

内斜齿轮磨削加工误差在线监测与补偿*

浮文华^① 王会良^{①②} 蒋 闯^{①②}

(^①河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳 471003; ^②机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 以数控机床磨削内斜齿轮为研究对象, 研究在磨削过程中存在的加工误差及补偿问题。首先, 通过齐次坐标变换原理, 推导出工件到刀具之间存在误差的齐次坐标变换矩阵, 得出加工过程中的几何误差模型; 其次, 利用内置信号同步采集方法, 实现机床加工误差在线监测, 并通过软件补偿原理对主要误差源进行补偿; 最后, 通过齿轮检测仪, 对误差补偿前、后齿面进行检测, 补偿后的齿面误差有所减小。该实验为提高机床加工精度的研究提供了数据理论支撑。

关键词: 几何误差; 齐次坐标变换; 在线监测; 误差补偿

中图分类号: TG86 **文献标识码:** A

DOI: [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.11.025](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.11.025)

Internal helical gear grinding error on-line monitoring and compensation

FU Wenhua^①, WANG Huiliang^{①②}, JIANG Chuang^{①②}

(^①School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, CHN; ^②Henan Collaborative Innovation Center for Advanced Manufacturing of Mechanical Equipment, Luoyang 471003, CHN)

Abstract: Taking the grinding of internal helical gears by CNC machine tools as the research object, the machining error and compensation problems in the grinding process are studied. Firstly, through the principle of homogeneous coordinate transformation, the homogeneous coordinate transformation matrix with errors between the workpiece and the tool is derived, and the geometric error model in the machining process is obtained. Secondly, the on-line monitoring of machine tool machining error is realized by using the built-in signal synchronous acquisition method, and the main error sources are compensated by the software compensation principle. Finally, through the gear detector, the tooth surface before and after error compensation is detected, and the tooth surface error after compensation is reduced. This experiment provides data theoretical support for improving the machining accuracy of machine tools.

Keywords: geometrical error; homogeneous coordinate transformation; on-line monitoring; error compensation

数控机床是汽车、航空航天和军事领域中使用最广泛的制造设备之一^[1-2], 在工业中起着重要作用, 而机床误差是影响加工精度最主要的原因, 影响着行业的整体发展。因此, 在保证机床加工效率的基础上提高其加工精度是目前亟需解决的问题。

机床加工精度一直受国内外学者们的关注, 针对机床误差模型^[3-4], 分别提出了多体系统理论、

矢量法和齐次坐标变换等建模方法。田凤桢等^[5]利用多体系统理论, 设计机床加工零件相应运动链, 并对其加工误差进行分析; 付国强等^[6]根据指数积理论和坐标系微分运动理论, 建立了运动轴几何误差贡献值模型, 提出了运动轴几何误差灵敏度分析方法; 杨斌^[7]利用内置传感器信息, 结合数控机床运动学模型, 提出了一种利用内置传感器测量机床

* 龙门实验室前沿探索课题 (LMQYTSKT024); 省级科技研发计划联合基金 (222103810040); 2023年度河南省高等学校重点科研项目 (23A460017)

动态加工误差方法；史燕等^[8]采用优化PID控制器中的关键参数，对多轴联动数控机床运动误差进行补偿，验证所提方法具有良好的适应性。若要提高机床加工精度就要控制其加工误差，大多数会将误差补偿技术^[9-11]作为提高数控机床精度的主要途径。

本文对磨削内斜齿轮加工误差展开研究，利用多体系统和齐次坐标变换原理，建立机床刀具相对于工件的几何误差模型，通过加工过程在线监测，进行数据采集和分析，对其进行反向误差补偿。这对提高机床加工精度具有重要作用，对生产精密零件企业的发展具有重要意义^[12]。

1 多体系统的机床运动学模型

本文采用多体系统原理^[13-14]，以数控机床磨削内斜齿轮为例建立其运动学模型，该数控成型砂轮磨齿机拥有X、Y、Z、A、C五个联动轴。其中，X、Z、C轴是机床磨削系统的主要运动轴，X轴和Z轴与机床床身固定，C轴是工件分度数控回转台，安装在X轴上；Y轴和A轴辅助运动，A轴用来控制砂轮的旋转，实现内斜齿轮的加工，安装在Z轴的工作台上。机床运动轴示意图如图1所示。

