

渐开线碟形砂轮磨削面齿轮数控加工研究

王延忠¹, 侯良威¹, 兰州¹, 钟扬¹, 赵洪铺¹, 吕庆军², 赵兴福³

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国兵器工业集团公司 中国北方车辆研究所, 北京 100072;

3. 中国航空工业集团公司 哈尔滨东安发动机(集团)有限公司, 哈尔滨 150066)

摘 要: 为进行面齿轮数控精密加工, 提出了一种渐开线碟形砂轮磨削面齿轮加工方法。根据面齿轮成形过程及磨削加工原理, 推导了渐开线碟形砂轮磨削面齿轮齿面方程, 进行了面齿轮磨削加工机床设计, 给出了基于机床结构的面齿轮磨削加工方法, 进行了磨削加工过程中的啮合点刀位计算; 借助 VERICUT 软件进行了面齿轮数控磨削加工仿真, 最后进行了面齿轮磨削加工试验, 通过对面齿轮齿面进行检测, 得到齿面偏差最大值为 $-10.1 \sim 12.1 \mu\text{m}$, 结果验证了渐开线碟形砂轮磨削加工面齿轮方法的正确性。

关 键 词: 面齿轮; 磨削加工; 碟形砂轮; 机床设计; 刀位计算

中图分类号: V261.2⁺5

文献标志码: A

Research on processing method of grinding face gear with involute disc wheel

WANG Yan-zhong¹, HOU Liang-wei¹, LAN Zhou¹, ZHONG Yang¹,
ZHAO Hong-pu¹, LÜ Qing-jun², ZHAO Xing-fu³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. China North Industries Group Corporation,
China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

3. Harbin Dongan Engine (Group) Corporation Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Harbin 150066, China)

Abstract: A method of face gear grinding by involute disc wheel was proposed for precision machining. Tooth surface equation of face gear with disc wheel grinding was derived in accordance with the surface forming process and grinding principles. A special CNC (computerized numerical controlled) machine was developed for face gear grinding, and the method was given for face gear grinding based on the structure of the machine, the tool path generation of meshing points was also calculated. Grinding process of face gear was simulated by VERICUT. Finally, the processing experiments of grinding were conducted, and the coordinate values of tooth surface points were detected, by which the maximum deviation of $-10.1 \sim 12.1 \mu\text{m}$ was obtained. The results verify that the processing method of face gear grinding with involute disc wheel is correct.

Key words: face gear; grinding process; disc wheel; machine design;
tool path generation

收稿日期: 2014-03-15

基金项目: 预研基金重点项目(9140A18020113HX); 预研项目(5130802X, 5131812X); 预研基金项目(9140A18020212HX)

作者简介: 王延忠(1963—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 主要从事先进精密传动加工技术、空间啮合曲面数字加工理论和技术研究。

面齿轮传动是一种圆柱齿轮与圆锥齿轮相啮合的齿轮传动,相对传统锥齿轮它有许多独特的优势^[1-3].尤其在航空系统中,国外在直升机主传动上的应用充分展现了其分流-汇流传动方面的特点^[4-5].南京航空航天大学^[6]和北京工业大学^[7]分别对面齿轮插齿加工进行了理论研究;河南工业大学^[8]对面齿轮的数控铣齿加工方法进行了研究;西北工业大学^[9-10]对面齿轮的滚齿加工进行了相关研究.

随着面齿轮应用环境要求的不断提高,磨削加工技术受到越来越多的关注,首先 Litvin 等提出了面齿轮磨削加工理论,建立了面齿轮磨削加工机构^[11];赵宁等对面齿轮磨削加工机床进行了理论研究并建立了机床模型^[12];彭先龙、方宗德等对面齿轮磨削加工方法进行了分析^[13];彭先龙等对碟形砂轮磨削加工误差进行了理论分析^[14];WANG 等对面齿轮复杂空间曲面数控加工技术进行了有关研究^[15].但关于面齿轮磨削加工方法和设备的研究还不够系统.

本文以面齿轮齿面成形原理为基础,研究渐开线碟形砂轮磨削面齿轮的数控加工技术,进行面齿轮磨削加工数控机床的结构设计,分析基于机床运动结构的数控加工坐标变换,并进行渐开线碟形砂轮磨削面齿轮加工试验.

1 渐开线碟形砂轮磨削面齿轮原理

面齿轮齿面的成形是基于圆柱小齿轮齿形刀具展成切削得到的,加工过程如图1所示.

插齿刀绕 z_c 轴以 ω_c 的转速旋转,面齿轮绕 z_g 轴以 ω_g 的转速旋转, γ 为轴交角,插齿刀的齿数为 N_c ,面齿轮齿数为 N_g ,且存在关系式

$$\frac{\omega_c}{\omega_g} = \frac{N_g}{N_c} \quad (1)$$

根据小齿轮与面齿轮的位置关系,可以分为垂直相交、非垂直相交、偏置垂直交错和偏置非垂

直交错等几种形式,建立相交轴面齿轮插齿加工坐标系如图2所示,坐标系 $O_{g0}(x_{g0}, y_{g0}, z_{g0})$ 为面齿轮的初始位置, $O_g(x_g, y_g, z_g)$ 是面齿轮绕 z_g 轴旋转形成的动坐标系,转速为 ω_g ;坐标系 $O_{c0}(x_{c0}, y_{c0}, z_{c0})$ 为插齿刀的初始位置, $O_c(x_c, y_c, z_c)$ 是插齿刀绕轴 z_c 转动形成的动坐标系,转速为 ω_c ; ϕ_g 为插齿刀转动角度参数, ϕ_c 为面齿轮转动角度参数, γ 为轴交角.

