

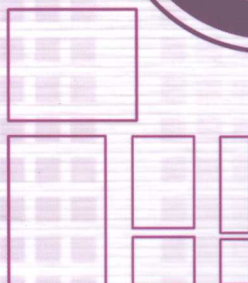
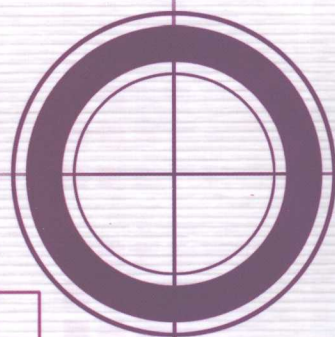


21世纪高等院校规划教材

汽车CAE技术

QICHE CAE JISHU

主编 丁渭平



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪高等院校规划教材
西南交通大学出版基金资助

汽车 CAE 技术

丁渭平 编著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内 容 简 介

本书以国内汽车行业产品设计开发的技术现状及发展趋势为背景,围绕汽车产品自主设计开发这一主线,结合汽车产品的结构特点与开发模式,系统介绍 CAE 技术在汽车工程领域应用的基本原则和实施要点,并以具体产品开发项目为案例,针对 CAE 目标设定、流程设计、要素分析、系统集成等关键问题进行讨论。本书旨在引导读者逐步树立系统化的 CAE 技术实施理念,并在透彻理解 CAE 核心技术的同时,培养其技术组织与管理能力,以适应汽车行业科技创新对复合型人才的要求。

本书可供车辆工程(汽车设计方向)及相关专业的研究生和高年级本科生使用,也可供汽车企业 CAE 技术人员和技术管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车 CAE 技术 / 丁渭平编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2010.2

21 世纪高等院校规划教材

ISBN 978-7-5643-0561-1

I. ①汽… II. ①丁… III. ①汽车—计算机辅助分析—高等学校—教材 IV. ①U46-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 021685 号

21 世纪高等院校规划教材

汽车 CAE 技术

丁渭平 编著

*

责任编辑 李芳芳

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 9.375

字数: 234 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0561-1

定价: 18.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

当代汽车工业已成为国民经济的支柱产业，其发展水平反映了国家工业技术的综合实力，而是否具有独立自主的产品设计开发能力，则关系到民族汽车工业的生死存亡。现阶段，作为先进设计技术的代表，CAE 技术已成为汽车企业产品设计开发的有效手段，以 CAE 为核心的技术体系成为企业核心技术的有效载体。在我国，随着行业总量的不断提升和市场竞争的白热化，加上知识产权问题的压力，产品自主设计开发能力的培养和提升已成为汽车企业生存与发展的关键问题，而 CAE 技术的推广应用正是解决这一问题的锐利武器。

CAE 技术依托于电子计算机的产生而产生，并伴随着计算机技术、信息技术、结构与系统分析技术、优化设计技术的发展而发展。在工程实践中，它不仅是产品分析与设计技术，而且是产品设计和开发理念，涉及思想方法的改变。特别是对于国内汽车行业而言，CAE 技术的推行还意味着对现行技术体系的变革，它强调在集成环境中的应用，以及相关技术环节的联系与协调，这已成为该项技术在推广应用中最值得关注的方向发展，并成为理论及实践中需要研究和解决的热点问题。本书突破了孤立看待和抽象研究 CAE 技术的局限性，将 CAE 技术置于国内汽车行业现实的技术背景条件之下，以系统工程的观点统筹 CAE 内外部技术要素，提出“CAE 空间”的概念。并结合企业技术发展战略，面向产品自主设计开发探讨 CAE 技术体系的构建与完善，以期有效服务于产业化技术创新。

目前，商品化的主流 CAE 软件在国内汽车行业中的普及程度越来越高，这无疑促进了国内汽车 CAE 技术的迅速发展。然而，众多企业 CAE 技术应用水平的实质性提升却并未和其软件引进的力度成正比。究其原因，基础数据不足、测试条件不完善、评判标准与设计准则缺失等成为客观上的困难，而对 CAE 技术体系认识上的局限性、相关知识与技能结构的不适应以及工程经验不足等，则成为主观上的障碍。为确保 CAE 技术沿着正确的轨道迅速发展，无论是对有志于从事 CAE 工作的高校汽车专业学生，还是对正在从事 CAE 工作的汽车企业技术人员和技术管理人员，均应对上述的困难与障碍保持清醒的认识。本书从汽车企业 CAE 工程实际出发，针对 CAE 技术应用与发展中所面临的关键问题进行了系统性的阐述与分析，在此基础上提出了相应的技术对策及原则，这对于 CAE 技术理论体系的完善和发展具有重要意义。同时，本书的一些研究成果还能成为具有一定现实意义的技术解决方案，为相关技术工作的开展提供较为直接的借鉴与帮助。

现阶段，CAE 技术的推广应用已受到国内汽车行业的高度重视，相关企业迫切需要掌握 CAE 技术的高素质人才，而国内高校汽车专业针对这方面的人才培养工作明显滞后于企业需求。其中，缺乏针对性的教材成为亟待解决的问题。另一方面，企业 CAE 技术人员及技术管理人员在工作实践中也迫切需要系统的、完善的技术理论及原则指导，本书即致力于解决这些问题。它以国内汽车行业产品设计开发的技术现状及发展趋势为背景，围绕汽车产品自主设计开发这一主线，结合汽车产品的结构特点与开发模式，系统介绍了 CAE 技术在汽车工程领域应用的基本原则和实施要点，并以典型产品开发项目为案例，针对 CAE 目标设定、流程设计、要素分析以及系统集成等关键问题进行讨论。本书共 6 章，按照“从基础到应用、从微观到宏观”的顺序编排，具体包括绪论、CAE 技术应用的公共学科基础概要、汽车 CAE 的专业理论与技术基础概要、汽车 CAE 的部分主流软件系统及其应用、面向汽车产品自主开发的 CAE 技术应用、汽车 CAE 的技术体系。每章配有思考题，其中很多并没有固定的标准答案，需要提出独立见解，旨在引导读者逐步树立系统化的 CAE 技术实施理念，并在透彻理解 CAE 核

