

基于神经网络控制稳压系统在 ICPT 中的应用

王 侃^{1,2} 袁学庆¹ 廖颜华^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在深海环境下, 感应耦合电能传输(Inductive Coupled Power Transfer ,ICPT) 系统初级、次级磁芯在受到水流冲击后会产生偏心 and 间隙, 引起耦合系数的变化。由于系统的非线性、不确定性等因素, PID 控制器使系统达到稳压状态的反应时间较长, 电流超调量大, 稳压效果较差, 导致负载两端电压值发生波动。本文提出基于神经网络的控制算法动态调节升压电路的占空比, 最终保证系统输出电压恒定, 克服了 PID 控制器不能满足水下系统控制需要的缺点。Matlab 仿真表明与 PID 控制器相比, 神经网络控制器反应时间缩短了 25 ms, 电流超调量减少了 3.5 A, 更适合在水下应用。

关键词: 感应耦合电能传输; 稳压; 神经网络控制器; 占空比

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A

文章编号: 1672-7649(2015)08-0135-05 doi: 10.3404/j.issn.1672-7649.2015.08.028

Application of voltage regulation system based on neural network in ICPT system

WANG Kan^{1,2} ,YUAN Xue-qing¹ ,LIAO Yan-hua^{1,2}

(1. Shenyang Institute of Automation , Chinese Academy of Sciences , Shenyang 110016 , China;

2. Graduate School , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

Abstract: In deep sea environment ,eccentricity and clearance will be created in the primary and secondary core of Inductive Coupled Power Transfer system under the impact of water ,which result in the change of coupling coefficient. Because of the nonlinearity and uncertainty ,PID controller costs longer time , larger current overshoot ,poorer voltage regulation to make the system stable ,which lead to voltage fluctuations across the load. In this paper ,the author put forward a dynamic control algorithm to adjust the boost circuit duty cycle based on neural networks ,and ultimately ensure that the system output voltage is constant ,to overcome the shortcomings ,which PID controller can't meet the needs of the undersea system control. Matlab simulation results show that compared with PID controller ,neural network controller's response time is reduced by 25ms ,the current overshoot reduced by 3.5A ,which is more suitable for application in underwater.

Key words: inductive coupled power transfer; voltage regulator; neural network controller; duty cycle

0 引 言

认识和开发海洋需要各种高技术手段, 作为探索内空间的重要手段之一的水下机器人技术具有等同运载火箭技术的重要意义。自主式水下航行器(AUV) 是探索海底世界的重要工具, 在商用民用

领域以及军事和海洋环境科学领域都有广泛的应用^[1], AUV 自带能源, 依靠自身的自治能力来管理和控制自己不仅可以完成水下搜索、监视、侦察、猎雷等军事任务, 而且还可以完成认识、研究和开发海洋的科学任务^[2]。

但是, 目前由于受到自身体积和电池技术的限

收稿日期: 2014-11-13; 修回日期: 2014-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279195); 辽宁省自然科学基金资助项目(203020038)

作者简介: 王侃(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水下机器人能源补充。

制, AUV 无法长时间在水下工作, 主要采用打捞回收至母船后进行充电的方法, 不仅智能化降低, 而且操作繁琐、耗时长, 大大降低了 AUV 的工作效率和隐蔽性。非接触感应电能传输 (Inductive Coupled Power Transfer, ICPT) 技术是目前水下电能传输的理想方式。但是已有的研究大都集中在空气中应用, 对于其在水中的应用, 尤其是控制方法的研究还鲜见报道。文献 [3] 提出基于锁环控制的 AUV 非接触充电系统的频率控制策略, 但未对控制效果进行验证。文献 [4] 通过 PID 控制器控制全桥电路的相角实现负载端电流的恒定调节, 但由于 ICPT 系统非线性、时变不确定等因素, 难以建立精确的数学模型, PID 控制器难以达到理想的控制效果。文献 [5] 通过采用模糊控制的算法调节控制脉冲的占空比, 实现系统输出的稳定, 但这种算法的反应时间较长, 不适合水下环境的应用。

