

基于 PCS7 的环丁砜 SIS 系统设计与实现

陈晓侠, 薛 旭

(大连交通大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 为了提升环丁砜产品生产过程的安全性, 确保在高温、高压、易燃易爆等危险因素下, 系统能够稳定运行, 采用 SIMATIC PCS7 故障安全型软硬件, 实施电源、CPU、通信模块等多级冗余设计, 构建高可靠性的安全仪表系统(SIS)。详细设计并实施了 SIS 系统的硬件配置(选择并安装适合的冗余组件)、联锁程序(编写安全逻辑程序确保故障时自动切换与安全操作)、监控界面(设计直观易用的监控画面以实时监控生产状态)和系统整体调试及投运。成功建立了基于 SIMATIC PCS7 的环丁砜生产安全仪表系统, 通过多重冗余措施显著提高了系统的安全性与可靠性, 有效应对了生产过程中的高风险因素, 保障了生产的安全进行。

关键词: SIS; 环丁砜生产控制; PCS7; CFC; 冗余

中图分类号: TH86

文章编号: 1000-0682(2025)04-0062-06

文献标识码: B

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.04.011

Design and implementation of sulfolane SIS system based on PCS7

CHEN Xiaoxia, XUE Xu

(School of Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China)

Abstract: In order to enhance the safety of the production process of sulfolane products and ensure stable operation of the system under high temperature, high pressure, and flammable and explosive hazards, SIMATIC PCS7 fault-tolerant software and hardware are adopted, and multi-level redundancy designs such as power supply, CPU, and communication modules are implemented to construct a highly reliable Safety Instrumented System (SIS). The detailed design and implementation include the hardware configuration of the SIS system (selection and installation of suitable redundant components), interlocking program (writing safety logic program to ensure automatic switching and safe operation in case of failure), monitoring interface (designing intuitive and easy-to-use monitoring screens to monitor production status in real time), and overall system debugging and commissioning. A safety instrumented system for sulfolane production based on SIMATIC PCS7 has been successfully established. Through multiple redundancy measures, the system's safety and reliability have been significantly improved, effectively addressing high-risk factors in the production process and ensuring safe production.

Keywords: Safety Instrument System; sulfolane production control; PCS7; CFC; redundancy

0 引言

环丁砜作为一种重要的化工产品,在炼油和化工领域应用广泛。环丁砜本身属于危险化学品,具有可燃性、易爆性和毒性。而且,在其生产过程中包

含加氢反应,如果温度、压力控制不当,可能导致反应失控、局部过热,增加火灾和爆炸的风险。因此,环丁砜生产过程除需要 DCS 系统实施自动控制以外,还需要独立的安全仪表系统(SIS)进一步提高系统安全性。SIS 系统能够在检测到潜在危险时迅速采取措施,如切断相关设备或启动安全程序,以防止事故的发生或扩大^[1]。

郭铁石采用德国 HIMA SIS 系统实现了硫酸再生装置的点火程序控制和气密性测试控制^[2]。刘运洲等人采用 Tricon 系统实现了委内瑞拉某炼油厂

收稿日期:2024-10-13

第一作者:陈晓侠(1976—),女,辽宁开原人,大连交通大学电气工程学院,副教授,研究方向为综合自动化与轨道交通先进控制。

E-mail: cxx_dty@163.com

加热炉的三重化冗余容错控制系统,详细介绍了系统硬件配置^[3]。胡楠采用美国 GE 公司的 GMR 系统完成了水煤浆气化工艺安全仪表设计^[4]。以上作者对所设计 SIS 系统的论述均侧重硬件配置,但对系统的联锁逻辑和控制软件都没有给出具体说明。韩国的 Park 等人研究了针对固体干燥剂脱水包装工艺的 SIS 系统,给出了控制逻辑,但没有介绍系统的具体实现^[5]。

SIMATIC PCS7 是基于全集成自动化的现代过程控制系统,其无缝集成安全仪表系统(SIS)的新技术,使其成为新一代过程控制系统的典范。其中集成的 S7 - 400FH 安全系统符合 IEC61508

(SIL3)和 IEC61511 等国际安全标准,并已广泛应用于紧急停车系统(ESD)、火灾及有毒有害气体监测和保护系统(F&G)、燃烧管理系统(BMS)和关键设备控制等^[6-7]。

