

基于改进的 PID 算法的压电柔性机械臂振动主动控制

张娟,白斌,舒亚峰,刘自强
(西北工业大学 力学与土木建筑学院 西安 710129)

摘要: 针对柔性机械臂的振动抑制问题,将模糊逻辑控制与增量式 PID 算法结合,通过模糊控制算法对增量式 PID 的主要参数进行在线最佳整定,从而得到增量式模糊自整定 PID 控制算法。通过对无反馈控制、增量式 PID 控制、增量式模糊自整定 PID 控制的分析及仿真,说明此控制方法可以使机械臂末端振幅衰减 80% 以上。改变机械臂的末端集中质量的结果表明:当机械臂抓取不同质量重物时,增量式模糊自整定 PID 控制算法仍然能够达到良好的控制效果。

关键词: 反馈控制; 振动; 模糊控制; 自适应系统

中图分类号: TH212; TH213.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-8728(2014) 05-0625-05

A Vibration Control System of Flexible Manipulator Based on Incremental Fuzzy Self-tuning PID Algorithm

Zhang Juan , Bai Bin , Shu Yafeng , Liu Ziqiang
(School of Mechanics , Civil Engineering and Architecture , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710129)

Abstract: The Incremental Fuzzy Self-tuning PID Control (IFSPC) is proposed for active vibration control of flexible piezoelectric manipulator. The control system combines fuzzy logic control and incremental PID algorithm , and the main parameters of incremental PID are tuned by fuzzy logic algorithm. The vibration amplitude can be suppressed by IFSPC with a decrement of 80% . And its advanced performance of vibration suppression and stability can be proved by comparison with no-feedback control and the incremental PID control. Its adaptability can be verified by changing the concentrated mass at the end of the arm. The simulation results show that the proposed IFSPC can be used for real-time vibration control in flexible manipulator effectively.

Key words: adaptive systems; algorithms; computer simulation; feedback control; flowcharting; fuzzy control; fuzzy logic; manipulators; MATLAB; matrix algebra; schematic diagrams; stability; vibration control; vibrations (mechanical)

柔性机械臂具有工作效率高、能量消耗低、载荷质量比大、构件设计紧凑等优点。例如 2000 年发射的由加拿大为国际空间站设计制造的空间吊装用机械臂,为了实现远距离抓取和释放物体,就使用了长达数十米的超长手臂。然而,柔性机械臂运动过程中所引起的残余振动不容忽视,使其难以精确定位,降低工作效率,严重影响系统的正常工作。而压电元件由于其响应快精度高,既可以做传感器,又可以作作动器,已被

收稿日期: 2012-12-04
基金项目: 西北工业大学基础研究基金项目(JC20110256) 和国家自然科学基金项目(NSFC11172234) 资助
作者简介: 张娟(1973-) ,副教授,博士,研究方向为大柔性机械臂振动控制, zhangj@nwpu.edu.cn

广泛应用于这类柔性结构的振动控制研究中。

Schoenwald^[1] 等针对双杆柔性机械臂研究了基于关节作动器与分布式压电薄膜作动器混合控制策略; Colin Hansen^[2] 等研究了智能柔性结构的主动非线性吸振方法,并考虑了控制溢出问题; 周烁^[3] 等针对高加速度运动和精确定位臂,指出其残余振动不可以忽略,伺服电机与智能结构构成的双执行器将是较好的振动抑制解决方案。

将模糊逻辑控制与增量式 PID 算法结合,通过模糊逻辑控制算法对增量式 PID 的主要参数进行在线自整定。在 Matlab/Simulink 下,基于双连杆压电柔性机械臂模型,建立无反馈控制、增量式 PID 控制和增量式模糊自整定 PID 控制 3 种控制模型,

并对控制模型进行仿真,得到了 3 种控制模型的控制结果。分析结果显示,增量式模糊自整定 PID 算法具有良好的控制效果,可以有效抑制柔性梁运动过程中的残余振动,提高运动精度。

