

基于 VERICUT 的偏心放置分段式齿圈铣齿方法研究

刘俊辉¹,狄成宝²,罗有朋²

(1. 平顶山技师学院,河南 平顶山 467000; 2. 重庆齿轮箱有限责任公司,重庆 402263)

摘要:为解决大直径且齿宽较宽的分段式齿圈的铣齿问题,提出采用偏心放置的主程序调用子程序循环加工的铣齿方法。根据主程序数学模型和子程序数学模型构建偏心放置铣齿方法的数学模型,基于 VERICUT 的仿真模型和仿真主、子程序,实现齿槽的开粗和精铣仿真加工;通过 VERICUT 对比分析功能模块,以齿面残留模型为依据,验证了偏心放置铣齿方法的可行性。

关键词:VERICUT;分段式齿圈;铣齿方法;偏心放置

中图分类号:TG61;TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0161-03

Research on Eccentric Placement Segmented Ring Gear Milling Method Based on VERICUT

LIU Junhui¹, DI Chengbao², LUO Youpeng²

(1. Pingdingshan Technician College, Pingdingshan 467000, China;

2. Chongqing Gearbox Co., Ltd., Chongqing 402263, China)

Abstract: To solve the problem of gear milling for segmented ring gear with large diameter and wide tooth width, a milling method of eccentric main program calling subroutine is proposed. According to the mathematical model of the main program and the mathematical model of the subprogram, the mathematical model of the eccentric placement gear milling method is constructed. Based on the simulation model of VERICUT and the simulation main and subroutines, the simulation machining of cogging and fine milling is realized. Through the comparative analysis function module of VERICUT, the feasibility of the eccentric placement gear milling method is verified based on the residual tooth surface model.

Keywords: VERICUT; segmented gearing; milling method; eccentric placement

0 引言

近年来,大功率(齿宽较宽)、大直径齿圈应用越来越广泛。由于直径较大,超出一般机床的加工范围,设计和工艺上一般采用分段式方式进行加工。在常规直径齿圈的铣齿加工中,常采用径向进刀方式,让齿圈中心与工作台回转中心重合,然后用主程序调用一个齿面子程序循环加工^[1]。这种加工方式程序段少,后期换刀、跳齿方便。对于分段式、大直径齿轮,零件中心无法与机床回转台中心重合,对于齿宽较窄的齿轮,可以采用轴向进刀的方式,通过框架编程,也能实现主程序调用子程序循环加工的方法^[2]。然而,对于齿宽较宽的大直径齿轮,轴向进刀时,刀轴悬伸长,刚性较差,加工出的齿面精度较低。工程应用中,还可以采用一次生成多个齿槽程序,进行加工,但这种加工方式程序过长、程序的容错性小、风险大。

为了解决以上问题,本文提出了一种偏心放置的主程序调用子程序循环加工的铣齿方法。通过设置合理的基准面,使毛坯放置在机床特定的位置。利用坐标系的旋转与平移建立主程序调用子程序的数学模型;通过齿面 UV 参数方程,建立四轴侧刃铣子程序切触点的刀心坐标及刀轴方向的数学表达式。根据主程序数学模型和子程序数学模型,创建基于 VERICUT 的仿真模型和仿真主、子程序,用来实现齿槽的开粗和精铣仿真加工;最后通过 VERICUT 对比分析功能模

