

平面 3-RRR 柔性并联机构自激振动智能控制*

邱志成, 朱许先, 余龙焕, 张宪民

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州, 510641)

摘要 平面 3-RRR 柔性并联机构的闭链耦合约束作用导致其奇异性复杂, 而机构在逆向雅可比奇异位形附近易发生自激振动, 严重影响机构的精度并对其结构造成破坏。为了让并联机构重新恢复正常工作, 设计振动主动控制算法对自激振动进行抑制。首先, 建立了机构的逆向运动学模型, 并基于速度雅可比矩阵获得并联机构的奇异判定条件; 其次, 在完成自激振动产生机理分析的基础上, 对振动加速度信号进行了滤波和移相处理; 然后, 结合加速度反馈与位置误差补偿, 设计了模糊神经网络非线性控制器、反向传播(back propagation, 简称 BP)神经网络自抗扰控制器; 最后, 通过振动主动控制实验, 验证了 2 种智能控制算法的有效性。实验结果表明, 所设计的 2 种控制算法能够在保障并联机构位置精度的条件下, 对自激振动进行快速且有效的抑制。

关键词 并联机构; 自激振动; 振动控制; 模糊神经网络; 自抗扰控制

中图分类号 TH113.1

引言

平面并联机构由于结构简单、定位精度高、易于设计、制造和控制而成为研究热点^[1]。然而, 运动支链间的耦合约束作用导致并联机构工作空间小、奇异性复杂^[2]。平面并联机构在奇异位形附近动态性能急剧恶化, 且易发生自激振动, 严重影响机构的定位精度。为改善平面并联机构在奇异位形处的动态性能, 对自激振动的主动控制研究具有重要意义。

并联机构的奇异性研究主要集中在奇异分类与奇异规避两个方面。目前, 普遍采用 Gosselin 等^[3]提出的基于速度雅可比矩阵行列式值的方法对奇异进行分类判别。为了消除奇异性的影响, 一般采用机构优化设计^[4]、工作模式转换^[5]、轨迹规划^[6]以及引入冗余^[7]等途径实现奇异规避。

柔性并联机构容易因柔性杆件的弹性变形而产生明显振动, 通常利用压电传感器与致动器对振动进行检测与抑制, 并结合应变和应变率反馈^[8]、自适应滑模控制器^[9]等控制算法实现振动控制。上述研究均是针对残余振动进行抑制, 目前鲜有关于平面并联机构自激振动方面的研究。

自激振动是依靠系统自身内部各组成部分之间的相互作用来维持的稳态周期性振动^[10], 这种振动现象存在于很多物理系统与工程领域, 例如: 机器人

磨削^[11]、高速转子的旋转^[12]以及机翼的颤振^[13]。在平面并联机构中, 当末端动平台运动到奇异位形附近时也会产生自激振动现象。

并联机构是存在关节间隙、杆长误差和摩擦等非线性因素的非线性系统, 难以建立精确模型。因此, 考虑采用不依赖被控对象模型的控制策略。将模糊推理可运用专家知识处理不确定信息的能力, 与人工神经网络的参数学习能力相结合, 设计出性能更加优良的模糊神经网络控制器^[14], 可达到对控制器参数^[15]与控制量输出^[16]进行优化的目的。采用模糊神经网络对非线性增益进行具有专家知识的在线自调节, 降低实验参数整定代价。

为了提高控制器的抗扰动能力, 采用自抗扰控制器设计自激振动控制算法。自抗扰控制核心是对系统总和扰动加以估计并进行前馈补偿, 从而有效提高系统抗干扰能力^[17]。然而, 常规自抗扰控制器参数较多, 增加了实验参数整定代价。BP 神经网络具有良好的参数在线学习能力, 考虑引入 BP 神经网络对自抗扰控制器中的主要参数在线自调整, 从而降低控制器参数整定代价, 提高系统的鲁棒性与自适应性。

笔者针对平面 3-RRR 柔性并联机构自激振动主动控制问题, 设计模糊神经网络非线性控制器与

* 国家自然科学基金资助项目(51820105007, 52175093, 51775190); 广东省自然科学基金资助项目(2019A1515011901); 广州市科技计划资助项目(202002030113)

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2021-10-09

BP神经网络自抗扰控制器,对于改善平面并联机构在奇异位形处的动态性能具有重要应用价值。

1 奇异性分析

图1为平面3-RRR柔性并联机构几何结构示意图。R表示转动关节,下划线表示驱动关节所在位置。机构由静平台 $A_1A_2A_3$ 、动平台 $C_1C_2C_3$ 以及3条对称分布且完全相同的运动支链 $A_kB_kC_k$ 组成,其中 $k=1,2,3$ 。每条运动支链由刚性主动杆 A_kB_k 和柔性被动杆 B_kC_k 组成。 A_k 为主动旋转关节,主动杆 A_kB_k 的连杆角 α_k 作为并联机构的输入,被动杆 B_kC_k 的连杆角记为 β_k 。在静平台中心建立全局坐标系 Oxy ,则动平台中心的位置和姿态角坐标 (x_p, y_p, θ_p) 作为并联机构的输出,其中: x_p, y_p 为动平台全局坐标; θ_p 为动平台姿态角,定义为动平台边线 C_1C_2 与 x 轴正方向的夹角。主动杆的长度为 $L_1=A_kB_k=245\text{ mm}$,被动杆的长度为 $L_2=B_kC_k=242\text{ mm}$,动平台的外接圆半径为 $L_3=PC_k=108\text{ mm}$ 。

