

硅锭电火花线切割 RBF-PID 恒张力控制研究

刘鹏, 罗福源, 孙凌云

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对硅锭电火花线切割电极丝存在张力不稳定、幅度变化大等问题,设计一种双边张力伺服控制系统。建立张力伺服系统数学模型,根据该模型设计一种基于 RBF 神经网络的 PID 控制算法并与传统 PID 控制算法进行仿真对比。仿真结果表明:优化后的 RBF-PID 可在 15 ms 内完成 PID 参数整定,实现了超调量<5%、调整时间<25 ms 的控制性能,克服了普通 PID 系统参数改变后需再次整定、自适应性差的缺点。硅锭电火花切割实验表明:RBF-PID 控制算法的张力波动率比普通 PID 算法降低了 40%,显著抑制了走丝速度、预紧力变化等因素对电极丝张力稳定性的影响。

关键词:硅锭;电火花线切割;恒张力控制;RBF-PID

中图分类号:TG661 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)06-0202-05

Research on RBF-PID Constant Tension Control for WEDM of Silicon Ingot

LIU Peng, LUO Fuyuan, SUN Lingyun

(College of Mechanic and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For the problems of unstable tension and large amplitude changes in the wire electrode wire of silicon ingot WEDM, a bilateral tension servo control system was designed. A mathematical model of the tension servo system was established, and according to the model, a PID control algorithm based on RBF neural network was designed and compared with the traditional PID control algorithm. The simulation results show that the optimized RBF-PID can realize rapid self-tuning of PID parameters within 15 ms, and achieve the control performance of less than 5% overshoot and less than 25 ms adjustment time. It overcomes the shortcoming of poor adaptability that needs to be readjusted after the parameters of the ordinary PID system are changed. The silicon ingot WEDM cutting experiment shows that the tension fluctuation rate of the RBF-PID control algorithm is 40% lower than that of the ordinary PID algorithm, which significantly suppresses the influence of factors such as wire speed and pre-tightening force change on the tension stability of the electrode wire.

Keywords: silicon ingot; WEDM; constant tension control; RBF-PID

0 引言

硅晶体材料硬度高、脆性大,一般的机加工方法容易产生崩裂,或者由于解理现象产生整体断裂,可加工性极差^[1]。高速往复电火花线切割(WEDM)因其非接触加工方式正逐渐成为硅晶体的有效加工手段^[2]。但是在切割加工过程中电极丝由于受到诸多外界因素干扰,会产生位置偏移,且偏移量会随着张力的变化而改变^[3],这严重影响硅片表面切割质量与加工的稳定性。

为解决电极丝张力波动带来的诸多问题,众多学者在控制张力波动方面进行了深入研究和探索。程伟建^[4]采用“重锤加双导轮铅丝松紧调节器”组合的方式对电极丝张力进行控制,在一定程度上解决了电极丝振动幅度大的问题;蒋近等^[5]采用基于相邻轴误差的多电机同步控制

方法,保证了切割线张力稳定。李强^[6]采用带死区的 PID 对电极丝张力进行闭环控制。HAAS P 等^[7]对切缝中的流场进行仿真分析,设计了可以高效清洁电解物的新型喷嘴,有效降低了冲洗过程对电极丝的影响。这些学者都在机械结构方面作出了一定改进,并以此为基础采用较为传统的控制方法对张力进行控制。但张力控制系统实际上是一个复杂的机电控制系统,系统的参数随着加工的进行往往会发生变化,采用传统的控制方法难以进一步突破提高张力控制精度的瓶颈。本文针对硅锭加工过程中电极丝张力波动的问题,设计了恒张力控制系统,并以此为基础,采用 RBF 神经网络对 PID 参数进行自动快速整定,克服了 PID 手动调参速度慢、不准确以及系统参数改变后需再次整定的缺陷,使电极丝张力在整个硅锭切割过程中保持良好的稳定性。

基金项目:江苏省自然科学基金优秀青年基金项目(BK20160084);南京市产学研后补助项目资助(201722014)

第一作者简介:刘鹏(1996—),男,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为数控技术与装备自动化控制。

