

基于复合粒子群自适应液压伺服系统力跟踪控制与试验

苏文海¹, 李冰¹, 闫聪杰¹, 朱光强³, 袁立鹏², 息晓琳¹, 何景峰²

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨博实自动化股份有限公司, 哈尔滨 150078)

摘要: 为提高液压伺服系统力跟踪控制性能, 针对不同环境模型及变期望力条件下, 液压伺服系统末端位置力跟踪存在稳态误差及动态特性差问题, 提出一种复合粒子群自适应阻抗控制策略。在建立液压伺服系统数学模型和阻抗模型基础上, 根据环境刚度及力偏差, 采用模糊算法确定阻抗参数范围, 结合莱维飞行粒子群快速通过局部与全局搜索确定不同环境刚度下的阻抗参数, 采用三次样条插值拟合阻抗参数随环境刚度变化方程; 分析末端位置力跟踪稳态误差原因及并建立数学模型, 根据末端位置力及当前末端位置, 利用自适应算法估计环境刚度与环境位置, 对期望位置补偿并选择阻抗参数。通过 Matlab-Adams 虚拟样机仿真, 验证复合粒子群自适应阻抗算法对液压伺服系统力跟踪有效性。二连杆串联机构台架试验结果表明, 采用复合粒子群自适应阻抗策略液压伺服系统力跟踪控制, 末端位置稳态误差范围 0~1, 在期望力发生变化时, 力跟踪动态性能良好。研究为液压伺服驱动足式农业移动平台及大型农业采摘机械臂末端位置力控制设计提供参考。

关键词: 液压伺服系统; 力跟踪控制; 粒子群; 阻抗控制; 自适应算法; 末端位置力

中图分类号: TP273+.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-9369(2018)01-0085-12

苏文海, 李冰, 闫聪杰, 等. 基于复合粒子群自适应液压伺服系统力跟踪控制与试验[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(1): 85-96.

Su Wenhai, Li Bing, Yan Congjie, et al. Force tracking control and test of adaptive hydraulic servo system based on composite particle swarm optimization[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(1): 85-96. (in Chinese with English abstract)

Force tracking control and test of adaptive hydraulic servo system based on composite particle swarm optimization/SU Wenhai¹, LI Bing¹, YAN Congjie², ZHU Guangqiang³, YUAN Lipeng¹, XI Xiaolin¹, HE Jingfeng²(1. School of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Harbin Boshi Automation Co., Ltd., Harbin 150078, china)

Abstract: In order to improve the performance of the force tracking control of the hydraulic servo system, the terminal position force tracking of the hydraulic servo system had the problem of steady state error and poor dynamic characteristic under the conditions of different environment models and variable expectation forces, an adaptive impedance control strategy for composite particle swarm optimization was proposed. Based on establishing the mathematical model of hydraulic servo system and the impedance model, according to the environment stiffness and force deviation, using fuzzy algorithm to determine the range of impedance parameters, combined with the improved Particle Swarm Optimization based on Levy Flights quickly through the local and global search to found the impedance parameters under different environment stiffness, the three spline interpolation was used to fit the equation of the impedance parameters with the change of the environmental stiffness; then, the mathematical model was established on the basis of the analysis of the cause of the steady error

收稿日期: 2017-12-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAH57F01); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51205057)

作者简介: 苏文海(1976-), 副教授, 硕士生导师, 研究方向为机电智能控制及液压伺服特性。E-mail: 250577403@qq.com

caused by the force tracking of the terminal position of the hydraulic servo system, according to the terminal position force and the current end position, the environment stiffness and environment location were estimated by adaptive algorithm, in order to compensate for desired position and select impedance parameters. Through the simulation of Matlab-Adams virtual prototype, the effectiveness of impedance algorithm of the composite particle swarm optimization adaptive for the force tracking of the hydraulic servo system was verified. The results of bench test of two link series mechanism showed that the force tracking control of hydraulic servo system using impedance strategy of composite particle swarm adaptive enables the terminal position to track the expected force in real time and accurately, and the steady-state error range was 0-1. The dynamic performance of the force tracking was fine when the expectation of the force changed in the current period. It provided a reference for the agricultural mobile platform of foot type with hydraulic servo system as a driving device and the end position force control design of the large agricultural picking arm.

Key words: hydraulic servo system; force tracking control; particle swarm; impedance control; adaptive algorithm; terminal position force

随着新型农业移动平台发展, 农业足式移动平台对复杂环境适应性及运动灵活性等方面较其他移动方式优势明显, 智能控制等高新技术应用成为农业机械装备研究重要方向^[1-2]。其中, 液压伺服系统作为农业足式移动平台主要传动方式^[3], 由于末端位置缺少力跟踪或力跟踪不准确, 机器人在田间、山地等复杂路面温室行走时环境刚度及末端位置期望力不断变化, 引起机身不稳定, 影响作业性能。因此, 研究液压伺服末端位置力跟踪控制对促进农业工程技术发展具有重要作用^[4-5]。目前, 液压伺服系统力跟踪控制主要基于位置阻抗控制策略^[6-7], 末端位置力跟踪稳态误差较高, 具有系统非线性及参数时变性特点, Sharifi 等提出一种自适应阻抗控制策略, 可辨识环境刚度及环境位置, 补偿期望位置, 有效降低末端位置力跟踪稳态误差^[8-9]; 李二超和刘智光等提出一种基于模糊自适应阻抗控制策略, 采用模糊算法通过力偏差及其变化率选择阻尼参数, 快速跟踪末端位置期望力^[10-11]。

本文提出一种基于复合粒子群自适应控制策略。在建立液压伺服系统数学模型和阻抗模型基础上, 根据环境刚度及力偏差采用模糊算法确定阻抗参数范围, 结合莱维飞行粒子群对阻抗参数快速通过局部和全局搜索确定阻抗参数, 采用3次样条插值拟合阻抗参数随环境刚度变化方程; 分析末端位置力跟踪稳态误差原因并建立数学模型, 根据末端位置力和当前位置, 利用自适应算法估计环境刚度与环境位置对期望位置补偿并选

择阻抗参数, 运用二连杆串联机构台架试验验证液压伺服系统力跟踪性能。

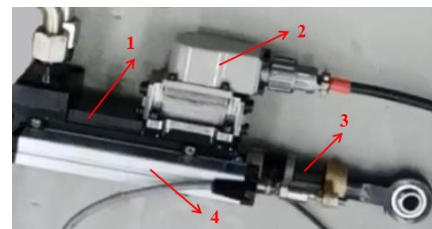
1 数学模型建立

1.1 液压伺服系统数学模型

液压伺服系统末端位置不与环境发生接触时为纯位置内环控制, 参照李冰等方法^[12]确立液压伺服系统数学模型。

1.1.1 液压伺服系统结构

液压伺服系统如图1所示, 主要由液压伺服阀、液压缸、位移传感器和力传感器等部分组成。



1-液压缸; 2-伺服阀; 3-力传感器; 4-位移传感器

1-Hydraulic cylinder; 2-Servo valve; 3-Force sensor; 4-Displacement

图1 液压伺服系统结构

Fig. 1 Structure diagram of hydraulic servo system

1.1.2 液压伺服阀数学模型

液压伺服阀包括力矩放大器和伺服阀两部分。力矩放大器将控制器输出偏差电压 e 转化为驱动电流 I , 在一定频率范围内, 力矩放大器可视为比例环节, 则力矩放大系数 K_a 表示为:

$$K_a = \frac{I}{e} \tag{1}$$

伺服阀为具有非线性特性功率放大器, 其传

递函数用二阶振荡环节近似表示，即

$$\frac{Q}{I} = \frac{K_v \omega_v^2}{s^2 + 2\delta_v \omega_v s + \omega_v^2} \quad (2)$$

