

蜗杆刀具滚磨摆线轮加工原理仿真与滚齿试验

吴金浩^{1,2} 魏冰阳^{1,2} 王建文³ 周国君³

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003)

(2. 龙门实验室, 洛阳 471000)

(3. 浙江陀曼智能科技股份有限公司, 绍兴 312000)

摘要:【目的】摆线轮是RV减速器的核心部件,其高效、精密的加工方法对保证减速器的性能至关重要。鉴于此,提出一种摆线轮滚齿、磨齿加工的基本原理方法。【方法】首先,通过螺旋面形成原理与空间坐标变换,求解啮合方程,建立了摆线轮封闭齿廓曲线、蜗杆刀具及齿向修形的几何运动模型。其次,利用VERICUT软件构建滚磨机床原理样机,通过形成曲面的运动仿真,与理论曲面比对,偏差小于0.004 mm。【结果】通过滚齿加工试验,证明了所建理论模型的正确性和蜗杆刀具滚磨加工技术的可行性。研究为摆线轮连续齿廓高效加工、三维拓扑修形奠定了理论与实践基础。

关键词: 摆线轮; 蜗杆刀具; 齿向修形; 滚齿; 磨齿

中图分类号: TH161 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

RV减速器具有体积小、质量轻、传动效率高等优点,广泛应用于工业机器人、机床和医疗检测设备等领域^[1]。摆线轮作为RV减速器的核心零部件,其加工质量对RV减速器的传动性能有显著影响。建立一种高效率、高精度的摆线轮加工方法,对制造高质量、高性能的RV减速器十分重要。

目前,摆线轮齿廓加工多采用成形法,对展成法加工的研究较少,尚未成为主流。然而,无论是成形法亦或是展成法,只要存在分度运动,都会出现齿廓拼接的现象,直接影响齿面的精度与质量,这是当前摆线轮加工的瓶颈问题。因此,摆线齿轮的设计加工技术一直受到国内外学者的广泛关注。刘昶等^[2]提出利用插齿刀具加工摆线齿轮的方法,实现了摆线齿轮有效齿廓的连续插削加工。汤勇等^[3]提出冷精加工摆线轮的方法,为摆线轮的精密加工提供了一定的参考。李天兴等^[4]建立摆线轮齿面展成磨削模型,为摆线齿轮的展成磨削工程化应用奠定了一定基础。ÖZEL等^[5]研究了立铣刀加工摆线齿轮的方法,通过改变设计参数和切削参数,对齿廓的切

削误差进行了分析。庞源^[6]根据空间啮合原理,建立磨削摆线轮的蜗杆砂轮模型,通过仿真验证了蜗杆砂轮加工摆线轮的合理性。姚继权等^[7]利用二次开发软件VB建立摆线轮滚刀的三维模型,并对滚刀进行有限元分析,为摆线轮展成磨削提供了理论依据。双文杰等^[8]利用空间几何变换,实现了蜗杆砂轮与工件齿廓自动化对准。得益于渐开线圆柱齿轮的修形方法与技术^[9-10],人们开始把齿廓修形引入RV摆线轮减速器。赵博等^[11]提出抛物线修形方式,为摆线轮的修形设计提供了新思路。焦文瑞等^[12]研究了摆线轮成形磨削修形方式,建立齿廓修形数学模型,给出了计算样例。韩天豪等^[13]提出摆线轮磨齿机各轴的误差补偿依据与方法,为摆线轮的精密加工提供了参考。高跃等^[14]研究了摆线轮齿廓优化、等移距修形方法,确定了摆线轮的最佳修形量。李晋凡等^[15]通过研究摆线轮压力角的分布规律,提出了新的齿廓修形方式。王永强等^[16]利用包络法计算了摆线轮的齿廓方程,分析了摆线轮修形后的齿面承载接触特性。

基于蜗杆类刀具的滚齿、磨齿方法作为一种成

收稿日期: 2025-01-10 修回日期: 2025-01-28

基金项目: 龙门实验室前沿探索课题(LMQYTSKT025)

作者简介: 吴金浩,男,1999年生,河南漯河人,硕士研究生;主要研究方向为摆线轮的拓扑修形设计、蜗杆砂轮磨削方法;2726516617@qq.com。魏冰阳(通信作者),男,1966年生,河南洛阳人,博士,教授,博士研究生导师;主要研究方向为高性能齿轮数字化设计与制造、齿轮传动动力学、摩擦学仿真;bywei29@163.com。

引用格式: 吴金浩,魏冰阳,王建文,等.蜗杆刀具滚磨摆线轮加工原理仿真与滚齿试验[J].机械传动,XXXX,XX(X):1-9.

WU Jinhao, WEI Bingyang, WANG Jianwen, et al. Simulation of the machining principle of hobbing and grinding cycloidal gears with worm cutters and hobbing tests[J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX(X): 1-9.

