

文章编号:1671-251X(2012)08-0059-04

姚玉梅,牛超,孔宪华. 起重机升降运动系统的建模及仿真研究[J]. 工矿自动化,2012(8):59-62.

## 起重机升降运动系统的建模及仿真研究

姚玉梅<sup>1</sup>, 牛超<sup>2</sup>, 孔宪华<sup>2</sup>

(1. 焦煤集团教育培训中心, 河南 焦作 454003; 2. 河南机电职业学院机械工程系, 河南 郑州 450002)

**摘要:**目前,对起重机升降系统的研究,基本上将电气系统和机械系统分开研究,或者只是简单的进行链接,很难建立有效、精确的数学模型。针对该问题,分析了起重机升降运动系统各组成部分的关系,建立了起重机升降运动系统机电耦合数学模型,以变量的形式引入了电磁转矩和钢丝绳的弹性系数,避免了单纯从机械系统或电气系统建模而忽略两者之间存在相互影响的缺陷;以负载运动位置作为控制变量,采用基于矢量控制的调速方法对该模型进行了仿真,结果表明,该模型能够较好地反映出起重机升降运动的工作过程。

**关键词:**起重机; 升降运动; 钢丝绳; 机电耦合; 数学模型; 矢量控制; Matlab; Simulink

**中图分类号:**TD633      **文献标识码:**A      **网络出版时间:**2012-08-03 13:42

**网络出版地址:**<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120803.1342.014.html>

### Modeling and Simulation Research of Hoisting System of Crane

YAO Yu-mei<sup>1</sup>, NIU Chao<sup>2</sup>, KONG Xian-hua<sup>2</sup>

(1. Center of Education and Training of Jiaozuo Coal Group, Jiaozuo 454003, China. 2. Department of Mechanical Engineering of Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** At present, research on crane hoisting system are generally done in way of electrical system and in way of mechanical system, or done in way of simple link of electrical system and mechanical system, so it's difficult to establish an effective and precise mathematical model. For the problem, an electromechanical coupling mathematical model of crane hoisting system was built based on analyzing of relationships between all component parts of hoisting system of crane. The model avoids to neglect interrelationship between the electrical system model and mechanical system model through introducing electromagnetism torque and elastic coefficient of ropes as variables. Meanwhile, a simulation test was performed for the model with speed regulation method based on vector control and taking position of load movement as control variable. The simulation result showed that the model preferably reflectes work process of hoisting system of crane.

**Key words:** crane, hoisting movement, steel wire rope, electromechanical coupling, mathematical model, vector control, Matlab, Simulink

### 0 引言

起重机升降运动系统是一个复杂的非线性电控调速系统,若要设计、研制一个品质优良的系统,确定最佳的控制方式,就必须对系统的静态和动态特性进行充分的研究,而建立一个适当的起重机升降

运动系统的数学模型则是研究系统静态和动态特性及控制技术的基础。目前,对起重机升降系统的研究,基本上将电气系统和机械系统分开研究或者只是简单的进行链接,很难建立有效、精确的数学模型<sup>[1]</sup>。针对该问题,本文通过分析起重机升降运动系统各组成部分的关系,将电磁转矩和钢丝绳的弹

收稿日期:2012-03-21

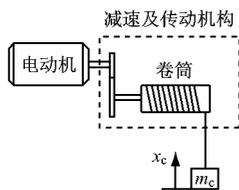
基金项目:河南省基础与前沿技术研究(102300410106)

作者简介:姚玉梅(1983-),女,安徽东至人,助理讲师,研究方向为控制理论与应用。E-mail:315ice@gmail.com

性系数以变量的形式引入到模型中,从而建立了系统的数学模型,将电动机的运动状态和负载的运动状态有效地统一在一起。并以此模型为基础,将负载运动位置作为控制变量,采用基于矢量控制的调速方法对该模型进行仿真,结果验证了模型的正确性。

### 1 起重机升降运动系统

起重机升降运动系统通常包括感应电动机、减速及传动机构、卷筒和制动器等模块,如图 1 所示。电动机转动时通过减速机构带动卷筒一起转动,卷筒转动时缠绕在其上的钢丝绳就会回卷或释放,从而使悬挂于钢丝绳下的重物作上升或下降运动。



$x_c$ —重物的位移;  $m_c$ —负载的质量

图 1 起重机升降运动系统结构

### 2 起重机升降运动系统数学模型的建立

感应电动机作为起重机的动力源,是升降运动系统中的一个重要环节,起重机升降运动系统性能的好坏很大程度上取决于其控制的优劣。早期用于起重机的基于  $U/f$  恒定控制的变频器的原理、控制方法及结构都比较简单,但该方法在低频时由于受电动机定子电阻压降的影响比较明显,输出最大转矩受到限制<sup>[2]</sup>。矢量控制在感应电动机中的应用大大提高了起重机的性能<sup>[3]</sup>,因此,将采用矢量控制的调速系统对起重机升降运动系统进行建模仿真。

