

文章编号: 1674-8085(2017)03-0076-07

外啮合高阶分段变性椭圆齿轮虚拟插削与分析

*李 军, 刘有余

(安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽, 芜湖 241000)

摘 要: 为了探索节曲线内凹的高阶分段变性椭圆(斜)齿轮插削方法, 基于外啮合非圆齿轮的运动特征和节曲线规律, 建立高阶分段变性椭圆直齿轮展成插削加工数学模型和插齿刀数学模型; 利用计算机技术对高阶分段变性椭圆节曲线凹凸性和凹凸部最小半径进行校验; 构建直齿高阶分段变性椭圆齿轮齿坯等极角、齿坯等弧长和齿坯等转角插削方案, 设计斜齿高阶分段变性椭圆齿轮的齿坯和插齿刀附加运动, 利用 Solidworks 二次开发功能进行仿真加工。虚拟插削结果表明节曲线内凹的高阶分段变性椭圆(斜)齿轮能采用上述方法进行插削, 相同插削效率下, 等弧长插削出的高阶分段变性椭圆齿轮齿廓精度一致, 其余插削方案各齿廓精度有差异; 斜齿轮插削附加运动对齿向精度无影响。

关键词: 高阶分段变性椭圆齿轮; 外啮合; 虚拟插削; 二次开发; 齿廓精度

中图分类号: TH132.424

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2017.03.013

VIRTUAL SLOTTING AND ANALYSIS OF EXTERNAL HIGH ORDER SEGMENT DEFORMED ELLIPTIC GEARS

* LI Jun, LIU You-yu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: The slotting method of external higher order deformed segment elliptic gears with partial concave pitch curve was studied. Base on slotting features of non-circular gears and pitch curve principle of elliptic gears, the slotting model of spur gears and slotting cutter was built by using SolidWorks. We also verify the partial concave pitch curve and minimum radius of higher order deformed segment elliptic gears based on the computer technology. Some slotting schemes of spur gear were constructed, which includes the equal polar-angle of workpiece, the equal rotary-angle of workpiece and the equal arc-length of workpiece. The extra rotation of slotting and extra rotation of workpiece of helical gear along its shaft were designed. Those methods were simulated using secondary development function of Solidworks. Virtual slotting indicated that external higher order deformed segment elliptic gears can be slotted by using above schemes. The slotting accuracy among teeth is the same in using the method of equal arc-length of workpiece and other slotting accuracy among teeth is different under the same stroke speed of slotting cutter. The tooth profile accuracy is independent of increment motion.

Key words: high order segment deformed elliptic gears; external gears; tooth accuracy; secondary development; virtual slotting

收稿日期: 2017-01-17; 修改日期: 2017-04-05

作者简介: *李 军(1990-), 男, 安徽芜湖人, 硕士生, 主要从事数字化设计与制造技术方面的研究(E-mail:2465402320@qq.com.cn);

刘有余(1976-), 男, 安徽桐城人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事现代集成制造系统方面的研究(E-mail: liuyoyu1@163.com).

0 引言

高阶分段变性椭圆齿轮是一种新型非圆齿轮,相比高阶椭圆齿轮,这种齿轮在啮合一周内传动比曲线发生多个变化周期,且在每个变化周期内传动比曲线不对称^[1]。高阶分段变性椭圆齿轮具有普通非圆齿轮优点,可以实现复杂变传动比传动的机械传动部件,其传动机构不仅可以实现主动件和从动件转角间的非线性关系,而且具有结构紧凑,传动过程平稳精准等优点^[2]。非圆齿轮传动广泛应用于工程机械、机床、汽车及航空航天等领域,但是由于非圆齿轮种类繁多,设计计算复杂,加工制造困难,所以非圆齿轮设计制造技术和 CAD 系统开发自问世应用以来一直是制造业的热点与难点。当前比较成熟且广泛应用的是线切割加工技术,但其效率太低,只适用于小批量生产^[3],此外,出现的电火花^[4]、激光等新型的加工方法,这种加工方法不仅加工效率低,而且仅适用于加工比较特殊材质和厚度极薄的齿轮。

高阶分段变性椭圆齿轮节曲线复杂多变,至今还没有一种健全的方法对其进行指导设计和制造。通过分析节曲线规律和非圆齿轮^[5]啮合特性,建立虚拟插削和插齿刀数学模型;借助于计算机技术,对节曲线凹凸性进行分析,从而决定展成加工方法;利用 solidworsk 里面二次开发功能,实现高阶分段变性椭圆齿轮虚拟插削仿真加工,分析插削最优方法,并对齿廓精度进行分析;高阶分段变性椭圆斜齿轮插削运动进行分析和仿真。

