

# 异步电机参数辨识系统研究

孟庆硕, 许鸣珠

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**在异步电机矢量控制系统中,电机参数的准确性对电机的控制效果有着重要的影响。采用传统的异步电机辨识方法,结合 DSP 芯片和变频器自身的性能,研制了异步电机参数辨识系统。系统对直流、堵转、空载 3 个实验进行整合,运用最小二乘法、PI 控制、SVPWM 技术、离散傅里叶变换等方法,准确地测得电机的定转子电阻、定转子漏感、励磁电感等电机参数。该方法简单,操作简便,用时短,易于实现,准确度高,与已有的矢量控制参数对比,可以证实其参数的准确性。

**关键词:**DSP;最小二乘法;SVPWM;离散傅里叶变换

**中图分类号:**TM343 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2018)04-0036-06

## 0 引言

在基于转子磁场定向的异步电机矢量控制中,由于其转子磁链角计算和电流解耦对电机参数有较高的要求。电机的高性能控制在很大程度上依赖于异步电机本身参数,而异步电机铭牌上不会给出相应的电机参数。因此,对异步电机参数的辨识是一个不容忽视的重点。电机参数辨识方法主要有两种,即离线辨识法和在线辨识法。在线辨识方法可以实时跟随电机不同工况进行校正,能更好地实现电机的自适应控制,但其模型复杂,计算量大,方法应用难度大,对控制单元的运算能力要求很高,目前多数在线参数辨识方法还在理论研究中<sup>[1-4]</sup>。传统的离线辨识方法需要独立地进行直流、堵转、空载 3 项实验<sup>[5-6]</sup>,需要对设备反复拆卸,加装不同种类控制器,操作繁琐,并且在实际工况下,这种情况往往不被允许。

现利用逆变器本身的性能,结合 DSP 芯片实现 SVPWM 控制<sup>[7]</sup>,将 3 个实验综合设计为一个系统,使异步电机参数辨识更加方便、快捷。同时运用最小二乘法、离散傅里叶变换<sup>[8]</sup>,使得辨识过程更加简单,辨识结果更加精确。

## 1 电机辨识原理

三相异步电机的电路分析较为复杂,通过简化分析可以得到稳态下的单相 T 型等效电路,如图 1 所示。其中  $R_s$  和  $R_r$  分别为定子电阻和转子电阻, $\sigma L_s$  和  $\sigma L_r$  分别为定子漏感和转子漏感, $L_s$  和  $L_r$  分别为定子自感和转子自感, $L_m$  为励磁电感, $s$  为转差率。其中  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ ,一般在辨识过程中假设  $L_s = L_r$ 。

电机试验中利用 SVPWM 技术产生电压矢量,辅助参数辨识实验的进行。异步电机驱动电路<sup>[9-10]</sup>如图 2 所示,主要由 6 个功率开关管元件组成,利用其 8 种工作状态来合成电压矢量。

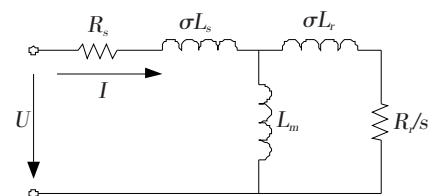


图 1 异步电机稳态时单相 T 型等效电路

收稿日期:2017-03-17 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.2018.04.06

基金项目:国家自然科学基金(11372198);河北省教育厅科学技术重点项目(ZD20131098)。

作者简介:孟庆硕(1993—),男,硕士研究生,研究方向为制理论与控制工程。E-mail:648503862@qq.com

孟庆硕,许鸣珠.异步电机参数辨识系统研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(4):36-40.

