

# 平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面误差检测及溯源

陈燕<sup>1,2</sup>,殷国富<sup>1\*</sup>,陈永洪<sup>3</sup>

(1. 四川大学 空天科学与工程学院,四川 成都 610065;2. 重庆商务职业学院,重庆 401331;

3. 重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆传动是一种新型蜗杆传动,由平面齿内齿轮及其包络形成的鼓形蜗杆所组成,具有体积小、重量轻及功率密度高等特点,在对体积和重量有限制的特服重载传动领域有广泛的应用前景。为了掌握平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面精度理论,利用微分几何与啮合理论建立含工艺误差的齿面数学模型,基于齿轮测量中心自由扫略功能分析齿面数据采集方式,探讨测头半径补偿原理及齿形匹配方法等,研究基于遗传算法的齿面误差溯源优化算法,并对样件齿面进行误差检测试验及误差溯源分析,验证了上述误差检测原理及溯源方法的可行性。研究内容为平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆的精度评价及后续高精修正加工提供了理论指导,有利于内齿轮包络鼓形蜗杆传动的推广和应用。

**关键词:**鼓形蜗杆传动;齿面误差;检测;溯源

**中图分类号:**TH132.44

**文献标志码:**A

## Errors Measuring and Tracing of Planar Tooth Internal Gear Enveloping Crown Worm Tooth Surface

CHEN Yan<sup>1,2</sup>, YIN Guofu<sup>1\*</sup>, CHEN Yonghong<sup>3</sup>

(1. School of Aeronautics & Astronautics, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Chongqing Business Vocational College, Chongqing 401331, China;

3. State Key Lab. of Mechanical Transmissions, Chongqing Univ., Chongqing 400044, China)

**Abstract:** As a new worm drive, planar tooth internal gear enveloping crown worm drive is composed of a planar tooth internal gear and a crown worm generated by the planar tooth internal gear surface. It is characterized with small size, light weight and high power density, and has wide application prospects on the special service overloaded transmission areas with the size and weight restrictions. In order to study the accuracy theory of planar tooth internal gear enveloping crown tooth surface, a mathematical model with process errors was established based on the differential geometry and meshing theory, and the data collection methods were analyzed based on the gear measuring center. The probe radius compensation principle and tooth match method were studied, as well as the optimization of tooth surface errors tracing was proposed. The experiments of tooth surface errors measuring and errors tracing were carried out, and the feasibility was verified. The results are expected to give a theoretical guidance to the accuracy assessment and high-precision amend manufacturing of planar tooth internal gear enveloping crown tooth surface, and are propitious to the promotion and application of internal gear enveloping crown worm drive.

**Key words:** crown worm drive; tooth surface errors; measuring; tracing

内齿轮包络鼓形蜗杆传动作为齿轮包络环面蜗杆传动的一种新形式,继承了齿轮包络环面蜗杆传

动的承载能力强、润滑效果好、使用寿命长等优点,同时因其特殊的内啮合形式而具有体积更小、重量

收稿日期:2015-07-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51405394);四川省科技厅应用基础计划资助项目(2014JY0129);教育部春晖计划合作研究项目(Z2014074)

作者简介:陈燕(1985—),女,博士生.研究方向:机械传动. E-mail:chenyan-85@163.com

\*通信联系人 E-mail:gfyin@scu.edu.cn

更轻的特点,可用于航空航天及船舶航海等特殊重载领域的动力传动。由于其鼓形蜗杆属于新型变齿厚变齿形蜗杆<sup>[1]</sup>,没有成熟的加工机床,传统的成形法也不适用于该类零件的加工,需对具有虚拟回转中心功能的环面蜗杆磨床进行改造<sup>[2]</sup>,进而实现鼓形蜗杆齿面加工。机床的改造、调整和安装总会带来一定的误差,直接影响传动副的齿面啮合性能<sup>[3-4]</sup>。在存在制造误差的情况下,传动副齿面因“边缘偏畸接触”导致其承载能力降低、振动噪音加大、使用寿命变短。同时,以鼓形蜗杆为基体,制作内齿轮滚刀或鼓形蜗杆砂轮,滚齿或磨齿加工内齿轮时,蜗杆的加工精度直接影响切削刃的廓形精度。因此,为提高蜗轮副的制造精度和啮合性能,对鼓形蜗杆齿面加工精度的控制极其重要。

