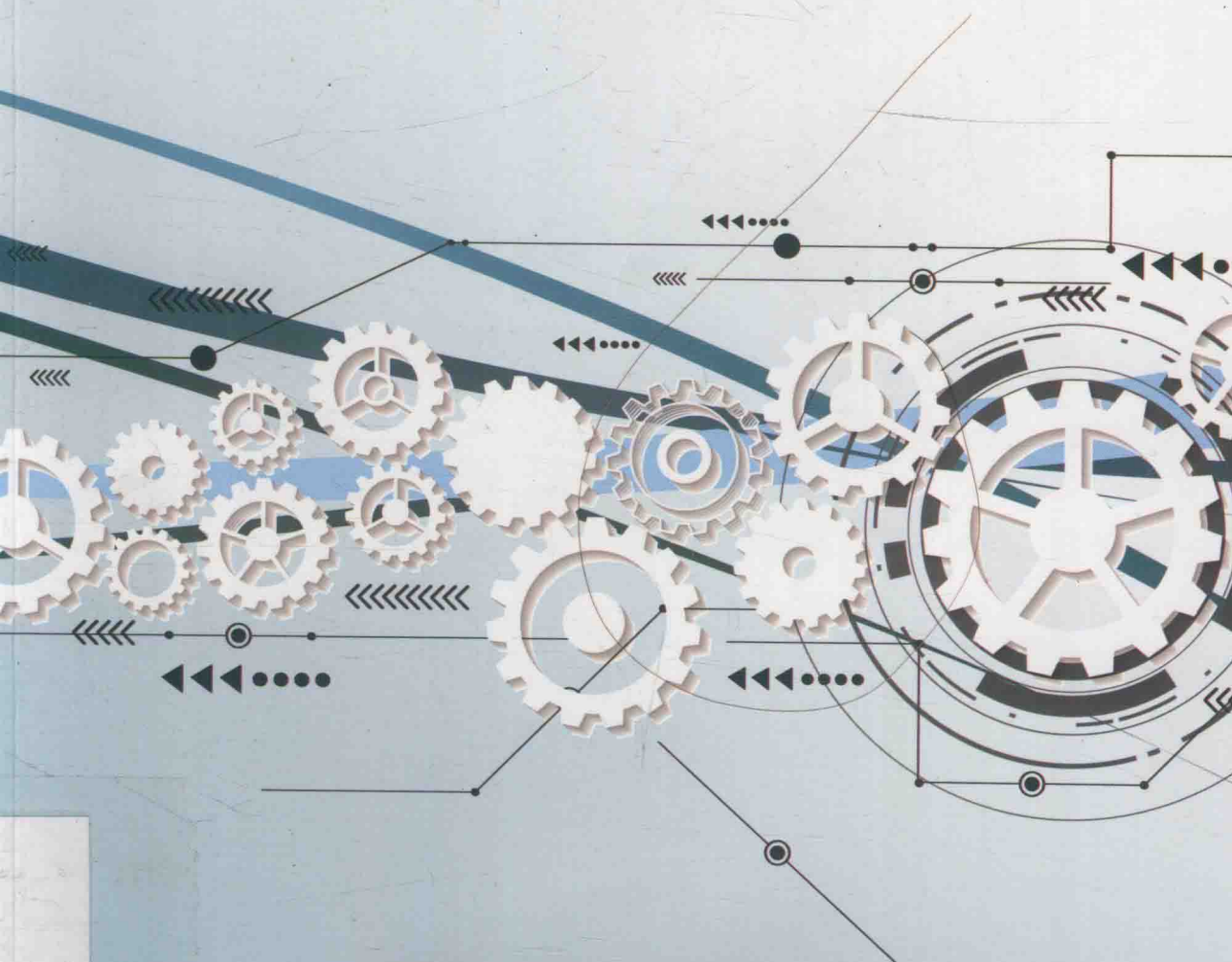




分析原理及应用

JIXIE CAE FENXI YUANLI JI YINGYONG

◎ 徐连江 著



电子科技大学出版社

本书由云南开放大学、云南国防工业职业技术学院学术专著出版经费资助出版

机械 CAE 分析原理及应用

■ 徐连江 著

常州大学图书馆
藏书章



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械CAE分析原理及应用/徐连江著. -- 成都:电子科技大学出版社, 2017.6
ISBN 978-7-5647-4695-7

