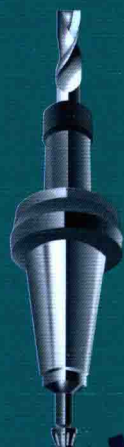


机械加工精度测量 与质量控制

薛岩 于明 等编著

JIXIE JIAGONG
JINGDU CELIANG YU
ZHILIANG KONGZHI

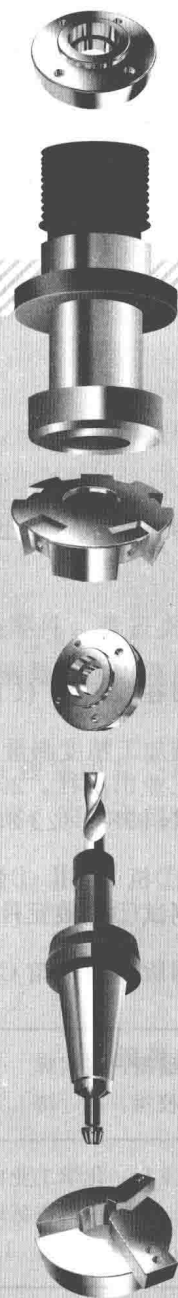


化学工业出版社

机械加工精度测量 与质量控制

薛 岩 于 明 等编著

JIXIE JIAGONG
JINGDU CELIANG YU
ZHILIANG KONGZHI



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以机械加工工艺为主线,实用、全面地介绍了机械加工过程中的精度测量及质量控制技术。全书主要内容包括零件的加工质量、极限与配合、几何公差、表面粗糙度、测量技术基础、测量误差与数据处理、几何量精度的测量,以及典型零件(轴类零件、套类零件、盘盖类零件、壳体类零件和齿轮类零件等)的精度测量方法以及质量控制的措施等。全书实用性强,采用最新国家标准。

本书可供机械制造业中工程技术人员、技术工人查阅和参考,也可供高等工科院校机械类和近机械类师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械加工精度测量与质量控制/薛岩,于明等编著. —北京:
化学工业出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-122-25526-6

I. ①机… II. ①薛…②于… III. ①机械元件-机械加工-
精密测试②机械元件-机械加工-质量控制 IV. ①TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 255532 号

责任编辑: 张兴辉
责任校对: 边 涛

文字编辑: 张绪瑞
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 432 千字 2016 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 79.00 元

版权所有 违者必究



前言

Foreword

随着我国经济实力的不断提高,机械行业对产品的质量要求越来越高,而零件的加工质量是保证产品质量的基础,零件加工质量的衡量标准即为加工精度。误差在机械加工过程中是不可避免的,需要我们对机械加工工艺过程进行控制,对影响机械加工精度的因素进行分析,提出相关的解决措施,从根本上减少误差的产生,从而提高零件的加工精度。

为使相关的工程技术人员能够掌握机械加工的精度要求、测量技术基础及典型零件加工过程中的精度测量及质量控制,我们以贯彻新颁布的国家标准为主,尽可能多地结合生产中典型实例,内容全面、突出实用性,编写了本书。

本书内容主要包括:

机械加工的精度要求部分,主要介绍了零件的加工质量与加工精度,以及零件精度要求的基础标准:极限与配合、几何公差、表面粗糙度。

测量技术基础部分,主要介绍了测量技术概论、测量误差及数据处理、几何量精度的测量。

典型零件的精度测量及质量控制部分,主要介绍了轴类零件、套类零件、盘盖类零件、壳体类零件和齿轮类零件的结构特点、技术要求、加工工艺分析、精度测量方法以及质量控制示例。

本书由山东建筑大学薛岩,济南军区锅炉环境检测站于明,济南一建集团总公司刘薛宁、王博编写。本书在编写过程中,全体编写人员付出了大量心血和时间,同时也得到了参编单位的领导和同事的大力支持,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编著者



目 录 Contents

第 1 篇 机械加工的精度要求

第 1 章 零件的加工质量 1

- 1.1 零件的工作能力与加工质量的关系 1
 - 1.1.1 零件的工作能力 1
 - 1.1.2 零件的加工质量 2
- 1.2 零件加工质量的主要影响因素 3
 - 1.2.1 工艺系统的原始误差 3
 - 1.2.2 提高加工精度的工艺措施 11
- 1.3 零件加工质量的控制 13
 - 1.3.1 零件尺寸精度的控制 13
 - 1.3.2 零件几何精度的控制 15
 - 1.3.3 零件加工表面质量的控制 17

第 2 章 极限与配合 18

- 2.1 概述 18
 - 2.1.1 有关尺寸的术语及定义 18
 - 2.1.2 有关公差与偏差的术语及定义 20
 - 2.1.3 有关配合的术语与定义 21
- 2.2 极限与配合国家标准 25
 - 2.2.1 标准公差系列 25
 - 2.2.2 基本偏差系列 28
 - 2.2.3 公差带与配合的国家标准 33
- 2.3 极限与配合的选择 35
 - 2.3.1 基准制的选择 35
 - 2.3.2 公差等级的选择 37
 - 2.3.3 配合的选用 39
- 2.4 线性尺寸的未注公差 42

第 3 章 几何公差 44

- 3.1 概述 44
 - 3.1.1 几何误差产生的原因及对零件使用性能的影响 44
 - 3.1.2 几何公差的有关术语 45

- 3.1.3 几何公差的几何特征及符号 46
- 3.1.4 几何公差代号和基准符号 46
- 3.2 几何公差的标注 47
 - 3.2.1 被测要素的标注 47
 - 3.2.2 基准要素的标注 48
 - 3.2.3 几何公差标注示例 49
- 3.3 几何公差的公差带 50
 - 3.3.1 形状公差及公差带 50
 - 3.3.2 方向公差及公差带 52
 - 3.3.3 位置公差 58
 - 3.3.4 跳动公差 62
- 3.4 公差原则 64
 - 3.4.1 有关术语及定义 64
 - 3.4.2 公差原则 67
- 3.5 几何公差的选择及未注几何公差的规定 73
 - 3.5.1 几何特征的选择 73
 - 3.5.2 基准的选择 74
 - 3.5.3 公差原则的选择 74
 - 3.5.4 几何公差的公差等级的选择 75
 - 3.5.5 几何公差的选择方法与举例 80

