

无速度传感器感应电机矢量控制方法的研究

张军潮¹, 孟永庆², 侯振义¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:给出了感应电机在两相静止坐标系下的数学模型,提出了一种基于转子磁场定向的无速度传感器矢量控制系统设计方案。详细介绍了系统的控制原理,并通过仿真研究验证了该系统模型和控制方案的正确性。

关键词:无速度传感器; 感应电机; 数学模型; 矢量控制

中图分类号: TM346 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)04-0071-04

无速度传感器矢量控制技术是在常规有速度传感器的矢量控制基础上发展起来的^[1-3],仍采用磁场定向控制技术。其主要的研究课题是如何利用定子电流、电压等测量信息准确地获取电机的转速信息。本文首先给出了三相感应电机在两相静止坐标系下的数学模型,并提出了一种基于转子磁场定向的无速度传感器矢量控制系统设计方案。

1 感应电机的数学模型

要获得感应电机控制的高动态性能,就必须知道感应电机的动态数学模型。感应电机是一个多变量、强耦合、非线性的复杂系统,建立三相感应电机的数学模型,首先需要对实际电机进行如下假设,抽象出理想化的情形:①忽略空间谐波,设三相绕组对称,在空间互差120°电角度,所产生的磁动势沿气隙周围按正弦规律分布;②忽略磁路饱和,各绕组的自感和互感都是恒定的;③忽略铁心损耗;④不考虑频率变化和温度变化对绕组电阻的影响。由此可得感应电机在两相静止坐标系下的数学模型。

以定子电流和转子磁链为状态变量的两相静止坐标系下三相感应电机的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma\tau_s} & 0 & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} & \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \\ 0 & -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma\tau_s} & -\frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \\ \frac{L_m}{\tau_r} & 0 & -\frac{1}{\tau_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{L_m}{\tau_r} & \omega_r & -\frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = n_p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (2)$$

机电运动方程:

$$J_m = d\omega_r/dt = n_p (T_e - T_l) \quad (3)$$

其中: R_s 、 L_s 分别为折算后定子电阻、电感; R_r 、 L_r 分别为折算后转子电阻、电感; L_m 为定转子互感; ω_r 为转子电气角速度; $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 分别为定子电压的 α 、 β 轴分量; $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 分别为定子电流的 α 、 β 轴分量; $\psi_{r\alpha}$ 、 $\psi_{r\beta}$ 分别为转子

磁链的 α, β 轴分量; n_p, J_m 分别为电机极对数、转动惯量、粘性摩擦系数; T_e, T_l 分别为电机产生的电磁转矩和负载转矩; $\tau_r = L_r/R_r$ 为转子时间常数; $\sigma = 1 - L_m^2/L_s L_r$ 为电机漏磁系数。公式(1)、(2)和(3)即构成了三相感应电机的数学模型,由该数学模型可以看出,该数学模型是一个多输入多输出、强耦合、非线性的复杂系统。

2 矢量控制^[2-4]

感应电机矢量控制又称为磁场定向控制,即把磁场矢量的方向作为坐标轴的基准方向,以此进行电机各物理量瞬时值(电流、电压、感应电势、磁势、磁链、磁通)的坐标变换,从而获得三相定子电流的解耦控制,即通过控制定子电流的励磁分量来控制转子磁通恒定,通过控制定子电流的转矩分量来控制电磁转矩,从而控制转速。

根据获得磁场定向角方法的不同可以将矢量控制分成直接磁场定向矢量控制和间接磁场定向矢量控制,本文主要讨论基于转子磁场定向的直接磁场定向矢量控制方法,其控制系统结构如图 1 所示。

