

主要内容

- Ø 概述
- Ø 数控编程中的常用指令
- Ø 数控编程中的工艺处理
- Ø 数控编程中的数学处理

2.1 概述

数控编程概念：

从分析零件图纸开始，经过工艺分析、数学处理到获得数控机床所需的数控加工程序的全过程叫做数控编程。



2.1 概述

数控编程步骤



2.1 概述

编程方法：手工编程和自动编程

手工编程：几何形状不太复杂的零件；

自动编程：**形状复杂**的零件；虽不复杂但**编程工作量很大**的零件（如有数千个孔的零件）；虽不复杂但**计算工作量大的**零件（如非圆曲线的计算）等。



2.1 概述



2.1 概述

据国外统计：

用手工编程时，一个零件的编程时间与机床实际加工时间之比，平均约为 30: 1；数控机床不能开动的原因中，有 20-30%是由于加工程序不能及时编制出造成的。

编程自动化是当今的趋势！



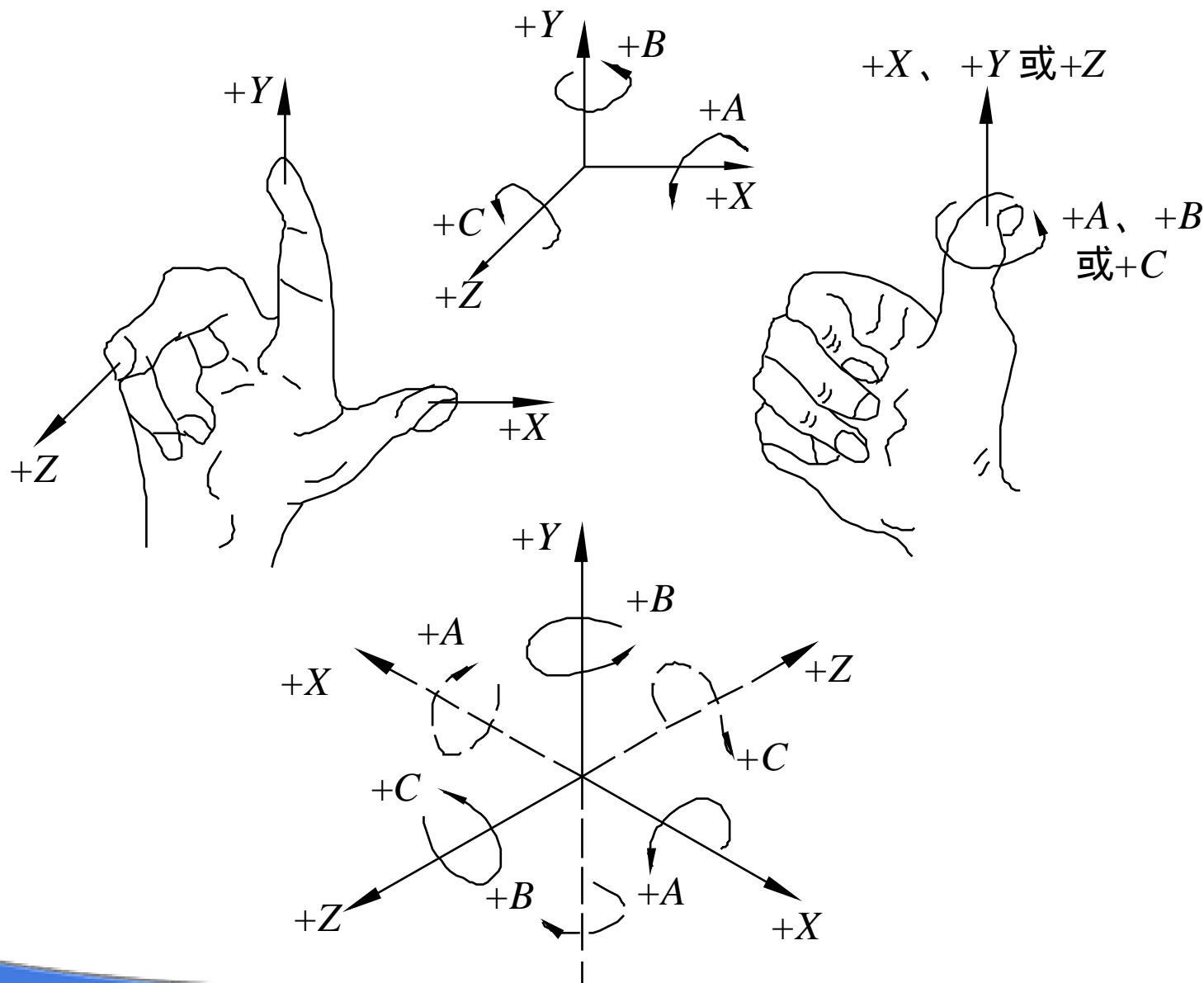
2.1 概述

坐标轴的命名及方向

标准规定，在加工过程中无论是刀具移动，工件静止，还是工件移动，刀具静止，一般都假定工件相对静止不动，而刀具在移动，并同时规定**刀具远离工件的方向**作为坐标轴的**正方向**。



2.1 概述



X、	Y、	Z
U、	V、	W
P、	Q、	R
A、	B、	C
D、	E	



2.1 概述

数控机床坐标轴的确定方法：

Z坐标

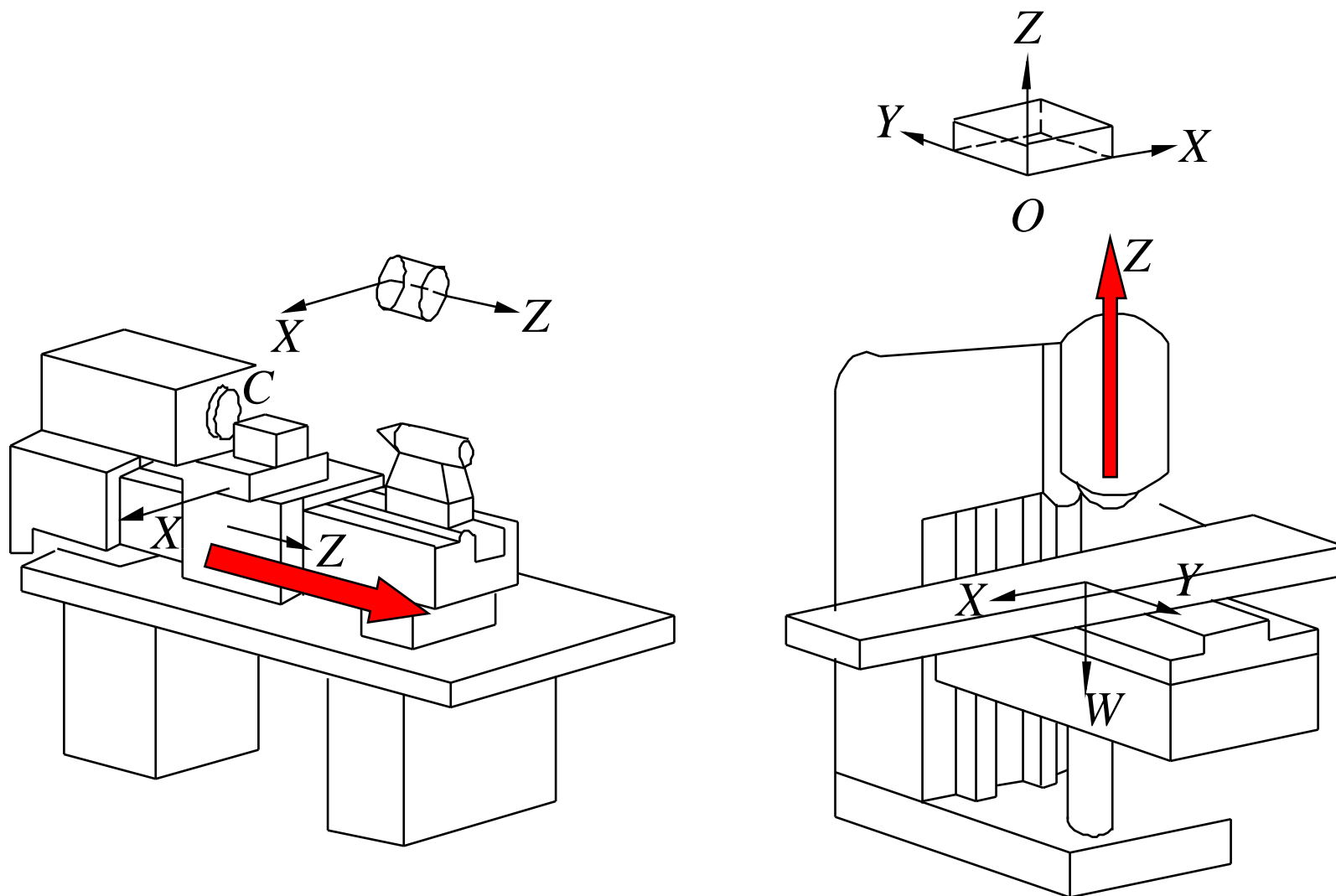
∅ 方位

- 标准规定：Z坐标 主轴轴线的进给轴。
- 若没有主轴 (牛头刨床)或者有多个主轴，则选择垂直于工件装夹面的方向为 Z坐标。
- 若主轴能摆动：
 - 在摆动的范围内只与标准坐标系中的某一坐标平行时，则这个坐标便是 Z坐标；
 - 若在摆动的范围内与多个坐标平行，则取垂直于工件装夹面的方向为 Z坐标。

∅ Z坐标正方向的规定：刀具远离工件的方向。



2.1 概述

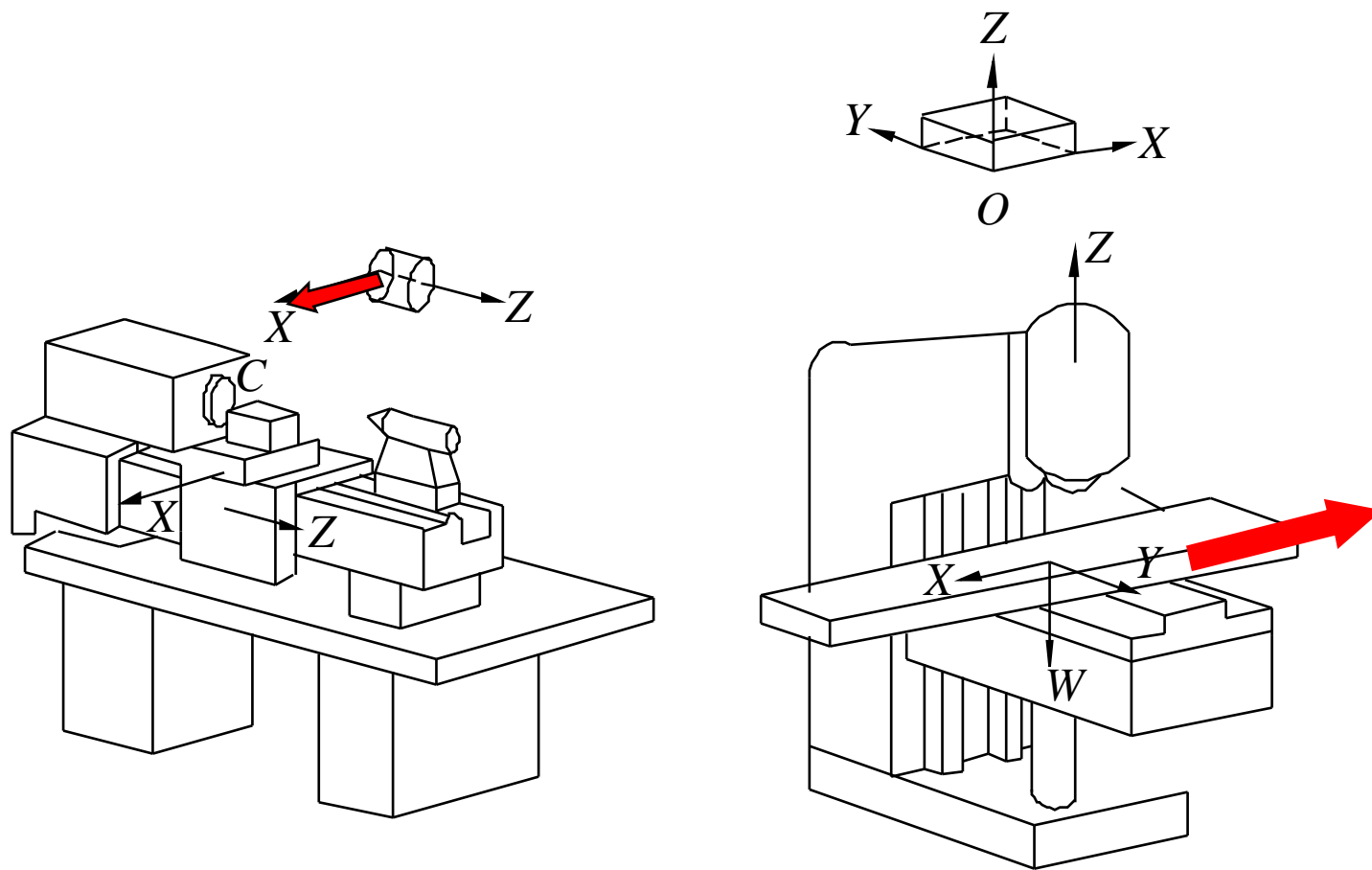


2.1 概述

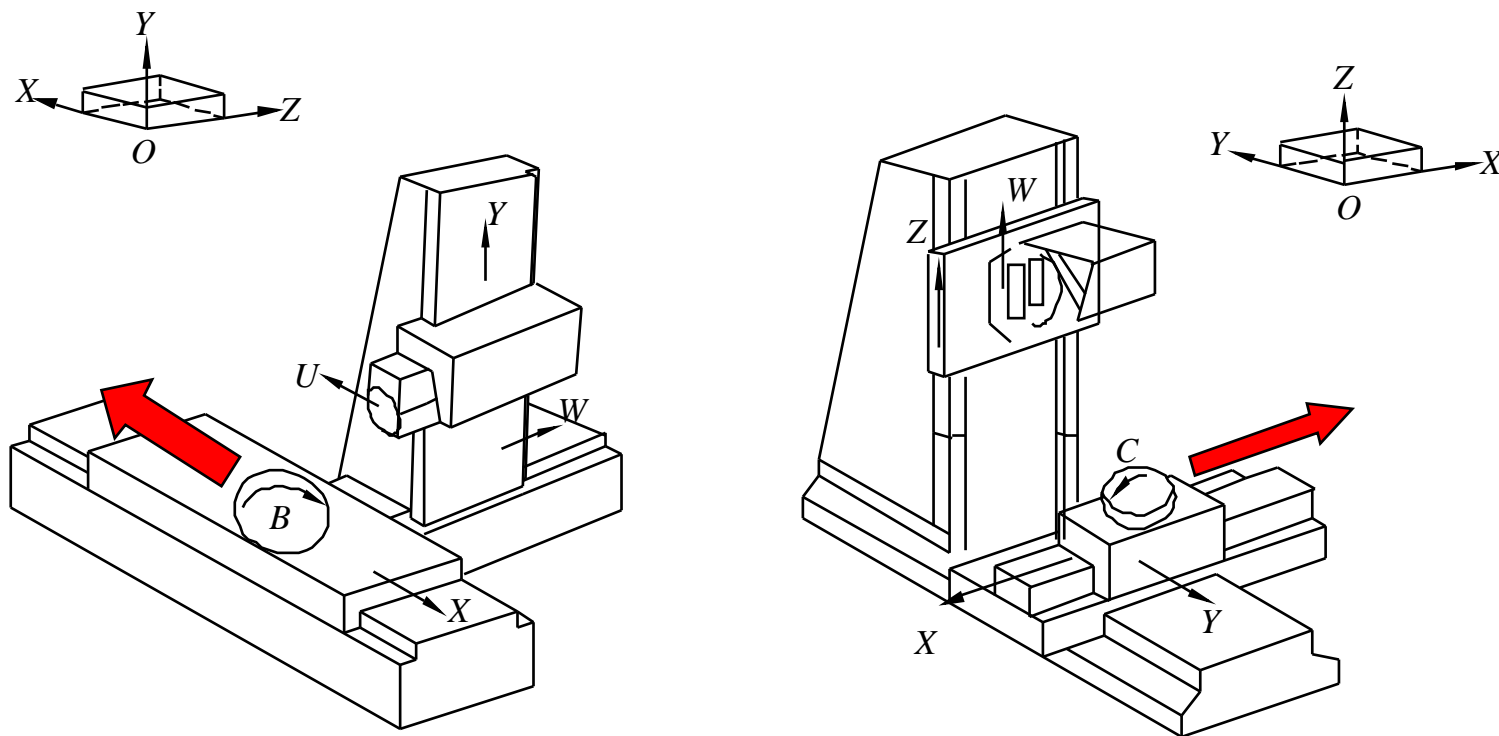
X坐标

- ∅ 在刀具旋转的机床上（铣床、钻床、镗床等）。
 - Z轴水平（卧式），则从刀具（主轴）向工件看时，X坐标的正方向指向右边。
 - Z轴垂直（立式）：
 - 单立柱机床，从刀具向立柱看时，X的正方向指向右边；
 - 双立柱机床（龙门机床），从刀具向左立柱看时，X轴的正方向指向右边。
- ∅ 在工件旋转的机床上（车床、磨床等），X轴的运动方向是工件的径向并平行于横向拖板，且刀具离开工件旋转中心的方向是X轴的正方向。

2.1 概述

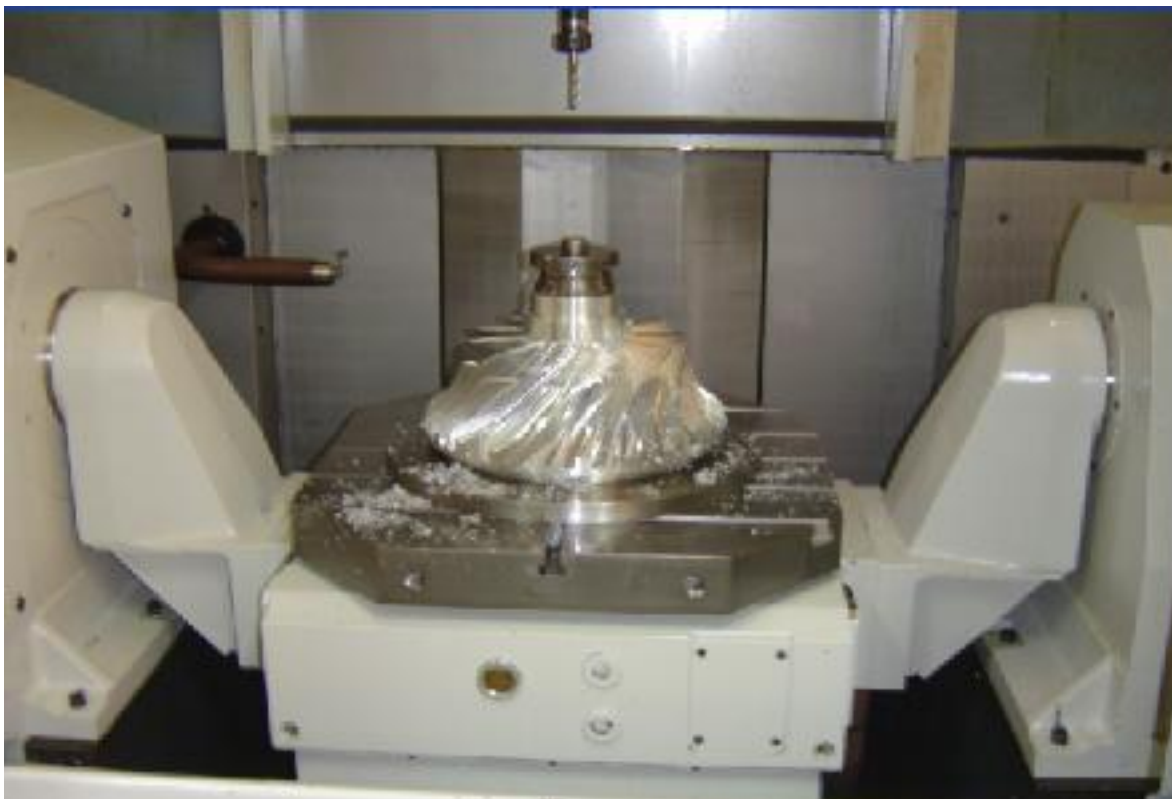


2.1 概述



2.1 概述

轴的确定 X 轴的正方向确定后，Y 轴可按右手直角笛卡尔直角坐标系来判定。



2.1 概述

坐标数：采用数字控制的运动方向的个数

联动数：数控系统能同时控制的坐标数

(2坐标联动加工 - - 5坐标联动加工)



2.1 概述

机床坐标系与机床原点

机床坐标系是机床上固有的坐标系，用于确定被加工零件在机床中的坐标、机床运动部件的位置（如换刀点、参考点）以及运动范围（如行程范围、保护区）等。

机床原点是机床坐标系的零点，在机床调试完成后便确定，是机床上固定的点，一般不允许用户改变。数控车一般在卡盘前后端面的中心，数控铣各厂家不一样，有的工作台中心，有的行程终点等。

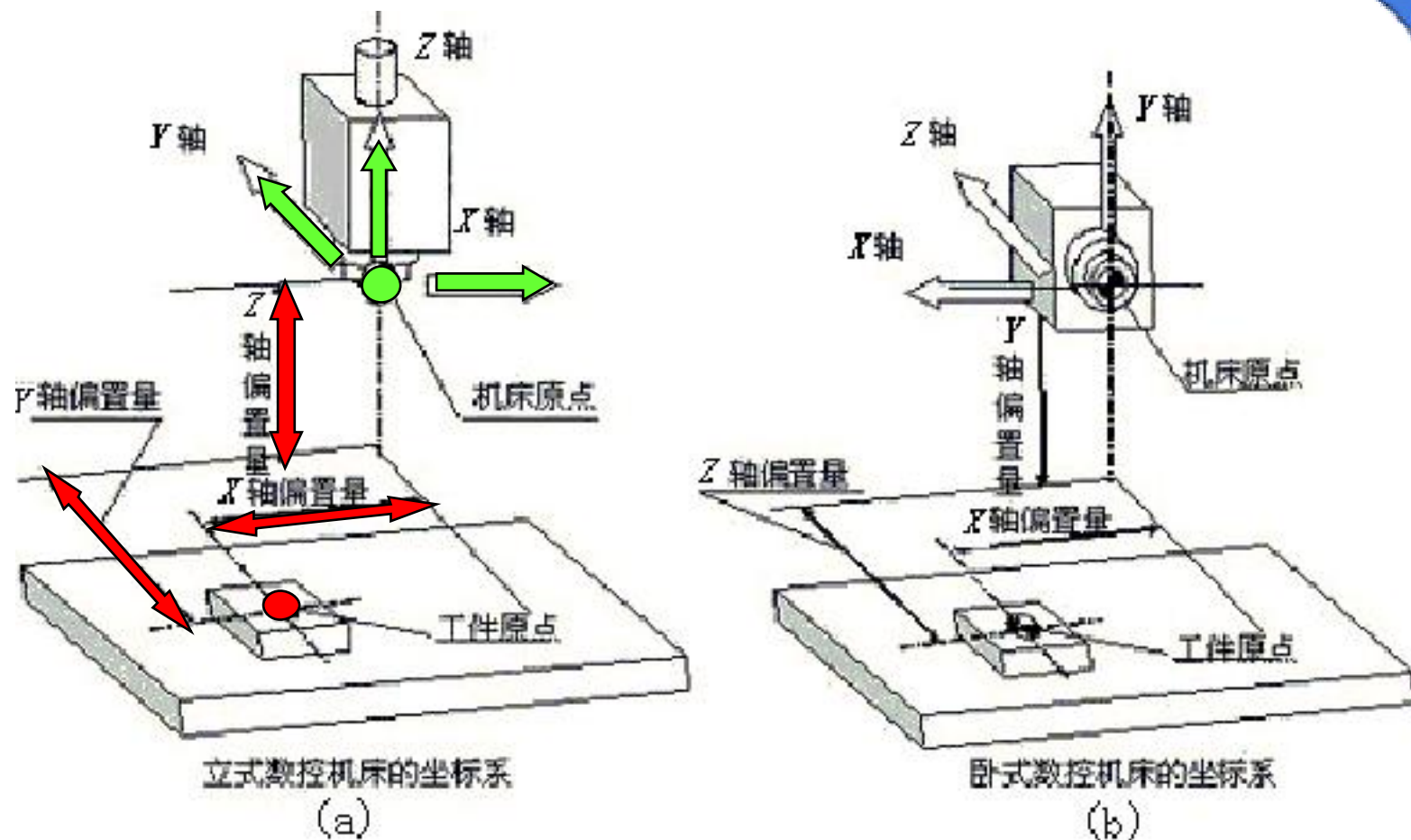


2.1 概述

工件坐标系与工件原点

- 1) 由编程人员确定,用于编程;
- 2) 工件坐标系的原点称为工件原点或工件零点,可用程序指令来设置和改变;
- 3) 根据编程需要,在一个加工程序中可一次或多次设定或改变工件原点。

2.1 概述



工件原点偏置：工件随夹具在机床上安装后，工件原点与机床原点间的距离。

2.1 概述

加工程序结构与格式

O0001; 程序名

若干
程序
段

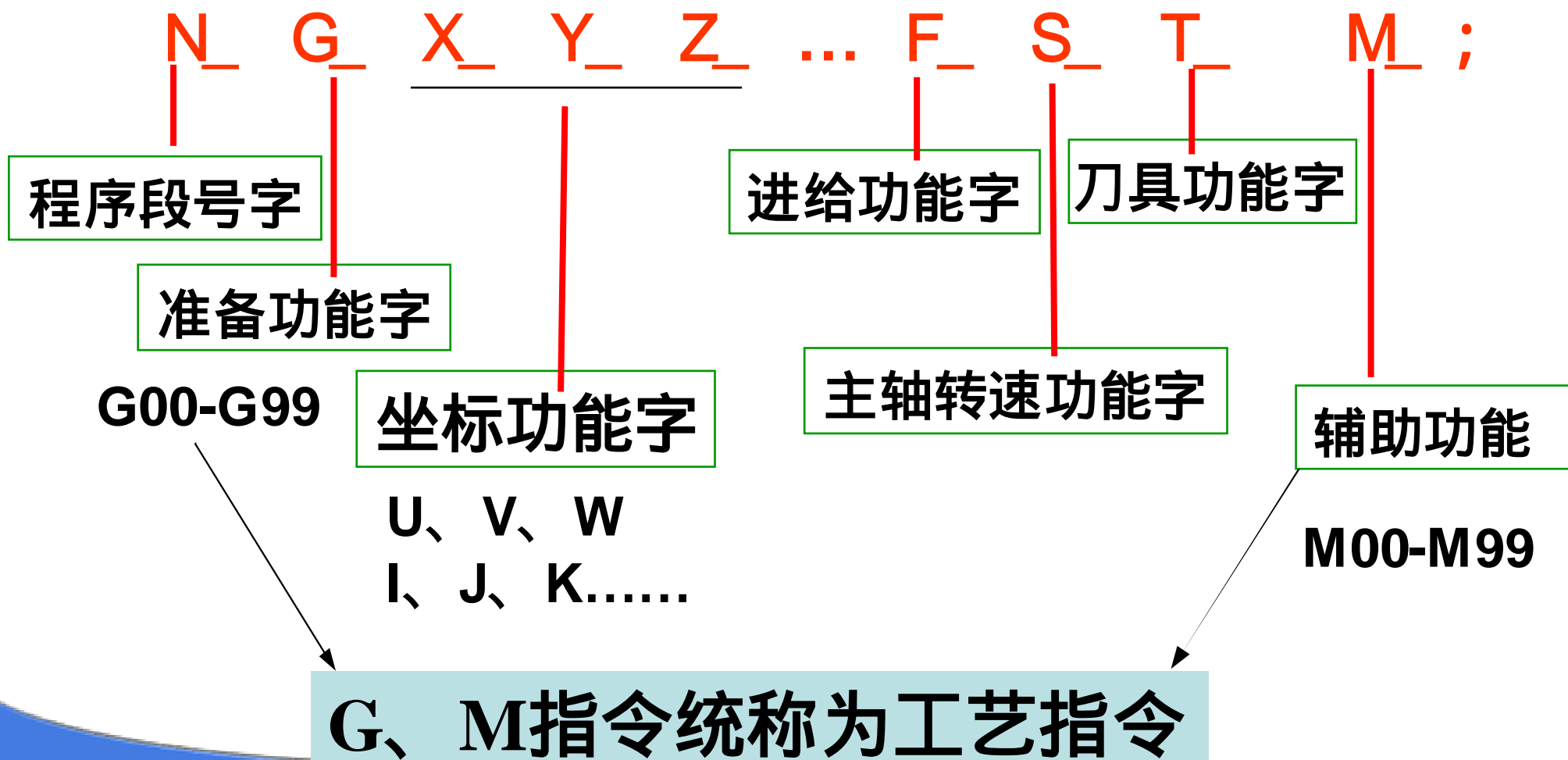
{
N10 G92 X0 Y0 Z200.0;
N20 G90 G00 X50.0 Y60.0 S300 M03;
N30 G01 X10.0 Y50.0 F150 ;
.....

N110 M30; 程序结束指令



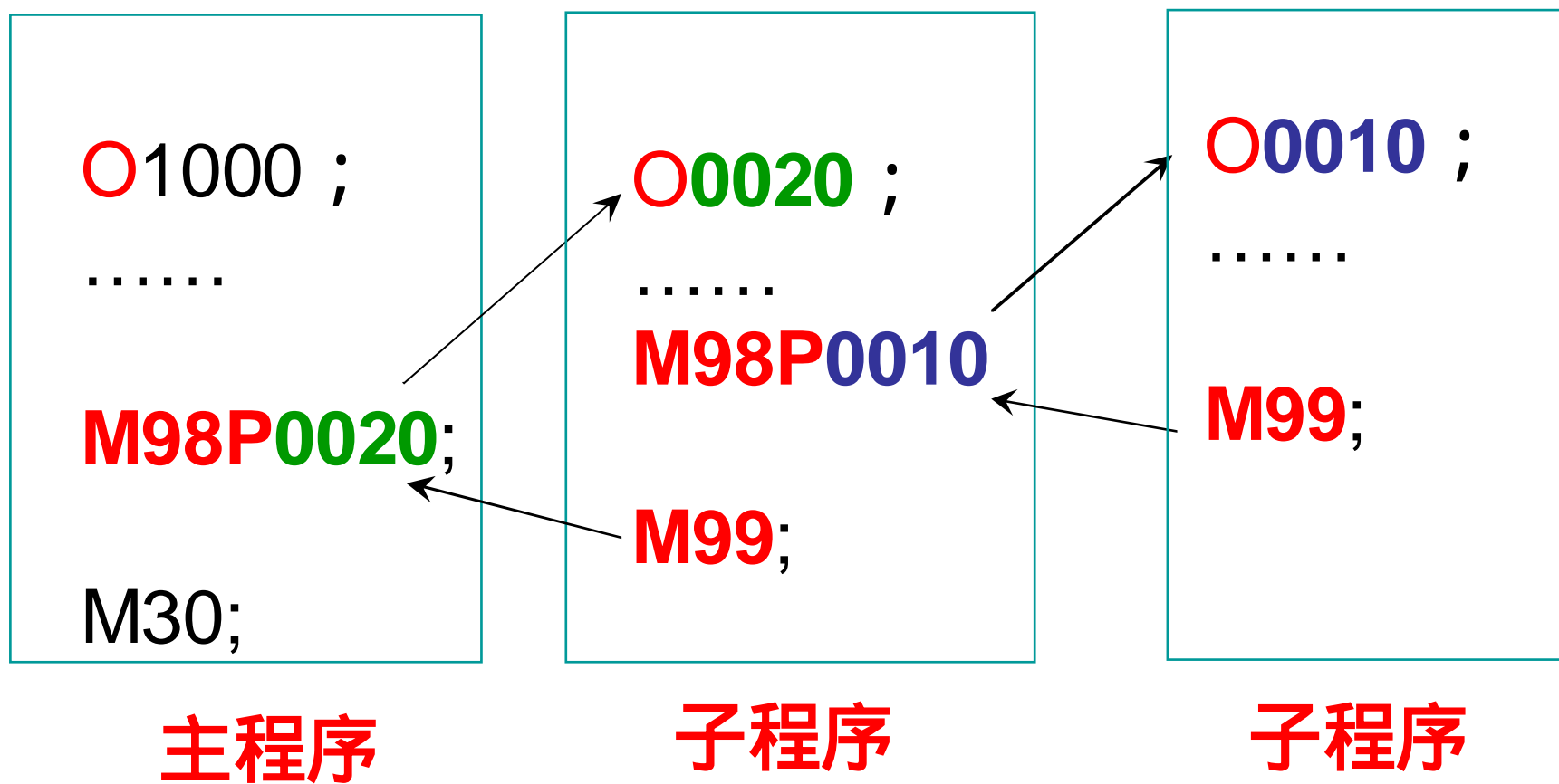
2.1 概述

字地址程序段的一般格式为：



2.1 概述

主程序和子程序



2.2 数控编程中的常用指令

代码	组	含义
G00	01	定位（快速移动）
G01		直线插补(切削进给)
G02		圆弧插补 / 螺旋插补 CW
G03		圆弧插补 / 螺旋插补 CCW
G02.2, G03.2		渐开线插补 CW/CCW
G02.3, G03.3		指数函数插补 CW/CCW
G02.4, G03.4		三维圆弧插补 CW/CCW
G04	00	暂停
G05		AI 轮廓控制（高精度轮廓控制兼容指令）
G05.1		AI 轮廓控制 / 纳米平滑加工 / 平滑插补
G05.4	01	HRV3,4 接通 / 断开
G06.2		NURBS 插补
G07	00	假想轴插补
G07.1(G107)		圆柱插补
G08		AI 轮廓控制（前瞻控制兼容指令）
G09		准确停止
G10		可编程数据输入
G10.6		刀具回退 & 返回
G10.9		直径 / 半径编程的可编程切换

