



CAD/CAM/CAE工程应用丛书

ANSYS系列

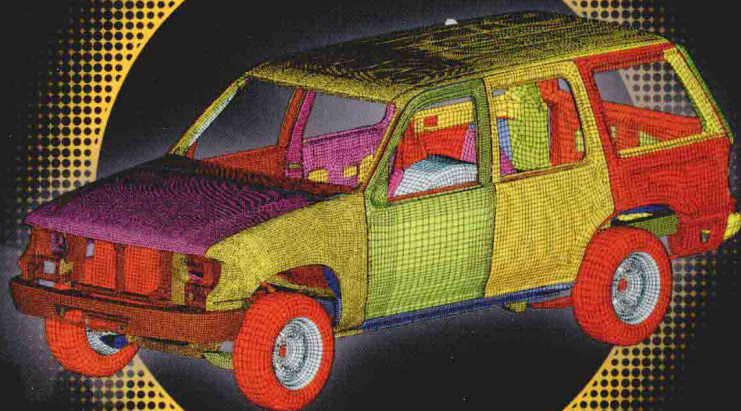
ANSYS 14.5与 HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析

贺李平 肖介平 龙 凯 编著

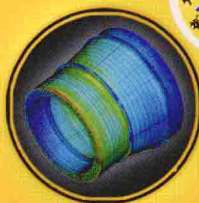
第2版

本书核心内容包含

- ANSYS高级单元技术
- 基于HyperMesh的有限元网格划分
- 有限元装配技术
- HyperMesh与ANSYS的数据传递接口
- 静力分析
- 模态分析
- 谐响应分析
- 瞬态动力学分析
- 响应谱分析
- 随机振动分析
- 几何非线性分析
- 材料非线性分析
- 接触非线性分析
- 多体刚-柔系统分析



附赠全书范例
素材  光盘



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 · ANSYS 系列

ANSYS 14.5 与 HyperMesh 12.0 联合 仿真有限元分析

第 2 版

贺李平 肖介平 龙 凯 编著



机械工业出版社

本书主要讲解如何利用 HyperMesh 建立高质量的有限元模型,再以 ANSYS 作为求解器来解决各类工程问题。全书共 16 章,包含了 HyperMesh 有限元网格建模技术、ANSYS 高级单元技术、装配体连接技术、静力分析、模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析、响应谱分析、随机振动分析、几何非线性分析、材料非线性分析、接触非线性分析和多体刚-柔系统动力学分析等内容。作者还针对每个专题精心设计了实例。

本书可作为使用 HyperMesh 和 ANSYS 进行工程分析的工程技术人员及相关专业师生的参考用书,也可作为 HperMesh 和 ANSYS 软件的教材或培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 14.5 与 HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 / 贺李平, 肖介平, 龙凯编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2014.8

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-47967-3

I. ①A… II. ①贺… ②肖… ③龙… III. ①有限元分析—应用软件
IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 213050 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: 张淑谦

责任校对: 张艳霞

责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014 年 10 月第 2 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm·21.75 印张·535 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47967-3

ISBN 978-7-89405-536-1 (光盘)

定价: 59.80 元 (含 1CD)

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

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

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、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, 以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用, 不但可以提高设计质量, 缩短工程周期, 还可以节省大量建设投资。

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, 仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的, 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, 以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

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, 使得本丛书内容具有专业性强、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

有限元方法是在当今工程分析中获得最广泛应用的数值计算方法, 由于它的通用性和有效性, 已受到工程技术界的高度重视。如今, 一大批由专业软件公司开发的商业软件 (如 ABAQUS、ADINA、ANSYS 和 NASTRAN 等) 已得到广泛认可和应用。

众所周知, ANSYS 是当前主流的有限元分析软件之一, 而 HyperMesh 则是十分优秀的有限元前处理工具。本书将 ANSYS 和 HyperMesh 结合起来, 讲解如何利用 HyperMesh 建立高质量的有限元模型, 再以 ANSYS 作为求解器来解决各类工程问题。

本书共 16 章, 涵盖了 HyperMesh 有限元网格建模技术、ANSYS 高级单元技术、静力学分析、动力学分析、非线性分析等内容。本书特别讲解了装配体连接技术、螺栓预紧和多体刚-柔系统动力学分析等高级技术。由于 ANSYS Workbench 被广泛使用, 本书也讲解了利用 HyperMesh 为 ANSYS Workbench 进行前处理的方法。

本书是作者多年从事有限元分析工作的理论概括、技术积累和经验总结, 特色如下。

- 内容新颖。本书是一本专门讲解 ANSYS 与 HyperMesh 联合仿真的书籍。本书基于 ANSYS 14.5 和 HyperMesh 12.0 讲解最新的建模技术、单元技术和计算方法, 本书的方法也能应用于其他版本的 ANSYS 和 HyperMesh。
- 注重方法, 讲求实用。本书讲解了如何利用 HyperMesh 为 ANSYS 建立有限元模型, 如何选择单元并确保其计算精度。对于每个专题, 讲解了必要和关键的方法, 如单元选择、单元选项设置、求解控制等关键技术。书中给出了所有实例的详细描述, 只要读者细心研读并付诸实践, 必能掌握正确方法, 提升仿真水平。
- 内容精炼。本书的目的在于帮助读者解决实际问题, 提升有限元技术应用水平。书中没有罗列 ANSYS 和 HyperMesh 软件的所有功能和详细操作步骤, 只介绍最关键的建模和计算步骤, 但并不影响完整性。本书立足于实际工程应用, 只介绍了三维有限元分析技术, 省略了平面应力和平面应变等二维问题。
- 配套一张模型文件光盘, 以提高读者的学习效率。

