

一种用于感应电机的鲁棒变结构观测器*

凌 强 徐文立 陈 峰
(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要 提出一种同时实现感应电机转速和转子电流观测的方法。针对感应电机这一多变量耦合非线性时变对象,以 Lyapunov 稳定判据作为设计基础,通过变结构项的引入来抵消不可知部分,确保 Lyapunov 稳定判据的条件成立,从而得到原系统的鲁棒非线性观测器。理论分析表明,由于变结构项的引入,保证了所设计的观测器具有收敛性和对参数变动的鲁棒性。感应电机的仿真实验说明了该方法的可行性和良好性能。

关键词 感应电机,观测器,变结构
分类号 TP 13

Robust Observer with Variable Structure for Induction Motors

Ling Qiang, Xu Wenli, Chen Feng
(Tsinghua University)

Abstract A method using the currents of the stator to observe simultaneously the currents of the rotor and the rotation speed is presented. Based on the law of Lyapunov stability and variable structure control theory, a variable structure term is introduced to counteract the influence of uncertain factors. The observer is asymptotically convergent and has robustness against the parameter variation. The simulations show the feasibility and the good performance of the method.

Key words induction motor, observer, variable structure

1 引 言

感应电机在实际生产中被大量采用,与此相应发展出多种新型有效的控制方法。但是许多控制方法需要全状态信息,包括无法直接测量的转子状态,这就需要观测转子状态;同时,出于降低价格、提高可靠性等方面的考虑,希望通过观测取得转速值。在电机运行中,转子电阻值会随温度升高而逐渐变大,于是观测器的鲁棒性就显得尤为重要。

感应电机由一多变量耦合非线性系统描述,且系统中有时变参数,所以实现观测具有一定困难。文献[1]引入一种双时间尺度理论,在考虑机械量时认为电磁量已趋于稳态,利用稳态关系粗略估计出转

速观测误差,以此构造出转速观测器。[2]利用积分变结构控制,通过 Lyapunov 方法构造出状态观测器;但其所用的 Lyapunov 函数是以切换函数向量而非观测误差构造的,无法保证观测器的收敛性。[3]利用 Popov 超稳定性理论构造出一种观测器,通过忽略其中的不可知小量部分,使之具有实用性。以上方法具有一定的可用性,但在观测的精确性、观测器对参数变动的鲁棒性等方面并非十分理想。

本文在借鉴以上方法的基础上,利用 Lyapunov 稳定判据导出一种观测器,通过引入变结构项来抵消其中不可知部分,实现了转子电流和转速较为精确的观测;由于变结构项的引入,对转子电阻值的变动具有较强的鲁棒性。

* 清华大学博士论文基金课题(9809)

2 感应电机动态模型

首先引入感应电机的模型。根据文献[4], 得到在同步旋转的两相坐标系($d-q$ 坐标系) 下的感应电机模型(不失一般性, 设电机为一对极)

$$\begin{cases} D\dot{x} + C(\omega, \hat{\omega})x + Rx = u \\ j d\omega dt = \tau - f\omega - \tau \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$D = \begin{bmatrix} L_s I & L_m I \\ L_m I & L_r I \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_s I & 0 \\ 0 & R_r I \end{bmatrix}$$

$$C(\omega, \hat{\omega}) = \begin{bmatrix} \omega L_s J & \omega L_m J \\ \omega L_m J & \omega L_r J \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tau = L_m(i_{rd}\dot{i}_{sq} - i_{rq}\dot{i}_{sd}) = L_m x_s^T J x_r$$

$$x = [x_s^T \quad x_r^T]^T, \quad x_s = [i_{sd} \quad i_{sq}]^T$$

$$x_r = [i_{rd} \quad i_{rq}]^T \quad (2)$$

i_{sd} 和 i_{sq} 分别为定子电流在 d 和 q 轴上的分量, i_{rd} 和 i_{rq} 分别为转子电流在 d 和 q 轴上的分量; $u = [u_s \quad u_r]^T$, u 为控制电压, $u_r = [0, 0]^T$, u_s 为可调输入; ω 为感应电机转速, $\hat{\omega}$ 为坐标系旋转速度, $\omega = \omega - \hat{\omega}$, R_s 和 R_r 分别为定子和转子电阻, L_s 和 L_r 分别为定子和转子自感, L_m 为定子和转子之间的互感, τ 为电磁转矩, τ 为负载转矩, f 为摩擦阻尼系数, j 为转子转动惯量, 转子磁通 $\Psi_r = L_m x_s + L_r x_r$ 。

