

基于自抗扰控制器的无刷直流电机控制系统

夏长亮, 李正军, 杨 荣, 祁温雅, 修 杰

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 南开区 300072)

CONTROL SYSTEM OF BRUSHLESS DC MOTOR BASED ON ACTIVE-DISTURBANCE REJECTION CONTROLLER

XIA Chang-liang, LI Zheng-jun, YANG Rong, QI Wen-ya, XIU Jie

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: The active-disturbance rejection controller (ADRC) is independent of system model and overcomes the shortcomings of classic PID controller, so ADRC has good performance and simple algorithm. In order to achieve high dynamic performance of control system, a new strategy for brushless DC motor is presented by using ADRC in this paper. The strategy realizes the disturbance compensation without accurate knowledge of motor parameters and the controller can be designed without accurate motor model. Extended states Observer(ESO) in ADRC can real-time calculate the value of disturbance, so the motor model is transformed into a series-connection object. The control design includes two one-order ADRCs. One ADRC controls the current in armature winding, which is the inner loop, and the other ADRC controls rotor speed, which is the outer loop. The experiment results show that the controllers ensure very good robustness and adaptability under modeling uncertainty and external disturbance and produce better dynamic performance than classic PID controller in the operation conditions.

KEY WORDS: Electric machine; Active-disturbance rejection controller(ADRC); Brushless DC motor; Dynamic performance; Robustness

摘要: 自抗扰控制器(ADRC)是在继承经典PID不依赖于对象模型优点的基础上,通过改进经典PID固有缺陷而形成的新型控制器,性能优良并且算法简单。无刷直流电机作为一个非线性系统,采用经典PID控制难以得到满意的控制效果。为了提高控制系统的动态性能和鲁棒性,文中给出了无刷直流电机的自抗扰控制方案。该控制方案不需要精确电机参数就可以实现干扰补偿,控制器的设计也不需要建立电机的精确数学模型。自抗扰控制器利用其内部的扩张状态观测器可以估计出系统的内外扰动,据此将电机等效为由两

个非线性系统构成的串联对象,然后设计两个一阶自抗扰控制器实现对电机的内外环控制,内环控制电流,外环控制转速。实验结果表明,自抗扰控制器对电机模型的不确定性和外部扰动变化具有较强的适应性和鲁棒性,控制系统具有优良的动态性能。

关键词: 电机; 自抗扰控制器; 无刷直流电机; 动态性能; 鲁棒性

1 引言

无刷直流电机(BLDCM)作为一种电子驱动的无极变速电动机,具有结构简单、运行效率高、动态响应好等诸多优点,在家用电器和工业生产领域的应用日益广泛。目前较多电动机控制系统采用的是经典PID控制器,由于无刷直流电机是一个非线性系统,如电枢反应的非线性、转动惯量和相电阻的变化等,致使经典PID控制器难以满足控制系统的性能要求。现代控制理论如最优控制理论、自适应控制理论和滑模变理论可以有效提高电机的运行性能^[1-7]。但由于无刷直流电机是一个多变量、强耦合的系统,部分状态变量不易或者无法检测,采用现代控制理论设计控制方案时,运算量往往较大,需要高性能微处理器支持,控制系统成本较高。具有自适应、自学习功能的智能控制策略如模糊控制、神经网络控制等虽然控制电机时能得到较为满意的结果,但是设计难度大,计算复杂,不易在实际工程中得到推广和应用^[8-9]。

自抗扰控制器是在继承经典PID不依赖于对象模型优点的基础上,通过改进经典PID固有缺陷而形成的新型控制器。该控制器算法简单,参数适应性广,能自动检测并补偿控制对象的内外扰动,控制对象参数发生变化或遇到不确定性扰动时都能

基金项目: 天津市应用基础研究计划重点项目(043802011); 天津市科技攻关计划重大科技工程项目(053182811)。

得到很好的控制效果, 具有较强的适应性、鲁棒性和可操作性。目前, 自抗扰控制器已被成功地应用在机器人高速高精度控制、传动装置的运动控制和异步电机变频调速控制等诸多领域^[10]。

