

第 14 篇 齿轮的测绘

主 编 侯东海

编写人

审稿人

第 1 章 杨寿夜 (郑州机械研究所)
袁和相 (郑州机械研究所)

刘忠明
刘世军

第 2 章 侯东海

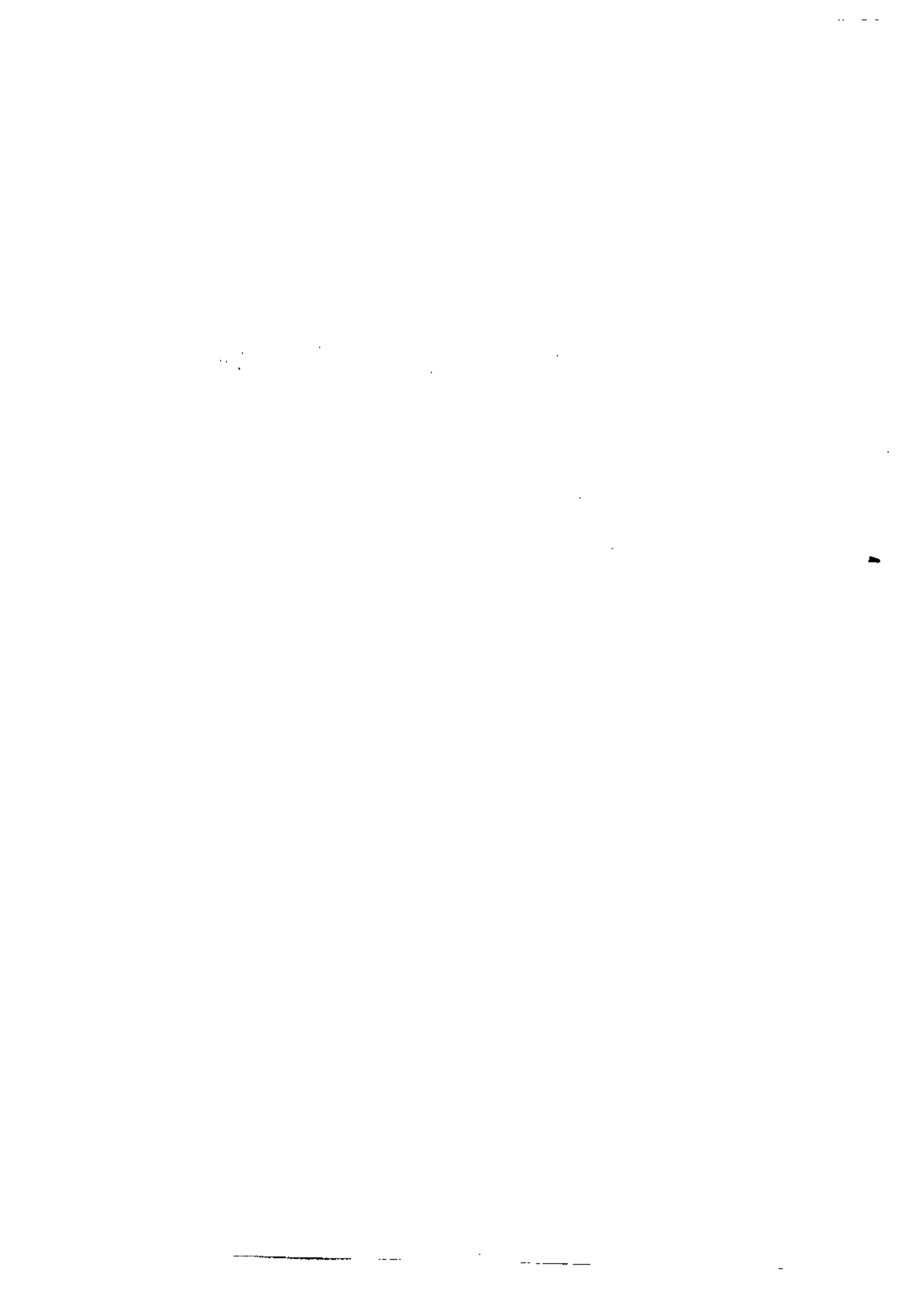
侯东海
杨寿夜

第 3 章 张肖志 (郑州机械研究所)

侯东海
张元国

第 4 章 冯澄宙 (郑州工业大学)

侯东海
张元国



第 1 章 圆柱齿轮的测绘

1 概述

在冶金、矿山、电站、石化、车辆、船舶和航空航天等工程中,有许多齿轮装置是从国外引进的,尤其是大型成套设备上的齿轮装置,其设计及制造水平较高。对这些齿轮装置进行解体测绘,有助于消化、吸收国外先进技术,提高我国齿轮设计、工艺、制造及装配水平,促进我国引进设备的国产化,同时对引进生产线的维护和正常运行提供保障。

齿轮测绘是一项较复杂的工作,首先必须了解被测齿轮箱的应用场合、负荷大小、速度高低、润滑油的参数、润滑方式、材料与热处理工艺和齿面强化工艺等,还要了解是哪个国家、什么厂家及什么年代生产的齿轮箱,采用什么标准设计制造,是米制还是英制齿轮等。测绘的目的是在了解上述情况的基础上,根据齿轮箱及齿轮副实物,采用必要的计量手段,通过对已知参数和测量的参数的分析计算,最终确定出齿轮的基本参数和工艺,如:齿数 z 、法向模数 m_n 、法向压力角 α_n 、分度圆螺旋角 β 、齿顶高系数 h_a' 、法向变位系数 x_n 、中心距 a 、齿轮副的顶隙、侧隙、齿轮材料与热处理工艺、精度、齿面硬度、切齿方法及工艺路线等。

通过测绘达到比较准确地描绘出齿轮副原设计的本来面目,从而能够重新生产或研制出该齿轮副的目的。

2 渐开线圆柱齿轮的测绘

2.1 直齿圆柱齿轮的测绘

2.1.1 直齿圆柱齿轮的参数测量

(1) 齿数和齿宽 被测齿轮的齿数 z_1 和 z_2 可直接数出。

被测齿轮的齿宽可用游标卡尺测出。

(2) 中心距 a 中心距的测量是比较关键的,因为中心距 a 的测量精度将直接影响齿轮副的测绘结果,必须准确地测出齿轮副的实际中心距。

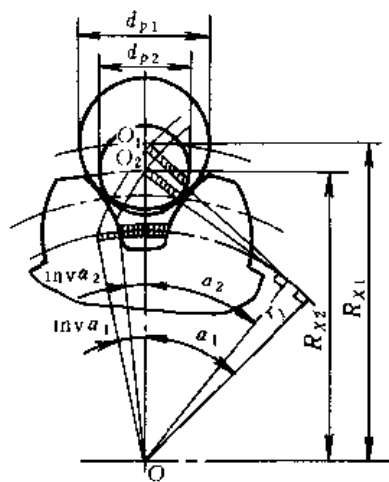
测量中心距时,可直接测量两齿轮轴或对应的两箱体孔间的距离,再测出轴或孔的直径,通过换算得到中心距。以上的测量均需反复测量,还要测出轴和箱体孔的圆度、圆柱度及轴线间的平行度,它们对换算中心距都有影响。测轴径或孔径应分别采用外径千分尺和

内径千分尺,测轴或孔间距离可采用精密游标卡尺。

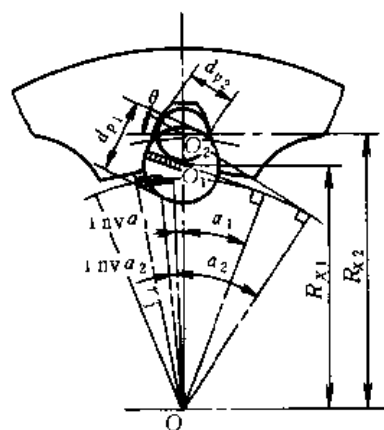
(3) 公法线长度 W_k 和基节 p_b 通过测量公法线长度基本上可确定模数和压力角。在测量公法线长度时,需注意选择适当的跨齿数进行测量,一般要在相邻齿上多测几组数据,以便比较选择。

对于直齿和斜齿圆柱齿轮,可用公法线千分尺或精密游标卡尺测出两相邻齿公法线长度 W_k 和 W_{k+1} (k 为跨齿数),则基节 p_b 为

$$p_b = W_{k+1} - W_k \quad (14.1-1)$$



a.



b.

图 14.1.1 用跨棒或跨球法测公法线长度

- a) 用圆棒(钢球)测量外齿轮基节
- b) 用圆棒(钢球)测量内齿轮基节

对于齿宽较窄的外斜齿 $\left\{ b < \frac{4m_n}{\sin\beta} \right\}$ 或人字齿 (或齿数较少的内、外直齿), 其公法线不能直接测量时, 可通过跨棒或跨球 (斜齿只能用跨球) 方法来测量, 从而通过必要的计算求得 p_b , 见图 14.1-1。

采用两组不同直径的圆棒 (或钢球), 即 d_{p2} 和 d_{p1} , 分别测量圆棒 (或钢球) 中心至齿轮中心的距离 R_x 值, 并计算 Δd_p , 即

$$\Delta d_p = d_{p2} - d_{p1} = \pm 2r_b \left[\operatorname{inv} \left(\arccos \frac{r_b}{R_{x2}} \right) - \operatorname{inv} \left(\arccos \frac{r_b}{R_{x1}} \right) \right] \quad (14.1-2)$$

式中 “+” 号用于外啮合, “-” 号用于内啮合。

计算时, 要先假设不同的模数 m 及分度圆压力角 α 的组合, 查出对应于基节表 (见表 14.1-4) 中的不同 p_b , 再由 $r_b = \frac{z p_b}{2\pi}$, 算出不同的 r_b , 然后分别代入上式进行试算, 若等式两边趋于相等, 则这组对应的 m 和 α 即为所求的模数和压力角。

当被测齿轮齿数为奇数时, 其外 (内) 齿的 R_x 值可通过以下的测量与计算 (见图 14.1-2~4)。

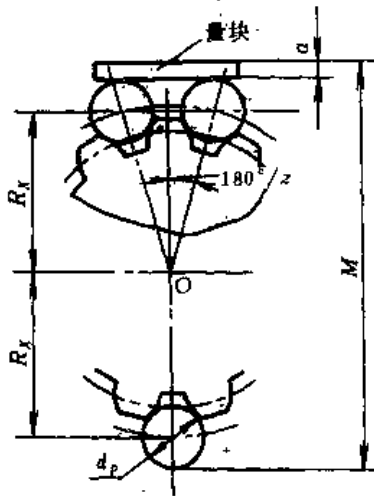


图 14.1-2 奇数齿外齿轮测量

1) 奇数外齿 由图 14.1-2 可知

$$R_x = \frac{M - d_p - a}{1 + \cos \frac{180^\circ}{z}} \quad (14.1-3)$$

2) 奇数内齿 由图 14.1-3 可知

$$R_x = \frac{M + d_p + a}{1 + \cos \frac{180^\circ}{z}} \quad (14.1-4)$$

或由图 14.1-4 得到

$$R_x = \frac{M + d_p + a + b}{\cos \frac{180^\circ}{z} + \cos \frac{360^\circ}{z}} \quad (14.1-5)$$

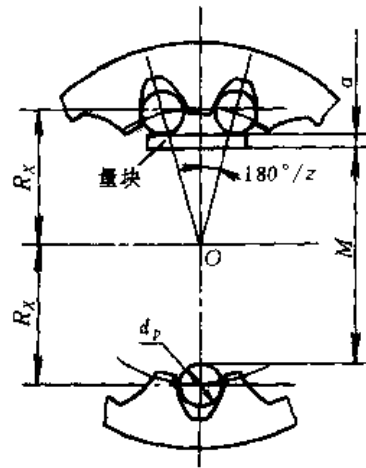


图 14.1-3 奇数齿内齿轮测量

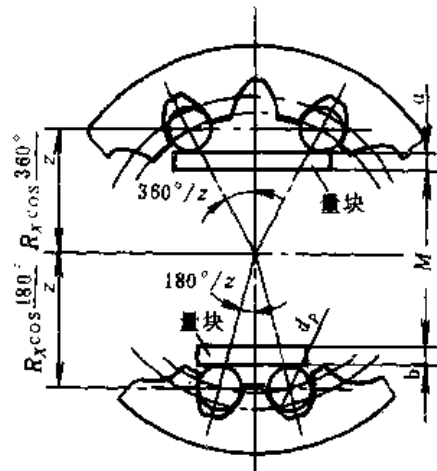


图 14.1-4 奇数齿内齿轮测量

圆棒 (球) 直径 d_p 推荐值为

外直齿: $d_p = 1.68m$

内直齿: $d_p = 1.476m$

斜齿: $d_p = 1.75m_n$ (钢球直径)

选用的圆棒 (球) 的直径 d_{p2} 与 d_{p1} 之差要尽量大些, 一般控制在 0.5~3mm 之内, 以减少测量误差对结果的影响。但球或棒与齿廓的接触点一定要控制在齿廓的渐开线部位上。

(4) 齿顶圆直径与齿根圆直径 用精密游标卡尺或螺旋千分尺测量齿顶圆直径 d_{a1} 和 d_{a2} , 在不同的径向方位上测几组数据, 取其平均值。

当被测齿轮的齿数为奇数时, 不能直接测出齿顶圆直径, 可先测得图 14.1-5 中的 D 值, 通过式 (14.1-6) 或式 (14.1-7) 计算求得齿顶圆直径 d_a 。

$$1) \quad d_a = D \sec^2 \theta \quad (14.1-6)$$

式中 $\theta = \arctan \frac{b}{2D}$

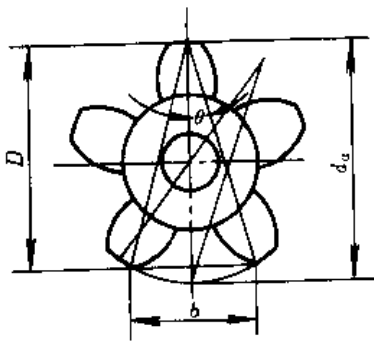


图 14.1-5 齿顶圆直径的测量

2) 近似算法为

$$d_a = D \sec \frac{90^\circ}{z} \quad (14.1-7)$$

当测绘带内孔的奇数齿齿轮时, 可通过测量内孔直径 d 和内孔壁到齿顶的距离 H_1 来确定 d_a 以及通过测量内孔直径 d 与由内孔壁到齿根的距离 H_2 确定 d_f , 由图 14.1-6 可知

$$d_a = d + 2H_1 \quad (14.1-8)$$

$$d_f = d + 2H_2 \quad (14.1-9)$$

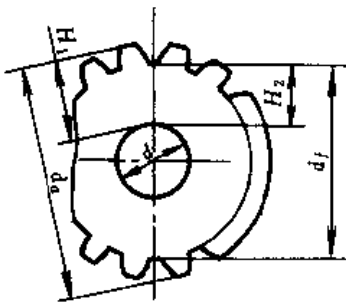


图 14.1-6 用精密游标卡尺测齿高

(5) 全齿高 可用深度尺直接测出全齿高 h , 也可以通过测量齿顶和齿根到齿轮内孔(或轴径)的距离, 换算得到 h (见图 14.1-6)。

通过对全齿高的测量及计算, 可以判断齿轮的变位形式, 确定齿顶高系数, 并判别模数制还是径节制。

(6) 齿侧间隙及齿顶间隙 为了保证齿轮副能进行正常啮合运行, 齿轮副需要有一定的侧隙及顶隙。

$$\text{理论侧隙 } j \approx (W_{k1} - W_{k1}') + (W_{k2} - W_{k2}')$$

$$\text{理论顶隙为 } c \cdot m$$

工业现场往往用压铅法测出齿轮副的静态啮合侧隙及顶隙。

(7) 齿面硬度、材料及热处理方式

通过硬度计可测出齿面的硬度。

根据齿面硬度及肉眼观察齿部表面, 确定其热处理方式。

齿轮材料的测定, 可在齿轮不重要部位钻孔取样进行材料化学成分分析, 确定齿轮材质。

(8) 其他测量

1) 精度 对于重要的齿轮, 在条件许可情况下, 可用齿轮测量仪器测量轮齿的精度, 但应考虑齿面磨损情况, 酌情确定齿轮的精度等级。

2) 齿面粗糙度 可用粗糙度测量仪测出齿面粗糙度。

3) 修形 对于高速齿轮与重载齿轮, 还应在实测的齿廓与齿向误差数值基础上检查齿面是否有修形设计。

2.1.2 直齿圆柱齿轮基本参数的确定

齿轮测绘中, 有些参数可直接测定给出, 有的齿轮参数(如模数、变位系数等)必须通过计算判断及比较才能合理确定。

(1) 模数、压力角的确定 模数在测量时无法直接确定, 在英制计算体系中是采用径节制, 模数 m 与径节 P 的关系为 $m = 25.4/P$, 表 14.1-1 为世界主要采用模数制国家的系列标准, 表 14.1-2 为径节系列标准。

表 14.1-1 世界主要采用模数制国家的系列标准模数

| 国 别 | ISO | 中 国 | 苏 联 | 德 国 | 捷 克 | 法 国 | 日 本 |
|------|---------|---------|---------|-----|-------|--------|--------|
| 标准号 | ISO | GB | ГОСТ | DIN | CSNO | NFE | JIS B |
| 模 数 | 54-1996 | 1357-87 | 9563-60 | 780 | 14608 | 23-011 | 701-63 |
| 0.1 | | * | * | * | | | * |
| 0.12 | | * | | | | | |
| 0.15 | | * | * | | | | * |
| 0.2 | | * | * | * | * | | * |
| 0.25 | | * | * | * | * | | * |
| 0.3 | | * | * | * | * | | * |
| 0.35 | | * | * | * | | | * |
| 0.4 | | * | * | * | * | | * |
| 0.45 | | | * | * | | | * |
| 0.5 | | * | * | * | * | * | * |
| 0.55 | | | * | * | | * | * |

(续)

| 国 别 | ISO | 中 国 | 苏 联 | 德 国 | 捷 克 | 法 国 | 日 本 |
|-------|---------|---------|---------|-----|-------|--------|--------|
| 标准号 | ISO | GB | ГОСТ | DIN | ČSNO | NFE | JIS B |
| 模 数 | 54-1996 | 1357-87 | 9563-60 | 780 | 14608 | 23-011 | 701-63 |
| 0.6 | | * | * | * | * | * | * |
| 0.65 | | | | * | | | * |
| 0.7 | | * | * | * | ○ | * | * |
| 0.8 | | * | * | * | * | * | * |
| 0.9 | | * | * | * | ○ | * | * |
| 1.0 | * | * | * | * | * | * | * |
| 1.125 | ○ | | * | * | | * | |
| 1.25 | * | * | * | * | * | * | * |
| 1.375 | ○ | | * | * | | * | |
| 1.5 | * | * | * | * | * | * | * |
| 1.75 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 2.0 | * | * | * | * | * | * | * |
| 2.25 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 2.5 | * | * | * | * | * | * | * |
| 2.75 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 3 | * | * | * | * | * | * | * |
| 3.25 | | ○ | | * | ○ | | * |
| 3.5 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 3.75 | | ○ | | * | ○ | | * |
| 4 | * | * | * | * | * | * | * |
| 4.25 | | | | | | | * |
| 4.5 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 4.75 | | | | * | | | * |
| 5 | * | * | * | * | * | * | * |
| 5.25 | | | | * | | | * |
| 5.5 | ○ | * | * | * | ○ | * | * |
| 5.75 | | | | * | | | * |
| 6 | * | * | * | * | * | * | * |
| 6.25 | | | | * | | | * |
| 6.5 | (○) | ○ | | * | ○ | | * |
| 6.75 | | | | * | | | * |
| 7 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 7.5 | | | | * | | | * |
| 8 | * | * | * | * | * | * | * |
| 8.5 | | | | * | | | * |
| 9 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 9.5 | | | | * | | | * |
| 10 | * | * | * | * | * | * | * |
| 11 | ○ | * | * | * | ○ | * | * |
| 12 | * | * | * | * | * | * | * |
| 13 | | | | * | ○ | | * |
| 14 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 15 | | | | * | ○ | | * |
| 16 | * | * | * | * | * | * | * |
| 18 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 20 | * | * | * | * | * | * | * |
| 22 | ○ | * | * | * | * | * | * |
| 24 | | | | * | | | * |
| 25 | * | * | * | * | | * | * |
| 27 | | | | * | | | * |
| 28 | ○ | * | * | * | | | * |
| 30 | | | | * | | | * |
| 32 | * | * | * | * | | | * |
| 33 | | | | * | | | * |
| 36 | ○ | * | * | * | | | * |
| 39 | | | | * | | | * |
| 40 | * | * | * | * | | | * |
| 42 | | | | * | | | * |
| 45 | ○ | * | * | * | | | * |
| 50 | * | * | * | * | | | * |
| 55 | | | * | * | | | * |
| 60 | | | * | * | | | * |

注：*为应用的模数，○为尽可能不用的模数。

表 14.1-2 径节系列标准

| | | | | |
|--------|----------------|---|---|-----------------|
| 径节系列 P | 1 | 双模数系列 m_1/m_2 (m_1 计算分度圆直径用; m_2 计算齿高用) | 双径节系列 P_1/P_2 (P_1 计算分度圆直径用; P_2 计算齿高用) | $\frac{3}{4}$ |
| | $1\frac{1}{4}$ | | | $\frac{4}{5}$ |
| | $1\frac{1}{2}$ | | | $\frac{5}{7}$ |
| | $1\frac{3}{4}$ | | | $\frac{6}{8}$ |
| | 2 | | | $\frac{7}{9}$ |
| | $2\frac{1}{4}$ | | | $\frac{8}{10}$ |
| | $2\frac{1}{2}$ | | | $\frac{9}{11}$ |
| | $2\frac{3}{4}$ | | | $\frac{10}{12}$ |
| | 3 | | | $\frac{11}{14}$ |
| | $3\frac{1}{2}$ | | | $\frac{12}{14}$ |
| | 4 | | | $\frac{14}{18}$ |
| | 5 | | | $\frac{16}{21}$ |
| | 6 | | | $\frac{18}{24}$ |
| | 7 | | | $\frac{20}{26}$ |
| | 8 | | | $\frac{22}{29}$ |
| | 9 | | | $\frac{24}{32}$ |
| | 10 | | | $\frac{26}{35}$ |
| | 11 | | | $\frac{28}{37}$ |
| | 12 | | | $\frac{30}{40}$ |
| | 14 | | | $\frac{32}{42}$ |
| | 16 | | | $\frac{34}{45}$ |
| | 18 | | | $\frac{36}{48}$ |
| | 20 | | | $\frac{38}{50}$ |
| | 22 | | | $\frac{40}{54}$ |
| | 24 | | | |
| | 26 | | | |
| | 28 | | | |
| | 30 | | | |

1) 通过实测的顶圆直径 d_a 、齿数 z 和齿顶高来判断该传动齿轮副是模数制还是径节制，并可初步确定该值，即

$$m = \frac{d_a}{z + 2h_a^*} \quad (14.1-10)$$

$$P = 25.4 \frac{(z + 2h_a^*)}{d_a} \quad (14.1-11)$$

式中 h_a^* 见表 14.1-3，模数及径节见表 14.1-1 和表 14.1-2。

根据上式计算出来的值，如果 m 值是标准值，则该齿轮为模数制；如果 P 值是标准值，则该齿轮为径节制。否则，这个齿轮可能为变位齿轮。

2) 用基节 p_b 来确定模数 m 和压力角 α

$$m = \frac{p_b}{\pi \cos \alpha} \quad (14.1-12)$$

米制齿轮的压力角通常为 20° 、 14.5° 、 15° 、 17.5° 、 22.5° 、 25° 和 30° 等。

英制齿轮压力角通常为 20° 、 14.5° 、 15° ，其次是 16° 、 17° 、 17.5° 和 22.5° 等。

可通过计算或查基节表（表 14.1-4）确定合理的模数和压力角。

公式中，基节只与模数和压力角有关，而且模数和压力角已标准化，所以用基节来确定模数是比较准确的。

(2) 齿顶高系数 h_a^* 和顶隙系数 c^* 在确定模数的同时也确定了齿顶高系数 h_a^* 。若 h_a^* 不接近 1，就有可能是变位齿轮，若 h_a^* 接近于 0.8，还可能是短齿齿形。当然，要注意接近于 1 也可能是短齿变位齿轮。

顶隙系数 c^* 可根据全齿高按下式计算

$$c^* = \frac{h}{m} - 2h_a^* \quad (14.1-13)$$

计算出 c^* 值后再按表 14.1-3 套用标准值。

(3) 变位系数的确定 齿轮副分为标准齿轮和变位齿轮两种，而变位齿轮又分为高度变位和角度变位。

当 $a' = a$ ，且 $d_a' = d_a$ 时，为标准齿轮副

当 $a' = a$ ，且 $d_a' \neq d_a$ 时，为高度变位齿轮副

当 $a' \neq a$ 时，为角度变位齿轮副

式中 a' ——实测中心距；

a ——理论中心距。

1) 标准齿轮副

$$x_1 = x_2 = 0 \quad (14.1-14)$$

2) 高度变位齿轮副 ($x_1 + x_2 = 0$)

$$x_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{d_{a1}' - d_{a2}'}{m} - z_1 + z_2 \right) \quad (14.1-15)$$

或
$$x_1 = \frac{d_{a1}' - d_a}{2m}$$

$$x_2 = -x_1$$

式中 d_{a1}' 、 d_{a2}' ——实测小、大轮齿顶圆直径；

d_{a1} ——理论的标准小轮齿顶圆直径。

表 14-1-3 世界主要国家圆柱齿轮基准齿形基本参数

| 国 别 | 齿形种类 | 标 准 号 | m 或 p | α | h_a^* | c^* | ρ_f | 备 注 |
|---------|--------------|---------------|-----------|--------------|---------|---------------|-------------------|------------|
| 国际标准化组织 | 标准齿形 | ISO R53-1998 | m | 20° | 1 | 0.25 | $0.38m$ | |
| 中 国 | 标准齿形 | GB 1356-88 | m | 20° | 1 | 0.25 | $0.38m$ | |
| | 短齿齿形 | GB 1356-88 | m | 20° | 0.8 | 0.30 | | |
| 前苏联 | 标准齿形 | ГОСТ 13755-68 | m | 20° | 1 | 0.25 | $0.4m$ | |
| | 短齿齿形 | ГОСТ 13755-68 | m | 20° | 0.8 | 0.30 | | |
| | 旧标准齿形 | OCT BKC 6922 | m | 20° | 1 | 0.20 | | |
| 美 国 | 标准齿形 | ASA B6.1-1932 | P | 14.5° | 1 | 0.157 | $\frac{0.157}{P}$ | |
| | 标准复合齿形 | ASA B6.1-1932 | P | 14.5° | 1 | 0.157 | $\frac{0.2}{P}$ | |
| | 标准齿形 | ASA B6.1-1932 | P | 20° | 1 | 0.157 | $\frac{0.3}{P}$ | |
| | 短齿齿形 | ASA B6.1-1932 | P | 20° | 0.8 | 0.2 | | |
| | 标准齿形 | ASA B6.1-1968 | P | 20° | 1 | 0.4 | | $>P20$ 剃齿法 |
| | 标准齿形 | ASA B6.1-1968 | P | 25° | 1 | 0.4 | | $>P20$ 剃齿法 |
| | 标准齿形 | ASA B6.19 | P | 20° | 1 | 0.2 0.35 | | $<P20$ 剃齿法 |
| 瑞 士 | 标准齿形 | VSM 15520 | m | 20° | 1 | 0.25 0.167 | | 用于磨齿法 |
| | 马格齿形 | | m | 15° | 1 | 0.167 | | |
| | 马格齿形 | | m | 20° | 1 | 0.167 | | |
| 联邦德国 | 标准齿形 | DIN 867 | m | 20° | 1 | 0.1~0.3 | | |
| | 短齿齿形 | | m | 20° | 0.8 | 0.1~0.3 | | |
| | 旧标准齿形 | | m | 15° | 1 | 0.167 | | |
| 捷 克 | 标准齿形 | CSNO 14607 | m | 20° | 1 | 0.25 | | |
| | 标准齿形 | CSNO 14607 | m | 15° | 1 | | | |
| 英 国 | A级复合齿形 | BSS 436-1940 | P | 20° | 1 | 0.44 | | |
| | A、B、C、D级复合齿形 | BSS 436-1940 | P | 20° | 1 | 0.25 | | |
| | 标准齿形 | | P | 14.5° | 1 | 0.157 | | |
| | 短齿齿形 | | P | 20° | 0.8 | 0.30 | | |
| | 标准齿形 | | P | 20° | 1 | 0.35 | | |
| 法 国 | 标准齿形 | NF E23-011 | m | 20° | 1 | 0.25 | $0.4m$ | |
| | 短齿齿形 | | m | 20° | 0.75 | 0.20 | | |
| 日 本 | 标准齿形 | JIS B1701-63 | m | 20° | 1 | 0.25 | | |
| | 短齿齿形 | JIS B1701-63 | m | 14.5° | 1 | 0.25 | | |

表 14.1-4 基圆齿距 $p_b = \pi m \cos \alpha$ 数值表

(mm)

| m | P | α | | | | | | |
|-------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 25° | 22.5° | 20° | 17.5° | 16° | 15° | 14.5° |
| 1 | 25.4000 | 2.847 | 2.902 | 2.952 | 2.996 | 3.020 | 3.035 | 3.042 |
| 1.058 | 24 | 3.012 | 3.071 | 3.123 | 3.170 | 3.195 | 3.211 | 3.218 |
| 1.155 | 22 | 3.289 | 3.352 | 3.410 | 3.461 | 3.488 | 3.505 | 3.513 |
| 1.25 | 20.3200 | 3.559 | 3.628 | 3.690 | 3.745 | 3.775 | 3.793 | 3.802 |
| 1.270 | 20 | 3.616 | 3.686 | 3.749 | 3.805 | 3.835 | 3.854 | 3.863 |
| 1.411 | 18 | 4.017 | 4.095 | 4.165 | 4.228 | 4.261 | 4.282 | 4.292 |
| 1.5 | 16.9333 | 4.271 | 4.354 | 4.428 | 4.494 | 4.530 | 4.552 | 4.562 |
| 1.588 | 16 | 4.521 | 4.609 | 4.688 | 4.758 | 4.796 | 4.819 | 4.830 |
| 1.75 | 14.5148 | 4.983 | 5.079 | 5.166 | 5.243 | 5.285 | 5.310 | 5.323 |
| 1.814 | 14 | 5.165 | 5.265 | 5.355 | 5.435 | 5.478 | 5.505 | 5.517 |
| 2 | 12.7000 | 5.694 | 5.805 | 5.904 | 5.992 | 6.040 | 6.069 | 6.083 |
| 2.117 | 12 | 6.028 | 6.144 | 6.250 | 6.343 | 6.393 | 6.424 | 6.439 |
| 2.25 | 11.2889 | 6.406 | 6.531 | 6.642 | 6.741 | 6.795 | 6.828 | 6.843 |
| 2.309 | 11 | 6.574 | 6.702 | 6.816 | 6.918 | 6.973 | 7.007 | 7.023 |
| 2.5 | 10.1600 | 7.118 | 7.256 | 7.380 | 7.490 | 7.550 | 7.586 | 7.604 |
| 2.540 | 10 | 7.232 | 7.372 | 7.498 | 7.610 | 7.671 | 7.708 | 7.725 |
| 2.75 | 9.2364 | 7.830 | 7.982 | 8.118 | 8.240 | 8.305 | 8.345 | 8.364 |
| 2.822 | 9 | 8.035 | 8.191 | 8.331 | 8.455 | 8.522 | 8.563 | 8.583 |
| 3 | 8.4667 | 8.542 | 8.707 | 8.856 | 8.989 | 9.060 | 9.104 | 9.125 |
| 3.175 | 8 | 9.040 | 9.215 | 9.373 | 9.513 | 9.588 | 9.635 | 9.657 |
| 3.25 | 7.8154 | 9.254 | 9.433 | 9.594 | 9.738 | 9.815 | 9.862 | 9.885 |
| 3.5 | 7.2571 | 9.965 | 10.159 | 10.332 | 10.487 | 10.570 | 10.621 | 10.645 |
| 3.629 | 7 | 10.333 | 10.533 | 10.713 | 10.873 | 10.959 | 11.012 | 11.038 |
| 3.75 | 6.7733 | 10.677 | 10.884 | 11.070 | 11.286 | 11.325 | 11.380 | 11.406 |
| 4 | 6.3500 | 11.389 | 11.610 | 11.809 | 11.986 | 12.080 | 12.138 | 12.166 |
| 4.233 | 6 | 12.052 | 12.286 | 12.496 | 12.683 | 12.783 | 12.845 | 12.875 |
| 4.5 | 5.6444 | 12.813 | 13.061 | 13.285 | 13.483 | 13.590 | 13.665 | 13.687 |
| 5 | 5.0800 | 14.236 | 14.512 | 14.761 | 14.981 | 15.099 | 15.173 | 15.208 |
| 5.08 | 5 | 14.464 | 14.744 | 15.000 | 15.211 | 15.341 | 15.415 | 15.451 |
| 5.5 | 4.6182 | 15.660 | 15.963 | 16.237 | 16.479 | 16.609 | 16.690 | 16.728 |
| 5.644 | 4.5 | 16.070 | 16.381 | 16.662 | 16.910 | 17.044 | 17.127 | 17.166 |
| 6 | 4.2363 | 17.083 | 17.415 | 17.713 | 17.977 | 18.119 | 18.207 | 18.249 |
| 6.350 | 4 | 18.080 | 18.431 | 18.746 | 19.026 | 19.176 | 19.269 | 19.314 |
| 6.5 | 3.9077 | 18.507 | 18.866 | 19.189 | 19.475 | 19.629 | 19.724 | 19.770 |
| 7 | 3.6286 | 19.931 | 20.317 | 20.665 | 20.973 | 21.139 | 21.242 | 21.291 |
| 7.257 | 3.5 | 20.662 | 21.063 | 21.242 | 21.743 | 21.915 | 22.022 | 22.072 |

(续)

| m | P | α | | | | | | |
|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 25° | 22.5° | 20° | 17.5° | 16° | 15° | 14.5° |
| 8 | 3.175 | 22.778 | 23.220 | 23.617 | 23.969 | 24.159 | 24.276 | 24.332 |
| 8.467 | 3 | 24.108 | 24.575 | 24.996 | 25.369 | 25.569 | 25.693 | 25.573 |
| 9 | 2.8222 | 25.625 | 26.112 | 26.569 | 26.966 | 27.179 | 27.311 | 27.374 |
| 9.236 | 2.75 | 26.297 | 26.807 | 27.266 | 27.673 | 27.892 | 28.027 | 28.092 |
| 10 | 2.54 | 28.472 | 29.025 | 29.521 | 29.962 | 30.199 | 30.345 | 30.415 |
| 10.160 | 2.5 | 28.928 | 29.489 | 30.000 | 30.441 | 30.682 | 30.831 | 30.902 |
| 11 | 2.3091 | 31.320 | 31.927 | 32.473 | 32.958 | 33.219 | 33.380 | 33.457 |
| 11.289 | 2.25 | 32.143 | 32.766 | 33.327 | 33.824 | 34.092 | 34.257 | 34.336 |
| 12 | 2.1167 | 34.167 | 34.829 | 35.426 | 35.954 | 36.329 | 36.414 | 36.498 |
| 12.700 | 2 | 36.160 | 36.861 | 37.492 | 38.052 | 38.353 | 38.539 | 38.627 |
| 13 | 1.9538 | 37.014 | 37.732 | 38.378 | 38.950 | 39.259 | 39.449 | 39.540 |
| 14 | 1.8143 | 39.861 | 40.634 | 41.330 | 41.947 | 42.278 | 42.484 | 42.581 |
| 14.514 | 1.75 | 41.325 | 42.126 | 42.847 | 43.487 | 43.831 | 44.043 | 44.145 |
| 15 | 1.6933 | 42.709 | 43.537 | 44.282 | 44.943 | 45.298 | 45.518 | 45.623 |
| 16 | 1.5875 | 45.556 | 46.439 | 47.234 | 47.939 | 48.318 | 48.553 | 48.665 |
| 16.933 | 1.5 | 48.212 | 49.147 | 49.989 | 50.734 | 51.136 | 51.384 | 51.502 |
| 18 | 1.4111 | 51.250 | 52.244 | 53.139 | 53.931 | 54.358 | 54.622 | 54.748 |
| 20 | 1.2700 | 56.945 | 58.049 | 59.043 | 59.924 | 60.398 | 60.691 | 60.831 |
| 20.320 | 1.25 | 57.856 | 58.978 | 59.987 | 60.883 | 61.364 | 61.662 | 61.804 |
| 22 | 1.1545 | 62.639 | 63.854 | 64.947 | 65.916 | 66.438 | 66.760 | 66.914 |
| 25 | 1.0160 | 71.181 | 72.561 | 73.803 | 74.905 | 75.497 | 75.864 | 76.038 |
| 25.4 | 1 | 72.320 | 73.722 | 74.984 | 76.103 | 76.705 | 77.077 | 77.255 |

