



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108491674 B

(45) 授权公告日 2023.07.18

(21) 申请号 201810523818.X

G06Q 10/04 (2023.01)

(22) 申请日 2018.05.28

G06Q 50/06 (2012.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108491674 A

(56) 对比文件

CN 105975749 A, 2016.09.28

JP H05104333 A, 1993.04.27

US 2012317058 A1, 2012.12.13

CN 202726229 U, 2013.02.13

CN 207309753 U, 2018.05.04

CN 106093849 A, 2016.11.09

CN 107314768 A, 2017.11.03

(43) 申请公布日 2018.09.04

(73) 专利权人 西南交通大学

地址 610031 四川省成都市二环路北一段111号

专利权人 江苏省艾格森数控设备制造有限公司

郭亮 等. 基于深度学习理论的轴承状态识别研究.《振动与冲击》.2016, 第35卷(第12期), 第166-195页.

L. Zhang .etc.A deep learning-based multi-sensor data fusion method for degradation monitoring of ball screws.《2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu)》.2016, 第1-6页.

(72) 发明人 高宏力 孙弋 洪鑫 宋虹亮

蔡璨羽 由智超 张永平 高照兵
汪洋 金立天

审查员 刘小玲

(74) 专利代理机构 北京正华智诚专利代理事务所(普通合伙) 11870

专利代理师 吕春艳

权利要求书5页 说明书6页 附图3页

(51) Int.Cl.

G06F 30/27 (2020.01)

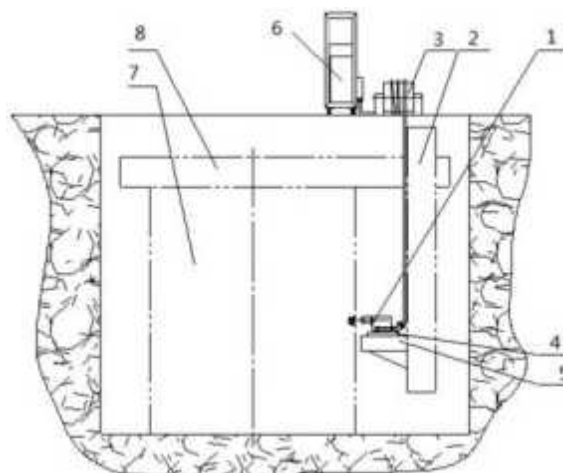
G06N 3/084 (2023.01)

(54) 发明名称

一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种水下放电成型工作机的定位误差预测方法,包括控制柜、轨道架、卷筒、运输平台、堆内构件、放电成型工作机、工作平台和安装适配座;所述工作平台底部设置堆内构件,堆内构件的一端设置轨道架,轨道架的上方设置滚筒,所述滚筒的一端设置控制柜,轨道架的一端设置运输平台,运输平台的顶部设置安装适配座,安装适配座的顶部设置放电成型工作机,解决了在核电厂运行与维护过程中,无法预知电火花机床的失效和性能退化,及时对退化原因进行排查,无法更好的设计生产计划的问题。



CN 108491674 B

1. 一种水下放电成型工作机检测系统,其特征在于,包括控制柜(6)、轨道架(2)、卷筒(3)、运输平台(5)、堆内构件(7)、放电成型工作机(1)、工作平台(8)和安装适配座(4);所述工作平台(8)、堆内构件(7)、轨道架(2)、安装适配座(4)、放电成型工作机(1)和运输平台(5)设置于水面下,所述卷筒(3)和控制柜(6)设置于水面上,所述工作平台(8)设置在堆内构件(7)顶部,所述堆内构件(7)的一端设置轨道架(2),所述轨道架(2)的上方设置卷筒(3),所述卷筒(3)的一端通过现场总线连接到控制柜(6),所述轨道架(2)的一端活动设置运输平台(5),所述运输平台(5)的顶部设置安装适配座(4),所述安装适配座(4)的顶部固定设置放电成型工作机(1);

所述控制柜(6)包括控制器、数据采集卡和工控机,所述控制器通过现场总线分别与数据采集卡连接,所述数据采集卡通过现场总线与工控机连接,所述数据采集卡用于采集球栅尺和编码器采集到的数据;所述工控机用于接收数据采集卡采集的数据且进行分析处理和预警;

水下放电成型工作机的定位误差预测方法,包括如下步骤:

步骤A1:使用球栅尺和电机编码器采集位置数据;

步骤A2:计算电极驱动轴倾斜度且计算电极驱动轴间隙;

步骤A3:根据电极驱动轴倾斜度,利用倾斜度退化拟合方法计算倾斜度退化拟合值;且根据电极驱动轴间隙,利用间隙退化拟合方法计算间隙退化拟合值;

步骤A4:将倾斜度退化拟合的值和间隙退化拟合值输入到BP神经网络映射模型进行训练得到倾斜度和间隙值与定位误差之间的映射关系;

步骤A5:将倾斜度退化拟合预测值和间隙退化拟合预测值输入BP神经网络映射模型进行定位误差预测;

所述步骤A2的计算电极驱动轴间隙包括如下步骤:

步骤B1:给电机发送控制指令让水下电火花机床分别沿着X轴和Y轴方向循环往复移动,运动的起始点 P_0 ,在移动路径上采样点依次为 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_{10}$;重复执行上面的循环运动K次,采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标为 S_{ij} , $j=1, 2, \dots, k$,利用球栅尺测量采样点 P_i 位置为 T_{ij} , $j=1, 2, \dots, k$;

