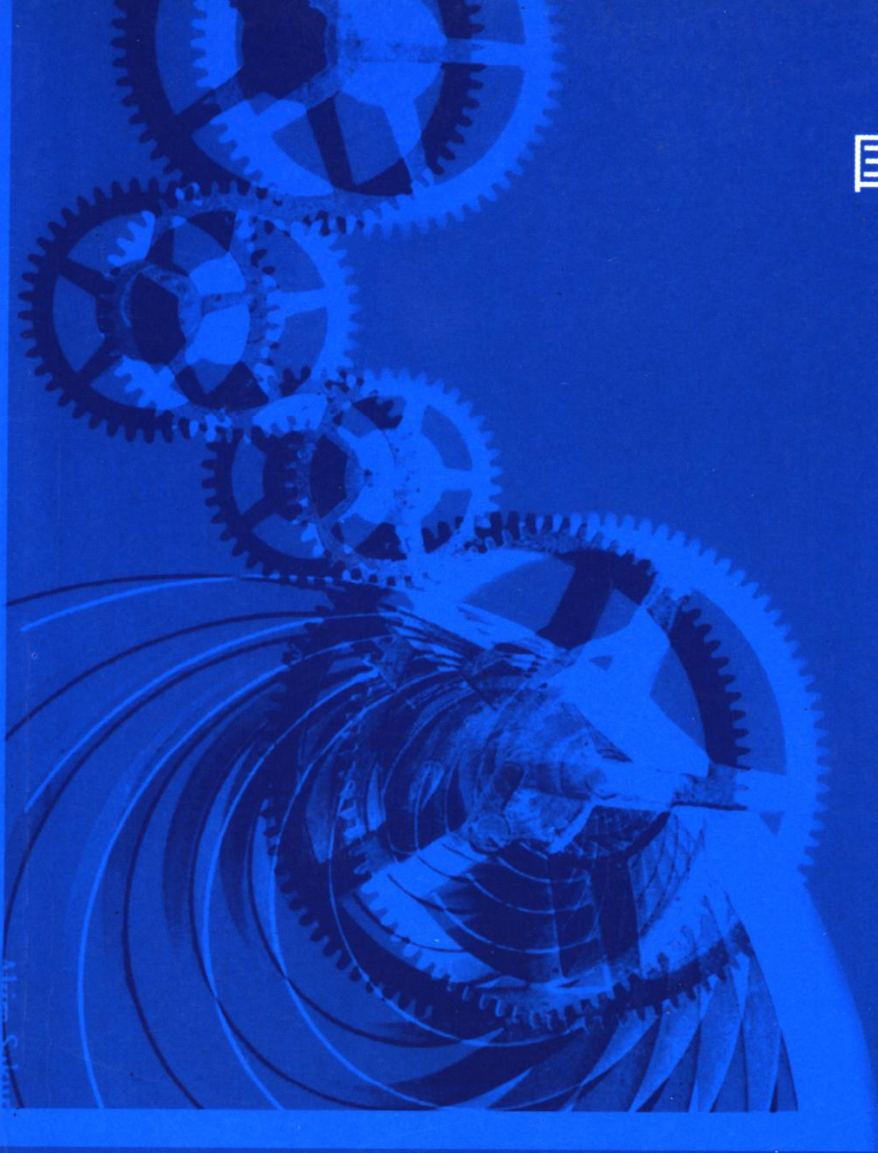


国家自然科学基金项目



机床适应控制系统



刘艳明 编著

02.35

华中科技大学出版社

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

E-mail: hustpp@wuhan.cn gb.com

165

TG502.35
L76

国家自然科学基金项目

机床适应控制系统

刘艳明 编著



华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机床适应控制系统/刘艳明 编著
武汉:华中科技大学出版社, 2002年1月
ISBN 7-5609-2582-0

