

# 单边直线感应电机等效电路参数研究

徐伟<sup>1,2</sup>, 孙广生<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

[摘要] 单边直线感应电机(SLIM)相对于旋转感应电机(RIM)存在气隙大、边缘效应等,若采用RIM开路和短路试验方法,会给参数测量带来较大误差。文章提出的一种适合SLIM参数测定的新型方案,只需测量电机输入端的总功率、相电压、相电流和频率4个量,即可计算出初级电阻、初级漏感、次级电阻、次级漏感、气隙电感和铁损电阻。电机的特性分析表明,该方法真实有效,具有一定的参考价值。

[关键词] 单边直线感应电机;开路试验;短路试验;参数测量;等效电路

[中图分类号] TM359.4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)00-0076-05

## 1 前言

单边直线感应电机(SLIM)由旋转感应电机(RIM)沿纵向剖开后沿水平面展平而成,如图1所示。电机的初级(定子)和次级(转子)直接产生水平推力,用其牵引列车,具有无黏着力驱动、爬坡能力强、转弯半径小、加速快、噪声低等优点,近年来在中国、日本、加拿大的地铁和轻轨运输中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>,见图2。

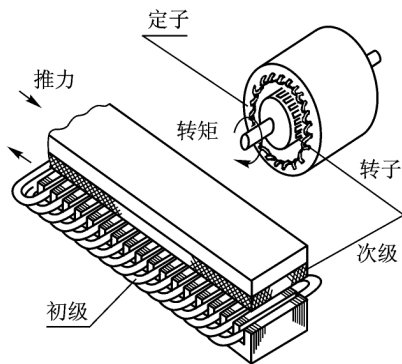


图1 SLIM形成与结构图

Fig. 1 Formation and construction of SLIM

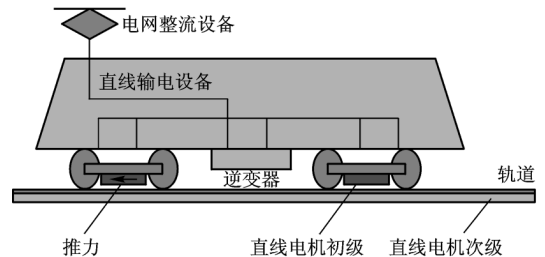


图2 SLIM驱动的列车示意图

Fig. 2 The interpretive photograph of vehicle pulled by SLIM

SLIM工作时,初级电流产生的磁动势通过气隙在次级导体板中感应出与其方向相反的涡流,同时由于磁路开断,在电机运行方向存在边缘效应,给SLIM的参数(初级电阻、初级漏感、次级电阻、次级漏感、气隙电感和铁损电阻)带来影响;随着电机运行速度增加,气隙电感和次级电阻变化最为明显。SLIM矢量控制需要对电机参数进行在线辨识,根据不同的运行状况,对电机的互感、初级电流等量进行及时的补偿,从而采用类似RIM的控制方法来控制SLIM。其中在线参数辨识和补偿控制都是建立在电机的静态(转差率 $s=1$ )参数基础上的,若所给的静态参数误差大,会严重影响电机的控制效果,甚至

[收稿日期] 2006-08-03;修回日期 2006-09-09

[作者简介] 徐伟(1980-),男,重庆市人,中国科学院研究生院、中国科学院电工研究所博士研究生,从事交通中直线电机的相关研究;孙广生(1944-),男,北京市人,中国科学院电工研究所研究员,博士生导师,从事高电压、新能源、直线电机牵引驱动等研究

造成控制失败<sup>[4]</sup>。

SLIM 因其特殊结构,不能直接采用 RIM 参数的测定方法,其铁耗和附加损耗亦不能通过作图确定。笔者采用直接计算的手段,避开了 RIM 参数测定的繁琐步骤,简单可行。

