

基于小型 PLC 的多模式 DCS 智能控制模块设计

丁 之¹, 庞毅飞², 何宗蔚³, 阎 杰³

(1. 四川中烟工业有限责任公司 信息中心, 成都 610020;

2. 四川中烟工业有限责任公司 绵阳卷烟厂, 四川 绵阳 621000;

3. 四川中烟工业有限责任公司, 成都 610000)

摘要: 多模式 DCS 是一种由多个分布式的控制单元组成、每个控制单元可以实现不同的控制模式的工业自动化控制系统, 该系统中所涉及的控制逻辑较为复杂, 需要考虑多个不同的控制模式的切换、并行、优先级等问题, 增加了控制过程的难度; 为此, 利用小型 PLC 设计多模式 DCS 自动控制模块; 将小型 PLC 元件作为模块控制器, 调整传感器、处理器、VFD 变频器、通信网络等部分的内部结构, 通过电路的连接完成多模式 DCS 控制模块硬件设计; 采集工业自动化生产线实时运行数据, 采用特征提取与匹配的方式, 识别当前生产线的运行模式, 利用小型 PLC 生成自动化生产线控制指令, 以分散的方式传输给各个生产线工作设备, 最终从工作模式、位置、速度等方面, 实现多模式 DCS 控制功能; 测试结果表明: 设计模块的位置和速度控制误差分别降低了 35 mm 和 83.75 r/min, 能够有效提高生产线输出产品的合格率。

关键词: 小型 PLC; 多模式; 工业自动化生产线; DCS 控制模块

Design of Multi-mode DCS Intelligent Control Module Based on Small PLC

DING Zhi¹, PANG Yifei², HE Zongwei³, YAN Jie³

(1. Information Center, Sichuan Tobacco Industry Co., Ltd., Chengdu 610020, China;

2. Mianyang Cigarette Factory, China Tobacco Industry Co., Ltd., Mianyang 621000, China;

3. China Tobacco Sichuan Industrial Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: A multi-mode distributed control system (DCS) is composed of multiple distributed control units, and each unit can achieve different modes of industrial automation control system. The system has complex control logic, which needs to consider issues such as mode switching, parallelism, and priority, thereby increasing the difficulty of control process. To address this, a multi-mode DCS automatic control module is designed using a small programmable logic controller (PLC). Using the small PLC components as a module controller to adjust the sensors, processors, variable-frequency drives (VFDs), and communication networks, and complete the hardware design of multi-mode DCS control module through circuit connections. The real-time operational data is collected from industrial automation production line, and a feature extraction and matching method is employed to identify the current operating mode of production line. The small PLC is used to generate control instructions for automated production line, which are transmitted to operation devices from various production lines in a decentralized manner. Finally, the multi-mode DCS control functions are realized in terms of work mode, position, and speed. Experimental results indicate that the position and speed control errors of the designed module are reduced by 35 mm and 83.75 r/min, respectively, effectively improving the first-pass yield (FPY) of production line.

Keywords: small PLC; multi-mode; industrial automation production line; DCS control module

收稿日期:2024-06-13; 修回日期:2024-08-27。

基金项目:四川中烟工业有限责任公司科技项目(XX202201)。

作者简介:丁 之(1985-),男,硕士,工程师。

通讯作者:庞毅飞(1987-),男,大学本科,工程师。

引用格式:丁 之,庞毅飞,何宗蔚,等. 基于小型 PLC 的多模式 DCS 智能控制模块设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9): 168-175, 215.

0 引言

自动化生产线是一种通过自动化机械系统来完成生产过程的生产组织, 它的主要特征是: 被加工物体在机床间的自动传递, 加工、装卸、检测等过程都是在机床上完成的; 各机械设备工作节奏一致, 生产工艺具有较高的连续性。但多模式工业自动化生产线一般针对特定的生产流程和产品规格进行设计和优化, 对于临时性或短期生产需求的控制效果较差。要实现加工线机械装备的自动化, 就要在工业自动化生产线中应用控制系统, 使加工线的装备自动运转, 并对生产流程及装备的运转状态进行优化, 从而提高产品的生产效率及品质, 减少成本。

文献 [1] 系统采用 TS 模糊模型来描述系统中的非线性负荷品质, 提高了控制系统的鲁棒性; 利用 MTS 实验平台, 对悬架的力学特性进行分析, 构建准确的摩擦数学模型, 通过干扰观测器, 估计真实摩擦对生产线工作设备的干扰, 实现对摩擦的补偿。在此基础上, 以设备加速度、悬架运动行程、动态负载等作为控制指标, 采用 TS 模糊建模与干扰观测器相结合的方法, 研究悬架的 H_{∞} 状态反馈鲁棒控制器, 实现对生产线的控制。文献 [2] 控制系统利用 RBF 神经网络分析生产线的温度变化特征, 根据塑料成型生产目的计算具体的温度控制量, 从而实现对生产线中温度参数的控制。而文献 [3] 系统以 Matlab/Simulink 为软件平台, 利用 STM32-MAT 与 Matlab embedded coder 等工具, 将控制模型生成为符合设计要求的 STM32 工程文件, 通过 Keil 编译并下载进 STM32 中, 并验证控制系统在实际生产线环境中运行的可行性。然而由于生产线中工作的设备数量众多, 采用上述传统控制系统存在明显的控制效果不佳的问题, 间接的影响工业生产效率与质量。

