



普通高等教育“十三五”规划教材

机械加工过程优化技术

李淑娟 编著



科学出版社

普通高

教材

机械加工过程优化技术

李淑娟 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合作者多年的教学实践和国内外同行专家的教学研究成果编写而成,将机械加工过程不同类型的优化问题由浅入深地进行分析、数学建模和求解,将其结果进行工程化并分析可行性。本书主要内容包括对加工过程的静态影响因素分析、建模,采用解析法、罚函数法以及非数值解法求得其最优解的方法和过程;考虑加工过程中干扰因素对目标函数的影响,建立随时间变化的系统动态模型,并采用相应的自适应控制获得最优解的方法;考虑工程实际问题,多因素影响结果时,通过实验的方法确定主要的影响因素,并获得最优解的优化方法。

本书可作为机械设计制造及其自动化、机械工程、工业工程、管理工程以及印刷包装工程等相关专业高年级本科生、研究生的教材,也可作为企业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械加工过程优化技术/李淑娟编著. —北京:科学出版社,2017.3

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-052379-2

I. ①机… II. ①李… III. ①金属切削—高等学校—教材 IV. ①TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 054876 号

责任编辑:杨向萍 杨 丹/责任校对:郑金红

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年3月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:200 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着人们对自然环境保护和可持续发展的要求与人类社会需求矛盾的加剧,绿色化、智能化制造成为制造技术发展的趋势。制造过程的精益化和准时化是实现绿色制造和可持续发展的重要使能技术,同时精益化和准时化的程度也反映一个国家或企业的技术水平及实力。无论是何种制造技术,不管其制造原理和制造方法的差异有多大,在满足制造技术要求的条件下,生产效率最大化、制造成本最小化和利润最大化永远是企业获得良好效益的根本目标。因此,围绕着制造过程的特点和基本要求,培养高层次的制造技术人才,不断提高制造技术的精益化和准时化程度以提升制造业的竞争优势,是制造技术发展进步永恒的主题。

机械加工过程优化技术研究机械加工工艺过程中工程问题的分析、不同条件下的数学建模以及求解的基本理论和方法,分析工艺参数变化对制造过程的最优化指标的影响,是机械类及相关专业一门重要的专业课程。根据教学改革实践和技术发展需求,该课程由浅入深,从对制造过程影响因素的静态分析入手,建立其数学模型,并采用解析的方法和数学规划的方法对问题进行求解,同时对复杂静态条件下的问题进行非数值解的求解。在静态求解的基础上,分析加工过程的扰动对最优化目标的影响,引入在线实时监测和控制的方法获得动态制造过程的建模和求解,并通过实例验证上述理论。最后对新的工艺过程和多因素影响目标的优化方法进行介绍。

本书第4章由刘永副教授撰写,第6章由汤奥斐副教授撰写,第8章由袁启龙教授撰写,其余部分由李淑娟教授撰写并负责全书统稿。翟志波、王嘉宾、辛彬和杨磊鹏博士以及麻磊、安蓓等硕士研究生参与了部分资料的收集整理和图表绘制工作。感谢李言教授对撰写工作的指导。

在本书的撰写过程中,听取了许多专家的宝贵意见,参考引用了部分著作和论文中的内容和插图,在此表示衷心感谢!

限于作者水平,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年9月

目 录

第一部分 加工过程建模及优化技术

第 1 章	概述	3
1.1	机械加工工艺过程优化的意义	4
1.2	最优化目标	5
第 2 章	静态建模	8
2.1	工程问题的数学化	8
2.1.1	生产率目标函数	9
2.1.2	成本目标函数	11
2.1.3	利润率目标函数	11
2.1.4	目标函数的极值	12
2.2	最优切削速度	15
第 3 章	约束条件的数学描述	19
3.1	约束的来源	19
3.2	约束条件函数	20
3.2.1	最小进给量的限制	21
3.2.2	最大进给量的限制	21
3.2.3	最低切削速度的限制	25
3.2.4	最大切削速度的限制	25
3.2.5	电机功率的限制	26
3.2.6	刀具合理耐用度的限制	26
第 4 章	求解方法	28
4.1	静态最优化的数学模型及其求解方法	28
4.1.1	解析法	28
4.1.2	罚函数法	32
4.2	静态最优化问题求解举例	36
4.2.1	问题描述	36