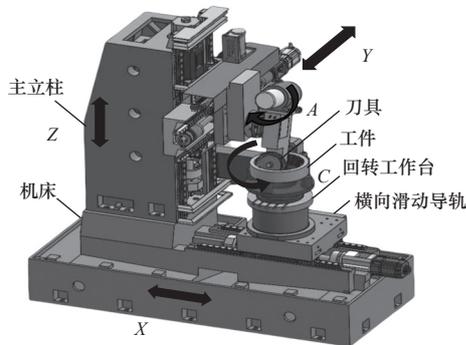


图1 机床运动轴示意图

1.1 多体系统拓扑结构和低序体阵列

根据对内斜齿轮磨削系统进行运动学分析，把机床系统分为两个运动链，从机床机身开始到工件端结束的是工件运动链，从机床机身开始到刀具结束的是刀具运动链。两者确定各运动部件的相邻低序体关系，通过运动关系对个运动轴进行编号，数控磨齿机机床的拓扑结构图如图2所示。

由图2可知，在该多体系统中，只有 B_1 运动体是最开始标记的，其他每个运动体都有相邻的序号运动体，通过对该系统当中的各个运动体进行序号

列表，用 $L(K)$ 来表示， K 为运动体在系统的序号。

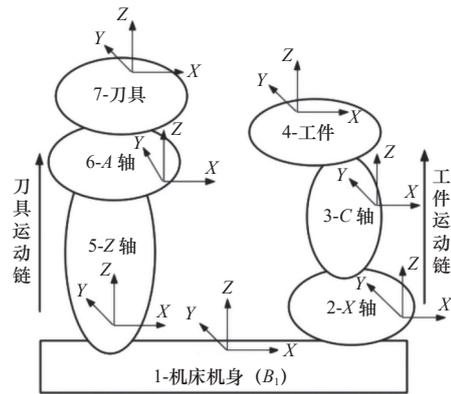


图2 数控磨齿机拓扑结构图

假设 S 是 K 的相邻低序体，用公式可以表达出相邻运动体的关系：

$$L(K) = S \tag{1}$$

低序体算子用 L 表示，则有：

$$L^{(n)}(K) = L(L^{(n-1)}(K)) \tag{2}$$

低序体算子的定义为

$$L^{(1)}(K) = L(K) \tag{3}$$

$$L^{(0)}(K) = K \tag{4}$$

$$L(0) = 0 \tag{5}$$

通过上述公式可得出多体系统的低序体阵列，见表1。

表1 多体系统的低序体阵列

	各阶低序体算子			运动编号			
	1	2	3	4	5	6	7
$L^0(K)$	1	2	3	4	5	6	7
$L^1(K)$	0	1	2	3	1	5	6
$L^2(K)$	0	0	1	2	0	1	5
$L^3(K)$	0	0	0	1	0	0	1
$L^4(K)$	0	0	0	0	0	0	0

1.2 加工误差几何模型

内斜齿轮磨削系统在图2所示工件到刀具运动链排序为：从工件连接C轴连接X轴至机身，再从机身连接Z轴连接A轴至刀具结束。因此内斜齿轮磨削系统运动链中的各个运动体坐标系之间的理想状态坐标变换关系矩阵如下： T_{gC} 、 T_{CX} 、 T_{XJ} 、 T_{JZ} 、 T_{ZA} 、 T_{AW} 。

