

# 基于磨削齿轮方式修整齿轮误差的分析\*

刘铁军<sup>1,2</sup>, 孙宝玉<sup>1\*</sup>, 张西龙<sup>1</sup>

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012;  
2. 长春奥普光电技术股份有限公司, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为解决常规齿轮加工过程中所产生的误差,将精密磨齿加工与先进检测技术应用到提高齿轮等级中,通过对造成齿轮加工误差因素的分析,建立了误差因素与齿轮精度指标之间的对应关系,并结合精密磨削齿轮的加工特点及优势,提出了采用精密磨削齿轮改进齿轮精度的方法,即在已有齿轮误差的前提下,结合实验,就其误差成因、磨齿原理、修整方法等方面提出了较为完善的改进办法,并对其进行修整,从而避免了该误差对传动机构精度的影响。研究表明:采用精密磨齿方式进行齿轮误差的修整,是有效提高齿轮精度的捷径,在常规方法等级基础上可以提高2~3个等级。

**关键词:** 齿轮;磨齿;误差;修整

中图分类号: TH132.41 文献标志码:A

文章编号: 1001-4551(2012)05-0506-06

## Analysis of modifying gear error based on grinding gear method

LIU Tie-jun<sup>1,2</sup>, SUN Bao-yu<sup>1</sup>, ZHANG Xi-long<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. Changchun UP Optotech Co., Ltd., Changchun 130033, China)

**Abstract:** To solve the generated error in normal gear processing, the precision grinding of gears processing and advanced detective technology were applied to increase the level of gear, the corresponding relationship between the error factors and gear precision index was established by analyzing the error factors in gear processing production. Combined with the precision grinding gears characteristics and advantages, the method that gear precision be improved by the precision grinding of gears was proposed. On the premise of the gear error, the causes of error, gear grinding principle, modifying method were suggested to get perfect improved method, thus the impact of transmission mechanism precision by the error was avoided. The results suggest that, using precision gear grinding ways to modify the error, it is the shortcut in effective improving the accuracy of the gear, on the basis of the conventional methods, it can improve the level of 2 to 3 grades.

**Key words:** gear; grinding; error; modify

## 0 引 言

渐开线圆柱齿轮传动误差包括各个齿轮的制造误差、齿轮副的安装误差和齿轮副的传动误差<sup>[1]</sup>。而在渐开线齿轮传动误差中,齿轮制造误差占据主要地位。齿轮制造误差包括刀具误差、机床误差、夹具误差、检测误差和其他非周期误差。随着齿轮精度理论的不进步,制造工业和测量技术的不断发展,对齿轮

精度的测量、可靠性和功能提出了新的要求,因此,减少或消除齿轮制造误差是精密齿轮制造的关键。

目前,减少齿轮制造误差的方法有两种:①利用先进的加工和检测设备有效提高齿轮精度;②采用有效的误差分析手段,分析误差产生的根源,运用现有技术手段和方法减小误差的产生<sup>[2]</sup>。其中,采用先进的磨削齿轮技术是获得高精度齿轮最为可靠的一种加工方式<sup>[3]</sup>,同时磨齿也是有效纠正常规齿轮加工中产生的

收稿日期:2011-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60574089);中科院长春光机所三期创新工程资助项目(057X22C050)

作者简介:刘铁军(1977-),男,吉林长春人,主要从事精密机械CAD/CAM/CAE方面的研究. E-mail:ljtomas@sina.com

通信联系人:孙宝玉,女,教授,博士. E-mail:wdysby1@163.com

各项齿轮误差,以及提高齿轮精度最直接的途径,且磨齿后的齿面表面粗糙度可达到  $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 。通常磨齿可以达到的精度等级为6~3级,由于各种相应误差的存在,实际可达到的精度等级约为6~4级<sup>[4]</sup>。