1 恒张力控制系统工作原理

电火花线切割恒张力控制系统根据执行机构的不同可以分为机械式、磁粉式和电机式。机械式存在控制精度低、时滞性大等缺点。磁粉式虽具有张力调节方便、快捷等优点,但对张力的恒定起效慢^[8],难以满足硅钨切割过程中对张力伺服执行装置的快速响应性等要求。另外,传统的非对称式恒张力控制方案在往复走丝电火花线切割机床中存在加工区域电极丝张力不一致的固有缺陷。因此本文基于电机式的执行装置设计了如图 1 所示的双边恒张力控制系统。

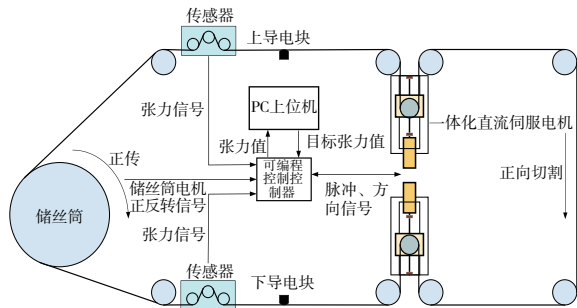


图 1 恒张力控制系统原理图

储丝筒电机在正常运转前,通过 PC 上位机设置电极丝目标张力值,张力传感器在控制系统中作为反馈元件,负责采集电极丝的实际张力值,将采集到的张力值转化为数字量信号后送入控制器,控制器根据设定目标值与实际值的差值来控制伺服执行装置的速度以及方向,直流伺服驱动装置将伺服电机的旋转运动转化为直线运动以控制电极丝架上电极丝的长度,从而达到控制电极丝张力的目的。

2 控制对象模型构建

将电极丝恒张力控制过程简化成如图 2 所示。

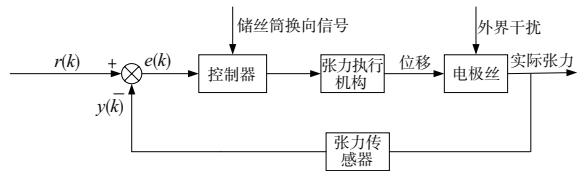


图 2 恒张力系统控制框图

张力执行环节由直流伺服电机以及直线滑台组成,直线滑台将直流伺服电机的旋转运动转化为滑台的直线运动,电机通过联轴器与丝杆相连,丝杆带动张力调节轮上下运动,从而驱动电极丝长度改变,进行张力实时调整,伺服执行机构系统框图如图 3 所示。

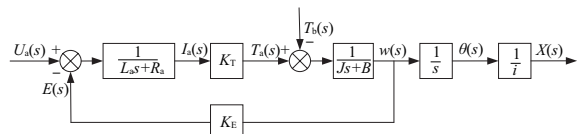


图 3 伺服执行机构系统框图

伺服执行机构的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{X(s)}{U_a(s)} = \frac{w(s)}{U_a(s)} = \frac{K_T/i}{s(L_a s + R_a)(J s + B) + K_E K_T s} \quad (1)$$

电极丝作为最终被控对象,输入为位移,输出为电极丝的实际张力,在电极丝弹性形变范围内,可将这一部分传递函数表示为

$$G_2(s) = \frac{2EA}{l} \quad (2)$$

由此可以得出被控对象的系统传递函数为

$$G(s) = G_1(s) G_2(s) = \frac{K_T/i}{s(L_a s + R_a)(J s + B) + K_E K_T s} \cdot \frac{2EA}{l} \quad (3)$$

式(3)中参数含义及其所对应的数值如表 1 所示。

表 1 传递函数中相关参数的数值及其含义

参数	含义	数值
$K_T/(Nm/A)$	电机转矩常数	0.218
$K_E/(Nm/A)$	反电动势常数	0.218
R_a/Ω	电枢电阻	2.6
L_a/mH	电枢电感	1.1
$J/(kg \cdot m^2)$	折算至轴的转动惯量	9.45×10^{-5}
i/L	转子到滑台的传动比	2π
L/mm	丝杠螺距	8
E/Pa	材料弹性模量	3.2×10^{11}
A/m^2	电极丝横截面积	2.54×10^{-8}

