

文章编号:1000-582X(2009)11-1246-06

基于双圆弧法的摆线针轮数控编程系统设计

陈兵奎, 胡俊章, 李朝阳

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要:在介绍双圆弧法计算原理基础上,采用连续双圆弧法插补方式,通过控制插补误差实现加工步长的动态伸缩,获得满足数控机床圆弧插补的轮廓节点数据;开发了相应的数控程序生成软件;只需输入摆线针轮的几个参数,即可获得摆线行星轮的数控加工程序,实现了任意齿数摆线轮数控自动编程;根据轮廓节点数据以及刀具中心轨迹坐标,可对摆线轮的加工过程进行运动仿真。摆线轮数控磨削的实验结果验证了理论推导的正确性和软件的实用性。

关键词:摆线针轮传动;双圆弧法;插补;数控编程系统

中图分类号:TP319

文献标志码:A

Computerized numerical control programming system of cycloidal-pin gear based on double-arc method

CHEN Bing-kui, HU Jun-zhang, LI Chao-yang

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,
Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Based on the principle of double-arc method, continuous two-way circular interpolation method and the control of interpolation error are used to achieve a dynamic expansion on the process step and to get contours node data that meets the requirements of CNC machine tools' circular interpolation. Accordingly, corresponding CNC program software can be developed. Using this kind of software, the CNC process program can be gotten but only inputting several parameters of the cycloidal-pin gear. In this case, automatic programming for cycloid gear of any number of teeth is realized. According to the contours node data and the track coordination of tool center, the process program of cycloid gear can be simulated. The experimental result of cycloidal-pin gear CNC grinding validates the correctness of the theory deduction and practicality of the software.

Key words: transmission of cycloidal-pin gear; double-arc method; interpolation; CNC programming system

摆线针轮行星传动以其传动比大、承载能力高等突出的优点,在机械、化工、冶金、机器人、交通运输机械等领域获得了广泛的应用^[1]。该传动的啮合副由针轮和摆线行星齿轮组成,摆线行星轮的加工制造是影响其传动性能的关键技术。在摆线行星传动的啮合传动理论方面,国内外很多学者做了大量

有益的工作,为摆线轮的加工制造打下了坚实的基础^[2-4]。一般的,摆线轮的切齿加工采用滚齿机改装后铣齿,或插齿机改装后插齿的方法加工。这种方法受传动链、挂轮数量等因素的影响,只能加工有限规格的摆线轮。摆线轮的精加工通常在专用磨床上按展成原理磨削而成,尽管砂带磨法和成形磨法提

收稿日期:2009-06-12

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAF01B01-03);重庆市科技攻关重点项目(CSTC,2006AA3010-6)

作者简介:陈兵奎(1966-),男,重庆大学研究员,博士生导师,主要从事精密传动及系统研究,(E-mail)bkchen@cqu.edu.cn。

高了磨削效率^[5-6],但摆线磨床目前主要是用传统机械式磨齿机(偏心距、齿数等均受限制),使产品的规格、加工的精度等受到很大影响。为了对摆线轮的加工进行更深入的研究,王乾廷等^[7]提出了用切触线法加工摆线齿廓,张德全等^[8]研究了摆线轮齿廓曲线 CNC 成形磨削机理,刘殿忠等^[9]提出了在一般机床上范成加工短幅外摆线的新方法。

近年来,数控机床得到了广泛的普及,利用数控机床的通用性解决摆线齿轮加工中存在的问题,具有良好的发展前景。数控加工的基础和前提是数控程序的编制。目前的数控系统几乎没有摆线等复杂曲线的插补功能,大部分只有直线和圆弧插补。张敬东^[10]介绍了一种等误差直线逼近离散法求摆线轮廓的节点,利用单一的直线插补法实现了摆线轮的数控加工。而加工刀具在直线插补的每一段都要经过加速、匀速、减速、停顿 4 个阶段,利用单一的直线插补法会降低摆线轮加工的质量,影响加工的效率。若单一进行直线插补,还会导致加工数据冗长,数控系统的内存可能一次无法完全装载加工数据,给加工带来很大的困难。