该环丁砜 SIS 系统采用 SIMATIC PCS7 故障安全型软硬件,通过电源、CPU、通信模块等硬件的多级冗余和简单高效的 CFC 联锁控制程序设计,旨在提高环丁砜产品生产过程的安全性,确保在高温、高压、易燃易爆等危险因素下,系统仍能稳定运行。

1 工艺要求

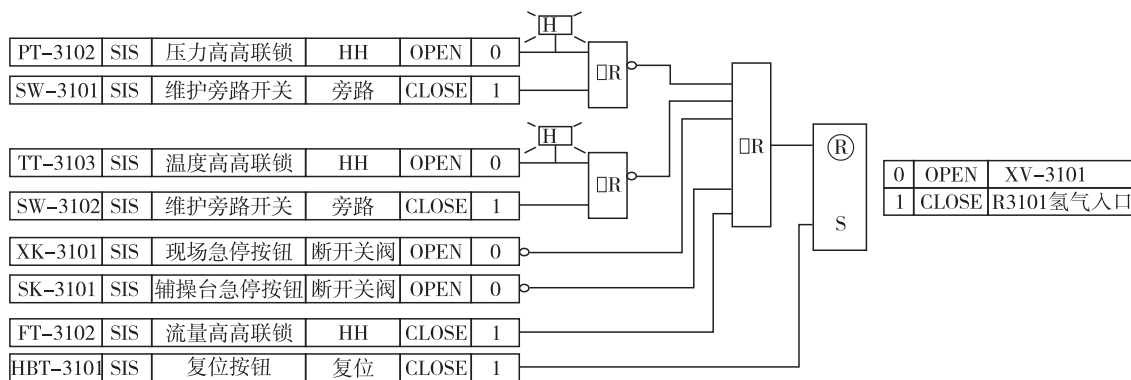


图 1 SIS 系统联锁控制逻辑图(部分)

化工设计院根据生产工艺要求,给出了 SIS 系统联锁控制逻辑图。以图 1 为例,图中给出了 R3101 加氢反应器氢气入口阀 XV - 3101 的控制逻辑。在压力 PT - 3102 或者温度 TT - 3103 发生高高联锁时关阀,这两种联锁可以通过各自的维护旁路开关屏蔽。当氢气流量 FT - 3102 发生高高联锁时,XV - 3101 阀也将被关闭,但此联锁不提供维护

旁路开关,即不能被屏蔽。此外,在紧急情况下,操作员按下现场阀门装置旁的急停按钮或辅操台上的急停按钮,都可以将 XV - 3101 阀门关闭,停止氢气进料。当故障解除时,可以通过 HBT - 3101 复位软开关将阀门打开(复位)。

2 环丁砜 SIS 系统硬件设计

表 1 SIS 系统硬件配置清单

序号	设备类型	设备名称	数量
1	电源	冗余电源模块(电器)	1
2	电源	稳压电源	2
3	CPU	410E - FH 套件	1
4	CPU	电池	4
5	ET 200SP HA	MOUNTING RAIL 482MM (19")	1
6	ET 200SP HA	SIMATIC ET 200SP HA,PN 接口模块 IM155 - 6 PN	2
7	ET 200SP HA	ET 200SP HA, BUSADAPTER BA 2XRJ45	2
8	ET 200SP HA	SIMATIC ET 200SP HA,冗余装载模块	1
9	ET 200SP HA	ET 200SP HA, F - DI 16X24VDC	2
10	ET 200SP HA	SIMATIC ET 200SP HA 接线板	7
11	ET 200SP HA	SIMATIC ET 200SP HA 载体模块 8 倍载体	1
12	ET 200SP HA	ET 200SP HA, F - DQ 10X24VDC/2A	3
13	ET 200SP HA	ET 200SP HA, F - AI 8xI 2 - /4 - wire HART HA	2
14	ET 200SP HA	ET 200SP HA, 5 TB - COVER, 22,5MM	1
15	ET 200SP HA	SIMATIC ET 200SP HA 接线板	1

该 SIS 系统硬件主要由电源、CPU 和分布式 I/O(ET200SP HA)组成,选型清单如表 1 所示,采用了多重冗余设计:

(1)CPU 冗余:CPU 模块由一对 CPU 410E 互为冗余构成,2 个 CPU 之间通过 4 个同步模块和 2 对同步光纤互相监测对方状态,实现故障无扰切换,支持 SIL3 或更高的安全功能;

