

## 无头轧制多级传动系统建模与仿真

Modeling and simulation of endless rolling multi-drive system

王宏文, 柳溪, 卢鹏飞

WANG Hong-wen, LIU Xi, LU Peng-fei

(河北工业大学 电气与自动化学院, 天津 300130)

摘要: 无头轧制多级传动控制是基于现场总线的, 以交流电机作为执行机构, 以变频器作为控制与放大装置的机电控制系统。本文通过矢量变换建立异步电机在两相同步旋转坐标系下的数学模型, 构建出交流传动系统等效的直传动系统的动态结构图。通过理论分析、SIMULINK 软件包仿真和实验验证, 证明这种方法是可行的。该数学模型为开发各种智能算法在交流多级传动系统上的应用奠定了基础。

关键词: 无头轧制; 位置随动控制; 矢量变换控制

中图分类号: TP275

文献标识码: B

文章编号: 1009-0134(2009)06-0089-04

## 0 引言

无头轧制技术是目前国际上用于钢材生产线的一种最先进的加工方法, 是连轧设备工艺及技术方面的最新进展之一。无头轧制工艺可以实现无间隙地生产钢材, 减少产品切头、切尾损失, 并大幅度降低中间坯的切头损失, 提高成材率, 实现全定尺交货, 轧制系统参数稳定, 减少机械和电气故障, 延长易损件的使用寿命, 从而大幅度降低生产成本, 提高经济效益<sup>[1]</sup>。本论文目的在于对无头轧制的关键技术之一交流多级传动系统的“等效”模型进行研究, 以达到降阶、定常、线性化的目的, 为在系统级实现各种智能的控制算法打下基础。

## 1 无头轧制多级传动系统

无头轧制工艺的特点对与之相关的传动系统提出了一些特殊的要求: 1) 焊机小车的运行速度要严格地与1#粗轧机轧制线速度相同, 以确保焊机设备的安全与焊接过程的准确; 2) 为了确保除鳞效果, 钢坯通过除鳞箱时速度要慢, 但为了保证及时追上前一根钢坯的尾部, 除鳞结束后要快速追赶。因此, 从加热炉到1#粗轧机入口的传动系统是多级速度传动系统; 3) 由于现场生产随机因素的影响, 每一次开始追赶时前一根钢坯尾部的的位置会有所不同, 负责追赶的传动系统相当于一个位置随动系统。

## 2 数学模型的建立

在实际应用中, 高精度的传动系统多为矢量变

频器和异步电机组成的交流传动系统。因此, 要实现对本传动系统的精确控制, 必须研究异步电机在矢量变换下的等效数学模型和变频器的解耦原理, 以期得到该位置随动系统的准确数学模型。

本文采用按转子磁链定向的矢量控制。对于鼠笼型异步电动机的转子是短路的, 对于绕线式异步电动机来说, 用在变频调速中, 其转子也是短路的, 因而  $u_{ra}=u_{rb}=0$ 。若按转子磁链定向, 则 M 轴与电动机转子全磁链  $y_r$  轴重合, T 轴垂直于 M 轴, 从而使  $y_r$  在 T 轴上的分量为零, 表明转子全磁链  $y_r$  惟一由 M 轴绕组中电流所产生, 可知定子电流矢量  $i_s$  在 M 轴上的分量  $i_{sm}$  是纯励磁电流分量; 在 T 轴上的分量  $i_{st}$  是纯转矩电流分量。

三相异步电动机变换到 M-T 坐标系上的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{sM} \\ u_{sT} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_s & L_m p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & -\Delta\omega L_m & R_r + L_r p & -\Delta\omega L_r \\ \Delta\omega L_m & L_m p & \Delta\omega L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sM} \\ i_{sT} \\ i_{rM} \\ i_{rT} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中参数定义如下:

$u_{sM}$ —定子电压矢量  $u_s$  在 M 轴上的分量;

$u_{sT}$ —定子电压矢量  $u_s$  在 T 轴上的分量;

$R_s$ —定子绕组电阻;

$R_r$ —转子绕组电阻;

$\Delta\omega$ —M-T 轴相对与转子的角转速;

$L_m$ —M-T 坐标系定子等效两相绕组的自感;