本书主要编著工作由贺李平博士 (北京无线电测量研究所) 完成, 参加本书编著工作的还有肖介平工程师 (北京汽车研究总院有限公司) 和龙凯博士 (华北电力大学)。本书的编著得到北京无线电测量研究所的支持, 在此深表感谢。在本书的写作过程中, 家庭迎来了两个小生命, 妻子和家人承担了繁重的家务工作, 非常感谢他们在写作中给予的理解和支持。

由于作者水平有限, 书中难免存在缺点和错误, 敬请读者批评指正, 如有疑问, 可发邮件至 bithlp@sina.com。

作 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 有限元法的基本概念 1

1.2 有限元法的发展及应用 2

1.2.1 有限元法的诞生 2

1.2.2 有限元软件的发展及应用 3

1.3 ANSYS 软件的发展及应用 6

1.4 HyperMesh 软件的发展及应用 8

1.5 有限元分析的基本步骤 10

第 2 章 ANSYS 高级单元技术 11

2.1 杆单元 LINK180 11

2.1.1 杆单元的几何构型 11

2.1.2 设置单元选项 12

2.1.3 设置实常数 12

2.1.4 杆单元分析实例 1 13

2.1.5 杆单元分析实例 2 14

2.1.6 杆单元的使用建议 14

2.2 梁单元 BEAM188 15

2.2.1 梁单元的几何构型 15

2.2.2 设置单元选项 15

2.2.3 梁单元的横截面 16

2.2.4 梁单元分析实例 16

2.2.5 梁单元的使用建议 19

2.3 板壳单元 SHELL181

和 SHELL281 20

2.3.1 板壳单元的几何构型 20

2.3.2 设置单元选项 20

2.3.3 板壳单元的横截面 21

2.3.4 板壳单元分析实例 1 22

2.3.5 板壳单元分析实例 2 25

2.3.6 板壳单元的使用建议 27

2.4 实体单元 SOLID185、SOLID186

和 SOLID187 27

2.4.1 实体单元的几何构型 28

2.4.2 设置单元选项 29

2.4.3 实体单元分析实例 30

2.4.4 实体单元的使用建议 34

2.5 质量单元 MASS21 35

2.5.1 质量单元描述 36

2.5.2 设置单元选项 36

2.5.3 设置实常数 36

2.6 线性弹簧单元 COMBIN14 37

2.6.1 线性弹簧单元描述 37

2.6.2 设置单元选项 38

2.6.3 设置实常数 38

2.7 非线性弹簧单元 COMBIN39 38

2.7.1 非线性弹簧单元描述 39

2.7.2 设置单元选项 39

2.7.3 设置实常数 39

2.8 预紧力单元 PRETS179 40

2.8.1 预紧力单元描述 40

2.8.2 定义预紧力方向 41

2.9 刚性杆/梁单元

MPC184-Link/Beam 42

2.9.1 刚性杆/梁单元描述 42

2.9.2 设置单元选项 42

2.10 铰链单元 MPC184-Revolute 43

2.10.1 铰链单元描述 43

2.10.2 定义节点局部坐标系 44

2.10.3 设置单元选项 44

2.10.4 定义铰链截面 44

2.11 目标单元 TARGE170 与接触

单元 CONTA173、CONTA174

和 CONTA175 45

2.12 刚性区域 CERIG 46

2.13 柔性连接 RBE3 46

第 3 章 基于 HyperMesh 的有

限元网格划分 47

3.1 HyperMesh 的用户界面 47

3.2 模型导入及几何清理实例	51	数据传递接口	111
3.3 一维网格划分	55	6.1 HyperMesh 与 ANSYS 的接口	111
3.4 二维网格划分实例	57	6.2 实例: 利用 HyperMesh 为 ANSYS 建立分析模型	112
3.5 三维网格划分	64	6.3 实例: 利用 HyperMesh 为 Workbench Mechanical 进行前处理	121
3.5.1 四面体网格划分实例	64	6.4 实例: HyperMesh 接触向导	128
3.5.2 六面体网格划分实例	70	6.5 实例: 利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建二维接触模型	136
3.6 网格质量检查	77	6.6 实例: 利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建三维接触模型	144
3.6.1 网格质量检查内容	77	6.7 实例: 利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建梁单元	152
3.6.2 网格质量检查及编辑实例	81	6.8 本章小结	160
3.7 本章小结	93	第7章 静力分析	161
第4章 有限元装配技术	94	7.1 静力分析的求解方法	161
4.1 实体-板壳-梁单元连接技术	94	7.2 静力分析的基本步骤	161
4.1.1 实体-实体连接技术	94	7.2.1 建立有限元网格模型	161
4.1.2 实体-板壳连接技术	95	7.2.2 施加边界条件及载荷	162
4.1.3 实体-梁连接技术	96	7.2.3 设置求解控制选项	162
4.1.4 板壳-板壳连接技术	98	7.2.4 求解	163
4.1.5 板壳-梁连接技术	99	7.2.5 查看结果	163
4.2 螺栓连接	101	7.3 静力分析实例	163
4.2.1 实体螺栓连接模型	101	7.4 本章小结	167
4.2.2 刚性连接简化模型	101	第8章 模态分析	168
4.3 焊接	102	8.1 模态分析的求解方法	168
4.3.1 节点耦合	102	8.2 模态分析的基本步骤	169
4.3.2 焊点	102	8.2.1 建立有限元网格模型	169
4.4 轴承连接	103	8.2.2 施加边界条件	169
4.4.1 刚性连接	103	8.2.3 设置求解控制选项	170
4.4.2 柔性连接	104	8.2.4 求解	170
4.4.3 Surface-Based Constraints	104	8.2.5 查看结果	171
4.4.4 轴承连接算法对比	105	8.3 有预应力的模态分析	171
4.5 本章小结	106	8.3.1 静力分析	171
第5章 加载	107	8.3.2 模态分析	171
5.1 载荷的基本概念	107	8.4 模态分析实例	172
5.2 载荷步、子步和平衡迭代	107	8.5 有预应力的模态分析实例	176
5.2.1 载荷步	107		
5.2.2 子步	108		
5.2.3 平衡迭代	108		
5.3 时间的作用	108		
5.4 阶跃载荷与斜坡载荷	109		
5.5 载荷的施加	109		
第6章 HyperMesh 与 ANSYS 的			