式中， Q -流量； K_v -伺服阀流量增益； ω_v -伺服阀固有频率； δ_v -伺服阀阻尼比。

1.1.3 缸体传动数学模型

缸体传动一般近似等效为积分加上二阶振荡

环节，其传递函数为

$$G_s = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\delta_n \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3)$$

式中， ω_n -液压缸固有频率； δ_n -动力元件阻尼比。

1.1.4 液压伺服系统

根据式(2)~(3)建立液压伺服系统数学模型结构见图2，各部分参数见表1。

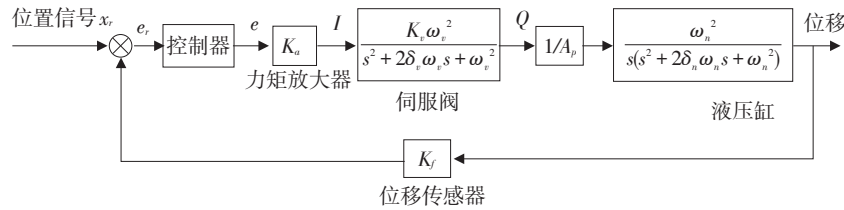


图2 液压伺服系统

Fig. 2 Hydraulic servo system

表1 液压伺服系统参数

Table 1 Parameters of the hydraulic servo system

| 参数名称 Parameter name | 参数符号 Parameter symbol | 参数值 Parameter values | 参数单位 Parameter unit |
|---|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 活塞有效面积 Effective area of piston | A_p | 4.9×10^{-4} | m^2 |
| 液压缸固有频率 Natural frequency of hydraulic cylinder | ω_n | 69.12 | $rad \cdot s^{-1}$ |
| 动力元件阻尼比 Damping ratio of power element | δ_n | 0.35 | 无因次 |
| 流量增益 Flow gain | K_v | 1.82×10^{-3} | $m^3 \cdot s^{-1} \cdot A^{-1}$ |
| 伺服阀固有频率 Natural frequency of servo valve | ω_v | 1.57×10^2 | $rad \cdot s^{-1}$ |
| 阻尼比 Damping ratio | δ_v | 6.14×10^{-12} | 无因次 |
| 力矩放大系数 Moment magnification coefficient | K_m | 45 | 无因次 |

1.2 阻抗模型建立

1.2.1 基于位置阻抗模型

如图3所示，液压伺服系统末端位置与环境物体发生接触后，液压缸非独立受控对象，而是由液压缸与环境共同组成综合动态系统。环境模型刚度极大，液压缸末端位置受力与其位置偏差用阻抗模型表示为

$$F_x = M_d \Delta \ddot{x} + B_d \Delta \dot{x} + K_d \Delta x \quad (4)$$

对式(4)拉普拉斯变换可得其传递函数为

$$\Delta x = \frac{F_x}{M_d s^2 + B_d s + K_d} \quad (5)$$

式中， M_d 、 B_d 和 K_d 分别表示液压伺服系统期望惯性、期望阻尼和期望刚度； $\Delta x = x_r - x$ 表示位置修正量，其中 x 为当前运动轨迹， x_r 为期望运动轨迹； F_x 表示液压缸末端与环境之间接触力，当液压伺服系统为纯位置控制时为0。

由图3可知，环境模型对液压缸末端位置存在

反作用力 F_e ，其值等于 F_x 。环境模型根据自身刚度不同会产生位移形变 $\Delta x_e = x - x_e$ ，其中 x_e 为环境位置，环境模型与液压缸末端间相互作用力表示为

$$F_e = M_e \Delta \ddot{x}_e + B_e \Delta \dot{x}_e + K_e \Delta x_e \quad (6)$$

式中， M_e 、 B_e 和 K_e 表示环境阻抗参数。

在实际运动中，由于液压缸末端位置运动速度与加速度较小，环境模型与液压缸末端之间相互作用力可简化为

$$F_e = K_e \Delta x_e \quad (7)$$

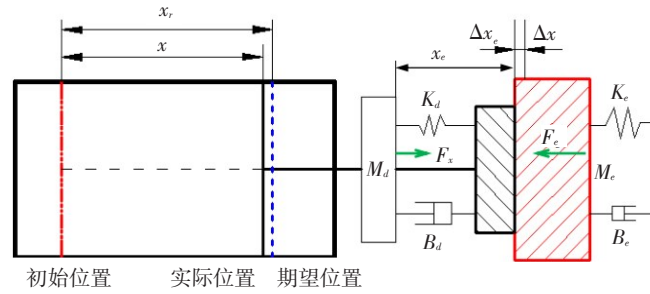
1.2.2 力跟踪模型

由于液压伺服系统在工作过程中，液压缸末端位置需保持一定力，引入期望力 F_r 构成力闭环，其力学公式为

$$F_r - F_e = M_d \Delta \ddot{x}_m + B_d \Delta \dot{x}_m + K_d \Delta x_m \quad (8)$$

式中， Δx_m 表示位置偏差，值为 $x - x_r$ 。

基于位置液压伺服系统末端位置力跟踪阻抗控制见图4。



x_e -期望运动轨迹; x -当前运动轨迹; x_e -环境位置; Δx -位置修正量; Δx_e -环境模型位移形变; F_c -液压缸末端与环境间接触力; F_e -环境模型对液压缸末端位置的反作用力; M_d 、 B_d 和 K_d 分别表示液压伺服系统期望惯性、期望阻尼和期望刚度; M_e 、 B_e 和 K_e 分别表示环境阻抗参数

x_e -Trajectory of expected motion; x -Trajectory of Current motion; x_e -Location of the environment; Δx -Corrections of position; Δx_e -Displacement deformation of environmental model; F_c - Contact force between the terminal of a hydraulic cylinder and the environment; F_e -Reaction force of the environment model to the terminal position of the hydraulic cylinder; M_d , B_d and K_d represent the desired inertia, expected damping and expected stiffness of the hydraulic servo system, respectively; M_e , B_e and K_e respectively represent the parameters of the environmental impedance

图3 末端位置与接触环境模型

Fig. 3 Model of the terminal position and the contact environment

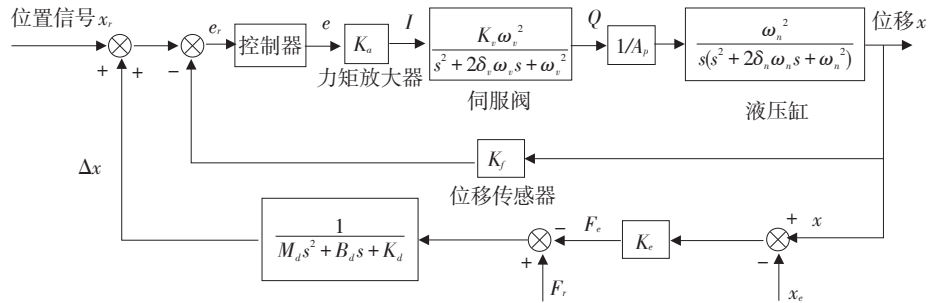


图4 位置力跟踪阻抗控制

Fig. 4 Position force tracking impedance control

2 阻抗控制律设计

期望惯性 M_d 、期望阻尼 B_d 及期望刚度 K_d 影响液压伺服系统末端位置修正量^[13]。在不同环境模型及期望力条件下，保证液压伺服系统末端位置力快速精确跟踪期望力关键在于控制系统精确寻找阻抗控制参数。针对液压伺服系统力跟踪控制实时性，需通过控制律建立阻抗参数变化方程，使液压伺服系统力跟踪根据末端位置接触环境刚度不同调整阻抗控制参数，提高其末端位置力跟踪控制性能。