收稿日期: 2008-10-20

作者简介: 王宏文(1957-), 男, 辽宁人, 教授, 研究方向为现代传动控制理论与智能化工程装备。

$L_r$ — $M$ - $T$ 坐标系定子与转子同轴等效绕组间的互感;

$L_s$ — $M$ - $T$ 坐标系转子等效两相绕组的自感;

$P$ —微分算子;

$i_{sM}$ —定子电流矢量  $i_s$  在  $M$  轴上的分量;

$i_{sT}$ —定子电流矢量  $i_s$  在  $T$  轴上的分量;

$i_{rM}$ —转子电流矢量  $i_r$  在  $M$  轴上的分量;

$i_{rT}$ —转子电流矢量  $i_r$  在  $T$  轴上的分量。

电动机转子全磁链  $\psi_r$  在  $M$ - $T$  轴系上的量可用方程表示为:

$$\psi_r = L_m i_{sM} + L_r i_{rM} \quad (2)$$

$$0 = L_m i_{sT} + L_r i_{rT} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入到式(1)得:

$$\begin{bmatrix} u_{sM} \\ u_{sT} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_r & L_m p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_r & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_r + L_r p & 0 \\ \Delta\omega L_m & 0 & \Delta\omega L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sM} \\ i_{sT} \\ i_{rM} \\ i_{rT} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)的第三行可得:

$$0 = R_r i_{rM} + p(L_m i_{sM} + L_r i_{rM}) = R_r i_{rM} + p\psi_r$$

由上式求出:

$$i_{rM} = -\frac{p\psi_r}{R_r} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)中,求得:

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sM} \quad (6)$$

式(6)中,  $T_r = \frac{L_{rd}}{R_r}$ —转子电路的时间常数。

式(6)所表明的物理意义是:转子磁链  $\psi_r$  惟一由定子电流矢量的励磁电流分量  $i_{sM}$  产生,与定子电流矢量的转矩电流分量  $i_{sT}$  无关,这充分说明了异步电动机矢量控制系统按转子全磁链定向可以实现磁通和转矩的完全解耦;还表明了,  $\psi_r$  和  $i_{sM}$  之间的传递函数是一个一阶惯性环节,当  $i_{sM}$  为阶跃变化时,  $\psi_r$  的变化要受到励磁惯性的阻挠,  $\psi_r$  按时间常数  $T_r$  呈指数规律变化,这和直流电动机励磁绕组的惯性作

用是一致的。

由磁链方程(2)和(3)得:

$$i_{rM} = \frac{1}{L_r} (\psi_r - L_m i_{sM}) \quad (7)$$

$$i_{rT} = -\frac{1}{L_r} (L_m i_{sT}) \quad (8)$$

带入  $M$ - $T$  坐标系上的转矩方程

$$T_e = n_p L_m (i_{sT} i_{rM} - i_{sM} i_{rT}) \quad (9)$$

$$\text{得: } T_e = \frac{n_p L_m}{L_r} i_{sT} \psi_r \quad (10)$$

式(9)中:

$T_e$ —电磁转矩;

$n_p$ —电机极对数。

式(10)所表明的物理意义是,当恒定时,无论是稳态还是动态过程,电磁转矩都与异步电动机的转矩电流分量成正比。

运动方程与坐标变换无关,仍为:

$$n = \frac{375 n_p (T_e - T_L)}{Jp} \quad (11)$$

式(11)中,  $T_L$ —负载转矩。

为了使两个子系统完全解耦,除了坐标变换以外,还应设法抵消转子磁链  $\psi_r$  对电磁转矩  $T_e$  的影响。通常的办法是,把 ASR 的输出信号除以  $\psi_r$ , 当控制器的坐标反变换与电机中的坐标变换抵消,且变频器的滞后作用可以忽略时,此处的  $(\div \psi_r)$  便可与电机模型中的  $(\times \psi_r)$  抵消,两个子系统就近似解耦了。这时,带除法环节的矢量控制系统可以看成是  $\psi_r$  和  $n$  两个独立的线性子系统,可以采用经典控制理论的单变量线性系统综合方法或相应的工程设计方法来设计两个调节器  $A\psi R$  和 ASR。此处将磁链子系统残余耦合作用所造成的滞后、矢量控制的计算延迟时间、变频器和电机的电磁惯性、近似等效为一个一阶惯性环节<sup>[2]</sup>。

其传递函数为:

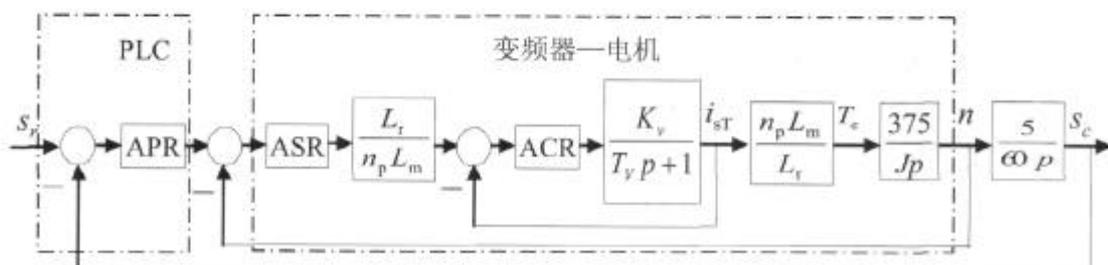


图1 位置随动系统原理图

$$G(s) = \frac{K_v}{T_v p + 1}$$

上式中:

$K_v$ —PWM 装置放大倍数, 取 22;

$T_v$ —等效滞后时间常数, 取 0.00341s。

本文是将变频器与电机看成整体作为研究对象。在无头轧制系统中对磁链  $\psi$  的控制由变频器实现, 其  $A\psi R$  和  $ACR$  参数不需要设置, 所以我们只对转速  $n$  的控制进行研究。由上述分析可得位置随动系统原理图, 如图 1 所示。

### 3 控制器设计与系统参数计算

为了更准确直观地研究无头轧制多级传动系统, 我们开发研制了无头轧制多级传动系统模拟实验台, 如图 2 所示。



图 2 无头轧制模拟试验台机械结构图

该机械平台可分为上下两大部分。下部有两个滑块平台, 分别由两根滚珠丝杠连接推动, 焊接用的模拟钢坯加在两个滑块平台上。一号滑块平台模拟进入一号轧机的钢坯, 二号滑块平台模拟出炉钢坯。上部为焊机滑块平台, 焊机固定在其底部并随之一同运动。焊机滑块平台根据下部两个滑块平台的相对位置实现对一号滑块平台的跟踪, 并在两块待焊钢坯对接处与二号滑块平台同步。驱动下部两个滑块平台的是两台变频器专用异步电机, 焊机滑块平台由永磁同步电机拖动, 以满足位置控制要求

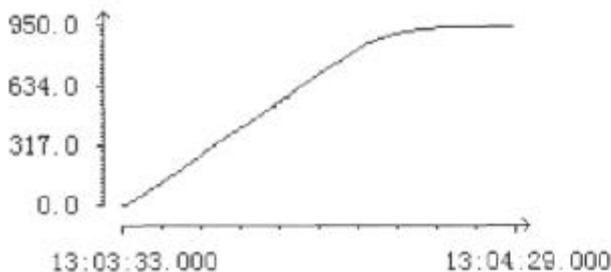


图 3 实际系统阶跃响应曲线

的动态性能。滚珠丝杠的一端连接光电编码器, 用于测量 3 个滑块平台的相对位置。在上导轨的两端和中点安装了 3 个接近开关, 下导轨两端和行程中安装了 4 个接近开关, 7 个接近开关用以滑块平台位置初始化和终点提示<sup>[3]</sup>。

实际控制系统参数:  $APR: p=2, ASR: p=12, I=400$ 。并给实际系统输入 950mm 的位置阶跃信号, 可得实际系统的阶跃响应监控曲线, 如图 3 所示。

在此处将负载以及和电机连接的滚珠丝杠转动惯量均折算到电机转子转动惯量  $J$  中。

由式(11)可知:

$$n = \frac{375}{Jp} T_e \quad (12)$$

实际系统中通过 Wincc 监控曲线, 可读出电机输出转矩与转速值如下:

在  $t_1=21.132s$  时,  $T_1=0.367N \cdot m, n_1=148.99n/min$ ;  
在  $t_2=21.231s$  时,  $T_2=0.428N \cdot m, n_2=150.019n/min$ 。

(13)