鉴于以上问题,笔者将对摆线轮齿廓曲线采用连续双圆弧法插补方式^[11],通过控制插补误差的方法获取满足加工精度的数控加工节点数据,解决齿轮共轭曲面离散数据的处理问题;同时,开发基于 VisualC++ 语言的摆线轮数控自动编程系统,并进行数控磨削实验验证。

1 双圆弧法计算原理

双圆弧算法主要是利用局部坐标系,通过给定曲线上 2 个节点的坐标 $p_i(x_i, z_i)$ 、 $p_{i+1}(x_{i+1}, z_{i+1})$ 和这 2 点的切矢 P_i 、 P_{i+1} 作 2 条圆弧 O_1 和 O_2 , 圆弧 O_1 、 O_2 应满足下列条件^[12]:

- 1) O_1 过点 $p_i(x_i, z_i)$ 且与 P_i 相切;
- 2) O_2 过点 $p_i(x_{i+1}, z_{i+1})$ 且与 P_{i+1} 相切;
- 3) O_1 与 O_2 在点 N 处相切;
- 4) N 是 $\triangle p_i P p_{i+1}$ 的内心。

以上 6 个约束唯一确定了插补的 2 段双圆弧,如图 1 所示。

根据以上条件,结合图 1 在局部坐标系中可分别求出公切点 N , 圆心坐标 O_1 、 O_2 , 双圆弧半径 R_1 、 R_2 , 计算过程如下:

在局部坐标系 $v_i p_i u_i$ 中用 L_i 表示直线段 $p_i p_{i+1}$ 之间的距离为

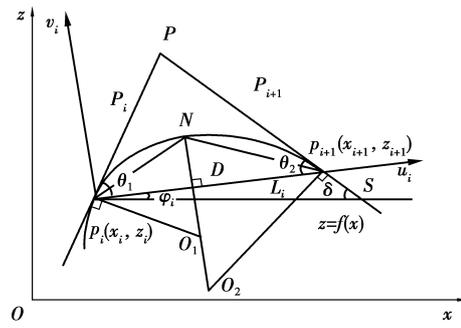


图 1 双圆弧插补原理构造图

$$L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (1)$$

线段 $p_i p_{i+1}$ 和 x 轴的夹角为

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i}\right) \quad (2)$$

切矢 P_i 和 x 轴的夹角为

$$\angle P p_i S = \arctan(P_i) \quad (3)$$

切矢 P_{i+1} 和 x 轴的夹角为

$$\angle P S p_{i+1} = |\arctan(P_{i+1})| \quad (4)$$

分别求得 θ_1 、 θ_2 为

$$\theta_1 = \arctan(P_i) - \varphi_i \quad (5)$$

$$\theta_2 = |\arctan(P_{i+1})| + \varphi_i \quad (6)$$

其中 θ_1 、 θ_2 要根据切矢 P_i 、 P_{i+1} 和直线段 $p_i p_{i+1}$ 斜率的正负以及曲线的凹凸型分情况具体求解。以上只是针对图 1 所示给出 θ_1 、 θ_2 的表达式。

在 $\triangle p_i N p_{i+1}$ 中由正弦定理求得

$$L_{p_i N} = \frac{\sin(\theta_2/2)}{\sin[(\theta_1 + \theta_2)/2]} \cdot L_i \quad (7)$$

由于点 N 是双圆弧的公切点,则 $p_i p_{i+1} \perp O_2 N$ 于 D , 分别求得

$$L_{p_i D} = L_{p_i N} \cdot \cos(\theta_1/2) \quad (8)$$

$$L_{DN} = L_{p_i N} \cdot \sin(\theta_1/2) \quad (9)$$

$$L_{DO_1} = L_{p_i D} / \tan \theta_1 \quad (10)$$

$$L_{DO_2} = (L_i - L_{p_i D}) / \tan \theta_2 \quad (11)$$

$$R_1 = L_{DN} + L_{DO_1} \quad (12)$$

$$R_2 = L_{DN} + L_{DO_2} \quad (13)$$

综上所述,在局部坐标系中公切点 $N(L_{p_i D}, L_{DN})$, 圆心 $O_1(L_{p_i D}, -L_{DO_1})$, 圆心 $O_2(L_{p_i D}, -L_{DO_2})$ 以及半径 R_1 、 R_2 均已求出。

