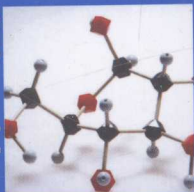




国防特色教材·材料科学与工程

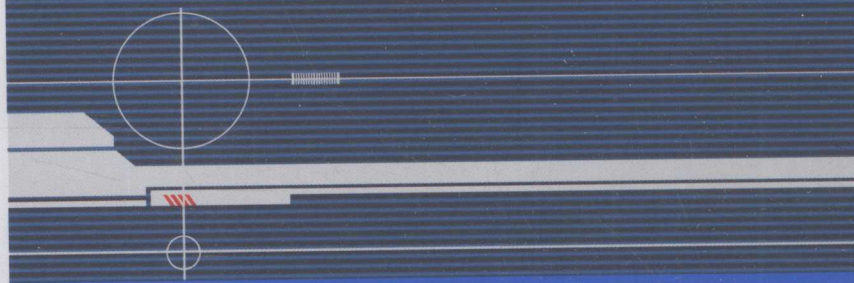
National Defense
TEXTBOOK



材料加工过程的 建模与数值分析

CAILIAO JIAGONG GUÓCHENG DE
JIANMO YU SHUZHIFENXI

盖登宇 李 鸿 马旭梁 主编



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防特色教材·材料科学与工程

材料加工过程的 建模与数值分析

盖登宇 李 鸿 马旭梁 主编

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书阐述材料加工建模与数值分析。其内容包括数学模型与建模方法;回归分析,人工神经网络,试验化设计,相似理论,有限差分,有限元以及热力学计算等材料加工模拟中常用的建模方法与算法;热处理、铸造、焊接及塑性成形等几个典型加工过程的建模与数值分析,以及常用软件 and 上机实践内容。

书中注重基础知识与工程应用的结合,案例翔实,力求深入浅出,通俗易懂。

本书可作为材料加工专业研究生或高年级本科生教材,也可作为相近学科教学参考书,同时可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工过程的建模与数值分析/盖登宇,李鸿,马旭梁主编. —西安:西北工业大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-5612-2687-2

I. 材… II. ①盖…②李…③马… III. ①工程材料—加工—建立模型—研究
②工程材料—加工—数值模拟—研究 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 214809 号

材料加工过程的建模与数值分析

盖登宇 李 鸿 马旭梁 主编

责任编辑 张 友

*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88492314

<http://www.nwpup.com> E-mail: fxb@nwpup.com

陕西向阳印务有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:24.5 字数:517 千字

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5612-2687-2 定价:45.00 元

前 言

计算机技术在各种传统技术中的应用已成为发展趋势,计算机辅助材料加工工程(材料加工 CAE)将为材料加工工程提供新的研发手段,带来材料研究方法上的革命,而其基础则是数学建模。本书较为全面地介绍建模与数值分析技术在铸、锻、焊、热处理等材料加工过程中的应用。

本书主要内容是由模型基础知识、数学模型构建、材料加工工程常用模型及算法构成的基础篇,由铸造、热处理、焊接、塑性成形材料数值分析构成的应用篇,以及最后给出的几个提供读者上机进行实践的具体操作内容等三大部分组成,可以形成较为完整的材料加工工程建模及数值分析知识体系。本书在注重基础培养的同时,也突出了专业领域特色。

希望通过对本书的学习,读者能够了解材料加工建模与仿真的概念;掌握材料加工的模型及其在材料加工过程中的应用;了解材料加工,包括铸造、热处理、锻造和焊接等过程数值分析技术;了解各类专用及通用数值分析软件的应用范围及方法。通过生产过程的实例剖析,将建模及数值分析技术应用于材料加工及成形过程中,以实现材料加工过程的分析与研发,提高材料现代加工制造的技术水平。