3) 角度变位齿轮副 ($x_1 + x_2 \neq 0$) 变位系数的计

$$x_2 = x_2 - x_1 \quad (14.1-21)$$

算步骤如下:

a. 求角度变位后的啮合角 α'

$$\alpha' = \arccos\left(\frac{a}{a'} \cos \alpha\right) \quad (14.1-16)$$

b. 求变位系数之和 x_2

$$x_2 = \frac{z_2}{2 \tan \alpha'} (\operatorname{inv} \alpha' - \operatorname{inv} \alpha) \quad (14.1-17)$$

c. 求中心距变动系数 y

$$y = \frac{a' - a}{m} \quad (14.1-18)$$

d. 求齿顶高变动系数 Δy

$$\Delta y = x_2 - y \quad (14.1-19)$$

e. 按齿顶圆直径计算变位系数

$$x_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{d'_{a1} - d'_{a2}}{m} - z_1 + z_2 + 2x_2 \right) \quad (14.1-20)$$

通过上述计算并圆整的变位系数再以其计算两轮齿顶圆直径、公法线长度及中心距,从而核对所确定的变位系数的准确程度。

也可通过实测齿轮的公法线长度来计算变位系数,即

$$x_1 = \frac{W'_{k1} - W_k}{2m \sin \alpha} \quad (14.1-22)$$

式中 W'_{k1} ——实测公法线长度;

W_k ——非变位齿轮的公法线长度。

这种处理方法也受到一些因素的影响,如啮合侧隙、轮齿的磨损、制造及测量的误差等都会影响变位系数的准确性。因此,也只能作为一种参考数据。通过上述几种计算方法算出的变位系数要进行圆整,一般情况下圆整到小数点后3位即可,当被测齿轮的模数很大时,圆整的位数还要多一些,位数的多少以通过对中

心距 a 、齿顶圆 d_a 及公法线长度 W 的验算均符合要求为止。

在特殊情况下,如齿轮副的中心距很大、放射性或高温等特定场合人无法接近或齿轮箱正在运行无法开箱检测时,只能对齿轮备件测绘,可通过下式近似估算啮合角 α' ,并判断变位形式,即

$$\operatorname{inv}\alpha' = \left[\frac{W'_{k_1} + W'_{k_2} + 2\Delta}{p_b} - (k_1 + k_2 - 1) \right] \frac{\pi}{z_x} \quad (14.1-23)$$

式中 W'_{k_1} 、 W'_{k_2} ——两齿轮公法线长度;

k_1 、 k_2 ——跨齿数;

Δ ——齿厚的减薄量,一般为 0.08~0.25mm。

若试算出的啮合角 $\alpha' = \alpha$,可视为标准啮合或高度变位;若 $\alpha' \neq \alpha$,相差很大,即为角度变位。这种方法只适用于齿轮备件为新的或没有很大磨损时。

(4) 其他计算

1) 公法线长度 W_k 及跨齿数 k

$$k = \frac{z}{180^\circ} \arccos \left(\frac{z \cos \alpha}{z + 2x} \right) + 0.5 \quad (14.1-24)$$

$$W_k = m \cos \alpha [(k - 0.5)\pi + z \operatorname{inv} \alpha] + 2mx \sin \alpha \quad (14.1-25)$$

当被测齿轮的齿厚和齿槽不等时,其公法线长度不能按上式计算,应按下式计算:

$$W_k = k' p_b + \bar{s} \cos \alpha + d_b \cos \beta_b \operatorname{inv} \alpha' + 2mx \sin \alpha \quad (14.1-26)$$

式中 k' ——跨齿槽数。

2) 固定弦齿高 \bar{h}_c 和固定弦齿厚 \bar{s}_c

$$\bar{s}_c = m \cos^2 \alpha \left(\frac{\pi}{2} + 2x \tan \alpha \right) \quad (14.1-27)$$

$$\bar{h}_c = \frac{d_a - d}{2} - \frac{1}{2} \bar{s}_c \tan \alpha \quad (14.1-28)$$

3) 跨棒(球)距 M 圆棒(球)中心所在圆的压力角 α_M

$$\operatorname{inv} \alpha_M = \operatorname{inv} \alpha + \frac{d_p}{d \cos \alpha} + \frac{2x \tan \alpha}{z} - \frac{\pi}{2z} \quad (14.1-29)$$

M 值为

z 为偶数时

$$M = \frac{d_b}{\cos \alpha_M} + d_p = \frac{m z \cos \alpha}{\cos \alpha_M} + d_p \quad (14.1-30)$$

z 为奇数时

$$M = \frac{d_b}{\cos \alpha_M} \cos \frac{90^\circ}{z} + d_p = \frac{m z \cos \alpha}{\cos \alpha_M} \cos \frac{90^\circ}{z} + d_p \quad (14.1-31)$$

关于直齿圆柱齿轮的测绘步骤,可参照表 14.1-5 进行。

2.1.3 直齿圆柱齿轮的测绘实例

1. 冶金矿山齿轮的测绘

某钢厂卷扬机传动箱内的一对直齿外啮合平行轴渐开线齿轮的测绘。

(1) 实测数据

$z = 23$, $d'_{a1} = 154.48 \text{mm}$, $W'_{k_1} = 47.65 \text{mm}$, $W'_{k_2} = 65.33 \text{mm}$; $z_2 = 121$, $d'_{a2} = 739.022 \text{mm}$, $W'_{k_1} = 249.38 \text{mm}$, $W'_{k_2} = 267.08 \text{mm}$, $a' = 435 \text{mm}$ 。

(2) 测绘数据处理

1) 计算基圆齿距

$$p_b = W'_{k_1} - W'_{k_2} = 65.33 - 47.65 = 17.68 \text{mm}$$

$$p_b = W'_{k_2} - W'_{k_1} = 267.08 - 249.38 = 17.70 \text{mm}$$

2) 确定模数 m 及压力角 α 由表 14.1-4 查得 $p_b = \pi m \cos \alpha = 17.713 \text{mm}$ 时的模数及压力角分别为 $m = 6 \text{mm}$ 、 $\alpha = 20^\circ$ 的米制齿轮。

3) 判断变位形式并求变位系数

$$a = \frac{m}{2} (z_1 + z_2) = \frac{6}{2} (23 + 121) = 432$$

$$a \neq a'$$

由 $a' \neq a$ 说明该齿轮副为角度变位传动。

求啮合角 α'

$$\alpha' = \arccos \left(\frac{a}{a'} \cos \alpha \right)$$

$$= \arccos \left(\frac{432}{435} \cos 20^\circ \right) = 21^\circ 3' 32''$$

求变位系数和 x_x

$$x_x = \frac{z_1 + z_2}{2 \tan \alpha} (\operatorname{inv} \alpha' - \operatorname{inv} \alpha)$$

$$= \frac{23 + 121}{2 \tan 20^\circ} (\operatorname{inv} 21^\circ 3' 32'' - \operatorname{inv} 20^\circ)$$

$$= 0.512745$$

求中心距变动系数 y

$$y = \frac{a' - a}{m} = \frac{435 - 432}{6} = 0.5$$

求齿顶高变动系数 Δy

$$\Delta y = x_x - y = 0.512745 - 0.5 = 0.012745$$

按齿顶圆直径计算变位系数

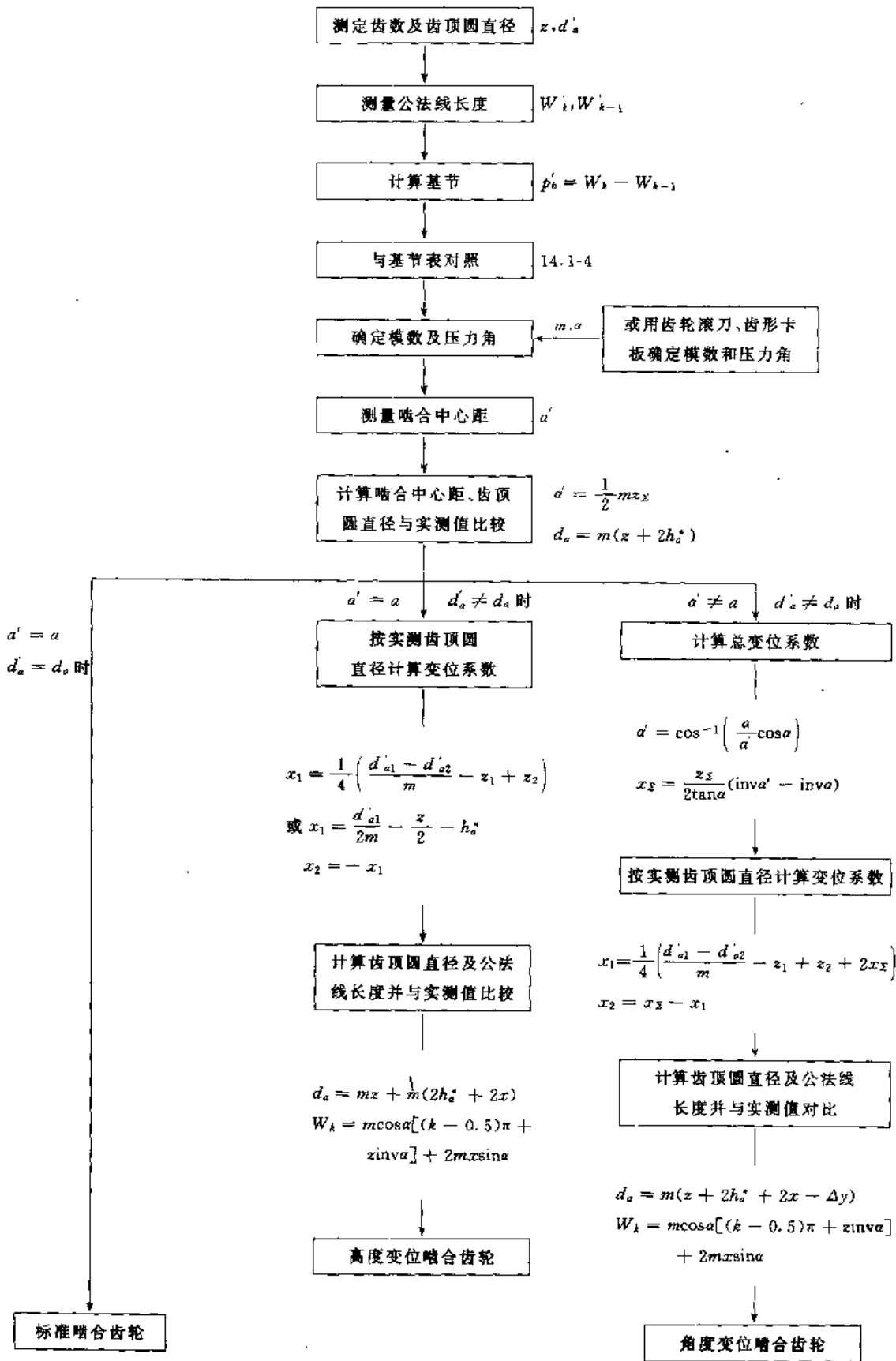
$$x = \frac{1}{4} \left(\frac{d'_{a1} - d'_{a2}}{m} - z_1 + z_2 + 2x_x \right)$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{154.48 - 739.002}{6} - 23 + 121 + 2 \times 0.512745 \right) = 0.40035$$

取 $x_1 = 0.4$

则 $x_2 = x_x - x_1 = 0.5128 - 0.4 = 0.1128$

表 14.1-5 直齿圆柱齿轮测绘程序



4) 验算齿顶圆直径 按已确定的变位系数 x_1 和 x_2 , 验算齿顶圆直径, 取标准齿顶高系数 $h_a^* = 1$ 。

$$\begin{aligned} d_{a1} &= m(x_1 + 2h_a^* + 2x_1 - 2\Delta y) \\ &= 6(23 + 2 \times 1 + 2 \times 0.4 - 2 \times 0.0128) \\ &= 154.646\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 d_{a1} (154.48mm) 大 0.166mm。

$$\begin{aligned} d_{a2} &= m(x_2 + 2h_a^* + 2x_2 - 2\Delta y) \\ &= 6(121 - 2 \times 1 + 2 \times 0.1128 - 2 \times 0.0128) \\ &= 739.20\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 d_{a2} (739.022mm) 大 0.178mm。

5) 验算法线长度及减薄量 按已确定的变位系数 x_1 及 x_2 , 验算法线长度及减薄量。

$$\begin{aligned} W_1 &= m \cos \alpha [(k-0.5)\pi + z_1 \text{inv} \alpha] + 2x_1 m \sin \alpha \\ &= 6 \cos 20^\circ [(3-0.5)\pi + 23 \times 0.014904] + 2 \times \\ &\quad 0.4 \times 6 \sin 20^\circ = 47.855\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 W_1 (47.650mm) 大 0.205mm。

$$\begin{aligned} W_{14} &= m \cos \alpha [(k-0.5)\pi + z_2 \text{inv} \alpha] + 2x_2 m \sin \alpha \\ &= 6 \cos 20^\circ [(14-0.5)\pi + 121 \times 0.014904] + \\ &\quad 2 \times 0.1128 \times 6 \sin 20^\circ = 249.747\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 W_{14} (249.38mm) 大 0.367mm。

6) 验算中心距 a 按已确定的 x_1 和 x_2 , 验算中心距 a 。

$$\begin{aligned} \text{inv} \alpha' &= \frac{2 \tan \alpha}{z_x} + \text{inv} \alpha = \frac{2 \tan 20^\circ}{23+121} \times 0.5128 + \text{inv} 20^\circ \\ &= 0.01749628 \end{aligned}$$

可得 $\alpha' = 21^\circ 3' 27''$ 。

$$\begin{aligned} \Delta y &= \left[\frac{\text{inv} \alpha' - \text{inv} \alpha}{2 \tan \alpha} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \alpha'} - 1 \right) \right] z_x \\ &= \left[\frac{\text{inv} 21^\circ 3' 27'' - \text{inv} 20^\circ}{2 \tan 20^\circ} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos 20^\circ}{\cos 21^\circ 3' 27''} - 1 \right) \right] \\ &\quad (23+121) = 0.013456 \end{aligned}$$

$$y = x_x - \Delta y = 0.5128 - 0.013456 = 0.4993444$$

$$a_c = a + my = 432 + 6 \times 0.4993444 = 434.996\text{mm}$$

实测中心距为 435mm, 计算与实测只差 0.004mm。

2. 行星齿轮的测绘

某钢厂卷扬机传动箱内行星传动为单级的 NGW (直齿) 减速器中行星齿轮的测绘。

(1) 实测数据

实测中心距 a_c (太阳轮与行星轮) = a'_{ac} (行星轮与内齿轮) = 113.78mm。

太阳轮 $z_a = 24$, $d'_{a_a} = 80.18\text{mm}$, $W'_{a_3} = 24.12\text{mm}$, $W'_{a_4} = 32.98\text{mm}$ 。

行星轮 $z_c = 50$, $d'_{c_c} = 158.24\text{mm}$, $W'_{c_6} = 51.78\text{mm}$, $W'_{c_7} = 60.72\text{mm}$ 。

内齿轮 $z_b = 126$, $d'_{b_b} = 374.3\text{mm}$, $W'_{b_{14}} = 125.72\text{mm}$ 。

(2) 测绘数据处理

1) 计算基圆齿距 p_b

$$p_b = W'_{a_3} - W'_{a_4} = 32.98 - 24.12 = 8.86\text{mm}$$

$$p_b = W'_{c_7} - W'_{c_6} = 60.72 - 51.78 = 8.94\text{mm}$$

2) 确定模数 m 及压力角 α 由表 14.1-4 查得 $p_b = \pi m \cos \alpha = 8.856\text{mm}$ 时的模数及压力角分别为 $m = 3\text{mm}$, $\alpha = 20^\circ$ 的米制齿轮。

3) 判断变位形式并求变位系数 外啮合 (太阳轮与行星轮) 理论中心距 a_c 。

$$\begin{aligned} a_{ac} &= \frac{m}{2} z_x = \frac{3}{2} (24+50) = 111 \\ a_{ac} &< a'_{ac} \end{aligned}$$

这说明该传动副为角度变位。

内啮合 (行星轮与内齿轮) 理论中心距 a_{cb} 。

$$\begin{aligned} a_{cb} &= \frac{m}{2} (z_b - z_c) = \frac{3}{2} (126 - 50) = 114 \\ a_{cb} &> a'_{cb} \end{aligned}$$

这也说明该传动副为角度变位。

求角度变位后的啮合角 α'

$$\begin{aligned} \alpha'_{ac} &= \arccos \left(\frac{a_{ac}}{a'_{ac}} \cos \alpha \right) \\ &= \arccos \left(\frac{111}{113.78} \cos 20^\circ \right) = 23^\circ 32' 49'' \\ \alpha'_{cb} &= \arccos \left(\frac{a_{cb}}{a'_{cb}} \cos \alpha \right) \\ &= \arccos \left(\frac{114}{113.78} \cos 20^\circ \right) = 19^\circ 41' 36'' \end{aligned}$$

求变位系数之和 x_x

$$\begin{aligned} x_{x_{ac}} &= \frac{z_a + z_c}{2 \tan \alpha} (\text{inv} \alpha'_{ac} - \text{inv} \alpha) \\ &= \frac{24+50}{2 \tan 20^\circ} (\text{inv} 23^\circ 32' 49'' - \text{inv} 20^\circ) = 1.00754 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{x_{cb}} &= \frac{z_b - z_c}{2 \tan \alpha} (\text{inv} \alpha'_{cb} - \text{inv} \alpha) \\ &= \frac{126-50}{2 \tan 20^\circ} (\text{inv} 19^\circ 41' 36'' - \text{inv} 20^\circ) \\ &= -0.07276 \end{aligned}$$

求中心距变动系数 y

$$y_{ac} = \frac{a'_{ac} - a_{ac}}{m} = \frac{113.78 - 111}{3} = 0.92667$$

$$y_{cb} = \frac{a'_{cb} - a_{cb}}{m} = \frac{113.78 - 114}{3} = -0.07333$$

求齿顶高变动系数 Δy

$$\begin{aligned} \Delta y_{ac} &= x_{x_{ac}} - y_{ac} = 1.00754 - 0.92667 \\ &= 0.08087 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{cb} &= x_{x_{cb}} - y_{cb} = -0.07276 - (-0.07333) \\ &= 0.00057 \end{aligned}$$

按齿顶圆直径分配变位系数

$$x_a = \frac{1}{4} \left(\frac{d_{aa} - d_{ac}}{m} - z_a + z_c + 2x_{\Sigma ac} \right)$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{80.18 - 158.24}{3} - 24 + 50 + 2 \right. \\ \left. \times 1.00754 \right) \approx 0.5$$

$$x_c = x_{\Sigma ac} - x_a = 1.00754 - 0.5 \approx 0.5$$

$$x_b = x_{\Sigma ab} + x_c = -0.07276 + 0.5 \approx 0.43$$

4) 按确定的变位系数 x_a 、 x_c 和 x_b 验算齿顶圆直径 取标准齿顶高系数 $h_a^* = 1$ 。

$$d_{aa} = m(z_a + 2h_a^* + 2x_a - 2\Delta y_{ac})$$

$$= 3(24 + 2 \times 1 + 2 \times 0.5 - 2 \times 0.08087)$$

$$= 80.515 \text{ mm}$$

比实测 d'_{aa} 值大 0.33 mm。

$$d_{ac} = m(z_c + 2h_a^* + 2x_c - 2\Delta y_{ac})$$

$$= 3(50 + 2 \times 1 + 2 \times 0.5 - 2 \times 0.08087)$$

$$= 158.515 \text{ mm}$$

比实测 d'_{ac} 值大 0.27 mm。

$$d_{ab} = m(z_b - 2h_a^* + 2x_b - 2\Delta y_{ab})$$

$$= 3(126 - 2 \times 1 + 2 \times 0.43 - 2 \times 0.00057)$$

$$= 374.577 \text{ mm}$$

比实测 d'_{ab} 值大 0.28 mm。

5) 按 x_a 、 x_c 和 x_b 验算法线长度及减薄量

$$W_{a3} = m \cos \alpha [(k - 0.5)\pi + z \operatorname{inv} \alpha] + 2x_a m \sin \alpha$$

$$= 3 \cos 20^\circ [(3 - 0.5)\pi + 24 \operatorname{inv} 20^\circ] +$$

$$2 \times 0.5 \times 3 \sin 20^\circ = 24.175 \text{ mm}$$

比实测 W'_{a3} 值大 0.06 mm。

$$W_{c6} = 3 \cos 20^\circ [(6 - 0.5)\pi + 50 \operatorname{inv} 20^\circ] +$$

$$2 \times 0.5 \times 3 \sin 20^\circ = 51.837 \text{ mm}$$

比实测 W'_{c6} 值大 0.06 mm。

$$W_{b14} = 3 \cos 20^\circ [(14 - 0.5)\pi + 126 \operatorname{inv} 20^\circ] +$$

$$2 \times 0.43 \times 3 \sin 20^\circ = 125.738 \text{ mm}$$

比实测 W'_{b14} 值大 0.02 mm。

6) 按 x_a 、 x_c 和 x_b 验算中心距 a

a. 外啮合

$$\operatorname{inv} \alpha'_{ac} = \frac{2 \tan \alpha}{z_c} x_{\Sigma ac} + \operatorname{inv} \alpha$$

$$= \frac{2 \tan 20^\circ}{24 + 50} \times 1 + \operatorname{inv} 20^\circ = 0.02475$$

得 $\alpha'_{ac} = 23^\circ 31' 38''$

$$\Delta y_{ac} = \left[\frac{\operatorname{inv} \alpha'_{ac} - \operatorname{inv} \alpha}{2 \tan \alpha} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \alpha_{cb}}{\cos \alpha_{cb}} - 1 \right) \right] z_{\Sigma ac}$$

$$= \left[\frac{\operatorname{inv} 23^\circ 31' 38'' - \operatorname{inv} 20^\circ}{2 \tan 20^\circ} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos 20^\circ}{\cos 23^\circ 31' 38''} - 1 \right) \right] \times$$

$$(24 + 50) = 0.0799$$

$$y_{ac} = x_{\Sigma ac} - \Delta y_{ac} = 1.00754 - 0.0799$$

$$= 0.9276$$

$$a_{acc} (\text{计算值}) = a_{ac} + m y_{ac} = 111 + 3 \times 0.9276$$

$$= 113.78 \text{ mm}$$

实测中心距与计算值完全相等。

b. 内啮合

$$\operatorname{inv} \alpha'_{cb} = \frac{2 \tan \alpha_{cb}}{z_c} x_{\Sigma cb} + \operatorname{inv} \alpha_{cb}$$

$$= \frac{2 \tan 20^\circ}{126 - 50} \times (-0.07) + \operatorname{inv} 20^\circ$$

$$= 0.01423353$$

$$\alpha'_{cb} = 19^\circ 42' 19''$$

$$\Delta y_{cb} = \left[\frac{\operatorname{inv} \alpha'_{cb} - \operatorname{inv} \alpha_{cb}}{2 \tan \alpha_{cb}} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \alpha_{cb}}{\cos \alpha_{cb}} - 1 \right) \right] z_{\Sigma cb}$$

$$= \left[\frac{\operatorname{inv} 19^\circ 42' 19'' - \operatorname{inv} 20^\circ}{2 \tan 20^\circ} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos 20^\circ}{\cos 19^\circ 42' 19''} - 1 \right) \right]$$

$$(126 - 50) = 0.00054$$

$$y_{cb} = x_{\Sigma cb} - \Delta y_{cb} = -0.07276 - 0.00054$$

$$= -0.07222$$

$$a_{abc} (\text{计算值}) = a_{cb} - m y_{cb} = 114 + 3(-0.07222)$$

$$= 113.783 \text{ mm}$$

实测中心距比计算中心距小 0.003 mm。

2.2 斜齿圆柱齿轮的测绘

斜齿圆柱齿轮的测绘基本上与直齿圆柱齿轮相同。其不同点是轮齿倾斜一个角度,使轮齿具有端面及法面不同的两套参数。一般测绘计算是以标准渐开线齿形的端面参数为依据的,在测绘中还要穿插端面及法面参数的换算,这两套参数均与轮齿分度圆柱螺旋角 β 的余弦有关,容易搞混,测绘计算时应予注意。

斜齿轮的基本参数均以法面参数为标准值,斜齿轮测绘主要是采用适当的办法或使用必要的轮齿测量仪器,较准确地测出其分度圆柱螺旋角 β ,以保证这两套参数测绘的准确度。

斜齿轮的端面与法面参数的关系为:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} \quad (14.1-32)$$

$$x_t = x_n \cos \beta \quad (14.1-33)$$

$$h_a^* = h_{an}^* \cos \beta \quad (14.1-34)$$

$$c_t^* = c_n^* \cos \beta \quad (14.1-35)$$

$$y_t = y_n \cos \beta \quad (14.1-36)$$

$$\Delta y_t = \Delta y_n \cos \beta \quad (14.1-37)$$

$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (14.1-38)$$

2.2.1 斜齿圆柱齿轮的测绘方法

斜齿圆柱齿轮测绘步骤与直齿圆柱齿轮大致相同,主要是增加了螺旋角的测量,测量分度圆螺旋角 β 有以下几种方法。

(1) 一般测量方法

1) 滚印法 在齿轮的齿顶圆上涂上一层较薄的红丹,把白纸蒙在其上或使齿轮在纸上滚动,可得到较为清晰的压痕,见图 14.1-7。

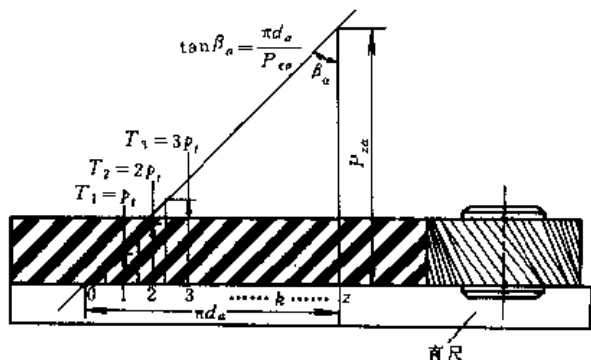


图 14.1-7 滚印法测螺旋角

根据顶圆螺旋角 β_a 和齿顶圆直径 d_a 等参数求分度圆螺旋角 β

$$\tan \beta_a = \frac{\pi d_a}{T} \quad (14.1-39)$$

$$\tan \beta = \frac{d}{d_a} \tan \beta_a \quad (14.1-40)$$

或 $\sin \beta = \pi m_n \frac{x}{P_z} = \pi m_n \frac{k}{P_{zk}}$

式中 P_z ——轮齿导程;

P_{zk} ——跨 k 个齿所对应的轴向齿距。

2) 滚珠—轴向齿距法 如图 14.1-8 所示,轴向齿距为

$$p_x = \frac{l - d_f}{k} \quad (14.1-41)$$

$$\sin \beta = \frac{\pi m_n}{p_x} \quad (14.1-42)$$

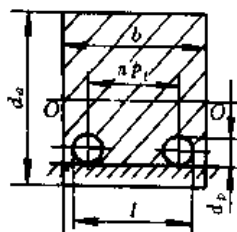


图 14.1-8 滚珠—轴向齿距法测螺旋角

上述方法的测量精度较低,只作为测绘粗略估算或参考用。

(2) 精确测量法

1) 在没有较好的测齿条件下,齿轮大小适中,可通过上述的粗略方法测得齿顶圆螺旋角 β_a 及齿顶圆 d_a ,然后计算出轮齿的近似导程 P_z 。

$$P_z = \frac{\pi d_a}{\tan \beta_a} \quad (14.1-43)$$

可在较新的铣床或车床上配上分度头,也可在精度较高的滚齿机或螺纹加工机床上,根据 P_z 选配交换齿轮,将被测齿轮安装后,用千分表压在齿面上,若工件旋转过程中,千分表的指针基本不动,则说明这个导程即为切制轮齿时的实际导程。若千分表指针摆动较大,表示 β_a 有误差,造成导程误差 ΔP_z (千分表压在齿面上的任意部位,尽管沿齿高各点齿面上螺旋角不同,但导程都是一样的,不影响测量结果)。

$$\Delta P_z = \frac{P_z^2 \Delta \epsilon}{\pi d_a l - P_z \Delta \epsilon} \quad (14.1-44)$$

式中 ΔP_z ——导程误差;

P_z ——近似导程;

l ——测头相对齿轮的轴向位移;

$\Delta \epsilon$ ——千分表的读数。

实际导程 $P_z = P_z' \pm \Delta P_z$, 表值增加取“-”号;表

值减少取“+”号。实际 β_a 值由式 $\cot \beta_a = \cot \beta_a' \pm \frac{\Delta P_z}{\pi d_a}$ 算出。

经过反复的校准,即选配、更换不同的交换齿轮,最后得到较准的 β_a ,然后再根据 $\tan \beta = \frac{d}{d_a} \tan \beta_a$ 便可算出较准确的分度圆螺旋角 β 。

2) 在精密台式仪器上,如用瑞士的 SP-60、PH-100……,前联邦德国的 OPTON LIMM500 等均可精确地直接测出分度圆螺旋角 β 。

3) 大型精密齿轮(装在箱体中的或正在运转着的齿轮)在齿宽比较大时,可通过上置式或旁置式轴向齿距仪等较准确的测出 β 值。

注意:在齿轮测绘过程中,往往受到各种条件限制,很难把全部数据精确地测出来,如螺旋角等。在这种情况下,测绘仿制的齿轮副不能单件更换使用,只能成对使用。

斜齿轮公法线长度 W_k 、跨齿数 k 、固定弦齿厚 \bar{s}_k 和固定弦齿高 \bar{h}_k 的计算公式见表 14.1-6 和表 14.1-7。

当被测齿轮的齿厚和齿槽不等时,其公法线长度不能按表 14.1-7 公式计算,应为

$$W_k = k P_m + \bar{s}_k \cos \alpha + d_k \cos \beta \sin \alpha' + 2 m_n x_n \sin \alpha \quad (14.1-45)$$

式中 k' ——跨齿槽数。

关于斜齿轮的测绘步骤,可参照表 14.1-8 进行。

表 14.1-6 斜齿轮固定弦齿厚 \bar{s}_c 和固定弦齿高 \bar{h}_c 计算式

| α_n | 不变位 $x_{n1} = x_{n2} = 0$ | | 高变位 $x_{n1} = x_{n2}$ | | 角变位 $x_{n1} \neq x_{n2}$ | |
|------------|---------------------------|-------------------------------------|---|--|--------------------------|--|
| 通式 | \bar{s}_c | $0.5\pi m_n \cos^2 \alpha_n$ | $0.5\pi m_n \cos^2 \alpha_n + m_n x_n \sin 2\alpha_n$ | $(0.5\pi \cos^2 \alpha_n + x_n \sin 2\alpha_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $(1 - 0.125\pi \sin 2\alpha_n) m_n$ | $(1 - 0.125\pi \sin 2\alpha_n + x_n \cos^2 \alpha_n) m_n$ | $(1 - 0.125\pi \sin 2\alpha_n + x_n \cos^2 \alpha_n - \Delta y_n) m_n$ | | |
| 14.5° | \bar{s}_c | $1.47232 m_n$ | $(1.47232 + 0.4848 x_n) m_n$ | $(1.47232 + 0.4848 x_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $0.80962 m_n$ | $(0.80962 + 0.9373 x_n) m_n$ | $(0.80962 + 0.9373 x_n - \Delta y_n) m_n$ | | |
| 15° | \bar{s}_c | $1.46557 m_n$ | $(1.46557 + 0.5000 x_n) m_n$ | $(1.46557 + 0.5000 x_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $0.80365 m_n$ | $(0.80365 + 0.9330 x_n) m_n$ | $(0.80365 + 0.9330 x_n - \Delta y_n) m_n$ | | |
| 16° | \bar{s}_c | $1.45145 m_n$ | $(1.45145 + 0.5299 x_n) m_n$ | $(1.45145 + 0.5299 x_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $0.79190 m_n$ | $(0.79190 + 0.9240 x_n) m_n$ | $(0.79190 + 0.9240 x_n - \Delta y_n) m_n$ | | |
| 17.5° | \bar{s}_c | $1.42876 m_n$ | $(1.42876 + 0.5736 x_n) m_n$ | $(1.42876 + 0.5736 x_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $0.77476 m_n$ | $(0.77476 + 0.9096 x_n) m_n$ | $(0.77476 + 0.9096 x_n - \Delta y_n) m_n$ | | |
| 20° | \bar{s}_c | $1.38705 m_n$ | $(1.38705 + 0.6428 x_n) m_n$ | $(1.38705 + 0.6428 x_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $0.74758 m_n$ | $(0.74758 + 0.8830 x_n) m_n$ | $(0.74758 + 0.8830 x_n - \Delta y_n) m_n$ | | |
| 22.5° | \bar{s}_c | $1.34076 m_n$ | $(1.34076 + 0.7071 x_n) m_n$ | $(1.34076 + 0.7071 x_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $0.72232 m_n$ | $(0.72232 + 0.8536 x_n) m_n$ | $(0.72232 + 0.8536 x_n - \Delta y_n) m_n$ | | |
| 25° | \bar{s}_c | $1.29024 m_n$ | $(1.29024 + 0.7660 x_n) m_n$ | $(1.29024 + 0.7660 x_n) m_n$ | | |
| | \bar{h}_c | $0.69918 m_n$ | $(0.69918 + 0.8214 x_n) m_n$ | $(0.69918 + 0.8214 x_n - \Delta y_n) m_n$ | | |

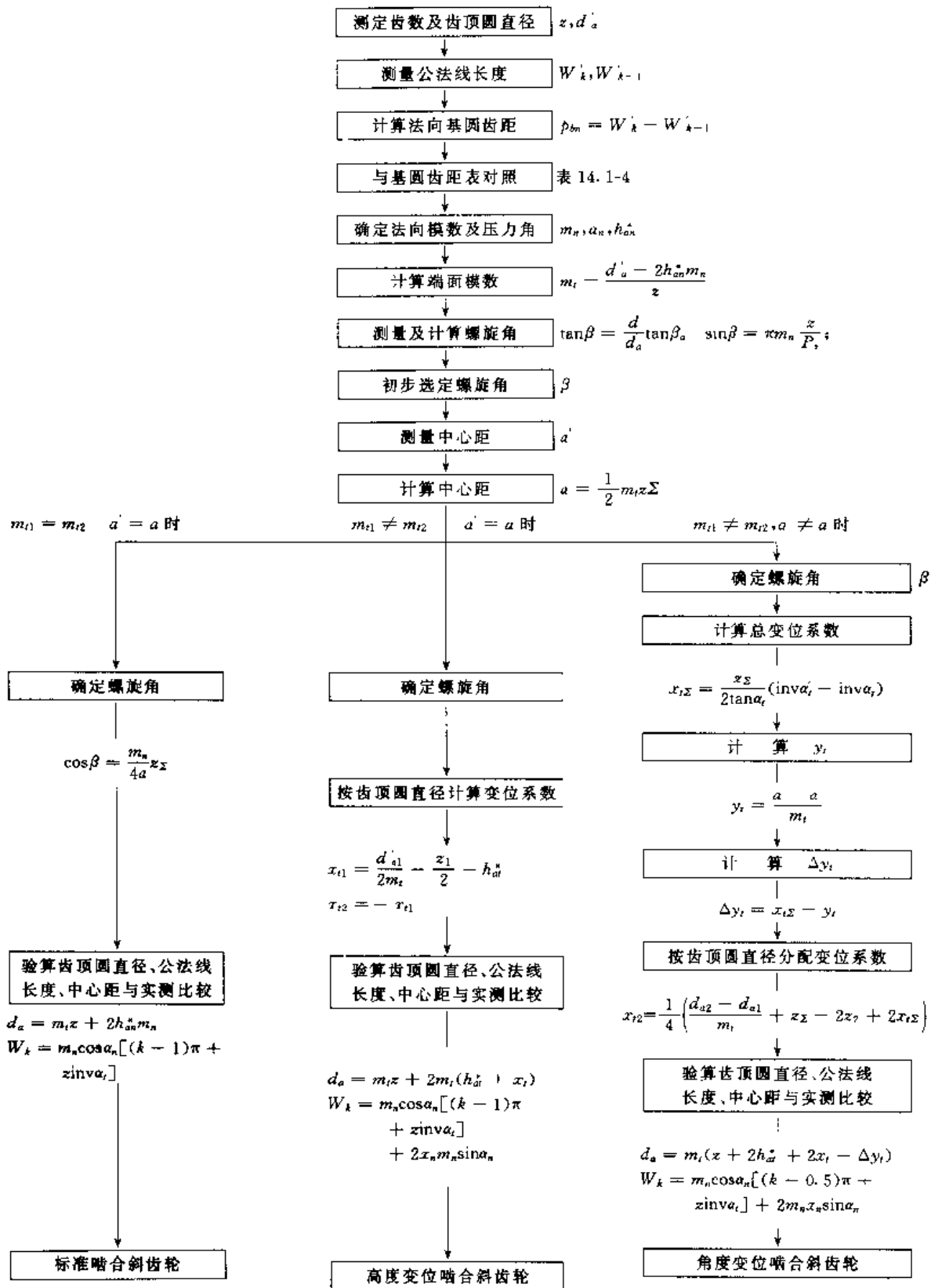
注：对直齿圆柱齿轮，表中 $\alpha_n = \alpha$ ， $m_n = m$ 。

