



高等职业技术教育机电类专业规划教材  
机械工业出版社精品教材

第3版

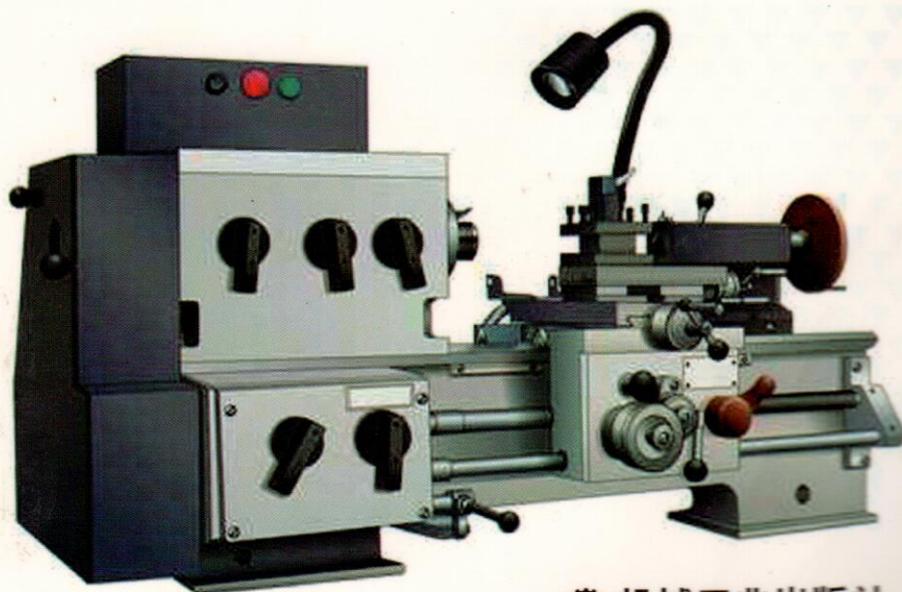
# 机械制造工艺 与机床夹具



刘守勇 李增平 主编



配电子课件



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
绪论	1
第1章 机械加工工艺流程的制订	3
1.1 基本概念	3
1.2 零件图的工艺分析	12
1.3 毛坯的选择	15
1.4 定位基准及其选择	18
1.5 工艺路线的拟订	21
1.6 加工余量的确定	30
1.7 工序尺寸及其公差确定	38
1.8 机床与工艺装备的选择	45
1.9 机械加工生产率和技术经济分析	46
习题	52
第2章 机械加工质量	57
2.1 机械加工精度	57
2.2 机械加工的表面质量	78
习题	86
第3章 机床夹具设计基础	91
3.1 概述	91
3.2 工件定位的基本原理及定位元件	93
3.3 定位误差的分析和计算	111
3.4 工件的夹紧	123
习题	134
第4章 机床专用夹具及其设计方法	139
4.1 各类机床夹具及其结构特点	139
4.2 专用夹具设计的全过程	153
习题	160
第5章 典型零件加工	162
5.1 车床主轴加工	162
5.2 箱体加工	173
5.3 连杆加工	182
5.4 圆柱齿轮加工	188
习题	198
第6章 现代制造技术简介	201
6.1 精密加工和超精密加工	201
6.2 特种加工方法	207
6.3 数控加工技术	212
6.4 柔性制造系统	219
6.5 计算机集成制造系统	221
6.6 计算机辅助工艺规程设计	225
习题	231
第7章 机械装配工艺基础	232
7.1 概述	232
7.2 保证装配精度的工艺方法	233
7.3 装配尺寸链	238
7.4 装配工艺规程的制订	246
习题	248
参考文献	251

一、机械  
机械制造  
是为国民经济  
是要完成机械  
制造业的发展水  
工业和高科技  
在优先发展的  
二、机械  
机械制造  
在公元210年  
加工瓦特蒸汽  
齿轮加工等机  
首先研制出合  
速切削的需求  
精度上看, 191  
工), 1970年  
20世纪80  
和信息技术的  
计算机辅助制  
计算机集成制  
生产准备、组  
一个整体。  
我国的机械  
有沿海沿江少  
我国的机械工  
制造单机到制  
成套水平不断  
中的支柱产业  
统计数据显  
万倍, 为1978  
5%, 至2008年  
高。按产品销售  
1985年已达3%  
工业中的位次。

必须指出,对于某一具体误差来说,应根据其实际情况来判定其是属于系统性误差还是随机性误差。如大量生产中,加工一批工件往往需经过多次调整,每次调整时产生的调整误差就不可能是常值,变化也无一定规律,此时的调整误差就是随机性误差。但对一次调整中加工出来的工件来说,调整误差又属于常值系统性误差。

