



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102023612 B

(45) 授权公告日 2012. 07. 04

(21) 申请号 201010568731. 8

(22) 申请日 2010. 12. 01

(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 梅雪松 刘栋 陶涛 冯斌

张东升 程有龙

(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 汪人和

(51) Int. Cl.

G05B 19/404 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 2003201746 A1, 2003. 10. 30, 全文.

JP 2008210273 A, 2008. 09. 11, 全文.

TW 200604503 A, 2006. 02. 01, 全文.

US 2009112488 A1, 2009. 04. 30, 全文.

CN 1149918 A, 1997. 05. 14, 全文.

JP 2000267712 A, 2000. 09. 29, 全文.

审查员 宋淑鹏

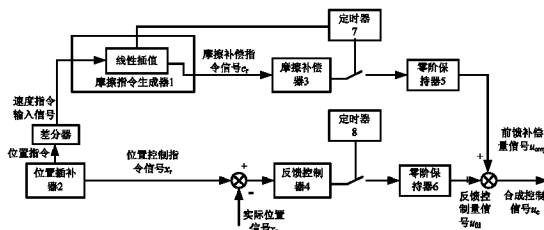
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

(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装置及其补偿方法。其提出采用离散系统多采样率控制结构来实现位置反馈控制和摩擦前馈补偿来实现针对摩擦误差的消除。在该多采样率控制结构中,要求摩擦前馈的采样频率高于位置反馈的采样频率,利用该多采样率控制结构可以在不改变伺服进给控制系统的结构和稳定性的条件下,在位置反馈中加入细化的摩擦前馈补偿功能。细化的摩擦前馈补偿量的计算利用伺服进给控制系统中的位置插补器输出,通过线性插值方法得到更为细化的补偿速度指令输入,进而采用指数摩擦模型来实现对摩擦力幅值变化的预测及补偿量的确定。该补偿方法充分利用了多采样率控制器的特点和伺服系统的结构提高了摩擦补偿的输出精度和输出频率,从而实现了更为精确的摩擦补偿效果。



1. 一种数控机床伺服控制系统摩擦误差补偿方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 首先位置插补器 (2) 向差分器输出位置指令,所述差分器根据位置指令计算得到速度指令输入信号,并传给摩擦指令生成器 (1);

2) 摩擦指令生成器 (1) 根据速度指令输入信号计算生成摩擦补偿指令信号 C_r ;

3) 摩擦补偿器 (3) 根据摩擦补偿指令信号 C_r 计算得到摩擦补偿值信号,再由第一定时器 (7) 确定的采样周期下通过第一零阶保持器 (5) 实现对摩擦补偿器 (3) 输出的摩擦补偿值信号的保持,所述第一零阶保持器 (5) 输出前馈补偿量信号 u_{cmp} ;

4) 在步骤 1) 至 3) 进行的同时,将位置插补器 (2) 生成的位置指令信号 X_r 与实际反馈测量得到的位置信号 X_a 求差后,作为位置反馈误差信号;使所述位置反馈误差信号通过反馈控制器 (4),在第二定时器 (8) 确定的采样周期下,得到位置反馈控制量信号;然后通过第二零阶保持器 (6) 后输出反馈控制信号 u_{fd} ;将所述反馈控制信号 u_{fd} 和步骤 3) 的前馈补偿量信号 u_{cmp} 按照下式 (A) 求和得到摩擦误差补偿后的合成控制信号 u_c :

$$u_c(T_u^i) = u_{fd}(T_{fd}^j) + u_{cmp}(T_{cmp}^k) \quad (A)$$

式 (A) 中, T_u^i 为 i 时刻合成控制器量输出信号 u_c 的输出采样周期; T_{fd}^j 为 j 时刻反馈控制量信号 u_{fd} 的采样周期; T_{cmp}^k 为 k 时刻摩擦前馈补偿量信号 u_{cmp} 的采样周期。

2. 根据权利要求 1 所述的误差补偿方法,其特征在于:步骤 2) 中,所述摩擦指令生成器 (1) 根据速度指令输入信号计算生成摩擦补偿指令信号 C_r 的方法为:摩擦指令生成器 (1) 根据速度指令输入信号,按照第一定时器 (7) 的采样周期对摩擦指令生成器 (1) 的速度指令输入信号进行线性化插值,得到摩擦补偿指令信号 C_r 。