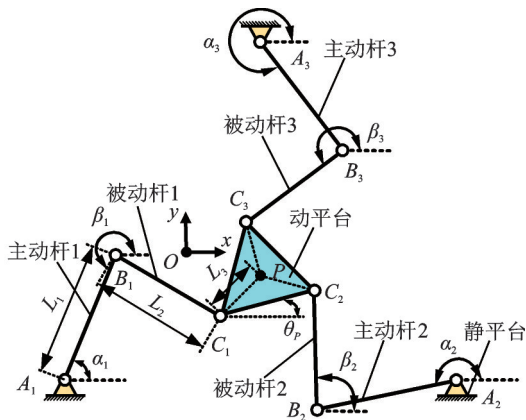


图1 平面3-RRR柔性并联机构几何结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of geometric structure of planar 3-RRR flexible parallel mechanism

速度雅可比矩阵主要用于并联机构的奇异性分析。对运动学约束方程求导后可获得速度约束方程,并简化为矩阵形式

$$J_a \dot{\alpha} = J_x \dot{x} \quad (1)$$

其中: $\dot{\alpha}=[\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\alpha}_3]$ 和 $\dot{x}=[\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{\theta}_p]$ 分别为驱动输入速度矢量与动平台输出速度矢量; J_x 为正向雅可比矩阵; J_a 为逆向雅可比矩阵^[18]。

根据雅可比矩阵 J_x 和 J_a 的行列式值是否为0,可将奇异位形分为3种类型。笔者主要针对 $\det(J_a)=0$ 情形下的第1类奇异进行分析,即逆向

雅可比奇异。由于机构在奇异位形附近时,其性能已经严重恶化,因此将逆向雅可比奇异判定条件修正为 $|\det(J_a)| \leq \delta$,奇异判断阈值 δ 通过实验进行选取,并将该条件作为实验中的奇异位形选择依据。

2 振动主动控制器设计

2.1 模糊神经网络非线性控制

结合加速度反馈与伺服电机位置误差补偿,设计自适应非线性控制器为

$$u_{NL} = u_{NL}(e_p) + u_{NL}(e_a) = k_{pNL}e_p(t) + k_{aNL}e_a(t) \quad (2)$$

其中: e_p 和 e_a 分别为伺服电机的位置误差和主动杆的振动加速度误差; k_{pNL} 与 k_{aNL} 分别为位置误差补偿与加速度反馈的非线性增益。

根据以下非线性函数进行自适应调节^[19]

$$k_{pNL} = a_p + b_p [1 - \text{sech}(c_p e_p(t))] \quad (3)$$

$$k_{aNL} = a_a + b_a / [1 + \exp(c_a e_a(t))] \quad (4)$$

其中: a_p, b_p, c_p 与 a_a, b_a, c_a 为非线性增益系数; $\exp(x)$ 和 $\text{sech}(x)$ 为指数函数与双曲正割函数。

实验结果表明,加速度反馈非线性增益中的系数 a_a 对控制效果起主要作用,但其可调范围较大,需通过参数整定的方式进行试凑,增加了实验参数整定代价。因此,设计模糊神经网络非线性控制器,对控制系数 a_a 进行在线自调节。图2为模糊神经网络非线性控制器结构框图。

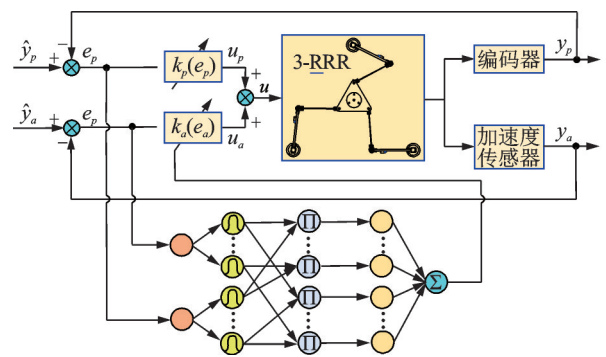


图2 模糊神经网络非线性控制器结构框图

Fig.2 Structure block diagram of fuzzy neural network nonlinear controller

该控制器将伺服电机位置误差 e_p 与主动杆振动加速度误差 e_a 作为网络输入,将加速度反馈非线性增益中的系数 a_a 作为网络输出。模糊神经网络可以实现模糊规则的在线设计,实现对非线性控制增益进行具备专家知识的自适应调节。

