

动力卡盘动态夹紧力测试系统研制

贾梦,薛丁睿,刘思凡,王卫英
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:为测量旋转状态下车床动力卡盘夹紧力,设计并制作了一套基于 S 型压力传感器的卡盘无线测力装置,该装置由传感器、变送器、数据存储及显示模块三部分组成。对传感器进行性能测试验证,并设计与制作了变送器实物。采用 LabVIEW 建立虚拟机,对采集到的信号进行存储及显示。实验测试结果表明:该系统可以满足动力卡盘夹紧力的测试需求。

关键词:动力卡盘;传感器;夹紧力;无线

中图分类号:TG751 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0229-05

Development of Clamping Force Test System for Powerchuck

JIA Meng, XUE Dingrui, LIU Sifan, WANG Weiyang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to measure the clamping force of the chuck in the rotating state, a set of wireless chuck force measuring device based on the S-type pressure sensor is designed and produced, which mainly consists of three parts as sensor, transmitter, data storage and display, and whose performance of the sensor is verified. The transmitter is designed and its real object is produced. LabVIEW is applied to build a virtual machine to store and display the collected signals. The experimental test results show that the system is able meet the test requirements of the clamping force of the power chuck.

Keywords: power chuck; sensor; clamping force; wireless

0 引言

动力卡盘是连接车床主轴与工件的专用夹具,用于工件的定位与夹紧。它是车床主轴与工件连接的桥梁,车床主轴的运动及精度通过卡盘传递给工件^[1]。高速旋转的工件及其夹紧系统具有巨大的运动能量,由于卡爪离心力的大小与转速的平方成正比,夹紧力下降很多。当有效夹紧力小于抵抗切削力所需的最小夹紧力时,工件就会被甩出而造成重大事故^[2]。为保证安全,需要对动力卡盘夹紧力进行动态补偿。因此需要得到卡盘在不同转速下的夹紧力数值。

本文针对动力卡盘动态夹紧力设计了一套测试系统。测试系统主要由传感器、无线变送器及无线接收终端等组成^[3]。本文分析了 S 型电阻应变片式压力传感器的检测电路,采用 Abaqus 有限元分析软件对弹性体的应变规律进行了仿真验证;采用 Altium Designer 设计了传感器输出信号的处理电路及供电电路,制作了变送器实物;采用 LabVIEW 建立了数据接收虚拟机对采集到的信号进行存储及显示,为车床动力卡盘夹紧力的动态补偿提供了技术支持。

1 测力传感器

测力传感器的作用是将压力转变为电信号输出。本

文采用 S 型电阻应变片式压力传感器,其主要由弹性体、电阻应变片和检测电路组成^[4]。检测电路如图 1 所示,其中 E 为供电电压, U_0 为输出电压; R_1 与 R_2 为定值电阻,作用是保护电路,防止过载^[5];应变片 $R_{g1} - R_{g4}$ 组成全桥电路, U 为电桥电压,弹性体不受力时,应变片阻值相等, $U_0 = 0$,弹性体受压时,弹性体承压后产生应变场,应变片阻值随之改变,使 U_0 值改变,且输出值与压力成正比例关系^[6];应变片 R_{p1} 、 R_{p2} 为补偿片,弹性体受压阻值减小时对 U_0 进行非线性补偿^[7-8]。