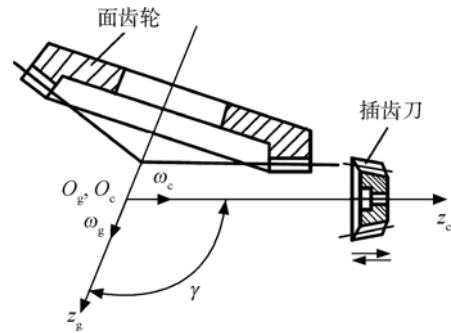


图1 面齿轮成形原理

Fig. 1 Face gear forming principle

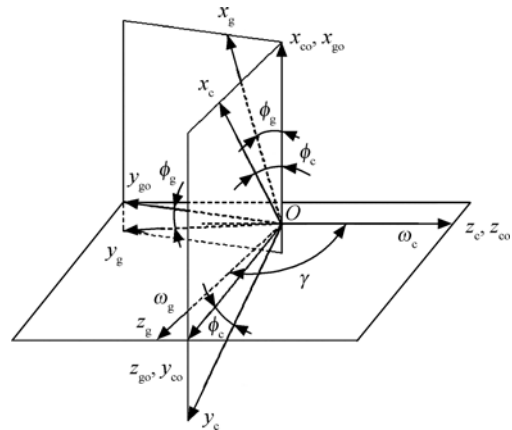


图2 面齿轮插齿加工坐标系

Fig. 2 Face gear shaping coordinate system

由坐标关系可得,插齿刀动坐标系到面齿轮动坐标系的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{gc} = \begin{bmatrix} \cos \phi_g \cos \phi_c + \cos \gamma \sin \phi_c \sin \phi_g & -\cos \phi_g \sin \phi_c + \cos \gamma \cos \phi_c \sin \phi_g & -\sin \gamma \sin \phi_g & 0 \\ -\sin \phi_g \cos \phi_c + \cos \gamma \sin \phi_g \sin \phi_c & \sin \phi_g \sin \phi_c + \cos \gamma \cos \phi_c \cos \phi_g & -\sin \gamma \cos \phi_g & 0 \\ \sin \gamma \sin \phi_c & \sin \gamma \cos \phi_c & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

当轴交角 $\gamma=90^\circ$ 时,坐标系转换矩阵变为

$$\mathbf{M}_{gc} = \begin{bmatrix} \cos \phi_g \cos \phi_c & -\cos \phi_g \sin \phi_c & -\sin \phi_g & 0 \\ -\sin \phi_g \cos \phi_c & \sin \phi_g \sin \phi_c & -\cos \phi_g & 0 \\ \sin \phi_c & \cos \phi_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

建立面齿轮插齿刀的轮廓坐标系如图3

所示.

由渐开线插齿刀齿廓方程和齿轮啮合原理^[16]得到面齿轮的齿面方程为

$$\mathbf{r}_g(\phi_c, \theta_c) = \begin{bmatrix} n_b \left\{ \cos \phi_g [\sin(\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o)) \mp \theta_c \cos(\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o))] - \frac{\sin \phi_g}{m_{2c} \cos[\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o)]} \right\} \\ - n_b \left\{ \sin \phi_g [\sin(\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o)) \mp \theta_c \cos(\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o))] + \frac{\cos \phi_g}{m_{2c} \cos(\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o))} \right\} \\ - r_b \{ \cos[\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o)] \pm \theta_c \sin[\phi_c \pm (\theta_c + \theta_o)] \} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

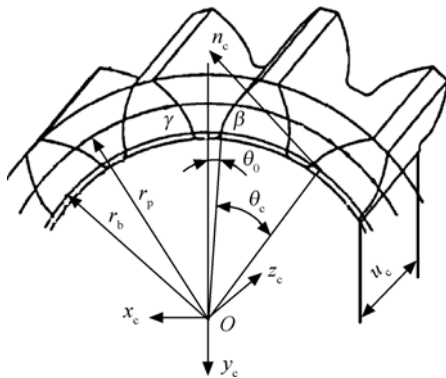


图 3 面齿轮插齿刀齿廓

Fig. 3 Face gear shaper cutter tooth profile

其中 m_{2c} 为传动比, 且 $m_{2c} = \frac{N_c}{N_g} = \frac{\omega_k}{\omega_c}$, 上、下表示的运算符号分别对应于插齿渐开线 γ, β 所展成的面齿轮齿面。