I.①机… II.①徐… III.①机械设计-计算机辅助分析 IV.①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第150148号

机械 CAE 分析原理及应用

徐连江 著

策划编辑 李述娜

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 北京一鑫印务有限责任公司

成品尺寸 185mm × 260mm

印 张 21.25

字 数 512千字

版 次 2017年6月第一版

印 次 2017年6月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-4695-7

定 价 74.00元

版权所有, 侵权必究

CAE 从 20 世纪 60 年代初在工程上开始应用到今天, 已经历了 60 多年的发展历史, 其理论和算法都经历了从蓬勃发展到日趋成熟的过程, 现已成为工程和产品结构分析中(如航空、航天、机械、土木结构等领域)必不可少的数值计算工具, 同时也是分析连续力学各类问题的一种重要手段。随着计算机技术的普及和不断提高, CAE 系统的功能和计算精度也都有了很大的提高, 各种基于产品数字建模的 CAE 系统应运而生, 并已成为结构分析和结构优化的重要工具, 同时也是计算机辅助 4C 系统(CAD/CAE/CAPP/CAM)的重要环节。在这样一个大的历史背景下, 本书《机械 CAE 分析原理及应用》应运而生。

CAE 系统的核心思想是结构的离散化, 即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, 这样可以解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。本书在总结大量前人研究成果的基础上结合自身对机械方向 CAE 的运用经验与理解, 对 CAE 分析原理、各类流行 CAE 软件、典型应用案例等进行了详细论述。希望本研究能够对我国机械行业 CAE 技术的运用起到推广和帮助的作用, 更希望本研究最终能对我国制造业的发展起到正面的、积极的影响。

