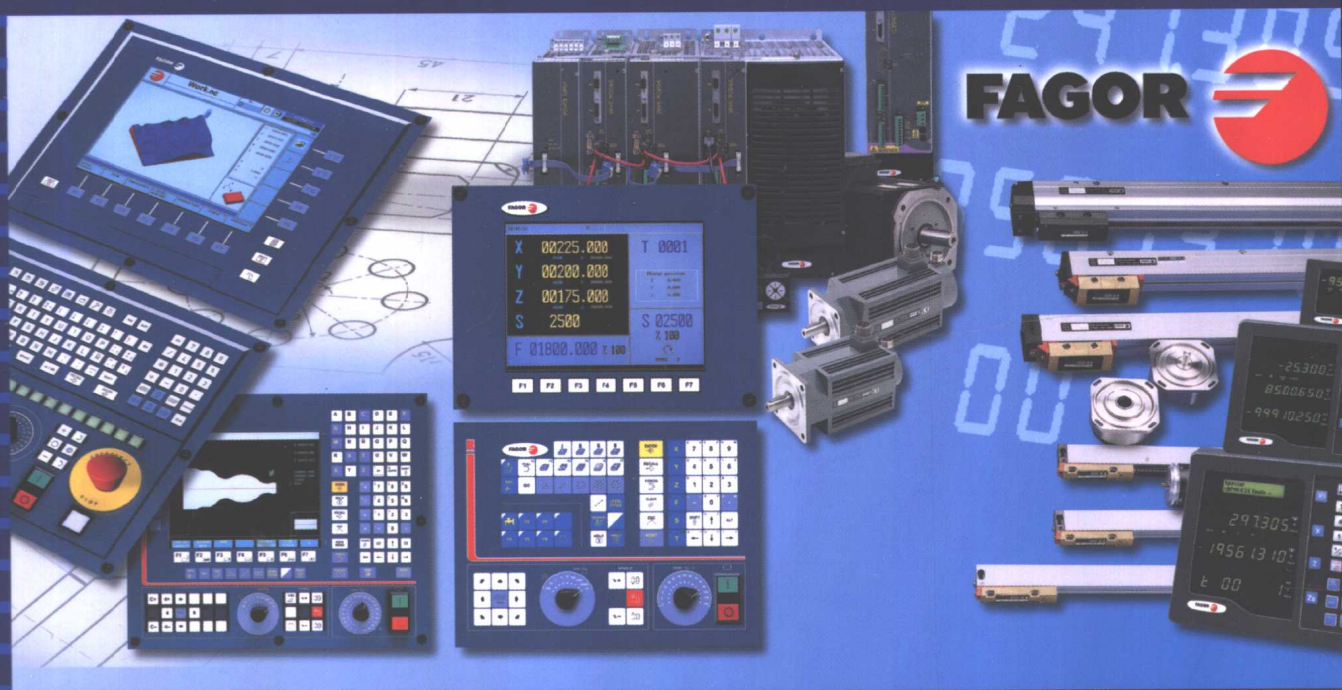


数控技术与制造自动化

● [加] Yusuf Altintas 著



Manufacturing Automation — Metal Cutting Mechanics,
Machine Tool Vibrations,
and CNC Design



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

数控技术与制造自动化

Manufacturing Automation——Metal Cutting Mechanics,
Machine Tool Vibrations, and CNC Design

[加] Yusuf Altintas 著
罗学科 译

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

数控技术与制造自动化/[加]奥廷塔思 (Yusuf Altintas)
著;罗学科译. —北京:化学工业出版社, 2002.11
ISBN 7-5025-4060-1

I. 数… II. ①奥…②罗… III. 数控机床 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 069907 号

Manufacturing Automation—Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design/by Yusuf Altintas

ISBN 0-521-65973-6

Copyright © Cambridge University Press

本书中文简体翻译版由 Cambridge University Press 授权化学工业出版社独家出版发行。未经出版者许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2002-2166

数控技术与制造自动化

Manufacturing Automation—Metal Cutting Mechanics,
Machine Tool Vibrations, and CNC Design

[加] Yusuf Altintas 著

罗学科 译

责任编辑: 张兴辉

文字编辑: 韩庆利 张燕文 梁玉兰

责任校对: 陶燕华

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14 字数 338 千字

2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4060-1/TH·105

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

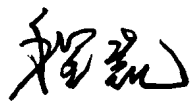
序

实现高精度加工和加工过程的自动化、智能化一直是现代制造技术发展的两个主要目标和标志。高效制造出高质量、低成本、面向用户需求的产品是任何一个制造企业在竞争中取胜的关键。随着制造的全球化，制造业大量向中国转移和集中，加之中国加入 WTO，中国制造业和制造科学研究与开发人员正面临着前所未有的机遇和挑战。在这种情况下，本书的翻译出版是非常及时的。这本书内容丰富，实例具体，非常出色地展现了精密切削加工和数控、自动化、传感器技术的集成。同时，作者结合自身切身的研究项目和在工业界的实践，全方位地介绍了该领域的前沿研究成果和发展动态。