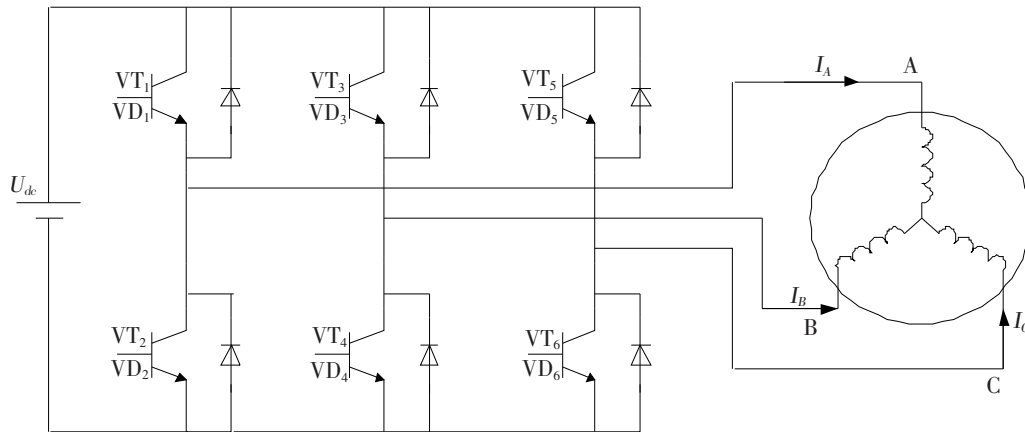


图 2 异步电机驱动主电路

1.1 定子电阻参数辨识

采用直流实验进行定子辨识,通过控制逆变器对电机施加低压直流电,根据欧姆定律计算出电阻值。利用 SVPWM 技术对母线电压  $U_{dc}$  进行斩波,产生高频电压脉冲,近似直流电。对于异步电机而言,此时 B 相定子电阻与 C 相定子电阻并联后,与 A 相定子电阻串联,此时等效电路图如图 3 所示。因此母线电压即为相电压  $U_{ab}$ ,A 相线电流即为  $I_a$ 。

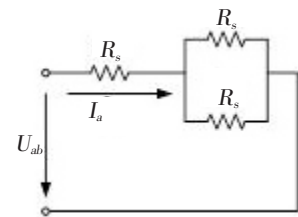


图 3 直流实验等效电路

电机的定子电阻为

$$R_s = U_{ab} / (1.5 I_a) \tag{1}$$

在矢量控制的坐标变换中,根据  $\alpha\beta$  坐标系下的电压、电流与三相电压、电流的关系,得到 SVPWM 的输入给定为

$$\begin{cases} U_\alpha = U_a \\ U_\beta = (U_a + 2U_b) / \sqrt{3} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

为保证电流的稳定,防止电压过大,实验采用电流的 PI 控制,其控制结构如图 4 所示,给定  $\alpha$  轴恒定的电流值,通过反馈定子电流,进行 PI 控制。并采用了电压重构技术,检测母线电压和计算 PWM 占空比,计算出电机相电压  $U_{ab}$ ,利用霍尔传感器测得其线电流  $I_a$ 。

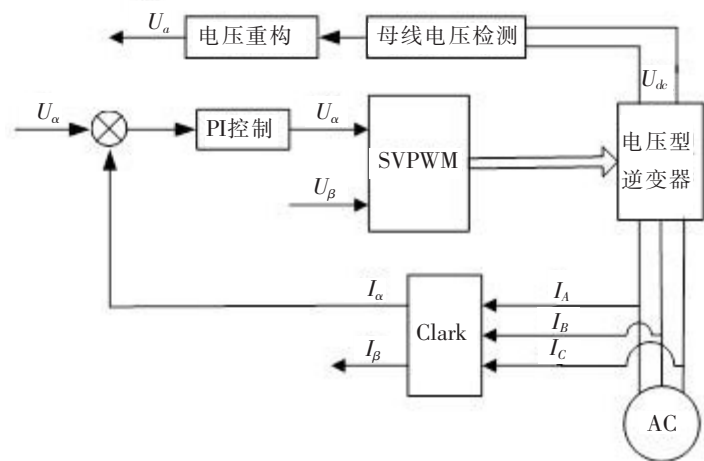


图 4 直流实验控制结构图

在直流实验中,电压与电流之间存在  $y=ax+b$  的线性关系,其中,  $y$  为相电压  $U_{ab}$ ,  $x$  为线电流  $I_a$ ,  $a$  为电阻  $R_s$ ,  $b$  为此线性相关参数<sup>[8]</sup>。由于测量精度的问题,电压和电流在测量过程中容易产生误差,导致计算出的电阻结果不准确。在实验中采用同一条件下多次测量的方法,来减小测量过程中误差带来的影响。测出  $n$  组数据  $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, n)$  值,根据最小二乘法的原理,未知参数  $a, b$  的求取应该满足式(3)取最小值。

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \tag{3}$$

使式(3)取极小值条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

整理式(4)得

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i y_i - b \sum_{i=1}^n x_i - a \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i = nb - a \sum_{i=1}^n x_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

解方程得

$$a = \frac{\overline{xy} - \overline{x}\overline{y}}{\overline{x^2} - \overline{x}^2} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \overline{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \\ \overline{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n \\ \overline{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i / n \\ \overline{x^2} = \sum_{i=1}^n x_i^2 / n \end{cases} \quad (7)$$

把所测得的数据代入式(5)就可以求出  $a, b$  的值。采用简单的最小二乘法处理数据,其公式简单、运算量小,同时也能够保证结果的精确性。实验证明采用最小二乘法处理数据对解决工程问题而言,是一种非常简单、实用、有效的方法。

