



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114185270 A

(43) 申请公布日 2022.03.15

(21) 申请号 202111425076.5

(22) 申请日 2021.11.26

(71) 申请人 中国科学院微电子研究所
地址 100029 北京市朝阳区北土城西路3号

(72) 发明人 郝朝宇 宗明成 武志鹏 李璟
殷超 齐月静

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任
公司 11021

代理人 王文思

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

G01B 11/06 (2006.01)

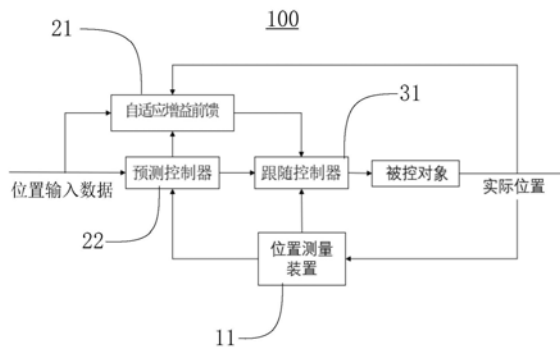
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

用于精密运动平台的模型预测运动控制方法及其系统

(57) 摘要

本公开提供一种用于精密运动平台的模型预测运动控制方法及其系统,用于控制精密运动平台,用于精密运动平台的模型预测运动控制方法包括以下步骤:获取位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据;根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据以及补偿数据;根据预测数据以及补偿数据,得到当前时刻的运动平台输入数据。在本公开提供的技术方案中,通过过往多个时刻的平台位置数据与位置输入数据产生预测数据,并同时针对预测数据产生补偿数据,进行动态调整,采用具有预测性质的控制方法来提前估计误差,能够根据平台位置数据,实时跟踪精密运动平台产生的误差,并根据误差控制计算精密运动平台实际的控制输入,提高精密运动平台跟踪精度。



1. 一种用于精密运动平台的模型预测运动控制方法,用于控制精密运动平台,其特征在于,包括以下步骤:

获取位置输入数据以及过往多个时刻的运动平台位置数据;

根据所述位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到预测数据以及补偿数据;

根据所述预测数据以及所述补偿数据,得到当前时刻的运动平台输入数据。

2. 如权利要求1所述的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法,其特征在于,根据所述位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到预测数据以及补偿数据的步骤包括:

根据所述位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到所述预测数据;

根据所述位置输入数据以及所述预测数据,得到所述补偿数据。

3. 如权利要求2所述的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法,其特征在于,根据所述位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到所述预测数据的步骤包括:

获取平台模型,得到系数矩阵;

根据所述系数矩阵、所述位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到所述预测数据。

4. 如权利要求3所述的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法,其特征在于,根据所述系数矩阵、所述位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到所述预测数据的步骤包括:

根据所述系数矩阵、所述位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到模拟输入;

根据所述系数矩阵、所述模拟输入以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据,得到预测数据。

5. 如权利要求2所述的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法,其特征在于,根据所述位置输入数据以及所述预测数据,得到所述补偿数据的步骤中,满足以下关系:

$$y_f = K1(y_d - y_p) + \frac{K2}{1-z^{-1}}(y_d - y_p) * ts$$

其中, y_f 为所述补偿数据, $K1$ 与 $K2$ 为预设可调增益, y_d 为所述位置输入数据, y_p 为所述预测数据, z 代表拉氏变换因子, ts 是被控对象的采样时间。

6. 如权利要求5所述的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法,其特征在于, $K1$ 与 $K2$ 两个所述预设可调增益满足以下关系:

$$K1 = \frac{a(y_d - y)}{1-z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|}$$

$$K2 = \frac{b(y_d - y)}{1-z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|} + d$$

$$|K2| \leq \varepsilon$$

其中, a 、 b 为设定影响因子, d 为偏移常量, ε 为 K_2 的取值边界, y_d 为所述位置输入数据, y 为运动平台输出数据, z 代表拉氏变换因子。

7. 如权利要求1所述的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法, 其特征在于, 所述运动平台位置数据包括运动平台输入数据以及运动平台输出数据。

8. 一种用于精密运动平台的模型预测运动控制系统, 其特征在于, 包括:

测量装置, 用于获取运动平台位置数据; 以及,

控制装置, 与所述测量装置电性连接, 用于根据位置输入数据以及过往多个时刻的所述运动平台位置数据, 得到预测数据以及补偿数据, 并根据所述预测数据以及所述补偿数据, 得到运动平台输入数据。

9. 如权利要求8所述的用于精密运动平台的模型预测运动控制系统, 其特征在于, 所述控制装置包括:

预测控制器, 用于根据所述位置输入数据以及过往多个时刻所述运动平台位置数据, 得到所述预测数据;

自适应增益前馈器, 与所述预测控制器电性连接, 用于根据所述位置输入数据以及所述预测数据, 得到所述补偿数据; 以及,

跟随控制器, 与所述自适应增益前馈器以及所述预测控制器电性连接。

10. 如权利要求8所述的运动控制系统, 其特征在于, 所述测量装置包括位置测量器。

用于精密运动平台的模型预测运动控制方法及其系统

技术领域

[0001] 本公开涉及精密平台控制领域,特别涉及一种用于精密运动平台的模型预测运动控制方法及其系统。

背景技术

[0002] 在半导体制造和检测领域,通常采用光学精密测量系统对硅片表面高度进行测量。光学精密测量系统对硅片表面测量过程中需精密运动平台对硅片的上表面进行实时跟踪,从而使硅片表面始终保持在光学测量系统的最佳焦平面附近。由于硅片表面起伏未知,造成运动平台的动态跟踪精度下降。

