



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103048949 B

(45) 授权公告日 2015. 05. 27

(21) 申请号 201210563651. 2

审查员 殷华宇

(22) 申请日 2012. 12. 22

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

(72) 发明人 冯斌 梅雪松 孙挪刚 张东升

牟恩旭

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

代理人 徐文权

(51) Int. Cl.

G05B 19/404(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102023612 A, 2011. 04. 20, 全文.

WO 95/27930 A1, 1995. 10. 19, 全文.

冯斌等. “开放式数控系统摩擦补偿的实现”. 《机床与液压》. 2011, 第 39 卷 (第 19 期), 第 7-9, 19 页.

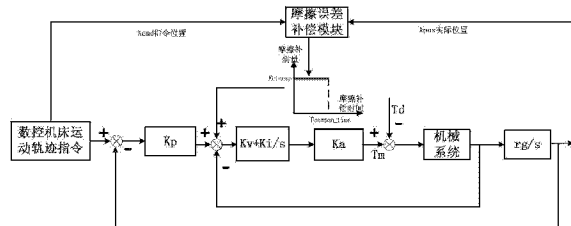
权利要求书2页 说明书16页 附图8页

(54) 发明名称

一种数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法

(57) 摘要

本发明公开了一种数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法。该模块具有摩擦误差学习模式与摩擦误差补偿模式。在摩擦误差学习模式下,可自动对数控机床摩擦补偿特性参数进行学习,在摩擦误差补偿模式下,可自动实现数控机床不同工况下的高精度摩擦误差补偿,本发明采用的摩擦误差补偿方法具有摩擦误差补偿精度高、自动智能且无需用户调试经验、便于移植到不同的数控系统中等优点,可明显提高数控机床加工精度及生产效率。



1. 一种数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 首先依据数控机床用户需求,读取摩擦误差补偿模块相关设置参数;

2) 根据输入的参数,摩擦误差补偿模块进行模块工作模式选择;摩擦误差补偿模块,通过模块工作模式选择,工作在摩擦误差补偿模式或摩擦误差学习模式下,其中摩擦误差学习模式下,摩擦误差补偿模块通过粗学习器、精学习器、智能函数生成器来生成精学习摩擦补偿量函数;在摩擦误差补偿模式下,摩擦误差补偿模块通过精学习摩擦补偿量函数、摩擦补偿器、反向点判别器、摩擦补偿效果评价器实现数控机床高精度摩擦补偿;

3) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数生成精摩擦补偿量,摩擦补偿器依据反向点判别器的输出结果,实现数控机床的高精度摩擦补偿,在此过程中,摩擦补偿效果评价器对摩擦补偿效果进行评价;

4) 若摩擦补偿效果不满足要求,根据实际摩擦补偿效果要求,重新设置摩擦误差补偿模块相关参数并将摩擦误差补偿模块工作模式设置为摩擦误差学习模式;

5) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差学习模式,数控机床按照正余弦粗学习运动轨迹程序进行运动,摩擦误差补偿模块采集的相关运动信号,粗学习器进行相关计算从而得到与反向点加速度对应的最优粗摩擦补偿量数组;

6) 在最优粗摩擦补偿量数组的基础上,数控机床按照正余弦精学习运动轨迹程序进行运动,摩擦误差补偿模块采集相关运动信号,精学习器对最优粗摩擦补偿量数组进行相关计算从而得到与反向点加速度对应的最优精摩擦补偿量数组;

7) 将步骤6)中得到的最优精摩擦补偿量数组输入到智能函数生成器中,通过相关智能算法自动生成精学习摩擦补偿量函数,摩擦误差学习模式结束;

8) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数根据数控机床所处工况自动计算出精摩擦补偿量;摩擦补偿器依据反向点判别器输出的相关信号,将精摩擦补偿量脉冲加入到数控机床相应运动轴伺服控制器速度环速度指令中,从而实现了对数控机床伺服系统摩擦误差的高精度补偿;

9) 若数控机床运动过程中,摩擦补偿效果不满足实际要求,则重复步骤4)至步骤8),实现数控机床摩擦误差高精度补偿并满足摩擦误差补偿效果要求。

2. 根据权利要求1所述的数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,其特征在于:步骤1)中,所述摩擦误差补偿模块相关参数为:最小加速度 Acc_{min} 、最大加速度 Acc_{max} 、加速度区间1特征值 Acc_1 、加速度区间2特征值 Acc_2 、加速度区间1步长数 Num_1 、加速度区间2步长数 Num_2 、加速度区间3步长数 Num_3 、粗学习运动循环次数 $Coarse_num$ 、精学习运动循环次数 $Fine_num$ 、摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag$ 、摩擦补偿时间 $Fcompen_time$ 、粗学习摩擦补偿量初始值 $Fini_value$ 、粗学习摩擦补偿增量 $CoaFvalue_step$ 、精学习摩擦补偿增量 $FineFvalue_step$ 、摩擦补偿效果要求值 $Fricmd$;上述最小加速度 Acc_{min} 、最大加速度 Acc_{max} 、加速度区间1特征值 Acc_1 、加速度区间2特征值 Acc_2 均为反向点的加速度值。

3. 根据权利要求1所述的数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,其特征在于:步骤2)中,所述摩擦误差补偿模块进行其工作模式选择,如果摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag = 0$,则进入摩擦误差补偿模式,如果摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag = 1$,则进入摩擦误差学习模式。

4. 根据权利要求 1 所述的数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,其特征在于:步骤 3) 中,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数依据机床运动轨迹处于反向点时的加速度值自动计算出精摩擦补偿量。

5. 根据权利要求 1 所述数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,其特征在于:步骤 5) 中,数控机床按照正余弦粗学习运动轨迹程序进行运动时,粗学习器开始工作,反向点判别器依据摩擦误差补偿模块采集的运动位置指令信号,进行反向点判别;当反向点判别器判断出机床运动位置指令处于反向点时,粗摩擦补偿发生器进行粗摩擦补偿,摩擦补偿效果评价器进行摩擦补偿效果评价;当该反向点加速度下的粗摩擦补偿的次数达到粗学习运动循环次数时,粗学习加速度更新器将更新后的加速度值输入到数控机床正余弦粗学习运动轨迹程序中,从而改变数控机床运动轨迹,当数控机床运动轨迹反向点加速度值大于 Acc_{max} 时,由摩擦补偿效果评价器得到最优粗摩擦补偿量数组,粗学习器结束工作; Acc_{max} 指数控机床运动轴所能允许运行的最大反向点加速度值。

6. 根据权利要求 1 所述数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,其特征在于:步骤 6) 中,数控机床按照正余弦精学习运动轨迹程序进行运动时,精学习器开始工作,反向点判别器依据摩擦误差补偿模块采集运动位置指令信号,进行反向点判别;当反向点判别器判断出机床运动位置指令处于反向点时,精摩擦补偿发生器进行精摩擦补偿,摩擦补偿效果评价器进行摩擦补偿效果评价;当该反向点加速度下的精摩擦补偿的次数达到精学习运动循环次数时,精学习加速度更新器将更新后的加速度值输入到数控机床正余弦精学习运动轨迹程序中,从而改变数控机床运动轨迹,当数控机床运动轨迹反向点加速度值大于 Acc_{max} 时,由摩擦补偿效果评价器得到最优精摩擦补偿量数组,精学习器结束工作; Acc_{max} 指数控机床运动轴所能允许运行的最大反向点加速度值。

7. 根据权利要求 1 所述的数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,其特征在于:步骤 8) 中,所述摩擦补偿器依据反向点判别器输出的相关信号,将精摩擦补偿量生成具有正负号的精摩擦补偿量脉冲并将该脉冲加入到数控机床相应运动轴伺服控制器速度环速度指令中,从而实现数控机床伺服系统摩擦误差高精度补偿。

一种数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法

技术领域

[0001] 本发明属于数控机床技术领域,涉及一种数控机床误差补偿方法,尤其是一种针对数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法。该摩擦误差补偿方法具有高精度、智能化等优点

背景技术

[0002] 摩擦是引起高速、高精度数控机床动态误差主要因素之一,且不利于运动控制精度的提高。数控机床摩擦特征在低速时表现为强烈的非线性,主要表现为在速度过零时,非线性的摩擦力的作用使得数控系统无法通过自身控制器来完全消除由摩擦带来的不利影响。由于摩擦误差严重地限制数控机床轮廓精度的提高,因此,关于伺服系统摩擦误差高精度、智能补偿一直是高速、高精度数控技术研究的热点和难点。

[0003] 传统数控机床伺服系统摩擦误差补偿主要依靠调试人员工程调试经验且耗时、费力,无法达到最优摩擦误差补偿效果。由于数控机床伺服系统摩擦特性具有时变特征,为了保持数控机床加工精度,需要调试人员不断调整相关摩擦误差补偿参数导致需要耗费大量人力、生产时间,从而不利于数控机床生产效率的提高。高精度智能摩擦补偿方法更为实际可行有效,可以达到很高的摩擦误差补偿精度且无需人工调试经验,能够智能匹配最优摩擦误差补偿参数,从而节省调试时间、提高数控机床生产效率。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的缺点,提供一种数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,该方法采用摩擦误差学习模式与摩擦误差补偿模式。在摩擦误差学习模式下,可自动对数控机床摩擦补偿特性参数进行学习,在摩擦误差补偿模式下,可自动实现数控机床不同工况下的高精度摩擦补偿,从而达到提高数控机床生产效率及加工精度的目的。

[0005] 本发明的目的是通过以下技术方案来解决的:

[0006] 本发明种数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 首先依据数控机床用户需求,读取摩擦误差补偿模块相关设置参数;

[0008] 2) 根据输入的参数,摩擦误差补偿模块进行模块工作模式选择;摩擦误差补偿模块,通过模块工作模式选择,工作在摩擦误差补偿模式或摩擦误差学习模式下,其中摩擦误差学习模式下,摩擦误差补偿模块通过粗学习器、精学习器、智能函数生成器来生成精学习摩擦补偿量函数;在摩擦误差补偿模式下,摩擦误差补偿模块通过精学习摩擦补偿量函数、摩擦补偿器、反向点判别器、摩擦补偿效果评价器实现数控机床高精度摩擦补偿;

[0009] 3) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数生成精摩擦补偿量,摩擦补偿器依据反向点判别器的输出结果,实现数控机床的高精度摩擦补偿,在此过程中,摩擦补偿效果评价器对摩擦补偿效果进行评价;

[0010] 4) 若摩擦补偿效果不满足要求,根据实际摩擦补偿效果要求,重新设置摩擦误差补偿模块相关参数并将摩擦误差补偿模块工作模式设置为摩擦误差学习模式;