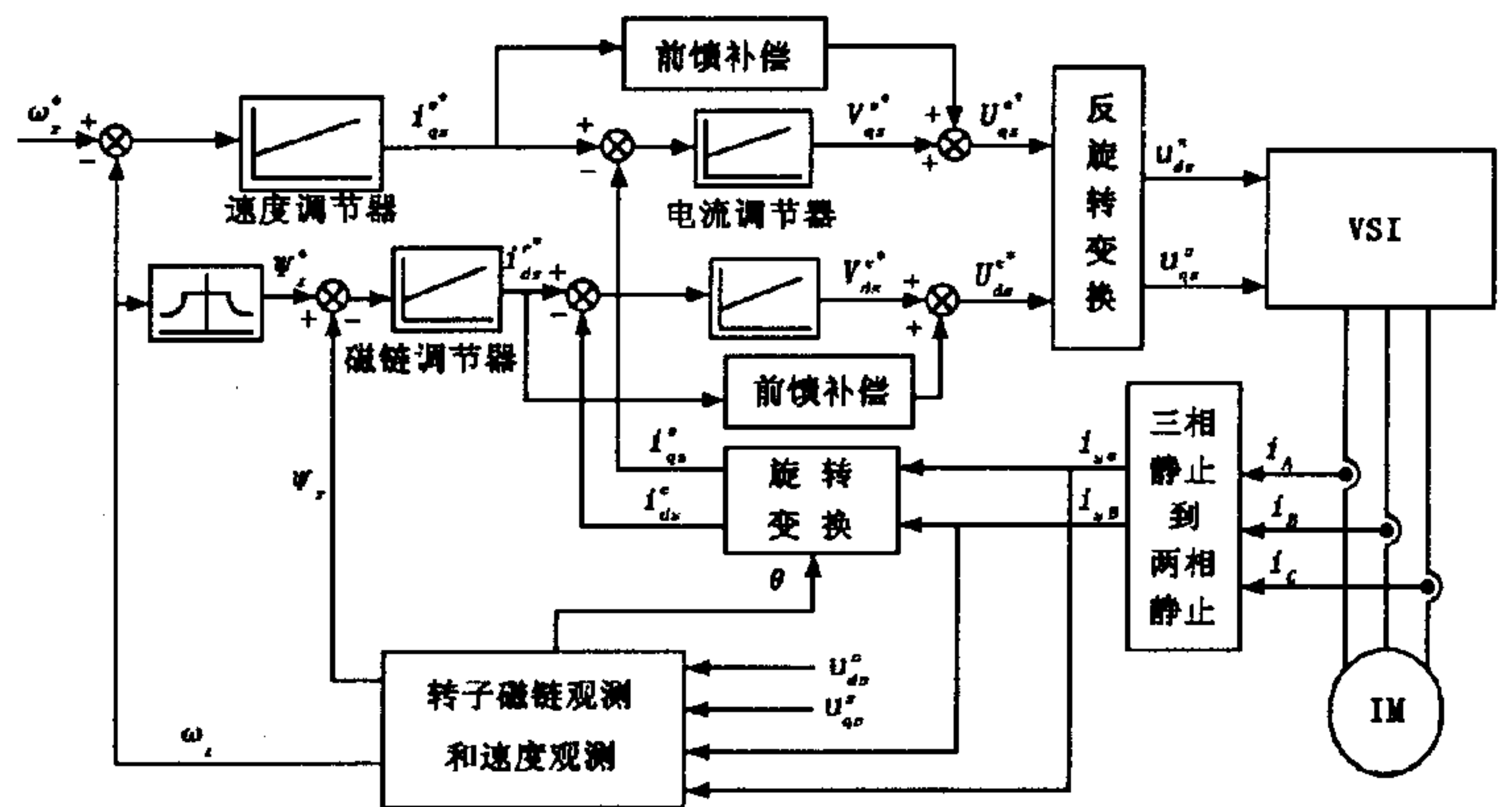


图 1 直接磁场定向矢量控制系统

2.1 有限补偿的电压型转子磁链观测器

本文采用有限补偿的电压型转子磁链观测器来进行磁链观测^[5],从而实现转子磁场定向。该方法能够有效克服原来电压模型观测转子磁链时纯积分环节带来的相位误差。有限补偿的电压型转子磁链观测器采用一种将积分环节和低通滤波器结合起来的磁链观测方法,如下式所示。

$$y = x/(p + \omega_c) + \omega_c z/(p + \omega_c) \tag{4}$$

式中 y 为积分环节的输出, x 是积分环节的输入, z 是补偿信号, ω_c 是滤波器的截止频率。从式中可以发现当 z 分别取 0 或 y 时,上式改进积分环节可分别视为低通环节和纯积分环节。因此适当地调整补偿量,可以使此改进型积分环节起到介于纯积分环节和一阶惯性之间的作用。在 $\alpha - \beta$ 坐标系下,其结构如图 2 所示。