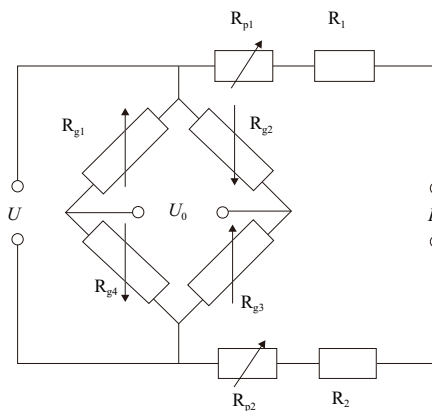


图 1 压力传感器检测电路

传感器应变片粘贴方式如图 2 所示。传感器材质为

第一作者简介:贾梦(1992—),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为机械设计。

不锈钢,灵敏度为 2mV/V,量程为 1.5 T。本文采用 Abaqus 有限元分析软件对传感器性能进行了验证,图 3 所示为夹紧力 3 140 N 时传感器在应变片敏感栅粘贴方向的弹性应变输出云图。在应变片粘贴位置取 A、B、C、D 4 个点,输出其在不同载荷下沿应变片敏感栅方向的弹性应变值,结果汇总如表 1 所示。仿真结果表明,应变片位置的应变与压力成正比例关系,传感器的功能可靠。

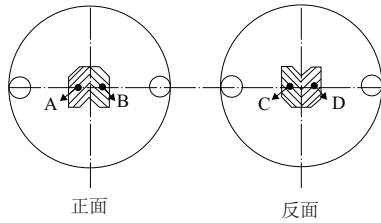


图 2 应变输出点位置

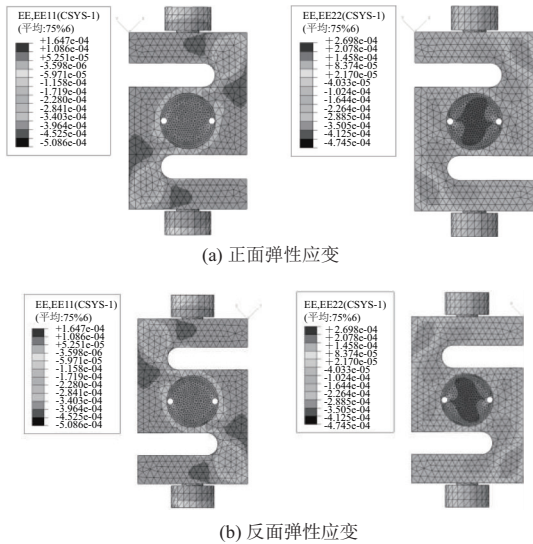


图 3 传感器弹性应变云图(压力 3 140 N)

表 1 不同压力下敏感栅方向的弹性应变值

序号	压力/N	敏感栅方向的应变值/($\mu\text{m}/\text{m}$)			
		A	B	C	D
1	0	0	0	0	0
2	3 140	-230.6	178.0	175.6	-228.1
3	6 280	-461.2	356.1	351.3	-456.3
4	9 420	-691.8	534.1	527.0	-684.5

2 变送器设计

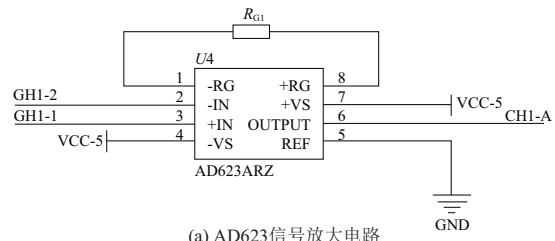
2.1 信号调理电路设计

由于传感器输出的电压信号较小,5 V 供电时输出的理论最大电压仅为 10 mV,因此需要对其进行放大及滤波处理。由于卡盘工作时处于旋转状态,因此将信号经模数转换后无线发送至接收终端。为降低成本、提高效率与系统稳定性,采用模块化方法搭建信号处理电路,为各模块设计对应的接口电路就可以使用模块相应功能。

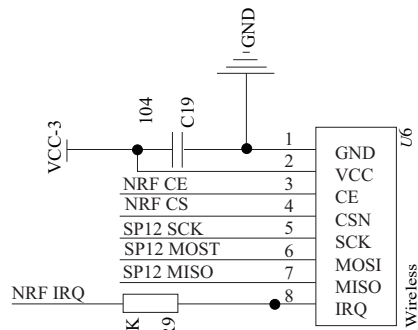
采用 AD623 芯片搭建信号放大电路,AD623 是一款易于使用的仪表放大器,具有低功耗、低噪声、低温漂、宽增益范围(1~1 000)等特点。使用时外接反馈电阻实现对放大电路增益的控制。AD623 具有 8 个引脚,接口电路如图 4(a)所示,放大倍数为 G 时,所选反馈电阻阻值为 $R_{G1} = (100/G - 1) \text{ k}\Omega$ 。

