第42卷 第11期
2010年11月
哈尔滨工业大学学报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Vol. 42 No. 11
Nov. 2010

在三轴插齿机上实现非圆齿轮磨齿运动的方法

李建刚[1], 周 磊[1], 赵 巍[1], 李泽湘[1,2]

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 518055 深圳, hit. li. jg@ gmail. com; 2. 香港科技大学 电子及计算机工程学系,香港)

摘 要: 为了提高非圆齿轮加工精度,解决磨床设计周期长、造价高的问题,基于一种非圆齿轮成形砂轮展成磨削法原理,提出了在三轴非圆齿轮插齿机上改装成形磨头,实行非圆齿轮磨齿加工的方法. 利用非圆齿轮插齿加工原理,解决了在插齿机上进行无干涉无抬刀分度的问题;同时利用平面运动转化理论,实现了四轴运动到三轴运动的转化,使非圆齿轮磨齿加工可以应用于实际生产中,该方法有利于非圆齿轮在齿面硬度要求高的领域应用.

关键词: 磨齿; 插齿; 非圆齿轮; 成形砂轮; 展成法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367 - 6234(2010)11 - 1749 - 04

Noncircular gear grinding method using gear generator with form-grinding

LI Jian-gang[1], ZHOU Lei[1], ZHAO Wei[1], LI Ze-xiang[1,2]

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin institute of technology, Shenzhen 518055, China;
2 Dept. of Electronic and Computer Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, HongKong, China)

Abstract: In order to overcome the problems of long design cycle and high costs of grinding machine and improve the accuracy of noncircular gear, a new noncircular gear grinding method, based on 3-axis noncircular gear shaping machine has been put forward by adding form-grinding. Dividing motion data with no interference and no putting grinder up has been deduced using noncircular gear tooth generated method in the shaping process. A simple function could translate 4-axis motion data to 3-axis motion data in noncircular gear grinding process. The problem that it is difficult to grind noncircular gear hard tooth has been solved, that makes noncircular gear grinding with high accuracy became possible.

Key words: gear grinding; gear shaping; noncircular gear; form-grinding; generated method

非圆齿轮因其能够按照一定的变传动比运动,在工业上应用得越来越多,其加工精度的要求也越来越高. 非圆齿轮的磨齿问题是一个未能解决的突出难点,严重影响了非圆齿轮在重载和高精度方面的应用[1-7].

成形砂轮展成磨削法是一种全新的非圆齿轮磨削方法[1]. 该方法把成形砂轮看作插齿刀的一个刀齿,利用非圆齿轮插齿加工过程中齿廓成形原理,推导出了非圆齿轮齿廓的成形砂轮展成磨削方法.

收稿日期: 2009 - 06 - 08.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50705024);
广东省自然科学基金资助项目(07300029).
作者简介: 李建刚(1976—),男,副教授;
李泽湘(1961—),男,教授,博士生导师,长江学者.

本文在上述方法基础上对非圆齿轮和砂轮的空间位置关系进行分析研究. 提出了在三轴非圆齿轮插齿机上增加磨头装置来实现非圆齿轮的磨齿,给出了非圆齿轮磨削无 Z 方向运动进行分度的原理和计算方法,以及由四轴磨削运动到三轴磨削的运动转换方法.

1 非圆齿轮齿廓的成形砂轮展成磨削原理[1]

非圆齿轮插齿加工是将插齿刀看作一个圆齿轮,根据非圆齿轮和圆柱齿轮啮合原理,计算得到在插齿过程中非圆齿轮和插齿刀的相对运动关系,表示为非圆齿轮转角 ϕ_i 及其中心 O 的 XY 坐标 x_i, y_i 和插齿刀的旋转运动 ψ_i,如图1所示. 即可以通过 N 组四轴点位坐标来控制四轴数控插齿机

床来实现插制非圆齿轮,一组点位坐标可以表示为 $P_i(\psi_i,\phi_i,x_i,y_i)$,其中 $i=0,1,2,\cdots,N$.

