

王启平等编著

精密 加工工艺学

国防工业出版社

精密加工工艺学

王启平等编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分五章,即机械加工精度、机械加工表面质量、工艺系统热变形、精密零件加工和精密加工条件等。

本书是在多年教学实践和从事精密加工科学研究的基础上编著的。书中系统地论述了精密零件加工的基本原理、工艺方法、影响加工质量的主要因素、保证加工质量的措施及实现精密加工所具备的条件。全书论述清晰,便于讲授和自学。

本书除作为高等工科院校机械制造工艺及有关专业学生教学用书外,还可供有关专业的研究生及工厂从事精密加工的工程技术人员参考。

精密加工工艺学

王启平 等编著

国防工业出版社出版、发行

(北京市丰公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

河北涿中印刷厂印装

787×1092 1/16 印张23¹/₂ 545千字

1990年1月第一版 1990年1月第一次印刷 印数: 0,001— 2,750册

ISBN 7-118-00208-9/TG19 定价: 12.00元

前 言

随着现代技术的发展,为了培养大专院校学生和工厂工程技术人员分析、解决精密机器零件加工质量问题的能力,在总结多年教学实践和从事精密加工科研实践的基础上,编写了这本《精密加工工艺学》。

从世界上有关机械加工精度的大量统计资料可以看到,机械加工的极限精度由十九世纪初的1mm级提高到二十世纪的0.01mm级,现在又进一步提高到0.01 μ m级,这些足以说明机械加工精度正在迅速提高。二十世纪七十年代以来,由于航天、大规模集成电路、激光技术等需要,又促进了精密加工技术的进一步发展。例如,美国在1975年研制了数控金刚石车床,能加工镜面的椭圆面和抛物线曲面,表面轮廓度误差为0.3 μ m,表面粗糙度仅为0.05 μ m;1978年又研制成功了计算机控制的金刚石车床,加工精度可达0.075 μ m,表面粗糙度仅为0.0011 μ m。我国也先后研制成功了多种精密机械产品,如加工6级精密丝杠的大型精密螺纹磨床S7450、磨削超精密齿轮的精密Y7431型磨齿机、分度精度为 $\pm 0.1''$ 的360齿端齿分度台、车削加工圆度公差为0.2~1 μ m薄壁铝合金球面的JQ-1型精密球面车床、车削端面平面度精度为0.3 μ m/60mm的高精密磁盘车床S1-222等等。为了迅速提高我国精密加工技术水平,机械工业部提出近期要突破下述重点项目:0.1''级的分度技术;0.1 μ m级的精密位移技术;1 μ m/m级的直线度加工技术;0.01 μ m级圆度的加工技术;四级精密齿轮、二级精密蜗轮及3A级滚刀的精密机械加工和测试技术;以及高精密加工基本原理的研究等。

《精密加工工艺学》包括有机械加工精度、机械加工表面质量、工艺系统热变形、精密零件加工及精密加工条件等五章内容。前三章主要介绍了保证精密机器零件(含一般机器零件)质量的基本原理、工艺方法和主要途径。第四章结合具有典型性的八个精密零件加工的分析,进一步阐述了保证精密机器零件加工质量的原理、工艺方法和具体措施。最后一章,较系统地总结了保证实现精密加工和超精密加工所需的(如机床设备、工具、工件、热处理及加工环境等)必备条件。本书可供高等工科院校有关专业学生和工厂从事精密加工的工程技术人员使用,还可供有关专业的研究生参考。

《精密加工工艺学》由王启平编写第一、二章,颜婉容编写第三章,李益民编写第四、五章。全书由王启平主编,彭锡鸿审核。在编写和定稿过程中,李世纯和赵黎辉同志参加了部分工作,特表谢意。

由于水平所限,书中错误及不当之处,望读者批评指正。

编著者

1985年12月

目 录

第一章 机械加工精度

第一节 机械加工精度概述	1
一、加工精度	1
二、加工误差	2
三、机械加工精度的研究内容	7
第二节 机械加工精度的获得方法	7
一、尺寸精度的获得方法	9
二、形状精度的获得方法	11
三、位置精度的获得方法	12
第三节 工艺系统原有的原始误差对机械加工精度的影响及其控制	13
一、工艺系统原有的原始误差对尺寸精度的影响及其控制	14
二、工艺系统原有原始误差对形状精度的影响及其控制	34
三、工艺系统原有的原始误差对位置精度的影响及其控制	61
第四节 加工过程中其它因素造成的原始误差对机械加工精度的影响及其控制	63
一、工艺系统受力变形的影响及其控制	64
二、工艺系统磨损的影响及其控制	76
三、工艺系统残余应力的影响及其控制	80
第五节 保证和提高机械加工精度的主要途径	82
一、减少或消除原始误差	82
二、补偿原始误差	83
三、抵消原始误差	84
四、转移原始误差	85
五、分化原始误差	86
六、均化原始误差	87