#### 2.1 感应电动机在两相静止坐标系 $\alpha-\beta$ 轴下的数学模型

感应电动机电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \\ u_{\alpha r} \\ u_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & Mp & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & Mp \\ Mp & \omega M & R_r + L_r p & \omega L_r \\ -\omega M & Mp & -\omega L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于鼠笼型电动机的转子是短路的,对于绕线式异步电动机,用在变频调速中,其转子也是短路的,因而  $u_{\alpha r} = u_{\beta r} = 0$

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_{\alpha s} \\ \psi_{\beta s} \\ \psi_{\alpha r} \\ \psi_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

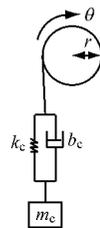
$$T_e = \frac{3n_p M}{2L_r} (\psi_{\alpha r} i_{\beta s} - \psi_{\beta r} i_{\alpha s}) \quad (3)$$

式中:  $i = [i_{\alpha} \ i_{\beta}]^T$ ,  $\psi = [\psi_{\alpha} \ \psi_{\beta}]^T$ ,  $u = [u_{\alpha} \ u_{\beta}]^T$  分别表示  $\alpha-\beta$  轴下电流矢量、磁链矢量和电压矢量;定子各量均用下角标  $s$  表示;转子各量均用下角标  $r$  表示; $\omega$  为转子输出机械角速度; $R_s$  和  $R_r$  分别为定子和转子的电阻; $L_s$ 、 $L_r$  分别是定子和转子的自感; $M$  为定子和转子回路之间的互感; $n_p$  为电动机极对数。

由式(1)~(3)可看出,感应电动机是一个非线性、强耦合的多变量系统,动态特性复杂,因此,对转速和磁链很难进行高性能控制,而矢量控制可以将感应电动机近似等效为直流电动机,其基本思路是以产生相同的旋转磁场为原则,将感应电动机在静止三相坐标系上的定子交流电流通过坐标变换等效成同步旋转坐标系上的直流电流,并分别加以控制,从而实现磁通和转矩的解耦控制,以达到直流电动机的控制<sup>[4]</sup>。

#### 2.2 起重机升降运动系统机械模型

假设不考虑起重机主梁等机械构件的弹性形变所造成的影响,忽略钢丝绳的质量,减速及传动机构的齿轮之间不存在间隙<sup>[5]</sup>,则起重机升降运动系统的等效模型可简化为图 2,其中弹簧、阻尼结构等效为钢丝绳<sup>[6]</sup>。



$k_c$ 、 $b_c$ —钢丝绳及绳头组合的等效刚度和阻尼;

$\theta$ —卷筒的角位移; $r$ —卷筒半径

图 2 起重机升降运动系统简化模型

机械系统的运动微分方程为

$$\begin{aligned} m_c \ddot{x}_c - k_c (\theta r - x_c) + m_c g - b_c (\dot{\theta} r - \dot{x}_c) &= 0 \\ J_m \ddot{\theta} + r k_c (\theta r - x_c) + r b_c (\dot{\theta} r - \dot{x}_c) &= n T_e \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $J_m$  为电动机转子、减速机构、卷筒、重物等等效在卷筒上的转动惯量;  $n$  为齿轮的传动比。

系统中  $k_c = k_1 k_s / (k_1 + k_s)$  是负载运行位置的函数, 其中  $k_s$  为绳头组合的刚度;  $k_1$  为钢丝绳的刚度, 钢丝绳的刚度在运行过程中是随着负载的位置变化的<sup>[7]</sup>, 即

$$k_1 = n_1 n_c EA / L \quad (5)$$

式中:  $n_1$  为钢丝绳运行与负载运行的速度比;  $n_c$  为提升负载的钢丝绳的根数;  $E$  为钢丝绳等效弹性模量;  $A$  为钢丝绳横截面积;  $L$  为钢丝绳的长度。

机械系统方程式(4)和电磁转矩方程式(3)构成了起重机升降运动机械系统和感应电动机之间的耦合关系, 结合式(1)、(2), 导出感应电动机和机械系统的非线性耦合状态方程式