心技术的同时,培养其技术组织与管理能力,以适应汽车行业科技创新对复合型人才的要求。

本书可供车辆工程(汽车设计方向)及相关专业的研究生和高年级本科生使用,也可供汽车企业CAE技术人员和技术管理人员参考。本书在编著过程中形成如下的鲜明特点:

(1)与工程实际紧密结合,切中当前国内汽车行业CAE技术实施与发展的关键问题。本书所反映的主要技术观点根植于汽车行业的工程实际,在实践中经受了检验,并通过去粗存精、去伪存真的理论提炼与修正过程,揭示出CAE技术实施及发展中的内在矛盾和规律。在此基础上,针对汽车行业CAE技术推广应用中的一系列关键问题提出解决对策,并形成相应的技术原则及规范,力求较为直接地支持产业化工作。

(2)紧密联系CAE技术的最新发展趋势,理念先进,观点新颖。本书从系统化的角度对CAE技术做了全面的审视与分析,注重相关技术环节的联系与协调,这适应于当前汽车行业工程实际中对CAE技术的最新发展要求。同时,充分关注汽车行业热点技术问题,诸如悬架系统集成与整车匹配、车轮定位参数的设计与调校以及车内低频噪声的治理等,旨在为CAE技术在这些领域的应用提供必要的启迪与帮助,所述观点及相关实践受到许多同行专家的认可。

(3)以产品设计开发流程为主线,实现CAE技术理论、理念与技能阐述的有机结合。本书以汽车产品自主设计开发的模式与流程分析为切入点,并以相关产品的设计开发流程为主线,面向典型问题的解决,针对CAE技术的相关理论、理念及CAE软件的综合运用等问题加以梳理和阐述,脉络清晰且贴近实际。

(4)深入浅出,便于学习和理解。作为主要面向高校汽车专业的专著型教材,本书在编写中充分考虑到学生的知识层次、知识结构和学习特点,并借助CAE软件能够“屏蔽艰深理论基础”的功能,合理组织材料,控制难度,便于学习和理解。

本书的写作素材主要来源于作者在相关汽车企业主持CAE工作期间的实践经验与理论思考,并融合了作者在高校任教期间针对汽车专业本科生、研究生的授课材料,以及针对汽车企业CAE工程师的培训材料,是作者近年来从事汽车CAE技术应用及理论研究的一次总结和升华。

西南交通大学汽车工程研究所的杨明亮、杨玲敏、沈渡同志参加了本书的编写工作,中国汽车技术研究中心的李洪亮博士对本书的撰写提出了建设性意见并提供了部分案例资料,四川航天职业技术学院的王昊涵同志、西南交通大学汽车工程研究所的李建锋同志也提供了部分素材,在此深表感谢!

本书在撰写过程中,引用了许多相关文献资料,在此对这些作者致以最诚挚的谢意!

衷心感谢相关企业的积极鼓励与大力支持!

特别感谢西南交通大学出版基金的资助!

汽车CAE技术博大精深,方兴未艾。在其日新月异的发展中,新的思想、观点与技术手段不断涌现,并有许多问题尚在争论之中。因此,本书的研究只能是管中窥豹,希望能够起到抛砖引玉的作用。由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请读者及同行专家批评、指正!

丁渭平

2009年8月于成都

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 关于 CAE 技术的一般性认识	1
1.2 CAE 技术与汽车产品开发	9
思考题	14
参考文献	15
第 2 章 CAE 技术应用的公共学科基础概要	16
2.1 一个支撑 CAE 全过程的理论与技术框架	16
2.2 数值分析	17
2.3 有限单元法	22
2.4 多体系统动力学	27
2.5 优化设计	33
2.6 工程数据库系统	45
2.7 人工智能	49
思考题	53
参考文献	53
第 3 章 汽车 CAE 的专业理论与技术基础概要	55
3.1 汽车 CAE 的专业支撑体系	55
3.2 汽车设计的内容、特点及步骤	56
3.3 悬架系统集成与整车匹配的概念内涵及核心技术	60
3.4 车轮定位参数的设计与调校	68
3.5 车内低频噪声治理的技术解决方案	75
思考题	80
参考文献	81
第 4 章 汽车 CAE 的部分主流软件系统及其应用	82
4.1 CAE 软件及选择	82
4.2 ADAMS 及其应用	83
4.3 ANSYS 及其应用	91
4.4 NASTRAN 及其应用	95
4.5 SYSNOISE 及其应用	97
4.6 MATLAB/Simulink 及其应用	100
思考题	103
参考文献	104

第 5 章 面向汽车产品自主开发的 CAE 技术应用	105
5.1 汽车产品的自主开发	105
5.2 基于 AI 选型的悬架系统参数化设计流程构造 ^[2]	106
5.3 悬架系统整车匹配的性能仿真与协调分析	111
5.4 悬架弹性元件的最佳刚度设计 ^[8]	117
5.5 支持悬架系统整车匹配设计的工程数据库系统	122
思考题	125
参考文献	126
第 6 章 汽车 CAE 的技术体系	127
6.1 CAE 项目的组织与管理	127
6.2 基于 CAE 的汽车产品设计平台构建原则与总体构架	129
6.3 悬架系统设计平台 ^[1]	131
6.4 底盘集成控制系统设计平台	136
思考题	143
参考文献	143

第1章 绪论

1.1 关于 CAE 技术的一般性认识

1.1.1 CAE 及其相关概念

CAE 的英文全称为 “Computer Aided Engineering”，中文意为 “计算机辅助工程”，是指以计算数学、计算力学及相关工程科学为基础的针对复杂工程或产品进行数学建模、计算分析、行为模拟与优化设计的计算机信息处理技术。其中，“相关工程科学”涉及机械、电子、建筑、交通、气象、地质、海洋、生物、医药等极为广阔的应用领域，由此形成了众多的 CAE 技术应用分支。而计算数学与计算力学则渗透于各个应用分支，为具体工程问题的建模与求解提供相应的数学工具，从而构成相关 CAE 软件的核心计算方法。