块,验证了本文提出方法的有效性。

1 偏心放置铣齿方法数学模型构建

1.1 主程序数学模型构建

分段齿圈放在工作台上,为了便于找正与对刀,在齿坯两端设置 4 个基准面,分段齿圈偏置放置简图如图 1 所示。

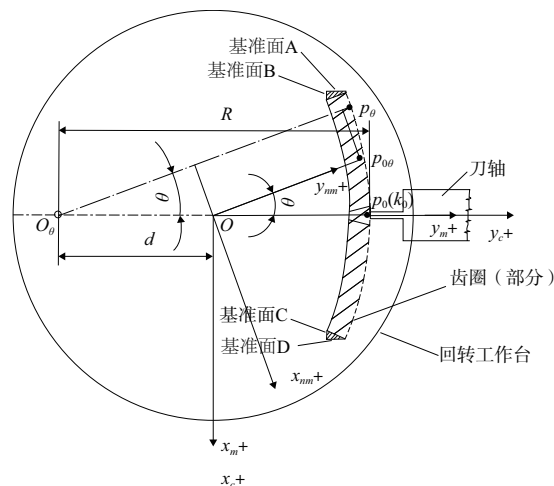


图 1 分段齿圈偏置放置简图

第一作者简介:刘俊辉(1979—),男,河南平顶山人,副教授,硕士研究生,研究方向为数控加工专业教学与技能竞赛。

根据图 1 可知,通过在基准面 A、B、C、D 对刀,使零件位于 $x_c y_c z_c$ 零件坐标系下(z_c 垂直直面朝上),其中 y_c 轴与零件中心 O_θ 和工作台回转中心 O 的连线轴重合。初始状态下,通过齿槽分中,使刀尖 k_0 与 y 轴和齿顶圆交点 P_0 重合^[3-4]。

在主程序编程时,首先使编程坐标系 $x_m y_m z_m$ 与零件坐标系 $x_c y_c z_c$ 重合^[5]。在主程序调用初始 y_c 上齿槽的子程序加工 P_θ 处的齿槽时,首先使编程坐标系逆时针旋转 θ 角,变为 $x_{nm} y_{nm} z_{nm}$,此时, y_{nm} 与齿端齿顶圆的交点为 $P_{0\theta}$ 。然后沿 $P_{0\theta} P_\theta$ 移动至 P_θ 。

在 $x_{nm} y_{nm} z_{nm}$ 下记 $P_{0\theta} P_\theta$ 为 ${}^n P_{0\theta} P_\theta$, OP_0 为 ${}^n OP_0$, OP_θ 为 ${}^n OP_\theta$ 。

令偏心距 $OO_\theta = d$, 零件齿顶圆半径为 R 。由几何关系可得,在 $x_m y_m z_m$ 坐标系下:

$$OP_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ R-d \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$OP_\theta = \begin{bmatrix} -R\sin\theta \\ R\cos\theta-d \end{bmatrix} \quad (2)$$

在 $x_{nm} y_{nm} z_{nm}$ 下:

$${}^n OP_{0\theta} = \begin{bmatrix} 0 \\ R-d \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^n OP_\theta = M \cdot OP_\theta \quad (4)$$

$${}^n P_{0\theta} P_\theta = {}^n OP_\theta - {}^n OP_{0\theta} \quad (5)$$

其中 M 为坐标系旋转矩阵,逆时针旋转 θ 角。

$$M = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

联立式(1)-式(5),得

$${}^n P_{0\theta} P_\theta = \begin{bmatrix} -d\sin\theta \\ d(1-\cos\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

至此,主程序数学模型已经建完。

1.2 子程序数学模型构建

通过齿面 UV 参数方程,建立四轴侧刃铣子程序切触点的刀心坐标及刀轴方向的数学表达式。单个齿槽加工主要分为型腔铣开粗、齿根精加工、齿面侧刃半精铣和齿面精洗^[6]。型腔铣和齿根精加工用的是定轴铣,比较简单,在此不做讨论。齿面半精铣和精铣是变轴铣,工程应用中,为了提高加工效率和齿面表面粗糙度,外齿加工一般采用在刀轴相切与加工点的侧刃铣。齿面 uv 方向示意图如图 2 所示。

