



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108015761 B

(45) 授权公告日 2021.05.07

(21) 申请号 201610958133.9

审查员 梁磊

(22) 申请日 2016.11.02

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108015761 A

(43) 申请公布日 2018.05.11

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

地址 518000 广东省深圳市南山区高新技术产业园南区粤兴一道18号香港理工大学产学研大楼205室

(72) 发明人 张银炎 李帅

(74) 专利代理机构 深圳中一专利商标事务所

44237

代理人 张全文

(51) Int. Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

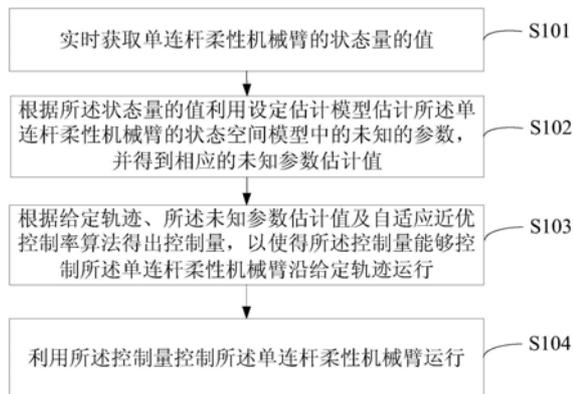
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称

一种单连杆柔性机械臂控制方法及系统

(57) 摘要

本发明提供了一种单连杆柔性机械臂控制方法及系统,包括:实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值;根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中的未知的参数,并得到相应的未知参数估计值;根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率算法得出控制量,以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行;利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行。本发明在不知道单连杆柔性机械臂状态空间模型中的未知参数值的情况下,能通过控制量对单连杆柔性机械臂进行控制,以实现单连杆柔性机械臂的末端对所述给定轨迹的跟踪。



1. 一种单连杆柔性机械臂控制方法,其特征在于,所述方法包括:

实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值;

根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中的未知的参数,并得到相应的未知参数估计值;

根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率公式得出控制量,以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行;

利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行;

其中:

所述状态空间模型为:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = W_f \phi_f(\mathbf{x}) + W_g \phi_g(\mathbf{x})u(t), \quad y = h(\mathbf{x})$$

其中, $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量; W_f 和 W_g 为未知的参数矩阵; $\phi_f(\mathbf{x})$ 和 $\phi_g(\mathbf{x})$ 为已知的关于状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 的函数; $u(t)$ 为电枢的输入电压; y 为所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $h(\mathbf{x})$ 表示所述单连杆柔性机械臂的末端位置与所述状态向量之间的映射关系;

所述设定估计模型为:

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) + \tau \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)u^k - \tau K_x(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k),$$

$$\hat{W}_f^{k+1} = \hat{W}_f^k - \tau K_f(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$\hat{W}_g^{k+1} = \hat{W}_g^k - K_g(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_g(\mathbf{x}^k),$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}$ 为对应于所述状态向量的一个辅助状态向量,且初始值设置为 $\mathbf{x}(0)$; \hat{W}_f 、 \hat{W}_g 分别对应为 W_f 的估计量、 W_g 的估计量; K_x 、 K_f 及 K_g 均为对角权矩阵并用于调整参数 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g 的收敛速度,并且 K_x 、 K_f 及 K_g 的对角元素值都大于零其余元素值为零;参数 τ 表示采样间隔;上标 k 表示第 k 次迭代;

所述自适应近优控制率公式为:

$$u^k = (TR + \eta(L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^T QL_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^{-1}(QL_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^T(Y_d^k - \hat{Y}^k)\mathbf{v},$$

其中, R 、 Q 及 T 分别为时变最优控制性能指标的对应参数,且 R 、 Q 均为设定的正定对称矩阵, T 为设定的预测参数; $Y_d^k = [y_d^k, \dot{y}_d^k, \ddot{y}_d^k, \dddot{y}_d^k, \overset{\cdot\cdot\cdot}{y}_d^k]$ 是由第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹对应的位置及第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹的1阶至4阶导数值共同构成的向量;此外,

$\hat{Y}^k = [y^k, L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^4h(\mathbf{x}^k)]$,并且,

$$L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k) = \partial h(\mathbf{x})/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad , \quad L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad ,$$

$L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k)$, $L_{\hat{f}}^4h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k)$; y^k 表示 $k\tau$ 时刻

时所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{g}}^3h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)$;参数向量 $\mathbf{v} \in R^5$,且 \mathbf{v} 包括的第 i 个元素值为 $v_i = T^{5+i}/(24(5+i)i!)$;增益参数 $\eta = T^9/5184$ 。

2. 根据权利要求1所述的单连杆柔性机械臂控制方法,其特征在于,所述单连杆柔性机械臂包括电机,且所述电机包括电枢;所述控制量为待施加于所述电枢的电压;

并且,利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行的步骤包括:

将待施加于所述电枢的电压输入至所述电枢,以通过电机驱动所述单连杆柔性机械臂运行。

3. 一种单连杆柔性机械臂控制系统,其特征在于,所述单连杆柔性机械臂控制系统包括:

变量获取模块,用于实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值;

参数估计模块,用于根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中的未知的参数,并得到相应的未知参数估计值;

控制量计算模块,用于根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率公式得出控制量,以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行;

轨迹控制模块,用于利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行;

其中:

所述状态空间模型为:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = W_f \phi_f(\mathbf{x}) + W_g \phi_g(\mathbf{x})u(t), \quad y = h(\mathbf{x})$$

其中, $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量; W_f 和 W_g 为未知的参数矩阵; $\phi_f(x)$ 和 $\phi_g(x)$ 为已知的关于状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 的函数; $u(t)$ 为电枢的输入电压; y 为所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $h(x)$ 表示所述单连杆柔性机械臂的末端位置与所述状态向量之间的映射关系;

