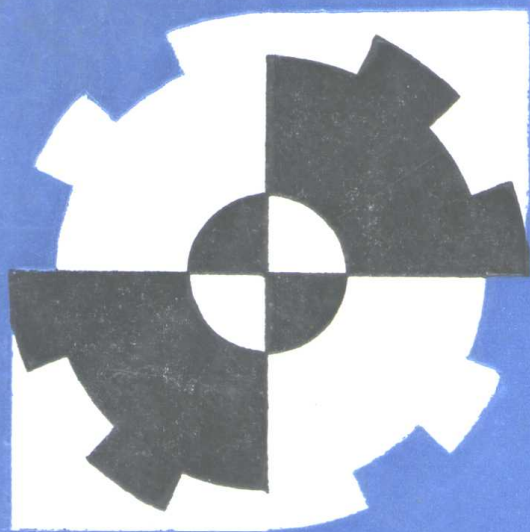


齿轮精度标准与检验手册

吴昭同 张 鄂 蒋承蔚 编



中国计量出版社

齿轮精度标准与检验手册

吴昭同 张 鄂 蒋承蔚 编

中国计量出版社

新登(京)字024号

内 容 提 要

本手册完整地介绍了中小模数渐开线圆柱齿轮精度、中小模数锥齿轮精度、中小模数圆柱蜗杆蜗轮精度,以及齿条精度等国家标准及应用,并列出了齿轮加工误差与检验参数的理论知识,以及ISO齿轮精度检验标准。此外,还详尽地介绍了齿轮传动链精度计算和ISO滚齿机精度验收等国际先进标准。

本手册内容着重提供便于选择的经验资料和示范应用实例,可供从事齿轮传动设计、制造和检测的工程技术人员使用,也可供大专院校师生参考。

齿轮精度标准与检验手册

吴昭同 张 鄂 蒋承蔚 编

责任编辑 刘瑞清

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号(100013)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 787×1092/16 印张 20.25 字数 493千字

1994年2月第1版 1994年2月第1次印刷

印数 1—6 000

ISBN 7-5026-0631-9/TH·15

定价 19.80 元

版权所有 翻版必究

前 言

齿轮传动广泛应用于飞速发展的机械工业、国防工业和尖端技术的机电产品中，其精度与检验标准是机械工业重要的基础标准。为此，特编辑一本较为完全的、实用的齿轮精度标准与检验手册，以满足广大工程技术人员需要。

近年来，国家技术监督局陆续颁布了中、小模数渐开线圆柱齿轮精度、锥齿轮和双曲线齿轮精度，以及圆柱蜗杆、蜗轮精度等国家标准，对于我国齿轮传动的设计、制造和质量的提高起着重要的作用。这些中、小模数齿轮精度标准，以及齿轮制造误差理论基础知识和ISO齿轮精度检验标准等，着重提供便于选择的经验资料和示范应用实例，首次较为完整的、系统的收集编辑在同一手册内。再者，在齿轮传动精度与检验标准系列中，目前国外已出现了ISO滚齿机精度验收和传动链精度计算等先进标准，鉴于我国这些同类标准尚未制订或有待修订，故在本手册中亦予以介绍，以供参考和借鉴。

本手册共12章，分为两部分。

第一部分包括齿轮加工误差与检验参数，渐开线圆柱齿轮精度，小模数渐开线圆柱齿轮精度，圆柱齿轮精度检验，锥齿轮和准双曲面齿轮精度，小模数锥齿轮精度，圆柱蜗杆蜗轮精度，小模数圆柱蜗杆蜗轮精度，齿条精度。以上主要介绍齿轮加工误差和各类齿轮的精度标准选用实例。第二部分包括齿轮传动精度的确定与计算，齿轮传动链精度计算，滚齿机精度验收条件。以上主要介绍齿轮传动链精度计算方法及与之相关的滚齿机精度验收标准。本手册第五、七、九章由浙江大学蒋承蔚老师编写，第三、六、八、十一章由上海交通大学张鄂教授编写，第一、四、十、十二章由浙江大学吴昭同教授编写，以及第二章由蒋承蔚、吴昭同编写。全书由吴昭同、张鄂通稿。

由于作者水平所限，错误与未尽之处望读者批评指正。

编 者

1992年10月

目 录

前言

第一章 齿轮加工误差与检验参数 (1)

- 1 齿轮加工误差 (1)
- 2 齿轮误差的检验参数 (19)

第二章 渐开线圆柱齿轮精度 (32)

- 1 适用范围 (32)
- 2 齿轮、齿轮副误差及侧隙的定义和代号 (32)
- 3 精度等级及其选用 (32)
- 4 齿坯要求 (32)
- 5 齿轮检验与公差及检验组的选择 (41)
- 6 齿轮副的检验与公差 (55)
- 7 齿轮副侧隙的规定及计算 (57)
- 8 图样标注 (60)
- 9 应用示例 (60)
- 附录 A 齿轮公差关系式与计算式 (64)

第三章 小模数渐开线圆柱齿轮精度 (66)

- 1 适用范围 (66)
- 2 定义及代号 (66)
- 3 精度等级 (66)
- 4 齿坯要求 (66)
- 5 公差与检验 (74)
- 6 侧隙 (74)
- 7 图样标注 (105)
- 附录 公差或极限偏差计算式及公比 (106)

第四章 渐开线圆柱齿轮精度检验 (108)

- 1 范围 (108)
- 2 相关标准 (108)
- 3 术语和代号 (109)
- 4 齿轮检测范围 (110)
- 5 偏差位置的识别 (110)
- 6 齿距偏差和齿距累积误差的检测 (111)
- 7 齿形误差检测 (117)
- 8 齿向误差检测 (121)
- 9 切向综合误差检测 (124)

