

带式输送机软起动的速度控制特性分析

李文华, 张鑫

辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁阜新 123000

摘要 分析带式输送机直接起动速度不稳定的机理, 指出额外提供加速度所需的动转矩是造成起动不稳定的主要根源。应用液体黏性软起动装置, 可保证起动稳定性, 根据软起动装置工作原理, 提出采用局部线性化处理, 建立软起动装置的数学模型, 并求解其传递函数。针对系统中参数的摄动和不确定性, 设计了一种模糊 PID 控制器。利用其参数自整定功能来保证调速系统的稳定性。应用 Matlab 中的 Simulink 工具箱进行仿真实验。结果表明, 当系统传递函数发生变化时, 模糊 PID 控制效果很好, 适应能力很强, 响应较快, 鲁棒性好, 保证了系统的调速特性。

关键词 液体黏性软起动; 数学模型; 模糊 PID; 自整定

中图分类号 TP273⁺.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.20.006

Speed Control Characteristics for the Soft Starting of Belt Conveyor

LI Wenhua, ZHANG Xin

School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

Abstract The mechanism of speed instability involving belt conveyor directly starting is analyzed, that the dynamic torque needed for additional acceleration is the main reason for starting instability is pointed out. By applying the hydro-viscous soft starting device to the starting of belt conveyor is able to ensure starting stability. According to the working principle of soft starting device, through the local linear processing, the mathematical model of soft starting device is built, and its transfer function is solved. Aiming at the perturbations and uncertainty of system parameters, a method of fuzzy PID controller is designed. The stability of the speed regulation system is ensured by using the self-tuning function. The simulink toolbox of Matlab is used to conduct the simulation experiment. The results show when the system transfer function changes, the fuzzy PID has a better adaptive capacity, faster response, better robustness, and is able to assure that the system obtains good speed regulation characteristics.

Keywords hydro-viscous soft starting; mathematical model; fuzzy PID; self-tuning

0 引言

随着中国对一些中小煤矿的兼并重组, 大型煤矿建设越来越多。由于煤矿井下运输巷道空气湿度大、空间狭小, 大多情况下煤矿输送装置采用带式输送机作为运输工具。伴随着机械制造、电机、化工和冶金工业等技术进步的影响, 带式输送机也在不断完善, 使它成为现代物料搬运系统机械化和自动化不可缺少的重要组成部分, 且广泛应用于现代化的各种工业企业中, 如矿山的井下巷道、矿井地面运输系统、露天采矿场及选矿厂中。对于带式输送机的起动情况可分为直接起动和软起动。从当前技术水平来说, 直接起动的确是最廉价的方法, 但并不是最优的起动方法; 而软起动提供可控起车、可控停车、过载保护、功率平衡、空载起动、检验带速

等优越性。

1 软起动在带式输送机上的应用

图 1 为带式输送机直接起动时带面应力的分布情况, 其中 F 为皮带表面应力, F_{m1} 为紧边表面应力峰值, F_1 为紧边表面应力最小值, F_{m2} 为松边表面应力峰值, F_2 为松边表面应力最小值; B_1, B_2 为应力峰值下降时间。可见带面应力分布明显不均, 存在尖峰载荷, 这将对整个带式输送机产生较大的冲击^[1]。同时, 也可看出起动时, 电动机输出的转矩也较大, 然后逐渐趋于正常, 这样对电网, 电气元件也产生较大冲击^[2]。其原因是, 当电动机直接起动时, 除了要提供负载运行所需的静力矩外, 还需额外提供产生加速度所需要的动力矩, 加速度越大, 起动时的动力矩也越大, 对机械系统和电气系统的冲击

收稿日期: 2012-12-26; 修回日期: 2013-04-16

作者简介: 李文华, 教授, 研究方向为机电液一体化、电液伺服控制系统设计, 电子信箱: llnet88@163.com

也越大。同时满载起动还可能造成皮带与滚筒打滑,影响输送机寿命。因此,减小设备的起动加速度、控制设备的速度,是解决设备起动的关键问题。而液体黏性软起动装置是一种可控的软起动,它安装在电动机与减速器之间,依靠液体黏性剪切力传递转矩,从而实现电机空载起动,能够提供可控的、平滑的、无冲击的起动力矩,以减小机械冲击,且能够实现过载保护。

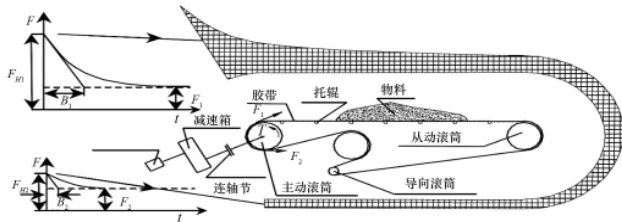


图1 带式输送机直接起动时带面应力分布
Fig. 1 Surface stress distribution while belt conveyor directly starting