## 2 理论基础

SLIM 的等效电路如图 3 所示,其励磁支路分为串联和并联两种<sup>[4,5]</sup>。

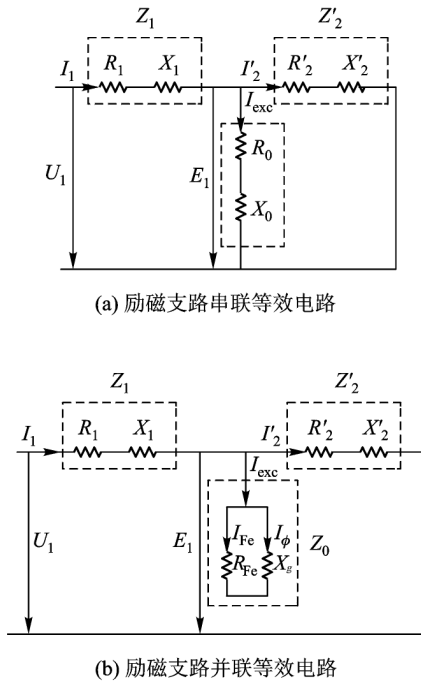


图 3 SLIM 等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit of SLIM

初级绕组阻抗  $Z_1 = R_1 + jX_1$  (1)

次级阻抗(折算到初级)

$$Z'_2 = R'_2 + jX'_2 = \frac{Z_2(s)}{s} = \frac{R'_2(s) + jX'_2(s)}{s} \quad (2)$$

励磁支路阻抗

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (3)$$

其中  $Z_0$  可以等效为  $R_{Fe}$  和  $X_g$  并联组成;

$$R_0 = \frac{R_{Fe}^2 X_g^2}{R_{Fe}^2 + X_g^2} \quad (4)$$

$$X_0 = \frac{R_{Fe}^2 X_g}{R_{Fe}^2 + X_g^2} \quad (5)$$

把  $Z_0$  和  $Z'_2$  等效为

$$Z_i = \frac{Z_0 Z'_2}{Z_0 + Z'_2} \quad (6)$$

此时等效电路如图 4 所示。

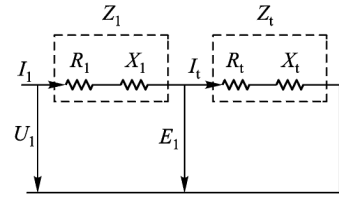


图 4 SLIM 简化等效电路

Fig. 4 Simple equivalent circuit of SLIM

气隙电抗  $X_g$  计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$X_g = 4m_1 \mu_0 f \frac{(N_1 k_{w1})^2 L_i \tau}{\pi p g k_c} \quad (7)$$

式中,  $m_1$  为相数;  $\mu_0$  为空气磁导率;  $N_1$  为每相串联匝数;  $k_{w1}$  为初级绕组系数;  $g$  为空气隙大小;  $k_c$  为卡氏系数;  $L_i$  为初级铁心宽度;  $p$  为极对数。笔者用开路试验确定初级电阻  $R_1$ , 电抗  $X_1$ , 铁损电阻  $R_{Fe}$ ; 短路试验确定  $R'_2$  和  $X'_2$ , 具体如下。

### 2.1 开路试验

电机在空载时转速稳定后,若  $s$  较小(0.05 以内),转子支路因电阻很大可断开,此时  $X_0 \approx X_g$ 。测量三相输入功率  $P_{10}$ , 相电压  $U_{10}$ , 相电流  $I_{10}$ , 输入频率  $f_{10}$ 。

根据串联支路可得

$$\begin{cases} \cos\varphi_0 = \frac{P_{10}}{m_1 U_{10} I_{10}} \\ R_1 + R_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cos\varphi_0 \end{cases} \quad (8)$$

初级电抗  $X_1$  和串联电抗  $X_0$  满足:

$$X_1 + X_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \sqrt{1 - \cos^2\varphi_0} \quad (9)$$