表 14.1-7 斜齿轮公法线 W 及跨齿数 k 计算式

| α_n | | 不变位 | 变位 |
|------------|-------|--|---|
| 通式 | k | $\frac{\alpha_n}{180^\circ} z \frac{\operatorname{inv} \alpha_n}{\operatorname{inv} \alpha_n} + 0.5$ | $\frac{1}{180^\circ} z \left(\cos^{-1} \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) \frac{\operatorname{inv} \alpha_n}{\operatorname{inv} \alpha_n} + 0.5$ |
| | W_k | $m_n \cos \alpha_n [(k - 0.5)\pi + z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n \cos \alpha_n [(k - 0.5)\pi + z \operatorname{inv} \alpha_n] + 2x_n m_n \sin \alpha_n$ |
| 14.5° | k | $14.52813 z \operatorname{inv} \alpha_n + 0.5$ | $1.00194 z \operatorname{inv} \alpha_n \left(\arccos \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) + 0.5$ |
| | W_k | $m_n [3.41526(k - 0.5) + 0.96815 z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n [3.41526(k - 0.5) + 0.96815 z \operatorname{inv} \alpha_n] + 0.50076 x_n m_n$ |
| 15° | k | $13.55058 z \operatorname{inv} \alpha_n + 0.5$ | $0.90337 z \operatorname{inv} \alpha_n \left(\arccos \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) + 0.5$ |
| | W_k | $m_n [3.0345(k - 0.5) + 0.96593 z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n [3.0345(k - 0.5) + 0.96593 z \operatorname{inv} \alpha_n] + 0.51764 x_n m_n$ |
| 16° | k | $11.86292 z \operatorname{inv} \alpha_n + 0.5$ | $0.74143 z \operatorname{inv} \alpha_n \left(\arccos \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) + 0.5$ |
| | W_k | $m_n [3.0199(k - 0.5) + 0.96126 z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n [3.0199(k - 0.5) + 0.96126 z \operatorname{inv} \alpha_n] + 0.55127 x_n m_n$ |
| 17.5° | k | $9.85427 z \operatorname{inv} \alpha_n + 0.5$ | $0.56310 z \operatorname{inv} \alpha_n \left(\arccos \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) + 0.5$ |
| | W_k | $m_n [2.9962(k - 0.5) + 0.9537 z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n [2.9962(k - 0.5) + 0.9537 z \operatorname{inv} \alpha_n] + 0.60141 x_n m_n$ |
| 20° | k | $7.45512 z \operatorname{inv} \alpha_n + 0.5$ | $0.37276 z \operatorname{inv} \alpha_n \left(\arccos \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) + 0.5$ |
| | W_k | $m_n [2.9521(k - 0.5) + 0.93969 z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n [2.9521(k - 0.5) + 0.93969 z \operatorname{inv} \alpha_n] + 0.68404 x_n m_n$ |
| 22.5° | k | $5.81017 z \operatorname{inv} \alpha_n + 0.5$ | $0.25823 z \operatorname{inv} \alpha_n \left(\arccos \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) + 0.5$ |
| | W_k | $m_n [2.9025(k - 0.5) + 0.92388 z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n [2.9025(k - 0.5) + 0.92388 z \operatorname{inv} \alpha_n] + 0.76537 x_n m_n$ |
| | k | $4.63349 z \operatorname{inv} \alpha_n + 0.5$ | $0.18534 z \operatorname{inv} \alpha_n \left(\arccos \frac{z \cos \alpha_n}{z + 2x_n} \right) + 0.5$ |
| | W_k | $m_n [2.8472(k - 0.5) + 0.90631 z \operatorname{inv} \alpha_n]$ | $m_n [2.8472(k - 0.5) + 0.90631 z \operatorname{inv} \alpha_n] + 0.84524 x_n m_n$ |

注：直齿轮时， $\alpha_n = \alpha$ 。

表 14.1-8 斜齿圆柱齿轮测绘程序



注： $m_n = m_t \cos \beta$ ； $x_n = \frac{x_t}{\cos \beta}$ ； $h_{an}^* = \frac{h_{at}^*}{\cos \beta}$ ； $c_n^* = \frac{c_t^*}{\cos \beta}$ ； $\tan \alpha_n = \tan \alpha_t \cos \beta$ ； $\sin \alpha_n = \sin \alpha_t \cos \beta$ ； $\cos \alpha_n = \frac{\cos \alpha_t \cos \beta}{\cos \beta}$ ； $\cos \alpha_t = \frac{a}{a'} \cos \alpha_n$ 。

2.2.2 斜齿圆柱齿轮的测绘实例

1. 冶金矿山齿轮的测绘

某钢厂转炉吹氧提升减速器的一对斜齿外啮合平行轴渐开线齿轮的测绘。

(1) 实测数据

$z_1=23$, $d'_{a1}=217.72\text{mm}$, $W'_3=64.04\text{mm}$, $W'_4=87.64\text{mm}$, $z_2=86$, $d'_{a2}=753.86\text{mm}$, $\bar{h}_{t2}=8.41\text{mm}$, $\bar{s}_{t2}=12.87\text{mm}$ 和 12.92mm , $a'=470\text{mm}$, $\beta_{a2}=20^\circ40'$ 。

(2) 测绘数据处理

1) 计算基圆齿距 p_{bn}

$$p_{bn}=W'_4-W'_3=87.64-64.04=23.60\text{mm}$$

2) 确定模数 m_n 及压力角 α_n 。由表 14.1-4 查得 $P_{bn}=\pi m_n \cos \alpha_n=23.617\text{mm}$ 时模数及压力角分别为 $m_n=8\text{mm}$, $\alpha_n=20^\circ$ 的米制齿轮。

3) 判断变位形式并求变位系数

$$m_{t1}=\frac{d'_{a1}-2h_{am}^*m_n}{z_1}=\frac{217.72-2\times1\times8}{23}=8.77\text{mm}$$

$$m_{t2}=\frac{d'_{a2}-2h_{am}^*m_n}{z_2}=\frac{753.86-2\times1\times8}{86}=8.58\text{mm}$$

通过以上估算,端面模数 m_t 取为 8.675mm , 按测得的 β_a , 估算分度圆螺旋角 β

$$\tan \beta = \frac{m_t z_2}{d'_{a2}} \tan \beta_{a2} = \frac{8.675 \times 86}{753.86} \tan 20^\circ 40'$$

$$\beta = 20^\circ 28' 30'', \text{ 参照原图取 } \beta = 20^\circ$$

$$a = \frac{m_n(z_1+z_2)}{2\cos\beta} = \frac{8(23+86)}{2\cos 20^\circ} = 463.982\text{mm}$$

$$a \neq a'$$

这说明该齿轮副为角度变位。

求啮合角 α'_i

$$\begin{aligned} \alpha'_i &= \arccos\left(\frac{a}{a'} \cos \alpha_i\right) \\ &= \arccos\left(\frac{463.982}{470} \cos 21^\circ 10' 22''\right) \end{aligned}$$

$$\alpha'_i = 22^\circ 59' 33''$$

求变位系数之和 $x_{i\Sigma}$

$$\begin{aligned} x_{i\Sigma} &= \frac{z_1+z_2}{2\tan\alpha'_i} (\text{inv}\alpha'_i - \text{inv}\alpha) \\ &= \frac{23+86}{2\tan 21^\circ 10' 22''} (\text{inv} 22^\circ 59' 33'' - \text{inv} 21^\circ 10' 22'') \end{aligned}$$

$$x_{i\Sigma} = 0.736182$$

$$x_{n\Sigma} = x_{i\Sigma} / \cos \beta = 0.736182 / \cos 20^\circ = 0.783429$$

求中心距变动系数 y_t

$$y_t = \frac{a' - a}{m_t} = \frac{470 - 463.982}{81 \cos 20^\circ} = 0.706884$$

求齿顶高变动系数 Δy_t

$$\begin{aligned} \Delta y_t &= x_{i\Sigma} - y_t = 0.736182 - 0.706884 \\ &= 0.029298 \end{aligned}$$

按齿顶圆直径计算变位系数

$$\begin{aligned} x_{t1} &= \frac{1}{4} \left(\frac{d'_{a1} - d'_{a2}}{m_t} - z_1 + z_2 + 2x_{i\Sigma} \right) \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{217.72 - 753.86}{81 \cos 20^\circ} - 23 + 86 + \right. \\ &\quad \left. 2 \times 0.736182 \right) = 0.3794 \end{aligned}$$

$$x_{n1} = x_{t1} / \cos \beta = 0.3794 / \cos 20^\circ = 0.4037$$

参照原图取 $x_{n1} = 0.4000$; 则 $x_{t1} = 0.3759$

$$x_{t2} = x_{i\Sigma} - x_{t1} = 0.7362 - 0.3759 = 0.3603$$

$$x_{n2} = x_{t2} / \cos \beta = 0.3603 / \cos 20^\circ = 0.3833$$

4) 验算齿顶圆直径 按已确定的变位系数 x_{n1} 及 x_{n2} , 验算齿顶圆直径, 取标准齿顶高系数 $h_{am}^* = 1$

$$\begin{aligned} d_{a1} &= m_t z_1 + 2(h_{am}^* + x_{n1} - \Delta y_t) m_n \\ &= \frac{8 \times 23}{\cos 20^\circ} + 2 \left(1 + 0.4000 - \frac{0.029298}{\cos 20^\circ} \right) 8 \\ &= 217.710\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 $d'_{a1} = 217.720\text{mm}$ 小 0.01mm 。

$$\begin{aligned} d_{a2} &= m_t z_2 + 2(h_{am}^* + x_{n2} - \Delta y_t) m_n \\ &= \frac{8 \times 86}{\cos 20^\circ} + 2 \left(1 + 0.3833 - \frac{0.029298}{\cos 20^\circ} \right) 8 \\ &= 753.790\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 $d'_{a2} = 753.68\text{mm}$ 大 0.11mm 。

5) 验算法线长度及减薄量 按已确定的变位系数 x_{n1} 及 x_{n2} , 验算法线长度及减薄量

$$\begin{aligned} W_3 &= m_n \cos \alpha_n [\pi(k-0.5) + z_1 \text{inv} \alpha_n] + 2m_n x_{n1} \sin \alpha_n \\ &= 8 \cos 20^\circ [\pi(3-0.5) + 23 \text{inv} 21^\circ 10' 22''] + \\ &\quad 2 \times 8 \times 0.4 \sin 20^\circ = 64.308\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 $W'_3 = 64.04\text{mm}$ 大 0.268mm 。

$$\begin{aligned} W_4 &= m_n \cos \alpha_n [\pi(k-0.5) + 23 \text{inv} 21^\circ 10' 22''] + \\ &\quad 2 \times 8 \times 0.4 \sin 20^\circ = 87.925\text{mm} \end{aligned}$$

比实测 $W'_4 = 87.64\text{mm}$ 大 0.285mm 。

6) 验算中心距 a 按已确定的 x_t 及 $x_{i\Sigma}$, 验算中心距 a 。

$$\begin{aligned} \text{inv} \alpha'_i &= \frac{2 \tan \alpha_i}{z_\Sigma} x_{i\Sigma} + \text{inv} \alpha_i \\ &= \frac{2 \times \tan 21^\circ 10' 22''}{109} \times 0.7397 + \text{inv} 21^\circ 10' 22'' \\ &= 0.023050 \end{aligned}$$

$$\alpha'_i = 23^\circ$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= \left[\frac{\text{inv} \alpha'_i - \text{inv} \alpha_i}{2 \tan \alpha_i} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \alpha_i}{\cos \alpha'_i} - 1 \right) \right] z_\Sigma \\ &= \left[\frac{\text{inv} 23^\circ - \text{inv} 21^\circ 10' 22''}{2 \tan 21^\circ 10' 22''} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos 21^\circ 10' 22''}{\cos 23^\circ} - 1 \right) \right] \times 109 \end{aligned}$$

$$= 0.029774$$

$$y_t = x_{i\Sigma} - \Delta y_t = 0.7397 - 0.029774$$

$$= 0.709926$$

$$a_r = a + m_r y_r = 463.982 + \frac{8}{\cos 20^\circ} \cdot 0.709926 \\ \approx 470.026 \text{mm}$$

实测中心距为 470mm, 计算与实测只差 0.026mm。

2. 透平齿轮的测绘

某化工厂的斜齿透平齿轮的测绘

(1) 实测数据

$z_1 = 46$, $d'_{a1} = 172.340 \text{mm}$; $z_2 = 93$, $d'_{a2} = 340.694 \text{mm}$; $W'_6 = 59.82 \text{mm}$, $W'_7 = 70.14 \text{mm}$, $W'_{12} = 124.70 \text{mm}$, $W'_{13} = 135.05 \text{mm}$ 。

测量齿轮副实际中心距 a' : 两轴颈内侧用块规测量为 165.135mm, 大齿轮和小齿轮对应部分的轴颈实测为 $\phi 90_{-0.16}^0 \text{mm}$, $\phi 80_{-0.15}^0 \text{mm}$, 因此实测中心距 a' 为

$$a' = 165.135 + \frac{1}{2}(90 - 0.16 + 80 - 0.19) \\ \approx 249.960 \text{mm}$$

在齿面上直径为 $\phi 154.974 \text{mm}$ 处, 在 PH-100 上测得螺旋角为 $9^\circ 29'$ 。

齿轮副的啮合侧隙, 用压铅法测得: 啮入端为 0.42~0.43mm, 中部为 0.44~0.45mm, 啮出端为 0.44~0.45mm, 而采用千分表测得为 0.40mm。

齿高: 大齿轮为 9.24mm, 小齿轮为 8.43mm。

(2) 测绘数据处理

1) 计算法向基圆齿距 p_m

$$p_m = W'_7 - W'_6 = 70.14 - 59.82 = 10.32 \text{mm}$$

$$p_m = W'_{13} - W'_{12} = 135.05 - 124.7 = 10.35 \text{mm}$$

2) 确定模数 m_n 及压力角 α_n

由表 14.1-4 查得 $p_m = \pi m_n \cos \alpha_n = 10.332 \text{mm}$ 时的模数及压力角分别为 $m_n = 3.5 \text{mm}$, $\alpha_n = 20^\circ$, 米制齿轮。

3) 计算分度圆柱螺旋角 β

$$\text{因为 } \frac{\pi d}{\cos \beta} = \frac{\pi d_i}{\cos \beta_i} = P,$$

式中 d_i ——任意直径;

β_i ——任意直径上对应的螺旋角。

由上式可推出:

$$\sin \beta = \frac{m_n z \tan \beta_i}{d_i} = \frac{3.5 \times 46 \tan 9^\circ 29'}{154.974}$$

$$\beta = 9^\circ 59' 37'', \text{ 取 } \beta = 10^\circ$$

4) 判断变位形式并求变位系数

$$a = \frac{m_n (z_1 + z_2)}{2 \cos \beta} = \frac{3.5(46 + 93)}{2 \cos 10^\circ} = 247.003 \text{mm}$$

$$a \neq a'$$

这说明该齿轮副为角度变位。

求啮合角 α'

$$\alpha'_i = \arccos \left(\frac{a}{a'} \cos \alpha_i \right)$$

$$= \arccos \left(\frac{247.003}{249.960} \cos 20^\circ 17' 1'' \right)$$

$$\alpha'_i = 22^\circ 2' 40''$$

也可以通过两轮的基圆求 α'

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha_i = \frac{3.5}{\cos 10^\circ} \times 46 \times \cos 20^\circ 17' 1''$$

$$= 153.346 \text{mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_i = \frac{3.5}{\cos 10^\circ} \times 93 \times \cos 20^\circ 17' 1''$$

$$= 310.025 \text{mm}$$

$$\alpha'_i = \arccos(153.346/165.441) = 22^\circ 2' 40''$$

$$\alpha'_i = \arccos(310.025/334.478) = 22^\circ 2' 40''$$

式中 $d'_1 = 165.441 \text{mm}$;

$$d'_2 = 334.478 \text{mm}。$$

求变位系数之和 x_{Σ}

$$x_{\Sigma} = \frac{z_1 + z_2}{2 \tan \alpha_i} (\text{inv} \alpha'_i - \text{inv} \alpha_i)$$

$$= \frac{46 + 93}{2 \tan 20^\circ 17' 1''} (\text{inv} 22^\circ 2' 40'' - \text{inv} 20^\circ 17' 1'')$$

$$= 0.866902$$

$$x_{n\Sigma} = x_{\Sigma} / \cos \beta = 0.866902 / \cos 10^\circ = 0.880276$$

求中心距变动系数 y_r

$$y_r = \frac{a' - a}{m_n} = \frac{249.96 - 247.003}{3.5 / \cos 10^\circ} = 0.832022$$

求齿顶高变动系数 Δy_r

$$\Delta y_r = x_{\Sigma} - y_r = 0.866902 - 0.832022 = 0.03488$$

按齿顶圆直径计算变位系数

$$x_{r1} = \frac{1}{4} \left(\frac{d'_{a1} - d_{a1}}{m_n} - z_1 + z_2 + 2x_{\Sigma} \right)$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{172.340 - 340.694}{3.5 / \cos 10^\circ} - 46 + 93 + \right.$$

$$\left. 2 \times 0.866902 \right) = 0.34086$$

$$x_{n1} = x_{r1} / \cos \beta = 0.34086 / \cos 10^\circ = 0.34612$$

$$x_{r2} = x_{\Sigma} - x_{r1} = 0.866902 - 0.34086 = 0.52604$$

$$x_{n2} = x_{r2} / \cos \beta = 0.52604 / \cos 10^\circ = 0.53416$$

取 $x_{n1} = 0.346$, $x_{n2} = 0.534$, $x_{r1} = 0.341$, $x_{r2} = 0.526$ 。

5) 验算齿顶圆直径 按已确定的变位系数 x_{n1} 及

x_{n2} , 验算齿顶圆直径, 取标准齿顶高系数 $h_{an}^* = 1$

$$d_{a1} = m_n z_1 + 2(h_{an}^* + x_{n1} - \Delta y_r) m_n$$

$$= \frac{3.5 \times 46}{\cos 10^\circ} + 2 \left(1 + 0.346 - \frac{0.03488}{\cos 10^\circ} \right)$$

$$\times 3.5 = 172.658 \text{mm}$$

比实测 $d'_{a1} = 172.34 \text{mm}$ 大 0.318mm。

6) 验算法线长度及减薄量 按已确定的变位

系数 x_{n1} 及 x_{n2} , 验算法线长度及减薄量。

$$W_6 = m_n \cos \alpha_n [\pi(k-0.5) + z_1 \operatorname{inv} \alpha_n] + 2m_n x_{n1} \sin \alpha_n$$

$$= 3.5 \cos 20^\circ [\pi(6-0.5) + 46 \operatorname{inv} 20^\circ 17' 1''] + 2 \times 3.5 \times 0.346 \sin 20^\circ = 60.013 \text{mm}$$

比实测 $W_6 = 59.82 \text{mm}$ 大 0.193mm 。

同样可计算出 $W_7 = 70.345 \text{mm}$, 比实测 $W_7 = 70.14 \text{mm}$ 大 0.205mm , $W_{12} = 124.864 \text{mm}$ 比实测 $W_{12} = 124.7 \text{mm}$ 大 0.164mm , $W_{13} = 135.196 \text{mm}$ 比实测 $W_{13} = 135.05 \text{mm}$ 大 0.146mm 。

7) 验算中心距 按已确定的 x_{n1} 及 x_{n2} , 验算中心距 a 。

$$\operatorname{inv} \alpha_i = \frac{2 \tan \alpha_i}{z_\Sigma} x_{i\Sigma} + \operatorname{inv} \alpha_i$$

$$= \frac{2 \tan 20^\circ 17' 1''}{(46+93)} (0.341 + 0.526) + \operatorname{inv} 20^\circ 17' 1''$$

$$= 0.0201815$$

$$\alpha_i = 22^\circ 2' 41''$$

$$\Delta y_i = \left[\frac{\operatorname{inv} \alpha_i - \operatorname{inv} \alpha_i}{2 \tan \alpha_i} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \alpha_i}{\cos \alpha_i} - 1 \right) \right] z_\Sigma$$

$$= \left[\frac{\operatorname{inv} 22^\circ 2' 41'' - \operatorname{inv} 20^\circ 17' 1''}{2 \tan 20^\circ 17' 1''} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos 20^\circ 17' 1''}{\cos 22^\circ 2' 41''} - 1 \right) \right] \times 139$$

$$= 0.034926$$

$$y_i = x_{i\Sigma} - \Delta y_i = (0.341 + 0.526) - 0.034926$$

$$= 0.83207$$

$$a' = a + m_n y_i = 247.003 + \frac{3.5}{\cos 10^\circ} \times 0.83207$$

$$= 249.960 \text{mm}$$

实测中心距为 249.960mm , 与计算相符。

(8) 利用 PH-100 渐开线齿轮测量仪及 OPT ON LMM500 三坐标测量仪, 测得齿轮的齿形误差、齿向误差等数值, 按 GB 10095-88 精度标准要求 and 制造工艺情况确定该齿轮副精度为 4 级 (或 5 级)。齿面为渐开线且经过磨齿, 齿面粗糙度测得为 $R_a 0.63 \sim 1.25 \mu\text{m}$ 。测出大齿轮齿没有修缘、小齿轮做了修缘处理, 齿顶修缘高度约 $0.76 m_n$, 修缘量约 0.025mm , 齿根也修缘, 修缘点离齿根约 $0.43 m_n$, 修缘量约 0.025mm 。这种透平齿轮为了适应高速 (节圆线速度在 100m/s 以上)、重载 (齿面芬氏系数一般在 1.47N/mm^2 以上) 长期连续运行的需要, 一般对小齿轮要进行齿廓及齿向修形, 有时还要镀铬、镀银或硫化。

3. 行星齿轮的测绘

某钢厂制氧厂透平膨胀机高速重载行星齿轮增速器为人字齿单级 NGW 型传动。

(1) 实测数据

太阳轮 $z_a = 26$, $d_{wa} = 42.50 \text{mm}$, $W_5 = 18.98 \text{mm}$, $W'_5 = 22.94 \text{mm}$ 。

行星轮 $z_b = 59$, $d_{wb} = 91.88 \text{mm}$, $W_{10} = 39.66 \text{mm}$, $W_{11} = 43.62 \text{mm}$;

内齿轮 $z_c = 145$, $d_{wc} = 216.50 \text{mm}$, 测量用钢球直径 $d_s = 3$, $M' = 213.34 \text{mm}$ 。

a'_{ac} (太阳轮与行星轮) $= a'_{cb}$ (行星轮与内齿轮) $= 64.75 \text{mm}$ 。

在 SP-60 渐开线测量仪上测出 $\beta = 25^\circ 50' 31''$

(2) 测绘数据处理

1) 计算基圆法向齿距 p_{bn}

$$p_{bn} = W'_5 - W_5 = 22.94 - 18.98 = 3.96 \text{mm}$$

$$p_{bn} = W'_{11} - W_{10} = 43.62 - 39.66 = 3.96 \text{mm}$$

2) 确定模数 m_n 及压力角 α_n 由表 14.1-4 查得 $p_{bn} = \pi m_n \cos \alpha_n = 3.947 \text{mm}$ 时的模数及压力角分别为 $m_n = 1.36 \text{mm}$, $\alpha_n = 22^\circ 30'$, 米制齿轮。

3) 判断变位形式并求变位系数

外啮合 (太阳轮与行星轮) 理论中心距 a_{ac}

$$a_{ac} = \frac{m_n z_\Sigma}{2 \cos \beta} = \frac{1.36(26+59)}{2 \cos 25^\circ 50' 31''} = 64.2 \text{mm}$$

$$a_{ac} < a_{ac}$$

这说明该齿轮副为角度变位。

内啮合 (行星轮与内齿轮) 理论中心距 a_{cb}

$$a_{cb} = \frac{m_n z_\Sigma}{2 \cos \beta} = \frac{1.36(145-59)}{2 \cos 25^\circ 50' 31''} = 64.97 \text{mm}$$

$$a_{cb} > a_{cb}$$

这说明该齿轮副为角度变位。

求啮合角 α'_{tac}

$$\alpha'_{tac} = \arccos \left(\frac{a_{ac}}{a_{ac}} \cos \alpha_{tac} \right)$$

$$= \arccos \left\{ \frac{a_{ac}}{a_{ac}} \cos \left[\arctan \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) \right] \right\}$$

$$= \arccos \left\{ \frac{64.2}{64.75} \cos \left[\arctan \left(\frac{\tan 22.5^\circ}{\cos 25^\circ 50' 31''} \right) \right] \right\}$$

$$\alpha'_{tac} = 25^\circ 42' 35''$$

同理可求得 $\alpha'_{tcb} = 24^\circ 16' 19''$

求变位系数之和 x_{Σ}

$$x_{\Sigma ac} = \frac{z_a + z_c}{2 \tan \alpha'_{tac}} (\operatorname{inv} \alpha'_{tac} - \operatorname{inv} \alpha_{tac})$$

$$= \frac{26+59}{2 \tan 24^\circ 42' 50''} (\operatorname{inv} 25^\circ 42' 35'' - \operatorname{inv} 24^\circ 42' 50'') = 0.3559$$

$$x_{\Sigma cb} = \frac{z_b + z_c}{2 \tan \alpha'_{tcb}} (\operatorname{inv} \alpha'_{tcb} - \operatorname{inv} \alpha_{tcb})$$

$$= \frac{145-59}{2 \tan 24^\circ 42' 50''} (\operatorname{inv} 24^\circ 16' 19'' - \operatorname{inv} 24^\circ 42' 50'') = -0.1495$$

求中心距变动系数 y_t

$$y_{tac} = \frac{a_{ac} - a_{ac}}{m_t} = \frac{64.75 - 64.2}{1.51} = 0.3492647$$

$$y_{tcb} = \frac{a_{cb} - a_{cb}}{m_t} = \frac{64.97 - 64.75}{1.51} = -0.15073529$$

求齿顶高变动系数 Δy_t

$$\Delta y_{tac} = x_{\Sigma tac} - y_{tac} = 0.3559 - 0.3493 = 0.0066$$

$$\Delta y_{tcb} = x_{\Sigma tcb} - y_{tcb} = -0.1495 - (-0.1507) = 0.0012$$

求齿顶圆直径, 计算变位系数

$$\begin{aligned} x_{ta} &= \frac{1}{4} \left(\frac{d'_{aa} - d'_{ca}}{m_t} + z_c - z_a + 2x_{\Sigma tac} \right) \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{42.50 - 91.88}{1.51} + 59 - 26 + \right. \\ &\quad \left. 2 \times 0.3559 \right) = 0.2584 \end{aligned}$$

$$x_{tc} = x_{\Sigma tac} - x_{ta} = 0.3559 - 0.2485 = 0.0975$$

$$\begin{aligned} x_{tb} &= x_{\Sigma tcb} - x_{tc} = -0.1495 + 0.0975 \\ &= -0.0520 \end{aligned}$$

选取 $x_{ta} = 0.258$, $x_{tc} = 0.098$, $x_{tb} = -0.052$

4) 验算齿顶圆直径 按已确定的变位系数 x_{ta} 、 x_{tc} 和 x_{tb} , 验算齿顶圆直径, 取法向齿顶高系数 $h_{an}^* = 0.9$,

$$\begin{aligned} d'_{aa} &= m_t z_a + 2(h_{an}^* + x_{ta} - \Delta y_{tac}) m_n \\ &= \frac{m_n z_a}{\cos \beta} + 2(h_{an}^* + x_{ta} / \cos \beta - \Delta y_{tac} / \cos \beta) m_n \\ &= \frac{1.36 \times 26}{\cos 25^\circ 50' 31''} + 2(0.9 + 0.258 / \cos 25^\circ 50' 31'' - \\ &\quad 0.0066 / \cos 25^\circ 50' 31'') \times 1.36 \\ &= 42.496 \text{mm} \end{aligned}$$

比实测 $d'_{aa} = 42.50 \text{mm}$ 小 0.004mm 。

同理可求得 $d'_{ca} = 91.873 \text{mm}$ 比实测 $d'_{ca} = 91.88 \text{mm}$ 小 0.007mm , $d'_{ba} = 216.815 \text{mm}$ 比实测 $d'_{ba} = 216.5 \text{mm}$ 大 0.315mm 。

5) 验算法线长度及减薄量 按已确定的变位系数 x_{ta} 、 x_{tc} 和 x_{tb} , 验算法线长度及减薄量。

$$\begin{aligned} W_5 &= m_n \cos \alpha_n [(k-0.5)\pi + z_a \text{inv} \alpha'_t] + 2m_n x_{ta} \sin \alpha_n \\ &= 1.36 \cos 22.5^\circ [(5-0.5)\pi + 26 \text{inv} 24^\circ 42' 50''] + \\ &\quad 2 \times 1.36 \times 0.286 \sin 22.5^\circ \\ &= 19.005 \text{mm} \end{aligned}$$

比实测 $W_5 = 18.985 \text{mm}$ 大 0.020mm 。

$$\begin{aligned} W_6 &= 1.36 \cos 22.5^\circ [(6-0.5)\pi + \\ &\quad 26 \text{inv} 24^\circ 42' 50''] + 2 \times 1.36 \times \\ &\quad 0.286 \sin 22.5^\circ = 22.952 \text{mm} \end{aligned}$$

比实测 $W_6 = 22.940 \text{mm}$ 大 0.012mm 。

从以上对太阳轮公法线的计算, 可见除对太阳轮采用正变位提高强度外, 太阳轮的齿厚基本不减薄, 而减薄量放在行星轮上, 从而保证太阳轮与行星轮的啮合侧隙。

对于内斜齿轮, 用 x_t 计算 M 值, 测量用钢球 $d_p = 3 \text{mm}$ 。

计算 M 值

$$\begin{aligned} d_{bb} &= m_t z_b \cos \alpha_t = 1.511 \times 145 \times \cos 24^\circ 42' 50'' \\ &= 199.0422 \end{aligned}$$

$$r_{bb} = \frac{d_{bb}}{2} = 99.5211$$

$$\begin{aligned} \text{inv} \alpha_1 &= \frac{\pi}{2z_b} + \text{inv} \alpha_t - \frac{d_p}{d_{bb} \cos \beta} + \frac{2x_{tb} \tan \alpha_t}{z_b} \\ &= \frac{\pi}{2 \times 145} + \text{inv} 24^\circ 42' 50'' - \\ &\quad \frac{3}{99.5211 \times 2 \cos 25^\circ 50' 31''} + \\ &\quad \frac{2(-0.052) - \tan 24^\circ 42' 50''}{145} \\ &= 0.02265869 \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = 22^\circ 52' 30''$$

$$R = \frac{r_{bb}}{\cos \alpha_1} = \frac{99.5211}{\cos 22^\circ 52' 30''} = 108.01604 \text{mm}$$

$$M = 2R - d_p = 108.016 \times 2 - 3 = 213.032 \text{mm}$$

比实测 $M' = 213.340 \text{mm}$ 小 0.31mm 。

还可以利用实测 M' 来计算内斜齿轮的分度圆弧齿厚与理论值比较。

$$M' = 213.34 \text{mm}$$

$$R' = \frac{M' - d_p}{2} = \frac{213.34 + 3}{2} = 108.170 \text{mm}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{r_{bb}}{R'} = \frac{99.5211}{108.170} = 0.92004372$$

$$\alpha_1 = 23^\circ 4' 3''$$

$$\begin{aligned} \bar{s}_b &= 2r_b \left(\frac{\pi}{z_b} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_1 - \frac{r_p}{r_{bb} \cos \beta} \right) \\ &= 219.1 \left(\frac{\pi}{145} + \text{inv} 24^\circ 42' 50'' - \text{inv} 23^\circ 4' 3'' - \right. \\ &\quad \left. \frac{1.5}{99.5211 \cos 25^\circ 50' 30''} \right) = 2.314 \text{mm} \end{aligned}$$

而理论值为

$$\begin{aligned} \bar{s}_b &= \frac{\pi m_t}{2} + 2x_{tb} m_t \tan \alpha_t \\ &= \frac{\pi \times 1.51}{2} + 2 \times 0.052 \times 1.51 \times \tan 24^\circ 42' 50'' \\ &= 2.446 \text{mm} \end{aligned}$$

理论计算 \bar{s}_b 比实测计算的 \bar{s}_b 大 0.132mm 。

6) 验算全齿高

齿根高 h_f

$$\begin{aligned} h_{fa} &= m_n (h_{an}^* - x_{ta} + c_n^*) \\ &= 1.36(0.9 - 0.286 + 0.35) = 1.310 \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{fc} &= m_n (h_{an}^* - x_{tc} + c_n^*) \\ &= 1.36(0.9 - 0.108 + 0.35) = 1.552 \text{mm} \end{aligned}$$

$$h_{fb} = m_n (h_{an}^* - x_{tb} + c_n^*)$$

$$= 1.36(0.9 - 0.057 + 0.35) = 1.621\text{mm}$$

齿根圆直径 d_f

$$d_{f_a} = m_z a - 2h_{f_a} = 1.51 \times 26 - 2 \times 1.31 = 36.64\text{mm}$$

$$d_{f_c} = m_z c - 2h_{f_c} = 1.51 \times 59 - 2 \times 1.55^2 = 85.986\text{mm}$$

$$d_{f_b} = m_z b + 2h_{f_b} = 1.51 \times 145 + 2 \times 1.621 = 222.192\text{mm}$$

实测齿根圆直径分别为

$$d'_{f_a} = 36.50\text{mm}, d'_{f_c} = 85.68\text{mm}, d'_{f_b} = 222.86\text{mm}$$

全齿高 h

$$h_a = \frac{1}{2}(d_{a_a} - d_{f_a}) = \frac{1}{2}(42.496 - 36.64) = 2.928\text{mm}$$

$$h_c = \frac{1}{2}(d_{c_a} - d_{f_c}) = \frac{1}{2}(91.873 - 85.986) = 2.944\text{mm}$$

$$h_b = \frac{1}{2}(d_{b_a} - d_{f_b}) = \frac{1}{2}(222.192 - 216.815) = 2.688\text{mm}$$

而实测全齿高为

$$h'_a = \frac{1}{2}(d'_{a_a} - d'_{f_a}) = \frac{1}{2}(42.50 - 36.50) = 3.00\text{mm}$$

$$h'_c = \frac{1}{2}(d'_{c_a} - d'_{f_c}) = \frac{1}{2}(91.88 - 85.68) = 3.10\text{mm}$$

$$h'_b = \frac{1}{2}(d'_{b_a} - d'_{f_b}) = \frac{1}{2}(222.86 - 216.50) = 3.18\text{mm}$$

通过上述的测绘计算及验算，可以看出测绘的参数及计算的结果基本相符，这套参数能够满足该齿轮箱原设计的要求。

2.3 齿条的测绘

测绘齿条主要是用精密游标卡尺测得一个或几个齿距，即 $k\pi m$ ，然后与理论齿距 $k\pi m$ 对比，便可得到模数或径节，而齿条的压力角可用量角器近似量出；也可通过测量与齿条相啮合的齿轮得到模数及压力角，并以此验算齿条。

关于齿条的具体尺寸除了用 πm 衡量外，还可利用钢球（钢棒）准确测出齿厚（见图 14.1-9），判断齿的磨损情况，其计算公式为

$$M = \frac{d_p}{2\sin\alpha} - \frac{\pi m}{4\tan\alpha} + \frac{d_t}{2} = \frac{1}{2}d_p(\cos\alpha + 1) - \frac{1}{4}\pi m \cot\alpha \quad (14.1-46)$$

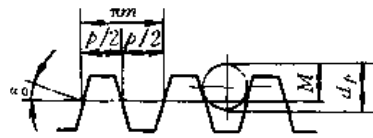


图 14.1-9 用圆棒（钢球）测量齿条

2.4 内齿轮的测绘

外齿轮的测绘计算公式均适用于内齿轮的测绘计算，只须将齿数和 $z_s = z_1 + z_2$ 改为 $z_s = z_2 - z_1$ ，变位系数之和 $x_s = x_1 + x_2$ 改为 $x_s = x_2 - x_1$ 即可。