熟工艺,已在渐开线圆柱齿轮的加工中得到广泛应用,加工效率与精度优势明显。但综合国内外研究可知,该类方法在摆线轮加工方面的研究较少,限制了该类方法的应用,尤其在对连续齿廓摆线轮修形时,现有的方法明显存在原理性缺陷。鉴于此,本文拟以蜗杆刀具滚齿、磨圆柱齿轮原型为基础,给出摆线轮蜗杆刀具的廓形计算方法,对蜗杆滚刀、砂轮几何结构与齿向修形方法进行仿真分析,以期较全面地验证蜗杆刀具加工摆线轮的可行性与三维拓扑修形的便利性。

1 蜗杆刀具加工摆线齿的原理

1.1 摆线轮滚齿加工原理

以滚齿加工为例,蜗杆刀具加工摆线轮的原理如图1所示,其原型为蜗杆与圆柱齿轮的啮合。为了能加工出正确的摆线齿廓,滚刀的切削刃与摆线轮齿廓共轭,二者做共轭展成运动。摆线轮除了有效啮合齿廓,齿顶、齿根还存在大段的过渡曲线,构成了一个完整圆周的封闭曲线。因此,其滚刀不同于渐开线齿轮滚刀:左、右齿廓相互独立,齿廓过渡曲线无严格要求。对于摆线轮,要求滚刀的刀齿“根槽-齿廓-齿顶”必须构成一个完整光滑的曲线(图2所示纵向廓形),从而可保证摆线轮的连续滚切加工,同时形成封闭的齿廓曲线,避免齿廓搭接不精确的问题。这是摆线轮滚齿加工的特殊要求。

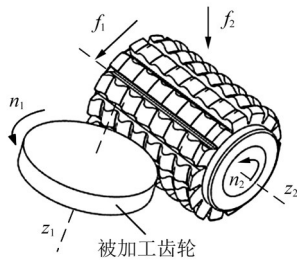


图1 摆线轮滚刀的工作原理

Fig. 1 Working principle of the cycloidal gear hob

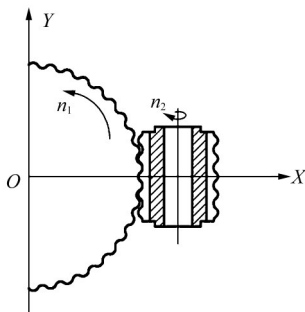


图2 摆线轮端面与滚刀轴向剖面

Fig. 2 Axial profile of the cycloidal gear face and the hob

1.2 摆线轮加工方法对比

表1所示未滚切法与当前常见的成型法和线切割

加工方法的对比。在3种加工方法中,滚切法齿廓齿向双向修形、齿廓对接最方便。

表1 摆线轮不同加工方法特点

Tab. 1 Characteristics of different processing methods of cycloidal gears

加工方法	原理	齿廓精度	工艺性
线切割	齿廓数字化	齿廓曲线完整封闭,可齿廓修形	无切削力,可多件同时切割;需控制齿面变形、质量
成型法	齿廓数字化	相邻齿廓需搭接,可齿廓修形	分齿加工,效率一般;需专门设计制造成形刀
滚切法	蜗杆与圆柱齿轮共轭展成	齿廓曲线完整封闭,可齿廓齿向修形	连续加工,效率高;刀具复杂,需专门设计制造

2 蜗杆刀具几何模型的建立

2.1 摆线轮齿廓方程

摆线轮的齿廓曲线形成有两种方法^[7]:外切外滚法和内切外滚法。两种方法可以等效为同一短幅外摆线,如图3所示。其中, M 形成的轨迹 MM' 为短幅外摆线。

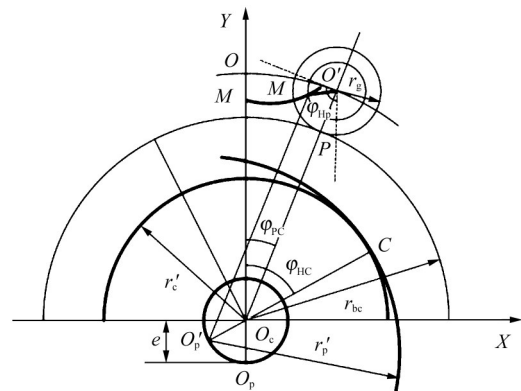


图3 摆线轮齿廓形成原理

Fig. 3 Principle of cycloidal gear tooth profile formation

两种方法的等效条件为

$$O'M' = r'_p - r'_c = e \quad (1)$$

$$r_{bc} + r_g = O_p M = O_c O' = r_p \quad (2)$$

$$\frac{r_{bc}}{r_g} = \frac{r'_c}{e} = z_c \quad (3)$$

联立式(1)~式(3),有以下关系

$$\frac{e}{r_g} = \frac{r'_c}{r_{bc}} = \frac{r'_p}{r_p} = K \quad (4)$$

式中, r_g 、 r'_p 均为动圆半径; r_{bc} 、 r'_c 均为基圆半径; r_p 为针轮分布圆半径; z_c 为摆线齿轮齿数; e 为偏心距; K 为短幅系数。

根据摆线轮的成形原理,可以得到摆线轮的标准齿廓方程为

$$\begin{cases} x_c = [r_p - \frac{r_m}{S}] \cos(1 - i'')\varphi - [e - \frac{Kr_m}{S}] \cos i''\varphi \\ y_c = [r_p - \frac{r_m}{S}] \sin(1 - i'')\varphi + [e - \frac{Kr_m}{S}] \sin i''\varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中, i'' 为摆线轮和针轮的传动比 z_p/z_c , 其中, z_p 为针齿数; φ 为相对转角及图 3 中啮合相位角的 φ_{HP} 简写; r_m 为针齿半径; $S=1+K^2-2K\cos\varphi$ 。