8.6 本章小结	182	11.4 单点响应谱分析实例	230
第 9 章 谐响应分析	183	11.5 多点响应谱分析实例	241
9.1 谐响应分析的求解方法	183	11.6 本章小结	246
9.2 谐响应分析的基本步骤	185	第 12 章 随机振动分析	247
9.2.1 建立有限元网格模型	185	12.1 随机振动分析的类型	247
9.2.2 模态分析 (可选)	185	12.2 随机过程的数字特征	247
9.2.3 设置求解控制选项	185	12.3 随机振动分析的基本步骤	248
9.2.4 施加边界条件及载荷	186	12.4 单点随机振动分析实例	251
9.2.5 求解	187	12.5 多点随机振动分析实例	259
9.2.6 查看结果	187	12.6 本章小结	263
9.3 有预应力的谐响应分析	188	第 13 章 几何非线性分析	265
9.3.1 静力分析	188	13.1 几何非线性涉及的问题 及处理方法	265
9.3.2 谐响应分析	188	13.1.1 小应变大位移 (或大转动)	265
9.4 谐响应分析实例	189	13.1.2 大应变 (包含大位移 或大转动)	265
9.5 有预应力的谐响应分析实例	199	13.1.3 应力刚化效应	266
9.6 本章小结	202	13.1.4 载荷和位移方向	266
第 10 章 瞬态动力学分析	204	13.1.5 有限元网格模型的特殊要求	266
10.1 瞬态动力学分析的求解 方法	204	13.1.6 几何非线性求解控制	267
10.2 瞬态动力学分析的基本 步骤	205	13.1.7 监视求解过程	267
10.3 有预应力的瞬态动力学 分析	207	13.2 几何非线性分析实例	267
10.4 瞬态动力学分析的关键 技术	208	13.3 本章小结	272
10.4.1 积分时间步长	208	第 14 章 材料非线性分析	273
10.4.2 自动时间步长	210	14.1 弹塑性涉及的问题及处理 方法	273
10.4.3 初始条件	210	14.1.1 弹塑性	273
10.4.4 阻尼	212	14.1.2 Bauschinger 效应	274
10.5 瞬态动力学分析实例	213	14.1.3 静水压力	274
10.6 有预应力的瞬态动力学 分析实例	221	14.1.4 率相关性	274
10.7 本章小结	225	14.1.5 屈服准则	274
第 11 章 响应谱分析	227	14.1.6 流动准则	275
11.1 响应谱分析的类型	227	14.1.7 强化准则	275
11.2 单点响应谱分析的 基本步骤	228	14.1.8 弹塑性材料的简化模型	276
11.3 多点响应谱分析的 基本步骤	229	14.1.9 有限元网格模型的特殊要求	276
		14.1.10 弹塑性求解控制	276
		14.2 超弹性涉及的问题及处理 方法	276
		14.2.1 超弹性	276

14.2.2 超弹性材料的简化模型.....	277	15.4 接触非线性分析	
14.2.3 有限元网格模型的特殊要求.....	277	实例 2: 钢球跌落.....	302
14.2.4 单元技术的特殊要求.....	277	15.5 接触非线性分析	
14.2.5 超弹性求解控制.....	278	实例 3: 钢球跌落.....	309
14.3 弹塑性材料非线性分析		15.6 接触非线性分析	
实例.....	278	实例 4: 螺栓预紧.....	313
14.4 超弹性材料非线性分析		15.7 本章小结.....	318
实例.....	283	第 16 章 多体刚-柔系统分析.....	320
14.5 本章小结.....	288	16.1 多体刚-柔系统的建模技术.....	320
第 15 章 接触非线性分析.....	289	16.1.1 建立柔体模型.....	320
15.1 面-面接触.....	289	16.1.2 建立刚体模型.....	320
15.1.1 建立面-面接触模型.....	289	16.1.3 建立连接模型.....	321
15.1.2 面-面接触分析的关键技术.....	290	16.2 多体刚-柔系统分析求解	
15.2 点-面接触.....	293	控制.....	321
15.2.1 建立点-面接触模型.....	293	16.3 多体刚-柔系统分析实例.....	321
15.2.2 点-面接触分析的关键技术.....	294	16.4 本章小结.....	336
15.3 接触非线性分析		参考文献.....	337
实例 1: 过盈配合.....	294		

第1章 绪论

1.1 有限元法的基本概念

一般情况下, 工程问题均可表达为数学模型。大多数工程问题的数学模型, 都是针对特定的系统应用自然界的基本定律和原理, 推导出来的微分方程组。一般不能得到精确解, 而需要借助数值方法来近似求解。