由面齿轮插齿加工方法, 依据共轭曲面原理, 可以得到蜗杆砂轮磨削面齿轮的加工方法^[17-18], 如图 4 所示, 面齿轮、虚拟插齿刀、蜗杆砂轮三者之间的啮合关系。

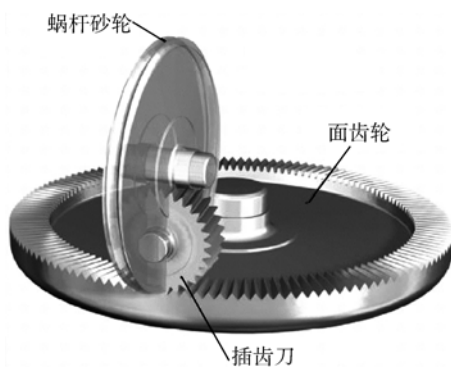


图 4 面齿轮蜗杆砂轮加工原理

Fig. 4 Surface machining principle of worm wheel gear

但蜗杆砂轮型面复杂, 制造精度要求高, 且修整困难, 在工程实际应用中不具有可行性。由此可以采用渐开线碟形砂轮进行替代加工, 虚拟小齿轮和渐开线碟形砂轮之间存在着虚拟的啮合关系, 如图 5 所示, 面齿轮齿面和渐开线碟状砂轮都可以看成是插齿刀齿面在空间运动的包络面。

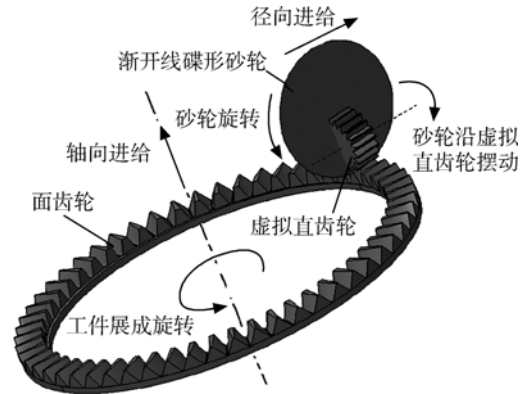


图 5 面齿轮、直齿轮和砂轮位置模型

Fig. 5 Face gear, pinion and wheel position model

磨削加工时, 碟形砂轮高速旋转模拟虚拟直齿轮的一个齿; 面齿轮绕自身轴线旋转的同时, 砂轮绕虚拟直齿轮的轴线作旋摆运动, 两运动速度为定值, 即可实现面齿轮齿廓的展成加工; 单齿完成后进行分度, 并重复以上动作, 直到完成面齿轮所有齿的磨削加工, 本文以正交面齿轮为例进行实际加工过程分析。

2 齿面方程推导及专用机床设计

由于渐开线碟形砂轮的截面形状为插齿刀的一个单齿型面, 所以它的产形线即为当 $z_s = 0$ 时的虚拟插齿刀型面, 碟形砂轮渐开线齿廓如图 6

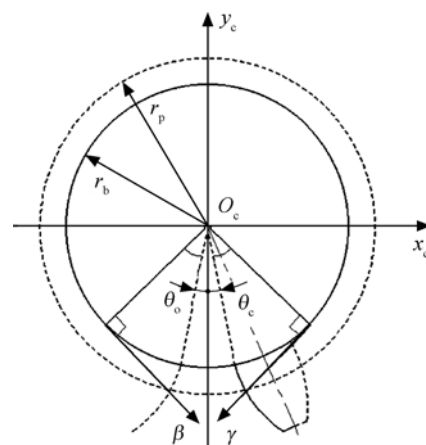


图 6 砂轮渐开线型面齿廓

Fig. 6 Wheel involute tooth profile surface

所示(z_c 垂直于纸面). 其中 r_b 为基圆半径, r_p 为分度圆半径, θ_o 为齿廓与基圆交点的角度参数, θ_c 为砂轮齿面的参数.

此时砂轮基体的单齿面向量方程为(u_c 为砂轮沿着面齿轮径向进给时的进给参数)

$$\mathbf{r}_s(u_c, \theta_c) = \begin{bmatrix} r_b[\sin(\theta_o + \theta_c) - \theta_c \cos(\theta_o + \theta_c)] \\ -r_b[\cos(\theta_o + \theta_c) + \theta_c \sin(\theta_o + \theta_c)] \\ u_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

建立渐开线碟形砂轮磨削加工坐标系如图7所示, 坐标系 $O_{g1}(x_{g1}, y_{g1}, z_{g1})$ 为面齿轮的初始位置, $O_{g2}(x_{g2}, y_{g2}, z_{g2})$ 是面齿轮绕 z_{g1} 轴旋转形成的动坐标系, 转速为 ω_g ; $O_{s1}(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$ 为砂轮的初始位置, $O_{s2}(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$ 是砂轮沿虚拟插齿刀中心轴 z_c 摆动形成的动坐标系, 转速为 ω_s ; ϕ_s 为砂轮摆动角度参数, ϕ_g 为面齿轮转动角度参数.

