

〔苏〕 Б.С.巴拉克辛 主编

АДАПТИВНОЕ

УПРАВЛЕНИЕ СТАНКАМИ

机床的适应控制

机械工业出版社

机床的适应控制

〔苏〕 B.C. 巴拉克辛 主编

李锐锋 译

马开疆 谭汝谋 校



机械工业出版社

本书阐述了通过自动控制(适应控制)工艺过程来提高金属切削机床的加工精度和生产率的问题;叙述了对加工工艺过程实行适应控制的理论基础和适应控制系统的设计计算方法;讨论了由加工一种尺寸规格的工件过渡到加工另一种尺寸规格的工件时,按照优化加工过程的精度参数对机床—夹具—刀具—工件系统进行自动重新调整的问题。文中介绍了装有弹性位移和其它因素的自动控制系统、准确地自动重新调整的系统和优化系统的机床,并介绍了这些系统的应用范围及其效果。

本书适合于机械制造厂和科学研究所的工程技术人员阅读。对高等院校的教师、学生亦不无裨益。

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТАНКАМИ

Под Ред. Б.С.Блакшин

Издательство «Машиностроение», 1973г.

* * *

机床的适应控制

[苏] Б.С.巴拉克辛 主编

李锐锋 译

马开疆 谭汝谋 校

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $26 \frac{1}{2}$ · 字数 652 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—5,400 · 定价 5.45 元

*

统一书号: 15033·5757

校 者 序

自机床诞生之日起,其技术革新的基本目标即是高效率与高精度。对于这两个貌似矛盾的目标,过去多是孤立地达到的,有取有舍。直到适应控制机床研制成功后,这两项指标才在机床上得到兼顾,取得最佳的加工效果。

到目前为止,机床技术的发展大致经历了五个阶段,即手工阶段,机械化阶段,自动化阶段,最佳化阶段和系统化阶段。它们的主要区别,表现为加工工艺过程中人与机器的分工与取代。如在动力来源、工艺过程控制数据的输入和对工艺过程控制数据的适应修正等三个方面,人和机器的功能划分随技术的发展而逐渐发生变化。在手工阶段,生产是以人力为动力的,所有控制信息都由人输入给工艺过程,并根据实际生产情况的变化而及时修正这些输入。到了机械化阶段,机器动力取代了人力。因为这时通过机器放大了人的操作力,所以劳动强度大为降低。但所有控制数据还是靠人来输入和修正的。自动化则是由事先向机床输入固定的操作程序代替了人的临床操作。最佳化技术进一步利用机器来完成根据实际加工环境的变化而及时修正操作程序的任务,从而可以经常充分地发挥机床—夹具—刀具—工件系统的潜力,最佳地达到保证产品质量、提高生产率和降低成本的目的。系统化标志着制造技术的更高级发展,它是在单台机床自动化与最佳化的基础上,把一组完成共同生产任务的机床群组成一个统一的系统,机器不仅完成各台机床之间的信息处理与交换,而且各工序间的物料流(毛坯、工件与工夹具等的传送、存贮)甚至也由机器自动控制与传递。

最佳化生产是人们长期以来的理想。适应控制机床的出现,已使之开始成为现实。当前,美国和苏联在适应控制机床的研究和实用方面,已居于领先地位。其次是日本和西德,它们也一直在进行系统的研究和产品的研制工作。就技术来讲,某些类型的适应控制(约束适应控制)机床已经进入实用阶段,尽管在技术上还有许多问题急待解决,在经济合理性上还有许多疑问,但作为技术发展方向,其前景却是十分肯定的。如国际生产技术研究学会(CIRP)1971年所作技术预测指出,1985年最佳适应控制技术将得到发展和广泛应用。美国制造工程师协会(SME)1977年的技术预测认为,1985年将有20%的磨床采用磨削效率、表面光洁度及精度的适应控制系统,1986年最佳适应控制的电火花与电解加工机床将得到发展和广泛应用。人们重视研究适应控制技术,并不只是由于受到它所显示的突出的技术效果的引诱,更为其有待开发的巨大技术经济潜力所驱使。

适应控制的概念是1951年首先在C.S.Draper和Y.T.Li合写的题为《最佳化控制原理以及对内燃机的应用》论文中提出的。但是,自动控制界在经过多年实践与探讨后,才逐渐明确了它的定义与分类。一般认为,适应控制系统的特点是在不能预知的随机变化的环境中,能够针对给定的运行指标(或评价指标)连续地监测系统的运行状态,并能以闭环方式自动校正系统的可调参数,使系统达到最佳状态。运行指标的值要在变化的环境中连续计算确定,这也就是自适应控制系统。然而,在机械制造领域内,却已普遍接受了一种广义的适应控制概念,即“凡能测量实际加工过程的特性值,并将利用其测量结果来校正控制器的输入值的系统,就是适应控制。”根据这一概念,在国际机床技术界,一般认为机床的适应控制有三种:(1)约束适应控制,简称ACC(Adaptive Control Constraint);(2)最佳适

应控制, 简称 ACO(Adaptive Control Optimization); (3) 学习适应控制 (Trainable Adaptive Control)。

约束适应控制是针对某一运行指标(如精度、生产率), 根据事前的经验, 对一个或几个可以表征该指标的物理过程参数(如切削功率、切削力、扭矩或切削变形等)规定出其约束值, 作为控制过程所追求的最佳值。在控制过程中, 不断将实测值与此约束值进行比较, 并及时改变可调参数(如进给量、切削速度等), 力求使实际过程参数值接近此约束值, 但不能超过它, 依此实现最佳控制。

最佳适应控制是依一个由若干过程参量构成的评价函数(如生产成本方程式)进行工作的。该评价函数是事先根据试验得出的。在控制过程中, 不断按此计算出瞬时评价指标值(如成本), 并以选定的优化法则(如最大陡度法)来校正可调参数, 使该评价函数尽可能快地达到一个理论最佳数值(如最低成本)。

