

摘 要



当前带式输送机正朝着长跨度、大功率、高带速、高稳定性的方向发展，带式输送机的动态设计及启动稳定性研究已成为新的课题。采用合理的启动方式降低带式输送机的启动动载荷是提高启动稳定性的主要方法。本文在分析了带式输送机动态特性基础上研究一种基于电动机变频驱动的软启动装置。

首先，文中建立带式输送机的动力学模型，分析了各种启动方案对带式输送机启动特性的影响，找出了带式输送机的最佳启动加速度曲线；分析了各个电机的驱动功率的理想分配和实际分配的问题，找出了调节功率平衡的方法。然后结合一条带式输送机的具体要求，设计了一套变频软启动系统，包括变频启动系统主回路断路器、隔离变压器、ACS 1000 变频器的选型、变频驱动系统控制单元的设计，变频驱动系统的调速系统设计，多电机功率平衡的实现等。最后，通过现场试验检验了变频驱动系统能否满足带式输送机在启动过程中对驱动力和速度变化、负载发生变化时对驱动滚筒输出转矩变化、在加速和减速阶段系统可靠性及长时间运行系统稳定性的要求。

实验结果表明，变频软启动系统能够实现大型带式输送机在启动过程中对驱动力输出变化的要求，延长了启动时间，大大降低了输送带内的启动张力。同时变频驱动系统的使用可降低输送带的强度进而减少设备投资成本，变频驱动还具有维护量少和节能的优点。

关键词：变频调速驱动 软启动 带式输送机 功率平衡

Abstract

As belt conveyors are currently developing in the direction of long span, high power, high belt speed, high stability, the research on dynamic design and starting stability of belt conveyors has become a new subject. Adopting a reasonable starting way to reduce the dynamic load of belt conveyors is the main method to improve starting stability. Therefore, based on analyzing the dynamic characteristics of belt conveyors, this thesis studies a kind of soft starting device driven by variable-frequency motors after analyzing.

Firstly, dynamic models of belt conveyors have been created in the paper, the effects of various starting plans on the starting characteristics of belt conveyors have been analyzed, and the best starting acceleration curve of belt conveyors has been identified. Besides, the method to adjust the power balance has been found out after a analysis of ideal and actual distribution of the driven power of each motor. Then combined with the specific requirements of a belt conveyor, a set of variable frequency soft starting system has been designed, including main circuit breaker, isolation transformer, the selection of the ACS 1000 transducer in variable frequency starting system, and the design of control unit, the design of speed control system as well as multi-motors power balance, etc. in variable frequency driving system. Finally, field trials have tested whether variable frequency driving system can meet the different demands for driving forces and speed changes during the starting process of belt conveyors, the changes of drive pulley output torque with load changes, system stability in the acceleration and deceleration phase and long-running stability of the system as well.

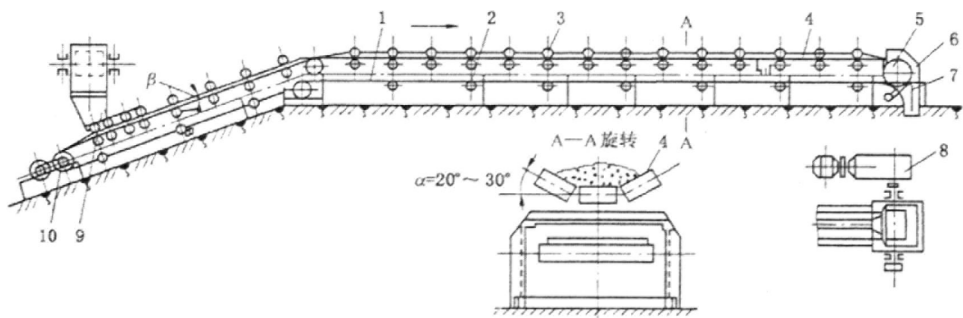
The experimental results have showed that variable frequency soft-driving system can meet the requirements of driving force output changes during the starting process for large belt conveyors, extend the start-up time and greatly reduce the starting tension of the conveyor belts. Meanwhile, the use of variable frequency driving system can reduce the strength of the conveyor thereby reducing the cost of equipment investment. Moreover, variable frequency drive also has the advantages of low maintenance and energy saving.

Keywords: Variable speed drive Soft start Belt conveyor Power balance

1 绪论

1.1 课题研究的背景

带式输送机是以输送带作为牵引机构和承载机构的一种连续运输机械，主要由驱动装置、拉紧装置、托辊、机架、清扫装置等组成^[1]。带式输送机的结构简图如图 1.1 所示。带式输送机的工作原理如下：输送带绕经机头驱动滚筒和机尾改向滚筒形成一个封闭的环形带，同时上、下输送带分别支承在上、下托辊上，张紧装置给输送带以正常运转所需要的张力。当驱动装置带动驱动滚筒旋转时，借助驱动滚筒与输送带之间的摩擦力使输送带及其上面的货物一同运转，输送带上的货物被载运到机头后，由于输送带的转向而实现卸载。它是输送散状物料的主要设备之一，具有连续运行、运输能力大、运行阻力小、耗电率低、运行平稳、运输途中对物料的破碎性小、较易实现自动控制等优点，广泛应用于煤炭、冶金、港运、建材等部门^[2]。



1 机架 2 下托辊 3 上托辊 4 输送带 5 驱动滚筒 6 卸载装置
7 清扫装置 8 驱动装置 9 装载装置 10 张紧装置

图 1.1 带式输送机结构简图

随着矿山、工厂企业的生产规模逐渐扩大和新技术的不断应用，对带式输送机的长度、功率、稳定性、节能性提出了新的要求。国内外的研究人员和工程技术人员对带式输送机的动态特性、启动特性、部件的可靠性进行了广泛的研究。而我国对于大功率和长距离带式输送机的控制及驱动研究起步比较晚，与国外的驱动设备存在一定的差距^[3]。带式输送机的动态过程主要是发生在带式输送机的启制动阶段，所以研究新型的启动装置提高启动阶段的稳定性是发展新型带式输送机的关键。

目前企业采用的启动系统有：调速型液力偶合器驱动系统、电软启动控制系统、CST 可控启动传输系统、变频启动装置等^[4]。本文结合布尔台矿井下 3⁻¹ 煤大巷带式输送机，对大功率长距离带式输送机的变频驱动设备进行研究。

1.2 研究的目的和意义

先进的带式输送机必须适应高生产率的要求,提高生产率可以采用提高带速和增加输送带宽度的方法。由于输送带的成本占输送机整机成本的一半左右,增加带宽会大大提高设备资金,而所需的安装空间也要增加,特别是有的带式输送机的使用巷道空间狭小,增加带宽将增加巷道宽度,使生产成本将增加,因此,提高带速将更经济。目前国内带式输送机的运行速度为 $2\sim 5.8\text{m/s}$,国外带式输送机运行速度已达 $7\sim 12\text{m/s}$ 。目前,国内的带式输送机生产和使用单位在研究、设计和制造高带速输送机方面与德国、澳大利亚等国的企业存在明显差距。为了提高我们的生产设计水平,就需要我们对带式输送机的动态特性,尤其是启动特性进行深入的研究。

目前带式输送机在直接启动过程中存在的缺点:

- (1)启动时输送带紧边承受的张紧力过大,易造成输送带损坏;
- (2)启动动力矩较大,容易造成减速器齿轮不正常磨损,使连接部件松动;
- (3)启动时电流较大,易造成电动机绕组过热,自动开关容易出现跳闸,烧损熔断器;
- (4)急停使输送带松弛,发生严重堆煤、卷带情况;

基于以上缺点,对带式输送机启动特性进行动态分析和改善带式输送机的启动性能已提到日益重要的位置上^[6]。采用可控启动技术是解决上述带式输送机问题的必然选择。

国内外科技工作者在电气、液力、机电液一体化等领域做了大量的研究工作,并开发了各种形式的调速装置,虽都能实现带式输送机可控启动,减轻带式输送机启动张力数值,但其可控性能及价格差别较大,在现场的使用效果不是很好,有的产品维护工作量大,传输效率不高且不利于与带式输送机整机实现自动化控制、监测。因此研究一套可控性能高,安装维护方便,便于实现自动控制的系统具有很大的意义^[6]。

1.3 带式输送机软启动国内外发展现状

目前对带式输送机实现可控启动有多种方式,大致可分为两大类:一类是用电动机调速启动;另一类是用鼠笼式电动机配用机械调速装置对负载实现可控启动和减速停车。电机调速启动可用绕线式感应电动机转子串电阻调速、直流电机调速、变频调速即可控硅调压调速等多种方式。机械调速装置有调速型液力耦合器、CST 可控启动传输及液体粘滞可控离合器三种^[7]。下面就几种常用的软启动装置的使用特点做一下介绍。

1.3.1 调速型液力耦合器驱动系统

调速型液力耦合器的主要构件有:输入输出轴、泵轮、涡轮、油箱、防护罩、安全保护装置。

它的工作原理是:电动机通过传动轴带动耦合器的泵轮旋转,使工作腔体里的工作

液加速加压，将电能转变为液体动能，工作液由泵轮的出口出来后冲向对面的涡轮，液流使涡轮叶片与泵轮同向转动，泵轮带动输出轴转动，又将液能转换为机械能。

改变液力偶合器工作腔中工作油的充满量，在电动机输入转速不变时实现对工作机的无级调速与软启动。

采用调速型液力偶合器驱动的使用效果：

- (1) 可实现电动机“空载”启动，缩短了启动电流时间，减少对电网进行冲击。
- (2) 功率平衡可达 $\pm 5\%$ ，调速范围 1-1/4，启动加速度范围 $0.1 \sim 0.3m/s^2$ ；
- (3) 能实现多机顺序启动；额定负载下有较高的传动效率；
- (4) 隔离扭矩，减缓冲击，过载保护作用；
- (5) 结构简单，无机械磨损，对环境要求低，使用寿命长，易于实现自动控制；
- (6) 操作维护简单方便。

然而，由于调速型液力偶合器为通用性产品，其性能指标及精度要求不能专门满足大功率长距离带式输送机驱动控制的要求。

1.3.2 BOSS 驱动系统

BOSS 系统的核心元件是 Ω 离合器和可调动静摩擦片间隙的自动控制技术。其优点是启动平稳，可实现恒扭矩输出，均匀加速启动；摩擦片组设在高速轴，易于控制；与逆止器和制动器的配置灵活、方便；可靠性高，维护简便。缺点是：在软启动过程中发热量大，摩擦片磨损严重，使用寿命短；由于油膜间隙有限，无法实现真正的空载启动；不能实现无级调速，传动效率低，对润滑油的质量要求高，运行成本高；液压及控制系统复杂；离合器片在高速轴时，控制系统难以准确控制^[8]。

1.3.3 电软启动控制器

电软启动控制器通过控制其内部晶闸管的导通角以交流调压方式限制电动机的启动电流，使电机平稳达到额定转速。开始启动时，系统按预先设定的启动加速速率使触发器移相，晶闸管导通向电机输出电压，电动机实现启动。在启动时间内，输出电压从零按照一定的斜率升高到额定电压，使电动机的转速由零上升到额定转速，启动过程结束，系统处于正常运行状态^[9]，系统原理如图 1.2 所示。

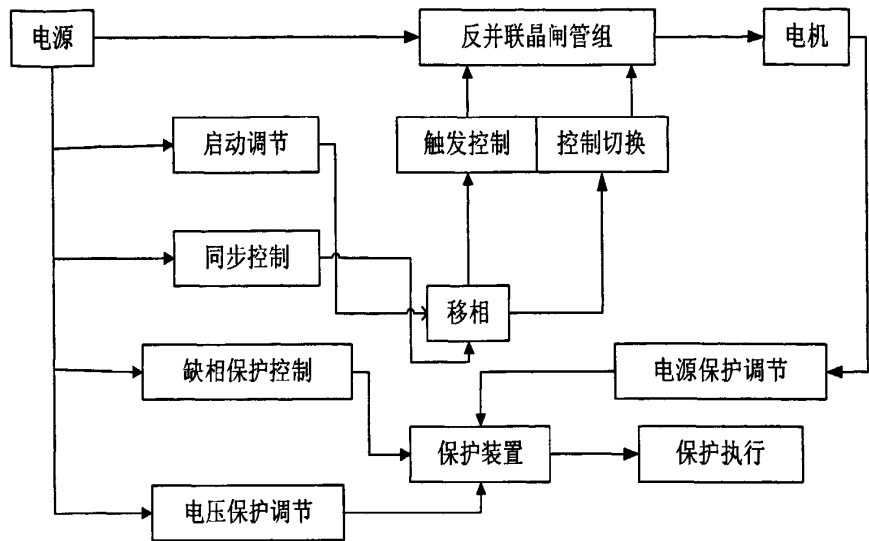


图 1.2 电软启动原理图

其特点是操作简便，价格低廉，但恒转矩负载时，差动功率损耗大，效率低；选用电机时要增加 20%~40% 的容量；在启动到正常运行过程中会造成启动力的冲击；采用降压启动，满载时启动困难；不能实现功率平衡和无级调速功能，在顺槽可伸缩带式输送机中应用广泛。

1.3.4 CST 可控启动传输系统

CST 系统是由一种专为大型带式输送机配套的新型机电一体化软启动系统。该装置通过电液比例阀及控制系统，带有齿轮减速器、湿式离合器实现软启动与功率平衡传动装置。因为 CST 的力矩控制器装在低速轴上，离合片之间的液流是层流，呈线性特性，因而有较高的控制精确。CST 的控制一般基于 Rockwell 的 SLC 控制平台，实现带式输送机的起、停控制。CST 是一种能保证在紧急制动或突然断电时提供可控制动力的驱动系统^[10]。

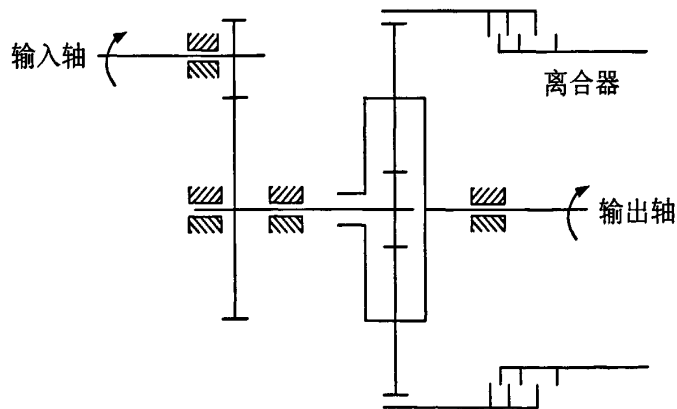


图 1.3 CST 系统结构简图

CST 装置通过液压控制系统控制输出轴的扭矩,该扭矩跟随离合器上的液压压力变化。一个带式输送机系统配置一台电机及 CST 装置,也可以由多台电机及 CST 装置

组成。载荷的分配是系统通过控制每台 CST 离合器的压力，允许 CST 离合器出现少量打滑来实现的。空载启动时，先使驱动电机达到满转速，控制系统逐渐增加分配到每台 CST 离合器上的液压力，从而驱动输送机起动并逐渐加速到额定速度，使得带式输送带有一个预拉伸过程。传输系统中有多台 CST 装置时，控制系统可以合理地分配载荷，确保每台电机分担相同的负载，使整个驱动系统中部件的寿命均衡。

在输送机正常运行时，根据载荷的要求，每台 CST 装置的离合器或保持少量打滑状态或保持最大压力以输出适当扭矩。但当负载出现增加将引起离合器打滑即被“软锁定”。当离合器被软锁定时，任何瞬间的冲击或过载都保持离合器打滑，保护驱动系统的所有部件不受冲击。

如图 1.4 所示为 CST 系统布置示意图^[11]。

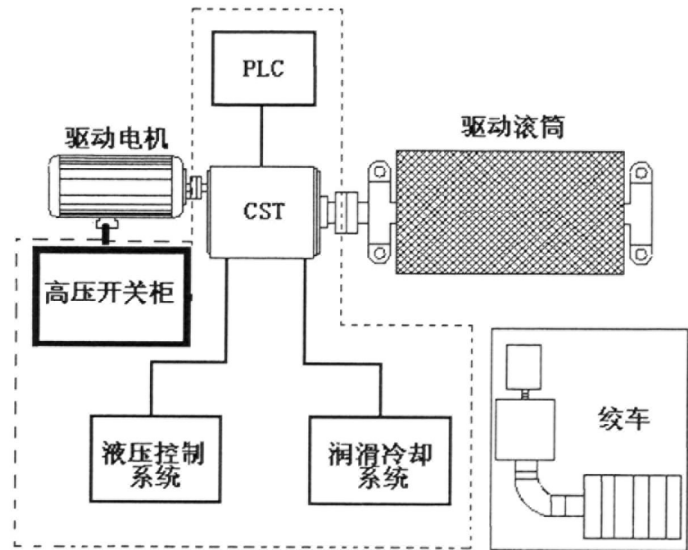


图 1.4 CST 系统布置示意图

采用 CST 驱动装置控制，能实现 S 曲线加速启动，进一步提高了安全性、可靠性和部件保护，启动平稳；CST 能在 $\pm 2\%$ 的范围内进行出色的电机负载分配，传动效率高达 99%；但 CST 驱动装置的体积庞大，安装不便；复杂且维护困难，后期运行成本高。

1.3.5 变频驱动系统

近年来由于交流变频调速技术的不断提高，在大型带式输送机上也开始应用交流变频系统。带式输送机中的变频调速驱动系统，可应用于输送机的恒转矩负载的调速驱动过程中。它能有效控制输送机柔性负载的软启动、软停车，实现各驱动装置之间的功率分配，避免出现撒料与断带，能有效抑制输送带突变张力对机械设备造成的危害，延长输送机使用寿命；同时在使用多电机驱动的带式输送机系统中能够动态分配各个电机的输出功率，精度高，波动范围小。

下图为变频驱动系统与带式输送机的布置示意图。

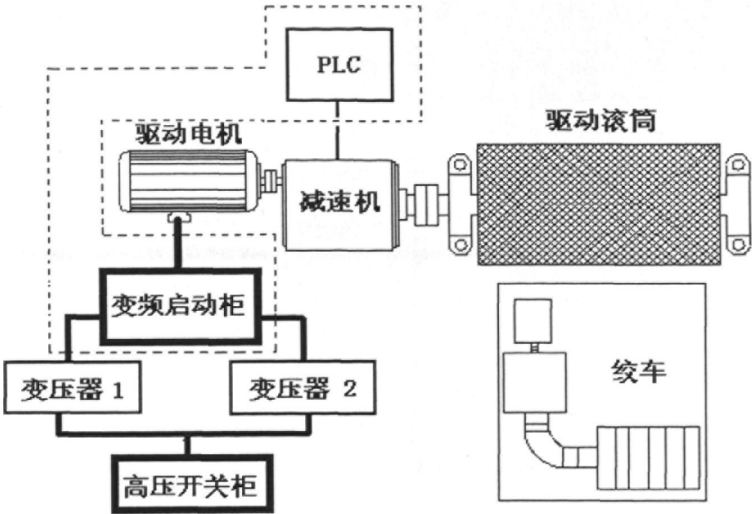


图 1.5 变频驱动系统示意图

1.4 研究的主要内容

本文研究的主要内容是结合布尔台煤矿带式输送机的要求，研究设计一套变频软启动装置，具体将围绕以下主要方面进行：

1、研究带式输送机的启动特性

本文通过建立典型带式输送机系统动力学模型，确定其动力学微分方程，求解输送带张力的数学表达式。分析在不同的速度控制曲线时，输送带张力的变化，找到合适的驱动速度曲线。

2、变频驱动系统的设计

结合布尔台煤矿带式输送机的要求，设计一套变频驱动系统，包括硬件的选型，控制系统设计、辅助系统设计以及控制方法的实现等内容。

3、进行现场试验

通过现场试验检验变频驱动系统能否满足：带式输送机在启动过程中对驱动力和速度变化的需求，能否满足负载发生变化时对驱动滚筒输出转矩变化的需求，以及验证变频驱动系统的稳定性和可靠性等。

1.5 本文的组织结构

全文分为六章，各章内容安排如下：

第一章：简要说明课题研究背景及意义，分析带式输送机软启动技术在国内外发展现状。

第二章：带式输送机驱动系统的需求分析与总体设计，主要对带式输送机驱动系统的功能需求、性能需求进行分析总结，对总体方案的设计和研究思路进行阐述。

第三章：带式输送机启动特性研究。主要对带式输送机的启动特性和动特性进行了分析和研究。

第四章：变频驱动系统研究。主要是针对该带式输送机进行了变频控制系统的研究及变频的控制模式的选择；详细讨论主回路断路器、隔离变压器、ACS1000 变频器等部件的特性；对变频驱动系统的控制系统进行了研究。

第五章：变频驱动系统的实验验证。主要对变频系统在各种工况下的输出转矩和输出转速进行了性能测试，并对试验结果进行了分析整理。

第六章：总结本课题所做工作及研究成果，并分析系统设计中存在的不足之处，对今后工作进行展望。

2 带式输送机驱动系统需求分析与总体设计

2.1 3⁻¹ 煤大巷带式输送机概况

2.1.1 带式输送机结构

布尔台 3⁻¹ 煤大巷带式输送机功率大，输送距离长，结构复杂，输送机主要包括以下组成部分：输送带、驱动滚筒和减速机、托辊机架、张紧装置、驱动电动机和驱动装置、制动装置、控制及保护装置等^[12]，对于一般的物料输送系统，还应包括给料机、收尘器、溜槽、料库等。带式输送机布置如图 2.1 所示。