需要指出一点，内齿轮的变位系数 x 的符号是这样规定的：正值 x 表示插齿刀切齿时，移距修正为进刀方向，即刀具中心比切不修正齿轮时，要远离内齿轮的中心，使切出的齿变薄；反之，负值 x 表示插齿刀切齿时，移距修正为退刀方向，即刀具中心比切不修正齿轮时，要接近内齿轮的中心，使切出的齿变厚。

也就是说，在高度变位的情况下，内啮合齿轮副的外齿轮为正变位时，即 $x_1 > 0$ ，则 $x_2 > 0$ ，且 $x_1 = x_2$ ，若外齿轮为负变位时即 $x_1 < 0$ ，则 $x_2 < 0$ ，且 $-x_1 = -x_2$ 。

测绘内齿轮时，其齿顶圆和齿根圆不能作为推导其他参数的依据。因为这两个参数受过渡曲线干涉、齿顶干涉、插齿刀新旧程度等因素的影响，可能不是标准的。有时为了避免干涉，还须将内齿轮的齿顶圆直径加大。以下两个公式均可作为加大的齿顶圆直径公式。

$$d_{a2} = (d_2 - 2m_n h_{an}^* + 2m_n x_{n2}) + \frac{2m_n (h_{an}^* - x_{n2})}{z_2 \tan\alpha_n} \quad (14.1-47)$$

$$d_{a2} = (d_2 - 2m_n h_{an}^* + 2m_n x_{n2}) + k d_1 \quad (14.1-48)$$

修正系数 k 按表 14.1-9 选取。

表 14.1-9 修正系数

| $u = z_2/z_1$ | 1.3 | 2.5 | 3.0 | 5.0 | 10 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k | 0.015 | 0.014 | 0.013 | 0.009 | 0.005 |

内齿轮的 p_b 可通过测量内直齿公法线推算出来，当内直齿公法线不易测量，或为内斜齿时，可用钢球（棒）测得。内直齿或内斜齿的 M 值可由公式算出（见第 2 篇第 3 章渐开线圆柱齿轮几何计算）。其他均与外直齿的测绘相同。测绘实例可参考行星齿轮的测绘例题。

2.5 交错轴斜齿轮的测绘

交错轴斜齿轮传动是斜齿圆柱齿轮传动的一种特

殊情况。分为轴交角 $\Sigma=90^\circ$ 和 $\Sigma \neq 90^\circ$ 两种类型。测绘的关键是通过测绘及有关计算分析, 得到满意的螺旋角 β_1 和 β_2 。

当 $\Sigma=90^\circ$ 时, 其螺旋角 β_2 为

$$\tan \beta_2 = \frac{z_1 [2a + (d'_{a2} - d'_{a1})]}{z_2 [2a - (d'_{a2} - d'_{a1})]} \quad (14.1-49)$$

将实测的 z_1 、 z_2 、 d'_{a1} 、 d'_{a2} 和 a 代入上式, 即得 β_2 , 则 $\beta_1 = 90^\circ - \beta_2$ 。

当 $z_2 = z_1$, 即 $i=1$, 且 $d'_{a2} = d'_{a1}$ 时; 则有 $\beta_1 = \beta_2 = 45^\circ$ 。

当 $i=1$, $d'_{a2} \neq d'_{a1}$ 时, 则有

$$\sin 2\beta_2 = \frac{c}{2} + \sqrt{c + \frac{c^2}{4}} \quad (14.1-50)$$

式中 $c = \left(\frac{m_n z}{a}\right)^2$ 。

当 $i \neq 1$ 时, 则有

$$\frac{z_1}{\cos \beta_1} + \frac{z_2}{\cos \beta_2} = \frac{2a}{m_n} \quad (14.1-51)$$

当 $\Sigma \neq 90^\circ$ 时, 其螺旋角 β_2 为

$$\tan \beta_2 = \frac{z_1 [2a + (d'_{a2} - d'_{a1})]}{z_2 [2a - (d'_{a2} - d'_{a1})] \sin \Sigma} \cot \Sigma \quad (14.1-52)$$

$$\beta_1 = \Sigma - \beta_2 \quad (14.1-53)$$

最后将 β_1 和 β_2 代入 $\frac{z_1}{\cos \beta_1} + \frac{z_2}{\cos \beta_2} = \frac{2a}{m_n}$ 验算。

2.6 其他类型的渐开线圆柱齿轮的测绘

2.6.1 只有一个齿轮的渐开线圆柱齿轮的测绘

在生产实践中, 有时因种种原因, 会出现只能测绘一个齿轮的参数, 同时还要推算其他参数。

测绘中, 根据测得的公法线 W_k 及 W_{k-1} 算得 p_b , 通过基圆齿距表查得相对应的 m_n 及 α_n 。

测出螺旋角 β 和齿顶圆 d'_a , 便可求出 h_{am}^* 。

$$h_{am}^* = \frac{1}{2} \left(\frac{d'_a}{m_n} - \frac{z}{\cos \beta} \right) \quad (14.1-54)$$

测出 h 求 c_n^*

$$c_n^* = \frac{h}{m_n} - 2h_{am}^* \quad (14.1-55)$$

要求出准确的 x_n 是比较困难的, 只能通过实测的齿全高、齿顶圆直径及公法线长度来间接推算。

当 $d'_a = d + 2m_n h_{am}^*$ 时, 为标准啮合齿轮。

当 $d'_a \neq d + 2m_n h_{am}^*$ 时, 即为高度变位啮合齿轮, 则

$$x_n = \frac{d'_a - (d + 2m_n h_{am}^*)}{2m_n} \quad (14.1-56)$$

当实测全齿高 $h' < m_n (2h_{am}^* + c_n^*)$, 说明可能存在 Δy_n , 表示角度变位啮合齿轮。则

$$x_n = \frac{d_f}{2m_n} + h_{an}^* + c_n^* - 0.5z \quad (14.1-57)$$

$$x_n = \frac{W_k - W_{k-1}}{2m_n \sin \alpha_n} \quad (14.1-58)$$

实际轮齿的变位系数 x 应在上述两个公式计算值之间。

【例】有一齿轮实测数据为 $z=30$, $d'_a=100.61\text{mm}$, $W'_5=41.96\text{mm}$, $W'_6=50.82\text{mm}$, $h'=6.70\text{mm}$ 。

$$\text{估算 } m = \frac{d'_a}{z + 2h_{an}^*} = \frac{100.61}{30 + 2 \times 1} = 3.14\text{mm}$$

$$p_b = W'_6 - W'_5 = 50.82 - 41.96 = 8.86\text{mm}$$

查基圆齿距表可得 $m=3\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$ 。

取标准齿型 $h_{an}^*=1$, $c_n^*=0.25$

$$h = m(2h_{an}^* + c_n^*) = 3(2 \times 1 + 0.25) = 6.75\text{mm}$$

$$\Delta h = h' - h = 6.70 - 6.75 = -0.05\text{mm}$$

实测齿高小于标准值, 说明为角度变位。

$$x = \frac{d_f}{2m} + h_{an}^* + c_n^* - 0.5z$$

$$= \frac{d'_a - 2h}{2m} + h_{an}^* + c_n^* - 0.5z$$

$$= \frac{100.61 - 6.75}{2 \times 3} + 1.0 + 0.25 - 0.5 \times 30$$

$$= 0.768$$

$$x = \frac{W'_6 - W'_5}{2m \sin \alpha} = \frac{50.82 - 49.97}{2 \times 3 \sin 20^\circ} = 0.41$$

实际齿轮的变位系数为 $x=0.44$ 。

对于一对大型的或贵重的合金钢齿轮, 在其长期运行造成齿面严重磨损时, 一般可在强度允许的条件下, 将大、小两轮均进行适当的负变位切削加工(滚齿或磨齿), 然后各配一相应的正变位后的齿轮, 即由一对要报废了的齿轮, 经角度变位后, 仍满足原中心距的要求, 便可形成两对不同角度变位的齿轮, 均能满足使用要求。

2.6.2 英制齿轮的测绘

英制 23000kW 燃汽轮发电机组用的 3S 离合器滑动外齿齿轮的测绘(计算公式参照表 14.1-10)。

表 14.1-10 径节制齿轮尺寸计算表

(1/in)

| 名称 | 符号 | 公式 |
|-------|-----|--|
| 径 节 | DP | $DP = \frac{\pi}{p}$; $DP = \frac{z + 2h_{an}^*}{d'_a}$ |
| | | $DP = \frac{2h_{an}^* + c_n^*}{h}$; $DP = \frac{z_1 + z_2}{2a}$ |
| 中 心 距 | a | $a = \frac{z_1 + z_2}{2DP}$ |
| 分度圆直径 | d | $d = \frac{z}{DP}$ |

(续)

| 名称 | 符号 | 公式 |
|-------|-------|--|
| 齿顶圆直径 | d_a | $d_a = d + 2h_a = \frac{z + 2h_a^*}{DP}$ |
| 齿根圆直径 | d_f | $d_f = d - 2h_f = \frac{z - 2(h_a^* + c^*)}{DP}$ |
| 齿顶高 | h_a | $h_a = \frac{h_a^*}{DP}$ |
| 齿根高 | h_f | $h_f = \frac{h_a^* + c^*}{DP}$ |
| 全齿高 | h | $h = h_a + h_f = \frac{2h_a^* + c^*}{DP}$ |
| 备注 | | 表中长度单位换算成米制毫米时需乘以 25.4, DP 与 m 关系为: $mDP = 25.4$ |

(1) 实测数据 在瑞士 PH-100 量仪上测量, 测得参数如下:

$z = 185$, $d_b = 407.092\text{mm}$, $\beta_b = 26^\circ 32' 20''$ (工作齿面), $\beta_b = 26^\circ 33' 20''$ (非工作齿面), $d_a' = 472.41\text{mm}$, $d_f' = 464.95\text{mm}$, $b = 68\text{mm}$, $p_{bm} = 6.18\text{mm}$, $h' = 373\text{mm}$.

(2) 测绘数据处理

1) 计算径节 DP

计算齿顶圆及齿根圆:

$$d_a = \frac{d_a'}{25.4} = \frac{472.41}{25.4} = 18.599''$$

$$d_f = \frac{d_f'}{25.4} = \frac{464}{25.4} = 18.305''$$

估算径节 DP

$$DP = \frac{z}{d_a} = \frac{185}{18.599} = 9.947$$

$$DP \approx \frac{z}{d_f} = \frac{185}{18.305} = 10.107$$

由此可知

$$10.107 = \frac{z}{d_f} > \frac{z}{d} > \frac{z}{d_a} = 9.947$$

故取 $DP = 10$ ($m_n \approx 2.54\text{mm}$)

2) 计算 α 和 α_n

$$\alpha = \arccos \frac{d_b}{d} = \arccos \frac{407.092}{469.900} = 29^\circ 57' 51''$$

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \arcsin(\sin \alpha \cos \beta_b) \\ &= \arcsin(\sin 29^\circ 57' 51'' \cos 26^\circ 32' 30'') \\ &= 26^\circ 32' 26'' \end{aligned}$$

3) 计算 p_{bm}

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos \left(\frac{\tan \alpha_n}{\tan \alpha} \right) \\ &= \arccos \left(\frac{\tan 26^\circ 32' 26''}{\tan 29^\circ 57' 51''} \right) = 29^\circ 51' 46'' \end{aligned}$$

$$m_n = m \cos \beta = 2.54 \cos 29^\circ 51' 46'' = 2.2005\text{mm}$$

$$\begin{aligned} p_{bm} &= \pi m_n \cos \alpha_n = \pi \cdot 2.2005 \cos 26^\circ 32' 26'' \\ &= 6.185\text{mm} \end{aligned}$$

4) 计算基圆螺旋角 β_b

$$\begin{aligned} \beta_b &= \arccos \left(\frac{\sin \alpha_n}{\sin \alpha} \right) \\ &= \arccos \left(\frac{\sin 26^\circ 32' 26''}{\sin 29^\circ 57' 51''} \right) = 26^\circ 32' 20'' \end{aligned}$$

5) 计算基圆直径 d_b

$$\begin{aligned} d_b &= d \cos \alpha = 469.9 \times \cos 29^\circ 57' 51'' \\ &= 407.0922 \end{aligned}$$

其他计算从略。

3 圆弧圆柱齿轮的测绘

圆弧齿轮由于具有承载能力高、润滑条件好、加工工艺简单和成本较低等特点, 在我国获得了很多方面的应用, 对这些齿轮进行测绘, 有两个问题需要说明。第一, 我国的圆弧齿轮有单圆弧齿轮和双圆弧齿轮两种, 并有相应的模数、基本齿廓、精度、滚刀等专业标准, 目前单圆弧齿轮技术已逐步被双圆弧齿轮替代。因而, 对单圆弧齿轮测绘后, 一般应重新设计为技术先进的双圆弧齿轮。第二, 由于历史原因, 不管是单圆弧齿轮, 还是双圆弧齿轮, 都出现过多种齿廓, 在制造备件时, 必然涉及滚刀问题。但目前只有符合 GB 12759-91《双圆弧齿轮基本齿廓》和 JB929-67《单圆弧齿轮基本齿廓》的圆弧齿轮滚刀可直接从工具厂购买。因而, 在对实物测绘后, 建议将原齿廓设计为上述任一种齿廓。

3.1 圆弧齿轮几何参数的测绘

对圆弧齿轮箱或齿轮副应测量下述参数: 中心距 a , 齿数 z_1, z_2 , 齿顶圆直径 d_{a1}, d_{a2} , 齿根圆直径 d_{f1}, d_{f2} , 齿顶圆螺旋角 β_{a1} 或 β_{a2} , 齿宽 b 等。测量方法与渐开线圆柱齿轮相同。但应注意的是, 圆弧齿轮的齿根圆直径是在加工时严格控制的尺寸, 直接影响齿廓的径向位置, 实测时要尽量测量准确。

3.2 圆弧齿轮几何参数的确定

3.2.1 模数 m_n 及螺旋角 β 的确定

(1) 方法一 该方法主要是用测量出的齿顶圆螺旋角 β_{a1}, β_{a2} 和齿顶圆直径 d_{a1}, d_{a2} 来确定模数 m_n 和分度圆螺旋角 β 。

分度圆直径 d

$$d_1 = \frac{2a}{1+u} = \frac{2a}{1+z_2/z_1} \quad (14.1-59)$$

$$d_2 = \frac{2au}{u+1} = \frac{2a}{1+z_1/z_2} \quad (14.1-60)$$

分度圆螺旋角近似值 β'

$$\beta' = \arctan \left(\frac{d_2 \tan \beta_{a2}}{d_{a2}} \right) \quad (14.1-61)$$

或
$$\beta' = \arctan \left(\frac{d_1 \tan \beta_{a1}}{d_{a1}} \right) \quad (14.1-62)$$

模数近似值 m_n

$$m_n = \frac{2a \cos \beta'}{z_1 + z_2} \quad (14.1-63)$$

根据 GB1840—89 给出的圆弧齿轮标准模数, 可确定模数 m_n 。

在确定模数后, 按下式反算确定螺旋角 β

$$\beta = \arccos \left[\frac{m_n (z_1 + z_2)}{2a} \right] \quad (14.1-64)$$

(2) 方法二 按齿顶圆、齿根圆直径确定模数。

$$m_n = \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2h_1^*} \quad (14.1-65)$$

或
$$m_n = \frac{d_{a2} - d_{f2}}{2h_2^*} \quad (14.1-66)$$

对于符合 JB 929—67 的单圆弧齿轮取 $h_1^* = 1.5$, $h_2^* = 1.36$; 对于符合 GB 12759—91 的双圆弧齿轮, 取 $h_1^* = h_2^* = 2.0$, 计算后根据圆弧齿轮模数系列将 m_n 取为标准值。

分度圆螺旋角 β

$$\beta = \arccos \left[\frac{m_n (z_1 + z_2)}{2a} \right] \quad (14.1-67)$$

需要指出的是, 目前正在使用的圆弧齿轮传动装置, 绝大部分都是符合这两种齿廓标准的, 用方法二确定 m_n 、 β 即可达到测绘目的。该方法不需测量齿顶圆螺旋角, 计算过程也较方法一简便。

3.2.2 齿顶高系数 h_a^* 和齿根高系数 h_f^* 的确定

圆弧齿轮的齿廓是由多段圆弧组成的, 较为复杂, 难以通过常规的测量和计算来确定被测绘齿轮究竟是何种齿廓。比较可行的办法是通过测量齿轮的齿顶圆直径和齿根圆直径, 计算出齿高系数 h^* , 齿顶高系数 h_a^* 和齿根高系数 h_f^* 与标准规定进行对比作大致的判断。

对于双圆弧齿轮, $h_a^* = \frac{d_a - d}{2m_n}$, $h_f^* = \frac{d - d_f}{2m_n}$, 在 GB 12759—91 中规定为 $h_a^* = 0.9$, $h_f^* = 1.1$, $h^* = 2.0$ 。

对于单圆弧齿轮, 凸齿: $h_1^* = \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2m_n}$, $h_{a1}^* = \frac{d_{a1} - d_1}{2m_n}$, $h_{f1}^* = \frac{d_1 - d_{f1}}{2m_n}$; 凹齿: $h_2^* = \frac{d_{a2} - d_{f2}}{2m_n}$, $h_{a2}^* = \frac{d_{a2} - d_2}{2m_n}$, $h_{f2}^* = \frac{d_2 - d_{f2}}{2m_n}$ 。在 JB 929—67 中规定 $h_{a1}^* = 1.2$, $h_{f1}^* = 0.3$, $h_1^* = 1.5$, $h_{a2}^* = 0$, $h_{f2}^* = 1.36$, $h_2^* = 1.36$ 。

如果计算值与标准值相差较大, 则应考虑被测齿轮的齿廓为其他非标准齿廓, 一般情况下, 可以用标准齿廓替代。特殊情况下, 如齿轮不是成对更换, 须用精确的仪器来确定齿廓参数。

3.3 圆弧齿轮的测绘实例

3.3.1 单圆弧齿轮的测绘实例

某三级单圆弧齿轮箱末级齿轮副的测绘。

(1) 实测数据

$$a' = 315 \text{mm}, z_1 = 24, z_2 = 76, d_{a1} = 165.56 \text{mm}, d_{f1} = 147.62 \text{mm}, d_{a2} = 478.75 \text{mm}, d_{f2} = 462.46 \text{mm}。$$

用滚印法测得大齿轮齿顶圆螺旋角 $\beta_a = 17^\circ$

(2) 测绘数据处理

1) 计算分度圆直径 d_1 、 d_2

$$d_1 = \frac{2a'}{1 + z_2/z_1} = \frac{2 \times 315}{1 + 76/24} = 151.2 \text{mm}$$

$$d_2 = \frac{2a'}{1 + z_1/z_2} = \frac{2 \times 315}{1 + 24/76} = 478.8 \text{mm}$$

2) 确定模数 m_n 及螺旋角 β 初定分度圆螺旋角

$$\begin{aligned} \beta' &= \arctan \left(\frac{d_2 \tan \beta_{a2}}{d_{a2}} \right) \\ &= \arctan \left(\frac{478.8 \tan 17^\circ}{478.75} \right) = 17^\circ 0' 6'' \end{aligned}$$

初定模数 m_n

$$m_n = \frac{2a \cos \beta'}{z_1 + z_2} = \frac{2 \times 315 \times \cos 17^\circ 0' 6''}{24 + 76} = 6.025 \text{mm}$$

根据模数系列标准, 可认为该齿轮副模数为 $m_n = 6 \text{mm}$ 。

确定分度圆螺旋角 β

$$\begin{aligned} \beta &= \arccos \left[\frac{m_n (z_1 + z_2)}{2a} \right] \\ &= \arccos \left[\frac{6 \times (24 + 76)}{2 \times 315} \right] = 17^\circ 45' 10'' \end{aligned}$$

3) 计算齿高系数、齿顶高系数与齿根高系数

$$h_1^* = \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2m_n} = \frac{165.56 - 147.62}{2 \times 6} = 1.495$$

$$h_{a1}^* = \frac{d_{a1} - d_1}{2m_n} = \frac{165.56 - 151.2}{2 \times 6} = 1.197$$

$$h_{f1}^* = \frac{d_1 - d_{f1}}{2m_n} = \frac{151.2 - 147.62}{2 \times 6} = 0.298$$

$$h_2^* = \frac{d_{a2} - d_{f2}}{2m_n} = \frac{478.75 - 462.46}{2 \times 6} = 1.3575$$

$$h_{a2}^* = \frac{d_{a2} - d_2}{2m_n} = \frac{478.75 - 478.8}{2 \times 6} = -0.0042$$

$$h_{f2}^* = \frac{d_2 - d_{f2}}{2m_n} = \frac{478.8 - 462.46}{2 \times 6} = 1.362$$

以上系数与 JB 929—67 规定值十分接近, 可认为齿廓符合 JB929—67。

4) 验算

$$d_{a1} = d_1 + 2h_{a1}^* m_n \\ = 151.2 + 2 \times 1.2 \times 6 = 165.6 \text{ mm}$$

$$d_{f1} = d_1 - 2h_{f1}^* m_n \\ = 151.2 - 2 \times 0.3 \times 6 = 147.6 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = d_2 + 2h_{a2}^* m_n \\ = 478.8 + 2 \times 0 \times 6 = 478.8 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = d_2 - 2h_{f2}^* m_n \\ = 478.8 - 2 \times 1.36 \times 6 = 462.48 \text{ mm}$$

考虑到加工及测量误差, 与实测数据相比可以认为测绘结果正确。

3.3.2 双圆弧齿轮的测绘实例

某高速双圆弧齿轮副, 双斜齿结构。

(1) 实测数据

$$a' = 350 \text{ mm}, z_1 = 56, z_2 = 100, d'_{a1} = 258.45 \text{ mm}, \\ d'_{f1} = 242.48 \text{ mm}, d'_{a2} = 455.89 \text{ mm}, d'_{f2} = 439.92 \text{ mm}.$$

(2) 测绘数据处理

1) 计算分度圆直径

$$d_1 = \frac{2a'}{1+z_2/z_1} = \frac{2 \times 350}{1+100/56} = 251.282 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{2a'}{1+z_1/z_2} = \frac{2 \times 350}{1+56/100} = 448.718 \text{ mm}$$

2) 确定模数 m_n

$$m_n = \frac{d'_{a1} - d'_{f1}}{2h^*} = \frac{258.45 - 242.48}{2 \times 2} = 3.993 \text{ mm}$$

$$m_n = \frac{d'_{a2} - d'_{f2}}{2h^*} = \frac{455.89 - 439.92}{2 \times 2} = 3.993 \text{ mm}$$

根据模数系列标准, 选取模数为标准值 $m_n = 4 \text{ mm}$ 。

3) 确定分度圆螺旋角 β

$$\beta = \arccos \left[\frac{m_n(z_1 + z_2)}{2a} \right] \\ = \arccos \left[\frac{4 \times (56 + 100)}{2 \times 350} \right] = 26^\circ 56' 48''$$

4) 计算齿顶高系数 h_a^* 与齿根高系数 h_f^*

$$h_a^* = \frac{d'_{a1} - d_1}{2m_n} = \frac{258.45 - 251.282}{2 \times 4} = 0.896$$

$$h_a^* = \frac{d'_{a2} - d_2}{2m_n} = \frac{455.69 - 448.718}{2 \times 4} = 0.8965$$

$$h_f^* = \frac{d_1 - d'_{f1}}{2m_n} = \frac{251.282 - 242.48}{2 \times 4} = 1.10025$$

$$h_f^* = \frac{d_2 - d'_{f2}}{2m_n} = \frac{448.718 - 439.92}{2 \times 4} = 1.09975$$

按 GB 12759—91 规定, 选取 $h_a^* = 0.9$, $h_f^* = 1.1$ 。

5) 验算

$$d_{a1} = d_1 + 2h_a^* m_n \\ = 251.282 + 2 \times 0.9 \times 4 = 258.482 \text{ mm}$$

$$d_{f1} = d_1 - 2h_f^* m_n \\ = 251.282 - 2 \times 1.1 \times 4 = 242.482 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = d_2 + 2h_a^* m_n \\ = 448.718 + 2 \times 0.9 \times 4 = 455.918 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = d_2 - 2h_f^* m_n \\ = 448.718 + 2 \times 1.1 \times 4 = 439.918 \text{ mm}$$

考虑到加工及测量误差, 可认为测绘结果正确。

第2章 锥齿轮的测绘

1 概述

1.1 锥齿轮测绘的特点

测绘是根据已有实物探索其原设计本来面目的过程, 其中要综合考虑设计、加工及使用等诸多因素。

对于锥齿轮而言, 由于它种类较多、齿形制度各异、加工方法多样、设计标准不统一, 因而增加了测绘工作的难度。锥齿轮测绘不仅要求测绘人员做到测绘方法正确、测量准确, 同时还要了解各类锥齿轮的几何性质、加工特点和设计方法等, 以保证能正确反映原设

计的意图, 从而使根据测绘图样重新制造的锥齿轮能够满足实际传动的需要。

1.2 锥齿轮测绘的一般程序及注意事项

锥齿轮的测绘内容主要包括: 原始数据和印迹的取得; 齿型及齿制的辨别; 基本齿形要素的确定; 其他要素的推算、核对和确定。

锥齿轮测绘的一般程序可见图 14.2-1。

锥齿轮测绘需注意以下事项:

1) 设计分析、结构分析及工艺分析应贯穿于测绘整个过程。

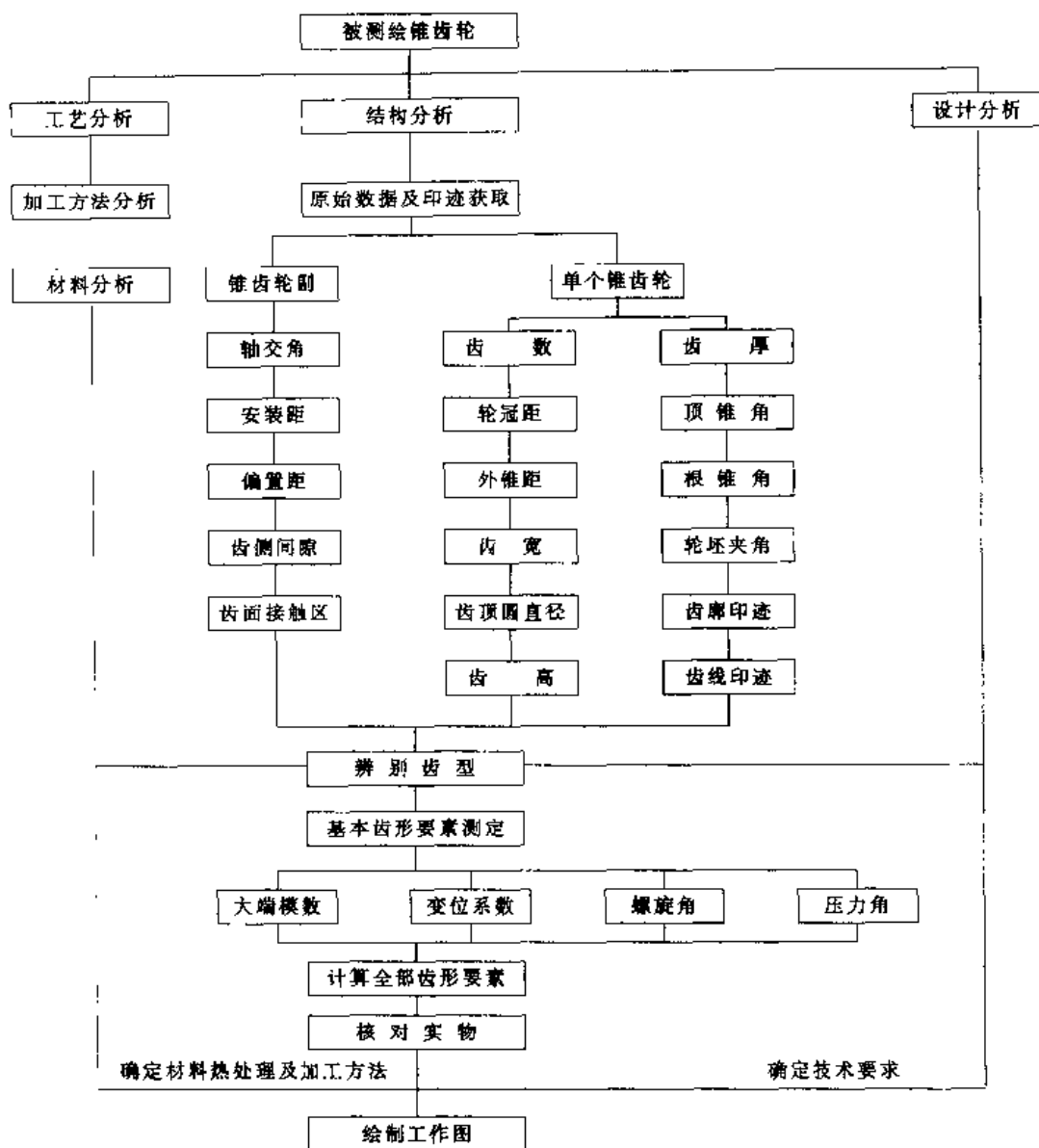


图 14.2-1 锥齿轮测绘程序

2) 锥齿轮参数及尺寸的测量可分别按锥齿轮副和单个锥齿轮两组进行。其中锥齿轮副的参数和尺寸如安装距、偏置距、齿侧间隙及接触区是非常重要的原始数据。

3) 由于锥齿轮齿形制度各异、设计标准不统一，其测绘过程是测量、计算、分析互相结合反复进行的过程。

2 原始数据及印迹的取得

2.1 锥齿轮副的参数及尺寸的测量

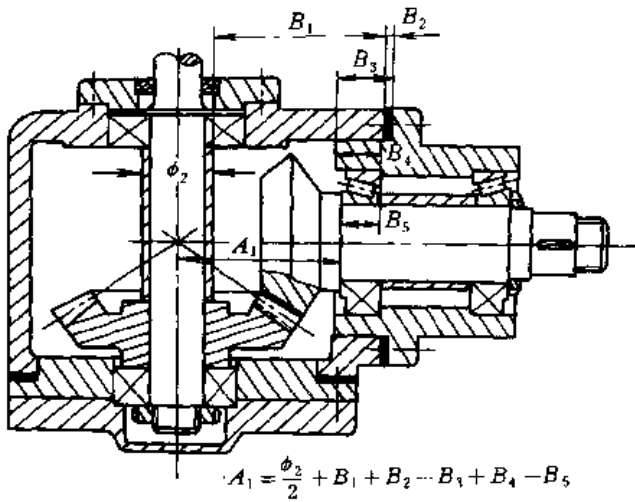
(1) 轴交角 Σ 锥齿轮副大多数情况为轴线正交传动，即 $\Sigma=90^\circ$ 。若非正交 ($\Sigma \neq 90^\circ$)，可在壳体齿轮轴支承孔内插入芯棒，再用量角器等测量轴交角 Σ 。

(2) 安装距 A 有下列两种测量方法：

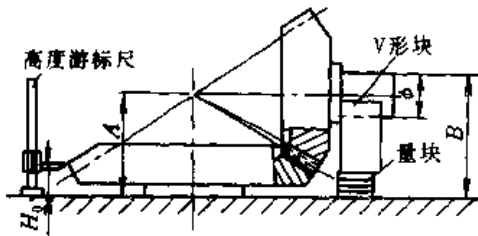
1) 在壳体原来安装位置测量，见图 14.2-2a，首先测出图中尺寸链中各个相关尺寸，然后按尺寸链关系推算出安装距 A 。

2) 在配对模拟位置测量，见图 14.2-2b，首先将两个配对锥齿轮安装在相交轴装备上（如滚动检查机、锥齿轮研齿机，或在万能铣床上加分度头或在平板上用 V 形块加垫片），调整大、小轮的相对位置，再现壳体原来安装位置时锥齿轮副的齿侧间隙及接触区部位，然后测出图中尺寸 B 和 ϕ 即可推算出安装距 A 。

对于准双曲面齿轮，两齿轮的轴线为空间交错轴，这时齿轮的安装距 A 为齿轮的安装基准面到两轴线的公垂线的距离，见图 14.2-3。



a)



b)

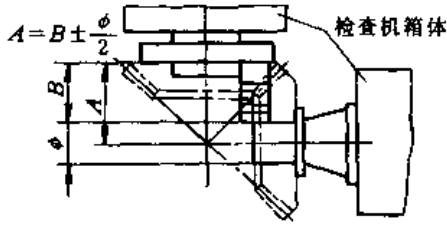


图 14.2-2 安装距 A 的测量

a) 在原安装位置测量 b) 在配对模拟位置测量

(3) 偏置距 E 有下列两种测量方法:

1) 在壳体上测量,可在壳体孔内插上心棒进行测量,按尺寸链关系推算出两轴孔轴线之间的距离(即偏置距 E)。

2) 在配对模拟位置测量,见图 14.2-3。与测量安装距 A 时相似,首先将两个配对准双曲面齿轮安装在交错轴装备上(如滚动检查机、锥或平台等上),调整好大、小轮的相对位置后,测出图中尺寸 T_1 、 ϕ_1 、 T_2 、 ϕ_2 ,即可推算出偏置距 E。

(4) 齿侧间隙 可用百分表或压铅法在壳体原来安装位置测量。

(5) 齿面接触区 有两种测量方法:

1) 涂色法 采用这种方法测出的齿面接触区代

表的是空负荷状况。

2) 齿面磨痕观察法 使用后的轮齿在接触部位会被磨光,光亮面的大小及位置就是这对锥齿轮副在受载后的齿面接触区。

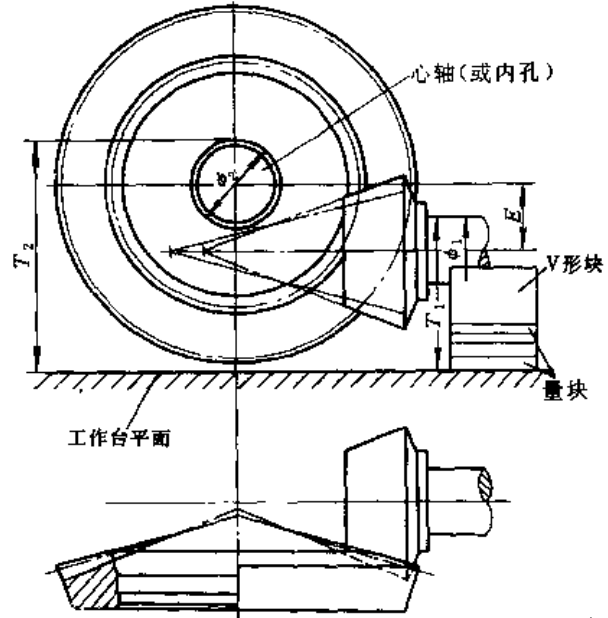


图 14.2-3 准双曲面齿轮偏置距的测量

2.2 单个锥齿轮的参数及尺寸的测量

(1) 齿数 z 正常情况下数出齿数即可。当锥齿轮严重损伤时,齿数需推算,参见本章 6.3 节。

(2) 轮冠距 H_a 如图 14.2-2b 所示,将齿轮基面平放于平台上,用高度尺测量。若顶锥大端倒角,可用填料补齐成尖角后再测量。在 180° 对称位置上各测一次,取其平均值。

轮冠距 H_a 与安装距 A 两项中必须测定一项。

(3) 外锥距 R 如图 14.2-4 所示,在原来安装位置或配对模拟位置时,可成对地用卡钳直接量出 $2R'$ 。对单个锥齿轮,可用一对直尺竖立在顶锥面上,从两直尺交叉点到大端背锥读出 R' 值来,测量时应注意使直尺通过锥齿轮的回转轴线。若锥齿轮大端倒角,则应在大端补齐成尖角后测量。

成对测量时有

$$R=R' \quad (14.2-1)$$

单个锥齿轮测量时,对收缩齿有: $R=R'$, 同式 (14.2-1); 对等高齿有

$$R=R' - \frac{h}{2.15} \cot \delta \quad (14.2-2)$$

式中 h ——齿高;

