

# 关于机械加工理论 知识

# 一、基本概念

## 1. 弹性系统：

切削加工时，由机床、刀具、夹具、工件组成的工艺系统是弹性系统。

## 2. 工艺系统总位移

### 1) 弹性变形：

机械加工时，由于切削力、夹紧力以及重力、惯性力等的作用，工艺系统各部分产生的相应的变形。

2) 系统中各元件因其接触处的间隙还会产生位移、

### 3) 工艺系统总位移

弹性变形+位移=总位移

### 4) 决定因素：

外力的大小和弹性系统抵抗外力及其变形的能力

### 3. 刚度：

物体抵抗欲使其变形的外力的能力

### 4. 工艺系统刚度：

指工艺系统抵抗其变形的外力的能力。是指工件加工表面在切削力法向分力 $F_y$ 的作用下，刀具相对工件在该方向位移 $y$ 的比值。

$$k = \frac{F_y}{y}$$

No  
Image

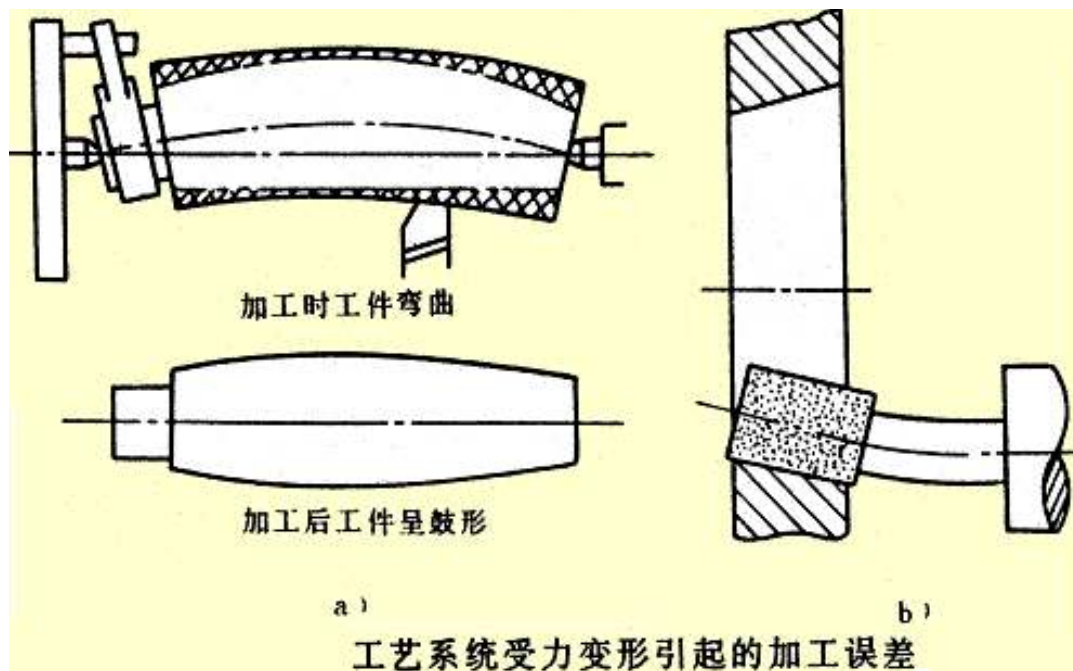
- 加工中影响加工精度最大的是刀刃在加工表面法线方向的位移。因此计算时必须考虑此方向上的切削力和位移。法向位移 $y$ 除了 $F_y$ 分力影响外， $F_y$ 、 $F_z$ 也对它有影响。
- 在 $K$ 一定时，则 $F_y$ 越大，则系统变形量越大。对加工精度影响越大。
- 若工艺系统刚度很大，尽管切削力等外力作用，也能使系统位移减少到最低限度。

## 5. 加工误差：

由于切削力等引起的工艺系统产生的弹性变形，使刀具和工件在静态下调整好的相互位置，以及切削成形运动所需要的正确几何关系发生变化，从而造成加工误差。

## 6、举例

- 工件刚性差，在加工细长轴时出现中间粗，两头尖的情况（腰鼓形）如图所示：
- 无进给磨削
- 就车床加工刚性很好的工件，粗车后，再精车。有时不但不把刀横向进给，反而把它后退一点，才能保证精度要求



# 工艺系统刚度的计算

## (一)工艺系统总变形

切削加工时，工艺系统的有关部件在各种外力的作用下，会产生不同程度的变形，使刀具和工件的相对位置发生变化，从而产生相应的加工误差。

工艺系统在某处的法向总变形是各个组成环节在同一处的法向变形的迭加。

$$y = y_{jc} + y_{jj} + y_d + y_g \quad (1)$$

式中  $y$  —— 工艺系统总变形；  
 $y_{jc}$  —— 机床的受力变形；  
 $y_{jj}$  —— 夹具的受力变形；  
 $y_d$  —— 刀具的受力变形；  
 $y_g$  —— 工件的受力变形。

## (二) 工艺系统刚度计算

由工艺系统的刚度定义可知，机床刚度 $k_{jc}$ 、夹具刚度 $k_{jj}$ 、刀具刚度 $k_d$ 和工件刚度 $k_g$ 分别为：

$$k_{jc} = F_y / y_{jc} , \quad k_{jj} = F_y / y_{jj} , \quad k_d = F_y / y_d , \quad k_g = F_y / y_g$$