第五章 锥齿轮和准双曲面齿轮精度 (131)

- 1 适用范围 (131)

2 锥齿轮 (准双曲面齿轮)、齿轮副误差及侧隙的定义和代号	(131)
3 精度等级	(131)
4 齿坯要求	(133)
5 齿轮的检验与公差	(142)
6 齿轮副的检验与公差	(148)
7 齿轮副侧隙的规定和计算	(158)
8 图样标注	(158)
9 应用举例	(164)
附录 A 齿轮公差关系式与计算式	(168)
第六章 小模数锥齿轮精度	(168)
1 适用范围	(168)
2 定义及代号	(168)
3 精度等级	(168)
4 齿坯要求	(168)
5 公差与检验	(168)
6 侧隙	(179)
7 图样标注	(181)
附录 公差或极限偏差计算式及公比	(184)
第七章 圆柱蜗杆、蜗轮精度	(187)
1 适用范围	(187)
2 蜗杆、蜗轮的误差及传动和侧隙的定义和代号	(187)
3 精度等级及其选用	(187)
4 齿坯要求	(199)
5 蜗杆、蜗轮的检验与公差	(199)
6 蜗杆副的检验与公差	(208)
7 蜗杆传动的侧隙规定与计算	(208)
8 图样标注	(218)
9 应用举例	(219)
第八章 小模数圆柱蜗杆、蜗轮精度	(224)
1 适用范围	(224)
2 定义及代号	(224)
3 精度等级	(224)
4 公差与检验	(224)
5 侧隙	(236)
6 图样标注	(236)
附录 蜗杆、蜗轮公差或极限偏差计算式及公比	(242)
第九章 齿条精度	(245)
1 适用范围	(245)
2 齿条、齿条副的误差及侧隙的定义和代号	(245)
3 精度等级	(245)
4 齿坯要求	(245)
5 齿条公差与检验	(245)

6 齿条副的公差与检验	(252)
7 侧隙	(253)
8 图样标注	(253)
第十章 齿轮及齿轮传动精度的确定与计算	(256)
1 齿轮精度等级及结合形式确定方法	(256)
2 齿轮传动精度计算的基本原理	(257)
3 传动链精度的计算方法	(259)
第十一章 齿轮传动链精度计算	(272)
1 传动链精度计算方法 (ГОСТ 21098—82)	(273)
2 小模数渐开线圆柱齿轮传动链精度计算方法 (SJ 2557—84)	(287)
第十二章 滚齿机验收条件——精度检验 ISO/DIS 6545.2	(294)
1 使用范围	(294)
2 相关标准	(294)
3 几点说明	(294)
4 名称术语	(294)
5 符号	(294)
6 几何精度检验	(308)
7 运动精度检验	(308)
8 切齿试验	(310)
参考文献	(316)

第一章 齿轮加工误差与检验参数

1 齿轮加工误差

齿轮传动的力、运动、误差的传递是沿着一对工作齿的啮合线方向进行的，因此齿轮的转角误差可以归结到齿轮传动的啮合线上计量。当具有转角误差的齿轮与理想精确的测量齿条作单面啮合，啮合误差可看成啮合点在该瞬时沿啮合线方向移动了一个附加距离，该附加距离称啮合线增量 ΔF （减量即为负增量）。左、右齿面啮合线增量用 ΔF_L 、 ΔF_R 表示（图 1—1 a）。单面啮合检验时，切向综合误差 $\Delta F_i'$ （以分度圆弧长计）和啮合线增量 ΔF （以基圆弧长计）有以下关系：

$$\Delta F = \Delta F_i' \cos \alpha \quad (1-1)$$

图示啮合线箭头方向为正，逆方向为负。

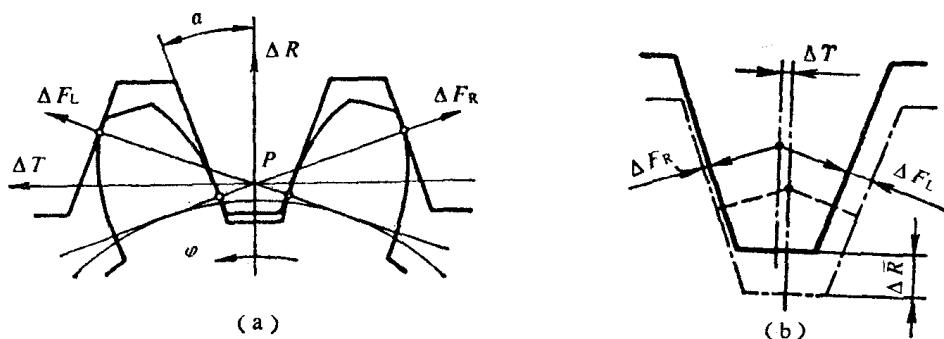


图 1—1 齿轮误差计量系统

如齿轮与理想精确的测量齿条作双面啮合，当齿轮齿廓有误差时齿条即从理论位置偏移至虚线实际位置（图 1—1 b），其径向位移 ΔR 和单面啮合啮合线增量 ΔF 的关系为