这里所说的成形砂轮,就是把盘状砂轮的廓形修成齿数为 Z_0 的渐开线圆柱齿轮的一个牙齿的形状(见图 1). 它磨削非圆齿轮一个齿槽的过程就相当于齿数 Z_0 的齿轮和非圆齿轮一个齿槽的啮合过程. 图 2 表示瞬时成形砂轮磨削非圆齿轮第 3 个齿槽时的砂轮和非圆齿轮的位置关系. 文献[1] 给出了磨削非圆齿轮第 k 个齿槽时,插齿刀和非圆齿轮相对四轴运动点序列 P_i 从 $i=TS_k$ 到 $i=TE_k$ 之间,相对应的成形砂轮和非圆齿轮的四轴运动数据($\varepsilon_{k,i},\phi_{k,i},x_{k,i},y_{k,i}$) 可以计算得到,这里不再赘述.

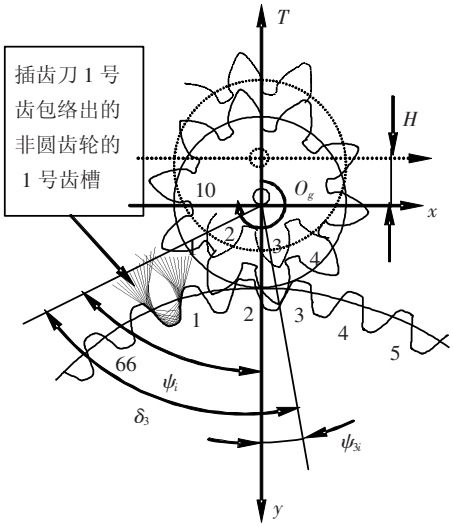

图 1　插齿刀刀齿包络非圆齿轮齿槽图[1]

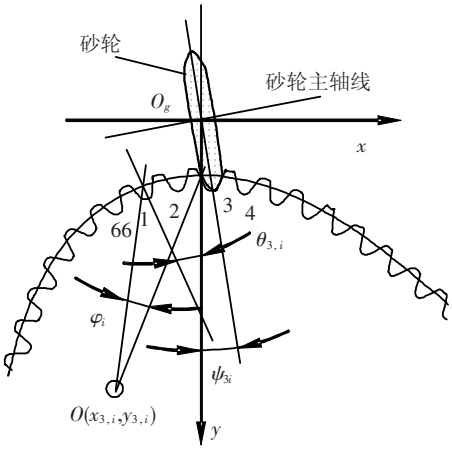

图 2　磨削非圆齿轮第 3 个齿槽时砂轮和非圆齿轮之间的位置关系图[1]

磨削完一个齿槽后,工件和砂轮作分度运动,接着按照齿轮 Z_0 的下一个牙齿与非圆齿轮的下一个齿槽作啮合运动磨削,采用的是一种间隙的展成磨法.

2　非圆齿轮磨削机床的分析

如果要设计一台符合该原理的非圆齿轮磨齿机床,需要上述四轴联动来实现展成磨削运动. 同时,需要设计磨头使砂轮沿自身轴线高速旋转,形成磨削速度. 为了磨到非圆齿轮全齿宽,磨齿过程中砂轮需要沿 z 方向上下移动,类似于插齿过程中的插齿刀沿自身轴线 z 往复切削齿廓的运动.

但是,目前没有满足上述要求的齿轮磨床,如果要单独开发一台样机,不仅周期长,而且非常昂贵. 考虑到该磨削原理是从非圆齿轮插齿加工原理演化而来,最直接的验证方法就是在非圆齿轮插齿机床中,将插齿刀替换成高速旋转的砂轮来进行加工实验. 下面就着重讨论在插齿机上通过增加磨头来实现磨齿的运动计算问题.