CAE 是一个很广的概念，从字面上讲它可以包括工程和制造业信息化的所有方面。但是，传统的 CAE 主要指用计算机对工程和产品进行性能与安全可靠性的分析，对其未来的工作状态和运行行为进行模拟，及早发现设计缺陷，并证实未来工程、产品功能和性能的可用性与可靠性^[1]。可见，CAE 是一项综合性的应用技术，它以解决具体工程问题为出发点，借助于计算机信息处理手段，集成应用计算数学、计算力学等“单元”技术，形成系统化的技术解决方案以支持复杂工程或产品的优化设计。其中涉及计算数学、计算力学、优化设计等比较重要的概念，对它们进行必要的了解有助于对 CAE 技术的透彻理解与全面把握：

(1) **计算数学**。现代工程科学与技术的发展十分迅速，它们都有一个共同的特点，就是需要应对大量的数据处理问题。例如，发射一颗探测宇宙奥秘的人造卫星，从卫星设计开始到发射、回收为止，科学家和工程技术人员及工人就要对卫星的总体、部件进行全面的设计和生 产，要对选用的火箭进行设计和生产，这里面就有许许多多的数据要进行准确的计算。发射和回收的时候，又需要对发射角度、轨道、遥控、回收下落角度等进行精确的计算。又如，在高能加速器里进行高能物理试验，研究具有很高能量的基本粒子的性质及其相互作用和转化规律，这里面也有大量的数据计算问题。在汽车产品开发中，从整车总布置到关键零部件的可靠性分析，从车身造型到发动机、底盘与车体的性能匹配等一系列设计过程中无不贯穿着海量的数据计算。计算问题可以说是现代社会各个领域普遍存在的共同问题，工业、农业、交通运输、医疗卫生、文化教育等，哪一行哪一业都有许多数据需要计算。通过数据分析，以便掌握事物发展的规律。研究计算问题的解决方法和有关数学理论问题的学科就叫做计算数学。它属于应用数学的范畴，内容十分丰富，主要包括：代数方程，线性代数方程组，微分方程的数值解法，函数的数值逼近问题，矩阵特征值的求法，最优化计算问题，概率统计计算问题，等等，还包括解的存在性、唯一性、收敛性和误差分析等理论问题。在工

程领域中, 计算数学更多地被称为“数值计算方法”或“数值分析”, 它“教会”计算机如何有效地解决数学和逻辑问题, 在工程科学与技术中正发挥着越来越重要的作用, 是支撑计算力学的基础, 二者共同成为 CAE 技术的理论与方法基石。

(2) **计算力学**。计算力学是根据力学中的理论, 利用电子计算机和各种数值计算方法, 解决力学中的实际问题的一门新兴学科。它横贯力学的各个分支, 如固体力学、岩土力学、水力学、流体力学、生物力学等, 并不断扩大相关工程领域中力学的研究和应用范围, 同时也在逐渐发展自己的理论和方法。计算力学的产生和发展得益于计算数学和大型通用计算机这种强大计算工具的出现, 其核心内容是具有力学应用针对性的各种数值计算方法, 它们往往直接被相关 CAE 软件的解算内核所吸收。经典的、具有代表性的计算力学方法主要有: 有限差分法、变分法、有限单元法、边界单元法、无单元法等。这些方法绝大多数是将偏微分方程的边值问题转化为代数方程问题, 然后用计算机在有限个点上求解。近年来, 多刚体系统的动力学理论与方法得到迅速发展, 它将传统的刚体力学、分析力学与先进的计算机技术结合起来, 形成了计算力学的新分支, 已用于对飞行器、机器人等复杂系统进行运动学和动力学分析。从 20 世纪 70 年代末开始, 多刚体系统动力学应用到了汽车技术领域, 并逐渐发展到与有限单元法等相结合以解决“多柔体”和“刚弹耦合”等问题, 进而出现了所谓的“多体系统动力学”理论与方法。计算力学对各种力学问题的适应性强, 应用范围广。它能详细给出各种数值结果, 通过图像显示还可以形象地描述力学过程。它能多次重复进行数值模拟, 比实验省时且经济。但计算力学也有弱点, 例如, 它不能给出函数形式的解析表达式, 因此比较难以显示数值解的规律性。许多非线性问题由于解的存在和唯一性缺乏严格证明, 数值计算结果须进行必要的验证。用计算力学方法求解各种力学问题, 一般有下列几个步骤:

- ① 用工程和力学的概念及理论建立计算模型;
- ② 用数学知识寻求最恰当的数值计算方法;
- ③ 编制计算程序进行数值计算, 并在计算机上求出答案;
- ④ 运用工程和力学的概念判断和解释所得结果和意义, 得出科学结论。

这实际上正是应用 CAE 技术解决工程问题的基本思路。计算力学涉及各个力学分支, 为它们服务, 促进它们的发展, 同时也受它们的影响。计算力学曾揭示出一些前所未知的物理现象, 如两个非线性孤立波在相遇和干扰后仍能保持原有的振幅和波形, 就是首先从数值计算中发现的, 然后才通过实验得到证实。计算力学也推动了变分方法等基本力学方法和计算方法的研究。计算力学对力学实验提出了更高的要求, 促进了实验的发展。在计算力学的帮助下, 对实验过程中测点的最佳位置、测量最佳时刻等的确定有了更可靠的理论指导。计算力学在应用中也提出了不少理论问题, 如稳定性分析、误差估计、收敛性等, 吸引许多数学家去研究, 从而推动了数值分析理论的发展。还值得一提的是, 计算力学也为实际工程项目开辟了优化设计的前景。过去, 工程师们虽有追求最优化设计的愿望, 但力不从心。现在, 由于有了强有力的结构分析方法和工具, 便有条件研究改进设计的科学方法, 逐步形成了计算力学的一个重要分支——结构优化设计。

