

带式输送机闭环特性动态分析与PID控制*

席平原¹ 朱江² 申屠留芳¹

(1. 淮海工学院机械学院, 连云港 222005; 2. 常州信息职业技术学院机电学院, 常州 213164)

【摘要】 带式输送机需要采用动态分析方法进行精确设计。本文选择适用于输送带的粘弹性动力学模型,开发了具有闭环控制的驱动装置仿真模块,电动机的输出扭矩和转速随负载力矩和时间而变化。对整个输送机系统应用仿真软件建立了动力学仿真模型,采用PID控制器对输送机启动过程进行控制,构造闭环控制系统,对带式输送机的动态特性进行分析,从而为输送机启动的分析和控制以及系统的优化设计提供精确的分析手段。

关键词: 输送机 满载启动 闭环PID控制 动力学仿真

中图分类号: TH222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0210-05

Analysis and PID Control on Dynamical Performance of Conveyor Possessing Closed-loop

Xi Pingyuan¹ Zhu Jiang² Shentu Liufang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Changzhou College of Information Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract

With the development of belt conveyor dynamical analysis was required to design conveyor. The viscoelasticity model suiting to the belt was selected, and simulation model of driving device with closed-loop controlling was developed, which indicated that motor speed and its output torque vary with load and time, therefore the simulation results were more close to practice. The dynamic simulation model of overall conveyor system was programmed, and PID controller was applied to stabilize starting process of conveyor, thus the closed-loop controlling system was created in simulation software. The simulation of dynamic performances of conveyor provided accurate design techniques to controlling starting process and optimizing on belts system.

Key words Conveyor, Full-loading starting, Closed-loop PID control, Dynamic simulation

引言

近年来,带式输送机向长距离、高速度、大运量方向发展,使带式输送机面临复杂的动力学及其驱动控制等问题,为了使带式输送机安全可靠地运行,其结构系统必须具有良好的动态特性。在满载启动过程中,输送带中产生大的动张力决定了输送带的各结构件设计强度。传统的设计比较注重静特性计算,而对动特性考虑得比较少,这样在确定输送带的动应力时通常取较大的安全系数,必将造成投资上

的浪费。因此,本文对满载启动过程进行动态分析和控制^[1]。

1 输送带动态仿真模型

1.1 输送带粘弹性动力学模型

在带式输送机运转过程中,输送带受各种大小和性质不同的载荷作用,处在极其复杂的应力状态下。同时输送带的费用约占整个输送机费用的一半,在经济上起着举足轻重的地位。常用的输送带粘弹性动力学模型主要有 Maxwell 松弛模型、Vogit

非松弛模型和三元件固体粘弹性模型,其中 Maxwell 模型能模拟粘弹性材料对应变的响应,而不能模拟对应力的响应;而 Vogit 模型却刚好相反。三元件组合模型虽然能完全模拟材料的粘弹性,但是模型复杂不利于力学分析,况且模型参数依靠测试手段很难得到,目前还没有成熟的方法和测试仪器。考虑到输送机本身的性能特点,高速大运量的输送机配有自动张紧机构能自动补偿输送带的变形,因此可以忽略输送带对应变的响应而只考虑对应力的响应。另外,在使用中要求带芯材料和橡胶不能剥离,即二者的变形要保持一致,这一点正是 Vogit 模型能满足的,而且这种模型的参数也比较容易确定,所以本文将输送带的力学模型简化为一系列的 Vogit 模型的串联形式,如图 1 所示。根据每个带段的力平衡关系得到带段的动力学方程为^[2]

$$m(i)\ddot{x}(i) + w(i)\dot{x}(i) = k(i)[x(i-1) - x(i)] - k(i+1)[x(i) - x(i+1)] + c(i)[\dot{x}(i-1) - \dot{x}(i)] - c(i+1)[\dot{x}(i) - \dot{x}(i+1)] \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中 $m(i)$ ——第 i 个单元的质量
 $k(i)$ ——第 i 个单元的刚度系数
 $c(i)$ ——第 i 个单元的阻尼系数,它反映了输送带、托辊及系统其他部件损失的综合阻尼系数
 $w(i)$ ——第 i 个单元上单位长度的阻力
 $x(i)$ ——第 i 个单元的位移

