

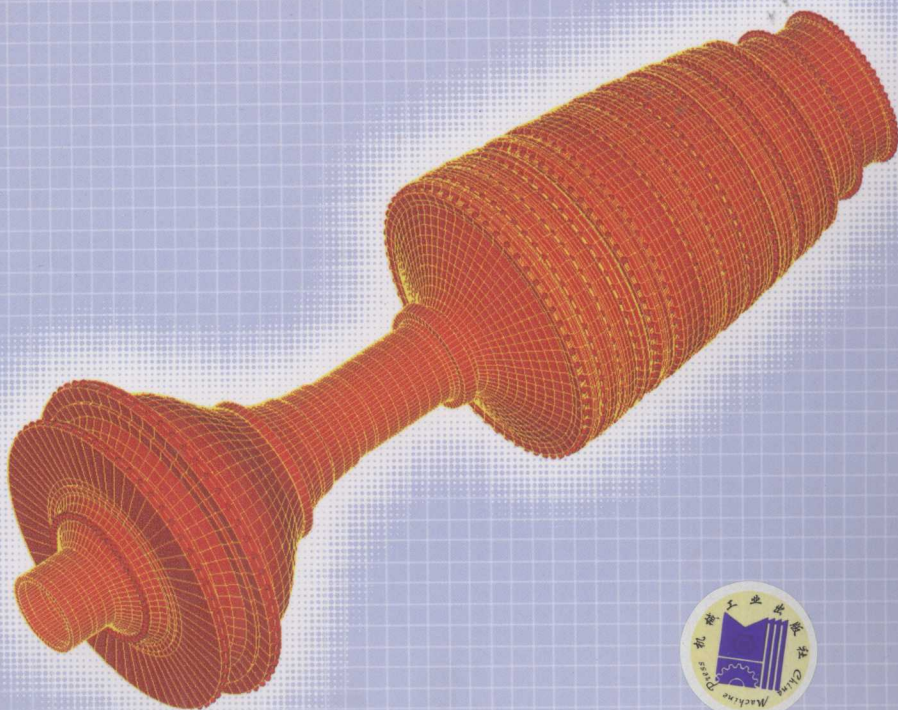
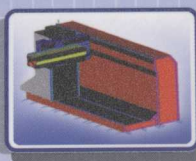
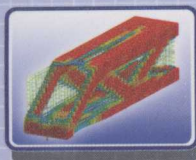
CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

SAMCEF

有限元分析 与应用实例



周传月 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



附赠超值 DVD 光盘
视频操作 + 范例素材

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

SAMCEF 有限元分析与 应用实例

周传月 主编



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了 SAMCEF 软件在不同领域应用的基本理论、使用方法和应用实例。全书可分为三个部分：第一部分介绍 SAMCEF 软件及其基本使用知识；第二部分以实例详解的方式说明 SAMCEF Field 建模、线性结构分析、模态分析、热分析、结构非线性分析和机构运动非线性分析等的具体操作和关键技术；第三部分着重介绍 SAMCEF 转子动力学专业分析软件包 SAMCEF Rotor 的基本理论和分析技术。通过本书的学习，读者不但能够迅速掌握 SAMCEF 软件的操作方法，而且能够对具体的工程问题进行独立分析。

本书可作为理工院校相关专业高年级本科生、研究生及教师学习 SAMCEF 软件的辅导用书，也可作为广大工程技术人员和科研工作者使用 SAMCEF 软件的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

SAMCEF 有限元分析与应用实例 / 周传月主编. —北京：机械工业出版社，2009.1

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-25667-0

I. S… II. 周… III. 有限元分析-应用程序, SAMCEF IV. 0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 203793 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：丁 诚 吴鸣飞

责任编辑：丁 诚 唐洪昌 郭 娟

责任印制：杨 曦

三河市国英印务有限公司印刷

2009 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm · 28.5 印张 · 702 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-25667-0

ISBN 978-7-89482-810-1 (光盘)

定价：60.00 元 (1DVD)

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 68993821

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

编辑热线电话：(010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版



序 言

At present, China is experiencing a period of rapid development, from manufacturing to service-based economy innovation-driven economy. In order to continue to succeed, China needs the best software tools.

SAMTECH SA committed to professional technical team for provide the world's leading software products to Chinese users for improving Chinese users competitiveness in the global market. Now SAMTECH is pleased to provide the book to readers of SAMCEF software applications on the Chinese version. The book including specific application of SAMCEF software and example of the integration of China on guiding readers quickly and efficiently grasp SAMCEF software applications, SAMCEF software to help you in finite element analysis in the power of all released.