$$\Delta R = \frac{\Delta F_L + \Delta F_R}{2 \sin \alpha} \quad (1-2)$$

双面啮合齿条切向位移 ΔT 为

$$\Delta T = \frac{\Delta F_L - \Delta F_R}{2 \cos \alpha} \quad (1-3)$$

式中 α ——齿形角。

齿轮加工误差有 4 种形式（图 1—2）：

- ①径向加工误差；②切向加工误差；③轴向加工误差；④产形面误差。

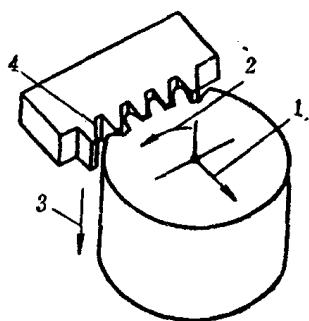


图 1—2 切齿时 4 种误差形式

1.1 径向加工误差

被切齿轮和刀具间径向距离的变化，如齿坯在机床上定位误差、刀具的径向跳动等，都

会引起齿轮的径向加工误差。该误差在齿轮任一轴向截面上是常值。

1.1.1 齿轮几何偏心

由于齿坯在机床上定位误差（如定位心轴的跳动或与齿坯基准孔的配合间隙、基准轴线与校准圆轴线的重合等），引起齿坯基准轴线与工作台回转轴线不重合，因此产生齿轮几何偏心 e_r 。图 1—3 所示为被切齿轮与理想精确的测量齿条作单面啮合测量，该回转矢量 e_r 引起齿轮啮合线增量 $\Delta_r F$ 为

$$\Delta_r F = \pm e_r \sin(\varphi \pm \alpha) \quad (1-4)$$

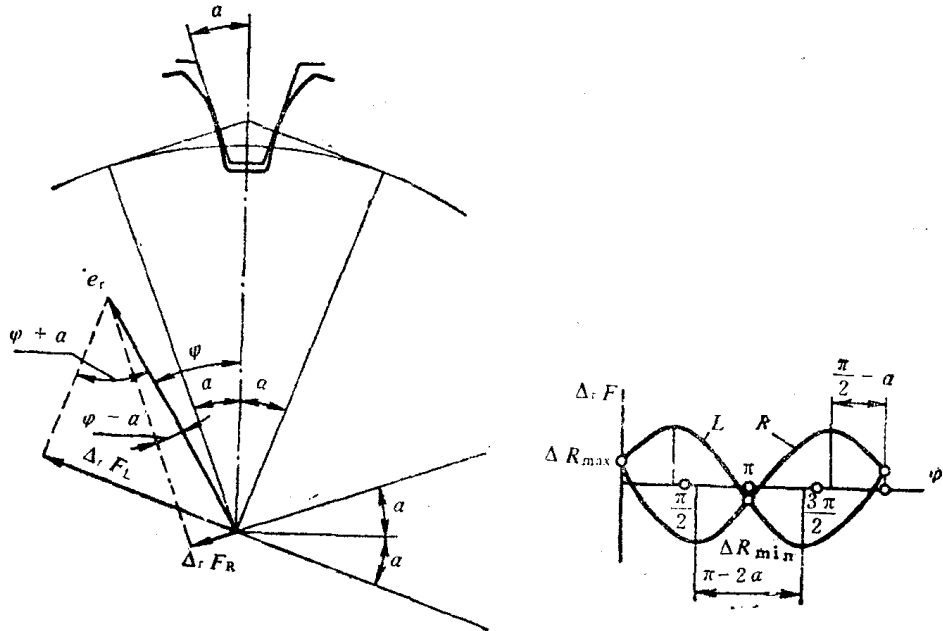


图 1—3 几何偏心引起的齿轮啮合线增量

式中 φ ——齿轮回转角（正负号表示左右齿面）。

该项误差以齿轮一转为周期，其齿圈对加工回转中心无偏心误差，而对基准轴线有基圆偏心。

1.1.2 刀具径向跳动

刀具径向跳动引起齿轮误差 见 1.3。

1.2 切向加工误差

齿轮切向加工误差的产生，对于展成法工作的机床是由于刀具和齿坯间展成运动的破坏，对于有分度机构的机床是由于分度误差。机床传动链各环节误差，主要是最终的分度蜗轮副误差，或机床分度盘和展成链中进给丝杆的误差。它是产生切向加工误差的源。切向误差沿齿轮每条接触线是常值。

1.2.1 连续展成法的切向加工误差

(1) 齿轮运动偏心

连续展成法（滚、插、蜗杆砂轮磨等）切齿时，机床分度蜗轮的偏心误差使工作台相对于刀具作周期性不均匀回转，引起齿轮运动偏心。图 1—4 所示为滚齿时假定滚刀恒速回转，其水平线速度为常值 v 。当工作台有大或小的滚切角速度 ω 或 $\omega - \Delta\omega$ 时，其切削时啮

合节点为 P_1 或 P_2 ，瞬时发生基圆半径为 r_{b1} 或 r_{b2} ，形成的齿形为 1 或 2。此时齿形 2 比 1 有较大的曲率半径、较大的基圆半径，相当于有基圆偏心，即运动偏心 e_k 。此时刀具与齿轮间径向距离无变化，而刀具相对齿轮中心产生切向位移，同一角位置上左右齿面两点误差值相等，而符号相反。图 1—4 所示为被切齿轮与理想精确测量齿条作单面啮合测量，由运动偏心引起的啮合线增量 $\Delta_k F$ 是以齿轮一转作为周期的误差：

$$\Delta_k F = \pm e_k \sin(\varphi + \psi_k) \quad (1-5)$$

式中 e_k ——由机床分度蜗轮偏心 e_2 引起的齿

$$\text{轮运动偏心: } e_k = e_2 \cdot \frac{r_b}{r_2} = \frac{\Delta\varphi_2 \cdot r_b}{206} (\mu\text{m});$$

r_b ——齿轮基圆半径 (mm);

r_2 ——机床分度蜗轮的分度圆半径 (mm);

$\Delta\varphi_2$ ——机床分度蜗轮最大转角误差之半 (角秒);