3. 根据权利要求 1 所述的误差补偿方法,其特征在于:步骤 3) 中,所述摩擦补偿器 3 生成的前馈摩擦补偿量 u_{cmp} 的计算采用指数摩擦模型来完成,所述指数摩擦模型如式 (B):

$$u_{cmp}(T_{cmp}^k) = \begin{cases} \alpha_{cf} \left[T_s^+ e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_1^+} + T_c^+ \left(1 - e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_2^+} \right) \right] & \omega_r(T_{cmp}^k) > \Omega_d \\ 0 & |\omega_r(T_{cmp}^k)| \leq \Omega_d \\ \alpha_{cf} \left[T_s^- e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_1^-} + T_c^- \left(1 - e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_2^-} \right) \right] & \omega_r(T_{cmp}^k) < -\Omega_d \end{cases} \quad (B)$$

其中 T_s^+ 和 T_s^- 分别为指数摩擦模型中正负方向的静摩擦力幅值, T_c^+ 和 T_c^- 分别为正负方向库仑摩擦力幅值, Ω_1^+ 、 Ω_1^- 和 Ω_2^+ 、 Ω_2^- 分别为正负方向的 Stribeck 临界速度, α_{cf} 为补偿增益系数,根据伺服电机的控制方式和摩擦模型的参数进行调整, Ω_d 为指数摩擦模型的临界速度。

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,涉及一种误差补偿方法,尤其是一种针对数控机床伺服系统的摩擦误差补偿方法。

背景技术

[0002] 摩擦是数控机床伺服进给系统中一种强烈并且不可避免的外部扰动因素。由于摩擦产生的误差现象将严重地限制数控机床高精度控制的实现。因此关于伺服系统中摩擦误差的消除和控制一直是高速、高精度数控技术研究的热点和难点。由于摩擦的强非线性特性,一般的线性反馈控制方法很难针对性地解决摩擦在高速、换向等条件下的误差特性。利用基于摩擦模型的前馈补偿方法是一种更为直接而有效的控制方法。根据摩擦模型可以实现对摩擦力幅值和摩擦误差特性的建模和预测,并通过前馈补偿可以针对性输出补偿量以抵消摩擦力的作用,从而实现摩擦误差的消除。

[0003] 然而对于数控机床伺服系统等应用条件而言,运动路径具有较高的运动速度和加速度要求,需要频繁地进行速度换向,摩擦力变化强烈,简单直接补偿的补偿策略的作用时间较少,补偿效果受到一定的限制。因此需要利用伺服系统控制系统结构来提高前馈补偿方法的应用效果。对于数字控制系统而言,被控对象的控制量输入仅仅在采样瞬间变化,而在相邻两个采样瞬间的整个时间区间内,无论被控对象的输出如何变化,其输入的特性仅根据保持器的特性而变化,即这时整个控制系统处于开环控制状态。

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,根据伺服系统控制系统的特性提出利用多采样率控制策略来实现摩擦补偿,该摩擦补偿策略在控制周期内插入补偿周期,使摩擦补偿作用发生在非反馈控制状态下,减少了位置反馈控制和摩擦前馈补偿的相互耦合影响,并且提高了补偿的输出精度和输出频率,从而实现了更为精确的摩擦补偿效果。

[0005] 本发明的目的是通过以下技术方案来解决的:

[0006] 该数控机床伺服控制系统摩擦误差补偿方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 首先位置插补器向差分器输出位置指令,所述差分器根据位置指令计算得到速度指令输入信号,并传给摩擦指令生成器;

[0008] 2) 摩擦指令生成器根据速度指令输入信号计算生成摩擦补偿指令信号;

[0009] 3) 摩擦补偿器根据摩擦补偿指令信号计算得到摩擦补偿值信号,再由第一定时器确定的采样周期下通过第一零阶保持器实现对摩擦补偿器输出的摩擦补偿值信号的保持,所述第一零阶保持器输出前馈补偿量信号;