为了解决系统在控制模式之间切换时出现过渡问题, 影响系统的动态响应和稳定性的难点, 在小型可编程逻辑控制器 (PLC, programmable logic controller) 的支持下, 设计多模式集散控制系统 (DCS, distributed control system) 自动控制模块。

1 多模式 DCS 控制模块硬件设计

设计的多模式 DCS 控制模块硬件部分中, 所有的生产线传感器均连接至处理器设备上, 并通过总线与控制器相连, 组成一个完整的控制模块。在模块硬件中加设变频器 (VFD, variable-frequency drive) 和电气驱动装置, 用来提升模块硬件设备的执行效率。因实际控制过程中应用的设备较多, 不能以一张照片的形式展示, 故补充了实际应用中硬件设备的简图, 具体架构如图 1 所示。

由图 1 可知, 设计的 DCS 控制模块总体架构主要

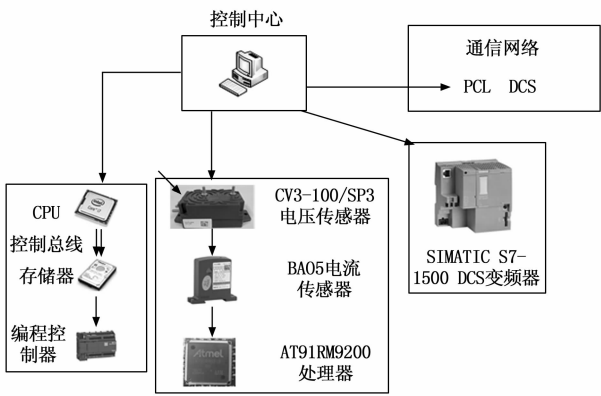


图 1 DCS 控制模块总体架构设计

由小型 PLC 元件、传感器与处理器、变频器和通信网络四部分组成。将 CPU 作为核心处理器, 负责执行用户程序、处理数据以及与其他设备进行通信。存储器用于存储用户程序、数据和模块配置信息, CPU 通过控制总线与存储器进行数据传输和控制。编程控制器通过特定的接口 (如 RS-232、USB 等) 与 PLC 连接, 用于用户程序的输入、检查、修改和监控。将 CV3-100/SP3 电压传感器和 BA05 电流传感器连接到工业自动化生产线的相关设备上, 实时采集电压值和电流值等运行数据。变频器通常通过控制总线与 PLC 连接, 接收来自 PLC 的指令来控制工作电压和频率, 以满足生产线的速度控制要求。通信网络模块通过 PLC 的通信接口 (如以太网口、串口等) 与其他硬件设备 (如其他 PLC、上位机等) 进行数据交换。DCS 控制模块通过通信网络与 PLC 进行通信, 发送控制指令并接收来自 PLC 的反馈数据, 从而实现对整个自动化生产线的控制。

1.1 基于小型 PLC 元件提高控制的灵活性

小型 PLC 元件允许设计者根据具体的应用需求, 灵活配置控制系统。无论是增加新的控制逻辑、改变现有逻辑还是扩展新的输入/输出点, 小型 PLC 都能提供较高的灵活性, 以满足多模式 DCS 系统的需求, 提高了对工业自动化生产线实时数据采集和处理的速度。选用小型 PLC 元件的内部结构如图 2 所示。

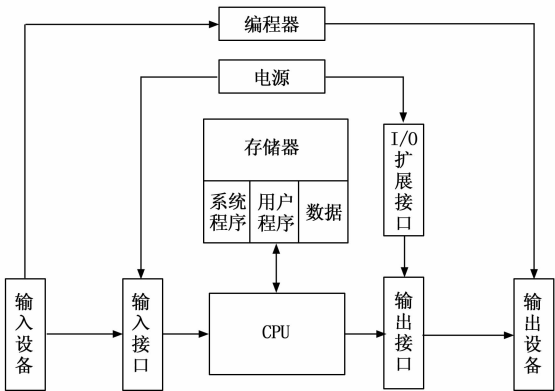


图 2 小型 PLC 元件内部结构图

控制器外部开关信号均为输入变量,在设计模块中主要针对的是工业自动化生产线中传感器的反馈结果,经输入接口存储到内部的数据存储器中,经过逻辑运算、数据处理等环节,最终以输出变量的形式送到输出接口,从而控制输出设备。CPU 与存储器之间,经由所述的地址、数据和控制总线,以及输入、输出接口电路。中央处理器主要负责从内存中读入、执行、删除、以及对中断的处理。可编程控制器的输入、输出部分是可编程控制器与外界进行通信的窗口。此外,通过 TM172PBG28R 编程控制器,可以把用户的程序输入到 PLC 的内存中,并通过编程控制器对其进行检查、修改和监控。将上述组成 PLC 的元素按照图 2 结构进行连接,完成对小型 PLC 元件的设计。在实际的设计安装过程中,需要综合考虑工业自动化生产线工作环境情况,调整 PLC 元件的安装大小,降低 PLC 元件对工业自动化生产线工作的干扰。

