

基于 BP 神经网络的多升降台同步控制研究

高庆吉, 于婷婷, 牛国臣, 王力

(中国民航大学 机器人研究所, 天津 300300)

摘要: 大型分布式升降台控制系统中, 其同步控制是最关键的问题之一; 针对传统神经网络 PID 控制器在多升降台同步控制的结构复杂及同步时间长等问题, 提出一种基于相邻偏差耦合控制结构的 BP 神经网络 PID 同步控制策略, 在确定同步误差定义的基础上, 建立异步电机的矢量控制模型, 改进了 BP 神经网络同步控制器; 对四升降台同步控制系统的仿真实验表明: 所研究的控制策略同步误差小, 收敛速度快, 实用性强。

关键词: 多升降台; 同步控制; 相邻偏差耦合; BP 神经网络; PID

Study of Synchronization Control for Distributed Stage Elevators Based on Back Propagation Neural Network

Gao Qingji, Yu Tingting, Niu Guochen, Wang Li

(Robotics Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The synchronization is one key issue in the large distributed multiple stage elevators. According to the problems of complex structure and big synchronization deviation occurring in the traditional neural network for stage elevators, a neural network control strategy based on adjacent deviation coupling is proposed. Vector control model of motor was built on the basis of synchronization deviation definition and tracking deviation definition, and back propagation neural network control was improved. Simulation result of four stage elevators system convinced that the studied control strategy is of small synchronization deviation, high convergence speed and strong practicality.

Keywords: multiple stage elevators; synchronization control; adjacent deviation coupling; back propagation neural network; PID

0 引言

大型分布式升降台的控制直接影响演出效果。其中, 每个舞台模块的升降控制与整体协调是分布式升降台同步问题的关键所在。同步控制策略分为非交叉耦合同步控制和交叉耦合同步控制。交叉耦合同步控制中将多个控制对象之间的速度或位置反馈信号进行耦合, 能够反映控制对象之间的综合控制信号, 以此提高系统的同步性能^[1]。当控制对象较多时, 控制系统结构和控制算法的复杂度相应提高, 系统的同步精度和响应速度也相应地降低^[2]。

轨道式组合机械分布式升降台控制系统中, 升降台受其惯性大、轨道摩擦系数不均匀、驱动电机传动轴驱动特性不匹配以及钢丝绳弹性大等因素的影响, 难以在短时间内达到高精度同步控制。神经网络控制算法具有良好的自学习能力, 可根据系统的同步误差对控制器参数进行在线调整^[3]。然而, 当升降台数量较多时, 上述神经网络控制器结构将非常复杂, 同步精度差, 系统的同步响应时间长^[4-5]。

本文以分布式升降台同步控制系统为研究对象, 以位置同步为最终目标, 以减小同步误差和提高同步速度为衡量标准, 升降台采用并联式同步控制结构, 拟采用一种基于相邻偏差耦合的 BP 神经网络 PID 同步控制策略, 简化神经网络 PID 控制器结构。将搭建四升降台同步控制系统平台, 仿真验证该控制策略在系统启动和有扰动情况下系统的同步控制性能和系统的

鲁棒性。

1 基于相邻偏差耦合的多升降台同步控制结构

以下本文中同步均为位置同步。跟踪误差作为各升降台跟踪给定高度的性能指标, 在 N 块升降台同步控制系统中, 定义第 i 块升降台的跟踪误差为

$$e_i(t) = x_i^*(t) - x_i(t) \quad (1)$$

其中: $x_i^*(t)$ 为第 i 块升降台在 t 时刻的给定高度, $x_i(t)$ 为第 i 块升降台在 t 时刻的实际运行高度。

同步误差是各升降台之间同步的判断指标。定义第 i 块升降台与其他升降台的同步误差

$$\begin{cases} \gamma_{i1}(t) = e_1(t) - e_i(t) \\ \gamma_{i2}(t) = e_2(t) - e_i(t) \\ \vdots \\ \gamma_{iN}(t) = e_N(t) - e_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\gamma_{ij}(t)$ 表示 t 时刻第 i 块升降台与第 j 块升降台的同步误差。

分布式升降台同步控制系统中, 升降台采用并联式同步控制结构, 即所有的升降台跟随同一高度指令^[6]。传统神经网络控制结构中, 以第 i 块升降台为例, 该控制结构中剩余 $(N-1)$ 块升降台的同步误差均引入到神经网络 PID 同步控制器中, 神经网络结构复杂, 网络权值调整繁琐, 在保证同步精度的同时, 增加了系统同步的响应时间, 同步速度慢^[7]。