采用 NRF24L01 无线模块进行信号的发送与接收,NRF24L01 模块具有体积小、功耗低,便于开发等优点,在 2.4 GHz 的工作频段上,最高传输速率可以达到 2 Mbit/s,满足传感器的数据传输要求。无线发送模块接口电路如图 4(b)所示。

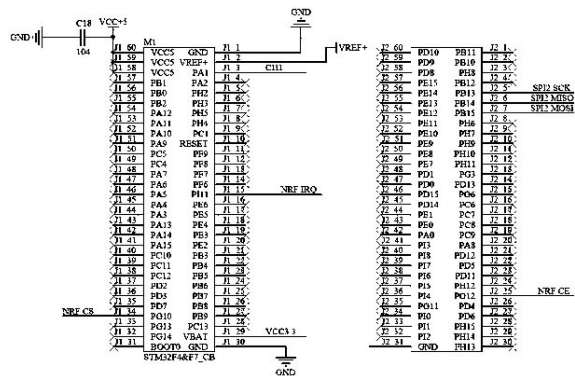
采用 STM32F4 核心板作为系统处理器,核心板内置 ADC 模块,具有体积小、性能稳定、接口丰富、易于编程等优点,核心板接口电路如图 4(c)所示。核心板内置的 AD 模块采集电压信号范围 0~+3.3 V,因此选用 AD623 的反馈电阻 R_{G1} 阻值为 330 Ω ,此时放大倍数约为 304 倍,传感器 5 V 供电时,放大后的理论最大信号电压为 3.04 V。



(a) AD623 信号放大电路



(b) 无线发送模块电路



(c) STM32 核心板接口电路

图 4 信号调理模块电路

2.2 供电模块设计

测力系统采用可充电的锂电池供电,电池最大输出电

压 12.6 V, 可持续输出电流为 5 A, 电池容量为 2 800 mAh, 适用于功耗 60 W 以内的电路系统。系统各模块所需电压如图 5 所示, 压力传感器供电电压为 5 V, 放大电路供电电压为 ±5 V, 核心板及无线模块供电电压 3.3 V。因此需要设计相应的调压电路, 将输入电压转化为各模块所需要的电压。

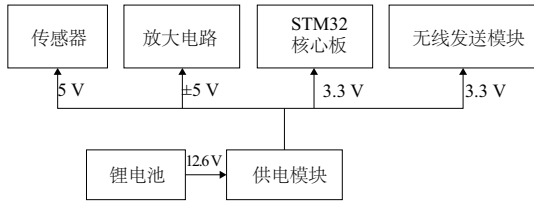
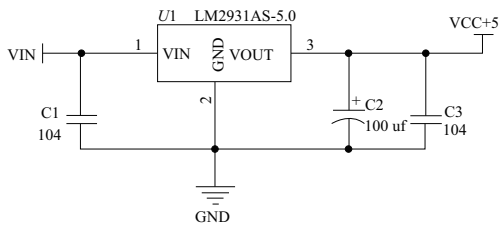
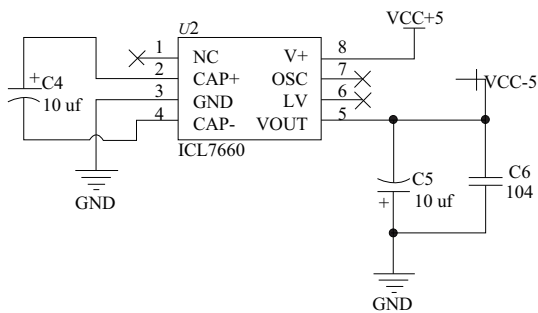