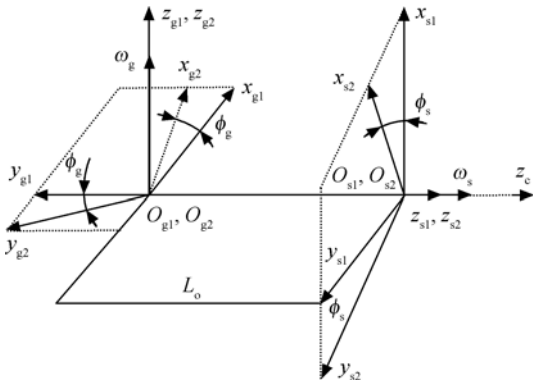


图7 渐开线碟形砂轮磨削加工坐标系

Fig. 7 Grinding wheel coordinate system

当完成对刀后, 坐标原点 O_{g1} 和 O_{s1} 重合, 进行坐标转换.

从坐标系 O_{g1} 到坐标系 O_{g2} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{g2, g1} = \begin{bmatrix} \cos \phi_g & \sin \phi_g & 0 & 0 \\ -\sin \phi_g & \cos \phi_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

从坐标系 O_{s1} 到坐标系 O_{g1} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{g1, s1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

从坐标系 O_{s2} 到坐标系 O_{s1} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{s1, s2} = \begin{bmatrix} \cos \phi_s & -\sin \phi_s & 0 & 0 \\ \sin \phi_s & \cos \phi_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

则从砂轮坐标系 O_{s2} 到面齿轮坐标系 O_{g2} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{g2, s2} = \mathbf{M}_{g2, g1} \cdot \mathbf{M}_{g1, s1} \cdot \mathbf{M}_{s1, s2} = \begin{bmatrix} \cos \phi_g \cos \phi_s & -\cos \phi_g \sin \phi_s & -\sin \phi_g & 0 \\ -\sin \phi_g \cos \phi_s & \sin \phi_g \sin \phi_s & -\cos \phi_g & 0 \\ \sin \phi_s & \cos \phi_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

与插齿加工的转换阵矩 $\mathbf{M}'_{gc}$ 相同, 同理得到面齿轮齿面方程为

$$\mathbf{r}_g(\phi_s, \theta_c) = \begin{bmatrix} r_b \left\{ \cos \phi_g [\sin(\phi_s + \theta_c + \theta_o) - \theta_c \cos(\phi_s + \theta_c + \theta_o)] - \frac{\sin \phi_g}{m_{2c} \cos(\phi_s + \theta_c + \theta_o)} \right\} \\ -r_b \left\{ \sin \phi_g [\sin(\phi_s + \theta_c + \theta_o) - \theta_c \cos(\phi_s + \theta_c + \theta_o)] + \frac{\cos \phi_g}{m_{2c} \cos(\phi_s + \theta_c + \theta_o)} \right\} \\ -r_b [\cos(\phi_s + \theta_c + \theta_o) + \theta_c \sin(\phi_s + \theta_c + \theta_o)] \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

计算结果验证了渐开线磨削加工原理的正确性. 由碟形砂轮加工面齿轮时的相对运动需求, 进行面齿轮专用磨削加工机床设计, 其空间结构布局如图8所示.

机床包括 x, y, z 三个移动和 A, B, C 三个转动. 沿机床导轨 x 向的移动可以实现磨削加工的

轴向进给和附加平动, 沿导轨 y 方向的移动实现砂轮磨削的径向进给运动, 沿导轨 z 向的移动实现砂轮相对于面齿轮的附加运动, A 向转动实现面齿轮的分齿运动, B 向转动实现砂轮沿虚拟插齿刀轴线的摆动, C 向为砂轮自身的高速旋转运动, x_1 和 C_1 实现砂轮修整运动.

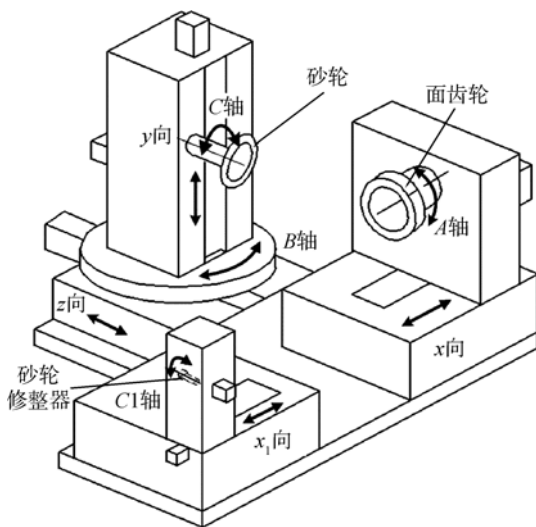


图8 面齿轮磨削机床空间运动结构示意图

Fig. 8 Face gear machine tool structure

3 面齿轮磨削加工方法及刀位计算

3.1 基于机床结构的面齿轮磨削加工方法

基于上述渐开线碟形砂轮磨削面齿轮原理,根据机床结构建立其加工展成关系如图9所示,砂轮的型面中心在 O_1 点,虚拟插齿刀的轴线过 O_2 点,因此碟形砂轮的旋摆中心也应该是过 O_2 的轴线,所以当砂轮绕 O_2 做旋摆运动时,砂轮的型面中心 O_1 的运动轨迹应为弧线 O_1O_1' ,此时砂轮刀柄的摆动中心 O 的运动轨迹为圆弧 OO' 。

