弧齿锥齿轮

常用加工方法介绍

上海第一机床厂技术資料室

1971年9月

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

目　录

一 前 言

加工正常的收缩弧齿锥齿轮，常用平顶齿理原理，（图一），工件按根锥角安装。若刀盘内刀齿与外刀齿的齿形角相等，则加工出的轮齿凹面和凸面的法向齿形角，即在节锥母线上的法向齿形角是不相等的。

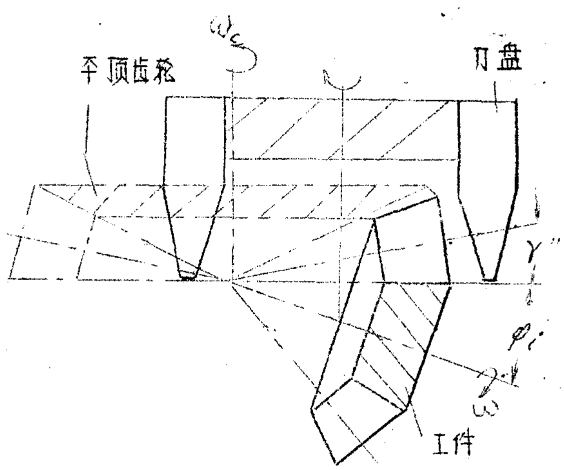

图 1－1

加工出的一对齿轮就不能正确啮合，为此，我们对刀盘的内外刀齿的齿形角给予修正，使一对加工出的齿轮啮合面中点的法向齿形角相等。刀齿齿形角的修正值$\Delta\alpha$按下式确定。

$$\Delta\alpha=\frac{\gamma_1''+\gamma_2''}{2}\sin\beta_c$$

对于刀齿外刀刃则减小$\Delta\alpha$，内刀刃增大$\Delta\alpha$。

为了计算方便我们引进“刀号”这个名称，刀号N°以下式确定

$$N^\circ=\frac{\Delta\alpha}{10}=\frac{\gamma_1''+\gamma_2''}{20}\sin\beta_c$$

并且，把刀号标准化，从0，$\frac{1}{2}$，1，1$\frac{1}{2}$………20。

由于刀盘出现了“刀号”，刀盘的种类极其烦杂，为了便于组织生产，这里按生产量的大小，介绍几种常用的加工方法。

二、固定调整法

㈠固定调整法的一般情况

固定调整法适用于大量生产，采用此方法加工，必须准备专用的刀盘，此刀盘，错刀量，刀号，切削方法都由被加工的齿轮副的要求而确定。

它由下列五个工序组成：

1. 用粗切双面刀盘粗切大齿轮。
2. 用精切双面刀盘精切大齿轮。
3. 用粗切双面刀盘粗切小齿轮。
4. 用单面外刃刀盘精切小齿轮凹面。
5. 用单面内刃刀盘精切小齿轮凸面。

由于在计算时采用了完善的修正，加工齿轮质量较好。如果为适应大量生产，采用五台机床固定五个工序来进行生产，更为理想。

如果所加工的齿轮副传动比大于3者，为平衡五台机床的负荷，可用半滚切法，藉以缩短大齿轮的加工时间，效果甚为显著。

㈡刀号制度

由图1－1可知，以平顶齿轮原理，加工收缩齿弧齿锥齿轮。刀盘轴线垂直于齿轮根锥母线，而不垂直于齿轮的节锥母线，因此，刀盘的齿形角不等于工件的压力角，我们先讨论齿轮的凸面，图2－1中的圆锥面代表刀盘的内工作侧刃所形成的圆锥面，即假想平顶齿轮的牙齿凹面，也就是说，此时刀盘的内工作侧刃在切削齿轮牙齿的凸面。