I. 机…
II. 刘…
III. 机床-自适应控制系统
IV. TG503.5

机床适应控制系统

刘艳明 编著

责任编辑:黄以铭
责任校对:蔡晓瑚

封面设计:秦茹
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社
武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录排:华中科技大学出版社照排室
印刷:荆州市今印印务有限公司

开本:787×960 1/16	印张:15.25	字数:238 000
版次:2002年1月第1版	印次:2002年1月第1次印刷	印数:1—1 000
ISBN 7-5609-2582-0/TG·52		定价:25.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

序

随着生产力的发展,机床加工工件外形越来越复杂,对加工精度和生产率的要求越来越高,因此,要求设计、制造出能够高效地加工外形复杂而精密的工件的机床,而其实现,除要求提高机床本身的精密度外,更为重要的是利用高度自动化的手段,(自)适应控制技术便是这样一种重要的手段。采用这种技术,机床不仅能够在正常设计的条件下,实现复杂外形工件的高精度、高效率的自动加工,而且在某些不确定因素影响下和在出现某些偶然的不正常情况下,仍能自动调整控制规律,使加工顺利完成。因此,这是当前机床设计、制造需要广泛采用的一种技术。

适应控制的理论并非新事物,它的出现和发展已有 50 年以上的历史。国内、外有关的著作也不鲜见。但是由于利用它进行控制时,需要复杂的运算,故其实现,只是在出现具有高速运算能力的计算机之后,才有了可能。近年来优质、价廉、体积小的微型计算机的迅猛发展,更为在快速、复杂加工的机床上实现这种控制技术创造了条件,并得到迅速的发展,现在已成功地研制出一些机床的适应控制系统,在生产中实际使用,一些性能更加完美的新的适应控制技术和系统还在研究之中。遗憾的是,有关的报道,目前只散见于各种中、外期刊、文献之中,缺少一本能集中、系统地反映适应控制技术和系统的书籍,供参考和学习之用。

本书作者刘艳明博士是一位具有深厚理论根底的硕学之士。他长期从事(自)适应控制理论和机床适应控制技术与系统的研究。他的博士论文、博士后所做课题以及在德国、美国的先进技术环境下多年的研究工作,都是围绕这一方面进行的,因此,有深厚的学术造诣和丰富的实际经验。为了在国内促进这项先进技术的应用和科研工作的开展,他在广泛搜集国内、外有关资料、文献的基础上,结合自己从事研究工作的成果,编写成了《机床适应控制系统》这本专著。书中内容包括了适应控制必不可少的耳目——反映机床加工过程中各种状态的传感器,比较成熟并已实际用于生产的机床适应控制技术与系统,十分有应用前景还处于研究阶段的技术与系统等。本书较好地反映了当前机床适应控制的概况和水平,内容丰富新颖,论述详明,行文流畅,适用于自动化技术研究人员、机床及复杂加工机械的控制系统的设计者和有关专业的大学

生、研究生的学习和参考之用。由于机械加工行业在国民经济中占有十分重要的地位,相信本书在新世纪中对发展我国经济能发挥作用。

陈锦江 谨识

2001 年 7 月于华中科技大学

前 言

机床自适应控制的基本目标之一是提高加工效率,其效果在粗加工过程的自适应控制中表现尤为明显。传统数控系统在编程时为避免加工故障往往选择保守的加工参数,从而限制了加工效率。然而,对于机床自适应控制系统,编程时可根据机床最大能力设定约束变量值,在加工过程中自动调节加工参数,以维持最大加工效率。

机床自适应控制的另一基本目标是提高产品质量,其效果在精加工过程的自适应控制中表现尤为明显。传统数控系统在编程时只能根据经验和知识选择刀具运动轨迹,当刀具磨损或机床发生热变形时便无法保证加工质量。然而,对于机床自适应控制系统,则可根据加工精度要求,在加工过程中自动调节加工参数,以保证加工质量。

