

基于碟形砂轮磨齿的面齿轮包络残差研究

郭 辉¹, 赵 宁¹, 张淑艳²

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

摘 要: 介绍了采用碟形砂轮磨削面齿轮的原理及过程,研究了齿廓包络和齿宽包络两种包络方式产生包络残差的机理. 分别建立了两种加工方式下包络残差的计算模型和方法,并研究了所产生包络残差的特点. 通过数值算例分析了包络过程中刀具周向进给角度、齿宽方向进给量以及碟形砂轮外径对齿面包络残差的影响规律. 计算结果表明:齿宽包络比齿廓包络具有更高的效率. 进行了以齿廓包络方式的面齿轮磨齿加工实验,当刀具周向进给角度分别取为 2° , 1° , 0.5° 及 0.2° 时,齿面表面粗糙度逐渐明显提高,齿面磨削加工印痕的数目和方向与包络仿真计算结果一致. 初步证明根据包络残差计算结果选取合适的进给量参数,可以保证面齿轮磨齿加工的表面粗糙度水平并能提高加工效率.

关 键 词: 面齿轮; 包络残差; 碟形砂轮; 磨齿; 表面粗糙度

中图分类号: V261.2⁺7; TH132.41

文献标志码: A

Envelope residuals research of face gear based on disc grinding wheel tooth grinding

GUO Hui¹, ZHAO Ning¹, ZHANG Shu-yan²

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Science,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The principles and processes for grinding face gears with disc grinding wheel were described. The envelope residual mechanism was studied for two machining methods of profile envelope and longitudinal envelope. The envelope residual computing models for two kinds of cutting mode were established, and the generating characters of envelope residual were investigated. The influences of cutting parameters, such as circumferential feeding angle, longitudinal feeding and grinding disk diameter on surface envelope residuals were analyzed. Computing results indicates that longitudinal envelope has much higher efficiency than profile envelope. A grinding experiment of face gear by profile envelope was performed. When the tool circumferential feeding angles were taken as 2 degree, 1 degree, 0.5 degree and 0.2 degree, respectively, the tooth surface roughness was improved significantly, and the number and direction of the grinding traces were consistent with the envelope simulation results. The appropriate feeding parameters adopted according to the envelope residual computing results can ensure surface roughness level of face gear teeth by grinding.

Key words: face gear; envelope residual; disc grinding wheel; tooth grinding; surface roughness

收稿日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(51075328, 51105307); 陕西省自然科学基金(2014JM7242)

作者简介: 郭辉(1978—),男,山东潍坊人,讲师,博士,主要研究方向为齿轮传动与机械动力学等.

面齿轮传动在直升机动力传输系统中的应用起到了显著减少减速箱质量、提高承载力的作用,引起了国内外学者的关注^[1-4]。

Litvin 等^[3-5]系统地研究了直齿面齿轮和斜齿面齿轮的齿面展成、修形及啮合仿真等设计方法;Zanzi 等^[6]研究了通过控制碟形砂轮轴线角度的小齿轮双冠修形方法,得到了面齿轮副预设的接触方向和稳定的瞬时接触线长度;Guinand 等^[7]提出了一种快速分析面齿轮齿面载荷分布和齿根弯曲应力的方法,并进行了准静态加载实验研究;李政民卿等^[8]研究了面齿轮齿面变尖特性;唐进元等^[9]采用有限元法计算直齿面齿轮加载过程中接触应力和弯曲应力的变化特点;张俐等^[10]等根据面齿轮齿面曲率的变化特点研究了面齿轮自适应检测网格计算方法;苏进展等^[11]研究了新型弧线齿面齿轮传动的设计方法。

磨齿是提高齿轮精度、硬度和表面粗糙度的重要手段。目前,面齿轮的磨齿方法^[12]有蜗杆碟形砂轮磨削、单指数分度展成磨削和格利森公司开发的新型 CONIFACE™ 方法。Litvin 等^[4]首先提出了磨削面齿轮的蜗杆碟形砂轮,并申请了专利。这种方法加工效率很高,同时由于连续磨削使得齿距精度很高,但是由于蜗杆齿面为椭球形渐开线蜗杆,修整控制难度很大。CONIFACE™ 方法是利用单面直线刀刃碟形砂轮展成磨削面齿轮,优点是不需要在小轮轴线方向进给因而效率较高,但由于存在局部干涉,因此只能得到近似的齿面形状,同时会产生一定的传递误差。单指数分度展成磨削方法^[12]利用渐开线碟形砂轮展成面齿轮轮齿,原理简单且容易实现,缺点是加工效率偏低。

彭先龙等^[13-14]使用插齿刀的端面轮廓方程推导了碟形砂轮的齿面方程,采用双参数包络方法展成得到了面齿轮的齿面。另外还研究了基于碟形砂轮磨齿的数控规律和面齿轮的修形方法。以上研究都是基于面齿轮的理论齿面,没有考虑加工过程中由于不连续包络产生的齿面包络残差问题。本文研究碟形砂轮磨削面齿轮的包络特点和规律,对于确定合理的加工工艺参数,保证面齿轮齿面表面粗糙度以及提高磨齿加工效率等方面具有一定的意义。