第二章 机械加工表面质量

第一节 机械加工表面质量概述	88
一、机械加工表面质量的含义	88
二、机械加工表面质量对机器产品使用性能和使用寿命的影响	89
第二节 表面粗糙度及使其降低的工艺措施	93
一、切削加工	93
二、磨削加工	99
三、超精研、研磨、珩磨和抛光加工	102
第三节 表面层物理、机械性能及其改善的工艺措施	111
一、表面层的冷作硬化	111

二、表面层的金相组织变化	112
三、表面层的残余应力	114
四、减小残余拉应力、防止表面烧伤和裂纹的工艺措施	117
第四节 机械加工中的振动及其控制途径	123
一、机械加工中振动的基本类型	124
二、机械加工中的振动现象及其控制途径	130

第三章 工艺系统的热变形

第一节 工艺系统热变形概述	142
第二节 工艺系统热变形及其对加工精度的影响	144
一、机床热变形及其对加工精度的影响	144
二、工件热变形及其对加工精度的影响	147
三、刀具热变形及其对加工精度的影响	149
第三节 工艺系统热变形及温度场的计算	150
一、解析法	152
二、数值法	159
三、热源法	163
第四节 减少工艺系统热变形的主要措施	183
一、减少热量的产生,防止热源的影响	184
二、加强散热能力	185
三、控制温度变化,均衡温度场	185
四、采取补偿措施	188
五、改善机床结构,进行计算机辅助设计	189

第四章 精密零件的加工

第一节 圆柱气浮轴承的加工	191
一、加工方案的确定	192
二、外环套端面与内孔的磨削	194
三、内环轴的安装	197
四、内环轴浮板端面的磨削	199
第二节 精密球面的加工	201
一、球面的精加工方法	201
二、成形范成法磨内球面	202
三、陀螺浮球的车削	205
第三节 精密联轴体的加工	212
一、精密联轴体的结构特点及精度要求	212
二、箱体零件加工的工艺特点	213
三、精密联轴体的平面加工	213
四、精密联轴体的孔系加工	216
第四节 $\pm 0.1''$ 刚性多齿分度盘的加工	220
一、多齿分度盘概述	220

二、端齿盘的齿形	221
三、端齿盘的粗加工	222
四、端齿盘的精化	224
第五节 精密圆柱齿轮的加工	228
一、概述	228
二、精密圆柱齿轮的滚齿加工	230
三、精密圆柱齿轮的磨齿加工	231
第六节 精密蜗轮副的加工	239
一、精密蜗轮副的加工工艺	239
二、提高精密蜗轮副运动精度的主要措施	243
第七节 精密丝杠的加工	251
一、概述	251
二、精车螺纹的误差分析	255
三、精密丝杠的磨削与研磨	264
四、提高精密丝杠螺距精度的校正装置	269
五、精密丝杠的激光测量	273
第八节 电液伺服阀阀芯阀套的加工	275
一、阀芯和阀套的工艺过程	276
二、阀套圆柱孔与方孔的加工	279
三、阀芯轴向尺寸的配磨方法	295
四、伺服阀径向尺寸自动配磨原理	304

第五章 精密加工的条件

第一节 加工设备的精化	307
一、机床主轴部件的精化	307
二、机床移动部件的精化	318
第二节 消除振动干扰	322
一、减少与消除机内干扰振源	322
二、提高加工设备的抗振性	326
第三节 选择适宜的刀具、磨具和研具	328
一、切削刀具	328
二、磨具	333
三、研具	337
第四节 提高精加工前工件的质量	340
一、对工件材料性能与质量的要求	340
二、精密加工对热处理工序的要求	342
三、提高工件定位基准的精度	343
第五节 提高对刀及微量进给精度	346
一、提高对刀精度的方法	346
二、实现精确微量进给的机构	347
第六节 保持稳定的环境温度	358

一、室温变化对加工精度的影响	358
二、精密加工应达到的室温标准	361
三、创造局部恒温条件	362

附 录

附表1 $\Phi(p)$ 函数表	364
附表2 $\Omega(p)$ 函数表	364
附表3 $\psi(p)$ 函数表	365
附表4 $K_0(u)$ 函数表	366
附表5 几种金属材料的线膨胀系数 α	367
附表6 几种金属材料的密度 ρ 、比热 c 、导热系数 λ 和导温系数 a	368
参考文献	368

第一章 机械加工精度

第一节 机械加工精度概述

一、加工精度

(一) 精度的概念

对任何一台机器、一件工具或一个零件,为了保证它们的作用和性能,必然要对它们提出许多方面的质量要求。精度就是质量要求的一个方面。此外还有强度、刚度、表面质量等方面的要求。