图 5 变频器各模块组成及电压

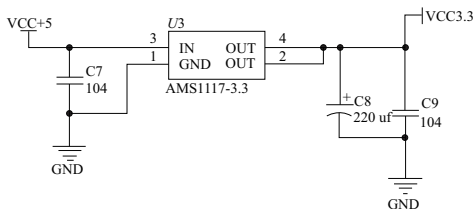
首先将锂电池提供的 +12.6 V 的电压通过低压差线性稳压器 LM2931-5.0 转换为 +5 V 的电压源分别提供给传感器、AD623。再将 +5 V 电压通过小功率极性翻转电源转换器 ICL7660 转换为 -5 V 的电压源提供给 AD623。然后将 +5 V 的电压通过正向低压降稳压器 AMS1117-3.3 转换为 +3.3 V 电压提供给核心板、无线模块。最后将 +3.3 V 的电压源经过一阶 RC 滤波电路后作为 AD 转换器参考电压。所有电压源输出端都与地之间连接了相应的去耦电容来滤除各电压源的高频杂波, 各电压转换模块电路如图 6 所示。



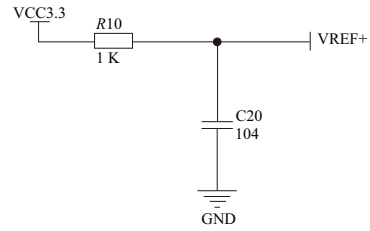
(a) LM2931AS-5.0 电路



(b) ICL7660 电路



(c) AMS1117-3.3 电路

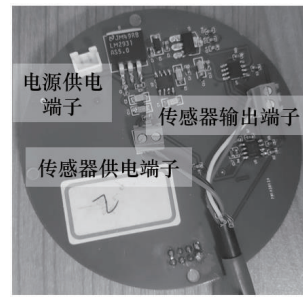


(d) 一阶 RC 滤波电路

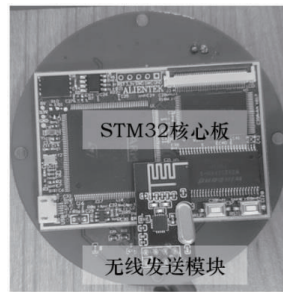
图 6 电压转换模块电路

3 测力系统实物制作与标定

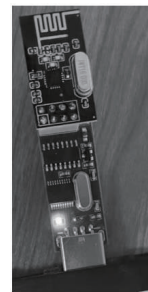
使用 Altium Designer 16 软件设计 PCB 板, 采用双层敷铜板作为印制板, 双面铜皮与地线网络相连接。设计完成后打样, 焊接相关电子元器件到 PCB 板上, 测试无异常后导入驱动程序, 完成变送器的制作。变送器实物如图 7 所示。



(a) PCB 反面



(b) PCB 正面



(c) 无线接收

图 7 变送器实物

传感器所测得的数据最终以串口通信的方式发送到 PC 端, 采用 LabVIEW 2015 软件开发用于实时接收串口数据的虚拟机。本文采用串行通信 ActiveX 控件 MSCOMM32 实现计算机与下位机的通信, 虚拟机界面如图 8 所示。开始读取后可以同时实现 6 路数据的接收与处理, 测试数据被存放到指定地址可供访问。

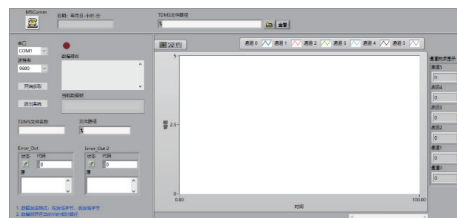


图 8 数据处理与显示虚拟机界面

采用压力机对传感器进行静态标定,压力机可以实时显示施加的压力,最大压力输出为 10 T。得到施加压力与测试系统输出汇总如表 2 所示。

表 2 压力机示数与测试系统输出

序号	压力/N	示数
1	3 988	0.877 0
2	6 000	1.317 0
3	7 980	1.755 0
4	9 920	2.198 6
5	11 100	2.467 8