有限元方法 (Finite Element Method, FEM) 是在当今工程分析中应用最广泛的数值计算方法。它具备的通用性和有效性, 已使它受到工程技术界的高度重视。有限元方法的基本思想是用较简单的问题代替复杂问题再求解。它将求解域看成是由许多称为“单元”的小的互连子域组成, 对每一单元假定一个近似解, 然后推导并求解这个域总的满足条件 (如结构的平衡条件), 从而得到原问题的解。用于建立有限元方程的变分原理或加权余量法在数学上已证明是微分方程和边界条件的等效积分形式。因此, 有限元解可收敛于原数学模型的精确解。

从有限元理论的角度看, 有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 可分为 4 个步骤, 即: 结构离散化、单元分析、整体分析以及数值求解。

(1) 结构离散化

结构离散化即网格划分, 是将连续体离散为有限个单元, 并通过它们边界上的节点相互连接成为组合体。图 1-1 表示采用四边形和三角形单元将连续体离散化的图形。各个单元通过它们的角节点相互连接。

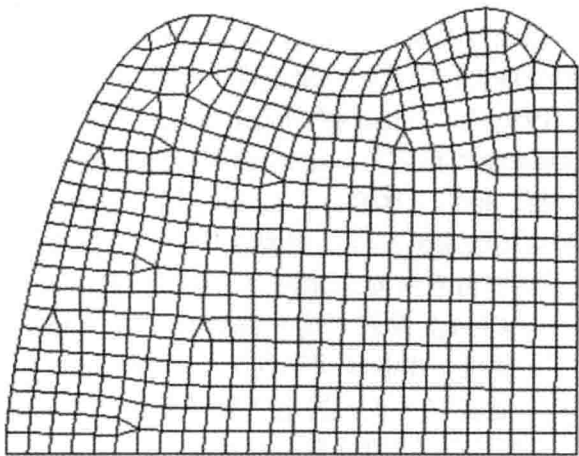


图 1-1 连续体的有限单元离散

(2) 单元分析

单元分析是建立单元节点力与节点位移之间的关系，即建立单元的刚度方程

$$[k]^e \{u\}^e = \{f\}^e \quad (1-1)$$

式中， $[k]^e$ 为单元刚度矩阵，与单元内部的材料、变形分布有关； $\{u\}^e$ 为单元节点位移向量； $\{f\}^e$ 为单元节点力向量。

(3) 整体分析

整体分析即单元组合，是将式 (1-1) 描述的单元刚度方程应用到所有单元，并将它们组合起来，以建立整体刚度方程

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (1-2)$$

式中， $[K]$ 为整体系统刚度矩阵； $\{U\}$ 为整体系统节点位移向量； $\{F\}$ 为整体系统节点力向量。

(4) 数值求解

整体刚度方程 (1-2) 是线性代数方程组。在引入边界条件之后，即可采用直接解法（如 Gauss 消元法、三角分解法、波前法等）或迭代解法（如超松弛迭代法、共轭梯度法等）进行求解，从而得到各节点位移，再由几何方程和本构方程进一步得到各单元内部应变及内部应力。

1.2 有限元法的发展及应用

1.2.1 有限元法的诞生

有限元的思想早在几个世纪前就已经产生并得到了应用。例如，用多边形（有限个直线单元）逼近圆来求得圆的周长。但作为一种方法而被提出，则是发生在 20 世纪的事。从应用数学的角度看，有限元法的基本思想可以追溯到 Courant 在 1943 年发表的论文《Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations》^[1]。他将一系列三角形区域上的分片连续函数和最小位能原理相结合，来求解 St. Venant 扭转问题。由于当时计算机尚未出现，这篇论文并没有引起应有的关注。此后，许多应用数学家、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。有限元法的实际应用是随着电子计算机的出现而开始的。1956 年，Turner 和 Clough 等人发表了名为《Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures》的论文^[2]。他们将钢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。他们首次给出了用三角形单元求解平面应力问题的正确解答。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。他们的工作开始了利用电子计算机求解复杂弹性力学问题的新阶段，一般认为这是工程学界有限元法的开端。1960 年，Clough 发表了另一篇名为《The Finite Element Method in Plane Stress Analysis》的论文^[3]。他进一步求解了弹性力学平面问题，并将该方法的应用范围扩展到飞机以外的土木工程。他在文中正式提出“有限元法”（Finite Element Method）的名称，使人们更清楚地认识到有限元法的特性和功效。

由此之后，有限元法的理论迅速发展起来，并被广泛应用于各种力学问题，成为分析大型、复杂工程结构的强有力手段。随着计算机的迅速发展，有限元法中人工难以完成的大量

计算工作能够由计算机来实现并快速地完成。因此,可以说,计算机的发展很大程度上促进了有限元法的建立和发展。

1.2.2 有限元软件的发展及应用

有限元法是通过计算机实现的。有限元软件封装了有限元的理论、单元形式和算法,直接反映了有限元技术的发展和應用。下面对有限元软件的发展历程进行简要回顾^[4-6]。

1. 有限元软件的起源期

1963年, Wilson 和 Clough 为了教授结构静力与动力分析而开发了 SMIS (Symbolic Matrix Interpretive System), 其目的是为了弥补传统手工计算方法和结构分析矩阵法之间的隔阂。1969年, Wilson 在第一代程序的基础上开发了第二代线性有限元分析程序, 即著名的 SAP (Structural Analysis Program)。这也是我国最早引入的一个线性有限元程序, 对我国有限元技术的发展和工程应用曾经发挥了巨大的促进作用。此后, 随着研究工作的深入, 非线性有限元程序 NONSAP 被开发出来, 它主要采用隐式积分进行平衡迭代和瞬态问题的求解。