在环面蜗杆齿面的误差测量与加工误差控制方面,国内外学者进行了深入的研究。秦大同<sup>[5-6]</sup>采用坐标测量方法分析环面蜗杆齿形偏差,并利用误差补偿技术修正机床调整参数,提高了蜗杆的加工精度;刘丰林<sup>[7]</sup>针对几种常见的蜗杆类型,分析了测量时干涉误差产生的原因;赵亚平等<sup>[8]</sup>分析了双环面二次包络环面蜗杆的齿面接触特性及各种误差的敏感性。鼓形蜗杆齿面作为一种不同于环面蜗杆齿面的新型复杂空间螺旋面,其误差测量及加工误差控制是亟待解决的问题。

作者针对平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面误差的检测问题,建立带各种工艺误差的齿面数学模型,研究基于齿轮测量中心自由扫略功能的齿面误差检测方法,探讨齿面误差溯源理论,并对样件进行检测试验和溯源分析,为齿面高精修正加工提供理论指导。

## 1 鼓形蜗杆齿面误差数学模型

平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面是以平面齿内齿轮齿面为母面并按展成原理所包络形成。

### 1.1 标架设置

考虑各种工艺误差,建立鼓形蜗杆齿面带误差的坐标系,如图1所示。

空间固定标架 $\sigma_1(o_1 - x_1, y_1, z_1)$ 和 $\sigma_2(o_2 - x_2, y_2, z_2)$ 为母平面和鼓形蜗杆的初始位置,其底矢分别为 $(i_1, j_1, k_1)$ 和 $(i_2, j_2, k_2)$ ;母平面与运动标架 $\sigma_p(o_p - x_p, y_p, z_p)$ 固连,并绕 $z_p$ 轴以角速度 $\omega_p$ 转动,鼓形蜗杆与运动标架 $\sigma_w(o_w - x_w, y_w, z_w)$ 固连,并绕 $z_w$ 轴以角速度 $\omega_w$ 转动;标架 $\sigma_p$ 和 $\sigma_w$ 的底矢分别为 $(i_p, j_p, k_p)$ 和 $(i_w, j_w, k_w)$ ;活动标架 $\sigma_a(o_a - x_a, y_a,$

$z_a)$ 的 $x_a$ 轴和 $y_a$ 轴位于母平面上且原点 $o_a$ 位于主基圆上,其底矢为 $(i_a, j_a, k_a)$ ;母平面和鼓形蜗杆某瞬时的转动位移分别为 $\varphi_p$ 和 $\varphi_w$ ,且有 $\varphi_w/\varphi_p = \varphi_w/\omega_p = i_{12}$ ,其中: $i_{12}$ 为成形传动比; $r_b$ 为主基圆半径; $\Delta r_b$ 为加工过程中的主基圆半径误差;母平面倾角为 $\beta$ ;  $\Delta\beta$ 为加工过程中的母平面倾角误差; $a$ 为成形中心距; $\Delta a$ 为加工过程中的成形中心距误差; $\delta$ 为轴间角; $\Delta\delta$ 为加工过程中的轴间角误差。

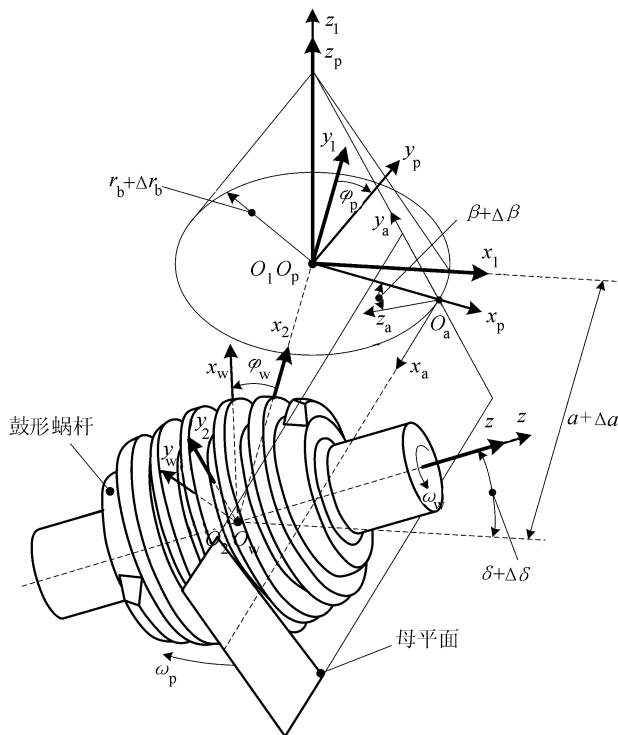


图1 坐标系设置

Fig. 1 Coordinates system setting

### 1.2 齿面方程

由啮合原理可得鼓形蜗杆齿面成形时,母平面包络过程的啮合函数 $\Phi$ 为:

$$\begin{cases} \Phi = M_1 \sin \varphi_p + M_2 \cos \varphi_p M_3, \\ M_1 = -v \cos(\delta + \Delta\delta) + (r_b + \Delta r_b) \cdot \\ \quad \cos(\delta + \Delta\delta) \sin(\beta + \Delta\beta), \\ M_2 = u \cos(\delta + \Delta\delta) \sin(\beta + \Delta\beta) + \\ \quad (a + \Delta a) \sin(\delta + \Delta\delta) \cos(\beta + \Delta\beta), \\ M_3 = -u \sin(\delta + \Delta\delta) \cos(\beta + \Delta\beta) - i_{21} u \cos(\beta + \Delta\beta) - \\ \quad (a + \Delta a) \cos(\delta + \Delta\delta) \sin(\beta + \Delta\beta) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $u$ 和 $v$ 分别为母平面沿 $x_a$ 和 $y_a$ 方向的参数。

当母平面随转角 $\varphi_p$ 连续变化时,可得带误差的鼓形蜗杆齿面方程:

$$\begin{cases}
 \mathbf{r}_w = x_w \mathbf{i}_w + y_w \mathbf{j}_w + z_w \mathbf{k}_w, \\
 x_w = u(\sin(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_w \sin \varphi_p - \cos \varphi_w \cos \varphi_p) - \\
 x_w = u(\sin(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_w \sin \varphi_p - \cos \varphi_w \cos \varphi_p) - \\
 (r_b + \Delta r_b)(\cos \varphi_w \sin \varphi_p + \sin(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_w \cos \varphi_p) + \\
 v(\cos \varphi_w \sin \varphi_p \sin(\beta + \Delta\beta) + \\
 \sin(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_w \cos \varphi_p \sin(\beta + \Delta\beta) + \\
 \cos(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_w \cos(\beta + \Delta\beta)) + (a + \Delta a) \cos \varphi_w, \\
 y_w = u(\sin(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_w \sin \varphi_p + \sin \varphi_w \cos \varphi_p) + \\
 (r_b + \Delta r_b)(\sin \varphi_w \sin \varphi_p - \sin(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_w \cos \varphi_p) - \\
 v(\sin \varphi_w \sin \varphi_p \sin(\beta + \Delta\beta) - \\
 \sin(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_w \cos \varphi_p \sin(\beta + \Delta\beta) - \\
 \cos(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_w \cos(\beta + \Delta\beta)) - \\
 (a + \Delta a) \cos \varphi_w, \\
 z_w = u \cos(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_p - \\
 v \cos(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_p \sin(\beta + \Delta\beta) + \\
 v \sin(\delta + \Delta\delta) \cos(\beta + \Delta\beta) + \\
 (r_b + \Delta r_b) \cos(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_p, \\
 \Phi = 0
 \end{cases}
 \quad (2)$$

式中,  $\Delta r_b = \Delta\beta = \Delta a = \Delta\delta = 0$  时, 表示为无工艺误差的鼓形蜗杆齿面方程。

## 2 鼓形蜗杆齿面测量

平面包络鼓形蜗杆齿面的测量是基于齿轮测量中心的扫描功能而完成齿面数据点信息获取的。

### 2.1 测量原理

鼓形蜗杆齿面在齿轮测量中心上的误差检测如图2所示。鼓形蜗杆装夹在回转台上, 可由步进电机驱动绕坐标轴  $C$  轴转动, 转角可精确度量; 测头可沿  $x, y, z$  3 个方向移动, 分别通过各自的光栅尺精确定位。首先将测头置于位置①处, 固定  $z$  值, 在基准圆上任意测量3点, 可得圆心坐标  $(x_c^{(1)}, y_c^{(1)}, z_c^{(1)})$ ; 其次将测头置于端面②处, 在基准端面上任测一点, 坐标为  $(x_c^{(II)}, y_c^{(II)}, z_c^{(II)})$ ; 将测头移动到蜗杆任一轴截面③处, 固定  $x$  轴及  $C$  轴, 利用轮廓扫描功能扫描鼓形蜗杆的轴向齿廓; 将  $C$  轴旋转一个测量间隔角  $\theta_c$  后, 扫描另一个轴向齿廓; 每次将  $C$  轴转动一个  $\theta_c$ , 直至完成整个鼓形蜗杆齿面的轴向齿廓扫描, 得一系列的轴向齿廓坐标值  $(x_c^{(1)}, y_c^{(k)}, z_c^{(k)}, C_c^{(k)})$ , 其中, 上标  $k = 1, 2, \dots, k_c$  为对应测试点的序号,  $k_c$  为整个鼓形蜗杆齿面的测试点数。