机床自适应控制的最终目标是提高经济效益,其不仅体现在加工效率上,同时还体现在编程和操作人员对机床加工的经验 and 知识上。由于机床自适应控制系统在加工过程中可自动调节加工参数,所以,减轻了编程人员的劳动量和减少了操作人员的干预,缩短了编程时间和减少了操作步骤,其效果在复杂零件加工过程的自适应控制中表现尤为明显。

机床加工过程自适应控制已有 30 余年的历史,不过直至近几年来由于检测技术、控制技术和计算机技术的迅速发展,才使机床适应控制系统具有了强大的生命力。为推动机床适应控制系统的广泛应用和迎接机床加工控制系统的变革,本书率先采用系统论的观点和方法,从机床加工系统检测到信号处理、系统建模到适应控制、系统设计到实现,对机床适应控制系统进行了全面的论述。同时汇集了本人及国内外的最新研究成果和资料,全书的基本内容如下:

第 1 章为绪论,概述了机床适应控制的概念及分类,分析了机床适应控制的机能及意义,综述了机床适应控制的发展及应用;

第 2 章介绍了机床加工系统检测及信号处理方法,包括机床加工过程变量检测,刀具磨、破损检测,加工工件精度检测,机床加工状况检测及其信号处理;

第 3 章探讨了机床加工系统模型及其建立方法,包括切削力、力矩和功率

模型,机床加工优化模型,刀具磨损模型和机床加工精度模型;

第4章阐述了机床约束适应控制策略,包括典型反馈适应控制,参数适应控制,模型参考适应控制,变结构适应控制,神经网络适应控制以及模糊适应控制;

第5章讨论了机床加工参数优化方法,包括拉格朗日优化,几何规划,可行方向搜索优化,神经网络优化和遗传算法优化;

第6章给出了机床最优适应控制策略,包括典型机床最优适应控制,基于刀具磨损机理自然约束的最优适应控制,基于模型最优适应控制,基于神经网络的最优适应控制,遗传算法和神经网络融合型最优适应控制以及基于知识的专家最优适应控制;

第7章论述了机床几何适应控制策略,包括典型立铣几何适应控制,加工工件表面精度自校正控制,加工工件平直度几何自适应控制,多轴机床轮廓精度的模型参考自适应控制,加工工件圆型误差在线比例-积分学习控制,基于模型的加工精度预测控制以及多维切削力和轮廓误差的神经网络控制;

第8章研究了机床适应控制系统的基本构成和实现方法,包括基于Multibus-I的机床适应数控系统和基于ISA的机床适应数控系统。

华中科技大学的陈锦江教授详细地审阅了全书,王昶教授悉心地校正了全书,借此机会表达我诚挚的感谢。我在从事机床适应控制的研究工作期间得到了国家自然科学基金、国家教委优秀年轻教师基金、国家教委留学回国人员基金、国家博士后基金、武汉市晨光计划和华中科技大学青年教师基金等项目的资助,在此谨表示衷心的感谢。感谢华中科技大学信息与智能工程研究所诸位同仁的热情支持和项目组各位研究生的帮助。感谢华中科技大学出版社的大力支持和辛勤劳动。

限于著者的学识水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正。

作者 刘艳明

2001年6月于美国

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 机床适应控制概念及分类	(1)
1.2 机床适应控制机能及意义	(4)
1.3 机床适应控制系统的发展及应用	(6)
1.3.1 机床适应控制系统的产生	(6)
1.3.2 机床适应控制策略的发展	(10)
1.3.3 机床适应控制系统的应用	(12)
1.3.4 机床智能控制系统的展望	(14)
第 2 章 机床加工系统变量的检测及信号处理	(16)
2.1 加工过程变量检测	(17)
2.1.1 切削力检测	(17)
2.1.2 切削温度检测	(18)
2.1.3 切削功率和电流检测	(20)
2.2 刀具磨、破损检测及信号处理	(22)
2.2.1 AE 传感器检测及信号处理	(22)
2.2.2 加速度传感器检测及信号处理	(24)
2.2.3 位移传感器检测及信号处理	(26)
2.2.4 切削声音传感器检测及信号处理	(28)
2.2.5 光学图像传感器检测及信号处理	(30)
2.2.6 放射性同位素传感器检测及信号处理	(32)
2.3 加工工件精度检测	(33)
2.3.1 表面粗糙度检测	(33)
2.3.2 尺寸形状检测	(36)
2.4 机床加工状况检测	(40)
2.4.1 振动和切屑检测	(40)
2.4.2 机床热变形检测	(43)

