

高温承压破碎机械控制系统设计和应用

常明伟, 袁志林, 江海蛟, 李建峰, 吴建军

(北京航天动力研究所 流体与旋转机械事业部, 北京 100176)

摘要: 为了实现高温承压破碎机械的连续运行, 采用理论设计和模拟验证的方式, 开发了一种新架构的电气控制系统; 针对某石化项目工艺配置情况, 将常规“一控一”防爆电气控制柜置于现场的形式, 升级为“一控多”方式, 并放置于安全区域, 有效减小安全风险、减少成本、实现集中控制; 控制系统采用西门子最新的 PLC1517H 冗余 CPU, 并通过冗余方式与分布式 I/O 进行通信; 通过模块化编程、UDT 结构、永久区域等方法, 使编程、组态更加准确高效; 采用安全可靠的 MODBUS RTU 与中控系统实现通信, 使其可以监控设备的运行状态; 通过现场运行反馈, 控制系统保证了设备稳定、可靠的运行, 操作、维护便利性较好。

关键词: 一控多; 冗余 PLC; 多重背景; MODBUS RTU 通信; 时钟同步

Design and Application on High Temperature and Pressure Crushing Mechanical Control System

CHANG Mingwei, YUAN Zhilin, JIANG Haijiao, LI Jianfeng, WU Jianjun

(Department of Liquid and Rotating Machinery, Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100176, China)

Abstract: In order to realize the continuous operation of high temperature and pressure crushing machinery, an electrical control system with new architecture is developed by means of theoretical design and simulation verification. According to the process configuration of a certain petrochemical project, the conventional "one control one" explosion-proof electrical control cabinet is upgraded to the "one control and multiple" mode in the site, and placed in a safe area, which effectively reduces the safety risks and costs, and achieves the centralized control. The control system adopts the Siemens latest PLC1517H redundant CPU to communicate the distributed I/O in a redundant manner. The modular programming, UDT structure, permanent area and other methods are used to make the programming and configuration more accurate and efficient. The safe and reliable MODBUS RTU is used to communicate with the central control system, so it can monitor the running state of the equipment. Through the on-site operation feedback, the control system ensures the stable and reliable operation of the equipment, which has better operation and maintenance convenience.

Keywords: one control multiple; redundant PLC; multiple backgrounds; MODBUS RTU communication; clock synchronization

0 引言

中国石油资源供不应求, 但煤炭资源丰富, 从 2002 年开始, 在国家能源战略、环境保护要求和经济效益的驱动下, 煤开始作为原油替代品, 煤炭气化工业在国内获得广泛的应用, 众多石油化工企业和煤炭企业的煤化工项目相继建成和投产。中国形成了世界范围内最大的煤气化产业集群, 中国正在运行的煤气化装置占全世界总量的 60% 以上^[1]。

按照煤炭集中使用、清洁利用的原则, 高效、节能和环保必然是未来煤气化工艺的发展方向, 这正是煤炭清洁转化气化技术工艺的技术优势。在煤化工工艺装置的设备中, 高温承压破碎机械安装于气化炉与锁渣阀或锁渣罐之间, 用来破碎气化炉中产生的大块炉渣, 保证气化炉能长期顺利排渣, 工艺系统连续、稳定运行, 是提高整套系统安全运行和可靠性的重要设备, 在工艺系统中占有重要地位, 是不可或缺的核心设备^[2]。不过极端情况下, 气化炉

有掉落耐火砖的可能性, 所以该设备具有破碎极高硬度的耐火砖能力。驱动该设备的液压系统最大工作压力可达 25 MPa, 最大破碎扭矩可达 35 000 Nm。

本设计是结合某石油石化项目的实际应用。

1 破碎机配置

破碎机由三部分构成, 主机破碎部分, 电控系统和液压系统。由于物料所在环境压力可达 7.5 MPa, 温度可至 280 度, 所以主机的外壳属压力容器, 实际使用的为 II 类压力容器, 破碎部分为动刀、静刀组合。当物料进入二者之间时, 旋转的动刀利用较大的扭矩将物料破碎。液压系统是整套装置的动力来源, 采用结构紧凑、占地小、更加节能环保的闭式系统, 具体为变量泵、定量马达组合。电控系统的控制对象为液压系统, 所以液压系统的性能要求和配置决定了电控系统的选型和规模, 由于破碎机处于有爆炸危险区环境中, 如果电控系统放置现场的话, 需要考虑防爆要求。三系统配置如图 1 所示。

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-03-13。

作者简介: 常明伟(1983-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 常明伟, 袁志林, 江海蛟, 等. 高温承压破碎机械控制系统设计和应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 189-195, 202.