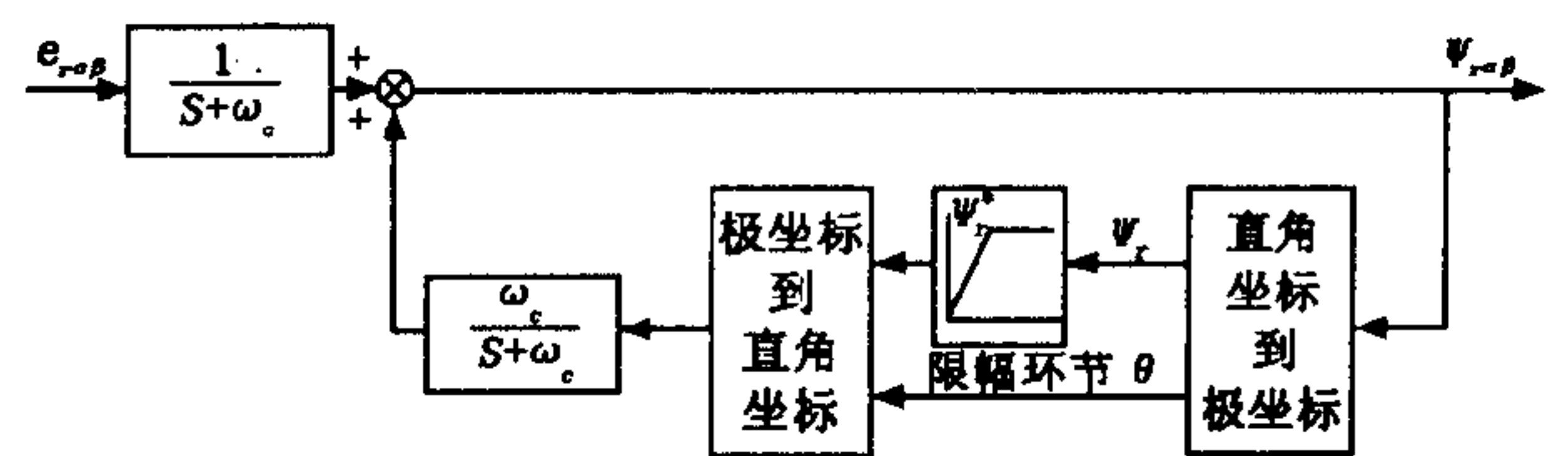


图 2 有限补偿的电压型磁链观测器

图中 $e_{r\alpha\beta}$ 为两相静止坐标系轴 α, β 上的转子反电势,作为磁链观测器的输入。 $\psi_{r\alpha\beta}$ 作为输出,为 α, β 轴的观测磁链。 ψ_r 为合成后的转子磁链幅值,限幅环节的上限为 ψ_r^* , θ 为转子磁链与两相静止坐标系 α 轴的夹角。同时,系统在磁链幅值的不同阶段予以不同的补偿,使得相移得以不同的补偿。例如:在启动过程中,当磁链还没有完全建立时,将输出直接反馈,得到的将是纯积分形式,这样有利于磁链幅值迅速达到给定的 ψ_r^* ,而且由于这一时间为毫秒级,所以直流漂移带来的影响会很小。一旦进入稳态,磁链观测器变为改进电压型的磁链观测器,直流漂移和相位误差的问题将得到很好的解决。

2.2 转速估计

无速度传感器矢量控制系统的速度辨识是整个系统设计中最关键的环节之一,速度估计值的正确与否将直接影响到调速系统的性能。对于速度观测器的一般要求是在较大范围内对于速度的稳态精确估算,同时保证快速的动态响应。速度观测器的输入一般为易于检测的电机端量,如电机定子侧的电压和电流等,通过一定的算法得到电机转子转速的估算值,并作为反馈用于速度的闭环控制。现有的速度辨识方法有:模型参考自适应、基于 PI 控制器法、转差频率估计法、转子次谐波法等。从简化算法、改善系统性能及实用性的前提考虑,本文推荐综合性能较好的动态速度估计器来进行转速估计。