精度按其含义,又可细分为精密度和精确度。

1. 精密度 指在精度方面能够达到或应该具有的范围。如对加工零件所使用的机床、夹具、刀具和量具来说,它们所能达到的精度范围,即是它们的精密度。对一个机器零件来说,则根据它在机器中的作用对其提出具有一定范围的精度要求,亦即是该零件本身的精密度。加工精密零件所使用的具有较高精度的机床、夹具、刀具和量具,称之为精密机床、精密夹具、精密刀具和精密量具。

2. 精确度 指在精度方面相对理想状态的准确程度。如机器零件加工后的精度,即是该零件的精确度。

在对零件进行机械加工时,即使具备了相应的精密机床、夹具、刀具和量具等,并不一定就能加工出精确度很高的零件来。为了得到较高精确度的零件,除采用相应精度的精密机床设备和精密工具外,还必须在零件加工前对所使用的机床、夹具、刀具等进行精确的调整,并且在零件加工过程中还要相应地严格控制各种力和热等其它因素的影响,只有这样在工人精细操作下才能加工出精确度很高的零件。

(二) 加工精度的概念

机器零件的精度,按其含义又可细分为设计精度和加工精度。

1. 设计精度 即根据机器的使用性能对其组成零件各有关表面在尺寸、形状和位置方面提出具有一定范围的精度要求。它们在零件图纸上是以相应的尺寸公差和形位公差表示的。

例如,精密丝杠车床,为了保证能加工出6级精度的精密丝杠(单个螺距公差为 $\pm 0.003\text{mm}$,全长上的螺距累积误差的公差为 $\pm 0.020\text{mm}$),其主轴部件的装配精度为:

主轴锥孔中心线的径向跳动	0.003mm
	0.007mm/300mm处
主轴轴向窜动	0.002mm
主轴定心轴颈的径向跳动	0.010mm
主轴轴端支承面的跳动	0.010mm

为了保证主轴部件的装配精度，对其中的组成零件——主轴（见图 1-1）提出如下精度要求：

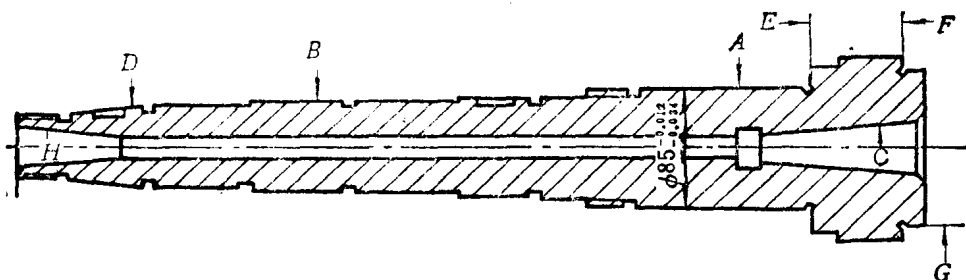


图1-1 精密丝杠车床主轴简图

主要支承轴颈 A、B 的尺寸公差为 IT6 级，其圆度公差为	0.006mm
A、B 轴颈对前后锥孔 C、H 中心线的圆跳动为	0.005mm
定心轴颈 G 对前后锥孔 C、H 中心线的圆跳动为	0.007mm
端面 E 对轴颈 A、B 的圆跳动为	0.001mm
端面 F 及定心轴颈 G 对轴颈 A、B 的圆跳动为	0.007mm
前锥孔 C 对 A、B 的圆跳动为	0.002mm
锥面 D 对轴颈 A、B 的圆跳动为	0.003mm/300mm 处
	0.005mm

上述在主轴零件图上所标注的尺寸、形状和位置方面的精度要求，就是该零件的设计精度。

2. 加工精度 即加工后零件的几何参数与其理想状态相符合的程度，它们之间的差异常以加工误差表示。加工精度包括：

(1) 尺寸精度 指加工后零件的某些表面本身或表面与表面之间的实际尺寸与理想尺寸之间的符合程度。理想尺寸一般指零件图上所标注有关设计尺寸的平均尺寸。如主轴前支承轴颈 $\phi 85^{+0.012}_{-0.017}$ mm 的理想尺寸就是 $\phi 84.977$ mm。若某一根主轴的前支承轴颈加工后尺寸为 $\phi 84.983$ mm，则其尺寸误差为 $84.983 - 84.977 = 0.006$ mm。

(2) 形状精度 指加工后零件加工表面的实际形状与理想形状之间的符合程度。理想形状是指绝对准确的形状，如平面、圆柱面、球面、螺旋面等。若某一根主轴的前支承轴颈加工后的圆度误差为 0.002mm，则其形状精度亦为 0.002mm。

(3) 位置精度 指加工后零件有关表面之间的实际位置与理想位置之间的符合程度。理想位置是指绝对准确的位置，如两平面平行、两平面垂直、两圆柱面同轴等。若某一根主轴的前锥孔 C 加工后对轴颈 A、B 的圆跳动为 0.001mm，则其位置精度亦为 0.001mm。

