

水转水散货码头直装工艺流程自动控制

范鑫, 陈思龙

(中交一航局安装工程有限公司)

摘要: 文章主要介绍了水转水散货码头3台卸船机与1台装船机直装工艺协调作业的流量自动控制技术。为了解决装卸系统的卸船机与装船机等多台单机工作能力不匹配, 造成的落料点撒料、带式输送机流量不均匀、装船效率低、船舶待泊时间长等问题, 主要从水转水散货码头装卸系统直装的工艺工况、装卸船的配载原则和对内模PID算法、Smith预估补偿器的设计等方面进行研究, 采用了PLC控制及计算机解析等方法, 设计一种全新的控制方法, 实现装卸系统多台单机动态流量自动调控, 改善了装卸系统落料点撒料、效率低等问题, 值得推广。

关键词: 散货; 直装; 流量控制; 仿真系统

0 引言

港口是水路运输的枢纽, 也是连接陆路和海洋运输的重要节点, 因此, 提高港口的装卸效率和降低运营成本是港口管理的重要任务之一。在港口装卸作业中, 卸船和装船是2个非常重要的环节。卸船机将海运货物从船上卸下, 装船机将货物装载到船上, 二者协同作业直接影响到港口的装卸效率和运营成本。然而, 在实际的港口运营中, 这两大设备的协同作业存在着诸多问题, 亟待解决。

为了提高效率, 一直在研究如何实现自动控制和优化2个环节的工艺流程。特别是在装卸过程中, 物料的流量控制一直是难点问题。传统的操作方式需要大量的人工监控和调整, 不仅劳动强度大, 而且难以保证流量的稳定和精确控制。在此背景下, 为响应国家绿色环保、智慧赋能的号召, 推动港口智能化发展, 针对水转水散货码头多机协同装卸作业工艺系统的特点, 建立水转水散货码头装卸工艺系统的设备配置仿真优化模型, 并设计求解算法。开发了一种水转水散货码头装卸系统流量自适应控制的控制方法, 有效地解决装卸系统、装卸线作业效率和船舶排产作业系统的矛盾关系。

1 水转水散货码头直装工艺

以3台额定能力为2 500 t/h(矿石)的桥式抓斗卸船机, 1台额定能力6 000 t/h(矿石)的装船机和1条额定能力6 000 t/h的带式输送机, 没有中转堆场的水转水散货码头为背景, 重点对装

系统直装工况工艺流程自动控制进行研究。

卸船机在卸船作业不同舱口状态, 作业工效不同, 为提高单机工作效率, 使码头设备利用率达到最佳, 减少船舶停靠时长, 提高吞吐量。在“船—船”工艺下, 根据装船机流量需求, 卸船机、振动给料器使用情况, 分析得出以下6种卸船工艺(1条船卸装到另1条船的情况下):

1) 3台卸船机正常工作同时卸料。卸船机漏斗振动给料器根据装船机额定需求进行给料调节, 即额定给料量为6 000 t/h。受振动给料器电机驱动力矩的影响, 当变频器频率低于40%时, 力矩过低不足以驱动电机, 容易造成电机堵转烧毁, 振动给料器流量调节区间为800~2 000 t/h。其调节误差为5%, 即其实际流量调节为 $(800 \pm 125) \sim (2 000 \pm 125)$ t/h。

2) 1台卸船机清舱, 2台卸船机满负荷工作。要保证带式输送机和装船机满负荷运转料流达到额定给料量6 000 t/h, 需要提前引入变量, 对3台卸船机进行流量调控, 即2台卸船机满负荷运转2 500 t/h, 达到5 000 t/h, 另一台卸船机根据清舱时间提前备料, 并降低流量控制在1 000 t/h。

3) 2台卸船机清舱, 1台卸船机正常作业模式。该工作模式卸料量无法满足正常装船作业, 因此可配合装船机平舱作业。

4) 3台卸船机清舱。因卸船清舱需求时间较长, 设备功耗较大, 所以停止带式输送机与装船机, 待船舱底部铁矿石整理堆积完毕后再启动。

5) 装船机移舱。装船机移舱时间较短, 且只

有 1 台装船机，因此在装船机移舱时只需要暂停给料，设备不需要停机。

6) 装船机平舱。在装船机平舱作业时，如遇卸船机清舱则由该卸船机供料，如卸船机全部正常作业，则 3 台卸船机轮巡供给，以保证船舶整体平衡以及控制接料漏斗的存储状态。

流量控制难点主要包括：

1) 能力协同问题。没有中转堆场，直接实现 3 台卸船机向 1 台装船机直接输送物料的直装工艺，能力之间不匹配，容易造成落料点撒料、带式输送机流量不均匀、装船效率低、船舶待泊时间长的问題。

2) 作业安全问题。装船机卸船机工作工况复杂多变，且工作在同一轨道上，单机频繁移动、同船作业增加单机碰撞风险。

3) 精确给料问题。由于工艺限制，计量用皮带秤不能实现一对一计量，且存在反馈滞后，累计误差大，对流量控制造成极大误差堆叠，后期控制补偿难度大。

2 系统设计

2.1 设计思路

本项目采用水转水直装工艺，3 台卸船机对 1 台装船机作业，因此需要控制 3 台卸船机的振动给料器，3 台设备既要单独调节又要相互配合。但给料流量系统存在非线性、时变性、不确定性和不完全性等，获得精确的数学模型比较困难。为有效避免出现较大的短时料留在皮带上重叠，需实现快速有效地调节，以装船机的需求为前提，以皮带秤为最终确认的反馈点，对流量实现精准控制。同时优化单台卸船机的给料系统，实现卸船机振动给料器的精准控制，从源头减少误差。设计思路如下：

1) 严格控制卸船机漏斗放料，保持卸船机接料漏斗货物保持在 20% 以上，防止给料器中断给料，避免在抓斗卸料过程中物料不受振动给料器的控制。

2) 受卸船机清舱和装船机平舱以及单机换舱等扰动影响，卸船与装船的效率需要相互匹配。根据装船机需求以及设备使用情况实时调整设备组。

3) 为保证整体效率，各个船舱实现均匀卸载，各个卸船机振动给料器物料供给要尽量保持均匀一致。

4) 为保证连续供料，避免振动给料器频繁启停，需要根据不同漏斗内的物料调整振动给料器的给料频率。当某个给料器的振动频率发生变化时会影响总的输出流量，因此需要实现单台给料器的实时给料数据。

5) 由于皮带秤与单机存在相对位置，3 台给料器的总量存在滞后性，需引入大滞后算法，减少误差。

6) 最后实现当某个或几个振动给料器需要调整给料系数时，其它振动给料器通过控制器随之自动调整，以实现总输出保持不变，使整个码头的物流系统趋于平衡，提高吞吐量。

2.2 系统组成

流量自动控制系统由以下 3 个部分构成：

1) 数据采集系统

该系统包括流量传感器、速度传感器、料位传感器、皮带秤、二维激光雷达称重系统等，用于监测和控制系统的各种参数，如物料流量、皮带速度、料位高度以及称重等。

2) 中央控制系统

这是控制系统的核心，包括 PLC(可编程逻辑控制器)、HMI(人机界面)和相应的控制软件。控制系统接收传感器系统的信号，对这些信号进行处理和分析，然后输出控制信号，以控制卸船机或装船机的操作。

3) 执行器系统

该系统包括电机、减速器、驱动装置等设备，用于接收控制系统的控制信号；驱动带式输送机、卸船机或装船机等设备运转，以实现物料的输送和装卸。

各部分在控制系统的协调下，实现带式输送机的流量自动控制，并可接入企业的 ERP 系统或生产管理系统，为企业的整体信息化管理提供数据支持。水转水散货码头直装工艺流程流量自动控制系统示意图见图 1。

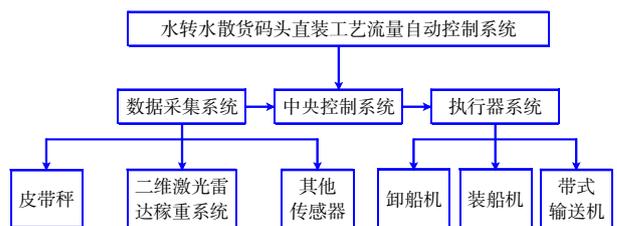


图 1 水转水散货码头直装工艺流程流量自动控制系统示意图

3 算法设计

3.1 基于 Smith 大滞后控制下的卸船机与带式输送机控制系统特性

基于 Smith 大滞后的 3 台卸船机与 1 条带式输送机系统作业是一种复杂的系统控制问题。这种系统通常需要进行动态特性分析, 并使用适当的控制策略确保系统的稳定性和性能。

在卸船机和带式输送机系统中, 卸船机从船上抓取散货并放在皮带上。带式输送机将散货运送到存储设施或其他处理设备中。这种系统通常具有复杂的动态特性, 包括大滞后和耦合效应。Smith 大滞后是一种常见的动态特性, 描述了控制信号与系统输出之间的时间延迟。在卸船机和带式输送机系统中, 这种滞后可能来自于卸船机抓取散货并将其放在皮带上所需的时间, 以及带式输送机将散货运输到目标位置所需的时间^[1]。

为了确保系统的稳定性和性能, 可以采取以下控制策略:

1) 预测控制

通过使用预测模型估计系统的未来输出。这些模型可以考虑到卸船机和带式输送机的动态特性, 包括 Smith 大滞后和耦合效应。通过预测控制, 可以提前调整控制信号, 以最大程度地减少系统输出与目标之间的误差。

2) 补偿控制

通过使用补偿器补偿系统的 Smith 大滞后。这些补偿器可以产生适当控制信号, 以抵消滞后对系统性能的影响。

3) 鲁棒控制

通过设计控制器处理系统的不确定性。这些不确定性可能包括卸船机和带式输送机的故障、负载变化和干扰。鲁棒控制可以确保系统在面临这些不确定性时仍能保持稳定性和性能。

综上所述, 基于 Smith 大滞后的 3 台卸船机

与 1 条带式输送机系统作业需要进行动态特性分析, 并采用适当的控制策略确保系统的稳定性和性能。

3.2 基于内模 PID 算法及 Smith 预估补偿器的控制器设计

根据码头装卸系统现状, 针对解决 3 台卸船机 1 台装船机直装工艺协同作业保持总流量可控的问题, 对振动给料器的给料量需要进行严格的控制。为此, 设计一种全新的抗扰动的自适应串级调控系统。该系统基于内模 PID 算法上加入 Smith 预估补偿器, 比普通 PID 单回路控制系统在结构上增加了多个副调节器, 使系统能够对进入副回路的干扰有很强的抑制能力, 改善主控制通道的动态特性, 提高系统的快速反应能力^[2]。预估器系统框图见图 2。

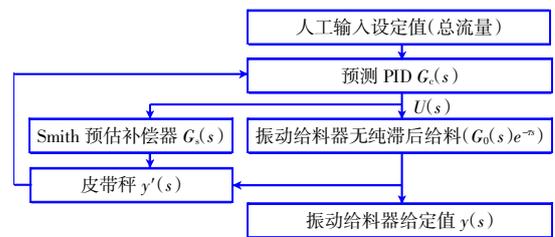
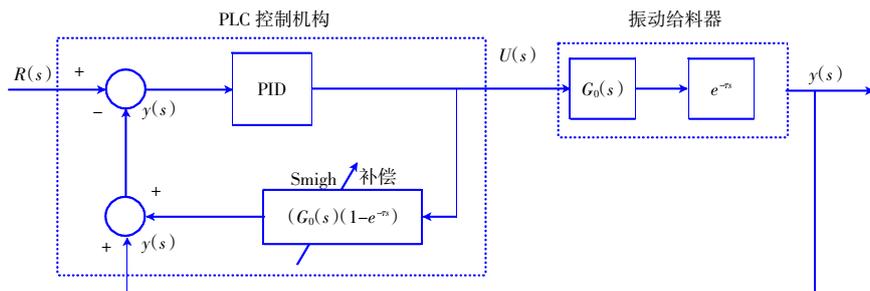


图 2 预估器系统框图

图中, $G_c(s)$ 为系统预测值; τ 为纯滞后时间; $y'(s)$ 为 Smith 预估补偿器与反馈的比较值; $y(s)$ 为调节后的给定值; $G_0(s)$ 为被控过程无纯滞后环节的传递函数; $G_s(s)$ 为 Smith 预估补偿器的传递函数; 受到调节器的作用振动给料器要经过纯滞后时间 τ 才能得到反馈输入, 这就导致反馈不及时, 造成超调, 对系统的稳定性产生不利影响^[1]。为使 $y'(s)$ 与 $U(s)$ 不存在滞后 τ , 则需在 Smith 中继续引入 $e^{-\tau s}$, 得到以下公式:

$$G_s(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau s})$$

改进后的模型见图 3。



注: $R(s)$ 为人工输入的设定值。

图 3 改进后的模型

4 控制方案

4.1 中央控制系统

中央控制系统由中央控制器 PLC 统筹各个单机 PLC 模块，通过光纤与无线 AP、5G 等手段与

各单机进行信息交互，读取各单机的运行状态、抓货情况、货物需求状况以及振动给料器的给料调节和皮带秤的反馈读取。控制系统结构图如图 4 所示。

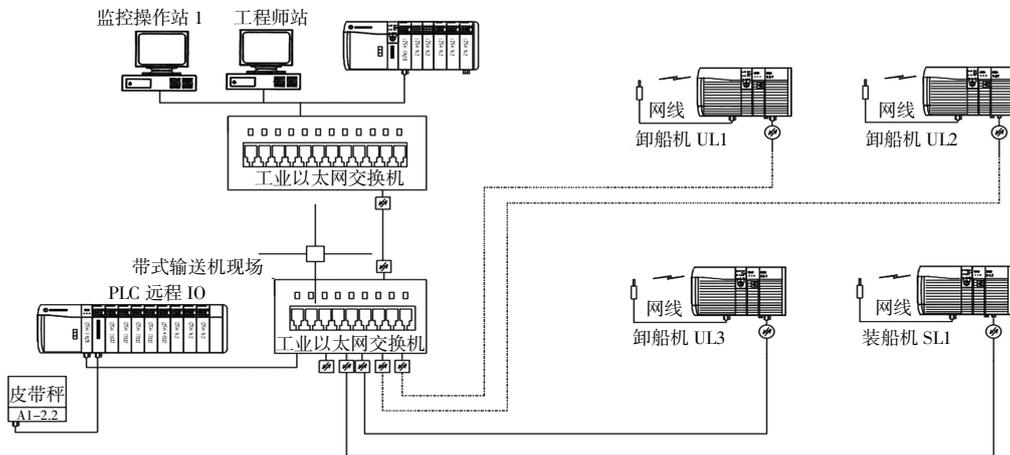


图 4 控制系统结构图

4.2 给料控制方案

根据卸船模式、装船流量需求、船体平衡等，配合数学模型制定以下卸船机接料漏斗及振动给料器控制方案。

4.2.1 系统标定

对卸船机接料漏斗进行网格数字化，建立数学模型，对接料漏斗容量进行百分比标定，以减小对卸船机接料漏斗内存有物料的误差计算。然后根据现场情况以及皮带秤和激光扫描称重系统反馈参数对 PID 算法与 Smith 预估补偿器进行数据整定。

4.2.2 控制方法

根据装船机料流需求，检测卸船机工作状态，判断卸船机工作数量，对卸船机随机或轮循进行编组运行，根据人工给定的料流需求通过 PID 算法与 Smith 预估补偿器，对振动给料器进行自动调节，实现精准控制。根据取料累计量对管控系统进行反馈，实现对船舶的预调控^[3]。

工作模式如下：

1) 装船机以 6 000 t/h 负荷运转，则 3 台卸船机同时工作，其工作模式在保证不超接料漏斗上限值时，对 3 台卸船机的 3 台振动给料器进行流量分配，通过 Smith 预估补偿器进行前置加量，变后滞调节为超调节，满足带式输送机的不同工况流量需求；

2) 卸船机清舱，在满足接料漏斗余量 20%的

要求时，控制振动给料器给料。当其中 1 台接料漏斗余量不足 40%时，该振动给料器降低给定量，调节其它 2 台增量；

3) 卸船机故障，则对装船机流量供给根据故障数量进行限额；如果装船机在平舱状态，料流需求少，则启动 1 台卸船机（在保证卸船船舶平衡情况下，随机或者轮换启动，以保证维护修理）；

4) 换舱时装船机发出换舱信号，振动给料器停止给料。

5 结语

本文的控制系统设计合理、可行性高，该系统选用集散控制的理念，即选择上下位的结构模式，真正实现了集中管理、分散控制，使计算机集中控制可能存在的问题得到有效解决，并能提高系统的可靠性。

通过仿真试验验证，发现优化策略可显著提高协同作业效率和装卸能力，同时降低等待时间和能耗等成本指标。此外，优化策略的实施还提高了港口的稳定性和可靠性，减少了人为因素对协同作业的影响。

参考文献：

- [1] 潘永湘,杨延西,赵跃.过程控制与自动化仪表[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 郭姝梅.控制系统结构、控制策略互补性仿真研究[D].南京:南京气象学院,2003.
- [3] 林秀.基于 PLC 的配料远程控制系统设计[D].扬州:扬州大学,2017.