为简化传统同步控制结构, 缩短系统同步误差收敛时间, 提高系统的同步性能, 本文引入相邻偏差耦合的概念, 即只引入该控制对象与相邻两控制对象的偏差, 实现 BP 神经网络权值的在线调整网络, 基于相邻偏差耦合的 BP 神经网络 PID 同

收稿日期: 2014-10-31; 修回日期: 2014-12-16。

作者简介: 高庆吉(1966-), 男, 黑龙江桦川人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事机器人导航控制、机器视觉方向的研究。

步控制器结构如图 1 所示。

当升降台的跟踪误差和同步误差满足

$$\begin{cases} e_i(t) \rightarrow 0 \\ \gamma_{ij}(t) \rightarrow 0 \end{cases}$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j$, 分布式升降台控制系统实现同步。

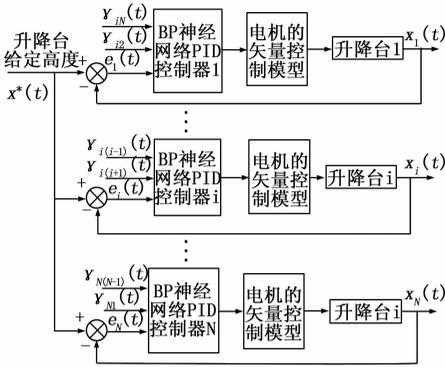


图 1 基于相邻偏差耦合的分布式升降台同步结构框图

2 BP 神经网络 PID 同步控制器

2.1 神经网络 PID 同步控制器结构

人工神经网络不依赖于控制对象准确的数学模型, 因而具有很强的容错性和鲁棒性^[8]。此外, 神经网络还具有较好的自学习和自适应能力。将神经网络控制器与传统 PID 结合, 设计了 BP 神经网络 PID 同步控制器, 其结构如图 2 所示^[9-10]。

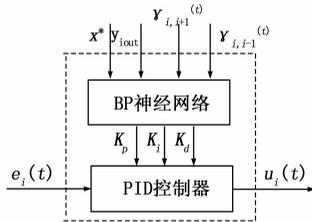


图 2 BP 神经网络 PID 同步控制器结构

神经网络 PID 同步控制器采用 4-5-3 型神经网络, 如图 3 所示。其中, 输入层 4 个神经元的输入分别为:

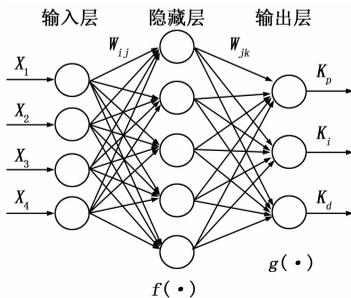


图 3 神经网络结构

$$\begin{cases} X_1 = x^* \\ X_2 = y_{iout} \\ X_3 = \gamma_{i,i+1} \\ X_4 = \gamma_{i,i-1} \end{cases}$$

其中: x^* 为升降台的给定高度, y_{iout} 为升降台反馈的实际高度。 W_{ij} 为输入层第 i 个神经元节点与隐藏层第 j 个神经元节点的连接权, $f(\cdot)$ 为双曲正切型 Sigmoid 激活函数。 W_{jk} 为隐藏层第 j 个神经元节点与输出层第 k 个神经元节点的连接权, $g(\cdot)$ 为对数型 Sigmoid 激活函数。

PID 控制器采用增量式数字 PID, 其算式为:

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i \Delta e(k) + K_d \Delta e^*(k) \quad (3)$$

其中: $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, $\Delta e^*(k) = \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$ 。

2.2 BP 神经网络学习算法

BP 神经网络学习算法把误差信号按原来正向传播的路径反向传回到每个神经元, 调整每个隐藏层神经元的加权系数, 使误差信号趋向最小。

BP 神经网络学习算法中, 定义误差函数

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (x^*(n) - y_{iout}(n))^2 \quad (4)$$

