

切削参数对弧齿锥齿轮齿面平均 残余高度的影响

邓 静¹, 贾新杰², 邓效忠¹

(1. 河南科技大学 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003;
2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 基于弧齿锥齿轮展成加工原理, 推导了各数控(NC)轴运动表达式, 研究刀盘转速、数控轴联动速度和单步插补角度等参数对齿面平均残留高度的影响规律, 建立了两者之间的耦合关系, 在此基础上完成了切齿验证试验。结果表明: 在降低齿面平均残留高度方面, 刀片旋转切削速度的改变影响很小, 数控轴联动移动速度的影响略有增加, 单步插补度数的影响最为显著, 实验结果和理论分析结果一致, 验证了本文理论的正确性。

关 键 词: 弧齿锥齿轮; 数控(NC)滚切法; 精铣; 切削参数; 平均残留高度

中图分类号: V232.8; TG61⁺1; TH161⁺.5

文献标志码: A

Effect of cutting parameters on average scallop height for tooth surface of spiral bevel gears

DENG Jing¹, JIA Xinjie², DENG Xiaozhong¹

(1. Henan Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

2. School of Mechatronics Engineering,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: Based on the spiral bevel gear finish milling theories conducted by the numerical control (NC) face milling method, the expressions of motions for the NC axes were deduced, the influencing patterns of cutting speed, rate of movement of linkage axes, and degree of single step interpolation on the average scallop heights were studied, and their coupling relations were setup. Accordingly, the cutting experiment was conducted to verify the above results. The proposed study indicates that increasing the cutting speed and the rate of movement of the linkage axes has limited effect on average scallop height, while decreasing the degree of single step interpolation is able to reduce the average scallop height dramatically, which agrees with the theoretical analysis.

Key words: spiral bevel gears; numerical control (NC) face milling method;
finishing face milling; cutting parameters; average scallop height

收稿日期: 2016-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51475141)

作者简介: 邓静(1983—), 女, 讲师, 博士, 主要从事齿轮加工及装备技术研究。

通讯作者: 邓效忠(1957—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事齿轮先进制造理论及装备技术研究。E-mail: dxz01@163.com

引用格式: 邓静, 贾新杰, 邓效忠. 切削参数对弧齿锥齿轮齿面平均残余高度的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1690-1697.
DENG Jing, JIA Xinjie, DENG Xiaozhong. Effect of cutting parameters on average scallop height for tooth surface of spiral bevel gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1690-1697.

随着计算机技术的发展,弧齿锥齿轮的制造正在朝着高效率、高精度的方向发展。由于受诸多因素影响,弧齿锥齿轮真实齿面形貌成因复杂,机床精度和刚度、刀盘精度、切削参数等方面严重制约着弧齿锥齿轮的加工精度。因此,研究弧齿锥齿轮齿面表面粗糙度的影响规律具有很强的现实意义。

由于加工方法不同,相关学者建立了多种弧齿锥齿轮表面粗糙度评定数学模型,且对于加工路径进行合理规划。吴福忠^[1]采用包络面构建技术,在等残留高度的基础上对刀具路径进行了规划,并通过实验验证了该方法的可行性。郝小忠等^[2]根据不同的曲面特征,采用环形刀有针对性地进行多轴加工,构建了基于最大步距理念的数学模型,论证了残留高度恒定时步距与刀倾之间的映射关系并对最佳步距进行了计算,通过实验验证了该算法在保证加工精度的前提下,能有效缩短加工刀轨路径,提高加工效率。彭芳瑜等^[3]采用刀刃点扫描识别技术,基于超精加工范畴内构建了一种空间表面形貌模型,解析在运动过程中刀刃的运动形态,将曲面点转化为点云数据进行表达并设定随动包容盒,在此基础上对既定数据进行分析 and 计算,完成了曲面形貌的构建。梁鑫光等^[4]提出了一种在工件表面等距离间隔缓存残留高度、在刀具端等时间间隔缓存振动响应的双缓存离散机制,利用系统瞬时动态位移响应的插值信息对已加工表面法向残留高度进行修正,建立了考虑铣削系统动力学响应的球头刀 5 轴铣削已加工表面形貌预测模型。Antoni 等^[5]针对端铣加工过程,采用核函数回归和基因算法估计其表面粗糙度。Plakhotnik^[6]对 5 轴端铣材料去除后真实形貌进行建模和计算,并通过实验进行了验证。Ramesh 等^[7]研究了航空钛合金车削表面粗糙度的测量和定量分析。Routara 等^[8]采用表面响应法和基因算法优化影响数控车削表面粗糙度的加工参数。Zain 等^[9]采用人工智能网络预测端铣加工表面粗糙度。Edward 等^[10]针对机加工过程表面粗糙度成因的模型进行了分析,并进行了实验验证。YUAN Entao 等^[11]对细分表面多轴加工路径进行了规划。İlhan 等^[12-13]采用人工神经网络和多重回归法对车削加工表面粗糙度进行建模和预测。韩佳颖等^[14]构建了滚切法加工弧齿锥齿轮时切削参数和齿面平均残留高度的映射关系,但并未给出切削参数的影响规律。明兴祖等^[15]研究了 5 轴联动弧齿锥齿轮磨齿机磨齿加工齿面表面粗糙度的定量计算。

