

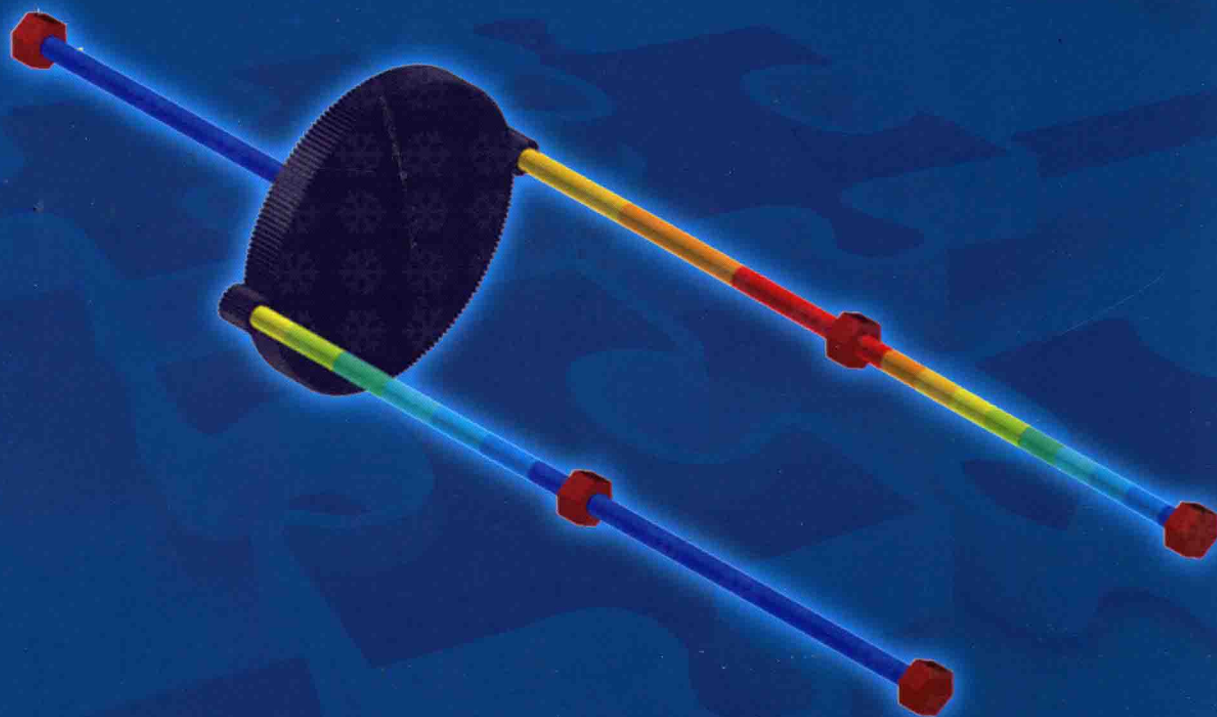
 **CAD/CAM/CAE**
工程应用丛书

SAMCEF

有限元分析与应用实例

>>> >> > >> > **第2版**

◎ 周传月 主编



附赠超值 **DVD** 光盘
视频操作+范例素材



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

SAMCEF 有限元分析与应用实例

第 2 版

周传月 主编



机械工业出版社

本书系统介绍了 SAMCEF 软件在不同领域的基本理论、使用方法和应用实例。全书从内容上可分为四部分,第一部分为 SAMCEF 软件的介绍和基本使用,包括有限元方法和有限元软件介绍, SAMCEF 软件包和功能模块的分析功能和基础知识, SAMCEF 的安装方法和启动, SAMCEF 的用户界面、建模功能、分析数据定义、有限元网格划分和求解分析过程,以及 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、线性模态分析、热分析、结构非线性分析和机构非线性分析等的具体操作和关键技术,每个实例都图文并茂地介绍了 SAMCEF Field 的操作流程,并对操作过程进行细致的解释,可满足各层次读者的需求;第三部分着重介绍 SAMCEF 转子动力学专业分析软件包 SAMCEF Rotor 所涉及的转子动力学基本理论和分析技术,包括横向振动和扭转振动两部分,并以多个实例介绍了 SAMCEF Rotor 的使用方法和分析过程;第四部分给出了 SAMCEF 软件在其他领域的应用实例,包括复合材料分析实例、电缆线分析实例、流固耦合分析实例和拓扑优化分析实例。通过本书的学习,读者不仅能够迅速掌握 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的高年级本科生、研究生、教师学习 SAMCEF 软件的参考用书,也可供广大工程技术人员和科研工作者学习参考使用。