从非圆齿轮成形砂轮展成磨削原理可知,如果假定砂轮中心不动,它们之间的位置关系可以用砂轮的转动,非圆齿轮中心在平面两个方向的移动和绕自身中心的转动这 4 个运动来实现. 根据微分几何原理,两个物体在平面内的相对位置关系最多只有 3 个自由度,即只需要用前面这 4 个运动中的 3 个运动就可以表示出它们在平面内的相对位置关系. 同时,在实际工业生产中,已经有一批三轴联动的非圆齿轮插齿机床在实际中应用,其运动(见图 3)基本满足非圆磨齿的运动需要,只需在插齿刀刀杆上安装成形砂轮磨头,就能实现非圆齿轮磨齿的需要,如图 4 所示. 下面就给出在三轴插齿机床中实现非圆齿轮磨齿分度和每一个齿的加工展成运动的转化关系.

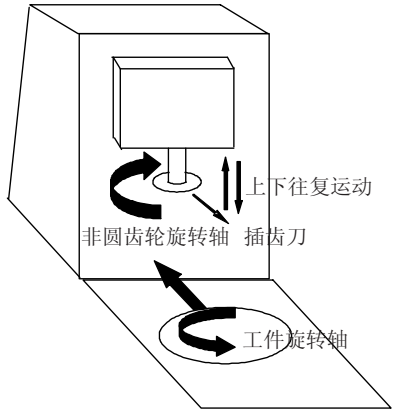

图 3　三轴插齿机的运动简图

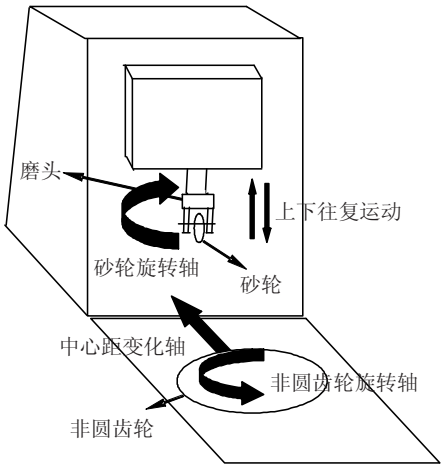

图 4　增加了磨头的三轴插齿机的运动简图

3　无干涉无抬刀磨削分度四轴运动的实现

在分度过程中，如果要保证砂轮和非圆齿轮不发生干涉，最简单的方法就是将砂轮沿齿轮轴向上移到一个安全平面后再进行分度，但是这样就需要增加一个分度 Z 轴. 而大部分非圆齿轮插齿机没有这个运动. 这样，在利用数控非圆齿轮插齿机来实现非圆齿轮磨齿时，加工完一个齿后必须给出合适的分度运动来避免砂轮和齿轮的干涉.

为了解决上述问题，根据非圆齿轮啮合原理[3-4]，在插齿加工过程中，插齿刀如果沿着图 1 所示的 T 方向（插齿刀节圆和非圆齿轮节曲线的切线方向）移动 H 距离，到图 1 所示的虚线位置（插齿加工的切入初始位置），则按照原来的插齿数据运动，非圆齿轮和插齿刀不会相接触，其中 H 可以由下式确定：

$$H = H_{a0} + H_a + C. \tag{1}$$

其中：H_{a0} 为插齿刀的齿顶高，H_a 为非圆齿轮齿顶高，C 为一个大于零的数，其值由齿轮节曲线的最小曲率半径和插齿刀的半径决定.