[0010] 4) 在步骤 1) 至 3) 进行的同时,将位置插补器生成的位置指令信号与实际反馈测量得到的位置信号求差后,作为位置反馈误差信号;使所述位置反馈误差信号通过反馈控制器,在第二定时器确定的采样周期下,得到位置反馈控制量信号;然后通过第二零阶保持

器后输出反馈控制信号；将所述反馈控制信号和步骤3)的前馈补偿量信号按照下式(A)求和得到摩擦误差补偿后的合成控制信号：

$$[0011] \quad u_c(T_u^i) = u_{fd}(T_{fd}^j) + u_{cmp}(T_{cmp}^k) \quad (A)$$

[0012] 式(1)中, T_u^i 为i时刻合成控制器量输出信号 u_c 的输出采样周期； T_{fd}^j 为j时刻反馈控制量信号 u_{fd} 的采样周期； T_{cmp}^k 为k时刻摩擦前馈补偿量信号 u_{cmp} 的采样周期。

[0013] 以上方法,在步骤2),所述摩擦指令生成器根据速度指令输入信号计算生成摩擦补偿指令信号的方法为：摩擦指令生成器根据速度指令输入信号,按照第一定时器的采样周期对摩擦指令生成器的速度指令输入信号进行线性化插值,得到摩擦补偿指令信号。

[0014] 以上方法,在步骤3)中,所述摩擦补偿器3生成的前馈摩擦补偿量 u_{cmp} 的计算采用指数摩擦模型来完成,所述指数摩擦模型如式(B)：

$$[0015] \quad u_{cmp}(T_{cmp}^k) = \begin{cases} \alpha_{cf} \left[T_s^+ e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_1^+} + T_c^+ \left(1 - e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_2^+} \right) \right] & \omega_r(T_{cmp}^k) > \Omega_d \\ 0 & |\omega_r(T_{cmp}^k)| \leq \Omega_d \\ \alpha_{cf} \left[T_s^- e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_1^-} + T_c^- \left(1 - e^{-\omega_r(T_{cmp}^k)/\Omega_2^-} \right) \right] & \omega_r(T_{cmp}^k) < -\Omega_d \end{cases} \quad (B)$$

[0016] 其中 T_s^+ 和 T_s^- 分别为指数摩擦模型中正负方向的静摩擦力幅值, T_c^+ 和 T_c^- 分别为正负方向库仑摩擦力幅值, Ω_1^+ 、 Ω_1^- 和 Ω_2^+ 、 Ω_2^- 分别为正负方向的 Stribeck 临界速度, α_{cf} 为补偿增益系数,根据伺服电机的控制方式和摩擦模型的参数进行调整, Ω_d 为指数摩擦模型的临界速度。

[0017] 本发明具有以下有益效果：

[0018] (1) 本发明采用离散系统的多采样率控制结构实现伺服控制系统的位置反馈控制器和摩擦前馈补偿器,该结构使位置反馈控制器和摩擦前馈补偿器工作在不同的采样频率下,并且要求摩擦前馈补偿器的采样频率高于位置反馈控制器,以实现摩擦补偿和位置控制在输出时刻上的解耦,到达缩短摩擦前馈补偿输出的效果,可以有效地实现针对摩擦强烈变化等条件下的摩擦误差补偿功能。

[0019] (2) 本发明针对高加速度、换向条件下的摩擦力变化剧烈,实现了多周期的摩擦前馈补偿器,在不改变系统反馈控制周期的条件下,通过细分前馈补偿周期,细化摩擦补偿指令信号,实现了更为精细的多次补偿量信号输出,特别是针对高加速度、换向条件,可以得到更好的摩擦误差补偿效果。更为重要的是采用多采样率控制器结构实现了一种在闭环结构下的开环补偿功能,将闭环反馈控制与前馈补偿方法分离,减少了相互作用的耦合关系。

