

平面刀具加工面齿轮的理论分析

彭先龙, 张 乐, 郭 卫

(西安科技大学 机械工程学院, 西安 710054)

摘 要: 采用平面刀具加工面齿轮可提高刀具的通用性和降低设计制造成本. 首先在对格林森方法仿真的基础上指出仅用高阶滚比是不能获得理想齿面的, 然后提出了附加运动, 通过这个附加运动与高阶滚比刀具在运动中可以实现虚拟渐开线的精确模拟. 其三提出了确定高阶滚比、附加运动多项式系数的方法. 其四建立了平面刀具的产形面和平面刀具加工的面齿轮的数学模型. 最后进行了滚比与运动规律、轮齿接触分析等数值仿真, 结果表明: 算例中的最大齿面误差为 -1.05 mm , 接触路径倾斜, 接触椭圆长度为 11.2 mm , 传动误差约为 $0''$, 被加工面齿轮与标准小轮的啮合表现出良好的“准共轭”特性. 因此这种可粗切, 亦可精磨的加工方法具备良好的可行性与实用性.

关 键 词: 面齿轮; 平面刀具; 加工; 高阶滚比; 附加运动; 齿面误差; 轮齿接触分析

中图分类号: V323.8; TH132.4

文献标志码: A

Theoretical analysis for manufacturing face gear by plane cutter

PENG Xian-long, ZHANG Le, GUO Wei

(School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an 710054, China)

Abstract: The application of the plane cutter in face gear manufacturing is able to improve the generality and decrease the design and manufacturing cost of the cutter. Firstly, based on the simulation of the Gleason Works' method, it pointed out that the ideal tooth surface cannot be obtained by only the application of higher order roll ratio. Then an additional motion was proposed; through the additional motion and higher order roll ratio, the exact simulation of suppositional involute can be realized in the cutter's motion. Thirdly, the method for determining the polynomial coefficients of the higher order roll ratio and additional motion was proposed. Fourthly the equations of the generating plane of the plane cutter and the tooth surface of the face gear were derived. Finally, the numerical simulation of the roll ratio, motion rule, tooth contact analysis were performed. The results show that: in the numerical example, the maximum tooth surface error is -1.05 mm , the contact path is tilted, the maximum length of contact ellipse is 11.2 mm , transmission errors is about $0''$, the meshing between the generated face gear and the standard pinion demonstrates good features of 'quasi conjugate'. Hence the manufacturing method for rough cutting, and finish grinding has perfect feasibility and practicability.

收稿日期: 2015-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51605378); 中国博士后基金(2016M592814); 陕西省自然科学研究计划(2015JQ5159); 西安科技大学博士启动基金(2015QDJ026)

作者简介: 彭先龙(1982—), 男, 讲师, 博士, 主要从事机械传动和液压传动的研究.

引用格式: 彭先龙, 张乐, 郭卫. 平面刀具加工面齿轮的理论分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 1018-1024. PENG Xianlong, ZHANG Le, GUO Wei. Theoretical analysis for manufacturing face gear by plane cutter[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4): 1018-1024.

Key words: face gear; plane cutter; manufacturing; higher order roll ratio; additional motion; tooth surface errors; tooth contact analysis

传统上航空用面齿轮的制造方法基于插齿法^[1-2],导致滚切、磨齿、铣齿^[3-7]等加工方法中的刀具都必须复制插齿刀法面上的理论齿廓。换言之改变面齿轮传动的参数,就必须重新设计、制造和修整刀具。这既不利于刀具的序列化和标准化,又在具体应用中耗时、费力、增加刀具制造成本。尽管 YAN Xiaoyu 等提出了一种铣齿方法^[8],但是其加工效率低,只适用于小批量加工。

采用平面刀具粗切、磨齿加工面齿轮具有很好的应用前景。例如刀具可标准化;产形面为平面,若为砂轮,修整简便;对任意参数的面齿轮都可以进行加工,不存在奇异点;采用大半径刀具,不需齿向进给,切削效率高。

格林森于 2010 年在其公司网站上公布了平面刀具加工面齿轮的技术^[9],并于 2012 年获得美国专利^[10]。国内毛世民等基于格林森技术,提出了控制由此方法加工的面齿轮的几何啮合性能的构想^[11]。然而文献[9-11]更多的是在方法与技术层面进行了论述,除了提及非定常滚比之外,并未对刀具的其他运动规律做详细说明。