图2－1中符号为：

B点—平顶齿轮节锥齿线上的任意一点

γ''角—被切齿轮的齿根角

α角—刀齿的齿形角

η角—平面T与平面H的交线和直线$\overline{mB}$ 在平面H上的投影所夹的角

λ角—角度β在平面H上的投影。

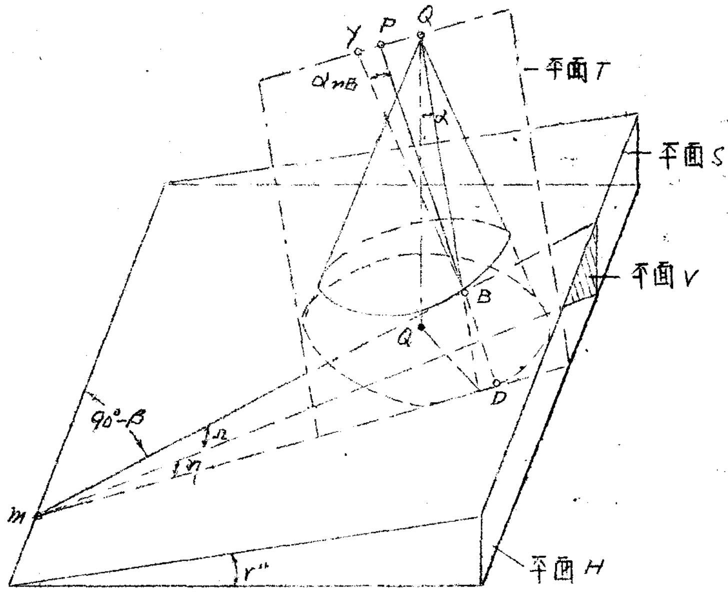

图　2－1

设平面N－N过B点并垂直于直线$\overline{mB}$ 而与平面T相交于直线$\overline{DBY}$（图2－1中未表示平面N-N），那末平面N-N 就是平顶齿轮牙齿在节锥齿线B点处的法向剖面，在图2－2中，直线$D^V B^V Y^V$ 就是这个法向剖面在垂直平面V上的迹线。

直线$\overline{BP}$过B垂直于平面S，（故$\overline{BP}$亦在法向剖面中），那末，直线$\overline{BP}$与直线$\overline{BY}$之间的夹角∠PBY就是假想平顶齿轮牙齿凹面在B点的法向压力角，用$\alpha_{n凸}$ 表示。

若将直线$\overline{PB}$延长到平面H中的E点（图2－2），则直线$\overline{BD}$与直线$\overline{BE}$之间的夹角∠DBE也是$\alpha_{n凸}$。

在图2－2中表示了法向剖面中的真实情况，$\angle P^n B^n Y^n = \angle D^n B^n E^n = \alpha_{n凸}$。

由图2－1及图2－2中，我们可知

$$\sin\Omega = \sin\gamma''\cos\beta \qquad \operatorname{tg}\lambda = \frac{\operatorname{tg}\beta}{\cos\gamma''} \quad ;$$

$$\sin\eta = \operatorname{tg}\Omega \ \operatorname{tg}\alpha$$

由图2－2知

$$\alpha_{n凸} = \angle D^nB^nF^n - \angle E^nB^nF^n$$

而 $\operatorname{tg}\angle D^nB^nF^n = \dfrac{\overline{D^nF^n}}{\overline{B^nF^n}} = \dfrac{\overline{D^hF^h}}{\overline{B^VF^V}} = \dfrac{\ell\operatorname{tg}\eta}{\ell\sin\Omega} = \dfrac{\operatorname{tg}\eta}{\sin\Omega}$

由于角度η和Ω都是相当小，则认为：

$$\frac{\operatorname{tg}\eta}{\sin\Omega} = \frac{\sin\eta}{\operatorname{tg}\Omega} = \frac{\operatorname{tg}\Omega\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\Omega} = \operatorname{tg}\alpha$$