由式(12)得:

$$n_2 - n_1 = \frac{375}{J} \left( \frac{T_2}{p} - \frac{T_1}{p} \right) \quad (14)$$

$$\Delta s = \frac{T_2}{p} - \frac{T_1}{p} \quad (15)$$

$\Delta t=t_2-t_1=0.099s$  时间间隔非常短, 在这段时间内  $T_e$  近似按直线变化。

所以式(15)中,  $\Delta s$ : 近似为  $T_e$  在  $t_2-t_1$  时间内与时间轴围成的梯形的面积。将式(13)中数据带入到式(15)得  $\Delta s=0.03935$

将此值带入到式(14)中, 求得:

$$J=9.398kg \cdot m^2$$

在控制系统中钢坯的前进是由滚珠丝杠转动实现的, 电机轴与丝杠连接, 丝杠每转一周, 钢坯前进 5mm。即钢坯前进速度与电机转速的关系为:

$$v = \frac{5}{60} n \quad (16)$$

式(16)中,  $v$ —钢坯前进线速度, 单位  $mm/s$ 。

故位移与电机转速之间的传递函数为:

$$s = \frac{v}{p} = \frac{5}{60p} n \quad (17)$$

式(2-17)中,  $s$ —钢坯位移, 单位  $mm$ 。



图4 simulink 仿真程序

## 4 系统仿真

根据位置随动系统原理图(图1),编写simulink程序进行仿真<sup>[7]</sup>,如图4所示。

由于二号钢坯对一号钢坯的伺服过程和焊机对一号钢坯的伺服过程基本相似,所以本文只对二号钢坯的响应曲线进行分析。图1中,各环节调节器均为PI调节器,参数与实际系统相同,其中APR : $p=2$ , ASR : $p=12, l=400$ 。实际系统ACR未知,此处自行设计,取ACR : $p=1, l=2$ 。给二号钢坯仿真模型中同样输入950mm的位置阶跃信号,仿真模型的阶跃响应曲线,如图5所示。

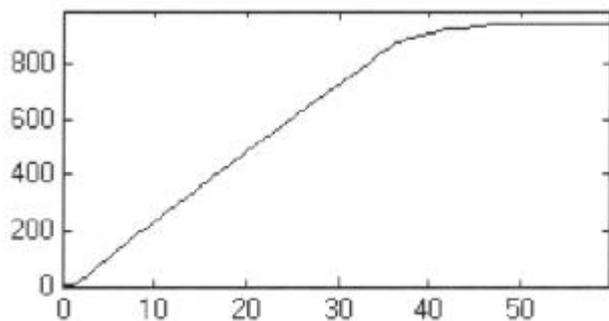


图5 仿真模型二号钢坯阶跃响应曲线

## 5 结论

1)由表1可知,该曲线误差很小,模型基本反映了系统的实际运行情况。滑块处于丝杠不同阶段,造成负载转矩略有不同,使得仿真系统在启动过程中比实际系统稍快。

表1 动态性能指标对比

指 标 对 比	$T_d$ (s)	$T_r$ (s)	$T_s$ (s)	$\sigma\%$
仿真模型	19.625	30.603	38.701	0
实际系统	19.952	30.670	38.876	0
相对误差	1.639%	0.218%	0.450%	0

2)可以用该等效模型来模拟交流传动系统,尤其是在钢坯运动以“秒”为单位时更具使用价值。

参考文献:

- [1] 王宏文,李韶远,等.唐钢无头轧制多级传动系统[J].冶金自动化,2002,6-2:37-39.
- [2] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].机械工业出版社,2005.
- [3] 王宏文,刘通学,等.无头轧制多级传动模拟实验平台的研究与开发[J].制造业自动化,2008,1-1:23-26.
- [4] 王树.变频调速系统设计与应用[M].机械工业出版社,2006.
- [5] 胡灵杰.基于Matlab无刷直流电机控制系统建模与仿真[J].机械与电子,2007,12-1:35-38.
- [6] 李有军.异步电机分析模型综述[J].电气技术,2007,11-1:8-10.
- [7] Hoang Lehuy. Modeling and simulation of electrical drives using Matlab Simulink and power system blockset[J].IEEE Proceeding from Industrial Electronic Society,2001,3(2): 1603-1611.
- [8] Yang Geng,LuoYing li.Electrical Machinery and Motion Control Systems [J] Beijing: Tsinghua University Press,2006.3.