



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105058163 A

(43) 申请公布日 2015. 11. 18

(21) 申请号 201510236553. 1

(22) 申请日 2015. 05. 11

(71) 申请人 西安理工大学

地址 710048 陕西省西安市金花南路 5 号

(72) 发明人 高峰 孟振华 李艳 赵柏涵

李英浩

(74) 专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214

代理人 李娜

(51) Int. Cl.

B23Q 17/00(2006. 01)

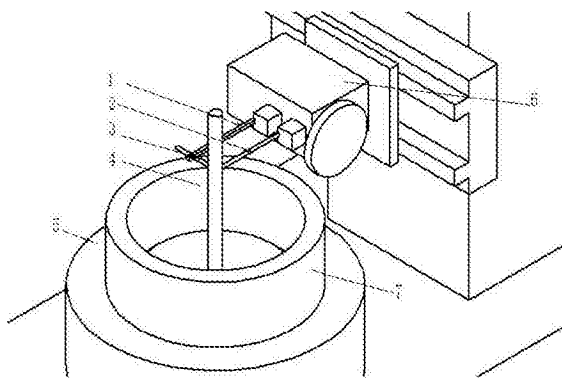
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

磨齿机工作状态时热误差测量装置及测量方法

(57) 摘要

本发明公开了一种磨齿机工作状态时热误差测量装置,包括温度测量部分和位移测量部分;温度测量部分为在磨齿机的主要发热部位上设置温度传感器;位移测量部分包括通过支架固定在磨齿机主轴基座上的 X 向位移传感器和 Y 向位移传感器,X 向位移传感器和 Y 向位移传感器与检棒接触,检棒固定在转台上。还公开了利用该装置进行热误差测量的方法,包括位移测量、计算检棒圆心坐标序列、排除系统误差、计算转台轴线表达式以及热误差建模。该装置在现有磨齿机上设置 X 向位移传感器、Y 向位移传感器以及在磨齿机的主要发热部位布置温度传感器,用该装置进行热误差测量,测量精度高,补偿效果更好。该装置结构简单,测量方法容易掌握,易于推广。



1. 磨齿机工作状态时热误差测量装置,其特征在于,包括温度测量部分和位移测量部分;

所述温度测量部分包括分别设置在磨齿机的主轴电机、主轴前后端盖、进给驱动电机、转台面、冷却液导流槽、立柱、床身、转台基座、主轴基座上的温度传感器;

所述位移测量部分包括通过支架(1)固定在磨齿机主轴基座(6)上的X向位移传感器(2)和Y向位移传感器(3),所述X向位移传感器(2)和Y向位移传感器(3)与检棒(4)接触,所述检棒(4)固定在转台(5)上。

2. 根据权利要求1所述的磨齿机工作状态时热误差测量装置,其特征在于,所述检棒(4)长度为680mm-720mm,直径为48mm-52mm。

3. 根据权利要求1所述的磨齿机工作状态时热误差测量装置,其特征在于,所述支架(1)为碳纤维支架。

4. 磨齿机工作状态时热误差测量方法,其特征在于,采用一种测量装置,其结构为:包括温度测量部分和位移测量部分;

所述温度测量部分包括分别设置在磨齿机的主轴电机、主轴前后端盖、进给驱动电机、转台面、冷却液导流槽、立柱、床身、转台基座、主轴基座上的温度传感器;

所述位移测量部分包括通过支架(1)固定在磨齿机主轴基座(6)上的X向位移传感器(2)和Y向位移传感器(3),所述X向位移传感器(2)和Y向位移传感器(3)与检棒(4)接触,所述检棒(4)固定在转台(5)上;

所述检棒(4)长度为680mm-720mm,直径为48mm-52mm;

所述支架(1)为碳纤维支架;

测量方法具体包括以下步骤:

步骤1:位移测量:

首先设X向位移传感器(2)轴线与Y向位移传感器(3)轴线交点为测量坐标系原点O,测量坐标系X、Y、Z轴平行于机床坐标系;然后旋转转台(5),旋转的过程中记录X向位移传感器(2)的数据 Dx_{ij} 和Y向位移传感器(3)的数据 Dy_{ij} ;

