



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116967540 A

(43) 申请公布日 2023. 10. 31

(21) 申请号 202311172268.9

G06F 17/16 (2006.01)

(22) 申请日 2023.09.12

(71) 申请人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙坪坝正街 174号

(72) 发明人 周杰 孔维建 王时龙 王四宝

董建鹏 肖雨亮 康玲 易力力

陶金洋 夏茂浩

(74) 专利代理机构 重庆航图知识产权代理事务

所(普通合伙) 50247

专利代理师 胡小龙

(51) Int. Cl.

B23F 23/12 (2006.01)

B23Q 15/12 (2006.01)

G06F 30/20 (2020.01)

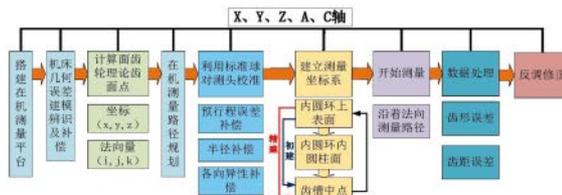
权利要求书4页 说明书13页 附图7页

(54) 发明名称

考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法

(57) 摘要

本发明公开了一种考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,包括如下步骤:步骤一:在机测量几何误差补偿:11)搭建在机测量平台;12)在机测量几何误差建模;13)在机测量几何误差辨识;14)以辨识得到的直线轴几个误差和旋转轴几何误差,补偿在机测量几何误差;步骤二:齿面误差在机测量:21)在齿面上规划测量点,并得到各个测量点的齿面法向量;22)建立测量坐标系;23)依次对各个测量点进行测量,得到面齿轮在各个测量点的实际齿面点;24)根据面齿轮在各个测量点的实际齿面点与理论齿面点,得到面齿轮的齿形误差与齿距误差;25)根据得到的面齿轮齿形误差与齿距误差,对面齿轮进行反调修正。



1. 一种考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤一:在机测量几何误差补偿

11) 搭建在机测量平台:所述在机测量平台包括磨齿机、测头和信号接收装置,所述测头安装在磨齿机的Y轴上,所述信号接收装置分别与所述测头和磨齿机通过信号线连接;

12) 在机测量几何误差建模

基于在机测量平台的拓扑结构,分别建立在机测量平台理想无误差运动模型 T_{PG}^i 和在机测量平台实际有误差运动模型 T_{PG}^r ;

13) 在机测量几何误差辨识

131) 直线轴几何误差辨识

分别构建在机测量平台X轴、Y轴和Z轴的几何误差等式;

构建在机测量平台X轴、Y轴和Z轴中,任意两轴之间的垂直度误差等式;

采用激光干涉仪测量几何误差耦合作用后的综合误差,利用9线法解耦分离出在机测量平台X轴、Y轴和Z轴的几何误差;

132) 旋转轴几何误差辨识

以球杆仪作为测量设备,根据在机测量平台旋转轴C轴或A轴在旋转过程中的球杆公称长度、球杆安装角、工件球安装角、几何误差以及所测球杆伸缩量之间的函数关系,分别建立C轴和A轴的几何误差逆向辨识模型,依据所测球杆伸缩量辨识得到C轴和A轴的各项几何误差;

14) 以辨识得到的直线轴几个误差和旋转轴几何误差,补偿在机测量几何误差;

步骤二:齿面误差在机测量

21) 在齿面上规划测量点,并得到各个测量点的齿面法向量;

22) 利用标准球分别校准测头和旋转工作台,根据面齿轮的内环上表面、内环圆柱面以及齿槽中点建立测量坐标系;

23) 依次对各个测量点进行测量,得到测头在各个测量点处的坐标,进而得到面齿轮在各个测量点的实际齿面点;

24) 根据面齿轮在各个测量点的实际齿面点与理论齿面点,得到面齿轮的齿形误差与齿距误差;

25) 根据得到的面齿轮齿形误差与齿距误差,对面齿轮进行反调修正。

2. 根据权利要求1所述考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,其特征在于:所述步骤12)中,在机测量平台理想无误差运动模型 T_{PG}^i 为:

$$T_{PG}^i = (T_{RP}^i)^{-1} T_{RG}^i$$

$$T_{RG}^i = T_{RC}^i T_{CG}^i = T_{pRC} T_{mRC} \times T_{pCG} T_{mCG}$$

$$T_{RP}^i = T_{RX}^i T_{XZ}^i T_{ZA}^i T_{AY}^i T_{YP}^i = T_{pRX} T_{mRX} \times T_{pXZ} T_{mXZ} \times T_{pZA} T_{mZA} \times T_{pAY} T_{mAY} \times T_{pYP} T_{mYP}$$

其中, T_{PG}^i 表示测头和面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵;

T_{RG}^i 表示机床底座与面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵； T_{RC}^i 表示机床底座与C轴之间的理想齐次变换矩阵； T_{pRC} 表示机床底座与C轴之间的安装位姿矩阵； T_{mRC} 表示机床底座与C轴之间的运动位姿矩阵； T_{CG}^i 表示C轴与面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵； T_{pCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的安装位姿矩阵； T_{mCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的运动位姿矩阵；

T_{RP}^i 表示测头与机床底座之间的理想齐次变换矩阵； T_{RX}^i 表示机床底座与X轴之间的理想齐次变换矩阵； T_{pRX} 表示机床底座与X轴之间的安装位姿矩阵； T_{mRX} 表示机床底座与X轴之间的运动位姿矩阵； T_{XZ}^i 表示X轴与Z轴之间的理想齐次变换矩阵； T_{pXZ} 表示X轴与Z轴之间的安装位姿矩阵； T_{mXZ} 表示X轴与Z轴之间的运动位姿矩阵； T_{ZA}^i 表示Z轴与A轴之间的理想齐次变换矩阵； T_{pZA} 表示Z轴与A轴之间的安装位姿矩阵； T_{mZA} 表示Z轴与A轴之间的运动位姿矩阵； T_{AY}^i 表示A轴与Y轴之间的理想齐次变换矩阵； T_{pAY} 表示A轴与Y轴之间的安装位姿矩阵； T_{mAY} 表示A轴与Y轴之间的运动位姿矩阵； T_{YP}^i 表示Y轴与测头之间的理想齐次变换矩阵； T_{pYP} 表示Y轴与测头之间的安装位姿矩阵； T_{mYP} 表示Y轴与测头之间的运动位姿矩阵；

在机测量平台实际有误差运动模型 T_{PG}^r 为：

$$T_{PG}^r = (T_{RP}^r)^{-1} T_{RG}^r$$

$$T_{RG}^r = T_{RC}^r T_{CG}^r = T_{pRC} T_{peRC} T_{mRC} T_{meRC} T_{pCG} T_{peCG} T_{mCG} T_{meCG}$$

$$T_{RP}^r = T_{RX}^r T_{XZ}^r T_{ZA}^r T_{AY}^r T_{YP}^r = T_{pRX} T_{peRX} T_{mRX} T_{meRX} \times T_{pXZ} T_{peXZ} T_{mXZ} T_{meXZ}$$

$$\times T_{pZA} T_{peZA} T_{mZA} T_{meZA} \times T_{pAY} T_{peAY} T_{mAY} T_{meAY} \times T_{pYP} T_{peYP} T_{mYP} T_{meYP}$$

其中， T_{PG}^r 表示测头与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵；

T_{RG}^r 表示机床底座与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵； T_{RC}^r 表示机床底座与C轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{pRC} 表示机床底座与C轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{mRC} 表示机床底座与C轴之间运动位姿误差矩阵； T_{CG}^r 表示C轴与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵； T_{pCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的安装位姿误差矩阵； T_{mCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的运动位姿误差矩阵；

T_{RP}^r 表示机床底座与测头之间的实际齐次变换矩阵； T_{RX}^r 表示机床底座与X轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{pRX} 表示机床底座与X轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{mRX} 表示机床底座与X轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{XZ}^r 表示X轴与Z轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{pXZ} 表示X轴与Z轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{mXZ} 表示X轴与Z轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{ZA}^r 表示Z轴和A轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{pZA} 表示Z轴和A轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{mZA} 表示Z轴和A轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{AY}^r 表示A轴与Y轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{pAY} 表示A轴与Y轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{mAY} 表示A轴与Y轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{YP}^r 表示Y轴与测头之间的实际齐次变换矩阵； T_{pYP} 表示Y轴与测头之间的安装位姿误差矩阵； T_{mYP} 表示Y轴与测头之间的运动位姿误差矩阵。

3. 根据权利要求1所述考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,其特征为:所述步骤131)中,X轴的几何误差等式为:

$$E_X = B_X^{-1} \Delta_X$$

$$E_X = [\delta_x(X), \delta_y(X), \delta_z(X), \varepsilon_x(X), \varepsilon_y(X), \varepsilon_z(X)]$$

$$\Delta_X = [\Delta x_1(X), \Delta x_2(X), \Delta x_3(X), \Delta y_1(X), \Delta y_2(X), \Delta z_1(X)]$$

$$B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_1 & -y_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_2 & -y_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_3 & -y_3 \\ 0 & 1 & 0 & -z_1 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & -z_2 & 0 & x_2 \\ 0 & 0 & 1 & y_1 & -x_1 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, E_X 表示X轴的几何误差矩阵; B_X 表示X轴的几何误差辨识矩阵; Δ_X 表示X轴的误差矩阵; $\delta_x(X)$ 、 $\delta_y(X)$ 和 $\delta_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(X)$ 、 $\varepsilon_y(X)$ 和 $\varepsilon_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta x_i(X)$ 表示X轴沿第i条测量路线运动时测得的X轴定位误差; $\Delta y_i(X)$ 和 $\Delta z_i(X)$ 表示X轴沿第i条测量路线运动时分别Y方向和Z方向上测得的直线度误差;

Y轴的几何误差等式为:

$$E_Y = B_Y^{-1} \Delta_Y$$

$$E_Y = [\delta_x(Y), \delta_y(Y), \delta_z(Y), \varepsilon_x(Y), \varepsilon_y(Y), \varepsilon_z(Y)]$$

$$\Delta_Y = [\Delta y_4(Y), \Delta y_5(Y), \Delta y_6(Y), \Delta x_4(Y), \Delta z_4(Y), \Delta z_5(Y)]$$

$$B_Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & x_4 & -z_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & x_5 & -z_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & x_6 & -z_6 \\ 0 & 0 & 1 & z_4 & -y_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -x_4 & 0 & y_4 \\ 0 & 1 & 0 & -x_5 & 0 & y_5 \end{bmatrix}$$