4.2.2	解法一——边界极值比较法	37
4.2.3	解法二——罚函数法	43
4.3	静态最优化问题求解——遗传算法	45
4.3.1	孔加工参数优化问题描述	45
4.3.2	建立工艺优化目标	47
4.3.3	约束条件	48
4.3.4	求解算法设计	49
4.3.5	实例验证	50

第二部分 加工过程适应控制及优化技术

第 5 章	动态优化建模	55
5.1	静态最优化的局限性	55
5.1.1	刀具耐用度的变化对静态最优化应用的限制	55
5.1.2	切削力的变化对静态最优化应用的限制	57
5.1.3	工艺系统的刚度变化对静态最优化应用的限制	58
5.2	动态最优化模型	59
5.3	切削过程动态特征参数的实时检测	61
5.3.1	切削力的实时测量	61
5.3.2	刀具磨损过程的实时检测	67
第 6 章	动态最优化问题求解	77
6.1	动态最优化问题求解方法	77
6.1.1	基于约束的自适应控制	78
6.1.2	最优自适应控制	79
6.1.3	人工自适应控制	84
6.2	实例验证	85
6.2.1	切割原理及设备	86
6.2.2	SiC 单晶切削力建模	86
6.2.3	模型阶次辨识	89
6.2.4	模型参数估计和最小方差控制	91
6.2.5	实验研究	93

第三部分 试验优化技术

第 7 章	试验设计及试验方法	105
7.1	正交试验设计原理	105

7.1.1 多因素的试验问题.....	105
7.1.2 正交表安排试验.....	107
7.1.3 交互作用.....	112
7.2 方差分析.....	116
7.2.1 方差分析的必要性.....	116
7.2.2 多因子试验的方差分析.....	117
第 8 章 响应曲面法.....	130
8.1 响应曲面法简介.....	130
8.2 最速上升法.....	132
8.3 二阶响应曲面分析.....	138
8.4 响应曲面的实验设计.....	147
8.5 多重响应优化的满意度函数方法及实例验证.....	153
参考文献.....	175
附录.....	176

第一部分

加工过程建模及优化技术

第1章 概述

在人类发展的历史长河中，制造对工具的进步和人类文明的发展有不可磨灭的贡献。制造过程是按照人类所需，运用主观掌握的知识和技能，借助手工或客观可以利用的物质工具，采用有效的方法，将原材料转化成最终物质产品，并投放市场的全过程。制造过程包括市场调研和预测、产品设计、选材和工艺设计、生产加工、质量保障、生产过程管理、营销、售后服务等产品生命周期内一系列相互联系的活动。制造技术是完成制造活动所需的一切手段的总和。高质量、高水平的制造业必然有先进的制造技术作后盾。因此，制造技术是一个国家科技水平的综合体现，是国家经济可持续发展的根本动力。

日常生活中的吃、住、行等使用的物品都离不开制造：①物质资料的生产是人类社会赖以生存和发展的基础，是推动人类社会进步、决定人类社会面貌的主要因素，人类最基本的活动是物质资料的生产。②生产的目的是满足社会和人们生活的需要，制造过程则是提供这一需要的基石。③强大、先进的制造技术是在激烈的市场竞争中取胜，提高综合国力和人民生活水平的保障。④制造技术也反映一个国家的综合实力。人类社会的发展史，特别是近几十年世界经济的发展状况就是有力的证明。纵观世界各国的发展过程可以发现，如果一个国家的制造业发达，其经济必然强大，因此制造业和社会的进步与发展有着密切的关系。

就目前的工业生产而言，制造活动可分为基础制造、变换制造和最终制造三大类。基础制造即获取自然资源，并把它们转换成能被其他制造业利用的原材料，如采矿、钢铁冶炼等。变换制造是指把基础制造的输出转换成工业产品，如轧钢、化工生产等。变换制造的特征是产品的物理形态不完整。最终制造是指把毛坯、原材料或半成品经过加工并装配成用户可以直接使用的最终产品，如机械加工、装配等生产都属于这一类。