2.1 基于复合粒子群阻抗控制律

复合粒子群算法阻抗控制采用模糊算法确定阻抗参数对应种群范围；根据种群范围局部与全局搜索最优解；为防止种群粒子陷入局部最优解，利用莱维飞行策略将进入局部最优解粒子位置重新更新，确定合理阻抗参数。

2.1.1 模糊算法阻抗参数种群范围选择

模糊算法阻抗参数种群范围选择策略是当环境刚度较大时需液压杆伸缩刚度减小，保护系统及环境物体不受变形破坏；当环境刚度较小时需液压杆伸缩刚度增大，满足作业性能。按照力偏差对阻抗参数作相应微调，确定阻抗参数选择范围。

根据环境刚度及其力偏差作为输入，输出为阻抗模型 M_d 、 B_d 和 K_d 参数范围。输入与输出各语言变量值集合均为{负大(NB)，负中(NM)，负小(NS)，零(ZO)，正小(PS)，正中(PM)，正大(PB)}，隶属度函数取高斯隶属度函数。输入环境刚度 K_e 、力跟踪偏差 F_e 设置论域分别为 $[0, 2000]$ 和 $[-1000, 1000]$ ；输出 M_d 、 B_d 、 K_d 设置论域分别为 $[0, 2]$ 、 $[0, 200]$ 和 $[0, 1000]$ ，则输入与输出 FIS 关系曲面如图 5 所示。由图 5 可知，阻抗参数种群范围可根据不同环境刚度及其力偏差确定阻抗参数搜索范围，保证粒子群搜索精度。

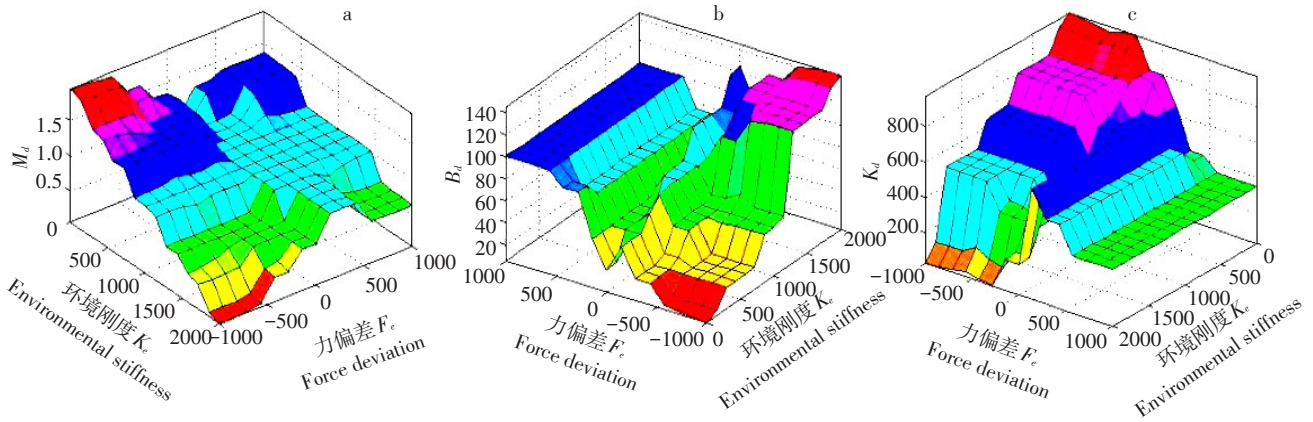


图5 FIS输入输出关系曲面

Fig. 5 FIS input-output relational surface

2.1.2 速度与位置更新

在粒子群PSO算法中，将阻抗参数看作3组 m 个粒子组成群体，在1个 $D=3$ 维空间中搜索，其中第 i 个粒子表示为1个 D 维向量 $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is})$ ，每个粒子位置就是1个潜在解。将 x_i 代入目标函数，根据适应值衡量解优劣。

在每次迭代计算中，粒子根据下列公式更新本身速度和位置：

$$V_{is}^{n+1} = \omega V_{is}^n + c_1 r_1(n)(P_{is}^n - X_{is}^n) + c_2 r_2(n) \quad (9)$$

$$X_{is}^{n+1} = X_{is}^n + V_{is}^{n+1} \quad (10)$$

式中： $i=1, 2, \dots, m, s=1, 2, \dots, D$ ； C_1 和 C_2 为非负常数，调节粒子飞向自身及全局最好位置方向步长，一般取2； r_1 和 r_2 为[0, 1]范围内变化且相互独立随机数； ω 为惯性权值； n 为迭代次数。

为减少进化过程中粒子离开搜索空间， V_{is} 通常限定在一个范围内。

2.1.3 莱维飞行位置更新

由于PSO算法在迭代前期具有较快收敛速度，后期收敛速度慢，易使粒子陷入局部极值^[14]。采用莱维飞行进一步判断，对已陷入局部极值粒子作邻域搜索，获得全局最优值。粒子群算法中采用莱维飞行对当前粒子位置 X_i 更新，更新公式为：

$$X_{is}^{n+1} = X_{is}^n + \alpha \oplus Levy(\beta) \quad (11)$$

式中， α 为步长因子，控制随机搜索范围； \oplus 表示点乘积； $Levy(\beta) \sim u = t^{-1/\beta}$ 表示服从参数为 β 莱维分布， β 取值区间为 $1 < \beta < 3$ ^[15]。

根据文献[16]计算莱维随机数，得到莱维飞行更新位置方程为

$$X_{is}^{n+1} = X_{is}^n + \alpha_0 \frac{\varphi u}{|v|^{1/\beta}} (X_{is}^n - P_{gs}^n) \quad (12)$$

$$\varphi = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma((\frac{1+\beta}{2})\beta \times 2^{(\beta-1)/2})} \right)^{1/\beta}$$

式中， u 、 v 均服从标准正态分布； α_0 是常数； Γ 是标准Gamma函数。

2.1.4 权值改进PSO算法

惯性权值 ω 是粒子群算法重要参数，调整前一次粒子对当前粒子寻找速度影响。当 ω 较大时，种群粒子全局搜索能力较强， ω 较小时，种群粒子局部搜索能力较强。因此，本文采用基于自适应权重粒子群算法。其权值调整公式为：

$$\omega(t) = \omega_{min} - \frac{(\omega_{max} - \omega_{min}) * (f - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}} \quad (13)$$

$$\omega(t) = \omega_{max}$$

式中， $\omega(t)$ 为粒子群在第 t 代时惯性权重值； ω_{max} 、 ω_{min} 分别代表权重取值区间上限、下限； f 为粒子目标函数值， f_{avg} 、 f_{min} 分别表示当前所有粒子平均值和最小值。