1 碟形砂轮加工面齿轮的原理和过程

1.1 碟形砂轮磨削面齿轮的原理

因为面齿轮是由圆柱齿轮齿面共轭展成,因

此可以设想让碟形砂轮模拟圆柱齿轮的运动以完成面齿轮齿面的加工。碟形砂轮磨削方法^[4]如图 1 所示,图中表示了碟形砂轮在两个不同时刻所处的位置,这种方法将碟形砂轮轴截面齿廓修整成与配对圆柱直齿轮相同的形状。磨削加工时,缓慢变化碟形砂轮的安装角 φ_B 并将 X 轴和 Z 轴插补,同时令其在小齿轮轴线方向上作往复运动,此时碟形砂轮便形成了一个旋转的虚拟小齿轮。与此同时,面齿轮按照传动比绕其回转轴作相应的转动,从而模拟了它与小齿轮间的啮合,完成了展成运动。这一过程是双参数包络过程。

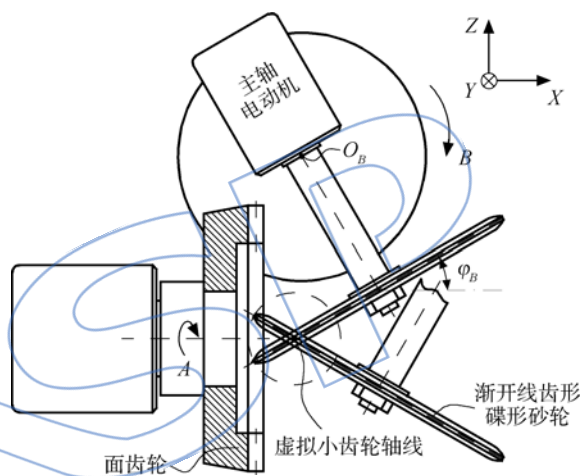


图 1 碟形砂轮磨削原理图

Fig. 1 Grinding principle sketch of disc grinding wheel

1.2 磨齿过程特点分析

要实现面齿轮整个齿面的包络,需要碟形砂轮在两个方向上进给,有两种方法可以实现这一过程。第 1 种方法:固定机床的 B 轴角度(图 1 中 φ_B),即碟形砂轮此时模拟位于某个时刻处的小齿轮齿面,让碟形砂轮在面齿轮齿宽方向连续磨削,然后改变碟形砂轮的安装角 φ_B ,再次让碟形砂轮沿齿宽方向磨削;这样形成的面齿轮齿面在齿廓方向上看来是由一些倾斜的凹曲面(Σ_1 和 Σ_2)包络构成^[15],如图 2 所示。

第 2 种方法:固定碟形砂轮在面齿轮齿宽方向上的位置(即图 1 中 Y 轴固定),令机床的 B 轴在正负啮合角度范围内连续运动,这相当于用一个齿宽很薄的小齿轮展成部分齿面。此时碟形砂轮将包络出近似沿面齿轮齿高方向的一条齿面线,如图 3 中 L_1 。再改变碟形砂轮在齿宽方向的位置(即机床沿 Y 轴少量进给),令 B 轴连续悬摆,如此重复,即可包络出整个齿面。

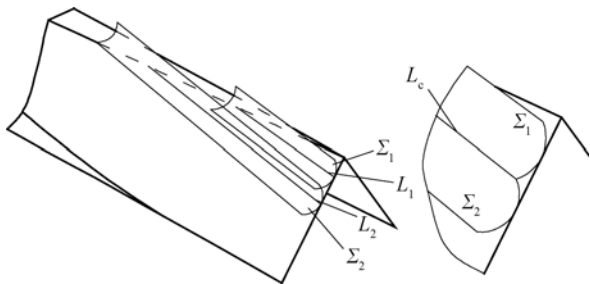


图 2 齿面包络方式 I

Fig. 2 Tooth envelop pattern I

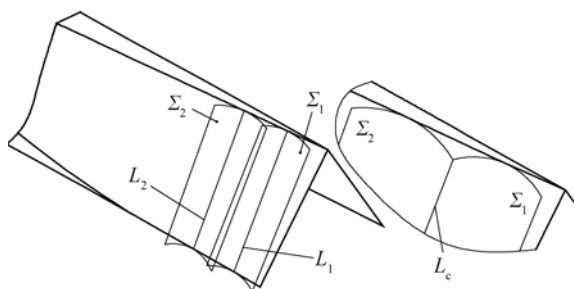


图 3 齿面包络方式 II

Fig. 3 Tooth envelop pattern II

瞬时产形面 Σ_1 和 Σ_2 与理论齿面间的切线分别为 L_1 和 L_2 . 除了切线外其他部位齿面点都是有残余高度的,称为包络残差. 包络残差影响面齿轮齿面的表面粗糙度,是齿轮精度的重要指标,必须严格控制. 为了既保证加工精度又能获得最大加工效率,需在加工前预先计算出最小的包络次数,以确定刀具进给量.