在系统状态分量 x_s, x_r 和 ω 中, 定子电流 x_s 可直接测量, 转子电流 x_r 和转速 ω 需通过观测得到, 转子阻值 R_r 在电机运行中随温度升高会缓慢增长。

3 状态观测器

3.1 电流观测器

构造电流观测器如下(R_r 已知)

$$\dot{\hat{x}} = -D^{-1}(C(\hat{\omega}, \omega) + R)\hat{x} + D^{-1}u \quad (3)$$

其中 \hat{x} 和 $\hat{\omega}$ 分别为 x 和 ω 的观测值, 而电流观测误差为

$$e = x - \hat{x} = [\tilde{x}_s^T \quad \tilde{x}_r^T]^T$$

其中, \tilde{x}_s 为定子电流观测误差, 其值可知; \tilde{x}_r 为转子电流观测误差, 其值未知。则误差动态方程为

$$\dot{e} = -D^{-1}(\hat{C} + R)e + D^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L_m J & L_r J \end{bmatrix} x \Delta\omega \quad (4a)$$

或 © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$\dot{e} = -D^{-1}(C + R)e + D^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L_m J & L_r J \end{bmatrix} \hat{x} \Delta\omega \quad (4b)$$

其中

$$\Delta\omega = \omega - \hat{\omega}, \quad \hat{C} = C(\hat{\omega}, \omega), \quad C = C(\omega, \omega)$$

当 $\Delta\omega = 0$ 时, 方程(4a), (4b) 稳定, 其状态 e 收敛到 0。

3.2 转速观测器

选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} e^T D R^{-1} D e + \frac{1}{2\lambda\omega R_r} \Delta\omega^2$$

其中 $\lambda\omega$ 为正常数。考虑到 R_r 变化很缓慢, 则结合方程(4b) 得 V 的导数为

$$\dot{V} = -e^T D e + \{ (L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r)^T \times J(L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r) \frac{\Delta\omega}{R_r} + \frac{1}{\lambda\omega R_r} \Delta\omega \Delta\dot{\omega} \}$$

根据 Lyapunov 稳定判据, 要使 e 和 $\Delta\omega$ 都渐近趋于 0, 只需 $V = 0$ 时 $\dot{V} < 0$ 成立, 而 $D > 0$, 故只需

$$(L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r)^T J(L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r) \frac{\Delta\omega}{R_r} + \frac{1}{\lambda\omega R_r} \Delta\omega \Delta\dot{\omega} = 0 \quad (5)$$

成立。由式(5), 选择 $\Delta\dot{\omega}$ 的形式为

$$\Delta\dot{\omega} = -\lambda\omega U\omega \quad (6)$$

其中 $U\omega$ 为变结构项, 用来抵消 \dot{V} 中不确定项

$$(L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r)^T J(L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r) \frac{\Delta\omega}{R_r}$$

且

$$U\omega = \text{sign}(J(L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r))^T \times J(L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r) K \text{sign}(\Delta\omega) \quad (7)$$

其中 K 为一正常数, 且 $\Psi = K$, 即 K 大于或等于 Ψ 的上界, $\Psi = L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r$ 。