另因本书编写历时漫长, 其中或有很多不足之处, 望广大读者不吝赐教, 大家共同进步。

目 录

CONTENTS

第一章 绪 论 / 001

第一节 CAE 技术基本概念与发展历史概述 / 001

第二节 CAE 分析过程及模拟仿真步骤 / 004

第三节 CAD/CAE/CAM 集成化 / 008

第四节 部分 CAE 通用软件介绍 / 011

第二章 机械结构强度分析中的 CAE 技术 / 026

第一节 机械结构强度 CAE 分析原理——有限元分析基础理论与方法 / 026

第二节 机械结构强度有限元分析过程中的关键技术 / 038

第三节 大型工程机械结构与机床关键大件的 CAE 分析示例 / 053

第四节 特殊结构 CAE 分析示例 / 078

第三章 机械结构稳定性的 CAE 分析与简例分析 / 098

第一节 机械结构屈曲稳定性分析原理及过程 / 098

第二节 简例——汽车起重机伸缩吊臂结构局部稳定性分析 / 100

第三节 吊臂结构局部稳定性的二次开发 / 105

第四章 机械 CAE 分析中的优化设计 / 108

第一节 优化设计基本原理 / 108

第二节 CAE 分析中的优化设计方法 / 113

第三节 CAE 优化设计过程 / 116

第四节 简例——吊臂 CAE 参数优化设计 / 119

第五章 CAE 分析技术的网络化 / 126

第一节 CAE 分析网络化的体系结构 / 126

第二节 基于 CAE 分析网络化系统实现 / 129

第三节 简例——CAE 分析的网络化工程 / 132

第六章 基于 CAE 的垂直循环立体车库结构与开发 / 139

第一节 概 论 / 139

第二节 垂直循环立体车库结构研究方案设计 / 143

第三节 垂直循环立体车库结构的有限元分析研究 / 148

第四节 链传动结构优化设计与运动仿真 / 155

第七章 基于 CAE 的减速器优化系统研究与开发 / 166

第一节 概 述 / 166

第二节 减速器基本结构型式及故障类型分析 / 172

第三节 减速器关键零部件的参数化设计 / 180

第四节 基于 CAE 的减速器分析系统开发 / 187

第五节 系统应用实例 / 195

第八章 基于 CAE 的超声探头外壳注塑模具设计与开发 / 206

第一节 引 言 / 206

第二节 超声探头手柄下盖零件设计 / 210

第三节 基于 CAE 分析的探头外壳注塑模具设计 / 218

第四节 基于 Moldflow MPI 的注塑过程 CAE 分析 / 233

第五节 基于正交试验的注塑成型工艺参数优化设计 / 243

第九章 基于 CAE 驱动纯电动中巴车身结构正向设计研究 / 253

第一节 概 论 / 253

第二节 参考车型性能分析及本书设计车型性能目标水平确定 / 258

第三节 基于动力总成合理布置的纯电动中巴车身结构初步设计 / 265

第四节 纯电动中巴车身结构初始方案多阶段改进设计 / 272

第五节 车身结构底部平台的提取与适应性研究 / 296

第十章 CAE 分析的研究趋势综述与未来展望 / 316

第一节 基于知识的 CAE 分析 / 316

第二节 协同 CAE 分析技术 / 321

第三节 CAD/CAE 集成化建模 / 327

后 记 / 332

参考文献 / 333

第一章 绪 论

第一节 CAE 技术基本概念与发展历史概述

一、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。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能分析, 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)。

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。为了使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, 在产品的设计、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

外的迅猛发展,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。

二、CAE 发展历史

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 Mac Neal 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 Karlsson & 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广泛的特性分析范围。1986 年 ADINAR&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 也把其产品扩展为 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。

第二节 CAE 分析过程及模拟仿真步骤

一、CAE 分析过程及模拟仿真步骤

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。

(一)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。

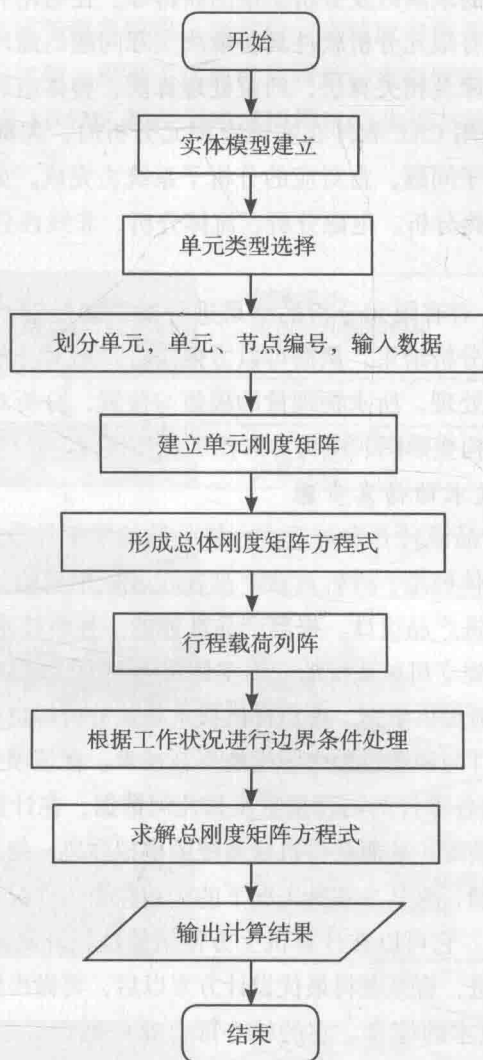


图 1-1 有限元法的基本求解步骤

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。

1. 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。

2. 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。

3. 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。

(二) 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揉合在一起,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,使用系统仿真软件在各种虚拟环境中真实地模拟系统的运动,对其在各种工况下的运动和受力情况进行仿真分析,观察并试验各组成部件的相互运动情况。它可以在计算机上方便地修改设计缺陷,仿真试验不同的设计方案,对整个系统进行不断改进,直至获得最优设计方案以后,再做出物理样机。

虚拟样机技术是多项技术的综合。它的核心部分是机械系统运动学、动力学建模理论和控制理论及其技术实现。而应用数学中的数值算法又提供了求解这种问题的有效快速算法。计算机可视化及动画技术的发展为这项技术提供了友好的用户界面。CAD/FEA (Finite Element Analysis) 等技术的发展为虚拟样机的应用提供了技术环境。CAD 三维造型技术使虚拟样机技术的机械系统描述问题变得简单,且机械系统的设计修改也非常便捷,在此基础上,在计算机上的设计、试验、设计的反复过程才有时间上的意义。而 FEA 技术可以使零部件的结构设计不断细化、改进。目前,虚拟样机技术已成为一项相对独立的产业技术,广泛应用于机械制造、工程机械、汽车、航空航天、国防、铁道、兵器、石油化工领域,它改变了传统的设计思想,为用户提供满意的设计结果。