2.2 蜗杆齿廓方程推导

以滚齿加工为例, 建立摆线齿轮滚刀和摆线轮的空间啮合坐标系, 如图 4 所示。 $S_0(O_0-X_0, Y_0, Z_0)$ 和 $S_3(O_3-X_3, Y_3, Z_3)$ 分别为摆线轮和滚刀的空间固定坐标系; $S_1(O_1-X_1, Y_1, Z_1)$ 和 $S_2(O_2-X_2, Y_2, Z_2)$ 分别为摆线轮和滚刀的活动坐标系; Z_3 轴与摆线齿轮滚刀的回转轴重合, Z_0 轴与摆线轮的回转轴重合; 轴线之间的中心距为 E ; 坐标系 S_3 与摆线齿轮滚刀固联, S_1 与摆线轮固联。

起始位置时, S_0 与 S_1 重合, S_2 与 S_3 重合; 摆线齿轮以角速度 ω_1 绕 Z_1 轴旋转, 以速度 v_1 沿 Z_1 轴线方向匀速运动; 摆线齿轮滚刀以角速度 ω_2 绕 Z_2 轴旋转, 以速度 v_2 沿 Z_2 轴线方向匀速运动。摆线齿轮滚刀头数与摆线轮齿数应有如下关系

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{z_c}{z} \quad (6)$$

式中, φ_1 、 φ_2 分别为摆线轮与摆线齿轮滚刀转动的角度; z 为摆线齿轮滚刀头数。

滚刀与摆线轮的中心距为摆线轮节圆半径 r_1 与滚刀节圆半径 r_2 之和, 即

$$E = r_1 + r_2 \quad (7)$$

滚刀与摆线轮啮合时, 主截面垂直于摆线轮的

$$M_{30} = M_{32}M_{21}M_{10} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\psi - \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 & -\sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\psi - \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 \cos\psi & E \sin\varphi_2 \\ -\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 \sin\psi - \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 & \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 \sin\psi - \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 \cos\psi & E \cos\varphi_2 \\ \cos\varphi_1 \cos\psi & -\sin\varphi_1 \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, ψ 为摆线齿轮滚刀的安装角。

将摆线轮坐标系 S_1 上任意一点 G 表示在摆线齿轮滚刀坐标系 S_2 中, 有

$$r_2 = M_{30}r_1 \quad (9)$$

将式(8)代入式(9), 即可得到摆线轮上任意一点 G 在摆线齿轮滚刀动坐标系的坐标表达式。

摆线轮上任意一点的坐标和法线可分别表示为

$$r_1 = x_1i + y_1j + z_1k \quad (10)$$

$$n = (x'_1(\varphi), y'_1(\varphi)) \quad (11)$$

摆线齿轮滚刀与摆线轮啮合时, 若摆线轮上的某一点是滚刀的接触点, 则此点具有相同的法线。由于滚刀刀面是螺旋面形成的, 此时, 摆线轮上的

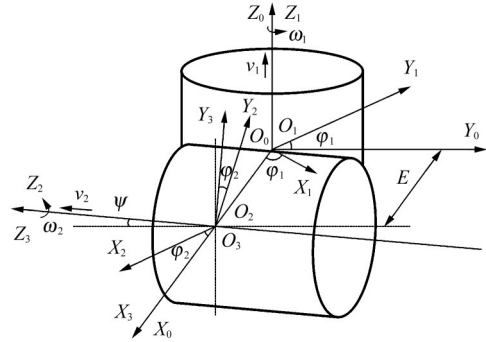


图 4 摆线齿轮滚刀和摆线轮空间啮合

Fig. 4 The cycloidal gear hob and cycloidal gear are space-meshed

旋转轴, 两者的接触点是端面轮廓曲线上的点。假设摆线轮齿面上任意一点 G 在摆线轮坐标系 S_1 中的矢量表示为 $r_1=(x_1, y_1, z_1)^T$, 在滚刀坐标系 S_2 中的矢量表示为 $r_2=(x_2, y_2, z_2)^T$ 。根据其几何关系, 求得各坐标之间的变化关系如下:

$$M_{10} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{21} = \begin{bmatrix} \sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & -1 & 0 & E \\ \cos\psi & 0 & \sin\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{32} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

整理上述各坐标变换, 得

点一定满足式(12)螺旋面的性质, 即

$$PN_z = yN_x - xN_y \quad (12)$$

式中, P 为滚刀的导程; N_x 、 N_y 、 N_z 均为螺旋面的法向量。

将式(10)、式(11)代入式(12), 即可求出转角 φ 与 r_1 的关系, 即接触条件。此时, 接触线方程为

$$r_2 = M_{30}r_1 = x_2i + y_2j + z_2k \quad (13)$$

式中, i 、 j 、 k 分别为 x_2 、 y_2 、 z_2 的单位矢量。由于需要得到的是摆线齿轮滚刀的轴平面 YOZ 内的廓形, 所以, 将瞬时接触线以角速度 ω 沿着摆线齿轮滚刀轴线 OZ 旋转, 假设旋转的角度为 θ , 则表达式为

$$\begin{cases} x = x_2 \cos \theta - y_2 \sin \theta \\ y = x_2 \sin \theta + y_2 \cos \theta \\ z = z_2 + P \end{cases} \quad (14)$$

式中, P 为滚刀的导程。

令表达式中的 $x=0$, 即可得到摆线齿轮对在摆线齿轮滚刀轴截面内的滚刀廓形方程, 即

$$\begin{cases} y = x_2 \sin \theta + y_2 \cos \theta \\ z = z_2 + P \end{cases} \quad (15)$$

