

异步电动机速度辨识中极点配置和参数辨识

郭其一¹, 周桂法^{1,2}, 尚敬², 毛中亚¹

(1. 同济大学 电气工程系, 上海 200092; 2. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 深入分析了以定子电流、转子磁链为状态变量的异步电机状态观测器方案, 提出一种异步电机状态观测器的极点配置方法, 系统给出观测器的设计过程; 并给出定子电阻、转子电阻和速度的自适应率. 仿真研究和现场实验表明, 该方案对电机参数变化的鲁棒性好, 磁链观测精度高, 收敛速度快. 基于该状态观测器方可实现高性能的无速度传感器运行.

关键词: 状态观测器; 极点配置; 定子电阻辨识; 转子电阻辨识; 速度辨识

中图分类号: TP 276

文献标识码: A

Parameters Tuning and Poles Designation for Sensorless Induction Motor Drive

GUO Qi¹, ZHOU Guifa^{1,2}, SHANG Jing², MAO Zhongya¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: This paper presents a completely analysis for the state observer whose state variables are stator currents and rotor fluxes and a new poles designation method is proposed and a detailed process of designing is also described. Then the adaption laws for stator resistant and rotor resistant and speed are given. The proposed method is verified with simulation and experiments.

Key words: stator observer; poles designation; stator resistance identification; rotor resistance identification; speed identification

速度传感器一直是影响感应电机鲁棒性和控制性能的一个瓶颈: 它们两者之一的鲁棒性变坏

时, 其角速度调节受到限制并导致低速时信号的时滞很高; 或者具有很高的调节能力和很好的系统响应, 但却对震动和冲击很敏感. 近年来随着对速度传感器需求的增长^[1] (如速度前馈和黏着控制系统的速度控制部分), 安装在感应电机上的速度传感器会在相当程度上增加单个感应电机的体积, 同时带来电机功率密度的损失, 此外还有计划、安装、维护等的费用, 都是牵引系统总成本的重要组成部分. 另外一种感应电机无速度运行的方式是对转速进行开环计算, 因其成本较低, 故速度测量装置被广泛地引入到工业应用中, 但是它们对参数的依赖性很强^[2].

1 极点配置

在异步电动机调速系统中, 能否准确地得到定子或转子磁链, 将直接关系到系统控制性能的好坏. 一方面, 磁链计算的误差会直接影响转矩的控制效果, 造成速度的偏差, 而且使电动机有可能工作在欠励或过励状态下, 容易造成电流波形的畸变; 另一方面, 在无速度传感器运行状态下, 磁链是速度辨识过程所需的重要参数, 其误差将直接影响速度辨识的精度和能否收敛到真值. 在全阶观测器模型^[2-3]中, 采样误差及干扰信号要经过一个误差校正环节才输入到系统中, 因此系统的抗干扰性得到极大提高^[4]. 以定子电流、转子磁链为状态变量, 易得异步电动机的全阶模型经过一个误差校正环节才输入到系统中, 因此系统的抗干扰性得到极大提高. 以定子电流、转子磁链为状态变量, 易得异步电动机的全阶模型如下:

收稿日期: 2009-09-16

作者简介: 郭其一(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为电力牵引系统检测与控制. E-mail: gqi1@263.net

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} & 0 & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{\omega L_m}{\sigma L_s L_r} \\ 0 & -\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} & -\frac{\omega L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $i_{s\alpha}$ 和 $i_{s\beta}$ 为定子 α 和 β 轴电流; $\psi_{r\alpha}$ 和 $\psi_{r\beta}$ 为转子 α 和 β 轴的磁链; L_s, L_r, L_m 分别代表定子电感、转子电感、互感; R_s, R_r 为定转子电阻; T_r 为转子时间常数; ω 为电机转速; σ 为漏磁系数。

上面推导出的状态方程代表了实际的系统,对于异步电动机,下面构造闭环状态观测器来观测这个实际系统中的状态变量.这个闭环观测器的形式为

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + Bu + G(\hat{i}_s - i_s) \quad (2)$$