附图说明

[0020] 图1是伺服系统多采样率摩擦补偿控制器结构；

[0021] 图2是摩擦-速度关系模型 Stribeck 曲线；

[0022] 图3是采用线性插值实现速度指令的细化；

[0023] 图4是通过本发明所述方法得到的直线轨迹的效果数据图；

[0024] 图5是通过本发明所述方法得到的圆轨迹的效果数据图。

具体实施方式

[0025] 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：

[0026] 1) 首先位置插补器 2 向差分器输出位置指令,所述差分器根据位置指令计算得到速度指令输入信号,并传给摩擦指令生成器 1；

[0027] 2) 摩擦指令生成器 1 根据速度指令输入信号计算生成摩擦补偿指令信号 C_r ；

[0028] 3) 摩擦补偿器 3 根据摩擦补偿指令信号 C_r 计算得到摩擦补偿值信号,再由第一定时器 7 确定的采样周期下通过第一零阶保持器 5 实现对摩擦补偿器 3 输出的摩擦补偿值信号的保持,所述第一零阶保持器 5 输出前馈补偿量信号 u_{cmp} ；

[0029] 4) 在步骤 1) 至 3) 进行的同时,将位置插补器 2 生成的位置指令信号 X_r 与实际反馈测量得到的位置信号 X_a 求差后,作为位置反馈误差信号;使所述位置反馈误差信号通过反馈控制器 4,在第二定时器 8 确定的采样周期下,得到位置反馈控制量信号;然后通过第二零阶保持器 (6) 后输出反馈控制信号 u_{fd} ;将所述反馈控制信号 u_{fd} 和步骤 3) 的前馈补偿量信号 u_{cmp} 按照下式 (A) 求和得到摩擦误差补偿后的合成控制信号 u_c ：

$$[0030] \quad u_c(T_u^i) = u_{fd}(T_{fd}^j) + u_{cmp}(T_{cmp}^k) \quad (A)$$

[0031] 式 (A) 中, T_u^i 为 i 时刻合成控制器量输出信号 u_c 的输出采样周期; T_{fd}^j 为 j 时刻反馈控制量信号 u_{fd} 的采样周期; T_{cmp}^k 为 k 时刻摩擦前馈补偿量信号 u_{cmp} 的采样周期。

[0032] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述：

[0033] 1、采用多采样率的控制结构作为位置反馈控制和摩擦前馈补偿的结构。

[0034] 本发明所述的多采样率控制结构如图 1 所示。该控制结构主要有由摩擦指令生成器 1、位置插补器 2、摩擦补偿器 3、反馈控制器 4、零阶保持器 5、零阶保持器 6、定时器 7 和定时器 8 构成。其中摩擦补偿器 3、零阶保持器 5 和定时器 7 构成的摩擦前馈补偿部分。反馈控制器 4、零阶保持器 6 和定时器 8 构成的位置反馈控制部分。摩擦指令生成器 1 根据位置插补器 2 的位置输出计算速度指令输入信号,进而生成摩擦补偿指令信号 C_r ,具体为:摩擦指令生成器 1 根据速度指令输入信号,按照第一定时器 7 的采样周期对摩擦指令生成器 1 的速度指令输入信号进行线性化插值,得到摩擦补偿指令信号 C_r 。根据摩擦补偿指令信号 C_r ,摩擦补偿器 3 计算得到摩擦补偿值,在由定时器 7 确定的采样周期下通过零阶保持器 5 实现对前馈补偿器补偿量 u_{cmp} 的输出保持。根据位置插补器 2 生成的位置指令信号 X_r 与实际反馈测量得到的位置信号 X_a 求差后,作为位置反馈误差。根据位置反馈误差通过位置控制器 4 得到位置反馈控制量信号,然后在由定时器 8 确定的采样周期下,通过零阶保持器 6 后实现对反馈控制信号 u_{fd} 的输出保持。但该结构的特征在于零阶保持器 5 的输出采样频率高于零阶保持器 6 的输出采样频率,以实现更为精细补偿量的输出。最终合成控制器量输出信号 u_c 可以表达为反馈控制量信号 u_{fd} 和前馈摩擦补偿量信号 u_{cmp} 两部分之和,即上述式 (A) 所示的形式。第 i 采样时刻的合成控制量 u_c 由工作在不同采样频率下的第 j 采样时刻反馈控制量 u_{fd} 和第 k 采样时刻前馈补偿器补偿量 u_{cmp} 输出来共同确定。

[0035] 2、利用指数摩擦模型实现摩擦补偿量的计算。

[0036] 本发明摩擦补偿的功能是通过摩擦补偿器 3 生成的前馈摩擦补偿量 u_{cmp} 来实现。而该前馈摩擦补偿量 u_{cmp} 的计算采用指数摩擦模型来完成。指数摩擦模型是通过指数形式对如图 2 所示的摩擦 - 速度关系 Stribeck 曲线进行参数化建模,进而可以通过速度 ω 实