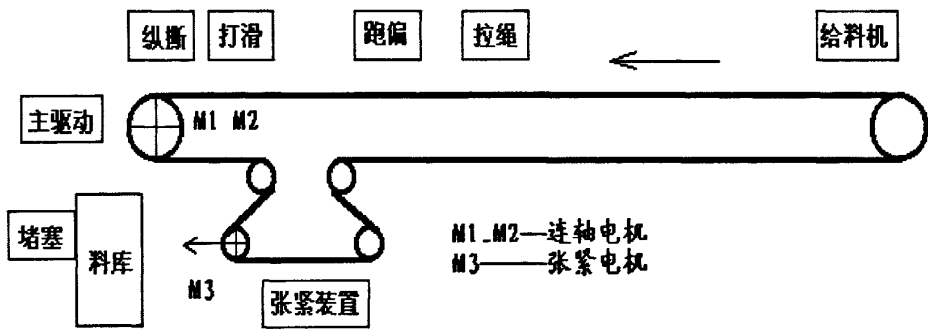


图 2.1 带式输送机简单布置图

2.1.2 3-1 煤大巷带式输送机主要技术参数及环境工况

- 运量：3500(t/h)；
- 带宽：1600(mm)；
- 长度：4735(m)；
- 带速：4.5(m/s)；
- 带强：ST3150；
- 轴功率：2544(kw)；
- 电机功率：3×1200(kw)；
- 驱动方式：机头驱动 2:1；
- 带式输送机倾角：0.47°；
- 海拔高度：1300(m)；
- 环境质量：周围粉尘大，环境恶劣
- 环境温度：户外-28℃~+40℃
- 供电电压：高压10KV±20%，50Hz±10%；
- 机头驱动距离主井驱动机房：582(m)；

2.1.3 带式输送机对软启动装置的要求

大型输送机启动阶段的动载荷由静张力和动张力构成,出现载荷峰值时会使输送带不平稳运行甚至接头断裂,波动的载荷还会使滚筒、托辊轴承及其它部件毁坏^[13]。

带式输送机软启动系统的基本特性是^[14]:

- (1) 具备良好启动性能、足够的启动力矩、良好的可控性能和较高的传动效率;
- (2) 驱动装置能实现按给定的加、减特性对负载进行控制;
- (3) 启动过程中应尽量平稳,减小各部件所承受的动载荷;
- (4) 启动和稳定运行阶段有可靠的过载保护能力;
- (5) 电动机启动时对电网的冲击小,多电动机驱动时使负荷分配均匀;
- (6) 可承受长时间慢速运行;
- (7) 配置可集成在控制系统中的先进控制器。

为满足启动要求,输送机控制系统要解决的问题是:

- (1) 带式输送机的启动控制问题尤其是延长启动时间和降低启动加速度^[15]。
- (2) 带式输送机的输出功率控制问题,当出现过载,或者多个驱动系统之间的负载不能平衡时,就可出现带式输送机的机械部件因过载而损坏。

2.2 带式输送驱动控制系统总体设计

2.2.1 当前常用启动控制系统比较

1、调速型液力偶合器驱动系统中由于调速型液力偶合器为通用性产品,其性能指标及精度要求不能专门满足大功率长距离带式输送机驱动控制的要求^[16]。

2、BOSS 驱动系统在软启动过程中发热量大,摩擦片磨损严重,使用寿命短;由于油膜间隙有限,无法实现真正的空载启动;不能实现无级调速,传动效率低,对润滑油的质量要求高,运行成本高;液压及控制系统复杂;离合器片在高速轴时,控制系统难以准确控制。

3、电软启动控制器在恒转矩负载时,差动功率损耗大,效率低;选用电机时要增加 20%~40%的容量;在启动到正常运行过程中会造成启动力的冲击;采用降压启动,满载时启动困难;不能实现功率平衡和无极调速功能,在顺槽可伸缩带式输送机中应用广泛。

4、CST 驱动系统控制,能实现 S 曲线加速启动,进一步提高了安全性、可靠性和部件保护,启动平稳;CST 能在±2%的范围内进行出色的电机负载分配,传动效率高达 99%;但 CST 驱动装置的体积庞大,安装不便;复杂且维护困难,后期运行成本高。

5、变频驱动系统能有效控制输送机柔性负载的软启动、软停车,实现各驱动装置之间的功率分配,避免出现撒料与断带,能有效抑制输送带突变张力对机械设备造成的

危害，延长输送机使用寿命；同时在使用多电机驱动的带式输送机系统中能够动态分配各个电机的输出功率，精度高，波动范围小。

综上所述大型带式输送机的软启动方法是有很多，它们的性能和价格差别很大。对各种软启动装置的性能比较总结^[17, 18]如下表 2. 1。

表 2.1 常用软启动装置的性能比较

性能指标	调速型液力偶 合器	BOSS	CST	电软启动	变频启动
软启动特性	较好	好	好	较差	好
控制系统	简单	较复杂	复杂	简单	较简单
功率平衡	较好	好	好	一般	好
低速运行	较稳定	稳定	稳定	差	稳定
传输效率	较高	高	高	低	高
可靠性	可靠	可靠	可靠	一般	可靠
互换性	好	差	差	好	好
体积	大	小	大	小	一般
运行成本	低	高	高	低	低
价格	低	高	高	低	高
验带	可以	可以	可以	不可以	可以

2.2.2 驱动控制系统总体设计方案

近几年随着微电子技术、控制技术及网络化技术的高速发展，交流变频调速技术发展也十分迅速，其性能也胜过其他任何一种交流调速(如液力偶合器、降压调速、滑差调速等)方式。变频调速具有调速性能好、节能效果显著、运行工艺安全可靠等优点，对于提高劳动生产率，增加带式输送机频启的稳定性，降低能耗具有现实意义。

变频驱动系统与带式输送机的布置如图 1.5 所示。

变频调速驱动系统的控制部分为了能够更好的融入到布尔台现有的综合自动化控制系统中去，也采用了自动化控制系统的统一平台 Rockwell Controllogix，变频调速驱动系统和自动化控制部分的接口采用 DeviceNet 通讯接口，在变频器内配置 NDNA-01 接口模块，通过 DeviceNet 总线方式，将变频驱动系统和自动化控制系统结合在一起。从而通过综合自动化控制系统，将变频调速驱动系统的参数、控制接入到调度室^[19]。

在 3[＃]煤大巷带式输送机变频驱动控制上采用 ACS1000 内配置的主/从控制宏，主机和从机的所有传动命令和给定设置都可以通过主机控制盘或与主机相连接的外部控制台来给出，从机通过连接到主机的光缆获得控制信号，如图 2. 2 和 2. 3 所示：

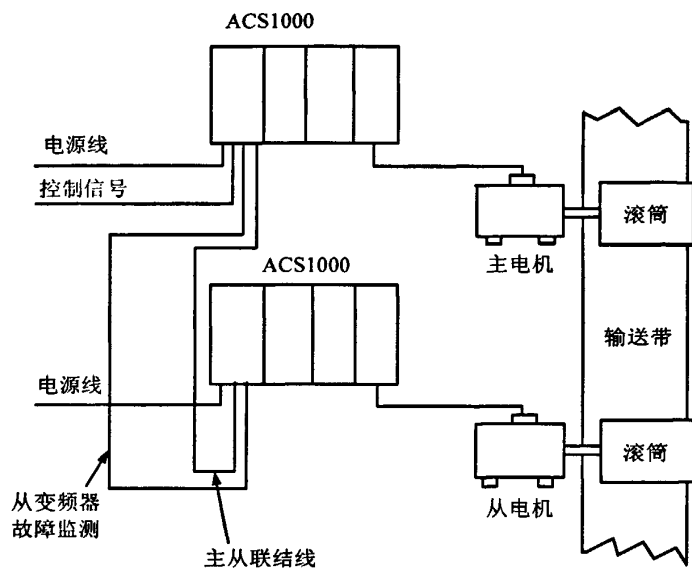


图 2.2 主从控制示意图

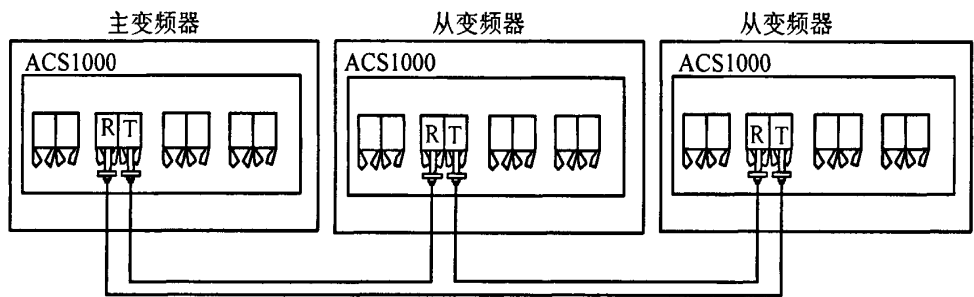


图 2.3 主从控制光纤环网连接图

2.3 小结

本章详细介绍了布台尔煤矿大巷带式输送机的工艺布置，技术参数和工作环境；提出了对启动系统的要求；针对该带式输送机的工况和相关需求，提出了变频控制系统的总体设计方案和主从控制方式。

3 带式输送机启动特性研究

带式输送机系统的组成构件有由输送带、滚筒、上下托辊和支撑架、张紧装置、驱动系统及辅助装置等。输送带、张紧装置、驱动装置决定了整体系统动力学特性，是系统动力学分析的主要研究对象^[20]。本章主要对带式输送机的启动特性和动特性进行分析和研究。

3.1 带式输送机启动过程的分析

带式输送机在运行过程中运量大、惯性高。在启动和制动时，输送带内会产生张力的突变，张紧装置来不及反映会使输送带的整体或局部出现相对滑动，引起输送带和滚筒的摩擦发热，输送带磨损加快，缩短使用寿命。同时冲击力使得张紧装置的负荷增加，降低了安全系数，甚至使托辊、支架因受冲击损坏^[21]。所以要研究带式输送机的启动过程。

带式输送机的启动过程包括初动阶段、静阻力施加于驱动滚筒的阶段和输送机启动达到额定速度的阶段。当带式输送机启动时，输送机滚筒转动，输送带开始拉紧，当输送带中的一带段两端的拉力差大于它所受的静阻力时就会加速运动^[22]。在运动的瞬间，静阻力变为动阻力，力的变化使输送带产生振动，导致其横截面内的动张力上升。

在启动过程中，驱动系统输入的驱动力作用在驱动滚筒上，驱动滚筒与输送带间的摩擦力拉动滚筒绕入点输送带及推动绕出点的输送带运动。作用在输送带上的牵引力会以波的形式向后传播。当输入的牵引力发生变化时，输送带内的张力会产生变化出现冲击或峰值张力。输送带内的张力受输送机长度和运行阻力及输送带本身力学性能的影响。通过改变启动装置的加速启动过程，使输出的驱动力平稳加速，及通过带式输送机综合控制系统实现张紧装置和驱动装置的实时的协作，可使输送带启动过程平稳，消除峰值张力。

3.2 输送带中弹性波的传播

根据机械振动学的知识，将输送带视为带有库仑阻尼力均质的线弹性模型，当输送带任意截面上出现力的扰动时，将以弹性变形的形式沿带纵向传播。弹性波的传播速度为：

$$c = \sqrt{\frac{E'}{\rho_i}} \quad (m/s) \quad (3.1)$$

式中： E' —输送带的折算弹性模量(N)；

ρ_i —输送带的载荷线密度(kg/m)；

弹性波沿输送带的传播速度，会决定输送带中动张力的幅值的大小。影响输送带内动张力的弹性波包括入射波、反射波、透射波。入射波从扰动源产生，是反射波和透射波的波源。反射波出现在密度不同的两种介质的边界上，越过边界并远离扰动源的波是透射波^[23, 24]。

运行过程中托辊间的输送带呈抛物线形状，其垂度可由公式：

$$Y = \frac{(q_m + q_d)gl_i^2}{8S} \sum_{i=1}^n X_i^2$$

表示，这时输送带的弹性模量可由密度和变形折算决定，表达式为：

$$E_i' = \frac{12S^3}{q_0^2 l_i^2 + 12S^3 / E_0} \quad (3.2)$$

式中：

S —输送带的平均张力(N)；

q_0 —带线密度(kg/m)(在承载区段上 $q_0 = q_d + q_m$ ，回空段上 $q_0 = q_d$)；

q_m —物料的线密度(kg/m)；

q_d —输送带的线密度(kg/m)；

l_i —托辊组之间距离(m)；

E_0 —输送带纵向弹性模量(kg/m)；

将式(3.2)代入(3.1)式可得：

$$c_i = \sqrt{\frac{E_i'}{\rho_i}} = \sqrt{\frac{12S^3}{(q_0^2 l_i^2 + 12S^3 / E_0) \cdot \rho_i}} \quad (m/s) \quad (3.3)$$

3.3 带式输送机动态特性分析

带式输送机的设计多考虑静态特性，为了保证输送机安全可靠高效地运行，有必要掌握其动态特性。带式输送机的动态特性主要反映在如下几方面^[25]：

(1)纵向振动：由于输送带为粘弹性体，在外界扰动力作用下尤其是在启动和制动阶段会产生的一种纵向振动，是带式输送机运行时承受的最主要振动之一。

(2)横向振动：因为输送带在托辊上出现了一定的悬垂度，这就构成了薄板振动体系，振动方向在铅垂面内。系统设计时尤其要避免共振或降低振幅，否则将危害设备。

(3)输送带侧向振动：在垂直于输送带运行方向并沿着托辊轴线方向上产生的干扰力会使输送带产生侧向的振动，这种振动可能使输送带跑偏或是撒料。

(4)载料冲击：当输送带装料时，物料对输送带的现象。

(5)其他冲击：输送带及承载物料在正常运行过程中，输送带产生的变形在经过托辊时对托辊和支架造成冲击影响。

带式输送机的动态分析方法是考虑将输送带视为粘弹性体,综合考虑驱动装置的启动特性,运行阻力、质量分布、初张力、线路各区段的坡度变化、带式输送机的挠度变化以及拉紧装置等因素的作用,建立其动力学模型,计算输送机在启动过程中输送带上不同点的加速度、速度、动张力,随时间的变化。明确按传统静态设计方法设计的输送机可能出现的不安全之处,提出改进措施,确定设计和控制参数。

为了方便建立动力学模型,我们对研究的带式输送机做如下假设^[26]:

- (1)输送带的在纵向的力学性能保持一致;
- (2)物料在输送带上均匀分布;
- (3)支撑输送带的托辊质量均匀分布,阻力系数不随带速发生变化;
- (4)将输送带作为一维杆处理;
- (5)忽略启动、制动时输送带的横向振动,将各改向滚筒看作刚体;

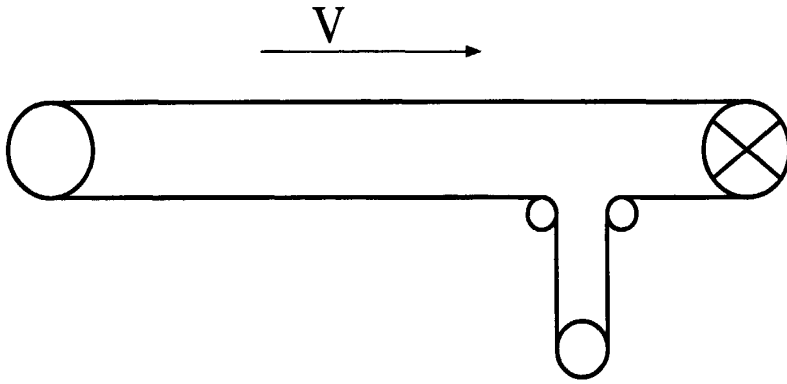


图 3.1 带式输送机力学模型

如图 3.1 为带式输送机的简化动力学模型。综合考虑输送带所受阻力、输送带挠度、运行速度等条件,在不考虑垂度对带式输送机的动态影响时,建立输送机动力学方程为^[27-29]:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{dv}{dt} - \frac{AE}{q_h} \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{A\eta}{q_h} \frac{d^3u}{dx^2 dt} + \frac{w(x,t)}{q_h} = 0 \quad (3.4)$$

式中:

A ——输送带的横截面积(m^2);

q_h ——输送机单位长度等效质量(kg/m);

承载段: $q_h = q + q_d + q_i'$; 回空段: $q_h = q_d + q_i''$;

q ——单位长度均布物料的平均质量(kg/m);

q_d ——单位长度输送带的平均质量(kg/m);

q_i' ——单位长度承载段托辊的平均等效质量(kg/m);

q_i'' ——单位长度回程段托辊的平均等效质量, (kg/m);

$u(x, t)$ ——对应点输送带的位移(m)；

$w(x, t)$ ——单位长度输送带承受的阻力(N)；

初始条件：

(1) 在带式输送机启动之前，输送带的各点处于静止状态，即有：

$$\begin{cases} U(x, 0) = 0 \\ \frac{dU(x, 0)}{dt} = 0 \\ t = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

(2) 当输送机启动完成时，输送带各个位置达到额定速度，进入稳定运行工况。此时有：

$$\begin{cases} \frac{dU(x, T)}{dt} = \frac{du(x, t)}{dt} + v \\ \frac{dU(x, t_2)}{dt} - \frac{dU(x, t_1)}{dt} = 0 \\ t \geq T \end{cases} \quad (3.6)$$

(3) 在拉紧装置处，采用液压拉紧时，有以下条件：

$$2EB \frac{du(2L, 0)}{dx} = 2EB \frac{du(2L, T)}{dx} = F \quad (3.7)$$

根据以上边界条件、初始条件得到带式输送机动力学方程的解析解为：

$$u(x, t) = U(0, t) + \frac{F}{2E}(x - L) + \omega(x, t) \quad (3.8)$$

其中：

$$\begin{cases} U(0, t) = \frac{1}{2}at^2 & \text{斜波激励} \\ U(0, t) = \frac{v}{2}(t - \frac{T}{\pi} \cos \frac{\pi t}{T}) & \text{正弦激励} \\ U(0, t) = vt & \text{阶跃激励} \end{cases}$$

求得 $u(x, t)$ 后，对于输送带的张力可由下式求得：

$$S(x, t) = E \frac{du}{dt} \quad (3.9)$$

通过动力学分析，经计算仿真得出如下结论^[26]：

- (1) 阶跃激励引起的动态力变化很大；
- (2) 斜坡激励引起的动态力冲击相对较小；
- (3) 正弦激励产生的总张力较斜坡激励还小，动态冲击也不大；

3.4 启动加速度对动态特性的影响分析

3.4.1 启动加速度的计算方法^[30]

带式输送机启动时传动滚筒所示作用力的平衡方程式为:

$$F_q - F_u = \sum M a_1 \quad (3.10)$$

式中:

F_q ——电动机输出的启动力(N);

F_u ——输送带所受的工作阻力(N);

a_1 ——启动加速度(m/s^2);

$\sum M$ ——带式输送机的总的变位质量(kg);

$$\sum M = (q_{RO} + q_{RU} + q_G + 2q_B) + 2T + \frac{n \sum J_{id} i_i^2}{r^2} + \sum \frac{J_i}{r_i} \quad (3.11)$$

$$F_u = C f L g (q_{RO} + q_{RU} + q_G + 2q_B) + q_G H q + F_{r1} + F_{i2} \quad (3.12)$$

式中:

L ——研究输送带的总长度(m);

T ——拉紧装置的重锤质量的一半(kg);

C ——修正系数;

f ——输送带与托辊的摩擦系数;

g ——重力加速度(m/s^2);

H ——输送机卸料段和装料段间的高度差(m);

F_{s1} ——特种阻力(N);

F_{s2} ——附加阻力(N);

q_{RO} ——承载托辊旋转部分单位长度的质量(kg/m);

q_{RU} ——回空托辊旋转部分单位长度的质量(kg/m);

q_B ——输送带单位长度的质量(kg/m);

q_G ——承载物料单位长度的质量(kg/m);

n ——驱动单元的个数;

J_{id} ——第*i*个驱动单元旋转部分总的转动惯量($kg \cdot m^2$);

i_i ——第*i*个驱动单元的传动比;

r ——滚筒半径(m);

J_i ——第*i*个滚筒的转动惯量($kg \cdot m^2$);

r_i ——第*i*个滚筒的半径(m);

设 $F_q = K_a \cdot F_u$, 带入式(2.10)可得带式输送机的启动加速度计算式为:

$$a_1 = (K_a - 1) F_u / \sum M \quad (3.13)$$

其中： K_a ——启动系数；

在静态设计中电动机直接启动一般取 $K_a = 2.0$ ；带液力耦合器一般取 $K_a = 1.3 \sim 1.7$ 。采用变频调速可控传动系统时，因其驱动力和加速度是可控的，所以启动系数 $K_a = 1.05$ 。采用软启动设备可以降低输送带的强度或增加其安全系数，对于降低带式输送机的整机成本和运行稳定性十分有利。

3.4.2 加速度控制曲线的选取

为使输送机启动过程平稳，减小启动时的张力冲击。应使驱动系统输出的驱动力变化平稳，启动时加速度峰值较小，速度变化平缓。研究表明，采用“S”形的加速度曲线比直线加速度平稳，出现的振动和噪声都小^[31]。为优化启动加速度曲线，将启动张力冲击降到最小，本文研究了采用不同加速度曲线时，输送机的响应情况。

(1) 匀加速度曲线

匀加速度曲线的采用分段函数的形式，其表达式为(3.14)。

$$\dot{u} = \begin{cases} \frac{v}{T}t & 0 \leq t \leq t_1 \\ v_\tau & t_1 \leq t \leq t_1 + \tau \\ \frac{v}{T}(t - \tau) & t_1 + \tau \leq t \leq T + \tau \\ v & t \geq T + \tau \end{cases} \quad (3.14)$$

这种启动过程分为，加速阶段、爬行阶段、加速阶段、匀速运行阶段。当输送机启动时，输送带的速度由零开始匀加速到爬行速度，并保持爬行速度运行，此时加速度为零。当整个输送带都达到爬行速度以后，驱动装置驱动输送带再次匀加速到稳定运行速度。启动过程的加速度变化如图 3.2(a)所示，速度变化如图 3.2(b)所示。整个启动时间是 90s 输送带的工作速度是 4m/s，爬行速度为 0.4m/s，爬行时间 10s，在启动过程中输送带内张力变化曲线如图 3.2(c)，张紧滚筒的位移曲线如图 3.2(d)。

