

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.016

# 基于神经元 PID 的永磁无刷电机控制系统研究

赵鹏飞, 俞建定\*, 骆国庆

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:**针对高性能永磁无刷电机的伺服控制问题,对永磁无刷电机的物理结构、数学模型、工作原理进行了研究,介绍了永磁无刷电机控制系统的构成和传统 PID 控制器的工作原理,对基于传统 PID 控制器的无刷电机控制系统的不足进行了分析和归纳,提出了一种基于神经元 PID 的永磁无刷电机智能控制方法,阐述了神经元 PID 控制器特点,对神经元 PID 控制系统进行了算法设计和实现,将神经元 PID 控制器应用在永磁无刷电机速度环的控制中,利用神经元的自学习能力,可以进行控制参数的在线训练及实时整定,利用 Matlab/Simulink 分别对基于传统 PID 和基于神经元 PID 的永磁无刷电机控制系统进行了仿真和测试,并对比了两者的仿真结果。研究表明,该系统能够提高无刷电机的响应速度和运行平滑性。

**关键词:**无刷电机;伺服控制;神经元 PID;自适应

**中图分类号:**TH39;TP273

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2014)07-0892-06

## Control system of brushless DC motor based on neuron PID

ZHAO Peng-fei, YU Jian-ding, LUO Guo-qing

(Information science and engineering institute of NingBo University, NingBo 315211, China)

**Abstract:** Aiming at servo control of high-performance permanent magnet brushless motor, the physical structure, the mathematical model and the principle of permanent magnet brushless motor were researched. After the introductions of the principle of traditional PID controller and the control system of permanent magnet brushless motor, the defects of brushless motor control system based on traditional PID controller were analyzed and summarized, an intelligent control strategy of permanent magnet brushless motor based on Neuron PID was proposed. Firstly, the characteristics of Neuron PID controller were expounded. Then the algorithm of the Neuron PID control system was designed and implemented, the Neuron PID controller was used in control of speed loop of permanent magnet brushless, utilizing the self-learning ability of Neuron PID, control parameters can be trained and adjusted in real time. At last, simulation of permanent magnet brushless motor control system based on traditional PID and Neuron PID were given with Simulink, both the results of simulation were compared. The results indicate that the system can improve the response of speed and the rotational stability of brushless motor.

**Key words:** brushless DC; servo control; neuron PID; adaptive

## 0 引言

随着电力电子技术、微电子技术及现代控制理论的发展,高性能的永磁无刷电机控制系统已经越来越多地被应用于伺服控制、航空航天、机器人等领域。永磁无刷电机使用电子换向,克服了直流电机由于机械

换向所引起的电磁干扰和噪声,具有结构简单、体积小、维护方便等一系列优点<sup>[1]</sup>。永磁无刷电机的控制技术及其伺服性能的提升一直是国内外控制领域的研究热点。

永磁无刷电机的气隙磁场非常复杂,电感、磁链和电流之间存在很强的耦合性、时变性和非线性,无法对

收稿日期:2014-01-13

作者简介:赵鹏飞(1985-),男,河南安阳人,主要从事伺服控制、嵌入式系统与应用方面研究。E-mail:zhp\_f\_nbu@sina.com.

通信联系人:俞建定,男,高级实验师,硕士生导师。E-mail:yujianding@nbu.edu.cn.

其建立准确的数学模型,这些因素加大了对无刷电机进行精确控制的难度。在传统比例 - 积分 - 微分 (PID) 控制系统中,比例增益  $K_p$ 、积分增益  $K_I$ 、微分增益  $K_D$  在系统工作时是固定的,而参数一旦固定,就难以脱离固定的数学模型,这就使得其在控制非线性、时变、耦合及参数和结构不确定的复杂过程时,调节效果较差,难以满足高性能尤其是精密设备的伺服控制要求。

智能控制以其良好的非线性、自学习及自适应能力近年来受到广泛关注,然而现有的永磁无刷电机神经网络控制策略多数仍停留在理论阶段,由于算法复杂度过高、学习收敛性差,导致可操作性不高,难以真正进入工程应用<sup>[2-3]</sup>。为了解决这一问题,本研究从应用角度出发,结合 PID 神经网络,提出一种实用、有效、更加适合永磁无刷电机的智能控制策略,从而实现系统自学习和自适应功能,提高系统控制的稳定性和鲁棒性。