其中, E_Y 表示Y轴的几何误差矩阵; B_Y 表示Y轴的几何误差辨识矩阵; Δ_Y 表示Y轴的误差矩阵; $\delta_x(Y)$ 、 $\delta_y(Y)$ 和 $\delta_z(Y)$ 分别为Y轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(Y)$ 、 $\varepsilon_y(Y)$ 和 $\varepsilon_z(Y)$ 分别表示Y轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta y_i(Y)$ 表示Y轴沿第i条测量路线运动时测得的Y轴定位误差; $\Delta x_i(Y)$ 和 $\Delta z_i(Y)$ 表示Y轴沿第i条测量路线运动时分别X方向和Z方向上测得的直线度误差;

Z轴的几何误差等式为:

$$E_Z = B_Z^{-1} \Delta_Z$$

$$E_Z = [\delta_x(Z), \delta_y(Z), \delta_z(Z), \varepsilon_x(Z), \varepsilon_y(Z), \varepsilon_z(Z)]$$

$$\Delta_Z = [\Delta z_7(Z), \Delta z_8(Z), \Delta z_9(Z), \Delta x_8(Z), \Delta y_7(Z), \Delta x_7(Z)]$$

$$B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & y_7 & -x_7 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_8 & -x_8 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_9 & -x_9 \\ 0 & 1 & 0 & -y_8 & 0 & z_8 \\ 0 & 0 & 1 & x_7 & -z_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_7 & 0 & z_7 \end{bmatrix}$$

其中, E_z 表示Z轴的几何误差矩阵; B_z 表示Z轴的几何误差辨识矩阵; Δ_z 表示Z轴的误差矩阵; $\delta_x(Z)$ 、 $\delta_y(Z)$ 和 $\delta_z(Z)$ 分别为Z轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\epsilon_x(Z)$ 、 $\epsilon_y(Z)$ 和 $\epsilon_z(Z)$ 分别表示Z轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta z_i(Z)$ 表示Z轴沿第i条测量路线运动时测得的Z轴定位误差; $\Delta x_i(Z)$ 和 $\Delta y_i(Z)$ 表示Z轴沿第i条测量路线运动时分别Z方向上和Y方向上测得的直线度误差;

x_i 、 y_i 和 z_i 分别表示测量线上理想点的X轴坐标、Y轴坐标以及Z轴坐标;

$i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ 。

4. 根据权利要求1所述考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法, 其特征在于: 所述步骤131) 中, X轴与Y轴之间的垂直度误差等式为:

$$S_{YX} = \theta_y - \theta_x$$

$$S_{YZ} = \theta_y - \theta_z$$

$$S_{ZX} = \theta_z - \theta_x$$

其中, S_{YX} 表示X轴与Y轴之间的垂直度误差; S_{YZ} 表示Y轴与Z轴之间的垂直度误差; S_{ZX} 表示Z轴与X轴之间的垂直度误差; θ_x 表示X轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角; θ_y 表示Y轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角; θ_z 表示Z轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角。

5. 根据权利要求1所述考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法, 其特征在于: 所述步骤132) 中, 旋转轴C轴或A轴在旋转过程中的球杆公称长度、球杆安装角、工件球安装角、几何误差以及所测球杆伸缩量之间的函数关系为:

$$\Delta L_R = \sin \theta_R \cos \varphi_R \delta_x(R) + \sin \theta_R \sin \varphi_R \delta_y(R) - \cos \theta_R \delta_z(R)$$

$$- \sin \theta_R \sin \varphi_R (z_{R\omega 0} + L_R \cos \theta_R) \epsilon_x(R) + \sin \theta_R \cos \varphi_R (z_{R\omega 0} + L_R \cos \theta_R) \epsilon_y(R)$$

其中, 下标R代表旋转轴, 可用A和C代替; L_R 表示球杆仪公称长度; ΔL_R 代表球杆仪伸缩量; θ_R 球杆轴线与工作台轴线之间的夹角, 记作安装角; $z_{R\omega 0}$ 为工件球离工作台表面高度; φ_R 为工件球球心的坐标向量与x坐标轴正向之间的夹角, 定义为工件球的初始安装角; $\delta_x(R)$ 、 $\delta_y(R)$ 和 $\delta_z(R)$ 表示R轴分别在X、Y和Z方向上的直线误差; $\epsilon_x(R)$ 和 $\epsilon_y(R)$ 分别表示R轴在X和Y方向上的角度误差。

考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法

技术领域

[0001] 本发明属于误差测量技术领域,具体的为一种考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法。

背景技术

[0002] 面齿轮传动是一种新型的齿轮传动方式,与锥齿轮相比具有动力分流效果好、结构紧凑、承载能力强、重合度高、以及对安装误差不敏感等优点,故广泛应用于直升机主减速器分流传动装置中。齿面精度直接影响到整机使用寿命与服役性能,然而面齿轮是一种变齿厚的齿形,加工过程较为复杂。

[0003] 现有技术中,一般采用离线测量的方式对面齿轮的加工精度进行检测,虽然能够满足检测要求,但需要在面齿轮加工设备与面齿轮测量设备之间进行二次装夹,且由于二次装夹,导致面齿轮工件因安装变化等因素对其测量精度造成影响,同时也会降低测量效率。公开号为CN114754698B的中国专利公开了一种面齿轮齿面测量点规划及在机测量方法,虽然实现了面齿轮的在机测量,但并未考虑磨齿机机械误差对测量结果的影响,测量结果无法准确反应面齿轮的加工误差,因此无法对齿面加工误差进行在机修正。

发明内容

[0004] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,不仅能够实现面齿轮齿面误差的在机测量,而且能够降低甚至消除在机测量平台的几何误差对测量结果的影响,使测量结果能够准确反应面齿轮的齿面加工误差,从而能够在机对面齿轮的齿面加工误差进行修正。

[0005] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0006] 一种考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,包括如下步骤:

[0007] 步骤一:在机测量几何误差补偿

[0008] 11) 搭建在机测量平台:所述在机测量平台包括磨齿机、测头和信号接收装置,所述测头安装在磨齿机的A轴上,所述信号接收装置分别与所述测头和磨齿机通过信号线连接;

[0009] 12) 在机测量几何误差建模

[0010] 基于在机测量平台的拓扑结构,分别建立在机测量平台理想无误差运动模型 T_{PG}^i 和在机测量平台实际有误差运动模型 T_{PG}^r ;

[0011] 13) 在机测量几何误差辨识

[0012] 131) 直线轴几何误差辨识

[0013] 分别构建在机测量平台X轴、Y轴和Z轴的几何误差等式;

[0014] 构建在机测量平台X轴、Y轴和Z轴中,任意两轴之间的垂直度误差等式;

[0015] 采用激光干涉仪测量几何误差耦合作用后的综合误差,利用9线法解耦分离出在机测量平台X轴、Y轴和Z轴的几何误差;

[0016] 132) 旋转轴几何误差辨识

[0017] 以球杆仪作为测量设备,根据在机测量平台旋转轴C轴或A轴在旋转过程中的球杆公称长度、球杆安装角、工件球安装角、几何误差以及所测球杆伸缩量之间的函数关系,分别建立C轴和A轴的几何误差逆向辨识模型,依据所测球杆伸缩量辨识得到C轴和A轴的各项几何误差;

[0018] 14) 以辨识得到的直线轴几个误差和旋转轴几何误差,补偿在机测量几何误差;

[0019] 步骤二:齿面误差在机测量

[0020] 21) 在齿面上规划测量点,并得到各个测量点的齿面法向量;

[0021] 22) 利用标准球分别校准测头和旋转工作台,根据面齿轮的内环上表面、内环圆柱面以及齿槽中点建立测量坐标系;

[0022] 23) 依次对各个测量点进行测量,得到测头在各个测量点处的坐标,进而得到面齿轮在各个测量点的实际齿面点;

[0023] 24) 根据面齿轮在各个测量点的实际齿面点与理论齿面点,得到面齿轮的齿形误差与齿距误差;

[0024] 25) 根据得到的面齿轮齿形误差与齿距误差,对面齿轮进行反调修正。

[0025] 进一步,所述步骤12)中,在机测量平台理想无误差运动模型 T_{PG}^i 为:

$$[0026] \quad T_{PG}^i = (T_{RP}^i)^{-1} T_{RG}^i$$

$$[0027] \quad T_{RG}^i = T_{RC}^i T_{CG}^i = T_{pRC} T_{mRC} \times T_{pCG} T_{mCG}$$

$$[0028] \quad T_{RP}^i = T_{RX}^i T_{XZ}^i T_{ZA}^i T_{AY}^i T_{YP}^i = T_{pRX} T_{mRX} \times T_{pXZ} T_{mXZ} \times T_{pZA} T_{mZA} \times T_{pAY} T_{mAY} \times T_{pYP} T_{mYP}$$

[0029] 其中, T_{PG}^i 表示测头和面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵;

[0030] T_{RG}^i 表示机床底座与面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵; T_{RC}^i 表示机床底座与C轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pRC} 表示机床底座与C轴之间的安装位姿矩阵; T_{mRC} 表示机床底座与C轴之间的运动位姿矩阵; T_{CG}^i 表示C轴与面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵; T_{pCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的安装位姿矩阵; T_{mCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的运动位姿矩阵;

[0031] T_{RP}^i 表示测头与机床底座之间的理想齐次变换矩阵; T_{RX}^i 表示机床底座与X轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pRX} 表示机床底座与X轴之间的安装位姿矩阵; T_{mRX} 表示机床底座与X轴之间的运动位姿矩阵; T_{XZ}^i 表示X轴与Z轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pXZ} 表示X轴与Z轴之间的安装位姿矩阵; T_{mXZ} 表示X轴与Z轴之间的运动位姿矩阵; T_{ZA}^i 表示Z轴与A轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pZA} 表示Z轴与A轴之间的安装位姿矩阵; T_{mZA} 表示Z轴与A轴之间的运动位姿矩阵; T_{AY}^i 表示A轴与Y轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pAY} 表示A轴与Y轴之间的安装位姿矩阵; T_{mAY} 表示A轴与Y轴之间的运动位姿矩阵; T_{YP}^i 表示Y轴与测头之间的理想齐次变换矩阵; T_{pYP} 表示Y轴与测头之间的安装位姿矩阵; T_{mYP} 表示Y轴与测头之间的运动位姿矩阵;