1 高阶分段变性椭圆齿轮插削数学模型

1.1 插削加工数学模型与高阶分段变性椭圆齿轮节曲线

高阶分段变性椭圆齿轮齿坯以右焦点为原点建立工件坐标系 $S_a(o_a x_a y_a z_a)$ 与工作台重合,齿坯

绕 z_a 轴以角速度 w_a 转动,插齿刀绕 z_b 轴以角速度 w_b 在齿坯节曲线上做纯滚动,同时做插削运动,与齿坯形成啮合加工的展成运动,插齿刀在平面 $x_b o_b y_b$ 以 v_x 做退刀运动,并沿 z_b 轴做进给运动,保证切除全部齿宽,从而建立刀具坐标系 $S_b(o_b x_b y_b z_b)$ 与插齿刀固联^[6]。如图 1 所示。

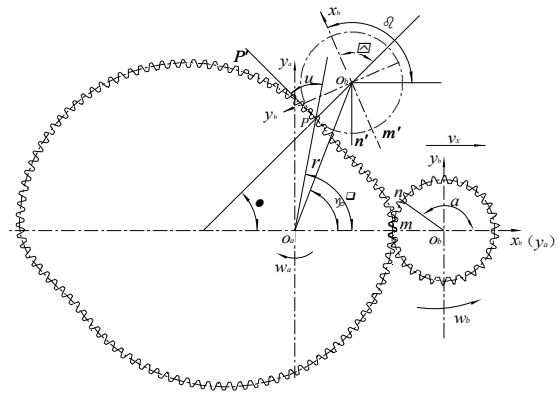


图 1 高阶分段变性椭圆齿轮插削加工断面图
Fig.1 Slotting section diagram of high order segment deformed elliptic gears

高阶分段变性椭圆齿轮椭圆是将高阶椭圆齿轮一周上的传动比分成 n 周期,每周期变性成 N 段。

$$\sum_{j=1}^N 2\pi/Nm_j = 2\pi \quad (1)$$

式中: N 为分段数; $j=1,2,3,\dots,N$, m_j 为每段变性系数。

高阶分段变性椭圆齿轮节曲线方程^[7]:

$$r_{ij} = \frac{a(1-e^2)}{1 - e \cos \left[nm_j \left(\theta - 2\pi(i-1)/n - 2\pi \sum_{k=1}^{j-1} 1/nNm_k \right) + (j-1) \times 2\pi/N \right]} \quad (2)$$

$$\left(2\pi(i-1)/n + 2\pi \sum_{k=1}^{j-1} (1/nNm_k) < \theta \leq 2\pi(i-1)/n + 2\pi \sum_{k=1}^j (1/nNm_k) \right)$$

式中: n 为阶数, $i=1,2,3,\dots,n$; a 为长半轴; e 为偏心率; n 为阶数; θ 为极角。

如图 2 所示,当 $a=150$, $e=0.1$ 几种高阶分段变性椭圆齿轮节曲线。

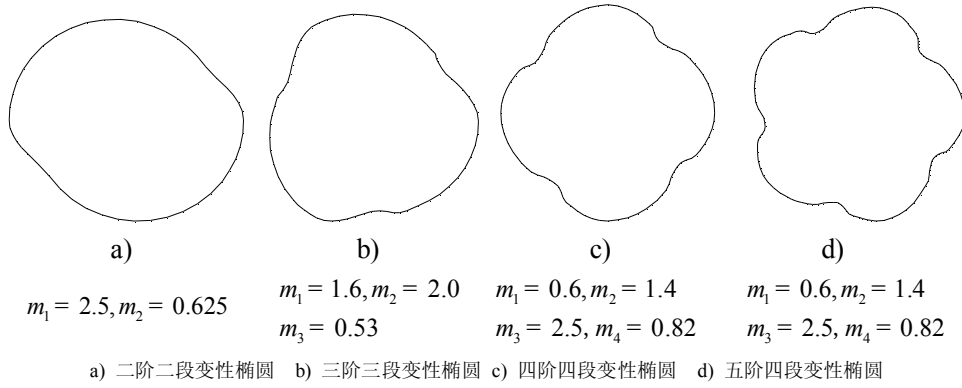


图2 高阶分段变性椭圆

Fig.2 High order segment deformed elliptic gears

1.2 插削啮合数学模型

插齿刀沿高阶分段齿坯节曲线做纯滚动运动，同时在平面进给运动和轴向冲程插削运动，啮合包络一周加工出高阶分段变性椭圆齿轮所有齿廓。如图1所示，插齿刀加工一段时间，其刀位点从 o_b 运动到 o'_b ，刀具坐标系公转角度为 λ ，随插齿刀自转角度为 β ，总转角为 ψ ， P 点为插齿刀分度圆和齿坯节曲线的相切点， PP' 为 P 的公切线， PP' 的正方向与极径正方向的夹角 u ^[8]：