## 1 电机结构及数学模型

构建控制系统前,本研究首先对被控对象结构和数学模型进行简要理论分析。

永磁无刷电机属于永磁同步电机的一种,其电机本体由定子线圈绕组和永磁体转子构成,其定子绕组通常为多相(三、四、五等),转子极对数为  $2n$  ( $n=1,2$  等)。本研究以定子三相绕组、转子 2 极对数电机为对象进行分析。构建数学模型时,需作出如下假设:

- (1) 定子线圈为三相对称绕组,采取 Y 型方式连接;
- (2) 不计涡流及磁滞损耗;忽略齿槽效应及磁路饱和;
- (3) 气隙磁场为梯形波,且平顶宽度为  $120^\circ$  电角度;
- (4) 忽略电机本体摩擦,忽略电枢效应。

根据以上假设,本研究建立  $a、b、c$  三相坐标系,对无刷电机模型进行分析,简化后永磁无刷电机相电压方程的矩阵形式如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_s - L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_s - L_m \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_A, u_B, u_C$ —定子绕组电压,V; $i_A, i_B, i_C$ —定子电

流,A; $e_A, e_B, e_C$ —定子绕组电动势,V; $R_s$ —每相定子绕组的电阻; $L_s$ —每相定子绕组的自感; $L_m$ —两相定子绕组的互感; $p$ —微分算子  $p = d/dt$ 。

式(1)所对应的永磁无刷电机等效电路如图 1 所示。

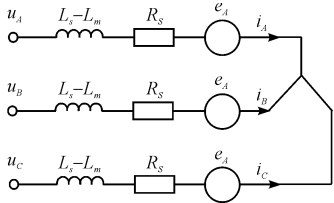


图 1 永磁无刷电机等效电路

永磁无刷电机运行过程中,瞬时电磁转矩方程表达式可表示为:

$$T_e = \frac{n_p}{\omega} (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) \quad (2)$$

式中: $\omega$ —电机转子的角速度,rad/s; $n_p$ —极对数。

由式(2)可知,改变经过电机定子各相线圈电流幅值可以对电机转矩和转速进行调节和控制。

电机的机械运动方程为:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中: $T_e, T_l$ —电磁转矩和负载转矩, $N \cdot m$ ;  $J$ —电机转子的转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。

综合相电压方程式(1)、转矩方程式(2)和机械运动方程式(3),即可构成一个永磁无刷电机完整数学模型。由以上数学分析可知,永磁无刷电机控制系统参数非常多,且具有很强的耦合性、时变性和非线性。传统 PID 控制难以满足高性能的应用场合需求。

## 2 永磁无刷电机控制系统结构

本研究设计中,采用三闭环构成永磁无刷电机控制系统,包括位置外环、速度中环、电流内环。在对位置不敏感的场合,往往省略位置外环,系统简易结构框图如图 2 所示。

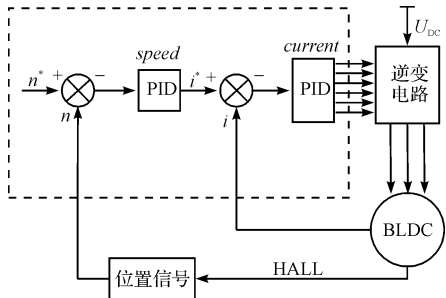


图 2 BLDC 伺服控制结构框图

无刷电机换相实现了电子化,因此控制中心必须得知转子的位置信息,目前无刷电机控制策略主要分为有位置传感器和无位置传感器两种。本研究中位置环和速度环以定子内嵌霍尔位置传感器信号进行计算,电流以总线电流信号进行计算,研究主要集中在 PID 控制器的改进。

系统中,位置环和速度环根据霍尔状态变化计算出电机运转圈数和运转速度,并进行 PID 调节,输出调整后的控制指令;电流内环根据总线电流的变化,进行 PID 调节。整个系统中,PID 控制器的调节性能非常关键。

### 3 PID 控制系统设计

#### 3.1 传统 PID 控制系统

PID 控制系统主要包括 PID 控制器及被控对象两部分,PID 算法实际上是一种通过对被控对象过去、现在及将来状态进行计算,从而对输出控制指令进行修正的控制算法。传统的 PID 控制框图如图 3 所示。

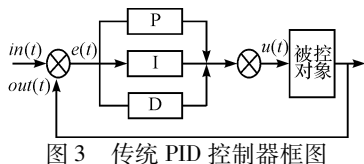


图 3 传统 PID 控制器框图

$t(t=1,2,3\cdots)$ —抽样数字; $in(t)$ —输入信号值; $out(t)$ —被控对象实际反馈信号值; $e(t)$ —输入信号与实际反馈信号误差; $u(t)$ —经过 PID 修正后的输出信号