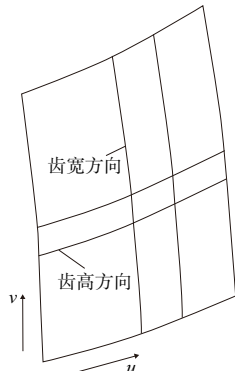


图 2 齿面 uv 方向示意图

由图 2 可知,齿面可以表示成双参数 u (沿齿高方向) 和 v (沿齿宽方向) 的矢量函数 $S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ 。

由渐开面的性质可知,在曲面上任意一点 $S(u_0, v_0)$ 上 u 向的切向矢量 $S_u(u_0, v_0) = \left. \frac{\partial S(u, v_0)}{\partial u} \right|_{u=u_0}$ 与 v 向的切向矢量 $S_v(u_0, v_0) = \left. \frac{\partial S(u_0, v)}{\partial v} \right|_{v=v_0}$ 不平行,即 $S_u(u_0, v_0) \times S_v(u_0, v_0) \neq 0$ ^[7-8]。由空间向量知识得出,曲面上任意一点 $S(u_0, v_0)$ 处的单位法向量:

$$n(u_0, v_0) = \frac{S_u(u_0, v_0) \times S_v(u_0, v_0)}{|S_u(u_0, v_0) \times S_v(u_0, v_0)|} \quad (7)$$

在进行四轴侧刃铣时,当刀轴的切触点移动到 $S(u_0, v_0)$ 的同时,刀轴侧刃还要与切触点相切,则编程控制刀心,相对于 $S(u_0, v_0)$ 沿着切触点 $n(u_0, v_0)$ 方向移动 $D/2$,即刀心位置坐标:

$$S_i(u_0, v_0) = S(u_0, v_0) + \frac{D}{2} \times n(u_0, v_0) \quad (8)$$

工作台相对于 $y+$ 轴旋转 θ 角。由于齿面的 u 向和刀轴在一个平面上,由偏导函数的几何意义可得

$$\beta = \arctan(S_u(u_0, v_0)) \quad (9)$$

其中 β 是带符号的,在如图 3 所示的坐标系下,下齿面为 -, 上齿面为 +。此时,记 $S(u_0, v_0)$ 侧刃铣的切削 NC 代码在 $x_m y_m z_m$ 为 (x_0, y_0, z_0, β) 。

而 θ 相位角处的刀轴相对于初始刀轴角度为: $\theta + \beta$ 。此时, $S_\theta(u_0, v_0)$ 侧刃铣的切削 NC 代码在 $x_{nm} y_{nm} z_{nm}$ 为

$$(x_0, y_0, z_0, \theta + \beta) \quad (10)$$

而对于带有 RTCP (刀尖点跟随功能) 的机床,子程序采用刀轴矢量编程 (刀轴方向用 $A3=, B3=, C3=$) 时,刀轴方向自动与坐标系匹配,不必考虑齿槽变换时刀轴方向与零件的相对位置。

至此,分段大齿轮偏置放置子程序数学模型的构建已经完成。

2 VERICUT 仿真实现

为了验证数学模型的正确性,取齿数 84, 模数 32 (外圆直径 $\phi 2752$) 齿圈的 1/12, 偏心距 $d = 1000$, 如图 4 所示。在五轴机床 DMU200P 中进行 VERICUT 加工仿真。分段齿圈偏心放置示意图如图 3 所示。

