

锥形摆线啮合副加工方法*

陈兵奎 王淑妍 蒋旭君 房婷婷 李朝阳
(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要: 为解决锥形摆线啮合副软齿面的切削加工和硬齿面的磨削加工, 提出用指锥刀具/磨具直接形成零件轴向锥形, 而零件断面摆线或圆弧齿通过展成方式形成的“指锥包络”切削/磨削加工方法。以锥形摆线轮的大端作为基准, 推导锥形摆线轮和锥形圆弧内齿轮切削/磨削过程中的刀具/磨具中心轨迹方程。针对理论推导的刀具/磨具中心轨迹方程, 运用 Pro/Engineer 软件, 对啮合副零件的切削/磨削加工过程进行了运动仿真, 验证理论推导的正确性和加工方法的可行性。在理论推导及加工仿真的基础上, 进一步完成样机的试制。在 ZC1066H 三坐标测量机上, 对样机的锥形啮合副零件进行加工精度测量, 测得锥形摆线轮断面周节累积误差为 0.035 mm, 圆弧内齿轮断面周节累积误差为 0.014 mm, 测量结果表明该加工方法切实可行, 且具有较高的精度。

关键词: 锥形摆线轮 锥形圆弧内齿轮 行星传动 加工方法

中图分类号: TH132

0 前言

摆线针轮行星传动是一种应用十分广泛的传动形式。近年来, 该传动出现了一些新的结构, 如 RV、TWINSPIN、DOJEN 等^[1]。RV(Rotary vector)型行星传动机构是以具有两级减速装置和曲轴采用了中心圆盘支承结构为主要特征的封闭式摆线针轮行星传动机构^[2]。TWINSPIN 减速器的主要特征是采用中空转子式输出, 输出机构创新采用了十字滑板, 两端支撑为交错滚子式轴承, 因而又称为轴承减速器^[3]。DOJEN 摆线减速器采用 2K-H 机构, 传动采用机芯式设计, 悬臂式针齿的另一端有锥度, 与机壳上的锥孔配合自动定心^[4]。另一方面, 关于摆线轮最佳齿形的研究也引起人们的关注。关天民、何卫东等分析了摆线轮的等距修形、移距修形和转角修形等基本修形方法及其组合修形方法, 并就如何利用这些基本修形方法的优化组合加工摆线轮, 从而实现高的运动精度和小的间隙回差等问题进行了研究^[5-6]。

根据普通摆线针轮行星传动的针齿半径改变时, 对应的系列变幅摆线互为等距线这一特性, 提出了新型锥形摆线轮行星传动^[7]。其基本构件有锥形圆弧内齿轮、锥形摆线轮和输出机构等。该新型传动具有传动精度高、间隙可调、啮合刚度高、可精密磨削等优点, 因此在机器人、精密机械等工业领域有着广泛的应用前景。该传动的任意断面实质上是一个普通的摆线针轮行星传动, 即锥形摆线行

星传动任意断面都满足啮合定律, 而这一系列的摆线针轮行星传动的变幅系数、基圆、滚圆、针轮和摆线轮的节圆、偏心距均相等, 但针齿半径、摆线轮的齿顶圆和齿根圆不同^[8]。

共轭啮合零件的制造精度直接影响着传动的承载能力、精度和效率, 因此锥形啮合副的加工是该传动的关键技术之一。目前普通摆线轮主要根据短幅外摆线的形成原理来进行加工, 切削加工方法主要有滚齿、插齿等; 摆线轮的精加工通常在专用磨床上按展成原理进行磨削^[9], 而砂带磨和成形法也逐渐引起人们的重视^[10-11]。此外, 基于三坐标测量机, 编制相应测量程序对啮合副零件加工精度进行齿轮自动检测是重要的发展方向^[12]。本文将着重研究针对锥形摆线啮合副的“指锥包络”加工方法。