$$u = \arctan\left(\frac{r}{dr/d\varphi}\right), 0 < dr/d\varphi < \pi \quad (3)$$

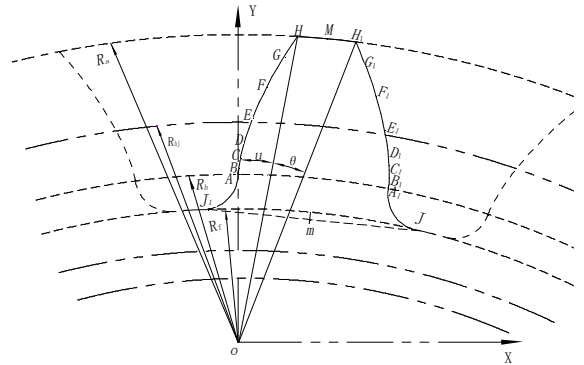
$$\begin{cases} ll' = |o'_a o_b| = \sqrt{r^2 + r_{bj}^2 + 2rr_{bj} \sin u} \\ \gamma = \theta - \arcsin(r_{bj} \cos u / ll') \end{cases} \quad (4)$$

插齿刀沿齿坯节曲线上的纯滚动的弧长的 mp 等于插齿刀啮合过程的弧长 $m'p$ ：

$$\begin{cases} s = mp = m'p = \int_0^\theta \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta \\ \psi = \beta - \lambda = s/r_{bj} \end{cases} \quad (5)$$

1.3 建立插齿刀数学模

如图3所示，粗实线为1节距齿廓，由A、B、C、D、E、F、G、H、A₁、B₁、C₁、D₁、E₁、F₁、G₁、H₁、J、J₁特征组成。A点和A₁点在基圆上，H点和H₁点在齿顶圆上，AH段和A₁H₁段分别是渐开线齿廓。



根据渐开线曲线方程, 上述渐开线 AH 段齿廓点的坐标方程:

$$\begin{cases} x(n+1) = 0.5D_b \sin(T_n) - 0.5D_b T_n \cos(T_n) \\ y(n+1) = 0.5D_b \cos(T_n) + 0.5D_b T_n \sin(T_n) \end{cases} \quad (10)$$

插齿刀节圆上的齿厚 s :

$$\begin{cases} p(n+1) = (-0.5D_b \sin(T_n) + 0.5D_b T_n \cos(T_n)) \cos j + (0.5D_b \cos(T_n) + 0.5D_b T_n \sin(T_n)) \sin j \\ q(n+1) = (0.5D_b \sin(T_n) - 0.5D_b T_n \cos(T_n)) \sin j + (0.5D_b \cos(T_n) + 0.5D_b T_n \sin(T_n)) \cos j \end{cases} \quad (13)$$

A_1J 段为与 A_1H_1 段渐开线齿廓和齿根圆均相切, AJ_1 段与 AH 段渐开线齿廓和齿根圆均相切。如图 3 所示, A 点和 A_1 点在基圆上, 初始值为 T 取 0° , 通过式 (10) 与式 (13) 计算出坐标 A 和 A_1 的坐标为 (x_1, y_1) , (p_1, q_1) 。

AJ_1 过渡圆弧的半径 r_g :

$$r_g = (R_b^2 - R_f^2) / 2R_f \quad (14)$$

由齿廓上任一点 k 的压力角 a_k 和极径 R_k 得任意圆上的齿厚 s_k :

$$s_k = sR_k / R_{bf} - 2R_k [(\tan a_k - a_k) - (\tan a - a)] \quad (15)$$

将 R_a 代入式 (19) 中得插齿刀外圈上的齿厚 s_a , 通过弧度与角度的关系求出, 插齿刀外圈上的厚度角 θ 。

J 点在齿根圆上, 采用近似求解的方法得出 J 的坐标:

$$\begin{cases} x(J) = R_f \sin(n_1 < BO_b O_g + 2 \tan a_H - 2a_H + \theta) \\ y(J) = R_f \cos(n_1 < BO_b O_g + 2 \tan a_H - 2a_H + \theta) \end{cases} \quad (16)$$