3 RBF-PID 张力控制器设计

RBF 神经网络是一种三层向前的局部逼近网络,由于输入到输出的映射是非线性的,而隐含层空间到输出空间的映射是线性的。因此能够加快学习速度并避免局部极小问题^[9-10],其结构如图 4 所示^[11]。

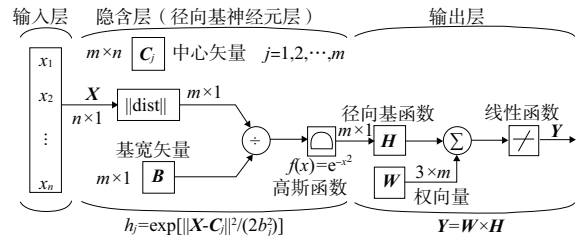


图 4 RBF 神经网络结构

假设径向基(RBF)神经网络中输入层节点的个数为 n ,则可用向量表示为

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T \quad (4)$$

输入层到隐含层的权值为 1,隐含层节点个数为 m ,设 RBF 神经网络的径向基向量为 $\mathbf{H} = [h_1, h_2, h_3, \dots, h_m]^T$,选取高斯函数作为径向基函数,则 h_j 可以表示为

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{X} - \mathbf{C}_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中: b_j 为隐含层第 j 个神经元节点的基宽参数; $\mathbf{C}_j = [c_{j1}, c_{j2}, c_{j3}, \dots, c_{jn}]^T$ 为隐含层第 j 个神经元的中心向量。设隐含层到输出层的权值向量为 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_m]^T$,则输出层可以表示为

$$Y = W^T \times H \quad (6)$$

设取第 k 次采样输入与输出的误差为 $e(k)$, 取 RBF 神经网络的指标函数为 $E(k) = \frac{1}{2} e(k)^2$, 采用梯度下降法^[12], 对网络参数以及隐含层到输出层的权向量进行调整。

$$\Delta w_j(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_j(k)} = \eta e(k) h_j \quad (7)$$

$$\Delta b_j(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial b_j(k)} = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial h_j(k)} \cdot \frac{\partial h_j(k)}{\partial b_j(k)}$$

$$\eta e(k) w_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \quad (8)$$

$$\Delta c_{ji}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial c_{ji}(k)} = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial h_j(k)} \cdot \frac{\partial h_j(k)}{\partial c_{ji}(k)} = \eta e(k) w_j h_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \quad (9)$$

考虑上次权值调整量大小对本次权值调整的影响, 引入与上次调整有关的动量系数 β , 动量系数取值在 0~1 之间, 以平滑权值等参数调整过程, 避免引起调节震荡, 进行第 k 次更新得到第 $k+1$ 次网络参数为:

$$w_j(k+1) = w_j(k) + \eta \Delta w_j(k) + \beta \Delta w_j(k-1) \quad (10)$$

$$b_j(k+1) = b_j(k) + \eta \Delta b_j(k) + \beta \Delta b_j(k-1) \quad (11)$$

$$c_{ji}(k+1) = c_{ji}(k) + \eta \Delta c_{ji}(k) + \beta \Delta c_{ji}(k-1) \quad (12)$$

将本文电极丝张力伺服控制系统引入径向基 (RBF) 神经网络加经典的增量式 PID 控制, 得到图 5 所示的基于 RBF 神经网络的 PID 恒张力控制器。

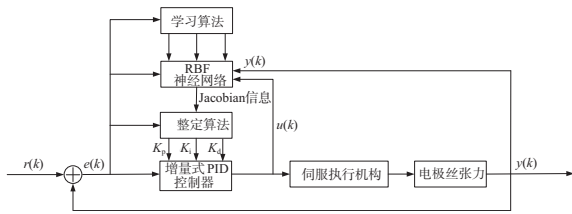


图 5 RBF-PID 恒张力控制器

额定电极丝张力输入信号 $r(k)$, 与经过传感器测得的实际输出信号 $y(k)$ 相比, 得到偏差信号 $e(k)$ 、 $u(k)$ 以及 $y(k)$ 作为 RBF 神经网络的输入信号, 经过 RBF 神经网络整定后得到 PID 控制器的 3 个参数 K_p, K_i, K_d 。取 PID 参数向量 $K = [K_p, K_i, K_d]^T$, 采用梯度下降法对 PID 3 个参数进行调整, 调整公式如下:

$$\Delta K_p(k) = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial K_p} = -\eta_p e(k) \frac{\partial y}{\partial u} e_p \quad (13)$$

$$\Delta K_i(k) = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial K_i} = -\eta_i e(k) \frac{\partial y}{\partial u} e_i \quad (14)$$

$$\Delta K_d(k) = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial K_d} = -\eta_d e(k) \frac{\partial y}{\partial u} e_d \quad (15)$$