其中: n_m 为神经网络输出层的输出个数。

按误差函数 $E(n)$ 的负梯度方向修改加权系数, 隐藏层和输出层的权值调整:

$$\Delta w_{jk}(n) = -\alpha_1 \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} + \eta_1 \Delta w_{jk}(n-1) \quad (5)$$

$$\Delta w_{jk}(n) = \alpha_1 \delta_k^3(n) u_k^3(n) + \eta_1 \Delta w_{jk}(n-1) \quad (6)$$

$$\delta_k^3(n) = e(n) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial y(n)}{\partial \Delta u(n)}\right) x_k(n) g'(X_k^3(n)) \quad (7)$$

其中: α_1 、 η_1 分别为隐藏层和输出层之间的学习因子和惯性因子, $j = 1, \dots, 5, k = 1, 2, 3$ 。

$x_k(n)$ 为增量式数字 PID 控制器的输入变量

$$\begin{cases} x_1(n) = e(n) - e(n-1) \\ x_2(n) = e(n) \\ x_3(n) = e(n) - 2e(n-1) + e(n-2) \end{cases}$$

隐藏层和输入层的权值调整为:

$$\Delta w_{ij}(n) = -\alpha_2 \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \eta_2 \Delta w_{ij}(n-1) \quad (8)$$

$$\Delta w_{ij}(n) = \alpha_2 \delta_i^2(n) u_i^2(n) + \eta_2 \Delta w_{ij}(n-1) \quad (9)$$

$$\delta_j^2(n) = f'(X_j^2(n)) \sum_{k=1}^3 \delta_k^3 w_{jk}(n) \quad (10)$$

2.3 异步电机矢量控制模型

同步控制系统中, 对系统中的异步电机进行矢量控制。异步电机是一个高阶、非线性、多变量、强耦合的复杂系统。矢量控制基于异步电机动态数学模型, 利用坐标变换将交流电机定子电流分解为励磁分量和转矩分量。异步电机矢量控制原理如图 4 所示。

三相异步电机在按转子磁场定向的同步旋转 $d-q$ 坐标系中, 有下式成立:

$$\psi_{dr} = \psi_r, \psi_{qr} = 0 \quad (11)$$

$$i_{dr} L_r + i_{dr} L_m = \psi_r \quad (12)$$

$$i_{qr} L_r + i_{qr} L_m = 0$$

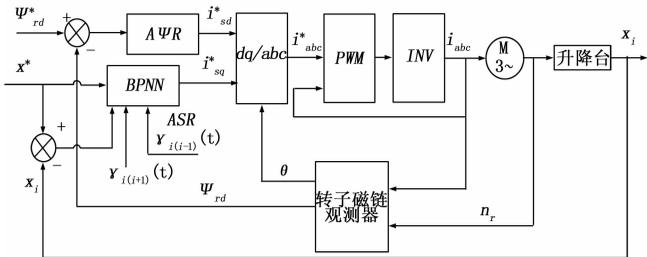


图 4 异步电机矢量控制

鼠笼型三相异步电机，有 $u_{qr} = u_{dr} = 0$ ，电压方程可化简为：

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_1 L_s \\ \omega_1 L_s & R_s + L_s p \\ L_m p & 0 \\ \omega_1 L_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式 (13)、(14)、(15) 推导得，

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sd} \quad (14)$$

$$T_c = n_p \frac{L_m}{L_r} i_q \psi_r \quad (15)$$

$$\omega_s = \frac{R_r L_m i_q}{\psi_r L_r} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ & L_s \\ L_m & L_r \\ & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_e = \frac{2}{3} n_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (18)$$

$$T_e - T_L = J \omega_r \frac{p}{n_p} + F \frac{\omega_r}{n_p} \quad (19)$$

其中： ψ 为磁链、 L 为电感、 i 为电流、 ω 为角速度，下标 s 和 r 分别表示定子和转子分量，下标 d 和 q 分别为 $d-q$ 坐标系中 d 、 q 轴的分量。 T_e 、 T_L 分别为电磁转矩和负载转矩， n_p 为极对数。

3 仿真实验及分析

3.1 同步系统建模与控制器设计

R_s/Ω 同步误差是评价系统同步的关键指标。为验证所提控制策略的有效性和实用性，搭建四升降台并联同步控制系统。对 Y2 系列三相异步电机进行矢量控制，钢丝绳等传动模块和升降台简化为惯性环节。异步电机和单升降台参数分别如表 1 和表 2 所示，其中 P_e 为三相异步电机功率； R_r 、 R_s 分别为定子和转子电阻； L_{ls} 、 L_{lr} 、 L_m 分别为定子绕组漏感、转子绕组漏感和定转子漏感； J 为电机转动惯量； p 为极对数。其中， S 为单升降台面面积； PL 为单升降台的载重； H_{max} 为单升降台最大行程； v_{max} 为单升降台最大速度。