传统 PID 控制的数学模型表达式如下:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: $K_p$ —比例参数, $T_i$ —积分时间常数, $T_d$ —微分时间常数。

从图 3 及公式(4)可知,PID 控制器通过对 3 个控制参数的设置,可以非线性地修正控制信号,从而使得被控对象按照既定目标运行。

由此可见,对于 PID 控制器来讲, $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  3 个参数的设置尤为关键,PID 控制器的参数整定是 PID 控制系统设计的核心内容,参数的合理性直接决定了 PID 系统的控制效果。

传统的 PID 控制器设计时, $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  参数设置主要有两类方法<sup>[4]</sup>:一是理论计算法,主要依据系统数学模型,经过数学方法计算来确定;二是工程整定法,主要是依据工程实践经验,直接在控制系统试验中进行。这两类方法参数设置成功后在系统工作时都是固定不变的,对于线性度比较好的被控对象可以得到较为理想的控制效果。然而,对于永磁无刷电机这种时

变性强、非线性度高的控制对象,特别是在负载突变、电机启动时,传统 PID 控制器往往难以平衡快速反应及超调之间的矛盾,不能达到非常良好的控制效果。

#### 3.2 神经元 PID 控制系统

##### 3.2.1 神经元 PID 控制特点

传统的神经网络如 BP 网络用于智能控制时,目的在于实时学习和改变 PID 控制器的参数,从而使传统 PID 控制发挥最大效果,显而易见,这种策略并未真正脱离传统 PID 控制框架。PID 神经元网络(PIDNN)是基于 PID 控制系统构建的<sup>[5]</sup>,将 PID 的控制规律融入神经网络中,从而构建出一种更加适合复杂控制系统的新型神经网络模型<sup>[6]</sup>。其结构模型如图 4 所示。

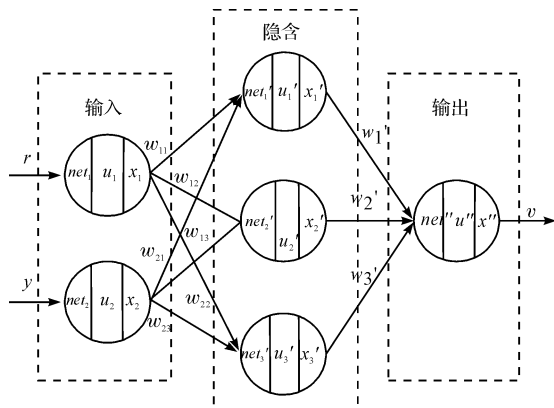


图 4 PID 神经网络基本单元结构图

由图 4 可见,PIDNN 的基本结构为“2-3-1”型结构,输入层包含两个神经元,用于接收外部输入信号;隐含层包含比例、积分、微分 3 个神经元,用于完成比例、积分和微分运算;输出层包含一个神经元,用于完成最后综合信号的输出。

##### 3.2.2 神经元 PID 控制系统算法及实现

神经元 PID 控制器和被控对象相连,即构成神经元 PID 控制系统<sup>[7-8]</sup>。本研究所采用的神经元 PID 控制器结构如图 5 所示。

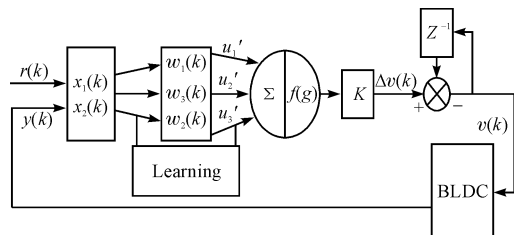


图 5 神经元 PID 控制器基本结构

$r(k)$ —控制器的预期输入信号值; $y(k)$ —被控对象实际反馈信号值; $v(k)$ —神经元 PID 控制器信号输出值,作为被控对象的控制信号输入指令

PID 神经元控制器前向算法根据网络输入值,按照网络权重值、状态函数和输出函数形成最终输出值。



在 PID 神经元控制器的 S 函数编写时<sup>[9]</sup>,选取权重初始值参数为: $w_{1j} = 1, w_{2j} = -1, w'_1 = K_P, w'_2 = K_I, w'_3 = K_D$ ,将参数分别代入式(5,6,7,9),即可得到输出层神经元输出为:

$$v(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{i=0}^t e(k) + K_D [e(k) - e(k-1)]$$

(12)