1 控制算法

1.1 模糊逻辑控制

模糊控制方法是把人类自然语言表述的控制策略,通过模糊集合和模糊逻辑推理转化成数字或数学函数,再用计算机实现预定的控制。由于模糊控制是以人的操作经验为基础,而不是依赖于控制系统的数学模型,实际上是把人的智能融入了控制系统,实现了人的某些智能。

1.2 增量式 PID 控制算法

增量式 PID 属于计算机数字 PID 控制中的一种,当执行机构需要控制量的增量(如驱动步进电动机等)时,应采用增量式 PID 控制算法。

增量式 PID 控制算法为

$$\Delta u(k) = r_0 e(k) - r_1 e(k-1) + r_2 e(k-2) \quad (1)$$

式中: $r_0 = K_p + K_i T + \frac{K_d}{T}$; $r_1 = K_p + \frac{2K_d}{T}$; $r_2 = \frac{K_d}{T}$ 。

由于控制算法中不需要累加,控制增量 $u(k)$ 仅与最近 3 次的采样值有关,所以较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果。

1.3 增量式模糊自整定 PID 算法

虽然模糊控制算法和 PID 算法相比,响应更快,超调量更小,并且能够克服非线性因素等等,但受到计算机存储容量的限制,使模糊控制算法只能取得有限地控制等级,限制了控制精度。

增量式模糊自整定 PID 控制算法是在增量式 PID 算法的基础上,采用模糊控制规则,自动对增量式 PID 参数进行最佳整定。增量式模糊自整定 PID 算法结构图如图 1 所示。

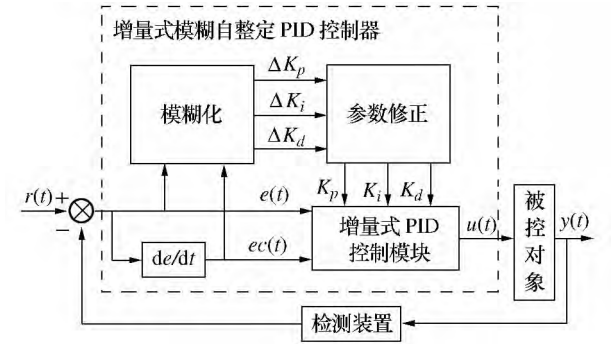


图 1 增量式模糊自整定 PID 结构图

依照模糊控制的步骤,首先确定模糊化输入输出量。模糊控制的输入量为 e 和 ec ,输出量为 K_p 、 K_i 和 K_d ,分别创建它们的数据库和模糊控制规则库,之后建立输入输出量之间的模糊推理,并对调整结果进行清晰化。其中,调整比例系数 K_p 的作用是加快系统的响应速度,提高系统的调节精度;调整积分作用系数 K_i 的作用是消除系统的稳态偏差;调整微分作用系数 K_d 的作用是在响应过程中抑制偏差向任何方向变化,对偏差变化进行提前预报,以改善系统的动态特性。

通过模糊控制推理得到 PID 参数整定量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,代入如下公式计算

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 是 PID 控制器的参数; K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为初始值; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为模糊推理的结果。

增量式模糊自整定 PID 控制器的算法流程如图 2 所示。

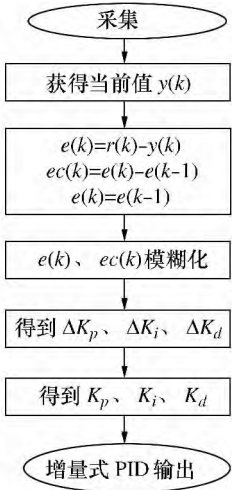


图 2 增量式模糊自整定 PID 控制器算法流程

2 控制系统的建立

2.1 双柔性机械臂数学模型建立

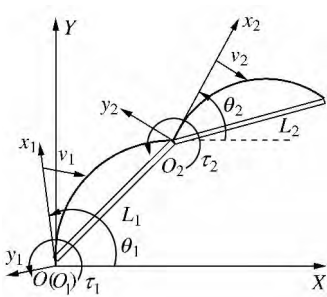


图 3 双柔性机械臂数学模型割线坐标系

将每段柔性连杆做 Euler-bernoulli 梁处理 ,利用割线坐标法建立其惯性笛卡尔坐标系 OXY ,如图 3 , $o_1x_1y_1$ 和 $o_2x_2y_2$ 分别为连杆 1 ,连杆 2 的动坐标系。割线坐标系下有^[5]

$$\begin{cases} x_d = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 \\ y_d = L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