第 4 章 表面粗糙度 82

- 4.1 概述 82
 - 4.1.1 表面粗糙度的概念 82
 - 4.1.2 表面粗糙度对机械零件使用性能的影响 82
- 4.2 表面粗糙度的评定 84
 - 4.2.1 有关基本术语 84
 - 4.2.2 表面粗糙度的评定参数 85
 - 4.2.3 表面粗糙度的数值规定 86
- 4.3 表面粗糙度的选择和标注 88

4.3.1 表面粗糙度评定参数及 数值的选择	88
---------------------------------	----

4.3.2 表面结构要求在图样上的 标注	90
-------------------------------	----

第2篇 测量技术基础

第5章 测量技术概述 98

5.1 测量技术的基础知识	98
5.1.1 测量的定义	98
5.1.2 有关的常用术语	99
5.2 测量器具的分类及主要技术 指标	99
5.2.1 测量器具的分类	99
5.2.2 测量器具的主要技术 指标	100
5.3 常用测量器具的使用、 维护及示例	101
5.3.1 卡尺(普通游标卡尺、 高度游标卡尺、深度 游标卡尺、带表卡尺、 数显卡尺)	101
5.3.2 千分尺(外径千分尺、 内径千分尺、杠杆千分尺、 深度千分尺、内测千分尺) ..	116
5.3.3 指示表(内径百分表、 杠杆百分表、深度百分表、 扭簧比较仪、电感测微仪、 气动测量仪)	127
5.3.4 角度量具(直角尺、万能 角度尺)	140
5.3.5 量规(光滑极限量规、 螺纹量规)	145
5.3.6 立式光学比较仪、测长仪 ..	151

5.3.7 三坐标测量机	156
5.4 测量方法及测量技术的 应用	163
5.4.1 测量方法的分类	163
5.4.2 测量技术的基本原则	164

第6章 测量误差及数据处理 166

6.1 测量误差的概述	166
6.1.1 测量误差简介	166
6.1.2 测量误差的产生	167
6.2 测量误差的分类及数据 处理	169
6.2.1 系统误差	169
6.2.2 随机误差	170
6.2.3 粗大误差	173
6.2.4 测量不确定度	173
6.3 测量精度	175

第7章 几何量精度的测量 176

7.1 尺寸精度的测量	176
7.1.1 用通用测量器具测量 工件	176
7.1.2 用光滑极限量规测量 工件	179
7.2 几何精度的测量	184
7.2.1 几何误差的检测原则	184
7.2.2 几何误差的评定准则	186
7.2.3 几何精度的测量示例	188
7.3 表面精度的测量	197
7.3.1 表面粗糙度的测量方 法	198
7.3.2 表面粗糙度的测量示 例	199

第3篇 典型零件的精度测量与质量控制

第8章 轴类零件 206

8.1 轴类零件的结构特点与 技术	206
8.2 轴类零件的加工工艺分 析	209
8.3 轴类零件的精度	211
8.3.1 轴类零件的精度测量	211
8.3.2 轴类零件精度影响因 素及	212

8.4 轴类零件精度测量与质 量	213
8.4.1 细长轴	213
8.4.2 花键轴	217
8.4.3 车床主轴	220

第9章 套类零件 226

9.1 套类零件的结构特点与 技术	226
----------------------------	-----

9.2 套类零件的加工工艺分析	233	11.3.2 壳体类零件精度影响 因素及措施	257
9.3 套类零件的精度	235	11.4 壳体类零件精度测量与 质量控制示例	258
9.3.1 套类零件的精度测量	235	11.4.1 CA6140 型车床主轴箱 ...	258
9.3.2 套类零件精度影响 因素及措施	236	11.4.2 减速器箱体	261
9.4 套类零件精度测量与质量 控制示例	238	第 12 章 齿轮类零件	264
9.4.1 轴承套	238	12.1 齿轮类零件的结构特点与 技术要求	264
9.4.2 液压缸	239	12.2 齿轮类零件的加工工艺分析 ...	265
第 10 章 盘盖类零件	241	12.2.1 齿轮材料、毛坯及 热处理	265
10.1 盘盖类零件的结构特点与 技术要求	241	12.2.2 齿轮的加工	266
10.2 盘盖类零件的加工工艺分析	242	12.2.3 齿轮类零件加工的定位 基准和装夹	274
10.3 盘盖类零件的精度	243	12.3 齿轮类零件的精度	274
10.3.1 盘盖类零件的精度测量 ...	243	12.3.1 齿轮类零件的精度测量 ...	274
10.3.2 盘盖类零件精度影响 因素及措施	244	12.3.2 齿轮类零件精度影响 因素及措施	275
10.4 盘盖类零件精度测量与 质量控制示例	244	12.4 齿轮类零件精度测量与 质量控制示例	278
第 11 章 壳体类零件	246	12.4.1 圆柱齿轮	278
11.1 壳体类零件的结构特点与 技术要求	246	12.4.2 圆锥齿轮	281
11.2 壳体类零件的加工工艺分析	253	12.4.3 蜗杆蜗轮	284
11.3 壳体类零件的精度	256		
11.3.1 壳体类零件的精度测量 ...	256		
参考文献	289		

第1篇

机械加工的精度要求

第1章



零件的加工质量

1.1 零件的工作能力与加工质量的关系

1.1.1 零件的工作能力

各种机械产品都是由若干个零件组成的，这些零件工作时都要承受载荷的作用，而零件必须在规定的工作条件和使用寿命期间能够抵抗可能出现的失效，即能够正常工作，这就是机械零件的工作能力。

(1) 衡量机械零件工作能力的主要指标

① 强度 强度是指零件在外力作用下抵抗断裂破坏或塑性变形的能力。保证零件在外力作用下不发生破坏，是零件能正常工作的前提条件，也是衡量机械零件工作能力的最基本原则。

② 刚度 刚度是指零件在外力作用下抵抗弹性变形的能力，即零件在外力作用下产生的变形应在允许的限度之内。刚度是保证强度的重要条件，刚度不足将影响机器的正常工作、影响加工精度、影响自振频率等。