由式(12)可知,连接权重选初值时神经元 PID 可以等价于经典 PID 控制器,这使得初始运行时可以达到与经典 PID 控制器近似控制效果。相比现有的神经元 PID 算法<sup>[10-11]</sup>,这样选择简捷有效,更加符合 PID 控制器特性。

系统工作开始后,在运行过程中神经元 PID 根据迭代公式(10,11)进行在线训练学习,对权重值进行调整,就可以达到更优效果。

5 系统分析与实验

本研究实验使用的永磁无刷电机主要参数如表 1 所示。

表 1 实验用永磁无刷电机基本参数

| 属性名                       | 数值    |
|---------------------------|-------|
| 极对数 $p$                   | 2     |
| 定子绕组线圈电阻 $R/\Omega$       | 0.4   |
| 定子绕组线圈等效电感 $L - M/mH$     | 0.53  |
| 转子转动惯量 $J/kg \cdot m^2$   | 0.007 |
| 额定电压 $U/V$                | 24    |
| 额定转速 $n/r \cdot min^{-1}$ | 3 000 |
| 额定转矩 $N \cdot m$          | 0.35  |
| 额定功率 $W$                  | 150   |

系统仿真时,输入速度指令为  $3\,000\,r \cdot min^{-1}$ 。

传统 PID 控制设计中参数采取工程整定法分别选取  $K_P = 0.013, K_I = 18.81, K_D = 0.009$ 。神经元 PID 控制中,权重初值  $w'_1 = K_P, w'_2 = K_I, w'_3 = K_D$ 。基于传统 PID 控制器和神经元 PID 控制器对无刷电机进行仿真得到的运行速度曲线如图 7、图 8 所示。

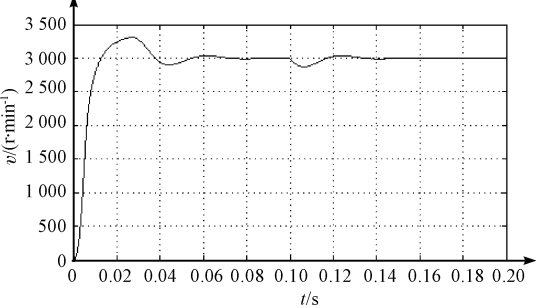


图 7 传统 PID 控制无刷电机速度曲线

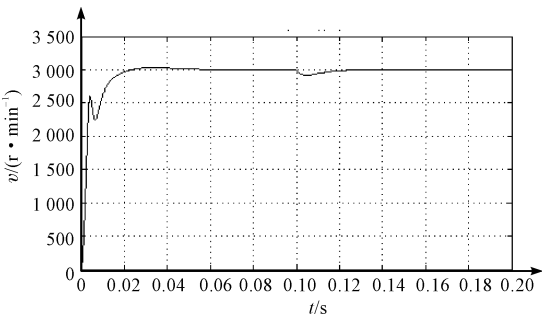


图 8 神经元 PID 控制无刷电机速度曲线

图 7、图 8 中,对比两幅速度曲线图可以看出,PID 神经元控制下无刷电机响应速度及运行平稳性明显优于传统 PID 控制。

6 结束语

本研究从永磁无刷电机结构和数学模型入手,分析了无刷电机特点及控制系统结构,然后探讨了传统 PID 控制及神经元 PID 控制的理论及实现,最后搭建了系统仿真模型进行了验证,并与传统 PID 控制效果进行了对比和总结。

PID 神经元控制器融合了神经网络和 PID 控制的两者优点,具有结构简单、应用性强、便于实现等优点。采用硬件电路实现时,由电阻、电容及运放即可进行搭建,采用软件实现时,控制芯片工作量也不大。本研究采取的控制策略对于永磁无刷电机控制系统的研发具有一定的借鉴意义。

参考文献(References):

[1] SONG Fa-zhen, WANG Yu, CAO Hai-qing. Software Design of brushless DC Motor Control System Based on DSP [C]//2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMISC). Hangzhou:[ s. n. ],2013;364-367.

[2] ARULMOZHIAL R, KANDIBAN R. An Intelligent Speed Controller for Brushless DC motor [C]// 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapore:[ s. n. ],2012;16-21.

[3] KIRUTHIKA A, ALBERTRAJAN A, RAJALAKSHMI P. Mathematical Modelling and Speed Control of a Sensored Brushless DC Motor using Intelligent Controller [C] //2013 International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nano-technology (ICE-CCN). India:[ s. n. ],2013;211-216.

[4] 刘 刚,王志强,房建成. 永磁无刷直流电机控制技术与应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[5] WANG Mao-li, CHENG Guang-he, KONG Xiang-xin. A

Single Neuron Self-Adaptive PID Controller of Brushless DC Motor[C]//2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Shanghai:[s. n.],2011:262-266.