步骤2:计算检棒(4)圆心坐标序列:

依据所述步骤1得到的X向位移传感器(2)的数据 Dx_{ij} 和Y向位移传感器(3)的数据 Dy_{ij} 以及检棒(4)半径 r_b ,利用平面圆方程 $(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=r_b^2$ 计算出当前测量平面下检棒(4)圆心坐标序列 r_j , $j=(1,2,3,4,5,6)$;

步骤3:排除系统误差:

将所述步骤2得到的检棒(4)圆心坐标序列 r_j 进行最小二乘圆拟合,得到转台(5)轴心坐标序列 R_i , $i=(1,2,3,4,5)$;

步骤4:求转台(5)轴线表达式:

将所述步骤3得到的转台(5)轴心坐标序列 R_i 进行空间直线最小二乘拟合,求出转台(5)轴线空间表达式为:

$$\frac{x-R_{x0}}{X} = \frac{y-R_{y0}}{Y} = \frac{z-R_{z0}}{Z} \quad (1)$$

式(1)中, $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 为转台轴线上一点, $a=(X, Y, Z)$ 为转台轴线方向向量;

步骤5:热误差建模,具体方法为:

步骤 5.1:根据所述步骤 3 得出的转台 (5) 轴心坐标序列 R_i , 求出测量坐标系 X、Y 方向分量 X_i 和 Y_i , 再根据所述步骤 4 得出的转台轴线表达式导出转台 (5) 轴线角度热误差序列: $\theta_p = (\theta_{p1}, \theta_{p2}, \dots, \theta_{pn})$, 其中 p 为测量数据组数, $p = (1, 2, \dots, n)$;

步骤 5.2:提取温度传感器数据, 记为 T_{pq} , q 为温度传感器编号, $q = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)$, p 为测量数据组数, $p = (1, 2, \dots, n)$;

步骤 5.3:根据相关性判别公式:

$$\rho_{T_{pq}, R_p} = \frac{\sum_{p=1}^n (T_{pq} - \bar{T}_q)(R_p - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{p=1}^n (T_{pq} - \bar{T}_q)^2} \sqrt{\sum_{p=1}^n (R_p - \bar{R})^2}} \quad (2)$$

式 (2) 中, R_p 为某一界面内检棒圆心坐标随着温度变化的热误差序列,

令: $\rho_{T_{pq}, R_p} \geq \lambda$, 其中, λ 为相关性系数阈值,

利用多元线性回归理论建立热误差模型:

$$X = T * A = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y = T * B = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\theta = T * C = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式中, A、B、C 分别代表热误差序列 X、Y、 θ 的热误差模型中的温度变量系数向量;

步骤 5.4:根据最小二乘原理求解系数向量 $A = (T^T T)^{-1} T^T X$, $B = (T^T T)^{-1} T^T Y$, $C = (T^T T)^{-1} T^T \theta$, 求得系数向量 A、B、C;

步骤 5.5:将所述步骤 5.4 得出的系数向量 A、B、C 代入热误差模型中即得到磨齿机的热误差。

5. 根据权利要求 4 所述的测量热误差的方法, 其特征在于, 所述步骤 1 具体按照以下步骤实施:

步骤 1.1:沿坐标系 Z 方向每隔 90mm-110mm 标记 5 个与坐标系 Z 轴垂直的测量平面, 记为 S_i , 其中, $i = (1, 2, 3, 4, 5)$;

步骤 1.2:将 X 向位移传感器 (2) 和 Y 向位移传感器 (3) 置于所述步骤 1.1 所述的测量平面 S_i 内,令转台 (5) 旋转 360° ,期间每旋转 60° 记录 X 向位移传感器 (2) 的数据 Dx_{ij} 和 Y 向位移传感器 (3) 的数据 Dy_{ij} ,其中, $i = (1,2,3,4,5)$, $j = (1,2,3,4,5,6)$;