2 包络残差计算模型

由于加工面齿轮的碟形砂轮齿廓不是直线而是凸形的,因此无法采用滚刀加工渐开线齿轮的残差计算公式,需要建立新的计算模型. 而碟形砂轮渐开线齿廓各点处的曲率半径不同,同时碟形砂轮与面齿轮之间是空间啮合关系,所以很难获得包络残差的解析计算公式,本文采用数值模拟方法.

如图 2、图 3 所示, Σ_1 和 Σ_2 是碟形砂轮在面齿轮固联坐标系中连续运动所形成的两个包络面,两曲面间的交线为 L_c ,此交线上各点与面齿轮理论齿面间的法向距离即齿廓包络残差. 可通过推导获得 Σ_1 和 Σ_2 在面齿轮坐标系的曲面方程,联立求解可以确定其交线 L_c 的方程,进而离散地求出交线 L_c 上各点到面齿轮理论齿面的距离.

2.1 齿廓包络

2.1.1 刀具瞬时包络面方程

齿廓包络方法需要碟形砂轮在面齿轮齿宽方

向也就是虚拟小齿轮轴线方向上高速连续磨削,此时碟形砂轮刀具的单参数包络面就是瞬时圆柱齿轮齿面. 将圆柱齿轮齿面方程转换至面齿轮坐标系中可得给定 φ_B 角度位置时的包络面方程(即 Σ_1 和 Σ_2).

根据圆柱齿轮与面齿轮间的共轭展成关系,其运动坐标系如图 4 所示. 其中 S_2 和 S_s 分别与面齿轮及虚拟圆柱齿轮固联; S_m 和 S_a 为辅助固定坐标系;面齿轮与虚拟圆柱齿轮按照传动比转动. $\varphi_2 = (N_s/N_2) \cdot \varphi_s$, N_s 与 N_2 分别为刀具和面齿轮的齿数. L_0 为辅助参数,为已知的给定值,这里取 L_0 为面齿轮内半径 L_1 .

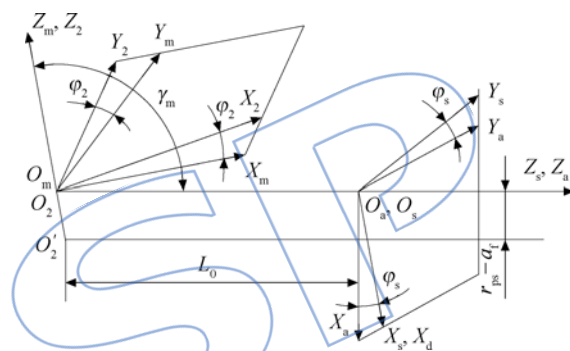


图 4 圆柱齿轮展成面齿轮坐标系

Fig. 4 Coordinate systems applied for generation of a face gear with a pinion

圆柱齿轮齿面方程(产形面)^[16-17]

$$\mathbf{r}_s(u_s, l_s) = \begin{bmatrix} r_{bs}[\sin(u_{0s} + u_s) - u_s \cos(u_{0s} + u_s)] \\ -r_{bs}[\cos(u_{0s} + u_s) + u_s \sin(u_{0s} + u_s)] \\ l_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 u_s 和 l_s 分别表示齿轮沿齿廓和轴线方向上的齿面参数; r_{bs} 是刀具齿轮基圆半径; u_{0s} 为基圆初始角. 则当刀具转角为 φ_s 时在面齿轮坐标系 S_2 中瞬时产形面方程为

$$\mathbf{r}_2(u_s, l_s) = \mathbf{M}_{2s}(\varphi_s) \mathbf{r}_s(u_s, l_s) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{r}_2$ 与 $\mathbf{r}_s$ 分别是刀具曲面在坐标系 S_2 和坐标系 S_s 中的径矢; $\mathbf{M}_{2s}(\varphi_s)$ 是从刀具坐标系到面齿轮坐标系的转换矩阵

$$\mathbf{M}_{2s}(\varphi_s) = \mathbf{M}_{2a} \cdot \mathbf{M}_{as} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{M}_{as}(\varphi_s) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_s & -\sin \varphi_s & 0 & 0 \\ \sin \varphi_s & \cos \varphi_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{2a} = \mathbf{M}_{2m} \cdot \mathbf{M}_{ma} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 \cos \gamma_m & \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \sin \gamma_m & L_0 \cos \varphi_2 \sin \gamma_m \\ -\sin \varphi_2 \cos \gamma_m & \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 \sin \gamma_m & -L_0 \sin \varphi_2 \sin \gamma_m \\ -\sin \gamma_m & 0 & \cos \gamma_m & L_0 \cos \gamma_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.1.2 相邻产形面交线方程