Fanuc 30i

2.2 数控编程中的常用指令

准备功能G代码

在插补运算之前需要规定，为插补运算作好准备的工艺指令，如：G17 G01 G02 G08等。

模态代码和非模态代码

模态代码：一经在一个程序段中指定，其功能一直保持到被取消或被同组其它G代码所代替。

非模态代码：仅在所出现的程序段内有效。

G41、G42、G40

G81~G89

G04

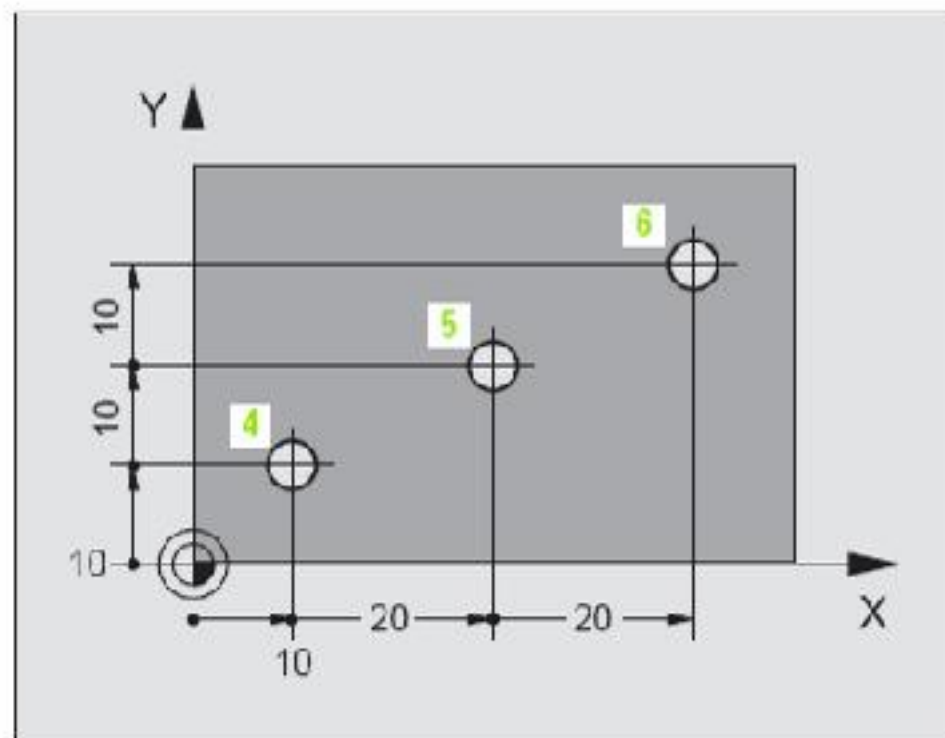
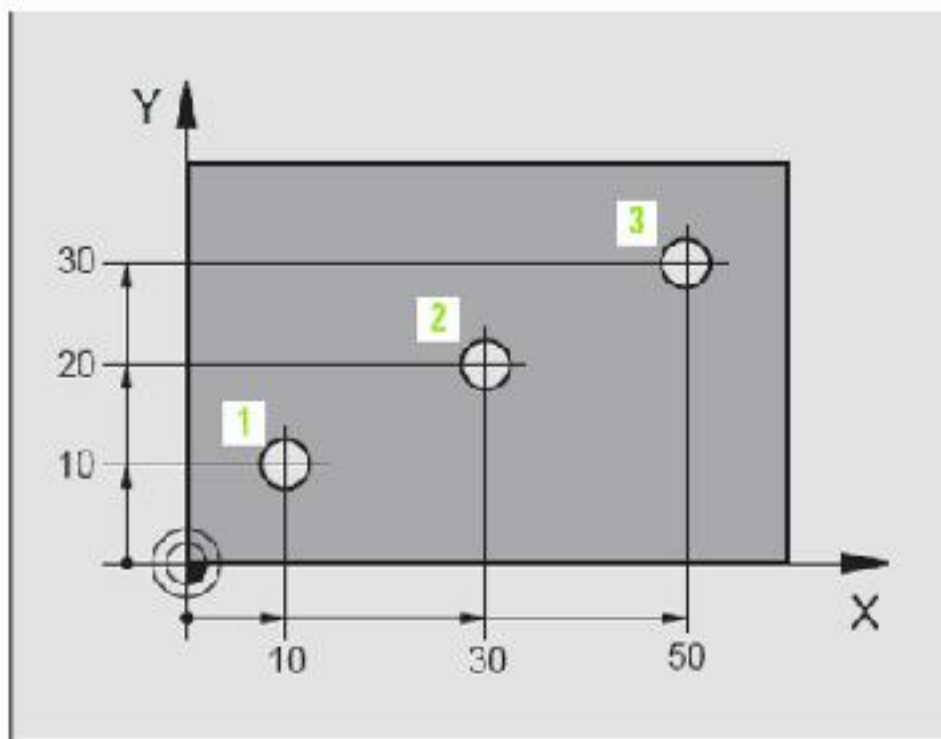
G90、G91

G00、G01、G02、G03



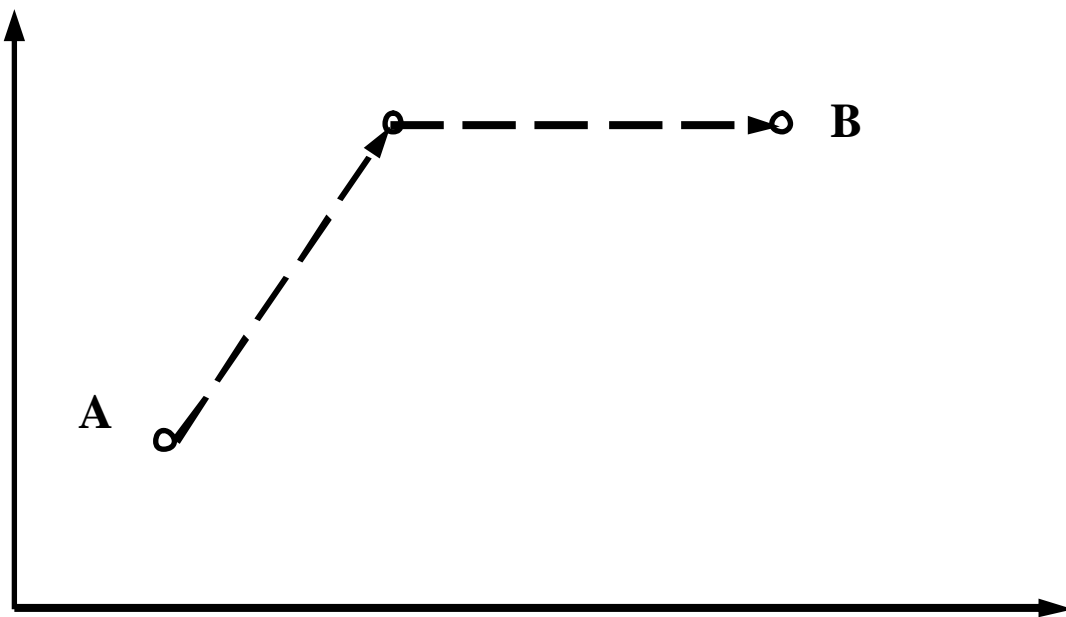
2.2 数控编程中的常用指令

绝对坐标与增量坐标编程指令 G90 G91

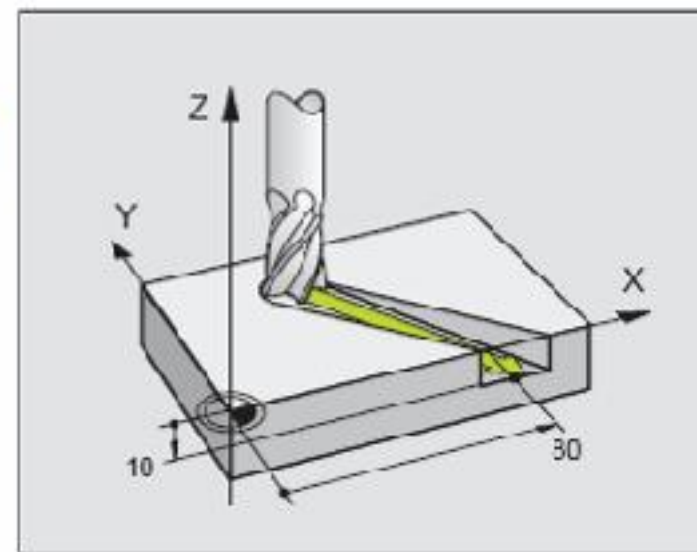


2.2 数控编程中的常用指令

快速点定位指令 G00

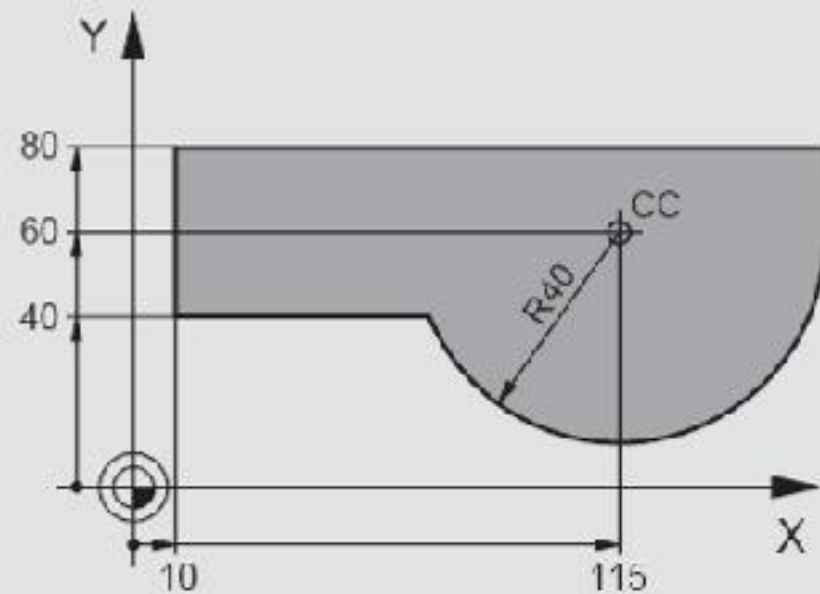
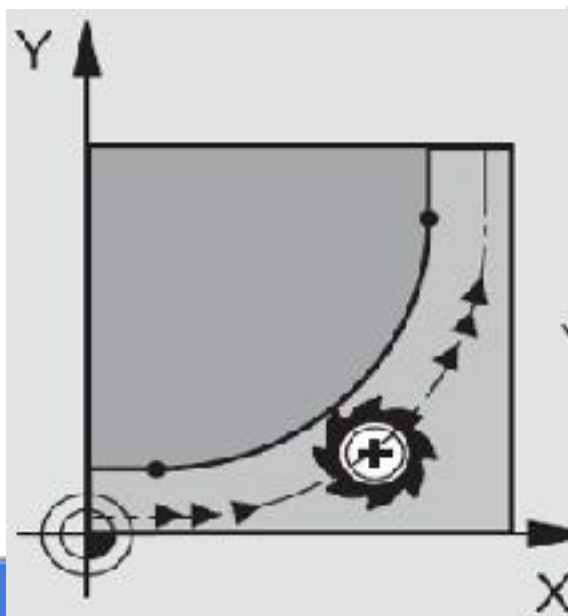
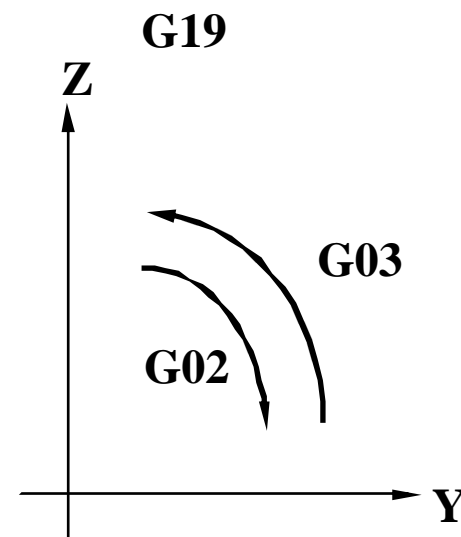
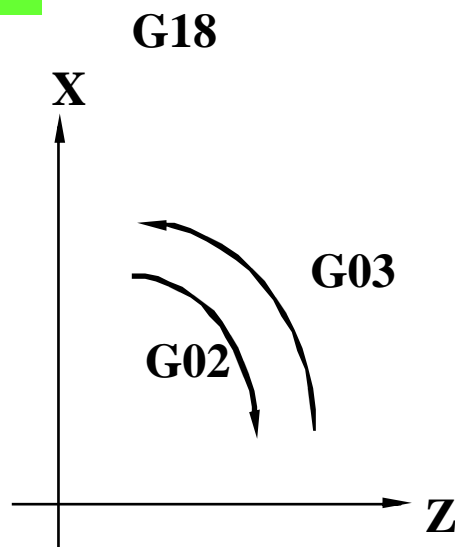
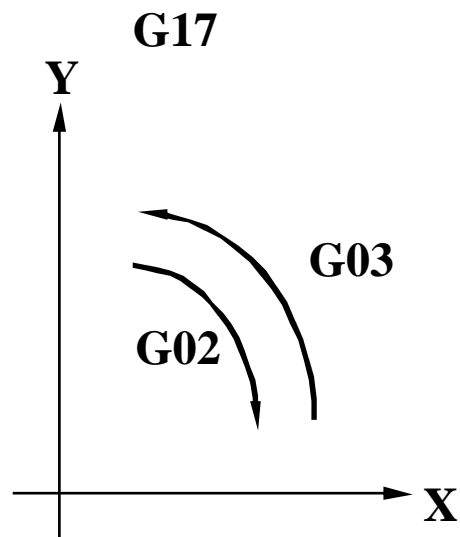


直线插补指令 G01



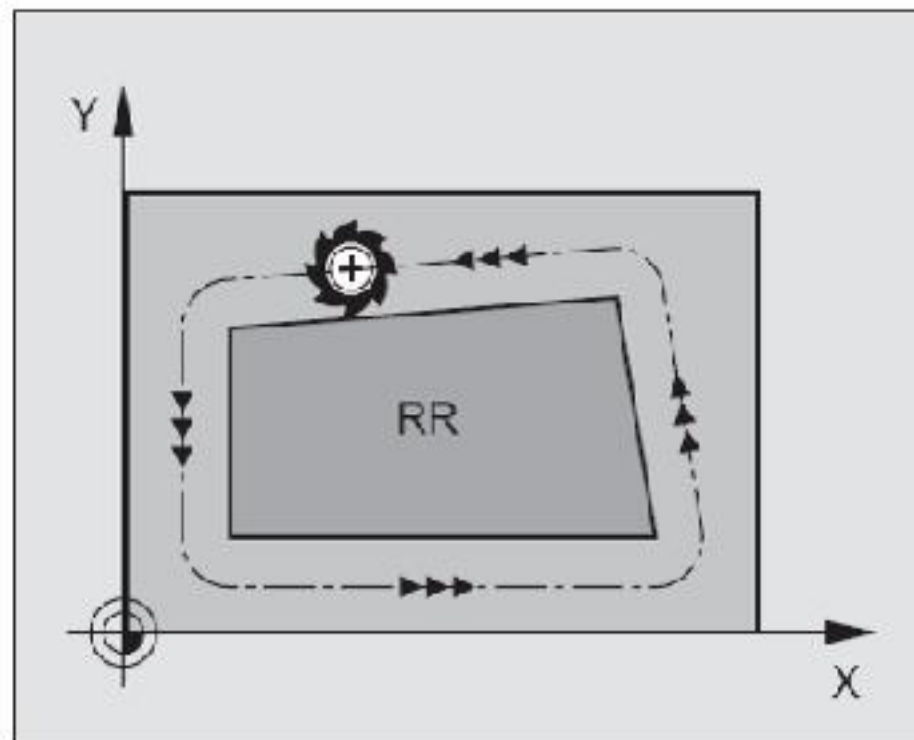
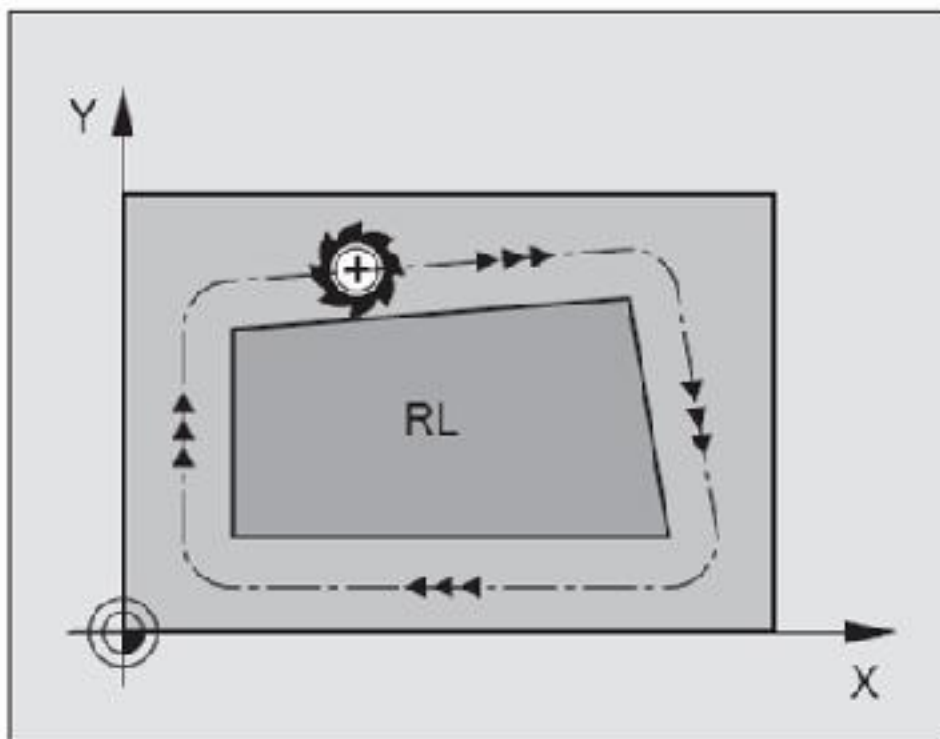
2.2 数控编程中的常用指令

圆弧插补指令 G02/G03



2.2 数控编程中的常用指令

刀具半径补偿建立与取消指令 G41/G42 G40



2.2 数控编程中的常用指令

刀具长度补偿建立与取消指令 G43/G44 G49

G43(G44) α _ H_

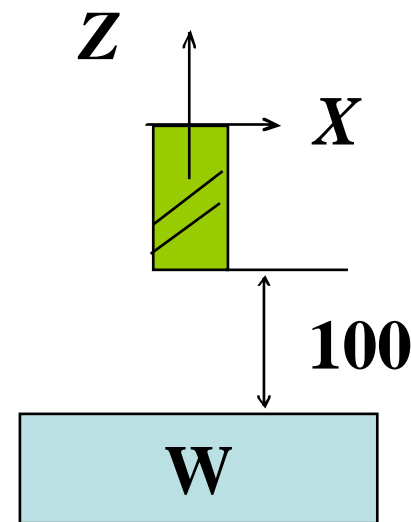
G43: 正偏移

G44: 负偏移

G49: 取消长度补偿

 α _: 指定轴的位置

H_: 偏移值地址

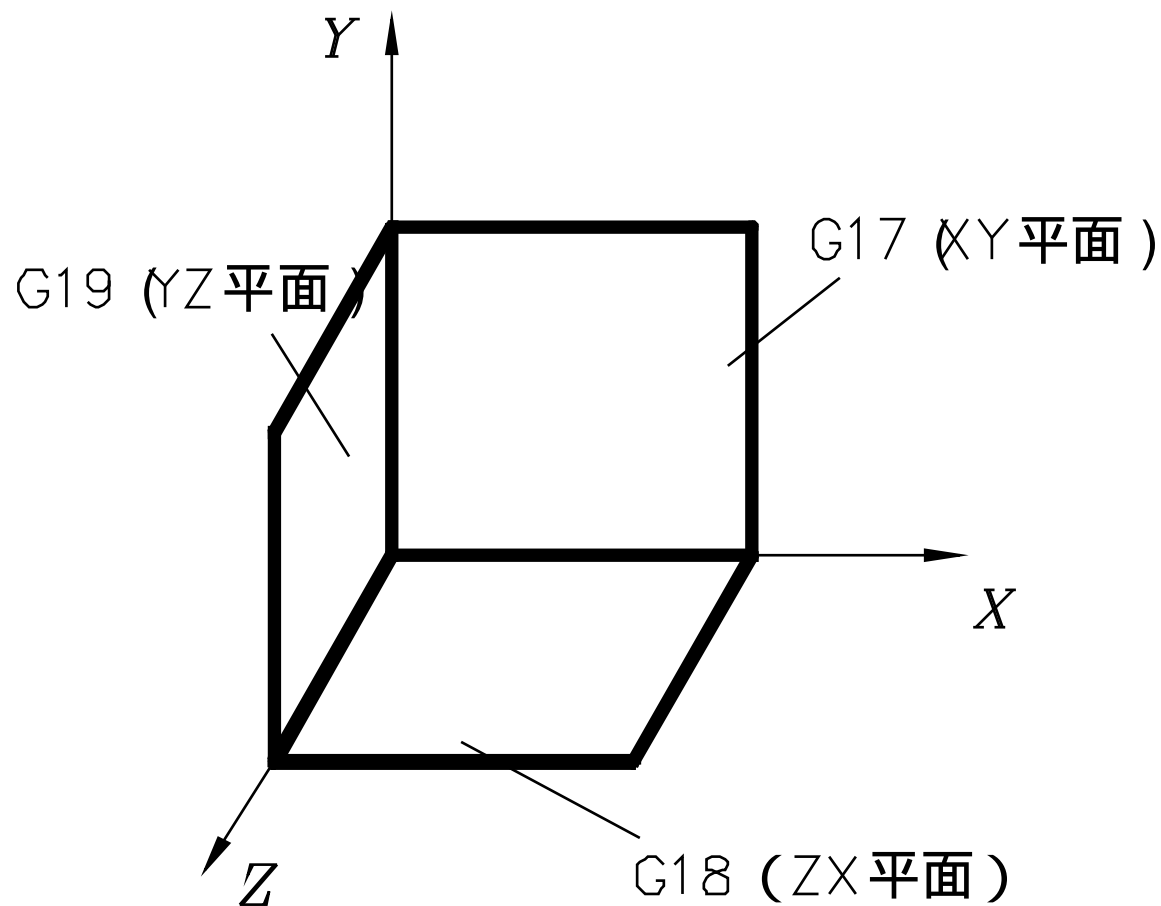


G91G43 Z-100.0 H1; H1----刀具偏移值为 20.0



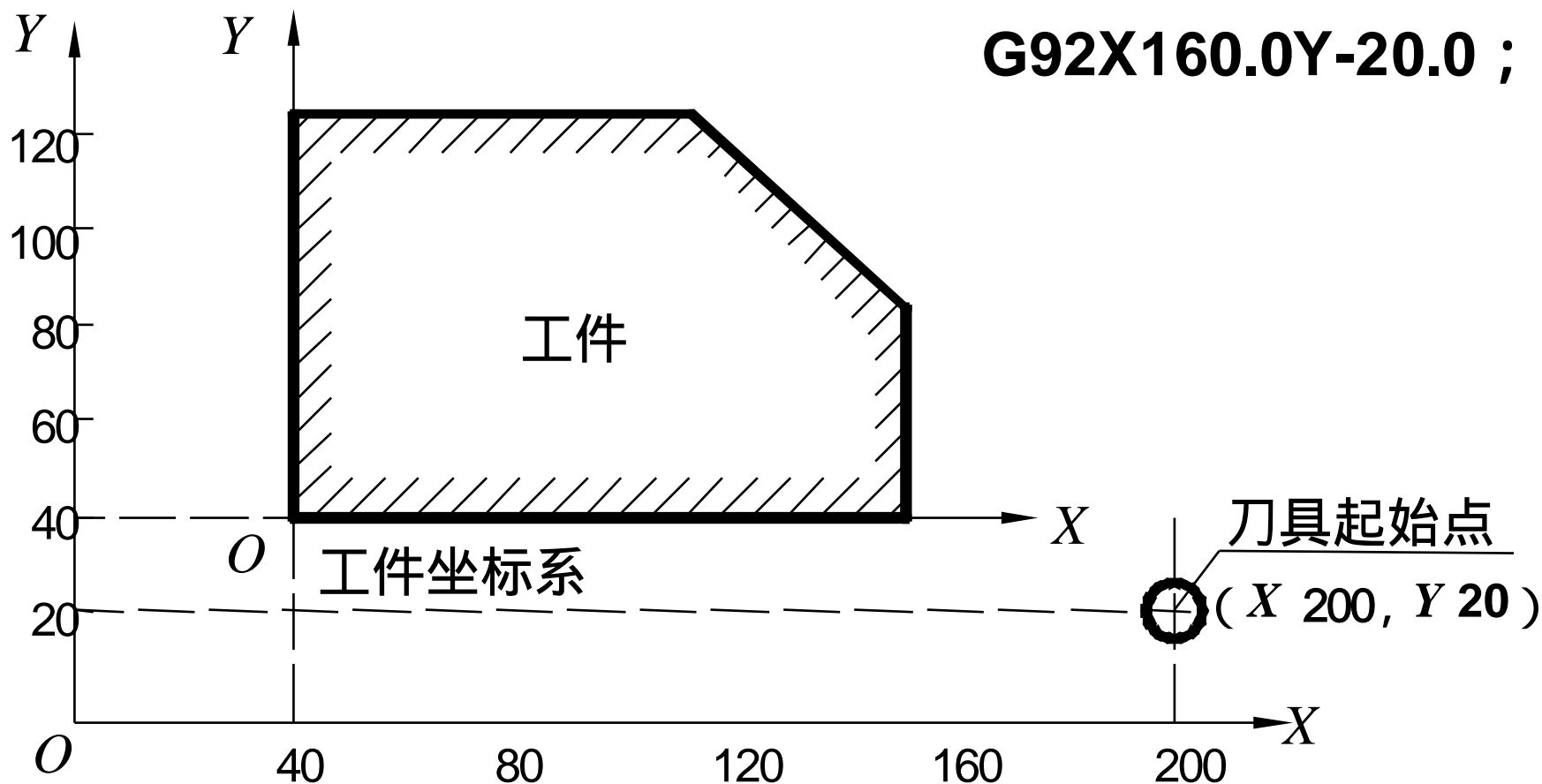
2.2 数控编程中的常用指令

坐标平面选择指令 G17 G18 G19



2.2 数控编程中的常用指令

工件坐标系设定指令 G92



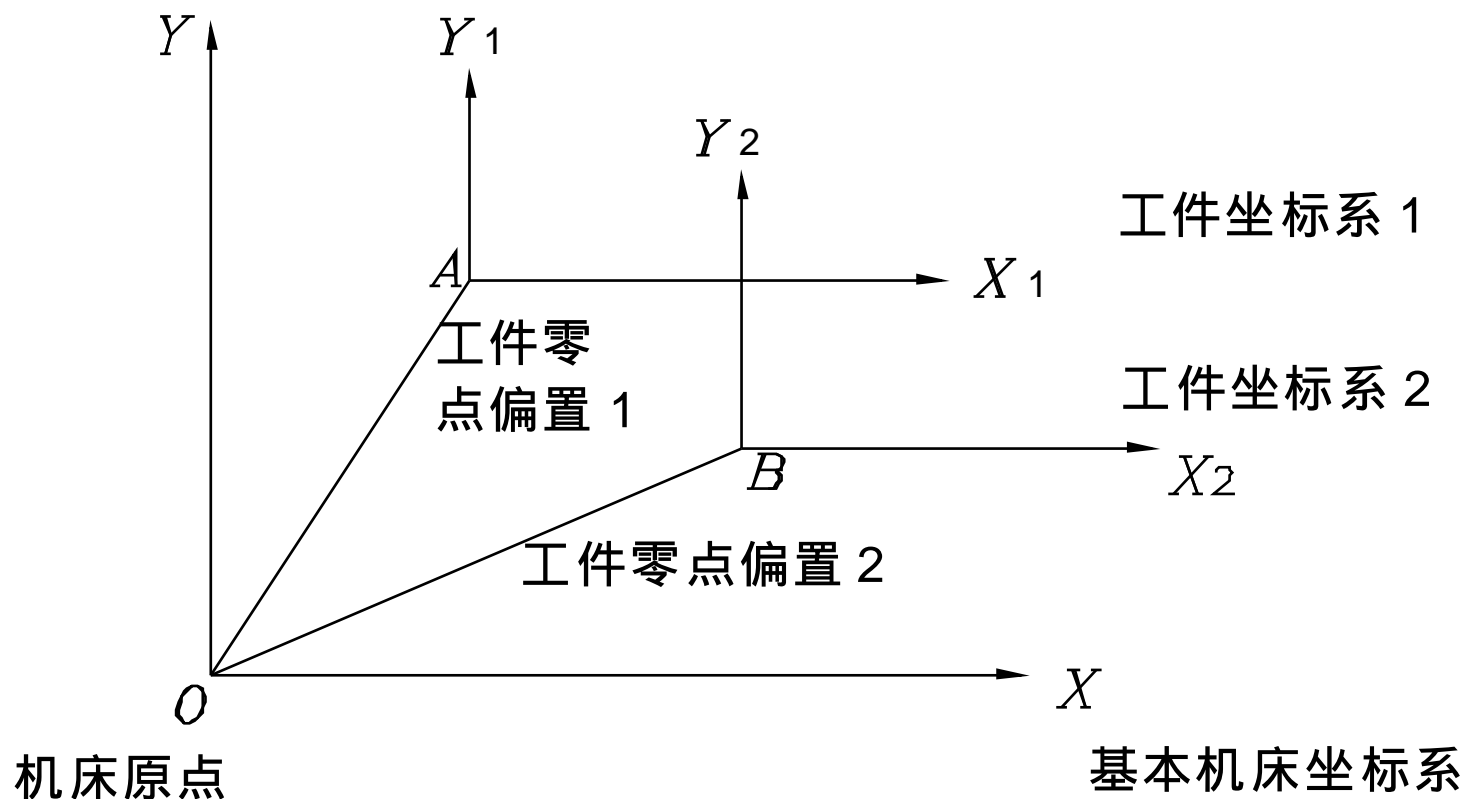
机床坐标系



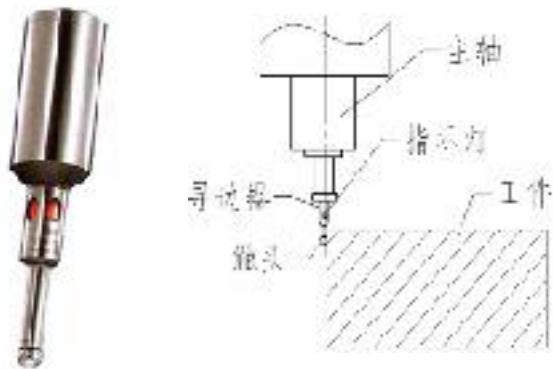
2.2 数控编程中的常用指令

用 G54-G59 指令设定工件坐标系

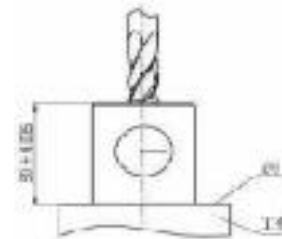
操作者在实际加工前，测量工件原点与机床原点之间的偏置值，并在数控系统中预先设定。这个值叫做“**工件零点偏置**”。



2.2 数控编程中的常用指令



寻边器及其对刀



轴设定器及其对刀

工件零点偏置??



自动对刀各种测头



2.2 数控编程中的常用指令

暂停（延迟）指令 G04

使刀具作短时间（几秒钟）的**无进给光整加工**，用于车槽、镗孔、铰孔等场合。

G04 P/X(U) ;

极坐标指令 G16(建立)、G15(取消)

G17/G18/G19 G90/G91 G16;

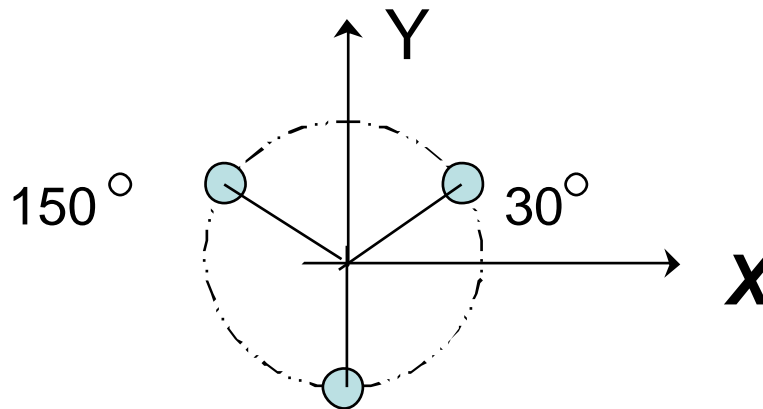
G—X(半径) Y(角度) F—;

.....