本书第 1,9,14 章及第 12 章的 12.4 节由哈尔滨工程大学盖登宇编写;第 4,12 章(不包括 12.4 节)由哈尔滨工程大学李新林编写;第 5 章由哈尔滨工程大学侯彦芬编写;第 6,7 章由哈尔滨工程大学李鸿编写;第 10 章由哈尔滨工程大学王香编写;第 11 章由哈尔滨工程大学李莉编写;第 2,13 章由哈尔滨理工大学马旭梁编写;第 3 章由哈尔滨师范大学何立晖编写;第 8 章由中南大学杜勇、刘立斌编写。全书由盖登宇、李鸿、马旭梁主编,由盖登宇统稿,由哈尔滨工程大学李庆芬教授主审。

在本书的编写过程中,哈尔滨工程大学陈昭运教授提供了大量应用实例;哈尔滨工程大学材料计算课题组的学生们在成稿过程中给予了大力的帮助,提供帮

助的有王世滨硕士、闵祥军硕士、褚元召硕士、黎群霞硕士,付红梅硕士以及周晓雪、吕云鹤同学。在此一并表示衷心的感谢!

由于笔者水平有限,时间仓促,书中内容如有不妥之处,敬请读者指正。

编 者

2009 年 1 月

目 录

第 1 章 材料加工模型与建模	1
1.1 模型基本概念	1
1.1.1 模型的分类	1
1.1.2 不同类型模型之间的关系	2
1.1.3 模型的本质	3
1.2 数学模型	3
1.2.1 数学模型及其特点	3
1.2.2 数学模型的分类	5
1.2.3 数学模型的评价	8
1.2.4 建立数学模型的目的	9
1.3 建模及模型构造	9
1.3.1 建模	9
1.3.2 模型构造方法	11
1.3.3 建模具体过程	12
1.4 材料加工常用模型与算法	15
1.4.1 基于回归分析的模型及应用	15
1.4.2 基于人工神经网络的模型及应用	16
1.4.3 基于试验化设计的模型及应用	16
1.4.4 相似理论模型及应用	17
1.4.5 基于有限差分法的模型及应用	18
1.4.6 基于有限元法的模型及应用	20
1.4.7 基于热力学计算的模型及应用	21
复习思考题	22
第 2 章 基于回归分析的建模与分析	24
2.1 回归分析概述	24
2.1.1 回归模型的一般形式	24
2.1.2 回归分析的步骤	25

2.2 线性回归	27
2.2.1 一元线性回归	27
2.2.2 多元线性回归	34
2.3 自变量选择与逐步回归	43
2.3.1 自变量选择	43
2.3.2 逐步回归	47
2.4 非线性回归	47
2.4.1 将非线性问题线性化	47
2.4.2 非线性模型	48
2.5 回归分析在材料加工中的应用	49
2.5.1 规律性分析	49
2.5.2 性能预测	49
2.5.3 加工过程工艺参数优化设计	50
2.5.4 材料常数的确定	51
复习思考题	51

第3章 基于人工神经网络的建模与分析 54

3.1 人工神经网络	54
3.1.1 人工神经网络概述	54
3.1.2 人工神经元	55
3.1.3 人工神经网络构成	57
3.1.4 人工神经网络的工作方式	58
3.1.5 人工神经网络的学习方法	59
3.1.6 Hebb 算法	60
3.2 BP 网络	61
3.2.1 映射网络与 BP 网络	61
3.2.2 BP 神经元	61
3.2.3 BP 网络模型	62
3.2.4 BP 网络学习	63
3.2.5 提高 BP 网络泛化能力	66
3.2.6 BP 网络局限	67
3.3 神经网络技术与其他智能方法的结合应用	67
3.3.1 神经网络与专家系统结合	67
3.3.2 神经网络与遗传算法结合	69