Σ_1 和 Σ_2 分别对应着两个位置 $\varphi_s^{(1)}$ 与 $\varphi_s^{(2)}$ 处的刀具产形面, 进给量 $\Delta\varphi_s = \varphi_s^{(2)} - \varphi_s^{(1)}$, 则两相邻产形面交线 L_c 方程为

$$\mathbf{r}_2^{(1)}(u_s^{(1)}, l_s^{(1)}, \varphi_s^{(1)}) = \mathbf{r}_2^{(2)}(u_s^{(2)}, l_s^{(2)}, \varphi_s^{(2)}) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{r}_2^{(1)}$ 和 $\mathbf{r}_2^{(2)}$ 分别为 Σ_1 和 Σ_2 对应的位矢. 方程(6)为含有4个参数 $u_s^{(1)}$, $l_s^{(1)}$, $u_s^{(2)}$ 及 $l_s^{(2)}$ 的非线性方程组, 方程个数为3; 当给定交线上一点齿轮的半径值, 即可求解该点坐标.

2.1.3 包络残差计算

设相邻产形面交线 L_c 上已知任意一点 N 的位矢为 $\mathbf{r}_N$. 设面齿轮理论齿面上一点 M 的齿面参数为 (u_s, l_s, φ_s) , 若 M 点的法线 $\mathbf{n}_M$ 经过 N 点且其参数满足啮合方程, 则 M 点即为 N 点在齿面上的垂点, 即

$$\begin{cases} [\mathbf{r}_2(u_s, l_s, \varphi_s) - \mathbf{r}_N] \times \mathbf{n}_M = 0 \\ f_{2s}(u_s, l_s, \varphi_s) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过计算 M 点和 N 点之间的距离即可得到 N 点的包络残差高度.

2.2 齿宽包络

2.2.1 碟形砂轮齿面方程

如图5所示, 碟形砂轮横向截面齿廓与圆柱齿轮刀具齿廓相同, 将齿廓曲线绕碟形砂轮轴线 Z_d 旋转可得到碟形砂轮的齿面. 图中坐标系 S_d 与碟形砂轮固联, S_a 为辅助坐标系, 坐标系 S_l 与虚拟圆柱齿轮固联. 圆柱齿轮轴线到碟形砂轮轴线间的最短距离为 E_d .

设圆柱齿轮端面齿廓方程已知^[17-18], 为

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_1(u_1) \quad (8)$$

从圆柱齿轮端面坐标系 S_l 向碟形砂轮坐标系 S_d 的坐标转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{dl}(\theta_d) = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & 0 & \sin \theta_d & E_d \cos \theta_d \\ \sin \theta_d & 0 & -\cos \theta_d & E_d \sin \theta_d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则碟形砂轮齿面方程为

$$\mathbf{r}_d(u_1, \theta_d) = \mathbf{M}_{dl}(\theta_d) \cdot \mathbf{r}_1(u_1) \quad (10)$$

其法向量为

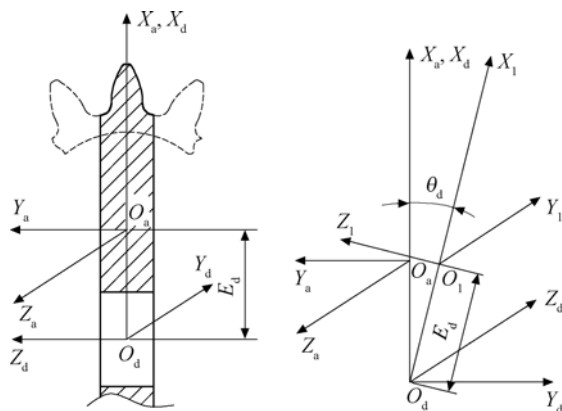


图5 碟形砂轮齿面生成坐标系

Fig. 5 Coordinate systems applied for generation of disc grinding wheel

$$\mathbf{n}_d(u_1, \theta_d) = \frac{\partial \mathbf{r}_d(u_1, \theta_d)}{\partial u_1} \times \frac{\partial \mathbf{r}_d(u_1, \theta_d)}{\partial \theta_d} \quad (11)$$

2.2.2 包络面方程

当固定碟形砂轮在面齿轮齿宽方向上的位置, 单参数(将碟形砂轮绕虚拟刀具齿轮轴线悬挂)包络面齿轮时, 仅仅得到图3所示的系列曲面 Σ_1 或 Σ_2 等. 若碟形砂轮外径无限大, 那么碟形砂轮单参数包络曲面也就成为面齿轮齿面. 但受实际因素限制, 碟形砂轮外径仅能取有限尺寸. 由碟形砂轮加工面齿轮的坐标系如图6所示, 其中 S_d 与碟形砂轮固联; S_m , S_2 , S_s 及 S_a 与图4意义相同, 但在这里 L_0 是一个变化的参数, 因此坐标系 S_s 与 S_a 将随着碟形砂轮在面齿轮齿宽上的位置的变化而移动.