[0011] 5) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差学习模式,数控机床按照正余弦粗学习运动轨迹程序进行运动,摩擦误差补偿模块采集的相关运动信号,粗学习器进行相关计算从而得到与反向点加速度对应的最优粗摩擦补偿量数组;

[0012] 6) 在最优粗摩擦补偿量数组的基础上,数控机床按照正余弦精学习运动轨迹程序进行运动,摩擦误差补偿模块采集相关运动信号,精学习器对最优粗摩擦补偿量数组进行相关计算从而得到与反向点加速度对应的最优精摩擦补偿量数组;

[0013] 7) 将步骤 6) 中得到的最优精摩擦补偿量数组输入到智能函数生成器中,通过相关智能算法自动生成精学习摩擦补偿量函数,摩擦误差学习模式结束;

[0014] 8) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数根据数控机床所处工况自动计算出精摩擦补偿量;摩擦补偿器依据反向点判别器输出的相关信号,将精摩擦补偿量脉冲加入到数控机床相应运动轴伺服控制器速度环速度指令中,从而实现对数控机床伺服系统摩擦误差的高精度补偿;

[0015] 9) 若数控机床运动过程中,摩擦补偿效果不满足实际要求,则重复步骤 4) 至步骤 8), 实现数控机床摩擦误差高精度补偿并满足摩擦误差补偿效果要求;

[0016] 进一步的,上述步骤 1) 中,所述摩擦误差补偿模块相关参数为:最小加速度 Acc_{min} 、最大加速度 Acc_{max} 、加速度区间 1 特征值 Acc_1 、加速度区间 2 特征值 Acc_2 , 上述加速度量均为反向点的加速度值、加速度区间 1 步长数 Num_1 、加速度区间 2 步长数 Num_2 、加速度区间 3 步长数 Num_3 、粗学习运动循环次数 $Coase_num$ 、精学习运动循环次数 $Fine_num$ 、摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag$ 、摩擦补偿时间 $Fcompen_time$ 、粗学习摩擦补偿量初始值 $Fini_value$ 、粗学习摩擦补偿增量 $CoaFvalue_step$ 、精学习摩擦补偿增量 $FineFvalue_step$, 摩擦补偿效果要求值 $Fricmd$ 。

[0017] 上述步骤 2) 中,所述摩擦误差补偿模块进行其工作模式选择,如果摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag=0$, 则进入摩擦误差补偿模式,如果摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag=1$, 则进入摩擦误差学习模式;

[0018] 上述步骤 3) 中,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数依据机床运动轨迹处于反向点时的加速度值自动计算出精摩擦补偿量。

[0019] 上述步骤 5) 中,数控机床按照正余弦粗学习运动轨迹程序进行运动时,粗学习器开始工作,反向点判别器依据摩擦误差补偿模块采集的运动位置指令信号,进行反向点判别;当反向点判别器判断出机床运动位置指令处于反向点时,粗摩擦补偿发生器进行粗摩擦补偿,摩擦补偿效果评价器进行摩擦补偿效果评价;当该反向点加速度下的粗摩擦补偿的次数达到粗学习运动循环次数时,粗学习加速度更新器将更新后的加速度值输入到数控机床正余弦粗学习运动轨迹程序中,从而改变数控机床运动轨迹,当数控机床运动轨迹反向点加速度值大于 Acc_{max} 时,由摩擦补偿效果评价器得到最优摩擦粗补偿量数组,粗学习器结束工作。

[0020] 上述步骤 6) 中,数控机床按照正余弦精学习运动轨迹程序进行运动时,精学习器开始工作,反向点判别器依据摩擦补偿误差模块采集运动位置指令信号,进行反向点判别;当反向点判别器判断出机床运动位置指令处于反向点时,精摩擦补偿发生器进行精摩擦补偿,摩擦补偿效果评价器进行摩擦补偿效果评价;当该反向点加速度下的精摩擦补偿的次数达到精学习运动循环次数时,精学习加速度更新器将更新后的加速度值输入到数控机床

正余弦精学习运动轨迹程序中,从而改变数控机床运动轨迹,当数控机床运动轨迹反向点加速度值大于 Acc_{max} 时,由摩擦补偿效果评价器得到最优精摩擦补偿量数组,精学习器结束工作。

[0021] 上述步骤 8) 中,所述摩擦补偿器依据反向点判别器输出的相关信号,将精摩擦补偿量生成具有正负号的精摩擦补偿量脉冲并将该脉冲加入到数控机床相应运动轴伺服控制器速度环速度指令中,从而实现数控机床伺服系统摩擦误差高精度补偿。

[0022] 本发明具有以下有益效果:

[0023] (1) 本发明采用数控机床摩擦误差补偿模块运行相关智能算法,得到数控机床伺服系统在各工况下最优精摩擦补偿量脉冲,避免了依靠人工经验调试耗时且无法得到最佳摩擦补偿参数等缺点,提高了摩擦误差补偿的精度。

[0024] (2) 本发明可依据用户设置的相关摩擦误差补偿模块参数,通过对有关数据的采集与计算,自动地执行摩擦误差学习模式或摩擦误差补偿模式,满足了用户对数控机床伺服系统摩擦误差高精度补偿的需求。本发明采用的摩擦误差补偿方法具有摩擦误差补偿精度高、自动智能且无需用户调试经验等优点,可明显提高数控机床加工精度及生产效率。

附图说明

[0025] 图 1 是数控机床伺服系统摩擦误差补偿基本原理示意图;

[0026] 图 2 是数控机床正余弦粗学习及精学习运动轨迹示意图;

[0027] 图 3 是粗学习器及精学习器工作原理图;

[0028] 图 4 是智能函数生成器工作原理图;

[0029] 图 5 是数控机床摩擦误差补偿模块工作原理示意图;

[0030] 图 6 是 x 轴精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量数组曲线对比图;

[0031] 图 7 是 y 轴精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量数组曲线对比图;

[0032] 图 8 是在 $F=1000\text{mm}/\text{min}$, $R=50\text{mm}$, x/y 轴联动圆误差轨迹,其中,图 8 (a)为未摩擦补偿得到的圆误差结果,图 8 (b)为采用本发明模块在摩擦误差补偿模式下的圆误差结果;

[0033] 图 9 是在 $F=2000\text{mm}/\text{min}$, $R=50\text{mm}$, x/y 轴联动圆误差轨迹,其中,

[0034] 图 9 (a)为未采用本发明的摩擦误差补偿方法得到的圆误差结果,图 9 (b)为采用本发明模块在摩擦误差补偿模式下的圆误差结果;

[0035] 图 10 是在 $F=3000\text{mm}/\text{min}$, $R=50\text{mm}$, x/y 轴联动圆误差轨迹,其中,图 10 (a)为未摩擦补偿得到的圆误差结果,图 10 (b)为采用本发明模块在摩擦误差补偿模式下的圆误差结果。

具体实施方式

[0036] 本发明的数控机床伺服控制系统摩擦误差补偿方法包括以下步骤:

[0037] 1) 首先依据用户需求,需设置的摩擦误差补偿模块的参数有:最小加速度 Acc_{min} 、最大加速度 Acc_{max} 、加速度区间 1 特征值 Acc_1 、加速度区间 2 特征值 Acc_2 ,上述加速度量均为反向点的加速度值、加速度区间 1 步长数 Num_1 、加速度区间 2 步长数 Num_2 、加速度区间 3 步长数 Num_3 、粗学习运动循环次数 $Coarse_num$ 、精学习运动循环次数 $Fine_num$ 、摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag$ 、摩擦补偿时间 $Fcompen_time$ 、粗学习

摩擦补偿量初始值 $Fini_value$ 、粗学习摩擦补偿增量 $CoaFvalue_step$ 、精学习摩擦补偿增量 $FineFvalue_step$ ，摩擦补偿效果要求值 $Fricmd$ ；

[0038] 2) 根据输入的相关参数，摩擦误差补偿模块进行摩擦误差补偿模块工作模式选择。如图 5 所示，如果摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag=0$ ，则进入摩擦误差补偿模式，如果摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag=1$ ，则进入摩擦误差学习模式；

[0039] 3) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式，即摩擦误差补偿模块工作模式选择参数 $Frilearn_flag=0$ 。当数控机床运动时，精学习摩擦补偿量函数，依据处于反向点时的加速度值，自动生成精摩擦补偿量。摩擦补偿器依据反向点判别器的输出结果，实现数控机床的高精度摩擦补偿，在此过程中，摩擦补偿效果评价器对摩擦补偿效果进行评价；

[0040] 4) 若摩擦补偿效果不满足要求，即摩擦补偿效果要求值 $Fricmd$ 小于摩擦补偿效果评价器函数值 F ，则需要根据实际摩擦补偿效果要求，重新设置摩擦误差补偿模块相关参数，并将摩擦误差补偿模块工作模式设置为摩擦误差学习模式即设置 $Frilearn_flag=1$ ；

[0041] 5) 粗学习器工作开始，数控机床按照特定的正余弦粗学习运动轨迹程序进行运动。该数控机床运动轨迹为正余弦位置轨迹如图 2 所示，该轨迹加速度幅值等于其反向点处的加速度值即等效走圆位置轨迹时的向心加速度值。其证明过程如下式(1) — (8) 所示。同时，摩擦误差补偿模块采集运动位置指令信号及机床工作台实际运动位置信号；

[0042] 设数控机床 x 轴其位置轨迹为正弦曲线，表达式为：

$$[0043] \quad X = R \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (1)$$

[0044] 其中：

[0045] R ——轨迹运动半径；

[0046] T ——轨迹运动周期；

[0047] 在数控机床达到进给速度时二者均为常值，对于各轴而言，有着相同的运动周期。

[0048] 对表达式(1)求一阶导数可以得到 X 轴的速度表达式：

$$[0049] \quad \dot{X} = R \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (2)$$

[0050] 对表达式(1)求二阶导数可以得到 X 轴的加速度表达式：

$$[0051] \quad \ddot{X} = -R \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (3)$$

[0052] 对于 Y 轴，其运动轨迹为余弦曲线，同理可得：

$$[0053] \quad Y = R \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (4)$$

$$[0054] \quad \dot{Y} = R \frac{2\pi}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (5)$$

$$[0055] \quad \ddot{Y} = -R \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (6)$$

[0056] 对于 X 轴与 Y 轴合成的圆周运动，进给速度 V 及向心加速度 A 表达式如下：

$$[0057] \quad V = \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2} = \sqrt{\left(R \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t\right)^2 + \left(R \frac{2\pi}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t\right)^2} = R \frac{2\pi}{T} \quad (7)$$

$$[0058] \quad A = \frac{V^2}{R} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R \quad (8)$$