ψ_k ——运动偏心对几何偏心的相位差。

式中，+、- 号表示左、右齿面。此时，左右齿面的最大误差值的相位差为 π 。

(2) 几何偏心和运动偏心的综合

齿轮上同时存在相同周期的几何偏心与运动偏心，其合成误差是综合偏心 e_z ，引起左右齿面啮合线增量 $\Delta_z F$ 为

$$\Delta_z F = \pm e_z \sin(\varphi + \beta_z) \quad (1-6)$$

$$\text{式中 } e_z = \sqrt{e_r^2 + e_k^2 + 2e_re_k \cos(\psi_k + \alpha)},$$

$$\beta_z \text{——综合偏心向量对几何偏心向量的相位差: } \tan \beta_z = \frac{\pm e_r \sin \alpha + e_k \sin \psi_k}{e_r \cos \alpha + e_k \cos \psi_k}.$$

式中，正负符号表示左右齿面。

①左右齿面上两综合偏心相等 ($e_{zL} = e_{zR}$) 的条件为 $\cos(\psi_k - \alpha) = \cos(\psi_k + \alpha)$ 。但由于 $\alpha \neq 0^\circ$ ，因此只有在 $\psi_k = 0^\circ$ 或 $\psi_k = \pi$ 时才有可能。

②沿左面啮合线上综合偏心等于零 ($e_{zL} = 0$) 的条件为 $\psi_k - \alpha = \pi$ 及 $e_r = e_k$ (图 1—5 a)。

③沿右面啮合线上综合偏心等于零 ($e_{zR} = 0$) 的条件为 $\psi_k + \alpha = \pi$ 及 $e_r = e_k$ (图 1—5 b)。

④切齿时引入预知量的几何偏心，可在左右面上同时补偿运动偏心。补偿是在 $\psi_k = \pi$ ， $e_{zL} = e_{zR}$ 时进行 (图 1—5 c) 的。设引入的几何偏心为

$$e_r = Ke_k \quad (1-7)$$

按式 (1-6) 中 e_z 的表达式可得：

$$e_{zL} = e_{zR} = e_k \sqrt{K^2 + 1 - 2K \cos \alpha}$$

对上式求导数，并使之等于零，可得 e_z 为最小值的条件：

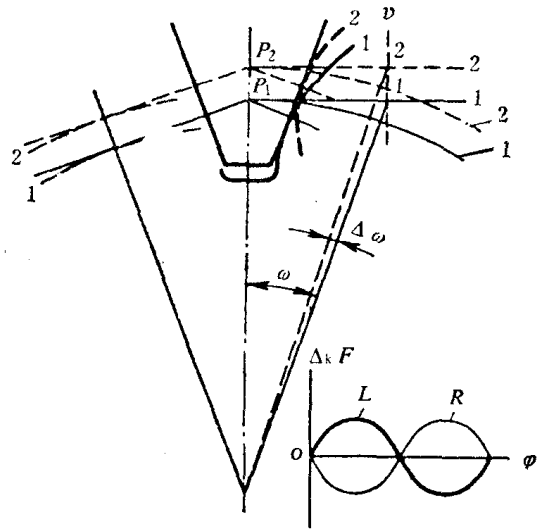


图 1—4 机床分度蜗轮偏心引起的齿轮啮合线增量

$$K = \cos \alpha$$

当 $\alpha = 20^\circ$ 时, 得:

$$e_{\Sigma L} = e_{\Sigma R} = 0.34 e_k$$

(1-8)

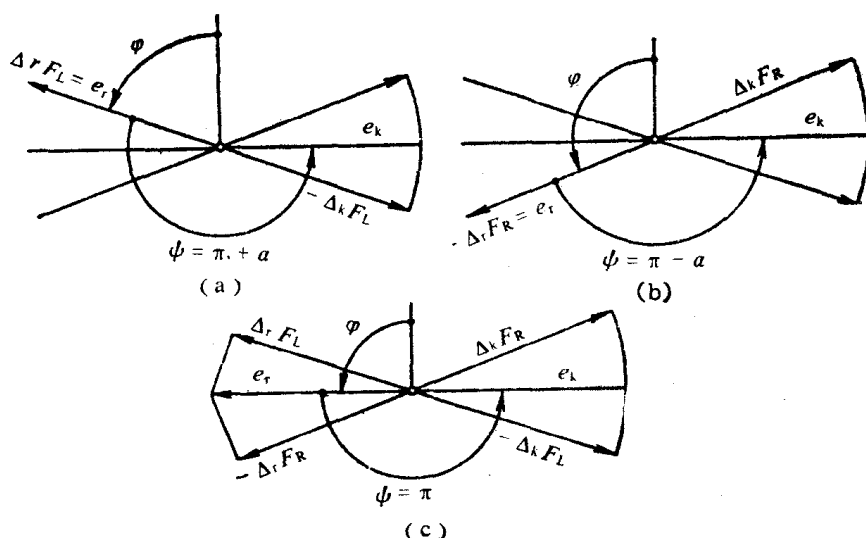


图 1-5 几何偏心和运动偏心的补偿

因此, 在齿轮切制或工作时引入预加的几何偏心 (安装偏心) $e_r = e_k \cos \alpha$, 可有三分之二的机床误差得到补偿。

(3) 机床工作台的摆动

在大型切齿机上, 常具有机床工作台沿着与机床纵向平面成 ψ_0 角的平面上作周期摆动的特性。该周期误差不是回转矢量, 而是工作台中心在该平面上以工作台一转作为周期的位移变化量; $e_3 \sin(\varphi + \psi_3)$ 。工作台摆动在啮合线上的增量可表示为 (图 1-6):

$$\Delta_3 F = \pm e_3 \sin(\varphi + \psi_3) \sin(\psi_0 \pm \alpha) \quad (1-9)$$

式中 e_3 ——工作台摆动量之半;