对于上述所求任一点坐标,在整体坐标系和局部坐标系的坐标分别为 (x, z) 及 (u, v) , 由局部坐标系转化为整体坐标系时有

$$\left. \begin{aligned} x &= u \cdot \cos \varphi_i - v \cdot \sin \varphi_i + x_i \\ z &= u \cdot \sin \varphi_i + v \cdot \cos \varphi_i + z_i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2 摆线轮双圆弧插补算法

2.1 摆线行星轮双圆弧插补数值分析

曲线连续双圆弧插补应满足插补段曲线的单峰性,双圆弧插补不能跨越拐点。拐点是曲线信息的关键点,拐点将曲线分割为多个单峰曲线段,应分别对单峰曲线段进行插补计算。

由于摆线轮廓曲线具有连续对称性,如图 2。所以,只要对一个齿廓进行插补,利用坐标旋转就可以得到整个摆线轮廓的双圆弧插补数据。为了保证摆线行星轮正反转传动特性的一致,摆线行星轮的左右齿廓应具有对称性。

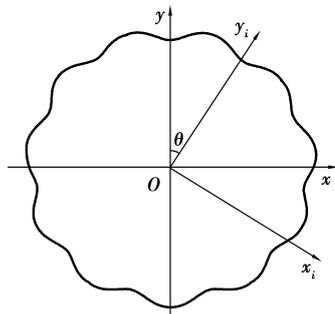


图 2 摆线轮齿廓坐标旋转图

摆线轮一个轮齿的对称中轴与摆线齿廓起始线的夹角大小 $\theta = \pi/Z_g$, Z_g 为摆线轮齿数,令对称中轴的直线方程为 $y = kx$, 斜率 $k = \tan(\pi/2 - \pi/Z_g)$, 所以有: $y = x \cot(\pi/Z_g)$, 将任意齿差的摆线轮齿廓方程代入到对称中轴的直线方程, 得到一个仅含有摆线轮参数角 θ 的方程^[13]

$$R_z \cos \theta - e \cos\left(\frac{Z_b \theta}{Z_b - Z_g}\right) - \left[\pm r_z \frac{-K \cos\left(\frac{Z_b \theta}{Z_b - Z_g}\right) + \cos \theta}{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos\left(\frac{Z_b \theta}{Z_b - Z_g}\right)}} \right] = \left[R_z \sin \theta - e \sin\left(\frac{Z_b \theta}{Z_b - Z_g}\right) \pm r_z \frac{-K \sin\left(\frac{Z_b \theta}{Z_b - Z_g}\right) + \sin \theta}{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos\left(\frac{Z_b \theta}{Z_b - Z_g}\right)}} \right] \cdot \cot\left(\frac{\pi}{Z_g}\right), \quad (15)$$

式中: $K = e \cdot Z_b/R_z$, R_z 为针轮中心圆半径, e 为偏心距, Z_b 为针轮齿数; Z_g 为摆线轮齿数; r_z 为针齿

半径。

式(15)中 θ 正是对称中轴及摆线轮齿廓的交点(即摆线轮齿顶)相对应的 θ , 令其为 θ_{\max} 。根据齿廓曲线的对称性, 当 $\theta \in [-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$, 可确定摆线轮一个轮齿的齿廓曲线。

以一齿差摆线轮为例, 齿廓曲线方程为^[14]

$$\begin{cases} x = R_z \cdot \sin \theta - e \cdot \sin Z_b \theta + r_z \cdot \cos \gamma, \\ y = R_z \cdot \cos \theta - e \cdot \cos Z_b \theta - r_z \cdot \sin \gamma. \end{cases} \quad (16)$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos \theta - K \cdot \cos Z_b \theta}{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos(Z_b - 1)\theta}}, \quad (17)$$

$$\cos \gamma = \frac{K \sin Z_b \theta - \sin \theta}{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos(Z_b - 1)\theta}}. \quad (18)$$