SAMTECH CEO

Mr. Eric Carnoy

目前，中国正经历着一个迅猛发展的时期，从制造服务型经济转向创新驱动型经济。为了继续取得成功，中国需要最佳的软件工具。

SAMTECH 公司致力于以专业的技术团队和卓越的技术实力带给中国用户世界领先的软件产品，从而大大提升中国用户在全球市场的竞争力。如今 SAMTECH 公司很高兴为中国读者提供这本介绍 SAMCEF 软件应用的中文版书籍。本书详细介绍了 SAMCEF 软件的具体应用，通过理论与实例相结合的讲解，引导中国读者快速高效地掌握 SAMCEF 软件的应用方法，从而有效帮助您把 SAMCEF 软件在有限元分析方面的强大威力全部释放出来。

SAMTECH 公司首席执行官

Eric Carnoy





前 言

SAMCEF 软件最早出现在 20 世纪 60 年代,从 80 年代随着计算机技术的发展而迅速发展起来,进而在航空、航天等高端领域得到了广泛的应用。21 世纪初 SAMCEF 软件开始在我国各个工程领域和科研领域得到广泛的应用。北京东方极峰科技有限公司(EMAX)作为 SAMCEF 软件在中国的代理商,早在 7 年前就在中国宣传和推广该软件,目前已经拥有航空、航天、船舶、能源、电力、核能等领域的众多用户。

SAMCEF 软件被认为是功能最强的有限元分析软件之一,特别是在多刚体/多柔体非线性分析领域、转子动力学分析领域和电缆线静动力学等分析领域,其技术和特点更是独树一帜。SAMCEF 软件融结构、传热学、声学、电学以及热固耦合、流固耦合、热电耦合、振动噪声耦合、光学机械热耦合于一体,可以分析复杂的固体力学、结构力学系统,特别是能够驾驭非常庞大复杂的问题和模拟系统级非线性多体动力学问题。利用 SAMCEF 软件不但可以进行单一零件的力学和多物理场分析,同时可以进行多部件的系统级的分析研究,这一特点相对于其他分析软件来说是独一无二的。SAMCEF 软件除了向通用性方面发展外,还在向要求更高的专业分析领域发展,例如以 SAMCEF Rotor 软件包为代表的转子动力学分析领域,以 SAMCEF Cable 软件包为代表的电缆线专业分析领域等。

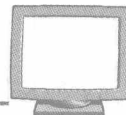
本书全面系统地介绍了 SAMCEF 软件在不同领域应用的基本理论、使用方法和应用实例。全书可分为三个部分:第一部分为 SAMCEF 软件介绍和基本使用,包括有限元方法和有限元软件介绍、SAMCEF 软件包的分析功能和基础知识、SAMCEF 的安装方法和过程、SAMCEF 的用户界面、SAMCEF 的建模功能、SAMCEF 的分析数据定义、SAMCEF 的有限元网格划分、SAMCEF 的求解分析过程和 SAMCEF 的后处理;第二部分以实例详解的方式说明 SAMCEF Field 建模、线性结构分析、模态分析、热分析、结构非线性分析和机构运动非线性分析等的具体操作和关键技术,每个实例都以图文并茂的形式介绍 SAMCEF Field 的操作流程;第三部分着重介绍 SAMCEF 转子动力学专业分析软件包 SAMCEF Rotor 的基本理论和分析技术,并以多个图文并茂的分析实例介绍 SAMCEF Rotor 的使用方法和分析过程,同时给出了多个多物理场耦合分析实例,包括振动噪声耦合分析、压电材料电-机械耦合分析、电-热-机械耦合分析、电磁场分析、光学-机械-热耦合分析等,还给出了复合材料分析实例、电缆线分析实例、流固耦合分析实例和拓扑优化分析实例。

本书涉及的内容较广,读者可根据自己的需要进行选择性阅读。要充分掌握该软件,还需要进行大量的上机操作。

本书可作为理工院校相关专业高年级本科生、研究生及教师学习 SAMCEF 软件的辅导用书,也可作为广大工程技术人员和科研工作者使用 SAMCEF 软件的参考书。

本书由北京东方极峰科技有限公司的周传月主编,参与本书编写的人员还有徐志程、齐宏伟、姜宏杰、李桂英、关琦、王超、王美娥、张建斌、李艳芬、马哲、单昆仑、曾晨辉、罗慧强、王洪飞、励成武、何伟、马力、崔曼利等, Samtech 公司工程师查鹏参加了本书的校对工作。





本书在编写过程中得到了比利时 SAMTECH 公司北京代表处的大力支持和帮助，尤其是在经费上的支持，使本书得以顺利出版，在此表示衷心的感谢。特别要感谢的是 SAMTECH 公司亚太区总经理牟全臣博士，他为本书提出了非常宝贵的意见和建议，并邀请 SAMTECH 公司首席执行官 Eric Carnoy 先生为本书作序。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，敬请读者批评指正，欢迎来信 (emax@163.com) 共同探讨。