工艺是指劳动者利用生产工具对各种原材料或半成品进行加工或处理（如切削、测量、热处理、检验等），最后使之成为产品的方法，即工艺就是制造产

品的方法。一般制造机械产品的方法称为机械制造工艺,包含零件的机械加工工艺和机器装配工艺。

在生产过程中,直接改变生产对象状态(包括形态和性态,如形状、位置、尺寸以及机械物理性能等),使其成为成品或半成品的过程称为工艺过程。它是生产过程的主要组成部分。其中,采用机械加工方法改变毛坯或原材料的形状、尺寸、相对位置、表面质量及性能,使其成为合格零件的过程,称为机械加工工艺过程。而把组成产品的全部零部件按设计要求,采用合理的装配顺序和方法正确地组合装配在一起,形成最终产品的过程,称为机械装配工艺过程。

组成工艺过程的基本单元是工序。工序是指一个(或一组)工人,在一台机床(或一个工作地),对同一个(或同时对几个)工件所连续完成的那一部分工艺过程。它是组成工艺过程的基本单元。判断是否为同一工序的主要依据是:工作地点(或者机床)是否变动,对同一个零件的加工是否连续。

把机械加工工艺过程的具体内容以表格的形式写成文件,就是机械加工工艺规程(简称工艺规程)。它是在具体的生产条件下,以较合理的工艺过程 and 操作方法,按规定形式写成的工艺文件,经审批后用来指导生产。其内容主要包括零件加工工序内容、切削用量、工时定额以及各工序所采用的设备和工艺装备等。工艺规程是指导生产的主要技术文件,是在工艺理论和实践经验的基础上制订的用来指导操作工人工作的基本依据。在产品投产前要根据工艺规程进行有关的技术准备和生产准备,如安排原材料的供应、通用工装设备的准备、专用工装设备的设计与制造、生产计划的编排、经济核算、对工人业务的考核等。除此之外,它也是工艺过程主要的依据。此外,新建或扩建工厂和车间时,要根据工艺规程确定所需要的机床设备的品种和数量、机床的布置、占地面积、辅助部门的安排等。企业间可通过工艺规程进行技术交流,不断提高工艺水平,但同时工艺规程对企业至关重要,为了保持企业的竞争优势,经常是相互保密的^[1]。

1.1 机械加工工艺过程优化的意义

机械加工过程发展的智能化和精细化,使得加工过程中在不同的状态下获

得最优或者近优目标成为发展趋势。机械加工过程最优化就是寻求使加工过程获得最大经济效益的加工条件。首先从经济的观点出发,选择一个最优化目标,一般选取最大利润率、最低成本或最高生产率。此外,还要从技术的观点出发,对最优化过程提出一些约束条件,如切削功率不大于设备额定功率,工件表面粗糙度不低于工艺要求等。

在加工装备(机床、刀具、夹具等)以及加工任务已确定的条件下,一般的加工过程中可以控制的变量有切削速度、进给量和切削深度,统称为切削用量。切削用量是切削加工过程中的基本控制量。切削用量优化是切削加工工艺过程优化的基础,不仅决定着加工技术的水平和效率,也决定着产品的制造质量和使用效果。以提高切削加工效率,降低加工成本,获得高质量的产品为目的进行切削用量优化的研究,具有重要的现实意义和深远的历史意义。目前,大多数工厂在生产中凭经验或参考切削用量相关手册来选择切削参数,这往往达不到切削用量的最优选。切削用量的选择是制订机械零件加工工艺的一个重要方面,选择的恰当与否,将直接影响成品的质量、生产率和加工成本等,然而由于影响切削用量的因素繁多,影响因素之间又相互交叉、相互制约,因此确定最佳的切削用量较为困难。随着各种新型加工材料的不断涌现以及数控加工机床、加工中心和柔性制造系统的广泛运用,仅依靠个人经验来确定切削用量已远不能适应时代的发展。而运用现代切削理论、数学建模和模型分析方法寻求切削参数的最优组合,是切削用量优化的一个重要发展方向。