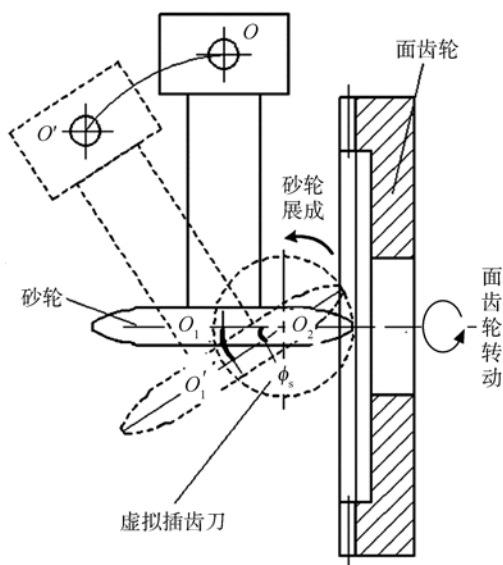


图9 基于机床结构的面齿轮磨削展成

Fig. 9 Show face gear grinding on machine

基于机床运动结构,进行面齿轮磨削加工时,上述运动方式等价于如图10所示。

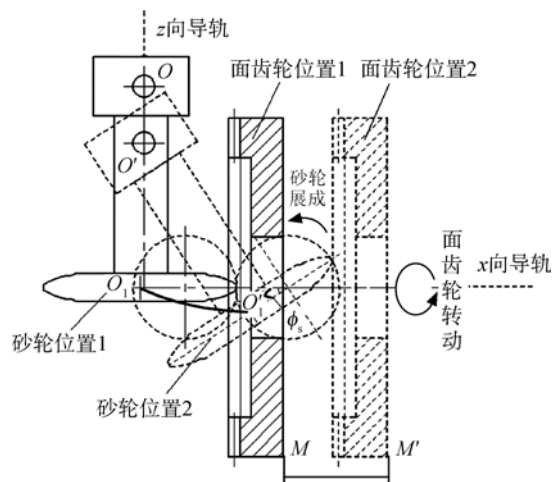


图10 面齿轮磨削等价原理

Fig. 10 Face gear grinding equivalence principle

连接砂轮的刀柄中心 O 的运动轨迹为直线段 OO' ,砂轮的型面中心 O_1 的运动轨迹为弧线 O_1O_1' ,面齿轮运动轨迹为直线段 MM' , θ_1 为刀柄的摆角, R 为刀柄长度。其运动简图如图11所示。

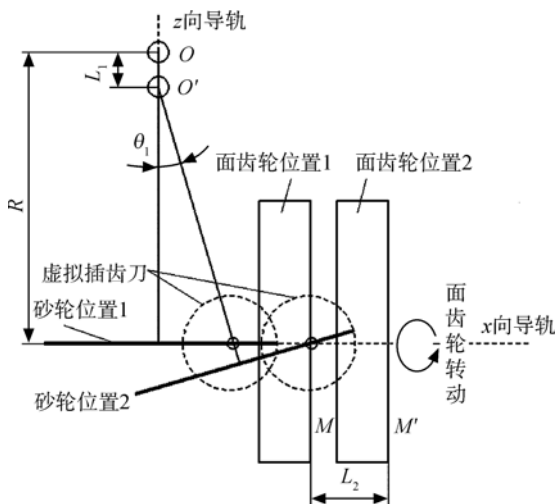


图11 面齿轮磨削加工运动分析

Fig. 11 Face gear grinding motion analysis

刀柄中心 O 在机床 z 向导轨的移动距离,也就是 z 轴行程为

$$L_1 = R - R \sin \theta_1 \quad (11)$$

面齿轮在机床 x 向的移动距离,也就是 x 轴行程为

$$L_2 = R \cos \theta_1 \quad (12)$$

刀柄的摆角 θ_1 为机床 B 向的旋转角度行程,面齿轮的转动角度为 A 向旋转角度行程。另外,为完成面齿轮的齿长方面的要求,需要进行径向进给运动,即机床 y 轴行程,如图12所示。

由以上分析,对3个运动轴 x, y, z ,两个旋转

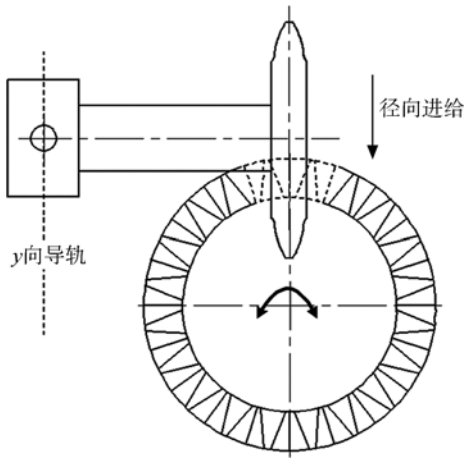


图12 沿齿长方向的进给过程

Fig. 12 Feed direction along the length

A轴,B轴进行控制,加上C轴砂轮的高速自转,给出不同的数值,即可完成对面齿轮型面的数控加工.