学习适应控制具有从过去的经验中进行学习的机能, 因此与最佳适应控制系统相比, 它有一个长期存贮器, 将在现实加工环境中历次按某一事先规定的评价函数控制所得实测结果存贮起来, 对其进行比较分析, 并据此对以前的评价函数进行修正, 使之更符合于该现实加工环境而成为进一步优化的基础。

从理论上讲, 学习适应控制与最佳适应控制都比约束适应控制有更好的技术效果。但由于需要测量的参数多, 算法复杂, 不仅技术困难大, 而且投资也大, 目前还很不成熟, 只有屈指可数的几个样机在试验中。相反, 虽然约束适应控制的效果较之略差, 但是近年来对此所进行的研究最为广泛深刻, 目前在生产中实际使用的适应控制机床多属此类, 它们多是用于工件形状复杂, 要求精度高, 加工工时长, 机床、刀具和工件材料费很高的加工场合。这时采用约束适应控制可以收到最好的技术经济效果, 它不仅可以用较少的投资达到高效率、高精度的生产要求, 而且还可以防止因过载而损坏机床、刀具或工件。因此, 约束适应控制机床在未来相当长的时间内, 都是一种实用、有效的新型设备。

B. C. 巴拉克辛教授主编的这本《机床的适应控制》, 正是以约束适应为主要对象的。本书的主要撰写人由于研制这种新型适应控制机床在理论与实践方面所作贡献而荣获了1972年列宁奖金。本书就是在这些工作的基础上编写的, 它以尺寸链理论为基础, 广泛地讨论了误差形成的机理, 并详细地介绍了为此所建立的数学模型。这不仅为研制适应控制机床提供了理论基础, 同时对于研究一般机械加工精度理论时, 也可从中得到理论指导。约束值的选择是约束适应控制关键之一。本书从优化理论到优值的计算都作了应有的介绍, 对于切削数据的优化, 提供了基本概念和方法。更可贵的是, 本书以较大的篇幅引用较多实例介绍了各种可解的适应控制方案及它们的试验结果, 在这个基础上, 又讨论了适应控制系统的设计问题。这些经验对开展约束适应控制的研究和设计, 都有参考价值。尽管这本书是1973年出版的, 但因上述特点, 它仍不失为当前有关机床适应控制的重要著作之一, 尤其是对适应控制的硬件技术来说, 更是如此。

这是一本由十多人合写的书, 在有些章节中难免出现内容重复的弊病。另外, 原书也有多处撰写及印刷错误, 我们尽量做了校正与注明。绪论至第四章是由我校订的, 第五章至第九章由谭汝谋同志校订。由于我们水平有限, 难免仍有许多错误, 欢迎读者指正。