弧齿锥齿轮齿面拓扑结构相当复杂,弧齿锥齿轮表面粗糙度可用表面粗糙度量块定性测量或表面形貌测量仪定量测量。在弧齿锥齿轮加工前,若能通过理论方法对齿面残留高度进行计算,将会有效减少切削参数的调整次数,合理优化齿面啮合性能。结合理论分析和实验验证,本文将基于国产 YK2260X 数控铣齿机对刀盘转速、数控轴联动速度和单步插补角度等切削参数对齿面平均残留高度的影响规律做定量分析。

1 YK2260X 数控弧齿锥齿轮铣齿机各轴运动表达式

YK2260X 数控铣齿机是我国具有自主知识产权的弧齿锥齿轮制造装备,其切齿数学模型如图 1 所示。其中,坐标轴 Z_1 和刀盘同轴,坐标系 S_n 位于刀具轴与工件轴共线时的位置。设定 $O_n(0,0,0)$,轮坯箱体绕 M 点旋转,坐标系 S_1 和虚拟摇台固连, S_r 和 q 分别为虚拟径向和角向刀位,工件坐标系 S_1 的原点和设计交叉点重合,机床辅助坐标系 S_m ,垂直轮位 E_m ,床位修正量 ΔB ,轴向轮位修正量 ΔA 。刀盘转角和齿轮转角分别为 φ_i, φ_1 ,齿轮设计交叉点和轮坯箱体旋转中心的距离为 L ,轮坯安装角为 γ_m 。 C_x, C_y 和 C_z 表示了刀盘与工件之间的 3 个直线位置关系。

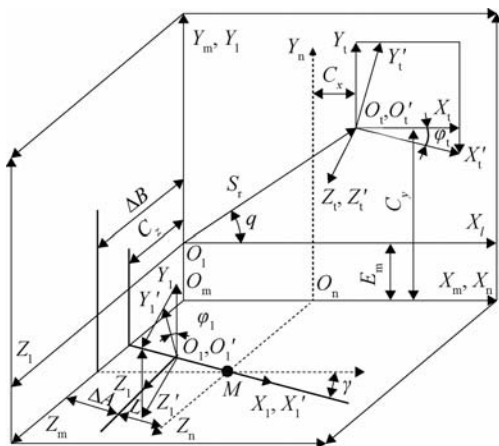


图 1 YK2260X 铣齿加工模型

Fig. 1 YK2260X milling gear machining model

设滚比 m , 参考点对应的轮坯初始角度和虚拟角向刀位为 φ_0 和 q_0 , 由此可得 A 轴 (φ 为工件轴转角)、X 轴、Y 轴和 Z 轴的运动表达式分别为^[16]

$$C_z = \Delta B - (\Delta A - L)\sin\gamma_m \tag{4}$$

式中 c, d 分别为确定 $\varphi-q$ 关系的多项式系数。
 $L=L_0-C-D$, 上式中轮坯安装基面至轮坯箱体
旋转中心的距离 L_0 为机床常数。工件安装距表
示为 C , 工件夹具的轴向厚度表示为 D 。

2 平均残留高度计算

2.1 刀片切削刃建模

如图 2 所示, 坐标系 S_t 和刀盘固连, 为刀盘
坐标系, 则刀盘切削刃方程可以表示为(忽略刀尖
圆弧)

$$\mathbf{r}_{ti}(s, \theta) = \begin{bmatrix} (r_c + s\sin\alpha)\cos\theta \\ (r_c + s\sin\alpha)\sin\theta \\ -s\cos\alpha \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

法向量为

$$\mathbf{n}_{ti} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha\cos\theta \\ -\cos\alpha\sin\theta \\ \pm\sin\alpha \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中 (s, θ) 为曲面坐标; r_c 为刀尖半径; α 为刀具齿
形角, 其中, 外切削刃 α 取“+”, 内切削刃取“−”。