[0003] 目前采用的经典PID控制技术,是根据已知的跟踪误差,通过调整跟踪误差的比例增益、累积跟踪误差增益和跟踪误差的微分增益,组合三个计算分量得到被控系统的控制输入;然而,在应对硅片表面测量的复杂情况下,根据跟踪误差进行设计的PID控制方法,具有一定的滞后特征,无法预判跟踪位置的变化情况,不能获得理想的跟踪精度,对未来将要产生的误差没有预判,导致计算的控制输入调整量对未来的跟踪误差产生影响,无法满足精密运动平台的控制精度的要求。

发明内容

[0004] 本公开的主要目的是提出一种用于精密运动平台的模型预测运动控制方法及其系统,旨在解决精密运动平台运动控制精度无法满足的问题。

[0005] 为实现上述目的,本公开提出一种用于精密运动平台的模型预测运动控制方法,用于控制精密运动平台,包括以下步骤:

[0006] 获取位置输入数据以及过往多个时刻的运动平台位置数据;

[0007] 根据位置输入数据以及过往多个时刻的运动平台位置数据,得到预测数据以及补偿数据;

[0008] 根据预测数据以及补偿数据,得到运动平台输入数据。

[0009] 可选的,根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据以及补偿数据的步骤包括:

[0010] 根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据;

[0011] 根据位置输入数据以及预测数据,得到补偿数据。

[0012] 可选的,根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据的步骤包括:

[0013] 获取平台模型,得到系数矩阵;

[0014] 根据系数矩阵、位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据。

[0015] 可选的,根据系数矩阵、位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据的步骤包括:

[0016] 根据系数矩阵、位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到模拟输入;

[0017] 根据系数矩阵、模拟输入以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据。

[0018] 可选的,根据位置输入数据以及预测数据,得到补偿数据的步骤中,满足以下关系:

$$[0019] \quad y_f = K1(y_d - y_p) + \frac{K2}{1 - z^{-1}}(y_d - y_p) * ts$$

[0020] 其中, y_f 为补偿数据, $K1$ 与 $K2$ 为预设可调增益, y_d 为位置输入数据, y_p 为预测数据, z 代表拉氏变换因子, ts 是被控对象的采样时间。

[0021] 可选的, $K1$ 与 $K2$ 两个预设可调增益满足以下关系:

$$[0022] \quad K1 = \frac{a(y_d - y)}{1 - z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|}$$

$$[0023] \quad K2 = \frac{b(y_d - y)}{1 - z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|} + d$$

$$[0024] \quad |K2| \leq \varepsilon$$

[0025] 其中, a 、 b 为设定影响因子, d 为偏移常量, ε 为 $K2$ 的取值边界, y_d 为位置输入数据, y 为平台输出数据, z 代表拉氏变换因子。

[0026] 可选的,运动平台位置数据包括运动平台输入数据以及运动平台输出数据。

[0027] 本公开还提供一种用于精密运动平台的模型预测运动控制系统,包括:

[0028] 测量装置,用于获取运动平台位置数据;以及,

[0029] 控制装置,与测量装置电性连接,用于根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据以及补偿数据,并根据预测数据以及补偿数据,得到运动平台输入数据。

[0030] 可选的,控制装置包括:

[0031] 预测控制器,用于根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据,得到预测数据;

[0032] 自适应增益前馈器,与预测控制器电性连接,用于根据位置输入数据以及预测数据,得到补偿数据。以及,

[0033] 跟随控制器,与自适应增益前馈器以及预测控制器电性连接。

[0034] 测量装置包括位置测量器。

[0035] 在本公开提供的技术方案中,通过过往多个时刻的运动平台位置数据与位置输入数据产生预测数据,并同时针对预测数据产生补偿数据,进行动态调整,采用具有预测性质的控制方法来提前估计误差,能够根据运动平台位置数据,实时跟踪精密运动平台产生的误差,并根据误差控制计算精密运动平台实际的控制输入,提高精密运动平台跟踪精度。

附图说明

[0036] 图1为本公开提供的用于精密运动平台的模型预测运动控制系统一实施例的连接框图;

- [0037] 图2为本公开提供的用于精密运动平台的模型预测运动控制系统的控制框图；
- [0038] 图3为图1中自适应增益前馈器的控制框图；
- [0039] 图4为现有技术中与本公开的位置跟踪曲线对比图；
- [0040] 图5为图4中位置跟踪曲线图的局部放大示意图；
- [0041] 图6为现有技术中的轨迹跟踪误差曲线；
- [0042] 图7为本公开提供的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法的轨迹跟踪误差曲线；
- [0043] 图8为本公开提供的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法中自适应增益的变化图；
- [0044] 图9为剧烈信号中现有技术与本公开的位置跟踪曲线对比图；
- [0045] 图10为剧烈信号中现有技术与本公开的轨迹跟踪误差曲线对比图。

具体实施方式

[0046] 为使本公开的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本公开进一步详细说明。

[0047] 另外，若本公开实施例中有涉及“第一”、“第二”等的描述，则该“第一”、“第二”等的描述仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示其相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。另外，各个实施例之间的技术方案可以相互结合，但是必须是以本领域普通技术人员能够实现为基础，当技术方案的结合出现相互矛盾或无法实现时应当认为这种技术方案的结合不存在，也不在本公开要求的保护范围之内。

[0048] 请参阅图1，本公开提供一种用于精密运动平台的模型预测运动控制系统100，用于控制精密运动平台，包括测量装置以及控制装置；测量装置用于获取运动平台位置数据；控制装置与测量装置电性连接，用于根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据，得到预测数据以及补偿数据，并根据预测数据以及补偿数据，得到运动平台输入数据。