第 3 章 机床加工系统模型	(46)
3.1 力、力矩和功率模型	(46)
3.1.1 切削力经验模型及其单因素回归分析方法	(46)
3.1.2 切削力稳态模型参数的实时估计方法	(48)
3.1.3 切削力动态模型参数的在线最小二乘递归估计方法	(50)
3.1.4 切削力滤波模型参数的在线递归估计方法	(51)
3.1.5 切削力随机模型参数的在线递归估计方法	(53)
3.1.6 切削力非线性模型的在线神经网络辨识方法	(54)
3.1.7 切削力矩和功率模型	(55)
3.1.8 磨削力和功率模型	(56)
3.2 机床加工优化模型	(56)
3.2.1 目标函数	(56)
3.2.2 约束函数	(58)
3.2.3 优化模型	(60)
3.3 刀具磨损模型	(61)
3.3.1 变切削条件下的后刀面磨损估计	(62)
3.3.2 基于主轴转速变化的后刀面磨损预测	(66)
3.3.3 基于力检测和非线性观测器的在线后刀面磨损估计	(67)
3.3.4 基于自适应观测器的在线后刀面磨损估计	(70)
3.3.5 基于自适应观测器的在线刀具磨损估计	(72)
3.3.6 基于神经网络的鲁棒刀具磨损估计	(74)
3.4 机床加工精度模型	(78)
3.4.1 加工精度回归分析模型	(78)
3.4.2 加工精度递归估计模型	(79)
3.4.3 加工精度神经网络模型	(80)
第 4 章 机床约束适应控制	(82)
4.1 反馈适应控制	(82)
4.1.1 PID 控制策略	(82)
4.1.2 车削力积分控制系统	(83)
4.2 参数适应控制	(86)
4.2.1 参数适应控制结构	(86)

4.2.2 铣削力参数适应控制系统	(87)
4.3 模型参考适应控制	(90)
4.3.1 模型参考适应控制结构	(90)
4.3.2 铣削力模型参考适应控制系统	(90)
4.4 变结构适应控制	(92)
4.4.1 变结构适应控制策略	(93)
4.4.2 车削力变结构适应控制系统	(94)
4.5 神经网络适应控制	(97)
4.5.1 神经网络控制原理	(97)
4.5.2 铣削力神经网络直接控制系统	(98)
4.6 模糊适应控制	(100)
4.6.1 模糊控制原理	(100)
4.6.2 铣削力模糊控制系统	(101)
第5章 机床加工参数优化	(103)
5.1 机床加工参数拉格朗日优化	(103)
5.1.1 拉格朗日优化算法	(103)
5.1.2 车削参数拉格朗日优化算例	(104)
5.2 机床加工参数几何规划	(106)
5.2.1 几何规划算法	(106)
5.2.2 车削参数几何规划算例	(107)
5.3 机床加工参数可行方向搜索优化	(110)
5.3.1 可行方向搜索优化原理	(110)
5.3.2 铣削参数可行方向搜索优化算例	(111)
5.4 机床加工参数神经网络非线性规划	(113)
5.4.1 K-L 神经网络非线性规划	(113)
5.4.2 车削参数的 K-L 神经网络非线性优化算例	(115)
5.5 机床加工参数时变递归神经网络优化	(117)
5.5.1 时变递归神经网络	(117)
5.5.2 车削参数时变递归神经网络优化算例	(118)
5.6 机床加工参数增广拉格朗日乘子型神经网络优化	(118)
5.6.1 增广拉格朗日乘子型神经网络优化	(118)
5.6.2 铣削参数增广拉格朗日乘子型神经网络优化算例	(119)

