

文章编号:1674-8190(2018)03-388-08

航空齿轮磨削加工安装偏心误差补偿研究

王鹏,王莹,汪鼎,田莹

(西安航空学院 机械工程学院,西安 710077)

摘要:磨齿加工时齿坯几何中心与回转工作台轴心存在安装偏心误差,降低了磨齿加工精度。以数控成型砂轮磨齿机工作原理为基础,建立偏心误差磨削加工几何模型;提出安装偏心误差补偿法,建立偏心误差补偿数学模型,通过数学模型求出磨削砂轮在X、Y两个方向的进给补偿增量;以YK73125数控成型砂轮磨齿机为例,进行安装偏心误差补偿实验,齿轮的左右齿面单个齿距极限偏差绝对值分别减小了 $0.9\ \mu\text{m}$ 和 $1.6\ \mu\text{m}$,齿距累积总偏差绝对值分别减小了 $49.6\ \mu\text{m}$ 和 $43.3\ \mu\text{m}$ 。结果表明:安装偏心误差与单个齿距偏差和齿距累积总偏差成正比;采用安装偏心误差补偿进行磨齿加工,有效地减小了单个齿距偏差和齿距累积总偏差,齿轮的精度有所提高。

关键词:高精度齿轮;磨齿加工;单个齿距偏差;齿距累积总偏差;安装偏心误差补偿

中图分类号:TH161⁺.11

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.013

Research on Eccentric Error Compensation of Aviation Gear Grinding Installation

Wang Peng, Wang Ying, Wang Ding, Tian Ying

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: There is eccentric error between the geometric center of the gear blank and the axis of the rotary table during the gear grinding process. The machining precision of grinding tooth accuracy is reduced. According to the working principle of computer numerical control(CNC)grinding wheel grinding machine, the eccentric error geometric model is built. The compensation method of installation eccentricity error is put forward. The mathematical model of offset error compensation is established. The feed compensation increment of the grinding wheel in the two directions of X and Y is obtained through the mathematical model. Taking the YK73125 CNC grinding wheel grinding machine as an example, the eccentric error compensation experiment is carried out. The single pitch limit deviation is reduced by 0.9 and 1.6 on left and right tooth surfaces. The total cumulative pitch error is reduced by 49.6 and 43.3 on left and right tooth surfaces. The results show that the eccentric error of the installation is proportional to the deviation from the single pitch and the total cumulative deviation of the tooth distance. The experimental results show that the installation eccentricity error compensation for gear grinding can effectively reduce the total deviation of the single pitch deviation and the cumulative tooth distance. The precision of gear grinding is improved.

Key words: high precision gear; grinding machining; single tooth pitch deviation; tooth pitch cumulative total deviation; installation eccentric error compensation

0 引言

齿轮是现代机械中应用最广泛的传动零件。它具有传动平稳和传动比准确等优点,也是航空发动机中的重要零件。航空发动机中的齿轮制造精

度直接影响其传动的性能和安全^[1],因此航空齿轮都属于高精度齿轮。磨齿加工是获得高精度齿轮常用的加工方法,数控成型磨齿机是磨齿加工的重要装备^[2]。

关于如何提高成型砂轮磨齿加工的精度,国内外学者进行了很多研究。国外,N. Yoshino 等^[3]提出了修正砂轮廓形和试算砂轮位置两种齿廓偏差补偿方法,提高齿轮磨削精度;Y. Kobayash 等^[4]建立了由齿廓偏差求解砂轮安装误差的数学模型来进行砂轮廓形修整,提高磨齿精度;S. R. Park 等^[5]基于齐次坐标变换提出一种制造机床的综合误差建模方法;A. W. Khan 等^[6]和 Zhao Y 等^[7]采用变换矩阵、解析二次型、多体系统运动学解决磨齿机制造误差的问题。国内,李平等^[8]、宋洪侠等^[9]、和张虎等^[10]研究了磨齿过程中安装偏心误差与齿廓误差的关系,减小了齿轮齿廓误差;张立功等^[11]分析了成形法对磨削斜齿轮的齿形误差的影响;李国龙等^[12]针对拓扑修形齿轮的成形磨削误差提出了一种砂轮廓形优化方法;Yu Chunjian 等^[13-14]针对物理场中耦合条件下的重型数控回转工作台的动静态精度进行了系统研究;石枫^[15]论述了合理选择磨齿余量的形式、磨齿余量等因素是提高磨齿质量的基本条件以及蜗杆砂轮对中性对被加工齿轮齿形对称性的影响;梅军炎等^[16]通过磨齿方法进而提高磨齿质量。综上所述,针对如何提高磨齿精度国内外的研究主要集中在磨齿余量,工装夹具、降低磨齿机的安装制造误差,提高回转工作台精度,修整砂轮刀具廓形等方面,对于如何在磨齿加工过程中在线减小齿轮误差研究较少。