对应式(1)则实际系统的状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

式中: x 是状态向量; \hat{x} 是状态估计; A 是系统矩阵; \hat{A} 表示估计; B 为输入系数阵; u 是输入向量; G 是观测矩阵; 而 i_s 是定子电流; \hat{i}_s 是电流估计值。

如果能做到 $A = \hat{A}$ 那么

$$\begin{aligned} \dot{x} - \dot{\hat{x}} &= A(x - \hat{x}) + G(y - \hat{y}) = \\ &= A(x - \hat{x}) + GC(x - \hat{x}) = \\ &= (A + GC)(x - \hat{x}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: C 是输出矩阵; y 是状态向量; \hat{y} 是状态估计。

显然只要 $A + GC$ 的特征根有负的实部,即使某一时刻估计值和实际值不相等,它们的差值也会随时间按照指数规律衰减到 0。

在实际运用中,由于观测器的 \hat{A} 和实际系统的 A 是不相等的,事实上,两者做到完全相等也不可能,那么在这种情况下,状态观测能够观测到实际系统的状态,下面进行分析:

$$\begin{aligned} \dot{x} - \dot{\hat{x}} &= (Ax + Bu) - (\hat{A}\hat{x} + Bu - GC(x - \hat{x})) = \\ &= (Ax + \hat{A}\hat{x}) - (\hat{A}\hat{x} + \hat{A}\hat{x} - GC(x - \hat{x})) = \\ &= (A + GC)(x - \hat{x}) - (\hat{A} - A)\hat{x} \end{aligned} \quad (5)$$

视 $e = (x - \hat{x})$ 为状态变量, $u = \hat{x}$ 为系统输入, $B = -(\hat{A} - A) = -\Delta A$ 为输入矩阵,显然

$$\begin{aligned} \Delta A = \hat{A} - A &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & -(\hat{\omega} - \omega)J \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & (\hat{\omega} - \omega)J \end{bmatrix}_{4 \times 4} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & -(\hat{\omega} - \omega) \frac{J}{c} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & (\hat{\omega} - \omega)J \end{bmatrix}_{4 \times 4} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $c = \sigma L_s L_r / L_m$; J 是转动惯量。

如果定义状态方程的李亚普诺夫函数为

$$V = e^T e + \frac{(\hat{\omega} - \omega)^2}{\lambda} \quad (7)$$

其中 λ 是常数.显然当状态估计误差 e 和转速估计误差 $(\hat{\omega} - \omega)$ 同时为 0 时,函数 V 为 0。

非线性系统渐进稳定的充分条件是李亚普诺夫函数 V 的导数 dV/dt 负定,即误差项应呈衰减的趋势,估计值 $\hat{\omega}$ 应逐步逼近实际值 ω ,估计的状态 \hat{x} 应逐步逼近实际状态 x 。

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e^T [(A + GC)^T + (A + GC)]e - \\ &= 2 \frac{(\hat{\omega} - \omega)}{c} [\hat{\psi}_{r\beta} (i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}) - \\ &\quad \hat{\psi}_{r\alpha} (i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta})] + 2 \frac{(\hat{\omega} - \omega)}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\hat{i}_{s\alpha}$ 和 $\hat{i}_{s\beta}$ 为定子 α 和 β 轴电流的估计值。

最后一项中的实际转子磁链是无法得到的,在转子磁链定向准确的情况下这一项为 0,故略去.把原来的电机的状态方程重写为^[5]

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{r11} & 0 & a_{r12} & -a_{il2} \\ 0 & a_{r11} & a_{il2} & a_{r12} \\ a_{r21} & 0 & a_{r22} & -a_{il2} \\ 0 & a_{r21} & a_{il2} & a_{r22} \end{bmatrix} \cdot \\ &\quad \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

写成矢量的形式为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{i}}_s \\ \bar{\boldsymbol{\psi}}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{r11} & a_{r12} + ja_{i12} \\ a_{r21} & a_{r22} + ja_{i22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{i}}_s \\ \bar{\boldsymbol{\psi}}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix} [\bar{\mathbf{u}}_s] \quad (10)$$

式中: $\bar{\mathbf{i}}_s$ 是定子电流矢量; $\bar{\boldsymbol{\psi}}_r$ 是转子磁链空间向量; $\bar{\mathbf{u}}_s$ 是电压输入向量.

