

文章编号:1000-582X(2007)05-0055-04

面齿轮插齿加工中过程包络面和理论齿廓的干涉

李政民卿,朱如鹏

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

摘要:实现面齿轮加工是面齿轮传动研究的基础,利用齿轮插齿加工方法,对正交非偏置面齿轮插齿加工中过程包络面和理论齿廓的干涉进行研究,目的是为了验证这种加工方法的可行性。根据插齿加工的原理,建立了面齿轮插齿加工坐标系,给出了插刀理论齿廓方程,推导了面齿轮插齿加工理论齿廓方程和加工中过程包络面方程;分析了过程包络面和面齿轮插齿加工理论齿廓的位置关系,仿真计算结果表明面齿轮插齿加工不会引起过程包络面和插齿理论齿廓的干涉;最终,通过面齿轮插齿加工试验论证了上述结果的正确性。

关键词:齿轮;面齿轮;齿轮加工

中图分类号:TH132

文献标志码:A

面齿轮传动是一种圆柱齿轮和圆锥齿轮相互啮合的齿轮传动^[1],如图1所示。按传动位置关系可将面齿轮传动分为正交非偏置、正交偏置、非正交非偏置和非正交偏置4种情况。面齿轮传动具有重合度大、无需防错位设计、与其啮合的直齿圆柱齿轮无轴向力等优点^[2]。根据美国在上世纪90年代进行的面齿轮传动实验可知,以面齿轮为传动元件的航空减速器在重量方面较传统结构降低40%,噪声降低10分贝,并且动力分流效果好、振动小^[3]。

面齿轮传动机构早在1949年 Buckingham 所著的《Analytical mechanics of gears》一书中就有介绍,他主要利用几何投影的方法近似的研究了面齿轮齿形变化的特点^[4];上世纪90年代在美国军方和 NASA 联合进行的 ART (The Advanced Rotorcraft Transmission) 计划中,主要对面齿轮进行了高速重载的研究,并且利用面齿轮设计了新型直升机的主减速器传动装置的分流结构^[5];最近由美国 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 支持的 TRP (Technology Reinvestment Program) 项目继续支持对面齿轮传动技术的研究,研究的主要背景是在新一代阿帕奇 (Apache) 武装直升

机中应用面齿轮传动技术^[6];2005年由美国军方应用航空技术董事会 AATD (The U. S. Army's Applied Aviation Technology Directorate) 主办的一项研究中,已成功地将在直升机传动系统(其中包括 AH-64D Apache 武装直升机)中运行 60 h,其进一步的实验将运行 400 h。

为了实现面齿轮的制备^[7],文中对正交非偏置面齿轮插齿加工中过程包络面和理论齿廓的干涉进行研究,目的是确定这种加工方法的可行性。

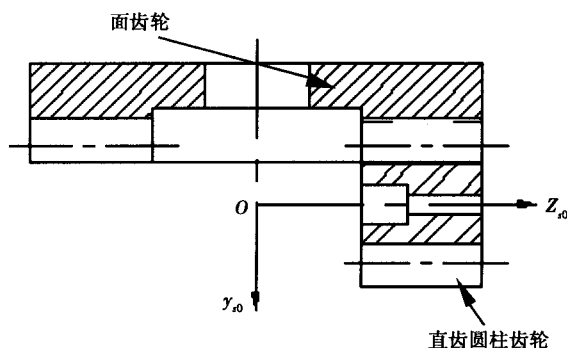


图1 面齿轮和直齿圆柱齿轮传动图

收稿日期:2007-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19675005)。

作者简介:李政民卿(1977-),男,南京航空航天大学博士研究生,主要从事机械设计和机械传动研究。朱如鹏(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail) rpzhu@nuaacqu.edu.cn。

1 面齿轮插齿加工的理论齿廓

1.1 插齿理论齿廓的坐标系建立

面齿轮插齿理论齿廓坐标系的建立是推导插齿理论齿廓方程的基础。

根据插齿加工的特点建立坐标系, 设定一个系统变量和 2 个定值, 分别是渐开线直齿圆柱齿轮插刀(插刀)在某一加工时刻的转动角度 φ_1 ; 面齿轮和插刀的传动比 i ; 插刀初始所在坐标系原点与面齿轮旋转轴的距离 d 。