控制器采用基于Mamdani模型的模糊神经网络

络结构框图^[20]如图3所示。第1层作为输入层;第2层计算各输入分量的隶属函数,每个输入量的模糊分割数均为5;第3层计算每条规则的适用度;第4层实现归一化计算;第5层作为输出层用于实现解模糊化操作。

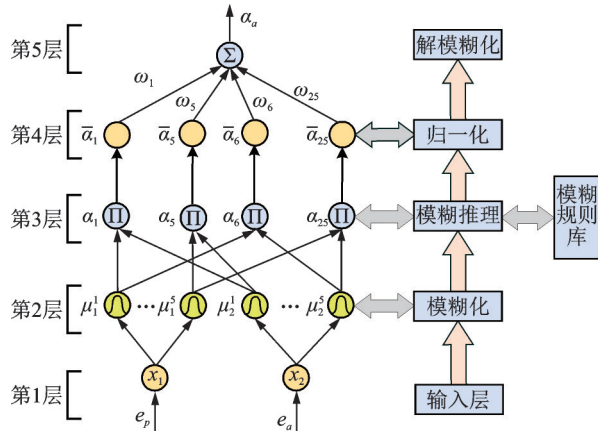


图3 基于Mamdani模型的模糊神经网络结构框图

Fig.3 Fuzzy neural network structure block diagram based on Mamdani model

采用梯度下降法对模糊神经网络参数进行自适应调节,包括第5层权值 ω_j 、第2层隶属函数中心值 c_{ij} 和宽度值 σ_{ij} 。模糊神经网络参数更新规则如下

$$\omega_j(k+1) = \omega_j(k) - \eta_1 \frac{\partial E}{\partial \omega_j} \quad (j = 1, 2, \dots, 25) \quad (5)$$

$$c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - \eta_2 \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} \quad (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 5) \quad (6)$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) - \eta_3 \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} \quad (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 5) \quad (7)$$

其中: η_1, η_2 和 η_3 分别为 ω_{ij}, c_{ij} 和 σ_{ij} 的学习率。

2.2 BP神经网络自抗扰控制

设计带自调整柔化因子的BP神经网络自抗扰控制器(active disturbance rejection control,简称ADRC)结构框图如图4所示。由常规自抗扰控制器、位置误差补偿和自适应BP神经网络3部分组成。自调整柔化因子的引入,可以根据系统状态误差变化实时优化控制量输出,从而达到消除抖振的目的。BP神经网络的引入可实现非线性扩张状态观测器参数的自适应调节,提高控制器的鲁棒性和自适应性。

常规自抗扰控制器主要由4个部分组成^[17]。第1部分为跟踪微分器,以设定值 v_0 为输入,得到非线性微分跟踪器方程为

$$\begin{cases} e' = v_1(k) - v_0 \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hfhan(e', v_2(k), r_1, h) \end{cases} \quad (8)$$

其中:非线性函数 $fhan(\cdot)$ 为最速反馈函数^[17]; r_1 为跟踪速度因子; h 为滤波因子。

第2部分为非线性扩张状态观测器,以输入 u_{ADRC} 和输出 y_a 来跟踪估计系统状态和扰动,即

$$\begin{cases} e = z_1(k) - y_a(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_1 e] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h[z_3(k) - \beta_2 f_1 + b_0 u_{ADRC}(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h(-\beta_3 f_2) \\ f_1 = fal(e, \alpha_1, \delta_1) \\ f_2 = fal(e, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (9)$$

其中: β_1, β_2 和 β_3 为非线性扩张状态观测器的系数; $fal(\cdot)$ 为非线性函数^[17]。

第3部分为非线性状态误差反馈控制律,可以

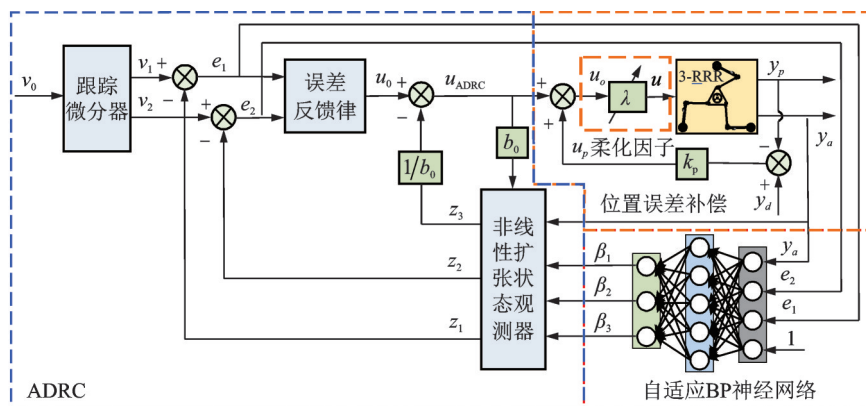


图4 BP神经网络自抗扰控制器结构框图

Fig.4 Structure block diagram of BP neural network ADRC

实现系统的非线性控制,表达式为

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = -\text{fhan}(e_1, e_2, r_2, h_2) \end{cases} \quad (10)$$