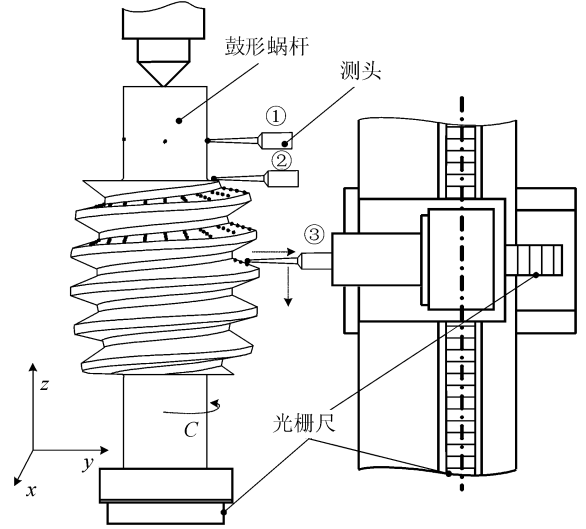


图2 测量示意图

Fig.2 Schematic of measurement

### 2.2 测量数据处理

上述测量所得数据位于齿轮测量中心的测量坐标系  $\sigma_c$ , 需对其进行坐标变换和齿形匹配处理, 将其转换至鼓形蜗杆齿面的固连坐标系  $\sigma_w$ 。

利用图2所示的基准圆①和基准端面②相关数据, 对测量所得的鼓形蜗杆齿面轴向齿廓坐标值  $(x_c^{(1)}, y_c^{(k)}, z_c^{(k)}, C_c^{(k)})$  进行平移处理, 得中间坐标值  $(x_{1'}^{(k)}, y_{1'}^{(k)}, z_{1'}^{(k)})$ , 有转换关系为:

$$\begin{cases}
 x_{1'}^{(k)} = y_c^{(k)} \sin \theta_c^{(k)} - x_c^{(1)}, \\
 y_{1'}^{(k)} = y_c^{(k)} \cos \theta_c^{(k)} - y_c^{(1)}, \\
 z_{1'}^{(k)} = z_c^{(k)} - (z_c^{(II)} - r_c - h)
 \end{cases}
 \quad (3)$$

式中,  $r_c$  为测头半径,  $h$  为基准端面距鼓形蜗杆中心坐标原点的轴向距离。

将中间坐标值  $(x_{1'}^{(k)}, y_{1'}^{(k)}, z_{1'}^{(k)})$  绕平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆的轴线  $z_w$  旋转, 可得平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面实际齿廓的测头中心在固连坐标系  $\sigma_w$  中的坐标值  $(x_{1a}^{(k)}, y_{1a}^{(k)}, z_{1a}^{(k)})$  为:

$$\begin{cases}
 x_{1a}^{(k)} = (y_c^{(k)} \sin \theta_c^{(k)} - x_c^{(1)}) \cos \varphi_c + \\
 (y_c^{(k)} \cos \theta_c^{(k)} - y_c^{(1)}) \sin \varphi_c, \\
 y_{1a}^{(k)} = - (y_c^{(k)} \sin \theta_c^{(k)} - x_c^{(1)}) \sin \varphi_c + \\
 (y_c^{(k)} \cos \theta_c^{(k)} - y_c^{(1)}) \cos \varphi_c, \\
 z_{1a}^{(k)} = z_c^{(k)} - (z_c^{(1)} - r_c - h)
 \end{cases}
 \quad (4)$$