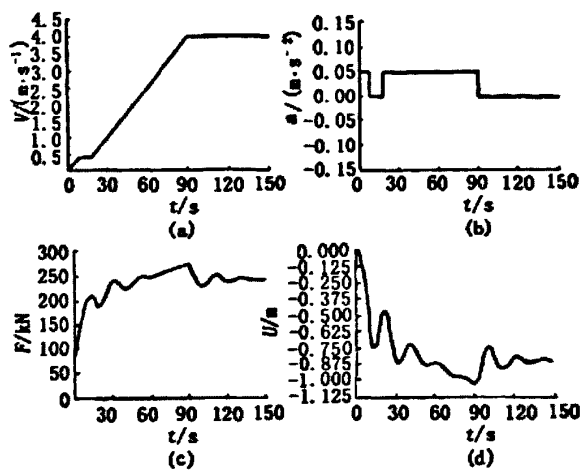


图 3.2 匀加速度启动仿真结果

(2)组合曲线

组合曲线的函数表达式为(3.15)。启动过程分为四个阶段加速阶段、爬行阶段、再次加速阶段、匀速运行阶段。该速度曲线为“S”，与匀加速过程相比可以看到张力波动幅值减小，运行更加平稳。

$$u = \begin{cases} \frac{v_r}{2}(1 - \cos \frac{\pi t}{t_1}) & 0 \leq t \leq t_1 \\ v_r & t_1 \leq t \leq t_1 + \tau \\ \frac{v - v_r}{2} \left[1 - \cos \frac{\pi(t - t_1 - \tau)}{T - t_1} \right] + v_r & t_1 + \tau \leq t \leq T + \tau \\ v & T + \tau \leq t \end{cases} \quad (3.15)$$

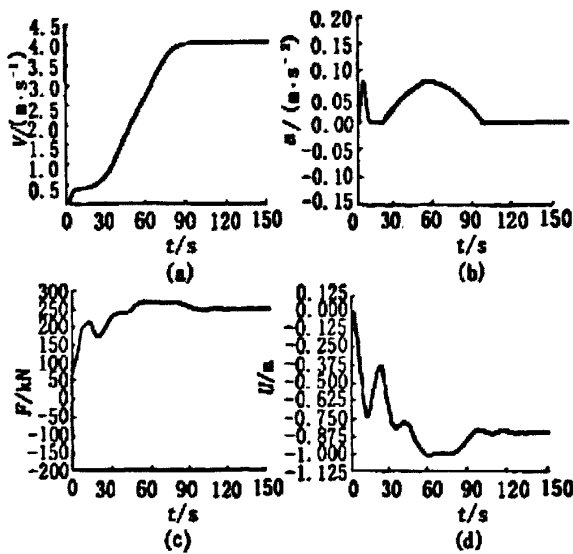


图 3.3 组合曲线仿真结果

(3)组合抛物线启动速度曲线

式 (3.12) 为带爬行段的组合抛物线启动速度曲线, 该函数为段分 6 段函数, 其曲线见图 3.4(a), 图 3.4(b) 为启动过程的加速度曲线; 图 3.4(c) 为启动过程输送带最大张力曲线; 图 3.4(d) 为启动过程拉紧装置位移曲线。

$$\dot{u} = \begin{cases} \frac{2v_r}{t_1^2}t^2 & 0 \leq t \leq t_1/2 \\ V_r \left[-1 + \frac{4t}{t_1} - 2\frac{t^2}{t_1^2} \right] & t_1/2 \leq t \leq t_1 \\ v_r & t_1 \leq t \leq t_1 + \tau \\ \frac{2(V-V_r)}{(T-t_1)^2}(t-t_1-\tau)^2 + V_r & t_1 + \tau \leq t \leq \frac{T+t_1}{2} + \tau \\ -\frac{4(V-V_r)}{(T-t_1)^2} \left[\frac{[t-(T+\tau)]^2}{2} + \frac{(T-t_1)^2}{8} \right] & \frac{T+t_1}{2} + \tau \leq t \leq T + \tau \\ v & T + \tau \leq t \end{cases} \quad (3.16)$$

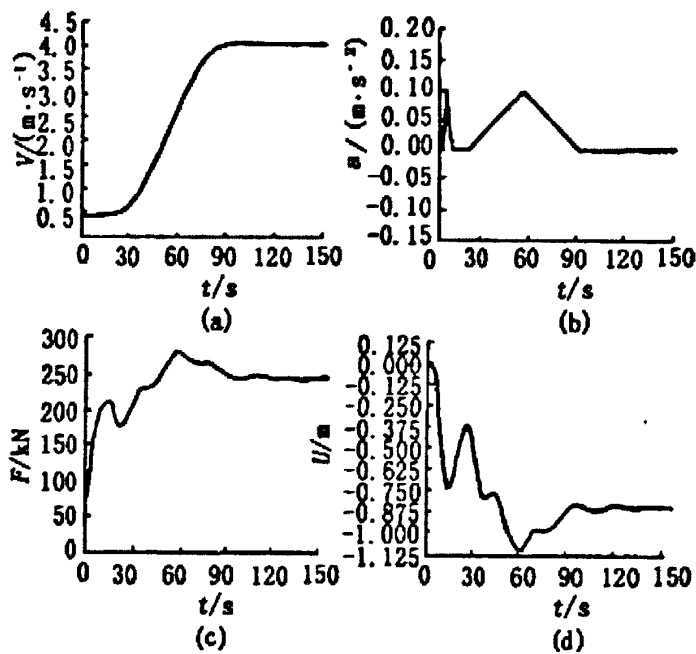


图 3.4 组合抛物线速度启动曲线仿真结果

以上式中:

u ——速度(m/s);

t ——时间(s);

T ——除去爬行时间的启动时间(s);

τ ——爬行速度的时间(s);

v ——稳定运行速度(m/s);

t_1 —— $T/10$;

$v_r = v/10$;

由图 3.2、3.3、3.4 可得到：带式输送机输送带的上的动张力与启动加速度曲线有关，但同时也与启动的时间有关，在实际应用中要根据实际情况选择理想的启动曲线^[32]。

3.5 多电机驱动的功率平衡问题

具有两个及以上的传动滚筒的传动系统称为多滚筒传动系统。由电动机到与传动滚筒相连的联轴器称为一个驱动单元。为了便于长距离带式输送机启动，常常安装几组驱动装置。这时要考虑负载功率在各个驱动装置间的分配问题。不同的驱动布置形式应采用不同的分配方式。不平衡的功率分配，会引起电机的过载^[33, 34]。

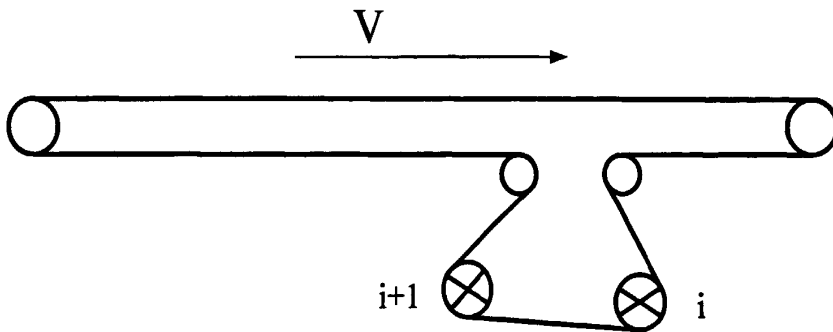


图 3.5 双滚筒驱动带式输送机线路示意图

3.5.1 牵引力的理想分配

输送带加速运行所需的牵引力由驱动滚筒和输送带摩擦产生。输送带在与滚筒相遇点的张力 S_y ，大于分离点的张力 S_l ，张力之差为滚筒所传递的牵引力 F 。考虑驱动滚筒的摩擦驱动能力，每个滚筒所能传递的最大牵引力为：

$$F_{\max} = S_y - S_l = S_l(e^{\mu\alpha} - 1) = S_y(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha}}) \quad (3.17)$$

式中： μ ——滚筒与输送带间的摩擦系数；

α ——输送带在滚筒上的围包角

则任意两滚筒的牵引力理想分配比为：

$$r_{i(i+1)} = \frac{F_{i\max}}{F_{(i+1)\max}} = \frac{S_{il}(e^{\mu\alpha_i} - 1)}{S_{(i+1)y}(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha_{i+1}}})} \quad (3.18)$$

根据：

$$S_{(i+1)y} = S_{il} + W_i \quad (3.19)$$

式中：

i ——任意一个滚筒的编号;

$i+1$ ——沿着输送带运行方向, i 之后的驱动滚筒的编号;

W_i ——两个驱动滚筒范围内的线路的阻力;

所以:

$$r_{i(i+1)} = \frac{F_{i\max}}{F_{(i+1)\max}} = \frac{S_{iL}(e^{\mu\alpha_i} - 1)}{S_{(i+1)L}(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha_{i+1}}})} = \frac{(e^{\mu\alpha_i} - 1)}{(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha_{i+1}}})} (1 + \frac{W_i}{S_{iL}})^{-1} \quad (3.20)$$

两个紧邻布置的驱动滚筒间, W_i 为零, 由式 3.20 可知, 牵引力的理想分配比为: $e^{\mu\alpha_i} - 1 / 1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha_{i+1}}}$ 。此种分配方式是从摩擦条件的角度考虑的, 各个驱动滚筒与输送带的摩擦条件决定了各驱动滚筒能否承担所分配得到的牵引力。在设计输送机时各个驱动所分配的牵引力应该与本身的摩擦条件一致^[35]。

3.5.2 设计时牵引力的分配方法

采用多滚筒传动的带式输送机在正常运行时, 驱动滚筒和输送带间至少有一点二者的线速度相等。

(1) 输送带任意两点间的速度比

$$\frac{V_j}{V_{j+1}} = \frac{l_j}{l_{j+1}} = \frac{l_0(1 + \varepsilon_j)}{l_0(1 + \varepsilon_{j+1})} = \frac{(1 + \varepsilon_j)(1 - \varepsilon_{j+1})}{(1 + \varepsilon_{j+1})(1 - \varepsilon_j)} \approx 1 - \varepsilon_{j+1} + \varepsilon_j \quad (3.21)$$

由输送带发生的变形与张力的关系: $\varepsilon = \frac{S}{E_0}$, 代入上式得到:

$$\frac{V_j}{V_{j+1}} = 1 - \frac{S_{j+1} - S_j}{E_0} \quad (3.22)$$

式中: j ——研究段的编号;

$j+1$ ——输送带运行方向, 与 j 点相邻点的编号;

S_j —— j 点受到的牵引力(N);

S_{j+1} —— $j+1$ 点受到的牵引力(N);

E_0 ——输送带弹性模量(N/m);

l_j ——在时间段 t 内, j 点输送带运行的距离(m);

l_{j+1} ——在时间段 t 内, $j+1$ 点输送带运行的距离(m);

l_0 ——不受拉时输送带的初始长度(m);

ε ——拉伸应变;

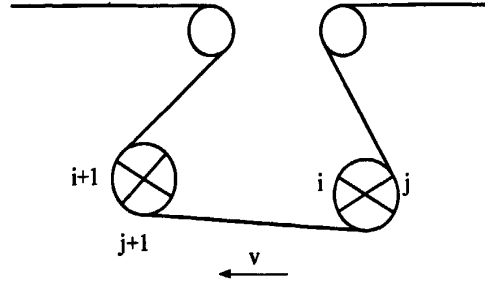


图 3.6 驱动滚筒布置图

从式 3.22 中可知当刚度 E_0 为常数运行时输送带的张力不同，其速度也不同。 j 点和 $j+1$ 点的是任意选取的，因此在电机在电动状态下，可取为某一驱动滚筒的 i 相遇点和后继滚筒 $i+1$ 的相遇点。张力间有关系如下：

$$S_{j+1} = S_j + W_i - F_i \quad (3.23)$$

由式(3.22)和(3.23)，可得两滚筒相遇点的速度关系式为

$$\frac{V_j}{V_{j+1}} = 1 + \frac{F_i - W_i}{E_0} \quad (3.24)$$

由上式可以看出，两滚筒相遇点的速度与输送带刚度、两滚筒间的阻力和前级驱动滚筒的牵引力有关。

(2) 驱动滚筒间的速度关系

用变频驱动装置驱动时，驱动滚筒的线速度可以表示为：

$$V = \omega_r R = \frac{2\pi R n}{60 i_a} = \frac{2\pi R f (1 - S_d)}{i_a p} \quad (3.25)$$

其中：

V ——驱动滚筒的线速度 (m/s)；

ω_r ——驱动滚筒的角速度 (rad/s)；

n ——电动机的输出转速 (r/min)；

R ——驱动滚筒的直径 (m)；

S_d ——电动机的转速差；

i_a ——减速器的传动比；

f ——电压频率 (Hz)；

P ——电动机的磁极对数；

当减速器传动比和电机磁极对数相同时，两个驱动滚筒的速度比为：

$$\frac{V_i}{V_{i+1}} = \frac{R_i f_i (1 - S_{di})}{R_{i+1} f_{i+1} (1 - S_{d(i+1)})} = \frac{R_i f_i (1 - S_{di}) (1 + S_{d(i+1)})}{R_{i+1} f_{i+1} (1 - S_{d(i+1)}) (1 + S_{d(i+1)})}$$

$$\approx \frac{R_i f_i (1 - S_{di} + S_{d(i+1)})}{R_{i+1} f_{i+1}} \quad (3.26)$$

令: $f_{i/(i+1)} = \frac{f_i}{f_{i+1}}$

上式改为:

$$\frac{V_i}{V_{i+1}} = \frac{R_i (1 - S_{di} + S_{d(i+1)})}{R_{i+1}} f_{i/(i+1)} \quad (3.27)$$

根据异步电动机的机械特性曲线, 在其正常工作点附近为近似的直线故有

$$\frac{S_d}{M_d} = \frac{S_{de}}{M_{de}} \quad (3.28)$$

S_{de} ——电动机额定转差率;

M_{de} ——电动机的额定转矩;

M_d ——电动机的输出转矩。

电动机工作在电动状态时, 电动机功率与驱动滚筒输出功率间的关系为:

$$M_d \omega_d \eta = \frac{\omega_d}{i_a} R F \quad (3.29)$$

$$M_d = \frac{1}{i_a \eta} R F \quad (3.30)$$

把(3.30)代入上(3.28)式, 得出

$$S_d = \frac{S_{de} R}{M_{de} i_a \eta} F = A F \quad (3.31)$$

式中:

ω_d ——电动机输出角速度, (rad/s);

η ——传动效率;

F ——滚筒输出的牵引力(N);

A ——驱动装置的常数, 与电动机特性、减速比、驱动滚筒半径和传动效率有关。

由(3.27)和(3.31)推导得出:

$$\frac{V_i}{V_{i+1}} = \frac{R_i (1 - A F_i + A_{i+1} F_{i+1})}{R_{i+1}} f_{i/(i+1)} \quad (3.32)$$

该式表明了相邻两个驱动滚筒间的速度和牵引力的关系。

(3) 在稳定运行时牵引力的分配分析

当电动机稳定运行时,在驱动滚筒与输送带的相遇点它们的速度相等,此时牵引力的关系为:

$$\begin{aligned} \frac{V_j}{V_{j+1}} = \frac{V_i}{V_{i+1}} = \frac{R_i(1-A_iF_i+A_{i+1}F_{i+1})}{R_{i+1}} f_{i/(i+1)} = 1 + \frac{F_i - W_i}{E_0} \\ - \left(\frac{1}{E_0} + \frac{R_i A_i}{R_{i+1}} f_{i/(i+1)} \right) F_i + \left(\frac{R_i A_{i+1} f_{i/(i+1)}}{R_{i+1}} \right) F_{i+1} = 1 - \frac{W_i}{E_0} - \frac{R_i}{R_{i+1}} f_{i/(i+1)} \end{aligned} \quad (3.33)$$

根据逐点计算方法,总牵引力与总阻力 W_0 的关系:

$$\sum F = W_0 \quad (3.34)$$

对于任意布置的 m 个驱动滚筒驱动时,可按式(3.33)列出 $m-1$ 个方程式,与(3.34)联立解出 m 个牵引力的方程组。

当两滚筒驱动时,可得到以下方程组:

$$\begin{cases} -\left(\frac{1}{E} + \frac{R_1 A_1}{R_2} f_{1/2} \right) F_1 + \left(\frac{R_1 A_2 f_{1/2}}{R_2} \right) F_2 = 1 - \frac{W_1}{E_0} - \frac{R_1}{R_2} f_{1/2} \\ F_1 + F_2 = W_0 \end{cases} \quad (3.35)$$

两个驱动滚筒的牵引力的分配比例为:

$$r_{1/2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\frac{R_1 A_2}{R_2} f_{1/2} W_0 - \left[1 - \frac{W_1}{E_0} - \frac{R_1}{R_2} f_{1/2} \right]}{\left(\frac{1}{E} + \frac{R_1 A_1}{R_2} f_{1/2} \right) W_0 + \left[1 - \frac{W_1}{E_0} - \frac{R_1}{R_2} f_{1/2} \right]} \quad (3.36)$$

根据公式(3.36),影响牵引力分配的因素有电动机的机械特性、输送带的弹性模量、各传动装置的传动比和效率、各驱动滚筒的直径、驱动滚筒之间的阻力和输送带运行总阻力、电动机的供电频率等^[36]。

对于完成设计的带式输送机,电动机、传动装置、驱动滚筒等都已确定。要改变输出的牵引力,只能靠调节电动机的供电频率来实现。

将牵引力配比公式两边对 $\frac{f_1}{f_2}$ 求导:

$$(r_{1/2})' = \frac{\frac{R_1}{R_2} [(A_2 - A_1) W_0 + 2]}{\left\{ -\left(\frac{1}{E_0} + \frac{R_1 A_1}{R_2} f_{1/2} \right) W_0 + \left[1 - \frac{W_1}{E_0} - \frac{R_1}{R_2} f_{1/2} \right] \right\}^2} \quad (3.37)$$

$(A_2 - A_1)W_0 \ll 1$, 所以 $(r_{1/2})' > 0$, 牵引力分配比 $\frac{F_1}{F_2}$ 是 $\frac{f_1}{f}$ 的单调增函数。当 F_1 过大时, 为了调节功率平衡可降低 f_1 、升高 f_2 ; 当 F_2 过大时, 为了调节功率平衡可降低 f_2 、升高 f_1 。对于多电机驱动系统, 通过调节频率也可以来调节电机的输出功率。

(4) 发电状态下牵引力的配比分析

上述分析限于在电机电动状态下, 若电机处于发电状态时, 牵引力的配比分析如下:

- 1) 在发电状态下, 电机的牵引力为制动力;
- 2) 带式输送机正常运行时, 输送带和传动滚筒至少在分离点两者的速度相等;
- 3) 驱动装置常数 A 在发电状态时: $A = \frac{S_{de} R \eta'}{M_{de} i_a}$

4) 输送机所受的总阻力 $W_0 \leq 0$

则发电状态下两个驱动滚筒牵引力的分配比例关系为:

$$r_{1/2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{-(\frac{1}{E} - RfA_2)W_0 - [1 - \frac{W_1}{E_0} - \frac{R_1}{R_2} f_{1/2}]}{RfA_1W_0 + [1 - \frac{W_1}{E_0} - \frac{R_1}{R_2} f_{1/2}]} \quad (3.38)$$

将公式 (3.38) 两边对 $\frac{f_1}{f_2}$ 求导

$$(r_{1/2})' = \frac{\frac{R_1}{R_2} [W_0(A_2 - A_1) + 2]}{\left\{ RfA_1W_0 + \left[1 - \frac{W_1}{E_0} - \frac{R_1}{R_2} f_{1/2} \right] \right\}^2} \quad (3.39)$$

发电状态下与电动状态下的结论相同, 当 F_1 过大时, 为了调节功率平衡可降低 f_1 、升高 f_2 ; 当 F_2 过大时, 为了调节功率平衡可降低 f_2 、升高 f_1 。

3.5.3 功率平衡控制策略

在设计输送机时, 一般选用相同性能参数的电机, 供电电压相同, 功率因素近似相等, 此时, 我们可依据各电机的负载电流来进行功率的平衡。当电机转速大于同步转速时, 电机处于发电状态, 此时电机电流为正值; 当电机转速小于同步转速时, 电机处于电动状态, 电流为负值。驱动装置的控制系統通过采集各电动机同一时刻的电流值的平均值为控制参数来实现控制的^[37, 38]。

其工作过程是: 先将电流信号 $I_1, I_2 \dots I_n$ 采集到控制器。由控制器计算出电流的平均值

$I_p = \frac{\sum_{j=1}^n I_j}{n}$ 。将 I_p 与各个电机的电流 $I_j (j=1, 2, \dots, n)$ 比较, 可得到

$$u_1 = I_1 - I_p, u_2 = I_2 - I_p, \dots, u_n = I_n - I_p。$$

当 $\left| \frac{U_j}{I_p} \right| \times 100\% < 5\%$ 时，相应的电机的频率不需调节；

当 $\frac{U_j}{I_p} \times 100\% > 5\%$ 时，相应的电动机频率逐渐减小；

当 $\frac{U_j}{I_p} \times 100\% < -5\%$ 时，相应的电机频率逐渐增加；

运行过程中若出现两台电动机一台发电、一台电动时，系统会通过比较两台电动机电流的绝对值来判断输送带处于启动加速状态，还是处于制动减速状态。若电动状态的电动机电流绝对值较大，则是加速状态，系统需要牵引力，要加大发电电动机的电压频率；若制动状态的电动机电流绝对值较大，则是减速状态，系统需要制动力，要减小电动电机的频率，使其进入发电状态；最后计算电流平均值，调节功率平衡。

