

基于 DSP 的机器人末端力控制系统设计

王志¹, 汪步云², 许德章²

(1. 芜湖安普机器人产业技术研究院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽工程大学 机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 工业机器人的运动分为自由运动和受力约束运动两种不同的运动类型; 受力约束运动不仅要进行精确的位置控制, 而且要对接触力进行精确控制; 文章对机械臂的末端力控制系统进行了研究; 采用了高精度电动滑台作为力控制系统的执行机构, 在电动滑台末端增加了柔性单元, 从而克服了系统柔性不足的缺点, 并且依据 Lyapunov 稳定性理论确定系统的二阶参数, 使用 Narendra 提出的稳定自适应设计方法构建了电动滑台的数学模型; 对机械臂末端柔顺系统的系统设计及算法进行了研究, 消除了外界噪声对系统的干扰, 解决了力控制的基本控制策略问题, 优化了力控制时系统的响应特性。

关键词: 工业机械臂; 阻抗控制; 受力约束运动

Design of End Force Control System of Robot Based on DSP

Wang Zhi¹, Wang Buyun¹, Xu Dezhang²

(1. Wuhu Anpu Robot Industrial Technology Research Institute, Wuhu 241000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: The industrial robot motion can be divided into two different motion types of free motion and force-constrained motion. Not only the position of the force-constrained motion is controlled accurately, but also the contact force is controlled accurately. The paper studies the control system of end force of mechanical arm. High-precision electric sliding table is adopted as the actuator of the control system, and the flexible unit is added at the end of the electric sliding table, so that the drawback of system flexibility deficiency is overcome. The second order parameter of the system is determined based on the Lyapunov stability theory, and the stable adaptive design method proposed by Narendra is used to build the mathematical model of electric sliding table. The paper studies the design and algorithm of the soft system of the mechanical arm end. The influence of outside noise on the system is eliminated, the basic control strategy problem of force control is solved, and the response characteristics of the system is optimized when the system is controlled by force.

Keywords: industrial mechanical arm; impedance control; force-constrained motion

0 引言

传统规划控制算法对受力约束控制无法达到令人满意的控制效果, 力约束控制不仅要进行精确的位置控制, 而且必须对力接触进行精确控制, 如果不能对力进行精确控制, 则可能在工作过程中损坏设备^[1]。受力约束控制又称为柔顺控制, 柔顺控制就是利用能反映外部力的传感器对工业机器人的运动轨迹进行调整, 使得工业机械臂对外界空间力的变化有响应的能力, 因此, 我们称工业机械臂对外界环境具有柔顺性^[2]。文章采用阻抗控制方法对系统进行力控制。

1 系统的整体设计方案

总体设计思想是: 利用高精度轻载电动滑台作为执行机构, 当柔顺机构处于位置控制模式运动时候, 系统根据预先规划好的路径运动; 当外界接触力超过切换阈值时, 切换至力控制模式, 同时, 力控制模式下根据事先设定好的额定压力值进行运动, 这个模式也称之为恒力控制模式^[3]。这个过程就是完

整的力控制。整体设计思想如图 1 所示。

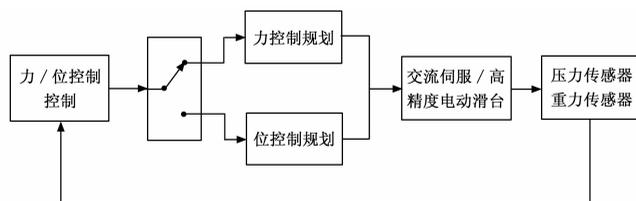


图 1 柔顺控制总体设计方案

2 高精度电动滑台的数学建模

柔顺系统的电动滑台的动力学模型为图 2 所示。

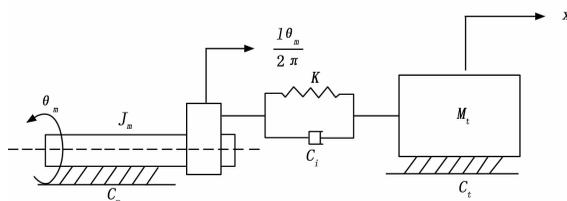


图 2 电动滑台动力学模型

图 2 中, J_n 为旋转零件的总转动惯量; θ_n 为滚珠丝杠的转角; T 为伺服电机的力矩值; K 为传动系统的轴向刚度; c_i 为直线导轨的粘性摩擦系数; c_t 为传动系统轴向粘性摩擦系数; c_n 为旋转零件的总粘性摩擦系数; M_t 为柔性元件和滑台的质量。

