

基于 DTC 的大倾角带式输送机控制系统设计

汝长青

(煤炭科学研究院 上海研究院, 上海 200030)

摘要: 针对 28°以上倾角的带式输送机启动加速度过大易引起物料下滑, 较大的动张力易使输送带撕裂的问题, 提出将直接转矩控制 (DTC) 技术的变频调速应用于大倾角带式输送机控制系统中, 介绍了直接转矩控制原理, 并成功地将其应用于阜新海州立井煤矿。实践检验证明, 大倾角带式输送机控制系统启动转矩大, 且运行平滑, 将带式输送机的最大倾角拓展为 35°。

关键词: 直接转矩控制; 带式输送机; 软启动; 大倾角

中图分类号: TD528 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336 (2010) 09-0091-03

Design on Control System of High Inclined Belt Conveyor Based on DTC

RU Chang-qing

(Shanghai Research Institute, China Coal Research Institute, Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the material downward sliding occurred by the start speed too higher of the belt conveyor over 28° and the conveyor belt tearing easy occurred by the higher tension, the frequency converted speed control of the direct torque control technology was proposed and applied to the control system of the high inclined belt conveyor. The paper introduced the work principle of the direct torque control (DTC) technology, which was successfully applied to the underground mine of the Fuxin Haizhou Mine. The practice inspection showed that the control system of the high inclined belt conveyor could have high start torque and smooth operation and could ensure the belt conveyor to have the max transportation inclination of 35°.

Key words: direct torque control; belt conveyor; soft start; high inclination

1 概述

据研究带式输送机倾角越大, 启动时的加速度对物料输送的稳定性影响越大。对于满载的大倾角带式输送机, 过大的加速度会引起物料下滑或滚动, 并容易造成输送带较大的动张力, 导致撕裂。因此, 选择有效的控制方式, 减小启制动时的最大加速度, 确保大倾角带式输送机能够平稳运行。矿用带式输送机要求启动转矩大, 能够满足满载启动的要求, 但大的驱动功率与高带速的直接启动将造成大的冲击电流, 使电网电压急剧下降, 可能引起启动失败烧毁电机, 因此带式输送机一般采用软启动驱动装置。目前国内带式输送机软启动装置常见的有差动轮系液黏调速装置和液力调速装置^[1]。差动轮系液黏调速装置是利用油膜的动力黏性, 通过调节离合片之间的油压来调节输出轴的转速, 达到输送机的软启动, 但维护要求高, 价格昂贵。液力调速装置是通过调整偶合器内部工作腔的充液量来改变输出轴转速, 运行可靠但调速精度和效率较

低。本文结合直接转矩控制 DTC 方法, 对倾角为 28~35°的带式输送机控制系统进行研究, 通过变频控制改变电源频率来调节电动机转速达到输送机的软启动, 实现大倾角条件下带式输送机的平滑启动和物料平稳运行, 提高带式输送系统的动态性能和运行效率, 克服传统控制方法低速时较大的电机噪声和转矩脉动。

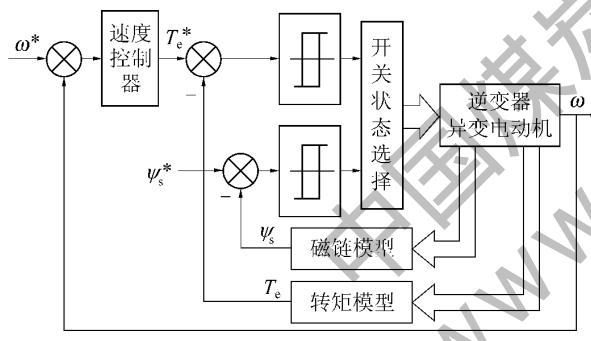
2 直接转矩控制的基本原理与模型

大倾角带式输送机的直接转矩控制法以 35°倾角的加速度和速度为最终求解值, 在定子坐标系下分析电机的数学模型, 采集电机的实际磁链和实际转矩, 并采用 Bang-Bang 控制法获得快速的转矩响应, 然后将计算得到的磁链、转矩与给定值进行比较, 将误差限制在给定的容差范围之内, 实时产生 PWM 控制信号, 送给脉冲优化器, 逆变之后控制电机的运行状态。要进行磁链的控制, 必须在每一个控制周期内产生一个定子实际磁链的估算