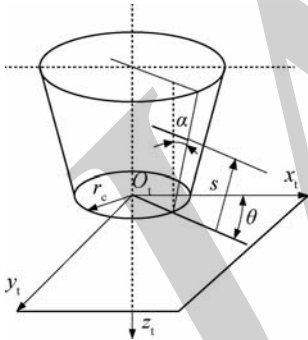


图 2 刀盘坐标系
Fig. 2 Coordinate system of the cutter head

2.2 小轮精切齿面方程

根据所建立的加工数学模型, 切削刃 i 所包
络的齿面在任意时刻可以表示为

$$\mathbf{r}_{1'i}(s, \theta, \varphi_i, \varphi_1) = \mathbf{M}_{1't} \mathbf{r}_{ti}(s, \theta) \tag{7}$$

式中 $\mathbf{M}_{1't} = \mathbf{M}_{1'1}(\varphi_1)\mathbf{M}_{1m}\mathbf{M}_{ml}\mathbf{M}_{lt}\mathbf{M}_{tt'}(\varphi_t)$, 其中
 $\mathbf{M}_{1't}, \mathbf{M}_{1'1}, \mathbf{M}_{1m}, \mathbf{M}_{ml}, \mathbf{M}_{lt}, \mathbf{M}_{tt'}$ 分别为从坐标系 S_t
到 $S_{1'}$, $S_{1'}$ 到 $S_{1'}$, S_m 到 S_1 , S_l 到 S_m , S_t 到 S_1 , S_t 到
 S_t 的位置向量变换矩阵。

对应的切削刃的法线为

$$\mathbf{n}_{1'i}(s, \theta, \varphi_i, \varphi_1) = \mathbf{L}_{1't} \mathbf{n}_{ti}(s, \theta) \tag{8}$$

式中 $\mathbf{L}_{1't} = \mathbf{L}_{1'1}(\varphi_1)\mathbf{L}_{1m}\mathbf{L}_{ml}\mathbf{L}_{lt}\mathbf{L}_{tt'}(\varphi_t)$, 其中 $\mathbf{L}_{1't},$
 $\mathbf{L}_{1'1}, \mathbf{L}_{1m}, \mathbf{L}_{ml}, \mathbf{L}_{lt}, \mathbf{L}_{tt'}$ 分别为 $\mathbf{M}_{1't}, \mathbf{M}_{1'1}, \mathbf{M}_{1m}, \mathbf{M}_{ml},$

$\mathbf{M}_{lt}, \mathbf{M}_{tt'}$ 的 3 阶主子式。

滚切小轮齿面时, 产形轮和被加工小轮的啮
合方程为^[17]

$$\mathbf{n}_m \cdot \mathbf{v}_m^{(1p)} = 0 \tag{9}$$

由式(7)、式(8), 可得 φ_t 和 φ_1 为变量的数
控滚切加工时齿面方程和单位法线方程

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{1'} = \mathbf{r}_1(\varphi_t, \varphi_1) \\ \mathbf{n}_{1'} = \mathbf{n}_1(\varphi_t, \varphi_1) \end{cases} \tag{10}$$

2.3 精切切削参数计算

基于滚切法弧齿锥齿轮小轮的数控精加工,
切削参数主要包括以下几项: 刀盘旋转切削速度
 v_c , X 轴和 Y 轴合成运动的线速度 v_{XY} , 单齿插补
角向摆动范围 $q \in [q_1, q_2]$, 单步插补度数 Δq 。

单齿插补总步数为

$$N_c = (q_1 - q_2) / \Delta q \tag{11}$$

刀盘角速度为

$$\omega_t = v_c / r_c \tag{12}$$

X 轴、 Y 轴插补模拟摇台转动的角速度为

$$\omega_c = v_{XY} / D_{sr} \tag{13}$$

式中 r_c 为刀尖半径, D_{sr} 为机床的径向刀位。

在加工过程中, 有 N 条切削刃参与切削, 相
邻两条切削刃之间的夹角为

$$\theta_p = 2\pi / N \tag{14}$$

式中 N 为刀片个数。

设定在加工起始位置时切削刃 $i=1$ 与坐标
轴 x_t 共线, 即在起始位置时, $\theta_0=0^\circ$ 。刀刃 i 的转
角在任意时刻 t 可以表示为

$$\theta_i(t) = \theta_i + \varphi_i(t) \tag{15}$$

式中 $\theta_i = \theta_0 - (i-1)\theta_p, i=1, 2, \dots, N$ 。

刀盘转角为

$$\varphi_t(t) = \omega_t t \tag{16}$$

角向摆动为

$$q_c(t) = q_1 + k(q_2 - q_1) / N_c \tag{17}$$

式中 k 表示第 k 次插补, $0 \leq k \leq N_c$ 。

滚切法加工弧齿锥齿轮小轮的转角为

$$\varphi_1(t) = \varphi_0 + q_c(t) / m \tag{18}$$

式中 φ_0 代表工件起始角度。

2.4 齿面平均残留高度求解

从理论上讲, 产形面与小轮齿面是线接触, 然
而实际加工中, 切削刃和小轮齿面为点接触。

如图 3 所示, $\widehat{M_i - N_i M_x Q_i - M_i}$ 所围区域表示
残留面积。对于任意时间 t , 残留高度 δ_i 为: 从理
论齿面到第 k 次插补(对应切削刃 i) 时与第 $k+1$
次插补(对应切削刃 $i+2$) 时相交点 M_i 之间的距