本书译者多年来一直在同一领域从事科研与教学工作。译者本人的科研和教学经历和他在许多类似工作上的成果与见解，无疑也为此书的中文版增添了新的色彩。

我相信读者会从本书中得到许多有益的启示，本书将对中国制造科学的技术创新和发展起到积极的推动作用。

英国利兹城市大学教授



2002 年 6 月

译 序

随着高新技术的迅猛发展,新的学科门类层出不穷,机械制造被认为是一门比较古典的学科。然而,随着材料学科、微电子技术、计算机科学和传感器技术的发展,特别是近二十年来,数控技术的广泛应用,传统制造模式向柔性化、自动化、数字化的方向发展,制造技术出现了许多新的特点,从学科发展的角度看,主要是制造技术已经成为一门综合技术。其核心内容机床设计、金属切削原理与刀具、计算机数控(CNC)技术、计算机辅助制造(CAM)技术以及传感器辅助智能加工技术均涉及相当宽知识和技术领域,有必要对相关领域近年的发展进行总结,作为专著出版,不仅可以作为本专业高年级学生,研究生的参考教科书,还可以帮助该领域的工程师更新知识。

译者一直有心从事这一工作,但限于水平和科研经历的限制,一直没有实现。2001年,我到英国做访问研究,发现了剑桥大学出版社出版的这本专著,它是加拿大不列颠哥伦比亚大学(University of British Columbia)制造自动化实验室主任、国际著名制造自动化技术专家 Yusuf Altintas 教授对制造技术近20年,特别是对自己领导的实验室12年科研工作的总结。本书的特点是资料翔实,实例具体,绝大多数内容是作者及其学生发表在国际期刊上的论文,还有部分是学生的学位论文。在内容上涉及该领域比较前沿的问题。

在有关金属切削的内容中,讲述了金属切削(尤其是车削和铣削)的详细数学模型的建立过程,特别强调解决车间实际问题 and 机床设计问题的宏观切削力学。对加工颤振问题及其检测和抑制策略的研究相当深入,这些内容对研究精密/超精密加工和高速加工有很大的理论价值。

作者在有关数控技术的讲述上,与其他书有很大不同。作者没有将主要精力放在数控编程和简单应用这样一些问题上,而重点讲述数控技术中比较核心的设计问题,对驱动器的选择、反馈传感器、进给驱动的建模和分析、实时轨迹生成和插补算法的设计和 CNC 系统误差的分析等方面内容讲述得相当详细,这在其他类似书籍中是比较难见到的。

书中还全面地论述了开放式 CNC 系统设计的思想及其传感器辅助智能制造系统的关键技术,这些内容在国内尤为难得。

本书不但是作者科研和工程实际经验的总结,也是作者从事该专业哲学思想的反映。作者踏踏实实从事科研工作和解决实际工程问题的作风和学风,非常值得我们学习,这也是译者引进本书的目的之一。

本书在翻译过程中得到了各方面的支持,这里要特别感谢北京发格自动化设备有限公司(公司简介见封三前页)提供了版权引进基金。公司总经理陈晓光,经理郑张龙先生在获知我想翻译这样一本专著后,认真阅读了原著,并一致认为这是一本很有价值的书。于是决定提供资助并大力支持我的翻译工作,这种支持教育事业的精神令人钦佩,也体现了他们先进的企业理念。

北京机床研究所常务副总工俞圣梅研究员认真阅读了原著,对翻译引进给予肯定和支持。初译完成后,在英国进行研究访问的华侨大学刘雄伟教授和在此留学的罗熙淳博士分别审阅了译文初稿,并提出了宝贵的修改意见。在翻译过程中,译者 also 通过电子邮件与作者联

系，得到了作者的支持，对原版中一些印刷错误进行了改正，原版作者还为本书欣然作序。译者在英国学习期间的导师，欧洲著名精密制造专家 K. Cheng 教授也热情地作序一篇以示鼓励。在此，译者对给予本书出版提供帮助的各位朋友和老师们的表示衷心的感谢。

由于本书涉及的领域相当宽广，内容比较新，译者的专业涉猎范围比较窄，加之水平有限，在翻译过程中难免产生一些不妥甚至是错误之处，译者热情欢迎广大读者朋友和同行进行批评指正。(译者 Email: xk_luo@263.net)。

译者

2002 年 6 月

前言

金属切削技术是应用最为广泛的产品最终成型工艺之一，随着材料科学、计算机科学和传感器技术的发展，金属切削技术还在进一步的发展之中。将毛坯加工成最终产品的过程是在计算机数控（CNC）机床上进行车、钻、铣、拉、镗和磨等切削加工，从毛坯上切除多余的材料。本书的目的是帮助学生和相关专业的工程师理解金属切削技术的科学原理并将这些原理应用到生产实际，解决在车间生产中遇到的实际问题。本书反映了作者的工程实践、研究经历及其制造工程的哲学思想。

工程师们在将基本物理原理应用到实际机床设计和加工工艺的制定过程中，以他们看得见，摸得着的方式进行学习是最好的学习方式。在分析、设计机床及其加工工艺中，数学、物理、计算机、软件和测量学将成为一种有用的集成工具。