代入1式得工艺系统刚度与工艺系统各组成部分刚度之间的关系：

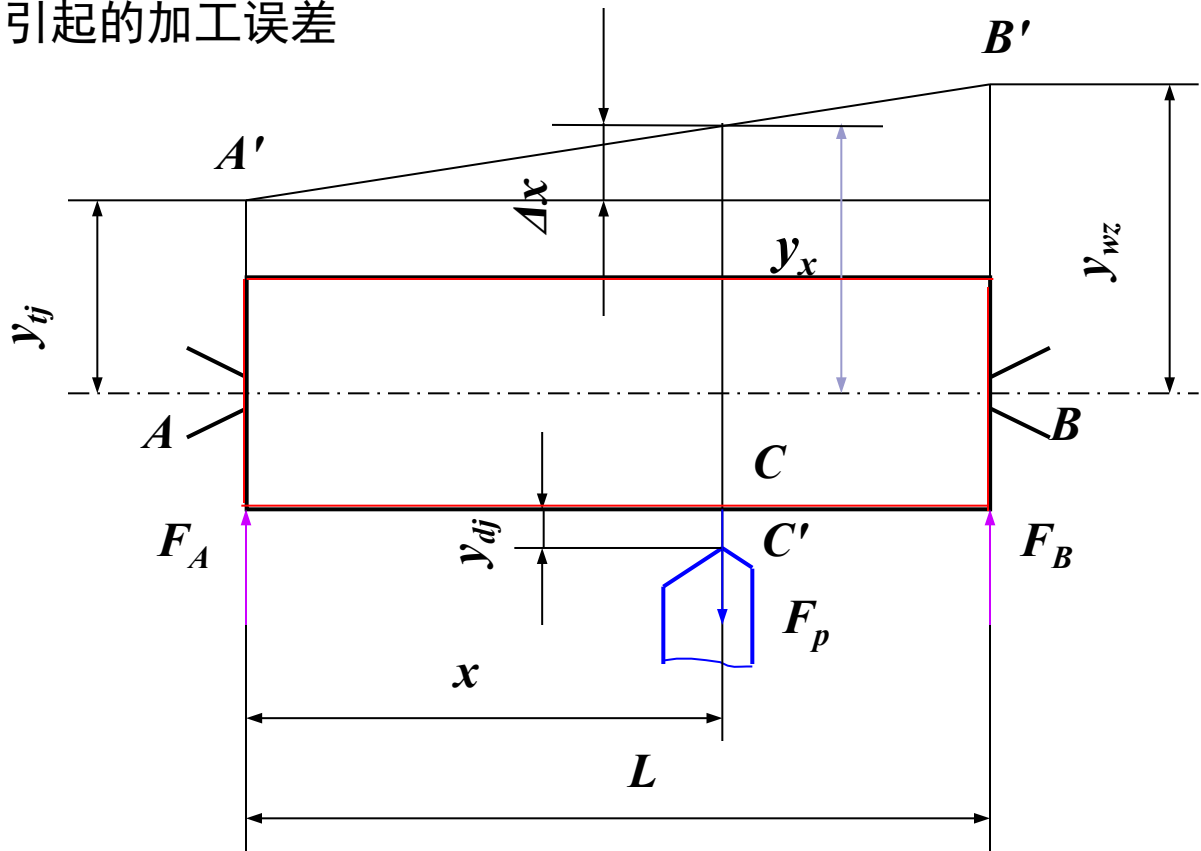
$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{jc}} + \frac{1}{k_{jj}} + \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_g}$$

式中  $k$  —— 工艺系统刚度；  
 $k_{jc}$  —— 机床刚度；  
 $k_{jj}$  —— 夹具刚度；  
 $k_d$  —— 刀具刚度；  
 $k_g$  —— 工件刚度。

# 三、工艺系统刚度对加工精度的影响

## 1、切削力作用点位置变化引起工件形状误差

### 1) 机床变形引起的加工误差



工艺系统变形随受力点变化规律



机床的刚度是由各个部件的刚度决定的，其计算方法为：

设工件短而粗，刚度很大，其变形可以忽略不计，安装在两顶尖之间，在切削力 $F_y$ 的作用下，床头位置由A到A`，尾座由B到B`，刀架从C到C`，其位移量分别为： $y_{tj}$ ， $y_{wz}$ ， $y_{dj}$ ，中心线从AB移到A`B`。

径向切削力为 $F_y$ ，由 $F_y$ 引起的头架和尾座处的受力为 $F_A$ 和 $F_B$ ，刀架受力为 $F_y$ 。

在距离床头 $x$ 处，工件轴线移动的距离为 $y_x$ 。

$$y_x = y_{tj} + \Delta x = y_{tj} + \frac{x}{L} (y_{wz} - y_{tj})$$

机床总的变形量：

$$y_{jc} = y_x + y_{dj} = y_{tj} + \left( y_{wz} - y_{tj} \right) \frac{x}{L} + y_{dj}$$

根据刚度定义， $K_{tj}$ ， $K_{wz}$ ， $K_{dj}$ 分别为头架、尾座和刀架的刚度，则：

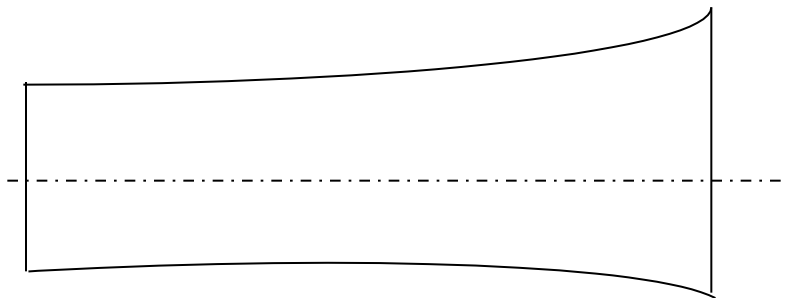
$$y_{tj} = \frac{F_A}{K_{tj}} \quad y_{wz} = \frac{F_B}{K_{wz}} \quad y_{dj} = \frac{F_Y}{K_{dj}}$$

## 2) 工件变形引起的加工误差

■工件为悬臂梁时:

$$y_{g\max} = \frac{F_y L^3}{3EI} \quad K = \frac{F_y}{y_{\max}} = \frac{3EI}{L^3}$$

加工后工件形状为:



■工件为简支梁时:

$$y_g = F_y \frac{(L-x)^2 x^2}{3EI}$$

当 $x=0$ 或 $x=L$ 时,  $y_g=0$ , 变形最小  
当 $x=L/2$ 时, 变形最大,

$$Y_{g \max} = \frac{F_y l^3}{48EI}$$

由于工件变形, 使工件加工后成鼓形,  
如图所示



工件受力变形引起的加工误差

式中

$y_g$ —— 工件变形；

$E$ —— 工件材料弹性模量；

$I$ —— 工件截面惯性矩；

$F_y$ —— 工件受到的切削力

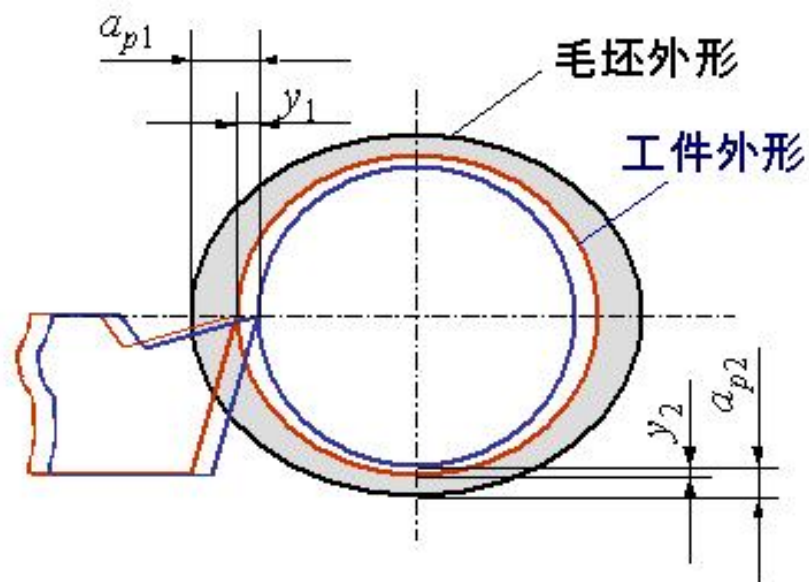
$x$ —— 受力点到支承点的距离

$L$ —— 工件的长度

## 2、切削力大小变化引起的加工误差

### ■ 误差复映规律

切削加工中，由于毛坯本身的误差（形状或位置）使切削深度不断变化，从而引起切削力的变化，促使工艺系统产生相应的变形，因而工件表面上保留了与毛坯表面类似的形状和位置误差，但加工后残留的误差比毛坯误差从数值上大大减少了，这一现象称为“误差复映”



误差复映现象

## ■ 减少误差复映的方法

■ K越大，复映系数  $\varepsilon$  越小

■ 进给量  $f$  减少时，可以减小  $C$ ，则  $\varepsilon$  减小

■ 增加走刀次数

■ 减小毛坯误差值

## ■ 多次走刀总的的误差复映系数

当加工分几次走刀时，每次的误差复映系数为  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$

## ■应用推广

- 每一工件毛坯形状误差，都以一定复映系数形成工件的加工误差，这是用于切削余量不均引起的。
- 车削时， $K$ 很高时， $\delta < 1$ ， $n$ 次走刀，加工误差下降很快，因此只在粗加工用来估算加工误差，当 $K$ 低时，则从实际出发，来提高加工精度。
- 尺寸分散。在大批分生产中，用调整法加工一批工件，如毛坯尺寸不一，则加工后工件仍有尺寸不一的误差。
- 毛坯硬度不均匀，也会造成加工误差。当走刀次数一定时，如果一批毛坯材料的硬度差别很大，会使工件的尺寸分散范围扩大，甚至超差。

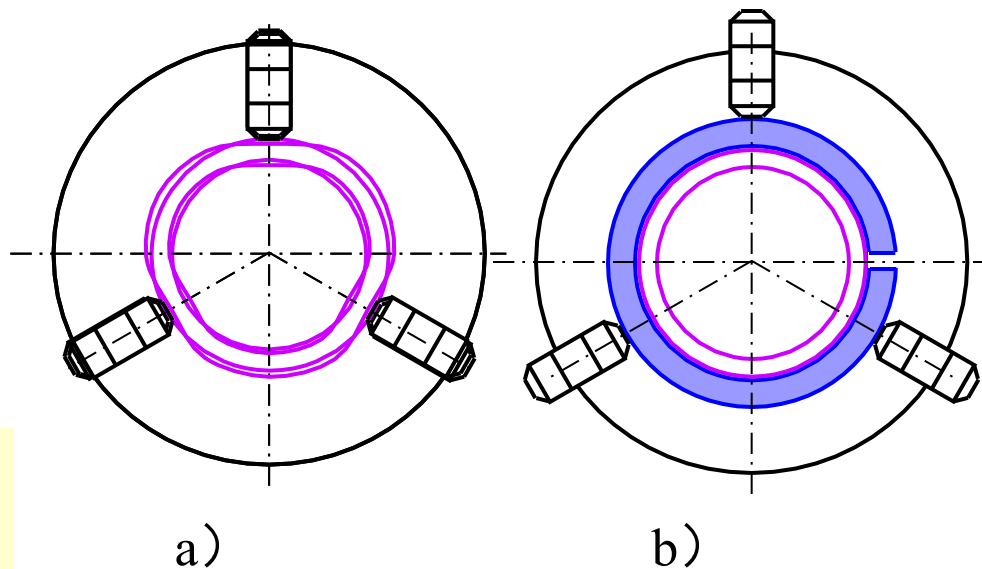


### 3、夹紧力、重力、传动力和惯性力引起的加工误差

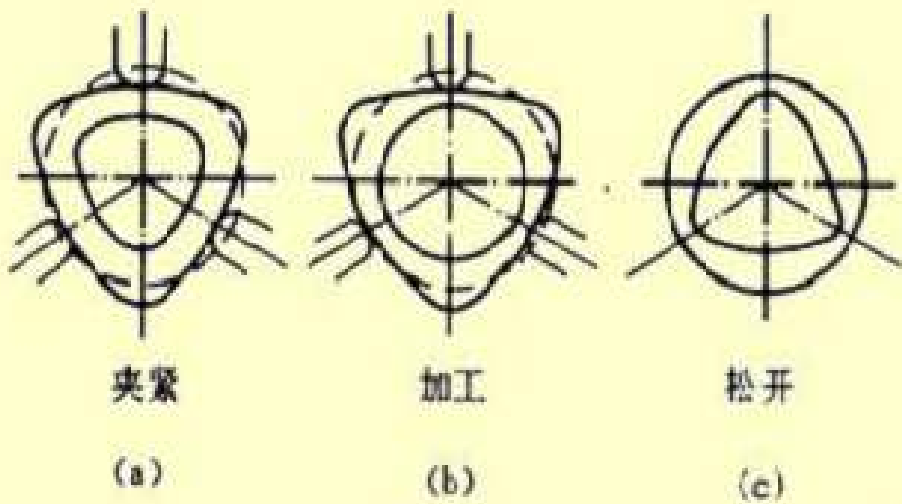
#### ◆ 夹紧力影响

【例1】薄壁套夹紧变形

解决：加开口套

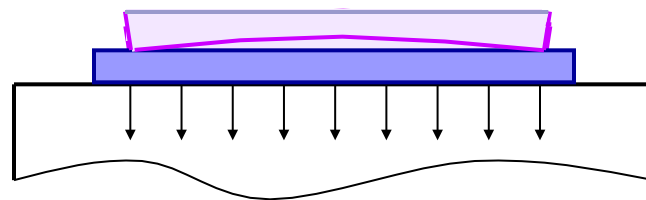
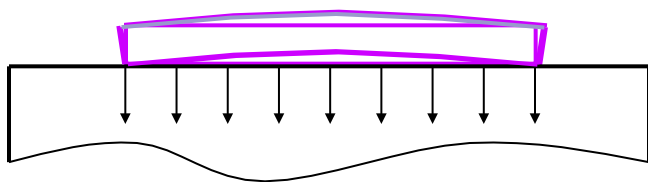