③ 稳定性 稳定性是指零件在压力作用下维持原有形态平衡的能力。某些细长杆件（或薄壁构件）在轴向压力达到一定的数值时，会失去原来的平衡形态而丧失工作能力，这种现象称为失稳。

④ 耐磨性 耐磨性是指零件抗磨损的能力。

⑤ 耐热性 耐热性是指零件在受热的条件下，仍能保持其优良的力学性能的性质。

⑥ 抗振性 抗振性是指零件在外界一定频率和幅值的交变载荷作用下，不致发生共振，振幅也不得超过一定限度的能力。

⑦ 耐腐蚀性 耐腐蚀性是指零件抵抗周围介质腐蚀破坏作用的能力。

(2) 机械零件的失效

机械零件的失效是指零件丧失预定的功能或达不到设计要求的性能。常见的失效形式有：

① 断裂 属于强度问题。零件在外力作用下，其危险截面的应力超过零件的强度极限而导致的断裂；或在变应力的作用下，危险截面发生的疲劳断裂。

② 过大的塑性变形 仍然属于强度问题。当作用于零件上的应力超过了材料的屈服极限，零件将产生残余变形，破坏零件之间的相互位置和配合关系，降低工作精度。

③ 过量的弹性变形 属于刚度问题。弹性变形在允许的范围之内是可以的，但过量后，会使零件不能正常工作，有时还会引起振动。

④ 零件的表面失效 零件的表面破坏主要是腐蚀、磨损和接触疲劳（点蚀）、胶合、表面塑性流动、压溃等，会改变相对位置关系和配合关系，降低工作精度。

另外，还有连接的松动、运动精度达不到要求、打滑或过热、压力容器或管道的泄漏等失效形式。

1.1.2 零件的加工质量

质量是表示产品优劣程度的参数，机械产品的质量体现在机械产品的工作性能和使用寿命上，这两者在很大程度上取决于零件的工作能力，而零件的工作能力直接与零件的机械加工质量有关。因此，对机械零件的加工的质量要求越来越高，保证零件的加工质量是保证机械产品质量的基础。

机械零件的加工质量，包括机械加工精度和表面质量两个方面的要求。通常设计人员会根据零件的具体使用要求来规定零部件的加工精度，并采取适当的工艺方法来对误差范围加以控制。通过精度的控制，一方面可以提高生产效率，另一方面也可以降低加工的成本，提高工件使用寿命。

（1）加工精度

加工精度是指零件加工后的实际几何参数（尺寸、形状和位置）与理想几何参数相符合的程度。它们之间的差异称为加工误差，加工误差的大小反映了加工精度的高低。加工误差越大精度越低，加工误差越小精度越高。任何加工方法所得到的实际参数都不会绝对准确，从零件的功能看，只要加工误差控制在零件图要求的公差范围之内，就认为保证了零件的加工精度。加工精度包括：

① 尺寸精度 指加工后零件的实际尺寸与零件尺寸公差带中心的相符合程度。主要是用来严格限制加工表面与基准尺寸的误差。在机械加工中通常通过设置尺寸精度，把实际值与理想值之间的误差控制在一定范围之内。尺寸精度是加工精度中的重要内容。

② 几何精度 几何精度包括形状精度和位置精度。

形状精度是指加工后零件表面的实际几何形状与理想几何形状的相符合程度。主要是指，在对零件进行加工的时候，通过几何形状精度来控制零件表面几何形状误差的指标。在机械加工中常常用到的几何形状精度主要是直线度、平面度、圆度以及圆柱度。

位置精度是指加工后零件有关表面之间的实际位置与理想位置的相符合程度。主要是指，用来限制加工表面与基准的相互位置误差的指标。在机械加工中通常用到的相互位置精度主要是平行度、垂直度、倾斜度、同轴度、对称度以及位置度。

尺寸精度和几何精度构成了完整的机械加工精度。在机械加工中由于多种因素的限制，误差是永远存在着的，机械加工中的误差只能控制而不能消除，因而进行精度控制在机械加工中就显得非常重要。

（2）加工表面质量

加工表面质量是指机械加工后零件表面层的微观几何结构以及表层金属材料性质发生变



化的情况,它是零件加工后表面层状态完整性的表征。加工表面质量包括两个方面的内容:加工表面的几何形状误差和表面层金属的力学物理性能。

① 加工表面的几何形状误差 加工表面的几何形状误差,包括如下四个部分:表面粗糙度是加工表面的微观几何形状误差,其波长与波高比值一般小于50;表面波纹度是加工表面不平度中波长与波高的比值等于50~1000的几何形状误差;纹理方向是指表面刀纹的方向,它取决于表面形成过程中所采用的机械加工方法,在表4-13中给出了各种纹理方向及其符号标注;伤痕是在加工表面上一些个别位置上出现的缺陷,例如砂眼、气孔、裂痕等。

当波长与波高比值大于1000时,称为宏观几何形状误差,例如圆度误差、圆柱度误差等,它们属于加工精度范畴。

② 表面层金属的力学物理性能和化学性能 由于机械加工中力因素和热因素的综合作用,加工表面层金属的力学物理性能和化学性能将发生一定的变化,主要反映在以下三个方面。

a. 表面层金属的冷作硬化 表面层金属硬度的变化用硬化程度和深度两个指标来衡量。在机械加工过程中,工件表面层金属都会有一定程度的冷作硬化,使表面层金属的显微硬度有所提高。一般情况下,硬化层的深度可达0.05~0.30mm;若采用滚压加工,硬化层的深度可达几个毫米。

b. 表面层金属的金相组织 机械加工过程中,由于切削热的作用会引起表面层金属的金相组织发生变化。在磨削淬火钢时,由于磨削热的影响会引起淬火钢中的马氏体的分解,或出现回火组织等。

c. 表面层金属的残余应力 由于切削力和切削热的综合作用,表面层金属晶格会发生不同程度的塑性变形或产生金相组织的变化,使表层金属产生残余应力。

加工表面质量的主要指标是表面粗糙度。

1.2 零件加工质量的主要影响因素

零件的机械加工是在由机床、夹具、刀具和工件组成的工艺系统中进行的。零件的尺寸、几何形状和表面间相对位置的获得,取决于工件和刀具在切削运动过程中的相对位置和相互运动关系,所以零件的尺寸、几何形状和表面间相对位置的精度,取决于机床、夹具、刀具和工件这个工艺系统的精度。工艺系统中的各种误差,都以不同的程度和方式反映为加工误差。工艺系统的误差是“因”,是根源,加工误差是“果”,是表现,因此,把工艺系统的误差称之为原始误差。工艺系统中的各项原始误差,都会使工件和刀具的相对位置或相互运动关系发生变化,造成加工误差,从而影响零件的加工精度。分析产生各种原始误差的因素,积极采取措施控制原始误差,是保证和提高加工精度的关键。