金属切削发生在切削刀具和安装在机床上的工件材料之间，机床的运动是受 CNC 单元控制的，CNC 单元使用的数控（NC）指令是在计算机辅助设计/计算机辅助制造（CAD/CAM）系统上生成的。能否高效、精确地切除金属取决于 NC 程序的准备、加工工艺参数的设计，切削条件、刀具几何形状、工件和刀具的材料、机床刚度和 CNC 单元的性能。加工和机床领域的制造工程师必须熟悉上面所列的每个问题，更为重要的是将这些知识联系起来并以多学科综合的方式解决加工中的问题。

本书的前几章讲述了金属切削及车削和铣削的详细数学模型，重点强调了解决车间实际问题和机床设计问题的宏观切削力学。虽然本书中没有涉及工件和刀具材料设计的微观切削力学，但简单介绍了材料可加工性的基本原理、刀具磨损机理和刀具破损问题，并给出了完整的图片。机床设计所需要的结构学、固体力学、振动学、运动学等学科的知识在有关机械工程的教材中有专门论述。本书建立在以上这些知识的基础上，将振动的基本原理和实验模态分析技术应用于机床和金属切削领域。为了简单方便地解决加工振动问题，对相应的数学方法进行了简化，并对制造工程师在实际生产中每天遇到的加工颤振问题进行了深入的讨论。

本书的最后三章主要讲述 CNC 机床的编程、设计和生产自动化问题。简要介绍了数控编程和 CAD/CAM 技术，但对于初学 CNC 机床的编程和使用方法已经足够了。本书中对进给驱动器的选择、反馈传感器、进给驱动的建模和分析、实时轨迹生成和插补算法的设计和 CNC 定向误差的分析等方面内容的讲述比其他书要更为详细。书中也全面地论述了开放式 CNC 设计的思想及在 CNC 机床上增加传感器和控制算法模块以改善加工精度和提高生产率的方法。

处理实际制造问题是学生们学习的最佳途径。本书中涉及的内容是经过实验验证并被广泛应用于研究室和工业生产的工程原理；书中给出的实例和思考问题源自作者及其学生的科学研究项目和所已解决的工业实际问题；书中以工业项目形式给出的多学科交叉问题是为了便于读者同时应用所必需的各门技术，例如要求读者首先解决基本的切削力学问题，接下来分别解决铣削力学、立铣刀的静态变形和相应表面形状误差的建模、立铣刀的振动模型和颤振稳定性问题。又如，在解决飞机翅膀结构铣削加工问题中读者对相关的知识链进行了综合联系，这个问题也是来自工业实际的项目。与此类似，在另一个项目中，我们引导学生一步一步地走过了编程、实时建模和 CNC 机床控制等步骤。因为所有的项目均在作者的实验室

进行了试验，因此在书中提供的许多教学和研究装置可用于教师教学。

本书是为学习金属切削原理、机床振动、实验模态分析、NC 编程和 CAD/CAM 技术、CNC 系统设计和基于传感器的智能加工技术的大学高年级学生、研究生和从事实际生产的制造工程师编写的。也可作为从事金属切削力学和动力学、CNC 技术和基于传感器的智能加工技术的科研工作者的参考书。

致谢

本书中的每章内容绝大多数源自作者本人的工程实践、科学研究和教学经历。除 CAM 技术（第 4 章）之外，每章内容都是涉及作者在不列颠哥伦比亚大学（University of British Columbia）制造自动化实验室指导的多名研究生学位论文的内容。

已毕业的研究生 E. Budak 博士、A. Spence 博士和 Haikun Ren 博士对第 2 章的内容作出了贡献，这一章主要研究金属切削原理；E. Schamoto 博士对斜角切削中剪切角的预测作出了贡献；E. Budak、S. Engin、D. Montgomery、P. Chan、P. lee 和 M. Campomanes 的论文对写作第 3 章有很大的帮助，这一章主要讲述机床的变形和振动问题；电气工程师 J. Peng 和 A. Nick Newell 及机械工程师 A. J. Lane 和 K. Erkorkmaz 的论文对写作第 5 章的内容有很大的帮助，这一章讲述了 CNC 的设计原理；N. A. Erol 和 K. Munasinghe 的学位论文形成了最后一章，这一章主要是有关传感器辅助加工和开放式 CNC 系统设计的问题。作者向所有已毕业和在读的研究生在加工、机床、CNC 设计、加工过程监控等方面的研究积累表示感谢。S. Atadan 作为作者多年的亲密朋友，帮助作者准备了附录中有关拉氏变换和 z 变换的内容。I. Lazoglu 博士校阅了全书内容。

作者还要提到几位对作者制造工程经历有帮助的机械师、工程师和教授。作者从土耳其 Kirikkale 的 M.K.E Top Otomotiv 工厂的机床设计工程师、工艺师和机械师，加拿大 Montreal 的 Pratt & Whitney 公司的机械师，位于 Hamilton 的加拿大金属加工研究所的工艺设计人员那里接受了丰富的工程实际训练。作者基本的工程教育和丰富的机床设计和分析知识来自伊斯坦布尔技术大学；CAD/CAM 教育来自 New Brunswick 大学；有关机床的工程背景来自 McMaster 大学，这些对于作者在制造工程方面的全面发展和研究技能的提高是最有价值的。G. Ulsoy 教授、Y. Koren 教授、G. Pritschow 教授、U. Heisel 教授、T. Moriwaki 教授和 T. Altan 教授与作者建立了深厚的个人友谊和合作研究关系，并鼓励作者完成了这本著作。作者的研究工作、工程风格及人生哲学深受恩师 J. Tlustý 教授的影响。