[0049] 具体的，在公开提供的本实施例中，控制装置包括预测控制器21以及自适应增益前馈器22；预测控制器21用于根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据，得到预测数据；自适应增益前馈器22与预测控制器21电性连接，用于根据位置输入数据以及预测数据，得到补偿数据。

[0050] 另外，在本实施例中，控制装置包括跟随控制器23；测量装置包括位置测量器11。位置测量器11有多种实施方式，只要能够探测运动平台的位置即可，例如红外探测、激光测距等方式，在此不做具体限制。

[0051] 在本实施例中，预测控制器21用于产生预测数据；自适应前馈补偿器22用于产生补偿数据；跟随控制器23用于跟随预测数据以及补偿数据，保持系统稳定；位置测量器11用于测量运动平台实际到达的位置，以便于提供反馈数据。

[0052] 基于上述运动控制系统100，本公开还提供一种用于精密运动平台的模型预测运动控制方法，用于控制精密运动平台，包括以下步骤：

[0053] S10、获取位置输入数据以及过往多个时刻的运动平台位置数据；

[0054] S20、根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据，得到预测数据以及

补偿数据；

[0055] S30、根据预测数据以及补偿数据，得到运动平台输入数据。

[0056] 在本公开提供的技术方案中，通过过往多个时刻的运动平台位置数据与位置输入数据产生预测数据，并同时针对预测数据产生补偿数据，进行动态调整，采用具有预测性质的控制方法来提前估计误差，能够根据运动平台位置数据，实时跟踪精密运动平台产生的误差，并根据误差控制计算精密运动平台实际的控制输入，提高精密运动平台跟踪精度。

[0057] 进一步的，步骤S20包括：

[0058] S21、根据位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据，得到预测数据；

[0059] S22、根据位置输入数据以及预测数据，得到补偿数据。

[0060] 先根据运动平台位置数据，产生预测数据，在通过补偿数据对预测数据进行补偿，多次根据运动平台位置数据中的实际误差进行动态调整，可应对复杂控制条件下，根据预测跟踪误差的变化，进行补偿数据的控制，使得误差收缩到一定标准区间。

[0061] 具体的，步骤S21包括：

[0062] S211、获取以及平台模型，得到系数矩阵；

[0063] S212、根据系数矩阵、位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据，得到预测数据。

[0064] 将平台模型引入预测控制器22内，通过系数矩阵控制产生的预测数据在计算时，位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据的加权系数，便于产生更加精确的预测数据。

[0065] 更进一步的，步骤S212包括：

[0066] S2121、根据系数矩阵、位置输入数据以及过往多个时刻运动平台位置数据，得到模拟输入；

[0067] S2122、根据系数矩阵、模拟输入以及过往多个时刻运动平台位置数据，得到预测数据。

[0068] 另一方面，步骤S22中，满足以下关系：

$$[0069] \quad y_f = K1(y_d - y_p) + \frac{K2}{1 - z^{-1}}(y_d - y_p) * ts$$

[0070] 其中， y_f 为补偿数据，K1与K2为预设可调增益， y_d 为位置输入数据， y_p 为预测数据， z 代表拉氏变换因子， ts 是被控对象的采样时间。

[0071] 在本实施例中，通过一个比例环节以及一个积分环节，形成不同两个可调增益，并以此来计算补偿数据，以便于输出运动平台输入数据。

[0072] 进一步的，K1与K2两个预设可调增益满足以下关系：

$$[0073] \quad K1 = \frac{a(y_d - y)}{1 - z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|}$$

$$[0074] \quad K2 = \frac{b(y_d - y)}{1 - z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|} + d$$

$$[0075] \quad |K2| \leq \varepsilon$$

[0076] 其中， a 、 b 为设定影响因子， d 为偏移常量， ε 为K2的取值边界， y_d 为位置输入数据， y

为运动平台输出数据, z 代表拉氏变换因子。

[0077] 需要说明的是, 在本实施例中, 运动平台位置数据包括运动平台输入数据以及运动平台输出数据。

[0078] 基于上述用于精密运动平台的模型预测运动控制方法及其系统, 本公开提供一具体实施例:

[0079] 1、被控对象为精密运动平台, 获取被控对象的模型, 即精密运动平台的离散模型, 提取模型参数, 根据模型参数确定预测步长 (i), 输入步长 (j)。

[0080] 在本实施例中, 被控对象的模型为:

$$[0081] \quad A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k)$$

[0082] 其中: $y(k)$ 和 $u(k)$ 分别代表 k 时刻被控对象的运动平台输出数据和运动平台输入数据;

$$[0083] \quad A(z^{-1}) = 1 + a_1 * z^{-1} + a_2 * z^{-2} + \dots + a_n * z^{-n}$$

$$[0084] \quad B(z^{-1}) = b_0 + b_1 * z^{-1} + b_2 * z^{-2} + \dots + b_m * z^{-m}$$