本文以成型砂轮磨齿机的工作原理为基础,针对直齿圆柱齿轮磨削加工时安装偏心误差对单个齿距偏差和齿距累积总偏差的影响,提出磨齿加工时通过成型砂轮在 x 、 y 方向的进给补偿增量来减小齿轮的单个齿距偏差和齿距累积总偏差,以期减小齿轮误差,提高齿轮传动的精度。

1 砂轮成型磨齿加工原理

磨齿加工是提高齿轮精度的常见工艺,磨齿机是磨齿加工的常用设备。目前我国多采用数控成型砂轮磨齿机进行磨齿加工,数控砂轮成型砂轮磨齿机示意图如图 1 所示。数控转台沿 C 轴方向的

旋转实现工件(齿坯)分度转动; x 轴方向实现砂轮架的进给和快退,磨齿加工中砂轮架进给运动称为径向运动; z 轴方向实现砂轮在被加工齿轮齿向的往复运动; y 轴方向实现砂轮架切向运动,保证砂轮始终用新的面来磨削工件。在磨斜齿轮时,砂轮需要倾斜一个螺旋角,通过滑座沿 A 轴的旋转来实现。其中 z 轴和 C 轴属于磨削运动轴, y 轴属于砂轮修整轴, x 轴主要用于磨削工件进刀时使用。当进行磨削时, z 轴和 C 轴形成联动关系,砂轮的轴线与齿坯的轴线垂直,砂轮截形的中心线与齿槽截形中心线重合,利用成型的砂轮廓形磨削轮齿的渐开线齿廓。

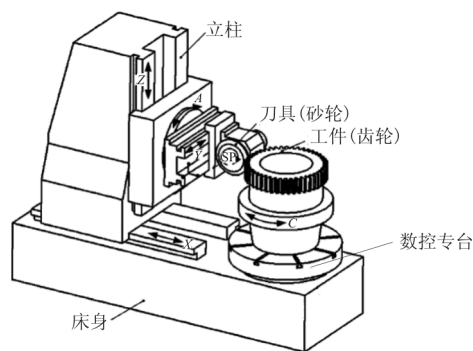


图 1 数控砂轮成型磨齿机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CNC grinding machine for grinding wheel

2 齿坯安装偏心误差对磨齿精度的影响

磨齿精度取决于磨齿机的制造精度、砂轮刀具的廓形精度以及齿坯的安装精度。本文主要研究齿坯的安装精度对磨齿精度的影响。齿轮传动最基本的要求是传动平稳、瞬时传动比准确。在齿轮的各项误差指标中,传动的平稳性和传动比准确性主要由轮齿的单个齿距偏差和齿距累积总偏差决定的。

在齿轮端平面上,以齿坯中心为圆心,圆心到齿高中部的距离为半径存在一个圆称为实际分度圆。实际分度圆截得相邻两轮齿同侧齿面间所对应的弧长称为实际齿距。实际齿距与理论齿距的差值称为单个齿距偏差 f_{pt} ^[17],它反映了一个齿距角内的分度精度以及轮齿在圆周上分布的均匀性。齿距累积总偏差 F_p 是指在齿轮同侧齿面任意弧长($k=1$ 至 $k=z$)内的最大齿距累积偏差,它表现

为齿距累积偏差曲线的总幅度值, F_p 为绝对值^[18], 它反映了齿轮旋转一圈的转角误差以及一圈内传动比最大变动量。

综上所述, 单个齿距偏差 f_{pt} 是指两个轮齿间同侧齿面上在分度圆上弧长尺寸的偏差, 影响齿轮传动的平稳性。齿距累积总偏差 F_p 是指单个齿距偏差累积起来产生的总偏差, 影响齿轮传动比的准确性。齿距累积总偏差是由每个轮齿的单个齿距偏差共同作用引起的。

磨齿加工时, 齿坯安装在回转工作台上, 因存在齿坯精度误差, 回转工作台制造误差和人为安装误差, 导致齿坯的几何中心与数控回转工作台的回转中心存在偏心误差。偏心误差加工模型如图 2 所示。其齿坯几何中心 O_1 与数控回转台的中心 O 有安装偏心 e_j 。实线圆为加工节圆, 虚线圆为理论节圆。理论节圆上的轮齿应均匀分布, 但加工时由于齿坯安装偏心误差的存在, 导致轮齿在加工节圆上均匀分布。假设在切削节圆的中心角 θ 范围内, 均匀分布 k 个轮齿, 因理论节圆与加工节圆不重合, 轮齿在理论节圆分布不均匀, 产生单个齿距偏差和齿距累积总偏差, 降低了齿轮精度。

