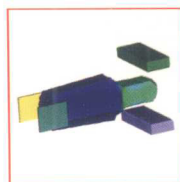
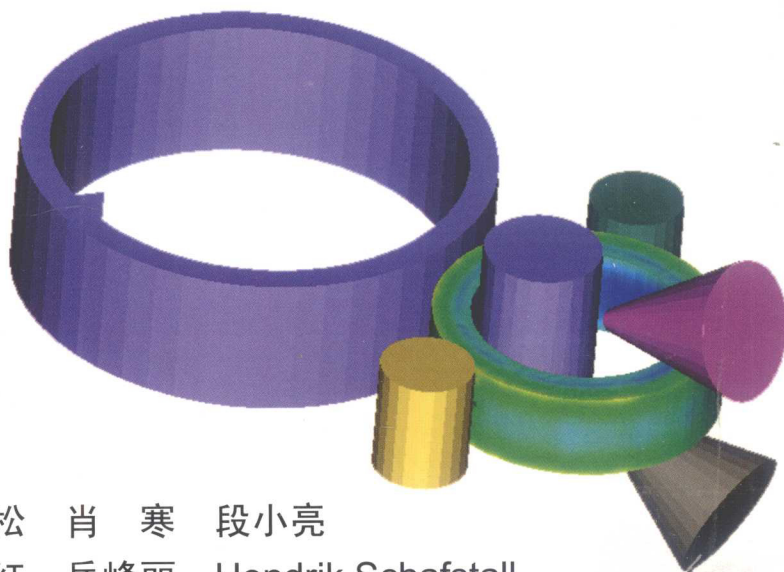


万水CAE技术丛书

 **simufact**
Certified Reseller



主 编 刘劲松 肖 寒 段小亮
副主编 张伟红 岳峰丽 Hendrik Schafstall

Simufact

在材料成型与控制工程中的应用

材料成型与控制工程领域的典型实例专业精讲



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 CAE 技术丛书

Simufact 在材料成型与 控制工程中的应用

主 编 刘劲松 肖 寒 段小亮

副主编 张伟红 岳峰丽 Hendrik Schafstall



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍 Simufact 在材料成型与控制工程中的典型应用及其相关的技术问题,特别是对应用有限元法与有限体积法解决材料加工过程中的具体操作过程作了重点讲解。全书以应用为主,理论为辅,既注重 Simufact 的基本原理与使用方法,又强调提高实际工程应用分析能力。

全书共分 13 章,第 1 章介绍有限元技术在材料成型与控制工程中的应用状况,第 2、3 章介绍 Simufact 在材料成型与控制工程中的一些常用技术与基本操作界面,第 4~13 章分别从开式模锻、闭式模锻、开坯锻、挤压、轧管、旋压、环轧、轧制、钣金热冲压、热处理等方面介绍 Simufact 在材料成型与控制工程中的典型应用案例,并给出了全部操作流程。读者通过本书的学习,可以掌握有限元法与有限体积法解决实际工程问题的关键技术,学会应用本专业知识分析问题、解决问题,将理论分析与工程实践紧密衔接在一起。

本书既适合作为材料成型与控制工程专业本科生与研究生的教材,也可作为相关企事业单位工程技术人员的应用参考书,还可作为 Simufact 数值模拟分析软件的培训教材。

本书所有案例的模型文件可以从中国水利水电出版社网站和万水书苑免费下载,网址为: <http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目(CIP)数据

SIMUFACT在材料成型与控制工程中的应用 / 刘劲松, 肖寒, 段小亮主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 4

(万水CAE技术丛书)

ISBN 978-7-5084-9576-7

I. ①S… II. ①刘… ②肖… ③段… III. ①工程材料—成型—应用软件, Simufact IV. ①TB3-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第049187号

策划编辑: 杨元泓 责任编辑: 张玉玲 封面设计: 李 佳

书 名	万水 CAE 技术丛书 Simufact 在材料成型与控制工程中的应用
作 者	主 编 刘劲松 肖 寒 段小亮 副主编 张伟红 岳峰丽 Hendrik Schafstall
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 12.25 印张 302 千字
版 次	2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	30.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

数值模拟对于塑性加工成形工艺是强有力的设计、分析和优化的工具，可以预测成形期间零件形状的变化、最终应变分布、缺陷形成区域等，并可在零件生产前最大限度地优化工艺参数，所有这些对于成功地成形复杂形状的零件并减少成形时间是至关重要的。数值模拟能够处理各种复杂的工程问题，同时它也是进行科学研究的重要工具。数值模拟分析已成为替代大量实物试验的数值化“虚拟试验”，基于该方法的大量计算分析与典型的验证性试验相结合可以做到高效率 and 低成本。

塑性加工成形模拟技术经历了几十年的发展，国际上已经出现了一批塑性成形模拟软件。其中，大型数值模拟分析软件 **Simufact** 是可以快速模拟各种冷热成形、挤压、轧制等塑性成形过程的工艺成形专用软件，它可以实现对具有高度组合的非线性体成形过程的全自动数值模拟。**Simufact** 是基于原 **Superform** 和 **Superforge** 开发出来的先进的材料加工及热处理工艺仿真优化平台，包括辊锻、楔横轧、孔型斜轧、环件轧制、摆碾、径向锻造、开坯锻、剪切/强力旋压、挤压、锻造、自由锻、温锻、锤锻、多向模锻、板管的液压胀形等材料加工工艺均可用 **Simufact** 进行仿真。**Simufact** 采用的求解器包括 **MARC**（有限元法 FEM）和 **DYTRAN**（有限体积法 FVM）两种。**Simufact** 采用 **Windows** 和 **MSC.mentat** 两套操作界面，一般工程中使用通常采用 **Windows** 操作界面，简单易行。