3.6 小结

本章研究了输送机的启动特性，分析了带式输送机启动的三个阶段及这三个阶段中驱动装置与输送带间力的相互作用；通过将输送带看作具有库仑阻尼力的线弹性模型，讨论了弹性波沿输送带传播的速度；分析了在带式输送机启动的过程中输送带紧边和松边张力波的产生和传播及它们相遇时产生的振荡对输送机的影响；将输送带按粘弹性体的力学性质，建立输送机动力学模型，求得输送机在启动过程中输送带各点随时间的推移所发生的速度，加速度和张力的变化；根据带式输送机启动时传动滚筒作用力的运动平衡方程计算了带式输送机的启动加速度，通过仿真比较了不同加速度曲线对输送带张力影响，为选择理想的启动速度曲线提供理论依据；根据摩擦传动的理论得出了多电机驱动的理想功率分配比，基于驱动滚筒和输送带间没有相对滑动得出了多滚筒间的牵引力的实际分配，通过监测电机电流的方法获得电动机的运行状态，提出了多电机功率平衡的策略。

4 变频驱动系统研究

4.1 变频器的基本概念

4.1.1 变频器的结构原理

在变频调速中，常使用电压源型变频调速器，其工作原理是：电压与频率固定的三相对称交流电经过不可控整流桥后转化为脉动直流电，再将脉动直流电滤波后，通过逆变器将直流电转换为频率可调、电压可调的等效交流电，输出给异步电机。由于电机的转速与电源频率成正比，通过改变电源输出的频率，调节电机转速，实现平滑无级调速^[39-40]。

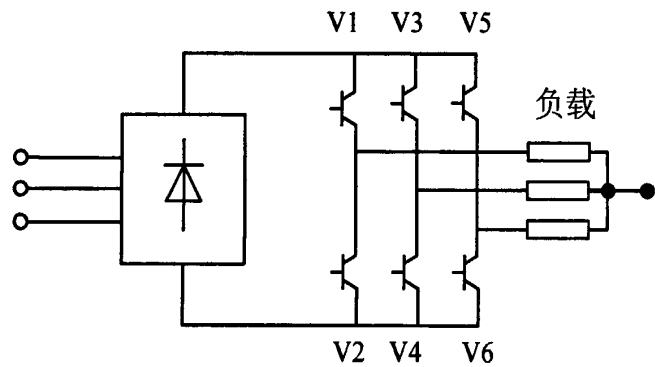


图 4.1 变频器构成原理图

变频器的主回路一般由逆变器、整流器和滤波系统组成。在正相序工作时，电子元件按 V1→V2→V3→V4→V5→V6→V1 顺序导通，在负相序工作时，逆变电子元件按 V6→V5→V4→V3→V2→V1→V6 的逆序导通。改变电子元件的导通周期 T 就可改变交变电源频率，而改变电子元件的导通时间就可改变交变电源电压。

4.1.2 变频器调速原理

变频调速原理是电机输出转速 n 在负载恒定（转差率 S 恒定）时正比于电源频率 f，见下式：

$$n = 60f(1 - s) / p \tag{4.1}$$

式中：n——电动机转速
f——工作电源频率
s——电动机转差率
p——电动机极对数

交流电动机变频调速，启动加速度可以控制在 0~0.05 m/s²，调速范围宽、精度高，并实现启制动速度曲线的自动跟踪。可以控制输送机按照“S”性曲线启动和制动，实现系

统的动态稳定可靠。通过变频器调整各电机的机械特性尽量接近,避免某些电机作负功,而某些电机过载。

4.2 变频器选型及控制模式

综合布尔台 3⁻¹ 煤大巷带式输送机功率大,煤矿井下环境恶劣,变频器散热问题,国家煤矿安全规程,井下设备要求防爆性能考虑,采用变频器柜安装在地面的驱动方式。

变频器采用瑞士 ABB 公司生产的最先进的原装进口产品 ACS 1000 系列中压变频装置,系统配置如下图 4.2 “VFD 系统配置”所示: ACS 1000 。

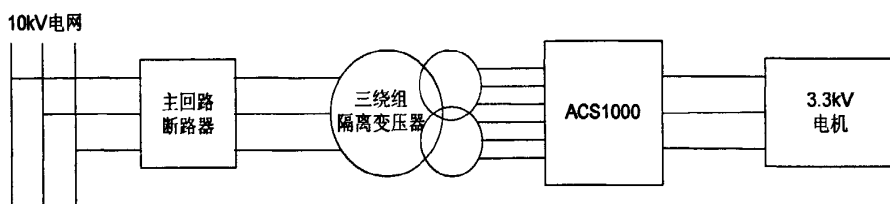


图 4.2 VFD 系统配置

ACS1000 是具有明确定义功能和接口的 ABB 最新一代的全数字交流电压源型变频器,其最大的优点是采用了集成门极换流晶闸管 IGCT 以及正弦波输出滤波器的综合应用,使变频器输出电压的正弦波特性更好,适用于国产防爆电机,电机无需降容使用,而且不会引起电机的谐振。同时将减小尖峰电压对电机绝缘性能的损坏,并且变频器和电机之间的电缆长度有所提高,DTC(Direct Torque Control)模式下,距离可达到 5 km,完全满足 3⁻¹ 煤大巷带式输送机变频器至电机 582 m 距离的要求,实际电缆按照 700 m 计算。

控制方式采用 DTC(即直接转矩控制),可以避免电机输出转矩的脉动,因此减小了对负载和相应设备的冲击。ACS1000 可以通过设置参数来选择不同的操作方式和各种功能,也可以由 PLC 系统的控制通过各种通讯协议 DeviceNet 与变频装置实现通讯,可以由此产生传动控制器所需的给定值,调取变频调速装置所有参数设定和运行参数。

使用 ACS1000 中压变频装置驱动皮带电机,具有起停时间可调,启动电流小,启动转矩大,减小机械磨损和皮带损耗,使用主/从应用宏可以解决电机轴经由皮带相互连接的三台传动之间的负荷均衡分配问题,在输送物料量发生变化时可以调节电机转速 [41]。

在 3⁻¹ 煤大巷带式输送机变频驱动控制上采用 ACS1000 内配置的主/从控制宏,主机和从机的所有传动命令和给定设置都可以通过主机控制盘或与主机相连接的外部控制台来给出,从机通过连接到主机的光缆获得控制信号。如图 2.2、2.3 所示:

4.3 变频调速系统主要设备及特性

变频调速系统由主回路断路器、隔离变压器、变频器和电动机等组成。如图 4.2 VFD 系统配置所示。

4.3.1 主回路断路器

主回路断路器的主要功能是隔离变压器原边额定电压和额定电流，配备电流互感器和保护继电器共同保护变压器和变压器一次侧电缆。主回路断路器能承受变压器的冲击电流，能响应变压器的短路故障，能响应变压器和电缆的长时间过载。从安全的角度考虑，主回路断路器必须由 ACS 1000 变频器来操控，在就地柜控方式下只能在实验位置进行分合闸控制试验。型号选择 VD4 12 1250。具体参数如下：

标准：IEC 62271-100, CB 1984-2003;
 额定电压 U_r : 12(kV);
 额定绝缘电压 U_s : 12(kV);
 额定工作耐受电压 U_d (1min): 42(kV);
 雷电冲击耐受电压 U_p : 75(kV);
 额定频率 F_r : 50-60 (Hz);
 额定电流 ($40^{\circ}C$): 1250(A);
 额定对称短路电流: 25(kA);
 额定短时耐受电流(4s): 25(kA);
 分闸时间: 40-60(ms);
 燃弧时间: 10-15(ms);
 开断时间: 50-75(ms);
 合闸时间: 60-80(ms);
 环境温度: $-15-+40(^{\circ}C)$;
 热带气候标准: IEC60086-2-30 IEC 721-2-1;
 电磁兼容性: GB 11022 IEC 60694

4.3.2 隔离变压器

ACS 1000 变频器必须通过隔离变压器供电。变压器二次侧绕组必须根据变频器输入整流桥脉冲数的不同提供相位移。对于 12 脉冲变频器，变压器二次侧两个绕组之间的相位移位 30° 。隔离变压器另外一个作用是提供足够的感抗将电网侧谐波限制在 IEEE 519-1992 和 GB/T 14549-93 标准所要求的限值范围内。型号选择 ZBS-M-2000，具体参数如下：

连接组别 (IEC 76-1): Dy11d0;

整流器脉冲数：12 脉冲；
功率器件类别：二极管；
高压绕组额定容量(IEC 61378-1) S_R ：2000(kVA)；
低压绕组额定容量：1000 kVA；
高压侧额定电压：10000 V；
电压波动范围：±10%；
额定频率波动范围：50± 5%；
变压器高压侧额定电流：115.5 A；
低压侧额定电压：1903 V；
变压器二次侧额定电流 303.4 A；
理想空载直流电压：5140 V；
电源系统最大短路容量：500 MVA；
变压器类：油浸式；
外部冷却介质-冷却介质最高温度：40[°C]；

4.3.3 ACS1000 变频器

ACS 1000 变频器是标准化的高压交流传动系列产品，拓扑结构采用电压型三电平 IGCT 逆变器，适用于平方转矩负载和恒转矩负载。ACS 1000 其最高的系统可靠性源自于 ABB 最新一代功率半导体元器件集成门极换流型晶闸管(IGCT)。卓越的转矩特性和速度特性源自于 ABB 直接转矩控制(DTC)技术。ACS 1000 变频器具备完善的接口，可以友好地集成到大型过程控制系统中。

ACS 1000 变频器的拓扑结构为电压型三电平 IGCT 逆变器（如图 4.3 所示）。采用最少的元器件却使 ACS 1000 变频器具有较高的可靠性。基于直接转矩控制(DTC)技术的 ACS 1000 变频器可提供精确的速度和转矩控制^[42]。

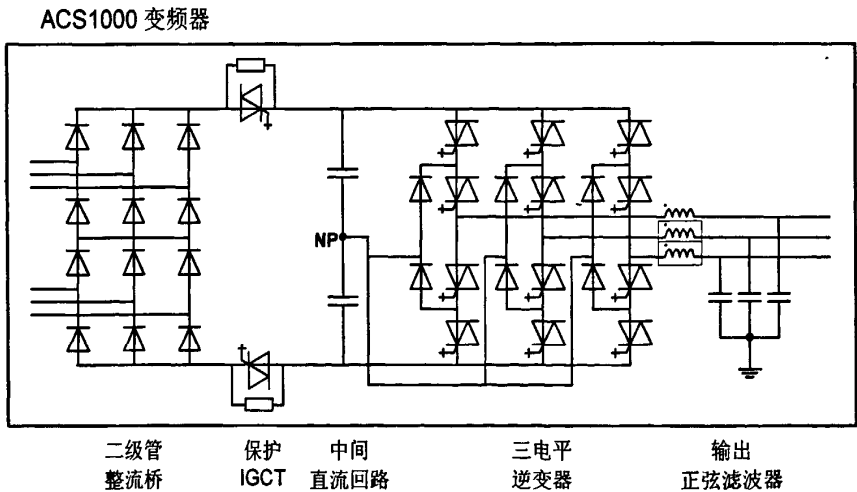


图 4.3 ACS 1000 12-脉冲系统拓扑结构图

(1)IGCT 功率半导体器件

新型器件 IGCT(集成门极换流型晶闸管)既有 IGBT(绝缘门极双极性晶体管)开关频率高的特性,还有 GTO(可关断晶闸管)的容量大、耐压高和低导通损失率特性。因此 IGCT 无须串联,可直接应用于高压电网中。

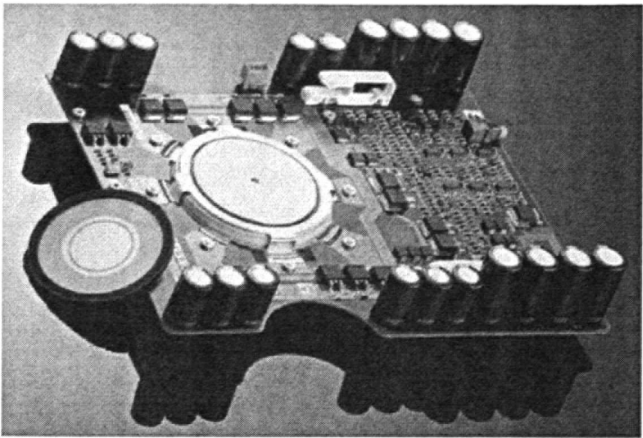


图 4.4 IGCT 功率半导体器件图

1) IGCT 技术参数

瞬时开关频率高达: $20(KHz)$;

开关时间(关断): $1(\mu s)$;

电流变化率: $4(kA/\mu s)$;

电压变化率: $10-20(kA/\mu s)$;

交流阻断电压: $4.5(kV)$;

直流阻断电压: $2.8(kV)$;

IGCT 的故障率 FIT: 100;

2) IGCT 特性

IGCT 特性主要有: 与 IGBT 相媲美的快速开关特性、低开关损耗、低通态损耗、均质开关特性、无需缓冲电路、集成续流二极管、高可靠性等。

因此由 IGCT 构成的直接转矩控制变频器 ACS 1000 结构更简单。如拓扑结构图所示,三电平逆变器仅由 12 只 IGCT 构成,加之直流回路中起保护作用的两只 IGCT,整个系统仅采用 14 只大功率半导体元器件,无需串并联的单管拓扑结构,大大提高了系统的可靠性;同时由于 IGCT 通态损耗和开关损耗低,大大提高了系统的效率。ACS 1000 系统的平均无故障时间为 6 年。

(2) 直接转矩控制(DTC)技术

直接转矩控制(DTC)直接对电机的磁通和转矩进行控制。将电机电流和直流电压测量值输入建立电机数学模型,该模型每 25 微秒就产生一组转矩和磁通值。电机转矩比较

器将转矩实际值与转矩给定值进行比较，磁通比较器将磁通实际值与磁通给定值进行比较，根据两个比较器的输出，优化脉冲选择器确定逆变器的开关状态。

DTC 控制技术将转距控制器和调制器集成；转距控制周期为 $25\mu s$ ，动态精度和静态精度高；采用 DTC 转矩响应时间小于 $3ms$ ，响应速度快，而采用矢量控制转矩响应时间为 $10\sim 20ms$ ，采用开环控制响应时间大于 $100ms$ ；零速满转距的高启动转距特性，适用于传送带设备和挤压机应用；高过载能力，适用于窑应用；

(3) LC 低通正弦波滤波器

标准的 ACS1000 输出侧配置有电流反馈来控制低通 LC 正弦波滤波器的运行。根据设计允许通过的低频频率恰好低于逆变器输出侧所采用最低的开关频率。这样提高输送给电机的电压和电流的纯度。ACS 1000 变频器输出电压和电流总体谐波均小于 2% ，转矩脉动小于 1% 。

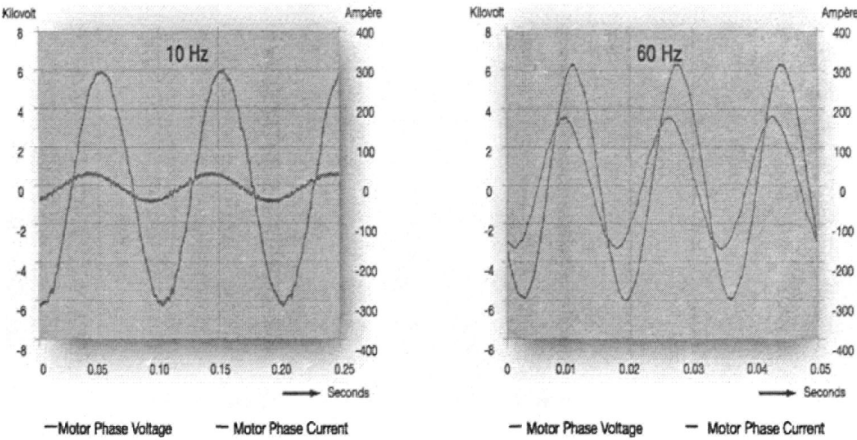


图 4.5 低通 LC 正弦波滤波器波形图

LC 低通正弦波滤波器的特点为：

1) 消除谐波造成的发热。发生在电机输入端子的电压反射和电压加倍现象不再出现，变频器可以直接拖动标准高压电机，而不需要考虑发热降容因素。因此 ACS 1000 可以适用于所有标准高压绕组绝缘系统。

2) 高频共模电压得到抑制，也就不存在导致电机轴承损坏的容性耦合高频电流，不需对电机的绝缘加以特别的考虑。

3) ACS1000 对电机电缆的长度没有限制可达 $5\sim 20km$ 。

(4) 无熔断器设计

ACS1000 是使用 IGCT 作为主电路保护无熔断器设计的高压变频器。位于整流器和直流回路之间的 IGCT 可以直接把逆变器和主电源隔离，且分断时间极短仅为 $25\mu s$ 。使用 IGCT 作为传动系统的保护设备，不仅元器件数目少，而且安全可靠。

(5) 特殊功能

1) 电机辨识

ACS 1000 内部 DTC 电机模型能够自动辨识电机的基本参数，并写入到变频器中。此程序通常在调试时只需运行一次。如果需要，随时可以对电机进行重新辨识运行。

2) 主电源失电跨越

当主电源断电时，旋转的电机和负载的动能将向 ACS 1000 提供足够的能量，以维持 ACS 1000 继续运行，但变频器没有转矩输出。当供电恢复后，电动机自动地加速至原来设定的速度值并回复到正常工作状态。根据负载惯性，失电跨越的时间最长可达 5 秒。

3) 磁通优化

当电机负载未饱和时，ACS 1000 自动优化电机磁通，降低总体能耗和电机噪音。依据负载转矩和速度，总体效率(变频器和电机)可以提高 1-10%。

4) 跟踪启动

处在惯性旋转状态的电机可以切至 ACS 1000 的输出侧。ACS 1000 自动检测电机的运行状态并重新启动电机。

5) 临界转速

当电机在调速过程中需要避开某些电机速度或速度带时，例如机械振动问题，可采用临界转速功能。ACS 1000 最多可以设置 5 组不同的在运行过程中需要跨越的速度或速度带。

6) 保护功能

ACS 1000 有完善的保护功能，包括：电机绕组温度、电机欠载、电机堵转、整流桥短路、充电故障、电机超速、过电流、逆变器短路、电机缺相、欠电压、接地故障、过载、通讯故障、测量信号丢失、电池检测等。

(6) 控制器硬件

1) 辅助电源

ACS 1000 的辅助电源为三相 400VAC，50Hz，辅助电源用于风机。

2) 控制电源

ACS 1000 的控制电源为单相 230VAC，50Hz，来自于用户的 UPS 系统。辅助隔离变压器产生 27VDC 和 20VDC 电压给变频器中各种不同类型的电子控制板供电。

3) 电子控制装置

ACS1000 为全数字智能型变频器，其控制核心主要由两块电子线路板来完成：AMC-33 电机与应用控制板和 INT 系统接口板。AMC-33 负责逻辑运算、DTC 电机模型计算以及与 DTC 算法相关的控制环的处理。INT 负责产生 IGCT 门极触发信号和处理传动系统控制和保护的电压和电流信号。

AMC-33 主控板和 INT 接口板均采用 DSP 数字信号处理器(主频 150MHz)和 ASIC 特殊应用集成电路，以满足高速和可靠的控制技术的工艺要求。系统采用光纤通讯以确保高水平的噪声抑制。

4) I/O 接口板

空冷型变频器标准配置两块 I/O 板。每块 I/O 接口板提供 14 路 DI、6 路 DO、4 路 AI 和 2 路 AO。

5) 通讯接口

除硬接线 I/O 之外, ACS1000 与目前市场上所有的主要的现场总线兼容, 如 DeviceNet 等。

(7) 总体结构设计

1) 防护等级

空冷型 ACS 1000 标准产品提供 IP21 保护等级的柜体。

2) 电缆进出线

功率电缆和控制电缆的进出线方式均可以采用上进出线或下进出线的方式。两种方式的并存, 可以将通讯及控制电缆和动力电缆异径敷设, 避免信号的干扰, 提高控制的可靠性。

3) 柜门机电联锁

功率单元的柜门与接地开关以及主电路断路器机电联锁, 从而保证只有在断开主电源, 直流电容放电结束并且接地开关接地后, 功率单元的柜门才能打开。同样, 只有在关好柜门并且接地开关处于断开状态, 才能闭合主回路断路器给变频器上电。从而确保系统运行时候的人员安全^[43]。

4.4 带式输送机变频驱动控制系统设计

变频调速驱动系统的控制部分为了能够更好的融入到布尔台现有的综合自动化控制系统中去, 也采用了自动化控制系统的统一平台 Rockwell Controllogix, 变频调速驱动系统和自动化控制部分的接口采用 DeviceNet 通讯接口, 在变频器内配置 NDNA-01 接口模块, 通过 DeviceNet 总线方式, 将变频驱动系统和自动化控制系统结合在一起。从而通过综合自动化控制系统, 将变频调速驱动系统的参数、控制接入到调度室。

变频调速驱动系统的控制部分包括: 高压柜控制、变频器控制、辅助电机减速机油泵、风扇控制、皮带保护系统通讯控制、其它信号采集或控制等。

4.4.1 高压柜控制柜

高压柜必须要通过变频器直接控制, 变频器必须对高压柜断路器有绝对的控制权。因此在此设计高压柜时候, 必须取消传统上就地柜控的方式。此外为了防止变频器内辅助电源丢失、高压柜控制电源也同时消失的极端情况的出现, 在断路器内增加失压保护的机械执行机构, 确保变频器的安全^[44, 45]。高压柜控制原理图及高压柜控制连接图如下图 4.6、4.7:

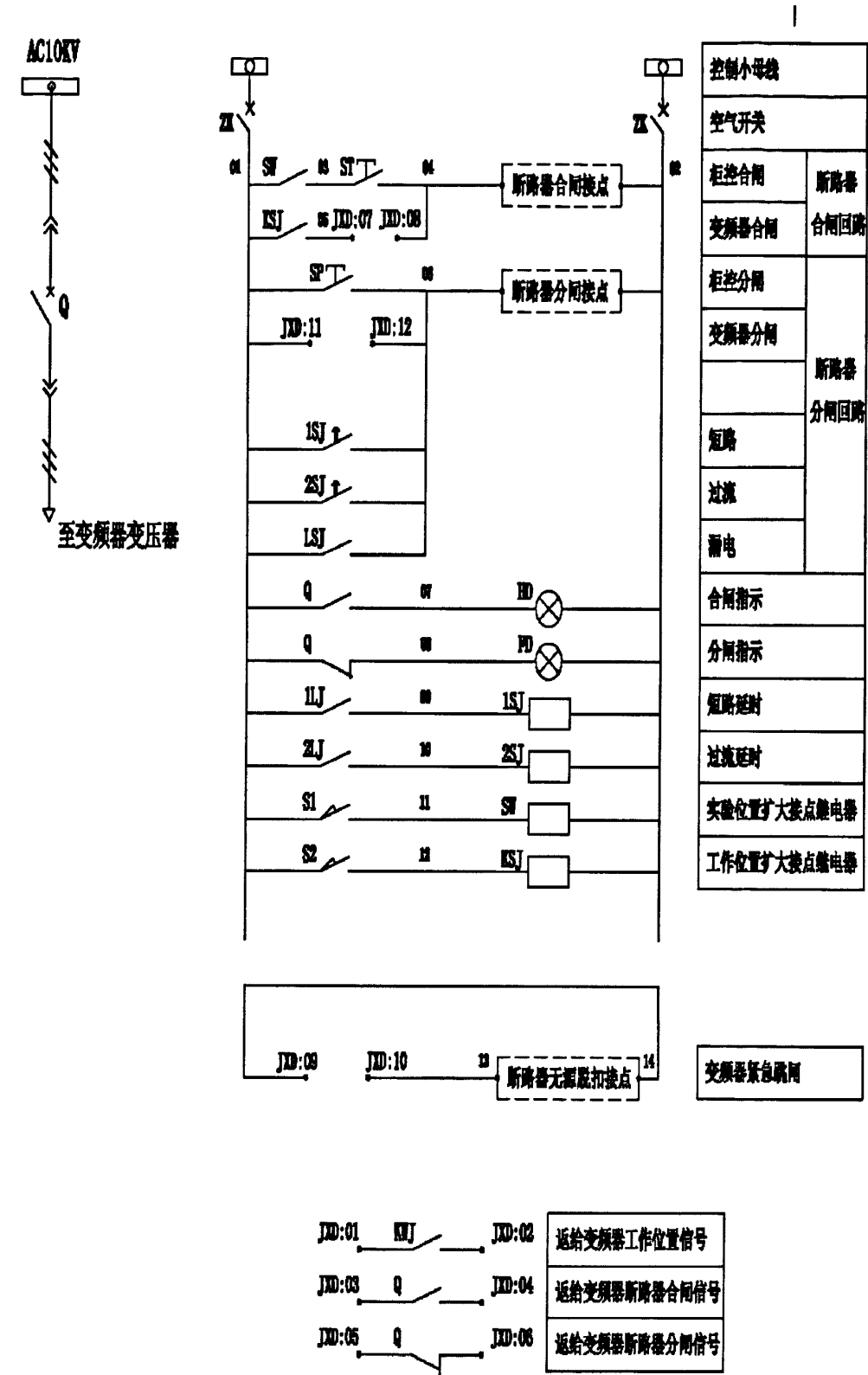


图 4.6 高压柜控制原理图

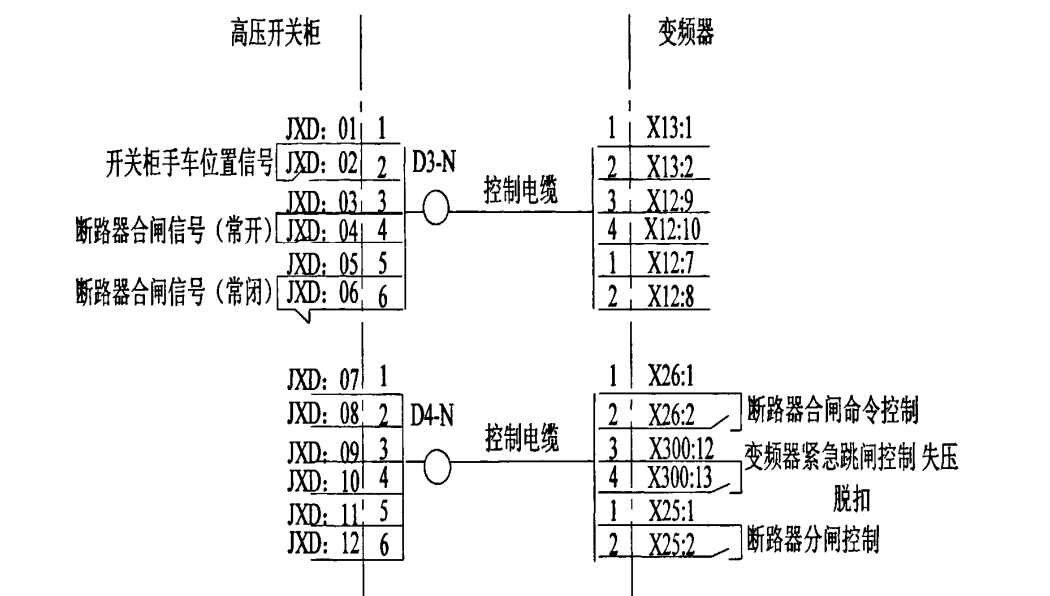


图 4.7 断路器控制连接

4.4.2 变频器的控制

3⁻¹ 煤大巷带式输送机变频器置于地面主井变频器室, 主电动机和辅助电机均在大巷带式输送机机头, 且设有机头低压配电室, 故系统设计带式输送机控制主站与自动化系统的主井驱动机房控制系统合二为一:

采用 DeviceNet 网络与 ACS1000 变频器通讯完成变频系统监控; 自动化控制主站配置 DeviceNet 扫描适配器, 结合变频控制柜的 NDNA-01 接口模块, 实现变频器的监控功能。将变频器控制参数选择为“Com.Module”, 并对变频器中参数组“Group 91”、“Group 92” 进行设置, 将需要读写的参数映射到 DNB 地址表中。如下图:

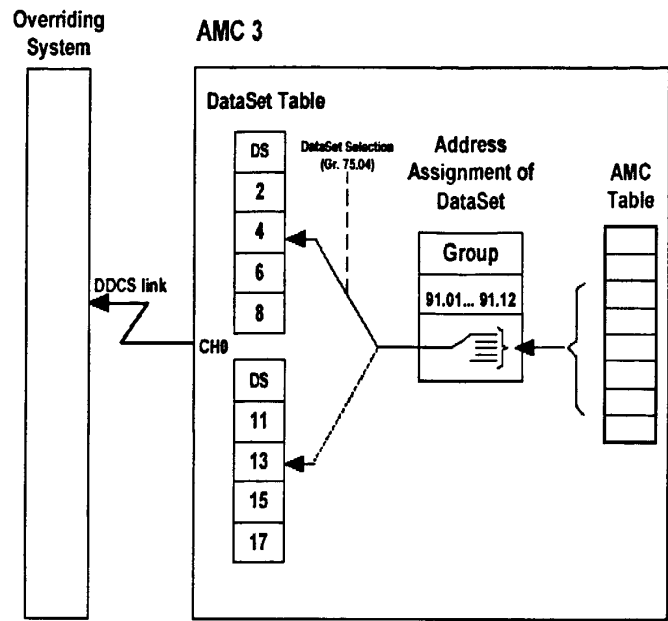


图 4.8 变频器参数设置

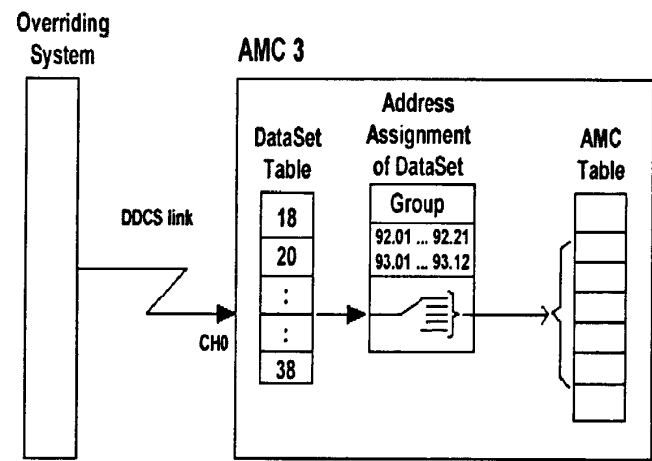


图 4.9 变频器参数设置

具体设置如表 4.1 所示：

表 4.1 输入地址映射表

DNB 映射地址	参数代码	参数描述	参数组	参数
Local:7:I. Data	801	变频器主状态字	91	01
Local:7:I. Data	803	变频器辅状态字	91	02
Local:7:I. Data	810	变频器辅状态字	91	03
Local:7:I. Data	901	变频器故障字	91	04
Local:7:I. Data	903	变频器故障字	91	05

DNB 映射地址	参数代码	参数描述	参数组	参数
Local:7:I. Data	904	变频器故障字	91	06
Local:7:I. Data	905	变频器故障字	91	07
Local:7:I. Data	907	变频器故障字	91	08
Local:7:I. Data	103	变频器转速	91	09
Local:7:I. Data	107	变频器电流	91	10
Local:7:I. Data	108	变频器转矩	91	11
Local:7:I. Data	110	变频器功率	91	12
Local:7:0. Data	706	变频器主控字	92	01
Local:7:0. Data	324	变频器速度给定	92	02
Local:7:0. Data	325	变频器转矩给定	92	03
Local:7:0. Data	2005	变频器转矩限幅	92	04
Local:7:0. Data	2202	变频器加速时间	92	05
Local:7:0. Data	2203	变频器减速时间	92	06
Local:7:0. Data	2207	变频器积分软化时间	92	07
Local:7:0. Data	2601	变频器方式选择	92	08
Local:7:0. Data	NONE	备用	92	09
Local:7:0. Data	NONE	备用	92	10
Local:7:0. Data	NONE	备用	92	11
Local:7:0. Data	NONE	备用	92	12

4.4.3 井下带式输送机机头辅助设备控制

(1) 机头低压柜中加装 Remote FLEX I/O，主站采用 Remote I/O 网络与其通讯完成辅机系统监控；

(2) 皮带保护系统通过 RS485 接口，采用 MODBUS RTU 协议接入 Remote FLEX I/O 中的 MODBUS 通讯模块，实现系统智能接入；

(3) 其它信号如机头启停按钮信号、输送带张力信号及电机、减速器的温度信号等均 I/O 方式接入 Remote FLEX I/O 中；

所有控制逻辑均由自动化系统的主井驱动机房监控系统的 CPU 完成，提高了系统的可靠性和易维护性^[47, 48]。

控制系统配置原理图如下：

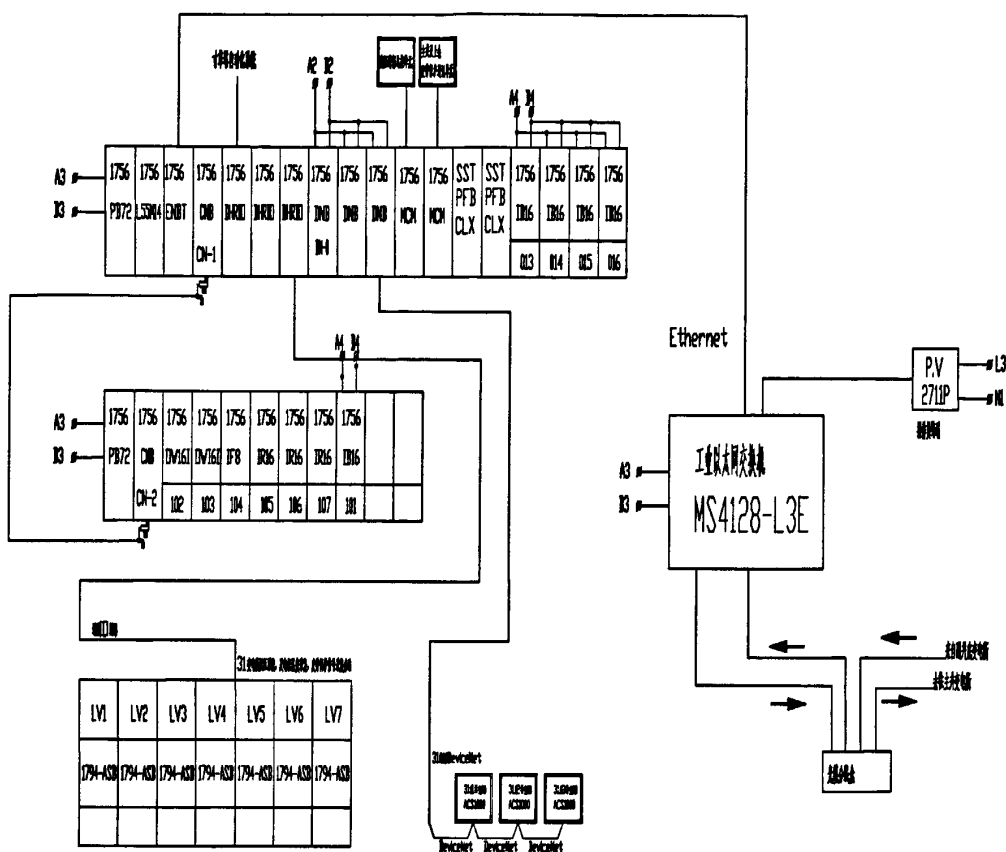


图 4.10 控制系统原理图

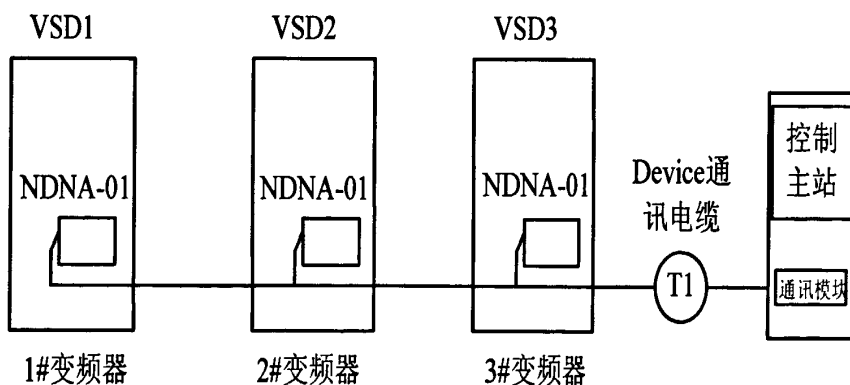


图 4.11 DeviceNet 通讯连接图

4.5 变频调速的速度控制

变频驱动系统的主驱动采用的是速度给定的控制方式。在速度给定前速度曲线经过了“S”形优化。“S”曲线由软化时间和加（减）速时间两个参数来取定。积分软化时间一般为加速时间的 10%，如下图：

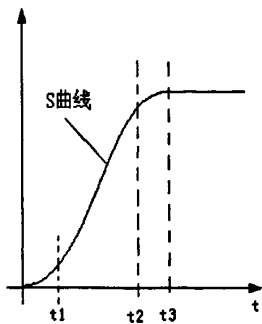


图 4.12 S 形速度曲线图

图中， $t_1 = t_3 - t_2$ 为软化时间， t_3 为加速时间，在 t_1 至 t_2 之间，为近似确定斜率的直线段。经过“S”曲线优化，速度给定值被给定到变频器内部的 PID 速度控制器中，然后按照 PID 的调节规则，对电机实现速度输出，使电机速度沿着设定的“S”曲线运行^[49]。

在 PID 控制中，比例项用于纠正偏差，积分项用于消除系统的稳态误差，微分项用于减小系统的超调量，增加系统稳定性。其控制原理图为：

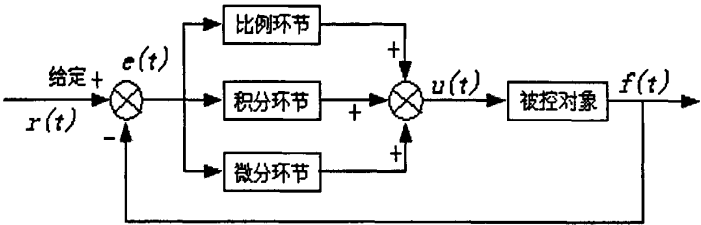


图 4.13 PID 控制系统原理图

速度 PID 控制的原理是：速度的给定值为 $r(t)$ ，反馈值为 $f(t)$ ，给定值与反馈值的差值 $e(t)$ 为系统实际的输入值。 $e(t)$ 经过比例环节、积分环节、微分环节后得到系统的输出值 $u(t)$ ，输出到被控对象中。经过与理想的输入值比较，得到一个偏差为系统的反馈值 $f(t)$ ，反馈值返回到 PID 控制系统的输入端与给定值叠加，作为下一个输入值 $e(t)$ 输入 PID 控制系统中，直到系统的输出符合给定的要求。

PID 控制系统的控制规律可有下列的公式描述：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d de(t)}{dt} \right] \tag{4-2}$$

其中： K_p 为比例常数， T_i 为积分常数， T_d 为微分常数；

系统的传递函数为：

$$G(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \tag{4-3}$$

通过调节 PID 中的三个常数，可以得到一个稳定的速度控制系统。如下为系统在进行 PID 控制时的系统响应曲线：

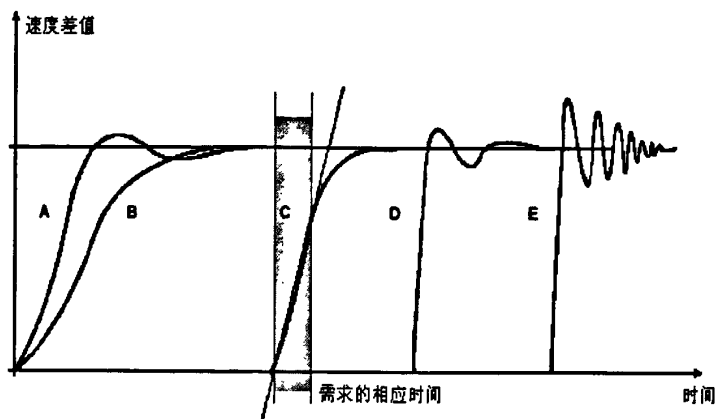


图 4.14 速度响应曲线

曲线 a，欠补偿，其中比例常数和积分常数设置值偏小，比例参数小，积分时间太短；

曲线 b，欠补偿，其中积分常数设置偏小，积分时间太短；

曲线 c，正常，速度响应时间在要求的范围内，没有波动；

曲线 d，正常，速度响应快，在设定值范围内波动正常，适合需要动态稳定的系统响应；

曲线 e，过补偿，在设定值附近波动大，比例常数设置值偏大，积分常数设置值偏小。

4.6 变频驱动系统多电机功率平衡

布尔台 3⁻¹ 煤大巷带式输送机变频驱动由三台驱动电机组成，其中两台为连轴电机、一台张紧电机。两台连轴电机一台为主驱，一台为从驱，张紧电机为次主驱（从驱）。主驱控制为速度给定控制，从驱为转矩给定，次主驱为速度给定。

1) 主驱和从驱：在平衡调节中，首先给主驱设定一个速度，主驱产生转矩，将主驱的转矩给定给从驱，从而达到连轴电机的转矩跟随，如果从驱的速度高于主驱，则由于同轴原因，势必对主驱有拖动作用，从而使主驱转矩降低，而从驱转矩给定变小，速度降低；同理当从驱的速度低于主驱使后，主驱对从驱有拖动作用，从而主驱转矩变大，从驱的转矩给定增大，从驱速度提高，这样，主驱和从驱之间通过转矩跟随，达到速度平衡。

2) 主驱和次主驱：在平衡调节中，将主驱的速度给定加 2%给次主驱，从而起到张紧的作用，由于在带式输送机运行方向上，次主驱的速度比主驱速度要快，这样就形成了次主驱拖动主驱的现象，转矩比主驱大，因此次主驱进行了转矩的限幅，即将主驱的实际转矩作为次主驱的转矩限幅，这样，一方面，次主驱速度要比主驱快，另一方面又受到了主驱的转矩限幅，次主驱的速度由于受到了主驱转矩的限幅，速度达不到给定值，

从而次主驱的速度、转矩就跟主驱的速度、转矩达到一个平衡，从而实现了三驱之间的转矩平衡。

由此可以得出，三驱之间的平衡调节，主从之间通过转矩控制，主驱和次主驱之间通过速度给定和转矩限幅来实现。

4.7 小结

本章详细介绍了变频器的结构、变频调速的基本原理；布台尔煤矿大巷带式输送机的工艺布置，技术参数和工作环境；针对该带式输送机进行了变频控制系统的研究及变频的控制模式的选择；详细讨论主回路断路器、隔离变压器、ACS1000 变频器等部件的特性；对变频驱动系统的控制系统进行了研究，包括高压控制柜、变频器、机头辅助设备的控制设计。

5 变频驱动系统实验验证

5.1 实验目的

为了验证带式输送机系统各项技术指标是否达到工业要求,为了设备运行有可靠的技术依据保证,特别是为了测试对配置有变频器控制的远距离带式输送机运行中的各项技术数据,为下一步开展输送机的研究和设计提供可靠的技术依据和实验数据。

5.2 实验方案

根据以上的理论研究和工程实际应用状况,测试方案拟定如下^[50]:

(1)观察带式输送机在空载启动时驱动滚筒的转矩和速度曲线的变化及各个滚筒的转矩、速度曲线的波动,分析研究的变频驱动系统能否达到带式输送机对软启动装置在启动加速时的驱动力和速度变化的要求;

(2)观察带式输送机正常停机和紧急制动时驱动滚筒输出转矩和速度曲线的变化,分析变频驱动系统能否达到带式输送机对驱动装置在正常停车和紧急制动时对驱动滚筒输出转矩的要求;

(3)观察负载量发生变化时,电机输出转矩曲线的变化,分析变频驱动系统的输出转矩能否随着负载量的变化而自动调整;

(4)观察带式输送机调速加速、减速过程中,各个驱动的输出转矩和速度曲线的变化,分析变频驱动系统可靠性能;

(5)观察带式输送机运行 20 个小时后的转矩和速度曲线的变化,分析变频系统的稳定运行效果;