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. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2015.8

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-51157-1

I. ①S… II. ①周… III. ①有限元分析-应用程序 IV. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 191944 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: 张淑谦 责任编辑: 王海霞

责任校对: 张艳霞 责任印制: 乔 宇

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2015 年 9 月第 2 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·28.75 印张·713 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-51157-1

ISBN 978-7-89405-855-3 (光盘)

定价: 79.80 元 (含 1DVD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: (010) 88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: (010) 68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

(010) 88379203

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

出版说明



随着信息技术在各领域的迅速渗透, CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用, 从根本上改变了传统的设计、生产与组织模式, 对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早, 使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计, 而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发, 以保持自己在技术上的领先地位和在国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用, 不但可以提高设计质量, 缩短工程周期, 还可以节约大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性, 掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧, 已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而, 仅仅掌握简单的软件操作方法还是远远不够的, 只有将计算机技术和工程实际结合起来, 才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑, 机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用和 AutoCAD、天正建筑 CAD 软件在建筑及室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖施工图、空调布线图、电路布线图以及建筑总图绘制等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作, 配以大量具有代表性的实例, 并融入了作者丰富的实践经验。本套丛书具有专业性强、操作性强、指导性强的特点, 是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前 言

SAMCEF 软件最早出现在 20 世纪 60 年代, 80 年代之后随着计算机技术的发展迅速发展起来, 进而在航空航天等高端领域得到了广泛的应用。SAMCEF 软件于 21 世纪初开始在我国各个工程领域和科研领域得到应用。北京东方极峰科技有限公司 (EMAX) 作为 SAMCEF 软件的代理商早在 21 世纪初就在我国宣传和推广该软件。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 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。SAMCEF 软件不但可以做单一零件的力学分析, 而且可以同时做多部件的系统级分析研究, 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 Rotors 软件包为代表的转子动力学分析领域、以 SAMCEF Wind Turbine 软件包为代表的风力发电动力学系统分析领域和以 SAMCEF Cable 专业分析领域软件包为代表的电缆线专业分析领域等。

本书系统介绍了 SAMCEF 软件在不同领域的基本理论、使用方法和应用实例。全书从内容上可分为四部分, 第一部分为 SAMCEF 软件的介绍和基本使用, 包括有限元方法和有限元软件介绍, SAMCEF 软件包和功能模块的分析功能和基础知识, SAMCEF 的安装方法和启动, SAMCEF 的用户界面、建模功能、分析数据定义, SAMCEF 的有限元网格划分和求解分析过程, 以及 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、线性模态分析、热分析、结构非线性分析和机构非线性分析等的具体操作和关键技术, 每个实例都图文并茂地介绍了 SAMCEF Field 的操作流程, 并对操作过程进行详细的解释, 可满足各层次读者的需求; 第三部分着重介绍 SAMCEF 转子动力学专业分析软件包 SAMCEF Rotors 所涉及的转子动力学基本理论和分析技术, 包括横向振动和扭转振动两部分, 并以多个实例介绍了 SAMCEF Rotors 的使用方法和分析过程; 第四部分给出了 SAMCEF 软件在其他领域的应用实例, 包括复合材料分析实例、电缆线分析实例、流固耦合分析实例和拓扑优化分析实例。通过本书的学习, 读者不仅能够迅速掌握 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。