采用虚拟样机技术,可在产品的设计早期确定关键的设计参数,更新产品开发过程,缩短开发周期,大大降低成本,提高产品质量。

在商品化虚拟样机软件中, ADAMS 是世界上最权威的且应用最广的集建模、求解、可视化于一体的虚拟样机软件。使用这套软件可以构建包括机-电-液一体化在内的、任意复杂的多体动力学数字化虚拟样机模型, 为用户提供从产品概念设计、方案论证、详细设计到产品方案修改、优化、试验甚至故障诊断各阶段、全方位、高精度的仿真计算结果, 从而大大减少了昂贵的物理样机制造及试验次数, 提高了产品设计质量, 大幅度缩短产品研制周期和费用, 增强产品的市场竞争力。利用 ADAMS 软件创建虚拟样机的步骤与建立物理样机的步骤很相似, 整个仿真过程如图 1-2 所示。

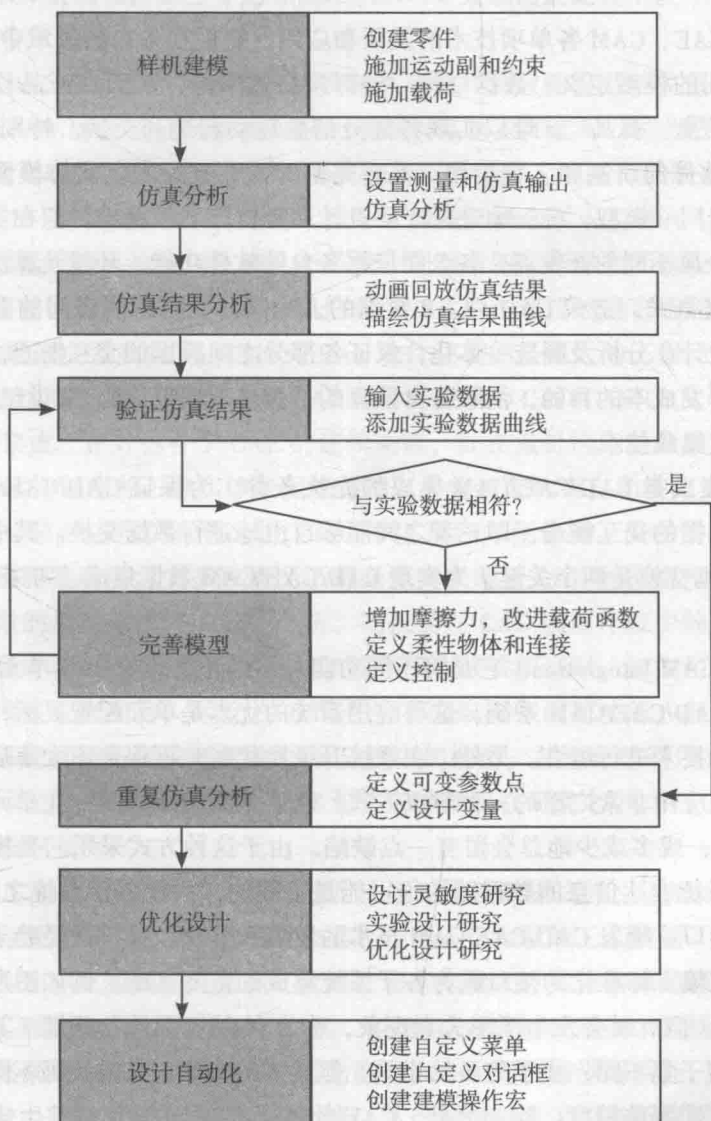


图 1-2 虚拟样机建模仿真基本步骤

根据图 1-2 所示步骤可以完成一个复杂的机械系统的仿真分析,但实际中应注意以下事项:

(1) 采用渐进式的,从简单分析逐步发展到复杂的机械系统分析的策略;

(2) 在进行较复杂的机械系统仿真时,可以将整个系统分解为若干子系统,先对这些子系统进行仿真分析和试验,逐个排除建模仿真过程中隐含的问题,最后进行整个系统的仿真分析试验。