G15;

2.2 数控编程中的常用指令

加工三个小孔



```
G17/G18/G19 G90/G91 G16;
```

```
G_X_Y_F_;
```

```
.....
```

```
G15;
```

```
...
```

```
G17G90G16;
```

```
G81X100.Y30.Z-20.R-5.F200;
```

```
Y150.;
```

```
Y270.;
```

```
G15G80;
```

```
...
```

2.2 数控编程中的常用指令

参考点返回

参考点是机床上的固定点，一般作为换刀和坐标系测量零点等使用，通过参考点返回功能 **G28** 可以很容易移动到参考点上。

G28G91X0Y0Z0;

比例缩放 (G51 G50)

G51 X-Y-Z-P-; X Y 缩放中心, **P** 缩放倍数

G51X-Y-Z-I-J-K; X Y 缩放中心, **I J K** 各轴缩放倍数, 倍率为负, 实现镜像

G50 缩放取消

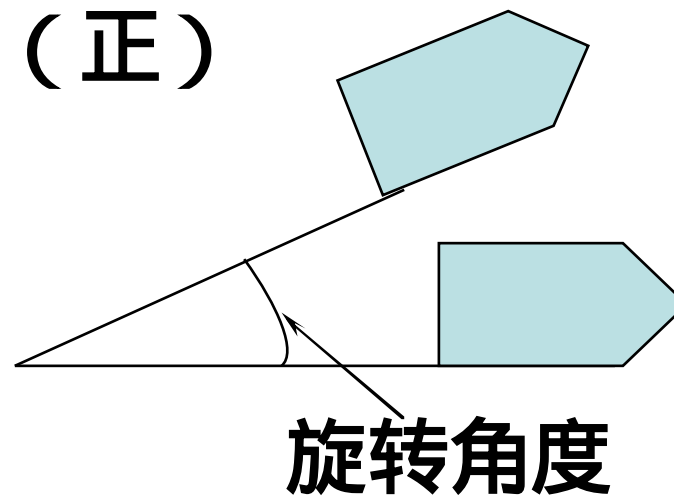
2.2 数控编程中的常用指令

坐标旋转指令 (G68, G69)

G17/G18/G19 G68 X-Y-Z- R-; 旋转中心 (X
Y Z) , 旋转角度, 逆 (正)

G69 取消

旋转中心



M代码 (M00-M99)

M01 , M00 , M02 , M30 , M03 , M04 , M05
M06 , M07 , M08 , M09 , M98 , M99。 。 。

2.2 数控编程中的常用指令

F、S 代码

F-, **G94** 每分钟进给量, 单位为 mm/min;

G95 主轴每转进给量, 单位为 mm/r, 如车螺纹等。

S-, **G96 S160** 恒线速度功能, 使切削点的线速度始终保持
保持在 160m/min;

G97 S1000 注销 G96, 主轴转速为 1000r/min。



2.2 数控编程中的常用指令

刀具功能指令 T

$Tx\ x$ 、 $Tx\ x\ x\ x$ ；选择刀具，也可用来选择刀具偏置

例如，T12：用作选刀时表示 12号刀具；

T0101：前两位 0表示刀具号，后两位 0表示刀具补偿号。



2.3 数控编程中的工艺处理

数控加工工艺的特点

- (1) 工序内容具体
- (2) 工序内容复杂
- (3) 工序内容严密
- (4) 工序集中
- (5) 加工精度不仅取决于加工过程，还取决于程编阶段
(存在逼近误差、圆整化误差、插补误差)

2.3 数控编程中的工艺处理

数控加工工艺的内容

1. 数控机床上加工零件的选择
2. 数控工艺性分析
3. 工艺路线制订
4. 工序设计



2.3 数控编程中的工艺处理

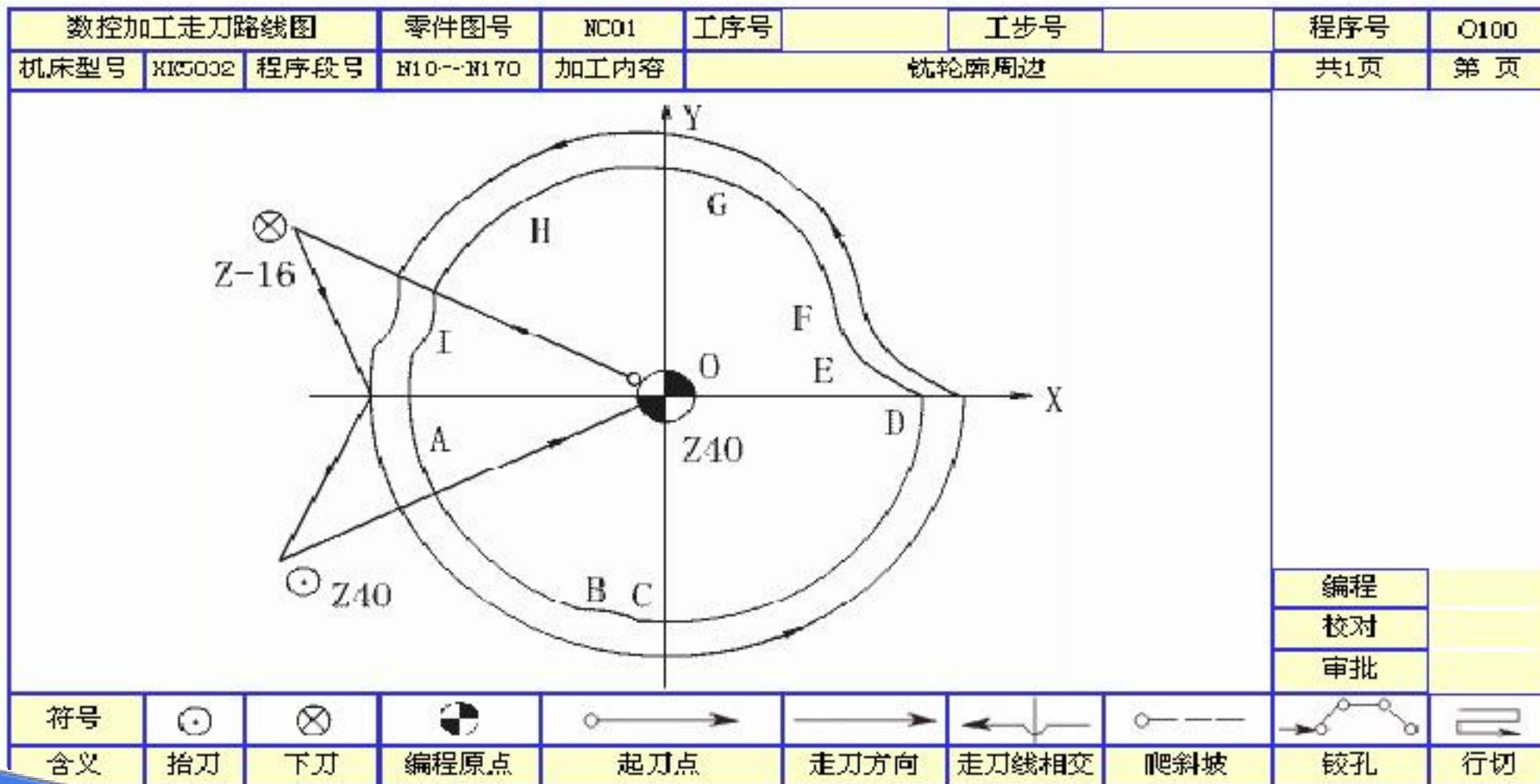
数控加工工序卡片

xxx厂		数控加工工序卡片			产品名称代号	零件名称		零件图号	
						座架		WD-9901	
工艺序号		程序编号	夹具名称	夹具编号		使用设备		车间	
			台钳			ZJK7532-1		数控	
工步号	工步作业内容		加工面	刀具号	刀具规格	主轴转速	进给速度	切削深度	备注
1	φ50面铣刀铣上表面到尺寸		上表面	T01	φ50面铣刀	1000	200	+15	
2	φ20立铣刀铣四周侧面到尺寸		四侧面	T02	φ20立铣刀	1000	200	-11	
3	φ20立铣刀铣A、B台阶面		A、B面	T02	φ20立铣刀	1000	200	0	
4	φ6钻头钻6个小孔		小孔6	T03	φ6钻头	800	100	-22	
5	φ14钻头钻2个大孔		大孔2	T04	φ14钻头	500	80	-22	
编制			审核		批准		年月日	共页	第页



2.3 数控编程中的工艺处理

数控加工走刀路线图



编程

校对

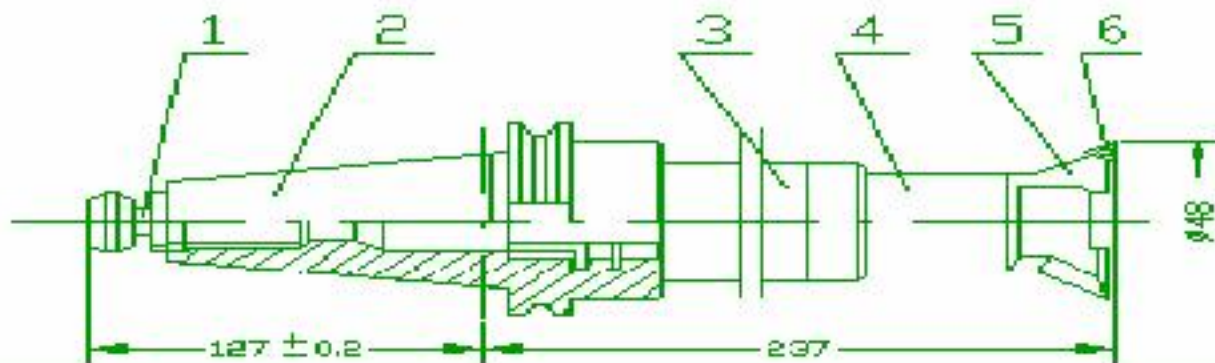
审批



2.3 数控编程中的工艺处理

数控刀具卡片

零件图号		J30102-4	数 控 刀 具 卡 片			使用设备
刀具名称		镗刀				TC-3U
刀具编号		T13006	换刀方式	自动	程序编号	
刀 具 组 成	序号	编号	刀具名称	规格	数量	备注
	1	T013980	拉钉		1	
	2	390、140-50 50 027	刀柄		1	
	3	391、01-50 50 100	接杆	$\Phi 50 \times 100$	1	
	4	301、68-03650 085	镗刀杆		1	
	5	R416.3-122053 25	镗刀组件	$\Phi 41-\Phi 53$	1	
	6	TCMM110208-52	刀片		1	
	7				2	GC435



备注

定制

审核

批准

共页

第页



2.3 数控编程中的工艺处理

数控机床上加工零件的选择

两种情况

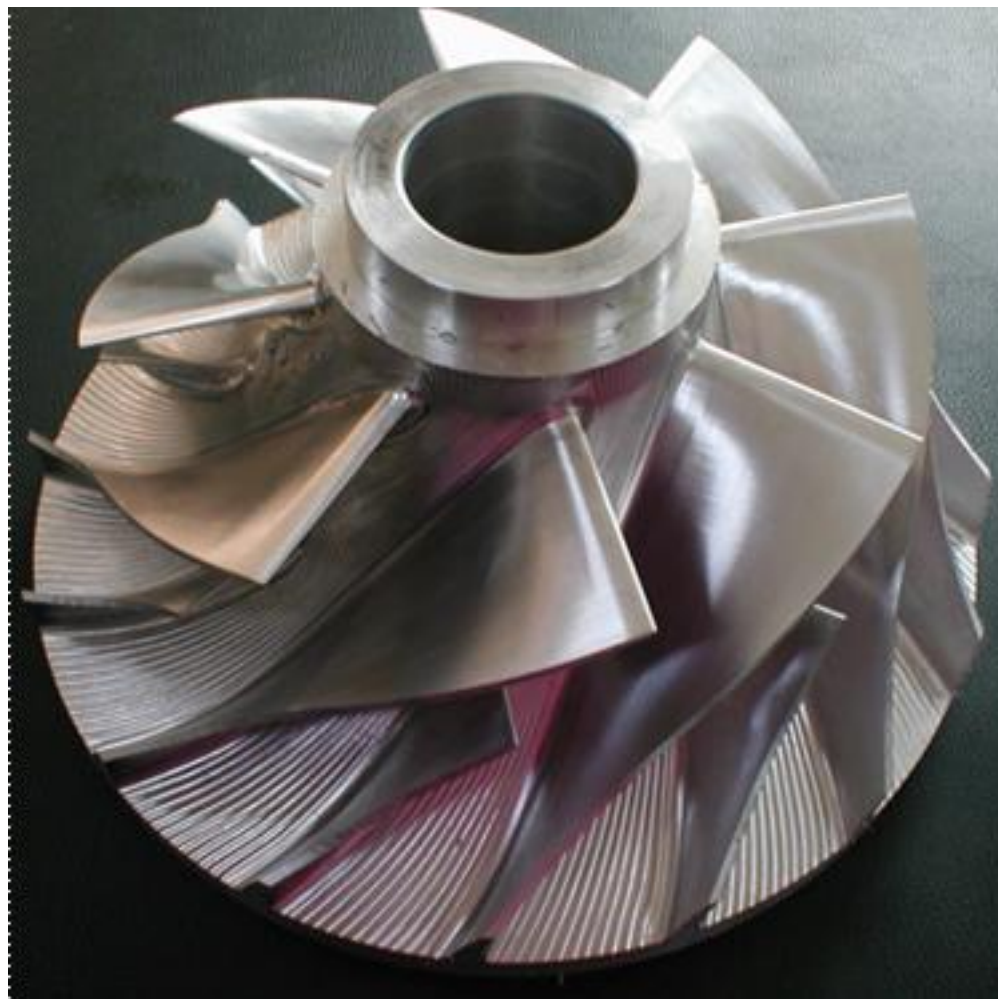
- ∅有毛坯和零件图样，选择合适的数控机床
- ∅有数控机床，选择合适零件

考虑因素主要有：

毛坯材料、类型；
零件轮廓复杂程度、尺寸大小
加工内容及精度、零件批量。。。



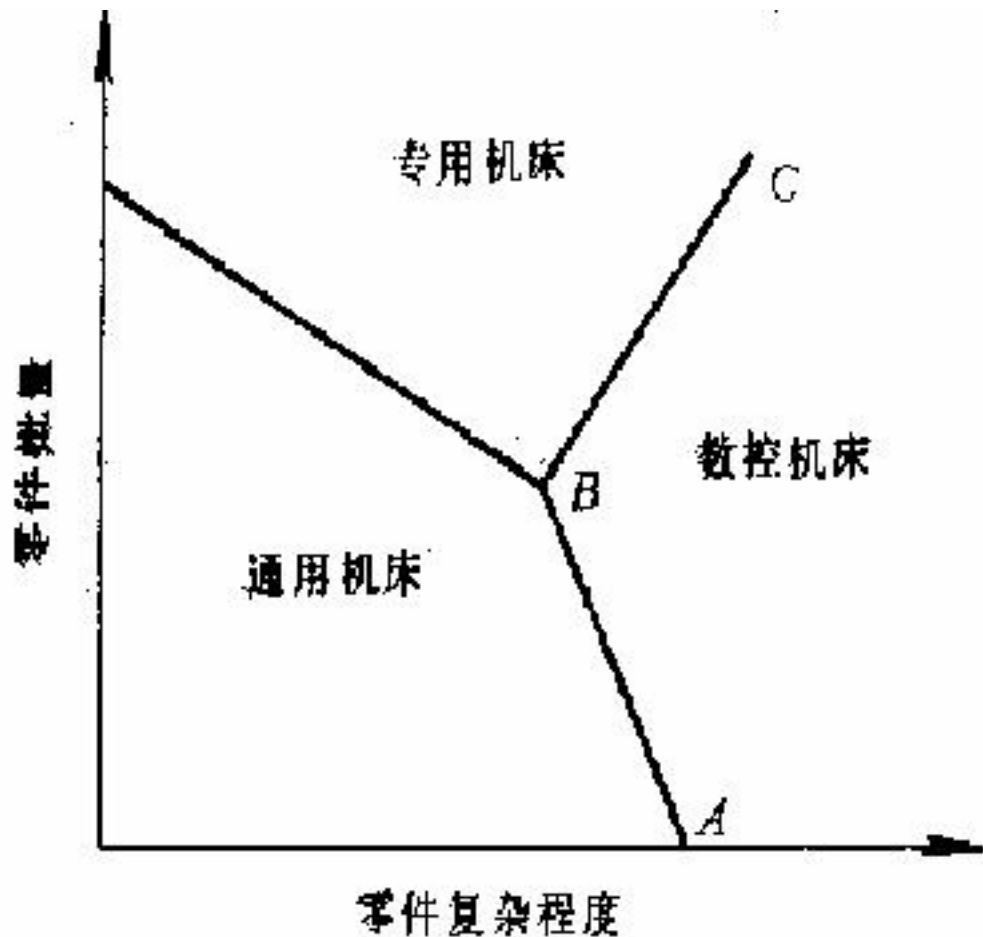
2.3 数控编程中的工艺处理



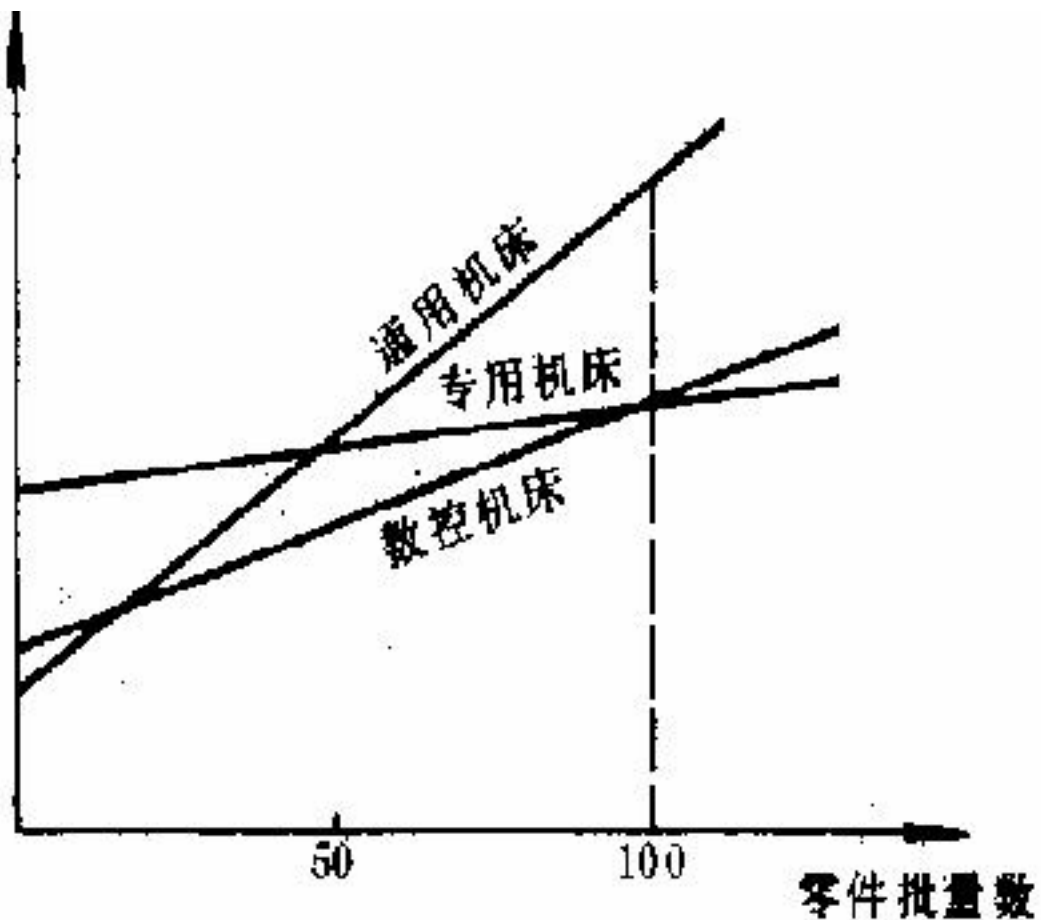
加工机床？



2.3 数控编程中的工艺处理



零件复杂程度与零件批量的关系



零件批量与总加工费用的关系



2.3 数控编程中的工艺处理

对零件设计及工艺性的要求

1) 设计数据应符合编程方便的原则

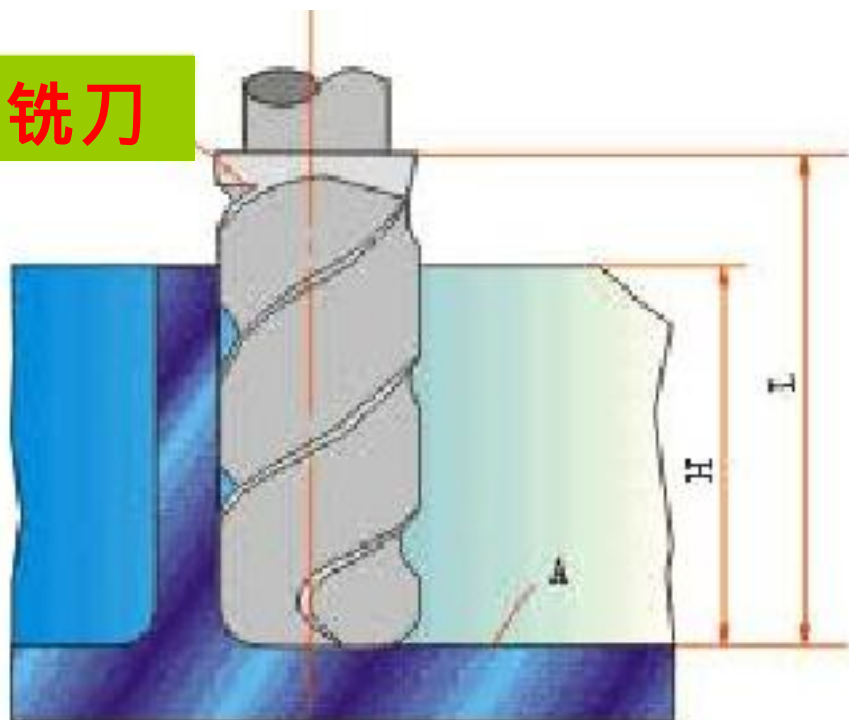
- ü 同一基准线引注尺寸；
- ü 直接给出坐标尺寸；
- ü 对称公差等。

2) 结构工艺性应符合数控加工的特点

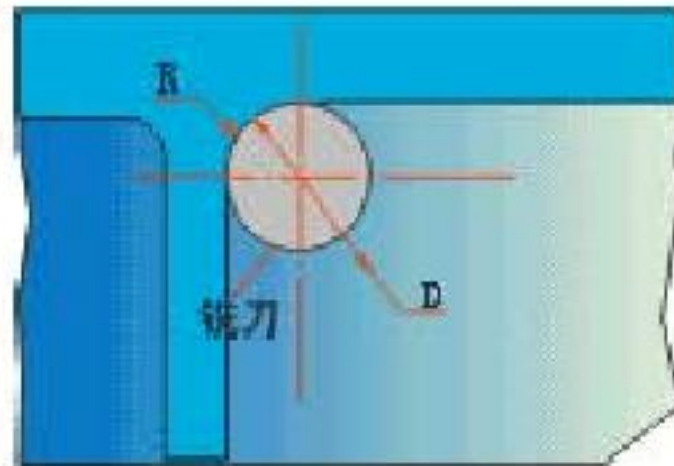
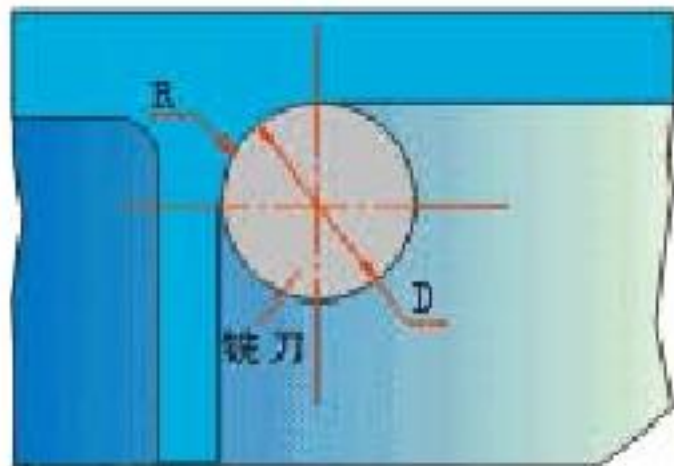
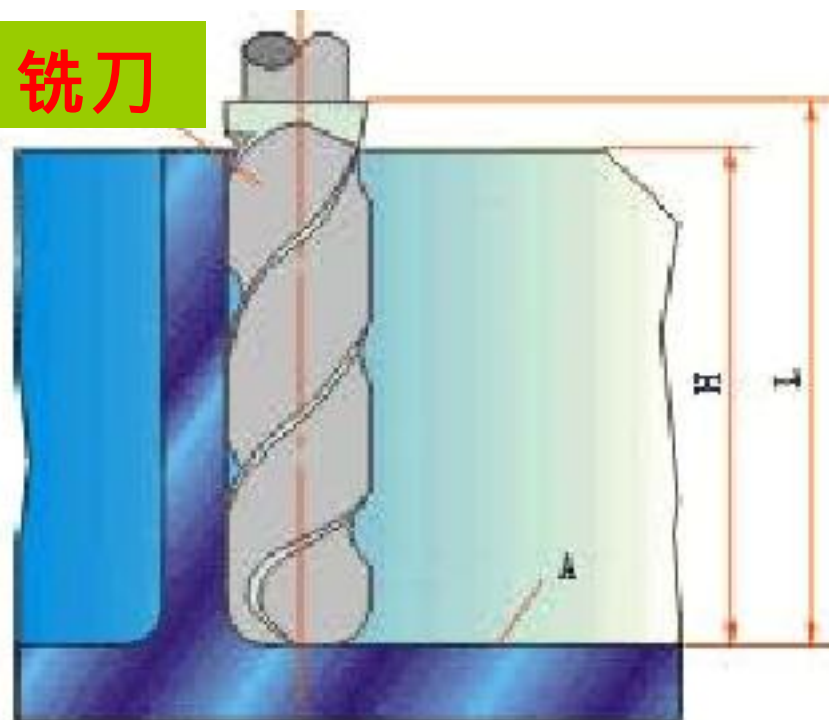
- ü 零件外形、内腔最好采用统一几何类型和尺寸；
- ü 内槽圆角半径不应过小；

2.3 数控编程中的工艺处理

铣刀

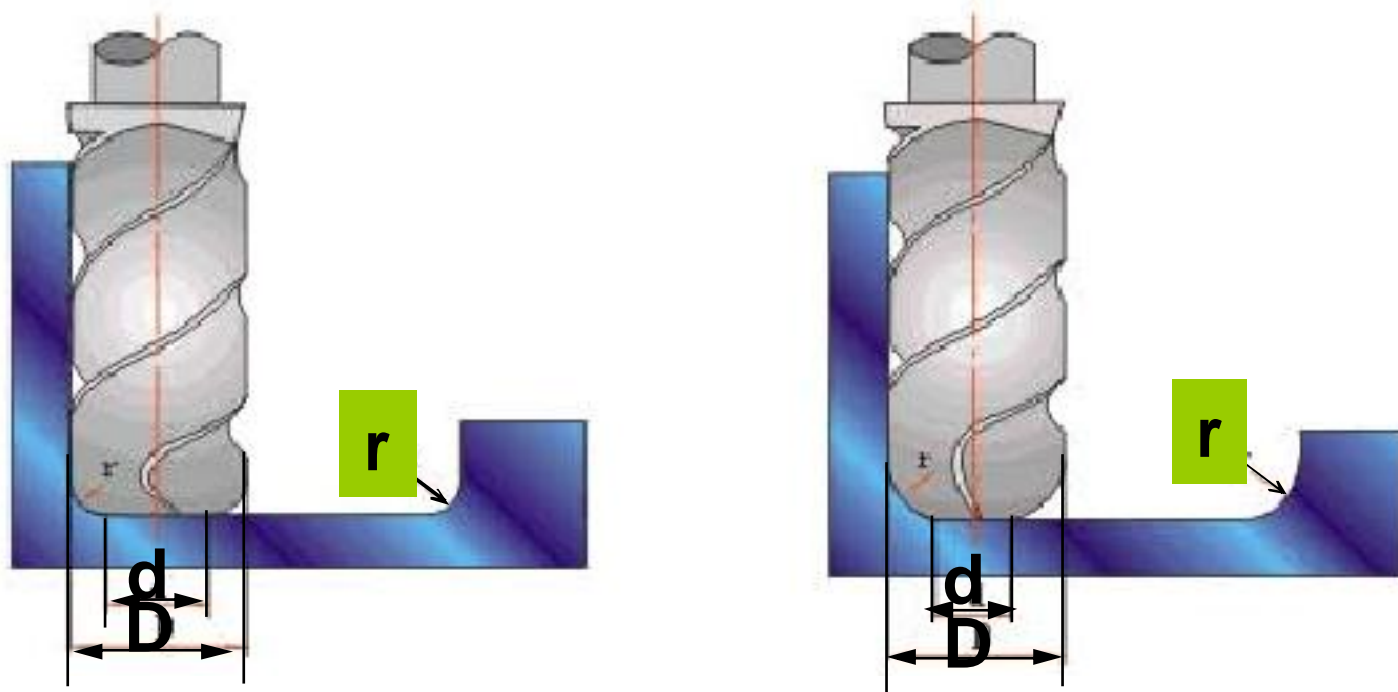


铣刀



2.3 数控编程中的工艺处理

ü 铣削零件底面时，槽底圆角半径 r 不应过大



铣刀端刃铣削平面的面积越小，加工表面的能力越差，工艺性也越差。

2.3 数控编程中的工艺处理

工艺路线制订

内容：

机床选择、加工方法、装夹、加工阶段划分、工序安排...

机床选择：

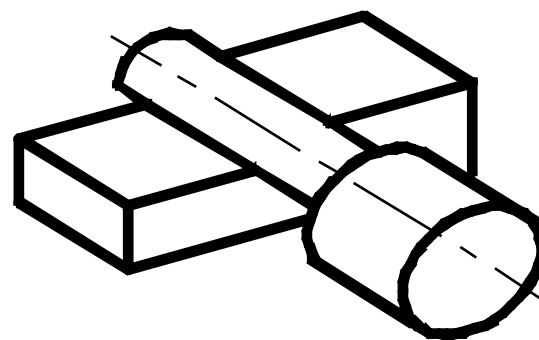
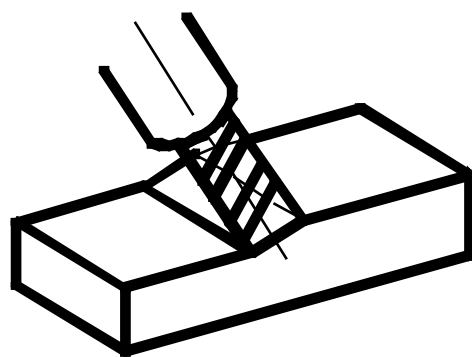
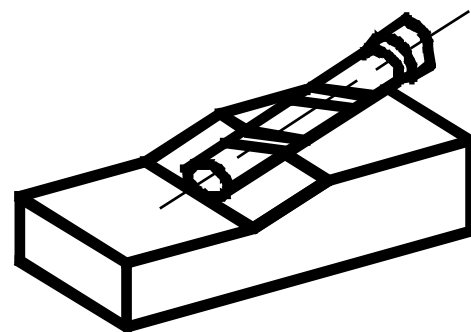
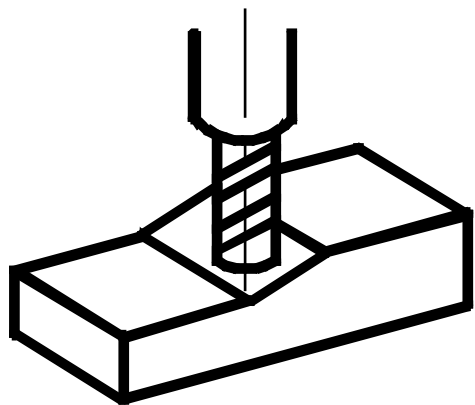
考虑毛坯的材料和类型、零件轮廓形状复杂程度、尺寸大小、加工精度、批量、热处理要求等因素。

要满足：T、Q、C



2.3 数控编程中的工艺处理

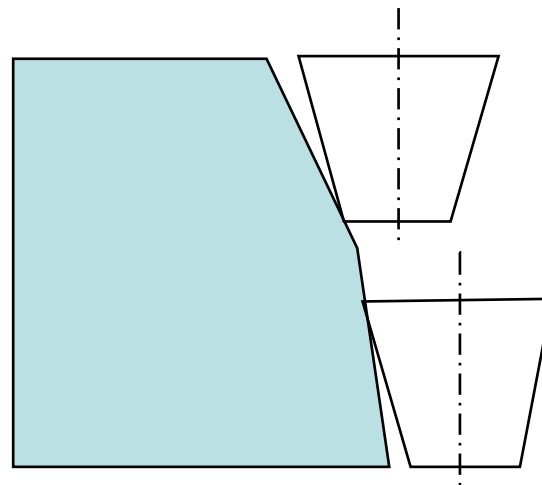
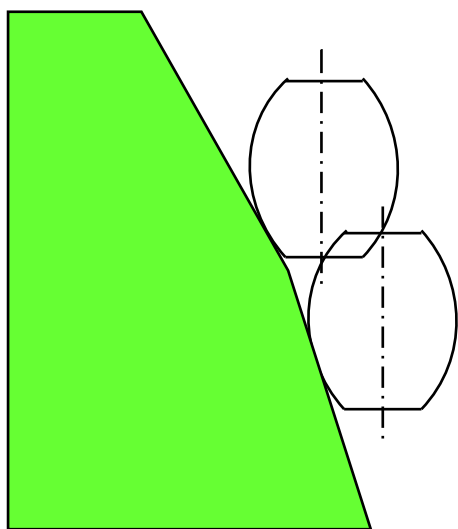
加工方法的选择：



固定斜角斜面加工的多种方法



2.3 数控编程中的工艺处理



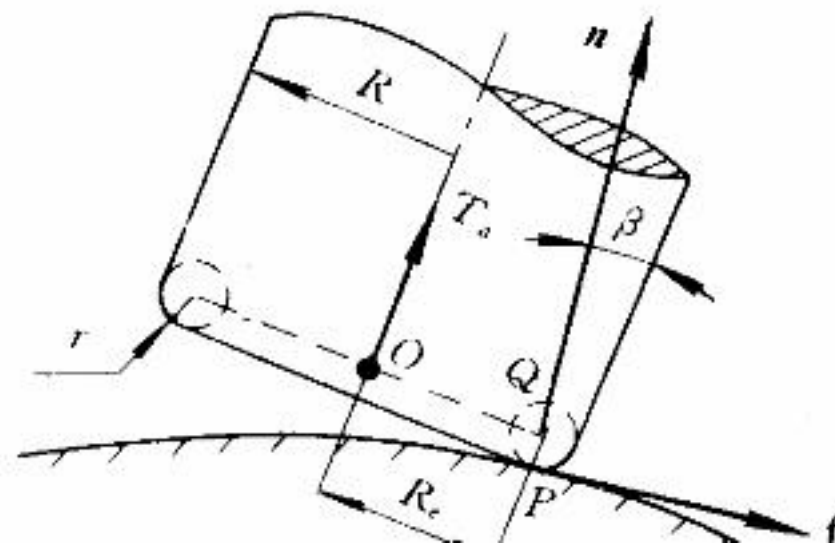
变斜角斜面加工



2.3 数控编程中的工艺处理

孔加工：镗孔

铣孔（一把铣刀加工多孔、高速.....）



曲面加工

2.3 数控编程中的工艺处理

立卧两用



2.3 数控编程中的工艺处理

工序的安排：

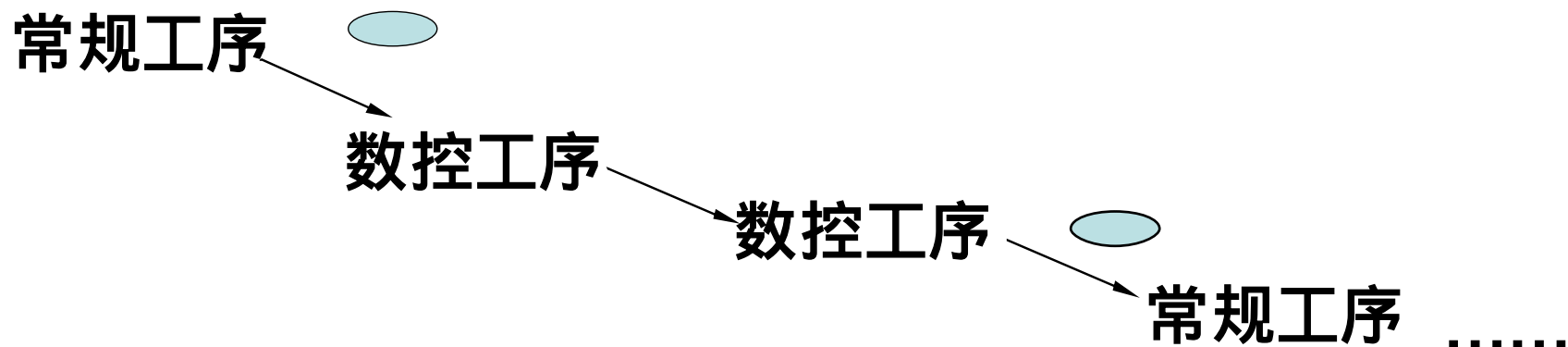
- ∅ 先进行内形内腔加工，后进行外形加工工序；
- ∅ 同定位、同夹紧最好一起进行，以减少重复定位；
- ∅ 用同刀具加工的工序最好一起进行，节省换刀时间；
- ∅ 同一次装夹中进行的多道工序，应先安排对工件刚性破坏较小的工序。

基准先行、先主后次、先粗后精、先面后孔



2.3 数控编程中的工艺处理

数控工序与常规工序的衔接：



除了必要的基准面加工、校正和热处理等工序外，要尽量减少数控加工工序与常规加工工序交接的次数。

2.3 数控编程中的工艺处理

数控加工工序的详细设计

1) 零件的装夹与夹具的设计

ü 数控机床的夹具与传统夹具结构的差别

夹具体 + 定位 + 夹紧

不需要导向和对刀功能，夹具比较简单。



2.3 数控编程中的工艺处理

ü设计或选用要求

- q 基准重合，以减少定位误差；
- q 统一基准，减少重复定位次数，减少重复定位误差；
- q 夹紧要可靠，尽量避免振动；夹紧点分布要合理，夹紧力大小要适中且稳定，减少夹紧变形；
- q 夹具结构应力求简单，加工部位要敞开；
- q 数控夹具装卸应方便（气动。。）；
- q 多件装夹，以提高加工效率等。