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$x(t) = [x_c \quad \theta \quad \psi_{ar} \quad \psi_{\beta r} \quad i_{as} \quad i_{\beta s} \quad \dot{x}_c \quad \dot{\theta}]^T;$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma L_s} & \frac{-1}{m_c} & 0 \end{bmatrix}^T;$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & u_{as} & u_{\beta s} & m_c g & 0 \end{bmatrix};$$

$$f(x(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\theta} \\ aMi_{as} - \alpha\psi_{ar} - n_p n \dot{\theta} \psi_{\beta r} \\ aMi_{\beta s} - \alpha\psi_{\beta r} + n_p n \dot{\theta} \psi_{ar} \\ -\gamma i_{as} + \alpha\beta\psi_{ar} + n_p \beta n \dot{\theta} \psi_{\beta r} \\ -\gamma i_{\beta s} + \alpha\beta\psi_{\beta r} - n_p \beta n \dot{\theta} \psi_{ar} \\ \frac{1}{m_c} [k_c(\theta r - x_c) + b_c(\dot{\theta} r - \dot{x}_c)] \\ \frac{1}{J_m} [n \frac{n_p L_m}{L_r} (\psi_{ra} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{sa}) - rk_c(\theta r - x_c) - rb_c(\dot{\theta} r - \dot{x}_c)] \end{bmatrix}$$

其中:  $\sigma = 1 - M^2 / (L_s L_r)$  为漏感因子;  $T_r = L_r / R_r$  为转子时间常数;  $\alpha = 1 / T_r$ ;  $\gamma = M^2 R_r / (\sigma L_s L_r) + R_s / (\sigma L_s)$ ;  $\beta = M / (\sigma L_s L_r)$ 。

### 3 仿真研究

本文基于 Matlab/Simulink 建立了起重机升降运动系统的仿真模型, 并对该模型进行了基于感应电动机矢量控制情况下的仿真测试。其仿真模型如图 3 所示, 系统模型参数见表 1。

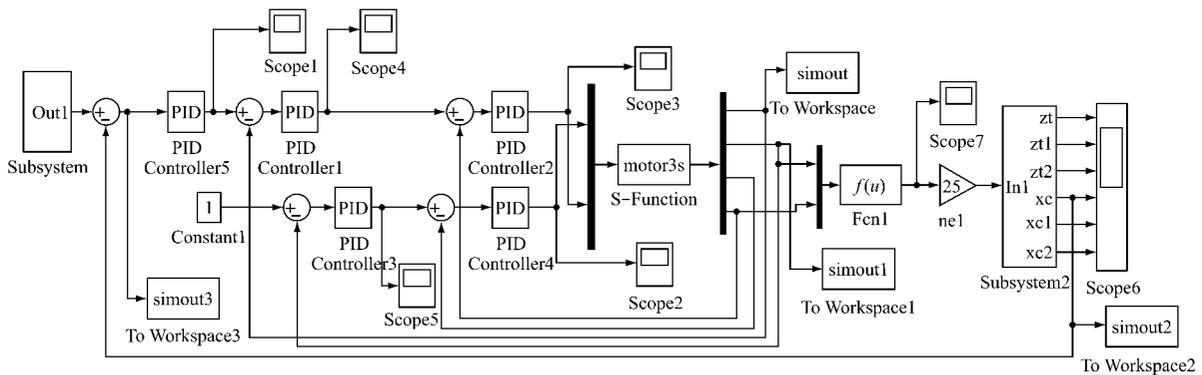


图 3 起重机升降运动系统仿真模型

设位置跟踪给定:  $x_c^* = 5 \sin(\frac{\pi}{10}t - \frac{\pi}{2}) + 5$ , 上升的最大高度为 10 m, 运行时间为 20 s, 其中 0~10 s 为负载上升阶段, 10~20 s 为负载的下降阶段。为了更细致地分析系统的性能, 将仿真实验分为轻载和重载 2 种情况<sup>[5]</sup>, 仿真结果如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可看出, 所建立的系统模型能够较好地反映出起重机升降运动的工作过程。基于感应电动机矢量控制的条件下, 轻载时, 系统跟踪给定信号的精度明显高于重载情况下, 同时钢丝绳弹力对

系统的性能影响不是很明显; 重载时, 系统刚刚运行时, 钢丝绳对系统影响较为明显。从图 5 可以看出, 位置误差曲线存在较为明显的振动, 随着负载的上升, 钢丝绳在变短, 弹力的影响在逐渐减小。

### 4 结语

将感应电动机和机械系统加以耦合, 建立了起重机升降系统的机电耦合数学模型, 同时将钢丝绳的弹性系数以变量的形式引入到模型中, 使系统具有变刚度特性, 从而能更真实地反应系统的运行状