由表2的坐标变换矩阵，可以得到磨削内斜齿轮多体系统在理想状态下刀具到工件之间的齐次坐标变换矩阵 T_{gW} ，即：

表 2 相邻坐标系间的位姿变换

$i-j$	理想坐标变换矩阵	含几何误差坐标变换矩阵
$C-g$	$T_{gC} = I_{4 \times 4}$	$T_{gC}^e = I_{4 \times 4}$
$X-C$	$T_{XC} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $T_{CX} = (T_{XC})^{-1}$	$N_{XC} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zc} & \varepsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ \varepsilon_{zc} & 1 & -\varepsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} & 1 & \delta_{zc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $T_{XC}^e = T_{XC} \cdot N_{XC} \quad T_{CX}^e = (T_{XC}^e)^{-1}$
$J-X$	$T_{JX} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{XJ} = (T_{JX})^{-1}$	$T_{JX}^e = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & x + \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{XJ}^e = (T_{JX}^e)^{-1}$
$Z-J$	$T_{JZ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$T_{JZ}^e = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{yz} & \delta_{xz} \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{xz} & \delta_{yz} \\ -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{xz} & 1 & z + \delta_{zz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$A-Z$	$T_{ZA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$T_{ZA}^e = T_{ZA} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{za} & \varepsilon_{ya} & \delta_{xa} \\ \varepsilon_{za} & 1 & -\varepsilon_{xa} & \delta_{ya} \\ -\varepsilon_{ya} & \varepsilon_{xa} & 1 & \delta_{za} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$W-A$	$T_{AW} = I_{4 \times 4}$	$T_{AW}^e = I_{4 \times 4}$

$$T_{gW} = T_{gC} T_{CX} T_{XJ} T_{JZ} T_{ZA} T_{AW} \quad (6)$$

由于机床在加工内斜齿轮磨削时各个运动轴会出现几何误差，因此还应求出存在误差时刀具与内斜齿之间的齐次坐标变换矩阵。在存在误差的情况下，其变换矩阵为

$$T_{gW}^e = T_{gC}^e T_{CX}^e T_{XJ}^e T_{JZ}^e T_{ZA}^e T_{AW}^e \quad (7)$$

构建机床内斜齿轮磨削系统中刀具到工件坐标系之间的误差矩阵为 E_{gW} ，误差情况下两坐标系之间的变换矩阵 T_{gW}^e 就等于误差矩阵 E_{gW} 与理想状态下两坐标系之间变换矩阵 T_{gW} 的乘积，即：

$$T_{gW}^e = E_{gW} \cdot T_{gW} \quad (8)$$

所以

$$E_{gW} = T_{gW}^e \cdot (T_{gW})^{-1} \quad (9)$$

通过最小误差假设，将 E_{gW} 表达为

$$E_{gW} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： δ_x 、 δ_y 、 δ_z 分别为几何误差在 X、Y、Z 轴方向上的位移分量， ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为几何误差在 X、

Y、Z 轴方向上的转角分量。

1.3 齿面误差模型

在进行磨削加工过程中，忽略掉砂轮的修整误差，用 η 来表示砂轮轴向廓形参数，则修正之后砂轮的轴向廓形坐标矢量为

$$r^q(\eta) = [x^q(\eta), y^q(\eta), 0, 1]^T \quad (11)$$

砂轮的回转曲面是由其轴向廓形绕轴线做回转运动所形成的轨迹面。砂轮回转参数用 φ 表示，则在砂轮的坐标系当中，其坐标矢量为

$$r^w(\eta, \varphi) = T_{qw}(\varphi) r^q(\eta) \quad (12)$$

$$T_{qw}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

则砂轮单位法矢为

$$n^w(\eta, \varphi) = \frac{\frac{\partial r^w(\eta, \varphi)}{\partial \eta} \times \frac{\partial r^w(\eta, \varphi)}{\partial \varphi}}{\left| \frac{\partial r^w(\eta, \varphi)}{\partial \eta} \times \frac{\partial r^w(\eta, \varphi)}{\partial \varphi} \right|} \quad (14)$$

由于砂轮曲面特征可以用单位法矢和坐标矢量联合表示，因此，在齿轮坐标系中理想的砂轮曲面可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{r}^s(\eta, \varphi, \alpha, \beta, x) = \mathbf{T}_{gW} \cdot \mathbf{r}^w(\eta, \varphi) \\ \mathbf{n}^s(\eta, \varphi, \alpha, \beta, x) = \mathbf{T}_{gW} \cdot \mathbf{n}^w(\eta, \varphi) \end{cases} \quad (15)$$

在实际加工中，各轴的几何误差用向量 $\mathbf{G} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 表示，故实际的砂轮曲面为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_e^s(\eta, \varphi, \alpha, \beta, x, \mathbf{G}) = \mathbf{T}_{gW}^e \cdot \mathbf{r}^w(\eta, \varphi) \\ \mathbf{n}_e^s(\eta, \varphi, \alpha, \beta, x, \mathbf{G}) = \mathbf{T}_{gW}^e \cdot \mathbf{n}^w(\eta, \varphi) \end{cases} \quad (16)$$