所述设定估计模型为:

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) + \tau \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)u^k - \tau K_x(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k),$$

$$\hat{W}_f^{k+1} = \hat{W}_f^k - \tau K_f(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$\hat{W}_g^{k+1} = \hat{W}_g^k - K_g(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_g(\mathbf{x}^k),$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}$ 为对应于所述状态向量的一个辅助状态向量,且初始值设置为 $\mathbf{x}(0)$; \hat{W}_f 、 \hat{W}_g 分别对应为 W_f 的估计量、 W_g 的估计量; K_x 、 K_f 及 K_g 均为对角权矩阵并用于调整参数 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g 的收敛速度,并且 K_x 、 K_f 及 K_g 的对角元素值都大于零其余元素值为零;参数 τ 表示采样间隔;上标 k 表示第 k 次迭代;

所述自适应近优控制率公式为:

$$u^k = (TR + \eta(L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^T QL_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^{-1}(QL_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^T(Y_d^k - \hat{Y}^k)\mathbf{v},$$

其中, R 、 Q 及 T 分别为时变最优控制性能指标的对应参数,且 R 、 Q 均为设定的正定对称矩阵, T 为设定的预测参数; $Y_d^k = [y_d^k, \dot{y}_d^k, \ddot{y}_d^k, \ddot{\ddot{y}}_d^k, \ddot{\ddot{\ddot{y}}}_d^k]$ 是由第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹对应的位置及第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹的1阶至4阶导数值共同构成的向量;此外, $\hat{Y}^k = [y^k, L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^4h(\mathbf{x}^k)]$,并且,

$$L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k) = \partial h(\mathbf{x})/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad , \quad L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad ,$$

$$L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k), \quad L_{\hat{f}}^4h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k); y^k \text{表示 } k\tau \text{ 时刻}$$

时所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k) = \partial L_{\hat{g}}^3h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)$;参数向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^5$,且 \mathbf{v} 包括的第 i 个元素值为 $v_i = T^{5+i}/(24(5+i)i!)$;增益参数 $\eta = T^9/5184$ 。

4. 根据权利要求3所述的单连杆柔性机械臂控制系统,其特征在于,所述单连杆柔性机械臂包括电机,且所述电机包括电枢;所述控制量为待施加于所述电枢的电压;

并且,所述轨迹控制模块用于将待施加于所述电枢的电压输入至所述电枢,以通过电机驱动所述单连杆柔性机械臂运行。

一种单连杆柔性机械臂控制方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于机器人技术领域,尤其涉及一种单连杆柔性机械臂控制方法及系统。

背景技术

[0002] 机器人技术是一种综合了计算机、控制论、结构学、信息和传感技术、人工智能、仿生学等多学科而形成的高新技术,随着科学技术的不断发展,机器人技术的研究十分活跃并被日益运用到广泛的领域中。由于在许多机器人运用场景中,例如航空运用、车载机器人和建筑方面的大型机械等,要求机器人手臂具有轻型化,因此,传统的刚性机械臂已经不再适用。较之于刚性机械臂,柔性机械臂具有结构轻、载重自重比高等特性,因而其具有较低的能耗、较大的操作空间和较高的效率,在工业和国防等应用领域中占优十分重要的地位。

[0003] 然而,在传统单连杆柔性机械臂的建模过程中,往往难以得到准确的模型参数,存在较大的模型误差,从而较难实现单连杆柔性机械臂对给定轨迹的跟踪。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种单连杆柔性机械臂控制方法及系统,以解决传统单连杆柔性机械臂的建模过程中难以得到准确的模型参数的问题。

[0005] 一种单连杆柔性机械臂控制方法,所述方法包括:

[0006] 实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值;

[0007] 根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中的未知的参数,并得到相应的未知参数估计值;

[0008] 根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率公式得出控制量,以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行;

[0009] 利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行。

[0010] 在其中一个实施例中,所述单连杆柔性机械臂包括电机,且所述电机包括电枢;所述控制量为待施加于所述电枢的电压;

[0011] 并且,利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行的步骤包括:

[0012] 将待施加于所述电枢的电压输入至所述电枢,以通过电机驱动所述单连杆柔性机械臂运行。

[0013] 在其中一个实施例中,所述状态空间模型为:

$$[0014] \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = W_f \phi_f(\mathbf{x}) + W_g \phi_g(\mathbf{x})u(t), \quad y = h(\mathbf{x})$$

[0015] 其中, $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量; W_f 和 W_g 为未知的参数矩阵; $\phi_f(\mathbf{x})$ 和 $\phi_g(\mathbf{x})$ 为已知的关于状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 的函数; $u(t)$ 为所述电枢的输入电压; y 为所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $h(\mathbf{x})$ 表示所述单连杆柔性机械臂的末端位置与所述状态向量之间的映射关系。

[0016] 在其中一个实施例中,所述设定估计模型为:

$$[0017] \quad \hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) + \tau \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)u^k - \tau K_x(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k),$$

$$[0018] \quad \hat{W}_f^{k+1} = \hat{W}_f^k - \tau K_f (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k) \phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$[0019] \quad \hat{W}_g^{k+1} = \hat{W}_g^k - K_g (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k) \phi_g(\mathbf{x}^k),$$

[0020] 其中, $\hat{\mathbf{x}}$ 为对应于所述状态向量的一个辅助状态向量,且初始值设置为 $\mathbf{x}(0)$; \hat{W}_f 、 \hat{W}_g 分别对应为 W_f 的估计量、 W_g 的估计量; K_x 、 K_f 及 K_g 均为对角矩阵并用于调整参数 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g 的收敛速度,并且 K_x 、 K_f 及 K_g 的对角元素值都大于零其余元素值为零;参数 τ 表示采样间隔;上标 k 表示第 k 次迭代。

