

矢量控制的带式输送的动力学仿真*

吴启鹏, 方敏

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 采用长距离、大带宽、大运量、高带速的带式输送机输送散装物料已成为带式输送机发展的主流。采用有限元分析法建立输送带的动力学模型, 并采用 Matlab/Simulink 建立具有反馈作用的异步电机矢量控制仿真模块。对建立的带式输送机的动力学数学模型在 Simulink 中建立仿真模型, 构建带式输送机的闭环控制仿真, 以便更真实地反映实际系统。

关键词: 带式输送机; 矢量控制; 动力学仿真

中图分类号: TP271

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)15-0009-04

Vector control of belt conveyor dynamics simulation

Wu Qipeng, Fang Min

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: With long distance, large bandwidth, large capacity, high speed belt conveyor bulk materials has become the mainstream in the development of belt conveyor. This article uses the finite element analysis method to establish the dynamic model of conveying belt, and using Matlab/Simulink establish a feedback effect of vector control induction motor simulation module. On the establishment of belt conveyor dynamic mathematical model based on the Simulink simulation model, construction of belt conveyor the closed-loop control simulation, to truly reflect the actual system.

Key words: belt conveyor; vector control; dynamics simulation

目前, 带式输送机的发展趋势是向安全、稳定、高效、节能、环保的方向发展。如何使带式输送机运行更加平稳, 使生产效率达到最大化是人们关注的内容。

带式输送机的主要组成装置包括环形输送带、托辊、驱动装置、拉紧装置、传动滚筒、改向滚筒等。带式输送机系统是复杂的机电系统, 输送带是决定整体系统动力学现象的主要因素, 是分析系统动态特征的重要部分^[1]。驱动装置的异步电机是一个强耦合多变量系统, 存在高性能上难以控制的关键问题。目前应用最多的方案有: (1) 按转子磁链定向的矢量控制系统; (2) 按定子磁链控制的直接转矩控制系统。按转子磁链定向控制给出了交流电动机的基本解耦控制方法。基于 Matlab 按转子磁链定向矢量控制的交流调速系统仿真, 正确地应用坐标变换模块是建立转子磁链模型的基础。同时, 转子磁链、转矩解耦环节的模型也是仿真的关键因素。

* 基金项目: 国家自然科学基金“大型带式输送系统张力控制关键问题的研究”(61004082)

1 带式输送机有限元力学模型的建立

在建立输送带动力学模型时, 首先做如下基本假设^[2]:

- (1) 胶带物料的横向振动相对于纵向振动而言影响很小, 可忽略不计;
- (2) 不考虑支架、托辊组等的弹性;
- (3) 胶带的结构参数是线性的;
- (4) 缠绕在滚筒上的胶带, 其弹性模量无穷大, 其质量可忽略不计;
- (5) 有载分支物料的质量沿有载分支均匀分布;
- (6) 承载段和回程段的运行阻力在输送带纵向均匀分布, 且模拟摩擦阻力系数与带速呈线性关系;
- (7) 托辊旋转部分的等效质量在承载段和回程段上沿带纵向均匀分布。

本文采用有限元法对带式输送机系统进行建模。图 1 所示为带式输送机有限元动力学模型图。图中, k 为刚度系数, C 为阻尼系数。输送带由承载段和回程段组成。承载段和回程段的托辊间距分别相等, 将承载段、回程

段的皮带分别分成 M 、 N 段, 输送机的总长度为 L 。从机头开始编号, 依次为: $1, 2, \dots, M$; 下分支从尾部开始编号, 依次为 $M+1, M+2, \dots, N+M$ 。依据图 1, 设 F 为驱动装置的驱动力, w 为干扰信号, $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$ 分别为第 i 个单元的位移、速度、加速度。