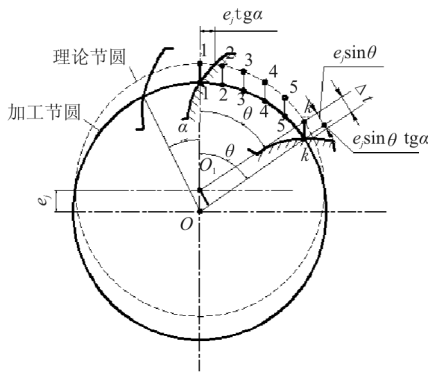


图 2 偏心误差加工模型
Fig. 2 Eccentricity error machining model

以“左齿面”为例, 分析理论节圆上的实际位置与其理论位置之间的差距。由图 2 可知, 在理论节圆上, e_j 值很小, 近似由弧长代替, 第一个齿实际位置与理论位置相距弧长近似等于 $e_j \operatorname{tg} \alpha$ 。因此, 第 k 个齿的实际位置与理论位置相距弧长为

$$\Delta t = e_j \sin \theta + e_j \cos \theta \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

式中: e_j 为偏心误差; α 单位为分 (文中 α 单位与此相同)。

当式(1)等于 0 时, 即 $\Delta t = e_j \sin \theta + e_j \cos \theta \operatorname{tg} \alpha =$

0, 可得 $\operatorname{tg} \theta = -\operatorname{tg} \alpha$ 。当 $\theta = -\alpha$ 或 $\theta = \pi - \alpha$ 时, $\Delta t = 0$, 则该轮齿“左齿面”在理论节圆上的实际位置与理论位置是重合的。

对式(1)式进行微分, 即, $\frac{d}{d\theta}(\Delta t) = e_j(\cos \theta - \sin \theta \operatorname{tg} \alpha)$, 并令其为 0, 则可得: $\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$ 。

当 $\theta = 90^\circ - \alpha$ 或 $\theta = 270^\circ$ 时, Δt 为最大值或最小值, 则该轮齿“左齿面”在理论节圆上的实际位置与理论位置相差最大。当 $\theta = 90^\circ - \alpha$ 时, $\sin \theta = \cos \alpha$, 而 $\cos \theta = \sin \alpha$, 将其带入式(1)得: $\Delta t_{\max} = e_j(\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha) = \frac{\pm e_j}{\cos \alpha}$ 。

同理, 当 $\theta = 270^\circ - \alpha$ 时, $\sin \theta = -\cos \alpha$, 而 $\cos \theta = -\sin \alpha$, 带入式(1), 得: $\Delta t_{\min} = \frac{\pm e_j}{\cos \alpha}$, 所以当存在偏心误差时, 齿距累积总偏差为式(2)。

$$\Delta t_{\Sigma} = |\Delta t_{\max}| + |\Delta t_{\min}| = \frac{2}{\cos \alpha} e_j \quad (2)$$

当 $\alpha = 20^\circ$ 时, $\Delta t_{\Sigma} = 2.13 e_j$, 将 Δt_{\max} 的 e_j 带入式(1), 可得:

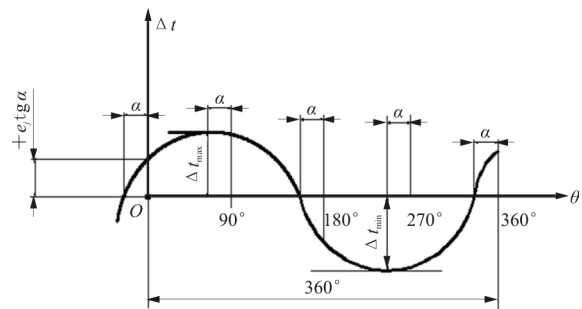
$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta t_{\max}(\cos \alpha \sin \theta + \cos \theta \sin \alpha) \\ &= \Delta t_{\max} \sin(\theta + \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)表示轮齿“左齿面”的累积偏差, 即它们在理论节圆上的实际位置与理论位置之间相距的弧长。

同理, “右齿面”的累积偏差为式(4)。

$$\Delta t = \Delta t_{\max} \sin(\theta - \alpha) \quad (4)$$

在式(3)和式(4)中, $\Delta t_{\max} = e_j / \cos \alpha$ 。齿距累积总偏差曲线, 如图 3 所示。其中, 图(a)中的 y 轴 Δt 表示各齿“左齿面”的齿距累积总偏差, 图(b)中的 y 轴 Δt 表示“右齿面”的齿距累积总偏差, x 轴 θ 表示相位角。