该策略中单个粒子通过每次迭代更新选取合适 ω 值，使种群粒子在全局和局部搜索能力间达到最佳平衡，保证粒子群算法具有较强参数优化能力。

2.1.5 适应度函数

PSO适应度函数作为目标函数对其阻抗参数值优化指标。本文采用绝对值时间积分性能指标作为参数选择最小适应函数，在目标函数中加入控制输入平方项^[17]。根据文献[18]选择式(14)作为选取最优指标的适应度函数方程。

$$Fit = \int_0^t J_1 |e(t)| + J_2 tu(t)^2 dt \quad (14)$$

式中， $e(t)$ 为 $F_r - F_e$ 关于时间 t 变化函数， $u(t)$

为 Δx 关于时间 t 变化函数； J_1 、 J_2 为调节权值。

2.1.6 复合粒子群算法步骤

- ① 根据模糊算法确定种群范围；
- ② 初始化粒子群并设定初始位置和速度；
- ③ 计算每个粒子适应值；
- ④ 对每个粒子适应值和全局经历最佳位置 P_{gs} 适应值比较，若较好，则将其确定为当前全局最佳位置；
- ⑤ 对每个粒子适应值和经历最佳位置 P_{is} 适应值比较，若较好，则将其为当前最佳位置；
- ⑥ 根据式⑩更新权重值；

⑦ 根据式⑨对粒子速度和位置更新；

⑧ 如果满足终止条件，则输出解；若不满足终止条件，按莱维飞行更新粒子位置；

⑨ 按粒子群算法评价适应值；

⑩ 返回⑧。

2.2 复合粒子群阻抗控制器性能分析

针对液压伺服系统末端位置力跟踪性能分析，分别用常规阻抗控制(见图4)与复合粒子群阻抗控制对比，其中复合粒子群阻抗控制模型采用如图6所示建立测试目标函数，记录液压伺服系统模型在不同环境刚度下跟踪力及当前位置变化情况。

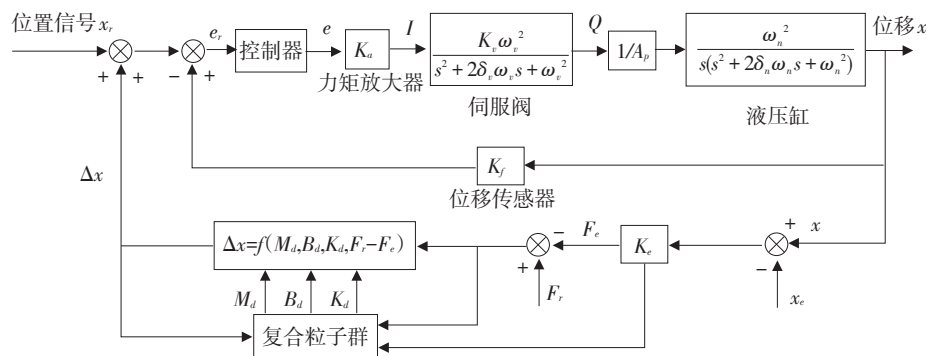


图6 复合粒子群阻抗控制

Fig. 6 Composite particle swarm optimization impedance control

2.2.1 复合粒子群参数选择

① 粒子群参数

惯性因子： $\omega_{max}=1.2$ ， $\omega_{min}=0.2$ ；加速常数： $c_1=2$ ， $c_2=2$ ；种群维数： $Dim=3$ ；种群规模： $Swarm-Size=100$ ；最大迭代次数 $Iter=100$ ；最小适应值 $Fit=0.1$ ；适应度函数调节权值 $J_1=0.999$ ， $J_2=0.01$ 。

② 莱维飞行参数

步长因子 $\alpha_0=0.01$ ；莱维参数 $\beta=2$ 。

2.2.2 分析测试

利用 Matlab-2009b 编写程序分析测试，其中输入位置信号为 10 mm，干扰末端位置为 0.2 mm，期望力为 100 N。然后，与复合粒子群搜寻 3 个输出变量匹配，建立 $\Delta x=f(M_d, B_d, K_d, F_r, F_c)$ 方程，离散化式(8)，采用向前差分方法^[19]化为差分格式，得到离散化后阻抗控制器为

$$\begin{cases} \Delta x(k) = (B\Delta x(k-1) - C\Delta x(k-2) + f(k))/A, k \geq 2 \\ A = M_d/\delta t^2 + B_d/\delta t + k_d \\ B = 2M_d/\delta t^2 + B_d/\delta t \\ C = M_d/\delta t^2 \\ \Delta x(0) = 0, \Delta x(1) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\Delta x(k)$ 为 k 时刻位置修正量； $f(k)$ 为 k 时刻沿液压杆方向接触力值($F_r - F_c$)； δt 为阻抗控制器采样周期。

同时，取不同环境刚度(见表2)(分41组，每组计算10次)分析测试，复合粒子群算法迭代过程中适应度函数值随迭代次数变化趋势如图7所示。

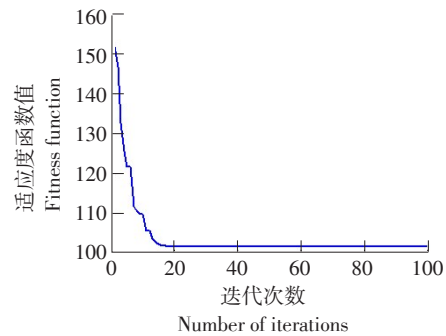


图7 适应度函数曲线

Fig. 7 Curve of fitness function

由图7可知，每次计算迭代次数均在16~20次时处于完全收敛，其适应值达到最小值后趋于稳定状态。阻抗参数 M_d 、 B_d 、 K_d 变化值，液压杆当前位置及跟踪力变化情况如表2所示。

表2 不同环境刚度下测试结果

Table 2 Test results under different environments tiffness

| 环境刚度 K_e Environmental stiffness | M_d | B_d | K_d | 当前位置 x Current position | 跟踪力 F_x Tracking force |
|---------------------------------------|-------|--------|-------|------------------------------|-----------------------------|
| 0 | 1.334 | 25.01 | 800.0 | 10 | 0 |
| 50 | 1.279 | 32.79 | 754.1 | 10 | 15.23 |
| 100 | 1.261 | 38.74 | 730.3 | 10 | 28.96 |
| 150 | 1.249 | 42.86 | 712.2 | 10.010 | 41.40 |
| 200 | 1.242 | 45.44 | 698.7 | 10.010 | 52.55 |
| 250 | 1.244 | 46.95 | 684.2 | 10.010 | 62.40 |
| 300 | 1.240 | 47.51 | 680.2 | 10.010 | 71.27 |
| 350 | 1.238 | 47.85 | 672.8 | 10.010 | 79.05 |
| 400 | 1.230 | 48.21 | 665.3 | 9.997 | 85.93 |
| 450 | 1.215 | 48.87 | 657.1 | 9.984 | 92.02 |
| 500 | 1.198 | 49.60 | 650.0 | 9.995 | 97.47 |
| 550 | 1.157 | 51.65 | 636.6 | 9.984 | 102.30 |
| 600 | 1.118 | 53.79 | 624.1 | 9.977 | 106.60 |
| 650 | 1.077 | 56.33 | 610.3 | 9.969 | 110.40 |
| 700 | 1.039 | 59.12 | 595.6 | 9.961 | 113.90 |
| 750 | 1.000 | 62.35 | 576.4 | 9.956 | 116.90 |
| 800 | 0.985 | 64.88 | 564.5 | 9.947 | 119.60 |
| 850 | 0.975 | 67.64 | 548.9 | 9.941 | 122.00 |
| 900 | 0.976 | 70.24 | 533.5 | 9.935 | 123.90 |
| 950 | 0.984 | 72.70 | 518.5 | 9.930 | 125.50 |
| 1 000 | 1.000 | 74.80 | 506.5 | 9.927 | 126.60 |
| 1 050 | 1.017 | 77.38 | 489.2 | 9.921 | 127.60 |
| 1 100 | 1.028 | 79.73 | 474.7 | 9.917 | 128.10 |
| 1 150 | 1.028 | 82.16 | 460.1 | 9.913 | 128.30 |
| 1 200 | 1.016 | 84.69 | 445.1 | 9.909 | 128.10 |
| 1 250 | 0.996 | 87.52 | 426.8 | 9.908 | 127.70 |
| 1 300 | 0.951 | 90.01 | 413.7 | 9.900 | 126.90 |
| 1 350 | 0.903 | 92.70 | 397.3 | 9.896 | 126.00 |
| 1 400 | 0.849 | 95.32 | 380.7 | 9.891 | 124.80 |
| 1 450 | 0.796 | 97.82 | 364.2 | 9.886 | 123.50 |
| 1 500 | 0.743 | 100.00 | 350.2 | 9.881 | 121.30 |
| 1 550 | 0.710 | 102.40 | 332.2 | 9.877 | 120.80 |
| 1 600 | 0.683 | 104.50 | 317.4 | 9.873 | 119.30 |
| 1 650 | 0.667 | 106.60 | 303.4 | 9.865 | 117.90 |
| 1 700 | 0.662 | 108.80 | 290.1 | 9.865 | 116.50 |
| 1 750 | 0.663 | 111.30 | 275.3 | 9.865 | 113.30 |
| 1 800 | 0.665 | 113.70 | 264.2 | 9.858 | 108.40 |
| 1 850 | 0.665 | 116.50 | 250 | 9.847 | 103.20 |
| 1 900 | 0.66 | 119.40 | 233.6 | 9.829 | 100.50 |
| 1 950 | 0.64 | 122.20 | 213.7 | 9.813 | 100.10 |
| 2 000 | 0.638 | 125.40 | 200.0 | 9.805 | 99.01 |