其中:误差非线性组合为 $-\text{fhan}(e_1, e_2, r_2, h_2)$ 。

第 4 部分为扰动补偿过程,用于计算自抗扰控制器的控制输出,表达式为

$$u_{\text{ADRC}}(k) = u_0 - z_3(k)/b_0 \quad (11)$$

其中: b_0 为扰动补偿因子。

为消除伺服电机的位置误差,增加位置误差补偿量 $u_p = k_p(y_d - y_p)$,其中: y_d 和 y_p 分别为电机的期望位置与实际位置。

控制器总的控制量输出为

$$u_o = u_{\text{ADRC}} + u_p \quad (12)$$

图 4 所示控制器中将加速度信号 y_a 作为 ADRC 的一个输入,加速度信号噪声经非线性扩张状态观测器的 3 个系数 β_1, β_2 和 β_3 放大后,导致振动控制后的小幅振动产生抖振现象。引入柔化因子 λ 为

$$\lambda = 1 - \exp\left[-(e_p - \mu)^2 / \sigma^2\right] \quad (13)$$

其中: e_p 为伺服电机的位置误差,单位为脉冲数 Cts; μ 和 σ 分别为高斯函数的中心值和宽度值。

图 5 为柔化因子随电机位置误差变化的理论自调节曲线。当电机位置误差较大时,采用接近于 1 的柔化因子以快速抑制大幅振动。当电机位置误差较小时,以指数形式迅速减小,弱化小幅振动阶段的控制量输出,从而消除抖振。自抗扰控制器参数较多,为解决上述问题,增加了控制器参数整定代价,引入 BP 神经网络对 3 个系数进行在线自适应调节^[21]。

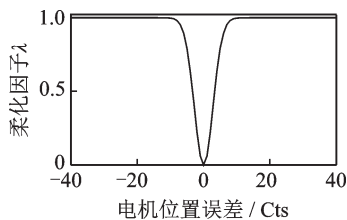


图 5 柔化因子随电机位置误差变化的理论自调节曲线

Fig.5 Theoretical self-adjusting curve of flexibility factor changing with motor position error

选用结构为 4-5-3 的 BP 神经网络,包含输入层、隐含层和输出层,且输入节点数为 4,隐藏层节点数为 5,输出层节点数为 3。控制器采用的 BP 神经网络结构如图 6 所示。将自抗扰控制器部分的系统输出 y_a 、信号误差 e_1 、信号微分误差 e_2 以及常数项 1 作

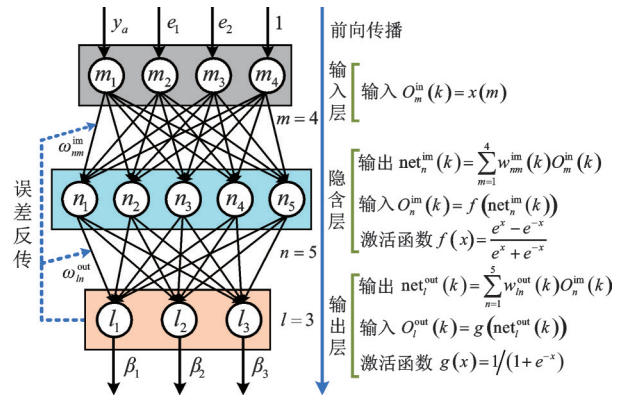


图 6 控制器采用的 BP 神经网络结构图

Fig.6 Structure diagram of BP neural network adopted by the controller

为 BP 神经网络的 4 个输入。加入常数项 1 作为网络输入是为了提高网络的稳定性。BP 神经网络的输出为非线性扩张状态观测器的 3 个系数 β_1, β_2 以及 β_3 。改进的 BP 神经网络自抗扰控制器具有更强的自适应性与抗干扰能力。

将双曲正切函数 $f(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$ 设置为隐含层的激活函数,并将 Sigmoid 函数 $g(x) = 1 / (1 + e^{-x})$ 设置为输出层的激活函数。根据梯度下降法,权值的更新学习算法^[22]分别为

$$\begin{cases} \Delta \omega_{ln}^{\text{out}}(k) = \eta \delta_l^{\text{out}}(k) O_n^{\text{in}}(k) + \alpha \Delta \omega_{ln}^{\text{out}}(k-1) \\ \delta_l^{\text{out}}(k) = e(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{\Delta y}{\Delta O_{ln}^{\text{out}}}\right) g'(\operatorname{net}_l^{\text{out}}(k)) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta \omega_{nm}^{\text{in}}(k) = \eta \delta_n^{\text{in}}(k) O_m^{\text{in}}(k) + \alpha \Delta \omega_{nm}^{\text{in}}(k-1) \\ \delta_n^{\text{in}}(k) = f'(\operatorname{net}_n^{\text{in}}(k)) \sum_{l=1}^3 \delta_l^{\text{out}}(k) \omega_{ln}^{\text{out}}(k) \end{cases} \quad (15)$$

其中: η 为学习速率; α 为惯性系数,加入惯性系数项是为了加快网络更新速率;符号 $\operatorname{sgn}(\Delta y / \Delta O_{ln}^{\text{out}})$ 用于近似代替未知偏导项 $\partial y(k) / \partial O_{ln}^{\text{out}}(k)$ 。