[0059] 由公式(1)与(3)、(4)与(6)可以看出,各轴的反向点处的加速度值即为其整个运动过程中的加速度幅值;由公式(3)、(6)和(8)可以看出,各轴运动过程中的加速度幅值的绝对值与所合成的圆周运动的向心加速度值相同。因此,数控机床进行圆运动时,反向点的加速度值可用该圆的向心加速度值来代替;

[0060] 6) 依据摩擦误差补偿模块采集运动位置指令信号,反向点判别器进行反向点判别。在此过程中,粗摩擦补偿发生器进行初始化。由于实际数控机床实际反馈位置信号容易受到外界干扰,造成错误判别反向点位置,所以需采用受外界干扰较小的指令位置信号进行反向点判别。其反向点判别过程如下①—③所示。当反向点判别器判断出机床运动位置指令处于反向点时,向粗摩擦补偿发生器发出启动信号指令及粗摩擦补偿量值的符号信息,同时向摩擦补偿效果评价器发出启动信号指令;

[0061] 反向点判别过程:

[0062] ①反向点判别器采集并存储相邻3个采样周期的指令位置信号,分别记做 Position1、Position2、Position3;

[0063] ②反向点判别器对所存储的指令位置信号 Position1、Position2、Position3 进行如下运算:

$$[0064] \quad \Delta_{\text{position1}} = \text{Position2} - \text{Position1} \quad (9)$$

$$[0065] \quad \Delta_{\text{position2}} = \text{Position3} - \text{Position2} \quad (10)$$

[0066] ③反向点判别器对 $\Delta_{\text{position1}}$ 与 $\Delta_{\text{position2}}$ 进行如下运算:

$$[0067] \quad \text{Reverse_test} = \Delta_{\text{position1}} \times \Delta_{\text{position2}} \quad (11)$$

[0068] 若 $\text{Reverse_test} < 0$, 则说明数控机床处于位置指令反向点。

[0069] 摩擦补偿量值的符号(正值或负值)由函数 $\text{sgn}(d_r)$ 确定,如下式所示:

$$[0070] \quad \text{Sgn}(d_r) = \begin{cases} 1 & (d_r > 0) \\ -1 & (d_r < 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$[0071] \quad d_r = x_{k+1} - x_k$$

$$[0072] \quad (13)$$

[0073] x_k ——数控机床反向时刻 k 的位置指令值;

[0074] x_{k+1} ——数控机床 $k+1$ 时刻的位置指令值;

[0075] d_r ——数控机床位置指令值之差;

[0076] 7) 粗摩擦补偿发生器接收到反向点判别器发出的相关信号后,开始进行粗摩擦补偿。粗摩擦补偿脉冲,其时间长度为摩擦补偿时间 $F_{\text{compen_time}}$,幅值为 F_{ricomp} 。粗摩擦补偿发生器进行粗摩擦补偿的次数,由粗学习运动循环次数决定。粗摩擦补偿发生器工作原理如图 3a 所示;

[0077] 8) 摩擦补偿效果评价器接收到反向点判别器发出的启动信号指令后,根据采集的

运动位置指令信号及机床工作台实际运动位置信号,按照式(14)所示的评价函数进行摩擦补偿效果评价,其函数值越小,摩擦补偿效果越好;

[0078] 摩擦补偿效果评价函数:

$$[0079] \quad F = \frac{\sum_{i=1}^N |x_{pos} - x_{cmd}|}{N} \quad (14)$$

[0080] 其中:

[0081] x_{pos} ——数控机床工作台实际位置;

[0082] x_{cmd} ——数控机床指令位置;

[0083] F ——摩擦补偿效果评价器函数值;

[0084] N ——采样点数, $N = 2 \times \frac{F_{compen_time}}{T}$, T_s 为采样周期。

[0085] 9) 重复步骤 5) 至 8), 可得该反向点加速度下不同摩擦补偿量所对应的摩擦补偿效果评价器函数值, 从中选取使摩擦误差补偿效果评价函数值最小时所对应的摩擦补偿量。该摩擦补偿量为在此反向点加速度下最优的粗摩擦补偿量;

[0086] 10) 在步骤 5) 至 9) 进行的同时, 当粗摩擦补偿发生器进行粗摩擦补偿的次数等于粗学习运动循环次数值时, 完成粗补偿脉冲循环, 启动粗学习加速度更新器, 圆周运动向心加速度在原基础上进行更新, 并将更新后的加速度值输入到数控机床正余弦粗学习运动轨迹程序中, 从而改变数控机床运动轨迹; 具体工作原理如式(15) — (18) 所示:

$$[0087] \quad Acc_{new} = Acc_{pre} + \Delta Acc \quad (15)$$

[0088] 其中: Acc_{new} ——更新后的圆周运动向心加速度;

[0089] Acc_{pre} ——更新前的圆周运动向心加速度;

[0090] ΔAcc ——粗学习器向心加速度的更新步长。

[0091] ΔAcc 的计算:

[0092] 当 $Acc_{min} \leq Acc_{pre} < Acc1$ 时

$$[0093] \quad \Delta Acc = \frac{Acc1 - Acc_{min}}{Num1} \quad (16)$$

[0094] 当 $Acc1 \leq Acc_{pre} < Acc2$ 时

$$[0095] \quad \Delta Acc = \frac{Acc2 - Acc1}{Num2} \quad (17)$$

[0096] 当 $Acc2 \leq Acc_{pre} \leq Acc_{max}$ 时

$$[0097] \quad \Delta Acc = \frac{Acc_{max} - Acc2}{Num3} \quad (18)$$

[0098] 11) 重复步骤 5) 至 10), 可得各反向点加速度所对应的最优粗摩擦补偿量数组, 当 $Acc_{pre} > Acc_{max}$ 时, 粗学习器工作结束;

[0099] 12) 精学习器工作开始, 数控机床按照特定的正余弦精学习运动轨迹程序进行运动。该数控机床运动程序为正余弦位置轨迹如图 2 所示, 该轨迹加速度幅值等于其反向点处的加速度值即等效走圆位置轨迹时的向心加速度值。同时, 摩擦误差补偿模块采集运动位置指令信号及机床实际运动位置信号;

[0100] 13) 依据摩擦误差补偿模块采集运动位置指令信号, 反向点判别器进行方向点判

别。当反向点判别器判断出机床运动位置指令处于反向点时,向精摩擦补偿发生器发出启动信号指令及精摩擦补偿量值的符号信息,同时向摩擦补偿效果评价器发出启动信号指令;

[0101] 14) 精摩擦补偿发生器接收到反向点判别器发出的相关信号后,开始进行精摩擦补偿。精摩擦补偿脉冲,其时间长度为摩擦补偿时间 F_{compen_time} ,幅值为 F_{ricomp_Fine} 。精摩擦补偿发生器进行精摩擦补偿的次数,由精学习运动循环次数决定。精摩擦补偿发生器工作原理如图 3b 所示;

[0102] 15) 摩擦补偿效果评价器接收到反向点判别器发出的启动信号指令后,根据采集的运动位置指令信号及机床工作台实际运动位置信号,按照式(14)所示的评价函数进行摩擦补偿效果评价,其函数值越小,摩擦误差补偿效果越好;

[0103] 16) 重复步骤 12)至 15),可得该反向点加速度下不同补偿量所对应的摩擦补偿效果评价器函数值,从中选取使摩擦误差效果评价函数值最小时所对应的摩擦补偿量。该摩擦补偿量为在此反向点加速度下最优的精摩擦补偿量;

[0104] 17) 在步骤 12)至 16)进行的同时,当精摩擦补偿发生器进行精摩擦补偿的次数等于精学习运动循环次数值时,完成精补偿脉冲循环,启动精学习加速度更新器,圆周运动向心加速度在原基础上进行更新,并将更新后的加速度值输入到数控机床正余弦精学习运动轨迹程序中,从而改变数控机床运动轨迹;

[0105] 具体工作原理如式(19) — (22)所示:

$$[0106] \quad Acc_{new} = Acc_{pre} + \Delta Acc_f \quad (19)$$

[0107] 其中: Acc_{new} ——更新后的圆周运动向心加速度;

[0108] Acc_{pre} ——更新前的圆周运动向心加速度;

[0109] ΔAcc_f ——精学习器向心加速度的更新步长;

[0110] ΔAcc_f 的计算:

[0111] 当 $Acc_{min} \leq Acc_{pre} < Acc1$ 时

$$[0112] \quad \Delta Acc_f = \frac{Acc1 - Acc_{min}}{2 \times Num1} \quad (20)$$

$$[0113] \quad \text{当 } Acc1 \leq Acc_{pre} < Acc2 \text{ 时 } \Delta Acc_f = \frac{Acc2 - Acc1}{2 \times Num2} \quad (21)$$

[0114] 当 $Acc2 \leq Acc_{pre} \leq Acc_{max}$ 时

$$[0115] \quad \Delta Acc_f = \frac{Acc_{max} - Acc2}{2 \times Num3} \quad (22)$$

[0116] 18) 重复步骤 12)至 17),可得各反向点加速度所对应的最优精摩擦补偿量数组,当 $Acc_{pre} > Acc_{max}$ 时,精学习器工作结束;

[0117] 19) 智能函数生成器进行精学习摩擦补偿量函数生成。如图 5 所示,智能函数生成器根据由精学习器输出的最优精摩擦补偿量数组及其所对应的反向点加速度,智能生成精学习摩擦补偿量函数;

[0118] 20) 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数根据数控机床所处工况自动计算出精摩擦补偿量。摩擦补偿器依据反向点判别器输出的相关信号,将精摩擦补偿量脉冲加入到数控机床相应运动轴伺服控制器速度环速度指令中,从而实现对数控机床伺服系统摩擦误差的高精度补偿,如图 5 所示;

[0119] 21)若数控机床运动过程中,摩擦补偿效果不满足实际要求,可重复步骤4)至步骤20),实现数控机床摩擦误差高精度补偿并满足摩擦补偿效果要求。

[0120] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述:

[0121] 1、数控机床伺服系统摩擦误差补偿基本原理示意图

[0122] 本发明所述的数控机床伺服系统摩擦误差补偿基本原理如图1所示。其中, K_p 为位置环增益; K_v 、 K_i 为速度环增益、速度环积分增益; K_a 为电流环比例系数; T_m 、 T_d 为伺服系统驱动力矩、伺服系统负载力矩; r_g 为伺服系统传动比; X_{cmd} 为运动指令位置; X_{pos} 为数控机床工作台实际位置; F_{ricomp} 为摩擦补偿量; F_{compen_time} 为摩擦补偿时间。当数控机床运动时,摩擦误差补偿模块采集运动指令位置 X_{cmd} 及数控机床工作台实际位置 X_{pos} ,计算精摩擦补偿量并生成精摩擦补偿量脉冲,其幅值为 F_{ricomp} ,脉冲持续时间 F_{compen_time} ,将精摩擦补偿量脉冲加入到图1所示的速度环指令处,实现对摩擦误差的补偿。在数控机床运动过程中,当工作台速度过零时即发生实际运动换向时,由于摩擦力作用伺服控制系统本身无法克服摩擦力带来的扰动,故产生了摩擦误差。摩擦补偿通过在速度过零时加入摩擦补偿量脉冲来抑制摩擦力影响,加快换向过程从而抑制摩擦误差产生。