5.7 机床加工参数遗传算法优化	(120)
5.7.1 遗传算法优化	(120)
5.7.2 铣削参数遗传算法优化算例	(122)
5.8 机床加工参数变搜索域遗传算法优化	(123)
5.8.1 变搜索域遗传算法优化	(123)
5.8.2 铣削参数变搜索域遗传算法优化算例	(125)
第6章 机床最优适应控制	(126)
6.1 典型机床最优适应控制系统	(126)
6.1.1 典型机床适应控制系统结构	(126)
6.1.2 铣削过程	(127)
6.1.3 优化理论	(128)
6.1.4 自适应控制器设计	(129)
6.2 基于刀具磨损机理自然约束的最优适应控制	(130)
6.2.1 刀具磨损机理自然约束	(130)
6.2.2 最优控制模型	(132)
6.3 基于模型的铣削最优适应控制	(132)
6.3.1 刀尖温度参数辨识和计算	(133)
6.3.2 刀具磨损模型	(136)
6.3.3 适应控制	(136)
6.4 基于神经网络的机床最优适应控制	(136)
6.4.1 车削加工过程的神经网络最优控制	(136)
6.4.2 铣削加工过程的神经网络最优控制	(140)
6.5 遗传算法和神经网络融合型机床最优适应控制	(145)
6.5.1 加工过程神经网络在线辨识	(145)
6.5.2 加工过程遗传算法最优控制	(146)
6.5.3 铣削加工过程最优控制实验	(147)
6.6 基于知识的机床专家最优适应控制系统	(148)
6.6.1 系统辨识和自适应建模	(148)
6.6.2 最优控制策略	(149)
6.6.3 铣削最优控制系统	(149)

第 7 章 机床几何适应控制	(151)
7.1 典型立铣几何适应控制	(151)
7.1.1 刀具偏移模型和递归参数估计	(151)
7.1.2 几何适应控制	(152)
7.1.3 立铣几何适应控制实验	(153)
7.2 立铣表面精度自校正控制	(156)
7.2.1 立铣过程状态空间模型	(156)
7.2.2 基于零极点配置的状态反馈	(158)
7.2.3 铣削几何适应控制仿真	(159)
7.3 立铣平直度几何自适应控制	(161)
7.3.1 加工误差和偏移模型	(161)
7.3.2 导轨误差跟踪控制	(164)
7.3.3 立铣几何适应控制实验	(165)
7.4 多轴机床轮廓精度的模型参考自适应控制	(168)
7.4.1 交叉耦合控制	(168)
7.4.2 模型参考自适应控制	(170)
7.4.3 应用实验	(173)
7.5 圆型误差在线比例-积分学习控制	(176)
7.5.1 学习控制器	(176)
7.5.2 实验	(178)
7.6 基于模型的车削精度预测控制	(179)
7.6.1 加工系统的机械学模型	(179)
7.6.2 卡尔曼滤波和状态预测	(182)
7.6.3 控制器设计	(184)
7.6.4 系统性能评估	(185)
7.7 多维铣削力和轮廓误差的神经网络控制	(187)
7.7.1 神经网络控制结构	(187)
7.7.2 实验	(189)
第 8 章 机床适应控制系统	(193)
8.1 基于 Multibus-I 的机床适应数控系统	(193)
8.1.1 基于 Multibus-I 的机床适应数控系统结构	(193)