本文首先简述上述文献中的方法,进行相关的仿真计算并指出其不足,然后详细论述平面刀具加工面齿轮的方法:①提出平面刀具的附加运动;②确定平面刀具的滚比和运动规律;③建立刀具和面齿轮的齿面模型。④进行齿面仿真计算并进行齿面偏差的计算;⑤对被加工齿面与标准渐开线小轮的啮合进行几何啮合性能仿真。

1 格林森切齿方法

根据文献[9-10]所述,采用平面刀具加工面齿轮的原理如图 1 所示。其中平面刀具切削平面在该位置的投影由 y_g 表示,平面刀具绕虚拟插齿刀(由虚线圆及坐标系 S_s 表示)轴线转动,直线 $O_sO'_g$ 与 y_g 刚性固联,当 $O_sO'_g$ 由其初始位置转过 φ_g 到另一位置 O_sO_g 时,即平面刀具转过 φ_g ,面齿轮绕其自身轴线的转角为 φ_2 ,两转角满足的关系为

$$\varphi_2 = a_0 + a_1\varphi_g + a_2\varphi_g^2 + \cdots + a_n\varphi_g^n \quad (1)$$

式中 $a_i(i=0, 1, \cdots, n)$ 为待确定的滚比系数, n 为阶数。通过确定式(1)中的系数,使平面刀具在运动的过程中形成虚拟渐开线,并由该渐开线展成面齿轮的轮齿。

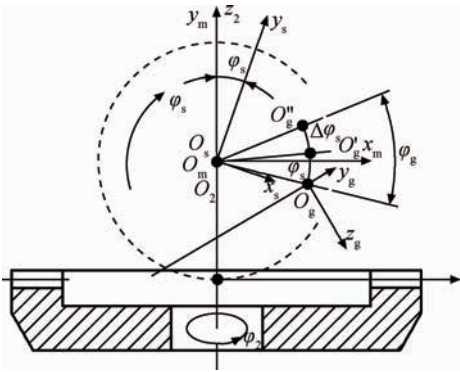


图 1 平面刀具展成加工面齿轮
Fig. 1 Face gear generated by plane cutter

平面刀具没有齿向(z_s 方向)进给运动,因此加工效率较高。齿高方向的进给运动类似于在凤凰牌机床上加工直齿锥齿轮的齿高方向的进给运动,即刀具的齿高进给方向垂直于根锥。

为了确定式(1)中的非定常滚比多项式系数,文献[9-10]提供的方法如图 2 所示。在分度圆上的 P_1 点处,平面刀具与虚拟渐开线相切,因此在该点精确地模拟了渐开线,相应的面齿轮上的共轭点也将是精确的。但是在其他任意点处如 P_2 ,平面刀具绕虚拟插齿刀的转角为 $\Delta\varphi_s$ 。在渐开线上按一定步长取几个点,计算相应的 $\Delta\varphi_s$ 为

$$\Delta\varphi_s = 2\arcsin[(0.5|\overline{P_2P_3}|)/|\overline{O_sP_2}|] \quad (2)$$

如图 1, $\Delta\varphi_s$ 构成了平面刀具的附加转角。

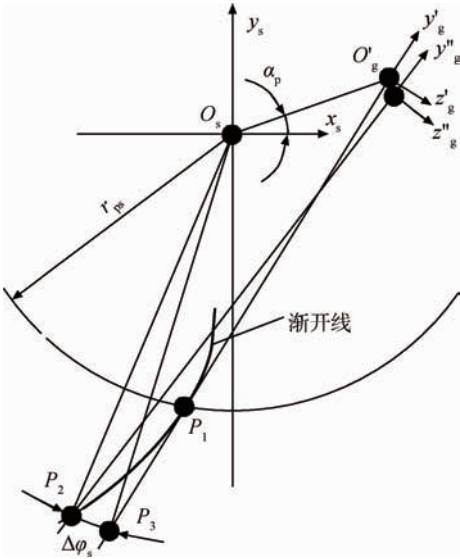


图 2 虚拟渐开线的形成
Fig. 2 Generation of virtual involute

如图 1、图 2 所示,当平面刀具在坐标系 S_s 中转过附加转角 $\Delta\varphi_s$ 后,平面刀具将与虚拟插齿刀固联,转过转角 φ_s ,此时 φ_s, φ_2 满足插齿加工的传动比,即

$$\varphi_2 = \varphi_s N_s / N_2 = m_{2s} \varphi_s \tag{3}$$

式中 N_s, N_2 分别为插齿刀、面齿轮的齿数, $m_{2s} = N_s / N_2$. 很显然,进行传统插齿加工的仿真模拟可以计算一系列 φ_s, φ_2 的离散值. 如图 1 所示有

$$\varphi_g = \Delta\varphi_s + \varphi_s \tag{4}$$

确定 $\varphi_s, \varphi_2, \Delta\varphi_s$ 的离散值后,则可以用线性回归法拟合确定式(1)的多项式系数.

