

基于BP神经网络的三轴转台偏航控制

刘凯,路平

(军械工程学院 光学与电子工程系,河北 石家庄 050003)

摘要:三轴飞行仿真转台系统作为一种非线性、强耦合系统,难以用精确的数学模型进行描述。文中以三轴飞行转台系统中的回转转台伺服控制系统为研究对象,在分析了回转转台的驱动机构—直流无刷电机的数学模型的基础上,对常规PID控制算法和BP神经网络PID控制算法进行了比较分析。对BP神经网络算法和计算流程进行了简介。同时对阶跃和正弦信号进行MATLAB仿真。仿真结果表明,该方法可以实现有效的控制,并且与传统PID算法相比,具有更好的自适应性和鲁棒性。

关键词:三轴转台;神经网络;直流无刷电机;MATLAB

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)09-0210-03

Heading Control of Three-axis Simulators Based on BP NN

LIU Kai, LU Ping

(Department of Optics and Electronics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The three-axis flight motion simulator table is a nonlinear and strongly-coupled system. With its research focus on the servo control system of the three-axis flight motion simulator table and the mathematical model of the brushless DC motor which is used as the drive mechanisms of the rotary table, make an comparison between the traditional PID control arithmetic and NN PID control way arithmetic based on model forecast. MATLAB simulation is conducted to test stepping and sloop input signals. Simulation result indicates that this method can get satisfied control result, and it has the capability of better self-adaptability and robustness.

Key words: three-axis table; NN; brushless DC motor; MATLAB

0 引言

三轴飞行仿真转台是一种高性能的半实物仿真测试设备。它可以按照指令的要求,模拟飞行器飞行时的转角、角速度、角加速度以及飞行扰动,实时再现飞行器在空中飞行时的姿态^[1]。三轴飞行仿真转台是一个复杂的多输入多输出、非线性、强耦合系统。要实现转台超低速、宽调速、高频响、高精度地控制,需要选择与其相适应的控制算法。常规PID控制算法简单、鲁棒性好、可靠性高,但是控制器参数一经选定,就不能进行自适应调整,使得转台系统的控制精度变差。神经网络具有自学习和自适应的能力,可对转台系统进行学习进而确定最佳的PID参数^[2],实现了对转台的有效控制。

文中以回转转台作为控制对象,采用神经网络PID控制算法,实现转台的高精度控制。

1 回转转台

三轴转台是电动转台,电机是各轴的主要部件。其主要作用是驱动转台按照设定要求进行偏转,准确模拟飞行器在空中的飞行姿态。回转转台作为三轴转台的重要组成部分,主要用来模拟飞行器在空中飞行时航向角的变化规律。

直流无刷电动机既具有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点,又具有直流电动机的运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好的特点,因此应用范围日益广泛^[3]。本三轴飞行仿真转台系统中的回转转台就是采用直流无刷电机作为执行驱动元件,以PWM波控制直流无刷电机转动的。直流无刷电机是以自控式运行的,因此负载变化的情况下不会出现振荡和失步的现象。

根据转台的结构特征,执行驱动电机和负载视为一个整体,可得被控对象满足微分方程为^[4,5]:

$$U_a = E_a + I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (1)$$

$$T - T_L = J_m \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{d\Omega}{dt} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 U_a 为外部输入电压, E_a 为额定励磁

收稿日期:2011-12-30;修回日期:2012-04-05

基金项目:国防预研项目(9140A24070609JB3402)

作者简介:刘凯(1986-),男,硕士研究生,研究方向为导航、制导与控制;路平,教授,硕士生导师,研究方向为通信与信息系统。

下电动机的反电势, I_a 为电枢电流, R_a 为电枢回路总电阻, L_a 为电枢回路总电感, T 为电机电磁转矩, T_L 为负载转矩, J_m 为转子惯性矩, Ω 为转子的机械角速度。

式(1)、(2)经拉氏变换为^[6]:

$$\left. \begin{aligned} U(s) - E_a(s) &= (R + Ls)I_a(s) \\ E(s) &= C_e s \Omega(s) \\ C_m I_a(s) &= J_m s^2 \Omega(s) + T_L(s) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据上式,得到回转转台的结构框图如图 1 所示。