电机的状态方程的特征方程为

$$\lambda^2 - (a_{r11} + a_{r22} + ja_{i22})\lambda - a_{r21}(a_{r12} + ja_{i12}) = 0 \quad (11)$$

观测器的特征方程为

$$\lambda^2 - (a_{r11} + a_{r22} + g_1 + jg_2 + ja_{i22})\lambda - (a_{r12} + ja_{i12})(a_{r21} + g_3 + jg_4) = 0 \quad (12)$$

观测器极点与电机极点的比例是 k

$$\begin{aligned} -(a_{r11} + a_{r22} + g_1 + jg_2 + ja_{i22}) &= \\ -(a_{r11} + a_{r22} + ja_{i22})k & \end{aligned}$$

显然

$$\begin{cases} (a_{r11} + a_{r22}) + g_1 = (a_{r11} + a_{r22})k \\ g_2 + a_{i22} = a_{i22}k \\ a_{r21} + g_3 = a_{r21}k^2 \\ g_3 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} g_1 = (k-1)(a_{r11} + a_{r22}) \\ g_2 = (k-1)a_{i22} \\ g_3 = (k^2-1)a_{r21} \\ g_4 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

2 参数辨识

2.1 速度辨识

基于 Lyapunov (李雅普洛夫) 理论来推导自适应率, 由式(1)~(14)得, 状态的观测误差方程为^[3,6]

$$\frac{d}{dt} \mathbf{e} = [\mathbf{A} + \mathbf{GC} + \omega_r \mathbf{A}_\omega] \mathbf{e} + \Delta \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$; \mathbf{A}_ω 代表速度估计的系统矩阵.

定义 Lyapunov 函数为

$$V(\mathbf{e}, \hat{\omega}_r - \omega_r) = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + (\hat{\omega}_r - \omega_r)^2 / \lambda_\omega \quad (16)$$

其中 \mathbf{P} 为 4×4 的对称正定矩阵. 对式(16)求导, 得

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V &= \mathbf{e}^T [(\mathbf{A} + \mathbf{GC})^T \mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} + \mathbf{GC}) + \\ &\omega_r (\mathbf{A}_\omega^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega)] \mathbf{e} + \Delta \omega_r [\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}_\omega^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \\ &\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}}] - \frac{2}{\lambda_\omega} \Delta \omega_r \frac{d \Delta \omega_r}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

令

$$\frac{2}{\lambda_\omega} \Delta \omega_r \frac{d \Delta \omega_r}{dt} = \Delta \omega_r [\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}_\omega^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}}] \quad (18)$$

如果选择合适的观测器增益矩阵 \mathbf{G} , 使如下不等式成立, 则状态误差方程(15)是渐进稳定的, 从而保证了状态观测器的渐进稳定性^[7].

$$(\mathbf{A} + \mathbf{GC})^T \mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} + \mathbf{GC}) + \omega_r (\mathbf{A}_\omega^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega) < 0 \quad (19)$$

自适应律由下式给出:

$$\frac{d}{dt} \hat{\omega}_r = \frac{\lambda_\omega}{2} [\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}_\omega^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}}] = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}} \quad (20)$$

转速的自适应辨识算法为

$$\hat{\omega}_r = K_{p\omega} [\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}}] + K_{i\omega} \int_0^t [\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}}] dt \quad (21)$$

其中: $K_{p\omega}$ 与 $K_{i\omega}$ 分别是比例积分常数.

