



(21) 申请号 202011467208.6

(22) 申请日 2020.12.14

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113051673 A

(43) 申请公布日 2021.06.29

(73) 专利权人 华南理工大学
地址 510630 广东省广州市天河区五山路
381号
专利权人 中山市华南理工大学现代产业技
术研究院

(72) 发明人 张铁 胡亮亮 邹焱飏 何英武

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限
公司 44102

专利代理师 江裕强

(51) Int.Cl.
G06F 30/17 (2020.01)
G06F 30/27 (2020.01)
G06N 3/126 (2023.01)
G06F 119/14 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 110531707 A, 2019.12.03
CN 109940609 A, 2019.06.28
CN 107918276 A, 2018.04.17
CN 107498562 A, 2017.12.22
CN 110460277 A, 2019.11.15
CN 106994686 A, 2017.08.01
CN 109583093 A, 2019.04.05
CN 111788040 A, 2020.10.16

刘慧芳等.超磁致伸缩执行器位移模型的参
数辨识.《机械工程学报》.2011,第47卷(第15
期),第115-119页.

陈琳等.基于修正Stribeck模型的摩擦补偿
策略.《微特电机》.2019,第47卷(第04期),第66-
70页.

李玲等.栓接结合部在动载荷下的能量耗散
特性.《机械工程学报》.2016,第52卷(第13期),
第141-147页. (续)

审查员 范广坡

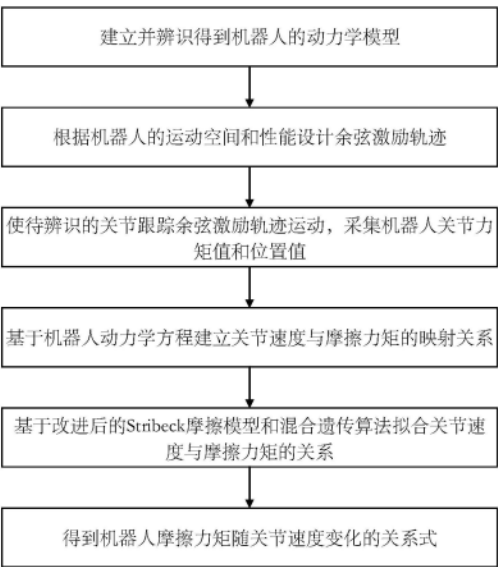
权利要求书4页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方
法

(57) 摘要

本发明公开了一种机器人改进Stribeck摩
擦模型辨识方法。所述方法包括如下步骤:采用
改进Stribeck摩擦模型对机器人关节摩擦力进
行建模,使用不同的余弦激励轨迹依次对机器人
关节进行激励,获得机器人关节摩擦力矩-速度
映射关系;利用模拟退火混合遗传算法,根据得
到的机器人关节摩擦力矩-速度映射关系辨识改
进Stribeck摩擦模型的参数。本发明所提出的改
进Stribeck摩擦模型及其辨识方法实用可行,建
立机器人关节内部摩擦力的准确模型,提高了机
器人动力学模型的精度,同时也可进一步改善机
器人的控制性能。



[接上页]

(56) 对比文件

张建宇等. 基于改进差分进化算法的机器人动力学参数辨识方法研究.《北京联合大学学

报》.2020,第34卷(第01期),第48-56页.

郭敬等. 液压转台摩擦模型优化辨识.《兵工学报》.2010,第31卷(第06期),第855-859页.

1. 一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1、采用改进Stribeck摩擦模型对机器人关节摩擦力进行建模,使用不同的余弦激励轨迹依次对机器人关节进行激励,获得机器人关节摩擦力矩-速度映射关系;

对传统Stribeck摩擦模型进行改进,改进Stribeck摩擦模型如下式所示:

$$\tau_f = \begin{cases} \frac{|\dot{q}_i|}{\dot{q}_{i0}} \cdot F(\dot{q}_{i0}) & |\dot{q}_i| < \dot{q}_{i0} \\ F(\dot{q}_i) & |\dot{q}_i| > \dot{q}_{i0} \end{cases}; \quad (1)$$

$$F(\dot{q}_i) = \left(f_c + (f_s - f_c) \cdot e^{-|\dot{q}_i/v_s|^\gamma} \right) \cdot \text{sign}(\dot{q}_i) + f_v \cdot \dot{q}_i + f_p$$

式中, τ_f 为机器人关节的摩擦力矩, i 为关节序号, $i=1,2,\dots,6$, $\dot{q}_i$ 为关节 i 的角速度, f_c 为库伦摩擦系数, f_s 为最大静摩擦力, v_s 为Stribeck速度阈值, γ 为Stribeck曲线的衰减经验常数,取值为 $0.5 \sim 2$, f_v 为粘性摩擦系数, f_p 为偏置参数, $\dot{q}_{i0}$ 为设定的速度阈值;在Stribeck摩擦模型中添加一个偏置参数 f_p ,能够提高摩擦模型跟实际摩擦力矩的拟合精度;在关节低速区间内引入线性函数连接摩擦模型,能够克服机器人关节在运动换向时产生力矩突变的缺点,提升机器人低速运动控制性能;

S2、利用模拟退火混合遗传算法,根据步骤S1中得到的机器人关节摩擦力矩-速度映射关系辨识改进Stribeck摩擦模型的参数。

2. 根据权利要求1所述的一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法,其特征在于,步骤S1中,所述余弦激励轨迹的参数数值根据所用的机器人运动空间和性能确定,具体如下:

由改进Stribeck摩擦模型式(1)可知,同时采用描图法对Stribeck曲线进行拟合,高速段即高于Stribeck速度阈值 v_s 的拟合直线与纵轴交点值为库伦摩擦系数 f_c ,其斜率为粘性摩擦系数 f_v ,低速段即低于Stribeck速度阈值 v_s 的拟合直线与纵轴交点值为最大静摩擦力 f_s ,其与库伦摩擦系数 f_c 的交点值为Stribeck速度阈值 v_s ,因此低速运动利于辨识参数 f_s 和 v_s ,高速运动则利于辨识参数 f_c 和 f_v 。

3. 根据权利要求2所述的一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法,其特征在于,为了更全面准确地辨识出摩擦参数,不能采用单一的余弦运动轨迹方案,故采用高、低速的余弦轨迹相结合的运动方案,即采用两种不同速度下的余弦轨迹去激励机器人关节,低速余弦轨迹的最高速度为Stribeck速度阈值 v_s 的2到4倍,高速余弦轨迹的最高速度要远远大于Stribeck速度阈值 v_s ,至少为10倍以上。

4. 根据权利要求1所述的一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法,其特征在于,步骤S1中,将机器人关节系统建模为由扭转弹簧连接的二惯量系统,右侧为电机侧,左侧为关节侧, τ_m 为电机输入转矩,由电机侧传递到减速器输入端,减速器将输入力矩放大并传输到输出端, q 为机器人关节的转角, $M(q)$ 为机器人关节的转动惯量;

对于关节型机器人,其机器人动力学方程是机器人关节力矩和关节位置、角速度、角加速度之间的关系,可表达为:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f; \quad (2)$$

式中, q 为机器人关节的转角, $\dot{q}$ 、 $\ddot{q}$ 分别为关节的角速度和角加速度, $M(q)$ 为机器人关

节的转动惯量, $C(q, \dot{q})$ 为与离心力和科氏力有关的力矩, $G(q)$ 为关节重力矩, τ_f 为关节摩擦力矩;

由式 (2) 可知在机器人的动力学方程及转角、角速度、角加速度、关节力矩已知的情况下, 令 $\hat{M}(q)$ 、 $\hat{C}(q, \dot{q})$ 、 $\hat{G}(q)$ 分别为式 (2) 中 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 、 $G(q)$ 相对应变量的辨识值, τ 为机器人关节的实际力矩, 可计算得出机器人关节的摩擦力矩 $\hat{\tau}_f$ 为:

$$\hat{\tau}_f = \tau - \hat{M}(q)\ddot{q} - \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} - \hat{G}(q) \quad (3)。$$