式中: n_1 为近似的角度系数。

通过 J 点关于直线对称方法, 求解出 J_1 点坐标, 如图 3 所示直线 oM , o 点为坐标原点, M 点的坐标为:

$$((p(8) - x(8))/2 + x(8), y(8) - (y(8) - q(8))/2)$$

从而得到直线 oM 方程, 过 J 点垂直于直线 oM 的 J_1 , JJ_1 与直线 oM 的交点为 m 。

$$s = \pi M_n / 2 \quad (11)$$

得一个齿厚对应的角度 j :

$$sb = \cos a(s + M_n Z \sin \alpha) \quad (12)$$

再根据反渐开线曲线方程, 上述渐开线 A_1H_1 段齿廓点的坐标方程:

$$\begin{cases} l_1 = x(J) \\ l_2 = y(J) \\ l_3 = x(8) + (p(8) - x(8)) / 2 \\ l_4 = y(8) + (y(8) - q(8)) / 2 \end{cases} \quad (17)$$

由式 (21) 得 m 点坐标为 $((l_1 l_3 + l_2 l_4) / (l_1^2 l_2 + l_1), ((l_1 l_3 + l_2 l_4) / (l_1^2 l_1 + l_1) (l_2 / l_1))$, 从而得出 J_1 点坐标为 $(2(l_1 l_3 + l_2 l_4) / (l_1^2 / l_1 + l_1) - l_3, (2(l_1 l_3 + l_2 l_4) / (l_1^2 / l_1 + l_1) (l_2 / l_1) - l_4)$ 。通过切线圆弧指令得到 A_1J 段和 AJ_1 段过渡圆弧。

2 高阶分段变性椭圆齿轮节曲线凹

凸性及凹凸处最小半径校验

高阶分段变性椭圆齿轮节曲线比较复杂, 节曲线上每点的曲率半径不同, 其凹凸性决定了加工方法的选择。凸处过小的曲率半径会引起齿轮加工出现根切现象而降低强度, 凹处节曲线会导致插齿刀半径大于最小曲率半径而无法加工, 因此有必要对节曲线凹凸性及凹凸处最小半径进行校验。

2.1 节曲线凹凸性校验

高阶分段变性椭圆齿轮凹凸性可根据节曲线上每点曲率半径的正负来判断。设节曲线极坐标方程为 $r = r(\varphi)$, $\varphi \in [a, b]$ 。有节曲线曲率半径方程^[9]:

$$\rho = (r^2 + (\frac{dr}{d\varphi})^2)^{3/2} / (r^2 + (\frac{dr}{d\varphi})^2 - r \frac{d^2 r}{d\varphi^2}) \quad (18)$$

将极角区间离散成一系列极角值, 对应着每个极角值求出曲率半径, 如果没有出现负值节曲线就为凸性, 反之为凹性。将节曲线的极角区间离散成 N 等分, 对应校验节曲线凹凸性的算法流程图见图 4。