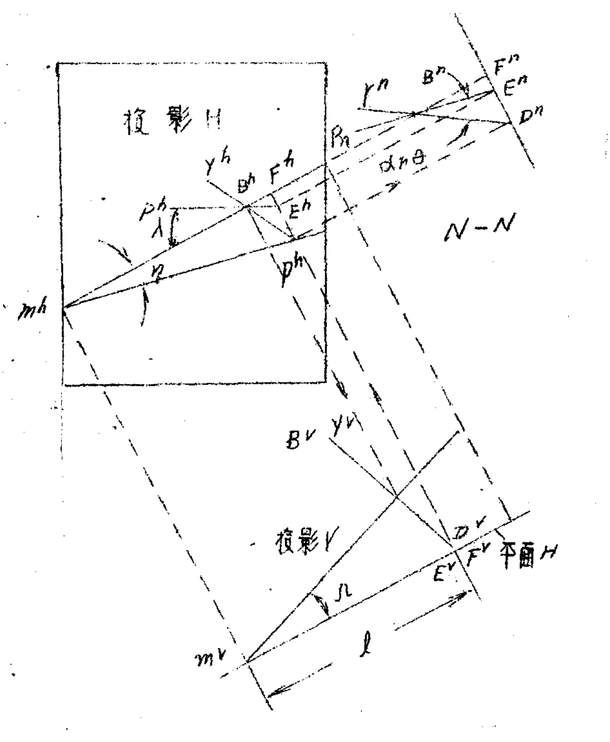

图 2－2

因此，可以认为 $\angle D^n B^n F^n \doteq \alpha$

又因 $tg\angle E^n B^n F^n = \dfrac{\overline{E^n F^n}}{\overline{B^n F^n}} = \dfrac{\overline{E^h F^h}}{\overline{B^V F^V}} = \dfrac{\overline{B^h F^h}\, tg\lambda}{\overline{B^V F^V}} =$

$$\frac{\overline{B^V F^V}\sin\Omega\, tg\lambda}{\overline{B^V F^V}} = \sin\Omega\, tg\lambda = \sin\gamma''\cos\beta\,\frac{tg\beta}{\cos\gamma''} = tg\gamma''\sin\beta$$

令： $\delta = \angle E^n B^n F^n$

则： $tg\delta = tg\gamma''\sin\beta$

故： $\alpha_{n凸} = \alpha - \delta$ .... (2-1)

同理可得 $\alpha_{n凹} = \alpha + \delta$ .... (2-2)

根据公式(2-1)，(2-2)可得：

大齿轮牙齿凸面节锥齿线中点C的法向压力角是

$$\alpha_{nc2凸} = \alpha - \delta_2$$

大齿轮牙齿凹面 ....

$$\alpha_{nc2凹} = \alpha + \delta_2$$

小齿轮牙齿凸面 ....

$$\alpha_{nc1凸} = \alpha - \delta_1$$

小齿轮牙齿凹面 ....

$$\alpha_{nc1凹} = \alpha + \delta_1$$

上面几式中 δ_1 和 δ_2 各为：

$$tg\delta_1 = tg\gamma''_1 \cdot \sin\beta_C$$

$$tg\delta_2 = tg\gamma''_2 \cdot \sin\beta_C$$

我们知道，大齿轮凸面与小齿轮凹面啮合，及大齿轮凹面与小齿轮凸面啮合，但两啮合面的压力角不相等，就不能啮合。为此，我们修正刀齿齿形角，使啮合面中点的法向压力角相等。