(a) 左齿面

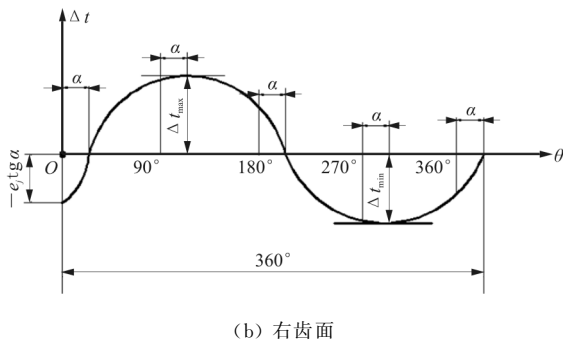


图 3 齿距累积总偏差曲线
Fig. 3 Cumulative total deviation curve of pitch

偏心距对于齿距累积总偏差以最大齿距差作为振幅呈三角函数变化,各齿的次序以相位角 θ 表示,其波峰值和波谷值均为最大和最小的齿距差。安装位置和齿轮参数决定了压力角 α 和初相位 θ ^[19-20]。

由于单个齿距偏差影响齿轮传动的平稳性,同时影响齿距累积总偏差,而齿距累积总偏差影响齿轮传动比的正确性。由式(2)可知,当压力角 α 一定时,齿距累积总偏差与安装偏心误差 e_j 成正比关系。因此,当齿坯安装偏心误差增大时,导致磨齿加工时单个齿距偏差和齿距累积总偏差增加,降低了齿轮精度以及传动的平稳性和传动比的准确性。本文提出磨削加工偏心误差补偿法,以期提高齿轮传动精度。

3 磨削加工偏心误差补偿

磨齿加工时,齿坯存在偏心,砂轮刀具相对齿坯孔轴心线的径向距离和切向距离产生变化,因此需要调整砂轮在 x 轴、 y 轴方向上的进给量。以机床的固定中 O 为坐标原点, Ox 为径向运动轴 (x 轴), Oy 为砂轮轴向进给轴 (y 轴)。偏心磨削加工轮齿分布图,如图 4 所示。

第一个齿的加工,齿坯是以 O_1 为圆心,砂轮在 p_1f 的位置,砂轮的径向位置与齿坯的几何圆心、机床工作台的旋转中心 O 在同一条直线上。所以在此位置,砂轮在 x 轴方向上和 y 轴方向上的进给增量应分别为: $\Delta x_1 = e, \Delta y_1 = 0$ 。然后工作台旋转轴 C 轴转过一个分度角 ϕ (齿轮在分度过程中逆时针旋转),开始第二个齿加工,在齿坯安装无偏心的情况下,砂轮进给方向必须要求和工件的直

径方向一致,而且总是在 x 轴上。存在偏心距 e 的情况下,如果砂轮进给方向仍然保持在 x 轴方向上不变,磨削加工的轮齿是不准确的,应对砂轮的位置调整,使得砂轮沿切向轴方向,到达 p_2m 的位置,且在 x 轴方向上和齿坯的圆心 O_2 在同一水平位置。因此,砂轮在 x 轴方向上和 y 轴方向上的进给增量为: $\Delta x_2 = e \cos \phi, \Delta y_2 = e \sin \phi$ 。加工到第三个齿时,砂轮在 x 轴方向上和 y 轴方向上的进给增量分别为: $\Delta x_3 = e \cos 2\phi, \Delta y_3 = e \sin 2\phi$ 。由此类推,加工第 k 个齿时,砂轮在 x 轴方向上和 y 轴方向上的进给增量为式(5)。

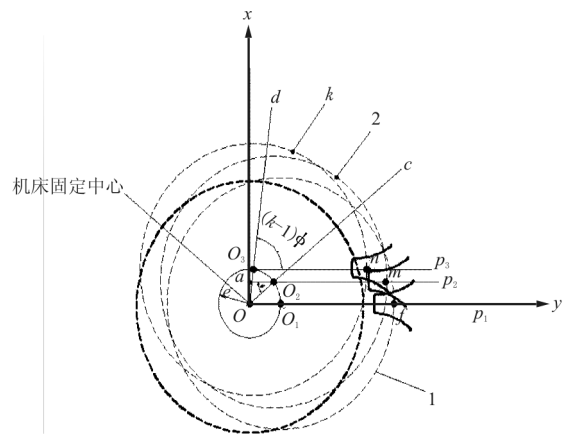


图 4 偏心磨齿加工轮齿分布图
Fig. 4 Gear distribution of eccentric gear grinding

$$\begin{cases} \Delta x_k = e \cos(k-1)\phi \\ \Delta y_k = e \sin(k-1)\phi \end{cases} \quad (5)$$