本书是 2009 年 1 月出版的《SAMCEF 有限元分析与应用实例》一书的修订版, 删去了 SAMCEF 软件不再开发的部分内容, 增加了 SAMCEF Rotors 转子动力学分析扭转振动的内容和应用实例。

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, 如果要充分掌握该软件, 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的高年级本科生、研究生、教师学习 SAMCEF 软件的参考用书, 也可供广大工程技术人员和科研工作者学习参考使用。

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、沈那伟、高寒等。西门子工业软件公司的 SAMCEF 软件技术经理张旗利先生和技术工程师高寒先生提供了关于 SAMCEF 软件的最新资讯。

本书在编写过程中得到了西门子工业软件（北京）有限公司市场部的大力支持和帮助，尤其是在出版经费上的支持，使得本书得以顺利出版，在此深表衷心的感谢。

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

编 者

目 录

出版说明

前言

第1章 有限元分析和 CAE 软件.....1

1.1 有限元分析1

1.2 有限元方法和有限元分析的历史1

1.3 有限元分析的工程应用2

1.4 有限元分析的流程3

1.5 CAE 软件概述和主要的有限元分析软件4

第2章 SAMCEF 软件介绍8

2.1 西门子工业软件比利时有限公司8

2.2 SAMCEF 的发展历史8

2.3 SAMCEF 系列软件介绍9

2.3.1 前后处理软件 SAMCEF Field9

2.3.2 通用求解器12

2.4 SAMCEF 专业分析软件包14

2.4.1 SAMCEF Rotor 转子动力学软件包14

2.4.2 SAMCEF Machine Tools 机床分析软件包20

2.4.3 SAMCEF for Wind Turbine 风电分析软件包23

2.4.4 SAMCEF Amaryliss 高温分解与烧蚀分析软件包24

2.4.5 SAMCEF for Power Line and Substations 输电线和变电站专业集成软件包25

第3章 SAMCEF 基本分析过程29

3.1 SAMCEF 软件的安装29

3.1.1 硬件系统要求29

3.1.2 软件系统要求30

3.1.3 SAMCEF 的安装30

3.2 SAMCEF 的启动和用户界面34

3.2.1 SAMCEF Field 的启动34

3.2.2 SAMCEF Field 的用户界面36

3.3 SAMCEF Field 的菜单界面37

3.3.1 SAMCEF Field 菜单界面的基本概况37

3.3.2 鼠标的使用38

3.3.3 人机对话界面 (MMI)40

3.4 SAMCEF Field V5 的功能45

3.4.1 参数化45

3.4.2 几何模型46

3.4.3 网格46

3.4.4 装配单元46

3.4.5 材料特性46

3.4.6 分析47

3.4.7 工作过程48

3.4.8 报告和输出50

3.5 SAMCEF 有限元分析简单实例51

3.5.1 问题描述51

3.5.2 导入几何模型51

3.5.3 修补几何模型52

3.5.4 数据的定义54

3.5.5 生成有限元网格56

3.5.6 求解57

3.5.7 后处理59

第4章 SAMCEF Field 建模功能64

4.1 概述64

4.1.1 建模介绍64

4.1.2 建模功能65

4.1.3 图标库	66
4.2 创建几何对象	66
4.2.1 创建点	66
4.2.2 创建线	67
4.2.3 创建面	67
4.2.4 创建轴	67
4.2.5 创建无限大平面	68
4.2.6 创建草图	68
4.2.7 拉伸建模	70
4.2.8 旋转建模	70
4.2.9 体素的创建	71
4.2.10 创建交点或交线	72
4.2.11 创建螺旋线	72
4.2.12 创建扫描模型	72
4.2.13 面合并成壳	73
4.2.14 粘合	73
4.2.15 融合	73
4.2.16 创建区域	73
4.3 几何对象的修补	75
4.3.1 删除操作	75
4.3.2 修改操作	76
4.3.3 特性转换	80
4.4 其他基本操作	82
4.4.1 输入和输出	82
4.4.2 复制和粘贴	83
4.4.3 投影	83
4.4.4 修改	85
4.4.5 分析	87
4.4.6 爆炸	87
4.4.7 提取	88
4.4.8 偏移	88
4.4.9 复制	89
4.4.10 移动	89
4.4.11 放置	91
4.4.12 冻结	92
4.4.13 数据资料	93
4.4.14 参数设置	93