BP 神经网络 PID 同步控制器采用 4-5-3 型结构，神经网络的学习因子 $\eta = 0.85$ ，惯量因子 $\eta = 0.85$ ，加权系数初值选取 $[-1, 1]$ 上的随机数。

3.2 仿真结果及分析

实验 1 验证系统启动阶段无干扰情况下同步控制策略的控制效果，给定高度为：

表 1 三相异步电机电气参数

P_e /kw	R_s /W	R_r /W	L_{ls} /mH
7.5	1.5	0.7	9.9
L_{lr} /mH	L_m /mH	J /kg × m ²	p
9.85	174	0.23	2

表 2 单升降台参数

s /m ²	PL /kg	H_{max} /mm	v_{max} /(mm/s)
4 × 4	600	4 400	200

$$x^*(t) = 500 \text{ mm}$$

在同一速度指令下，系统启动阶段的同步误差响应曲线如图 5 所示，其中横坐标 X 表示时间，单位为 s 。纵坐标 YW 表示误差，单位为 mm 。

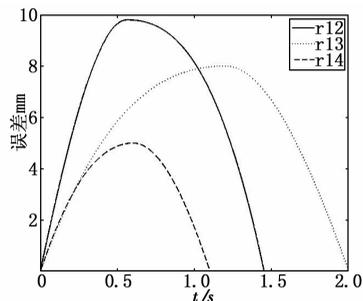


图 5 无干扰情况下系统的同步误差曲线

从图 5 可知，在系统启动阶段同步误差为 9.8 mm，同步时间为 2 s，2 s 之后各升降台之间达到位置同步。

实验 2 系统稳定运行之后，在 $t = 4 \text{ s}$ 时设置扰动，系统的同步误差响应曲线如图 6 所示。

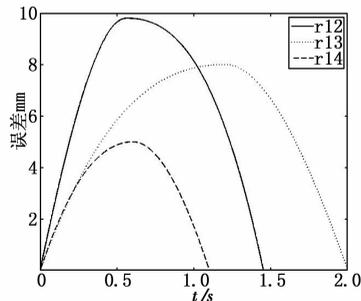


图 6 有干扰情况下系统的同步误差曲线

由图 6 曲线可得，当发生扰动时，最大的同步误差为 4 mm，各同步误差在 1 s 内均收敛到零。

综合上述两实验可知，在采用相邻偏差耦合的同步控制结构基础上，基于 BP 神经网络 PID 的同步控制策略在系统启动阶段和受到扰动后同步误差均小于 10 mm，并且同步误差均能在短时间内收敛到零。

4 结论

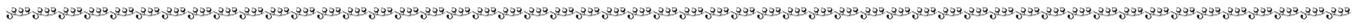
针对多轨道式组合机械升降台同步中的时变、非线性因素导致的控制对象数学模型不准确及传统控制器结构的复杂性不适用于分布式升降台控制系统的问题，本文利用相邻偏差耦合简化同步控制结构，并且采用具有在线自学能力的 BP 神经

网络 PID 同步控制器, 构建每一路升降台的同步控制器结构和学习算法, 对四路升降台同步控制系统进行仿真, 实验结果表明: 基于相邻偏差耦合的 BP 神经网络 PID 同步控制器在系统的启动阶段以及受到扰动时, 具有同步误差小和同步误差收敛速度快的特点, 鲁棒性较好。

参考文献:

[1] 姜晓平, 朱奕, 伞治. 大功率随动试验台多永磁同步电机同步控制 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18 (4): 88-95.
 [2] 曹春平, 王波, 胥小勇, 等. 基于神经网络多电机偏差耦合同步控制研究 [J]. 控制工程, 2013, 20 (3): 415-418.
 [3] 袁溪泽, 齐向东. 基于 PLC 的升降台同步模糊控制系统研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2012 (3): 98-101.
 [4] Zhang Y H, Zhao D, Zhang J S. Research on PID controller based on the BP neural network [A]. 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011 (135): 516-519.
 [5] Zeng J, Wang L G, Ye M J, et al. Research of several PID algo-