2.2.3 对比分析

3组不同参数下原始阻抗控制在不同环境刚度测试结果见图8，当前末端位置见图8a，随刚度增大而减小且变化趋势与表2一致，末端位置跟踪力值见图8b，随阻抗参数变化而变化，随环境刚度增大呈线性递增趋势，大于期望力，无法实现良好力跟踪控制性能。

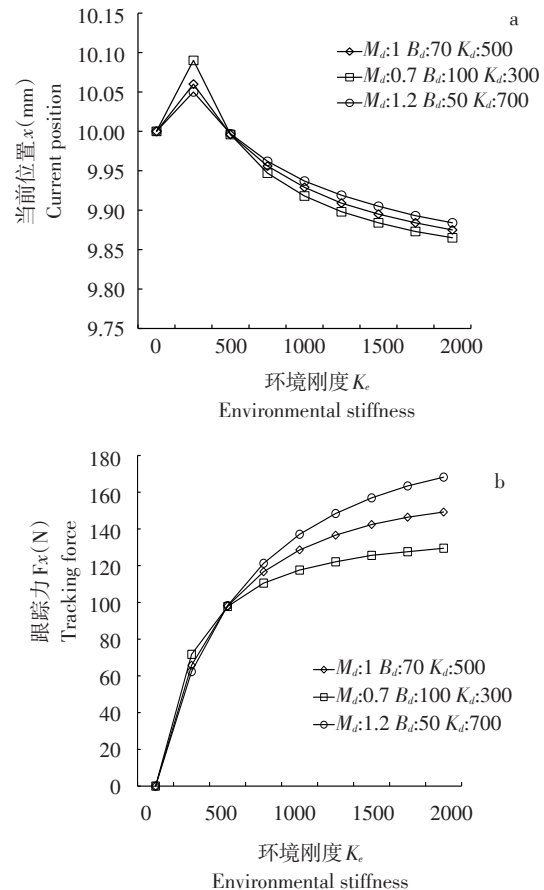


图8 原始阻抗控制分析结果

Fig. 8 Results of conventional impedance control analysis

与表2对比看出，采用复合粒子群控制阻抗控制器，随环境刚度增大，末端位置接触力变化趋势为先增后减，环境刚度1 000~1 500范围内跟踪力最大，阻抗参数随环境刚度变化自我调整，增强液压伺服系统末端位置力跟踪控制性能。

2.3 阻抗参数变化方程建立

根据表2得到阻抗参数，建立其阻抗控制参数随环境刚度变化连续方程。为保证阻抗参数 M_d 、 B_d 和 K_d 随环境刚度变化连续、平滑，采用3次样条插值^[20]拟合曲线，如图9所示，图中“*”为表2所示阻抗参数值。

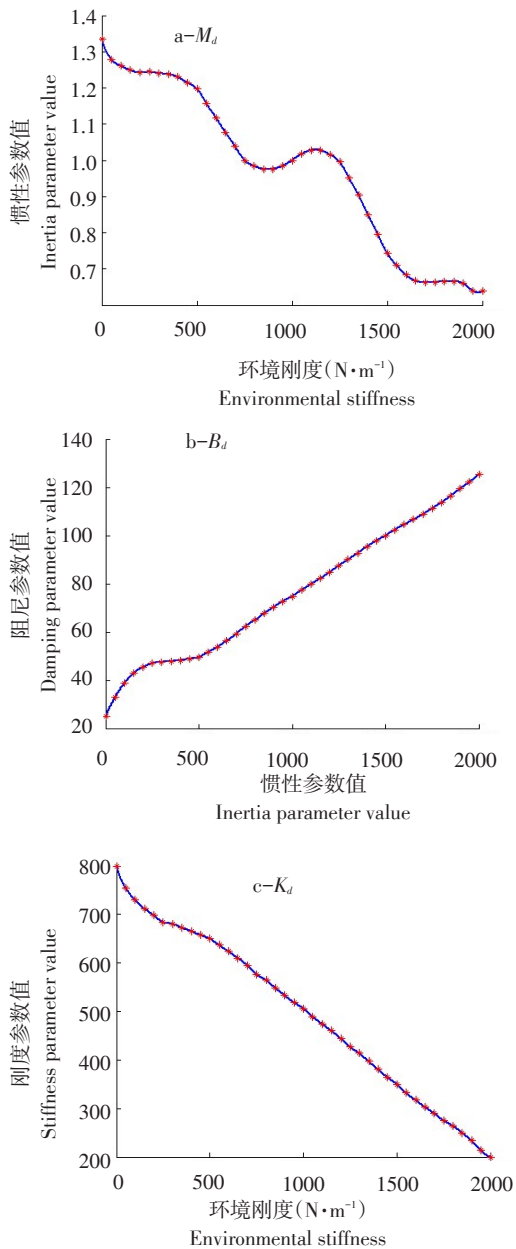


图9 阻抗参数随环境刚度变化拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of impedance parameters with the change of environmental stiffness

利用 Matlab-2009b 曲线拟合工具箱 cftool 拟合所得三次样条插值曲线 Sum of Sin Function 函数, 得到阻抗参数随环境刚度变化 3 个线性方程, 其通项公式为

$$[M_d, B_d, K_d] = \sum_i a_i \sin(b_i k_e + c_i) \quad (16)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 表示方程系数, 其中 $i \in [1, 4]$ 表示方程项数。选择误差平方和趋近于零方程, 拟合效果越好, 因此阻抗控制参数按照式 (16) 随环境刚度变化调节。