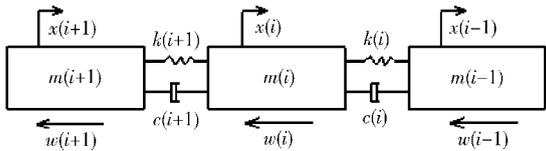


图 1 输送带的粘弹性动力学模型

Fig. 1 Viscoelasticity dynamical model of belt

1.2 输送带仿真模型

本文分析一大型港口中转粮库用于输送粮食的 DT II 800B3-600 型带式输送机,它具有槽形托辊,并倾斜布置,输送倾角 $\beta = 10^\circ$,运送物料的堆积密度 $\gamma = 0.79 \text{ t/m}^3$,生产率 $Q = 500 \text{ t/h}$,采用重锤拉紧装置,带宽 $B = 800 \text{ mm}$,带速 $v = 3 \text{ m/s}$,输送距离 $L = 600 \text{ m}$,电动机型号为 Y280M-4。

将此输送机的输送带划分成 40 个单元,以提高仿真精度,上、下分支各 20 个,每个单元包含的带段相等,各滚筒划在相近的单元中,如图 2 所示。

将输送带动力学模型转换为状态空间表达式

$$\dot{Z} = AZ + Bu \quad y = CZ + Du$$

式中 Z ——状态变量 A ——系数矩阵

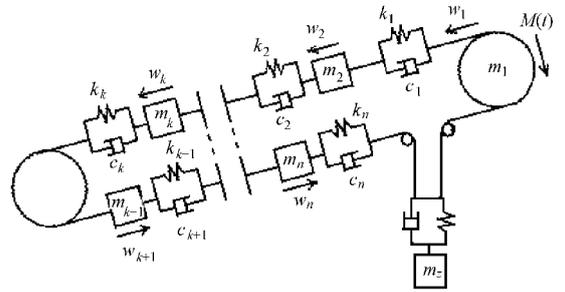


图 2 带式输送机系统的有限元力学模型

Fig. 2 Finite element model of conveyor system

B ——输入矩阵 C ——输出矩阵
 D ——系统传输矩阵
 y ——输出向量 u ——输入向量

应用 Simulink 仿真软件开发输送带状态空间仿真模块,如图 3 所示。为了便于访问该模块将此子系统进行封装^[3]。

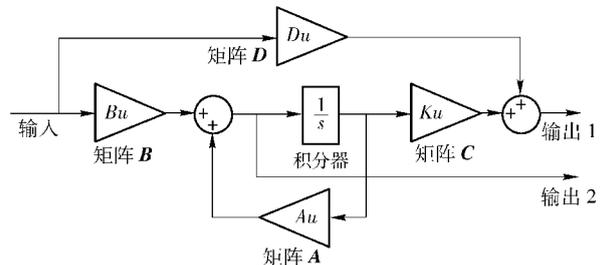


图 3 输送带的状态空间仿真模块

Fig. 3 Simulation model in state space of the belt

2 驱动装置仿真模型的建立

鼠笼电动机的输出扭矩为

$$T = \frac{(2+q)\lambda_m T_n}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + q} \quad (2)$$

式中 q ——与电动机转子电阻有关的系数
 λ_m ——电动机允许的过载倍数
 T_n ——电动机的额定转矩
 s ——电动机的转差率
 s_m ——电动机最大转矩对应的转差率

而电动机转速随负载转矩 T_z 和输出转矩 T 的变化关系为^[4]

$$\frac{J}{38.2} \frac{dn}{dt} = T - T_z \quad (3)$$

式中 J ——折算到电动机轴上的全部飞轮惯量
 n ——转速

在以往的带式输送机动态特性分析时,一般只考虑电动机输出扭矩随转速的变化,而没有考虑电动机转速和输出扭矩都随负载力矩的变化而变化。本文采用 Matlab 仿真软件编写程序,开发了具有闭环控制特性的驱动电动机仿真模块。此模块电动机

的输入信号继承上一个输出信号的采样周期,输出扭矩和转速随负载力矩和时间而变化,真实地反映了驱动装置的动态工作过程^[4-5]。

3 拉紧装置动力学模型

3.1 拉紧装置运动微分方程

输送机采用重锤式拉紧装置,其力学模型如图4所示。

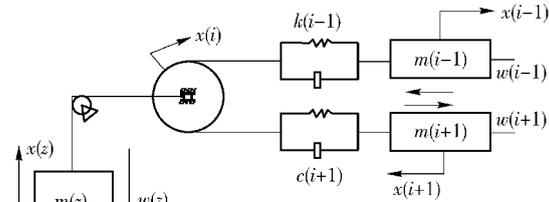


图4 拉紧装置的动力学模型

Fig. 4 Dynamical model of take-up device

根据拉紧装置的受力情况,其离散化动力学方程为^[6-7]

$$m(z)\ddot{x}(z) = k(z)[x(z-1) - 2x(z) + x(z+1)] + c(z)[\dot{x}(z-1) - 2\dot{x}(z) + \dot{x}(z+1)] - w(z) \quad (4)$$