δ ——节锥角。

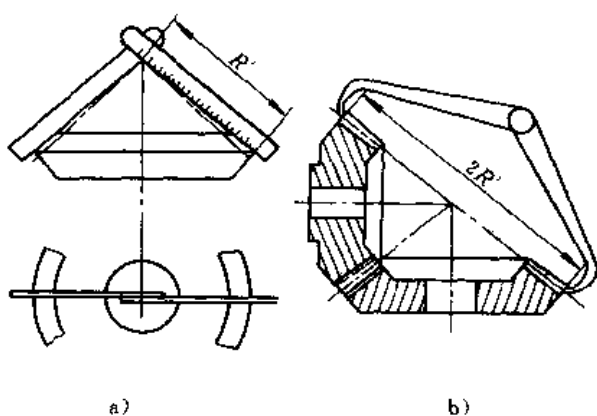


图 14.2-4 外锥距 R 的测量

a) 单件测量 b) 成对测量

(4) 齿宽 b 如图 14.2-5 所示, 按不同的结构用游标卡尺直接量出。在一对锥齿轮副中, 一般大、小锥齿轮的齿宽 b 不相等, 应取较小值。

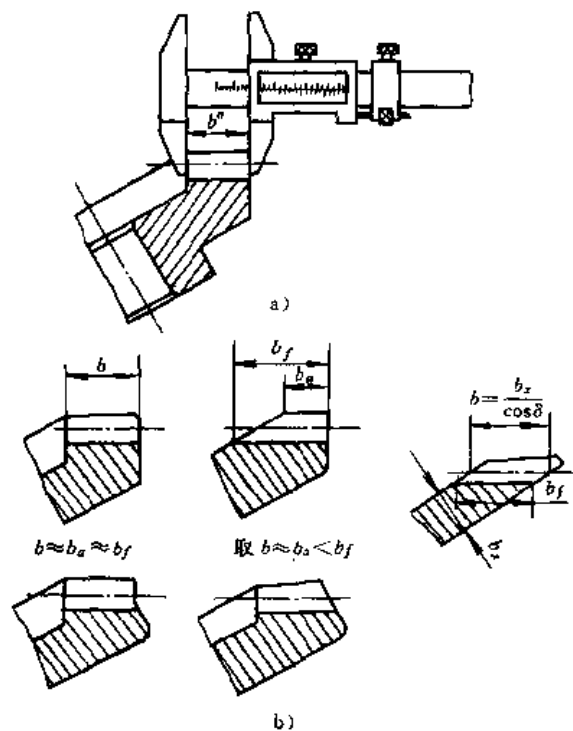


图 14.2-5 齿宽 b 的测量

(5) 齿顶圆直径 d_a 。在齿轮圆周相互垂直的直径方向上量取 d_a , 取平均值至小数点后二位。

偶数齿时: $d_a = d_a$ (14.2-3)

奇数齿时: $d_a \approx d_a' / \cos\left(\frac{90^\circ}{z}\right)$ (14.2-4)

若大端存在倒圆角或者倒角, 则 d_a 应加补偿量 Δd_a , 见图 14.2-6。

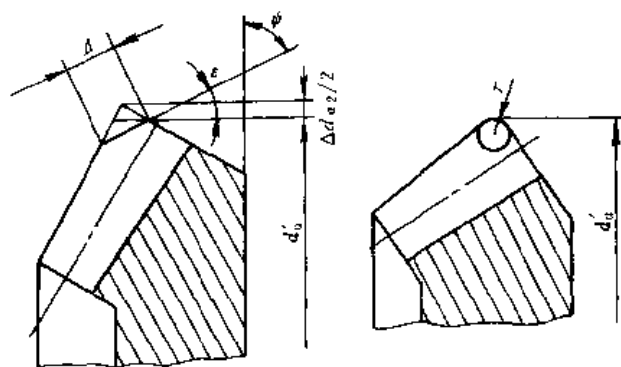


图 14.2-6 锥齿轮倒角和倒圆后齿顶圆直径的补偿

倒圆角, 半径为 r 时:

$$\Delta d_a \approx 0.83r \quad (14.2-5)$$

倒斜角, $\psi \neq 90^\circ$ 时:

$$\Delta d_a \approx 2\Delta \cos(\psi + \delta) \cos \delta \quad (14.2-6)$$

倒直角, $\psi = 90^\circ$ 时:

$$\Delta d_a \approx \Delta \sin 2\delta \quad (14.2-7)$$

(6) 全齿高 h 测量齿顶圆直径 d_a 和齿根圆直径 d_f 后通过推算得出

$$h = \frac{d_a - d_f}{2 \cos \delta} \quad (14.2-8)$$

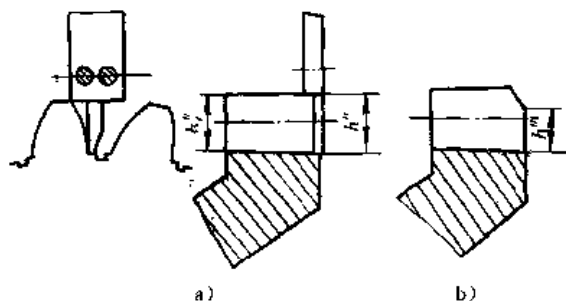


图 14.2-7 全齿高 h 的测量

a) 无倒角 b) 有倒角

也可以用游标卡尺直接量出, 见图 14.2-7。如果大端倒角, 则齿高应在大端补齐成尖角后测量。否则, 齿高

应加上被偿量 Δh ：

$$\Delta h = \Delta \cos(\psi + \delta)$$

倒直角时，上式中 ψ 取 90° 。

(7) 法向齿顶厚 \bar{s}_{an} 和法向齿根槽宽 e_{fn} 见图 14.2-8，用游标卡尺测量大端、齿宽中点和大端三处，每处取最小值，读数到小数点后一位。

(8) 顶锥角 δ_a 根据图 14.2-9b

$$\delta_a = \arctan \frac{d_a - d_a'}{2b_{ax}}$$

$$\approx \arcsin \frac{d_a - d_a'}{2b_a}$$

(14.2-9)

(10) 轮坯夹角 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 如图 14.2-10 所示，按不同的结构用万能游标量角器量取。

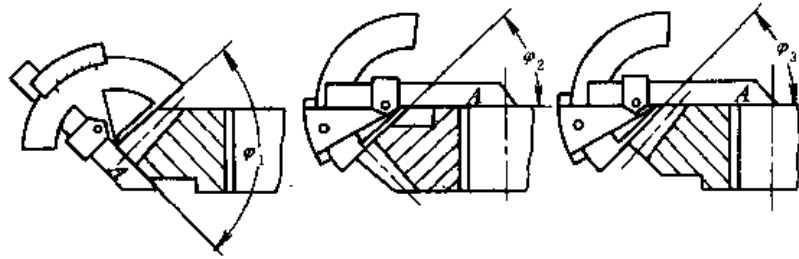


图 14.2-10 轮坯夹角的测量

(14.2-10)

2.3 印迹的取得

(1) 大端背锥齿廓印迹图 在锥齿轮大端背锥齿部上涂少许红丹粉（或带色涂料），用硬纸覆盖，然后用手指沿齿廓和齿廓的边缘轻按，则得到齿廓印迹图。大致印上 $z/5$ 个齿即可。

(2) 顶锥锥面齿线印迹图 用上述方法在顶锥上印下 $1/6$ 圆周的扇形即可。

为清楚起见，最好在印迹图上标明大、小轮的旋向及凹、凸面等。

2.4 对加工方法、精度等级、材料及热处理的了解

(1) 加工方法 主要是观察记录齿面刀痕的纹路以及齿沟沟底的刀痕形式。一般可借助放大镜在齿面未磨损部位（如非工作面、齿面四角及边缘）进行观察。

(2) 精度等级 根据实物磨损情况可用单面啮合仪或万能测齿仪来检测精度。确定精度等级时还应综合考虑传动情况、转速及加工方法等。

(3) 材料及热处理 可采用以下几种方法进行了解：

1) 打硬度，用洛氏硬度计或手提式硬度计测量轮齿齿廓表面及轮齿顶面的硬度值。

2) 在样品上钻孔取样，取其切屑作化学成分的分析。

3) 将样品表面磨平一小块面积，经抛光、腐蚀后作表面金相组织分析。

4) 在具有光谱仪、电子探针仪或离子探针仪的条件下，可对实物的化学成分作无损检测，其特点是不需破坏原实物就可获得精确的测量数据。

5) 没有条件的情况下，可作火花鉴别，以便初步确定材料的品种；还可用简单工具（如钢锉、断锯条、钻头等）的刃口刻划轮齿齿面，以便判别齿轮的热处理

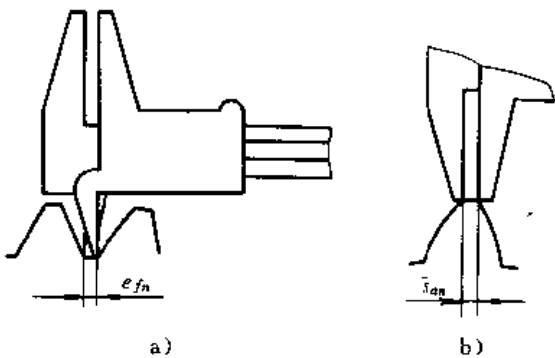


图 14.2-8 法向齿顶厚 \bar{s}_{an} 和法向齿根槽宽 e_{fn} 的测量

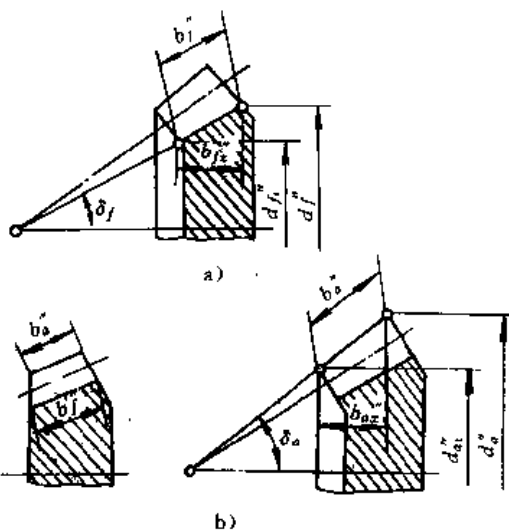


图 14.2-9 顶锥角 δ_a 和根锥角 δ_f 的测量

(9) 根锥角 δ_f 根据图 14.2-9a

$$\delta_f \approx \arctan \frac{d_f - d_f'}{2b_{fx}} \approx \arcsin \frac{d_f - d_f'}{2b_f}$$

(14.2-11)

状况、并估计出齿面的硬度值。一般通用工具的切削刃的硬度为50~60HRC。

3 锥齿轮种类及齿形制度的辨别

准确地辨别锥齿轮的种类及所采用的齿形制度是锥齿轮测绘中一个非常重要的问题。

3.1 锥齿轮种类的辨别

任何一类锥齿轮副都可从齿线的形状、齿高特点、齿廓形式等多方面的特征来分类，而任何一种齿形均可看作是由多种特定的具体结构形式的组合。下面分别介绍具体结构形式的辨别。

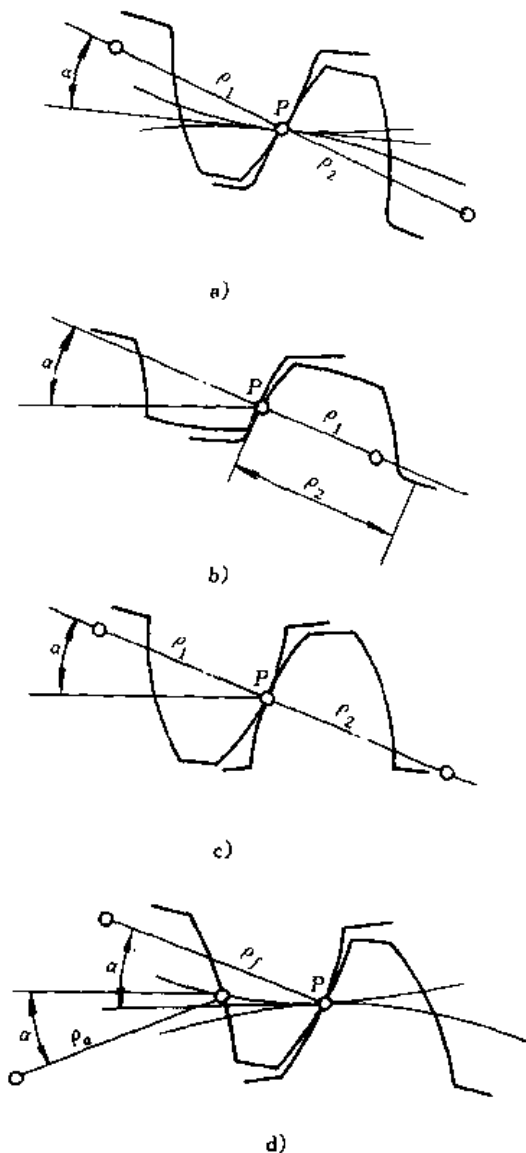


图 14.2-11 齿廓形式的辨别
a) 准渐开线、变性渐开线
b) 圆弧 c) 准弧线 d) 球面

(1) 齿线形式的辨别

- 1) 径向直线（直齿），直线通过锥顶。
- 2) 切向直线（斜齿）与正弦线，两者区别在于后者中部有凸出（凹入）。
- 3) 弧线（收缩齿），齿线为一定半径的圆弧线，其中包括弧齿零度锥齿轮。
- 4) 弧线与长幅外摆线（等高齿），两者主要借助齿线各点螺旋角的变化规律来区别，以 $\Delta\beta$ 代表锥齿轮从小端到大端螺旋角的变化值 ($\Delta\beta = \beta - \beta_1$)，则弧形等高齿的 $\Delta\beta$ 较小，外摆线形等高齿的 $\Delta\beta$ 较大，见图 14.2-15。

(2) 齿高形式的辨别

- 1) 收缩齿 其中又分为两种。
正常收缩齿 $\frac{h}{h_1} = 1.3 \sim 1.5$
双重收缩齿 实测顶锥角比理论顶锥角大 2° 以上，或实测根锥角比理论根锥角小 2° 以上。
- 2) 等高齿 $\frac{h}{h_1} \leq 1.05$

(3) 齿廓形式的辨别

- 1) 准渐开线齿廓 用齿条刀具以展成法加工的齿廓。
 - 2) 变性渐开线齿廓 大齿轮的齿廓是直线，小齿轮的齿廓是变性渐开线。用“半展成法”或“对偶法”加工。
 - 3) 圆弧齿廓 大、小轮齿廓均为圆弧。大齿轮为凹弧线，小齿轮轮齿是凸弧线。用展成法加工。
 - 4) 准弧线齿廓 每个轮齿两侧均是凸弧，用圆拉法加工。
 - 5) 球面齿廓 每个轮齿一侧为凸弧，另一侧为凹弧，用统一刀盘法加工。
- 齿廓形式的辨别可参考图 14.2-11。

3.2 锥齿轮齿形制度的辨别

锥齿轮齿形制度主要包括基本（刀具）齿廓、变位原则和其他有关设计等方面的要求。齿形制度由图表、数据和一些规定组成。

按本章 3.1 节辨别出锥齿轮种类后，再结合各种齿形制度的特征，就可以初步辨别出被测绘齿轮所采用的齿形制度。

4 锥齿轮基本齿形要素的测定

4.1 大端模数 m_t （或径节 P ）

锥齿轮的模数或径节是其齿形几何尺寸计算的基础，模数的测定是至关重要的。锥齿轮一般以大端端面

模数 m 为基准, 对于等高齿锥齿轮还采用参考点法向模数 m_{np} 作为齿高计算的基准。 m_{np} 的测定将在本章 5.3 节单独介绍。

绝大多数直齿锥齿轮的大端端面模数 m_t 或径节 P 都采用标准系列值, 故测定时应将 m_t 圆整为 GB12368 的标准值或将径节 P 圆整为标准值, 径节系列参见本篇第 1 章表 14.1-2。曲线齿锥齿轮的大端模数 m 或径节 P 不一定符合标准系列值。

大端模数的测定主要有外锥距法、顶径法和成对顶径法。其中, 前两种方法对收缩齿和等高齿锥齿轮均适用, 成对顶径法只适用于变位系数不详的收缩齿锥齿轮。

(1) 外锥距法测定 m_t

$$m_t = \frac{2R \sin \delta_1}{z_1} = \frac{2R \sin \delta_2}{z_2} \quad (14.2-12)$$

式中 δ_1 、 δ_2 ——小锥齿轮和大锥齿轮的节锥角;

z_1 、 z_2 ——小锥齿轮和大锥齿轮的齿数。

(2) 顶径法测定 m

收缩齿锥齿轮:

$$\begin{aligned} m_t &= \frac{d_{a2}}{z_2 + 2(h_{a2}^* - x) \cos \delta_2} \\ &= \frac{d_{a1}}{z_1 + 2(h_{a1}^* + x) \cos \delta_1} \end{aligned} \quad (14.2-13)$$

式中 h_{a2}^* ——齿顶高系数;

x ——变位系数。

等高齿锥齿轮:

$$\begin{aligned} m_t &= \frac{d_{a2} - 2(h_{a2}^* - x)m_{np} \cos \delta_2}{z_2} \\ &= \frac{d_{a1} - 2(h_{a1}^* + x)m_{np} \cos \delta_1}{z_1} \end{aligned} \quad (14.2-14)$$

式中 m_{np} ——参考点法向模数。

(3) 成对顶径法测定 m_t

$$m_t = \frac{d_{a1} \cos \delta_2 + d_{a2} \cos \delta_1}{z_1 \cos \delta_2 + z_2 \cos \delta_1 + 4h_{a1}^* \cos \delta_1 \cos \delta_2} \quad (14.2-15)$$

4.2 径向变位系数 x

各种齿形制度对变位系数的选取均有具体的规定。按本节所给方法进行初步计算后, 应套相应的标准规定值, 可参见第 5 篇第 2 章。

(1) 收缩齿锥齿轮径向变位系数 x 的测定有下列两种方法:

1) 顶径法

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{2 \cos \delta_1} \left(\frac{d_{a1}}{m_t} - (z_1 + 2h_{a1}^* \cos \delta_1) \right) \\ &= \frac{1}{2 \cos \delta_2} \left((z_2 + 2h_{a2}^* \cos \delta_2) - \frac{d_{a2}}{m_t} \right) \end{aligned} \quad (14.2-16)$$

2) 成对顶径法

$$x = \frac{d_{a1}(0.5z_2 + h_{a2}^* \sin \delta_1) - d_{a2}(0.5z_1 + h_{a1}^* \sin \delta_2)}{d_{a1} \sin \delta_1 + d_{a2} \sin \delta_2} \quad (14.2-17)$$

(2) 等高齿锥齿轮径向变位系数 x 的测定可采用下述顶径法

$$\begin{aligned} x &= \frac{d_{a1} - m_t z_1 - 2h_{a1}^* m_{np} \cos \delta_1}{2m_{np} \cos \delta_1} \\ &= \frac{-(d_{a2} - m_t z_2 - 2h_{a2}^* m_{np} \cos \delta_2)}{2m_{np} \cos \delta_2} \end{aligned} \quad (14.2-18)$$

4.3 螺旋角 β

螺旋角的测定要借助顶锥锥面齿线的印迹图。应注意印迹图上螺旋角的方向与实物相反。下面按照锥齿轮的种类分别介绍其螺旋角的测定方法。

4.3.1 斜齿锥齿轮螺旋角的测定

斜齿锥齿轮螺旋角的公称值定义在大端, 其测定步骤如下。有关符号见图 14.2-12。

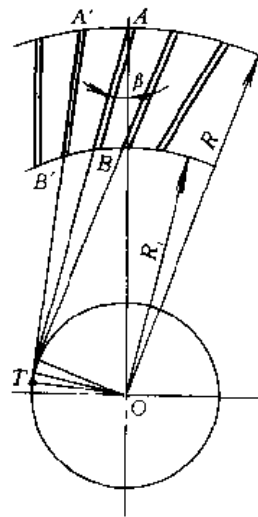


图 14.2-12 斜齿锥齿轮螺旋角的测量

- 1) 确定顶锥中心 O 。
- 2) 定出几条齿线 AB 、 $A'B'$... 的延长线所围成的多边形的内切圆, 找出该圆与 AB 延长线的切点 T 。
- 3) 量出 $\angle OAT$, 则有斜齿锥齿轮的大端螺旋角为

$$\beta = \angle OAT \quad (14.2-19)$$

4.3.2 收缩齿曲线齿锥齿轮螺旋角的测定

收缩齿曲线齿锥齿轮采用圆弧齿线，参考点取在齿宽中点，其螺旋角即为中点螺旋角 β_m 。 β_m 的测定方法见图 14.2-13。需要注意的是，按本方法测出来的是顶锥中点螺旋角 β_m ，在一般测绘中，可把它近似作为节锥螺旋角。若需精确测定，还要完成顶锥螺旋角到节锥螺旋角的转换。另外，选用标准刀号后，也要对初定螺旋角加以修正。顶锥中点螺旋角 β_m 的测定步骤为：

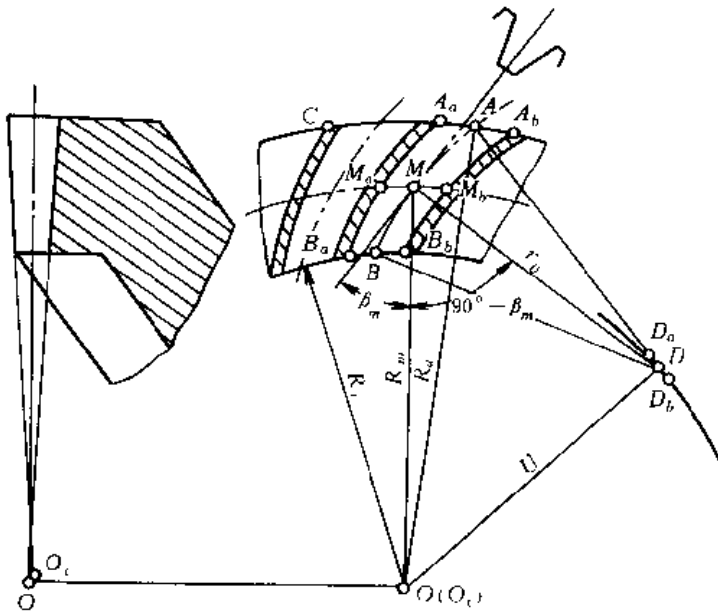


图 14.2-13 收缩齿曲线齿锥齿轮 β 的测定

(1) 确定顶锥中心 O 以大端齿线上 A, C 两点为圆心，以外锥距 R 为半径作两圆弧，交点 O 即为顶锥中心。

(2) 确定齿宽中点 以 O 为圆心，以中点锥距 R_m 为半径作圆弧与相邻齿迹线交于 M_a 和 M_b 。

(3) 确定刀盘中心 D 取一个清晰的齿线(凹面或凸面)，通过齿线上大端、中点和小端 A_a, M_a, B_a (或 A_b, M_b, B_b) 三点作圆 D_a (或圆 D_b)，量出 $\overline{M_a D_a}$ (或 $\overline{M_b D_b}$) 值，选用与 $\overline{M_a D_a}$ 最接近的标准刀盘直径 r_0 值。再以 O 为圆心，以 $\overline{O D_a}$ 为半径作圆弧 $\widehat{D_a D_1}$ ；以 M (即 $M_a M_b$ 的中点) 为圆心，以 r_0 为半径作圆弧与 $\widehat{D_a D_1}$ 相交于 D 点，则 D 即为刀盘中心。

(4) 求 β_m 连 $\overline{MD}, \overline{MO}$ ，用量角器量出 $\angle OMD$ ，则
$$\beta_m = 90^\circ - \angle OMD \quad (14.2-20)$$

4.3.3 等高齿曲线齿锥齿轮螺旋角的测定

等高齿曲线齿锥齿轮的顶锥顶点和节锥顶点不重合，而且还主要包括外摆线齿线和圆弧齿线两大类。对于外摆线齿制，需要测定参考点螺旋角 β_p ；对于圆弧齿线，需要测定的是 β_m 。因此，测定螺旋角时需要在

齿线印迹图上分别定出顶锥顶点和节锥顶点，还要结合线式(摆线或圆弧齿线)的辨别，根据不同的齿形种类分别加以测定。测定方法如图 14.2-14，其步骤为

(1) 确定顶锥中心 O_2 以两条齿线大端 A, C 两点为圆心，以顶锥外锥距 R_a 为半径作两弧线，两弧线的交点即为 O_2 。

以 O_2 为圆心，分别以顶锥外锥距 R_a 和顶锥内锥距 $R_o = R_a - b$ 为半径作两同心圆弧，分别与同一条齿线迹凸(凹)边相交于 A, B 点。

(2) 确定节锥顶点 O_2 和齿宽中点 M 先以齿线大端 A 为圆心，以外锥距 R 为半径作圆弧；再以齿线小端 B 为圆心，以内锥距 $R_i = R - b$ 为半径作圆弧；两圆弧的交点即为节锥顶点 O_2 。以 O_2 为圆心，以中点锥距 R_m 为半径作圆弧交齿线迹于 M 点。

(3) 求齿线外半段 \widehat{AM} 、内半段 \widehat{MB} 和全段 \widehat{AB} 的曲率中心 D, D_1 和 D_m 在 \widehat{AM} 、 \widehat{MB} 上取等分点 E, F 。分别作齿线段 \widehat{AEM} 、 \widehat{MFB} 和 \widehat{AMB} 的拟合圆，得三个曲率中心 D, D_1, D_m 。

(4) 量角度、计算 $\Delta\beta$ 值 连 $\overline{O_2 A}, \overline{AD}$ ； $\overline{O_2 M}, \overline{MD_m}$ ； $\overline{O_2 B}, \overline{BD_1}$ ，量出 $\angle O_2 AD$ 、 $\angle O_2 MD_m$ 、 $\angle O_2 BD_1$ ，则有：

齿线外半段 \widehat{AM} 的螺旋角 β 、内半段 \widehat{MB} 的螺旋角 β_1 、全段 \widehat{AB} 的螺旋角 β_m 分别为

$$\beta \approx 90^\circ - \angle O_2 AD \quad (14.2-21)$$

$$\beta_1 \approx 90^\circ - \angle O_2 BD_1 \quad (14.2-22)$$

$$\beta_m \approx 90^\circ - \angle O_2 MD_m \quad (14.2-23)$$

外半段(大端)螺旋角与内半段(小端)螺旋角的差值为

$$\Delta\beta = \beta - \beta_1 \quad (14.2-24)$$

(5) 辨别齿线形式、按不同的齿线形式分别测定参考点螺旋角 以 β_m 和 $\Delta\beta$ 值对照图 14.2-15，辨别齿线形式和测定参考点螺旋角。

1) 如果 $(\beta_m, \Delta\beta)$ 坐标点落在外摆线区域，则属摆线等高齿锥齿轮。以 O_2 为圆心，以 $R_p = R - 0.415b$ 为半径作圆弧交 \widehat{MA} 于 P 点，量出 $\angle O_2 PD_m$ ，则参考点螺旋角 β_p 为

$$\beta_p = 90^\circ - \angle O_2 PD_m \quad (14.2-25)$$

2) 落在弧线区域，则属等高齿弧齿锥齿轮。可先用作图法求出齿槽间中点，再利用本章 4.3.2 节所述的方法求出中点螺旋角 β_m 。

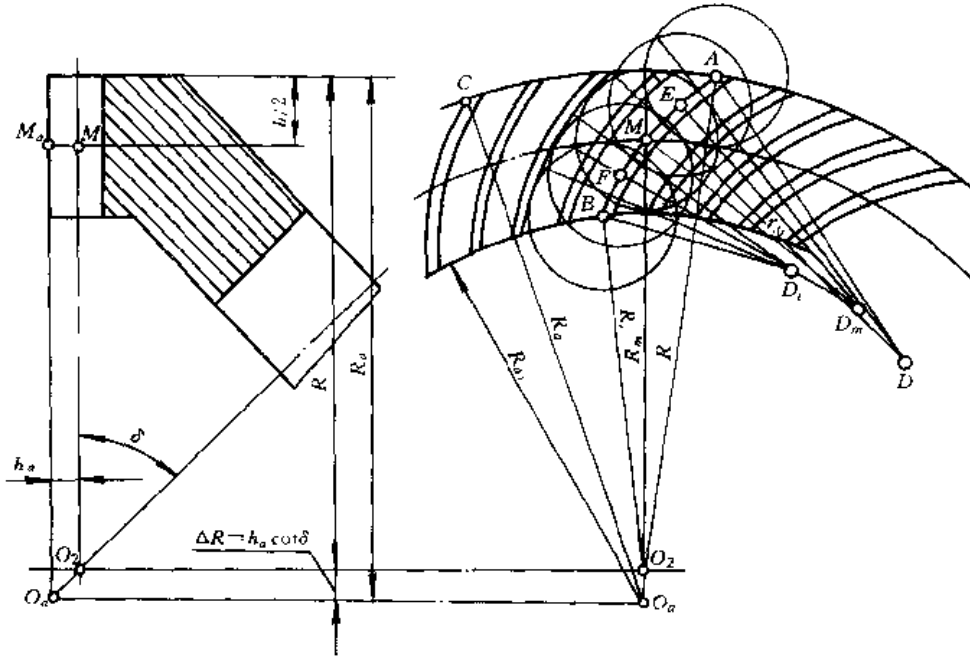


图 14.2-14 等高齿曲线齿锥齿轮 β 的测定

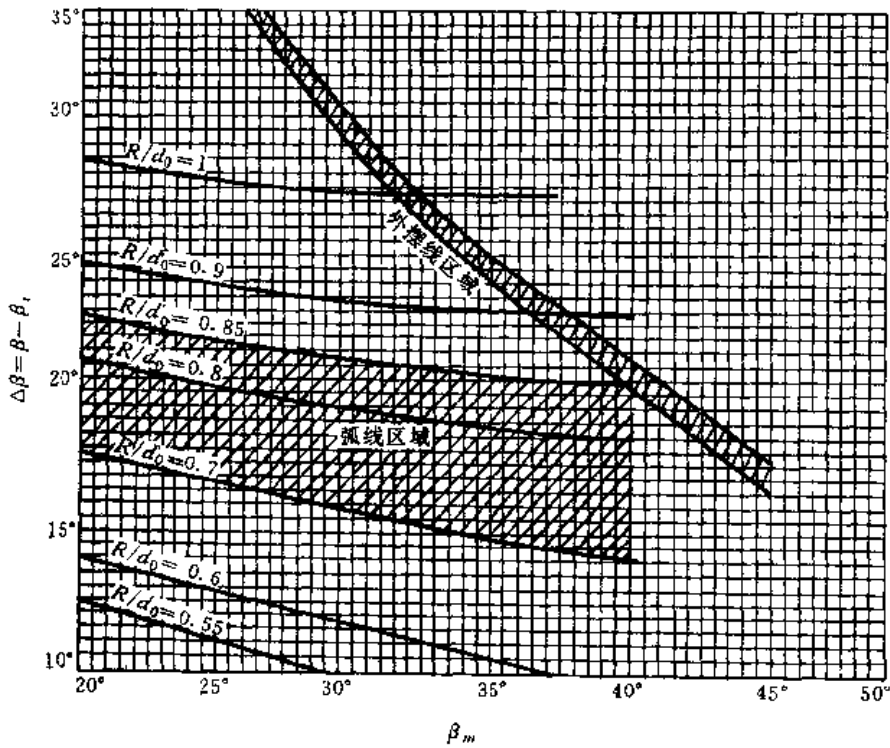


图 14.2-15 等高齿曲线齿锥齿轮齿线形式辨别

4.4 刀具齿形角 α_0

一般在大轮大端端面背锥齿廓印迹图上进行测定。先测出大端端面压力角，即凹面压力角 α_n 、凸面压力角 α_s ，或者计算出 $\alpha_n + \alpha_s$ ，再换算成大端法向压力角

α_n ，最后结合齿形制度确定出刀具齿形角的标准值 α_0 。

根据齿数比 u 的不同，刀具齿形角 α_0 的确定可采用基圆齿距法和双切线法两种方法。

(1) 基圆齿距法 该方法适用于 $u < 2.5$ 的场合，按如下步骤测定。

1) 测量公法线长度 W , 计算基圆齿距 P_b 。如图 14.2-16 所示, 按背锥当量齿数 $z_v = z / \cos \delta$ 确定跨齿数 k , 可取 $k = 0.111z_v + 0.5$ 。在凹、凸面两侧分别量出 $W_{a(k)}, W_{a(k+1)}, W_{a(k-1)}$ 以及 $W_{i(k)}, W_{i(k+1)}, W_{i(k-1)}$ 。凹、凸面两侧的基圆齿距为

$$p_{ba} = W_{a(k+1)} - W_{a(k)} = W_{a(k)} - W_{a(k-1)} \quad (14.2-26)$$

$$p_{bi} = W_{i(k+1)} - W_{i(k)} = W_{i(k)} - W_{i(k-1)} \quad (14.2-27)$$

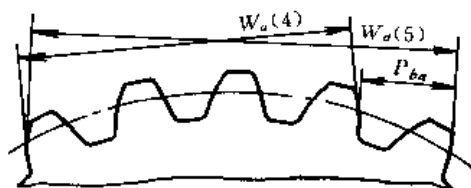


图 14.2-16 基圆齿距法测定齿形角 α_c

2) 计算大端端面压力角

$$\alpha_a \approx \arccos \frac{p_{ba}}{\pi m} \quad (14.2-28)$$

$$\alpha_i \approx \arccos \frac{p_{bi}}{\pi m} \quad (14.2-29)$$

3) 计算法向压力角 α_n

对收缩齿:

$$\alpha_n \approx \frac{1}{2} \arctan \left[\cos \beta \frac{\tan \alpha_c + \tan \alpha_i}{1 - \tan \alpha_c \tan \alpha_i \cos^2 \beta} \right] \quad (14.2-30)$$

对等高齿:

$$\alpha_n \approx \arctan \left[\frac{1}{2} (\tan \alpha_c + \tan \alpha_i) \cos \beta \right] \quad (14.2-31)$$

4) 选定齿形角 α_0 。按法向压力角 α_n 值, 结合齿形制选取最接近的刀具齿形角的标准值。

(2) 双切线法 该方法适用于 $u > 2.5$ 的场合, 这种情况下, 大轮齿廓接近于齿条齿形, 可按以下步骤测定:

1) 量出双切线夹角 γ 如图 14.2-17 所示, 把大端齿廓印迹展开, 沿齿廓迹线作节圆上左右两侧的切线, 量出两切线的夹角 γ 。可多量几个齿, 然后取平均值。

2) 计算大端端面齿廓两侧压力角之和

$$\alpha_i + \alpha_a = \gamma + \theta \quad (14.2-32)$$

式中 θ ——齿廓上 p_i, p_a 两点在大端端面背锥齿廓印迹图上所夹的中心角。

$$\theta \approx \frac{\cos \delta_2}{z_2} [180^\circ - (0.7x + x_1) \times 115^\circ] \quad (14.2-33)$$

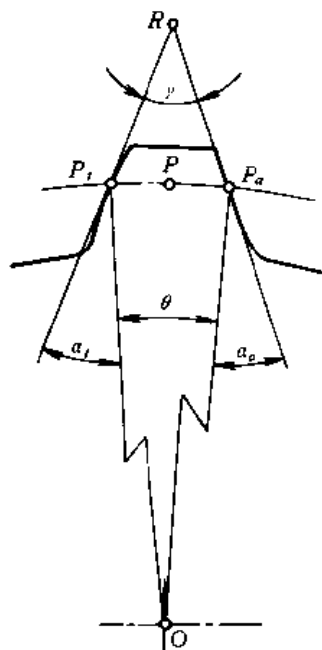


图 14.2-17 双切线法测定齿形角 α_0

3) 计算法向压力角 α_n 。按锥齿轮齿高形式的不同分别计算。

对收缩齿:

$$\alpha_n = \frac{1}{2} \arctan [0.9 \cos \beta \tan (\alpha_i + \alpha_a)] \quad (14.2-34)$$

对等高齿:

$$\alpha_n = \arctan \left[\tan \left(\frac{\alpha_i + \alpha_a}{2} \right) \cos \beta \right] \quad (14.2-35)$$

4) 选定齿形角 α_0 。按 α_n 值, 结合齿形制选取最接近的刀具齿形角的标准值。

5 各类锥齿轮的测绘

5.1 直齿及斜齿锥齿轮的测绘

直齿锥齿轮的基本齿廓适用于斜齿锥齿轮。表 14.2-1 为世界上主要的直齿锥齿轮基本齿廓参数。

除了在机床或汽车、拖拉机差速器上的短齿制外, 直齿锥齿轮具有下列特征:

1) 齿顶高系数 $h_a^* = 1$ 。

2) 齿形角 α_0 有三种 $\left(14 \frac{1}{2}^\circ, 20^\circ, 25^\circ \right)$;

3) 顶隙系数 c^* 规定较多。

4) 模数 m (或径节 DP) 采用标准系列。

直齿及斜齿锥齿轮的测绘具有下列特点:

1) 可以用成对顶径法测定大端模数 m_r 。

表 14.2-1 直齿锥齿轮的刀具齿廓基本参数

| 齿形制 | | 基准 | 齿形角 α_0 | 齿顶高 系数 h_a^* | 顶隙系数 c^* | 适用范围 | 备注 |
|-----------------------|--|----------------|--------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|--|
| 国际 | ISO 677-1976 | m 或 DP | 20° | 1 | 0.2 | | $1 \leq m \leq 50$ $20 \geq DP \geq 0.5$ |
| 中国 | JB 110-60 | 大端模数 | 20° | 1 | 0.2 | $z_v \geq 17$ | |
| | GB 12369-90 | m | | | | | 也可用 $\alpha_0 = 14 \frac{1}{2}^\circ$ 和 25° |
| 前 联 邦 德 国 | 哈尔别克厂制 (Harbeck) | m | 20° | 1 | 0.167 | $z_v \geq 28$ | |
| | 雷内克厂制 (Reinecker) | m | 20° 15° | 1 | 0.1236 | $z_v \geq 28$ | 也可用于高变位 |
| | DIN 867 | m | 20° 15° | 1 | 0.1~0.3 | $z_n \geq 14$ $z_v \geq 25$ | 也可用于高变位 |
| 前 苏 联 | ГОСТ 3058-54 | m | 20° | 1 | 0.2 | | |
| | 科维尔佳叶夫-波塔斯卡叶夫 (Ковердаев-Потаскаев) | m | 20° | 1 | 0.2 | $z_v \geq 17$ | 也可用于高(切)变位 |
| | 库德略夫切夫制 (Кудрявцев) | m | 20° | 1 | 0.2 | $z_v \geq 17$ | 也可用于高变位 |
| 英国 | BSS 545-1934 | 大端径节 DP_d | 20° | 1 | 0.25 | $z_v \geq 20$ | 也可用于高变位 |
| 美国 | GLEASON | DP_d | 20° | 1 | 0.188 | | 也可用 $\alpha_0 = 14 \frac{1}{2}^\circ$ 和 25° |

2) 可由径向变位系数 x 结合顶隙系数 c^* 、齿形角 α_0 辨别齿形制。

3) 切向变位系数一般根据齿形制取值。

在取得原始数据和图迹后, 直齿及斜齿锥齿轮的测绘可参考如下步骤进行:

1) 计算节锥角

$\Sigma = 90^\circ$ 时,

$$\begin{cases} \delta_1 = \arctan \frac{z_1}{z_2} \\ \delta_2 = 90^\circ - \delta_1 \end{cases} \quad (14.2-36)$$

$\Sigma \neq 90^\circ$ 时,

$$\begin{cases} \delta_1 = \arctan \frac{\sin \Sigma}{\frac{z_2}{z_1} + \cos \Sigma} \\ \delta_2 = \Sigma - \delta_1 \end{cases} \quad (14.2-37)$$

2) 测定大端模数 m (或径节 DP) 并取接近的标准系列值, 参见本章 4.1 节。

3) 测定径向变位系数 x , 参见本章 4.2 节。

4) 测定螺旋角 β (针对斜齿锥齿轮), 参见本章 4.3 节。

5) 测定齿形角 α_0 , 参见本章 4.4 节。

6) 辨别齿形制, 确定齿顶高系数 h_a^* 、顶隙系数 c^* 、径向变位系数 x 、切向变位系数 x_t 。

7) 确定精度等级和齿坯公差, 可参照 GB11365。

8) 计算全部齿形要素。

9) 核对实物。

10) 确定材料及热处理等技术要求。

11) 绘制工作图。

5.2 收缩齿曲线齿锥齿轮的测绘

1. 齿形类型辨别

收缩齿曲线齿锥齿轮主要包括弧齿锥齿轮和零度齿弧齿锥齿轮。

(1) 弧齿锥齿轮 收缩齿弧齿锥齿轮又可分为格里森制和埃尼姆制两种。前者在我国现有传动中应用较广泛, 后者在 1956 年以后进口的前苏联产品中有采用。两种齿制辨别的要点为:

1) 若 $u=1$, $\beta_m=35^\circ$, 两种齿制差别不大;

2) 若 $u \neq 1$, $\beta_m=35^\circ$, 则应通过顶径的不同来辨别。

3) 若 $\beta_m=25^\circ$, 则为埃尼姆制。

(2) 零度齿锥齿轮 即中点螺旋角为零度(或小于 10°)的弧齿锥齿轮,这种锥齿轮可与直齿锥齿轮互相替代。

2. 收缩齿锥齿轮的测绘特点

收缩齿锥齿轮的测绘有如下特点:

1) 应注意收缩形式的辨别,当模数较小时,常采用双重双面法切齿形成双重收缩齿。

2) 模数 m_t (或径节 DP) 可采用标准系列值,也可为非标准系列值。

3. 测绘步骤

在取得原始数据和图迹之后,收缩齿弧齿锥齿轮和零度齿弧齿锥齿轮的测绘可参考如下步骤进行:

1) 计算节锥角, 见式 (14.2-37) 和式 (14.2-38)。

2) 测定大端模数 m_t (或径节 DP), 可参见本章 4.1。

3) 测定径向变位系数 x , 参见本章 4.2 节。

4) 测定螺旋角 β , 参见本章 4.3 节。

5) 测定齿形角 α_0 , 参见本章 4.4 节。

6) 辨别齿形制, 确定齿顶高系数 h_a^* 、顶隙系数 c^* 、径向变位系数 x 、切向变位系数 x_t 。注意, 对于格里森制零度齿弧齿锥齿轮, 其齿顶高系数 h_a^* 、顶隙系数 c^* 以及切向变位系数 x_t 与直齿锥齿轮时的取值相同。

7) 确定精度等级和齿坯公差, 可参照 GB11365;

8) 计算全部齿形要素。

9) 核对实物。

10) 确定材料及热处理等技术要求。

11) 绘制工作图。

5.3 等高齿曲线齿锥齿轮的测绘

等高齿曲线齿锥齿轮的测绘首先要辨别齿线形式, 然后按不同的种类分别进行其余项目的测定。

等高齿曲线齿锥齿轮的共性在于采用双模数制, 即齿高的计算采用参考点模数为基准, 其大端模数的测定一般要用外锥距法。

等高齿曲线齿锥齿轮主要分为摆线齿线和圆弧齿线两种。摆线齿锥齿轮又主要分为“奥”制和“克”制两种齿制。

5.3.1 摆线齿锥齿轮

(1) “奥”制摆线齿锥齿轮 “奥”制的摆线齿锥齿轮分为普通型(N型)和特殊型(G型)两种, 这里只介绍普通型的测绘。

普通型(N型)摆线齿锥齿轮的刀具参数, 如刀盘形成半径 r_w 、刀盘名义半径 r_b 、刀盘滚动圆半径 E_b 和锥齿轮设计参数如参考点锥距 R_p 、参考点螺旋角 β_p

有直接联系, 与参考点法向模数 m_{np} 有间接联系。由于 R_p 、 β_p 及 m_{np} 等设计参数有无限多的组合, 而 r_w 、 r_b 、 E_b 等刀具参数只能套用标准值, 因此测绘中锥齿轮的设计参数和标准化的刀具参数之间要经过多次的试配。

该齿制锥齿轮测绘的重点在于测定参考点法向模数 m_{np} 、参考点螺旋角 β_p 以及选定刀盘参数。测绘时可以先计算参考点锥距, $R_p = R - 0.415b$, 然后结合几何设计计算按下列步骤进行:

1) 初定参考点螺旋角 β_p 、参考点法向模数 m_{np}

$$\beta_p = 0.914(\beta_m + 6^\circ) \quad (14.2-38)$$

式中 β_m ——在齿线印迹图上测得的中点螺旋角。

$$m_{np} = \frac{h - 0.35}{2.15} \quad (14.2-39)$$

2) 计算刀盘的名义半径 r_b

$$r_b = R_p \sin \beta_p \quad (14.2-40)$$

3) 选定刀盘规格, 得出刀盘名义半径 r_b 、刀组数 Z_w

4) 计算刀盘滚动圆半径 E_b

$$E_b = \frac{Z_w}{z_p} E_y \quad (14.2-41)$$

式中 E_y ——外摆线的基圆半径, $E_y = R_p \cos \beta_p$,

$$z_p \text{——假想平面齿轮齿数, } z_p = \frac{z_2}{\sin \delta_2}。$$

5) 根据 E_b 及 m_{np} 初值选择刀盘型号, 确定 E_b 标准值和刀盘形成半径 r_w 的平方值。

6) 计算参考点模数 m_{np}

$$m_{np} = 2 \sqrt{\frac{R_p^2 - r_w^2}{z_p^2 - z_w^2}} \quad (14.2-42)$$

7) 计算参考点螺旋角 β_p

$$\beta_p = \arccos \left(\frac{m_{np} z_p}{2R_p} \right) \quad (14.2-43)$$

(2) “克”制摆线齿锥齿轮 “克”制摆线齿锥齿轮的参考点选在齿宽中点, 因此, 该齿制测绘的重点在于测定中点法向模数 m_{mn} 、中点螺旋角 β_m 以及选择刀盘参数。测绘时可先计算出中点锥距 $R_m = R - 0.5b$, 然后按下列步骤进行:

1) 测定大端模数 m_t , 参见本章 4.1 节。

2) 测定中点螺旋角 β_m , 参见本章 4.3 节。

3) 测定齿形角 α_0 , 参见本章 4.4 节。

4) 初定中点法向模数 m_{mn} 。

$$m_{mn} \approx \frac{h}{2.25} \quad (14.2-44)$$

5) 根据中点法向模数 m_{mn} 初值和机床型号选择刀盘, 得出刀盘半径 r_b 、刀组数 Z_w 等。

6) 计算中点法向模数 m_{mn}

$$m'_m = \frac{R_m}{R} m \cos \beta'_m \quad (14.2-45)$$

m'_m 应圆整为标准值。克林根贝尔格 m'_m (mm) 的标准系列值为: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 25, 30。

7) 校正螺旋角

$$\beta_m = \arccos \left(\frac{m'_m \cos \beta'_m}{m_m} \right) \quad (14.2-46)$$

8) 按照齿形制确定有关系数。

9) 确定精度等级和齿坯公差。

10) 计算全部齿形要素。

11) 核对实物。

12) 确定材料及热处理等技术要求。

13) 绘制工作图。

5.3.2 弧齿等高齿锥齿轮

弧齿等高齿锥齿轮测绘方法与收缩齿弧齿锥齿轮时大致相同。应注意的是, 对应于不同的齿制, 弧齿等高齿锥齿轮采用不同的齿高模数。洛卡氏齿制采用小端面模数 m , 作齿高模数, 即

$$m = \frac{R_i}{R} m_i = (1 - \phi_R) m_i \quad (14.2-47)$$

式中 ϕ_R —— 齿宽系数, $\phi_R = b/R$;

b —— 齿宽 (mm);

R —— 外锥距 (mm)。

其余齿制大多采用中点法向模数 m_m 作齿高模数, 即

$$m_m = \frac{R_m}{R} m_i \cos \beta_m \quad (14.2-48)$$

5.4 准双曲面齿轮的测绘

准双曲面齿轮副是用来传递空间交错轴之间的回转运动的, 采用一对相切于一点的圆锥面作它们的节面(分度圆锥面)。两分度圆锥面的切点是联系两个齿轮空间位置各要素的唯一联接点, 也是两个齿轮的唯一同模数点。准双曲面齿轮副测绘的参考点应选在上述切点处。弧齿准双曲面齿轮测绘的参考点, 在齿宽中点处。本节只介绍弧齿准双曲面齿轮副的测绘。

准双曲面齿轮测绘的重点在于测定参考点分度圆半径(其作用相当于相交轴曲线齿锥齿轮时的大端模数)、参考点螺旋角以及刀盘参数。测绘要点如下:

(1) 原始数据及印迹的取得 原始数据及印迹的取得与相交轴弧齿锥齿轮时大致相同, 但有以下补充:

1) 在齿线印迹图上求螺旋角和刀盘直径时, 应注意大、小齿轮在参考点处有各自不同的锥距和螺旋角。

2) 应注意偏置方式。通常情况下, 小齿轮左旋时采用下偏置, 小齿轮右旋时采用上偏置。这样小齿轮的螺旋角比大齿轮的要大。

3) 在测压力角的同时求出极限压力角 $\Delta\alpha_0$, 可参见图 14.2-17。

极限压力角 $\Delta\alpha_0$ 为

$$\Delta\alpha_0 \approx \Delta\alpha \cos \beta_2 = \frac{\alpha_{a2} - \alpha_{f2}}{2} \cos \beta_2 \quad (14.2-49)$$

式中 α_{a2}, α_{f2} —— 大端凹面压力角和大端凸面压力角;

β_2 —— 大端螺旋角。

4) 顶锥角 δ_a 和根锥角 δ_f 的测定, 借助测得的大、小端的齿顶圆直径 d_a, d'_a ; 大、小端的齿根圆直径 d_f, d'_f 以及齿宽 b_a, b_f 进行, 可参见图 14.2-9、式(14.2-10) 以及式(14.2-11)。

5) 量出轮坯夹角, 参见图 14.2-10。

(2) 初测主要齿形要素,

1) 中点分度圆半径 r_m

$$\begin{cases} r_{m2} \approx (1 - h_{a2}^*) r_{am2} + h_{a2}^* r_{fm2} \\ r_{m1} \approx h_{a2}^* r_{am2} + (1 - h_{a2}^*) r_{fm1} \end{cases} \quad (14.2-50)$$

式中 r_{am1}, r_{am2} —— 两齿轮中点齿顶圆半径;

$$\begin{cases} r_{am1} = \frac{d'_{a1} + d'_{a1}}{4} \\ r_{am2} = \frac{d'_{a2} + d'_{a2}}{4} \end{cases} \quad (14.2-51)$$

r_{fm1}, r_{fm2} —— 两齿轮的中点齿根圆直径:

$$\begin{cases} r_{fm1} = \frac{d_{f1} + d_{f1}}{4} \\ r_{fm2} = \frac{d_{f2} + d_{f2}}{4} \end{cases} \quad (14.2-52)$$

h_{a2}^* —— 大轮齿顶高系数, 根据第 5 篇第 6 章表 5.6-5 及表 5.6-6 选取。

初定中点分度圆半径 r_{m1}, r_{m2} 之后, 再用由实物测得的螺旋角 β_{m1}, β_{m2} 来核对。可把由螺旋角计算得到的

加大系数 $K = \frac{\cos \beta_{m2}}{\cos \beta_{m1}}$ 与由中点分度圆半径计算得到的

加大系数 $K = \frac{z_2 r_{m1}}{z_1 r_{m2}}$ 相比较。

2) 中点螺旋角 β_m 及节平面内的偏置角 $\Delta\beta_m$:

小齿轮的中点螺旋角 β_{m1} 可用下式计算:

$$\beta_{m1} \approx 25^\circ + 5^\circ \sqrt{\frac{z_2}{z_1}} + 90^\circ \frac{E(1 - 0.5\phi_2)}{2r_{m2}} \quad (14.2-53)$$

再与实测值相比较。

大齿轮的中点螺旋角 β_{m2} 可用下式计算:

$$\beta_{m2} \approx \arccos(K \cos \beta_{m1}) \quad (14.2-54)$$

再与实测值相比较。

节平面内的偏置角 $\Delta\beta_m$ 为

$$\Delta\beta_m = \beta_{m_1} - \beta_{m_2} \quad (14.2-55)$$

3) 节锥角 δ

$$\begin{cases} \delta_2 \approx \delta_{a2} - h_{a2}^* \Sigma\theta_{D_2} \\ \delta_1 \approx \delta_{a1} - (1 - h_{a2}^*) \Sigma\theta_{D_1} \end{cases} \quad (14.2-56)$$

式中 $\Sigma\theta_{D_1}$ 、 $\Sigma\theta_{D_2}$ ——两齿轮的齿顶角和齿根角之和

$$\begin{cases} \Sigma\theta_{D_1} = \theta_{a1} + \theta_{f1} = \delta_{a1} - \delta_{f1} \\ \Sigma\theta_{D_2} = \theta_{a2} + \theta_{f2} = \delta_{a2} - \delta_{f2} \end{cases} \quad (14.2-57)$$

再用节平面内的偏置角 $\Delta\beta_m$ 进行核对:

$$\cos(\Delta\beta_m) = \tan\delta_1 \tan\delta_2 \quad (14.2-58)$$

4) 中点锥距 R_m

$$\begin{cases} R_{m_1} = \frac{r_{m_1}}{\sin\delta_1} \\ R_{m_2} = \frac{r_{m_2}}{\sin\delta_2} \end{cases} \quad (14.2-59)$$

5) 极限压力角 $\Delta\alpha_0$

$$|\tan\Delta\alpha_0| = \frac{R_{m_1} \sin\beta_{m_1} - R_{m_2} \sin\beta_{m_2}}{R_{m_1} \tan\delta_1 + R_{m_2} \tan\delta_2} \quad (14.2-60)$$

6) 齿线中点极限法曲率半径 ρ_m

$$\rho_m = \frac{\tan\beta_{m_1} - \tan\beta_{m_2}}{\sin\Delta\alpha_0 \left[\frac{\tan\beta_{m_1}}{R_{m_1} \tan\delta_1} + \frac{\tan\beta_{m_2}}{R_{m_2} \tan\delta_2} \right] + \cos\Delta\alpha_0 \left[\frac{\sec\beta_{m_1}}{R_{m_1}} - \frac{\sec\beta_{m_2}}{R_{m_2}} \right]} \quad (14.2-61)$$

(3) 调整 ρ_m 值, 使之满足刀盘半径 r_0 , 测算平均齿形角 α_0 , 选取标准值:

1) ρ_m 值的调整可通过改变节锥角 δ 和中点锥距 R_m 等参数来实现, 按第5篇第6章表 5.6-1 中所列试算法进行。

2) 测算平均齿形角 α_0 :

大齿轮端面平均啮合角 α_2 :

$$\alpha_2 = \frac{\gamma_1 + \theta_2}{2} \quad (14.2-62)$$

大齿轮法面平均啮合角 α_{n2} :

$$\alpha_{n2} = \arctan(\tan\alpha_2 \cos\beta_2) \quad (14.2-63)$$

结合齿形制取接近 α_{n2} 的标准值 α_0 。

(4) 辨别齿高形式, 测定 θ_a 、 θ_f 可参照第5篇第6章表 5.6-1 先分别计算出对应标准收缩齿、双重收缩齿和倾斜根线收缩齿的齿顶角和齿根角之和 $\Sigma\theta_{D_2}$, 然后结合测得的 $\Sigma\theta_{D_2}$ 进行对比辨别。确定齿高形式后, 再按上述表中对应的公式计算出 θ_a 、 θ_f 。

(5) 推算全部齿形要素。

(6) 核对实物。

(7) 确定精度等级和齿坯公差。

(8) 确定材料及热处理等技术要求。

(9) 绘制工作图。

6 锥齿轮成对简化测绘

锥齿轮的测绘和更换一般是成对进行的, 测绘中最重要的是保证原有的传动比、齿轮强度、传动结构的安装及配合条件等, 至于采用何种齿形制度对传动则没有太大的影响。这样, 有时可以省去对齿制的辨别这个繁杂的过程, 对有些参数也不必进行精确测量, 因而简化了测绘过程。

在工作中, 有时受时间等因素限制, 要求在不拆卸齿轮的条件下进行测绘; 齿轮已严重损伤, 缺乏必要的已知数据; 不需考虑详细的原设计方案, 只要能保证传动性能即可; 原设计需进行改进等。基于上述情况, 可以简化测绘, 成对更换。

6.1 成对简化测绘的步骤

锥齿轮成对简化测绘的主要特征在于齿形制度可以选用, 不必经过繁杂的辨别; 测绘的重点在于大端模数的测定。其简化的测绘步骤见图 14.2-18。

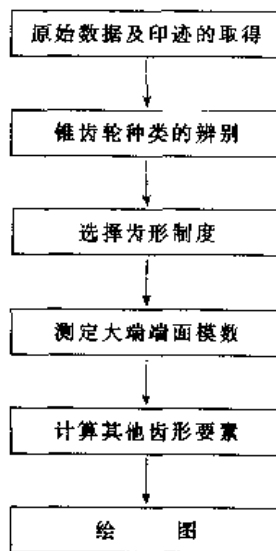


图 14.2-18 锥齿轮成对简化测绘步骤

6.2 不拆卸条件下锥齿轮的简化测绘

(1) 原始数据的获取 按本章2节中所介绍的方法, 测出锥齿轮的安装距 A 、外锥距 R 、齿顶圆直径 d_a 等。

(2) 大端模数 m_r 的测定 按外锥距法测定, 见公式 (14.2-12)。

6.3 严重损伤锥齿轮的简化测绘

当锥齿轮损伤失效时,假定其中一个严重损伤,不可辨识,则可取另一个损伤较轻的齿轮进行测绘以获得原始数据,测绘步骤为:

(1) 原始数据及印迹的获得

- 1) 测定背锥角 δ_0 , 见图 14.2-10。
- 2) 获得顶锥锥面齿线印迹及大端背锥齿廓印迹, 见本章 2.3 节。

(2) 基本齿形要素的测定

- 1) 齿数的测定 数出损伤较轻齿轮的齿数 z_1 或

者 z_2 , 结合背锥角可计算出另一个严重损伤的齿轮的齿数 z_2 或者 z_1 :

$$\begin{cases} z_2 = z_1 \tan \delta_{s1} \\ z_1 = z_2 \tan \delta_{s2} \end{cases}$$

- 2) 外锥距 R 、刀盘半径 r_0 、参考点螺旋角 β_p (或 β_m) 的测定 借助顶锥锥面齿线印迹图用作图法求出, 见本章 4.3 节。

- 3) 齿形角 α_0 的测定 根据大端背锥齿廓印迹图来确定, 见本章 4.4 节。

- 4) 大端模数 m 的测定 见本章 4.1 节及公式 (14.2-12)。

第3章 蜗杆、蜗轮的测绘

1 概述

蜗杆、蜗轮传动是空间交错轴齿轮传动的一种特殊形式,可以传递动力和运动。它具有单级传动比大、传动平稳、噪声小、结构紧凑、在一定条件下可以实现自锁等优点。因此,在近代工业中的应用十分广泛,特别在机床制造、电梯、自动扶梯及精密仪器中应用尤为普遍。

蜗杆、蜗轮测绘的目的是根据实物通过直接测量和计算以及从实物上进行直接取样对材料进行分析化验,找出原设计的各参数,确定蜗杆、蜗轮的几何尺寸、材料配对及硬度、加工方法、热处理工艺等,为替换、配制易损零件提供方便和依据。蜗杆传动的测绘工作是比较复杂的工作,要想达到正确的测绘就得具备较全面的知识,尤其是蜗杆传动方面的知识。需要了解蜗杆传动的分类、特点及各国蜗杆、蜗轮的有关标准,同时必须合理选择测量工具及必要的检测仪器,掌握正确的测量方法并对所测得的数据进行正确的分析处理,据此提出修正、替代、配制零部件的设计和加工等最佳方案,直接为生产服务。

2 蜗杆传动类型的鉴别

测绘蜗杆副最重要的一条就是要知道它是那一种类型的蜗杆副。根据蜗杆分度曲面的形状,蜗杆传动可以分为圆柱蜗杆传动、环面蜗杆传动和锥蜗杆传动三大类。

2.1 圆柱蜗杆螺旋齿面类型的鉴别

圆柱蜗杆传动可以细分为普通圆柱蜗杆传动、双

导程圆柱蜗杆传动、圆弧圆柱蜗杆传动。

2.1.1 普通圆柱蜗杆传动

普通圆柱蜗杆传动包含有阿基米德蜗杆传动(ZA)、法向直廓圆柱蜗杆传动(ZN)、渐开线圆柱蜗杆传动(ZI)与锥面包络圆柱蜗杆传动(ZK)等几种类型。

以上四种圆柱蜗杆螺旋齿面类型的鉴别通常都是采用直廓样板,经过试配加以鉴别,有条件的也可直接在仪器上进行鉴别。

- 1) 当蜗杆轴向齿形是直线齿廓时,该蜗杆传动为阿基米德蜗杆传动。

- 2) 当蜗杆法向齿形是直线齿廓时,该蜗杆传动为法向直廓蜗杆传动。

- 3) 当蜗杆在某一基圆柱的切面上的剖切齿形是直线齿廓时,该蜗杆传动为渐开线蜗杆传动。

- 4) 当以直廓样板试配的过程中与上述三种类型不符,蜗杆轴向或法向齿廓也不呈中凹,就应该考虑是否属于锥面包络圆柱蜗杆传动。

2.1.2 双导程圆柱蜗杆传动

该传动的特点是,蜗杆的齿厚不再是定值,而是沿轮齿螺旋线方向逐渐变化。理论上讲,双导程蜗杆的齿形也可按普通圆柱蜗杆那样分类,其中,以阿基米德(ZA)和法向直廓(ZN)这两种齿形因制造工艺性好而最常见。

2.1.3 圆弧圆柱蜗杆(ZC蜗杆)

圆弧圆柱蜗杆包括以下三种类型:圆环面包络圆柱蜗杆 ZC_1 、圆环面圆柱蜗杆 ZC_2 和轴向圆弧齿圆柱蜗杆 ZC_3 。这类蜗杆可用凸圆弧样板试配进行鉴别,如果齿形圆弧所在的截面是蜗杆啮合截面,可认为该蜗

杆类别为 ZC_1 ；如果齿形圆弧所在的截面是蜗杆轴平面，可认为该蜗杆类别为 ZC_2 或 ZC_3 。然后，再观察蜗杆齿面的刀痕，若是砂轮磨削成形的是 ZC_2 ，车刀车削成形的是 ZC_3 。以上是 GB10086-88《圆柱蜗杆、蜗轮术语及代号》规定的圆柱蜗杆的分类方法，它与一些国外标准的对照见表 14.3-1。美国 AGMA 标准对蜗杆的种类没做规定，英国标准 BS 只规定了一种蜗杆，即渐开线蜗杆；前苏联标准与我国标准十分接近。

表 14.3-1 各国的圆柱蜗杆齿廓对照

| 英国 BS | 德国 DIN 3975-1976 | 日本 JISB 1723-1977 | 前苏联 ГОСТ 18498-73 | 中国 GB 10086-88 |
|-------|------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| | ZA | 1型 | ZA | ZA (阿基米德蜗杆) |
| ZI | ZI | 4型 | ZI | ZI (渐开线蜗杆) |
| | ZN | 2型 | ZN ₂ | ZN ₁ (齿槽法向直廓蜗杆) |
| | | | ZN ₃ | ZN ₂ (齿体法向直廓蜗杆) |
| | | | ZN ₁ | ZN ₃ (齿面法向直廓蜗杆) |
| | ZK | 3型 | ZK ₁ | ZK ₁ (盘状锥面包络蜗杆) |
| | | | ZK ₂ | ZK ₂ (指状锥面包络蜗杆) |
| | | | ZK ₃ | ZK ₃ (端锥面包络蜗杆) |
| | ZH | | ZT ₁ | ZC ₁ (圆环面包络蜗杆) |
| | | | ZT ₂ | ZC ₂ (圆环面蜗杆) |
| | | | | ZC ₃ (轴向圆弧齿蜗杆) |

2.2 环面蜗杆螺旋齿面类型的鉴别

环面蜗杆传动的蜗杆齿面是不可展的螺旋面，根据齿面成形方法的不同，环面蜗杆可分为直廓环面蜗杆，平面包络环面蜗杆，锥面包络环面蜗杆和渐开面包络环面蜗杆等四种类型。

当蜗杆轴平面齿形为直线时，为直廓环面蜗杆，当蜗杆轴平面齿形不是直线，而是近似直线的凸曲线时，

为平面包络环面蜗杆；锥面包络环面蜗杆轴平面齿形曲线凸度较之平面包络环面蜗杆更大；而渐开面包络蜗杆轴平面齿形曲线凸度最大。

后三种蜗杆螺旋齿面还可通过仪器进行精确的测量，然后同理论分析计算比较后加以鉴别。但是平面一次包络环面蜗杆和渐开面一次包络环面蜗杆，可以通过鉴别与之相啮合的蜗轮齿面而加以鉴别。

3 普通圆柱蜗杆、蜗轮的测绘

3.1 几何参数的测量

(1) 蜗杆头数 (齿数) z_1 和蜗轮齿数 z_2 用目测确定。

(2) 蜗杆齿顶圆及蜗轮喉圆直径 d_{a1} , d_{a2} 可用精密游标卡尺或千分尺直接测量，见图 14.3-1。测量时，可在三、四个不同的直径位置上进行，取其中的最大值。当蜗轮齿数为偶数时，齿顶圆直径就是将卡尺的读数减去两端量块高度之和。当蜗轮的齿数为奇数时，可按本篇第 1 章“圆柱齿轮的测绘”所介绍的方法进行修正。

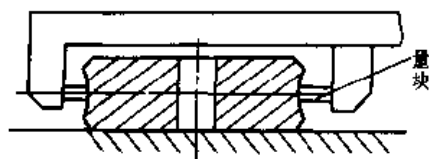


图 14.3-1 蜗轮喉圆直径的测量

(3) 蜗杆齿高 h_1 测量蜗杆齿高 h_1 ，一般有以下几种方法。

1) 用精密深度尺直接测量蜗杆齿高，见图 14.3-2。

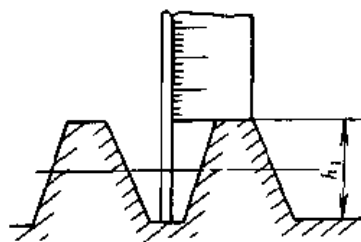


图 14.3-2 蜗杆齿高的测量

2) 采用精密游标卡尺测量蜗杆的齿顶圆直径 d_{a1} 和蜗杆齿根圆直径 d_{f1} ，并按下式计算：

$$h_1 = \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2} \quad (14.3-1)$$

(4) 蜗杆轴向齿距 p_x 测量蜗杆轴向齿距 p_x ，可以用直尺或精密游标卡尺在蜗杆的齿顶圆柱上沿轴向

直接测量(见图14.3-3)。为了精确起见,最好多跨几个轴向齿距(比如说 n 个),然后将所测得的数除以所跨齿数,就是蜗杆的轴向齿距。

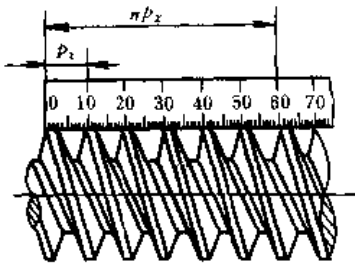


图14.3-3 蜗杆轴向齿距的测量

(5) 蜗杆齿形角 α 蜗杆齿形角可用角度尺或齿形样板在蜗杆的轴向剖面和法向剖面内测量,将两个剖面的数值都记录下来,作确定参数时的参考。也可以用不同齿形角的齿轮滚刀插入齿部作比较来判断。

(6) 蜗杆副中心距 a' 蜗杆副中心距的测量对蜗杆传动的啮合参数的确定以及对校核所定参数的正确性都是很重要的。对于变位蜗杆传动,其测量中心距 a' 是确定蜗轮径向变位系数 x_2 的依据。另外,中心距测量是蜗杆副综合测量中的一个关键测量项目,因此,应该仔细测量,力求精确。必须强调,只有当根据测绘设计的几何参数所计算出来的中心距 a 与实测的中心距 a' 相一致时,才能保证蜗杆传动的正确啮合。

测量中心距时,可利用设备原有的蜗杆和蜗轮轴,清洗后,重新装配进行测量。测量时,首先要测量这些轴的本身尺寸 (D_1', D_2') 与形位公差,以便作为修正测量结果的参考。

常用的测量方法有:

1) 用精密游标卡尺或千分尺,测出两轴外侧间的距离 L' (见图14.3-4) 并按下式计算中心距:

$$a' = L' - \frac{D_1' + D_2'}{2} \quad (14.3-2)$$

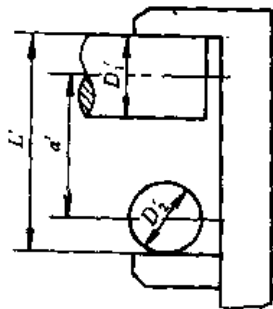


图14.3-4 测蜗杆蜗轮轴外侧间的距离

2) 用内径千分尺中心距测出两轴内侧间的距离 L (见图14.3-5), 并按下式计算中心距:

$$a' = L + \frac{D_1' + D_2'}{2} \quad (14.3-3)$$

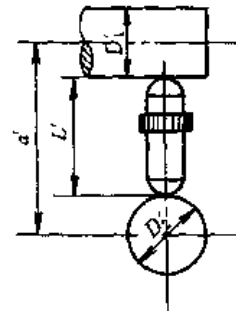


图14.3-5 测蜗杆蜗轮轴内侧间的距离

3) 当中心距不大,用上述方法测量有困难时,可用量块测量两轴内侧间的距离(见图14.3-6), 并按式(14.3-3) 计算中心距。

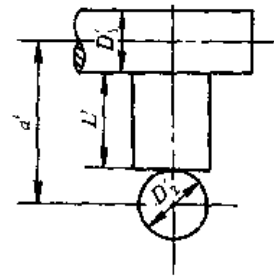


图14.3-6 用量块测蜗杆蜗轮轴内侧间的距离

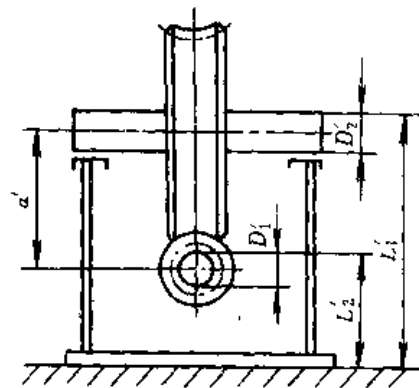


图14.3-7 在平台上测蜗杆、蜗轮轴线间的距离

4) 在划线平台上测出 L_1' 及 L_2' (见图14.3-7), 再分别测出蜗杆、蜗轮轴径 D_1', D_2' , 并按下式计算中心距:

$$a' = L_1' - L_2' - \frac{D_2' + D_1'}{2} \quad (14.3-4)$$

应当指出,用卡尺或千分尺测量两轴距离时,必须是两轴线公垂线长度,卡尺、千分尺必须与轴线垂直。

5) 在生产现场,常采用测量蜗轮减速机箱体中心孔的距离来确定中心距*a'*。通过可调千斤顶将箱体放平,校准各孔的正确位置,然后测得蜗轮轴孔和蜗杆轴孔的最低位置距离,同时测得蜗轮轴孔直径和蜗杆轴孔直径,并通过适当的计算就可得到蜗杆副的测量中心距。

3.2 基本参数的确定

(1) 蜗杆齿形 可以采用本章2.1节介绍的方法作出准确的判断。但是,有时在缺乏条件的情况下测绘,要准确判断蜗杆齿形是很困难的,所以对要求保证传动精度的蜗杆副的更换,建议采用成对更换的方法。

(2) 模数(径节或齿距) 首先要了解所测绘设备的生产国和制造厂家及所采用的齿形制度,从而基本上可确定所测绘蜗杆副是模数制还是径节制。同时,可根据测量的蜗杆轴向齿距*p_x*查表14.3-2来确定,也可根据测绘的蜗轮喉圆直径*d'_{a2}*按下面公式进行初算:

$$m' = \frac{d'_{a2}}{z_2 + 2} \quad (14.3-5)$$

$$DP' = \frac{z_2 + 2}{d'_{a2}} \times 25.4 \quad (14.3-6)$$

$$p' = \frac{\pi d'_{a2}}{(z_2 + 2) \times 25.4} \quad (14.3-7)$$

根据计算结果查表14.3-2,看其数值与哪一种制度的数值相符,即可判断蜗杆副的制度,确定出相应的*m*, *DP*, *p*。如果计算结果与标准的模数、径节或周节均不相符,那么这个蜗轮可能是变位的蜗轮,需要进一步确定变位系数*x₂*。

表 14.3-2 蜗杆轴向齿距 *p_x*、模数 *m*、径节 *DP* 和齿距对照表

| <i>p_x</i> /mm | <i>m</i> /mm | <i>DP</i> /in ⁻¹ | <i>p</i> /in |
|--------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| 3.142 | 1 | | |
| 3.175 | (1.011) | | 0.125(1/8) |
| 3.325 | (1.058) | 24 | (0.131) |
| 3.627 | (1.155) | 22 | (0.143) |
| 3.990 | (1.270) | 20 | (0.157) |
| 4.433 | (1.411) | 18 | (0.175) |
| 4.712 | 1.5 | (16.933) | 0.1875(3/16) |
| 4.763 | (1.516) | | |
| 4.987 | (1.588) | 16 | (0.196) |