(2)分布式 IO 接口模块冗余:在分布式 I/O ET200SP HA 中,工业以太网接口模块 IM155-6 PN 是冗余配置的,保证 CPU 与分布式 IO 之间的可靠连接;

(3)电源和电源模块冗余:系统引入两路相互独立的 220 VAC 电源,分别为两块 CPU 的电源模块 PS407 和两块分布式 IO 电源模块供电,以确保系统供电的可靠性。

3 程序设计

PCS7 是西门子的一个完全无缝集成的自动化解决方案,其软件组成包括 Step7、WinCC、CFC(连续功能图)和 SFC(顺序功能图)、Simatic Net、PDM 等。PCS7 中的功能模板、变量记录和报警管理,是通过 Step7 中的 CFC 和 SFC 自动生成的,无需在 WinCC 中手动配置,大大提高了软件系统的可靠性和开发人员的编程效率。

3.1 硬件配置

PCS7 硬件配置如图 2 所示。两个机架上分别配置完全相同的电源和 CPU410E,构成 CPU 冗余。从 CPU 自带的以太网接口引出 PROFINET 总线,都连接到 PN 接口模块 IM155-6PN 上。打开 IM155-6PN 的属性页,可以看到它实际上是两个接口模块的冗余。选中 PN 接口模块,在界面下方列表中可以配置该分布式 I/O 的 I/O 模块,获取各 I/O 通道的地址。

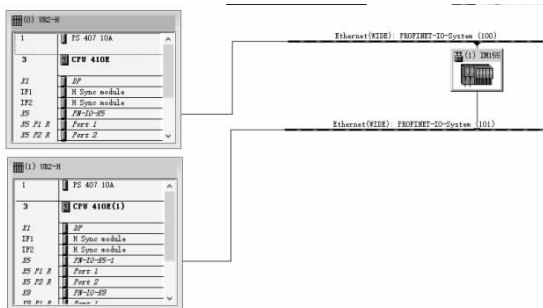


图 2 硬件配置

点击硬件配置界面“选项”菜单下的“组态网

络”,可以打开系统的网络视图,为自动化站 AS(两个冗余的 CPU)、操作员站 OS 和分布式 I/O ET200SP HA(两个冗余的 PN 接口模块)配置 IP 地址。上述 5 个节点的 IP 地址必须分配在同一网段内。

3.2 控制程序设计

SIS 系统的控制任务就是完成关键位置进料阀门的联锁控制、现场和辅操台上按钮对阀门的急停控制,以及辅操台上的回路报警灯、系统总报警和试灯、消音等控制。

该次编程采用的是 PCS7 CFC(Continuous Function Chart,连续功能图)编程方式,其在可视化编程、高效与灵活性、易于维护、丰富的库支持等方面都具有显著的优势,CFC 编程在工业自动化领域得到了广泛的应用和认可^[8]。

以图 1 中 XV-3101 氢气入口阀为例,其部分控制程序如图 3 和图 4 所示。图中名称以“F_”开头的功能块为 Fail-safe(故障安全)块,简称 F 模块,来自 PCS7 的 S7 F System Lib 模块库,具有快速响应、冗余、钝化、限流、权限等特殊功能,可以满足系统 SIL3 等级的要求。

图 3 中左上角 F_CH_AI 块为模拟量输入通道驱动块,功能是读取 AI 模块输入通道原始值,将其转换成工程量值输出。在该程序中,此模块将 IW512 地址中的 A/D 转换结果,转化为 0~7 MPa 范围内的工程量数,由右侧 V 和 V_DATA 参数输出给后级模块。输出 V 连接到两个 F_CMP_R 比较模块,上面的比较模块比较参数为 3.0 MPa,输出作为压力高报警。下面的比较模块比较参数为 3.3 MPa,输出作为高高联锁。图中右上方的灰色块 F3102(MonAnL)是模拟过程值监控块,在此类模块中可以设置输入参数 PV 的报警限值、报警使能开关、数据归档、工程量单位等,这些数值和信息都可以通过 OS 的编译传输到上位机 WinCC 中,从而不必在 WinCC 中手动组态数据连接,提高可靠性和效率。