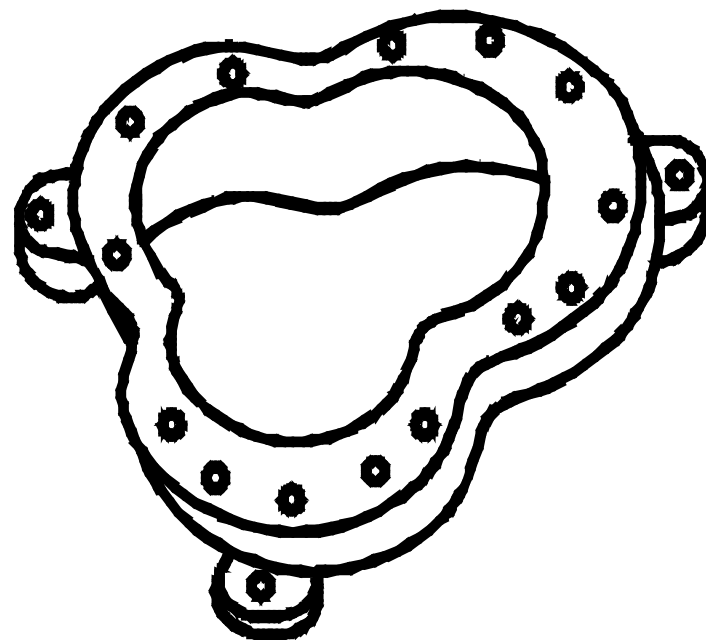
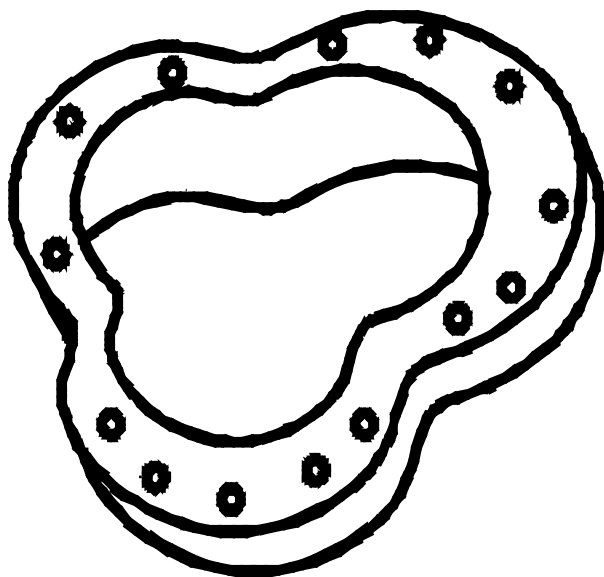
2.3 数控编程中的工艺处理

加工部位要敞开



2.3 数控编程中的工艺处理

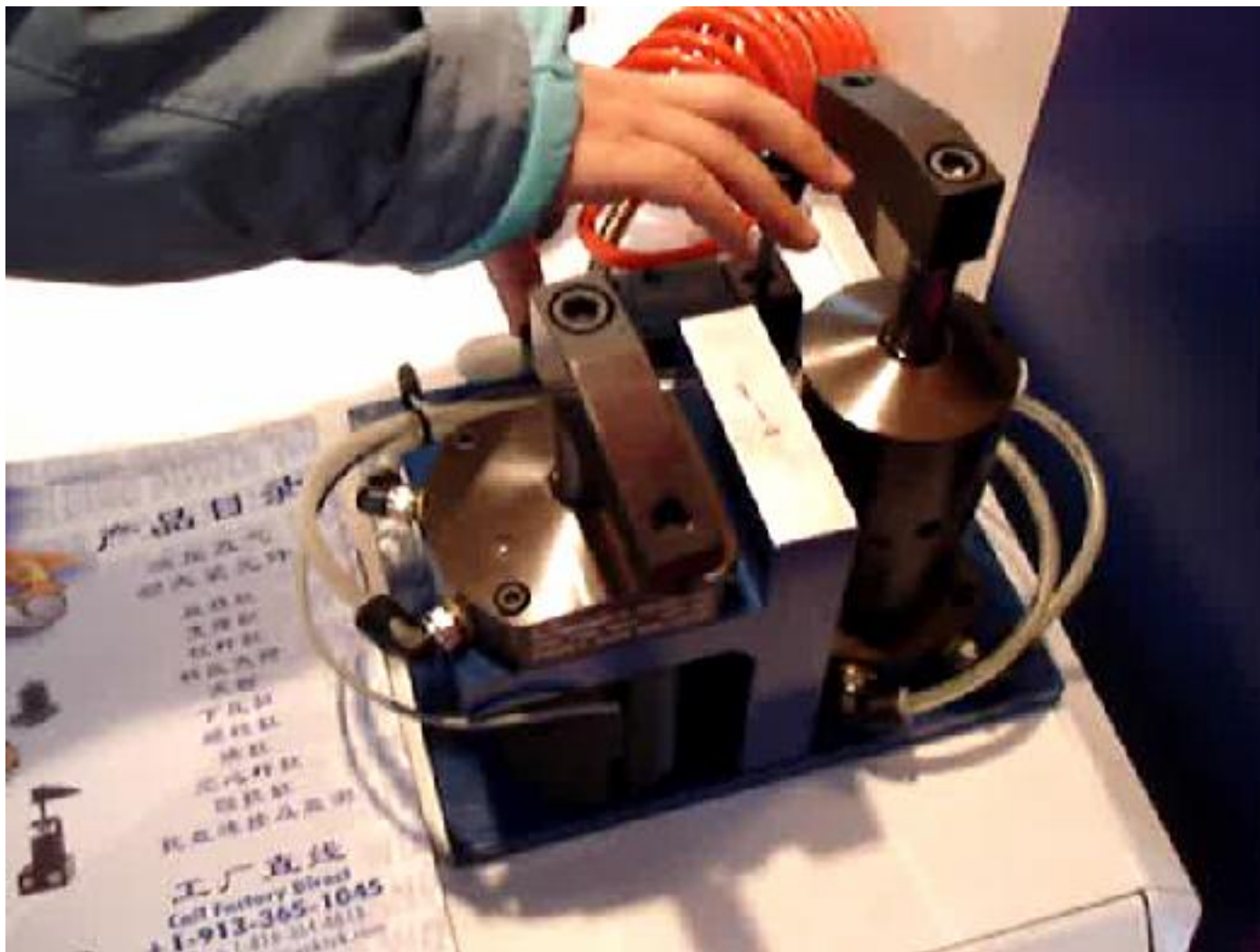
夹在何处？



2.3 数控编程中的工艺处理



2.3 数控编程中的工艺处理

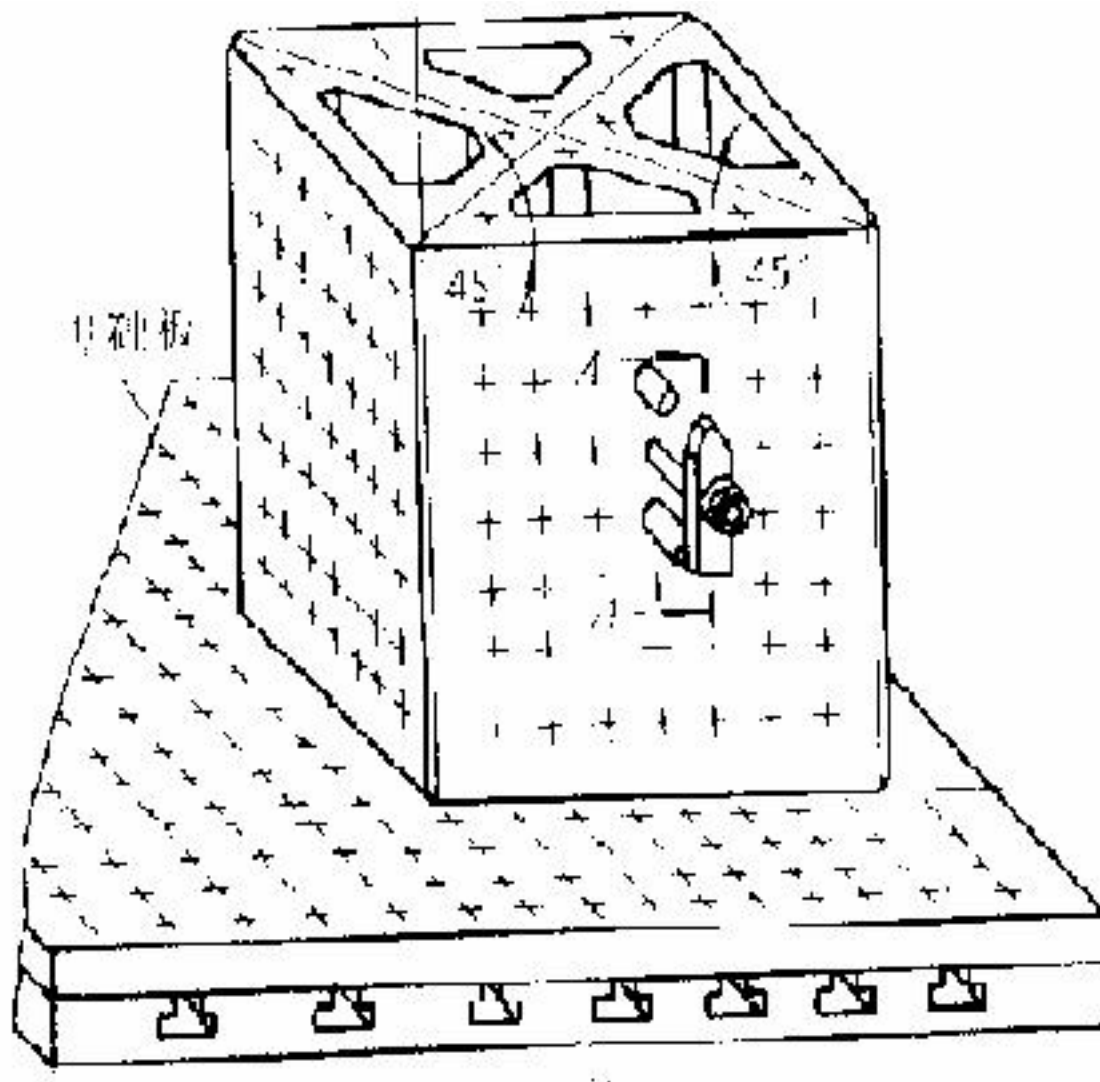


气动夹紧视频



2.3 数控编程中的工艺处理

多件装夹 ·



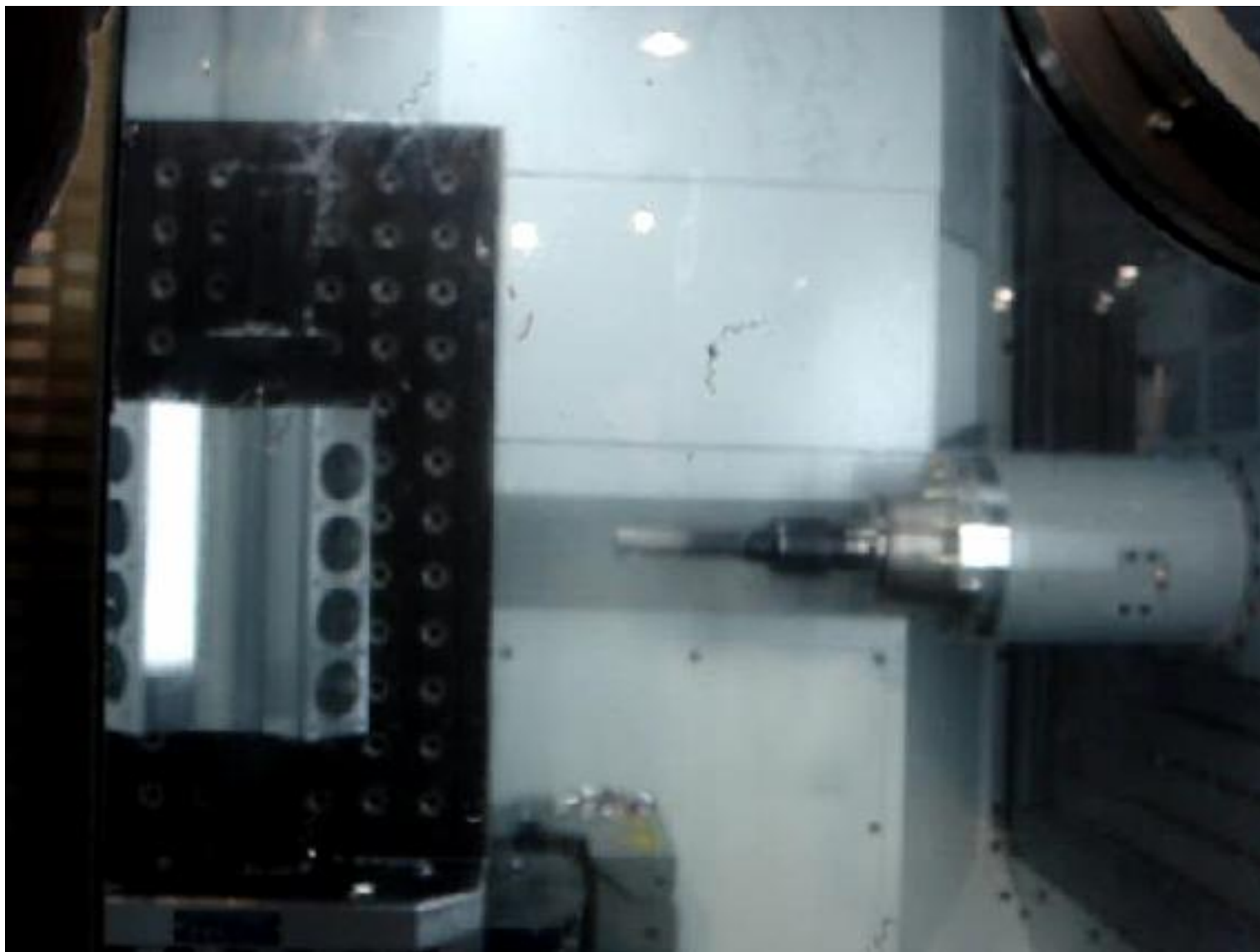
2.3 数控编程中的工艺处理



多件装夹
多件加工
视频



2.3 数控编程中的工艺处理



多件装夹多件加工视频



2.3 数控编程中的工艺处理

2) 刀具的选择

应满足：安装调整方便、刚性好、精度高、耐用度高等要求



2.3 数控编程中的工艺处理

刀具主要结构

- 1) 整体式
- 2) 机夹式



2.3 数控编程中的工艺处理



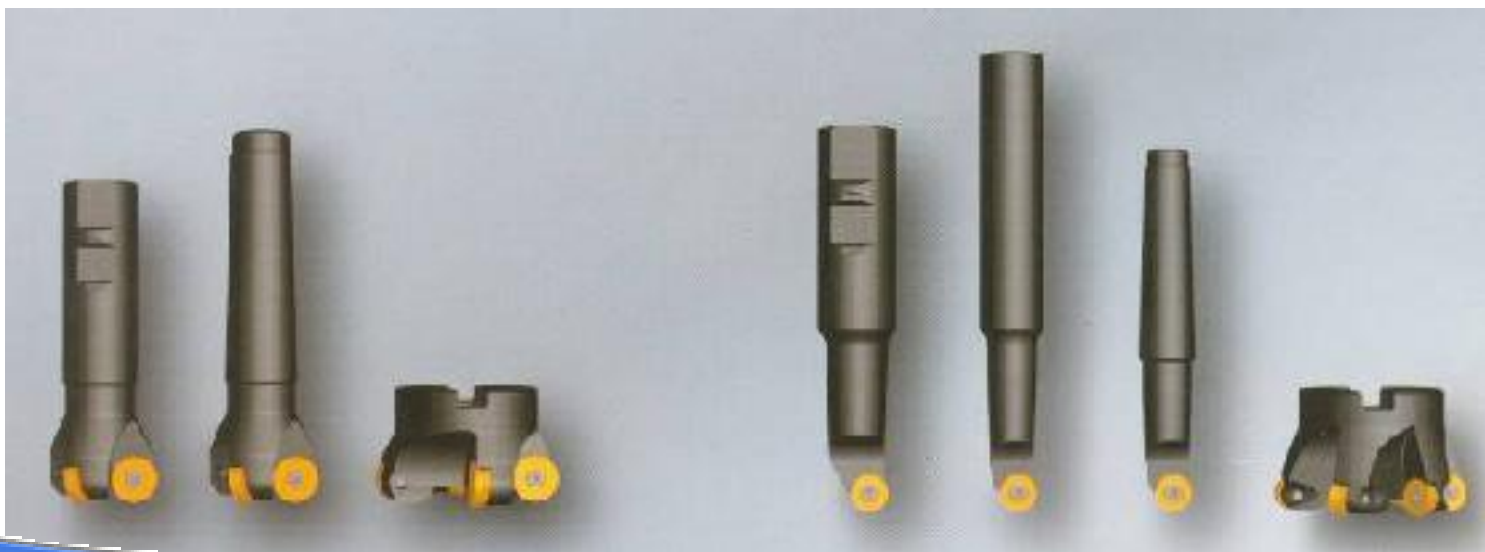
整体式



2.3 数控编程中的工艺处理



机
夹
式



2.3 数控编程中的工艺处理



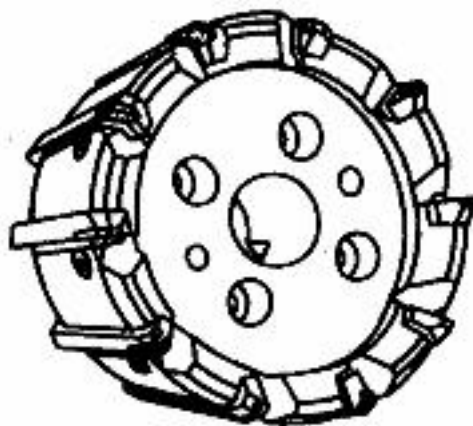
刀具中心冷却



2.3 数控编程中的工艺处理

刀具分类：（见教课书）

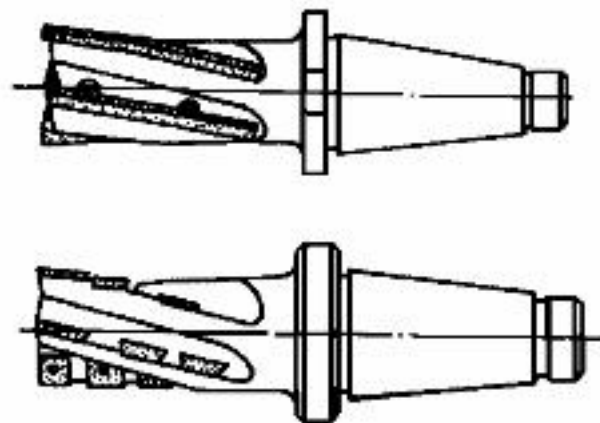
常用铣刀：



面铣刀

面铣刀：圆周表面和端面上都有切削刃，端部切削刃为副切削刃。面铣刀多制成套式镶齿结构，刀齿材料为高速钢或硬质合金，刀体为 40Cr。

2.3 数控编程中的工艺处理



立铣刀

立铣刀的圆柱表面（主切削刃）和端面上（副切削刃）都有切削刃，为螺旋齿，以增加切削平稳性，主、副切削刃可同时进行切削，也可单独进行切削。

普通立铣刀端面中心处无切削刃，轴向进给？

2.3 数控编程中的工艺处理



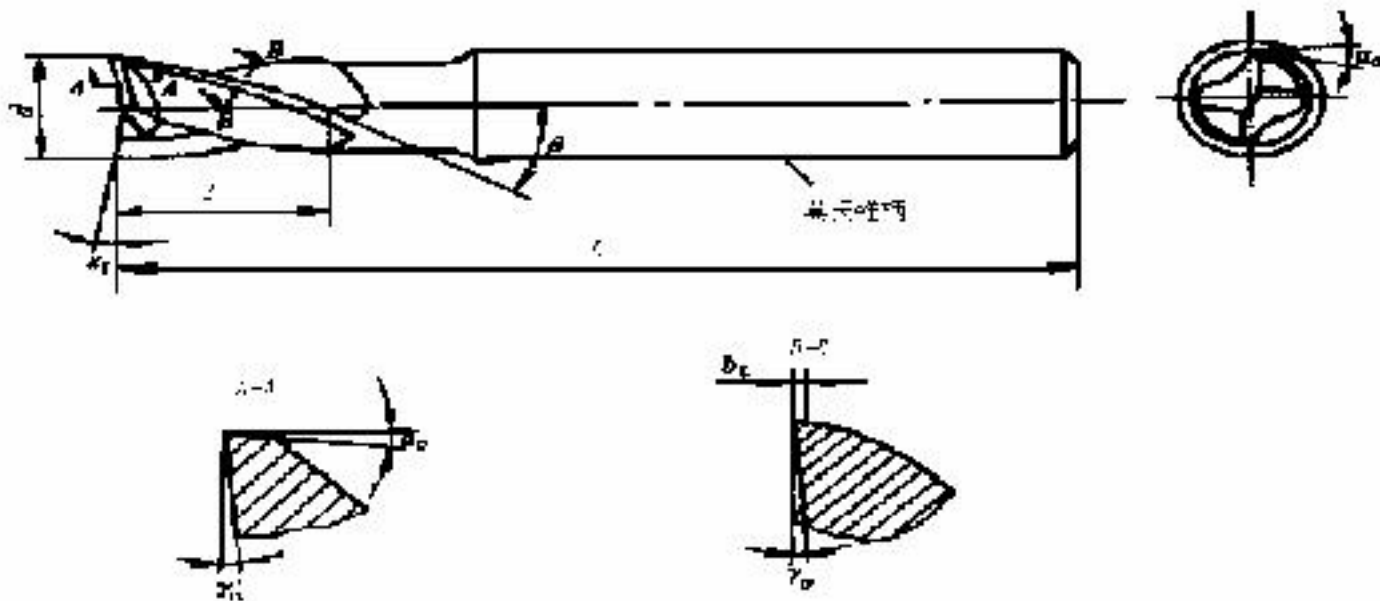
圆柱形球头立铣刀



圆锥形球头立铣刀

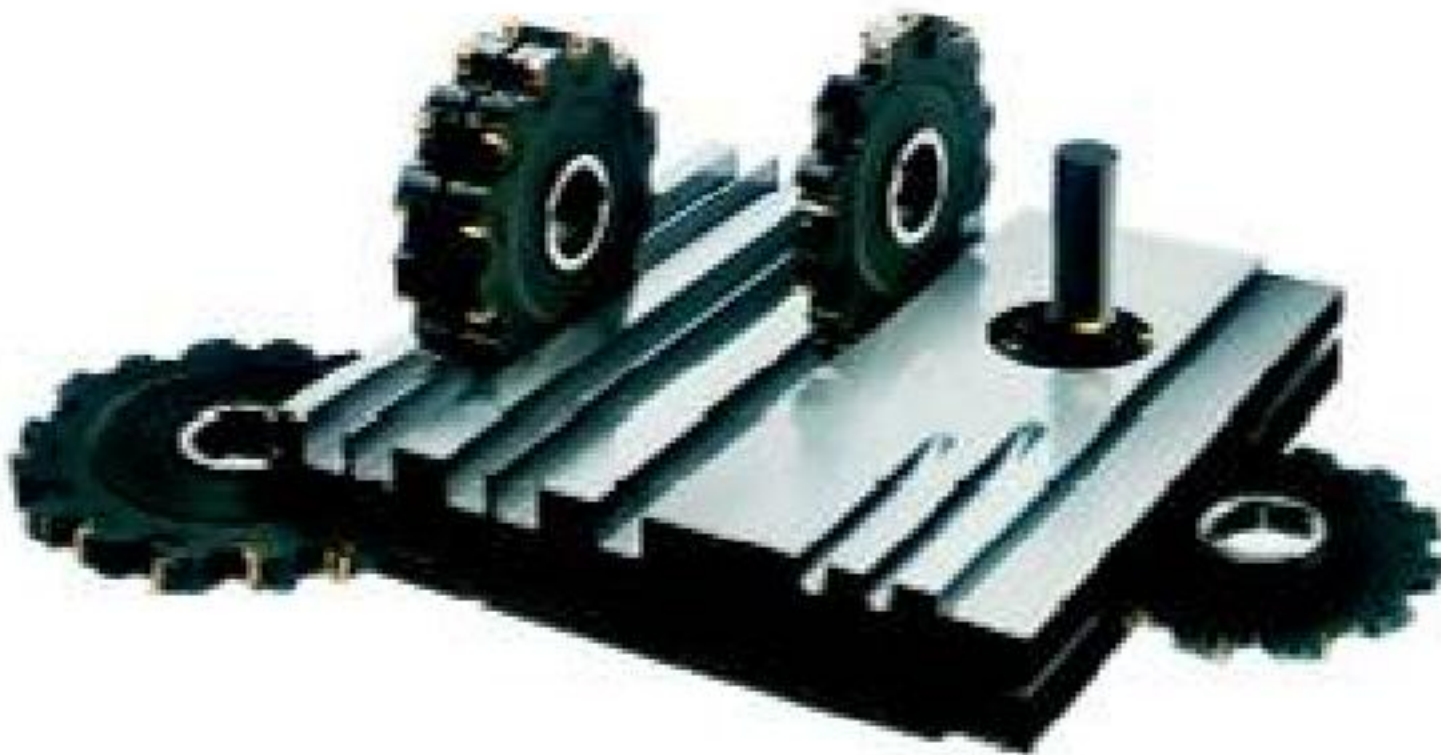
球头铣刀结构特点：球头上布满切削刃，圆周刃与球头刃圆弧连接，可以作径向和轴向进给。

2.3 数控编程中的工艺处理



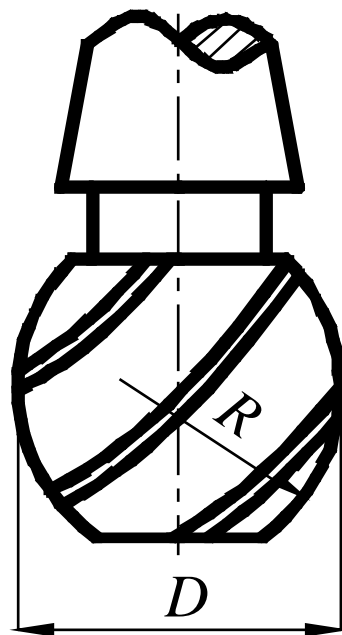
键槽铣刀：有两个刀齿，圆柱面和端面都有切削刃，端面刃延至中心，既像立铣刀，又像钻头。加工时先轴向进给达到槽深，然后沿键槽方向铣出键槽全长。

2.3 数控编程中的工艺处理



三面刃铣刀

2.3 数控编程中的工艺处理



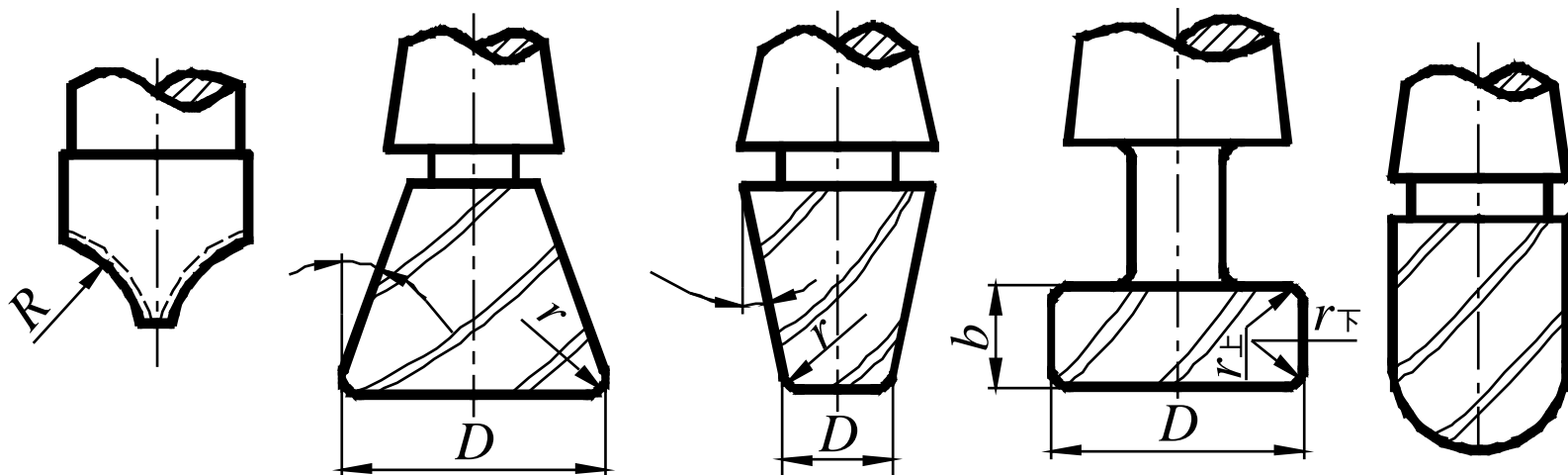
鼓形铣刀的切削刃分布在半径为 R 的圆弧面上，端面无切削刃。改变刀刃的切削部位，可以切出从负到正的不同斜角。缺点：刃磨困难，切削条件差，不适合加工有底的轮廓表面。

2.3 数控编程中的工艺处理



波纹立铣刀因其切削刃呈**正弦波**的形状而得名。它的特点是主切削刃各点的半径、前角、刃倾角都不等，能**减少切削振动**；切削阻力小、切屑成鱼鳞状，因而排屑流畅，散热性能好，刀具耐用度高。

2.3 数控编程中的工艺处理



成型铣刀一般都是为特定的工件或加工内容专门设计制造的，如角度面、凹槽、特形孔或台阶等。

2.3 数控编程中的工艺处理

铣刀刃磨



2.3 数控编程中的工艺处理

铣刀选择

ü 大平面：**面铣刀**；

ü 加工凹槽、小台阶面及平面轮廓：**立铣刀**

ü 加工空间曲面、模具型腔等：**球头铣刀**

ü 加工封闭的键槽：**键槽铣刀等**

ü 加工变斜角零件：**鼓形铣刀**

ü 特殊形状：**成形铣刀**

根据不同的加工材料和加工精度要求，应选择不同参数的铣刀进行加工。

2.3 数控编程中的工艺处理

3) 切削用量的选择

粗加工时，一般以提高生产率为主，但也应考虑经济性和加工成本；

半精加工和精加工时，应在保证加工质量的前提下，兼顾切削效率、经济性和加工成本。



2.3 数控编程中的工艺处理

4) 对刀点确定

Ø何谓对刀点？

刀具相对工件运动的起点，也是程序的起点。

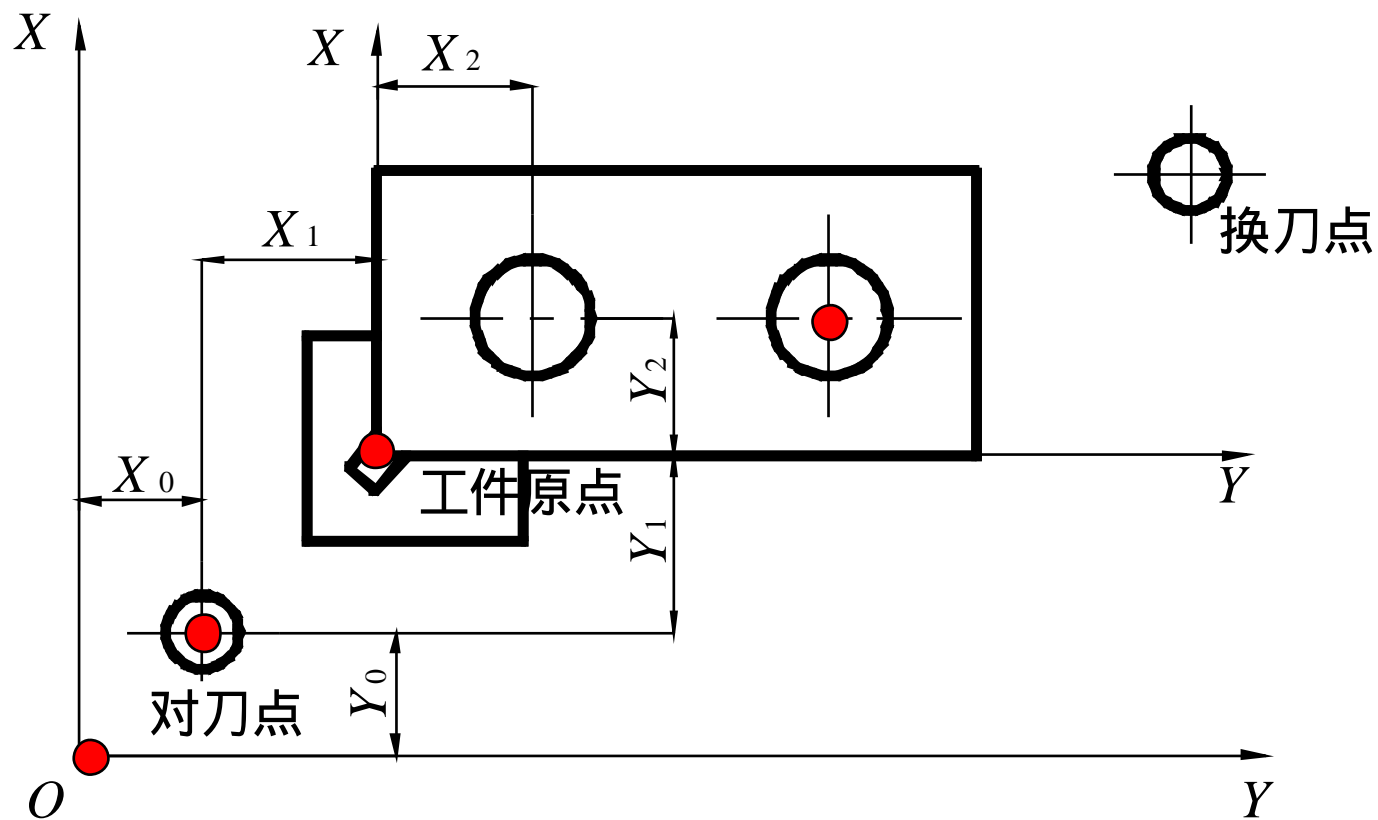
Ø选择准则？

- q 对刀点应尽量选在零件的设计基准或工艺基准上；
- q 便于对刀、观察和检测；
- q 简化坐标值的计算；
- q 精度高、粗糙度低的表面。

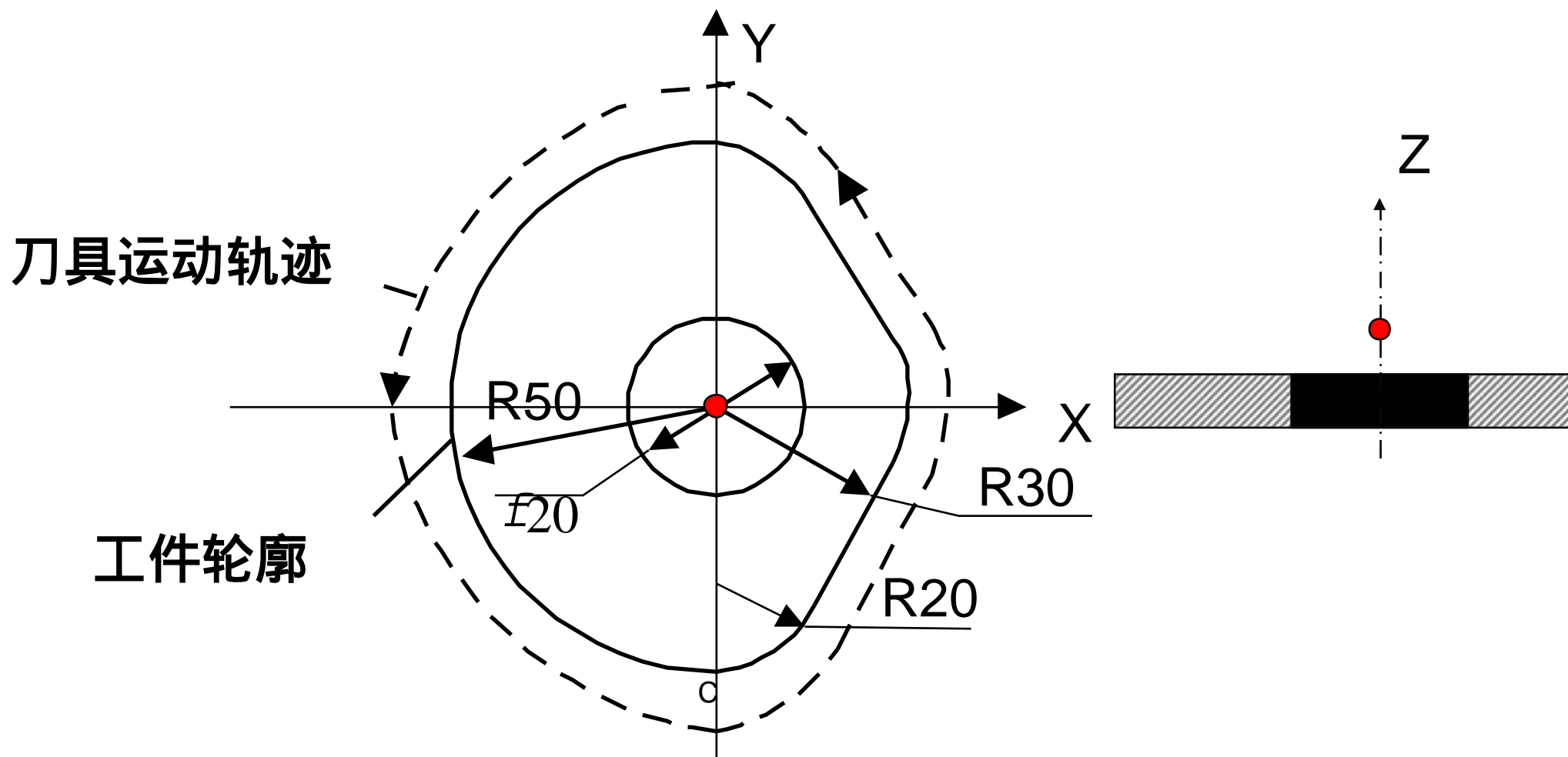


2.3 数控编程中的工艺处理

Ø对刀点位置



2.3 数控编程中的工艺处理

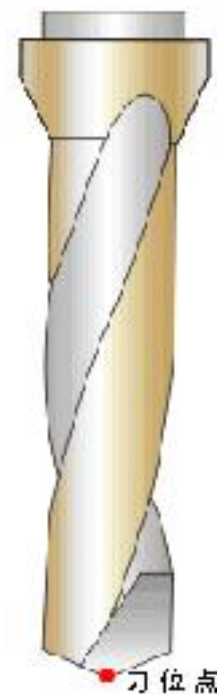
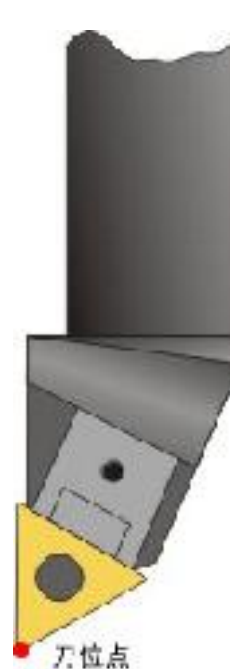