本文对上述方法进行了相关研究,限于篇幅不进行坐标变换、啮合方程等中间过程的论述,直接给出仿真结果.

如图 3 所示为直接采用文献[9-10]的方法,用平面刀具展成面齿轮的齿面偏差. 由该图可以看出其齿面偏差达到了 -2 mm 以上,且极不规则,偏差有正有负.

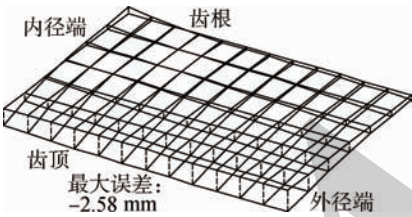


图 3 平面刀具展成面齿轮的齿面偏差
Fig. 3 Surface deviation of face gear generated by plane cutter

尽管可以采用优化算法^[12-13]、敏感矩阵法^[14]来消除这种误差,但是这会用到机床数控运动多项式的系数. 实际上考虑刀具、插齿刀和面齿轮的切触关系,可以直接确定刀具的运动,并获得较理想的齿面. 如图 2 所示,平面刀具转过附加转角 $\Delta\varphi_s$ 来模拟 P_2 点,由于平面刀具不与渐开线相切,平面刀具除了与渐开线相交于 P_2 点之外,必然与另一点相交. 若要获得式(1)系数的比较精确的解,则必须引入另一运动.

图 4 所示为格林森采用平面刀具加工面齿轮的数控机床运动自由度配置. A 轴为被加工面齿轮的旋转轴, C 轴为刀具的自转轴, B 轴相当于虚拟插齿刀的旋转轴. 平移 x 为齿高方向的进给运动,由于采用平面刀具一次只能加工一侧齿面,当一侧的所有齿面加工完毕,工件台沿 y 向运动(图示向上移动 $2r_0, r_0$ 为面齿轮的中径),以加工另一侧齿面, z 向运动在文献[9-10]中没有详细说明.

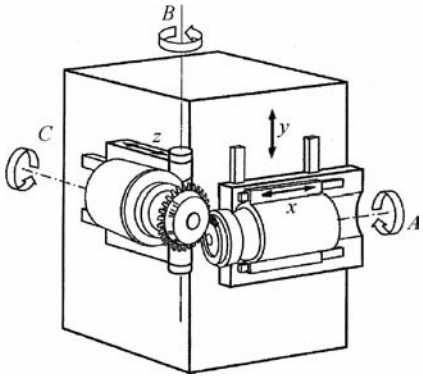


图 4 格林森的平面刀具加工面齿轮的机床配置

Fig. 4 Configuration of machine tool for manufacturing face gear in Gleason Works

2 附加运动

不管文献[9-10]是处于什么目的不提及刀具的 z 向运动,然而刀具工件台的 z 向运动非常重要. 如图 5 所示,在 S_s 中,平面刀具由初始位置 $O_s O'_g$ 直线移动到 $O_s O''_g$ (由机床的 Z 轴运动实现),再转过 $\Delta\varphi_s$ 到达 $O_s O''_g$,平面刀具即可以做到与虚拟渐开线处处相切,从而刀具在附加转角 $\Delta\varphi_s$ 和附加平移 X_s 的作用下,精确地模拟渐开线. 如图 1,最后随 S_s 转过 φ_s 到位置 OO_g ,切削面齿轮. 因此改变面齿轮的设计参数,只需调整刀具的运动参数,不用重新设计刀具. 理论上

$$X_s = r_{ps} \Delta\varphi_s = b_0 + b_1 \varphi_g + b_2 \varphi_g^2 + \cdots + b_n \varphi_g^n \tag{5}$$

式中 r_{ps} 为虚拟插齿刀的分度圆半径, $b_i (i=0, 1, \cdots, n)$ 为待确定的拟合参数.

显然,式(1)高阶滚比与式(5)的高阶运动需要借助数控加工技术^[15].