根据以上推导, 将得到的摆线齿轮滚刀轴截面上的瞬时接触线沿着摆线齿轮滚刀轴线方向作螺旋运动, 可得到未开槽的滚刀三维模型。此时, 只需对滚刀进行容屑槽的设计即可得到摆线齿轮滚刀的三维模型。

2.3 摆线齿轮滚刀参数化建模

综合考虑滚刀的制造成本及滚刀刃磨与产背的难度, 滚刀直径取60 mm, 容屑槽数为14。由文献[18]可知, 槽数越多, 齿面包络线愈细密, 加工出的齿廓精度愈高, 齿面质量愈好, 但需要增加滚刀的直径。

根据第2.2节的分析, 设计计算出的摆线齿轮滚刀基本参数如表2所示。结合式(15)计算出的轴截面内滚刀的廓形, 建立摆线齿轮滚刀的三维模型, 如图5所示。

表2 摆线齿轮滚刀设计参数
Tab. 2 Design parameters of cycloidal gear hobs

参数	值
外径 d_a /mm	60
头数 z	1
长度 L /mm	70
分度圆直径 d_f /mm	54.8
螺旋升角 λ (°)	3.1513
容屑槽数 Z_k	14
容屑槽深度 H /mm	7
第一铲削量 K_1 /mm	2
第二铲削量 K_2 /mm	3

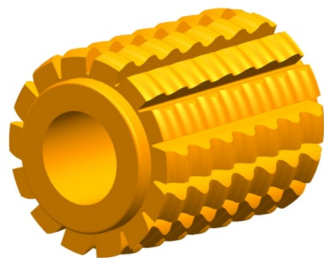


图5 摆线齿轮滚刀三维模型
Fig. 5 3D model of cycloidal gear hob

3 摆线轮齿向修形的磨削原理

在RV减速器中对称布置的两个摆线片之间, 存

在1个倾覆力矩, 线接触会导致针齿与摆线片之间的应力集中, 齿向鼓形修形则对改善摆线轮载荷分布与应力集中有利。只是当前尚无适宜的摆线轮齿向修形加工方法, 导致目前对摆线轮修形研究集中在等移距修形(齿廓修形), 齿向修形研究甚少。可以参考文献[19]以渐开线齿轮齿向鼓形修形类比摆线轮鼓形修形。

3.1 齿向修形曲线方程

滚刀演化为蜗杆砂轮可实现磨齿加工与齿向修形。蜗杆磨齿机是齿轮制造业的常用设备, 工程技术上易于实施, 能为摆线轮高效精密加工提供一种良好的技术途径。采用前述滚刀类似的计算方法, 设计蜗杆砂轮的基本参数如表3所示。为提高砂轮的线速度, 与滚刀相比, 砂轮直径宜大不宜小。

表3 蜗杆砂轮设计参数
Tab. 3 Design parameters of worm wheel

参数	值
直径 d /mm	200
头数 z	1
长度 L /mm	90
分度圆直径 d_f /mm	194.8
导程角 γ (°)	0.9282

由于摆线轮的齿向修形研究较少, 可参考渐开线直齿圆柱齿轮^[20], 其修形量的确定应综合考虑加工、装配误差与承载变形, 取值范围一般在0.005~0.025 mm之间, 这里齿向修形量取0.02 mm。

通过对摆线轮进行齿向鼓形修形, 建立摆线轮的鼓形曲线, 如图6所示。横坐标 Z 表示摆线轮的齿宽方向, 纵坐标 Y 表示摆线轮齿廓的法向方向。鼓形修形曲线为抛物线, 其中, 最大修形量为 h ; 任意一点 b_i 的修形量为 h_i ; 整条抛物线的长度为摆线轮的齿宽 b 。齿向修形的鼓形中心为摆线轮的齿宽中点, 其修形量为0, 向两端按照抛物线的变化规律进行对称修形。

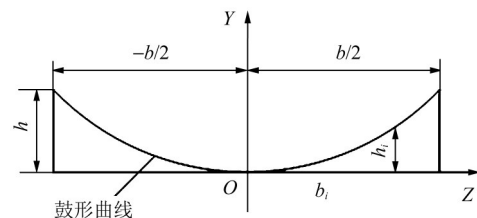


图6 齿向修形曲线

Fig. 6 Tooth to the practice curve

根据几何关系, 可建立摆线轮齿向鼓形修形曲线的函数表达式, 且摆线轮任意一点处 $(-b/2 < t < b/2)$ 的修形量为

$$f(Z_i) = \frac{4h}{b^2} Z_i^2 \quad (16)$$

式中, $4h/b^2$ 为齿向修形抛物线系数; Z 的取值范围为 $-b/2$ 到 $b/2$ 。

3.2 齿向修形磨削路径规划

在摆线轮齿向修形时, 可以通过改变刀具在 X 轴方向的附加移动量来实现^[21]。具体方法如下:

通过控制刀具在 X 轴方向的不同位置, 并不断改变摆线轮与刀具之间的中心距实现摆线轮的齿向修形。这种方法计算简便且容易实现。

在此过程中, 刀具的进给量与摆线齿轮齿向磨削路径如图 7 所示。 XOZ 为摆线轮坐标系, $X_1O_1Z_1$ 为滚刀磨削过程中的坐标系, $X_2O_2Z_2$ 为滚刀磨削起始点的坐标系, 则刀具在 X 轴方向的进给量 Δx 与摆线轮齿向修形曲线的关系可表示为

$$\Delta x = E + f(Z) \quad (17)$$

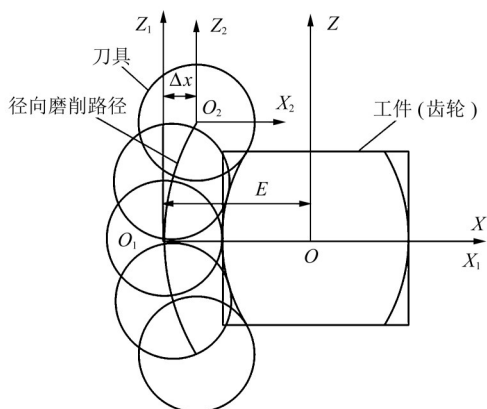


图 7 齿向修形磨削路径

Fig. 7 Grinding path of tooth modification

4 摆线轮的加工过程仿真

4.1 滚齿机建模

为了方便使用 VERICUT 进行仿真加工, 先利用 NX12.0 建立滚齿机三维模型, 并保存为 *.stl 的格式, 再导入 VERICUT 仿真软件当中。摆线齿轮滚刀加工摆线轮时, 是通过多轴联动来实现机床加工的, 如图 8 所示。滚切过程中主要通过滚刀的高速旋转产生磨削力; C 轴为工件旋转轴, 保持与 B 轴的联动关系, 实现摆线轮的连续分齿。

4.2 摆线轮滚切加工仿真

由于 VERICUT 软件中刀具可选择的类型较少, 现通过 NX12.0 建立摆线齿轮滚刀的三维模型。将摆线齿轮滚刀的三维模型导入 VERICUT 软件中, 并将提前设计好的数控程序导入 VERICUT 软件中, 即可进行摆线轮的滚齿磨削仿真。

图 9(a) 所示为仿真加工中的摆线齿轮, 图 9(b)

所示为仿真加工完成的摆线齿轮。

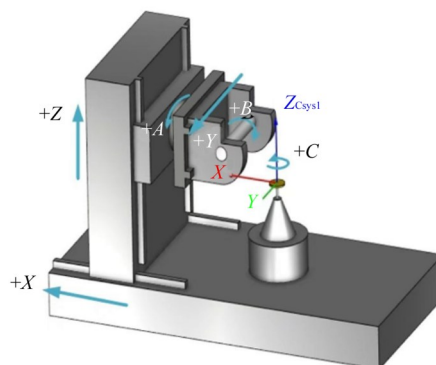
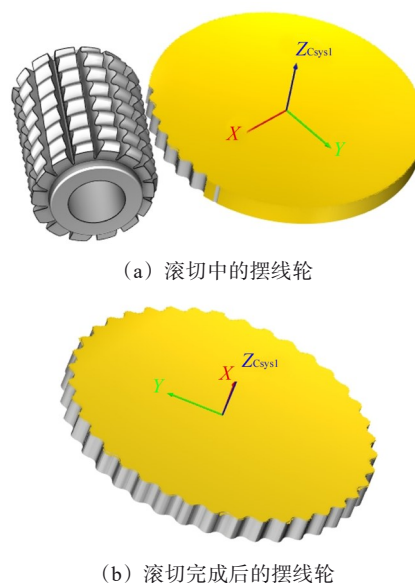


图 8 摆线轮滚齿机

Fig. 8 Cycloidal gear hobbing machine



(a) 滚切中的摆线轮

(b) 滚切完成后的摆线轮

图 9 摆线轮滚切仿真加工

Fig. 9 Simulation machining of cycloidal gear rolling

VERICUT 软件中有曲面自动比较功能, 只需理论的摆线轮模型导入即可与仿真加工后的齿面进行对比。

图 10(a) 所示为仿真加工后摆线轮的残留和过切曲面的自动比较, 图 10(b) 所示为摆线轮表面上的过切残留三维模型, 彩色部分表示残留。

通过观察曲面对比结果发现, 利用滚刀对摆线轮加工时, 不存在过切偏差, 且残留偏差只有两处, 分别为 $0.004\ 08\ \text{mm}$ 与 $0.001\ 15\ \text{mm}$ 。残留偏差很小, 证明了滚刀加工摆线轮有较高的精度。这一部分偏差由滚刀容屑槽引起, 如果增加滚刀容屑槽数, 该部分误差会进一步减小。

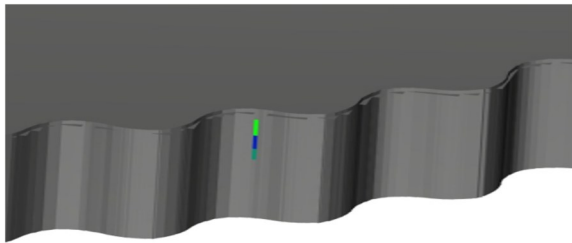
4.3 摆线轮齿向修形仿真

摆线轮展成磨削齿向修形时, 滚刀和摆线轮同时作旋转运动, 并保持一定的运动比例; 同时, 滚刀作一个径向进给运动和轴向进给运动, 通过改变中心距来实现摆线轮的齿向修形。具体来说, 滚刀

从原点进给到磨削起点,通过B轴和C轴的联动实现摆线轮磨削时的分度,进而不断改变滚刀在Z轴和X轴的距离,直至完成摆线轮的齿向磨削,经过三轴联动,能够完整加工出整个修形后的摆线轮齿面。



(a) 曲面自动比较



(b) 过切残留模型(放大)