初级铁心损耗为

$$\Delta P_{1Fe} \approx 0.5 (P_{10} - m_1 I_{10}^2 R_{1dc}) \quad (10)$$

其中  $R_{1dc}$  为初级每相的直流电阻。

$$R_0 = \frac{\Delta P_{1Fe}}{m_1 I_{10}^2}; R_{Fe} = \frac{X_g^2 + X_g \sqrt{X_g^2 - 4R_0^2}}{2R_0} \quad (11)$$

初级电阻

$$R_1 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cos\varphi_0 - R_0 \quad (12)$$

根据式(8)计算出  $X_g$ , 得

$$X_1 \approx \frac{U_{10}}{I_{10}} \sqrt{1 - \cos^2\varphi_0} - \frac{R_{Fe}^2 X_g}{R_{Fe}^2 + X_g^2} \quad (13)$$

### 2.2 短路试验

堵转试验时,初级输入电压为额定电压的 0.5 倍以内<sup>[7]</sup>,采用开路试验的办法,测得总输入功率

$P_{1sh}$ 、相电流  $I_{1sh}$ 、相电压  $U_{1sh}$  和输入频率  $f_{1sh}$ , 于是:

$$\cos\varphi_{sh} = \frac{P_{1sh}}{m_1 U_{1sh} I_{1sh}} \quad (14)$$

求得等效电阻  $R_1$  和电抗  $X_1$  分别为

$$R_1 = \frac{U_{1sh}}{I_{1sh}} \cos\varphi_{sh} - R_1 \quad (15)$$

$$X_1 = \frac{U_{1sh}}{I_{1sh}} \sqrt{1 - \cos^2\varphi_{sh}} - X_1 \quad (16)$$

根据式(2)、式(4)~式(6)可反求得  $R'_2 (s=1)$  和  $X'_2 (s=1)$  分别为

$$R'_2 = \frac{(R_1 R_0 - X_1 X_0)(R_0 - R_1) + (X_1 R_0 + R_1 X_0)(X_0 - X_1)}{(R_0 - R_1)^2 + (X_0 - X_1)^2} \quad (17)$$

$$X'_2 = \frac{(X_1 R_0 + R_1 X_0)(R_0 - R_1) - (R_1 R_0 - X_1 X_0)(X_0 - X_1)}{(R_0 - R_1)^2 + (X_0 - X_1)^2} \quad (18)$$

### 3 试验平台

由于 SLIM 气隙接近 10 mm, 电机空载时转差率约为 0.1, 此时把次级支路断开会产生较大误差。笔者采用直流电动机(见图 5 辅助部分)在负载端通过皮带轮顺向拖动 SLIM, 使其接近同步转速( $s$  在 0.01 内), 此时为真正空载<sup>[8]</sup>。短路试验去掉辅助部分。