二、加工误差

(一) 加工误差和原始误差的概念

无论是用试切法加工一个零件，还是用调整法加工一批零件，加工后都会发现零件

在尺寸、形状或位置等某个方面与理想的零件有所不同，其间的差值称为加工误差。

零件加工后所以产生加工误差，主要是由机床、夹具、刀具、量具和工件所组成的工艺系统，在完成零件加工的任何一道工序期间都有很多误差因素起作用，这些造成零件加工误差的误差因素称为原始误差。

(二) 产生加工误差的主要原始误差分析

1. 工艺系统原有的原始误差 即在零件未进行切削加工以前，由机床、夹具、刀具、量具和工件组成的工艺系统所存在的误差，它们将在不同程度上以不同的形式反应到被加工的零件上，造成加工误差。工艺系统原有的原始误差包括如下几个方面：

(1) 机床误差 机床的制造、安装误差以及长期使用后的磨损是造成加工误差的重要原始误差因素。被加工零件上任何一个或一组表面的加工，都是由所使用机床上的工件和工具两大系统的成形运动实现的。当机床上的工件和工具两大系统，由于制造、安装误差以及磨损使其本身运动（如主轴的回转运动和工作台的直线运动）及它们之间的相互运动存在误差时，则必然造成被加工零件在形状和位置方面的加工误差。例如，对车、镗类机床，若机床主轴和工作台本身运动以及它们之间的空间位置误差过大，很难加工出较精确的圆柱表面或圆锥表面；对铣、刨类机床，若主轴或刀架和工作台本身运动以及它们之间的空间位置误差过大，则也很难加工出高精度的平面和相互平行或垂直的平面；同理，对螺纹齿轮加工机床，也很难加工出高精度的螺纹和齿形表面。

(2) 夹具和刀具误差 夹具误差主要包括定位元件、对刀元件、分度机构及夹具体等有关零、部件的制造误差以及它们在长期使用后的磨损，都将会直接或间接地造成被加工零件的加工误差。

刀具本身的制造和刃磨误差对零件加工精度的影响，将根据刀具种类的不同而有所区别。采用尺寸刀具或成形刀具加工时，其本身的尺寸或形状误差将直接造成被加工零件的尺寸和形状误差；采用成形刀具对零件加工表面进行展成加工时，则刀具切削刃的形状、有关尺寸等误差也会直接影响被加工零件的加工精度；当采用一般刀具加工时，刀具本身的制造和刃磨误差一般没有什么直接影响。

(3) 工件误差 对加工前的工件（或毛坯），若待加工表面本身有形状误差或与其有关表面之间有位置误差，也都会造成切削加工后这个零件加工表面本身及其与其它有关表面之间的加工误差。

(4) 测量误差 加工零件不管采用那种方法，均需对试切的那个零件的试切尺寸进行测量，以便确定刀具需进一步调整的准确位置。这时，所使用的量具、量仪本身误差，测量过程中使用的对比标准、其它测量工具以及测量部位或目测不准等误差，也都会间接造成被加工零件的加工误差。

(5) 定位和安装调整误差 当一批工件在机床上或夹具中定位时，若选择的定位基准与工序基准不重合或定位基准之间有位置误差，都会造成由于工件定位不准而引起加工误差。

在对零件进行每一道工序的加工之前，总要进行这样或那样的安装调整工作。例如，在机床上准确安装夹具、刀具和工件，按零件图纸要求调整刀具到加工尺寸位置，在成批生产中还需要通过样件或试切工件的实际尺寸调整刀具的最终位置等等。由于安装和调整不可能绝对准确，故也会造成被加工零件的加工误差。

2. 加工过程中其它因素造成的原始误差 即在零件的加工过程中, 在力、热和磨损等因素的影响下, 将破坏工艺系统的原有精度, 使工艺系统有关组成部分产生新的附加的原始误差, 从而进一步造成被加工零件的加工误差。加工过程中其它因素造成的原始误差, 主要有工艺系统的受力变形、工艺系统的热变形、工具的磨损和工件内部的残余应力。

(三) 加工误差的性质

在零件的整个加工过程中, 虽然有很多原始误差在不同程度上造成被加工零件的加工误差, 但从所产生加工误差的性质来分, 不外乎有系统性误差和随机性误差两大类:

1. 系统性误差 即在相同的工艺条件下, 加工一批零件时所产生的大小和方向不变或按加工顺序作有规律变化的加工误差。前者称为常值系统性误差, 后者称为变值系统性误差。

机床、夹具、刀具和量具本身的制造误差, 机床、夹具和量具的磨损, 加工过程中刀具的调整以及它们在恒定力作用下的变形等造成的加工误差, 一般都是常值系统性误差。例如, 用直径尺寸比图纸规定尺寸小 0.02mm 的铰刀铰孔时, 则所铰出的孔径尺寸都比规定尺寸小 0.02mm , 这种加工误差就是常值系统性误差。此外, 对于加工中所使用的机床、夹具和量具, 由于它们的磨损速度很慢, 故对它们在使用一段较长时期后因显著磨损而造成的加工误差, 也可以看做是常值系统性误差。