1 指锥包络切削加工方法

锥形摆线轮行星传动的针齿半径沿轴向呈线性变化, 圆弧内齿轮齿廓由锥形针齿工作部分和过渡曲面组成, 而锥形摆线轮可看作锥形针齿包络而成。依据这一特性, 提出了锥形摆线轮和锥形圆弧内齿轮切削加工的“指锥包络法”, 即用指锥刀具直接形成零件轴向锥形, 而摆线齿廓或圆弧内齿轮齿廓按离散的方式展成。采用此方法, 工件轴向锥形通过刀具锥度形成, 而沿工件轴向的任意断面的齿廓实际上都是展成出来的。只要保证刀具的锥度有足够的直线度, 即可获得高的加工精度和加工效率。

1.1 锥形摆线轮切削加工

一般地, 以锥形摆线轮的大端作为基准。该断面齿廓曲线如图 1 所示, 其方程为^[13]

* 国家自然科学基金(50375159)和新世纪优秀人才计划资助项目。
20060302 收到初稿, 20061028 收到修改稿

$$\begin{cases} x = x_0 + r_z \cos \beta \\ y = y_0 - r_z \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中 x, y ——实际齿廓坐标
 r_z ——断面针齿半径
 β ——理论齿廓上任一点 M 的法线与 x 轴线的夹角

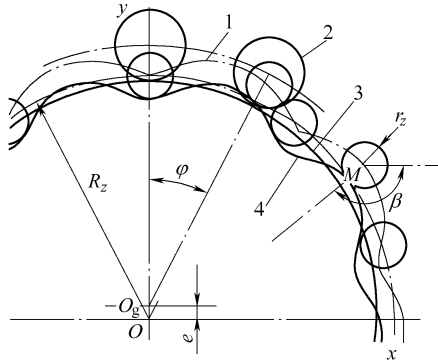


图 1 锥形摆线轮断面齿廓曲线
 1. 基圆 2. 理论齿廓 3. 滚圆 4. 实际齿廓

x_0, y_0 描述的是理论齿廓曲线, 其方程表达式如下

$$\begin{cases} x_0 = R_z \sin \varphi - e \sin Z_b \varphi \\ y_0 = R_z \cos \varphi - e \cos Z_b \varphi \end{cases}$$

式中 R_z ——针齿半径
 Z_b ——针轮齿数
 $Z_b = Z_g + 1$
 Z_g ——摆线轮齿数
 e ——偏心距
 $e = K_1 R_z / Z_b$
 K_1 ——短幅系数
 φ ——滚圆中心绕基圆的中心绕过的角度
 $\cos \beta = \pm \frac{K_1 \sin Z_b \varphi - \sin \varphi}{\sqrt{1 + K_1^2 - 2K_1 \cos Z_g \varphi}}$
 $\sin \beta = \mp \frac{-K_1 \cos Z_b \varphi + \sin \varphi}{\sqrt{1 + K_1^2 - 2K_1 \cos Z_g \varphi}}$

图 2 是锥形摆线轮铣削模型。设刀具从理论摆线齿廓进刀, 刀具与摆线轮大端对应的刀具半径为 r_c , 刀具的法向进刀量为 Δt_i , 刀具中心轨迹方程为

$$\begin{cases} x_c = x_0 + (r_c + \sum \Delta t_i) \cos \beta \\ y_c = y_0 - (r_c + \sum \Delta t_i) \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

锥形摆线轮齿廓刀具中心曲线如图 3 所示, 当 $r_z = (r_c + \Delta t_i)$ 时, 即加工出摆线轮齿廓。根据摆线轮不发生根切和尖角现象条件, 最大刀具半径必须小于摆线轮理论齿廓最小曲率半径 ρ_{0min} , 即 $\rho_{0min} > r_{cmax}$ 。