砂轮与齿轮磨削接触点的条件是：从齿轮坐标系的原点向砂轮回转面上做一点径矢 \mathbf{r}^s ，若这一点在回转面上的法线 \mathbf{n}^s 与这一点绕齿轮轴线 \mathbf{k}^s 的线速度矢量垂直，说明这个点是磨削接触点。因此，理想的接触条件与实际的接触条件分别是：

$$f(\eta, \varphi, \alpha, \beta, x) = (\mathbf{k}^s \times \mathbf{r}^s + \mathbf{k}^s) \cdot \mathbf{n}^s = 0 \quad (17)$$

$$f_e(\eta, \varphi, \alpha, \beta, x, \mathbf{G}) = (\mathbf{k}^s \times \mathbf{r}_e^s + \mathbf{k}^s) \cdot \mathbf{n}_e^s = 0 \quad (18)$$

式中： β 是砂轮安装角，常数； x 是砂轮到齿轮的中心距，常数； α 是螺旋加工参数，只有在几何误差存在时，才会影响到接触线形状，而几何误差向量 \mathbf{G} 只与各运动轴的位置有关。当 α 为常数 α_k 时， $f=0$ 作为接触条件就只成为与砂轮的轴向廓形 η 和回转廓形参数 φ 有关。由于其轴向廓形 η 范围已知，将 η 等分成 n 个离散数值，令 $\eta = \eta_j (j = 1, 2, 3, \dots, n)$ ，根据 $f=0$ 求出对应的 φ_j ，然后将 (η, φ_j) 代入 \mathbf{r}^s ，即可求得接触点单位法矢 $\mathbf{n}_{kj}^s(\eta, \varphi_j)$ 和坐标矢量 $\mathbf{r}_{kj}^s(\eta, \varphi_j)$ 。由于 η 与 $f=0$ 联合求出 φ ，因此 η 的函数可用 φ 来表示，则由 n 个接触点拟合成的第 k 条接触线也可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_k^s(\eta) = \{\mathbf{r}_{kj}^s(\eta, \varphi_j)\} \\ \mathbf{n}_k^s(\eta) = \{\mathbf{n}_{kj}^s(\eta, \varphi_j)\} \end{cases} \quad (19)$$

而齿面可以看成是由 λ 条离散的接触线组成，因此理想和实际齿面分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{r}^s(\eta) = \{\mathbf{r}_k^s(\eta)\} \\ \mathbf{n}^s(\eta) = \{\mathbf{n}_k^s(\eta)\} \end{cases}, \quad k = 1, 2, \dots, \lambda \quad (20)$$

$$\begin{cases} \mathbf{r}_e^s(\eta) = \{\mathbf{r}_{ek}^s(\eta)\} \\ \mathbf{n}_e^s(\eta) = \{\mathbf{n}_{ek}^s(\eta)\} \end{cases}, \quad k = 1, 2, \dots, \lambda \quad (21)$$

故可建立各轴几何误差与齿面误差的关系，模型为

$$\begin{cases} \delta_{Fg} = [\delta_{gx}, \delta_{gy}, \delta_{gz}, 0]^T = \mathbf{r}_{ekj}^s - \mathbf{r}_{kj}^s \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{Fg} = [\varepsilon_{gx}, \varepsilon_{gy}, \varepsilon_{gz}, 0]^T = \mathbf{n}_{ekj}^s - \mathbf{n}_{kj}^s \end{cases} \quad (22)$$

$k = 1, 2, \dots, \lambda \quad j = 1, 2, \dots, n$

2 加工误差在线监测及补偿

由于数控机床在磨削过程中，会出现不同方向的几何误差，机床精度达不到技术规定要求，为了提高机床加工精度，对其加工过程进行在线监测。在机床加工过程中，反馈元件用于在线信息传递，可以实现对进给系统的运行状态和运动精度进行实

时监测和控制。

2.1 在线监测

监测目的是通过内置传感器，完成对信号数据的采集，结合数据处理技术和特征提取方法，将其转化为可处理信号。在采集过程中，信号数据需进行采样、编码和传输以便将其输入到计算机系统中，信息分析、处理、存储和显示是通过计算机系统完成的，这些操作可为实时监控提供关键的数据。在线监测系统如图3所示。

