

采用非线性展成法加工修形齿面

李高益, 劳奇成, 姬宁博, 赵乐

西安工业大学

摘要: 基于曲面共轭原理提出通过非线性展成运动完成修形插齿刀齿面磨削的加工方法, 建立磨齿运动数学模型, 求解得到离散的加工运动参数。在 VERICUT 软件中进行了标准渐开线插齿刀及修形插齿刀的仿真磨削, 根据加工结果分析, 验证了该方法的可行性。

关键词: 曲面共轭; 修形插齿刀; 展成法; VERICUT

中图分类号: TG721; TH132.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2021.12.018

Machining Modification of Tooth Surface by Non-linear Generating Method

Li Gaoyi, Lao Qicheng, Ji Ningbo, Zhao Le

Abstract: Based on the principle of surface conjugation, a machining method to complete the tooth surface grinding of the modified shaper cutter by nonlinear generating motion is proposed. The mathematical model of the grinding motion is established, and the discrete machining motion parameters are solved. The simulation grinding of standard involute gear shaper cutters and modified gear shaper cutters is carried out by VERICUT. Based on the analysis of the machining results, the feasibility of this method is verified.

Keywords: surface conjugation; modified gear shaper cutter; generating method; VERICUT

1 引言

插齿刀^[1]是齿轮插削加工用的一种复杂刀具, 目前普遍采用展成法对其进行磨削加工。在磨削标准渐开线齿形时, 展成比固定不变, 一般插齿刀的齿形是修形渐开线, 通常采用修整砂轮截形的方法完成磨削。对于硬质合金插齿刀, 由于刀具材料硬度较大, 一般采用超硬砂轮磨削, 但这类砂轮修整难度大, 不利于小批量生产插齿刀的加工成本控制及加

工效率要求。

本文提出通过非线性展成比的磨齿运动完成修形插齿刀齿面的磨削, 建立磨齿运动数学模型完成参数求解, 在不改变锥面砂轮形状的前提下, 完成了标准渐开线插齿刀与齿廓修形插齿刀的齿面磨削仿真, 为修形插齿刀的磨削提供了新思路。

2 磨齿加工运动分析

2.1 坐标系的建立与变换

建立如图 1 所示坐标系, 其中 $(o-xyz)$ 是磨齿机床固定坐标系, $(o_2-x_2y_2z_2)$ 是插齿刀齿面动坐标系, z_2 轴与其轴线重合, $(o_1-x_1y_1z_1)$ 是砂轮动坐标系, x_1

基金项目: 复杂刀具专用高精度数控系列磨床项目(2020ZDLGY14-02)

收稿日期: 2021年5月

- [7] 姚屏, 林源, 汤勇, 等. 结构拓扑优化方法及其机器人轻量化应用现状及发展[J]. 机电工程技术, 2018, 47(11): 117-122.
- [8] 许辉煌, 褚旭阳. 工业机器人多目标拓扑优化设计[J]. 机床与液压, 2017, 45(11): 32-37.
- [9] 孙晨光, 刘宇红, 冀鹏飞, 等. SCARA 机器人手臂结构模态分析与拓扑优化[J]. 现代制造工程, 2018(7): 51-57
- [10] N Bakhtiyari, P Allinger, M Friedrich, et al. A new approach for sizing, shape and topology optimization[J]. SAE International Congress and Exposition, 1996.
- [11] M P Bendsøe, O Sigmund. Topology optimization: theory, methods and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [12] 管贻生, 邓休, 李怀珠, 等. 工业机器人的结构分析与优

化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 126-131.

- [13] 郑文标, 彭晋民. 卧式加工中心立柱的轻量化设计研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(8): 138-141.