图10 摆线轮滚切过切残留分析

Fig. 10 Cycloidal hobbing shear residue analysis

通过式(17)可知滚刀在X轴方向的进给量 Δx 与修形量之间的关系,可以求出每点进给量所对应的X值。现每隔0.1 mm取1个Z值,得到一系列Z值的离散点,将得到的每个Z值代入式(17),就可以得到对应的X值。根据X与Z的数值坐标,进行NC编程。

以蜗杆砂轮替代滚刀,机床结构(见图8)与运动方式不变,完成摆线轮齿向修形运动仿真。图11所示为齿向鼓形修形仿真完成后的摆线轮。

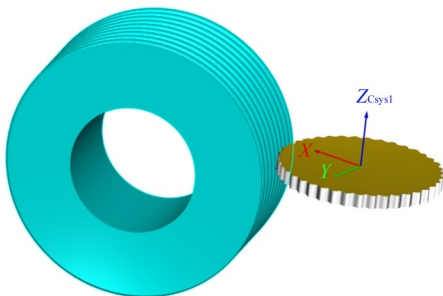


图11 摆线轮齿向修形仿真

Fig. 11 Simulation of the tooth direction drum of the cycloidal gear

通常情况下,由于修形数量级小,难以直观地观察到摆线轮的齿向鼓形。因此将修形量放大至0.5 mm,得到齿向修形后的中鼓形摆线轮,如图12

所示。放大后可明显观察到齿向呈鼓形凸起。

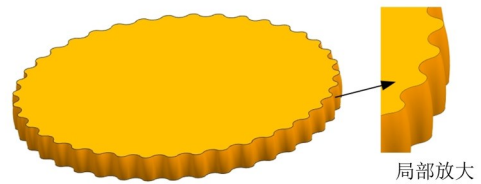


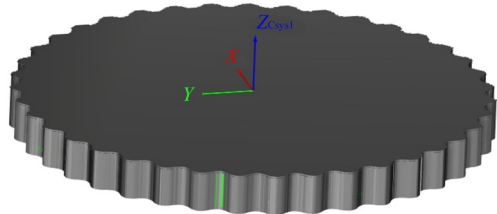
图12 齿向鼓形修形的摆线轮

Fig. 12 Cycloidal gear with toothed drum shape

图13(a)所示为仿真加工后摆线轮的残留和过切曲面的自动比较。由于齿向修形量较小,这里将过切和残留公差均设置为0.001 mm,图13(b)所示为摆线轮表面上的过切残留三维模型。图中只有少量绿色部分,摆线轮齿面略微有残留。



(a) 曲面自动比较



(b) 自动比较模型

图13 自动比较误差结果

Fig. 13 Automatic comparison error results

通过齿向修形曲面自动比较,所得最大残留偏差为0.001 25 mm,整个加工过程不存在过切。残留偏差因砂轮做切削刃处理与VERICUT软件曲线插补运动引起。与前述滚切相比,原理性误差进一步减小。

5 滚齿试验

根据表(2)中的滚刀设计参数对滚刀进行加工制造。所设计制造的滚刀如图14所示。从滚刀检测报告(图15)看,齿廓误差为0.03 mm,精度符合验证性试验要求。

摆线轮的基本参数如表4所示。

摆线轮滚切试验在YN3180滚齿机上完成,摆线轮毛坯的直径为128.6 mm。工件装夹与加工后的摆

线轮如图 16 所示。滚切加工分两次进刀: 第 1 次进刀 2.5 mm, 加工完成后退至原始位置; 第 2 次进至全齿深 2.6 mm, 防止机床导轨进给爬行, 定位不准确, 同时, 少量的进给量能起到光刀的作用。滚切完成后的摆线轮如图 16(c) 所示, 齿面质量良好。

表 4 摆线轮的基本参数

Tab. 4 Basic parameters of cycloid gear

参数	值
摆线轮齿数 z_c	39
针轮齿数 z_p	40
针轮分布圆半径 r_p/mm	66
偏心距 e/mm	1.3
针轮节圆半径 r_p'/mm	52
摆线轮齿顶圆半径 r_{ac}/mm	64.3
摆线轮齿根圆半径 r_{fc}/mm	61.7