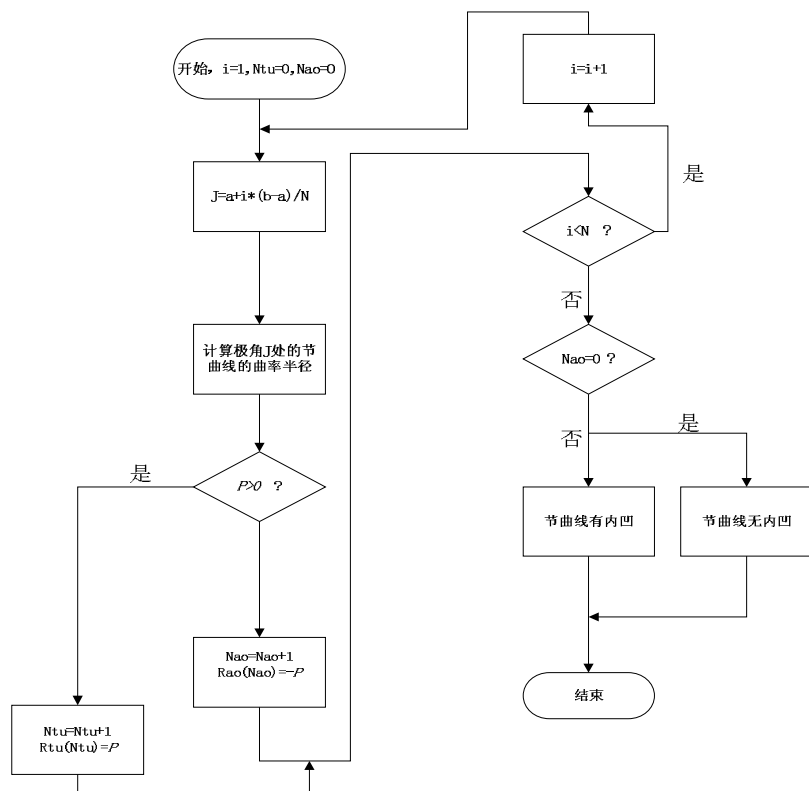


图4 高阶分段变性椭圆节曲线凹凸性检验流程图

Fig.4 Program flow chart of concavity and convexity judgment of high order segment deformed elliptic gear pitch curve

2.2 节曲线凹凸性最小半径校验

节曲线全凸的椭圆齿轮可以采用滚齿或插齿的方法加工, 对于节曲线有内凹的非圆齿轮或非圆内齿轮则采用插齿插削的方法加工。如图4所示, 分别把节曲线上离散点的曲率半径存放于数组 Rao()和 Rtu()中。凸部曲率半径最小值 Rtumin 计算流程如图5所示:

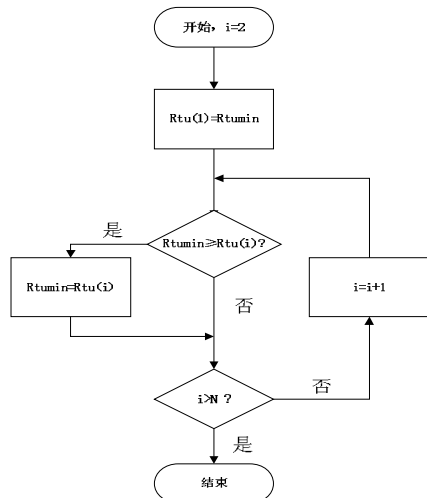


图5 节曲线凸部曲率半径最小值检验流程图

Fig.5 Program flow chart of minimum curvature radius of pitch curve convexity

根据凸部曲率半径最小值, 算出加工时不发生根切的最大模数:

$$m_{\max} = \frac{p_{tu \min} \sin^2 a}{(ha^* + c^*) \cos \beta} \quad (19)$$

式中: a 为刀具压力角; ha^* 为齿顶高系数; c^* 为顶隙系数; β 为螺旋角; 非圆外齿轮 $p_{tu \min} = R_{tu \min}$, 非圆内齿轮 $p_{tu \min} = R_{ao \min}$ 。

节曲线有内凹的高阶分段变性椭圆齿轮需要对插齿刀的半径进行校验, 以免插齿刀半径大于节曲线最小曲率半径导致无法加工。加工时, 模数确定, 插齿刀的齿数直接影响其节圆的大小, 插齿刀最多齿数:

$$z_{\max} = \frac{R_{ao \min}}{m} \quad (20)$$

式中: m 为端面模数; 非圆外齿轮 $p_{ao \min} = R_{ao \min}$, 非圆内齿轮 $p_{ao \min} = R_{tu \min}$ 。

考虑齿刀加工过程中会出现齿形干涉和顶切问题, 不出现齿形干涉插齿刀最小齿数为:

$$z_{\min 1} = \frac{(1/\sin^2 a - (ha^* + c^*)^2)}{(ha^* + c^* - 1)} \quad (21)$$

不出现顶切的最小插齿刀齿数:

$$z_{\min 2} = \frac{2}{\sin^2 \alpha} \quad (22)$$

实际计算时要综合以上不同的约束条件得出的插齿刀的齿数, 当式(20)到式(22)不能同时满足时, 式(22)为主要公式进行考虑。

3 高阶分段变性椭圆直齿轮插削仿真加工

插齿刀插削加工高阶分段变性椭圆齿坯时, 根据齿坯和插齿刀的转动方法的不同可分为齿坯等极角插削、齿坯等弧长插削和齿坯等转角插削3种方式。

3.1 齿坯等极角插削

齿坯相对于机床转动相同的极角, 插齿刀进行插削, 插削一周所用时间为 Nt , 单位时间 t 齿坯转动的极角为 $2\pi/N$, 齿坯等极角速度为 w :

$$w = 2\pi/Nt \quad \theta = nwt \quad (23)$$

根据式(5)和式(3)可确定插齿刀的弧长 s 和插齿刀分度圆与齿坯节曲线的公切点处的夹角 u 。

刀具坐标系转动的角度为 λ :

$$\lambda = u + \theta - \pi/2 \quad (24)$$

再根据式(5)可推导出插削时间 nt 插齿刀齿廓转动的角度 β :

$$\beta = s/r_{bj} + u + \theta - \pi/2 \quad (25)$$

直齿虚拟插削包络图如图6所示, 节曲线有内凹的高阶分段变性椭圆齿轮也能够包络插削, 齿坯外围为插齿刀刀位点的运动轨迹, 其分布不均, 各处齿廓插削精度不同。

3.2 齿坯等弧长插削

齿坯相对于机床转动过相同的弧长, 即刀具坐标系的角速度 w_t 保持不变, 插齿刀进行插削, 插削一周所用时间 Nt , 共插削 N 次, 单位时间 t 内插削弧长为 s/N 。

刀具坐标系公转角度:

$$\psi = w_t nt \quad (26)$$

经过时间 nt 内, 插齿刀刀位点 o_b 在 $x_a o_a y_a$ 平面的坐标:

$$\begin{cases} x_{o_b} = ll' \cos \gamma \\ y_{o_b} = ll' \sin \gamma \end{cases} \quad (27)$$

插齿刀沿齿坯节曲线纯滚动的弧长:

$$s = sn/N = \int_0^\theta \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} d\theta \quad (28)$$

将式(3)和式(26)代入式(25)可得转角 β 。

直齿虚拟包络插削结果如图6, 齿坯外围插齿刀的刀位点轨迹均匀一致, 各处齿廓精度一致。

3.3 齿坯转角插削

齿坯相对机床转过相同的转角, 插齿刀进行插削, 插削一周所用时间为 Nt , 单位时间 t 内齿坯转动的角度为 $2\pi/N$, 齿坯等转角速度为 w_a :

$$w_a = 2\pi/Nt, \quad \gamma = w_a t \quad (29)$$

将式(3)和式(29)代入式(4), 得:

$$\theta = w_a t + \arcsin\left(\frac{r_{bj} \cos u}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2}}\right) \quad (30)$$

从而求出 t 时刻, 插齿刀和齿坯啮合点 p 处的极角 θ , 其余的和等极角插削法相同。如图6所示, 插齿刀刀位点运动轨迹分布不均, 各处齿廓精度不一致, 离心率越大, 插削齿廓整体精度越低。

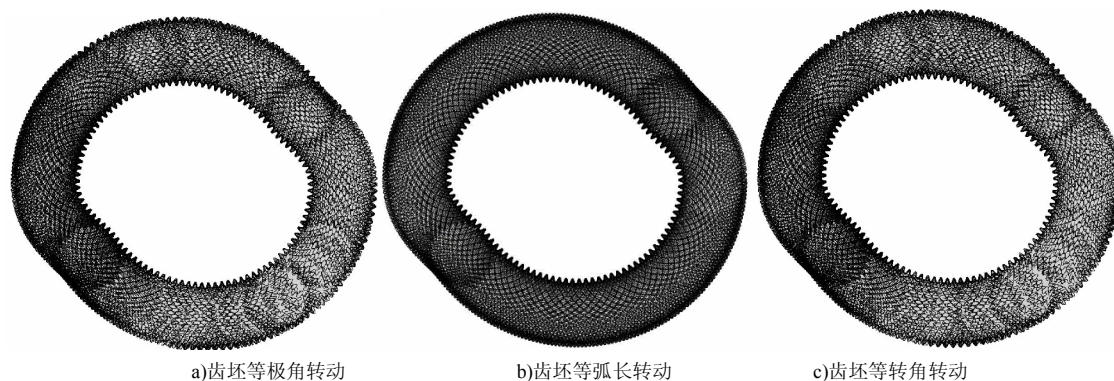


图6 插削高阶分段变性椭圆齿轮平面运动刀位轨迹图

Fig.6 Plane motion path chart of cutter for slotting high order segment deformed elliptical gears

