

# 机械CAE

## 分析原理及工程实践

纪爱敏 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 机械 CAE 分析原理 及工程实践

纪爱敏 编著



机械工业出版社

本书介绍了 CAE 分析原理及其实施过程。以机械工程中的若干实际问题为例,详细论述了运用 CAE 分析方法解决问题的方案、策略等一系列关键技术,内容涉及:大型机械结构和特殊结构的强度 CAE 分析技术;机械结构的局部稳定性 CAE 分析技术和二次开发;基于 CAE 分析的机械结构优化设计方法;网络化 CAE 分析系统的构建及实现,并分析了目前 CAE 分析的研究趋势。

本书可供从事 CAE 分析技术的科研人员、工程实际中相关技术的应用人员以及高校机械工程专业师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械 CAE 分析原理及工程实践/纪爱敏编著. —北京:机械工业出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-111-25636-6

I. 机… II. 纪… III. 机械设计—计算机辅助分析  
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 185203 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王春雨 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

148mm×210mm·6.75 印张·198 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-25636-6

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

CAE (Computer Aided Engineering) 分析是指以现代计算力学、计算数学及计算机图形学为基础, 以计算机仿真为手段, 实现对产品性能的可靠性分析和优化设计, 以及对其未来的工作状态和运动行为进行模拟, 确保产品质量和使用性能要求。运用 CAE 方法可实现现代制造业在高效、高速、高精度、低成本、节约资源和高性能等方面的要求, 这是传统的计算方法和分析手段无法达到的。CAE 分析的理论基础是有限元法, 将各门具体学科的有限元分析方法与 CAD 和 CAM 技术相结合, 便构成了 CAE 分析技术的框架。值得一提的是, 在 CAE 支撑理论日益成熟的同时, 为加快推广 CAE 技术的应用, 世界上相继成立一些著名的 CAE 软件开发公司, 致力于 CAE 技术的推广和应用, 有力地促进了 CAE 分析理论研究水平的提升和 CAE 技术应用领域的拓展。随着有限元分析理论的成熟、CAD/CAM 技术的飞速发展以及计算机硬件水平的日益提高, CAE 软件的功能也日益强大, 使得 CAE 技术成功地应用于航空、航天、建筑、化工、汽车、电子、机械等工业部门, 几乎涵盖了所有行业, 取得了显著的经济效益和社会效益。

由于 CAE 分析与计算力学、计算数学、工程科学、现代计算机技术等多个学科密切相关, 因而其原理深奥, 相应的 CAE 软件对使用人员要求高, 且商用 CAE 软件均为通用性软件, 并不涉及某一具体行业的应用, 使得一般人员很难在短时间内掌握其要领。而且尽管目前介绍 CAE 基本原理和方法的书籍较多, 但缺少系统阐述应用 CAE 解决复杂实际问题的策略和步骤的著作, 故此, 不利于将此项技术推广到工程实际中以及再作进一步研究, 鉴于此, 作者结合多

年来对 CAE 分析理论的研究和理解以及与多个企业合作解决实际问题的体会,写成本书,期望对广大读者有所帮助。

本书从机械工程中的若干问题入手,论述其 CAE 分析的一般理论和关键技术,并以工程实际问题为例详细地讨论了 CAE 分析的实施过程。第 1 章介绍 CAE 分析的基本概念、发展历史、分析步骤和部分通用软件;第 2 章介绍机械结构强度的 CAE 分析原理和关键技术,分别以汽车起重机中的伸缩吊臂和车架、桥梁中的锚具组件以科氏质量流量计为例,给出了各自的分析过程;第 3 章讨论机械结构局部屈曲的 CAE 分析理论,并以吊臂结构局部稳定性分析为例,介绍其分析过程和二次开发技术;第 4 章介绍机械 CAE 优化设计方法,并讨论吊臂参数优化设计问题;第 5 章论述 CAE 网络化的体系结构和实施过程,并给出锚具零件和齿轮传动作为应用示例;第 6 章讨论 CAE 分析的研究趋势,包括知识性 CAE 分析技术、协同 CAE 分析技术和 CAD/CAE 集成化建模技术。