编 者





目 录

序言		3.2.1 SAMCEF Field 的启动	35
前言		3.2.2 SAMCEF Field 用户界面	37
第 1 章 有限元分析和 CAE 软件	1	3.3 SAMCEF Field 菜单界面	38
1.1 有限元分析	1	3.3.1 SAMCEF Field 菜单界面简介	38
1.2 有限元方法和有限元分析的历史	1	3.3.2 鼠标的使用	39
1.3 有限元工程应用	2	3.3.3 人机对话界面	40
1.4 有限元分析流程	3	3.4 SAMCEF Field 的功能	44
1.5 CAE 软件概述和主要的有限元分析软件	4	3.4.1 参数化	44
第 2 章 SAMCEF 软件介绍	9	3.4.2 几何模型	44
2.1 SAMTECH 公司	9	3.4.3 网格	45
2.2 SAMCEF 的发展历史	9	3.4.4 装配单元	45
2.3 SAMCEF 系列软件介绍	10	3.4.5 材料特性	45
2.3.1 前后处理软件 SAMCEF Field	11	3.4.6 分析	45
2.3.2 通用求解器	12	3.4.7 工作过程	47
2.4 SAMCEF 专业分析软件包	15	3.4.8 报告和输出	49
2.4.1 SAMCEF Rotor 转子动力学软件包	15	3.5 SAMCEF 有限元分析简单实例	49
2.4.2 SAMCEF Machine Tools 机床分析软件包	19	3.5.1 问题描述	49
2.4.3 SAMCEF Turbine Wind 风电分析软件包	21	3.5.2 导入几何模型	50
2.4.4 SAMCEF Amayllis 专业的高温分解与烧蚀分析软件包	24	3.5.3 导入和修补几何模型	51
2.4.5 SAMCEF for Power Line and Substations 输电线和变电站专业集成软件包	25	3.5.4 数据定义	52
第 3 章 SAMCEF 基本分析过程	28	3.5.5 生成有限元网格	55
3.1 SAMCEF 软件安装	28	3.5.6 求解	56
3.1.1 硬件系统要求	28	3.5.7 后处理	57
3.1.2 软件系统要求	28	第 4 章 SAMCEF Field 建模功能	61
3.1.3 SAMCEF 的安装	29	4.1 概述	61
3.2 SAMCEF 的启动	35	4.1.1 建模介绍	61
		4.1.2 建模功能	62
		4.1.3 图标库	62
		4.2 创建几何	63
		4.2.1 创建点	63
		4.2.2 创建线	63
		4.2.3 创建面	64
		4.2.4 创建轴	64



4.2.5 创建无限大平面	64	5.2.2 基本概念	94
4.2.6 创建草图	65	5.2.3 数据库	94
4.2.7 拉伸建模	67	5.2.4 局部分析数据	96
4.2.8 旋转建模	67	5.2.5 应用数据	97
4.2.9 体素创建	67	5.2.6 分析数据对话框	100
4.2.10 创建交点或交线	68	5.2.7 物理数据类型	104
4.2.11 创建螺旋线	69	5.2.8 特殊的单元	104
4.2.12 创建扫描模型	69	5.3 单元特性定义	109
4.2.13 面合并成壳	69	5.3.1 单元类型	109
4.2.14 粘合	70	5.3.2 单元参数定义	110
4.2.15 融合	70	5.4 材料数据定义	117
4.2.16 创建区域	70	5.4.1 材料类型	117
4.3 几何修补	71	5.4.2 定义方法	117
4.3.1 删除操作	72	5.5 边界条件	117
4.3.2 几何修改操作	73	5.5.1 边界条件类型	118
4.3.3 几何特性转换	75	5.5.2 各类型边界条件简介	118
4.4 其他基本操作	77	5.6 载荷定义	119
4.4.1 Import 和 Export	77	5.6.1 载荷的介绍	119
4.4.2 Copy 和 Paste	78	5.6.2 载荷类型	120
4.4.3 投影	79	5.7 装配连接定义	120
4.4.4 修改	80	5.7.1 装配连接简介	120
4.4.5 分析	82	5.7.2 连接类型简介	120
4.4.6 爆炸	83	第 6 章 SAMCEF Field 网格划分	124
4.4.7 提取	83	6.1 SAMCEF 有限元网格	124
4.4.8 偏移	83	6.1.1 网格简介	124
4.4.9 复制	84	6.1.2 网格约束	124
4.4.10 移动	84	6.2 有限元网格划分	133
4.4.11 比例缩放	85	6.2.1 划分网格	133
4.4.12 放置	86	6.2.2 输入/输出网格体	141
4.4.13 冻结	87	6.3 有限元网格质量检查	143
4.4.14 数据资料	87	6.3.1 检查网格质量	143
4.4.15 参数设置	87	6.3.2 显示方法	149
第 5 章 分析数据定义	89	6.4 有限元网格修改	152
5.1 分析类型	89	6.4.1 修改网格实体	152
5.1.1 分析类型简介	89	6.4.2 网格重编号	156
5.1.2 更改分析类型	90	6.4.3 分网参数选择	157
5.1.3 几种典型的分析类型	90	第 7 章 SAMCEF Field 分析求解	158
5.2 分析数据	93	7.1 求解参数设置	158
5.2.1 分析数据简介	93	7.1.1 求解菜单	158