[0123] 2、数控机床正余弦粗学习及精学习运动轨迹示意图

[0124] 图2为数控机床x轴在如下表1所示的运动轨迹参数条件下,正余弦粗学习及精学习运动轨迹,其运动半径为5mm:

[0125] 表1. 正余弦粗学习及精学习运动轨迹参数表

[0126]

参数名称	参数值
Accmin	1
Accmax	15
Acc1	5
Acc2	10
Num1	3
Num2	2
Num3	1
Coarse_num	4
Fine_num	1
Frilearn_flag	1

[0127] 由正余弦粗学习及精学习运动轨迹可以看出,在粗学习器工作时,数控机床按照正余弦粗学习运动轨迹进行运动,其圆向心加速度由粗学习加速度更新器控制,按照参数设定递增,从而使x轴的运动加快,位置轨迹的频率逐渐增加。在精学习器工作时,数控机床按照正余弦精学习运动轨迹进行运动,其圆向心加速度由精学习加速度更新器控制,按照参数设定递增,从而使x轴的运动加快,位置轨迹的频率逐渐增加。

[0128] 3、粗学习器及精学习器工作原理图

[0129] 3.1 粗学习器工作原理

[0130] 本发明摩擦误差补偿模块的功能是通过摩擦补偿器产生摩擦补偿脉冲来实现,设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差学习模式即设置 Frilearn_flag=1,粗学习器开始工作,其粗学习器工作原理如图 3a 所示。

[0131] ①粗学习器开始工作后,数控机床按照特定的正余弦粗学习运动轨迹程序进行运动。粗学习器进行粗摩擦补偿发生器初始化,完成如式(23)所示的操作;

$$[0132] \quad \text{Fricomp} = \text{Fini_value} \quad (23)$$

[0133] 其中:

[0134] Fini_value—粗学习摩擦补偿量初始值

[0135] Fricomp——摩擦补偿量

[0136] ②若粗摩擦补偿发生器接收到反向点判别器发出的启动信号指令后,开始进行粗摩擦补偿,粗摩擦补偿脉冲,其脉冲时间长度为摩擦补偿时间 Fcompen_time,脉冲幅值为 Fricomp,若未接收到来自反向点判别器发出的启动信号指令,则输出补偿脉冲幅值为零;

[0137] ③粗摩擦补偿发生器按照式(24)所示更新摩擦补偿量:

$$[0138] \quad \text{Fricomp} = \text{Fricomp} + \text{CoaFvalue_step} \quad (24)$$

[0139] 其中 CoaFvalue_step 为粗学习摩擦补偿增量;

[0140] ④当粗摩擦补偿发生器发出粗摩擦补偿量脉冲的数量小于粗学习运动循环数时,重复步骤②——③;当粗摩擦补偿发生器发出粗摩擦补偿量脉冲的数量大于或等于粗学习运动循环数时,完成粗补偿脉冲循环。启动粗学习加速度更新器,圆周运动向心加速度在原基础上进行更新,并将更新后的加速度值输入到数控机床正余弦粗学习运动轨迹程序中,从而改变数控机床运动轨迹;

[0141] ⑤当反向点加速度小于或等于最大加速度 Accmax 时,重复步骤①——④,当反向点加速度大于最大加速度 Accmax 时,由摩擦补偿效果评价器得到最优粗摩擦补偿量数组,粗学习器结束工作;

[0142] 3.2 精学习器工作原理

[0143] 粗学习器结束工作后,得到最优粗摩擦补偿量数组,在此基础上,精学习器开始工作,其工作原理如图 3b 所示:

[0144] ①精学习器工作开始后,数控机床按照特定的正余弦精学习运动轨迹程序进行运动。精学习器进行精摩擦补偿发生器初始化,完成式(25)所示操作:

$$[0145] \quad \text{Fricomp} = \text{Fini_value_fine} \quad (25)$$

[0146] 其中, Fini_value_fine 为精学习摩擦补偿量初始值,精学习摩擦补偿量基准值由粗学习最优摩擦补偿量,按如下方法确定:

[0147] 设由粗学习器工作结束后得到的最优粗摩擦补偿量数组为:

$$[0148] \quad [cv_1 \quad cv_2 \quad cv_3 \quad \cdots \quad cv_n]$$

[0149] 其对应的反向点加速度数组为:

$$[0150] \quad [a_{c1} \quad a_{c2} \quad a_{c3} \quad \cdots \quad a_{cn}]$$

[0151] 将最优粗摩擦补偿量数组进行扩充,得到精学习摩擦补偿量基准值数组(1×2n-1 维),如图 3c 所示:

[0152] $[cv_1 \quad cv_2 \quad cv_2 \quad cv_3 \quad cv_3 \quad \cdots \quad cv_n \quad cv_n]$

[0153] 将扩充得到的精学习摩擦补偿量基准值数组记作：

[0154] $[fv_1 \quad fv_2 \quad fv_3 \quad fv_4 \quad fv_5 \quad \cdots \quad fv_{m-1} \quad fv_m]$ $m=2n-1$

[0155] 将其相应的反向点加速度数组扩充为：

[0156] $[a_{c1} \quad a_{f12} \quad a_{c2} \quad a_{f23} \quad a_{c3} \quad \cdots \quad a_{f(n-1)n} \quad a_{cn}]$

[0157] 其中：

[0158] $a_{f(i)(i+1)}=a_{c(i)}+\Delta Acc_f \quad i=1, 2, \cdots, n-1 \quad (26)$

[0159] 该式中 ΔAcc_f 为精学习向心加速度的更新步长。

[0160] 将扩充后的反向点加速度数组记作：

[0161] $[a_{f1} \quad a_{f2} \quad a_{f3} \quad a_{f4} \quad a_{f5} \quad \cdots \quad a_{fm-1} \quad a_{fm}] \quad m=2n-1$

[0162] 当反向点加速度为 a_{fk} , $k=1, 2, \cdots, m$ 时, 精学习摩擦补偿量初始值 $Fini_value_fine$:

[0163] $Fini_value_fine=fv_k-(Fine_num \times FineFvalue_step)$

[0164] $k=1, 2, \cdots, m \quad (27)$

[0165] 其中：

[0166] $Fine_num$ ——精学习运动循环次数；

[0167] $FineFvalue_step$ 精学习摩擦补偿增量；

[0168] ②若精摩擦补偿发生器接收到反向点判别器发出的启动信号指令, 则输出精摩擦补偿量脉冲, 其脉冲时间长度为摩擦补偿时间 $Fcompen_time$, 脉冲幅值为 $Fricomp$, 若未接收到来自反向点判别器发出的启动信号指令, 则输出补偿脉冲幅值为零；

[0169] ③精摩擦补偿发生器按照式所示更新摩擦补偿量：

[0170] $Fricomp=Fricomp+FineFvalue_step \quad (28)$

[0171] 其中 $FineFvalue_step$ 为精学习摩擦补偿增量；

[0172] ④当精摩擦补偿发生器发出精摩擦补偿量脉冲数量小于精学习运动循环数时, 重复步骤②——③；当精摩擦补偿发生器发出精摩擦补偿量脉冲数量大于或等于精学习运动循环数时, 完成精补偿脉冲循环。启动精学习加速度更新器, 圆周运动向心加速度在原基础上进行更新, 并将更新后的加速度值输入到数控机床正余弦精学习运动轨迹程序中, 从而改变数控机床运动轨迹；

[0173] ⑤当反向点加速度小于或等于最大加速度 $Accmax$ 时, 重复步骤①——④。当反向点加速度大于最大加速度 $Accmax$ 时, 由摩擦摩擦补偿效果评价器得到最优精摩擦补偿量数组, 精学习器结束工作。

[0174] 4. 智能函数生成器工作原理图

[0175] 智能函数生成器以最优精学习摩擦补偿量数组及其反向点加速度数组为输入, 通过智能算法运算, 生成精学习摩擦补偿量函数。智能函数生成器为用户提供了三种生成网络的智能算法, 并且提供了拟合效果评价函数, 从三种智能算法生成的智能函数中, 自动选取拟合效果评价最优的智能函数为精学习摩擦补偿量函数。

[0176] 智能函数生成器, 其具体工作原理介绍如下：

[0177] ①智能函数生成器将由最优精摩擦补偿量数组和精学习反向点加速度数组作为输入；

[0178] ②智能算法:智能算法生成器提供三种生成网络的智能算法,分别为 BP 神经网络算法,径向基神经网络算法,广义回归神经网络算法;

[0179] A:BP 神经网络算法

[0180] 该智能算法为一个隐层含 20 个节点,输出层含 1 个节点的 BP 神经网络模型,其隐层传递函数为 tansig 函数,输出层传递函数为 pureline 函数,其结构如图 4a 所示。该神经网络学习速率为 0.05,采用了 Levenberg-Marquardt 算法为网络训练算法,训练误差目标为 $1e-5$,最大迭代次数为 1500 代;BP 神经网络基本工作原理如下所示:

[0181] 隐层第 i 个神经元的输出为下式所示:

$$[0182] \quad a1_i = f1\left(\sum_{j=1}^{N_t} \omega1_{ij} p_j + b1_i\right) \quad i = 1, 2, \dots, 20 \quad (29)$$

[0183] 其中:

[0184] N_t ——训练样本个数,由输入数组维数确定;

[0185] $f1$ ——tansig 函数,即 $f1(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$;

[0186] $\omega 1_{ij}$ ——隐层第 i 个神经元与输入层第 j 个神经元之间权值;

[0187] p_j ——第 j 个训练样本;

[0188] $b1_i$ ——隐层第 i 个神经元的偏置值。

[0189] 输出层神经元输出为下式所示:

$$[0190] \quad a2_1 = f2\left(\sum_{i=1}^{20} \omega2_{1i} a1_i + b2_1\right) \quad (30)$$

[0191] 其中:

[0192] $f2$ ——pureline 函数,即 $f2(x) = x$;

[0193] $\omega 2_{1i}$ ——输出层神经元与隐层第 i 个神经元之间权值;