本文从控制性能和实用化的角度给出了无刷直流电机的自抗扰控制方案, 并通过实验验证了该方案的有效性。

2 无刷直流电机模型

无刷直流电机一般由永磁同步电动机本体、逻辑驱动电路及位置传感器三部分组成, 图1为原理图。为便于分析, 以三相桥式Y接电机为例, 假设电机采用三相对称绕组, 假设驱动电路的功率器件为理想开关, 电机反电势为梯形波, 忽略续流二极管的电流, 得电机的状态方程为

$$u_x = Ri_x + (L - M)\dot{i}_x + e_x \quad (1)$$

x 为 a, b, c

式中 u_x 为 x 相相电压; i_x 为 x 相相电流; R 为各相绕组电阻; L 、 M 分别为各相绕组自感和互感; e_x 为 x 相的反电势。

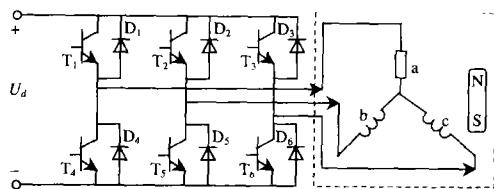


图1 无刷直流电机原理图

Fig.1 The diagram of brushless DC motor

电磁转矩方程为

$$T_{em} = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (2)$$

式中 ω 为电机的机械角速度。

机械运动方程为

$$T_{em} = T_l + D\omega + J\dot{\omega} \quad (3)$$

式中 D 为粘滞阻尼系数; T_l 为负载转矩; J 为转动惯量。

三相桥式无刷直流电机选择两两导通方式, 则任意时刻只有两相电枢绕组导通, 另一相为悬空。假设电枢电流为 i , 两相电枢绕组的感应电动势为 e , 则 $e = e_1 + e_2$, e_1 为电流流入绕组的感应电动势, e_2 为电流流出绕组的感应电动势, 得下式

$$\dot{i} = -\frac{Ri}{L-M} + \frac{u_s}{2(L-M)} - \frac{e}{2(L-M)} \quad (4)$$

式中 u_s 为加在两相导通绕组上的电压。

$$\dot{\omega} = -\frac{D\omega}{J} + \frac{ei}{\omega J} - \frac{T_l}{J} \quad (5)$$

当反电势是梯形波时, 导通绕组的反电势值为 $e_1 = e_2 = k_e p \omega$, 由式(5)得

$$\dot{\omega} = -\frac{D\omega}{J} + \frac{2k_e pi}{J} - \frac{T_l}{J} \quad (6)$$

式中 k_e 为电机电势系数; p 为电机极对数。

式(4)对应电机的电流子系统 ΣI , 式(6)对应转速子系统 ΣS , 上述方程的参数在电机运行过程中会发生变化, 自抗扰控制器对系统参数的变化有较强的鲁棒性, 适合对上述系统进行控制。

3 自抗扰控制器和电机控制系统设计

自抗扰控制器是在反馈线性化的基础上设计的新型控制器, 由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、非线性反馈控制律(NLSEF)三部分组成。它通过非线性变换, 将非线性系统转化为线性系统的积分串联结构, 从而实现了动态系统的反馈线性化^[11]。由于自抗扰控制器是根据被控系统的时间尺度划分对象, 因此设计时不用考虑系统的线性或非线性, 时变或时不变, 可用于控制时变系统、多变量系统和非最小相位系统等多种控制对象。

对于如下表示的非线性对象

$$y^{(n)} = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, t) + w(t) + u \quad (7)$$

其中, $f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, t)$ 为未知函数; $w(t)$ 为未知外扰; y 为量测输入; u 为控制输入。其对应的自抗扰控制器结构图2为