8.1.2 机床适应数控操作系统	(204)
8.2 基于 ISA 的机床适应数控系统	(214)
8.2.1 基于 ISA 的机床适应数控系统结构	(214)
8.2.2 自适应控制卡	(218)
8.2.3 自适应数控系统软件	(222)
参考文献	(225)

第 1 章 绪 论

1.1 机床适应控制概念及分类

机床自诞生之日起,其技术革新的基本目标之一是高效率和高精度。机床数控技术的产生和发展虽然使机床效率和加工精度得到显著提高,但是并没有从本质上解决机床的效率和精度问题。如图 1-1 所示,传统的机床数控系统实质上是半闭环控制系统,系统只是在伺服单元内具有位置和速度反馈环节,只能通过电机位置和速度的检测和控制使机床按期望运动轨迹和速度运行。并且其期望运动轨迹和速度是编程时由预先给定的加工参数确定的,它取决于编程人员对工件和刀具材料、冷却效果和机床特征等的经验和知识。所以,编程人员对加工参数的选取直接影响产品尺寸精度、表面粗糙度、金属切削率、刀具磨损率和刀具破损等,最终影响到机床效率和产品质量。为了保证生产安全和避免加工故障,编程人员往往按最坏的极端情况(实际上很少发生)选取保守不变的加工参数。然而,实际加工过程是复杂多变的,加工效率和精度不仅与伺服单元的位置和速度有关,而且受加工状态和外界干扰等因素的影响。这些因素主要有工件材质不均、刀具磨损和变形、机床热变形等,编程人员无法预先考虑这些过程因素的影响,而机床适应控制技术则是考虑加工过程因素,从本质上探索生产率和产品质量问题。

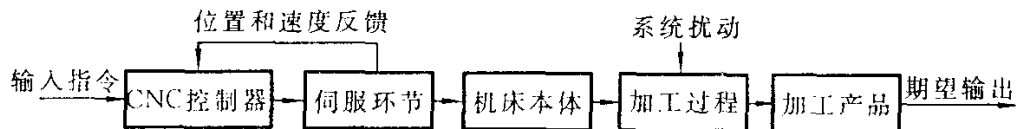


图 1-1 机床数控系统

机床适应控制系统是全闭环控制系统,如图 1-2 所示,它除了电机位置、速度的检测和控制外,主要通过机床加工过程变量(切削力、转矩、功率、刀具磨损、尺寸精度和表面粗糙度等)的在线检测和实时控制来调节加工参数(切削速度、进给量等),所以,能够消除加工过程中机床状态变化和外界扰动的影