考虑到转速 ω 为机械量, 变化缓慢, 故有 $\dot{\omega} = \Delta\dot{\omega}$ 则

$$\dot{\omega} = \lambda\omega U\omega \quad (8)$$

根据双时间尺度理论^[11], 可利用式(4a) 在稳态下的关系式估计 \tilde{x}_r 和 $\text{sign}(\Delta\omega)$ 。此时 $\dot{e} = 0$, 则由方程(4a) 得

$$\tilde{x}_r = \frac{1}{\omega L_m} (R_s J - \omega L_s I) \tilde{x}_s \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{sign}(\Delta\omega) = & \text{sign}[\{J(L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r + L_r \tilde{x}_r)\}^T \times \\ & \{(\omega - \hat{\omega})L_m J \tilde{x}_s + (\omega - \hat{\omega})L_r J \tilde{x}_r + R_r \tilde{x}_r\}] \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)是利用稳态关系得到的。如果实际状态与稳态相差较远,则式(9)的误差会很大,此时还不如取 $\tilde{x}_r = [0 \ 0]^T$ 。 \tilde{x}_s 可作为是否接近稳态的一个标志, \tilde{x}_s 大可认为与稳态差距较大;反之亦然。于是式(9)可修正为

$$\tilde{x}_r = \begin{cases} \frac{1}{\omega L_m} (R_s J - \omega L_s I) \tilde{x}_s, & \tilde{x}_s < \text{thr} \\ [0 \ 0]^T, & \tilde{x}_s > \text{thr} \end{cases} \quad (11)$$

其中 thr 为一正常数,充当阈值。

式(8)中 λ_ω 控制观测器的跟踪速度,其值较大时,观测值变化较快,能较迅速跟上真实值,但会产生较大幅度的振荡;其值较小时,观测值变化慢,不易跟上真实值,但跟踪过程较平稳。因而可以动态分段调整 λ_ω 的取值,当转速观测值与真实值偏差大时,其值取大些,以加快跟踪速度;反之,则取小些,以使跟踪平缓。 \tilde{x}_s 可作为转速观测误差大小程度的一种度量。

于是,利用式(3), (7), (8), (10)和(11),并动态分段调整 λ_ω 的值,便得到一个完整的电流和转速观测器。仿真结果如图1所示(详见3.4节)。

3.3 转速观测器对 R_r 的鲁棒性

当 R_r 真值未知而采用其估计值构造观测器时,由于 R_r 随着电机运行中温度的升高,其值缓慢增大,故一般给出的 R_r 的估计值与真值相比偏小。

令 R_r 取估计值 $\hat{R}_r = 0.7R_r$,其余条件与3.2节完全相同。取(3.2)节的电流和转速观测器,仅将其中的 R_r 换成 \hat{R}_r 。仿真结果如图2所示。

从图2(b)可以看出,转子电流观测性能较为理想;转速观测有一个静差,大约为5.5rad/s,此时电机的稳态转速约为282rad/s,则转速观测的相对误差约为2%,误差较少。可见观测器对 R_r 的变动具有一定的鲁棒性。

下面讨论观测器具有鲁棒性的原因。在 $\hat{R}_r = R_r$ 时,令 $\Delta R_r = R_r - \hat{R}_r$,则全状态电流观测器的误差方程(4a)变为

$$De = - \begin{bmatrix} \omega L_s J + R_s & \omega L_m J \\ (\omega - \hat{\omega}) L_m J & (\omega - \hat{\omega}) L_r J + \hat{R}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_s \\ \tilde{x}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ J(L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r + L_r \tilde{x}_r) \end{bmatrix} \Delta \omega - \begin{bmatrix} 0 \\ x_r \end{bmatrix} \Delta R_r \quad (12)$$

由式(12),利用稳态关系估计 $\Delta \omega$ 的符号

$$\begin{aligned} \text{sign}(\Delta \omega) &= \\ & \text{sign} \left\{ \left[J(L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r + L_r \tilde{x}_r) \right]^T \times \right. \\ & \left. \left\{ (\omega - \hat{\omega}) L_m J \tilde{x}_s + (\omega - \hat{\omega}) L_r J \tilde{x}_r + \right. \right. \\ & \left. \left. \hat{R}_r \tilde{x}_r + \Delta R_r x_r \right\} \right\} \end{aligned}$$

由于 ΔR_r 未知,可略去 $\Delta R_r x_r$ 项,近似为式(10)的形式。由于 ΔR_r 较小, x_r 值也不大,故 $\Delta R_r x_r$ 不会太大;并且由于符号函数具有鲁棒性,即自变量的值改变