在磨削过程中，磨削完非圆齿轮第 k 个齿槽对应的插齿刀和非圆齿轮相对四轴运动点序列 P_i 为 $i = TE_k$，非圆齿轮第 $k+1$ 个齿槽开始磨削时对应的插齿刀和非圆齿轮相对四轴运动点序列 P_i 为 $i = TS_{k+1}$. 首先，利用文献[1]给出的公式，通过修正插齿刀和非圆齿轮相对四轴运动点序列 P_i 从 $i = TE_k$ 到 $i = TS_{k+1}$ 之间的数据 $P_i(\psi_i, \phi_i, x_i, y_i)$ 成为 $P'_i(\psi_i, \phi_i, x_i, y_i \pm H)$（正号对应外齿轮，负号对应内齿轮）；其次，计算出砂轮和非圆齿轮的相对运动数据 $(\varepsilon'_{i,k}, \phi'_{i,k}, x'_{i,k}, y'_{i,k})$；最后，让砂轮和非圆齿进行联动来实现分度. 砂轮和非圆齿轮在没有干涉的情况下完成了分度.

以上分析表明：非圆齿轮磨齿不需要磨头上移分度，即可在原有磨齿原理计算数据中完成分度.

因此，可以很容易得到磨削非圆齿轮由第 k 个齿槽包络过程为 $(\varepsilon_{k,i}, \phi_{k,i}, x_{k,i}, y_{k,i})$，$i = TS_k, TS_k + 1, \cdots, TE_k$ 和第 $k+1$ 个齿槽分度过程 $(\varepsilon'_{i,k}, \phi'_{i,k}, x'_{i,k}, y'_{i,k})$，$i = TE_k, TE_k + 1, \cdots, TS_{k+1}$ 两部分组成.

4　非圆齿轮磨齿在三轴插齿机上的运动等效转化

从相对运动关系来说，为了实现插齿刀节圆和非圆齿轮节曲线任意瞬时相切纯滚动，在不考虑切点位置情况下，插齿刀和非圆齿轮的相对位置关系可以用插齿刀的回转、非圆齿轮的回转以及插齿刀和工件中心距的变化 3 个参数来实现[8-11]. 如果在该机床上实现非圆齿轮磨齿，需要将第一节计算的四轴插齿数据 $(\varepsilon_{k,i}, \phi_{k,i}, x_{k,i}, y_{k,i})$ 和第三节计算的分度数据 $(\varepsilon'_{i,k}, \phi'_{i,k}, x'_{i,k}, y'_{i,k})$ 进行等效运动转化.

因为三轴和四轴相比，缺少 X 方向的运动，如图 5 所示，建立新的坐标系 $O_g - \bar{x}, \bar{y}$，在运动过程中砂轮中心 O_g 和非圆齿轮中心 O 都在 $\bar{y}$ 轴上[12]. 根据平面坐标转化关系，从坐标系 $O_g - x, y$ 到坐标系 $O_g - \bar{x}, \bar{y}$ 中，$(\varepsilon_{k,i}, \phi_{k,i}, x_{k,i}, y_{k,i})$ 可以转化成为 $(\bar{\varepsilon}_{k,i}, \bar{\phi}_{k,i}, \bar{x}_{k,i}, \bar{y}_{k,i})$，具体公式为

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_{k,i} = \varepsilon_{k,i} + \lambda_i, \\ \bar{\phi}_{k,i} = \phi_{k,i} + \lambda_i, \\ \bar{x}_{k,i} = 0, \\ \bar{y}_{k,i} = \sqrt{x_{k,i}^2 + y_{k,i}^2}. \end{cases} \tag{2}$$

其中：$\lambda_i = \arctan(y_{k,i}/x_{k,i})$.

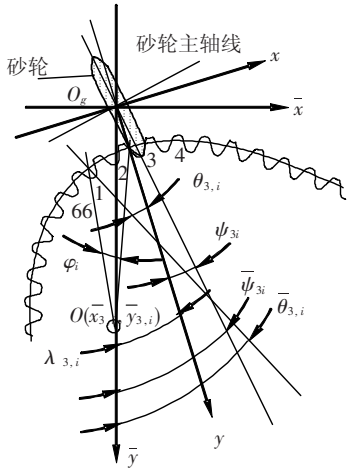

图 5　四轴磨齿到三轴磨齿的运动转化图

5 结 论

1)提出了在国内已有的非圆齿轮三轴插齿机床上增加磨头的形式来实现非圆齿轮磨齿.