机床、夹具和刀具等在热平衡前的热变形, 加工过程中刀具的磨损等都是随加工时间的顺延而作规律的变化的, 故它们所造成的加工误差, 一般可认为是变值系统性误差。

2. 随机性误差 即在相同的工艺条件下, 加工一批零件时产生大小和方向不同且无变化规律的加工误差。

零件加工前的毛坯或工件的本身误差 (如加工余量不均或材质软硬不等)、工件的定位误差、机床热平衡后的温度波动以及工件残余应力变形等引起的加工误差, 均属于随机性误差。例如, 使用直径尺寸比图纸规定尺寸小 0.02mm 的铰刀加工一批零件的内孔时, 所铰出的零件孔径尺寸虽都会比规定尺寸小 0.02mm , 但又不都是准确地小 0.02mm , 而是有的可能略大一些, 有的可能略小一些, 参差不齐地在 0.02mm 附近波动。此外, 对机床主轴箱在工作达到热平衡后因温度的上下波动而引起一批零件加工后加工误差的变动范围; 一批工件由于夹紧力变化而造成一批零件加工后的加工误差的变动范围等, 均可看做是随机性误差。

虽然对随机性误差来说, 它的产生原因是错综复杂的, 但并不等于这类加工误差就没有什么规律可循。为了进一步掌握和控制加工误差, 就必须寻求随机性误差的规律性。为此, 现以调整法加工一批轴类零件的轴颈尺寸进行分析和研究。

在完全相同的工艺条件下, 并且在完全消除系统性误差的情况下加工一批轴类零件的轴颈, 加工后经准确测量发现它们的尺寸有大有小不完全相同。经分析其原因主要与这批零件的材质软硬和加工余量大小不等有关。为了便于分析, 现先只考虑这批零件材质软硬不等这方面的影响。

现假设由于材质软硬不均而对加工误差产生影响的有甲、乙、丙、丁等诸因素。为了简化分析, 现取最简单的情况, 即每一个因素对加工后轴颈尺寸的影响都有三种可

能：一使被加工零件的轴颈尺寸恰好等于这批零件轴颈尺寸的平均值 $\bar{a}$ 、二和三使其比平均值分别大 $1\mu\text{m}$ 和小 $1\mu\text{m}$ 。这样就可通过简单的数学推导，找出只有一个因素或同时有二个、三个以至四个因素作用时造成这批零件轴颈尺寸的分布规律。将它们点画在以零件轴颈尺寸及各类尺寸出现频率的直角坐标上，如图 1-2 所示。

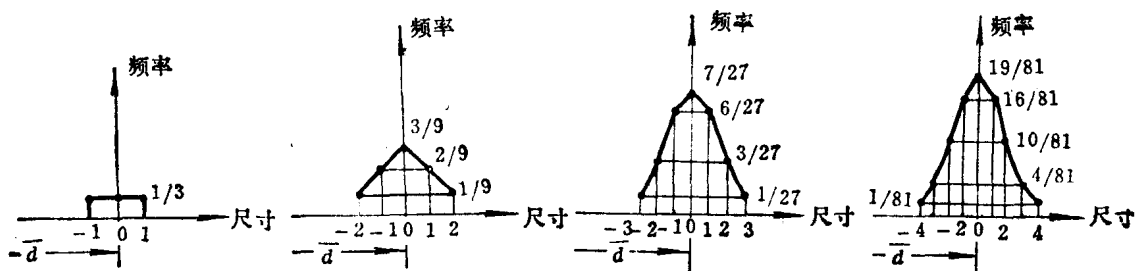


图1-2 一~四个因素作用时零件轴颈尺寸的分布规律

当有六个或更多因素同时作用时，这批零件轴颈尺寸的分布规律如图 1-3 所示，它将由一条折线逐渐演变成为一条近似光滑的曲线（图中虚线所示）。

同理，由于这批零件轴颈加工余量不均所产生的尺寸误差，其分布规律同材质不均的影响一样。当同时考虑它们的影响时，总的随机性误差也必然有如图 1-3 中虚线所示的分布规律。