响,以优化整个机床加工过程(经济性能、生产率和产品质量)。

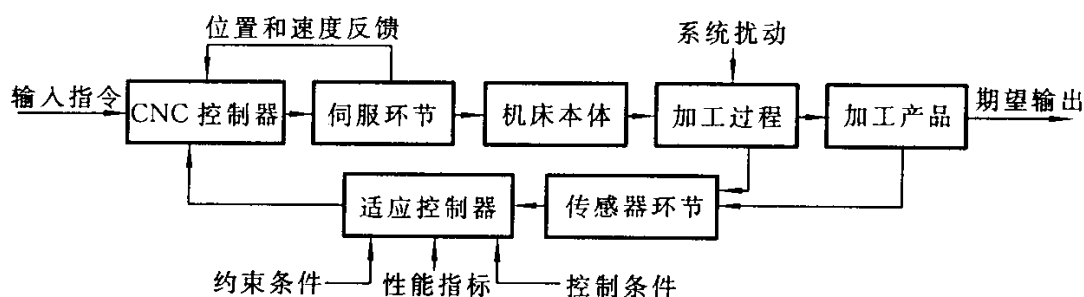


图 1-2 机床适应控制系统

适应控制的概念是由 C. S. Draper 和 Y. T. Li 于 1951 年在“最佳化控制原理以及对内燃机的应用”一文中首先提出的^[1]。至今虽有 50 余年的发展,但还没有统一的定义。在自动控制界一般认为:适应控制系统的特点是在不能预知的随机变化环境中能够针对给定的系统运行指标(目标函数)、连续地监测系统的运行状态,并能以闭环方式自动地校正系统的可调参数,使系统达到最佳状态。然而在机械制造领域内,却普遍采用一种更为广义的适应控制概念,即凡能测量实际加工过程的特性值,并能利用测量结果来校正控制器输出值的系统便视为是适应控制系统。如图 1-2 所示,机床适应控制系统实际上是一过程控制系统,通常基于实际加工状态变量的测量,采用相应控制策略对加工参数进行自动调整以提高生产效率和产品质量。根据不同的传感器、控制策略和目标,机床界一般认为机床适应控制分为三类^[2]:

(1) 最优适应控制(ACO,即 Adaptive control with optimization)。最优适应控制通常以经济性能为运行指标,通过在线测量和控制对切削过程进行优化。如图 1-3 所示,最优适应控制系统由控制器、机床加工、性能计算和优化计算环节组成,在控制过程中,选定能够表征该运行指标的评价函数,再基于

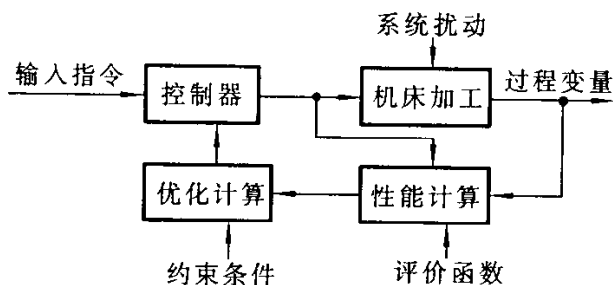


图 1-3 最优适应控制

机床状态的在线检测实时计算性能评价函数,并在约束条件下通过优化计算策略校正可调参数(切削速度、进给量等),以使性能评价函数尽快达到并维持最优。

(2) 约束适应控制(ACC,即 Adaptive control with constraints)。约束适应控制通常以生产率为运行指标,通过在线测量和控制对切削过程进行优化。如图 1-4 所示,约束适应控制系统由控制器、机床加工和适应计算环节组成,在控制过程中,对能够表征该运行指标的物理参数(切削力、功率等)确定其约束值,再基于机床状态的在线检测,并在约束条件下通过适应计算策略实时校正可调参数(切削速度、进给量等),以使机床状态尽快达到并维持在约束值状态。

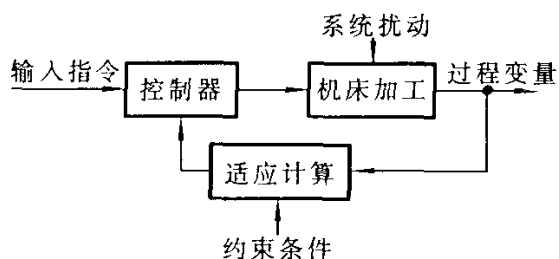


图 1-4 约束适应控制

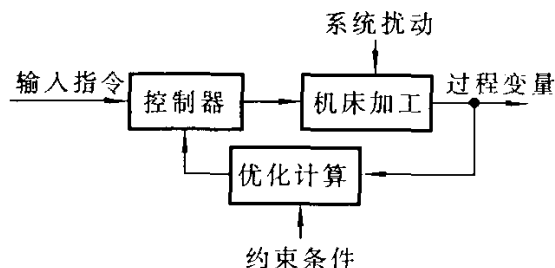


图 1-5 几何适应控制

(3) 几何适应控制(GAC,即 Geometric adaptive control)。几何适应控制通常以产品精度为运行指标,通过在线测量和控制对切削过程进行优化。如图 1-5 所示,几何适应控制系统由控制器、机床加工和优化计算环节组成,在控制过程中,选定能够表征该运行指标的物理参数(尺寸精度、表面粗糙度等),再基于机床状态的在线检测,并在约束条件下通过优化计算策略实时校正可调参数(切削速度、进给量等),以使产品的加工精度尽快达到并维持在期望精度。