本人向剑桥大学出版社的编辑 Florence Padgett 提供的编辑支持表示感谢，对项目经理 Andrew Wilson 和 TechBook 公司的 Michie Shaw 在书稿最终出版方面细心和专业的处理表示感谢。感谢剑桥大学出版社和 TechBook 公司的合作与帮助。

机床和金属切削工程是一门多学科综合交叉的领域，要成为一名出色的制造工程师和研究者，需要掌握多方面的知识。这需要特别努力勤奋地工作，离开家庭成员的奉献是不可能实现的。作者的妻子 Nesrin，女儿 Cagla 和儿子 Hasan 对于作者将无数的周末和家庭节假日花费在建设不列颠哥伦比亚大学制造自动化实验室表示理解和支持，这个实验室和这本书倾注了作者 12 年的心血。作者的父亲 Hasan 和母亲 Hatice 是勤劳、忠厚和热情的村民，他们居住在土耳其 Denizli 一个叫 Bekili 的小镇上，他们不但是作者的生活典范更是作者的精神支柱。作者之所以能完成此书，要归功于所有在作者职业生涯中给予作者支持的人们。

Yusuf Altintas

内 容 提 要

金属切削是在产品制造中应用最为广泛的最终成型方式，近年来，随着材料技术、计算机技术和传感器技术的发展，金属切削领域所涉及的相关技术得到了很大的发展。

本书重点讲述金属切削技术的科学原理及将这些原理应用到生产实际解决车间生产中遇到的实际问题的方法。数学、物理、计算机、软件和测试与测量等学科是分析、设计机床及其加工工艺的综合工具，本书对这些学科的相关内容也做了讨论。

本书首先讲述了金属切削力学的基本知识，接下来讲述了振动工程的基本原理和实验模态分析技术在解决车间具体生产问题中的应用；书中对制造工程师在实际生产中每天遇到的加工颤振问题进行了深入的讨论；比较全面地讨论了 CNC 机床的编程、设计和自动化制造、CAD/CAM 等技术问题。书中对机床驱动器的选择、反馈传感器、进给驱动的建模和分析、实时轨迹生成和插补算法的设计、CNC 定向误差的分析等方面的内容进行了详细的论述。书中每章均包含有来自工业实际的例子、设计项目和思考问题。

本书是为学习金属切削原理、机床振动、实验模态分析、NC 编程和 CAD/CAM 技术、CNC 系统设计和基于传感器的智能加工技术的大学高年级学生、研究生和从事实际生产的制造工程师编写的。也可作为从事金属切削力学和动力学、CNC 技术和基于传感器的智能加工技术的科研工作者的参考书。

作者 Yusuf Altintas 是机械工程教授，现任不列颠哥伦比亚大学制造自动化实验室 (Manufacturing Automation Laboratory at the University of British Columbia) 主任。

目 录

第1章 导言	1
第2章 金属切削力学	3
2.1 导言	3
2.2 直角切削力学	3
2.3 切削力的机械模型	10
2.4 剪切角的理论预测	13
2.5 斜角切削的力学分析	14
2.5.1 斜角切削的几何关系	14
2.5.2 斜角切削参数的求解	16
2.5.3 切削力的预测	18
2.6 车削加工的力学分析	20
2.7 铣削加工的力学分析	26
2.8 立铣切削力解析建模	32
2.9 钻削加工的力学分析	36
2.10 刀具的磨损和破损	41
2.10.1 刀具磨损	41
2.10.2 刀具破损	45
2.11 思考问题	46
第3章 加工过程中的静态和动态变形	49
3.1 导言	49
3.2 机床结构	49
3.3 加工中的尺寸和形状误差	50
3.3.1 外圆车削中的形状误差	50
3.3.2 镗刀杆	51
3.3.3 立铣加工中的形状误差	52
3.4 加工过程中的结构振动	55
3.4.1 自由振动和强迫振动的基础知识	55
3.4.2 有向传递函数	58
3.4.3 设计和测量坐标系	59
3.4.4 多自由度系统的解析模态分析	60
3.4.5 刀具和工件之间的相对传递函数	64
3.5 多自由度系统的实验模态分析	65
3.6 切削过程中的颤振	71
3.7 铣削加工中颤振的解析预测	76
3.7.1 动态铣削模型	76