ψ_3 ——工作台摆动影响相对几何偏心的相位差, 式中 $\pm$ 号表示左右啮合线。

机床工作台摆动引起被切齿轮双面啮合时测量齿条的径向位移由式 (1-2) 与 (1-9) 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{e_3 \sin(\varphi + \psi_3)}{2 \sin \alpha} [\sin(\psi_0 + \alpha) - \sin(\psi_0 - \alpha)] \\ &= e_3 \sin(\varphi + \psi_3) \cos \psi_0 \end{aligned} \quad (1-10)$$

图 1-6 机床工作台摆动引起的误差

引起测量齿条的切向位移由式 (1-3) 与 (1-9) 可表示为

$$\Delta T = e_s \sin(\varphi + \psi_s) \sin \psi_0 \quad (1-11)$$

在 $\psi_0 = \pi/2$ 的特殊情况下 (即摆动平面和机床横向平面重合), 工作台摆动不引起被切齿轮双面啮合时测量齿条的径向位移 ($\Delta R = 0$), 而只有引起切向位移的运动偏心。

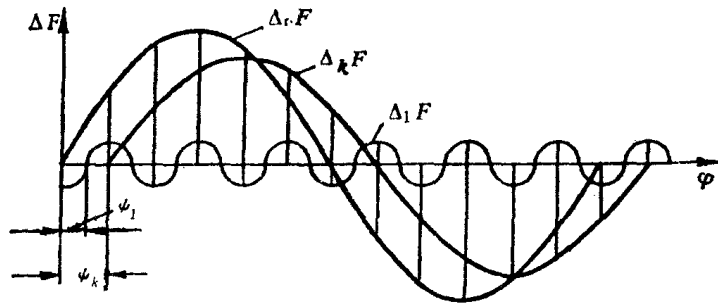


图 1-7 机床分度蜗杆副引起的周期误差

(4) 分度蜗杆周期误差

机床分度蜗杆的径向、轴向跳动和安装误差, 切削分度蜗轮时的刀具跳动等引起切齿时在分度蜗轮一转中多次重复出现的周期性回转角变化, 使被切齿轮产生频率为 Z_2/Z_1 (如只考虑以蜗杆一转为周期的基波分量) 的周期误差 (图 1-7)。齿轮上啮合线增量为

$$\Delta_1 F = \pm e_1 \left[\sin \left(\varphi \frac{Z_2}{Z_1} + \psi_1 \right) \right] \frac{r}{r_2} \quad (1-12)$$

式中 e_1 ——分度蜗杆一转基波误差的振幅;

Z_2 ——机床分度蜗轮齿数;

Z_1 ——分度蜗杆头数;

ψ_1 ——蜗杆偏心影响相对几何偏心的相位差;

r 与 r_2 ——被切齿轮及分度蜗轮的半径。

式中, $\pm$ 号表示左右齿面。

在滚切宽斜齿轮时, 该误差在各齿侧表面上形成与工件轴线平行分布的条纹 (图 1-8a); 在同一齿面上产生的齿面波度, 其波峰或波谷是沿着接触线分布的, 而不破坏接触线的直线性 (图 1-8b)。对于直齿轮, 形成的波纹, 其波峰或波谷是沿着齿向线分布的。

分度蜗杆误差在被切齿轮上形成的最大周期误差是有一定极限的, 它取决于该误差的频率。如果周期误差的周期为 φ_1 , 在 φ_1 内 A、B = 边缘切刃切削形成齿面棱形度高度为 ΔF_1 。若由分度蜗杆产生较大周期误差, 它并不保留在工件上, 而被 A、B 二切刃切去 (图 1-8c)。当分度蜗轮齿数增加一倍即周期角 φ_2 减少为一半时, 则齿轮的最大可能周期误差 ΔF_2 减少为 $1/4 (\Delta F_2 = \frac{1}{4} \Delta F_1)$ 。齿轮上最大周期误差可用下面近似式表示 (角秒),

$$\Delta \varphi_{max} \approx \frac{151200}{K_k^2} \quad (\text{秒}) \quad (1-13)$$

式中, K_k 表示齿轮上的周期误差频率, 可等于:

$$K_k = Z_2 \pm mkZ \quad (1-14)$$

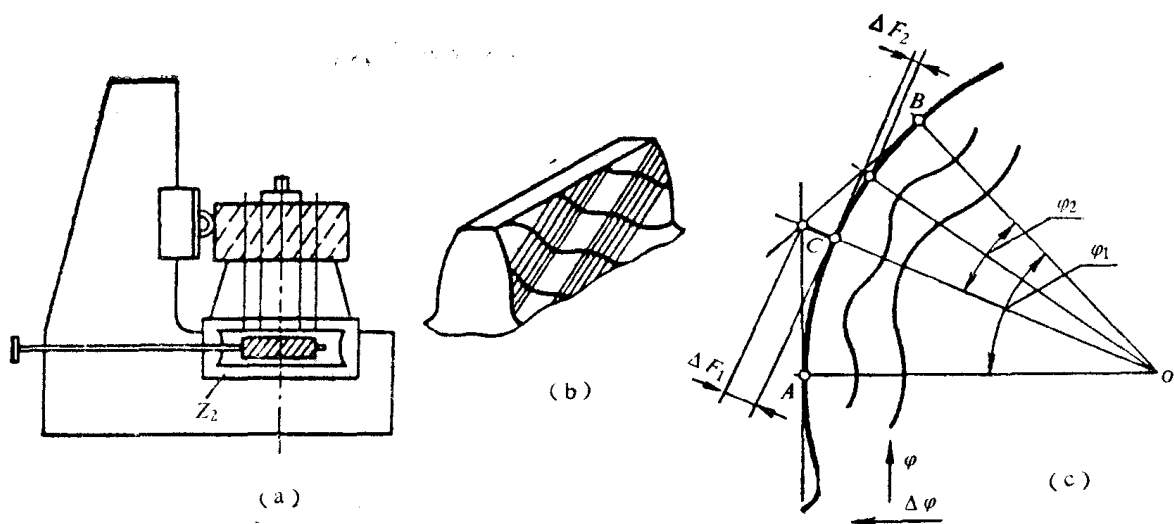


图 1—8 滚削齿轮表面波纹

(或 $K_k = |Z_2 - mkZ|_{\min}$)