现对摩擦力幅值 T_f 的预测。在多采样率摩擦补偿器的结构下,离散形式的指数摩擦补偿器输出表达如式 (B) 所示。

$$[0037] \quad u_{\text{cmp}}(T_{\text{cmp}}^k) = \begin{cases} \alpha_{\text{cf}} \left[T_s^+ e^{-\omega_r(T_{\text{cmp}}^k)/\Omega_1^+} + T_c^+ \left(1 - e^{-\omega_r(T_{\text{cmp}}^k)/\Omega_2^+} \right) \right] & \omega_r(T_{\text{cmp}}^k) > \Omega_d \\ 0 & |\omega_r(T_{\text{cmp}}^k)| \leq \Omega_d \\ \alpha_{\text{cf}} \left[T_s^- e^{-\omega_r(T_{\text{cmp}}^k)/\Omega_1^-} + T_c^- \left(1 - e^{-\omega_r(T_{\text{cmp}}^k)/\Omega_2^-} \right) \right] & \omega_r(T_{\text{cmp}}^k) < -\Omega_d \end{cases} \quad (\text{B})$$

[0038] 其中 T_s^+ 和 T_s^- 分别为指数摩擦模型中正负方向的静摩擦力幅值, T_c^+ 和 T_c^- 分别为正负方向库仑摩擦力幅值, Ω_1^+ 、 Ω_1^- 和 Ω_2^+ 、 Ω_2^- 分别为正负方向的 Stribeck 临界速度, α_{cf} 为补偿增益系数, 根据伺服电机的控制方式和摩擦模型的参数进行调整, Ω_d 为指数摩擦模型的临界速度。

[0039] 3、采用线性插值方法实现补偿指令的细化

[0040] 本发明所述的摩擦指令生成器 1 用于实现摩擦补偿指令信号 C_r 的计算: 首先根据位置插补器 2 输出的位置指令, 通过差分器得到速度指令输入信号, 再以摩擦前馈补偿器周期 T_{cmp} , 即定时器 7 的采样周期为时间单位, 对该速度指令值进行线性插值。即将该速度指令进行等分细化, 如图 3 所示。如当反馈控制量采样周期 T_{fd} 为摩擦前馈补偿器采样周期 T_{cmp} 的 3 倍时, 就需要对速度指令进行 3 等分, 已得到细化的速度指令即摩擦补偿指令信号 C_r , 作为摩擦前馈补偿器的速度输入。采用该方法不会增加伺服控制系统的计算负担, 不产生冗余数据。

[0041] 4、本发明所述的反馈控制部分为数控系统中常见的任意控制器形式, 如比例控制器、比例积分控制器和比例积分微分控制器。反馈控制器主要用于位置指令的反馈调节, 不实现针对性的摩擦误差消除作用。

[0042] 以下给出本发明的一种具体实施例的测试结果:

[0043] 控制对象为采用安川交流伺服系统的 X-Y 轴精密伺服工作台, 伺服电机的主要参数为:

[0044]

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	SGMAV-02ADA2C	1.91	0.637	0.0637	131072	4mm
Y	SGMAV-02ADA2C	1.91	0.637	0.0637	131072	4mm

[0045] 图 4 给出对于进给速度为 20mm/s, 加速度为 200mm/s² 的直线运动轨迹下, 通过位置精度为 0.1 μ m 的雷尼绍光栅尺进行位置检测得到的误差结果对比。图 4a 为, 未采用本发明的摩擦补偿方法得到的误差结果, 图 4b 为采用本发明的摩擦补偿方法得到的误差结果。可以看出通过本发明实现的摩擦补偿方法对直线轨迹条件下的摩擦误差尖峰有明显降低作用。

[0046] 图 5 给出了进给速度条件为 40mm/s 下, 半径为 20mm 的圆轨迹运动下, 通过位置精度为 0.1 μ m 的雷尼绍光栅尺进行位置检测得到的误差结果对比。图 5a 为未采用本发明的摩擦补偿方法得到的误差结果, 图 5b 为采用本发明的摩擦补偿方法得到的误差结果。可以看出通过本发明实现的摩擦补偿方法对圆轨迹条件下的摩擦误差尖峰同样有明显降低作用。