值^[2]，确定定子磁链 ψ_s 的计算式为 $\psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt$ ，其中： R_s 为定子电阻； u_s 和 i_s 分别为定子电压和定子电流； t 为时间。直接转矩控制的输入量需要测量驱动电动机的两相电流和中间环节的直流电压 U_{dc} ，定子电压 u_s 由测得的 U_{dc} 和逆变器的开关状态 S_a, S_b, S_c （取 0 或 1）确定^[3]，即 $u_s = \sqrt{2/3} U_{dc} [(-1)^{S_a} + \alpha (-1)^{S_b} + \alpha^2 (-1)^{S_c}] / 2$ ，其中， α 为旋转因子， $\alpha = \exp(2\pi j/3)$ 。

对定子磁链进行校正以提高在低速时定子磁链的精度，使电机在低速时也能产生极高的启动转矩。此模型不受转子参数变化的影响，计算转矩反馈信号^[4]，即 $T_e = n_p (i_{s\beta} \psi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{s\beta})$ ，其中： T_e 为电磁转矩； n_p 为电机极对数； $i_{s\beta}, i_{s\alpha}, \psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ 为电流 i_s 与定子磁链 ψ_s 在 $\alpha-\beta$ 坐标系的分量。

采用定子磁链必须依照 $\omega - \psi_s - i_s$ （转速 - 磁链 - 电流）状态方程进行控制，降低交流电机的惯量以及漏电感，该数值越小，转矩上升时间就越快，轴转矩的变化就越快，才能克服 35° 倾角下物料的斜坡分力，以较低的加速度缓慢提高速度。转矩和磁链控制的直接转矩控制模型如图 1 所示^[5]。



* 为实际采样值

图 1 转矩和磁链控制的直接转矩控制模型

与传统的控制不同，基于 DTC 的带式输送机确保交流电机转矩为首要控制元素，而不是电机电流，控制交流电机转矩的间隔为 25 μs，能为任何电机提供小于 5 ms 的快速转矩响应，使输送带以较低的加速度平滑启动。

3 应用实例分析

1) 应用条件。为了对上述提出的控制方法有效性进行验证，设计了基于 DTC 的带式输送机控制系统，应用于阜新海州立井煤矿的大倾角煤炭运输中，整个系统的安装如图 2 所示^[6]（前期以 38°

倾角安装试验成功后，正常运行为 35° 倾角）。带速 $v = 1.60 \sim 3.15 \text{ m/s}$ ，运量 $Q = 450 \text{ t/h}$ ，倾角为 35°，启制动加速度小于 0.3 m/s^2 ，变频启动电机功率 $2 \times 560 \text{ kW}$ ，输送物料为原煤。

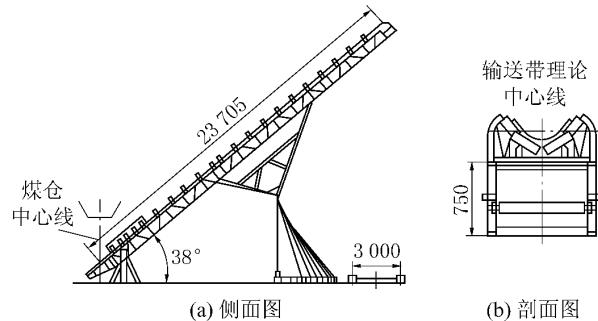


图 2 带式输送机系统安装侧面图与剖面图

2) 应用方式。当输送带倾角大于 28° 时，带式输送机要适应输送不同状况的物料，必须根据需要调整启制动时间，同时根据输送物料的状况（质量、湿度等）改变带速，最大限度保证带式输送机稳定运行。在带式输送机中，速度斜率如果在启动初期加入一段延迟，时间 3~8 s（根据输送机长度确定），能进一步改善启动的瞬间峰值张力，如图 3 所示。在延迟期内，可以给原来松弛的输送带及时拉紧留下余地，在速度增大之前，使所有的带式输送机元部件在很低的速度下进入运行状态，削弱过大的张力。

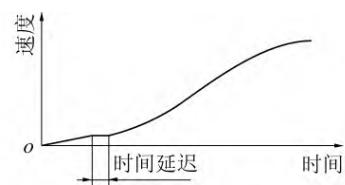


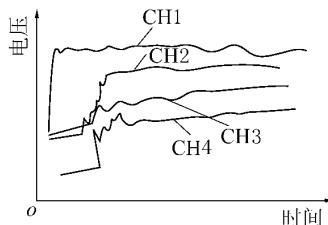
图 3 带延迟段的速度曲线

此项目考虑电机的参数与工况要求，在实际运行过程中将变频器启动转矩设定为 1.2 倍的初始转矩，既可扩大过载的承受能力，又提高工作效率。按照图 3 曲线调节变频器参数，设定合理的启动时间，控制电机速度与转矩。在特殊情况下，可在线实时修改变频器的参数从而改变电机运行模式。为实现 2 套驱动装置合理分配，采用主从控制达到速度同步和力矩平衡，主传动为闭环速度控制模式，从传动为闭环力矩控制模式，主从传动之间通过适当的通信连接，使输送机的双电机启动更平稳。