假设插刀初始坐标系是以其圆心为坐标原点, 插刀的齿宽在坐标系 Z_1 轴的负方向上建立, 记为 $O_1X_1Y_1Z_1$; 当绕 Z_1 轴转过 $\varphi_1 = \theta$ 角后, 插刀坐标系, 记为 $O_0X_0Y_0Z_0$; 将插刀初始坐标系沿 Z_1 轴的正方向移动距离 d , 并保证各轴方向不变建立中间过渡坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$; 最终通过中间过渡坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 绕 Y_2 轴转过 $\varphi_2 = i\varphi_1$ 角, 得到面齿轮插齿理论齿廓的坐标系 $OXYZ$, 如图 2 所示。

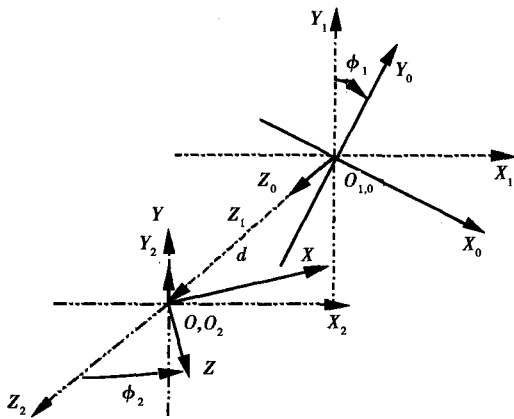


图 2 面齿轮插齿理论齿廓坐标系

1.2 插齿理论齿廓方程

在 $O_0X_0Y_0Z_0$ 坐标系中插刀理论渐开面, 如图 3 所示。

插刀理论渐开面上任一点的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 则

$$\begin{cases} x_0 = \frac{r_b \sin(\text{inv}\alpha)}{\cos\alpha} \\ y_0 = \frac{r_b \cos(\text{inv}\alpha)}{\cos\alpha} \\ z_0 = -\frac{r_b \tan\gamma}{\cos\alpha} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, α 为渐开面上任一点在其所在渐开线上的压力角; γ 为渐开面上任一点与 $O_0X_0Y_0Z_0$ 坐标系原点所构

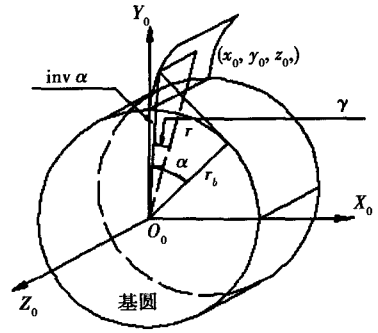


图 3 插刀理论渐开面坐标系

成的矢径与坐标平面 $O_0X_0Y_0$ 的夹角; r_b 为渐开面的基圆半径; $\text{inv}\alpha$ 为渐开面上任一点在其所在渐开线上的展成角, 即 $\text{inv}\alpha = \tan\alpha - \alpha$ 。

根据坐标转换公式, 得出在 $OXYZ$ 坐标系中与 (x_0, y_0, z_0) 坐标相对应点 (x, y, z) , 即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(i\theta) \cos\theta & \cos(i\theta) \sin\theta & -\sin(i\theta) \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \sin(i\theta) \cos\theta & \sin(i\theta) \sin\theta & \cos(i\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(i\theta) & 0 & -\sin(i\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(i\theta) & 0 & \cos(i\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ -d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)是渐开面的面族方程, 其中 γ 和 α 是母面几何参数; θ 是母面运动参数。

根据包络原理^[8], 得出插齿理论齿廓的包络条件

$$A \frac{\partial x}{\partial \theta} + B \frac{\partial y}{\partial \theta} + C \frac{\partial z}{\partial \theta} = 0, \quad (3)$$

式中,

$$A = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial \gamma} & \frac{\partial z}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha} & \frac{\partial z}{\partial \alpha} \end{vmatrix}; B = \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial \gamma} & \frac{\partial x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial z}{\partial \alpha} & \frac{\partial x}{\partial \alpha} \end{vmatrix}; C = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \gamma} & \frac{\partial y}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha} & \frac{\partial y}{\partial \alpha} \end{vmatrix}.$$

将式(2)和(3)联立, 即得到面齿轮插齿加工的理论齿廓方程。

1.3 插齿理论齿廓仿真

在 MATLAB6.5 版本的软件中进行面齿轮插齿理论齿廓的仿真。仿真图形如图 4 所示。图 4 中取模数 $m=5$; 齿数 $z=20$; 分度圆上压力角 $\alpha=20^\circ$; 传动比 $i=1/5$; 插刀初始坐标原点到面齿轮转轴距离 $d=240$; 齿宽 $B=60$ (齿宽为定义域参数)。