通过对摆线轮齿廓曲率方程进行数学分析, 得知在一个齿廓中存在 2 个拐点, 在拐点处摆线轮齿廓曲率

$$\rho = \frac{1}{r_z + \frac{R_z [1 + K^2 - 2K \cos(Z_b - 1)\theta]^{3/2}}{K(1 + Z_b) \cos(Z_b - 1)\theta - (1 + Z_b K^2)}} = 0. \quad (19)$$

求得拐点处参数角

$$\theta_1 = \frac{1}{Z_b - 1} \cdot \arccos\left(\frac{1 + Z_b K^2}{K(1 + Z_b)}\right), \quad (20)$$

结合图 2, 根据摆线轮齿廓对称性, 可确定同一个齿廓曲线上另一拐点处参数角

$$\theta_2 = -\frac{1}{Z_b - 1} \cdot \arccos\left(\frac{1 + Z_b K^2}{K(1 + Z_b)}\right). \quad (21)$$

将对称中轴方程 $y = x \cot(\pi/Z_g)$ 代入到式(16), 此时 $Z_g = Z_b - 1$, 通过数值计算方法可解得

$\theta_{\max} = \frac{\pi}{Z_b - 1}$, 即一个整齿齿廓参数角为

$$\theta \in \left[-\frac{\pi}{Z_b - 1}, \frac{\pi}{Z_b - 1}\right].$$

由于在 $\theta \in \left[-\frac{\pi}{Z_b - 1}, \frac{\pi}{Z_b - 1}\right]$ 的范围内摆线齿廓曲线存在 2 个拐点, 应在拐点处将一个整齿的摆线轮廓分成 3 段分别进行双圆弧插补, 双圆弧插补步骤如下:

1) 由初始角得到第 1 节点坐标 (x_i, y_i) 和切矢 P_i 。

2) 设定一个步长角 Δ , 求出第 2 节点坐标 (x_{i+1}, y_{i+1}) 和切矢 P_{i+1} , 根据双圆弧算法计算原理, 求得公切点 N , 圆心 O_1, O_2 以及半径 R_1, R_2 。

3) 通过设定允许误差判断走过的步长角 Δ 是否满足要求。为了使数控代码在满足加工精度的条件下尽可能简化, 需要对允许误差设定一个下限, 若实际误差小于这个下限, 则步长角 Δ 自动增加微小步长 Δ_1 再进行判断。

4)若满足步骤 3,令

$x_i = x_{i+1}, y_i = y_{i+1}, P_i = P_{i+1}$;同时步长角 Δ 递增一倍继续执行步骤 2、3。

5)若不满足步骤 3,步长角 Δ 回跳一半,执行步骤 2、3,直到满足控制条件为止。

重复如上步骤,最终完成一个摆线轮齿廓的双圆弧插补,再对得到的双圆弧插补数据整体进行坐标旋转,每次旋转角度

$$\alpha = \frac{2\pi i}{Z_g}, i = 1, 2, \dots, Z_g。$$

坐标旋转计算公式

$$\begin{cases} x = x_i \cos \alpha - y_i \sin \alpha, \\ y = x_i \sin \alpha + y_i \cos \alpha. \end{cases} \quad (22)$$

综上,即可完成整个摆线轮连续双圆弧插补。

2.2 双圆弧插补误差计算

在摆线轮齿廓双圆弧插补过程中保证了插补曲线的单峰性,因此也保证了拟合误差在插补区间的单峰性。摆线轮双圆弧插补的拟合误差计算可按图 3所示进行近似计算,过原齿廓曲线做切线平行于直线段 $p_i p_{i+1}$,切点为 T ,原齿廓曲线在 T 点的切矢为

$$\frac{dy}{dx} = \arctan\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right), \quad (23)$$