(续)

| <i>p_x</i> /mm | <i>m</i> /mm | <i>DP</i> /in ⁻¹ | <i>p</i> /in |
|--------------------------|--------------|-----------------------------|---------------|
| 5.700 | (1.814) | 14 | (0.224) |
| 6.283 | 2 | (12.7) | (0.247) |
| 6.350 | (2.021) | | 0.25(1/4) |
| 6.650 | (2.116) | 12 | (0.262) |
| 7.254 | (2.309) | 11 | (0.286) |
| 7.854 | 2.5 | | (0.309) |
| 7.938 | (2.527) | | 0.3125(5/16) |
| 7.980 | (2.540) | 10 | (0.314) |
| 8.866 | (2.822) | 9 | (0.349) |
| 9.425 | 3 | | (0.371) |
| 9.525 | (3.032) | | 0.375(3/8) |
| 9.975 | (3.175) | 8 | (0.393) |
| 11.000 | 3.5 | | (0.433) |
| 11.110 | (3.537) | | 0.4375(7/16) |
| 11.400 | (3.626) | 7 | (0.449) |
| 12.570 | 4 | | (0.495) |
| 12.700 | (4.043) | | 0.500(1/2) |
| 13.300 | (4.233) | 6 | (0.524) |
| 14.140 | 4.5 | | (0.557) |
| 14.290 | (4.548) | | 0.5625(9/16) |
| 15.710 | 5 | | (0.618) |
| 15.870 | (5.053) | | 0.625(5/8) |
| 15.960 | (5.080) | 5 | (0.628) |
| 17.460 | (5.559) | | 0.6875(11/16) |
| 18.850 | 6 | (4.233) | (0.742) |
| 19.050 | (6.064) | | 0.75(3/4) |
| 19.950 | (6.350) | 4 | (0.785) |
| 20.640 | (6.569) | | 0.8125(13/16) |
| 21.990 | 7 | (3.629) | (0.866) |
| 22.220 | (7.074) | | 0.875(7/8) |
| 22.800 | (7.257) | 3.5 | (0.898) |
| 23.810 | (7.580) | | 0.9375(15/16) |
| 25.130 | 8 | (3.175) | (0.989) |
| 25.400 | (8.085) | | 1.000(1) |
| 26.600 | (8.467) | 3 | (1.047) |
| 26.990 | (8.590) | | 1.0625(1/16) |
| 28.270 | 9 | | (1.113) |

(续)

| p_x/mm | m/mm | DP/in^{-1} | p/in |
|-----------------|---------------|---------------------|--------------------|
| 28.580 | (9.096) | | 1.125(1/8) |
| 29.020 | (9.236) | $2^3/4$ | (1.142) |
| 30.160 | (9.061) | | 1.1875($1^3/16$) |
| 31.420 | 10 | (2.540) | (1.237) |
| 31.750 | (10.106) | | 1.250(1/4) |
| 31.920 | (10.159) | 2.5 | (1.257) |
| 33.340 | (10.612) | | 1.3125($1^5/16$) |
| 34.930 | (11.117) | | 1.375($1^3/8$) |
| 35.470 | (11.289) | 2.25 | (1.396) |
| 36.510 | (11.622) | | 1.4375($1^7/16$) |
| 37.700 | 12 | (12.117) | (1.484) |
| 38.100 | (12.127) | | 1.500($1^1/2$) |
| 39.900 | (12.700) | 2 | (1.570) |
| 41.270 | (13.138) | | 1.625($1^5/8$) |
| 43.980 | 14 | (1.614) | (1.732) |
| 44.450 | (14.149) | | 1.75($1^3/4$) |
| 45.600 | (14.514) | $1^3/4$ | (1.795) |
| 47.620 | (15.166) | | 1.875($1^7/8$) |
| 50.26 | 16 | (1.588) | (1.979) |
| 50.80 | (16.176) | | 2.00(2) |
| 53.20 | (16.933) | 1.5 | (2.094) |
| 56.55 | 18 | (1.411) | (2.226) |
| 62.83 | 20 | (1.270) | (2.474) |
| 63.84 | (20.319) | 1.25 | (2.513) |
| 78.54 | 25 | (1.016) | (3.092) |
| 79.80 | (25.400) | 1 | (3.142) |
| 94.25 | 30 | (0.847) | (3.710) |

(3) 齿形角 α 国家标准对基准蜗杆的齿形角的规定如下: 阿基米德蜗杆轴向齿形角 $\alpha_x = 20^\circ$, 法向直廓蜗杆法向齿形角 $\alpha_n = 20^\circ$, 渐开线蜗杆的法向齿形角 $\alpha_n = 20^\circ$, 锥面包络圆柱蜗杆齿面的锥形刀具产形角 $\alpha_n = 20^\circ$ 。

对于动力蜗杆, 当导程角 $\gamma > 30^\circ$ 时, 允许增大齿形角, 推荐采用 25° ; 对于分度蜗杆副, 允许减小齿形角, 推荐采用 15° 或 12° 。

目前世界上大多数国家都规定模数制蜗杆的齿形角 $\alpha = 20^\circ$ 。在一些旧设备中有时可能遇到齿形角为 $22\frac{1}{2}^\circ$, 25° , 30° 的蜗杆, 测绘时应尽量改为现在规定

的数值。

径节制蜗杆传动的齿形角, 常见的有 $14\frac{1}{2}^\circ$ 、 20° 及 25° , 有时还可能遇到 $17\frac{1}{2}^\circ$ 及 30° 。

(4) 蜗杆分度圆直径 d 为使蜗轮滚刀标准化, 蜗杆直径 d_1 值必须标准化。测绘及设备改装设计时应考虑这一点。具体系列请参看本手册第6篇第2章普通圆柱蜗杆传动。

(5) 齿顶高系数 h_a^* 、顶隙系数 c^* 在测得全齿高 h_1 和模数 m 后, 一般可先试取齿顶高系数 $h_a^* = 1$, 顶隙系数 $c^* = 0.2$, 按公式 $h_1 = 2h_a^*m + c^*m$ 核算所得数值, 如果 $h_1 \neq h_1$, 说明齿顶高系数 h_a^* 和顶隙系数 c^* 的取值不正确, 应当重新确定。

我国、德国和经互会的标准一般规定 $h_a^* = 1$, 但在导程角 $\gamma > 30^\circ$ 时, 为满足高速重载传动的需要, 可采用短齿制, 取 $h_a^* = 0.8$ 。

对渐开线蜗杆、蜗轮可分别取为 $h_{a1}^* = 1$, $h_{a2}^* = 2\cos\gamma - 1$ 。

为保证蜗轮滚刀的寿命, c^* 值可能大于 0.2, 某些特殊传动要求 c^* 小于 0.2, 因此国家标准规定 c^* 值还可在 0.15~0.35 之间取值。德国标准 DIN3975~1976 规定一般取 $c^* = 0.167 \sim 0.3$, 最好取 $c^* = 0.2$ 。英国 BS 制规定 $c^* = 0.2 \sim 0.25$, 而 DP 制蜗轮 $c^* = 0.157$ 。

重新选取 h_a^* 和 c^* 后, 再用 h_1 的计算式核算, 直到测得值 h_1 与计算值 h_1 相符, 即可最后确定 h_a^* 和 c^* 。

(6) 蜗轮变位系数 x_2 在测绘蜗杆副时, 需要分析确定是否为变位蜗杆副。在模数 m 确定后, 应按下述步骤来进一步计算分析:

1) 核算实测喉部齿顶圆直径 d_{a2} 是否等于计算值 d_{a2}

$$d_{a2} = mx_2 + 2h_a^* \quad (14.3-8)$$

若 $d_{a2} \neq d_{a2}$, 就要考虑到该蜗轮可能是变位蜗轮, 应通过中心距的测算来进一步分析。

2) 核算蜗杆传动的啮合中心距

$$a = \frac{(d_{a1} - 2h_a^*m) + mx_2}{2} \quad (14.3-9)$$

式中 m 是按照蜗杆轴向齿距 p_x 查表 14.3-2 判定的标准模数。比较 a 值和实测值 a' , 若计算的 a 与实测的中心距 a' 不一致, 就说明这对蜗杆副是变位啮合, 这个蜗轮是变位蜗轮。

3) 变位系数 x_2 按下式计算

$$x_2 = \frac{a' - a}{m} = \frac{d_{a2}' - d_{a2}}{2m} - \frac{z_2}{2} - h_a^* \quad (14.3-10)$$

再将计算所得数值参照制造国的变位制度来最后确定被测蜗杆副的变位系数值。

蜗轮变位系数 x_2 取值主要受到轮齿根切和齿顶变尖的限制。各国变位系数取值情况见表 14.3-3。

表 14.3-3 各国变位系数概况

| | |
|---------------------|---|
| 中国 (GB 10085-88) | $-0.5 \leq x_2 \leq +0.5$ (建议 $x_2 \geq 0$) |
| 前联邦德国 (DIN 3976-80) | $x_2 = 0 \sim +0.5$ |
| 前苏联 (ГОСТ 2144-76) | $-0.75 \leq x_2 \leq +1.0$ |
| 日本 (JISB 1723) | $-0.3 \leq x_2 \leq +0.25$ |

4 双导程圆柱蜗杆、蜗轮的测绘

双导程蜗杆传动中,蜗杆轮齿两侧齿面导程数值是不相同的,相应的左右齿面模数也存在一个差值,因而蜗杆的齿厚就不再是定值,而是沿轮齿螺旋线方向逐渐变化,形成了渐变齿厚蜗杆。正因为双导程蜗杆具有这种齿厚从蜗杆的一端到另一端逐渐增大或减小的特征,所以可用蜗杆的轴向移动来调整蜗杆副的齿侧间隙,使之得到所要求的侧隙,而无须增加新的结构或改变中心距。在运转磨损后,还可根据实际侧隙的变化调整蜗杆的轴向位置,以保持所要求的侧隙,保证传动精度。同时延长蜗杆副的使用寿命。因而在机床设备中被广泛应用。

双导程蜗杆虽然左右齿面具有不同的导程,但同侧齿面的导程却是一个定值;而且,与其相啮合的蜗轮的所有轮齿齿厚是相等的,因此,双导程蜗杆副的啮合原理和普通圆柱蜗杆副是相同的。在蜗轮中间平面的剖面上,蜗杆仍相当于基本齿条,蜗轮相当于和齿条啮合的齿轮,所不同的是左右齿面模数不同 (m_L 和 m_R),节点不同 (C_L 和 C_R),左右齿面的两个节圆直径也不相等 (d'_L 和 d'_R),这两个节圆上的齿距分别等于蜗杆的左右齿距。而且,一般来说,左右齿面不但模数及节圆不等于公称模数及公称节圆,左右齿面模数不相同,而且齿形角也不一定相同。因而与此有关的一系列参数值都要按左右齿面分别进行计算。由于中心距是按公称 m 值计算的,所以,从某种意义上说,可将双导程蜗杆两侧齿面的传动看作是两对具有不同模数的变位蜗杆传动,大模数齿面的传动可看作是负变位传动,小模数齿面的传动看作是正变位传动。若按左右齿形的对称性来分类,有左右模数差对称 ($\Delta m_L = \Delta m_R$)、左右齿形角对称 ($\alpha_L = \alpha_R$)、左右模数差不对称 ($\Delta m_L \neq \Delta m_R$)、左右齿形角不对称 ($\alpha_L \neq \alpha_R$) 等几种情况。但通常采用等模数差、等齿形角分布,只在发生齿面干涉

时才根据情况采用左右齿面模数差不对称、齿形角不对称分布。

4.1 几何参数的测量

双导程蜗杆的下列几项几何参数按照本章第3节“普通圆柱蜗杆、蜗轮的测绘”中所述的方法测量:

- 1) 蜗杆头数 z_1 和蜗轮齿数 z_2 。
- 2) 蜗杆齿顶圆直径及蜗轮喉圆直径 d_{a1} 、 d_{a2} 。
- 3) 蜗杆齿高 h_1 。
- 4) 蜗杆左齿面及右齿面齿形角 α_{L1} 、 α_{R1} 。
- 5) 蜗杆左齿面及右齿面轴向齿距 p_{zL} 、 p_{zR} 。
- 6) 中心距 a 。

双导程蜗杆的测绘与普通单导程蜗杆的测绘方法是基本相同的,只是公称模数 m 的确定方法有所不同。

双导程蜗杆轮齿齿厚是变化的,而公称齿距又不能进行实际测量,这就使得公称模数 m 的确定变得困难。确定公称模数 m 的途径可有以下几条:

1) 根据左、右齿距 p_{zL} 、 p_{zR} ,然后按照左右模数差对称分布试算公称模数 m' :

$$m' = \frac{p_{zL} + p_{zR}}{2\pi}$$

再用 m' 核算测量中心距 a ,将 m' 代入下式

$$a = \frac{m' z_2 + (d_{a1} - 2h_a^* m')}{2} \quad (14.3-11)$$

如果实测中心距 $a' \approx a$,则可确定 $m = m'$;

如果 $a' \neq a$,则要根据另外的途径再求。

2) 根据实测的 d'_{a2} 试算 m'

$$m' = \frac{d'_{a2}}{z_2 + 2h_a^*}$$

其中 h_a^* 选取 1,试求出 m' ,再用 m' 代入式 (14.3-11) 校验中心距。若试算的中心距 $a \approx$ 实测中心距 a ,则可确定 $m = m'$;若 $a \neq a'$,则应另行试取 $h_a^* = 0.8$,之后再按上述程序校验中心距。若相等,则可定 $m = m'$;若不等,则要另找途径。

3) 在测量蜗轮喉圆直径 d_{a2} 有困难时,可根据实测中心距 a' ,蜗杆顶圆直径 d'_{a1} 用下式试算公称模数 m' :

$$m' = \frac{2a' - d'_{a1}}{z_2 - 2h_a^*} \quad (14.3-12)$$

式中 h_a^* 先取 1,求出 m' 代入式 (14.3-11) 校验中心距,若 $a \approx a'$,可确定 $m = m'$;若 $a \neq a'$,再试取 h_a^* 计算并校验,若几经校验,都不能达到 $a \approx a'$,就要另寻途径。

4) 测定蜗杆、蜗轮的齿高 h'_1 、 h'_2 ,由齿高试定 m'

$$m = \frac{h_1'}{2h_a^* + c^*} = \frac{h_2'}{2h_a^* + c^*}$$

求出 m 后再按上面介绍的方法校核中心距，最后确定 m 。

5) 根据所测绘的蜗杆齿顶圆柱面上的公称模数测量处的刻线标记(周圈或横道刻线)测出齿厚 s_{x1} 及距基准端面的距离，从而试算 m ：

$$m = \frac{2s_{x1}}{\pi}$$

再用 m 按中心距校核公式验算中心距，若 $a = a'$ ，可确定 $m = m'$ 。

4.2 基本参数的确定

(1) 公称模数 m 和平均模数差 Δm 双导程蜗杆副的公称模数 m 的确定原则和普通单导程蜗杆(即普通圆柱蜗杆)相同，是根据蜗杆副所需传递的功率(要求的轮齿承载能力)而确定的。和普通蜗杆不同的是双导程蜗杆的公称模数 m 只用于计算公称齿距 p_x 、公称分度圆直径 d_1 、 d_2 、以及传动中心距 a 等，而实际的左齿面齿距 p_{xL} 、右齿面齿距 p_{xR} 、及左右齿面节圆直径 d_{L1} 、 d_{R1} 、 d_{L2} 、 d_{R2} ，等参数是用相应的左齿面模数 m_L 、右齿面模数 m_R 来计算的。

公称模数一般为左右齿面模数的平均值，按标准模数系列选取(但也可以不是标准值)。

模数差是左右齿面模数 m_R 、 m_L 、($m_R > m_L$) 与公称模数 m 之差，即 $\Delta m_R = m_R - m$ ， $\Delta m_L = m - m_L$ ，一般取 $\Delta m_R = \Delta m_L$ ，但为避免根切时，可取 $\Delta m_R \neq \Delta m_L$ 。

平均模数差 $\Delta m = \frac{\Delta m_R + \Delta m_L}{2}$ ，其数值与齿厚调整量 Δs 有密切关系，取决于齿厚增量系数 K_s 。 Δm 值大，双导程蜗杆的齿厚调整量就大，但影响啮合区域的偏移量也大，这使 Δm 值受到限制。一般将平均模数差 Δm 值对称分配在左右齿面上，即

$$\Delta m_R = \Delta m_L = \Delta m$$

而

$$\Delta m = \frac{1}{2} m K_s = \frac{\Delta s}{2\pi}$$

式中 K_s ——齿厚增量系数。

因此 $m_R = m + \Delta m_R = (1 + 0.5K_s)m$

$$m_L = m - \Delta m_L = (1 - 0.5K_s)m$$

蜗轮加工中有时会产生齿形干涉，大模数齿面易产生根切。为避免根切，可减小大模数齿面模数 m_R ，使 $\Delta m_R < \Delta m_L$ ，这样左右齿面模数差不再对称分布，即 $\Delta m_R \neq \Delta m_L \neq \Delta m$ ，甚至出现 $\Delta m_R = 0$ ，即 $m_R = m$ 。

(2) 齿厚增量系数 K_s 双导程蜗杆轴向移动单位长度时的轴向齿厚变化量称为齿厚增量系数 K_s 。它等

于左右齿距差与公称齿距之比值：

$$K_s = \frac{p_{xR} - p_{xL}}{p_x} \quad (14.3-13)$$

(3) 齿厚调整量 Δs Δs 是为了补偿制造误差和蜗轮磨损所形成的侧隙而在设计时选定的最大齿厚调整量。一般推荐 $\Delta s = 0.3 \sim 0.6 \text{mm}$ ，在动力传动中， Δs 允许取得大一些，可按 $\Delta s = \pi m K_s$ 。

(4) 齿面齿形角 α_{L1} 、 α_{R1} 、 α_{L2} 、 α_{R2} 双导程蜗杆的齿形角和普通蜗杆齿形角的确定原则一样，通常取 15° 或 20° ，必要时也可取其他数值。在蜗杆直线齿廓截面上，左右齿面齿形角一般取成相等。

(5) 蜗杆轮齿宽度 b 蜗杆轮齿宽度 $b = b_1 + \Delta b + b_2$ (见图 14.3-8)

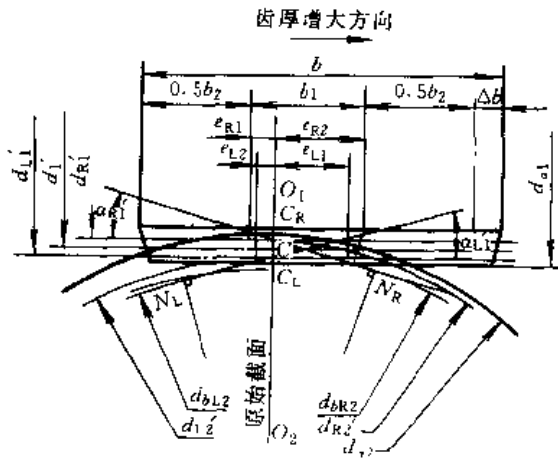


图 14.3-8 双导程蜗杆的齿宽

(图中 $m_R > m > m_L$)

蜗杆齿宽 b 太小影响啮合质量，还可能使齿厚调整量 Δs 不能达到最大允许值。相反，齿宽 b 过大又引起蜗杆厚齿端最小齿槽底部宽度 e_{min} 过小而不利于加工，因此 b 取值要经计算确定。

(6) 原始截面处的齿厚 s_{o1} 双导程蜗杆的齿厚是渐变的，在每一截面上都不相等，只有在轮齿的某一截面上才具有公称齿厚 $s_{x1} = \frac{1}{2} \pi m$ 。为了保证双导程蜗杆副的啮合精度，应使设计、制造和装配的基准一致，因此设计中常将公称齿厚处与原始截面 O_1O_2 (见图 14.3-8) 处重合。

5 圆弧圆柱蜗杆、蜗轮的测绘

5.1 几何参数的测量

圆弧圆柱蜗杆、蜗轮除齿廓部分几何参数的测绘方法与普通圆柱蜗杆、蜗轮的测绘方法有所不同外，其

他各部分尺寸参数的测绘与普通圆柱蜗杆基本相同，这里只介绍圆弧圆柱蜗杆的齿廓参数的测绘方法。

(1) 齿廓圆弧半径 ρ 及齿形的测绘

1) 齿廓样板测绘法 根据蜗杆模数大致确定 ρ 的取值范围，初选圆弧样板或圆弧尺，将其贴靠在蜗杆齿面上，观察圆弧曲率是否相符。注意，观察时样板与齿面间的缝隙透光要均匀一致，才能认为是相符。

用样板或圆弧尺靠贴蜗杆齿面时，应在蜗杆法向截面和轴向截面两个截面上进行比较，选择确定与蜗杆齿廓最相符的圆弧半径 ρ_s 。

2) 测点计算法 测量工具可以采用齿厚卡尺、万能工具显微镜、或三坐标测量仪直接在蜗杆法截面内进行测量。根据测得的若干数据进行计算，可确定齿廓圆弧半径和压力角，见图 14.3-9。若法截面齿廓为圆弧（或近似圆弧），可用下列三点决定一圆的方程式：

$$\begin{cases} (x_{n1} - b')^2 + (z_{n1} - a')^2 = \rho_n^2 \\ (x_{n2} - b')^2 + (z_{n2} - a')^2 = \rho_n^2 \\ (x_{n3} - b')^2 + (z_{n3} - a')^2 = \rho_n^2 \end{cases} \quad (14.3-14)$$

因为 $x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, z_{n1}, z_{n2}, z_{n3}$ 为已知，代入就可求得 a', b', ρ_n 从而也求得 α_n

$$\alpha_n = \arcsin \frac{b' - R_1}{\rho_n} \quad (14.3-15)$$

若轴截面齿廓为圆弧（或近似圆弧），可先测得法向齿廓的 x_{n1}, x_{n2}, x_{n3} 和 z_{n1}, z_{n2}, z_{n3} ，然后根据法向与轴向坐标点的转换关系求出轴向坐标点即可。

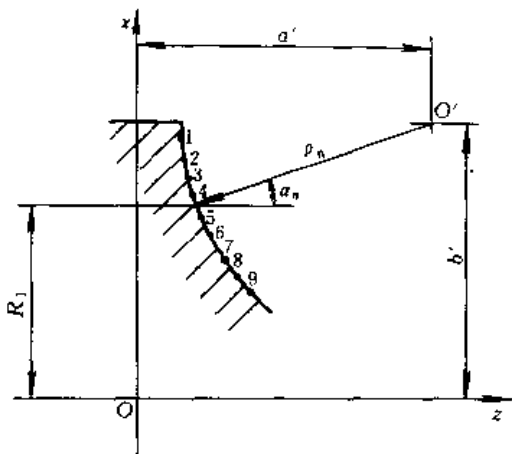


图 14.3-9 测点法测齿廓曲线

3) 测点作图法 测得齿廓上三点坐标后，将相邻两点的弦联接，再作两弦的垂直平分线，则可得到一个交点，该交点即为齿廓圆弧的中心。联接圆弧中心与分度线在齿廓上的交点所得到的线段就是齿廓圆弧半径

ρ_n ，此线段与分度线之间的夹角为压力角 α_n ，见图 14.3-10。通过度量即可得到 ρ_n 和 α_n 的数值， a' 和 b' 也可求得。

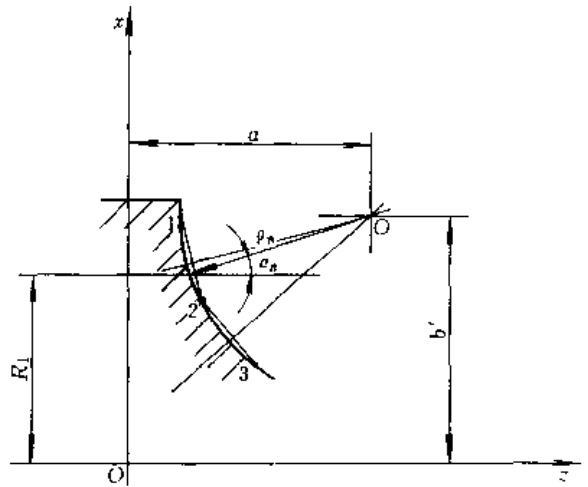


图 14.3-10 作图法测蜗杆齿廓线

5.2 基本参数的确定

圆弧圆柱蜗杆基本参数基本上与普通圆柱蜗杆基本参数相同，但由于它承载能力大，为了改善传动质量，圆弧圆柱蜗杆传动必须采用正变位，变位系数 x_2 的取值范围为 $x_2 = 0.5 \sim 1.5$ 。刀具产形角，齿廓曲率半径等基本参数，国家标准 GB9147—88 都已有规定。可参见本手册第 6 篇第 3 章，这里不再详述。

6 圆柱蜗杆、蜗轮测绘程序及测绘实例

6.1 测绘程序

普通圆柱蜗杆测绘程序框图见图 14.3-11。

6.2 测绘实例

某厂进口前联邦德国 CAVEX 减速机。标牌标注其中心距 250mm，减速比为 $i = 4.8$ 。

(1) 实测数据

中心距 $a' = 250\text{mm}$ ，蜗杆顶圆直径 $d_{a1} = 138\text{mm}$ ，全齿高 $h_1 = 29.41\text{mm}$ ，轴向齿距 $p_x \approx 47.125\text{mm}$ ，分度圆法向齿厚 $s_{a1} = 15.55\text{mm}$ ，蜗杆头数 $z_1 = 5$ ，蜗轮齿数 $z_2 = 24$ ，蜗轮顶圆直径 $d_{a2} = 423.9\text{mm}$ ，蜗轮喉圆直径 $d'_{a2} = 416\text{mm}$ ，蜗轮全齿高 $h_2 = 30\text{mm}$ ，蜗轮轮缘宽度 $d'_2 = 76\text{mm}$ 。

(2) 数据处理

1) 主要参数的确定

$$\text{蜗轮端面模数 } m = \frac{p_x}{\pi} = \frac{47.125}{\pi} \approx 15\text{mm}$$

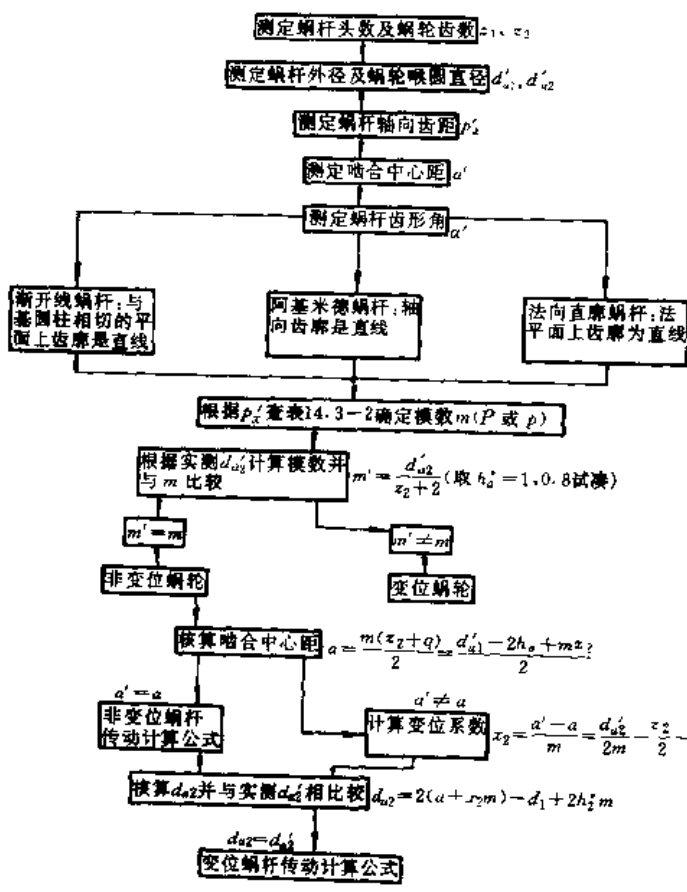


图 14.3-11 普通圆柱蜗杆测绘程序框图

齿高系数 $h_1^* = \frac{h_1}{m_1} = \frac{29.41}{15} = 1.961$

由产品样本可知，顶隙系数 $c^* = 0.16$

故齿顶高系数 $h_a^* = \frac{h_1^* - c^*}{2} = \frac{1.961 - 0.16}{2} = 0.9$

蜗杆直径系数

$$q = \frac{d_{a1} - 2h_a^* m_1}{m_1} = \frac{138 - 2 \times 0.9 \times 15}{15} \approx 7.4$$

蜗杆分圆柱导程角 $\gamma_1 = \arctan \frac{z_1}{q} = \arctan \frac{5}{7.4} = 34^\circ 2' 45''$

法向模数 $m_n = m_1 \cos \gamma_1 = 15 \cos 34^\circ 2' 45'' = 12.429 \text{mm}$

标准中心距 $a = \frac{1}{2} m_n (z_2 + q) = \frac{1}{2} \times 15 \times (24 + 7.4) = 235.5 \text{mm}$

因实测中心距 $a' > a$ ，故为正变位传动。

变位系数 $x_2 = \frac{a' - a}{m_1} = \frac{250 - 235.5}{15} = 0.967$

2) 几何尺寸计算

$d_{a1} = m_1 (q + 2 \times h_a^*) = 15 \times (7.4 + 2 \times 0.9) = 138 \text{mm}$

$d_1 = m_1 q = 15 \times 7.4 = 111 \text{mm}$

$h_1 = (2h_a^* + c^*) m_1 = (2 \times 0.9 + 0.16) \times 15 = 29.4 \text{mm}$

$s_{n1} = 0.4 \pi m_n = 0.4 \pi \times 12.429 \approx 15.619 \text{mm}$

$d_{a2} = m_n (z_2 + 2h_a^* + 2x_2) = 15 \times (24 + 2 \times 0.9 + 2 \times 0.967) = 416.01 \approx 416 \text{mm}$

可以看出，实测数值与计算基本相符，故可确定该蜗杆传动基本参数如下：

$a = 250 \text{mm}, m_1 = 15 \text{mm}, q = 7.4 \quad \gamma_1 = 34^\circ 2' 45''$

$z_1 = 5, z_2 = 24, x_2 = 0.967, c^* = 0.16, h_a^* = 0.9$

(3) 蜗杆齿廓曲线 p_n 和 a_n 的测绘 假定蜗杆法截面齿廓为近似圆弧，故用测齿厚卡尺测出法向齿廓若干坐标点，本例共测 15 个点，结果见表 14.3-4。

将所测 15 点分成 5 组（见表 14.3-5）根据 H 和 S ，利用 $x_n = \frac{1}{2} d_{a1} - H$ 和 $z_n = S$ ，分别求得每组的 x_{n1} ， x_{n2} ， x_{n3} 及 z_{n1} ， z_{n2} ， z_{n3} ，结果见表 14.3-6。将每组坐标值代入方程式 (14.3-14)，分别求出每组的 a' ， b' ， ρ_n ， α_n ，然后取其平均值。

本题所求之值为：

$a = 88.35, b = 89.70, \rho_n = 87.55, \alpha_n = 23^\circ$

表 14.3-4 法向齿廓点的坐标

(mm)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 |
| S | 3.74 | 4.05 | 4.35 | 4.97 | 5.64 | 6.36 | 6.75 | 7.55 | 8.42 | 9.34 | 10.32 | 11.39 | 12.50 | 13.70 | 14.92 |

注：H—沿齿高方向，点到齿顶的高度；

S—被测点的齿厚之半。

表 14.3-5 坐标点分组

| 代号 | 第一组 | | | 第二组 | | | 第三组 | | | 第四组 | | | 第五组 | | |
|----|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| H | 2 | 13 | 27 | 3 | 13 | 25 | 4 | 13 | 21 | 6 | 13 | 29 | 8 | 13 | 19 |
| S | 3.74 | 7.55 | 14.92 | 4.05 | 7.55 | 13.70 | 4.35 | 7.55 | 12.50 | 4.97 | 7.55 | 11.39 | 5.64 | 7.55 | 10.32 |

表 14.3-6 计算结果

| 代号 | 第一组 | | | 第二组 | | | 第三组 | | | 第四组 | | | 第五组 | | |
|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| z_n | 67 | 56 | 42 | 66 | 56 | 44 | 65 | 56 | 46 | 63 | 56 | 48 | 61 | 56 | 50 |
| z_n | 3.74 | 7.55 | 14.92 | 4.05 | 7.55 | 13.70 | 4.35 | 7.55 | 12.50 | 4.97 | 7.55 | 11.39 | 5.64 | 7.55 | 10.32 |

7 环面蜗杆、蜗轮的测绘

环面蜗杆传动与圆柱蜗杆传动在几何参数的含义、计算方法和选择原则上都有很大的区别,因此其测绘方法也和圆柱蜗杆副有所不同。圆柱蜗杆副的测绘以蜗杆参数的测绘为主导,而环面蜗杆副中蜗杆的分度曲面不是圆柱面而是圆环面,使得蜗杆分度圆、齿顶圆、齿根圆等的径向尺寸 d_1 、 d_{a1} 、 d_{f1} 以及导程角 γ 随蜗杆的轴向截面位置的变化而变化,不再是一个定值,且齿形完全取决于包络它的刀具蜗轮的参数,再加上环面蜗杆常常对螺旋面进行修形或修缘,因而很不便于测绘,相反,单包络环面蜗杆副中的平面蜗轮(或渐开线齿轮)是一个齿面为平面(或渐开线)的齿轮,各项参数测绘起来都较方便,因此,单包络环面蜗杆副的测绘应以蜗轮为主导,环面蜗杆只需测绘出毛坯尺寸即可,齿部尺寸均由蜗轮刀具包络成形。双包络环面蜗杆副原则上必须成对更换,因此,对无法进行准确测绘的参数,可参照实物由最终设计给定。

7.1 几何参数的测量及确定

- (1) 中心距 a
- (2) 蜗杆头数 z_1 和蜗轮齿数 z_2
- (3) 蜗轮喉部齿顶圆直径 d_{a2} 及蜗轮齿顶圆最大圆直径 d_{a2}
- (4) 蜗杆、蜗轮全齿高 h_1 、 h_2
- (5) 蜗杆、蜗轮齿宽 b_1 、 b_2

这几项几何参数的测绘方法可参照本章3节“普通圆柱蜗杆蜗轮的测绘”。

(6) 平面蜗轮平面倾斜角 β 由于齿面是平面,可用角度尺直接测量。对小模数也可以用滚印法间接测量。测量时,必须以蜗轮的两个端面中的基准端面为一个角边,圆周对称多测几个位置,取其平均值。

(7) 平面蜗轮分度圆压力角 α 和平面蜗轮成形圆直径 d_s 测出平面蜗轮公法线长度 W' , 则

$$d_s = W' / \cos \beta$$

首先用角度尺测量蜗轮齿形角 $2\alpha_1$ 见图 14.3-12, 从而判断出蜗轮分度圆压力角 α'

$$\alpha' = \frac{\alpha_1}{2} + K \frac{180^\circ}{z_2}$$

式中 K ——齿厚系数,一般取 $K=0.55, 0.5, 0.45$ 。

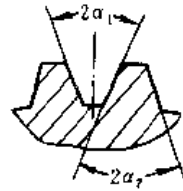


图 14.3-12 平面蜗轮齿形角

(8) 蜗轮分度圆直径 d_2 、端面模数 m_t

$$d_2 = \frac{d_b'}{\sin \alpha}$$

$$m_t = \frac{d_2}{z_2}$$

(9) 用实测的 d_{a2} 计算 m_t' , 并与 m_t 核对, 确定 m_t 、 h_a^* 、 c^*

$$m_t' = \frac{d_{a2}}{z_2 + 2h_a^*}$$

($h_a^* = 1 \sim 0.7$ 大模数时取小值, 小模数时取大值)

若 $m_t' \approx m_t$ 则确定 $m_t = m_t'$

这时, h_a^* 也确定, 则 c^* 值可按下式计算选定:

$$c^* = \frac{h_2' - 2h_a^* m_t}{m_t} = \frac{h_2' - 2h_a^* m_t'}{m_t'}$$

($c^* = 0.16 \sim 0.25$)

(10) 蜗杆分度圆直径 d_1

$$d_1 = 2a' - d_2$$

(11) 环面蜗杆毛坯尺寸的确定

1) 蜗杆喉部顶圆直径 d_{a1} 、最大齿顶圆直径 d_{max}

环面蜗杆毛坯曲面是一个圆环面, 当喉部导程角 γ 较大时, 其喉部顶圆直径 d_{a1} 、最大齿顶圆直径 d_{a1max} 不能像圆柱蜗杆那样简单地用卡尺测量, 这时, 可在平台上用高度尺来测量, 见图 14.3-13。

$$d_{a1} = 2(L_1 - A)$$

$$d_{a1max} = 2(L_2 - A)$$

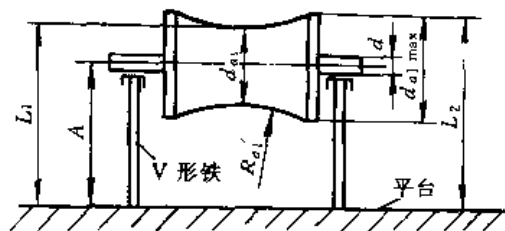


图 14.3-13 环面蜗杆齿顶圆直径测量

注意,环面蜗杆喉部常有制造时的刻线,测量时,要转动蜗杆,测量刻线部位附近的最小尺寸 L_1 及两端最大高度尺寸 L_2 。

2) 环面蜗杆齿顶圆弧半径 R_{a1} 可以采用圆弧尺测量 R_{a1} ,也可以如图 14.3-13 所示测出 3 个点的坐标后用计算或作图后获得 R_{a1} 。