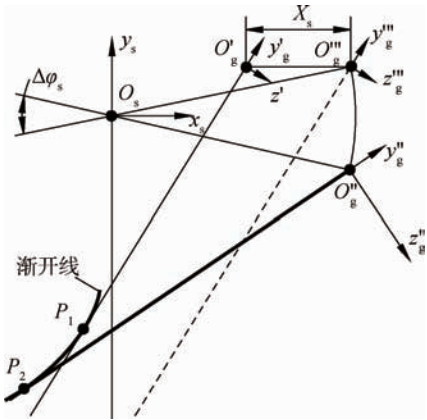


图 5 平面刀具展成渐开线的附加运动
Fig. 5 Plane cutter's additional motion for involute generation

由式(5)可知,虚拟渐开线的形成与通过齿条展成加工插齿刀(小轮)的本质是相同的。原来分属于齿条(平面刀具)的平移和插齿刀(小轮)的自转在此完全归结为平面刀具的运动。因此 $\Delta\varphi_s$ 和 X_s 不仅满足式(5),还满足平面刀具与虚拟插齿刀之间的啮合方程。

尽管引入了附加运动,由上述分析可知,图 4 所示的机床配置依然可以用来加工面齿轮。

3 滚比、运动系数的确定

由上述分析可知,要使刀具在运动过程中形成虚拟渐开线,关键是确定系数 $a_i, b_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 。其方法和步骤如下:

1) 如图 5 所示,建立平面刀具展成虚拟渐开线齿面的数学模型(坐标变换和啮合方程),虚拟渐开线齿面位置矢量为 $\mathbf{R}_s(u, \theta)$,运动参数为 $\Delta\varphi_s$ 和 X_s 。

2) 如图 1 所示,与面齿轮传统插齿过程相同,建立虚拟渐开线齿面展成面齿轮齿面的数学模型,面齿轮齿面用 $\mathbf{R}_2(u, \theta, \varphi_s)$ 表示, u 为齿廓曲面参数, θ 为齿宽曲面参数,运动参数为 φ_s ,通过啮合方程 f_{2s}^s 将 u, θ, φ_s 联系起来。

3) 在面齿轮旋转投影面上,如图 6 所示,沿齿面的对角线取 1, 2, $\dots$, q 个离散点,图中 r_1, r_2 为面齿轮的内径和外径, l 为齿面的扩展长度, E 为相邻点之间的步长。这些点确定为

$$\begin{cases} l_j = (r_1 - l) + E(j - 1) & j = 1, 2, \dots, q \\ R_j = \frac{2 \cdot 25m}{r_2 - r_1} (l_j - r_1) - r_{ps} - 1.25m \end{cases} \quad (6)$$

式中 m 为模数。之所以沿图 6 的对角线确定离散点有 3 个理由:①点 1 有最大的正值 φ_s ,点 q 有最小的负值 φ_s ;②点 1, 2, $\dots$, q 映射到插齿刀上为标准的虚拟渐开线;③通过以不同方式取离散点的计算表明。图 6 的对角线两侧的齿面相对理论齿面内凹指向轮齿内侧。

4) 用方程(7)可以确定 $\Delta\varphi_{sj}, \varphi_{sj}, \varphi_{2j}$ 和 X_{sj} 。利用式(4)则可以确定平面刀具的转角 φ_{gj} 。

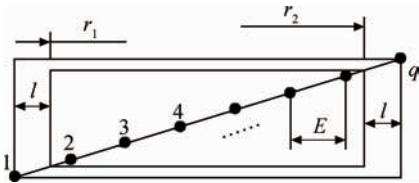


图 6 确定 a_i, b_i 的离散点

Fig. 6 Discrete points for determination a_i, b_i

$$\begin{cases} \sqrt{R_{2j}(x)^2 + R_{2j}(y)^2} = l_j \\ R_{2j}(z) = R_j \\ f_{2s}^s(u, \theta, \varphi_s) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

5) 由式(1)和式(5)有

$$\begin{bmatrix} \varphi_{21} \\ \vdots \\ \varphi_{2q} \end{bmatrix} = \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \varphi_{g1}^{n-1} \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & \cdots & \varphi_{gq}^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \mathbf{\Psi F} \quad (8)$$

并且令 $\mathbf{G} = [X_{s1} \cdots X_{sq}]^T, \mathbf{H} = [b_0 \cdots b_n]^T$, 则可以用最小平方拟合出 $\mathbf{F}, \mathbf{H}$ 的解为^[15]

$$\begin{cases} \mathbf{F} = [\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi}]^{-1} \mathbf{\Psi}^T \mathbf{D} \\ \mathbf{H} = [\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi}]^{-1} \mathbf{\Psi}^T \mathbf{G} \end{cases} \quad (9)$$