5. 根据权利要求1所述的一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法, 其特征在于, 步骤S1中, 为了辨识关节摩擦模型的摩擦参数, 首先需要建立机器人关节摩擦力矩和所对应关节速度之间的映射关系; 为保证机器人运动速度从零开始均匀变化, 采用机器人跟踪余弦轨迹的运动方案, 采集机器人关节同时刻下的力矩值和位置值, 通过滤波处理与差分运算, 利用式 (3) 来建立速度与关节摩擦力矩映射关系, 具体如下:

在机器人处于空载且外力为零的状态下, 若让机器人其中一个关节单独跟踪余弦轨迹运动, 其它非激励关节呈锁定状态, 则关节的科氏力和离心力为0, 能消除关节科氏力和离心力估计误差对摩擦参数辨识产生的影响, 还能避免多关节同时运动的耦合误差;

取关节激励轨迹为:

$$x(q) = -A \cos(wt); \quad (4)$$

理论速度为:

$$v(q) = A w \sin(wt); \quad (5)$$

加速度为:

$$a(q) = A w^2 \cos(wt); \quad (6)$$

其中, w 代表余弦轨迹的频率, 由上述加速度公式可知, 加速度是与频率 w 的平方成正比的, 为了减小机器人手臂转动惯量 $M(q)$ 估计误差对摩擦模型辨识精度的影响, 选取轨迹 $w \leq 1$ 的余弦轨迹。

6. 根据权利要求5所述的一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法, 其特征在于, 步骤S2中, 在得到机器人关节摩擦力矩和所对应关节速度之间的映射关系数据后, 利用遗传算法来辨识摩擦模型参数, 同时加入模拟退火算法提升算法的搜索效率, 模拟退火混合遗传算法具体包括以下步骤:

步骤S2.1、初始化操作: 将式 (1) 改进Stribeck摩擦模型参数的辨识值: 库伦摩擦系数 $\hat{f}_c$ 、最大静摩擦力 $\hat{f}_s$ 、Stribeck速度阈值 $\hat{v}_s$ 、粘性摩擦系数 $\hat{f}_v$ 、偏置参数 f_p 、速度阈值 $\hat{q}_0$ 转化成向量形式为 $x_s = [\hat{f}_c, \hat{f}_s, \hat{v}_s, \hat{f}_v, f_p, \hat{q}_0]$, 在参数的范围内随机生成初始种群序列 $\{x_k\}_{k=1}^M$, x_k 表示种群中第 k 个个体, 设置进化代数 $g=0$, 最大进化代数 G , 种群规模 M , 交叉参数 Pc_1 , Pc_2 , 变异参数 Pm_1, Pm_2 ;

步骤S2.2、适应度计算: 针对生成的初始种群, 计算各需辨识参数对应种群中每个个体的适应度;

步骤S2.3、选择, 交叉, 变异操作: 基于轮盘赌算法选择适应度高的个体, 再经交叉变异操作产生新一代的种群;

步骤S2.4、模拟退火操作：对经过遗传算法得到的较优解给予扰动后得到新种群，然后对新种群进行模拟退火操作产生新一代的种群；

步骤S2.5、退温操作，精英保留操作：用迄今为止的最优个体替换掉当前种群中最差的个体；

步骤S2.6、判断该种群是否满足终止条件 $g > G$ ， g 为当前进化代数， G 为最大进化代数，若满足终止条件，则从种群进行过程中选出具有最大适应度的个体作为最优解输出，若不满足终止条件则返回步骤S2.2。

7. 根据权利要求6所述的一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法，其特征在于，步骤S2.3中，进行交叉变异操作时，交叉、变异参数选择自适应参数，具体如下：

$$Pc = \begin{cases} Pc_1 - \frac{(Pc_1 - Pc_2) - (f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ Pc_1 & f' < f_{avg} \end{cases}; \quad (7)$$

$$Pm = \begin{cases} Pm_1 - \frac{(Pm_1 - Pm_2) - (f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ Pm_1 & f < f_{avg} \end{cases}$$

式中， f_{max} 为群体中最大适应度值， f_{avg} 为每代群体的平均适应度值， f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值， f 为要变异的个体的适应度值；

交叉方式采用均匀交叉，假设在第 g 代种群的第 k 和 $k+1$ 两个个体 $\mathbf{x}_k^g$ ， $\mathbf{x}_{k+1}^g$ 进行交叉，交叉后两个新个体为：

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k^{g+1} = \beta \mathbf{x}_k^g + (1 - \beta) \mathbf{x}_{k+1}^g \\ \mathbf{x}_{k+1}^{g+1} = \beta \mathbf{x}_{k+1}^g + (1 - \beta) \mathbf{x}_k^g \end{cases}; \quad (8)$$

式中，参数 $\beta \in [0, 1]$ 是常数或随机数， $\mathbf{x}_k^{g+1}$ ， $\mathbf{x}_{k+1}^{g+1}$ 分别为第 $g+1$ 代种群的第 k 和 $k+1$ 两个个体；

变异操作时采用单点变异方式，假设在当前种群中第 k 个个体 $\mathbf{x}_k$ 产生变异，变异后的新个体为：

$$\mathbf{x}'_k = \text{rand}[x_k - s(g)(x_k - L), x_k + s(g)(U - x_k)]; \quad (9)$$

其中， $\text{rand}[a, b]$ 函数代表返回 $[a, b]$ 范围内的一个随机数， $s(g)$ 为变异尺度， $s(g) = 1 - r^{(1-g/G)^c}$ ， g 为当前进化代数， G 为最大进化代数， c 为常数参数，取值为2~4， r 为随机参数， $r \in [0, 1.0]$ ； U 、 L 分别为种群个体 $\mathbf{x}_k$ 的上、下限。

8. 根据权利要求6所述的一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法，其特征在于，步骤S2.4中，在得到经过遗传算法进化后的较优解时，给予扰动得到新种群，其中采用的扰动方式为：

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k^{g+1} = \mathbf{x}_k^g + \xi(U - L) \\ \xi = \text{sgn}(u - 0.5)W[(1 + 1/W)^{|2u-1|} - 1] \end{cases}; \quad (10)$$

其中， $\mathbf{x}_k^g$ 第 g 代种群中的第 k 个个体， $\mathbf{x}_k^{g+1}$ 代表第 $g+1$ 代种群中的第 k 个个体， U 、 L 分别为

种群个体 x_k 的上、下限, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, w 为当前温度, u 为随机参数, $u \in [0, 1.0]$ 。

一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法

技术领域

[0001] 本发明涉及机器人的动力学控制优化领域,主要涉及一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法。

背景技术

[0002] 近年来随着人们对机器人的需求不断上升,机器人的应用范围不断扩大,如应用于打磨、抛光、装配等领域,而且像手动示教、人机共存等操作中,人与机器人的工作空间重叠,因此对机器人的防碰撞等具有更高的要求,在这些应用场景中,往往需要机器人的力感知能力。通常有两种途径实现机器人的力感知,即增加力/力矩传感器或者直接通过检测机器人电机电流而感知机器人的外部力信息。由于力/力矩传感器价格昂贵,目前有很多关于通过检测电机电流而获得关节力矩,利用机器人动力学方程得到机器人的末端受力的研究。机器人关节的运动是通过RV或者谐波减速器将伺服电机的运动传递到手臂,由于减速器各个运动部件的摩擦,在建立机器人的动力学方程中需要考虑到关节传动中的摩擦力。因此,结合机器人关节摩擦模型,可以建立更加精确的机器人动力学模型,以此来提高机器人末端力感知的精度。

