

齿轮振动噪声与修形技术

深圳市合发齿轮机械有限公司
Shenzhen HEFA Gear Machinery Co.,Ltd.



传动工程师的在职学院

在线提问



专家解答|介绍

.....

资源下载

文章推送

在线直播

名师阵容 精彩不断





主讲人介绍—杨建军

- 博士，河南科技大学副教授，硕士生导师。
- 从2005年毕业至今长期从事齿轮相关领域的研究工作，主持国家自然科学基金面上项目，中国博士后科学基金面上项目，河南省科技攻关项目等，发表论文四十余篇，SCI收录10篇次。发表专利9项，获得河南省科技进步三等奖一项，机械工业部二等奖一项，毕业研究生6人，在读研究生4人。
- 研究方向为齿轮啮合原理，齿轮系统动力学，螺旋锥齿轮的设计与制造，超声研齿加工。

1

齿轮的齿廓曲线

2

齿轮振动噪声的来源

3

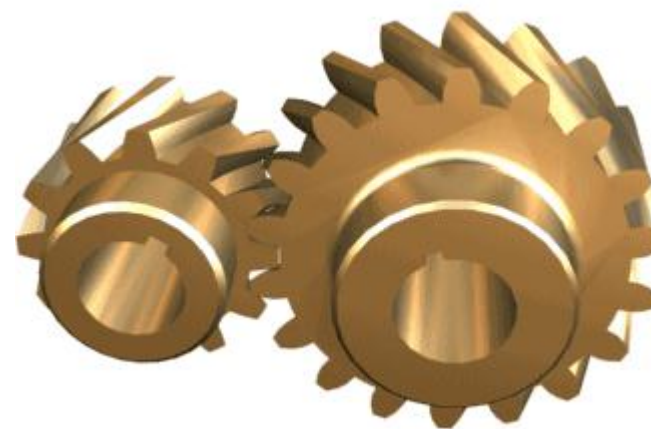
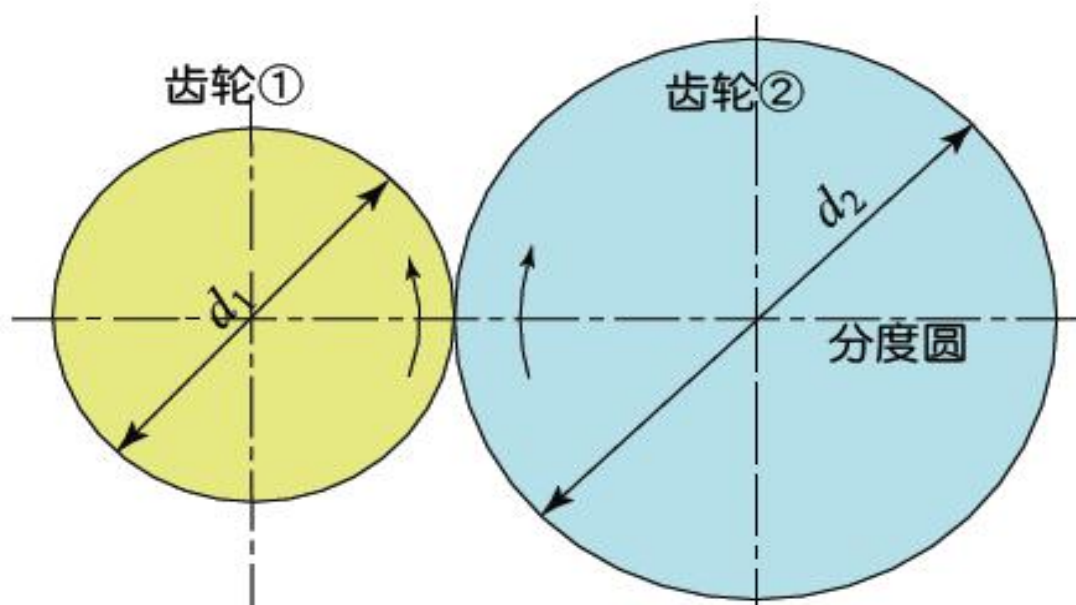
渐开线圆柱齿轮的修形

4

齿面修形的评定

● 齿轮的啮合

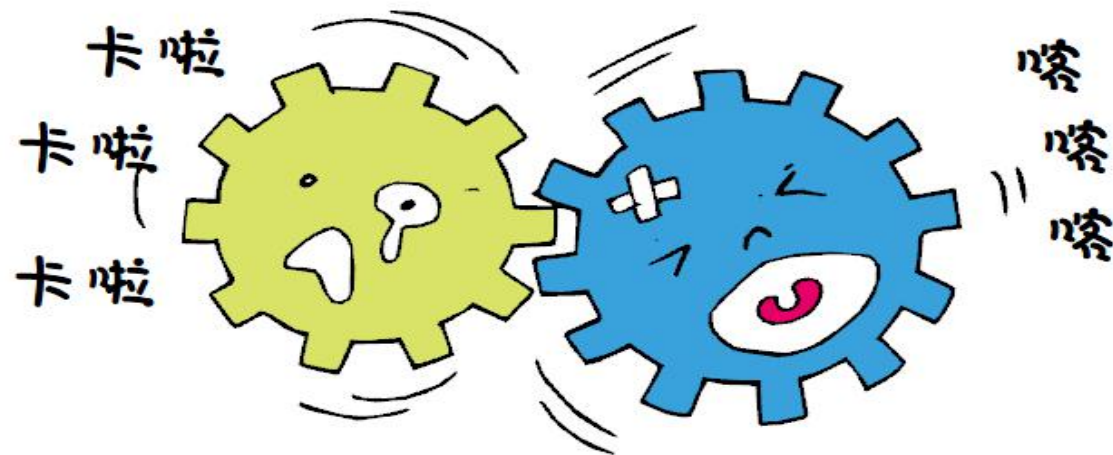
两个齿轮啮合时的模样，看上去就像是直径大小为 d_1 、 d_2 两个摩擦轮（Friction wheels）无相对运动的传递旋转运动。



轮齿传动时既要安静又要连续，满足传动比 $i_{主从} = \omega_{主} / \omega_{从}$

仅仅在摩擦轮的外周上分割出等分的齿距，装上突起，然后相互啮合转动的话，会出现如下问题：

- 轮齿的切点产生滑动
- 切点的移动速度时快时慢
- 产生振动及噪音



工程意义： i_{12} 常数可减少因速度变化所产生的附加动载荷、振动和噪音，延长齿轮的使用寿命，提高机器的工作精度。

●最常用的齿轮齿形是什么？

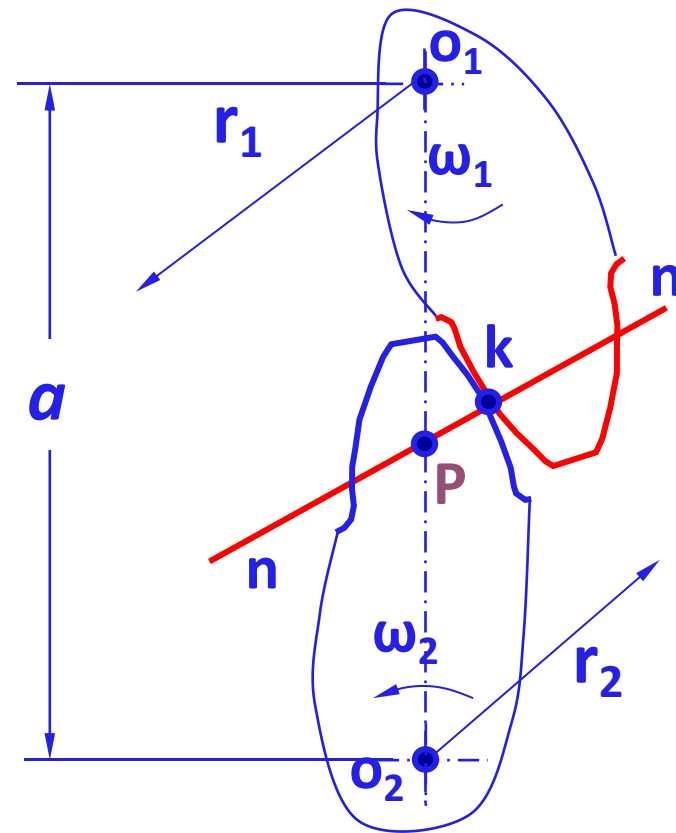
● 齿廓啮合基本定律

$$\text{由: } v_{12} = O_1P \omega_1 = O_2P \omega_2$$

$$\text{得: } i_{12} = \omega_1 / \omega_2 = O_2P / O_1P$$

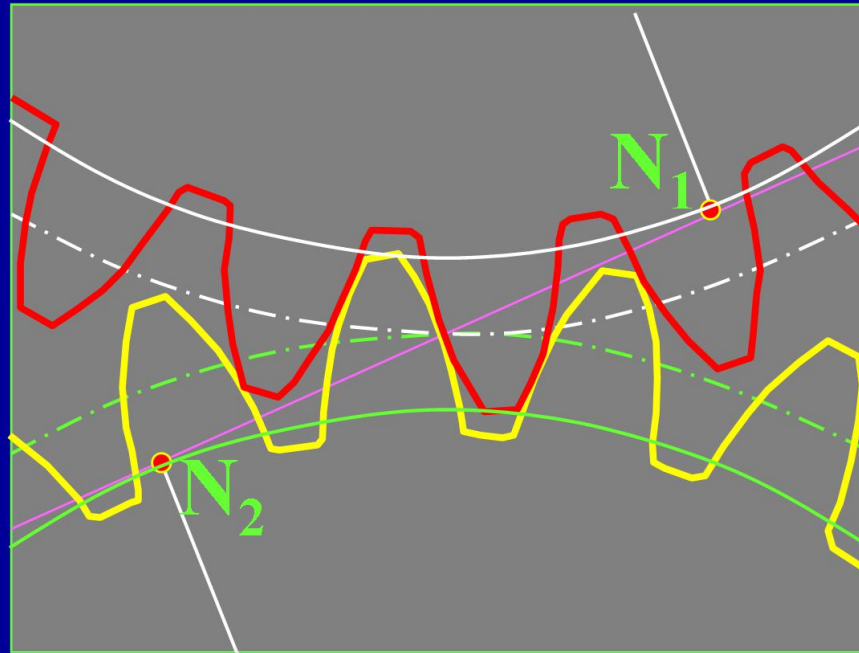
齿廓啮合基本定律: 互相啮合的一对齿轮在任一位置时的传动比, 都与连心线 O_1O_2 被其啮合齿廓的在接触处的公法线所分成的两段成反比。

凡能按给定传动比规律相互啮合传动的一对齿廓称为共轭齿廓。



●啮合点 移动

按ESC返回, 正转↓, 反转↑ 连续动画: 按键不松手, 点动: 单击键



啮合线----啮合点移动的轨迹



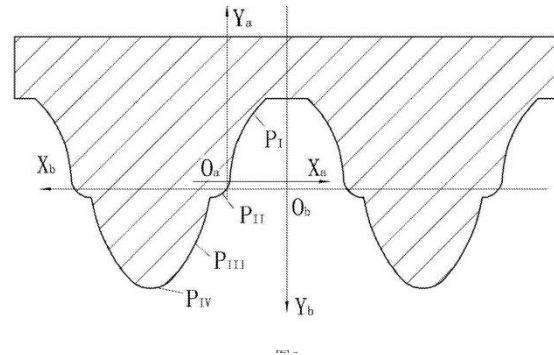
渐开线齿廓



圆弧齿廓



摆线齿廓



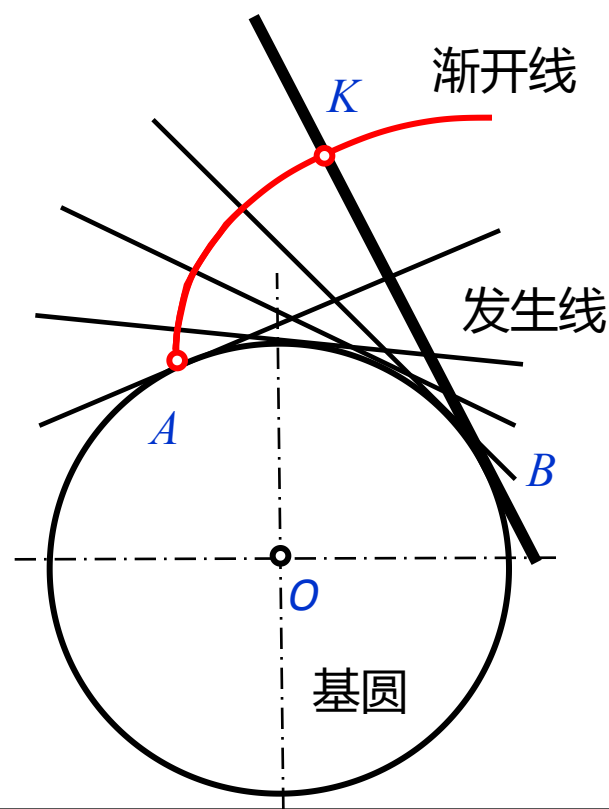
抛物线齿廓

一般说来，满足齿廓啮合定理的共轭齿廓有无限多对，但是考虑到加工和制造等因素，就只有有限的几种。

渐开线具有很好的传动性能，而且便于制造、安装、测量和互换使用等优点。因此它的应用最为广泛。

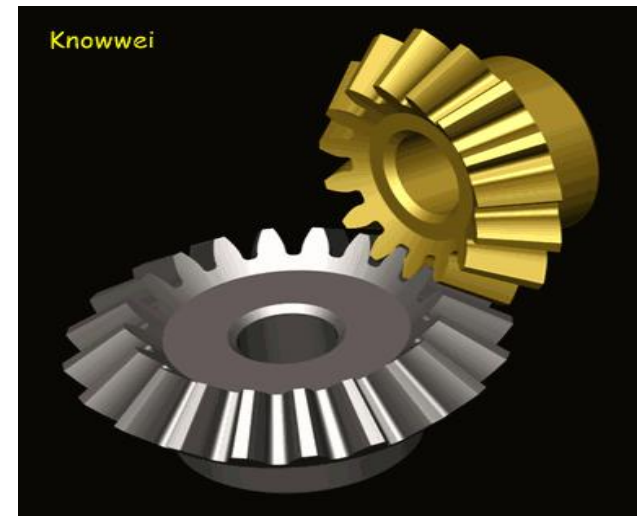
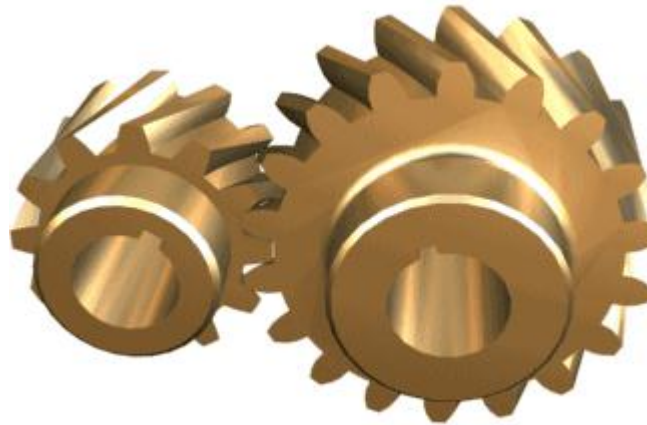
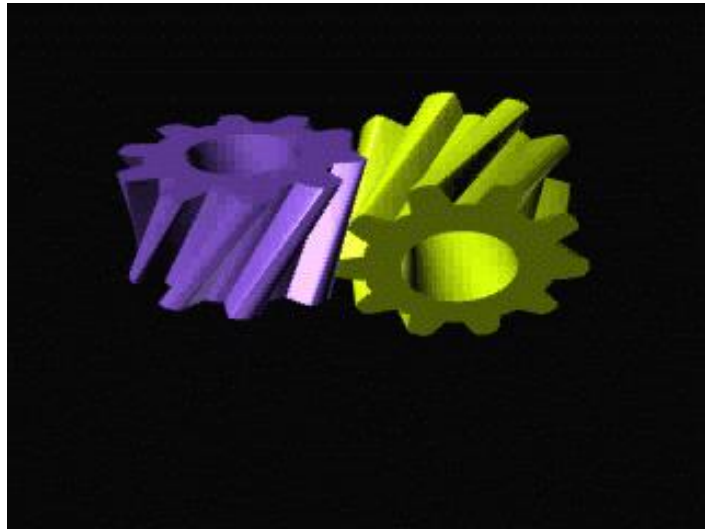
●什么是渐开线

将一端系有铅笔的线缠在圆筒的外周上，然后在线绷紧的状态下将线渐渐放开。此时，铅笔所画出的曲线即为渐开曲线。圆筒的外周被称为基圆。



●渐开线齿轮的优点

- 即使中心距多少有些误差，也可以正确的啮合。
- 刀具相对简单，加工和测量也比较容易。
- 因为在曲线上滚动啮合，所以，可以平稳连续地传递旋转运动。
- 一个刀具可以加工齿数不同的齿轮。