[0085] 其中, A 、 B 通过历史变量计算, 以形成更准确的被控对象的平台模型。

[0086] 2、请参阅图2, 通过被控对象模型的参数来计算模型的各多项式系数, 根据公式:

$$[0087] \quad 1 = A(z^{-1})E_i(z^{-1}) + z^{-i}D_i(z^{-1})$$

$$[0088] \quad B(z^{-1})E_i(z^{-1}) = F_i(z^{-1}) + z^{-i}H_i(z^{-1})$$

$$[0089] \quad E_i(z^{-1}) = 1 + e_{i,1} * z^{-1} + e_{i,2} * z^{-2} + \dots + e_{i,i-1} * z^{-(i-1)}$$

$$[0090] \quad D_i(z^{-1}) = d_{i,0} + d_{i,1} * z^{-1} + d_{i,2} * z^{-2} + \dots + d_{i,n} * z^{-n}$$

$$[0091] \quad F_i(z^{-1}) = f_{i,0} + f_{i,1} * z^{-1} + f_{i,2} * z^{-2} + \dots + f_{i,i-1} * z^{-(i-1)}$$

$$[0092] \quad H_i(z^{-1}) = h_{i,0} + h_{i,1} * z^{-1} + h_{i,2} * z^{-2} + \dots + h_{i,m-1} * z^{-(m-1)}$$

[0093] 求以上两个解Diophantine方程(丢番图方程), 得到图2中的各系数矩阵 F 、 D 、 H 、 E ; 在本实施例中, 系数矩阵 F 、 D 、 H 、 E 的系数分布为:

$$[0094] \quad F = \begin{bmatrix} f_{1,0} & 0 & \dots & 0 \\ f_{2,1} & f_{2,0} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{i,i-1} & f_{i,i-2} & \dots & f_{1,0} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} d_{1,0} & d_{1,1} & \dots & d_{1,n} \\ d_{2,0} & d_{2,1} & \dots & d_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i,0} & d_{i,1} & \dots & d_{i,n} \end{bmatrix}$$

$$[0095] \quad H = \begin{bmatrix} h_{1,0} & h_{1,1} & \dots & h_{1,m-1} \\ h_{2,0} & h_{2,1} & \dots & h_{2,m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,0} & h_{i,1} & \dots & h_{i,m-1} \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ e_{2,1} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{i,i-1} & e_{i,i-2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

[0096] 3、确定对角加权系数矩阵 Q 、 R , 其中 Q 是 $i \times i$ 对角矩阵、 R 是 $j \times j$ 对角矩阵; 计算系数矩阵 L , 计算公式如下:

$$[0097] \quad L = (F^T Q F + R)^{-1} F^T Q$$

[0098] 4、根据公式 $u_p = y_d - H u_1 + D y$ 计算得到模拟输入 (u_p);

[0099] 根据公式 $y_p = H u_1 + D y + F u_p$ 计算得到预测数据 (y_p)。

[0100] 5、请参阅图3, 通过一个比例 (P) 环节, 可调增益为 $K1$; 一个积分 (I) 环节, 可调增益

为K2,来计算补偿数据(y_f);根据模型具体参数,确定自适应机制中增益影响因子a、b参数值,偏移值d和K2边界范围 ε 值;自适应增益前馈器21的可调增益K1、K2根据以下公式计算:

$$[0101] \quad K1 = \frac{a(y_d - y)}{1 - z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|}$$

$$[0102] \quad K2 = \frac{b(y_d - y)}{1 - z^{-1}} * \frac{y_d - y}{|y_d - y|} + d$$

$$[0103] \quad |K2| \leq \varepsilon$$

[0104] 6、根据以下公式计算补偿数据(y_f):

$$[0105] \quad y_f = K1(y_d - y_p) + \frac{K2}{1 - z^{-1}}(y_d - y_p) * ts$$

[0106] 7、将($y_p + y_f$)输入到以PID设计方法设计的二级跟随控制器23;使用位置测量器11获取精密运动平台的平台输出数据(y),作为信号输入到自适应增益前馈器21,预测控制器22和跟随控制器23。

[0107] 在公开提供的本实施例中,根据实际系统控制精度要求,适当调整上述预测步长(i),模拟控制输入步长(j),对角加权系数矩阵Q、R,自适应机制中增益影响因子a、b参数值,偏移值d,和K2边界范围 ε 等值。

[0108] 在精密运动平台跟随复杂轨迹曲线时,采用单纯PID方法和本公开提供的用于精密运动平台的模型预测运动控制方法进行比较,单纯PID方法和本公开的位置跟踪曲线对比如图4所示,对图4中部分区间进行放大,得到图5对比图,可以看出本公开以及单纯PID方法相对于理想位置的误差。

[0109] 轨迹跟踪误差曲线如图6和图7所示。可以明显发现,本方法比PID控制更先进入误差要求标准线,且本方法相较于PID控制的误差均值更小。

[0110] 系统调整良好之后自适应增益K1、K2曲线如图8,增益的取值随着控制误差的情况自适应调整,可应对复杂控制条件下,根据预测跟踪误差的变化,提前进行扩大和减小补偿增益,使得误差收缩到一定标准区间。

[0111] 对于变化更剧烈的信号,采用单纯PID控制和本公开提出的方法,位置跟踪曲线如图9,跟踪误差曲线如图10。在误差曲线图10中可以看到,在低频信号向高频信号转换过程中,PID控制方法,输出位置会发生剧烈变化,带来跟踪误差增大,本公开提出的方法在信号切换过程中相较PID方法输出较平滑,跟踪误差更小。

[0112] 以上所述的具体实施例,对本公开的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本公开的具体实施例而已,并不用于限制本公开,凡在本公开的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本公开的保护范围之内。