采用双连杆压电柔性机械臂作为动力学模型 , 两段机械臂都为柔性材料 ,其参数见表 1。

表 1 柔性材料参数

各相关参数	柔性臂 1	柔性臂 2	压电元件
长×宽×高	350 mm×40 mm×1 mm	300 mm×30 mm×1 mm	50 mm×30 mm×1 mm
弹性模量	200 GPa	200 GPa	62.89 GPa
质量	0.11 kg	0.07 kg	—
末端集中质量	0.29 kg	0	—

此动力学模型为一组高度非线性、高度耦合的常微分方程。耦合首先表现在两杆之间刚性运动的耦合 ,在动力学方程中 ,表现为角速度的二次项及系数的三角函数;其次 ,是整体刚性运动和弹性变形之间的耦合 ,在动力学方程中 ,表现为刚性运动变量与弹性变形量之间的交叉项。

2.2 压电片位置

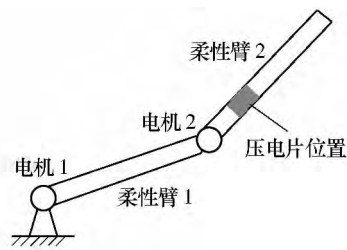


图 4 压电片位置示意图

压电元件位置直接决定控制效果 ,压电片位置在柔性臂 2 上 ,如图 4 所示。压电元件始末两段距臂 2 始端的距离 $x_s = 0.07\text{ m}$ 、 $x_e = 0.23\text{ m}$ 。元件密度 $\rho = 7.5\times10^3\text{ kg/m}^3$,应变系数 $d_{31} = 200\times10^{12}\text{ C/N (m/V)}$,相对介电常数 $\varepsilon = 2\,000$ 。

2.3 状态方程

建立控制模型的动力学方程为

$$M(q)\ddot{q} + H(q,\dot{q})\dot{q} + K(q) = G\tau \quad (4)$$

式中: $M(q)$ 是对称的惯性矩阵; $H(q,\dot{q})$ 是表征哥氏力和离心力作用的交叉耦合矩阵; $K(q)$ 为刚度矩阵; G 为系数矩阵; τ 为控制力矩矢量。

由式 (4) 可以得到模型的状态方程 ,取状态变量 $x(t) = [q\ \dot{q}]^T$ 控制变量 $u(t) = [\tau_1\ \tau_2\ U_a]^T$ 输出变量 $y(t) = [\theta_1\ \theta_2\ v_1\ v_2]^T$ 则

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6\times6} & I_{6\times6} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}H \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6\times3} \\ M^{-1}G \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} C_{11} & \mathbf{0}_{2\times6} \\ C_{21} & \mathbf{0}_{2\times6} \end{bmatrix}, \quad \mathcal{C}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ C_{21} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \phi_{11} & \phi_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}, \quad D = [\mathbf{0}_{4\times3}] \end{aligned}$$

式中: ϕ_{11} 、 ϕ_{12} 、 ϕ_{21} 、 ϕ_{22} 均为模态函数。

3 控制系统仿真及结果

运用 s 函数在 MATLAB/SIMULINK 模块中建立控制模型的状态方程 ,两关节电机的驱动力矩分别为 $\tau_1 = 1.07\sin(2\pi ft)$ 、 $\tau_2 = 0.065\sin(2\pi ft)$,其中 $f = 10\text{ Hz}$ 。在 Simulink 中分别建立不加反馈控制、增量式 PID 控制、增量式模糊自整定 PID 这 3 种控制系统的仿真模型。为了方便对比 ,两个增量式 PID 模块的离散采样周期 T 都设为 0.005 s ,且将两个增量式 PID 模块初始参数都分别设置为 $K_p = 500$ 、 $K_i = 3\,000$ 、 $K_d = 12$ 。在增量式模糊自整定 PID 控制器中 , ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊控制模块规则库如表 2、表 3、表 4 所示。