2 软起动数学模型的建立

若分析软起动装置的调速稳定性,首先应建立软起动的数学模型^[4-6],然后确定其转动稳定区域。液体黏性软起动装置影响剪切力因素:主动摩擦片角速度、从动摩擦片角速度、润滑油黏度、控制油缸压力,其中主动摩擦片角速度是电机提供的,润滑油经过冷却器后,其温度基本保持不变,其黏性也大致不变。所以切应力只与从动摩擦片角速度和控制油液的压力有关。

故设其函数表达

$$\tau = f(\omega_2, p) \quad (1)$$

式中, τ 为主、从动摩擦片之间的剪切应力,MPa; ω_2 为从动摩擦片的角速度,rad/s; p 为控制油缸的压力,MPa。

软起动装置所传递的转矩为

$$M = n \int_{R_1}^{R_2} \tau \cdot 2\pi r^2 dr = n \int_{R_1}^{R_2} f(\omega_2, p) \cdot 2\pi r^2 dr \quad (2)$$

式中, n 为油膜数; R_1 为主、从动摩擦片的接触面内径,m; R_2 为主、从动摩擦片的接触面外径,m。

故 $M = F(\omega_2, p)$ 为软起动装置的外特性表达式。

设在其工作区域 $a(p_a, \omega_{2a}, M_a)$ 点,可求 a 点附近线性化的数学模型。

$M = F(\omega_2, p)$, ($N \cdot m$) 在 a 点按泰勒级数展开,设 $\Delta M = M - M_a$; $\Delta p = p - p_a$; $\Delta \omega_2 = \omega_2 - \omega_{2a}$, 省略二阶无穷小。可得

$$\Delta M = \frac{\partial F}{\partial p} \Delta p + \frac{\partial F}{\partial \omega_2} \Delta \omega_2 \quad (3)$$

将 $K_{pa} = \left. \frac{\partial F}{\partial p} \right|_{p=p_a, \omega_2=\omega_{2a}}$ $K_{\omega a} = \left. \frac{\partial F}{\partial \omega_2} \right|_{p=p_a, \omega_2=\omega_{2a}}$ 代入式(3)得

$$\Delta M = K_{pa} \Delta p + K_{\omega a} \Delta \omega_2 \quad (4)$$

式中, K_{pa} 为 a 点的转矩的压力增益; $K_{\omega a}$ 为 a 点的转矩的转速增益。

设负载转矩 M_1 与从动轴转速 ω_2 之间的关系为

$$M_1 = F_1(\omega_2) \quad (5)$$

则在 a 点附近有

$$\Delta M_1 = \frac{\partial F_1}{\partial \omega_2} \Delta \omega_2 \quad (6)$$

$$\text{令 } K_{\omega a} = \left. \frac{\partial F_1}{\partial \omega_2} \right|_{\omega_2=\omega_{2a}}$$

其中, $K_{\omega a}$ 为 a 点负载系数,则 $\Delta M_1 = K_{\omega a} \Delta \omega_2$

设负载的转动惯量为 J , 则有

$$\Delta M = J \frac{d\Delta \omega_2}{dt} + \Delta M_1 = J \frac{d\Delta \omega_2}{dt} + K_{\omega a} \Delta \omega_2 \quad (7)$$

对式(7)进行拉氏变换得

$$\Delta \omega_2 = \frac{1}{JS + K_{\omega a}} \Delta M \quad (8)$$

其中, S 为复频率。

p 由电液比例阀控制,电液驱动系统近似为一个一阶惯性环节,在 a 点增量的传递函数为

$$\Delta p = \frac{K_1}{T_1 S + 1} \Delta U \quad (9)$$

式中, ΔU 为输入信号增量; K_1 为电液驱动系统的放大倍数; T_1 为电液驱动系统的时间常数。

综上,得到软起动系统传递函数方块图(图2)。其中, K_p 为软起动转矩的压力增益; K_{ω} 为软起动转矩的转速增益; $K_{\omega a}$ 为负载系数; ΔU 为输入信号的增量; ΔM 为输入转矩的增量。