[0194] $b2_1$ ——输出层神经元的偏置值。

[0195] 训练误差值为神经网络对输入相应输出同期望输出的差值,BP 神经网络根据训练误差逐层修改各层神经元之间的权值,直至训练误差值小于训练误差目标,即完成神经网络的训练。

[0196] B:径向基神经网络算法

[0197] 该智能算法为如图 4b 所示的径向基神经网络模型。其隐层节点数由算法自身根据训练结果是否满足训练目标确定。训练目标为使性能指标函数值为零。在图 4b 中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,为网络的输入向量, $H = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T$ 为网络的径向基向量,其中 h_j 为高斯基函数:

$$[0198] \quad h_j = \exp\left(-\frac{\|X - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (31)$$

[0199] 其中 $\|\cdot\|$ 表示欧式范数。

[0200] 网络的第 j 个结点的中心矢量为: $C_j = [c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{ij}, \dots, c_{mj}]^T$,其中, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ 。网络的基宽向量为 $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$, b_j 为结点的基宽度参数,且为大于零

的数。网络的权值向量为： $W=[w_1, w_2, \dots, w_m]$

[0201] K 时刻网络的输出为下式所示：

$$[0202] \quad y_m(k) = WH = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m \quad (32)$$

[0203] 设理想输出为 $y(k)$ ，则性能指标函数为下式所示：

$$[0204] \quad E(k) = \frac{1}{2} (y(k) - y_m(k))^2 \quad (33)$$

[0205] 径向基神经网络算法通过不断修改基函数的中心、隐含层到输出层权值、结点基宽参数及隐层结点数，来使其性能指标函数达到训练目标。

[0206] C：广义回归神经网络算法

[0207] 该智能算法为图 4c 所示的广义回归神经网络算法，包括了输入层、模式层、求和层与输出层 4 层神经元。网络的输入为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ ，输出为 $y=[y_1, y_2, \dots, y_k]^T$ 。输入层中的神经元数等于学习样本中输入向量的维数 m ，各神经元是简单的分布单元，直接将输入变量传递给模式层。

[0208] 模式层的神经元数目等于学习样本的数目 n ，各神经元各自对应不同的样本，神经元 i 的传递函数为下式所示：

$$[0209] \quad p_i = \exp\left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2}\right] \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (34)$$

[0210] 神经元 i 的输入为输入变量 X 与其对应的样本 X_i 之间的 Euclid 距离平方 $D_i^2 = (X - X_i)^T (X - X_i)$ 的指数形式。其中 X 为网络输入变量， X_i 为第 i 各神经元对应的学习样本。

[0211] 求和层中使用两种类型神经元进行求和，一种神经元的计算公式为 $\sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2}\right]$ ，利用该公式对所有模式层神经元的输出进行算术求和，其与模式层各神经元的连接权值为 1，其传递函数为下式所示：

$$[0212] \quad S_D = \sum_{i=1}^n p_i \quad (35)$$

[0213] 另一种神经元计算公式是 $\sum_{i=1}^n Y_i \exp\left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2}\right]$ ，利用该公式对所有模式层神经元的输出进行加权求和，模式层中第 i 个神经元与求和层中第 j 个分子求和神经元之间的连接权值为第 i 个输出样本 Y_i 中的第 j 个元素 y_{ij} ，其传递函数为下式所示：

$$[0214] \quad S_{Nj} = \sum_{i=1}^n y_{ij} p_i \quad j=1, 2, \dots, k \quad (36)$$

[0215] 输出层中的神经元数目等于样本中输入向量的维数 k ，各神经元将求和层的输出相除，就可以各输出层神经元的输出，神经元 j 的输出对应估计结果 $\hat{Y}(X)$ 的第 j 个元素，即下式所示：

$$[0216] \quad y_j = \frac{S_{Nj}}{S_D} \quad j=1, 2, \dots, k \quad (37)$$

[0217] ③智能函数生成：在完成神经网络的训练后，智能函数生成器将训练完成的三种

神经网络转化相应的智能函数；

[0218] ④拟合效果评价函数

[0219] 拟合效果评价函数通过对智能函数生成器所生成的三种智能函数的拟合精度，从误差绝对值均值、标准差以及生成时间三个方面进行评价。

[0220] 下面介绍拟合效果评价函数的工作原理；

[0221] 拟合效果评价函数形式为下式所示：

$$\begin{cases}
 EV(i) = w_1 \times \log(10 \times \frac{Err(i)}{Err(2)}) + w_2 \times (\frac{Mse(i)}{Mse(2)}) + w_3 \times (\frac{T(i)}{T(2)}) & i=1,2,3 \\
 w_1 + w_2 + w_3 = 1 \\
 Err(i) = \frac{\sum_{j=1}^n |Net(a_{cj}) - cv_j|}{n} \\
 Mse(i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (Net(x_k) - \mu)^2}{N}} \\
 \mu = \frac{\sum_{k=1}^N Net(x_k)}{N}
 \end{cases} \quad (38)$$

[0223] 其中 Err (i)——智能函数的误差绝对值均值；

[0224] Mse——智能函数生成补偿量的标准差；

[0225] μ ——智能函数生成补偿量的均值；

[0226] N——计算有关统计量时的样本数，这里取 5000

[0227] T——生成智能函数所用的时间；

[0228] acj——粗学习反向点加速度数值；

[0229] cvj——最优粗摩擦补偿量；

[0230] Net (·)——智能函数输出值；

[0231] w1——智能函数的误差绝对值均值对应的权重；

[0232] w2——智能函数生成补偿量的标准差对应的权重；

[0233] w3——生成智能函数所用的时间对应的权重。

[0234] i——智能函数标识

[0235] i=1 代表 BP 神经网络算法；

[0236] i=2 代表径向基神经网络算法；

[0237] i=3 代表广义回归神经网络算法；

[0238] ⑤拟合效果评价函数以径向基神经网络算法生成的智能函数为基准，对通过另两种智能算法生成的智能函数进行评价，用户采用使拟合效果评价函数值 (EV (i)) 最小的智能算法所生成的智能函数为精学习摩擦补偿量函数。

[0239] 5、数控机床摩擦误差补偿模块工作原理示意图

[0240] 本发明所述的摩擦误差补偿模块工作原理，如图 5 所示。首先，读取摩擦误差补偿模块相关设置参数并进行摩擦误差补偿模块工作模式选择，当 Frilearn_flag=0 时，摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式，当 Frilearn_flag=1 时，摩擦误差补偿模块

工作模式为摩擦误差学习模式。

[0241] 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差学习模式时,粗学习器实现最优粗摩擦补偿量数组的生成,在此基础上,精学习器完成最优精摩擦补偿量数组的生成。智能函数生成器依据相关智能算法生成精学习摩擦补偿量函数,摩擦误差学习模式结束。

[0242] 设置摩擦误差补偿模块工作模式为摩擦误差补偿模式时,在精摩擦补偿实现阶段,当数控机床运动时,精学习摩擦补偿量函数,根据数控机床所处工况自动计算出精摩擦补偿量。摩擦补偿器依据反向点判别器输出的相关信号,将精摩擦补偿量脉冲加入到数控机床伺服控制器速度环速度指令中,从而实现对数控机床相应运动轴伺服系统摩擦误差的高精度智能补偿;

[0243] 以下给出本发明的一种具体实施例的测试结果:

[0244] 控制对象为采用三菱交流伺服系统的 X-Y 轴精密伺服工作平台,伺服电机的主要参数为下表 2 所示:

[0245] 表 2 伺服电机主要参数表

[0246]

轴	电机型号	扭矩/ N.m		扭矩常量/ N.m/V	编码器 线数	丝杠 导程
		最大	额定			
X	HF-KP43	3.8	1.3	0.475	10000P/r	5mm
Y	HF-KP43	3.8	1.3	0.475	10000P/r	5mm

[0247] 实验过程中采用的摩擦误差补偿模块相关设置参数,如下表 3 所示:

[0248] 表 3 摩擦误差补偿模块相关设置参数表

[0249]	最小加速度	1mm/s ²
	最大加速度	50mm/s ²
	加速度区间 1 特征值	15mm/s ²
	加速度区间 2 特征值	30mm/s ²
	加速度区间 1 步长数	10
	加速度区间 2 步长数	10
	加速度区间 3 步长数	10
	粗学习运动循环次数	10
	精学习运动循环次数	3
[0250]	X 轴摩擦补偿时间	200ms
	X 轴粗学习摩擦补偿量初始值	1.5
	X 轴粗学习摩擦补偿增量	0.2
	X 轴精学习摩擦补偿增量	0.05
	Y 轴摩擦补偿时间	200ms
	Y 轴粗学习摩擦补偿量初始值	1.5
	Y 轴粗学习摩擦补偿增量	0.2
	Y 轴精学习摩擦补偿增量	0.05

[0251] 采用误差峰值、绝对误差平均值、误差均方根值、对摩擦补偿效果进行综合分析,各函数表达式如下所示:

[0252] 误差峰值如下式所示:

[0253] $MAXE = \max(|x_{pos} - x_{cmd}|)$ (39) 绝对误差平均值如下式所示：

$$[0254] \quad AMV = \frac{\sum_{n=1}^{num} |x_{pos} - x_{cmd}|}{num}$$

(40)

[0255] 误差均方根值如下式所示：

[0256]

$$MSV = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{num} (x_{pos} - x_{cmd})^2}{num}} \quad (41)$$

[0257] 其中 :num——采样点数；

[0258] Xpos——数控机床工作台实际位置值；

[0259] Xcmd——数控机床指令位置。

[0260] 图 6a 给出 x 轴摩擦误差学习模式下,使用 BP 神经网络算法所生成的精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量数组曲线。

[0261] 图 6b 给出 x 轴摩擦误差学习模式下,使用径向基神经网络算法所生成的精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量数组曲线。

[0262] 图 6c 给出 x 轴摩擦误差学习模式下,使用广义回归神经网络算法所生成的精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量数组曲线。

[0263] 图 7a 给出 y 轴摩擦误差学习模式下,使用 BP 神经网络算法所生成的精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量值数组曲线。

[0264] 图 7b 给出 y 轴摩擦误差学习模式下,使用径向基神经网络算法所生成的精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量数组曲线。

[0265] 图 7c 给出 y 轴摩擦误差学习模式下,使用广义回归神经网络算法所生成的精学习摩擦补偿量函数曲线及最优精摩擦补偿量数组曲线。

[0266] 拟合效果评价函数值及评价结果如下表 4 所示：

[0267] 表 4 拟合效果评价函数值对比表

[0268]

	EV(1)	EV(2)	EV(3)	最优选择
X 轴	1.148	1.000	1.100	径向基神经网络
Y 轴	1.011	1.000	1.109	径向基神经网络