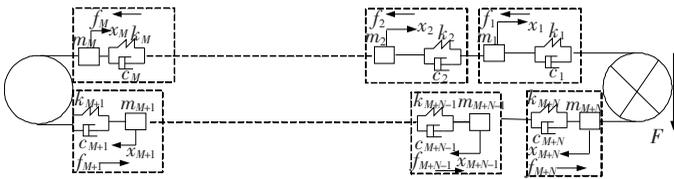


图 1 带式输送机动力学模型

应用拉格朗日方程, 则可列出 $M+N$ 段皮带单元的受力平衡方程式^[3]为:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 &= k_1(x_{N+M} - x_1) - k_2(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_{N+M} - \dot{x}_1) - c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - f_1 \\
 m_2 \ddot{x}_2 &= k_2(x_1 - x_2) - k_3(x_2 - x_3) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - f_2 \\
 &\dots \\
 m_M \ddot{x}_M &= k_M(x_{M-1} - x_M) - k_{M+1}(x_M - x_{M+1}) + c_M(\dot{x}_{M-1} - \dot{x}_M) - c_{M+1} \\
 &\quad (\dot{x}_M - \dot{x}_{M+1}) - f_M \\
 m_{M+1} \ddot{x}_{M+1} &= k_{M+1}(x_M - x_{M+1}) - k_{M+2}(x_{M+1} - x_{M+2}) + c_{M+1}(\dot{x}_M - \\
 &\quad \dot{x}_{M+1}) - c_{M+2}(\dot{x}_{M+1} - \dot{x}_{M+2}) - f_{M+1} \\
 &\dots \\
 m_{M+N-1} \ddot{x}_{M+N-1} &= k_{M+N-1}(x_{M+N-2} - x_{M+N-1}) - k_{M+N}(x_{M+N-1} - x_{M+N}) \\
 &\quad + c_{M+N-1}(\dot{x}_{M+N-2} - \dot{x}_{M+N-1}) - c_{M+N}(\dot{x}_{M+N-1} - \dot{x}_{M+N}) - f_{M+N-1} \\
 m_{N+M} \ddot{x}_{N+M} &= k_{N+M}(x_{M+N-1} - x_{N+M}) - k_1(x_{N+M} - x_1) + c_{N+M}(\dot{x}_{M+N-1} \\
 &\quad - \dot{x}_{N+M}) - c_1(\dot{x}_{N+M} - \dot{x}_1) - f_{N+M} + F
 \end{aligned}$$

将上述方程组写成一般形式:

$$\begin{aligned}
 m_i \ddot{x}_i - c_i \dot{x}_{i-1} + (c_i - c_{i+1} + w_i) \dot{x}_i - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - k_i x_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) x_i \\
 - k_{i+1} x_{i+1} = -f_i F_i
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $i=1, 2, \dots, M+N$; $k_i = \frac{EB}{l_i}$; $c_i = \frac{EB\tau}{l_i}$ 。其中 k_i 、 E 、 B 、 l_i 、 c_i 、 τ 分别为第 i ($i=1, 2, \dots, M+N$) 个单元的等效刚度系数、单位带宽的弹性模量、带宽、长度、单元的等效阻尼系数和流变常数。

$$\begin{aligned}
 m_i &= (q_B + q_C + q_{i0}) \times l_i, (i=1, \dots, 4) \\
 m_i &= (q_B + q_n) \times l_i, (i=5, \dots, 7)
 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, m_i 、 q_B 、 q_C 、 q_{i0} 、 q_n 分别为第 i 个单元的等效质量、单位长度胶带的质量、单位长度物料的质量、承载段单位长度托辊的质量、回程段单位长度托辊的质量。

$$\begin{aligned}
 f_i &= \{f_0 C' l_i g [q_{i0} + (q_B + q_C) \cos\theta]\} \times v_i = f_w \times v_i, (i=1, \dots, 4) \\
 f_i &= \{f_0 C' l_i g (q_n + q_B \cos\theta)\} \times v_i = f_w \times v_i, (i=5, \dots, 7)
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $f_0=0.03$, C' 是与速度有关的系数; f_i 、 g 、 θ 分别为第 i 个单元的运行阻力、重力加速度和皮带倾角。