步骤B2:计算机械传动部分X轴定位误差,X轴定位误差公式为 $A = \overline{T_{ij}} - \overline{S_{ij}}$;

X轴反向间隙公式为 $\beta_x = (\overline{T_{ij}\uparrow} - \overline{T_{ij}\downarrow}) - (\overline{S_{ij}\uparrow} - \overline{S_{ij}\downarrow})$;

式中, T_{ij} 为球栅尺测量采样点 P_i 位置, S_{ij} 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标, $\overline{S_{ij}\uparrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器正向移动位置坐标, $\overline{T_{ij}}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置的平均值, $\overline{S_{ij}}$ 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标的平均值,

$\overline{S_{ij}\downarrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器反向移动位置坐标, β_x 为X轴反向间隙, $\overline{T_{ij}\uparrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置正向移动的坐标, $\overline{T_{ij}\downarrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置反向移动的坐标;

步骤B3:计算机械传动部分Y轴定位误差,Y轴定位误差公式为 $A = \overline{T_{ij}} - \overline{S_{ij}}$;

Y轴反向间隙公式为 $\beta_y = (\overline{T_{ij}\uparrow} - \overline{T_{ij}\downarrow}) - (\overline{S_{ij}\uparrow} - \overline{S_{ij}\downarrow})$;

式中, T_{ij} 为球栅尺测量采样点 P_i 位置, S_{ij} 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标, $\overline{T_{ij}}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置的平均值, $\overline{S_{ij}}$ 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标的平均值, $\overline{S_{ij}\uparrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器正向移动位置坐标, $\overline{S_{ij}\downarrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器反向移动位置坐标, β_y 为Y轴反向间隙, $\overline{T_{ij}\uparrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置正向移动的坐标, $\overline{T_{ij}\downarrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置反向移动的坐标;

所述步骤A2的计算电极驱动轴倾斜度包括以下步骤:

步骤C1:给电机发送控制指令,水下电火花机床分别沿着X、Y轴方向作直线运动,运动过程中用球栅尺测量工作机位置点设置为坐标值 X_t 和 Y_t ;

步骤C2:水下电火花机床工作点移动位置的X轴的趋势线可表示为

$$D(x) = a_1x + b_1$$

Y轴的趋势线可表示为

$$D(y) = a_2x + b_2$$

利用最小二乘法,使拟合函数曲线与球栅尺测量值之差的平方和最小,可表示为公式:

$$\begin{cases} \min_{a,b} \sum_{i=1}^n (D(x_i) - y_i)^2 \\ \min_{a,b} \sum_{i=1}^n (D(y_i) - x_i)^2 \end{cases}$$

直线误差能反映进给系统两个轴的倾斜度 α , α 与直线度误差之间满足关系式

$$\alpha = \arctan (D/H)$$

式中, H 表示直线度误差的测量范围;根据等价无穷小替换原则,当 $H \rightarrow 0$ 时 $\alpha_x \sim a_1$, $\alpha_y \sim a_2$,即倾斜度等于拟合趋势线的斜率; D 表示工作中趋势线;

步骤C3:倾斜度预测,建立倾斜度退化模型,倾斜度 α_x , α_y 与服役时间之间服从线性关系可以用下面线性方程表示:

$$\begin{cases} \beta_x = k_1t_1 + b_1 \\ \beta_y = k_2t_2 + b_2 \end{cases}$$

式中, k_1 为X轴线性关系的权值, k_2 为Y轴轴线性关系的权值, b_1 为X轴线性关系的偏置, b_2 为Y轴线性关系的偏置;

步骤C4:间隙的拟合与预测,建立间隙退化模型,水下电火花机床进给系统的反向间隙 β_x , β_y 与服役时间 t 之间的非线性关系可以使用指数函数近似表示:

$$\begin{cases} \alpha_x = a_1 + b_1e^{c_1t} \\ \alpha_y = a_2 + b_2e^{c_2t} \end{cases}$$

式中 b_1 为X轴线性关系的权值, b_2 为Y轴线性关系的权值, a_1 为X轴线性关系偏置, a_2 为Y轴线性关系偏置, c_1 为X轴时间常数, c_2 为Y轴时间常数;

步骤C5:根据球栅尺测量值与电机编码器测量值计算得到水下电火花机床进给系统的倾斜度和反向间隙误差样本值,利用最小二乘法,对模型进行拟合,

$$\begin{cases} \min_{k,b} \sum_{t=0}^n (\beta(t) - \beta^t)^2 \\ \min_{a,b} \sum_{t=0}^n (\alpha(t) - \alpha^t)^2 \end{cases}$$

得到倾斜度和反向间隙的退化规律。

2.根据权利要求1所述的一种水下放电成型工作机检测系统,其特征在于,所述放电成型工作机(1)包括驱动装置、电极、球栅尺;所述电极通过连接装置设置在脉冲放电装置上,所述脉冲放电装置设置在驱动装置上,所述球栅尺分别设置在驱动装置的横向轴和纵向轴上;所述驱动装置包括电机、减速器、编码器和丝杆螺母机构;所述丝杆螺母机构通过减速器设置在电机上,所述编码器设置在电机上。

3.一种水下放电成型工作机检测系统的定位误差预测方法,其特征在于,方法包括如下步骤:

步骤A1:使用球栅尺和电机编码器采集位置数据;

步骤A2:计算电极驱动轴倾斜度且计算电极驱动轴间隙;