3.4 人工神经网络在材料加工中的应用.....	72
3.4.1 加工基础理论及数据形成.....	72
3.4.2 加工参数优化.....	73
3.4.3 加工检测中应用.....	73
3.4.4 加工后性能预测.....	74
3.4.5 加工过程及质量控制.....	74
3.4.6 材料与加工过程设计.....	75
复习思考题	75
第4章 基于试验设计的建模与分析	76
4.1 试验设计概述.....	76
4.1.1 试验设计的概念及意义.....	76
4.1.2 发展概况.....	76
4.1.3 试验设计的常用术语.....	77
4.2 正交设计.....	78
4.2.1 正交表.....	78
4.2.2 多因素试验.....	79
4.2.3 有交互作用的试验.....	84
4.2.4 正交试验的方差分析法.....	87
4.3 参数设计.....	91
4.3.1 概述.....	91
4.3.2 稳健设计.....	93
4.3.3 灵敏度分析.....	97
4.4 均匀设计.....	98
4.5 试验设计在材料加工中的应用实例.....	99
4.5.1 试验设计在焊接中的应用	100
4.5.2 试验设计在铸造中的应用	101
4.5.3 试验设计在塑性成形中的应用	101
4.5.4 试验设计在热处理中的应用	102
4.5.5 试验设计在火焰喷涂中的应用	102
4.5.6 均匀设计方法在 304H 钢力学性能试验中的应用	102
复习思考题.....	103

第 5 章 相似理论及建模	105
5.1 相似概念及基本定理	105
5.1.1 量纲理论	105
5.1.2 相似的概念	106
5.1.3 相似基本定理	108
5.2 相似准则导出方法	110
5.3 模型相似条件	116
5.4 相似理论在材料加工中的应用	118
复习思考题.....	119
第 6 章 有限差分法	121
6.1 差分原理	121
6.2 差分方程与相容性	122
6.2.1 基本的有限差分格式	122
6.2.2 有限差分方程的相容性	126
6.3 收敛性与稳定性	128
6.3.1 有限差分方程的收敛性	128
6.3.2 有限差分方程的稳定性	129
6.3.3 线性差分格式的 Lax 等价定理	131
6.4 有限差分法在材料加工中的应用	132
复习思考题.....	133
第 7 章 有限元法	135
7.1 弹性有限元法	135
7.1.1 有限元法的概念	135
7.1.2 弹性有限元法	142
7.2 弹塑性有限元法	150
7.3 刚塑性有限元法	156
7.3.1 刚塑性变形的边界值问题	156
7.3.2 刚塑性变形的广义变分原理	157
7.3.3 拉格朗日乘子法	158
7.3.4 刚塑性有限元基本分析步骤	159
7.4 大型有限元软件的结构	159

7.4.1 常见的大型有限元软件	159
7.4.2 有限元软件的结构	160
7.5 有限元法在材料加工中的应用	162
7.5.1 热处理	162
7.5.2 铸造成形	162
7.5.3 焊接	163
7.5.4 塑性成形	163
复习思考题	165
第8章 热力学计算	167
8.1 材料热力学基本概念	167
8.1.1 通用热力学基本概念	167
8.1.2 热力学第一定律及其相关基本概念	167
8.1.3 热力学第二定律及其相关基本概念	168
8.1.4 热力学第三定律	170
8.1.5 热力学定律综合	170
8.2 Gibbs 自由能模型	172
8.2.1 纯物质的自由能——点阵稳定性常数	172
8.2.2 溶体相模型	174
8.3 热力学数据的测量原理	186
8.3.1 热容	186
8.3.2 相变热的测量	187
8.3.3 生成热的测量	187
8.3.4 熵与熵变的测量	189
8.3.5 Gibbs 自由能的测量	190
8.3.6 偏摩尔量的测量	190
8.3.7 由偏摩尔量求积分摩尔量	192
8.4 相图计算与扩散动力学模拟及其应用实例	193
8.4.1 相图计算基本原理	193
8.4.2 相图计算的历史与发展趋势	194
8.4.3 相图计算的基本步骤	197
8.4.4 相图计算的作用	197
8.4.5 应用实例	198
复习思考题	206