2.3 数控编程中的工艺处理

Ø如何对刀？

“刀位点”与“对刀点”重合

刀具在机床上的位置是由“刀位点”的位置来表示的。所谓“刀位点”就是表征刀具特征的点。



2.3 数控编程中的工艺处理



千分表

问题：孔中心如何对刀？

两面交线上的一点为对刀点，如何对刀？

2.3 数控编程中的工艺处理

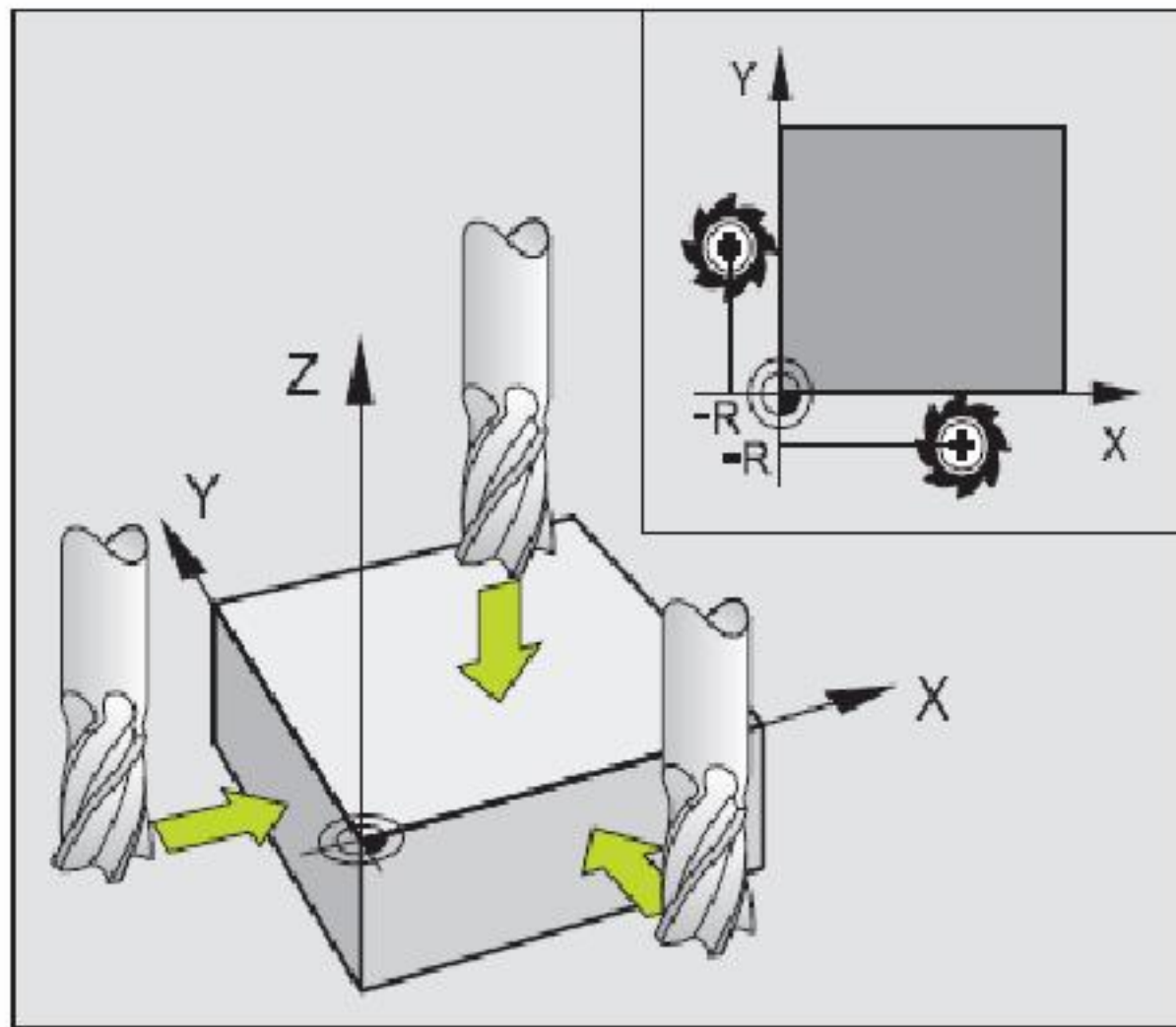


对刀



2.3 数控编程中的工艺处理

- ü 将工件夹紧并对正；
- ü 将已知半径的标准刀具装于主轴上；
- ü 得到实际位置值。



2.3 数控编程中的工艺处理



刀具测量视频



2.3 数控编程中的工艺处理



2.3 数控编程中的工艺处理

5) 加工路线确定

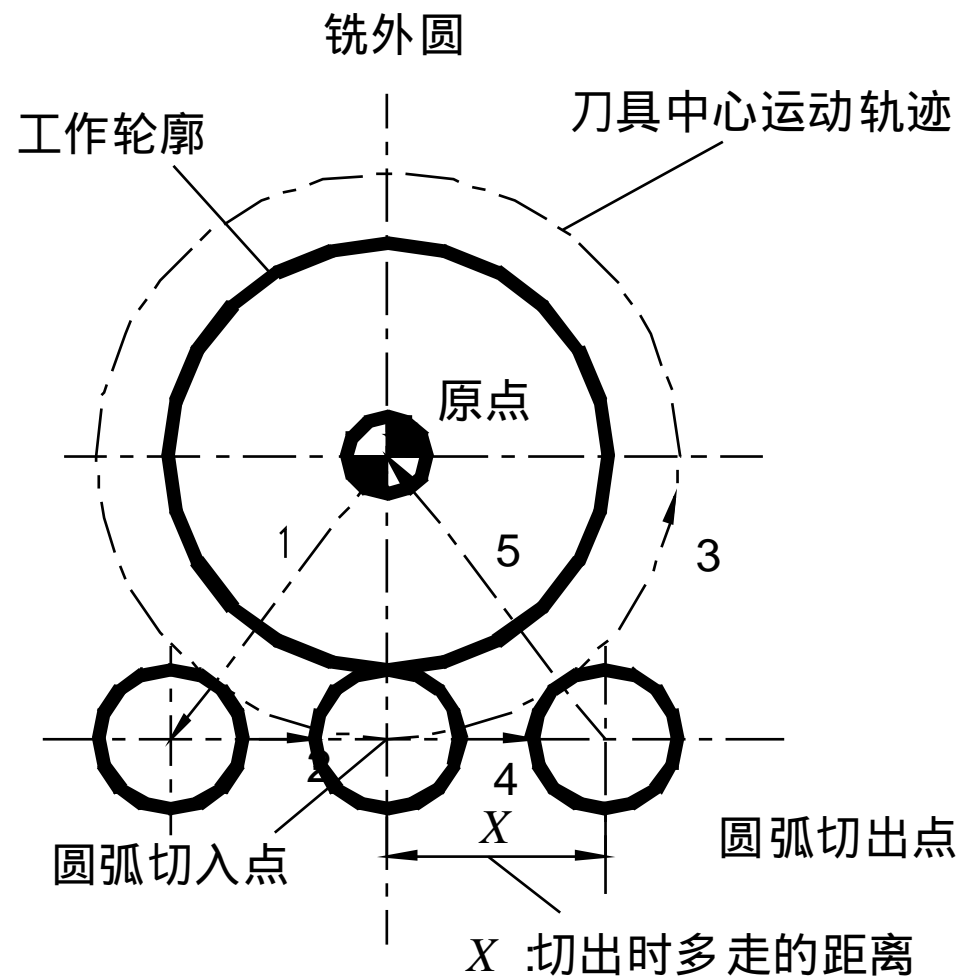
加工路线是指刀具相对于被加工工件的运动轨迹，不但包含了工步的内容，而且也反映了工步的顺序。

- q 保证零件的加工精度和表面粗糙度要求；
- q 简化数值计算，减少程编工作量；
- q 缩短加工路线，减少刀具空行程时间，提高加工效率。

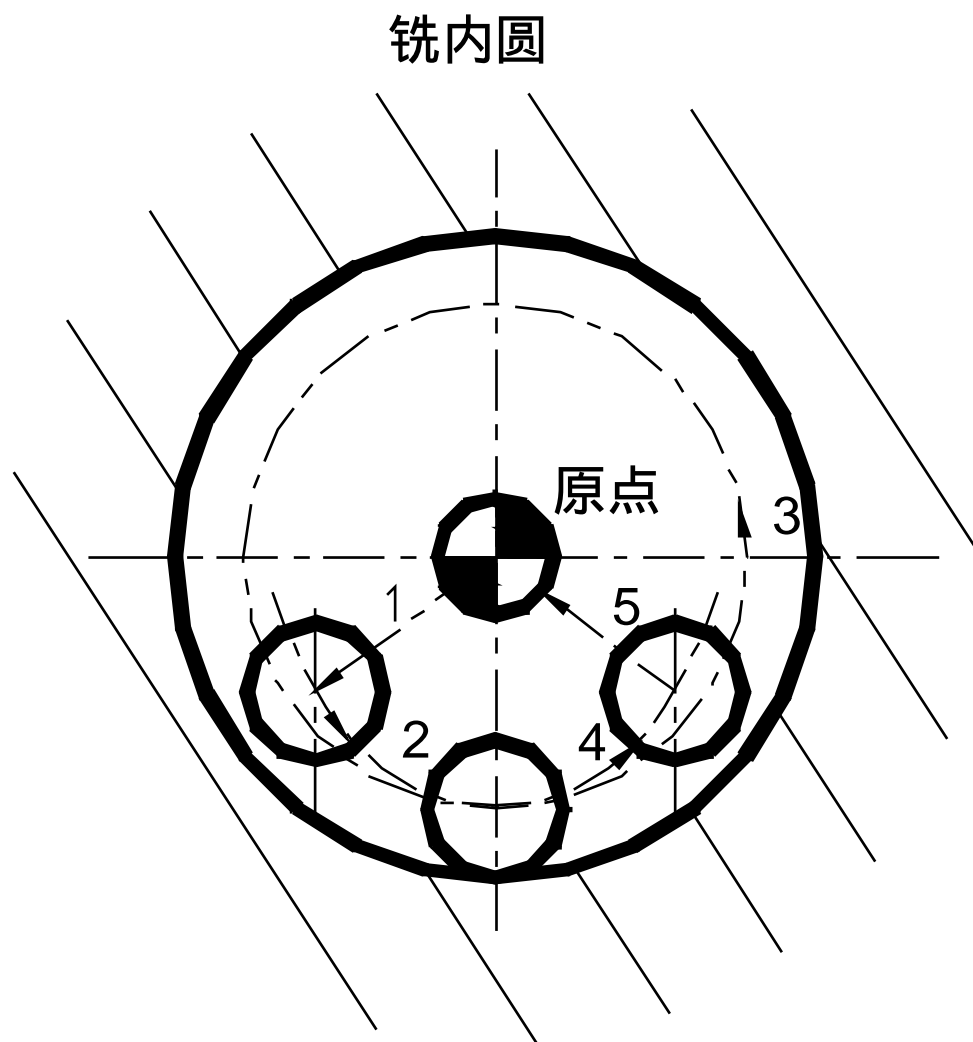


2.3 数控编程中的工艺处理

切向切入切出

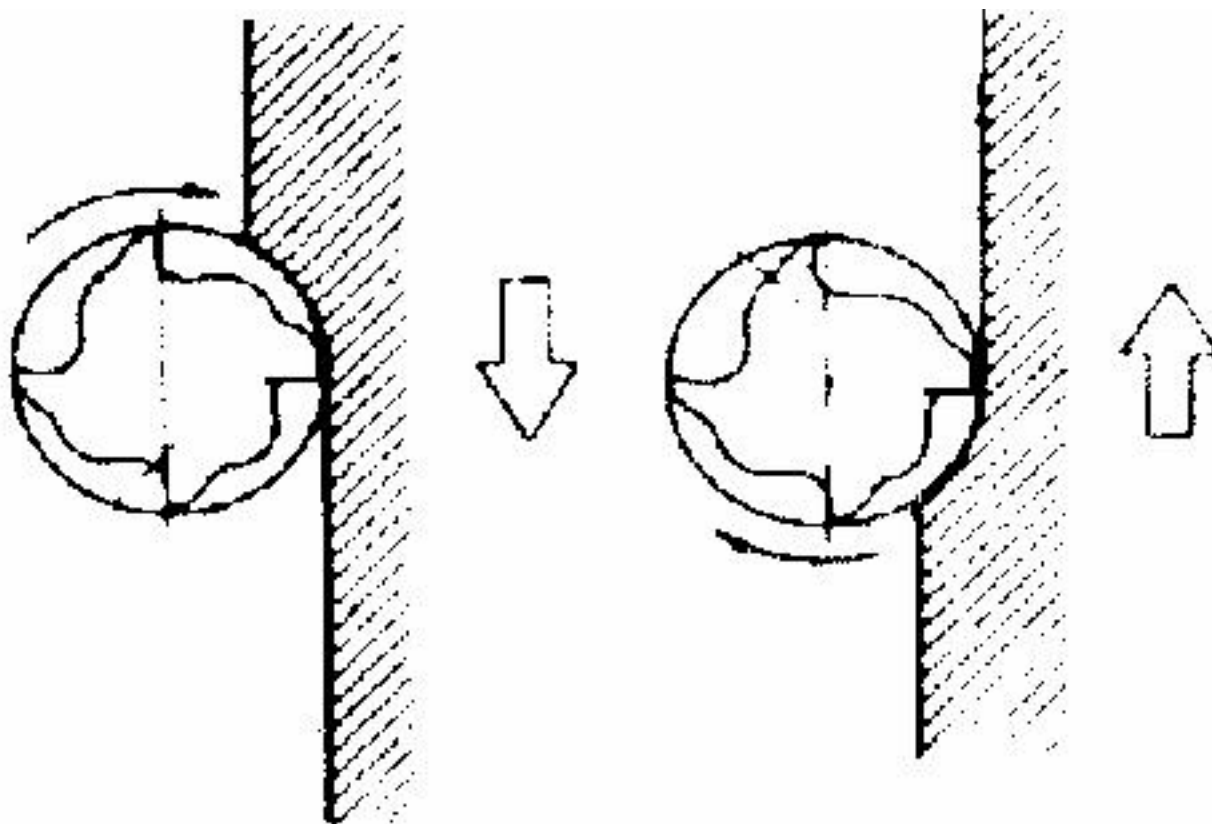


2.3 数控编程中的工艺处理



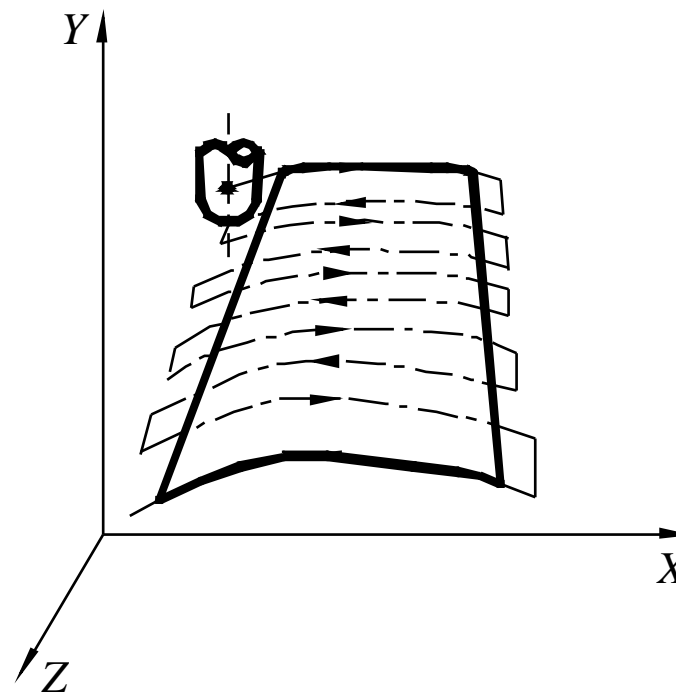
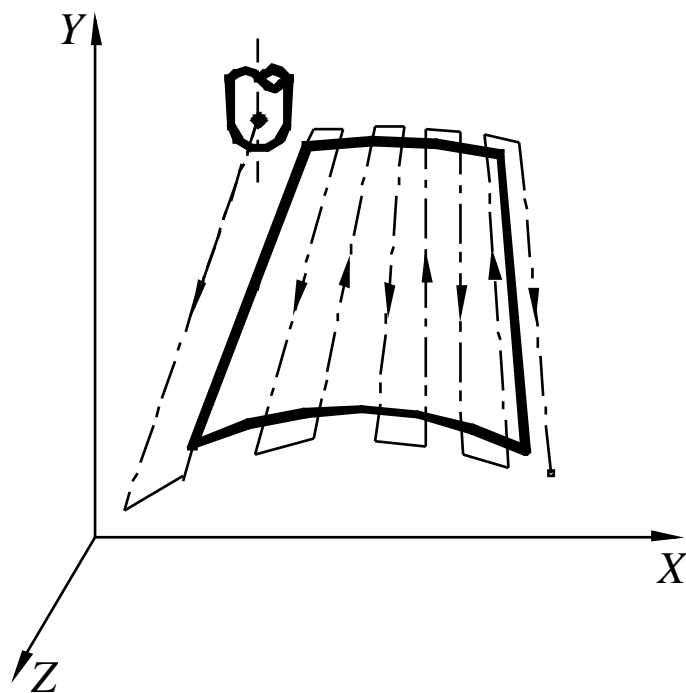
2.3 数控编程中的工艺处理

顺铣、多次走刀、避免进给停顿



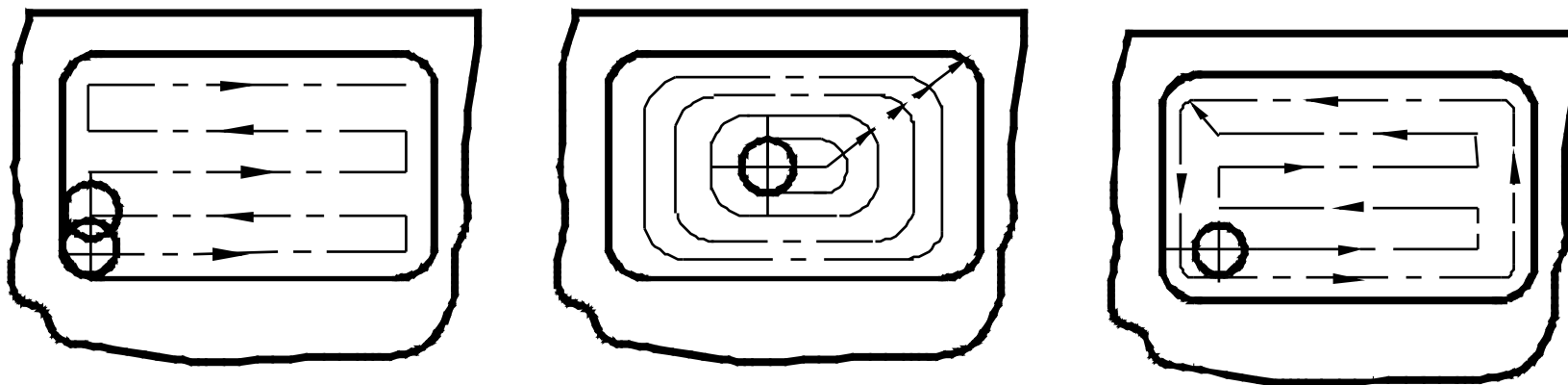
2.3 数控编程中的工艺处理

曲面加工：行切法

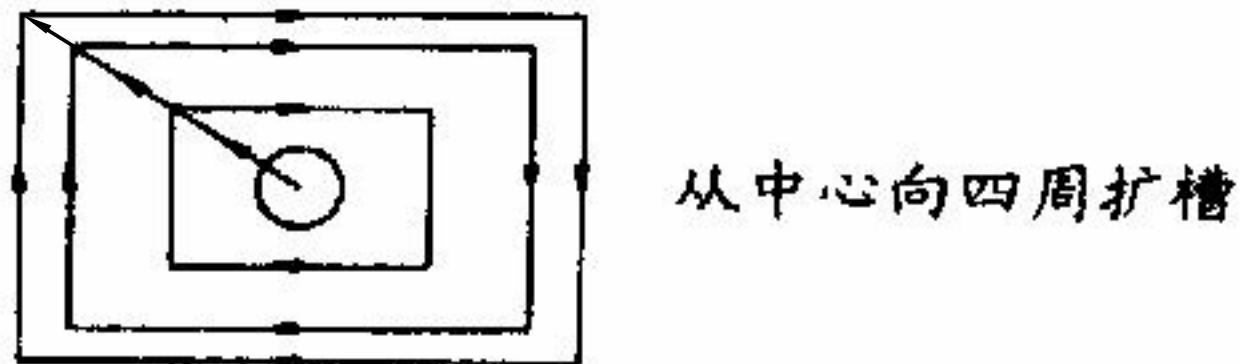
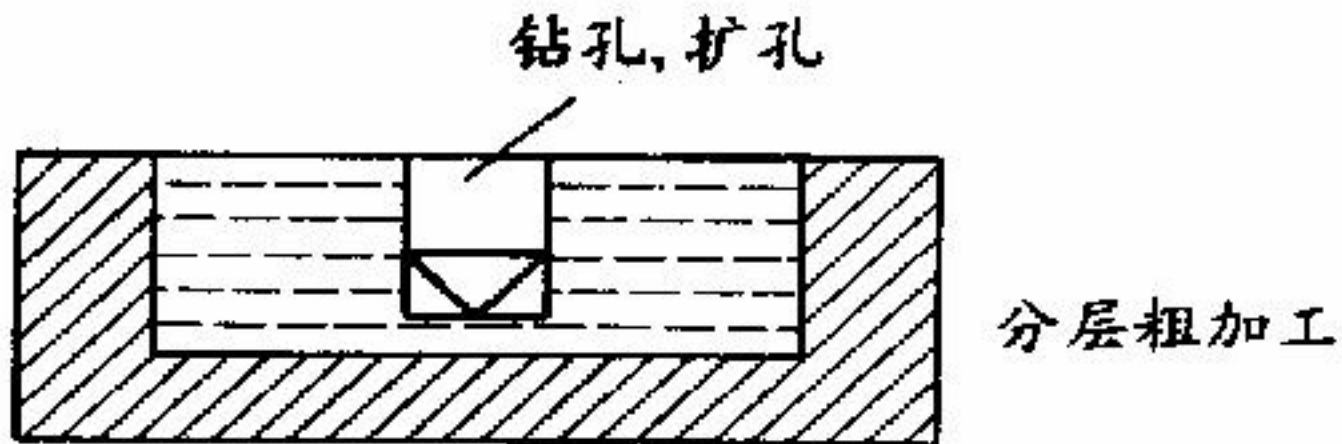


2.3 数控编程中的工艺处理

凹槽加工



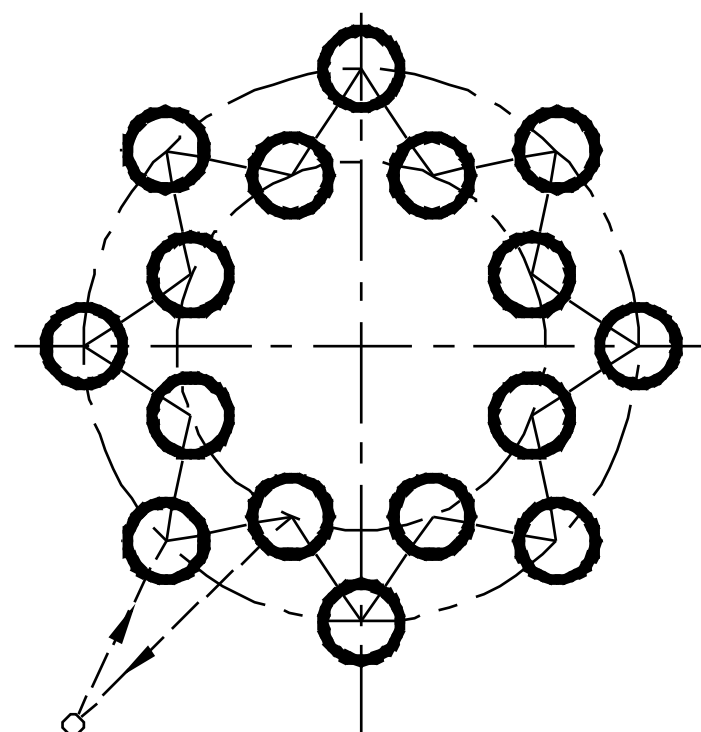
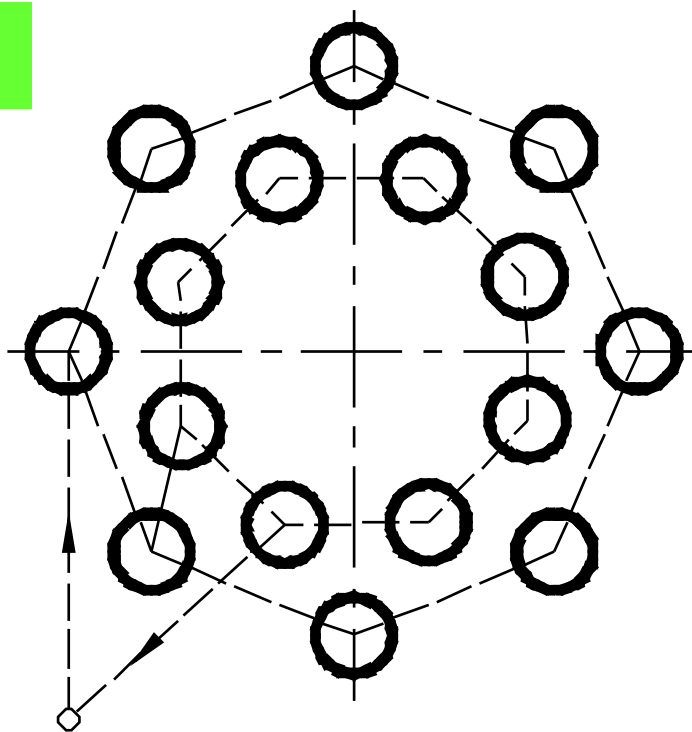
2.3 数控编程中的工艺处理



问题：槽中有凸台怎么办？

2.3 数控编程中的工艺处理

孔加工

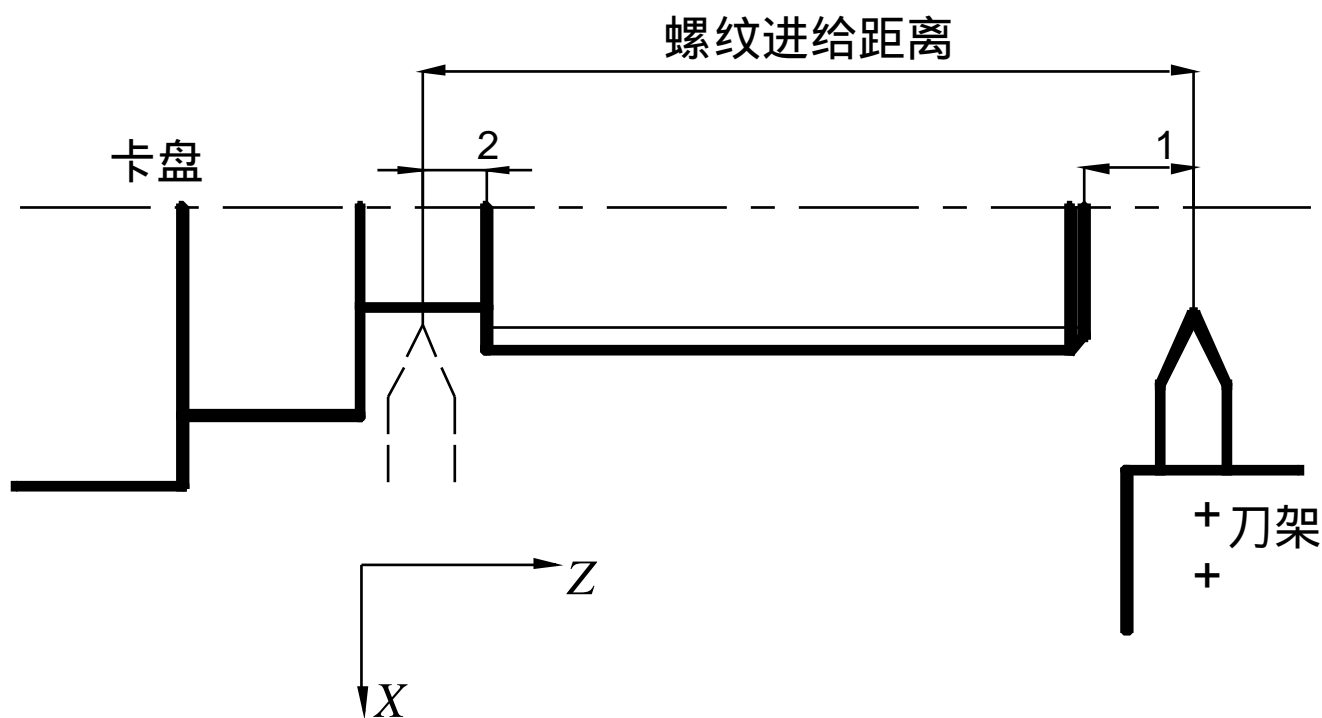


问题：1m以上的深孔如何加工？



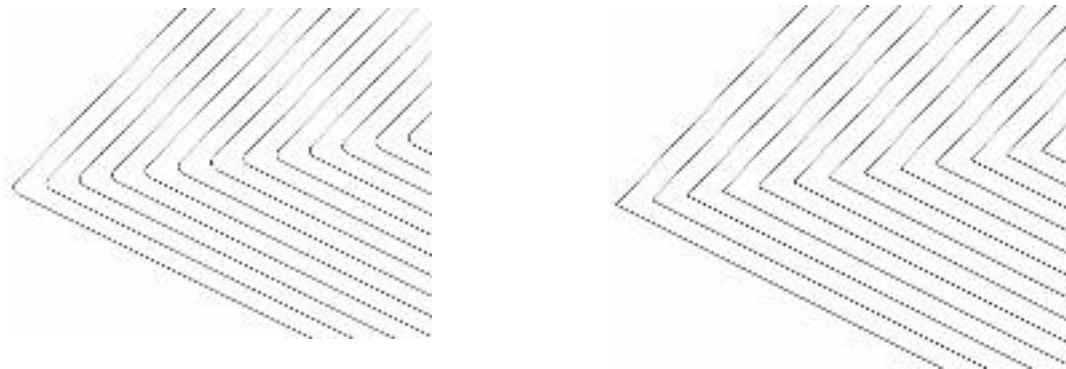
2.3 数控编程中的工艺处理

螺纹加工

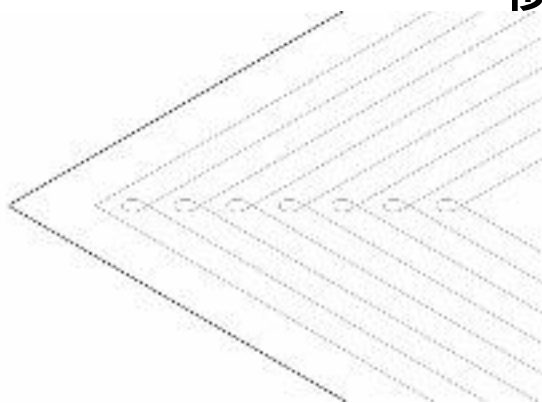
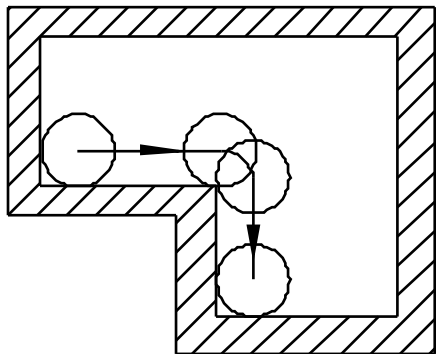