7.1.2 校验分析数据	158	9.1.4 建立吊耳实体	190
7.1.3 设置	158	9.1.5 模型的精细处理	192
7.1.4 载荷工况	166	9.1.6 建立分析数据	192
7.1.5 结果选择	166	9.1.7 网格划分	193
7.1.6 输出控制	167	9.1.8 求解	193
7.2 求解运行	167	9.1.9 结果显示	193
7.2.1 转换和运行	167	9.2 模型的修改以及结果的更新	193
7.2.2 求解监控	168	9.2.1 实例分析	193
7.2.3 求解器配置	170	9.2.2 分析步骤及流程	194
7.2.4 求解命令	171	9.2.3 分析数据的更新	194
第8章 SAMCEF Field 后处理	172	9.2.4 重新计算	195
8.1 SAMCEF Field 结果后处理		9.2.5 查看结果	195
概述	172	9.3 修改一个导入的模型	195
8.1.1 后处理菜单	172	9.3.1 实例分析	195
8.1.2 结果图标	174	9.3.2 实现步骤及流程	195
8.2 后处理方法和过程	175	9.3.3 修改模型	196
8.2.1 结果属性	175	9.3.4 建立分析数据	196
8.2.2 结果单位——色标	175	9.3.5 网格划分	197
8.2.3 结果样式——显示模式	178	9.3.6 计算	197
8.2.4 结果属性——变形和变形系数	179	9.3.7 查看结果	197
8.2.5 结果属性——网格	180	9.4 导入及修改模型	198
8.2.6 结果属性——结果使用网格或 使用外形	180	9.4.1 实例分析	198
8.2.7 绘制模式	181	9.4.2 操作步骤	198
8.2.8 动画	182	第10章 线性结构分析应用实例	200
8.2.9 列表	183	10.1 连杆应力分析	200
8.2.10 结果绘图	184	10.1.1 实例分析	200
8.2.11 结果参数	187	10.1.2 分析模型和载荷条件	200
8.2.12 结果标准	187	10.1.3 建立分析模型	200
8.2.13 绑定或分离节点和外形	188	10.1.4 定义分析数据	202
8.2.14 卸载结果	189	10.1.5 划分有限元网格	203
8.2.15 输入结果实体	189	10.1.6 求解	205
8.2.16 超单元恢复	189	10.1.7 查看结果	205
8.2.17 为将来恢复保存超单元	189	10.2 离心叶轮应力分析	207
第9章 SAMCEF Field 建模实例	190	10.2.1 实例分析	207
9.1 耳板几何建模	190	10.2.2 建立模型	207
9.1.1 实例分析	190	10.2.3 定义分析数据	208
9.1.2 启动 SAMCEF Field	190	10.2.4 网格	211
9.1.3 建立模型底座	190	10.2.5 求解	212
		10.2.6 后处理	213



10.3 简单悬臂梁应力分析	216	14.1.3 定义分析数据	238
10.3.1 实例分析	216	14.1.4 装配组件	239
10.3.2 分析模型及载荷条件	217	14.1.5 网格划分	242
10.3.3 分析流程	217	14.1.6 计算	242
第 11 章 模态分析实例	221	14.1.7 查看结果	243
11.1 连杆模态分析	221	14.2 四连杆机构动力学分析	243
11.1.1 实例分析	221	14.2.1 问题描述	243
11.1.2 分析数据	221	14.2.2 创建几何模型	243
11.1.3 模态分析过程	221	14.2.3 定义分析数据	244
11.1.4 计算结果	222	14.2.4 网格划分	247
11.2 壳结构模态分析实例	224	14.2.5 计算	247
11.2.1 实例分析	224	14.2.6 查看结果	247
11.2.2 操作步骤	224	14.3 多柔性体机床运动分析	249
第 12 章 热分析实例	227	14.3.1 实例分析	249
12.1 平板结构传热分析算例	227	14.3.2 启动	250
12.1.1 实例分析	227	14.3.3 定义分析数据	251
12.1.2 启动	227	14.3.4 装配组件	252
12.1.3 建立模型	227	14.3.5 网格划分	255
12.1.4 定义分析数据	228	14.3.6 计算	255
12.1.5 网格划分	228	14.3.7 查看结果	255
12.1.6 计算	229	第 15 章 转子动力学理论背景	256
12.1.7 查看结果	229	15.1 简介	256
第 13 章 结构非线性分析实例	230	15.1.1 转子动力学问题	256
13.1 弹塑性材料结构的非线性 分析	230	15.1.2 转子动力学的基本假设	256
13.1.1 实例分析	230	15.2 模型	256
13.1.2 启动	230	15.2.1 转子模型	256
13.1.3 定义分析数据	230	15.2.2 静子模型	259
13.1.4 网格划分	232	15.2.3 模型减缩	260
13.1.5 计算	232	15.2.4 连接部件	261
13.1.6 查看结果	233	15.2.5 载荷	263
13.2 接触非线性实例	233	15.2.6 时域系统方程	263
13.2.1 实例分析	233	15.2.7 频率域系统方程	264
13.2.2 操作步骤	233	第 16 章 转子动力学分析实例	265
第 14 章 机构运动非线性分析实例	238	16.1 悬臂盘转子临界转速分析	265
14.1 曲柄滑轨结构非线性分析 实例	238	16.1.1 实例分析	265
14.1.1 实例分析	238	16.1.2 建立分析模型	266
14.1.2 启动	238	16.1.3 定义分析数据	267
		16.1.4 网格	271
		16.1.5 求解	272