1.2 锥形圆弧内齿轮切削加工方法

锥形圆弧内齿轮铣削模型如图 4 所示, 它的刀

具中心曲线如图 5 所示, 锥形圆弧内齿轮断面齿廓方程为

$$\begin{cases} x_n = R_z \cos \left(2n \frac{2\pi}{Z_b} \right) + r_z \cos \left(\theta - n \frac{2\pi}{Z_b} \right) \\ y_n = R_z \sin \left(2n \frac{2\pi}{Z_b} \right) + r_z \sin \left(\theta - n \frac{2\pi}{Z_b} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $n = 0, 1, 2, \dots, Z_g$
 θ ——参数

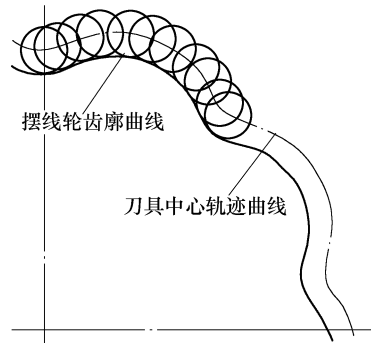


图 2 锥形摆线轮铣削模型

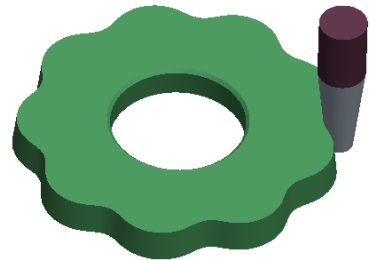


图 3 锥形摆线轮齿廓刀具中心曲线



图 4 锥形圆弧内齿轮铣削模型

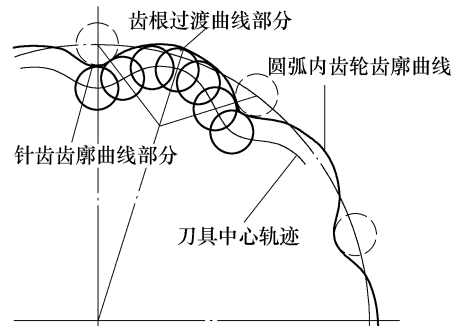


图 5 锥形圆弧内齿轮刀具中心曲线

其对应的刀具中心轨迹方程为

$$\begin{cases} x_{c1} = R_z \cos\left(2n\frac{2\pi}{Z_b}\right) + \\ (r_c + r_z + \Delta T - \sum \Delta t_i) \cos\left(\theta - n\frac{2\pi}{Z_b}\right) \\ y_{c1} = R_z \sin\left(2n\frac{2\pi}{Z_b}\right) + \\ (r_c + r_z + \Delta T - \sum \Delta t_i) \sin\left(\theta - n\frac{2\pi}{Z_b}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 ΔT ——总余量

当 $\Delta T - \sum \Delta t_i = 0$ 时，即加工出圆弧针齿齿廓。

由于圆弧内齿轮的过渡曲线通常取为与针齿相切的圆弧，因此容易获得其刀具中心轨迹。为了保证不发生干涉现象，必须保证锥形圆弧内齿轮齿根过渡曲线最小半径大于刀具半径最大值，即 $r_{g\min} > r_{c\max}$ 。

2 指锥包络磨削方法

为了消除磨具表面高点对零件表面质量的影响，用“指锥包络”法磨削零件时，磨具除高速自转外，应附加上下串刀运动。

取锥形摆线轮大端断面为研究对象，其对应磨具半径为 r_c ，则此断面内磨具中心的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_m = x_0 \mp (\Delta z + r_c + \sum \Delta t_i) \cos \beta \\ y_m = y_0 \pm (\Delta z + r_c + \sum \Delta t_i) \sin \beta \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δz ——磨具半径变化量