2 驱动电机的矢量控制仿真模型的建立

异步电机的动态数学模型是一个高阶、非线性、强

耦合的多变量系统, 研究时通常将其做理想性的假设, 将其数学模型进行坐标变换, 对其进行降阶、解耦, 并将其等效成直流电机模型进行控制。矢量控制有按转子磁链定向和定子磁链定向的控制等策略^[4]。按转子磁链定向的矢量控制给出了交流电机的基本解耦控制。

按转子磁链定向的异步电机的数学模型^[5]:

$$T_e = \frac{n_p L_m}{L_r} i_{st} \psi_r \quad (4)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p^2 L_m}{J L_r} i_{st} \psi_r - \frac{n_p}{J} T_L \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_r + \frac{L_m}{T_r} i_{sm} \quad (6)$$

$$\frac{di_{sm}}{dt} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \psi_r - \frac{R L_s^2 + R L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{sm} + \omega_1 i_{st} + \frac{u_{sm}}{\sigma L_s} \quad (7)$$

$$\frac{di_{st}}{dt} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{st} + \omega i_{sm} + \frac{u_{st}}{\sigma L_s} \quad (8)$$

$$\omega_1 - \omega = \omega_s = \frac{L_m i_{st}}{T_r \psi_r} \quad (9)$$

其中, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$; n_p 为交流电动机极对数; L_m 、 L_r 、 L_s 为绕组互感、转子自感和定子自感; i_{st} 、 i_{sm} 为定子电流转矩分量和定子电流励磁分量; ψ_r 、 σ 、 T_r 为转子磁链、漏磁系数和转子电磁时间常数; u_{sm} 、 u_{st} 分别为 M 和 T 轴电压; ω_1 、 ω 、 ω_s 分别为转速、定子频率和转差频率。

由式(6)可得:

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sm} \quad (10)$$

从而可得^[6]:

(1) 转子磁链 ψ_r 仅由定子电流励磁分量 i_{sm} 产生, 与转矩分量 i_{st} 无关。

(2) 电磁转矩 T_e 公式为 i_{st} 与 ψ_r 乘积, 仍旧耦合。

(3) 由直流电机的控制特性可知, 当励磁绕组恒定时, 其电磁转矩只与电机绕组的电流有关。因此, 对于感应电机只要使转子磁链恒定, 即 $\psi_r = \text{Const}$, 此时的电磁转矩 T_e 则与转矩电流分量 i_{st} 成线性关系, 正好符合本仿真控制要求。

图 2 为带转矩内环的转速、磁链闭环的矢量控制系统。转矩内环之所以有助于解耦, 是因为磁链对控制对象的影响相当于一种扰动作用, 转矩内环可以抑制这个扰动, 从而改造整个系统的性能^[7]。