[0003] 由于机器人运动学方程存在非线性,关节的运动速度变化较大,如何将满足不同运动速度的较高精度的摩擦模型综合到动力学方程中是机器人推广应用的关键问题之一,故针对机器人关节摩擦进行准确的动力学建模一直是摩擦领域、机器人及其控制领域研究的重要课题。禹鑫焱、詹益安提出了一种六自由度机械臂动力学模型辨识方法(禹鑫焱,詹益安,欧林林,王正安,洪学劲峰.六自由度机械臂动力学模型辨识方法[P].浙江:CN107498562A,2017-12-22),其发明利用改进的牛顿-欧拉方法建立机械臂动力学模型,并基于改进粒子群算法辨识动力学参数,但是采用的是库伦+粘性摩擦模型,该线性摩擦模型在机器人关节从静止到转动、从运动到静止以及变换转向方向等低速运动过程中并不能真实反映摩擦的非线性特性。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服上述背景技术的不足,满足现有的需求,对传统Stribeck摩擦模型进行改进以更好地适用于工业机器人,同时提出一种相应的摩擦模型辨识方法。该方法使用改进后的Stribeck摩擦模型对机器人关节内部摩擦力进行建模,然后使用不同的余弦激励轨迹依次对机器人关节进行激励,建立机器人关节摩擦力矩与关节速度的映射关系,最后,利用混合遗传算法辨识改进后的Stribeck摩擦模型的各个参数。为简化叙述,文中将改进后的Stribeck摩擦模型统一称为改进Stribeck摩擦模型。

[0005] 本发明的目的至少通过如下技术方案之一实现。

[0006] 一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法,包括如下步骤:

[0007] S1、采用改进Stribeck摩擦模型对机器人关节摩擦力进行建模,使用不同的余弦激励轨迹依次对机器人关节进行激励,获得机器人关节摩擦力矩-速度映射关系;

[0008] S2、利用模拟退火混合遗传算法,根据步骤S1中得到的机器人关节摩擦力矩-速度映射关系辨识改进Stribeck摩擦模型的参数。

[0009] 进一步地,步骤S1中,针对机器人实际上的关节摩擦力矩相对于正、负速度之间并不完全对称的问题,同时为解决传统Stribeck摩擦模型在速度为零处不连续,会导致机器人关节在运动换向时产生力矩的突变,影响机器人低速运动控制性能,因此对传统Stribeck摩擦模型进行改进,改进Stribeck摩擦模型如下式所示:

$$[0010] \quad \tau_f = \begin{cases} \frac{|\dot{q}_i|}{\dot{q}_{i0}} \cdot F(\dot{q}_{i0}) & |\dot{q}_i| < \dot{q}_{i0} \\ F(\dot{q}_i) & |\dot{q}_i| > \dot{q}_{i0} \end{cases}; \quad (1)$$

$$F(\dot{q}_i) = \left(f_c + (f_s - f_c) \cdot e^{-|\dot{q}_i/v_s|^\gamma} \right) \cdot \text{sign}(\dot{q}_i) + f_v \cdot \dot{q}_i + f_p$$

[0011] 式中, τ_f 为机器人关节的摩擦力矩, i 为关节序号, $i=1,2,\dots,6$, $\dot{q}_i$ 为关节 i 的角速度, f_c 为库伦摩擦系数, f_s 为最大静摩擦力, v_s 为Stribeck速度阈值, γ 为Stribeck曲线的衰减经验常数,通常取值为0.5~2,此处取值为2, f_v 为粘性摩擦系数, f_p 为偏置参数, $\dot{q}_{i0}$ 为设定的速度阈值;在Stribeck摩擦模型中添加一个偏置参数 f_p ,能够提高摩擦模型跟实际摩擦力矩的拟合精度;在关节低速区间内引入线性函数连接摩擦模型,能够克服机器人关节在运动换向时产生力矩突变的缺点,提升机器人低速运动控制性能。

[0012] 进一步地,步骤S1中,所述余弦激励轨迹的参数数值根据所用的机器人运动空间和性能确定,具体如下:

[0013] 由改进Stribeck摩擦模型式(1)可知,同时采用描图法对Stribeck曲线进行拟合,高速段即高于Stribeck速度阈值 v_s 的拟合直线与纵轴交点值为库伦摩擦系数 f_c ,其斜率为粘性摩擦系数 f_v ,低速段即低于Stribeck速度阈值 v_s 的拟合直线与纵轴交点值为最大静摩擦力 f_s ,其与库伦摩擦系数 f_c 的交点值为Stribeck速度阈值 v_s ,因此低速运动利于辨识参数 f_s 和 v_s ,高速运动则利于辨识参数 f_c 和 f_v 。

[0014] 进一步地,为了更全面准确地辨识出摩擦参数,不能采用单一的余弦运动轨迹方案,故采用高、低速的余弦轨迹相结合的运动方案,即采用两种不同速度下的余弦轨迹去激励机器人关节,低速余弦轨迹的最高速度为Stribeck速度阈值 v_s 的2到4倍,高速余弦轨迹的最高速度要远远大于Stribeck速度阈值 v_s ,至少为10倍以上。

[0015] 进一步地,步骤S1中,将机器人关节系统建模为由扭转弹簧连接的二惯量系统,右侧为电机侧,左侧为关节侧, τ_m 为电机输入转矩,由电机侧传递到减速器输入端,减速器将输入力矩放大并传输到输出端, τ 为关节力矩, q 为机器人关节的转角, τ_f 为关节摩擦力矩, $M(q)$ 为机器人关节的转动惯量。

[0016] 对于关节型机器人,其机器人动力学方程是机器人关节力矩和关节位置、角速度、角加速度之间的关系,可表达为:

$$[0017] \quad \tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f; \quad (2)$$

[0018] 式中, q 为机器人关节的转角, $\dot{q}$ 、 $\ddot{q}$ 分别为关节的角速度和角加速度, $M(q)$ 为机器人关节的转动惯量, $C(q, \dot{q})$ 为与离心力和科氏力有关的力矩, $G(q)$ 为关节重力矩, τ_f 为关节摩擦力矩。

[0019] 由式(2)可知在机器人的动力学方程及转角、角速度、角加速度、关节力矩已知的情况下,令 $\hat{M}(q)$ 、 $\hat{C}(q, \dot{q})$ 、 $\hat{G}(q)$ 分别为式(2)中 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 、 $G(q)$ 相对应变量的辨识值, τ 为机器人关节的实际力矩,可计算得出机器人关节的摩擦力矩 $\hat{\tau}_f$ 为:

$$[0020] \quad \hat{\tau}_f = \tau - \hat{M}(q)\ddot{q} - \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} - \hat{G}(q)。(3)$$

[0021] 进一步地,步骤S1中,为了辨识关节摩擦模型的摩擦参数,首先需要建立机器人关节摩擦力矩和所对应关节速度之间的映射关系;为保证机器人运动速度从零开始均匀变化,故本发明采用机器人跟踪余弦轨迹的运动方案,采集机器人关节同时刻下的力矩值和位置值,通过滤波处理与差分运算,利用式(3)来建立速度与关节摩擦力矩映射关系,具体如下:

[0022] 在机器人处于空载且外力为零的状态下,若让机器人其中一个关节单独跟踪余弦轨迹运动,其它非激励关节呈锁定状态,则关节的科氏力和离心力为0,可以消除关节科氏力和离心力估计误差对摩擦参数辨识产生的影响,还可以避免多关节同时运动的耦合误差。

[0023] 取关节激励轨迹为:

$$[0024] \quad x(q) = -A\cos(wt); \quad (4)$$

[0025] 理论速度为:

$$[0026] \quad v(q) = A\omega\sin(wt); \quad (5)$$

[0027] 加速度为:

$$[0028] \quad a(q) = A\omega^2\cos(wt); \quad (6)$$

[0029] 式(4) — (6)中, w 代表余弦轨迹的频率,由上述加速度公式可知,加速度是与频率 w 的平方成正比的,为了减小机器人手臂转动惯量 $M(q)$ 估计误差对摩擦模型辨识精度的影响,可选取轨迹 $w \leq 1$ 的余弦轨迹。

[0030] 进一步地,步骤S2中,在得到机器人关节摩擦力矩和所对应关节速度之间的映射关系数据后,利用遗传算法来辨识摩擦模型参数,同时加入模拟退火算法提升算法的搜索效率,模拟退火混合遗传算法具体包括以下步骤:

[0031] 步骤S2.1、初始化操作:将式(1)改进Stribeck摩擦模型参数的辨识值:库伦摩擦系数 $\hat{f}_c$ 、最大静摩擦力 $\hat{f}_s$ 、Stribeck速度阈值 $\hat{v}_s$ 、粘性摩擦系数 $\hat{f}_v$ 、偏置参数 f_p 、速度阈值 $\hat{q}_0$ 转化成向量形式为 $\mathbf{x}_s = [\hat{f}_c, \hat{f}_s, \hat{v}_s, \hat{f}_v, \hat{f}_p, \hat{q}_0]$,在参数的范围内随机生成初始种群序列 $\{\mathbf{x}_k\}_{k=1}^M$, $\mathbf{x}_k$ 表示种群中第 k 个个体,设置进化代数 $g=0$,最大进化代数 G ,种群规模 M ,交叉参数 P_{c1} , P_{c2} ,变异参数 P_{m1} , P_{m2} ;

[0032] 步骤S2.2、适应度计算:针对生成的初始种群,计算各需辨识参数对应种群中每个个体的适应度;

[0033] 步骤S2.3、选择,交叉,变异操作:基于轮盘赌算法选择适应度高的个体,再经交叉变异操作产生新一代的种群;

[0034] 步骤S2.4、模拟退火操作:对经过遗传算法得到的较优解给予扰动后得到新种群,然后对新种群进行模拟退火操作产生新一代的种群;

[0035] 步骤S2.5、退温操作,精英保留操作:用迄今为止的最优个体替换掉当前种群中最差的个体;

[0036] 步骤S2.6、判断该种群是否满足终止条件 $g > G$, g 为当前进化代数, G 为最大进化代数,若满足终止条件,则从种群进行过程中选出具有最大适应度的个体作为最优解输出,若不满足终止条件则返回步骤S2.2。

[0037] 进一步地,步骤S2.3中,进行交叉变异操作时,交叉、变异参数选择自适应参数,具体如下:

$$[0038] \quad \begin{aligned} Pc &= \begin{cases} Pc_1 - \frac{(Pc_1 - Pc_2) - (f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ Pc_1 & f' < f_{avg} \end{cases}; \\ Pm &= \begin{cases} Pm_1 - \frac{(Pm_1 - Pm_2) - (f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ Pm_1 & f < f_{avg} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

[0039] 式中, f_{max} 为群体中最大适应度值, f_{avg} 为每代群体的平均适应度值, f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值, f 为要变异的个体的适应度值;

[0040] 交叉方式采用均匀交叉,假设在第 g 代种群的第 k 和 $k+1$ 两个个体 $\mathbf{x}_k^g$, $\mathbf{x}_{k+1}^g$ 进行交叉,交叉后两个新个体为:

$$[0041] \quad \begin{cases} \mathbf{x}_k^{g+1} = \beta \mathbf{x}_k^g + (1 - \beta) \mathbf{x}_{k+1}^{g+1} \\ \mathbf{x}_{k+1}^{g+1} = \beta \mathbf{x}_{k+1}^g + (1 - \beta) \mathbf{x}_k^g \end{cases}; \quad (8)$$

[0042] 式中,参数 $\beta \in [0, 1]$ 是常数或随机数, $\mathbf{x}_k^{g+1}$, $\mathbf{x}_{k+1}^{g+1}$ 分别为第 $g+1$ 代种群的第 k 和 $k+1$ 两个个体;

[0043] 变异操作时采用单点变异方式,假设在当前种群中第 k 个个体 $\mathbf{x}_k$ 产生变异,变异后的新个体为:

$$[0044] \quad \mathbf{x}'_k = \text{rand}[\mathbf{x}_k - s(g)(\mathbf{x}_k - L), \mathbf{x}_k + s(g)(U - \mathbf{x}_k)]; \quad (9)$$

[0045] 式中, $\text{rand}[a, b]$ 函数代表返回 $[a, b]$ 范围内的一个随机数, $s(g)$ 为变异尺度, $s(g) = 1 - r^{(1-g/G)^c}$, g 为当前进化代数, G 为最大进化代数, c 为常数参数,一般 $c = 2 \sim 4$, r 为随机参数, $r \in [0, 1.0]$; U 、 L 分别为种群个体 $\mathbf{x}_k$ 的上、下限。

[0046] 进一步地,步骤S2.4中,在得到经过遗传算法进化后的较优解时,给予扰动得到新种群,其中采用的扰动方式为:

$$[0047] \quad \begin{cases} \mathbf{x}_k^{g+1} = \mathbf{x}_k^g + \xi(U - L) \\ \xi = \text{sgn}(u - 0.5)W \left[(1 + 1/W)^{|2u-1|} - 1 \right]; \end{cases} \quad (10)$$

[0048] 式中, $\mathbf{x}_k^g$ 第 g 代种群中的第 k 个个体, $\mathbf{x}_k^{g+1}$ 代表第 $g+1$ 代种群中的第 k 个个体, U 、 L 分别为种群个体 $\mathbf{x}_k$ 的上、下限, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, W 为当前温度, u 为随机参数, $u \in [0, 1.0]$ 。

[0049] 相比于现有技术,本发明的优点在于:

[0050] 本发明实现了使用改进Stribeck摩擦模型对机器人关节内部摩擦力进行建模,同时基于混合遗传算法实现了改进Stribeck摩擦模型的参数辨识,使得基于改进Stribeck摩

擦模型的动力学模型能够更好地预测机器人运动过程中的力矩变化,可进一步提高机器人的控制性能。

附图说明

- [0051] 图1是本发明实施例中所使用的机器人实验平台。
 [0052] 图2是本发明实施例中改进Stribeck摩擦模型参数辨识方法的流程图。
 [0053] 图3是改进Stribeck摩擦模型的示意图。
 [0054] 图4是采用描图法对Stribeck曲线进行拟合的示意图。
 [0055] 图5是机器人关节系统结构示意图。
 [0056] 图6是模拟退火混合遗传算法的流程图。
 [0057] 图7是本发明实施例中关节1的改进Stribeck摩擦模型拟合图。
 [0058] 图8是本发明实施例中关节1的力矩拟合图。

具体实施方式

[0059] 为使本发明的目的、技术方案和优点表达得更加清楚明白,下面结合附图及具体实施例对本发明再作进一步详细的说明。

[0060] 实施例:

[0061] 使用广州数控RB08A3型机器人研究各关节的摩擦力矩特性,机器人实验平台如图1所示。使用装载实时控制系统的工控机作为上位机,并采用EtherCat协议进行通信,并通过控制柜给伺服驱动器发送脉冲的方式来控制机器人各轴的伺服电机运动。实验中关节的力矩信号通过伺服系统的电流环采样得到,机器人的关节转角通过关节编码盘换算得到,机器人控制和采样周期都为1ms。

[0062] 一种机器人改进Stribeck摩擦模型辨识方法,如图2所示,包括如下步骤:

[0063] S1、采用改进Stribeck摩擦模型对机器人关节摩擦力进行建模,使用不同的余弦激励轨迹依次对机器人关节进行激励,获得机器人关节摩擦力矩-速度映射关系;

[0064] 对传统Stribeck摩擦模型进行改进,改进Stribeck摩擦模型示意图如图3所示,数学表达式为:

$$[0065] \quad \tau_f = \begin{cases} \frac{|\dot{q}_i|}{\dot{q}_{i0}} \cdot F(\dot{q}_{i0}) & |\dot{q}_i| < \dot{q}_{i0} \\ F(\dot{q}_i) & |\dot{q}_i| > \dot{q}_{i0} \end{cases}; \quad (1)$$

$$F(\dot{q}_i) = \left(f_c + (f_s - f_c) \cdot e^{-|\dot{q}_i/v_s|^\gamma} \right) \cdot \text{sign}(\dot{q}_i) + f_v \cdot \dot{q}_i + f_p$$