表 2 ΔK_p 的模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NS	NM	NB	NB

表 3 ΔK_i 的模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 4 ΔK_d 的模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS	PB

通过分析臂 2 中点的形变量 v_2 ,来得到控制结果。控制系统仿真分析结果如图 5。

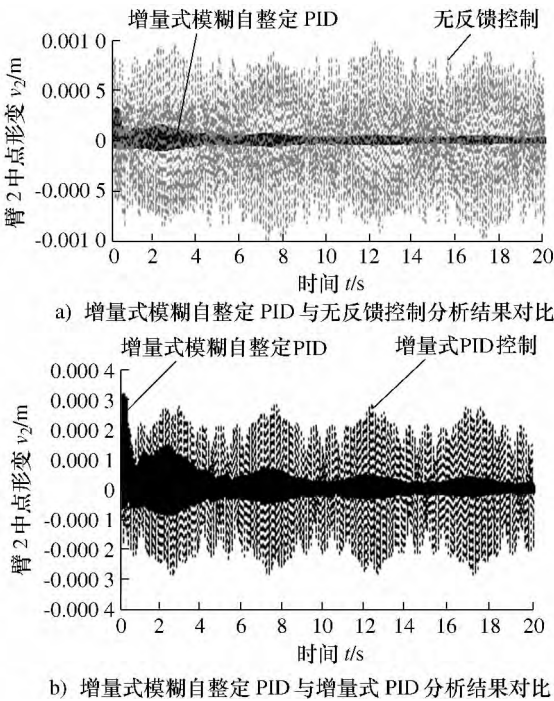


图 5 控制系统仿真分析结果

由图 5a) 可知 ,增量式模糊自整定 PID 可以大幅度提高系统的稳定性和精度 ,达到了很好的控制效果;由图 5b) 可知 ,通过模糊控制器对 PID 参数的自整定 ,系统在运行过程中的振动幅值较传统的增量式 PID 控制有了明显的衰减 ,并且 ,随着系统的运行 ,模糊控制器对增量式 PID 的参数进行在线优化整定 ,并使得振动幅值在控制的后半程减小了 80% 以上 ,控制效果进一步提高。