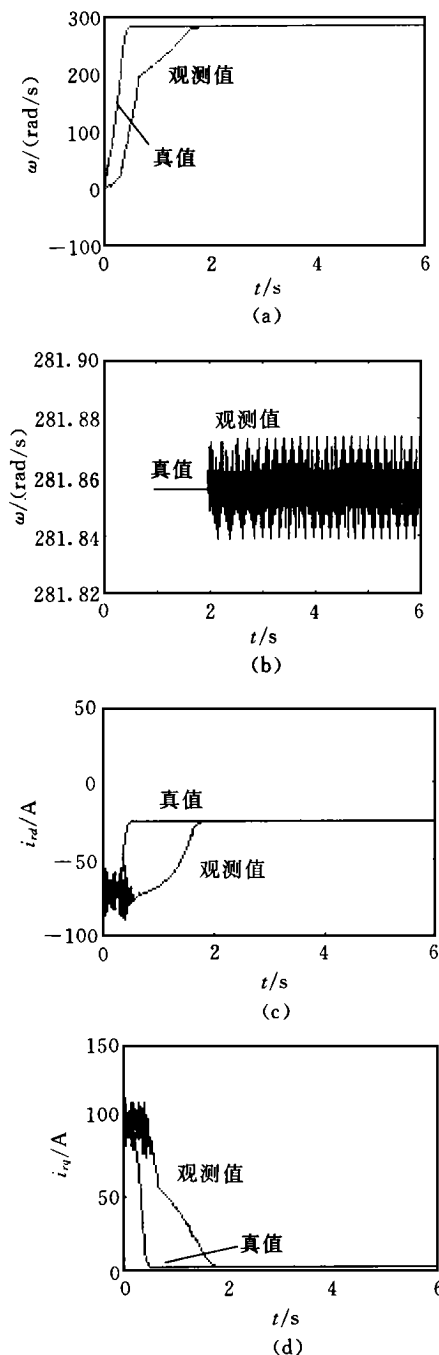


图1 R_r 采用真实值的仿真曲线

- (a) 转速观测
- (b) 转速观测的局部放大
- (c) 转子电流 i_{rd} 的观测
- (d) 转子电流 i_{rq} 的观测

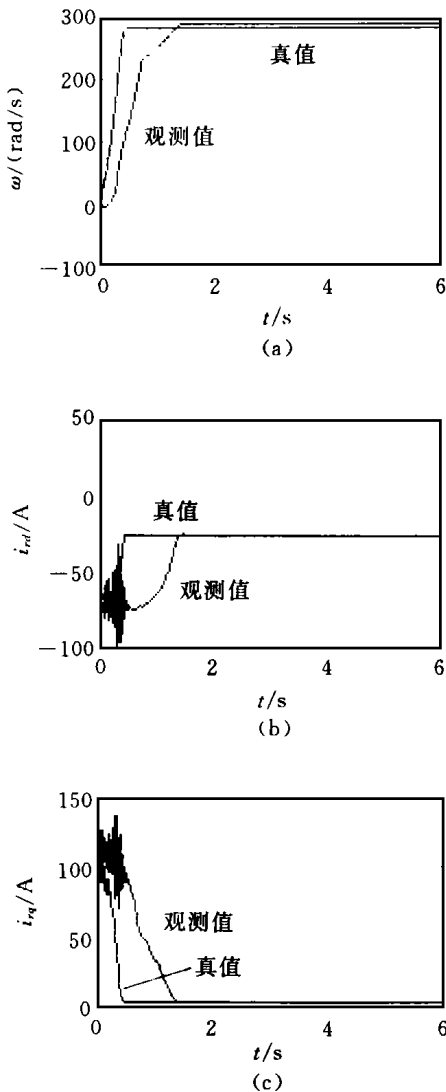


图 2 $\hat{R}_r = 0.7R_r$ 的仿真曲线
 (a) 转速观测
 (b) 转子电流 i_{rd} 的观测
 (c) 转子电流 i_{rq} 的观测

时,其符号可能不变,尤其当其数值较大时。故在电流估计误差 \tilde{x}_s 和 \tilde{x}_r 较大时,略去 $\Delta R_{\sigma r}$ 对 $\Delta\omega$ 符号的估计影响不会很大。