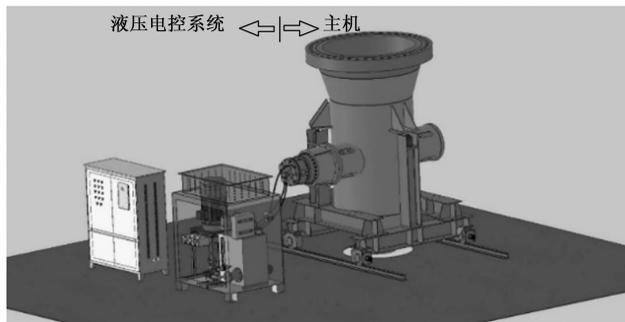


图 1 破碎机各系统示意图

2 硬件配置

2.1 液压系统工作原理

液压传动是将机械能通过油液压力传导实现机械传动和控制的一种方式,它具有大推力、无级调速、运行平稳、适于恶劣工作环境等特性。液压动力装置采用双向变量泵一定量马达容积调速回路,闭式循环油路系统^[3]。液压泵选择双向变量柱塞泵,可实现在维持电机转向不变的情况,液压马达的正反转快速切换。根据工艺需要液压马达配置减速机,实现低速、大扭矩特性。驱动泵配置变量斜盘,由伺服机构控制斜盘位置,进而影响排量大小和液压马达转速。液压系统工作时由电机通过联轴器带动液压泵泵转动,产生高压油驱动液压马达转动。

2.2 仪表配置

液压系统采用闭式系统,据此配置的测量仪表^[4]有:正转、反转工作压力变送器、补油压力变送器、过滤器压力变送器、液位变送器、温度变送器等。正转和反转工作压力变送器分别用于测量破碎机正常工作中的压力和堵塞过程中的压力,补油压力变送器用于测量液压泵进油口的补油压力,以防泵抽空造成泵损坏,过滤器压力变送器用于监测过滤器是否堵塞;液位变送器用于监测油箱液位,防止由于自然损耗和泄漏导致液压泵抽空的情况,因为油箱通过空气滤清器与大气相通,所以选用常规的压力变送器测量液位;油温过高或过低的话会导致液压油粘度系数变小或变大,损坏相关的泵、马达、阀等器件,所以选择温度变送器监测液压油温度;为了维修方便,液压泵吸油管路上安装有吸油球阀,同时配置接近开关用于设备的连锁。

破碎机运行中,需要正转、反转的切换,有两种方式可以实现:改变电机转向或改变液压油流向。变换电机转向需增加一个接触器、接线也比较复杂,频繁转向对电机的性能要求也太高,而且电机换向的周期也较长,不建议选择;变换液压油流向的话,只需增加一个电磁换向阀,通过阀的动作改变液压油流向即可实现破碎机的正、反转,而电机一直保持正转即可。此设计根据中位机制选用“Y”型三位四通电磁换向阀^[5]。

2.3 控制柜配置

一般情况下,现场都有多套破碎机,控制方案可以采用“一控一”或“一控多”,即一台控制系统控制一套设备

或多套设备。由于现场防爆区域划分为气体防爆 2 区,放在现场的控制柜须采用防爆结构且取得防爆认证。控制系统常用的防爆结构为“Exd”(隔爆)型和“Exp”(正压防爆)型^[6]。“Exd”型将相关的电气和控制器件分别放置在隔爆腔内,当有爆炸发生的时候,火花和热量不会传导至外部区域引发外部爆炸,所以“Exd”型设备一般比较大、笨重,且不能做的太大,也因此不能放入太多电器元件,只能用于小型控制系统。“Exp”型,即保持外壳内部保护气体压力大于外部大气压力,以阻止外部爆炸性气体进入外壳内的方法来防止爆炸的发生,为了保持控制柜内正压需要外接仪表风、配置减压过滤及自动补压装置,且正压柜的密封性和防护要求也较高,所有进出接口均需防爆格兰头,所以成本相对较高。综上所述,现场放置控制系统,由于防爆原因控制柜本体配置相对复杂,成本也较高,只适合小型控制系统,一般采用“一控一”的方案。

如果将控制系统放入现场机柜室,可以避开现场防爆要求,按非防爆处理。此时可以选择标准尺寸的控制柜,防护要求也很低,成本可以大大降低。另外可以根据需要并柜来满足中大型控制系统的布置要求,适合“一控多”方案。

综合比较,电控系统布置采用放置于现场机柜间的“一控多”方案,系统架构图如图 2 所示。为了方便用户维修和分清电仪界面,现场配置两个操作盘(均为防爆形式):现场操作柱(电气)和就地控制箱(仪表)。现场操作柱主要配置电机相关的转换开关,电流表,按钮指示灯等,就地控制箱主要配置液压马达相关的转换开关,按钮指示灯,急停等。电气柜选择更加紧凑和易维护的开关柜。各个系统之间的信号往来详见图 2。