本书主要介绍作者近些年的研究工作,为保证内容的完整性和体现本领域最新的研究成果,还吸收了目前机械 CAE 领域国内外学者发表的研究成果,本书尽量将其列于参考文献中,若有所遗漏,敬请谅解。

由于机械 CAE 分析技术涉及面广、内容精深,限于作者的水平,书中难免存在疏忽和错误,祈望读者赐教。

非常感谢河海大学常州校区提供的学术著作出版资助。衷心感谢校区各级领导和老师们对作者研究工作的大力支持。另外,作者的几位研究生黄全生、沈利斌、刘永明、武刚峰在本书统稿过程中也做了许多工作,在此一并表示衷心感谢。

编 者

# 目 录

## 前言

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 第 1 章 CAE 基本原理及模拟仿真 .....               | 1  |
| 1.1 CAE 技术基本概念 .....                    | 1  |
| 1.2 CAE 发展历史 .....                      | 2  |
| 1.3 CAE 分析过程及模拟仿真步骤 .....               | 6  |
| 1.3.1 有限元法的分析过程 .....                   | 6  |
| 1.3.2 基于虚拟样机技术的仿真步骤 .....               | 8  |
| 1.4 CAD/CAE/CAM 集成化 .....               | 11 |
| 1.5 部分 CAE 通用软件介绍 .....                 | 15 |
| 第 2 章 机械结构强度分析中的 CAE 技术 .....           | 35 |
| 2.1 机械结构强度 CAE 分析原理——有限元分析基础理论与方法 ..... | 35 |
| 2.1.1 有限元分析方法的基本概念 .....                | 35 |
| 2.1.2 结构静力的有限元分析过程 .....                | 36 |
| 2.1.2.1 单元特性推导 .....                    | 36 |
| 2.1.2.2 总刚度矩阵的形成 .....                  | 44 |
| 2.1.2.3 载荷移置 .....                      | 45 |
| 2.1.2.4 约束处理 .....                      | 48 |
| 2.1.2.5 求解线性方程组 .....                   | 48 |
| 2.1.2.6 计算其他物理量 .....                   | 48 |
| 2.1.2.7 计算结果处理 .....                    | 49 |
| 2.1.2.8 结果显示 .....                      | 49 |
| 2.2 机械结构强度有限元分析过程中的关键技术 .....           | 49 |
| 2.2.1 实体模型的有效建立 .....                   | 49 |
| 2.2.1.1 分析对象的有效简化 .....                 | 49 |
| 2.2.1.2 降维处理 .....                      | 52 |
| 2.2.1.3 对称与反对称性的利用 .....                | 53 |
| 2.2.1.4 复杂结构中构件的连接 .....                | 54 |
| 2.2.2 模型网格划分 .....                      | 56 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 2.2.2.1 单元精度与单元选择 .....            | 56         |
| 2.2.2.2 网格划分原则 .....               | 57         |
| 2.2.3 位移边界确定及力的边界条件 .....          | 63         |
| 2.2.3.1 位移边界条件确定 .....             | 63         |
| 2.2.3.2 力的边界条件 .....               | 65         |
| 2.2.4 求解策略 .....                   | 65         |
| 2.2.4.1 求解方法 .....                 | 65         |
| 2.2.4.2 多载荷步求解 .....               | 67         |
| 2.2.5 计算精度的改善 .....                | 67         |
| 2.3 大型工程机械结构的强度 CAE 分析示例 .....     | 69         |
| 2.3.1 汽车起重机伸缩吊臂结构有限元分析 .....       | 70         |
| 2.3.1.1 伸缩吊臂有限元建模过程 .....          | 71         |
| 2.3.1.2 QY25K 吊臂分析示例 .....         | 73         |
| 2.3.1.3 QAY125 吊臂分析示例 .....        | 76         |
| 2.3.1.4 小结 .....                   | 80         |
| 2.3.2 汽车起重机车架有限元分析 .....           | 80         |
| 2.3.2.1 车架部分有限元建模过程 .....          | 81         |
| 2.3.2.2 固定支腿与活动支腿有限元建模 .....       | 82         |
| 2.3.2.3 QY35K 车架分析示例 .....         | 82         |
| 2.3.2.4 QAY125 车架分析示例 .....        | 84         |
| 2.4 特殊结构 CAE 分析示例 .....            | 91         |
| 2.4.1 锚具组件有限元分析 .....              | 91         |
| 2.4.1.1 单孔锚具有限元分析模型 .....          | 92         |
| 2.4.1.2 两种锚板锥角的计算结果比较 .....        | 94         |
| 2.4.1.3 夹片与锚板间摩擦因数对锚固性能的影响 .....   | 97         |
| 2.4.2 质量流量计测量管有限元建模及分析 .....       | 99         |