(6)检测带式输送机在空载调速运行时,给变频器变压器供电的高压柜的输出功率和输出电流的变化,分析变频系统的节能效果;

通过以上各种工况下的实验观察、记录、检测,分析变频系统在带式输送机使用过程中,驱动电机的功率平衡、速度变化是否满足工业设计和理论研究的要求,进一步可以推测输送带中张力的变化是否达到了平稳变化的要求。

5.3 变频驱动系统设定

如图 2-1 所示为带式输送机的简单布置图,其中 M1、M3 为主驱,M2 从驱(或者 M2、M3 为主驱,M1 为从驱),M1 为速度给定,M2 为转矩给定,M3 速度给定。在控制设计上,M1 电机速度通过在 HMI 上设定百分比速度(10%~100%,设定根据电机参数 5-50Hz),将 M1 主驱的实际转矩设定,M2 转矩给定,将 M1 的速度给定增加 2%,

设定 M3 的速度给定，并将 M1 的实际转矩作为 M3 的转矩限幅。

5.4 变频驱动系统在各种工况下的性能实验

为了更好的监测带式输送机的启动运行状态，变频启动系统设置监控系统，在监测控制系统的显示窗口中，可以将各种载荷下的带式输送机的运行状态通过各种曲线显示出来。

5.4.1 空载启动过程

带式输送机启动及运行过程：启动带式输送机前确认带式输送机保护系统运行正常，变频器正常，处于准备好状态，冷却辅佐系统正常。

带式输送机的启动及运行过程主要分四个阶段：

(1)预张紧阶段（带式输送机速度由 $0 \sim 10\%V_0$ ），此阶段，带式输送机按设定的一段“S”曲线运行，此段“S”曲线由加速时间和软化时间来确定其形状；

(2)加速过渡阶段（带式输送机速度维持在 $10\%V_0$ ），此阶段，带式输送机按直线速度曲线运行，速度维持在 $10\%V_0$ ；

(3)加速阶段（速度由 $10\%V_0$ 加速至设定值），此阶段，带式输送机按设定的另一段“S”曲线运行，此段“S”曲线由加速时间和软化时间来确定其形状；

(4)运行阶段（速度维持在设定值运行），此阶段带式输送机达到预设定的速度稳定运行。

在集控启动带式输送机的控制画面中设定带式输送机的运行速度，然后在带式输送机的控制画面中点击“启动”按钮，此时带式输送机将按照设定的启动曲线启动。

(1)预张紧阶段，启动时先以 50s 的加速时间，10s 的软化时间的“S”曲线运行。这一变化过程中的驱动系统驱动转矩和驱动滚筒转速图，如图 5.1 中竖线左边的部分。

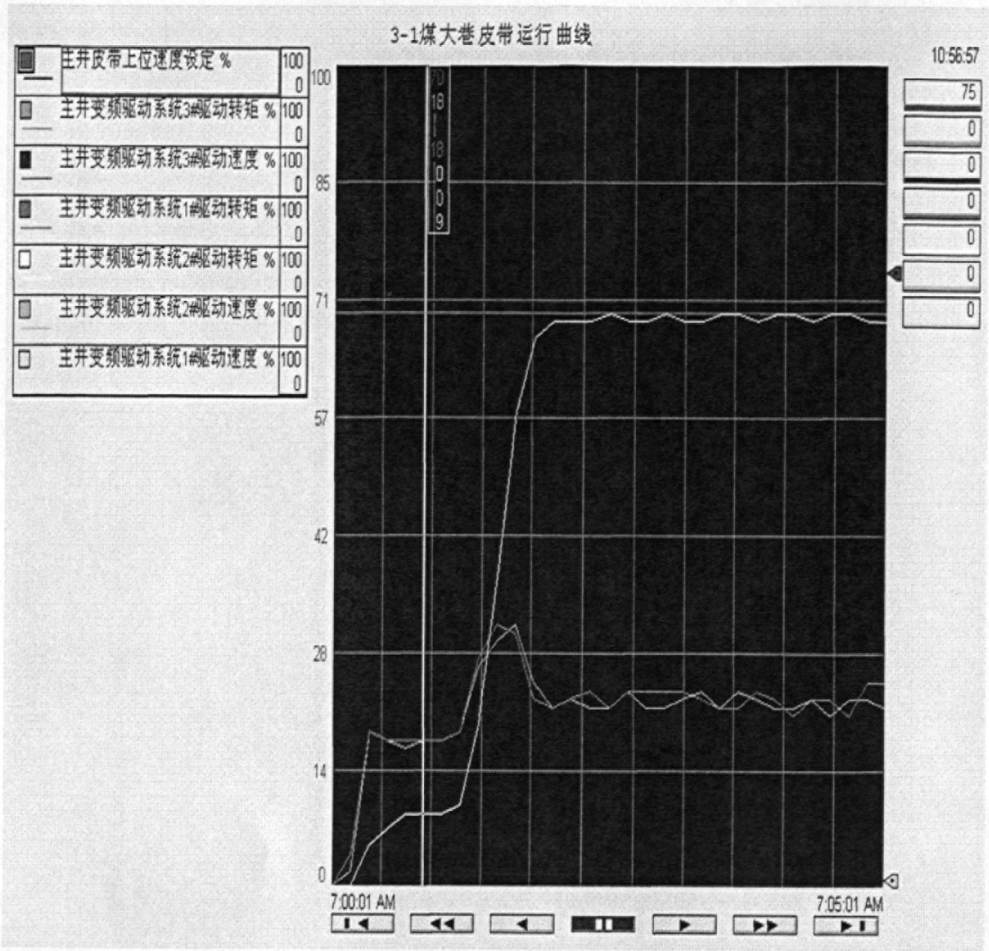


图 5.1 预张紧阶段转矩、速度图

(2)加速过渡阶段，速度达到 $10\%V_0$ ，然后在 $10\%V_0$ 情况下维持 10s。驱动系统驱动转矩和驱动速度图，如图 5.2 中竖线左边的部分。

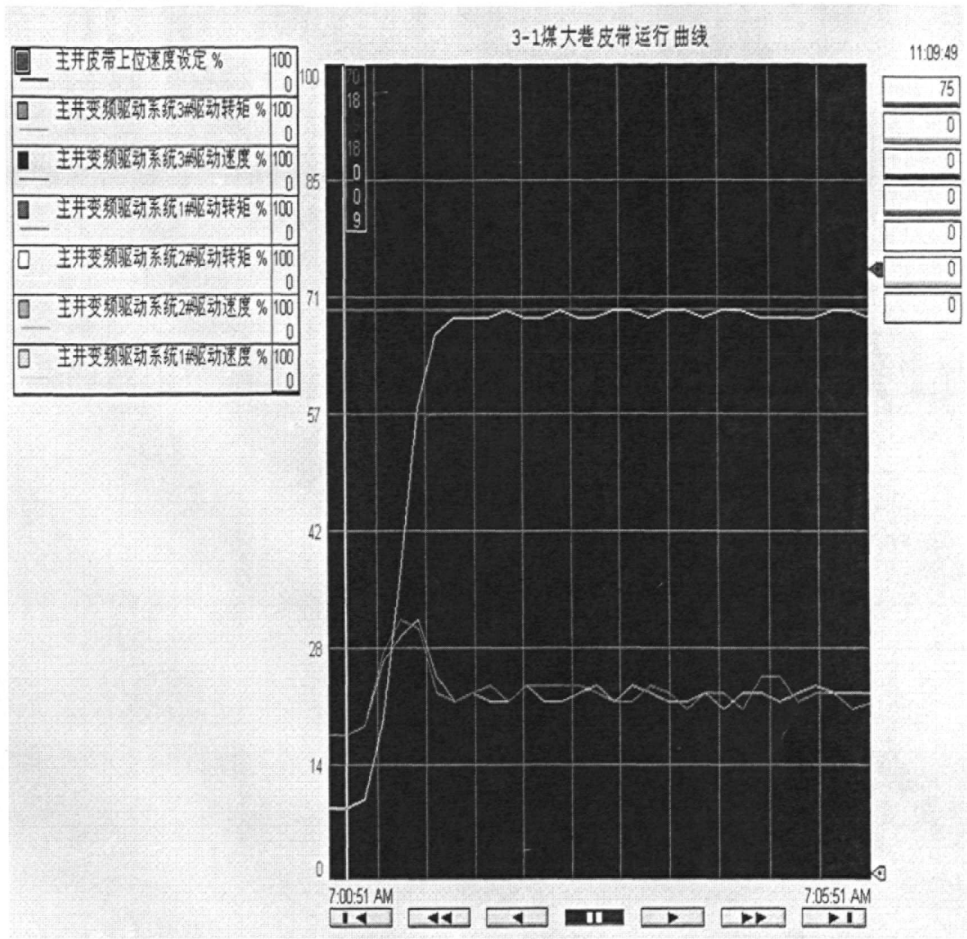


图 5.2 加速过渡阶段转矩和速度图

(3)加速阶段，以 60s 的加速时间，10 秒的软化时间的“S”曲线运行，驱动系统驱动转矩和驱动速度图，如图 5.3 中竖线左边的部分。

(4)启动结束，此时带式输送机运行在设定值 $70\%V_0$ 的速度下，速度偏差 1%，如图 5.4 中竖线左边的部分。

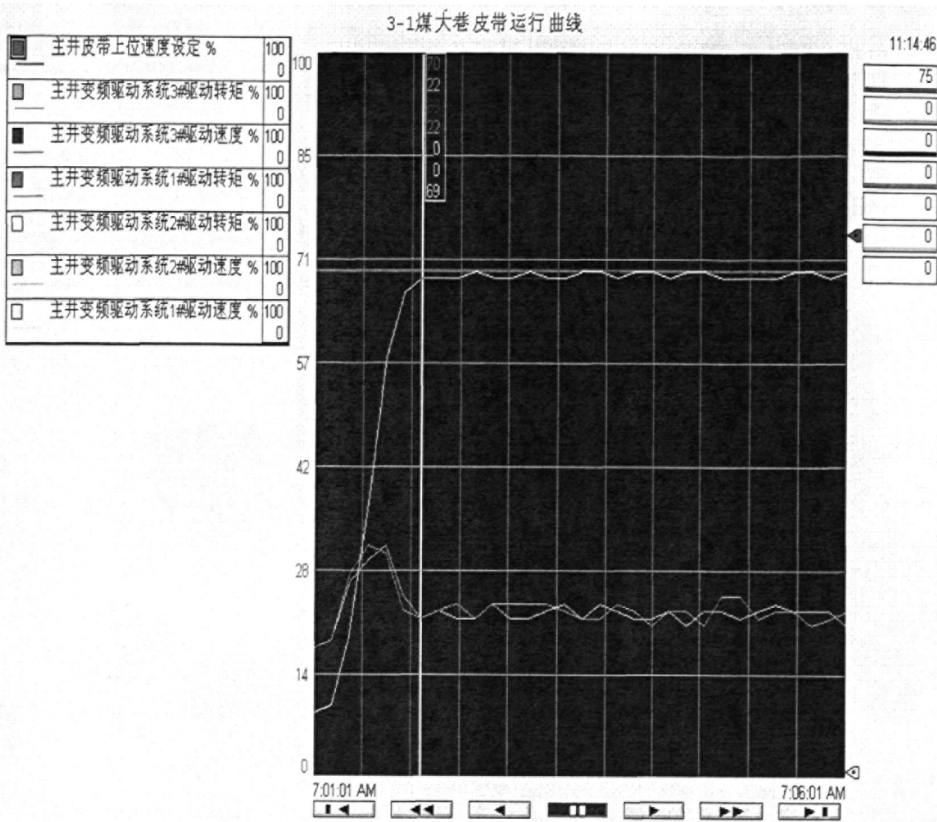


图 5.3 加速阶段转矩和速度图

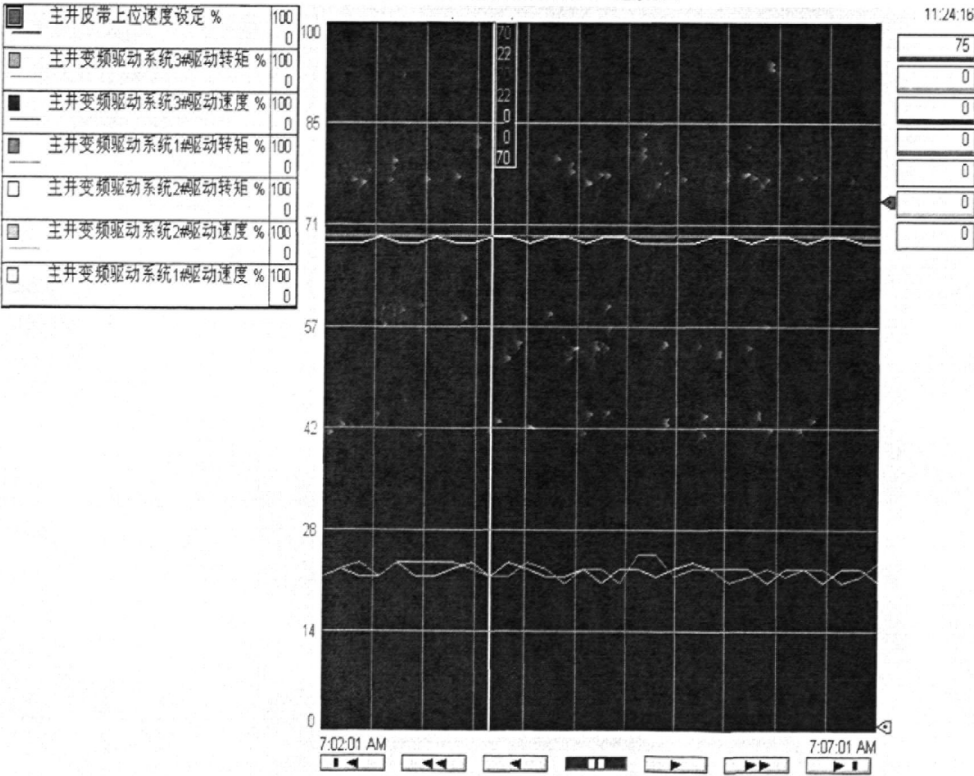


图 5.4 启动结束时转矩和速度图

从以上几个图中所描述的几种曲线我们可以看出：在预张紧阶段，变频系统的两个驱动滚筒的驱动转矩在 50s 内由 0 逐渐增加到最大输出转矩的 18%，两个驱动滚筒的驱动速度沿着设定的“S”形曲线增加，这个过程中滚筒由静止开始转动并将驱动力缓慢的施加到输送带上，由于驱动力矩的变化非常缓慢在 50s 内仅仅增加到最大输出转矩的 18%，所以不会对输送带产生冲击，驱动力沿着输送带传播，使整个输送带获得很小的加速度缓慢加速运行，加速度先增加后降低而后为零；加速过渡阶段，变频系统的两个驱动滚筒的驱动转矩稳定在 18%，驱动速度稳定在最大驱动速度的 9%，这一阶段的作用是使输送带各个部分运行均匀，可进一步改善暂态动应力的峰值，使松弛的皮带张紧，为加速做好准备；加速阶段，在经过了加速过渡阶段的准备后，整个系统开始加速到设定值，加速过程中要克服系统的惯性力，变频系统的驱动滚筒的驱动转矩由最大输出转矩的 18% 开始增加，在到达最大输出转矩的 30% 左右后又开始下降，最后运行到最大输出转矩左右 22%，这一变化过程是由于设定的驱动曲线是“S”形，系统的加速度要先增大后减小，由图中的曲线可以看出两个驱动滚筒的输出转矩和转速变化过程相似，3 号滚筒的转矩能很好的跟随 1 号滚筒转矩的变化而变化，由此可推测它们的输出功率平衡；稳定运行阶段，驱动速度输出稳定在最大值的 70% 左右，驱动转矩运行在最大输出转矩的 22% 左右，这一阶段带式输送机系统稳定运行，驱动输出转矩仅用来克服带式输送机系统的运行阻力。

由变频系统的启动过程的描述我们可以看到变频系统真正实现了输送带输送机系统的软启动，利用变频器的软启动功能，将电机的软启动和带式输送机的软启动结合起来，通过电机的慢速启动，带动带式输送机缓慢启动，将输送带内部贮存的能量缓慢释放，使带式输送机在启动过程中形成的张力波极小，不会对输送带造成损害。

5.4.2 带式输送机正常停车过程

在输送系统正常停车时，首先送料系统停止送料，待输送带上的物料卸完后，输送系统进入电动运行状态，变频器控制输送带按设定好的减加速度缓慢停止，然后电机断电，制动器上闸。带式输送机停车主要分为两种情况：带式输送机保护故障停车，此时带式输送机以 10s 的减速时间，从满速降至 0；带式输送机正常停车，此时带式输送机转矩在 10s 内降至 0，然后带式输送机按惯性停车。