1.2 基于传感器与处理器提高采集数据的质量

DCS 控制模块中传感器和处理器的内容是采集工业自动化生产线的实时运行数据并对其进行分析处理,它们能够提高数据采集质量、实现实时监测、支持多模式控制、提高处理器性能、降低功耗以及易于扩展和升级。这些好处使控制系统能够更好地满足工业自动化生产线的需求,提高生产效率和产品质量,实现了对生产线运行状态的实时监测^[4]。主要传感器为 CV3-100/SP3 电压传感器和 BA05 电流传感器,工业自动化生产线传感器具体包括生产线中所有设备的运行电压值和电流值、生产负载数据以及样品试件移动位置等,其中生产线设备工作电流与电压传感器的内部结构如图 3 所示。

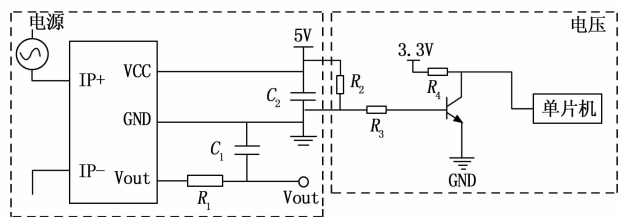


图 3 工业自动化生产线工作电流/电压传感器结构图

原生产线设备硬件结构是一个基于传统 PLC 控制系统,其中传感器直接连接到 PLC,而 PLC 通过其内置的处理器和通信接口来管理和控制生产线。在这个结构中,没有专门的处理设备来提高传感器数据采集质量。此外,原系统没有充分利用 ARM 芯片的高级功能,如内部调试信道和高级中断控制器,从而会导致处理速度较慢,无法满足复杂或高速控制任务的需求。因此,按照上述方式,在考虑工业自动化生产原理的情况下,对工业自动化生产线中的负载以及位置传感器内部

结构进行调整^[5]。为保证加设的小型 PLC 元件能够实时接收到传感器获取的生产线实时运行数据,实现 PLC 元件与传感器之间的连接如图 4 所示。

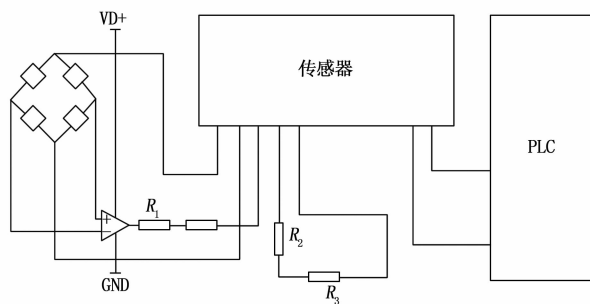


图 4 小型 PLC 元件与传感器连接示意图

从图 4 中可以看出,在小型 PLC 元件与传感器之间安装了一个处理器设备,该设备的工作目的是提高传感器对生产线实时工作数据的采集质量。设计 DCS 控制模块中选用 32 位工业级 ARM 芯片 AT91RM9200 作为核心处理器,在低功率状态下,可以输出 3.1mA 的电流,而且它还有一个外挂总线,可以很好地扩展^[6]。具有较高的处理速度,包含内部调试信道的内部模拟器,支持 SDRAM、静态存储器、BurstFlash 等设备的运行,同时配有高级中断控制器,可实现对异常信号的屏蔽。

1.3 基于 DCS 中 VFD 变频器提高控制效率

VFD 变频器通过分散控制的形式,能够实现对生产线工作速度的高效控制与调整。这种分散控制的方式使得每个变频器都能独立地根据生产需求进行速度调节,从而提高了整个生产线的控制效率。VFD 变频器的工作原理如图 5 所示。

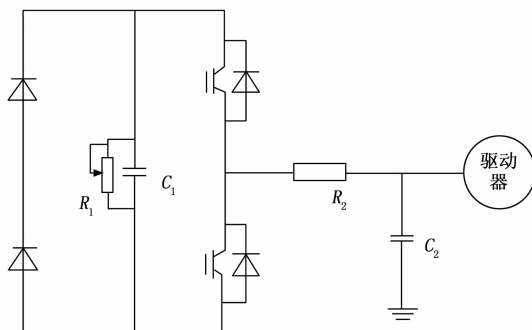


图 5 VFD 变频器工作原理图

图 5 表示的 SIMATIC S7-1500 变频器通过对工作电压和频率的控制,以适应工业自动化生产线的速度控制要求。安装的变频器接收小型 PLC 元件发出的控制指令,实现对生产线工作模式的驱动。