[0047] 综上所述,本发明为了实现对摩擦力的预测,采用指数摩擦模型来实现对摩擦力的建模和辨识。对于指数摩擦模型而言,根据细化的速度指令信号通过该模型就可以由解析式计算得到摩擦力幅值,实现对摩擦力幅值的预测计算。将该预测值乘以一定的增益系数后作为摩擦前馈补偿器的输出,从而实现对摩擦力的抵消。

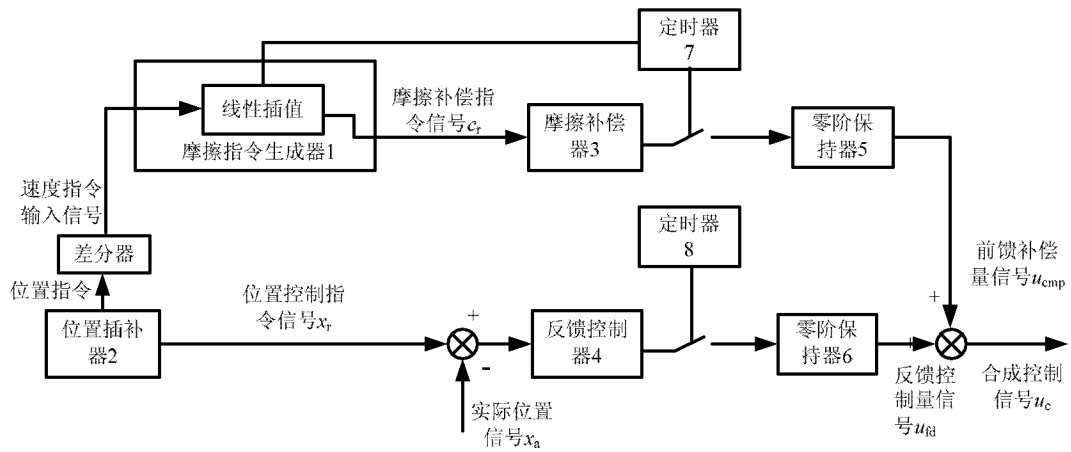


图 1

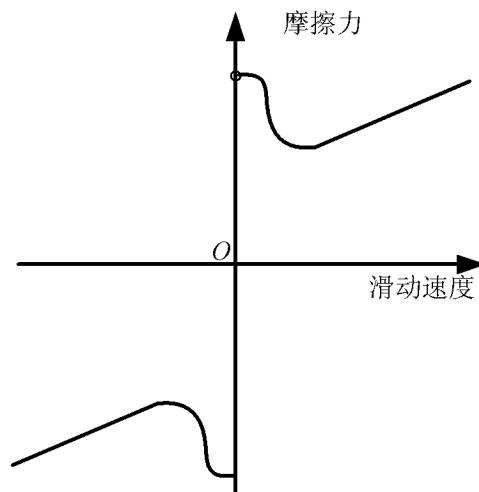


图 2