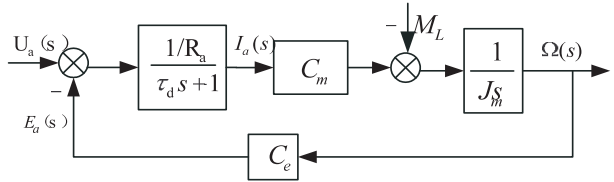


图 1 回转转台结构框图

根据回转转台的具体参数结构,建立系统的近似数学模型为:

$$G(s) = \frac{0.02419}{8.901 \times 10^{-6} s^2 + 0.004437s + 0.00718} \quad (4)$$

2 BP神经网络PID

2.1 应用BP神经网络理论的PID控制器简介

BP神经网络,即误差反向传播神经网络,是一种具有隐含层的多层前馈网络。它可以通过自身的反复学习了解所控制的系统结构、参数等特性,进而得到系统所需要的控制规律。因此基于BP神经网络构成的控制器在调节能力和鲁棒性方面具有较强的优势。

神经网络输出层的输出参数对应PID控制器的3个可调参数,通过神经网络的学习不断调整加权系数,从而使其稳定状态对应于某种最优控制律下的控制器参数,并使控制器适应受控对象结构参数以及环境的变化。

应用BP神经网络理论的转台PID控制系统结构如图2所示。控制器由两部分组成:

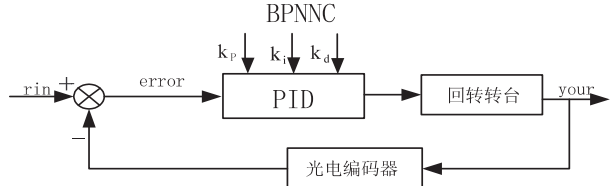


图 2 BP神经网络PID控制结构图

①常规PID控制器:它对回转转台的驱动装置一直流无刷电机进行闭环控制。在线调整3个控制参数 k_p 、 k_i 、 k_d ;

②BPNN为BP神经网络结构。其网络输出值与PID三个控制参数一一对应。根据回转转台系统的运行状态,实时调整三个参数,使得转台的控制精度达到要求^[7]。

回转转台的神经网络PID控制器采用三层BP网络模型4-5-3结构形式。其中,将系统给定值 $r(k)$ 、被控对象 $y(k)$ 、误差 $e(k)$ 和1作为网络输入层的四个节点输入,输出层的三个输出值分别作为需要调整的PID三个控制参数^[8,9]。

根据数字PID控制算法的增量算式:

$$\Delta u(k) = k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (5)$$

设输出层的输出分别为:

$$X_1 = e(k) - e(k-1), X_2 = e(k), X_3 = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (6)$$

应用神经元的自学习功能,使得隐含层的权值 w_i 不断进行自适应调整。这样神经网络的输出值和控制性能最优的PID控制器的参数一一对应。

2.2 应用BP神经网络的PID算法实现和流程

由网络结构可以确定,网络输入层有四个输入^[10]:

$$O_j^{(1)} = x(j) \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

网络隐含层的输入、输出分别为:

$$\begin{aligned} \text{net}_i^{(2)}(k) &= \sum_{j=1}^4 w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \\ O_i^{(2)}(k) &= f(\text{net}_i^{(2)}(k)) \end{aligned} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (8)$$

隐含层的加权系数为 $w_{ij}^{(2)}$;输入层、隐含层、输出层分别用上角标(1)、(2)、(3)代表。

将正负对称的Sigmoid函数作为隐含层的活化函数:

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (9)$$

BP神经网络的输出层的输入输出为:

$$\left. \begin{aligned} \text{net}_l^{(3)}(k) &= \sum_{i=1}^5 w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \\ o_l^{(3)}(k) &= g(\text{net}_l^{(3)}(k)) \\ o_1^{(3)}(k) &= k_p \\ o_2^{(3)}(k) &= k_i \\ o_3^{(3)}(k) &= k_d \end{aligned} \right\} \quad (l = 1, 2, 3) \quad (10)$$