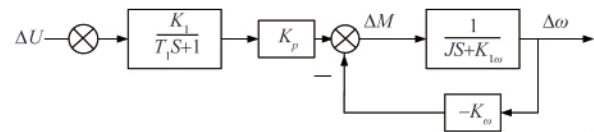


图2 软起动系统传递函数方块图

Fig. 2 Block diagram of soft starting system transfer function

根据图2所示的软起动系统传递函数方块图,建立系统的传递函数为

$$G(S) = \frac{K_1 K_p}{JT_1 S^2 + JS + (K_{\omega a} - K_{\omega}) T_1 S + K_{\omega a} - K_{\omega}} \quad (10)$$

其中, K_p 、 K_{ω} 是变化的,在不同工作点数值不同,同时软起动装置还具有一定滞后性,当系统传递函数发生变化时,常规PID很难满足系统的动态特性和静态特性,适应能力较弱。因此需要PID控制器根据软起动系统参数变化而时刻调整控制参数,故采用参数自整定模糊PID控制,满足软起动装置要求。

3 模糊PID控制器的设计

模糊控制器以西门子S7-200PLC为硬件的核心,用欧姆龙增量型旋转编码器来检测速度信号,对减速器输入端转速进行实时检测,PLC将反馈的速度信号和设定值进行比较,得到的偏差值 e 和偏差变化率 $e_c (de/dt)$ 作为输入,对软起动系统进行控制^[3,7]。模糊控制器的输入变量为 e 和 $e_c (de/dt)$, 输出

变量为 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$, 分别是 K_p, K_I, K_D 的修正参数(图 3)。

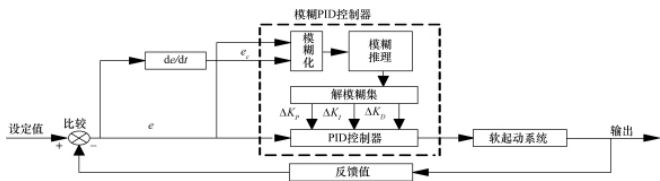


图 3 模糊 PID 控制系统

Fig. 3 Fuzzy PID control system

3.1 模糊化

根据实际经验,取输入量偏差的论域为 $[-1.5, +2.5]$;偏差

变化率的论域为 $[-0.6, +0.4]$;输出量 ΔK_p 的论域为 $[-3, +3]$; ΔK_I 的论域为 $[-1, +1]$; ΔK_D 的论域为 $[-3, +3]$ 。设 5 者模糊论域均为 $[-6, +6]$, 其中 e 的量化因子 $12/4=3$; e_c 的量化因子 $12/1=12$; 输出量 ΔK_p 的比例因子 $3/6=0.5$; ΔK_I 的比例因子 $1/6=0.16667$; ΔK_D 的比例因子 $3/6=0.5$ 。设输入和输出变量的模糊子集为{正大,正中,正小,零,负小,负中,负大}。并且简记为: $\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ 。并建立与之对应的模糊集的隶属函数,输入量 e, e_c 及输出量 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 采用高斯隶属函数。

3.2 模糊控制规则表

根据参考文献[7]建立参数调整规则,创建模糊控制规则表(表 1)。即当 e 取 NB (负大), e_c 取 NB (负大)时,输出量 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 取 PB, NB, PS (正大、负大、正小)。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 List of fuzzy control rules

$\Delta K_p/\Delta K_I/\Delta K_D$	e							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
e_c	NB	$PB/NB/PS$	$PB/NB/NS$	$PB/NM/NB$	$PM/NM/NB$	$PS/NS/NB$	$ZO/ZO/NM$	$ZO/ZO/PS$
	NM	$PB/NB/PS$	$PB/NB/NS$	$PM/NM/NB$	$PS/NS/NM$	$PS/NS/NM$	$ZO/ZO/NS$	$NS/ZO/ZO$
	NS	$PM/NB/ZO$	$PM/NM/NS$	$PM/NS/NM$	$PS/NS/NM$	$ZO/ZO/NS$	$NS/PS/NS$	$NS/PS/ZO$
	ZO	$PM/NM/ZO$	$PM/NM/NS$	$PS/NS/NS$	$ZO/ZO/NS$	$NS/PS/NS$	$NS/PM/NS$	$NM/PM/ZO$
	PS	$PS/NM/ZO$	$PS/NS/ZO$	$ZO/ZO/ZO$	$NS/PS/ZO$	$NS/PS/ZO$	$NM/PM/ZO$	$NM/PB/ZO$
	PM	$PS/ZO/PB$	$ZO/ZO/NS$	$NS/PS/PS$	$NM/PS/PS$	$NM/PM/PS$	$NM/PB/PS$	$NB/PB/PB$
	PB	$ZO/ZO/PB$	$ZO/ZO/PM$	$NM/PS/PM$	$NM/PM/PM$	$NM/PM/PM$	$NB/PB/PS$	$NB/PB/PB$