(3) **优化设计**。优化设计是从多种方案中选择最佳方案的设计方法, 它是 CAE 技术应用的目的是归宿。优化设计以数学中的最优化理论为基础, 并以计算机为手段, 根据设计所追求的性能目标, 建立目标函数, 在满足给定的各种约束条件下, 寻求最优的设计方案。第二次世界大战期间, 在军事上首先应用了优化技术。1967 年, 美国的 R.L.福克斯等发表了第一篇机构最优化论文。1970 年, C.S.贝特勒等用几何规划解决了液体动压轴承的优化设计问题。

后,优化设计在机械设计中得到应用和发展。随着数学理论和电子计算机技术的进一步发展,优化设计已逐步成为一门新兴的、独立的工程学科,并在生产实践中得到了广泛的应用。通常设计方案可以用一组参数来表示,这些参数有些已经给定,有些没有给定,需要在设计中优选,称为设计变量。如何找到一组最合适的设计变量,在允许的范围内,能使所设计的产品结构最合理、性能最好、质量最高、成本最低(即技术经济指标最佳),有市场竞争能力,同时设计的时间又不要过长,这都是优化设计所要解决的问题。一般来说,优化设计有以下几个步骤:①从工程问题本身的概念和原则等出发,制定目标要求,确定设计变量及其约束条件,从而建立优化模型;②审视优化模型的特点,选择适宜的最优化算法;③进行程序设计,并由计算机筛选出最优设计方案;④对所获得的最优设计方案进行解释、评价及验证。显然,这与上述计算力学问题的求解步骤具有内在的一致性。经典的最优化算法基本上是“逐步逼近”型的算法,有线性规划和非线性规划之分,其中又包含许多具体的算法。而最优化算法的全局收敛问题一直是该领域理论及应用中关注的焦点,并已成为优化设计理论与方法研究中最活跃的部分。在这方面,研究者们提出了一系列所谓的“现代最优化算法”,如各种启发式算法、模拟退火算法、遗传算法和人工神经网络算法等,许多已成功地应用于CAE的具体工作实践中。

1.1.2 CAE 技术内涵的演进

CAE 技术研究始于 20 世纪 50 年代中期,其发展始终以 CAE 软件的产生和发展为标志。商品化的 CAE 软件出现于 70 年代初期,到 80 年代中期 CAE 软件在可用性、可靠性和计算效率上已基本成熟。目前,CAE 技术正向着平台化的方向发展,服务于产品全寿命周期,日益成为联系产品设计、制造与终端用户的技术纽带。伴随着这一发展过程,CAE 的技术内涵也在不断地演进。这里从应用的角度出发,按发展阶段将其分为 4 种观点,它们均具有现实的合理性:

(1) 以往的观点——CAE 基本等同于有限单元分析技术。CAE 的理论基础起源于 20 世纪 40 年代。1943 年,自数学家 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来求解 St. Venant 扭转问题以来,一些应用数学家、物理学家和工程师由于各种原因都涉足过有限单元的概念。但只是到 1960 年以后,随着电子计算机的广泛应用和发展,有限单元分析技术这门特别依赖于数值计算的学科才真正步入了飞速发展时期。1963 年,Dr. Richard MacNeal 和 Mr. Robert Schwendler 投资成立了 MSC 公司,开发出被称为 SADSAM (Structural Analysis by Digital Simulation of Analogy Methods) 的有限单元法结构分析软件。两年后, MSC 公司中标参与美国国家航空及宇航局 (NASA) 的计算结构分析方法研究,其程序 SADSAM 更名为 MSC.NASTRAN,从而拉开了基于有限单元分析技术的大型通用 CAE 软件研制及商品化的序幕。由于有限单元分析所涉及的问题和算法基本上全部来源于和应用工程之中,因而 CAE 遂成为这门学科的名称^[2]。几十年来,有限单元分析技术的应用已由弹性力学的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稳定问题、动力问题和波动问题;分析的对象从弹性材料扩展到塑性、黏塑性和复合材料等,并从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域。其作用范围渗透到工程问题分析的诸多方面,

在很多情况下成为 CAE 应用中首选（甚至是唯一）的理论基础和技术手段。因而，在以往相当长的一段时间内，人们自觉或不自觉地将 CAE 技术和有限单元分析技术等量齐观。

（2）较早期的观点——CAE 基本等同于有限单元分析加上优化设计技术。有限单元法理论的逐步成熟和计算机技术的迅速发展使得 CAE 技术应用经历了 20 世纪 60 年代的探索发展时期，70 年代至 80 年代的独立发展专家应用时期，直到 90 年代与 CAD 相辅相成的共同发展、推广使用时期。在这一阶段，CAE 与 CAD 的界限和分工越来越明确，使用者也从分析专家转向设计工程师，客观上要求 CAE 与 CAD 之间交互设计信息，其中特别强调 CAE 过程须向 CAD 过程反馈有关设计缺陷的发现、评判、溯源信息及其改进设计的指导意见。而优化设计理论与技术对于此类问题的解决独具优势，因而引起了工程应用领域的高度重视。在此背景下，CAE 的技术内涵中被顺理成章地引入了优化设计的元素，即 CAE 是使用计算机系统来分析 CAD 模型，允许设计者模拟并研究产品的行为，以便进行改进和优化产品设计。此时，CAE 技术的核心思想仍然根植于有限单元法的“结构离散化”，就是将实际结构离散为有限数目的规则单元组合体，实际结构的物理性能可以通过对离散体进行分析，得出满足工程精度的近似结果来替代对实际结构的分析。而在对 CAE 的功能描述中则增加了“优化设计”的提法，认为 CAE 是用计算机辅助求解复杂工程和产品结构强度、刚度、屈曲稳定性、动力响应、热传导、弹塑性、表面接触等力学性能的分析计算以及结构性能的优化设计等问题的一种近似数值分析方法。相应的，许多商品化 CAE 软件中也集成了优化设计的功能模块。