由于几何偏心的方向与磨削加工方向的起始位置之间存在夹角 θ ,引入矢量 e 对砂轮磨削起始点的初始相位角 θ ,得到齿坯安装偏心引起的砂轮在 x 轴方向上进给增量 Δx 和 y 轴方向上进给增量 Δy 的进给增量的关系表达式(式(6))。

$$\begin{cases} \Delta x = e \cos[(k-1)\phi - \theta] \\ \Delta y = e \sin[(k-1)\phi - \theta] \end{cases} \quad (6)$$

式中: e 为偏心量; θ 为初始相位角; ϕ 为分度角 ($360/z$); Δx 为 x 轴的进给增量; Δy 为 y 轴的进给增量。

从式(6)可以看出:砂轮 x 轴方向进给增量以几何偏心 e 为振幅呈余弦变化, y 轴方向进给增量以几何偏心 e 为振幅呈正弦变化。通过式(6)可以计算成型砂轮在 x 轴和 y 轴方向上进给补偿增量 Δx 和 Δy 。

4 磨齿加工偏心误差补偿实验

在 YK73125 数控成形磨齿机的 CAM 系统中,嵌入齿坯安装偏心误差补偿模块,用户测量并输入安装偏心误差 e ,在 CAM 系统中计算砂轮在 x, y 两轴方向上进给补偿增量的 Δx 和 Δy ,完成偏心误差补偿磨齿加工。

4.1 普通砂轮成型磨齿实验

利用 YK73125 数控成型砂轮磨齿机进行磨齿实验,加工齿轮精度可达到 5 级标准,磨齿机要求安装偏心距小于 0.004 mm。待加工标准渐开线,直齿圆柱齿轮主要参数: $Z=35, m=16$,实际测量安装偏心误差 0.003 mm,安装偏心误差满足磨齿机要求,未采用偏心误差补偿进行磨齿加工,对每个轮齿的左右齿面进行测量,测量结果如图 5~图 6 所示。

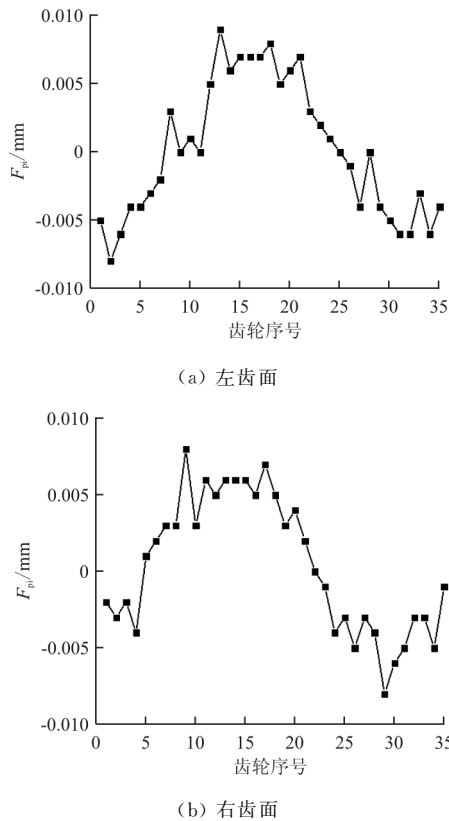
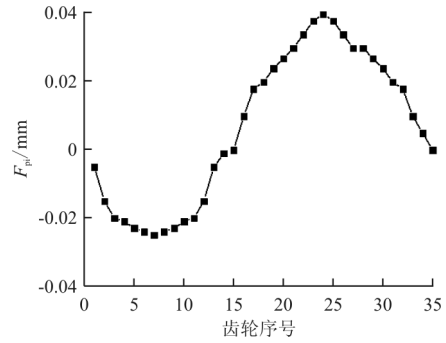
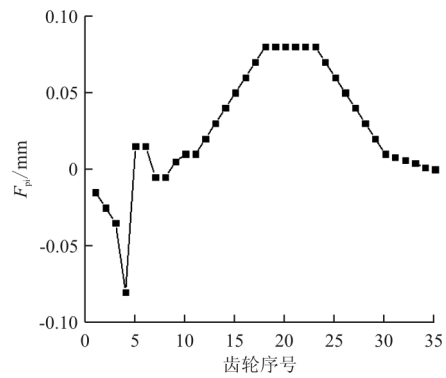


图 5 单个齿距偏差

Fig. 5 Single pitch error



(a) 左齿面



(b) 右齿面

图 6 齿距累积总偏差

Fig. 6 Accumulation error of tooth spacing

通过实验数据进行计算,左齿面单个齿距极限偏差 $f_p=8.5 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差 $F_p=65.4 \mu\text{m}$;右齿单个齿距极限偏差 $f_p=-7.7 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差 $F_p=66 \mu\text{m}$ 。