● 渐开线齿轮的制式

➤ 模数制齿轮（公制）

模数是齿轮的通用的称呼，比如 $m2$ 、 $m4$ … 模数数字越大，轮齿也越大。

➤ 径节制齿轮（英制）

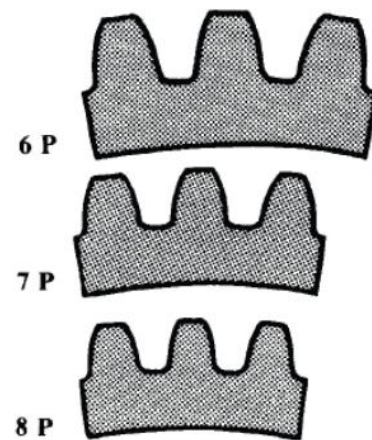
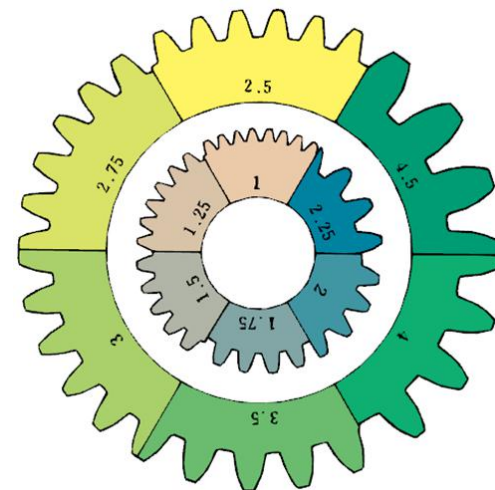
英制单位的国家（英、美国），使用径节（分度圆直径为1英吋时的齿轮齿数）来表示轮齿的大小。比如 $DP2$ 、 $DP4$ …

$$m = \frac{25.4}{DP} (mm)$$

➤ 双模数制齿轮

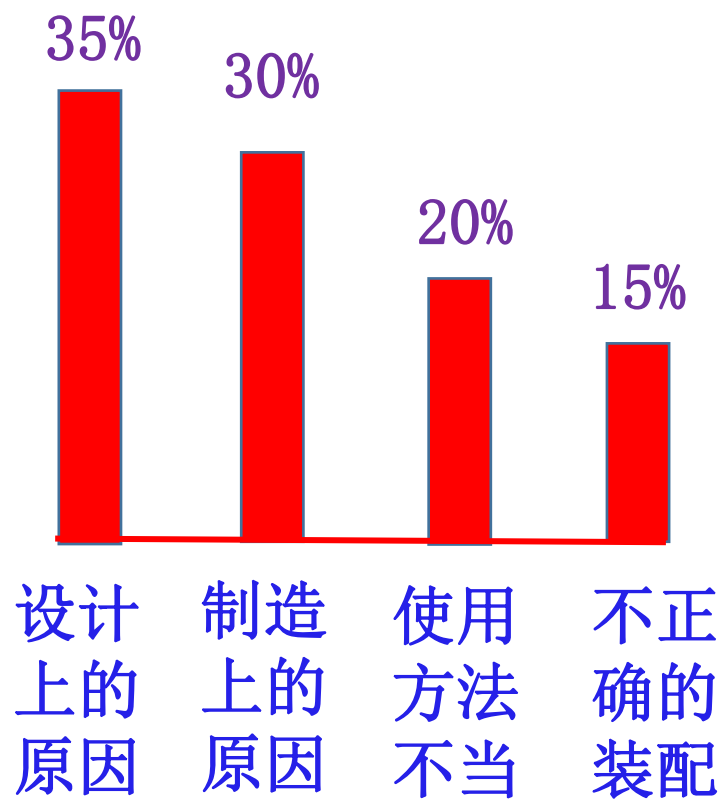
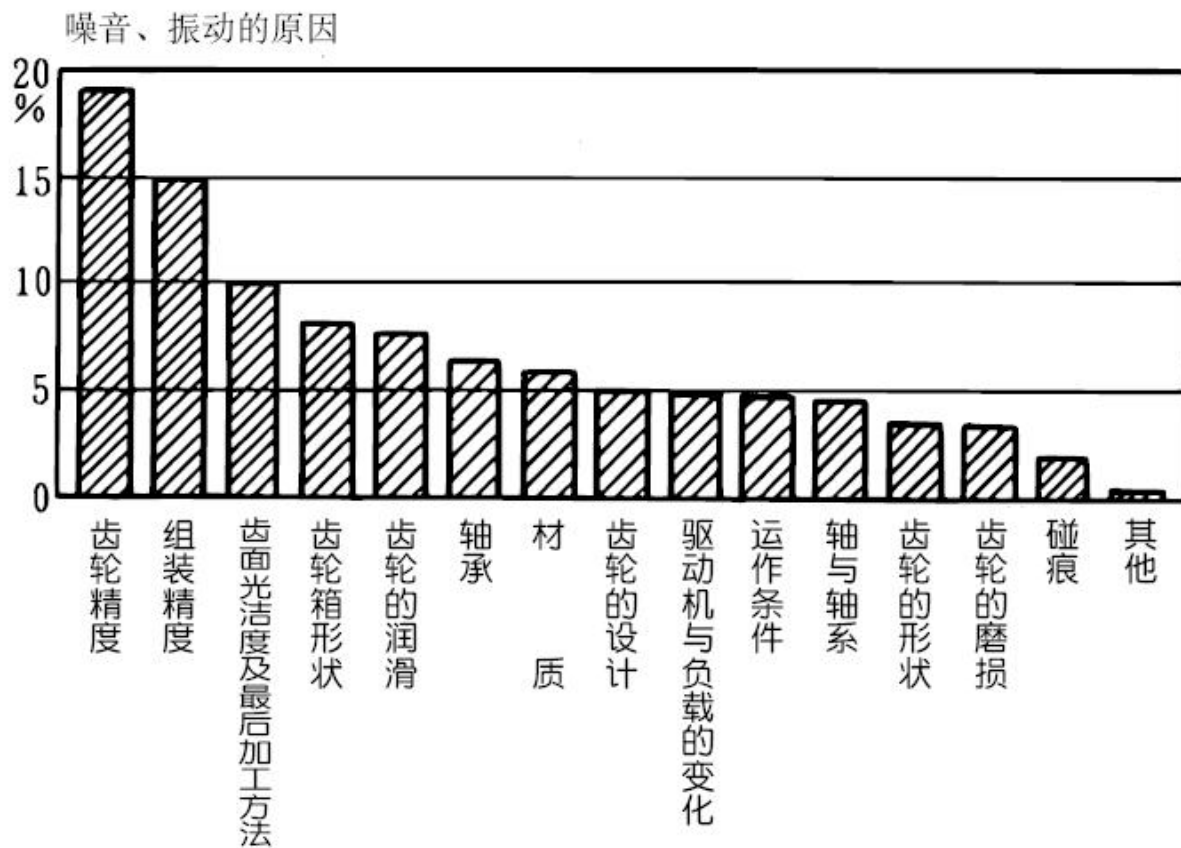
用两个大小不等的模数来计算一个齿轮的各部尺寸，其中较大的模数用来计算分度圆直径，较小的模数用来计算轮齿的尺寸。用于获得短齿齿形。

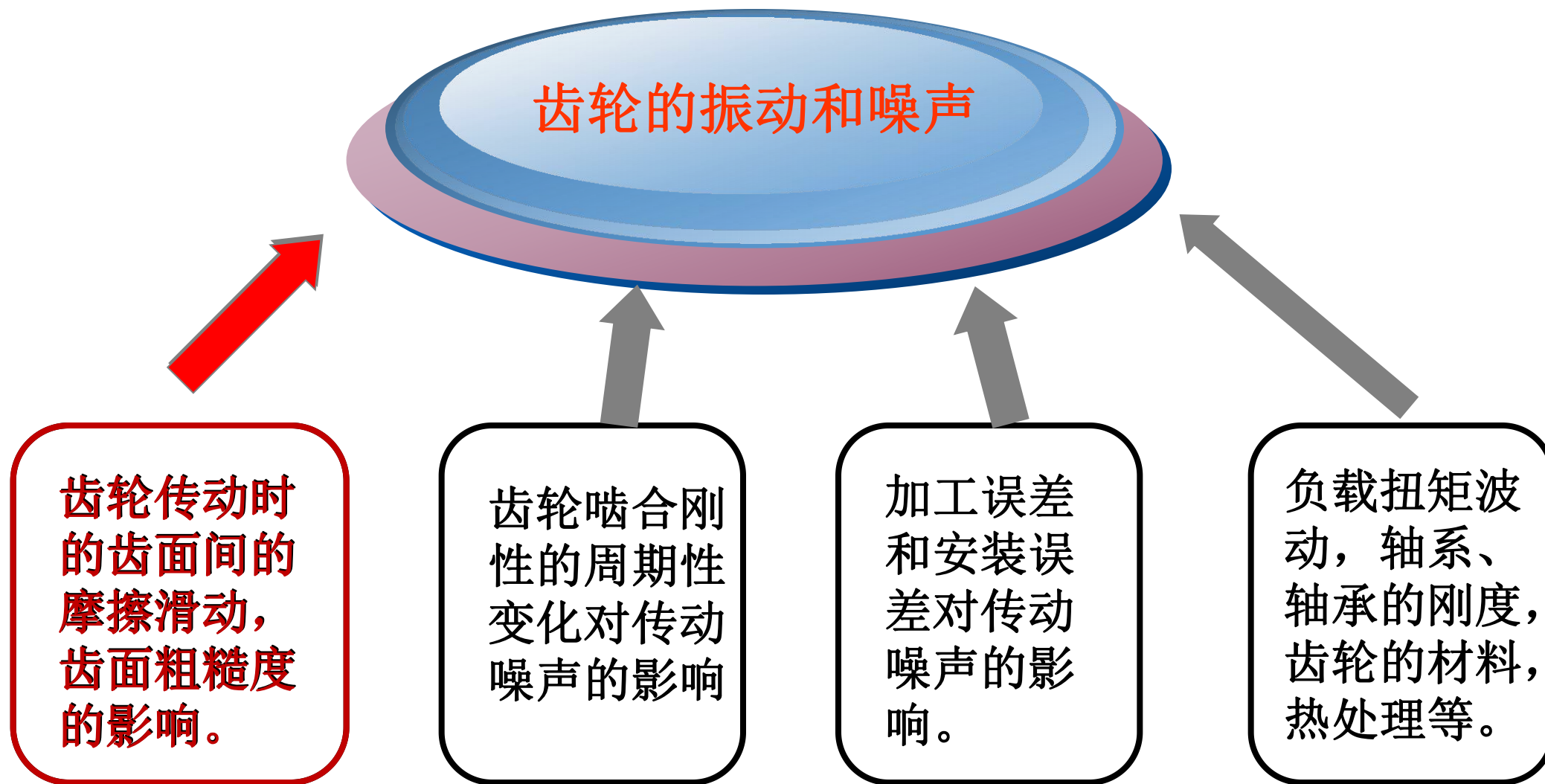
➤ 双径节制齿轮



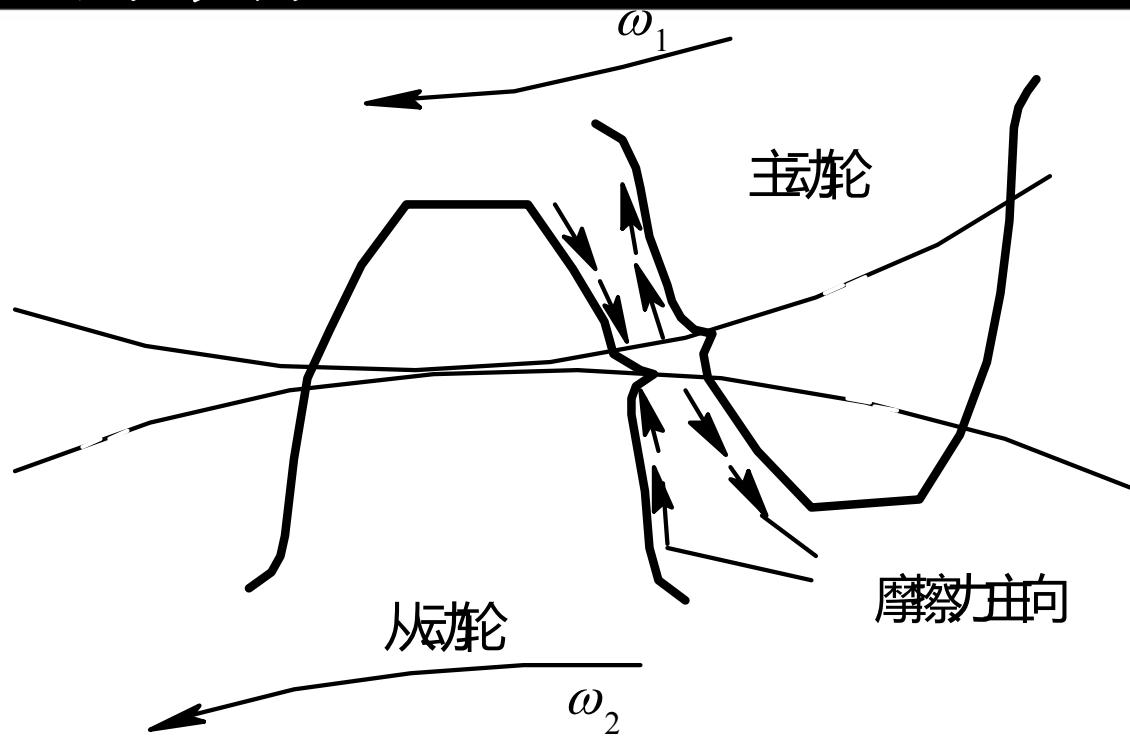
Gear Teeth of Different Diametral Pitch

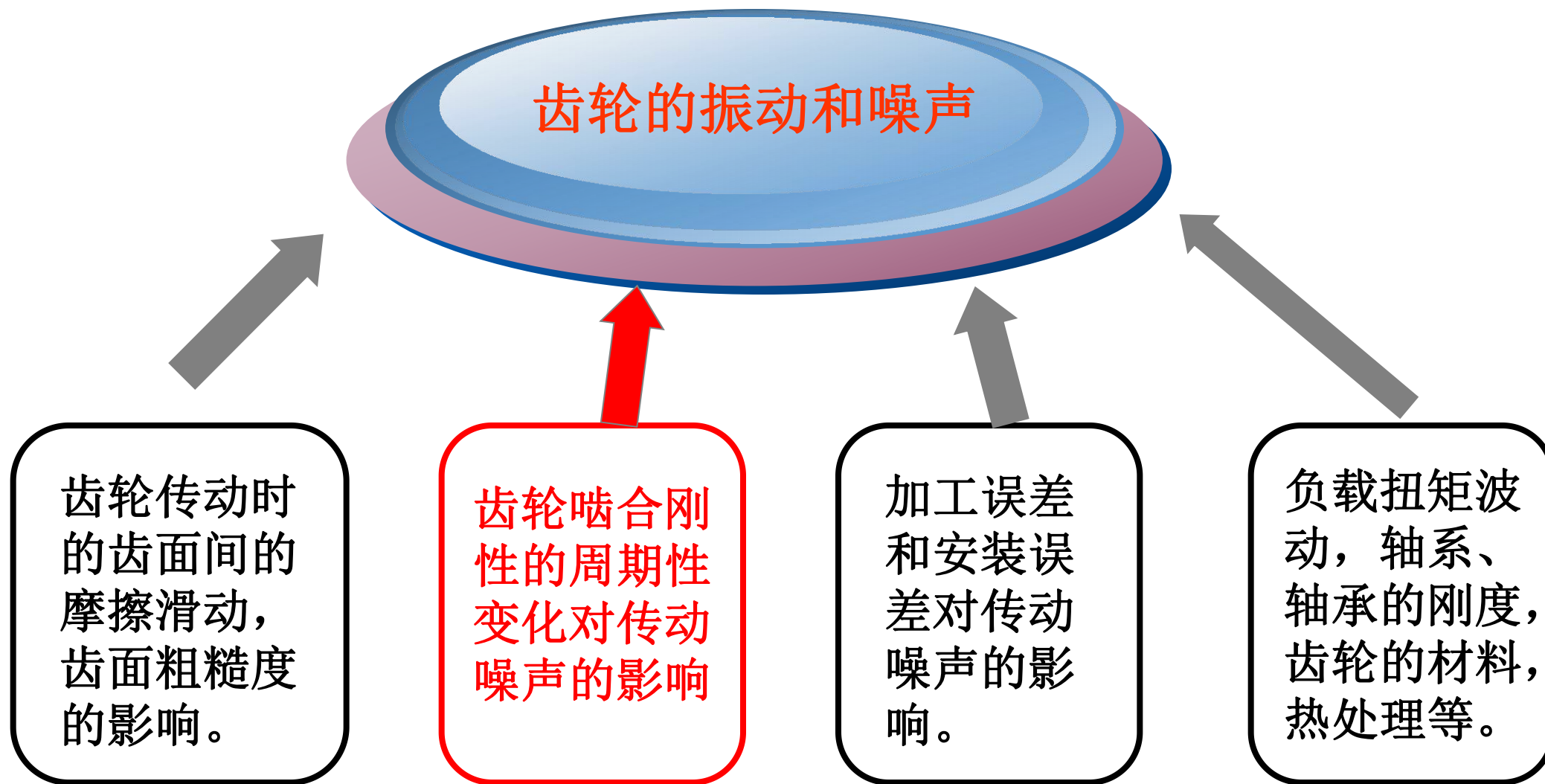
● 齿轮的振动和噪声的来源

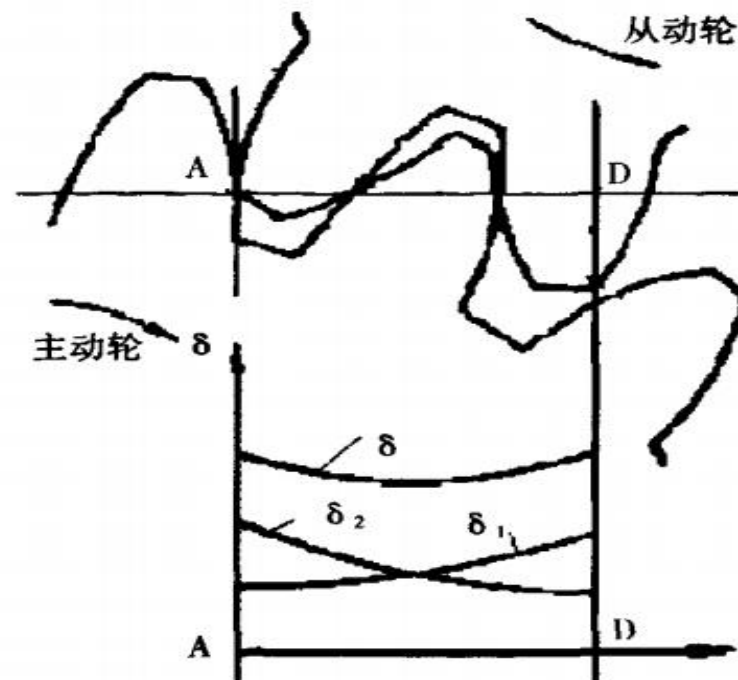
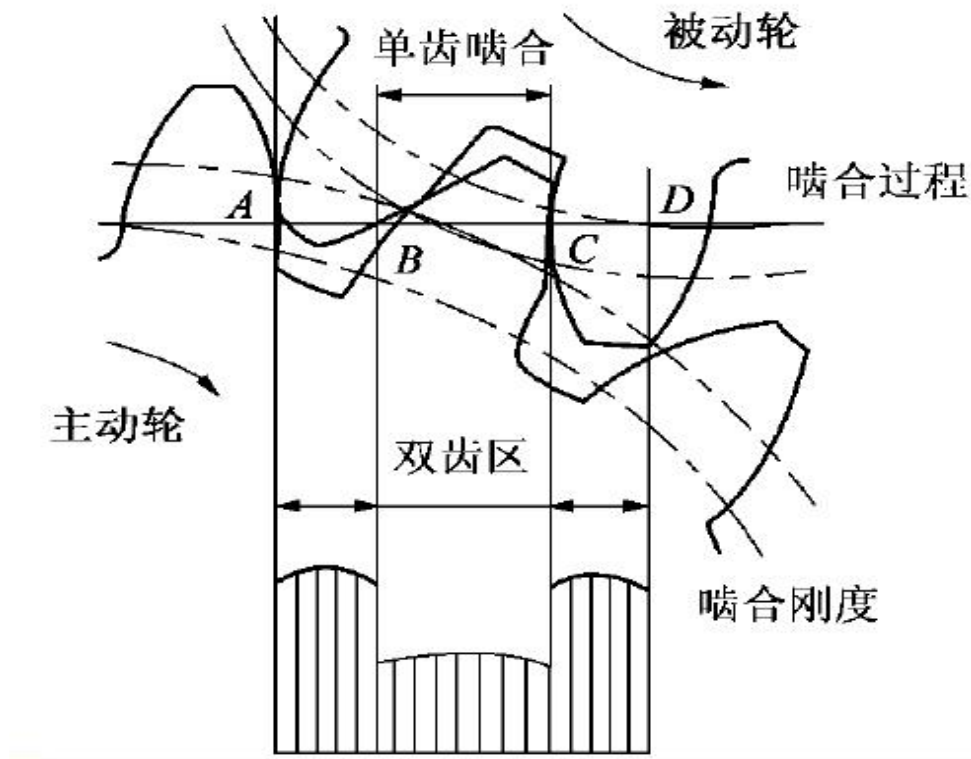