修正量为$\Delta\alpha$

若 $\Delta\alpha=\frac{\delta_1+\delta_2}{2}$

将内刀齿的齿形角制成 $\alpha_i=\alpha+\Delta\alpha$

将外刀齿的齿形角制成 $\alpha_e=\alpha-\Delta\alpha$

则

$$\alpha_{nc2凸}=\alpha_i-\delta_2=\alpha+\frac{\delta_1-\delta_2}{2}$$

$$\alpha_{nc2凹}=\alpha_e+\delta_2=\alpha+\frac{\delta_2-\delta_1}{2}$$

$$\alpha_{nc1凸}=\alpha_i-\delta_1=\alpha+\frac{\delta_2-\delta_1}{2}$$

$$\alpha_{nc1凹}=\alpha_e+\delta_1=\alpha+\frac{\delta_1-\delta_2}{2}$$

经过修正刀齿齿形角，一对齿轮相应啮合角的中点法向压力角已经相等了。由于δ_1和δ_2 数值均较小，而且相差很少，虽然每个齿轮本身的牙齿两面压力角不相等，但对于两个齿轮啮合没有影响。

因为 γ''_1、γ''_2、δ_1及δ_2较小，

故 δ_1和δ_2可写成

$$\delta_1=tg\gamma''_1\sin\beta_c=\gamma''_1\sin\beta_c$$

$$\delta_2=tg\gamma''_2\sin\beta_c=\gamma''_2\sin\beta_c$$

$$\Delta\alpha=\frac{\delta_1+\delta_2}{2}=\frac{\gamma''_1+\gamma''_2}{2}\sin\beta_c \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2-3)$$

刀盘的刀号即将公式(2-3)写成

$$N^\circ=\frac{\Delta\alpha}{10}=\frac{\gamma''_1+\gamma''_2}{20}\sin\beta_c$$

刀号已经标准化，为…$3\frac{1}{2}$，$4\frac{1}{2}$，$5\frac{1}{2}$…………$20\frac{1}{2}$

因而 $\alpha_i = \alpha + 10N^\circ$

$\alpha_e = \alpha - 10N^\circ$ ………………………… (2-4)

㈢双面刀盘要素的确定

(1)精切大轮用的双面刀盘 (见图2-3)

W_2—大轮精切刀盘错刀量，即相当假想平顶齿轮的法向齿顶厚度。

$\overset{\frown}{bd}$—大轮节圆齿槽宽度，(即小轮节圆弧齿厚S_1)

由图可见，错刀量W_2是由$\overset{\frown}{bd}$或S_1来决定。

由于amb与end的曲率半径及螺旋角大致相同，同时$\overset{\frown}{mn}$与$\overset{\frown}{bd}$的所在，呈锥体表面(即节锥面)所以，可以认为：

$$\overset{\frown}{mn} = \frac{L}{Le} S_1$$

线段$\overline{fg}$亦在节锥面上，所以可以近似认为：

$$\overline{fg} \cong \overset{\frown}{mn} \cos\beta_c = \frac{L}{Le} S_1 \cos\beta_c$$

错刀量：$W_2 = \overline{fg} - h_{c2}(tg\alpha_i + tg\alpha_e)$

$$= \frac{L}{Le} S_1 \cos\beta_c - \frac{L}{Le} h''_2 (tg\alpha_i + tg\alpha_e)$$

$$tg\alpha_i + tg\alpha_e \approx 2tg\,\alpha$$

$$\therefore \quad W_2 = \frac{L}{Le}(S_1 \cos\beta_c - 2h''_2 tg\alpha) \quad \cdots\cdots (2-5)$$

齿宽系数：

$Kb = \frac{b}{Le}$，则$W_2 = (1-0.5Kb)(S_1 \cos\beta_c - 2h''_2 tg\alpha)$……

………… (2-6)

形成直径：

外刃：$D_{e2} = D_u + W_2$ ………………………… (2-7)

内刃： $D_{i2}=D_u-W_2$ ………………… (2-7a)

(2)粗切大轮用的双面刀盘

粗切大轮用的双面刀盘，共错刀量W_2'，形成直径D_{e2}'，D_{i2}'的确定，只要满足这样一个要求，即使用本刀具切出的齿轮，尚留有足够的余量，供精切双面刀盘切出：

$$W_2''=W_2-\triangle W \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2-8)$$