4 高阶分段变性椭圆齿轮斜齿插削

仿真加工

高阶分段变性椭圆斜齿轮平面联动方法与直齿轮相同。为了加工出具有一定螺旋角的斜齿轮,基于等弧长虚拟插削在插齿刀或齿坯上附加一个转动^[10]。

插齿刀有沿轴向运动 v_z , 插削每移动一个螺旋线导程, 插齿刀附加转动一周。有附加运动 Dw_b :

$$Dw_b = (v_z \tan \beta) / r_{bj} \quad (31)$$

插削时间为 t 时, 插齿刀合成转角 β' :

$$\beta' = \beta + (v_z t \tan \beta) / r_{bj} \quad (32)$$

插刀旋向与转动方向相同时取“-”, 反之取“+”。插削结果如图 7 所示, 所示插削结果正确。

插齿刀沿齿坯轴向移动一个螺旋线的导程, 齿坯附加转动一周。插削时间为 t 时, 齿坯附加运动为 Dw_b :

$$\int_0^t \Delta w_a r dt = \int_0^t v_z \tan \beta dt \quad (33)$$

两边求导化简求解为: $Dw_a = \frac{v_z \tan \beta}{r}$

所以齿坯合成转角为: $\gamma' = \gamma \pm \int_0^t \frac{v_z \tan \beta}{r} dt$

插刀旋向与转动方向相同时取“-”, 反之取“+”。插削结果如图 (8) 所示, 由图所示插削结果正确。

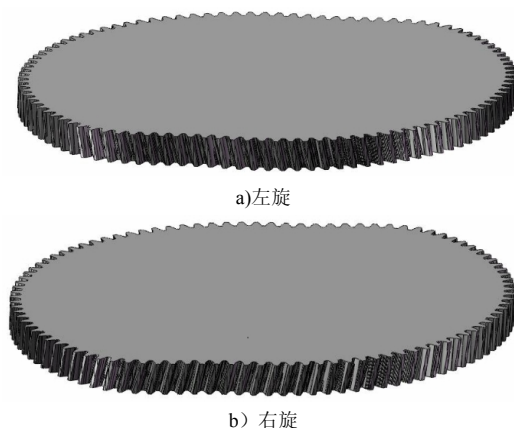


图 7 插齿刀附加运动插削二阶二段椭圆斜齿轮

Fig.7 Method of addition movement on slotting cutter for second orders and second segments deformed elliptic gear

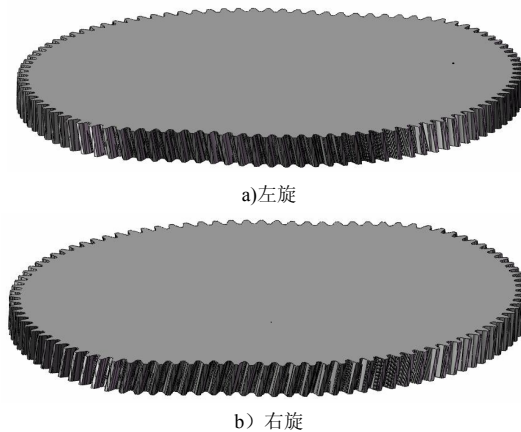


图 8 齿坯附加运动插削二阶二段椭圆斜齿轮

Fig.8 Method of addition movement on workpiece for second orders and second segments deformed elliptic gear

5 结论

根据椭圆齿轮啮合原理, 建立高阶分段变性椭圆齿轮加工联动数学模型和插齿刀数学模型; 并对其节曲线凹凸性进行讨论, 确定加工方法; 根据平面内插齿刀和齿坯转动方式得不同, 建立 3 种直齿插削方法, 分别为等弧长插削、等极角插削和等转角插削, 并通过 solidworks 里面二次开发功能进行仿真加工, 仿真插削结果验证三种插削方法都正确, 其中等弧长插削加工后的各处齿廓精度一致, 其余两种插削各齿廓精度有差异。

根据椭圆斜齿轮的特征, 分别对齿坯和插齿刀轴向附加运动, 并进行仿真插削加工, 均能插削出左旋和右旋的高阶分段变性椭圆齿轮, 且齿向精度无差异。虚拟插削结果验证高阶分段变性椭圆齿轮插削理论, 可以进一步推广到自由节曲线非圆齿轮的应用, 从而对非圆齿轮计算机辅助设计系统开发有一定帮助。

参考文献:

- [1] 张瑞, 吴序堂, 聂钢等. 高阶变性椭圆齿轮的研究与设计[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 727-730.
- [2] 李宝妮, 张迎春. 非圆齿轮的应用及其发展动向[J]. 机床与液压, 2008, 36(4): 286-289.
- [3] 胡赤兵, 孔德永, 张敏, 等. 非圆齿轮实体建模方法与线切割加仿真[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(4): 38-42.