[0021] 在其中一个实施例中,所述自适应近优控制率公式为:

$$[0022] \quad u^k = (TR + \eta(L_{\hat{g}}L_f^3h(\mathbf{x}^k))^T QL_{\hat{g}}L_f^3h(\mathbf{x}^k))^{-1}(QL_{\hat{g}}L_f^3h(\mathbf{x}^k))^T(Y_d^k - \hat{Y}^k)\mathbf{v},$$

[0023] 其中, R 、 Q 及 T 分别为时变最优控制性能指标的对应参数,且 R 、 Q 均为设定的正定对称矩阵, T 为设定的预测参数; $Y_d^k = [y_d^k, \dot{y}_d^k, \ddot{y}_d^k, \ddot{\ddot{y}}_d^k]$ 是由第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹对应的位置及第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹的1阶至4阶导数值共同构成的向量;此外, $\hat{Y}^k = [y^k, L_f^1h(\mathbf{x}^k), L_f^2h(\mathbf{x}^k), L_f^3h(\mathbf{x}^k), L_f^4h(\mathbf{x}^k)]$, 并且,

$$L_f^1h(\mathbf{x}^k) = \partial h(\mathbf{x})/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad , \quad L_f^2h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^1h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad ,$$

$$L_f^3h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^2h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k), \quad L_f^4h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k); y^k \text{表示} k\tau \text{时刻时}$$

所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $L_{\hat{g}}L_f^3h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3h(\mathbf{x}^k)/\partial \mathbf{x}^k \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)$; 参数向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^5$, 且 \mathbf{v} 包括的第 i 个元素值为 $v_i = T^{5+i}/(24(5+i)!)$; 增益参数 $\eta = T^9/5184$ 。

[0024] 一种单连杆柔性机械臂控制系统,包括:

[0025] 变量获取模块,用于实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值;

[0026] 参数估计模块,用于根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中的未知的参数,并得到相应的未知参数估计值;

[0027] 控制量计算模块,用于根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率公式得出控制量,以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行;

[0028] 轨迹控制模块,用于利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行。

[0029] 在其中一个实施例中,所述单连杆柔性机械臂包括电机,且所述电机包括电枢;所述控制量为待施加于所述电枢的电压;

[0030] 并且,所述轨迹控制模块用于将待施加于所述电枢的电压输入至所述电枢,以通过电机驱动所述单连杆柔性机械臂运行。

[0031] 在其中一个实施例中,所述状态空间模型为:

$$[0032] \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = W_f \phi_f(\mathbf{x}) + W_g \phi_g(\mathbf{x})u(t), \quad y = h(\mathbf{x})$$

[0033] 其中, $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量; W_f 和 W_g 为未知的参数矩阵; $\phi_f(\mathbf{x})$ 和 $\phi_g(\mathbf{x})$ 为已知的关于状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 的函数; $u(t)$ 为所述电枢的输入电压; y 为所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $h(\mathbf{x})$ 表示所述单连杆柔性机械臂的末端位置与所述状态向量之间的映射关系。

[0034] 在其中一个实施例中,所述设定估计模型为:

$$[0035] \quad \hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \hat{W}_f^k \phi_g(\mathbf{x}^k) + \tau \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k) u^k - \tau K_x (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k),$$

$$[0036] \quad \hat{W}_f^{k+1} = \hat{W}_f^k - \tau K_f (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k) \phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$[0037] \quad \hat{W}_g^{k+1} = \hat{W}_g^k - K_g (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k) \phi_g(\mathbf{x}^k),$$

[0038] 其中, $\hat{\mathbf{x}}$ 为对应于所述状态向量的一个辅助状态向量,且初始值设置为 $\mathbf{x}(0)$; \hat{W}_f 、 \hat{W}_g 分别对应为 W_f 的估计量、 W_g 的估计量; K_x 、 K_f 及 K_g 均为对角矩阵并用于调整参数 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g 的收敛速度,并且 K_x 、 K_f 及 K_g 的对角元素值都大于零其余元素值为零;参数 τ 表示采样间隔;上标 k 表示第 k 次迭代。

[0039] 在其中一个实施例中,所述自适应近优控制率公式为:

$$[0040] \quad u^k = (TR + \eta(L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^T Q L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^{-1} (Q L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^T (Y_d^k - \hat{Y}^k) \mathbf{v},$$

[0041] 其中, R 、 Q 及 T 分别为时变最优控制性能指标的对应参数,且 R 、 Q 均为设定的正定对称矩阵, T 为设定的预测参数; $Y_d^k = [y_d^k, \dot{y}_d^k, \ddot{y}_d^k, \ddot{\ddot{y}}_d^k, \ddot{\ddot{\ddot{y}}}_d^k]$ 是由第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹对应的位置及第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹的1阶至4阶导数值共同构成的向量;此外, $\hat{Y}^k = [y^k, L_f^1 h(\mathbf{x}^k), L_f^2 h(\mathbf{x}^k), L_f^3 h(\mathbf{x}^k), L_f^4 h(\mathbf{x}^k)]$, 并且,

$$L_f^1 h(\mathbf{x}^k) = \partial h(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad , \quad L_f^2 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^1 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad ,$$

$$L_f^3 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^2 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k), \quad L_f^4 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k); y^k \text{表示} k\tau \text{时刻时}$$

所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)$; 参数向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^5$, 且 \mathbf{v} 包括的第 i 个元素值为 $v_i = T^{5+i} / (24(5+i) i!)$; 增益参数 $\eta = T^9 / 5184$ 。