[0032] 在机测量平台实际有误差运动模型 T_{PG}^r 为:

$$[0033] \quad T_{PG}^r = (T_{RP}^r)^{-1} T_{RG}^r$$

$$[0034] \quad T_{RG}^r = T_{RC}^r T_{CG}^r = T_{pRC} T_{peRC} T_{mRC} T_{meRC} T_{pCG} T_{peCG} T_{mCG} T_{meCG}$$

$$[0035] \quad T_{RP}^r = T_{RX}^r T_{XZ}^r T_{ZA}^r T_{AY}^r T_{YP}^r = T_{pRX} T_{peRX} T_{mRX} T_{meRX} \times T_{pXZ} T_{peXZ} T_{mXZ} T_{meXZ} \\ \times T_{pZA} T_{peZA} T_{mZA} T_{meZA} \times T_{pAY} T_{peAY} T_{mAY} T_{meAY} \times T_{pYP} T_{peYP} T_{mYP} T_{meYP}$$

[0036] 其中, T_{PG}^r 表示测头与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵;

[0037] T_{RG}^r 表示机床底座与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵; T_{RC}^r 表示机床底座与C轴之间的实际齐次变换矩阵; T_{peRC} 表示机床底座与C轴之间的安装位姿误差矩阵; T_{meRC} 表示机床底座与C轴之间运动位姿误差矩阵; T_{CG}^r 表示C轴与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵; T_{peCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的安装位姿误差矩阵; T_{meCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的运动位姿误差矩阵;

[0038] T_{RP}^r 表示机床底座与测头之间的实际齐次变换矩阵; T_{RX}^r 表示机床底座与X轴之间的实际齐次变换矩阵; T_{peRX} 表示机床底座与X轴之间的安装位姿误差矩阵; T_{meRX} 表示机床底座与X轴之间的运动位姿误差矩阵; T_{XZ}^r 表示X轴与Z轴之间的实际齐次变换矩阵; T_{peXZ} 表示X轴与Z轴之间的安装位姿误差矩阵; T_{meXZ} 表示X轴与Z轴之间的运动位姿误差矩阵; T_{ZA}^r 表示Z轴和A轴之间的实际齐次变换矩阵; T_{peZA} 表示Z轴和A轴之间的安装位姿误差矩阵; T_{meZA} 表示Z轴和A轴之间的运动位姿误差矩阵; T_{AY}^r 表示A轴与Y轴之间的实际齐次变换矩阵; T_{peAY} 表示A轴与Y轴之间的安装位姿误差矩阵; T_{meAY} 表示A轴与Y轴之间的运动位姿误差矩阵; T_{YP}^r 表示Y轴与测头之间的实际齐次变换矩阵; T_{peYP} 表示Y轴与测头之间的安装位姿误差矩阵; T_{meYP} 表示Y轴与测头之间的运动位姿误差矩阵。

[0039] 进一步,所述步骤131)中,X轴的几何误差等式为:

$$[0040] \quad E_X = B_X^{-1} \Delta_X$$

$$[0041] \quad E_X = [\delta_x(X), \delta_y(X), \delta_z(X), \varepsilon_x(X), \varepsilon_y(X), \varepsilon_z(X)]$$

$$[0042] \quad \Delta_X = [\Delta x_1(X), \Delta x_2(X), \Delta x_3(X), \Delta y_1(X), \Delta y_2(X), \Delta z_1(X)]$$

$$[0043] \quad B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_1 & -y_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_2 & -y_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_3 & -y_3 \\ 0 & 1 & 0 & -z_1 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & -z_2 & 0 & x_2 \\ 0 & 0 & 1 & y_1 & -x_1 & 0 \end{bmatrix}$$

[0044] 其中, E_X 表示X轴的几何误差矩阵; B_X 表示X轴的几何误差辨识矩阵; Δ_X 表示X轴的误差矩阵; $\delta_x(X)$ 、 $\delta_y(X)$ 和 $\delta_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(X)$ 、 $\varepsilon_y(X)$ 和 $\varepsilon_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta x_i(X)$ 表示X轴沿第i条测量路线运动时测得的X轴定位误差; $\Delta y_i(X)$ 和 $\Delta z_i(X)$ 表示X轴沿第i条测量路线运动时分别Y方向和Z方向上测得的直线度误差;

[0045] Y轴的几何误差等式为:

$$[0046] \quad E_Y = B_Y^{-1} \Delta_Y$$

$$[0047] \quad E_Y = [\delta_x(Y), \delta_y(Y), \delta_z(Y), \varepsilon_x(Y), \varepsilon_y(Y), \varepsilon_z(Y)]$$

$$[0048] \quad \Delta_Y = [\Delta y_4(Y), \Delta y_5(Y), \Delta y_6(Y), \Delta x_4(Y), \Delta z_4(Y), \Delta z_5(Y)]$$

$$[0049] \quad B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & x_4 & -z_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & x_5 & -z_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & x_6 & -z_6 \\ 0 & 0 & 1 & z_4 & -y_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -x_4 & 0 & y_4 \\ 0 & 1 & 0 & -x_5 & 0 & y_5 \end{bmatrix}$$

[0050] 其中, E_Y 表示Y轴的几何误差矩阵; B_Y 表示Y轴的几何误差辨识矩阵; Δ_Y 表示Y轴的误差矩阵; $\delta_x(Y)$ 、 $\delta_y(Y)$ 和 $\delta_z(Y)$ 分别为Y轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(Y)$ 、 $\varepsilon_y(Y)$ 和 $\varepsilon_z(Y)$ 分别表示Y轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta y_i(Y)$ 表示Y轴沿第i条测量路线运动时测得的Y轴定位误差; $\Delta x_i(Y)$ 和 $\Delta z_i(Y)$ 表示Y轴沿第i条测量路线运动时分别X方向和Z方向上测得的直线度误差;

[0051] Z轴的几何误差等式为:

$$[0052] \quad E_Z = B_Z^{-1} \Delta_Z$$

$$[0053] \quad E_Z = [\delta_x(Z), \delta_y(Z), \delta_z(Z), \varepsilon_x(Z), \varepsilon_y(Z), \varepsilon_z(Z)]$$

$$[0054] \quad \Delta_Z = [\Delta z_7(Z), \Delta z_8(Z), \Delta z_9(Z), \Delta x_8(Z), \Delta y_7(Z), \Delta x_7(Z)]$$

$$[0055] \quad B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & y_7 & -x_7 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_8 & -x_8 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_9 & -x_9 \\ 0 & 1 & 0 & -y_8 & 0 & z_8 \\ 0 & 0 & 1 & x_7 & -z_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_7 & 0 & z_7 \end{bmatrix}$$

[0056] 其中, E_Z 表示Z轴的几何误差矩阵; B_Z 表示Z轴的几何误差辨识矩阵; Δ_Z 表示Z轴的误差矩阵; $\delta_x(Z)$ 、 $\delta_y(Z)$ 和 $\delta_z(Z)$ 分别为Z轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(Z)$ 、 $\varepsilon_y(Z)$ 和 $\varepsilon_z(Z)$ 分别表示Z轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta z_i(Z)$ 表示Z轴沿第i条测量路线运动时测得的Z轴定位误差; $\Delta x_i(Z)$ 和 $\Delta y_i(Z)$ 表示Z轴沿第i条测量路线运动时分别Z方向和Y方向上测得的直线度误差;

[0057] x_i 、 y_i 和 z_i 分别表示测量线上理想点的X轴坐标、Y轴坐标以及Z轴坐标;

[0058] $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ 。

[0059] 进一步, 所述步骤131)中, X轴与Y轴之间的垂直度误差等式为:

$$[0060] \quad S_{YX} = \theta_y - \theta_x$$

$$[0061] \quad S_{YZ} = \theta_y - \theta_z$$

$$[0062] \quad S_{ZX} = \theta_z - \theta_x$$

[0063] 其中, S_{YX} 表示X轴与Y轴之间的垂直度误差; S_{YZ} 表示Y轴与Z轴之间的垂直度误差; S_{ZX} 表示Z轴与X轴之间的垂直度误差; θ_x 表示X轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角; θ_y 表

示Y轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角; θ_z 表示Z轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角。

[0064] 进一步,所述步骤132)中,旋转轴C轴或A轴在旋转过程中的球杆公称长度、球杆安装角、工件球安装角、几何误差以及所测球杆伸缩量之间的函数关系为:

$$[0065] \quad \begin{aligned} \Delta L_R &= \sin \theta_R \cos \varphi_R \delta_x(R) + \sin \theta_R \sin \varphi_R \delta_y(R) - \cos \theta_R \delta_z(R) \\ &- \sin \theta_R \sin \varphi_R (z_{R\omega_0} + L_R \cos \theta_R) \varepsilon_x(R) + \sin \theta_R \cos \varphi_R (z_{R\omega_0} + L_R \cos \theta_R) \varepsilon_y(R) \end{aligned}$$

[0066] 其中,下标R代表旋转轴,可用A和C代替; L_R 表示球杆仪公称长度; ΔL_R 代表球杆仪伸缩量; θ_R 球杆轴线与工作台轴线之间的夹角,记作安装角; $z_{R\omega_0}$ 为工件球离工作台表面高度; φ_R 为工件球球心的坐标向量与x坐标轴正向之间的夹角,定义为工件球的初始安装角; $\delta_x(R)$ 、 $\delta_y(R)$ 和 $\delta_z(R)$ 表示R轴分别在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(R)$ 和 $\varepsilon_y(R)$ 分别表示R轴在X和Y方向上的角度误差。

[0067] 本发明的有益效果在于:

[0068] 本发明考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,直接通过磨齿机搭建在机测量平台,并将测头安装在磨齿机的A轴上,为在机测量创造基础条件。在对面齿轮的齿面加工误差进行在机测量前,首先,利用在机测量平台的拓扑结构,建立测头与面齿轮之间的在机测量几何误差模型;然后,对各项几何误差进行辨识,分别得到直线轴几何误差和旋转轴几何误差;最后,利用辨识得到的直线轴几个误差和旋转轴几何误差对在机测量时的几何误差进行补偿;如此,可以确保在机测量过程中,能够降低甚至消除在机测量平台的几何误差对测量结果的影响。在对在机测量的几何误差进行补偿后,对面齿轮齿面进行在机测量,利用测头依次对规划的测量点进行测量,分别得到各个测量点的坐标,进而得到面齿轮在各个测量点的实际齿面点;利用实际齿面点与理论齿面点,得到面齿轮的齿形误差与齿距误差,所述的齿形误差与齿距误差即为消除几何误差影响后的面齿轮齿面加工误差,最后,对面齿轮进行反调修正,能够提高面齿轮的加工精度。

附图说明

[0069] 为了使本发明的目的、技术方案和有益效果更加清楚,本发明提供如下附图进行说明:

[0070] 图1为本发明考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法的流程图;

[0071] 图2为在机测量平台的结构示意图;