将压力 $f(x)$ 与示数 x 使用 Matlab 进行多项式拟合,得到 $f(x)$ 与 x 间的关系式:

$$f(x) = 4\,468x + 99.31。$$

采用此表达式,在 4 000~11 000 N 范围内,无线测力系统误差 < 0.75%。

4 实验测试与分析

夹紧力测试系统设计、制作完成以后,针对不同类型的动力卡盘还需设计相应的测试工装。图 9(a)所示为安装在 CAK6150Di 车床上的一种动力分度卡盘,卡盘上预留了夹具安装的标准接口,根据接口尺寸为传感器设计测试专用工装并安装在传感器上,如图 9(b)所示,将传感器通过测试工装安装在卡盘上并夹紧,如图 9(c)所示。为变送器设计外壳防止其测试时甩出,外壳如图 9(d)所示。动力分度卡盘测试系统总体测试方案如图 10 所示,传感器通过测试工装被卡盘夹紧,变送器通过安装基板固定在卡盘的端面。

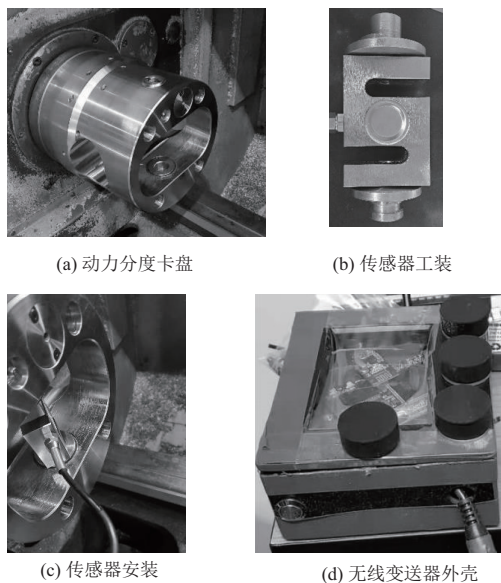


图 9 测试工装设计

卡盘的理论夹紧力在供油压力分别为 2 MPa、3 MPa、4 MPa 时分别为 5 652 N、8 478 N、11 304 N。测试系统安装完成后,开始夹紧力测试,过程如下:

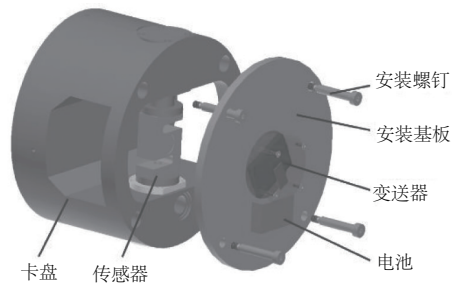


图 10 测试系统安装方案

1) 设置初始供油压力为 2 MPa,通过 LabVIEW 虚拟机读取夹紧力的静态稳定值;

2) 设置车床转速分别为 200、500、800、1 000、1 200、1 500、1 800 r/min,通过车床控制面板读取主轴实际转速,记录不同转速下夹紧力的稳定值;

3) 停转主轴,增大供油压力到 3 MPa 读取静态夹紧力并重复 2) 中的测试步骤;

4) 停转主轴,增大供油压力到 4 MPa 读取静态夹紧力并重复 2) 中的测试步骤。

动力分度卡盘的夹紧力实测值汇总如表 3 所示,绘制夹紧力变化折线图如图 11 所示。从图表中数据可以看出,转速达到 1 800 r/min 时,动力卡盘夹紧力在初始供油压力分别为 2 MPa、3 MPa、4 MPa 时损失分别为 891 N、720 N、544 N,夹紧力损失分别达 16.7%、8.7%和 5.0%。