式中 η_p, η_i, η_d 为 PID 3 个参数的学习率; $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为 Jacobain 信息, 表示被控对象输入对输出的灵敏度, 计算方法如下:

$$\frac{\partial y}{\partial u} \approx \frac{\partial y_m}{\partial u} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \quad (16)$$

仿真及实验开始前计算还需要确定隐含层网络节点的个数、权值向量、学习率、动量因数等参数, 本文仿真与实验中隐含层节点个数取 6, PID 参数学习率取 4.5, 网络参数更新的学习率取 0.8, 动量因子取 0.3。

4 仿真与实验分析

4.1 Matlab 仿真

本文采用 Matlab 自带的 Simulink 工具箱结合 S 函数对两种不同的控制算法进行仿真。首先取神经网络的结构为 3-6-1, 并确定 RBF 网络输入为 $e(k)$ 、 $u(k)$ 、 $y(k)$ 。然后构建被控对象数学模型, 并将被控对象离散化处理, 取采样周期为 10 μ s。最后给定阶跃输入信号, 搭建的 Simulink 仿真系统框图如图 6 所示。

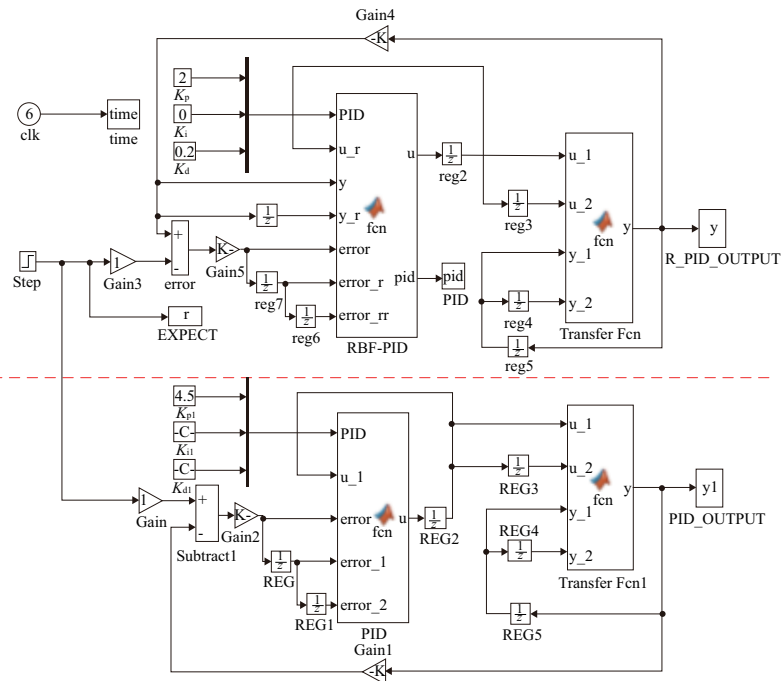


图 6 Simulink 仿真系统框图

利用试凑法不断完善普通 PID 的 3 个控制参数,得到 $K_p = 4.5$ 、 $K_i = 0.35$ 、 $K_d = 0.1$ 。与 RBF-PID 仿真对比,效果如图 7 所示。