[0066] 式中, τ_f 为机器人关节的摩擦力矩, i 为关节序号, $i=1,2,\dots,6$, $\dot{q}_i$ 为关节 i 的角速度, f_c 为库伦摩擦系数, f_s 为最大静摩擦力, v_s 为Stribeck速度阈值, γ 为Stribeck曲线的衰减经验常数,通常取值为0.5~2,此处取值为2, f_v 为粘性摩擦系数, f_p 为偏置参数, $\dot{q}_{i0}$ 为设定的速度阈值;在Stribeck摩擦模型中添加一个偏置参数 f_p , 能够提高摩擦模型跟实际摩擦力矩的拟合精度;在关节低速区间内引入线性函数连接摩擦模型,能够克服机器人关节在运动换向时产生力矩突变的缺点,提升机器人低速运动控制性能。

[0067] 所述余弦激励轨迹的参数数值根据所用的机器人运动空间和性能确定,具体如

下:

[0068] 由改进Stribeck摩擦模型式(1)可知,同时采用描图法对Stribeck曲线进行拟合,如图4所示,高速段即高于Stribeck速度阈值 v_s 的拟合直线与纵轴交点值为库伦摩擦系数 f_c ,其斜率为粘性摩擦系数 f_v ,低速段即低于Stribeck速度阈值 v_s 的拟合直线与纵轴交点值为最大静摩擦力 f_s ,其与库伦摩擦系数 f_c 的交点值为Stribeck速度阈值 v_s ,因此低速运动利于辨识参数 f_s 和 v_s ,高速运动则利于辨识参数 f_c 和 f_v 。

[0069] 为了更全面准确地辨识出摩擦参数,不能采用单一的余弦运动轨迹方案,故采用高、低速的余弦轨迹相结合的运动方案,即采用两种不同速度下的余弦轨迹去激励机器人关节,低速余弦轨迹的最高速度为Stribeck速度阈值 v_s 的2到4倍,高速余弦轨迹的最高速度要远远大于Stribeck速度阈值 v_s ,至少为10倍以上。

[0070] 将机器人关节系统建模为由扭转弹簧连接的二惯量系统,结构示意图如图5所示,右侧为电机侧,左侧为关节侧, τ_m 为电机输入转矩,由电机侧传递到减速器输入端,减速器将输入力矩放大并传输到输出端, τ 为关节力矩, q 为机器人关节的转角, τ_f 为关节摩擦力矩, $M(q)$ 为机器人关节的转动惯量。

[0071] 对于关节型机器人,其机器人动力学方程是机器人关节力矩和关节位置、角速度、角加速度之间的关系,可表达为:

$$[0072] \quad \tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f; \quad (2)$$

[0073] 式中, q 为机器人关节的转角, $\dot{q}$ 、 $\ddot{q}$ 分别为关节的角速度和角加速度, $M(q)$ 为机器人关节的转动惯量, $C(q, \dot{q})$ 为与离心力和科氏力有关的力矩, $G(q)$ 为关节重力矩, τ_f 为关节摩擦力矩。

[0074] 由式(2)可知在机器人的动力学方程及转角、角速度、角加速度、关节力矩已知的情况下,令 $\hat{M}(q)$ 、 $\hat{C}(q, \dot{q})$ 、 $\hat{G}(q)$ 分别为式(2)中 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 、 $G(q)$ 相对应变量的辨识值, τ 为机器人关节的实际力矩,可计算得出机器人关节的摩擦力矩 $\hat{\tau}_f$ 为:

$$[0075] \quad \hat{\tau}_f = \tau - \hat{M}(q)\ddot{q} - \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} - \hat{G}(q); \quad (3)$$

[0076] 为了辨识关节摩擦模型的摩擦参数,首先需要建立机器人关节摩擦力矩和所对应关节速度之间的映射关系;为保证机器人运动速度从零开始均匀变化,故本发明采用机器人跟踪余弦轨迹的运动方案,采集机器人关节同时刻下的力矩值和位置值,通过滤波处理与差分运算,利用式(3)来建立速度与关节摩擦力矩映射关系,具体如下:

[0077] 在机器人处于空载且外力为零的状态下,若让机器人其中一个关节单独跟踪余弦轨迹运动,其它非激励关节呈锁定状态,则关节的科氏力和离心力为0,可以消除关节科氏力和离心力估计误差对摩擦参数辨识产生的影响,还可以避免多关节同时运动的耦合误差。

[0078] 取关节激励轨迹为:

$$[0079] \quad x(q) = -A \cos(wt); \quad (4)$$

[0080] 理论速度为:

$$[0081] \quad v(q) = A w \sin(wt); \quad (5)$$

[0082] 加速度为:

[0083] $a(q) = Aw^2 \cos(wt)$; (6)

[0084] 式(4) — (6)中, A代表余弦轨迹的幅值, w代表余弦轨迹的频率, 由上述加速度公式可知, 加速度是与频率w的平方成正比的, 为了减小机器人手臂转动惯量M(q)估计误差对摩擦模型辨识精度的影响, 可选取轨迹 $w \leq 1$ 的余弦轨迹。

[0085] 本实施例中, 以机器人第1关节进行辨识实验, 将机器人其余关节分别锁定在其对应的零位位置, 设置机器人的第1关节运动轨迹分别为 $q_{11} = \pi/4 + 0.2 * (\cos 0.08\pi t - 1)$ 、 $q_{12} = \pi/4 + 0.8 * (\cos 0.2\pi t - 1)$, 重复运动10次后, 采集机器人关节同时刻下的转角数据及其相对应的力矩数据, 对其进行平均化和滤波处理, 再采用中心差分法对处理后的转角数据进行微分运算得到相对应的角速度和角加速度信息, 利用式(3)计算得到在转速序列 $\{\dot{q}_1\}_{j=1}^N$ 下相对应的实际摩擦力矩 $\{F_1\}_{j=1}^N$ 数据, 将两个运动轨迹所处理得到的数据相结合, 如图7里的黑色实线曲线所示。

[0086] 需要辨识的摩擦参数有 $\mathbf{x}_s = [\hat{f}_c, \hat{f}_s, \hat{v}_s, \hat{f}_v, \hat{f}_p, \hat{q}_0]$, 基于MATLAB语言进行混合遗传算法的编程实现, 从而实现改进Stribeck摩擦模型对机器人关节内部实际摩擦力矩的拟合。

[0087] S2、利用模拟退火混合遗传算法, 根据步骤S1中得到的机器人关节摩擦力矩-速度映射关系辨识改进Stribeck摩擦模型的参数。

[0088] 在得到机器人关节摩擦力矩和所对应关节速度之间的映射关系数据后, 利用遗传算法来辨识摩擦模型参数, 同时加入模拟退火算法提升算法的搜索效率, 如图6所示, 模拟退火混合遗传算法具体包括以下步骤:

[0089] 步骤S2.1、初始化操作: 将式(1)改进Stribeck摩擦模型参数的辨识值: 库伦摩擦系数 $\hat{f}_c$ 、最大静摩擦力 $\hat{f}_s$ 、Stribeck速度阈值 $\hat{v}_s$ 、粘性摩擦系数 $\hat{f}_v$ 、偏置参数 $\hat{f}_p$ 、速度阈值 $\hat{q}_0$ 转化成向量形式为 $\mathbf{x}_s = [\hat{f}_c, \hat{f}_s, \hat{v}_s, \hat{f}_v, \hat{f}_p, \hat{q}_0]$, 在参数的范围内随机生成初始种群序列 $\{\mathbf{x}_k\}_{k=1}^M$, $\mathbf{x}_k$ 表示种群中第k个个体, 设置进化代数 $g=0$, 最大进化代数G, 种群规模M, 交叉参数 Pc_1, Pc_2 , 变异参数 Pm_1, Pm_2 ;

[0090] 步骤S2.2、适应度计算: 针对生成的初始种群, 计算各需辨识参数对应种群中每个个体的适应度;