1.2.1 工艺系统的原始误差

工艺系统的原始误差是指,由于工艺系统本身的结构状态、操作过程以及加工过程中的物理力学现象,使得刀具和工件之间的相对位置关系发生偏移的各种因素。一部分原始误差与工艺系统本身的初始状态有关;一部分原始误差与切削过程有关。这两部分误差又受环境条件、操作者技术水平等因素的影响。

(1) 与工艺系统本身的初始状态有关的原始误差

① 加工原理误差 是指采用了近似的成形运动或近似的刀刃轮廓进行加工而产生的误差。通常,为了获得规定的加工表面,刀具和工件之间必须实现准确的成形运动,机械加工中称为加工原理。理论上应采用理想的加工原理和完全准确的成形运动以获得精确的零件表面。但在实践中,完全精确的加工原理常常很难实现,有时加工效率很低;有时会使机床或

刀具的结构极为复杂,制造困难;有时由于结构环节多,造成机床传动中的误差增加,或使机床刚度和制造精度很难保证。因此,采用近似的加工原理以获得较高的加工精度,是保证加工质量和提高生产率以及经济性的有效工艺措施。

例如,齿轮滚齿加工用的滚刀本身有两种原理误差:一是刀刃齿廓近似造形原理误差,由于制造上的困难,采用阿基米德基本蜗杆或法向直廓基本蜗杆代替渐开线基本蜗杆;二是由于滚刀刀刃数有限,实际加工出的齿形是一条折线而不是光滑的渐开线,但由此造成的齿形误差远比由滚刀制造和刃磨误差引起的齿形误差小得多,故忽略不计。又如模数铣刀成形铣削齿轮,模数相同而齿数不同的齿轮,齿形参数是不同的,理论上,同一模数不同齿数的齿轮就要用相应的一把齿形刀具加工。实际上,为精简刀具数量,常用一把模数铣刀加工某一齿数范围的齿轮,也采用了近似刀刃轮廓。

② 调整误差 机械加工过程中经常需要进行一些调整工作,调整的作用主要是使刀具与工件之间达到正确的相对位置。在调整过程中不可能绝对准确,难免会产生误差,这是由于调整过程中调整幅度难以控制造成的,调整误差最终也会影响到机械加工质量与精度。工艺系统的调整有两种基本方式,即试切法和调整法。

a. 试切法 是指通过对工件试切、测量、调整刀具、再试切的反复过程,直至达到所需要的尺寸。试切法生产效率低,要求工人的技术水平较高,否则质量不易保证,在单件小批量生产中普遍采用试切法加工。引起试切法调整误差的因素主要有:

i. 测量误差 指量具本身的精度、测量方法或使用条件下的误差(如温度影响、操作者的细心程度)等,它们都影响调整精度,因而产生加工误差。

ii. 机床进给机构的位移误差 当试切最后一刀时,往往要按刻度盘的显示值来微量调整刀架的进给量,这时常会出现进给机构的“爬行”现象,结果使刀具的实际位移与刻度盘显示值不一致,造成加工误差。

iii. 试切与正式切削时切削层厚度不一致 不同材料刀具的刃口半径是不同的,因此,刀刃所能切除的最小切削层的极限厚度不同。

b. 调整法 是指在成批、大量生产中,先根据样件(或样板)进行初调,试切若干工件,再据此作精确微调。这样既缩短了调整时间,又可得到较高的加工精度。由于采用调整法对工艺系统进行调整时,也要以试切为依据,因此上述影响试切法调整精度的因素,同样也对调整法有影响。此外,影响调整精度的因素还有:

i. 定程机构误差 在大批大量生产中,广泛采用行程挡块、靠模、凸轮等机构保证加工尺寸。这时候,这些定程机构的制造精度和调整,以及与它们配合使用的离合器、电气开关、控制阀等的灵敏度,就成为调整误差的主要来源。

ii. 样件或样板的误差 在调整法中常采用样板或样件来调整刀具和工件的相对位置,这时样件或样板的制造误差、安装误差和对刀误差均会影响调整精度。

iii. 测量有限试件造成的误差 工艺系统初调好以后,一般都要试切几个工件,并以其平均尺寸作为判断调整是否准确的依据:由于试切加工的工件数(称为抽样件数)不可能太多,因此不能把整批工件切削过程中各种随机误差完全反映出来。故试切加工几个工件的平均尺寸与总体尺寸不可能完全符合,因而造成误差。

③ 定位误差 定位是机械加工中的重要步骤,在定位过程中产生的误差就是定位误差。造成定位误差主要有两个因素:一是机械加工选择的实际定位与设计定位,两者之间存在误差,从而造成定位误差;二是机械加工中定位元件不准确,实际尺寸超出了允许变动范围,这是造成定位误差的又一个重要因素。

④ 夹具误差 夹具的作用是使工件相对于刀具和机床占有正确的位置,因此,夹具误差对工件的加工精度(特别是位置精度)有很大影响。夹具的实际误差就体现在装夹过程

中,由此产生基准不重合误差和定位副制造误差。夹具元件磨损使夹具误差增大,为保证工件加工精度,夹具中的关键易损元件(如:铣套、镗套、定位元件等)需选用高耐磨材料制造,且在磨损达到一定程度后及时更换。

所以,在加工过程中,应注意选择合适的夹具,采用正确的夹紧方法,选择合适的夹紧力和夹紧力作用点。保证在加工过程中工件位置不发生变化,工作可靠,并增加工件的安装刚性,减少振动。