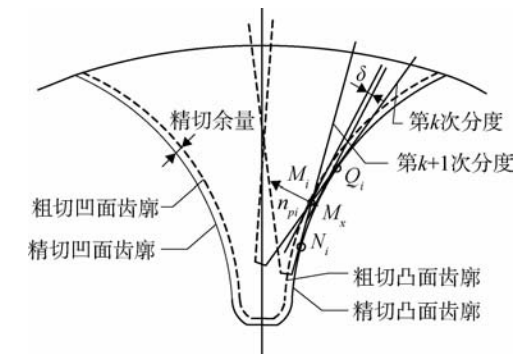


图 3 小轮精切示意图

Fig. 3 Schematic of finishing face milling of the pinion

离。 Q_i, N_i 分别为理论齿面与切削刃 i 和 $i+1$ 的瞬时接触点,其理论残余高度为零。在接触点处刀具和工件之间为线接触,满足啮合方程。 Q_i, N_i 形成的点集即为两者之间的接触线。

基于上述理论,以小轮凸面为计算对象,齿面平均残留高度 $\bar{\delta}$ 的计算步骤如下:

1) 任意时刻 t ,将式(16)、式(18)代入式(10)可得 $(r_{1'}, n_{1'})$,然后将式(15)代入式(5)可得 s , $s \geq 0$ 说明刀具已经切入轮坯, $s < 0$ 说明刀具未接触轮坯。进而易于求出第 k 次和第 $k+1$ 次插补 Q_i, N_i 的坐标向量;

2) 结合齿面旋转投影原理,判断 Q_i, N_i 是否为齿面点。若是,根据点 (Q_i, N_i) 和式(6)可求得任意时刻 t 切削刃 i 、切削刃 $i+1$ 在小轮坐标系 S_1 内的方程,进而求得两者的交点 $M_i(\theta_i, \varphi_i)$ 。否则,终止本次计算,返回上一步;

3) 假定沿点 M_i 法线方向(如式(10)所示)进行投影,对应的理论齿面点坐标为 $M_i(\theta_x, \varphi_x)$,则有

$$r_{1'i}(\theta_x, \varphi_x) + \delta_i n_{1'i}(\theta_x, \varphi_x) = r_{1'i}(\theta_i, \varphi_i) \tag{19}$$

式中 (θ_x, φ_x) ,未知数 δ_i ,共有 3 个独立方程,可以采用迭代法求解 δ_i ;

4) 其结果 δ_i 录入数组当中,并计算数组平均值 $\bar{\delta}$,该值即为齿面平均残留高度;

5) 虽然齿轮凹、凸面加工参数和刀盘参数不同,但平均残留高度计算方式相同,此处不再赘述。

值得注意的是齿面平均残留高度不同于齿面表面粗糙度,前者是齿面表面上若干计算点残留高度的平均值,而后者是指齿面上沿一定方向一定取样长度内轮廓算术平均偏差。

3 算 例

3.1 实例数据

以单面法精铣弧齿锥齿轮小轮为例,本文将

结合上述计算方法进行理论计算及实验验证。表 1~表 3 分别为小轮几何参数、数控铣齿机调整参数及刀盘参数。

表 1 小轮几何参数

Table 1 Geometrical parameters of the pinion	
参数	数值及说明
齿数	18
模数/mm	7
旋向	左
螺旋角/(°)	35
平均压力角/(°)	20
面锥角/(°)	38.13
齿宽/mm	35

表 2 YK2260X 型 4 轴数控铣齿机调整参数

Table 2 Adjusting parameters of the YK2260X four-axis numerical control gear milling machine		
加工参数	凸面	凹面
机床安装角 $\gamma_m/(^\circ)$	30.703881	30.703881
单齿插补角向摆角范围 $q_1 \sim q_2/(^\circ)$	0~40	0~40
单步插补度数 $\Delta q/(^\circ)$	0.25	0.25
角向刀位 $q/(^\circ)$	-68.129741	-75.872571
径向刀位 S_r/mm	95.80	95.697520
水平轮位 $\Delta A/\text{mm}$	0	0
垂直轮位 E_m/mm	-1.877251	-1.151015
床位 $\Delta B/\text{mm}$	0	0
轮坯安装距 C/mm	237.863137	235.214039
初始转角 $\varphi_0/(^\circ)$	0	0
滚比 m	1.769898	1.696115