$$\Delta z = z \tan \alpha$$

z ——磨具升降变化量

α ——锥度角

由上式可知，磨具中心的运动轨迹不仅与 x, y 变化量有关，而且与 z 向的上、下运动变化量有关。锥形摆线轮磨削加工磨具中心轨迹曲线如图 6 所示。

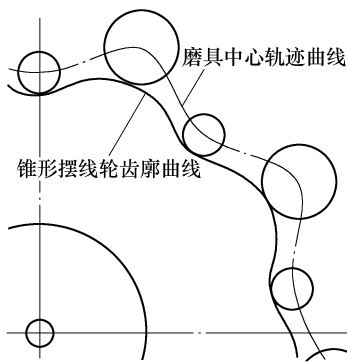


图 6 锥形摆线轮磨削加工磨具中心轨迹曲线

同样地，可得到磨削时针齿齿廓部分对应的磨具中心轨迹方程

$$\begin{cases} x_{m1} = R_z \cos\left(2n\frac{2\pi}{Z_b}\right) + \cos\left(\theta - n\frac{2\pi}{Z_b}\right) \times \\ (r_c + r_z + \Delta T_m - \sum \Delta t_i \mp \Delta z) \\ y_{m1} = R_z \sin\left(2n\frac{2\pi}{Z_b}\right) + \sin\left(\theta - n\frac{2\pi}{Z_b}\right) \times \\ (r_c + r_z + \Delta T_m - \sum \Delta t_i \pm \Delta z) \end{cases} \quad (6)$$

圆弧内齿轮磨削加工磨具中心轨迹曲线如图 7 所示。需要指出的是，如果指锥磨具为立方氮化硼或金刚石砂轮且修整精度足够，也可按前文所述的铣削方式进行磨削。

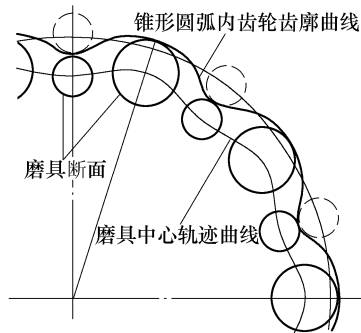


图 7 圆弧内齿轮磨削加工磨具中心轨迹

3 加工仿真及样机试制

运用 Pro/Engineer wildfire 软件对锥形摆线轮、锥形圆弧内齿轮的切削/磨削加工过程进行了仿真。图 8、9 是加工锥形摆线轮时刀具分别相对摆线轮和

