

第九章

圆柱齿轮结合的精度设计

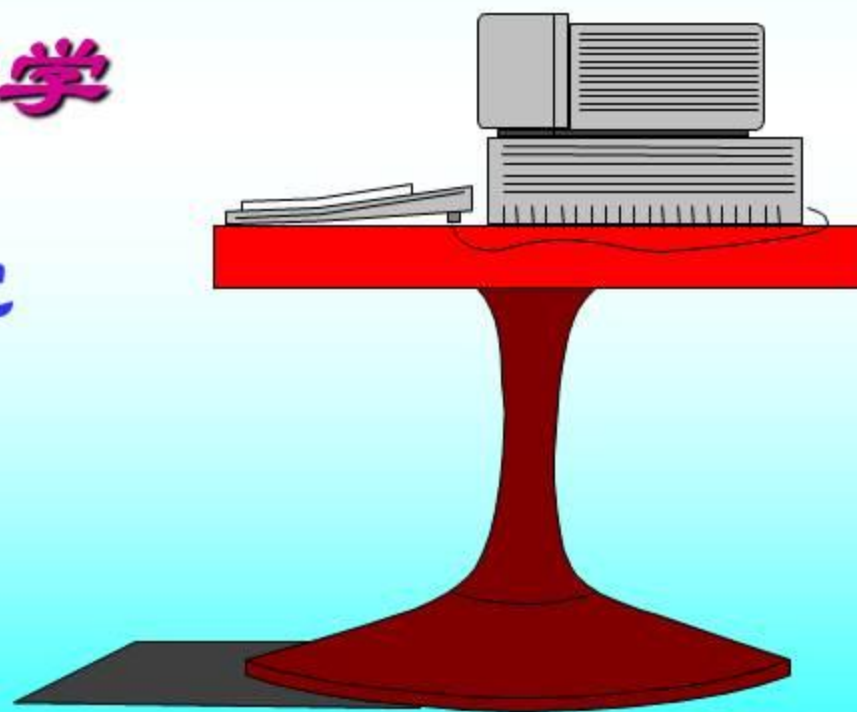
Involute Cylindrical Gear Precision Design

武汉理工大学

机电工程学院

机械设计部

张宏 制作



齿 轮 Gear

一、作用 { 传递运动和动力
改变轴的转速与转向

二、种类 { 圆柱齿轮——用于两平行轴的传动。
圆锥齿轮——用于两相交轴的传动。
蜗轮蜗杆——用于两交叉轴的传动。



圆柱齿轮



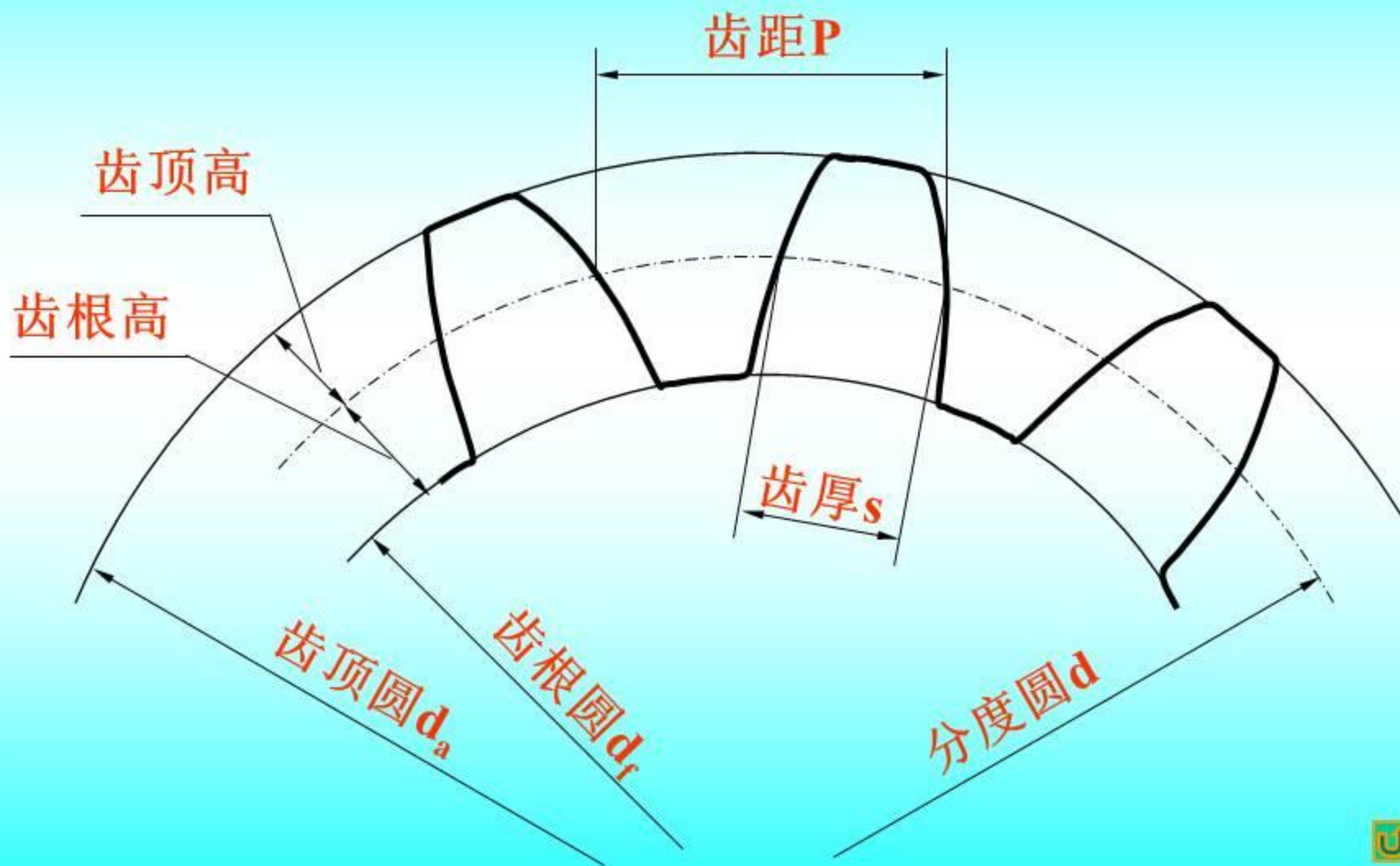
圆锥齿轮



蜗轮蜗杆

三、圆柱齿轮 Cylindrical Gear

1、圆柱齿轮各部分的名称



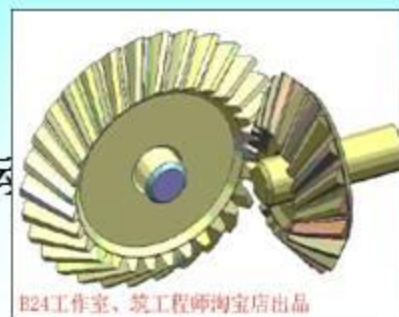
§ 9-1 、 齿轮传动的使用要求



在各种机器产品中所用齿轮，对齿轮传动的要求因用
但归纳起来主要有以下四项：

1. 传递运动的准确性 (accuracy)

要求齿轮在一转范围内，最大转角误差要尽量小，以保证从动



2. 传动的平稳性 (stability)

要求瞬时传动比的变化尽量小，以保证低噪音、低冲击和较小振动。

3. 载荷分布的均匀性 (loading distribution homogeneity)

要求齿轮啮合时齿面接触良好，若齿面接触不均匀易引起应力集中，齿由局部磨损加剧，易失效，缩短齿轮的使用寿命。



4. 传动侧隙的合理性 (backlash rationality)

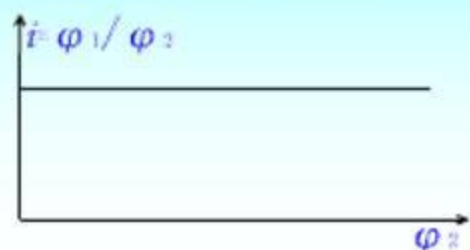
要求齿轮啮合时非工作齿面间应有一定的间隙。齿侧间隙的作用是补偿齿轮传动受力后的弹性变形、热膨胀及齿轮的加工安装误差，从而防止齿轮传动咬死和烧伤，保证齿轮自由回转并贮存润滑油。



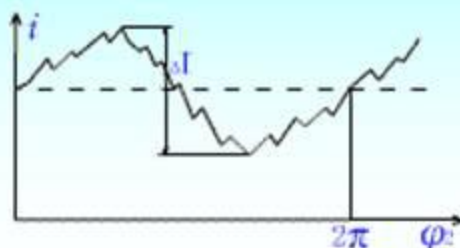
§ 9-1 齿轮传动的使用要求

一. 传递运动的准确性 accuracy

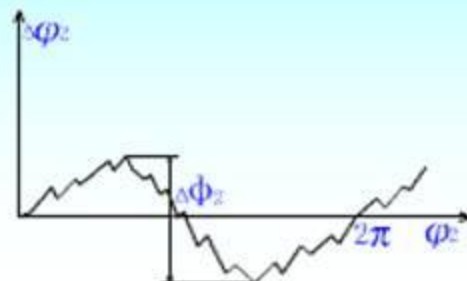
理论上:



实际上:



原因:

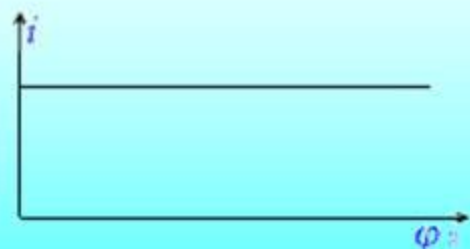


要求:

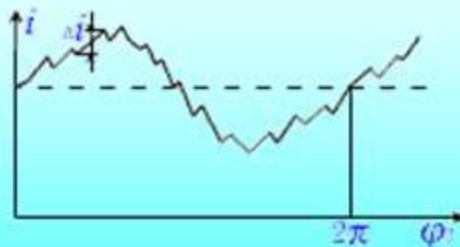
Δi 即 $\Delta\Phi_2$
尽量小

二. 传递运动的平稳性 stability

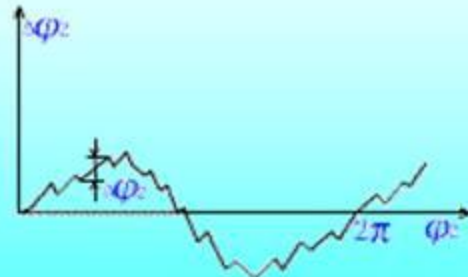
理论上:



实际上:



原因:



要求:

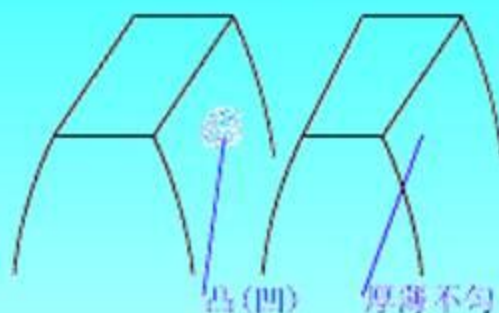
Δi 即
 $\Delta\psi_2$ 尽量小

三.载荷的均匀性 loading distribution homogeneity

理论上:齿面理想



实际上:

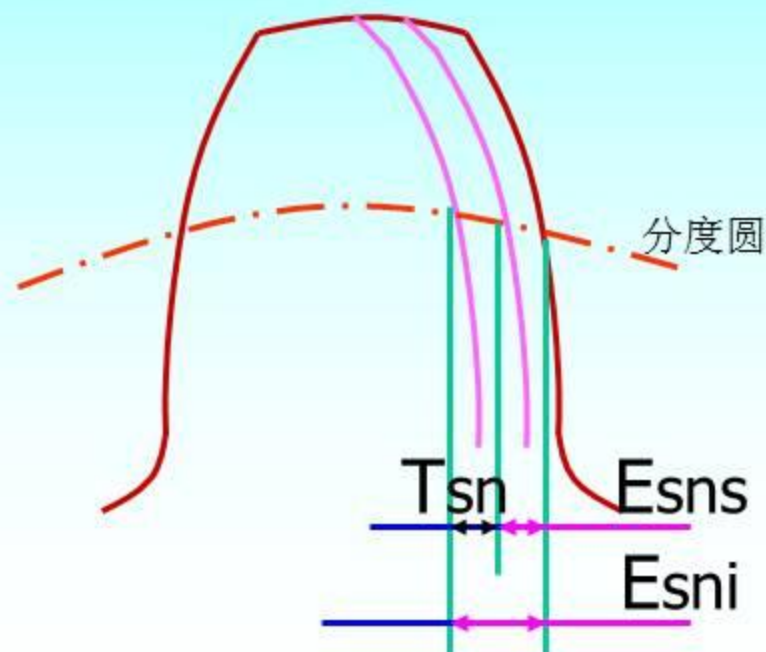


要求:

齿面误差

尽量小

四.传动侧隙的合理性 backlash rationality



根据齿轮工作条件不同而对上述四项要求的侧重点是不同的。如：

1) 测量仪器上用的读数齿轮、机床分度机构齿轮，其特点是传递运动准确性要高，负荷不大，转速不高。所以对以上第一项要求较高，且要求侧隙要小。

2) 高速动力齿轮（如高速发动机、减速器、高速机床的变速箱等设备上用的齿轮），其特点是：传递功率大，圆周速度高。所以对以上第二项要求较高。

3) 低速重载齿轮（如矿山机械、轧钢机、起重机械等设备上的低速重载齿轮），其特点是：传递动力大，模数和齿宽均较大，转速一般较低。所以对以上第三项要求较高。

对各类齿轮均要求具有一定的传动侧隙。

一、齿距偏差 circular pitch individual error



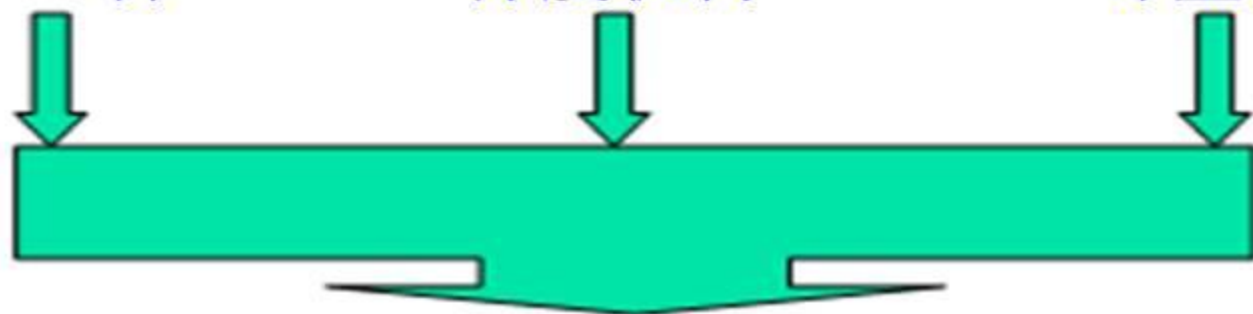
时钟



分度机构



计量表



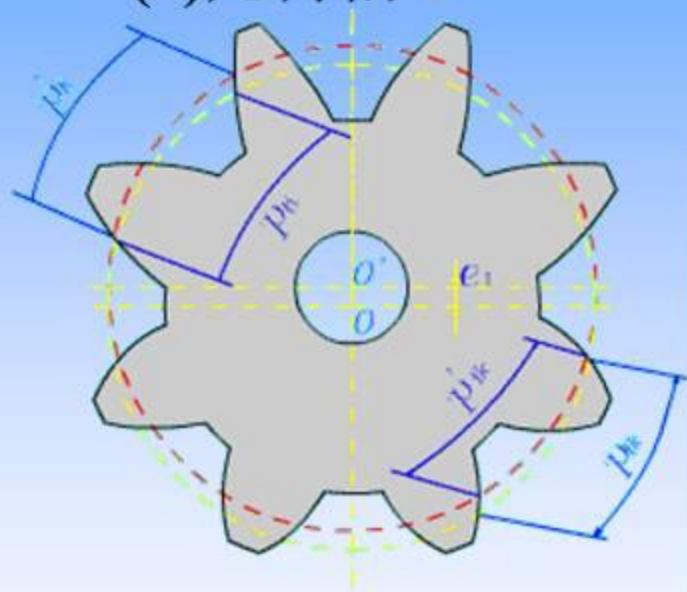
转动准确性

§ 9-2 齿轮上影响其使用要求的主要误差

一.影响传递运动的准确性 $stability$ 的主要误差

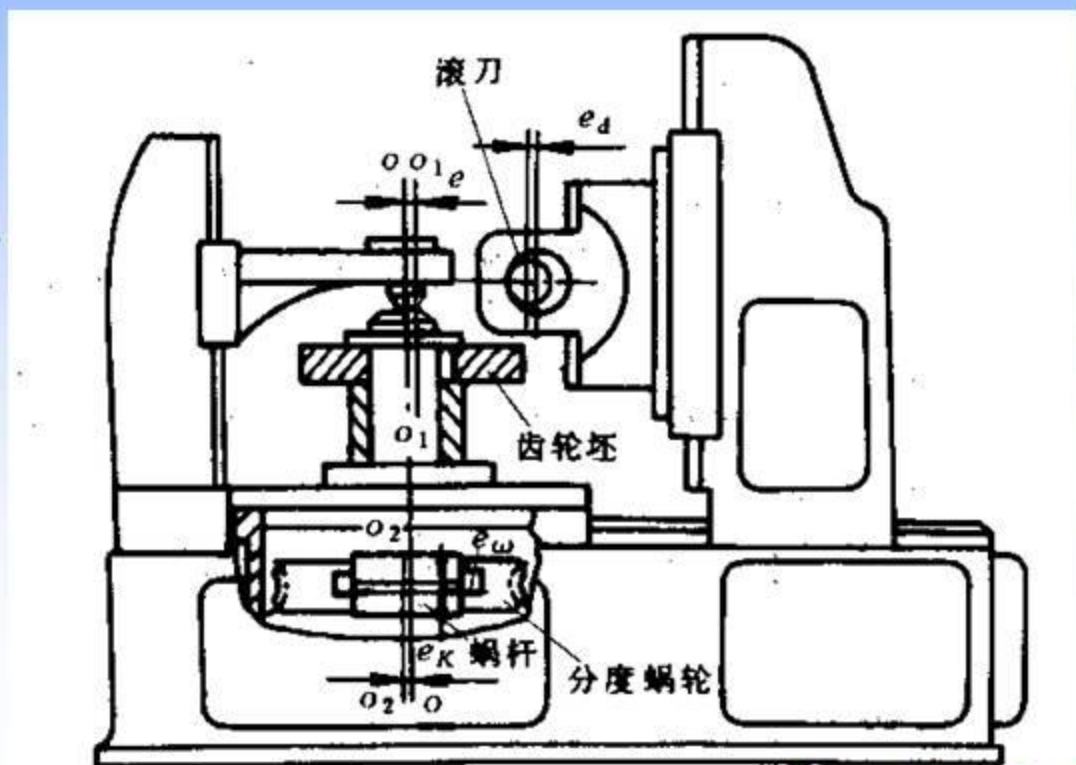
1.径向误差——几何偏心及其产生原因

(1)几何偏心



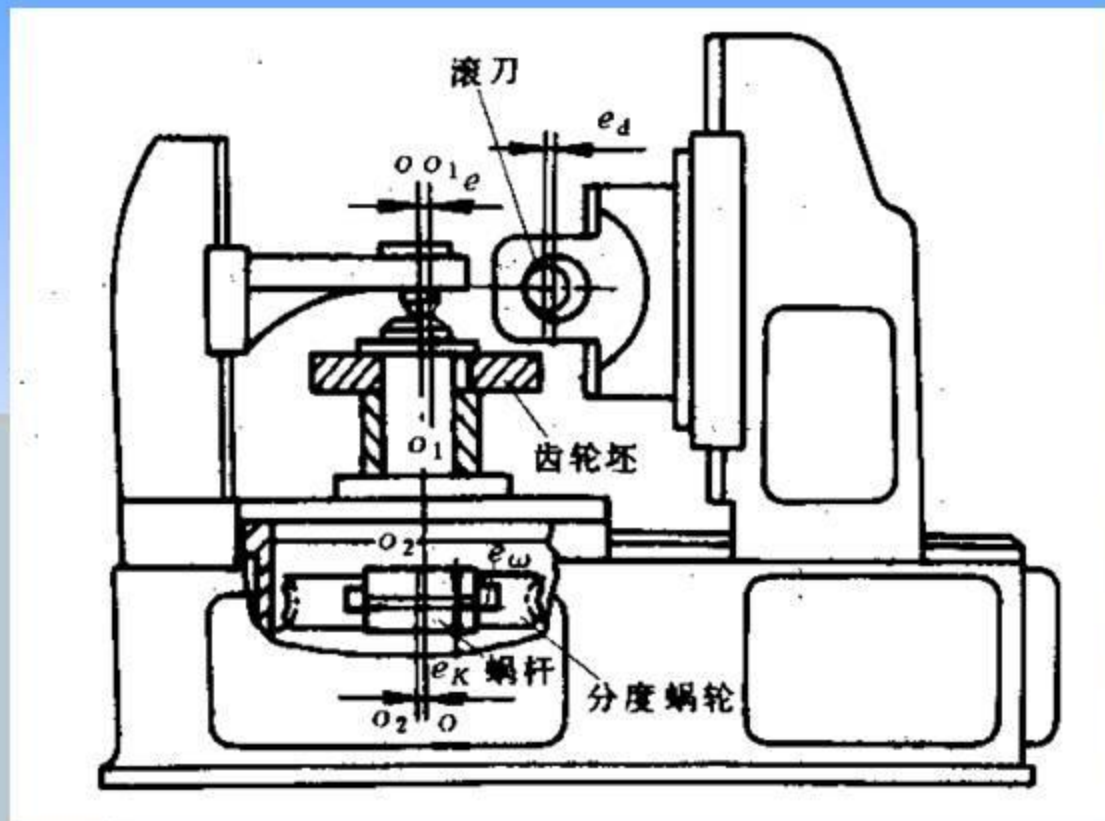
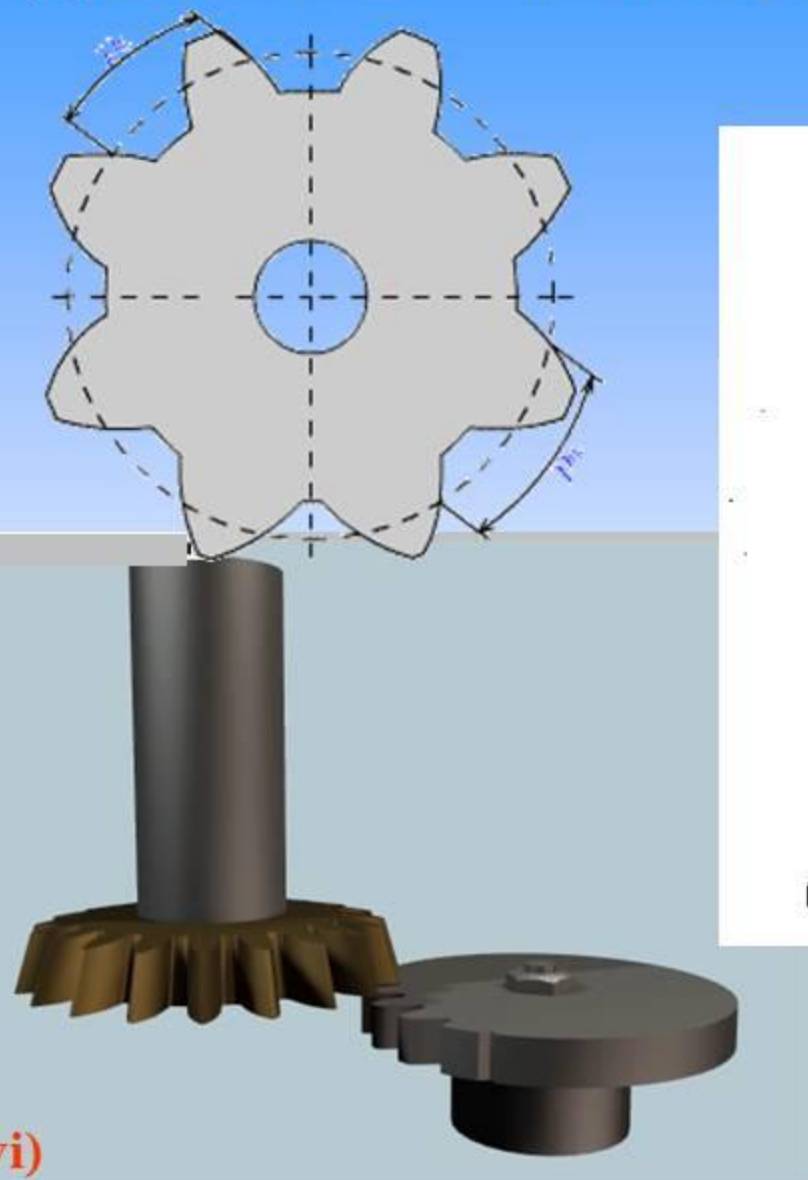
(2)产生原因