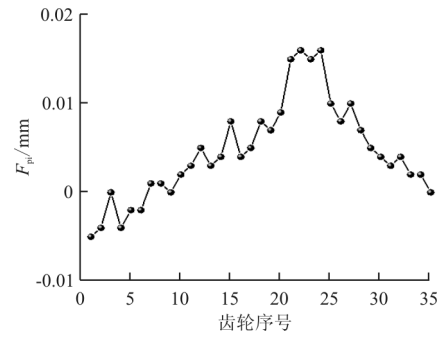
4.2 偏心误差补偿磨齿实验

采用偏心误差补偿加工相同参数的齿轮,为了体现补偿效果,实验采用较大的偏心距。测量安装偏心距 $e=0.036 \text{ mm}$ 。根据砂轮进给增量表达式,在 CAM 系统中进行进给增量补偿计算,得到磨削 35 个齿的进给补偿增量 $\Delta x_i, \Delta y_i$,如表 1 所示。通过 35 个齿的进给补偿增量 $\Delta x_i, \Delta y_i$,采用偏心误差补偿进行磨齿。测量结果如图 7~图 8 所示。

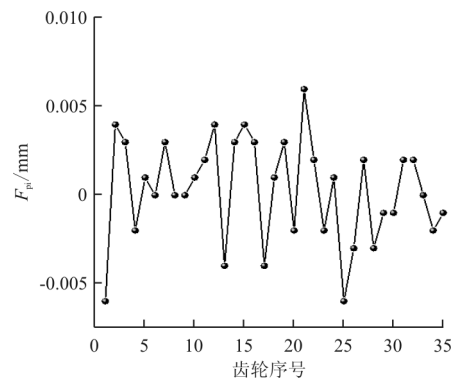
表 1 进给补偿增量表

Table 1 Feed compensation increment

序号	x 轴增量 $\Delta x_i/\mu\text{m}$	y 轴增量 $\Delta y_i/\mu\text{m}$
1	0.036 0	0.000 0
2	0.035 4	0.006 4
3	0.033 7	0.012 7
4	0.030 9	0.018 5
5	0.027 1	0.023 7
6	0.022 4	0.028 1
7	0.017 1	0.031 7
8	0.011 1	0.034 2
9	0.004 8	0.035 7
10	-0.001 6	0.036 0
11	-0.008 0	0.035 1
12	-0.014 2	0.033 1
13	-0.019 8	0.030 0
14	-0.024 9	0.026 0
15	-0.029 1	0.021 2
16	-0.032 4	0.015 6
17	-0.034 7	0.009 6
18	-0.035 9	0.003 2
19	-0.035 9	-0.003 2
20	-0.034 7	-0.009 6
21	-0.032 4	-0.015 6
22	-0.029 1	-0.021 2
23	-0.024 9	-0.026 0
24	-0.019 8	-0.030 0
25	-0.014 1	-0.033 1
26	-0.008 0	-0.035 1
27	-0.001 6	-0.036 0
28	0.004 8	-0.035 7
29	0.011 1	-0.034 2
30	0.017 1	-0.031 7
31	0.022 4	-0.028 1
32	0.027 1	-0.023 7
33	0.030 9	-0.018 5
34	0.033 7	-0.012 6
35	0.035 4	-0.006 4



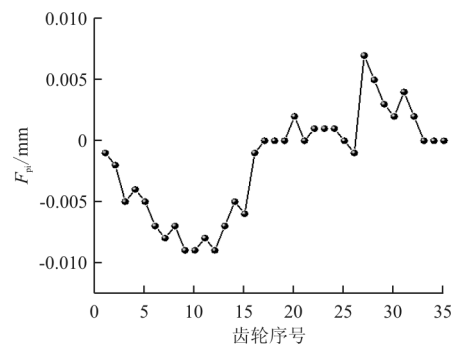
(a) 左齿面



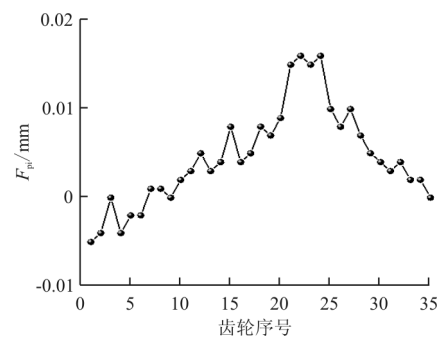
(b) 右齿面

图 7 单个齿距偏差

Fig. 7 Single pitch error



(a) 左齿面



(b) 右齿面

图 8 齿距累积总偏差

Fig. 8 Accumulation error of tooth spacing

通过实验数据进行计算,左齿面单个齿距极限偏差 $f_p=7.6 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差 $F_p=15.8 \mu\text{m}$;右齿面单个齿距极限偏差 $f_p=6.1 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差 $F_p=22.7 \mu\text{m}$ 。