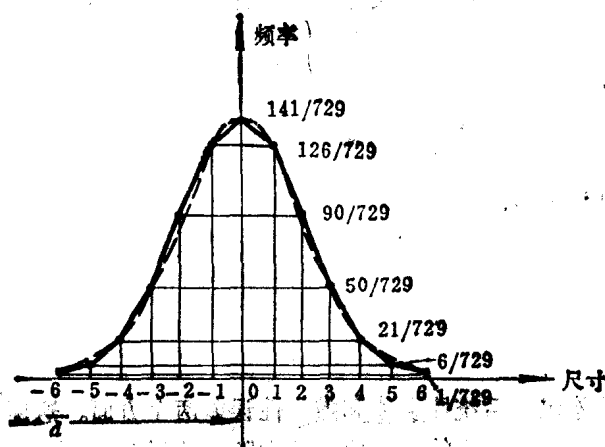


图1-3 同时有六个或更多因素作用时零件轴颈尺寸的分布规律

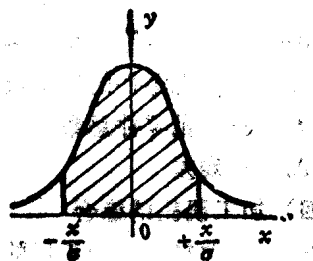


图1-4 正态分布曲线

综上所述，由图中曲线可知随机性误差也有它本身的规律性，具体表现为：

- (1) 随机性误差有大有小，其出现的可能性是以一批零件的平均尺寸为 中心的对称分布；
- (2) 距这批零件平均尺寸越近的随机性误差出现的可能性越大，而越远的则出现的可能性越小；
- (3) 虽然随着同时作用的因素增加而使随机性误差的分布范围增加，但由于误差

最大值和最小值两个极端情况出现的可能性极小，故可认为随机性误差是具有一定的实用范围的。

为了确定随机性误差的实用范围，可通过对与随机性误差分布规律相适应的正态分布曲线 $y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ 下面积的积分求得。如图 1-4 所示，对图中曲线下具有阴影部分的面积 A 可通过对分布曲线的积分计算求得，即：

$$A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{x}{\sigma}}^{+\frac{x}{\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} d\left(\frac{x}{\sigma}\right)$$

各种不同的 $\frac{x}{\sigma}$ 值时的面积 A 值可由表 1-1 查得

表1-1 不同 $\frac{x}{\sigma}$ 值时曲线下面积 A 的部分值

$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A
0	0.0000	0.2	0.1586	0.5	0.3830	1.5	0.8664	2.5	0.9876	3.5	0.9994
0.1	0.0796	0.3	0.2359	1	0.6826	2	0.9542	3	0.9973	4	0.9999

由上述部分积分表的数值可知，随机性误差出现在 $x = \pm 3\sigma$ 之外的可能性仅占 0.27%。由于这个数值很小，故可认为随机性误差的实用分布范围就是 $\pm 3\sigma$ 。 σ ——系均方根偏差，其数值可通过对一批零件加工后实际尺寸的统计计算求得，即：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}}$$

式中 d_i ——一批零件中某个零件的实际尺寸；

$\bar{d}$ ——批零件的平均尺寸；

n ——批零件总数；

Δ_i ——残差。

(四) 加工误差的综合

对一批零件来说，加工后的总误差包括系统性误差和随机性误差两个方面。这两个方面的加工误差，往往也都是分别由很多项单个的系统性误差和随机性误差综合的结果。由于系统性误差和随机性误差的性质不同，故在综合时对系统性误差是用代数和表示，而对随机性误差则是用方根平方和表示，即：

$$\Delta_{\text{总}} = \Delta_{\text{系}} \pm \frac{1}{2} \Delta_{\text{随}}$$

式中 $\Delta_{\text{总}}$ ——一批零件加工后的总误差；

$\Delta_{\text{系}}$ ——所有单个系统性误差的综合

$$\Delta_{\text{系}} = \sum_{i=1}^m \Delta_{\text{系}i}$$

$\Delta_{\text{总}}^2$ ——所有单个随机性误差的综合

$$\Delta_{\text{总}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \Delta_{\text{总}j}^2}$$

三、机械加工精度的研究内容

研究机械加工精度的根本目的就在于通过减少和控制各种原始误差来不断提高机器零件的加工精度，以适应机器性能和使用寿命方面不断提高的要求。

在机械制造业中，对机械加工精度的要求越来越高。从机械加工精度不断提高的过程就可明显地看到这一点。据统计，从十九世纪初开始，机械加工能达到的最高精度几乎每隔 50 年提高一个数量级，即由 1800 年初的 1mm 提高 1850 年的 0.1mm、1900 年的 0.01mm 和 1950 年的 0.001mm。而从二十世纪五十年代开始，机械加工精度提高的步伐更加迅速。如到 1970 年时，其最高精度已达到 $0.1\mu\text{m}$ ，目前又在向 $0.01\mu\text{m}$ 的精度挺进。此外，我国的齿轮和丝杠的精度标准已由原来的旧标准五级改为包括尚未定具体数值待发展级在内的新标准十级，我国公差标准也由原来的旧标准十二级改为新标准二十级。上述这些都充分说明了机械加工精度要求不断提高的总趋势。