齿坯在滚齿机
上有安装偏心



2.切向误差——运动偏心及其产生原因

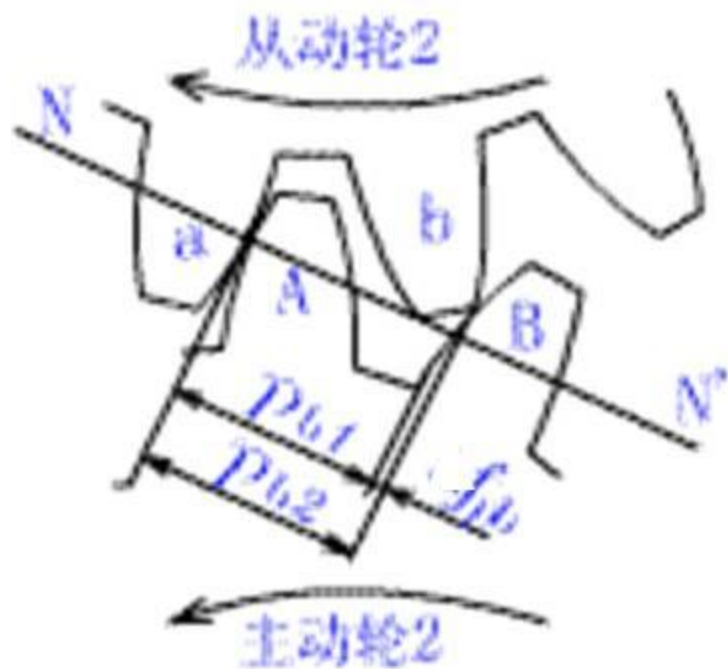
(1)运动偏心 —— 涡轮安装偏心



二.影响传递平稳性stability的主要误差

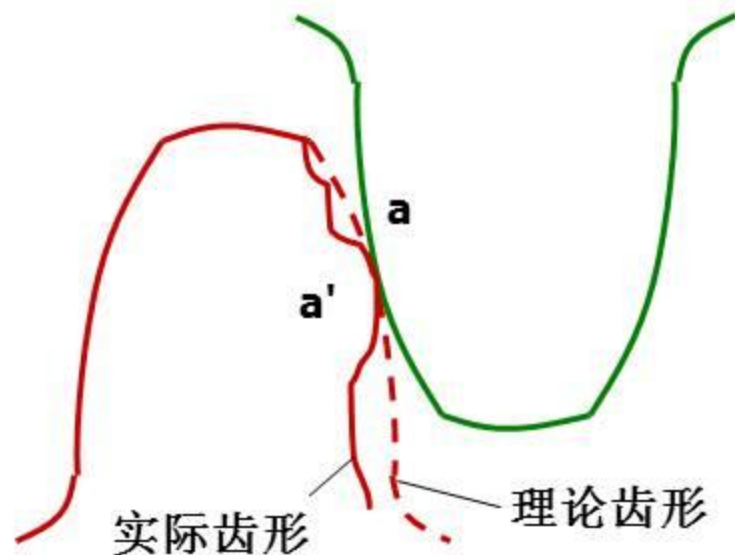


1.齿距偏差

$$\text{齿距偏差} = \text{实际齿距} - \text{公称齿距}$$


2.齿廓总偏差

齿廓总偏差是指齿轮端截面上实际齿形对渐开线的误差。



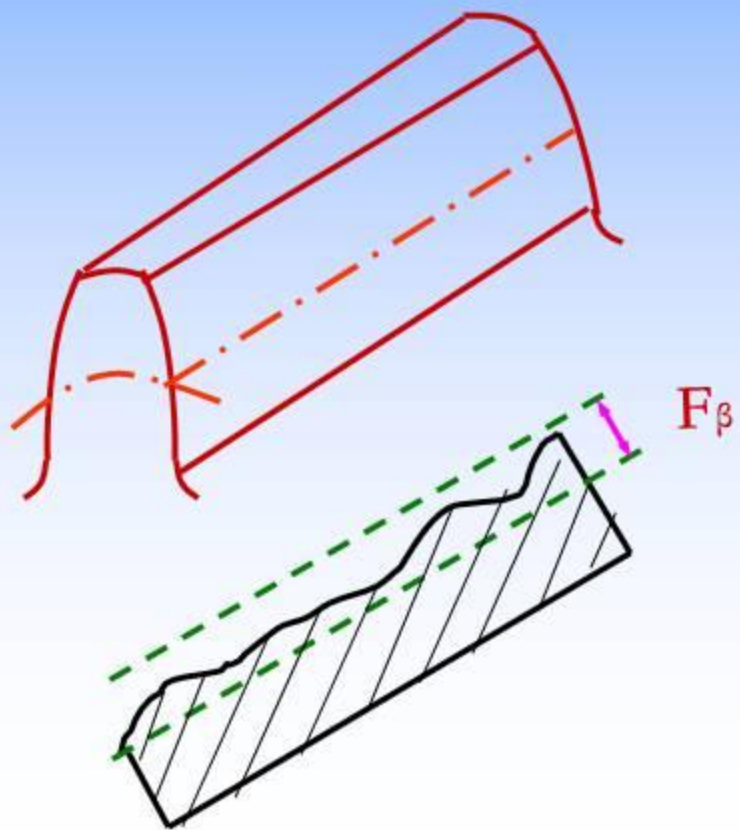
3.误差的产生原因

齿距偏差和齿廓总偏差主要来源于滚刀和分度蜗杆的制造误差。

三.影响载荷均匀性的主要误差

loading distribution homogeneity

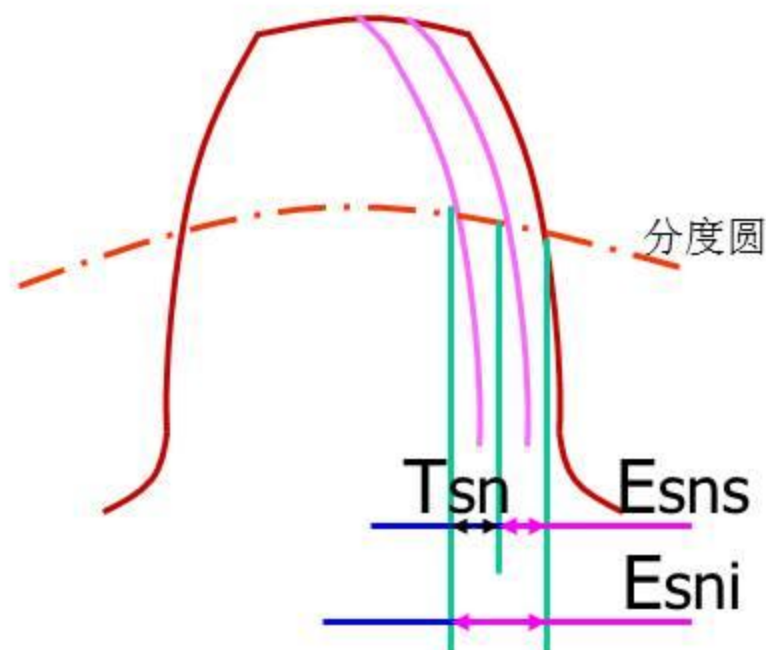
{ 齿高方向 → 齿廓总偏差
齿宽方向 → 螺旋线偏差



螺旋线偏差是指在分度圆柱面上，齿宽有效部分范围内（端部倒角部分除外）包容实际齿向线且距离最小的两条设计齿向线之间的端面距离。

四. 影响侧隙的主要误差 backlash rationality

齿厚偏差 E_{sn} 是指分度圆柱面上齿厚实际值与公称值之差。



E_{sns} 表示齿厚上偏差， E_{sni} 表示齿厚下偏差

为了保证齿轮传动侧隙，齿厚的上、下偏差均应为负值。

T_{sn} 是指齿厚偏差 E_{sn} 的最大允许变动量

§ 9-3 齿轮的强制性检测精度指标、侧隙指标及其检测

一、影响运动准确性 $accuracy$ 的偏差项目及其评定参数

1. 齿距累积总偏差 ΔF_p 及其允许值 F_p

二、影响齿轮传动平稳性 $stability$ 的偏差项目及其评定参数