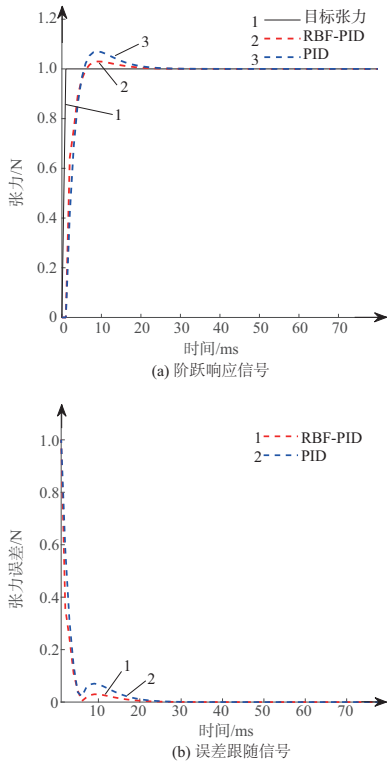


图 7 仿真系统输出

图 7(a)中线 1 代表期望输出,线 3 是通过试凑法得到的 PID 仿真波形,线 2 为基于 RBF 的 PID 仿真波形。图 7(b)中线 1 为基于 RBF 的 PID 输出误差跟随曲线,线 2 为普通 PID 误差跟随曲线。分析图 7(a)可知,采用 RBF-PID 控制方式下输出信号的超调量略低于普通 PID 控制方式,控制系统稳定的时间基本都在 25 ms 附近,两者控制效果基本一致,均满足控制系统精度及其稳定性要求。

随着加工进行,系统参数会发生变化,当电极丝的直径由原来的 0.18 mm 磨损至 0.15 mm 时,电极丝横截面积

变为 $1.77 \times 10^{-8} \text{m}^2$,此时普通 PID 若用原来的 PID 参数,即会出现张力控制系统超调量大、调整时间长等现象,严重的还会引起系统振荡,如图 8 所示。普通的 PID 的超调量已达 20%左右,系统稳定的时间也增加了 1 倍左右,控制效果已满足不了张力控制的高精度、快速调节的要求;采用基于 RBF 神经网络的 PID 控制可以根据系统自动优化 PID 参数,输出响应的超调量在 5%以内,在 25 ms 内完成对目标值追踪,解决了系统参数变化后普通 PID 控制效果变差的问题,提高了系统的稳定性。