文章根据 Lyapunov 稳定性理论确定系统的二阶参数, 使

收稿日期: 2016-12-30; 修回日期: 2017-03-10。

基金项目: 安徽省科技攻关项目(1604a0902125); 安徽省自然科学基金项目(1608085QF154); 芜湖市科技计划项目(2016cxy03)。

作者简介: 王志(1987-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事运动控制系统分析与设计方向的研究。

许德章(1964-), 男, 安徽庐江县人, 博士, 教授, 主要从事机器人信息感知, 服务机器人与特种机器人方向的研究。

用 Narendra 提出的稳定自适应设计方法构建了电动滑台的数学模型^[5]。由此得到电动滑台的传递函数:

$$G(s) = \frac{y_p(s)}{y_r(s)} = \frac{k_c G_p(s)}{1 + G_1(s) + G_2(s) G_p(s)} \quad (1)$$

将电动滑台的主要技术参数带入公式 (1), 得到传递函数:

$$G_p(s) = \frac{0.00012176(s + 33015)}{s^2 + 1.214s} \quad (2)$$

3 柔性元件的数学建模

柔性元件主要由圆柱螺旋弹簧、3D 打印结构部件、阻尼器、圆柱导轨及直线轴承构成。

由物理学分析可以把阻尼元件、圆柱导轨和直线轴承视作阻尼器; 结构部件和压力传感器视作质量块 (物体); 圆柱螺旋弹簧视作理想弹簧。柔性元件的力模型简化如图 3 所示。

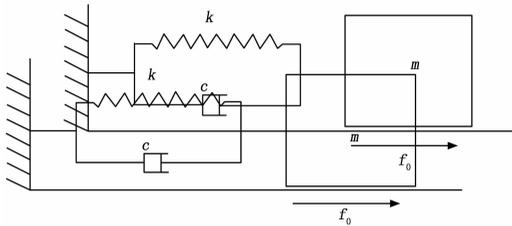


图 3 柔性元件力学模型

根据材料的已知特性: 论文把圆柱形螺旋弹簧视作理想的弹簧, 忽略弹簧的阻尼^[6]。且已知弹簧的弹性系数 $k = 0.5 \text{ N/M}$; 阻尼器的阻尼系数随着速度的变化而发生变化, 且其摩擦力和速度的大小成正比关系, 论文把比例系数设为阻尼系数 $c = 0.1$; 压力传感器和 3D 打印结构质量和为 0.25 kg ; 由于圆柱导轨和直线轴承之间的摩擦力非常小, 所以论文取摩擦力 $f_0 = 0$ 。

设系统的输入力大小为 $u(t)$, 输出力大小为 $y(t)$, 柔性元件的阻尼器其摩擦力大小为 $f dy(t)/dt$, 可以得到的系统的运动方程:

$$u(t) - f \frac{dy}{dt} - ky(t) = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (3)$$

则可以得到系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (4)$$

把已知值代入传递函数, 可以得带柔性元件的传递函数:

$$G(s) = \frac{4}{s^2 + 0.4s + 20} \quad (5)$$

4 压力信号的改进型小波阈值降噪

信号在采样和传输过程之中, 难免会夹杂一些噪声信号, 从而造成信号的失真, 若直接将染上噪声的信号作为控制系统的输入信号, 则会极大地影响传感器补偿后的精度, 增加系统误差, 降低了传感器补偿的意义。因此, 文章采用改进型小波阈值算法进行力信号的降噪处理。改进型小波阈值函数如公式 (6)。

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} - \text{sgn}(w_{j,k}) \frac{\lambda \sqrt{m}}{2 |w_{j,k}| \sqrt{m-1}}, & |w_{j,k}| > \lambda \\ \text{sgn}(w_{j,k}) \frac{|w_{j,k}| \sqrt{m+1}}{2 \lambda \sqrt{m}}, & |w_{j,k}| \leq \lambda \end{cases} \quad (6)$$

为了验证改进型阈值函数的降噪效果, 在 MATLAB 的小波工具箱中采用 DB4 小波为母小波; 输入的原信号使用 sref 信号, 干扰信号使用高斯白噪声; 采样的数据长度为 2000, 小波的分解层数为 4 层, 并与传统软阈值降噪算法、硬阈值降噪算法、文献 [4] 算法作了比较, 验证算法降噪效果。