精切削余量，$\triangle W$ 可由表2-1选取

表2-1 精切削余量$\triangle$ W 表

模　　数	切削余量 $\triangle W$
2-3	0.5
3-6	0.75
6-12	1
12-15	1.25

形成直径：

外刃 $D_{e2}'=Du+W_2'$ ………………………… (2-9)

内刃 $D_{i2}'=Du-W_2'$ ………………………… (2-9a)

(3)粗切小轮用的双面刀盘

小齿轮齿槽底的宽度在牙齿小端处为最狭，所以为了保证粗切后有足够的精切余量，粗切小轮双面刀盘的错刀量W_1'应小于小齿轮牙齿小端的槽底法向宽度。即W_1'应小于和精切成的小齿轮作无间隙啮合的假想平顶齿轮牙齿的小端法向齿顶厚度W_1''。

从图2-3中，t_e和t_i各为牙齿大端和小端的节圆齿距，由于amb和$a_1m_1b_1$为完全相同的曲线，所以

$$t_i=t_e\frac{L_i}{L_e}=m\pi\frac{L_i}{L_e}$$

图中的圆弧$\widehat{ac}$与W_2的关系见下式：

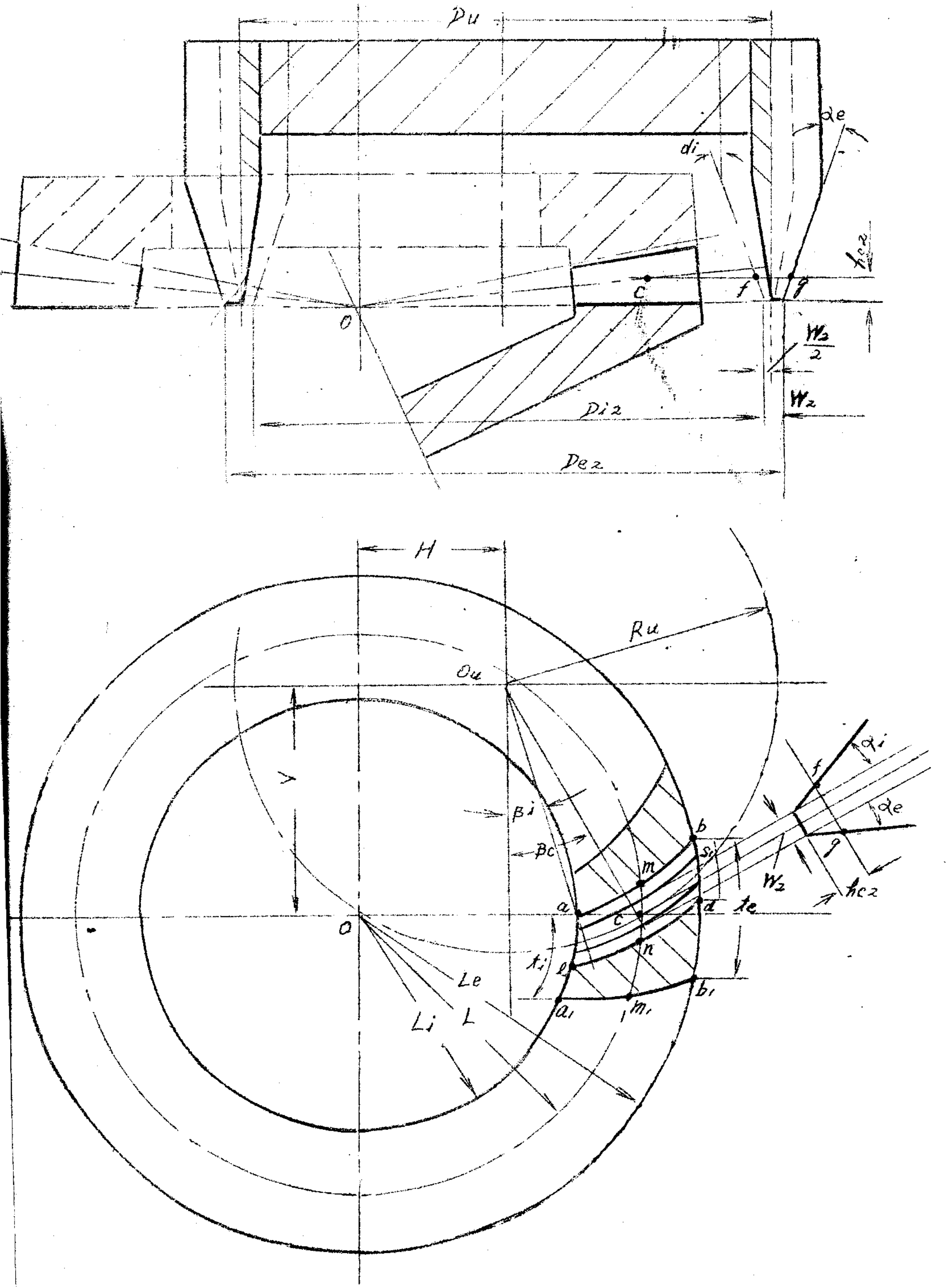

图 2-3 双面刀盘的错刀量

$$\widehat{ae} \approx \frac{1}{\cos\beta_i}\left[W_2+h_{c2}\frac{Li}{L}(tg\alpha_i+tg\alpha_e)\right]$$

$$=\frac{1}{\cos\beta_i}(W_2+2h_2''\frac{Li}{Le}tg\alpha)$$

同理，$\widehat{ea}_1=\frac{1}{\cos\beta_i}(W_1''+2h_1''\frac{Li}{L_e}tg\alpha)$