表 1 起重机升降运动系统模型参数

电动机参数		机械系统参数	
定子电感 $L_s/H$	0.035 5	减速箱传动比 $n$	25
转子电感 $L_r/H$	0.031 7	钢丝绳与负载速度比 $n_1$	1
互感 $M/H$	0.034 7	钢丝绳根数 $n_e$	2
定子电阻 $R_s/\Omega$	0.071 2	弹性模量 $E/(N \cdot mm^{-1})$	$1.2 \times 10^5$
转子电阻 $R_r/\Omega$	0.052	绳径 $\varphi/mm$	12
额定功率 $P/kW$	11	钢丝绳的长度 $L/m$	11
额定转速 $/(r \cdot min^{-1})$	1 450	绳头组合刚度 $k_s/(kg \cdot m^2)$	10 000
极对数 $n_p$	2	负载的质量 $m_c/kg$	10~5 000
重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$	9.8	等效阻尼 $b_c/(N \cdot (s \cdot m^{-1}))$	8 000
		等效转动惯量 $J_m/(kg \cdot m^2)$	182
		卷筒直径 $\varphi/mm$	620

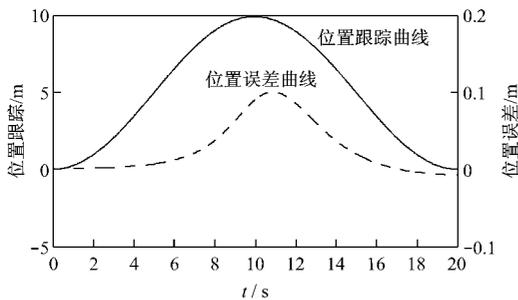


图 4 轻载情况下位置跟踪及误差曲线

况, 仿真结果也验证了该模型的正确性, 为研究起重机升降运动系统的静态和动态特性及控制技术的奠定了良好的基础。

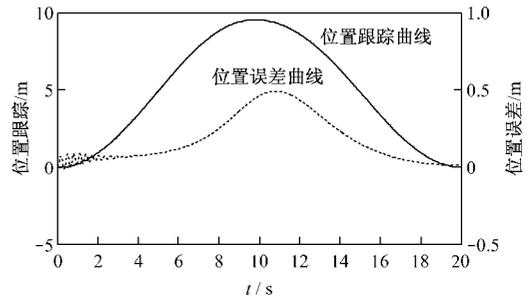


图 5 重载情况下位置跟踪及误差曲线

参考文献:

[1] 韩守习, 张大可. 基于 Simulink 的起重机起升机构动态仿真[J]. 重庆大学学报, 2003(6): 67-73.

[2] 曹玲芝, 王红卫, 李春文, 等. 起重机变频调速控制技术的研究现状及趋势[J]. 微电动机, 2008, 41(3): 62-64.

[3] 张秉松, 王峥. 起重机械两种调速方法的比较[J]. 防爆电动机, 2007(4): 9-11.

[4] BOSE B K. Modern Power Electronics and AC Drives [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

[5] 牛超, 姚玉梅. 起重机升降运动系统自适应 Backstepping 控制研究[J]. 工矿自动化, 2011(9): 67-71.

[6] 王向红, 朱昌明, 杨广全, 等. 电梯系统机电耦合模型仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 2328-2361.

[7] 金卫清, 张惠侨, 郑延军. 电梯机械系统动态特性的建模分析[J]. 机械设计与研究, 1999(3): 53-55.

### Sixnet 军用交换机和 EL326 三层交换机获得安全认证

全球通信、监控和工业自动化控制专家——红狮控制(Red Lion Controls)于 2012-07-09 宣布, 旗下的工业以太网交换机 Sixnet 产品系列和 EL326 三层交换机已获得军用和工业市场的关键认证。2 种 Sixnet 系列军用级以太网交换机——ET-8MG-MIL-1 和 ET-8MS-MIL-1 已被证实能够在高达 150 000 m 的高空环境中工作, 符合军用规格 MIL-STD-810F 的要求。这项测试由位于纽约朗肯科玛(Ronkonkoma)的 Retlif 检测实验室完成。ET-8MS-MIL-1 是一种带有 8 个端口的 10/100 M 快速以太网交换机, 并带有军用风格的 D38999 接头; ET-8MG-MIL-1 是一种带有 8 个端口的千兆位以太网交换机, 带有军用接头。2 种交换机都有托管和非托管的型号。

EL326 三层交换机提供了 24 个千兆位以太网端口, 可选择专用堆叠端口和 10 千兆的上行线路。这些交换机将先进的企业级功能与用于工业环境, 比如变电站、交通控制、铁路和其它重大任务网络的坚固耐用而性能卓越的交换功能相结合。

Sixnet EL326-A0-1 和 EL326-AA-1 三层工业以太网交换机, 已获得“保险商实验室(Underwriters Laboratories, UL)”的 UL 和 C-UL(UL 508, ISA 12.12.01 一大类二分类)的认证。保险商实验室的认证是对产品安全性和合规性的承认, 得到国际上的尊重和认可; 受检产品必须符合这家享有盛誉的检验机构的严格准则。

(Chris Wang)