[0269] 注 :这里 w1=0.10 ;w2=0.85 ;w3=0.05

[0270] 其中, EV(1) 代表 BP 神经网络算法, EV(2) 代表径向基神经网络算法,

[0271] EV(3) 代表广义回归神经网络算法, 从上表可以看出, 采用径向基神经网络算法生成精摩擦补偿量函数为最优选择。

[0272] 图 8 给出对于进给速度为 F=1000mm/min, R = 50mm 圆运动轨迹下, 通过位置分辨率为 0.1um 的雷尼绍光栅尺进行数控机床工作台位置检测得到的圆误差结果对比。图 8(a) 为, 未摩擦补偿得到的圆误差结果, 图 8 (b) 为采用本发明模块在摩擦误差补偿模式下的圆误差结果。可以看出, 通过本发明实现的摩擦误差补偿方法对摩擦误差尖峰有明显抑制作

用,摩擦补偿效果对比如下表 5 所示:

[0273] 表 5F=1000mm/min, 摩擦补偿效果对比表

	未摩擦补偿	摩擦补偿
[0274] MAXE (μm)	6.5	2.6
AMV (μm)	3.8	1.1
MSV (μm)	4.073	1.2728

[0275] 图 9 给出对于进给速度为 $F=2000\text{mm}/\text{min}$, $R=50\text{mm}$ 圆运动轨迹下,通过位置分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 的雷尼绍光栅尺进行数控机床工作台位置检测得到的圆误差结果对比。图 9(a)为,未摩擦补偿得到的圆误差结果,图 9 (b)为采用本发明模块在摩擦误差补偿模式下的圆误差结果。可以看出,通过本发明实现的摩擦误差补偿方法对摩擦误差尖峰有明显抑制作用。摩擦补偿效果对比如下表 6 所示:

[0276] 表 6F=2000mm/min, 摩擦补偿效果对比表

	未摩擦补偿	摩擦补偿
[0277] MAXE (μm)	8.6	3.5
AMV (μm)	5.1	1.7
MSV (μm)	5.3666	1.9748

[0278] 图 10 给出对于进给速度为 $F=3000\text{mm}/\text{min}$, $R=50\text{mm}$ 圆运动轨迹下,通过位置分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 的雷尼绍光栅尺进行数控机床工作台位置检测得到的圆误差结果对比。图 10 (a)为,未摩擦补偿方法得到的圆误差结果,图 10 (b)为采用本发明模块在摩擦误差补偿模式下的圆误差结果。可以看出通过本发明实现的摩擦补偿方法对摩擦误差尖峰有明显抑制作用。摩擦补偿效果对比如下表 7 所示:

[0279] 表 7F=3000mm/min, 摩擦补偿效果对比表

	未摩擦补偿	摩擦补偿
[0280] MAXE (μm)	10	5.5
[0281] AMV (μm)	6.2	1.9
MSV (μm)	6.4343	2.2136

[0282] 从以上实验结果可知,通过该发明所述方法,可对摩擦造成的误差进行高精度智能补偿,并且可根据实际摩擦误差补偿精度要求,进行摩擦误差补偿模块工作模式选择,实现对摩擦误差的自动、高精度、智能补偿。