式中,  $\varphi_c$  为齿形匹配角, 通过后续齿面误差函数计算获得。

## 3 鼓形蜗杆齿面误差溯源理论

以齿面各项误差值为优化参数, 以带误差的平面齿内齿轮包络蜗杆齿面数据和实测数据最匹配为

优化目标,利用优化算法对其进行多目标优化,所得优化结果即为平面齿内齿轮包络蜗杆齿面的误差源值。

### 3.1 测头中心理论轨迹

在齿轮测量中心对平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面进行测量,测头为圆球,所得到的数据实际上是测头中心的坐标值,需对其进行测头半径补偿,如图 3 所示。图中,  $F$  点为测头中心,  $r_c$  为测头半径,  $\Sigma$  为平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面,  $G$  点为测头与平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的实际接触点。

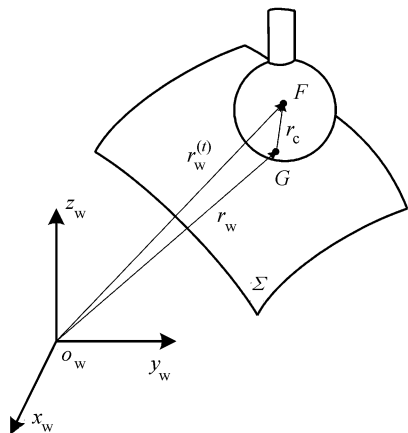


图 3 测头半径补偿示意图

Fig.3 Schematic of probe radius compensation

平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的单位法向量在其固连坐标系  $\sigma_w$  中可以表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{n}_w &= n_{wx} \mathbf{i}_w + n_{wy} \mathbf{j}_w + n_{wz} \mathbf{k}_w, \\ n_{wx} &= \cos(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_w \sin(\beta + \Delta\beta) - \\ &\quad \cos \varphi_w \sin \varphi_p \cos(\beta + \Delta\beta) - \\ &\quad \sin(\delta + \Delta\delta) \sin \varphi_w \cos \varphi_p \cos(\beta + \Delta\beta), \\ n_{wy} &= \cos(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_w \sin(\beta + \Delta\beta) - \\ &\quad \sin \varphi_w \sin \varphi_p \cos(\beta + \Delta\beta) - \\ &\quad \sin(\delta + \Delta\delta) \cos \varphi_w \cos \varphi_p \cos(\beta + \Delta\beta), \\ n_{wz} &= \sin(\delta + \Delta\delta) \sin(\beta + \Delta\beta) + \\ &\quad \cos \delta \cos \varphi_p \cos(\beta + \Delta\beta) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

结合平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面方程式(2),可得平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的测头中心理论轨迹为:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{r}_w^{(t)} &= \mathbf{r}_w + r_c \mathbf{n}_w = x_w^{(t)} \mathbf{i}_1 + y_w^{(t)} \mathbf{j}_1 + z_w^{(t)} \mathbf{k}_1, \\ x_w^{(t)} &= x_w + r_c n_{wx}, \\ y_w^{(t)} &= y_w + r_c n_{wy}, \\ z_w^{(t)} &= z_w + r_c n_{wz} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

### 3.2 齿面误差函数

平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的轴向及法向

齿厚沿螺旋线方向的分布为两头厚、中间薄,齿面不同位置的齿形、齿厚、齿距等均各不相等。为此,提出一种平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面综合误差定义方法,如图 4 所示。图中,  $\Sigma_r$  为实际蜗杆齿面,  $\Sigma_t$  为理论蜗杆齿面,定义齿面误差  $\Delta f$  为实际平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面上测量点与理论齿面上的法向对应点之间的距离。

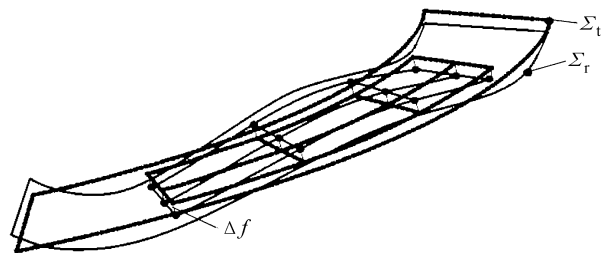


图 4 齿面误差

Fig.4 Errors of tooth surface

平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面实测点对应的理论齿面上法向点求解困难,进而转求其轴向点对应坐标值  $(x_t^{(k)}, y_t^{(k)}, z_t^{(k)})$ , 其与实测点坐标值  $(x_{1a}^{(k)}, y_{1a}^{(k)}, z_{1a}^{(k)})$  之间应满足式(7)关系。

$$z_t^{(k)} = z_{1a}^{(k)} \sqrt{(x_t^{(k)})^2 + (y_t^{(k)})^2} = \sqrt{(x_{1a}^{(k)})^2 + (y_{1a}^{(k)})^2} \quad (7)$$