全书以应用为主，理论为辅，通过各种典型材料加工案例详细介绍 **Simufact** 在材料加工工程中的应用及其相关的技术问题。全书共分 13 章，第 1 章介绍有限元技术在材料成型与控制工程中的应用状况，第 2、3 章介绍 **Simufact** 在材料成型与控制工程中的一些常用技术与基本操作界面，第 4~13 章分别从开式模锻、闭式模锻、开坯锻、挤压、轧管、旋压、环轧、轧制、钣金热冲压、热处理等方面介绍 **Simufact** 在材料成型与控制工程中的典型应用案例，并给出了全部操作流程。读者通过本书的学习，可以掌握有限元法与有限体积法解决实际工程问题的关键技术，学会应用本专业知识分析问题、解决问题，将理论分析与工程实践紧密衔接在一起。

本书既适合作为材料加工工程专业本科生与研究生的教材，也可作为相关企事业工程技术人员的应用参考书，还可作为 **Simufact** 数值模拟分析软件的培训教材。

本书的编写得到了德国 **Simufact** 工程公司与中仿新联（北京）科技有限公司的支持与鼓励，特别是中仿新联（北京）科技有限公司的 **Jason Li** 先生对本书的编写与出版给予了大力帮助，在此致以由衷的感谢！同时，中国科学院金属研究所张士宏研究员带领下的塑性加工先进技术研究组对本书也提出了很多宝贵建议，最后感谢在本书编写过程中给予作者支持与关心的老师和同事们！

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。

刘劲松

2012 年 3 月于沈阳

目 录

前言

第1章 绪论	1	3.5.4 视角/角度工具栏	19
1.1 有限元法的发展历程	1	3.5.5 鼠标左键功能选择工具栏	20
1.1.1 有限元法的孕育及诞生期	1	3.5.6 移动选项工具栏	20
1.1.2 有限元法的蓬勃发展期	2	3.5.7 模拟工具栏	20
1.1.3 有限元法的成熟壮年期	3	3.6 菜单	21
1.2 有限元法的意义	4	3.6.1 文件菜单 (File)	21
1.3 有限元法在塑性加工领域的应用	5	3.6.2 编辑菜单 (Edit)	21
1.4 有限元法的发展趋势	6	3.6.3 视图菜单 (View)	21
1.5 有限体积法	7	3.6.4 插入菜单 (Insert)	22
1.6 Simufact 有限元软件的特点	8	3.6.5 工具菜单 (Tools)	22
第2章 Simufact 模拟过程中的一些常用技术	10	3.6.6 窗口菜单 (Window)	22
2.1 材料模型	10	3.6.7 帮助菜单 (Help)	23
2.1.1 弹性部分	10	3.7 “进程属性”对话框	23
2.1.2 塑性部分	11	第4章 开式模锻模拟	25
2.2 热力学	11	4.1 引言	25
2.2.1 模具传热	11	4.2 开式模锻实例分析	26
2.2.2 工件传热	12	4.2.1 创建新的工艺仿真	26
2.3 运动学	12	4.2.2 导入几何模型	27
2.3.1 设备	12	4.2.3 定义材料	32
2.3.2 模具与弹簧	13	4.2.4 定义设备	32
2.4 摩擦模型	13	4.2.5 定义摩擦	33
2.5 损伤模型	14	4.2.6 定义温度	35
第3章 Simufact.forming 操作界面	15	4.2.7 点历史追踪	36
3.1 引言	15	4.2.8 控制参数设置及运行	37
3.2 Simufact.forming 总体界面	15	4.2.9 模拟结果分析	40
3.3 语言选择	16	第5章 闭式模锻模拟	45
3.4 程序初始设置	17	5.1 引言	45
3.5 工具栏	17	5.2 闭式模锻实例分析	46
3.5.1 标准工具栏	17	5.2.1 创建新的工艺仿真	46
3.5.2 图像显示工具栏	18	5.2.2 导入几何模型	47
3.5.3 后处理工具栏	18	5.2.3 定义材料	48
		5.2.4 定义设备	48