机械加工精度研究的主要内容如下：

- (1) 机械加工精度的获得方法；
- (2) 工艺系统原有的原始误差对机械加工精度的影响及其控制措施；
- (3) 加工过程中其它因素造成的原始误差对机械加工精度的影响及其控制措施；
- (4) 提高机械加工精度的主要途径。

第二节 机械加工精度的获得方法

一、尺寸精度的获得方法

1. 试切法 是获得零件尺寸精度最早采用的加工方法，同时也是目前常用的获得高精度尺寸的主要方法之一。所谓试切法，即是在零件加工过程中不断对已加工表面的尺寸进行测量，并相应调整刀具相对工件加工表面的位置进行试切，直到达到尺寸精度要求的加工方法。如图 1-5 所示，轴颈尺寸的试切加工、轴颈尺寸的在线测量磨削、箱

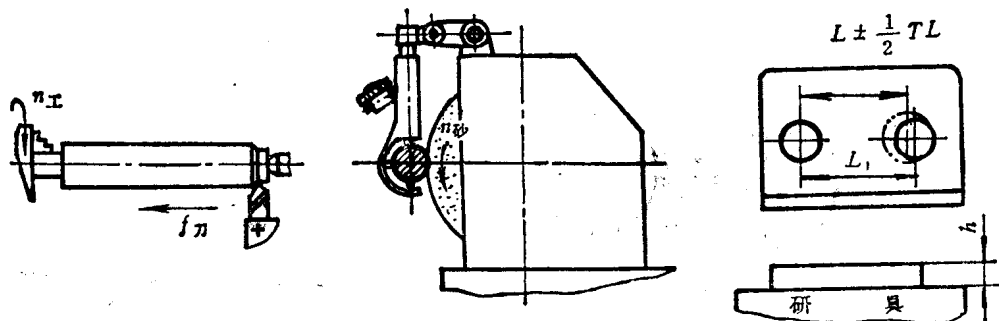


图1-5 试切法加工实例

体孔系的试镗加工及精密量块的手工精研等，均属试切法加工。

2. 调整法 是在成批生产条件下采用的一种加工方法。所谓调整法，即是按试切好的工件尺寸、标准样件或对刀块等调整确定刀具相对零件相应加工表面的准确位置，并在保持此准确位置不变的条件下，对一批零件进行加工的方法。如图 1-6 所示，在多刀车床、六角车床或自动车床上加工轴类零件（见图 a），在铣床上铣槽（见图 b），在无心磨床上磨削外圆（见图 c），以及在摇臂钻床上通过钻模加工箱体孔系（见图 d）等，均属调整法加工。