2.4 PLC 配置及组态

破碎机所需要控制的电气仪表数量不多,所以选择成本较低、可靠性较高的 PLC 做为控制核心^[7-8]。品牌选择西门子,产品选用最新的 S7-1500 系列,考虑到破碎机是整个工艺里面的重要设备,电源、CPU 和通信均采用冗余方式,I/O 模块采用远程分布式形式^[9],即 ET200MP^[10]。为了操作方便并实时显示控制系统运行中一些重要信息,配置一块触摸屏。CPU、远程 I/O、显示屏之间采用目前主流的 Profinet 连接。冗余 PLC 组态,网络配置如图 3 所示。

1517H 采用光纤冗余,是西门子高性能的冗余 CPU。冗余系统中的 Profinet 环网与 CPU 的冗余连接是分别设置的,两个冗余连接使用光纤电缆经由同步模块将 CPU 直接连接在一起,H-CPU 的同步不会影响 PROFINET 上的带宽,因此 S7-1500H 系统的切换时间最快可达 50 ms。而且通过使用不同类型的同步模块和光纤电缆,S7-1500H 系统的两个 CPU 之间最远距离可达 10 km。

冗余 CPU 涉及到 MRP 冗余环网,PN 口专用性等,组态涉及到的细节较多,见图 4。

远程分布式 IO 接口模块采用高性能 IM 155-5 PN HF,适用于冗余和安全系统。ET200MP 采用模块化设计,扩展性很高且高度灵活,工艺功能也很强大。