步骤A3:根据电极驱动轴倾斜度,利用倾斜度退化拟合方法计算倾斜度退化拟合值;且根据电极驱动轴间隙,利用间隙退化拟合方法计算间隙退化拟合值;

步骤A4:将倾斜度退化拟合的值和间隙退化拟合值输入到BP神经网络映射模型进行训练得到倾斜度和间隙值与定位误差之间的映射关系;

步骤A5:将倾斜度退化拟合预测值和间隙退化拟合预测值输入BP神经网络映射模型进行定位误差预测;

所述步骤A2的计算电极驱动轴间隙包括如下步骤:

步骤B1:给电机发送控制指令让水下电火花机床分别沿着X轴和Y轴方向循环往复移动,运动的起始点 P_0 ,在移动路径上采样点依次为 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_{10}$;重复执行上面的循环运动K次,采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标为 S_{ij} , $j=1, 2, \dots, k$,利用球栅尺测量采样点 P_i 位置为 T_{ij} , $j=1, 2, \dots, k$;

步骤B2:计算机械传动部分X轴定位误差,X轴定位误差公式为 $A = \overline{T_{ij}} - \overline{S_{ij}}$;

X轴反向间隙公式为 $\beta_x = (\overline{T_{ij}\uparrow} - \overline{T_{ij}\downarrow}) - (\overline{S_{ij}\uparrow} - \overline{S_{ij}\downarrow})$;

式中, T_{ij} 为球栅尺测量采样点 P_i 位置, S_{ij} 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标, $\overline{S_{ij}\uparrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器正向移动位置坐标, $\overline{T_{ij}}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置的平均值, $\overline{S_{ij}}$ 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标的平均值,

$\overline{S_{ij}\downarrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器反向移动位置坐标, β_x 为X轴反向间隙, $\overline{T_{ij}\uparrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置正向移动的坐标, $\overline{T_{ij}\downarrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置反向移动的坐标;

步骤B3:计算机械传动部分Y轴定位误差,Y轴定位误差公式为 $A = \overline{T_{ij}} - \overline{S_{ij}}$;

Y轴反向间隙公式为 $\beta_y = (\overline{T_{ij}\uparrow} - \overline{T_{ij}\downarrow}) - (\overline{S_{ij}\uparrow} - \overline{S_{ij}\downarrow})$;

式中, T_{ij} 为球栅尺测量采样点 P_i 位置, S_{ij} 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标, $\overline{T_{ij}}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置的平均值, $\overline{S_{ij}}$ 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标的平均值, $\overline{S_{ij}\uparrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器正向移动位置坐标, $\overline{S_{ij}\downarrow}$ 为采样点 P_i 处电机编码器反向移动位置坐标, β_y 为Y轴反向间隙, $\overline{T_{ij}\uparrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置正向移动的坐标, $\overline{T_{ij}\downarrow}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置反向移动的坐标;

所述步骤A2的计算电极驱动轴倾斜度包括以下步骤:

步骤C1:给电机发送控制指令,水下电火花机床分别沿着X、Y轴方向作直线运动,运动过程中用球栅尺测量工作机位置点设置为坐标值 X_t 和 Y_t ;

步骤C2:水下电火花机床工作点移动位置的X轴的趋势线可表示为

$$D(x) = a_1x + b_1$$

Y轴的趋势线可表示为

$$D(y) = a_2x + b_2$$

利用最小二乘法,使拟合函数曲线与球栅尺测量值之差的平方和最小,可表示为公式:

$$\begin{cases} \min_{ab} \sum_{i=1}^n (D(x_i) - y_i)^2 \\ \min_{ab} \sum_{i=1}^n (D(y_i) - x_i)^2 \end{cases}$$

直线误差能反映进给系统两个轴的倾斜度 α , α 与直线度误差之间满足关系式

$$\alpha = \arctan (D/H)$$

式中,H表示直线度误差的测量范围;根据等价无穷小替换原则,当 $H \rightarrow 0$ 时 $\alpha_x \sim a_1$, $\alpha_y \sim a_2$,即倾斜度等于拟合趋势线的斜率;D表示工作中趋势线;

步骤C3:倾斜度预测,建立倾斜度退化模型,倾斜度 α_x , α_y 与服役时间之间服从线性关系可以用下面线性方程表示:

$$\begin{cases} \beta_x = k_1t_1 + b_1 \\ \beta_y = k_2t_2 + b_2 \end{cases}$$

式中, k_1 为X轴线性关系的权值, k_2 为Y轴轴线性关系的权值, b_1 为X轴线性关系的偏置, b_2 为Y轴线性关系的偏置;

步骤C4:间隙的拟合与预测,建立间隙退化模型,水下电火花机床进给系统的反向间隙 β_x , β_y 与服役时间 t 之间的非线性关系可以使用指数函数近似表示:

$$\begin{cases} \alpha_x = a_1 + b_1e^{st} \\ \alpha_y = a_2 + b_2e^{st} \end{cases}$$

式中 b_1 为X轴线性关系的权值, b_2 为Y轴线性关系的权值, a_1 为X轴线性关系偏置, a_2 为Y轴线性关系偏置, c_1 为X轴时间常数, c_2 为Y轴时间常数;

步骤C5:根据球栅尺测量值与电机编码器测量值计算得到水下电火花机床进给系统的倾斜度和反向间隙误差样本值,利用最小二乘法,对模型进行拟合,

$$\begin{cases} \min_{k,b} \sum_{t=0}^n (\beta(t) - \beta^t)^2 \\ \min_{a,b} \sum_{t=0}^n (\alpha(t) - \alpha^t)^2 \end{cases}$$