4 面齿轮的数学模型

4.1 刀具方程

图 7 所示为平面刀具的定义,在其横截面上由直线和圆弧组成,分别用来展成面齿轮的工作齿面和过渡曲面。刀具位矢方程可以表示为

$$\mathbf{R}_g = [(-r_c + u)\sin\theta \quad (-r_c + u)\cos\theta \quad 0 \quad 1]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{gc} = [(-r_c - u^* + \rho\sin U)\sin\theta \quad (-r_c - u^* + \rho\sin U)\cos\theta - \rho + \rho\cos U \quad 1]^T \quad (11)$$

单位法矢分别为

$$\mathbf{n}_g = [0 \quad 0 \quad -1 \quad 0]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{n}_{gc} = [\sin U \sin\theta \quad -\sin U \cos\theta \quad \cos U \quad 0]^T \quad (13)$$

式中 r_c 是刀具的平均半径; u, θ 是刀具圆平面参数; U 是圆弧曲面参数; u^* 定义了圆弧与直线的切点; ρ 为平面刀具圆弧半径。

在以下的推导过程中主要以面齿轮的工作齿面为例,对于过渡曲面,采用相同的步骤即可。

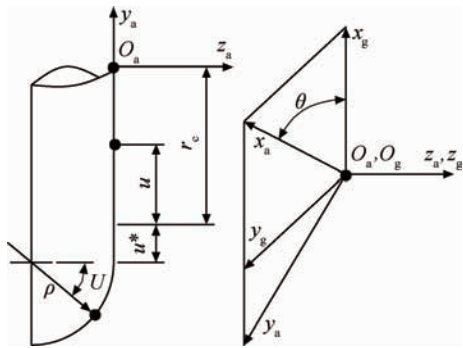


图 7 平面刀具的定义

Fig. 7 Definition of plane cutter

4.2 面齿轮的方程

图 8 所示为平面刀具展成加工面齿轮的坐标

系,描述了平面刀具与面齿轮之间的相对位置与运动关系.常数 α, w_1, γ 分别为压力角、齿槽宽和面齿轮传动的轴夹角.

坐标系 S_g, S_2 分别与平面刀具和面齿轮固联,其他坐标系 S_b, S_c, S_d, S_m, S_p 为辅助坐标系, S_m, S_p 与机床固联.则平面刀具在 S_2 中的曲面族为

$$\mathbf{R}_2(u, \theta, \varphi_g) = \mathbf{M}_{2p}(\varphi_2) \mathbf{M}_{pm}(\gamma, r_0) \cdot$$
$$\mathbf{M}_{md}(\varphi_g) \mathbf{M}_{dc}(X_s, r_{ps}) \mathbf{M}_{cb}(w_1, \alpha) \cdot$$
$$\mathbf{M}_{bg}(r_c) \mathbf{R}_g(u, \theta) = \mathbf{M}_{2g} \mathbf{R}_g(u, \theta) \quad (14)$$

式中 $\mathbf{M}_{2g}$ 为从 S_g 到 S_2 的坐标变换,其他类同.曲面族的法矢为

$$\mathbf{n}_2(u, \theta, \varphi_g) = \mathbf{M}_{2g} \mathbf{n}_g(u, \theta) \quad (15)$$

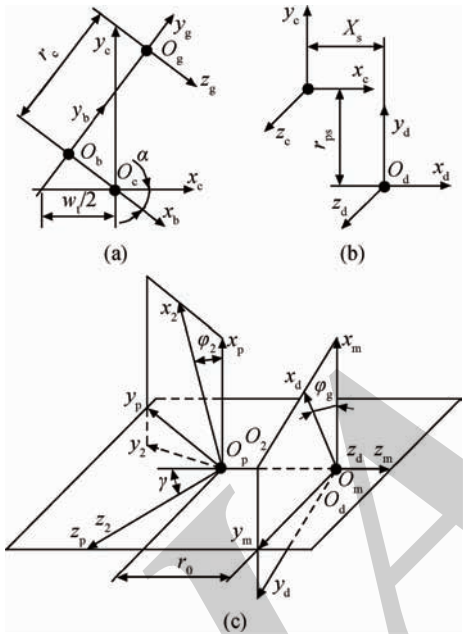


图 8 平面刀具切削面齿轮的坐标系
Fig. 8 Coordinates for cutting face gear by plane cutter

面齿轮是该曲面族的包络,确定该包络的啮合方程为

$$f_{2g}^2(u, \theta, \varphi_g) = \mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{v}_{2g}^2 = \mathbf{n}_2 \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{M}_{2g}}{\partial \varphi_g} \cdot \frac{d\varphi_g}{dt} \mathbf{R}_g \right)$$