| 2.4.2.1 有限元模型建立 .....              | 99         |
| 2.4.2.2 有限元法与解析法结果的比较 .....        | 103        |
| 2.4.2.3 U 形管科氏流量计的分析 .....         | 104        |
| 2.4.2.4 科氏质量流量计的仿真分析 .....         | 105        |
| <b>第 3 章 机械结构稳定性的 CAE 分析 .....</b> | <b>112</b> |
| 3.1 机械结构屈曲稳定性分析原理 .....            | 112        |
| 3.1.1 杆的稳定性 .....                  | 113        |
| 3.1.2 板的稳定性 .....                  | 115        |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 3.2 结构屈曲稳定性 CAE 分析过程 .....                              | 118 |
| 3.3 分析示例——汽车起重机伸缩吊臂结构局部稳定性分析 .....                      | 119 |
| 3.3.1 伸缩吊臂结构局部稳定性分析的有限元建模 .....                         | 120 |
| 3.3.2 分析示例 .....                                        | 122 |
| 3.4 吊臂结构局部稳定性的二次开发 .....                                | 127 |
| 3.4.1 二次开发方案 .....                                      | 127 |
| 3.4.2 二次开发过程 .....                                      | 128 |
| 3.4.3 实例运行 .....                                        | 133 |
| <b>第 4 章 机械 CAE 分析中的优化设计</b> .....                      | 136 |
| 4.1 优化设计基本原理 .....                                      | 136 |
| 4.1.1 优化设计建模 .....                                      | 136 |
| 4.1.2 优化设计问题的基本求解方法 .....                               | 139 |
| 4.1.3 优化设计的一般过程 .....                                   | 141 |
| 4.1.4 机械优化设计的分类 .....                                   | 143 |
| 4.2 CAE 分析中的优化设计方法 .....                                | 143 |
| 4.2.1 提高优化设计 CAE 分析效率的近似方法 .....                        | 144 |
| 4.2.2 CAE 分析中的优化技术特点 .....                              | 147 |
| 4.3 CAE 优化设计过程 .....                                    | 148 |
| 4.3.1 CAE 优化过程基本要素 .....                                | 148 |
| 4.3.2 CAE 优化设计步骤 .....                                  | 150 |
| 4.4 示例——吊臂 CAE 参数优化设计 .....                             | 151 |
| <b>第 5 章 CAE 分析技术的网络化</b> .....                         | 160 |
| 5.1 CAE 分析网络化的体系结构 .....                                | 161 |
| 5.1.1 基于应用服务提供商模式的 CAE 远程分析服务体系<br>结构 .....             | 161 |
| 5.1.2 基于动态服务器网页 ASP 技术及 CAE 软件集成的 Web-CAE<br>体系结构 ..... | 162 |
| 5.2 基于 CAE 分析网络化系统实现 .....                              | 165 |
| 5.2.1 基于应用服务提供商模式的 CAE 远程分析服务系统 .....                   | 165 |
| 5.2.2 基于动态服务器网页 ASP 技术及 CAE 软件集成的<br>Web-CAE 系统 .....   | 166 |
| 5.3 CAE 分析网络化工程示例 .....                                 | 168 |
| 5.3.1 锚具零件网络化有限元分析 .....                                | 168 |
| 5.3.2 齿轮传动网络化有限元分析 .....                                | 174 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第 6 章 CAE 分析的研究趋势</b> | 182 |
| 6.1 基于知识的 CAE 分析         | 182 |
| 6.1.1 基于知识的 CAE 分析建模结构   | 182 |
| 6.1.2 CAE 分析建模知识分类与表达    | 183 |
| 6.1.3 知识的推理、计算及知识库的动态更新  | 187 |
| 6.2 协同 CAE 分析技术          | 188 |
| 6.2.1 协同 CAE 分析的体系结构     | 190 |
| 6.2.2 协同 CAE 系统功能模块结构    | 191 |
| 6.2.3 系统实现的技术方案          | 193 |
| 6.2.4 协同 CAE 系统的关键技术     | 194 |
| 6.3 CAD/CAE 集成化建模        | 196 |
| 6.3.1 影响 CAD 与 CAE 集成的因素 | 197 |
| 6.3.2 CAD/CAE 集成化建模方式    | 198 |
| <b>参考文献</b>              | 203 |