（3）现实的观点——CAE 基本等同于多刚体动力学加有限单元分析加优化设计技术。这一观点潜移默化地形成于现阶段 CAE 技术应用的工作实践之中。例如，针对汽车这样的复杂装配体，在整车、底盘及其各个子系统的建模与分析中，需要处理大量的机构运动学和动力学问题，其特点是各部件的大位移运动和空间非线性关系，这些正好是多刚体系统动力学的适用范围。多刚体系统动力学是在经典力学的基础上发展起来的一个新的学科分支，它的研究对象是由多个刚体连接构成的系统，它的主要任务是研究建立系统的适用于计算机的动力学模型的方法^[3]。目前在工程领域中，以 MSC.ADAMS 为代表的多刚体系统动力学分析软件已获得较为广泛的应用，涉及航空、航天、汽车、发动机以及铁道车辆等行业。与有限单元法相比，多刚体系统动力学处理大位移运动和空间非线性关系的数学模型具有更小的自由度数，在满足精度要求的前提下其求解效率大大提高。在实际应用中，多刚体系统动力学与有限单元法相结合，还形成了所谓的“多柔体分析”及“刚弹耦合分析”技术，其基本思想是将有限单元分析流程嵌入到多刚体系统动力学的总体分析流程中去，将原先被视为刚体的相关结构转化为柔性体加以考虑并在其上划分有限单元，从而能够相对确切地反映结构实际存在的变形状态，以提高仿真分析的置信度。另一方面，多刚体系统动力学一般用于探查相对宏观的机构（装配体）运动规律，在很多情况下可为相对微观的有限单元分析提供必要的边界条件，这在动态分析的场合往往更加需要。事实上，作为 CAE 的计算力学基础，无论是多刚体系统动力学还是有限单元分析，其作用均在于揭示出所关心的分析对象性能与其结构特征之间的内在联系，并进一步建立它们之间的直接定量关系，这是实施优化设计的前提。

（4）更全面的观点——CAE 基本等同于计算力学手段及其综合再加上优化设计技术。随着 CAE 技术应用领域的不断拓展，其所涉及的专业学科也越来越丰富，如固体力学、流体力

学、声学、空气动力学、传热学及燃烧学等。当前,面向专业学科的 CAE 软件不断出现,其解算内核也不只限于有限单元和多刚体系统动力学方法,有些还呈现出多种计算力学手段综合运用特点。例如,美国 Vibro-Acoustic Sciences 公司的声学分析软件 AutoSEA2 就是以统计能量分析法作为其解算内核的,而另一著名声学分析软件 LMS.SYSNOISE 的解算内核则同时吸收了有限单元法和边界单元法,等等。值得注意的是,随着产品复杂程度的不断提高,CAE 必然面临着更加复杂的分析对象。现阶段,CAE 分析中的一些复杂问题已贯穿于多个学科领域。例如,在汽车工程领域越来越受到重视的车辆声振舒适性(Noise, Vibration & Harsion, 简称 NVH)分析问题,它涉及车身、悬架、动力总成及传动系统等多个部件(子系统)的相互作用与协同,其研究与解决依赖于腔体声学、结构振动及系统动力学等多个学科中的深层知识,并需要进行声振耦合、刚体与弹性体耦合特性的动力学分析,数学建模与求解极其复杂和困难。在这方面,新兴的多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, 简称 MDO)理论及方法为问题的解决提供了良好思路^[4-7],而相关的计算力学理论与方法的综合运用是 MDO 的基础,在形式上则表现为基于工作流程协同的相关专业学科 CAE 软件的系统集成。

1.1.3 CAE 系统的功效分析

通常,为了在计算机中分析和模拟一个产品,首先必须建立其“产品模型”,即以一定的数据抽象,定义和表达产品在其生命周期中的相关信息,包括数据、结构和关系等。有了产品模型以后,就可以运用 CAE 的分析方法(计算力学手段及其综合),来探查产品在工作环境中的状态和行为,以便评定产品是否满足设计要求,并在必要时提出改进设计的意见。以机械工程领域 CAE 技术应用为例,CAE 系统可以计算出产品各构件的运动速度、加速度和受力的大小,并可以对运动的机构进行动态分析,这是其“分析”功能;CAE 系统可以在计算机屏幕上显示出机构运动的三维动画,以这种形象、逼真的方式向设计者传递分析结果信息,这是其“模拟”功能;CAE 系统可以根据分析与模拟结果,检查机构的运动轨迹,校核运动件的干涉情况,检查受力变形是否合理,评判振动行为是否超标等,这是其“解析”功能。CAE 系统还可以采用最优化等方法进行方案优选,使方案设计考虑的因素更为精细、全面、合理,这是其“改进”功能。

总之,当前 CAE 系统的功能主要体现在对产品状态和行为的分析与模拟,以及对原始设计方案的解析和改进,具体如图 1.1 所示。其中,“分析与模拟”是 CAE 系统的基础功能,它以计算数学、计算力学及相关工程科学的分析理论与技术为基础,并要求使用者掌握相应的 CAE 软件应用技能。而“解析”和“改进”则是 CAE 系统在工程应用中的价值体现,它需要相关工程科学领域的专业背景知识与工程经验作为支持,相应的评价标准与准则更是不可或缺。得益于计算机图形、图像处理技术的飞速发展,CAE 软件的图形用户界面(GUI)不断完善,人机交互更加友好。现阶段,许多大型的商品化 CAE 软件借助其精心设计的用户界面,“屏蔽”了上述 CAE 系统基础功能所涉及的艰深理论与技术基础,代之以形象、逼真的计算机三维图形操作,因而更易被广大工程技术人员所接受。这实际上降低了 CAE 软件的学习与应用难度,有助于 CAE 技术的推广。同时,也使工程技术人员能够更加专注于工程问

题本身,即可以将更多的精力投入到具体的工程应用领域。事实上,当前 CAE 工作的实践已反复证明:CAE 技术实施效果的好坏更多地取决于应用领域专业背景知识与工程经验的掌握和积累程度,以及相关评价标准与准则是否健全。