第9章 热处理过程建模及数值分析	207
9.1 热处理模拟概述	207
9.2 温度场建模及有限元计算	208
9.2.1 导热方程	209
9.2.2 初始条件与边界条件	210
9.2.3 热物性参数	211
9.2.4 换热系数	211
9.2.5 单元离散化	212
9.2.6 温度场变分方程	215
9.2.7 温度场离散	217
9.2.8 单元分析	218
9.2.9 整体合成	220
9.2.10 温度场算法.....	222
9.3 组织转变的数值模拟	223
9.3.1 利用连续冷却转变曲线计算组织转变	224
9.3.2 利用等温冷却转变曲线计算组织转变	226
9.4 扩散建模及计算	228
9.4.1 控制方程	228
9.4.2 有限差分法解扩散问题	229
9.5 应用实例	230
9.5.1 活塞杆局部热处理消除焊接应力	231
9.5.2 磁轭拉紧螺杆开裂事故分析	234
复习思考题.....	239
第10章 铸造过程建模及数值分析	241
10.1 充型过程仿真.....	241
10.1.1 充型过程的流体力学基础.....	241
10.1.2 铸件充型过程数值模拟常用方法.....	247
10.2 凝固过程仿真.....	250
10.2.1 凝固过程的传热学基础.....	250
10.2.2 传热方程的有限差分解法.....	257
10.3 应用实例.....	263
复习思考题.....	272

第 11 章 焊接过程建模及数值分析	274
11.1 焊接熔池的流体动力学分析.....	274
11.1.1 数学建模.....	274
11.1.2 数值分析.....	277
11.2 焊接温度场数值模拟.....	277
11.2.1 热源模型的确定.....	277
11.2.2 焊接温度场数值模拟实现.....	282
11.3 焊接应力与变形分析.....	284
11.3.1 热弹塑性分析.....	285
11.3.2 有限元方程及求解.....	286
11.3.3 求解.....	287
11.4 应用实例.....	288
复习思考题.....	294
第 12 章 塑性加工过程建模及数值分析	296
12.1 塑性变形中有限元求解.....	296
12.1.1 刚塑性有限元求解.....	296
12.1.2 刚黏塑性有限元求解.....	300
12.2 塑性加工数值模拟的关键技术.....	301
12.2.1 建模以及可能产生的误差.....	301
12.2.2 边界条件.....	302
12.2.3 网格再生.....	302
12.2.4 确定初始速度场.....	302
12.3 变形与传热耦合.....	303
12.3.1 概述.....	303
12.3.2 塑性加工传热问题的基本理论.....	303
12.4 应用实例.....	308
12.4.1 叶片模压实例介绍.....	308
12.4.2 水泵叶片热弯成形.....	310
复习思考题	312
第 13 章 材料加工模拟中常用软件及应用	313
13.1 ANSYS 及其应用	313

13.1.1	ANSYS 的功能	313
13.1.2	ANSYS 的特点	314
13.1.3	ANSYS 的结构	314
13.1.4	ANSYS 有限元分析	314
13.2	MARC 及其应用	330
13.2.1	MARC 的特点	330
13.2.2	MARC 功能介绍	330
13.3	MAGMAsoft 与铸造仿真	332
13.3.1	MAGMAsoft 铸造模拟软件简介	332
13.3.2	MAGMAsoft 的实现过程	333
13.3.3	MAGMAsoft 的工作流程	333
13.3.4	MAGMAsoft 模拟过程	333
13.3.5	采用 CAD/CAE 技术的总体结构	335
13.4	MATLAB 及数值分析应用	336
13.4.1	MATLAB 软件简介	336
13.4.2	MATLAB 基础	339
13.4.3	MATLAB 用于神经网络计算	340
13.5	Thermo - Calc 与相图计算	342
	复习思考题	347
第 14 章	上机实践	348
14.1	钢的热力学计算	348
14.2	ANSI4140 钢端淬温度场仿真实验	360
14.3	神经网络预测结构钢性能	370
	参考文献	375

第1章 材料加工模型与建模

模型作为科学和工程的研究手段有着悠久的历史,最早是具有象征意义的原样模型,随后才发展了抽象意义的相似模型和数学模型。

材料加工的科学研究同样需要建立模型,其中物理模型和数学模型是解决材料加工工程问题的重要手段。尤其是数学模型,通过建立适当的数学模型来研究实际问题已成为材料加工研究和应用的主要手段。正是数学模型的采用,材料加工的研究才脱离了试错法,成为一门真正的科学。