步骤 1.3:间隔 10-15 分钟执行所述步骤 1.2 一次,完成 p 组测量数据采集。

6. 根据权利要求 4 所述的测量热误差的方法,其特征在于,所述步骤 4 求转台 (5) 轴线表达式的具体方法为:

设 d_i 为转台轴心坐标序列 R_i 到轴线距离的平方和,

$$则: d_i = \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} R_{iy} - R_{y0} & R_{iz} - R_{z0} \\ Y & Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_{ix} - R_{x0} & R_{iz} - R_{z0} \\ X & Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_{ix} - R_{x0} & R_{iy} - R_{y0} \\ X & Y \end{vmatrix}}{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (6)$$

$$令: \begin{cases} \frac{\partial(\sum_i^s d_i^2)}{\partial X} = 0 \\ \frac{\partial(\sum_i^s d_i^2)}{\partial Y} = 0 \\ \frac{\partial(\sum_i^s d_i^2)}{\partial Z} = 0 \end{cases}$$

求解后得到转台轴线上一点 $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 以及转台轴线方向向量 $a = (X, Y, Z)$;

将 $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 和 $a = (X, Y, Z)$ 代入 $\frac{x-R_{x0}}{X} = \frac{y-R_{y0}}{Y} = \frac{z-R_{z0}}{Z}$ 中得出转台轴线表达式。

磨齿机工作状态时热误差测量装置及测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于精密机床加工技术领域,涉及一种磨齿机工作状态时热误差测量装置,本发明还涉及利用上述装置测量磨齿机热误差的方法。

背景技术

[0002] 在磨齿加工中,冷却液在冷却工件的同时吸收大量磨削热,集聚在工作台的 T 型槽和导流槽中,造成机床关键部件和加工环境的明显升温,这种情况称为冷却液升温效应。冷却液升温效应是导致磨齿机热误差的主要因素。

[0003] 目前国内外针对机床热误差的研究主要是在非加工状态下进行,没有充分考虑冷却液升温效应对于机床热误差的影响。真实加工条件下,飞溅的冷却液会对激光干涉仪和电涡流传感器造成严重干扰;而不考虑冷却液升温效应的非加工状态热误差预测模型对实际加工状态下的热误差预测效果很差。因此,进行加工状态下热误差测量对提高精密磨齿机加工精度具有重要意义。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种磨齿机工作状态时热误差测量装置,解决了现有装置因无法测量磨齿机工作状态下的热误差而造成的磨齿机加工精度低的问题。

[0005] 本发明的另一目的是提供利用上述测量装置测量磨齿机热误差的方法。

[0006] 本发明所采用的第一种技术方案是,一种磨齿机工作状态时热误差测量装置,包括温度测量部分和位移测量部分;温度测量部分包括设置在磨齿机的主轴电机、主轴前后端盖、进给驱动电机、转台面、冷却液导流槽、立柱、床身、转台基座、主轴基座上的温度传感器;位移测量部分包括通过支架固定在磨齿机主轴基座上的 X 向位移传感器和 Y 向位移传感器,X 向位移传感器和 Y 向位移传感器与检棒接触,检棒固定在转台上。

[0007] 本发明第一种技术方案的特点还在于,

[0008] 检棒长度为 680mm-720mm,直径为 48mm-52mm。

[0009] 支架为碳纤维支架。

[0010] 本发明所采用的第二种技术方案是,磨齿机工作状态时热误差测量方法,采用一种测量装置,其结构为:

[0011] 包括温度测量部分和位移测量部分;温度测量部分包括设置在磨齿机的主轴电机、主轴前后端盖、进给驱动电机、转台面、冷却液导流槽、立柱、床身、转台基座、主轴基座上的温度传感器;位移测量部分包括通过支架固定在磨齿机主轴基座上的 X 向位移传感器和 Y 向位移传感器,X 向位移传感器和 Y 向位移传感器与检棒接触,检棒固定在转台上;

[0012] 检棒长度为 680mm-720mm,直径为 48mm-52mm;

[0013] 支架为碳纤维支架;

[0014] 测量方法具体包括以下步骤:

[0015] 步骤 1:位移测量:

[0016] 首先设X向位移传感器轴线与Y向位移传感器轴线交点为测量坐标系原点O,测量坐标系X、Y、Z轴平行于机床坐标系;然后旋转转台,旋转的过程中记录X向位移传感器的数据 Dx_{ij} 和Y向位移传感器的数据 Dy_{ij} ;

[0017] 步骤2:计算检棒圆心坐标序列:

[0018] 依据步骤1得到的X向位移传感器的数据 Dx_{ij} 和Y向位移传感器的数据 Dy_{ij} 以及检棒半径 r_b ,利用平面圆方程 $(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=r_b^2$ 计算出当前测量平面下检棒圆心坐标序列 $r_j, j=(1,2,3,4,5,6)$;

[0019] 步骤3:排除系统误差:

[0020] 将步骤2得到的检棒圆心坐标序列 r_j 进行最小二乘圆拟合,得到转台轴心坐标序列 $R_i, i=(1,2,3,4,5)$;

[0021] 步骤4:求转台轴线表达式:

[0022] 将步骤3得到的转台轴心坐标序列 R_i 进行空间直线最小二乘拟合,求出转台轴线空间表达式为:

$$[0023] \quad \frac{x-R_{x0}}{X} = \frac{y-R_{y0}}{Y} = \frac{z-R_{z0}}{Z} \quad (1)$$

[0024] 式(1)中, $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 为转台轴线上一点, $a=(X, Y, Z)$ 为转台轴线方向向量;

[0025] 步骤5:热误差建模,具体方法为:

[0026] 步骤5.1:根据步骤3得出的转台轴心坐标序列 R_i ,求出测量坐标系X、Y方向分量 X_i 和 Y_i ,再根据所述步骤4得出的转台轴线表达式导出转台轴线角度热误差序列: $\theta_p=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$,其中 p 为测量数据组数, $p=(1,2, \dots, n)$;

[0027] 步骤5.2:提取温度传感器数据 T_{pq}, q 为温度传感器编号, $q=(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)$, p 为测量数据组数, $p=(1,2, \dots, n)$;

[0028] 步骤5.3:根据相关性判别公式:

$$[0029] \quad \rho_{T_{pq}, R_p} = \frac{\sum_{p=1}^n (T_{pq} - \bar{T}_q)(R_p - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{p=1}^n (T_{pq} - \bar{T}_q)^2} \sqrt{\sum_{p=1}^n (R_p - \bar{R})^2}} \quad (2)$$

[0030] 式(2)中, R_p 为某一界面内检棒圆心坐标随着温度变化的热误差序列,

[0031] 令: $\rho_{T_{pq}, R_p} \geq \lambda$,其中, λ 为相关性系数阈值,

[0032] 利用多元线性回归理论建立热误差模型:

$$[0033] \quad X = T * A = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdot & \cdot & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \cdot & \cdot & T_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{m1} & T_{m2} & \cdot & \cdot & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[0034] \quad Y = T * B = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdot & \cdot & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \cdot & \cdot & T_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{m1} & T_{m2} & \cdot & \cdot & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[0035] \quad \theta = T * C = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdot & \cdot & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \cdot & \cdot & T_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{m1} & T_{m2} & \cdot & \cdot & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0036] 上式中, A、B、C 分别代表热误差序列 X、Y、θ 的热误差模型中的温度变量系数向量;

[0037] 步骤 5.4:根据最小二乘原理求解系数向量 $A = (T^T T)^{-1} T^T X$, $B = (T^T T)^{-1} T^T Y$, $C = (T^T T)^{-1} T^T \theta$, 求得系数向量 A、B、C;

[0038] 步骤 5.5:将所述步骤 5.4 得出的系数向量 A、B、C 代入热误差模型中即得到磨齿机的热误差。

[0039] 本发明第二种技术方案的特点还在于,

[0040] 步骤 1 具体按照以下步骤实施:

[0041] 步骤 1.1:沿坐标系 Z 方向每隔 90mm-110mm 标记 5 个与坐标系 Z 轴垂直的测量平面, 记为 S_i , 其中, $i = (1, 2, 3, 4, 5)$;

[0042] 步骤 1.2:将 X 向位移传感器和 Y 向位移传感器置于步骤 1.1 所述的测量平面 S_i 内, 令转台旋转 360° , 期间每旋转 60° 记录 X 向位移传感器的数据 Dx_{ij} 和 Y 向位移传感器的数据 Dy_{ij} , 其中, $i = (1, 2, 3, 4, 5)$, $j = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$;

[0043] 步骤 1.3:间隔 10-15 分钟执行步骤 1.2 一次, 完成 p 组测量数据采集。

[0044] 步骤 4 求转台轴线表达式的具体方法为:

[0045] 设 d_i 为转台轴心坐标序列 R_i 到轴线距离的平方和,

$$[0046] \quad \text{则: } d_i = \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} R_{iy} - R_{y0} & R_{iz} - R_{z0} \\ Y & Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_{ix} - R_{x0} & R_{iz} - R_{z0} \\ X & Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_{ix} - R_{x0} & R_{iy} - R_{y0} \\ X & Y \end{vmatrix}}{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (6)$$

$$[0047] \quad \text{令} : \begin{cases} \frac{\partial(\sum_{i=1}^5 d_i^2)}{\partial X} = 0 \\ \frac{\partial(\sum_{i=1}^5 d_i^2)}{\partial Y} = 0 \\ \frac{\partial(\sum_{i=1}^5 d_i^2)}{\partial Z} = 0 \end{cases}$$

[0048] 求解后得到转台轴线上一点 $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 以及转台轴线方向向量 $a = (X, Y, Z)$;

[0049] 将 $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 和 $a = (X, Y, Z)$ 代入 $\frac{x-R_{x0}}{X} = \frac{y-R_{y0}}{Y} = \frac{z-R_{z0}}{Z}$ 中得出转台轴线表达式。

[0050] 本发明的有益效果是 :磨齿机工作状态时热误差测量装置,在现有磨齿机上设置 X 向位移传感器和 Y 向位移传感器,可以对加工状态的磨齿机进行位移测量,在磨齿机的主要发热部位布置温度传感器,可以采集磨齿机工作状态时的温度,将位移与温度结合便可得出磨齿机工作状态时的热误差 ;用该装置进行热误差测量,测量精度高,补偿效果更好 ;并且利用磨齿加工 Z 方向往复运动进行测量,避免引入 X、Y 方向重复定位误差 ;该装置结构简单,便于现场安装,测量方法容易掌握,易于推广。

附图说明

[0051] 图 1 是本发明一种磨齿机工作状态时热误差测量装置的结构示意图 ;

[0052] 图 2 是利用一种磨齿机工作状态时热误差测量装置测量热误差方法中排除系统误差的示意图。

[0053] 图中,1. 支架,2. X 向位移传感器,3. Y 向位移传感器,4. 检棒,5. 转台,6. 主轴基座。

具体实施方式

[0054] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0055] 本发明一种磨齿机工作状态时热误差测量装置的结构如图 1 所示,包括温度测量部分和位移测量部分 ;温度测量部分包括设置在磨齿机的主轴电机、主轴前后端盖、进给驱动电机、转台面、冷却液导流槽、立柱、床身、转台基座、主轴基座上的温度传感器 ;位移测量部分包括通过支架 1 固定在磨齿机主轴基座 6 上的 X 向位移传感器 2 和 Y 向位移传感器 3, X 向位移传感器 2 和 Y 向位移传感器 3 与检棒 4 接触,检棒 4 固定在转台 5 上,检棒 4 长度为 680mm-720mm,直径为 48mm-52mm,支架 1 为碳纤维支架。

[0056] 磨齿机工作状态时热误差测量方法,采用一种测量装置,其结构为 :

[0057] 包括温度测量部分和位移测量部分 ;温度测量部分包括设置在磨齿机的主轴电机、主轴前后端盖、进给驱动电机、转台面、冷却液导流槽、立柱、床身、转台基座、主轴基座