5.2.5 定义摩擦	49	8.2.7 网格划分	103
5.2.6 定义温度	50	8.2.8 控制参数设置及运行	104
5.2.7 插入流线	52	8.2.9 模拟结果分析	105
5.2.8 控制参数设置及运行	53	第 9 章 封头旋压模拟	108
5.2.9 模拟结果分析	54	9.1 引言	108
第 6 章 开坯锻模拟	58	9.2 封头旋压实例分析	109
6.1 引言	58	9.2.1 创建新的工艺仿真	109
6.2 开坯锻实例分析	58	9.2.2 导入几何模型	110
6.2.1 创建新的工艺仿真	58	9.2.3 定义材料	111
6.2.2 导入几何模型	60	9.2.4 定义设备	112
6.2.3 定义材料	62	9.2.5 定义摩擦	117
6.2.4 定义设备	63	9.2.6 定义温度	118
6.2.5 定义摩擦	69	9.2.7 网格划分	120
6.2.6 定义温度	70	9.2.8 接触定义	120
6.2.7 网格划分	72	9.2.9 控制参数设置及运行	121
6.2.8 控制参数设置及运行	74	9.2.10 模拟结果分析	123
6.2.9 模拟结果分析	74	第 10 章 环轧模拟	125
第 7 章 挤压损伤模拟	76	10.1 引言	125
7.1 引言	76	10.2 环轧实例分析	125
7.2 挤压损伤实例分析	76	10.2.1 创建新的工艺仿真	125
7.2.1 创建新的工艺仿真	76	10.2.2 导入几何模型	126
7.2.2 导入几何模型	77	10.2.3 定义材料	127
7.2.3 定义材料	79	10.2.4 定义设备	129
7.2.4 定义设备	79	10.2.5 定义摩擦	136
7.2.5 定义摩擦	81	10.2.6 定义温度	138
7.2.6 定义温度	82	10.2.7 网格划分	141
7.2.7 网格划分	84	10.2.8 控制参数设置及运行	141
7.2.8 旋转轴的定义 (2D)	85	10.2.9 模拟结果分析	143
7.2.9 控制参数设置及运行	85	第 11 章 板材轧制模拟	148
7.2.10 模拟结果分析	87	11.1 引言	148
第 8 章 三辊轧管成形模拟	91	11.2 板材轧制实例分析	149
8.1 引言	91	11.2.1 创建新的工艺仿真	149
8.2 三辊轧管成形实例分析	92	11.2.2 导入几何模型	150
8.2.1 创建新的工艺仿真	92	11.2.3 定义材料	150
8.2.2 导入几何模型	93	11.2.4 定义设备	152
8.2.3 定义材料	93	11.2.5 定义摩擦	157
8.2.4 定义摩擦	95	11.2.6 定义温度	157
8.2.5 定义温度	95	11.2.7 网格划分	159
8.2.6 定义设备	98	11.2.8 对称面定义	160

11.2.9	控制参数设置及运行	161
11.2.10	模拟结果分析	162
第 12 章	钣金热成形模拟	164
12.1	引言	164
12.2	钣金热成形实例分析	164
12.2.1	创建新的工艺仿真	164
12.2.2	导入几何模型	165
12.2.3	定义材料	167
12.2.4	定义设备	168
12.2.5	定义摩擦	169
12.2.6	定义温度	169
12.2.7	定义压边圈弹簧	172
12.2.8	网格划分	173
12.2.9	定义对称边界	173

12.2.10	控制参数设置及运行	174
12.2.11	模拟结果分析	175
第 13 章	热处理模拟	179
13.1	引言	179
13.2	热处理实例分析	179
13.2.1	创建新的工艺仿真	179
13.2.2	导入几何模型	180
13.2.3	定义材料	181
13.2.4	定义摩擦	182
13.2.5	定义温度	182
13.2.6	网格划分	185
13.2.7	控制参数设置及运行	186
13.2.8	模拟结果分析	187
参考文献		190

1.1 有限元法的发展历程

有限元方法（FEM, Finite Element Method, 也叫“有限单元法”或“有限元素法”）是计算机问世以后迅速发展起来的一种数学分析方法。众所周知，每一种自然现象的背后都有相应的物理规律，对物理规律的描述可以借助相关的定理或定律表现为各种形式的方程（代数、微分、积分），这些方程通常称为控制方程（Governing Equation）。针对实际的工程问题推导这些方程并不十分困难，然而要获得问题的解析的数学解却很困难。人们多采用数值方法给出近似的满足工程精度要求的解答。有限元方法就是一种应用十分广泛的数值分析方法。

有限元方法的基础是变分原理和加权余量法，其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元，在每个单元内选择一些合适的节点作为求解函数的插值点，将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式，借助于变分原理或加权余量法将微分方程离散求解。采用不同的权函数和插值函数形式，便构成不同的有限元方法。在有限元方法中，把计算域离散剖分为有限个互不重叠且相互连接的单元，在每个单元内选择基函数，用单元基函数的线性组合来逼近单元中的真解，整个计算域上总体的基函数可以看作由每个单元基函数组成的，则整个计算域内的解可以看作是由所有单元上的近似解构成。

有限元法这个名词是 1960 年 R. W. Clough 教授首先提出的，他在美国土木工程学会（ASCE）的计算机会议上发表了 *The Finite Element in Plane Stress Analysis* 的论文，文中第一次提出了有限元法（Finite Element Method）的名词。有限元法的发展经历了孕育及诞生期、蓬勃发展期、成熟壮大期。

1.1.1 有限元法的孕育及诞生期

在 300 多年前，牛顿和莱布尼茨发明了积分法，证明了该运算具有整体对局部的可加性。虽然，积分运算与有限元技术对定义域的划分是不同的，前者进行无限划分而后者进行有限划分，但积分运算为实现有限元技术提供了一个理论基础。

在牛顿之后约 100 年,著名数学家高斯提出了加权余值法及线性代数方程组的解法。其中,加权余值法被用来将微分方程改写为积分表达式,线性代数方程组被用来求解有限元法所得出的代数方程组。在 18 世纪,数学家拉格朗日提出了泛函分析,它是将偏微分方程改写为积分表达式的另一途径。