[0042] 在本发明提供的单连杆柔性机械臂控制方法及系统中,首先实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值,并根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中未知的参数,以得到相应的未知参数估计值;根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率公式得出控制量,以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行;最后利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行。因此,本发明提供的单连杆柔性机械臂控制方法及系统能够自行得出相应的未知参数估计值,故在不知道单连杆柔性机械臂状态空间模型中的未知参数值的情况下,能通过控制量对单连杆柔性机械臂进行控制,以实现单连杆柔性机械臂的末端对所述给定轨迹的跟踪,从而克服了传统单连杆柔性机械臂的建模过程中难以得到准确的模型参数的问题。

附图说明

[0043] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他实施例的附图。

[0044] 图1是本发明第一实施例提供的单连杆柔性机械臂控制方法的实现流程图;

[0045] 图2是本发明实施例的单连杆柔性机械臂的平面结构示意图;

[0046] 图3是本发明第二实施例提供的单连杆柔性机械臂控制系统的结构框图。

具体实施方式

[0047] 为了便于理解本发明,下面将参照相关附图对本发明进行更全面的描述。附图中给出了本发明的较佳实施例。但是,本发明可以以许多不同的形式来实现,并不限于本文所描述的实施例。相反地,提供这些实施例的目的是使对本发明的公开内容的理解更加透彻全面。

[0048] 除非另有定义,本文所使用的所有的技术和科学术语与属于发明的技术领域的技术人员通常理解的含义相同。本文中在发明的说明书中所使用的术语只是为了描述具体的实施例的目的,不是旨在限制本发明。本文所使用的术语“和/或”包括一个或多个相关的所列项目的任意的和所有的组合。

[0049] 实施例一:

[0050] 如图1所示,第一实施例提供了一种单连杆柔性机械臂控制方法,用于控制单连杆柔性机械臂运行。其中,单连杆柔性机械臂包括单连杆机械臂及电机,所述电机安装于所述单连杆机械臂的基座上,并且所述单连杆机械臂上设有柔性关节。本实施例中,所述单连杆柔性机械臂控制方法可以由PLC(可编程逻辑控制器)等控制器来执行,包括以下内容。

[0051] 步骤S101、实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值。

[0052] 本实施例中,实时获取是指每重复执行所述单连杆柔性机械臂控制方法一次,则都需要获取最新的状态量的值。状态量是指描述物质系统状态的物理量,且能够随时间而发生变化,例如所述电机的角位置及角速度、所述柔性关节的角位置及角速度。

[0053] 具体的,可以通过传感器来获取状态量的值。需要指出的是,该步骤中状态变量的数量可以为两个或以上。

[0054] 步骤S102、根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中未知参数,并得到相应的未知参数估计值。

[0055] 本实施例中,状态空间模型是动态时域模型,以隐含着的时间为自变量。所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中包括已知的参数和未知的参数,其中,未知的参数可以为矩阵形式(记为未知的参数矩阵,相应的,未知参数估计值则为未知参数矩阵估计值),且该未知的参数矩阵是指包括未知的参数的矩阵。所述设定估计模型是基于所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型而得出的,其能够对所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中所有未知的参数进行估计。

[0056] 步骤S103、根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率公式得出控制量,以使得所述控制量能够使所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行。

[0057] 本实施例中,给定轨迹是已知的,即期望所述单连杆柔性机械臂的末端能够实现的运行轨迹。自适应近优控制率公式具有自适应控制和最优控制的特点,且该自适应近优控制率公式是基于所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型,并结合所述位置参数估计值及所述给定轨迹而运行的,从而得出控制量,并使得所述控制量能够实时、自适应的控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行。其中,控制量,作为所述单连杆柔性机械臂的控制输入,以控制所述单连杆柔性机械臂运行。

[0058] 步骤S104、利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行。

[0059] 因此,在控制量的控制下,所述单连杆柔性机械臂即能实时沿所述给定轨迹运行。故,本发明实施例在不知道单连杆柔性机械臂状态空间模型中的未知参数的情况下,能通过控制量对单连杆柔性机械臂进行控制,以实现单连杆柔性机械臂的末端对所述给定轨迹的跟踪,从而克服了传统单连杆柔性机械臂的建模过程中难以得到准确的模型参数的问题。

[0060] 在其中一个实施例中,所述电机包括电枢。所述控制量为待施加于所述电枢的电压。并且,步骤S104包括:将待施加于所述电枢的电压输入至所述电枢,以通过电机驱动所述单连杆柔性机械臂运行。

[0061] 其中,电枢指电机需要外接电源的部分,例如直流电机电枢为转子,交流电机电枢为定子。当向电枢输入相应的电压(即待施加于电枢的电压)后,电机则将电能转换为机械能,从而驱动所述单连杆柔性机械臂进行相应运行。

[0062] 在其中一个实施例中,所述状态空间模型为:

$$[0063] \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = W_f \phi_f(\mathbf{x}) + W_g \phi_g(\mathbf{x})u(t), \quad y = h(\mathbf{x})$$

[0064] 其中, $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量。 W_f 和 W_g 为未知的参数矩阵。 $\phi_f(\mathbf{x})$ 和 $\phi_g(\mathbf{x})$ 为已知的关于状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 的函数。 $u(t)$ 为所述单连杆柔性机械臂的电枢的输入电压。 y 为所述单连杆柔性机械臂的末端位置。 $h(\mathbf{x})$ 表示所述单连杆柔性机械臂的末端位置与所述状态向量之间的映射关系。