3 自激振动控制实验研究

3.1 系统装置与振动信号处理

平面 3-RRR 柔性并联机构系统连接图如图 7 所示,主要由并联机构本体、计算机、运动控制卡、伺服电机及其配套驱动器、数据采集卡和加速度传感器等硬件组成。伺服电机为安川电机有限公司生产,型号为 SGMAV-08ADA61。运动控制卡是美国 Delta Tau Data System 公司生产的可编程多轴运动控制器 PMAC,型号为 PMAC2-PCI。加速度传感器为瑞士 Kistler 公司的电容式单向加速度传感器,

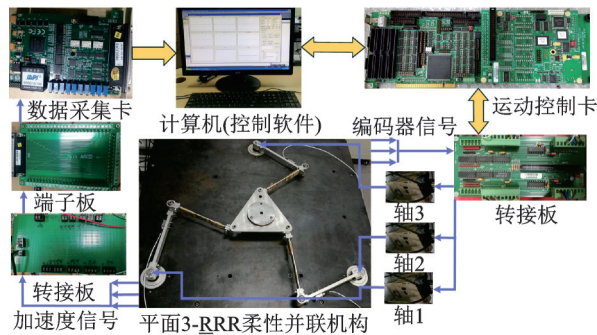


图 7 平面 3-RRR 柔性并联机构系统连接图

Fig.7 Connection diagram of planar 3-RRR flexible parallel mechanism system

频率响应为 0~1 kHz,测量范围为 ±30 g。设采样频率为 100 Hz,即采样周期为 10 ms。

计算机通过运动控制软件实现轨迹离散规划、脉冲计算与指令发送、振动信号采集与数据处理等,运动控制卡与伺服驱动器搭配实现并联机构三轴同步运动控制。安装在主动杆上的单自由度加速度传感器可以检测其振动加速度信号,进而获得基于加速度反馈的振动控制量。编码器同步采集伺服电机位置数据,获得位置误差补偿量。利用振动控制算法求解总的控制量,从而实现平面 3-RRR 柔性并联机构的自激振动主动控制。笔者选取逆向雅可比奇异位形(95 mm, -95 mm, 0°)处的自激振动为例进行说明。并联机构保持 0°定姿态角,从原点初始位形(0 mm, 0 mm, 0°)匀速直线运动到该奇异位形处,轨迹的插补次数为 35,此处插补次数与机构的运动速度有关,终点奇异位形的雅可比矩阵行列式值为 $\det(J_a) = -0.00890$ 。

图 8 为自激振动信号曲线。通过加速度传感器采集 3 根主动杆的自激振动加速度信号,主动杆 1 的振动加速度信号时域曲线如图 8(a)所示,纵坐标为直接采集到的加速度信号电压值,实际的加速度可根据传感器的灵敏度 264.0 mV/g 进行换算。由图 8(b)可

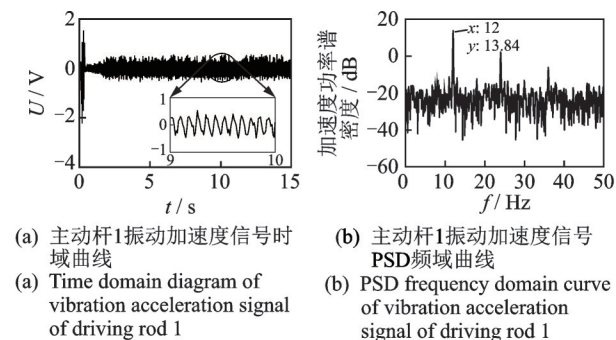


图 8 自激振动信号曲线

Fig.8 Self-excited vibration signal curve

知,主动杆振动加速度信号的主要振动频率为 12 Hz。当机构运动到奇异位形处时,导致伺服电机未能准确定位至期望位置,而是在期望位置附近以一定频率进行反复自调节并产生振动,同时带动主动杆以相同的频率往复摆动,进而激发了自激振动。

3.2 模糊神经网络非线性控制实验

在控制实验中,并联机构由初始位形(0 mm, 0 mm, 0°)直线运动到终点奇异位形(95 mm, -95 mm, 0°),插补次数为 35,移相步数为 6 个采样周期。非线性增益的参数分别为: $a_p = 0.015$; $b_p = 0.005$; $c_p = 1$; $b_a = 10$; $c_a = 1$; 系数 a_a 通过模糊神经网络进行在线自调节。权值、中心值与宽度值的学习率分别为 $\eta_1 = 0.7$, $\eta_2 = 0.01$ 和 $\eta_3 = 0.02$ 。网络的权值向量 w 、隶属函数的中心值矩阵 c 以及宽度值矩阵 σ 的初始值分别为

$$w = [60, 60, 55, 50, 50, 55, 55, 50, 45, 45, 50, 50, 45, 45, 40, 50, 45, 45, 40, 40, 45, 45, 40, 40, 40]$$

$$c = \begin{bmatrix} -1 & -0.6 & 0 & 0.6 & 1 \\ -1 & -0.6 & 0 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