[0091] 步骤S2.3、选择, 交叉, 变异操作: 基于轮盘赌算法选择适应度高的个体, 再经交叉变异操作产生新一代的种群;

[0092] 进行交叉变异操作时, 交叉、变异参数选择自适应参数, 具体如下:

$$[0093] \quad \begin{aligned} Pc &= \begin{cases} Pc_1 - \frac{(Pc_1 - Pc_2) - (f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ Pc_1 & f' < f_{avg} \end{cases}; \\ Pm &= \begin{cases} Pm_1 - \frac{(Pm_1 - Pm_2) - (f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ Pm_1 & f < f_{avg} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

[0094] 式中, $f_{\max}$ 为群体中最大适应度值, f_{avg} 为每代群体的平均适应度值, f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值, f 为要变异的个体的适应度值;

[0095] 交叉方式采用均匀交叉, 假设在第 g 代种群的第 k 和 $k+1$ 两个个体 $\mathbf{x}_k^g$, $\mathbf{x}_{k+1}^g$ 进行交叉, 交叉后两个新个体为:

$$[0096] \quad \begin{cases} \mathbf{x}_k^{g+1} = \beta \mathbf{x}_k^g + (1-\beta) \mathbf{x}_{k+1}^g; \\ \mathbf{x}_{k+1}^{g+1} = \beta \mathbf{x}_{k+1}^g + (1-\beta) \mathbf{x}_k^g; \end{cases} \quad (8)$$

[0097] 式中, 参数 $\beta \in [0, 1]$ 是常数或随机数, $\mathbf{x}_k^{g+1}$, $\mathbf{x}_{k+1}^{g+1}$ 分别为第 $g+1$ 代种群的第 k 和 $k+1$ 两个个体;

[0098] 变异操作时采用单点变异方式, 假设在当前种群中第 k 个个体 $\mathbf{x}_k$ 产生变异, 变异后的新个体为:

$$[0099] \quad \mathbf{x}'_k = \text{rand}[\mathbf{x}_k - s(g)(\mathbf{x}_k - L), \mathbf{x}_k + s(g)(U - \mathbf{x}_k)]; \quad (9)$$

[0100] 式中, $\text{rand}[a, b]$ 函数代表返回 $[a, b]$ 范围内的一个随机数, $s(g)$ 为变异尺度, $s(g) = 1 - r^{(1-g/G)^c}$, g 为当前进化代数, G 为最大进化代数, c 为常数参数, 一般 $c = 2 \sim 4$, r 为随机参数, $r \in [0, 1.0]$; U 、 L 分别为种群个体 $\mathbf{x}_k$ 的上、下限。

[0101] 步骤S2.4、模拟退火操作: 对经过遗传算法得到的较优解给予扰动后得到新种群, 然后对新种群进行模拟退火操作产生新一代的种群;

[0102] 在得到经过遗传算法进化后的较优解时, 给予扰动得到新种群, 其中采用的扰动方式为:

$$[0103] \quad \begin{cases} \mathbf{x}_k^{g+1} = \mathbf{x}_k^g + \xi(U - L) \\ \xi = \text{sgn}(u - 0.5)W[(1 + 1/W)^{2u-1} - 1] \end{cases} \quad (10)$$

[0104] 式中, $\mathbf{x}_k^g$ 第 g 代种群中的第 k 个个体, $\mathbf{x}_k^{g+1}$ 代表第 $g+1$ 代种群中的第 k 个个体, U 、 L 分别为种群个体 $\mathbf{x}_k$ 的上、下限, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, W 为当前温度, u 为随机参数, $u \in [0, 1.0]$ 。

[0105] 步骤S2.5、退温操作, 精英保留操作: 用迄今为止的最优个体替换掉当前种群中最差的个体;

[0106] 步骤S2.6、判断该种群是否满足终止条件 $g > G$, g 为当前进化代数, G 为最大进化代数, 若满足终止条件, 则从种群进行过程中选出具有最大适应度的个体作为最优解输出, 若不满足终止条件则返回步骤S2.2。

[0107] 本实施例中, 在利用模拟退火混合遗传算法进行参数辨识时, 取种群规模 $M = 100$, 最大遗传代数 $T = 500$, 交叉参数 $P_{c1} = 0.9$, $P_{c2} = 0.6$, 变异参数 $P_{m1} = 0.1$, $P_{m2} = 0.001$, 冷却因子 $k = 0.99$, 种群搜索空间设置为 $f_c \in [5, 20]$, $f_s \in [15, 50]$, $f_v \in [10, 40]$, $v_s \in [0.001, 0.1]$, $f_p \in [-1, 1]$, $\dot{q}_0 \in [0, 0.1]$ 。

[0108] 该算法采用的是十进制浮点数形式, 故不需要进行编码和解码操作。将待辨识的摩擦参数转化成向量形式为 $\mathbf{x}_s = [\hat{f}_c, \hat{f}_s, \hat{v}_s, \hat{f}_v, \hat{f}_p, \hat{q}_0]$ 。

[0109] 定义摩擦力矩的误差为:

$$[0110] \quad e(\mathbf{x}_s, \dot{q}_i) = F_i - \tau_f(\mathbf{x}_s, \dot{q}_i); \quad (11)$$

[0111] 式中, F_i 为实际摩擦力矩, $\tau_f(\mathbf{x}_s, \dot{q}_i)$ 为辨识摩擦力矩,

$$[0112] \quad \tau_f(\mathbf{x}_s, \dot{q}_i) = \left[\hat{f}_c + (\hat{f}_s - \hat{f}_c) \cdot \exp\left(-(\dot{q}_i / \hat{v}_s)^2\right) \right] \cdot \text{sign}(\dot{q}_i) + \hat{f}_v \cdot \dot{q}_i + \hat{f}_p; \quad (12)$$

[0113] 定义目标函数为

$$[0114] \quad J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N e^2(\mathbf{x}_s, \dot{q}_{ij}); \quad (13)$$

[0115] 式中, N 为采样次数, 则辨识问题变为极小化目标函数 J 。

[0116] 在上述的参数范围内随机生成初始种群后, 对初始种群进行选择、交叉和变异等遗传操作产生新种群, 给予新种群一定的扰动后再进行模拟退火操作和精英保留操作, 通过迭代计算得到优化个体并检测进化代数进行终止条件判断, 当满足终止条件 ($g > G$), 则输出全局最优解; 否则, 继续进行迭代优化。

[0117] 最终辨识的结果为: $f_c = 11.64$, $f_s = 23.19$, $v_s = 0.02767$, $\gamma = 2$, $f_v = 27.88$, $f_p = 0.47$, $q_0 = 0.01$ 。

[0118] 辨识得到改进Stribeck摩擦模型参数后, 将辨识参数所对应的摩擦力矩-速度曲线拟合结果绘于图7, 其中黑色实线曲线为实际摩擦力矩, 黑色虚线曲线为利用辨识值所计算得到的摩擦力矩。从图7中可以看出, 辨识得到的计算摩擦力矩与实际摩擦力矩两者基本吻合。

[0119] 为验证所辨识摩擦模型参数的准确性, 将关节1跟踪二级傅里叶级数轨迹 $0.3\cos 0.1\pi t + 0.6\sin 0.1\pi t + 0.1\cos 0.2\pi t - 0.05\sin 0.2\pi t$, 采集数据并进行滤波处理, 将关节1的实际关节力矩绘于图8中的黑色实线曲线所示, 以库伦+粘性摩擦模型为基础所计算得出的关节力矩为图8中的黑色间隔虚线曲线所示, 以改进Stribeck摩擦模型为基础所计算得出的关节力矩为图8中的黑色点状虚线曲线所示。从图8中可明显看出以改进Stribeck摩擦模型为基础的计算关节力矩与实际关节力矩拟合的更好, 说明本发明方法可行实用。