2. 加工误差的数理统计方法

常用的统计分析方法有两种:分布曲线法和点图法。此处仅介绍分布曲线法。

(1) 实际分布曲线 用调整法加工出来的一批工件,尺寸总是在一定范围内变化的,这种现象称为尺寸分散。尺寸分散范围就是这批工件最大和最小尺寸之差。如果将这批工件的实际尺寸测量出来,并按一定的尺寸间隔分成若干组,然后以各个组的尺寸间隔宽度(组距)为底、以频数(同一间隔组的零件数)或频率(频数与该批零件总数之比)为高作出若干矩形,即直方图。如果以每个区间的中点(中心值)为横坐标,以每组频数或频率为纵坐标得到的一些相应的点,将这些点连成折线即为分布折线图。当所测零件数量增多、尺寸间隔很小时,此折线便非常接近于一条曲线,这就是实际分布曲线。

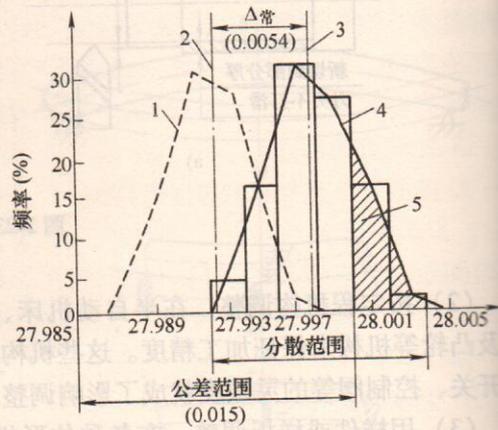


图 2-24 活塞销孔直径尺寸分布图  
1—理论分布位置 2—公差范围中心 (27.9925)  
3—分散范围中心 (27.997) 4—实际分布位置 5—废品区

图 2-24 所示为一批  $\phi 28_{-0.015}^0$  mm 活塞销孔镗孔后孔径尺寸的直方图和分布折线图,它是根据表 2-1 数据绘制的。

表 2-1 活塞销孔直径频数统计表

组别 k	尺寸范围/mm	组中心值 $\bar{x}$ /mm	频数 m	频率 $m/n$
1	27.992 ~ 27.994	27.993	4	4/100
2	27.994 ~ 27.996	27.995	16	16/100
3	27.996 ~ 27.998	27.997	32	32/100
4	27.998 ~ 28.000	27.999	30	30/100
5	28.000 ~ 28.002	28.001	16	16/100
6	28.002 ~ 28.004	28.003	2	2/100

由图 2-24 可以看出:

1) 尺寸分散范围(28.004mm - 27.992mm = 0.012mm)小于公差带宽度( $T = 0.015$ mm),表示本工序能满足加工精度要求。

2) 部分工件超出公差范围(阴影部分)成为废品,究其原因是尺寸分散中心(27.9979mm)与公差带中心(27.9925mm)不重合,存在较大的常值系统性误差( $\Delta_{\bar{x}} = 0.0054$ mm),如果设法使尺寸分散中心与公差带中心重合,把镗刀伸出量调短 0.0027mm,分布折线左移到理想位置,则可消除常值系统性误差,使全部尺寸都落在公差带内。

(2) 直方图和分布折线图的作法

1) 收集数据。一个工序加工的全部零件称为总体，从总体中抽出来进行研究的一批零件称样本。收集数据时，通常在一次调整好机床加工的一批工件中取 100 件（称样本容量），测量各工件的实际尺寸或实际误差，并找出其中的最大值  $X_{\max}$  和最小值  $X_{\min}$ 。

2) 分组。将抽取的工件按尺寸大小分成  $k$  组。 $k$  可由表 2-2 中的经验数据确定，通常每组至少有 4~5 个数据。

表 2-2 分组数

数据的数量	组数 $k$
50 ~ 100	6 ~ 10
100 ~ 250	7 ~ 12

3) 计算组距

$$\text{组距 } h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{k - 1}$$

按上式计算出的  $h$  值应根据量仪的最小分辨值的整数倍进行圆整。

4) 计算组界

$$\text{各组组界: } X_{\min} \pm (j-1)h \pm h/2$$

$$(j = 1, 2, 3, \dots, k)$$

各组的中值:  $X_{\min} + (j-1)h$

5) 统计频数  $m_i$ 。计算频率  $m_i/n$

6) 绘制直方图和分布折线图。

(3) 正态分布曲线 实践表明，在正常生产条件下，无占优势的影响因素存在，而加工的零件数量又足够多时，其尺寸分布总是按正态分布的。因此，在研究加工精度问题时，通常都是用正态分布曲线（高斯曲线）来代替实际分布曲线，使加工误差的分析计算得到简化。