式中 $m(z)$ ——重锤及拉紧装置质量

$w(z)$ ——拉紧装置所在输送带段摩擦阻力

$k(z)$ ——拉紧装置所在输送带段刚度系数

$c(z)$ ——拉紧装置所在输送带段阻尼系数

3.2 拉紧装置仿真模型

拉紧滚筒所在带段的运动特性和整个闭环输送带运动特性一致,在拉紧装置动力学方程中已经考虑到拉紧装置位移,所以把拉紧装置划在相近的单元作为一个带段来考虑,其质量转换为相应带段的等效质量,统一建立状态空间仿真模型。

4 输送机系统仿真模型

4.1 输送机工作过程PID控制

在工程实际中,应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制,简称PID控制,又称PID调节。PID控制器以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。当被控对象的结构和参数不能完全掌握,或得不到精确的数学模型,控制理论的其他技术难以采用时,系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定,这时应用PID控制技术最为方便。为了提高输送机启动过程的稳定性,减少启动时间,降低动张力从而改善系统的动态性能,本文采用PID控制器对输送机启动过程进行控制^[8]。

PID控制器的参数整定是控制系统设计的核心

内容。它是根据被控过程的特性确定PID控制器的比例系数、积分时间和微分时间。本文采用Simulink软件的非线性系统控制设计(NCD)输出模块,接到系统的输出端口,利用NCD模块提供的数值优化算法,用图形的方式来设计最优的PID控制器的参数。

4.2 输送机整机仿真模型建立

闭环输送带和拉紧装置的仿真模型中,将驱动装置的驱动力作为激励力,按照影响系数法可列出输送机整机的动力学方程

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + (c_1 + c_n + w_1)\dot{x}_1 - c_1\dot{x}_2 - c_n\dot{x}_n + (k_1 + k_n)x_1 - k_1x_2 - k_nx_n = F_1(t) \\ m_2\ddot{x}_2 - c_1\dot{x}_1 + (c_1 + c_2 + w_2)\dot{x}_2 - c_2\dot{x}_3 - k_1\dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_2 - k_2x_3 = F_2(t) \\ \vdots \\ m(z)\ddot{x}(z) = k(z)[x(z-1) - 2x(z) + x(z+1)] + c(z)[\dot{x}(z-1) - 2\dot{x}(z) + \dot{x}(z+1)] - w(z) \\ m_n\ddot{x}_n - c_{n-1}\dot{x}_n + (c_{n-1} + c_n + w_n)\dot{x}_n - c_n\dot{x}_1 - k_{n-1}x_{n-1} + (k_{n-1} + k_n)x_n - k_nx_1 = F_n(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 F_1, F_2, \dots, F_n ——第1, 2, ..., n单元驱动力

驱动装置仿真模块的输出扭矩作为输入,输送带和拉紧装置的状态空间模块作为系统模块,带式输送机系统中各点的位移、速度、加速度和动张力作为输出,另外以电动机两侧带段的张力差产生的力矩作为电动机模块的负载力矩,调用PID控制模块,形成闭环控制系统,建立整个输送机系统的仿真模型,如图5所示^[9]。

5 仿真结果和实验验证

本系统的方程为刚性方程,故采用适用于刚性方程的变步长ODE15S仿真算法求解。ODE15S算法是在数值积分基础上可变阶数的多步算法,能够根据模型特性自动调整步长。另外此算法采用标准局部误差控制方法来监控每一个时间步的误差,因此特别适用求解刚性方程,可以提高仿真的速度和精度。通过合理设置仿真模型的输入输出参数,运行诊断参数以及一些高级设置选项等运行仿真模型,得到仿真结果如图6~9所示。由仿真结果可知,输送机启动后带速急剧变化,最大加速度迅速增大到15.45 m/s²,经几次波动大约38 s时带速逐渐平稳。启动后驱动滚筒承载段(单元1)带张力急剧增大达最大值89 275 N,经几次波动大约37 s时带张力逐渐平稳,这样输送机启动瞬间驱动滚筒承载

