

ICS 29.160.30

CCS K26

团体标准

T/CI 287-2024

轨道交通直线感应电机关键参数 辨识及测定方法

Identification and measurement method for key parameters of linear
induction machine in rail transit

2024-01-25 发布

2024-01-25 实施

中国国际科技促进会 发布

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由华中科技大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：华中科技大学、中国科学院电工研究所、襄阳中车电机技术有限公司、株洲中车时代电气股份有限公司、同济大学、中车株洲电机有限公司、湖南中车尚驱电气有限公司、广州地铁集团有限公司、湖南磁浮交通发展股份有限公司、中车株洲电力机车有限公司、中铁磁浮交通投资建设有限公司、青岛四方机车车辆股份有限公司。

本文件主要起草人：徐伟、葛健、刘毅、李耀华、唐一融、王珂、林国斌、李伟业、袁文烨、葛琼璇、丁叁叁、苏诗湖、郭颖聪、成思伟、彭俊、冯守智、何云风、陈晓亮、陈希隽、黄海涛、邓江明、佟来生、谢海林、廖凯举、董定昊、邹剑桥、上官用道、包振、肖晗。

轨道交通直线感应电机关键参数辨识及测定方法

1 范围

本文件规定了轨道交通直线感应电机关键参数辨识及测定方法的总体技术要求,包括技术的术语和定义、辨识方法、测定方法、校验规则等技术要求。

本文件适用于轨道交通直线电机车辆的单边短初级三相直线感应牵引电机(以下简称直线感应电机)的参数测定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件的必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 16318 旋转牵引电机基本试验方法

GB/T 2900.25 电工术语 旋转电机

GB/T 2900.36 电工术语 电力牵引

GB/T 32349 轨道交通 电力牵引 变流器供电的短初级直线感应电动机

GB/T 32383 城市轨道交通直线电机车辆通用技术条件

CJ/T 311 城市轨道交通直线感应牵引电机技术条件

3 术语、定义、符号和下标

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

参考模型 reference model

不含待辨识参数的数学模型。

3.1.2

可调模型 adjustable model

含有待辨识参数的数学模型。

3.1.3

模型参考自适应系统 model reference adaptive system

利用参考模型和可调模型输出量的偏差,根据一定的自适应律来动态更新可调模型的参数,使模型之间的误差为零,从而使可调系统的参数与参考模型相同,达到参数辨识的目的,模型参考自适应系统全局渐进收敛的充分条件是满足波波夫超稳定性理论。

3.1.4

波波夫超稳定性理论 Popov hyperstability theory

用于判定模型参考自适应系统是否渐进收敛。

注:波波夫超稳定性理论包括以下两个条件:

线性定常环节传递矩阵必须为严格的正实矩阵;

非线性时变反馈环节 W 必须满足波波夫积分不等式,即:

$$\int_0^{t_1} \boldsymbol{\varepsilon}_m^T W dt \geq -\gamma_0^2 \quad \forall t_1 \geq 0 \quad (1)$$

满足上述两个条件,模型参考自适应辨识系统则可渐进收敛。

3.2 符号和下标

3.2.1 符号

下列符号适用于本文件。

U, I —— 电压、电流

$\boldsymbol{u}, \boldsymbol{i}$ —— 电压矢量、电流矢量

R, L —— 电阻、电感

Ψ —— 磁链

σ —— 总漏感系数, $\sigma=1-L_m^2/(L_1L_2)$

ω —— 角频率

$\boldsymbol{E}, \boldsymbol{J}$ —— $\boldsymbol{E} = [1 \ 0; 0 \ 1], \boldsymbol{J} = [0 \ -1; 1 \ 0]$

3.2.2 下标

1, 2 —— 初级量、次级量

t —— 静态值

$\hat{}$ —— 观测量

N —— 额定值

m —— 励磁支路

l —— 漏感

4 参数辨识方法

4.1 参数辨识流程

基于模型参考自适应法的参数辨识流程见图 1。

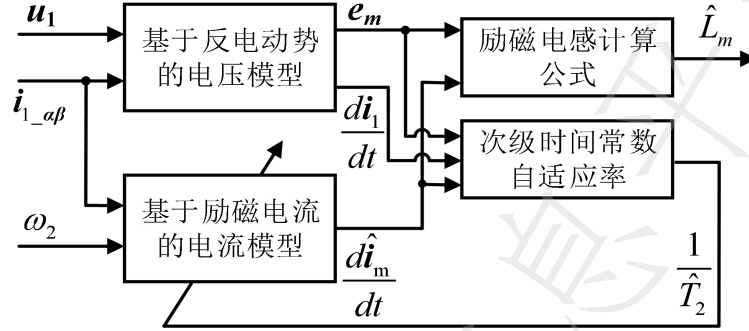


图 1 基于模型参考自适应法的参数辨识流程

4.2 基于模型参考自适应法的双参数辨识

定义反电动势为：

$$e_m = \frac{L_m}{L_2} \frac{d\psi_2}{dt} \quad (2)$$

定义励磁电流为：

$$i_m = \frac{\psi_2}{L_m} \quad (3)$$

选取励磁电流为观测变量，推导出如下以励磁电流为状态变量的电压、电流模型：

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{L_2}{L_m^2} [u_1 - (R_1 i_1 + \sigma L_1 \frac{di_1}{dt})] \quad (4)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \omega_2 J i_m - \frac{1}{T_2} i_m + \frac{1}{T_2} i_1 \quad \dots \quad (5)$$