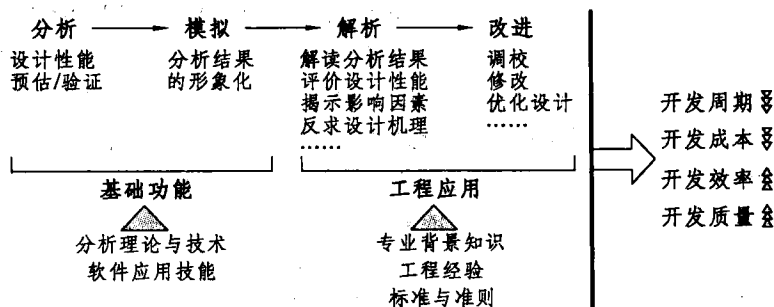


图 1.1 CAE 系统的功效

CAE 技术应用于产品设计开发,由于能在早期设计(图纸)阶段对产品性能作出预估,及时发现设计缺陷,从而大大减少了设计开发中的盲目性和后续返工的几率。又由于减少了对物理样机和试验的依赖,从而节省了相应的成本与时间投入。这意味着产品开发周期与开发成本的下降,以及开发效率和开发质量的提高——CAE 技术所追求的应用效果即在于此,如图 1.1 所示。需要指出的是,人们提出和应用 CAE 技术的初衷或许在于:有朝一日能够完全摆脱对物理样机和试验的依赖。但是,迄今为止对于绝大多数的应用场合,这种期待仍然是一个梦想。其原因在于,就 CAE 技术的应用现状而言,针对复杂产品分析结果的置信度仍然偏低,这已成为当前该领域普遍存在且最为棘手的瓶颈问题之一。因此,对 CAE 分析结果置信度的检验与提高成为关注的热点。一般认为,最具说服力的置信度检验方式是将 CAE 分析结果与相应的物理样机试验结果进行对比,并往往约定俗成地将试验结果视为标准。进而,依据在对比中发现的线索,并在一定的处理原则指导下对 CAE 模型(有时也涉及求解算法)进行修正,以提高其分析结果与试验结果相一致的程度。这意味着,现实情况下的 CAE 过程与物理样机和试验的联系仍旧非常紧密。特别是在 CAE 工作开展初期,由于基础数据与工程经验相对薄弱,更加需要相关试验条件的支持。由此极可能导致开发成本在一定时期内反而有所提高,这是可以理解的。随着 CAE 工作的深入与完善,将找到 CAE 与试验之间的最佳平衡点,长期内获得良好的应用效果。

1.1.4 CAE 与产品设计开发的契合

计算机技术已成为现代工业提升竞争力的主要手段之一。最先将计算机技术引入工业应用的是 CAD (Computer Aided Design, 计算机辅助设计),使用计算机软件直接从事图形的绘制与结构的设计;然后是 CAM (Computer Aided Manufacturing, 计算机辅助制造),使用计算机来操纵各式各样的精密工具机器以制造不同的零件组;最后引入的是 CAE,基于在产品分析和优化设计中强大的助力作用,自引入工业应用以来得到了长足的发展和广泛的应用。

如图 1.2 所示,CAE 与 CAD、CAM 在产品的设计开发中的定位和功能各有侧重,三者“天

然地”集成于现代产品设计开发的一般过程之中。其中,对 CAD 的理解分为三个层面,分别赋予“D”不同的解释:“Drawing”、“Design”和“Development”,即“绘图(现已扩展到三维造型)”、“设计”和“开发”。当前在以汽车工业为代表的诸多应用领域中,往往更习惯于“Drawing”的理解方式,并据此划分 CAD 与 CAE 的功能界限,形成 CAD 与 CAE 的相互驱动(这一点非常重要!),进而决定了 CAD 与 CAE 部门的职能和协同关系。

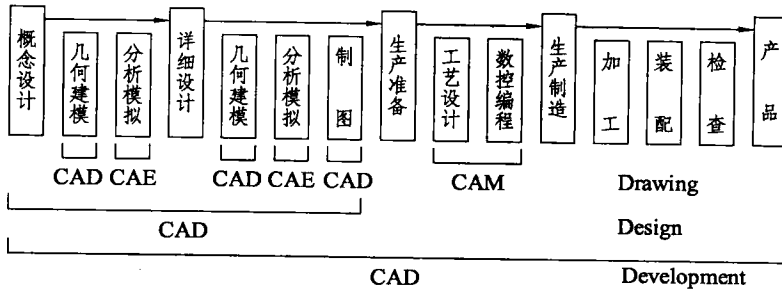


图 1.2 现代产品设计开发的一般过程

图 1.2 从宏观上揭示了 CAE 技术在产品设计开发过程中所处的环节和所起的作用。基于对传统 CAE 概念的扩展,另一种有影响力的观点认为:CAE 是包括产品设计、工程分析、数据管理、试验、仿真和制造在内的计算机辅助设计和生产的综合系统^[8]。它在产品开发周期每一阶段的所有工程功能的集成环境中组合了 3 个关键工程要素——应用(性能、结构集成性、可靠性、成本)、设备资源(硬件和软件)、技术(数据和信息管理)。因此,CAE 方法会导致整个工程过程本身的重新构造和简化,而不是当前过程中具体步骤的自动化(CA-Drawing 和 CAM 属于这种情况)。

而对于具体产品设计流程,CAE 的切入方式灵活多样,其中往往涉及与试验的关系处理,难以给出统一描述。以下仅以汽车悬架系统设计为例来简要说明这一问题:

在汽车悬架系统设计中,首先需要确定与悬架有关的整车平顺性、操纵稳定性等方面的性能要求,然后选定满足这些性能要求的悬架型式、结构参数和特性参数,必要时还要考虑成本控制等因素,最后再进行零部件结构设计。其中,选定悬架型式、结构参数和特性参数是问题的关键,其实质就是进行悬架与整车系统的性能匹配。当前在工程实际中,一般是从类比和经验出发进行悬架选型并构造原型样车,然后以试验为基础,通过反复试凑来确定与所预期的整车性能要求相匹配的悬架结构及特性参数,由此衍生出如图 1.3 所示的基于试验的悬架系统设计流程,涉及“零部件性能试验”与“整车性能试验(台架、道路)”这两个阶段。但这样做周期长、费用高、对经验的依赖性大。为解决这些矛盾,引入 CAE 技术对该设计流程进行调整。调整后的设计流程如图 1.4 所示,它以性能协调及仿真分析为核心,并将悬架系统选型、参数匹配、零部件结构设计、零部件及系统性能试验等主要环节有机地结合在一起,成为一项系统工程。与图 1.3 相比较,图 1.4 的设计流程中增加了“系统性能仿真分析”、“悬架与整车系统性能协调分析”以及“零部件性能分析”这三个 CAE 处理环节以及相应的设计循环。表面看来,这使得设计流程变得更为复杂,但实际上却大大减少了设计过程中的盲目性,减轻了试验环节上的压力,因而从整体上提高了设计效率。

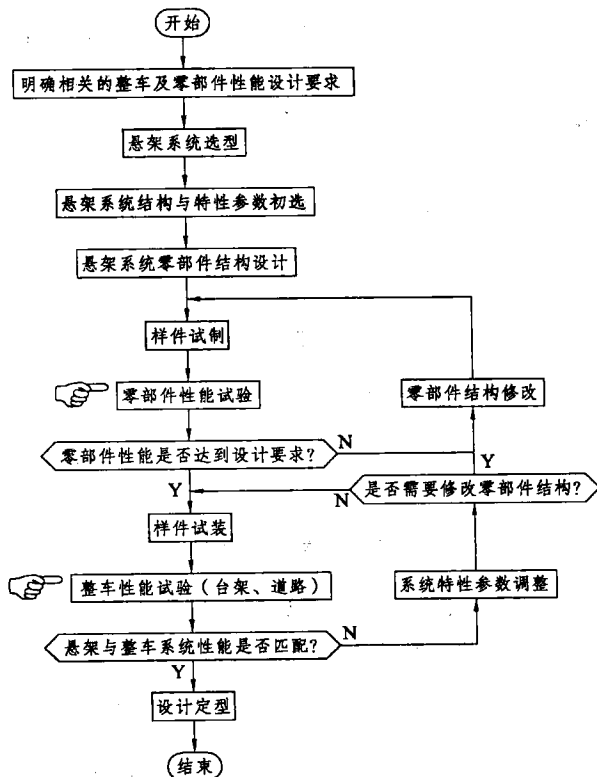


图 1.3 基于试验的悬架系统设计流程

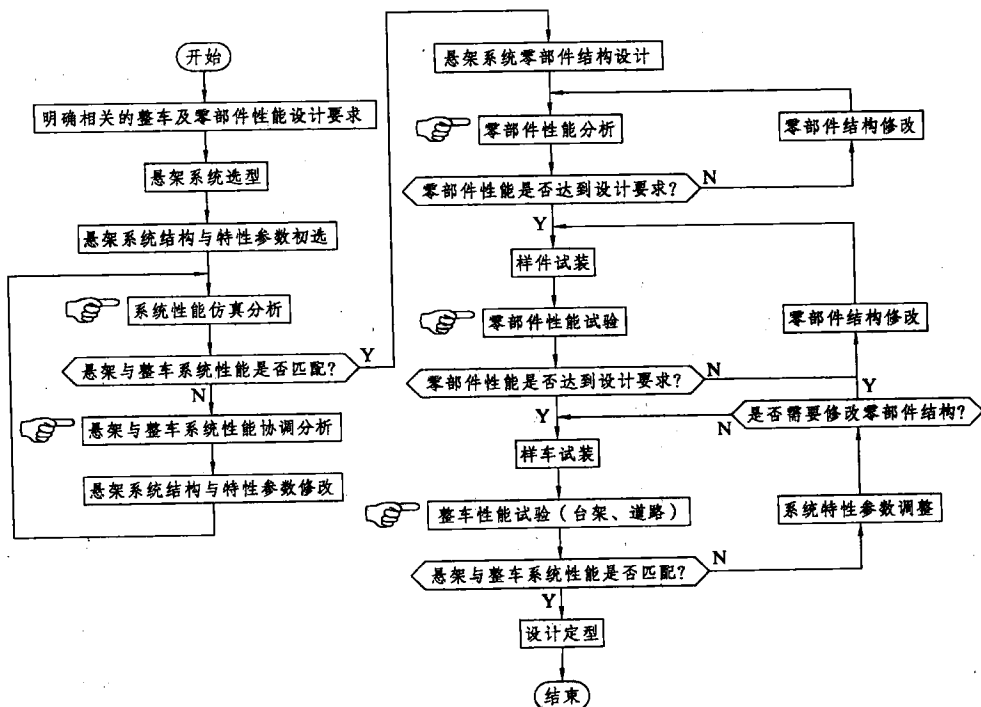


图 1.4 引入 CAE 技术的悬架系统设计流程

1.2 CAE 技术与汽车产品开发

1.2.1 CAE 技术在汽车产品开发中的全面引入

当前, CAE 技术已越来越广泛地应用于汽车产品的概念设计、详细设计及样车验证中,并在各自阶段发挥着不同的作用^[9]:

(1) **概念设计阶段**。概念设计阶段确定整个汽车产品的目标定位,确定整车、各系统的性能参数,制订各大总成设计任务书,规定设计控制数据,完成可行性研究报告。概念设计是汽车设计中最重要阶段,许多整车参数都在此阶段确定。这些参数决定了整车结构尺寸的详细设计。由于整个系统的复杂性,单单依靠设计者的经验无法准确地给出这些数据。基于 CAE 技术及大量经验和试验数据的整车数字化仿真体系,可以模拟整车在不同路况下的实际响应,为各零部件的精确 CAE 分析提供载荷条件,从而进行复杂的非线性动力学分析、关键部件疲劳寿命分析、整车舒适性分析、噪声和振动分析等。

(2) **详细设计阶段**。详细设计阶段的 CAE 技术具有多方面的应用,它能保证设计满足强度、刚度、疲劳寿命、振动噪声要求和设计质量控制目标,达到优化设计的目的。这一阶段的工作取决于汽车的性能目标,关键在于建立完善的分析方法和评价策略。