图 3 中靠右侧的两个功能块 P3102H、P3102HH(MonDiL)是数字过程值监控块,接收来自前级比较块输出的比较结果,分别对应高报警和高高联锁,此开关量可在上位机 WinCC 中被调用,显示报警和联锁状态。此报警和联锁状态还要连接到后级的逻辑运算中,控制该回路报警灯和系统总报警灯。

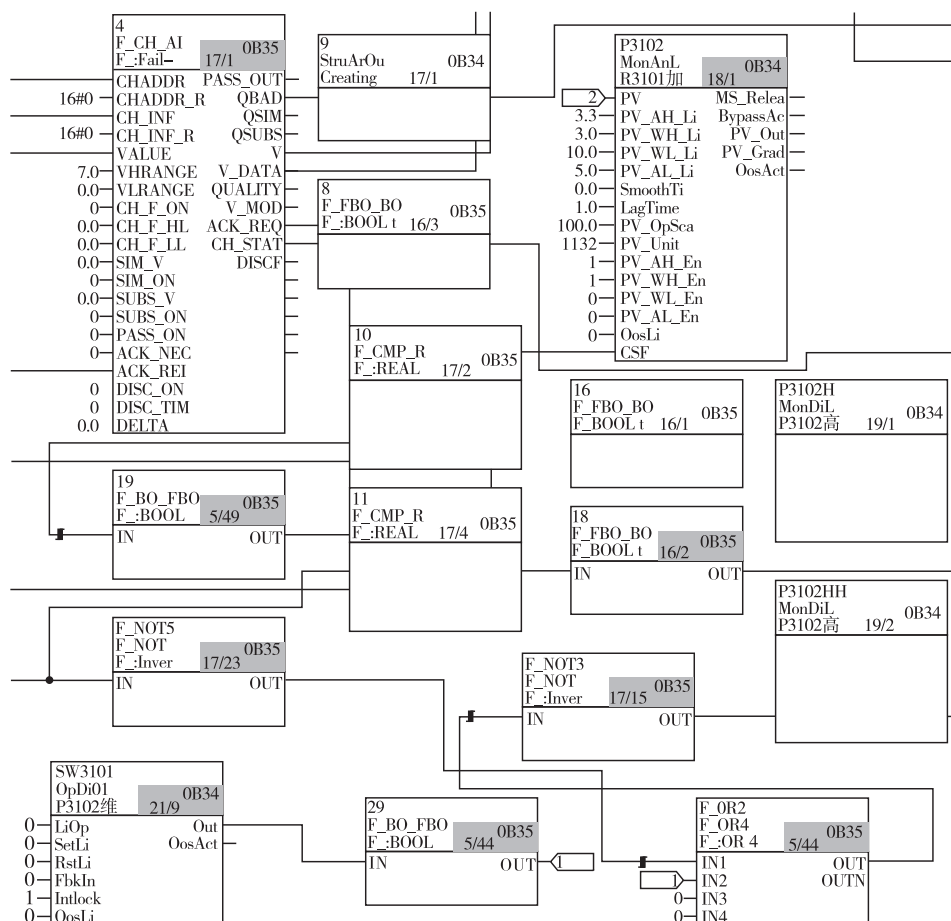


图3 PT3102 压力高报警、高高联锁图表程序

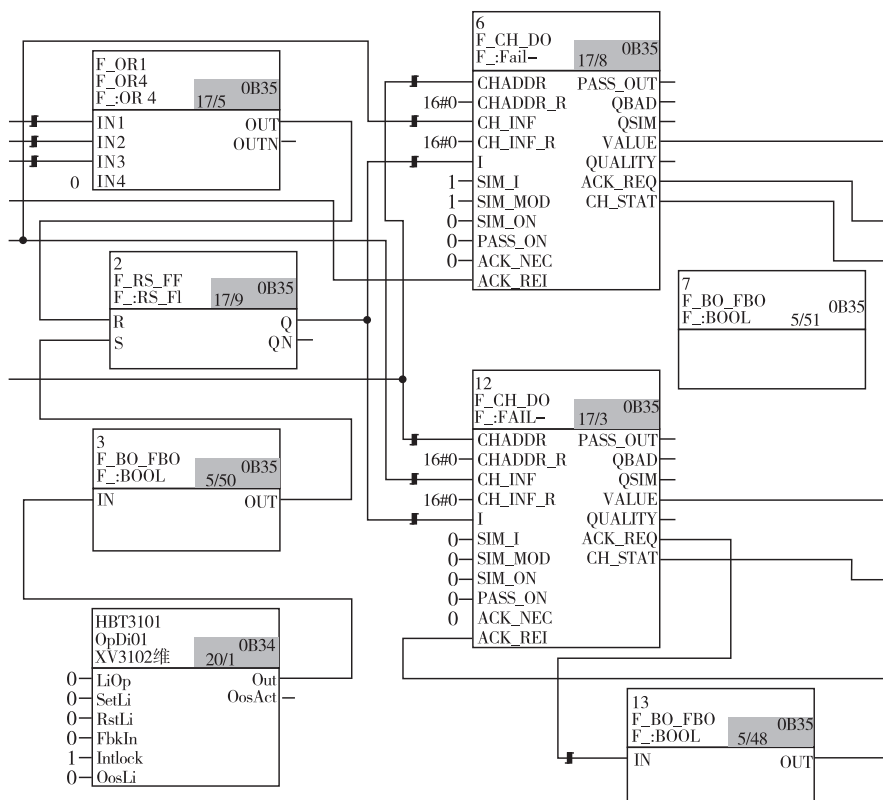


图4 XV-3101 氢气入口阀控制图表程序

图 3 左下角 OpDi01 (SW3101) 为数字量操作输出值块, 可接收由 WinCC 操作界面上输出的开关量, 此处 SW3101 作为图 1 中压力 PT-3102 的维护旁路开关, 当其被置 1 时, 其后的或非门输出固定为 0, 使得 PT-3102 的高高联锁对阀门 XV-3101 的关闭与否不起作用, 即压力联锁被旁路。

压力、温度、流量三路高高联锁相或 (此部分图表程序篇幅所限未给出), 对应图 1 中 RS 触发器之前或门的一部分, 其输出去到图 4 顶端或门的 IN1 端, 与现场急停按钮输入 (IN2) 和辅操台急停按钮输入 (IN3) 相或后去到 RS 触发器的 R 端 (复位端), 构成关阀条件。RS 触发器是复位优先型, 即当复位信号 R 和置位信号 S 均为 1 时, 触发器输出复位信号, 关阀, 符合故障安全原则。