2.2 转子电阻自适应律

随着温度改变, 转子电阻值在电机运行过程中变化很大^[1]. 由于转子电阻在实现高精度速度辨识中的重要作用, 准确知道其值是必要的. 此处, 将自适应观测器推广到转子电阻辨识当中

$$\frac{d}{dt} \mathbf{e} = [\mathbf{A} + \mathbf{GC} + \omega_r \mathbf{A}_\omega] \mathbf{e} + \Delta \omega_r \mathbf{A}_\omega \hat{\mathbf{x}} + \Delta R_r \mathbf{A}_{R_r} \hat{\mathbf{x}} \quad (22)$$

式中, $\Delta R_r = R_r - \hat{R}_r$. 定义 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned} V(\hat{\omega}_r - \omega_r, R_r - \hat{R}_r) &= \\ V(\mathbf{e}, \hat{\omega}_r - \omega_r) &+ (\hat{R}_r - \omega_s)^2 / \lambda_{R_r} \end{aligned} \quad (23)$$

式中: λ_{R_r} 是常数; \mathbf{A}_{R_r} 为转子电阻估计时的系统矩阵.

对其求微分得

$$\begin{aligned} \frac{dV(\mathbf{e}, \hat{\omega}_r - \omega_r, R_r - \hat{R}_r)}{dt} &= \frac{dV(\mathbf{e}, \hat{\omega}_r - \omega_r)}{dt} + \\ \Delta R_r [\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}_{R_r}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_{R_r} \hat{\mathbf{x}}] &- 2 \frac{\Delta R_r}{\lambda_{R_r}} \frac{d \hat{R}_r}{dt} \end{aligned} \quad (24)$$

转子电阻自适应观测器的稳定性由式(19)保证, 令下式成立:

$$\begin{aligned} \Delta R_r [\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}_{R_r}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_{R_r} \hat{\mathbf{x}}] &= \\ 2 \frac{\Delta R_r}{\lambda_{R_r}} \frac{d \hat{R}_r}{dt} \end{aligned} \quad (25)$$

可推导得转子电阻自适应辨识率为

$$\hat{R}_r = K_{pR_r} [\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}_{R_r}^T \mathbf{P} \mathbf{e}] + K_{iR_r} \int_0^t [\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}_{R_r}^T \mathbf{P} \mathbf{e}] dt \quad (26)$$

其中: K_{pR_r} 与 K_{iR_r} 分别是比例与积分常数.

2.3 定子电阻自适应律

将自适应观测器推广到定子电阻辨识当中, 可

得到

$$\frac{d}{dt}e = [A + GC + \omega_r A_{\omega}]e\Delta\omega_r A_{\omega} \hat{x} + \Delta R_s A_{R_s} \hat{x} \quad (27)$$

式中, $\Delta R_s = R_s - \hat{R}_s$. 定义 Lyapunov 函数为

$$V(\hat{\omega}_r - \omega_r, R_s - \hat{R}_s) = V(e, \hat{\omega}_r - \omega_r) + (\hat{R}_s - \omega_s)^2 / \lambda_{R_s} \quad (28)$$

对其求微分得

$$\frac{dV(e, \hat{\omega}_r - \omega_r, R_s - \hat{R}_s)}{dt} = \frac{dV(e, \hat{\omega}_r - \omega_r)}{dt} + \Delta R_s [\hat{x}^T A_{R_s}^T P e + e^T P A_{R_s} \hat{x}] - 2 \frac{\Delta R_s}{\lambda_{R_s}} \frac{d\hat{R}_s}{dt} \quad (29)$$

定子电阻自适应观测器的稳定性由式(19)保证,令等式(27)成立

$$\Delta R_s [\hat{x}^T A_{R_s}^T P e + e^T P A_{R_s} \hat{x}] = 2 \frac{\Delta R_s}{\lambda_{R_s}} \frac{d\hat{R}_s}{dt} \quad (30)$$

可推导得定子电阻自适应辨识率为

$$\hat{R}_s = K_{PR_s} [\hat{x}^T A_{R_s}^T P e] + K_{IR_s} \int_0^t [\hat{x}^T A_{R_s}^T P e] dt \quad (31)$$

式中: K_{PR_s} 与 K_{IR_s} 分别是比例积分常数; A_{R_s} 是定子电阻估计时的系统矩阵.

3 仿真结果与实验结果

进行状态观测器仿真研究的最大优点在于有系统状态的真实值(如磁链、电流、转速等)可以参考,可以掌握观测器相关参数的变化对其性能的影响. 本文仿真中采用的极点配置系数 $k = 1.5^{[8]}$. 实验中用到的电机参数如下:额定电压 2 400 V,额定频率 60 Hz,定子电阻 0.485 Ω ,转子电阻 1.200 Ω ,励磁电感 26.012 mH,定子漏感 0.754 mH,转子漏感 0.754 mH. 图 1 为转速估计仿真及其误差图.