薄壁套夹紧变形

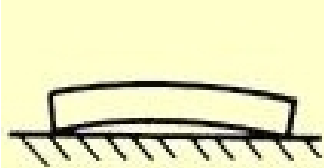


## 【例2】薄壁工件磨削

解决：加橡皮垫

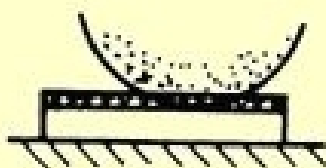


薄壁工件磨削



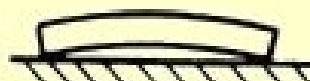
夹紧前

(a)



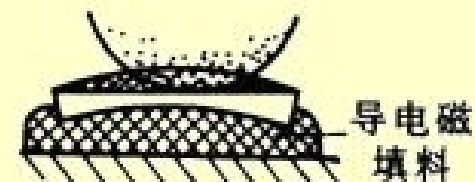
夹紧及加工

(b)

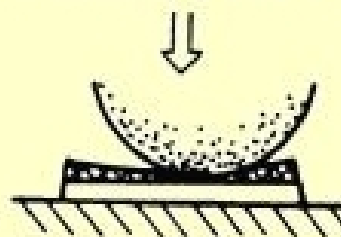


松开

(c)



导电磁  
填料



(d)

# 典 型 大 直 径 薄 壁

# 零 件 的 磨 削 加 工

一拖(洛阳)建筑机械有限公司 聂福全

摘 要:大直径薄壁类零件在磨削外圆时,由于存在装夹困难及变形量较大等问题,零件的加工质量很难保证,必须设计专用夹具及制定合理的加工工艺。文章针对拖式混凝土泵车中的一种典型零件,介绍一种简单、实用的外圆磨削夹具及零件的加工方法。

关键词:大直径 薄壁零件 磨削 工艺

在拖式混凝土泵车中,有一种典型的大直径薄壁零件——中间套(图1),其内孔直径为202 mm,外径为212 mm,壁厚仅为5 mm,且该零件各尺寸之间的形位精度要求较高,外圆表面粗糙度  $Ra$  要求为  $0.4 \mu\text{m}$ ,外圆圆度误差要求小于  $0.010\text{mm}$ 。由于零件壁厚较薄,在磨削外圆时,如果不采取措施,常常会因为夹紧力、磨削力、磨削热、内应力等原因,使工件产生较大的变形,不能保证零件的加工质量。为减小零件的变形,我们根据零件的结构特点,制订了合理的加工工艺流程,设计了专用磨削夹具并采取了特殊的装夹方法,可以有效地保证该类零件的加工质量。

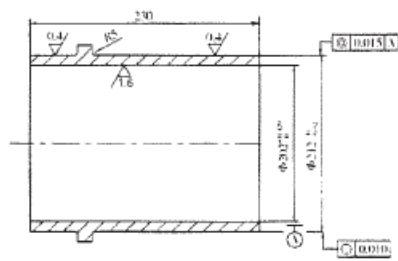


图1 中间套

## 1 零件在磨削外圆时的变形分析

根据零件的外形特点,采用锥度心轴装夹时,工件在夹紧力的作用下,由于锥体的作用而产生的

径向分力会使工件变形。此外,由于在磨削时,工件的内壁磨削热不易散失,磨削热也是引起薄壁零件变形的重要原因。由于工件变形,磨削后工件会形成马鞍形(图2),难以保证工件的圆度及同轴度误差要求,必须通过设计专用夹具并采用合理的工艺方案才能确保零件的加工质量。

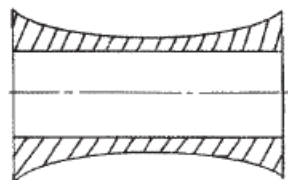
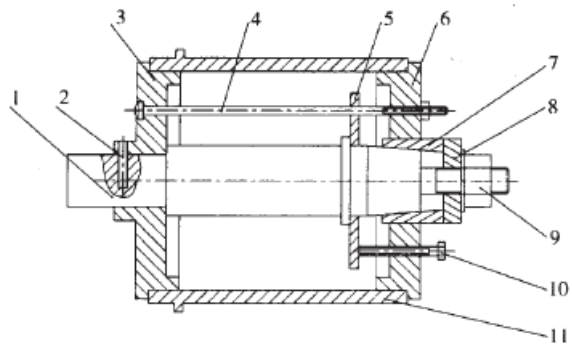


图2 变形后的工件

## 2 夹具结构和使用原理

如图3所示,该夹具为心轴、涨套可调式结构,由心轴1、固定销2、左定位板3、拉杆4、支撑板5、右定位板6、弹簧套7、压板8、带肩螺母9和顶丝螺栓10组成,其中左、右定位板与工件之间的配合为  $H6/h5$ ,右定位板6与弹性套7之间的配合为  $E8/h7$ 。弹簧套7的内锥度为  $20^\circ$ 。使用夹具时,先用固定销2将左定位板3固定在心轴1上,然后在心轴的另一端安装上支撑板5,以零件加工好的内孔为定位基准装入夹具,再将右定位板6装在心轴上



