

文章编号:1671-251X(2011)09-0067-05

DOI:CNKI:32-1627/TP.20110828.1431.017

起重机升降运动系统自适应 Backstepping 控制研究

牛超¹, 姚玉梅²

(1. 河南机电职业学院机械工程系, 河南 郑州 450002;

2. 焦煤集团教育培训中心, 河南 焦作 454003)

摘要:通过分析起重机升降运动系统各组成部分的关联关系,建立了起重机升降运动系统数学模型,从而将电动机的运动状态和负载的运动状态有效地统一起来;以该模型为基础,将负载运动位置作为控制变量,采用自适应 Backstepping 控制策略设计了一种起重机升降运动系统负载位置控制器。仿真结果表明,该控制器具有较快的响应速度和较小的跟踪误差,能够有效抑制负载突变和参数摄动的影响,具有良好的鲁棒性。

关键词:起重机;升降运动;自适应反推控制;鲁棒性

中图分类号:TP273

文献标识码:A

网络出版时间:2011-08-28 14:31

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20110828.1431.017.html>

收稿日期:2011-06-10

作者简介:牛超(1983-),男,河南温县人,助理讲师,硕士,研究方向为交流电动机控制。E-mail:315ice@gmail.com

从图3可看出,采用迭代学习控制算法设计的2种励磁控制器维持机端电压的能力明显优于PID控制方法;采用常规迭代学习控制算法经过3次迭代可以将机端电压控制在允许的范围内,而采用即时学习型迭代学习控制算法只需要2次迭代就可以将机端电压控制在允许的范围内;迭代学习控制的同步发电机相对功角的振荡幅度也小于PID控制方法。因此,采用即时学习算法控制初值的迭代学习控制算法维持机端电压的效果最好。

3 结语

将即时学习算法引入到基于迭代学习控制算法的同步发电机励磁控制器的设计中,在不影响迭代学习控制算法收敛性的前提下,加快了算法的收敛速度。Matlab/Simulink 仿真结果表明,采用该方法设计的同步发电机励磁控制器具有较强的维持机端电压的能力。

参考文献:

[1] 李仁俊,韩正之. 迭代学习控制综述[J]. 控制与决策, 2005,20(9):961-966.

- [2] BRISTOW D A, THARAYIL M, ALLEYNES A G. A Survey of Iterative Learning Control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2006(6):96-114.
- [3] XU J X. Direct Learning of Control Efforts for Trajectories with Different Magnitude Scales [J]. Automatica, 1997,33(12):2191-2195.
- [4] XU J X, XU J, GAO W J. A PD Type Fuzzy Logic Learning Control Approach for Repeatable Tracking Control Tasks[J]. Acta Automatic Sinica, 2001,27(4):434-446.
- [5] CHRISTOPHER G A, ANDREW W M, STEFAN S. Locally Weighted Learning for Control [J]. Artificial Intelligence Review, 1997,11(1):75-113.
- [6] GIANLUCA B, MAURO B, HUGUES B. Lazy Learning for Local Modeling and Control Design [J]. International Journal of Control, 1999,72(7/8):643-658.
- [7] 徐敏,林辉. 同步发电机迭代学习励磁控制器的仿真研究[J]. 电网技术, 2005,29(12):81-84.
- [8] ARIF M, ISHIIHARA T, INOOKA H. Incorporation of Experience in Iterative Learning Controllers Using Locally Weighted Learning [J]. Automatica, 2001,37(6):881-888.

Research of Adaptive Backstepping Control of Crane Hoisting System

NIU Chao¹, YAO Yu-mei²

(1. Department of Mechanical Engineering of Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 450002, China.

2. Center of Education and Training of Jiaozuo Coal Group, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Relationship of all parts of crane hoisting system was analyzed and mathematic model of the system was established, so as to effectively unify moving states of motor and loads of the system. A controller of load position of crane hoisting system based on adaptive Backstepping strategy was designed on the basis of the model, which takes load position as a control variable. The simulation result showed that the controller not only has faster responding speed and smaller tracking error, but also restrains influence of load wave and parameter perturbation effectively with good robustness.