第一作者: 黄红捷, 硕士研究生, 哈尔滨工业大学(深圳), 518055 广东省深圳市

First Author: Huang Hongjie, Postgraduate, School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518055, China

通信作者: 邓大祥, 副教授, 哈尔滨工业大学(深圳), 518055 广东省深圳市

Corresponding Author: Deng Daxiang, Associate Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518055, China

轴与砂轮轴线重合。 α_e 是插齿刀后角(加工过程中插齿刀需转过的角度), L 为砂轮运动距离, B 为齿宽方向的运动距离, φ 是插齿刀转过的角度, a 是加工中心距。在磨削齿面时, 插齿刀沿 z_2 轴的旋转运动 ω 与砂轮纵向直线运动 v_1 形成齿面展成运动, 同时工件沿 z 轴做水平运动 v_2 , 进而完成整个齿宽方向的磨削。

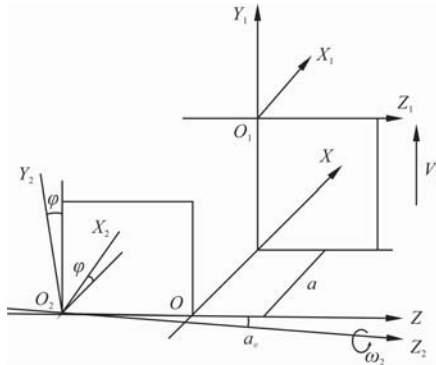


图1 锥面砂轮磨削坐标系

各坐标系变换如下

$$M_{02} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha_e & 0 & -\sin\alpha_e & 0 \\ \sin\alpha_e & 1 & \cos\alpha_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$M_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & L \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2 修形插齿刀齿面数学模型

渐开螺旋面方程为

$$\mathbf{r}_2^{(2)} = \begin{pmatrix} r_b \cos(\sigma + u + \theta) + r_b u \sin(\sigma + u + \theta) \\ r_b \sin(\sigma + u + \theta) - r_b u \cos(\sigma + u + \theta) \\ -p\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, r_b 为基圆半径; σ 为齿槽半角; θ 和 u 为参变量; p 为螺旋参数。

根据曲面上任意一点的法向矢量求解方法得到插齿刀齿面法向矢量为

$$\mathbf{n}_2^{(2)} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} = \begin{pmatrix} n_{x2} \\ n_{y2} \\ n_{z2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -pr_b u \sin(\sigma + u + \theta) \\ pr_b u \cos(\sigma + u + \theta) \\ r_b^2 u \end{pmatrix} \quad (4)$$

本文在研究时主要考虑齿廓鼓形修形, 通过对插齿刀齿形采用鼓形修形方式得到恰当的修形曲线, 并选择合理的修形值, 最终获得所需的修形效果^[2], 建立齿廓修形坐标系(见图2), 假设标准渐开线沿 x_0 方向, 则齿廓修形方程为

$$p(u) = \lambda [r_b(u - u_0)]^2 + h \quad (5)$$

式中, λ 是修形系数; h 是修形量; u_0 对应渐开线起始位置的展成角。

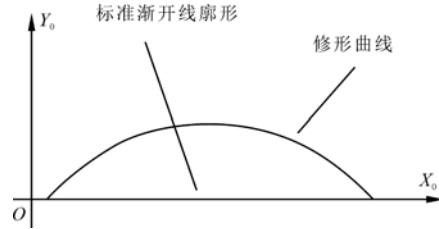


图2 齿廓修形曲线坐标系

结合标准渐开线齿面方程, 得到齿廓修形插齿刀齿面方程为

$$\mathbf{r}_2^{(2)'} = \begin{pmatrix} r_b \cos(\sigma + u + \theta) + [r_b u + p(u)] \sin(\sigma + u + \theta) \\ r_b \sin(\sigma + u + \theta) - [r_b u + p(u)] \cos(\sigma + u + \theta) \\ -p\theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

齿形长度和齿廓修形量相差较大, 因此齿廓的法向矢量可以看作不变。

2.3 砂轮产形面数学模型

砂轮产形面由一条确定斜率的直母线绕砂轮轴 y_1 旋转获得(见图3), 因此砂轮产形面方程为

$$\mathbf{r}_1^{(1)} = \begin{pmatrix} u_1 \sin v_1 \\ x_0(u_1) \\ u_1 \cos v_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, 母线方程 $x_0(u_1) = -u_1 \tan \alpha + H$, u_1 为砂轮磨削面某一点距砂轮中心的半径, α 为砂轮锥角; v_1 为母线 $x_0(u_1)$ 绕 y_1 轴旋转角度。