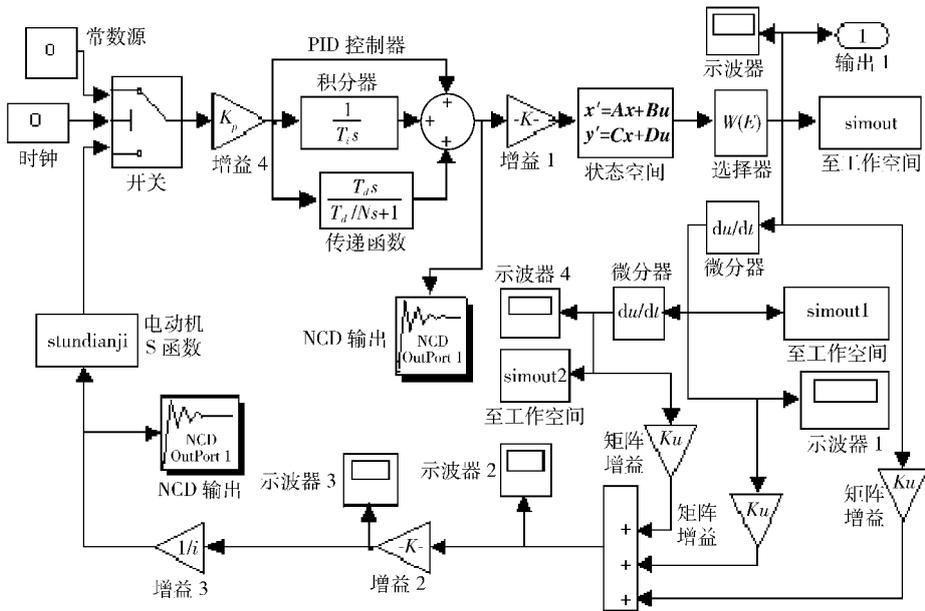


图 5 具有闭环 PID 控制的输送机整机仿真模型

Fig. 5 Simulation model of conveyor system with PID controller

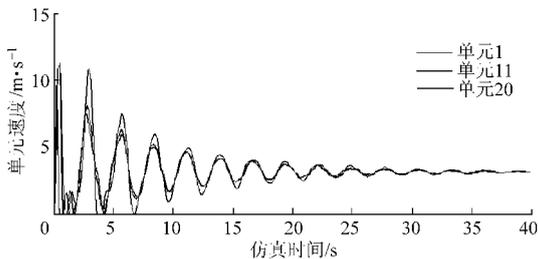


图 6 单元 1、11、20 速度随时间变化曲线

Fig. 6 Velocity curves of unit 1, 11, 20

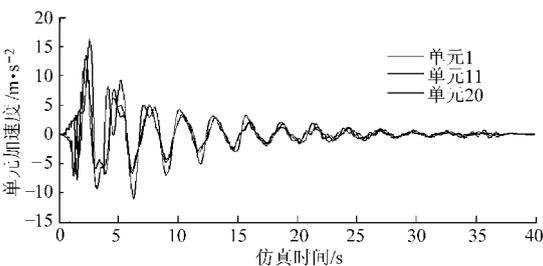


图 7 单元 1、11、20 加速度随时间变化曲线

Fig. 7 Acceleration curves of unit 1, 11, 20

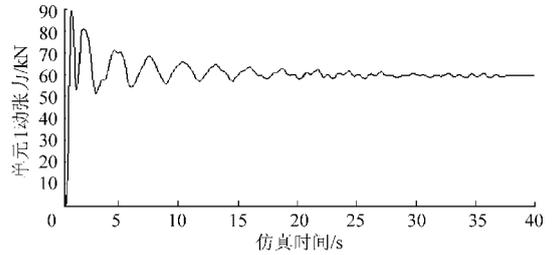


图 8 单元 1 (驱动滚筒处) 动张力随时间变化曲线

Fig. 8 Tension curve of unit 1 (on take-up pulley)

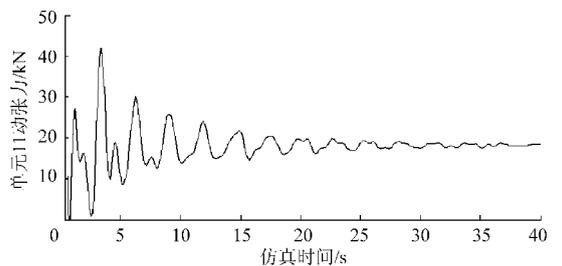


图 9 单元 11 (拉紧滚筒处) 动张力随时间变化曲线

Fig. 9 Tension curve of unit 11 (on drive pulley)