在 19 世纪末及 20 世纪初,数学家瑞雷和里兹首先提出可对全定义域运用展开函数来表达其上的未知函数。1915 年,数学家伽辽金提出了选择展开函数中形函数的伽辽金法,该方法被广泛地用于有限元。1943 年,数学家库朗德第一次提出了可在定义域内分片地使用展开函数来表达其上的未知函数,这实际上就是有限元的做法。

20 世纪 50 年代,飞机设计师们发现无法用传统的力学方法分析飞机的应力、应变等问题。波音公司的一个技术小组,首先将连续体的机翼离散为三角形板块的集合来进行应力分析,经过一番波折后获得前述的两个离散的成功。20 世纪 50 年代,大型电子计算机投入了求解大型代数方程组的工作,这为实现有限元技术提供了物质条件。1960 年前后,美国的 R.W.Clough 教授与我国的冯康教授分别独立地在论文中提出了“有限单元”这样的名词。此后,这样的叫法被广泛接受,有限元技术从此正式诞生,并很快风靡世界。

1.1.2 有限元法的蓬勃发展期

1963 年加州大学 Berkeley 分校, E. L. Wilson 教授和 R. W. Clough 教授开发了结构静力与动力分析软件 SMIS (Symbolic Matrix Interpretive System)。1969 年, Wilson 教授在第一代程序的基础上开发了著名的线性有限元分析程序 SAP (Structural Analysis Program) 和非线性程序 NONSAP。Wilson 教授的学生 Ashraf Habibullah 于 1978 年创建了 Computer and Structures Inc. (CSI), 公司大部分技术人员是 Wilson 教授的学生, 并且 Wilson 教授也是 CSI 的高级技术发展顾问。

同样是 1963 年, Richard MacNeal 博士和 Robert Schwendler 先生联手创办了 MSC 公司, 并开发了第一个软件程序, 名为 SADSAM (Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods), 即数字仿真模拟法结构分析。

美国国家太空总署 (NASA) 于 1966 年提出发展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 Software 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 程序并于 1971 年推出了 MSC.Nastran。

1967 年, SDRC 公司在 NASA 的支持下成立了, 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 年推出商业用有限元分析软件 Supertab。

1969 年, John Swanson 博士建立了自己的公司 Swanson Analysis Systems, Inc. (SASI), 并于 1970 发布了商用软件 ANSYS。1994 年 Swanson Analysis Systems, Inc. 被 TA Associates 并购, 并宣布新的公司名称改为 ANSYS。

进入 70 年代后, 随着有限元理论的趋于成熟, CAE 技术也逐渐进入了蓬勃发展的时期: 一方面 MSC、ANSYS、SDRC 三大 CAE 公司先后组建, 并且致力于大型商用 CAE 软件的研究与开发; 另一方面, 更多的新的 CAE 软件迅速出现, 为 CAE 市场的繁荣注入了新鲜血液。

1969 年, 当时任教于 Brown 大学的 Pedro 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。

David Hibbitt 是 Pedro Marcal 在 Brown 的博士生, David Hibbitt 与 Pedro Marcal 合作到 1972 年, 随后 Hibbitt、Bengt Karlsson 和 Paul Sorenson 于 1978 年共同建立 HKS 公司, 推出了 Abaqus 软件。2002 年 HKS 公司改名为 ABAQUS, 并于 2005 年被达索公司收购。

Klaus J. Bathe 60 年代末在 Berkeley 大学 Clough 和 Wilson 教授的指导下攻读博士学位, 从事结构动力学求解算法和计算系统的研究。Bathe 博士毕业后被 MIT 聘请到机械与力学学院任教。1975 年在 MIT 任教的 Bathe 博士在 NONSAP 的基础上开发了著名的非线性求解器 ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)。而在 1986 年 ADINA R&D Inc. 成立以前, ADINA 软件的源代码是公开的, 即著名的 ADINA81 版和 ADINA84 版的 FORTRAN 源程序, 后期很多有限元软件都是根据这个源程序编写的。

1977 年 Mechanical Dynamics Inc. (MDI) 公司成立, 致力于发展机械系统仿真软件, 其软件 ADAMS 应用于机械系统运动学、动力学仿真分析。后来被 MSC 公司收购, 成为 MSC 分析体系中一个重要的组成部分。

1975 年, John Hallquist 在美国 Lawrence Livermore 国家实验室开始为核武器弹头设计开发分析工具, 并于次年发布 DYNA 程序。1988 年, John Hallquist 创建了 LSTC (Livermore Software Technology Corporation) 公司, 发行和扩展了 DYNA 程序商业化版本 LS-DYNA。同年, MSC 在 DYNA3D 的框架下开发了 MSC.Dyna, 并于 1990 年发布第一个版本, 随后于 1993 年发布了著名的 MSC.Dytran。2003 年 MSC 与 LSTC 达成全面合作协议, 将 LS-DYNA 最新版的程序完全集入 MSC.Dytran 中。MSC 在 1999 年收购 MARC 之后开始了将 Nastran、Marc、Dytran 完全融合的工作, 并于 2006 年发布多物理场仿真平台 MD.Nastran。