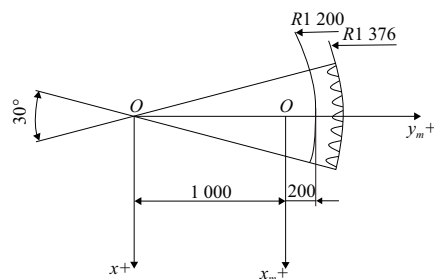


图 3 分段齿圈偏心放置示意图

图 4 所示为 VERICUT 偏心放置方案图,分段齿圈由夹具夹持,放在工作台上,并设定其可设定的零点偏移即

编程零点 G54 位于图 3 所示工作台的旋转中心 O 处,y 轴通过齿槽中部。

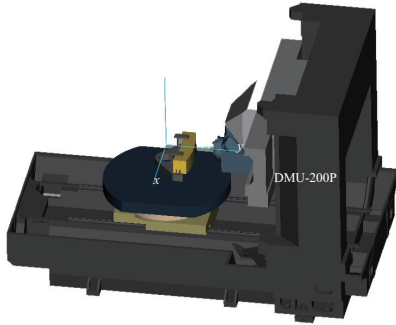


图 4 VERICUT 偏心放置方案图

2.1 程序设计

仿真前首先对主程序和子程序进行设计和编程。主程序逻辑框图如图 5 所示。

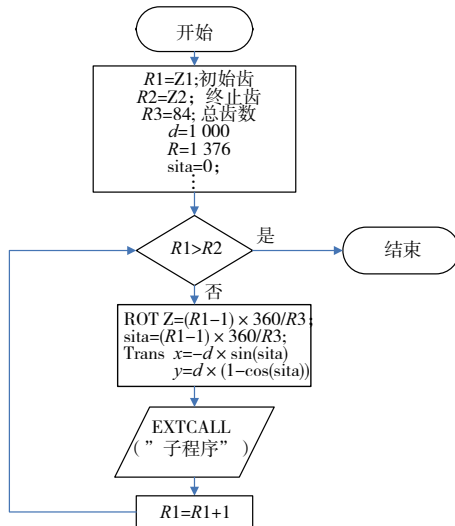


图 5 主程序逻辑框图

图 5 所示为主程序逻辑框图,通过 ROT 和 Trans 指令完成坐标系转换。此外此主程序还可以通过变量控制铣齿的位置及数量。子程序部分截图如图 6 所示。图 6 中,通过后处理构造器在 c 坐标轴下,额外补偿一个相位角。

```

N460 X=-29.15 Y=378.762 C=DC(24.999+(sita))
N470 X=-29.143 Y=378.747 C=DC(24.997+(sita))
N480 X=-29.129 Y=378.716 C=DC(24.993+(sita))
N490 X=-29.1 Y=378.655 C=DC(24.986+(sita))
N500 X=-29.044 Y=378.532 C=DC(24.972+(sita))
N510 X=-28.93 Y=378.287 C=DC(24.944+(sita))
N520 X=-28.703 Y=377.795 C=DC(24.888+(sita))
N530 X=-28.475 Y=377.303 C=DC(24.832+(sita))
N540 X=-28.362 Y=377.056 C=DC(24.804+(sita))
N550 X=-28.305 Y=376.932 C=DC(24.79+(sita))
N560 X=-28.291 Y=376.901 C=DC(24.787+(sita))
N570 X=-28.284 Y=376.886 C=DC(24.785+(sita))
N580 X=-28.277 Y=376.87 C=DC(24.783+(sita))
N590 X=-28.262 Y=376.839 C=DC(24.78+(sita))
N600 X=-28.255 Y=376.824 C=DC(24.778+(sita))
N610 X=-28.248 Y=376.808 C=DC(24.776+(sita))
  
```

图 6 子程序部分截图

2.2 仿真加工及结论

仿真采用主程序调用相同子程序的形式循环加工各个齿槽,仿真分为齿槽开粗、左齿面精加工、右齿面精加工、齿底精加工。第 1 个齿槽变轴精铣俯视图和第 3 个齿槽定轴开槽俯视图如图 7 和图 8 所示。

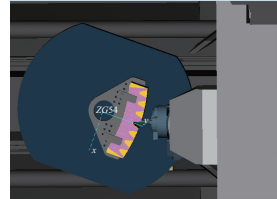


图 7 第 1 个齿槽变轴精铣俯视图

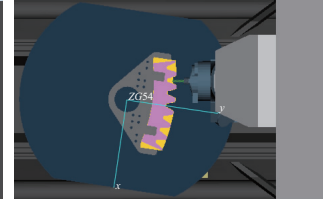


图 8 第 3 个齿槽定轴开槽俯视图

为了验证算法的正确性,仿真切削试验中,精加工 7 个不同相位的齿槽,加工后进行齿坯和设计齿轮对比,如果每一齿面都没有过切和残留异常的情况,就说明加工方法是正确的。用 VERICUT 自带的分析比较模块,使加工后的模型与设计模型进行对比分析,分析结果如图 9、图 10 所示。