表 3 精切刀盘参数

Table 3 Parameters of the finishing face milling cutter head	
参数	数值
刀盘半径 r_c/mm	114.78
理论错刀距 W/mm	3.06
刀片数 N	8
刀片压力角 $\alpha/(^\circ)$	19(外刀片) -21(内刀片)

3.2 计算结果分析

采用文中第 2.4 节方法,并编写相应程序,即可计算出相邻两条啮合线之间的残留高度 δ_i ,再取其平均值,即可求出全齿面内样本点的平均残留高度 $\bar{\delta}$ 。

1) 切削速度对平均残留高度影响

设定数控轴联动速度为 30 mm/min,单步插补度数为 $\Delta q=0.25^\circ$,切削速度 v_c 分别取为:25,

30,35,40,45,50 m/min,根据前文理论分别对平均残留高度进行计算,对应结果为 0.773,0.687,0.636,0.583,0.554,0.512 μm ,可得 v_c 与 $\bar{\delta}$ 的关系如图 4 所示,得出以下结论:切削速度 v_c 越大,齿面平均残留高度越小,但减小幅度并不大。

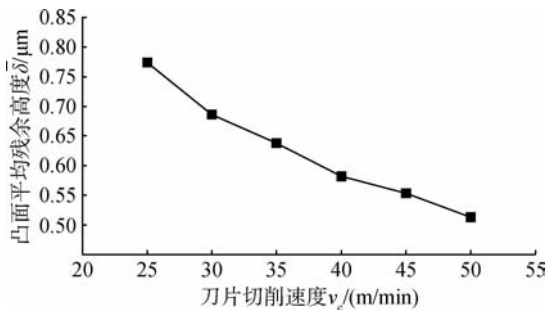


图 4 凸面平均残留高度 $\bar{\delta}$ 与切削速度 v_c 的关系
($v_{XY}=30\text{ mm/min}$, $\Delta q=0.25^\circ$)

Fig. 4 Relationship between $\bar{\delta}$ (convex side) and v_c
($v_{XY}=30\text{ mm/min}$, $\Delta q=0.25^\circ$)

2) 数控轴联动速度对平均残留高度影响

设定切削速度为 35 m/min,单步插补度数为 $\Delta q=0.25^\circ$,数控轴联动速度 v_{XY} 分别取为 20, 30, 40, 50, 60 mm/min,根据计算得到的对应的凸面平均残余高度为 0.583, 0.594, 0.605, 0.622, 0.631 μm ,经拟合后得到 v_{XY} 与 $\bar{\delta}$ 的关系如图 5 所示,可得出以下结论: v_{XY} 越大, $\bar{\delta}$ 越大,但增大幅度不大。

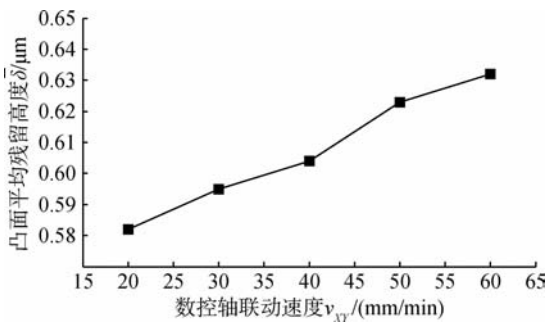
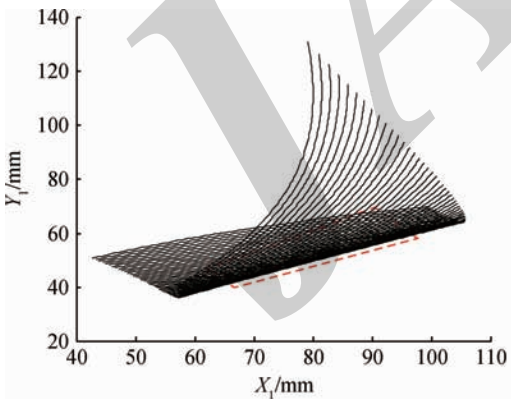


图 5 凸面平均残留高度 $\bar{\delta}$ 与联动轴移动速度 v_{XY} 的关系
($v_c=35\text{ mm/min}$, $\Delta q=0.25^\circ$)