第5章 分析数据定义 96

5.1 分析类型	96
5.1.1 分析类型简介	96
5.1.2 更改分析类型	97
5.1.3 几种典型的分析类型	97
5.2 分析数据	100
5.2.1 分析数据简介	100
5.2.2 基本概念	100
5.2.3 数据库	101
5.2.4 局部分析数据	103
5.2.5 应用数据	103
5.2.6 分析数据对话框	106
5.2.7 物理数据类型	111
5.2.8 特殊的单元	111
5.3 单元特性定义	117
5.3.1 单元类型	117
5.3.2 单元参数定义	118
5.4 材料数据定义	126
5.4.1 材料类型	126
5.4.2 定义方法	126
5.5 边界条件	127
5.5.1 边界条件类型	127
5.5.2 各类型边界条件简介	128
5.6 载荷定义	129
5.6.1 载荷简介	129
5.6.2 载荷类型	129
5.7 装配连接定义	130
5.7.1 装配连接简介	130
5.7.2 连接类型简介	130

第6章 SAMCEF Field 分析

求解	133
6.1 求解参数设置	133
6.1.1 求解菜单	133
6.1.2 校验分析数据	133
6.1.3 设置	133
6.1.4 载荷工况	142
6.1.5 结果选择	142

6.1.6 输出控制	143	8.1.5 划分有限元网格	170
6.2 求解运行	143	8.1.6 求解	171
6.2.1 转换和运行	143	8.1.7 查看结果	171
6.2.2 求解监控	144	8.2 离心叶轮应力分析	173
6.2.3 求解器配置	146	8.2.1 实例分析	173
6.2.4 求解命令	147	8.2.2 建立模型	173
第7章 SAMCEF Field 后处理	148	8.2.3 定义分析数据	174
7.1 SAMCEF Field 结果后处理		8.2.4 网格	177
概述	148	8.2.5 求解	178
7.1.1 后处理菜单	148	8.2.6 后处理	180
7.1.2 结果图标	149	第9章 模态分析实例	184
7.2 后处理方法和过程	149	9.1 连杆模态分析	184
7.2.1 结果属性	149	9.1.1 实例分析	184
7.2.2 结果单位——色标	150	9.1.2 分析数据	184
7.2.3 结果样式——显示模式	153	9.1.3 模态分析过程	184
7.2.4 结果属性——变形和变形		9.1.4 计算结果	186
系数	154	9.2 壳结构模态分析实例	188
7.2.5 结果属性——网格	155	9.2.1 实例分析	188
7.2.6 结果属性——结果使用网格或		9.2.2 操作步骤	188
使用外形	155	第10章 热分析实例	192
7.2.7 绘制模式	156	10.1 实例分析	192
7.2.8 动画	158	10.2 启动	192
7.2.9 列表	158	10.3 建立模型	192
7.2.10 结果绘图	160	10.4 定义分析数据	193
7.2.11 结果参数	162	10.5 网格划分	194
7.2.12 结果标准	163	10.6 计算	195
7.2.13 绑定或分离节点和外形	164	10.7 查看结果	196
7.2.14 卸载结果	164	第11章 结构非线性分析实例	197
7.2.15 输入结果实体	164	11.1 弹塑性材料结构的非线性	
7.2.16 超单元恢复	165	分析	197
7.2.17 为将来恢复保存超单元	165	11.1.1 实例分析	197
第8章 线性结构分析应用实例	166	11.1.2 启动	197
8.1 连杆应力分析	166	11.1.3 定义分析数据	198
8.1.1 实例分析	166	11.1.4 网格划分	199
8.1.2 分析模型和载荷条件	166	11.1.5 计算	200
8.1.3 建立分析模型	166	11.1.6 查看结果	200
8.1.4 定义分析数据	168	11.2 接触非线性实例	200