[0072] 图3为在机测量平台中各个运动部件的结构示意图;

[0073] 图4为在机测量平台的拓扑简图;

[0074] 图5为在机测量平台的运动简图;

[0075] 图6为在机测量平台的传动链示意图;

[0076] 图7为考虑42项几何误差元素的在机测量平台的全运动链示意图;

[0077] 图8为基于9线法的直线轴几何误差测量辨识原理图;

[0078] 图9为X轴与Y轴之间的垂直度误差辨识示意图;

[0079] 图10为球杆仪辨识旋转轴误差的示意图;

[0080] 图11为齿面测量点规划图;

- [0081] 图12为面齿轮在机测量坐标系的示意图；
 [0082] 图13为测量路径的示意图；
 [0083] 图14为几何误差补偿前后的相对误差拓扑图。

具体实施方式

[0084] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明,以使本领域的技术人员可以更好的理解本发明并能予以实施,但所举实施例不作为对本发明的限定。

[0085] 如图1所示,本实施例考虑几何误差的面齿轮齿面加工误差在机测量及修正方法,包括如下步骤。

[0086] 步骤一:在机测量几何误差补偿

[0087] 11) 搭建在机测量平台:在机测量平台包括磨齿机、测头和信号接收装置,测头安装在磨齿机的A轴上,信号接收装置分别与所述测头和磨齿机通过信号线连接,如图2所示。

[0088] 12) 在机测量几何误差建模

[0089] 基于在机测量平台的拓扑结构,分别建立在机测量平台理想无误差运动模型 T_{PG}^i 和在机测量平台实际有误差运动模型 T_{PG}^r 。

[0090] 如图3所示,为在机测量平台的结构示意图,表1为图3中各个附图标记对应的部件名称。

[0091] 表1各个部分序号与名称

| | | | | | | | | | |
|--------|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|
| [0092] | 序号 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | 名称 | 机座 | C轴 | 面齿轮 | X轴 | Z轴 | A轴 | Y轴 | 测头 |

[0093] 如图4和图5所示,分别为在机测量平台的拓扑简图和在被测量平台的运动简图。在被测量过程中,面齿轮在被测量平台几何误差传递是从各个运动轴出发,沿着在被测量测头链和待测工件链进行链式传递,使得处于两条链末端的测头与面齿轮之间产生相对位姿误差。

[0094] 具体的,测头侧传动链(机床底座RCS→测头坐标系PCS)为:机床底座—X轴—Z轴—A轴—Y轴—测头。

[0095] 待测工件侧传动链(机床底座RCS→齿轮坐标系GCS)为:机床底座—C轴—面齿轮。

[0096] 在被测量传动链如图6所示。

[0097] 机床几何误差可分为位置无关误差(PIGEs)和位置相关误差(PDGEs)。PIGEs由运动部件的装配偏差引起,与运动轴的位置无关;而PDGEs则是由运动部件的制造缺陷引起的可重复误差,它们会随着运动轴位置的变化而不断变化。根据空间运动学原理,机床的每个运动轴在无约束条件下均具有6个自由度,包括3个坐标轴方向上的直线运动自由度和3个绕坐标轴的旋转运动自由度。这6项误差属于PDGEs,另外X、Y、Z三个移动轴之间存在垂直度误差 S_{ZX} 、 S_{ZY} 、 S_{ZX} ,这三个误差属于PIGEs。旋转轴以C轴为例,存在4个PIGEs:2项径向窜动误差 δ_{Cx} 、 δ_{Cy} 以及偏转角度误差 α_{Cy} 和俯仰角度误差 β_{Cx} 。该在被测量平台一共有42项误差,即:30项PDGEs,12项PIGEs。X轴安装在机座上,假设X轴无安装误差,在被测量平台的几何误差如表2所示。

[0098] 表2在被测量平台几何误差

| 运动轴 | 序号 | PDGEs | | | PIGEs |
|-----|-------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------|
| | | 直线误差 | | 角度误差 | |
| X 轴 | 1-6 | $\delta_x(X), \delta_y(X), \delta_z(X)$ | $\varepsilon_x(X), \varepsilon_y(X), \varepsilon_z(X)$ | | \ |
| Z 轴 | 7-14 | $\delta_x(Z), \delta_y(Z), \delta_z(Z)$ | $\varepsilon_x(Z), \varepsilon_y(Z), \varepsilon_z(Z)$ | | S_{ZX} |
| A 轴 | 15-24 | $\delta_x(A), \delta_y(A), \delta_z(A)$ | $\varepsilon_x(A), \varepsilon_y(A), \varepsilon_z(A)$ | | $\delta_{Az}, \delta_{Ax}, \beta_{Az}, \gamma_{Ay}$ |
| Y 轴 | 25-32 | $\delta_x(Y), \delta_y(Y), \delta_z(Y)$ | $\varepsilon_x(Y), \varepsilon_y(Y), \varepsilon_z(Y)$ | | S_{YX}, S_{YZ} |
| C 轴 | 33-42 | $\delta_x(C), \delta_y(C), \delta_z(C)$ | $\varepsilon_x(C), \varepsilon_y(C), \varepsilon_z(C)$ | | $\delta_{Cx}, \delta_{Cy}, \alpha_{Cy}, \beta_{Cx}$ |

[0100] $\delta_x(X), \delta_y(X)$ 和 $\delta_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的直线误差； $\varepsilon_x(X), \varepsilon_y(X)$ 和 $\varepsilon_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的角度误差；

[0101] $\delta_x(Z), \delta_y(Z)$ 和 $\delta_z(Z)$ 分别表示Z轴在X、Y和Z方向上的直线误差； $\varepsilon_x(Z), \varepsilon_y(Z)$ 和 $\varepsilon_z(Z)$ 分别表示Z轴在X、Y和Z方向上的角度误差； S_{ZX} 表示Z轴与X轴之间的垂直度误差； $\delta_x(A), \delta_y(A)$ 和 $\delta_z(A)$ 分别表示A轴在X、Y和Z方向上的直线误差； $\varepsilon_x(A), \varepsilon_y(A)$ 和 $\varepsilon_z(A)$ 分别表示A轴在X、Y和Z方向上的角度误差； δ_{Az} 和 δ_{Ax} 分别表示A轴在Z和X方向上的径向窜动误差； β_{Az} 和 γ_{Ay} 分别表示A轴相对于Z轴的垂直度误差和A轴相对于Y轴的垂直度误差；

[0102] $\delta_x(Y), \delta_y(Y)$ 和 $\delta_z(Y)$ 分别表示Y轴在X、Y和Z方向上的直线误差； $\varepsilon_x(Y), \varepsilon_y(Y)$ 和 $\varepsilon_z(Y)$ 分别表示Y轴在X、Y和Z方向上的角度误差； S_{YX} 表示X轴与Y轴之间的垂直度误差； S_{YZ} 表示Y轴与Z轴之间的垂直度误差；

[0103] $\delta_x(C), \delta_y(C)$ 和 $\delta_z(C)$ 分别表示C轴在X、Y和Z方向上的直线误差； $\varepsilon_x(C), \varepsilon_y(C)$ 和 $\varepsilon_z(C)$ 分别表示C轴在X、Y和Z方向上的角度误差； δ_{Cx} 和 δ_{Cy} 分别表示C轴在X和Y方向上的径向窜动误差； α_{Cy} 和 β_{Cx} 分别表示C轴相对于Y轴的垂直度误差和C轴相对于X轴的垂直度误差。

[0104] 考虑到42项几何误差的在机测量平台的运动链如图7所示。

[0105] C轴坐标系与GCS的原点之间存在平动偏移量 $g_0 = [g_{0x}, g_{0y}, g_{0z}]^T$ ，Y轴坐标系与PCS的原点之间存在平动偏移量 $p_0 = [p_{0x}, p_{0y}, p_{0z}]^T$ 。此时，GCS与PCS相对于RCS的齐次变换矩阵分别为：

[0106]
$$T_{RC}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & g_{0x} \\ 0 & 1 & 0 & g_{0y} \\ 0 & 0 & 1 & g_{0z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{YP}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{0x} \\ 0 & 1 & 0 & p_{0y} \\ 0 & 0 & 1 & p_{0z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0107] 其中， T_{RC}^0 表示C轴坐标系相对于机床坐标系的齐次变换矩阵； T_{YP}^0 表示测头坐标系相对于Y轴坐标系的齐次变换矩阵； g_{0x}, g_{0y} 和 g_{0z} 分别表示C轴坐标系与GCS的原点之间在X、Y和Z方向平动偏移量； p_{0x}, p_{0y} 和 p_{0z} 分别表示Y轴坐标系与PCS的原点之间在X、Y和Z方向平动偏移量。

[0108] 在机测量平台各个运动轴的安装位姿 (T_{pQN})、安装位姿误差 (T_{peQN})、运动位姿 (T_{mQN})、运动位姿误差 (T_{meQN}) 以及相应的变换矩阵如表3所示，表中，Q和N分别表示某一前向运动链中的前一部分和后一部分。

[0109] 表3运动轴几何误差

| 轴 | T_{QN} | T_{pQN} | T_{peQN} | T_{mQN} | T_{meQN} |
|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| / | T_{RC} | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & g_{0x} \\ 0 & 1 & 0 & g_{0y} \\ 0 & 0 & 1 & g_{0z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $I_{4 \times 4}$ | $I_{4 \times 4}$ | $I_{4 \times 4}$ |
| C 轴 | T_{CG} | $I_{4 \times 4}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta_{Cx} & \delta_{Cx} \\ 0 & 1 & -\alpha_{Cy} & \delta_{Cy} \\ -\beta_{Cx} & \alpha_{Cy} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \cos C & -\sin C & 0 & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | T_{meCG} |
| X 轴 | T_{RX} | $I_{4 \times 4}$ | $I_{4 \times 4}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | T_{meRX} |
| [0110] Z 轴 | T_{RZ} | $I_{4 \times 4}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & S_{ZX} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{ZX} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | T_{meXZ} |
| A 轴 | T_{ZA} | $I_{4 \times 4}$ | $\begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{Ay} & \beta_{Az} & 0 \\ \alpha_{Ay} & 1 & 0 & \delta_{Ay} \\ -\beta_{Az} & 0 & 1 & \delta_{Az} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A & 0 \\ 0 & \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | T_{meZA} |
| Y 轴 | T_{AY} | $I_{4 \times 4}$ | $\begin{bmatrix} 1 & -S_{YX} & 0 & 0 \\ S_{YX} & 1 & -S_{YZ} & 0 \\ 0 & S_{YZ} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | T_{meAY} |
| / | T_{YP} | $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{0x} \\ 0 & 1 & 0 & p_{0y} \\ 0 & 0 & 1 & p_{0z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $I_{4 \times 4}$ | $I_{4 \times 4}$ | $I_{4 \times 4}$ |