(16)

在求 $\mathbf{M}_{2g}$ 对时间 t 的导数时,需要注意下式

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{d\varphi_2}{d\varphi_g} \cdot \frac{d\varphi_g}{dt} = \\ (a_1 + 2a_2\varphi_g + \cdots + na_n\varphi_g^{n-1})\omega_g \\ \frac{dX_s}{dt} = \frac{dX_s}{d\varphi_g} \cdot \frac{d\varphi_g}{dt} = \\ (b_1 + 2b_2\varphi_g + \cdots + nb_n\varphi_g^{n-1})\omega_g \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\omega_g = d\varphi_g/dt$.

5 算例与讨论

表 1 是本文面齿轮传动的基本参数^[16].在本例中高阶滚比及附加运动的阶数为 6,离散点的数量取 15.

表 2 是经式(6)~式(9)确定的高阶滚比、附加运动多项式的系数.滚比系数较小并随阶数的增加而增大.附加运动多项式系数的 1 阶系数近似为常数项的 10 倍,而 2 阶到 6 阶的系数呈近似 2 倍的关系.附加运动系数的数量级较大的原因是平面刀具的转角很小.

表 1 面齿轮及平面刀具参数

Table 1 Parameters of face gear and plane cutter

基本参数	取值
插齿刀齿数 N_s	30
小轮齿数 N_1	160
面齿轮齿数 N_2	25
压力角 $\alpha/(^\circ)$	90°
轴夹角 $\gamma/(^\circ)$	6.35
模数 m/mm	480
面齿轮内径 r_1/mm	560
面齿轮外径 r_2/mm	1500
平面刀具平均半径 r_c/mm	4
平面刀具圆弧半径 ρ/mm	6
阶数 n	15
离散点数量 q	2
扩展长度 l/mm	

表 2 高阶滚比及附加运动的多项式系数

Table 2 Polynomial coefficients of high order roll ratio and additional motion

系数	阶数						
	0	1	2	3	4	5	6
a_i	0.025	0.435	0.41	1.11	1.99	5.35	10.23
$b_i/10^{-3}$	0.013	0.126	0.21	0.56	1.01	2.72	5.198

图 9 是面齿轮的转角($\varphi_2 \times 500$ 表明 φ_2 放大了 500 倍)、附加位移与平面刀具转角的拟合函数关系曲线.由此图可以看出这些函数关系呈现明显的非线性,是否存在内在的必然的明确函数关系,还有待证明与推导.但是对于特定参数的面齿轮,通过本文的方法确定与之对应的滚比及附加运动函数,通过数值仿真证明是切实可行的.

图 10 是由式(14)和式(16),以及表 2 的参数仿真得到的平面刀具展成的面齿轮齿面(黑虚线),该齿面相对理论齿面(黑实线)存在一定的误

差,最大误差为 1.05 mm,最小误差数量级为 10^{-6} mm. 误差呈对角特性分布,且平面刀具展成齿面相对理论齿面向内凹,相当于某种对角修形^[16]. 要指出的是这种误差并非由于式(9)的最小平方拟合精度引起的,增加离散点的数量到 25 或减小到 7,这种误差也未有任何改变. 误差与平面刀具平均半径的大小亦无关. 这种误差实际上是由刀具平面与被加工齿面的接触特性,单参数双运动包络过程引起的,难以完全消除. 但可以优化刀具数控运动规律以进一步降低误差^[15,17].

是存在本质差别的,因此有图 10 所示的误差.

图 12、图 13 分别是平面刀具展成加工面齿轮与标准渐开线齿轮啮合的接触印痕及几何传动误差. 由图 12 可知,接触路径从根锥开始,直到外径齿顶处结束,路径为一倾斜的空间曲线,由此判断该齿轮具有较大的重合度. 同时接触椭圆的长度相较于理论情况有所减小,理论的接触圆长度近似于 24 mm,本文中在齿根处 7.8 mm,齿顶处 11.2 mm. 接触椭圆长度几乎为理论情况的一半. 由图 13 可知,该齿轮传动的几何传动误差 10^{-6} (″),约为 0″,结合接触特性可知,被加工的面齿轮与标准渐开线齿轮啮合具有“准共轭”特性.