需要指出,最后确定各项参数时,如果该项测绘必须严格照实物进行,则所测绘的各项参数只能按照设备生产国有关标准及产品样本,作适当圆整。如果无此特殊要求时,应该参照本手册第 6 篇第 4 章、第 5 章参

数选择中所介绍的各种参数合理搭配并重新计算。

渐开面包络环面蜗杆副测绘时,环面蜗杆几何参数的测量同上,而蜗轮的测量就是渐开线圆柱齿轮的测量。要注意的是用作蜗轮的渐开线圆柱齿轮通常是正变位齿轮,其变位系数 x_2 常在 0.5~2 范围内,而蜗轮齿高系数、齿顶隙系数为了便于借用渐开线齿轮滚刀常取 $h_a^* = 1$ 或 0.8 , $c^* = 0.25 \sim 0.2$ 。

7.2 测绘程序框图

环面蜗杆、蜗轮测绘程序框图见图 14.3-14。

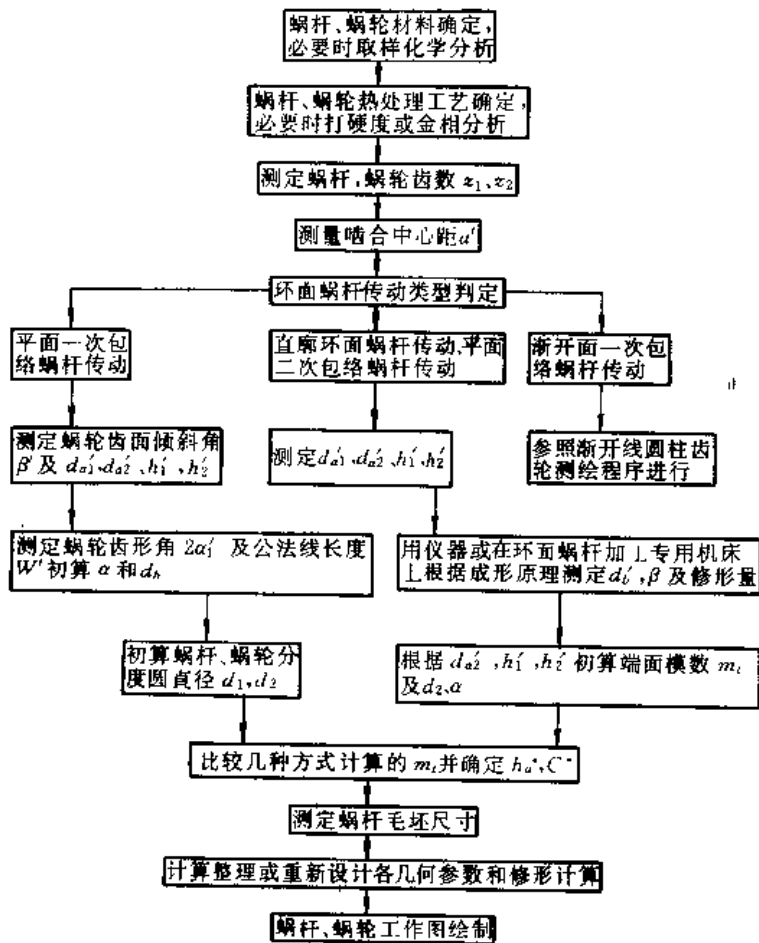


图 14.3-14 环面蜗杆传动测绘程序图

第 4 章 摆线针轮行星减速器的测绘

1 概述

摆线针轮行星减速器广泛应用在国防、矿山、冶金、化工、纺织等许多工业部门的设备上。这种减速器有的是国内自行设计的,有的是从国外引进的。

在生产中,为了消化、吸收国外的先进技术,对引进的具有较高水平的摆线针轮减速器进行解体测绘,以提高我国摆线针轮减速机的设计、工艺、制造水平。此外,在各种设备的检修过程中,也会遇到摆线针轮减速器,需要对其某些参数进行测绘。

测绘工作是一项比较重要又复杂的工作,测绘时要了解被测摆线针轮减速器的应用场合、负载大小;润滑油的油品参数,供油方式、压力及流量;以及是否采用了新的材料、新的结构等等,还要尽量知道是哪个国家的厂家和生产年代。在了解上述情况的基础上,使用必要的量具及计量手段进行测绘,通过对已知的参数和测量数据的分析计算,最终确定出摆线针轮减速器的基本参数,如齿数,偏心距,针齿分布圆直径,摆线轮和针轮的材料、齿面硬度等。

对比较重要的摆线针轮行星减速器,还需测量摆线轮的齿形,针齿、柱销孔的相邻、累积误差等。

本章只介绍摆线针轮行星减速器主要参数的测绘,其他一般尺寸的测绘,在此不再赘述。

2 摆线轮的测绘

(1) 摆线轮的齿数与齿宽 数出摆线轮的齿数 z_c , 用游标卡尺测量摆线轮齿宽 b_c 。

(2) 摆线轮的中孔及柱销孔等有关参数 摆线轮中孔直径 d_o 可用精密游标卡尺或内径千分尺测量;摆线轮的中孔与转臂轴承相配合,因此可顺便记录转臂轴承的型号。

数出柱销孔个数 z_w 。柱销孔直径 d_w 、柱销套外径 d_{rw} 和长度 l_w 、柱销直径 d_{rw} 和长度 l_{rw} 可直接量出。

柱销孔中心圆直径 D_w 不能直接测量,因柱销孔都为偶数,可按图 14.4-1 量出 l_1 、 l_2 , 则

$$D_w = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (14.4-1)$$

输出轴上柱销中心圆直径与柱销孔中心圆直径相等,也可用类似上面的方法测得 D_w 。

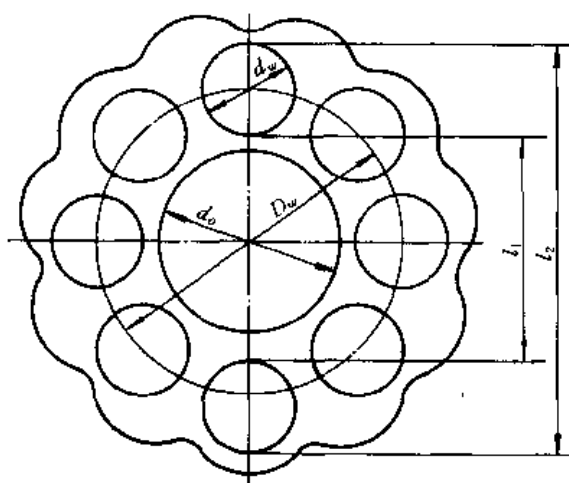


图 14.4-1 柱销孔中心圆直径的测量

(3) 偏心距 a 摆线针轮行星减速机的偏心距是一个重要参数,必须细心测量,其测量方法有两种:

1) 直接测量法 把偏心套安装在心轴上(若测绘的是双轴型摆线针轮减速器,则可用输入轴代替心轴),利用心轴两端的中心孔把心轴架起与导轨平行(图 14.4-2),用百分表测偏心距,偏心距 a 等于表中读数的 1/2。

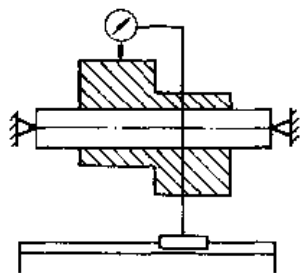


图 14.4-2 偏心距的测量

由于偏心套的偏心距有制造偏差,并在测量过程中也有误差,所以偏心距 a 的值可对照表 14.4-1 中的值选取;如测得的偏心距与表中值相接近,则按表中值选取;如相差较大,可用下面介绍的间接测量法进一步核对。

表 14.4-1 摆线针轮行星减速器的偏心距系列 (mm)

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|----|------|-----|------|----|-----|----|
| 0.65 | 0.75 | 0.85 | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 | 2.5 | 3 |
| 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 |
| 8.5 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 18 |

2) 间接测量法 摆线针轮行星减速机的偏心距 a 与柱销孔直径 d_w 、柱销套外径 d_{rw} 之间有以下关系:

$$2a = d_w - d_{rw} \quad (14.4-2)$$

上式是根据理论分析得到的。实际上,考虑制造误差的影响,一般实测的柱销孔尺寸要比理论值稍大些,或实测的柱销套外径要比理论值小一些,所以把实测的 d_w 、 d_{rw} 代入上式计算得到的偏心距 a , 值要比正确的偏心距 a 值大一些。

(4) 摆线轮的齿顶圆直径和齿根圆直径 一般摆线轮的齿数为奇数,所以不能直接测量其齿顶圆直径、齿根圆直径,需进行间接测量 l_o 、 l_f (图 14.4-3),为了减少制造误差的影响,应在不同径向方位上测量几组数据,取其平均值,则摆线轮齿顶圆直径 d'_a 为

$$d'_a = d_o + 2l_o \quad (14.4-3)$$

摆线轮齿根圆直径 d'_f 为

$$d'_f = d_o + 2l_f \quad (14.4-4)$$

若摆线轮齿数为偶数,则可直接测得齿顶圆直径 d'_a 和齿根圆直径 d'_f 。

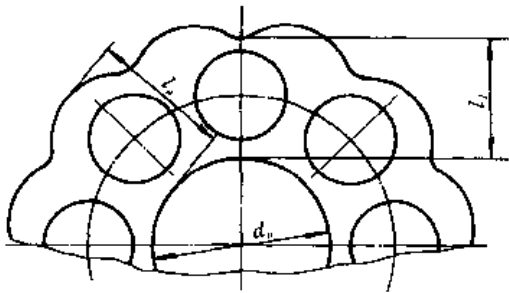


图 14.4-3 齿顶圆和齿根直径的测量

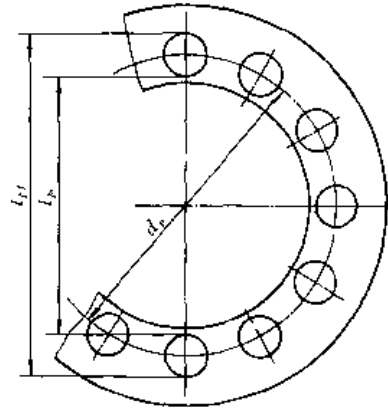


图 14.4-4 针齿中心圆直径的测量

3 针轮的测绘

3.1 针轮齿数

数出针轮齿数 z_p ，一般来说，针轮齿数 z_p 与摆线轮齿数 z_c 间的关系为

$$z_p = z_c + 1 \quad (14.4-5)$$

在传动比较大时，为了避免针齿相碰，或为了保证针齿壳的强度，需要抽齿，即间隔地抽去一个针齿，或间隔地抽去二个针齿，这时针轮齿数 z_p 与摆线轮齿数 z_c 间的关系为

间隔地抽去一个针齿时

$$2z_p = z_c + 1 \quad (14.4-6)$$

间隔地抽去二个针齿时

$$3z_p = z_c + 1 \quad (14.4-7)$$

二齿差摆线针轮行星减速器中，针轮齿数与摆线轮齿数差为 2，即

$$z_p - z_c = 2 \quad (14.4-8)$$

三齿差摆线针轮行星减速器中，针轮齿数与摆线轮齿数差为 3，即

$$z_p - z_c = 3 \quad (14.4-9)$$

3.2 针齿尺寸

用精密游标卡尺或外径千分尺测量针齿销直径 d_{sp} 及长度 l_{sp} ，针齿套外径 d_{sp} 及长度 l_{sp} 。针齿支持形式有双支点式和三支点式两种，有的针齿不带针齿套，在测绘时应加以说明。

3.3 针齿中心圆直径

针齿中心圆直径 d_p 不能直接在针轮上量得，需用间接测量法。一般针轮齿数为偶数，所以可在针轮的直径方向测得 l_{ps} 、 l_{pf} （见图 14.4-4），则针齿中心圆直径 d_p 为

$$d_p = \frac{l_{ps} + l_{pf}}{2} \quad (14.4-10)$$

4 参数的分析及测绘实例

4.1 变幅系数 K_1

摆线针轮行星减速器中，变幅系数 K_1 是关于齿廓的一个重要参数。 $K_1 = 0.42 \sim 0.85$ 时，其齿廓属于短幅外摆线；一般 $K_1 < 1$ 时，称 K_1 为短幅系数。当 $K_1 > 1$ 时，齿廓为长幅外摆线。近十多年来，也有取 $K_1 = 1$ 的普通外摆线，或 K_1 略小于 1 的微短幅外摆线作为摆线轮的齿廓；为了了解所测摆线轮的齿廓，应计算变幅系数 K_1

$$K_1 = \frac{z_p a}{r_p} \quad (14.4-11)$$

式中 z_p ——针轮齿数；当传动比大、间隔抽齿时，式中 z_p 应用理论针轮齿数，即 $z_c + 1$ 代入，二齿差或三齿差摆线针轮传动式，式中 z_p 应用理论针轮齿数，即分别代入实际针轮齿数的 1/2 或 1/3；

z_c ——摆线轮齿数；

a ——偏心距；

r_p ——针齿中心圆半径。

4.2 分析摆线轮的齿顶圆和齿根圆半径

理论上摆线轮的齿顶圆半径 r_{ac} 为

$$r_{ac} = r_p + a - r_{rp} \quad (14.4-12)$$

式中 r_{rp} ——针齿套外圆半径；若无针齿套，则用针齿销半径 r_{sp} 代之。

理论上摆线轮的齿根圆半径 r_{fc} 为

$$r_{fc} = r_p - a - r_{rp} \quad (14.4-13)$$

目前，我国生产的摆线轮齿廓，大部分是采用展成法加工的，为了运转时在摆线轮与针齿间形成油膜，补偿温升引起的热膨胀、制造误差等，一般在磨削摆线轮齿廓时采用移距修正和等距修正，使摆线轮与针齿间

有一定的齿侧隙存在。所以实测的摆线轮齿顶圆半径 $r_{a'}$ 、齿根圆半径 $r_{f'}$ 分别比理论的齿顶圆半径 r_a 、齿根圆半径 r_f 小一个齿侧隙。

现就几种特殊的情况介绍如下：

(1) 二齿差摆线轮的齿顶曲线 理论上二齿差摆线轮的齿顶是由两支相错半个齿的一齿差齿形相交而成尖角(图 14.4-5 中的 A 点), 制造时常采用以下三种方法之一除去尖角(图 14.4-5):



图 14.4-5 二齿差的齿顶曲线

1) 用外圆磨床把齿顶磨去 0.1~0.2mm, 并用油石磨去棱角。

2) 在齿顶采用复合齿形把尖角磨掉。

3) 用替代曲线代替原来的齿廓曲线。

用方法 1)、2) 加工的摆线轮齿根圆半径(即实测值)比用式(14.4-13)计算的值小一个齿侧隙; 用方法 3) 加工的摆线轮齿根圆半径比上两种方法的更小一点。

(2) 大传动比采用复合齿形 当摆线轮的齿形为短幅外摆线, 传动比较大时, 应用下式检查齿廓的最小曲率半径 ρ_{min}

$$\rho_{min} = -\sqrt{\frac{27z_c(1-K_c^2)}{(z_c+2)^3}} r_p \quad (14.4-14)$$

如针齿套外圆半径 r_{rp} (无针齿套时, 以针齿销半径 r_{sp} 代之) $< |\rho_{min}|$, 则摆线轮齿廓上不会产生尖角和干涉, 而摆线轮的齿顶在短幅外摆线的等距曲线上。实际的齿顶圆半径 $r_{a'}$ 、齿根圆半径 $r_{f'}$ 分别比用式(14.4-12)、式(14.4-13)计算的值小一个齿侧隙。

如针齿的 r_{rp} (无针齿套时, 用 r_{sp} 代之) $\geq |\rho_{min}|$, 则摆线轮齿廓上产生尖角或干涉。为了避免产生这种现象, 在齿顶采用复合齿形或用替代曲线代替原来的齿廓曲线(见图 14.4-6)。这时, 实际的齿顶圆半径 $r_{a'}$ 比用式(14.4-12)计算的值小一个齿侧隙以上, 齿根圆半径之间的关系和二齿差摆线针轮行星减速器的情况相同。



图 14.4-6 大传动比复合齿形与替代曲线

(3) 长幅外摆线轮的齿顶圆 长幅外摆线轮的齿廓是取长幅外摆线的等距曲线的一部分, 齿顶是齿顶圆上圆弧的一部分(见图 14.4-7), 其齿顶圆半径不能用式(14.4-12)计算, 可按测绘的齿顶圆半径 $r_{a'}$ 决定; 实际的齿根圆半径比用式(14.4-13)计算的值小一个齿侧隙。

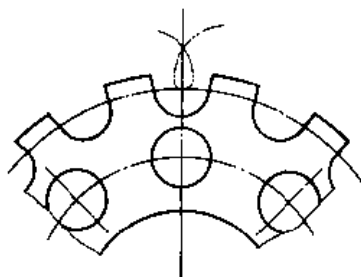


图 14.4-7 长幅外摆线轮的齿顶圆

(4) 普摆及微短幅外摆线轮的齿顶圆 普通外摆线及微短幅外摆线轮的齿顶曲线有两种形式:

1) 齿顶由外摆线或微短幅外摆线的等距曲线形成(见图 14.4-8a) 因考虑修形量的影响, 实测的齿顶圆半径 $r_{a'}$ 、齿根圆半径 $r_{f'}$ 分别比理论的齿顶圆半径 r_a 、齿根圆半径 r_f 小一个齿侧隙。

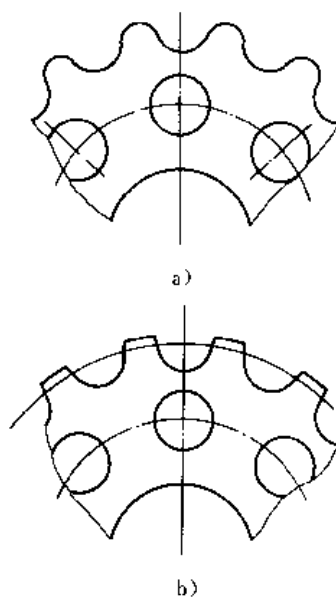


图 14.4-8 普通外摆线及微短幅外摆线轮的齿顶圆

a) 齿顶为等距曲线 b) 齿顶由圆弧组成

2) 齿顶由圆弧组成(图 14.4-8b) 齿形是取外摆线或微短幅外摆线的等距曲线的一部分, 齿顶是齿顶圆上圆弧的一部分, 制造时齿顶圆半径按测绘的值确定。实际的齿根圆半径比用式(14.4-13)计算的值小一个齿侧隙。

4.3 摆线针轮行星减速器的测绘实例

测绘一卧式摆线针轮行星减速器。

1. 实测数据

$$z_c' = 71, b_c' = 17.95\text{mm},$$

$$d_o = 151.52\text{mm}, \text{转臂轴承型号为 } 502219, z_w' = 10, \\ d_w' = 38.17\text{mm}, d_{rw}' = 34.99\text{mm}, l_{rw}' = 49.84\text{mm}, d_{nw}' = \\ 26.99\text{mm}, l_{nw}' = 87.86\text{mm}, D_w = 220.02\text{mm};$$

$$a = 1.51\text{mm};$$

$$d_{ac}' = 312.64\text{mm}, d_{fc}' = 306.64\text{mm};$$

$$z_p = 36, d_{ip}' = 9.994\text{mm}, l_{ip}' = 79.4\text{mm}, \text{无针齿套}, \\ d_p = 320.06\text{mm}.$$

2. 参数的确定

(1) 数据的处理 实测的数据带有制造和测量的误差, 需根据标准及经验将其圆整或处理。

$$z_c = 71, b_c = 18\text{mm}.$$

转臂轴承 502219 的外径为 151.5mm, 所以取 $d_o = 151.5\text{mm}$, $z_w = 10$ 。考虑制造误差以免柱销与销孔间卡死, 把销孔直径增大 0.15mm, 所以 $d_w = 38.15\text{mm}$, $d_{rw} = 35\text{mm}$, $l_{rw} = 50\text{mm}$, $d_{nw} = 27\text{mm}$, $l_{nw} = 88\text{mm}$, $D_w = 220\text{mm}$ 。

对照表 14.4-1, 取 $a = 1.5\text{mm}$ 。

实际针轮齿数 $z_p = 36$, 因摆线轮齿数 $z_c = 71$, 所以针轮属间隔抽齿, 理论的针轮齿数 $z_{p0} = 36 \times 2 = 72$, $d_{ip} = 10\text{mm}$, $l_{ip} = 80\text{mm}$; 无针齿套, $d_p = 320\text{mm}$ 。

(2) 计算变幅系数 K_1

$$K_1 = \frac{z_p a}{r_p} = \frac{72 \times 1.5}{160} = 0.675$$

因 K_1 远比 1 小, 所以该摆线轮的齿廓属一般的短幅外摆线。

(3) 计算摆线轮齿廓的最小曲率半径 ρ_{\min}

$$\rho_{\min} = -\sqrt{\frac{27z_c(1-K_1^2)}{(z_c+2)^3}} \\ = -\sqrt{\frac{27 \times 71(1-0.675^2)}{(71+2)^3}} \\ = -8.287$$

因无针齿套, 针齿半径为 r_{ip} , 而

$$r_{ip} = 5\text{mm}$$

$$r_{ip} < |\rho_{\min}|$$

所以摆线轮齿廓不发生干涉, 摆线轮齿顶不需采用复合齿形, 也不需用替代曲线。

(4) 计算齿顶圆半径和齿根圆半径

理论的齿顶圆半径 r_{ac}

$$r_{ac} = r_p + a - r_{ip} = 160 + 1.5 - 5 = 156.5\text{mm}$$

理论的齿根圆半径

$$r_{fc} = r_p - a - r_{ip} = 160 - 1.5 - 5 = 153.5\text{mm}$$

与实测的齿顶圆半径 $r_{ac}' = 156.32\text{mm}$ 、齿根圆半径 $r_{fc}' = 153.32\text{mm}$ 相比较, 可知齿侧隙为 0.18mm。

5 齿廓修形量的确定

摆线轮的齿廓修形量, 一般可根据经验确定。对于重要的摆线针轮行星减速器, 可用三坐标测量仪或万能工具显微镜测量摆线轮的齿廓, 然后用优化法计算其修形量, 其方法如下:

1. 建立目标函数

设图 14.4-9 中曲线 1 是短幅外摆线, 曲线 2 是曲线 1 的等距曲线, 与所测齿廓的测点很接近, 即测点与曲线 2 的法向距离控制在允许的偏差范围之内。

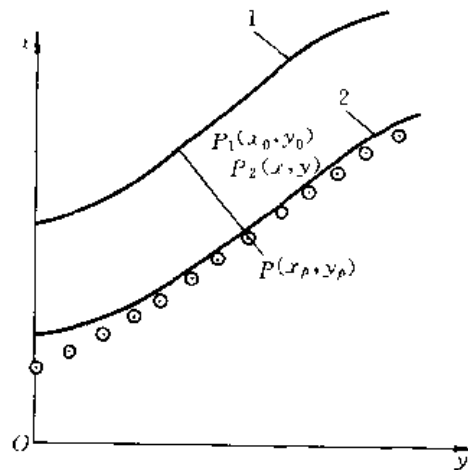


图 14.4-9 所求摆线齿廓的法向偏差
曲线 1 的方程式为

$$x_0 = (r_p - \Delta r_p) \left(\sin\psi - \frac{K_{1x}}{z_p} \sin z_p \psi \right) \\ y_0 = (r_p - \Delta r_p) \left(\cos\psi - \frac{K_{1y}}{z_p} \cos z_p \psi \right) \quad (14.4-15)$$

式中 ψ — 齿形参数;

Δr_p — 移距修形量, 加工时使摆线轮径向尺寸减小者为“+”, 反之为“-”;

K_{1x} — 短幅系数。按下式计算:

$$K_{1x} = \frac{az_p}{r_p - \Delta r_p} \quad (14.4-16)$$

z_p — 理论针轮齿数。

曲线 2 的方程式为

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + (r_p + \Delta r_p) (K_{1x} \sin z_p \psi - \sin\psi) / Q \\ y &= y_0 - (r_p + \Delta r_p) (-K_{1x} \cos z_p \psi + \cos\psi) / Q \\ Q &= (1 + K_{1x}^2 - 2K_{1x} \cos z_p \psi)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (14.4-17)$$

式中 Δr_p ——等距修形量, 即砂轮圆弧半径的增量, 加工时使摆线轮径向尺寸减小者为“+”, 反之为“-”;

z_c ——摆线轮齿数, 当二齿差或三齿差传动时, 式中 z_c 应用摆线轮理论齿数, 即分别代入实际摆线轮齿数的 1/2 或 1/3。

某测点 $P(x_p, y_p)$ 到曲线 2 的法线与曲线 2 相交于 $P_2(x, y)$ 点, 因曲线 2 是曲线 1 的等距线, 所以 PP_2 的延长线也是曲线 1 的法线, 与曲线 1 相交于 $P_1(x_0, y_0)$ 点, 且 P_1 点所对应的齿形参数 ψ 与 P_2 点的齿形参数 ψ 相同。设 P 点到曲线 1 上 P_1 点的距离为 S , 则

$$S^2 = (x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2$$

因 S 是法向距离, S 应为极小值, 所以把上式对 ψ 求导应等于 0, 即

$$-2(x_p - x_0) \frac{dx_0}{d\psi} - 2(y_p - y_0) \frac{dy_0}{d\psi} = 0$$

把式 (14.4-15) 代入上式, 经整理后得

$$\begin{aligned} & -x_p [(r_p + \Delta r_p) \cos \psi - az_p \cos z_p \psi] + \\ & y_p [(r_p + \Delta r_p) \sin \psi - az_p \sin z_p \psi] + \\ & (r_p + \Delta r_p) az_p \sin(z_p - 1)\psi - \\ & (r_p + \Delta r_p) a \sin(z_p - 1)\psi = 0 \end{aligned}$$

把上式除以 $(r_p + \Delta r_p)$, 并利用 $z_p - 1 = z_c$, $K_{1z} =$

$\frac{az_p}{r_p - \Delta r_p}$ 的关系得

$$\begin{aligned} F(\psi) = & x_p a \sin z_p \psi - x_p (\cos \psi - K_{1z} \cos z_p \psi) + \\ & y_p (\sin \psi - K_{1z} \sin z_p \psi) = 0 \end{aligned} \quad (14.4-18)$$

把上式对 ψ 求导得

$$\begin{aligned} F'(\psi) = & z_p^2 a \cos z_p \psi + x_p (\sin \psi - K_{1z} z_p \sin z_p \psi) + \\ & y_p (\cos \psi - K_{1z} z_p \cos z_p \psi) = 0 \end{aligned}$$

式 (14.4-18) 是一个三角函数超越方程式, 可用牛顿法迭代求得近似解, 其迭代公式为

$$\psi = \psi_0 - \frac{F(\psi_0)}{F'(\psi_0)} \quad (14.4-19)$$

式中 ψ_0 ——初始值, 可取 $\psi_0 = \pi/z_c$ 。

经多次迭代求得的 ψ 值, 使式 (14.4-18) 的值接近于 0 为止

把最后的 ψ 值代入式 (14.4-17), 即可求得 P_2 点的坐标, PP_2 的法向距离 S_2 为

$$S_2 = [(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2]^{\frac{1}{2}}$$

为了寻找 Δr_p 、 Δr_{rp} 使曲线 2 与多个测点相接近, 可把 Δr_p 、 Δr_{rp} 作为变量, 建立起目标函数

$$F(\Delta r_p, \Delta r_{rp}) = \frac{1}{m-j} \sum_{i=1}^m [(x_{pi} - x_i)^2 + (y_{pi} - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (14.4-20)$$

式中 j ——优化计算中, 从 j 点开始计算;

m ——优化计算中, 到 m 点结束计算。

当摆线轮齿廓的齿顶、齿根部分用成形法加工, 或用复合齿形等, 其齿顶、齿根部分不是短幅外摆线的等距曲线。所以, 在优化计算时, 测点的起始和终止点应离开齿根、齿顶处, 即取中间一段的测点进行优化计算, 使曲线 2 与中间一段的测点相符合或很接近。

2. 确立约束条件

(1) 移距修形量 Δr_p 移距修形量的范围一般为 $1 \geq \Delta r_p \geq -2$, 由此得约束条件:

$$g_1(\Delta r_p) = 1 - \Delta r_p \geq 0$$

$$g_2(\Delta r_p) = \Delta r_p + 2 \geq 0$$

(2) 等距修形量 Δr_{rp} 一般 $2 \geq \Delta r_{rp} \geq 0$, 由此得约束条件:

$$g_3(\Delta r_{rp}) = 2 - \Delta r_{rp} \geq 0$$

$$g_4(\Delta r_{rp}) = \Delta r_{rp} \geq 0$$

(3) 不发生齿廓干涉的条件 为了避免在加工过程中发生齿廓变尖、齿廓干涉, 应使摆线轮理论齿廓最小曲率半径的绝对值 $|\rho_{\min}|$ 大于砂轮圆弧半径, 当 $\frac{z_c - 1}{2z_c + 1} \leq K_{1z} < 1$ 时, 应满足

$$\sqrt{\frac{27z_c(1 - K_{1z}^2)}{(z_c + 2)^5}} r_p > r_p - \Delta r_p$$

由此得约束条件:

$$g_5(\Delta r_p) = \sqrt{\frac{27z_c(1 - K_{1z}^2)}{(z_c + 2)^2}} r_p - (r_p + \Delta r_p + 2) \geq 0$$

式中 “+2” 是使摆线轮的最小曲率半径不小于 2mm。

当 $K_{1z} < \frac{z_c - 1}{2z_c + 1}$ 时, 应满足

$$\frac{(1 + K_{1z})^2}{1 + K_{1z} + z_c K_{1z}} r_p > r_p + \Delta r_p$$

由此得约束条件:

$$g_6(\Delta r_p) = \frac{(1 + K_{1z})^2}{1 + K_{1z} + z_c K_{1z}} r_p - (r_p + \Delta r_p + 2) \geq 0$$

(4) 侧隙大于零 侧隙由等距修形量与移距修形量产生的, 并且侧隙大于最小间隙 Δ_{\min} , 即

$$\Delta r_p + \Delta r_{rp} \geq \Delta_{\min}$$

设最小间隙 $\Delta_{\min} = 0.01\text{mm}$, 则约束条件为

$$g_7(\Delta r_p, \Delta r_{rp}) = \Delta r_p + \Delta r_{rp} - 0.01 \geq 0$$

3. 选择优化方法

目标函数只有二维, 采用各种优化方法都适宜。这里选用复合形法, 复合形顶点数取 $K=3$, 取初始映射系数 $a_0=1.3$, 映射系数的最小值 $\delta=10^{-5}$; 为产生初始复合形的顶点给定随机数的界限 $A=-1, B=1$; 迭

代终止精度 $\epsilon=10^{-5}$ 。

【例】测绘一摆线针轮行星减速器，摆线轮齿数 $z_d=43$ ，针轮齿数 $z_p=44$ ，针齿中心圆半径 $r_p=228\text{mm}$ ，针齿套外圆半径 $r_{rp}=13.5\text{mm}$ ，偏心距 $a=4\text{mm}$ ，摆线轮齿廓的实测数据见表 14.4-2，试确定齿廓的修形量。

表 14.4-2 摆线轮齿廓测绘数据

| i | x_i | y_i |
|-----|---------|----------|
| 1 | 0 | 210.3454 |
| 2 | 2.4229 | 210.5560 |
| 3 | 4.5858 | 211.1145 |
| 4 | 6.3488 | 211.8580 |
| 5 | 7.7047 | 212.6356 |
| 6 | 8.7177 | 213.3547 |
| 7 | 9.4584 | 213.9809 |
| 8 | 10.0267 | 214.4974 |
| 9 | 10.4460 | 214.9231 |
| 10 | 10.7647 | 215.2648 |
| 11 | 11.0024 | 215.5390 |
| 12 | 11.1934 | 215.7583 |
| 13 | 11.3440 | 215.9399 |
| 14 | 11.4638 | 216.0747 |
| 15 | 11.5605 | 216.1882 |
| 16 | 11.6395 | 216.2801 |
| 17 | 11.7050 | 216.3554 |
| 18 | 11.7602 | 216.4178 |
| 19 | 11.8078 | 216.4704 |
| 20 | 11.8498 | 216.5159 |
| 21 | 11.8880 | 216.5560 |
| 22 | 11.9238 | 216.5926 |
| 23 | 11.9584 | 216.6268 |
| 24 | 11.9928 | 216.6598 |
| 25 | 12.0280 | 216.6923 |
| 26 | 12.0645 | 216.7250 |
| 27 | 12.1032 | 216.7582 |
| 28 | 12.1446 | 216.7924 |
| 29 | 12.1892 | 216.8278 |
| 30 | 12.2373 | 216.8646 |

(续)

| i | x_i | y_i |
|-----|---------|----------|
| 31 | 12.2895 | 216.9027 |
| 32 | 12.3459 | 216.9422 |
| 33 | 12.4069 | 216.9829 |
| 34 | 12.4726 | 217.0248 |
| 35 | 12.5433 | 217.0678 |
| 36 | 12.6191 | 217.1116 |
| 37 | 12.7000 | 217.1561 |
| 38 | 12.7862 | 217.2009 |
| 39 | 12.8778 | 217.2461 |
| 40 | 12.9745 | 217.2909 |
| 41 | 13.0765 | 217.3355 |
| 42 | 13.1836 | 217.3794 |
| 43 | 13.2959 | 217.4225 |
| 44 | 13.4129 | 217.4642 |
| 45 | 13.5349 | 217.5046 |
| 46 | 13.6615 | 217.5432 |
| 47 | 13.7925 | 217.5799 |
| 48 | 13.9277 | 217.6143 |
| 49 | 14.0669 | 217.6463 |
| 50 | 14.2098 | 217.6755 |
| 51 | 14.3561 | 217.7019 |
| 52 | 14.5056 | 217.7252 |
| 53 | 14.6579 | 217.7452 |
| 54 | 14.8128 | 217.7618 |
| 55 | 14.9699 | 217.7748 |
| 56 | 15.1288 | 217.7842 |
| 57 | 15.2892 | 217.7898 |
| 58 | 15.4508 | 217.7916 |
| 59 | 15.6132 | 217.7895 |
| 60 | 15.7760 | 217.7835 |

用上述方法解得，移距修形量 $\Delta r_p=0.0375\text{mm}$ ，等距修形量 $\Delta r_{rp}=0.1818\text{mm}$ ， $F=0.00192$ 。即取移距修形量 $\Delta r_p=0.0375\text{mm}$ ，等距修形量 $\Delta r_{rp}=0.1818\text{mm}$ 的齿廓曲线与所测齿廓的平均误差为 $F=0.00192\text{mm}$ 。

参考文献

- 1 机修手册编写组. 机修手册: 第1卷: 设备修理设计(下册). 第3版. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 2 孙正玺. 齿轮测绘与设计资料汇编. 北京: 技术标准出版社, 1981
- 3 胡丽华, 郎全栋. 汽车齿轮与花键测绘. 北京: 人民交通出版社,
- 4 成熙治, 刘法权. 蜗轮蜗杆测量. 北京: 中国计量出版社
- 5 王树人, 刘平娟. 圆柱蜗杆传动啮合原理. 天津: 天津科学技术出版社, 1982
- 6 杜厚金, 江有渝. 平面二次包络环面蜗杆传动制造工艺. 成都: 四川科学技术出版社, 1988
- 7 郑州机械研究所分度蜗轮课题组. 精密传动机构中包络蜗杆传动副的应用. 齿轮, 1988(4)
- 8 会田俊夫等. 齿轮的设计和制造第3卷: 圆锥齿轮与蜗轮. 金公望, 马雯瑾译. 北京: 中国农业机械出版社, 1984
- 9 杨兰春. 圆弧齿圆柱蜗杆传动. 太原: 山西人民出版社, 1984
- 10 郑州工学院. 摆线针轮行星传动. 北京: 科学出版社, 1978
- 11 赵若采, 陈顺爱. 摆线针轮行星减速机摆线轮一次成形的研究. 机械传动, 1996(3)