# 第1章 CAE 基本原理及模拟仿真

## 1.1 CAE 技术基本概念

计算机辅助工程 (CAE, Computer Aided Engineering) 是一个很广的概念, 单从字面上讲, 它可以包括工程和制造信息化的所有方面。CAM 及制造信息化技术作为独立部分飞速发展, 并在产品制造中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。因而, 目前已将 CAE 与 CAD、CAM 和 PDM 等并列提出。CAE 在科学研究和产品研发中的应用, 一般是指利用计算机及工程分析软件进行模拟和仿真的过程, 即 CAE 技术是以科学和工程问题为背景, 建立计算机模型并进行计算机仿真分析, 对工程和产品进行性能与安全可靠性分析, 对其未来的工作状态和运行状态进行模拟, 及早发现设计中的不足, 加以修改, 并证实未来工程、产品性能的可行性和可靠性。制造工程协会 (SME, Society of Manufacturing Engineering) 将计算机辅助工程作为计算机集成制造 (CIM, Computer Integrated Manufacturing) 技术构成, 进行如下定义: 对设计作分析和运行仿真, 以确定它对设计规则的遵循程度和性能特征 (analyzes a design and simulations its operation to determine its adherence to design rules and performance characteristics)<sup>[2]</sup>。

CAE 分析是建立在计算力学、计算数学、工程学科、数字仿真技术、计算机图形学等多个学科基础之上, 并以成熟的 CAE 软件来实现对科学和工程问题的求解和分析。因而, CAE 软件是一种综合多学科的知识密集型的信息产品。CAE 软件可以分为专用和通用两类。针对特定类型的工程或产品所开发的用于其性能分析、预测和优化的软件, 称之为专用 CAE 软件; 能够对多种类型的工程和产品的物理、力学性能进行模拟、分析、预测、评价和优化, 以实现产品技术创新的软件, 称之为通用 CAE 软件。

工程结构分析与计算的传统方法一般依据理论力学、材料力学

和弹性力学所提供的公式来进行, 这样的方法通常称为解析法。为了解析法能解决工程实际问题, 一般需要对其问题作许多简化, 因而, 计算精度较低。为弥补此缺陷和保证结构的安全性, 常采用加大安全系数的办法, 故导致结构尺寸过大, 不仅浪费材料, 有时还会造成结构性能的降低。而采用 CAE 分析的方法, 即使对复杂的工程实际问题, 也无须作很多简化, 计算精度高、速度快, 可得到满意的解答。工程实践表明, CAE 分析使大量繁杂的工程分析问题简单化, 使复杂的过程层次化, 节省了大量的时间, 避免了低水平的重复工作, 使工程分析和计算更快、更准确, 在产品设计、分析、新产品开发等方面发挥了重要作用。此外, CAE 的模拟技术在国内外迅猛发展, 也推动了许多相关的基础学科和应用科学的进步。