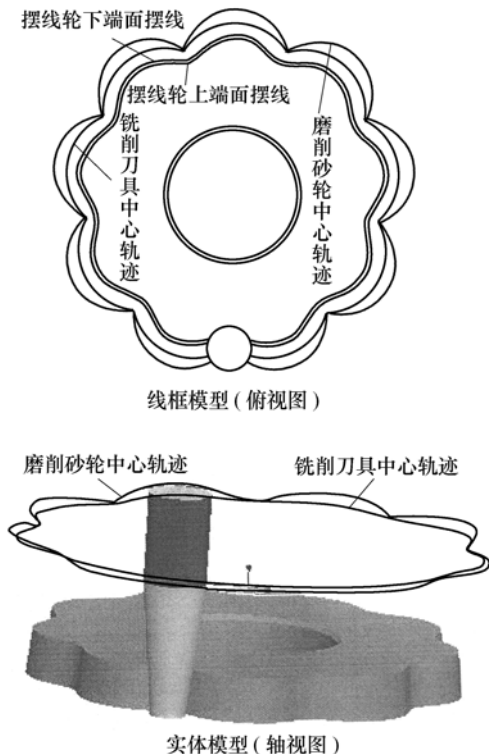


图 8 刀具相对摆线轮运动中心轨迹

内齿轮运动中心轨迹,在运动过程中刀具/磨具与工件没有发生干涉等现象,表明指锥刀具/磨具加工锥形啮合副是可行的。

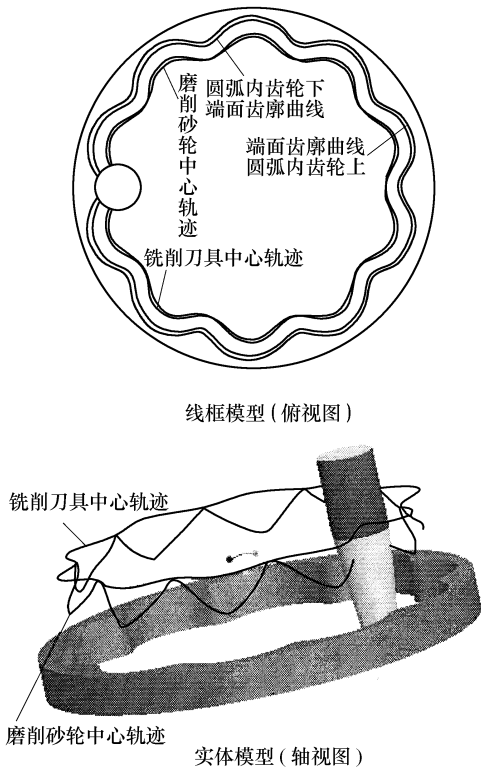


图 9 刀具相对内齿轮运动中心轨迹

根据理论研究结果,采用“指锥包络”法加工出一套传动比为 360 的锥形摆线行星传动样机,如图 10、11 所示。在 ZC1066H 三坐标测量机上对位于所加工零件轴向中部的断面精度进行了测量,该断面上锥形摆线轮周节累积误差 $\Delta t = 0.035 \text{ mm}$; 圆弧内齿轮周节累积误差 $\Delta t = 0.014 \text{ mm}$ 。锥形圆弧内齿轮周节误差如图 12 所示。锥形摆线轮周节误差如图 13 所示。可见,指锥包络法具有较高的加工精度。



图 10 啮合零件



图 11 圆弧内齿轮

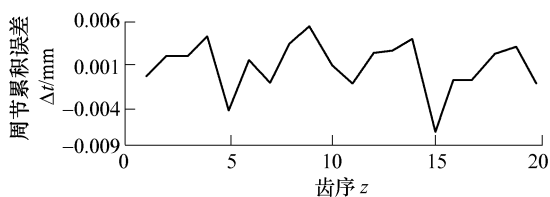


图 12 锥形圆弧内齿轮周节误差

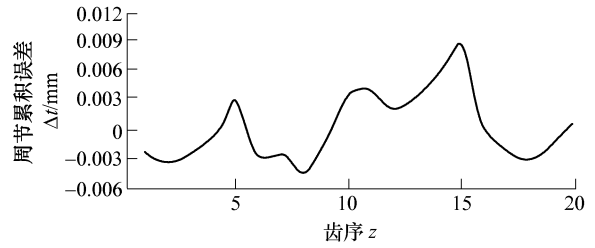


图 13 锥形摆线轮周节误差

4 结论

(1) 采用指锥刀具/磨具直接形成零件轴向锥形,而零件断面摆线或圆弧齿通过数控方式形成的指锥包络切削/磨削的加工方法切实可行。

(2) 指锥包络法具有较高的生产效率和加工精度。

(3) 本文的研究为该新型传动的加工生产及其工程应用奠定了重要基础,并对类似零件的加工有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 张俊芳,余墨娟,周建军. 用于机器人驱动的新型摆线传动技术[J]. 杭州电子工业学院学报, 2002(22): 67-72.
- [2] 饶振纲. RV 型行星传动的设计研究[J]. 传动技术, 2002(4): 6-11.
- [3] Motion Technologies. Twinspin/solution for precision [EB/OL].[2003]http://motiontech.com.au.
- [4] Rotprecision Inc. Mectrol dojen zero backlash speed reducers [EB/OL].[2003]http://www.rotolwbe.com.
- [5] 何卫东,李力行,李欣. 机器人用高精度 RV 减速器中摆线轮的优化新齿形[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 51-55.
- [6] 关天民. 摆线针轮行星传动中修形所产生的回转误差计算与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2001(10): 15-18.
- [7] 陈兵奎. 锥形摆线轮行星传动装置: 中国, ZLO3117879.0[P]. 2005-02-16.
- [8] 陈兵奎,蒋旭君,王淑妍. 新型锥形摆线轮行星传动初步研究[J]. 现代制造工程, 2005(2): 14-15.
- [9] 郑州工学院机械原理及机械零件教研室. 摆线针轮行星传动[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [10] LIANG Xichang, SHAO Ming, CHEN Da. Research of new technologies in gear-machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1994, 7(3): 188-192.
- [11] 严勇,汤子琳,甘启义. 摆线齿轮成形磨齿工艺[J]. 机械工艺师, 1994(3): 8-9.