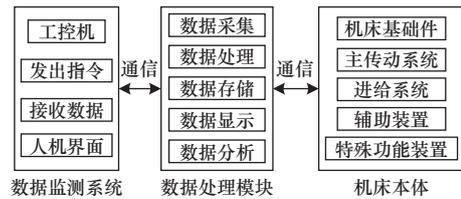


图3 在线监测系统

对内斜齿轮进行磨削如图4所示，工件参数见表3。加工过程中，C轴旋转是为了使加工齿轮齿槽处于既定的位置，A轴转动确定的是加工内斜齿的螺旋角，Z轴方向移动是为了实现齿宽方向磨削的进给运动，在磨削齿槽过程当中，X、Y、A、C轴一直保持锁止的状态。

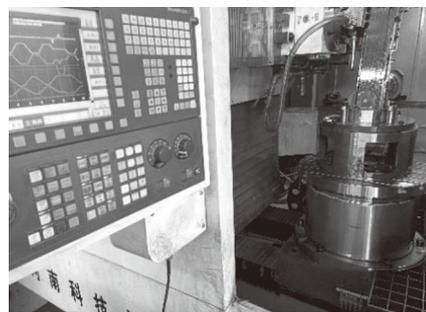


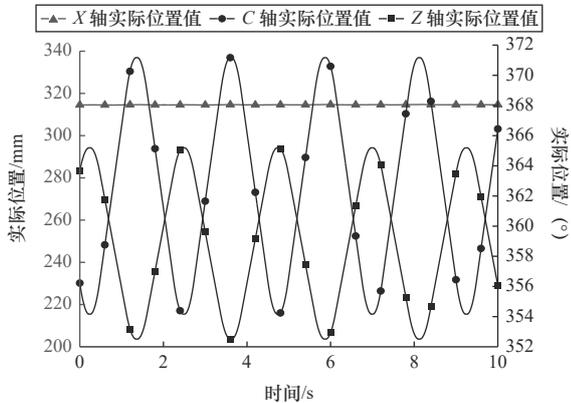
图4 内斜齿轮加工实验

表3 内斜齿轮的参数

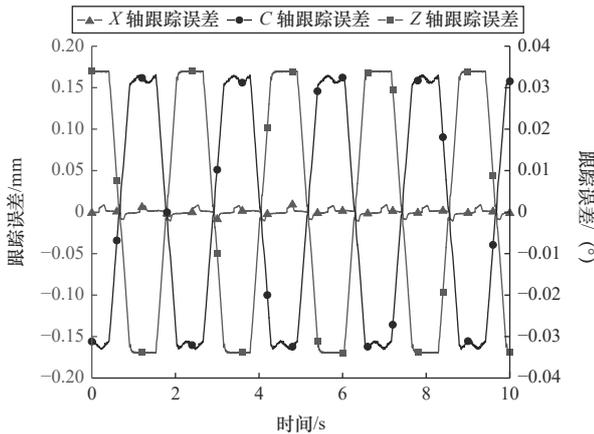
参数	数值
齿数 Z	79
模数 m_n/mm	2
压力角 $a_n/(\circ)$	20
螺旋角 $\beta/(\circ)$	15
齿宽 b/mm	45
变位系数 x_n	0

测试过程中，分别对各轴动态位置信号进行采集，如图5a所示。由于受切削刀具与工件相互作用的影响，检测出 X、Z、C 轴的位置信号出现了

明显的变化，如图 5b 所示，X 轴的跟踪误差范围约为 ± 0.01 mm，波动幅值微小；Z 轴与 X 轴相比，波动幅值变化较大，跟踪误差范围约为 ± 0.17 mm；C 轴位置在磨削的过程中和 Z 轴的波动趋势相似，C 轴幅值变化的范围为 $\pm 0.033^\circ$ 。



(a) 实际位置



(b) 跟踪误差

图 5 机床 X、Z、C 轴位移信号

2.2 误差补偿

数控机床几何误差^[15]补偿分为硬件补偿和软件补偿。硬件补偿采用机械式补偿来提高其加工精度，该方法成本高、通用性差、设计的周期时间长，并且难以用数控方法进行反馈控制，因此硬件补偿在机床的应用中较少；软件补偿是通过对机床各项误差源研究，配合计算机软件与数控系统对其进行反向误差补偿，来提高机床的加工精度及性能的。软件补偿基本原理如图 6 所示，在实验中选用列表法对机床进行误差补偿，不需要改变工件三维模型和机床加工程序，只需要在西门子系统中把测量好的误差补偿值输入到其误差补偿表里，就能实现误差修正。