16.1.6 后处理	273	16.6.5 求解	341
16.1.7 直接法求解临界转速	277	16.6.6 导入超单元	342
16.1.8 弹性支承条件临界转速	278	16.6.7 重新定义分析数据	343
16.2 阶梯轴转子临界转速分析	282	16.6.8 超单元求解	345
16.2.1 实例分析	282	16.6.9 后处理	346
16.2.2 建立分析模型	283	16.7 单盘转子临界转速分析 (三维实体模型)	349
16.2.3 定义分析数据	284	16.7.1 实例分析	349
16.2.4 网格	291	16.7.2 建立分析模型	349
16.2.5 求解	292	16.7.3 定义分析数据	351
16.2.6 后处理	293	16.7.4 网格划分	354
16.2.7 直接法求解临界转速	299	16.7.5 求解	355
16.3 阶梯轴转子谐波响应分析	302	16.7.6 后处理	357
16.3.1 实例分析	302	第 17 章 振动噪声分析实例	362
16.3.2 建立分析模型	304	17.1 容器声学响应分析	362
16.3.3 定义分析数据	305	17.1.1 实例分析	362
16.3.4 网格	309	17.1.2 启动	362
16.3.5 求解	310	17.1.3 建立分析数据	362
16.3.6 后处理	312	17.1.4 划分网格	364
16.4 阶梯轴转子瞬态响应分析	313	17.1.5 计算模态结果	364
16.4.1 实例分析	313	17.1.6 查看结果	365
16.4.2 建立分析模型	315	17.1.7 未耦合结构的模态分析	366
16.4.3 定义分析数据	316	17.1.8 谐响应分析	366
16.4.4 网格	319	17.1.9 谐响应分析(考察声学传播 规律)	371
16.4.5 求解	320	17.2 声学衍射分析	373
16.4.6 后处理	322	17.2.1 实例分析	373
16.5 阶梯轴转子二维模型临界 转速分析	324	17.2.2 启动并建立模型	373
16.5.1 实例分析	324	17.2.3 建立分析数据	374
16.5.2 建立分析模型	325	17.2.4 网格划分	375
16.5.3 定义分析数据	327	17.2.5 提交计算	376
16.5.4 网格	331	17.2.6 检查结果	376
16.5.5 求解	331	第 18 章 耦合分析典型实例	377
16.5.6 后处理	332	18.1 压电材料与控制装置的 强耦合模型	377
16.6 阶梯轴转子临界转速分析 (超单元)	335	18.1.1 模型描述	377
16.6.1 实例分析	335	18.1.2 分析目标	377
16.6.2 建立分析模型	336	18.1.3 线性静力分析	377
16.6.3 定义分析数据	339	18.1.4 模态分析	382
16.6.4 网格	341		





18.1.5 谐响应分析	384	18.6.1 模型描述	414
18.1.6 瞬态分析	386	18.6.2 分析目标	415
18.2 电动热力学分析实例	387	18.6.3 Z 向重力的线性静力分析 流程	415
18.2.1 模型描述	387	第 19 章 SAMCEF 特殊分析实例 ...	423
18.2.2 分析目标	388	19.1 复合材料分析	423
18.2.3 线性静态分析流程	388	19.1.1 实例分析	423
18.2.4 瞬态分析	393	19.1.2 操作步骤	423
18.3 电磁分析实例 1	394	19.2 简单电缆线分析	428
18.3.1 模型描述	394	19.2.1 模型描述	428
18.3.2 分析目标	395	19.2.2 启动软件设置	429
18.3.3 分析流程	395	19.2.3 电缆线分析	429
18.4 电磁分析实例 2	400	19.3 充满流体的箱体分析	433
18.4.1 模型描述	400	19.3.1 模型描述	433
18.4.2 分析目标	400	19.3.2 启动软件设置	433
18.4.3 分析流程	400	19.3.3 非线性分析	433
18.5 光机热耦合分析实例 1	405	19.3.4 模态分析	436
18.5.1 模型描述	405	19.4 拓扑优化分析	437
18.5.2 分析目标	405	19.4.1 模型描述	437
18.5.3 线性静力分析流程	405	19.4.2 拓扑优化分析的步骤	437
18.5.4 瞬态分析	412		
18.6 光机热耦合分析实例 2	414		



第1章 有限元分析和 CAE 软件

▶▶ 1.1 有限元分析

有限元法（或称为有限单元法）是当今工程分析中应用最广泛的数值计算方法。由于它的通用性和有效性而一直受到工程技术界的高度重视。伴随着计算机科学和技术的发展，它已成为计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）的重要组成部分，并发展成为计算机辅助工程（CAE）。计算机辅助工程是计算机技术和工程分析技术相结合而形成的新兴技术，其具体体现是 CAE 软件。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而形成的一种综合性、知识密集型信息产品。经过几十年的发展，CAE 软件分析的对象逐渐由线性系统发展为非线性系统，由单物理场发展到多物理场耦合系统，并在航空、航天、通用机械、建筑、土木工程、水利工程、爆破、石油化工、海洋工程等领域获得了成功的应用。随着计算机技术、CAD 技术、CAM 技术、ERP 技术、PDM 技术和 PLM 技术的发展，CAE 技术逐渐与它们相互渗透，并且向多种信息技术的集成方向发展。