- [12] ZHAI Haiyun, LI Zhen, CHEN Lincai, et al. Error processing method of cycloidal gear measurement using 3D coordinates measuring machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, 11(3): 196-200.
- [13] 饶振纲. 行星传动机构设计[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 1994.

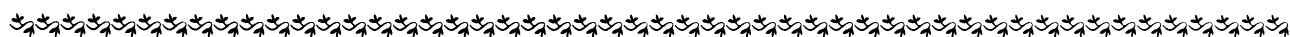
MANUFACTURING METHOD FOR THE CONIC CYCLOIDAL GEAR PAIR

CHEN Bingkui WANG Shuyan JIANG Xujun

FANG Tingting LI Chaoyang

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission,
Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: For solving the cutting problem of gear flank and the grinding of the hardened profile of the conic cycloidal meshing elements, a new cutting/grinding method called "finger cone enveloping" is put forward, that is, the axis direction cone of



(上接第 146 页)

chanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(3): 371-385.

- [10] LI Li, QU LIANGSHENG. Cyclic statistics in rolling bearing diagnosis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003(267): 253-265

CYCLIC-STATIONARY ANALYSIS OF BEARING VIBRATION AND FAULT DIAGNOSIS

JIA Minping YANG Jianwen

(School of Mechanical Engineering, Southeast
University, Nanjing 210096)

Abstract: The vibration feature of bearing with fault is analyzed, and on the condition of the mathematical model with impact signal of bearing, the signal is pointed out to be non-stationary and have the wide frequency band, so the fault

the gear is shaped by finger conic cutter or grinder, and cycloid or arc profile is formed by enveloping. Setting the bigger end of conic cycloidal gear as datum plane, the cutter/grinder center paths are developed. Cutting and grinding processes are simulated with Pro/Engineer software, which verify the correctness of theory deduction and feasibility of machining. On the basis of theory deduction and machining simulation, prototypes of the gears are produced. The machining precision of the conic meshing parts for prototypes of the gears is measured with three-dimension measuring machine of ZC1066H, and conic cycloidal gear accumulative pitch error is 0.035 mm and conic-arc-inner gear is 0.014 mm. Gear error measuring results demonstrate that the method of "finger cone enveloping" not only is feasible but also has fairly high precision.

Key words: Conic cycloidal gear Conic-arc-inner gear
Planetary transmission Machining method

作者简介: 陈兵奎, 男, 1966 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为精密传动及控制。

E-mail: bkchen@cqu.edu.cn

feature can't be gotten with the amplitude spectrum. Referencing the property of rotating movement of bearing, the cyclostationarity of vibration signal is deduced, and the signal is almost cyclostationary. The demodulation function of the second-order cyclic statistics is introduced, the method of using filtering and the second-order cyclic statistics to identify the fault feature is derived. The vibration of bearing with fault is analyzed and showed the method proposed in the paper is effective.

Key words: Rolling bearing Fault diagnosis
Cyclostationary Filtering
Second-order cyclic statistics

作者简介: 贾民平, 男, 1960 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械故障诊断、动态信号处理和振动工程。

E-mail: mpjia@seu.edu.cn

杨建文, 男, 1977 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械故障诊断和信号处理。

E-mail: mail_yjw@163.com