3.2 碟形砂轮磨削加工啮合点刀位计算

基于上述加工方法,建立碟形砂轮磨削加工坐标系如图13所示,坐标系 $O_{g1}(x_{g1}, y_{g1}, z_{g1})$ 为面齿轮的初始位置, $O_{g2}(x_{g2}, y_{g2}, z_{g2})$ 是面齿轮旋转一个角度形成的动坐标系; $O_{s1}(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$ 为砂轮的初始位置, $O_{s2}(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$ 是砂轮沿虚拟插齿刀中心轴摆动形成的动坐标系, $O_{s3}(x_{s3}, y_{s3}, z_{s3})$ 是砂轮沿面齿轮齿深方向的进给形成的动坐标系, $O_{s4}(x_{s4}, y_{s4}, z_{s4})$ 是砂轮沿面齿轮齿长方向进给形成的动坐标系.坐标系原点 O_{g1} 和 O_{s1} 之间距离为 l ,坐标系原点 O_{s2} 到 O_{s3} 之间距离为 h ,坐标系原点 O_{s3} 到 O_{s4} 之间距离为 r .

从坐标系 O_{g1} 到坐标系 O_{g2} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{g2,g1} = \begin{bmatrix} \cos \phi_g & \sin \phi_g & 0 & 0 \\ -\sin \phi_g & \cos \phi_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

从坐标系 O_{s1} 到坐标系 O_{g1} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{g1,s1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_{g2,s4} = \mathbf{M}_{g2,g1} \cdot \mathbf{M}_{g1,s1} \cdot \mathbf{M}_{s1,s2} \cdot \mathbf{M}_{s2,s3} \cdot \mathbf{M}_{s3,s4} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi_g \cos \phi_s & -\cos \phi_g \sin \phi_s & -\sin \phi_g & -r \sin \phi_g - h \cos \phi_g \sin \phi_s \\ -\sin \phi_g \cos \phi_s & \sin \phi_g \sin \phi_s & -\cos \phi_g & -r \cos \phi_g + h \sin \phi_g \sin \phi_s \\ \sin \phi_s & \cos \phi_s & 0 & h \cos \phi_s - l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

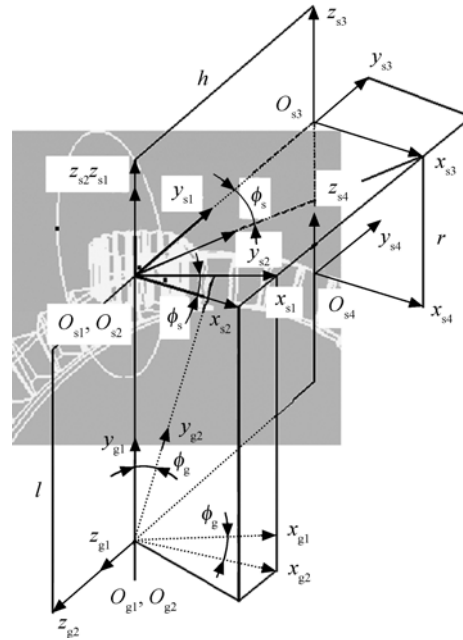


图13 碟形砂轮磨削加工坐标系

Fig. 13 Coordinate system of disc wheel grinding

从坐标系 O_{s2} 到坐标系 O_{s1} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{s1,s2} = \begin{bmatrix} \cos \phi_s & -\sin \phi_s & 0 & 0 \\ \sin \phi_s & \cos \phi_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

从坐标系 O_{s3} 到坐标系 O_{s2} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{s2,s3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & h \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

从坐标系 O_{s4} 到坐标系 O_{s3} 的转换矩阵为

$$\mathbf{M}_{s3,s4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

则在面齿轮全齿加工过程中,从砂轮坐标系 O_{s4} 到面齿轮坐标系 O_{g2} 的转换矩阵为

当 l, h 和 r 的值均取 0 时, 式(18)成为

$$\mathbf{M}_{g2,s4} = \begin{bmatrix} \cos \phi_g \cos \phi_s & -\cos \phi_g \sin \phi_s & -\sin \phi_g & 0 \\ -\sin \phi_g \cos \phi_s & \sin \phi_g \sin \phi_s & -\cos \phi_g & 0 \\ \sin \phi_s & \cos \phi_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

与面齿轮插齿和磨齿原理中的转换矩阵 $\mathbf{M}_{gc}$ 和 $\mathbf{M}_{gs}$ 相同, 验证了该方法的正确性。当对刀完成后 l 的值即为零, 因此, 合理选择参数 h 和 r 值, 以及面齿轮转角 ϕ_g 值, 即可实现面齿轮数控磨削加工。