2)考虑到插齿机没有 Z 轴控制运动的实际情况,解决了在不用抬刀、不产生干涉情况下的磨削分度问题,并给出了由四轴磨削运动到三轴磨削运动的转化公式.

3)对非圆齿轮磨齿加工原理在现实中的应用进行了理论研究,使非圆齿轮磨齿加工成为可能,有利于非圆齿轮在精度要求高的场合中应用.

参考文献:

[1] 贺敬良,李建刚. 非圆齿轮的成形砂轮展成磨削原理研究[J]. 农业机械学报,2007,38(10):145 – 149.

[2] 李建刚,吴序堂,李泽湘. 基于插齿模型的非圆齿轮根切分析[J]. 农业机械学报,2007,38(8):138 – 142.

[3] 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮及非匀速传动[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

[4] 吴序堂. 齿轮啮合原理[M]. 北京:机械工业出版社,1983.

[5] 李建刚,吴序堂,毛世民,等. 非圆齿轮齿廓数值计算的研究[J]. 西安交通大学学报,2005,39(1):75 – 78.

[6] HORIUCHI Y. On the gear theory suggested by leibnits-the analysis of non-circular gears-Bull[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1989,23(2):146 – 151.

[7] LITVIN F L. Gear geometry and applied theory[M]. New York: Prentice-Hall, 1994: 103 – 145.

[8] KATORI H, HAYASHI T. Simplified synthetic design method of pitch curves and tooth profiles for noncircular gears[C]//Proceedings of 1989 International Power Transmission Gearing Conference on New Technological Power Transmission 90´s. Chicago, Illinois:[s. n.], 1989: 527 – 532.

[9] DOONER D B. Use of noncircular gears to reduce torque and speed fluctuations in rotating shafts[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1997,119(3): 299 – 306.

[10] CHANG S L, TSAY C B. Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters[J]. Mechanism and Machine Theory, 1996, 31(7):879 – 890.

[11] SHIH-HIS T, DANIEL C H. Yong. Generation of identical noncircular pitch curves[J]. Mechanical Design, 1998 (2):337 – 341.

[12] CLEGHORN W L, SHOW E C. Computer analysis of continuously variable transmissions using noncircular gears[J]. Transactions of the CSME, 1987,11(2):113 – 120.

(编辑 杨 波)

(上接第 1743 页)

[3] LI J G, ZHAO H, YAO Y X, *et al.* Off-line optimization on NC machining based on virtual machining [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(9 – 10): 908 – 917.

[4] 张臣,周来水,余湛悦. 基于仿真数据的数控铣削加工多目标变参数优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 1039 – 1045.

[5] SRINIVAS J, GIRI R, YANG S H. Optimization of multi – pass turning using particle swarm intelligence [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(1 – 2): 56 – 66.

[6] SARAVANAN R, ASOKAN P, VIJAYAKUMAR K. Machining parameters optimization for turning cylindrical stock into a continuous finished profile using genetic algorithm (GA) and simulated annealing (SA) [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(7): 1 – 9.

[7] ONWUBOLU G C, KUMALO T. Multi-pass turning operations optimization based on genetic algorithms [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215: 117 – 124.

[8] 李建广,姚英学,刘长清,等. 面向车削用量优化的遗传算法研究[J]. 计算机集成制造系统 – CIMS, 2006, 12(10): 1651 – 1656.

[9] ALTINTAS Y, MERDOL S D. Virtual high performane milling [J]. Annals of the CIRP, 2007, 56(1): 81 – 84.

[10] LI J. G, LEE W B, YAO Y X, *et al.* Workpiece representation for virtual turning [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25 (9/10): 857 – 866.

(编辑 杨 波)