3 环境刚度估计

通过 2.2 分析可知, 采用复合粒子群阻抗控制律可提高液压伺服系统力跟踪控制性能, 但末端位置跟踪力与期望力之间依然存在稳态误差。因此需分析稳态误差产生原因, 消除稳态误差, 末端位置接触力准确跟踪期望力。

3.1 稳态误差分析

当液压伺服系统末端位置未与环境模型发生接触时, $F_c = F_r = 0$, 此时阻抗模型可表示为

$$M_d \Delta \ddot{x}_m(t) + B_d \Delta \dot{x}_m(t) + K_d \Delta x_m(t) = 0 \quad (17)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 液压伺服系统末端当前位置 x 可跟踪期望位置 x_r 。当液压伺服系统末端位置与环境模型发生接触时, 动态模型按照式 (8) 运行, 即位置偏差 Δx_m 与力偏差 $F_r - F_c$ 间关系受阻抗模型支配。其阻抗模型为

$$M_d \Delta \ddot{x}_m + B_d \Delta \dot{x}_m + K_d \Delta x_m = e \quad (18)$$

式中, e 为 $F_r - F_c$ 。

在环境参数一定情况下, 为获得恒定接触力, 令液压伺服系统末端参考位置 $x_{ra} = x_r$ 为定值, 则有 $\ddot{x}_{ra} = \dot{x}_{ra} = 0$, 则上式表示为

$$M_d \ddot{x} + B_d \dot{x} + K_d(x - x_{ra}) = e \quad (19)$$

根据式 (8) 可得到

$$x = \frac{F_r - e}{k_e} + x_e \quad (20)$$

式中, k_e 为环境刚度。将式 (20) 带入式 (19) 可推出稳态误差数学模型

$$e_{ss} = \frac{k_d k_e}{k_d + k_e} \left(\frac{F_r}{k_e} + x_e - x_{ra} \right) \quad (21)$$

为使液压伺服系统末端接触力在接触环境模型时准确跟踪期望力, 即 $e_{ss} \rightarrow 0$, 需要满足

$$x_{ra} = \frac{F_r}{k_e} + x_e \quad (22)$$

式 (22) 可表述为, 当液压伺服系统能够获得准确环境位置 x_e 与环境刚度 k_e , 则系统可根据式 (22) 计算产生液压伺服系统与环境模型期望接触力 F_r 所需轨迹值 x_{ra} 。

3.2 自适应算法环境参数估计

为使液压伺服系统末端位置与环境接触时可准确跟踪期望力 F_r , 根据式 (22) 需要获得准确环境刚度及环境位置, 因而采用一种自适应控制算法在线估计环境位置 x_e 与环境刚度 k_e , 这种控制方式

简单，鲁棒性强，可满足液压伺服系统实时性力跟踪控制要求^[21]。

根据液压伺服系统末端位置与地面简化接触模型，末端位置接触力为

$$f = k_e(x - x_e) \quad (23)$$

则末端位置接触力估计值为

$$f = \hat{k}_e(x - \hat{x}_e) \quad (24)$$

令 $\varphi_e = k_e - \hat{k}_e$, $\varphi_k = \hat{k}_e \hat{x}_e - k_e x_e$, 且 $\varphi = [\varphi_k \ \varphi_x]^T$, 根据式 (23) 和式 (24), 得到力估计误差为

$$\hat{f} - f = [x \ -1]\varphi \quad (25)$$

那么，自适应控制器设计目标则变成根据 $\hat{f} - f$ 调整环境参数估计值 \hat{k}_e 和 \hat{x}_e , 使得当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\hat{f} \rightarrow f$ 。

为保证所设计控制器稳定性，利用 Lyapunov 第二法及式(25)推导间接自适应算法估计环境位

置 x_e 与环境刚度 k_e 估计值为

$$\begin{aligned} \hat{k}_e &= -r_1 x (\hat{f} - f) \\ \hat{x}_e &= \frac{1}{\hat{k}_e} (r_1 x \hat{x}_e + r_2) (\hat{f} - f) \end{aligned} \quad (26)$$

式中: r_1 、 r_2 为常数，其中 $r_1=0.001$ 、 $r_2=0.003$ 。

3.3 自适应算法复合粒子群阻抗仿真分析

为验证复合粒子群自适应阻抗算法对液压伺服系统力跟踪有效性，分别与原始阻抗和模糊自适应阻抗^[11]对比，建立虚拟样机模型仿真测试。

液压伺服系统力跟踪仿真测试采用 Adams 与 Matlab 联合仿真模式。采用 Solidworks 软件建立液压传动系统三维模型并导入 Adams 中建立机械系统模型。将设置好 Adams 模型转换成 Matlab 插件，建立虚拟样机模型。在 Matlab/simulink 中建立仿真框架，如图 10 所示。

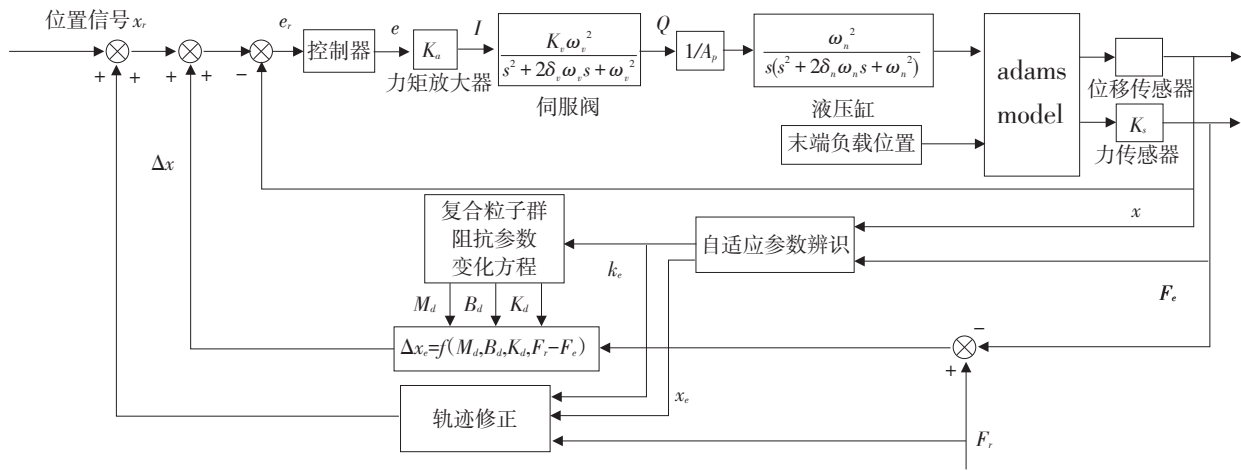
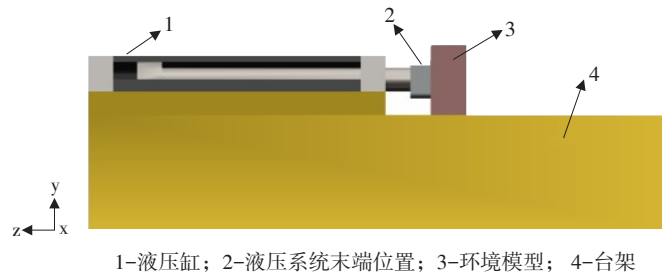


图 10 控制系统仿真模型框架
Fig. 10 Framework of simulation model of control system

如图 11 所示，在 Adams 虚拟样机模型中，设置液压系统末端位置，环境模型材料为铝块；在其末端位置添加力、位移传感器；输出位置信号为

10 mm，末端位置与环境模型间距离为 9.8 mm；仿真步长为 10 ms，仿真时间为 5 s，并记录仿真结果。



1-Hydraulic cylinder; 2-Terminal position of the hydraulic system; 3-Environmental model; 4-Bench