同样是 1963 年, MacNeal 和 Schwendler 联手创办了 MSC 公司。他们开发的第一个软件名为 SADSAM (Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods), 即数字仿真模拟法结构分析。

提到 MSC 公司, 就想到与其有着不解渊源的美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)。当年, 美国为了能够在与前苏联之间的太空竞赛中取得优胜而成立了 NASA。为了满足宇航工业对结构分析的迫切需求, NASA 于 1966 年提出了开发世界上第一套泛用型的有限元分析软件 NASTRAN (NASA Structural Analysis Program) 的计划, MSC 公司则参与了整个 NASTRAN 程序的开发过程。1969 年, NASA 推出了其第一个 NASTRAN 版本, 称为 COSMIC.Nastran。之后, MSC 公司继续改良 NASTRAN 程序并在 1971 年推出 MSC.Nastran。

另一个与 NASA 结缘的是 SDRC 公司, SDRC 公司在 NASA 的支持下成立于 1967 年, 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 年推出了商业有限元分析软件 Supertab。

1969 年, 任教于 Brown 大学的 Marcal 创建了 MARC 公司, 并推出了第一个商业非线性有限元程序 MARC。虽然 MARC 在 1999 年被 MSC 公司收购, 但其对有限元软件的发展起到了决定性的推动作用, 至今, 在 MSC 的分析体系中依然有着 MARC 程序的身影。

1970 年, Swanson 建立了自己的公司 Swanson Analysis Systems Inc. (SASI, 1994 年与 TA Associates 重组为 ANSYS 公司), 并发布了商用软件 ANSYS。其实早在 1963 年 Swanson 任职于 Westinghouse 公司的太空核子实验室时, 就已经为核子反应火箭的应力分析编写了名为 STASYS (Structural Analysis System) 的计算程序, 即 ANSYS 软件的前身。

2. 有限元软件的发展期

进入 20 世纪 70 年代后, 随着有限元理论的发展, 计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 技术也逐渐进入了蓬勃发展的时期。一方面, MSC、SDRC、ANSYS 三大 CAE 公司先后组建, 并且致力于大型商业 CAE 软件的研究与开发; 另一方面, 更多新的 CAE 软件迅速出现, 为 CAE 市场的繁荣注入了新鲜血液。

Hibbitt 是对有限元软件的杰出贡献者之一,他是 Marcal 在 Brown 大学的博士生。博士毕业后, Hibbitt 在 MARC 公司工作到 1977 年,随后与 Karlsson 和 Sorenson 于 1978 年共同建立了 HKS 公司,并推出了 ABAQUS 软件。该程序是能够引导研究人员自主增加用户单元和材料模型的早期有限元程序之一,因此受到科研人员和工程师们的青睐,对当时的有限元软件行业带来了实质性的冲击。

另一位对有限元软件做出重大贡献的人是 Bathe,他是 Wilson 在 Berkeley 大学的博士生,之后任教于 MIT。1975 年, Bathe 在 NONSAP 的基础上发表了著名的非线性求解器 ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)。在 1986 年 ADINA R&D Inc.公司成立以前, ADINA 软件的源代码是公开的,即著名的 ADINA81 版和 ADINA84 版本的 FORTRAN 源程序,后期的很多有限元软件都是根据这个源程序编写的。

Hallquist 是 CAE 历史中的另一个关键人物。他于 1976 年发布了显式有限元程序 DYNA,同时吸取前人的成果,并与 Berkeley 的研究人员紧密合作,在 DYNA 的基础上完成了 DYNA2D 和 DYNA3D 程序。现在我们熟知的众多软件(如 PAM-CRASH, MSC.Dytran, ANSYS/LS-DYNA)中都可以发现 DYNA 的踪迹,因此 DYNA 系列也被公认为显式有限元程序的鼻祖。

1984 年, ALGOR 公司成立。在购买了 SAP5 源程序和 ViziCAD 图像处理软件之后,推出了 ALGOR FEAS (Finite Element Analysis System)。

随着有限元技术的日趋成熟,市场上不断有新的公司成立并推出 CAE 软件。1983 年, AAC 公司成立,推出 COMET 程序,主要用于噪声及结构噪声优化分析等领域。随后, Computer Aided Design Software Inc.公司推出提供线性静态、动态及热分析的 PolyFEM 软件包。1988 年, Flomerics 公司成立,推出用于空气流及热传递的分析程序。同时期还有多家软件公司投入专业 CAE 程序的研发。由此, CAE 分析由力学领域逐渐扩展到了热学、流体和电磁领域,并且已经发展到多场耦合领域。可以说,有限元技术经过数十年的研究发展,其应用范围与研究对象发生了翻天覆地的变化。

3. 有限元软件的成熟期

自 20 世纪 90 年代至今是 CAE 技术的成熟期。这一时期的 CAE 领域呈现出了大鱼吃小鱼的市场局面,大的软件公司为了提升自己的分析技术、拓宽自己的应用范围寻找机会收购、并购小的、专业的软件商,因此 CAE 软件的功能得到了极大的提升。