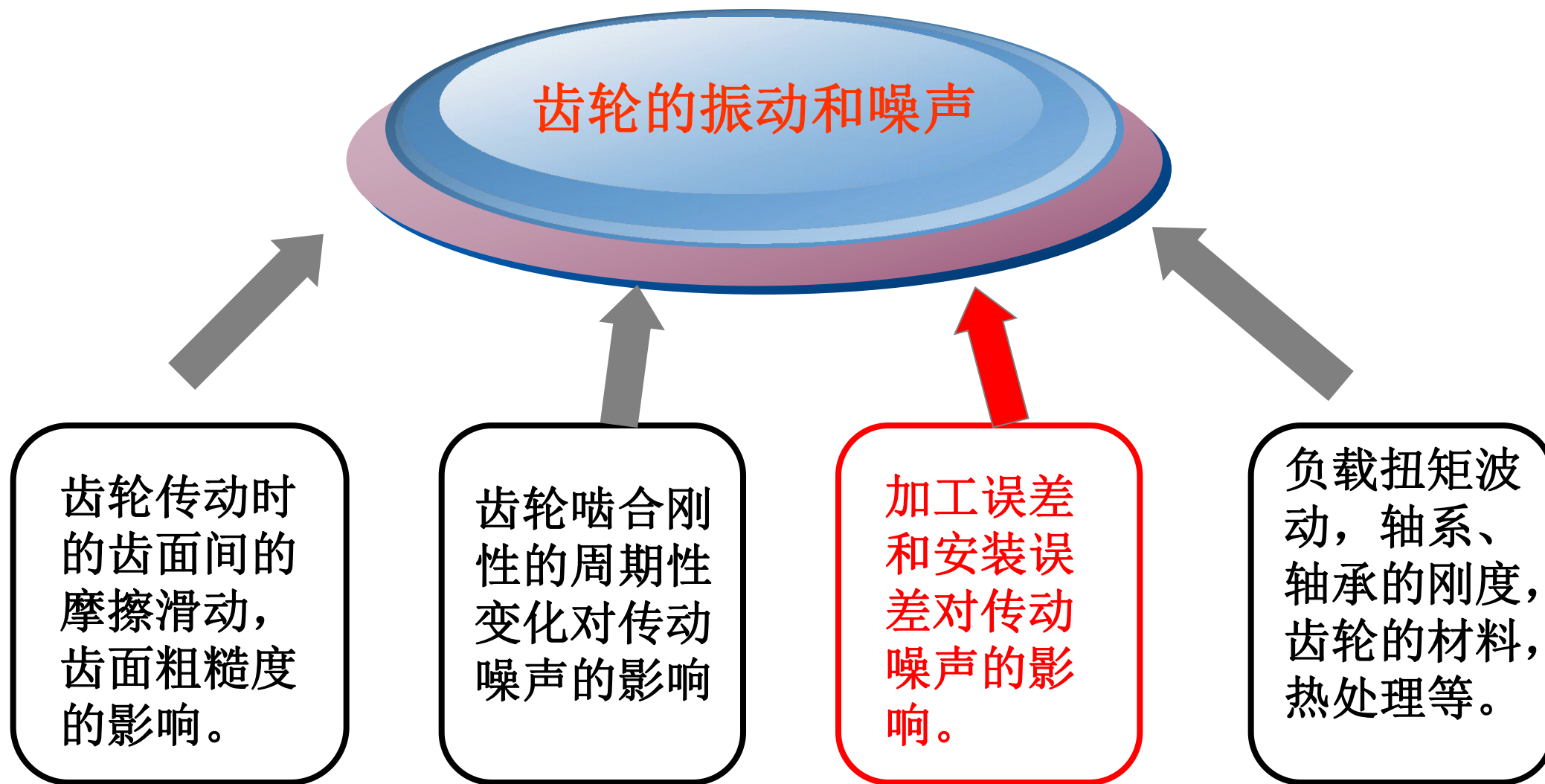
- 由于材料的塑性流动方向和齿面上的摩擦力方向一致，主动轮在节线处被碾出沟槽，被动轮在节线处被挤出脊棱。







- 单双齿交替啮合，产生啮合刚度发生变化，引起单齿啮合区和双齿啮合区的变形量不同

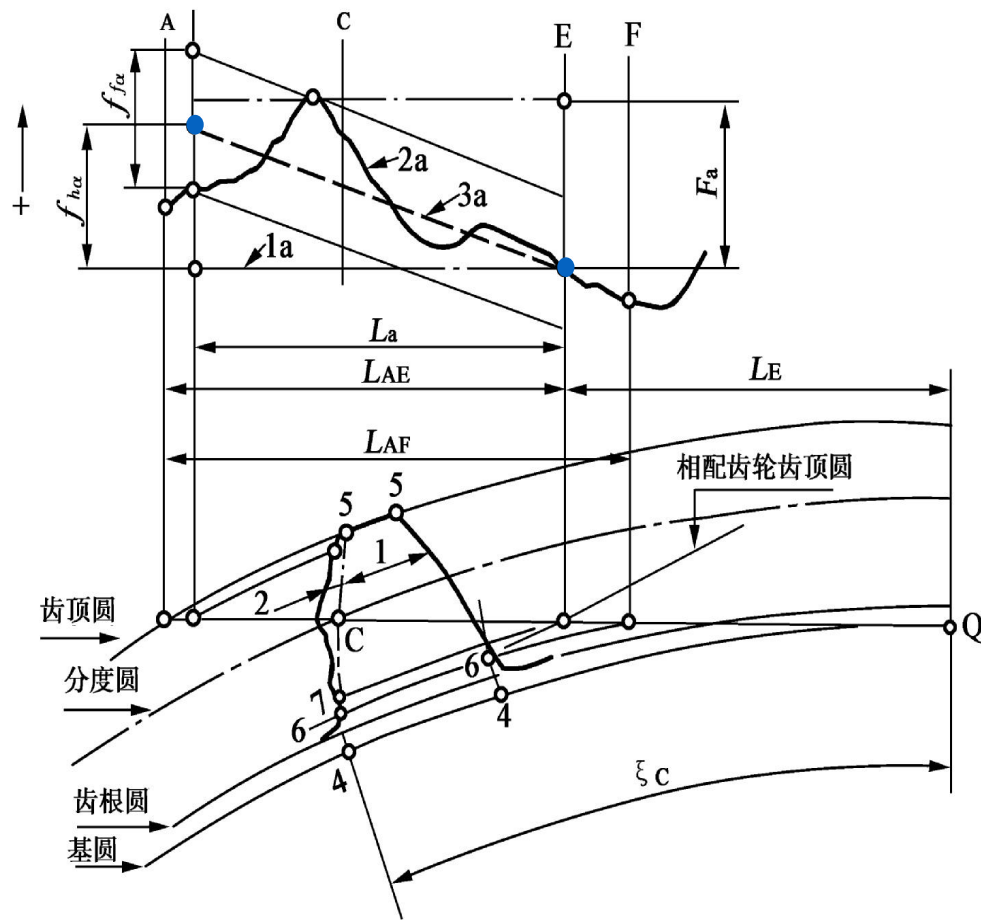


● 加工误差的影响

➤ 齿形误差和齿向误差

齿形误差是齿轮精度标准中影响齿轮传动振动噪声的主要误差项目，使齿轮在啮合过程中产生瞬时传动比的突变，即产生角加速度，从而产生高频冲击而发出噪音。很对情况齿形的形状对振动的影响大于齿形的误差。

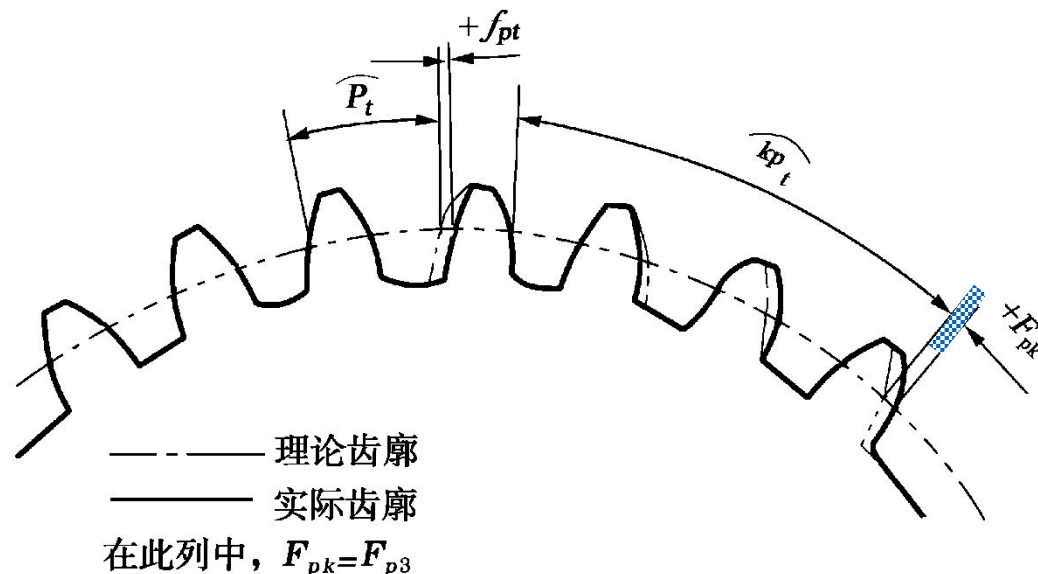
齿向误差主要影响齿轮的承载均匀性



● 加工误差的影响

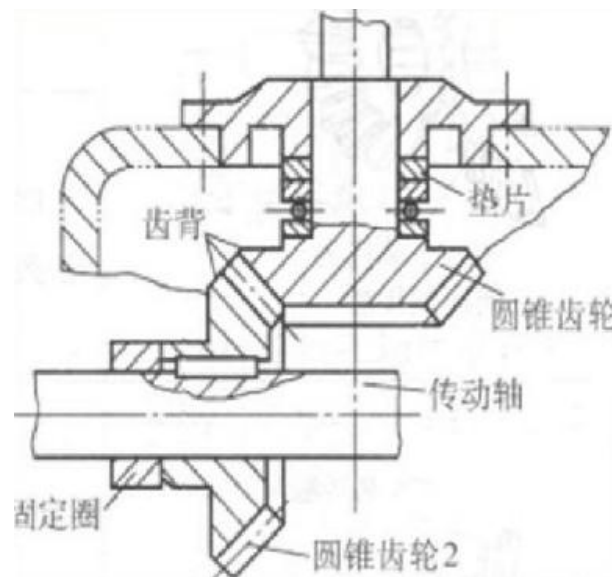
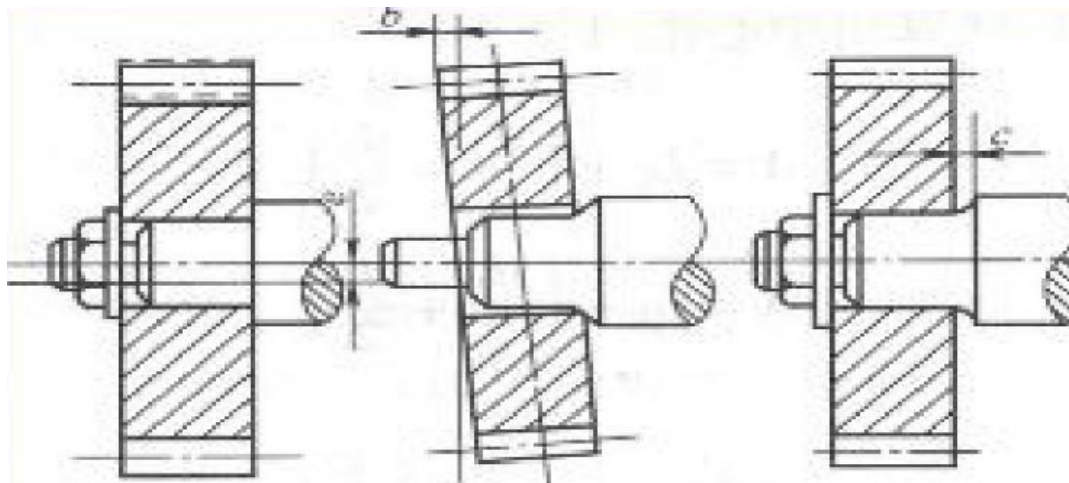
➤ 齿距误差

由于设备、刀具、齿坯加工时安装定位等多种原因造成的，是不可完全避免的误差，会影响到齿轮传递运动的准确性，而且导致一对进入啮合的齿发生冲撞，从而影响传动平稳性。

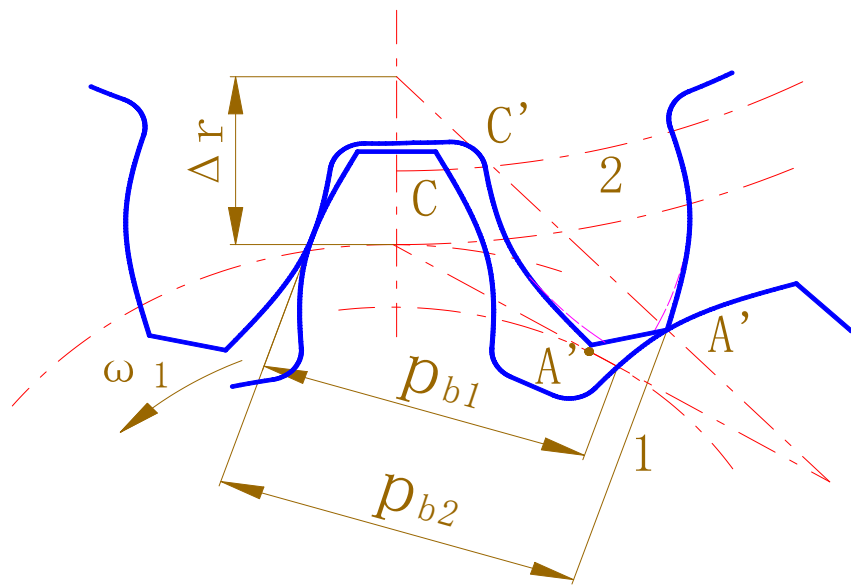


● 安装误差及其他因素影响

- ▶ 齿轮安装轴线不平行、中心距误差、齿向误差以及齿轮副侧隙过大，齿轮的轴向窜动，轴承的选择与预紧不当等，都会造成齿轮副不正确啮合，产生撞击声。



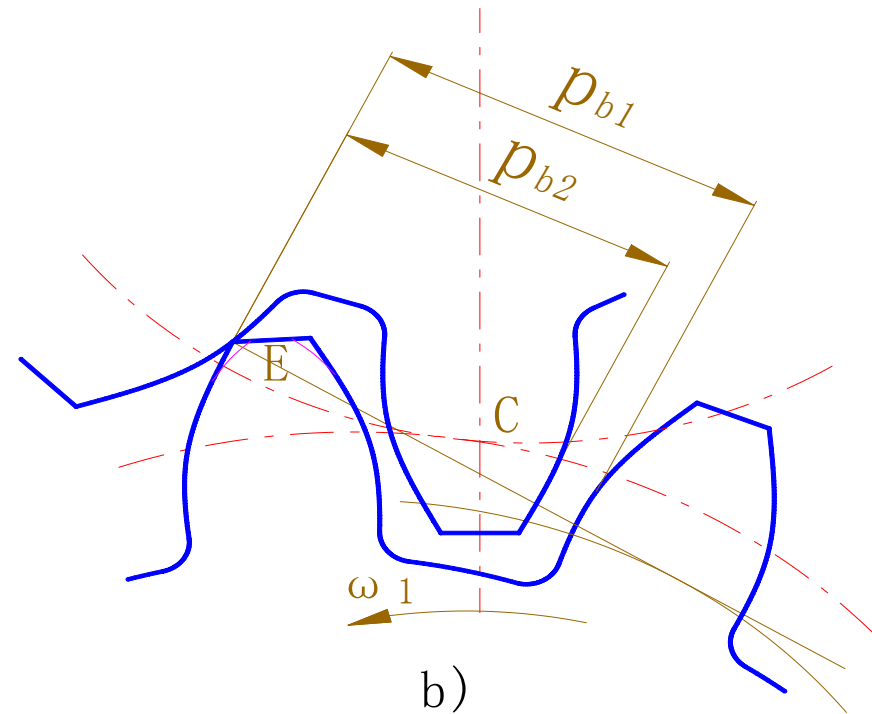
➤ 基节误差：制造误差、弹性变形引起



a)

