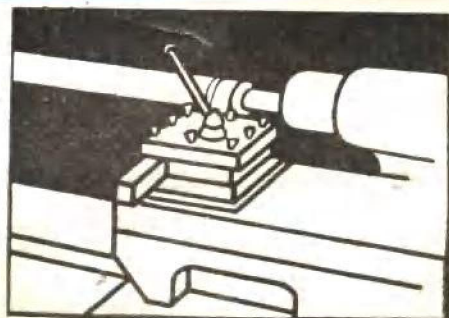


机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

怎样提高工件的 加工精度和光洁度

冯万增 黄观尧 编著



机械工业出版社

一、概 述

机械能否持久而准确地工作，与它的零件制造质量有着十分密切的关系。产品的数量与质量之间的关系是辩证的统一关系，而且质量是占第一位的。机械零件的质量，除去它本身材料的性质及其硬度、强度等物理机械性能之外，通常主要是指它的加工精度和表面光洁度。

车削加工的首要任务，就是在不同的加工条件 and 生产批量下，在提高生产效率和降低加工成本的基础上，采取相应措施把加工误差控制在所允许的偏差之内，从而有效地保证工件的加工精度和表面光洁度，以满足机械对零件的功能要求。

1 加工精度及误差来源 加工精度是指工件经加工后，它的尺寸、几何形状和表面相互位置精度的实际值与理想零件的符合程度。它们之间的不符合程度。称为加工误差。加工误差越小，加工精度越高。

工件的加工精度包括：尺寸精度、几何形状精度和各表面之间的相互位置精度。表面光洁度是微观的几何形状精度，它是宏观几何形状精度的基础。从广义上讲，表面光洁度也可属于加工精度的范围。

在车削加工中，工件各表面的形成，一定加工精度的获得，主要决定于工件和刀具在加工过程中其相互位置和相对运动的关系。由于工件和刀具受着自身条件及车床、夹具等条件的限制，因此车床、夹具、刀具和工件所组成的工艺系

统的种种误差，将在不同的条件下以不同的形式在工件上反映出不同的加工误差。显然，车削工件加工精度的高低，也就取决于整个工艺系统误差的大小。研究工艺系统的误差来源，是控制工件加工精度的主要依据。

影响工件加工精度的误差因素很多，概括起来，大致来自下述的几个方面。

(一) 工艺系统的几何误差 工艺系统的几何误差，主要包括理论误差，车床、刀具、夹具的原始制造误差，及其在长期使用过程中，逐渐磨损所扩大的误差等。

1) 理论误差：理论误差是指采用了近似的加工方法或加工运动所产生的原理性误差。这种误差往往是不可避免的。

例如，车削蜗杆螺纹时，因其螺距（或导程）等于模数与 π 的乘积。故在计算速比和选配挂轮的齿数时，只能将 π 值化为诸如 $\frac{157}{50}$ 、 $\frac{22}{7}$ 或 $\frac{5 \times 71}{113}$ 等近似的分数。显然，选用这样的挂轮传动车削蜗杆螺纹，是近似的加工运动，肯定会引起蜗杆的螺距及其累积误差。因其误差分别是0.001592、0.0012644和0.0000002，故可略去不计。

又如，当用尖头车刀加工外圆时，所获得的并不是理想的圆柱表面，在微观上是一种带细螺纹的表面。

2) 车床的几何误差：主要包括主轴的回转误差、导轨的直线度误差和成形运动的相对关系误差等。这些误差主要来自于车床的制造、安装及其使用过程中的磨损等。

3) 刀具误差：主要是指在成形车削时，所用的钻头、铰刀、螺纹车刀和成形车刀等刀具的刃磨质量。

4) 夹具误差：主要包括工件在夹具中的定位误差，夹具制造误差和安装误差等。例如，卡盘的跳动、各种心轴、

花盘、角铁的尺寸误差及其同轴度、垂直度、平行度等位置误差。

(二) 工艺系统的受力变形 由车床、刀具、夹具和工件所组成的工艺系统，在车削过程中受切削力、夹紧力、重力、离心力和传动力等外力的作用，往往会产生弹性变形，甚至塑性变形。同时，由于工艺系统中各运动部件之间都存在着一定的间隙。这些间隙在上述外力作用下，也会产生瞬时变化。这些变形和变化，均能破坏业已调整好的刀具与工件的相对位置，从而影响工件的加工精度。