本文提出基于神经网络的控制算法, 采用添加 DC/DC 升压电路, 通过动态调节电路开关的占空比进行功率动态补偿以实现输出电压的稳定。最终保证系统输出电压恒定, 克服了在深海环境下, 系统初级、次级磁芯在受到水流冲击后会产生偏心和间隙, 引起耦合系数的变化, 进而导致负载两端电压发生波动的缺点。

1 稳压系统概述

DC/DC 变换也称为直流斩波, 不仅能起到调压的作用, 还能起到有效抑制网侧谐振电流的作用。升压开关的基本电路如图 1 所示。输出升压中纹波电压主要由输出滤波电容 C 和 L 决定, 通过增大滤波电容 C 的容量, 并适当加大 L 可以减少纹波电压。只要电感与电容值足够大, 流经电感的电流和电容两端的电压纹波就非常小。为了在负载 R 上得到平直的电压, 在 R 两端并联一个滤波电容^[6]。

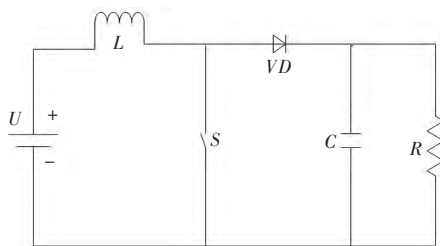


图 1 升压型 DC/DC 电路
Fig. 1 Step-up DC/DC circuit

其升压过程为当开关管 T 导通时, 二极管阳极接电源 U 负极, 承受反向电压而截止。电容 C 向负载 R 供电, 极性上正下负。电源电压全部加到电感两端 $u_L = U$, 在该电压的作用下电感电流 i_L 线性增长, 存储的磁场能量也逐渐增加。在一个开关周期 T_s 内开关管 T 导通时间为 t_{on} 。在 T 导通时间内, 电感电流的增量为

$$\Delta i_{L(+)} = \int_0^{t_1} \frac{U_s}{L} dt = \frac{U_s}{L} t_1 = \frac{U_s}{L} D_c T_s, \quad (1)$$

当 T 截止时, i_L 经二极管 VD 流向输出侧, 电感 L 中的磁场将改变 L 两端的电压极性, 以便 i_L 保持不变, 这样电源电压 U 与电感电压 u_L 串联 (高于负载电压 U_0) 给 C 和 R 供电, 负载 R 两端电压 U_0 仍然是上正下负。电感上的电压为 $U - U_0 < 0$, 电感电流 i_L 线性减小。在一个周期 T_s 内, 开关管 T 断开的时间为 $T_s - t_{on}$ 。到 T_s 时刻, i_L 达到最小值 I_{L2} 。在 T 截止期间, 电感电流的减小量绝对值为

$$\Delta i_{L(-)} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U_0 - U_s}{L} dt = \frac{U_0 - U_s}{L} (1 - D_c) T_s, \quad (2)$$

当稳态工作时, 开关管 T 导通期间电感电流的增长量 $\Delta i_L(+)$ 等于 T 截止期间的减小量 $\Delta i_L(-)$ 。即 $\Delta i_L(+)=\Delta i_L(-)$, 所以式 (1) 和式 (2) 可得到电压增益为

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 - D_c}. \quad (3)$$

由式 (3) 可知, D_c 是一个小于 1 的数, 输出电压与输入电压的比值始终大于等于 1, 即输出电压高于输入电压^[7]。

2 控制系统设计

2.1 负载恒流控制系统设计

由前述可知: 当耦合线圈的初级、次级磁芯随洋流运动而产生磁间隙和偏心时, 其互感系数也将随之变化, 系统输出电流同样受到影响, 此时可以通过动态调节 DC/DC 电路开关的占空比来实现输出电流的恒定。但是由于系统中包含有斩波、高频逆变等多种非线性开关, 现有的建模手段很难对其进行精确建模。神经网络具有不依赖于被控对象精确数学模型的特点, 对于处理高维度、非线性、不确定性的复杂控制问题具有极强的处理能力。本文基于神经网络设计负载恒流控制系统, 如图 2 所示。

系统根据实际恒定电流的需求值 I_{ref} 与测量获得

的实际输出值 I_c 相比较得到电流的误差值 I_{err} ，将 I_{err} 和上一时刻神经网络的输出 DC/DC 开关管的占空比 d_0 作为神经网络的输入数据，神经网络将输出上一时刻的开关管占空比 d_0 和占空比的变化量 Δd 给占空比计算模块，最终得到开关管的实际需要占空比，进而驱动恒流控制模块，实现副边输出电流的恒定。