PID控制器的输出是不能为负值的,所以将非负的Sigmoid函数作为输出层神经元的活化函数:

$$g(x) = \frac{1}{2}(1 + \tanh(x)) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (11)$$

根据设定的理想输出与给定值的逻辑关系来确定误差函数。设第 k 个样本的理想输出为 $U(k)$, 得到BP神经网络控制器的性能指标函数为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (u(k) - U(k))^2 \quad (12)$$

根据梯度下降法修改权系数,即:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} + \alpha w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (13)$$

上式中, η 为学习效率, α 为惯性系数, 取值范围均为 0 ~ 1 之间。

学习过程包括正向传播和反向传播两部分。正向传播开始对所有连接权系数随机地置以初值, 将输入信息经隐含层单元进行处理, 然后传向输出层得到输出值。如输出值不是期望得到的结果, 则进入反向传播过程。将期望值与输出值之间的误差通过原有的连接通路返回。不断修改各层神经元之间的连接权值以减小误差。不断重复这个过程, 直到实现转台要求的控制精度^[11]。

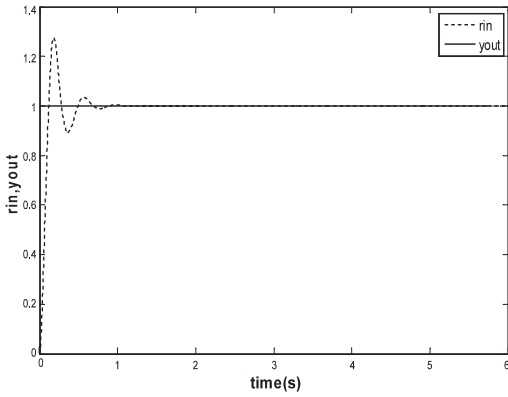
3 仿真实验

根据上文得到的回转转台的数学模型, 考虑偏航角的传递函数, 对回转转台的控制方法进行仿真分析。

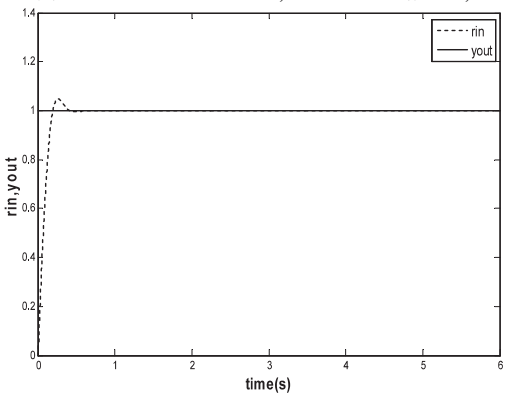
在常规 PID 控制方法下, 经过参数反复试凑, 可以得到较好输出效果。同时, 应用神经网络 PID 算法, 选取 $\eta = 0.2$, $\alpha = 0.05$, 输出效果更加理想。

在阶跃输入和正弦输入时, 响应曲线如图 3 所示。应用 BP 神经网络理论设计的 PID 控制器其参数自整定曲线如图 4 所示。

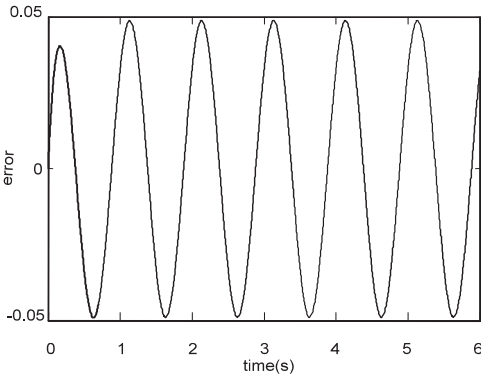
由图 3、4 可见, 对于阶跃响应无论是在调整时间还是稳态误差方面, BP 神经网络 PID 控制的效果均好于传统 PID 控制的效果, 对于正弦信号, BP 神经网络