2.3 数控编程中的工艺处理

高速加工



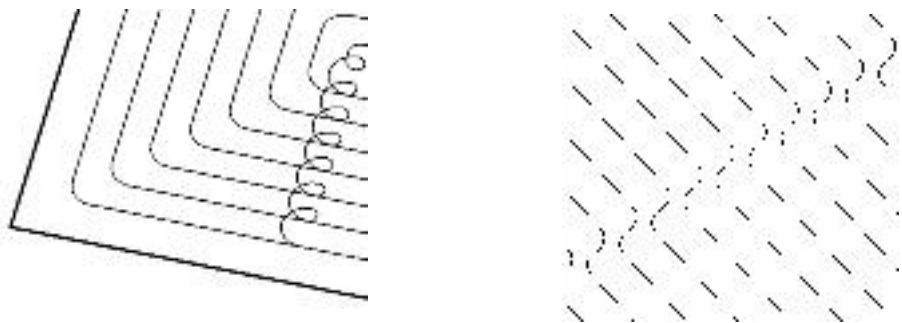
圆弧走刀和尖角走刀



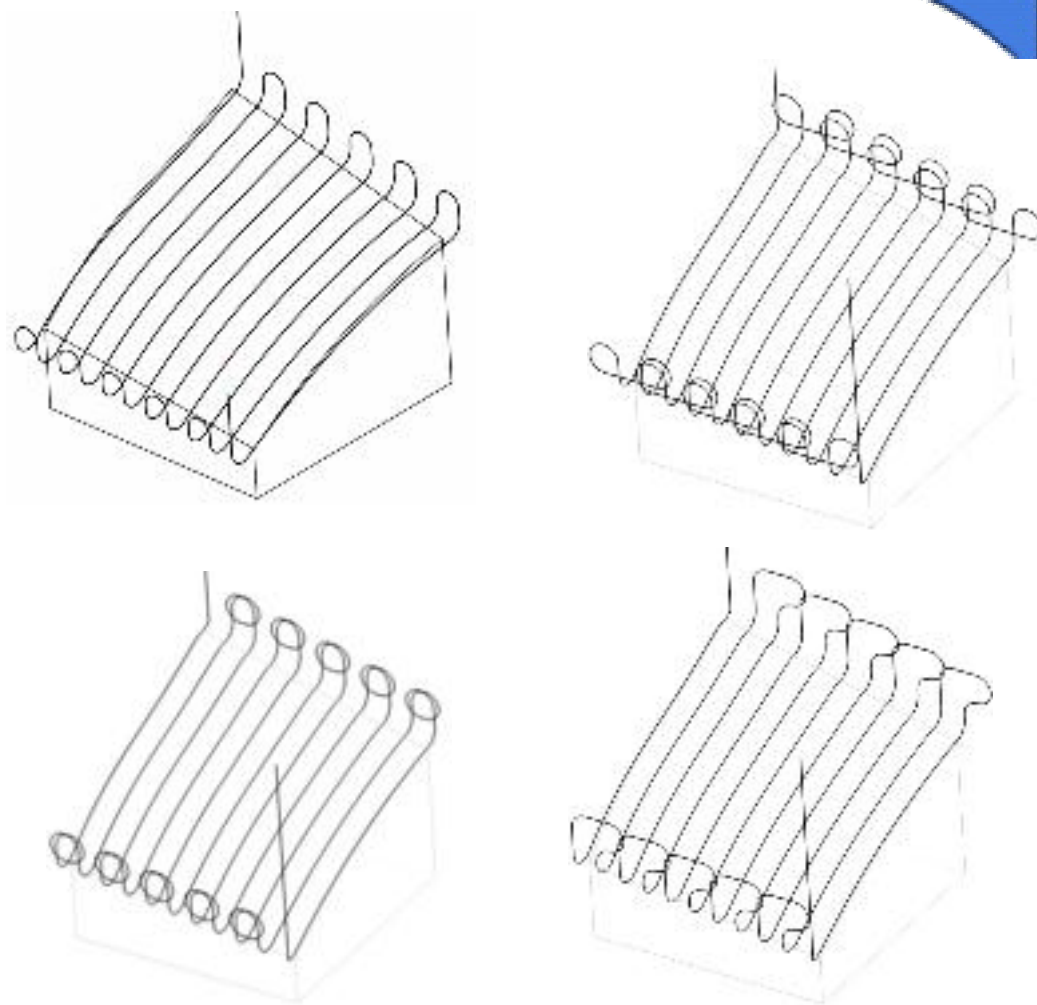
拐角处圆弧走刀路径

2.3 数控编程中的工艺处理

高速加工



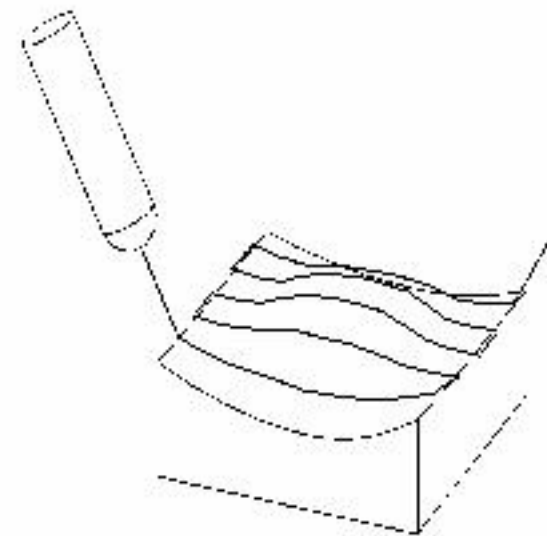
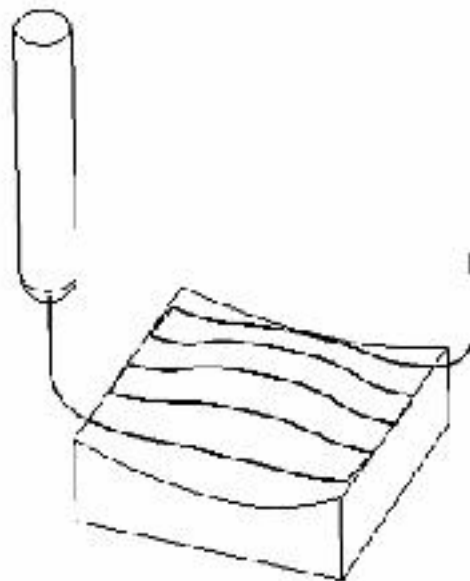
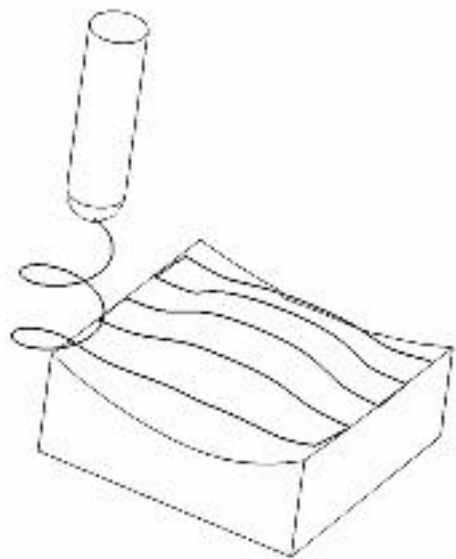
光滑的侧向移刀



行间光滑移刀

2.3 数控编程中的工艺处理

高速加工



各种进退刀方式

2.4 数控编程中的数学处理

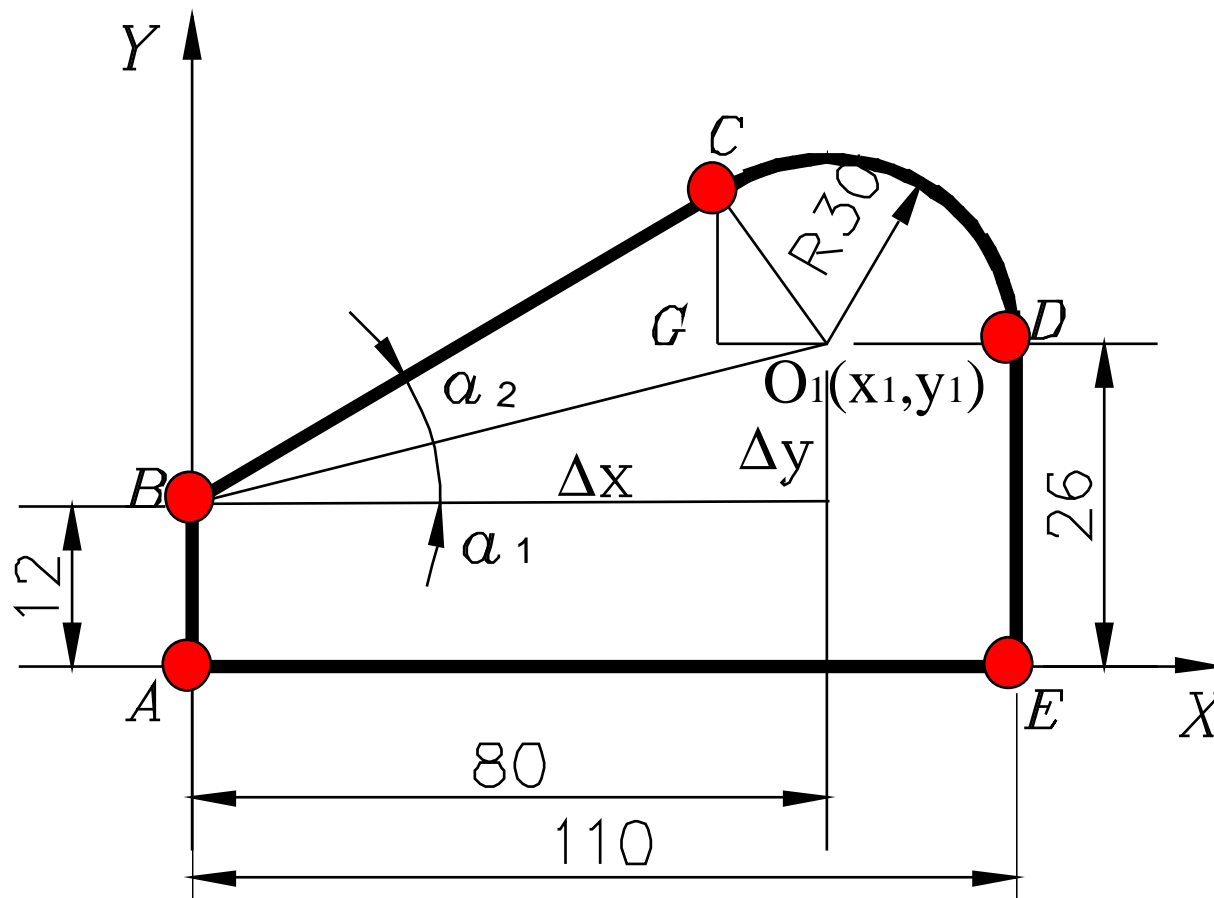
直线、圆弧类零件的数学处理

直线、圆弧类零件的轮廓一般由直线、圆弧组成。相邻几何元素间的交点或切点称之为**基点**。

基点的计算方法可以通过联立方程组求解，也可利用几何元素间的三角函数关系求解。

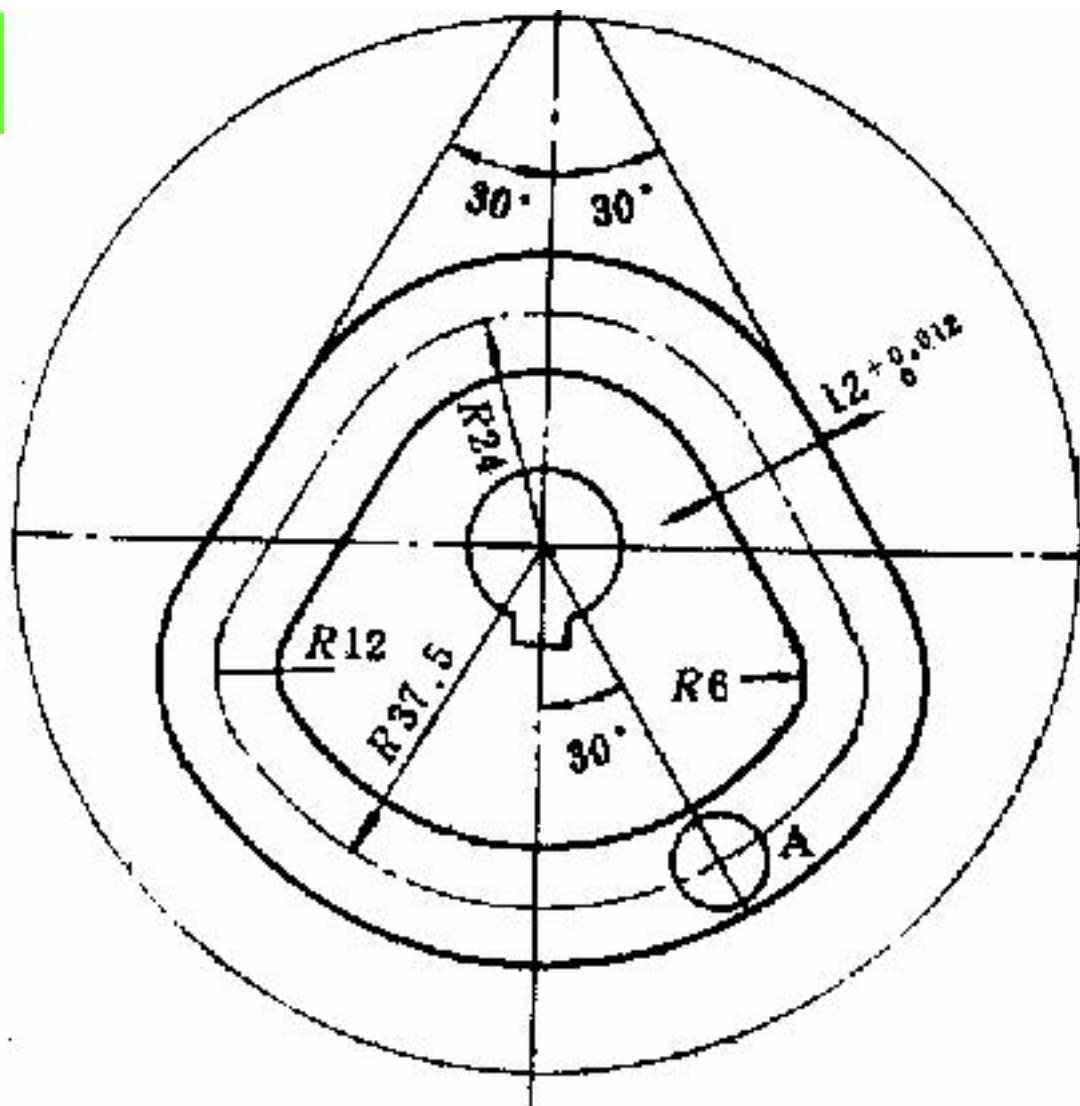


2.4 数控编程中的数学处理



2.4 数控编程中的数学处理

如何计算？



2.4 数控编程中的数学处理

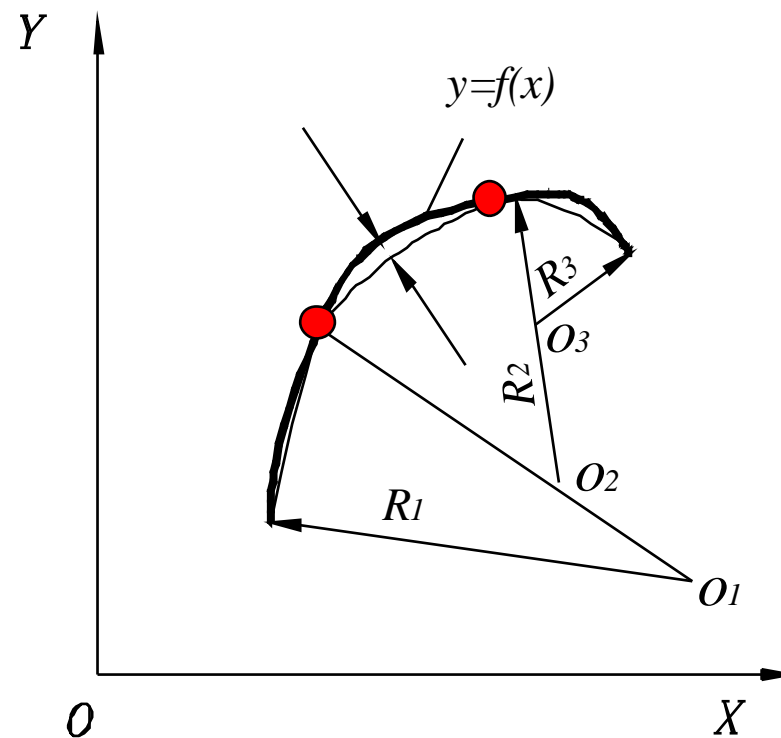
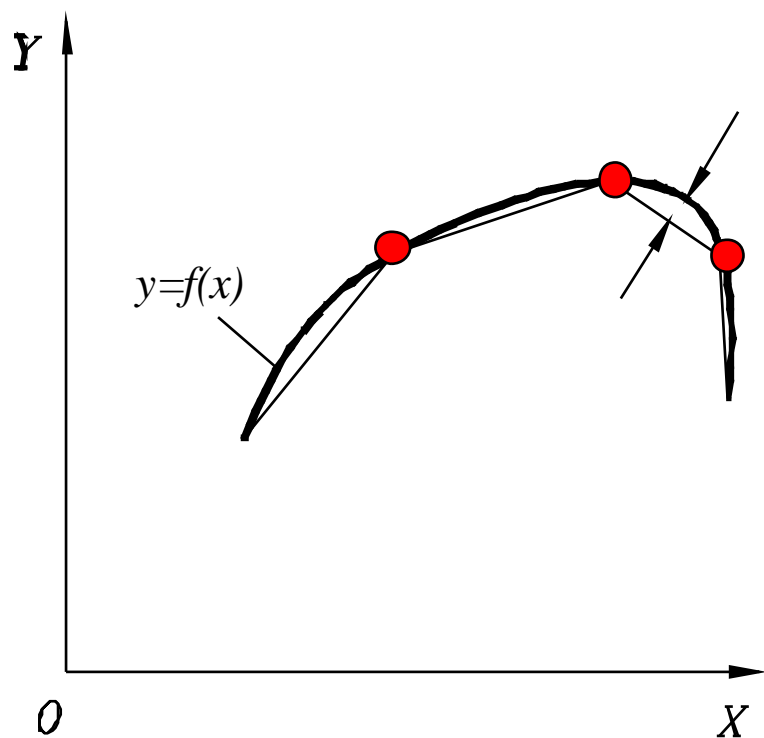
非圆曲线节点坐标计算

数控加工中把除直线与圆弧之外可以用数学方程式 $y=f(x)$ 表达的平面轮廓曲线，称为非圆曲线。

数学处理比较复杂，应在满足允许的编程误差条件下，用若干**直线段或圆弧段**去逼近给定的非圆曲线，相邻逼近线段的交点或切点称为**节点**。

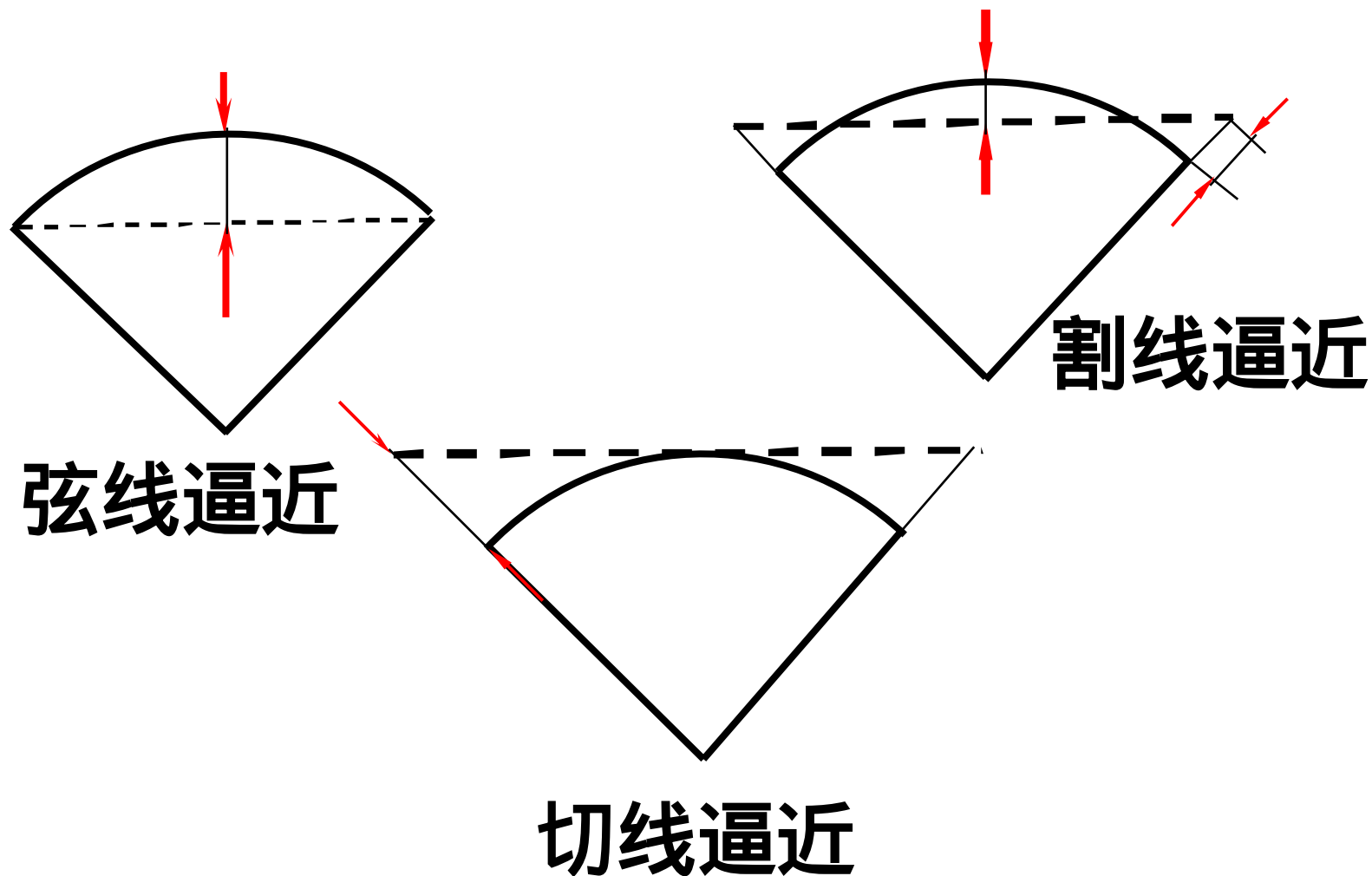


2.4 数控编程中的数学处理

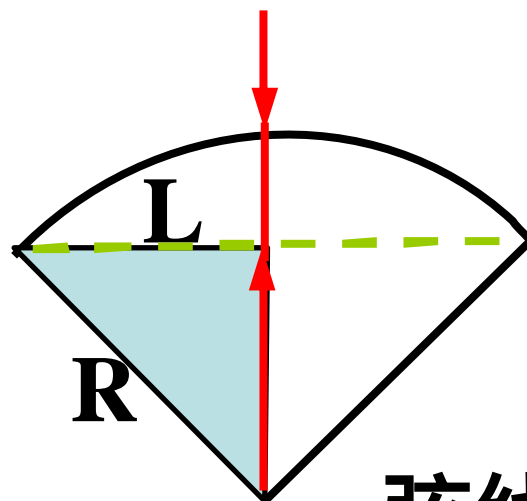


2.4 数控编程中的数学处理

用直线段逼近非圆曲线时节点的计算：



2.4 数控编程中的数学处理



弦线逼近

$$L \approx \sqrt{8 R \delta}$$

切线逼近

$$L \approx \sqrt{8 R \delta}$$

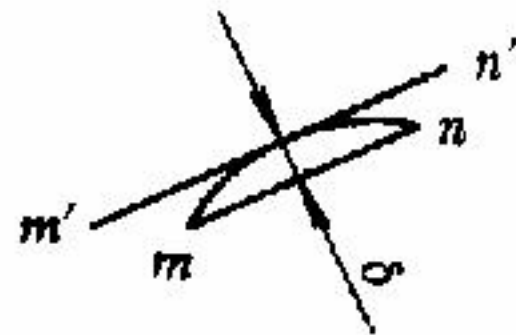
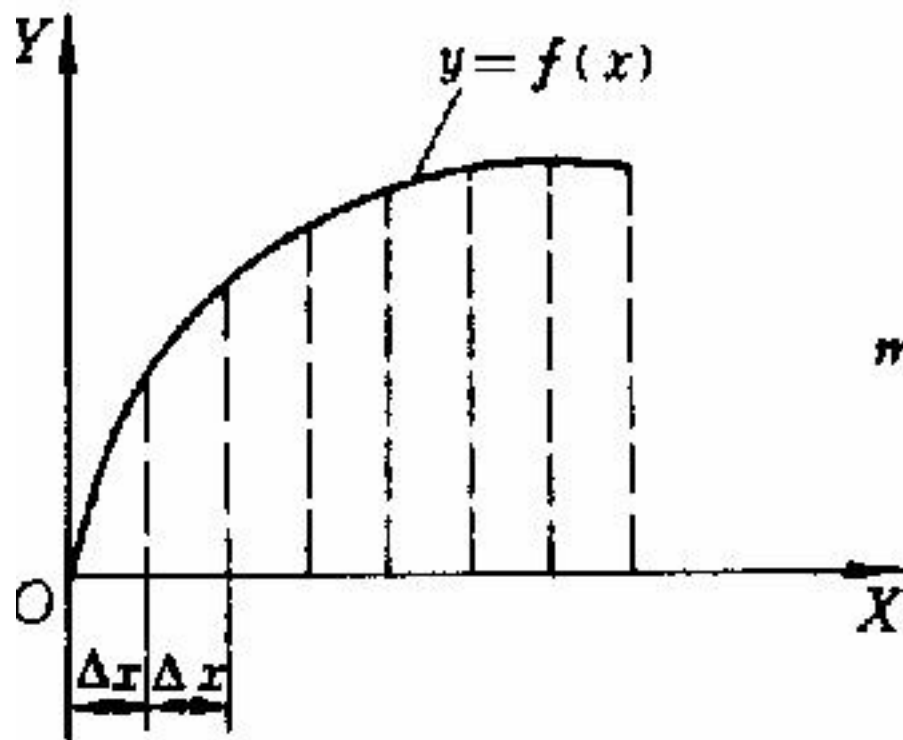
割线逼近

$$L \approx \sqrt{16 R \delta}$$

2.4 数控编程中的数学处理

弦线逼近中计算节点的方法主要有**等间距法**、**等步长法**和**等误差法**。

等间距法:



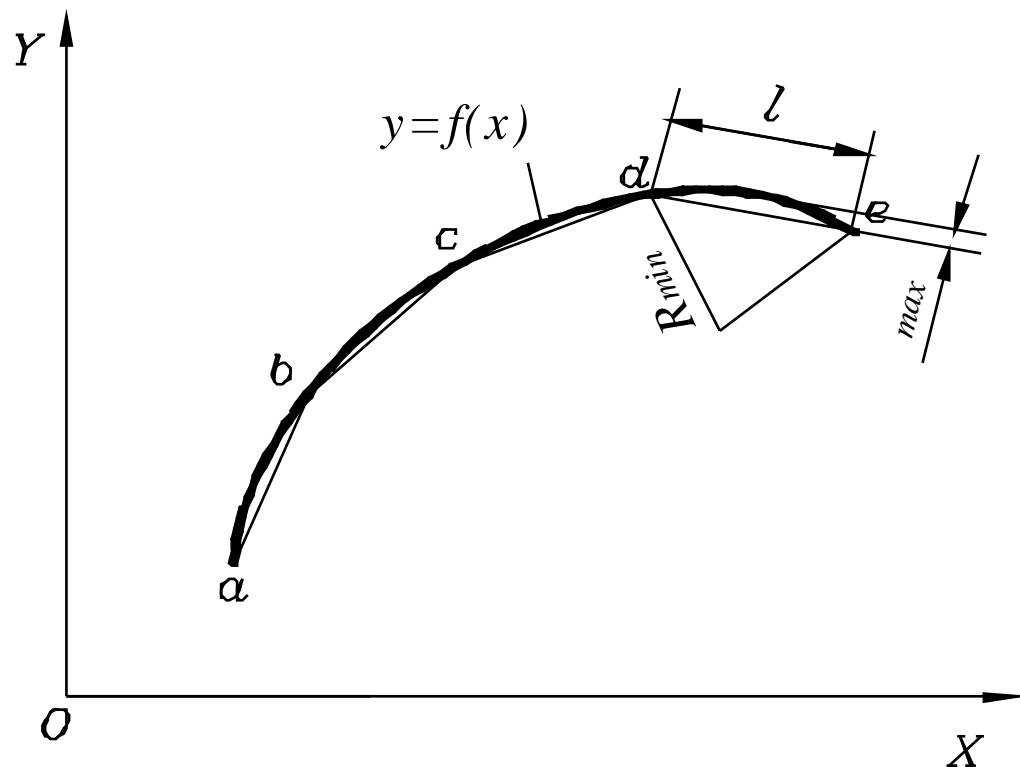
一般先取 $X=0$. 进行试算, 再验算 $\delta < \delta_{允}$?