MSC 公司作为最早成立的 CAE 公司,先后通过开发、并购,已经把数个 CAE 程序集成到其分析体系中。目前 MSC 公司旗下拥有十几个产品,如 NASTRAN、PATRAN、MARC、ADAMS、DYTRAN 和 EASY5 等,覆盖了线性分析、非线性分析、显式非线性分析、流体动力学分析和流-固耦合分析等领域。另外, MSC 公司还推出了多学科方案 (MD),把以上的诸多产品集成为单一框架以解决多学科协同仿真的问题。

SDRC 公司把其有限元程序 Supertab 并入到 I-DEAS 软件中,并加入耐用性、NVH、优化与灵敏度、电子系统冷却、热分析等技术,且将有限元技术与实验技术结合起来,开发了实验信号处理、实验与分析相关等技术。2001 年, EDS 公司收购了 SDRC,并将其与 UGS 合并重组。SDRC 的有限元分析程序演变成了 NX 中的 I-DEAS NX Simulation,与 NX NASTRAN (源于 MSC.Nastran)一起成为了 NX 产品生命周期中仿真分析的重要组成部分。

ANSYS 公司经过一连串的并购与自身壮大后,把其产品扩展为 ANSYS Mechanical 系列、ANSYS CFD (FLUENT/CFX) 系列、ANSYS Ansoft 系列等。2002 年,ANSYS 推出了软件集成环境平台 ANSYS Workbench Environment(AWE)。经过持续改进之后,ANSYS Workbench 以项目流程图的方式,将各种数值模拟方法集成到统一平台中,实现了不同软件之间的无缝连接。由此,ANSYS 塑造了一个体系规模庞大、产品线极为丰富的仿真平台,在结构分析、电磁场分析、流体动力学分析、多物理场耦合分析、协同技术等方面都提供了完善的解决方案。

CAE 市场的其他厂商也发生了不少的并购和重组,一些新的厂商也逐渐崭露头角。2002 年,HKS 公司改名为 ABAQUS,并于 2005 年被法国达索公司收购,2007 年更名为 SIMULIA。凭借强大的非线性计算能力,ABAQUS 软件在激烈的市场竞争中占据一席之地;以前后处理技术而进入 CAE 领域的 Altair 公司,其 HyperMesh 软件自诞生之日起就备受业界关注,而围绕前后处理建立起来的 HyperWorks 软件,已经成为了现在市场上很有竞争力的软件;LMS 也是一个比较有特色的 CAE 软件公司,其软件的分析集 1D、3D、“试验”于一身,不仅可以加速虚拟仿真,还能使仿真结果更准确可靠;COMSOL 则是以多物理场耦合仿真开辟出了一片新天地,为其自身的发展、也为 CAE 技术的发展拨开了迷雾。

另外,在市场中占有一定份额的还有 CAE 前处理软件 ANSA,结构优化软件 TOSCA,流体仿真软件 PHOENICS、NUMECA、STAR-CD,铸造仿真软件 ProCAST、FLOW-3D、MAGMA SOFT 等一批专业 CAE 分析软件。

4. 我国有限元软件的发展与现状

我国的力学工作者为有限元方法的初期发展做出了许多贡献,其中比较著名的有陈伯屏(结构矩阵分析方法)、钱令希(余能原理)、钱伟长(广义变分原理)、胡海昌(广义变分原理)、冯康(有限单元法理论)。遗憾的是,由于当时环境所致,我国有限元方法的研究工作受到阻碍,有限元理论的发展也逐渐与国外拉开了距离。

20 世纪 60 年代初期,我国的老一辈计算科学家较早地将计算机应用于土木、建筑和机械工程领域。当时黄玉珊教授就提出了“小展弦比机翼薄壁结构的直接设计法”和“力法-应力设计法”。而在 70 年代初期,钱令希教授发表了《结构力学中的最优化设计理论与方法的近代发展》。这些理论和方法都为国内的有限元技术指明了方向。

1964 年初,崔俊芝院士研制出国内第一个平面问题通用有限元程序,解决了刘家峡大坝的复杂应力分析问题。60 年代到 70 年代,国内的有限元软件诞生之后,曾计算过数十个大型工程,应用于水利、电力、机械、航空、建筑等多个领域。

70 年代中期,大连理工大学研制了有限元软件 JEFIX;航空工业部研制了 HAJIF 系列程序。80 年代中期,北京大学的袁明武教授通过对美国 SAP 软件的移植和重大改造,研制出了适合我国应用的 SAP84;北京农业大学的李明瑞教授研发了 FEM 软件;建筑科学研究院研制了“BDP-建筑工程设计软件包”;中国科学院开发了 FEPS、SEFEM;航空工业总公司开发了飞机结构多约束优化设计系统 YIDOYU。

90 年代之后,大批国外 CAE 软件涌入国内市场,遍及各个领域。国外的专家则深入到大学、科研院所、企业与工厂,展示他们的 CAE 技术、系统功能及使用技巧,使得国内 CAE 软件受到强烈打压。同时,由于在对直接为先进装备制造业服务的 CAE 软件核心技术的认识

上产生了偏差: CAE 既不属于基础科学, 又不属于科技攻关, 故而失去了必要的支持, 使其发展举步维艰, 以至于在 20 世纪的最后十几年, 国内 CAE 自主创新的步伐已经非常缓慢, 也逐渐地拉开了与国外 CAE 软件的距离。