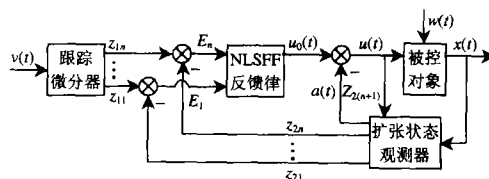


图2 自抗扰控制器结构图

Fig.2 The diagram of ADRC controller

在自抗扰控制器中, 跟踪微分器的使用减小了系统的初始误差, 解决了系统响应快速性和超调性之间的矛盾, 并可根据需要安排给定输入的过渡过程; 扩张状态观测器估计系统状态和内外扰, 将含未知干扰的非线性不确定性对象化为积分串联型对象进行控制; 非线性反馈控制律用来给定控制信号, 得到的控制量 $u(t) = u_0(t) - \frac{z_{2(n+1)}}{b}$ 中的 $-\frac{z_{2(n+1)}}{b}$ 为补偿扰动的分量。非线性反馈控制律用一个简单的非线性函数实现了对控制工程界的经验知识“大误差小增益, 小误差大增益”的数学拟合, 提高了

自抗扰控制器的动态性能和鲁棒性。

一阶自抗扰控制器方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = -R_1 \text{fal}(z_{11} - v(t), \alpha_0, \delta_0) \\ \varepsilon = z_{11} - y \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_1 \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) + b_0 u \\ \dot{z}_{22} = -\beta_2 \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \varepsilon_1 = z_{11} - z_{21} \\ u_0 = \beta_3 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha_2, \delta_2) \\ u = u_0 - z_{22}/b_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta \\ \varepsilon/\delta^{1-\alpha}, & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (9)$$

该控制器算法只需对象的输入输出数据 u 和 y ，简单且易实现。

参考文献[12]给出了非线性 PID 在串联对象上的应用。因为非线性 PID 和自抗扰控制器均可用“分离性原理”进行设计，非线性 PID 的跟踪微分器 II 替换成扩张状态观测器后，即为自抗扰控制器对串联对象的控制。

将式(4)中 $-\frac{e}{2(L-M)}$ 看作是电流子系统的扰动 $w_1(t)$ ，将式(6)中 $-\frac{T_L}{J}$ 看作是转速子系统的扰动 $w_2(t)$ ，可得串联对象方程

$$\begin{cases} \dot{i} = -\frac{R}{L-M}i + w_1(t) + \frac{1}{2(L-M)}u \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{J}\omega + w_2(t) + \frac{2k_e p}{J}i \end{cases} \quad (10)$$

根据上述方程给出无刷直流电机的自抗扰控制方案，如图 3 所示。

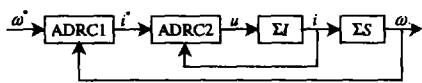


图3 无刷直流电机自抗扰控制图

Fig.3 The ADRC control system structure diagram of brushless DC motor

在图 3 中，ADRC1、ADRC2 均为一阶自抗扰控制器，ADRC2 和 ΣI 组成整个系统的内环，ADRC1 和 ΣS 组成整个系统的外环，设计时先把内环的传递函数当作 1，认为 i^* 直接控制 ΣS ，设计 ADRC1，然后把 i^* 作为 ΣI 的参考输入， i 跟踪 i^* ，据此设计 ADRC2。选择适当的参数，保证扩张状态观测器能很好地估计出系统总扰动的实时作用量，两个非线性时变子系统就被近似地变成两个积

分环节，完成了实时动态线性化。ADRC1 和 ADRC2 的参数按如下步骤进行整定：

(1) 确定 ADRC1 的参数，再确定 ADRC2 的参数。

(2) 选取一组参数为受控对象提供稳定控制，调整跟踪微分器参数满足过渡过程要求，调整扩张状态观测器参数使控制器尽可能快速而准确地估计参数输入和外扰的共同作用。

(3) 根据控制系统性能指标在线调整非线性反馈控制律的相关参数。

4 实验结果

本文以 TI 公司的数字信号处理器 (DSP) TMS320LF2407 为基础验证了自抗扰控制系统的性能，硬件框图如图 4 所示。自抗扰控制器参数的整定和相应的控制算法通过软件实现。

实验样机采用四对极桥式 Y 接无刷直流电机，具体参数为：额定电压 $U_N = 36V$ ；额定转矩 $T_N = 0.4N \cdot m$ ；额定转速 $T_N = 0.4N \cdot m$ ；相电阻 $R = 0.66\Omega$ ；有效电感 $L-M = 1.4mH(\pm 1.3\%)$ ；反电势系数 $K_e = 0.06V/(rad/s)$ ；转动惯量 $J = 1.57 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$ 。