2 面齿轮插齿加工的过程包络面

2.1 过程包络面的坐标系建立

过程包络面是由展成运动和径向进给运动共同形

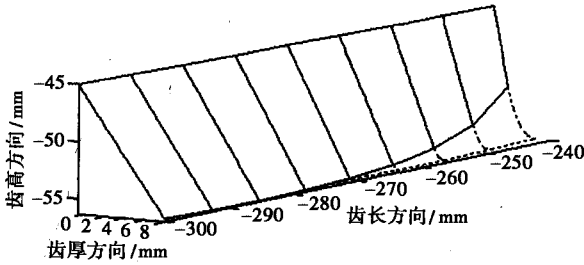


图 4 面齿轮插齿理论齿廓

成的。因此,在其坐标系中除保留插齿理论齿廓坐标系的全部变量和定值外还要添加径向运动比例因子 n , n 为单位时间内径向移动距离 s 和展成运动角 ϕ_1 的比值。

假设插刀初始坐标系是以其圆心为坐标原点,插刀的齿宽在坐标系 Z_2 轴的负方向上建立,记为 $O_2X_2Y_2Z_2$;沿 Y_2 轴的负方向移动距离 $s = n\phi_1$,并保持各坐标的方向不变建立坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$; $O_1X_1Y_1$ 平面绕 Z_1 轴转过 $\phi_1 = \theta$ 角后,建立坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$;将插刀初始坐标系沿 Z_2 轴的正方向移动距离 d ,并保证各轴方向不变建立中间过渡坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$;最终通过中间过渡坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 绕 Y_3 轴旋转 $\phi_2 = i\phi_1$ 角,获得过程包络面的坐标系 $OXYZ$,如图 5 所示。

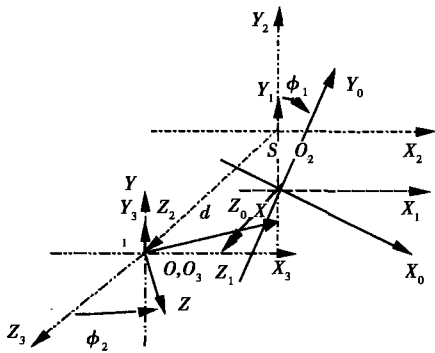


图 5 过程包络面坐标系

2.2 过程包络面方程

$O_0X_0Y_0Z_0$ 坐标系中插刀理论渐开面的方程如式(1)所示。

根据坐标转换公式,得出在 $OXYZ$ 坐标系中与 (x_0, y_0, z_0) 坐标相对应点 (x, y, z) , 即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(i\theta)\cos\theta & \cos(i\theta)\sin\theta & -\sin(i\theta) \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \sin(i\theta)\cos\theta & \sin(i\theta)\sin\theta & \cos(i\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(i\theta) & 0 & -\sin(i\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(i\theta) & 0 & \cos(i\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0 \\ -s \\ -d \end{bmatrix}, \quad (4)$$

过程包络面的包络条件

$$A_1 \frac{\partial x}{\partial \theta} + B_1 \frac{\partial y}{\partial \theta} + C_1 \frac{\partial z}{\partial \theta} = 0, \quad (5)$$

式中,

$$A_1 = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial \gamma} & \frac{\partial z}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha} & \frac{\partial z}{\partial \alpha} \end{vmatrix}; B_1 = \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial \gamma} & \frac{\partial x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial z}{\partial \alpha} & \frac{\partial x}{\partial \alpha} \end{vmatrix}; C_1 = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \gamma} & \frac{\partial y}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha} & \frac{\partial y}{\partial \alpha} \end{vmatrix}$$