例如，当车削轴类工件时，若不使用顶尖或跟刀架来辅助支撑工件以增加其刚性，则工件往往会在径向切削力 P_r 的作用下，产生如图1所示的锥形或腰鼓形。

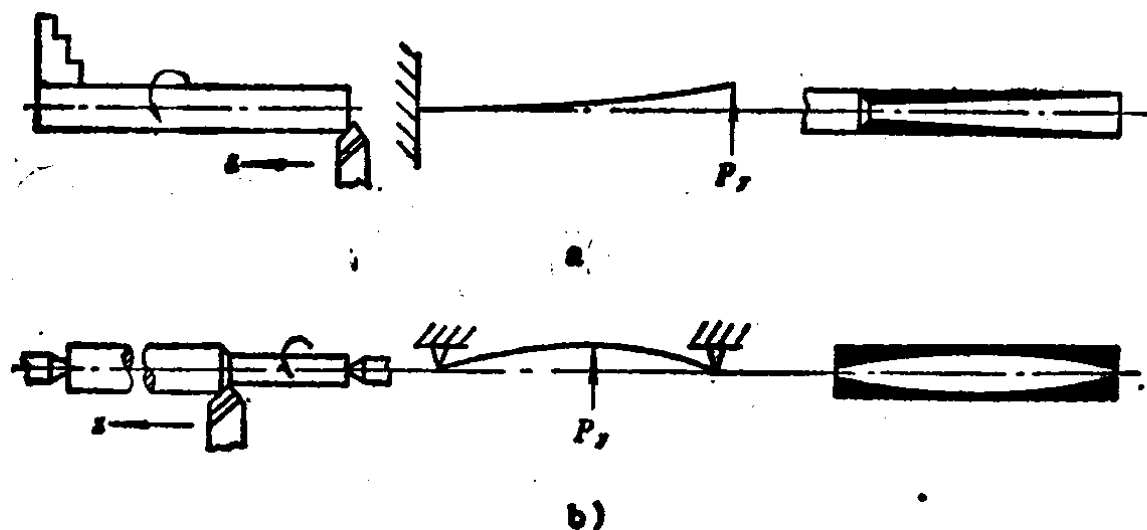


图1 径向切削力引起的轴变形

a) 锥形 b) 腰鼓形

当用三爪卡盘夹持套类工件时，若不采取增加工件刚性或改善施力方式、位置等措施，则工件会因夹紧力产生如图2a所示的弹性变形，这时镗出的孔如图2b所示的圆形；但加工后卸下工件，其孔则变成图2c所示的三角棱形。

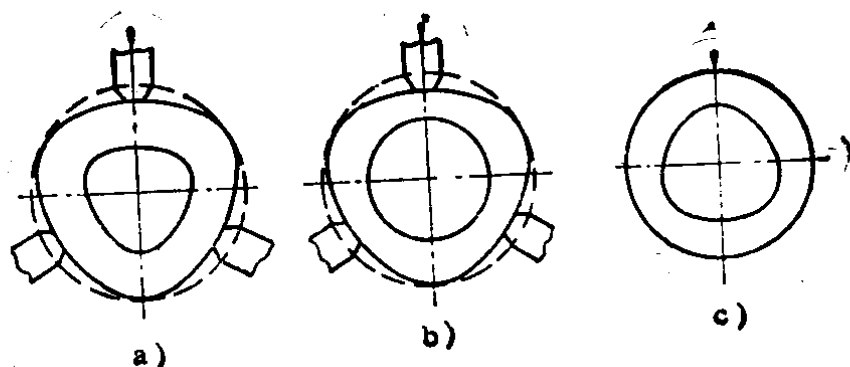


图2 夹紧变形

a) 夹紧后 b) 镗孔时 c) 放松后

当车削外形不对称的工件时，若不加配重，则工件旋转时所产生的离心力，将使主轴与轴承之间的间隙靠向离心力的相反方向，加大主轴的跳动，增大工件的圆度误差。

在车削外形有较大误差的坯件时，工件每转一转，切削深度将不断变化（见图3）。切削深度小时，切削力 P 小，刀具及刀架的变形和位移也小；切削深度大时，切削力 P 大，刀具及刀架的变形和位移也大。因此，毛坯的外形误差将会部分地复映在工件的已加工表面上。这就是所谓的毛坯误差复映。当然，这种复映将随着走刀次数的增多，会逐渐减小，直至消失。