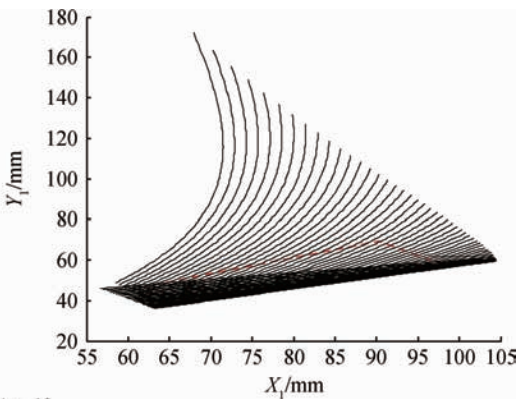
Fig. 5 Relationship between $\bar{\delta}$ (convex side) and v_{XY}
($v_c=35\text{ mm/min}$, $\Delta q=0.25^\circ$)

3) 单步插补度数 Δq 对平均残留高度 $\bar{\delta}$ 影响

如图 6 所示,随着单步插补度数大小不同,产形面与小轮齿面接触线的疏密也不同,图中虚线框为齿廓旋转投影后在小轮坐标系 $S_1(O_1-X_1Y_1Z_1)$ 中 X_1-Y_1 平面内的投影。通过控制单齿插补角向摆动范围 $q \in [q_1, q_2]$ 可以限制接触线与齿面接触的范围。根据图 6 可以得出以下结论:精切小轮时,轮齿大端的接触线密集性要小于小端,当减小单步插补度数时,产形轮与小轮齿面之间接触线也随之变密。接触线密表明第 k 次分度和第 $k+1$ 次分度之间切削刃夹角变小,从而残留高度 δ_i 减小。



(a) $\Delta q=1^\circ$



(b) $\Delta q=0.5^\circ$

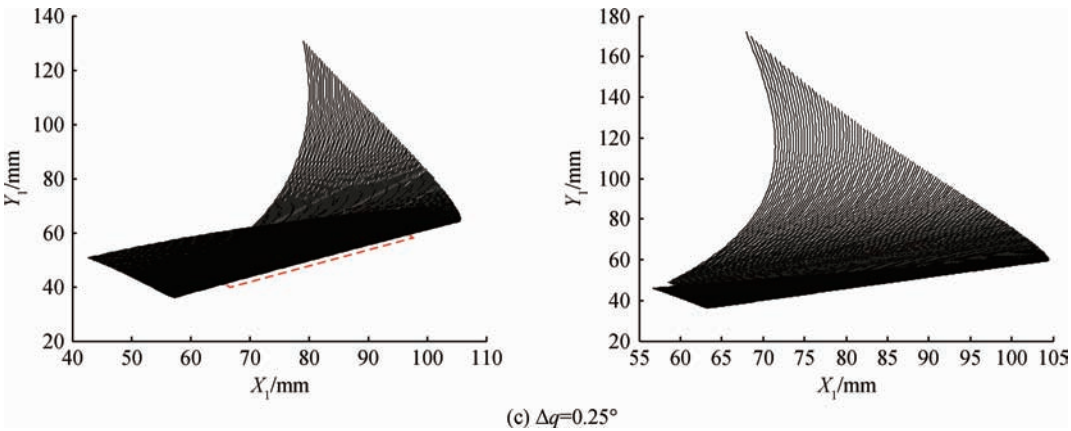


图 6 产形轮与小轮齿面的接触线(左为凸面,右为凹面, $v_c=35\text{ mm/min}$, $v_{XY}=60\text{ mm/min}$)

Fig. 6 Contact line between the generating gear and the pinion (left for the convex side and right for the concave side, $v_c=35\text{ mm/min}$, $v_{XY}=60\text{ mm/min}$)

表 4 显示出不同单步插补度数对应的齿面平均残留高度计算结果,可以得出以下结论:单步插补度数的变化对齿面平均残留高度具备显著的影响,当前者减小一半时,后者减小约 4 倍。随着单步插补度数的减小,齿面平均残留高度计算值不断减小。

表 4 齿面平均残留高度计算值与实验测量数据 ($v_c=57.72\text{ m/min}$, $v_{XY}=90.00\text{ mm/min}$)

Table 4 Computed value and experiment measurement data of the tooth surface average scallop height ($v_c=57.72\text{ m/min}$, $v_{XY}=90.00\text{ mm/min}$)

参数	$\Delta q=1^\circ$		$\Delta q=0.25^\circ$		$\Delta q=0.167^\circ$		$\Delta q=0.125^\circ$	
	凸面	凹面	凸面	凹面	凸面	凹面	凸面	凹面
齿面范围内计算点数 N	393	393	1546	1546	2316	2316	3085	3085
齿面最大残留高度 $\delta_{\max}/\mu\text{m}$	13.955	9.133	0.906	0.583	0.405	0.260	0.228	0.146
齿面平均残留高度 $\bar{\delta}/\mu\text{m}$	2.204	2.268	0.138	0.142	0.062	0.063	0.035	0.036
实测齿面表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	3.5604	3.2117	2.2975	1.8758	1.2374	1.4627	1.4562	1.2611
实测齿面 45 点平均偏差 μm	16.8	29.5	15.7	25.1	15.2	28.5	15.1	29.3