在对次级时间常数进行辨识时，指定式(4)所代表的电压模型为参考模型，指定式(5)所代表的电流模型为可调模型。此处假定励磁电感已知，次级时间常数可以通过构建相应的MRAS系统来进行辨识。由式(5)可以得到电流模型对应的估计方程如下：

$$\frac{d\hat{i}_m}{dt} = \omega_2 J \hat{i}_m - \frac{1}{\hat{T}_2} \hat{i}_m + \frac{1}{\hat{T}_2} i_1 \quad (6)$$

进一步，结合式(5)和(6)可得基于励磁电流的状态误差方程：

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon_m}{dt} &= \omega_2 J \epsilon_m - \frac{1}{T_2} \epsilon_m - \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{\hat{T}_2} \right) (\hat{i}_m - i_1) \\ &= A \epsilon_m - W \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_m = \boldsymbol{i}_m - \hat{\boldsymbol{i}}_m$ 为励磁电流误差值, $\boldsymbol{A} = -\frac{1}{T_2} \boldsymbol{E} + \omega_2 \boldsymbol{J}$, $\boldsymbol{W} = (\frac{1}{T_2} - \frac{1}{\hat{T}_2})(\hat{\boldsymbol{i}}_m - \boldsymbol{i}_1)$ 。

根据波波夫超稳定性理论, 上述模型参考自适应系统前向传递矩阵 $(s\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})^{-1}$ 满足严格正实的条件。在获取准确次级时间常数的基础上, 通过下式获得励磁电感辨识值:

$$\frac{\hat{L}_m^2}{\hat{L}_2} = |\boldsymbol{e}_m| / \left| \frac{d\hat{\boldsymbol{i}}_m}{dt} \right| \quad (8)$$

式中, $\frac{d\hat{\boldsymbol{i}}_m}{dt}$ 由式(5)计算得到, \boldsymbol{e}_m 由下式计算得到:

$$\boldsymbol{e}_m = \frac{\hat{L}_m^2}{\hat{L}_2} \frac{d\hat{\boldsymbol{i}}_m}{dt} = \boldsymbol{u}_1 - (R_1 \boldsymbol{i}_1 + \sigma L_1 \frac{d\hat{\boldsymbol{i}}_1}{dt}) \quad (9)$$

基于励磁电感和次级时间常数的辨识结果, 忽略次级漏感, 次级电阻的辨识值为:

$$\hat{R}_2 = \frac{\hat{L}_m}{\hat{T}_2} \quad (10)$$

5 适用条件

上述方法适用于轨道交通直线感应电机励磁电感、次级电阻/次级时间常数辨识, 使用前需完成静态试验并获取 T 型等效电路各参数静态值。

6 参数辨识及测定流程

6.1 概述

组成轨道交通直线感应电机关键参数辨识及测定方法的试验程序应严格按照先静态试验后参数辨识的步骤进行。

6.2 初级直流电阻测量

初级直流电阻测量按照 GB/T 16318 旋转牵引电机基本试验方法进行。

6.3 次级静态电阻测定

将单边短初级直线感应电机定子(初级)在测试台架上固定, 分别施加高频(1.5倍额定频率)和低频(0.5倍额定频率)的电压 U_k , 从 U_k ($U_k=0.4U_{1N}$) 开始逐渐降低, 记录初级绕组端电压 U_{ki} 、初级电流 I_{ki} 、定子端输入功率 P_{ki} , $i=1, 2$, 得到电机短路特性 $I_k=f(U_k)$, $P_k=f(U_k)$ 。

根据短路特性曲线, 选取额定相电流对应的相电压 U_{ki} 、短路损耗 P_{ki} , 可求得:

$$Z_{ki} = \frac{U_{ki}}{I_{ki}}, R_{ki} = \frac{P_{ki}}{3I_{ki}^2}, X_{ki} = \sqrt{Z_{ki}^2 - R_{ki}^2} = \omega_{ki} L_{ki} \quad (11)$$

根据短路时的等效电路（图2），忽略铁耗，得：

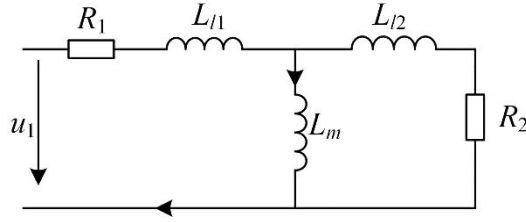


图2 直线感应电机短路工况 T 型等效电路

$$\begin{aligned} R_{ki} + jX_{ki} &= R_1 + X_{l1} + \frac{jX_m (R_2' + jX_{l2}')}{R_2' + jX_m + jX_{l2}'} \\ &= R_1 + R_2' \frac{\omega_{ki}^2 L_m^2}{R_2'^2 + \omega_{ki}^2 L_2'^2} + j\omega_{ki} \left[L_{l1} + \frac{L_m (\omega_{ki}^2 L_2 L_{l2} + R_2'^2)}{R_2'^2 + \omega_{ki}^2 L_2'^2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