Key words: crane, hoisting movement, adaptive backstepping control, robustness

0 引言

起重机升降运动控制系统是一个十分复杂的非线性系统^[1-2]。传统的起重机控制系统多采用PID控制算法,该算法实现简单,但动态特性和鲁棒性较差;模糊控制的实现又过于依赖操作者的经验^[3],使其应用范围受到很大的局限。采用非线性控制理论能够精确描述系统的运动状态,而且有意识地引入非线性可以提高系统的工作质量。自适应 Backstepping 控制算法是一种新的非线性控制方法,该算法不仅控制策略简单,而且能够有效地抑制系统参数变化对系统性能的影响,保证系统的全局稳定性^[4-5]。因此,本文通过分析起重机升降运动系统各组成部分的关联关系,建立了系统数学模型,并以该模型为基础,将负载运动位置作为控制变量,采用自适应 Backstepping 控制策略设计了一种起重机升降运动系统负载位置控制器,并对基于该控制器的起重机升降运动系统进行了仿真研究。

1 起重机升降运动系统数学模型

起重机升降运动系统结构如图1所示。

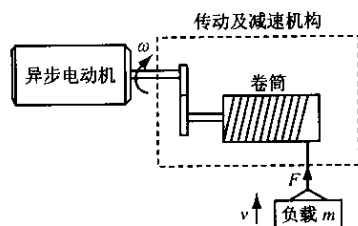


图1 起重机升降运动系统结构

对该系统作如下假设:(1)不考虑起重机主梁等机械构件的弹性形变造成的影响;(2)忽略钢丝绳的质量;(3)假定钢丝绳在系统运动过程中为刚

性,不产生弹性形变;(4)传动及减速机构的齿轮之间不存在间隙。

1.1 异步电动机模型

在转子磁场定向下,异步电动机在两轴同步旋转 $d-q$ 坐标系中的数学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\psi}_r \\ \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu\psi_r i_{qs} - \frac{f_1\omega}{J_1} - \frac{T_m}{J_1} \\ -\alpha\psi_r + \alpha L_m i_{ds} \\ -\gamma i_{ds} + \alpha\beta\psi_r + n_p\omega i_{qs} + \frac{\alpha L_m i_{qs}^2}{\psi_r} \\ -\gamma i_{qs} - \beta n_p\omega\psi_r - n_p\omega i_{ds} - \frac{\alpha L_m i_{ds} i_{qs}}{\psi_r} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ω 为电动机机械角速度; ψ_r 为 d 轴磁通; i_{ds} 、 i_{qs} 分别为 d 、 q 轴定子电流; f_1 为摩擦系数; J_1 为转动惯量; T_m 为负载转矩; L_m 为定转子互感; $\gamma = L_m^2 R_r / (\sigma L_s L_r^2) + R_s / (\sigma L_s)$,其中 R_s 、 R_r 分别为定子电阻、转子电阻, L_s 、 L_r 、 σ 分别为定子自感、转子自感、漏感系数; n_p 为转子极对数; $\alpha = R_r / L_r$; $\beta = L_m / (\sigma L_s L_r)$; $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$; $\mu = n_p L_m / (J_1 L_r)$; u_{ds} 、 u_{qs} 分别为 d 、 q 轴定子电压。

异步电动机的电磁转矩 T_e 为

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \psi_r \quad (2)$$

异步电动机的机械转速方程为

$$T_e = J_1 \frac{d\omega}{dt} + f_1 \omega + T_m \quad (3)$$

电动机负载转矩 T_m 在这里作为电动机轴上向外输出的机械转矩,它通过驱动机械传动机构带动

负载做升降运动。

1.2 传动及减速机构的动态模型

传动及减速机构包括传动轴、多级减速齿轮等。传动及减速机构的输入转矩即为 T_m (T_m 克服摩擦转矩后带动负载做升降运动), 其转动惯量为 J_2 , 转动摩擦系数为 f_2 , 负载转矩为 T_L , 减速比为 i , 则传动及减速机构的数学模型为

$$T_m = T_L + J_2 \frac{d\omega_L}{dt} + f_2 \omega_L \quad (4)$$

式中: ω_L 为传动及减速机构的转速, $\omega_L = \omega/i$ 。

设负载运动速度为 v , 卷筒的半径为 r , 有

$$v = r\omega_L = r\omega/i \quad (5)$$

$$T_L = rm g \quad (6)$$

式中: m 为负载质量; g 为重力加速度。

1.3 起重机升降运动系统的数学模型

将式(2)~(6)代入式(1), 整理后可得到起重机升降运动的动态数学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\psi}_r \\ \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \psi_r i_{qs} + Bv + Cm \\ -\alpha \psi_r + \alpha L_m i_{ds} \\ -\gamma i_{ds} + \alpha \beta \psi_r + n v i_{qs} + \frac{\alpha L_m i_{qs}^2}{\psi_r} + \sigma_1 u_{ds} \\ -\gamma i_{qs} - n \beta v \psi_r - n v i_{ds} - \frac{\alpha L_m i_{ds} i_{qs}}{\psi_r} + \sigma_1 u_{qs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mu_1 = \mu J_1 r/k$; $B = -(f_1 i + f_2)/k$; $C = -gr^2/k$; $k = J_1 i + J_2$; $n = n_p i/r$; $\sigma_1 = 1/(\sigma L_s)$ 。