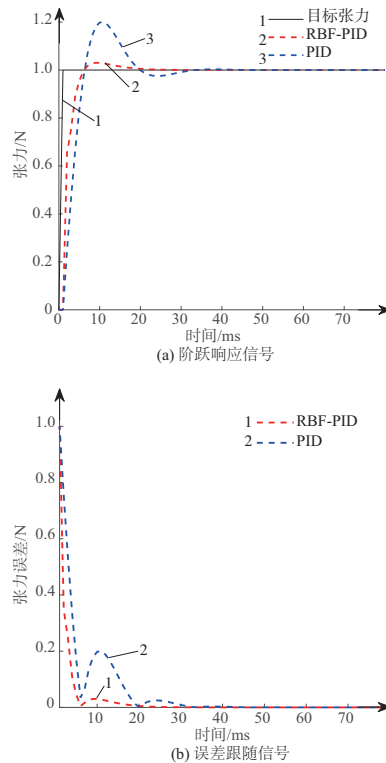


图 8 系统参数变化后仿真系统输出

RBF 神经网络可根据系统的参数完成 PID 参数的快速调节,系统参数变化之后 RBF 调节 PID 参数曲线如图 9 所示。

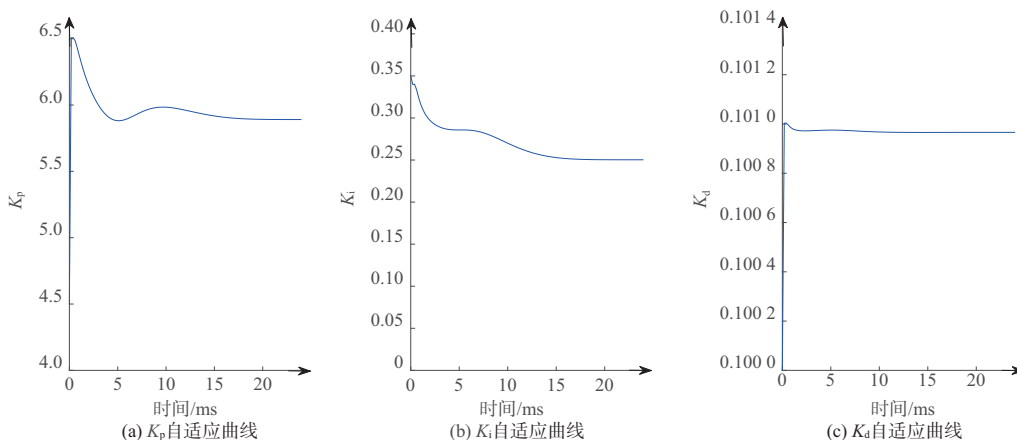


图 9 PID 参数整定曲线

优化后的 RBF-PID 算法根据系统参数不同完成了 PID 参数的自适应调节,调节的时间控制在 15 ms 以内,

满足控制系统调节的快速性需求,克服了系统因参数发生变化需手动试凑 PID 参数的缺陷,进一步提高了系统的自

适应性与抗干扰性。

4.2 张力波动实验分析

搭建如图 10 所示的实验样机进行张力波动控制实验,此样机可以完成弹簧式、普通 PID、RBF-PID 3 种不同的控制方式下张力控制实验。其中,机床上的紧丝器用以

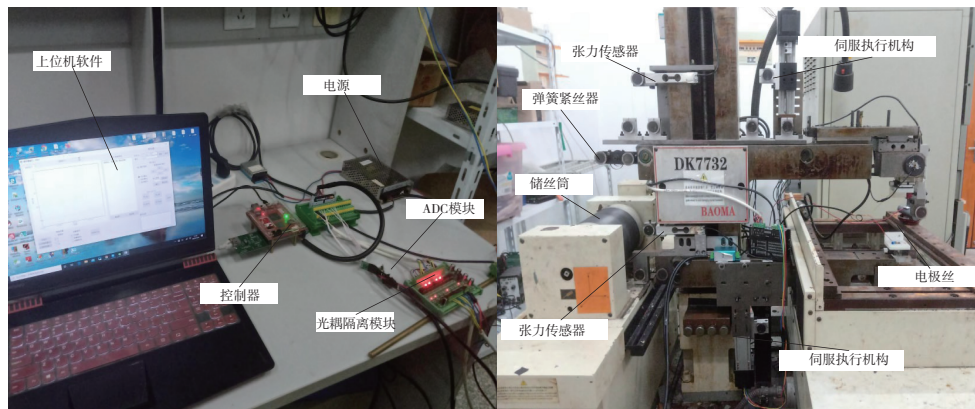


图 10 恒张力控制实验样机

实验时采集 20 s 内电极丝张力的平均值、最大值和最小值,并计算张力的波动率。张力波动率公式如下:

$$\delta = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\text{aver}}} \times 100\% \quad (17)$$

采用弹簧式恒张力控制装置走丝速度 10 m/s 时张力波动率高达 18.63%,如图 11 所示。在普通 PID 控制方式下,张力波动率随丝速的上升较为缓慢,对电极丝张力值有较好的控制作用。采用基于 RBF 神经网络的 PID 控制方式,张力波动率几乎不会随着丝速的上升而增加,可以很好地将张力波动率控制在 5% 以内。此外在丝速相同的情况下,基于 RBF 神经网络的 PID 控制张力波动率最小,对电极丝张力控制效果最为显著。

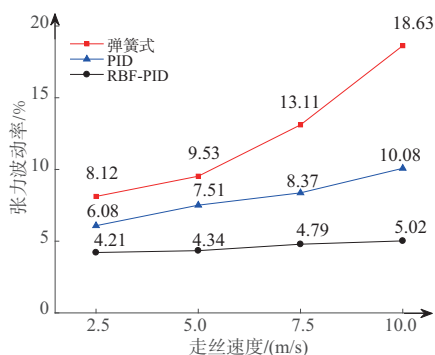


图 11 张力波动率随速度变化曲线

提高预紧力有利于降低电极丝张力波动率,并提高硅片表面切割质量,但过大的预紧力会增大电极丝磨损速度,降低电极丝使用寿命。本文优化后的控制算法便很好地解决了此矛盾点。图 12 表示的是在走丝丝速 7.5 m/s 下,张力波动率随预紧力的变化规律。当电极丝的预紧力下降时,采用弹簧式恒张力控制方式会使张力波动率迅速上升,此时若要进一步降低张力波动率,须提高电极丝预