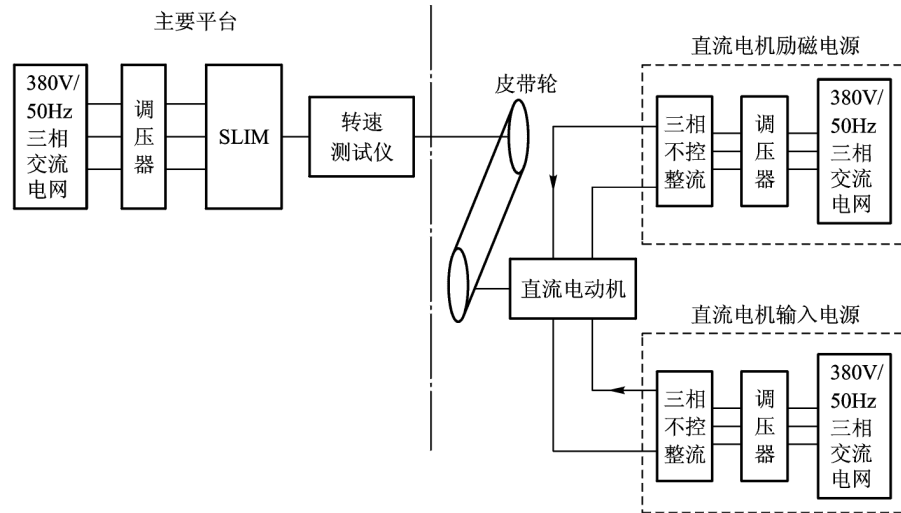


图 5 SLIM 参数测量平台

Fig. 5 Parameter measurement platform of SLIM

试验平台:1 台直线电机,3 台调压器,2 个不控整流桥,1 个转速测试仪,1 台直流电动机和堵转设备。

测量仪器:1 台电能质量分析仪,1 台示波器,2 个高压探头和两个电流钳。

被测试的 SLIM 设计参数如表 1 所示。

表 1 测试的 SLIM 设计参数

Table 1 Design data of tested SLIM

参数	参数值
功率/kW	10
线电压/V	380
线电流/A	30
相数	3
初级铁心宽/mm	110
初级铁心长/mm	700

续表

参数	参数值
极数	6
极距/mm	114
次级板宽/mm	220
机械间隙/mm	10

### 4 结果分析

表 2 为 SLIM 的等效电路测试参数和相应的仿真数值,可以看出两者误差在 5% 以内。在等效电路参数测量值的基础上,对 SLIM 的牵引力( $F_e$ )、功率因数( $\cos\varphi$ )、效率( $\eta$ )做了进一步研究,其仿真和测试结果如图 6 所示。其中牵引力和效率的仿真和试验测定值误差在 2% 以内,功率因数误差约为

4%。结果充分证明,SLIM 等效电路参数真实可信,满足了工程要求,具有一定的参考价值。

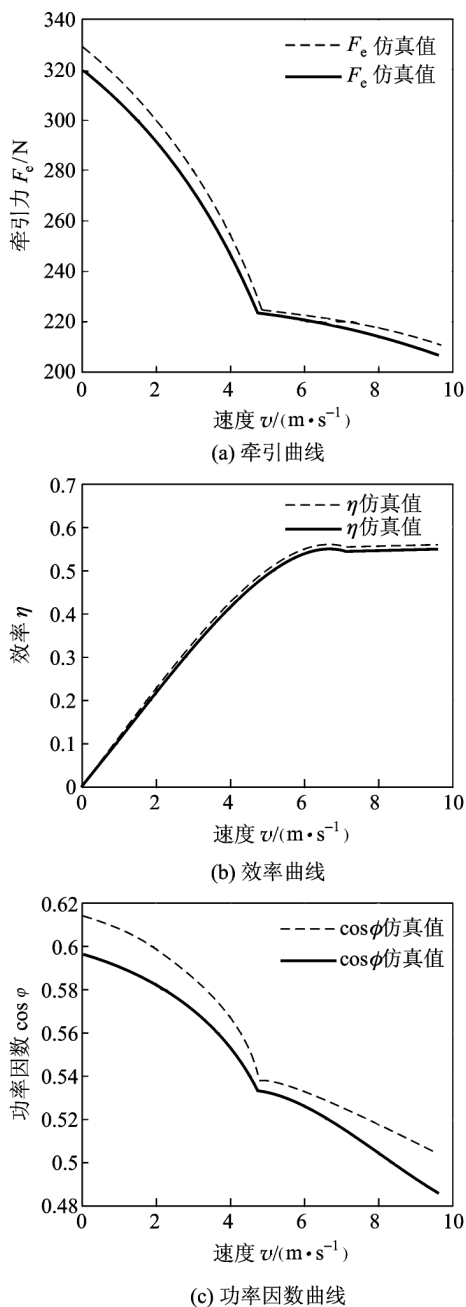


图6 SLIM 的仿真和试验特性曲线  
Fig.6 Simulation and measurement performance curves of SLIM

表2 等效电路参数测量和仿真结果

Table 2 Measurement and simulation parameter in equivalent circuit

项目	测试值	仿真值
初级电阻 $R_1/\Omega$	0.483	0.490
初级漏感 $L_1/\text{mH}$	5.453	5.441
气隙电感 $L_m/\text{mH}$	26.223	26.223
铁损电阻 $R_0/\Omega$	0.069	0.065
次级电阻 $R'_2/\Omega$	0.584	0.572
次级漏感 $L'_2/\text{mH}$	1.068	1.101