图 2 是观测器观测到的定子 q 轴电流和实际电流以及它们之间的差值. 可以看到在整个过程中电流的误差均维持在较小的水平上. 图 1 中切入的负载转矩为 8 000 N·m.

图 3 是转子 q 轴磁链观测值和实际值的比较以及它们的误差. 可见相对于总磁通量误差磁通量的比例为 $0.1/8.0 = 1.25\%$ 左右.

图 4 为空载零速度时的速度响应.

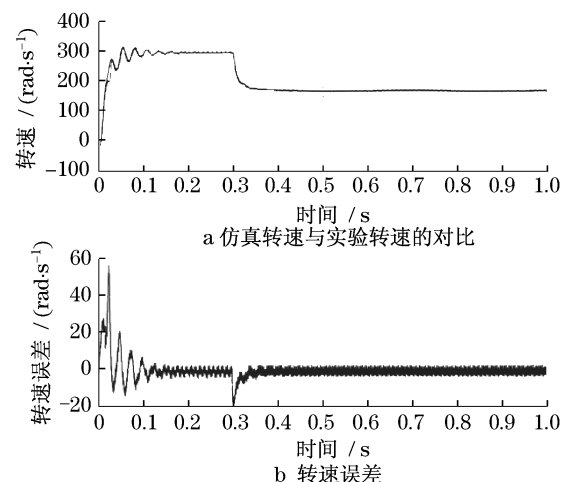


图 1 转速估计仿真及其误差

Fig.1 Simulation of speed estimation and error

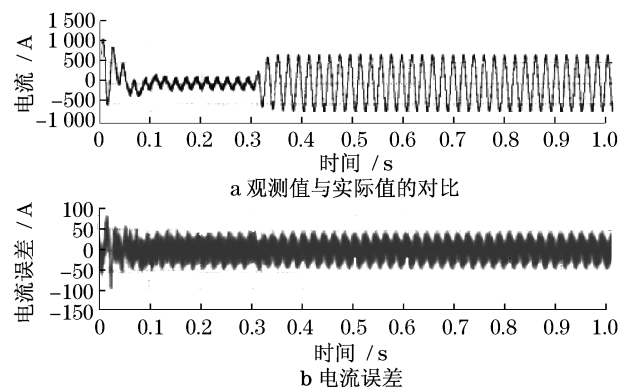


图 2 定子 q 轴电流观测值与实际值及误差

Fig.2 q -axis currents of the machine and observer

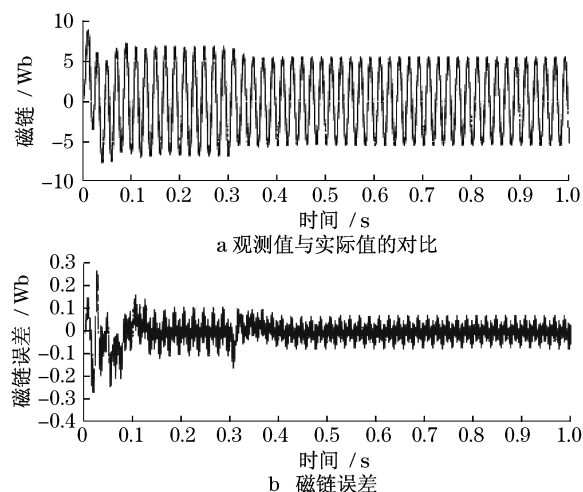


图 3 转子磁链的观测值与实际值的比较

Fig.3 Real and estimation value of rotor flux

图 5 是电机带全载时给定速度的阶跃响应波形. 从图中可以看到给定的速度是 $100 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 电机转速在 0.16 s 后达到了给定值, 然后经过一个很