[0111] 表中,各轴的运动位姿误差矩阵分别为:

[0112]
$$T_{meCG} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(C) & \varepsilon_y(C) & \delta_x(C) \\ \varepsilon_z(C) & 1 & -\varepsilon_x(C) & \delta_y(C) \\ -\varepsilon_y(C) & \varepsilon_x(C) & 1 & \delta_z(C) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0113]
$$T_{meRX} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(X) & \varepsilon_y(X) & \delta_x(X) \\ \varepsilon_z(X) & 1 & -\varepsilon_x(X) & \delta_y(X) \\ -\varepsilon_y(X) & \varepsilon_x(X) & 1 & \delta_z(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0114]
$$T_{meXZ} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(Z) & \varepsilon_y(Z) & \delta_x(Z) \\ \varepsilon_z(Z) & 1 & -\varepsilon_x(Z) & \delta_y(Z) \\ -\varepsilon_y(Z) & \varepsilon_x(Z) & 1 & \delta_z(Z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0115]
$$T_{meZA} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(A) & \varepsilon_y(A) & \delta_x(A) \\ \varepsilon_z(A) & 1 & -\varepsilon_x(A) & \delta_y(A) \\ -\varepsilon_y(A) & \varepsilon_x(A) & 1 & \delta_z(A) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0116] \quad T_{meAY}^i = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(Y) & \varepsilon_y(Y) & \delta_x(Y) \\ \varepsilon_z(Y) & 1 & -\varepsilon_x(Y) & \delta_y(Y) \\ -\varepsilon_y(Y) & \varepsilon_x(Y) & 1 & \delta_z(Y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0117] 综上,在机测量平台理想无误差运动模型 T_{PG}^i 为:

$$[0118] \quad T_{PG}^i = (T_{RP}^i)^{-1} T_{RG}^i$$

$$[0119] \quad T_{RG}^i = T_{RC}^i T_{CG}^i = T_{pRC} T_{mRC} \times T_{pCG} T_{mCG}$$

$$[0120] \quad T_{RP}^i = T_{RX}^i T_{XZ}^i T_{ZA}^i T_{AY}^i T_{YP}^i = T_{pRX} T_{mRX} \times T_{pXZ} T_{mXZ} \times T_{pZA} T_{mZA} \times T_{pAY} T_{mAY} \times T_{pYP} T_{mYP}$$

[0121] 其中, T_{PG}^i 表示测头和面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵;

[0122] T_{RG}^i 表示机床底座与面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵; T_{RC}^i 表示机床底座与C轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pRC} 表示机床底座与C轴之间的安装位姿矩阵; T_{mRC} 表示机床底座与C轴之间的运动位姿矩阵; T_{CG}^i 表示C轴与面齿轮工件之间的理想齐次变换矩阵; T_{pCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的安装位姿矩阵; T_{mCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的运动位姿矩阵;

[0123] T_{RP}^i 表示测头与机床底座之间的理想齐次变换矩阵; T_{RX}^i 表示机床底座与X轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pRX} 表示机床底座与X轴之间的安装位姿矩阵; T_{mRX} 表示机床底座与X轴之间的运动位姿矩阵; T_{XZ}^i 表示X轴与Z轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pXZ} 表示X轴与Z轴之间的安装位姿矩阵; T_{mXZ} 表示X轴与Z轴之间的运动位姿矩阵; T_{ZA}^i 表示Z轴与A轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pZA} 表示Z轴与A轴之间的安装位姿矩阵; T_{mZA} 表示Z轴与A轴之间的运动位姿矩阵; T_{AY}^i 表示A轴与Y轴之间的理想齐次变换矩阵; T_{pAY} 表示A轴与Y轴之间的安装位姿矩阵; T_{mAY} 表示A轴与Y轴之间的运动位姿矩阵; T_{YP}^i 表示Y轴与测头之间的理想齐次变换矩阵; T_{pYP} 表示Y轴与测头之间的安装位姿矩阵; T_{mYP} 表示Y轴与测头之间的运动位姿矩阵。

[0124] 在机测量平台实际有误差运动模型 T_{PG}^r 为:

$$[0125] \quad T_{PG}^r = (T_{RP}^r)^{-1} T_{RG}^r$$

$$[0126] \quad T_{RG}^r = T_{RC}^r T_{CG}^r = T_{pRC} T_{peRC} T_{mRC} T_{meRC} T_{pCG} T_{peCG} T_{mCG} T_{meCG}$$

$$[0127] \quad T_{RP}^r = T_{RX}^r T_{XZ}^r T_{ZA}^r T_{AY}^r T_{YP}^r = T_{pRX} T_{peRX} T_{mRX} T_{meRX} \times T_{pXZ} T_{peXZ} T_{mXZ} T_{meXZ} \\ \times T_{pZA} T_{peZA} T_{mZA} T_{meZA} \times T_{pAY} T_{peAY} T_{mAY} T_{meAY} \times T_{pYP} T_{peYP} T_{mYP} T_{meYP}$$

[0128] 其中, T_{PG}^r 表示测头与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵;

[0129] T_{RG}^r 表示机床底座与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵; T_{RC}^r 表示机床底座与C轴之间的实际齐次变换矩阵; T_{peRC} 表示机床底座与C轴之间的安装位姿误差矩阵; T_{meRC} 表示机床底座与C轴之间运动位姿误差矩阵; T_{CG}^r 表示C轴与面齿轮工件之间的实际齐次变换矩阵; T_{peCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的安装位姿误差矩阵; T_{meCG} 表示C轴与面齿轮工件之间的

运动位姿误差矩阵；

[0130] T_{RP}^r 表示机床底座与测头之间的实际齐次变换矩阵； T_{RX}^r 表示机床底座与X轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{peRX} 表示机床底座与X轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{meRX} 表示机床底座与X轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{XZ}^r 表示X轴与Z轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{peXZ} 表示X轴与Z轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{meXZ} 表示X轴与Z轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{ZA}^r 表示Z轴和A轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{peZA} 表示Z轴和A轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{meZA} 表示Z轴和A轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{AY}^r 表示A轴与Y轴之间的实际齐次变换矩阵； T_{peAY} 表示A轴与Y轴之间的安装位姿误差矩阵； T_{meAY} 表示A轴与Y轴之间的运动位姿误差矩阵； T_{YP}^r 表示Y轴与测头之间的实际齐次变换矩阵； T_{peYP} 表示Y轴与测头之间的安装位姿误差矩阵； T_{meYP} 表示Y轴与测头之间的运动位姿误差矩阵。

[0131] 13) 在机测量几何误差辨识

[0132] 在机测量各运动轴误差辨识,可分为直线轴和旋转轴的误差辨识。

[0133] 131) 直线轴几何误差辨识

[0134] 分别构建在机测量平台X轴、Y轴和Z轴的几何误差等式。如图8所示,本实施例基于9线法对X轴、Y轴和Z轴的几何误差进行测量辨识。测量线上已知点 $O_i(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$ 沿着测量线移动设定距离到达的理想点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, $i=1, 2, 3$, X轴沿测量线1、2、3测量, Y轴沿测量线4、5、6测量, Z轴沿测量线7、8、9测量。

[0135] X轴的几何误差等式为:

$$[0136] \quad E_X = B_X^{-1} \Delta_X$$

$$[0137] \quad E_X = [\delta_x(X), \delta_y(X), \delta_z(X), \varepsilon_x(X), \varepsilon_y(X), \varepsilon_z(X)]$$

$$[0138] \quad \Delta_X = [\Delta x_1(X), \Delta y_1(X), \Delta z_1(X), \Delta x_2(X), \Delta y_2(X), \Delta z_3(X)]$$

$$[0139] \quad B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_1 & -y_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_2 & -y_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_3 & -y_3 \\ 0 & 1 & 0 & -z_1 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & -z_2 & 0 & x_2 \\ 0 & 0 & 1 & y_1 & -x_1 & 0 \end{bmatrix}$$

[0140] 其中, E_X 表示X轴的几何误差矩阵; B_X 表示X轴的几何误差辨识矩阵; Δ_X 表示X轴的误差矩阵; $\delta_x(X)$ 、 $\delta_y(X)$ 和 $\delta_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(X)$ 、 $\varepsilon_y(X)$ 和 $\varepsilon_z(X)$ 分别表示X轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta x_i(X)$ 表示X轴沿第i条测量路线运动时测得的X轴定位误差; $\Delta y_i(X)$ 和 $\Delta z_i(X)$ 表示X轴沿第i条测量路线运动时分别Y方向和Z方向上测得的直线度误差;

[0141] Y轴的几何误差等式为:

$$[0142] \quad E_Y = B_Y^{-1} \Delta_Y$$

$$[0143] \quad E_Y = [\delta_x(Y), \delta_y(Y), \delta_z(Y), \varepsilon_x(Y), \varepsilon_y(Y), \varepsilon_z(Y)]$$

$$[0144] \quad \Delta_Y = [\Delta y_4(Y), \Delta y_5(Y), \Delta y_6(Y), \Delta x_4(Y), \Delta z_4(Y), \Delta z_5(Y)]$$

$$[0145] \quad B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & x_4 & -z_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & x_5 & -z_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & x_6 & -z_6 \\ 0 & 0 & 1 & z_4 & -y_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -x_4 & 0 & y_4 \\ 0 & 1 & 0 & -x_5 & 0 & y_5 \end{bmatrix}$$

[0146] 其中, E_Y 表示Y轴的几何误差矩阵; B_Y 表示Y轴的几何误差辨识矩阵; Δ_Y 表示Y轴的误差矩阵; $\delta_x(Y)$ 、 $\delta_y(Y)$ 和 $\delta_z(Y)$ 分别为Y轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(Y)$ 、 $\varepsilon_y(Y)$ 和 $\varepsilon_z(Y)$ 分别表示Y轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta y_i(Y)$ 表示Y轴沿第i条测量路线运动时测得的Y轴定位误差; $\Delta x_i(Y)$ 和 $\Delta z_i(Y)$ 表示Y轴沿第i条测量路线运动时分别X方向和Z方向上测得的直线度误差;