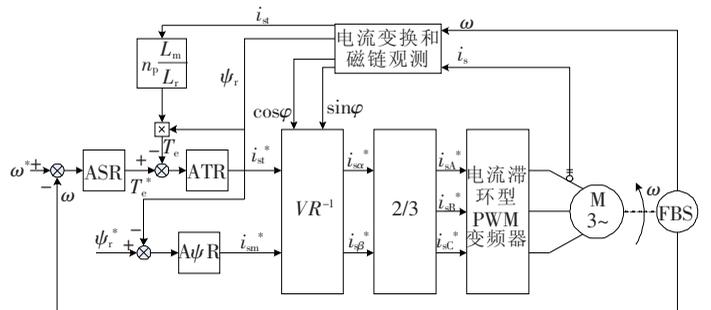


图 2 带转矩内环的转速、磁链闭环的矢量控制系统

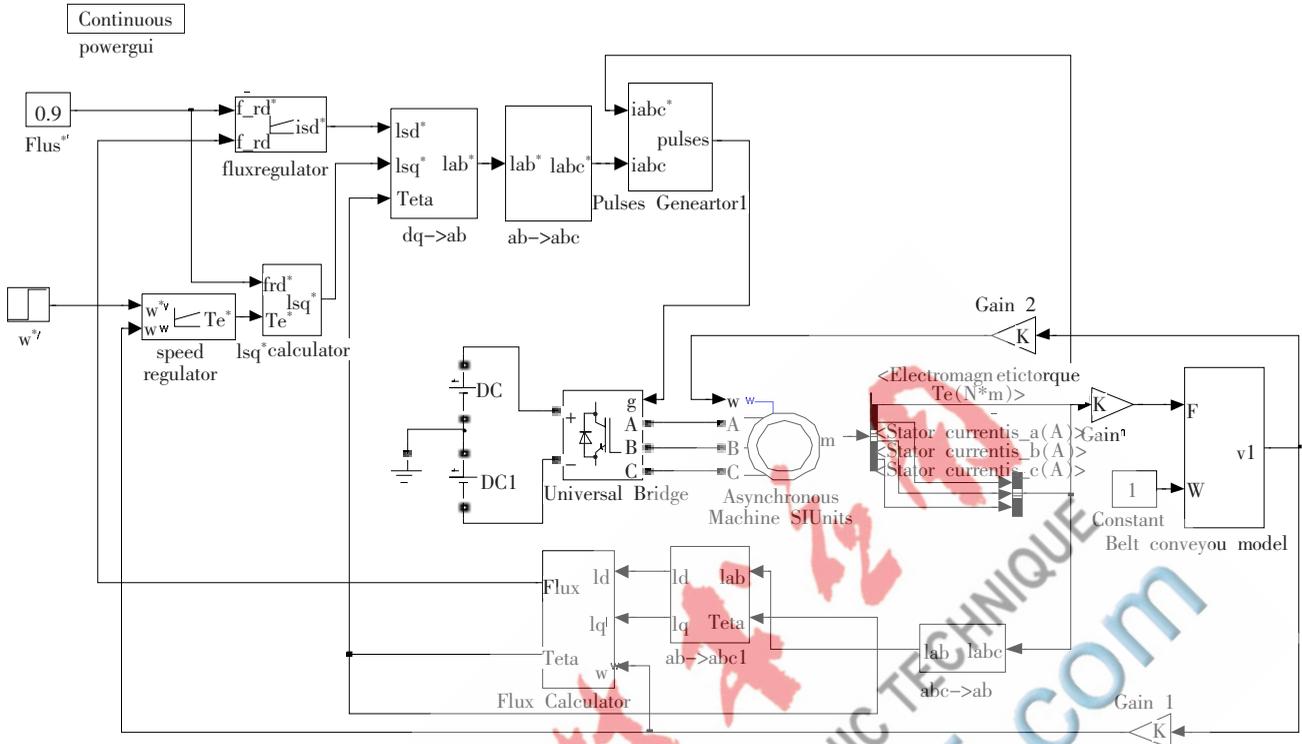


图3 矢量控制的带式输送机动力学仿真

3 系统仿真模型的建立

由异步电机的矢量仿真模块的输出扭矩作为激励, 电动机的输入 ω 为输送带驱动段的速度, 将输送带划分为 20 个单元(上、下分支各为 10), 以输送带的每段的方程在 Simulink 中建立各段的仿真模块作为系统模块, 以输送带给段的速度、加速度、位移作为输出, 建立系统的仿真模型如图 3 所示^[8]。

4 仿真实验

带式输送机的基本仿真参数如表 1 所示。

表 1 参数表

参数	值
每米货物质量/kg	55.6
每米长度的上托辊平均质量/kg	18
每米长度的下托辊平均质量/kg	6
每米胶带的质量/kg	15.2
胶带带宽/m	0.8
单位带宽的弹性模量	65×630×1 000
胶带的延滞时间/s	0.02
承载段胶带段数	4
回程段胶带段数	3
胶带总长度/m	2 000