针对如何获得高精度齿轮的问题,本研究就齿轮制造误差的成因、精密磨齿的工作原理和齿轮误差的相应修整过程进行了讨论,提出了采用精密磨削齿轮改进齿轮精度的方法。

## 1 误差分析

在我国的齿轮测量标准中规定了若干个测量项目要求,齿轮误差与使用特性关系如图1所示。

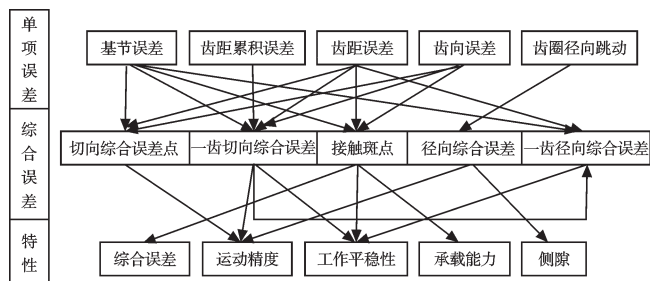


图1 齿轮误差与使用特性关系图

齿轮单项误差为最基本的误差,亦被称为原始误差,而综合误差是由各单项误差组合而成的。从图1中不难看出,齿轮单项误差在某种程度上直接影响齿轮综合误差的大小,并间接对齿轮的使用特性产生影响。所以,尽最大可能消除或修整齿轮的单项误差,能在一定程度上有效地控制齿轮的综合使用特性。

### 1.1 齿形误差

齿形误差是在端截面上,齿形工作部分内(齿顶倒棱部分除外)包容实际齿形且距离为最小的两条设计齿形间的法线距离。造成该误差的因素较多,包括砂轮的几何误差,即齿向、压力角、切削槽导程的修磨质量以及砂轮安装等因素的影响,但不受影响齿向其他精度等因素的干扰:

(1) 机床因素。刀具(砂轮)主轴和活动托座传动件磨损及工作台传动件的磨损以及砂轮与工作台同步的动态性能不好,均会造成不规则的齿形误差。

(2) 夹具因素。夹具的几何误差和夹具定心超差会造成工件径向跳动误差、轴向跳动误差或两者都有。工件径向跳动对齿形误差的斜坡成份影响很大。

(3) 砂轮因素。这是造成齿形误差最主要的因素。齿形是由多切削刃展成加工而成的,每片切削刃和它们与展成区域的相邻切削刃的几何关系都将影响齿形质量。用双头砂轮磨削齿轮,将直接影响齿形。另外,砂轮齿槽的数目对加工精密齿轮,特别是齿数较少的齿轮起着重要作用。砂轮齿槽越多,加工后的展成线

越密,由此可减小由展成法造成的固有齿形误差。

(4) 齿坯因素。包括:齿坯基准孔与夹具心轴之间的误差;心轴本身的径向跳动;齿坯端面与基准孔轴线的跳动误差;心轴中心与工作台回转中心不重合等<sup>[5]</sup>。

上述因素影响下得到未经修整的齿形如图2所示。

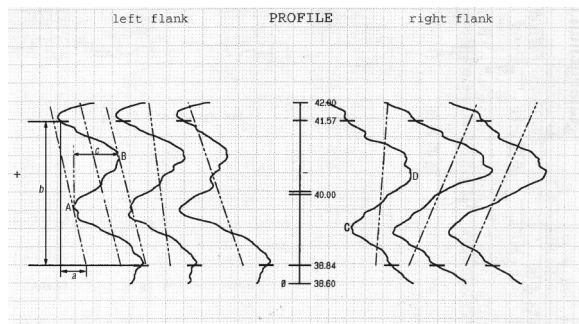


图2 修整前齿形图

a—齿廓的有效工作段;b—齿形的总体倾斜量;c—齿面的形状误差

### 1.2 齿向误差

齿向误差即在分度圆柱上,齿宽有效部分范围内(端部倒角部分除外),包括实际齿线的两条设计齿线之间的端面距离。影响该误差的因素为:

(1) 机床因素。

①机床的刀架导轨精度不够或磨损,立柱导轨精度不高,顶尖或顶尖机构设计不合理,以及工作台面水平性较差;

②加工斜齿轮时,差动挂轮误差大,差动传动链齿轮的制造误差和调整误差过大,或走刀丝杠间隙大,走刀窜动,则齿面易产生大的波纹。

(2) 夹具因素。工装、夹具制造、安装、调整精度过低。如工作台台面的垂直度和工件轴向跳动误差都会引起齿向摆动或锥度。综合考虑齿向因素,夹具是齿向影响较大的因素。

(3) 齿坯因素。齿坯的基准面对定位孔轴线的跳动过大。

在上述因素影响下得到的未经修整的齿向图如图3所示。

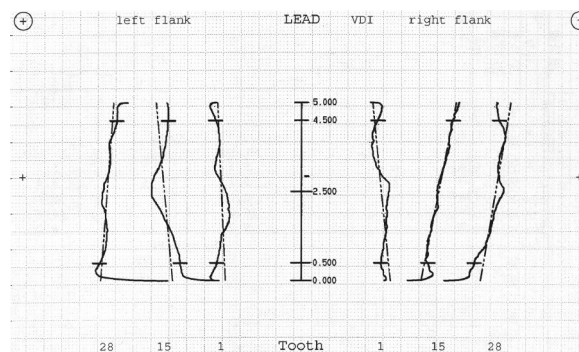


图3 修整前齿向图

### 1.3 周节累计误差

周节累计误差是在分度圆上任意两个同侧齿面间的实际弧长与公称弧长之差的最大值。周节累计误差主要包括齿圈径向跳动误差和公法线长度变动误差两个方面<sup>[6]</sup>。影响该误差的因素为：

(1) 齿圈径向跳动超差。

①齿坯几何偏心或安装偏心，齿坯几何偏心通常是齿坯孔的轴线与齿坯基准面的垂直度超差，以及齿坯外圆相对于齿坯孔轴线的同轴度超差，两者都会大大地影响齿圈径向跳动；

②用顶尖定位时，因顶尖或顶尖孔存在制造误差，使定位面接触不良而造成偏心。

(2) 公法线长度值超差，造成该误差的主要原因是设备精度问题，主要包括：机床分度蜗轮的精度过低；机床的工作台圆形导轨磨损；分度蜗轮与工作台圆形导轨不同轴。

## 2 修整方式

当齿轮进入啮合区和脱离啮合区时，由于存在齿轮制造误差以及受载变形等，这些因素引起齿轮角速度的变化，从而可对齿轮产生不良的冲击。这种冲击的产生，即使在高精度齿轮传动过程中也难以避免。若要减小传动中的冲击，有效途径之一是采用精密磨削齿轮修整方式，从而可有效地减少齿轮误差（特别要注意3个项目的精度控制，即周节累计误差、齿向误差、齿形误差）和受载变形等因素的产生，进而减少齿轮传动过程中的冲击。

理论上，按照齿廓形成的方法不同，精密磨齿可以分为成形法和展成法两大类，如表1所示。

通过对表1中磨齿类型的分析，蜗杆式砂轮磨齿是一种高效、高精度的齿轮加工方式，即采用蜗杆式砂轮与齿轮工件展成啮合的原理来磨削工件<sup>[7]</sup>，其工作

表1 磨齿类型及其方式对照表

类型	方式	优点	缺点
成形法磨齿		机床运动简单，生产效率高	砂轮修整复杂，磨齿过程中，砂轮磨损不均匀，加工精度不高
	单片锥形砂轮磨齿	砂轮刚性好，可采用大切削量，生产效率较高	精度提高受到限制
展成法磨齿	双片蝶形砂轮磨齿	机床运动简单，调整设备容易	生产效率最低，砂轮刚性较差，不宜采用较大的切削量
	蜗杆式砂轮磨齿	生产效率最高，展成运动和分齿运动是同时进行，没有空回时间	对砂轮的修整要求较高