[0147] Z轴的几何误差等式为:

$$[0148] \quad E_Z = B_Z^{-1} \Delta_Z$$

$$[0149] \quad E_Z = [\delta_x(Z), \delta_y(Z), \delta_z(Z), \varepsilon_x(Z), \varepsilon_y(Z), \varepsilon_z(Z)]$$

$$[0150] \quad \Delta_Z = [\Delta z_7(Z), \Delta z_8(Z), \Delta z_9(Z), \Delta x_8(Z), \Delta y_7(Z), \Delta x_7(Z)]$$

$$[0151] \quad B_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & y_7 & -x_7 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_8 & -x_8 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_9 & -x_9 \\ 0 & 1 & 0 & -y_8 & 0 & z_8 \\ 0 & 0 & 1 & x_7 & -z_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_7 & 0 & z_7 \end{bmatrix}$$

[0152] 其中, E_Z 表示Z轴的几何误差矩阵; B_Z 表示Z轴的几何误差辨识矩阵; Δ_Z 表示Z轴的误差矩阵; $\delta_x(Z)$ 、 $\delta_y(Z)$ 和 $\delta_z(Z)$ 分别为Z轴在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(Z)$ 、 $\varepsilon_y(Z)$ 和 $\varepsilon_z(Z)$ 分别表示Z轴在X、Y和Z方向上的角度误差; $\Delta z_i(Z)$ 表示Z轴沿第i条测量路线运动时测得的Z轴定位误差; $\Delta x_i(Z)$ 和 $\Delta y_i(Z)$ 表示Z轴沿第i条测量路线运动时分别Z方向和Y方向上测得的直线度误差;

[0153] x_i 、 y_i 和 z_i 分别表示测量线上理想点的X轴坐标、Y轴坐标以及Z轴坐标;

[0154] $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ 。

[0155] 构建在机测量平台X轴、Y轴和Z轴中,任意两轴之间的垂直度误差等式。X轴、Y轴和Z轴之间存在垂直度误差,垂直度误差包括 S_{ZX} 、 S_{YX} 和 S_{YZ} 。以 S_{YX} 为例,利用各个测点处的直线度误差 $\delta_y(X)$ 和 $\delta_x(Y)$,采用最小二乘法计算两项直线度误差的平均误差线,如图9所示,若将这两条平均线与理想坐标轴之间的偏差角分别记作 θ_x 和 θ_y ,则得到X轴与Y轴之间的垂直度误差等式为:

$$[0156] \quad S_{YX} = \theta_y - \theta_x$$

[0157] 同理,X轴与Z轴之间以及Y轴与Z轴之间的垂直度误差等式为:

$$[0158] \quad S_{YZ} = \theta_y - \theta_z$$

$$[0159] \quad S_{ZX} = \theta_z - \theta_x$$

[0160] 其中, S_{YX} 表示X轴与Y轴之间的垂直度误差; S_{YZ} 表示Y轴与Z轴之间的垂直度误差;

S_{ZX} 表示Z轴与X轴之间的垂直度误差； θ_x 表示X轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角； θ_y 表示Y轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角； θ_z 表示Z轴的实际轨迹与理论轨迹之间的偏差角。

[0161] 采用激光干涉仪测量几何误差耦合作用后的综合误差,利用9线法解耦分离出在机测量平台X轴、Y轴和Z轴的几何误差。

[0162] 132) 旋转轴几何误差辨识

[0163] 如图10所示,以球杆仪作为测量设备,根据在机测量平台旋转轴C轴或A轴在旋转过程中的球杆公称长度、球杆安装角、工件球安装角、几何误差以及所测球杆伸缩量之间的函数关系,分别建立C轴和A轴的几何误差逆向辨识模型,依据所测球杆伸缩量辨识得到C轴和A轴的各项几何误差。

[0164] 具体的,本实施例中,旋转轴C轴或A轴在旋转过程中的球杆公称长度、球杆安装角、工件球安装角、几何误差以及所测球杆伸缩量之间的函数关系为:

$$\begin{aligned} \Delta L_R &= \sin \theta_R \cos \varphi_R \delta_x(R) + \sin \theta_R \sin \varphi_R \delta_y(R) - \cos \theta_R \delta_z(R) \\ [0165] \quad &- \sin \theta_R \sin \varphi_R (z_{R\omega_0} + L_R \cos \theta_R) \varepsilon_x(R) + \sin \theta_R \cos \varphi_R (z_{R\omega_0} + L_R \cos \theta_R) \varepsilon_y(R) \end{aligned}$$

[0166] 其中,下标R代表旋转轴,可用A和C代替; L_R 表示球杆仪公称长度; ΔL_R 代表球杆仪伸缩量; θ_R 球杆轴线与工作台轴线之间的夹角,记作安装角; $z_{R\omega_0}$ 为工件球离工作台表面高度; φ_R 为工件球球心的坐标向量与x坐标轴正向之间的夹角,定义为工件球的初始安装角; $\delta_x(R)$ 、 $\delta_y(R)$ 和 $\delta_z(R)$ 表示R轴分别在X、Y和Z方向上的直线误差; $\varepsilon_x(R)$ 和 $\varepsilon_y(R)$ 分别表示R轴在X和Y方向上的角度误差。

[0167] 一个球杆伸缩量对应着旋转轴的5个误差 $\delta_x(R)$ 、 $\delta_y(R)$ 、 $\delta_z(R)$ 、 $\varepsilon_x(R)$ 和 $\varepsilon_y(R)$,所以需要做多组实验,从而辨识出多项几何误差元素,第i次试验对应的球杆仪伸缩量记为:

$$\begin{aligned} [0168] \quad \Delta L_{Ri} &= b_{Ri} e_R \\ [0169] \quad \begin{cases} b_{Ri} = [\sin \theta_{Ri} \cos \varphi_{Ri} + \sin \theta_{Ri} \sin \varphi_{Ri}, \\ -\cos \theta_{Ri} - \sin \theta_{Ri} \sin \varphi_{Ri} (z_{Ri\omega_0} + L_{Ri} \cos \theta_{Ri}), + \sin \theta_{Ri} \cos \varphi_{Ri} (z_{Ri\omega_0} + L_{Ri} \cos \theta_{Ri})] \\ e_R = [\delta_x(R), \delta_y(R), \delta_z(R), \delta_x(R), \delta_y(R)] \end{cases} \end{aligned}$$

[0170] 其中, ΔL_{iR} 为旋转轴R第i次试验对应的球杆仪伸缩量, b_{Ri} 为旋转轴R第i次试验对应误差辨识模型向量, e_R 为旋转轴的几何误差向量; θ_{Ri} 表示第i次试验时球杆轴线与工作台轴线之间的夹角; φ_{Ri} 为第i次试验时工件球球心的坐标向量与x坐标轴正向之间的夹角,定义为工件球的初始安装角; $z_{Ri\omega_0}$ 为第i次试验时工件球离工作台表面高度; L_{Ri} 表示第i次试验时球杆仪公称长度。

[0171] 14) 以辨识得到的直线轴几个误差和旋转轴几何误差,补偿在机测量几何误差。

[0172] 步骤二:齿面误差在机测量

[0173] 21) 在齿面上规划测量点,并得到各个测量点的齿面法向量。

[0174] 根据面齿轮的齿面方程,按照AGMA标准对齿面测量点进行规划,齿面测量区域网格点数量为:9×5,即在齿宽方向取9个网格点,在齿高方向取5个网格点,如图11所示。利用MATLAB计算出并生成45个齿面点以及各个点对应的法向量。

[0175] 22) 利用标准球分别校准测头和旋转工作台,补偿测头的各项异性、预行程误差以及半径补偿等。根据面齿轮的内环上表面、内环圆柱面以及齿槽中点建立测量坐标系,如图

12所示。

[0176] 23) 依次对各个测量点进行测量,得到测头在各个测量点处的坐标,进而得到面齿轮在各个测量点的实际齿面点。

[0177] 本实施例中,测量路径规划方法为:在对面齿轮齿形误差进行测量时,测头根据指定的测量路径移动,如图13所示。在对齿距误差进行测量时,测头对每个齿面45点中心点进行打点。在进行齿形误差和齿距误差测量时测头沿着理论测量点法向方向逼近待测面齿轮齿面,在测头接触到齿面,测头停止逼近,记录下此时测头坐标;

[0178] 24) 根据面齿轮在各个测量点的实际齿面点与理论齿面点,得到面齿轮的齿形误差与齿距误差;

[0179] 25) 根据得到的面齿轮齿形误差与齿距误差,对面齿轮进行反调修正。

[0180] 本实施例参照锥齿轮标准,利用在机测量软件输出几何误差补偿前后的齿面拓扑图,计算出补偿后面齿轮各测点相对误差如表4所示,并画出两者相对误差拓扑图,如图14所示。

[0181] 表4补偿前后齿面各测量点相对误差(μm)

| | 齿宽 | 齿高 | | | | |
|--------|----|------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | 1 | 0.04 | 0.65 | 0.38 | 0.16 | -0.1 |
| | 2 | 0.25 | 0.04 | 0.51 | 0.24 | 0.11 |
| [0182] | 3 | 0.46 | 0.18 | -0.14 | 0.36 | 0.17 |
| | 4 | 0.6 | 0.36 | 0.08 | -0.28 | 0.39 |
| | 5 | 0.83 | 0.53 | 0 | -0.13 | -0.43 |
| | 6 | 0.09 | 0.71 | 0.36 | 0.12 | -0.22 |
| | 7 | 0.3 | -0.03 | 0.48 | 0.14 | -0.07 |
| | 8 | 0.39 | 0.14 | -0.25 | 0.34 | 0.03 |
| [0183] | 9 | 0.53 | 0.23 | -0.12 | -0.38 | 0.4 |

[0184] 表5补偿前后齿面误差平方和SSE(μm^2)

| | 补偿前 SSE | 补偿后 SSE | 补偿率 |
|--------|------------|------------|--------|
| [0185] | 28669.2624 | 28456.3161 | 7.428% |

[0186] 如表5所示,补偿前齿面的误差平方总和(SSE)为 $28668.2426\mu\text{m}^2$,补偿后减少到 $28456.3136\mu\text{m}^2$,测量精度提高了7.428%。综上,这些结果表明,对几何误差补偿有效地提高了整个齿面的测量精度。

[0187] 以上所述实施例仅是为充分说明本发明而所举的较佳的实施例,本发明的保护范围不限于此。本技术领域的技术人员在本发明基础上所作的等同替代或变换,均在本发明的保护范围之内。本发明的保护范围以权利要求书为准。