得到倾斜度和反向间隙的退化规律。

4.根据权利要求3所述的一种水下放电成型工作机检测系统的定位误差预测方法,其特征在于,所述步骤A5的计算工作机定位误差预测包括以下步骤:

步骤D1:将反向间隙 β_x, β_y ,倾斜度 α_x, α_y 作为输入层,假设水下电火花机床进给系统定位误差 A_x, A_y 为输出层,选择隐含层神经元个数为7,选择ReLU函数 $f(x) = \max(0, x)$ 为神经元的激活函数,建立BP神经网络映射模型;

步骤D2:利用球栅尺测量值 β_x, β_y 和电机编码器测量值计算得的参数 α_x, α_y 和定位误差 A_x, A_y 作为训练样本集,输入到构建的BP神经网络进行训练,更新神经网络的权值和偏差,得到BP神经网络映射模型;

步骤D3:根据拟合的参数 $\beta_x, \beta_y, \alpha_x, \alpha_y$ 的退化规律,使用外插法,得到一定时间后反向间隙和倾斜度参数的采样,将参数输入训练好的BP神经网络映射模型中进行运算,得出X轴和Y轴的定位误差值,完成定位误差 A_x, A_y 的预测。

一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法的领域,特别是一种基于BP神经网络的核堆内水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法。一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法

背景技术

[0002] 目前国内外对于核电堆内构件电火花机床优化设计及寿命预测技术研究还没有深入展开,一些国家在一些特定机床上的性能退化机理的研究有些成果,但对于反应堆内构件电火花机床优化设计及寿命预测技术研究不够深入,也没有意识到这里面包含的效益。在核电厂运行与维护过程中,如果能够提前预知电火花机床的失效和性能退化,及时对退化原因进行排查,可以更好的设计生产计划,这将会带来不可估量的经济和社会效益。

发明内容

[0003] 为解决现有技术中存在的问题,本发明提供了一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法,解决了在核电厂运行与维护过程中,无法预知电火花机床的失效和性能退化,及时对退化原因进行排查,无法更好的设计生产计划的问题。

[0004] 本发明采用的技术方案是:一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法,包括控制柜、轨道架、卷筒、运输平台、堆内构件、放电成型工作机、工作平台和安装适配座;工作平台、堆内构件、轨道架、安装适配座、放电成型工作机和运输平台设置于水面下,卷筒和控制柜设置于水面上,工作平台设置在堆内构件顶部,堆内构件的一端设置轨道架,轨道架的上方设置卷筒,所述卷筒的一端通过现场总线连接到控制柜,轨道架的一端活动设置运输平台,运输平台的顶部固定设置安装适配座,安装适配座的顶部固定设置放电成型工作机。

[0005] 优选地,一种水下放电成型工作机检测系统的定位误差预测方法,方法包括如下步骤:

[0006] 步骤A1:使用球栅尺和电机编码器采集位置数据;

[0007] 步骤A2:计算电极驱动轴倾斜度且计算电极驱动轴间隙;

[0008] 步骤A3:利用倾斜度退化拟合方法计算倾斜度退化拟合值且利用间隙退化拟合方法计算间隙退化拟合值;

[0009] 步骤A4:将倾斜度退化拟合的值和间隙退化拟合的值输入到BP神经网络映射模型;

[0010] 步骤A5:将倾斜度退化拟合的值和间隙退化拟合的值进行BP神经网络的工作机定位误差预测。

[0011] 本发明水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法有益效果如下:

[0012] 通过安装在电火花机床上的球栅尺和电机编码器获取监测数据,以实时监测核电站堆内含硼去离子水环境中的电火花机床性能退化状态,利用本发明采取的方法可以拟合

得出定位性能参数与服役时间之间的关系,从拟合得出的关系能得出性能参数的预测,利用BP神经网络映射模型预测水下放电成型工作机的定位误差。从而实现核电堆内构件水下电火花机床的智能状态预测,指导机床检修维护方案的制定,节约维修费用。

附图说明

[0013] 图1为本发明一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法的核堆内水下放电成型工作机的结构图。

[0014] 图2为本发明一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法的流程图。

[0015] 图3为本发明一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法的反复运动图。

[0016] 图4为本发明一种水下放电成型工作机检测系统及定位误差预测方法的BP神经网络映射模型图。

[0017] 附图标记:1-放电成型工作机、2-轨道架、3-卷筒、4-安装适配座、5-运输平台、6-控制柜、7-堆内构件、8-工作平台。

具体实施方式

[0018] 下面结合附图对本发明的实施例进行详细说明。

[0019] 下面对本发明的具体实施方式进行描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,但应该清楚要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

[0020] 如图1所示,一种水下放电成型工作机检测系统,包括控制柜6、轨道架2、卷筒3、运输平台5、堆内构件7、放电成型工作机1、工作平台8和安装适配座4;工作平台8、堆内构件7、轨道架2、安装适配座4、放电成型工作机1和运输平台5设置于水面下,卷筒3和控制柜6设置于水面上,工作平台8设置在堆内构件7顶部,堆内构件7的一端设置轨道架2,轨道架2的上方设置卷筒3,卷筒3的一端通过现场总线连接到控制柜6,轨道架2的一端活动设置运输平台5,运输平台5的顶部设置安装适配座4,安装适配座4的顶部固定设置放电成型工作机1。