有限元分析（FEA）首先被运用于航空航天和核工业领域，因为在这些行业中，结构的安全是非常重要的。近 20 年来，有限元法被大量采用，这应直接归因于计算机技术的发展。因此，商业有限元软件能够解决非常复杂的问题，而不仅仅只解决结构的问题。

有限元分析由赋有材料属性的计算机模型或带有载荷和分析结果的图形构成，它被用于对新产品的设计和对已有产品的优化，用于在制造或建设前期对设计按照规范进行验证，还用于调整现有的产品或结构使其能满足新的服务条件。

分析的结构被细分为简单形状的微小网格单元，在每个单元里，位移变量假定由简单多项式图形函数和节点位移确定。应变和应力方程通过未知的节点位移扩展得到。从这一点看，平衡方程被假定为矩阵的形式，这种形式的矩阵很容易在计算机上通过编程求解。节点位移可以通过刚度矩阵方程进行求解。一旦得到了节点位移，单元应力和应变也能够被求解。

在每个模拟设计中，程序员都能够插入大量的函数，这些函数可以使系统为线性或非线性的形式。线性系统大大减小了复杂程度，通常它忽略了许多细微的加载和动作模拟；非线性系统的计算形式更贴近实际，如塑性变形、变化载荷等，同时它也能验证各种类型的破坏因素。

不论商业软件的功能和扩展能力有多神奇，它的本质则是将技术的理解和物理过程融入到分析中，只有这样才能选择合适的、准确的分析模型，并给出正确的定义和解释。

▶▶ 1.2 有限元方法和有限元分析的历史

从应用数学的角度考虑，有限元法基本思想的起源可以追溯到美国著名数学家



R.Courant 在 1943 年的工作。他首先尝试应用在一系列三角形区域上定义的分片连续函数和最小位能原理相结合的方法,来求解 St.Venant 扭转问题。此后,不少应用数学家、物理学家和工程师分别从不同角度对有限元法的离散理论、方法及应用进行了研究。Turner、Clough、Martin 和 Topp 于 1956 年发表了一篇文章,这篇文章提出了数值分析的广义定义。有限元法的实际应用是随着电子计算机的出现而开始的。首先是 Turner、Clough 等人于 1956 年将刚架分析中的位移法推广到弹性力学平面问题,并用于飞机结构的分析。他们首次给出了三角形单元求解平面应力问题的正确答案。三角形单元的特性矩阵和结构的求解方程是由弹性理论的方程通过直接刚度法确定的。他们的研究工作开始了利用计算机求解复杂弹性力学问题的新阶段。1960 年,Clough 进一步求解了平面弹性问题,并第一次提出了“有限单元法”的名称,使人们更清楚地认识到有限元法的特性和功效。

在 20 世纪 70 年代前期,有限元分析一般仅局限在拥有昂贵的大型计算机的航空、汽车、国防、核工业等领域,而且分析的范围非常有限。70 年代,Zienkiewicz 和 Cheung 等人进一步扩展了有限元技术。他们通过拉普拉斯方程来完成对一般问题的描述。数学家们正努力开发出更好的求解算法。一维线性元和 Rayleigh-Ritz 法的出现优化了特定类别的常规问题的求解。在非线性问题的求解和模拟研究方面,Hinton 和 Crisfield 为主要的贡献者。

在有限元方法快速进步的同时,其他的领域也在发展。例如,强大的网格生成方法的发展,使得除了复杂的几何模型外,商业软件已经具备了网格的能力。又如,高级 CAE 理论的产生,使工程制图只需要一个简单的 CAD 模型即可完成,使执行运动分析和组装分析可以作为有限元模型来使用。另外,由于计算机成本的快速降低和计算能力的显著提升,目前台式计算机能够对各种参数进行精确的计算(标准个人计算机的计算能力是 20 世纪 90 年代早期的超大型计算机计算能力的 10 倍之多)。这些都为有限元法的发展提供了有力的支持。

▶▶ 1.3 有限元工程应用

从本质上讲,有限元是用来解决常微分方程和偏微分方程的一种数学方法。因为它是一种数学方法,它能够求解那些用微分方程的形式描述的复杂问题,所以当这些类型的方程很自然地发生在自然科学的各个领域时,有限元法被无限制地应用到求解实际设计的问题中。

由于高成本的计算处理年代已经过去,因此有限元分析经常被用来解决复杂和关键的问题。通常情况下,传统单一的方法不能提供足够的信息来确定土木工程建筑的安全工作限度。例如,高层建筑、大的浮动桥或核反应堆的失败,其高昂的经济成本和恶劣的社会影响是我们无法承受的。

近年来,有限元分析几乎被大量应用于解决结构工程的问题,尤其是航空工业更加依赖于这项技术。由于飞机有快速、轻便和经济的要求,制造商必须依靠有限元分析技术来保持竞争优势。但更重要的问题是,为了安全飞机零部件的制造成本高,飞机制造商需要确保每个零件在发生破坏之前,提供停止使用的计划。

有限元分析被用在大量产品生产和制造工业已经有很多年。在工程设计方面有限元方法是一种非常有效的工具,它经常被用于解决下面领域中的问题:



- 结构强度计算分析。
- 结构碰撞冲击。
- 爆炸仿真分析。
- 流体动力学(CFD)仿真分析。
- 振动噪声分析。
- 疲劳耐久性分析。
- 结构热分析。
- 电磁场分析。
- 机械-热耦合分析。
- 光-机械-热耦合分析。
- 结构-流体-声场耦合。
- 压电材料及MEMS分析。
- 转子动力学分析。
- 质量扩散分析。
- 屈曲/稳定性分析。
- 结构动力学分析。
- 柔性机构动力学分析。
- 结构优化分析。
- 金属成型分析。
- 制造过程仿真分析。
- 铸造仿真分析。

现在,甚至连最简单的产品设计评估也依赖有限元方法。这是因为使用其他现有的方法通常不能准确和经济实惠地解决当前的设计问题。以物理实验作为标准的时代已经过去,因为它的成本确实太高了。

▶▶ 1.4 有限元分析流程

有限元模型是结构或零部件的离散模型,在模型里包含了结构的物理特性以及位移和力的边界条件,是结构状态的偏微分方程的近似解。在有限元技术中,单元是由节点(GRID)构成的,节点具有几何属性和物理属性。单元的形狀,单元的形函数,材料的特性,边界条件的确定,求解的方法等都和解的精度有关。因此,要适当了解材料力学的假定和相应的分析几何体,选择表达这些特性的单元,给出合理的网格分布,定义材料特性,在即将生成的节点(单元)或几何体上定义载荷和约束等,构成有限元模型的建立过程。以上的全过程可在前后处理软件中完成。

建立有限元模型,完全不同于几何体的描述。例如,一个梁单元的几何形状可以是一段直线或一段曲线,而梁截面的复杂几何形状可归结为截面积和惯性矩。薄壳结构用中面上的壳单元来描述,即便是采用三维实体单元,也必须删除小的圆孔和小的凸台等。

因此,建立有限元模型不需要几何上的极度逼真,而是需要性能上的真实性,以及对物理模型的深入了解。



正确使用有限元分析程序，至今仍然是分析工程师要认真对待的问题。首先要求分析工程师有坚实的力学基础，透彻了解典型问题的理论解。其次，要深入了解有限元的理论，离散的理论基础，解的稳定性、可靠性和有效性；能通过已有考题或自行设定考题检查模型的正确性；对工程问题的力学本质能准确地抽象或概括；对要解决的问题要反复论证；对大多数工程问题要有可靠的实验数据；勤于查阅相关文献，吸取他人的经验；对分析程序能熟练地驾驭；对分析的结果要准确判断正误；随时修正已有模型，最终给出准确的分析报告。对大多数分析工程师而言，对于所接受的设计工程师的几何模型，都要进行简化和修改，有时还要分析工程师自己建立几何模型。因此，分析工程师既要有力学背景，也要有工程背景，要熟练地掌握大型商业有限元分析程序，还要掌握必要的数学知识和其他的计算机软件（如 CAD）的知识。这些都将成为研究机构、大学和各大公司录取工程分析人才的必要条件。

▶▶ 1.5 CAE 软件概述和主要的有限元分析软件

CAE 软件通常可分为通用分析软件 and 行业专用软件。它从功能上可以划分为求解器软件和前后处理软件。从应用方向和领域上又可以分为主要面向结构领域的有限元分析（FEA）软件和针对流体力学领域的计算流体力学分析（CFD）软件，以及解决多物理场耦合问题的多场耦合分析软件。通用软件是可以对多种类型的产品和工程问题的物理力学性能进行分析、模拟、预测、评价和优化，以实现产品技术创新的软件，它以覆盖的应用范围广而著称。通用软件可以说是琳琅满目，目前在国际上被市场认可的通用 FEA 软件主要包括：美国 MSC 公司的 MSC.NASTRAN、MSC.MARC、MSC.DYTRAN、MSC.ADAMS、MSC.FATIGUE，美国 ANSYS 公司的 ANSYS、AUTODYN，法国 DASSAULT SYSTEMS 公司的 ABAQUS，美国 LSTC 公司的 LS-DYNA，美国 NEI 公司的 NEI NASTRAN，比利时 SAMTECH 公司的 SAMCEF，美国 ADINA 公司的 ADINA，法国 ESI 公司的 PAMCRASH，美国 Altair 公司的 OPTISTRUCT、RADIOSS 和美国 EDS 公司的 I-DEAS 等。这些软件都有着各自的特点，在行业内，一般将其分为线性分析软件、一般非线性分析软件和显式高度非线性分析软件。例如，NASTRAN、ANSYS、SAMCEF/LINEAR 都在线性分析方面具有自己的优势；而 MARC、ABAQUS、SAMCEF/MECANO 和 ADINA 则在非线性分析方面各具特点。其中，MARC 和 ABAQUS 被认为是最优秀的非线性求解软件；SAMCEF/MECANO 在弹性体和刚体耦合非线性分析方面见长；LS-DYNA、MSC.DYTRAN、ABAQUS/EXPLICIT、PAMCRASH 和 RADIOSS 是显式高度非线性分析软件的代表；LS-DYNA 在结构分析方面见长，是汽车碰撞仿真（CRASH）和安全性分析（SAFETY）的首选工具；而 MSC.DYTRAN 则在流固耦合分析方面见长，在汽车缓冲气囊和国防领域应用广泛。