1) 正态分布曲线方程式

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}}$$

其曲线形状如图 2-25 所示。

当采用正态分布曲线代替实际分布曲线时，上述方程的各个参数分别为

$X$ ——分布曲线的横坐标，表示工件的实际尺寸或实际误差；

$\bar{X}$ ——工件的平均尺寸，尺寸的分散中心，即

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k m_j X_j$$

$\sigma$ ——工序的标准差（均方根偏差）即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X})^2 m_j}$$

$y$ ——分布曲线纵坐标，表示分布曲线概率密度（分布密度）；

$n$ ——样本总数；

$X_j$ ——组中心值；

$k$ ——组数；

$e$ ——自然对数底（ $e = 2.7189$ ）。

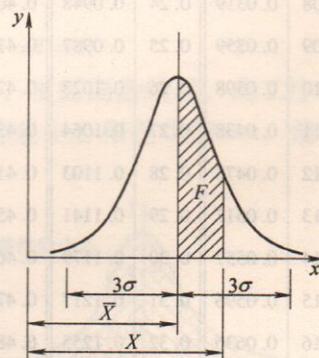


图 2-25 正态分布曲线

正态分布曲线下面所包含的全部面积代表了全部工件，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dX = 1$$

而图 2-25 中阴影部分的面积  $F$  为尺寸从  $\bar{X}$  到  $X$  间的工件的频率。

$$F = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{\bar{x}}^x e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dX$$

为计算方便，令  $\frac{X-\bar{X}}{\sigma} = Z$ ，则

$$F = \phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^Z e^{-\frac{z^2}{2}} dZ$$

各种不同  $Z$  值的函数  $\phi(Z)$  值见表 2-3。

表 2-3  $\phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^Z e^{-\frac{z^2}{2}} dZ$  之值

Z	$\phi(Z)$												
0.01	0.0040	0.17	0.0675	0.33	0.1293	0.49	0.1879	0.80	0.2881	1.30	0.4032	2.20	0.4861
0.02	0.0080	0.18	0.0714	0.34	0.1331	0.50	0.1915	0.82	0.2939	1.35	0.4115	2.30	0.4893
0.03	0.0120	0.19	0.0753	0.35	0.1368	0.52	0.1985	0.84	0.2995	1.40	0.4192	2.40	0.4918
0.04	0.0160	0.20	0.0793	0.36	0.1406	0.54	0.2054	0.86	0.3051	1.45	0.4265	2.50	0.4938
0.05	0.0199	0.21	0.0832	0.37	0.1443	0.56	0.2123	0.88	0.3106	1.50	0.4332	2.60	0.4953
0.06	0.0239	0.22	0.0871	0.38	0.1480	0.58	0.2190	0.90	0.3159	1.55	0.4394	2.70	0.4965
0.07	0.0279	0.23	0.0910	0.39	0.1517	0.60	0.2257	0.92	0.3212	1.60	0.4452	2.80	0.4974
0.08	0.0319	0.24	0.0948	0.40	0.1554	0.62	0.2324	0.94	0.3264	1.65	0.4505	2.90	0.4981
0.09	0.0359	0.25	0.0987	0.41	0.1591	0.64	0.2389	0.96	0.3315	1.70	0.4554	3.00	0.49865
0.10	0.0398	0.26	0.1023	0.42	0.1628	0.66	0.2454	0.98	0.3365	1.75	0.4599	3.20	0.49931
0.11	0.0438	0.27	0.1064	0.43	0.1664	0.68	0.2517	1.00	0.3413	1.80	0.4641	3.40	0.49966
0.12	0.0478	0.28	0.1103	0.44	0.1700	0.70	0.2580	1.05	0.3531	1.85	0.4678	3.60	0.499841
0.13	0.0517	0.29	0.1141	0.45	0.1772	0.72	0.2642	1.10	0.3643	1.90	0.4713	3.80	0.499928
0.14	0.0557	0.30	0.1179	0.46	0.1776	0.74	0.2703	1.15	0.3749	1.95	0.4744	4.00	0.499968
0.15	0.0596	0.31	0.1217	0.47	0.1808	0.76	0.2764	1.20	0.3849	2.00	0.4772	4.50	0.499997
1.16	0.0636	0.32	0.1255	0.48	0.1844	0.78	0.2823	1.25	0.3944	2.10	0.4821	5.00	0.4999997