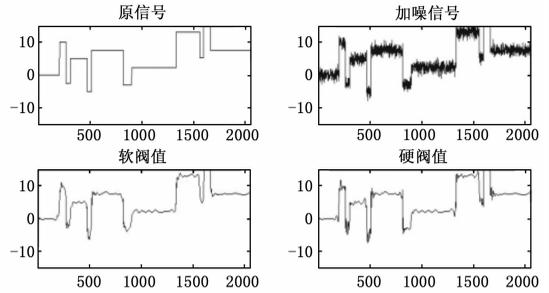


图 4 软阈值及硬阈值降噪信号

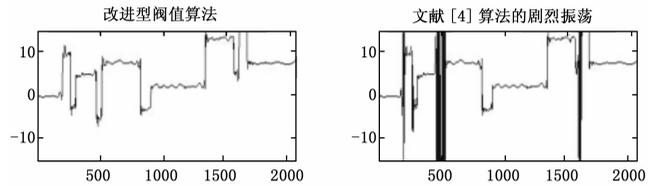


图 5 改进型小波阈值函数降噪及文献 [4] 算法出现的剧烈振荡

表 1 三种不同算法的降噪指标比较

降噪算法	硬阈值降噪	软阈值降噪	改进型阈值降噪
信噪比/db	24.8611	24.8199	24.8842
均方误差/db	1.3371	1.4050	1.0339

图 4 左上图是原始方波信号, 右上图是加过高斯白噪声后的信号, 左下图是通过小波软阈值函数处理过的信号, 右下图是小波硬阈值函数处理过的信号。综合图 4 可以看出软阈值降噪在细节处理上较为模糊, 不过没有明显的振荡; 在对细节信号的处理上, 硬阈值降噪比软阈值降噪好, 但是可以看到处理后的信号有明显的振荡。图 5 中改进型阈值降噪相对于软阈值降噪细节部分保留较好, 也没有硬阈值算法和文献 [4] 算法降噪时明显的振荡, 其最终降噪效果要好于其它三种算法。

根据表 1 信噪比 SNR 数据进行分析, 可以看出改进型阈值降噪的信噪比 SNR 值为 24.8842, 稍大于硬阈值和软阈值算法; 再从 MSE 均方误差来看, 改进型阈值降噪均方误差值 1.0339, 远小于前两种传统的算法; 根据表 1 分析新的算法在降噪效果上较传统算法有一定优势。

5 力控制的 PI 参数模糊自整定

机械臂末端柔顺系统的参数模糊自适应整定的原理如图 6 所示。

图 6 中, F_D 是系统预设的压力值; F_m 是经过重力补偿后得到的力传感器测量值, 也就有实际接触的力; F_{ec} 是当前的力误差和上一时刻力误差间的差, 也就是力误差变化量; F_e 是期望力值和实际接触力值之间的差, 也就是力误差; 模糊控制系统的输入力误差变化量 F_{ec} 与 F_e , 通过模糊推理后输出量即 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$, 也就是 PID 比例、积分、微分参数的调整量; θ 是通过运动学计算后控制器给力控制系统的控制量; x_0

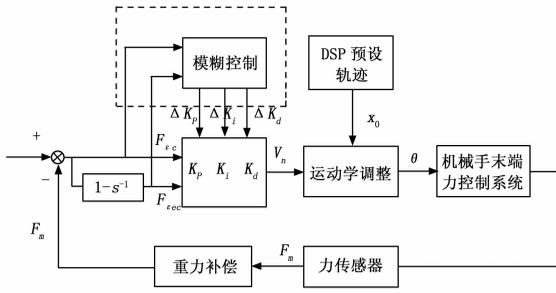


图 6 PID 参数模糊自整定

是 DSP 的预设轨迹； V_n 是 PID 控制的输出量，也就是机器人末端柔顺系统在工件坐标系里的调整速度。

以控制系统的响应速度、稳定性、稳态精度和超调量几方面作为指标来进行分析， K_p 、 K_i 、 K_d 三个调整量的作用如下。 K_p ：加快系统的响应速度，提高系统的精度； K_i ：消除控制系统静态误差； K_d ：改善了控制系统的动态特性，抑制系统的偏差变化量。根据实验及仿真可以得出模糊自适应调整 PI 参数的调整规则如表 2 所示。

表 2 参数 ΔK_p 调整模糊规则

K_p ecc ec	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NM	NM	NM	ZO	ZO
PM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
PS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
NS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
NB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 参数 ΔK_i 调整模糊规则

K_i ecc ec	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
PM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
PS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
NS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
NM	ZO	ZO	NS	NS	NM	NB	NB
NB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

表 4 参数 ΔK_d 调整模糊规则

K_d ecc ec	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
PM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
PS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
NS	PS	PS	ZO	NS	NS	NS	NB
NM	ZO	ZO	NS	NS	NS	NB	NB
NB	ZO	ZO	NS	NS	NM	NB	NB