上的温度传感器；位移测量部分包括通过支架 1 固定在磨齿机主轴基座 6 上的 X 向位移传感器 2 和 Y 向位移传感器 3，X 向位移传感器 2 和 Y 向位移传感器 3 与检棒 4 接触，检棒 4 固定在转台 5 上，检棒 4 长度为 680mm-720mm，直径为 48mm-52mm，支架 1 为碳纤维支架。

[0058] 测量方法具体包括以下步骤：

[0059] 步骤 1：位移测量：

[0060] 首先设 X 向位移传感器 2 轴线与 Y 向位移传感器 3 轴线交点为测量坐标系原点 0，测量坐标系 X、Y、Z 轴平行于机床坐标系；然后旋转转台 5，旋转的过程中记录 X 向位移传感器 2 的数据 Dx_{ij} 和 Y 向位移传感器 3 的数据 Dy_{ij} ；

[0061] 步骤 1 具体按照以下步骤实施，如图 2 所示：

[0062] 步骤 1.1：沿坐标系 Z 方向每隔 90mm-110mm 标记 5 个与坐标系 Z 轴垂直的测量平面，记为 S_i ，其中， $i = (1, 2, 3, 4, 5)$ ；

[0063] 步骤 1.2：将 X 向位移传感器 2 和 Y 向位移传感器 3 置于步骤 1.1 所述的测量平面 S_i 内，令转台 5 旋转 360° ，期间每旋转 60° 记录 X 向位移传感器 2 的数据 Dx_{ij} 和 Y 向位移传感器 3 的数据 Dy_{ij} ，其中， $i = (1, 2, 3, 4, 5)$ ， $j = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$ ；

[0064] 步骤 1.3：间隔 10-15 分钟执行步骤 1.2 一次，完成 p 组测量数据采集；

[0065] 步骤 2：计算检棒 4 圆心坐标序列：

[0066] 依据步骤 1 得到的 X 向位移传感器 2 的数据 Dx_{ij} 和 Y 向位移传感器 3 的数据 Dy_{ij} 以及检棒 4 半径 r_b ，利用平面圆方程 $(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = r_b^2$ 计算出当前测量平面下检棒 4 圆心坐标序列 r_j ， $j = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$ ；

[0067] 步骤 3：排除系统误差：

[0068] 将步骤 2 得到的检棒 4 圆心坐标序列 r_j 进行最小二乘圆拟合，得到转台 5 轴心坐标序列 R_i ， $i = (1, 2, 3, 4, 5)$ ；

[0069] 步骤 4：求转台 5 轴线表达式：

[0070] 将步骤 3 得到的转台 5 轴心坐标序列 R_i 进行空间直线最小二乘拟合，求出转台 5 轴线空间表达式为：

$$[0071] \quad \frac{x-R_{x0}}{X} = \frac{y-R_{y0}}{Y} = \frac{z-R_{z0}}{Z} \quad (1)$$

[0072] 式 (1) 中， $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 为转台轴线上一点， $a = (X, Y, Z)$ 为转台轴线方向向量；

[0073] 具体方法为：

[0074] 设 d_i 为转台轴心坐标序列 R_i 到轴线距离的平方和，

$$[0075] \quad \text{则：} \quad d_i = \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} R_{iy} - R_{y0} & R_{iz} - R_{z0} \\ Y & Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_{ix} - R_{x0} & R_{iz} - R_{z0} \\ X & Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_{ix} - R_{x0} & R_{iy} - R_{y0} \\ X & Y \end{vmatrix}}{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (6)$$

$$[0076] \quad \text{令} : \begin{cases} \frac{\partial(\sum_i^5 d_i^2)}{\partial X} = 0 \\ \frac{\partial(\sum_i^5 d_i^2)}{\partial Y} = 0 \\ \frac{\partial(\sum_i^5 d_i^2)}{\partial Z} = 0 \end{cases}$$

[0077] 求解后得到转台轴线上一点 $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 以及转台轴线方向向量 $a = (X, Y, Z)$;