马开疆

目 录

校者序

绪论 (B. C. 巴拉克辛) 1

第一章 零件的质量和加工生产率 29

第一节 机器零件的质量 (И. М. 巴拉钦柯夫) 29

第二节 形成零件加工误差的原因 (B. M. 巴兹罗夫) 32

一、误差形成机理的数学描述 40

二、加工误差形成机理的数学模型 61

第三节 丧失机床加工生产率的原因 (B. M. 巴兹罗夫) 78

第二章 达到要求的零件质量和加工生产率的现代方法 (B. A. 麦德维杰夫) 84

第三章 为提高精度和生产率面对工艺过程的控制 95

第一节 在机床上加工工件时工艺过程信息的获得 (B. A. 季米里亚齐夫) 95

第二节 提高加工精度和生产率的两条新途径 110

一、通过校正静态调整尺寸控制弹性位移 (B. A. 季米里亚齐夫) 110

二、通过校正动态调整尺寸控制弹性位移 (B. M. 巴兹罗夫) 115

三、通过校正静态和动态调整尺寸来控制弹性位移 (B. A. 季米里亚齐夫) 127

第三节 通过控制机床—夹具—刀具—工件系统的弹性位移来提高工件的加工精度 (B. M. 巴兹罗夫) 132

第四节 通过控制机床—夹具—刀具—工件系统的弹性位移提高工件的加工生产率 (B. A. 季米里亚齐夫) 147

第四章 为提高加工精度和加工生产率而对其它因素的控制 153

第一节 对机床—夹具—刀具—工件系统的热变形的控制 (Ю. М. 索洛维采夫) 153

一、导致静态调整尺寸发生变化的工艺系统各零部件的热变形 154

二、导致动态调整尺寸发生变化的工艺系统各零部件的热变形 158

三、工件的热变形及其产生的原因 162

四、选择用以补偿机床—夹具—刀具—工件系统热变形所引起的误差的被控制值和控制参数 163

第二节 对工件在机床上的安装过程的控制 (Ю. М. 索洛维采夫) 168

第三节 对工件表面粗糙度的控制 (Ю. М. 索洛维采夫, B. И. 沃罗年科) 174

第四节 对切削刀具的磨损的控制 (Ю. М. 索洛维采夫, B. И. 沃罗年科) 177

一、影响刀具磨损的因素 177

二、刀具的磨损同工件的质量、加工生产率和加工成本的关系 180

三、获得切削刀具磨损信息的方法 181

四、控制切削刀具磨损的手段 183

第五节 对表层质量的控制 (Ю. М. 索洛维采夫) 185

第五章 工件规格尺寸变动时对机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸重新调整的控制 189

第一节 对机床—夹具—刀具—工件系统尺寸重新调整所要解决的问题 (Ю. М. 索洛维采夫) 189

第二节 机床—夹具—刀具—工件系统的工作调整尺寸和尺寸调整、补充调整及重新调整的

合理公差的计算(Ю. М. 索洛缅采夫)	19
第三节 重新调整数控机床时所产生的静态和动态调整尺寸误差(В. А. 季米里亚齐夫)	197
第四节 实现机床—夹具—刀具—工件系统尺寸重新调整自动化的方法和手段的选择 (Ю. М. 索洛缅采夫)	209
一、测量支承工件的机床基准、刀具和程序载体的相对位置的必要性	209
二、控制机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸重新调整过程的方法与手段	214
第五节 机床—夹具—刀具—工件系统重新调整的自动化(Ю. М. 索洛缅采夫)	218
第六章 工件加工工艺过程的工序优化(Ю. М. 索洛缅采夫)	222
第一节 工艺过程的工序优化的任务、标准、数学保证与算法	222
第二节 计算最佳加工规范的方法	239
第三节 实现工艺过程的工序优化的手段和方法	249
第七章 研制适应控制系统的问题	255
第一节 适应控制系统及描述与分析被控制的工艺系统的一些一般问题(С. П. 普罗托波波夫)	255
第二节 工件加工工艺过程各项指标的测量方法(С. П. 普罗托波波夫)	266
第三节 设计自动控制系统时, 信息源和测量装置安装位置的选择(В. М. 巴兹罗夫)	272
第四节 适应控制系统的计算方法(В. Г. 米特洛法诺夫)	285
一、控制对象(工艺过程)和控制系统数学模型的建立	285
二、适应控制系统的静态和动态计算	304
三、弹性位移自动控制系统的研制实例	321
第八章 自动补充调整的机床及其效果	323
第一节 装有弹性位移量自动控制系统的机床(В. М. 巴兹罗夫, В. А. 季米里亚齐夫)	323
第二节 装有按精度参数进行调整的自动重新调整系统的机床(Ю. М. 索洛缅采夫)	369
第三节 装有多维控制系统的机床(Ю. М. 索洛缅采夫)	379
第九章 控制机床加工工艺过程的发展前景	384
第一节 工艺过程的精度控制方法和手段的发展前景(И. М. 科列索夫, В. А. 叶维谢耶夫, Ю. С. 奥萨德奇)	384
第二节 通过控制工件工艺基准和刀具切削刃的相对运动来提高旋转体类工件的加工精度的 方法(В. М. 巴兹罗夫)	400
参考文献	413
分类索引	416

绪 论

产品制造的每一个工艺过程的基本任务，就是要在成本最低和各种原材料消耗最少的前提下保证产品的质量。人们从现代产品的应用功能出发，对提高其质量，特别是提高其中的精度指标，提出了越来越多的要求。精度不仅是产品直接完成其应用功能的必要条件，而且也是保证它长期使用的一个前提。为此，就要在产品中建立所谓的“精度储备”，借以补偿产品在使用过程所产生的物理磨损。

在工艺过程的每一道工序中提高工件的制造精度，都会因其加工余量的偏差较小而显著地提高下一道工序的生产率。整个产品的精度及其在使用过程中的保持性，在极大程度上取决于构成产品的每个零件的质量。用以表征零件质量的指标有：精度、材料的物理机械性能和材料的表层状态以及其它许多指标。

通常用下列几种指标来表征每个零件的精度：零件各表面或其母线上两点之间的距离（尺寸精度）；零件的一些表面相对于选作基准的其它表面的相对偏转；外形尺寸范围内的表面形状；10毫米长度范围内的表面形状（波度）；1平方毫米范围内的表面形状（粗糙度）。

在上述各精度指标之间，存在着质和量的联系。每项精度指标的测量结果，不仅标志着被测量指标的值，而且还标志着其余全部指标之偏差总和。因此，在测量尺寸时，同时也测量了一部分相对偏转误差和形状误差（宏观几何形状、波度和粗糙度）。所以，为了更加接近于给定精度指标的实际值，就必须减少或者消除其余全部因素的误差，不然就会因为这些误差而导致错误地确定被测值，同时由此而得出的全部结论也是错误的。譬如，人们要判断一批零件的尺寸精度，就必须在零件上正确地规定出应该在其间测量尺寸的那些“点”，这样，就会在很大程度上减少表面的相对偏转误差和形状误差的影响（到可以略而不计的程度）。当采用对微观不平度的影响无反应的测量装置检测尺寸时，例如按梳动方式进行测量，就可以显著地减少微观不平度的误差对尺寸测量精度的影响。

因此，在解决每一个有关零件精度的问题时，不仅要明确地提出测量任务，而且要保证其它精度指标给这个值的测量所造成的误差尽可能最小。除了所要求的精度外，在许多情况下，还必须按照其它指标来保证零件的质量，譬如根据零件表层的物理化学性能、应力的符号和数值等。

对于加工来说，每一个工件都要包括在机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸链和运动链中。加工所获得的工件尺寸及其表面的相对位置，乃是这些链的终结环节。例如（图1），可用尺寸链

$$A_A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 - A_5 - A_6$$

和

$$B_A = B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_5 - B_6$$

确定工件被加工表面的半径 r ，其值为 $r = \sqrt{A_A^2 + B_A^2}$ ，两倍后，即变成被加工表面的直径。当加工表面直径较大的工件时， B_A 很小，其值可以忽略不计。

用尺寸链

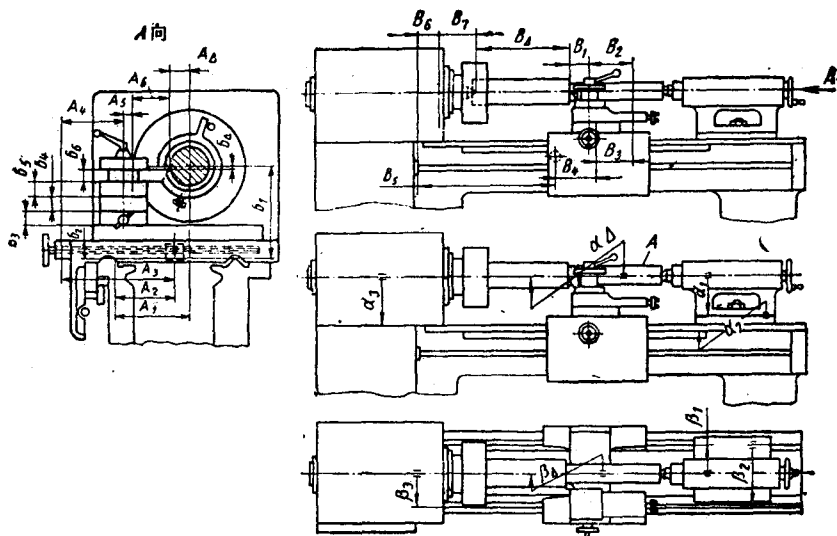


图1 车床的机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸链

$$B_A = B_1 - B_2 + B_3 + B_4 + B_5 - B_6 - B_7$$

求出轴的各阶梯的长度尺寸。

最后，用尺寸链

$$\alpha_A = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 \text{ 和 } \beta_A = \beta_1 + \beta_2 - \beta_3$$