考虑高频下满足如下条件：

$$R_2'^2 \ll \omega_{k1}^2 (L_m + L_{l2})^2 \quad (13)$$

则此时电机输入电阻满足：

$$R_{k1} = R_1 + R_2' \frac{\omega_{k1}^2 L_m^2}{R_2'^2 + \omega_{k1}^2 L_2'^2} \approx R_1 + R_2' \frac{L_m^2}{L_2'^2} \quad (14)$$

定义励磁电感与次级自感之比：

$$k_m = L_m / L_2 \quad (15)$$

对于轨道交通直线感应电机，考虑其气隙较大，励磁电感相对较小，一般取 $k_m=0.8$ 。

结合式(14)和(15)，可计算得出次级电阻静态值为：

$$R_{2t}' = (R_{k1} - R_{l1}) / k_m^2 \quad (16)$$

6.4 静态励磁电感、初次级漏感测定

当通入低频电压时，此时电机的输入电阻和电感表达式如下

$$\begin{cases} R_{k2} = R_{l1} + R_{2t}' \frac{\omega_{k2}^2 L_m^2}{R_{2t}'^2 + \omega_{k2}^2 L_2'^2} \\ L_{k2} = L_{l1} + \frac{L_m (\omega_{k2}^2 L_2 L_{l2} + R_{2t}'^2)}{R_{2t}'^2 + \omega_{k2}^2 L_2'^2} \end{cases} \quad (17)$$

将初级电阻和次级电阻的静态值代入式(17)，可计算得到励磁电感以及初次级漏感静态值如下：

$$\begin{cases} L_{m1} = \frac{k_m R_{2t}'}{\omega_{k2}} \sqrt{\frac{R_{k2} - R_{1t}}{R_{k1} - R_{k2}}} \\ L_{l2t} = \frac{1 - k_m}{k_m} L_{m1} \\ L_{l1t} = L_{k2} - \frac{L_{m1} (\omega_{k2}^2 L_{l2t} (L_{m1} + L_{l2t}) + R_{2t}'^2)}{R_{2t}'^2 + \omega_{k2}^2 (L_{m1} + L_{l2t})^2} \end{cases} \quad (18)$$

6.5 动态励磁电感、次级时间常数辨识

按照 4 中基于模型参考自适应法的双参数辨识方法,编写辨识算法,通过传感器将电流、速度等信号送入微处理器单元运算,算法中参考模型及可调模型所用参数均为 6.3 中静态值。试验时,直线感应电机采用次级磁场定向控制,将电机从静止加速至额定速度,利用示波器记录关键参数变化波形,并依此绘制关键参数变化曲线。

7 校验规则

将由本标准规定的直线感应电机参数辨识及测定方法获取的电机参数代入等效模型进行特性计算,得出推力、效率、功率因数等指标的计算值,通过与实际测得的电机推力、效率、功率因数比较,可间接校验本标准规定方法实施效果。

8 参数辨识及测定流程

直线感应电机参数辨识及测定流程如图 3 所示,具体流程如下:

- a) 固定直线感应电机定子;
- b) 向电机初级绕组通入 1.5 倍和 0.5 倍额定频率的电压,并做出短路特性曲线;
- c) 根据短路特性曲线,计算初级电阻、次级电阻、励磁电感、初次级漏感等参数静态值;
- d) 取消固定,将电机由静止正常运行至额定速度,并通过传感器获取电流、速度信号;
- e) 根据模型参考自适应法的双参数辨识方法获取电机关键参数辨识值。

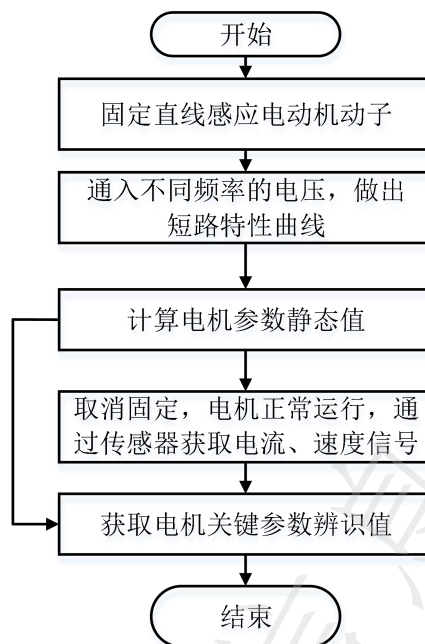


图3 直线感应电机关键参数辨识及测定流程