下面利用 Lyapunov 方法分析其稳定性。取 3.2 节中的 Lyapunov 函数,则 V 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -e^T D e + \{ (L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r)^T J (L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r) \frac{\Delta\omega}{R_r} + \\ & \frac{1}{\lambda\omega R_r} \Delta\omega \Delta\dot{\omega} - \frac{\Delta R_r}{R_r} \hat{x}_r^T (L_m \tilde{x}_s + L_r \tilde{x}_r) \end{aligned} \quad (13)$$

当式(12)在静态且观测误差 e 趋于零时,可得关系式

$$J(L_m \hat{x}_s + L_r \hat{x}_r) \Delta\omega - \hat{x}_r^T \Delta R_r = 0 \quad (14)$$

将式(14)代入(13),则 V 的导数变为

$$\dot{V} = -e^T D e + \frac{1}{\lambda\omega R_r} \Delta\omega \Delta\dot{\omega}$$

由式(12)得

$$\Delta\omega \Delta\dot{\omega} = 0 \quad (15)$$

上式等号仅当 $\Delta\omega = 0$ 时成立。由于 $D > 0$, 故

$$\dot{V} < 0 \quad (16)$$

由 Lyapunov 稳定判据可知 e 和 $\Delta\omega$ 渐近收敛。

从图 2(b) 可见转子电流观测误差(即 e 的分量)很小,接近于 0, 但 $\Delta\omega$ 有一个稍大的数值,这是因为:

1) $\text{sign}(\Delta\omega)$ 的估计误差: 当 e 的值较小时,其估计误差会较大,可能导致式(15)不成立,从而使式(16)不成立。

2) 式(14)带来的误差: 式(14)是在 e 为零的情况下得出的,而实际的 e 是围绕零波动的,从而可能破坏式(16)。

从总的情况看,实验结果和理论分析较为吻合。

3.4 仿真结果

仿真参数如下: $R_s = 0.687\Omega$, 真实的 $R_r = 0.642\Omega$, $L_s = 84\text{mH}$, $L_r = 85.2\text{mH}$, $L_m = 81.3\text{mH}$, $\tau = 20\text{N}\cdot\text{m}$, $f = 0.01$, $J = 0.03\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。初始的定子、转子电流均为零,初始转速为零, $\omega = 300\text{rad/s}$, 控制输入 $u = [300 \ 0]^T$ (由于观测器与控制器的分离性原理,此处取特殊控制并不影响观测器的通用性)。

当 R_r 采用真实值时,仿真曲线如图 1 所示。由图 1 可见,经过大约 1.8s, 转速和转子电流的观测值都已接近真实值; 2s 后, 转速观测误差小于 0.02rad/s, 转子电流两个分量 i_{rd} 和 i_{rq} 的观测误差分别小于 0.08A 和 0.03A, 其稳态跟踪精度较高。在观测开始阶段, 尽管转子电流观测误差较大, 但仅存在于初始的一小段时间内, 对控制效果影响不大。

当 R_r 取估计值 $\hat{R}_r = 0.7R_r$ 时, 仿真曲线如图 2 所示。

4 结 论

本文基于 Lyapunov 稳定判据, 提出一种转速和转子电流同时观测的方法, 并指出该方法对转子电阻变动具有鲁棒性。理论分析和仿真实验表明了本文方法的可行性。

尽管本文给出了一种状态观测器, 但它是以静差来换取对转子电阻的鲁棒性。如能构造出收敛的转子电阻辨识器, 并与本文观测器相结合, 将会具有更好的性能。

采用上述 11 组参数中的 4 组对系统进行仿真, 结果如图 3 所示。在图 3 中, T 分别取 0.6, 0.8, 1 和 1.4, 仿真结果为由上至下。可以看出, 4 组参数仿真所得到的曲线效果几乎一致, 而选择的参数之间也存在一定的规律: T 由初值变化 $P\%$, 只要 λ 在原值上增加 $2P\%$, 同时 K 增加 $(P/2)\%$, 即可得到相同的控制效果。可见, 加权自调整因子由于可随系统在线变化, 因而易于实现其自适应调节。这样, 通过在线识别被控系统参数的变化, 并相应调节控制算法的参数及开环增益, 即可实现对被控对象较好的控制。