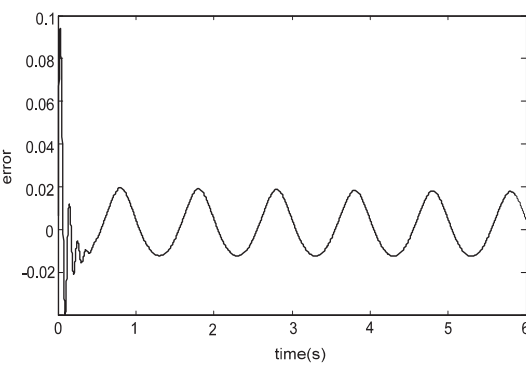
常规 PID 阶跃响应曲线



神经网络 PID 阶跃响应曲线

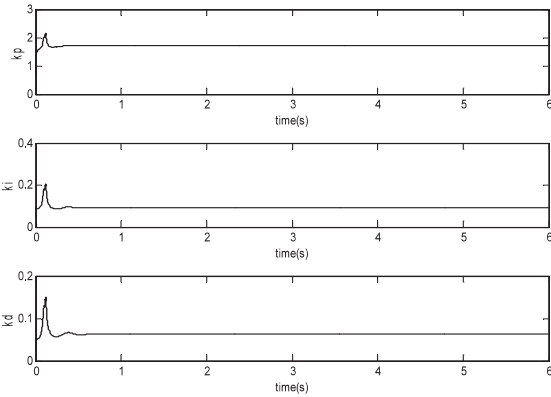


常规 PID 正弦响应误差曲线

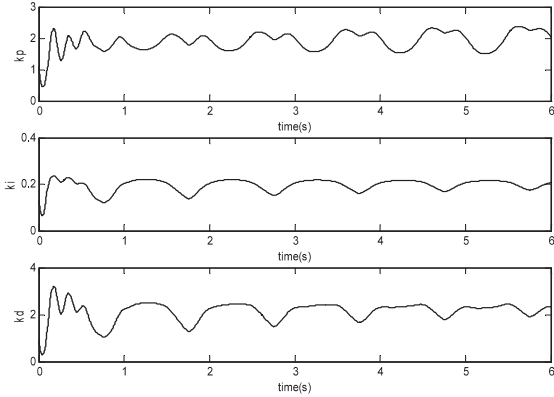


神经网络 PID 正弦响应误差曲线

图 3 控制效果曲线图



阶跃响应 PID 参数调整曲线



正弦响应 PID 参数调整曲线

图 4 PID 参数调整曲线

入回波损耗小于-28dB,噪声系数小 1.1dB,功率增益大于 15dB,电压增益高于 32dB。

表 1 电路性能指标及与其它设计的比较

参数	本设计	文献 [4]	文献 [13]	文献 [14]	文献 [5]	文献 [8]
工艺/ μm	0.18	0.25	0.35	0.09	0.18	0.18
频率/GHz	2.492	2.4	2.2	2.4	2.47	2.45
NF/dB	1.1	1.35	1.87	2.56	2.0	1.956
S11	-28.88	-20.3	-13	-12.66	-10.62	-30
S21	15.21	17.0	10	22.1	18.9	20.058
OP1dB/dBm	/	/	/	/	-13.2	-17.1
Vdd	1.8	2.5	1.8	1	1.5	1.8
功耗/mW	9	16.0	16.2	12.9	6.45	22.4

参考文献:

[1] 杨国敏,肖高标.射频低噪声放大器电路结构设计[J].电子测量技术,2006,29(1):1-2.

[2] 殷蔚.0.65 V 3mW CMOS 低噪声放大器设计[J].现代电子技术,2007(15):1-2.

[3] 王志功,陶蓁.我国第一块工作频率高于 2GHz CMOS 射频集成电路研制成功[J].高技术通讯,2000(9):1-3.

[4] 丘聪,叶甜春,范军.2.4GHz 可变增益 CMOS 低噪声放大器设计[J].固体电子学研究与进展,2010(1):1-3.