[0065] 在其中一个实施例中,基于上述状态空间模型,所述设定估计模型为:

$$[0066] \quad \hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) + \tau \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)u^k - \tau K_x(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k),$$

$$[0067] \quad \hat{W}_f^{k+1} = \hat{W}_f^k - \tau K_f(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$[0068] \quad \hat{W}_g^{k+1} = \hat{W}_g^k - K_g(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_g(\mathbf{x}^k),$$

[0069] 其中, $\hat{\mathbf{x}}$ 为对应于所述状态向量的一个辅助状态向量,且初始值设置为 $\mathbf{x}(0)$ 。 \hat{W}_f 、 \hat{W}_g 分别对应为 W_f 的估计量、 W_g 的估计量。 K_x 、 K_f 及 K_g 均为对角矩阵并用于调整参数 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g 的收敛速度,并且 K_x 、 K_f 及 K_g 的对角元素值都大于零其余元素值为零。本实施例中, K_f 和 K_g 的对角元素值应大于 K_x 的对角元素值,从而保证参数 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g 更好地收敛。参数 τ 表示采样间隔。本实施例中,参数 τ 在实际运用中应尽可能地小,例如 $\tau=0.01$ 秒。上标 k 表示第 k 次迭代。

[0070] 故,在第 k 迭代时,实时采集到状态向量 \mathbf{x}^k 内各元素的值(即各状态量的值),即能利用上述设定估计模型对未知的参数矩阵 W_f 和 W_g 进行估计,从而得出 \hat{W}_f 、 \hat{W}_g ,即未知参数矩阵估计值。

[0071] 可以理解的是,设定估计模型的实现方式不限于上述情况,只要能够对状态空间模型中的未知参数进行估计即可,例如若状态空间模型根据实际应用情况发生了变化,则设定估计模型也要作相应的调整。

[0072] 在其中一个实施例中,基于上述设定估计模型的实现方式,所述自适应近优控制率公式为:

$$[0073] \quad u^k = (TR + \eta(L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^T Q L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^{-1} (Q L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^T (Y_d^k - \hat{Y}^k) \mathbf{v},$$

[0074] 其中,R、Q及T分别为时变最优控制性能指标的对应参数。具体的,时变最优控制性能指标为:

$$[0075] \quad J(t) = \int_0^T (\mathbf{y}_d(t+\tau) - \mathbf{y}(t+\tau))^T Q (\mathbf{y}_d(t+\tau) - \mathbf{y}(t+\tau)) d\tau + \int_0^T \mathbf{u}^T(t+\tau) R \mathbf{u}(t+\tau) d\tau.$$

[0076] 并且,R、Q均为设定的正定对称矩阵,例如R、Q均可以为单位矩阵。T为设定的预测参数,例如可以为0到1之间的正数。 $Y_d^k = [y_d^k, \dot{y}_d^k, \ddot{y}_d^k, \dddot{y}_d^k, \overset{(4)}{y}_d^k]$ 是由第kτ时刻时所述给定轨迹对应的位置及第kτ时刻时所述给定轨迹的1阶至4阶导数值共同构成的向量,其中, y_d^k 为第kτ时刻时所述给定轨迹对应的位置,其余四个元素分别为第kτ时刻时所述给定轨迹的1阶至4阶导数值。此外, $\hat{Y}^k = [y^k, L_f^1 h(\mathbf{x}^k), L_f^2 h(\mathbf{x}^k), L_f^3 h(\mathbf{x}^k), L_f^4 h(\mathbf{x}^k)]$,其中,

$$L_f^1 h(\mathbf{x}^k) = \partial h(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$L_f^2 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^1 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k), \quad L_f^3 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^2 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$L_f^4 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k)$ 。在上述公式中, y^k 表示kτ时刻时所述单连杆柔性机械臂的末端位置。此外, $\hat{W}_f^k, \hat{W}_g^k, L_f^1 h(\mathbf{x}^k), L_f^2 h(\mathbf{x}^k), L_f^3 h(\mathbf{x}^k)$ 及 $L_f^4 h(\mathbf{x}^k)$,表示在第k次迭代时,根据所述未知参数矩阵估计值(即 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g)和所述状态空间模型得到的单连杆柔性机械臂的末端位置的1阶到4阶导数表达式中不含控制输入部分(即u)的估计值。另外, $L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)$,并且, $L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k)$ 表示在第k次迭代时,根据所述未知参数矩阵估计值(即 \hat{W}_f 和 \hat{W}_g)和所述状态空间模型得到的单连杆柔性机械臂的末端位置的4阶导数表达式中含控制输入u的系数的估计值。参数向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^5$,且v包括的第i个元素值为 $v_i = T^{5+i} / (24(5+i) i!)$ 。增益参数 $\eta = T^9 / 5184$ 。另外,上述自适应近优控制率公式最终得到的u为待施加到电枢的电压,以驱动单连杆柔性机械臂沿给定轨迹运行。

[0077] 因此在该实施例,利用实时采集的状态量(包括 \mathbf{x}^k 及 \mathbf{y}^k),结合给定轨迹 $Y_d^k = [y_d^k, \dot{y}_d^k, \ddot{y}_d^k, \dddot{y}_d^k, \overset{(4)}{y}_d^k]$ 、 \hat{W}_f^k, \hat{W}_g^k ,并通过上述自适应近优控制率公式,即可得出待施加于电枢的电压u,进而通过电机驱动单连杆柔性机械臂沿给定轨迹运行,故本发明实施例提供的上述单连杆柔性机械臂控制方法具有实时性、自适应性、近优性。

[0078] 可以理解的是,自适应近优控制率公式的具体实现方式不限于上述情况,只要能够利用给定轨迹、所述未知参数估计值得出控制量,以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行即可。例如若未知的参数或状态空间模型发生变化,则自适应近优控制率公式也会发生相应的变化。