现场急停按钮输入和辅操台急停按钮输入由另一页 CFC 图表中的 F_CH_DI (DI 输入驱动) 模块引入图 4, 经 F_NOT 取反后送至 RS 触发器前的或门。取反是因为现场按钮接线取的是常闭触点, 按下时状态为 0, 符合故障安全原则。F_CH_DI 模块的输出端 Q_DATA 连至 MonDiL 块, 用于在 WinCC 中显示按钮状态。

为了保证安全等级, SIS 系统中 XV-3101 氢气入口阀实际上为两台, 串联安装在氢气进料管道上。当有一台阀门发生故障时, 另一台仍可切断氢气进料。图 4 中右侧两个 F_CH_DO 块是开关量输出驱动模块, 将程序运算结果输出到 Q19.0 和 Q19.1, 从而通过 DO 模块对应通道输出 24 V 或 0 V 信号, 控制现场阀门动作。该模块的输入 I 来自前级的 RS 触发器, 复位逻辑按照图 1 中的或运算实现, 篇幅所限此处不赘述。置位逻辑来自图 4 左下角的 HBT3101 (OpDi01), 即上位机 WinCC 操作界面中的按钮。当通过按钮将 HBT3101 置 1 且当时无联锁发生时, RS 触发器输出置位信号将阀门打开。

4 监控界面设计

4.1 监控主画面

监控界面是直接面向用户的, SIS 系统的监控界面应该力求简洁、鲜明、操作简单, 防止操作员的误操作。该系统的监控界面将所有联锁回路放在一个主画面中, 无需操作员翻页查看。过程值报警、联锁发生时、旁路/急停按钮按下时, 颜色醒目易分辨。主画面如图 5 所示。