3) 应用分析。带式输送机直接转矩控制法就

是在一定的启动时间内, 通过控制启动加速度值来确保带式输送机按所要求的速度曲线平稳启动, 并达到额定的运行速度; 同时使电动机的启动电流和启动输送带的动张力控制在允许范围内, 既减少启动时输送带的动张力, 降低输送带的安全系数, 也降低对输送机元部件机械强度的要求。

实践运行测得的三相电机绕组变化曲线如图 4 所示, 直接转矩控制技术能够使电机在整个启动过程中, 转速上升非常平稳, 机械噪声很小。启动转矩响应非常快, 在启动开始极短的时间内达到最大限幅转矩值, 当转速开始上升时, 启动转矩保持恒定, 使带式输送机获得稳定的加速度。启动结束后, 电磁转矩与负载转矩保持平衡, 带式输送机进入稳态运行阶段。



CH1—CH3 为电机转子 a 相、b 相、c 相; CH4 为电机定子绕组

图 4 启动过程中电机绕组变化曲线

实践发现, 在带速不大于 2.5 m/s 、加速度不大于 0.3 m/s^2 时, 输送机在各种工况(满载启动、满载运行及停车)下运行相对比较平稳, 虽然表面有煤块滚动现象发生, 但不严重; 当带速为 3.15 m/s 时, 表面煤块滚动现象加剧, 输送机运行情况较差。另外当输送量很小或很大时, 带式输送机无法正常输送物料。通过实践检验, 带速应控制在 2.5 m/s 以内比较合适。

4 结 论

1) 通过实践应用证明, 将直接转矩控制法合理地应用在大倾角带式输送机中, 具有快速的转矩响应和低频时较高转矩, 在轻载、半载及满载装料时, 无论在启动过程、运行阶段、制动过程及静止状态, 都能使物料在 35° 倾角的输送带上保持稳定, 尚未出现物料下滑和滚料现象。

2) 该机的成功研制, 拓展了大倾角带式输送机的最大输送角度 35° , 增加了大倾角带式输送机的使用范围, 为煤矿主斜井运输系统箕斗提升改为大倾角上运带式输送机提供可靠的技术保障。

参考文献:

- [1] 沈卫娜, 程秀芳, 程相文. 带式输送机软启动技术分析与展望 [J]. 煤矿机械, 2008, 29 (8): 6-8.
- [2] HU Jun, WU Bin. New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux over a Wide Speed Range [EB/J]. IEEE Trans Power Electro, 1998, 13 (5): 969-977.
- [3] 陈伯时, 陈敏述. 交流调速系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 20-40.
- [4] 赵争鸣, 袁立强, 张海涛, 等. 通用变频器矢量控制与直接转矩控制特性试验比较 [J]. 电力电子, 2004, 2 (1): 14-19.
- [5] 陈伯时. 矢量控制与直接转矩控制的理论基础和应用特色 [J]. 电力电子, 2004, 2 (1): 5-9.
- [6] 史志. 高倾角花纹带式输送机的研究与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36 (3): 1-4.

作者简介: 汝长青 (1979-), 女, 黑龙江克山人, 工程师, 从事带式输送系统的研究与配套等方面的工作。Tel: 021-64382344-8154, E-mail: ruchangqing@163.com

收稿日期: 2010-03-28; 责任编辑: 赵瑞

(上接第 56 页)

参考文献:

- [1] 康红普. 软岩巷道底鼓的机理及防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 1-4.
- [2] 何满潮, 孙晓明. 中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 145-163.
- [3] 何满潮. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版, 1996.
- [4] 何满潮, 杨晓杰, 孙晓明. 中国煤矿软岩黏土矿物特征研究 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 28-35.
- [5] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 36-37.
- [6] Chen H J. Stress Analysis in Longwall Entry Roof Under High Horizontal Stress [D]. Morgantown: West Virginia University, 1999: 278.
- [7] 刘文涛, 何满潮, 杨生彬, 等. 深部岩巷不对称变形机理及支护对策研究 [C] //第九届岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 661-669.
- [8] 王洪立, 王玉白, 胡冠英. 巷道底鼓的原因及防治措施 [J]. 煤矿安全, 2005, 36 (8): 43-45.

作者简介: 王洪涛 (1974-), 男, 山东滨州人, 工程师, 现任陕西长武亭南煤业有限责任公司任生产技术科长。联系人: 韩国安, Tel: 13892991952, E-mail: shanxi711503@163.com

收稿日期: 2010-04-20; 责任编辑: 张扬