## 1.2 转子电阻、电感参数辨识

采用堵转实验进行转子电阻、漏感的辨识。其原理是给电机绕组接入单相正弦交流电,此时电机处于堵转状态,不会产生转矩。当电压频率较高时,由于励磁电感很大,图 1 中流过励磁回路的电流可以忽略不计,转差率  $s=1$ 。此时三相电机内部电路可以等效为 B 相、C 相电阻并联,后与 A 相电阻串联;B 相、C 相漏感并联,后与 A 相漏感串联。其等效电路图如图 5 所示。

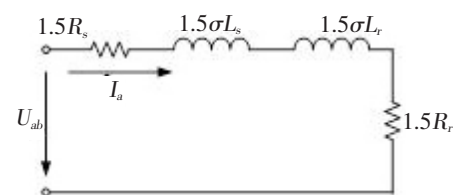


图 5 堵转实验等效电路

等效阻抗为

$$Z = U_{ab} / I_a \quad (8)$$

等效电阻为

$$R = (U_{ab} / I_a) \cos \theta \quad (9)$$

等效电抗为

$$X = (U_{ab} / I_a) \sin \theta \quad (10)$$

定子、转子漏感为

$$\sigma L_s = \sigma L_r = X / (3\omega) \quad (11)$$

式中,  $\omega$  为电压基波角频率。

转子电阻为

$$R_r = (2/3)R - R_s \quad (12)$$

在 SVPWM 控制算法中,控制  $U_a$  输入单相正弦电压,且  $U_\beta = 0$ ,保证 B、C 两相桥臂控制信号相同。

当电流稳定后,得到异步电机 A 相电流以及线电压  $U_{ab}$ ,进行离散傅里叶变换,可以得到相应的基波有效值和功率因数角。

由于电压和电流都是正弦波且它们之间存在相位差,其相位差即为功率因数角,可以利用电流为零时取电压值的方法,获得其电压值再除以其幅值再进行反正弦操作,就能够得到功率因数角,进而得到功率因数  $\cos \varphi$ ,大大简化了功率因数的计算过程<sup>[11]</sup>,得到

$$\begin{cases} \sin \varphi = U/M \\ \cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $U$  为 A 相电流为零时的相电压  $U_{ab}$ , $M$  为相电压的幅值。

根据式(8)~式(12)就可以推算出转子电阻  $R_r$  和定子、转子漏感  $\sigma L_s$ 、 $\sigma L_r$ 。

### 1.3 励磁电感辨识

采用空载实验进行励磁电感辨识,其原理是电机空载运行时转速接近同步转速,转差率  $s$  接近于零,电机转子回路可以近似为开路,等效电路如图 6 所示。

图中等效阻抗为

$$Z = U_a / I_a \quad (14)$$

等效电抗为

$$X = (U_a / I_a) \sin \theta \quad (15)$$

励磁电感为

$$L_m = X / 2\pi f - \sigma L_s \quad (16)$$

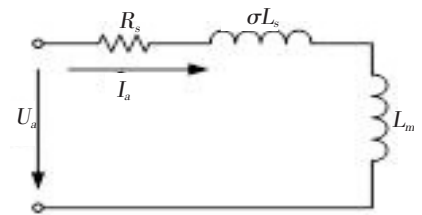


图 6 空载实验等效电路

通过电机开环 V/F 控制,施加额定频率的交流电压,使异步电机达到额定转速。通过霍尔传感器得到其母线电压和 A 相电流,利用电压重构技术即可得到  $U_{ab}$ 。采用离散傅里叶变换计算出电压、电流的基波有效值和功率因数角。再根据式(14)~式(16)即可计算出励磁电感  $L_m$ 。

## 2 辨识结果

采用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320F2812 作为主控器,采用专用驱动芯片 IR2110 和高达 25 A,1 200 V 的 IGBT 管,PWM 驱动信号通过高速光耦完全隔离高压与低压侧,保证驱动板不受高压干扰。用霍尔传感器检测输出电流波形,使低压侧和高压侧完全隔离。

实验中使用的电机额定参数为: $P_n = 200$  W; $U_n = 36$  V; $I_n = 9$  A; $\omega_n = 1\ 400$  r/min;极对数  $P = 2$ 。SVPWM 载波频率 10 kHz,死区时间为 3.2  $\mu$ s,IGBT 最大开关延迟时间  $T_{on} = 0.1$   $\mu$ s, $T_{off} = 0.3$   $\mu$ s。为了实现电机参数辨识目标,基于 DSP 编写了电机参数辨识系统,系统流程如图 7 所示。