[0021] 本方案的放电成型工作机1包括驱动装置、电极、球栅尺;电极设置在驱动装置上,球栅尺分别设置在驱动装置的横向轴和纵向轴上;驱动装置包括电机、减速器、编码器和丝杆螺母机构;丝杆螺母机构通过减速器设置在电机上,编码器设置在电机上。

[0022] 控制柜包括控制器、数据采集卡和工控机,控制器通过现场总线分别与数据采集卡连接,数据采集卡通过现场总线与工控机连接,数据采集卡用于采集球栅尺和编码器采集到的数据;工控机用于接收数据采集卡采集的数据且进行分析处理预测定。

[0023] 本实施方案在实施时,控制柜6控制卷筒3滚动,通过卷筒3的转动,沿着轨道架2把放电成型工作机1下放到指定的位置,放电成型机1安装固定在安装适配座4上,然后放电成型工作机1的驱动轴类似雕刻机一样在平面运动实现加工。是针对放电成型工作机在加工时的定位误差预测。

[0024] 如图2所示,一种水下放电成型工作机定位误差预测方法,方法包括如下步骤:

[0025] 步骤A1:使用球栅尺和电机编码器采集位置数据;

[0026] 步骤A2:计算电极驱动轴倾斜度且计算电极驱动轴间隙;

[0027] 步骤A3:根据电极驱动轴倾斜度,利用倾斜度退化拟合方法计算倾斜度退化拟合值;且根据电极驱动轴间隙,利用间隙退化拟合方法计算间隙退化拟合值;

[0028] 步骤A4:将倾斜度退化拟合的值和间隙退化拟合值输入到BP神经网络映射模型进行训练得到倾斜度和间隙值与定位误差之间的映射关系;

[0029] 步骤A5:将倾斜度退化拟合预测值和间隙退化拟合预测值输入BP神经网络映射模型进行定位误差预测。

[0030] 本方案的步骤A2的计算电极驱动轴间隙包括如下步骤:

[0031] 步骤B1:给电机发送控制指令让水下电火花机床分别沿着X轴和Y轴方向循环往复移动,运动的起始点 P_0 ,在移动路径上采样点依次为 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_{10}$ 。重复执行上面的循环运动K次,采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标为 $S_{ij}, j=1, 2, \dots, k$,利用球栅尺测量采样点 P_i 位置为 $T_{ij}, j=1, 2, \dots, k$;

[0032] 步骤B2:计算机械传动部分X轴定位误差,X轴定位误差公式为 $A = \overline{T_{ij}} - \overline{S_{ij}}$;

[0033] X轴反向间隙公式为 $\beta_x = (\overline{T_{ij}} \uparrow - \overline{T_{ij}} \downarrow) - (\overline{S_{ij}} \uparrow - \overline{S_{ij}} \downarrow)$;

[0034] 式中, T_{ij} 为球栅尺测量采样点 P_i 位置, S_{ij} 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标, $\overline{S_{ij}} \uparrow$ 为采样点 P_i 处电机编码器正向移动位置坐标, $\overline{T_{ij}}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置的平均值, $\overline{S_{ij}}$ 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标的平均值,

[0035] $\overline{S_{ij}} \downarrow$ 为采样点 P_i 处电机编码器反向移动位置坐标, β_x 为X轴反向间隙, $\overline{T_{ij}} \uparrow$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置正向移动的坐标, $\overline{T_{ij}} \downarrow$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置反向移动的坐标;

[0036] 步骤B3:计算机械传动部分Y轴定位误差,Y轴定位误差公式为 $A = \overline{T_{ij}} - \overline{S_{ij}}$;

[0037] Y轴反向间隙公式为 $\beta_y = (\overline{T_{ij}} \uparrow - \overline{T_{ij}} \downarrow) - (\overline{S_{ij}} \uparrow - \overline{S_{ij}} \downarrow)$;

[0038] 式中, T_{ij} 为球栅尺测量采样点 P_i 位置, S_{ij} 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标, $\overline{T_{ij}}$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置的平均值, $\overline{S_{ij}}$ 为采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标的平均值, $\overline{S_{ij}} \uparrow$ 为采样点 P_i 处电机编码器正向移动位置坐标, $\overline{S_{ij}} \downarrow$ 为采样点 P_i 处电机编码器反向移动位置坐标, β_y 为Y轴反向间隙, $\overline{T_{ij}} \uparrow$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置正向移动的坐标, $\overline{T_{ij}} \downarrow$ 为球栅尺测量采样点 P_i 位置反向移动的坐标。

[0039] 本方案的步骤A2的计算电极驱动轴倾斜度包括以下步骤:

[0040] 步骤C1:给电机发送控制指令,水下电火花机床分别沿着X、Y轴方向作直线运动,运动过程中用球栅尺测量工作机位置点设置为坐标值 X_t 和 Y_t ;

[0041] 步骤C2:水下电火花机床工作点移动位置的X轴的趋势线可表示为

$$[0042] \quad D(x) = a_1x + b_1$$

[0043] Y轴的趋势线可表示为

$$[0044] \quad D(y) = a_2x + b_2$$

[0045] 利用最小二乘法,使拟合函数曲线与球栅尺测量值之差的平方和最小,可表示为公式:

$$[0046] \begin{cases} \min_{a,b} \sum_{i=1}^n (D(x_i) - y_i)^2 \\ \min_{a,b} \sum_{i=1}^n (D(y_i) - x_i)^2 \end{cases}$$