4 面齿轮加工运动仿真及试验

基于上述面齿轮加工方法, 应用 VERICUT 软件建立机床结构模型, 进行面齿轮磨削展成加工仿真, 面齿轮模型参数如表 1 所示。

表 1 面齿轮设计参数

Table 1 Face gear design parameters

序号	参数	设计值
1	面齿轮齿数 N_g	42
2	名义压力角 $\alpha/(\circ)$	20
3	轴交角 $\gamma/(\circ)$	90
4	法向模数 m/mm	3.5
5	外半径 r_2/mm	83
6	内半径 r_1/mm	71
7	砂轮直径 d/mm	90
8	轴截面理论齿数 N_c	23

取 $h=7.875\text{ mm}$ 和 $r=12\text{ mm}$, $\phi_g=\pi/21$, 进行面齿轮磨削加工仿真, 如图 14 所示。

得到面齿轮仿真结果, 如图 15 所示, 由于建模过程中的误差因素, 与理论模型进行比较, 存在偏差最大值为 $9.5\text{ }\mu\text{m}$, 证明了磨削加工程序的正确性。

在所研制的面齿轮专用数控机床上进行面齿轮试件磨削加工, 如图 16 所示。

在 pmm-c700 三坐标测量机对上对试件进行检测, 检测区域选择在距齿顶 5%, 距齿根和内外端为 10% 的区域, 在此区域内齿宽方向取 9 个点, 齿高方向取 5 个点, 共计 45 个点, 如图 17 所示。

检测得到试件齿面点三维坐标值, 经坐标变换与齿面点理论坐标值进行比较, 得到面齿轮齿面点法向偏差, 如图 18 所示。

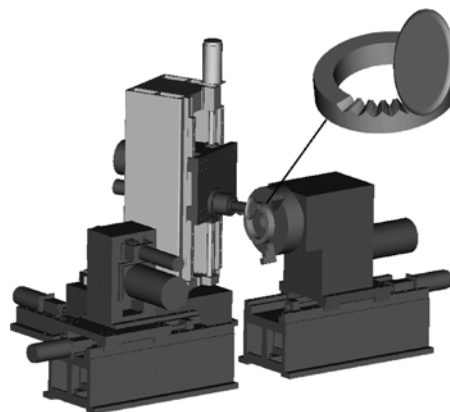


图 14 面齿轮磨削加工仿真过程

Fig. 14 Face gear grinding simulation

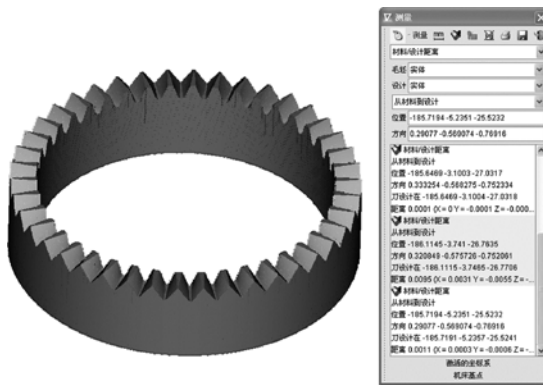


图 15 面齿轮加工仿真结果

Fig. 15 Face gear grinding simulation results

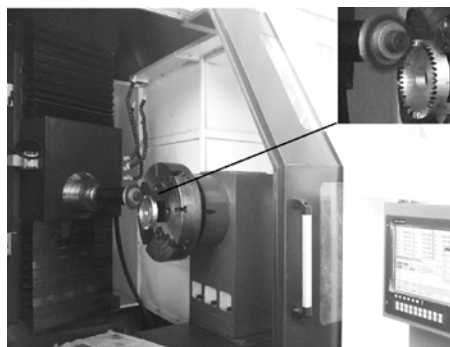


图 16 面齿轮磨削加工试验

Fig. 16 Face gear grinding test

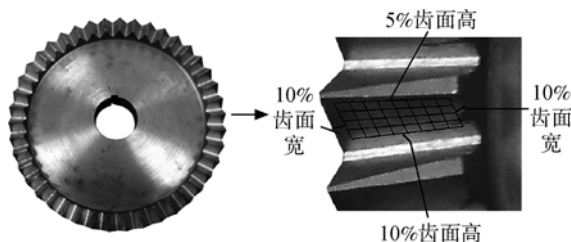
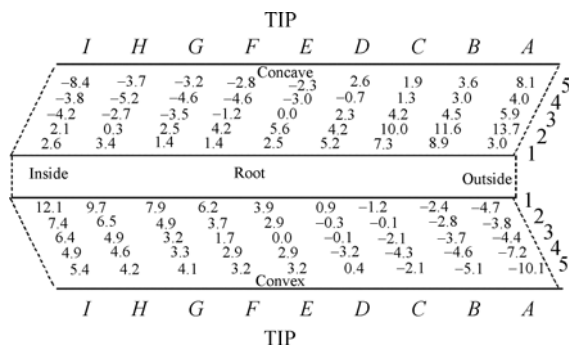


图 17 面齿轮检测

Fig. 17 Face gear detection

图18 齿面点法向偏差示意图(单位: μm)Fig. 18 Face gear tooth surface deviation (unit: μm)

由图18可见,试件检测全齿面法向偏差范围在 $-10.1 \sim 12.1 \mu\text{m}$ 之间,原因是试件加工过程中存在一定的误差因素.总体看来,试件检测结果验证了加工方法正确性.