⑤ 安装误差 是指工件在夹具中定位和夹紧时产生的误差。例如加工一批工件,每个工件的定位基准面与夹具定位元件的紧贴程度不同,还有工件的设计基准和定位基准不重合,都会造成安装误差。

⑥ 测量误差 是指确定工件尺寸的量具、量仪或机床检测元件(感应同步器、光栅、激光干涉仪)本身的误差和测量过程引入的误差之和。测量误差中包括仪器误差和测量过程误差。仪器误差:量具和量仪在设计原理、制造和安装上的缺陷带来的误差。测量过程误差:量具、量仪或机床上的检测元件在使用过程中,由于测量方法、环境条件和操作人员经验等引入的误差。

⑦ 刀具误差 主要指的是,在机械加工过程中由于刀具自身的磨损,导致机械加工中工件尺寸形状的误差。刀具误差是机械加工误差中的一个典型误差,刀具对加工精度和质量的影响,随刀具的种类不同而不同。当采用定尺寸刀具(如钻头、铰刀、键槽铣刀、浮动镗刀及圆拉刀等)加工时,刀具的尺寸精度直接影响工件的尺寸精度;当采用成形刀具(如成形车刀、成形铣刀、成形砂轮等)加工时,刀具的形状误差、安装误差将直接影响工件的形状精度;采用齿轮滚刀、花键滚刀、插齿刀等刀具展成加工时,刀具切削刃的形状必须是加工表面的共轭曲线,因此刀刃的形状误差会影响加工表面的形状精度;对于车刀、铣刀、镗刀等一般刀具,其制造精度对加工精度无直接影响,但这类刀具的耐用度较低,刀具容易磨损,刀具磨损后,就会影响工件的尺寸精度及形状精度,因此对刀具要及时进行修磨。

任何刀具在切削过程中,都不可避免产生磨损。正确地选用刀具材料、合理选用刀具几何参数和切削用量、正确采用冷却液等,均能最大限度减少刀具磨损;必要时,还可以用补偿装置对刀具磨损尺寸进行补偿。

⑧ 机床误差 机械加工主要是在机床上实现的,由于安装及磨损产生的机床误差是造成加工误差的主要原始误差因素,直接影响着机械加工质量和精度。机床误差主要包括机床主轴回转误差、导轨导向误差、传动链的传动误差以及主轴、导轨间的位置误差等几个方面。

a. 机床主轴回转误差 机床主轴是用来装夹工件或刀具,并将运动和动力传给工件或刀具的重要零件。它的回转精度是机床精度的一项重要指标,主要影响零件加工表面的几何形状精度、位置精度和表面粗糙度。主轴回转误差是指主轴实际回转轴线对其平均回转轴线的变动量,理论上讲,主轴回转时,其回转轴线的空间位置是固定不变的,即瞬时速度为零。实际上,由于主轴部件在加工、装配过程中的各种误差和回转时的受力、受热等因素,使主轴在每一瞬时回转轴心线的空间位置处于变动状态,造成轴线漂移,也就是存在着回转误差。主轴回转轴线的运动误差可以分解为径向圆跳动、轴向圆跳动和倾角摆动三种基本形式。

i. 产生机床主轴误差的主要因素有:不同轴孔及轴颈的同轴度误差、主轴系统的热变形或者刚度问题,轴承本身的误差、轴承的间隙、与轴承配合零件的误差等等。但是,它们对机床主轴回转误差的影响是依据加工方式的不同而有所不同的。主轴回转误差可以分解为径向圆跳动、轴向圆跳动和角度摆动三种不同形式。例如,车外圆时,径向圆跳动使加工面产生圆度和圆柱度误差;车端面时,轴向圆跳动使工件端面产生垂直度、平面度误差;机床主轴的角度摆动使回转轴线与工作台的导轨不再是平行的,对镗孔造成影响。

ii. 提高主轴回转精度的措施有以下几项。

提高主轴部件的制造精度。首先应提高轴承的回转精度,如选用高精度的滚动轴承,或采用高精度的多油楔动压轴承和静压轴承。其次是提高与轴承相配合零件(箱体支承孔、主轴轴颈)的加工精度。

对滚动轴承进行预紧。对滚动轴承适当预紧以消除间隙,甚至产生微量过盈。这是因为轴承内、外圈和滚动体弹性变形的相互制约,既增加了轴承刚度,又对轴承内、外圈滚道和滚动体的误差起均化作用,所以可提高主轴的回转精度。

使主轴的回转误差不反映到工件上。直接保证工件在加工过程中的回转精度而不依赖于主轴,是保证工件形状精度的最简单而又有效的方法。

b. 机床导轨误差 导轨是机床中确定主要部件相对位置的基准,也是运动的基准,它的各项误差将会在加工过程中直接作用于工件,影响被加工工件的精度。机床导轨误差,是指机床导轨副的运动件实际运动方向与理想运动方向的符合程度。在机床的精度标准中,直线导轨的导向精度一般包括下列主要内容:导轨在水平面内和垂直面内的直线度误差,前后导轨的平行度误差及导轨对主轴回转轴线的平行度或垂直度误差。

导轨误差对加工精度的影响,因加工方法和加工表面不同而异。在分析导轨误差对加工精度的影响时,主要应考虑导轨误差引起刀具与工件在误差敏感方向的相对位移。

i. 产生导轨导向误差的主要因素有:机床前后导轨平行度出现扭曲;长时间运转,导轨的不均匀磨损;导轨润滑系统出现问题,润滑不到位,导轨研伤;导轨防护罩损坏,加工铁屑、残料等异物进入,研伤导轨;机床安装不正确或地基不良。对加工精度的不良影响主要表现为:进行切削的时候,导轨在水平面内出现弯曲的现象:如果向前突起,就会出现“鼓形误差”;如果向后突起,就会出现“鞍形误差”。

ii. 减少机床导轨误差的措施有:首先在设计时应从结构、材料、润滑、防护装置等方面采取措施,以提高导轨的导向精度和耐磨性;在制造时应尽量提高导轨副的制造精度;机床安装时,应校正好水平和保证地基质量;另外,使用时要注意调整导轨副的配合间隙,同时保证良好的润滑和维护。