求出被加工表面在两个坐标平面上相对于中心孔中心线的偏转角度。中心孔是工件的工艺基准。

由尺寸链的理论得知，尺寸链终结环节的误差一般是全部组成环节的误差与其传动比乘积的总和：

$$\omega_A = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\partial A_A}{\partial A_i} \omega_i \quad (1)$$

式中 ω_i ——第 i 个组成环节的散差带；

$\frac{\partial A_A}{\partial A_i}$ ——第 i 个环节的传动比，表示其散差带 ω_i 对形成终结环节的散差带 ω_A 的影响；

m ——尺寸链中环节的总数。

工件在机床上的加工过程是由三个顺序完成的阶段组成的。第一个阶段是把工件装在机床或者夹具的基准上，按照要求精度使之在夹具中定位并夹紧，以便在整个加工期间都保持已经达到的装夹精度。第二个阶段是在工件装好后，对机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸链和运动链按所要求的精度进行静态调整（即在无工作载荷的情况下进行）。所谓调整，就是安装刀具，使切削刃相对于机床基准，或者使工件定位的夹具基准（有时是相对于被加工工件的基准）达到所要求的距离。有时，上述两个阶段的先后次序也会略有变化。第三个阶段是对机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸链和运动链进行动态调整（即在有工作载荷的情况下进行）。

由于在完成每个阶段时都会产生误差，所以，对于一个工件来说，其加工后的表面尺寸误差和偏转误差，在每一瞬间的大小可以视为：

$$\Delta_A = \Delta_y + \Delta_c + \Delta_o \quad (2)$$

或者对于一批工件来说, 其误差的散差带则为:

$$\omega_A = \omega_y + \omega_c + \omega_o \quad (3)$$

式中 Δ_A 和 ω_A ——分别为尺寸链终结环节的误差及其散差带;

Δ_y 和 ω_y ——分别为安装误差及其散差带;

Δ_c 和 ω_c ——分别为尺寸链静态调整尺寸的误差及其散差带;

Δ_o 和 ω_o ——分别为尺寸链动态调整尺寸的误差及其散差带。

由等式(2)和(3)得出, 要提高工件的精度, 就必须减少上述三个阶段中每个阶段所产生的误差。由于在多数情况下动态调整误差所占的比重最大, 所以我们先来分析减少它的现有方法和可能方法。

机械制造的实践经验证明, 任何一个工艺过程完成后, 在零件的全部上述精度指标上都会出现偏差。例如, 图2所示是用液压仿形车床加工一批轴类工件时其中一个直径尺寸变化的散点图。全部工件的直径

尺寸都是在同一个截面上测量的。从散点图中看出, 一批轴的散差带的总值 $\omega = 0.10$ 毫米, 乃是以下两个散差带的和: 偶然因素的共同作用所造成的偏差的散差带 ω_m

(瞬时散差带)和按一定规律

变化的系统作用因素的共同作用所造成的偏差的散差带 $\omega_{s.c.c.}$ 。

主要的偶然因素有: 加工余量的偏差、一批中各个工件材料的物理化学性能的差异(在一个工件中同样也有此类差异)、刀具几何参数的偏差及其磨钝、投入加工的各个工件温度的差异及其它等。应该注意, 在许多情况下, 有一个或几个偶然作用因素的偏差值会增大或减小, 在这种情况下, 随时反映瞬时散差带大小的散差带就缩小或者扩大。工件加工余量的偏差和材料物理机械性能的差异(可以近似地按其硬度的变化来判断)、切削刀具的磨钝程度, 这些都是导致切削力变化的原因, 而切削力的变化, 则由于机床—夹具—刀具—工件系统的柔度, 同样会引起刀具与被加工工件的额外相对位移, 结果在工件上就形成了误差。通常, 动态调整尺寸 A_o 的总误差中绝大部分是由它构成的。

按照一定规律变化的系统作用因素, 主要是切削刀具的尺寸磨损、机床—夹具—刀具—工件系统随切削力施力点坐标移动而变化的刚度, 由于切削力作用点的变动或工件的刚度在其加工过程中的变化而使工件本身产生的变形、机床的几何误差、机床—夹具—刀具—工件系统的热变形等等。

由于切削刀具的尺寸磨损, 之后加工出的一批中每一个工件的尺寸都会发生变化, 而且所加工出的每个工件表面都会产生形状误差和偏转误差。机床的可变刚度、机床的制造几何误差和磨损, 也都是导致工件表面产生形状误差和偏转误差的因素。

不久以前, 在机械制造的实践中, 由偶然因素和许多系统因素的共同作用所产生的误差, 曾被认为是一种不可避免的祸害。

在机床上加工工件使之达到给定精度的传统方法是:

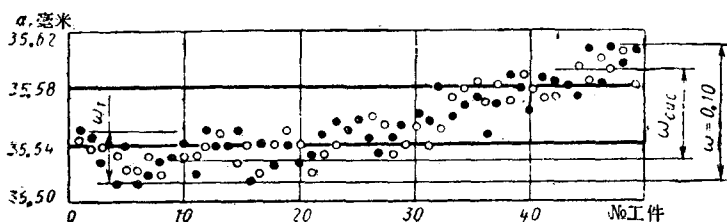


图2 各轴直径尺寸变化的散点图

○、●表示在各个工件的同一截面上两个相互垂直方向上的测量值

- 1) 提高机床—夹具—刀具—工件系统的刚度, 以便能够缩小瞬时散差带 ω_m 的值;
- 2) 采用较低的切削规范加工, 借以减少切削力的变化, 从而缩小瞬时散差带 ω_m 的值;
- 3) 加工分成几次走刀。可在同一台机床上完成, 也可在同一种结构或功能的不同机床上和不同类型的机床上来完成;
- 4) 在机床上加装校正装置, 以便提高工件的形状精度;
- 5) 采用手动或者自动系统对机床—夹具—刀具—工件系统定期进行补充调整, 以此来补偿切削刀具的尺寸磨损;
- 6) 用定期检修的办法保持机床的刚度及其几何精度。