$$p_{b2} > p_{b1}$$

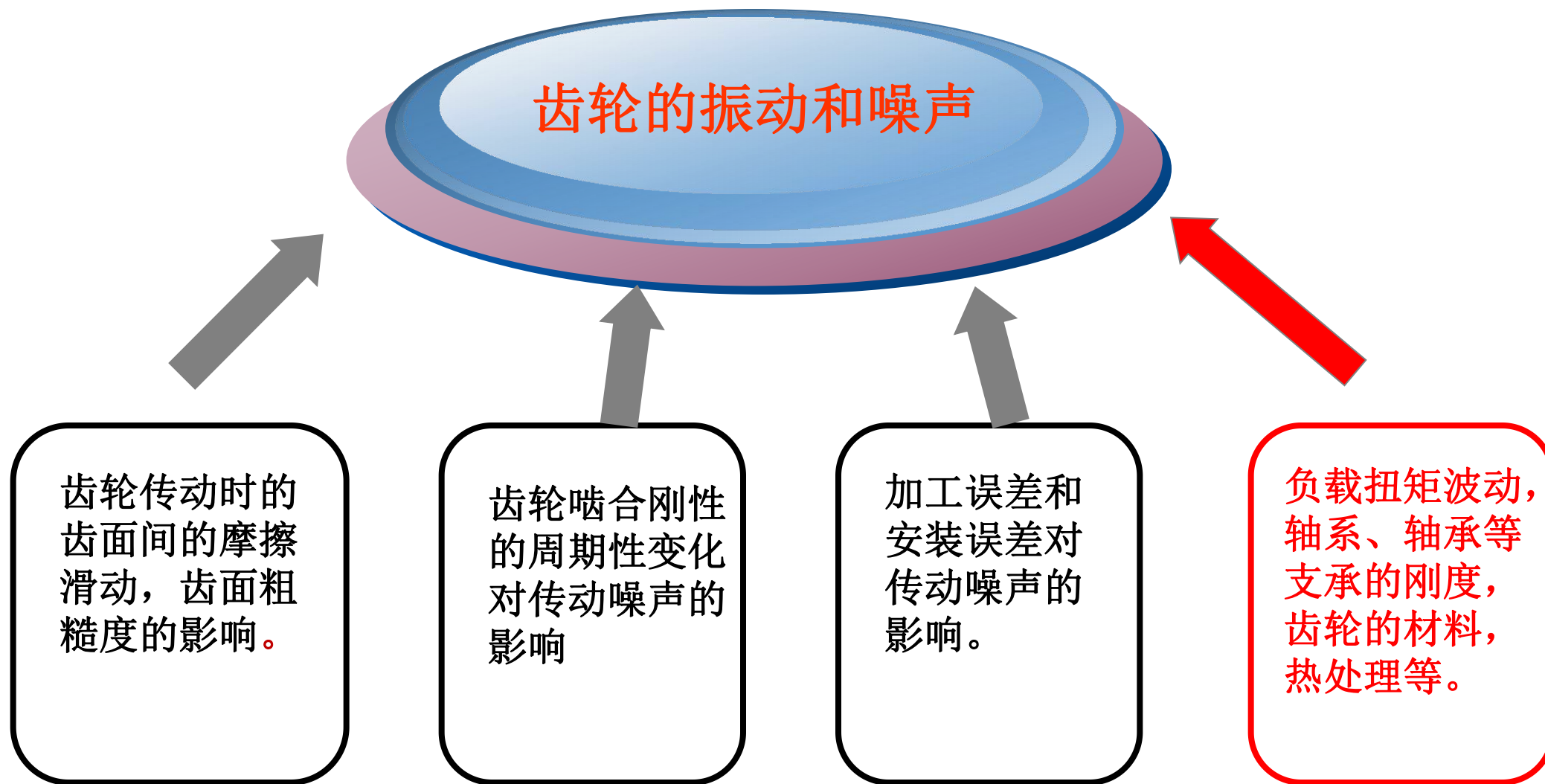
提前进入啮合



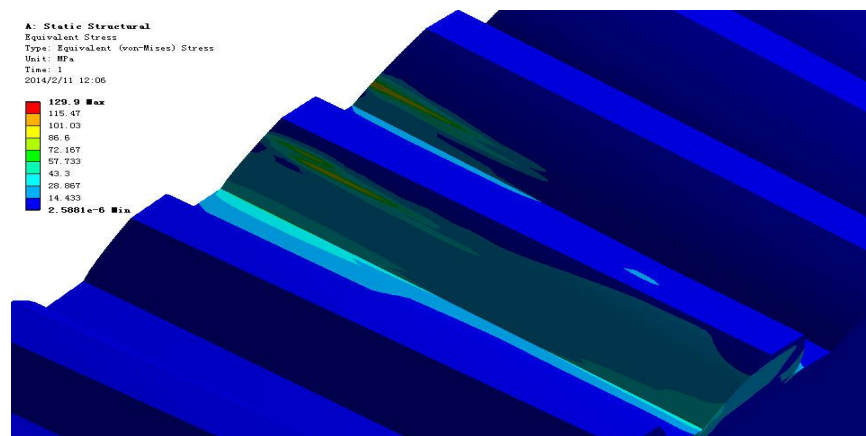
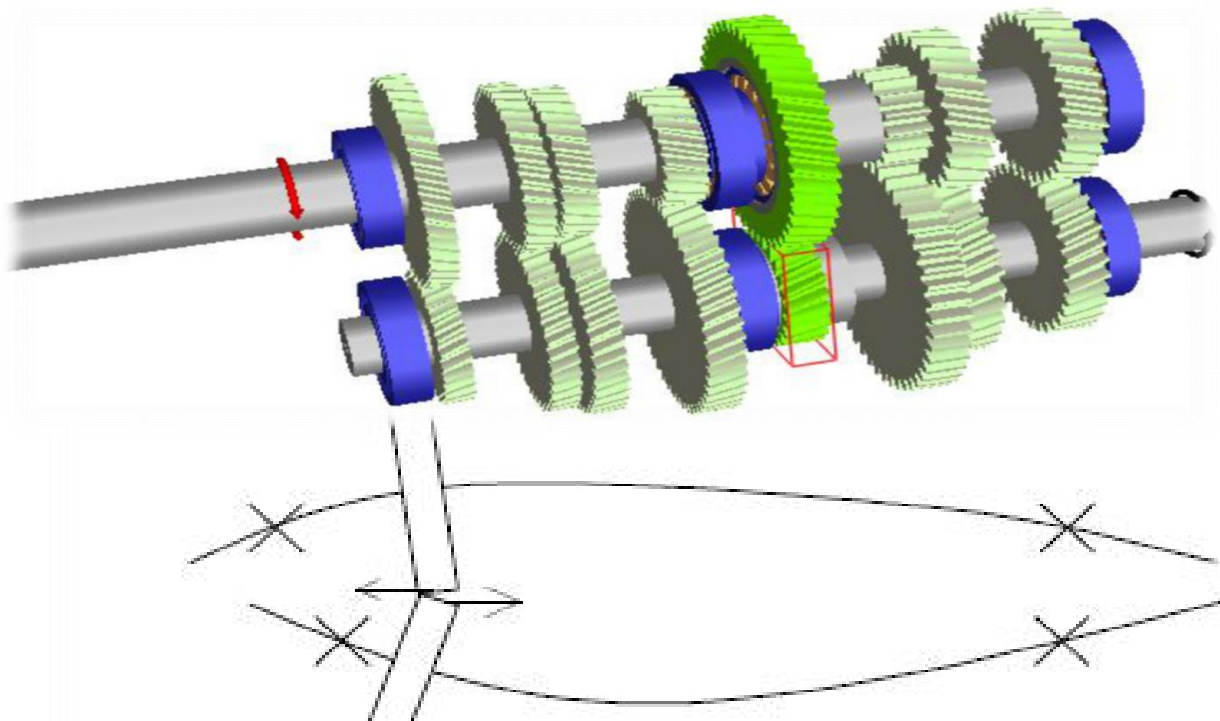
b)

$$p_{b2} < p_{b1}$$

滞后退出现啮合

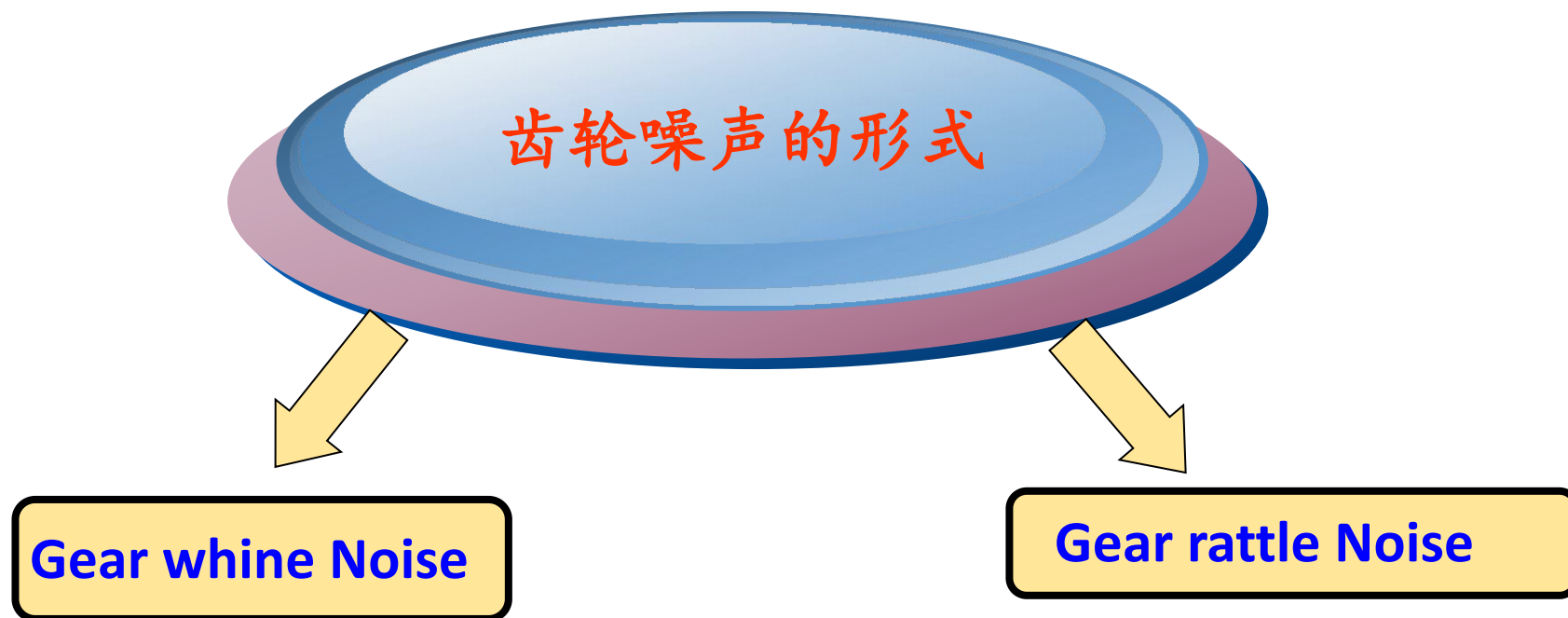


● 负载波动及轴系刚度的影响



啮合齿轮位错示意图

➤ 其他因素如**齿轮的材料**、**磨削方法**、**润滑方式**等，都会影响齿轮传动时的噪声。

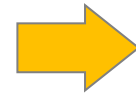


- 齿轮啮合刚性的周期性变化
- 齿面摩擦力变化

- 大多发生在空挡或轻载下
- 齿距误差
 - 齿侧间隙
 - 负载扭矩波动，轴和轴承的支撑刚度

● 振动的本质

- 齿距偏差
- 齿形偏差
- 安装误差
- 承载变形



传动误差

齿轮振动和噪声的本质来源是传动误差。

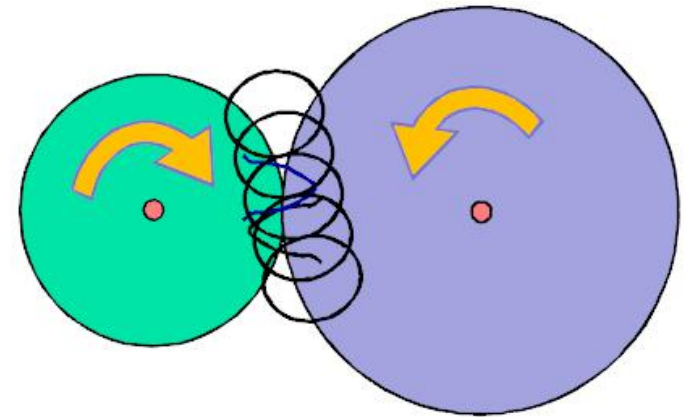
齿轮副的传动误差定义为被动齿轮实际转角偏离理论转角之值，随主动轮转角的变化，用公式表示为：

$$\delta\varphi_2 = (\varphi_2 - \varphi_2^{(0)}) - (\varphi_1 - \varphi_1^{(0)})(N_1 / N_2)$$

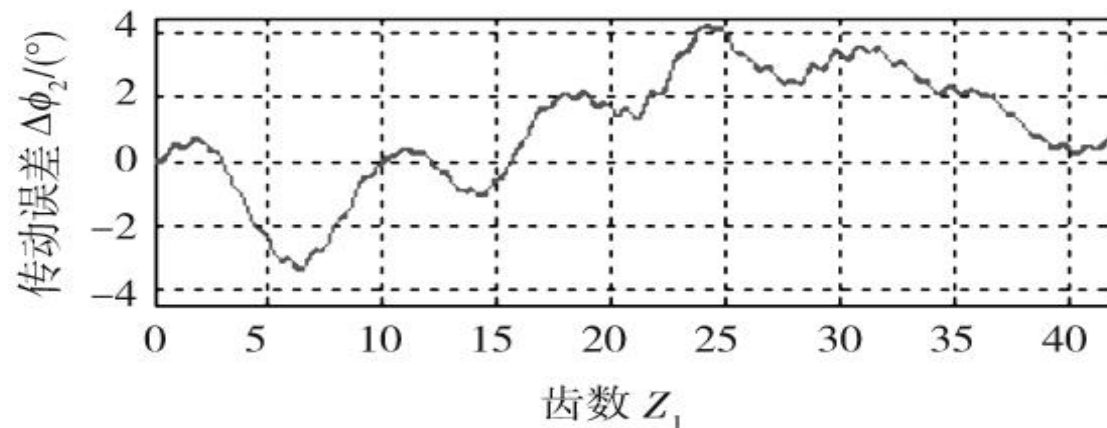
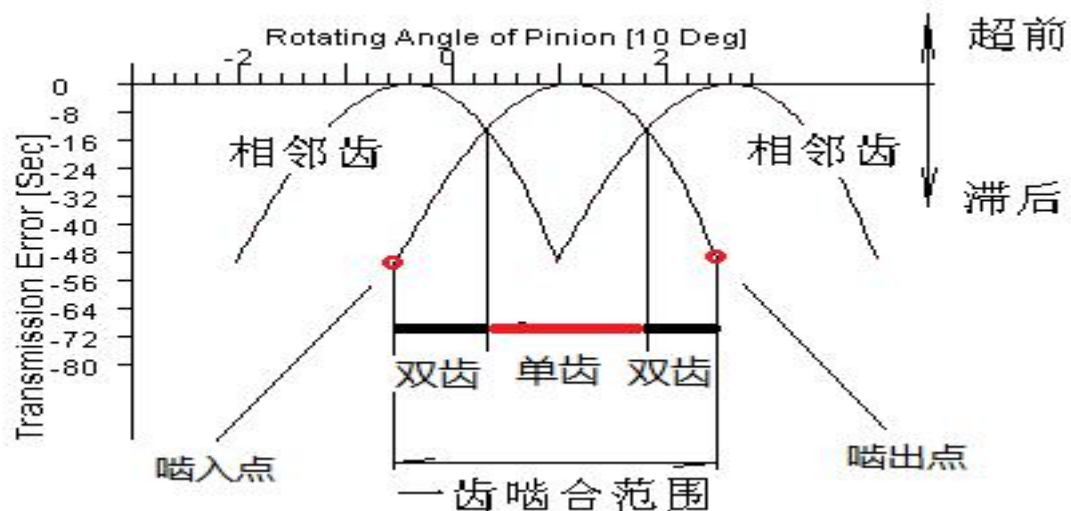
N_1 N_2 分别表示主动齿轮和被动齿的齿数

$\varphi_1^{(0)}$ $\varphi_2^{(0)}$ 分为两个齿轮的初始转角

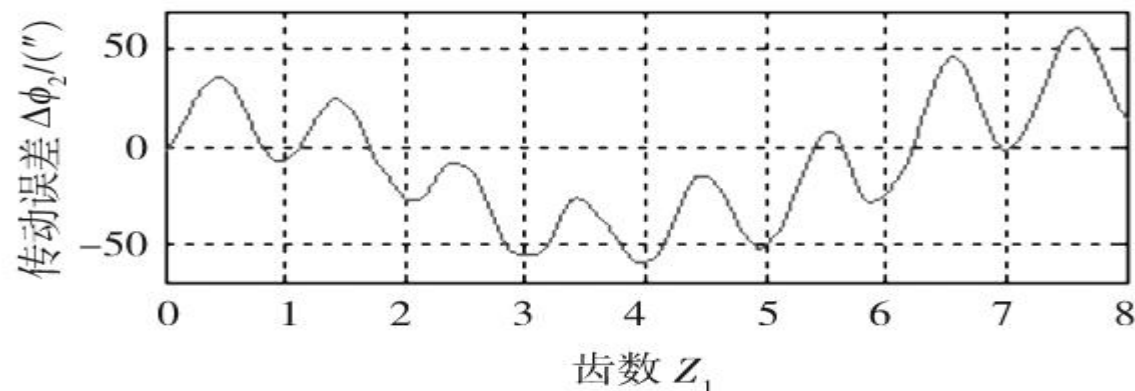
φ_1 φ_2 分为两个齿轮的转角



● 传动误差曲线



(a) 总体传动误差实测曲线



(b) 单齿传动误差实测曲线

传动误差分类

- 制造传动误差：由制造误差引起的
- 设计传动误差：与齿轮的设计参数有关的部分

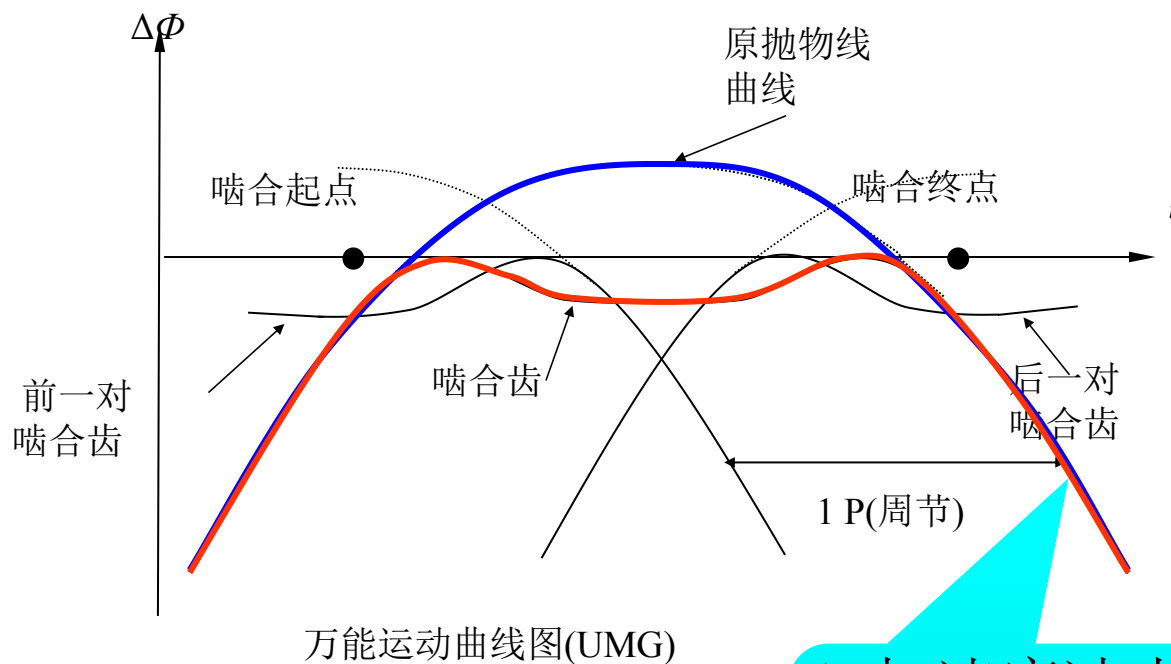
传动误差特征

- 随机性，随载荷波动
- 一定的周期性，与齿面修形和齿距误差周期变化

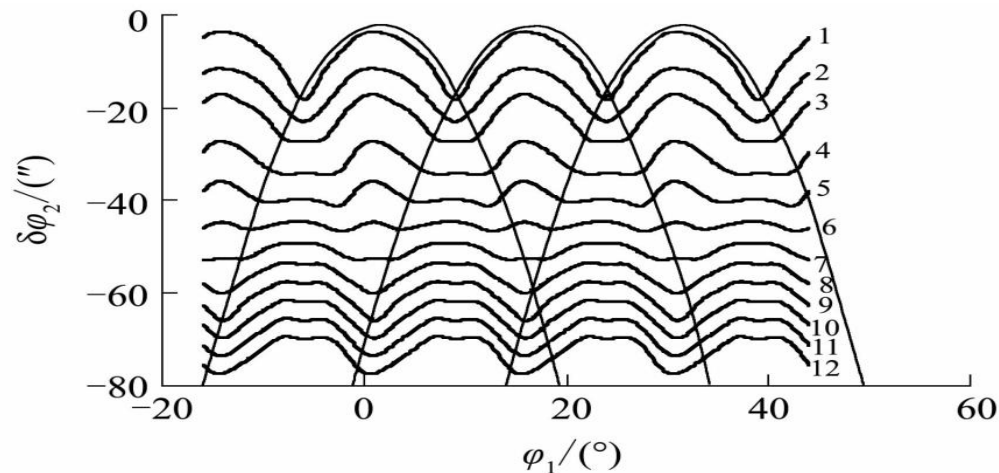
振动的传播



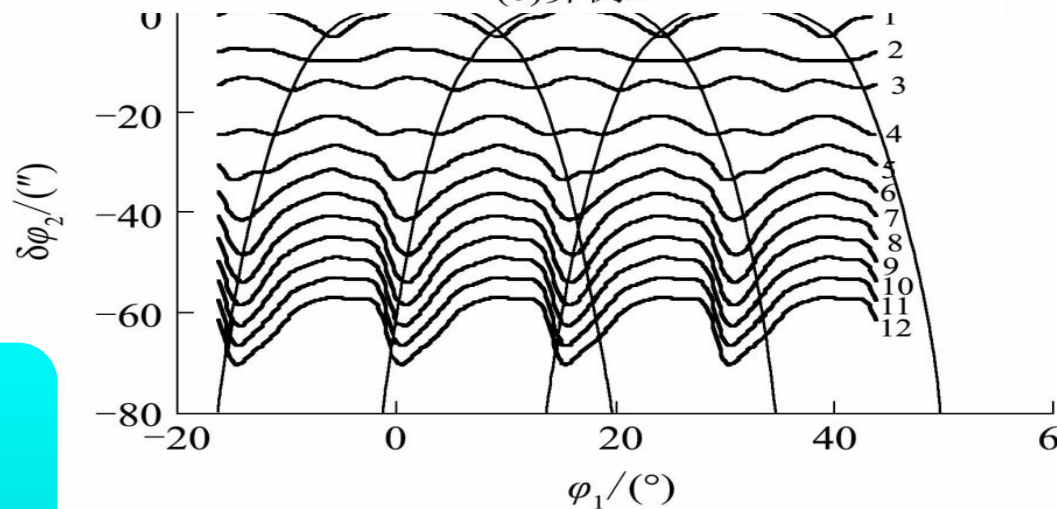
● 高阶传动误差



- 加速度冲击小
- 有效重合度大
- 改善振动和噪声



(b)算例2



(a)算例1

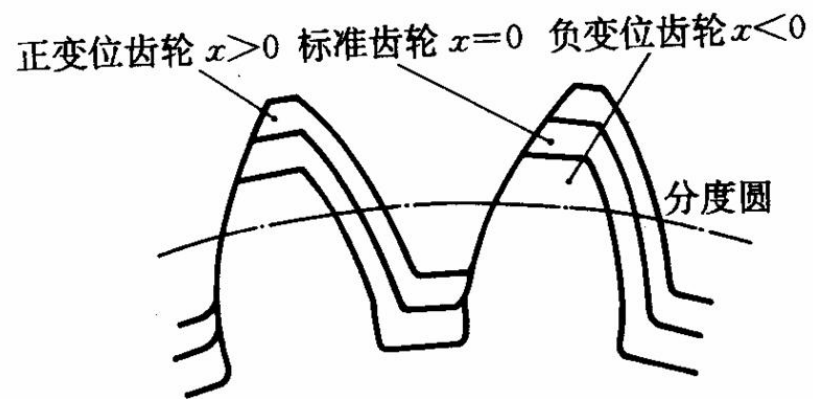
● 减少齿轮振动的措施

- 齿轮参数设计：增加重合度（增加齿数，负变位，增加齿顶高系数）
增加齿轮的刚性（增加模数，正变位，短齿）
- 齿轮加工精度：提高齿面光洁度，提高加工精度（减小齿距误差、基节偏差以及啮合角偏差）
单齿精度和啮合精度
- 齿面修形