c. 机床传动链误差 是指机床传动链中,首、末两端传动元件之间相对运动过程中出现的与理想参数之间的不符程度,它是螺纹、齿轮、蜗轮以及其他零件按展成原理加工时,影响其加工精度的主要因素。我们通常使用传动链条末端传动元件的转角误差来测量。

i. 产生机床传动链误差的主要原因有以下几个方面:传动链条单元制造工艺方面导致的误差;由齿轮、蜗杆、丝杠、螺母等传动元件在装配、加工和使用过程中,产生的其他误差或者正常使用中发生元件磨损;机床长时间大负载运行,造成各个传动机构的一些固定锁紧装置松动;机床使用久了正常磨损;操作不当,人为损坏等。若传动线路越长,传动机构越复杂,则传动误差越大。

ii. 减少传动链传动误差的措施有以下几项。

尽量缩短传动链。传动件数越少,传动链越短,传动精度就越高。

提高传动件特别是末端传动副(如丝杠螺母副、蜗轮蜗杆副等)的制造和装配精度。此外,可采用各种消除间隙装置以消除传动齿轮间的间隙。

尽可能采用降速传动,且传动比最小的一级传动件应在最后。

采用校正装置。校正装置的实质是在原传动链中人为地加入一误差,其大小与传动链本身的误差相等而方向相反,从而使之相互抵消。

(2) 与切削过程有关的原始误差

① 工艺系统力效应引起的变形 切削加工时,工艺系统在切削力、夹紧力以及重力等的作用下,将产生相应的变形和位移,破坏了工件和刀具间在静态下调整好的相互位置关系,造成加工误差。



a. 工艺系统受力变形对加工精度的影响

i. 切削力作用点位置变化引起的工件形状误差 切削过程中, 工艺系统的刚度会随切削力作用点位置的变化而变化, 因此使工艺系统受力变形亦随之变化, 从而导致加工后每一个工件的截面直径尺寸各不相同, 加工后工件出现鼓形、锥度、鞍形等。

ii. 切削力大小变化引起的加工误差 加工时, 如果毛坯形状误差较大或材料硬度很不均匀, 也会引起切削力的变化, 造成工件加工误差。工件的毛坯外形虽然具有粗略的零件形状, 但它在尺寸、形状以及表面层材料硬度上都有较大的误差。毛坯的这些误差在加工时使切削深度不断发生变化, 从而导致切削力的变化。发生改变的切削力再作用于工艺系统上, 使工艺系统的受力变形也产生相应的变化, 切削力增大, 变形也随之增大, 切削力减小, 变形也随之减小, 这种现象在工艺学上称为“误差复映”。每件毛坯的形状误差、位置误差都可以通过复映系数体现在工件加工的误差上, 这都是由于切削余量不均所引发的。当遇到大批量加工生产时, 一般采用定尺寸调整法进行加工, 将刀具调整至一定程度的切深后, 就连续性批量加工, 之后不会再进行试刀或调整切深。

iii. 夹紧力引起的加工误差 工件在装夹时, 由于工件刚度较低或夹紧力着力点不当, 会使工件产生相应的变形, 造成加工误差。用三爪卡盘夹持薄壁套筒时, 假定工件是正圆形, 夹紧后工件因弹性变形而呈三棱形, 虽镗出的孔为正圆形, 但松夹后, 套筒弹性变形恢复使孔变成相反的三棱形。为了减少加工误差, 应使夹紧力均匀分布, 可采用开口过渡环或采用专用卡爪夹紧。

iv. 组成工艺系统的零部件刚度不足导致的加工误差 一方面工件刚度比较低时, 切削力和自身重力作用下引起的工件变形对加工精度影响很大, 特别是细长棒材的加工; 另一方面刀具的刚度也会产生一定的影响。例如, 加工直径较小的内孔时, 采用镗床加工, 假若镗刀的刀杆刚度较差, 在镗孔加工过程中受力变形, 会严重影响内孔的加工精度, 导致加工误差。此外, 机床零部件的刚度也会对零件的加工精度产生影响。

b. 减小工艺系统受力变形对加工精度影响的措施

i. 提高工艺系统的刚度

提高机床构件自身刚度。在设计机床时, 注意提高支承件、传动件的刚度及主轴系统自身的刚度。支承件如床身、立柱、横梁等刚度的提高, 可以从截面形状和筋板布置来考虑。在横截面面积相等的前提下, 有如下结论: 空心截面的惯性矩比实心截面的大, 而刚度与惯性矩成正比关系, 那么就可以通过采用空心截面来提高刚度; 空心截面的外形尺寸愈大, 惯性矩愈大, 因此可用加大轮廓尺寸、减小壁厚来提高刚度, 而不用增加壁厚的方法; 方形截面的抗弯刚度比圆形截面好, 但抗扭刚度比圆形截面小; 长方形截面的抗弯刚度在其高度方向上比正方形截面的大, 但抗扭刚度则比正方形截面小; 封闭截面的刚度显然高于不封闭截面的刚度, 因此, 机床中的立柱、横梁、床身等尽可能采用封闭截面的结构。

提高工件安装时的刚度。工件安装时刚度的提高可以采用增加辅助支承的方法, 这样既不会造成过定位, 又可以保证加工精度。

提高加工时刀具的刚度。在加工时, 刀具的悬伸应尽量短, 刀杆应尽可能粗些, 以提高自身的刚度, 要特别注意多刀加工时, 整个刀具系统的刚度。

提高连接表面的接触刚度。接触刚度是指互相接触的表面, 受力后抵抗其变形的能力。由于部件的接触刚度远远低于实体的刚度, 所以提高接触刚度是提高工艺系统刚度的关键。

采用合理的装夹和加工方式。如加工细长轴时, 若改为反向进给(从主轴箱向尾座方向进给), 使工件从原来的轴向受压变为轴向受拉, 也可提高工件刚度。

此外, 增加辅助支承也是提高工件刚度的常用方法。例如加工细长轴时采用中心架或跟刀架就是一个很典型的实例。

ii. 减小载荷及其变化 采取适当的工艺措施, 如: 合理选择刀具几何参数, 即增大前角、让主偏角接近 90° 等; 合理选择切削用量, 即适当减少进给量和背吃刀量以减小切削力, 就可以减少受力变形; 将毛坯分组, 使一次调整中加工的毛坯余量比较均匀, 就能减小切削力的变化, 减小复映误差。