第三节 CAD/CAE/CAM 集成化

随着 CAD、CAE、CAM 各单项技术的发展和运用,它们在各各自的领域中发挥了重要作用,但由于它们彼此间的模型定义、数据结构、外部接口的不同,从而在产品设计与制造过程中便形成了一个信息“孤岛”,难以实现各部分信息自动转递和交换。特别是早期的 CAD 与 CAE 技术研究、软件的研制和工程应用,几乎是同时独立进行的。实体模型技术的出现,为纵向集成,即基于同一模型、统一地进行产品设计和分析打下了基础。但在实际中,由于大型 CAD、CAE 软件分属不同的开发商,各公司依据各自的软件功能、环境及算法,开发出彼此独立的主模型及数据格式,造成 CAD、CAE 数据的人为隔离,阻碍两者间的有效数据交换。为了使企业的产品设计、分析及制造一体化,保证各部分之间数据的交互畅通,以达到缩短产品开发周期,降低开发成本的目的,消除各自独立的“孤岛”现象,自 20 世纪 80 年代初便出现了 CAD/CAE/CAM 集成技术。

有效的数据集成是 CAD/CAE/CAM 集成的先决条件,为保证 CAD/CAE/CAM 三者的有效集成,需要保障数据的交互畅通,即三者之间能够自由地进行数据交换。其中,CAD 与 CAM、CAD 与 CAE 的数据交换是两个关键。为实现 CAD/CAE/CAM 数据集成,可采用两种方式:

1. 系统集成

即 CAD/CAE/CAM Integration。它是将不同功能、不同开发商的 CAX 单元系统集成到一起,形成一个完整的 CAD/CAE/CAM 系统。这种应用系统的优点是单元配置灵活,选择余地大,可以选择最优的单元技术进行组合。另外,在系统升级换代时,可保留不太落后的单元,与新的系统集成,因此是应用非常广泛的一种集成方式。缺点是系统集成后,在单元子系统之间很难做到“无缝连接”,或多或少地总会留有一点缺陷。由于这种方式采用的是模块组合的方式进行连接,而各子系统表达信息的数据结构很可能是不同的,为使各子系统之间能够交换数据,就需要开发数据接口。随着 CAD/CAE/CAM 技术的发展和普及,接口已经趋于标准化,摆脱了对具体子系统的依赖,标准化的接口成为各子系统集成的重要基础。例如图形信息的变换可采用 IGES 格式文件,但有时会发生图形失真现象,称为 IGES“风味”问题。其原因是:CAD 及 CAE 系统实体类型子集不同;或子集虽然相同,但具体的实体定义或代码不同;连接双方硬件环境不同,出现不同圆整精度。除此之外,CAE 软件还都有与 CAD 软件生成的实体模型导入接口,如 AN-SYS 可直接输入 UG 或 Pro/E 等生成的图形文件。而 CAD 软件也建立与 CAE 软件的输出接口。产品级的信息交换可采用 STEP 标准格式。然而,由于各子系统仍需通过转换

接口进行数据转换,降低了系统运行效率,也可能影响数据转换的可靠性和一致性。

2. 集成系统

即 Integrated CAD/CAE/CAM。它是由同一公司开发的集成化软件,在系统开发时,就将系统未来要用到的功能都考虑周全,并将这些功能全都集成到一个系统中,特别是采用主模型建模手段和统一的工程数据库共享机制,因此不会有任何连接的痕迹。这种系统一般不容易做到广泛意义上的 CAD/CAE/CAM 系统,而更多地是以狭义的 CAD/CAE/CAM 系统方式出现。例如 CAT-IA、I-DEAS、CADDs 等著名软件系统,可以在一个集成环境下完成从产品设计、工程分析到数控加工的过程。这种系统在一些特定行业(如模具行业)或部门应用得非常成功。