原理(如图4所示)是：砂轮相当于渐开线的蜗杆，工件沿自己的轴线进给，工件与砂轮按照传动比各自围绕自己的轴线回转。该加工方式更适合对已存在的齿轮误差进行修整，本研究将主要采用该方式对齿轮误差进行修整。

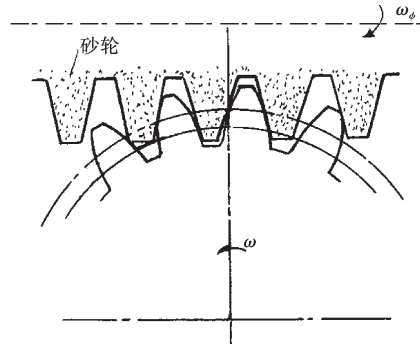


图4 磨齿工作原理示意图

### 2.1 齿形修整方式

修整齿向和齿距误差通常比修整齿形误差更容易。事实上，经磨齿修整后齿向和齿距精度可达4级以上或更好，而齿形精度很难达到4级以上。所以在对齿形修整时，使其齿廓尽量逼近理论齿廓。齿形修整包括修缘、修根和挖根等方法<sup>[8-9]</sup>。

#### 2.1.1 减小齿形的总体倾斜量

通过图2可知，齿形的总体倾斜量*b*较大，齿形曲线底部的倾斜角度明显大于顶部的倾斜角度，说明齿轮压力角存在误差。A、D点在齿面上表现为凹陷部位，而B、C点在齿面上表现为凸起部位，这些缺陷主要由砂轮不平衡摆振和砂轮齿距误差所引起的共同合成误差<sup>[10]</sup>。

可将齿形的误差分解为*a*和*c*两部分。为减小齿轮各个单项基本误差的产生，通常采用下列方法分析齿廓的有效工作段*a*引起的相关误差。

齿形误差计算：

$$\Delta f_0 = \pi \times \varepsilon \times m \times \Delta \alpha_f \times \sin \alpha \quad (1)$$

式中： $\Delta f_0$ —齿形误差， $\varepsilon$ —砂轮与齿轮工作面重合度， $\Delta \alpha_f$ —压力角偏差， $m$ —齿轮的模数， $\alpha$ —压力角。

修整齿形误差时磨齿设备的头架调整角度计算方法：

$$\Delta \alpha_n = -\frac{a}{s \times \operatorname{tg} \alpha} \quad (2)$$

式中： $s$ —测量齿形基圆展开长度， $\Delta \alpha_n$ —机床头架安装角。

实践结果表明：当室温下降时， $\alpha_n$ 要调小；当室温上升时， $\alpha_n$ 要调大。

#### 2.1.2 减小齿面的形状误差*c*

减小齿面的形状误差*c*，首先要保证砂轮的工作质



量,即精磨用的砂轮要精确平衡,修整砂轮时,金刚石刀的吃刀深度为  $3\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 。修整砂轮时,笔者相应地对砂轮作出精度调整,修整流程如下:

砂轮平衡→粗滚压→砂轮精平衡→金刚石刀附件修整→精滚压。

经过调整,可以测得砂轮及砂轮修整器的误差对齿轮的齿形误差分配,如表2所示。

表2 修整器误差对砂轮齿形误差影响

修整器各项误差			误差值	比对
滚压轮齿形误差	金刚石修整偏心	滚压轮安装偏斜	误差总值	占齿形误差的百分比
$1'$	$4.3''$	$0.66'$	$3'$	57%