通过实测点坐标值  $(x_{1a}^{(k)}, y_{1a}^{(k)}, z_{1a}^{(k)})$  并联立式(6)和(7)求解,可得实测点对应的轴向点坐标值  $(x_t^{(k)}, y_t^{(k)}, z_t^{(k)})$ 。

于是,平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面测量点  $k$  处的误差  $\Delta f^{(k)}$  可定义为:

$$\Delta f^{(k)} = (-1)^n \sin \lambda^{(k)} \sqrt{(x_t^{(k)} - x_{1a}^{(k)})^2 + (y_t^{(k)} - y_{1a}^{(k)})^2} \quad (8)$$

式中,  $n$  为判别系数,当  $\Sigma_r$  凹入  $\Sigma_t$  实体之内时  $n = 1$ , 当  $\Sigma_r$  凸出于  $\Sigma_t$  实体之外时  $n = 2$ ;  $\lambda^{(k)}$  为测量点  $k$  处的螺旋升角。

应用最小二乘法原理对平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的测量数据和理论数据进行匹配,以齿面匹配角  $\varphi_c$  为变量,构建评估函数

$$f_c(\varphi_c) = \min \sum_{k=1}^{k_c} (\Delta f^{(k)})^2 \quad (9)$$

通过式(9)可得出齿面测量数据与理论数据最佳匹配时的齿面匹配角  $\varphi_c$ , 将其带入式(8)可求出各测量点的齿面偏差值以及齿面偏差的极大值和极小值。

### 3.3 溯源算法

选用遗传算法对平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面误差溯源这一多变量单目标无约束优化问题进行

优化计算。

针对平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的加工误差源,选择误差溯源的优化变量为:

$$\mathbf{X} = [\Delta a, \Delta r_b, \Delta \beta, \Delta \delta]^T \quad (10)$$

建立误差溯源优化的适应度函数为:

$$f_s = \frac{1}{f_c(\varphi_c)} = \frac{1}{\min \sum_{k=1}^{k_c} (\Delta f^{(k)})^2} \quad (11)$$

平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的误差检测及溯源过程中,数据采集及处理流程如图5所示。