另外, ANSYS 收购了 Century Dynamics 公司, 把该公司以 DYNA 程序开发的高速瞬态动力学分析软件 AUTODYNA 纳入到 ANSYS 的分析体系中, 并且在 1996 年 ANSYS 与 LSTC 公司合作推出了 ANSYS/LS-DYNA。

1984 年, ALGOR 公司成立, 总部位于宾州的匹兹堡, ALGOR 公司在购买 SAP5 源程序和 Vizicad 图像处理软件后, 同年推出 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. 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, 提供用于空气流及热传递的分析程序。同时期还有多家专业性软件公司投入了专业 CAE 程序的开发。由此, CAE 的分析已经逐渐扩展到了声学、热传导、流体等更多的领域。

在早期有限元技术刚刚提出时, 其应用范围仅在航空航天领域, 且研究的对象也只局限在线性问题与静力分析。而经过近十年的发展研究, 有限元技术的应用范围已经囊括了力学、热、流体、电磁的自然界四大基本物理场, 并且已经发展了多场耦合技术。

1.1.3 有限元法的成熟壮大期

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 Easy 5 等, 覆盖了线性分析、非线性分析、显式非线性分析以及流体动力学问题和流场耦合问题。另外, MSC 公司还推出了多学科方案 (MD) 来把以上的诸多产品集成为一个

单一的框架来解决多学科仿真问题。

ANSYS 公司通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 系列以及 ANSYS Workbench 和 EKM 等。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、协同技术等方面都提供完善的解决方案。

SDRC 把其有限元程序 Supertab 并入到 I-DEAS 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有机地结合起来, 开发了实验信号处理、实验与分析相关等分析能力。而在 2001 年 SDRC 公司被 EDS 所收购, 并将其与 UGS 合并重组, SDRC 的有限元分析程序也演变成了 NX 中的 I-deas NX Simulation, 与 NX Nastran 一起成为了 NX 产品生命周期中仿真分析中的重要组成部分。

进入 21 世纪后, 早期的三大软件商 MSC、ANSYS、SDRC 的命运各不相同, SDRC 被 EDS 收购后与 UGS 进行了重组, 其产品 I-DEAS 已经逐渐淡出了人们的视线; MSC 自从 Nastran 被反垄断拆分后一蹶不振, 2009 年 7 月被风投公司 STG 收购; 而 ANSYS 则是最早出现的三大巨头中最为强劲的一支, 收购了 FLUENT、CFX、Ansoft 等众多知名厂商后, 逐渐塑造了一个体系规模庞大、产品线极为丰富的仿真平台。

而 CAE 市场的其他厂商也发生了不少的并购和重组, 一些新近的厂商也在逐渐崭露头角。如并入达索 SIMULIA 的 ABAQUS, 能否如 SolidWorks 一样借助达索的强劲在 CAE 市场中打出一片天地; 以前后处理而进入 CAE 领域的 Altair 公司, 其 Hypermesh 软件自诞生之日起就备受业界的关注, 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, 近几年来收入也持续上涨; LMS 也是一个比较有特点的 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, 为其发展更为 CAE 技术的发展拨开迷雾。

另外, 在市场中占有一定份额的还有如前后处理软件 ANSA、Truegrid, 流体仿真软件 FLUENT (被 ANSYS 收购)、CFX (被 ANSYS 收购)、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。

1.2 有限元法意义

有限元法作为一种数值计算分析方法, 是 20 世纪 50 年代求解航空工程结构问题的一种离散数学方法。这种方法的主要特点是, 对于任何复杂边界条件、复杂结构对象和初始条件, 都可以应用该方法进行求解, 特别适合于求解多物理场作用下的超静定工程问题, 包括结构分析、热分析、电磁分析、流体分析等各种问题。

经过 50 多年的发展, 有限元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题, 由静力平衡问题扩展到稳定问题、动力问题。分析的对象从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料等, 从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域。

有限元法是处理各种复杂工程问题的重要分析手段, 同时它也是进行科学研究的重要工具。利用有限元分析可以获取几乎任意复杂工程结构的各种机械性能信息, 可以直接就工程设计进行各种评判及优化, 提高产品品质。有限元分析已成为替代大量实物试验的数值化“虚拟

试验”，基于该方法的大量计算分析与典型的验证性试验相结合可以做到高效率 and 低成本。

1.3 有限元法在塑性加工领域的应用

金属塑性加工技术是现代化制造业中金属加工的重要方法之一。它是利用模具和锻压设备使金属材料变形，获得所需要的形状、尺寸和性能的制件加工过程。金属塑性成形件在汽车、飞机仪表、机械设备等产品的零部件中占有相当大的比例。由于其具有生产效率高、生产费用低的特点，适合于大批量生产，是现代高速发展的制造业的重要成形工艺。

近年来，计算机技术得到了快速发展并渗透到各个领域，为人类进行科学研究提供了强有力的工具。随着有限元理论的日益完善，数值模拟方法尤其是有限元法在金属塑性加工领域得到了广泛的应用。如今，有限元法已经成为一种先进的设计技术和手段。它不但可以分析材料的变形和流动规律、应力和应变分布规律，而且还能预测材料工艺缺陷的形成位置、形成条件和缺陷种类，并能进行工艺优化和模具设计。它克服了传统“试错法”的盲目性，节省了大量的人力、物力和时间。欧美等工业发达国家均把成形制造数值模拟与优化作为优先资助和发展的领域，并已将其大量应用于飞机、导弹、汽车等产品的成形制造过程。