② 工艺系统热效应引起的变形 在机械加工过程中, 工艺系统会受到各种热的影响而产生温度变形, 一般也称为热变形, 这种变形将破坏刀具与工件的正确几何关系和运动关系, 造成工件的加工误差。热变形对加工精度影响比较大, 特别是在精密加工和大件加工中, 热变形所引起的加工误差通常会占到工件加工总误差的 $40\% \sim 70\%$ 。

a. 引起工艺系统热变形的热源 热源可分为内部热源和外部热源两大类。

i. 内部热源 主要指切削热和摩擦热, 它们产生于工艺系统内部, 其热量主要是以热传导的形式传递的。

切削热是切削加工中最主要的热源, 它对工件加工精度的影响最为直接。在切削(或磨削)过程中, 消耗于切削层的弹性、塑性变形能量及刀具、工件和切屑之间摩擦产生的机械能, 绝大部分都转变成了切削热。切削热 $Q(J)$ 的大小与被加工材料的性质、切削用量及刀具的几何参数等有关。影响切削热传导的主要因素是工件、刀具、夹具、机床等材料的导热性能, 以及周围介质的情况。

摩擦热主要是机床和液压系统中运动部件产生的, 如电动机、轴承、齿轮、丝杠副、导轨副、离合器、液压泵、阀等各运动部分产生的摩擦热。

ii. 外部热源 主要指工艺系统外部的、以对流传热为主要形式的环境温度(它与气温变化、通风、空气对流和周围环境等有关)和各种辐射热(包括由阳光、照明、暖气设备等发出的辐射热)。

b. 工艺系统的热变形对加工精度的影响 主要分为以下三种。

i. 机床热变形引起的加工误差 在工艺系统热变形中, 机床热变形最为复杂, 工件、刀具的热变形相对来说要简单一些。这主要是因为, 在加工过程中, 影响机床热变形的热源较多, 也较复杂, 而对工件和刀具来说, 热源比较简单。

机床在工作过程中, 受到内、外热源的影响, 各部分的温度将逐渐升高。由于各部件的热源不同, 分布不均匀, 以及机床结构的复杂性, 其热变形随位置不同而不同, 温度高的地方热变形大, 温度低处热变形小。因此主要表现在主轴系统和导轨两大部分: 主轴系统的热变形会产生主轴的位移和倾斜, 影响工件的尺寸及几何形状; 导轨的热变形会产生中凹或中凸, 影响工件的几何精度。

机床空运转时, 各运动部件产生的摩擦热基本不变。运转一段时间之后, 各部件传入的热量和散失的热量基本相等, 即达到热平衡状态, 变形趋于稳定。机床达到热平衡状态时的几何精度称为热态几何精度。在机床达到热平衡状态之前, 机床几何精度变化不定, 对加工精度的影响也变化不定。因此, 精密加工应在机床处于热平衡之后进行。一般机床如车床、磨床等, 其空转的热平衡时间为 $4 \sim 6h$, 中小型精密机床为 $1 \sim 2h$, 大型精密机床往往要超过 $12h$, 甚至达数十小时。

机床类型不同, 其内部主要热源也各不相同, 热变形对加工精度的影响也不相同。车、铣、钻、镗类机床, 主轴箱中的齿轮, 轴承摩擦发热和润滑油发热是其主要热源, 使主轴箱及与之相连部分如床身或立柱的温度升高而产生较大变形。对卧式车床热变形试验结果表明, 影响主轴倾斜的主要因素是床身变形, 它约占总倾斜量的 75% , 主轴前后轴承温度差所引起的倾斜量只占 25% 。

对于不仅在水平方向上装有刀具, 在垂直方向和其他方向上也都可能装有刀具的自动车床、转塔车床, 其主轴热位移, 无论在垂直方向还是在水平方向, 都会造成较大的加工误差。



ii. 刀具热变形引起的加工误差 刀具热变形主要是由切削热引起的。通常传入刀具的热量并不太多,但由于热量集中在切削部分,而且刀具通常具有自身体积小、热容量小、热量集中、不易发散等特点,经常会出现较高的温升现象。刀具发生延展,尺寸变大,严重影响工件的切削量的大小,从而影响加工精度。例如车削时,高速钢车刀的工作表面温度可达 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$,而硬质合金刀具可达 1000°C 以上。刀具热变形主要对精加工工序或精密零件的加工过程影响较大,对于粗加工过程可以忽略刀具受热影响。

连续切削时,刀具的热变形在切削初始阶段增加很快,随后变得缓慢,经过不长的时间后($10\sim 20\text{min}$)便趋于热平衡状态。此后,热变形变化量就非常小,刀具总的热变形量可达 $0.03\sim 0.05\text{mm}$ 。

iii. 工件热变形引起的加工误差 工件热变形的热源主要是切削热。对于精密零件,周围环境温度和局部受到日光等外部热源的辐射热也不容忽视。当工件受热变形时,如果再按照预定的图纸进行加工,则加工后的工件必然与设计要求的参数之间产生较大的偏差。例如用车床车制轴类零件时,由于加工过程存在切削热,加工开始阶段温度较低,随着加工的进程温度逐渐升高,受热胀冷缩的影响,切削量增大,在加工冷却后它的直径和长度又都会发生收缩,这样就会产生实际尺寸小于理想尺寸的加工误差;同时在加工过程中由于工件的受热不均,会产生径向加工误差和圆柱度误差;对于有孔的零件加工过程中会产生同轴度误差;加工薄片类零件,则容易出现上翘曲变形的现象,从而在冷却后产生中凹的形状误差。