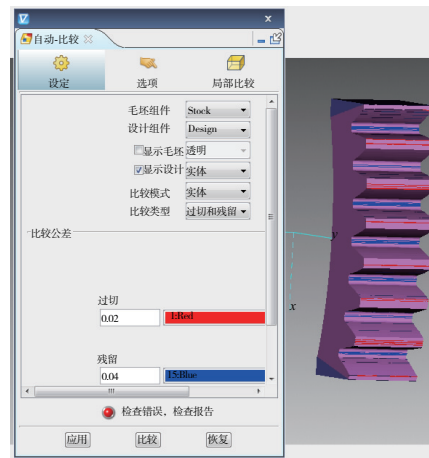


图 9 0.04 残余仿真切削对比图

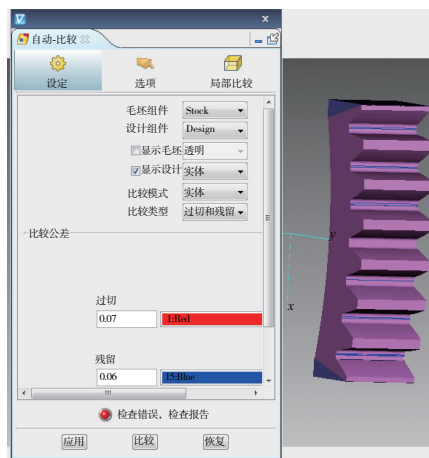


图 10 0.06 残余仿真切削对比图

(下转第 176 页)

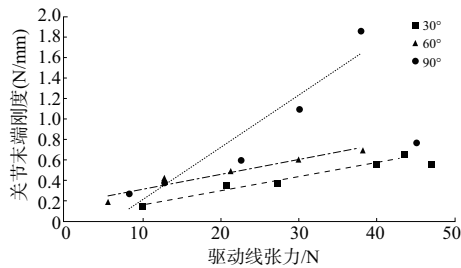


图 13 刚度-张力关系图

从图 13 中可以看出:1) 柔性关节末端刚度与驱动线张力之间存在线性关系(90°时不明显),随着驱动线张力的增加,关节末端刚度增大,但并不会无限制地增长,在张力达到一定值时刚度会发生突变;2) 柔性关节弯曲角度不同时,驱动线张力的变化对刚度的影响程度不同,且关节弯曲角度越大张力变化对刚度的影响程度越大;3) 驱动线张力相同时,关节弯曲角度越大,刚度越大。可以看出这些结论与 2.2 节中推测的相同,证明了所提出的变刚度方案的可行性。

4 结语

本文设计了一种用于检测的可变刚度连续型机器人,提出了机器人的运动学模型并通过实验加以验证;提出了通过改变驱动线张力实现连续型机器人变刚度的方案,建立 Adams 模型并进行了仿真验证;最后通过实验验证了所提变刚度方案的可行性。本文从驱动线张力入手,为可变刚度连续型机器人的研究提供一个新思路。

(上接第 163 页)

如图 9 所示,残留量设为 0.04 时,各齿面和齿根残留部位均匀;如图 10 所示,当残留量改为 0.06 时,各齿槽处齿面均无残留部位,齿根有少部分残余部位。图 9、图 10 显示齿顶有过切部位,过切量 >0.07 。因齿顶没进行加工,齿顶显示的过切部位是毛坯和零件位置不重合导致的。