[0078] 将 $M(R_{x0}, R_{y0}, R_{z0})$ 和 $a = (X, Y, Z)$ 代入 $\frac{x-R_{x0}}{X} = \frac{y-R_{y0}}{Y} = \frac{z-R_{z0}}{Z}$ 中得出转台轴线表达式 ;

[0079] 步骤 5 :热误差建模,具体方法为 :

[0080] 步骤 5.1 :根据步骤 3 得出的转台 5 轴心坐标序列 R_i , 求出测量坐标系 X、Y 方向分量 X_i 和 Y_i , 再根据所述步骤 4 得出的转台轴线表达式导出转台 5 轴线角度热误差序列 : $\theta_p = (\theta_{p1}, \theta_{p2}, \dots, \theta_{pn})$, 其中 p 为测量数据组数, $p = (1, 2, \dots, n)$;

[0081] 步骤 5.2 :提取温度传感器数据 T_{pq} , q 为温度传感器编号, $q = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)$, p 为测量数据组数, $p = (1, 2, \dots, n)$;

[0082] 步骤 5.3 :根据相关性判别公式 :

$$[0083] \quad \rho_{T_{pq}, R_p} = \frac{\sum_{p=1}^n (T_{pq} - \bar{T}_q)(R_p - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{p=1}^n (T_{pq} - \bar{T}_q)^2} \sqrt{\sum_{p=1}^n (R_p - \bar{R})^2}} \quad (2)$$

[0084] 式 (2) 中, R_p 为某一界面内检棒圆心坐标随着温度变化的热误差序列,

[0085] 令 : $\rho_{T_{pq}, R_p} \geq \lambda$, 其中, λ 为相关性系数阈值, λ 的范围为 0.86 到 0.9,

[0086] 利用多元线性回归理论建立热误差模型 :

$$[0087] \quad X = T * A = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[0088] \quad Y = T * B = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[0089] \quad \theta = T^*C = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdot & \cdot & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \cdot & \cdot & T_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{m1} & T_{m2} & \cdot & \cdot & T_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0090] 上式中, A、B、C 分别代表热误差序列 X、Y、 θ 的热误差模型中的温度变量系数向量;

[0091] 步骤 5.4: 根据最小二乘原理求解系数向量 $A = (T^T T)^{-1} T^T X$, $B = (T^T T)^{-1} T^T Y$, $C = (T^T T)^{-1} T^T \theta$, 求得系数向量 A、B、C;

[0092] 步骤 5.5: 将步骤 5.4 得出的系数向量 A、B、C 代入热误差模型中即得到磨齿机的热误差。

[0093] 本发明磨齿机工作状态时热误差测量装置, 在现有磨齿机上设置 X 向位移传感器和 Y 向位移传感器, 可以对加工状态的磨齿机进行位移测量, 在磨齿机的主要发热部位布置温度传感器, 可以采集磨齿机工作状态时的温度, 将位移与温度结合便可得出磨齿机工作状态时的热误差; 用该装置进行热误差测量, 测量精度高, 补偿效果更好; 并且利用磨齿加工 Z 方向往复运动进行测量, 避免引入 X、Y 方向重复定位误差; 该装置结构简单, 便于现场安装, 测量方法容易掌握, 易于推广。