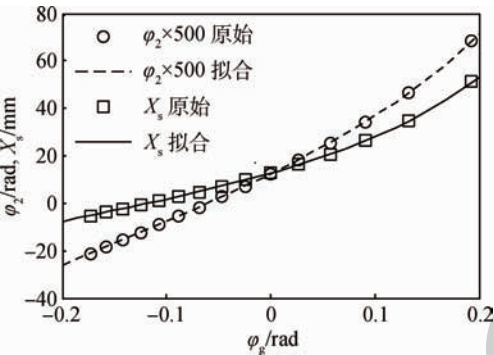


图 9 面齿轮转角、附加位移与刀具转角的关系
Fig. 9 Relationship among rotation angle of the face gear, additional displacement and rotation angle of the plane cutter

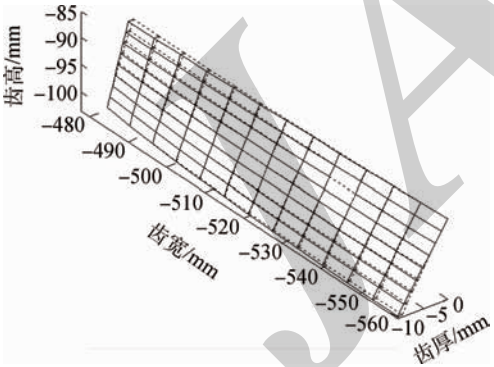


图 10 平面刀具加工面齿轮的齿面误差
Fig. 10 Tooth surface error of the face gear generated by plane cutter

图 11 是平面刀具展成加工面齿轮的过程中, φ_g 分别为 $-8.6^\circ, -5.7^\circ, -2.9^\circ, 0^\circ$ 时,平面刀具与面齿轮的瞬时接触线,均为空间直线. 两种加工过程(尽管两者非常相似)的区别在于:①理论上的,齿条—渐开线刀具(实体)—面齿轮;②本文情况,平面刀具—虚拟渐开线—面齿轮. 而理论上,众所周知,面齿轮与虚拟插齿刀的接触线为空间曲线,而虚拟插齿刀与齿条(平面刀具)为直线接触,因此齿条与面齿轮是点接触的. 因此两种加工方法

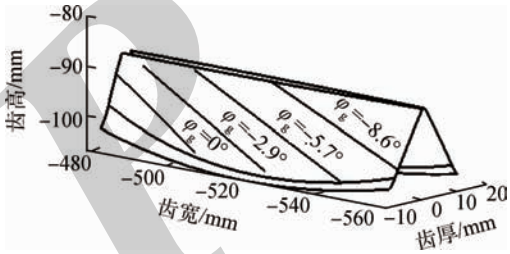


图 11 面齿轮与平面刀具的接触线($r_c = 200$ mm)
Fig. 11 Contact line between the face gear and plane cutter ($r_c = 200$ mm)

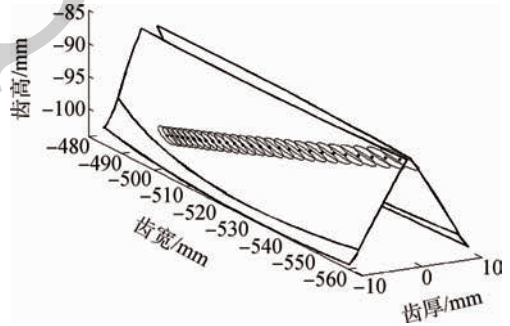


图 12 面齿轮传动的接触路径及椭圆
Fig. 12 Contact path and ellipse of the face gear transmission

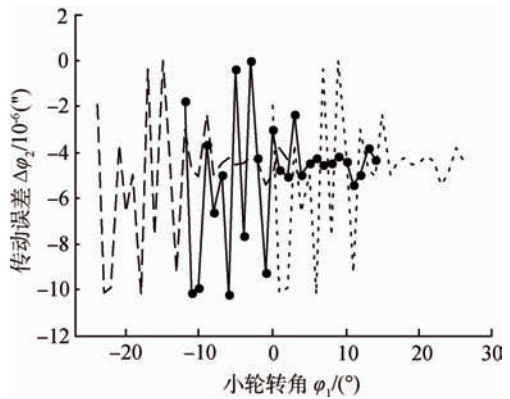


图 13 面齿轮的传动误差
Fig. 13 Transmission errors of the face gear

格林森优化后的接触路径^[9]与图12的接触路径非常相似。虽然传动误差不同,但是显然简单地优化滚比系数,即可实现抛物线传动误差和双向鼓形齿面修形。

图11、图12平面刀具的平均半径分别为200 mm和1 500 mm,可以看出随刀具半径的增大,齿根曲线的曲率半径增大(齿宽相同,图11的齿根曲线相对坐标轴,上翘较大,曲率半径小,图12的齿根曲线上翘比较平缓,曲率半径大)。根据格林森在直齿锥齿轮方面的经验^[18],根据齿根弯曲强度设计合理的刀具半径还是必要的。