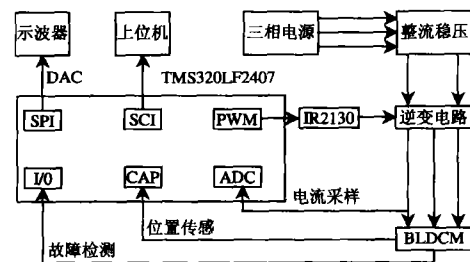


图4 无刷直流电机硬件控制框图

Fig.4 The hardware control framework of brushless DC motor

系统通过霍尔元件检测电机转子位置信号，DSP 将位置信号转化为速度信号，速度信号作为 ΣS 的输出量送入 ADRC1，非线性反馈控制律计算后得到的控制量为 ADRC2 的给定输入， ΣI 的输出量即控制电路主回路电流由 DSP 的 A/D 单元得到，ADRC2 输出的控制量通过 DSP 的事件单元 (EVA) 转化为占空比不同的方波来实现对样机的控制。速度环采样周期为 15ms，电流环采样周期为 3.2μs。

ADRC1 参数 ($R, \alpha_0, \delta_0, \beta_1, \alpha_1, \delta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha_2, \delta_2$) 整定后为：(200, 0.5, 0.01, 73, 0.5, 0.01, 230, 2, 1, 0.01)。

ADRC2 参数 ($R, \alpha_0, \delta_0, \beta_1, \alpha_1, \delta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha_2, \delta_2$) 整定后为：(10, 0.35, 0.01, 276, 0.7, 0.01, 730, 10, 1, 0.01)。

图5为系统空载且给定转速为额定转速时样机的转速响应曲线和速度跟踪曲线。

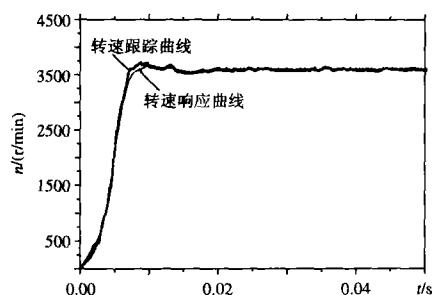


图5 样机空载转速响应和跟踪曲线
Fig.5 The dynamic speed response and track of BLDCM without load

图5显示出: ①样机起动时转速响应快并且超调小, 解决了经典PID控制响应快速时超调大的矛盾; ②整定参数后的ADRC1可以很好地跟踪速度输出。

图6为样机空载且给定转速为额定转速时控制系统主回路的电流实际曲线和跟踪曲线。

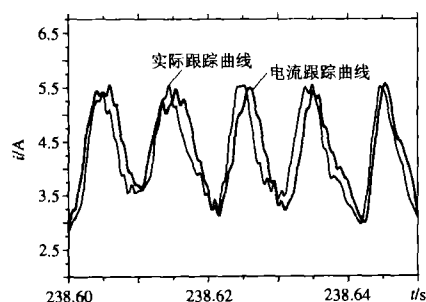


图6 主回路电流曲线和跟踪曲线
Fig.6 The actual curve and tracking curve of current in main loop

图7为突加一定负载时样机转速响应曲线。由图可得, 当系统受到一定的外来扰动时能自动对扰动进行动态补偿, 验证了自抗扰控制器具有良好的自适应性。

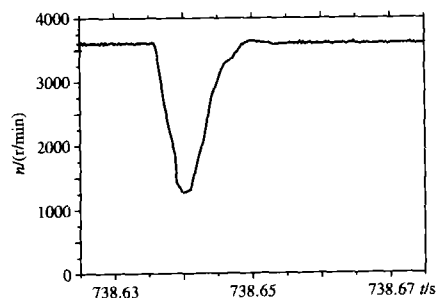


图7 空载加外扰时样机转速响应曲线
Fig.7 The dynamic speed response of BLDCM due to external disturbance without load

在ADRC1和ADRC2参数不变的情况下, 在

主回路中串入 0.2Ω 电阻模拟样机相电阻发生变化。电机转速响应图如图8所示。将该曲线与相电阻变化前的响应曲线进行比较, 结果表明, 当电机参数发生变化时控制系统依然保持很好的动态性能, 具有较强的鲁棒性。