gorithms based on MATLAB [J]. Advanced Materials Research, 2013: 1075-1079.
 [6] Samarth Singh, R Mitra. Comparative analysis of robustness of optimally offline tuned PID controller and fuzzy supervised PID controller [A]. Proceedings of 2014 RA ECS UIET Panjab University Chandigarh [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-6.
 [7] Xiong JJ, Liu J Y. Neural network PID controller auto-tuning design and application [A]. 25th Chinese Control and Decision Conference [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1370-1375.
 [8] 高恒路, 桑勇, 邵龙潭. 同步控制策略及其典型应用的研究 [J]. 液压气动与密封, 2012 (5): 1-7.
 [9] Balasubramonian M, Rajamani V. Design and real-time implementation of SHEPWM in single-phase inverter using generalized hopfield neural network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014, 61 (11): 6327-6336.
 [10] 秦帅, 张斌, 李彬. 模糊自抗扰控制在永磁同步电机调速系统的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (10): 29



(上接第 2339 页)

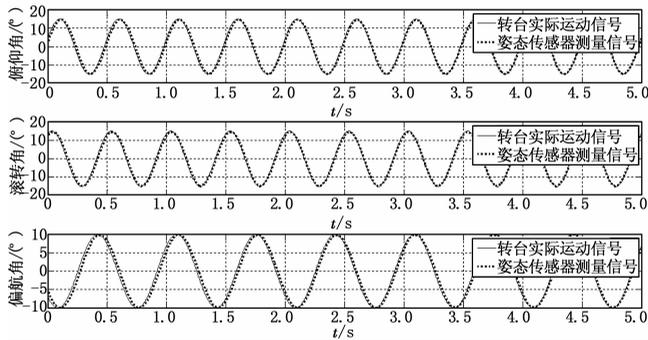


图 11 姿态传感器动态姿态测量结果

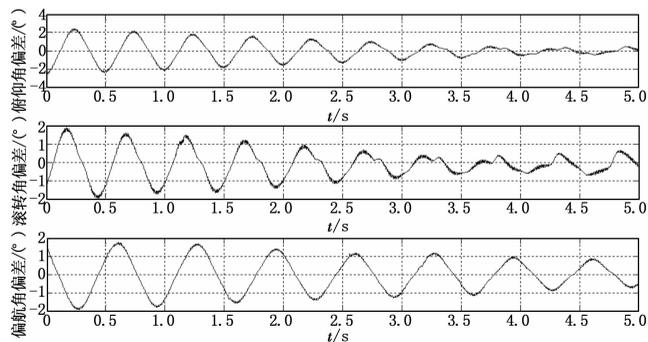


图 12 姿态传感器动态姿态测量偏差

5 结论

根据微小型球形飞行器的结构特点和工作原理, 本文设计了一套基于 ARM Cortex-M3 STM32F103RBT6 微控制器的飞行控制系统, 深入进行了其主要模块的功能设计与性能分析工作, 给出了相关研究结论与选型依据。为了测试该飞行控制系统的性能, 本文设计并完成了姿态传感器两轴转台实验和飞行器室内飞行试验。测试结果表明, 该控制系统的姿态传感器



(a) 悬停 (b) 左飞 (c) 恢复悬停 (d) 右飞

图 13 微小型球形飞行器室内低空灵活机动飞行

姿态测量精度高, 能够为飞行控制提供姿态参考信息; 飞行器能够圆满实现空中悬停、低空机动等复杂飞行动作, 且空中飞行姿态稳定、实时、可靠。所以, 本文所设计的飞行控制系统有效且性能稳定, 能够较好地满足微小型球形飞行器的飞行控制要求, 具有一定的实用性, 可为后续研究提供理论帮助与技术支持。

参考文献:

[1] Briod A, Kornatowski P, Zufferey JC, Dario Floreano. A Collision-resilient Flying Robot [J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31 (4): 496-509.
 [2] Klaptocz A, Floreano D, Zufferey (Dir.) J. -C. Design of Flying Robots for Collision Absorption and Self-Recovery [J]. EPFL, Lausanne, 2012; 6-9.
 [3] 盛汉霖, 张天宏, 刘冬冬. 基于扩展卡尔曼滤波器的低成本航姿系统设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (10): 2158-2164.
 [4] 刘璐琦. 基于 MTI 微惯性航姿系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
 [5] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
 [6] 赵斐. 微小型飞行器的姿态测量与控制系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.