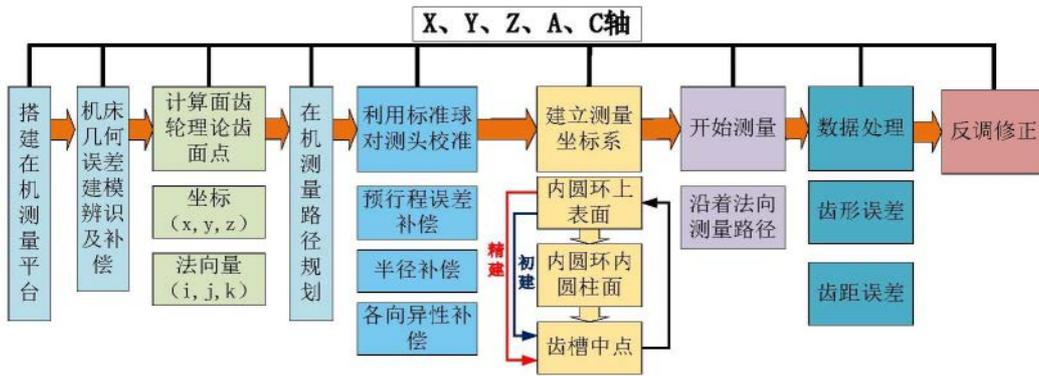


图1

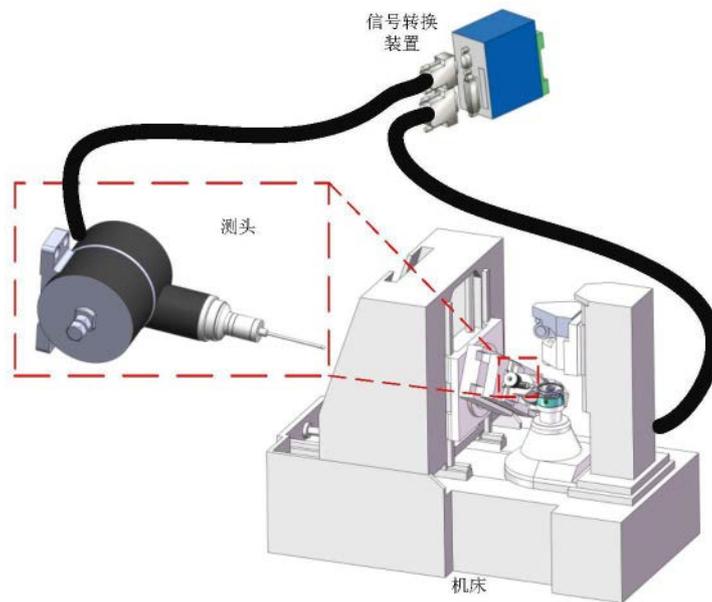


图2

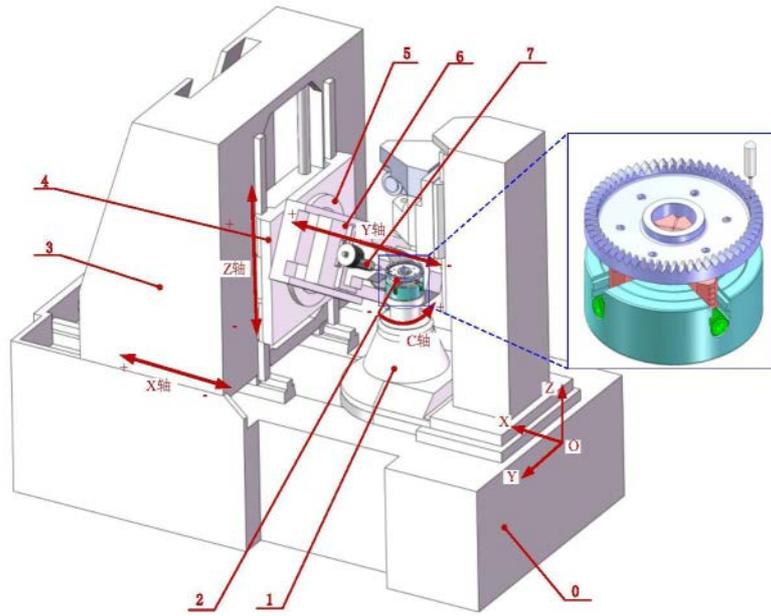


图3

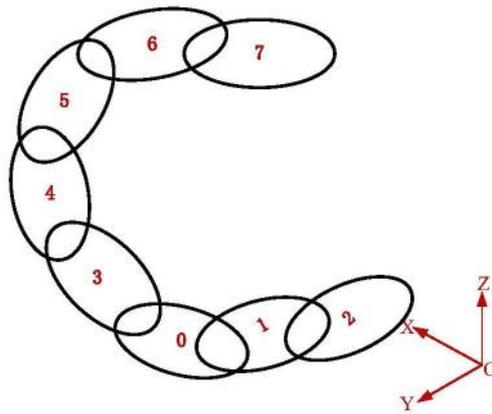


图4

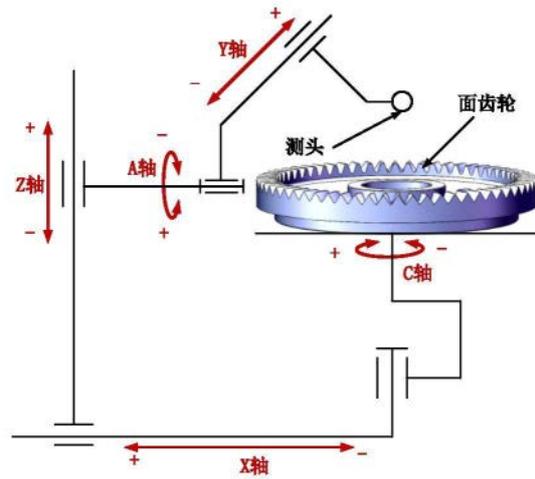


图5

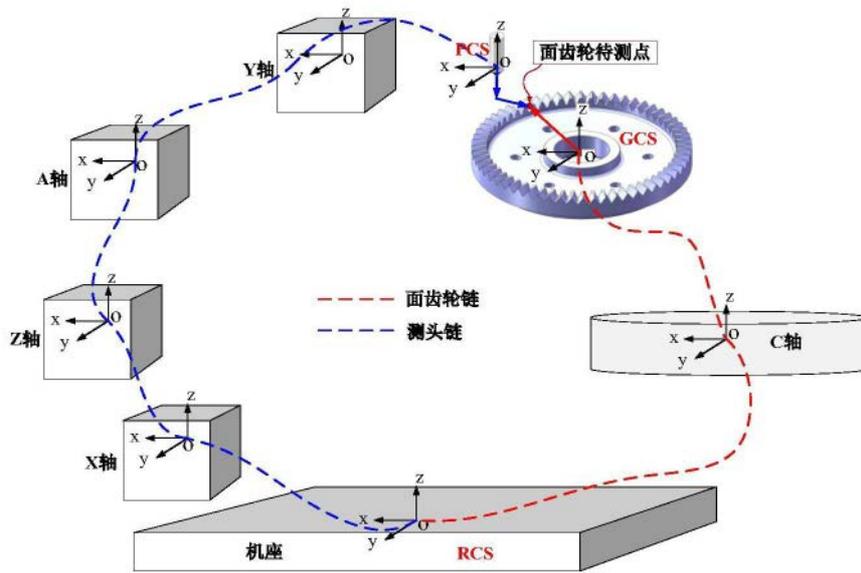


图6

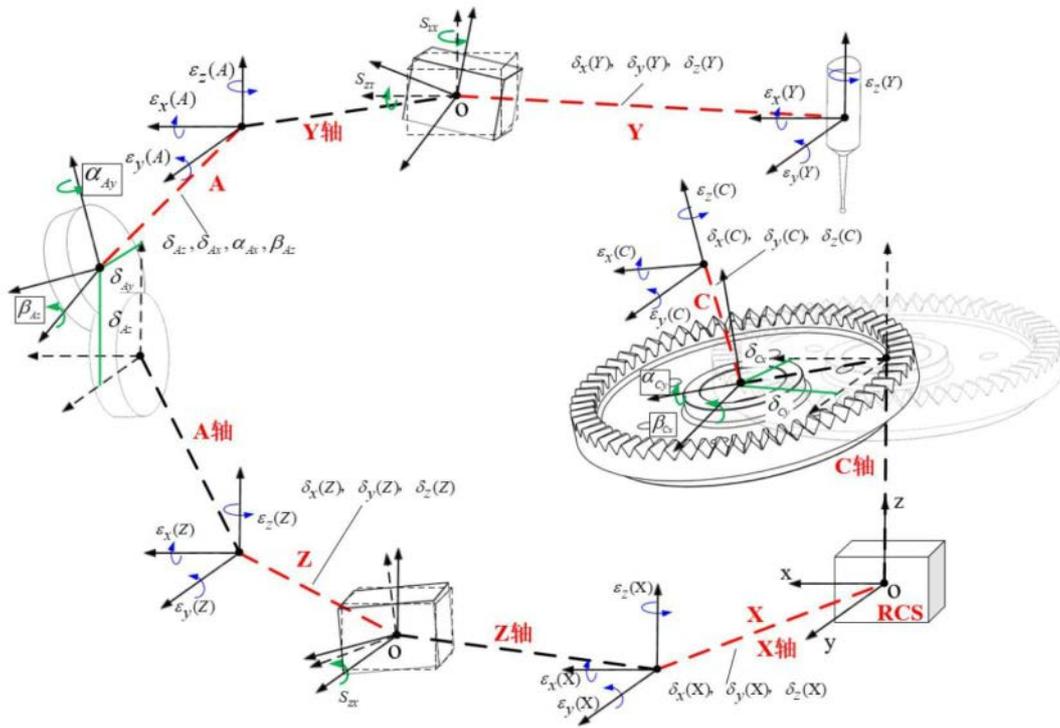


图7