[0079] 接下来,将介绍将所述单连杆柔性机械臂控制方法具体应用于单连杆柔性机械臂的其中一种具体实现方式。其中,需实时采集的状态量的值包括单连杆柔性机械臂电机的角位置及角速度和单连杆柔性机械臂柔性关节的角位置及角速度、单连杆柔性机械臂的末端位置。

[0080] 令 $\theta = x_1, \dot{\theta} = x_2, \alpha = x_3, \dot{\alpha} = x_4$,如图2所示,分别为:单连杆柔性机械臂电机的角位

置及角速度和单连杆柔性机械臂柔性关节的角位置及角速度。该单连杆柔性关节机械臂在参数未知的情况下的状态空间模型为：

$$[0081] \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = c_1 x_3 + c_2 x_2 + c_3 u, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = c_4 x_3 + c_5 x_2 + c_6 u + c_7 \sin(x_1 + x_3), \\ y = x_1 + x_3, \end{cases}$$

[0082] 其中, $c_4 < -c_1, c_2 = -c_5, c_3 = -c_6$ 。y表示该单连杆柔性机械臂末端的位置。u表示单连杆柔性机械臂的电枢的输入电压。该单连杆柔性机械臂的状态空间模型可以进一步表示为, $\dot{\mathbf{x}}(t) = W_f \phi_f(\mathbf{x}) + W_g \phi_g(\mathbf{x})u(t)$, $y = h(\mathbf{x})$, 该状态空间模型中已经知道的参数矩阵为 $\phi_f(\mathbf{x}) = [x_2, x_3, x_4, \sin(x_1 + x_3)]^T$, $\phi_g(\mathbf{x}) = [0, 1, 0, 1]^T$, 包含未知参数的未知参数矩阵为：

$$[0083] \quad W_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c_5 & c_4 & 0 & c_6 \end{bmatrix}, W_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_7 \end{bmatrix}$$

[0084] 根据本发明实施例提供的所述单连杆柔性机械臂控制方法,可先将 $\hat{\mathbf{x}}$ 初始化为 $\mathbf{x}(0)$,并设置参数矩阵 K_f 、 K_g 和 K_x 为一定的对角权矩阵。在进行第k次迭代时,首先通过传感器获得单连杆柔性机械臂的 $x_1^k, x_2^k, x_3^k, x_4^k$ 及对应的末端位置 y^k 。那么,该单连杆柔性机械臂的未知参数矩阵可以通过如下公式(即所述设定估计模型)进行在线估计：

$$[0085] \quad \hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) + \tau \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k) u^k - \tau K_x (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k),$$

$$[0086] \quad \hat{W}_f^{k+1} = \hat{W}_f^k - \tau K_f (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k) \phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$[0087] \quad \hat{W}_g^{k+1} = \hat{W}_g^k - K_g (\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k) \phi_g(\mathbf{x}^k).$$

[0088] 根据上述设定估计模型即可得出未知参数矩阵估计值。之后,设置给定轨迹为 $y_d(t)$,所述自适应近优控制率公式的性能指标中Q和R设置为相应的正定对称矩阵,预测参数T设置为相应的正数。接下来,利用所述自适应近优控制率公式,即 $u^k = (TR + \eta(L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^T QL_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^{-1}(QL_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k))^T(Y_d^k - \hat{Y}^k)\mathbf{v}$ 来计算需施加到电枢的电压 u^k 。其中, Y_d^k 可以根据给定轨迹 $y_d(t)$ 得出。参数

$\hat{Y}^k = [y^k, L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k), L_{\hat{f}}^4h(\mathbf{x}^k)]$ 及 $L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k)$ 可以通过下述公式来进行计算：

$$[0089] \quad \hat{x}_1 = x_2^k + x_4^k = L_{\hat{f}}^1h(\mathbf{x}^k), \quad \hat{y}^k = (\hat{c}_1^k + \hat{c}_4^k)x_3^k + \hat{c}_7^k \sin(x_1^k + x_3^k) = L_{\hat{f}}^2h(\mathbf{x}^k),$$

$$[0090] \quad \hat{y}^k = (\hat{c}_1^k + \hat{c}_4^k)x_4^k + \hat{c}_7^k x_2^k \cos(x_1^k + x_3^k) + \hat{c}_7^k \cos(x_1^k + x_3^k)x_4^k = L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k)$$

$$[0091] \quad \hat{y}^k = (\hat{c}_1^k + \hat{c}_4^k)(c_4^k x_3^k + c_5^k x_2^k + c_7^k \sin(x_1^k + x_3^k)) + \hat{c}_7^k \cos(x_1^k + x_3^k)(c_1^k x_3^k + c_4^k x_3^k + c_7^k \sin(x_1^k + x_3^k)) - \hat{c}_7^k (x_2^k + x_4^k) \sin(x_1^k + x_3^k)(x_2^k + x_4^k) - (\hat{c}_1^k + \hat{c}_4^k)\hat{c}_3^k u^k = L_{\hat{f}}^4h(\mathbf{x}^k) + L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}^3h(\mathbf{x}^k)u^k.$$

[0092] 根据上述 \hat{y}^k 的公式可以得出： $L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k) = -(\hat{c}_1^k + \hat{c}_4^k)\hat{c}_3^k$ ，且 $L_f^4 h(\mathbf{x}^k)$ 的值为 \hat{y}^k 中的其余部分。另外，参数向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^5$ ，且 \mathbf{v} 包括的第 i 个元素值为 $v_i = T^{5+i} / (24(5+i) i!)$ 。增益参数 $\eta = T^9 / 5184$ 。因此，最后即可根据所述自适应近优控制率公式得到在第 k 次迭代后需要施加到单连杆柔性机械臂的电枢的电压，进而控制单连杆柔性机械臂末端跟踪给定轨迹运行。