1.1 模型基本概念

模型是对研究对象的一种抽象,它反映现实中对象系统的主要特征,但它又高于现实,具有同类问题的共性。

模型一般具有如下特征:

- ①模型是对系统的抽象或模仿;
- ②模型由说明系统本质或特征的诸因素构成;
- ③模型集中地表明系统因素之间的相互关系。

研究目的不同,对同一个对象系统可以建立不同的模型,这些模型分别反映该系统的不同侧面。研究目的相同,同一个对象系统也可以建立不同的模型,反映不同的研究角度、考察因素和价值取向。

1.1.1 模型的分类

1. 原样模型

原样模型是在工程开发末期建立的一种对象实体,是具有实物形态的模型。它与目的工程在结构和过程方面基本相同。原样模型经过试验收进和完善后便是所要开发的目的工程。例如,新产品的样机可认为是原样模型。材料加工工程往往涉及大型铸锻件及焊接结构,其结构庞大,过程复杂,成本高,作原样模型是不可取的。

2. 相似模型

相似模型是根据不同系统间的相似规律(包括几何相似、逻辑相似和过程相似等)而建立的用于研究的模型。例如,地球仪、飞机风洞实验模型等都是相似模型。在材料加工中经常用到的物理模拟手段即是建立相似模型。通常物理模拟指放大或缩小比例,或简化条件,或代用材料,或用实验模型代替原型的研究。在材料加工中往往特指利用小试件,借助实验装置模拟材料加工过程的温度及受力的变化,进而揭示材料加工过程的材料组织及性能的变化。材料通过相似建模进行物理模拟可以通过少量的实验代替过去的大量重复性实验。

3. 数学模型

数学模型是指运用数学符号和公式来表达、研究对象系统的结构或过程的模型。工程中力求采用数学模型是因为数学模型是定量化的基础,是科学实验的补充手段,是预测和决策的重要工具,是推进科技发展的依据。数学的抽象化、公理化的概念和方法,体系十分严谨。数学模型是一种创新性的科学方法,它通过简化问题、抽象问题而得到,通过建立模型并采用适当的数学方法求解,进而对现实问题进行定量分析和研究,最终解决实际问题。总之,数学模型的推理计算、思维方法和想象力是科学发现的钥匙。它能够纠正一般经验和常识所产生的偏见,获得对客观世界的新认识,是其他方法难以比拟的。

1.1.2 不同类型模型之间的关系

可以说相似模型以及数学模型都是对原样模型的抽象及简化。在工程实践中往往几种模型是相辅相成的,工程的成功往往是几种模型综合运用结果。

利用数学建模能够从整体上和整个过程为相似模型的物理模拟提供理论趋势,尤其是非线性问题数值模拟更是具有量化结果的优势,从而避免了建立在相似条件下的物理模拟不能够进行外推的缺陷。

但由于材料加工的复杂性,目前尚缺乏全面描述加工过程的理论公式,数学模型的建立也要依赖物理模拟获得的过程主要影响因素及性能、缺陷形成机理的认识。数学模型基础上的数值模拟要依赖相似模型基础上的物理模拟来检验其合理性和可靠性。例如大型焊接结构件往往需要在热模拟机上得到其母材及焊接填充材料的各种性能以及不同温度的表现,这些是数值模拟的基础,而数值模拟的结果又需要由相似模型的小件进行物理模拟验证。所有这些工作完成后,其最终要经过中试实验,即利用原样模型(样件)进行验证。

1.1.3 模型的本质

从系统概念上看,模型是系统中各种关系的表达形式。因此,建立模型要从状态和过程两个方面去寻求,把握和描述各系统要素之间的相互关系。

模型是作为认识与实践活动的中介。模型既可以理解为概念集合的表达系统,又可以理解为创造实践的中间产品。模型既是认识的表达,又是实践活动的先导。模型参与认识世界和改造世界的不断的循环往复过程,既是认识不断深化的体现,又是实践活动不断拓展的体现。