为了节省篇幅,振动控制实验结果分析中只对伺服电机的位置误差信号进行说明,主动杆的加速度信号将不作展示。通过编码器采集伺服电机的位置误差信号,图 9 为模糊神经网络非线性控制电机 3 位置误差曲线。当 3 个杆件由于加工和安装造成的不对称性时,会影响自激振动的频率和幅值。

当运动到奇异位形后,伺服电机在期望位置附近小范围内作周期性自激振动。在第 5 s 时刻对伺服电机 1 施加振动控制后,振动幅值均迅速减小。在第 7.51 s 时刻后,电机的位置误差均趋于稳定值。控制实验结果表明,并联机构的自激振动在加入控制后的 2.51 s 内得到了快速有效的抑制。

实验中,模糊神经网络非线性控制电机 1 控制量曲线如图 10 所示。由图可知,控制量的变化趋势与振动信号的变化趋势相似,且在第 7.51 s 后控制量输入基本趋近于 0,只剩零星一两个脉冲输入。这与传感器的采样噪声有关,表明并联机构的自激振动在施加控制后的 2.51 s 内得到了有效抑制。

图 11 为模糊神经网络控制加速度反馈非线性增益曲线。在施加控制的初始阶段,加速度反馈增益 k_a 在 [90, 150] 之间迅速调节,而在第 7.51 s 后非线性增益均基本趋于稳定。

选取部分中心值绘制参数自调整曲线如图 12

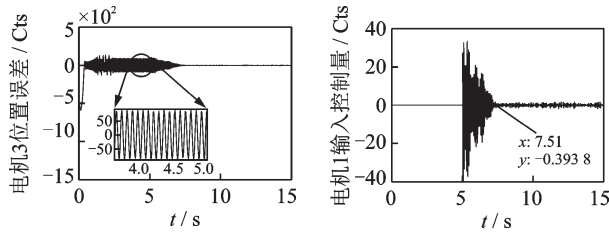


图9 模糊神经网络非线性控制电机3位置误差曲线
图10 模糊神经网络非线性控制电机1控制量曲线

Fig.9 Position error curve of motor 3 under fuzzy neural network nonlinear control
Fig.10 Control value curve of motor 1 under fuzzy neural network nonlinear control

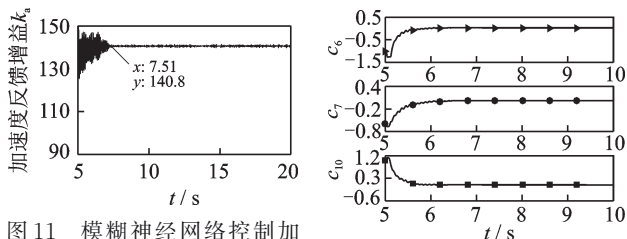


图11 模糊神经网络控制加速度反馈非线性增益曲线
图12 部分中心值自调整曲线(c_6, c_7, c_{10})

Fig.11 Acceleration feedback nonlinear gain curve under fuzzy neural network nonlinear control
Fig.12 Part of center value self-adjusting curves (c_6, c_7, c_{10})

所示。可见,在施加控制初期,参数均在较大范围内进行自适应调节,而在自激振动完全得到抑制后,各个参数均收敛于稳定值,保证了非线性增益的自适应调节与收敛。

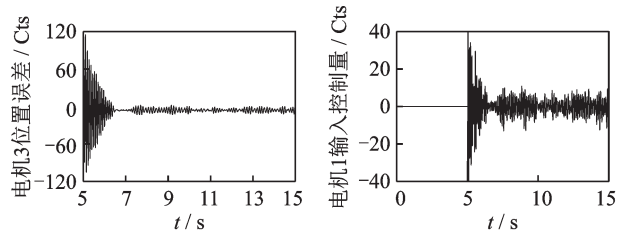
实验结果可知,模糊神经网络非线性控制器通过带有专家知识的参数自学习过程,实现了非线性控制增益的大范围自调整优化,降低了实验参数整定代价,提高了控制器的自适应性与鲁棒性。

3.3 BP神经网络自抗扰控制实验

并联机构由初始位形(0 mm, 0 mm, 0°)直线运动到终点奇异位形(95 mm, -95 mm, 0°),插补次数为35,移相步数为5个采样周期,在第5 s时刻对伺服电机1施加振动主动控制。

常规自抗扰控制器选取参数如下:采样步长 $h = 0.01$;跟踪微分器参数 $r_1 = 12$;非线性扩张状态观测器参数 $\alpha_1 = 0.75, \alpha_2 = 1.5, \delta_1 = \delta_2 = 0.2, \beta_1 = 57, \beta_2 = 1070, \beta_3 = 6850$;非线性状态误差反馈控制律参数 $r_2 = 16, h_2 = 1$;补偿因子 $b_0 = 1$ 。未引入柔化因子时,并联机构存在抖振现象。