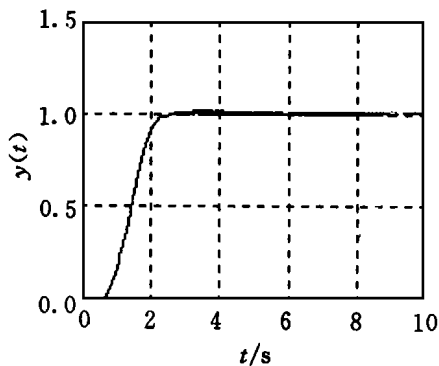


图 3 被控系统阶跃响应曲线

由表 2 可以看出, 被控对象惯性参数的增大会使系统的响应时间及超调增大, 而 λ 的增大使模糊控制器的输入 E 在第一条控制律的加权增大, 同时使第二条控制律的加权适当减小, K 的少量增大相应地加快了响应速度。由此可见, 式(1b)中的 $|e| \sqrt{e^2 + \lambda(e)^2}$ 的引入对本控制算法的自适应性有着重要的意义。

3 结 论

本文提出定量变量 $\sqrt{e^2 + \lambda(e)^2}$ 和定性变量 $|e| \sqrt{e^2 + \lambda(e)^2}$ 的概念, 并将二者的综合集成推理引入模糊加权自调整控制算法的设计, 从而提高了模糊控制算法的仿人智能性。本文工作为新型的模糊控制算法设计做出了有益的探索。

参 考 文 献

- 1 李士勇. 模糊控制、神经控制及智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996. 447~454, 531~541
- 2 Jan L. Stabilization of nonlinear systems by qualitative feedback controllers. *Int J Control*, 1995, 62(1): 109~128
- 3 J Lunze. Qualitative modeling of linear dynamical systems with quantized state measurements. *Automatica*, 1995, 30(3): 417~431
- 4 刘林运, 万百五. 定性控制综述. *信息与控制*, 1998, 27(1): 46~51

作 者 简 介

郑伟男, 1975年生。1999年获哈尔滨工业大学控制科学与工程系硕士学位, 现为控制科学与工程系博士研究生。主要研究方向为模糊控制, 智能控制。

李士勇男, 1943年生。现为中国自动化学会智能自动化专业委员会委员, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授, 博士生导师。主要研究方向为模糊控制, 神经控制及智能控制理论及其在过程控制和高技术领域中的应用研究。

张福恩男, 1936年生。现为中国自动化学会控制理论与运动控制两个委员会委员, 美国数学学会会员, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授, 博士生导师。主要研究方向为仿真转台技术与设备, 导航技术与设备, 计算机控制工程等。

(上接第 665 页)

参 考 文 献

- 1 Heath Hofmann, Seth R Sanders. Speed-sensorless vector torque control of induction machines using a two-time-scale approach. *IEEE Trans on Ind Application*, 1998, 34(1): 157~169
- 2 Tzuen-lin Chern, Jerome Chang, Kun-lin Tsai. Integral-variable-structure-control-based adaptive speed estimator and resistance identifier for induction motor. *Int J Control*, 1998, 69(1): 31~47
- 3 姬志艳. 异步电机直接转矩控制系统的研究. 清华大学博士学位论文, 1994
- 4 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1993

- 5 高宏程. 异步电机调速系统滑模控制器与滑模观测器设计研究. 清华大学博士学位论文, 1996

作 者 简 介

凌强男, 1975年生。1997年于中国科技大学获学士学位, 现为清华大学自动化系硕士研究生。研究方向为变结构控制及其它非线性鲁棒控制。

徐文立男, 1947年生。1990年于美国科罗拉多大学获博士学位, 现为清华大学自动化系教授。研究方向为自动控制, 计算机视觉。

陈峰男, 1971年生。1996年于俄罗斯圣彼得堡国立技术大学获硕士学位, 现为清华大学自动化系博士研究生。研究方向为电机非线性控制。