决定 K_k 时, 必需满足下面条件:

$$Z_2 \geq K_k < \frac{kZ}{2} \quad (1-15)$$

式中 m ——任意正整数或零;

k ——滚刀槽数;

Z_2 ——分度蜗轮齿数 (此时假定 $Z_1 = 1$);

Z ——被切齿轮齿数。

对于滚刀多槽数 (蜗杆砂轮磨齿时 $k = \infty$) 或分度蜗轮多齿数时, $K_k = Z_2$ 。

〔例 1〕当 $Z_2 = 84$, $k = 10$, $Z = 20$, 则齿轮上周期误差频率:

$$K_k = |84 \pm 10 \times 20| = \begin{vmatrix} 284 \\ 116 \end{vmatrix}$$

必需满足:

$$84 \geq K_k < 100$$

因此, $K_k = Z_2 = 84$ 及 $\Delta\varphi_{\max} = \frac{151\,200}{84^2} \approx 22''$ 。

〔例 2〕当 $Z_2 = 210$, $k = 10$, $Z = 20$, 则

$$K_k = |210 \pm 200| = 10 \text{ 及 } \Delta\varphi_{\max} = \frac{151\,200}{10^2} \approx 1512''$$

〔例 3〕当 $Z_2 = 210$, $k = 10$, $Z = 60$, 则

$$K_k = |210 \pm 600| = \begin{vmatrix} 810 \\ 390 \end{vmatrix}$$

因为

$$210 \geq K_k < 300$$

$$\text{所以 } K_k = 210 \text{ 及 } \Delta\varphi_{m, \lambda} = \frac{151200}{210^2} \approx 3.4''.$$

因此, 增加被切齿轮与机床分度蜗轮齿数会降低在齿轮上形成的周期误差频率和可能的最大周期误差值。后者已成为提高齿轮加工精度的一种途径, 如英国在 1954 年 BSS 1498 中规定:

卧式齿轮机床:

$$Z_2 \geq 285\sqrt{d_2} \quad (1-16)$$

立式齿轮机床:

$$Z_2 \geq 380\sqrt{d_2} \quad (1-17)$$

式中 d_2 ——分度蜗轮直径。

(5) 中间齿轮周期误差

由机床展成传动链任一中间齿轮综合偏心误差影响而产生的被切齿轮误差可表示为

$$\Delta_n F = \pm e_n i_{zn} \frac{r}{r_n} \sin(i_{nz}\varphi + \psi_n) \quad (1-18)$$

式中 e_n ——第 n 个中间齿轮的综合偏心量;

i_{zn} ——从被切齿轮到该中间齿轮间的传动比, $i_{nz} = 1/i_{zn}$;

ψ_n ——中间齿轮的偏心向量与几何偏心向量的相位角;

r 及 r_n ——被切齿轮与中间齿轮的半径。

在被切齿轮上, 由于中间齿轮误差基波分量影响, 所产生的误差频率为 $i_{nz} (= 1/i_{zn})$ 。当分度蜗轮副的减速比很大时, 其传动比 i_{zn} 极小 (0.01 到 0.001), 故中间齿轮误差对被切齿轮的精度影响较小。当分度蜗轮副的减速比小时, 传动比增至 0.03~0.05, 此时中间齿轮误差就产生一定的影响。

1.2.2 不连续展成法的切向加工误差

一般磨齿采用不连续展成法加工, 其机床的分度机构可分为参与展成运动和不参与展成运动两种。

(1) 不连续分度展成法磨齿

如 Y 7131 型、纳利斯型磨齿机, 其分度机构参与展成运动, 机床分度蜗轮副所形成的切向加工误差与连续展成法切齿相仿。被切齿轮的基节偏差不受分度蜗轮副精度的影响, 而仅受丝杆误差和砂轮形状误差的影响。如图 1—9 所示, 齿轮相邻齿上基圆齿距两端点 A' 与 B' 是置在机床工作台面一角位置上磨制的, 故不受机床分度蜗轮副的影响。同时该两点是在丝杆不同送进位置 O_1 、 O_2 (工作台中心) 处磨制的, 故基节偏差受丝杆误差的影响, 亦受砂轮轮廓角误差的影响。显然, 齿轮齿形误差是受机床分度蜗轮副、丝杆和砂轮形状等误差的影响。

(2) 单独分度展成法磨齿

如卧式马格型、柯里勃型磨齿机, 其单独分度机构不参与展成运动。分度盘或分度蜗轮的齿距累积误差直接形成被切齿轮的切向综合误差和一齿综合误差, 其曲线具有阶梯形的特征 (图 1—10)。由分度误差引起的齿轮周节偏差亦直接影响基节偏差,