3.3 齿面表面粗糙度与齿面平均偏差实测结果

实验目的在于验证齿面平均残留高度计算结果与齿面表面粗糙度、齿面 45 点平均偏差的关系。切齿在 YK2260X 型铣齿机上进行,机床调整参数经齿轮测量中心(型号:JD45+)反调以获得更小的齿面偏差^[18]。所用刀具为单面内精切刀盘,具

有 8 个刀片,材质为高速钢,刀具前角 $\eta_r=20^\circ$,采用千分表精调刀盘径跳误差(其径向跳动误差为 $\pm 0.003\text{ mm}$)。轮坯材料 20CrMoTi,使用正火处理,油冷。精切完成后,用 XM-200 型表面形貌测量仪进行表面粗糙度测量(图 7),并用弧齿锥齿轮测量仪测量齿面 45 点平均偏差(图 8)。



图 7 表面形貌测量仪测量表面粗糙度

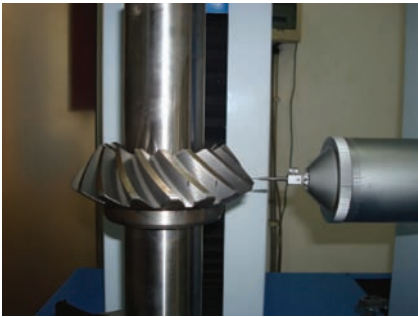


图 8 弧齿锥齿轮测量仪测量 45 点平均偏差

Fig. 7 Surface roughness measurement by surface topography measuring instrument

Fig. 8 45-point average deviation measured by spiral bevel gear measuring instrument

图 9 为每度分度数取不同值时加工齿面的表面粗糙度对比。从图中可以看出随着每度分度数的减小,齿面表面粗糙度值减小,但齿面表面粗糙度实测值在 $\Delta q = 0.167^\circ$, $\Delta q = 0.125^\circ$ 时稳定于 $R_a = 1.6$ 左右。

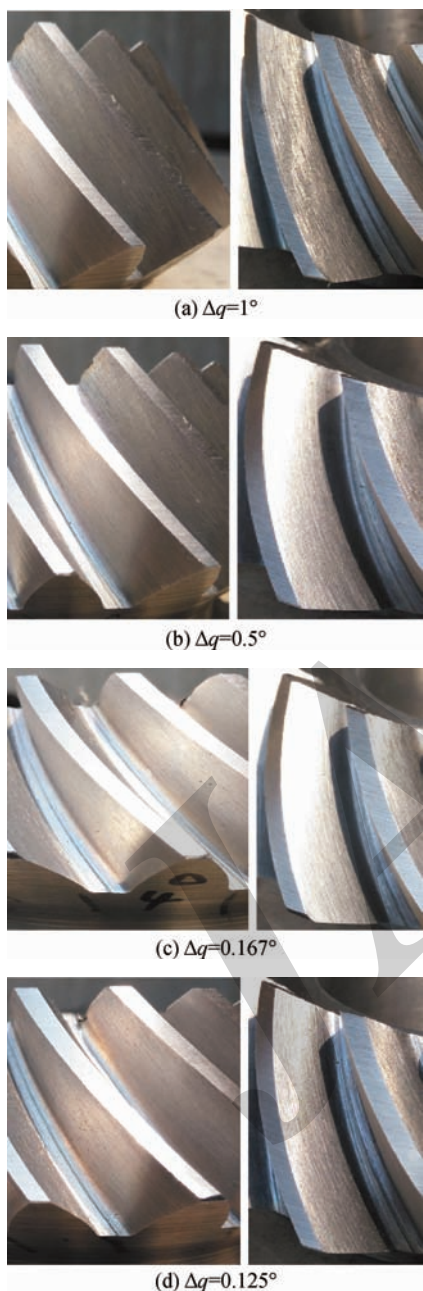


图 9 单步插补度数不同时齿面表面粗糙度对比
Fig. 9 Tooth surface roughness contrast with different single-step interpolation degrees

4 结 论

1) 依据数控滚切法精铣弧齿锥齿轮的加工理论及方法,以建立理论计算齿面平均残留高度的数学模型为目的,分析了采用数控滚切法精密

加工弧齿锥齿轮小轮时齿面残留高度的形成机理,构建了切削参数与齿面平均残留高度之间的映射关系。

2) 平均残留高度计算结果显示:刀片旋转切削速度(v_c)越高,数控轴联动速度(v_{XY})越慢,齿面平均残留高度越小;当单步插补度数减小到一半时,其齿面平均残留高度相应减少约 4 倍。