为了较详细地观察影响效果 ,将臂 2 的末端集中质量分别设为 0、10 g、50 g、100 g ,分别做 4 次控制仿真 ,仿真结果如图 6。

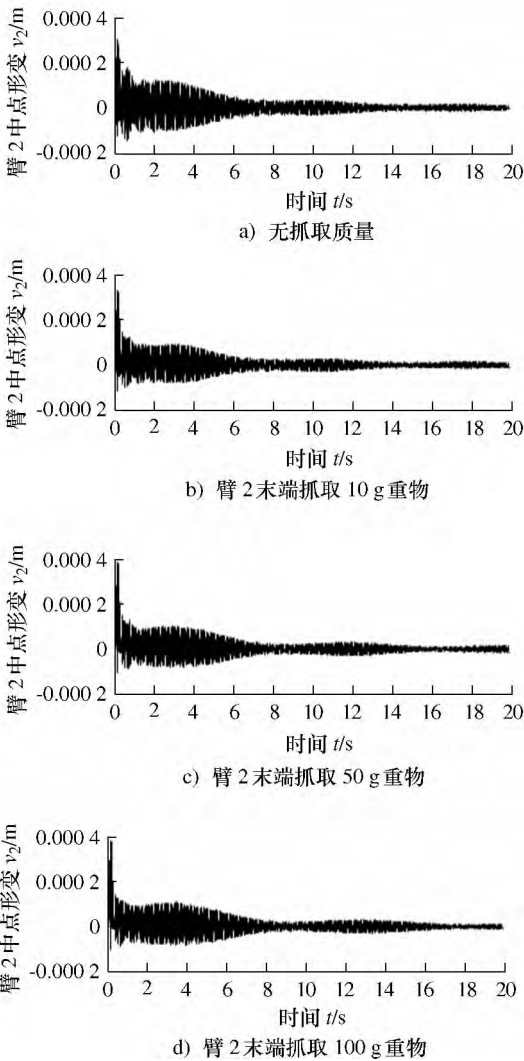


图 6 臂 2 末端不同抓取质量的控制仿真结果

通过对比分析 4 种不同抓取质量的仿真结果 ,可以得出 ,控制系统通过利用模糊控制器对增量式 PID 参数进行在线调整 ,可以自适应臂 2 末端不同重物对其动力学方程的影响 ,且仍然可以大幅降低柔性机械臂的振动幅值 ,提高其运动精度;机械臂在运动过程中 ,其混沌振动周期长短与其所抓取的质量大小有关 ,臂 2 末端所抓取的质量越大 ,其混沌周

期越长,且由分析结果可以看出,控制器会在系统的第一个混沌周期完成后,大幅降低机械臂的振动幅值,这是由于模糊控制器需要通过第一个混沌周期的运动,调整增量式 PID 控制器的参数,使其适合新的动力学方程,并且由于抓取质量变大所导致的混沌周期增长,控制器在第一个混沌周期内可以将增量式 PID 的参数调整的更适合系统。

4 结论

运用增量式模糊自整定 PID 算法,大幅降低双连杆压电柔性机械臂的振动幅值,大幅增加了机械臂的运动稳定性;通过模糊控制器对 PID 参数的整定,又使得控制效果在运行中不断提高,能够有效用于柔性机械臂的姿态控制和振动控制;对抓取不同质量重物进行模拟仿真,证明在不同的抓取质量的条件下,控制器仍然可以适应动力学方程的改变,有效地降低柔性臂在运动过程中的振动幅值,大幅提高了其运动精度。

[参考文献]

[1] Schoenwald D A , Ozguner O. Control of flexible manipulators via singlar perturbations and distributed vibration damping [J]. Dynamics and Control ,1996 , (6) : 5-32

[2] Lei C , Colin H , Han S , *et al.* Active nonlinear vibration absorber design for flexible structures [J]. International Journal of Acoustics and Vibration 2007 ,12(2) : 51-59

[3] 周烁 李运堂 孟光 ,等.高加速度运动和精确定位臂的振动主动控制 [J].机械强度 2006 28(1) : 6-12
Zhou S , Li Y T , Meng G , *et al.* Active vibration control

for arm structure undergoing high acceleration motion and precision positioning [J]. Journal of Mechanical Strength 2006 28(1) : 6-12 (in Chinese)

[4] de Paula C F , Ferreira L H C. An improved analytical pid controller design for non-monotonic phase lti systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology 2012 20 (5) : 1328-1333

[5] 曹青松 周继惠 黎林 ,等.基于模糊自整定 PID 算法的压电柔性机械臂振动控制研究 [J].振动与冲击 , 2010 (25) : 120-128
Cao Q S , Zhou J H , Li L , *et al.* Vibration control of piezoelectric flexible manipulator based on fuzzy self-tuning PID algorithm [J]. Journal of Vibration And Shock 2010 (25) : 120-128 (in Chinese)

[6] 唐贤伦 仇国庆 李银国 ,等.基于 Matlab 的 PID 算法在串级控制系统中的应用 [J].重庆大学学报 2005 , 28(9) : 61-63
Tang X L , Oiu G Q , Li Y G , *et al.* Implementation of PID algorithm based on MATLAB in cascade control system [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition) 2005 28(9) : 61-63 (in Chinese)

[7] 张国琪 吴宏鑫.基于特征模型的柔性结构自适应振动控制方法 [J].噪声振动与控制 2008 (3) : 21-24
Zhang G Q , Wu H X. On adaptive vibration control of flexible structures using characteristic model [J]. Noise and Vibration Control 2008 (3) : 21-24 (in Chinese)

[8] 邱志成.柔性机械臂的变结构振动控制研究术 [J].动力学与控制学报 2007 5(1) : 62-67
Qiu Z C. Study on variable structure vibration control for flexible manipulator [J]. Journal of Dynamics and Control 2007 5(1) : 62-67 (in Chinese)