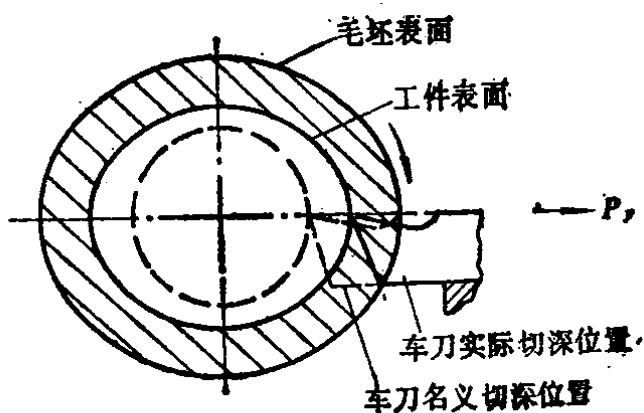


图3 毛坯误差复映

综上所述可知：或者增加工艺系统的刚度；或者减小切削力、夹紧力和离心

力；或者改善这些外力的作用 and 方向，均能消除或减小工艺系统的受力变形，提高工件的加工精度。

(三) 工艺系统的热变形 热胀冷缩是一般金属等物体的固有特性。在加工过程中所出现的各种热源：切削热、机床和动力件运动时的摩擦热，以及日光、灯光和取暖设施的辐射热，均会使工艺系统热胀变形，影响工件与刀具相对位置关系的准确性和稳定性，造成加工误差。工艺系统的热变形，对精密车削乃至普通精车所造成的加工误差，据统计约占总加工误差的40~70%。

1) 车床的热变形：车床的热变形可以从下述几个方面来认识：

(1) 室温变化和日光照射所引起的变形：实验表明，只有在标准温度 $+20^{\circ}\text{C}$ 的室温下，车床的静态几何精度才符合其出厂时的标准。而在其它的室温下，车床精度的多种检测项目均不合格。当室温 $<20^{\circ}\text{C}$ 时，车床床身导轨将呈图4虚线所示的中凹状；当室温 $>20^{\circ}\text{C}$ 时，则呈中凸状。其最大弯曲量可达 $0.007\sim 0.011$ 毫米。

阳光照射对车床精度也有明显的不良影响。有人曾在上午9点至11点，对安装在侧窗户下日光单侧照射的车床进行检测，床身两侧面的温差可达 10°C ，致使导轨的平行度误差达 $0.08\sim 0.14$ 毫米/米。

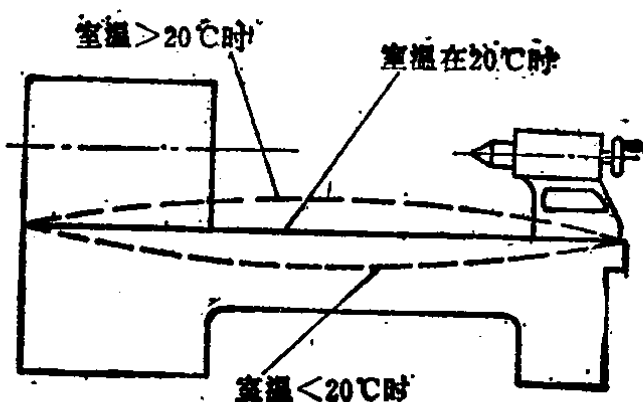


图4 室温变化对车床床身导轨平直度的影响

因此，比较精密的车床，在普通车间总是安装在避免日光照射，和空气对流较弱的地方；精密车床则安装在恒温车间里。没有恒温条件时，车削比较精密的工件，以在晚间10点至次日清晨6点这一室温变化较小的时间内进行，较为适宜。

(2) 车床的温升：车床开动之后，其温度将逐渐升高。因车床各零部件的运动速度、结构和体积均不相同，散热能力不一样，所以其各部位的热变形也不相同。

图5所示的是C620-1车床在主轴转速 $n=600$ 转/分时，空

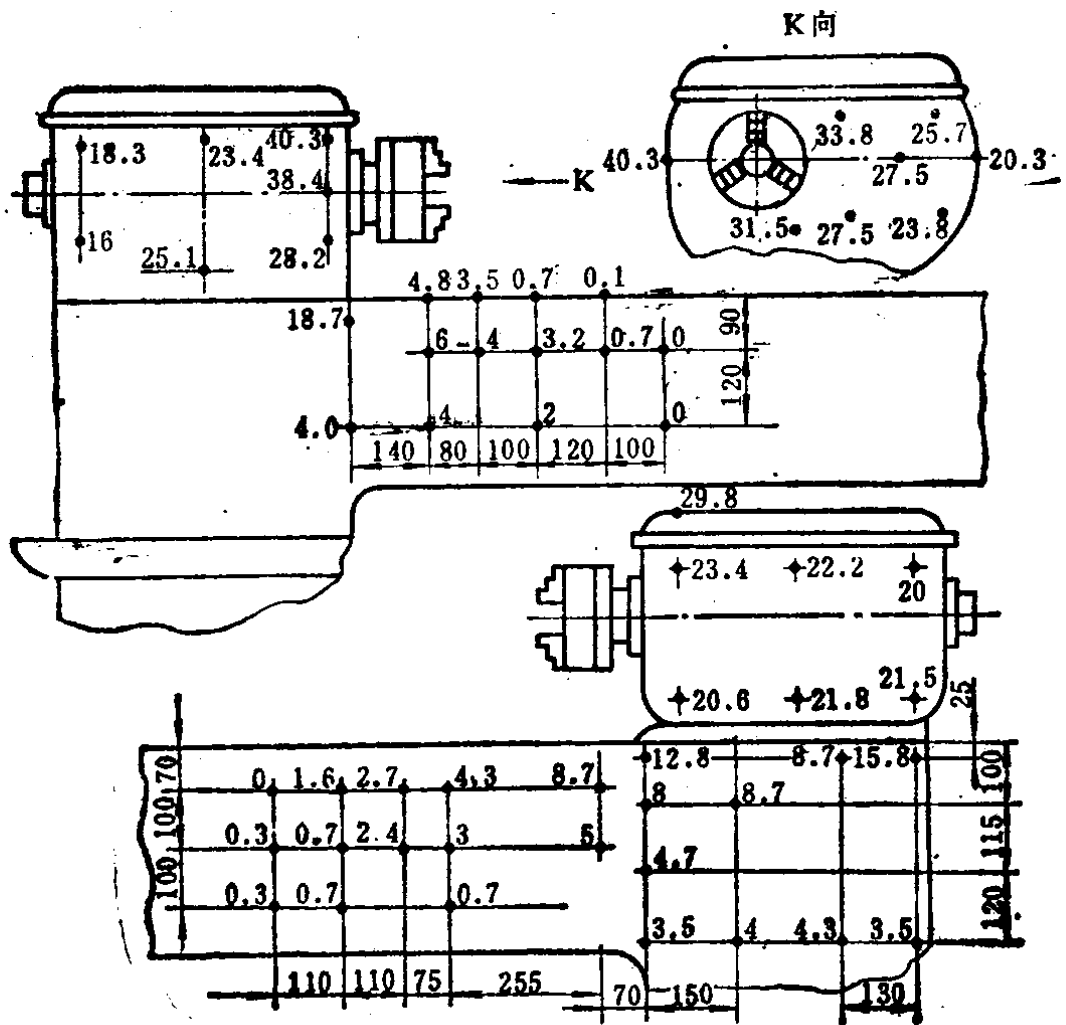


图5 C620-1车床各部位的温度分布
(图中·为测量点，点旁数字为温度升高值)

转 6 小时之后，各处温升的情况。从图中可看出，床头箱前轴承的正面和后面温升最高（ 40.3°C ），后轴承处次之、床身温升最低（ $0\sim 6^{\circ}\text{C}$ ）。因此导致床头箱和床身在垂直面和水平面内的变形、翘曲，使主轴轴线产生热位移和热倾斜，如图 6 的虚线所示。

车床的热位移和热倾斜，是影响工件加工精度的重要因素，对精密车削尤为不利。因而在精车 8 级以上机床丝杠等精密工件时，不仅对车床要做很多减小热变形的改进措施，而且要做热平衡的准备工作。

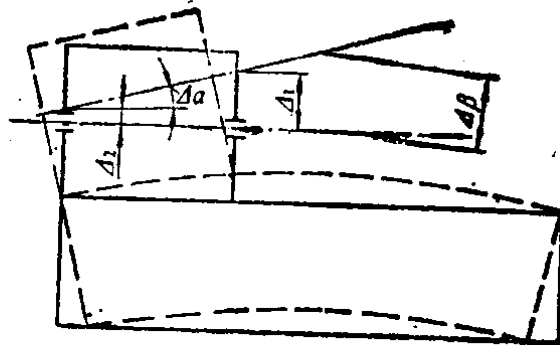


图6 车床的热倾斜和热位移

2) 工件的热变形：在车削过程中，工件在切削热的作用下，将会不断地热膨胀和热伸长，使工件的尺寸变化。

例如，某厂在用硬质合金车刀（ $\varphi=75^{\circ}$ 、 $\gamma=20^{\circ}$ ）高速车削（ $n=700$ 转/分、 $s=0.3$ 毫米、 $t=3$ 毫米）长轴（ $\phi 30 \times 2000$ 毫米）时，尽管用硫化油进行不断冷却，但是当车完一刀之后测量，轴的热伸长竟高达 4 毫米。因此，在车长轴时，必须不断调整顶尖与工件的间隙，或者使用弹性顶尖，以便工件的热伸长能自由地随时向后移动。

又如，在车削丝杠中，实验表明一米长的丝杠(工件)，当其温度每升高一度时（对 20°C 而言），因工件热伸长所造成的螺距累积误差可为 0.017 毫米；当车床母丝杠与工件丝杠的温度每相差 1°C 时， 400 毫米长的工件丝杠将会产生 0.0044 毫米的螺距累积误差。然而，标准规定 8 级机床丝杠在全长内的螺距累积误差 $t_{\text{积}}$ 仅为 0.08 毫米；7 级丝杠的 $t_{\text{积}}$ 仅为 0.04 毫

米。由此可见，工件的温升，对加工精度的影响是很大的。

3) 刀具的热伸长：切削区域所产生的热量，虽然大部分为切屑和工件所带走，传给刀具的热量并不多(见图 7 a)。但由于刀体体积小，热容量小，故刀具仍有相当的温升。实验表明，刀具温升与切削时间的关系如图 7 b 曲线 A 所示。开始切削时刀具温升较快，一般约经 3 ~ 4 分钟后，温升逐渐减缓，达到吸热和散热的平衡状态；当切削停止后，刀具温升立即下降，开始较快，而后减慢，如图 7 b 曲线 B 所示。刀具断续工作时，其温升的总趋势逐渐增加，使刀具热伸长。

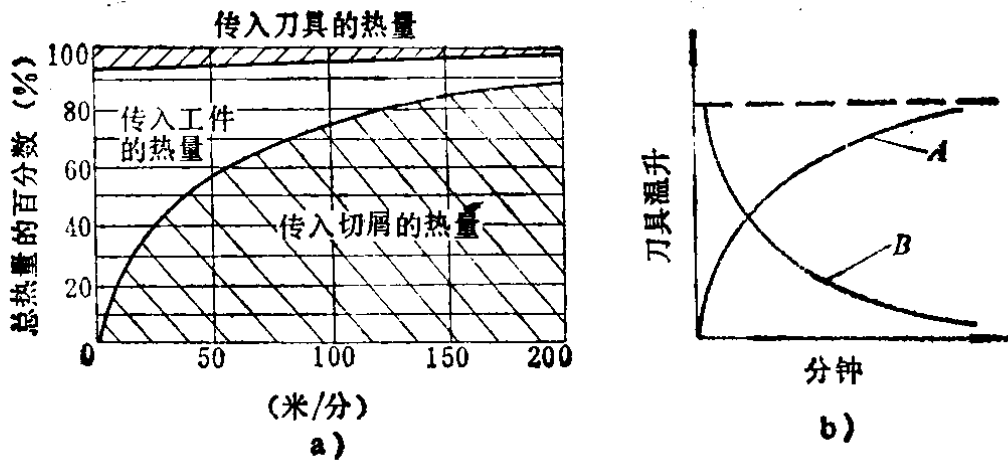


图7 切削热分布(图a)及(图b)刀具温升曲线

虽然，刀具磨损对于刀具热伸长具有相互抵偿的作用，特别是在刀具初期磨损阶段，更是这样。鉴于精加工时，一般切削用量较小，故车削短工件时，刀具热伸长对加工精度的影响可忽略不计。然而，在连续加工长工件或在自动车床上大批量加工工件的调刀时，就应考虑刀具热伸长对工件尺寸精度的影响。例如，当以切削速度 $v=150$ 米/分、切削深度 $t=1$ 毫米、走刀量 $s=0.3$ 毫米精车 300 毫米长的外圆时，车刀热伸长可达 0.041 毫米，而刀具径向磨损却仅为 0.0015 毫

米（刀片材料为YT15）。这时，工件势必会因此而产生锥度，所以精车之前的调锥，应把这一误差因素考虑进去。

（四）工件的内应力变形 物体在外力作用除去之后，存在于物体内部的应力，称为内应力。它是由于金属内部质点间距离的改变，破坏了原有质点间引力和斥力的平衡状态而产生的。

工件内应力的主要来源：1）毛坯在铸、锻、焊、热处理等过程中，由于表层和内部的冷却速度不同，收缩不均，金相组织转变时体积变化也不同，而产生内应力；2）工件在切削时，因已加工表面的塑性变形和局部高温，会产生内应力。而余量被切除后，会破坏毛坯原有内应力的平衡状态，使其重新分布；3）工件在夹紧力作用下会产生内应力；4）工件经冷校直后也会产生新的内应力。