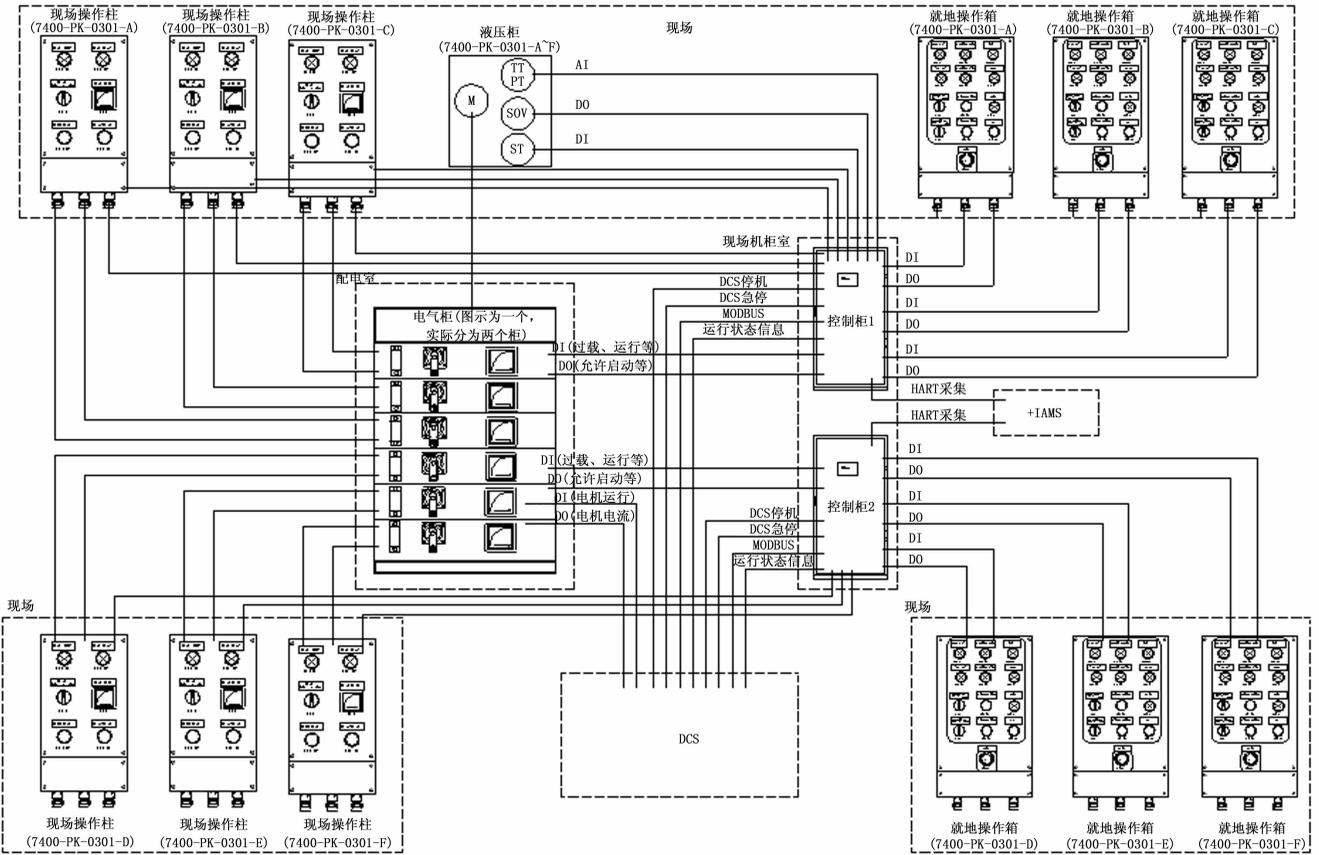


图 2 电气控制系统架构图

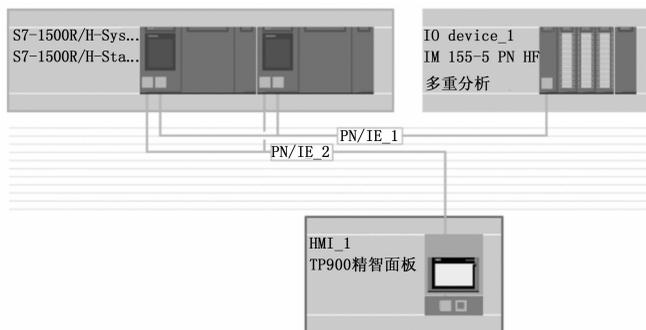


图 3 通信网络配置图

操作区、工艺流程区。由于采用“一控多”方案,同时为了画面美观和操作方便,顶部区域设置为“永久区域”,可快速在三台设备之间切换。显示屏组态如图 5 所示。

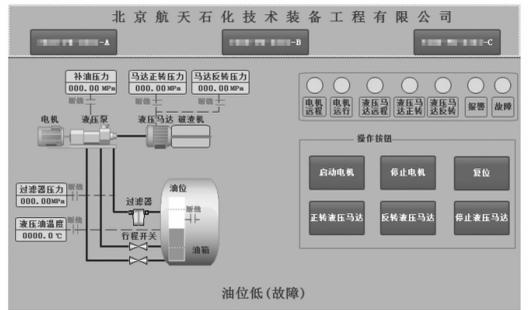


图 5 显示屏组态



图 4 1517H CPU 组态

2.5 提高可用性措施

本项目方案 CPU、通信和电源均采用了冗余设计,可靠性已经极大的提高。鉴于本设备的运行工况会对上下游装置带来影响,且本项目是一控多方案,为了避免控制系统损坏导致多台设备同时停车的情况,本方案增加了最后一道“保险”,即在 PLC 故障失效的情况下,仍可保证的设备运行,维持工艺运行的连续性。“运行允许”信号是控制系统发出到 MCC 的连锁信号集合,将此信号采用常闭点,可实现上述功能,即当 PLC 出现故障的情况,此信号会恢

显示屏组态^[11]主要分为 4 个区域,公共区、状态显示区、

复到默认的常闭状态，维持设备运行。需要说明的是，本方案已对控制系统故障采取措施了预警措施，以便人员及时介入。通过此项设计，可以使现场操作绕过控制系统，实现在应急情况下的设备运行功能。

3 通信功能

为了实现数据共享，PLC 控制系统需要与 DCS 系统实现通信。目前在煤化工和石油石化行业主要采用点对点 (Point to Point Connection) 连接方式，协议采用 MODBUS RTU^[12]。接口主要有 RS-232 和 RS-485 两种方式，两者的主要区别如下：

1) 抗干扰性。RS485 采用平衡驱动器和差分接收器方式，能有效抑制共模干扰，提高噪声抗干扰能力。RS232 采用单端驱动、单端接收电路^[13]，是一种共地传输方式，易受到公共地线上电位差和外部引入的干扰信号的影响。

2) 传输距离。RS485 接口的最大传输距离是 1.2 km (9 600 bps 时)，实际上最大可达 3 km。RS232 的传输距离有限，最大仅为 50 m。由于现场 PLC 与 DCS 系统之间一般在 300~800 m 之间，所以 RS485 成为首选。

3) 组网性能。使用 RS485 接口和双绞线可以组成串行通信网络，可以构成分布式系统，在总线上允许最多连接 128 个设备，用户可以采用“主从”方式方便地建立通信网络。RS232 只允许一对一通信，如果要实现 DCS 与多个设备间的通信，需要投入更多的硬件设备，增加无谓的成本投资。

4) 通信速率。RS232 的传输速率较低，在异步传输时，波特率仅为 20 kbps。RS485 的最大传输速率为 10 Mbps。

5) 信号电压。RS232 信号电平较高（逻辑信号“1”为“-3~-15 V”，“0”为“+3~+15 V”），易损坏接口电路芯片。RS485 传输的是差分信号，电平（逻辑信号“1”为“+2~+6 V”，“0”为“-2~-6 V”）较 RS232 大幅降低，且与 TTL 电平兼容。