带式输送机运行在 70% 速度下的正常停车过程：

(1) 开始停车时变频器的转矩开始从最大输出转矩的 22% 开始减小，速度从最大输出转速的 70% 开始减小，如图 5.5 中竖线部分所示。

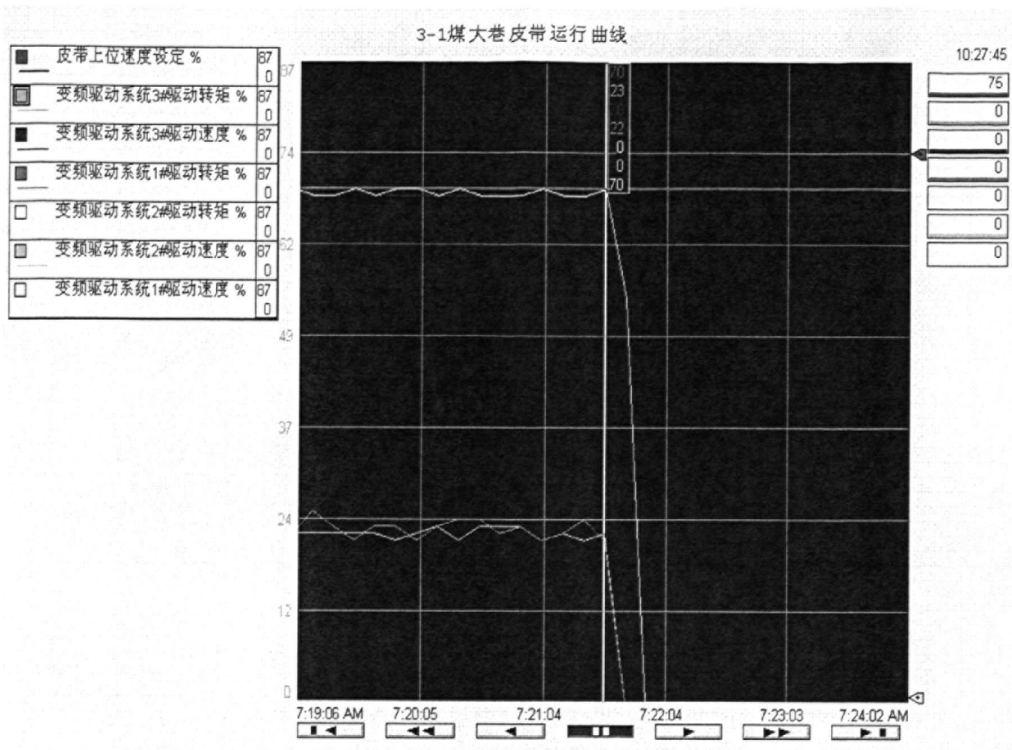


图 5.5 开始停车时转矩和速度图

(2) 变频停车阶段，制动 10s 后转矩输出为 0，但是速度没有完全降至 0，速度为最大输出速度的 55%，如图 5.6 中竖线部分所示。

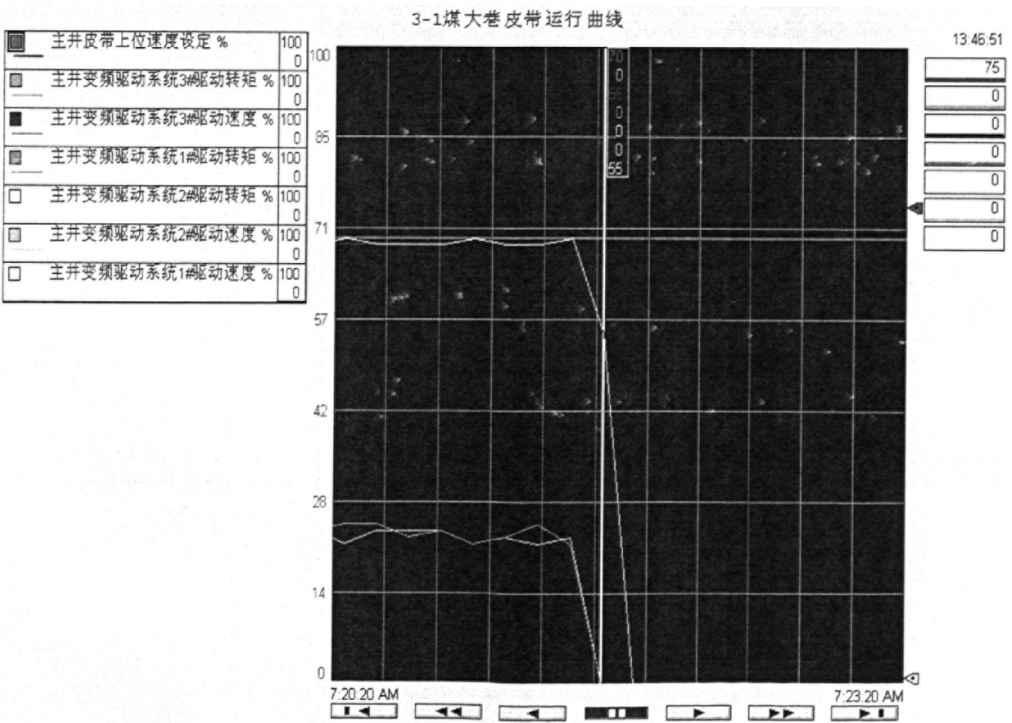


图 5.6 变频停车时转矩和速度图

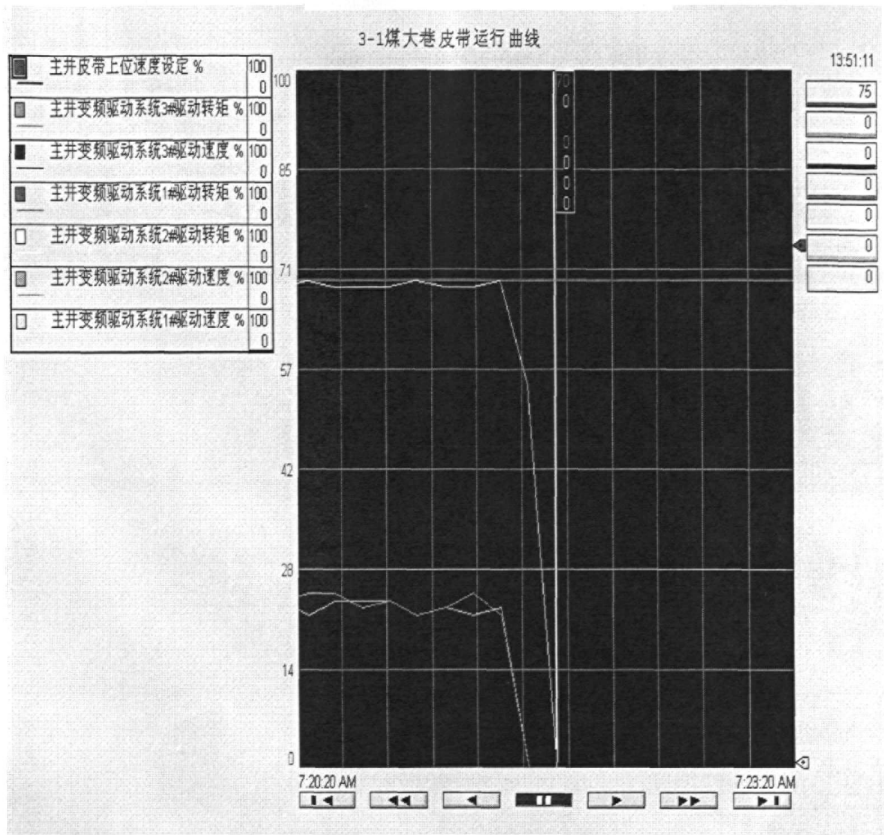


图 5.7 惯性停车时转矩和速度图

(3) 惯性停车阶段，此时带式输送机转矩为 0，速度由带式输送机的惯性从 55%降至 0，这个过程大概经历 30s 的时间，如图 5.7 中竖线左边的部分所示。

在正常停车过程中，开始停车时变频系统两个驱动滚筒的输出转矩在最大输出转矩的 22%左右，驱动速度在最大驱动速度的 70%左右，经过 10s 的变频制动，驱动滚筒的输出驱动转矩减小到 0，驱动滚筒的速度减小到最大驱动速度的 57%左右；进入惯性停车阶段，驱动滚筒的输出转矩为 0，带式输送机系统依靠运行阻力减速停车。由曲线图可以看出整个停车过程中进入变频停车阶段后，两个驱动滚筒的输出转矩按照相同的变化曲线从最大输出转矩的 22%下降到零，同步性好、控制精度高，最后利用运行阻力自然停车，输送机匀减速停车，过程平稳。

5.4.3 带式输送机有负载运行在 70%速度下的闭锁停车过程

开始停车时变频器的转矩开始从最大输出转矩的 24%减小，速度从最大输出转速的 70%开始减小，如图 5.8 中竖线部分所示。10s 以后，带式输送机速度及转矩输出为 0。

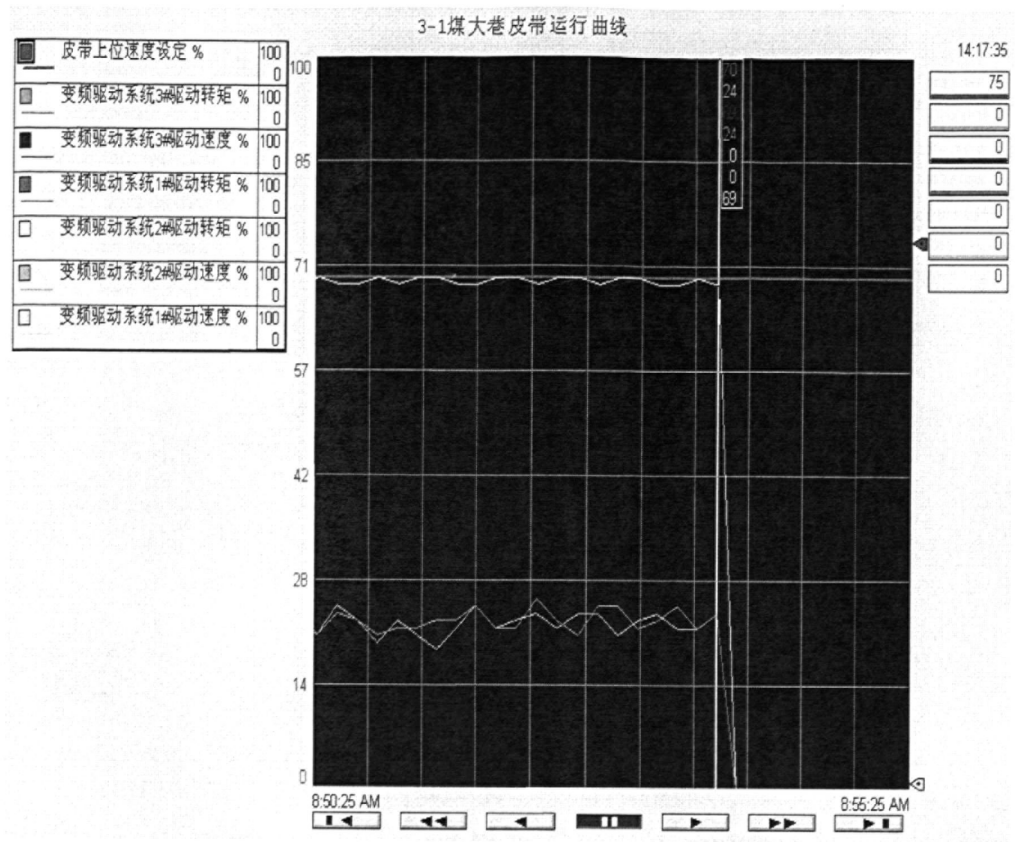


图 5.8 负载运行在 70%速度下的闭锁停车时转矩和速度图

由上面曲线可以看出，带式输送机带有负载闭锁急停时候，1 号、3 号驱动滚筒的输出驱动转矩和驱动速度，在 10s 内下降为零，两个驱动滚筒的转矩和转速变化曲线轨迹相同,同步性好，控制精度高，满足了闭锁停车的要求，同时变频驱动系统的闭锁停车时间可以根据需要设定，增强了系统的适用性。

5.4.4 负载量变化时电机转矩的变化

带式输送机运行在速度最大输出转矩的 75%，转矩为最大输出转速的 23%左右，此时负荷量比较小，近似于空载负荷，如图 5.9 所示。

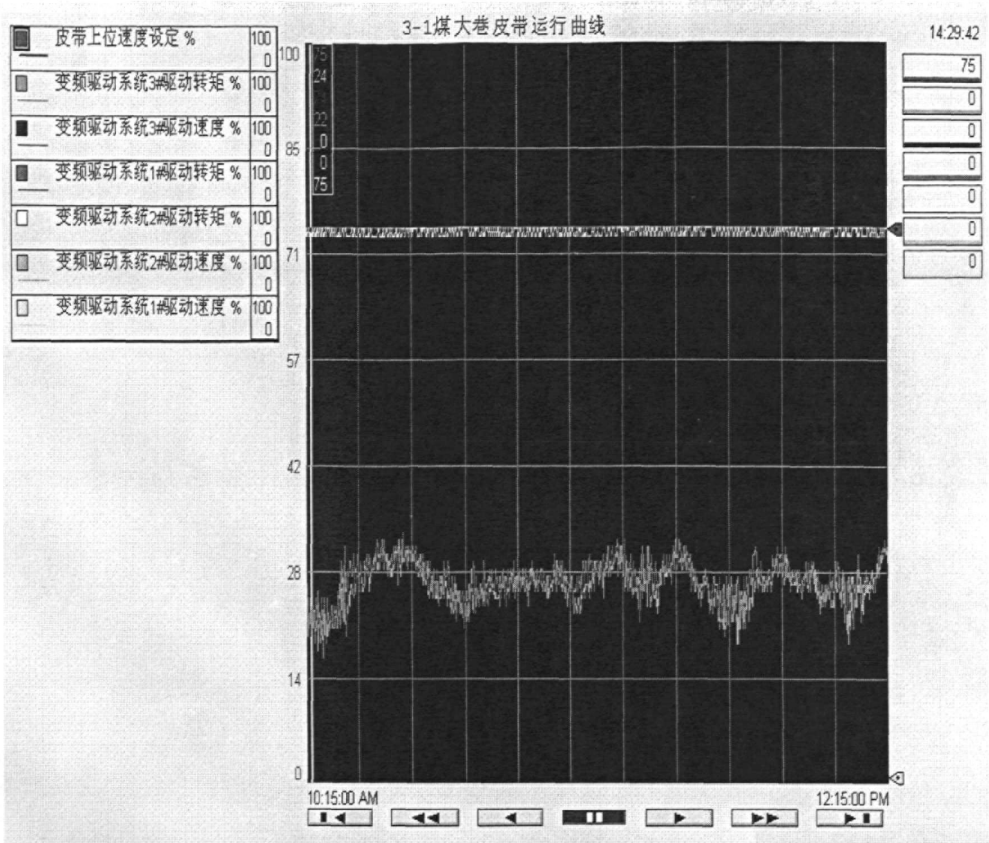


图 5.9 负载量变化时转矩和速度图

负载量增大时，速度依然为 75%，转矩增加到 30%，如图 5.10 的竖线部分所示。

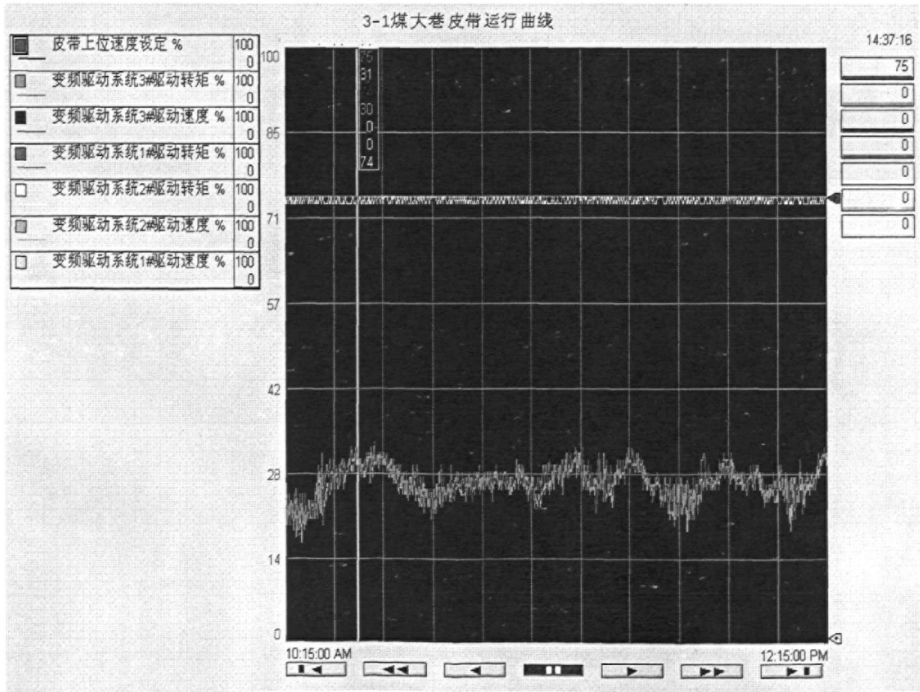


图 5.10 负载量变化时转矩和速度图

在带式输送机运行过程中,负载发生变化时,为保证带式输送机的平稳运行要求变频驱动系统的输出驱动转矩,随着负载的变化而变化,同时要求两个驱动滚筒的输出功率平衡。从图中可以看到当负载变化时,两个驱动滚筒的驱动转矩都由 22%左右,增加到了 30%左右,而驱动速度保持在 75%左右基本不变,波动范围为 1%,所以变频调速系统根据负载变化自调整的能力强,同时还可以看到两个驱动滚筒的转矩的变化曲线基本是同步的,这保证了输送机的平稳运行和多滚筒功率平衡,满足了大型输送机的负荷变化对驱动系统自调整能力的要求。

5.4.5 运行过程中加速调速过程

带式输送机首先设定速度为 75%，带式输送机按设定的启动曲线，加速至 75%，从启动至设定值，时间为 140s，首先经过 60s 的预张紧阶段，再经过 10s 的加速过渡阶段，然后是 70s 的加速阶段，最后带式输送机稳定在 75% 的速度下运行，波动 1%，如图 5.11。

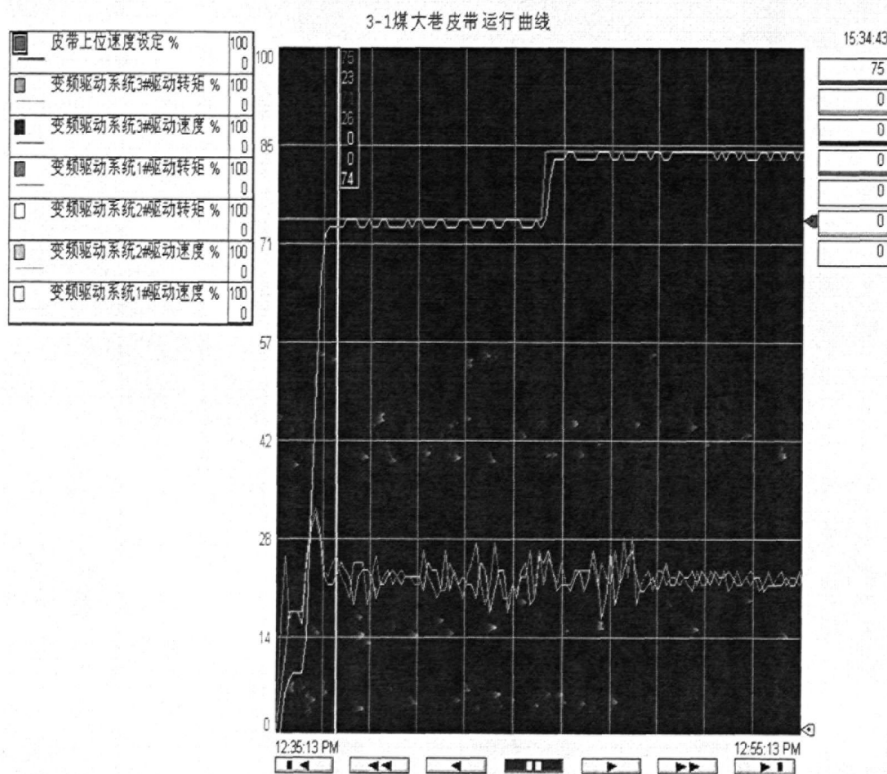


图 5.11 负载量变化时转矩和速度图

(2) 带式输送机在运行一段时间以后, 进行第二次加速, 速度设定为 85%, 加速时间为 60 秒, 软化时间 10 秒, 然后带式输送机将稳定在 85% 的速度运行, 如图 5.12、图 5.13。

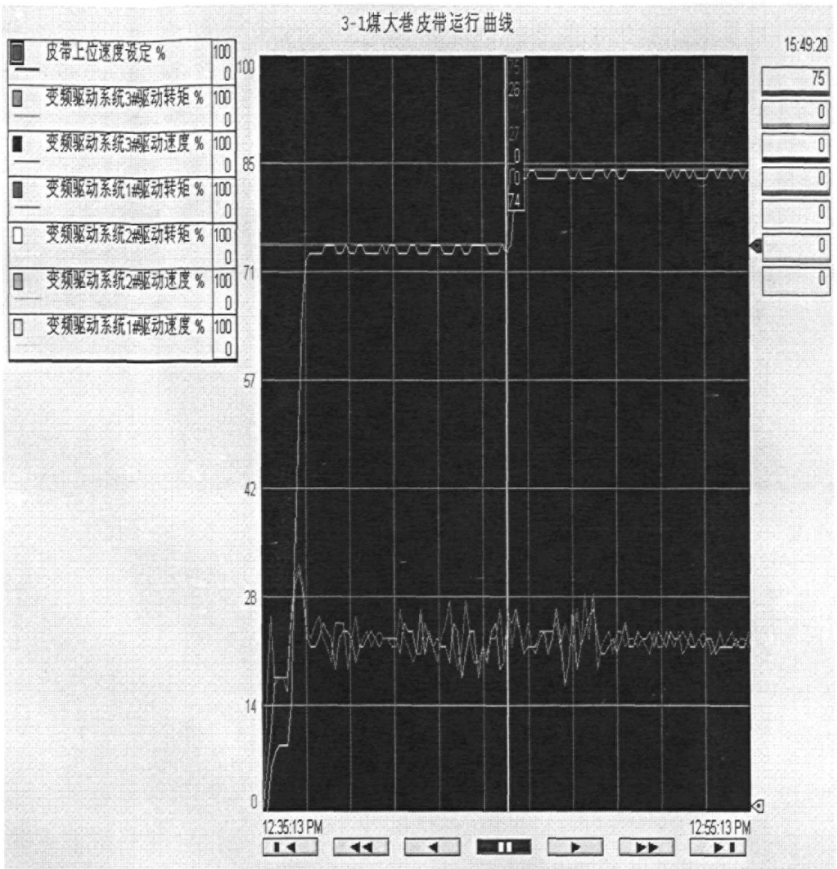


图 5-12 运行中加速时的转矩和速度图

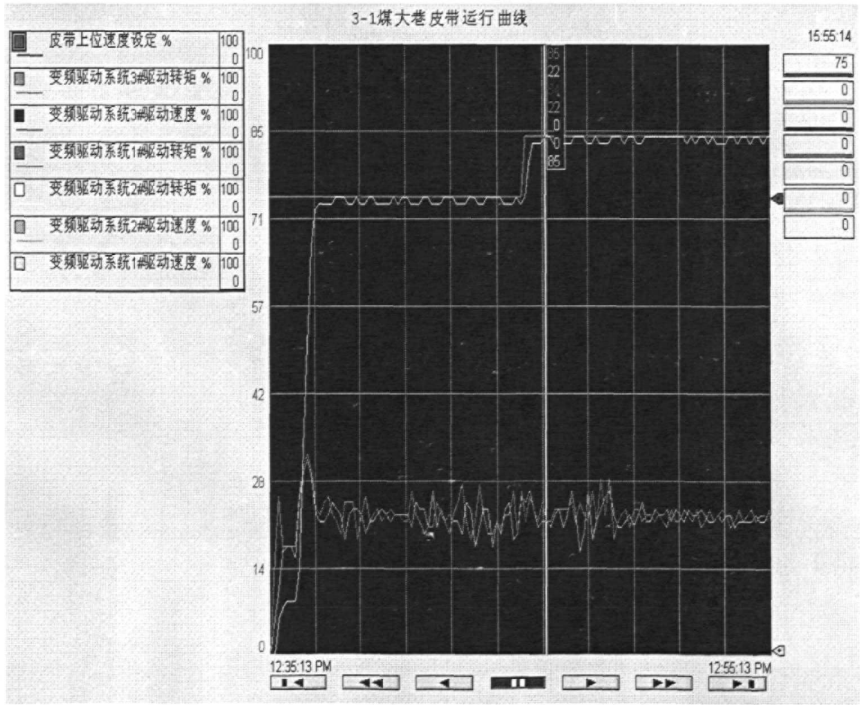


图 5.13 运行中的加速时的转矩和速度图

在运行过程中要加速时要求两个驱动滚筒的输出转矩同时增加以克服加速过程中的惯性力，同时要保证两个滚筒的输出驱动力的变化不能突变，以免在输送带中产生张力冲击，两个驱动滚筒的速度变化也要相同，防止由于速度变化的不同而使驱动滚筒之间的输送带张力上升；或者由于速度的不同在两个驱动滚筒之间出现输送带松弛现象，使得输送带和驱动滚筒之间发生相对滑动。

由以上图中变频系统两个驱动滚筒在运行中加速调速的驱动转矩和驱动速度的变化曲线我们可以看出：在运行调中，起始时，1号驱动滚筒的驱动转矩在最大输出转矩的23%，驱动速度为最大输出转速的74%，3号驱动滚筒的驱动转矩在最大输出转矩的26%，驱动速度为最大输出转速的74%；加速时为克服加速中的惯性力1号驱动滚筒的驱动转矩增加到最大输出转矩的26%，3号驱动滚筒的驱动转矩增加到最大输出转矩的27%，经过60秒钟的加速和10秒钟的软化时间后，1号驱动滚筒的驱动转矩降到了最大输出转矩的22%，驱动转速增加到最大输出转速的84%，3号驱动滚筒的转矩降到了最大输出转矩的22%，驱动转速增加到了最大输出转速的85%，整个调速过程中驱动力矩先增大后减小，使加速度先驱动后减小，整个速度曲线满足“S”形变化特征，调速结束后，输送机稳定运行在设定的速度上波动范围1%。所以变频驱动系统在运行调速时可以使输送机按照设定的速度曲线在一定时间内调整速度，整个过程中速度变化平稳，调速性能可靠。

5.4.6 带式输送机减速过程

带式输送机调速减速过程中，减速时间50s，减速软化时间为10s，带式输送机开始运行在85%的速度下，经过50s，速度调至70%，其中开始和结束的10s为软化时间，调速的减速过程是一个由减速时间和软化时间确定的“S”曲线，如图5.14、图5.15。