目前，市场上的 CFD 软件以美国 ANSYS 公司的 FLUENT、CFX，英国 Computational Dynamics 公司的 STAR-CD，美国 Metacomp Techenologies 公司的 CFD++，美国 Flow Science 公司的 FLOW-3D 最有代表性。其中 FLUENT、CFX、STAR-CD 这三个流体软件已经被国内的用户所熟悉。CFD++ 是美国 Metacomp Techenologies 公司的流体力学模拟软件。CFD++ 可以有效地解决流体力学问题中的可压流（任何马赫数）和不可压流，包括单组分和



多组分流动、化学反应流动、多相流、稳流和非稳流、旋转机械、热传导和多孔介质等。一阶、二阶和三阶的湍流方程,结合经典的壁面方程,可以精确地捕捉壁面附近的流体压缩参数、压力梯度、热传导等各种湍流特性。单方程的大涡模拟 (LES) 模型和混和的 LES 模型/雷诺平均 (RANS) 模型同样可用。后者极大地减少了传统 LES 的工作量。FLOW-3D 是国际知名的流体力学大师 C.W. Hirt 博士的毕生之作。从 1985 年正式推出后,在 CFD 和传热学领域得到了广泛的应用,在对实际工程问题的精确模拟与计算结果的准确性上都受到了用户的高度赞许。其独特的 FAVORTM 技术和针对自由液面的 VOF 方法为常见的金属压铸与水力学等复杂问题提供了更高精度、更高效率的解答。FLOW-3D 可以模拟铸件的充填和凝固过程,让铸造工程师能更深入地了解铸造过程。不仅如此,FLOW-3D 本身完整的理论基础与数值结构,也能满足不同领域用户的需要,如小到柯达公司最高级的相片打印机的喷嘴头计算,大到 NASA 超音速喷嘴与美国海军舰艇输油系统的设计。由于其精确而稳定的特性,20 多年来,FLOW-3D 已受到如美国火箭实验室、美国海军、英国水利署、利物浦大学、通用汽车等许多重要研究单位与国际大厂的肯定。

专用有限元软件是针对特定类型的工程或产品所开发的用于产品性能分析、预测和优化的软件,它以在某个领域中的应用输入而见长。受其应用领域的限制,它只能在各自的行业领域得到应用。例如,美国 ETA 公司推出的专门应用于汽车工程的软件 VPG (Virtual Proving Ground)。VPG 虚拟试验场是 ETA 公司长期总结汽车分析工程经验,在 FEMB 和 LS-DANA 平台上开发的。VPG 主要针对当前汽车产品开发中的主要问题,即整车系统动力学、部件疲劳、整车和部件 NVH、整车碰撞安全及乘员保护等问题。又如,美国 Flow Science 公司的 FLOW-3D,可进行各种金属材料浇铸、流动性、固化、压力、应力、温度及热平衡的仿真分析。工程师可根据计算结果更改设计,调整帽口的位置和数量,进而提高铸造质量。另外还有在锻造领域应用比较多的 Deform、SuperForm 也得到了很多企业的认可。

在管道行业中,CAEPIPE 是最主要的分析软件。它可以进行在静态和动态载荷条件下,管道的应力计算、法兰分析、管道支承设计和设备接口载荷分析。它们都是使用有限元方法的程序,智能化的软件使得用户不需要了解高深的有限元理论就可以分析复杂的系统,而且软件都配有图形处理界面。这些软件的计算结果都可以按照各种标准输出,例如美国 ASME 标准 ASME B31.1、B31.3、B31.4、B31.8 和 ASME Section III Class 2 & 3,加拿大 CAN/CSA - Z662 标准,英国标准 BS 806 和 BS 7159 以及挪威 DNV 等多种标准。在管道设计行业中,加拿大 ProCAD 公司的三维管道设计软件 3D SMART 和二维绘图软件 2D Designer 都是应用很广泛的专业管道设计软件。

在板材成型行业里,有 AutoForm Engineering 公司 Autoform、ETA 公司的 DynaForm、MSC 公司 Dytran、ESI 公司的 PAM-Stamp 和 FTI 公司的 FastForm 系列软件。

在钢结构设计和结构分析方面,世界级的 CAE 系统主要有美国 REI 公司的 Staad/China、SCIA 公司的 Esa-PrimaWin (EPW)、韩国 MIDAS Group 公司的 Midas 软件、美国 EDI 公司针对海洋工程结构的计算分析软件 SACS、美国 CSI 公司的钢结构计算分析软件 SAP2000、英国 AceCad 公司的钢结构设计软件 StruCad 和美国 Bentley 公司开发的钢结构设计软件 ProSteel 等。

在噪声和声场分析领域,以比利时 LMS 公司的 SYSNOISE 软件、比利时 FFT 公司的 ACTRAN 系列分析软件、意大利 STS 公司的 VNoise 软件和法国 ESI 公司的统计能量分析