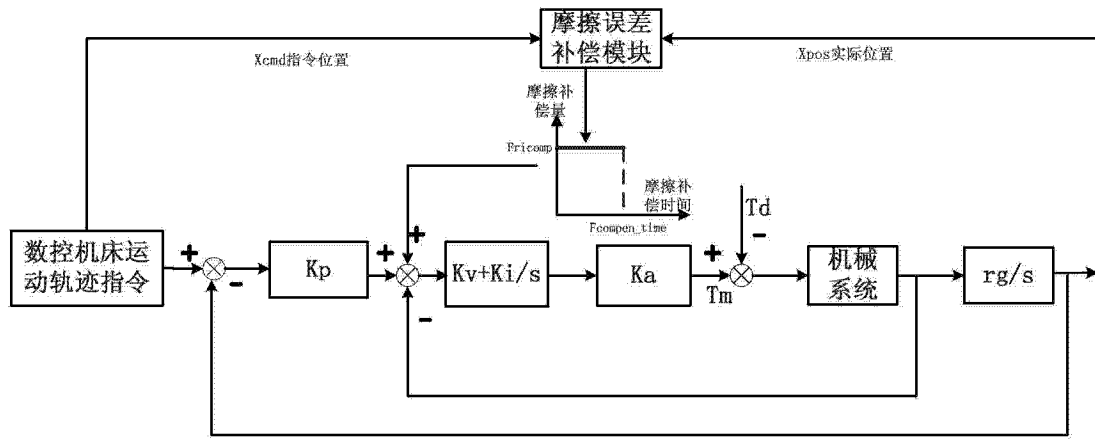


图 1

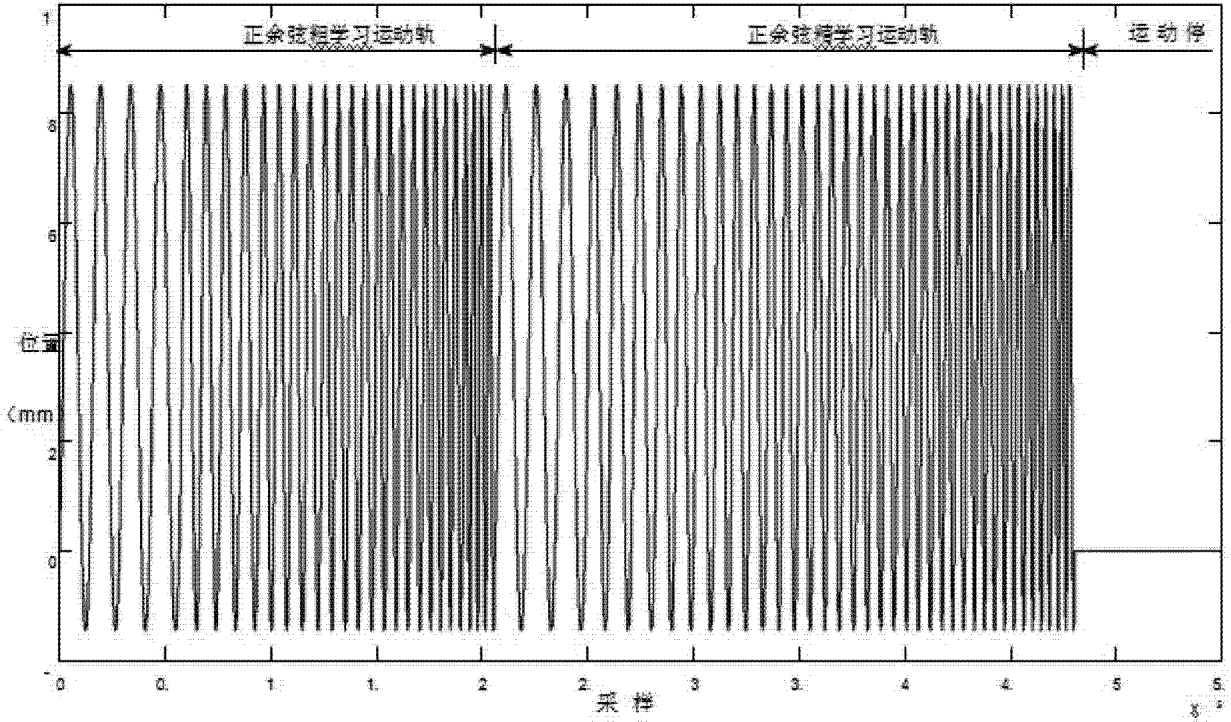


图 2

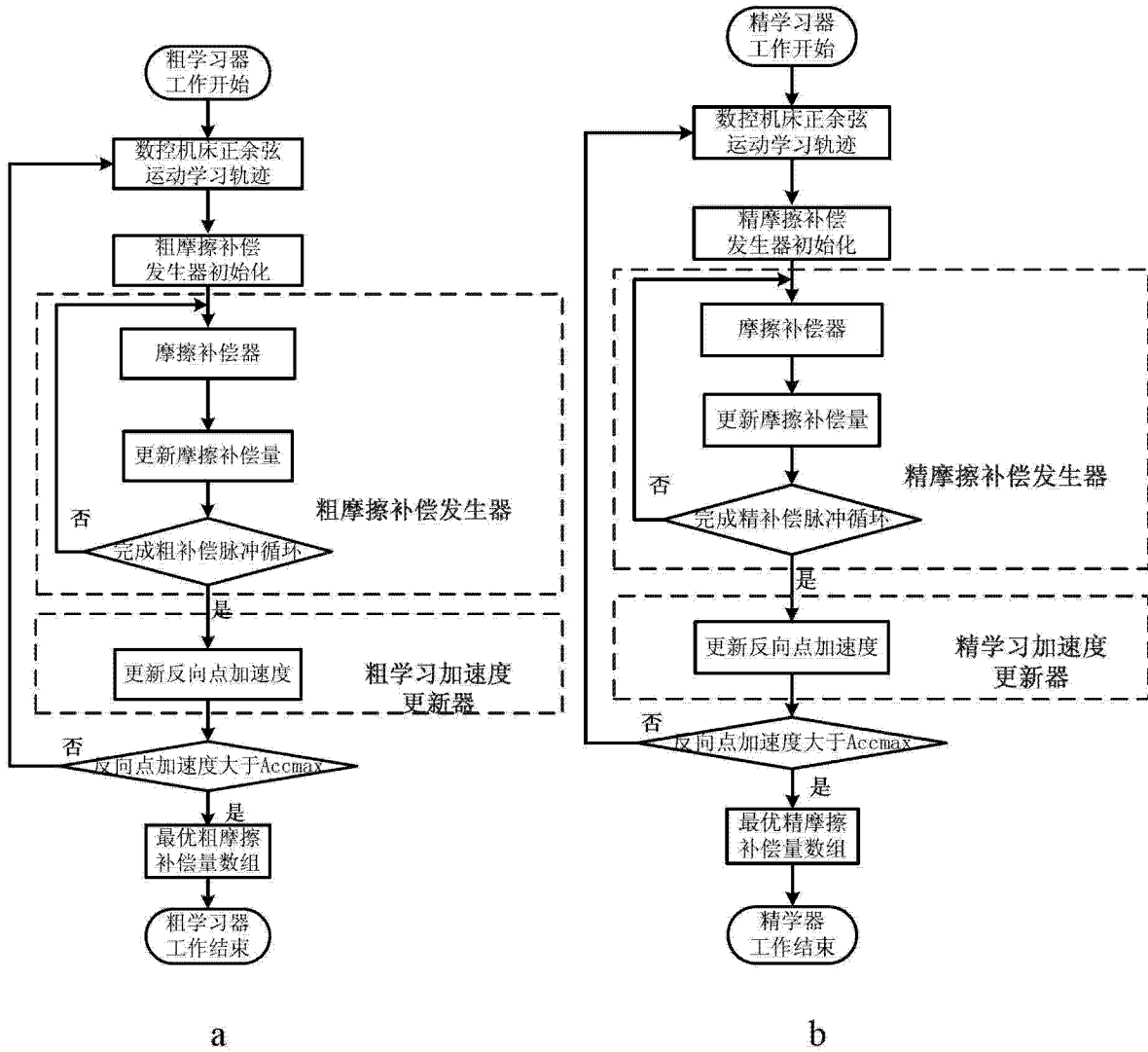


图 3

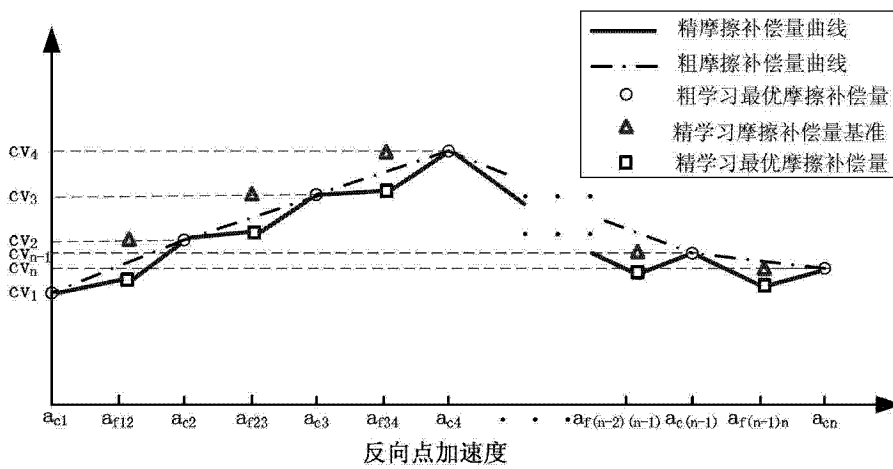


图 3c

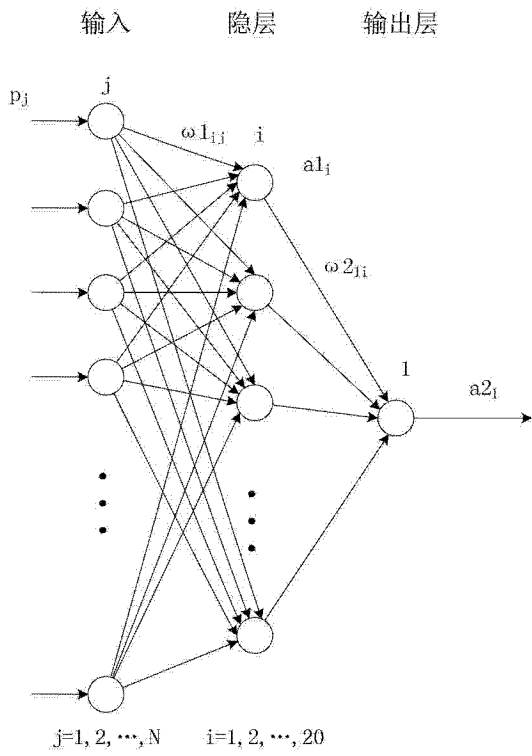


图 4a

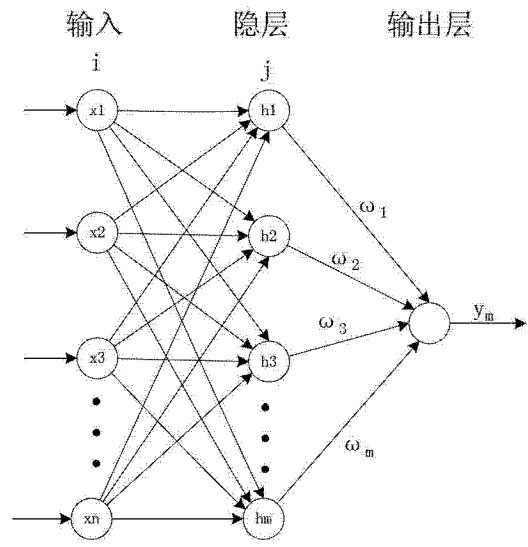


图 4b

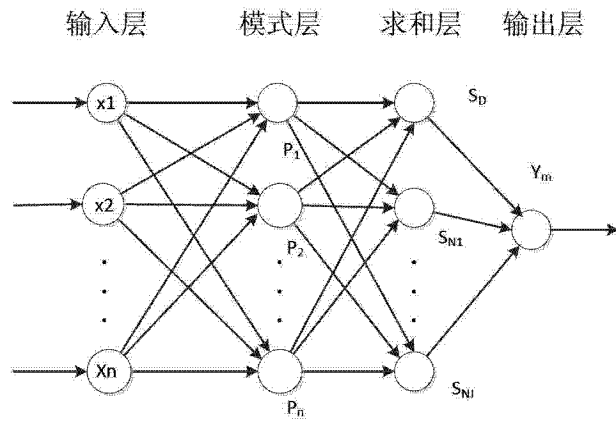


图 4c

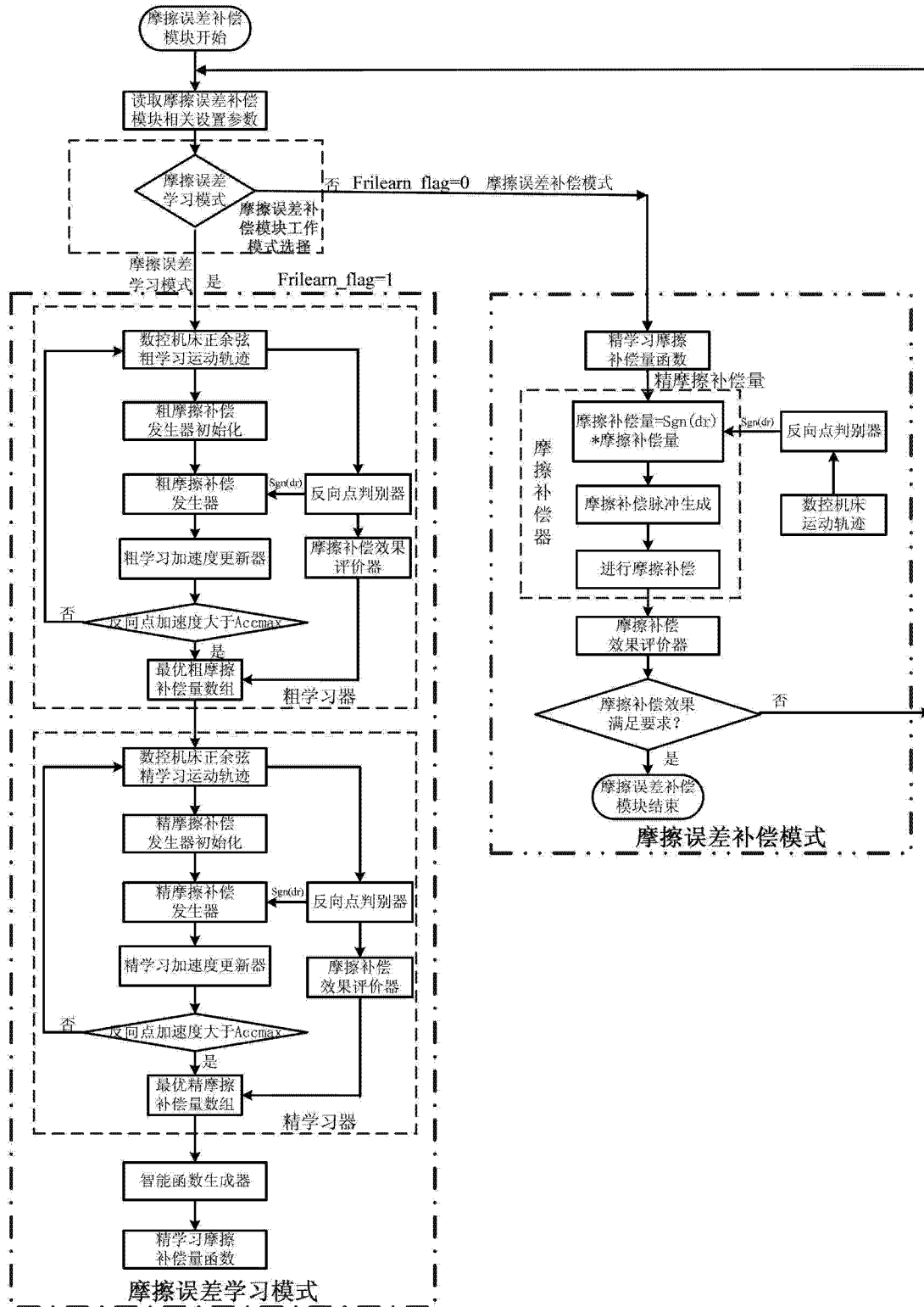


图 5

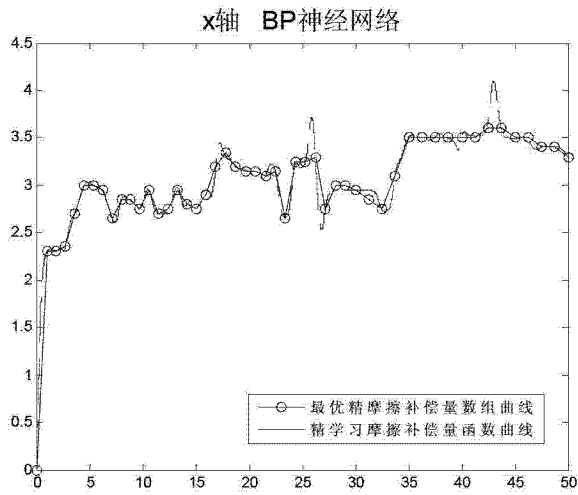