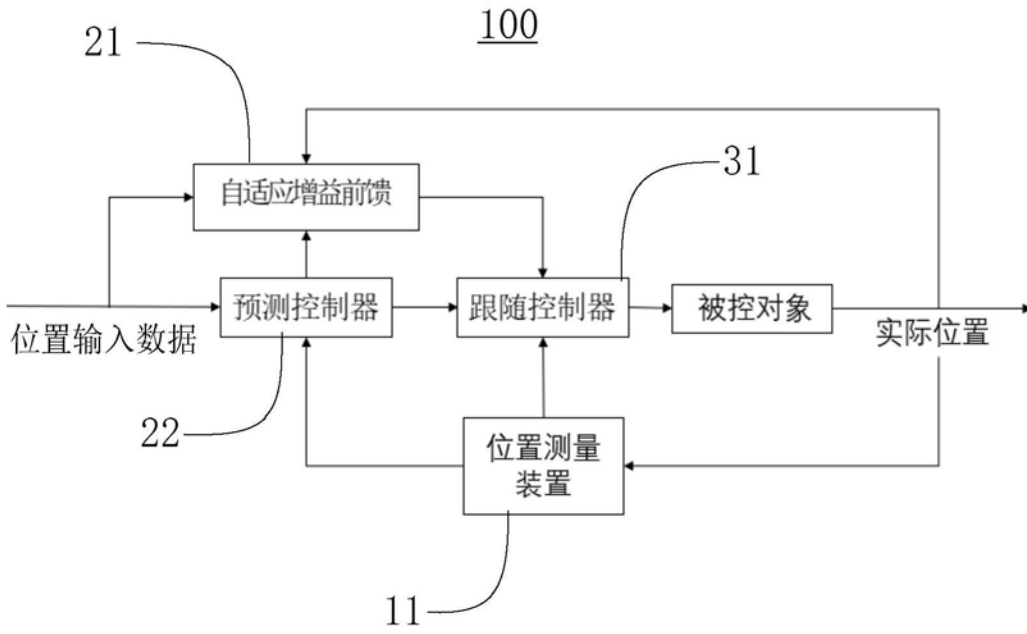


图1

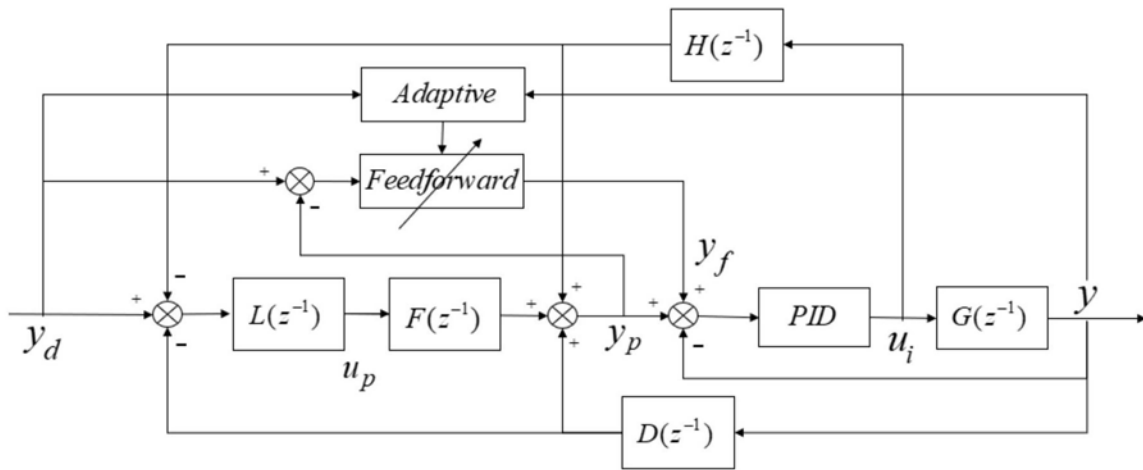


图2

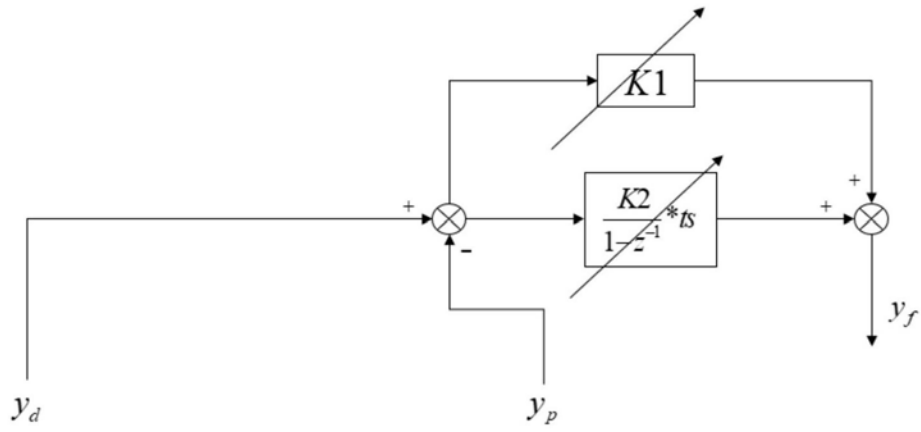