[0047] 直线误差能反映进给系统两个轴的倾斜度 α , α 与直线度误差之间满足关系式

$$[0048] \alpha = \arctan(D/H)$$

[0049] 式中, H 表示直线度误差的测量范围;根据等价无穷小替换原则,当 $H \rightarrow 0$ 时 $\alpha_x \sim a_1$, $\alpha_y \sim a_2$,即倾斜度等于拟合趋势线的斜率; D 表示工作中趋势线;

[0050] 步骤C3:倾斜度预测,建立倾斜度退化模型,倾斜度 α_x, α_y 与服役时间之间服从线性关系可以用下面线性方程表示:

$$[0051] \begin{cases} \beta_x = k_1 t_1 + b_1 \\ \beta_y = k_2 t_2 + b_2 \end{cases}$$

[0052] 式中, k_1 为X轴线性关系的权值, k_2 为Y轴轴线性关系的权值, b_1 为X轴线性关系的偏置, b_2 为Y轴线性关系的偏置;

[0053] 步骤C4:间隙的拟合与预测,建立间隙退化模型,水下电火花机床进给系统的反向间隙 β_x, β_y 与服役时间 t 之间的非线性关系可以使用指数函数近似表示:

$$[0054] \begin{cases} \alpha_x = a_1 + b_1 e^{c_1 t} \\ \alpha_y = a_2 + b_2 e^{c_2 t} \end{cases}$$

[0055] 式中 b_1 为X轴线性关系的权值, b_2 为Y轴线性关系的权值, a_1 为X轴线性关系偏置, a_2 为Y轴线性关系偏置, c_1 为X轴时间常数, c_2 为Y轴时间常数;

[0056] 步骤C5:根据球栅尺测量值与电机编码器测量值计算得到水下电火花机床进给系统的倾斜度和反向间隙误差样本值,利用最小二乘法,对模型进行拟合,

$$[0057] \begin{cases} \min_{k,b} \sum_{i=0}^n (\beta(t) - \beta^i)^2 \\ \min_{a,b} \sum_{i=0}^n (\alpha(t) - \alpha^i)^2 \end{cases}$$

[0058] 得到倾斜度和反向间隙的退化规律。

[0059] 如图4所示,本方案的步骤A5的计算工作机定位误差预测包括以下步骤:

[0060] 步骤D1:将反向间隙 β_x, β_y ,倾斜度 α_x, α_y 作为输入层,假设水下电火花机床进给系统定位误差 A_x, A_y 为输出层,选择隐含层神经元个数为7,选择ReLU函数 $f(x) = \max(0, x)$ 为神经元的激活函数,建立BP神经网络映射模型;

[0061] 步骤D2:利用球栅尺测量值 β_x, β_y 和电机编码器测量值计算得的参数 α_x, α_y 和定位误差 A_x, A_y 作为训练样本集,输入到构建的BP神经网络进行训练,更新神经网络的权值和偏差,得到BP神经网络映射模型;

[0062] 步骤D3:根据拟合的参数 $\beta_x, \beta_y, \alpha_x, \alpha_y$ 的退化规律,使用外插法,得到一定时间后反向间隙和倾斜度参数的采样,将参数输入训练好的BP神经网络映射模型中进行运算,得出X轴和Y轴的定位误差值,完成定位误差 A_x, A_y 的预测。

[0063] 本实施方案在实施时,水下电火花机床驱动装置的两个轴上安装球栅尺,首先计算计算电极驱动轴间隙,给电机发送控制指令让水下电火花机床沿X轴方向按照如图3所示的循环往复移动。运动的起始点 P_0 ,再移动路径上采样点依次为 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_{10}$ 。重复执行上面的循环运动K次,采样点 P_i 处电机编码器测量位置坐标为 $S_{ij} (j=1, 2, \dots, k)$,利用球栅尺测量采样点 P_i 位置为 $T_{ij} (j=1, 2, \dots, k)$,机械传动部分X轴定位误差可以使用公式 $A = \overline{T_{ij}} - \overline{S_{ij}}$ 算得,X轴反向间隙可以使用公式 $\beta_x = (\overline{T_{ij}} \uparrow - \overline{T_{ij}} \downarrow) - (\overline{S_{ij}} \uparrow - \overline{S_{ij}} \downarrow)$ 算得。

[0064] 类似的给电机发送控制指令让水下电火花机床沿Y轴方向循环往复移动,测量得到机械传动部分Y轴定位误差和Y轴反向间隙 β_y 。

[0065] 计算电极驱动轴倾斜度为,给电机发送控制指令让水下电火花机床分别沿着X、Y轴方向作直线运动,运动过程中用球栅尺测量工作机位置点坐标值 x_t, y_t 。两轴之间不完全垂直,水下电火花机床工作点移动位置线中包含的趋势线 $D(x) = a_1x + b_1$ 和 $D(y) = a_2y + b_2$ 。

[0066] 通过最小二乘法,使得拟合函数曲线与球栅尺测量值之差的平方和最小。用函数表示为:

$$[0067] \begin{cases} \min_{a,b} \sum_{i=1}^n (D(x_i) - y_i)^2 \\ \min_{a,b} \sum_{i=1}^n (D(y_i) - x_i)^2 \end{cases}$$

[0068] 直线误差能反映进给系统两个轴的倾斜度 α , α 与直线度误差之间满足关系式 $\alpha = \arctan(D/H)$,其中,H表示直线度误差的测量范围。

[0069] 实际工作中趋势线D一般在非常小的范围内变化,根据等价无穷小替换原则,当 $H \rightarrow 0$ 时 $\alpha_x \sim a_1, \alpha_y \sim a_2$,即倾斜度等于拟合趋势线的斜率。