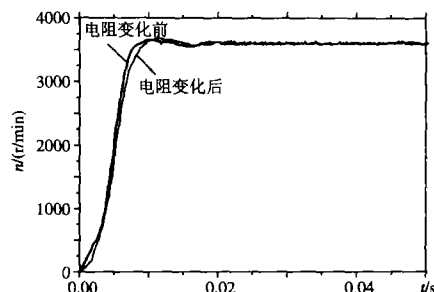


图8 电机参数发生变化后的样机转速响应图
Fig.8 The dynamic speed responses of BLDCM when motor parameter is changed

5 结束语

为提高无刷直流电机控制系统的性能, 本文根据自抗扰控制原理给出了电机的新型控制方案。该方案具有以下优点:

(1) 算法简单, 便于工程应用, 控制器设计只需电机的转速子系统和电流子系统的时间尺度, 而不依赖电机的精确模型。

(2) 性能优良, 响应快并且超调小, 一定范围内的负载变化和电机参数的变化不影响整个控制系统的品质, 鲁棒性强。

参考文献

- [1] Lee C K, Kwok N M. A BLDCM servo system using a variable structure controller with an adaptive switching slope [C]. Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE, 1995, (6): 1352-1357.
- [2] 夏长亮, 文德, 王娟. 基于自适应人工神经网络的无刷直流电机换相转矩波动抑制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 54-58.
Xia Changliang, Wen De, Wang Juan. A new approach of minimizing commutation torque ripple for brushless DC motor based on adaptive ANN[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 54-58.
- [3] 夏长亮, 王娟, 史婷娜, 等. 基于自适应径向基函数神经网络的无刷直流电机直接电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 123-127.
Xia Changliang, Wang Juan, Shi Tingna et al. Direct control of currents based on adaptive RBF neural network for brushless DC motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 123-127.
- [4] 夏长亮, 文德, 范娟, 等. 基于RBF神经网络的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 26-29(76).
Xia Changliang, Wen De, Fan Juan et al. Based on RBF neural network position sensorless control for brushless DC

- Motors[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2002, 17(3): 26-29(76).
- [5] 夏长亮, 杨晓军, 史婷娜, 等. 基于扰动观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2002, 17(6): 25-28.
Xia Changliang, Yangxiaojun, Shi Tingna *et al.* Position sensorless control of brushless DC Motor based on the disturbance observer[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2002, 17(6): 25-28.
- [6] 夏长亮, 徐绍辉, 史婷娜, 等. 基于遗传算法的超声波电机模糊自适应速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 99-103.
Xia Changliang, Xu Shaohui, Shi Tingna *et al.* Fuzzy adaptive speed control for ultrasonic motor based on genetic algorithm[J]. 中国电机工程学报 Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 99-103.
- [7] 夏长亮, 祁温雅, 杨荣, 等. 基于 RBF 神经网络的超声波电机参数辨识与模型参考自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 117-121.
Xia Changliang, Qi Wenya, Yang Rong *et al.* Identification and model reference adaptive control for ultrasonic motor based on RBF neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 117-121.
- [8] Rubaai A, Ricketts D, Kankam M D. Development and implementation of an adaptive fuzzy-neural-network controller for brushless drives[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2002, 38(2): 441-447.
- [9] El-Sharkawi M A, El-Samahy A A, El-Sayed M L. High performance drive of DC brushless motors using neural network [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1994, 9(2): 317-322.
- [10] 冯光, 黄立培, 朱东起. 采用自抗扰控制器的高性能异步电机调速系统[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 55-58.
Feng Guang, Huang Lipei, Zhu Dongqi. High performance control of induction motor based on auto-disturbance rejection controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 55-58.
- [11] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
Han Jingqing. Active-disturbance rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [12] 韩京清. 一种新型控制器-NLPID[J]. 控制与决策, 1994, 9(6): 401-407.
Han Jingqing. A new controller-NLPID[J]. Control and Decision, 1994, 9(6): 401-407.

收稿日期: 2004-07-20。

作者简介:

夏长亮 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;

李正军 (1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为无刷直流电机及其控制。