电动机的型号为 Y-280M-4 型鼠笼式异步电机, 其额定功率为 90 kW。带式输送机的参数用 M 文件进行给定。

以第 1 和 15 段进行分析, 第 1、15 段的加速度、速度和位移分别如图 4~图 9 所示。

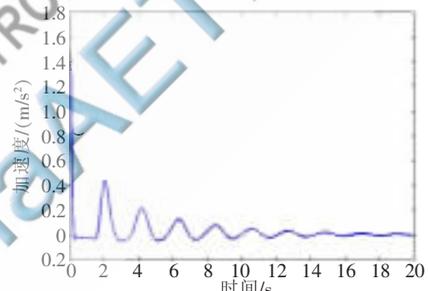


图4 第1段的加速度

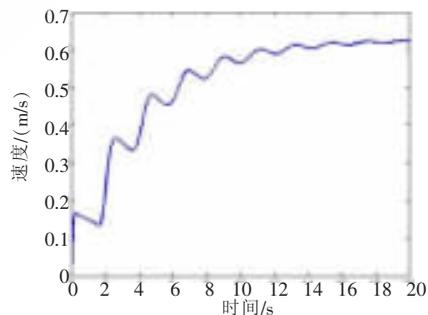


图5 第1段的速度

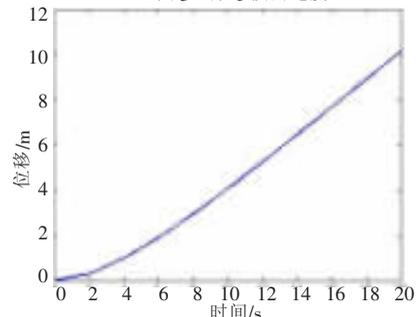


图6 第1段的位移

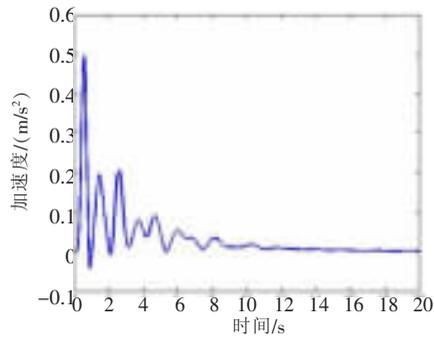


图7 第15段的加速度

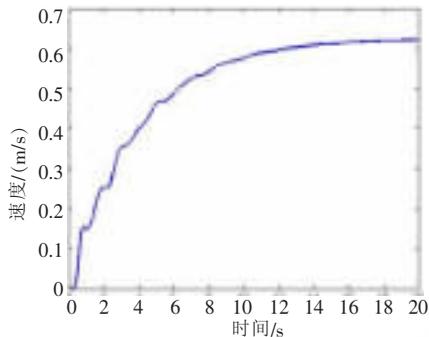


图8 第15段的速度

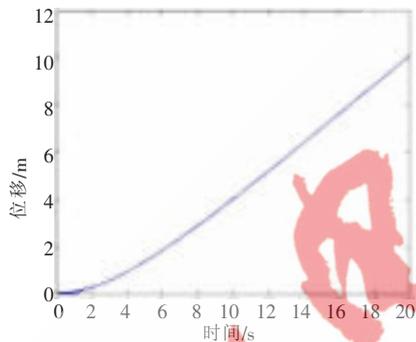


图9 第15段的位移

由仿真结果可知,与实际运行的结果比较符合,仿真可以在任意的时刻计算输送带的所有动态参数(如加速度、位移、速度)。带式输送机的动力学仿真为分析输送带的动态特性和今后继续深入研究张力控制提供了精确的分析手段。

参考文献

- [1] 张媛,周满山,于岩.长距离带式输送机动态特性的分析[J].矿山机械,2005(8).
- [2] HARRLISION A. Simulation of conveyor dynamics [J]. Bulk Solids Handling, 1996,16(1):33-36.
- [3] 李光布.带式输送机的动力学设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [4] 周志刚.一种感应电机的解耦控制方法[J].中国电机工程学报,2003,23(2):21-122.
- [5] 孟庆春,叶锦骄,郭凤仪.异步电动机直接转矩控制系统的改进[J].中国电机工程学报,2005,25(13):118-119.
- [6] 马志源.电力拖动控制系统[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 陈伯时.电力拖动自动控制系统——运动控制系统(第3版)[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [8] 魏巍.MATLAB控制工程工具箱技术手册[M].北京:国防工业出版社,2005.

(收稿日期:2012-04-07)

作者简介:

吴启鹏,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:复杂系统的建模。