图 8 所示为直流实验电压电流,在直流试验中,待电流稳定后,通过 DSP 的 ADC 模块进行转换,以 50 Hz 的频率对电压和电流进行同步采样,得到 128 个点的电压和电流值,并用最小二乘法计算,获得定子电阻  $R_s$ 。

在堵转试验中,通入 30 Hz 单相交流电,电流和电压的采样周期为 260  $\mu$ s,这样采集 128 个点即为一个完整周期。图 9 为堵转实验电压、电流,从图中可以看出电压超前电流,电压和电流近似正弦波。

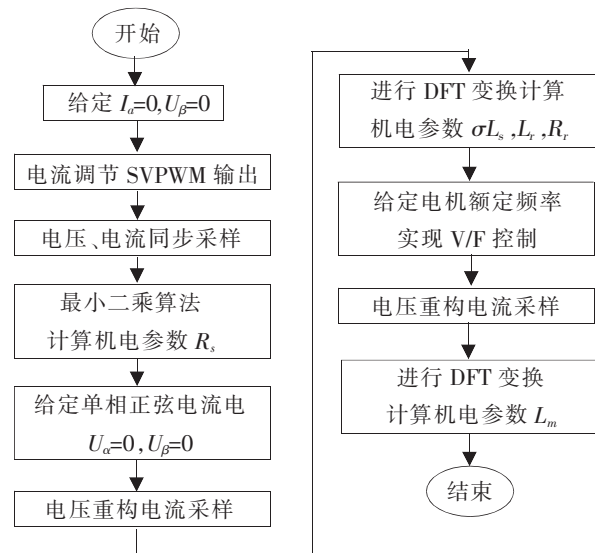


图 7 系统流程图

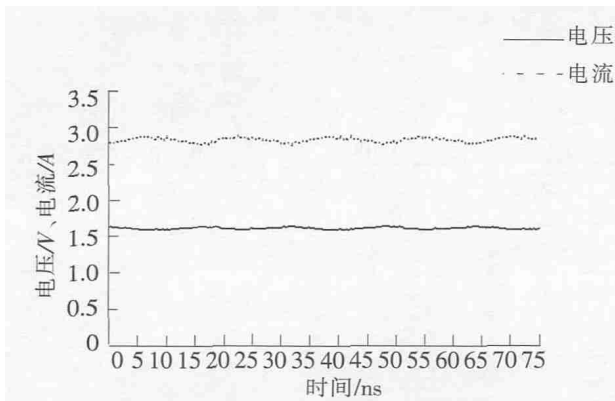


图 8 直流实验电压电流

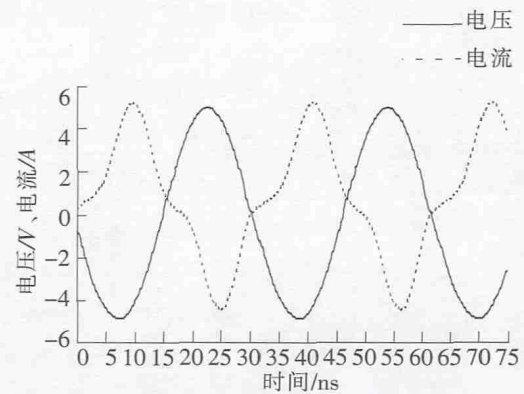


图 9 堵转实验电压电流

在空载实验中,通入 50 Hz 三相交流电,得到电压电流波形如图 10 所示。电机运行稳定后进行采样,由于 50 Hz 三相交流电,周期为 20 ms,对其电压和电流进行同步采样,采样 128 个点,采样周期为 156  $\mu$ s,保证了采样点为一个完整周期,方便进行离散傅里叶变换。

所得到的辨识结果如表 1 所示,通过计算得到转子时间常数为  $T_r=0.0171$ ,与之前通过矢量控制得到的  $T_r=0.0174$  对比,误差为 1.72%,具有较高的准确性。

表 1 辨识结果

$R_s/\Omega$	$\sigma L_s/H$	$\sigma L_r/H$	$R_r/\Omega$	$L_m/H$
0.406	0.0023	0.0023	0.366	0.005