有限元法的应用首先在于分析塑性加工过程的材料变形过程和机理，将很多不可视过程或高速变形过程转为可视化过程，从而可以分析材料的变形规律、材料的流动规律，判断材料的屈服过程和进入屈服的顺序。例如板材的冲压和弯曲变形过程中，板材各部位变形进入屈服状态是不同步的，了解屈服顺序和变形过程对于设计工艺和模具非常重要。另外，通过变形过程分析还可以预测和了解材料的回弹规律，以便对模具设计进行调整。对于锻造工艺，由于变形发生在模具之内无法进行直接观测，有限元可以模拟材料的流动和变形过程，这对于工艺优化和模具设计很有意义，对于掌握缺陷的形成也很有帮助。

有限元法还可以给出应变和应力分布，不但能够给出接触面的应力分布，还可以给出变形体内部任何位置的应力应变分布及变形历史，这对于判断材料的屈服状态、破裂位置等都很有意义。

有限元法可以预测材料的工艺缺陷形成位置、形成条件、缺陷种类，例如预测冲压过程的起皱、破裂和过度减薄等问题，预测锻造过程中的裂纹形成、折叠形成等问题，通过图形显示可以帮助判断缺陷产生的机理。这些已经在工业实例中得到了应用。

有限元法可以计算模具和材料的温度场变化，从而对材料的温度和材料性能变化进行实时计算。

有限元法还可以计算动态再结晶、相变和组织形态的转化，以用于控制材料变形后的组织和性能。

有限元结果可以用于工艺优化和模具设计，是塑性加工工艺和模具设计及优化的有力工具。有限元法可以给出总的变形力，给出变形体和模具的应力分布，这也是设备选择和模具强度设计的基础。

综合上述原因，有限元法在塑性加工各领域都相继得到了广泛应用。在汽车覆盖件模具设计企业，有限元模拟已经成为模具设计的一个关键工序，如同 CAD 成为模具和工艺设计的必备工具。这方面已经有大量的论文发表，这里就不再细述。有限元法在超塑成形、等温锻造、高温合金管材热挤压领域、管材液压成形、板材充液拉深成形等领域也有大量应用实例。在轧

钢领域,有限元法不但应用于热轧带钢的组织演变模拟,还可以应用于在线计算和工艺控制。有限元法还可以应用于焊接、热处理等热加工过程,应用于设备结构和疲劳分析,这些应用可以通过大量文献得到说明。

尽管塑性加工中的有限元理论及技术都有很大的发展,国内外的学者在一些方面已取得丰硕的成果,但由于塑性成形自身的特点,使得有限元法在塑性加工中的应用还存在许多难题,如如何建立一个能真实反映材料在成形过程中变形规律的本构关系、摩擦接触问题的处理、如何在分析过程中自动生成高质量的有限元网格及网格重划问题、宏观模拟和微观组织预测等,这些问题都是值得进一步开发研究的重要课题。

1.4 有限元法的发展趋势

有限元法的发展非常迅速,应用领域不断扩大,结合目前 CAE 软件的发展情况可以看出有限元法的一些发展趋势:

(1) 与 CAD 软件的无缝集成。

当今有限元分析软件的一个发展趋势是与通用 CAD 软件的集成使用,即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后,能直接将模型传送到 CAE 软件中进行有限元网格划分并进行分析计算,如果分析的结果不满足设计要求则重新进行设计和分析,直到满意为止,从而极大地提高了设计水平和效率。为了满足工程师快捷地解决复杂工程问题的要求,许多商业化有限元分析软件都开发了和著名的 CAD 软件(如 Pro/ENGINEER、Unigraphics、SolidEdge、SolidWorks 和 AutoCAD 等)的接口。有些 CAE 软件为了实现和 CAD 软件的无缝集成而采用了 CAD 的建模技术,如 ADINA 软件由于采用了基于 Parasolid 内核的实体建模技术,能够和以 Parasolid 为核心的 CAD 软件(如 Unigraphics、SolidEdge、SolidWorks)实现真正无缝的双向数据交换。

(2) 网格自适应重构、无网格模拟。

有限元计算分析时,结构离散后的网格质量直接影响到求解时间及求解结果的正确与否,近年来各软件开发商都加大了其在网格处理方面的投入。网格自适应重构是一个发展方向。软件不但要能够针对特定问题进行初始网格划分,还要能够根据变形量的大小、畸变程度、计算精度、计算速度要求进行有限次数的网格自动重构和数据的重新分配,对于网格的密度分布、重构次数和网格类型都要有一定的人工智能能力。

无网格模拟分析法是近年来出现的新方法,它在解决某些工程问题时具有很有效的作用,得到发展和应用。但该方法不可能是有限元的替代方法,只能是有限元法的补充。

(3) 有限元法与优化技术的集成应用。

目前,有限元法大多用于材料塑性加工过程的分析,还不具备独立进行工艺过程的优化能力。诚然,有限元法可以用于塑性加工过程的分析,这对工程技术人员分析、预测工艺过程中所发生的现象、理解塑性加工工艺过程是很有益处的,是一个不可缺少的工具。然而,人们应用有限元法的目的一般不只是分析工艺过程,更希望可以进行工艺的优化。一般来讲,人们都是事先设定多种工艺方案,在模拟分析多种方案的基础上确定一种比较合理的工艺方案,有一定的优化作用,但还不能保证工艺方案的最佳化,这是目前有限元在优化技术方面的缺陷。科研人员已尝试了多种有限元法与优化技术的结合,例如在有限元模拟基础上结合人工神经网络