- 1. 单个齿距偏差 Δf_{pt} 及其允许值 $\pm f_{pt}$
- 2. 齿廓总偏差 ΔF_α 及其允许值 F_α

三、影响载荷分布均匀性 $loading\ distribution\ homogeneity$ 的偏差项目及其评定参数

螺旋线总偏差 ΔF_β 及其允许值 F_β

四、影响侧隙 $backlash\ rationality$ 的偏差项目及其评定参数

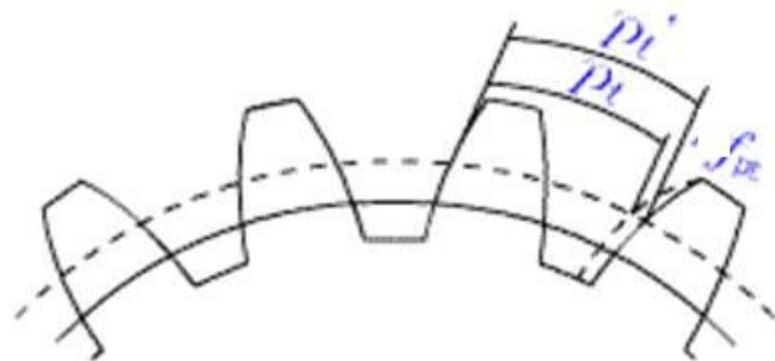
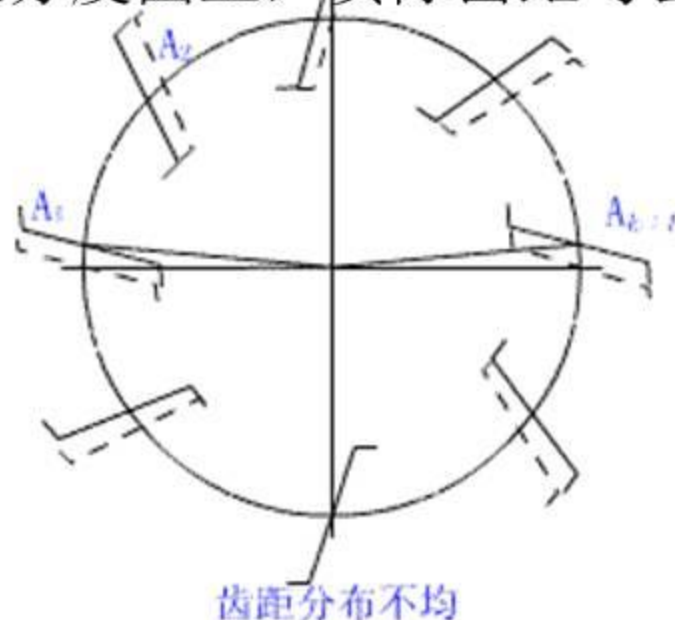
- 1. 齿厚上偏差 E_{sns} 和下偏差 E_{sni} 与齿厚公差 T_{sn}
- 2. 公法线长度上偏差 E_{ws} 和下偏差 E_{wi}



1、齿距累积总偏差 F_p 和单个齿距偏差 f_{pt} 及其检测

齿距累积总偏差 F_p (total cumulative pitch error)——指在齿轮分度圆上任意两个同侧齿面的实际弧长与公称弧长的误差值中的最大绝对值，对测得值进行数据处理得到。

单个齿距偏差 f_{pt} (circular pitch individual error)——指在分度圆上，实际齿距与公称齿距之差。



齿距偏差

1. 分度圆 2. 实际齿面 3. 公称齿面 4. 被测齿轮

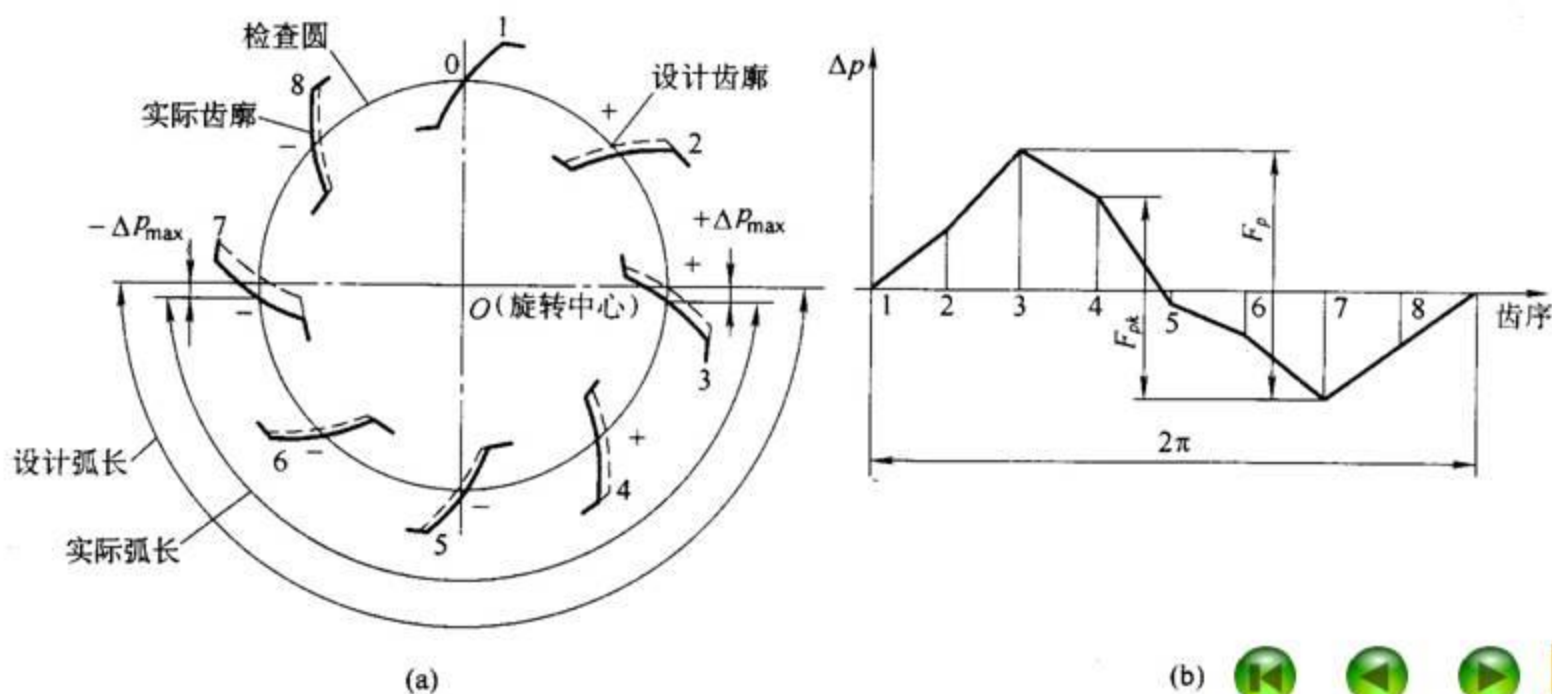
$A_1 A_{k+1}$ — K 个齿距的实际弧长 P_t —公称齿距 P_t' —实际齿距



1、齿距累积总偏差 F_p 和单个齿距偏差 f_{pt} 及其检测

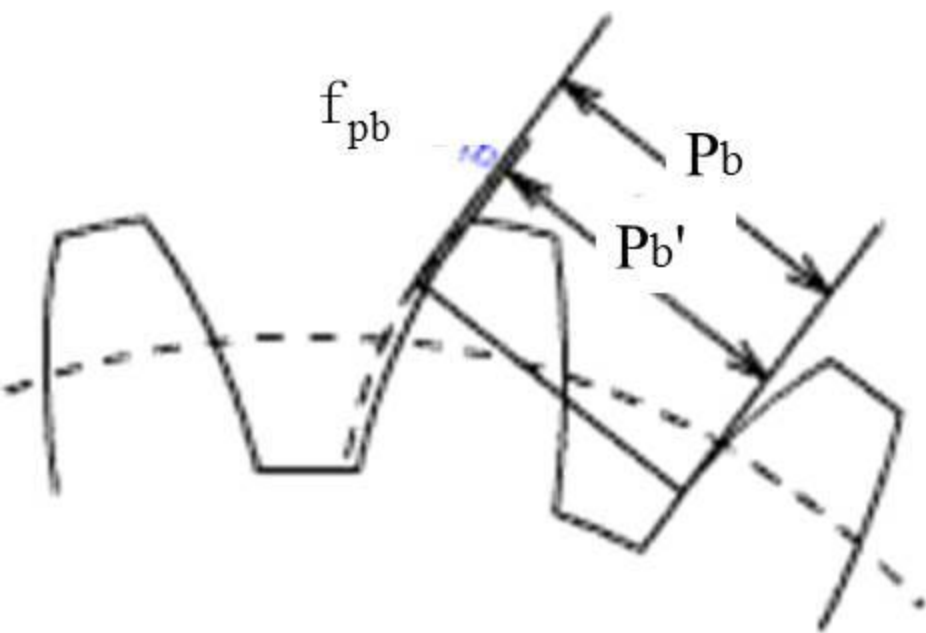
齿距累积总偏差 F_p ——指在齿轮分度圆上任意两个同侧齿面的实际弧长与公称弧长的误差值中的最大绝对值，对测得值进行数据处理得到。

单个齿距偏差 f_{pt} ——指在分度圆上，实际齿距与公称齿距之差。



2、基圆齿距偏差 f_{pb} 及其检测

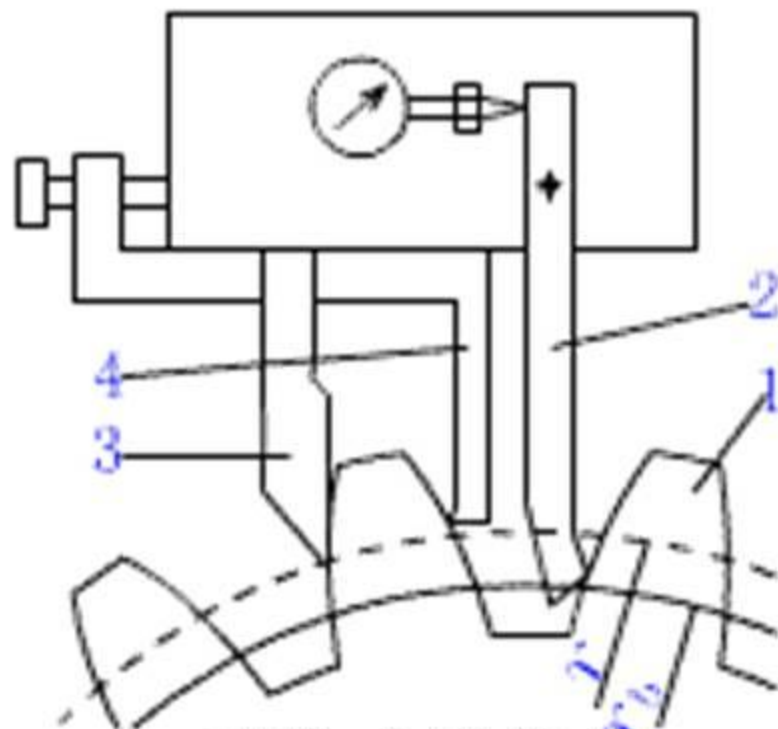
f_{pb} ——是指实际基节与公称基节之差。



基节偏差

P_b ——公称基节； P_b' ——实际基节

$$f_{pb} = P_b' - P_b$$



手持式基节仪

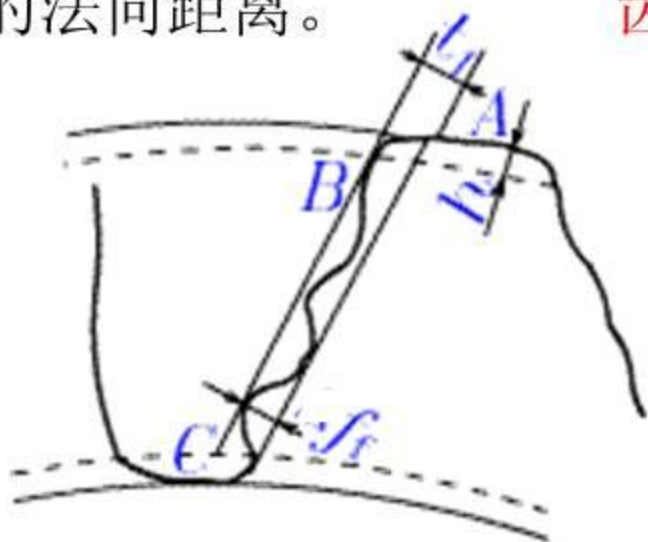
1——被测齿轮；2——活动测爪

3——固定测爪；4——支脚

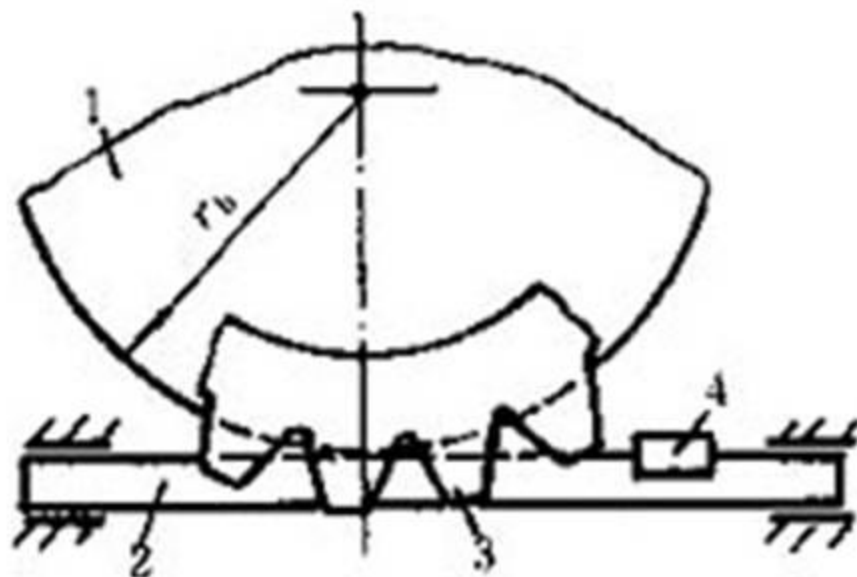
3、齿廓总偏差 F_α 及其检测

齿廓总偏差 F_α ——齿轮端截面上，齿形工作部分内(齿顶倒棱部分除外)，包括实际齿形且距离为最小的两条设计齿形间的法向距离。

齿形误差 total profile error



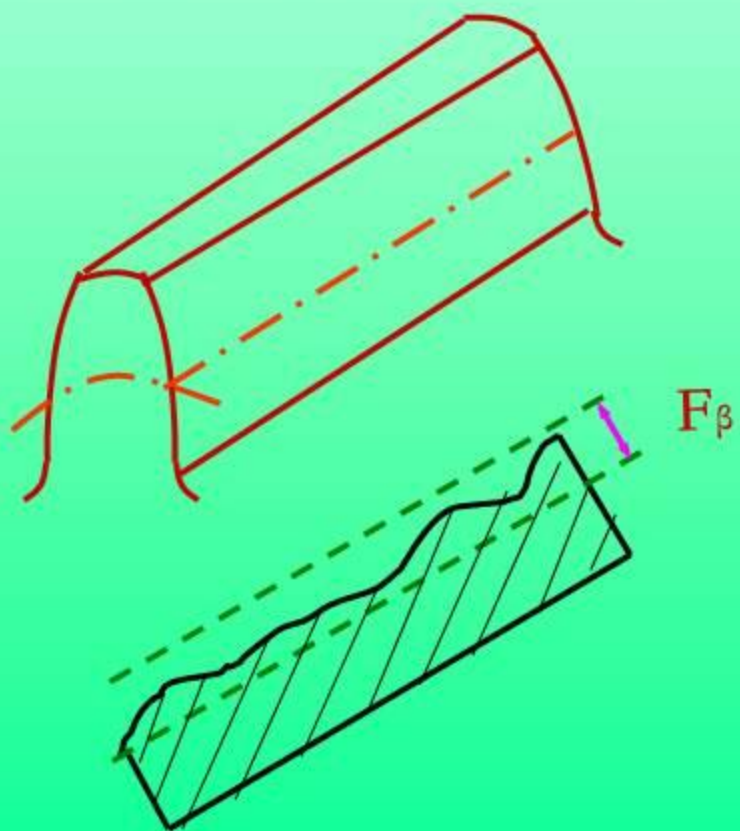
AB—倒棱部分;
h—倒棱高度
t—倒棱深度;
BC—工作部分



基圆盘式渐开线测量仪

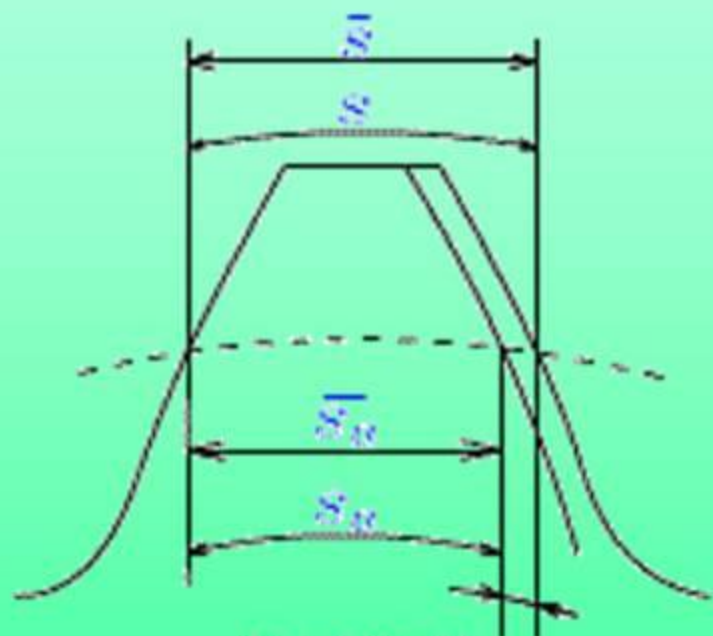
4、螺旋线总偏差 F_{β} 及其检测

F_{β} ——是指在分度圆柱面上，齿宽有效部分范围内（端部倒角部分除外）包容实际齿向线且距离最小的两条设计齿向线之间的端面距离。齿向误差 total alignment error



5、齿厚偏差(E_{sn})及其检测

E_{sn} ——是指分度圆柱面上齿厚实际值与公称值之差。

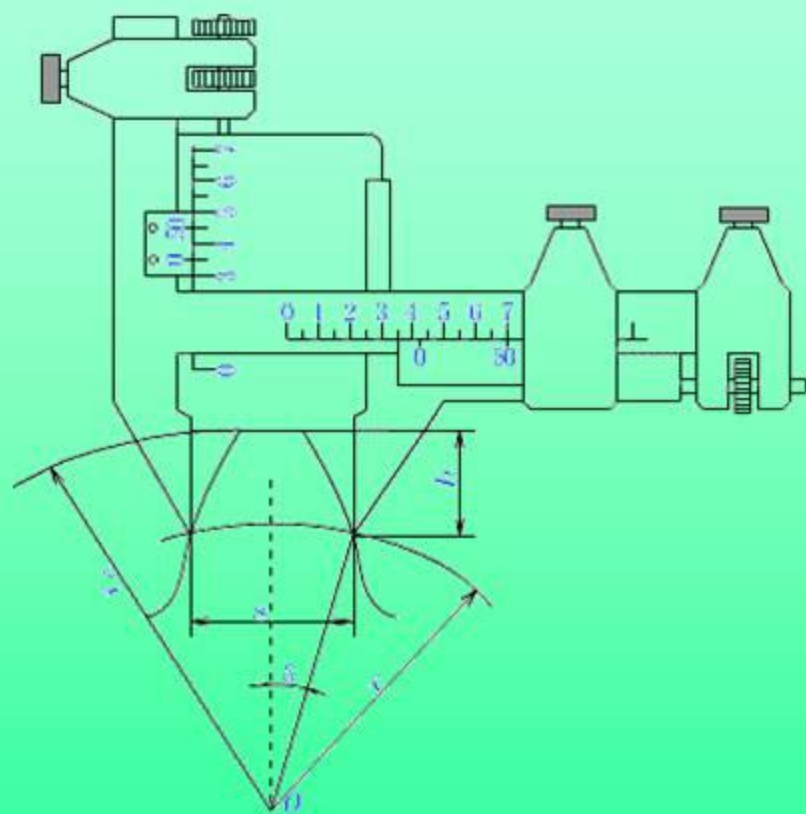


齿厚偏差

S ——公称齿厚；

S_a ——实际齿厚

$$E_{sn} = S_a - S \approx S_a - S$$

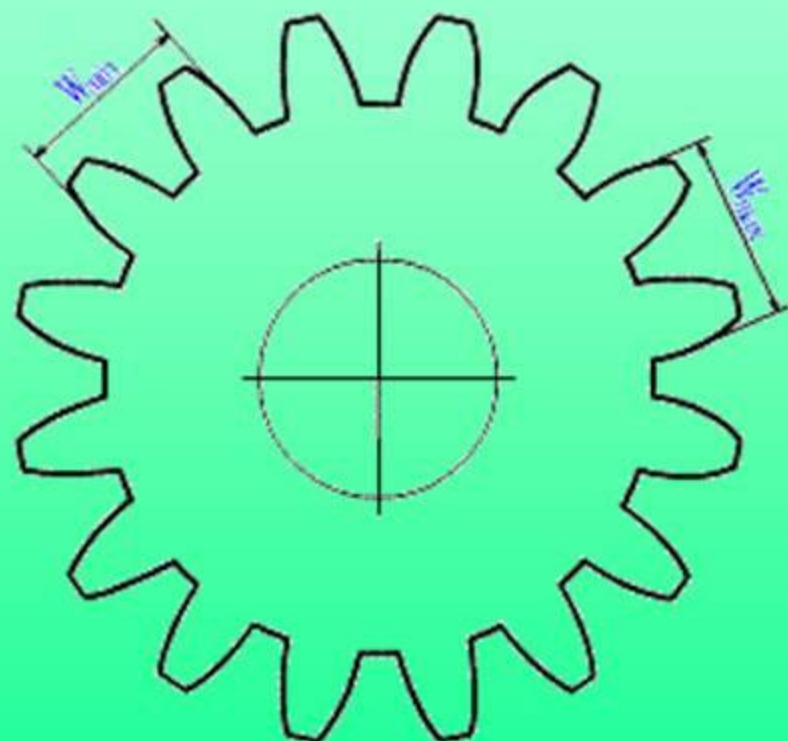


分度圆弦齿厚的测量

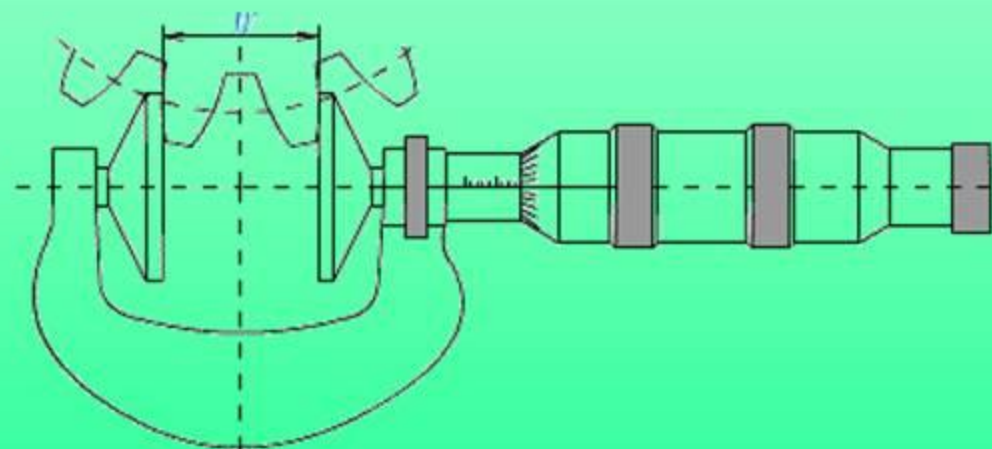
6、 公法线长度偏差 E_{wm} 及其检测

E_{wm} —— 是指在齿轮一周内，公法线长度平均值与公称值之差。

$$E_{wm} = (W_1 + W_2 + \dots + W_n) / Z - W_{\text{公称}}$$



公法线长度变动



用公法线千分尺测量公法线长度

小结：进行圆柱齿轮精度设计时，为了其三项精度和适当的侧隙需要，一般标注下列的公差和极限偏差：

- 齿轮齿距累积总偏差 ΔF_p 的允许值 F_p
- 齿轮单个齿距偏差 Δf_{pt} 的允许值（极限偏差） $\pm f_{pt}$
- 齿轮齿廓总偏差 ΔF_α 的允许值 F_α
- 齿轮螺旋线总偏差 ΔF_β 的允许值 F_β
- 齿轮跨齿数 k ，公称公法线长度及其上、下偏差

$$W_{E_{wi}}^{E_{ws}}$$

§ 9-4 评定齿轮精度时可采用的非强制性检测 精度指标

在加工一批齿轮经检测合格后，在工艺条件不变的情况下，继续加工时，可以采用下列的精度指标。

一、影响运动准确性 $accuracy$ 的偏差项目及其评定参数

- 1. 切向综合总偏差 $\Delta F_i'$ 及其允许值 F_i'
- 2. 径向综合总偏差 $\Delta F_i''$ 及其允许值 F_i''
- 3. 径向跳动 ΔF_r 及其允许值 F_r

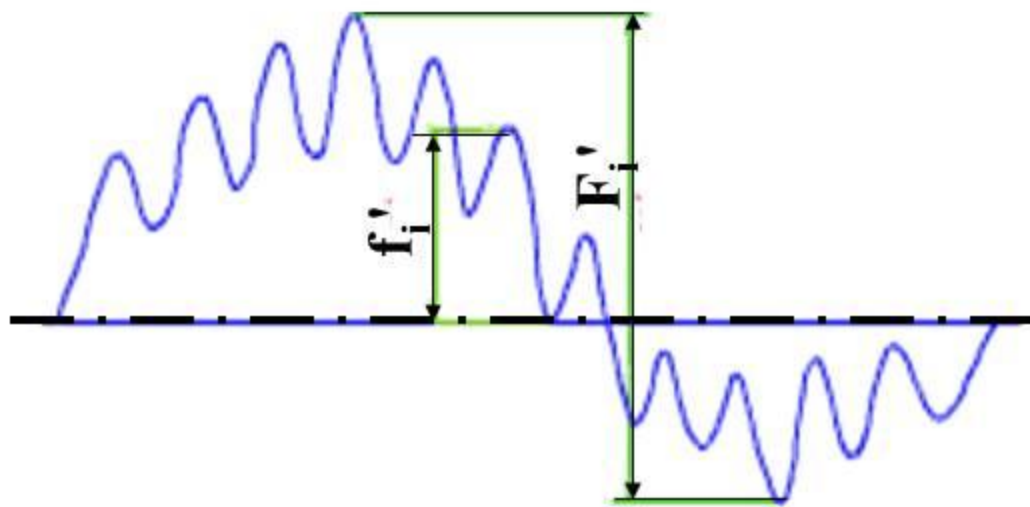
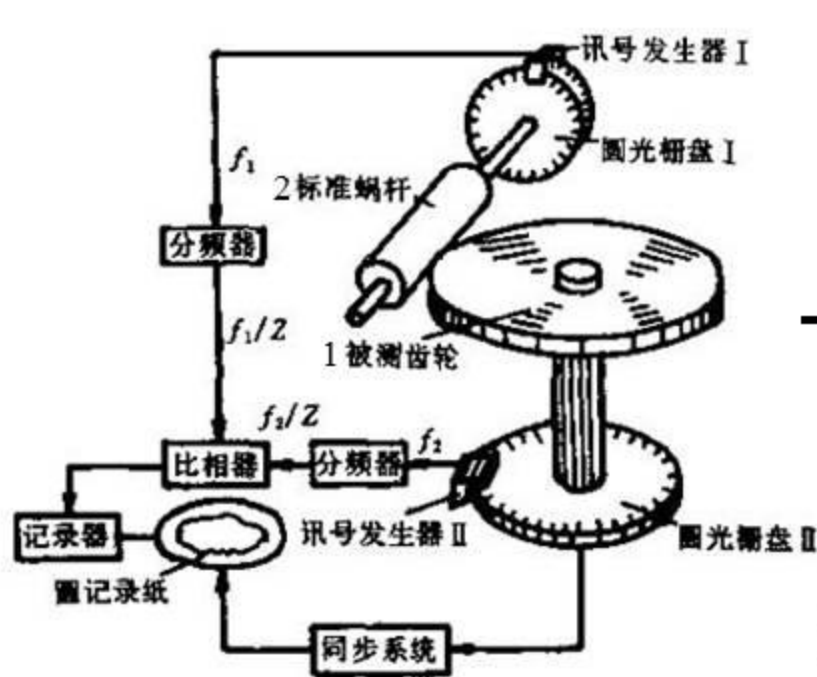
二、影响齿轮传动平稳性 $stability$ 的偏差项目及其评定参数

- 1. 一齿切向综合偏差 $\Delta f_i'$ 及其允许值 f_i'
- 2. 一齿径向综合偏差 $\Delta f_i''$ 及其允许值 f_i''

1、切向综合总偏差 F_i' 和一齿切向综合偏差 f_i' 及其检测

F_i' ——指被测齿轮与理想精确的测量齿轮单面啮合时，在被测齿轮一转内，实际转角与公称转角之差的总幅度值。

f_i' ——指被测齿轮与理想精确的测量齿轮单面啮合时，在被测齿轮一齿距角内实际转角与公称转角之差的最大幅度值。



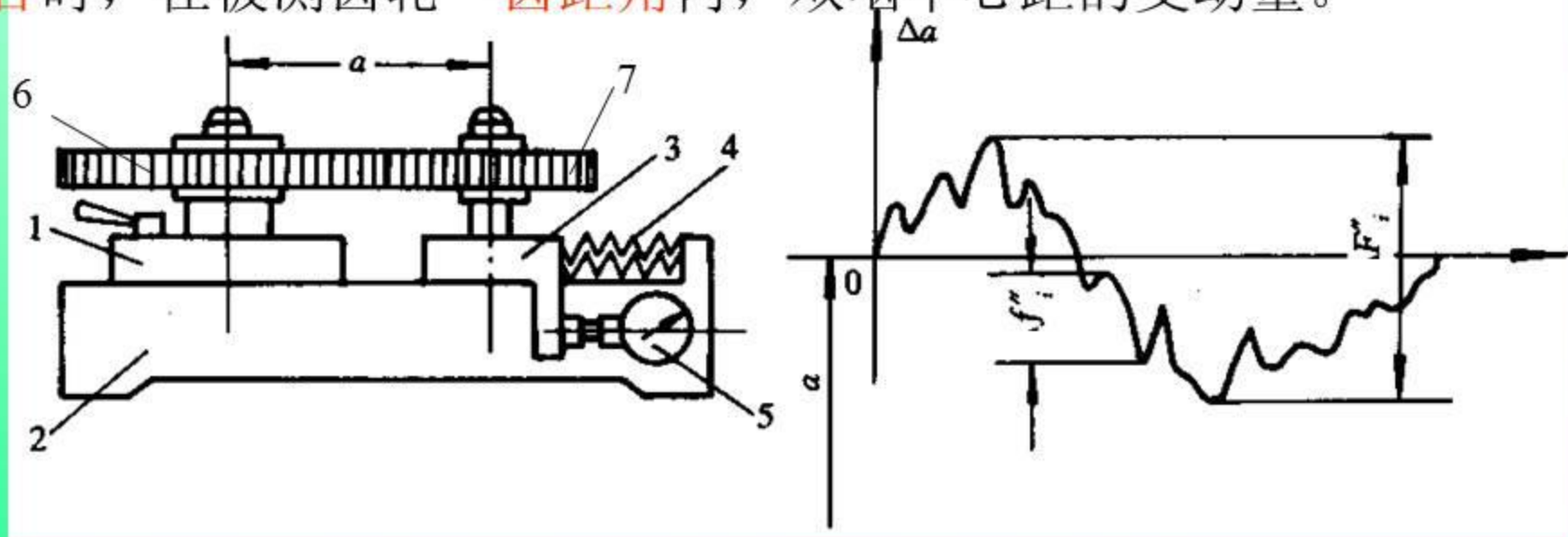
1—被测齿轮；2—测量齿轮(理想)；
3、4—摩擦盘(圆盘)

图 9-2 光栅式单面啮合综合测量仪原理图

2、径向综合总偏差 F_i'' 和一齿径向综合偏差 f_i'' 及其检测

F_i'' ——是指被测齿轮与理想精确的测量齿轮双面啮合时，在被测齿轮一转中，双啮中心距变动中的最大值与最小值之差。

f_i'' ——是指被测齿轮与理想精确的测量齿轮双面啮合时，在被测齿轮一齿距角内，双啮中心距的变动量。



1—固定滑板；2—底座；3—移动滑板；4—弹簧；
5—指示表；6—被测齿轮；7—测量齿轮

3、径向跳动 F_r (radial run-out of gear)及其检测

F_r ——是指齿轮一转范围内，测头在齿槽内与齿高中部的位置双面接触，测头相对于齿轮基准线的径向位移变动量。

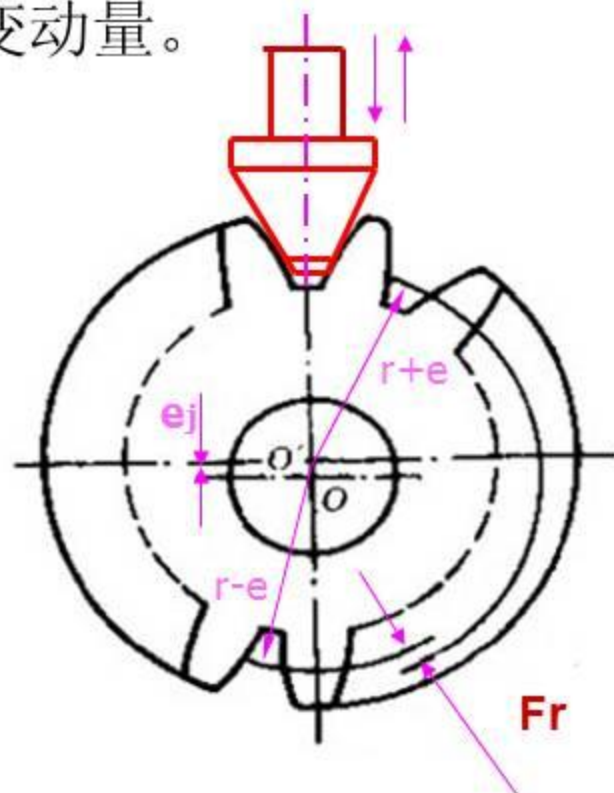


图9-8 几何偏心 e_j 产生 F_r

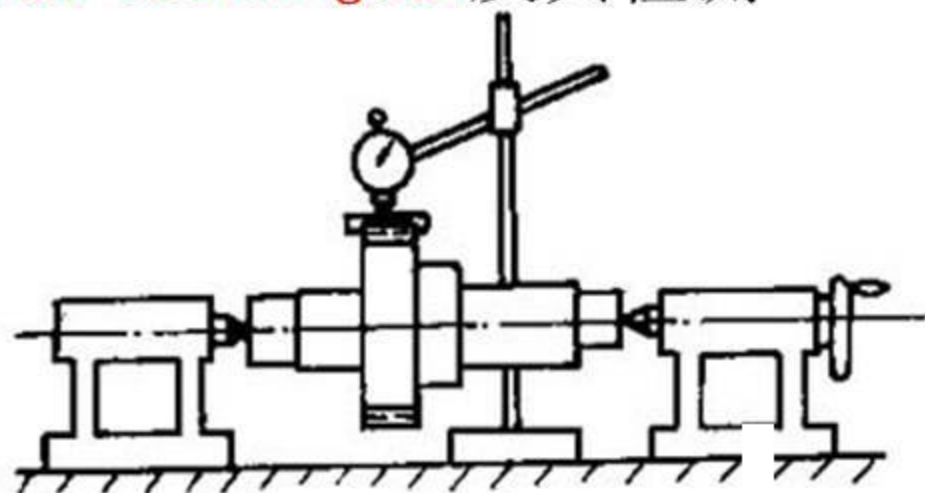
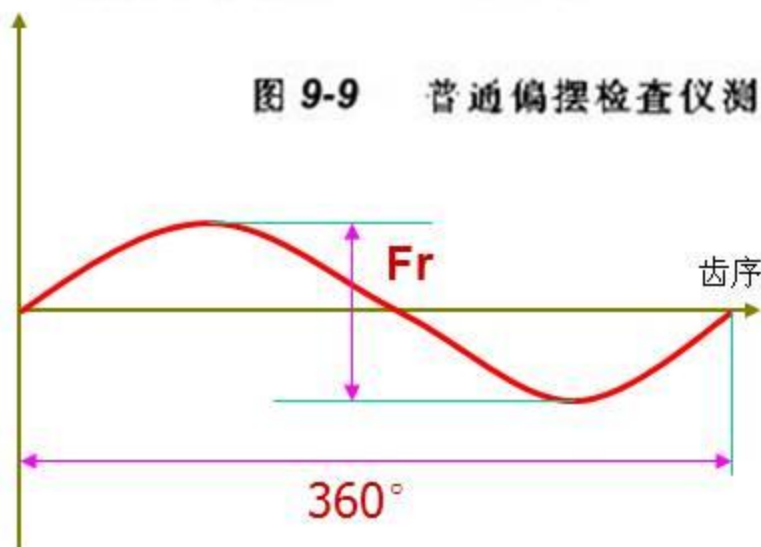


图 9-9 普通偏摆检查仪测量 ΔF



§ 9-5 齿轮的精度等级与齿轮坯公差

一、齿轮的精度等级及其标注

1. 齿轮的精度等级

F_p 、 f_{pt} 、 F_α 、 F_β 、 F_r 的精度等级各分 0、1、2、3、...、12 十三级。

F_i'' 、 f_i'' 的精度等级各分 4、5、6、...、12 九级。

0~2 级：远景发展；

3~5 级：高精度；

6~9 级：中等精度；

10~12 级：低精度。

2. 精度等级的标注

- 当齿轮的三项精度要求为同一级时的标注

7 GB/T 10095.1—2008

- 当齿轮的三项精度要求不相同时的标注

8-8-7 GB/T 10095.1—2008

二、齿轮坯公差 **gear blank precision**

1. 盘形齿轮的齿轮坯公差

- 基准孔 直径尺寸公差
- 基准端面 轴向圆跳动公差 $t_t=0.2 (D_d/b) F_\beta$
- 齿顶圆柱面 直径尺寸公差，径向圆跳动公差 $t_r=0.3 F_p$



§ 9-6 齿轮副中心距极限偏差和轴线平行度公差

一、齿轮副中心距极限偏差 Δf_a

(center distance error of gear pair)

Δf_a 是指齿轮副的两条轴线之间的实际距离（实际中心距）与公称中心距 a 之差。

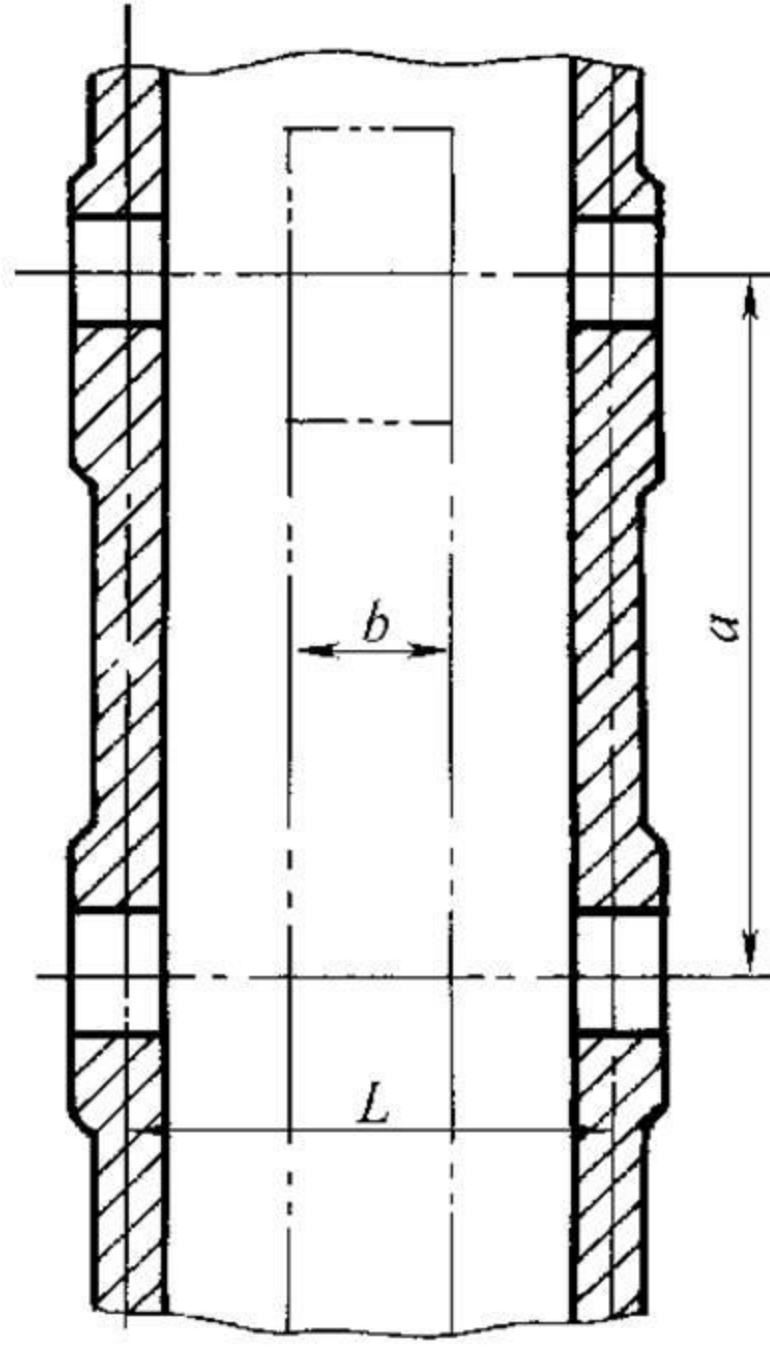
Δf_a 影响侧隙的大小。

图样上标注：

$$a \pm f_a$$

合格条件：

$$-f_a \leq \Delta f_a \leq +f_a$$



§ 9-7 圆柱齿轮精度设计示例

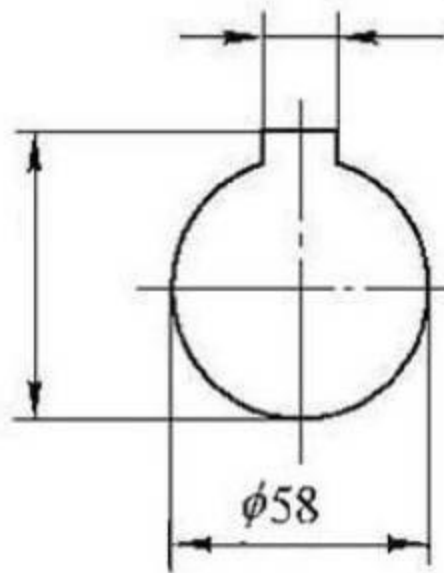
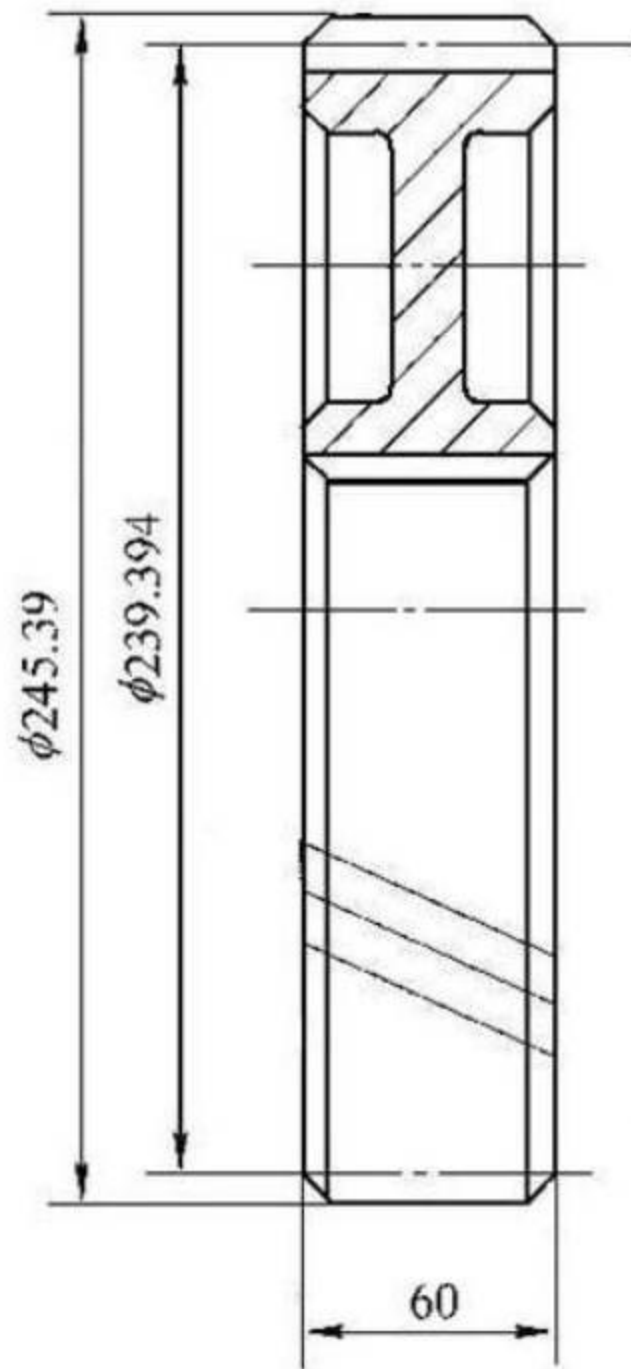
例 斜齿圆柱齿轮减速器从动齿轮精度设计。

功率：5kW，齿轮轴转速 $n_1=327\text{r/min}$ ， $\beta=8^\circ 6'34''$ ，
油池润滑。 $m_n=3\text{mm}$ ， $\alpha_n=20^\circ$ ， $z_1=20$ ， $z_2=79$ ，
 $b_2=60\text{mm}$ ，齿轮基准孔： $\phi 58\text{mm}$ 。

解

(1) 确定精度等级

参考齿轮圆周速度 $v=\pi (m_n z_1/\cos\beta)$ 、 $n_1=1.04\text{m/s}$
和普通圆柱齿轮减速器的有关资料，确定齿轮精度等级
为：8-8-7。



法向模数	m_n	3
齿数	z_2	79
标准压力角	α_n	20°
变位系数	x_2	0
螺旋角	β	8°6'34"
精度等级		
齿距累积总偏差允许值	F_p	
单个齿距偏差允许值	$\pm f_{pt}$	
齿廓总偏差允许值	F_α	
螺旋线总偏差允许值	F_β	
公法线长度	跨齿数	k
	公称值及极限偏差	$W^{+E_{\Sigma 2}}_{+E_{\Sigma 1}}$



(2) 确定强制性检测精度指标的公差（允许值）

按8-8-7 及齿轮有关参数、尺寸，由齿轮公差表格查得

$$F_p = 70 \mu\text{m}$$

$$f_{pb} = \pm 18 \mu\text{m}, \quad F_a = 25 \mu\text{m}$$

$$F_\beta = 21 \mu\text{m}$$

(3) 确定公称公法线长度及其极限偏差

$$\text{端面压力角 } \alpha_t = \arctan(\tan \alpha_n / \cos \beta) = 20.186^\circ$$

$$\text{假想齿数 } z' = z_2 \operatorname{inv} \alpha_t / \operatorname{inv} \alpha_n = 81.274$$

$$\text{跨齿数 } k = z' / 9 + 0.5 = 9.54, \quad \text{取 } k = 10$$

$$W_n = m_n \cos \alpha_n [\pi (k - 0.5) + z_2 \operatorname{inv} \alpha_t] = 87.552 \text{mm}$$

$$\text{上偏差 } E_{ws} = -0.071 \text{mm}, \quad \text{下偏差 } E_{wi} = -0.150 \text{mm}$$

分度圆直径 d (mm)	法向模数 m_n 或齿宽 b (mm)	精 度 等 级												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

齿轮传递运动准确性

齿轮齿距累积总偏差允许值 F_p (μm)

$50 < d \leq 125$	$2 < m_n \leq 3.5$	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	53.0	76.0	107.0	151.0	241.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	3.4	4.9	7.0	9.5	14.0	19.0	28.0	39.0	55.0	78.0	110.0	156.0	220.0
$125 < d \leq 280$	$2 < m_n \leq 3.5$	4.4	6.0	9.0	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	100.0	141.0	199.0	282.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	51.0	72.0	102.0	144.0	204.0	288.0

齿轮传动平稳性

齿轮单个齿距偏差允许值 $\pm f_{pt}$ (μm)

$50 < d \leq 125$	$2 < m_n \leq 3.5$	1.0	1.5	2.1	2.9	4.1	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0	47.0	66.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.1	1.6	2.3	3.2	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0	52.0	73.0
$125 < d \leq 280$	$2 < m_n \leq 3.5$	1.1	1.6	2.3	3.2	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0	51.0	73.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.2	1.8	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0

齿轮传动平稳性

齿轮齿廓总偏差允许值 F_α (μm)

$50 < d \leq 125$	$2 < m_n \leq 3.5$	1.4	2.0	2.8	3.9	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	63.0	89.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.7	2.4	3.4	4.8	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	54.0	76.0	108.0
$125 < d \leq 280$	$2 < m_n \leq 3.5$	1.6	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	50.0	71.0	101.0
	$3.5 < m_n \leq 6$	1.9	2.6	3.7	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	42.0	60.0	84.0	119.0

轮齿载荷分布均匀性

齿轮螺旋线总偏差允许值 F_β (μm)

$50 < d \leq 125$	$20 < b \leq 40$	1.5	2.1	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	95.0
	$40 < b \leq 80$	1.7	2.5	3.5	4.9	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0	56.0	79.0	111.0
$125 < d \leq 280$	$20 < b \leq 40$	1.6	2.2	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	50.0	71.0	101.0
	$40 < b \leq 80$	1.8	2.6	3.6	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	58.0	82.0	117.0

(4) 盘形齿轮的齿轮坯公差

基准孔 直径尺寸公差 H7

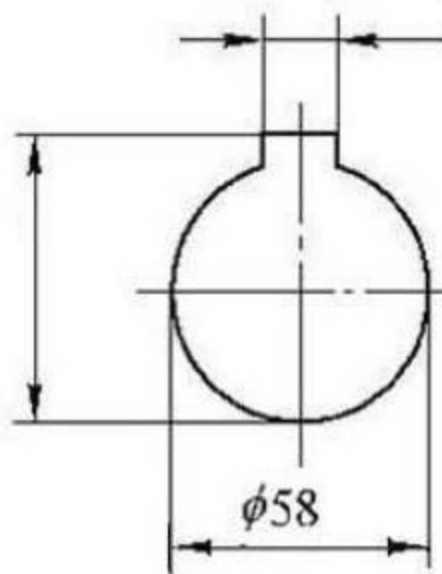
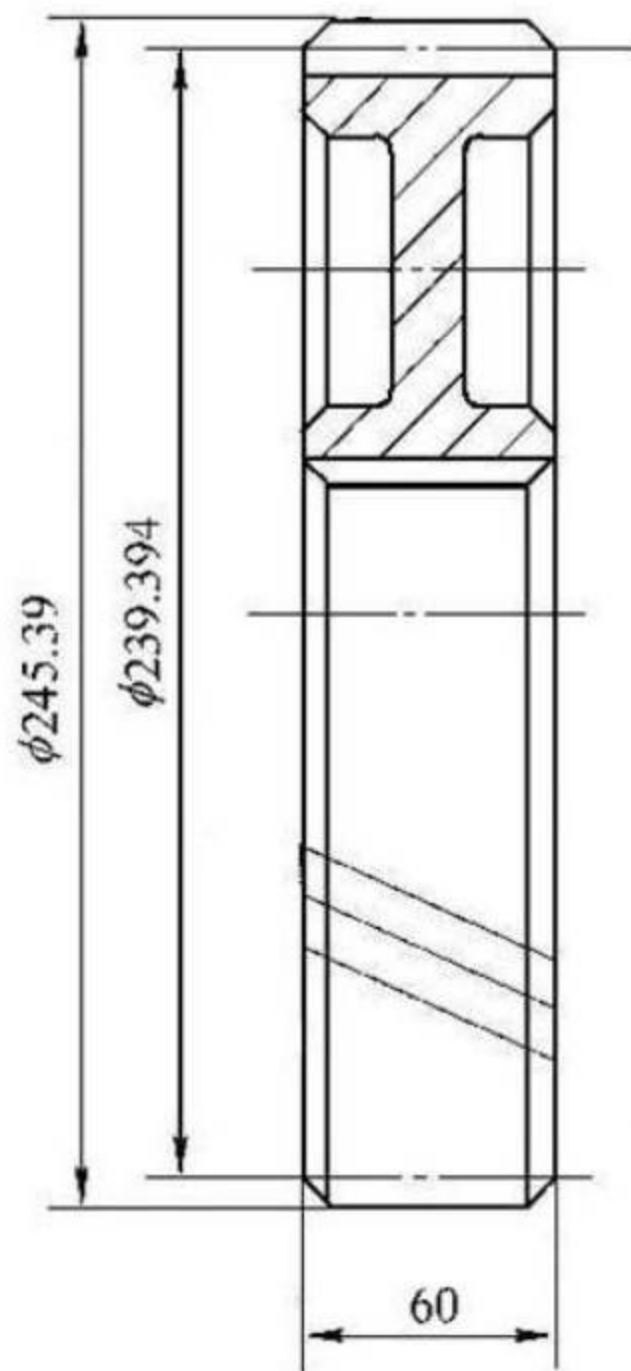
基准端面 轴向圆跳动公差

$$t_t = 0.2 (D_d / b) F_\beta = 0.2(239/60) \times 0.021 \approx 0.016\text{mm}$$

齿顶圆柱面 直径尺寸公差 $\phi 245.39\text{h}11$

(5) 齿轮副中心距极限偏差 $f_a=31.5\mu\text{m}$

图样上标注: $a \pm f_a$



法向模数	m_n	3
齿数	z_2	79
标准压力角	α_n	20°
变位系数	x_2	0
螺旋角	β	8°6'34"
精度等级		
齿距累积总偏差允许值	F_p	
单个齿距偏差允许值	$\pm f_{pt}$	
齿廓总偏差允许值	F_α	
螺旋线总偏差允许值	F_β	
公法线长度	跨齿数	k
	公称值及极限偏差	$W^{+E_{\Sigma}}_{+E_{\Sigma}}$



八、零件图标注



在齿轮工作图上应标注**齿轮的精度等级和齿厚极限偏差的数值**。

1) 在视图上标注的数据

直接标注在视图上的主要数据有：顶圆直径及公差；分度圆直径；齿宽；**孔(轴)直径及公差；定位面及其要求；表面粗糙度等**。

2) 用表格列出数据

在表格中列出的数据有：法向模数；齿数；齿形角；齿顶高系数；螺旋角，螺旋方向；径向变化系数；**齿厚公称值及上、下偏差；精度；齿轮副中心距及其极限偏差；配对齿轮符号及其齿数；检验项目及其公差(或极限偏差)数值**。

END

制作：张宏