(3) **样车验证阶段**。在产品定型之前,样车可用来验证整车性能是否达到设计目标,进而制订整改方案。CAE 技术与样车验证相结合有助于降低样车制造与试验成本,并大量减少整改次数。另一方面,样车验证同时也是对 CAE 模型的标定,通过标定后的 CAE 模型可寻找影响特定性能的关键敏感因素,并针对其具体问题提出切实有效的解决方案。

笼统地讲,包括整车和零部件在内的每一种汽车产品都可以列为 CAE 技术的应用对象。通过对其中所涉及关键部分的 CAE 分析,可以在早期设计阶段就把握好产品各个方面的性能,及早排除问题。这对于汽车行业来说极为重要,因为问题发现得越早,解决问题的代价就越低。为便于研究,相应于汽车构造的层次关系划分出如下 3 个应用层级:

(1) **整车层级**。通常需要进行整车运动学、动力学仿真,以模拟实际车辆的行驶状态。这需要建立整车 CAE 模型(虚拟样车),以计算、分析相关整车性能,通常包括动力性、燃油经济性、排放性、平顺性、操纵稳定性、通过性、制动性及 NVH 等。

(2) **系统层级**。高度复杂的汽车总体构造通常划分为 4 大系统:发动机、底盘、车身、电气设备。各系统又可做进一步的细化,如底盘系统又分为 4 大子系统:传动系、行驶系、转向系、制动系。整车 CAE 分析所明确的性能指标参数分解到相关系统、子系统后,即成为确定系统、子系统性能设计目标最主要的依据。系统层级 CAE 分析主要面向系统、子系统的整车匹配,即分解到系统、子系统上的整车性能是否可以实现以及如何实现的问题。

(3) **零部件层级**。主要是对零部件(小总成)的性能与结构分析,如发动机缸体、白车身结构、车门密封条、传动轴与万向节、悬架减振器、轮胎与轮毂单元等,以确定它们的性能和力学特性等是否符合总体设计要求,并在必要时进行优化与改进。

在汽车发展历史上,在为汽车企业带来巨大的回报方面,至今还没有什么技术能与 CAE 技术相比。在汽车产品开发中全面引入 CAE 技术,实现全过程虚拟样机仿真已成为当前汽车产品开发技术的重要发展方向之一,其作用集中体现在以下 3 个方面:

(1) 极大地缩短了产品的研制周期。在建模和分析过程中采用实体造型和参数化, 模型和参数的修改都很方便, 最终确定合理的结构参数所需时间得到大幅度的缩短。

(2) 减少了开发费用。相对于道路试验和室内台架试验而言, 利用 CAE 分析汽车整车及零部件的各种性能所需要的费用大幅度减少。

(3) 有利于通过优化等手段开发出性能更为优越的汽车整车和零部件。例如, 通过优化车架和车身的结构参数减轻整车重量; 通过优化行驶系和转向系的参数提高整车的操纵稳定性和行驶平顺性等。

当然, 从实际应用的角度来说, 汽车 CAE 作用的发挥还依赖于两个重要前提: 一个是对 CAE 技术的熟练掌握; 另一个是要提供最基本的试验数据和相关数据库。这里所指的基本试验数据, 是指诸如轮胎特性数据、道路特性数据、各种材料的力学特性等数据。所谓相关数据库是指企业在产品设计和开发过程中不断积累的、能够提供结构形式和主要参数 (包括价格、外协情况等) 的数据库。除此之外, 要更好地实施 CAE 并发挥其作用, 必须与 CAD、CAM 等结合起来加以综合运用。

1.2.2 汽车 CAE 技术需要解决的关键问题

CAE 技术应用于汽车产品的开发过程中, 面对的具体问题复杂多样。如采用有限单元法计算零件的应力和变形, 并进行强度和刚度分析; 采用多刚体动力学方法进行整车的操纵稳定性和行驶平顺性的动态仿真分析; 采用有限单元法进行碰撞分析; 采用有限单元法和边界单元法进行噪声分析等。可以说, CAE 在汽车产品开发过程中所发挥的作用已经无法取代。从力学的角度来看, 汽车 CAE 技术需要解决的关键问题主要涉及如下 5 个方面^[11]:

(1) 系统动力学分析。汽车系统动力学分析主要研究汽车的行驶性、操纵性等。通常采用多体 (多刚体、多柔体) 系统动力学分析方法。在研究过程中需要处理如下基本问题:

① 坐标系选择问题。相对坐标法是目前常用的方法, 它的特点是每个体上固结一个局部坐标系; 绝对坐标法则用统一的坐标系表示整个系统的状态, 它的计算效率低, 较少采用。

② 柔性体离散化问题。柔性体本质上是无限自由度系统, 为适应计算机数值计算的要求, 必须对柔性体进行离散化, 可用的方法有: 假设模态法、有限段方法、有限单元法等。有限单元法与模态分析法相结合是常用的方法, 该方法将系统的物理坐标变换为模态坐标, 从而大大降低了系统的自由度数目。

③ 建模方法选择问题。建模方法主要有: Newton-Euler (N/E) 方程 (矢量力学方程), 可对隔离体建立动力学方程; Lagrange 方程 (分析力学方程), 它从系统的能量角度入手建立动力学方程; Kane 方程, 它兼有矢量力学和分析力学的特点, 各种动力学原理与方程具有等效性。通常采用有限单元、假设模态、校正模态、奇异扰动等方法获得柔性体动力学有限维逼近的坐标基, 联同关节变量作为广义坐标, 通过 Lagrange 方程或变分原理导出动力学方程组。

④ 动力学方程数值算法问题。多体系统动力学方程的系数矩阵为高度非线性, 其初始条件或因参数的微小变化或因计算误差的积累都有可能導致仿真结果的较大偏差甚至发散。针对上述问题的理论研究至今进展不大。目前在仿真时还都是采用传统的数值积分方法, 如四阶 Runge-Kutta 法、Gear 法、Newmark 法等。