此外,需要注意的是,不同的机床和加工方法所产生的热源不同,工件受热方式不同,工件的尺寸、材料不同,其产生的加工误差也不相同。比如加工孔状零件,钻削加工和镗孔加工就有很大的区别;孔的大小也会影响加工中的散热,从而影响工件的加工精度;在车削一般轴类工件时可不考虑热变形伸长问题,但是车削细长轴时,因为工件长热变形伸长量大,所以一定要考虑到热变形的影响,不能在工件温度较高时测量。

c. 减少工艺系统热变形对加工精度影响的措施

i. 减少热源的发热和隔离热源 工艺系统的热变形对粗加工精度的影响一般可不考虑,而精加工主要是为了保证零件加工精度,所以工艺系统热变形的影响不能忽视。为了减小切削热,宜采用较小的切削用量。如果粗、精加工在一个工序内完成,粗加工的热变形将影响精加工的精度。一般可以采取:在粗加工后停机一段时间使工艺系统冷却,同时将工件松开,待精加工时再夹紧的工艺措施,从而减少粗加工热变形对精加工精度的影响。当零件精度要求较高时,则以粗、精加工分开为宜。

ii. 均衡温度场 如 M7150A 型磨床,该机床床身较长,加工时工作台纵向运动速度较高,所以床身上部温升高于下部。为均衡温度场所采取的措施是:将油池搬出主机做成一单独油箱;在床身下部配置热补偿油沟,使一部分带有余热的回油经热补偿油沟后送回油池。采取这些措施后,床身上、下部温差降至 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,导轨的中凸量由原来的 0.0265mm 降为 0.0052mm 。

iii. 采用合理的机床部件结构及装配基准 采用热对称结构,在变速箱中,将轴、轴承、传动齿轮等对称布置,可使箱壁温升均匀,箱体变形减小;在工件方面,应尽量避免薄壁、薄片、空心等易热变形的结构,因为外圆尺寸相同的管件和实心材料,前者热变形大;在刀具方面应尽量减少悬伸长度,控制热变形方向,避开误差敏感方向;合理选择机床零部件的装配基准;注意选材等。

iv. 加速达到热平衡状态 对于精密机床特别是大型机床,达到热平衡的时间较长。为了缩短这个时间,可以在加工前,使机床作高速空运转,或在机床的适当部位设置控制热源,人为地给机床加热,使机床较快地达到热平衡状态,然后进行加工。

v. 控制环境温度 精密机床应安装在恒温车间,其恒温精度一般控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,

精密级为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。恒温室平均温度一般为 20°C ，冬季可取 17°C ，夏季取 23°C 。

③ 残余应力重新分布引起的变形 残余应力也称内应力，是指在没有外力作用下或去除外力后工件内存留的应力。具有残余应力的零件处于一种不稳定的状态，它内部的组织有强烈的倾向要恢复到一个稳定的无应力状态，即使在常温下，零件也会不断地、缓慢地进行这种变化，直到残余应力完全松弛为止。在这一过程中，零件将会翘曲变形，原有的加工精度会逐渐丧失。

a. 残余应力是由于金属内部相邻组织发生了不均匀的体积变化而产生的。促成这种变化的因素主要来自冷、热加工。

i. 毛坯制造和热处理过程中产生的残余应力。在毛坯的热加工中，由于毛坯各部分厚薄不均匀，冷却速度不一致产生内应力。毛坯的结构愈复杂，各部分的厚度愈不均匀，散热的条件相差愈大，则在毛坯内部产生的残余应力也愈大。具有残余应力的毛坯由于残余应力暂时处于相对平衡的状态，在短时间内还看不出有什么变化。当加工时某些表面被切去一层金属后，就打破了这种平衡，残余应力将重新分布，零件就明显地出现了变形。

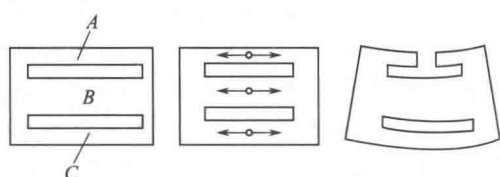


图 1-1 铸件残余应力的形成及变形

工件在铸、锻、焊、热处理等加工过程中，由于金相组织变化而引起体积变化，或工件各处温度不同，冷却速度不一，会使工件产生内应力。例如图 1-1 所示为一内外厚薄相差较大的铸件在铸造过程中产生残余应力的情形。

ii. 冷校直带来的残余应力。细长的轴类零件，如光杠、丝杠、曲轴、凸轮轴等在加工和搬运中很容易弯曲变形，因此大多在加工中安排冷校直工序。冷校直带来的残余应力，可以用图 1-2 来说明。弯曲的工件（原来无残余应力）要校直，必须使工件产生反向弯曲，使工件产生一定的塑性变形，如图 1-2 (a) 所示。当工件外层应力超过屈服强度时，其内层应力还未超过弹性限，故其应力分布情况如图 1-2 (b) 所示。

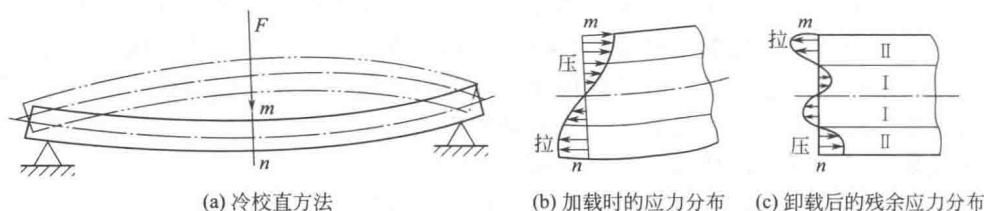


图 1-2 冷校直引起的残余应力

iii. 切削加工带来的残余应力。工件在进行切削加工时，表层产生塑性变形，晶格扭曲，拉长，密度减小，比容增大，因此体积膨胀，受到里层阻碍，故表层受压应力，里层产生平衡的拉应力；表层在切削时受到摩擦力的作用而被拉伸，但里层金属阻碍其拉长，因此表层受压应力，里层产生平衡的拉应力。从以上两点可知，工件在加工时受力的作用，使其表层产生压应力。

b. 减少或消除残余应力，一般可采取下列措施：

i. 增加消除内应力的热处理工序。例如对铸、锻、焊接件进行退火或回火；对精度要求高的零件，如床身、丝杠、箱体、精密主轴，在粗加工后进行时效处理等，以消除内应力。

时效处理分为天然时效、人工时效和振动时效三种。其中，天然时效是把毛坯或工件放在露天下，长期搁置，经过夏热冬寒、日暖夜凉的反复作用，内应力逐渐消除，效果较好，但造成再制品和资金的积压；人工时效进行热处理，又分为高温时效和低温时效，前者是