根据图 6 的 PID 参数模糊自整定方法，并带入前文的电动滑台和柔性单元的传递函数，可以得到系统的模糊控制 SIMULINK 仿真图见图 7。

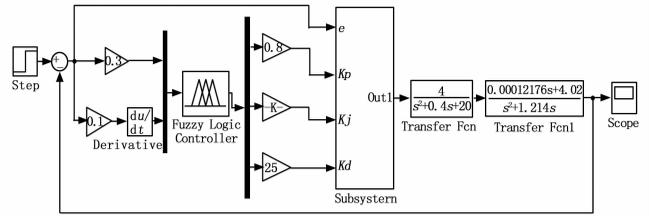


图 7 PID 参数模糊自整定仿真

带入整定好的模糊参数，仿真设定接触力为 4.5 N，仿真结果见图 8，其中实线是期望力，虚线是系统跟踪力曲线；在 0.3 s 时，期望力为 4.5 N，系统跟踪曲线在 0.6 s 左右达到 4.5 N 收敛并趋于稳定，系统没有出现明显的超调。

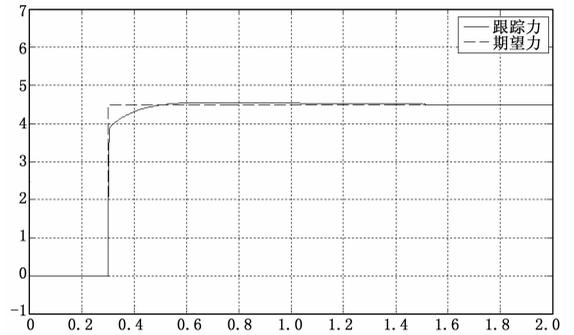


图 8 PID 参数的模糊自调整仿真

6 实验结果

实验采用华盛科技的 6 轴机械臂作为本体，将末端力控制系统安装在第 6 轴上。控制器采用 TI 公司的 TMS320F28335 型 DSP。

实验设定接触时，末端力控制系统把力控制在 4.5 N。图 9 是接触时 DSP 采集到的力反馈数据示意图。

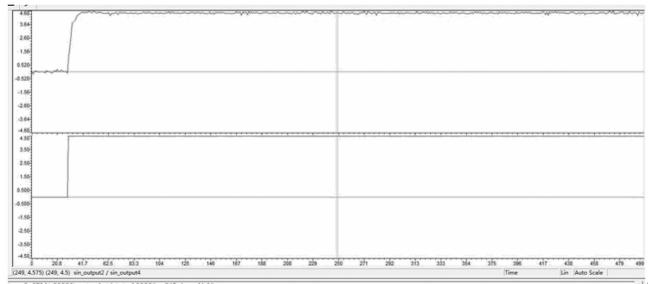


图 9 接触时的力反馈值

7 结论

图 10 中，上面的图形是力反馈信号，下面的是期望的力信号。在碰撞发生之前，系统受力为零，处于不受约束的运动状态；在第 30 个采样周期左右时，碰撞发生。从上图可看出，系统没有发生明显振荡，但是出现少量超调，持续时间约 40 个采样周期；峰值约 4.75 N，发生在第 42 个采样周期左右。之后经过 20 个采样周期，系统收敛并进入稳定状态，接触力

保持在期望值 4.5 N 左右。上述实验结果与仿真结果接近, 达到了预期效果。

参考文献:

[1] 毕 胜. 国内外机械手发展现状 [J]. 机械工程师, 2008 (7): 5-8.

[2] 李晓燕. 机械手力位置控制方法研究与应用 [D]. 河北大学, 2011.

[3] 盛国栋, 曹其新, 潘铁文, 等. 主从式机械手系统中力反馈的实

现 [J]. 中国机械工程, 2009, S2: 106-111.

[4] 吴光文, 王昌明, 包建东, 等. 基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法 [J]. 电子与信息学报, 2014 (6): 1340-1347.

[5] Le T H, Tamura Y, Matsumoto M. Spanwise pressure coherence on prisms using wavelet transform and spectral proper orthogonal decomposition based tools [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99 (4): 499-508.

[6] 周 尧, 张丰华, 田 津, 等. 基于 Matlab 的圆柱螺旋弹簧设计计算与优化 [J]. 设计与制造, 2015, 28 (1): 124-125.