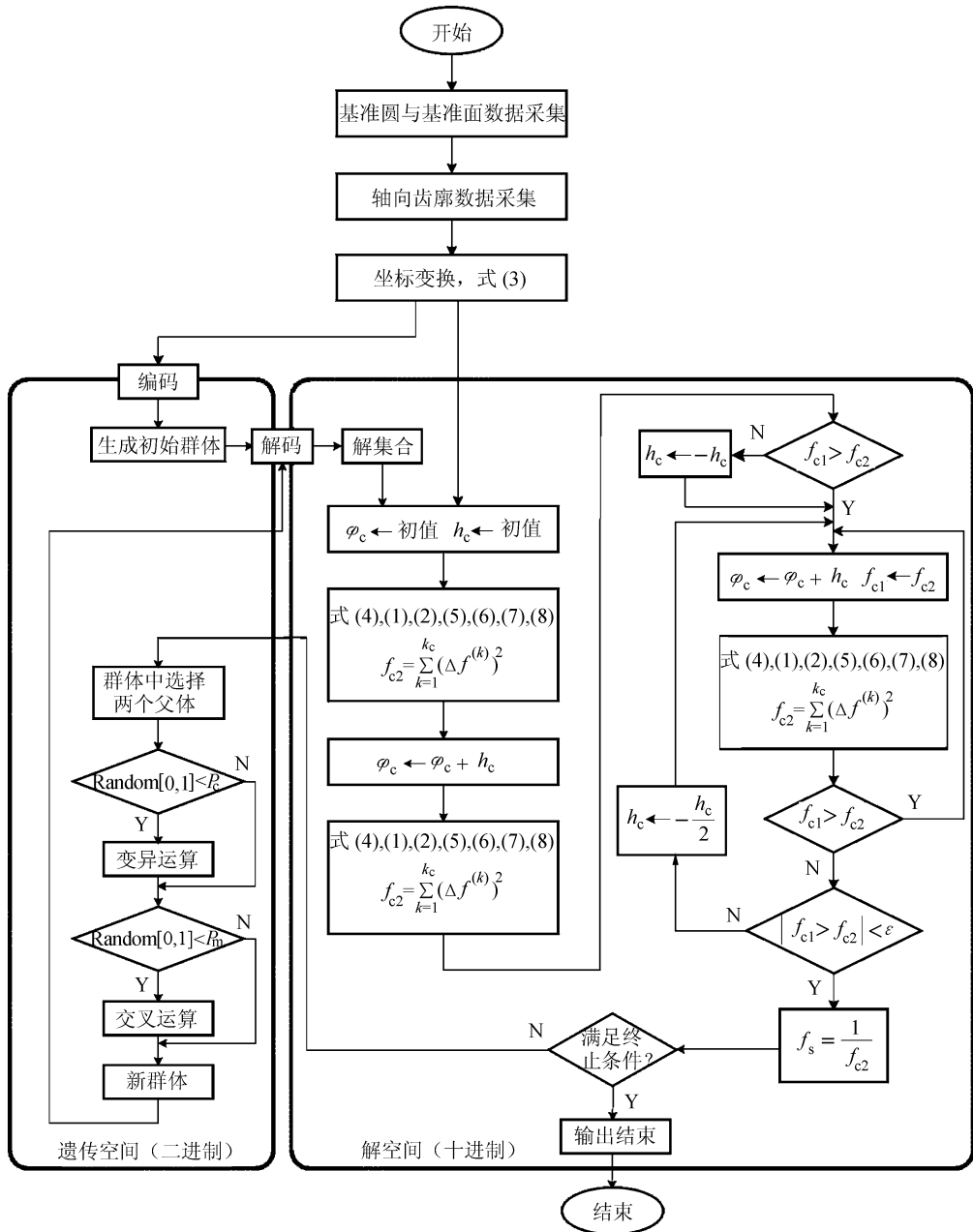


图5 误差溯源流程

Fig.5 Process of errors tracing

如图5所示,采集基准数据和齿面轴向齿廓数据,并将其转换至蜗杆固连坐标系;依据各项加工误差源的大小确定溯源优化变量的取值范围,并在优化变量取值范围内随机生成一个二进制表示的优化变量初始种群;将种群进行解码,形成十进制空间中的优化变量值;针对种群的每一个体变量,利用逐步

逼近法与二分法相结合的计算方法,计算齿面测量点的偏差总量,并形成遗传算法优化的适应度函数值;判断种群是否达到终止计算条件;若没达到终止计算条件,则回到种群的二进制空间,对种群进行交叉运算和变异运算,生成新的种群;重复上述计算过程,直至达到终止计算条件,所得最优适应度函数值

对应十进制的个体值,即为平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的各项误差源值,进而完成齿面误差溯源。

## 4 实验

以表 1 所示参数的平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆为样件,在克林贝格 P26 齿轮测量中心上按图 2 所示原理对其进行齿面检测,其中测头半径  $r_c$  为 0.499 mm,如图 6 所示。

表 1 蜗杆参数

Tab.1 Parameters of worm

参数	数值
中心距 $a/\text{mm}$	100
鼓形蜗杆头数 $Z_1$	1
平面齿内齿轮齿数 $Z_2$	63
轴间角 $\delta_1/(\circ)$	25
母平面倾角 $\beta/(\circ)$	28
主基圆半径 $r_b/\text{mm}$	45



图 6 误差测量

Fig.6 Error measuring

对测量数据按前述方法进行坐标变换、曲面匹配及误差评定,得平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆样件齿面偏差如表 2 所示,可见该样件的上侧齿面误差值为 0.079 mm,下侧齿面误差值为 0.082 mm。

表 2 蜗杆齿面偏差

Tab.2 Errors of worm tooth surface

检测项目	上侧齿面误差值		下侧齿面误差值	
	最小值	最大值	最小值	最大值
齿面偏差 $\Delta/\text{mm}$	-0.027	0.052	-0.049	0.033

按图 5 所示齿面误差溯源流程,并利用 Matlab 遗传算法工具箱编制误差溯源优化程序,对上述平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆样件齿面进行误差溯源计算,得溯源结果如表 3 所示。由表 3 可知,两侧齿面的中心距误差相对较小,而其余 3 项误差值相对较大;样件在加工过程中,中心距通过数控系统保障,

而主基圆半径依靠深度尺测量保障,轴间角和母平面倾角通过角度尺保障;故这一溯源结果与样件加工工艺精度保障体系一致。

表 3 蜗杆齿面误差值

Tab.3 Errors of worm tooth surface

误差值	上侧齿面	下侧齿面
中心距误差 $\Delta a/\text{mm}$	0.085	0.038
主基圆半径误差 $\Delta r_b/\text{mm}$	-0.460	0.340
轴间角误差 $\Delta \delta/(\circ)$	0.103	0.146
母平面倾角误差 $\Delta \beta/(\circ)$	-0.106	-0.161