11.2.1 实例分析·····	200	14.1.5 求解·····	233
11.2.2 操作步骤·····	200	14.1.6 后处理·····	234
第12章 机构运动非线性分析实例·····	205	14.1.7 用直接法求解临界转速·····	237
12.1 曲柄滑轨结构非线性分析		14.1.8 弹性支承条件临界转速·····	239
实例·····	205	14.2 阶梯轴转子临界转速分析·····	242
12.1.1 实例分析·····	205	14.2.1 实例分析·····	242
12.1.2 启动·····	205	14.2.2 建立分析模型·····	243
12.1.3 定义分析数据·····	206	14.2.3 定义分析数据·····	245
12.1.4 装配组件·····	206	14.2.4 网格·····	250
12.1.5 网格划分·····	209	14.2.5 求解·····	252
12.1.6 计算·····	209	14.2.6 后处理·····	253
12.1.7 查看结果·····	210	14.2.7 用直接法求解临界转速·····	259
12.2 四连杆机构动力学分析·····	210	14.3 阶梯轴转子谐波响应分析·····	262
12.2.1 问题描述·····	210	14.3.1 实例分析·····	262
12.2.2 创建几何模型·····	210	14.3.2 建立分析模型·····	263
12.2.3 定义分析数据·····	211	14.3.3 定义分析数据·····	264
12.2.4 网格划分·····	214	14.3.4 网格·····	268
12.2.5 计算·····	214	14.3.5 求解·····	269
12.2.6 查看结果·····	214	14.3.6 后处理·····	271
第13章 转子动力学理论背景·····	217	14.4 阶梯轴转子瞬态响应分析·····	272
13.1 概述·····	217	14.4.1 实例分析·····	272
13.1.1 转子动力学问题·····	217	14.4.2 建立分析模型·····	274
13.1.2 转子动力学的基本假设·····	217	14.4.3 定义分析数据·····	275
13.2 模型·····	217	14.4.4 网格·····	278
13.2.1 转子模型·····	217	14.4.5 求解·····	279
13.2.2 静子模型·····	220	14.4.6 后处理·····	280
13.2.3 模型减缩·····	221	14.5 阶梯轴转子二维模型临界	
13.2.4 连接部件·····	222	转速分析·····	282
13.2.5 载荷·····	224	14.5.1 实例分析·····	282
13.2.6 时域系统方程·····	224	14.5.2 建立分析模型·····	283
13.2.7 频率域系统方程·····	225	14.5.3 定义分析数据·····	285
第14章 转子动力学分析实例·····	226	14.5.4 网格·····	288
14.1 悬臂盘转子临界转速分析·····	226	14.5.5 求解·····	289
14.1.1 实例分析·····	226	14.5.6 后处理·····	289
14.1.2 建立分析模型·····	227	14.6 阶梯轴转子临界转速分析	
14.1.3 定义分析数据·····	228	(超单元)·····	292
14.1.4 网格·····	232	14.6.1 实例分析·····	292