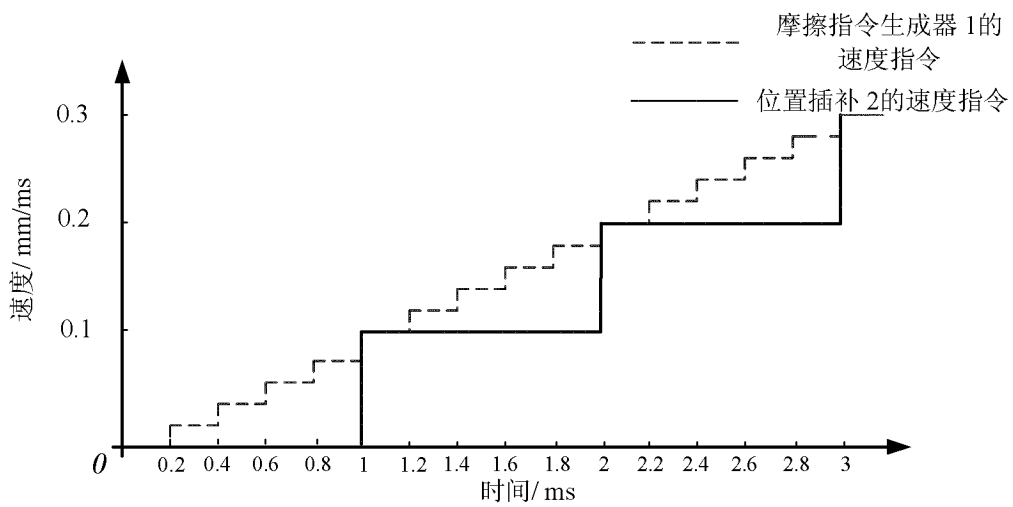


图 3

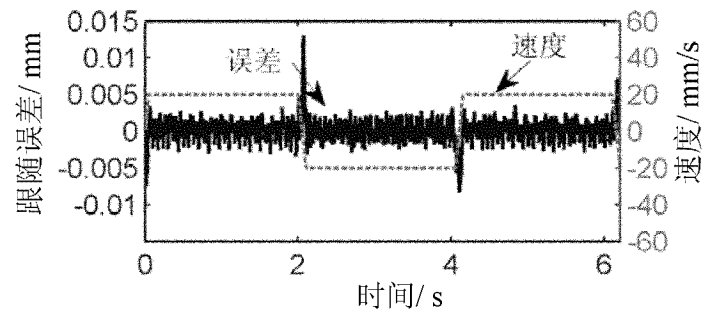


图 4a

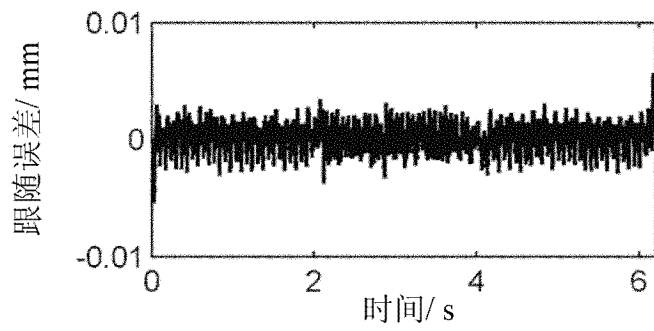


图 4b

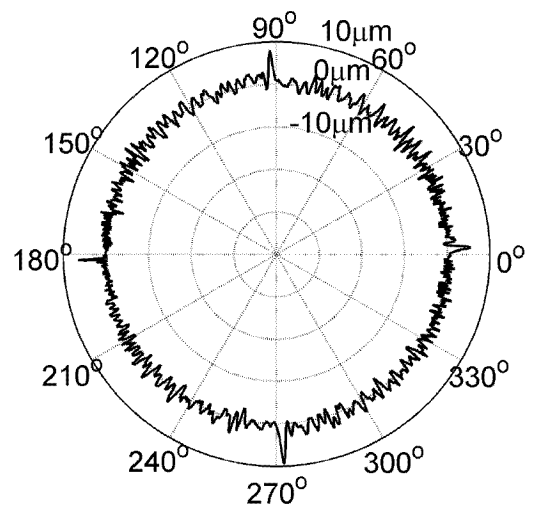


图 5a

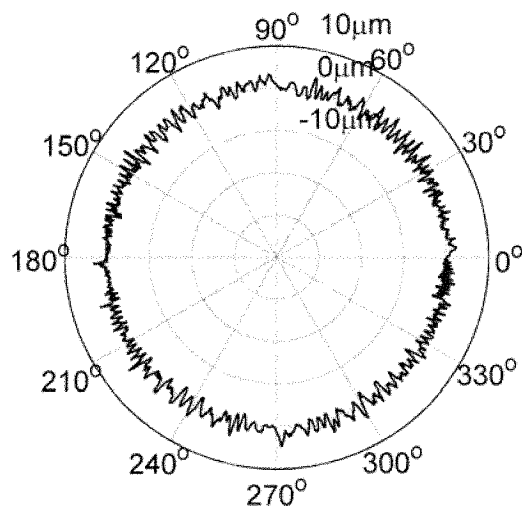


图 5b