[0070] 建立倾斜度退化模型,倾斜度 α_x, α_y 与服役时间之间服从线性关系可以用下面线性方程表示:

$$[0071] \begin{cases} \beta_x = k_1 t_1 + b_1 \\ \beta_y = k_2 t_2 + b_2 \end{cases}$$

[0072] 其中 k, b 为线性关系的权值与偏置。

[0073] 建立间隙退化模型,水下电火花机床进给系统的反向间隙 β_x, β_y 与服役时间 t 之间的非线性关系可以使用指数函数近似表示:

$$[0074] \begin{cases} \alpha_x = a_1 + b_1 e^{c_1 t} \\ \alpha_y = a_2 + b_2 e^{c_2 t} \end{cases}$$

[0075] 其中 b, a 为线性关系的权值与偏置, c 为时间常数。

[0076] 根据球栅尺测量值与电机编码器测量值计算得到水下电火花机床进给系统的倾斜度和反向间隙误差样本值,利用最小二乘法,对模型进行拟合,

$$[0077] \quad \begin{cases} \min_{k,b} \sum_{l=0}^n (\beta(t) - \beta^l)^2 \\ \min_{a,b} \sum_{l=0}^n (\alpha(t) - \alpha^l)^2 \end{cases}$$

[0078] 得到倾斜度和反向间隙的退化规律。

[0079] BP神经网络的设计与训练,选择反向间隙 β_x, β_y ,倾斜度 α_x, α_y 作为输入层,水下电火花机床进给系统定位误差 A_x, A_y 作为输出层。

[0080] 选择隐含层神经元个数为7,选择Relu函数 $f(x) = \max(0, x)$ 作为神经元的激活函数,BP神经网络映射模型如图4所示。

[0081] 利用球栅尺测量值和电机编码器测量值计算所得的参数 $\beta_x, \beta_y, \alpha_x, \alpha_y$,和定位误差 A_x, A_y 作为训练样本集,输入构建的BP神经网络进行训练,更新神经网络的权值和偏差,得到BP神经网络映射模型。

[0082] 基于BP神经网络的工作机定位误差预测根据拟合的参数 $\beta_x, \beta_y, \alpha_x, \alpha_y$ 的退化规律,使用外插法,得到一定时间后反向间隙和倾斜度参数的采样,将参数输入训练好的BP神经网络映射模型中进行运算,得出X,Y轴的定位误差值,完成定位误差的预测。