砂轮形成面的法向矢量为

$$\mathbf{n}_1^{(1)} = \frac{\partial \mathbf{r}^{(1)}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}^{(1)}}{\partial \theta} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \sin v_1 \\ -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos v_1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

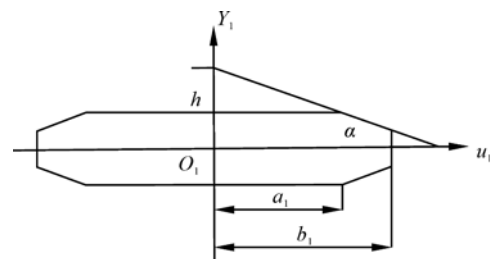


图3 锥面砂轮端截形

2.4 共轭分析

采用锥面砂轮磨削插齿刀时, 存在两个相互独立的运动, 即展成运动与齿宽方向往复运动, 砂轮与齿面属于双自由度点接触啮合关系^[3], 为连续共轭的两曲面。根据曲面共轭理论, 砂轮产形面与齿面满足: $\mathbf{r}_1^{(0)} = \mathbf{r}_2^{(0)}$, $\mathbf{n}_1^{(0)} = -\mathbf{n}_2^{(0)}$ 。

将齿面与砂轮形成面位矢与法矢转换到机床固

定坐标系($o-xyz$),则有

$$\begin{cases} u_1 \sin v_1 + a = x_2 \cos \alpha_c \cos \varphi - y_2 \cos \alpha_c \sin \varphi - z_2 \sin \alpha_c & (a) \\ -u_1 \tan \alpha + H + l = x_2 \sin \varphi + y_2 \cos \varphi & (b) \\ u_1 \cos v_1 = x_2 \cos \varphi \sin \alpha_c - y_2 \sin \varphi \sin \alpha_c + z_2 \cos \alpha_c - B & (c) \\ \sin \alpha \sin v_1 + a = n_{x2} \cos \alpha_c \cos \varphi - n_{y2} \cos \alpha_c \sin \varphi - n_{z2} \sin \alpha_c & (d) \\ \cos \alpha = n_{x2} \sin \varphi + n_{y2} \cos \varphi & (e) \\ \sin \alpha \cos v_1 = n_{x2} \cos \varphi \sin \alpha_c - n_{y2} \sin \varphi \sin \alpha_c + n_{z2} \cos \alpha_c & (f) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sin \alpha \sin v_1 + a = n_{x2} \cos \alpha_c \cos \varphi - n_{y2} \cos \alpha_c \sin \varphi - n_{z2} \sin \alpha_c & (d) \\ \cos \alpha = n_{x2} \sin \varphi + n_{y2} \cos \varphi & (e) \\ \sin \alpha \cos v_1 = n_{x2} \cos \varphi \sin \alpha_c - n_{y2} \sin \varphi \sin \alpha_c + n_{z2} \cos \alpha_c & (f) \end{cases} \quad (11)$$

在方程(d)、方程(e)、方程(f)中,左侧各项平方和与右侧各项平方和均等于1,因此独立方程只有两个,选取方程(d)、方程(e)两式。在整理后的方程组中,已知 B 和 u ,需求解 $\varphi, l, u_1, v_1, \theta$,在MATLAB软件中完成计算过程,初始数据为离散 10×10 组,即可得到一系列离散的运动参数

$$\varphi(i) = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n), B(i) = (B_1, B_2, \dots, B_n), l(i) = (l_1, l_2, \dots, l_n)$$

3 计算实例

3.1 加工实例

已知锥面砂轮锥角 $\alpha = 20^\circ, a_1 = 30\text{mm}, b_1 = 40\text{mm}, h = 40\text{mm}$,插齿刀模数3.25,齿数31,齿顶圆110.71mm,后角 6° ,前角 5° ,压力角 20.1707° (插齿刀齿形修正后),修形系数0.01,修形量0.2mm。

对于未修形的直齿插齿刀,仅需将修形系数与修形量看作为0。分别求解修形与未修形时的磨齿运动,得到如表1和表2所示的离散加工参数。将求解得到的插齿刀转角 φ 与砂轮位移 l 分别作为横纵坐标,以首尾两点作直线,并将其余各点作散点图,得到如图4和图5所示的转角与位移曲线。对比数据结果,在加工至相同齿宽位置处时,由于渐开线齿廓存在修形量,因此插齿刀转角较未修形的情况略微变大。