图3

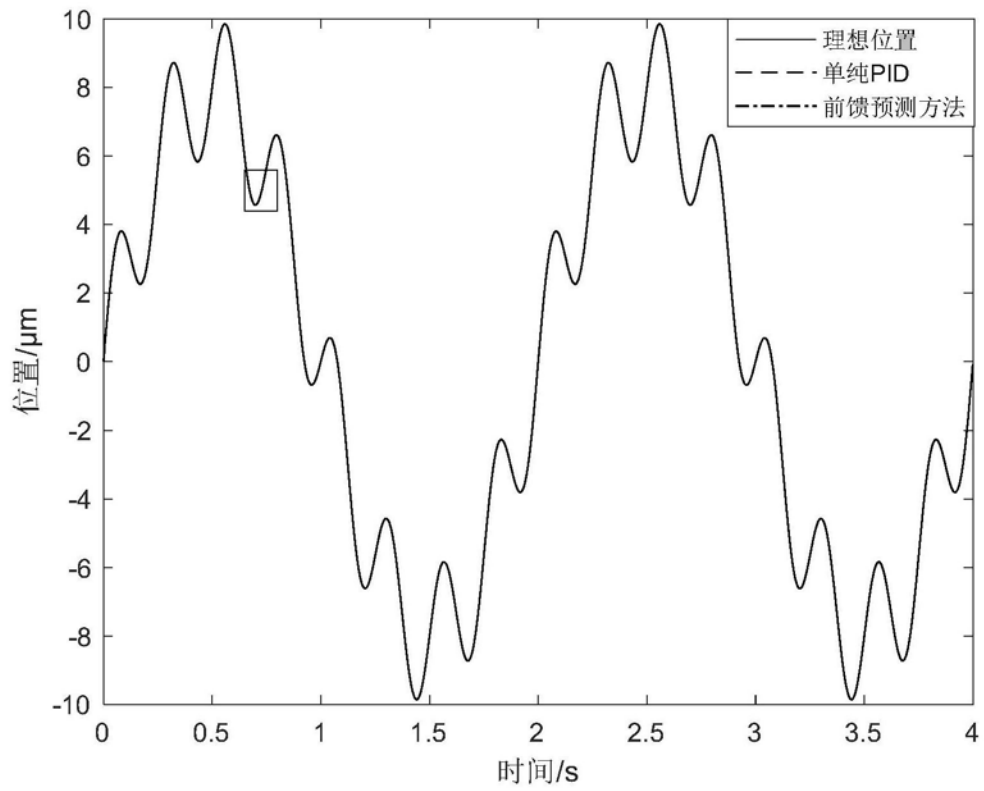


图4

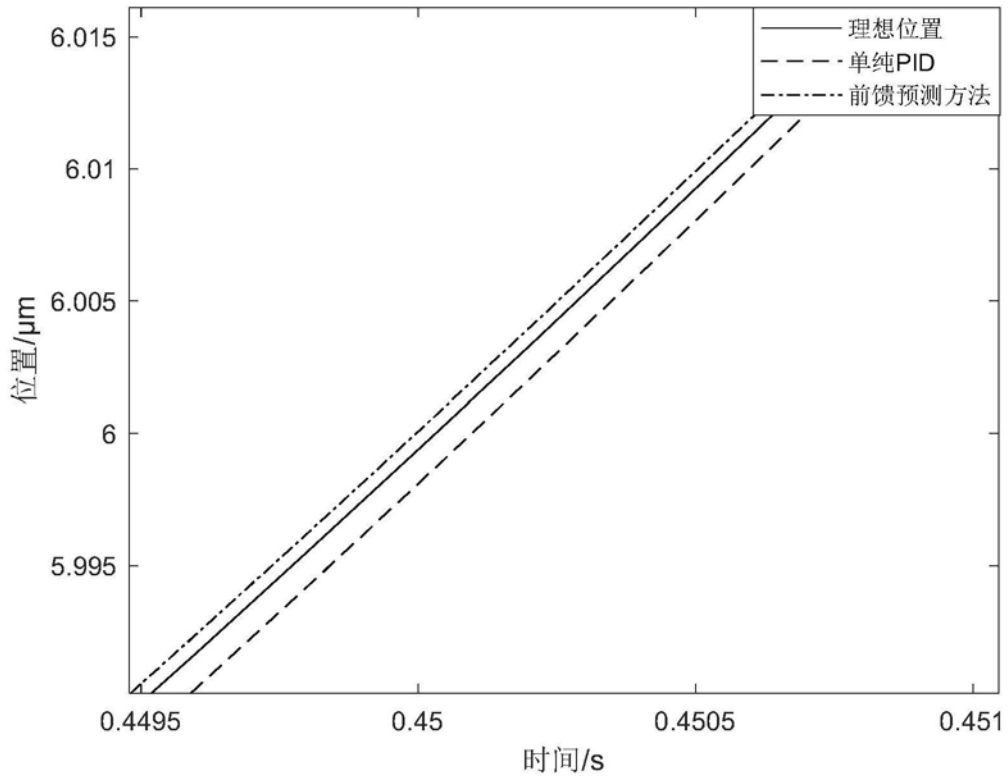


图5