由表2可见,砂轮修整机构误差造成齿形误差占齿形总体误差的50%以上,经过上述分析与调整,最终得到修整后的齿形如图5所示,其精度达到修整目的。

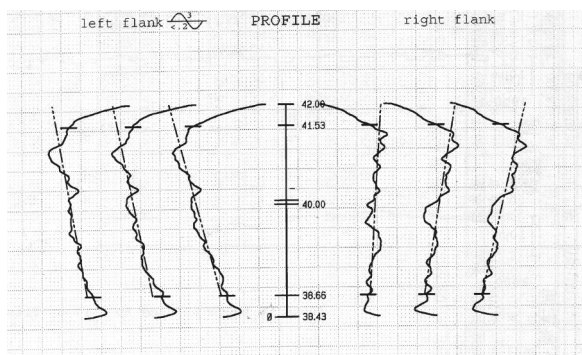


图5 修整后齿形图

## 2.2 齿向修整方式

沿齿线方向修整齿面,修整时使其齿面逼近理论齿面。通过齿向修整可以改善载荷沿齿轮接触线的不均匀分布现象,提高齿轮承载能力。齿向修整的方法主要有齿端修薄、螺旋修整、鼓形修整和曲面修整等:

(1) 齿顶修薄。对齿轮的一端或两端在一小段齿宽上将齿厚向顶部逐渐削薄,该方法是最简单的修整方法,效果较差。

(2) 螺旋修整。修整齿向或螺旋角的大小,使实际齿面位置接近理论的齿面位置。

(3) 鼓形修整。采用齿向修形是齿轮的齿宽中央鼓起,鼓形修整虽然能改善齿轮接触载荷不均匀分布,但是由于齿轮的两端载荷分布并不相同,误差也不完全按鼓形分布,其修整的效果并不理想。

(4) 曲面修整。特别考虑热变形,按照实际误差进行齿向修整,修整后的齿面不一定总是鼓起的,往往是凸凹相连的曲面,曲面的修正效果较为理想,但计算较为困难。

提高齿轮的齿向精度,首先应保证金刚石刀的刀架移动方向与砂轮回转线垂直;其次,减少齿轮心轴定位

端面对主轴回转轴线的摆动以及齿坯定位端面对定位孔几何中心线的摆动量。对图3进行分析,当齿向超差时,会造成齿宽方向上有效载荷负载不均,导致啮合齿轮中发生啮合歪曲,对齿轮轴有分量冲击载荷,特别是对齿距的累计误差影响最大。综上所述,本研究采用螺旋修整方法,最终得到修整后的齿向图如图6所示,其精度达到修整误差目的。

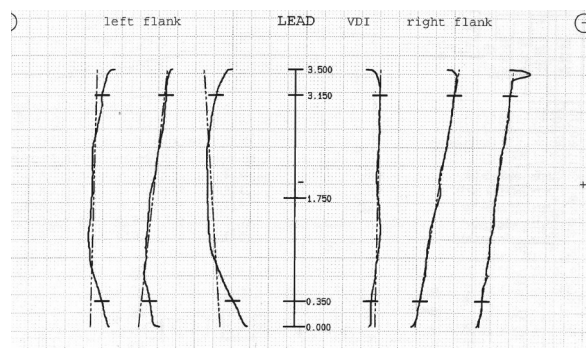


图6 修整后齿向图

综上所述,齿轮的精度指标与砂轮各项误差的对比如表3所示。

表3 磨齿机砂轮误差与磨齿精度对比表

砂轮各项误差			齿轮精度指标		结果
砂轮安装后端面跳动	砂轮安装后径向跳动	砂轮节距变化	齿形精度(要求5级)	齿向精度(要求5级)	精度对比
$1.8\ \mu\text{m}$	$3.6\ \mu\text{m}$	$4.4\ \mu\text{m}$	$6\ \mu\text{m}$	$5\ \mu\text{m}$	25%