未引入柔化因子时,自抗扰控制如图13所示。由图13(a)可知,机构的大幅振动迅速衰减,在小幅振动阶段产生了抖振现象。这是由于大增益的非线性扩张状态观测器将传感器采样误差放大,导致计算获得的控制量在小幅振动阶段仍保持较大值。由图13(b)可知,电机在小幅振动阶段也保持着较大的控制量输入,进而激发了并联机构的抖振。



(a) 电机3位置误差曲线5~15 s放大图
(b) 电机1控制量曲线
(a) Zoom in view of motor position error curve at 5~15 s
(b) Control value curve of motor 1

图13 未引入柔化因子时自抗扰控制

Fig.13 Active disturbance rejection control without adopting flexibility factor

BP神经网络自抗扰控制实验中,并联机构的运动参数和控制参数与常规ADRC控制实验保持一致,仅 β_1, β_2 与 β_3 通过模糊神经网络进行在线调节更新,3个参数的调节范围分别为 $\beta_1 \in [50, 60], \beta_2 \in [1065, 1085], \beta_3 \in [6050, 6065]$,初始值为各自可调范围的下限值,分别选为 $\beta_{10} = 50, \beta_{20} = 1065$ 以及 $\beta_{30} = 6050$ 。柔化因子的自调整函数中心值为 $\mu = 0$,宽度值为 $\sigma = 4$ 。选取BP神经网络的学习率 $\eta = 0.3$,动量因子 $\alpha = 0.005$,隐含层-输出层权值 ω_{ln}^{out} 与输入层-隐含层权值 ω_{nm}^{im} 的初始值均为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

BP-ADRC控制电机3位置误差曲线如图14所示。可见,在对伺服电机1施加控制后,伺服电机3振动幅值不断减小后趋于稳定值,自激振动在施加控制后得到了有效抑制。经过BP神经网络的参数自学习过程,实现了对自激振动快速有效的抑制,体现了BP神经网络参数自整定的优越性,提高了自适应性和抗扰能力。

图15为BP-ADRC控制电机1控制量曲线。由图可知,在第7.56 s后电机的振动控制量输入已经趋近于0,只剩零星脉冲输入。这与传感器采样噪声有关,说明自激振动在施加控制后2.56 s内得到了有效抑制。

图16为可调系数与输入量的变化曲线。图16(a)为非线性扩张状态观测器可调系数 β_1 更新曲线,在

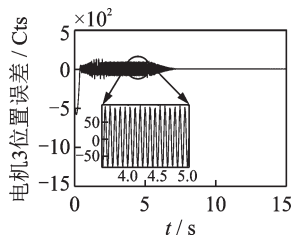


图14 BP-ADRC控制电机3位置误差曲线
Fig.14 Position error curve of motor 3 under BP-ADRC control

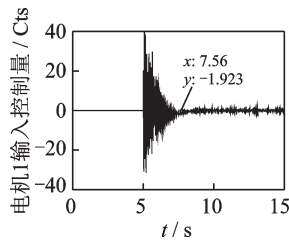
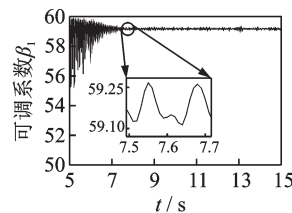
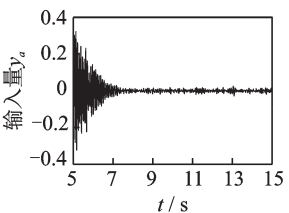


图15 BP-ADRC控制电机1控制量曲线
Fig.15 Control value curve of motor 1 under BP-ADRC control



(a) 可调系数 β 更新曲线
(a) Adjustable coefficient β update curve



(b) 输入量 y_a 变化曲线
(b) Input y_a variable curve

图16 可调系数与输入量的变化曲线

Fig.16 Adjustable coefficient and an input variable curve

初始阶段均进行大范围调节更新,经自适应调节过程后收敛于较优值。BP神经网络的输入量是基于加速度反馈信号获得的,输入量 y_a 变化曲线如图16(b)所示。在振动控制结束后神经网络的输出量仍存在极小的数值波动,由此计算产生的控制量仅对应图15所示的零星脉冲输入,对振动控制效果无影响。

图17为BP-ADRC控制柔化因子自调节曲线。在振动控制初始阶段,由于可调系数的初始值选择不佳,导致电机产生较大位置误差,因此该阶段柔化因子保持接近于1的较大值来快速抑制大幅振动。控制后期由于电机振幅减小,柔化因子以指数形式迅速减小,最终收敛至接近于0,弱化控制量输出,从而达到消除抖振的目的。