由该方程反求出此时的参数角 θ ,再将参数角 θ 代入齿廓方程,得到切点 $T(x_t, y_t)$ 。步长角 Δ 的控制误差 E_r 由切点 T 到圆心 $O_1(x_{o1}, y_{o1}), O_2(x_{o2}, y_{o2})$ 的距离及半径 R_1, R_2 确定。

$$\epsilon_1 = |\sqrt{(x_{o1} - x_t)^2 + (y_{o1} - y_t)^2} - R_1|, \quad (24)$$

$$\epsilon_2 = |\sqrt{(x_{o2} - x_t)^2 + (y_{o2} - y_t)^2} - R_2|, \quad (25)$$

$$E_r = \max(\epsilon_1, \epsilon_2)。 \quad (26)$$

误差控制:判定 E_r 与给定的容差 S 即可。

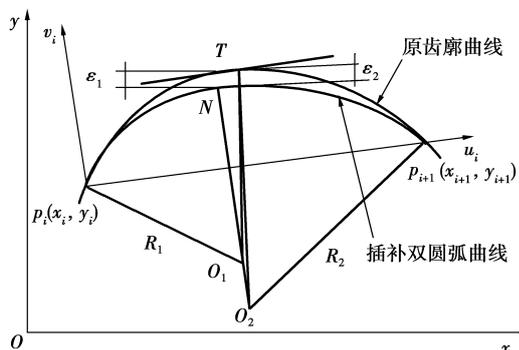
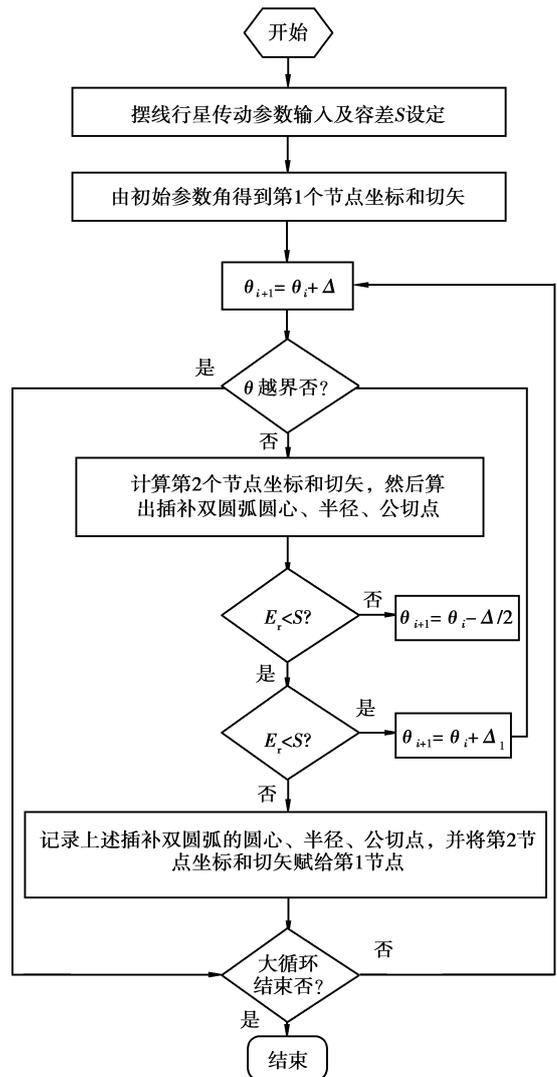


图 3 误差计算原理图

2.3 算法流程图



3 摆线轮数控编程系统设计及样件加工

3.1 数控编程系统功能设计原理

本系统是在 Windows2000 环境下,采用 VisualC++ 开发而成。系统功能结构如图 4,通过读取摆线轮加工参数生成实体齿廓数据文件,并对数据文件设置后置处理参数和工艺控制信息,从而生成数控代码,最终采用加工仿真验证数控代码的正确性。图 5 显示了系统主界面。