1.4 基于 PLC 与 DCS 间通信网络提高数据传输可靠性

PLC 与 DCS 间采用全局 I/O 通信方式,通过广播

通信模式实现数据交换, 这种通信方式确保了数据在传输过程中的准确性和可靠性。这种通信方式减少了数据传输的延迟, 使得控制系统能够更快地响应生产线的变化, 提高了生产的灵活性和适应性。加设的 PLC 与 DCS 控制模块中其他硬件设备之间的通信方式采用全局 I/O 通信方式, 在 PLC 网中, 每一个 PLC 的 I/O 区域都被划分成一个链接区, 链接区采用一个信箱的架构。PLC 与 DCS 间通信网络通过全局 I/O 通信方式实现快速、可靠的数据交换, 提高工业自动化生产线的响应速度和效率。发送区的数字和接收区的尺寸一样, 所占的地址相同, 其中一个是发送区, 其余的都是接收区, PLC 与 DCS 间采用的是广播通信模式^[7]。因为每个 PLC 都有同样的链接区和同样的地址段, 所以每个 PLC 对各自的链接区进行访问, 即对其它 PLC 的链接区进行了访问, 从而实现了硬件设备与 PLC 之间的数据交换。

除了上述硬件设备外, 还需要对电路的连接方式进行调整, 具体包括复位电路以及供电电源电路, 其中复位电路能够在工业自动化生产线不同的工作模式下, 实现生产线的初始化, 降低生产任务之间产生的干扰。而供电电源电路的优化, 则是在传统电路的基础上增加一个稳压电路和信号隔离电路, 通过稳压电路能够在保证控制模块给不同硬件设备提供不同等级电压的同时, 保证供电的稳定性, 而信号隔离电路则是屏蔽外部环境以及硬件设备之间产生的干扰信号。

2 多模式 DCS 控制模块功能设计

在控制模块硬件的支持下, 采用分散控制形式, 利用 PLC 设备生成多个针对不同工作设备的控制指令, 将其传输至对应的控制终端。设计 DCS 控制模块的基本工作原理为: 利用传感器设备采集工业自动化生产线的实时运行数据, 通过对实时运行数据的分析, 确定当前生产线的工作模式, 判断当前生产线是否满足生产任务需求, 以期作为控制模块功能的启动条件^[8]。利用小型 PLC 生成自动化生产线 DCS 控制指令, 将其分散传输至生产线的工作设备中, 最终从工作模式切换、位置以及速度的控制, 完成对工业自动化生产线的 DCS 控制任务。

2.1 有效采集工业自动化生产线实时运行数据

结合传感器设备、小型 PLC 和处理器等设备, 采集工业自动化生产线实时运行数据, 解决工业自动化生产线实时运行数据采集和控制指令生成等问题, 具有实时性、准确性、灵活性和可扩展性等优越性。工业自动化生产线的基本结构如图 6 所示。

在实际的生产线实时运行数据采集过程中, 将传感器安装至生产线上的各个施工设备上, 采用数据截获的

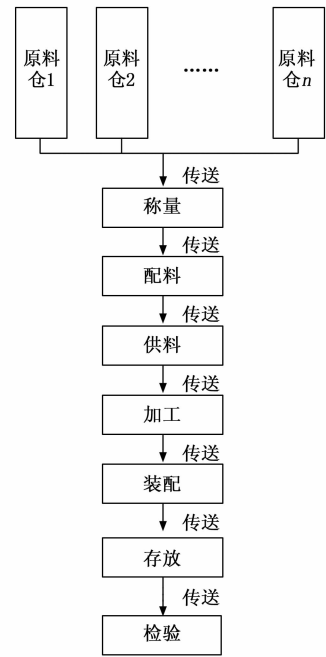


图 6 工业自动化生产线基本结构图

方式得出生产线运行数据的采集结果^[9]。以工业自动化生产线中的数控机床为例, 实时电压、实时电流、主轴转速、主轴功率等信息。传感器的高精度和实时性确保了数据的准确性和可靠性。采集结果为:

$$\begin{cases} U_c = \delta \cdot U_0 \\ I_c = \frac{U_c}{R_z} \\ \omega_c = \frac{1000v_{cut}}{\pi D_w} \\ P_c = F_{cut} \cdot v_0 \end{cases} \quad (1)$$

公式 (1) 中 δ 为数控机床的电压变比, U_0 为额定电压值, R_z 为数控机床中的总电阻值, v_0 和 v_{cut} 为原料的给进速度和切削速度, D_w 表示切削刀具直径, F_{cut} 为切削刀具在试件上施加的切削力^[10]。在此基础上对采集数据进行融合处理, 处理过程如下:

$$x_c(t) = \bar{\omega}_1 U_c(t) + \bar{\omega}_2 I_c(t) + \bar{\omega}_3 \omega_c(t) + \bar{\omega}_4 P_c(t) \quad (2)$$