络、遗传算法等进行优化。目前,这些方法的应用还不够方便,但其发展趋势是正确的,有限元技术和优化技术的结合是有限元发展的必然趋势,工程界将期待更合理先进的优化数学技术与有限元法的结合。

(4) 多场耦合问题的求解。

要求有限元法同时可以预测变形过程、温度场变化、工艺缺陷和组织演变,这就必须实现有限元的多物理场耦合模拟,在目前条件下大多采用弱耦合方式,其作用和发展趋势是不可低估的。

有限元法最早应用于航空航天领域,主要用来求解线性结构问题。随着求解问题的复杂化和计算机技术的发展,有限元法越来越多地用于结构非线性、多场耦合问题的求解。例如金属的塑性加工模拟时,用户期待有限元法能同时模拟分析变形过程、温度场变化、工艺缺陷和组织演变,这就需要有限元的多物理场耦合模拟。在目前条件下现有的商用软件大多采用弱耦合方式,因此如何提高多场耦合模拟的精度是未来的发展方向。

(5) 二次开发。

为了进一步提高有限元法的准确性,用户对已有软件的各种模型进行改进和二次开发是完全必要的。例如材料本构关系模型,对于软件所不具备的材料模型或数据不准确的模型,都有必要建立特定材料的本构关系模型。进行材料加工过程的组织演变模拟预测,就有必要进行组织演变模型的二次开发。对于各种缺陷和损伤的预测,也需要建立破坏或损伤模型,以实现这些功能。

1.5 有限体积法

有限体积法(Finite Volume Method),又称为有限容积法、控制容积积分法,是20世纪六七十年代逐步发展起来的一种主要用于求解流体流动和传热问题的数值计算方法。有限体积法是在有限差分法的基础上发展起来的,同时它又吸收了有限元法的一些优点。有限体积法与有限元法和有限差分法一样,也要对求解域进行离散,将其划分为一系列有限大小的离散网格,并使每个网格点周围有一个控制容积;将待解的微分方程对每一个控制容积积分,便得出一组离散方程,其中的未知数是网格点上的因变量的数值。有限体积法可视作有限单元法和有限差分法的中间物,其基本出发点是积分形式的控制方程,这一点不同于有限差分法,同时积分方程表示了特征变量在控制容积内的守恒特性,这又与有限元法不一样。有限单元法必须假定值在网格点之间的变化规律(既插值函数),并将其作为近似解。而在有限体积法中,插值函数只用于计算控制容积的积分,并且可以对微分方程中不同的项采取不同的插值函数。有限体积法的基本思路易于理解,积分方程中的每一项都有明确的物理意义,从而使方程进行离散时对各离散项可以给出一定的物理解释。有限体积法区域离散的节点网格与进行积分的控制容积相互分立,各节点具有互不重叠的控制容积,从而使求解域中场变量的守恒可以由各个控制容积中特征变量的守恒来保证。正是由于有限体积法的这些特点,使其成为当前求解流动与传热问题的数值计算中最成功的方法,已经被绝大多数工程流体和传热计算软件采用。值得一提的是,目前大型工程数值计算软件 Simufact 已经将全球领先的非线性求解器 MSC.Marc 和瞬态非线性求解器 MSC.Dytran 成功结合在一起,提供了有限元法与有限体积法两种建模求解方法,具有高效精确的求解能力,在工程中得到了广泛应用。

1.6 Simufact 有限元软件的特点

Simufact 公司成立于 1995 年,总部位于德国,是世界知名的 CAE 公司,致力于金属成形工艺仿真软件的开发、维护及相关技术服务。

Simufact 公司一直以来就是美国 MSC.Software 公司的商业合作伙伴,为其金属成形工艺模拟软件提供源程序并进行开发。2005 年德国 Simufact 公司和美国 MSC.Software 公司达成协议,在 MSC.Superform 和 MSC.SuperForge 的基础上开发出 simufact.forming 软件,可以用于模拟多种材料的加工工艺过程,包括辊锻、楔横轧、孔型斜轧、环件轧制、摆碾、径向锻造、开坯锻、剪切/强力旋压、挤压、锻锻、自由锻、温锻、锤锻、多向模锻、板管的液压涨形等。Simufact 还具有模具应力分析、热处理工艺仿真、材料微观组织仿真、焊接仿真等专业的配套模块。

Simufact 软件采用纯 Windows 风格和 MARC 风格两种图形交互界面,操作简单、方便,用户可自行选择。求解器将全球领先的非线性有限元求解器 MSC.Marc 和瞬态动力学求解器 MSC.Dytran 融合在一起,提供有限元法(FEM)和有限体积法(FVM)两种建模求解方法,具备快速、强健和高效的求解能力。