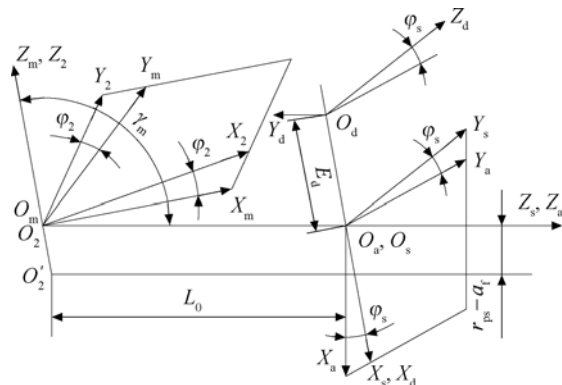


图6 碟形砂轮包络面齿轮的坐标系

Fig. 6 Coordinate systems applied for envelop face gear by disc grinding wheel

碟形砂轮与虚拟圆柱齿轮固联,即当虚拟圆柱齿轮旋转 φ_s 时,碟形砂轮绕点 O_s 悬摆 φ_s 角度(通过转动机床的 B 轴实现),面齿轮转角为 $\varphi_2 = (N_s/N_2) \cdot \varphi_s$.

由碟形砂轮连续悬摆所产生的包络面方程为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_2(u_1, \theta_d, \varphi_s, L_0) = \mathbf{M}_{2d}(\varphi_s, L_0) \mathbf{r}_d(u_1, \theta_d) \\ f_{2d}(u_1, \theta_d, \varphi_s, L_0) = \mathbf{n}_d \cdot \mathbf{v}_d^{(d2)} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\mathbf{M}_{2d} = \mathbf{M}_{2m} \cdot \mathbf{M}_{ma} \cdot \mathbf{M}_{as} \cdot \mathbf{M}_{sd}$, 为从碟形砂轮向面齿轮的坐标转换矩阵. 其中

$$\mathbf{M}_{sd} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -E_d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

而矩阵 $\mathbf{M}_{2m}$, $\mathbf{M}_{ma}$, $\mathbf{M}_{as}$ 与式(3)相同. $\mathbf{v}_d^{(d2)}$ 为碟形砂轮和面齿轮间的相对速度矢量,推导过程略.

2.2.3 相邻包络面交线方程

设 Σ_1 和 Σ_2 对应的碟形砂轮安装位置为 L_{01} 与 L_{02} , 进给量 $\Delta L = L_{01} - L_{02}$, 则两相邻包络面的交线方程为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_2^{(1)}(u_1^{(1)}, \theta_d^{(1)}, \varphi_s^{(1)}, L_{01}) = \mathbf{r}_2^{(2)}(u_1^{(2)}, \theta_d^{(2)}, \varphi_s^{(2)}, L_{02}) \\ f_{2d}^{(1)}(u_1^{(1)}, \theta_d^{(1)}, \varphi_s^{(1)}) = 0 \\ f_{2d}^{(2)}(u_1^{(2)}, \theta_d^{(2)}, \varphi_s^{(2)}) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中 $f_{2d}^{(1)} = 0$ 与 $f_{2d}^{(2)} = 0$ 分别是两曲面的啮合方程. 式(14)是含有 6 个参数 $u_1^{(1)}, \theta_d^{(1)}, \varphi_s^{(1)}$ 及 $u_1^{(2)}, \theta_d^{(2)}, \varphi_s^{(2)}$ 的非线性方程组, 方程个数为 5 个; 当给定齿高方向的坐标后即可求解包络面交线上的任意点 N. 再根据 2.1.3 节类似的方法可计算包络残差值.

3 齿面包络残差仿真计算

给定面齿轮副的一组设计参数, 如表 1 所示.

3.1 齿廓包络残差

当刀具转角(图 1 中 B 轴)增量 $\Delta\varphi_B = 1^\circ$ 时, 各瞬时齿廓包络残差线及包络残差数值的分布情况如图 7 所示. 等齿高位置处, 齿面上从内径到外径包络残差逐渐增大, 由齿根向齿顶逐渐增大, 最大包络残差位于面齿轮外径齿顶处. 这是因为面齿轮齿顶是由齿轮刀具的渐开线齿根部分包络产生, 而渐开线齿廓在齿根处曲率半径最小, 瞬时切除材料量小, 因此包络残差较大. 同时, 因为齿轮刀具与面齿轮齿面间的瞬时啮合线方向是倾斜于齿宽方向的(如图 2 中 L_1, L_2 所示), 所以面齿轮

轮齿在相同高度位置处半径越大则包络残差越大. 另外内径处包络线数目比外径处更多, 也是包络残差值较外径处小的原因. 对于本文给定的算例, 完全展成面齿轮两侧齿面需要刀具的转角范围约为 $\pm 24^\circ$, 因此若取 $\Delta\varphi_B = 1^\circ$, 则共需要 48 次进给, 产生的最大包络残差为 $2.26 \mu\text{m}$. 图中为了方便显示, 标志数值的位置省略了包络残差线, 而用黑点代替, 单侧齿面的包络残差线为 39 条.