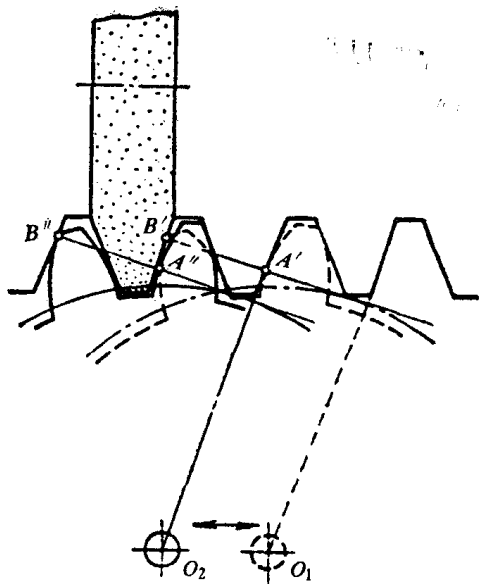


图 1—9 磨削相邻齿基节两端点时齿轮在机床上的位置

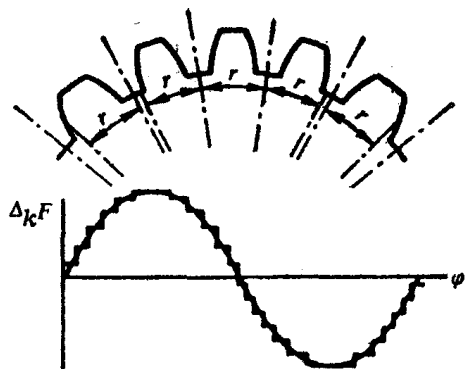


图 1—10 磨削切向综合误差曲线阶梯形特征

$$\Delta f_{pb} = \Delta f_{pb, cp} + \Delta f_{pt} \cos \alpha \quad (1-19)$$

式中 $\Delta f_{pb, cp} = \Delta f_{pb, cp} = \sum \Delta f_{pb} / Z$, 由齿形误差引起的平均基节偏差, 一般是由砂轮齿形角误差引起的;

Δf_{pt} ——周节偏差, 即周节对实际周节平均值的偏差。

1.2.3 自由展成法的切向加工误差

自由展成法加工齿轮时, 工件与刀具之间无强制的运动联系, 其中之一是主动件, 另一是从动件。剃齿、滚剃、研齿、珩齿及热轧齿轮皆属于此法, 研究精度时, 可以下面两个条件出发:

① 刀具与被切齿轮间中心距保持不变;

② 沿左右啮合线上切去金属而引起的作用力是相等的, 即左右面除去金属余量应相等。

以剃齿为例, 按第一个条件, 工序的终结时刻左右啮合线增量在中心连线上投影之和等于零 (图 1—11);

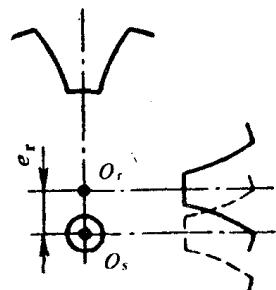
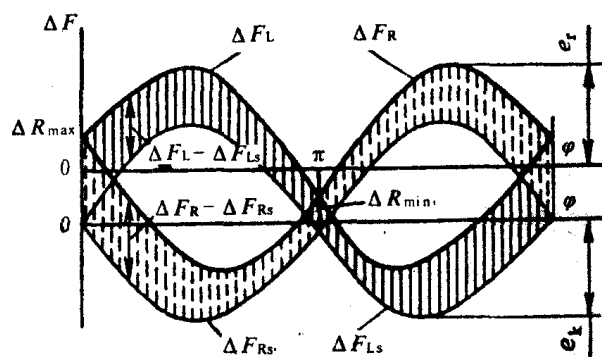


图 1—11 剃齿时几何偏心转变为运动偏心

$$\Delta R = \frac{\Delta F_{Ls} + \Delta F_{Rs}}{2 \sin \alpha} = 0 \quad (1-20)$$

式中 ΔR ——剃齿后齿廓的径向位移;

ΔF_{Ls} 、 ΔF_{Rs} ——剃齿后齿轮左右啮合线增量。

第二个条件表明左右齿面在剃齿前后的啮合线增量之差应相等;

$$\Delta F_L - \Delta F_{Ls} = \Delta F_R - \Delta F_{Rs} \quad (1-21)$$

由式 (1—20)、(1—21) 可得:

$$\Delta F_{Rs} = -\Delta F_{Ls} = \frac{\Delta F_R - \Delta F_L}{2} \quad (1-22)$$

(1) 如果在剃齿前齿轮仅具有几何偏心, 则将式 (1—4) 代入上式可得:

$$\Delta F_{Ls} = \frac{e_r}{2} [\sin(\varphi + \alpha) + \sin(\varphi - \alpha)] = e_r \cos \alpha \sin \varphi \quad (1-23)$$

$$\Delta F_{Rs} = -e_r \cos \alpha \sin \varphi$$

由上式可知, 有几何偏心的齿轮在剃齿后其左右齿面出现与运动偏心一样彼此大小相等方向相反的误差。因此, 齿轮的这种自由光整加工方法能使几何偏心转变为运动偏心。这种加工方法不能改善而只会增大齿轮运动偏心, 但能修正径向跳动误差, 改善基节偏差和齿形误差。如果剃齿时采用不同于剃前切齿时的啮合角, 则剃齿还会减小由机床传动链误差引起的周期误差。

(2) 如果剃齿前是插齿工序, 则插齿刀的几何偏心所引起的齿轮误差在剃后会转变为工件的运动偏心。将式 (1—47) 代入式 (1—23) 得剃齿后齿轮左齿面啮合线增量为

$$\begin{aligned} \Delta F_{Ls} &= \frac{-e_{or}}{2} \left[\sin\left(\varphi - \frac{Z}{Z_0} + \alpha + \psi_{or}\right) + \sin\left(\varphi - \frac{Z}{Z_0} - \alpha + \psi_{or}\right) \right] \\ &= -e_{or} \sin\left(\varphi - \frac{Z}{Z_0} + \psi_{or}\right) \cos \alpha \end{aligned} \quad (1-24)$$