将式(4)和(5)联立,即得到过程包络面方程。

2.3 过程包络面仿真

过程包络面的仿真仍然采用面齿轮插齿理论齿廓仿真参数,同时设定径向运动比例因子 $n = 1$ 。仿真效果如图 6 所示。

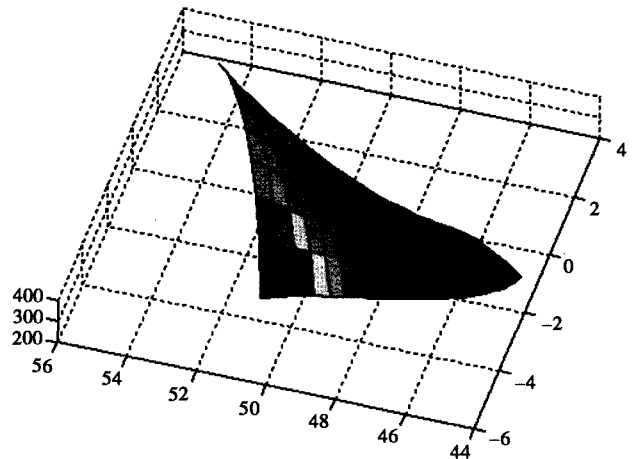


图 6 过程包络面

3 过程包络面与插齿理论齿廓位置关系分析

分析两者位置关系之前,根据加工过程中径向运动比例因子实际变化范围,取具有代表性的 3 个值进行位置关系仿真,即 $n_{\max} = 10$ 、 $n = 1$ 和 $n_{\min} = 0.1$ 。其它仿真参数与面齿轮插齿理论齿廓仿真中采用的一样,仿真效果如图 7 所示。

从图 7 中可见,无论径向运动比例因子如何变化,过程包络面始终处于插齿理论齿廓的一侧。

由于面齿轮理论齿廓是渐开线直齿圆柱齿轮齿廓的共轭面,根据这一特点,对加工过程中插齿理论齿廓去除材料侧进行判断。

判断采用图形仿真方法。仿真参数采用位置关系分析中 $n = 1$ 时的所有参数。仿真结果如图 8 所示。

从图 8 中可见,过程包络面处于去除材料侧。

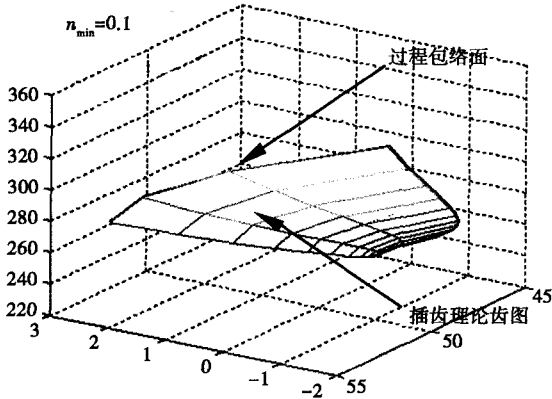
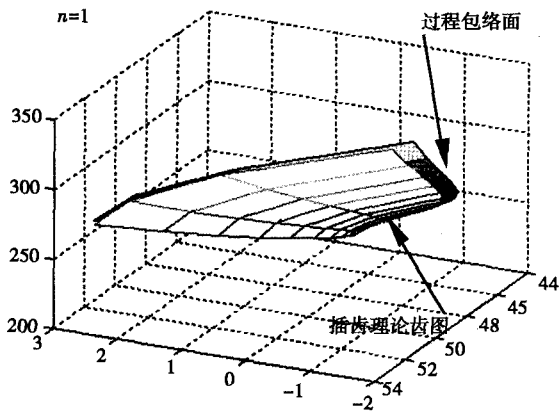
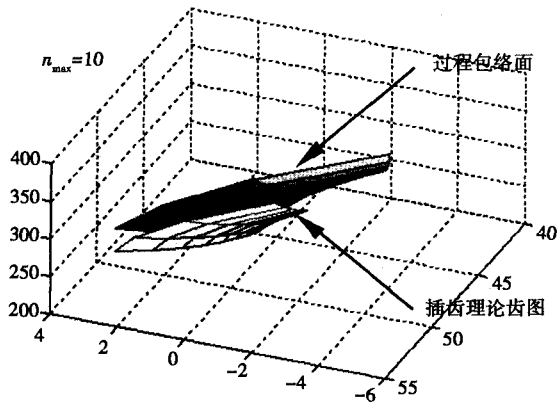


图7 位置关系分析图

4 结论

根据上述插齿理论齿廓和过程包络面方程,笔者利用 MATLAB6.5 版本软件进行了仿真计算,得出在面齿轮插齿加工过程中,过程包络面不会与插齿理论齿廓发生干涉。因此,利用插齿加工方法可以进行正交非偏置面齿轮的加工。