1.心轴 2.固定销 3.左定位板 4.拉杆 5.支撑板 6.右定位板 7.弹簧套 8.压板 9.带肩螺母 10.顶丝螺栓 11.工件

图3 夹具简图

并与零件内孔配合,在夹具上插入两根拉杆4(位置均布)并用螺母锁紧,这样就将夹具紧固在工件上了。然后再将弹簧套7插入心轴1与右定位板6之间的间隙中,安装压板,拧紧心轴上的带肩螺母9,将弹簧套压入,弹簧套就可以起到自动定心作用,而使心轴的轴线与工件的轴线保持一致,夹具就安装完成了。零件加工好后,先松开带肩螺母9,拧动三个顶丝螺栓10(三个顶丝螺栓10位置均布,并与两根拉杆4位置错开),右定位板就可带动弹簧套7沿相反方向退出工件,夹具就可以方便的拆卸了。

### 3 砂轮选型

选择砂轮时,砂轮特性如磨料、粒度、硬度、结合剂、石墨填料和砂轮组织对磨削质量都有影响,如果选择不当,就难以使工件达到预期的表面粗糙度。此外还应尽可能提高砂轮的切削性能,控制好砂轮工作表面磨粒的微刃及其等高,并使其保持锋利状态。鉴于该零件的材料为45号钢,为降低零件表面粗糙度,所选用的砂轮磨料的粒度要适中,硬度可以稍小一些。这是因为太硬的砂轮当其已完全钝化后,磨粒仍不能脱落,继续磨削反而使粗糙度变大。实际应用中,砂轮的选用以微晶刚玉或单晶刚玉、硬度为中级(K)、粒度为46号至60号为宜。此外,砂轮在使用前必须要经过修整,使砂轮表面有良好的磨粒切刃和微刃的脱粒性及等高性,从而确保工件磨削的表面粗糙度要求。

### 4 加工设备

为减小零件加工的形位误差,设备的选择非常重要。要求机床主轴要有较高的回转精度,径向跳动不大于0.001 mm,主轴刚度好,机床各部分不应有振动现象,因此最好选择较新的机床。结合我公司的实际情况,设备选用MB1332B型普通外圆磨床。

### 5 磨削液及冷却方式

为降低切削热,切削液可采用无油、无亚硝酸钠的LPG-1高效磨削冷却液。该冷却液是以高效极压润滑剂为添加剂作为配方基础,并从防锈、渗透、抗硬水性、清洗、消泡和杀菌等方面综合考虑的,具有环保、清洗性好、去油率高、冷却性好等优点,能节约大量能源和降低砂轮消耗,提高磨削用量,并提高生产效率。

使用磨削液时,应采用从磨削区下部供给切削液的方法,这样既可以使切削液很容易达到砂轮与工件接触的磨削区,同时又能使砂轮在磨削工件之后得到及时的冷却和清洗,从而延长砂轮的使用寿命、保持砂轮的几何形状,并可以在磨削连续表面时,使工件保持较低的温度,提高工件的形状与位置精度。

### 6 磨削用量

磨削时分为粗、精磨多道工序,这样可以使粗磨时产生的变形能在精磨时得以消除。磨削时,磨削用量选择应合适,粗磨时,砂轮的线速度为15~20 m/s,工件转速为35~70 r/min,工作台移动速度为0.03~0.05 m/min;精磨时,砂轮的线速度为10~15 m/s,工件转速为50~80 r/min,工作台移动速度为0.02~0.03 m/min。

## 6 磨削用量

磨削时分为粗、精磨多道工序,这样可以使粗磨时产生的变形能在精磨时得以消除。磨削时,磨削用量选择应合适,粗磨时,砂轮的线速度为 15~20 m/s, 工件转速为 35~70 r/min, 工作台移动速度为 0.03~0.05 m/min; 精磨时,砂轮的线速度为 10~15 m/s, 工件转速为 50~80 r/min, 工作台移动速度为 0.02~0.03 m/min。

## 7 工件的装夹

由于选用的设备为普通外圆磨床,在采用两顶尖装夹工件时,两顶尖、两中心孔同轴度误差将直接影响工件的加工精度,零件要求的加工质量很难保证。因此,为消除因工件两中心孔制造误差及两顶尖安装误差对工件圆度的影响,在装夹工件时,可以采取如图 4 所示方法选用两个特殊顶尖套 2, 顶尖套材料选用 GCr15 钢,车出外圆后磨削,中心孔使用 60°特殊中心钻钻出,淬硬至 60HRC,并用特殊内圆砂轮磨出中心孔,再以中心孔定位磨出外

圆,并研磨中心孔至表面粗糙度  $Ra0.4$ ,压入莫氏锥柄。然后将两个特殊顶尖装入外圆磨床头尾架,选用直径为 1/2 英寸的 0 级钢球,并与图 2 所示的专用夹具配合,通过使用夹头和拨盘即可完成工件的装夹(图 5)。用高精度钢球代替锥形顶尖,可把面接触改为线接触,消除了中心孔精度对工件加工精度的影响,可以显著提高工件的圆度。

## 8 磨削时的注意事项

1) 在精磨时,为减小夹紧力引起的工件变形,夹具的夹紧力应比粗磨时小一些。

2) 磨削后,为了防止工件生锈,工件应做除水、消除杂质及防锈处理。

3) 校正好砂轮的平衡。砂轮不平衡将引起振动,会对零件的形位精度造成影响,因此在磨削工件前,必须校正好砂轮的动、静平衡,并进行精细的

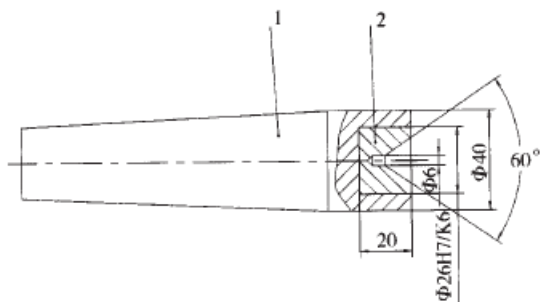
修整。

4) 磨削工件前将工作台和砂轮空运转 20~30 min,使机床工作性能稳定。在空运转的同时,要把机床液压缸中的空气排净。

5) 安装工件前,应检查两顶尖与工件中心孔的配合情况,必须将两顶尖和工件上的中心孔擦干净。

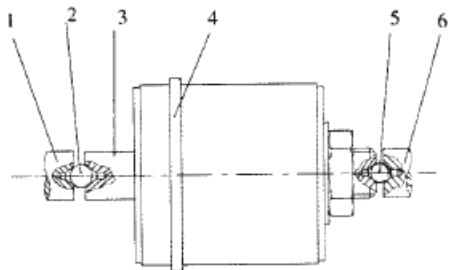
## 9 应用效果

该工艺方案简单、实用,夹具设计合理,应用方便,制造成本低,零件拆卸容易,通用性强,使用效果好,既可以有效确保工件加工质量,又能够提高工效,适于大直径薄壁类零件的批量生产。