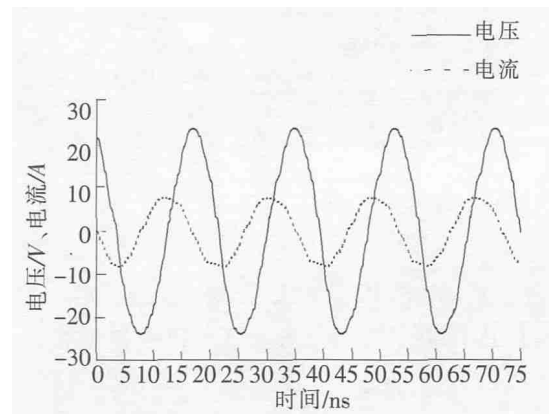


图 10 空载实验电压电流

### 3 结语

电机参数的准确性对电机的矢量控制有着重要的影响。本文基于空间矢量调制技术(SVPWM),采用了 PI 电流控制和最小二乘法,准确地计算出定子电阻。在堵转、空载试验中采用离散傅里叶变换数据处理手段,去除了其它谐波的影响,获得了准确的电机参数。研究的异步电机辨识系统,方法简单、程序运行时间短,其参数的准确性,能够满足矢量控制的需求。

### 参 考 文 献

- [1]Kojooyan-afari H, Monjo L, Corcoles F, et al. Parameter estimation of wound-rotor induction motors from transient measurements[J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 2014, 99:1-9.
- [2]Song Wang, Dinavahi V, Jian Xiao. Multi-rate real-time model-based parameter estimation and state identification for induction motors[J]. IEEE Electric Power Applications, 2013,7(1):77-86.
- [3]马小凡. 矢量变频异步电机的参数辨识技术研究[J]. 工业控制计算机, 2014,27(8):138-140.
- [4]肖曦,许青松,王雅婷,等. 基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2014,29(3):21-26.
- [5]李敏,肖兵. 异步电机参数辨识[J]. 信息技术, 2013(6):104-106.
- [6]栾东雪,许鸣珠,刘进志. 永磁同步电机的线性自抗扰控制及其参数整定研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015,28(3):62-66.
- [7]陈康平,曾岳南,李海波,等. 基于 TMS320F2812 的异步电机参数离线辨识系统[J]. 电机与控制应用, 2013,40(8):5-8.
- [8]任志斌,曾彪,曾德墙. 离散傅里叶变换在异步电机参数辨识中的应用[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2014,35(5):58-63.

(下转第 76 页)

- [7]刘亚净,赵奇楠,王建军. 置换流水车间新工件到达干扰管理研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(1):86-92.
- [8]刘凯,牛江川,申永军,等. 基于遗传粒子群算法的堆垛机作业路径优化[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(2):67-71.
- [9]王兴举,刘佳,周杨,等. 基于 GIS 铁路网络运营管理和分析系统[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(3):99-104.
- [10]杨毅凡,倪少权. 基于模糊聚类的 RITS 货运服务系统逻辑框架设计[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(3):101-105.

## Research on Site Selection of Public Bicycle

——Taking Beiyang Campus of Tianjin University as an Example

Liu Yulin<sup>1</sup>, Zhang Xiaoping<sup>2</sup>, Wang Tai<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the lack of analysis of urban public bicycle layout research, a public bicycle site location model based on Gis and genetic algorithm is established. From the aspects of student satisfaction and the cost of the firm, the location selection objective and influencing factors of the campus public bicycle station are determined. The influence of the spatial analysis function of Gis can be used to quantitatively analyze the influencing factors that can be expressed on the map. The best site location can be obtained by using median model combined with genetic algorithm. A scheduling optimization model with no time window constraint in single scheduling center is established, combing with genetic algorithm and Matlab.

**Key words:** campus traffic; public bicycle system; layout planning; Gis; genetic algorithm

(上接第 40 页)

[9]王成元. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008:45-61.

[10]于江涛,文小琴,游林儒. 基于空间矢量调制的异步电机离线参数辨识[J]. 信息技术,2013(6):133-136.

[11]任志斌,曾德墙. 基于极坐标的异步电机新型参数辨识方法[J]. 河北科技大学学报,2013,34(3):218-223.

## Research on Asynchronous Motor Parameter Identification System

Meng Qingshuo, Xu Mingzhu

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In asynchronous motor vector control system, the accuracy of the motor parameters has important influence on the control of the motor. This paper uses the traditional identification method of induction motor, and develops the induction motor parameter identification system combining with the DSP chip and the performance of the inverter. This system integrates direct current, locked-rotor, and no-load experiment, by using the least squares method, PI control, SVPWM technology, and discrete Fourier transform, can accurately measure the constant rotor resistance, leakage inductance and excitation inductance of the motor, etc. This method shows many advantages such as simple and easy to operate, saving time, high accuracy. Compared with existing vector control parameters, the accuracy of its parameters can be verified.

**Key words:** DSP; least square method; SVPWM; discrete Fourier transform