基于磨削内斜齿加工误差在线监测，对机床参与运动的轴误差特性进行测试分析，发现 Z、C 轴

的误差较大。根据误差曲线形状，利用动态操作功能将反向加权补偿计算值实时补偿到机床轴运动中，对其误差值进行补偿。

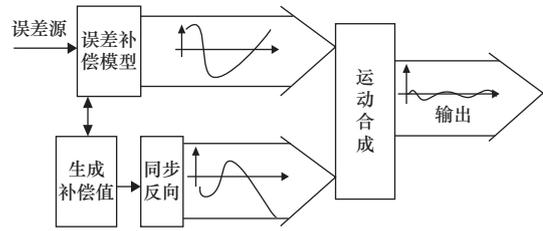


图 6 软件补偿基本原理图

3 齿面误差检测

为验证补偿后的齿轮精度有所提高，对补偿前后的齿轮进行检测，采用的检测设备是格里森 650GMS，实际测量平台如图 7 所示。

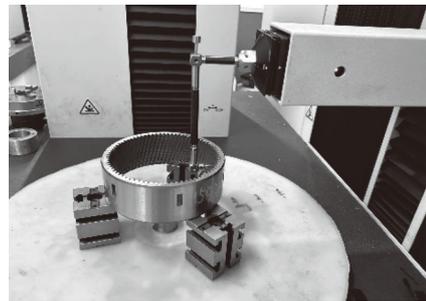


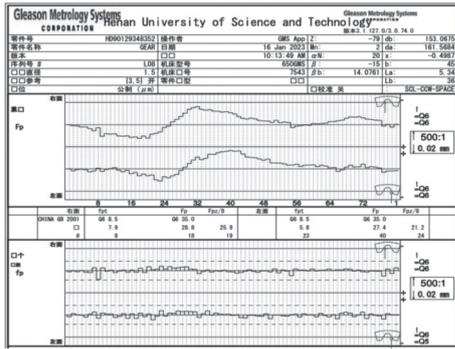
图 7 内斜齿轮实际测量平台

内斜齿轮的误差是按照圆柱齿轮误差检测标准进行评定的，用实际数据来表示机床几何误差对齿面的影响，分别是内斜齿轮的齿距累积总偏差 F_p 、单个齿距偏差 f_p 和齿廓总偏差 F_a 等精度标准。对加工内斜齿轮补偿前与补偿后进行检测，检测报告如图 8 和图 9 所示。

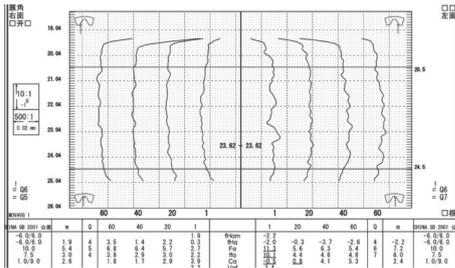
由表 4 可以看出，误差补偿之后内斜齿的加工误差明显减少，说明补偿后机床的加工精度有了显著提高。

表 4 机床误差补偿前后内斜齿轮精度对比

内斜齿轮误差	补偿前误差/ μm	补偿后误差/ μm	精度等级
右齿面累积总偏差 F_p	28.8	24.1	6级提升至5级
左齿面累积总偏差 F_p	27.4	17.2	6级提升至4级
右齿面单个齿距偏差 f_p	7.9	6.2	6级提升至5级
左齿面单个齿距偏差 f_p	5.8	3.6	5级提升至4级
齿廓总偏差 F_a	11.3	7.3	7级提升至5级