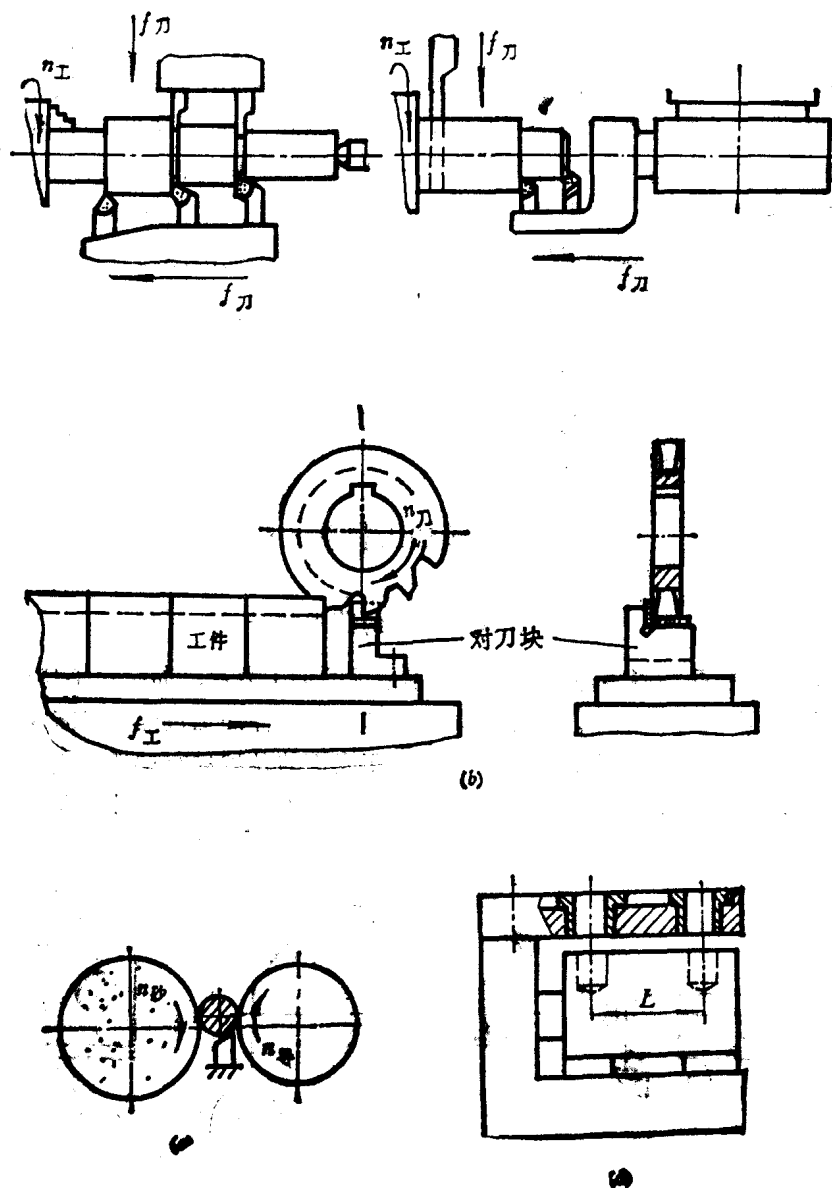


图1-6 调整法加工实例

3. 尺寸刀具法 即是在加工过程中, 采用具有一定尺寸的刀具或组合刀具, 以保证被加工零件尺寸精度的一种方法, 一般多用于封闭表面或平行表面的加工。如图 1-7 所示, 用方形拉刀拉方孔 (见图 a), 用钻头、扩孔钻、铰刀或镗刀块加工内孔 (见图 b), 以及用组合铣刀铣槽 (见图 c) 等, 均属尺寸刀具法加工。

4. 自动控制法 即在加工过程中, 通过由尺寸测量装置、动力进给装置和 控制 机构等组成的自动控制的加工系统, 使加工过程中的尺寸测量、刀具的补偿调整和切削加工等一系列工作自动完成, 从而自动获得所要求的尺寸精度的方法。

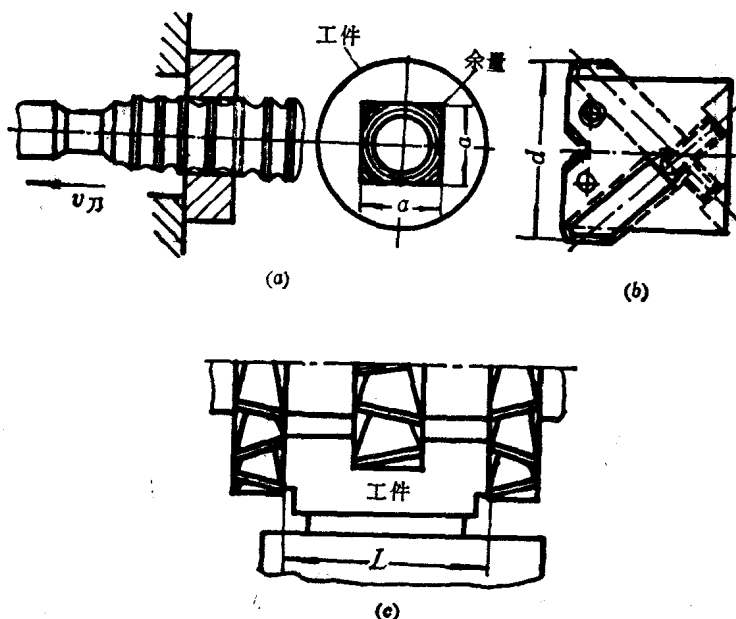


图1-7 尺寸刀具法加工实例

图 1-8 是在无心磨床上加工轴承座圈外圆时的尺寸自动控制系统原理简图。

自动测量装置是用电接触式的, 当被加工零件的外圆尺寸由于砂轮磨损而超出要求范围时, 触头 1 上移, 杠杆 2 就与触点 3 接触闭合, 电磁铁 4 作用将杠杆 5 吸下。这时, 杠杆 5 另一端的插销从凸轮 6 的凹槽处退出, 于是动力进给机构通过凸轮 7 带动摇杆 8 作往复回转运动, 并通过棘轮棘爪机构和蜗杆蜗轮副及丝杠螺母驱动导轮架 9 作补偿进给运动。当被加工工件的外圆尺寸减小到最小极限尺寸时, 杠杆 2 又与触点 10 接触闭合, 此时电磁铁 4 失去作用且在弹簧作用下使杠杆 5 另一端的插销又插进凸轮 6 的凹槽处, 使摇杆 8 不能复位并与凸轮 7 脱离接触, 于是导轮架 9 的补偿进给运动暂时自动停止。

图 1-9 所示是在数控机床上自动保证零件加工尺寸的原理方框图。

数控机床上的数控装置发出脉冲指令, 通过鉴相比较和功率放大后驱动电液步进电机转动一个相应的角度, 再通过机械传动机构驱使工作台或刀架前进一个相应的位移距离。与此同时, 测量装置将工作台或刀架的实际位移测出, 转换为脉冲信号反馈至比较器, 使之与控制脉冲进行比较, 并根据两者间的差值驱动工作台再作补偿位移, 从而保证工件的尺寸精度。