无论是在机床制造时也好, 还是在其使用过程中也罢, 如采用第一种方法的话, 为保持机床因物理磨损和调整所丧失的刚度, 就需要增加额外的耗费。如采用第二种和第三种方法的话, 则由于加工时间的增加, 会降低单件加工效率, 从而会提高加工成本。特别是在使用几台机床的情况下尤为如此。

我们现在来分析一个例子。假如要制造许许多多光滑轴, 其直径 $d = 25$ 毫米, 长度 $L = 60$ 毫米, 直径公差 $\delta_0 = 2 \sim 3$ 微米, 形状误差不超过直径公差的范围, 表面粗糙度为12级。

毛坯选用精轧棒料, 其直径尺寸公差 $\delta_{\text{外}} = 280$ 微米。这样, 要加工出合格的轴来, 在加工过程中就必须取得 $\epsilon_s = \frac{\delta_{\text{外}}}{\delta_0} = \frac{280}{2} = 140$ 的精度率。在现有的加工方法中, 有两种方法可以保证加工出的表面达到较高的光洁度要求, 这就是超精加工和研磨。不过无论哪种方法, 都不能保证达到所要求的精度率。在保证达到所要求的表面粗糙度的条件下, 研磨只能达到 $\epsilon_1 = \frac{\delta_s}{\delta_0} = \frac{15}{2} = 7.5$ 的精度率(式中 δ_s 为投入研磨加工的棒料的直径尺寸公差)。因此, 还必须再找一种或几种加工方法和机床, 借以使精度率的其余值达到 $\epsilon_2 = \frac{\delta_0}{\epsilon_1} = \frac{140}{7.5} = 18.6$ 。

加工精轧棒料时, 可以采用无心磨削的办法。因为当毛坯的直径尺寸公差为 $\delta_{\text{外}} = 280$ 微米时, 用无心磨削的办法可以保证使精度率达到 $\epsilon_s = \frac{\delta_{\text{外}}}{\delta_w} = \frac{280}{100} = 2.8$ (式中 δ_w 为无心磨削加工后棒料的直径尺寸公差)。

由上述情况看出, 完成上述两个工艺过程之后, 可以得到 $\epsilon_4 = \epsilon_1 \epsilon_s = 7.5 \times 2.8 = 21$ 的精度率。但不是所要求的精度率 $\epsilon_0 = 140$ 。因此, 还必须再找出一种能够得到 $\epsilon_5 = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_4} = \frac{140}{21} = 6.8$ 精度率的工艺系统。在用无心磨削的办法保证达到直径尺寸精度 δ_w 之后, 再用初研磨的办法, 就可以保证得到 $\epsilon_s \approx 6.8$ 的精度率。

可见, 要解决所提出的问题, 使轴件按上述指标达到所要求的精度, 就应该经过三道工序: 1) 无心磨削($\epsilon_s = 2.8$); 2) 初研磨($\epsilon_5 = 6.8$); 3) 终研磨($\epsilon_1 = 7.5$)。上述三道工序完成之后, 精度率的计算值 $\epsilon = \epsilon_s \epsilon_5 \epsilon_1 = 2.8 \times 6.8 \times 7.5 = 142.8$, 高于要求的精度率($\epsilon_0 = 140$)。

因此, 要求的工件精度越高, 为此所必需的走刀次数和各种机床的数量就越多。

图3的曲线表明, 由于公差的缩小, 亦即由于要求精度的提高, 工件的相对成本也就提高了。

对达到和提高零件精度的上述传统方法的分析表明, 加工精度和加工效率是有矛盾的。

⊖ 原文有误——校者注。

达到精度，而且特别是提高精度的全部现有方法，主要是以牺牲单件生产效率和提高加工成本为代价来减少加工误差的。

莫斯科机床工具学院（Мосстанкин）的“机械制造工艺”教研室根据以往的科研成果，早在四十年代末就为自己提出了一个任务，要探求一条原理上全新的途径，在提高生产率的同时，达到并提高工件的加工精度。由于对现有机床—夹具—刀具—工件系统的研究和对大量散点图的分析，已经可以明确地知道出现加工误差的原因及其在整个加工误差中的比重。首先已经确认，操作工人与调整人员通过测量加工后的工件借以控制工艺过程的反馈法，具有三个主要缺点：

1) 它不能告诉操作工人和调整人员表明工件产生误差的原因，因为他们所测量的是由作用于加工过程中的各种因素的偏差所造成的误差的总和；

2) 操作工人和调整人员通过测量工件所获得的信息，大都有很大时间滞后，因此，就无法及时地在加工过程中进行必要的校正，以使此刻所加工的工件达到要求质量；

3) 许多机床都具备在加工过程中连续测量或者周期性测量工件表面的尺寸偏差或形状偏差的仪器，因此，在许多情况下，工人都可以不断地校正工艺过程。然而这样会加速工人疲劳，从而出现差错。

根据以往的研究已经明确，必须找出其偏差与加工误差有函数关系的那些因素；必须找出并研究对这些因素偏差连续进行测量的方法和装置，以便获得可靠的信息；根据所获得的信息对工艺过程连续进行校正的过程必须实现自动化。

在解决第一个问题时，已经查明，在绝大多数情况下，工件余量和硬度的偏差对加工精度的影响最大。因此，一开始就应该对每一个投入加工的工件测量这两个值的偏差，借以获得信息，并对它进行处理，计算出必需的校正量，并且将其自动地纳入机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸链。这种系统已经研制出来，并且对它进行过研究。它可以显著地提高工件的直径尺寸精度，并且已经证实可以控制普通加工时的偶然作用因素。

然而，为了在加工前就能测量出工件材料硬度和加工余量的偏差，就需要创制自动测量装置、记忆存贮装置、计算装置、比较装置和执行机构。但这些系统是复杂的。因此，不得不另觅新路，以获取信息，特别是当有必要连续获得关于余量和硬度随每个工件长度发生变化的信息时尤其如此。