[0093] 需要说明的是，图1为本发明实施例的方法的流程示意图。应该理解的是，虽然图1的流程图中的各个步骤按照箭头的指示依次显示，但是这些步骤并不是必然按照箭头指示的顺序依次执行。除非本文中有明确的说明，这些步骤的执行并没有严格的顺序限制，其可以以其他的顺序执行。而且，图1中的至少一部分步骤可以包括多个子步骤或者多个阶段，这些子步骤或者阶段并不必然是在同一时刻执行完成，而是可以在不同的时刻执行，其执行顺序也不必然是依次进行，而是可以与其他步骤或者其他步骤的子步骤或者阶段的至少一部分轮流或者交替地执行。

[0094] 实施例二：

[0095] 第二实施例提供了一种单连杆柔性机械臂控制系统，包括以下内容，请参考图3。

[0096] 变量获取模块301，用于实时获取单连杆柔性机械臂的状态量的值。

[0097] 参数估计模块302，用于根据所述状态量的值利用设定估计模型估计所述单连杆柔性机械臂的状态空间模型中的未知的参数，并得到相应的未知参数估计值。

[0098] 控制量计算模块303，用于根据给定轨迹、所述未知参数估计值及自适应近优控制率公式得出控制量，以使得所述控制量能够控制所述单连杆柔性机械臂沿所述给定轨迹运行。

[0099] 轨迹控制模块304，用于利用所述控制量控制所述单连杆柔性机械臂运行。

[0100] 在其中一个实施例中，所述单连杆柔性机械臂包括电机，且所述电机包括电枢；所述控制量为待施加于所述电枢的电压。

[0101] 并且，所述轨迹控制模块304用于将待施加于所述电枢的电压输入至所述电枢，以通过电机驱动所述单连杆柔性机械臂运行。

[0102] 在其中一个实施例中，所述状态空间模型为：

$$[0103] \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = W_f \phi_f(\mathbf{x}) + W_g \phi_g(\mathbf{x})u(t), \quad y = h(\mathbf{x})$$

[0104] 其中， $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量； W_f 和 W_g 为未知的参数矩阵； $\phi_f(\mathbf{x})$ 和 $\phi_g(\mathbf{x})$ 为已知的关于状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 的函数； $u(t)$ 为所述电枢的输入电压； y 为所述单连杆柔性机械臂的末端位置； $h(\mathbf{x})$ 表示所述单连杆柔性机械臂的末端位置与所述状态向量之间的映射关系。

[0105] 在其中一个实施例中，所述设定估计模型为：

$$[0106] \quad \hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) + \tau \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)u^k - \tau K_x(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k),$$

$$[0107] \quad \hat{W}_f^{k+1} = \hat{W}_f^k - \tau K_f(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_f(\mathbf{x}^k),$$

$$[0108] \quad \hat{W}_g^{k+1} = \hat{W}_g^k - K_g(\hat{\mathbf{x}}^k - \mathbf{x}^k)\phi_g(\mathbf{x}^k),$$

[0109] 其中， $\hat{\mathbf{x}}$ 为对应于所述状态向量的一个辅助状态向量，且初始值设置为 $\mathbf{x}(0)$ ； \hat{W}_f 、 \hat{W}_g 分别对应为 W_f 的估计量、 W_g 的估计量； K_x 、 K_f 及 K_g 均为对角权矩阵并用于调整参数

\hat{W}_f 和 \hat{W}_g 的收敛速度,并且 K_x 、 K_f 及 K_g 的对角元素值都大于零其余元素值为零;参数 τ 表示采样间隔;上标 k 表示第 k 次迭代。

[0110] 在其中一个实施例中,所述自适应近优控制率公式为:

$$[0111] \quad u^k = (TR + \eta(L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^T Q L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^{-1} (Q L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k))^T (Y_d^k - \hat{Y}^k) \mathbf{v},$$

[0112] 其中, R 、 Q 及 T 分别为时变最优控制性能指标的对应参数,且 R 、 Q 均为设定的正定对称矩阵, T 为设定的预测参数; $Y_d^k = [y_d^k, \dot{y}_d^k, \ddot{y}_d^k, \ddot{\ddot{y}}_d^k, \ddot{\ddot{\ddot{y}}}_d^k]$ 是由第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹对应的位置及第 $k\tau$ 时刻时所述给定轨迹的1阶至4阶导数值共同构成的向量;此外, $\hat{Y}^k = [y^k, L_f^1 h(\mathbf{x}^k), L_f^2 h(\mathbf{x}^k), L_f^3 h(\mathbf{x}^k), L_f^4 h(\mathbf{x}^k)]$,并且,

$$L_f^1 h(\mathbf{x}^k) = \partial h(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad , \quad L_f^2 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^1 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k) \quad ,$$

$$L_f^3 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^2 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k), \quad L_f^4 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_f^k \phi_f(\mathbf{x}^k); \mathbf{v}^k \text{表示} k\tau \text{时刻时}$$

所述单连杆柔性机械臂的末端位置; $L_g L_f^3 h(\mathbf{x}^k) = \partial L_f^3 h(\mathbf{x}^k) / \partial \mathbf{x}^k \hat{W}_g^k \phi_g(\mathbf{x}^k)$;参数向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^5$,

且 \mathbf{v} 包括的第 i 个元素值为 $v_i = T^{5+i} / (24(5+i) i!)$;增益参数 $\eta = T^9 / 5184$ 。