段张力远远高于静张力。

采用 KJC-Ⅱ型矿用机电设备综合测试仪对输送机动态参数进行测试, 分别测得了驱动滚筒处和

拉紧滚筒处输送带的速度、加速度和动张力。表 1 是实测与仿真结果的对比, 表中的实测数据是几次实测的平均值, 仿真过程和实验测试结果基本一致。

表 1 输送机启动过程的仿真结果与实验数据的对比

Tab. 1 Parameters comparison between simulation and experiment

数据来源	单元 1 (驱动滚筒处)			单元 11 (拉紧滚筒处)			稳定时间/s
	最大速度 /m·s ⁻¹	最大加速度 /m·s ⁻²	最大动 张力/N	最大速度 /m·s ⁻¹	最大加速度 /m·s ⁻²	最大动 张力/N	
实验数据	7.81	5.59	94 605	7.64	5.26	45 706	36.75
仿真结果	7.69	5.45	92 751	7.29	5.15	43 862	38.03

6 结束语

通过建立适用于输送带的粘弹性动力学模型,由启动过程仿真模型可计算启动情况下任意时刻输送带任意截面的速度、加速度和动张力等动态参数,并绘出上述参数随时间的变化曲线。通过对带式输

送机动态特性的分析,采用PID控制器对输送机启动过程进行控制,可以对其启动过程进行合理控制,从而达到平稳启动和减小动张力的目的,以降低输送机研制生产费用,减少运行故障,提高其运行的效率和可靠性。

参 考 文 献

- 1 李光布. 带式输送机动力学及设计[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- 2 宋伟刚. 通用带式输送机设计[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- 3 薛定宇,陈阳泉. 基于 MATLAB-Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- 4 Hallac A, Metaxas A C. Modelling of industrial conveyerized applicators using higher order vector finite elements[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2006, 40(2): 101 ~ 108.
- 5 Ghayesh M H, Khadem S E. Non-linear vibration and stability analysis of a partially supported conveyor belt by a distributed viscoelastic foundation[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 27(1): 17 ~ 32.
- 6 Vladimir S S. Simulation and optimization of belt conveyor system with merging-splitting configuration[C] // Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Optimization, 2004.
- 7 席平原,李耀明,申屠留芳. 具有反馈环节的带式输送机动力学仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 207 ~ 210.
- 8 Moradi M H. New techniques for PID controller design[C] // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, vol. 2. New York: IEEE Press, 2003: 903 ~ 908.
- 9 席平原,申屠留芳. 用神经网络的带式输送机启动过程有限元分析[J]. 辽宁工程科技大学学报, 2007, 26(5): 761 ~ 763. Xi Pingyuan, Shentu Liufang. Finite element analysis of belt conveyor during starting based on neural network[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(5): 761 ~ 763. (in Chinese)

华人科学家孙大文获两项欧盟项目资助

欧盟第七框架计划公布了2010年度受理项目的评审结果,国际著名食品工程专家、国际农业工程委员会(CIGR)候任主席、爱尔兰皇家科学院院士、都柏林大学(UCD)终身教授、华人科学家孙大文(Da-Wen Sun)喜获两项欧盟第七框架计划项目资助,获得近100万欧元的项目经费支持。

欧盟第七框架计划(7th Framework Programme,简称FP7)是当今世界上最大的官方重大科技合作计划,它以研究国际前沿和竞争性科技难点为主要内容,具有研究水平高、涉及领域广、投资力度大、参与国家多等特点。该计划项目申请竞争非常激烈,平均申请成功率为15%左右。此次,孙大文教授递交的三项项目全部通过了评审,其中有两项获得立项资助。

获得资助的两项项目中,一项是将孙大文教授开发的熟肉制品真空超快速冷却技术进行工业化成果转化。该技术首次采用了冷却机理完全不同的真空冷却方法,以蒸发相变的传热过程取代传统方法中以热传导传热模式为主的传热过程,从而获得极其明显的超快速冷却效果。另一项是在孙大文教授的超声波过程强化技术基础上发展起来的。他首次将超声波技术应用于食品冻结过程中加速冰核和控制冰晶体的形成与分布,从而在冻结过程中快速获得了细胞内外大小均等的细小冰晶分布,达到减少能耗、增加冷冻效率和提高产品质量的目的。新项目将使用超声波技术改变葡萄酒成分的相互作用,强化加速葡萄酒的陈酿过程,从而在很短时间内使葡萄酒达到自然陈酿的酒体和风味。孙大文教授将联合几个国家的科研单位和中小型企业尽快实现科技成果的产业化,促进中小型企业对创新科技产品的研发及新市场的开发,提升整体竞争力。