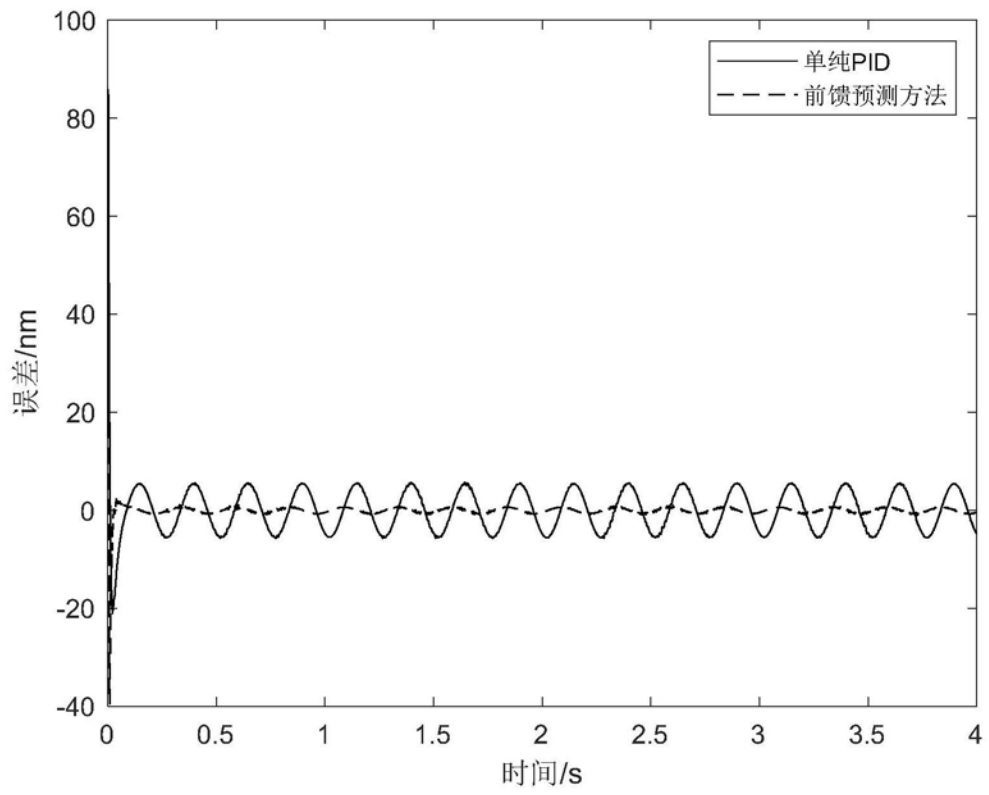


图6

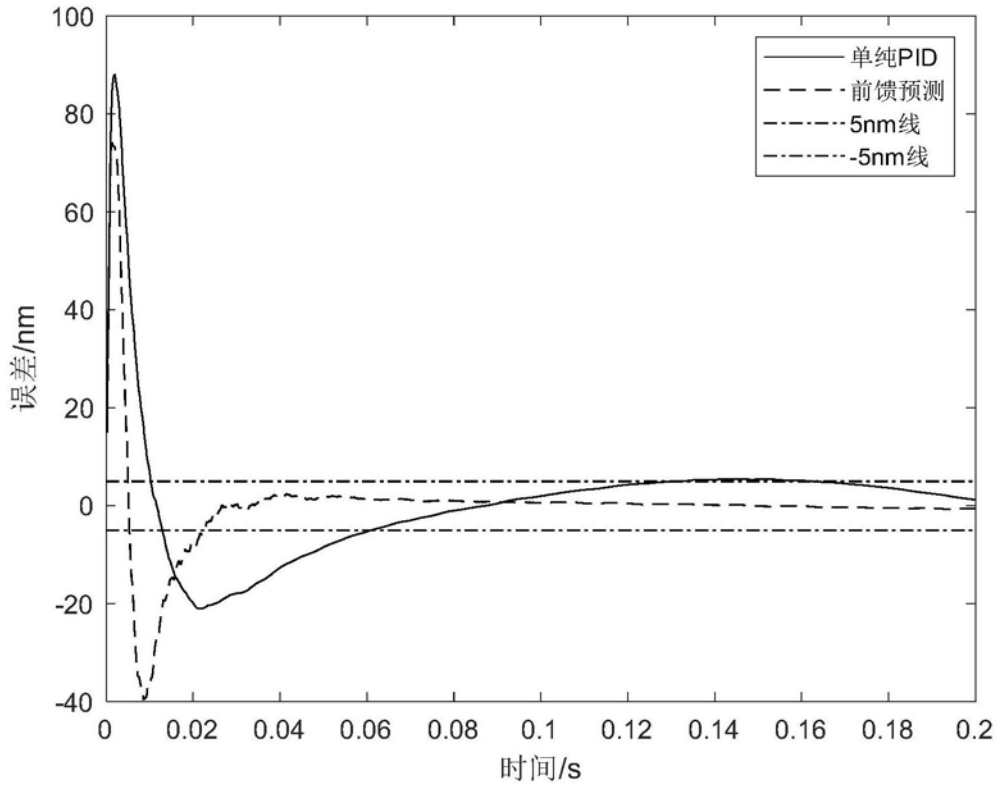


图7

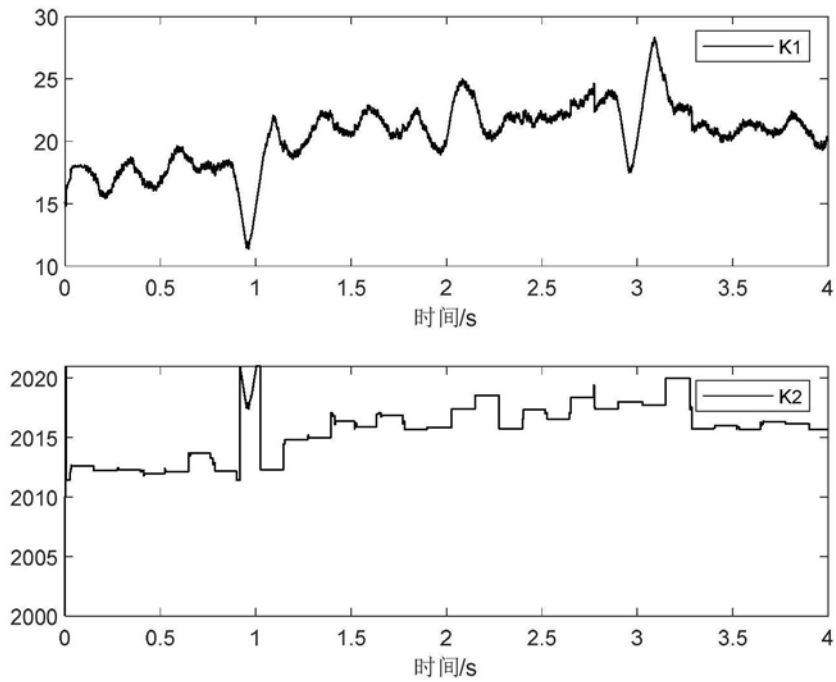