具有内应力的工件，有一种强烈复原和减小内应力的倾向。这种倾向会使经加工并已获得加工精度的工件产生变形而造成误差，逐渐丧失原有的加工精度。

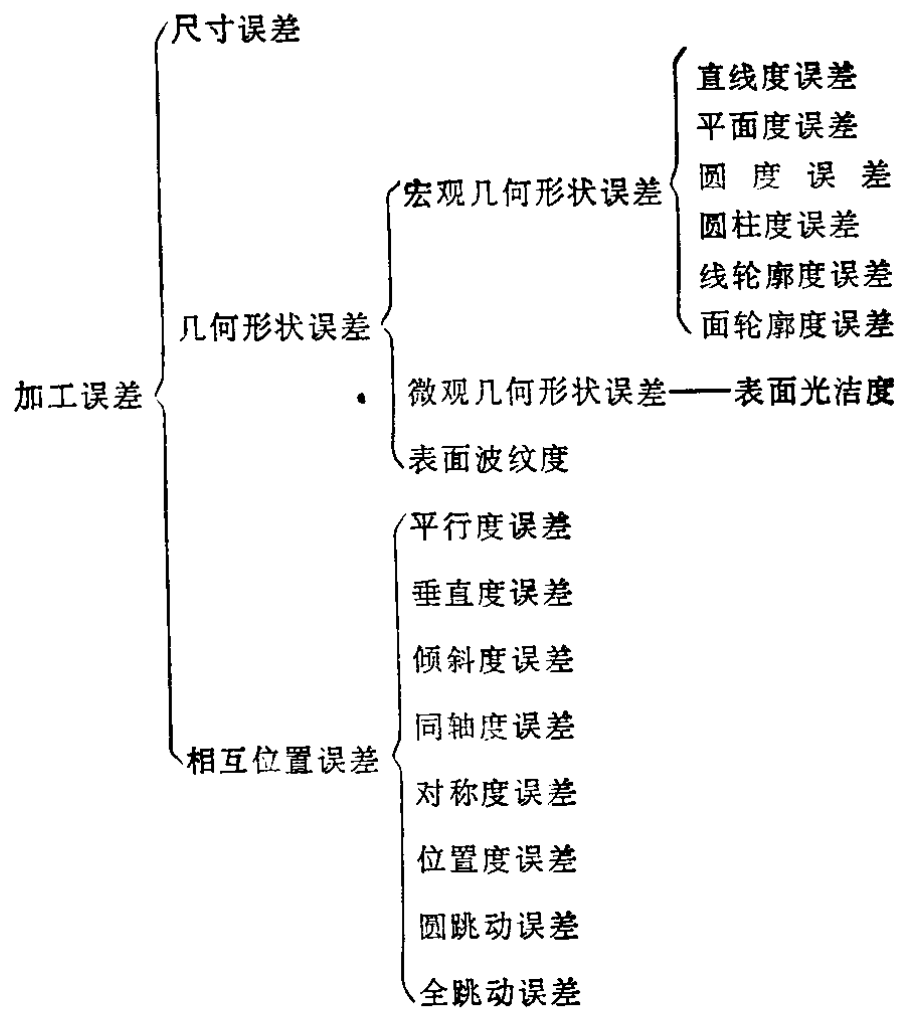
为此，在车削诸如主轴、丝杠以及工模夹具等高精度工件时，都要在精车之前，安排一次或多次的时效处理工序，以尽量消除内应力，避免或减小工件在精车后出现内应力变形，保证工件的加工精度。

（五）其它误差 包括工件的定位误差、测量误差，以及因技术水平或思想重视不够等因素所造成的调整误差、操作误差等。这些误差将在下面有关内容中介绍。

2 加工误差和公差 无论车床、刀具、夹具和量具多么精密、先进，还是操作者的技术水平有多么高超，都会由于上述误差的综合影响，而不可能把工件加工得绝对准确，在尺寸、几何形状和表面相互位置三个方面，总会与理想零件

存在一定的偏离。这种偏离，就是人们所常说的加工误差。

加工误差通常包括：



加工误差是客观存在的，想把工件加工得绝对精确，既不可能也不必要。因此，在使加工方便、经济合理并保证零件功用的前提下，只要把加工误差控制在公差即零件允许尺寸的变动量的范围之内就行了。

3 经济精度 经济精度是指正常生产条件下，各种加工方法所能获得的加工精度。如图 8 所示，其曲线表示某种加工方法的加工精度，横坐标和纵坐标分别表示加工误差和加工成本。由曲线的形态可知，当加工误差在 δ_1 以内时，加工精度每提高一点，都会使加工成本急剧增加；当加工误差大

于 δ_2 时，即使加工精度再降低，其加工成本的变化也是十分细微的。由图可见，曲线 ab 段是最为经济合理的，该区域即为某种加工方法的经济精度。

不同的加工方法，因机床等工艺装备的精度和加工方式不同，其经济精度的范围也不同。车削加工所能达到的表面光洁度和尺寸经济精度大致如表1所示；车削工件通常能获得7~9级（GB1184-80）左右的几何形状精度，5~7级的相互位置精度。

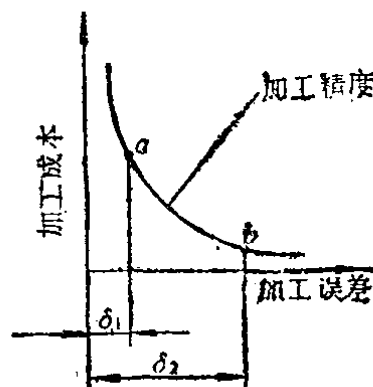


图8 经济精度

4 提高工件加工精度的含义 本书提出的怎样提高车削工件加工精度和表面光洁度的含义是：

1) 掌握车削工艺理论知识，提高车削加工技术水平：当质量问题发生时，能较快地判断出产生加工误差的原因，了解各种加工误差的性质和特征，掌握它们的规律，迅速地加以消减或排除。