- [6] 舒怀林. PID 神经网络及其控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [7] 周理孟. 永磁伺服系统智能 PID 控制方法研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学计算机学院,2009.
- [8] 申 亮,谢伟东. 永磁直流无刷电机改进的单神经元 PID 自

适应控制仿真研究[J]. 机电工程,2011,28(3):369-373.

- [9] 李 岩,张 超,刘陵顺. 无刷同步电机的起动性能仿真[J]. 兵工自动化,2012,31(1):81-85.
- [10] 王秀君,胡协和. 一种改进的单神经元 PID 控制策略[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(8):1498-1501.
- [11] 郭红霞,杨金明,刘文刚. 无刷双馈电机的 PID 神经网络控制[J]. 控制理论与应用,2008,25(1):53-56.

[编辑:程 浩]

#### 本文引用格式:

赵鹏飞,俞建定,骆国庆. 基于神经元 PID 的永磁无刷电机控制系统研究[J]. 机电工程,2014,31(7):892-897.

ZHAO Peng-fei, YU Jian-ding, LUO Guo-qing. Control system of brushless DC motor based on neuron PID[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):892-897.  
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 883 页)

动,电梯驱动的基本原理也就是欧拉公式所确立的摩擦曳引条件。在欧拉公式的推导过程中虽然也包含了摩擦力的因素,但在最终的结果中却与摩擦力的计算无关,摩擦力只是隐含在欧拉公式中的一个力学概念。在电梯的曳引力分析与计算过程中,虽然屡屡提及摩擦力,但却无法计算。

本研究分析了曳引轮和绳槽的受力情况,通过建立拉力、压力、比压和摩擦系数几个物理量之间的关系式,用力学方法得出了曳引摩擦力的计算公式。通过实例的计算校验可以看出,根据摩擦力计算公式得出的结果与欧拉公式得出的结果是一致的,并且两者在数值上很接近。因此,可以通过计算摩擦力的方法来验算曳引条件。摩擦力计算方法是以两个力的大小比较来确定曳引条件,比欧拉公式更为直观。此外,摩擦力计算公式还可用于分析一些特殊的曳引故障现象,弥补了欧拉公式在这方面的不足之处。

摩擦力计算方法在实用时,可先按公式(10)算出摩擦力  $F$ ,再按公式(11)算出轿厢侧的允许拉力  $T_1'$ ,其结果只要符合公式(12),就可以认为曳引条件成立,钢丝绳不会打滑。此外还要验算不能使摩擦力大于对重侧的拉力。

#### 参考文献(References):

- [1] 杨长骥. 起重机械[M]. 北京:机械工业出版社. 1982.

- [2] 中国建筑科学研究院建筑机械化研究分院. GB7588—2003,电梯制造与安装安全规范[S]. 中国建筑学院建筑机械化研究分院,2003.
- [3] 朱思中. 电梯的曳引计算(1)[J]. 中国电梯,2013,24(1):5-11.
- [4] 朱思中. 电梯的曳引计算(2)[J]. 中国电梯,2013,24(3):24-27.
- [5] 陈路阳. 电梯曳引绳在曳引轮绳槽中的蠕动与欧拉公式[J]. 中国电梯,2011,22(17):37-40.
- [6] 杨 锐. 关于电梯曳引条件的一些问题的探讨[J]. 中国电梯,2013,24(5):27-30.
- [7] 梁振湖. 由电梯曳引机的损坏引发的对曳引力的思考[J]. 中国电梯,2014,25(3):29-31.
- [8] 曾晓东. 钢丝绳及滑轮系统动力学—GB7588—2003 附录 M 的曳引力计算公式更正[J]. 中国电梯,2007,18(19):45-51.
- [9] 吴 昊,冯双昌. 电梯制动失效原因分析及检验对策[J]. 机电工程技术,2013,42(12):103-105.
- [10] 王宝强,许卫东. 对曳引式电梯上行制动试验制动距离的探讨[J]. 机械,2013(11):50-52.
- [11] 关金生. 电梯紧急制动减速度的理论分析[J]. 中国电梯,2014,25(1):17-22.
- [12] 刘照东. 通过两个实例再议电梯安全钳试验打滑条件[J]. 中国电梯,2013,24(17):55-57.
- [13] 杨 锐. 关于电梯曳引轮槽型与摩擦系数的探讨[J]. 中国电梯,2012,23(15):49-53.

[编辑:洪炜娜]