图8

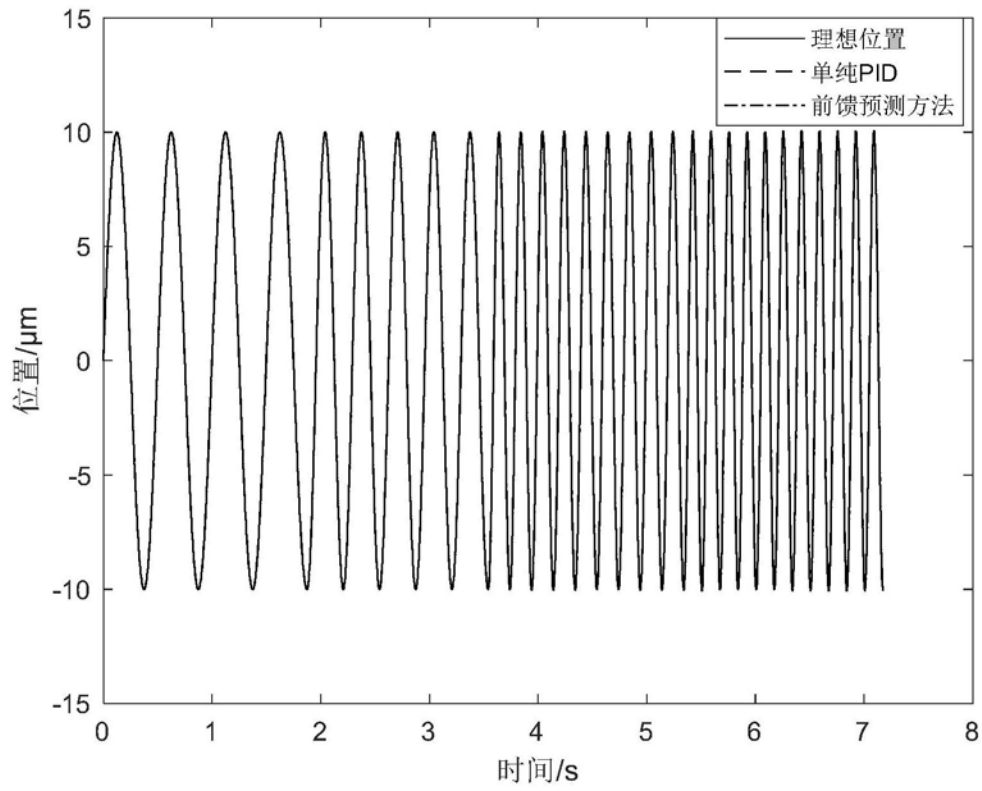


图9

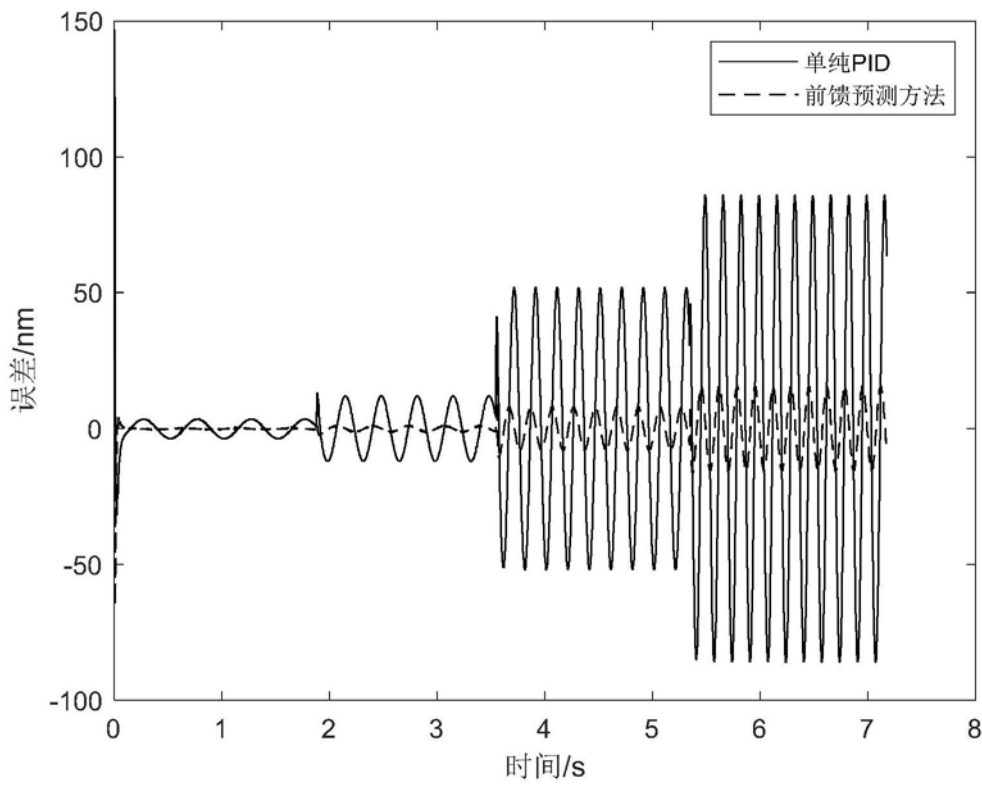


图10