在上述三种不同类型的机床适应控制中,虽然最优适应控制具有普遍意义,但由于最优适应控制系统比其他两种适应控制系统难于实现,所以,作为子最优适应控制系统的约束适应控制系统和几何适应控制系统的应用更为广泛,其中,约束适应控制系统主要用于粗加工过程,几何适应控制系统主要用于精加工过程。然而由于三种适应控制具有共同的特点,即都是追求某一最优(全局或局部)目标的反馈控制,因此,都具有以下三个要素:

(1) 检测要素,通过过程变量的检测获取有关机床加工状态、运行特性和条件变化的信息,并把这些信息从各种干扰中提取出来变换成所需的反馈信息;

(2) 决策要素,将反馈信息、输入指令和期望性能指标进行综合计算和评

估,并在约束条件下对控制量作出修改决定;

(3) 校正要素,将上述修改决定通过数控装置调节加工参数,以改变机床工作特性和维持最优工作状态。

1.2 机床适应控制机能及意义

机床适应控制主要通过加工过程变量的在线检测来实时调整加工参数(切削速度、进给量)以适应加工过程状态的变化。其适应能力主要包括:

- (1) 轮廓和仿形加工中变切深和变切宽引起的切削形状变化;
- (2) 工件硬度和可加工性变化引起的刀具破损;
- (3) 工件刚度变化引起的加工精度变差;
- (4) 刀具磨损引起的机床负荷增大;
- (5) 空切引起的机床效率降低。

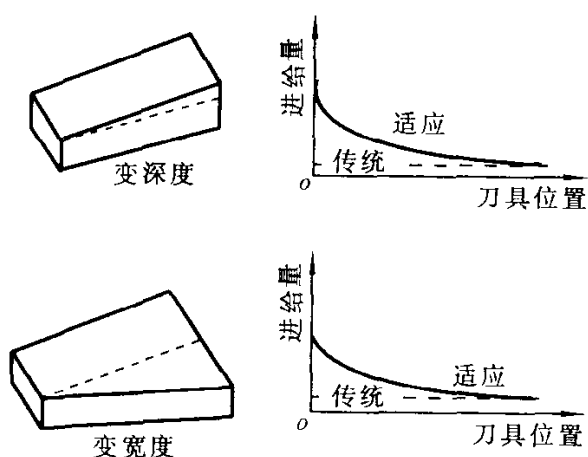


图 1-6 铣床传统数控系统与适应控制系统的进给量比较

机床适应控制能力的开发最终还是归结为对生产率和产品质量等基本目标的追求,并产生巨大的经济效益。其中,通过增加金属切除率以提高生产率是机床适应控制的基本目标之一,其效果在约束适应控制的粗加工过程中表现得尤为明显。图 1-6 给出了一铣削深度和宽度变化时,传统数控系统与适应控制系统的进给量对比情况。在传统数控系统中,编程时为适合最大的铣削深度和宽度,只能选择最小的进给量,并贯穿于整个铣削过程。然而,在约束

适应控制系统中,编程时则考虑机床的最大能力(如切削力等)设定约束变量值,在铣削过程中进给量可根据铣削深度和宽度变化进行最大调节以维持最大的切除率。根据加工材料种类和零件复杂程度的不同,适应控制系统的生产率比传统数控系统可提高 20%~80%^[1,7]。表 1-1 给出了三种不同材料工件在传统数控系统与适应控制系统中切削时间的对比情况。

提高产品质量是机床适应控制的另一基本目标,主要体现在精加工过程的几何适应控制系统中。传统数控系统在编程时根据经验和知识预先确定刀具的运动轨迹,当刀具磨损或机床发生热变形时,便无法保证产品质量。然而,