已经证明，切削力这一矢量的变化，是工件的加工余量、材料硬度和刀具磨钝程度的变化共同作用的结果，也是切削几何参数及其它许多因素发生变化的结果。换言之，切削力的变化可以视为作用于加工过程中诸因素的偏差变化的综合指标。切削力乃是一个矢量，而弹性位移尺寸又是机床—夹具—刀具—工件系统尺寸链动态调整尺寸的一个主要组成部分，所以就有必要弄清每个切削分力的变化对其所造成的弹性位移尺寸 Δ_s 的变化的影响。

如果根据大家对刚度的一般理解，把它看成是物体抵抗施加力在其作用方向上引起位移的能力，则必须运用当量力的概念。在理论力学中，当量力被理解为其力矩等于全部作用力的力矩之和的力。例如，在车削加工时，全部切削分力都作用于车刀，形成力矩，其力臂就是从相应的切削分力的施力点到刀架回转的瞬时中心的距离。

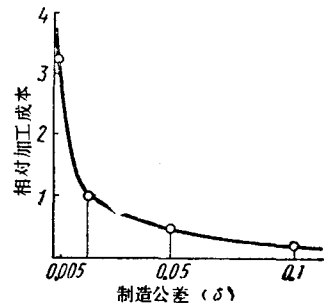


图3 相对成本同精度的关系

图4所示为平面切削时,亦即在没有分力 P_x 的情况下,用当量力取代切削分力 P 的示意图。按图4左边所示,当量力 P_s 等于:

$$P_s l_2 = P l_1 \text{ 或}$$

$$P_s = P \frac{l_1}{l_2} \quad (4)$$

按图4右边所示,当量力 P_s 等于:

$$P_s l_2 = -P l_1 \text{ 或}$$

$$P_s = -P \frac{l_1}{l_2}$$

式中 l_1 和 l_2 ——从力的作用线到回转瞬时中心的距离(力臂)。

由图中看出,在第二种情况下,当量力改变了符号,或者换句话说,改变了对车刀和刀架的作用方向。在第一种情况下,当量力加大了工件的尺寸,而在第二种情况下,它却减小了工件的尺寸。

图5所示是把两个切削分力 P_z 和 P_r 折合成当量力 P_s 的示意图。从图中看出,根据回转瞬时中心的位置,当量力:

$$P_s = P_z \frac{l_5}{l_4} + P_r \text{ 或 } P_s = -P_z \frac{l_6}{l_7} + P_r$$

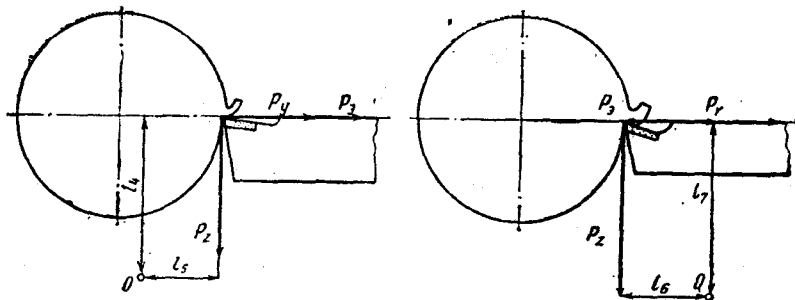


图5 由切削分力 P_z 和 P_r 折合成当量力的示意图

在后一种情况下,当 $-P_z \frac{l_6}{l_7} > P_r$ 时,当量力 P_s 便改变方向,工件的尺寸将缩小。

图6所示为三个切削分力 P_z 、 P_r 和 P_x 折合成当量力 P_s 的示意图。在第一种情况下(图6a),当量力 $P_s = P_z \frac{l_1}{l_2} + P_r + P_x \frac{l_3}{l_2}$ 。当量力 P_s 增大工件的直径。在第二种情况下(图6b),当量力 $P_s = -P_z \frac{l_1}{l_2} + P_r + P_x \frac{l_3}{l_2}$ 。当 $-P_z \frac{l_1}{l_2} > P_x \frac{l_3}{l_2} + P_r$ 时,当量力改变方向,结果工件的直径便缩小。一般情况下,当量力可以通过各切削分力用等式

$$P_s = P_z \xi + P_r \eta + P_x \gamma$$

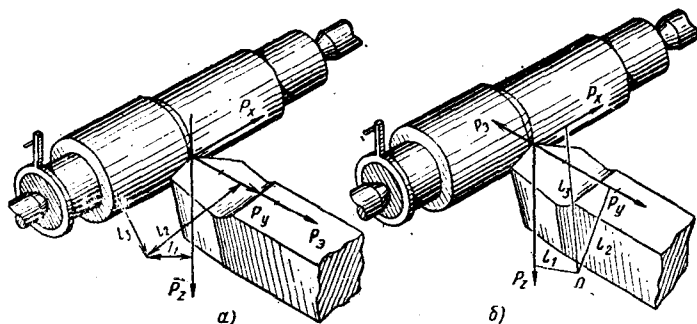


图6 三个切削分力折合成当量力的示意图

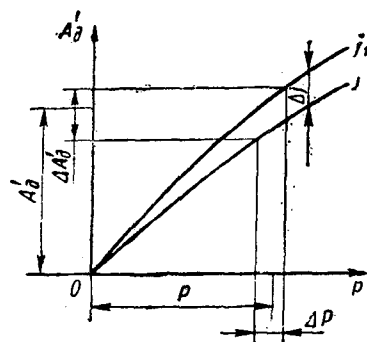


图7 动态调整尺寸的变化同切削力的关系

来表示。式中 ξ 、 η 、 γ 为表明每个切削分力对当量力的影响的系数。

应该注意，机床—夹具—刀具—工件系统的刚度 j 。应该理解为当量力与其作用方向上的弹性位移量 A_d' 之比，即 $j = \frac{P}{A_d'}$ 。

前面曾经指出，在当量力 P 改变方向时，也就是当其符号发生变化时，弹性位移量的符号同时也发生变化。由此得出，机床—夹具—刀具—工件系统的刚度永远是一个正值，与通常的刚度概念是相符的。在动态调整尺寸 A_d' 的总值中，有一部分取决于切削力所造成的弹性位移量，它可用下列等式确定：