图 6a

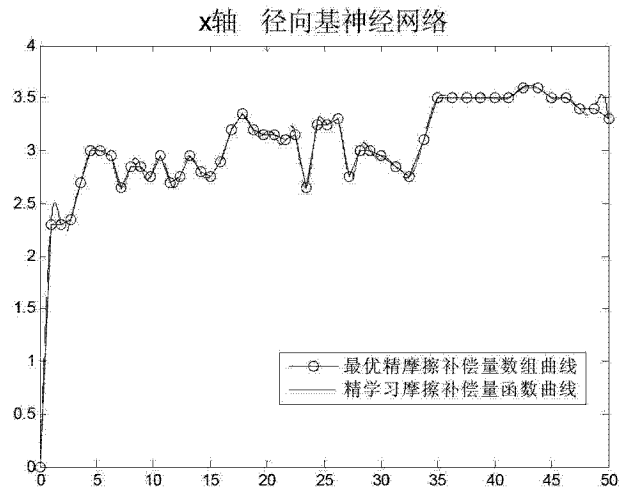


图 6b

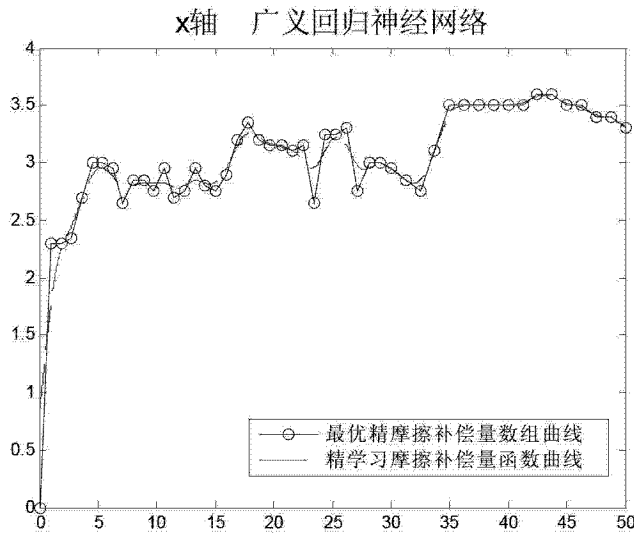


图 6c

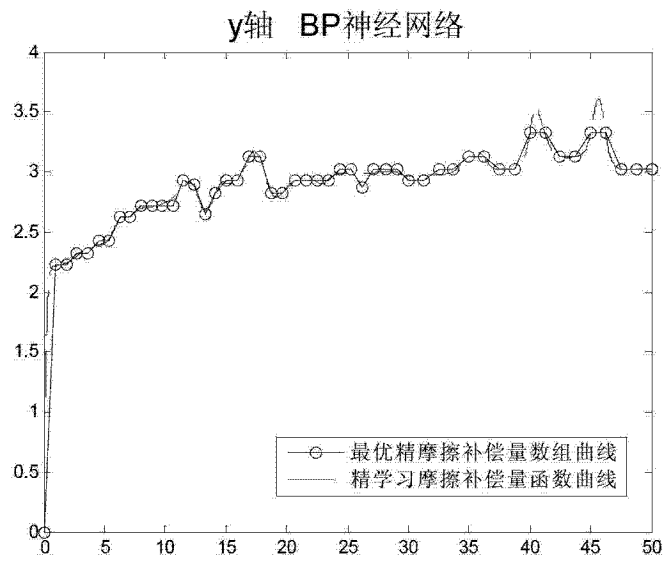


图 7a

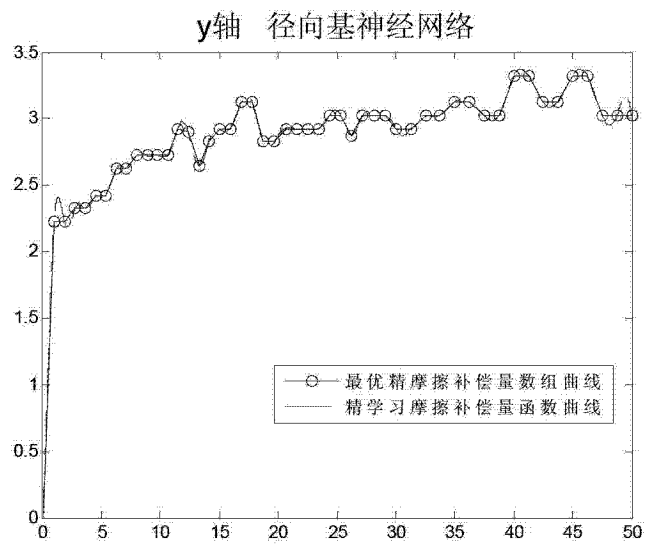


图 7b

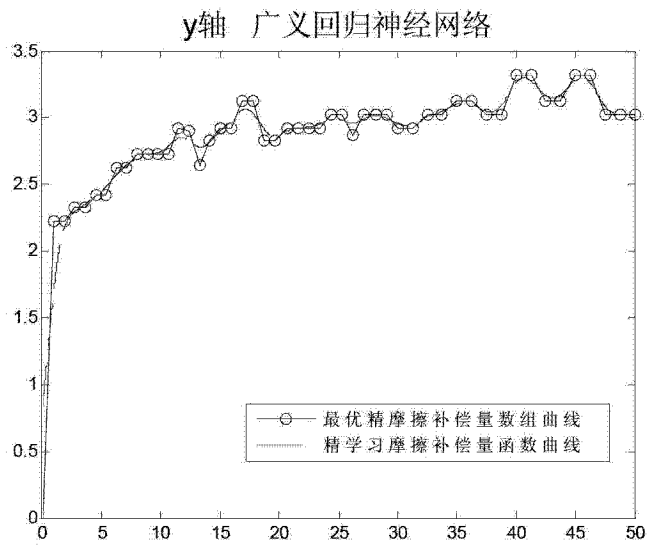


图 7c

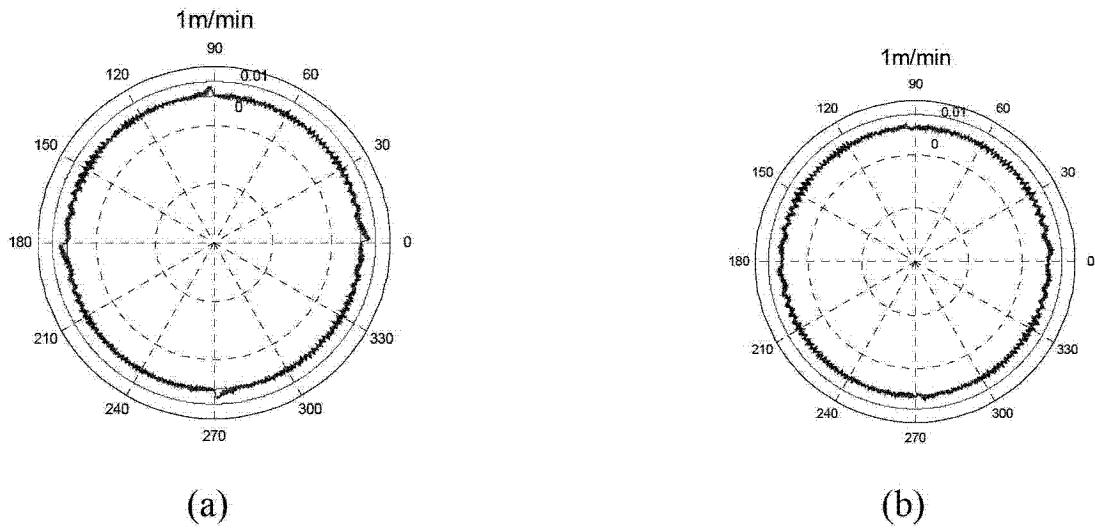


图 8

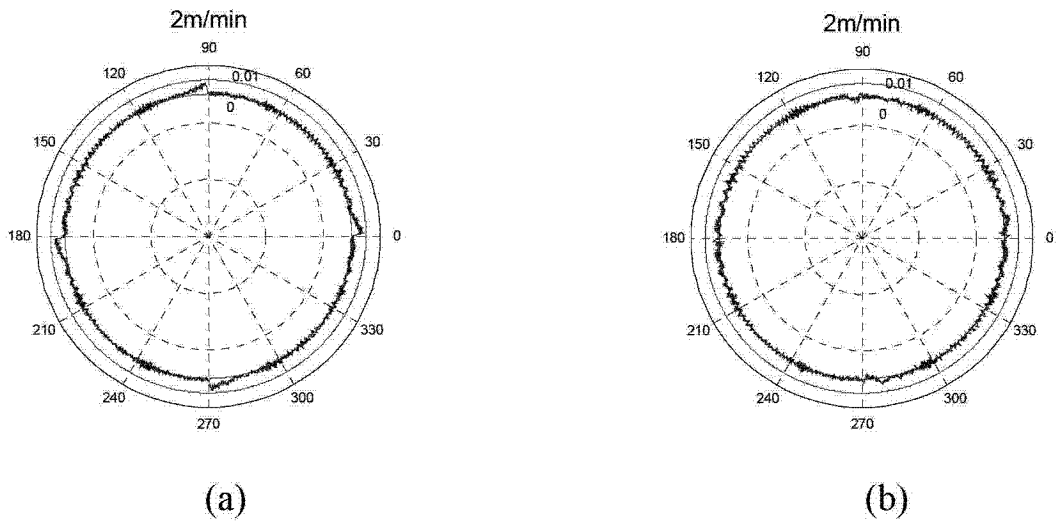


图 9

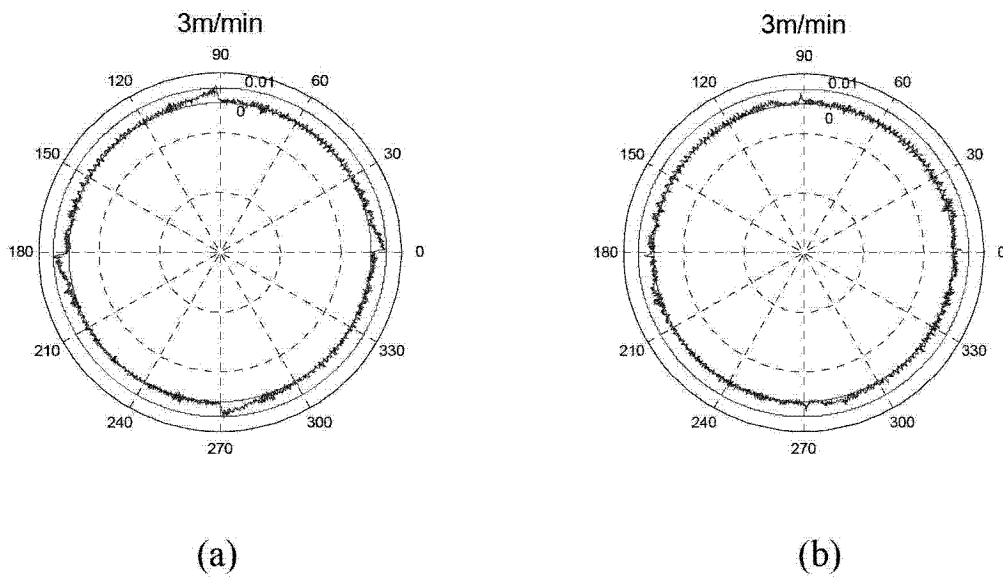


图 10