2) 经济而合理地选择加工方法：工件的同一种加工精度，都有多种获取的方法。操作者根据生产批量和现有加工条件，选用合理的加工方法，借以提高生产效率。

3) 改进加工方法：当加工条件难以达到工件加工精度的要求时，应在工艺上、夹具或刀具上搞革新，想办法，采用先进的技术成果来“以粗干精”，达到加工精度的要求。

4) 在保证本工序加工精度的基础上，为下道工序创造保证加工精度的有利条件：例如单件加工齿轮时，尽管齿轮外圆并不是工作表面，其光洁度和内外圆同轴度的要求并不高，但外圆往往是轮齿加工工序的辅助校正基准，所以车外圆时，有必要把表面光洁度提高一些，并提高内外圆的同轴度。

表1 车削加工所能达到的表面光洁度和尺寸精度

加工方法		光 洁 度 等 级			公 差 等 级 (GB1800-79)	
		钢(铸铁)	黄铜、青铜	轻合金	经济的	可及的
车 外 圆	粗 车	▽3~▽4			IT14~12	
	半精车	▽4~▽5		▽4~▽6	IT11~10	
	精 车	▽5~▽7		▽7~▽8	IT9~7	IT7~6
车 内 孔	粗 车	▽3~▽4			IT14~12	
	半精车	▽4~▽5			IT11~10	
	精 车	▽5~▽6	▽6~▽7	▽6~▽7	IT9~7	IT7~6
车 端 面		▽4~▽6	▽4~▽7		IT11~10	IT9~8
钻 孔	φ≤15	▽4	▽4~▽5		IT13~11	IT11~10
	φ>15	▽3	▽4		IT13~11	IT11~10
扩 孔		▽4~▽5			IT11~10	IT10~8
铰 孔	半精铰	▽5~▽6	▽6~▽7		IT8~7	IT7~6
	精 铰	▽6~▽7	▽8~▽9	▽8~▽9	IT7~6	
车切 槽断	一次行程	▽3				
	二次行程	▽4~▽5				
滚 压		▽7	▽8	▽10	IT7~6	
磨 削		▽5~▽10			IT7~6	IT5
珩 磨		▽7~▽12			IT6~5	IT5

5 提高工件加工精度的“顺序” 当工件的同一加工表面既有较高的光洁度要求，又有较高的形位精度和尺寸精度要求时，为了避免眉毛胡子一把抓，防止顾此失彼，首先应该明确下述两个问题：

(1) 表面光洁度、形位精度和尺寸精度相互之间的关系：零件同一加工表面的光洁度、形位精度和尺寸精度，彼此既有区别，而又有内在联系。因为没有一定的形状精度，也就没有相应的位置和尺寸精度；没有一定的表面光洁度做保证，其它精度也就无从谈起。例如，坑坑洼洼的表面，就不可能有精确的形状精度；不圆的圆柱面，就没有确定的或精确的直径尺寸；不平的两个平面之间，当然也就没有准确的平行度、垂直度等位置精度可言。

较高精度的零件，其配合表面的光洁度、形位精度和尺寸精度的公差数值之间，通常具有这样的量的关系，即：同一表面以光洁度数值(表面不平度平均高度) R_z 最小，约占其尺寸公差 δ 的10~25%；形状公差次之，约占 δ 的30~80%；位置公差通常大于形状公差(特殊情况例外)；尺寸公差 δ 最大。明确这些关系，并根据零件的具体精度要求及其结构工艺性，就可以分清主次，制定获得各个加工精度先后的顺序。

(2) 影响各项加工精度的主要因素：影响工件加工精度的误差是多种多样和错综复杂的。但是，并不是都没有规律可循。依工艺理论和车工实践可知：

1) 影响形状精度的主要误差因素，是车床的成形运动及其相互位置关系的误差、刀具的刃形误差(成形车削时)、安装误差和工艺系统刚度等等。

2) 影响位置精度的主要误差因素，是夹具的制造误差及其自身安装误差、工件的定位误差等。

3) 影响尺寸精度的主要误差因素是，操作误差、调整误差和测量误差等等。

4) 决定工件光洁度的主要因素，主要是刀具的几何参

数及其刃磨质量、切削用量和工艺系统振动等等。

在一般情况下，工件的形位精度在精车之前，基本上就由车床的工作精度和工件的定位精度以及工艺路线等所决定了。而工件的表面光洁度和尺寸精度，是在精车时才保证的，主要决定于工人操作(包括刀具刃磨)和调整的技术水平。