查表可知：当  $Z=0.3$  即  $X-\bar{X} = \pm 0.3\sigma$  时， $2\phi(Z) = 0.2358$

当  $Z=1.1$  即  $X-\bar{X} = \pm 1.1\sigma$  时， $2\phi(Z) = 0.7286$

当  $Z=3$  即  $X-\bar{X} = \pm 3\sigma$  时， $2\phi(Z) = 0.9973$

2) 正态分布曲线的特点：

① 曲线呈钟形，中间高、两边低；这表示尺寸靠近分散中心的工件占大部分，而尺寸远离分散中心的工件是极少数。

② 曲线以  $X = \bar{X}$  为轴对称分布，表示工件尺寸大于  $\bar{X}$  和小于  $\bar{X}$  的频率相等。

③工序标准差  $\sigma$  是决定曲线形状的重要参数。如图 2-26 所示,  $\sigma$  越大, 曲线越平坦, 尺寸越分散, 也就是加工精度越低;  $\sigma$  越小, 曲线越陡峭, 尺寸越集中, 也就是加工精度越高。

④曲线分布中心  $\bar{X}$  改变时, 整个曲线将沿  $X$  轴平移, 但曲线的形状保持不变, 如图 2-27 所示。这是常值系统性误差影响的结果。

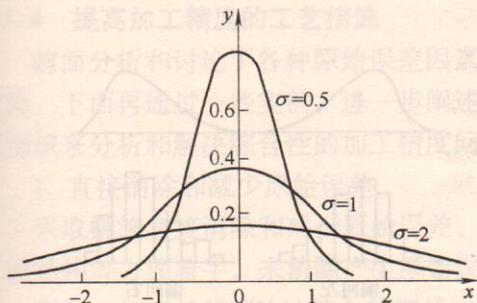


图 2-26 正态分布曲线的性质

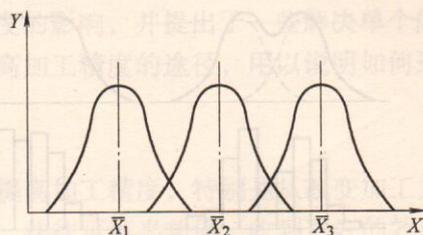


图 2-27  $\sigma$  不变时  $\bar{X}$  使分布曲线移动

⑤从表 2-3 中可以查出, 当  $X - \bar{X} = \pm 3\sigma$  时,  $F = 49.865\%$ ,  $2F = 99.73\%$ , 即工件尺寸在  $\bar{X} \pm 3\sigma$  以内的频率占 99.73%, 这就是说, 在  $X - \bar{X} = \pm 3\sigma$  范围内, 实际上已差不多包含了该批零件的全部, 只有 0.27% 的工件尺寸在  $\pm 3\sigma$  之外, 可忽略不计。因此, 一般取  $6\sigma$  为正态分布曲线的尺寸分散范围。

**例 2-1** 已知  $\sigma = 0.005\text{mm}$  零件公差带  $T = 0.02\text{mm}$ , 且公差对称于分散范围中心,  $X = 0.01\text{mm}$ 。试求此时的废品率。

**解**  $Z = X/\sigma = 0.01/0.005 = 2$

查表 2-6, 当  $Z = 2$  时,  $2\phi(Z) = 0.9544$ , 故废品率为

$$[1 - 2\phi(Z)] \times 100\% = [1 - 0.9544] \times 100\% = 4.6\%$$

**例 2-2** 车一批轴的外圆, 其图样规定的尺寸为  $\phi 20_{-0.1}^0\text{mm}$ , 根据测量结果, 此工序的分布曲线是按正态分布, 其  $\sigma = 0.025\text{mm}$ , 曲线的顶峰位置和公差中心相差  $0.03\text{mm}$ , 偏于右端。试求其合格率和废品率。

**解** 如图 2-28 所示, 合格率由 A、B 两部分计算

$$Z_A = \frac{X_A}{\sigma} = \frac{0.5T + 0.03}{\sigma} = \frac{0.5 \times 0.1 + 0.03}{0.025} = 3.2$$

$$Z_B = \frac{X_B}{\sigma} = \frac{0.5T - 0.03}{\sigma} = \frac{0.5 \times 0.1 - 0.03}{0.025} = 0.8$$