4.3 实验结果分析

通过对上述左右齿面的齿距累积总偏差(F_p)和单个齿距偏差(f_p)的测量曲线分析计算,得到的实验测量数据,如表2所示。

表2 实验测量数据

Table 2 Experimental measurement data

测量位置	测量数据			
	未采用偏心补偿		采用偏心补偿	
左齿面	$F_p=65.4 \mu\text{m}$	$f_p=8.5 \mu\text{m}$	$F_p=15.8 \mu\text{m}$	$f_p=7.6 \mu\text{m}$
右齿面	$F_p=66.0 \mu\text{m}$	$f_p=-7.7 \mu\text{m}$	$F_p=22.7 \mu\text{m}$	$f_p=6.1 \mu\text{m}$

从表2可以看出:采用偏心误差补偿加工,左右齿面单个齿距极限偏差和齿距累积总偏差与未采用补偿加工相比较,左右齿面单个齿距极限偏差和齿距累积总偏差的绝对值有了显著减小,表明安装偏心误差对磨齿加工的误差存在显著影响。

同时,从表2可以看出:存在较大偏心误差的情况下,采用偏心误差补偿进行磨齿。齿轮的左齿面单个齿距极限偏差绝对值减小了 $0.9 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差减小了 $49.6 \mu\text{m}$;右齿面单个齿距极限偏差绝对值减小了 $1.6 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差减小了 $43.3 \mu\text{m}$ 。采用偏心误差补偿进行磨齿,可以减小单个齿距极限偏差和齿距累积总偏差。

根据 ISO1328 标准查得:5级精度标准直齿圆柱齿轮,模数 $m=16$,齿数 $Z=35$,分度圆直径 $D=560 \text{ mm}$,齿距累积总偏差 $F_p=36.0 \mu\text{m}$,单个齿距极限偏差 $f_p=10.0 \mu\text{m}$ 。未补偿的磨齿加工,导致齿轮左右两个齿面齿距累积总偏差 F_p ,左齿面单个齿距极限偏差 f_p 均未能达到5级精度标准。采用安装偏心误差补偿的方法进行磨齿,所得齿轮的单个齿距极限偏差和齿距累积总偏差均可达到5级精度标准要求。

5 结论

(1) 本文以数控成型砂轮磨齿机工作原理为基础,建立了安装偏心误差加工几何模型,当齿轮压力角 α 一定时,单个齿距误差和齿距累积总偏差与安装偏心误差 e_j 成正比关系。当齿坯安装偏心误差增大时,导致磨齿加工时单个齿距偏差和齿距累积总偏差增加,降低齿轮精度。

(2) 本文提出了基于磨齿加工的安装偏心误差补偿法,建立了磨齿加工偏心误差补偿数学模型,通过计算得出磨齿加工时成型砂轮径向和切向的进给补偿增量。磨齿加工时,调整砂轮的进给补偿增量,可减小被加工齿轮的单个齿距偏差和齿距累积总偏差。

(3) 通过 YK73125 数控成型砂轮磨齿机进行偏心误差补偿实验,齿轮的左右齿面单个齿距极限偏差绝对值分别减小了 $0.9 \mu\text{m}$ 和 $1.6 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差绝对值分别减小了 $49.6 \mu\text{m}$ 和 $43.3 \mu\text{m}$ 。采用偏心误差补偿法进行磨齿加工减小了安装偏心误差对齿轮精度的影响,提高了齿轮精度,从而为高精度航空齿轮的磨削加工提供了可靠的理论支持。

参考文献

- [1] 王曦,赵兴龙.航空齿轮类零件加工工艺研究[J].金属加工(冷加工),2015(19):22-23.
Wang Xi, Zhao Xinglong. Research on machining technology of aviation gear parts[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2015(19): 22-23. (in Chinese)
- [2] 韩飞飞,赵继,张雷,等.数控机床几何精度综合解析与试验研究[J].机械工程学报,2012,48(21):141-148.
Han Feifei, Zhao Ji, Zhang Lei, et al. Synthetical analysis and experimental study of the geometric accuracy of CNC machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 141-148. (in Chinese)
- [3] Yoshino N, Ikeno K. Error compensation for form grinding of gear[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1991, 57(543): 3652-3655.
- [4] Kobayashi Y, Nishida N, Ougiya Y. An estimation of grinding wheel setting error in helical gear process by form grinding[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers,