产品建模技术和集成数据管理等是 CAD/CAE/CAM 集成的关键技术。

1. 产品建模技术

为了实现 CAD/CAM 信息的高度集成,一种共享的产品数据模型至关重要。一个完善的产品数据模型是 CAD/CAM 系统进行信息集成的基础,也是 CAD/CAM 系统数据共享的核心。基于传统实体造型的 CAD 系统仅局限于对产品几何形状的描述,缺乏产品制造所需的工艺信息,难以实现 CAD/CAM 系统的集成。将具有工程语义的特征概念引入 CAD/CAM 造型系统,建立基于特征的产品数据模型,这不仅支持从产品设计到制造各个产品生产阶段所需的信息,包括几何信息和工艺信息,而且还提供了符合人们思维方式的工程描述语言特征,能够方便地实现 CAD/CAM 之间的数据交换和共享。考虑到 CAE 软件注重的是强大的工程问题的仿真和分析功能,而实体建模的功能相对较弱(除大型 CAD 软件扩展成为 CAD/CAE/CAM 软件之外),因而, CAD/CAE 信息的集成,正好弥补了 CAE 的建模功能,如在做机构运动及动力仿真时,CAE 软件可读取由 CAD 软件创建的三维实体装配模型图,并将装配约束自动转化为运动副进行仿真,从而使得利用 CAE 软件进行仿真和分析变得易于实现和方便快捷。但在实际中,为保证 CAE 作数值分析的实现和精确度,大多数情况下都必须对来源于 CAD 的模型作一些必要的简化后再作分析,如所做的是三维实体的数值分析,则仅需对 CAD 模型作较少的简化,删去其中的工艺孔及台阶、倒角等。但是若分析的结构被视作板壳或梁模型时,则往往不能利用来自 CAD 的实体模型。对薄板或壳而言,尽管 CAD 软件中有提取板中面的功能,但对于由多个板组成的复杂结构时,可能就得不到较理想的 CAE 分析中的模型,甚至只能利用 CAE 软件的前处理功能重建模型。目前从三维实体模型到 CAE 板壳的转换仍在研究之中。

2. 集成数据管理技术

在 CAD/CAE/CAM 集成系统中,除了涉及一些结构型数据之外,还有大量如图形、图像,甚至语音等非结构型数据。除了产品结构数据之外,还有大量的工艺数据、加工装配数据和生产管理数据等。由于涉及的数据类型多且数据处理工作量大,导致常用的商用数据系统难以胜任,必须借助于工程数据库管理系统的支持。工程数据库能够处理复杂数据类型和复杂数据结构,具有对工程数据的动态定义和动态建模的能力,并向用户提供透明性,支持所有应用系统对全局数据的存取。通过工程数据库管理系统,从产品设计、工程分析直到制造过程中所产生的全部数据都能维护在同一数据库环境中。

产品数据管理 PDM (Production Data Management) 是以软件为基础,管理所有与产品相关

的信息（包括电子文档、数字化产品模型、数据记录等）和所有与产品相关的过程（包括工作流程和更改流程等）的技术。它提供产品全生命周期的信息管理，并可在企业内部或企业间为产品设计与制造建立一个并行化的产品协作环境。由于 PDM 系统的底层能支持异构软、硬件平台，中间层能提供分布式信息管理、通信服务以及支持应用集成的应用服务，所以被看作能支持信息集成与应用的一种集成平台或集成框架。故此，近几年来便提出在此平台上集成或封装 CAD、CAE、CAM 等多种开发环境和工具。因而 CAD、CAE、CAM 系统之间的信息传递变成了分别与 PDM 之间的信息传递，CAD、CAE、CAM 可以从 PDM 系统中提起各自所需要的信息，而各自应用的结果又可放回到 PDM 中去，从而实现 CAD/CAE/CAM 之间的信息集成，如图 1-3 所示。