2 起重机升降运动系统负载位置控制器设计

起重机垂直升降吊装负载过程中, 设负载距地面的位置变量为 h , 其导数为

$$\dot{h} = v \quad (8)$$

起重机升降运动系统由转速机械子系统和电磁子系统组成。式(7)中第一个方程为转速机械子系统, 其它3个方程属于电磁子系统。根据奇异摄动理论^[6-7], 转速机械子系统可看作慢系统, 而电磁子系统可看作快系统。因此, 电磁子系统状态变量 ψ_r , i_{ds} 和 i_{qs} 可迅速收敛于稳定值, 而负载运动速度 v 收敛于参考值的速度相对较慢。因此, 可假设在磁通得到准确控制的条件下有

$$\dot{v} = \mu_1 \psi_r^* i_{qs} + Bv + Cm \quad (9)$$

式中: ψ_r^* 为磁通的给定值。

令 $A = \mu_1 \psi_r^*$, 则式(9)可表示为

$$\dot{v} = Ai_{qs} + Bv + Cm \quad (10)$$

考虑到起重机吊装过程中可能存在负载发生小

的突变、电动机在运行过程中绕组升温等情况, 导致起重机升降运动系统受到外界干扰和参数发生不同程度的摄动, 将式(10)变换为^[8]

$$\dot{v} = (A + \Delta A)i_{qs} + (B + \Delta B)v + C(m + \Delta m) = Ai_{qs} + Bv + N \quad (11)$$

式中: N 表示参数的摄动和外界的干扰, $N = \Delta Ai_{qs} + \Delta Bv + C(m + \Delta m)$ 。

设位置跟踪误差为

$$e_1 = h - h^* \quad (12)$$

式中: h^* 为给定的位置参考。

位置误差的导数为

$$\dot{e}_1 = v - \dot{h}^* \quad (13)$$

v 可看作一个虚拟控制量, 选取 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2, \text{ 则 } V_1 \text{ 的导数为}$$

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (v - \dot{h}^*) = e_1 (v - \dot{h}^* - a_1 + a_1) \quad (14)$$

式中: $a_1 = -c_1 e_1$, 其中 c_1 为正常数。

由 Lyapunov 稳定理论可得, 若令虚拟控制量 $v^* = \dot{h}^* + a_1$, 则 Lyapunov 函数 $\dot{V}_1 \leq 0$ 。

为了得到实际的电流控制律, 定义虚拟控制量误差 $e_2 = v - v^*$, 则式(14)可写为

$$\dot{e}_1 = -c_1 e_1 + e_2 \quad (15)$$

e_2 的导数为

$$\dot{e}_2 = \dot{v} - \ddot{h}^* - \dot{a}_1 \quad (16)$$

将式(11)代入式(16)可得

$$\dot{e}_2 = Ai_{qs} + Bv + N - \ddot{h}^* + c_1 \dot{e}_1 \quad (17)$$

由于实际应用中 N 是随机的、不可预知的量, 同时 N 的上界也难以确定, 因此, 采用 $\hat{N}$ 表示不确定项估计值。

选取 Lyapunov 函数 V_2 为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{N}^2 \quad (18)$$

式中: $\tilde{N} = N - \hat{N}$; γ_1 为正数。

对式(18)求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{N} \dot{\tilde{N}} = e_1 (-c_1 e_1 + e_2) + \\ &e_2 (Ai_{qs} + Bv + N - \ddot{h}^* + c_1 \dot{e}_1) + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{N} \dot{\tilde{N}} = -c_1 e_1^2 + \\ &e_2 (Ai_{qs} + Bv + N - \ddot{h}^* + c_1 \dot{e}_1 + e_1) - \frac{1}{\gamma_1} (N - \hat{N}) \dot{\tilde{N}} \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可知,若采用 Backstepping 控制策略将 q 轴反推,位置控制器输出电流和自适应律可设计为

$$i_{qs}^* = A^{-1}(-Bv - \hat{N} - c_1 \dot{e}_1 + \ddot{h}^* - e_1 - c_2 e_2) \quad (20)$$

$$\dot{\hat{N}} = \gamma_1 e_2 \quad (21)$$

式中: c_2 为正数。

则将式(20)、式(21)带入式(19)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -c_1 e_1^2 + e_2(N - \hat{N} - c_2 e_2) - \\ &\frac{1}{\gamma_1}(N - \hat{N})\gamma_1 e_2 = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