共有 49 条控制规则, 其中 e 和 e_c 为输入, $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 为输出。控制规则为:if (e is $a1$) and (e_c is $b1$) then (ΔK_p is $c1$) (ΔK_I is $d1$) (ΔK_D is $e1$)。本系统采用 Matlab 默认的

Mamdani 的模糊决策推理方法, 并且根据表 1 建构模糊控制规则表,对系统进行控制。图 4 为模糊控制器输出的参数控制曲面。

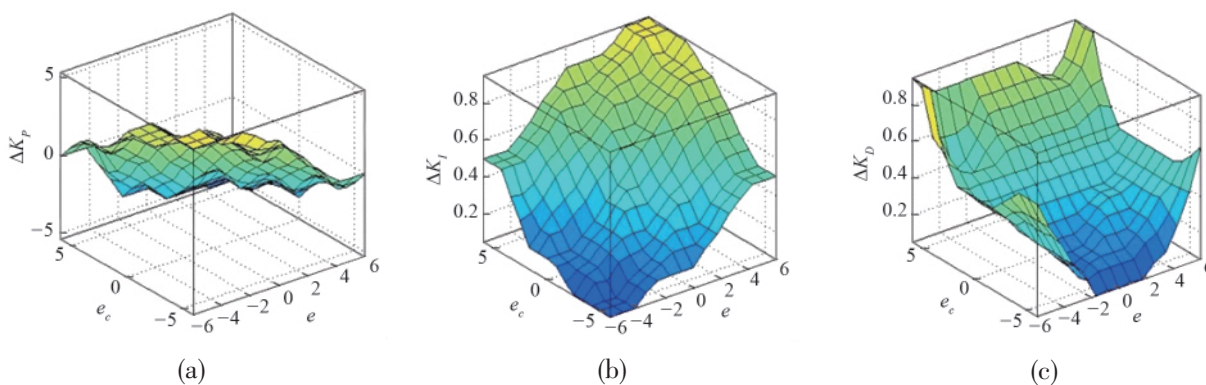


图 4 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的输出曲面
Fig. 4 Output curved surfaces of $\Delta K_p, \Delta K_I$ and ΔK_D

4 实验仿真及分析

利用 Matlab 的 Simulink 工具箱和 Fuzzy 模块, 构建动态系统, 进行模型建立、仿真、分析, 由于液体黏性软启动装置在实际应用中具有一定的时滞性, 并且其传递函数中的参数是随时间的推移而变化的, 设 t_1 时刻软启动系统的传递函数

为 $G_1(S)$, 则 $G_1(S) = \frac{1.93}{S^2 + 4.48S + 2.89} e^{-2S}$; 经过一段时间, 此时为 t_2 时刻, 其传递函数为 $G_2(S)$, 则 $G_2(S) = \frac{1.8}{S^2 + 3.46S + 2.73} e^{-2S}$ 。
PID 控制器初始参数: $K_p^0 = 1.0600, K_I^0 = 0.4553, K_D^0 = 0.7532$ 。

图 5 为 Matlab 建模仿真控制图, 图 6 为实验仿真曲线, 实验仿真曲线 C_1 、 C_2 代表模糊 PID 控制作用下的软起动传递函数 $G_1(S)$ 、 $G_2(S)$ 的阶跃响应。观察两组响应曲线, 可以得出以下实验结果: 当系统传递函数发生改变时, 模糊控制系统