表 1 面齿轮副的设计参数

Table 1 Design parameters of face gear drive

设计参数	数值
圆柱齿轮齿数(刀具、小齿轮) N_s, N_1	25
面齿轮齿数 N_2	77
名义压力角 $\alpha_n / (^\circ)$	20
圆柱齿轮螺旋角 $\beta / (^\circ)$	0
法向模数 m_n / mm	3
轴交角 $\gamma_m / (^\circ)$	90
面齿轮内半径 L_1 / mm	112
面齿轮外半径 L_2 / mm	133
碟形砂轮外径(实验) D_w / mm	150

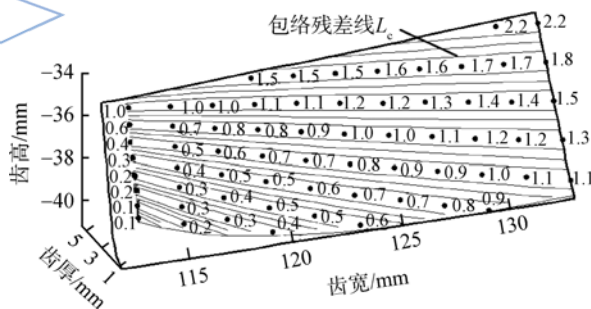


图 7 齿廓包络残差分布图($\Delta\varphi_B = 1^\circ$)(单位: μm)

Fig. 7 Envelope residual distributions with profile ($\Delta\varphi_B = 1^\circ$) (unit: μm)

取刀具转角增量 $\Delta\varphi_B = 2^\circ$ 时, 仿真计算包络残差分布如图 8 所示. 外径处包络残差线为 9 条, 包络线的密度减小为 $\Delta\varphi_B = 1^\circ$ 时的一半. 最大包络残差仍然出现在外径齿顶上, 增大为 $9.3 \mu\text{m}$. 包络残差分布规律与 $\Delta\varphi_B = 1^\circ$ 时基本相同.

当改变 $\Delta\varphi_B$, 即改变进给次数时, 最大包络残差变化情况如图 9 所示. 随着刀具周向进给次数的增大, $\Delta\varphi_B$ 逐渐减小, 最大包络残差呈非线性递减变化. 由于这种方法需要碟形砂轮在齿宽方向连续进给, 因此包络残差与碟形砂轮外径大小无关.

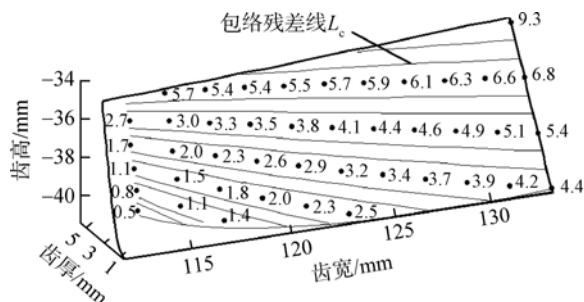


图8 齿廓包络残差分布图($\Delta\varphi_B=2^\circ$)(单位: μm)

Fig. 8 Envelope residual distributions with profile ($\Delta\varphi_B=2^\circ$) (unit: μm)

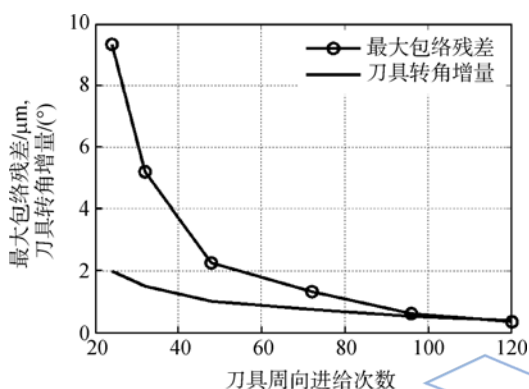


图9 最大包络残差与刀具周向进给次数的关系

Fig. 9 Relationship between maximum envelope residual and tool circumferential feeding number

3.2 齿宽包络残差

取碟形砂轮外径 $D_w=150\text{ mm}$, 当碟形砂轮沿面齿轮齿宽方向的逐次进给量 $\Delta L=2.1\text{ mm}$ 时, 包络残差分布情况如图10所示. 由于面齿轮齿宽为 21 mm , 因此碟形砂轮进给10次即可完成加工, 此时在齿面上将产生10条残高线. 由图可以看出, 齿面包络残差从齿顶向齿根逐渐增大, 在多数等齿高位置处从内径到外径包络残差亦逐渐增大. 过渡曲面上方邻近部位包络残差最大, 上述

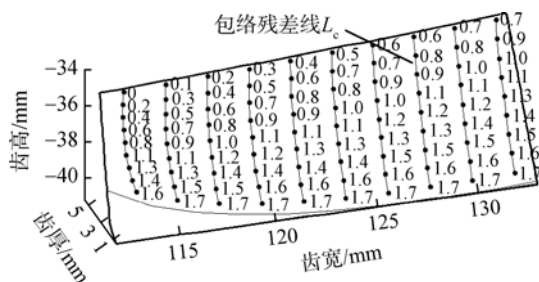


图10 齿宽包络残差分布($D_w=150\text{ mm}$)(单位: μm)

Fig. 10 Envelope residual distributions with longitudinal ($D_w=150\text{ mm}$) (unit: μm)

情况最大值为 $1.7\text{ }\mu\text{m}$, 尚未达到6级圆柱齿轮的精度要求.