这种方法以准确地观测转子磁链为基础,通过简单的数学推导,实时计算电机的转速。因此实现起来简

单,在参数准确的情况下动态响应和稳态精度都是十分理想的。

由异步电机在静止两相坐标系 $\alpha - \beta$ 下的电压方程和磁链方程,可得电机转子磁链的观测模型。在准确地观测到转子磁链 $\psi_{r\alpha}$ 和 $\psi_{r\beta}$ 以后,就可以进行电机转度的推算。

$$\theta = \arccos\left(\frac{\psi_{r\alpha}}{\sqrt{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}}\right) \quad (5) ; \quad \omega_e = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\psi_{r\alpha} d\psi_{r\beta}/dt - \psi_{r\beta} d\psi_{r\alpha}/dt}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \quad (6)$$

$$\omega_s = R_r T_e / n_p \psi_{rd}^2 \quad (7) ; \quad \omega_r = \omega_e - \omega_s \quad (8)$$

其中 ω_e 、 ω_r 和 ω_s 分别表示电机同步角速度、电机转速以及转差角速度。

2.3 电流调节器的设计

通过对电机 d 轴和 q 轴电压方程进行解耦,可以得到电机 d 轴与 q 轴的电流动态可简化成两个独立的一阶惯性系统^[6],如图3所示。