3.7.2 颤振稳定性叶瓣图	79
3.8 思考问题	85
第4章 制造自动化技术	90
4.1 导言	90
4.2 计算机数控单元	90
4.2.1 CNC 单元的体系结构	90
4.2.2 CNC 的执行	91
4.3 CNC 机床轴的命名规则	91
4.4 NC 零件程序的结构	92
4.5 主要准备功能	94
4.6 计算机辅助 NC 编程	97
4.7 解析几何基础	97
4.7.1 矢量和直线	98
4.7.2 物体的平移和旋转变换	98
4.7.3 圆	99
4.7.4 三次样条	99
4.8 APT 零件编程语言	101
4.8.1 几何定义语句	101
4.8.2 刀具运动语句	106
4.8.3 刀位文件和后置处理	107
4.9 用 CAD 系统进行 NC 编程	113
4.10 思考问题	114
第5章 CNC 系统的设计和分析	118
5.1 导言	118
5.2 机床驱动	118
5.2.1 机械零部件及驱动力矩	119
5.2.2 反馈装置	122
5.2.3 电气驱动	123
5.2.4 永磁电枢控制的直流电机	124
5.2.5 位置控制环	128
5.3 位置环的传递函数	129
5.3.1 闭环传递函数	129
5.3.2 CNC 系统的跟随误差	130
5.4 进给驱动控制系统的状态空间模型	131
5.5 立式铣床进给驱动控制系统的设计实例	133
5.6 CNC 系统中速度指令的生成	136
5.6.1 梯形速度图	137
5.6.2 有限加加速度的速度图生成	139
5.7 实时插补方法	147
5.7.1 直线插补算法	147

5.7.2 圆弧插补的算法	149
5.7.3 CNC 系统内的五次样条插补	152
5.8 电液 CNC 折弯机的设计	158
5.8.1 折弯机的液压系统	159
5.8.2 液压执行器模块的动态模型	160
5.8.3 基于计算机控制的电液驱动的动态性能辨识	162
5.8.4 数字位置控制系统的设计	164
5.9 思考问题	167
第 6 章 传感器辅助加工	173
6.1 引言	173
6.2 智能加工模块	173
6.2.1 硬件体系结构	173
6.2.2 软件体系结构	174
6.2.3 智能加工的应用	175
6.3 铣削加工中峰值切削力的自适应控制	176
6.3.1 引言	176
6.3.2 铣削加工系统的离散传递函数	177
6.3.3 极点-配置控制算法	179
6.3.4 铣削过程通用预测自适应控制	182
6.3.5 刀具破损的在线检测	186
6.3.6 颤振检测与抑制	187
6.4 用 IMM 系统进行型腔的智能化加工实例	188
6.5 思考问题	190
附录 A 拉普拉斯变换和 z 变换	193
A.1 引言	193
A.2 基本定义	194
A.3 部分分式展开法	197
A.4 用部分分式展开法进行拉氏逆变换和逆 z 变换	199
A.5 用余数法 (Residue Method) 进行逆 z 变换	201
A.6 用 MATLAB SYMBOLIC MATH TOOLBOX 进行逆拉氏变换和逆 z 变换	203
附录 B 利用最小二乘法进行离线和在线参数估计	205
B.1 离线最小二乘法估计	205
B.2 递归参数估计算法	206
参考文献	207

第1章 导 言

机床、金属切削、计算机数控 (CNC)、计算机辅助制造 (CAM) 以及传感器辅助智能加工技术所涉及的领域都相当宽, 这些领域的每个问题都需要丰富的学术和工程经验, 这样才能将它们有机地结合起来并应用到具体的制造工艺过程中去。

作为一名制造工程师虽然不可能在所有这些领域都成为专家, 但必须熟悉能够精确而又经济地制造零件的基本工程基础。这本书的重点在于金属切削力学、加工过程中的静态和动态变形、CNC 的设计原理、传感器辅助加工和 CNC 机床的编程技术的基础知识。虽然就工业工程方面而言, 诸如零件工序规划及其经济性问题在制造与成本问题中也起着很重要的作用, 但本书的重点还是集中于反映作者在工程实际、科研及教学方面所涉及有关加工过程中的物理原理方面。

这本书是按下面的结构组织的。

第2章主要涉及金属切削力学的基本知识。首先介绍二维直角切削力学。论述了在切削过程中切屑形成和刀具前刀面及后刀面摩擦的基本规律; 讲述了工件材料特性、刀具几何参数和切削条件之间的关系; 比较详细地说明了辨识加工过程中的剪切角、刀具前刀面和运动的切屑之间的平均摩擦因数以及屈服剪切应力的方法。介绍了实际切削中斜角切削的几何关系, 论述了实际切削加工中三维斜角切削的力学理论; 并根据斜角切削的力学定律给出了预测所有方向切削力的方法。介绍了制造业中最基本的三种切削方式: 车削、铣削和钻削的力学理论分析。对于铣削加工, 讲述了在笛卡儿坐标系中预测三维切削力的算法推导过程, 并给出了实际切削的采样结果; 给出了在实际中广泛应用的螺旋槽立铣刀切削力的预测算法。本章还简单介绍了有关刀具磨损和破损的方式及其成因, 这些内容对于评价工件的可加工性是很重要的。