但因，$\widehat{ea}_1=t_i-\widehat{ae}=mn\frac{Li}{Le}-\frac{1}{\cos\beta_i}(W_2+2h_2''\frac{Li}{Le}tg\alpha)$

上述二式联合

$$W_1''=\frac{Li}{Le}(m\pi\cos\beta_i-2(h_1''+h_2'')tg\alpha)-W_2$$

故 $W_1=W_1''-\Delta W$

ΔW见表 2－1。

㈣切削刀盘公称直径Du的选择

中小直径切削刀盘的公称直径共有十种规格，$\frac{1}{2}$"，$1\frac{1}{10}$"，$1\frac{1}{2}$"，2"，$3\frac{1}{2}$"，6"，($7\frac{1}{2}$")，9"，12"，18"，它选择依据：

(1)为使传动平稳，保持轴向压力尽量不变或少变，需要大齿轮维持一定的曲率，亦即螺旋角沿全齿长上尽量不变或少变。由图2－4示，所谓螺旋角者，即节锥齿线上任意一点的切线与该点的向量半径间的夹角齿轮的名义螺旋角是以齿线中点C处的螺旋角βc表示，常用推荐有35°，25°，10°，0° 四种,而任意一点的螺旋角则以β_X表示。

在△QOC中： $E^2=L^2+R_u^2-2LR_u\sin\beta c$

在△OQX中： $E^2=L_X^2+R_u^2-2L_XRu\sin\beta x$

由上述二式，联立解得，任意一点的压力角βx：

$$\sin\beta x=\frac{L_X^2+2LRu\sin\beta c-L^2}{2L_XRu}=\frac{1}{2Ru}\left(Lx+\frac{L(2Ru\sin\beta c-L)}{Lx}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2-10)$$