$$A_d' = \frac{P}{j} = \frac{P\eta}{j_0} \quad (5)$$

式中 P ——当量力；

j_0 ——机床—夹具—刀具—工件系统在选定截面上的刚度；

η ——联系切削力与当量力的系数。

切削力乃是作用于加工过程中的许多因素的函数：

$$P = f(v, s, t, HB, C_1, C_2, C_3) \quad (6)$$

式中 v ——切削速度；

s ——进给量；

t ——切削深度；

HB——工件材料的硬度；

C_1 ——切削几何参数；

C_2 ——切削刀具的状态；

C_3 ——其它因素。

加工时，切削力的变化是由上述每个因素的变化所引起的，它们是代数上相加的，这时，随时都同样会使动态调整尺寸 A_d' 发生变化（图7）：

$$A_d' \pm \Delta A_d' = \frac{P \pm \sum \Delta P_i}{j_0 \pm \sum \Delta j_i} \quad (7)$$

或者对于一批工件来说，

$$A'_0 + \omega'_0 = \frac{P + \omega_p}{j_0 + \omega_{j_0}}$$

式中 $\Delta A'_0$ ——由于切削力和刚度的变化，动态调整尺寸 A'_0 在每一瞬间所产生的偏差；

ΔP_i ——由于第 i 因素的变化，切削力 P 所产生的变化量；

j_0 ——机床—夹具—刀具—工件系统的刚度；

Δj_0 ——因第 i 因素的变化，机床—夹具—刀具—工件系统的刚度所产生的变化量；

ω'_0 ——动态调整尺寸 A'_0 的散差带；

ω_p ——切削力 P 的散差带；

ω_{j_0} ——机床—夹具—刀具—工件系统的刚度变化的散差带；

i ——诸因素的顺序标号；

n ——影响切削力 P 的变化的诸因素之总数；

m ——影响机床—夹具—刀具—工件系统的刚度变化的诸因素之总数。

这样，在搞清了动态调整尺寸在每一瞬间所产生的偏差的机理之后，进而必须找出一种减少这些偏差的新方法，以期达到和提高预定的精度。

现在，再回到加工时达到精度的三个阶段上来。加工后工件的尺寸可以写为：

$$A_A = A_y + A_0 + A'_0$$

式中 A_y ——安装尺寸；

A_0 ——静态调整尺寸；

A'_0 ——动态调整尺寸。

如果在动态调整尺寸 A'_0 中产生了偏差 $\Delta A'_0$ ，那么，理所当然在其它条件全部相同的情况下就要使之减少，以便使工件具有所要求的尺寸精度 A_A ，尤其是在必须提高精度时更是如此。根据以往的研究，已经研制了两种不同原理的新方法来解决所提出的问题。

第一种方法就是将机床—夹具—刀具—工件系统的尺寸链或运动链的静态调整尺寸以相反符号校正一个 ΔA_0 值，它同动态调整尺寸 A'_0 出现的（更准确地说是产生的）偏差 $\Delta A'_0$ 相等。对静态调整尺寸 A_0 进行校正，不外乎是改变切削深度这类做法。

$$A_A = A_y + A_0 \mp \Delta A_0 + A'_0 \pm \Delta A'_0$$

这时 $\Delta A_0 = \Delta A'_0$ 。

第二种方法就是将动态调整尺寸 A'_0 按相反符号校正一个 $\Delta A'_0$ 值，即：

$$A_A = A_y + A_0 + A'_0 \pm \Delta A'_0 \mp \Delta A'_0$$

校正量 $\Delta A'_0$ 根据等式 $\Delta A'_0 = \Delta A_0$ 来确定。

倘若用第一种方法校正静态调整尺寸 A_0 ，则必须不断改变其值的大小，也就是改变刀具切削刃和确定工件位置的机床或夹具基准之间的距离。改变距离，也就是使机床主轴或刀架滑座相对于使之定位的零件产生相对移动。

我们知道，在从静止状态过渡到运动状态时，摩擦系数的大小发生变化，并因此而产生爬行。校正量一般都是很小的。因此，机床—夹具—刀具—工件系统就必须具备能够实现平稳地往复微动的执行机构。图 8 所示的适应控制系统的方框图就是一例，其用途是校正静态调整尺寸 A_0 。为简单起见，以后我们称这个系统为控制静态调整尺寸 A_0 的控制系统。方框图由以下几部分组成：测量车刀在切削分力 P_x 作用下所产生的弹性位移量的传感器 1、放大器 2、比较器 3、程序装置 4 以及由减速器 6 和电动机 7 所组成的微动执行机构 5。

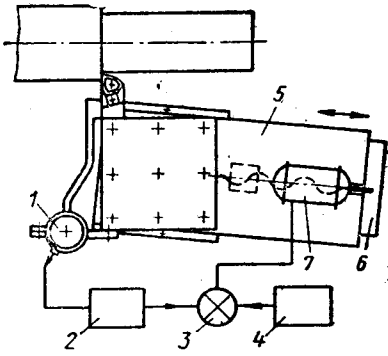


图8 静态调整尺寸适应控制系统的方框图

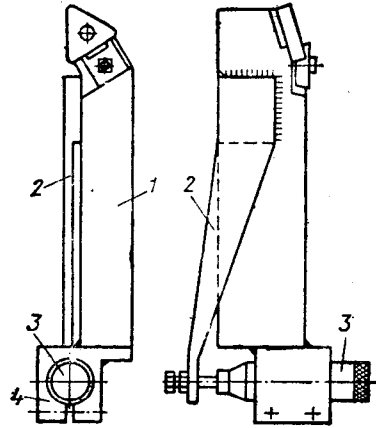


图9 测力部件示意图

为了减少爬行的影响，刀架上部相对于工件的中心线偏转了 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。因此，显著地提高了精度（5微米以下），同时也提高了在工件尺寸方向上微动的均匀性。传感器如图9所示。在刀杆1的前端装有测力杠杆2。装在刀杆1另一端的电感传感器3用来测量杠杆2端部的弹性位移量。由于作用在硬质合金可转位三边形刀片上的切削分力 P_x 发生变化，才使刀杆及杠杆2在其压力作用下产生变形。