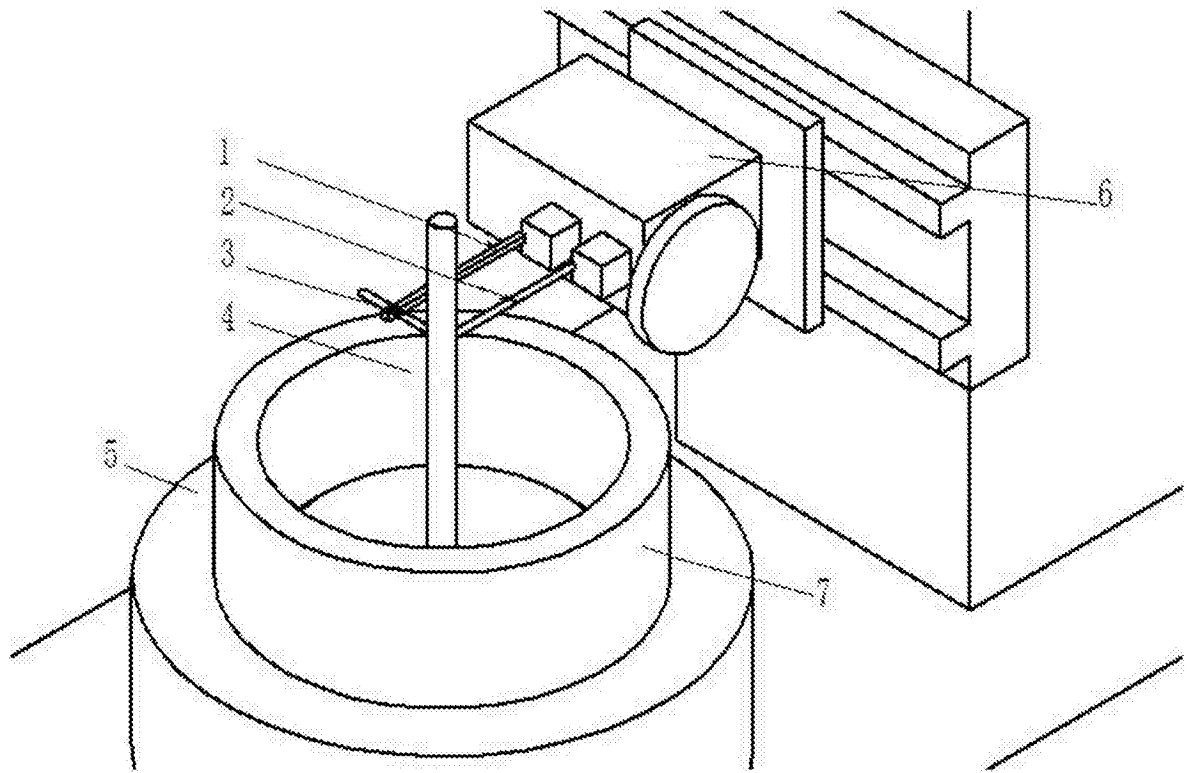


图 1

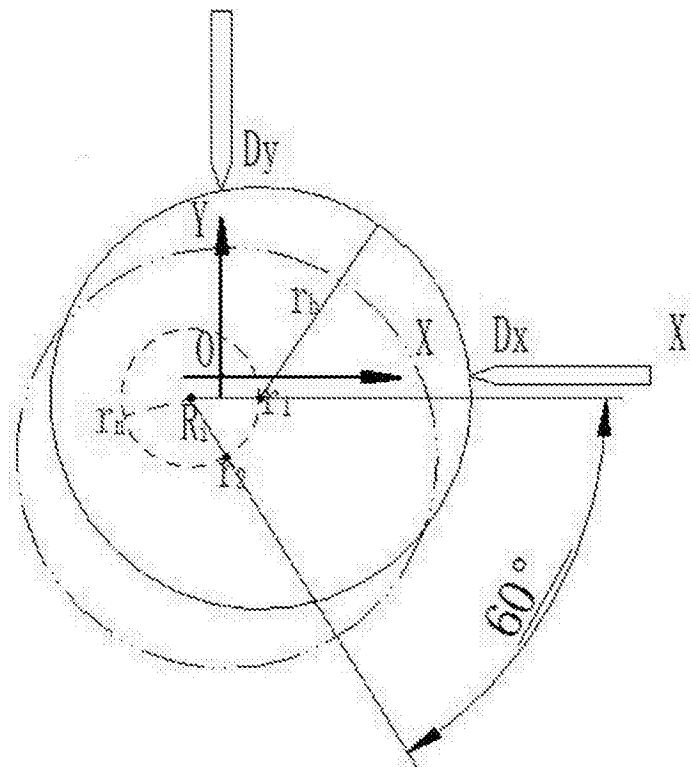


图 2