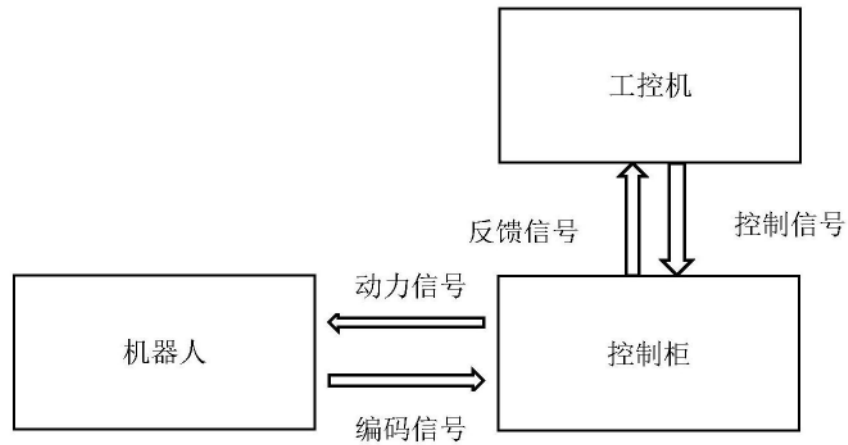


图1

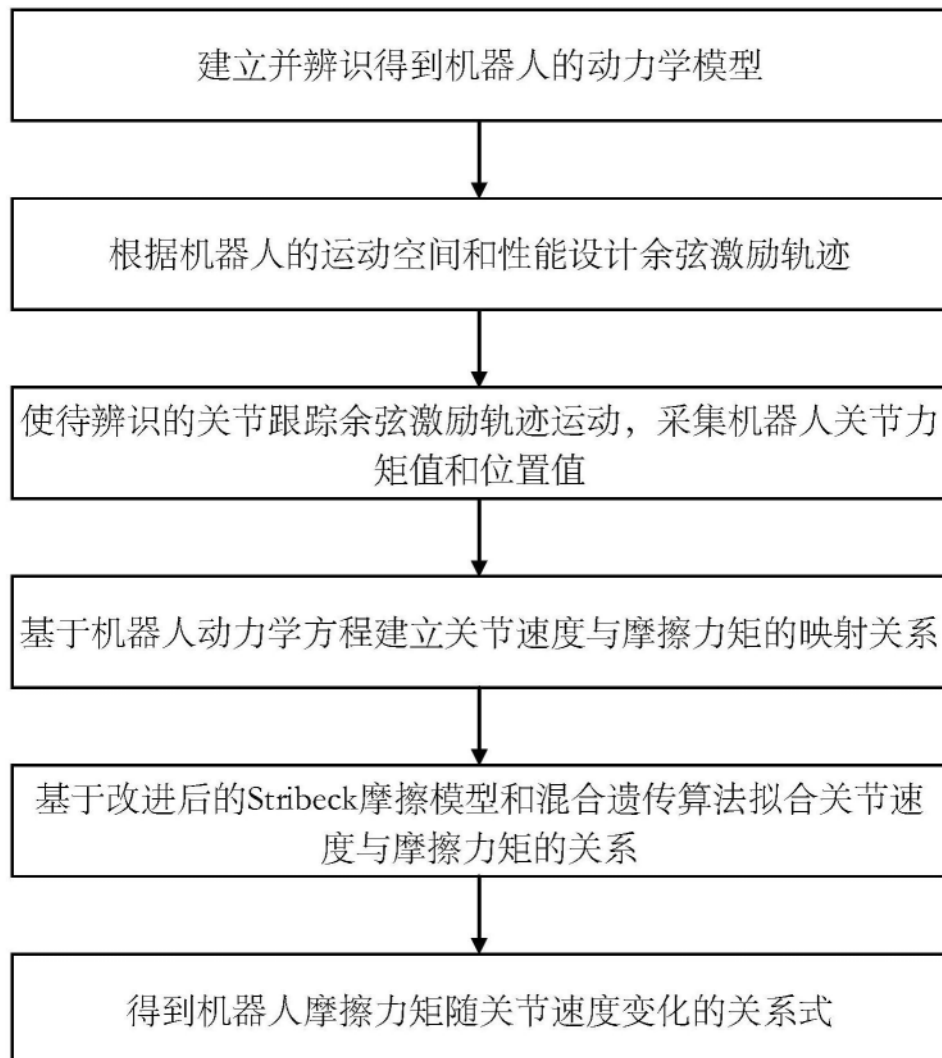


图2

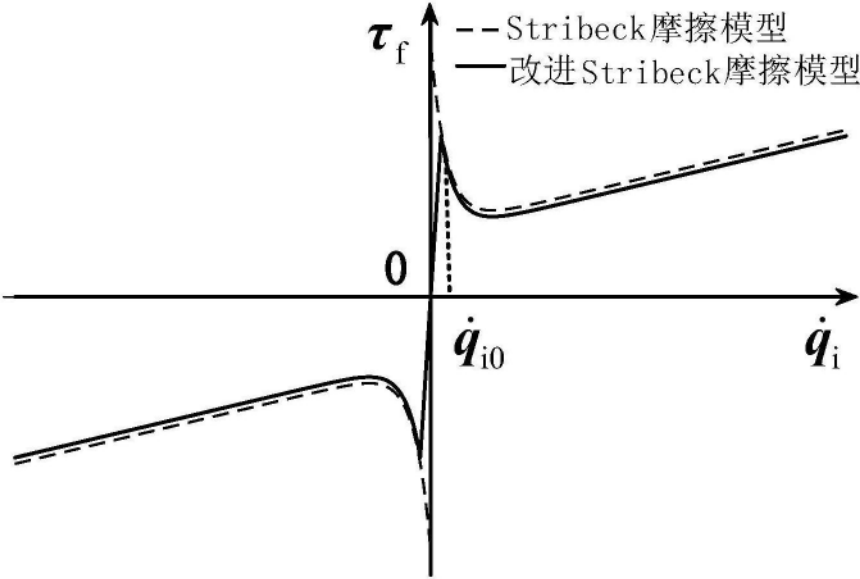


图3

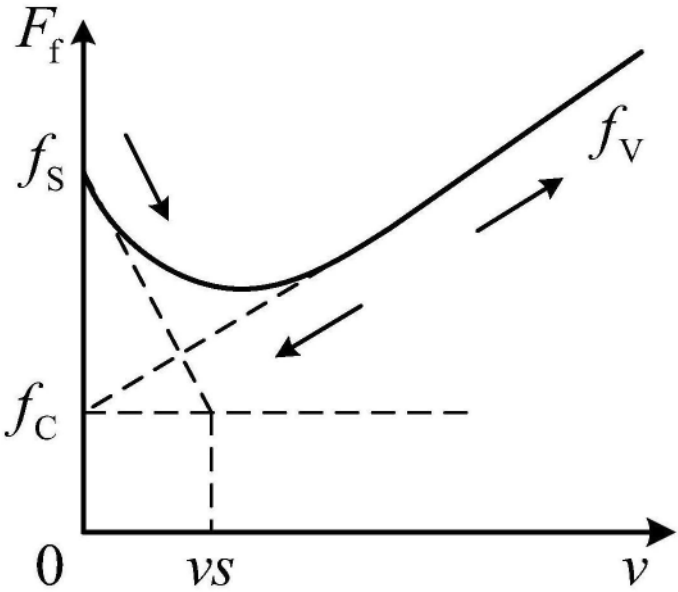


图4