图 14 滚刀

Fig. 14 Gear hob

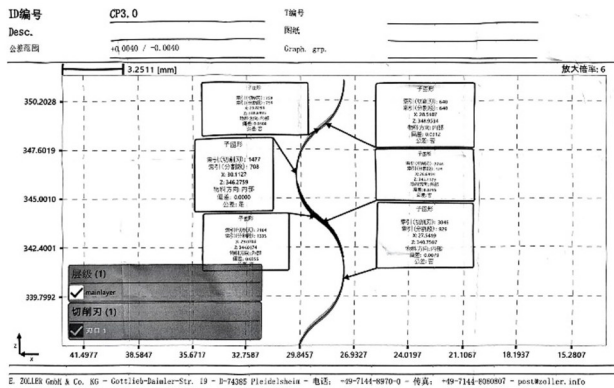


图 15 滚刀精度测量报告

Fig. 15 Accuracy measurement report of gear hob

使用 Gleason650GMS 对加工后的摆线轮进行精度测量, 结果图 17 所示。齿廓精度的测量报告如图 18 所示。

摆线轮的廓形误差基本在上下公差带内, 最大偏差为 0.11 mm, 最小偏差为 0.06 mm, 尽管精度稍低, 但足以验证本文的研究效果。

分析误差产生的原因如下: 滚刀廓形本身存在的误差(0.03 mm)、容屑槽残留、机床本身精度较低、进刀不准确与传动链分齿等。这些因素都会导

致较大的误差。



(a) 装夹过程

(b) 加工过程



(c) 加工后的摆线轮

图 16 摆线轮加工

Fig. 16 Cycloid gear machining

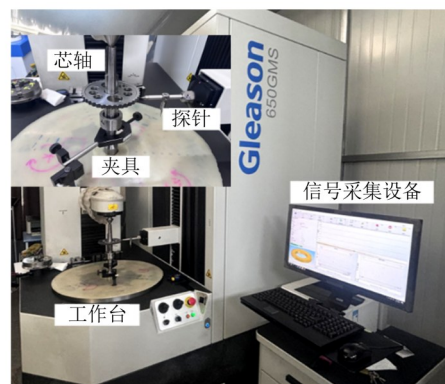


图 17 格里森测量机

Fig. 17 Gleason measuring machine

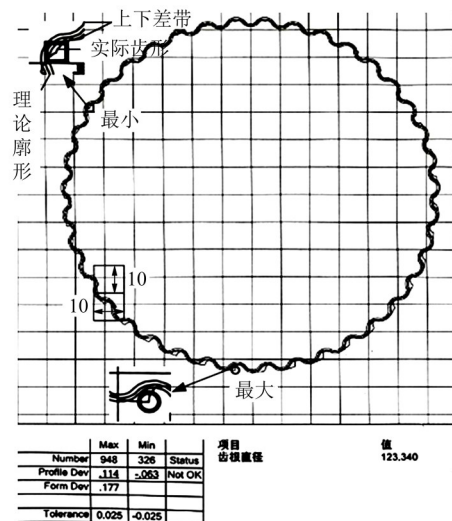


图 18 摆线轮测量报告

Fig. 18 Cycloid gear measurement report

6 结论

提出了一种摆线轮滚切、磨削加工的基本原型方法,完成了摆线轮蜗杆滚刀、砂轮几何结构与齿向修形方法的仿真与滚齿试验研究。主要结论如下:

1) 利用空间啮合与螺旋面形成原理,建立了摆线轮精确的封闭曲线、蜗杆刀具与齿向修形运动的几何模型;由机床原理样机构型和运动仿真得到的封闭曲面,与摆线轮理论曲面比较偏差小于0.004 mm,准确度较高,偏差部分由滚刀容屑槽引起。

2) 随着刀具容屑槽数的增加、刀具直径的增大,能进一步减小齿面偏差。摆线轮的齿向修形可由机床运动完成。利用机床构型与砂轮运动仿真,验证了利用蜗杆砂轮实现摆线轮三维拓扑修形的可行性。

3) 完成了滚刀设计、制作与滚齿加工,齿形精度符合验证性试验要求,证明了所建理论模型的正确性和工程应用的可行性。有望通过蜗杆刀具滚磨加工方法进一步提高摆线轮预加工效率与磨齿精度。

蜗杆刀具加工摆线轮的方法具有精度与效率优势。为解决摆线轮齿廓连续加工、三维拓扑修形奠定了理论与实践基础。

参 考 文 献

- [1] 贾吉帅,周建星,曾群锋,等.精密齿轮传动RV减速器研究现状[J].机床与液压,2023,51(10):189-196.
JIA Jishuai, ZHOU Jianxing, ZENG Qunfeng, et al. Review of RV reducers with precision gear transmission[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(10): 189-196.
- [2] 刘昶,石万凯,韩振华,等.基于插齿刀具运动控制的复合摆线齿轮加工方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(2):31-37.
LIU Chang, SHI Wankai, HAN Zhenhua, et al. Machining method of composite cycloid gear based on the kinematic control of shaping cutter[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(2): 31-37.
- [3] 汤勇,王志威,陈恭,等.摆线齿轮低成本冷精整加工关键工艺研究[J].机械工程学报,2022,58(14):154-160.
TANG Yong, WANG Zhiwei, CHEN Gong, et al. Research on critical technologies of low-cost cold precision extrusion of cycloidal gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 154-160.
- [4] 李天兴,邢春荣,王国峰,等.RV减速器摆线轮齿面展成磨削模型构建及影响因素分析[J].机械传动,2018,42(11):7-12.
LI Tianxing, XING Chunrong, WANG Guofeng, et al. Construction of generating grinding model and analysis of influencing factor for cycloidal gear tooth surface of RV reducer[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(11): 7-12.
- [5] ÖZEL C, ORTAÇ Y. A study on the cutting errors of the tooth profiles of the cycloidal gears manufactured in CNC milling machine[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2016, 53(1):42.
- [6] 庞源.摆线齿轮的分段修形设计及其连续展成磨削加工技术研究[D].重庆:重庆大学,2021:41-52.
PANG Yuan. Study on sectional-modification design of cycloid gear and its continuous generating grinding technology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021: 41-52.
- [7] 姚继权,张身厚,陈新.摆线齿轮滚刀的三维参数可视化设计[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(6):730-733.
YAO Jiquan, ZHANG Shenhou, CHEN Xin. Three-dimensional parametric and visual design of cycloid gear hob[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, 34(6): 730-733.
- [8] 双文杰,李沪曾.蜗杆砂轮与工件齿廓对准的调整计算[J].中国工程机械学报,2015,13(1):54-57.
SHUANG Wenjie, LI Huzeng. Adjustment calculation of profile alignment between grinding wheel and workpiece[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13(1): 54-57.
- [9] 杜彦斌,汪澳婷,何坤.含扭曲误差的鼓形斜齿轮接触分析[J].机械工程学报,2024,60(3):143-154.
DU Yanbin, WANG Aoting, HE Kun. Tooth contact analysis of helical gears with longitudinal modification considering twist errors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(3): 143-154.
- [10] 相涯.渐开线圆柱齿轮齿向鼓形修形方法研究[J].机械传动,2018,42(6):49-52.
XIANG Ya. Research of axial crowning modification of involute cylindrical gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(6): 49-52.
- [11] 赵博,邓效忠,李天兴,等.机器人RV减速器摆线轮修形的理论研究[J].机械传动,2015,39(12):1-6.
ZHAO Bo, DENG Xiaozhong, LI Tianxing, et al. Theoretical research of the modification of cycloidal gear used in RV reducer of robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(12): 1-6.
- [12] 焦文瑞,孔庆华,宋德朝,等.成形磨削摆线轮齿廓修形的研究[J].中国机械工程,2009,20(22):2676-2679.
JIAO Wenrui, KONG Qinghua, SONG Dechao, et al. Research on modification on cycloidal teeth profile with form grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22): 2676-2679.
- [13] 韩天豪,王会良,苏建新.摆线轮磨齿机轴定位精度测量与补偿[J].机械设计与制造,2022(8):18-21.
HAN Tianhao, WANG Huijiang, SU Jianxin. Measurement and compensation of shaft positioning accuracy of cycloidal gear grinding machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(8): 18-21.
- [14] 高跃,巩云鹏,房立金.RV减速器回差分析及其参数优化设计[J].机械设计与制造,2020(11):5-8.
GAO Yue, GONG Yunpeng, FANG Lijin. Analysis of backlash and parameter optimization design for RV reducer[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(11): 5-8.
- [15] 李晋凡,李天兴,李玉龙,等.基于齿廓压力角分布的RV摆线轮