CAE 技术在机械领域中的应用主要体现在这样几方面: ①运用有限元和模态分析等方法对机械产品的结构进行强度分析、振动分析和热分析, 并运用结构强度与寿命评估的理论、方法和规范, 对结构的安全性、可靠性以及使用寿命做出评价与估计; ②运用过程优化设计方法在满足设计、工艺等约束条件下, 对产品结构形状和参数、工艺参数进行优化设计, 以使产品结构性能及工艺过程达到最优; ③运用多体动力学的理论和虚拟样机技术 (Virtual Prototyping Technology) 对整机或机构进行运动/动力学仿真, 给出整机或机构的运动轨迹、速度、加速度以及动反力的数值, 通过对比可以获得最优的设计方案, 方便修改设计缺陷。

## 1.2 CAE 发展历史<sup>[3,4]</sup>

CAE 技术的发展是随着有限元基础理论的提出及发展、CAD 技术发展、计算机仿真技术的发展而兴起的, 特别是近 20 年来的计算机在高速化和小型化方面所取得的巨大成就, 以及 CAE 软件功能的不断扩展和完善, 使得 CAE 分析技术达到了很高的水平, 许多大型的通用分析软件已相当成熟并商品化, CAE 模拟分析技术不仅在科学研究中普遍采用, 而且在工程上也进入到实用化阶段。

美国于 1998 年成立了工程计算机模拟和仿真学会 (Computer Modeling and Simulation in Engineering), 其他国家也成立了类似的学

术组织。近年来各国都投入了大量人力和物力,对 CAE 技术进行研究和软件开发,同时也注重专业人才的培养。各行业中大批掌握 CAE 技术的科技队伍推动了 CAE 技术的研究和工业化应用。CAE 技术在国外已经广泛应用于不同领域的科学研究,并普遍应用于实际工程问题,在许多复杂的工程分析方面发挥了重要作用。

CAE 的理论基础起源于 20 世纪 40 年代。1943 年,数学家 R. Courant 第一次尝试用定义在三角形区域的分片连续函数的最小势能原理求解圣维南 (St. Venant) 扭转问题。1956 年, M. J. Turner 和 R. W. Clough 等人用矩阵法对飞机结构进行了受力和变形分析,应用了当时出现的数字计算机,第一次给出了用三角形单元求解复杂平面应力问题的方法。1963 至 1964 年, J. F. Besseling 等人证明了有限元是基于变分原理的里兹 (Ritz) 法的另一种形式,从而使里兹法分析的所有理论基础都适用于有限元法,确认了有限元法是处理连续介质问题的一种普遍方法。随着有限元法在科学研究和工程应用中的日益广泛,引起了数学界的关注,20 世纪 60 至 70 年代,较多的应用数学家对有限元法的误差、解的收敛和稳定性等方面进行了卓有成效的研究,论证了有限元法的基本原理是逼近论,是偏微分方程及其变分形式和泛函分析的结合,从而巩固了有限元法的数学基础。从此以后,有限元法的应用已由弹性力学的平面问题扩展到空间问题及板壳问题;由静力学平衡问题扩展到稳定问题、动力学问题和波动问题;分析对象的材料从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料等;研究领域从固体力学扩展到流体力学、传热学、电磁学以及多场耦合等学科。有限元法是 CAE 解决结构分析和性能优化的理论基础,将有限元分析技术功能由分析和校核扩展到优化设计,并结合 CAD 和 CAM 技术,便形成了 CAE 分析技术的框架。