表 3 动力卡盘动态夹紧力测试

序号	转速/ (r/min)	夹紧力实测值/N		
		油压=2 MPa	油压=3 MPa	油压=4 MPa
1	0	5 321	8 238	10 813
2	229	5 300	8 230	10 799
3	536	5 259	8 176	10 745
4	835	5 177	8 108	10 690
5	1 040	5 108	8 039	10 645
6	1 240	5 026	7 955	10 580
7	1 540	4 869	7 854	10 433
8	1 840	4 430	7 518	10 269

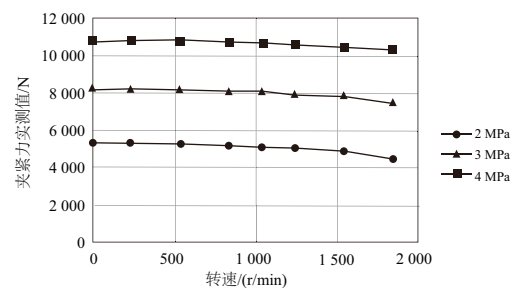


图 11 不同转速下动力卡盘夹紧力

夹紧力测试结果表明,本文设计的测试系统可以在卡盘旋转时获取其实际夹紧力;初始供油油压较小时,该款动力卡盘的夹紧力受转速影响较大,因此在保证加工质量前提下应选用较高的初始供油压力。

5 结语

本文设计并制作了一套带无线传送功能的车床夹紧力测试系统样机,完成了传感器选型、变送器设计与制作、传感器的标定等,并进行了实验测试。测试结果表明该测试系统可以有效满足卡盘夹紧力的测试需求。

参考文献:

[1] 张文亭. 数控车床液压卡盘夹紧控制系统的研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2014(2):74-76,86.

[2] 冯平法,郁鼎文,吴志军,等. 离心力补偿卡盘高速回转夹紧特性研究[J]. 中国机械工程,2007,18(14):1648-1652.

[3] 于凯,王扬威,闫勇程,等. 仿生水下机器人三维力测试系统

研究[J]. 机械制造与自动化,2016,45(5):152-155,229.

[4] 孙昊辰. 测力传感器的稳定性及其优化工艺[J]. 计算机产品与流通,2020(4):274.

[5] 张勇. 民机驾驶盘力测试技术研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(5):207-210.

[6] 陈会金. 楔式动力卡盘定心精度与夹紧力特性研究[D]. 烟台:烟台大学,2016.

[7] 姜学文. 半导体应变片全桥电路的补偿[J]. 仪表技术,1989(4):7-9.

[8] 姜培,李毅,王慧忠. 一种楔形液压动力三爪卡盘静态夹紧力测量仪的设计与应用[J]. 制造技术与机床,2020(10):124-125,132.

收稿日期:2020-12-09

(上接第 183 页)