6 结 论

本文首先介绍了格林森平面刀具加工面齿轮的原理和方法,基于对此原理与方法的研究,提出了附加运动,这个附加运动对平面刀具加工面齿轮来说是非常重要和必要的。提出了高阶滚比、附加运动函数多项式系数的确定方法;建立了展成加工坐标系;推导了平面刀具展成加工面齿轮的数学模型;进而进行了滚比、附加运动、误差、轮齿接触分析等数值仿真。结果表明:

1) 平面刀具展成的齿面相对传统方法展成的齿面存在一定的误差,偏差为负,这种偏差可视作为齿面的一种修形,轮齿接触分析仿真表明,由于该偏差的存在,被加工齿面与标准渐开线小轮的啮合呈现“准共轭”特性。

2) 平面刀具与被加工齿面是空间线接触的,无需齿向进给运动,切齿或磨齿效率高。平面刀具的转角与其附加运动和面齿轮的旋转为非线性函数关系。

参考文献:

- [1] Litvin F L, Fuentes A. Gear geometry and applied theory [M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [2] 吴亚男. 面齿轮滚齿加工方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
WU Yanan. Research on hobbing method of face gear[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] 彭先龙, 方宗德, 苏进展, 等. 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, et al. Theory analysis for application grinding disk in face gear grinding [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1159-1165. (in Chinese)
- [4] 唐进元. 一种盘形刀具加工面齿轮的方法: 中国, CN

- 104551265 A[P]. 2015-04-29.
- [5] Litvin F L, Fuentes A, Zanzi C, 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.
- [6] 赵宁, 郭辉, 方宗德, 等. 用球形滚刀滚切面齿轮的理论误差[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 677-682.
ZHAO Ning, GUO Hui, FANG Zongde, et al. Theory error of cutting face gears with sphericity hob [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 677-682. (in Chinese)
- [7] TAN Jie. Face gear forging method: United States, 6129793[P]. 2000-10-10.
- [8] YANG Xiaoyu, TANG Jinyuan. Research on manufacturing method of CNC plunge milling for spur face gear[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3013-3019.
- [9] Stadtfeld H J. Coniflex face gear cutting and grinding[EB/OL]. [2010-09-01]. <http://www.gearsolutions.com/article/detail/6020/coniflex-face-gear-cutting-and-grinding>.
- [10] The Gleason Works. Method and tool for manufacturing face gear: United States, US2012/00099939 A1[P]. 2012-04-26.
- [11] 毛世民, 曾新宇. 一种面齿轮磨齿方法: 中国, CN 103264198A[P]. 2013-08-28.
- [12] WANG Peiyu, Fong Z H. Fourth-order kinematic synthesis for face-milling spiral bevel gears with modified radial motion correction[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 128(2): 457-467.
- [13] Kolivand A M, Kahraman A. An ease-off based optimization of the loaded transmission error of hypoid gears[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(1): 011010. 1-011010. 9.
- [14] FAN Qi. Computerized modeling and simulation of spiral bevel and hypoid gears manufactured by gleason face hobbing process[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 128(6): 1315-1327.
- [15] Shih Y P. A novel ease-off flank modification methodology for spiral bevel and hypoid gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(8): 1108-1124.
- [16] 彭先龙, 胡锡文, 方宗德. 构造拓扑修形齿面的面齿轮传动主动设计[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1216-1222.
PENG Xianlong, HU Xiwen, FANG Zongde. Active design of face gear for modifying ease-off topology flank[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5): 1216-1222. (in Chinese)
- [17] FAN Qi, DaFoe R S, Swanger J W. Higher-order tooth flank form error correction for face-milled spiral bevel and hypoid gears[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(7): 072601. 1-072601. 7.
- [18] Stadtfeld H J. Straight bevel gears on phoenix machines using coniflex tools[EB/OL]. [2007-12-01] <http://www.gearsolutions.com/article/detail/5763/straight-bevel-gears-on-phoenix-machines-using-coniflex-tools>.