为加快推广 CAE 技术的应用和解决使用效率问题,在 CAE 支撑理论日益成熟的前提下,一些学者联合研究机构或公司相继成立了 CAE 软件研发公司,致力于 CAE 软件研制和开发工作。1963 年由 Dr. Richard MacNeal 和 Mr. Robert Schwnendle 成立了 MSC 公司,并开发了第一个结构分析软件。尔后参与美国国家航空和宇航局

(NASA) 发起的计算机结构分析方法研究, 其程序更名为 MSC/Nastran。1967 年在 NASA 支持下 SDRC 公司成立, 并于 1968 年发布了世界上第一个动力学测试及模态分析软件包, 1971 年推出商用有限元分析软件 Supertab (后并入 I-DEAS)。1970 年 Dr. John A. Swanson 成立 Swanson Analysis System Inc. (SASI) 后来重组后改为 ANSYS 公司, 开发 ANSYS 软件。至此世界上三大致力于有限元分析的著名 CAE 软件公司相继成立。1970 ~ 1980 年是 CAE 技术蓬勃发展的时期, 除 SDRC、MSC、ANSYS 等公司在技术应用领域继续创新外, 新的 CAE 软件公司先后成立。1971 年 MARC 公司成立, 致力于非线性有限元技术研究、非线性有限元软件开发、销售和售后服务。1999 年, MSC 收购了 MARC 公司, 相应地, 该软件更名为 MSC. Marc 软件。1977 年 Mechanical Dynamics Inc. (MDI) 公司成立, 开发的 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System) 软件, 是世界上最具权威性、使用最广的机械系统动力学仿真分析软件。2002 年, MDI 被 MSC 公司收购。1978 年 Hibbitt Karlssso & Sorensen (HKS) Inc. 公司成立, 其开发的 ABAQUS 软件, 非线性功能特别优异, 具有强大的模型级材料模块和宽广的特性分析范围。1986 年 ADINA R & D. Inc. 公司成立, 所开发的 ADINA 软件除广泛应用到各行业之外, 还能真正实现流场、结构和热力学的耦合分析, 被业内人士认为是有限元发展方向的代表。1987 年 LSTC (Livermore Software Technology Co.) 成立, 其产品 LS-DYNA 具有强大的显式动力学分析功能, 能模拟仿真工程中的接触、碰撞和爆炸等真实结构行为。1989 年 ESKD (Engineering Software Kesemoch and Development) 公司成立, 研究新型 P 方法有限元程序。同时期还有多家专业性软件公司投入专业 CAE 程序开发。这一时期的 CAE 发展的特点主要集中在计算精度、速度和硬件平台的匹配、计算机内存的有效利用及磁盘空间的利用。有限元分析技术在结构分析和场分析领域获得了很大的成功, 从力学模型开始拓展到各类物理场 (如温度场、磁场、声波场) 的分析; 从线性分析向非线性分析 (如材料为非线性、几何大变形导致的非线性、接触行为引起的边界条件非线性等) 发展, 从单一场的分析向几个场的耦合分析发展。出现了许多著名的分析