一般情况下，控制系统放置于现场设备旁，与 DCS 之间距离约 300~800 m，且有多套 PLC 需要与 DCS 通信，所以目前常用的通信接口为 RS485，协议采用 MODBUS RTU，PLC 组态如图 6 所示。对于此项目，虽然 PLC 控制系统放置于现场控制间，但为了保持通信的统一性，仍然选择 RS485 接口。

另外，对于两者距离超过 1 km 的情况，常用解决方案是光纤通信，即采用 RJ45 口，MODBUS TCP 通信协议。通过光电转换设备将电信号转换为光信号，此时传输距离至少可以达到 5 km 以上（单模光纤），另一端再通过光电转换模块转化为电信号。

4 编程技巧

4.1 IO 变量的结构化处理

UDT 类型是一种由多个不同数据类型元素组成的数据结构，元素可以是基本的数据类型，也可以是 STRUCT、数组等复杂数据类型以及其它 UDT 等^[14]。UDT 类型嵌套 UDT 类型的深度限制为 8 级。由于三台设备配置一致，I/

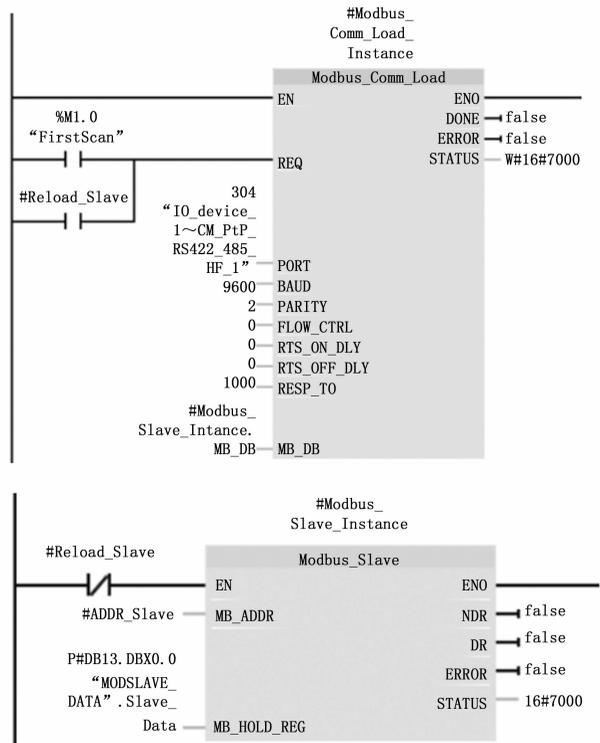


图 6 MODBUS RTU 组态

O 点的种类和数量也完全一致，所以为了方便和准确的引用，将单台设备的 I/O 定义成 UDT，如图 7 所示。

名称	数据类型	地址	保持	可写	从 H.	在 H.	监控
1	SL1DI	"SlagCrusher_a" %I8.0					
2	Bool	%I8.0					
3	Bool	%I8.1					
4	Bool	%I8.2					
5	Bool	%I8.3					
6	Bool	%I8.4					
7	Bool	%I8.5					
8	Bool	%I8.6					
9	Bool	%I8.7					
10	Bool	%I8.0					
11	Bool	%I8.1					
12	Bool	%I8.2					
13	Bool	%I8.3					
14	Bool	%I8.4					
15	Bool	%I8.5					
16	Bool	%I8.6					
17	Bool	%I8.7					
18	SL1DO	"SlagCrusherDO" %Q0.0					
19	Bool	%Q0.0					
20	Bool	%Q0.1					
21	Bool	%Q0.2					
22	Bool	%Q0.3					
23	Bool	%Q0.4					
24	Bool	%Q0.5					
25	Bool	%Q0.6					
26	Bool	%Q0.7					
27	SL1AI	"SlagCrusherAI" %I16.0					
28	Word	%W16					
29	Word	%W18					
30	Word	%W20					
31	Word	%W22					
32	Word	%W24					
33	Word	%W26					
34	Word	%W28					
35	Bool	%I4.0					
36	Bool	%I4.1					
37	Bool	%I4.2					
38	SL2DI	"SlagCrusherDI" %I10.0					
39	SL2DI	"SlagCrusherDI" %I10.0					
40	SL2DI	"SlagCrusherDI" %I10.0					
41	SL3DI	"SlagCrusherDI" %I12.0					
42	SL3DO	"SlagCrusherDO" %Q2.0					
43	SL3AI	"SlagCrusherAI" %I48.0					

图 7 UDT 结构

4.2 模块化处理

模块化是借鉴高级编程语言函数思路，将一些类似、常用的功能，提取出重要、简洁的信息，然后进行封装固

化处理。使用模块化编程, 程序块更易于维护, 也方便扩展, 测试和调试也得到简化, 当开发大型项目可多人同时进行, 加速项目进度^[14]。同时由于程序块不含全局变量, 移植性更佳。本项目将电机/加热器启停控制、数值线性化处理、堵塞运转控制、高低报警、设备状态信息集中显示、条件时间累加等分别做了模块化处理。

本项目配置多个模拟量输入信号仪表, 且均采用 4~20 mA 标准信号进行传输, 与 PLC 的对应关系为 4~20 对应 0~27 648 的线性关系, 由于此标准信号与仪表量程又是线性对应关系, 所以直接将仪表量程与 PLC 标准对应值做成功能块。此块的形参值包含: 输入变量、输入变量对应的范围最大值/最小值, 输出变量对应范围的最大值/最小值和输出变量。为了提高 PLC 处理效率, 整个计算过程采用整数进行, 然后输出变量再根据工艺要求的精度进行移位处理。增加移位形参后的线性化处理模块如图 8 所示。

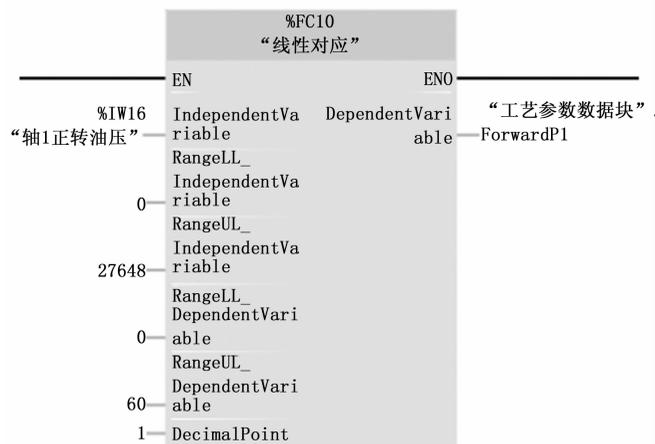


图 8 线性化处理模块

破碎机械破碎部分由转子和静刀两部分构成, 转轴上按一定的角度旋转排列安装动刀, 动刀通过转动剪切、碾压破碎物料。正常运行时产生的物料易破碎, 但在极端情况可能会从气化炉掉落强度极高的耐火砖, 如果耐火砖方位不对, 会出现“卡住”的情况, 此时需要通过反转调整物料方位再次破碎。如此反复。

由于涉及到进入堵转的条件(条件时间累积)判断, 堵塞正转、堵塞反转、中间停止时间的控制, 以及正反转次数的统计, 总的堵塞时间记录等要求, 临时变量使用多达 20 多个, 程序也达到 30 段。基于此, 将此功能封装成模块, 主程序更加简洁, 多次调用仅需改变形参即可, 也更加方便^[15]。堵塞控制功能块如图 9 所示。

4.3 多重背景

模块化使编程更加的方便快捷, 不过每次调用模块都会生成一个背景数据块, 大量的使用会产生“碎片”问题, 占用更多的系统资源, 处理效率也变得低下。此时可以利用“多重背景”^[16]的嵌套功能, 将某个模块直接作为一个功能块的静态变量处理, 这样就可以实现多个模块共享一个多重背景数据块, 减少背景数据块数量。此外, 多重背景



图 9 堵转控制功能块

中数据块均是静态变量，因此功能块有更好的可移植性。例如：在“条件时间累加”功能块中多次调用了 IEC TON 标准时间记时器模块^[17]。“条件时间累加”功能块的形式参数列表如图 10 所示。

条件时间累加			
名称	数据类型	默认值	
Input			
TSetST	Bool	false	<input type="checkbox"/>
Condition	Bool	false	
Reset	Bool	false	
T_Set	Timer	0	
TV_Set	S5Time	S5T#0ms	
TV_CBDR	Time	T#0ms	
Output			
Out_ACCTime	Dint	0	
InOut			
Static			
Each_CNDTTime	Time	T#0ms	
ACC_CNDTTime	Dint	0	
Each_CNDTTimeFMT	Dint	0	
SetTSetST	Bool	false	
STAT1_N	Bool	false	
STAT1_P	Bool	false	
STAT2_Temp	Bool	false	
STAT3_P	Bool	false	
OverT_Set	Bool	false	
TSet_BI	Word	16#0	
TSet_BIFMT	Int	0	
IECTON			
PT	Time	T#0ms	
ET	Time	T#0ms	
IN	Bool	false	
Q	Bool	false	

图 10 条件时间累加功能块形式参数

4.4 堵转处理

由于上游装置意外掉落的物料（如耐火砖），需要的最大破碎强度可达 198 MPa，所以此物料在动刀、静刀之间的方位直接影响破碎效果。有时会出现转子直接卡死的情况，此时就需要通过反转来调整物料方位，再进行正转破碎。如此反复三次，如果还出现卡死的情况就需要停车处理。

堵转程序处理有顺序法和计数法（见图 11）两种形式。顺序法按顺序编写三次反转和三次正转来实现，但可扩展性差；计数法通过反转变为正转时来计数，具有较高的通用性。本方案采用计数法。

5 时钟同步

PLC 控制系统中各种事件记录都包含一个关键参数：时刻，即每个事件都应增加一个时间戳。考虑到不同控制系统之间可能存在时间误差，所以需要 PLC 与别的控制系统之间进行时钟同步，以便准确的查询事件发生的先后顺序，确定故障原因。网络时间协议 NTP 是时钟同步普遍采用的一种方式^[18]。NTP 通常采用服务器和客户端的方式进行报文交换，在 PLC 与 DCS 进行时钟同步时，通常 PLC 作为客户端，DCS 控制室中的 PC 作为服务器，PLC 根据组态的更新间隔时间向 NTP 服务器发出时钟同步的需求，然后服务器应答，根据二次报文交换，从而确定 PLC 与服

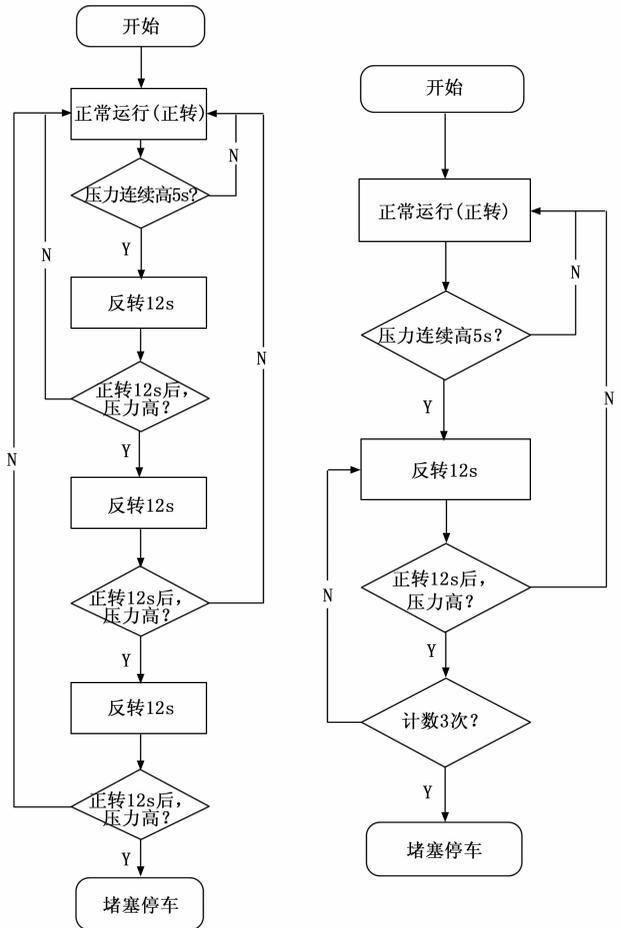


图 11 顺序法和计数法

务器的时间差，然后 PLC 进行时间校准，如果条件允许还可以进行本地时钟频率校准。

NPT 设置，首先需要在 PLC 中完成相应的组态，如图 12 所示。

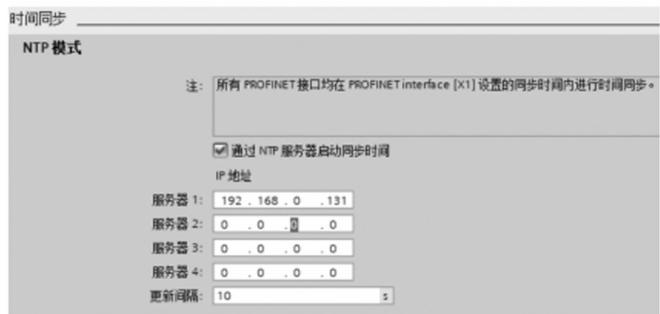


图 12 NPT 组态

其次，需要在注册表中完成相关操作来配置 Windows NTP 服务器。第一，需要打开 NTP 服务器功能，通过将下面注册表中的值修改为“1”实现，“HKEY_LOCAL_MACHINE \ SYSTEM \ CurrentControlSet \ Services \ W32Time \ TimeProviders \ NtpServer \ Enabled”；第二，