第3章主要讲述加工过程中的静态变形和振动问题。在加工过程中, 加工静态变形的发生是由于工件和刀具的弹性变形引起的; 当静态变形超出工件的允差极限后, 将使零件报废。书中给出了车削棒料和立铣加工时预测静态变形发生的位置和大小的公式, 这个方法也可以推广到其他诸如磨削和钻削等加工方式。加工过程中最普遍的问题源自动态变形 (即刀具和工件之间的相对振动), 其中最常见的振动现象是自激颤振, 发生颤振后, 刀具和工件之间的动态位移成指数规律增长, 最终将导致刀具跳出切削区或刀具的破坏。为了便于读者理解机床颤振, 书中首先归纳总结了有关单自由度和多自由度振动的基本理论知识。由于机床颤振主要是通过分析实验数据进行研究的, 书中也给出了有关实验模态分析的基本知识。利用模态分析技术, 工程师们可以将复杂的机床和工件结构表示为其他工程师能够理解的一组数学表达式。模态分析技术不但能够分析颤振, 也能明确地告诉机床设计工程师在加工期间发生颤振的根源, 从而使设计工程师改进设计。本章在讲述了振动工程的基础知识后, 重点分析了在直角切削和复杂的铣削加工中发生颤振的机理; 介绍了再生颤振的数学模型; 给出了在直角切削中确定无颤振切削深度和主轴转速的方法。介绍了在复杂的铣削加工中, 工程技术人员预测无颤振条件的特殊技术, 并利用仿真结果和实际试验结合的方法讲述了这种技术, 工程技术人员可以用该技术提高生产率并避免发生颤振。

第4章介绍 CNC 技术及数控加工和编程的基本知识。首先总结了各种 CNC 机床普遍接受的标准 NC 指令,包括 CNC 机床接受的 NC 代码的格式;沿刀具路径运动的运动指令如直线和圆弧插补指令;诸如控制主轴和冷却液的辅助指令和自动循环指令等。最后通过手工编写不同的 NC 代码引入了计算机辅助制造 (CAM) 的内容,先介绍了 APT (自动编程工具——Automatically Programmed Tooling) 编程语言,介绍了工件几何形状、刀具几何形状和刀具运动的参数定义结构,还给出了相应的 APT 指令。通常 APT 的输出被称为 CL (刀位) 数据文件,它是一种标准文件,经后置处理器处理后可以被 CNC 机床接受。后置处理器将独立于机床的 CL 数据自动转换为机床特定的 NC 指令格式。本章最后介绍了有关计算机辅助设计 (CAD) 系统,这种系统采用图形交互技术,既可以用来设计零件,也可以生成刀具路径。本章的重点是 CAM 技术的基本知识及其使用,并未涉猎计算机图形学的理论,因为这方面的知识并非是制造工程师所必备的知识。

掌握了 CNC 机床使用和编程的工程师们还要使自己熟悉有关 CNC 机床设计及 CNC 内部运行的基本原理。本书第5章对 CNC 设计的基础知识的讲述是从驱动电机和伺服放大器的选择开始讲起的。书中详细地讲解了进给伺服驱动系统的数学建模过程,根据对机械驱动系统的惯性和摩擦、伺服电机、放大器、速度和位置反馈传感器的实际判断给出了它们的传递函数。也讲述了如何将连续时域的物理系统模型变换到离散计算机时域的方法。给出了来自科研和生产实际的进给驱动数字控制系统的设计和调试过程。CNC 的设计包括直线、圆弧和样条插补实时刀具路径的生成,以及沿刀具路径的加速度、减速度和矢量进给速度的控制。本章还给出了设计电液机床驱动的完整例子,用以说明 CNC 设计的普遍原理,也就是说 CNC 技术可以应用于任何机械系统而与驱动器的类型无关。

加工技术近期发展的趋势是提高机床和 CNC 的智能化程度,这方面的内容在第6章中予以讨论。在机床上安装能够在加工时测量力、振动、温度和声音的传感器,通过数学模型可以发现这些传感器测量的信号和机床加工状态的关系;将数学模型编写成实时算法,可以监视机床的加工状态并发送指令给 CNC 以采取相应的动作。本章中给出了一种智能加工和开放式实时 CNC 操作系统,可以进行模块化设计并将基于传感器的应用算法集成到机床上。本章包括了简单而最基本的加工过程控制算法及其理论基础,还给出了切削力自适应控制、刀具失效的在线检测和颤振检测算法及其它们的实验验证和工程应用。

在每章的末尾给出了一些思考问题,它们大多来自作者所在的制造自动化研究实验室的实际设计,应用和实验中的问题,因此期望它们能让工科学子感受到工程实际中的一些问题。因为书中涉及多个工程学科在机床工程问题中的综合应用,虽然作者认为本书的读者已经理解了相关机械工程的基本概念,但在附录中作者还是给出了有关拉氏变换和 z 变换的基本原理和基于最小二乘方法的参数辨识技术。