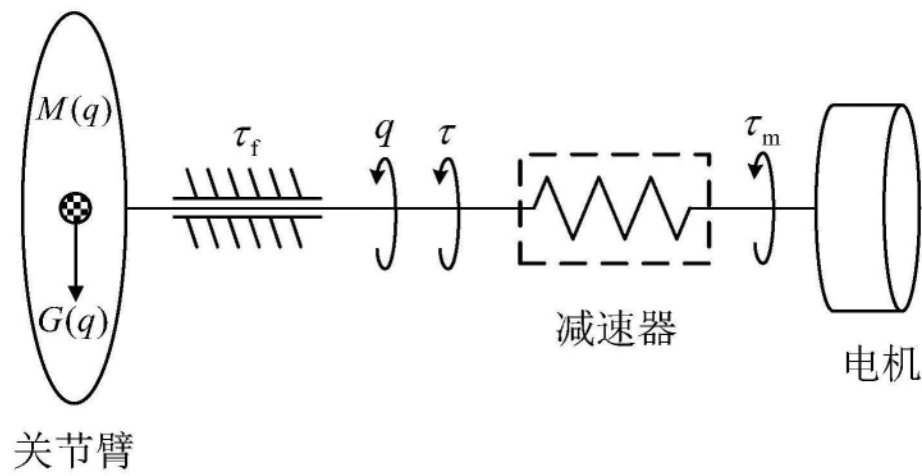


图5

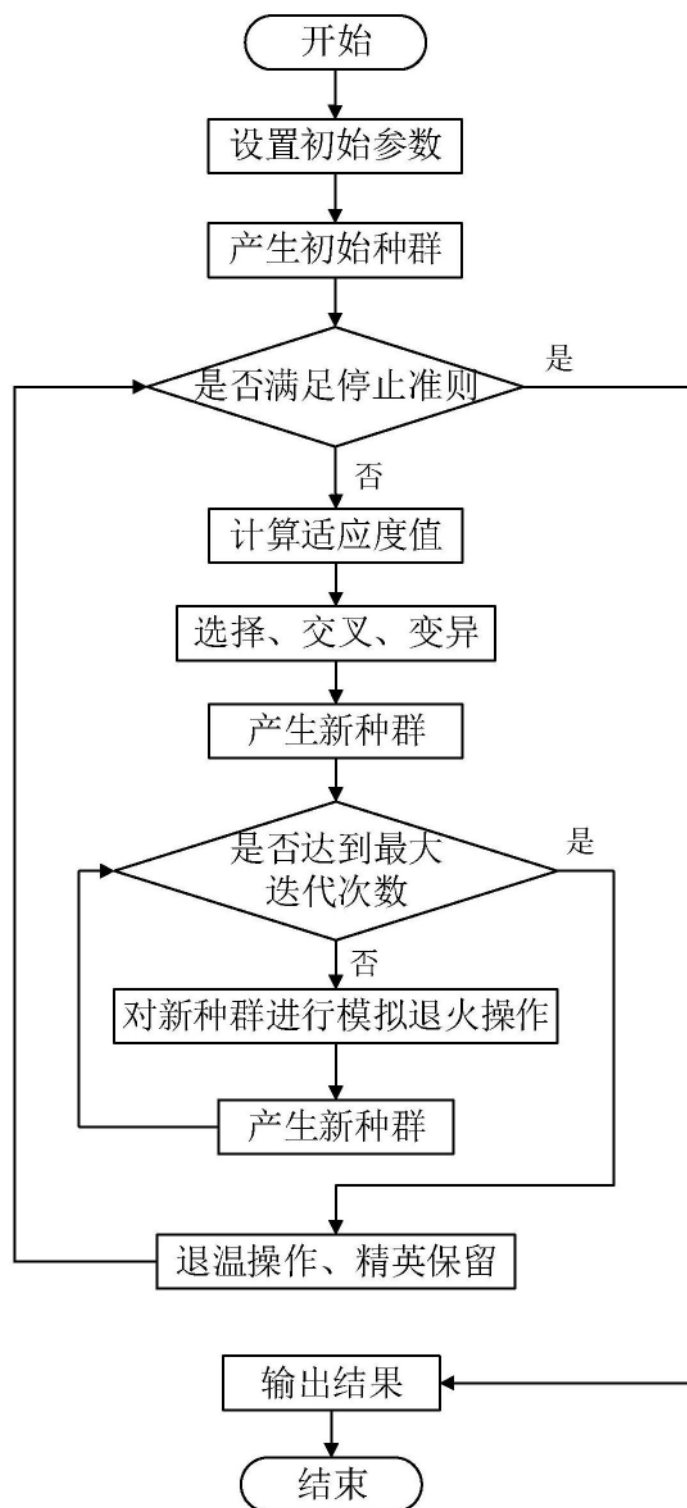


图6

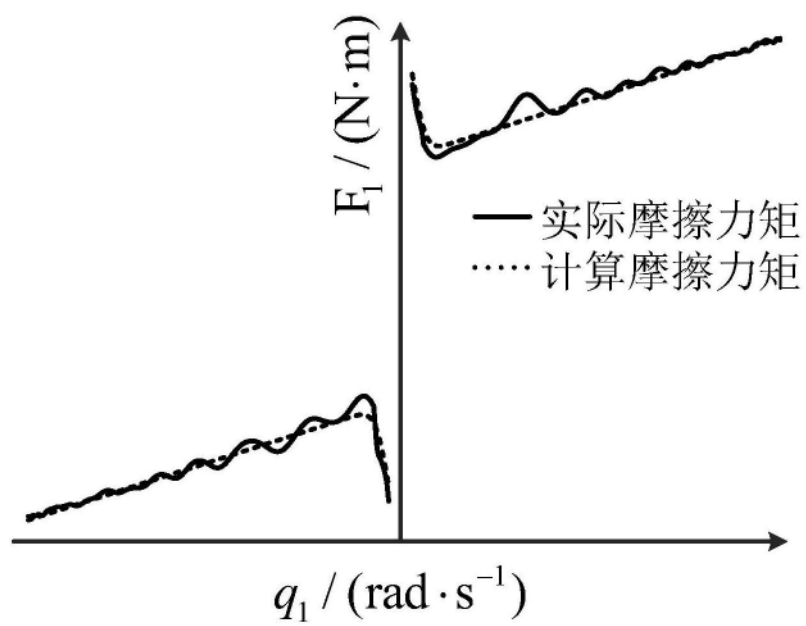


图7

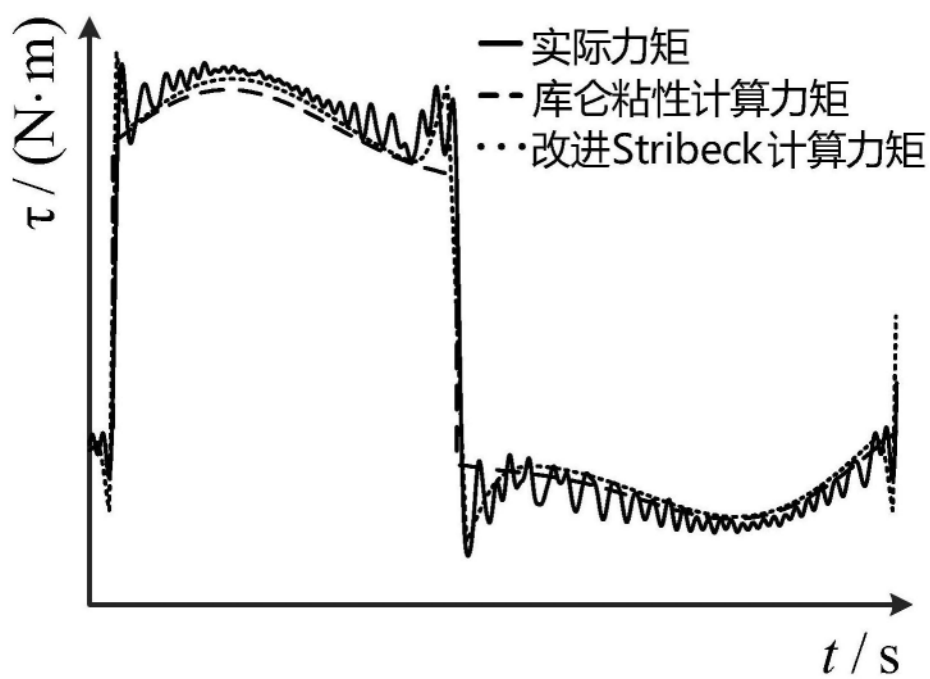


图8