## 5 结论

针对平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面的误差检测及溯源,展开了相关理论分析和实验研究,主要结果有:

1) 建立带各项工艺误差的平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面数学模型。

2) 提出一种以齿面偏差为基础的平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面误差测量评定方法。

3) 发展一种基于遗传算法的平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面误差溯源方法。

4) 通过样件测量试验及溯源分析验证了误差检测及溯源理论的可行性。

5) 平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆齿面误差溯源结果为其后续进一步高精修正加工提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] Chen Yonghong, Zhang Guanghui, Chen Bingkui, et al. A novel enveloping worm couple via employing the conjugating planar internal gear as counterpart [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 67(1): 17-31.
- [2] 张光辉, 黎亚元. 能虚拟中心距的环面数控磨床: 中国, CN1907615A [P]. 2007-02-07.
- [3] Chen Yonghong, Zhang Guanghui, Chen Bingkui. Study on tooth profile of planar enveloping crown worm [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(16): 1891-1896. [陈永洪, 张光辉, 陈兵奎, 等. 平面内齿包络凸环面蜗杆齿形研究 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(16): 1891-1896.]
- [4] Chen Yonghong, Zhang Guanghui, Chen Bingkui, et al. Meshing performance analysis of planar internal gear enveloping crown worm driving [J]. Journal of Chongqing U-

- niversity: Natural Science Edition, 2012, 35(3): 1-7. [陈永洪, 张光辉, 陈兵奎, 等. 平面内齿轮包络凸环面蜗杆传动啮合性能分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, 35(3): 1-7.]
- [5] Qing Datong, Yan Jia, Zhang Guanghui. Method to manufacture plane-generated hourglass worm with high precision based on coordinate measurements [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997, 33(1): 59-65. [秦大同, 颜佳, 张光辉. 平面包络环面蜗杆基于坐标测量的高精度制造方法[J]. 机械工程学报, 1997, 33(1): 59-65.]
- [6] Qing Datong, Jia Chenping, Yang Changqi. Application of error compensation methods in high precision machining of globoid worm[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(5): 1-4. [秦大同, 贾陈平, 杨长祺. 误差补偿技术在直廓环面蜗杆高精度加工中的应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(5): 1-4.]
- [7] Liu Fenglin, Qin Datong, Deng Xingyi. Precise inspection of worm tooth profile based on coordinate measurements [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(11): 9-13. [刘丰林, 秦大同, 邓兴奕. 基于坐标检测的蜗杆齿形精密测量分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(11): 9-13.]
- [8] Zhao Yaping, Kong Jianyi, Li Gongfa, et al. Computerized simulation of tooth contact and error sensitivity investigation for ease-off hourglass worm drives[J]. Computer Aided Design, 2012, 44(8): 778-790.
- [9] Lee Rueytsung, Shiou Fangjung. Calculation of the unit normal vector using the cross-curve moving mask method for probe radius compensation of a freeform surface measurement[J]. Measurement, 2010, 43(4): 469-478.
- [10] Wang Jingge, Zhang Junfu, Deng Xingqiao, et al. Parameter optimization of the non-backlash double-roller enveloping hourglass worm gearing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 6-12. [王进戈, 张均富, 邓星桥, 等. 无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动的参数优化[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 6-12.]
- [11] Ji Yongjun. Study on measurement of hourglass worm with gear measuring center[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2009. [姬永军. 基于CNC齿轮测量中心的环面蜗杆测量研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2009.]
- [12] 张光辉, 罗文军. 环面蜗杆齿面误差测量方法: 中国, CN101762388A[P]. 2010-06-30.
- [13] Li Junfeng. Study on cylindrical worm testing based on CNC gear measurement center[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. [李俊峰. 基于CNC齿轮测量中心的圆柱蜗杆测量研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.]
- [14] Hermes P. Optimierung der schneckenradfertigung durch prozesssimulation[J]. Forsch Ingenieurwes, 2010(74): 19-25.
- [15] Liang Shuhren, Lin A C. Lin. Probe-radius compensation for 3D data points in reverse engineering[J]. Computers in Industry, 2002, 48(3): 241-251.

(编辑 黄小川)