(参考文献[4]~[10]转第 86 页)

Fig.4 Pressure of sealing cover of different angle

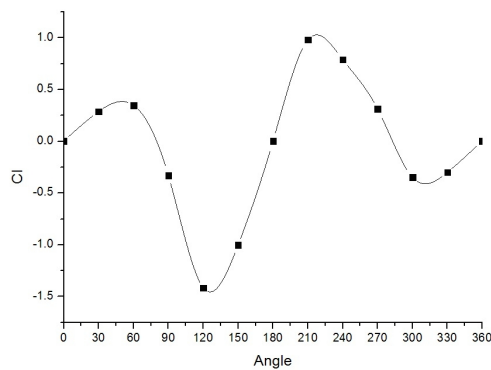


图5 升力系数随角度变化曲线

Fig.5 Lift coefficient with different angle

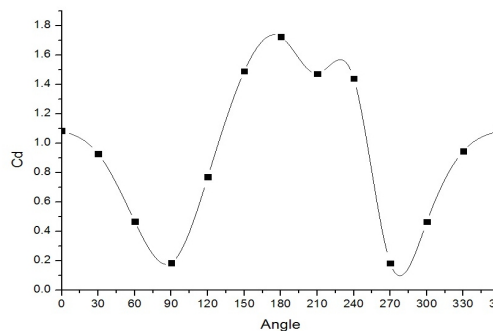


图6 阻力系数随角度变化曲线

Fig.6 Drag coefficient with different angle

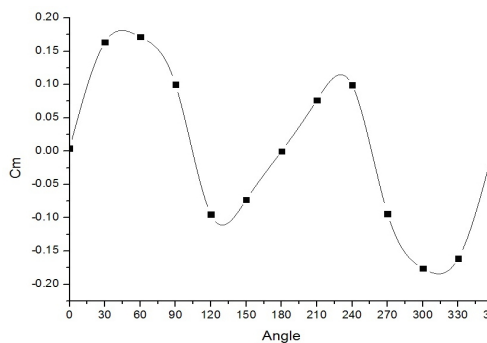


图7 力矩系数随角度变化曲线

Fig.7 Moment coefficient with different angle

4 结论

从文中结果分析来看,本文建立的数值方法是可靠的,可以用于分析密封盖的气动特性。从气动特性曲线可见,密封盖的升力系数、阻力系数和力矩系数的变化趋势符合正弦曲线变化趋势。当密封盖与来流方向成 210° 夹角时,升力系数最大;当密封盖凹面正对来流方向时,阻力系数最大;当密封盖与来流方向成 45° 夹角时,力矩系数最大。

参考文献:

- [1] 张中利,于存贵,马大为,等. 冲击作用下易碎式密封盖数值仿真及实验分析[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1): 62-66.
- [2] 崔二巍,于存贵,王松超. 火箭炮新型穿透式密封盖设计与仿真[J]. 兵工自动化, 2013, 32(10): 12-14.
- [3] 胡晓磊,盛文成,乐贵高,等. 车载导弹垂直发射系统双面导流器的研究[J]. 火力指挥与控制, 2013, 38(11): 53-55.
- [4] Shi T H. A new k- ϵ Eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [5] Yang S L, Chang Y L, Arici O. Incompressible Navier-Stokes Computation of the NREL Airfoils Using a Symmetric Total Variational Diminishing Scheme of Solar Energy Engineering[J]. Solar Engineering of Thermal Processes, 1994, 116(4): 174-182.
- [6] 郭涛,林丽,朱程香. 基于内外传热耦合的热气防冰系统仿真计算[J]. 航空动力学报, 2016, 31(11): 2621-2627.

(上接第 82 页)

- [4] Talón JLH, Ortega JCC, Gómez CL. Manufacture of a spur tooth gear in Ti-6Al-4V alloy by electrical discharge [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(3): 221-230.
- [5] 张国政,韩江,刘有余. 高阶椭圆齿轮加工方法及理论[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5): 1107-1112.
- [6] 刘有余,韩江,夏铤,等. 外啮合椭圆齿轮多方案插齿三维仿真与分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(7): 1031-1035.
- [7] 刘炀,袁媛,韩江. 高阶变型椭圆类非圆齿轮副设计与仿真[J]. 机械传动, 2014, 38(12): 38-45.
- [8] 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 115-160.
- [9] 李大柱. 自由节曲线非圆齿轮 CAD/CAM 技术研究与系统开发[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [10] Litvin F L. 齿轮几何学与应用理论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008: 285-287.