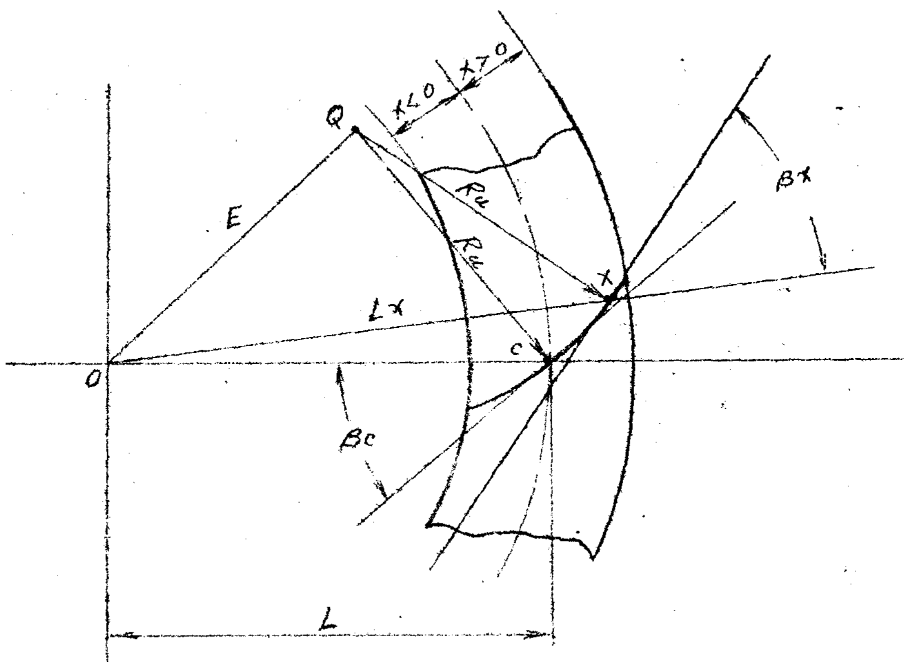

图2-4　齿线上任意一点X处的螺旋角βx分析

则大端螺旋角βe及小端螺旋角βi分别为：

$$\sin\beta e=\frac{1}{2Ru}\left[Le+\frac{L}{Le}(2Ru\sin\beta_c-L)\right]\quad\cdots\cdots\quad(2\text{-}11)$$

$$\sin\beta i=\frac{1}{2Ru}\left[Li+\frac{L}{Li}(2Ru\sin\beta_c-L)\right]\quad\cdots\cdots\quad(2\text{-}12)$$

为使βe与βi尽量相等，令：

$$Le+\frac{L}{Le}(2Ru\sin\beta c-L)=Li+\frac{L}{Li}(2Ru\sin\beta c-L)$$

在一般齿轮设计中，取齿面宽（齿长）　$F=\frac{1}{3}Le$

$$\therefore\quad Li=\frac{2}{3}Le\ ,\qquad L=\frac{5}{6}Le$$

代入上式，则得：　$2R_u \sin\beta_c = \frac{29}{30} L_e \approx L_e$

$$\therefore\quad D_{umax} = \frac{L_e}{\sin\beta_c} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}13)$$