● 减少齿轮振动的措施

- 齿轮参数设计： 增加重合度（增加齿数，负变位，增加齿顶高系数）
增加齿轮的刚性（增加模数，正变位，短齿）

齿轮变位可分为**高度变位**（变位系数 $x_1+x_2=0$ ）和**角度变位**（变位系数 $x_1+x_2\neq 0$ ）。

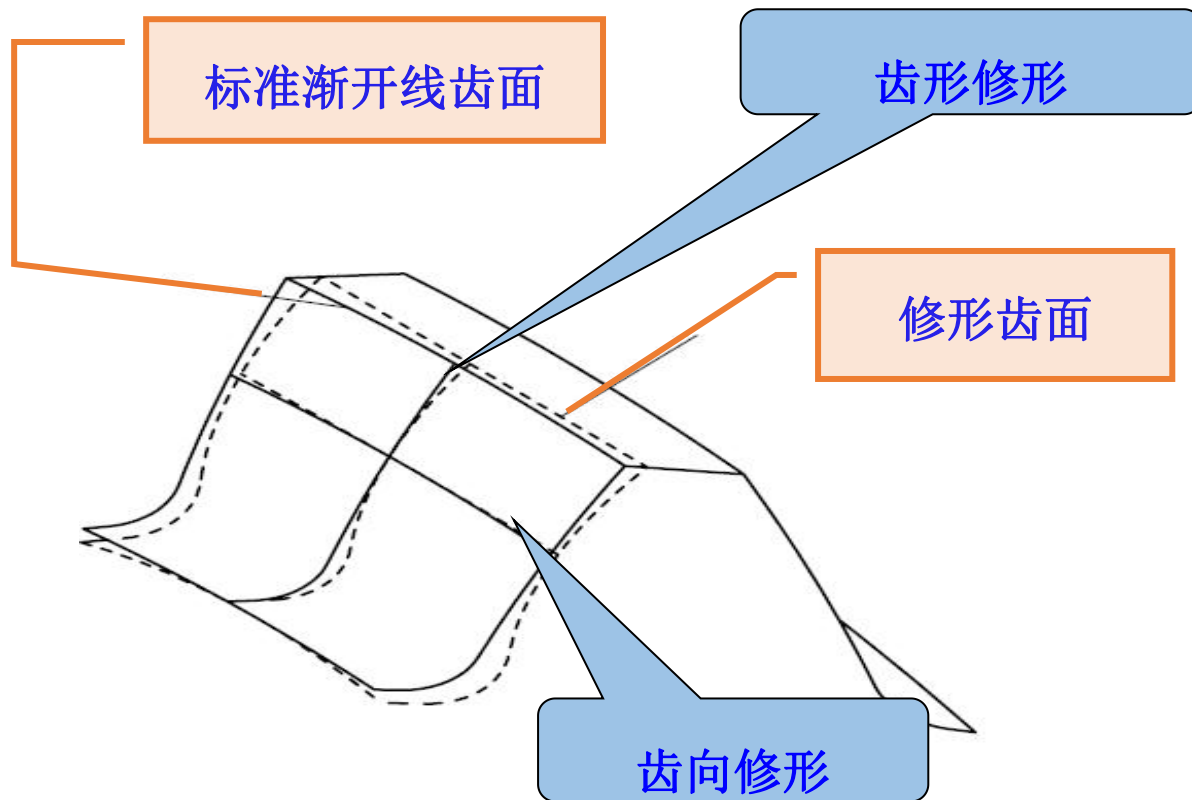


正变位时，齿顶圆和齿根圆也相应增大，齿根高减小，齿顶高增大，分度圆齿厚与齿根圆齿厚都增大，但齿顶容易变尖；

负变位时，齿顶圆和齿根圆也相应减小，齿根高增大，齿顶高减小，分度圆齿厚和齿根圆齿厚都减小。

● 轮齿修形

包括齿向(齿线)修形，齿形(齿廓)修形和齿面修形



齿向修形的原因:

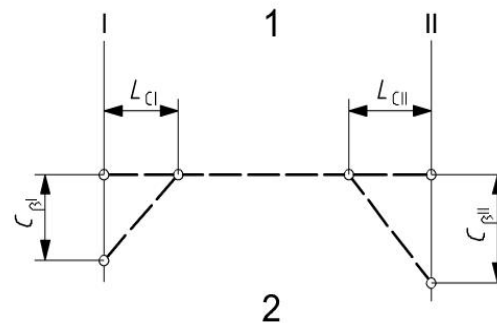
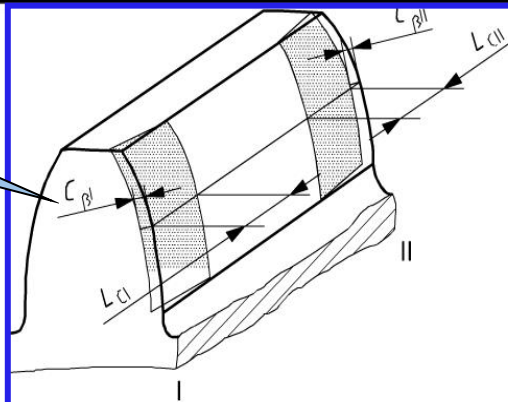
齿轮的安装误差，加工误差以及支撑轴的弯曲变形和扭转变形等。

齿形修形的原因:

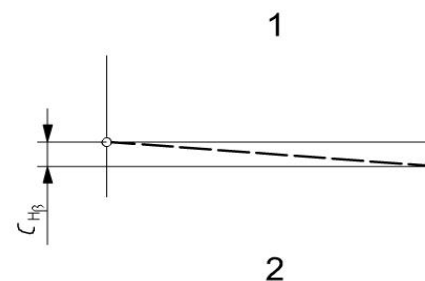
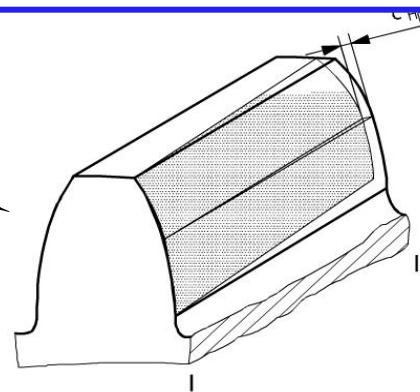
存在单双齿啮合，弹性变形，基节误差等，造成了齿轮之间的干涉，从而产生了啮入、啮出冲击。

● 齿向修形

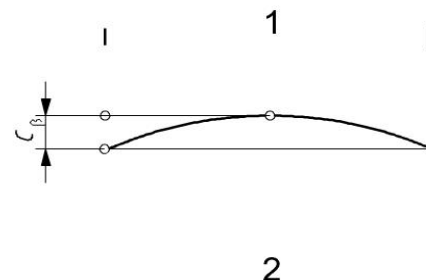
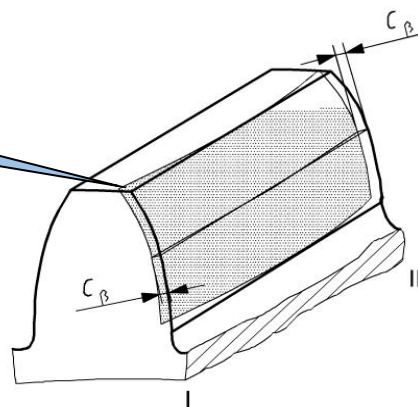
齿端修缘



螺旋线修形

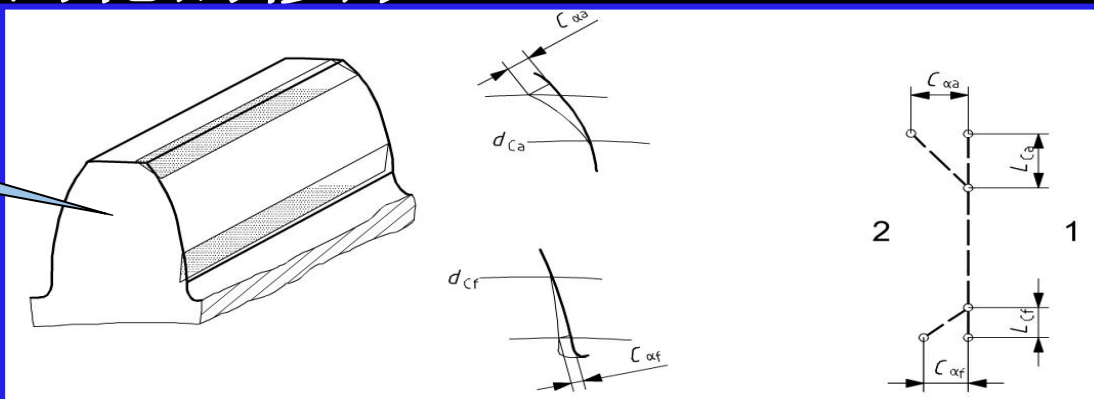


齿向鼓形修形

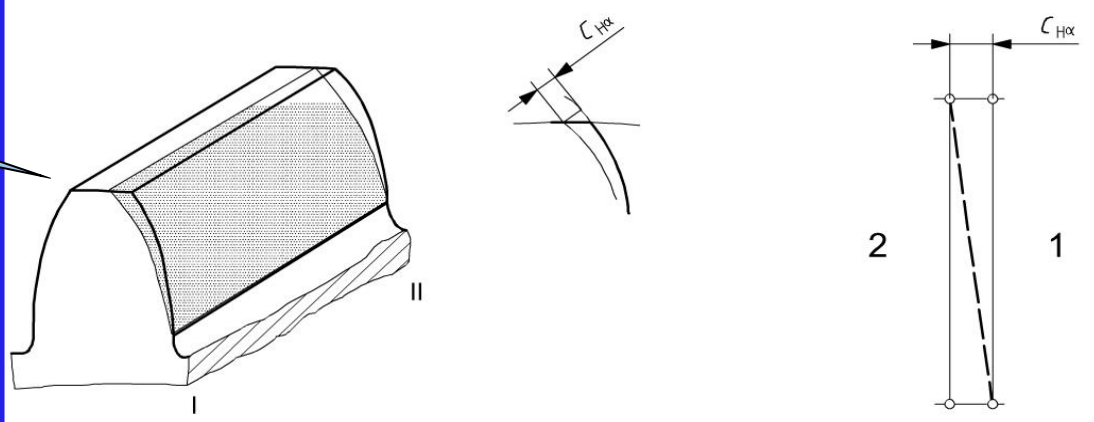


● 齿形修形

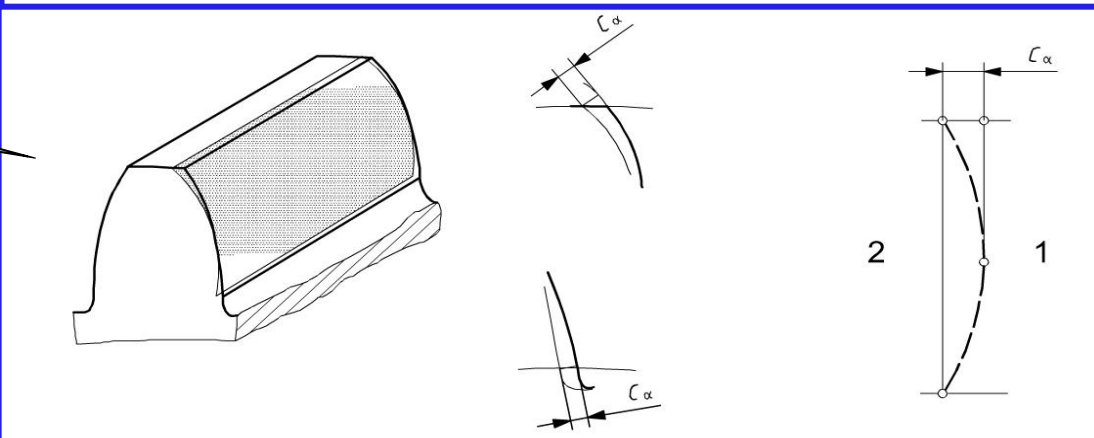
齿顶齿根修缘



压力角修形

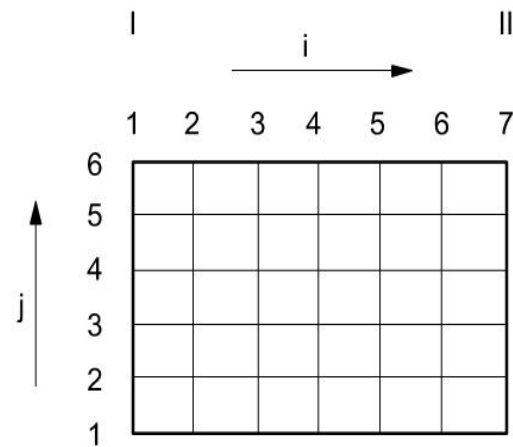
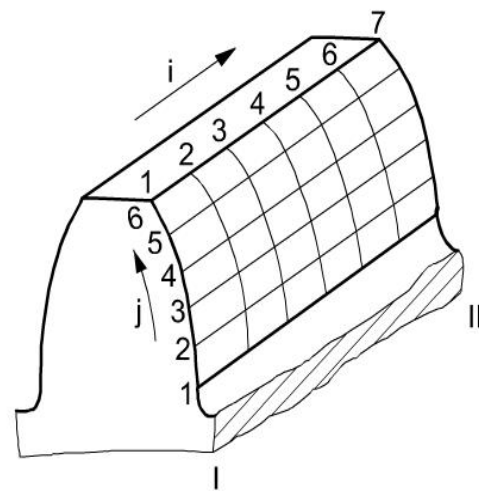


齿廓鼓形修形



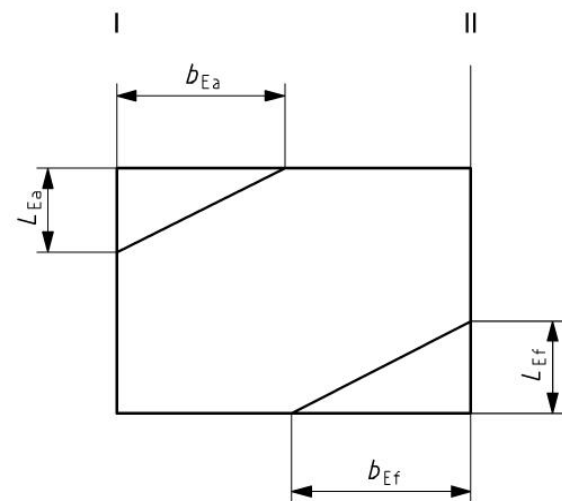
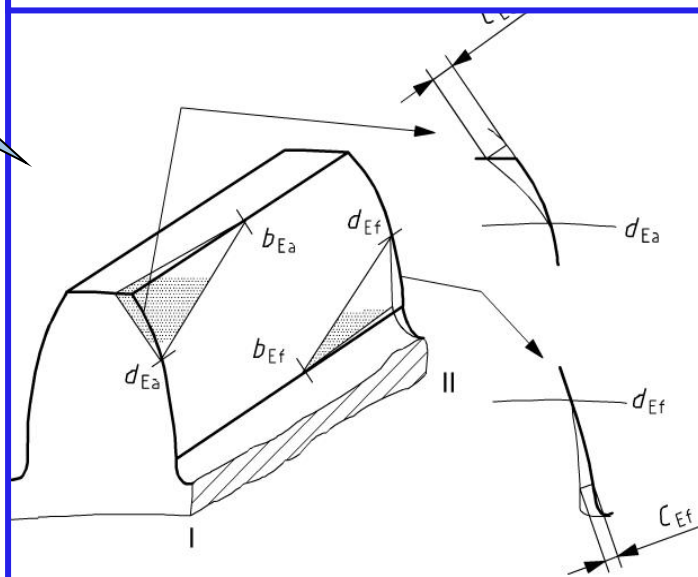
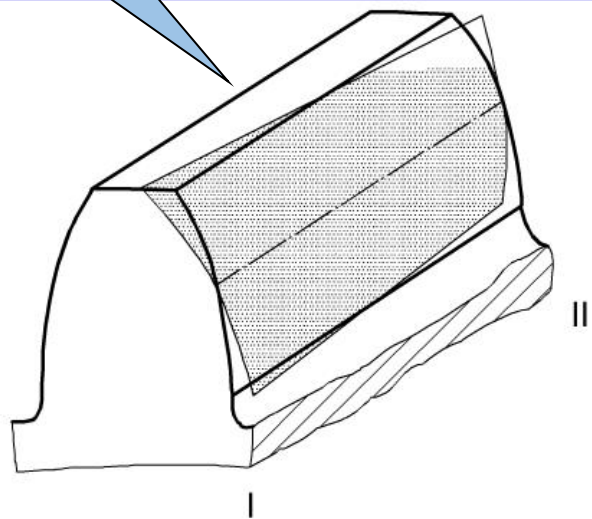
● 齿面修形

拓扑修形



齿面扭曲

对角修形



● 齿面修形量的计算

➤ 材料力学的方法

➤ 弹性力学的方法

➤ 数值解法：
 动力学方法
 有限元法
 边界元法

➤ 经验公式法



试
验
验
证

● 齿向修形:

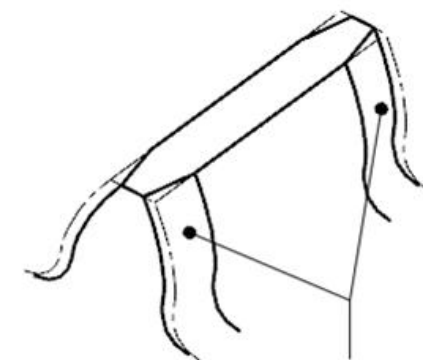
一般只对小齿轮进行修形，分为齿端修薄，鼓形修形，曲面修形。

➤ 齿端修薄

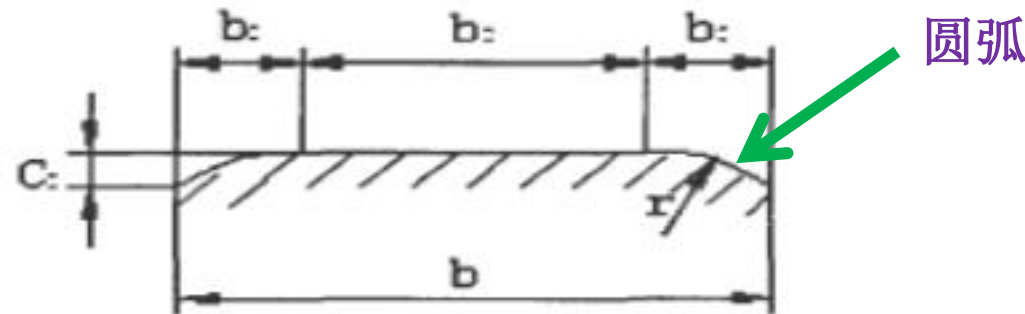
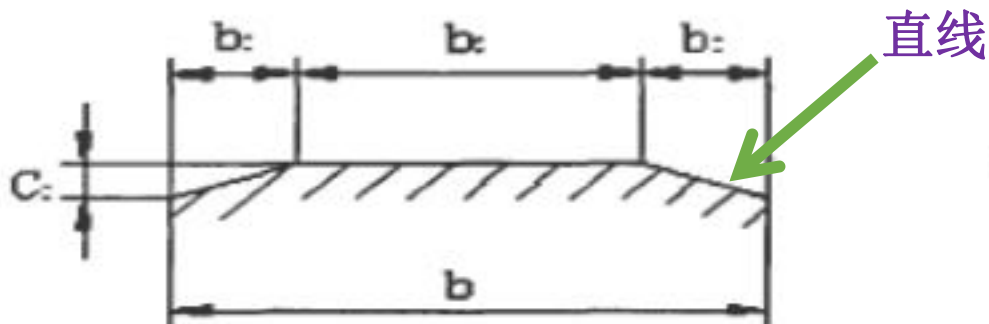
齿端修薄是将齿宽的两端部加以适当的倒角加工的方法。应用于一般工况下，对安装要求不严格的情况。

修形量: $\delta = 4f_{H\beta} \pm 0.02mm$ $f_{H\beta}$ — 螺旋线偏差

修形长度: $b_c \leq 2.2m_n + 5mm$ 或 $b_c \leq 0.1b + 5mm$



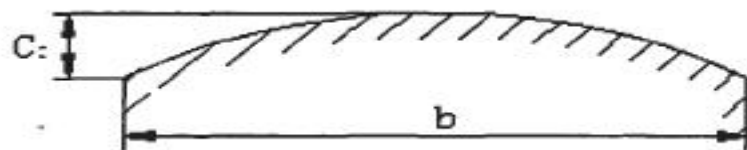
齿端修薄



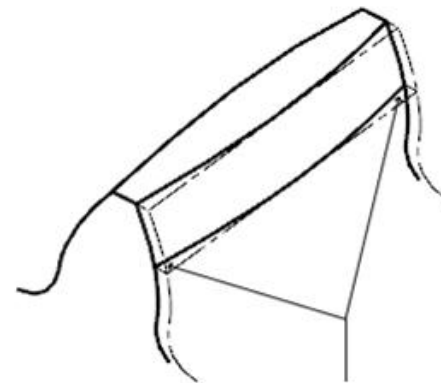
●齿向修形:

➤鼓形修形

适用于承载大的场合，鼓形量的确定很大程度上是依据经验公式进行修形，包括鼓形量大小和鼓形位置，修形量范围大致为**0.005~0.05mm**



鼓形修形



鼓形加工

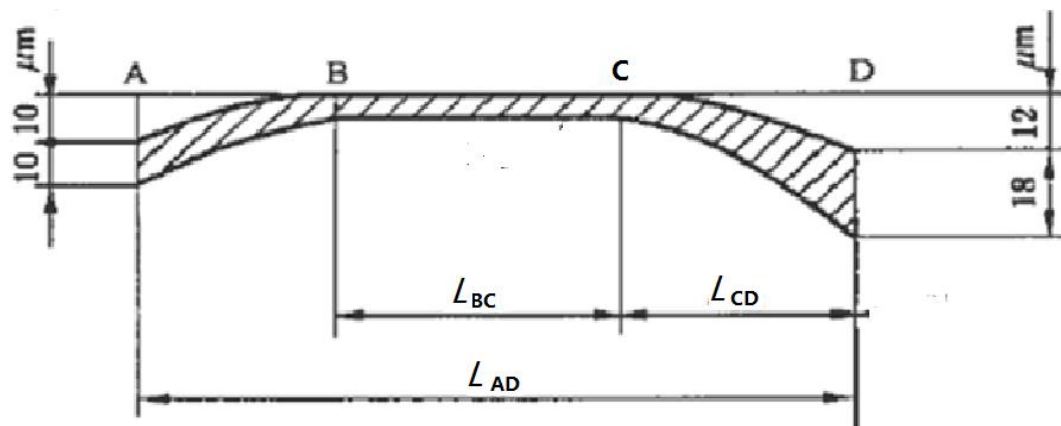
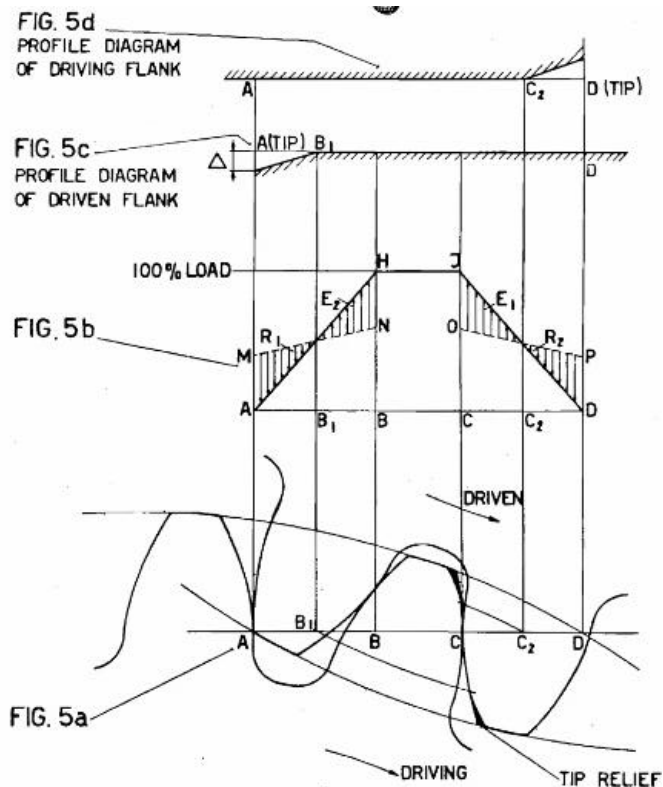
➤曲面修形

根据材料在工况条件下、温度影响下的变形计算出加工曲面。曲面修整效果较好，是较理想的修形方法，但计算比较麻烦。

●齿形(齿廓)修形

齿形修形包括长修形和短修形，修形部分的曲线可以是改变压力角的渐开线、直线、圆弧线、抛物线等，不论是那一种曲线均应与未修形部分的渐开线必须平滑过渡。

轮齿啮合载荷变化

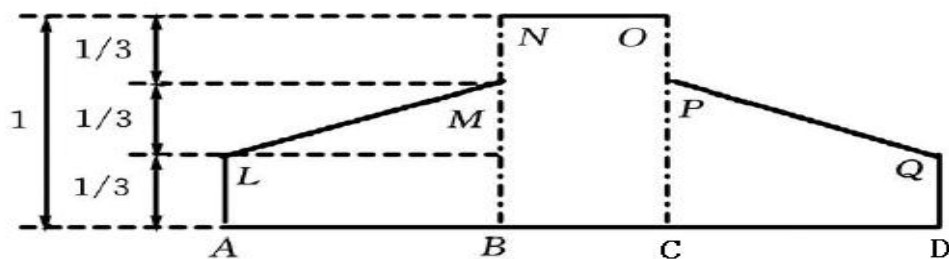


齿廓修形公差带

- A 双齿啮合起点
- B C 单双齿交替点
- D 双齿啮合终点

●齿形(齿廓)修形

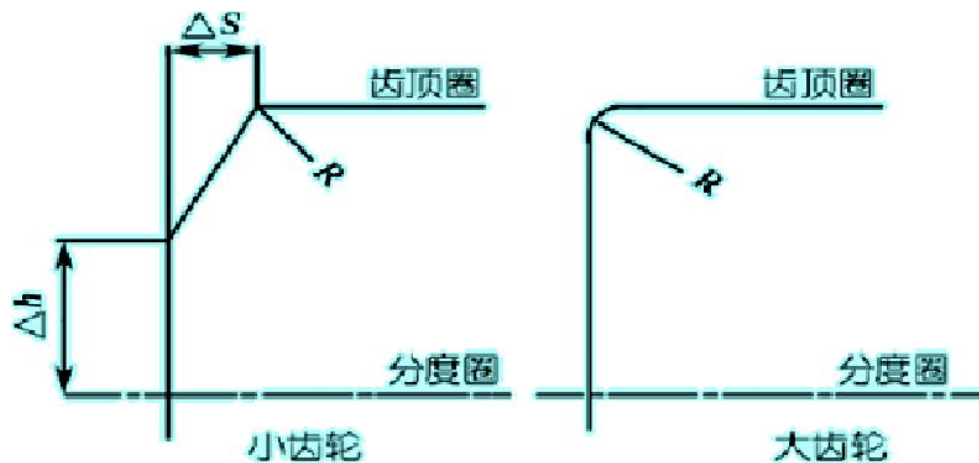
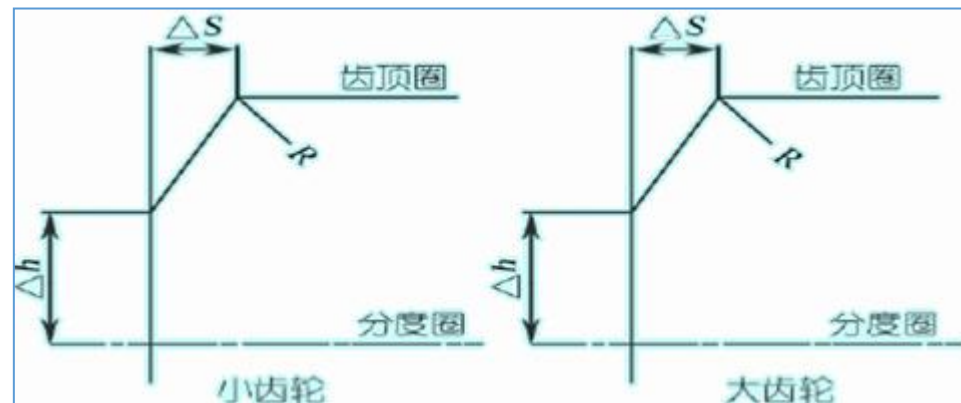
- **长修形** 由双齿啮合起点(或终点)修到临近的单齿啮合点, 在满载工况下啮合振动和噪声最小。当使用载荷较小, 尤其在接近空载时, 啮合重合度变小, 振动和噪声显著增大。因此, 只适用于大螺旋角或大重合度的齿轮。
- **短修形** 由双齿啮合起点(或终点)到长修形的 $1/2$ 处, 由于短修形保留有一半的两对齿啮合区, 重合度恒大于1, 运转平稳。因此, 短修形适用于直齿或一般螺旋角的斜齿轮。



- A 双齿啮合起点
- B C 单双齿交替点
- D 双齿啮合终点

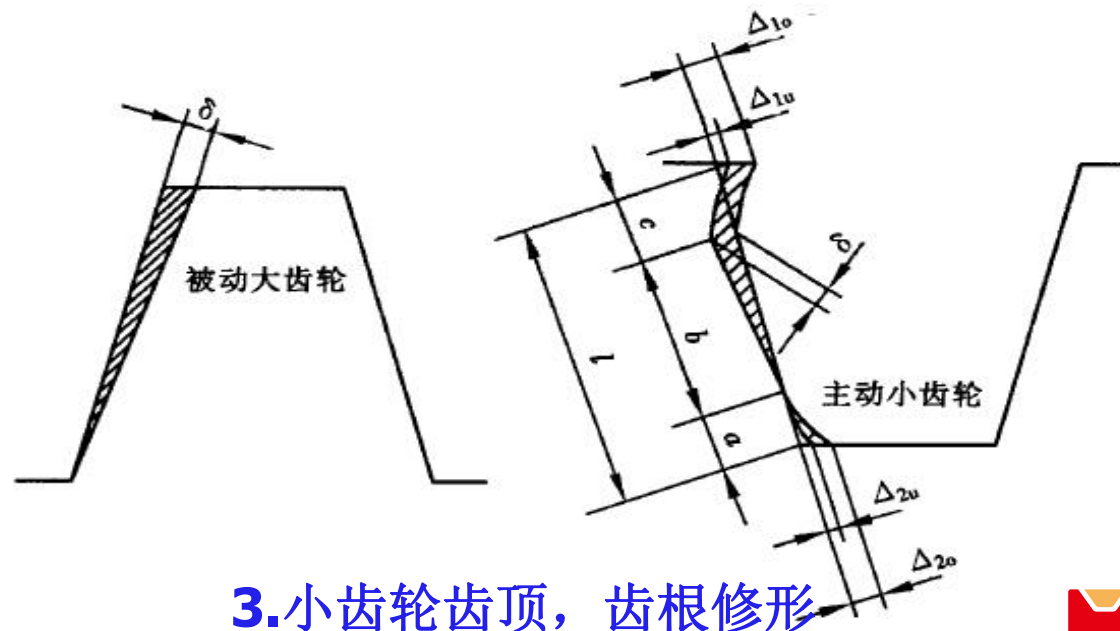
●齿形(齿廓)修形

齿廓修形的三种组合方式



1.小齿轮齿顶修缘

2.大、小齿轮齿顶修缘



3.小齿轮齿顶, 齿根修形

● 齿廓偏差和螺旋线偏差

齿廓形状偏差，齿廓倾斜偏差，螺旋线形状偏差和螺旋线倾斜偏差这些数值对齿轮的性能和强大有重要的影响，

形状偏差可以通过改善切齿方法，减小加工余量达到，

倾斜偏差，如果一对齿的倾斜斜率相等，符号相同，其偏差可以相互抵消，所以标准中不作为强制性检验项目，由用户协商解决。

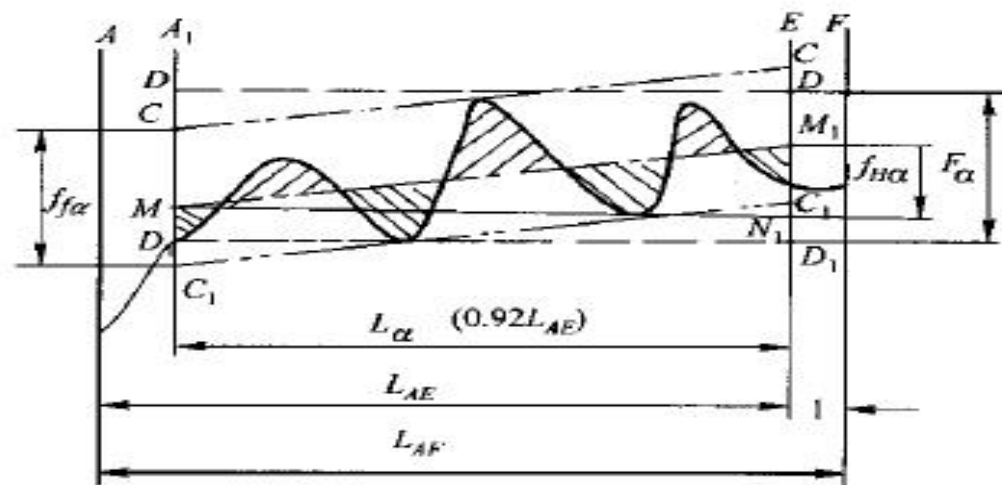


图1 齿廓曲线

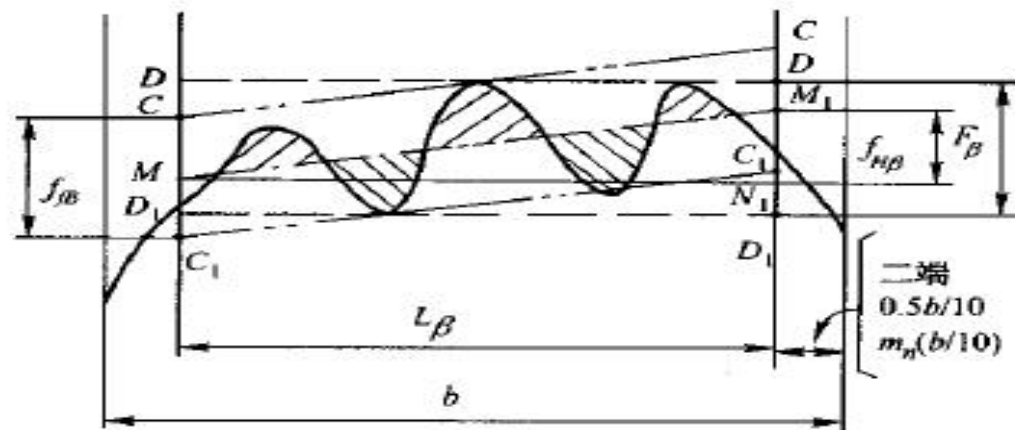
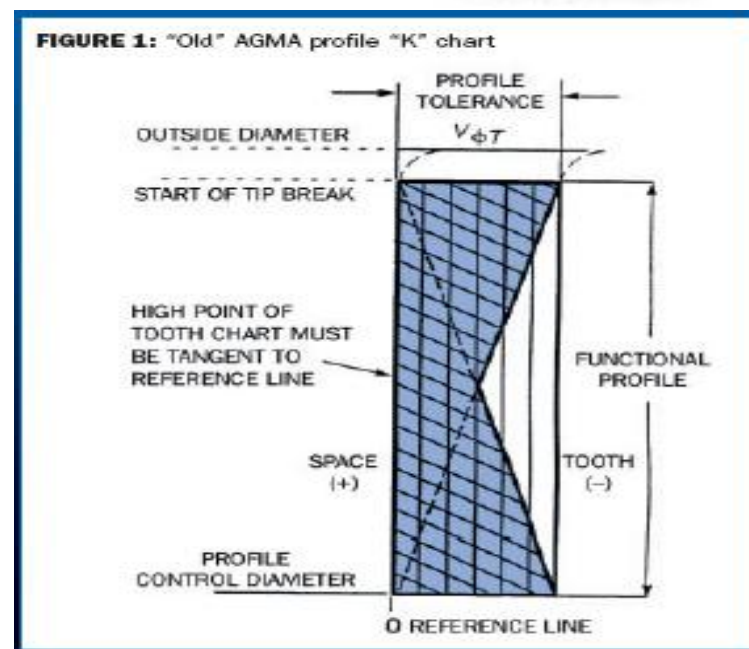
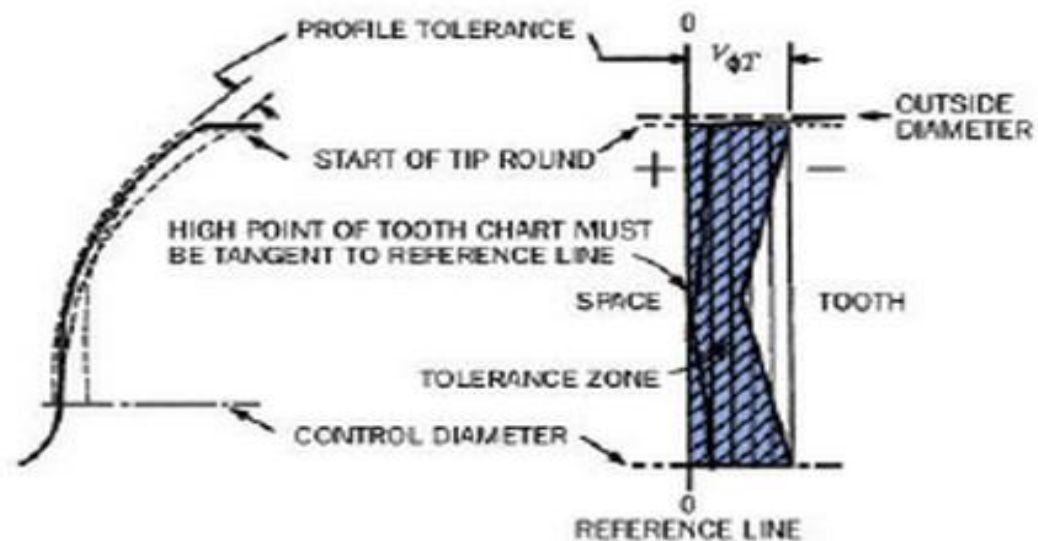