综上所述,利用本文提出的方法可以有效解决大直径且齿宽较宽的分段式齿圈的铣齿问题,且通过 VERICUT 自带的分析比较模块可知,偏心放置铣齿方法具有一定的可行性。

3 结语

为了解决大直径且齿宽较宽的分段式齿圈的铣齿问题,提出基于 VERICUT 偏心放置分段式齿圈铣齿方法,通过主程序数学模型和子程序数学模型完成偏心放置铣齿方法数学模型的构建。仿真实验结果表明:齿根残余量大于齿面。这是因为齿根精加工用的球刀,相对于齿面立铣刀,球刀的误差较大,故残余量较大;齿顶未进行加工,仿真加工出现的过切是毛坯和设计实体有放置误差而导致的;在整个仿真切削模型齿面余量是均匀的,且齿厚余量

参考文献:

- [1] HAO L N, XIANG C Q, GIANNACCINI M E, et al. Design and control of a novel variable stiffness soft arm [J]. *Advanced Robotics*, 2018, 32(11): 605-622.
- [2] LOSCHAK P M, BURKE S F, ZUMBRO E, et al. A robotic system for actively stiffening flexible manipulators [J]. *Rep U S*, 2015: 216-221.
- [3] KIM Y J, CHENG S B, KIM S, et al. A stiffness-adjustable hyperredundant manipulator using a variable neutral-line mechanism for minimally invasive surgery [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(2): 382-395.
- [4] 耿仕能,王友渔,陈丽莎,等. 变刚度连续型机械臂设计与控制 [J]. *宇航学报*, 2018, 39(12): 1391-1400.
- [5] JIANG S R, CHEN B, QI F, et al. A variable-stiffness continuum manipulators by an SMA-based sheath in minimally invasive surgery [J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2020, 16(2): e2081.
- [6] HAO L N, XIANG C Q, GIANNACCINI M E, et al. Design and control of a novel variable stiffness soft arm [J]. *Advanced Robotics*, 2018, 32(11): 605-622.
- [7] LIU Y G, YANG Y, PENG Y, et al. A light soft manipulator with continuously controllable stiffness actuated by a thin McKibben pneumatic artificial muscle [J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(4): 1944-1952.
- [8] AMANOV E, NGUYEN T D, MARKMANN S, et al. Toward a flexible variable stiffness endoport for single-site partial nephrectomy [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2018, 46(10): 1498-1510.

收稿日期:2020-11-23

误差值 ≥ 0.02 。综上所述,分段齿圈偏心放置坐标补偿数学模型及主程序调用算法都是正确的。

参考文献:

- [1] 李华芳. 基于 VERICUT 软件构建数控铣刀刀柄模型方法的探讨 [J]. *陕西工业职业技术学院学报*, 2019(3): 4-6.
- [2] 林欧. 基于 VERICUT 滚齿切削过程仿真及应用 [J]. *汽车工艺师*, 2020(3): 14-16.
- [3] 武晨光,陈晓东. 基于 VERICUT 的齿轮滚刀铲磨加工仿真 [J]. *科技创新与应用*, 2018(5): 28-31.
- [4] 贾康,洪军. 螺旋内齿圈拉刀结构分析及制造方法概述 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(9): 90-99.
- [5] 韩军,王静. 薄壁齿圈装夹方式优化分析研究 [J]. *内蒙古科技大学学报*, 2019, 38(1): 64-69.
- [6] 李玉帆,王永鹏,南博儒,等. 直齿锥齿轮的数控铣齿加工研究 [J]. *新技术新工艺*, 2018(1): 6-9.
- [7] 吕刚磊,刘军,刘正颖. 弧齿锥齿轮四轴展成运动位置求解及加工仿真 [J]. *机械传动*, 2020, 44(5): 83-87.
- [8] 庞璐,戴华,黎楠. 教学加工两用型微型数控铣床的数控系统研究与开发 [J]. *装备制造技术*, 2018(6): 49-53, 77.

收稿日期:2020-11-26