- 1997, 63(612): 2852-2858.
- [5] Park S R, Hoang T K, Yang S H. A new optical measurement system for determining the geometrical error of rotary axis of a 5-axis miniaturized machine tool[J]. Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 24(1): 175-179.
- [6] Khan A W, Chen Wuyi. Systematic geometric error modeling for workspace volumetric calibration of a 5-axis turbine blade grinding machine[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(5): 604-615. (in Chinese)
- [7] Zhao Y, Li T M, Tang X Q. Geometrics error modeling of machine tools based on screw theory[J]. Procedia Engineering, 2011, 24(8): 845-849.
- [8] 李平, 郭燕妮. 磨齿齿距累积误差的研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(6): 37-39.
- Li Ping, Guo Yanni. Research on the total cumulative pitch error of gear[J]. Machine tool & Hydraulics, 2008, 36(6): 37-39. (in Chinese)
- [9] 宋洪侠, 赵苏苏, 姜志峰, 等. 降低齿轮齿距累积偏差的方法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1796-1801.
- Song Hongxia, Zhao Susu, Lou Zhifeng, et al. Reduction of cumulative pitch deviation for gear in grinding machines[J]. Optics and Precision on Engineering, 2012, 20(8): 1796-1801. (in Chinese)
- [10] 张虎, 黄筱调, 袁鸿, 等. 砂轮位置对成形磨齿齿廓偏差的补偿[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1288-1295.
- Zhang hu, Huang Xiaodiao, Yuan hong, et al. Compensation for tooth profile deviations of gear profile grinding with grinding wheel position[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1288-1295. (in Chinese)
- [11] 张立功, 王军, 邓效忠. 成形法磨削斜齿轮的齿形误差分析[J]. 机械传动, 2009, 33(1): 73-75.
- Zhang Ligong, Wang Jun, Deng Xiaozhong. Tooth form error analysis of grinding helical gear by forming method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2009, 33(1): 73-75. (in Chinese)
- [12] 李国龙, 李先广, 刘飞, 等. 拓扑修形齿轮附加径向运动成形磨削中的砂轮廓形优化方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 155-162.
- Li Guolong, Li Xianguang, Liu fei, et al. Method of profile optimization of a form grinding wheel for grinding with additional radial motion of topologically modified gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 155-162. (in Chinese)
- [13] Yu Chunjian, Huang Xiaodiao, Fang Chenggang. Research on dynamic characteristics of NC rotary table considering leakage factors of its hydrostatic guideway[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 226(11): 2674-2685.
- [14] Yu Chunjian, Huang Xiaodiao, Fang Chenggang. Optimizing dynamic characteristics of NC rotary table based on electromechanical-hydraulic coupling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(4): 1081-1088.
- [15] 石枫. 探讨提高齿轮磨齿精度的途径[J]. 煤炭技术, 2013, 32(6): 230-232.
- Shi Feng. Analysis of ways of improving precision of gears grinding means[J]. Coal Technology, 2013, 32(6): 230-232. (in Chinese)
- [16] 梅军炎, 陈晓东. 浅析磨齿工艺常见齿形质量问题及其解决方法[J]. 国防制造技术, 2016(2): 47-48.
- Mei Junyan, Chen Xiaodong. Analysis of process and solutions about common tooth profile quality problems in grinding[J]. Defense Manufacturing Technology, 2016(2): 47-48. (in Chinese)
- [17] 刘岚岚, 周海, 赵熙平. 圆柱齿轮齿距偏差及检测的新旧标准差异性分析[J]. 机械工程师, 2004(6): 85-87.
- Liu Lanlan, Zhou Hai, Zhao Xiping. Analysis of difference between new and old standards for pitch deviation and detection of cylindrical gears[J]. Mechanical Engineer, 2004(6): 85-87. (in Chinese)
- [18] 高延新, 高金良. 渐开线圆柱齿轮精度国家新标准简介[J]. 机械工程师, 2002(12): 61-63.
- Gao Yanxin, Gao Jinliang. Brief introduction of new national standards for accuracy of involute cylindrical gears[J]. Mechanical Engineer, 2002(12): 61-63. (in Chinese)
- [19] 史恩秀, 田晓虹, 李永堂, 等. 渐开线圆柱齿轮齿形误差的测量与计算[J]. 太原科技大学学报, 2000, 21(1): 18-21.
- Shi Enxiu, Tian Xiaohong, Li Yongtang, et al. The measurement and calculating of the gear's profile[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2000, 21(1): 18-21. (in Chinese)
- [20] 高峰, 黄玉美, 王俊岭, 等. 数控成形砂轮磨齿机在机测量研究[J]. 制造技术与机床, 2006(1): 53-56.
- Gao Feng, Huang Yumei, Wang Junling, et al. Study on on-machine measurement for NC form gear grinding machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2006(1): 53-56. (in Chinese)

作者简介:

王 鹏(1983—),男,硕士,讲师。主要研究方向:机械设计与智能制造。

王 莹(1979—),女,博士,讲师。主要研究方向:机械设计与材料加工工程。

汪 鼎(1997—),男,本科生。主要研究方向:机械设计与制造。

田 莹(1994—),女,本科生。主要研究方向:机电系统控制。

(编辑:赵毓梅)