以 d 轴为例,其拉氏变换如公式(9)。利用简单的 PI 控制器,就可以很容易使实际电流跟随指令电流。

$$i_{ds}^*(S)/U_{ds}^e(S) = 1/(R_s + \sigma L_s S) \quad (9)$$

根据零极点对消的原理和极点设定方法,其控制器参数可以设定为

$$K_p^i = \sigma L_s \omega_c^i, \quad K_i^i = R_s \omega_c^i \quad (10)$$

其中 ω_c^i 为电流环的带宽,同理, q 轴电流调节器 PI 参数同 d 轴电流调节器。

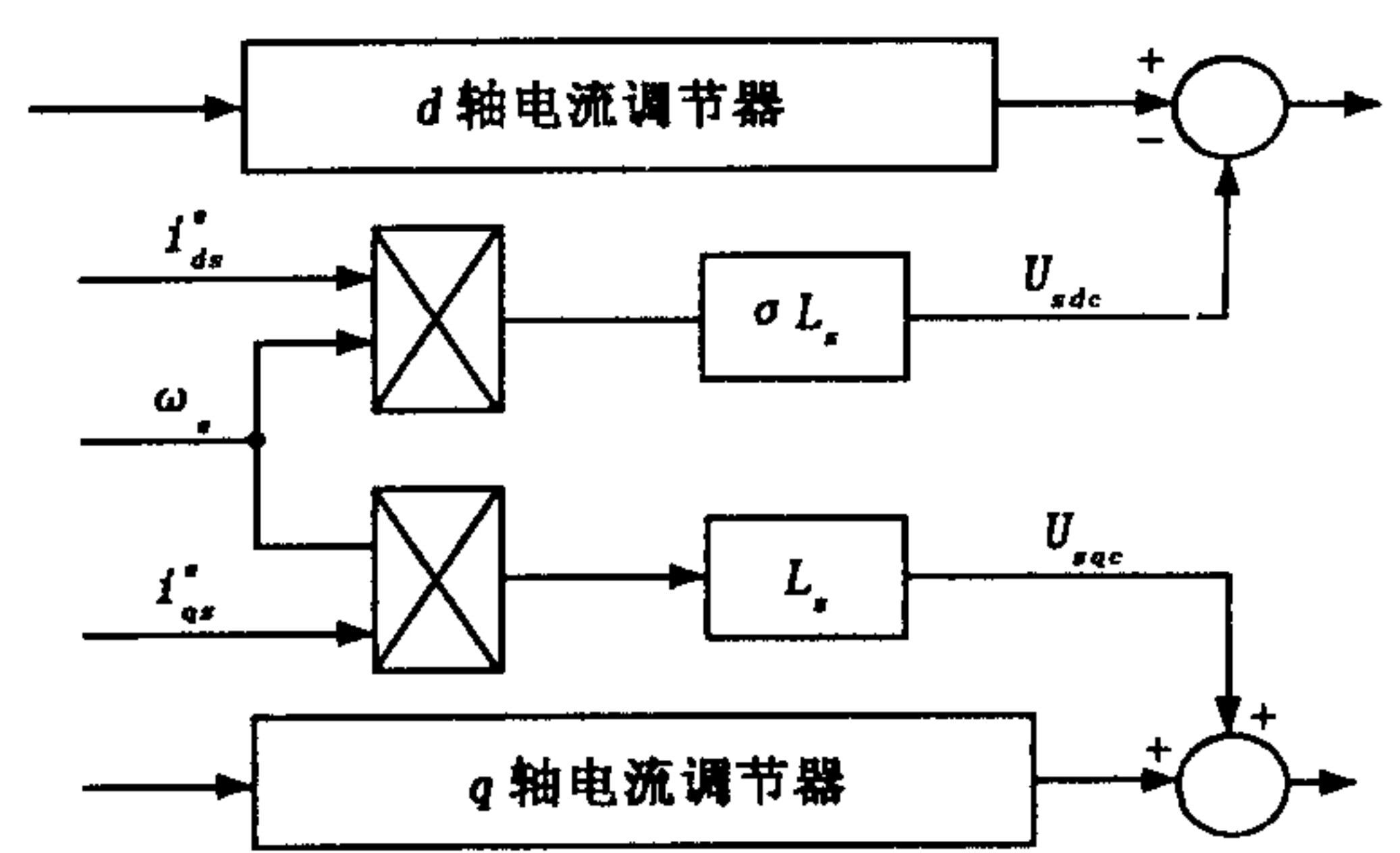


图3 d轴、q轴电压解耦关系图

3 仿真研究

依照前面所述数学模型、控制策略,利用 SimPowerSystems,对本文提出的控制方法进行了仿真研究。参数如表1所示。

表1 电机仿真参数

定子电阻	转子电阻	定转子互感	定(转)子漏感	极对数	转动惯量
R_s/Ω	R_r/Ω	L_m/mH	L_o/mH	N_p	$J_m/(kg/m^2)$
0.932 7	0.710 1	81.87	3.466 7	2	0.003 9

图4为电机转速响应曲线。测试条件为:空载启动、正反转最高转速1500 r/min、加减速时间2 s。从中可以看出:基于动态观测器的辨识转速方案可以在全频率范围内快速地跟踪电机实际转速。图5为电机空载启动,转速给定在2 s到达额定转速,变化率为750 r/s,在4 s突加额定负载(12 N·m)、7 s突卸额定负载转速相应曲线。从中可以看出,估测转速能够准确快速地跟踪电机实际转速。