右齿面啮合线增量为

$$\Delta F_{Rs} = e_{or} \sin\left(\varphi - \frac{Z}{Z_0} + \psi_{or}\right) \cos \alpha \quad (1-25)$$

由上式可知, 齿轮左、右啮合线增量大小相等, 而方向相反, 这种误差属运动偏心性质。

(3) 自由光整加工 (剃, 研等) 刀具本身的几何偏心, 当刀具齿数等于工件齿数时, 会引起工件的运动偏心; 当二者齿数不等和非整数比时, 则不会影响工件精度。刀具本身的运动偏心是不影响工件精度的。

1.3 产形面误差

刀具产形面误差是由于刀具产形面采用近似造形, 或由于它的制造和刃磨误差而产生的。此外, 还由于刀具的有限个刃口数和进给使切削过程的不连续而产生齿面的不精确。刀具产形面偏离精确表面的所有形状误差, 形成工件的齿形误差, 切削斜齿轮时还会引起接触线误差。

刀具产形面的齿形角误差引起工件的基节偏差和接触线方向误差, 导致直齿轮的工作不平稳, 并破坏直、斜齿轮的齿高接触。

1.3.1 滚刀的产形面误差

引起滚刀产形面误差的原因有: 滚齿方法的固有误差、滚刀的制造和刃磨误差以及滚刀在机床上的安装误差。

(1) 滚齿方法的固有误差

滚齿方法的固有误差包括：由于滚刀齿形不符合基本渐开线蜗杆及采用侧面径向铲削而产生的齿形误差；由于滚刀刀刃数有限而形成端面齿形棱形度；由于轴向进给而形成齿侧面不平度。这里主要介绍后两项误差。

①滚削齿形的形成过程是断续的，因此其端面齿形是由包络成理论渐开线的一些折线所组成，折线线段的数目等于 $\varepsilon_a Z_k / Z$ 。折线角顶与理论渐开线间沿渐开线法线计量的距离称棱形度（图 1—12）。棱形度 y 可按下式计算：

$$y = \frac{\rho_x}{\cos \psi/2} - \rho_x \quad (1-26)$$

式中 ρ_x ——渐开线曲率半径， $\rho_x = r_b \tan \alpha_x$ ；
 ψ ——两相邻包络切刃间的齿轮回转

角， $\psi = \frac{2\pi Z_0}{ZZ_k}$ ，实际上一

般 $\psi \leq 0.035$ ；

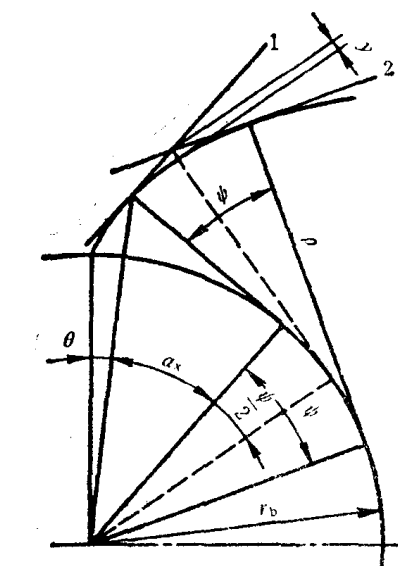


图 1—12 滚齿端截面上的棱形度

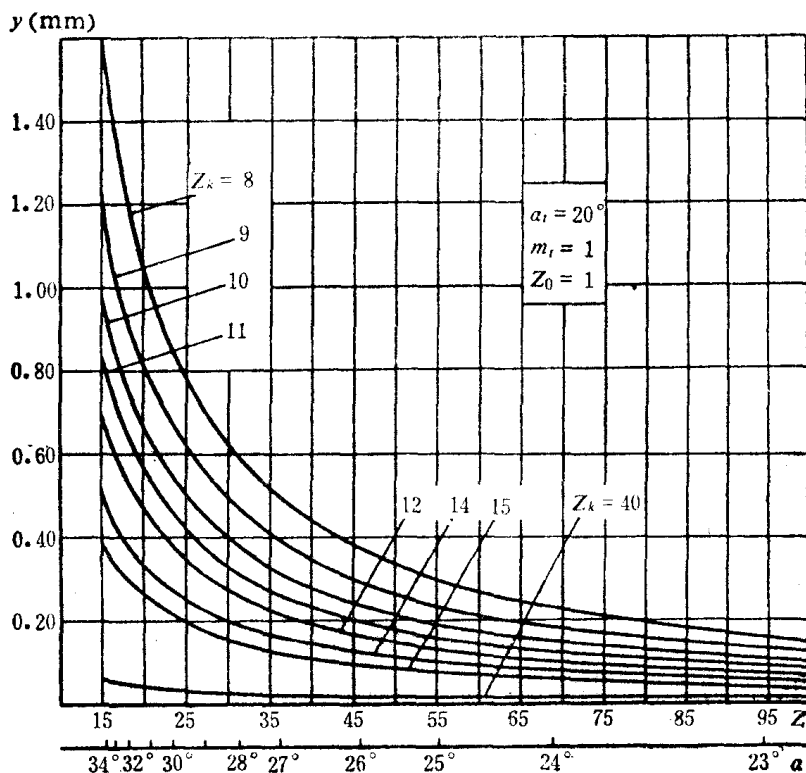


图 1—13 近顶圆处棱形高度关系曲线图

Z_0 ——滚刀的头数；

Z_k ——滚刀的容屑槽槽数。

将 $\cos \frac{\psi}{2}$ 按幂级数展开，略去高次项（因 ψ 很小，略去后的误差是很小的），并将 ρ_x 、