表1 直齿插齿刀部分离散加工参数

插齿刀转角 $\varphi(^{\circ})$	砂轮位移 $l(\text{mm})$	插齿刀轴向位移 $B(\text{mm})$
-6.43471	-8.803933	0
-6.43471	-8.803933	2.431054
-6.43471	-8.803933	4.862107
-6.43471	-8.803933	7.293161
-6.43471	-8.803933	9.724214
-6.43471	-8.803933	12.155268
-6.43471	-8.803933	14.586321
-6.43471	-8.803933	17.017375
...
19.466542	14.037784	9.724214
19.466542	14.037784	12.155268
19.466542	14.037784	14.586321
19.466542	14.037784	17.017375
19.466542	14.037784	19.448428
19.466542	14.037784	21.879482

表2 修形插齿刀部分离散加工参数

插齿刀转角 $\varphi(^{\circ})$	砂轮位移 $l(\text{mm})$	插齿刀轴向位移 $B(\text{mm})$
-6.562162	-8.803933	0
-6.562162	-8.803933	2.431054
-6.562162	-8.803933	4.862107
-6.562162	-8.803933	7.293161
-6.562162	-8.803933	9.724214
-6.562162	-8.803933	12.155268
-6.562162	-8.803933	14.586321
-6.562162	-8.803933	17.017375
...
19.534725	14.037784	9.724214
19.534725	14.037784	12.155268
19.534725	14.037784	14.586321
19.534725	14.037784	17.017375
19.534725	14.037784	19.448428
19.534725	14.037784	21.879482

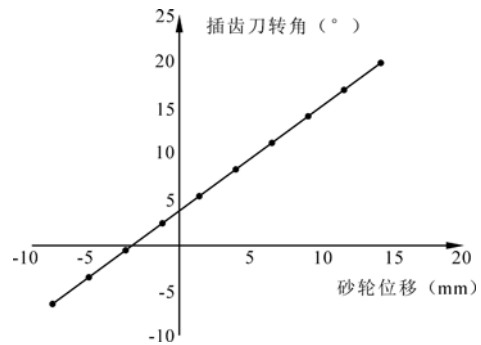


图4 直齿插齿刀转角与砂轮位移曲线

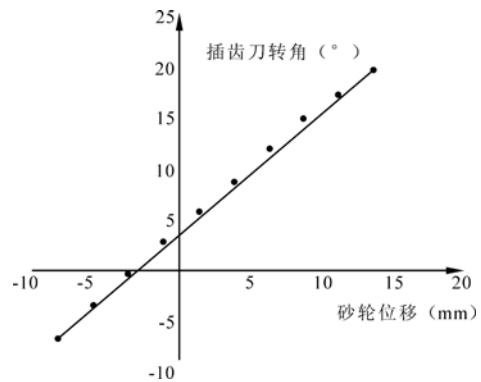


图5 修形插齿刀转角与砂轮位移曲线

3.2 接触轨迹

在MATLAB软件中绘制出磨削加工时齿面间的每一个接触点,这些点的集合即为接触轨迹(见图6)。接触轨迹从插齿刀大端面齿顶开始,按照展成运动规律逐渐包络出整个齿形,并通过齿宽方向的往复运动,沿齿向包络出整个齿面。

4 仿真加工及误差分析

4.1 在VERICUT软件中搭建仿真环境

VERICUT仿真软件可以在计算机环境下模拟

车削、铣削、磨削等多种加工方式,可以直观显示整个加工过程^[4]。在UG软件中建立磨齿机床三维模型并导入VERICUT软件,如图7所示,在编写数控程序时可采用上述计算得到的离散运动参数。