进入 21 世纪后, 虽然国外 CAE 软件占据市场主流的现状短时间内已经无法撼动, 但国内具有自主知识产权的 CAE 软件也逐渐市场化, 并获得了一定的发展。北京火箭软件有限公司推出了 FEPG; 郑州机械研究所推出了紫瑞 CAE; 大连理工大学开发了 CAE 软件 Adopt.Smart; 吉林大学开发了针对汽车结构的 KMAS 软件系统; 华中科技大学针对铸造成型开发了华铸 CAE 软件; 清华大学、上海交大在注塑成型 CAE 领域也推出了相应的分析软件。

虽然国内 CAE 自主研发之路历经艰辛, 但是广大专家学者用锲而不舍的战斗精神顽强地生存了下来。尤其是在近几年, 数字化产品设计概念逐渐深入人心, 国内高校的技术研究和应用水平不断提高, 有限元技术已经为广大企业所认可。随着国家对发展自主 CAE 平台愈发重视, 国内 CAE 的研究已经逐渐走出低迷状态, 获得了一定的发展。而且值得注意的是, 有限元技术不再仅仅停留在高校中, 而是更多地走向了企业。同时, 更多使用方便、操作简单的专用分析软件也得到了广泛应用。

1.3 ANSYS 软件的发展及应用

ANSYS 软件由美国 ANSYS 公司(由 John Swanson 博士创建于 1970 年)开发, 是融结构分析、流体分析、电磁分析、传热分析于一体的大型通用有限元分析软件。经过 40 多年的发展, ANSYS 从最初的版本发展到现在的 ANSYS 15.0, 其程序已经有了很大的变化。早期的 ANSYS 只提供了热分析及线性结构分析功能。如今, ANSYS 的分析功能已覆盖了自然界的四种场: 应力、应变场(结构分析)、温度场(热分析)、流场(流体动力学分析)和电磁场(电磁场分析), 其应用领域涵盖了航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统和运动器械等行业。

Mechanical APDL 是 ANSYS 的经典界面(图 1-2), 通常所说的 ANSYS 指的就是这个经典界面。在这个界面可完成各类分析的建模、计算和后处理。APDL (ANSYS Parametric Design Language, ANSYS 参数化设计语言)是一种类似 FORTRAN 的解释性语言, 提供一般程序语言的功能, 如参数、宏、标量、向量、矩阵运算、分支、循环、重复以及访问 ANSYS 有限元数据库等。利用 ANSYS 的程序语言组织管理 ANSYS 的有限元分析命令, 就可以实现参数化建模、施加参数化载荷与求解以及参数化后处理结果的显示, 从而实现参数化有限元分析的全过程。这也是 ANSYS 批处理分析的最高技术。在参数化的分析过程中可以简单地修改其中的参数达到反复分析各种尺寸、不同材料、不同载荷大小的多种设计方案, 极大地提高分析效率, 减少分析成本。

尽管 Mechanical APDL 提供了参数化建模和分析的功能, 但在实际工程中的应用并非易事。一方面, 学习 Mechanical APDL 需要较多的时间和精力; 另一方面, Mechanical APDL 处理复杂结构或装配体时十分烦琐。因此, 它无法满足结构工程师的需求。