查表 2-3 得:  $Z_A = 3.2, \phi(Z_A) = 0.49931; Z_B = 0.8, \phi(Z_B) = 0.2881$

故合格率:  $(0.49931 + 0.2881) \times 100\% = 78.741\%$

不合格率:  $(0.5 - 0.2881) \times 100\% = 21.2\%$

由图 2-28 可知, 虽有废品, 但尺寸均大于零件的上限尺寸, 故可修复。

3) 非正态分布。工件实际尺寸的分布情况, 有时并不近似于正态分布, 而是出现非正态分布。例如, 将两次调整下加工的零件混在一起, 尽管每次调整下加工的零件是按正态分

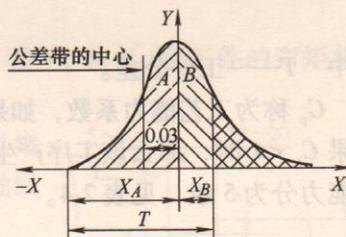


图 2-28 轴直径尺寸分布曲线

$\phi(Z)$

4861

4893

4918

4938

4953

4965

4974

4981

49865

49931

49966

499841

499928

499968

499997

4999997

而尺寸远

布的，但由于两次调整的工件平均尺寸及工件数可能不同，于是分布曲线将为如图 2-29a 所示的双峰曲线。如果加工中刀具或砂轮的尺寸磨损比较显著，分布曲线就会如图 2-29b 所示形成平顶分布。当工艺系统出现显著的热变形时，分布曲线往往不对称（例如，刀具热变形严重，加工轴时偏向左，加工孔时则偏右，如图 2-29c 所示），用试切法加工时，由于操作者主观上存在着宁可返修也不要报废的倾向，也往往出现不对称分布的现象（加工轴宁大勿小，偏右；加工孔宁小勿大，偏左）。

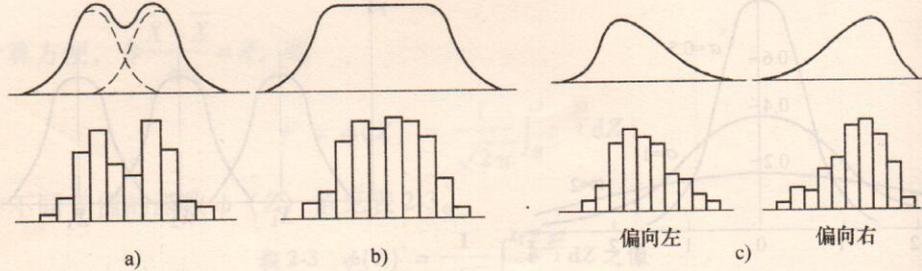


图 2-29 非正态分布

a) 双峰曲线 b) 平顶分布 c) 不对称分布

4) 正态分布曲线的应用:

①计算合格率和废品率。

②判断加工误差的性质。如果加工过程中没有变值系统性误差，那么它的尺寸分布应从正态分布；如果尺寸分散中心与公差带中心重合，则说明不存在常值系统性误差，若不重合则两中心之间的距离即常值系统性误差；如果实际尺寸分布与正态分布有较大出入，说明存在变值系统性误差，则可根据图 2-29 初步判断变值系统误差是什么类型。

③判断工序的工艺能力能否满足加工精度的要求。所谓工艺能力是指处于控制状态的加工工艺所能加工出产品质量的实际能力，可以用工序的尺寸分散范围来表示其工艺能力，大多数加工工艺的分布都接近正态分布，而正态分布的尺寸分散范围是  $6\sigma$ ，故一般工艺能力都取  $6\sigma$ 。因此，工艺能力能否满足加工精度要求，可以用下式判断

$$C_p = \frac{T}{6\sigma}$$

式中  $T$ ——工件公差。

$C_p$  称为工艺能力系数，如果  $C_p \geq 1$  时，可认为工序具有不产生不合格产品的必要条件。如果  $C_p < 1$  时，那么该工序产生不合格品是不可避免的。根据工艺能力系数的大小，可将工艺能力分为 5 级，见表 2-4。

表 2-4 工序能力等级表

工艺能力系数 $C_p$	工艺等级	工艺能力判断	工艺能力系数 $C_p$	工艺等级	工艺能力判断
$C_p > 1.67$	特级	工艺能力很充分	$0.67 < C_p \leq 1.00$	三级	工艺能力不足
$1.33 < C_p \leq 1.67$	一级	工艺能力足够	$C_p \leq 0.67$	四级	工艺能力极差
$1.00 < C_p \leq 1.33$	二级	工艺能力勉强			

5) 分布曲线法的缺点。加工中随机性误差和系统性误差同时存在，由于分析时没有考