- 修形方法[J]. 机械传动, 2021, 45(10): 51-56.
- LI Jinfan, LI Tianxing, LI Yulong, et al. Modification method of RV cycloid gear based on the tooth profile pressure angle distribution [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(10): 51-56.
- [16] 王永强, 魏冰阳, 徐家科, 等. 摆线针轮多齿啮合特性与承载接触分析方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(10): 1151-1158.
- WANG Yongqiang, WEI Bingyang, XU Jiake, et al. Multi tooth meshing characteristics and load bearing contact analysis method of cycloidal-pin wheels [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(10): 1151-1158.
- [17] 齿轮手册编委会编. 齿轮手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 142-156.
- Editor of the Gear Handbook Editorial Committee. Gear handbook [M]. Beijing: China Machinery Industry Press, 2001: 142-156.
- [18] 封森文, 马梓健, 谢英睿, 等. 数控滚齿加工工艺参数多目标优化方法[J]. 机床与液压, 2024, 15(5): 1-8.
- FENG Senwen, MA Zijian, XIE Yingrui, et al. Multi-objective Optimization Method for CNC Gear Hobbing Process Parameters [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 15(5): 1-8.
- [19] 曹然, 夏建芳. 鼓形修形和偏载对直齿轮强度的影响研究[J]. 机电工程, 2018, 35(11): 1172-1177.
- CAO Ran, XIA Jianfang. Influence of drum-shaped modification and deflected load on strength of spur gears [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(11): 1172-1177.
- [20] 魏延刚. 渐开线直齿圆柱齿轮的边缘效应与齿向修形初探[J]. 中国机械工程, 2011, 22(12): 1413-1417.
- WEI Yangang. Research on edge effect and longitudinal modification of involute spur cylindrical gear pairs [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(12): 1413-1417.
- [21] 何坤, 杜彦斌, 余凯飞. 齿向任意修形齿轮的连续展成磨削运动轨迹规划[J]. 制造技术与机床, 2019(5): 81-86.
- HE Kun, DU Yanbin, YU Kaifei. Continuous generating grinding trajectory planning of arbitrary lead modification gear [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(5): 81-86.

Simulation of the machining principle of hobbing and grinding cycloidal gears with worm cutters and hobbing tests

WU Jinhao^{1,2} WEI Bingyang^{1,2} WANG Jianwen³ ZHOU Guojun³

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

(2. Longmen Laboratory, Luoyang 471000, China)

(3. Zhejiang Tuoman Intelligent Technology Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: [Objective] The cycloid gear is a core component of the RV reducer, and its high-efficiency and precision machining methods are crucial for ensuring the performance of the reducer. In view of this, the basic principle methods of hobbing and grinding for the cycloid gear are proposed. [Methods] Firstly, the meshing equation was solved through the principle of helical surface formation and spatial coordinate transformation, and geometric motion models of the closed tooth profile curve of the cycloid gear, the worm cutter, and tooth-direction modification were established. Secondly, the principle prototype of the hobbing and grinding machine is constructed using VERICUT software. Through the motion simulation of the formed surface and comparison with the theoretical surface, the deviation is less than 0.004 mm. [Results] Through the hobbing processing test, the correctness of the established theoretical model and the feasibility of the worm cutter hobbing and grinding processing technology are verified. This lays a theoretical and practical foundation for the high-efficiency machining of the continuous tooth profile of the cycloid gear and three-dimensional topological modification.

Key words: Cycloidal gear; Worm-tool; Lengthwise modification; Gear hobbing; Gear grinding

(编辑: 刘星泽)