14.6.2 建立分析模型	294	14.10.6 查看结果	336
14.6.3 定义分析数据	295	14.10.7 建立单元组	337
14.6.4 网格	298	14.10.8 临界转速计算	337
14.6.5 求解	298	14.10.9 查看临界转速结果	338
14.6.6 导入超单元	299	14.11 混合模型分析实例	339
14.6.7 重新定义分析数据	300	14.11.1 1D-3D 混合模型	339
14.6.8 超单元求解	302	14.11.2 2D-3D 混合模型	342
14.6.9 后处理	302	14.12 滚动轴承支承转子分析 实例	349
14.7 单盘转子临界转速分析 (三维实体模型)	305	14.12.1 问题描述	349
14.7.1 实例分析	305	14.12.2 建立分析模型	349
14.7.2 建立分析模型	306	14.12.3 定义分析数据	350
14.7.3 定义分析数据	307	14.12.4 网格划分	354
14.7.4 网格划分	310	14.12.5 求解	355
14.7.5 求解	311	14.12.6 后处理	355
14.7.6 后处理	313	14.12.7 其他工况	357
14.8 循环对称分析实例	317	14.13 滚动轴承支承转子瞬态响应 分析实例	359
14.8.1 概述	317	14.13.1 问题描述	359
14.8.2 启动	317	14.13.2 建立分析模型	359
14.8.3 定义分析数据	318	16.13.3 定义分析数据	360
14.8.4 网格划分	319	14.13.4 网格划分	366
14.8.5 计算	320	14.13.5 求解	367
14.8.6 查看结果	321	14.13.6 后处理	369
14.8.7 查看完整三维结果	321	14.13.7 其他工况	371
14.9 航空发动机低压转子分析	323	第15章 扭转振动	374
14.9.1 问题描述	323	15.1 扭转振动概述	374
14.9.2 建立分析模型	323	15.2 简单两惯量系统	375
14.9.3 定义分析数据	324	15.3 齿轮系统	376
14.9.4 网格划分	329	15.4 系统运动方程	378
14.9.5 求解	330	15.5 固有频率和模态	381
14.9.6 后处理	331	15.6 扭转振动瞬态分析	382
14.10 旋转坐标系分析实例	332	第16章 扭转振动分析实例	384
14.10.1 概述	332	16.1 简单两惯量系统	384
14.10.2 启动	332	16.1.1 概述	384
14.10.3 定义分析数据	333	16.1.2 建立分析模型	384
14.10.4 网格划分	335	16.1.3 定义分析数据	385
14.10.5 稳态计算	336		

16.1.4 网格	389	16.4.4 网格	421
16.1.5 求解	389	16.4.5 求解	421
16.1.6 后处理	391	16.4.6 后处理	422
16.1.7 直接法求解临界转速	393	16.4.7 直接法求解	422
16.2 单自由度齿轮传动转子 分析	395	16.5 发电机-齿轮箱-压缩机轴系 (考虑齿轮柔性)	424
16.2.1 概述	395	16.5.1 概述	424
16.2.2 建立分析模型	396	16.5.2 建立分析模型	425
16.2.3 定义分析数据	396	16.5.3 定义分析数据	426
16.2.4 网格	400	16.5.4 网格	431
16.2.5 求解	401	16.5.5 求解	431
16.2.6 后处理	403	16.5.6 后处理	431
16.2.7 第二种模型计算结果	403	16.5.7 用直接法求解	432
16.2.8 第三种模型计算结果	404	第 17 章 SAMCEF 特殊分析实例	434
16.3 四惯量齿轮传动系统	406	17.1 复合材料分析	434
16.3.1 概述	406	17.1.1 实例分析	434
16.3.2 建立分析模型	406	17.1.2 操作步骤	434
16.3.3 定义分析数据	407	17.2 简单电缆线分析	439
16.3.4 网格	410	17.2.1 模型描述	439
16.3.5 求解	411	17.2.2 启动软件设置	440
16.3.6 后处理	412	17.2.3 电缆线分析	440
16.4 三轴船舶推进轴系(不考虑 齿轮柔性)	414	17.3 充满流体的箱体分析	444
16.4.1 概述	414	17.3.1 模型描述	444
16.4.2 建立分析模型	415	17.3.2 启动软件设置	444
16.4.3 定义分析数据	416	17.3.3 非线性分析	444
		17.3.4 模态分析	447

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,它由于通用性和有效性一直受到工程技术界的高度重视。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)。计算机辅助工程技术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集成的方向发展。

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,而不仅是解决结构的问题。

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,在每个单元中,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,程序员能够插入大量的函数,这些函数可以使系统成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;非线性系统计算形式更贴近实际,例如塑性变形、变化载荷等,同时它也能验证各种类型的破坏因素。

不管商业软件的功能和扩展能力有多神奇,它的本质是将技术的理解和物理过程融入分析中,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,Zeinkiewicz 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完成了对一般问题的描述。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 是主要的贡献者。