目前,进行加工过程最优化的基本方法是从研究加工过程的基本规律入手,探索最优化目标、约束条件与可控变量之间的关系,建立最优化目标函数和约束函数,并将两者结合起来,构成一个最优化数学模型。根据这个模型,按一定的策略探求目标函数的极值,从而确定相应的最优加工条件,即最优切削速度、进给量和切削深度。

1.2 最优化目标

最优化目标的确定是使本次加工获得最大经济效益为原则。以最常见的金属切削过程为例,通常作为切削过程最优化目标的有劳动生产率、成本和利润率。

1. 劳动生产率

劳动生产率是指单位时间内制造的合格品数量或者制造单件产品所消耗的劳动时间。劳动生产率一般通过时间指标来衡量。机械加工过程中，最主要的时间单元是时间定额。

时间定额是指在一定的生产条件下制订出完成单件产品（如一个零件）或某项工作（如一个工序）所必须消耗的时间。时间定额不仅是衡量劳动生产率的指标，也是安排生产计划、计算生产成本的重要依据，同时也是新建或扩建工厂（或车间）时计算设备和工人数量的依据。制订合理的时间定额是调动工人积极性的重要手段，它一般是由技术人员通过计算、类比，或者通过对实际操作时间的测定和分析而确定的。

完成零件一个工序所消耗的时间，称为单件时间定额，它由以下几部分组成。

（1）基本时间：指直接改变生产对象的形状、尺寸、相对位置与表面质量等所耗费的时间。对机械加工来说，基本时间为切除金属层所耗费的机动时间（也称为机加工时间，包括刀具的切入和切出时间），可由切削用量、加工余量、行程长度计算获得。

（2）辅助时间：指在每个工序中，为保证完成基本工艺过程所必需的各种辅助动作所耗费的时间。对机械加工而言，所谓辅助动作主要有装卸工件、开停机床、改变切削用量、试切和测量零件、手动进退等手动动作，一般通过查表及实例法获得。

基本时间和辅助时间的总和称为单件作业时间。

（3）工作地服务时间：指为保证加工过程正常进行，工人照管工作地点及保持正常工作状态所耗费的时间。主要包括：调整、更换和刃磨刀具、润滑和擦拭机床、清除切屑、收拾工具等所耗费的时间。工作地服务时间一般可按作业时间的 2%~7%来计算。

（4）休息和自然需要时间：指工人在工作班内为恢复体力和满足生理需要所消耗的时间。一般按作业时间的 2% 计算，当然可根据加工零件的大小、重量以及加工的复杂程度进行调整。

上述四种时间的总和称为单件时间。

（5）准备-终结时间：指成批生产中，为了生产一批零件，进行准备和结束工作所消耗的时间。即开始加工前需要熟悉工艺文件，领料、领取夹具、刀

具等工艺装备,调整机床等;加工一批零件结束时,需要拆卸和归还工艺装备,送交成品等。因该时间对于一批零件只消耗一次,所以可分摊到每个零件上。

劳动生产率是衡量生产效率的一个综合指标,它不单纯是一个工艺技术问题,还与产品设计、生产组织和管理工作有关。因此,改进产品结构,改善生产组织和管理,都是提高劳动生产率的有效措施。

2. 成本

制造一个零件(或产品)所耗费的费用总和为生产成本。与工艺过程直接有关费用,称为工艺成本。工艺成本由可变费用和不变费用两部分组成。

可变费用是指与零件年产量直接有关,并与之成正比变化的费用,包括毛坯材料及制造费、操作工人工资、通用机床折旧费和修理费、通用工艺装备(刀具、夹具)的折旧费和修理费以及机床电费等。

不变费用是指与零件年产量无直接关系,不随年产量的变化而变化的费用,包括专用机床和专用工艺装备的折旧费和修理费、调整工人的工资等。即当年产量在一定范围内变化时,这种费用基本保持不变。

3. 利润率

利润率是指在单位时间内创造的利润,一般根据产品的价格和生产总成本的差值来获得。

在一般情况下,采用最低成本或最大利润率为最优化的目标,当生产任务紧迫或在整个加工过程中某一工序出现薄弱环节时,则可以考虑采用最大生产率为最优化的目标。目标确定以后,还要把目标与被优化的参数,即切削用量联系起来,建立以切削用量为自变量的目标函数。在切削用量中,切削深度主要取决于加工余量,往往没有什么选择的余地。为了简化问题,对切削深度不予研究,讨论中只以切削速度和进给量为自变量,推导切削过程最优化的目标函数。