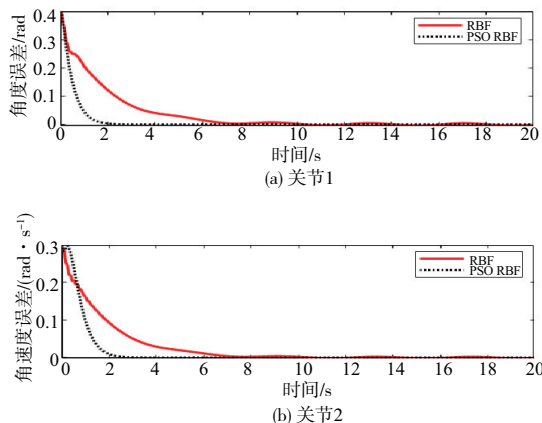


图 6 关节 1 和关节 2 的轨迹跟踪误差

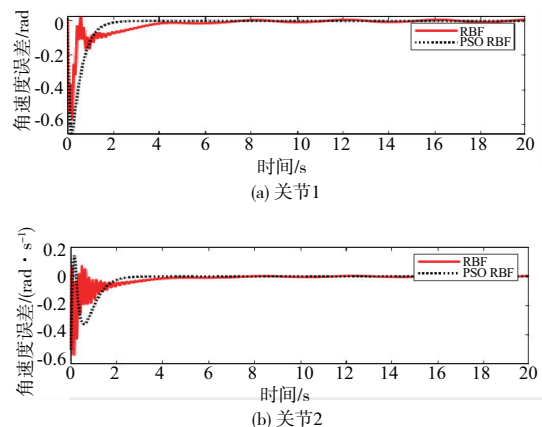


图 7 关节 1 和关节 2 的速度跟踪误差

从图 4 和图 5 分析得出,PSO-RBF 神经网络控制的轨迹和速度与理想的轨迹和速度基本吻合,而且与 RBF 神经网络控制相比,PSO-RBF 的轨迹更快地吻合理想轨迹。

从图 6 和图 7 可以看出,关节 1 轨迹吻合快将近 4s,关节 2 轨迹吻合快将近 2s。这表明 PSO-RBF 神经网络自适应控制实现了二连杆机械臂的高精度轨迹控制效果。通过和 RBF 控制方法对比,PSO-RBF 神经网络自适应控

制方法能够确保关节 1 和关节 2 的不确定项误差在一个更小的收敛领域,这说明该方法能更快逼近系统不确定项,保证控制系统在更短时间获得补偿并提高性能。

5 结语

1) RBF 神经网络控制能够在部分未确定机械臂模型参数的情况下获得较好的轨迹跟踪性能。而用 PSO 优化后的 RBF 神经网络控制可以获得更好的轨迹跟踪性能。

2) 通过和 RBF 神经网络自适应控制相比,PSO-RBF 神经网络自适应控制系统能够在更短时间内吻合理想控制轨迹,且控制稳定,提高了控制性能。

参考文献:

[1] 蔡自兴,谢斌. 机器人学[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2015.

[2] 张翠. 基于 RBF 神经网络的机械臂运动控制算法及应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2014.

[3] 孙秀军. 基于 RBF 神经网络的机械手轨迹规划及运动仿真研究[D]. 淄博:山东理工大学,2007.

[4] 夏俊. 基于 RBF 神经网络的无人水面舰艇自适应控制[J]. 机械制造与自动化,2019,48(3):185-188.

[5] 刘福才,高娟娟,王芳. 不同重力环境下空间机械臂神经网络鲁棒自适应控制[J]. 宇航学报,2013,34(4):503-510.

[6] 张文辉,刘文艺,叶晓平,等. 自由漂浮空间机械臂基于神经网络的鲁棒自适应控制[J]. 机械工程学报,2012,48(21):36-40.

[7] 洪昭斌,陈力. 基于高斯基模糊神经网络的漂浮基柔性空间机械臂自学习控制[J]. 工程力学,2009,26(6):172-177.

[8] 张瑞芬. 受到外部扰动的空间机械臂基于模糊递归神经网络的控制策略[J]. 机电工程,2017,34(1):62-67.

[9] JIA W, ZHAO D, SHEN T, et al. A new optimized GA-RBF neural network algorithm [J]. Computational Intelligence and Neuroscience,2014:982045.

[10] 肖凡,李光,周鑫林. 多连杆机械臂 GA-RBF 神经网络轨迹跟踪控制[J]. 机械科学与技术,2018,37(5):669-674.

[11] 陈文元,杨东勇. 基于 PSO 的神经网络机械臂自校正控制[J]. 机电工程,2008,25(1):44-47.

[12] 张震,张亚. 基于 PSO-RBF 神经网络的串联机械臂逆运动学分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(36):195-200.

[13] 刘金琨. RBF 神经网络自适应控制及 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社. 2014.

收稿日期:2020-12-23