公式 (2) 中参数 $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 、 $\bar{\omega}_3$ 和 $\bar{\omega}_4$ 分别表示的是设备运行数据分量的融合权重参数, $x_c(t)$ 为数控机床 t 时刻运行数据的采集结果, 同理可以得出工业自动化生产线中其他施工设备实时运行数据的采集与融合结果^[11]。为保证生产线实时运行数据的采集质量, 在处理器的支持下, 需要对初始采集数据进行过滤处理, 处理过程为:

$$x_f(t) = Zx_c(t) + B \quad (3)$$

其中: Z 和 B 分别为生产线数据的状态转移矩阵和输入矩阵。按照上述流程, 对生产线中的所有运行数据

采集结果进行处理,得出满足质量要求的生产线工作数据采集结果。

2.2 识别工业自动化生产线运行模式

将利用传感器设备采集的工业自动化生产线的运行数据输入至 PLC 元件中,根据预设的逻辑或程序进行处理和转发,以便后续的数据分析和模式识别,确定当前生产线的运行模式^[12],实现对生产线物料位置和速度的精准控制,提高生产效率和产品质量。工业自动化生产线运行模式可分为正常运行模式、调整运行模式和待机运行模式,正常运行模式就是按照正常的生产流程,依次执行生产操作的模式,调整模式是为了满足自动线调试和正常运行的要求,对生产线及其内部工作设备进行调整,调整过程不影响生产线的正常运行,而待机运行模式则表示生产线中的所有硬件设备均处于待机状态,未执行生产操作,将上述 3 种工作状态下生产线的标准特征标记为 τ_n 、 τ_s 和 τ_S 。以采集的运行数据为研究对象,利用公式 (4) 提取当前生产线的工作特征。

$$\tau(t) = \frac{f_{\max} x_f(t)}{\sum_{j=1}^T |x_f(t)|} \quad (4)$$

式中, T 为生产线数据的采集时长, $f_{\max}()$ 为数据最大值计算函数,将数据的采集与处理结果代入到公式 (4) 中,即可得出生产线工作特征的提取结果。当前工业自动化生产线运行模式识别结果为:

$$\mu = \frac{\tau(t) \cdot \tau}{\|\tau(t)\| \cdot \|\tau\|}, \tau \in \tau_n \cup \tau_s \cup \tau_S \quad (5)$$

若公式 (5) 计算得出特征匹配度 μ 的值高于阈值 μ_0 ,证明当前生产线的工作模式与 τ 对应工作模式一致,否则进行下一标准特征的比对,直至得到满足阈值条件的匹配结果^[13],由此即可准确识别当前工业自动化生产线的工作模式。

2.3 基于小型 PLC 实现 DCS 智能控制

小型 PLC 作为控制系统的核心,负责接收来自传感器的数据,执行逻辑运算,并根据预设的程序或算法生成控制指令。小型 PLC 具有循环扫描的工作方式,包括内部处理、通信、输入处理、控制执行、控制指令输出等环节。作为数据处理的核心,提高传感器的数据采集质量,并快速处理来自 PLC 和传感器的数据。PLC 采用的是循环扫描的工作方式,包括内部处理、通信、输入处理、控制执行、控制指令输出等环节^[14]。借助 PLC 的输出控制指令和通信网络,对生产线中的工作设备进行启停和状态切换,实现不同工作状态下的生产线运行模式的切换。在 PLC 不工作的时候,只能执行诸如内部处理、通讯业务等工作。PLC 的扫描过

程如图 7 所示。

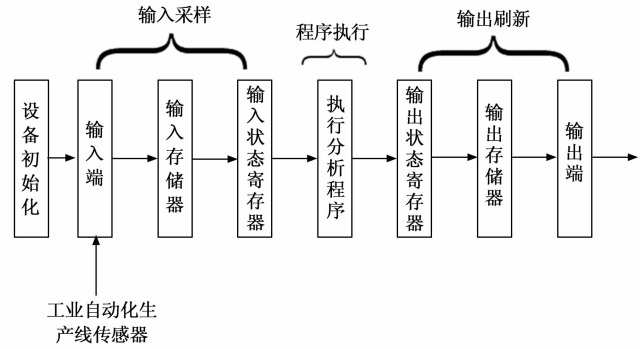


图 7 PLC 扫描工作过程图

在内部加工环节,实现了 PLC 的自检功能,确保了控制模块的内部硬件状态;在通讯服务阶段,PLC 与其它智能设备进行通讯,对编程序输入的指令作出响应,对编程序的显示内容进行更新等;在输入取样阶段,PLC 按照扫描工作模式,依次取样各输入端子的输入状况,然后将其存入到输入映象寄存器中,并将其刷新^[15]。然后进入程序处理阶段,使输入状态发生变化,此时存储器中的对应内容数据不会发生改变。在程序执行环节,PLC 按照一定顺序对程序进行扫描和执行,一般是按照从上到下、从左到右的次序。如果遇到一个程序跳跃指令,那么该程序就按照跳跃条件的满足与否来确定。在组件图像注册表中,它的内容将随着程序的执行而改变^[16]。在完成了全部的程序之后,进入输出处理阶段。在该阶段,PLC 将输出映象寄存器中的与输出相关的状态转移至输出锁存器,并以控制指令方式输出,用于驱动外部负荷。PLC 输出的控制指令可以量化表示为:

$$c = \{num, M, W_{dispatch}, \Delta p, \Delta v\} \quad (6)$$

其中: num 为生产线中的控制目标设备编号, M 为生产线的工作模式, $W_{dispatch}$ 为生产线中物料的调度量, Δp 和 Δv 分别为生产线中物料位置和控制量^[17]。其中 Δp 和 Δv 的计算公式如下:

$$\begin{cases} \Delta p = |x(t) - x_i| + |y(t) - y_i| + |z(t) - z_i| \\ \Delta v = \mu_c |v(t) - v_i| \end{cases} \quad (7)$$

其中: $[x(t), y(t), z(t)]$ 表示当前物料位置, $[x_i, y_i, z_i]$ 表示物料的目标位置,另外 $v(t)$ 和 v_i 对应的是生产线执行速度的当前值与控制目标值^[18]。同理可以得出控制指令中其他分量的量化求解结果,将 PLC 输出的控制指令通过通信网络传输给生产线的各个工作设备,实现模块的分散控制。

根据工业自动化生产线输入的生产任务,通过设备启停、开关阀状态的切换,实现生产线运行模式的切换。生产线运行模式的切换机理如图 8 所示。

在 PLC 元件输出控制指令的支持下,驱动生产线

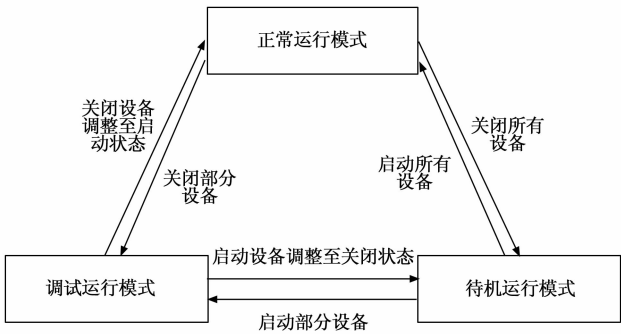


图 8 工业自动化生产线运行模式切换机理

中的工作设备的工作状态进行调整, 完成对工业自动化生产线运行模式的切换。PLC 利用方向输入/输出接口对步进电机进行正反向控制, 而脉冲输入/输出接口则对步进电机的转速和工作频率进行控制, 从而调整工业自动化生产线的执行与传输速度^[19]。在物料位置控制过程中, 根据传感器反馈的生产线执行进程, 确定物料的目标位置, 并对实时位置移动误差进行补偿, 进而从工作模式、位置以及速度 3 个方面, 实现对多模式工业自动化生产线的 DCS 控制功能。基于上述内容, 获取小型 PLC 的多模式 DCS 控制模块功能设计的流程图如图 9 所示。

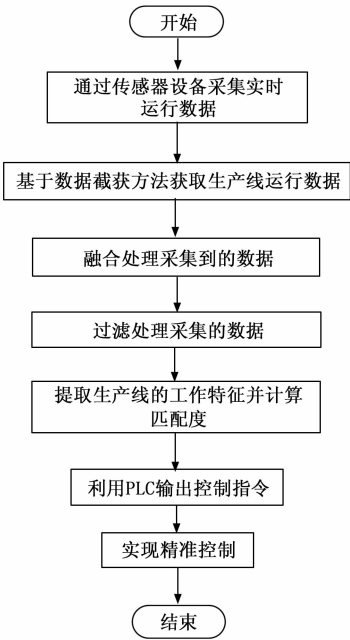


图 9 多模式 DCS 控制模块功能设计流程图

在上述研究中, 采用小型 PLC 元件替代传统的生产线控制器, 监测工业自动化生产线, 利用 CV3-100/SP3 电压传感器和 BA05 电流传感器采集工业自动化生产线中设备的运行电压值和电流值, 选用 32 位工业级 ARM 芯片 AT91RM9200 作为核心处理器, 提高传感器的数据采集质量。将 VFD 变频器作为工业自动化生

产线的驱动装置, 通过调节工作电压和频率, 及时调整生产线速度, 采用全局 I/O 通信方式, 通过链接区和信箱的架构, 实现不同 PLC 之间以及硬件设备与 PLC 之间的数据交换和通信, 降低生产任务之间的干扰。借助 PLC 的输出控制指令和通信网络, 对生产线中的工作设备进行启停和状态切换, 实现不同工作状态下的生产线运行模式的切换, 使设计系统更具实时性、准确性和灵活性。通过上述设计, 以期能够提升控制功能和工业自动化生产线的工作效率。

该研究中, 小型 PLC 通过调整传感器、处理器、变频器 (VFD)、通信网络等部分的内部结构, 并通过电路的连接, 完成多模式 DCS 控制模块的硬件设计。这种设计使得 PLC 能够采集工业自动化生产线的实时运行数据, 并采用特征提取与匹配的方式识别当前生产线的运行模式。基于识别结果, PLC 生成相应的自动化生产线控制指令, 并以分散的方式传输给各个生产线工作设备, 从而在工作模式、位置、速度等方面实现多模式的 DCS 控制功能。之所以说这种实现可以体现多模式的 DCS 智能控制, 原因如下。

- 1) 灵活性: 小型 PLC 的模块化设计允许根据不同的生产需求和运行模式调整控制策略, 从而实现对不同生产场景的适应性控制。
- 2) 实时性: 通过采集实时数据并快速响应, PLC 能够实时调整控制参数, 确保生产线的高效运行。
- 3) 智能化: 特征提取与匹配技术使得 PLC 能够识别复杂的生产模式, 并据此生成智能化的控制指令, 提高了控制的精确度和效率。
- 4) 分散控制: PLC 以分散的方式控制各个生产线工作设备, 这种分布式控制结构提高了系统的可靠性和容错性。

3 模块测试

为了测试设计的基于小型 PLC 的多模式 DCS 控制模块的控制功能和性能, 设计测试实验。根据实验目的将模块测试实验分为两个部分, 第一部分采用白盒测试方式, 验证设计 DCS 控制模块是否能够将生产线设备和物料控制与预期的运行参数和状态一致, 通过生产线设备与物料信息的观测结果, 得出反映模块控制功能的测试结果。而控制模块的最终目的是保证生产线的工作效率和质量, 从而获取满足生产质量要求的产品, 因此实验的第二部分用来测试控制模块的应用性能, 应用性能测试采用黑盒测试方式, 最终通过与传统控制系统的对比, 体现出设计 DCS 控制模块在控制功能以及应用性能两个方面的优势。

3.1 选择工业自动化生产线控制对象

此次实验选择工业空调自动化生产线作为研究对

象,该生产线可以分为两个部分,第一部分是组成工业空调零部件的加工、生产部分,涉及的工业设备包括焊接数控机床、切削数控机床等,第二部分是空调零配件的组装生产线,根据空调的硬件连接结构完成所有零配件的组装工作。组装生产线中安装的工作设备包括全自动组装机、传送带、自动送料机等部分,也就是控制模块的直接作用对象。选择的工业自动化生产线能够同时完成 200 台空调的生产与组装。为保证工业自动化生产线的控制价值,在无负载情况下,生产线的操作是否达到了目的产品的工艺要求;应急停机:确保无论在什么情况下,只要按下急停键,就能使流水线停止运转,防止流水线因故障而造成更大的损失;复位的要求要能够保证在复位的过程中,生产线的操作是合理的,比如,在任何时刻的复位都不能出现机械结构之间的挂钩碰撞等情况。在确定选择生产线运行正常的情况下,执行实验的下一步操作。

3.2 生成工业自动化生产线控制任务

从工作模式、物料位置和生产线执行速度 3 个方面生成工业自动化生产线控制的测试任务,由于正常运行模式下生产线的工作效率最高,因此生产线工作模式的控制目标均为正常运行模式,另外生产线执行速度主要是指数控机床的主轴转速。部分工业自动化生产线控制任务的生成结果,如表 1 所示。

表 1 工业自动化生产线控制任务表

控制任务编号	物料名称	物料位置控制目标	机床主轴转速/(r/min)
1	压缩机	(400,300)	5 000
	冷凝器	(600,300)	
	蒸发器	(800,300)	
	四通阀	(1 000,300)	
2	电磁离合器	(1 200,300)	8 000
	储液干燥器	(1 400,300)	
	膨胀阀	(1 600,300)	
3	压缩机	(1 800,300)	10 000
	冷凝器	(2 000,300)	
	蒸发器	(2 200,300)	
	四通阀	(2 400,300)	
4	电磁离合器	(2 600,300)	6 000
	储液干燥器	(2 800,300)	
	膨胀阀	(3 000,300)	

表 1 表示同一生产线在执行不同生产任务时的目标工作参数,物料位置控制坐标以生产线中的输送带对应的坐标系为参考,坐标系单位为 mm,在实际的生产过程中要求将所有物料放置在中心位置,输送带总宽度为 600 mm,因此要求所有物料控制目标位置的纵坐标均为 300。按照上述方式可以得出其他控制任务的生成结果,以此作为判定控制模块功能的比对标准。

3.3 安装并调试控制模块硬件设备

根据多模式 DCS 控制模块硬件设计结果,将小型 PLC 元件、传感器等设备安装在选择的工业自动化生产线的指定位置上,其中小型 PLC 元件的实际安装与接线实景如图 10 所示。



图 10 小型 PLC 元件安装实景图

在开始实验之前,为保证硬件设备与选择工业自动化生产线之间的适配度,需要对相关硬件设备进行调试。以图 10 表示的小型 PLC 元件为例,首先完成了上位机与 PLC 的通讯,并向 PLC 下载了上位机的控制程序。将 PLC 的状态调到 STOP 位置,通过计算机对程序中变量的控制验证生产线中 I/O 点是否与程序一一对应。若调试出现不对应点位现象,需要对设备中的所有接口线路进行重新连接。按照上述方式对控制模块硬件中的所有设备进行调试,保证设备能够在生产线环境中正常运行。

3.4 选择控制模块开发工具

设计的基于小型 PLC 的多模式 DCS 控制模块,选择 WPLSoft 作为编程软件,利用 WPLSoft 工具对控制模块进行配置,并编写程序。WPLSoft 工具提供了在线诊断功能,即开发人员可对控制模块硬件状态、PLC 执行状态、I/O 通道状态等进行直观调取,满足 DCS 控制模块以及可编程控制器的运行要求。

3.5 描述模块测试实验过程

利用选择的开发工具,将设计 DCS 控制模块的功能部分转换成程序代码,输入到主测计算机中,主测计算机与模块硬件之间形成物理连接,方便设备的调用与软硬件的协调。接入工业自动化生产线数据,将生成的控制任务逐一输入到控制模块中,得出控制执行结果。多模式 DCS 控制模块执行界面如图 11 所示。

按照上述方式可以得出实验中所有控制任务的执行结果。实验设置的对比项分别为文献 [1] 方法提出的基于 TS 模糊模型和扰动观测器的控制系统和文献 [2] 方法提出的基于 RBF 神经网络的控制系统,重复上述



图 11 多模式 DCS 控制模块执行界面

操作在相同的实验环境完成对比系统的开发, 得出相应的控制结果数据。

3.6 设置模块测试指标

从控制功能和应用性能两个方面设置模块的测试指标, 其中控制功能的量化测试指标为位置控制误差和速度控制误差, 其中位置控制误差的数值结果为:

ε_w = | x_c - x_t | + | y_c - y_t | + | z_c - z_t | (8)

式中, (x_c, y_c, z_c) 表示的是控制模块作用下物料的实际位置坐标, 在位置控制误差测试过程中需要综合考虑所有物料。速度控制误差的测试结果为:

ε_v = | v_c - v_t | (9)

其中: v_c 为控制模块作用下数控机床的主轴转速值。另外设置生产线生产产品的合格率作为控制模块应用性能的测试指标, 该指标的测试结果如下:

η_i = (n_q / n_t) × 100 % (10)

公式 (10) 中变量 n_q 和 n_line 分别为生产合格的空调产品数量以及生产线输出空调产品的总数量。最终计算出位置、速度控制误差越小, 证明对应方法的控制功能越优, 产品合格率越高, 说明对应控制模块的应用性能越高。

3.7 测试实验结果与分析

统计工业自动化生产线上料的位置信息, 通过公式 (8) 的计算得出位置控制误差的测试结果, 如图 12 所示。

从图 12 中可以直观的看出, 与两种传统系统相比, 设计 DCS 控制模块的位置控制误差更小, 降低约 35 mm。速度控制误差的测试结果, 如表 2 所示。

将表 1 中的速度数据与表 2 数据代入到公式 (9) 中, 计算得出 3 种方法的平均速度控制误差分别为 112.5、75.0 和 10 r/min。综合位置和速度控制误差的测试结果, 证明优化设计方法具有更高的控制功能。

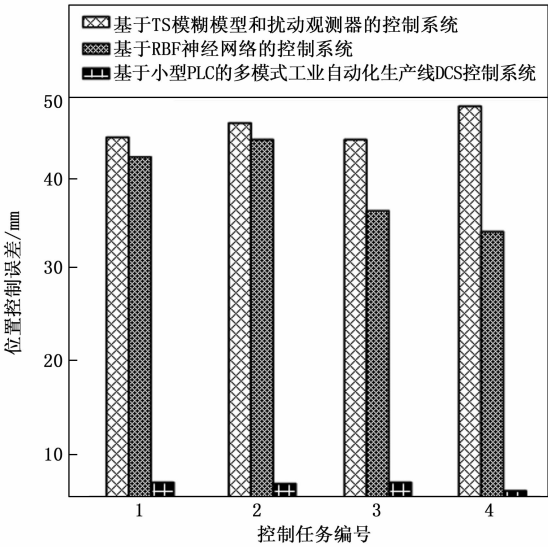


图 12 工业自动化生产线位置控制误差测试结果

表 2 多模式工业自动化生产线速度控制误差测试数据表

控制任务编号	基于 TS 模糊模型和扰动观测器的控制系统的速度控制误差/(r/min)	基于 RBF 神经网络的控制系统速度控制误差/(r/min)	基于小型 PLC 的多模式 DCS 控制模块的速度控制误差/(r/min)
1	5 100	5 080	5 010
2	7 850	7 880	7 990
3	10 110	10 040	10 010
4	6 090	6 060	6 010

3.7.2 控制性能测试

另外, 通过生产线输出产品的统计与质量检测, 得出反映应用性能的测试结果, 如表 3 所示。

表 3 工业自动化生产线控制应用性能测试结果

实验次数	生产线输出产品数量/个	应用基于 TS 模糊模型和扰动观测器的控制系统输出合格产品数量/个	应用基于 RBF 神经网络的控制系统输出合格产品数量/个	应用基于小型 PLC 的多模式 DCS 控制模块输出合格产品数量/个
1	200	196	199	200
2	200	194	198	200
3	200	196	198	199
4	200	199	200	200
5	200	197	198	199

将表 3 中的数据代入到公式 (10) 中, 计算得出应用 3 种不同方法生产线输出产品合格率的平均值分别为 98.2%、99.3% 和 99.8%。通过不同方法作用下生产线输出产品合格率的测试数据结果, 证明设计的基于小型 PLC 的多模式 DCS 控制模块具有更高的应用性能。

4 结束语

为了解决上述系统中存在的问题, 在小型 PLC 的支持下 (下转第 215 页)