因此，当工件的同一表面既有形位精度要求，又有表面光洁度和尺寸精度要求时，应根据各项加工精度之间的关系和影响精度的误差因素，本着先难后易、先主后次的顺序，一一地分析保证各项加工精度的方法。即：

首先考虑怎样保证工件的形状、位置精度，然后考虑怎样保证表面光洁度和控制尺寸精度。明确各项加工误差的影响程度之后，再进行加工。必要时，在半精车之前，应试验性地精车一刀，观测按既定方案加工得到的形位精度是否有了保证，表面光洁度是否符合要求。

二 提高工件的形状精度

形状精度是指工件加工表面几何形状的精度要求。形状公差符号见表2。

在良好的加工条件下，普通精车能获得5~7级(GB 1184-80)的形状精度，这是由车床自身的工作精度所决定的(见表3)。

1 车削工件获得表面形状的方法 车削工件的种类虽然繁多，但是就车削表面的形状而言，无非是由圆柱面、圆锥面、端平面，螺旋面或特型面等简单的几何表面所组成。这些表面一般都是通过工件的回转运动和刀具的进给运动，

表2 形状公差符号
表(GB1182-80)

项 目	符号
直 线 度	
平 面 度	
圆 度	
圆 柱 度	
线轮廓度	
面轮廓度	

表3 普通车床、精密车床
的工作精度 (毫米)

项 目	普通车床 (C620等)	精密车床
工件的圆度	0.01	0.001~0.005
工件的圆柱度	0.01/100	0.001~0.005/100
工件端面的平面度	0.015/100	0.005/100

经刀刃在工件上车削出来的。从几何运动学的基本原理上分析，这些表面的形成有下述的两种方法：

(一) 轨迹法 在工件和刀具的相对运动下，依靠刀尖运动轨迹来形成表面几何形状的加工方法，称之为轨迹法。各种圆柱面、圆锥面、端平面的车削，以及各种回转曲面的靠模车削，都属于轨迹法。

轨迹法所获得的形状精度，主要决定于车床的工作精度，以及工件内应力变形的大小等。当车削细长轴或薄壁套等特殊工件时，工件的形状精度还与所使用的辅具和夹紧方式等有关。至于仿形或靠模车削，工件的形状精度还与仿形或靠

模装置的制造及其安装精度有关。

(二) 成形法 用成形刀具代替车床的某些成形运动来获取工件回转曲面的加工方法称为成形法。例如用样板车刀车削各种回转曲面，用螺纹车刀车削各种螺纹等，均属于成形法。

用成形法所获得的形状精度，主要决定于车床的工作精度和刀具的刃形精度、安装精度。

除去轨迹法、成形法之外，车削加工还有包络法（加工面是切削刃相对于工件的一系列运动轨迹的包络面）。例如，旋风切削螺纹和旋风切削椭圆、圆球面等。

2 车床精度对工件形状精度的影响

(一) 主轴回转精度 包括主轴的径向跳动、轴向跳动和轴肩支撑面跳动。机床标准 (GC2-60) 规定，前两项的允差为0.01毫米，轴肩支撑面的跳动允差为0.02毫米。其检测方法如图9所示。

1) 主轴径向跳动：它将使工件半径尺寸变化，产生圆度误差。

车床主轴产生径向跳动的主要原因是：(1) 主轴前轴承内、外环滚道的圆度误差和波纹度；(2) 主轴前轴承的轴颈圆度误差，引起轴承内环的变形（见图10）；(3) 前轴承的间隙过大；(4) 前轴承滚子的形状误差

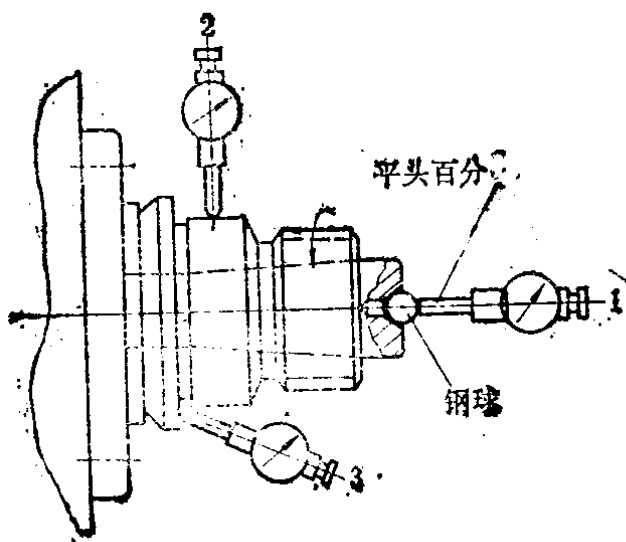


图9 主轴回转精度的检测方法

1—检测轴向跳动 2—检测径向跳动

3—检测轴肩跳动