根据上述结论,笔者对正交非偏置面齿轮进行了插齿加工的试验,并且成功切制出面齿轮,如图9所示。图中面齿轮模数为2,齿数为98。

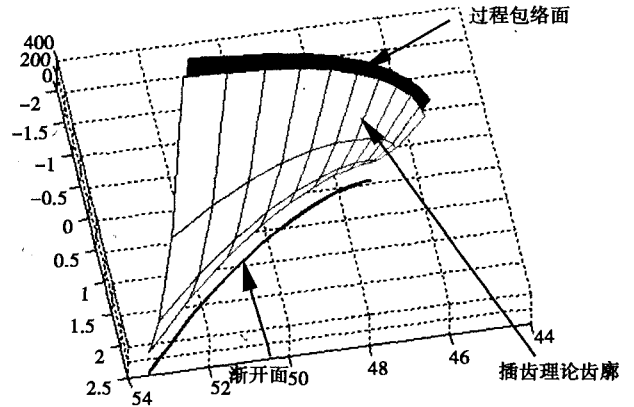


图8 去除材料侧判断图

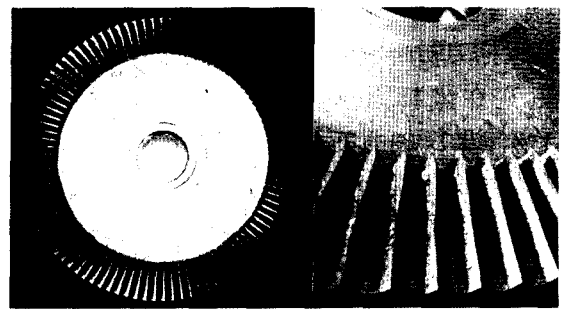


图9 正交非偏置面齿轮

参考文献:

- [1] LITVIN F L, ZHANG Y, WANG J C, et al. Design and geometry of face - gear drives [J]. Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, 1992(114): 642-647.
- [2] LITVIN F L, WANG J C, BOSSLER R B, et al. Application of face - gear drives in helicopter transmission [J]. Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, 1994(116): 672-676.
- [3] 朱如鹏, 潘升材, 高德平. 面齿轮传动的特点及啮合原理 [C]//中国航空学会第九届机械动力与学术会议论文. 江西九江: 中国航空学会, 1998.
- [4] LITVIN F L. Computerized determination of curvature relations and contact ellipse for conjugate surfaces [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995(125): 151-170.
- [5] 朱如鹏, 潘升材, 高德平. 正交面齿轮传动中齿宽设计的研究 [J]. 机械科学与技术, 1999, 18(4):36-38.
- [6] SANDRO BARONE, LEONARDO BORGIANNI, et al. Evaluation of the Effect of Misalignment and Profile Modification in Face Gear Drive by a Finite Element Meshing Simulation [J]. Transactions of the ASME, 2004(9):126.
- [7] 任敬心. 齿轮工程学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [8] 马香峰, 虞洪述, 吕荣寰. 确定共轭曲面的方法及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

(下转第95页)

Effects of Temperature on the Performance of ANAMMOX Biofilter

CHEN Yong¹, LI Jie², ZHANG Shu-de¹, ZHANG Jie¹

(1. Key Laboratory of Water Quality Science & Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To study the effects of temperature in the ANAMMOX process, an anoxic biofilter was employed. It was shown that the temperature influence not only the reaction rates but also the capability of ammonia removal in the ANAMMOX biofilter. The removal rate of ammonia in ANAMMOX biofilter was increased with the increase of temperature. The Arrhenius equation was used to describe the effects of temperature on the reaction rates.

Key words: ANAMMOX; biofilter; temperature; Arrhenius equation

(编辑 姚飞)

(上接第58页)

Process Method of Face-gear Drive with Spur Involute Pinion with the Shaping Machine

LI Zheng-min-qing, ZHU Ru-peng

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to research face-gear drives, a face-gear drive with spur involute pinion is considered. The generation of a face gear is based on application of a conventional shaping machine and an involute shaper. The functions of theoretic shaping surface and processing surface about the face gear are deduced. Computer programs are developed for simulation of these surfaces. In shaping time, mutual position of two surfaces, theoretic shaping surface and processing surface, is analyzed by simulation. In the end, the feasibility of the process method is concluded.

Key words: gear; face gear; gear manufacture

(编辑 陈移峰)