当有限元方法快速进步的时候,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的计算能力的 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 有限元分析的工程应用

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,能够求解用微分方程的形式描述的复杂问题,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,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,传统的单一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。但更重要的是,为了安全这个行业暴露出来的问题是零部件的制造成本高,同时它又是媒体关注的焦点,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的生产和制造业已经有很多年。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, 即使最简单产品的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且经济实惠地解决当前的设计问题。以物理实验为标准的时代已经过去, 毕竟它的成本确实太高了。

1.4 有限元分析的流程

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。在有限元技术里, 单元是由节点 (GRID) 构成的, 节点具有几何属性和物理属性。单元的形状、单元的形函数、材料特性、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。分析工程师首先要有坚实的力学基础, 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,有时还需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)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和行业专用软件。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。通用软件可以说是多种多样,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;西门子工业软件比利时有限公司(原 SAMTECH 公司)的 SAMCEF 和 SAMCEF Rotors;美国 ADINA 公司的 ADINA;法国 ESI 公司的 PAMCRASH、美国 Altair 公司的 HyperMesh、OptiStruct 和 RADIOSS 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 在线性分析方面具有自己的优势,而 Marc、Abaqus、SAMCEF/Mecano 和 ADINA 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 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。

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,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, 有 AutoForm Engineering 公司的 Autoform、ETA 公司的 DynaForm、MSC 公司的 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 公司的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, 以西门子工业软件比利时有限公司(原比利时 LMS 国际公司)的 Virtual.Lab Acoustic 软件和美国 ANSOL 公司的 Coustyx 软件最具代表性。

通过将开创性的 LMS SYSNOISE 技术融合到 LMS Virtual.Lab Acoustics 中, 西门子 LMS 已经建立了全球首个端对端的声学性能工程模拟环境, 通过虚拟模型进行产品的概念生成和设计改进, 再到基于试验的验证。LMS 声学求解覆盖常规应用, 例如结构声辐射和腔内声场的模拟; 并提供特殊声学工程问题, 如发动机升速、流体流动噪声、随机声等的专门解决方案。

美国 ANSOL 公司的 Coustyx 软件用于传动系统的声学设计和噪声计算分析, 实现以快速多极法(FMM)技术结合边界元(BEM)技术建立传动系统噪声计算分析模型, 实现大规模(100 万自由度)模型快速求解声学问题, 针对齿轮箱振动噪声传递, 采用以 Calyx 为核心的时间域多体齿轮动力学分析软件 T3D 和频率域噪声分析软件 Coustyx, 可以对传动系统进行仿真分析。

在结构疲劳分析领域, 主要有 MSC 公司的疲劳分析软件 MSC.Fatigue、nCode 公司的 FE-Fatigue、英国安全技术公司的 FE-SAFE、奥地利 Magna Steyr 公司的疲劳分析软件 FEMFAT 和德国 Steinbeis TZ 交通中心开发的疲劳分析软件 WinLIFE 等。其中, WinLIFE 软件建立在基本模块基础之上, 主要功能是分析机械结构, 以及齿轮、齿轮轴和轴承的疲劳寿命。WinLIFE 包含高级齿轮和轴承专业分析模块 Gearwheels&Bearings 以及基于 Web 的材料库 WinLIFE Material DB。WinLIFE 材料数据库包含可以由 WinLIFE 读取的材料特性数据, 它可以转化为内部数据库。材料特性数据来自公司的研究成果、文献和 WinLIFE 高级用户。授权用户可以从 Steinbeis TZ 公司的网站进入数据库并下载材料特性。

在电子系统散热仿真分析领域, 以英国 Flomerics 公司的 Flotherm 最为著名。Flotherm 采用了成熟的 CFD 和数值传热学仿真技术, 并结合了 Flomerics 公司在电子设备传热方面的大量独特经验和数据库开发而成, 同时 Flotherm 软件还拥有大量专门针对电子工业开发的模型库。Flotherm 软件可以应用到芯片与器件封装级热分析和热设计、PCB 板级与模块级热分