3) 实测齿面表面粗糙度值大于齿面平均残留高度值,这是因为理论计算时建立的模型是理想化的,并没有考虑机床误差、刀盘及刀片安装误差、因加工而产生的振动误差及刚度误差等因素的影响。

参考文献:

- [1] 吴福忠. 基于包络面构建的等残留高度刀具路径规划[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 217-221.
WU Fuzhong. Constant scallop height tool path planning by constructing envelope surface[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 217-221. (in Chinese)
- [2] 郝小忠, DUROOBI A A, 陈文亮, 等. 环形刀等残留高度多轴加工步距计算[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 538-542.
HAO Xiaozhong, DUROOBI A A, CHEN Wenliang, et al. Calculation of stepover based on constant scallop-height in multi-axis torus milling process[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(4): 538-542. (in Chinese)
- [3] 彭芳瑜, 方正隆, 吴警, 等. 基于点云的超精密铣削加工三维表面形貌仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1-6.
PENG Fangyu, FANG Zhenglong, WU Jing, et al. Three-dimensional surface topography simulation of ultra precision milling based on point cloud[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(8): 1-6. (in Chinese)
- [4] 梁鑫光, 姚振强. 基于动力学响应的球头刀五轴铣削表面形貌仿真[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 171-178.
LIANG Xinguang, YAO Zhenqiang. Dynamic-based simulation for machined surface topography in 5-axis ball-end milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 171-178. (in Chinese)
- [5] ANTONI W, MOHANNAD I D. Kernel based regression and genetic algorithms for estimating cutting conditions of surface roughness in end milling machining process[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(14): 11634-11641.
- [6] PLAKHOTNIK D, LAUWERS B. Computing of the actual shape of removed material for five-axis flat-end milling[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44: 1103-1114.
- [7] RAMESH S, KARUNAMOORTHY L, PALANIKUMAR K. Measurement and analysis of surface roughness in turn-

ing of aerospace titanium (GR5)[J]. Measurement,2012, 45(5):1266-1276.

[8] ROUTARA B C,SAHOO A K,PARIDA A K,et al. Response surface methodology and genetic algorithm used to optimize the cutting condition for surface roughness parameters in CNC turning[J]. Procedia Engineering,2012, 38:1893-1904.

[9] ZAIN A M,HARON H,SHARIF S. Prediction of surface roughness in the end milling machining using artificial neural network[J]. Expert Systems with Applications,2010, 37(2):1755-1768.

[10] EDWARD M, LUKASZ N. Analysis and verification of surface roughness constitution model after machining process[J]. Procedia Engineering,2012,39:395-404.

[11] YUAN Entao,SHAO Bing. Tool-path generation of multi-axis machining for subdivision surface[J]. AASRI Procedia,2012,3:60-65.

[12] İLHAN A,HARUN A. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method[J]. Measurement,2011,44(9):1697-1704.

[13] İLHAN A,MEHMET C. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method[J]. Expert Systems with Applications,2011,38(5):5826-5832.

[14] 韩佳颖,王太勇,李清,等. 螺旋锥齿轮滚切加工残留高度的精确计算[J]. 机械科学与技术,2012,31(1):83-86.

HAN Jiaying, WANG Taiyong, LI Qing, et al. Accurate calculation for spiral bevel gear generated cutting scallop height[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2012,31(1):83-86. (in Chinese)

[15] 明兴祖,严宏志,陈书涵. 多轴数控磨削螺旋锥齿轮的表面粗糙度研究[J]. 中国机械工程,2009,20(20):2470-2476.

MING Xingzu, YAN Hongzhi, CHEN Shuhan. Research on surface roughness for multi-axis NC grinding of spiral bevel gear [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20 (20):2470-2476. (in Chinese)

[16] 张华,邓效忠. 四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变性病铣齿研究[J]. 中国机械工程,2007,18(14):1652-1655.

ZHANG Hua, DENG Xiaozhong. Modified-roll method study on 4-axis CNC spiral bevel gear machine[J]. China Mechanical Engineer,2007,18(14):1652-1655. (in Chinese)

[17] LITVIN F L. Gear geometry and applied theory[M]. Cambridge:Combridge University Press,2004.

[18] 李天兴,邓效忠,李聚波,等. 螺旋锥齿轮齿面误差分析与自动反馈修正[J]. 航空动力学报,2011,26(5):1194-1200.

LI Tianxing, DENG Xiaozhong, LI Jubo, et al. Automatic feedback correction and deviation analysis for tooth surface of spiral bevel and hypoid gear[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(5):1194-1200. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)