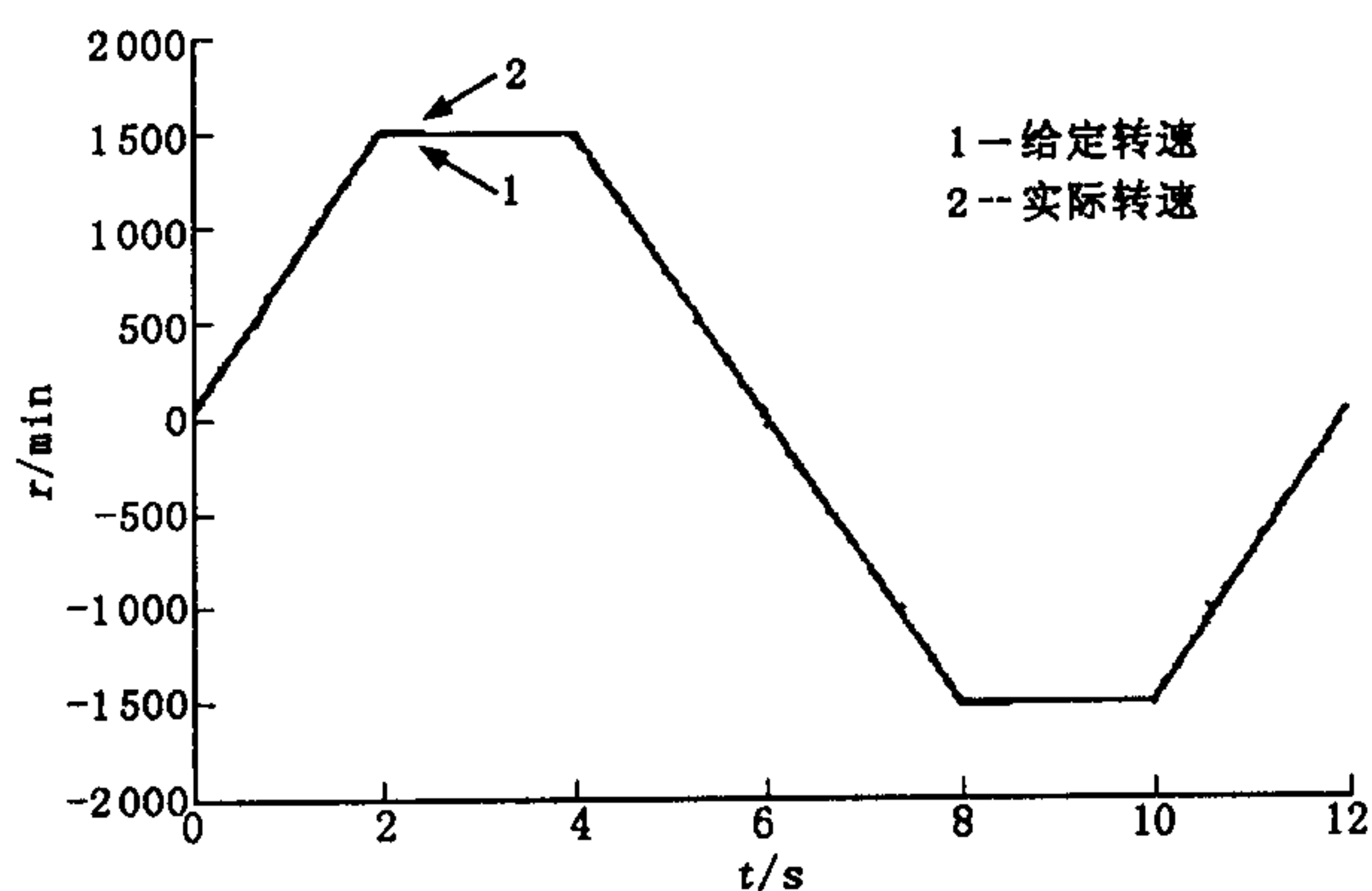


图4 空载正反转仿真实验

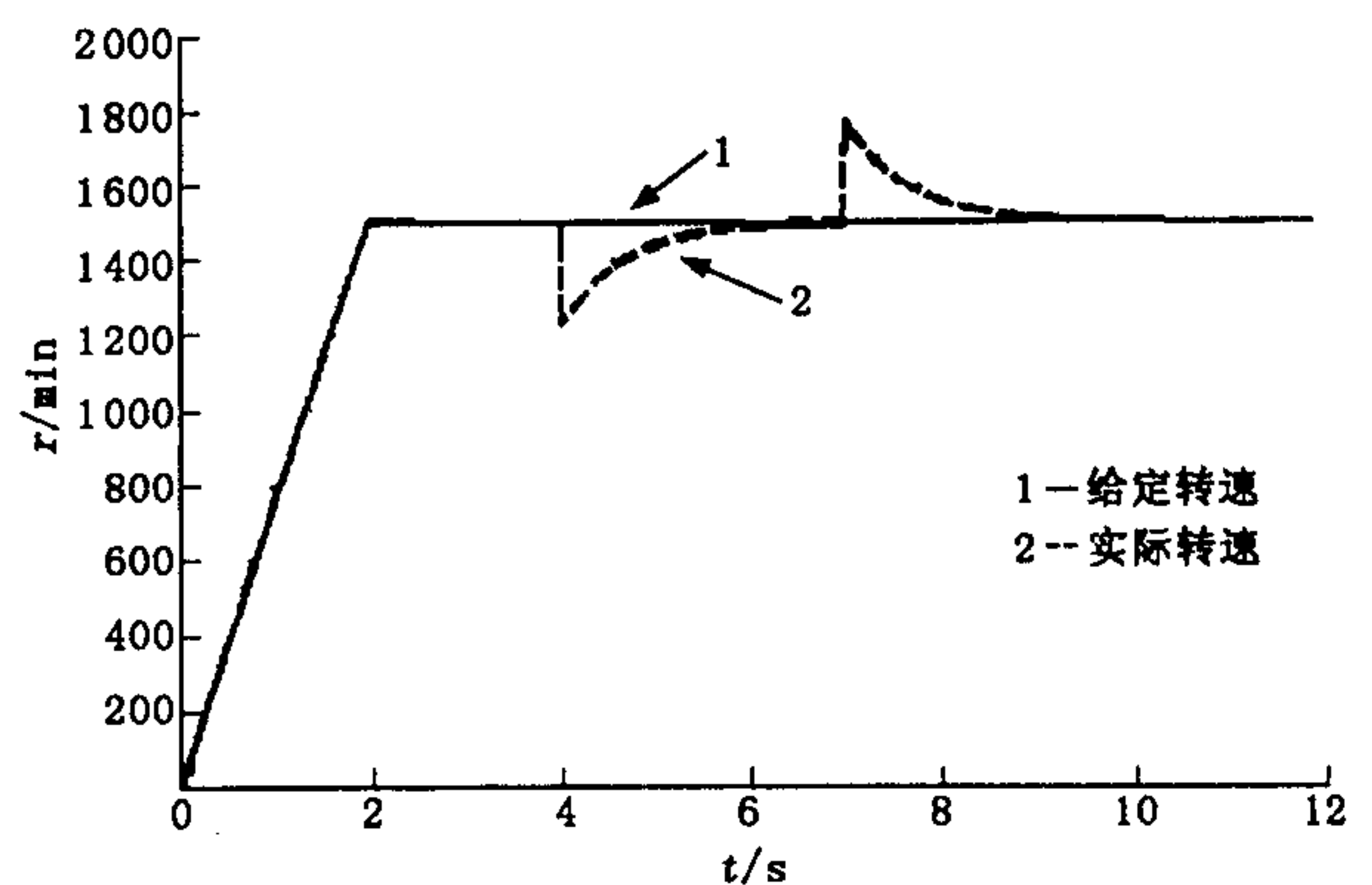


图5 突加突卸额定负载仿真实验

本文建立了感应电机在两相静止坐标系下的数学模型,并详细介绍了一种具有较强实用性的感应电机无速度传感器矢量控制的原理,包括转子磁链观测,转速估计和电流调节器的设计。最后,利用 Matlab/Sim-

ulink 开发了无速度传感器感应电机矢量控制的仿真系统,通过仿真研究,验证了该系统的正确性。

参考文献:

- [1] 曾岳南,陈伯时.异步电动机无速度传感器的矢量控制[J].电气传动自动化,2000,22(4):3-6.
- [2] 余功军.感应电动机的无速度传感器矢量控制若干问题的研究[D].西安:西安理工大学.1999.
- [3] 冯焱生,曾岳南.无速度传感器矢量控制原理与实践[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [4] 苏彦民,李宏.交流调速系统的控制策略[M].北京:机械工业出版社.1998.
- [5] Jun Hu, Bin Wu. New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux Over a Wide Speed Range[J]. IEEE Trans Power electronics. 1998,13(5):969-977.
- [6] Tajima H, Hori Y. Speed Sensorless Field - Orientation Control of the Induction Machine[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1993, 29(1): 175-180.

(编辑:门向生)

Study of Sensorless Vector Control Method of Induction Motor

ZHANG Jun - chao¹, MENG Yong - qing², HOU Zhen - yi¹

(1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. Department of Electrical Engineering, Xi'an Jiao - Tong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: This paper presents a mathematic model of induction motor under two phase static framework, and puts forward an implementation of sensorless vector control system based on the rotor magnetic field orientation. The control principle of the system is described in detail. At last, the validity of the model and the control method is verified by the MABLAB / SIMULINK simulation experiment.

Key words: sensorless; induction motor; mathematic model; vector control

(上接第 38 页)

A Terrain Analysis Method and the Application of It to Route Planning

ZHAO Hong¹, HE Hua - can¹, ZHAO Zong - tao¹, YU Lei^{2,3}

(1. Department of Computer Science, Northwest Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072; 2. Department of Computer Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069; 3. Division of Computer Science, Xi'an Research Inst. of Hi - Tech., Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract: Aim Terrain analysis is one important procedure in route planning for Cms. The main aim of it is to promote the real terrain matching probability, in this way, the targets can be destroyed successfully. By using the methods with FBM function, the formulas of finding the fractal dimension value and the variance are deduced. Especially a flow chart of the terrain analysis based on fractal dimension is proposed. Based on the deduced formulas the two character values are calculated and the corresponding matching probabilities are compared. Examples show that the constraint of fractal dimension in route planning can obviously increase the successful terrain matching probability.

Key words: fractal dimension; variance; information entropy; route planning