第2章 静态建模

2.1 工程问题的数学化

根据工程问题和现象,分析其产生的原因,寻找其相应现象背后的规律,并用数学公式表示出来,就是工程问题的数学化。实质上数学建模就是通过计算得到的结果来解释实际工程问题,并接受实际的检验,建立数学模型的全过程。当需要从定量的角度分析和研究一个实际工程问题时,就要在深入调查研究、了解对象信息、作出简化假设、分析内在规律等工作的基础上,用数学的符号和语言作表述来建立数学模型。

数学模型是一种模拟,是用数学符号、数学公式、程序、图形等对实际问题本质属性的抽象而又简洁的刻画,或能解释某些客观现象,或能预测未来的发展规律,或能为控制某一现象的发展提供某种意义下的最优策略或较好策略。数学模型一般并非现实问题的直接翻版,它的建立常常既需要对现实问题深入细致地观察和分析,又需要灵活巧妙地利用各种数学知识。这种应用知识从实际问题中抽象、提炼出数学模型的过程就称为数学建模。

不论是用数学方法在科技和生产领域解决实际问题,还是与其他学科相结合形成交叉学科,首要的和关键的一步是建立研究对象的数学模型,并加以计算求解(通常借助计算机)。建模过程一般包含以下几个方面。

(1) 模型准备。了解问题的实际背景,明确其实际意义,掌握对象的各种信息。以数学思想来包容问题的精髓,数学思路贯穿问题的全过程,进而用数学语言来描述问题。要求符合数学理论,符合数学习惯,清晰准确。

(2) 模型假设。根据实际对象的特征和建模的目的,对问题进行必要的简化,并用精确的语言提出一些恰当的假设。

(3) 模型建立。在假设的基础上,利用适当的数学工具来寻找各变量、常量之间的数学关系,建立相应的数学结构(尽量用简单的数学工具)。

(4) 模型求解。利用获取的数据资料, 对模型的所有参数做出计算 (或近似计算)。

(5) 模型分析。对所要建立模型的思路进行阐述, 对所得的结果进行数学分析。

(6) 模型检验。将模型分析结果与实际情形进行比较, 以此来验证模型的准确性、合理性和适用性。如果模型与实际较吻合, 则对计算结果给出其实际含义, 并进行解释。如果模型与实际吻合较差, 则应修改假设, 再次重复建模过程。

(7) 模型应用与推广。模型的应用方式因问题的性质和建模的目的而异, 而模型的推广就是在现有模型的基础上, 考虑一个更加全面, 更符合现实情况的模型。

应用数学方法去解决各类工程问题时, 建立数学模型是十分关键的一步, 同时也是十分困难的一步。建立数学模型的过程是把错综复杂的实际问题简化、抽象为合理的数学结构的过程。通过调查、收集数据资料, 观察和研究实际对象的固有特征和内在规律, 抓住问题的主要矛盾, 建立起反映实际问题的数量关系, 然后利用数学的理论和方法去分析和解决问题。这需要深厚扎实的数学基础, 敏锐的洞察力和想象力, 对实际问题的浓厚兴趣和广博的知识面。数学建模是联系数学方法与实际问题的桥梁, 是数学在各个领域广泛应用的媒介, 是科学技术转化的主要途径。数学建模在科学技术发展中的重要作用越来越受到数学界和工程界的普遍重视, 已成为现代科技工作者必备的重要能力之一。

在建立工程问题最优化的数学模型时, 若不考虑加工过程中各种随机扰动对加工过程的影响, 即所建立的最优化数学模型不随时间变化, 则称为静态最优化。本章主要讨论加工过程的静态最优化问题。

2.1.1 生产率目标函数

根据 1.2 节的分析可知, 计算过程中主要考虑单件作业时间, 因此一个工件或一道工序加工时间的主要组成有以下几个。

(1) 机动时间 ($t_{机}$): 有效切削时间。

(2) 准备时间 ($t_{准}$): 包括装卸工件以及进刀、退刀的时间。