[0113] 需要说明的是,本实施例提供的单连杆柔性机械臂控制系统与上述单连杆柔性机械臂控制方法一一对应,因此就不再赘述。

[0114] 在本发明所提供的几个实施例中,应该理解到,所揭露的装置和方法,可以通过其它的方式实现。例如,以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,例如,所述单元的划分,仅仅为一种逻辑功能划分,实际实现时可以有另外的划分方式,例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统,或一些特征可以忽略,或不执行。另一点,所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口,装置或单元的间接耦合或通信连接,可以是电性,机械或其它的形式。

[0115] 所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例方案的目的。

[0116] 另外,在本发明各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中,也可以是各个单元单独物理存在,也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。所述集成的单元既可以采用硬件的形式实现,也可以采用软件功能单元的形式实现。

[0117] 所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM, Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM, Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0118] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精

神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

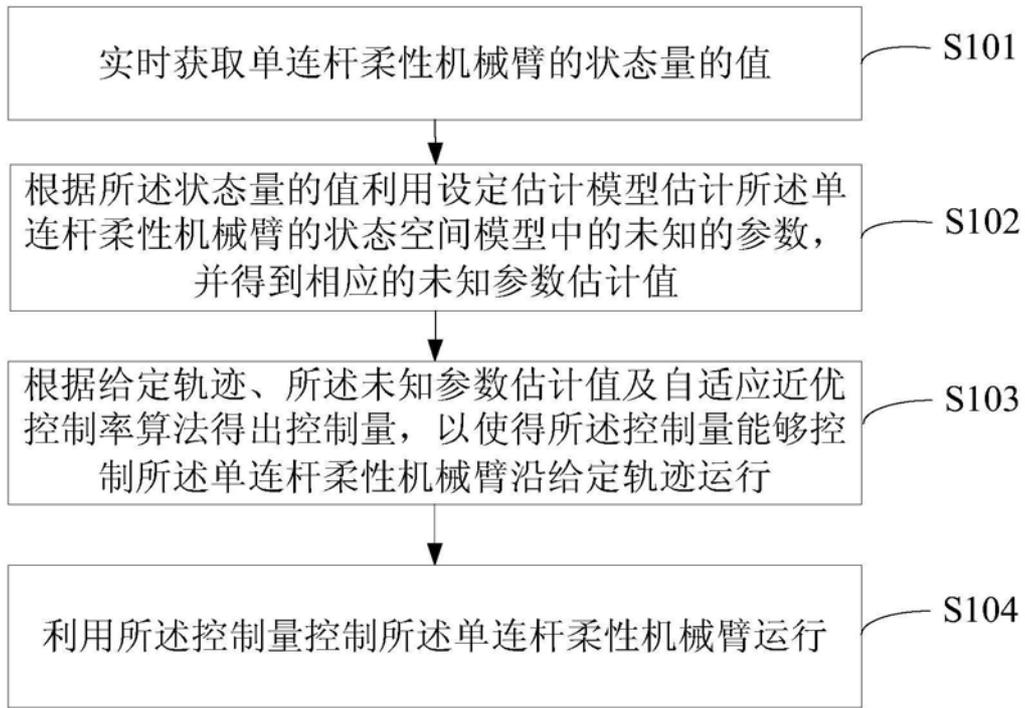


图1

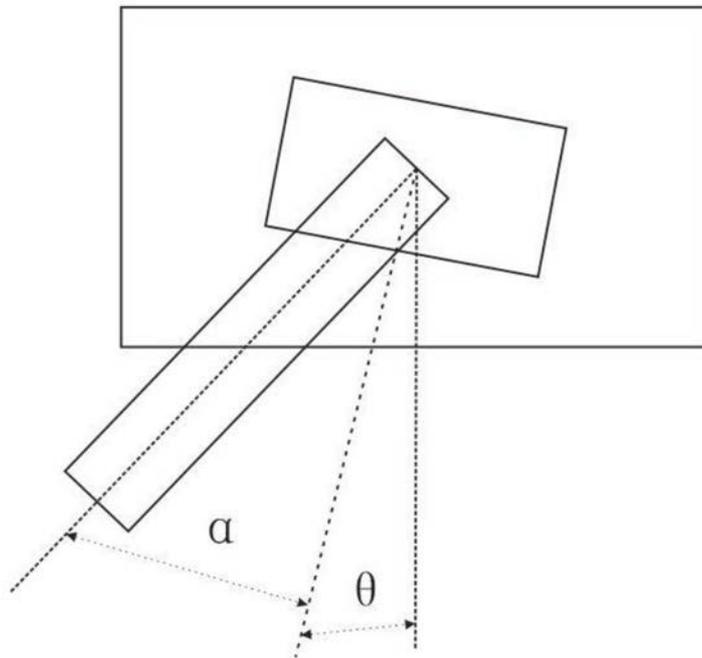


图2

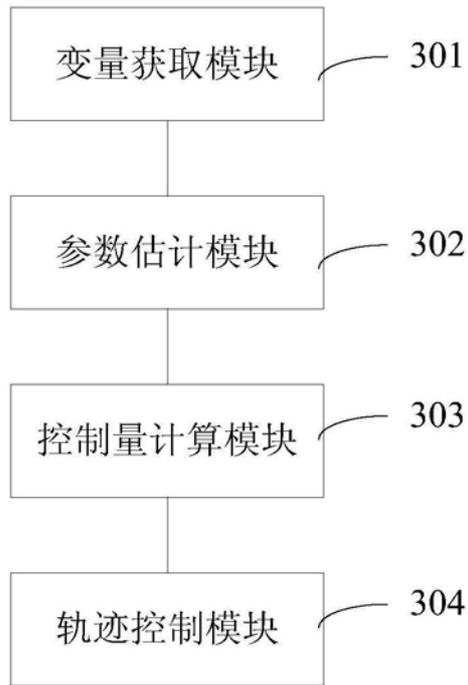


图3