第 2 章 金属切削力学

2.1 导 言

大多数机械零件的最终形状是通过机械加工获得的。许多成型过程像锻造、辊压成型和铸造，在成型后往往需要一系列的金属切削加工，以便获得零件最终要求的形状、尺寸及其表面质量。机械加工主要分为两大类：切削加工和磨削加工。切削加工用于从毛坯上切除材料，磨削加工往往在切削加工之后进行，以便使零件获得更高的表面质量和尺寸精度。最常见的切削加工有：车削、铣削和钻削，另外，还有一些特殊的切削加工方式，如镗削、拉削、滚削、刨削和成型切削。然而，所有金属切削的力学原理是一样的，但它们的几何关系和运动形式是不同的。在本章内容中并不涉及对各种切削加工的特性及刀具几何形状的具体分析，而着重于切削力学的基本原理，并给出了对铣削加工力学的综合分析讨论。读者要了解和学这这方面的内容，可以参考 Armarego 和 Brown^[2]，Shaw^[3]及 Oxley^[4]编写的有关金属切削方面的专著。

2.2 直角切削力学

虽然大多数切削加工是三维切削，并且其几何关系相当复杂，但在这里我们将以几何关系比较简单的二维直角切削为例来解释金属切削的基本力学原理。在直角切削加工中，材料是被垂直于刀具——工件相对运动方向的切削刃切除的。更为复杂的三维斜角切削的力学原理可以通过对直角切削模型施加相应的几何和运动变换获得。直角切削和斜角切削过程的示意图如图 2.1 所示。直角切削过程类似于刨削加工，刀具的切削刃是一条与切削速度 (V)

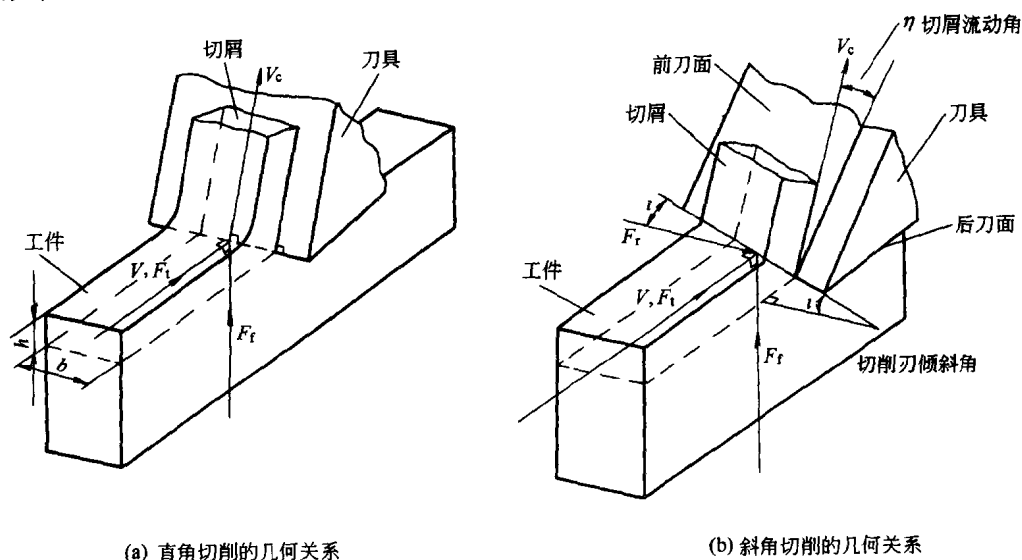


图 2.1 直角切削和斜角切削过程的几何表示

垂直的直线。一定切削宽度 (b) 和切削深度 (h) 的金属切屑从工件上被剪切下来。在直角切削中, 假定切削过程中工件材料沿切削刃是不变形的, 因此它是二维的平面应变变形过程, 不涉及材料的侧向伸展, 因此, 切削力只施加在切削速度方向和切削厚度方向, 它们分别被称作切向力 (F_t) 和进给力 (F_f)。然而, 在斜角切削过程中, 切削刃有一倾斜角 (i) 并且在径向施加了第三个作用力——径向力 (F_r)。

图 2.2 所示为直角切削的一截面图, 在切削过程中有三个变形区。刀具经历了切屑接触

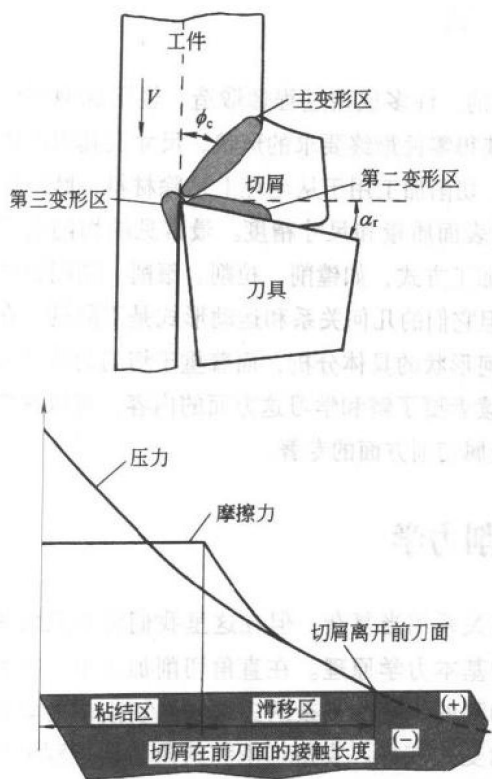


图 2.2 变形区和前刀面的载荷分布
一个薄的区域。

图 2.3 是直角切削过程中的截面图, 从中可以分析切削过程中的变形几何关系和切削力。假定刀具的切削刃是没有倒角和圆角的锋利刀刃, 并且变形发生在无限薄的剪切平面内。剪切角 (ϕ_c) 被定义为切削速度 (V) 方向和剪切平面之间的夹角。进一步假定在剪切平面上的剪切应力 (τ_s) 和正应力 (σ_s) 是恒定的; 施加在切屑剪切平面的合力 (F) 与施加在刀具前刀面上切屑和刀具的接触区上的力 (F) 是一对平衡力; 假定在刀具前刀面上切屑和刀具的接触区内取平均摩擦因数。从力平衡的观点看, 切削合力 (F) 是进给力 (F_f) 和切向力 (F_t) 的合成, 即:

$$F = \sqrt{F_f^2 + F_t^2} \quad (2.1)$$

进给力 (或推力) 沿切削厚度方向, 切向力 (或切削动力, 主切削力) 沿切削速度方向。作用在刀具和作用在切屑上的力大小相等, 方向相反。直角切削两个变形区的作用力如下所示:

主剪切区: 根据几何关系推导出作用在剪切平面的剪切力 (F_s) 为:

$$F_s = F \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) \quad (2.2)$$

式中 β_a ——刀具前刀面和运动的切屑之间的平均摩擦角；
 α_r ——刀具的前角。

剪切力可以表示为进给力 and 切向力的函数：

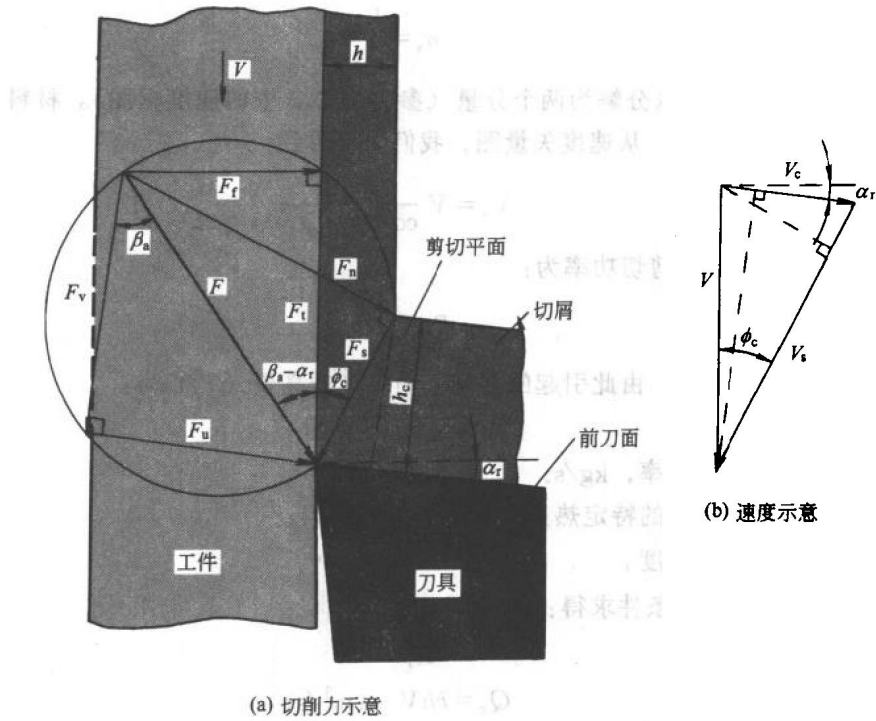
$$F_s = F_t \cos \phi_c - F_f \sin \phi_c \quad (2.3)$$

同样，作用于剪切平面的法向力可以按下面的公式求得：

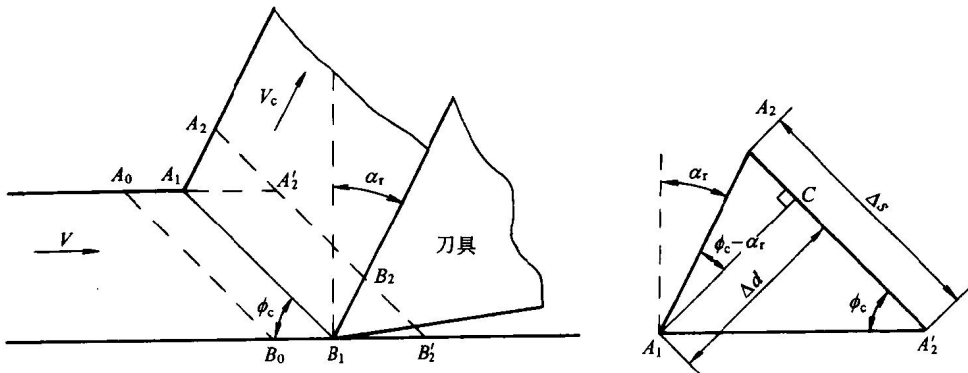
$$F_n = F \sin(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) \quad (2.4)$$

或：

$$F_n = F_t \sin \phi_c + F_f \cos \phi_c \quad (2.5)$$



(a) 切削力示意



(c) 剪切变形和应变示意

图 2.3 直角切削力