完成弹簧式恒张力控制,伺服执行机构结合控制器、上位机软件完成其他两种控制方式。FPGA 实现传统 PID 控制,上位机软件实现张力数据实时显示以及 RBF 神经网络优化部分,更新后的 PID 参数通过千兆以太网传输至 PID 控制器。

紧力,不可避免地降低了电极丝使用寿命;使用普通 PID 控制方式时,张力波动率得到了较好的控制,预紧力对张力的影响效果也有所降低,但整体效果要劣于优化后的 PID 算法。在同一预紧力下,优化后的 PID 控制张力波动率最低,抑制了电极丝高预紧力的影响,进一步提高了电极丝使用寿命。

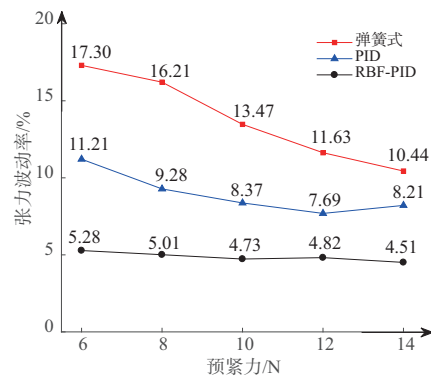


图 12 张力波动率随预紧力变化曲线

在张力波动率方面,优化后的 PID 控制算法较普通 PID 算法平均降低了 40%,将波动率控制在 5% 以下,满足硅锭切割对电极丝张力的苛刻需求,同时使用优化后的算法可以在适中的电极丝张力、较高的丝速下工作,在保证硅片加工质量的前提下,更好地提高电极丝的使用寿命与加工效率。

5 结语

1) 张力控制系统是一个复杂的机电控制系统,系统参数随加工过程往往发生变化,传统的 PID 控制算法需要根据系统手动更新参数,难以保证张力控制的精度与稳定性要求。

(下转第 238 页)

参考文献:

- [1] 章盼梅. 单模单冲数控冲床加工路径优化方法研究[J]. 现代制造工程, 2020(5): 71-76.
- [2] 李亚凯, 沈彦, 周一军. 基于 SOA 和柔性制造技术的生产调度系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(11): 156-160.
- [3] 涂海宁, 唐友平, 刘建胜, 等. 综合单元控制系统中的关键控制技术[J]. 制造技术与机床, 2019(4): 133-137.
- [4] 冯志新, 刘华刚, 郝瑞参. 汽车塑料件模具柔性制造系统设计[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10): 95-98.
- [5] 张俊, 汤腾飞, 方汉良. 面向大型航空结构件的混联柔性制造

系统概念设计与性能评估[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(1): 1-10.

- [6] 邵克勇, 郭浩轩, 韩峰, 等. 具有控制约束的分数阶混沌系统柔性同步控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1325-1330.
- [7] 丁鹏, 薛裕颖, 熊小敏, 等. 5G+边缘计算在智能汽车柔性制造中的应用[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 26-31.
- [8] 熊先青, 刘慧, 庞小仁. 大规模定制家具柔性制造系统构建与关键技术[J]. 木材工业, 2019, 33(2): 20-24.

收稿日期: 2021-03-24

(上接第 206 页)

2) 仿真结果表明, RBF 神经网络可根据系统参数实现 PID 控制参数自动、快速优化, 解决了 PID 手动调参速度慢、不准确以及系统参数改变后需再次整定的一系列问题。进一步提高了张力控制系统的响应速度与控制精度。

3) 实验结果表明, 采用 RBF-PID 控制算法的控制器可将张力波动率控制在 5% 以内, 比普通 PID 降低了 40%, 显著地抑制了电极丝磨损变形以及走丝速度、预紧力变化等对张力稳定性的影响。

参考文献:

- [1] 卢泽生, 王明海. 硬脆光学晶体材料超精密切削理论综述[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 15-21.
- [2] CHEN H R, LIU Z D, HUANG S J, et al. Study of the mechanism of multi-channel discharge in semiconductor processing by WEDM[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, 32: 125-130.
- [3] XIONG G Y, ZHENG M Z, LI D Y, et al. Study on the influence of non-electrical parameters on processing quality of WEDM-HS and improvement measures[C]//Computer and Computing Technologies in Agriculture IV, 2011: 514-520.
- [4] 程伟建. 多槽同步电火花线切割机床结构改进及运动控制研

究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.