而由表3可知,砂轮精度对齿向精度的影响占影响该精度因素的20%左右。所以,对修整齿向误差时主要考虑齿坯因素和砂轮修整机构误差的影响。

## 2.3 齿轮周节累计误差修整方式

造成齿轮的周节累计误差的主要原因是机床误差、砂轮误差、齿坯误差及安装误差等因素。所以在修整齿轮的周节累计误差时,应注意考虑全面并且让周节累计误差呈正弦分布且幅值最小。

### 2.3.1 机床头架往复过程重复性误差

砂轮若为单头,砂轮螺旋线经修整器一次修整后的齿距误差、齿距累计误差很小,反映在齿轮的相邻误差并不大。但砂轮若为双头,砂轮有两条螺旋曲线,砂轮修整器不能一次对砂轮修整完成,往复过程重复性误差造成齿距、齿距累计误差的不一致,因此在磨削加工中,不仅掺杂了机床误差(机床头架往复过程重复性误差等),而且加入了修整器的误差。所以在加工齿轮中,为了避免不必要的误差产生,应尽量选择单头砂轮。

在不考虑砂轮的螺旋升角影响的前提下,相邻齿距误差可通过下式计算:

$$\Delta t_{\pi} = \varepsilon \cos \alpha \times \Delta t_{\pi} \quad (3)$$

式中： $\Delta t_{\Pi}$ —砂轮齿距误差， $\alpha$ —压力角， $\varepsilon$ —砂轮与齿轮工作面重合度。

砂轮的齿距累积误差引起的齿轮齿形误差变化，可通过下式计算：

$$\Delta f_{\Sigma} = \frac{\Delta t_{\Sigma}}{Z} \cos \alpha \times \varepsilon \quad (4)$$

式中： $\Delta t_{\Sigma}$ —砂轮的齿距累积误差， $Z$ —齿轮齿数， $\varepsilon$ —砂轮与齿轮工作面重合度。

通过式(3,4)，可以看出砂轮影响齿轮误差最主要的方面分别为砂轮的安装误差、砂轮的齿距误差和砂轮齿距累积误差。因此，齿轮精加工中砂轮的精度对齿轮精度的提高具有重要的作用。所以，制造高精度齿轮的前提是对砂轮进行精密修整。

### 2.3.2 磨齿过程中的砂轮磨损

在磨齿过程中，砂轮的磨损量也直接影响齿轮的周节累计误差。而砂轮的磨损过程可分为3个磨损期：初期磨损、正常磨损、后期磨损。初期磨损阶段和急剧磨损阶段砂轮所磨工件的表面粗糙度  $Ra < 1.1$ <sup>[11]</sup>。正常磨损阶段，砂轮所磨工件表面粗糙度  $Ra < 0.8$ ，可满足加工一般高硬齿面齿轮的表面粗糙度要求。

(1) 磨齿砂轮选取原则。工件材料硬度较高时，应选用较软的砂轮；工件材料硬度较低时，应选用较硬的砂轮；砂轮与工件接触面较大时，应选用软砂轮；精磨时，应选用较硬的砂轮。

磨齿机床砂轮参数如表4所示。由表4可见，精磨齿形时，齿轮的模数越小，砂轮的粒度越细。为了保持砂轮轮缘不出缺口，采用锋利的金刚刀修整砂轮，对于高粒度的砂轮应用  $0.01 \text{ mm} \sim 0.005 \text{ mm}$  的进给量修整。

表4 磨齿机床砂轮参数

齿轮模数	齿槽槽底宽度	砂轮粒度
0.3	0.17	400
0.4	0.21	320
0.5	0.26	240
0.6	0.32	220
0.7	0.37	180
0.8	0.42	150
0.9	0.47	120
1.0	0.52	100