控制静态调整尺寸 A_s 的适应控制系统的工作原理如下：用程序装置4（图8）间断地或者按程序连续变化地给出动态调整尺寸 A_d 值。已经按此值调好的传感器测量出动态调整尺寸 A_d 的偏差 ΔA_d ，将信号放大后输送到比较器中去。在比较器中，测定值同给定值相比较，确定差值的符号，并将处理后的信号输送给电动机。电动机则通过减速器6移动刀架的上滑座，直到动态调整尺寸 A_d 的测定值同给定值之间的差值消失为止。

研究结果已经证明，控制静态调整尺寸 A_s 的适应控制系统的主要优点是：

- 1) 较之普通加工，一批工件的尺寸精度可提高1倍~4倍；
- 2) 可以保证有与普通加工时相同的表面粗糙度；
- 3) 可以减少振动；
- 4) 可以减少走刀次数，从而提高机床的单件加工生产率；
- 5) 可以减少工件加工余量的偏差，从而提高下一道工序的机床单件加工生产率；
- 6) 由于这种适应控制系统的结构简单，所以造价低廉；
- 7) 在改装工作进给不是无级变化的现有机床时，也可以获得上述优点。

这种适应控制系统也具有普通机床的一切缺点，即由于工件余量和材料硬度的偏差会使机床—夹具—刀具—工件系统的负荷不均匀，由于偶然性过载会损坏机床—夹具—刀具—工件系统等。

用第二种办法校正动态调整尺寸 A_d ，就是稳定动态调整尺寸 A_d 本身，亦即保持间断给定的或按程序给定的值不变。

为此，可以采用三种办法：1) 在机床—夹具—刀具—工件系统的刚度不变的情况下稳定当量力 P_x ；2) 在机床—夹具—刀具—工件系统的刚度变化的情况下，控制当量力 P_x ，使之与刚度 j_x 之比值保持不变；3) 在当量力 P_x 发生变化的情况下，控制机床—夹具—刀具—工件系统的刚度，使它们的比值保持不变。

正如由函数关系式(6)所知,有些因素的变化对当量力的变化是有影响的。用控制其中一个因素或者同时控制其中几个因素的办法,可以稳定当量力 P_s 。通过改变工作进给量 s 来控制切削力最为有效。如果切削力减小的话,就加大进给量;反之,如果切削力增大,就减小进给量;当遇到紧急情况时,进给量就可以减少到零。为了用这种适应控制系统实行对进给量的控制,在机床—夹具—刀具—工件系统中就必须具有无级均匀改变进给量的执行机构。上述适应控制系统的主要优点如下:

- 1) 可以达到比普通加工更高的加工精度(提高1~4倍以上);
- 2) 一批中的每个零件及其各个表面,都可以按照最合理的进给量进行加工,因而,机动时间最短,也就是可以达到为机床—夹具—刀具—工件工艺系统所允许的最高生产率;
- 3) 许多情况下还可以减少走刀次数,从而提高机床—夹具—刀具—工件系统的生产率;
- 4) 在加工一批工件过程中,机床—夹具—刀具—工件系统的负荷量始终不变,这就保证了提高切削刀具的尺寸耐用度,避免了刀具的损坏,进而减少了刀具的消耗;减少了机床—夹具—刀具—工件系统的不平衡磨损,从而减少了设备维修费用;
- 5) 工作安全。同时因为提高了多机管理的可能性,故而可提高操作工人与调整人员的劳动生产率;
- 6) 可以按照机床—夹具—刀具—工件系统所允许的更高加工用量进行加工;
- 7) 可以减少刀具调整和更换次数,因此也就可以再度提高单件生产率;
- 8) 可以简化数控机床的编程工作,并减少编程费用和编程时间;
- 9) 由于加工后的余量偏差较小,所以可提高在下一个机床—夹具—刀具—工件系统上加工工件的生产率。

这种适应控制系统的缺点如下:

- 1) 较之进给量“固定不变”的普通加工方法,表面粗糙度的变动范围大,有时为一级,有时为两级;
- 2) 由于执行机构必须能在正反向无级、均匀地改变进给量,因此,同控制静态调整尺寸的适应控制系统相比,机床的价格多少有些提高,尤其对要改装的现有机床来说更是如此。

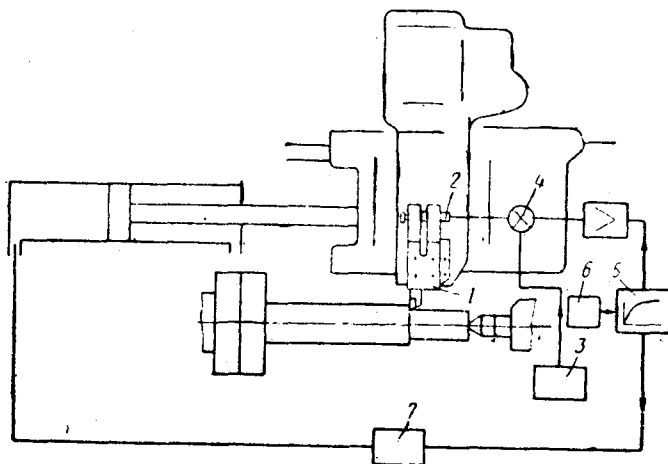


图10 控制动态调整尺寸的适应控制系统的方框图

图10所示半自动液压仿形车床的方框图即可为例。切削力是一个矢量,由测力刀夹1来测量。在测力刀夹上装有电感传感器2,后者将弹性变形量转换为同动态调整尺寸 A_s 成比例的电脉冲。程序装置3的用途是间断地或者按一定规律变化地给出动态调整尺寸 A_s 值。由测力装置和程序装置输出的电脉冲,在处理差值符号的比较器4中进行比较,然后,电信号通过放大器和由设定器6给定的最大进给量的限制器5,再输入到电磁换向阀7中去。后者