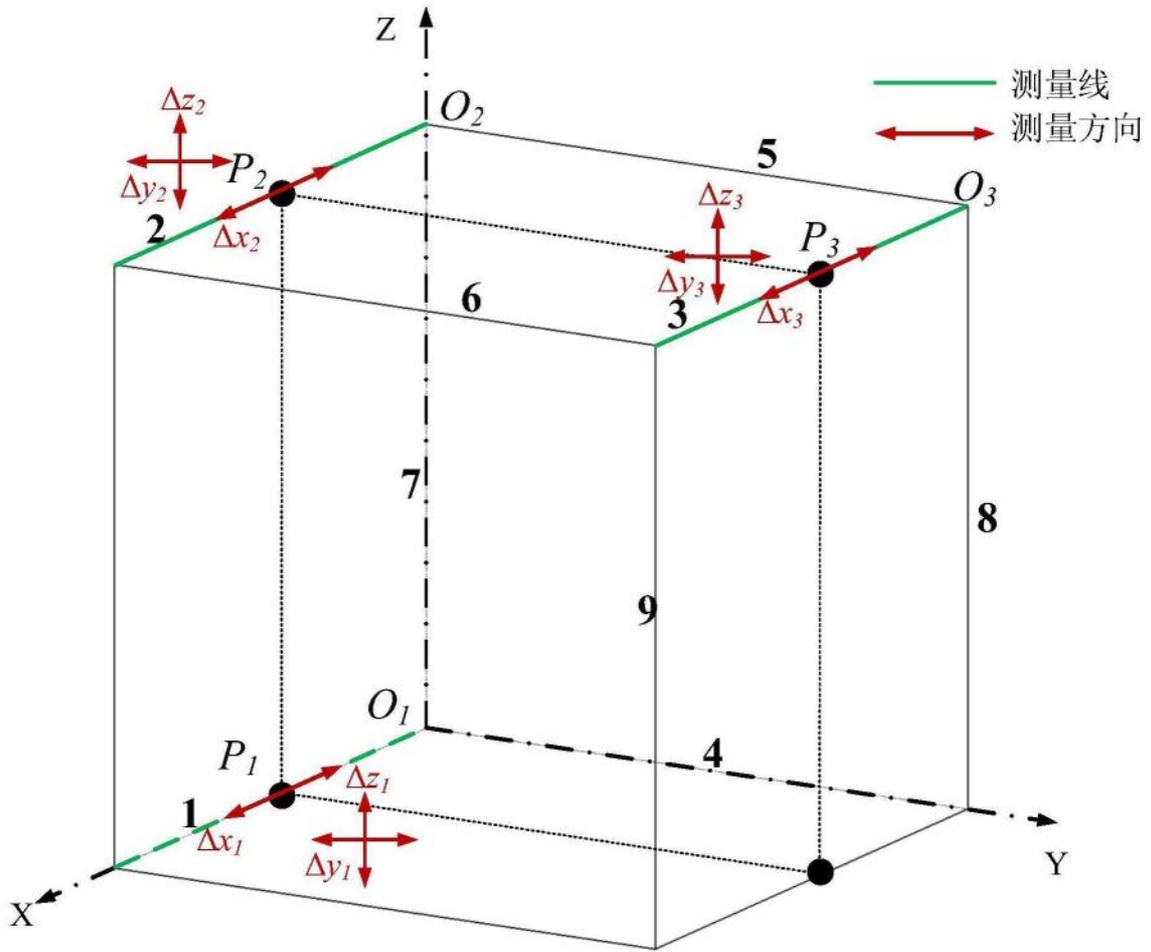


图8

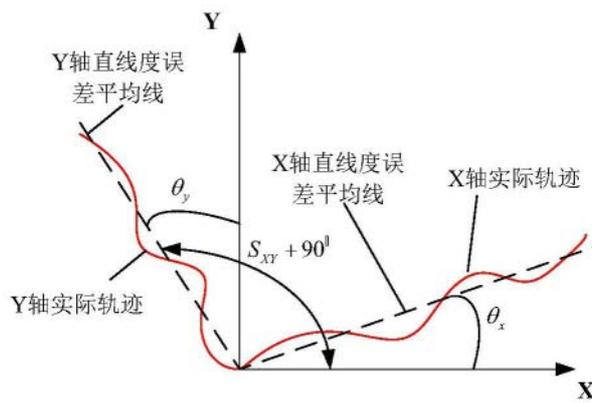


图9

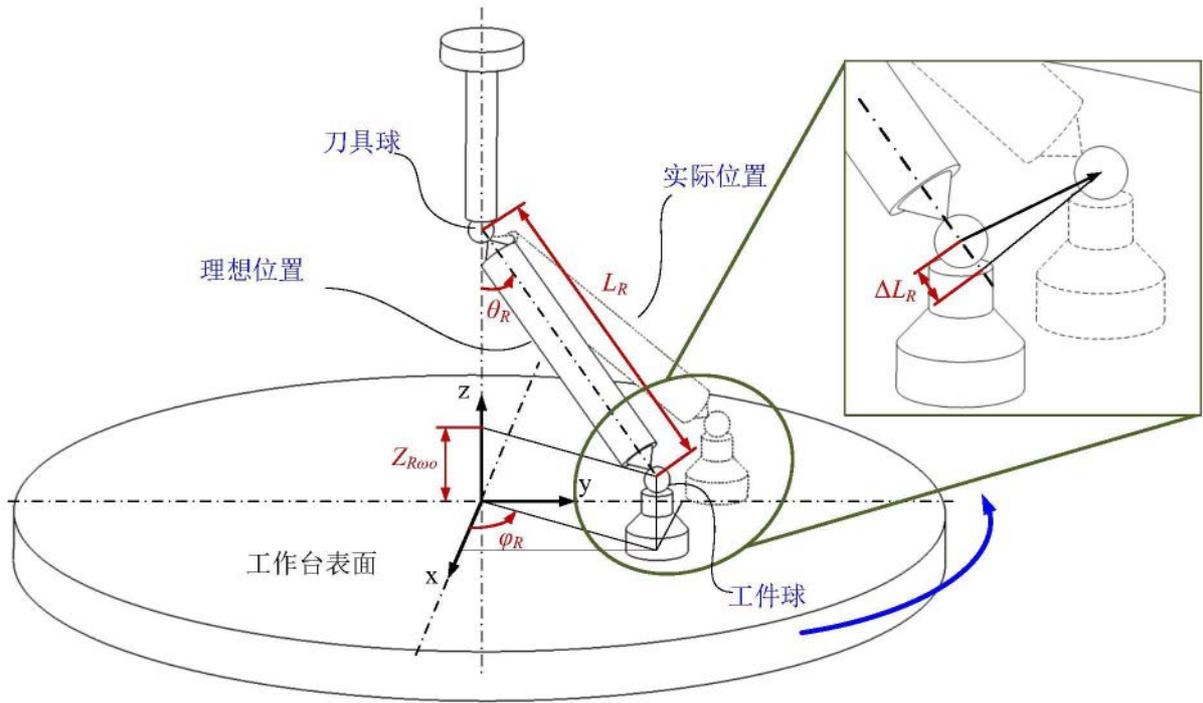


图10

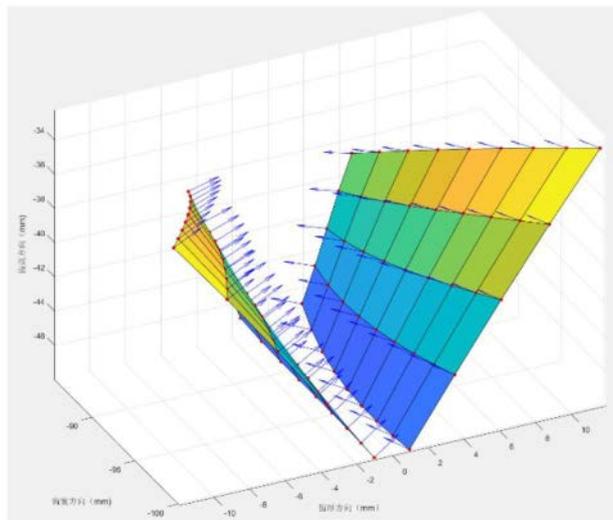


图11

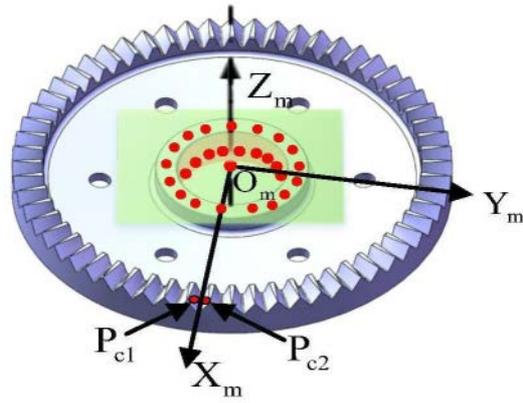


图12

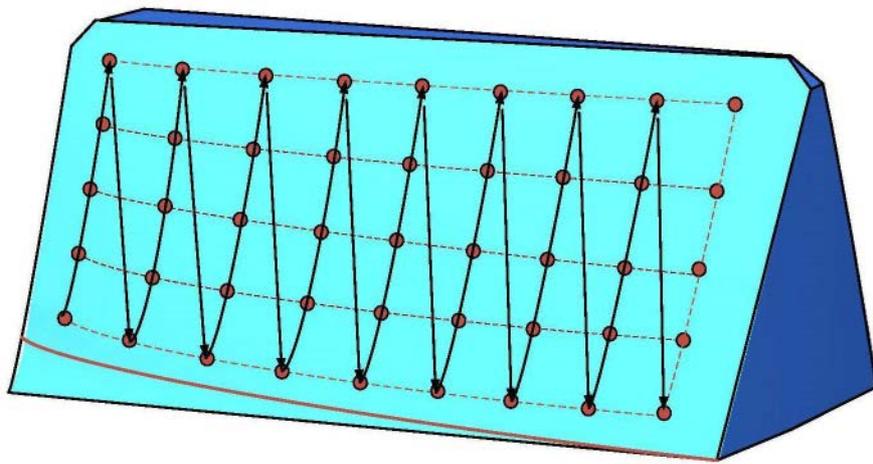


图13

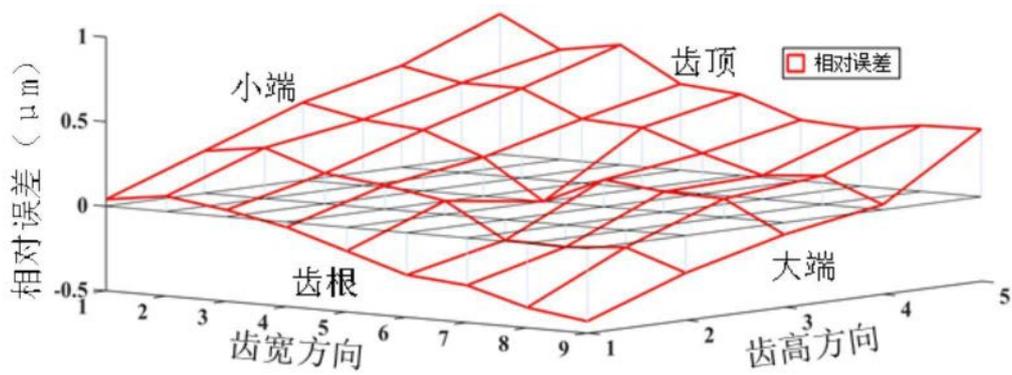


图14