图 11 Adams 虚拟样机模型
Fig. 11 Model of Adams virtual prototype

仿真结果如图 12 所示，通过原始阻抗、自适应阻抗和复合粒子群自适应阻抗控制对比分析；原始阻抗控制力跟踪在 150N 附近，稳态误差较大；模糊自适应阻抗控制力跟踪约为 110N，比较接近目标力，稳态误差相对较小；采用复合粒子群自适应阻抗控制，其末端位置接触力约为 100N，对目标力准确跟踪，稳态误差基本消除。

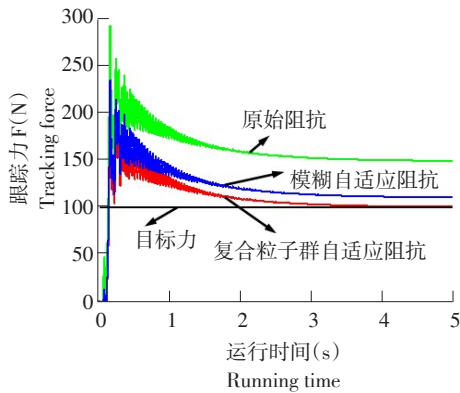


图 12 力跟踪仿真测试结果

Fig. 12 Force tracking simulation test result

通过 Adams 虚拟样机仿真测试可知，其力跟踪效果优于原始阻抗及模糊自适应阻抗控制，验证复合粒子群自适应阻抗算法对液压伺服系统力跟踪有效性，提高液压伺服系统末端位置力跟踪控制性能，为测试物理样机试验提供理论基础。

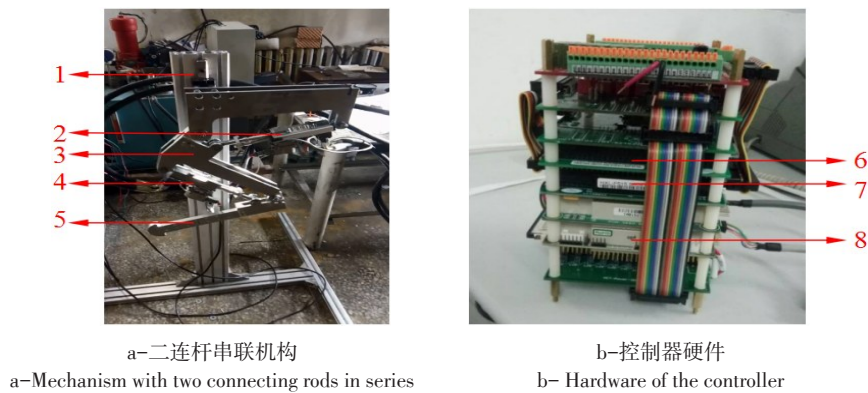
4 二连杆串联机构台架试验分析

为验证所设计控制策略在不同环境刚度及变期望力条件下，末端位置力跟踪特性及仿真分析有效性，于哈尔滨工业大学机电工程学院设计铝制二连杆串联机构试验台架，用于液压伺服系统力跟踪控制试验。

4.1 机构及原理

如图 13a 所示，该串联机构由台架、两个连杆机构和两个液压伺服系统组成，其中液压伺服系统(a)装有位移传感器，负责驱动连杆(1)位置控制；液压伺服系统(b)装有位移传感器与力传感器，既可驱动连杆(2)控制位置，又可控制跟踪。故采用液压伺服系统(b)→连杆(2)试验。动力源为哈尔滨工业大学机电工程学院流体控制实验室研制液压油泵(压力：15~18 MPa)，满足试验需要。

试验中，计算机作为上位机，上位机软件为 Matlab-2009b，下位机(见图 13b)采用研华 PC104，用 XPC 作为实时系统，可较好兼容上位机算法程序；HIT-PC104-HXL-P515 用于采集每个关节力/位置传感器信号，并 AD 转换。HIT-PC104-HXL-P520 用于 DA 转换产生液压阀控制信号；各板卡驱动用嵌入式 C++ 编写 S-Function 模块。



a-Mechanism with two connecting rods in series
 1-台架；2-液压伺服系统(a)；3-连杆(1)；4-液压伺服系统(b)；5-连杆(2)；
 6-HIT-PC104-HXL-P520；7- HIT-PC104-HXL-P515；8-PC104-3343
 b- Hardware of the controller
 1-Bench；2-Hydraulic servo system(a)；3-link rod(1)；4-Hydraulic servo system(b)；5- link rod(2)；
 6-HIT-PC104-HXL-P520；7-HIT-PC104-HXL-P515 8-PC104-3343

图 13 物理样机试验台架与控制器

Fig. 13 Test bench of physical prototype and controller physical

4.2 不同环境刚度末端位置力跟踪测试

不同环境刚度力跟踪测试试验过程与 3.3 仿真分析一致，液压伺服系统(b)驱动连杆(2)作往复摆

动并代替液压伺服系统末端位置与环境模型(木块、铝块、铁块及石块)接触，同时根据文献[22]方法计算液压杆伸缩一定距离时对应连杆(2)摆动位置。

从开始至9 s时启动液压伺服控制系统，油液压力加致10 MPa，根据环境模型将试验分为4部分，每部分试验分别原始阻抗、模糊自适应阻抗及复合粒子群自适应阻抗控制3组试验，试验结果如图14所示。

由图14a可知，当环境模型为木块时，原始阻抗控制力跟踪稳态误差较明显(约为119 N)，模糊自适应阻抗与复合粒子群自适应阻抗控制基本可

跟踪目标力，稳态误差约为0。如图14b~14d所示，当环境模型采用铝块、铁块及石块时，试验结果与3.3仿真结果基本一致，采用复合粒子群自适应阻抗控制液压伺服系统末端位置力跟踪稳态保持在0~1，验证采用复合粒子群自适应阻抗控制液压伺服系统，在不同环境模型时力跟踪效果良好，提高液压伺服系统末端位置在不同环境模型下力跟踪控制性能。