1. 莫氏锥柄 2. 顶尖套

图 4 特殊顶尖

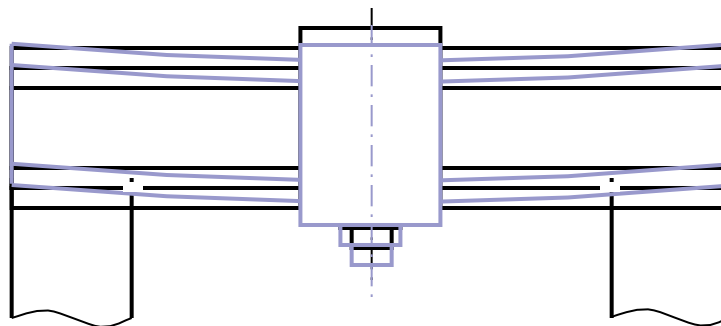


1. 顶尖 2. 钢球 3. 心轴 4. 工件 5. 钢球 6. 顶尖

图 5 工件的装夹

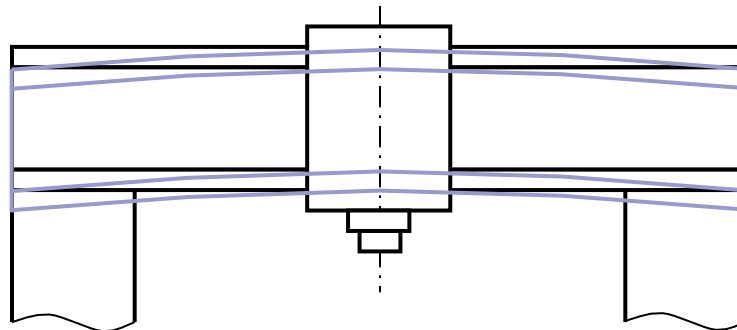
## ◆ 重力影响

### 【例】龙门铣横梁

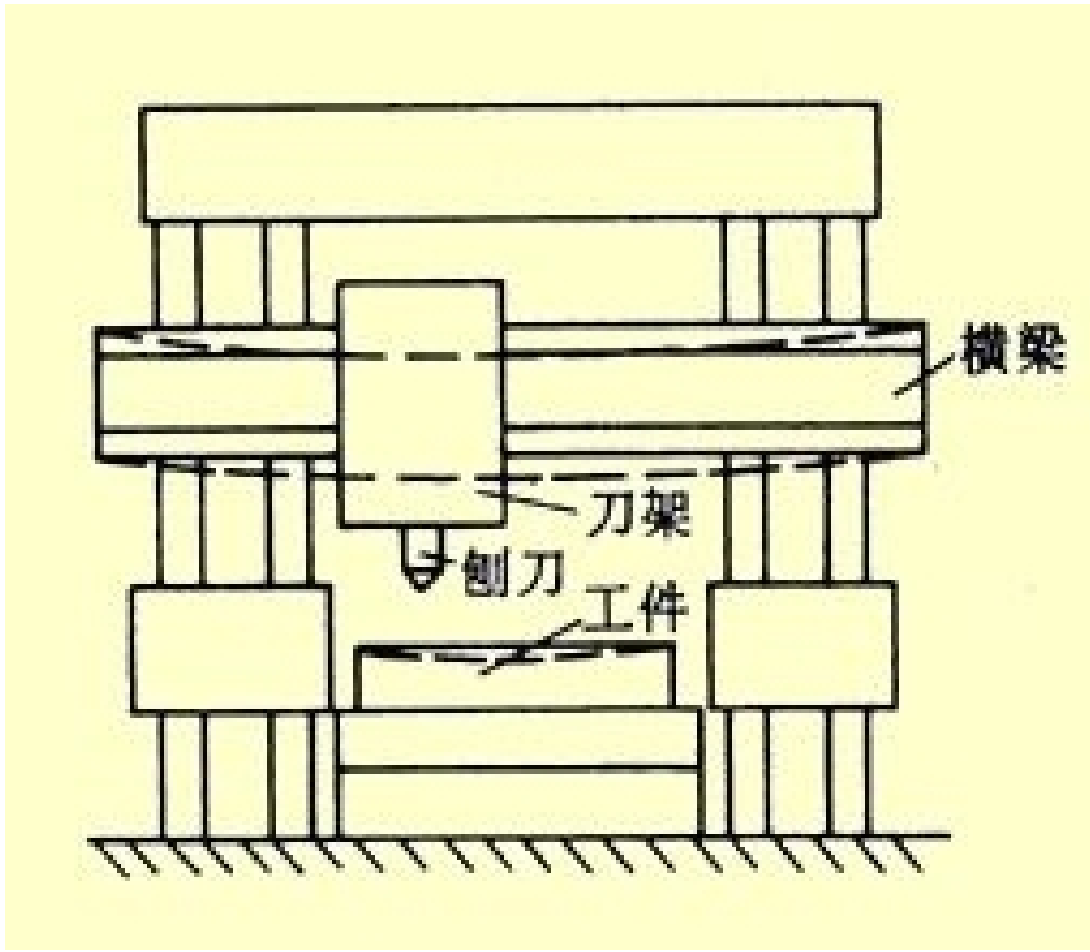


龙门铣横梁变形

解决：变形补偿



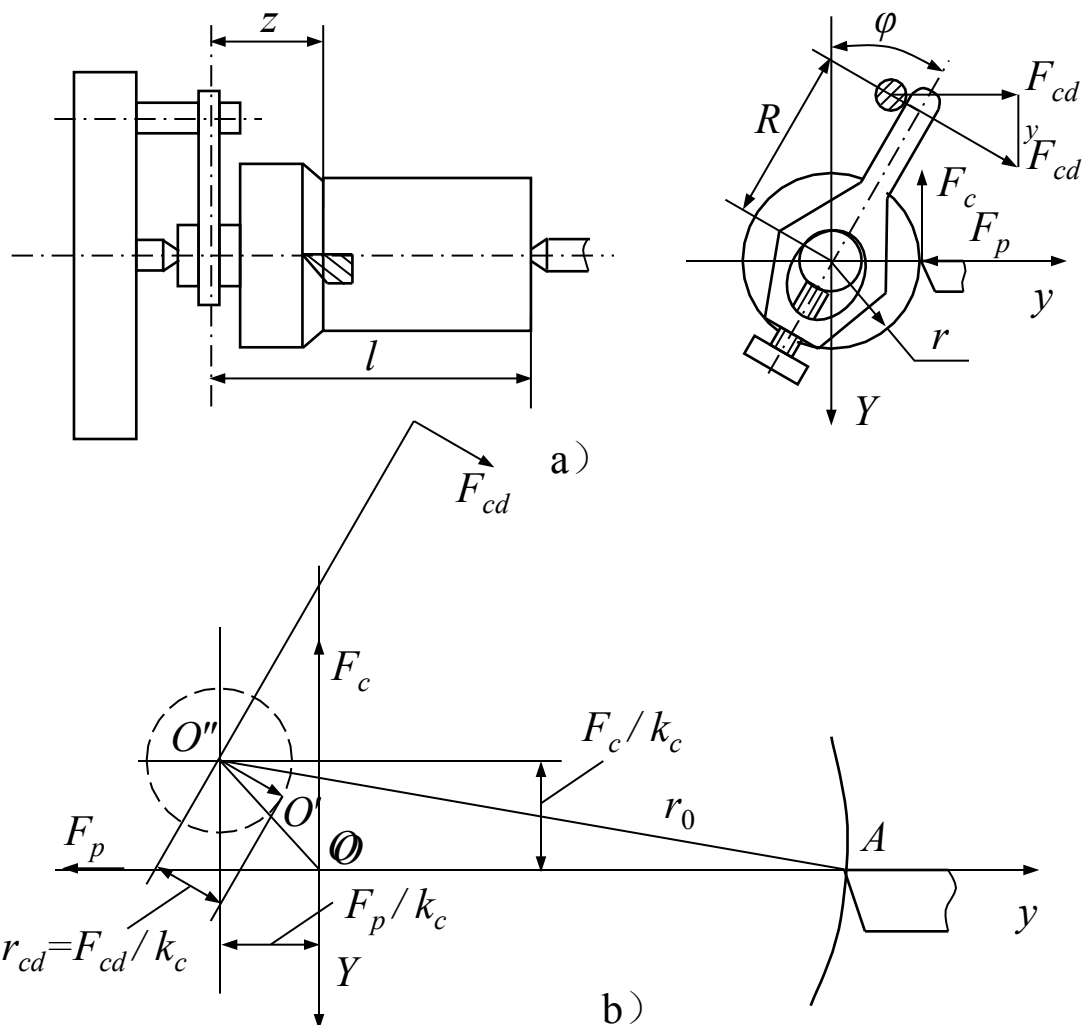
龙门铣横梁变形补偿





## ◆ 传动力与惯性力影响

- 理论上不会产生圆度误差（但会产生圆柱度误差）
- 周期性的力易会引起强迫振动



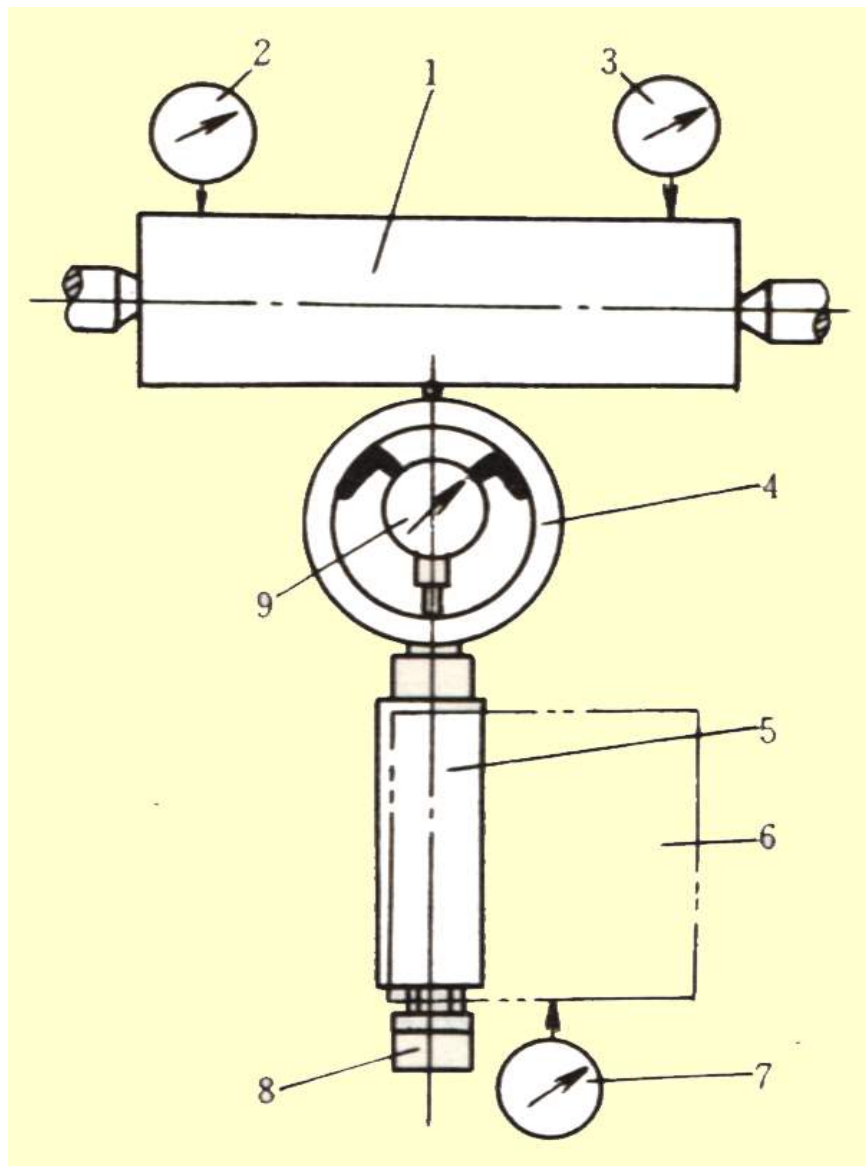
传动力对加工精度的影响

# 四、机床部件的刚度

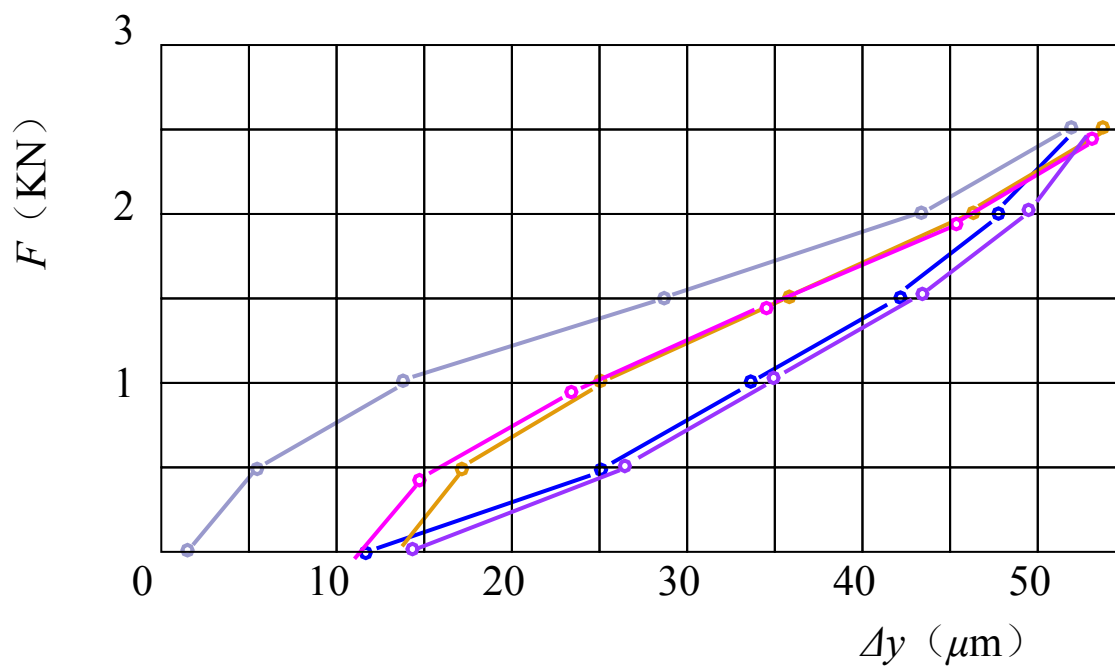
## 1、机床部件刚度测定

### ■ 静态测定法：

在机床不工作状态，模拟车削时的受力的受力情况对机床施加静载荷，然后测出机床部件在不同载荷下的变形，作出各部件的刚度特性曲线并计算刚度。



下图是对一车床进行3次加载和卸载循环，绘制了他的刚度曲线。