综上所述,引入自调整柔化因子消除了抖振问题,BP神经网络的引入实现了非线性扩张状态观测

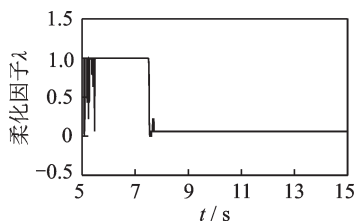


图17 BP-ADRC控制柔化因子自调节曲线

Fig.17 Self-adjusting curve of flexibility factor under BP-ADRC control

器中3个参数的在线自整定,降低了实验参数整定代价,提高了控制器的自适应性和鲁棒性。

4 结束语

针对平面3-RRR柔性并联机构自激振动问题,对振动加速度信号进行滤波和移相处理,结合加速度反馈与位置误差补偿,设计了模糊神经网络非线性控制器与BP神经网络自抗扰控制器,振动主动控制实验验证了控制算法的可行性与有效性。实验结果表明,设计的智能控制算法能够有效抑制平面3-RRR柔性并联机构的自激振动,保障了振动抑制后并联机构的定位精度,为平面并联机构的自激振动控制研究提供了参考价值。

参 考 文 献

- [1] 刘善增. 少自由度并联机器人机构动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-6.
- [2] BOHIGAS O, MANUBENS M, ROS L. Singularities of robot mechanisms: numerical computation and avoidance path planning [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 1-12.
- [3] GOSELIN C, ANGELES J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 281-290.
- [4] YANG X L, WU H T, CHEN B, et al. A dual quaternion approach to efficient determination of the maximal singularity-free joint space and workspace of six-DOF parallel robots [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 129: 279-292.
- [5] LIU S, QIU Z C, ZHANG X M. Singularity and path-planning with the working mode conversion of a 3-DOF 3-RRR planar parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 107: 166-182.
- [6] 莫嘉嗣, 张宪民, 邱志成, 等. SEM环境下3PRR并联平台奇异区域规避与逃逸控制策略[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 1-11.
MO Jiasi, ZHANG Xianmin, QIU Zhicheng, et al. Control strategy research on avoid and escape the singular area of the 3PRR parallel platform based on SEM environment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 1-11. (in Chinese)
- [7] 李官明, 曲海波, 郭盛. 平面结构冗余并联机构的误差敏感度分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 45-57.
LI Guanming, QU Haibo, GUO Sheng. Sensitivity analysis of a planar parallel manipulator with kinematic redundancy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 45-57. (in Chinese)
- [8] DONG L, SONG Y M, TAO S, et al. Dynamic modeling and hierarchical compound control of a novel

- 2-DOF flexible parallel manipulator with multiple actuation modes [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 103: 413-439.
- [9] ZHANG Q, LI C D, ZHANG J T, et al. Smooth adaptive sliding mode vibration control of a flexible parallel manipulator with multiple smart linkages in modal space[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 411: 1-19.
- [10] DING W J. Self-excited vibration: theory, paradigms, and research methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press; Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 1-17.
- [11] LU H, ZHAO X W, TAO B, et al. Online process monitoring based on vibration-surface quality map for robotic grinding [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(6): 2882-2892.
- [12] ZHANG Z G, DUAN N Y, LIN C G, et al. Coupled dynamic analysis of a heavily-loaded propulsion shafting system with continuous bearing-shaft friction[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 172: 105431.
- [13] LUM K Y, XU C L, LU Z B, et al. Design and experiment of data-driven modeling and flutter control of a prototype wing[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 398: 103-122.
- [14] LIN F J, WAI R J. Robust recurrent fuzzy neural network control for linear synchronous motor drive system[J]. *Neurocomputing*, 2003, 50: 365-390.
- [15] ZHU D C, DU B L, ZHU P C, et al. Constant force PID control for robotic manipulator based on fuzzy neural network algorithm[J]. *Complexity*, 2020, 2020: 3491845.
- [16] ZHAO T, LIU J H, DIAN S Y, et al. Sliding mode control theory based adaptive general type-2 fuzzy neural network control for power-line inspection robots [J]. *Neurocomputing*, 2020, 401: 281-294.
- [17] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 243-263.
- [18] 余龙焕, 邱志成, 张宪民. 基于加速度反馈的平面3-RRR柔性并联机器人自激振动控制[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21): 40-50.
- YU Longhuan, QIU Zhicheng, ZHANG Xianmin. Self-excited vibration control of planar 3-RRR flexible parallel manipulator based on acceleration feedback[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(21): 40-50. (in Chinese)
- [19] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2016: 100-102.
- [20] 李国勇. 神经·模糊·预测控制及其MATLAB实现[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 257-260.
- [21] WANG S S, ZHU H Q, WU M Y, et al. Active disturbance rejection decoupling control for three-degree-of-freedom six-pole active magnetic bearing based on BP neural network[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4): 3603505.
- [22] LIU Z, GUO H, WANG D, et al. Active-disturbance rejection control of brushless DC motor based on BP neural network[C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan, China: IEEE Computer Society, 2010: 3253-3256.



第一作者简介:邱志成,男,1973年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为振动主动控制、机器人控制。曾发表《移动双柔性梁系统的振动主动控制》(《振动、测试与诊断》2022年第42卷第1期)等论文。

E-mail: zhchqiu@scut.edu.cn

通信作者简介:张宪民,男,1964年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为精密定位与精密操作等。

E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn