析的可靠依据。有限元分析已成为汽车设计中的重要环节,无论是在车型改造,还是在新车开发阶段,就产品中的强度、刚度、疲劳、振动、噪声及耐撞击性能等问题进行计算分析,可以在很大程度上提高设计品质,缩短开发周期,节省开发费用,真正形成自主的产品开发能力。

汽车设计的直接目的就是安全、舒适、可靠、经济、环保、载质量大和自重轻等,在这些研制工作中要解决的关键问题之一就是汽车强度与刚度问题。在保证具有必要的强度储备和满足一定的刚度标准条件下,既要保证其疲劳寿命,又要保证其装配和使用要求,同时最大限度地减轻汽车结构的自重。随着现代汽车向高速化和轻量化方向的发展,振动和噪声控制日益成为汽车设计的一项关键技术。HVV (noise, vibration and harshness) 控制技术,亦在汽车产品的研发中占据了重要位置。通过整车的动态特性分析以达到控制振动与噪声的目的。另外汽车结构还需要满足安全性、经济性、乘坐舒适性等指标的要求。现代设计理论和方法的建立,特别是计算机辅助分析技术的运用,使汽车结构的分析水平有了质的飞跃。基于有限元法的结构仿真分析已经涵盖了从零部件、总成到整车的所有重要系统,现代汽车工业对新车开发及其各个子系统的研制过程、研制方法和效能评估手段等都提出了更高的要求,整车及绝大多数的零部件设计都必须经过多方面的计算机仿真分析,否则不能通过设计审查。计算机数值模拟技术现在已不仅仅作为科学研究的一种手段,在生产实践中也已作为必要手段普遍应用。

汽车结构由多种材料组成,其部件形式各种各样,包括板、梁、轴、块等,通过铆接与焊接构成空间形状复杂的体系,不可能用传统的解析数学来描述。另外,汽车所承受的载荷也十分复杂,包括自重、货物、乘员等各种载荷的作用,同时也受到各种道路激励和各种车速条件下惯性力的作用以及各连接构件之间的相互约束作用,不可能用经典力学的方法来计算。在汽车结构分析中,有限元法由于其能解决结构形状和边界条件都任意的力学问题而被广泛应用。各种汽车结构件都可应用有限元法进行静态分析、模态分析和动态分析。现代汽车设计中,已从早期的静态分析为主转化为以动态分析为主。因为汽车实际强度更加依赖于汽车振动及随机载荷响应。只有通过结构动态分析,才能进一步提高汽车结构强度的设计水平,汽车结构动态分析技术已经进入实用化阶段。在产品的不同开发阶段(概念设计阶段、详细设计阶段、样车制造阶段、产品测试评估阶段),都已得到广泛应用。在概念设计阶段,从最初的总布置即可

界入,如概略确定车身、发动机等总成的拓扑和结构参数;在详细设计阶段,对结构及零部件进行强度、刚度校核和优化设计;在样车试制阶段,进行专项分析,如部件疲劳分析、整车碰撞计算等,解决设计中存在的问题,将问题解决在产品投放市场之前。达到缩短开发时间、节省研制费用、减少投资风险、获得产品效益最大化的目标。汽车结构有限元分析的应用主要体现在以下几个方面:

(1)整车、车身及零部件结构强度、刚度、模态分析及结构优化设计。一是在汽车设计中对所有的结构件、主要零部件的强度和刚度进行分析;二是基于有限元法作为结构优化设计分析的工具;三是采用有限元法对车身及部件进行模态分析,了解各部件的固有频率及振型,进一步计算出各部件的动态响应,为结构的动态设计建立基础。

(2)车身内的声学设计。将车身结构模态与车身内声模态耦合,评价乘员感受的噪声并进行噪声控制。

(3)疲劳寿命与可靠性分析。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。

(4)碰撞与安全性分析。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,有效提高车辆设计的安全性,同时大幅减少实车试验的庞大费用。一是在碰撞时,车身结构、驾驶系统、座位等能吸收较高撞击能量,缓和冲击;二是发生事故时,确保车内乘员生存空间,通过安全气囊、座椅安全带等对乘员实施被动保护功能,以保证乘员安全并在碰撞后容易进行车外救助和脱险。

(5)气动或流场分析。应用计算流体力学(CFD)方法来预测车身外部流场,为汽车性能和造型设计服务。

(6)整车性能的综合分析及评价。从整体的角度对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。

现代汽车对结构设计提出了越来越高的要求,结构变形分析已不满足于传统的弹性分析,展现出许多新的特点。在要求有限元精确建模及产品精细设计的前提下,产品开发要更多地考虑非线性效应;进行有限寿命设计,以求产品轻量化;进行整车非线性系统分析,即整车平顺性、操纵稳定性不能仅以刚体模型进行分析,还要考虑结构的变形效应。主要体现在以下几个方面:

(1)电子和电器产品使用比例不断加大,这就涉及多物理场的耦合仿真问题;

(2)需要进行更精确的非线性分析,如少片弹簧、轮胎橡胶、悬架的大变形、零部件间的柔性连接等;

(3)汽车零部件分析的一个难点就是分析载荷的不易确定问题,为避免零部件内力确定不清、边界条件的不确定性等情况,影响计算精度甚至结果不可用,可以从总成系统及整车分析入手,如悬架系统、白车身系统及整车虚拟仿真等;

(4)刚柔耦合动力学分析,从传统的刚体动力学分析到考虑结构弹性的应力响应,如悬架车轮系统等。

随着计算机技术的飞速发展,计算规模、计算速度、计算机容量等已不再是主要矛盾,汽车结构有限元分析中,大多数问题都可以在微机上完成。通过建立零部件、结构或系统的有限元计算模型,或将CAD模型进行转换,对模型施加载荷或其他性能条件,即可进行计算。应用中的主要难题是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,尤其是动态载荷、路面载荷等;如何施加载荷,以反映各种行驶状态等。解

决好上述问题,要通过学习有限元基本理论,结合专业知识,将学习有限元法和掌握程序操作技巧结合起来,通过上机实践,加深对问题的理解。但要注意软件只是一个工具,它提供了一个利用有限元法的平台。程序使用的再好,如果不懂有限元理论,不了解专业设计,是做不好有限元分析的,更谈不上为工程结构服务。

图 1-2 ~ 图 1-13 列举了部分汽车结构有限元模型及实例,包括车身、车架、车桥、客车、轿车、货车及零部件等模型。

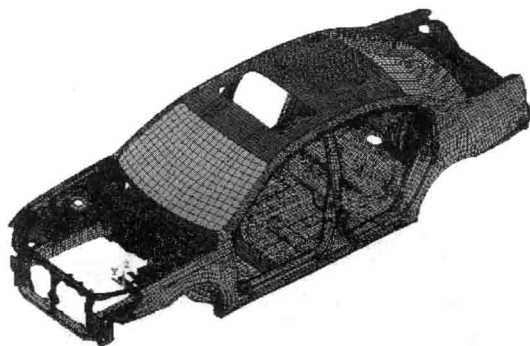


图 1-2

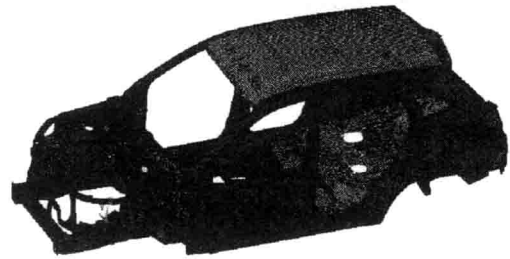


图 1-3

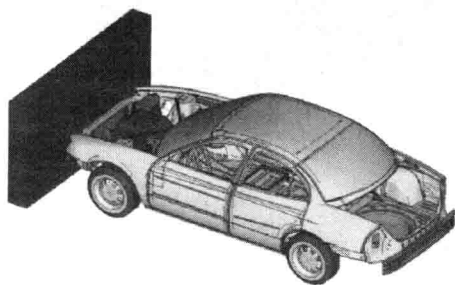


图 1-4

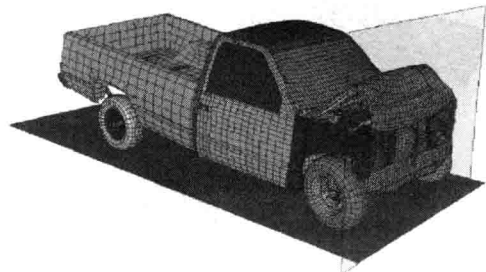


图 1-5

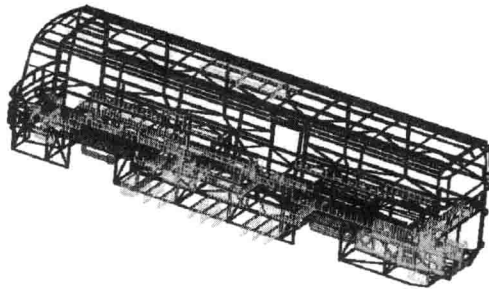


图 1-6

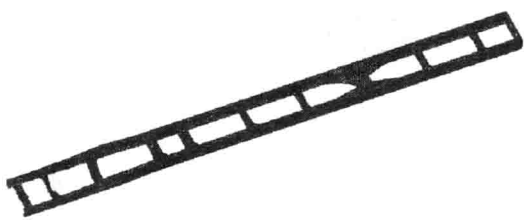


图 1-7

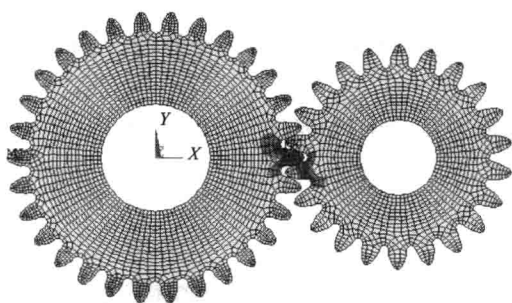


图 1-8

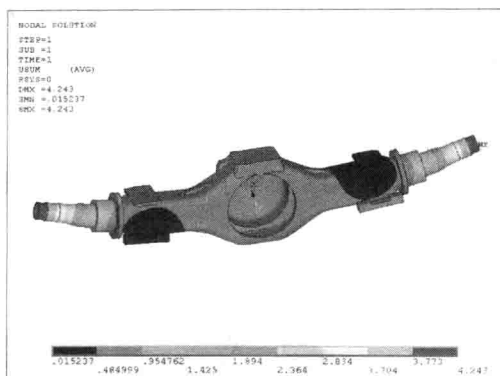


图 1-9



图 1-10



图 1-11

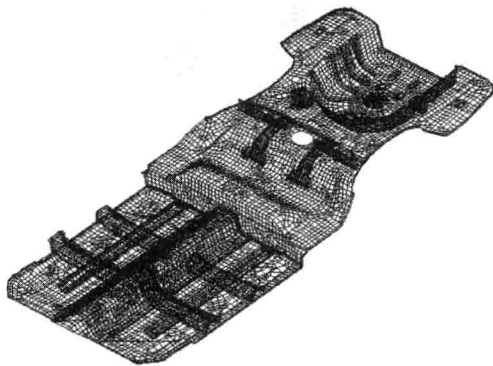


图 1-12

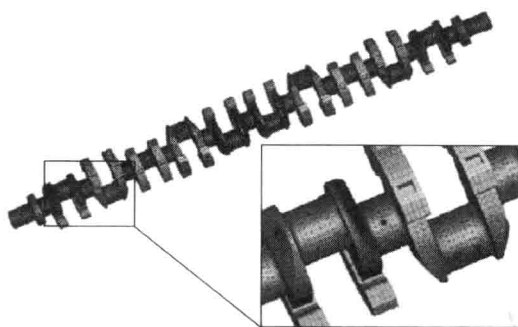


图 1-13

练 习 题

- 1-1 什么叫有限单元法？其基本思想是什么？
- 1-2 为什么要进行汽车结构分析？其主要分析内容有哪些？
- 1-3 请以关键词“有限元方法”、“Finite Element Analysis”、“FEA”、“汽车结构有限元方法”等上网搜索，了解有限元方法的应用情况，举例说明有限元方法在汽车工程中的应用。

第二章 有限元法的力学基础理论

本章介绍有限元法的力学基础理论、基本方程和经典解法,主要有弹性力学、弹性接触问题、薄板弯曲理论、动力学方程及塑性力学基础。旨在通过对弹性力学等基础理论的了解,理解有限元法的基本概念与相关原理,为进一步学习和应用有限元法建立基础。

第一节 概 述

有限元法是将连续体离散化的一种近似方法,依托于力学基础理论与变分原理,将连续体问题划分成有限个小单元的集合,在单元内采用分片插值的方法表示力学函数的分布,求解离散后的代数方程,得到力学函数的数值解。通过用较简单的概念和方法来代替较复杂的问题,然后借助于计算机去求解繁杂的方程,从而得到问题的解。有限元法作为最重要的数值计算方法之一,已经广泛应用于工程结构分析中。有限元法的发展与应用是与计算机技术的发展分不开的,没有计算机软硬件技术的支撑,有限元法就无法实现。随着计算机技术和有限元分析的发展,大量有限元通用和专用计算程序面市,再加上有限元法适应性广、概念简单、易于理解、计算精度高、能够解决工程中的大量问题,使得有限元法迅速得到推广及普及,成为理论研究和工程领域不可或缺的工具。

从有限元法所用力学基础理论来看,涉及弹性静力学、动力学、弹塑性力学与接触理论、疲劳与断裂力学、复合材料力学、流体力学和热力学等众多学科。但是有限元法本身仍在不断发展,各种分析软件功能越来越丰富,分析研究范围大大扩展,已经从传统的力学领域进入到物理、材料、生物和电子等众多工程领域中。虽然有限元法包括了众多方面的分析问题,但其主要的方法框架可以通过弹性力学加以说明,因而弹性力学既是一般变形体力学的基础,又是有限元法的基础,其中静态有限元法是各种有限元法的基础,而动态有限元法等则是静态有限元法的推广。

通过学习并掌握力学基础理论,一方面加深对有限元法的学习理解,另一方面也为将实际问题简化成力学模型打下基础。

第二节 弹性力学基础

弹性力学是研究弹性体在外力和约束作用下应力和变形分布规律的一门学科,是材料力学课程的延续。而材料力学主要研究单个杆件的计算,材料力学除了从静力学、几何学、物理学三方面进行分析外,还要引用一些关于构件形变状态或应力分布的假定,因此得到的解答往往是近似的。弹性力学可不采用这些假定得到比材料力学更加精确的解答,除了研究杆状结构外,还将研究板、壳、实体等非杆状结构。从研究物体的主要力学特征以及求解问题的范围着手,弹性力学主要采用四点假定:①线弹性假定;②均匀连续性假定;③各向同性假定;④小变形假定。超出以上假定研究范围都有专门的学科进行研究,如非线性弹性力学、塑性力学、

复合材料力学、损伤力学、大变形力学等。一般而言,在线弹性范围内,弹性力学的解认为是精确的,它可以用来校核材料力学的解以及有限元分析近似解,可以作为判定截面应力分布规律、检验不同单元、不同网格划分密度的解差别的标准等。

一、空间问题

弹性力学中的基本变量有体力、面力、应力、应变、位移等。体力是作用在物体体积内的力,如重力、惯性力等。面力是沿物体表面上的分布力,如风力、流体压力、接触压力等。作用在物体上的外力主要是指体力和面力。在外力作用下,物体将产生应力。物体内某点 P 的内力就是应力。沿应力所在平面的外法线方向的应力分量称为正应力,沿切线方向的应力分量称为切应力。 P 点在不同截面上的应力是不同的,为了研究 P 点处的应力状态,在 P 点处沿坐标轴 x, y, z 方向取一个微小的平行六面体,各边长分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 。假定应力在各面上均匀分布,每个面上的应力即可分解为一个正应力和两个切应力分量,如图 2-1 所示。当微小的六面体趋于无穷小时,六面体上的应力就代表 P 点处的应力。当物体处于平衡状态时,这个六面体也是平衡的,所以它满足静力平衡方程:

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum F_z = 0 \text{ 和 } \sum M_x = 0 \quad \sum M_y = 0 \quad \sum M_z = 0$$

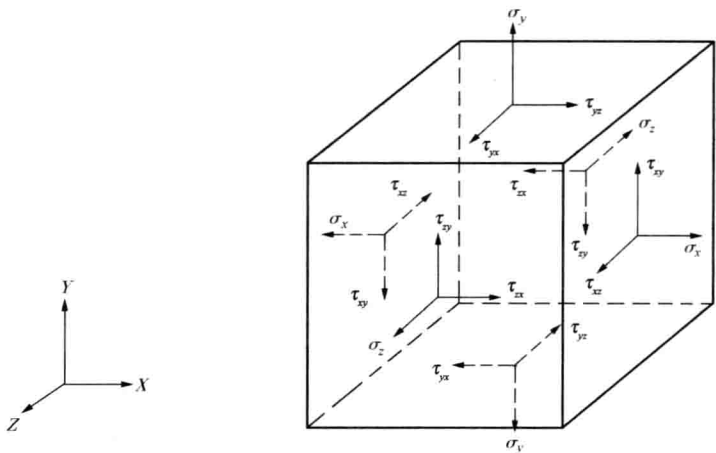


图 2-1 平行六面体应力分布图

可以建立应力与体力的相互关系——平衡微分方程和剪应力互等定理:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \tag{2-1}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \tag{2-2}$$

P 点处的应力分量共有 9 个,由于剪应力是成对存在的,9 个应力分量中只有 6 个是独立的。其中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 3 个正应力, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为 3 个剪应力, X, Y, Z 为单位体积的体力。这样