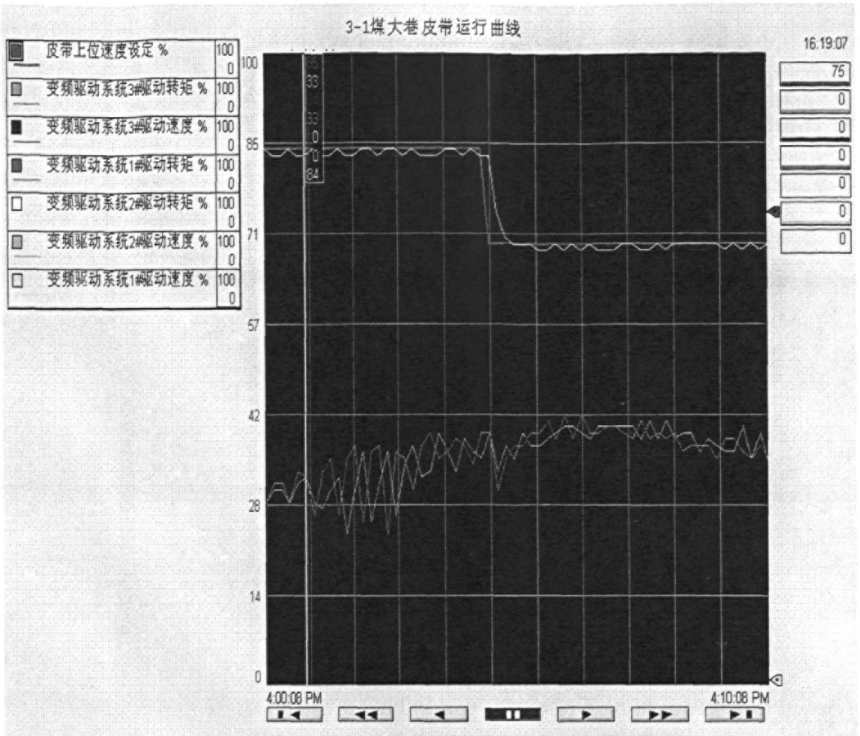


图 5-14 减速过程中的转矩和速度图

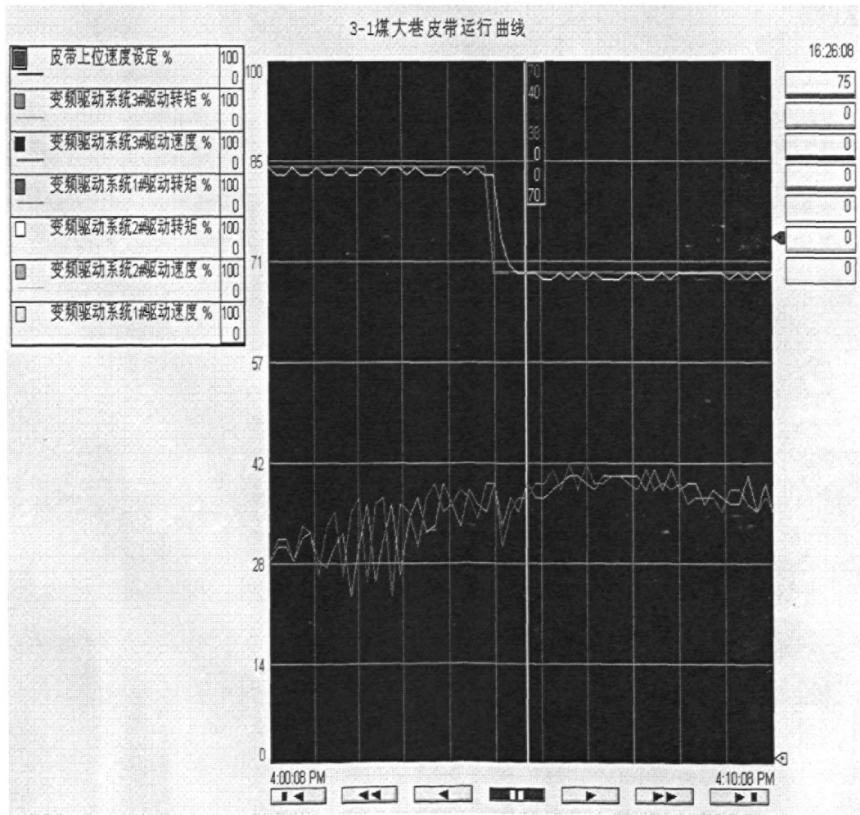


图 5-15 减速时转矩和速度图

在减速调速的过程中，输送带的速度要平稳的减小以防止输送带跑偏、撒料。从以上图中可以看出：进入减速调速阶段后，在输出转矩的作用下两个驱动滚筒的速度沿着

反“S”形曲线下降，在减速开始和结束时有 10s 的软化时间，这样使输送机的速度变化平稳，满足了输送带对速度变化的要求。

5.4.7 运行 20 个小时后的运行速度及转矩曲线

带式输送机在连续运行过程中，通过转矩曲线可以反映出带式输送机负载量的大小，如图 5.16。

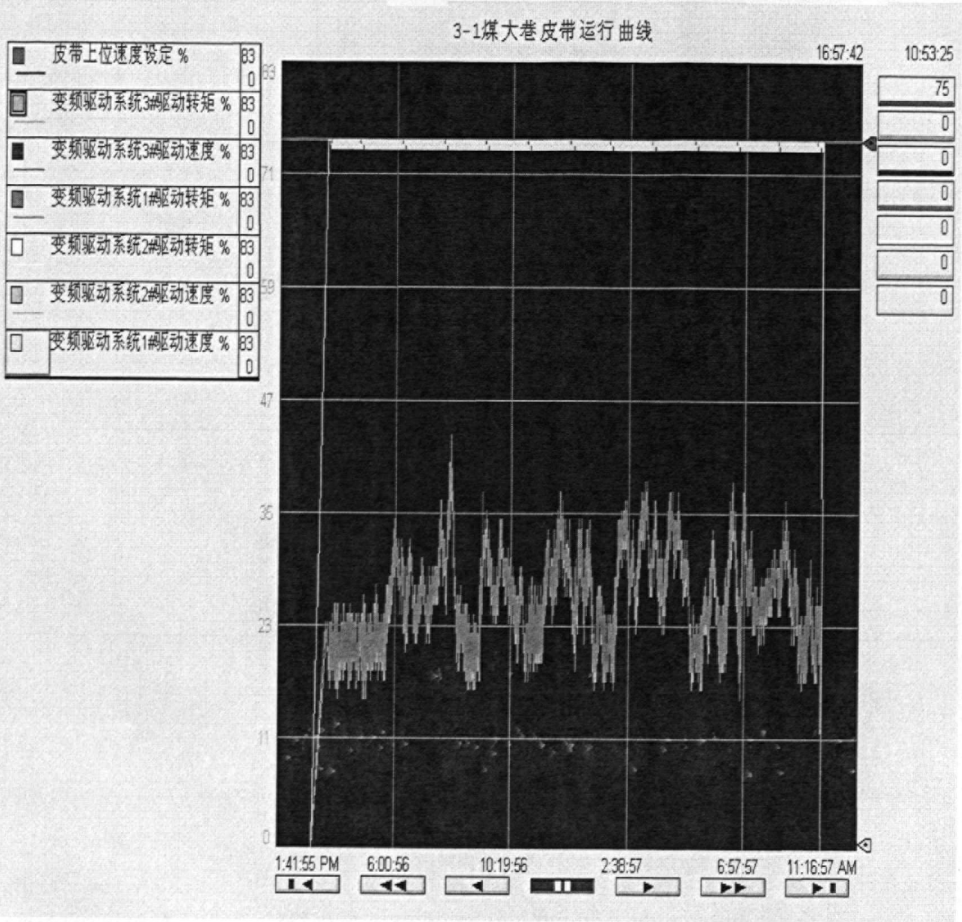


图 5.16 运行 20 小时后转矩和速度图

带式输送机在长期的运行过程中要保证输送带的运行速度平稳，驱动滚筒的输出转矩要随负荷的变化而变化。从上面的转矩变化中我们可以看到：在运行 20 个小时的过程中，变频系统驱动滚筒的输出速度维持在设定的运行速度上基本不变，很好的运行在设定的速度范围内，波动仅在 1%左右；驱动滚筒的输出转矩可以根据负载的大小自动调节输出转矩的大小，当负载增加时，输出转矩随之增加，当负载减少时，输出转矩随之减小，变频系统长时间运行时有可靠的负荷调整能力，且两个驱动滚筒的转矩曲线形状相似，由此可得在它们的输出转速相同的情况下，它们的输出功率能够保证基本平衡。

5.5 节能降耗

当带式输送机在一定的负载下运行时，轴的输出功率和带式输送机的速度成正比。如果降低带式输送机的速度，带式输送机的驱动功率也将减少。采用变频调速系统，可根据带式输送机的轴功率大小随时调节带速，使轴功率保持在额定功率状态下运行。例如：带式输送机空载运行时，变频带式输送机可运行在 10% 的额定速度下，轴的转矩和在满速运行时相等，但功率却不是很大，对于上述带式输送机，满速和 10% 的满速两者之间的轴功率差距很大，功率差达 10 倍。对于大、中型水平运输的带式输送机，空载功率是额定功率的 30%~40%，可见带式输送机空载运行时，把带速降下来后，节能效果十分明显。这比采用其它的驱动方式具有明显的优势。

以下的实测值可以说明：经过观察发现当带式输送机速度由 100% 减到 25% 时，给变频变压器供电的高压柜的功率每台减少约 130kW(10kV)。这大大节约了电能，减少了运行成本。

表 5.1 不同带速下高压柜的输出功率

带速 负荷柜	25%带速	50%带速	75%带速	100%带速
G19 柜功率	61.5kW	97.1kW	149kW	194kW
G19 柜电流	4.6A	7.1A	10.5A	13.1A

5.6 实验结论

根据现场实验得到的曲线，我们可以得出如下结论：

(1)测试结果表明，长距离带式输送机无负载、轻载和重载荷下，起动非常平稳，带载制动过程也非常平稳，而且可以根据现场的各种需要进行调整各种起动时间、停止时间，从而实现了长距离大功率带式输送机的各种起动和制动要求。

(2)变频带式输送机不仅满足了煤矿主运输系统的可靠性高和故障停机率低的要求，在变速控制和节能运行等方面日渐显示出变频驱动系统独有的优势，同时由于具有调速功能，延长了托辊的使用寿命，减少了设备投资和平时维护工作量。

(3)多驱动功率平衡好，速度同步好，控制精度高。从各种工况检测曲线中我们可以看出，两个驱动滚筒的输出转矩变化曲线和速度变化曲线形状相似，波动范围不超过 1%，具有很好的功率平衡性和速度同步性，同时能够精确的运行在设定的工作范围内，具有较高的控制精度。

5.7 小结

本章对布尔台煤矿采用变频驱动系统的带式输送机进行了现场实验,详细分析了带式输送机的空载启动、正常运行停车、带负载时的闭锁停车、负载发生变化时电机输出转矩的变化、运行过程中带式输送机的加速调速过程、减速过程以及运行 20 个小时后输送机的运行情况进行了现场实验。针对各个过程中带式输送机系统对变频驱动系统驱动滚筒输出转矩和输出转速的要求,对变频系统在各种工况下的输出转矩和输出转速进行了性能测试,并对试验结果进行了分析整理。

通过对试验结果的处理表明,变频驱动系统可以实现带式输送机在各种工况下的控制要求,带式输送机能够按照设定的启动、制动曲线实现平稳运行,从而降低了输送带的强度,减少设备的投资费用,同时变频驱动系统能够使各驱动滚筒间功率平衡,且控制精度高,速度同步性好,这样就可防止各个电机的负荷不均匀,造成电机的损坏。总之,变频驱动系统是目前所有驱动系统中比较理想的软启动装置,具有很好的推广前景。

6 总结与展望

目前国内带式输送机的设计和动态特性研究水平和世界最好水平还存在着较大的差距。我们采用的带式输送机的设计方法还是传统的静态设计法,要实现带式输送机的动态设计,首先要研究带式输送机的启动特性,研制新型的带式输送机软启动装置。

本文研究的主要内容是结合一条煤矿带式输送机的要求,研究设计一套变频软启动装置。本文研究了带式输送机的动态特性,获得了启动速度曲线和输送带内动张力的关系,采用速度反馈控制电动机的转动速度曲线,从而控制输送带的速度曲线,输送带缓慢启动;通过控制内部电流来实现各驱动电机间的功率平衡。通过实验表明:变频驱动系统能实现带式输送机的软启动功能,通过电机的慢速启动带动输送带缓慢启动,可减小输送带启动过程中的惯性力,大大降低了输送带启动时的动张力;变频驱动系统通过主从控制的方式可实现多电机驱动的功率平衡问题;同时变频驱动系统还具有降低设备成本、减小维护量、节能等方面的优点。

随着我国矿山企业对大功率、长距离、高带速的带式输送机的需求不断增加,提高带式输送机的设计水平,提高带式输送机的运行稳定性、降低设备成本等已经是广大科研者面临的主要问题。带式输送机未来的研究方向是:对驱动装置、制动装置和张紧装置对整机的综合作用进行研究。目前已经研制出了软启动装置、软制动装置和恒张力张紧装置,它们的使用对提高带式输送机的运行的稳定性发挥了重要作用。今后应以输送机各部件协同工作的最佳方式为最终目标,把输送机作为一个有机的整体来进行综合分析,寻找最优的组合模式与控制策略,在经济、可靠的条件下,提高输送机的整体工作性能。

研究带式输送机动态参数的直接测试方法,尤其是对输送带内动张力的直接测试的方法。目前采用的间接测量的方法,其准确性不高,误差较大。国外出现了基于 RFID 技术的输送带参数测试装置,将集成了传感器的 RFID 标签装在输送带中,可以随时获取输送带内动张力、疲劳应力、输送带温度等参数。今后我们也应该在传感器与数字标签集成,以及在输送带内植入的方面进行研究。

致 谢

三年多的学习时光已经接近尾声，在此对南京理工大学的老师，尤其对尊敬的陆宝春教授的关心指导和谆谆教诲表示诚挚的谢意。

感谢南京理工大学给我提供学习深造的机会，在这里我不仅学到了深厚的理论知识，更体会到了浓厚的学术氛围，老师课上的热情洋溢，课后的谆谆教诲，让我受益匪浅。

在开始论文的准备期间，从选题到查阅资料，论文方向的选定，提纲的确定，中期论文的修改，后期论文布局的调整，都是在陆老师的悉心指导下完成的。陆老师的热心、耐心和爱心成为我克服困难的精神动力，在他的帮助下，我在一个个困难面前挺过来，沿着追求真理的道理不断前进。陆老师渊博的专业学识、一丝不苟的治学态度、精益求精的工作作风、诲人不倦的高尚师德使我终生难忘。在此再次向尊敬的导师致以深深的谢意，并送去学生的深深祝福！

在论文的写作过程中，我单位的领导和同事都给予了教大的帮助和支持，特别是孟宝星等老师给予了很大的帮助，在此一并表示感谢！

感谢杜晋等同学与本人一起度过的这段难忘的时光，在学习和生活中给予我不少的帮助。他们对新知识孜孜不倦的追求精神，无时无刻不在激励着我；难题迎难而上，刻苦钻研的精神，是我行动的楷模。

感谢我的父母以及家人无微不至的关怀，他们的理解和支持使我能够专心完成我的学业，我的每一点成绩的取得都与他们的支持与鼓励息息相关。今后，我将继续在我的工作岗位上努力，成为家人的骄傲！

参考文献

- [1]张旭.大功率长距离带式输送机智能控制方法研究.[D]. 沈阳. 沈阳工业大学.2007
- [2]杨复兴. 输送带输送机的结构原理与计算. [M]. 北京. 煤炭工业出版社.1983
- [3]Stampfl, Hans R. Modern drive technology for belt conveyors,June [J]. Bulk Solids Handling,2001.4: 438-441
- [4]杨达文等. 带式输送机可控启动技术. [J]. 机电设备 2002.3 : 27-30
- [5]宋伟刚. 动态分析方法在带式输送机设计中的作用. [J]. 起重运输机械 2001 增刊: 36-46
- [6]侯友夫等. 带式输送机可控启动系统动态特性的理论研究. [J]. 中国矿业大学学报 1998.9: 246-249
- [7]蒋志武. 带式输送机软启动装置的选型比较. [J].煤矿机电, 2004.3: 45—48
- [8]刘平. 浅谈大功率输送带输送机的软启动. [J].中州煤炭,2006.4: 24—25
- [9]蒋卫粮. 大型带式输送机可控软启动技术. [J].煤矿机械 2000.9 : 1-3
- [10]王光炳. 带式输送机可控软启动装置的研究. [J].煤炭学报.2003.06: 316—322
- [11]朱路群等. YKQ 型液控外施闸带式输送机软启动设备. [J]. 煤炭工程 2003.8 : 54-56
- [12]宋伟刚. 通用带式输送机设计. [M].北京. 机械工业出版社.2006
- [13]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
- [14]蒋卫粮等. 一种新型带式输送机可控软启动技术的研究与实现. [J].机械设计与制造 2000.3 : 55-56
- [15]唐艳云等. 带式输送机几种常用软启动装置的性能分析. [J]. 矿山机械.2004.08: 77—80
- [16]Guangbu, Li. Analysis of the drive system of squirrel-cage motor with hydraulic coupling, [J]. Bulk Solids Handling.1999.2: 189-192
- [17]宋伟刚等.大型带式输送机合理可控启动曲线的研究.[J].起重运输机械 2002.8: 20-23
- [18] Karolewski, B.Ligocki, P., Frequency start-up control of long belt conveyors drives .[J]., Electrical Machines 2007.3.: 103-106
- [19]郑慧.井下带式输送机用变频调速技术的研究. [D]. 青岛. 山东科技大学.2005
- [20]杨达文等. 常用带式输送机的现状. [J]. 起重运输机械 2003.1: 4-6
- [21]孙可文. 带式皮带机的传动理论与设计计算. [M].北京. 煤炭工业出版社.1991
- [22]宋伟刚等.带式输送机启动的动力学分析. [J]. 物料搬运与分离技术 2002.6: 45-47
- [23]袁红兵等. 大型带式输送机软启动装置的工况分析.机械管理开发.[J]. 2003.3 : 8-9
- [24]黄明云等. 带式输送机软启动系统的设计原则. [J].起重运输机械 2001.1: 7

- [25]孙慧.带式输送机动态特性及可控启动研究[D]. 泰安. 山东科技大学.2004
- [26]宋伟刚等.大型带式输送机启动过程的仿真. [J]. 东北大学学报 1998.6: 312-315
- [27]洪晓华. 矿井运输提升. [M]. 徐州. 中国矿业大学出版社.2000
- [28]黄松原等, 输送带粘弹性力学特性的研究.连续输送技术.[J]. 1991. 1: 22-26
- [29]石延平等. 长距离带式输送机软启动过程中的动载荷分析. [J]. 煤矿机电, 2003.3 : 1-5
- [30]于岩等.带式输送机速度与加速度检测电路的设计.[J]. 山东矿业学院学报 1991.12: 402-406
- [31]邓晓红等.大功率带式输送机软启动时间对动载荷的影响. [J].煤矿机械 2004.2 : 60-63
- [32]柯晓丹等.大功率负载差动输系软启动系统的调速控制. [J]. 煤矿机电 2003.1 : 27-30
- [33] Kung, Walter The Henderson Coarse Ore Conveying system - A review of commissioning, start-up, and operation.[J] Bulk Material Handling by Conveyor Belt V. 2004.5.: 151-157
- [34]毛君等. 带式输送机启动特性和可控启动技术. [J]. 矿山机械. 2004.2 : 19-22
- [35]S. N. Ganeriwala. Fourier Transform Mechanical Analysis for Determining the Nonlinear Viscoelastic Properties of Polymers. Polymer Engineering and Science,1987.2: 34-45
- [36]李玉瑾等. 输送带输送机弹性振动特性及软启动理论研究.[J].煤矿设计 2000.6 : 13-15
- [37]侯友夫等. 带式输送机动态特性及控制技术. [M].北京. 煤炭工业出版社.2004
- [38]Harrison. A. Monitoring System for Steel—Reinforced Conveyor Belts,[J].Transaction of the ASME,1996.1: 148-153
- [39]李焦明. 变频调速驱动系统电机控制电路设计与维护. [J].电气应用.2005.03: 25—31
- [40]Kitts, Victor L. Stees, William K. Application of a medium voltage (4160 VAC) variable frequency drive on an underground mine belt conveyor system [J] Conference Record - IAS Annual Meeting 2000.4: 2721-2725
- [41]吕现传. 防爆变频驱动系统的设计. [J].煤矿现代化.2006.05: 58—59
- [42]Mertens, A. Sommer, R.; Brunette, C. Applications of medium voltage drives with IGBT three-level inverter.[R]. IEE Colloquium.2000.5: 51-55
- [43]L. K. Nordell. The Channer 20 KM Over Land Belt Conveyor.[J].Bulk Solids Handling,
- [44]熊光楞等. 控制系统仿真与建模处理. [M]. 北京. 科学出版社.1993
- [45]侯友夫等. 矿用钢丝绳芯带式输送机动态特性仿真研究. [J].煤炭科学技术 2000.1: 32-36
- [46]刘肖键等. 高速带式输送机的计算机辅助动态设计.[J].起重运输机械 2004.3 : 12-14

-
- [47] Hamilton, R.S. Shortt, G.G.; Staples, P.Design of a long overland conveyor with tight horizontal curves .[J]. Bulk Solids Handling, 1994.3 : 21-29
- [48] 李文宏等. 下运带式输送机制动系统计算机控制的研究. [J].起重运输机械 2002.7 : 5-8
- [49] Braglia, Marcello .Designing a belt conveyor controller in a bottling plant using fuzzy logic and genetic algorithms.[J]. Packaging Technology and Science, 2001.9: 27-51
- [50] 吴宏志等. 带式输送机可控启动系统的试验研究. [J].工矿自动化 2003.4 : 4-7