软件,如 Nastran、I-DEAS、ANSYS、ADINA、SAP、DYNA3D、ABAQUS 等,使用者多数为专家且集中在航空、航天、军事等几个领域。

20 世纪 90 年代是 CAE 技术的成熟壮大时期。主要发展是将 CAE 与 CAD 和 CAM 软件集成为 CAD/CAE/CAM 系统,从而形成一个完整、方便的实用产品。CAD 技术经过三十年的发展,经历了从线框技术到曲面技术,再到参数化技术,直至目前的变量化技术,为 CAE 技术的推广应用打下了坚实的基础。这期间各 CAD 软件开发商一方面大力发展自身 CAD 软件的功能,另一方面通过扩展 CAE 功能或并购 CAE 软件来增加其软件 CAE 功能,如著名的 CAD 软件 CATIA、UG、Pro/E 都增加了基本的 CAE 前后处理及一般的线性、模态分析功能。与此同时,各 CAE 软件开发商也积极发展与各 CAD 软件的专用接口,以增强软件的前后处理能力,如 MSC/Nastran 在 1994 年收购了 Patran 作为自己的前后处理软件,并先后开发了与 CATIA、UG 等 CAD 软件的数据接口。ANSYS 也在大力发展其软件的 ANSYS/Prepost 前后处理功能。目前,大型通用 CAE 软件除自身的前处理功能外,都具有与通用 CAD 软件图形的接口,以发挥 CAD 软件的强大建模功能。此外 CAE 还不断扩展本身的分析功能。MSC 先后通过开发及并购,目前旗下拥有十几个产品,如用于非线性瞬态动力问题的 MSC/Dytran 和用于耐久性疲劳寿命分析软件系统 MSC/Fatigue 等。同时 ANSYS 也将其产品扩展为 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Emag、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/LS-DYNA 等多个应用软件。

值得说明的是,近 15~20 年是 CAE 软件商品化的迅速发展阶段,CAE 开发商为了满足市场需求和适应计算机硬、软件技术的迅速发展,对其软件的功能、性能,特别是用户界面及前、后处理能力,进行了大幅扩充;对软件的内部结构和部分模块,特别是数据管理和图形处理,进行了较大改造。如采用面向对象的软件设计方法和 C++ 语言编写程序等。目前,市场上知名的 CAE 软件,在功能、可用性、可靠性以及对运行环境的适应性等方面有了极大的提高。这些 CAE 软件可以在超级并行机,分布式微机群,大、中、

小、微各类计算机和各种操作系统平台上运行。

当今,西方发达国家对 CAE 技术已实现了实用化。将 CAE 与 CAD、CAM 等技术结合,使企业对现代市场产品的多样性、复杂性、可靠性和经济性等做出迅速反应,增强了企业的市场竞争能力。在许多行业中,CAE 分析已作为产品设计与制造流程中不可逾越的一种强制性的规范加以实施。以国外某些大汽车及飞机制造公司为例,其零部件设计都必须经过多方面的 CAE 仿真分析,否则不能通过设计审查,更谈不上试制和投产。由此可见,在西方发达国家,计算机数值模拟现在不仅仅是科学研究的一种手段,在生产实践中也已作为必备工具而普遍应用。

21 世纪是信息和网络的时代,网络时代的到来将对 CAE 技术的发展起到不可估量的促进作用。现在许多大的软件公司已经采用互联网对用户进行 CAE 技术服务,对用户和分析过程中遇到的困难提供技术支持。随着网络技术的不断发展和普及,通过网络传递信息,将使某些技术难题,甚至全面的 CAE 分析过程都可能得到专家的技术支持,这在进一步推广 CAE 技术应用方面将发挥极为重要的作用。

### 1.3 CAE 分析过程及模拟仿真步骤<sup>[5,6,7]</sup>

机械 CAE 模拟分析和仿真主要体现在:①运用有限元法对零部件结构工作性能进行分析;②运用虚拟样机技术对整机的各种工况进行仿真,预测产品的整体性能等。下面就这两方面分别加以介绍。

#### 1.3.1 有限元法的分析过程

CAE 中的重要分析方法——有限元法的基本思想是将连续结构离散成有限个单元,即用有限个单元来表示复杂的工程结构,各单元之间通过单元的节点相连,一般以节点的位移作为未知量,分析单元特征,建立有限元总体平衡方程式,然后求解。有限元法的灵活性很大,对边界形状的描述具有良好的适应性,可以模拟复杂的边界情况,应用十分广泛。现以结构的应力分析为例,给出其求解的步骤,如图 1-1 所示。