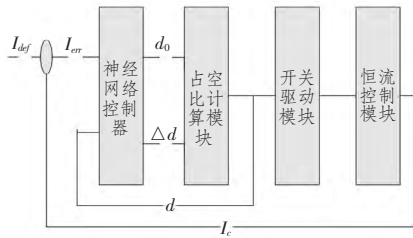


图 2 系统控制框图

Fig. 2 System control block diagram

2.2 BP 神经网络模型

BP 网络模型包括其输入输出模型、作用函数模型、误差计算模型和自学习模型。

1) 节点输出模型

隐节点输出模型:

$$O_f = f(\sum W_{ij} \cdot X_i - q_j); \quad (4)$$

输出节点输出模型:

$$Y_k = f(\sum T_{ij} \cdot O_j - q_k), \quad (5)$$

式中: f 为非线性作用函数; q 为神经单元阈值。

2) 作用函数模型

作用函数是反映下层输入对上层节点刺激脉冲强度的函数又称刺激函数，一般取为 $(0, 1)$ 内连续取值 Sigmoid 函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (6)$$

3) 误差计算模型

误差计算模型是反映神经网络期望输出与计算输出之间误差大小的函数:

$$E_p = 1/2 \cdot \sum (t_{pi} - O_{pi})^2, \quad (7)$$

式中: t_{pi} 为 i 节点的期望输出值; O_{pi} 为 i 节点计算输出值。

4) 自学习模型

神经网络的学习过程，即连接下层节点和上层节点之间的权重矩阵 W_{ij} 的设定和误差修正过程。BP 网络有师学习方式（需要设定期望值）和无师

学习方式（只需输入模式之分）。自学习模型为:

$$\Delta W_{ij}(n+1) = h \cdot \Phi_i \cdot O_{j+a} \cdot \Delta W_{ij}(n). \quad (8)$$

式中: h 为学习因子; Φ_i 为输出节点 i 的计算误差; O_j 为输出节点 j 的计算输出; a 为动量因子。

2.3 神经网络控制器设计

目前，人工神经网络的实际应用中，绝大部分的神经网络模型都采用 BP 网络及其变化形式。BP 网络是一种多层前馈型神经网络，其神经元的传递是 S 型函数，输出量为 $0 \sim 1$ 之间的连续量，它可以实现从输入到输出的任意非线性映射。BP 神经网络由一个输入层、一个输出层或多个隐藏层和一个输出层组成，层与层之间完全采用互联方式，同层神经元间无任何连接^[8]。

BP 神经网络控制器的设计包括各层节点数量、各层之间的激活函数和训练方法的选取以及相关的参数设置等，具体包括

1) 隐含层的数的确定: 由神经网络的结构特点可知，它可以包含一个或者多个隐含层，在实际的应用一般一个隐含层就可以完成任意非线性函数的映射。

2) 输入层节点数的确定: 输入层接受外部的输入数据，其节点数取决于实际的输入向量维数。在本文中将电流的误差值 I_{err} 和上一时刻神经网络的输出开关占空比 d_0 作为输入，因此输入层的节点数为 2。

3) 输出层节点数的确定: 神经网络将输出上一时刻的开关管占空比 d_0 和占空比的变化量 Δd ，因此本文的输出节点数为 2。

4) 隐含层节点数的确定: 研究表明隐含层节点数一般由输入层、输出层共同决定一般满足公式

$$q = \sqrt{p + r} + a \quad \mu \in [1, 10]. \quad (9)$$

式中: q 为隐含层节点数; p 为输入层节点数; r 为输出层节点数; a 为 $1 \sim 10$ 之间的随机数，经过试验隐含层数在 6 时可以起到较好的训练效果。

激活函数的选择: 由于 BP 算法要求激活函数必须是连续、可微的; 因此，通常采用 S 型（主要包括 sigmoid 函数，双切 tansig 函数）激活函数和纯线性（purelin）函数。如果 BP 网络最后一层的激活函数选择的是 sigmoid 函数，那么这个网络的输出将被限制在 $[0, 1]$ 之间; 如果选择的是 purelin 函数则可以任意取值。本文中在输入层到隐藏层间采用 tansig 函数，隐藏层到输出层间采用

purelin 函数。

训练方法及其参数的选择:

训练函数去梯度下降 BP 算法函数;

- 1) 学习速率为 0.05;
- 2) 性能目标为 0.001;
- 3) 训练最大迭代次数为 1000;

神经网络控制器训练的均方差性能函数曲线如

图 3 所示。

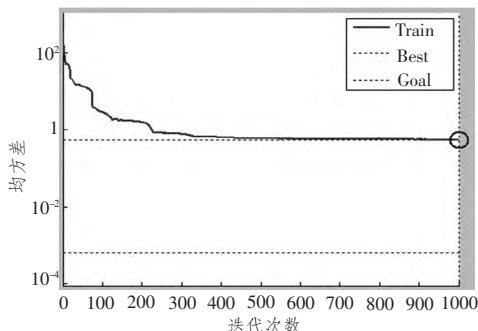


图 3 均方差性能函数

Fig. 3 MSE performance function

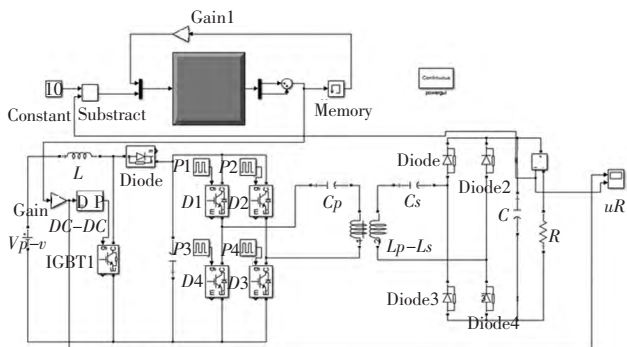


图 4 系统仿真模型

Fig. 4 System simulation model

3 仿真分析

为分析神经网络控制器的控制效果，基于 Simulink 搭建 SS^[9] 型 ICPT 系统模型电路，模型见图 4，参数见表 1，负载端输出目标电流为 10 A， M 为 16 μH 。

神经网络控制器的电流仿真波形如图 7 所示，仿真时间设置为 0.1 s。从图中可看出，在神经网络控制器的控制下，系统可以对电流进行快速调节，在 0.008 4 s 系统达到最大超调量，大小为 0.4 A；在 0.015 s 时，系统电流达到稳定，反应时间为 0.015 s，取得了很好的控制效果。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	取值
直流电压 $V_p - v / \text{V}$	48
初级回路谐振电感 $L_p / \mu\text{H}$	100
次级回路谐振电感 $L_s / \mu\text{H}$	64
互感 $M / \mu\text{H}$	16
初级回路线圈内阻 R_p / Ω	0.1
次级回路线圈内阻 R_s / Ω	0
初级回路谐振电容 $C_p / \mu\text{F}$	0.63
次级回路谐振电容 $C_s / \mu\text{F}$	0.98
负载 R / Ω	50

为了验证神经网络的优越性，将神经网络控制器与传统的 PID 控制器相比较，PID 控制器的控制效果如图 5 所示。从图中可看出，PID 控制器分别经过在 0.005 4 s 达到系统最大超调量 1.1 A 和 0.016 s 小于电流需求量 0.4 A 的 2 次震荡调整，经过 0.04 s 才使系统电流达到稳定。通过对比神经网络控制器和 PID 控制器的控制效果可以发现无论是反应速度还是电流超调量的控制神经网络控制器都明显优于 PID 控制器。

为了验证神经网络控制器的泛化效果，对耦合线圈的 M 值进行调整，模拟神经网络控制器在 M 值受洋流影响发生变化时的控制效果，设置 M 为 18 μH ，仿真时间为 0.1 s，仿真结果如图 6 所示。从