2.4 数控编程中的数学处理

等步长法：

用直线段逼近非圆曲线时，如果每个逼近线段长度相等，则称等步长法。



2.4 数控编程中的数学处理

等步长计算步骤：

q 求最小曲率半径 R_{min}

设曲线为 $y=f(x)$ ，则其曲率半径公式为

$$R = \frac{[1+(y')^2]^{3/2}}{y''}$$

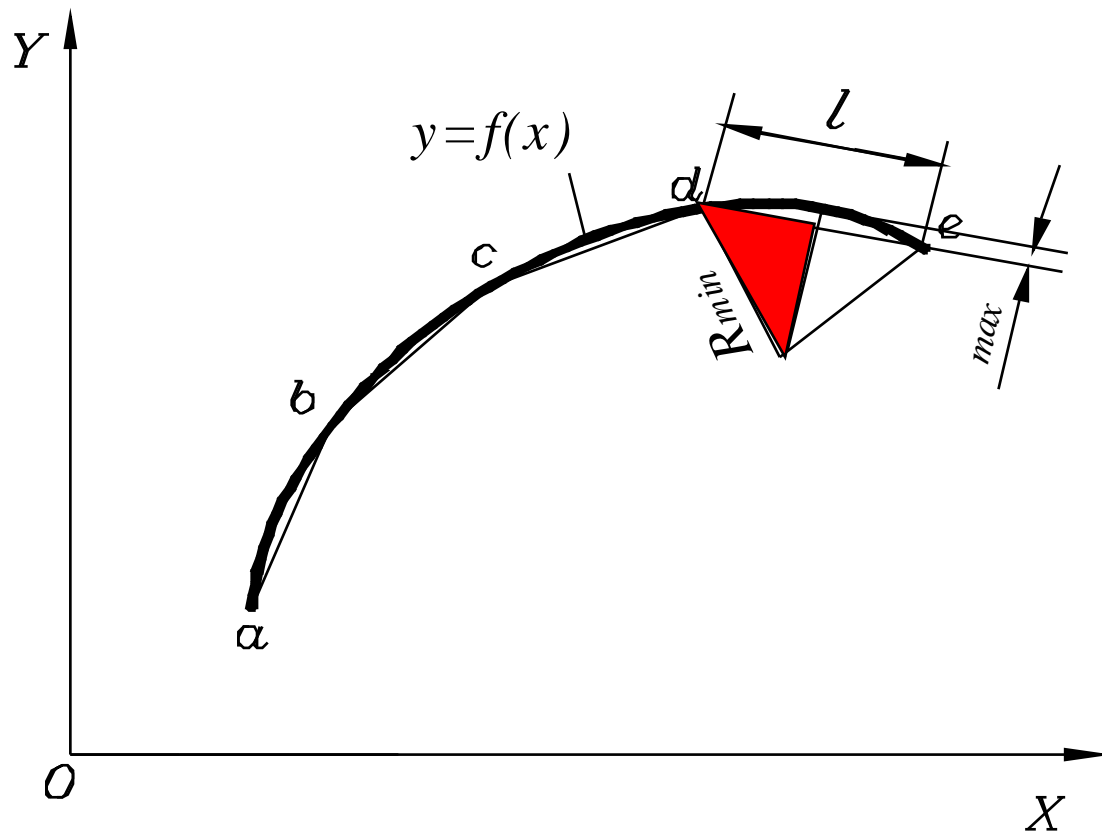
$$\frac{dR}{dx} = \frac{3(y'')^2 y' [1+(y')^2]^{1/2} - [1+(y')^2]^{3/2} y'''}{(y'')^2}$$

$$\frac{dR}{dx} = 0$$

$$3(y'')^2 y' - [1+(y')^2] y''' = 0$$

2.4 数控编程中的数学处理

q 计算允许步长 /



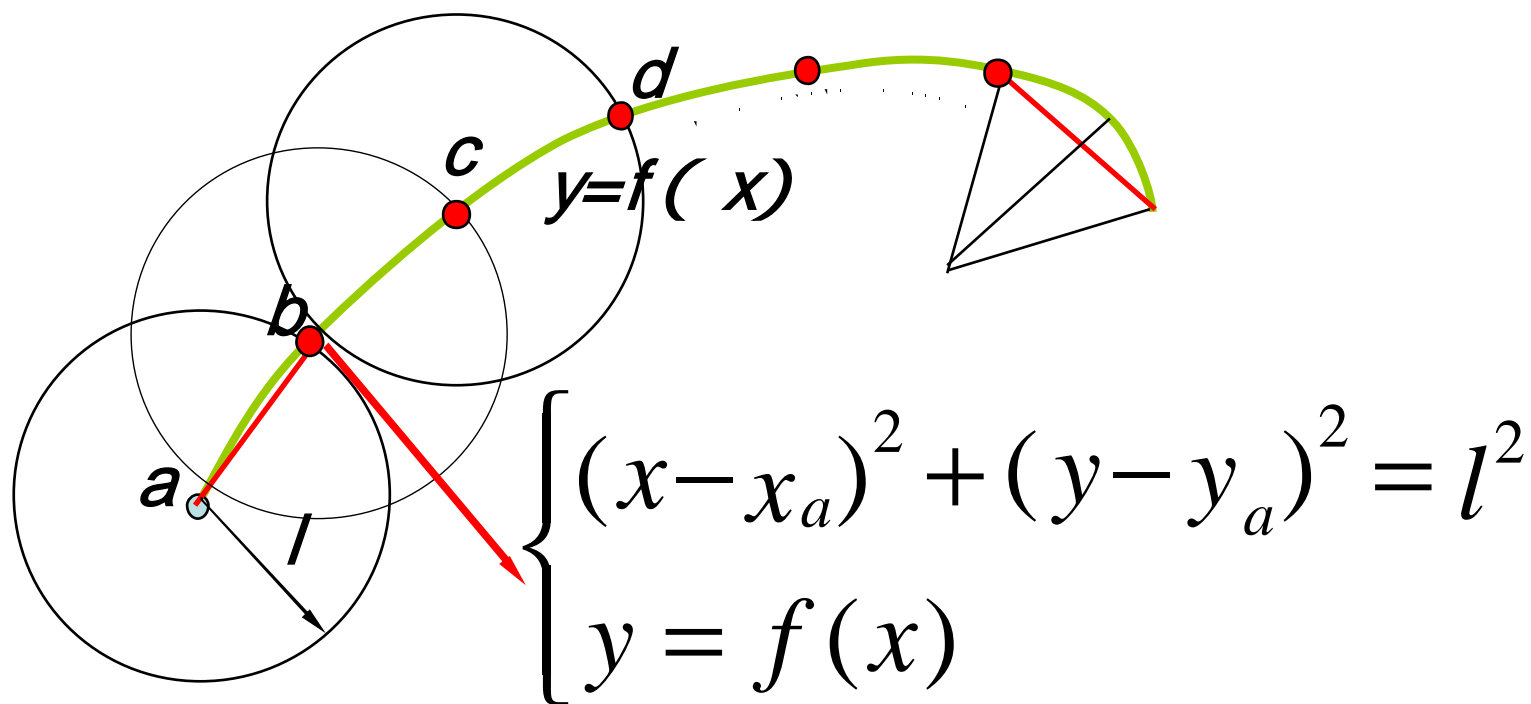
$$l = 2 \sqrt{R_{min}^2 - (R_{min} - \delta_{允})^2}$$

$$\approx 2 \sqrt{2 R_{min} \delta_{允}}$$

2.4 数控编程中的数学处理

q计算节点坐标

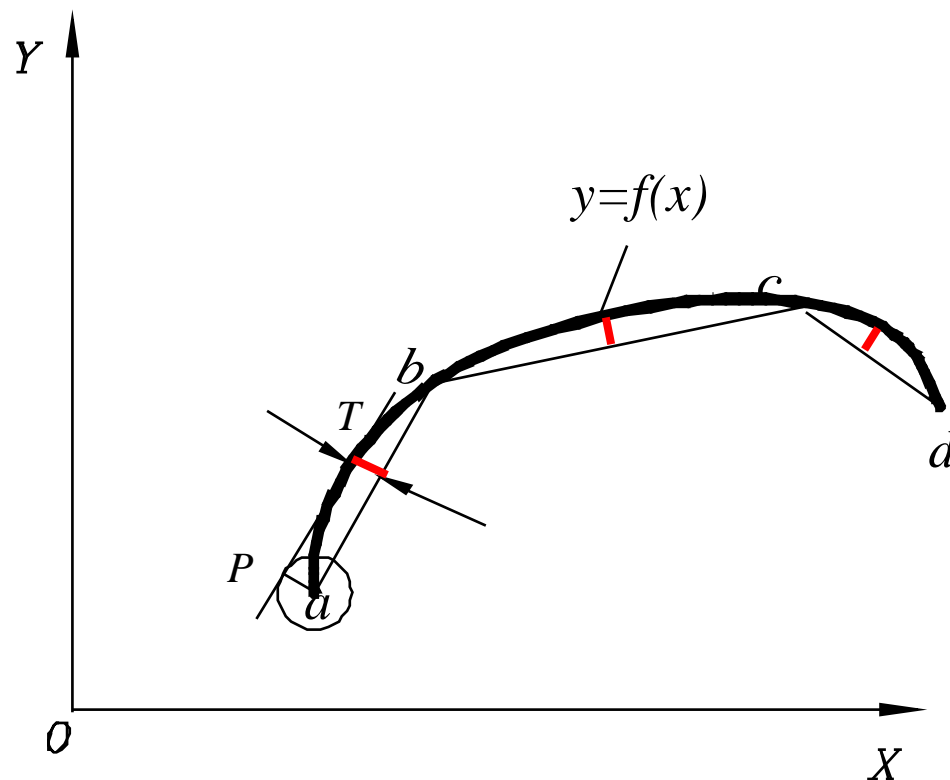
以起点 $a(x_a, y_a)$ 为圆心，以 l 为半径作圆，得到圆方程，与曲线方程 $y=f(x)$ 联立求解，可得第一个节点的坐标 (x_b, y_b) ，以此类推.....



2.4 数控编程中的数学处理

等误差法：

用直线段逼近非圆曲线时，如果每个逼近误差相等，则称等误差法。

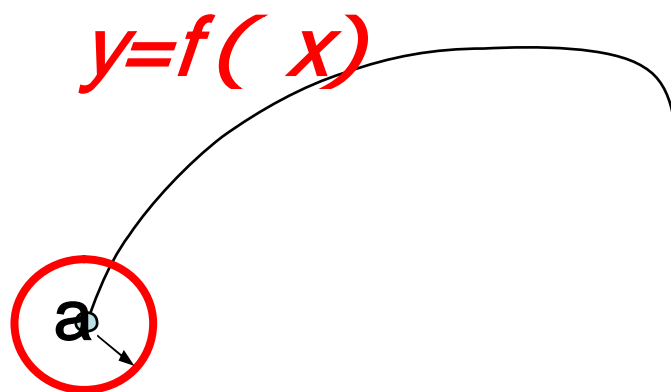


2.4 数控编程中的数学处理

等误差法计算步骤：

以起点 $a(x_a, y_a)$ 为圆心， $\delta_{允}$ 为半径作圆，得到圆方程

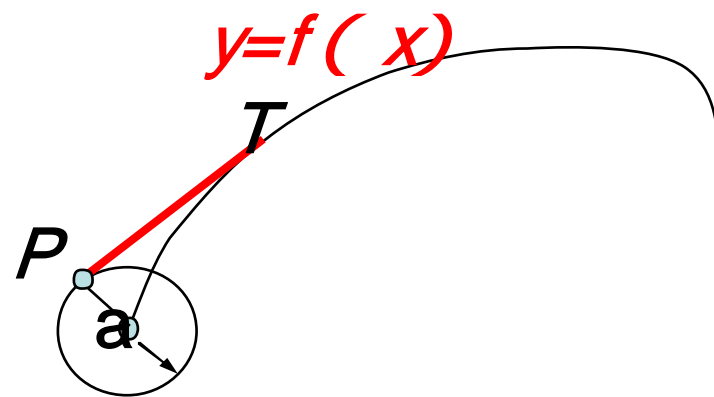
$$(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 = \delta_{允}^2$$



2.4 数控编程中的数学处理

q 求圆与曲线公切线 PT 的斜率 首先联立求解以下
 方程组得切点坐标 (x_T, y_T) 、 (x_P, y_P)

$$\begin{cases} \frac{y_T - y_P}{x_T - x_P} = -\frac{x_P - x_a}{y_P - y_a} \\ y_P = \sqrt{\delta_{允} - (x_P - x_a)^2} + y_a \\ \frac{y_T - y_P}{x_T - x_P} = f'(x_T) \\ y_T = f(x_T) \end{cases}$$



2.4 数控编程中的数学处理

由切点坐标求出斜率：

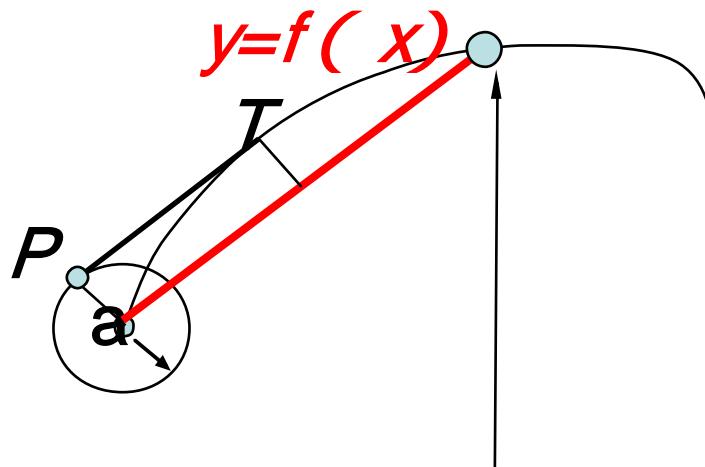
$$k = \frac{y_T - y_P}{x_T - x_P}$$



2.4 数控编程中的数学处理

过 a 点与直线 P 平行的直线方程为

$$y - y_a = k(x - x_a)$$



与曲线方程联立求解得 b 点坐标

$$\begin{cases} y - y_a = k(x - x_a) \\ y = f(x) \end{cases}$$

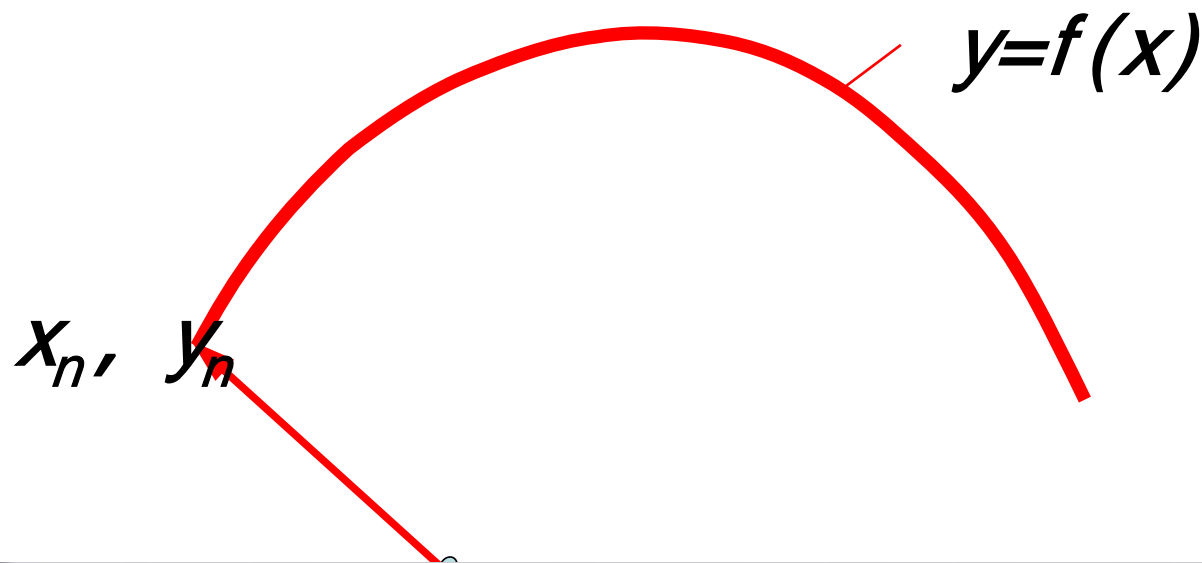
2.4 数控编程中的数学处理

用圆弧段逼近非圆曲线时节点的计算

用圆弧段逼近非圆曲线的方法有曲率圆法、三点圆法、相切圆法、双圆弧法等。

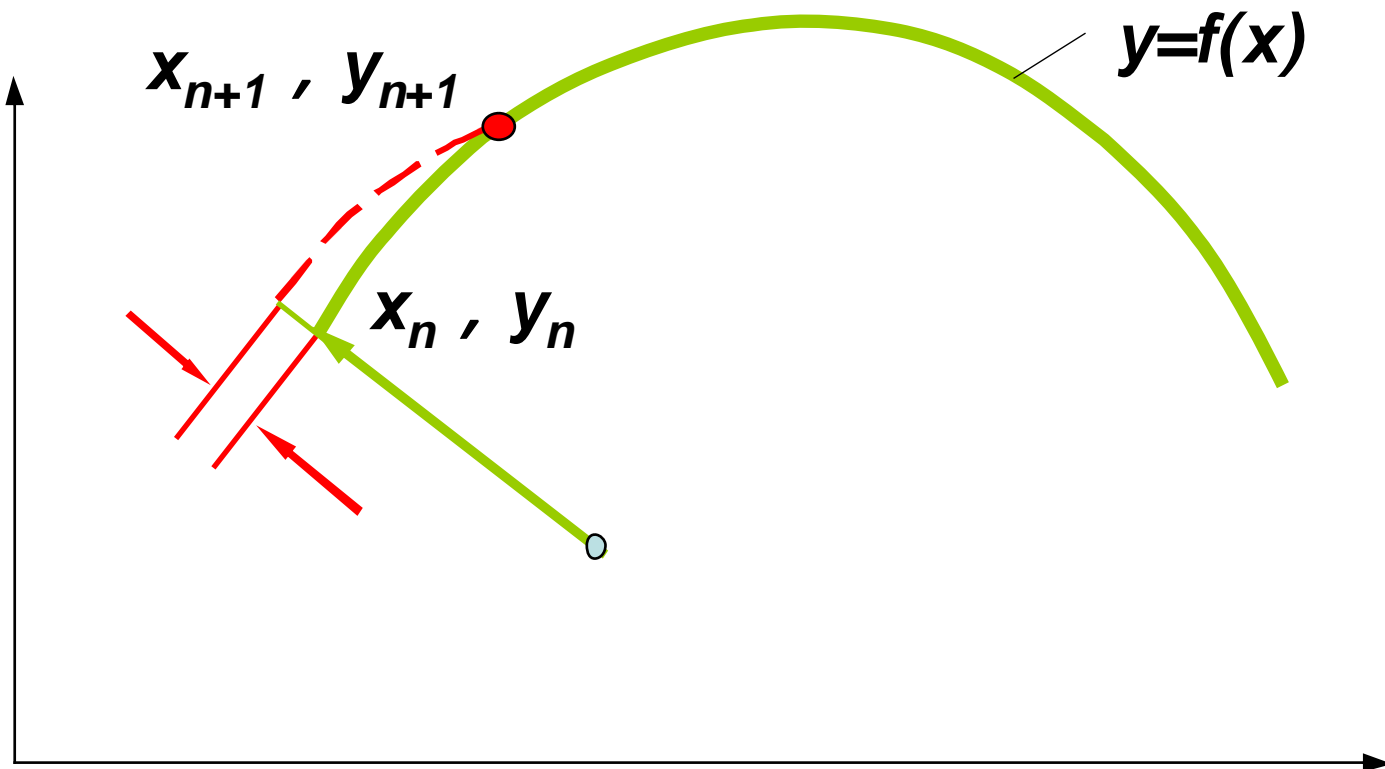
曲率圆法：用彼此相交的圆弧逼近非圆曲线。

从曲线的起点开始作与曲线内切的曲率圆，求出曲率圆的中心



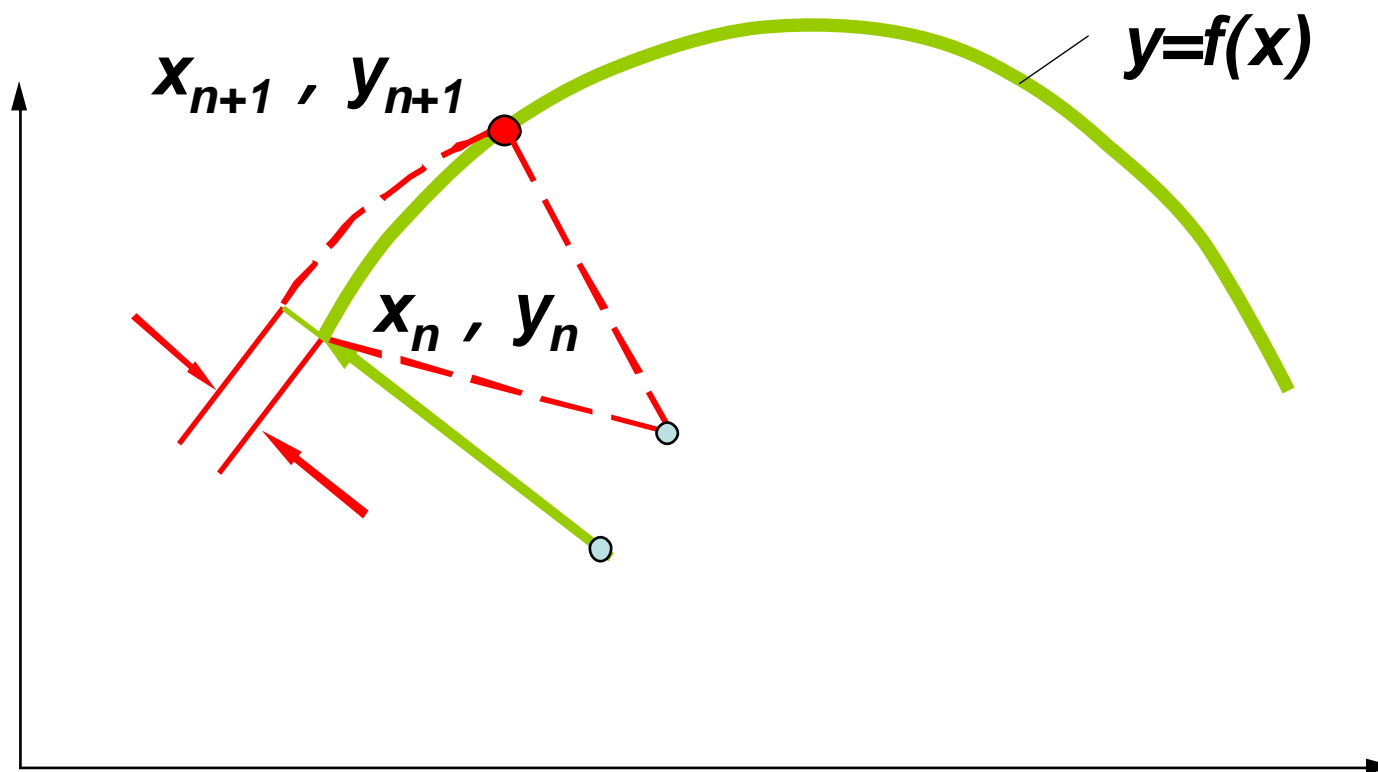
2.4 数控编程中的数学处理

以曲率圆中心为圆心，以曲率圆半径加（减） $\delta_{允}$ 为半径，所作的圆（偏差圆）与曲线 $y=f(x)$ 的交点为下一个节点



2.4 数控编程中的数学处理

过相邻两节点作圆，半径为曲率圆半径，计算圆心坐标。



重复以上步骤，求其它节点坐标及圆心坐标。

2.4 数控编程中的数学处理

三点圆法：

三点圆法是在已求出的各节点基础上，通过连续三点作圆弧，求出圆心坐标和圆的半径。

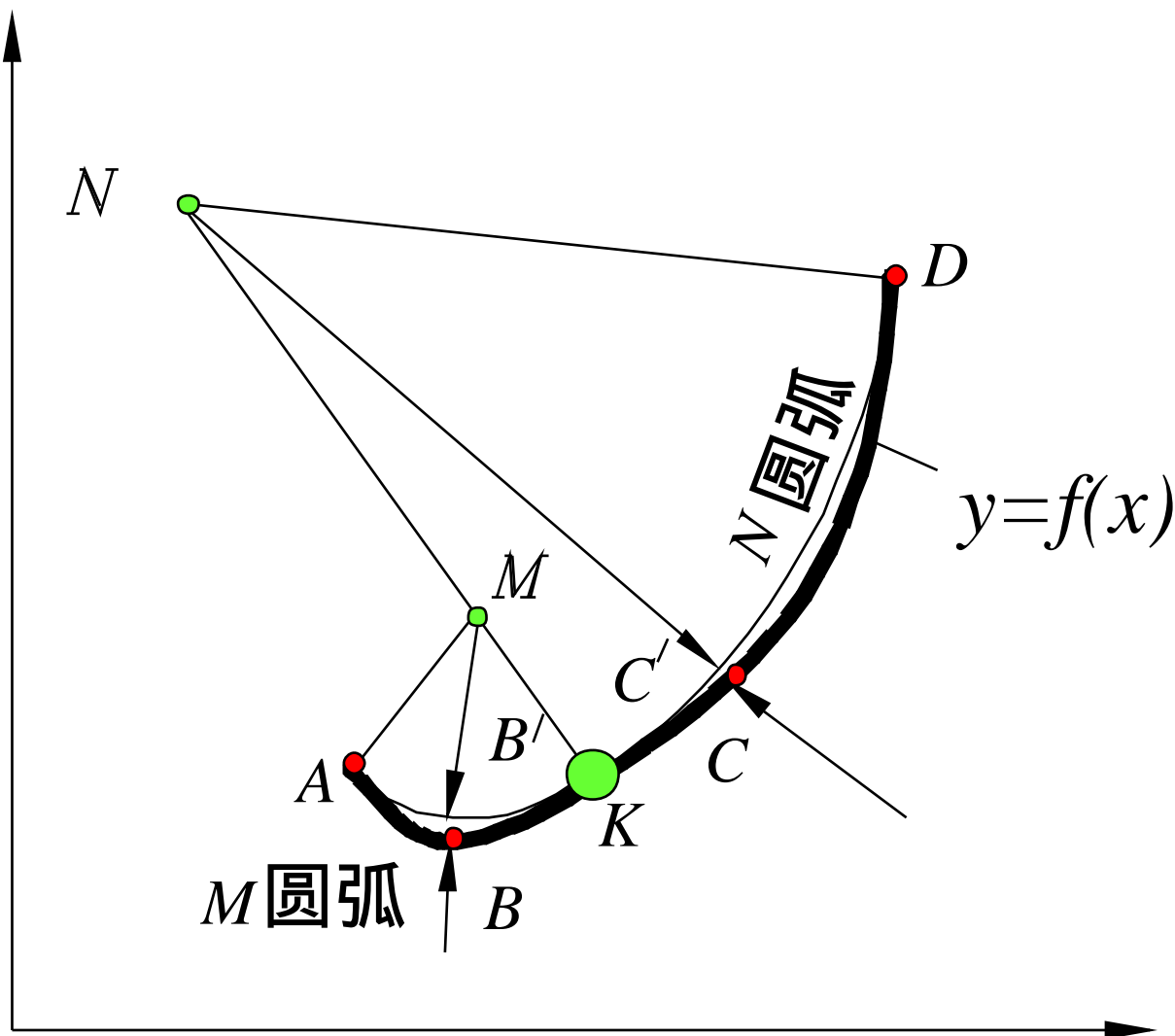


2.4 数控编程中的数学处理

相切圆法：

过曲线上 A B C 点作曲线的法线，分别交于 M N 点，并分别以点 M N 为圆心， AM DN 为半径作圆 M 和圆 N ，使圆 M 和圆 N 相切于 K 点。为了使两段圆弧相切，必须满足

$$\overline{AM} + \overline{MN} = \overline{DN}$$



2.4 数控编程中的数学处理

两圆弧段与曲线逼近误差的最大值，应满足

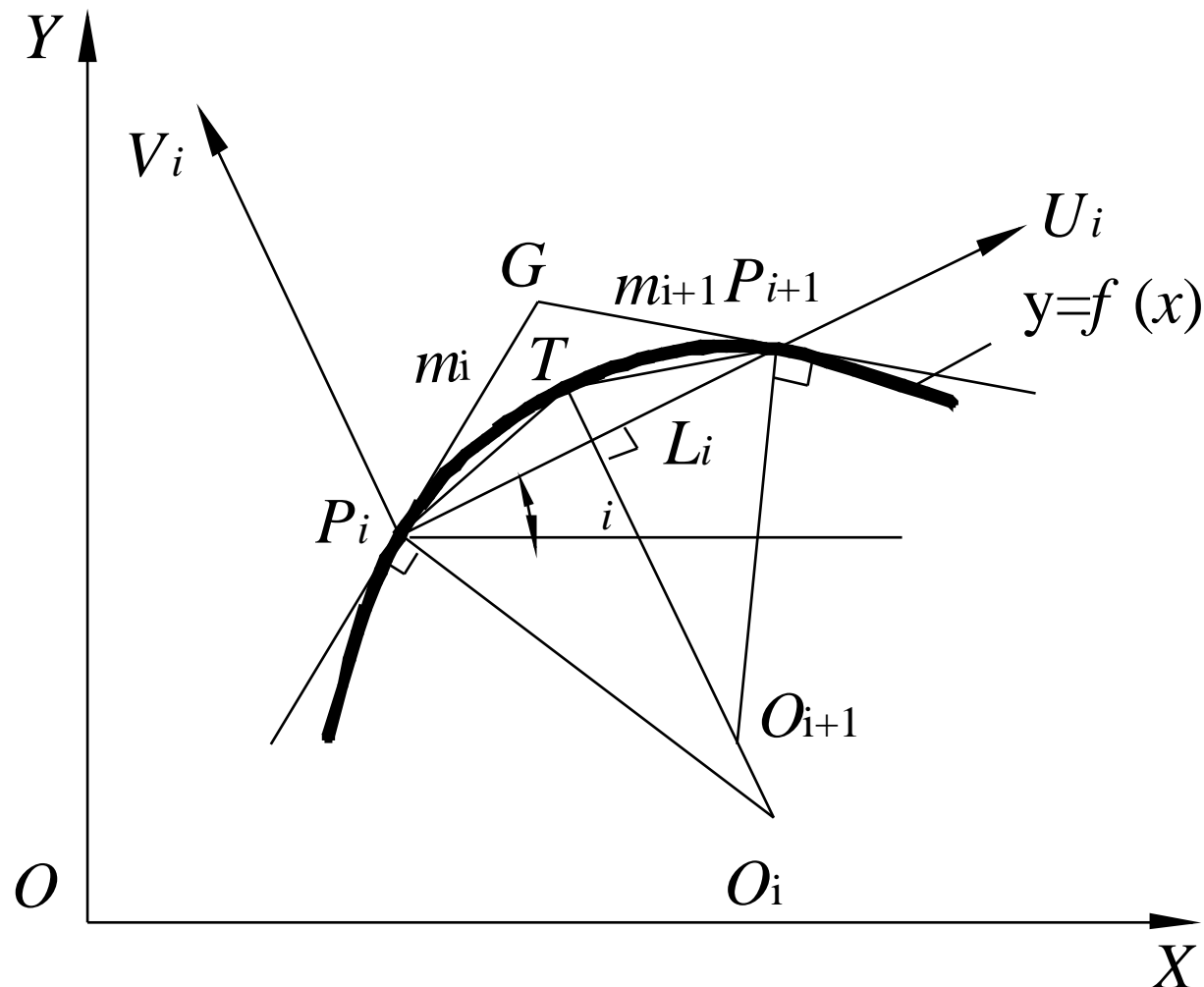
$$\overline{BB'} = \overline{MA} - \overline{MB} = \delta_{允}$$

$$\overline{CC'} = \overline{ND} - \overline{NC} = \delta_{允}$$

由以上条件确定的 B C D 三点可保证： M N 圆相切条件； $\delta_{允}$ 条件； M N 圆弧在 A L 点分别与曲线相切条件。

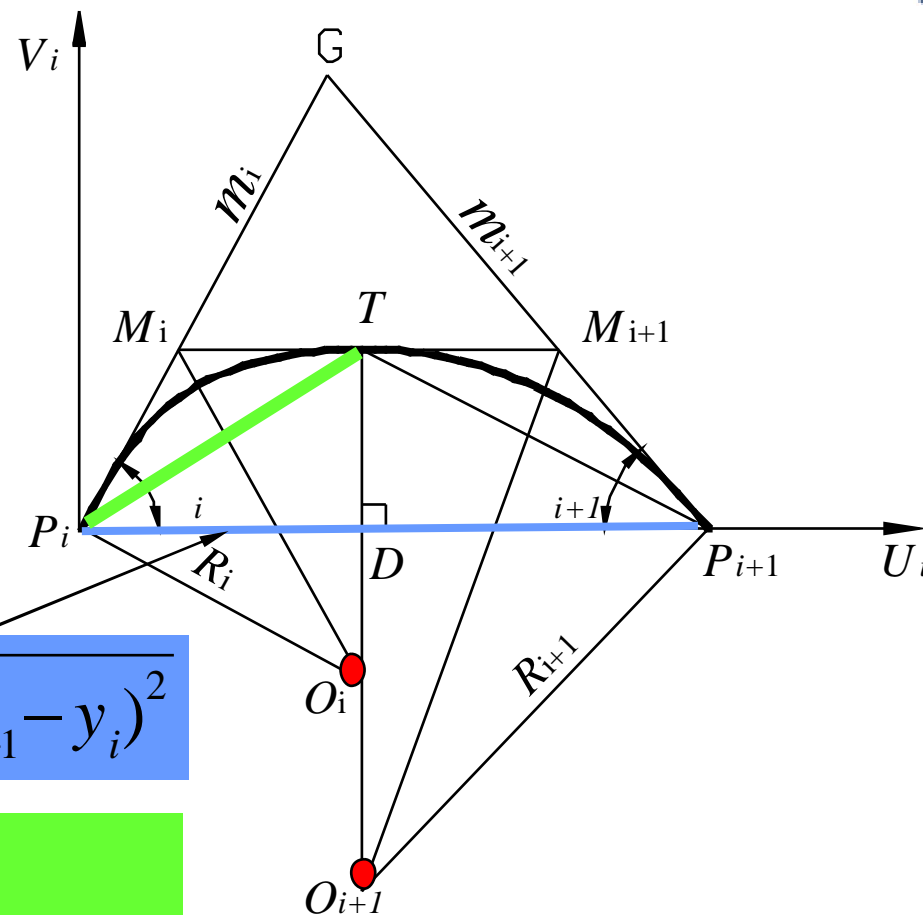
2.4 数控编程中的数学处理

双圆弧法 指在两相邻的节点间用两段相切的圆弧逼近曲线的方法。



2.4 数控编程中的数学处理

圆心坐标、切点坐标、半径的计算过程：(局部坐标系)



$$L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

$$\overline{P_i T} = \frac{\sin \frac{\theta_{i+1}}{2}}{\sin \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}} \overline{P_i P_{i+1}}$$

(正弦定理)

2.4 数控编程中的数学处理

切点坐标为

$$U_T = \overline{P_i D} = \overline{P_i T} \cos \theta_i / 2$$

$$V_T = \overline{DT} = \overline{P_i T} \sin \theta_i / 2$$

圆心 O_i, O_{i+1} 的坐标分别为

$$\begin{cases} U_{O_i} = U_T \\ V_{O_i} = \overline{DO_i} = \overline{P_i D} / \tan \theta_i \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{O_{i+1}} = U_T \\ V_{O_{i+1}} = \overline{DO_{i+1}} = (L_i - \overline{P_i D}) / \tan \theta_{i+1} \end{cases}$$