从工程角度来看,CAE 有限元法求解工程问题的基本过程主要

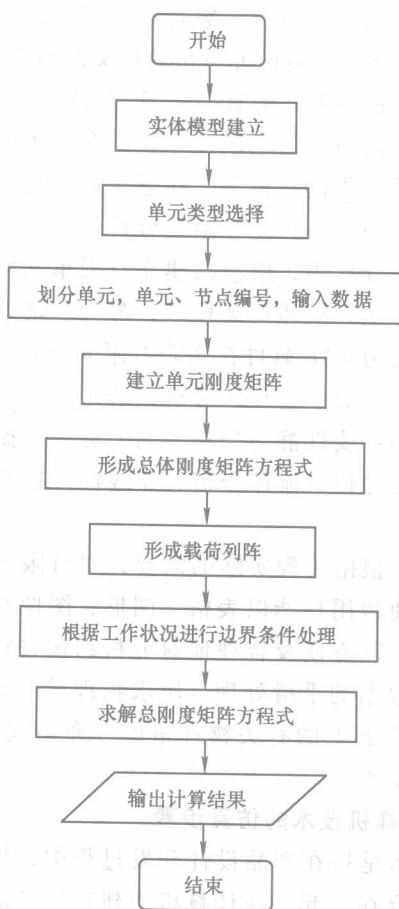


图 1-1 有限元法的基本求解步骤

包括：①前处理，即要作分析的结构有限元离散化；②有限元分析，即有限元方程的建立与求解，获得分析结果；③后处理，即计算结果的处理。

前处理过程：分析结构的有限元网格划分与数据生成。应用 CAD 或 CAE 软件的建模功能对结构进行实体建模，进而建立有限元分析模型。其中包括对分析对象进行合理的简化，运用点、线、面和三维实体等几何元素构建分析对象的实体模型，有限元网格的自

动划分,节点自动编号与节点参数自动生成,材料特性和载荷数据输入,公式化参数导入,有限元分析数据文件的生成与导出等。

有限元分析:针对上述的有限元模型进行单元分析,建立单元刚度矩阵,整体刚度矩阵的组装及整体平衡方程的建立,有限元方程的求解以及分析结果的获得等。在通用有限元分析软件中,此部分工作由系统自行完成。为使有限元分析软件具备解决实际问题的通用性,在有限元分析中,应包括建立有限单元库、材料库及相关算法,约束处理算法,整体组装模块,静力、动力、线性与非线性解法库等。大型通用 CAE 软件在实施有限元分析时,大都根据工程问题的物理、力学和数学特征,分解成若干子问题,由对应的分析子系统去完成,如:线性静力分析、动力分析、振动模态及响应分析、热分析、电磁分析、流体分析、非线性分析和优化设计等子系统。

后处理过程:根据工程实际的需要,对有限元分析的结果进行加工和处理,以使得用户能以表格、图形、图像和动画等方式获得分析结果,从而可以方便及合理地对分析结构进行评判。具体包括有限元分析结果数据的平滑处理,所求物理量的极值与位置,分析对象各个部位和剖面上的有关物理量的分布情况,如结构变形图、应力分布图和振型图等。

### 1.3.2 基于虚拟样机技术的仿真步骤

虚拟样机技术是指在产品的设计开发过程中,将分散的零部件设计和分析技术糅合在一起,在计算机上建造出产品的整体模型,并针对该产品在投入使用后的各种工况进行仿真分析,预测产品的整体性能,进而改进产品设计、提高产品性能的一种新技术。

虚拟样机技术利用软件建立机械系统的三维实体模型和力学模型,分析和评估系统的性能,从而为物理样机的设计和制造提供依据。虚拟样机技术是从分析解决产品整体性能及其相关问题的角度出发,解决传统的设计与制造过程中弊端的高新技术。在该项技术中,工程技术人员可以直接利用 CAD 系统所提供的各零件的物理信息及其几何数据,在计算机上定义零部件间的连接关系,对机械系统进行虚拟装配,从而获得机械系统的虚拟样机,使用系统仿真软