5 结 论

本文从面齿轮的插齿加工原理出发,依据共轭曲面原理,分析了渐开线碟形砂轮磨削面齿轮的数控加工方法,进行了面齿轮磨削加工专用数控机床的结构设计,最后完成了面齿轮加工试验,得出如下结论:

1) 采用渐开线碟形砂轮磨削面齿轮,替代了型面较为复杂的蜗杆砂轮,避开了蜗杆砂轮制造难度大,修整困难的缺陷.

2) 渐开线碟形砂轮磨削加工所得到的面齿轮齿面方程与插齿加工所得到的面齿轮齿面方程相同,验证了渐开线碟形砂轮磨削加工面齿轮理论的正确性.

3) 渐开线碟形砂轮磨削加工中的影响参数有 r , h 和 ϕ_g ,根据不同的加工要求,合理选择这些参数值,可以加工出相应的面齿轮.

4) 通过VERICUT软件对渐开线碟形砂轮磨削面齿轮过程进行仿真,并进行实际加工试验,通过结果分析验证了磨削加工方法的正确性.

参考文献:

- [1] Litvin F L, Zhang Y, Wang J C, et al. Design and geometry of face-gear drives [J]. Journal of Mechanical Design, 1992, 114(4): 642-647.
- [2] Litvin F L, Fuentes A, Gonzalez-Perez I, et al. Face gear drive with helical involute pinion: geometry, generation by a shaper and worm, avoidance of singularities and stress analysis [R]. NASA/CR-213443, 2005.
- [3] Litvin F L, Gonzalez-Perez I, Fuentes A, et al. Design, generation and stress analysis of face gear drive with helical

pinion [J]. Computer Methods in Applied Mechanics And-engineering, 2005, 194(36): 3870-3901.

- [4] Filler R R, Heath G F, Slaughter S C. Torque splitting by a concentric face gear transmission [R]. Montreal, Canada: American Helicopter Society 58th Annual Forum, 2002.
- [5] Lewicki D G, Heath G F, Filler R R, et al. RDS-21 face-gear surface durability tests [R]. NASA/TM-2007-214970, 2007.
- [6] 李政民卿, 朱如鹏. 面齿轮插齿加工中过程包络面和理论齿廓的干涉 [J]. 重庆大学学报, 2007, 30(5): 55-58.
LI Zhengminqing, ZHU Rupeng. Process method of face gear drive with spur involute pinion with the shaping machine [J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(5): 55-58. (in Chinese)
- [7] 王志, 石照耀, 刘建伟, 等. 正交面齿轮计算机仿真加工 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(7): 1004-1007.
WANG Zhi, SHI Zhaoyao, LIU Jianwei, et al. Simulation of orthogonal face gear proceeding [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(7): 1004-1007. (in Chinese)
- [8] 薛东彬, 陈大立, 李永祥. 面齿轮的数控铣削加工 [J]. 机械制造技术, 2010, 37(11): 65-66.
XUE Dongbin, CHEN Dali, LI Yongxiang. NC milling face gear processing [J]. Manufacturing Technology, 2010, 37(11): 65-66. (in Chinese)
- [9] ZHAO Ning, GUO Hui, FANG Zongde, et al. Research on machining face gear using a CNC hobbing machine [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97(101): 3761-3764.
- [10] 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)
- [11] Litvin F L, Chen Y J, Heath G F, et al. Apparatus and method for precision grinding face gear: US, 6, 146, 235 [P]. 2000-11-14.
- [12] 赵宁, 刘常青. 关于面齿轮磨削加工机床的研究 [J]. 机械设计与制造, 2007, (10): 151-152.
ZHAO Ning, LIU Changqing. Study on grinding machine of face gears [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2007, (10): 151-152. (in Chinese)
- [13] 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)
- [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 of applying grinding disk in face gear grinding [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(11): 101-104. (in Chinese)

- [15] WANG Yanzhong, HOU Liangwei, LIU Yanqiang, et al. Research on machining method of complex surface face gears[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 163: 233-237.
- [16] 姬存强, 魏冰阳, 邓效忠, 等. 正交面齿轮的设计与插齿加工试验[J]. 机械传动, 2010, 34(2): 58-61.
JI Cunqiang, WEI Bingyang, DENG Xiaozhong, et al. Design and gear shaping experiment on orthogonal face gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(2): 58-61. (in Chinese)
- [17] 王延忠, 吴灿辉, 葛旭阳. 面齿轮滚刀基本蜗杆的设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 166-169.
WANG Yanzhong, WU Canhui, GE Xuyang, et al. Basal worm designing method of face gear hob[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 166-169. (in Chinese)
- [18] 高金忠, 朱如鹏, 李政民卿. 面齿轮滚磨刀具基蜗杆齿廓奇异点研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2394-2400.
GAO Jinzhong, ZHU Rupeng, LI Zhengminqing. Research on singularities of base worm thread surface for hobbing or grinding face gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2394-2400. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)