当以不同外径的碟形砂轮以及不同的进给次数加工时, 面齿轮最大包络残差的变化如图11所示.

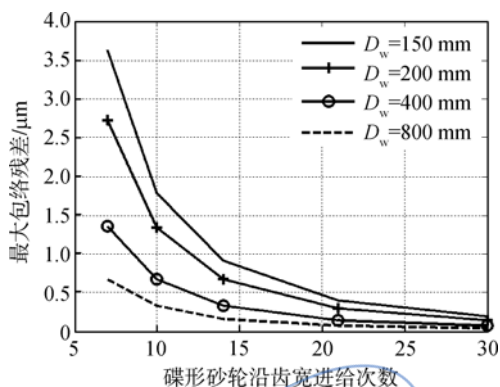


图11 最大包络残差与碟形砂轮外径及齿宽进给次数的关系

Fig. 11 Relationship between maximum envelope residual, disk diameter of disc grinding wheel and longitudinal feeding number

另外, 还可以看出, 采用齿宽包络方法需要的进给次数明显低于齿廓包络方法. 如对于外径为 150 mm 的碟形砂轮, 若要使最大齿面包络残差达到 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 齿宽包络只需要19次进给; 由图9曲线可知采用齿廓包络法则需要96次进给; 而当使用外径为 800 mm 的碟形砂轮时, 沿齿宽包络仅需8次进给即可达到精度要求, 因此可以大大提高加工效率. 主要原因是碟形砂轮在过轴截面内齿廓是渐开线, 在齿根部位曲率半径很小, 导致在齿廓方向包络残差较大; 而碟形砂轮曲面在端面内垂直于齿廓线方向的曲率半径相对较大, 因此沿齿宽包络时包络残差相对较小, 且碟形砂轮外径越大则包络残差越小.

4 磨齿加工实验

本文采用 QMK50A 型通用五轴联动曲面磨床, 如图12所示. 针对表1所列参数编制面齿轮数控加工程序, 完成碟形砂轮的自动修整和轮齿的磨削. 由于实验时间有限, 本文仅进行了不同转角增量的齿廓包络加工实验.

不同刀具转角增量条件下面齿轮表面磨齿加工情况如图13所示. 当刀具转角增量 $\Delta\varphi_B=2^\circ$ 时如图13(a)所示, 齿面外径处的包络纹路较粗, 有9条包络线(黑点标识), 其数目及方向与前文中

的仿真计算图 8 基本一致. 根据仿真计算外径处的包络残差值在 $4.4 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 之间, 而从实际加工情况来看包络残差值大于计算值. 由于面齿轮磨齿需要机床的 X 轴、Z 轴、A 轴及 B 轴四轴联动, 采用的机床直线定位精度为 $\pm 2 \mu\text{m}$, A 轴定位精度为 $\pm 5''$, B 轴定位精度为 $\pm 2.5''$, 在多种误差的影响下, 加工后测定的齿面偏差数值在 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 之间, 因此包络残差值尚不能与仿真计算值比对. 当刀具转角增量 $\Delta\varphi_B = 1^\circ$ 时如图 13(b) 所示, 此时齿面光滑性有所提高, 由 $\Delta\varphi_B = 2^\circ$ 时残留的加工纹路已经基本消失. 当继续增大进给次数即减小刀具转角增量 $\Delta\varphi_B$ 时, 如图 13(c)、图 13(d) 所示齿面变得越来越光滑, 分别对应 $\Delta\varphi_B$ 为 0.5° 和 0.2° . 对于文中的面齿轮, 根据仿真计算及图 9 曲线可知, 当 $\Delta\varphi_B = 0.5^\circ$ 时最大包络残差为 $0.59 \mu\text{m}$, 基本可以满足 6 级精度的包络残差加工要求 ($0.8 \mu\text{m}$ 以下).