希望选择的刀盘能符合上式，但是它必须同时考虑齿顶收缩率。所谓“齿顶收缩率”是牙齿小端顶面宽度 Si 与大端顶面宽度 Se 之比，以 ε_i 表示。

$$\varepsilon_i = \frac{S_i}{S_e}$$

由于弧齿锥齿轮齿线呈圆弧状，而大轮用双面法加工，大轮的齿沟底面是等宽的，小齿轮的齿顶面是等宽的，所以小轮

$\varepsilon_i = 1$　对于大齿轮　ε_{i2}　从图 2-5 可知：

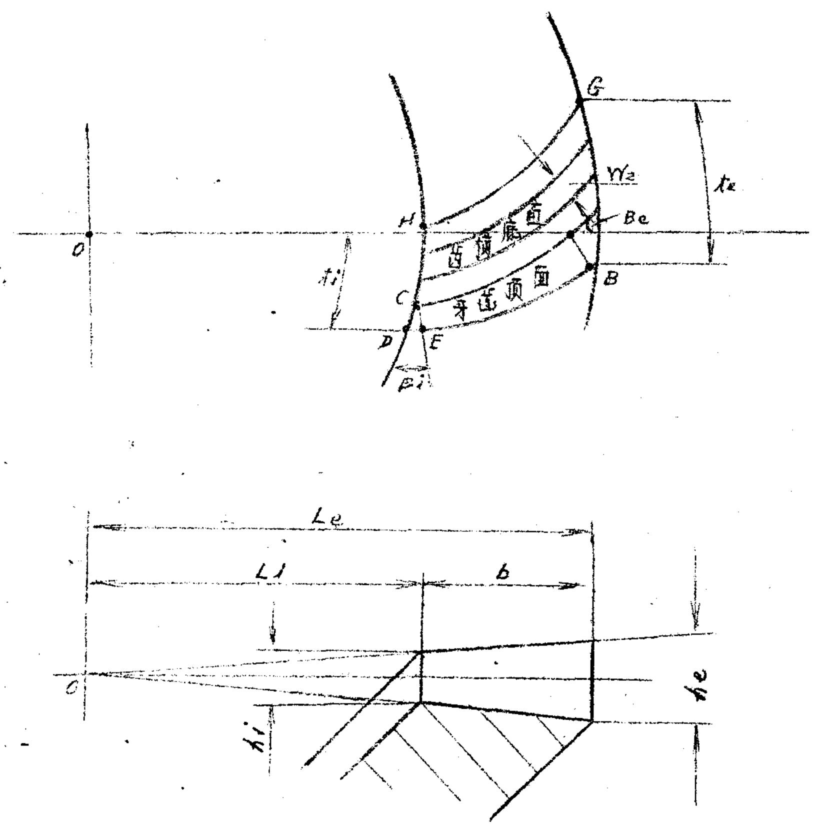

图 2-5　齿顶收缩率 ε_{i2} 的分析

$$\varepsilon_i=\frac{S_i}{S_e}=\frac{\overline{CE}}{\overline{BF}}=\frac{CD\cos\beta_i}{AB\cos\beta e}$$

而：$\overline{AB}=te-\overline{AG}=\pi m-\dfrac{W_2+2he\ \ tg\alpha}{\cos\beta e}$

$$\overline{CD}=t_i-\overline{CH}=\pi m\frac{L_i}{Le}-\frac{W_2+2h_i tg\alpha}{\cos\beta i}$$

而：齿宽系数 $\quad K_b=\dfrac{b}{Le},\quad \dfrac{Li}{Le}=1-K_b$

$$W_1=\frac{W_2}{m}$$

齿高系数 $\quad f_n=\dfrac{he}{m}\qquad K_h=\dfrac{hi}{he}$

系数K_h对于收缩齿齿轮，由图2-5可知：

$$K_h=\frac{h_i}{h_e}=\frac{Li}{Le}=1-Kb$$

系数K_h对于等高齿齿轮 $\quad h_i=h_e\quad K_h=1$

以上述诸项代入公式，则得ε_i为：

$$\varepsilon_i=\frac{\pi\cos\beta i(1-Kb)-2K_hf_h\ tg\alpha-W'}{\pi\cos\beta e-2fn\ tg\alpha-W'}\cdots\cdots\cdots(2-14)$$

由公式2-11及公式2-12可知大端及小端处螺旋角βe及βi

将齿宽系数$Kb=\dfrac{b}{Le}$代入上式，则得公式

$$\sin\beta e=\frac{Le}{Du}Kb(1-0.25\ Kb)+(1-0.5K_b)\sin\beta c$$

$$\sin\beta i=\frac{Le}{Du}\left((1-Kb)-\frac{(1-0.5Kb)^2}{1-Kb}\right)+\frac{1-0.5Kb}{1-Kb}\cdot\sin\beta_c$$

同理公式2－5可化为：