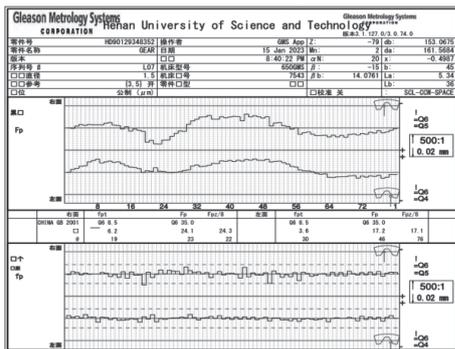


(a) 齿距偏差

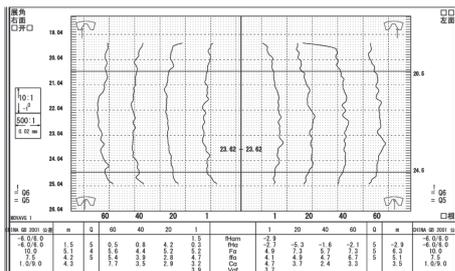


(b) 齿形偏差

图8 补偿前检测报告



(a) 齿距偏差



(b) 齿形偏差

图9 补偿后检测报告

4 结语

(1) 通过齐次坐标变换原理，对工件-床身-刀具进行坐标转换，建立运动链几何误差模型。

(2) 通过内置传感器，监测机床在磨削内斜齿轮时各轴的运动状态，发现机床的X轴误差幅值波动较小，Z、C轴误差幅值波动较为明显，因此，对机床的Z、C轴进行反向误差补偿。

(3) 通过齿轮检测分析仪对补偿前后的齿轮进行检测，经过对比分析，发现补偿后的各齿面误差均有显著减少。

综上所述，数控机床在实际加工中各轴均存在几何误差，通过机床的在线监测系统和软件补偿，可以提高工件的加工精度和表面质量，对机床加工精度提高具有重要意义。

参考文献

- [1] 章鸿. 五轴机床分类运动学建模及后置处理验证 [J]. 制造技术与机床, 2019(4): 180-183.
- [2] 杜正春, 杨建国, 冯其波. 数控机床几何误差测量研究现状及趋势 [J]. 航空制造技术, 2017(6): 34-44.
- [3] 董泽园, 李杰, 刘辛军, 等. 数控机床两种几何误差建模方法有效性试验研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 137-147.
- [4] 李晓晓, 孙付春, 吴昊荣. 数控机床关键几何误差元素溯源研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(1): 147-151, 156.
- [5] 田凤桢, 侯力, 谢超, 等. 圆弧齿线圆柱齿轮加工机床运动链设计与误差分析 [J]. 机械设计与制造, 2020(12): 1-4.
- [6] 付国强, 饶勇建, 谢云鹏, 等. 几何误差贡献值影响下五轴数控机床运动轴误差灵敏度分析方法 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(13): 1518-1528.
- [7] 杨斌. 基于内置传感器的数控机床动态加工误差测量方法 [J]. 机床与液压, 2017, 45(1): 35-39.
- [8] 史燕, 吴璞. 基于PID控制的多轴联动数控机床运动误差补偿 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 278-282.
- [9] 吕学祜, 郭前建, 王昊天, 等. 数控机床误差补偿关键技术综述 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(11): 104-111, 119.
- [10] 陈启迪, 胡小龙, 吝敏, 等. 超精密加工误差补偿技术研究综述 [J]. 中国机械工程, 2023, 34(3): 253-268.
- [11] 卢成伟, 钱博增, 王慧敏, 等. 工件分特征下的五轴数控机床关键几何误差分析与补偿方法 [J]. 中国机械工程, 2022, 33(14): 1646-1653.
- [12] 季泽平, 田春苗, 郭世杰. 数控机床几何误差研究现状与展望 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 65-77.
- [13] 王洪乐, 周青华, 熊青春. 基于多体系统理论的数控机床加工精度几何误差预测模型 [J]. 制造技术与机床, 2018(5): 78-83.
- [14] 王勇, 刘洋, 朱嘉敏, 等. QMB125球笼沟道磨床几何误差建模与敏感度分析 [J]. 机械设计与制造, 2022, 373(3): 30-35, 40.
- [15] 夏长久, 王时龙, 孙守利, 等. 五轴数控成形磨齿机几何误差一齿面误差模型及关键误差识别 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(5): 1191-1201.

第一作者: 浮文华, 女, 1998年生, 在读研究生, 研究方向为内斜齿轮的加工。E-mail: 1900934602@qq.com

通信作者: 王会良, 男, 1974年生, 博士, 副教授, 研究方向为工业工程、机械产品数字化设计与性能分析、计算机集成制造系统等。E-mail: whl-ly@163.com

(编辑 曲书瑶)

(收修改稿日期: 2023-05-07)

文章编号: 20231126

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。