(2) 磨削比  $B$ 。磨削比  $B$  是指被磨件的轴向去除尺寸和砂轮的轴向磨损量之比，即表达式为：

$$B = \frac{\Delta D}{\Delta d} \quad (5)$$

式中： $\Delta D$ —磨件的轴向去除尺寸， $\Delta d$ —砂轮磨料层磨损的轴向尺寸。

磨削比  $B$  的正确选用表如表5所示，通过表5可知，选取正确的磨削比，不仅可以提高修整齿轮的效

率，而且可以提高齿面的表面光洁度，避免磨齿过程中齿面烧伤现象的发生。

表5 磨削比  $B$  的正确选用表

齿轮材料	淬火钢	钢	铸铁	非金属	2Cr13
$\Delta D/\Delta d$	1.9~2.6	1.6~1.8	2.7~3.2	1.3~1.5	1.5~1.7

### 2.3.3 修整过程中齿面没有磨均匀

在齿轮加工中，有时会出现齿形不对称现象，除了刀具齿面非轴向性误差的影响外，主要是刀具对中性不好往往会引起齿形不对称。砂轮对中指磨削时砂轮所处的轴向位置应使其一个刀齿或刀槽的对称线通过齿坯中心。磨削齿轮时砂轮包络齿面的齿数是有限的。当砂轮对中指，切出的齿形对称，反之则引起齿形不对称，齿形不对称的程度与包络齿面的齿数齿形的大小及齿面渐开线的曲率有关，砂轮包络齿面的齿数越少，工件齿形越大，且齿面曲率越大时，齿形不对称将会更严重。也就是说对于齿轮模数越大且齿数较少的齿轮，磨齿前应认真使砂轮对中指，至于模数较小齿数较多的齿轮，刀具不对中指影响较小，对齿轮的周节累计误差的影响也较小。

### 2.3.4 磨削时砂轮有轴向窜动或工件安装基准与回转中心不同轴

径向误差<sup>[12]</sup>：

$$\Delta t_1 = \sum_j e_{yj} \sin(j \frac{Z}{i} \varphi + \varphi_{yj}) \quad (6)$$

式中： $i$ —刀具与工件之间传动比， $e_{yj}$ —径向误差的  $j$  阶幅值， $\varphi_{yj}$ —径向误差的  $j$  阶分量的相位角， $\Delta t_1$ —径向跳动误差。

切向误差：

$$\Delta t_2 = \sum_j e_{zj} \sin(j \frac{Z}{i} \varphi + \varphi_{zj}) \quad (7)$$

式中： $i$ —刀具与工件之间传动比， $e_{zj}$ —轴向误差的  $j$  阶幅值， $\varphi_{zj}$ —轴向误差的  $j$  阶分量的相位角， $\Delta t_2$ —轴向窜动误差。

由公式(6)的径向回转误差可近似的认为刀具安装偏心，由公式(7)的切向误差主要由刀具的轴向窜动产生。

刀具主轴回转误差引起的齿形误差为：

$$\Delta f_t = \Delta t_1 \sin \alpha + \Delta t_2 \cos \alpha \quad (8)$$

式中： $\Delta t_1$ —径向跳动误差， $\Delta t_2$ —轴向窜动误差， $\Delta f_t$ —齿形误差。

其中，公式(1)主要造成单一的、周节的误差；而公式(2~4)是造成周节累计误差的主要原因。

齿坯定位端面对应定位孔几何中心线的摆动量，齿坯的安装误差也对应于加大齿轮累计误差的产生：

$$\Delta F_p = \frac{2(e_i + e_j)}{\cos \alpha} \quad (9)$$

式中:  $e_i$ —齿坯的安装几何偏心误差,  $e_j$ —机床的运动偏心误差,  $\Delta F_p$ —安装偏心引起齿距累积误差。

从式(8,9)可以看出,齿坯几何偏心对齿轮的周节累计误差有直接影响,说明齿坯安装偏心属于大周期误差因素,对齿距累积总误差的影响较大,如果偏心量很大的话,从推导出的公式可以看出安装偏心以近2倍的关系影响着齿距累积总误差<sup>[13]</sup>,只要采取相应的修整措施,其影响的误差可以大幅度地减小。