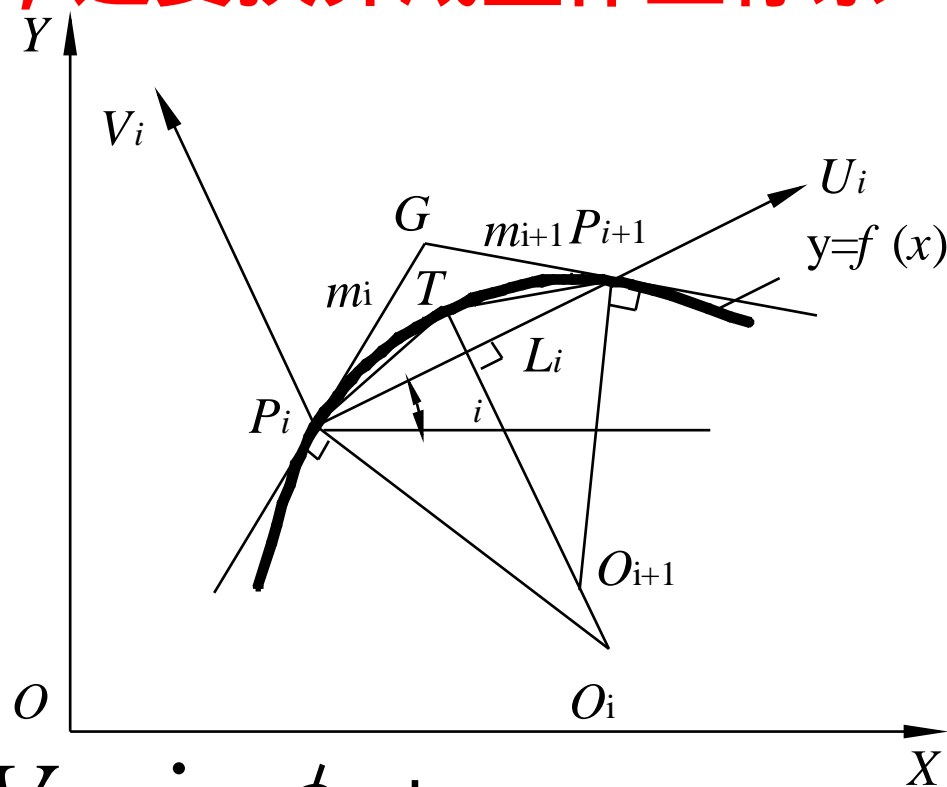
2.4 数控编程中的数学处理

$$R_i = \overline{DT} + \overline{DO}_i = V_T + V_{O_i}$$

$$R_{i+1} = \overline{DT} + \overline{DO}_{i+1} = V_T + V_{O_{i+1}}$$

2.4 数控编程中的数学处理

局部坐标系中的坐标求得后，还要换算成整体坐标系下的坐标，换算关系为：

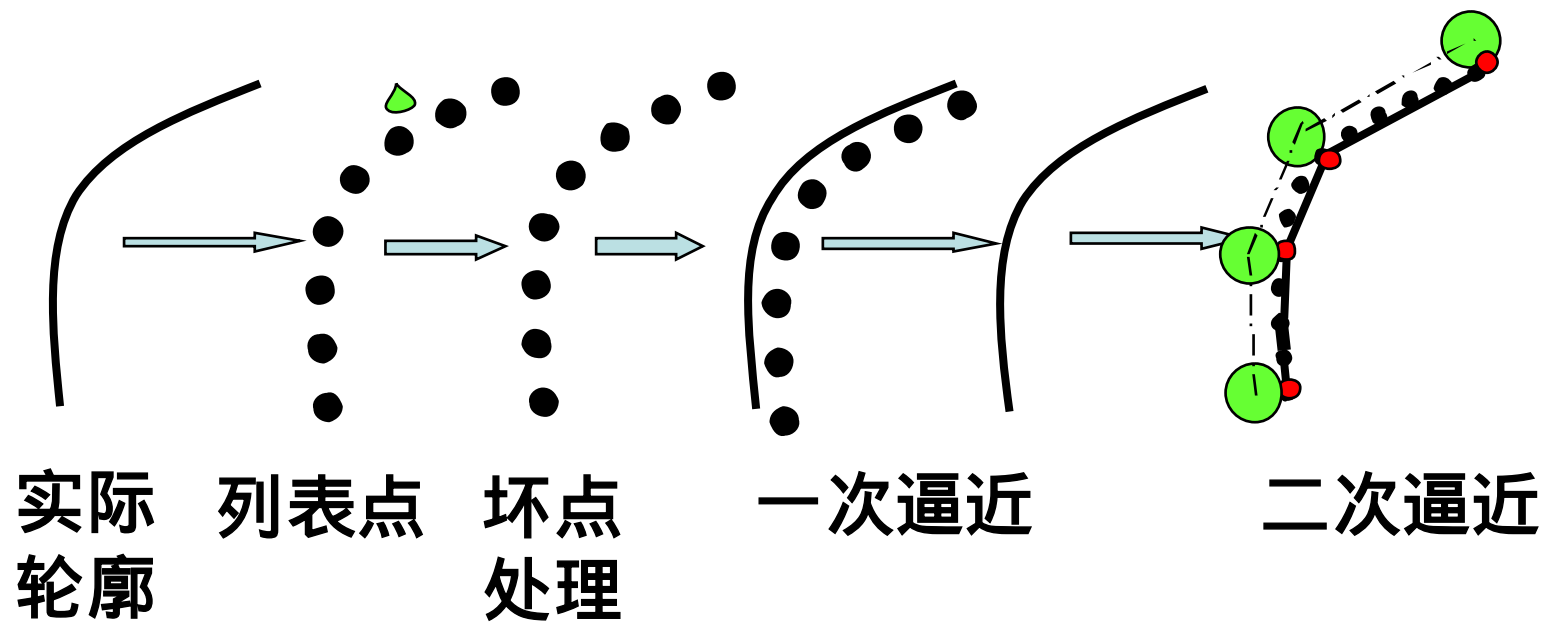


$$x_T = U_T \cos \phi_i - V_T \sin \phi_i + x_i$$

$$y_T = U_T \sin \phi_i + V_T \cos \phi_i + y_i$$

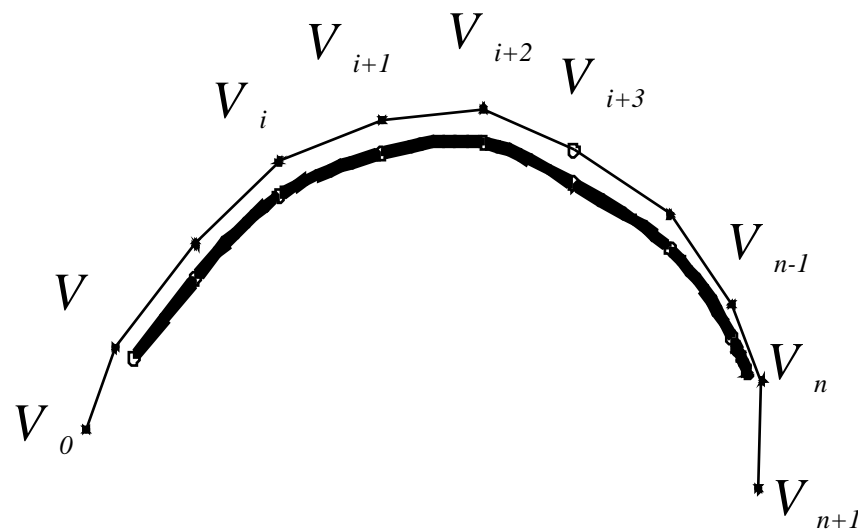
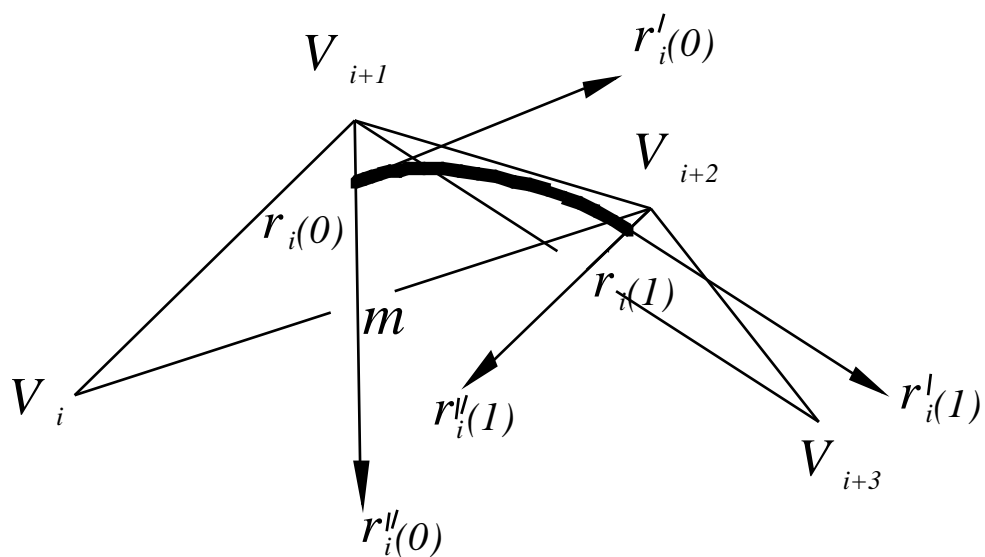
2.4 数控编程中的数学处理

列表曲线处理过程：



2.4 数控编程中的数学处理

B样条曲线拟合:



2.4 数控编程中的数学处理

三次样条曲线公式为

$$r_i(u) = \sum_{j=0}^3 N_{j,4}(u) V_{i+j}$$

式中： $N_{0,4}(u) = \frac{1}{3!}(1 - 3u + 3u^2 - u^3)$

$$N_{1,4}(u) = \frac{1}{3!}(4 - 6u^2 + 3u^3)$$

$$N_{2,4}(u) = \frac{1}{3!}(1 + 3u + 3u^2 - 3u^3)$$

$$N_{3,4}(u) = \frac{1}{3!}(u^3)$$

2.4 数控编程中的数学处理

$$r_i(0) = \frac{1}{6}(V_i + 4V_{i+1} + V_{i+2}) = V_{i+1} + \frac{1}{3}\left[\frac{1}{2}(V_i + V_{i+2}) - V_{i+1}\right]$$

$$r_i(1) = \frac{1}{6}(V_{i+1} + 4V_{i+2} + V_{i+3}) = V_{i+2} + \frac{1}{3}\left[\frac{1}{2}(V_{i+1} + V_{i+3}) - V_{i+2}\right]$$

$$r_i'(0) = \frac{1}{2}(V_{i+2} - V_i)$$

$$r_i'(1) = \frac{1}{2}(V_{i+3} - V_{i+1})$$

$$r_i''(0) = (V_{i+2} - V_{i+1}) + (V_i - V_{i+1})$$

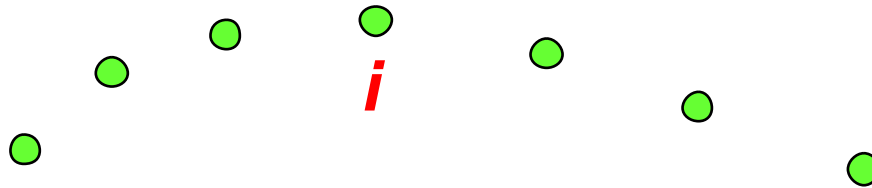
$$r_i''(1) = (V_{i+3} - V_{i+2}) + (V_{i+1} - V_{i+2})$$



2.4 数控编程中的数学处理

$$\frac{1}{6}(V_{i-1} + 4V_i + V_{i+1}) = P_i \quad (i = 0, 1, \dots, n)$$

根据端点条件补充两个方程



2.4 数控编程中的数学处理

曲面定义和曲面计算

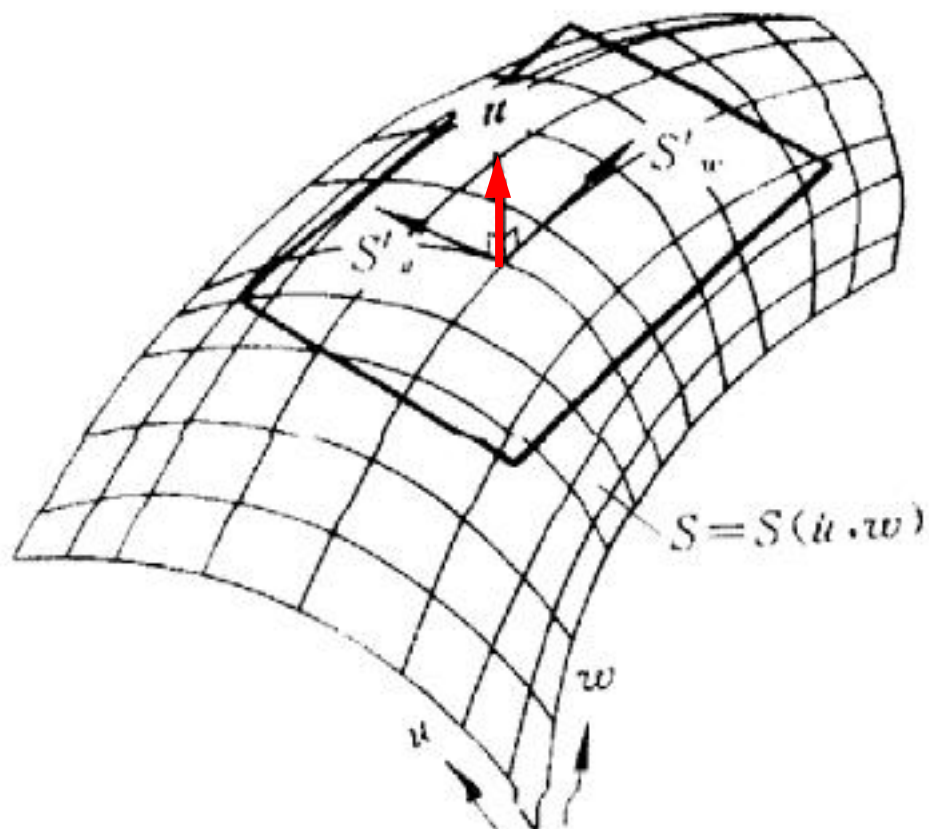
曲面定义方法

孔斯曲面法
贝齐尔曲面法
样条曲面法
NURBS曲面法



2.4 数控编程中的数学处理

由型值点坐标、边界条件



曲面方程从 $V(u, w)$

步长、行距

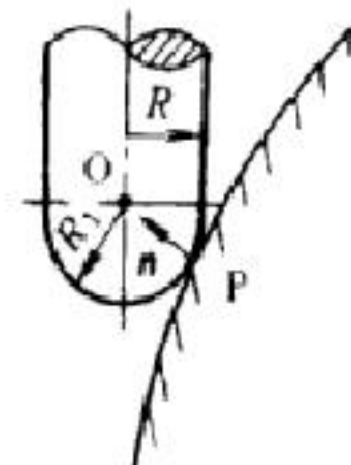
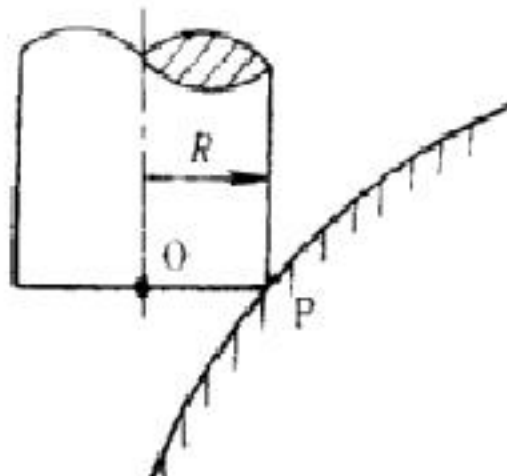
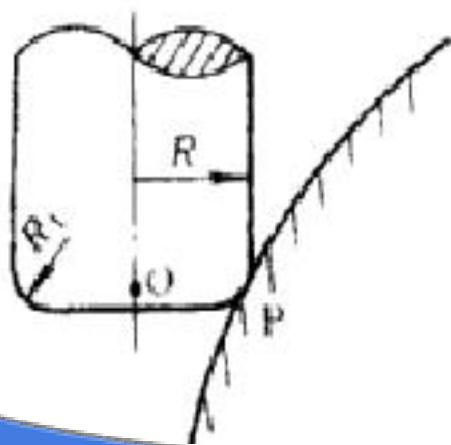
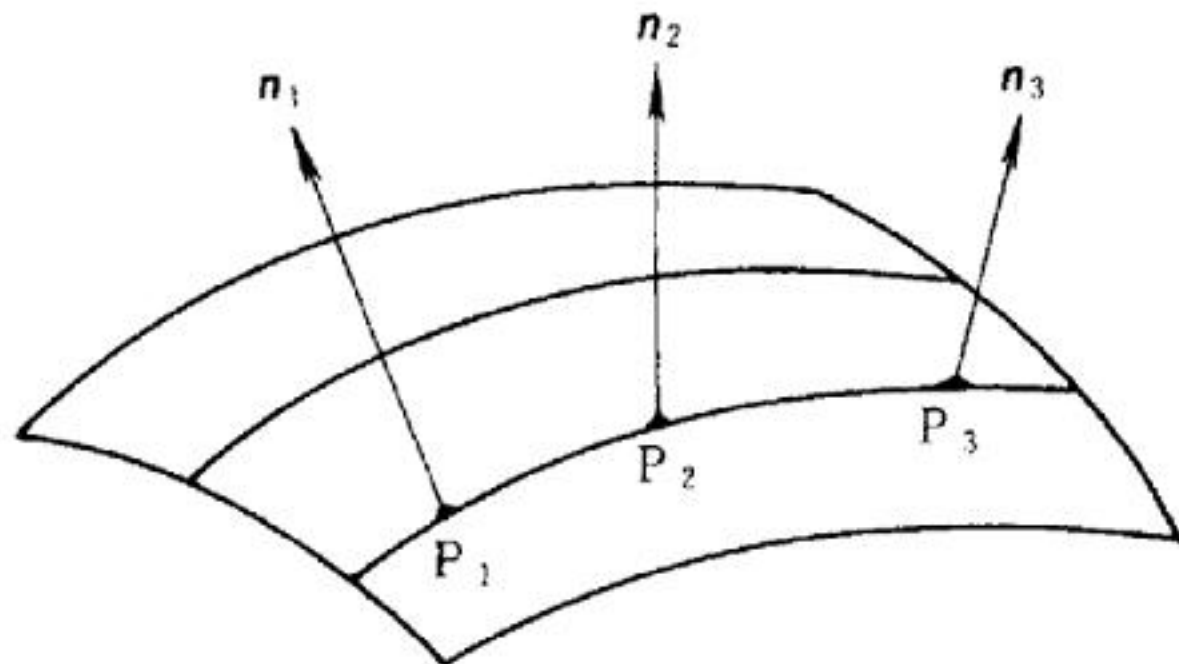
u w

$V(u, w)$

插补点坐标、切矢



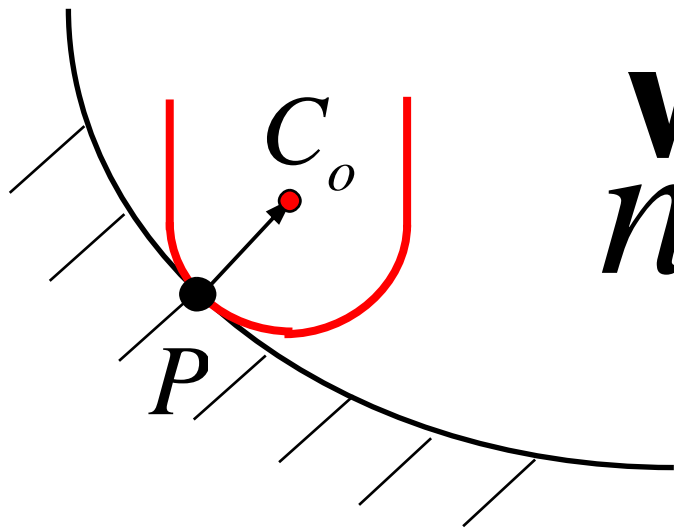
2.4 数控编程中的数学处理



2.4 数控编程中的数学处理

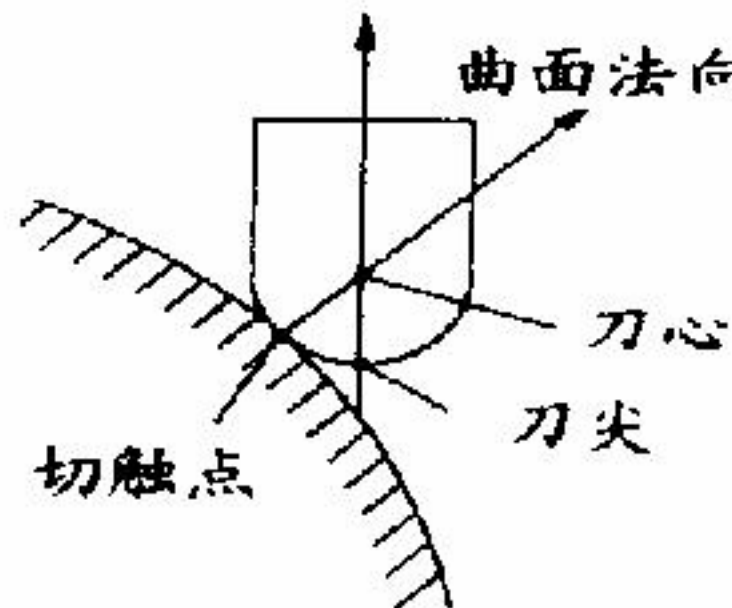
$$\mathbf{v}_{r_{c_o}} = \mathbf{v}_{r_p} + R\mathbf{n}$$

$$\mathbf{n} = s'_u \times s'_w$$



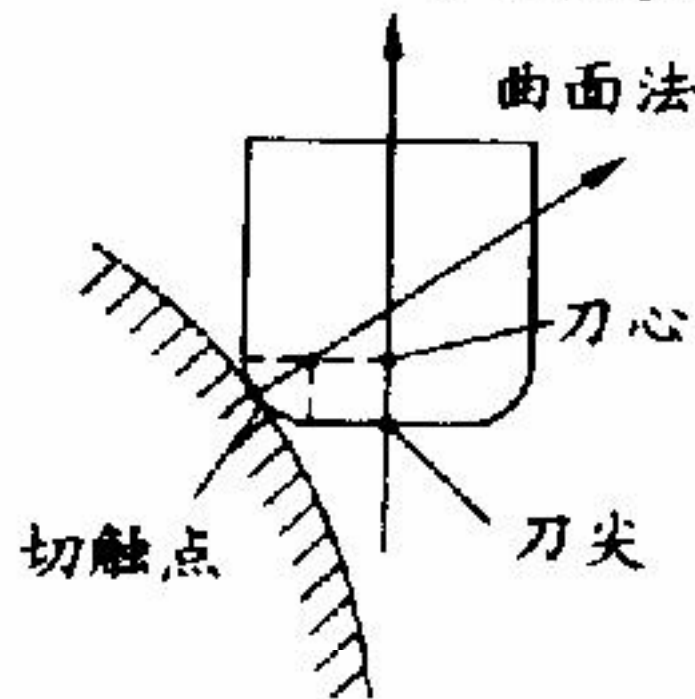
刀轴矢量

曲面法向矢量



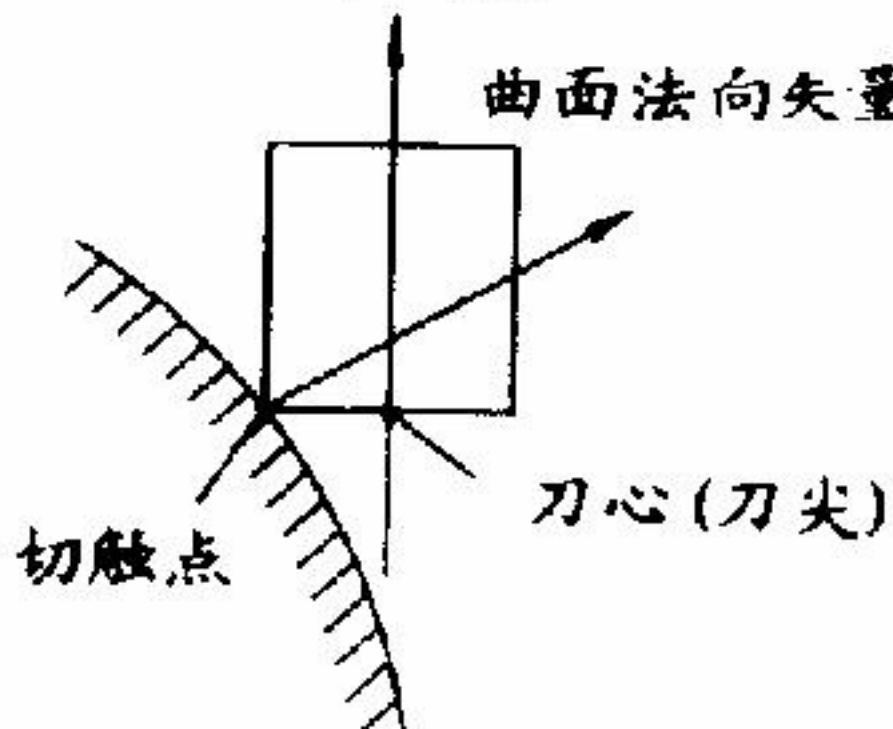
刀轴矢量

曲面法向矢量



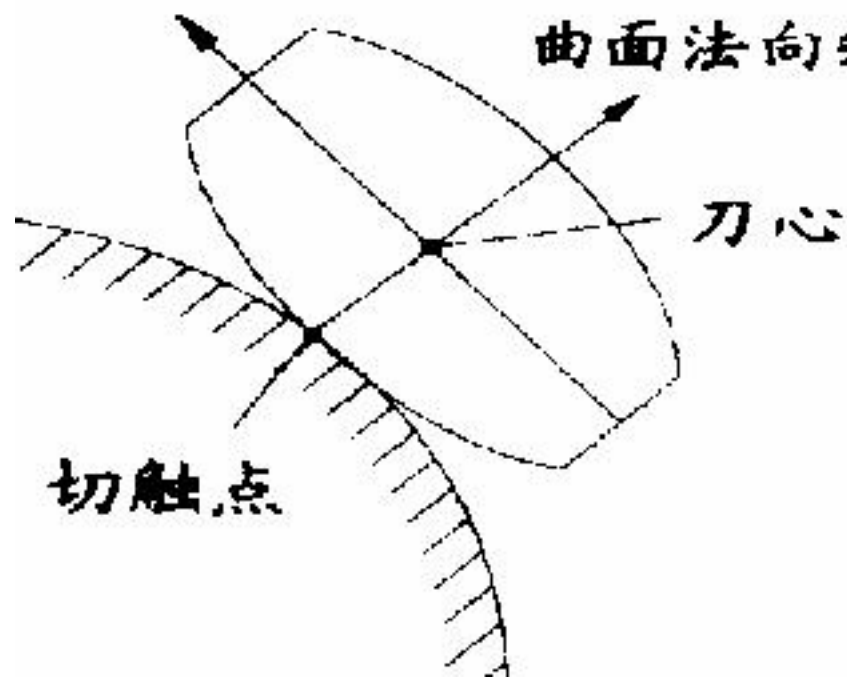
刀轴矢量

曲面法向矢量

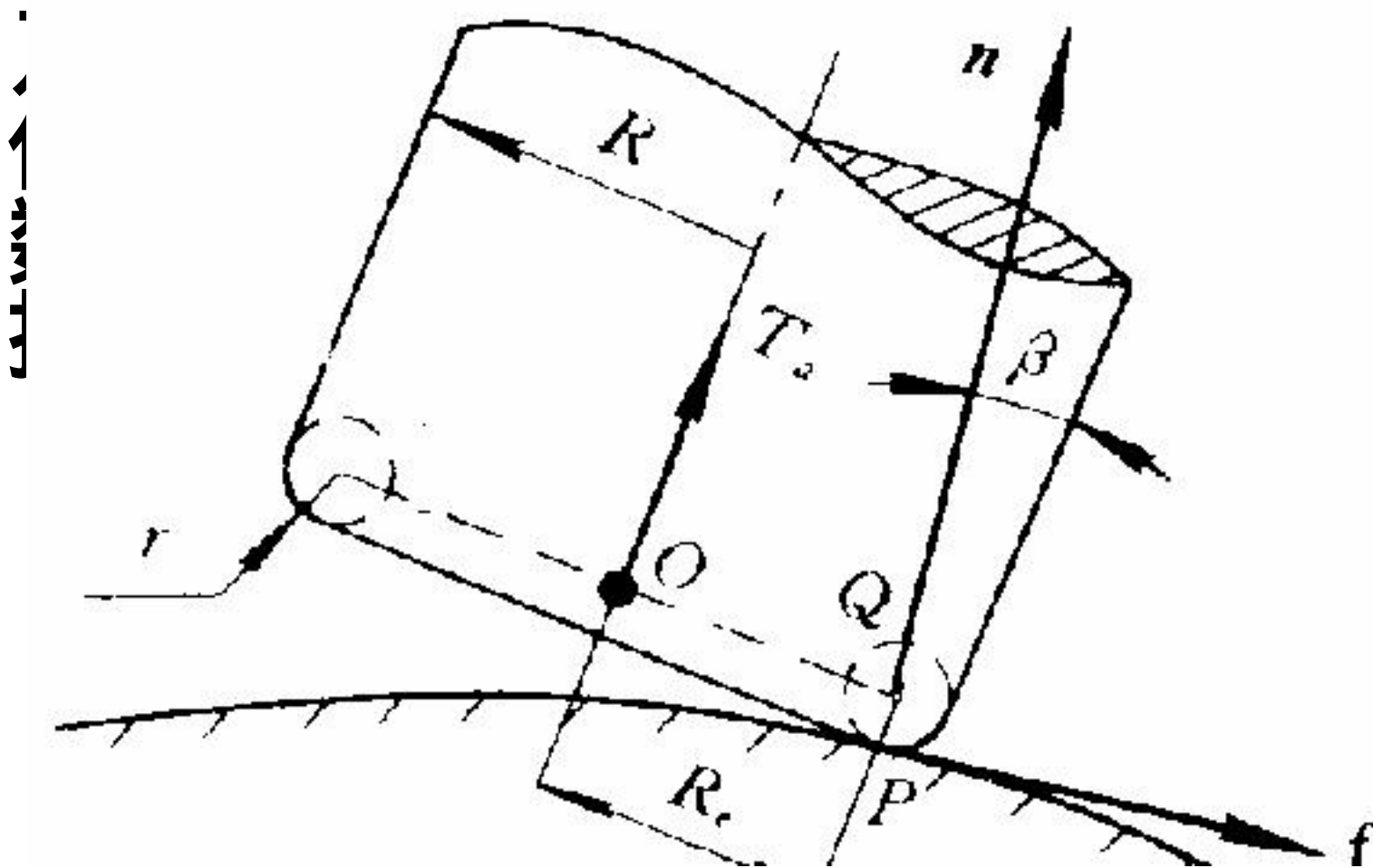


刀轴矢量

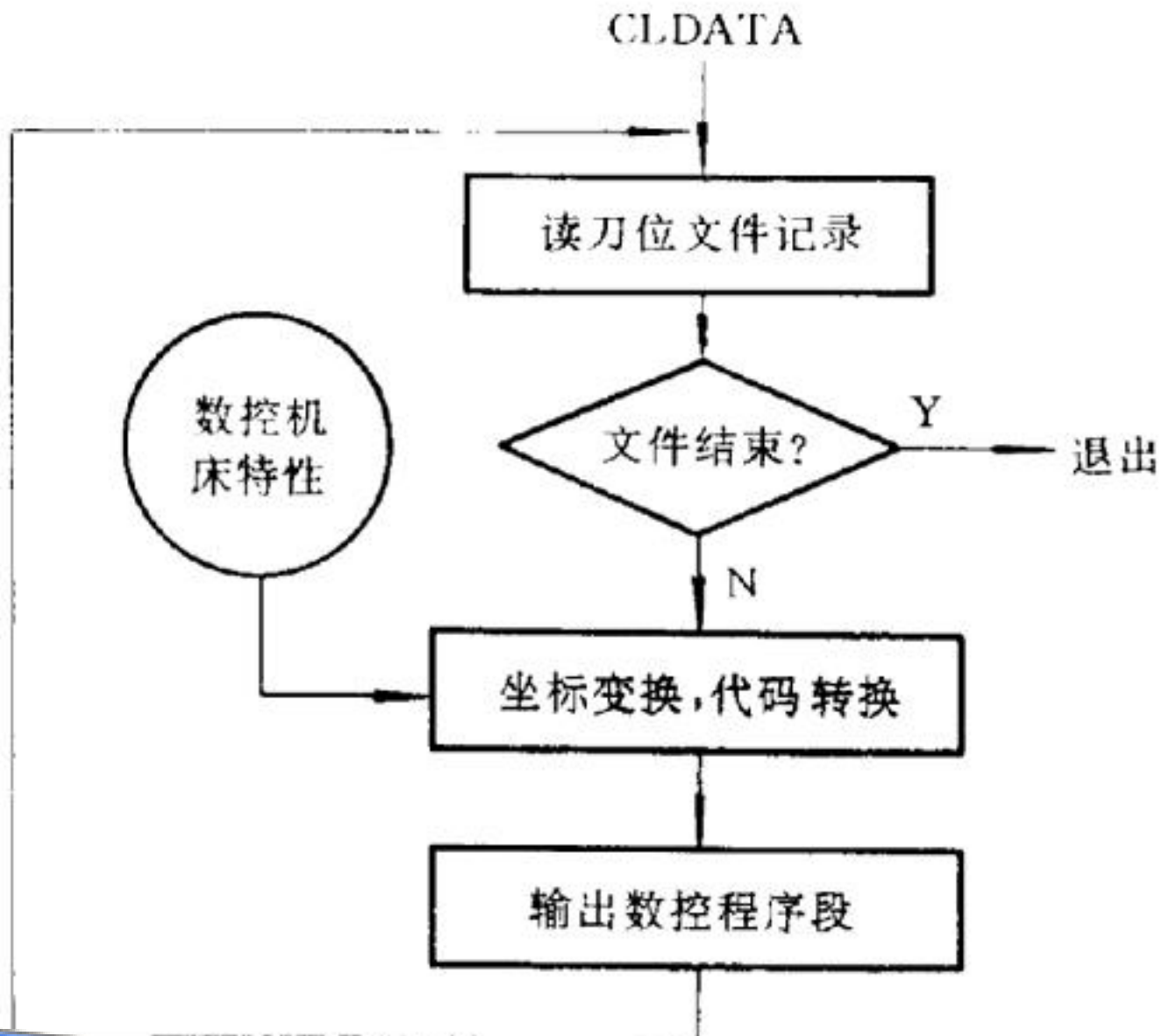
曲面法向矢量



2.4 数控编程中的数学处理



2.4 数控编程中的数学处理

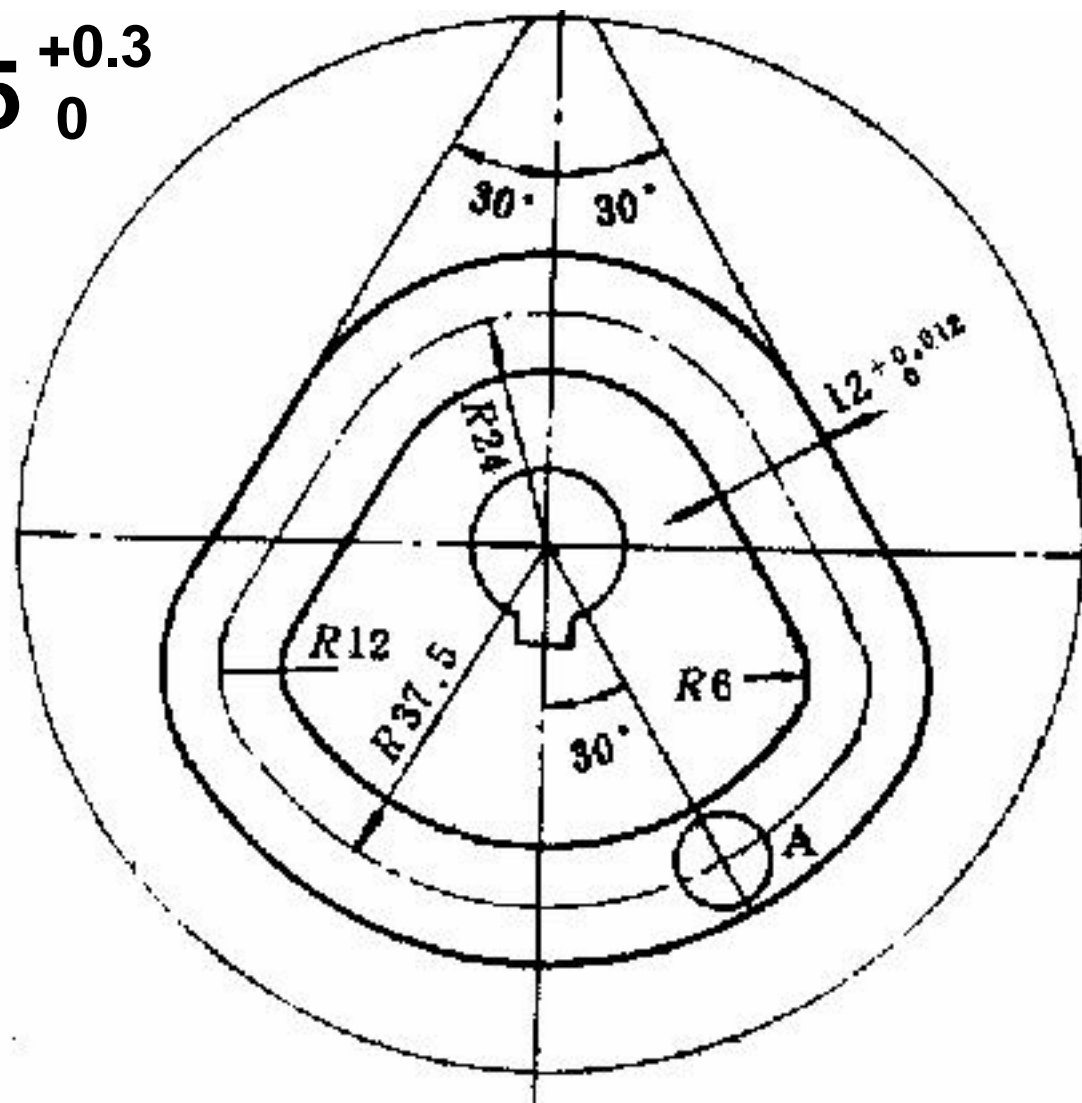


作业题一

已知槽深 $5.5^{+0.3}_0$

A为进刀孔

求中心轨迹上的基点坐标。



铣削图示零件的外形，为确保加工质量，试根据给出的条件，确定最大铣刀直径？

作业题二