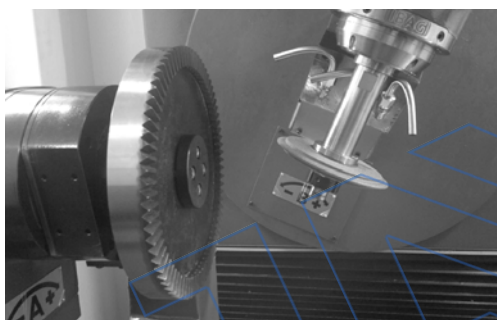


图 12 面齿轮数控磨齿实验

Fig. 12 Computer numerical control grinding experiment of face gear

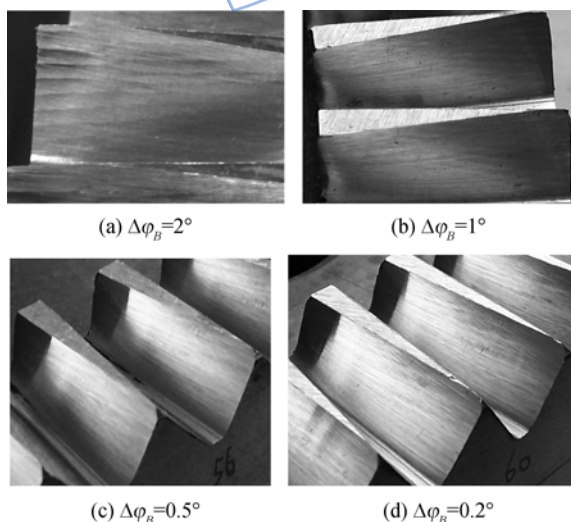


图 13 不同刀具转角增量情况下的齿面磨削情况

Fig. 13 Tooth grinding conditions with different tool increasing angles

5 结 论

1) 建立了基于碟形砂轮磨削面齿轮的两种包络残差计算模型.

2) 计算分析了包络残差与刀具进给参数及碟形砂轮外径间的关系. 分析表明齿宽包络比齿廓包络具有更高的加工效率, 且碟形砂轮外径越大这种优势越明显.

3) 磨齿加工实验初步验证了齿廓包络残差计算规律的正确性. 根据包络残差仿真计算结果确定加工参数可以保证加工精度并提高加工效率.

参考文献:

- [1] Filler R R, Heath G F, Slaughter S C, et al. Torque splitting by a concentric face gear transmission[R]. Montreal, Canada: The American Helicopter Society 58th Annual Forum, 2002.
- [2] Kissling U, Beermann S. Face gears: geometry and strength[EB/OL]. [2007-02-28]. <http://www.geartechology.com/issues/0107x/janfeb07.pdf>.
- [3] Litvin F L, Fuentes A, Zanzi C. Design, generation, and stress analysis of two versions of geometry of face-gear drives[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(10): 1179-1211.
- [4] Litvin F L, Zanzi C, Fuentes A, et al. Face-gear drive with spur involute pinion: geometry, generation by a worm, stress analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(25/26): 2785-2813.
- [5] Litvin F L, Perez I G, Fuentes A. Design, generation and stress analysis of face-gear drive with helical pinion[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(36/37/38): 3870-3901.
- [6] Zanzi C, Pedrero J I. Application of modified geometry of face gear drive[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(36/37/38): 3047-3066.
- [7] Guingand M, Vaujany J P, Jacquin C Y. Quasi-static analysis of a face gear under torque[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(39/40/41): 4301-4318.
- [8] 李政民卿, 朱如鹏. 基于包络法的正直面齿轮齿廓尖化研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(9): 1029-1033.
LI Zhengminqing, ZHU Rupeng. Research on pointing of face gear by enveloping method[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008, 19(9): 1029-1033. (in Chinese)
- [9] 唐进元, 刘艳平. 直齿面齿轮加载啮合有限元仿真分析[J]. 机械工程学报, 2013, 48(5): 124-131.
TANG Jinyuan, LIU Yanping. Loaded meshing simulation of face-gear drive with spur involute pinion based on finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 48(5): 124-131. (in Chinese)

- [10] 张俐,丁志耀,王延忠. 面齿轮齿面的自适应采样方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 247-251.
ZHANG Li, DING Zhiyao, WANG Yanzhong. Adaptive sampling method of face gear tooth surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(2): 247-251. (in Chinese)
- [11] 苏进展,方宗德,崔艳梅. 弧线齿面齿轮齿面接触分析[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 546-551.
SU Jinzhan, FANG Zongde, CUI Yanmei. Tooth contact analysis on face gears with arcuate tooth[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(3): 546-551. (in Chinese)
- [12] Stadtfeld H J. Coniface face gear cutting and grinding[EB/OL]. [2011-06-20]. <http://www.gearsolutions.com/article/detail/6020/coniface-face-gear-cutting-and-grinding>.
- [13] 彭先龙,方宗德,苏进展. 采用碟形砂轮的面齿轮磨齿方法理论分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 1159-1165
PENG Xianlong, FANG Zongde, SU Jinzhan. Theory analysis for application grinding disk in face gear grinding[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1159-1165. (in Chinese)
- [14] 彭先龙,李建华,方宗德,等. 碟形砂轮磨削面齿轮的数控规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(11): 101-104.
PENG Xianlong, LI Jianhua, FANG Zongde, et al. Computer numerical controlling rules for applying grinding disk in face gear grinding[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(11): 101-104. (in Chinese)
- [15] Litvin F L, Fuentes A. Gear geometry and applied theory [M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 103-107.
- [16] 傅则绍. 微分几何与齿轮啮合原理[M]. 山东 东营: 石油大学出版社, 1999: 104-105.
- [17] 吴序堂. 齿轮啮合原理[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 97-102.
- [18] Litvin F L. Handbook of face gear drives with a spur involute pinion [R]. NASA Final Contractor Report, CR-209909, 2000.