小的超调后达到稳态值。

图 6 为 $0 \sim 100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度阶跃响应试验结果。

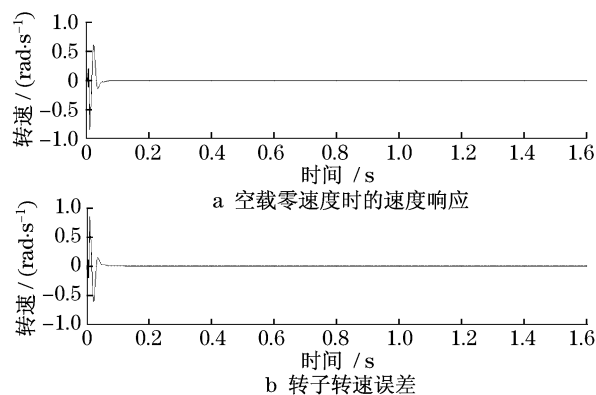


图 4 空载零速度时的速度响应

Fig.4 Speed response of zero speed and zero load torque

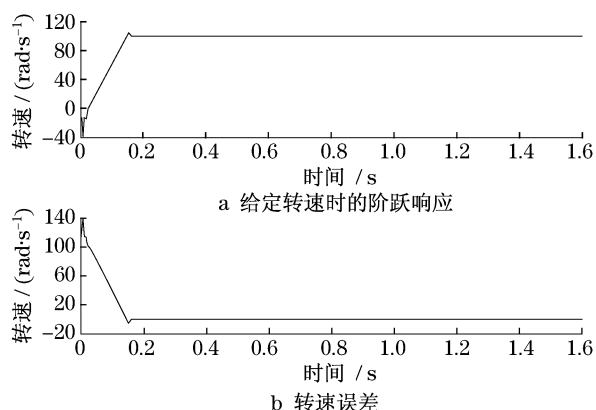
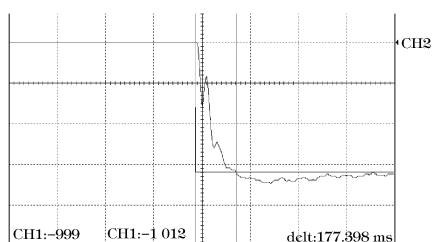


图 5 全载情况下的速度响应

Fig.5 Speed response at nominal load torque



通道 1 给定速度 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1} (\times 10)$ 通道 2 实际速度 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1} (\times 10)$

图 6 $0 \sim 100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度阶跃响应试验结果

Fig.6 Results for speed range from 0 to $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

4 结语

本文分析了以定子电流、定子磁链为状态变量构成的异步电机状态观测器方案,提出了一种异步电动机状态观测器的极点配置方法,并给出了定子转子电阻和速度自适应率.仿真结果和实验表明,该状态观测器方案对电机参数变化具有良好的鲁棒性,磁链观测精度高,收敛速度快,且便于系统实现。

参考文献:

- [1] Kubota H, Matsuse K. Speed sensorless field-oriented control of induction machine with rotor resistance adaption[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1994, 30(5): 1219.
- [2] Kubota H, Matsuse K, Nakano T. DSP-based speed adaptive flux observer of induction moter[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1993, 29(2): 344.
- [3] 陈硕. 基于磁通观测器的感应电动机无速度传感器矢量控制系统的参数在线辨识[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 10. CHEN Shuo. Online parameter identification for vector control of induction machine based on flux observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 10.
- [4] Depenbrock M, Hoffmann F, Koch St. Speed sensorless high performance control for traction drive[C] // Proc 7th EPE Conference Trondheim: [s. n.], 1997: 1418 - 1423.
- [5] Kubota H, Sato I, Tamura Y, et al. Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2002, 38: 1081.
- [6] Blaschke F. A new method for the structural decoupling of A. C. induction machines[C] // Conf Rec IFAC, Duesseldorf: [s. n.], 1971: 1 - 15.
- [7] Peng F Z, Fukao T. Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1994, 30(5): 1234.
- [8] 冬雷, 李永东. 无速度传感器异步电动机极低转速下的磁通位置观测[J]. 电工技术学报, 2001, 16(5): 20. DONG Lei, LI Yongdong. Flux position observer for speed sensorless operation of induction motor in very low speed range[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(5): 20.