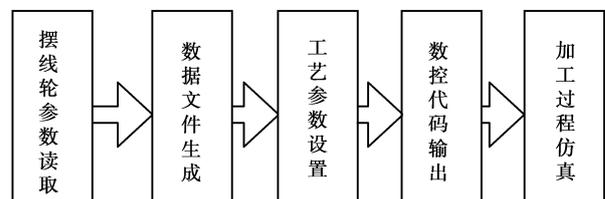


图 4 系统功能结构图

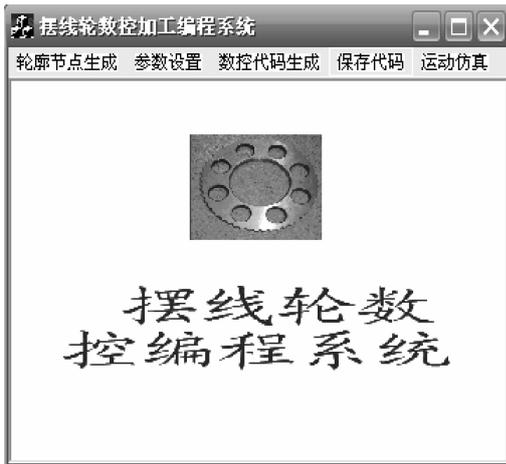


图 5 系统主界面



图 7 数控加工代码生成

1) 摆线轮参数读取。由于摆线行星轮有标准的齿廓曲线参数方程,通过参数设置框(图 6)设定几个相关的特征参数,就能实现该类零件的可参数化信息提取,从而映射到系统后台进行数据处理。



图 6 摆线轮参数读取框

2) 加工工艺参数设置。根据数据文件生成功能生成模块得到满足数控圆弧插补加工的齿廓节点数据文件,针对数据文件确定加工工艺路线,进行工艺参数和后置参数的设置。这些参数在系统中通过对话框输入方式得到,包括:指定加工起始点、刀具补偿方式、主轴转速及程序格式等。

3) NC 代码生成。数据文件完成数控加工工艺参数设定后,根据数控代码格式将摆线轮齿廓数据信息和加工工艺信息转换为适合 FAUNC 系统要求的数控加工代码(图 7)。

4) 运动仿真。基于 VC++6.0 并结合 OpenGL 关键技术,对摆线轮的磨削加工过程进行仿真(图 8)。

仿真首先要提取数控加工指令,将数控代码转化为刀位文件数据存储在所定义的链表中,通过遍历链表进行动画操作,实现摆线轮的数控加工仿真过程。通过将刀心轨迹与被加工表面一起显示出来,当选取了合适的加工刀具便能直观地确定在运动过程中刀具与工件没有发生干涉等现象,表明双圆弧法加工摆线行星轮齿廓是可行的。加工刀具选择必须保证摆线轮齿根过渡曲线最小半径大于刀具半径最大值。

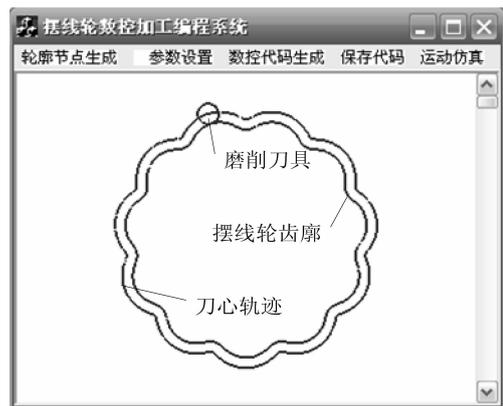


图 8 摆线轮加工仿真(截面图)

3.2 数控磨削实验

根据理论研究结果,采用摆线轮数控加工编程系统生成的 NC 代码在 FAUNC 型 MK2945C 连续轨迹数控坐标磨床上成功加工出一件摆线轮样件(图 9)。在 ZC1066H 三坐标测量机上对该摆线轮轴向中部截面的精度进行测量,该截面上摆线轮周节累积误差为 0.028 mm(如图 10),验证了该理论研究的正确性及该自动编程系统的可行性。