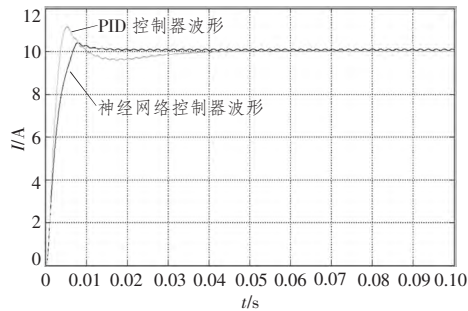


图 5 神经网络 PID 电流仿真波形

Fig. 5 Neural networks, PID current simulation waveforms

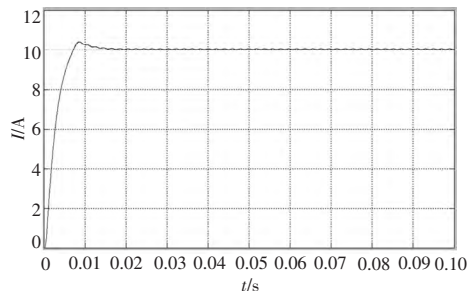


图 6 神经网络电流仿真波形

Fig. 6 Neural networks current simulation waveforms

图中可看出, 电流在 0.009 s 时达到最大超调量为 0.35 A, 系统的反应时间为 0.015 s。可以看出, 即使数据不在样本范围之内, 神经网络控制器也可以取得很好的控制效果, 神经网络的泛化能力得到很好的验证。

4 结 语

深海环境中, ICPT 系统初级、次级磁芯在受到水流冲击后会产生偏心和间隙, 导致负载端电压波动。本文针对 AUV 非接触充电系统对稳压电源的实际需求, 设计了基于神经网络的恒压控制系统。Matlab 仿真证明神经网络控制器可以取得良好的控制效果, 反应速度快, 超调量小, 且对样本外的数据具有良好的泛化能力, 克服了 PID 控制器无法满足水下应用的不足, 对 AUV 非接触充电技术的应用具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 王田苗, 杨兴帮, 梁建宏. 中央鳍/对鳍推进模式的仿生自主水下机器人发展现状综述[J]. 机器人, 2013(3): 352 - 362, 384.
WANG Tian-miao, YANG Xing-bang, LIANG Jian-hong. A survey on bionic autonomous underwater vehicles propelled by median and/or paired fin mode [J]. Robot, 2013(3): 352 - 362, 384.
- [2] 马伟锋, 胡震. AUV 的研究现状与发展趋势[J]. 火力与指挥控制, 2008(6): 10 - 13.
MA Wei-feng, HU Zhen. Current researches and development trend on AUV [J]. Fire Control and Command Control, 2008(6): 10 - 13.
- [3] 唐凡, 张克涵, 严卫生, 等. 水下自主航行器非接触式充电系统频率控制[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(2): 43 - 46 + 76.
TANG Fan, ZHANG Ke-han, YAN Wei-sheng, et al. Research on frequency control of contactless charging system of AUV [J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(2): 43 - 46 + 76.
- [4] THRIMAWITHANA D J, MADAWALA U K. A primary side controller for inductive power transfer systems [C]// Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 661 - 666.
- [5] 杨光, 唐厚君, 白亮宇. CIPT 模糊恒压控制策略设计与分析[J]. 电气自动化, 2013(4): 41 - 43.
YANG Guang, TANG Hou-jun, BAI Liang-yu. Design and analysis of fuzzy constant voltage control for the CIPT systems [J]. Electrical Automation, 2013(4): 41 - 43.
- [6] 周静, 王兴. 稳压系统在非接触感应电能传输系统中的应用[J]. 电源技术, 2012(4): 550 - 553.
ZHOU Jing, WANG Xing. Application of voltage regulation system in contactless induction power transmission system [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 4: 550 - 553.
- [7] 林飞, 杜欣. 电力电子应用技术的 Matlab 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
LIN Fei, DU Xin. Matlab simulation of power electronic application technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [8] 张德丰. Matlab 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
ZHANG De-feng. Matlab neural network application design [M]. Beijing: Mechanical Industrial Publishing House, 2009.
- [9] 周豪, 姚钢, 马立伟, 等. ICPT 系统谐振频率跟踪方法研究[J]. 电力电子技术, 2013(9): 77 - 79.
ZHOU Hao, YAO Gang, MA Li-wei, et al. A new method of frequency tracking control for ICPT system [J]. Power Electronics, 2013(9): 77 - 79.