由 Lyapunov 稳定定理可知,式(20)和式(21)能保证系统的稳定性。

将求得的参考电流 i_{qs}^* 与 q 轴反馈电流 i_{qs} 相比较,得到误差 $e_q = i_{qs}^* - i_{qs}$,通过 PID 控制器得到 q 轴的控制电压^[9]:

$$u_{qs}(t) = K_i \int_0^t e_q(t) dt + K_p e_q(t) \quad (23)$$

3 仿真研究

起重机升降运动系统的复杂性和被控对象的特殊性使得对它的分析和设计研究工作不可能完全在实物上进行。为了验证位置控制器的正确性,在 Matlab7.0.4 的 Simulink 环境下对起重机升降运动系统进行仿真,加入扰动和参数变化,观察系统在不同工况下的动、静态特性。系统仿真参数如表 1 所示^[10],仿真框图如图 2 所示。

表 1 系统仿真参数

名称	标称值	名称	标称值
定子自感 L_s/H	0.069 9	转动惯量 $J_1/(kg \cdot m^2)$	0.058 6
转子自感 L_r/H	0.069 9	转动惯量 $J_2/(kg \cdot m^2)$	0.3
互感 L_m/H	0.068	摩擦系数 $f_1/(N \cdot ms \cdot rad^{-1})$	0.01
定子电阻 R_s/Ω	0.18	摩擦系数 $f_2/(N \cdot ms \cdot rad^{-1})$	0.01
转子电阻 R_r/Ω	0.15	极对数 n_p	2
传动比 i	10	重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$	9.8
卷筒半径 r/m	0.2		

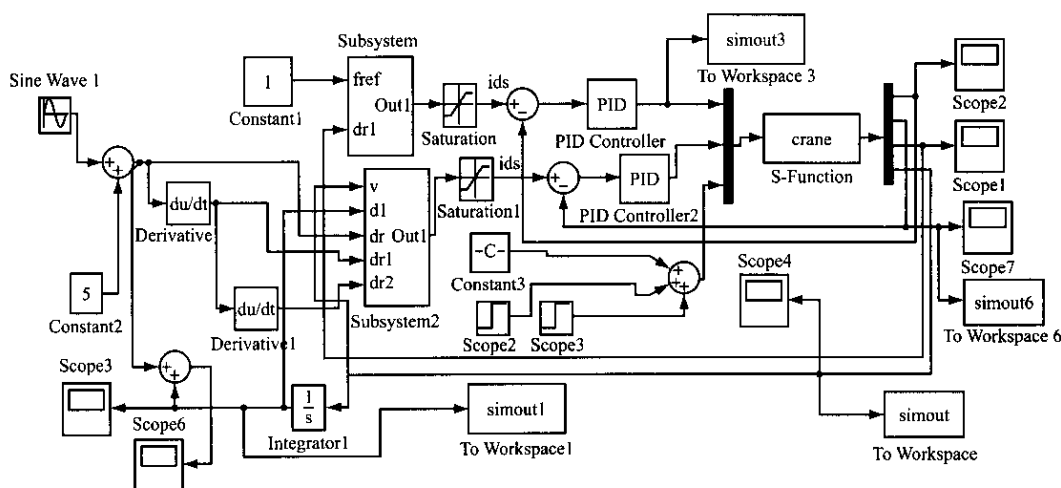


图 2 起重机升降运动系统仿真框图

起重机吊装物料的运动过程包括上升过程和下降过程,起重机将负载从地面提升到给定位置然后又返回到原位置,因此,可以认为负载的位置轨迹为一个正弦函数。假设位置跟踪给定 $h^* = 5\sin\left(\frac{\pi}{5}t - \frac{\pi}{2}\right) + 5$,上升的最大高度为 10 m,运行时间为 20 s,其中 0~10 s 为负载上升阶段,10~20 s 为负载下降阶段。为了更细致地分析系统性能,将仿真实验分为轻载和重载两种情况。

轻载时,在 0~10 s 上升阶段,当 $t=2$ s 时电动机转子电阻变为原来的 2 倍, $t=3$ s 时负载由 $m=100$ kg 突变为 $m=120$ kg;在 10~20 s 下降阶段,

提升负载分为空载和 $m=150$ kg 两种情况。仿真结果如图 3 所示。

从图 3 可看出,轻载时系统负载的位置信号能够快速准确地跟踪给定信号,具有较高的控制精度;在负载上升阶段,对于来自系统参数的摄动和负载的变化都具有很强的鲁棒性;在负载下降阶段,负载位置在空载和 $m=150$ kg 两种情况下都能很好地跟踪位置给定,且空载时的控制精度高于 $m=150$ kg 时的控制精度。