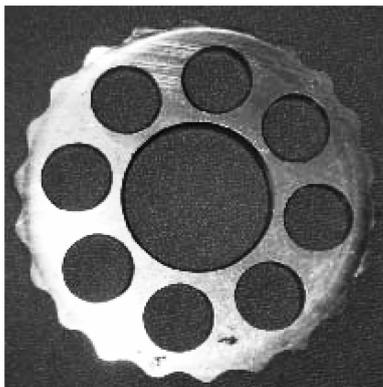


图 9 试制摆线轮样件

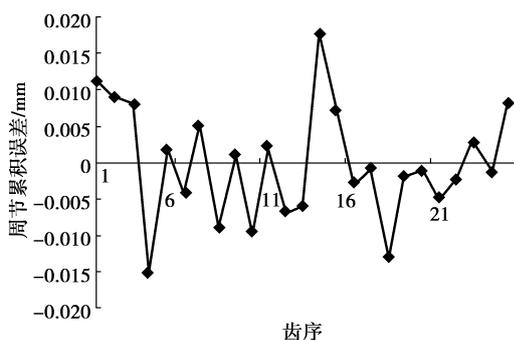


图 10 试制摆线轮周节误差

4 结 语

1)采用连续双圆弧法插补方式和动态伸缩步长的误差控制,获取了圆弧插补的齿廓节点数据,结合 VC++与 OpenGL 开发了一套完整的摆线轮数控加工编程系统。

2)利用开发的摆线轮数控加工编程系统,能够对摆线轮进行加工参数化设计和工艺信息处理,可快速准确生成 NC 代码及加工过程仿真,实现了任意齿数摆线轮的数控加工。

3)该研究为该类传动的加工生产及其工程应用奠定了重要基础,为突破该类传动精密数控加工的关键技术提供了理论依据。

参考文献:

- [1] XIE M, CHEN B K, LI C Y. Dynamics analysis of cycloid reducer[J]. Machine Design & Research, 2008, 24(2): 156-158.
- [2] LITVIN F L, FENG P H. Computerized design and generation of cycloidal gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 1996, 31(7): 891-911.
- [3] LAI T S. Geometric design of roller drives with cylindrical meshing elements [J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(1): 55-67.
- [4] LAI T S. Design and machining of the epicycloid planet gear of cycloid drives [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(7/8): 665-670.
- [5] LIANG X C, SHAO M, CHEN D. Research of new technologies in gear-machining [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1994, 7(3): 188-192.
- [6] 严勇, 汤子琳. 摆线齿轮成形磨齿工艺[J]. 机械工艺师, 1994(4): 8-9.
YAN YONG, TANG ZI-LIN. Grinding technology of cycloid gear[J]. Machinery Manufacturing Engineer, 1994(4): 8-9.
- [7] 王乾廷, 桂贵生. 用切触线法加工曲线轮廓[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2003, 26(3): 193-196.
WANG QIAN-GUI, GUI GUI-SHENG. Machining curved contour by contact curve [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2003, 26(3): 193-196.
- [8] 张德泉, 李真, 曹克伟, 等. 摆线轮齿廓曲线 CNC 成形磨削机理[J]. 天津大学学报, 1998, 31(4): 454-458.
ZHANG DE-QUAN, LI ZHEN, CAO KE-WEI, et al. Study on the CNC profiling gear grinding method of epicycloidal gear[J]. Journal of Tianjin University, 1998, 31(4): 454-458.
- [9] 刘殿忠, 田嘉. 用少齿差行星传动机构实现短副外摆线齿形的范成磨削装置[J]. 煤矿机械, 2004(8): 72-74.
LIU DIAN-ZHONG, TIAN JIA. A generating grinding device used for grinding contracted epicycloid gear with a planetary device of small difference between the number of teeth[J]. Coal Mine Machinery, 2004(8): 72-74.
- [10] 张敬东. 摆线齿轮的数控加工[J]. 现代制造工程, 2005(3): 49-50.
ZHANG JING-DONG. Numerical control machining of hypocycloidal gear [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2005(3): 49-50.
- [11] 陈明君, 赵清亮, 董申. 基于双圆弧步长伸缩数控插补非圆曲线算法的研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 111-116.
CHEN MING-JUN, ZHAO QING-LIANG, DONG SHEN. Study on the aspheric curve algorithm based on the bi-arc step length flex numerical control interpolation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1): 111-116.
- [12] 葛研军. 数控加工关键技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] CHEN B K, FANG T T, LI C Y. Gear geometry of cycloid drives [J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2008, 51(5): 598-610.
- [14] 饶振刚. 行星传动机构设计 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 1994.

(编辑 张 苹)