车床刀架变形曲线

## ■分析刚度曲线的特点：

- 非线性关系，不完全是弹性变形
- 加载和卸载曲线不重合，所围面积表示克服摩擦和接触塑性变形所作功
- 存在残余变形，反复加载卸载后残余变形 $\rightarrow 0$
- 机床部件刚度比按实体估算值小许多，表明其变形受多种因素影响

## ■工作状态测定法

## 2、影响机床部件刚度因素

- 连接表面接触变形 —— 其大小与接触面压强有关
- 零件表面摩擦力的影响
- 结合面间隙
- 组成件的实体刚度 —— 受力产生拉伸、压缩、弯曲变形；**特别是薄弱件**（楔条、轴套等）影响较大
- **施力方向的影响，测试时只模拟 $F_y$ ，实际上加工过程中， $F_x$ ， $F_y$ ， $F_z$ 同时作用。**

# 五、 减小受力变形对加工精度影响措施

## 1、 提高工艺系统刚度

### ■合理的设计：

设计工艺装备时，尽量减少连接面数目，注意刚度的匹配，防止局部低刚度环节出现，设计基础件、支承件时，合理设计零部件结构和截面形状。

### ■提高连接表面接触刚度

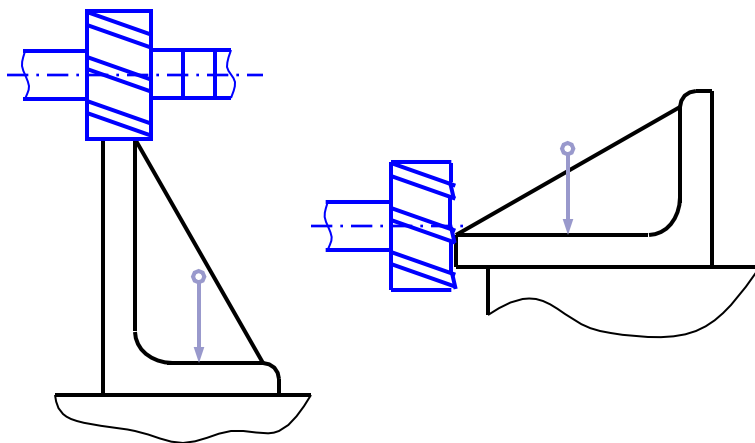
- 提高机床部件中零件接合表面的接触质量

- 给机床部件预加载荷

- 提高工件定位基准的精度和降低表面粗糙度值。

- 采用辅助支承（中心架，跟刀架，镗杆支承等）

## ■采用合理装夹和加工方式



支座零件不同安装方法

## 2、减小载荷及其变化

# 六、 工件残余应力引起的变形

## 1、内应力

### ■定义：

外部作用力去除后工件内存留的应力

### ■特点：

具有内应力的零件处于一种不稳定状态，它内部的组织有强烈的倾向要恢复到一个稳定的没有应力的状态，即使在常温下，零件也会不断的缓慢地进行这种变化，直到残余应力安全松弛为主，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。

### ■来源：冷、热加工。



## 2、毛坯制造和热处理产生的残余应力

### ■原因：

在铸、锻、焊、热处理等加工过程中，由于各部分冷热收缩不均匀，以及金相组织的体积变化，使毛坯内部产生相当大的残余应力。

### ■例1：

下图表示一个内外壁厚相差较大的铸件，浇注后，冷却过程如下：

壁A、C较薄，散热容易，冷却快。壁B冷却慢，当A、C从塑性状态冷却到弹性状态时，B还处于塑性状态，这时A、C收缩时B不起阻挡变形的作用，铸件内部不会产生内应力。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/795220221204011144>