重载时,在 0~10 s 上升阶段,当 $t=2$ s 时电动机转子电阻变为原来的 2 倍, $t=3$ s 时负载由 $m=1000$ kg 突变为 $m=1100$ kg;在 10~20 s 下降阶

段,负载分空载和 $m=1\,500\text{ kg}$ 两种情况。仿真结果如图 4 所示。

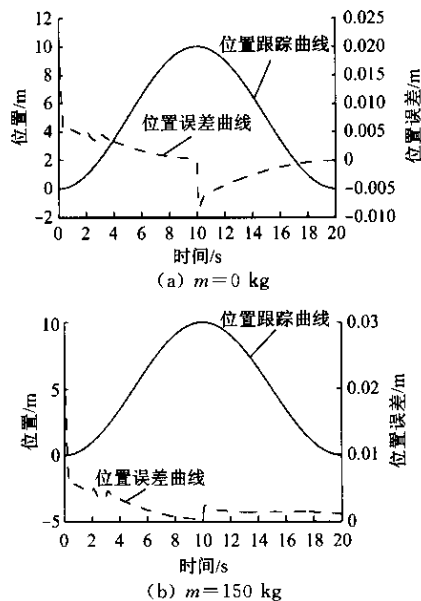


图 3 轻载时仿真结果

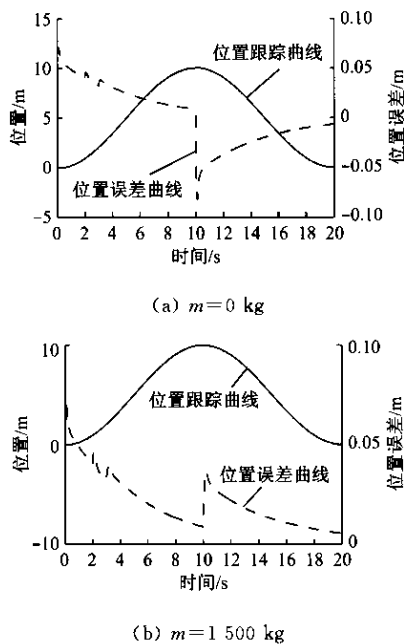


图 4 重载时仿真曲线

从图 4 可看出,重载时控制器同样能快速准确地跟踪给定信号,控制精度高,并且对于系统参数的摄动和负载的变化都具有很强的鲁棒性;在负载下降阶段,在空载和 $m=1\,500\text{ kg}$ 两种情况下,负载位置都能很好地跟踪位置给定。

4 结语

通过分析起重机升降运动系统各组成部分的关

联关系,建立了系统的数学模型,利用自适应 Backstepping 方法设计了一种起重机升降运动系统位置控制器。仿真结果表明,该控制器不仅具有较快的响应速度和较小的跟踪误差,而且能够有效地抑制负载突变和参数摄动的影响,具有良好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 陈蕴基. 关于起重机起升机构自动同步的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002(8): 496-499.
- [2] 郑舒. 起重机分布式系统设计[J]. 机电一体化, 2005(4): 81-83.
- [3] 王丁磊, 张勇. 塔式起重机起升机构中的模糊控制[J]. 起重运输机械, 2005(12): 28-30.
- [4] RASMUSEN H, VADSTRUP P, BORSTING H. Full Adaptive Backstepping Design of a Speed Sensorless Field Oriented Controller for an Induction Motor [C]//Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, 2001: 2601-2606.
- [5] ZHOU J A, WANG Y. Adaptive Backstepping Speed Controller Design for a Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. IEE Proceedings of Electrical Power Application, 2002, 149(2): 165-172.
- [6] KIM Dong-Il. Control of Induction Motors Via Singular Perturbation Technique and Nonlinear Feedback Control [C]//16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 1990, Pacific Grove: 909-914.
- [7] SORCHINI Z, KREIN P T. Formal Derivation of Direct Torque Control for Induction Motors Using the Singular Perturbation Method [C]//36th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2005: 2422-2428.
- [8] LI F J, TENG L T, CHANG C K. Adaptive Backstepping Control for Linear Induction Motor Drive Using FPGA[J]. Electric Power Applications, 2006, 4(135): 483-492.
- [9] 赵德宗, 张承进, 郝兰英. 一种无速度传感器感应电机鲁棒滑模控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 122-127.
- [10] RICAARDO M, SERGEI P, PADO V. Adaptive Input-output Linearizing Control of Induction Motors [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(2): 208-221.