(上接第 10 页)

得到多普勒频移之后, 带入式 (2), 求出水流速度 V , 其中水流速度设在常温下为 1 450 m/s。超声波在水中的速度 C 会随着水温变化, 所以需要水温进行测试, 从而对最终流速进行修正。

5 信号性能测试与结果分析

在 MATLAB 仿真情况下, 将 2 MHz 的发射信号加上信噪比为 10 的白噪声之后, 加上不同的频偏之后, 分别通过品质因数为 10、增益为 5 和中心频率为 2 MHz 的低通滤波器和带通滤波器, 所得到的信号, 通过复自相关运算测出相应频偏。根据表 1 可以发现窄带带通滤波的滤波误差明显低于低通滤波。图 9 表示在不加频偏只加噪声的情况下, 低通滤波和带通滤波的 MATLAB 信号仿真图。可以看出带通滤波的效果优于低通滤波。

表 1 低通带通滤波结果分析表

频偏/Hz	低通滤波后所测频偏/Hz	带通滤波后所测频偏/Hz	低通时误差/%	带通时误差/%
200	180.5	189.1	9.73	5.44
300	275.5	280.6	8.17	6.47
400	365.5	374.6	8.62	6.35

图 10 为回波信号经过滤波之后真实的模拟信号图。其滤波效果显著, 能很好地滤掉噪声, 虽然波峰处仍有毛刺, 但误差在可接受范围之内。经过驱动电路的发射信号强度可达 24 V, 满足换能器对发射信号的要求。将回波信号送入 FPGA 中计算处理, 就可得出水流流速。本文所设计系统, 其流速的可测范围为 0.2 ~ 5 m/s。

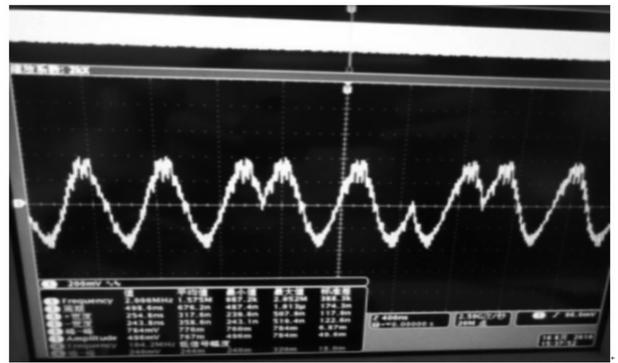


图 10 滤波后的回波图

芯片搭建硬件电路, 控制芯片内有丰富的 IP 核资源, 最大化的精简了硬件电路。对 DDS 的工作原理进行了阐述, 利用 FPGA 生成 M 码, 用 M 码对 DDS 生成的正弦波进行二相调制, 增加发射信号的能量, 减少回波信号因非平稳随机过程所产生的频率估计误差, 提高测量精度。在本文工作中, 优化设计了发射电路的换能器驱动电路和接收电路的信号滤波电路。驱动电路满足了换能器的发射需求, 滤波电路使用窄带滤波电路可以实现精确滤波, 减少回波信号的噪声。利用复自相关算法对接收到的信号进行分析处理, 能很好地计算出水流流速。具有测量精度高、误差低等优点。

参考文献:

[1] 田 淳, 刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.

[2] 邓昌闰. 超声多普勒流速仪的研制 (下) [J]. 水利信息化, 1990 (3): 22-26.

[3] 范寒柏, 贾少栓, 左保收, 等. 单波束声学多普勒流速仪设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2016 (9): 37-40.

[4] Haide M. A pulse-to-pulse incoherent flow measurement with frequency-coded signals [J]. 2013, 47 (1): 986-989.

[5] 陈斌杰. 基于 FPGA 的扩频信号发生器的研究与设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.

[6] 范思航. 超声波换能器驱动及前端接收电路研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2014.

[7] 闻蔚峰. 基于 FPGA 的水声通信信标信号生成及数字滤波 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.

[8] Williams A. Analog filter and circuit design handbook [M]. McGraw Hill Professional, 2013.

[9] 朱 昊. 基于软件无线电的数字 ADCP 信号处理系统的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.

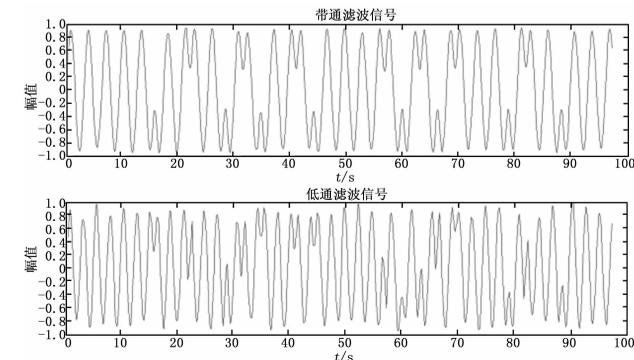


图 9 低通滤波和带通滤波信号仿真图

6 总结

本文介绍了多普勒测流的基本原理, 并以 FPGA 为控制