图2 螺旋线曲线

● K形齿

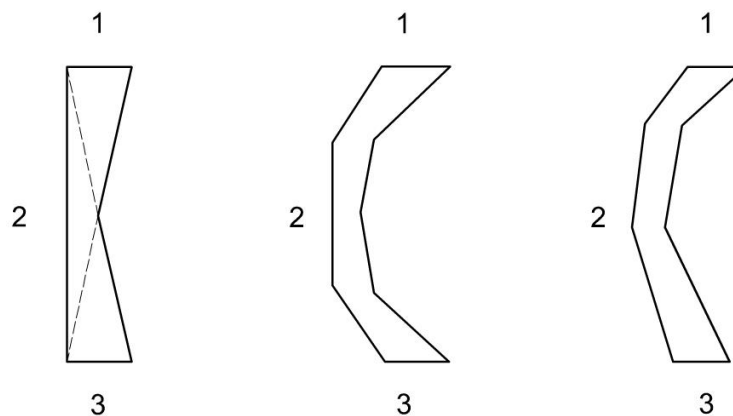
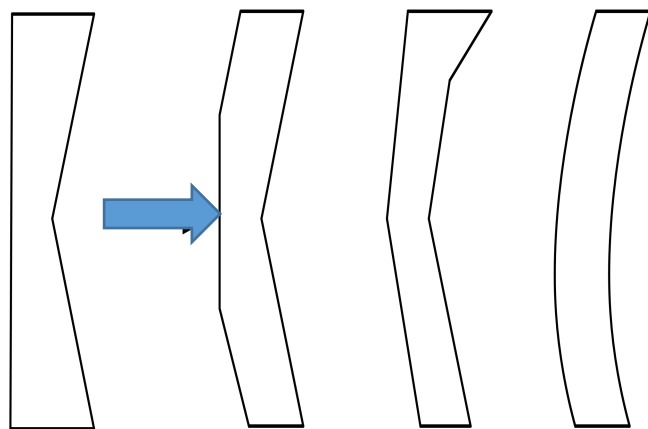
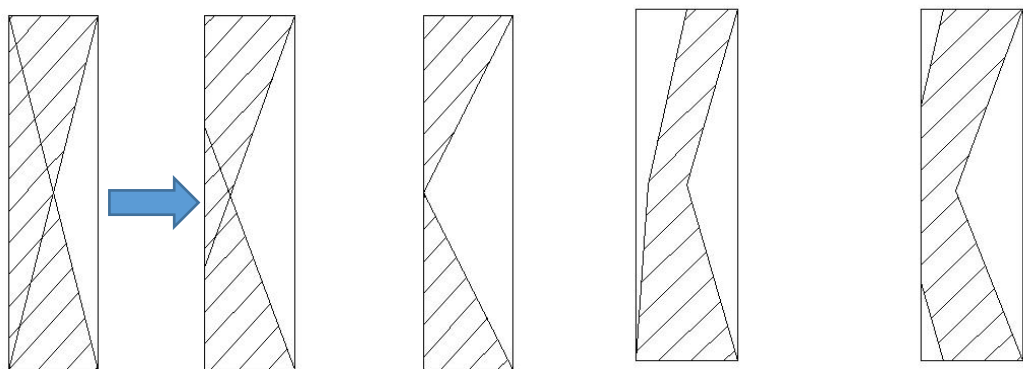
K形齿是以渐开线为基础，考虑到齿轮加工误差和材料因载荷引起的弹性变形等产生的噪声，对齿廓进行修正的齿形。

齿廓或螺旋线的偏差图呈“K”形，故俗称K形齿。

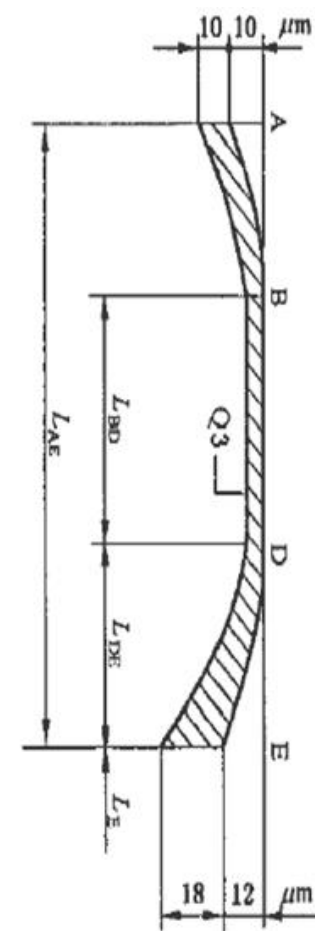


● K形图

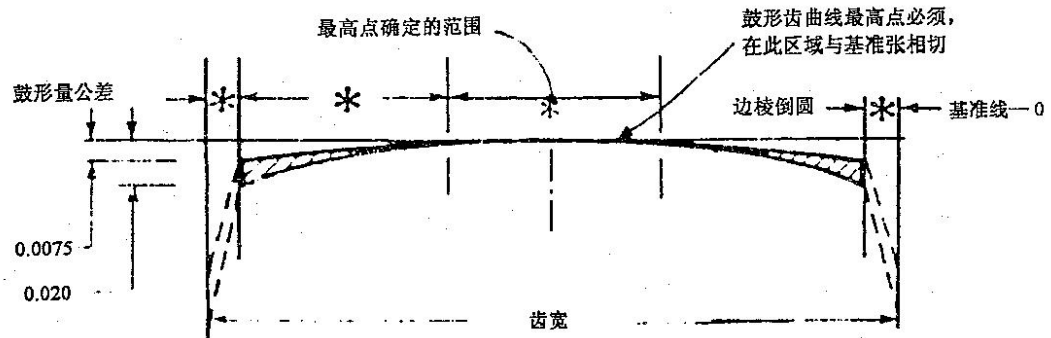
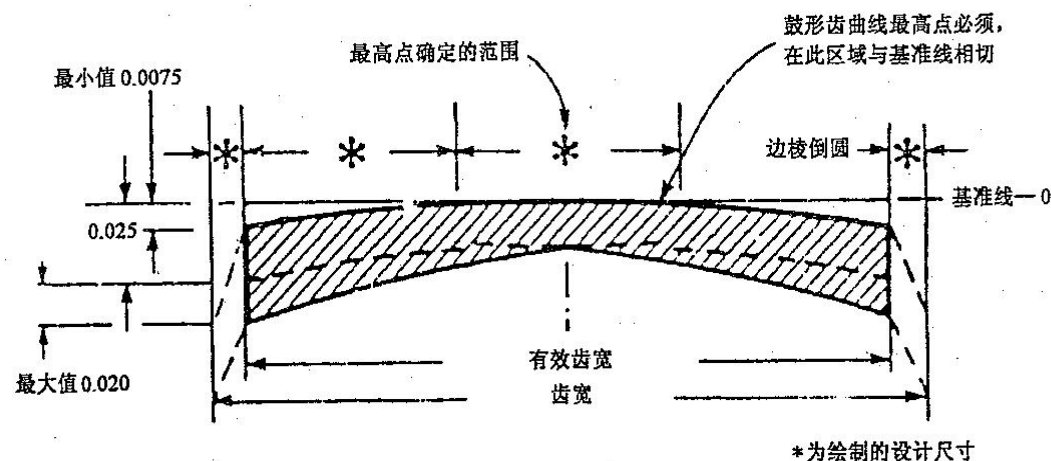
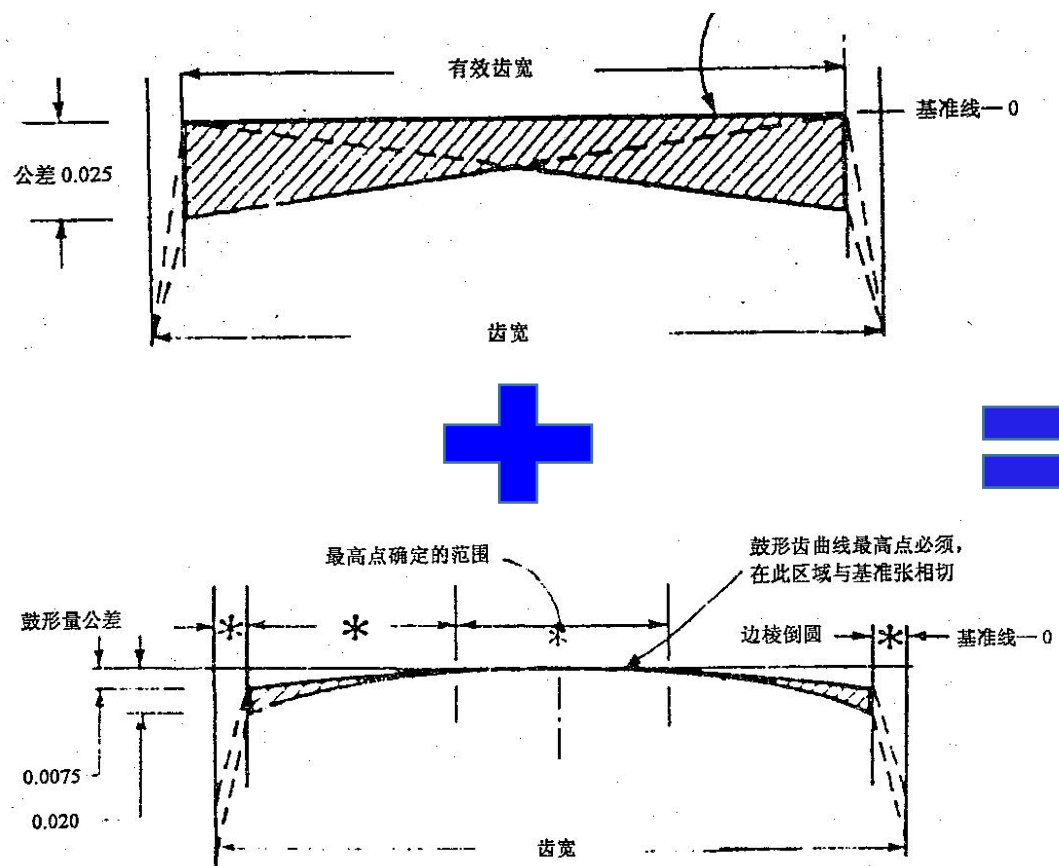
用某一等级的标准公差和用公差带图法综合评定齿廓的精度



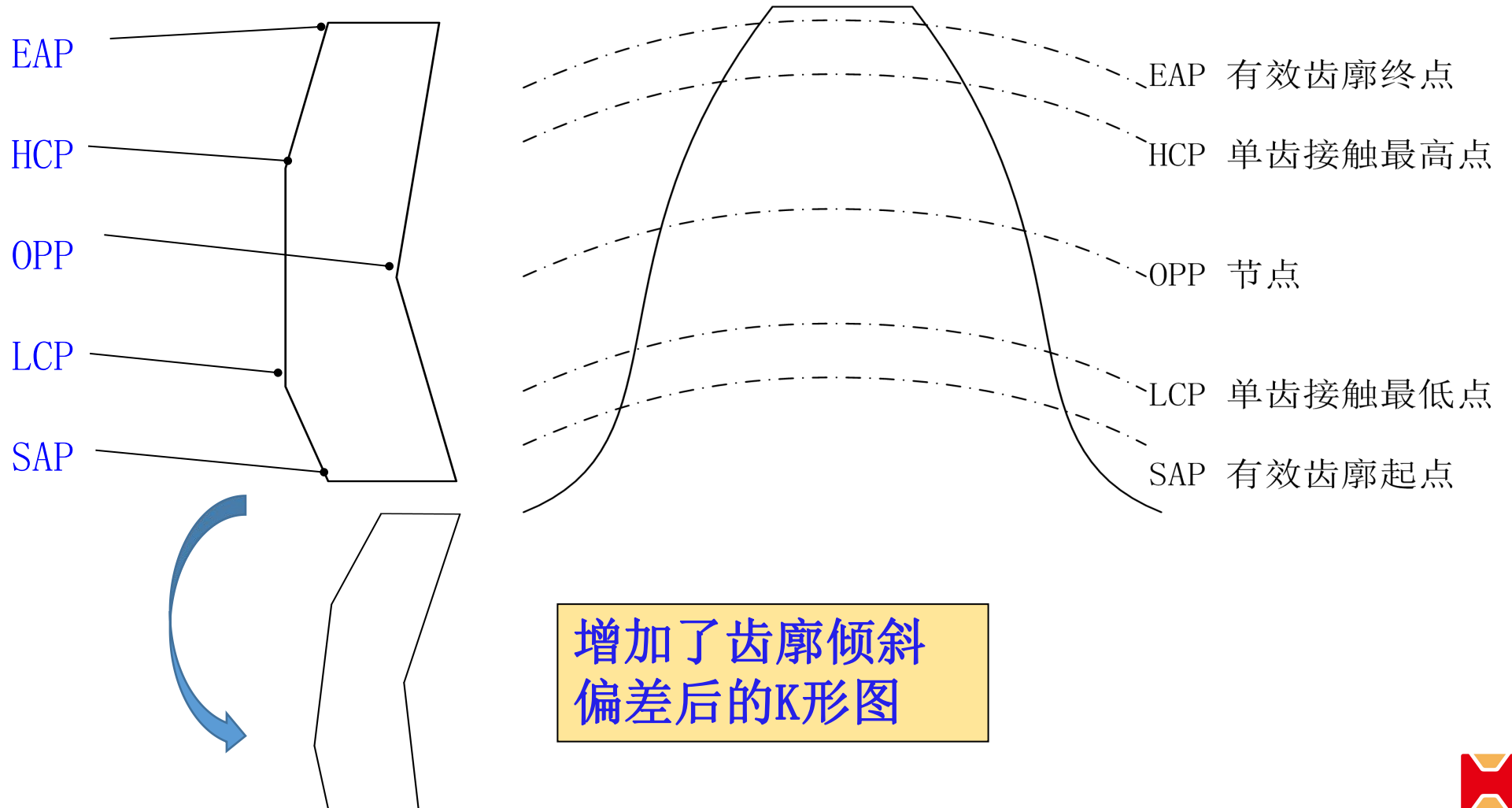
实际中常用**K形图**来评价齿廓总偏差。齿形公差带是对方向误差和单纯形状误差两种误差分量的综合控制。



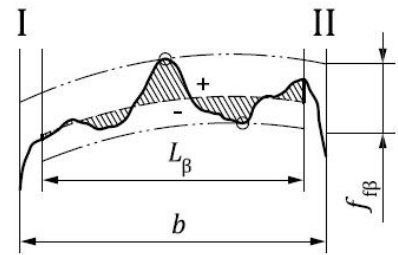
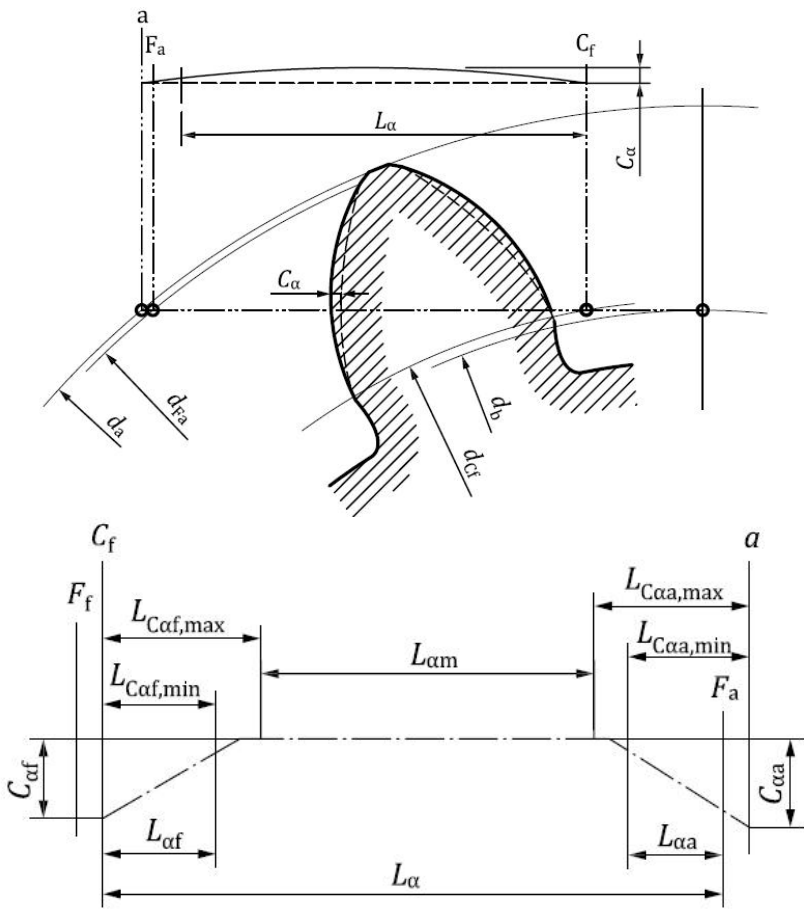
齿向和齿廓修形是为了获得特殊的齿形，图一表示了一个典型的齿形公差K形图，图二表示鼓形量K形图，图三表示公差和鼓形量的叠加图。



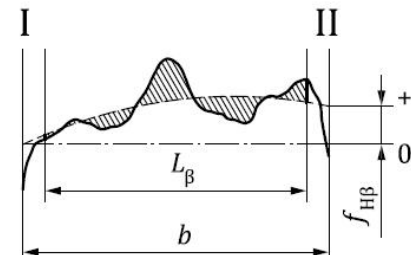
● 齿廓K形图上各点的含义



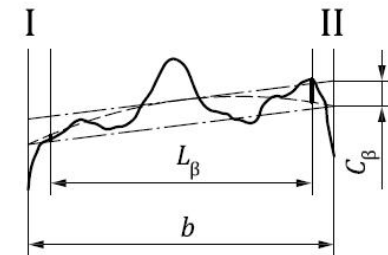
● ISO1328-1 2013对齿廓和齿向偏差的评定



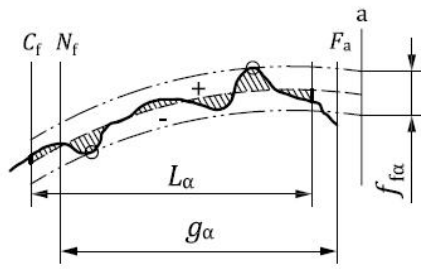
a) Helix form deviation



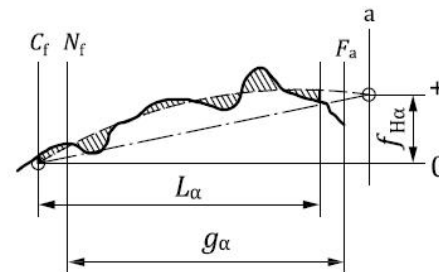
b) Helix slope deviation



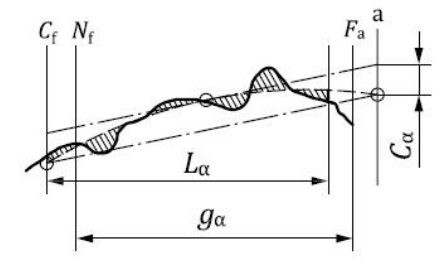
c) Helix crowning



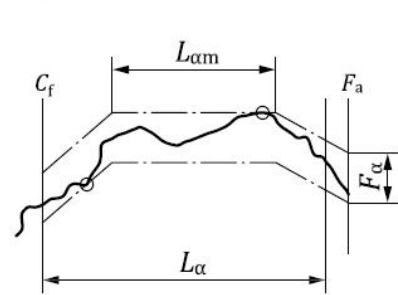
a) Profile form deviation



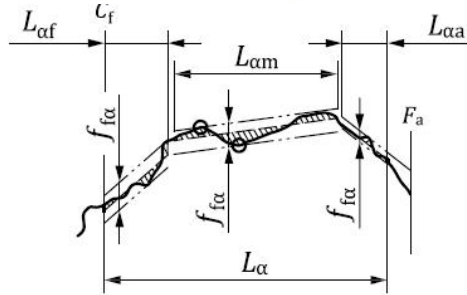
b) Profile slope deviation



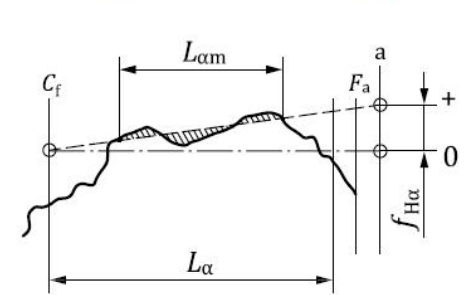
c) Profile crowning



a) Total profile deviation



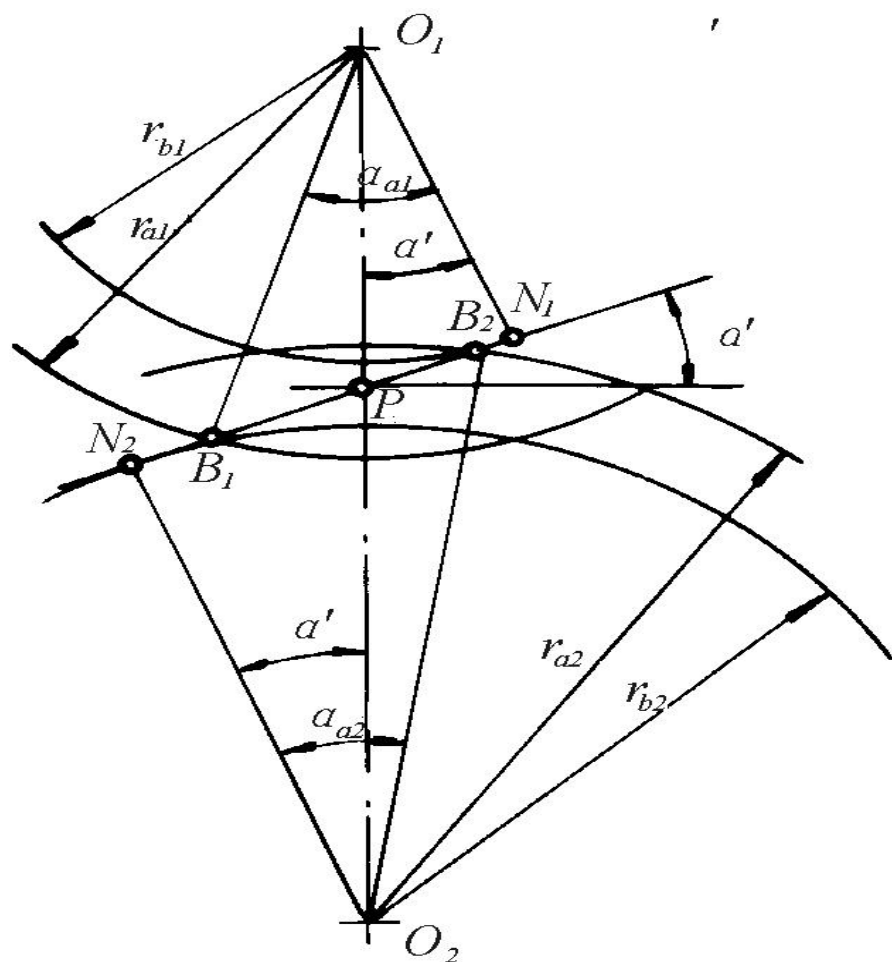
b) Profile form deviation



c) Profile slope deviation

● K形图的计算过程

第一步:计算重合度



(1) 计算啮合压力角

$$\alpha' = \cos^{-1} \frac{r_{b1} + r_{b2}}{A}$$

(2) 计算啮合节圆半径

$$r_1' = \frac{r_{b1}}{\cos \alpha'} \quad r_2' = \frac{r_{b2}}{\cos \alpha'}$$

(3) 有效啮合长度

$$B_1B_2 = \sqrt{(r_{a1}^2 - r_{b1}^2)} + \sqrt{(r_{a2}^2 - r_{b2}^2)} - A \cdot \sin \alpha'$$

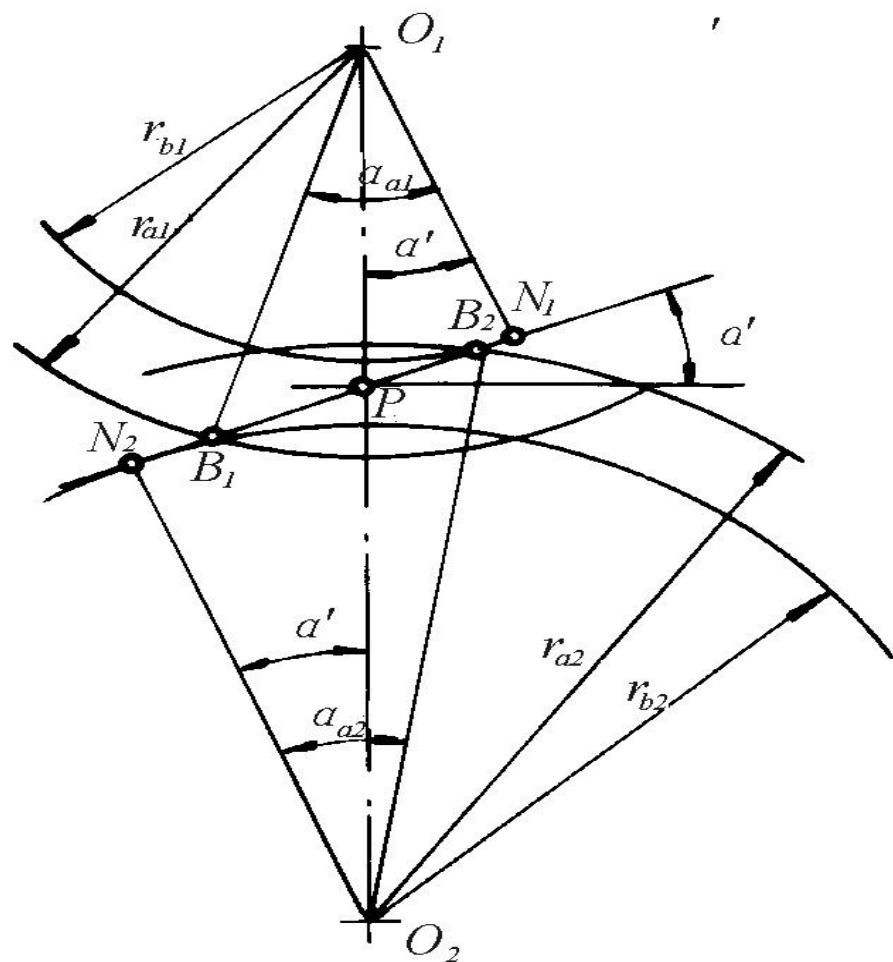
(4) 基节

$$P_b = \pi m \cos(\alpha)$$

(5) 重合度

$$\varepsilon = \frac{B_1B_2 - C}{P_b} \quad C \text{为齿顶倒角长度}$$

● K形图的计算过程



第二步:修形量的计算

(1) 计算有效齿廓啮合的最大终点曲率半径

$$\rho_{1\max} = B_1N_1 = \sqrt{(r_{a1}^2 - r_{b1}^2)}$$

$$\rho_{2\max} = B_2N_2 = \sqrt{(r_{a2}^2 - r_{b2}^2)}$$

(2) 计算啮合最低点的最小曲率半径

$$\rho_{1\min} = B_2N_1 = A \cdot \sin \alpha' - \sqrt{(r_{a2}^2 - r_{b2}^2)}$$

$$\rho_{2\min} = B_1N_2 = A \cdot \sin \alpha' - \sqrt{(r_{a1}^2 - r_{b1}^2)}$$

(3) 计算齿顶的修缘量和齿根修缘量 δ

$$\delta = 0.0075\sqrt{m} \pm 0.003 \text{ mm}$$

方法一

通常在0.007 mm~0.03 mm之间

● K形图的计算过程

方法二

小齿轮

大齿轮

$$\delta_{\min} = 25.4(2 + 0.16Q) \cdot 10^{-4}$$

$$\delta_{\min} = 25.4(0 + 0.16Q) \cdot 10^{-4}$$

$$\delta_{\max} = 25.4(5 + 0.16Q) \cdot 10^{-4}$$

$$\delta_{\max} = 25.4(3 + 0.16Q) \cdot 10^{-4}$$

方法三

一般工况齿轮齿顶齿根修形量/mm		
模数	修形量	倒角
1.5-3	0.005-0.010	0.125
3-5	0.010-0.015	0.25
5-8	0.015-0.020	0.5
8-10	0.020-0.025	0.75

重载齿轮和硬齿面齿轮修形量/ μm		
	直齿轮	斜齿轮
渐开线起点修形量	0.05Q	0.04Q
齿顶圆修形量	7.5+0.05Q	3.5+0.04Q
起点有效带宽	7.5+0.05Q	5+0.04Q
齿顶修形有效带宽	15+0.05Q	12.5+0.04Q

Q为单位齿宽上的作用力

$$Q = \frac{Tr}{B} \quad T = \frac{9549P}{n}$$

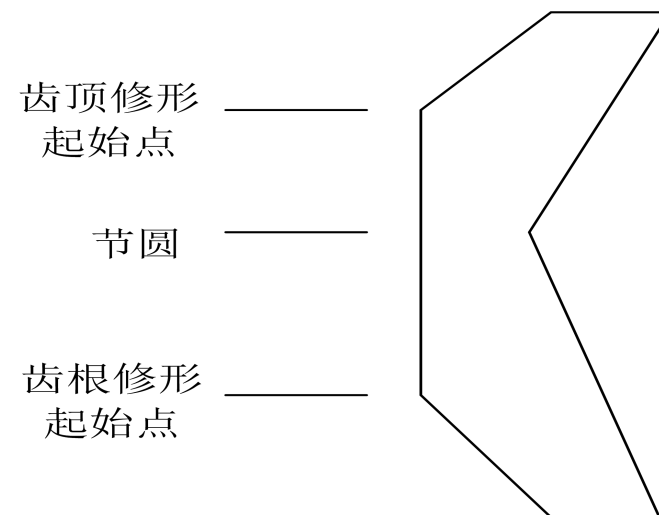
T扭矩NM, **P**功率kW, **n**转速rpm

● K形图的计算过程

(4) 齿轮修形起始点

齿顶最小修缘起始点 $(a_1, a_2) = \frac{B_1 B_2}{2} - (0.45 \sim 0.5) P_b$

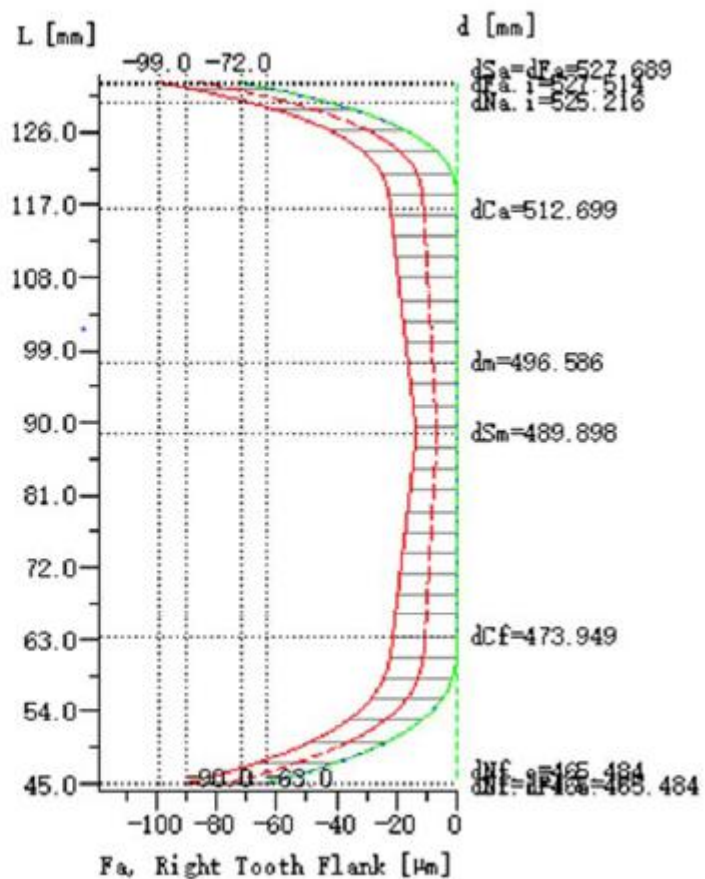
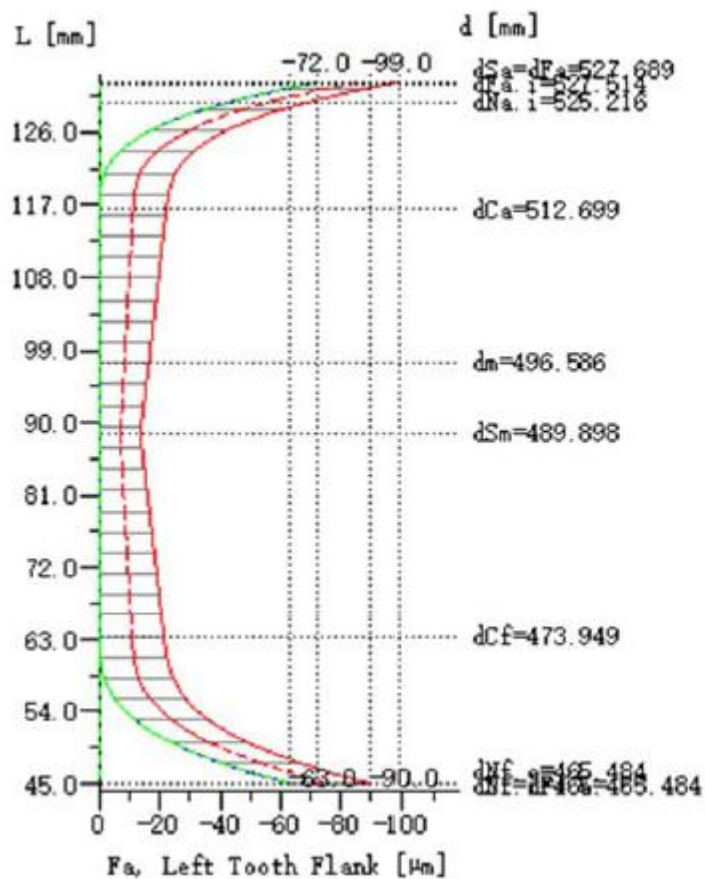
齿根最大修缘起始点 $(b_1, b_2) = 1.2(a_1, a_2)$



第三步 遵循主动轮基节略大于从动基节的总原则，选取适当的齿形，选主动轮齿形正向最大为0.01 mm，最小为零。

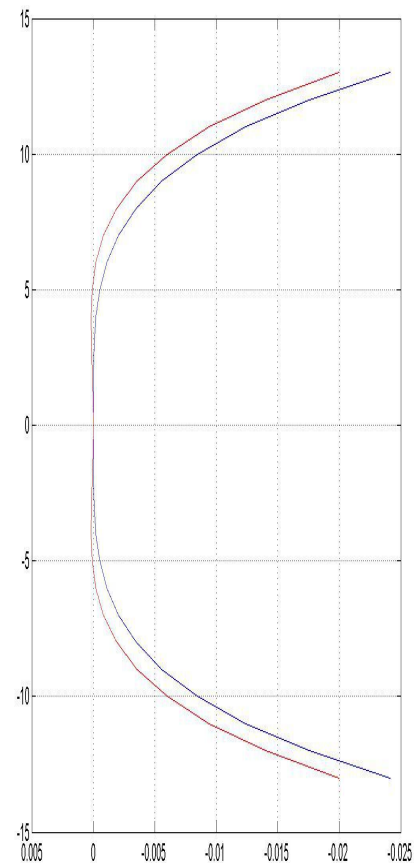
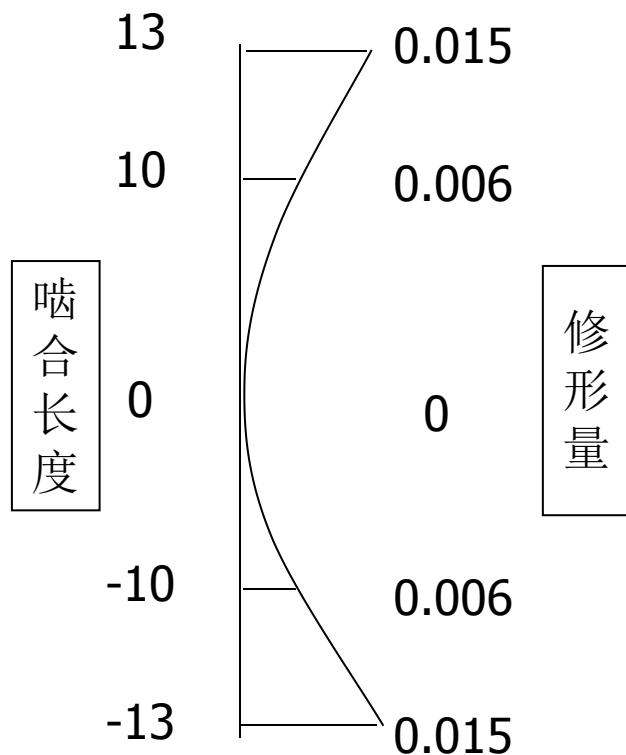
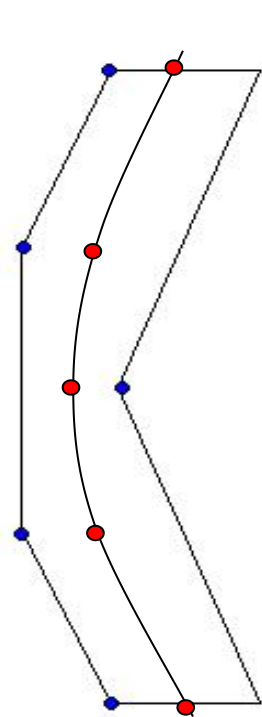
第四步 根据齿轮精度要求，工作状况等，参考齿轮的相关标准，给出该齿轮的齿廓形状偏差，并且中凹量不大于0.005mm

● K形图的计算过程



● 高阶抛物线修形曲线

$$\Delta L = Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 + Dx + E$$



$$A = -0.0085e-4$$

$$B = 0$$

$$C = 0$$

$$D = 0$$

$$E = 0$$

Thanks!

Shenzhen Longhua District Road No. 16 An Hongji waves of Creative Industrial Park building C.

深圳市龙华新区大浪创艺路16号安宏基工业园C栋

T - 18929357195 E - 2850623673@qq.com

www.hefagear.com

www.szhfcl.com

www.hefacd.com

传动工程师的在职学院



iHF 齿轮学堂



合发齿轮微信公众号