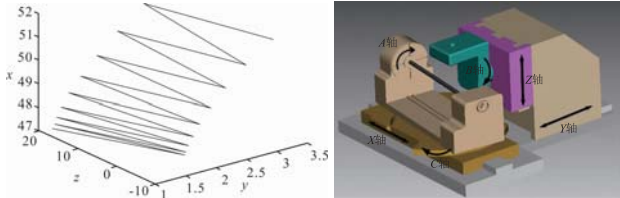


图6 磨齿运动接触迹

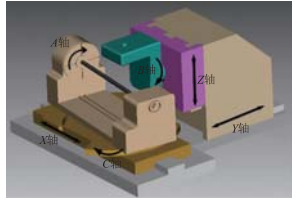


图7 仿真磨床

4.2 仿真加工结果分析

完成未修形齿面的磨削后,将加工后的毛坯导入至UG软件中,分别提取标准插齿刀齿与加工后毛坯对应位置处的齿廓曲线,依照插齿刀轴截面圆心,以等半径大小的方式分布10个检查点^[5]。利用UG软件的“偏差检查模块”生成检查报告,得到插齿刀齿廓误差数据(见表3)。对于修形插齿刀的磨削,仅是离散的磨齿运动参数不同,未改变锥面砂轮的形状,所得对应检查点偏差数据及偏差曲线分别见表4和图8。

表3 直齿插齿刀齿形误差 (mm)

检查点处半径	误差
55.14479	0.000289
54.48174	0.000580
53.81869	0.000843
53.15564	0.001111
52.49259	0.000736
51.82954	0.000559
51.16649	0.001431
50.50344	0.002411
49.84039	0.002503
49.17734	0.000801

表4 修形插齿刀齿形偏差 (mm)

检查点处半径	误差
55.14479	0.000981
54.48174	0.046544
53.81869	0.095407
53.15564	0.141029
52.49259	0.166956
51.82954	0.189943
51.16649	0.204438
50.50344	0.163075
49.84039	0.098703
49.17734	0.001609

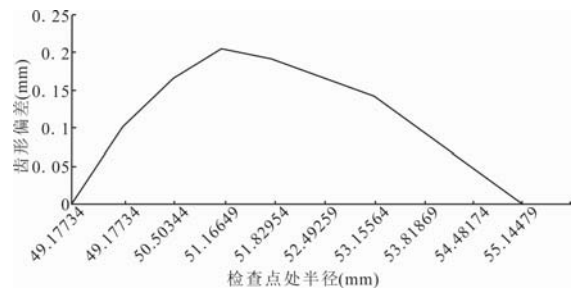


图8 修形插齿刀齿形偏差曲线

直齿插齿刀齿廓最大误差出现在靠近齿根的位置,考虑到此误差中包含模型转换误差,所以在仿真加工中的误差应当更小。采用抛物线齿廓修形后的齿廓偏差在齿顶和齿根相对较小,而齿廓中段的偏差相对较大,且偏差值符合所设计的修形曲线对应的修形量。

5 结语

利用曲面共轭原理建立了磨齿运动数学模型,精确计算出磨齿过程中离散的加工运动参数。在VERICUT仿真软件中搭建锥面砂轮磨齿机并进行仿真磨削加工,通过齿形比对的方法分析了仿真加工结果,结果表明通过展成运动的改变而不修整砂轮截形,即可完成修形插齿刀的磨削。

参考文献

[1]何枫. 滚刀与插齿刀制造原理的实质同一性[J]. 工具技术,2013,47(1):80-81.
 [2]李润方. 齿轮传动的刚度分析和修形方法[M]. 重庆:重庆大学出版社,1998.
 [3]蒋进科,方宗德,刘钊. 拓扑修形斜齿轮齿面插齿修正[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(7):102-107.
 [4]李云龙,曹岩. 数控机床加工仿真系统 VERICUT[M]. 西安:西安交通大学出版社,2005:5.
 [5]牟鑫宇,陈晓东. 基于 VERICUT 的 ZC1 蜗杆磨削仿真技术[J]. 工具技术,2020,54(2):54-58.

第一作者:李高益,硕士研究生,西安工业大学机电工程学院,710021 西安市

First Author: Li Gaoyi, Postgraduate, School of Electrical and Mechanical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China

通信作者:劳奇成,教授,西安工业大学机电工程学院,710021 西安市

Corresponding Author: Lao Qicheng, Professor, School of Electrical and Mechanical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China