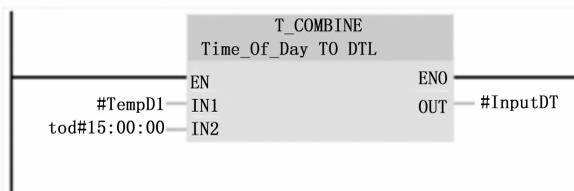
需要强制该机为时钟源, 通过将下面注册表中的值修改为“5”实现, “HKEY_LOCAL_MACHINE \ SYSTEM \ CurrentControlSet \ Services \ W32Time \ Config \ AnnounceFlags”。

不过, 在 PLC 控制系统 PN 口有限的情况下, 还可采用单个脉冲进行时钟同步的方式, 此时仅占用一个 PLC 的 DI 点。双方约定在每天的固定时间向 PLC 发送一个脉冲, CPU 收到此信号后, 将当前时间重置为约定时间来完成时钟同步。此方法适用于时钟同步精度要求不高的场合。脉冲同步的编程如图 13 所示。

6 控制系统应用

工厂验收测试 (FAT) 时, 将压力容器主机、液压柜、控制柜、电气柜、现场操作柱和就地控制箱按接线图做好连接, 然后按表 1 进行测试。

经 FAT 和 SAT, 控制系统各项工艺参数显示准确、稳定, 报警和连锁功能符合预期。堵转实验在各个堵塞阶段的跳转逻辑也进行了充分的测试, 满足设计要求。通过 MODSCAN 主站软件与 PLC 进行通信测试, 组态运行参数



程序段5:

注释

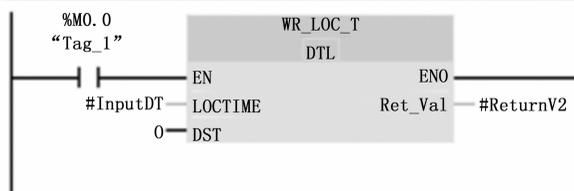


图 13 定时脉冲同步编程

均有效传递至中控系统。

经过现场实际运行反馈, 控制系统操作、维护方便, 可有效提醒操作人员设备在运行中出现的问题, 当有损害设备或工艺安全的故障时, 能及时停车保护设备和工艺的稳定。

表 1 FAT 内容

项目	报警连锁值或测试内容	现象	结论	备注
指示灯显示	针对不同运行状态, 相应的指示灯亮起或熄灭	与运行状态一致	符合设计预期	
远程模式	远程模式下电机、液压马达启停测试	电机启动、停止正常; 液压马达正转、反转、停止正常	符合设计预期	通过显示屏操作
就地模式	就地模式下电机、液压马达启停测试	电机启动、停止正常; 液压马达正转、反转、停止正常	符合设计预期	按压现场操作盘按钮、开关实现
就地急停, DCS 急停, DCS 停机	电机运行中 马达运行中 堵塞过程中	电机停止 电机、液压马达均停止 电机、液压马达均停止	符合设计预期 符合设计预期 符合设计预期	通过现场急停按钮和外置节点模拟
液压油温度	H: 65 ℃, HH: 70 ℃	当油温高于 65 ℃ 时报警, 高于 70 ℃ 时连锁停车	符合设计预期	通过手操器仿真
工作压力	H: 21 MPa. G	工作压力高于 21 MPa 时, 报警	符合设计预期	通过手操器仿真
油箱液位	L, LL	油箱液位低于 L 时报警, 低于 LL 时连锁停车	符合设计预期	通过手操器仿真
吸油球阀	吸油球阀关闭	电机无法启动或设备运行中连锁停车	符合设计预期	通过对应的行程开关动作触发
液压泵补油压力	LL: 1 MPa. G	设备运行中, 补油压力低于 1 MPa 时, 设备连锁停车	符合设计预期	通过手操器仿真
堵塞运行	正常堵塞	堵塞正反转 3 次后连锁停车	符合设计预期	当工作压力高于 21 MPa 时, 认为堵塞;
	堵塞开始的 5 s 内压力恢复正常	未进入堵转程序	符合设计预期	
	堵转第 1/2/3 次反转过程中压力恢复正常	退出堵转程序, 自动恢复正常运行	符合设计预期	
	堵转第 1/2/3 次正转过程中压力恢复正常	退出堵转程序, 自动恢复正常运行	符合设计预期	
动力电掉电	电机运行中掉电	显示“动力电掉电故障”	符合设计预期	
变送器断线	逐个断开变送器的供电线	对应的变送器显示断线符号	符合设计预期	
通信测试	所有通信点位	通信连接正常, 通信值准确无误	符合设计预期	通过 MODBUS 主站软件测试
硬接线信号	所有硬接线信号	与运行状态一致	符合设计预期	
设备运行状态信息显示	所有运行状态、报警、故障信息	相应报警或故障出现时, 显示屏上显示相应的信息	符合设计预期	

(下转第 202 页)