1.2 数学模型

1.2.1 数学模型及其特点

现代科技发展的一个重要特征就是研究者越来越多地使用数学。数学的应用使科学研究走向定量化。科学数学化成为科学研究的重要趋势。研究中无论是工程问题还是基础科学问题,无论是自然科学问题还是社会科学问题,都离不开数学模型。

经典的数学模型包括力学方面的牛顿三大定律、热力学中的热力学三大定律以及电磁学中的高斯定律等。在社会科学研究中各类的经济运行规律、马尔萨斯人口模型等都是数学模型。还有很多模型既可以用于自然科学领域,又可以用于社会科学领域,例如一些统计学模型和人工智能模型等。

我们知道模型是对现实世界中实体的特征及变化规律的一种表示或抽象,那么数学模型就是利用数学语言对某种事物系统的特征及数量关系建立的符号系统。重要的是如何看待数学模型。我们可以把数学模型看做一种对现实世界的理想化,它与实际问题的关系就像城市的交通图与城市交通系统:交通图扭曲地绘出各个距离和方向,但精致地表现出它们相互连接的情况,也就是从本质上简化了交通系统。数学模型同样是实际问题的粗略简化,但抓住了它的一些本质特征。模型的成功与否在于是否抓住事物的本质,差的数学模型是一系列罗列的数据描述,而好的数学模型则能够抓住物理本质,反映过程变化规律。为了反映本质而扭曲部分非本质的东西是允许的。

通常数学模型分为广义和狭义两种。广义言之,对客观事物进行的一级抽象或多级抽象的数学概念、数学公式、数学理论等都叫做数学模型。而狭义数学模型则是指反映特定问题或

特定事物系统的数学符号系统。一般应用于材料加工工程的数学模型往往是针对特定问题的,也就是狭义的数学模型,其目的也是解决具体问题。

数学模型具有以下特点。

1. 高度的抽象性

任何一门学科都具有一定的抽象性,数学的抽象性更高,这是数学区别于其他学科的显著特点。数学方法抛开了事物的次要属性,突出了事物的本质属性,而且舍弃了事物的物质和能量方面的具体内容,只考虑其数量关系和空间形式,并加以形式化和符号化,以便能够进行逻辑推理和数值运算。这种高度的抽象性,实质是对事物认识上的高度概括和深化,对同类问题包含更多的经验和理解。在科学研究中,不同性质的问题可以用相同的数学模型来表示,同一个问题也可以用不同的数学模型来表示。

2. 高度的精确性

数学方法的高度精确性表现在三个方面:一是表达各种因素、变量和它们之间的关系相当明确、清楚,二是逻辑推演和运算规则十分严密,三是结论非常确定。数学方法可以处理多变量、关系复杂的问题,可在有意义的范围内获得令人满意的计算精度,因此特别适合于揭示事物的量的规定性,成为定量研究的有力工具。

3. 应用的普适性

数学方法的高度抽象和精确,使之比任何一种科学方法的应用范围都更为广泛,或者说,任何一门学科的发展都必须引进和应用数学方法。可以说,目前只存在尚未运用数学方法的领域而不存在不能运用数学方法的领域。许多相同形式的数学模型可用于不同的实际问题,具有重要类比和借鉴意义。数学方法的形式化和公理化,使模型本身、计算过程和计算结果都便于交流。数学模型易变动,便于修改参数和改变计算关系,分析和求解问题速度快,求解成本低,特别是同计算机相结合时,这一特点更为突出。

尽管数学模型缺乏直观性、形象性和实时感,但由于上述特点,一直是普遍使用的有效模型,而通常所说的模型化过程主要是指建立数学模型的过程。

具有如此多的优点,数学模型究竟如何表示呢?事实上我们完全可以把数学模型看做转换函数,它将输入转换为输出,而其表示形式是多种多样的,可以是代数方程、微分方程或者积分方程,而且这些方程可以被植入离散计算中,例如有限元计算及有限差分计算。在科学研究中,不同性质的问题可以用相同的数学模型来表示,同一个问题也可以用不同的数学模型表示。例如材料研究中有时可以把温度场与电磁性能模型用同一数学模型表示,而人工神经网络模型以及回归分析方程都能很好地预测材料的流变应力。