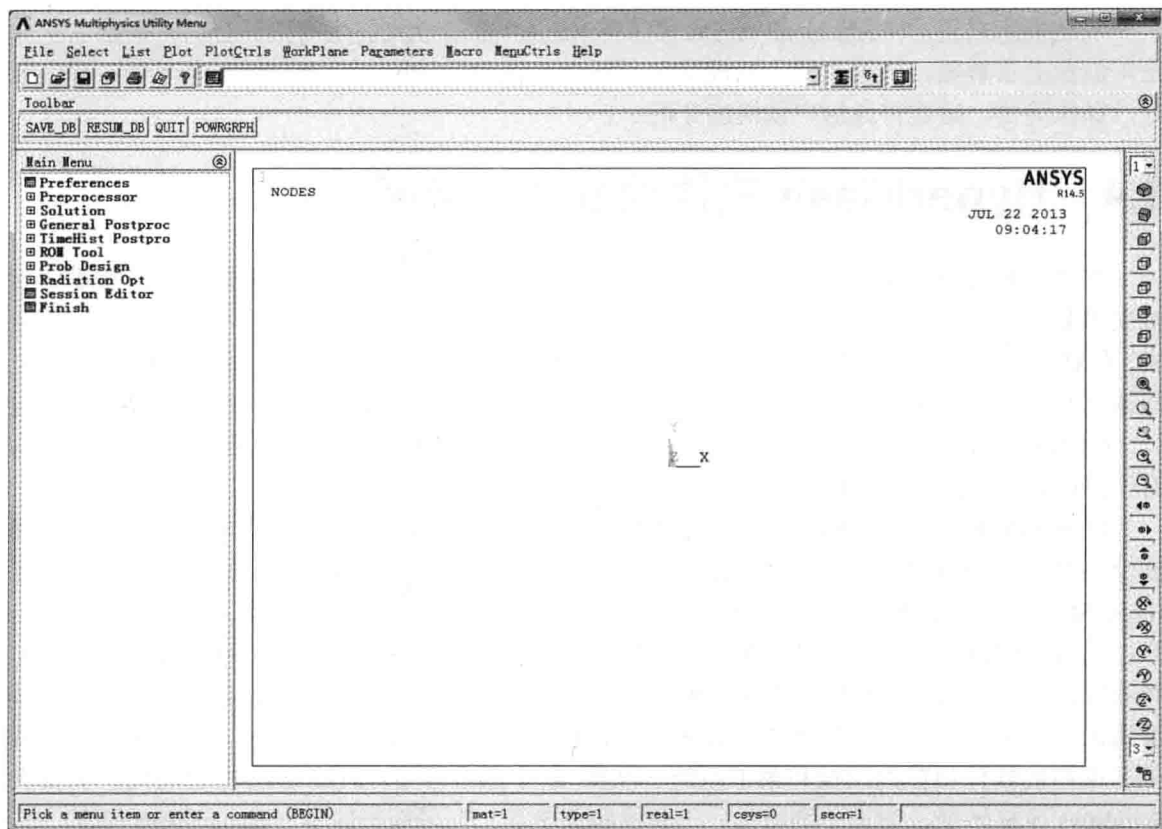


图 1-2 ANSYS 的经典界面

Mechanical 是 ANSYS 推出的新一代机械分析软件, 包含结构分析、热分析及电磁分析模块, 已集成到 Workbench 平台。与 Mechanical APDL 不同的是, Mechanical 将各分析类型封装成不同的分析系统 (Analysis Systems), 如静力分析 (Static Structural)、模态分析 (Modal)、瞬态动力学分析 (Transient Structural)、稳态热分析 (Steady-State Thermal) 等。对于每个分析系统, Mechanical 规范了分析步骤, 并简化了操作方法。例如, Static Structural 分析系统由 7 个步骤组成, 即定义分析类型 (Static Structural)、定义材料 (Engineering Data)、建立几何 (Geometry)、建立有限元模型 (Model)、求解控制 (Setup)、求解 (Solution) 和后处理 (Results), 如图 1-3 所示。

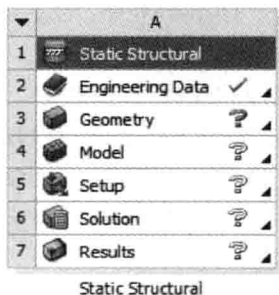


图 1-3 Static Structural 分析系统

从功能上来说, Mechanical APDL 和 Mechanical 都能独立完成有限元分析, 但前者更像是可编程的求解器, 操作灵活, 功能强大, 适合高级用户使用; 后者类似专家系统, 界面友好, 操作简单, 适合普通用户做快速分析。

1.4 HyperMesh 软件的发展及应用

在现代机械装备研发过程中, 有限元模型的规模越来越大, 网格越来越精细, 模型管理越来越复杂, 而激烈的市场竞争又要求研发周期不断缩短, 投放市场时间不断提前。一般来说, CAE 工程师 80% 的时间都花费在有限元模型的建立和修改上, 因此, 传统的有限元前处理器已经远远不能满足这些新的需求。一个功能强大、使用方便、能够与众多计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 系统和有限元求解器进行数据交换的有限元前处理工具, 对于提高有限元分析工作的质量和效率具有十分重要的意义。

HyperMesh 是美国 Altair 公司 (创建于 1985 年) 开发的有限元前处理软件, 它提供了高度交互的可视化环境, 帮助用户建立产品的有限元模型。Altair 公司在 1989 年发布了 HyperMesh, 并很快得到汽车行业的认同。早期的 HyperMesh 就可以在个人计算机上运行, 只占用极少的内存, 运行速度很快, 并在处理大模型 (当时指 1000~15 000 个单元模型) 时表现优秀。在其他软件还要求用户输入一大堆命令的时候, HyperMesh 就已经使用鼠标和屏幕操作与用户交互了。从第 2 个版本开始, HyperMesh 就可以导入多种几何曲面, 并形成了与现在的软件相似的面板和菜单系统。从第 8 个版本开始, HyperMesh 已将用户界面向 Windows 风格转变, 增加了浏览器、工具栏和菜单等。在最新的版本 (HyperMesh 12.0) 中, HyperMesh 提高了在 CAE 流程自动化方面的核心竞争力。

HyperMesh 是一个杰出的有限元前处理平台, 它提供了全面的 CAD 系统和 CAE 求解器的接口, 并且支持用户自定义, 从而可以与任何仿真环境无缝集成。HyperMesh 强大的几何清理功能可以用于修正几何模型中的错误, 修改几何模型, 从而提升建模效率; 高质量、高效率的网格划分技术可以完成杆、梁、板壳、四面体和六面体网格的自动和半自动划分, 大大简化了对复杂几何进行仿真建模的过程; 先进的网格变形 (Morphing) 技术允许用户直接更改现有网格, 实现新的设计, 无需重构几何模型, 从而提高设计开发效率; 功能强大的模型树视图能轻松应对各种大模型的要素显示和分级管理需要, 特别适合复杂机械装备的整体精细化建模。HyperMesh 的这些特点, 大大提高了 CAE 建模的效率和质量, 允许工程师把主要精力放在对产品本身性能的研究和改进上, 从而大大缩短了整个设计周期。

与其他的有限元前处理器比较, HyperMesh 的图形用户界面易于使用, 特别是它支持直接读取已有的 CAD 几何模型, 如 CATIA、Pro/E、SolidWorks、UG 等, 不需要任何其他数据转换, 从而尽可能避免数据丢失或者几何缺陷。另一方面, 它支持各种主流的 CAE 软件, 如 ABAQUS、ANSYS、CFX、FLUENT、LS-DYNA、MARC、NASTRAN、OptiStruct、PAM-CRASH、RADIOSS、STAR-CD 等。利用 HyperMesh 建立网格模型后, 可以直接把计算模型转化成不同的求解器格式文件, 从而利用相应的求解器进行计算, 这使得 HyperMesh 可以作为企业统一的 CAE 前处理平台。

图 1-4~图 1-6 为 HyperMesh 建立的高质量有限元模型。