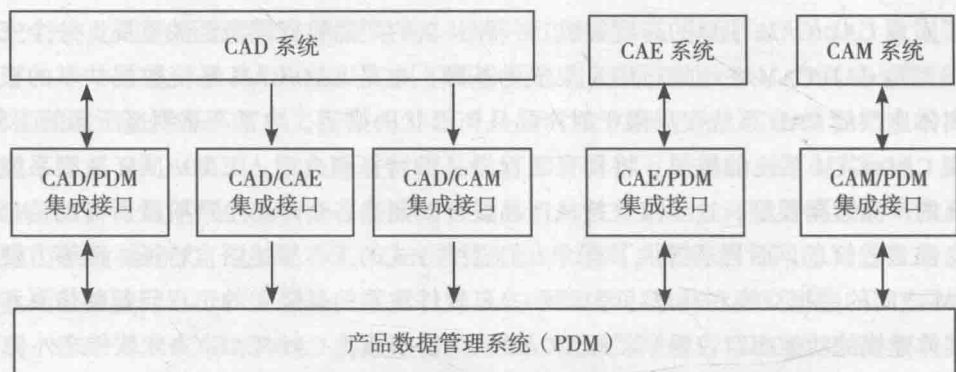


图 1-3 CAD/CAE/CAM/PDM 集成的体系结构

由图 1-3 可见，CAD、CAE、CAM 系统通过各自的 CAD/PDM、CAE/PDM、CAM/PDM 集成接口与 PDM 系统实现应用封装、接口交换或紧集成这样的三个层次。CAD 系统向 CAE 和 CAM 输送的信息通过 CAD/CAE 和 CAD/CAM 集成接口转换后存入 PDM 系统。从 PDM 功能可知，CAD 系统需要从 PDM 系统获取设计任务书、技术参数、原有零部件图样、资料以及更改要求等信息，CAD 系统产生的二维图样、三维模型、零部件的基本属性、产品明细表、零部件之间的装配关系、产品版本等设计结果，需要交由 PDM 系统来管理。CAD 与 PDM 之间集成的关键是要保证 CAD 的数据变化与 PDM 中数据变化的一致性，以达到二者间真正的紧集成，即在 CAD 与 PDM 之间建立共享产品数据模型，实现互操作，保证 CAD 中的修改与 PDM 中修改的互动性和一致性，真正做到双向同步。CAE 进行分析时，作为分析对象的几何模型是由 CAD 数据转换而得，其分析结果是对相应 CAD 模型性能的描述。由于 PDM 也是以 CAD 数据作为其管理核心，因此在 PDM 描述的产品结构树中，CAD 数据应该作为每个零部件必需的子对象节点，而 CAE 数据可以作为相应 CAD 数据的子对象节点。相对于 PDM 的体系结构，CAE 软件要作相应的分布式配置：License 文件及管理器等放在服务器端的功能层，应用程序、界面及各种输入/输出文件都在客户端，得到的详细分析报告作为主要的交流载体，放在服务器端的支持层共享，在功能层还需实现对分析报告或相关 CAD 文件的存、取、删、改、查等操作。在产品数据管理中，保证 CAD 创建的模型和 CAE 分析的模型的一致性是其基本目标。产品结构

树中的每一项零件及装配件,都必有其对应的 CAD 子对象,在 CAD 对象下创建 CAE 子对象,该子对象采用的分析模型为其父类的 CAD 模型,必须至少包含一个 DOC 或 PDF 格式的分析报告文件,如果出于分析人员之间交流的需要,可能还需要有 INP 或 DB 文件。INP 或 DB 文件可以是有限元分析文件、有限元网格文件、求解结果文件等,分析报告是求解结果产生的可视化图标和 CAE 分析后的修改建议等。这样,模型默认情况下,使用者在客户端看到的产品结构树中的每个 CAD 模型文件下都有一个 CAE 文件夹,其中包含有分析报告、INP 或 DB 等文件。激活某个文件,通过功能层根据需求和权限对该文件进行处理。CAM 系统从 PDM 系统中获取产品模型、工艺文档等信息,由此产生的刀位文件、NC 代码又交由 PDM 管理,因仅有这些方面的信息交流,故二者采用应用封装的集成模式就可以满足信息集成的要求。

第四节 部分 CAE 通用软件介绍

随着计算机软硬件技术的发展和数值计算理论的不完善,国际上一些著名的 CAE 软件公司通过对自身的 CAE 软件功能的不断扩展和深化,或通过收购兼并别的专业软件公司来增强已有软件的功能,从而形成了一批知名品牌的 CAE 仿真和分析软件,并在科学研究领域以及工程界得到广泛应用。这些软件的特点有以下几个方面。

1. 强大的建模和前处理功能

基于先进的计算机视窗和图形技术以及交互式操作方式等,用户界面更加友好,建模效率显著提高。

2. 先进的求解器

仿真软件能自动形成机械系统模型的动力学方程,并提供解算结果。分析软件求解工程问题的广度和深度不断提高,特别是非线性问题求解的能力取得重大进展。

3. 解决工程问题的深度和广度进一步加强

如有限元分析的范围由结构问题扩展为流体、电磁、电子以及多物理场耦合等领域,并由线性扩展到非线性和高度非线性问题。

4. 分析结果的可视化显示

以表格、图形和图像显示分析结果,并使用户更容易地获得和处理数值计算结果。以动画的形式再现结构的受载和 / 或动态过程。

5. 与其他 CAD/CAM 系统的集成性

为了取长补短,资源共享,许多 CAE 软件支持工业数据 / 几何模型交换标准,它们与 CAD 设计系统或 CAD/CAM 集成系统互留单向或双向接口。

CAE 软件产品可分为以下 3 类。

1. 通用 CAE 软件

这类软件自成体系,虽然侧重点有所不同,但解决工程问题的领域比较宽,适应性和通用性强,如 ABAQUS、ADINA、ANSYS、MARC 和 NASTRAN 等属于这类软件。