会自动整定控制参数, 适应系统的变化, 并且可以明显看出, 当传递函数发生变化时, 响应曲线的波动、稳定时间变化不大; 上升时间、超调量基本不变。

仿真结果表明, 采用模糊 PID 的软起动系统控制效果非

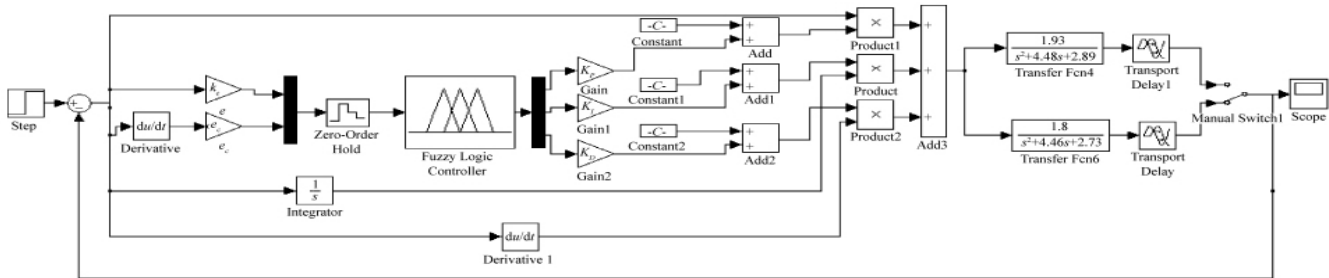


图 5 Matlab 建模仿真控制图

Fig. 5 Modeling and simulation of control chart with Matlab

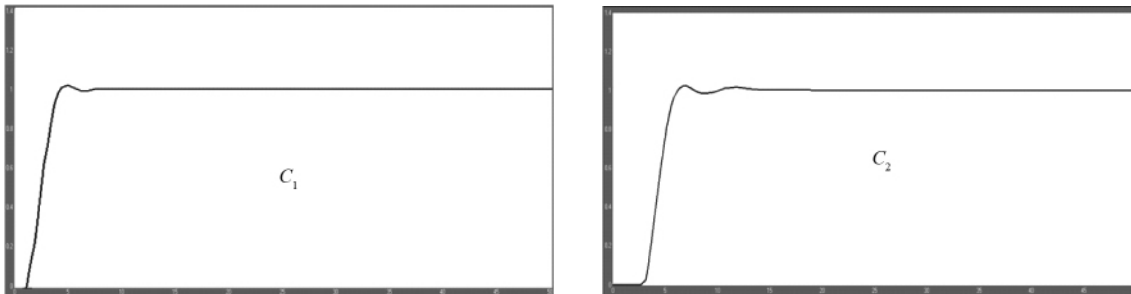


图 6 实验仿真曲线

Fig. 6 Experimental simulation curves

常好, 当系统传递函数变化后, 模糊 PID 控制能够尽快优化控制参数, 保证了系统的响应速度, 减小系统的超调量和振荡, 模糊 PID 自适应能力较强, 动态性能好, 鲁棒性好, 保证了系统的稳定工作, 使系统的调速性较好, 有利于减轻带式输送机起动时带来的附加冲击。

5 结论

本文通过局部线性化处理建立液体黏性速度控制的数学模型, 求解传递函数, 并对软起动系统进行仿真分析, 可得到如下结论。

(1) 在不考虑系统带有一定滞性的情况下, 系统为二阶系统; 考虑时滞环节时, 系统为二阶时滞系统。

(2) 当传递函数经过一段时间后, 由 $G_1(S)$ 变为 $G_2(S)$, $G_1(S)$ 的最大超调量为 1.76%, $G_2(S)$ 的最大超调量为 1.93%, 二者的超调量都很小, 说明控制效果较好。

(3) $G_1(S)$ 与 $G_2(S)$ 的峰值时间相差 1.8s, 上升时间相差 3.2s, 考虑到传动函数的变化为连续变化, 故本控制系统的品质指标很好, 针对大功率带式输送机的软起动过程, 具有较好的调速效果。

参考文献 (References)

[1] 龚永南, 程俊峰, 黎明柱. 皮带输送机混合型重载软起动方法的研究

[J]. 中国电机工程学报, 2006, 16(2): 159-162.

Gong Yongnan, Cheng Junfeng, Li Mingzhu. Proceeding of the CSEE, 2006, 16(2): 159-162.

[2] 李保春. 带式输送机软起动装置的分析、比较和应用[J]. 煤矿机械, 2004, 25(9): 94-96.

Li Baochun. Coal Mine Machinery, 2004, 25(9): 94-96.

[3] 侯勇严, 孙瑜, 郭文强. 一种自适应模糊 PID 控制器的仿真研究[J]. 陕西科技大学学报, 2004, 22(2): 48-52.

Hou Yongyan, Sun Yu, Guo Wenqiang. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2004, 22(2): 48-52.

[4] 张以都, 张启先. 液体粘性软启动传动装置的研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 658-662.

Zhang Yidu, Zhang Qixian. Journal of China Coal Society, 1998, 23(6): 658-662.

[5] 陈宁, 邱敏秀. 液体粘性软启动装置启动平稳性研究[J]. 中国机械工程, 2005(16): 1471-1473.

Chen Ning, Qiu Minxiu. China Mechanical Engineering, 2005(16): 1471-1473.

[6] Ogata K. 现代控制工程[M]. 卢伯英, 于海勋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.

Ogata K. Modern control engineering [M]. Lu Boying, Yu Haixun, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.

[7] 廖宗凡. 模糊 PID 参数自整定技术及其在中央空调系统中的应用[J]. 可编程控制器及工厂自动化(PLC&FA), 2006(10): 131-138.

Liao Zongfan. Programmable Controller & Factory Automation (PLC&FA), 2006(10): 131-138.

(责任编辑 吴晓丽)