- [5] 蒋近, 戴瑜兴, 邵克存, 等. 多线切割机走线系统的张力控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 183-187.
- [6] 李强. 往复走丝电火花线切割恒张力控制及工件厚度识别的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] HAAS P, PONTELANDOLFO P, PEREZ R. Particle hydrodynamics of the electrical discharge machining process. part 1: Physical considerations and wire EDM process improvement[J]. Procedia CIRP, 2013(6): 41-46.
- [8] 丁成才, 黄晓华, 邱明波, 等. 往复走丝电火花线切割机床电极丝恒张力装置性能研究[J]. 电加工与模具, 2018(1): 20-24.
- [9] LIU K, WU Y, ZHU T M, et al. Improved RBF network torque control in flexible manipulator actuated by PMAs[J]. Robotica, 2019, 37(2): 264-280.
- [10] ZHANG X M, MA C, YU X M. A neural network model for financial trend predicting[J]. Cluster Computing, 2019, 22(2): 3487-3494.
- [11] 焦银亮, 罗福源, 杨杰. 基于 RBF 的电火花多电源同步均衡控制算法[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(3): 170-174.
- [12] 李明, 封航, 张延顺. 基于 UMAC 的 RBF 神经网络 PID 控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(10): 2063-2070.

收稿日期: 2020-11-30

(上接第 231 页)

5 结语

1) 仿真结果表明: 混联式混合动力汽车动力转向系统中电液复合控制条件下液压油及转向力矩存在一定的波动; 制动系统中电液复合控制下车速及制动力也存在一定的波动; 悬挂系统中引入半主动控制电液复合控制效果更优。

2) 软件仿真可以较准确地对混联式混合动力汽车动力转向系统、制动系统、悬挂系统电液复合控制趋势进行预测, 但是与实际测量值还是存在差异, 需要根据后续试验参数不断调整、修正, 以得到最优控制方式。

3) 以混联式混合动力汽车为主要目标的新能源汽车及以电液复合控制条件下的智能化控制在未来是众多研究者着重关注和深入研究的方向。

参考文献:

- [1] 孙宝文. 插电式混合动力汽车电驱动系统过压抑制最优控制[J]. 电子测量技术, 2019, 42(3): 7-10.
- [2] 张怡然, 赵韩, 黄康, 等. 混合动力汽车多目标参数解耦优化方法研究[J]. 机械传动, 2019, 43(6): 6-12.
- [3] 张权让. 四驱插电式混合动力汽车电液复合制动系统压力协

调控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

- [4] 邓涛, 程栋, 周豪, 等. 基于灰色预测的混合动力系统 ECMS 能量管理策略研究[J]. 机械传动, 2017, 41(2): 6-11.
- [5] 何小路, 鲍久圣, 阴妍, 等. 混合动力车辆控制策略研究现状[J]. 机械传动, 2017, 41(1): 196-200.
- [6] 鹿静. 基于 ADVISOR 的纯电动汽车电-液复合制动协调控制策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [7] 许笑月. 基于 ADVISOR 的电液混合动力汽车再生制动的研究与仿真[D]. 成都: 西华大学, 2017.
- [8] 薛刘朋. 燃料电池与超级电容器混合动力汽车电气层的建模与抗扰控制研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2017.
- [9] 刘永刚, 解庆波, 秦大同, 等. 基于工况识别的混合动力汽车能量管理策略优化[J]. 机械传动, 2016, 40(5): 64-69, 73.
- [10] ZHANG H T, HAN W, XIONG L, et al. Design and research on hydraulic control unit for a novel integrated-electro-hydraulic braking system[C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Busan, Korea (South); IEEE, 2016: 139-144.
- [11] 韩云武, 罗禹贡, 李克强, 等. 混合动力汽车下坡辅助电-液复合制动控制方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 112-118.

收稿日期: 2020-12-01