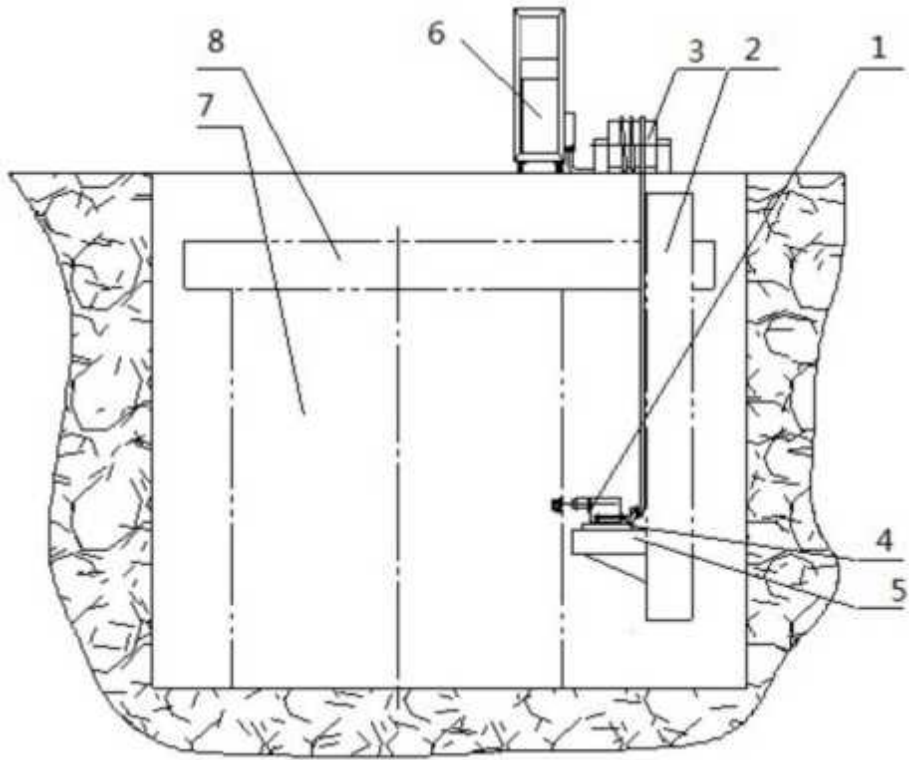


图1

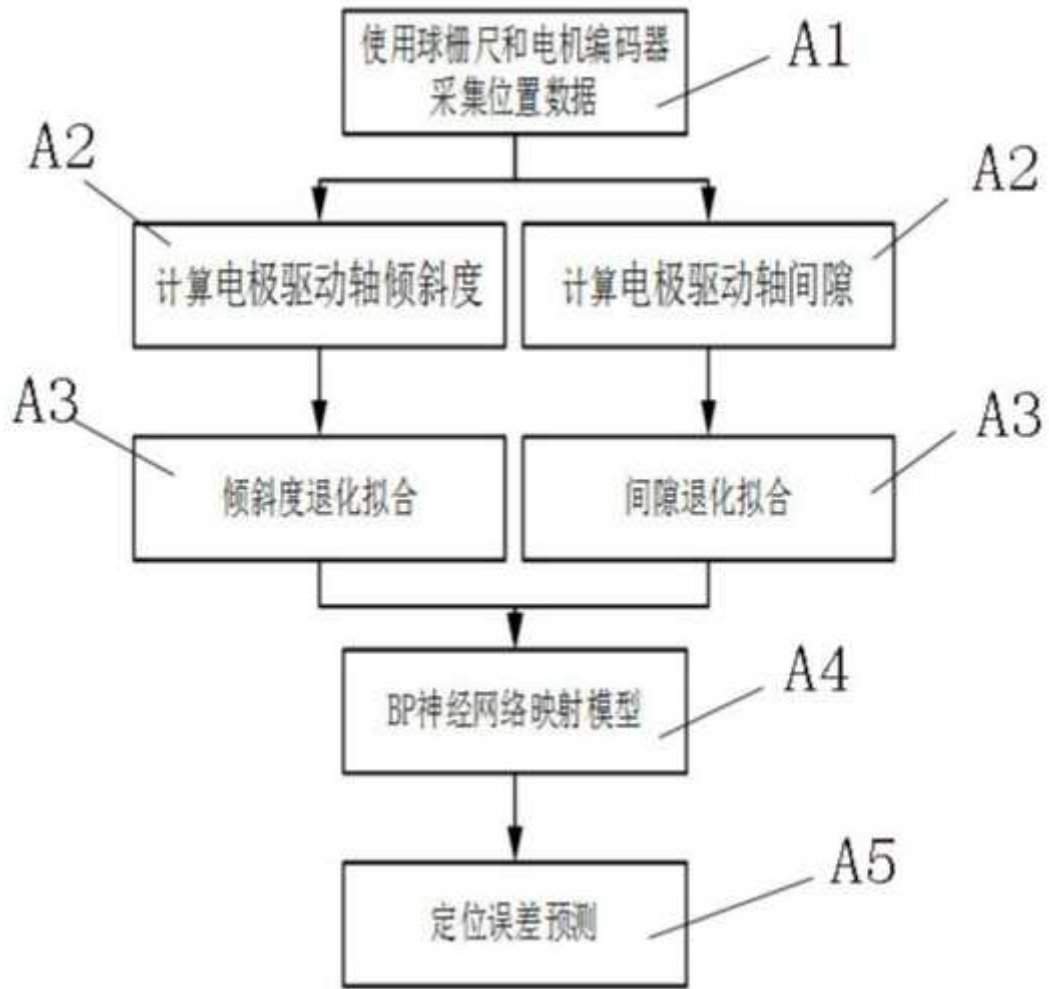


图2

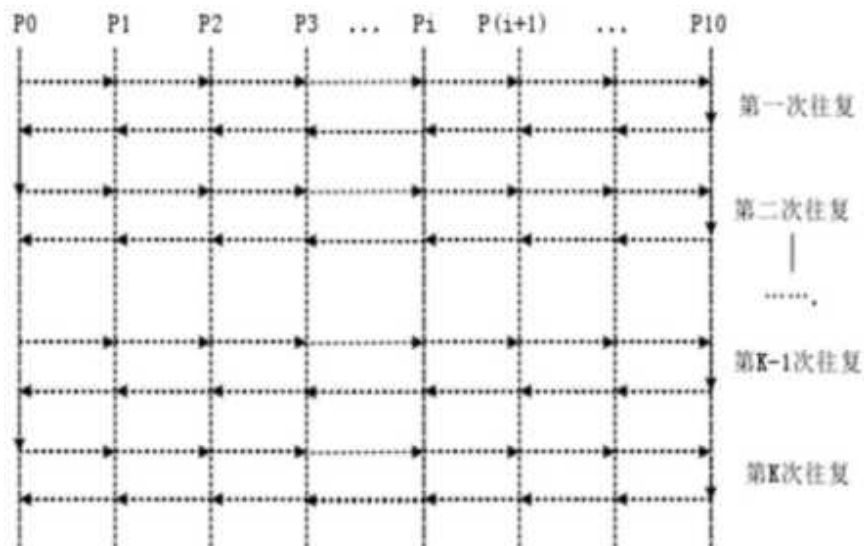


图3

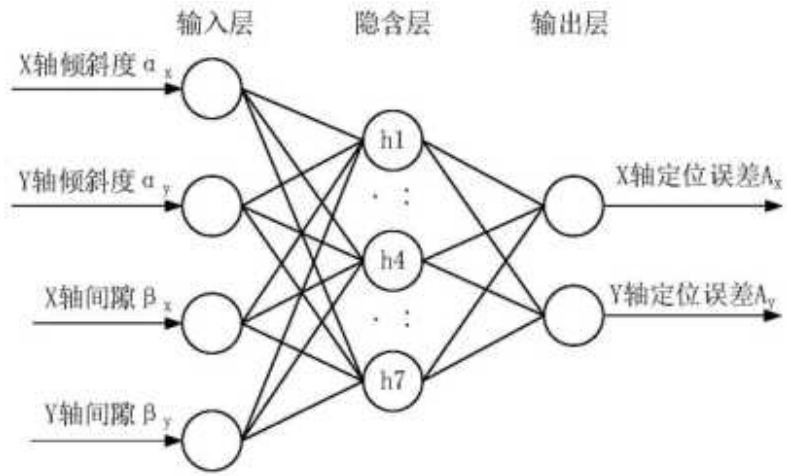


图4