[5] Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits[M]. New York:McGraw-Hill,2001.

[6] 黄伟,庄海孝,马成炎,等.应用于双频 GPS 接收机的

CMOS 低噪声放大器设计[J].微电子学与计算机,2010(12):1-3.

[7] 王良坤,马成炎,叶甜春.2.4GHz CMOS 低噪声放大器设计[J].微电子学,2008,38(2):262-264.

[8] Gil I, Cairo I, Sieiro J J. Low-power single-to-differential LNA at S-band based on optimized transformer topology and integrated ESD[J]. IET Journals on Electronics Letters,2008,44(3):198-199.

[9] Choi J, Im D, Lee K. A Self-tuned Balun-LNA with Differential Imbalance Correction and Blocker Filtering[J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2011, 21(12): 673-675.

[10] Lai Dengjun, Chen Yingmei, Wang Xiaodong, et al. A CMOS Single-differential LNA and current bleeding CMOS mixer for GPS receivers[C]//IEEE Conferences on Communication Technology (ICCT). [s.l.]:IEEE,2010;677-680.

[11] 齐凯,蔡理.2.45 GHz 0.18 μm 全差分 CMOS 低噪声放大器设计[J].微电子学,2009(6):1-4.

[12] Razavi B. RF Microelectronics[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[13] Deen M J, Chen C H, Cheng Y. MOSFET Modeling for Low Noise, RF Circuit Design[C]// IEEE CICC 2002. [s.l.]:[s.n.],2002.

[14] Enz C, Cheng Y. MOS Transistor Modeling for RF IC Design[J]. IEEE Transactions on Solid-state Circuits,2000,35(2):186-201.

(上接第 212 页)

PID 控制的跟踪效果有一定的优势,并且 PID 参数可以自行进行整定,使得工程实际应用更加便捷^[12]。

4 结束语

将神经网络理论应用到传统 PID 领域,既能够充分利用神经网络较强的自主学习功能,又能够体现传统 PID 控制器在结构上和控制性能上的特点。它能够学习和适应系统的动态特性,显示了很强的鲁棒性和容错性,系统的控制性能在很大程度上得到了改善。通过 MATLAB 进行仿真分析,结果表明:应用 BP 神经网络理论设计的 PID 控制器与常规的 PID 控制相比较具有较高的控制品质。

参考文献:

[1] Demore L A, Andrianos N P, Peterson R A. Design study for a high accuracy three-axis test table[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. [s.l.]:[s.n.],1985.

[2] 陈道炯,单世宝,宫赤坤,等.基于神经网络 PID 控制的系统非线性校正的研究[J].仪器仪表学报,2006,27(7):715-719.

[3] 朱玲.基于 DSP 的无刷直流电机控制系统研究[D].武

汉:武汉理工大学,2010.

[4] 汪小锋.基于 PWM 的直流无刷电机控制系统[D].南京:南京理工大学,2008.

[5] 朱喜娜,陆达,范汉清.基于 BP 算法 PID 控制器研究[J].计算机技术与发展,2010,20(5):183-186.

[6] 裴忠才,尹丽,王占林.基于神经网络的仿真转台控制系统[J].北京航空航天大学学报,2005,31(9):1045-1048.

[7] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2005.

[8] 彭奎,廖碧莲,宋绍剑.基于 BP 神经网络的汽包建模及其控制器设计[J].计算机技术与发展,2011,21(6):122-124.

[9] Taek C M, Henryk F. Neural-network-based spacecraft attitude control[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. [s.l.]:[s.n.],2002.

[10] 刘军,孙发白,白华煜.基于模糊神经网络自适应控制研究[J].科学技术与工程,2005,5(1):55-58.

[11] 任子武.基于神经网络的参数自整定 PID 控制算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2004.

[12] Kulkarni N V, Phan M Q. A Neural Network Based Design of Optimal Controllers for Nonlinear Systems[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. [s.l.]:[s.n.],2002.

基于 BP 神经网络的三轴转台偏航控制

作者: [刘凯, 路平](#)
作者单位: [军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2012(9)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201209055.aspx