### 3 修整结果

蜗杆式砂轮磨齿对齿轮修整是对齿形和齿向同时进行的。其经过精密磨齿修整前后的齿轮精度数据对比如表6所示。

表6 实验过程数据对比表

	齿形/ $\mu\text{m}$	齿向/ $\mu\text{m}$	周节累计误差/ $\mu\text{m}$	精度等级
修整前	12.5	7	16.2	7
修正后	6	4	12	5

由表6可知,蜗杆式砂轮磨齿对齿轮修整是提高齿轮精度的有效手段。

### 4 结束语

本研究从理论和实验两方面对齿轮的部分单项误差进行了分析,并对总体精度方面的影响进行了分析和讨论。在分析误差产生根源的基础上,利用齿轮检测仪设备对齿轮进行检测,并开展了与理论结果的分析比对。研究表明,该方法对齿轮的修整能有效的提高齿轮等级空间。实验结果较好地吻合理论分析

结果,为有效控制齿轮精度提供了方向。因此,如何优化造成误差的机构,减小齿轮传动机构合成误差将成为下一步的研究内容。

#### 参考文献(References):

- [1] 吴炎明,陶晓杰. 齿轮数控加工技术的研究[M]. 2版. 合肥:合肥工业大学出版社,2005:145-152.
- [2] 刘铁军,丁亚林. 磨齿修整机构误差分析研究[J]. 安徽理工大学学报,2008,28(6):40-44.
- [3] 王立鼎,凌四营,马勇,等. 精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法[J]. 光学精密工程,2009,17(2):321-325.
- [4] 刘铁军,丁亚林. 精密磨齿砂轮误差分析[J]. 航空精密制造技术,2009,45(1):9-12.
- [5] 张秀清,潘维忠. 齿轮加工误差分析及解决方法[J]. 煤炭技术,2007,26(2):20-21.
- [6] 雷勇,李向阳. 影响齿轮主要精度超差原因分析[J]. 济源职业技术学院学报,2003,2(2):24-25.
- [7] 周云锋,王文,张华. Y7125型蜗杆砂轮磨齿机数控化改造[J]. 机电工程,2003,20(5):5-7.
- [8] 袁野. 齿轮噪声与齿轮修形[J]. 机械研究与应用,2006,19(5):7-8.
- [9] 赵加元. 渐开线齿轮轮齿的修形设计[J]. 机械,2011,38(10):67-22.
- [10] 刘铁军,丁亚林,张馥生. 精密磨削齿轮的误差分析[J]. 机械设计与研究,2009,25(5):64-67.
- [11] 闫萍萍,张丙喜,唐东红. 磨削齿轮用蜗杆形砂轮的设计[J]. 工具技术,2005,39(6):56-57.
- [12] 商向东. 齿轮加工精度[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2000:38-53.
- [13] 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.

[编辑:张翔]

(上接第500页)

#### 参考文献(References):

- [1] 徐滨士,刘世参. 表面工程[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [2] 邹鸿乘,戴蜀娟,罗欣,等. 激光熔覆的热变形研究及热力学分析[J]. 应用激光,1995,15(2):56-60.
- [3] 郝南海,陆伟,左铁钊. 激光熔覆过程热力耦合有限元应力场分析[J]. 中国表面工程,2005,18(1):20-23.
- [4] 朱援祥,王勤,赵学荣,等. 基于ANSYS平台的焊接残余

应力模拟[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(2):69-72.

- [5] 张平,马琳,赵军军,等. 激光熔覆数值模拟过程中的热源模型[J]. 中国表面工程,2006,19(5):161-164.
- [6] 陈列,谢沛霖. 齿面激光熔覆中的防边缘塌陷工艺研究[J]. 激光技术,2007,31(5):518-521.
- [7] 韩国明,李建强,闫青亮. 不锈钢激光焊温度场的建模与仿真[J]. 焊接学报,2006,27(3):105-108.

[编辑:罗向阳]