## 5 结语

笔者提出了一种测量计算 SLIM 等效电路参数的新型方法,相对于传统 RIM 参数测量,该方法操作简单,求解方便。SLIM 的牵引力、效率和功率的仿真与试验曲线表明,测定的 SLIM 等效电路参数可信度较高。该方法能较准确地获取 SLIM 等效电路参数,为 SLIM 的牵引特性研究和在线参数辨识奠定了基础,具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] Nonaka S. Examination with test facility on dynamic characteristics of LIM for urban transit [A]. Int Conf ICEM'88 [C]. Pisa, 1988:127-132
- [2] Poloujadoff M. The Theory of Linear Inducing Machinery [M]. Oxford: Clarendon Press, 1980
- [3] Sakae Yamamura. Theory of Linear Induction Motors [M]. New York: Wiley J & Sons, 1970
- [4] Gieras J F. Experimental investigations of a shaded-pole flat linear induction motor [A]. IEEE SA Section, Africon [C]. 1992. 404-408
- [5] Cecconi V, Nuccio S, Galluzzo R G, et al. Experimental investigation of inverter-fed single-sided linear induction motor [A]. Int Conf ICEM'1988 [C]. Pisa, 171-175
- [6] Boldea I, Nasar S A. Linear Motion Electromagnetic Systems [M]. New York: Wiley J & Sons, 1985
- [7] Gieras J F. Linear Induction Drives [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994
- [8] Gieras J F. Simplified theory of double-sided linear induction motor with squirrel-cage elastic secondary [J]. Proceedings IEE Pt. B, 1983, 130(6): 424-430

# Research on the equivalent circuit parameter of single linear induction motor

Xu Wei<sup>1,2</sup>, Sun Guangsheng<sup>1</sup>

( 1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

[Abstract] The SLIM parameter has clear error to its real value on the base of the RIM parameter measurement method because it has larger air gap and edge effect. This paper proposes a new scheme suited for SLIM parameter detection. It only needs input total power, phase voltage, phase current, frequency, and then computes primary resistance, primary leakage induction, secondary resistance, secondary leakage induction, air induction and iron loss resistance. The performance analysis of SLIM indicates that this method is very effective and valuable.

[Key words] single linear induction motor; open-secondary circuit experiment; blocked-secondary circuit experiment; parameter measurement; equivalent circuit

---

(上接 72 页)

# Research of seismic events waveform in deep copper mine

Yang Zhiguo<sup>1</sup>, Yu Runcang<sup>2</sup>, Guo Ran<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing

100083, China; 2. China Nonferrous Engineering and Research Institute, Beijing 100038, China;

3. China Nonferrous Metal Mining (Group) Co., Ltd., Beijing 100055, China)

[Abstract] In order to better understand the regularities of rockburst occurrence, Dongguashan Copper Mine has installed an ISSI seismic monitoring system, which can make a real-time monitoring of rock mass respond to mining. This paper briefly described the layout of the monitoring system in Dongguashan Copper Mine, then analyzed how to process various kinds of event waveforms. By contrasting the different locations resulting from the automatic processing and the artificial processing, it is confirmed that the accuracy of an event location has been improved greatly by the artificial processing, which will make the calculation of seismic source parameters even more accurate. Based on the corresponding relations between waveforms recorded and mining practice, the event waveforms are assorted, which can identify events quickly. According to the analysis results of a detecting blast and an identified seismic event, the waveform analysis method put forward in this paper is validated. It will establish a sound basis for subsequent analysis of the stress or strain status, delineation of hazardous areas of rock mass and adoption of reasonable measures.

[Key words] deep mining; rockburst; seismic monitoring; waveform analysis