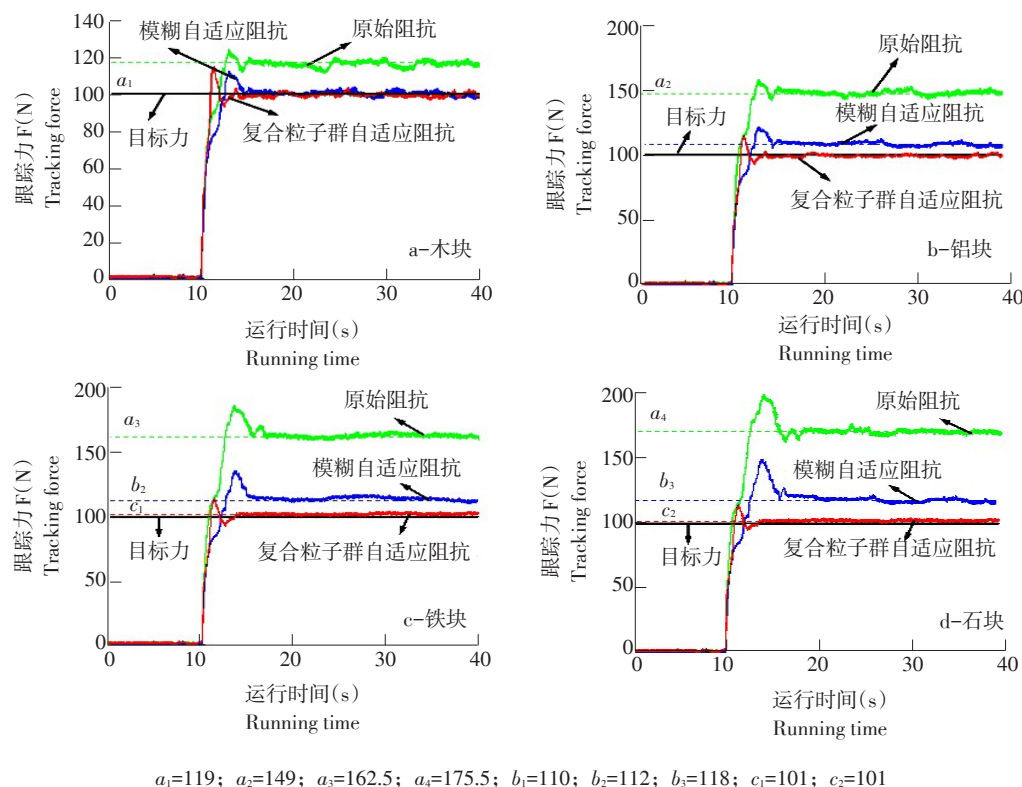


图14 不同环境模型力跟踪试验结果

Fig. 14 Test result of force tracking simulation

4.3 末端位置变期望力跟踪测试

为验证液压伺服系统在变期望力下跟踪特性，根据4.2测试结果，采用木块作为环境模型，期望力信号(时间：0~1.4, 1.4~3.6, 3.6~5 s；力幅值：0, 30, 10 N)一组方波信号，分别对模糊自适应阻抗及复合粒子群自适应阻抗控制策略对比试验研究，结果见图15。可知，当期望力从0 N阶跃至30 N时，采用模糊自适应阻抗及复合粒子群自适应阻抗控制策略跟踪效果良好，但调节时间分别为1和0.4 s，超调量分别为33.3%和9%；当期望力从30N阶跃至10N时，模糊自适应阻抗控制策略响应时间较慢且存在稳态误差，采用复合粒子群自适应阻抗控制策略，其末端位置力跟踪效果

良好，提高液压伺服系统末端位置变期望力跟踪动态性能。

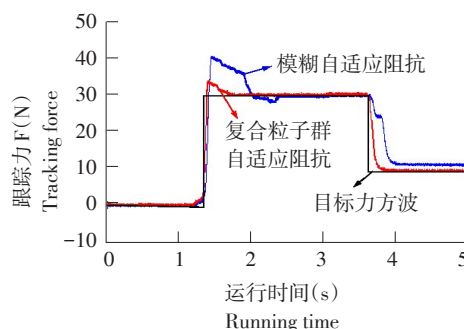


图15 末端位置变期望力跟踪试验结果

Fig. 15 Results of end position of the variable force tracking test

5 结 论

a. 本文提出一种复合粒子群自适应阻抗控制策略, 解决液压伺服系统末端位置在不同环境模型及变期望力下, 末端位置力跟踪存在稳态误差及动态特性差问题。根据复合粒子群阻抗控制策略, 确定阻抗参数范围基础上, 通过3次样条插值拟合建立阻抗参数随环境刚度变化方程, 满足系统实时控制需求。

b. 分析稳态误差产生原因并建立数学模型, 采用自适应算法根据末端位置力和当前位置准确估计环境刚度及环境位置并补偿期望位置。根据环境刚度选择阻抗参数调节, 使液压伺服系统末端位置快速准确跟踪期望力。

c. 借助 Matlab-Adams 虚拟样机仿真试验, 末端位置力跟踪效果优于原始阻抗及模糊自适应阻抗控制, 验证复合粒子群自适应阻抗算法对液压伺服系统力跟踪有效性。

d. 通过二连杆串联机构台架不同环境刚度模型及变期望力末端位置力跟踪试验, 采用复合粒子群自适应阻抗策略液压伺服系统力跟踪控制, 使末端位置能够实时快速、准确跟踪期望力, 稳态误差范围为0~1, 在期望力发生变化时, 其力跟踪动态性能良好。

e. 本研究可为液压伺服驱动足式农业机器人在复杂地形行走时保证机身平稳、提高作业性能提供参考, 为液压伺服驱动大型农业采摘机械臂末端位置抓取力控制、减少果实破损率等相关研究提供借鉴。

[参 考 文 献]

[1] 赵匀, 武传宇, 胡旭东, 等. 农业机器人的研究进展及存在的问题[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 20-24.

[2] 毕昆, 赵馨, 侯瑞峰, 等. 机器人技术在农业中的应用方向和发展趋势[J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 469-473.

[3] 陈志伟, 金波, 朱世强, 等. 液压驱动仿生多足机器人单腿设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 36-42.

[4] 罗锡文, 单鹏辉, 张智刚, 等. 基于推杆电动机的拖拉机液压悬

挂控制系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 1-6.

- [5] 徐鹏, 崔艳伟, 米伯林, 等. 基于 Simulink 的牧草收割机液压传动系统仿真研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(11): 83-88.
- [6] Pires J N, Godinho T, Araújo R. Force control for industrial applications using a fuzzy PI controller[J]. Sensor Review, 2004, 24(1): 60-67.
- [7] 林君健. 基于力传感器的工业机器人主动柔顺装配系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [8] Sharifi M, Behzadipour S, Vossoughi G. Nonlinear model reference adaptive impedance control for human-robot interactions[J]. Control Engineering Practice, 2014, 32: 9-27.
- [9] 吴乐彬, 王宣银. 自适应阻抗控制在广义主动加载中的应用[J]. 航空学报, 2008, 29(1): 204-208.
- [10] 李二超, 李战明, 李炜. 基于视觉的机器人模糊自适应阻抗控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(2): 409-413.
- [11] 刘智光, 于菲, 张靛, 等. 基于模糊自适应阻抗控制的机器人接触力跟踪[J]. 工程设计学报, 2015(6): 569-574.
- [12] 李冰, 苏文海, 息晓琳, 等. 仿生四足机器人自适应粒子群优化控制[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 24-29.
- [13] 丁庆鹏. 基于阻抗控制的四足仿生机器人稳定步态理论及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [14] 李荣雨, 王颖. 基于莱维飞行的改进粒子群算法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1685-1691.
- [15] 王庆喜, 郭晓波. 基于莱维飞行的粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(9): 2588-2591.
- [16] 牛海帆, 宋卫平, 宁爱平. 莱维飞行与粒子群的混合搜索算法[J]. 太原科技大学学报, 2016(1): 6-11.
- [17] 姜长泓, 张永恒, 王盛慧, 等. 基于改进粒子群优化算法的PID控制器参数优化[J]. 应用科学学报, 2017, 35(5): 667-674.
- [18] 余胜威, 曹中清. 基于人群搜索算法的PID控制器参数优化[J]. 计算机仿真, 2014, 31(9): 347-350.
- [19] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 6版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [20] 权龙哲, 申静朝, 奚德君, 等. 狭闭空间内苗盘物流化搬运机器人运动规划与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 51-59.
- [21] 孙桂涛, 邵俊鹏, 董翔, 等. 基于环境参数自适应估计的液压机器人力控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(4): 26-31.
- [22] Semini C. HyQ—Design and development of a hydraulically actuated quadruped robot[D]. Genoa: University of Genoa, 2010.