(1) 有限单元法求解技术。

Simufact 既支持基于更新欧拉方法的刚塑性分析,又支持基于更新的拉格朗日方法的弹塑性分析。

更新的拉格朗日方法描述的弹塑性分析在计算上虽然实现起来不如刚塑性分析简便,但是可以提供弹性应力、回弹、模具膨胀和工件残余应力等结果。

Simufact 对非线性方程组的迭代解法是牛顿-拉夫森迭代,而求解代数方程组的方法为稀疏存储的直接解法和稀疏存储的迭代解法。稀疏存储迭代求解器具备了求解效率高、精度好的特点,能够支持大规模的、复杂的金属成形分析。

(2) 有限体积法求解技术。

Simufact 不仅采用传统的有限元法求解金属成形工艺问题,还首次应用有限体积法求解高度非线性大变形问题。

金属成形是高度非线性工艺过程,多数情形下毛坯形状相当简单,但最终产品的几何形状非常复杂,采用基于有限体积的材料流动模拟技术突破了传统有限单元技术模拟极度大变形材料流动的障碍。

Simufact 采用的固定在空间的有限体积 Eulerian 网格技术是一个固定的参考框架,单元由节点连接构成,节点在空间上固定不动。非常适于精确模拟材料大变形问题,完全避免了用有限单元技术难以处理而又无法回避的三维网格的重划分问题。Simufact 采用了分辨率增强技术(RET)自动加密工件表面离散的小平面,提高对材料流动描述的精度。多道次锻造过程,跟踪材料表面的小平面的数量会非常大。Simufact 提供的图形界面网格稀化器可以在两个锻造道次之间稀化材料表面的小平面的数量,使模拟速度大大加快,减少所需内存。

Simufact 热处理模块可对正火、退火、淬火、回火、时效、感应加热、冷却相变等材料的热处理工艺和加工过程中的微观组织转变进行模拟仿真,可对热处理和加工过程进行热力耦合分析,充分考虑材料、边界条件、接触等非线性问题,对现实进行虚拟仿真。

Simufact 软件拥有材料数据库和加工设备数据库,数据库为开放式结构,用户可以对数据库进行修改和扩展。设备数据库中包含锻锤、曲柄压力机、螺旋压力机、液压机、机械压力机和辊锻机的参数,用户也可自定义工模具的运动方式。系统提供多种材料的材料数据库,包括钢材、工模具钢、铜、铝等有色金属、钛合金和钴基合金等。用户可将描述弹性材料或刚塑性材料流动的选项与引入温度影响的选项组合成四种分析类型,即弹塑性、刚塑性、弹粘塑性和刚粘塑性,供用户自由选择。

可以同时提交多个模拟任务,无需人工干预,系统按顺序自动完成各个模拟任务,如果某个模拟过程意外终止,那么将继续进行列表中的下一个模拟任务。

2

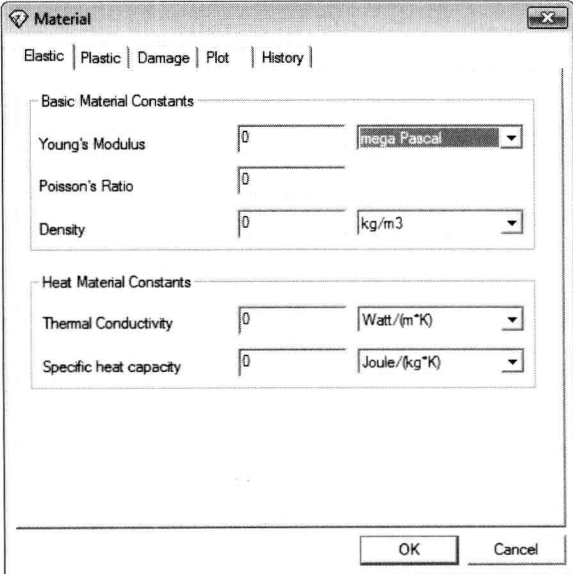
Simufact 模拟过程中的一些常用技术

2.1 材料模型

目前国内所使用的仿真软件基本上都是国外软件。软件内置的材料数据库大多数都是依照国外标准，用户时常遇到材料数据库中没有实际加工所需材料的情况。这时需要用户根据实际情况导入新的材料数据。一般来说，大多数仿真软件均可由用户自定义材料数据，方式大同小异，如通过材料性能实验获得所需要的材料参数等。下面以 simufact.forming 软件为例说明材料的定义方法，主要分为弹性部分和塑性部分。

2.1.1 弹性部分

Simufact 定义新材料弹性属性参数的界面如图 2.1 所示。



The image shows a 'Material' dialog box with tabs for Elastic, Plastic, Damage, Plot, and History. The 'Elastic' tab is selected. It contains two sections: 'Basic Material Constants' and 'Heat Material Constants'. Under 'Basic Material Constants', there are input fields for Young's Modulus, Poisson's Ratio, and Density, each with a unit dropdown menu. Under 'Heat Material Constants', there are input fields for Thermal Conductivity and Specific heat capacity, each with a unit dropdown menu. The 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Property	Value	Unit
Young's Modulus	0	mega Pascal
Poisson's Ratio	0	
Density	0	kg/m ³
Thermal Conductivity	0	Watt/(m*K)
Specific heat capacity	0	Joule/(kg*K)

图 2.1 弹性属性参数定义界面