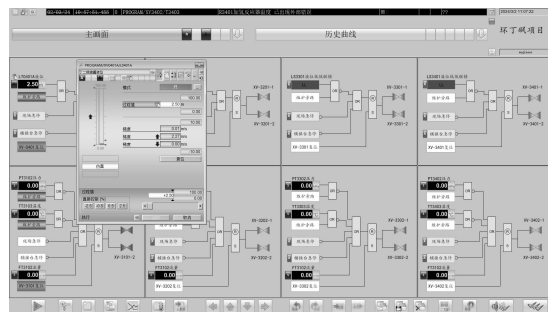


图 5 监控主画面

画面设计前, 要对 STEP7 中硬件配置、图表程序进行编译, 并对 WinCC 的 OS 站进行编译, 将图表程序中的变量和设置传输到 OS 中。画面设计时, 从 WinCC 图形编辑器@ PCS7 TyPicals APLV9. PDL 库中选择 MonAnL、MonDiL、OpDi01、VlvL (阀门) 等画面块, 粘贴到画面中, 再逐一通过动态向导中的“连接画面块至变量结构”功能, 将各块连接到图表程序中对应的各个变量模块。例如, 在主画面中粘贴一个 MonAnL 块, 通过动态向导将其连接到图表程序文件 XV3101 中的 P3102 变量 (PROGRAM \ XV3101 \ P3102), 如图 6 所示。WinCC 启动运行后, 此 MonAnL 块即显示 PT-3102 压力的实时采样值和报警等状态。

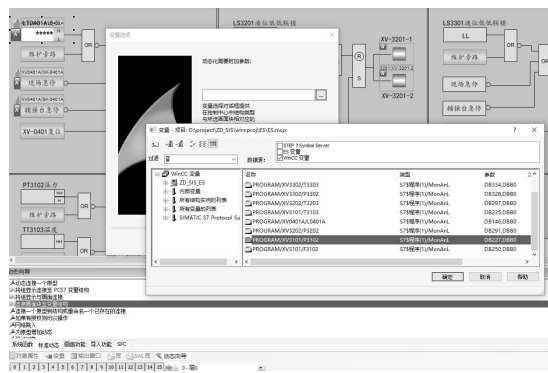


图 6 画面块连接变量

4.2 历史曲线

历史曲线的数据源来自于变量归档, 这在图表程序中 MonAnL 等变量的 I/O 表中已完成配置。历史曲线画面中调用 WinCC 控件库中的 WinCC Online TrendControl 控件, 在其属性页中选择、添加归档变量, 或者在运行后动态增删归档变量, 就可以查看到变量的历史曲线。调用 WinCC 控件库中的 WinCC RulerControl 控件, 可作为历史曲线的图例。

4.3 用户管理

相较 DCS, SIS 系统更加注重操作的安全性。该系统中, 建立两级用户: engineer 和 operator。Engineer 具有所有权限, 而 operator 除查看报警记录及

用户注册外,监控界面底部的其他按钮都不允许操作。

实现方法是在 WinCC 的用户管理器的“权限等级”窗口中新建一个名为“操作员屏蔽”的权限,在 WinCC 的“用户管理器”窗口中建立上述两个用户,将“操作员屏蔽”权限分配给 engineer 而不分配给 operator。之后,打开@ Button11. PDL 和@ Button12. PDL 按钮画面,在不允许操作员操作的按钮上,将按钮组态中的“授权”指定为“操作员屏蔽”。系统运行后,当注册为 operator 用户时,单击组态过授权的按钮,会弹出提示“无操作员权限”,而不会执行按钮的正常功能,从而保证了如“退出运行系统”等重要按钮不会被误操作。

5 系统调试及运行

系统调试可分为两个阶段,一是针对控制程序的仿真调试,修正程序中的错误。二是系统上电加外部信号调试,修正机柜接线、监控画面等错误,并验证系统的冗余功能。PCS7 软件安装时,可以自定义安装 S7 - PLCSIM 仿真工具,它模拟了 S7 - CPU 的许多功能。可以在不连接实物 CPU 的情况下,完成对控制程序的下载、运行,强制修改参数、监控程序运行状态等操作。当然,S7 - PLCSIM 无法完成 CPU 冗余的测试。该系统通过上述两个阶段的调试后,对任一 CPU 断电,对任一电源模块断电,对任一 PN 接口模块断电,监控界面均正常显示,没有发生任何数据丢失现象,验证了冗余设备可以无扰动切换,SIS 系统工作可靠。

该 SIS 系统现已交付用户使用,投运 3 个月以来运行稳定,界面操作的简洁直观也受到了工程师和操作人员的一致好评,现场运行界面如图 7 所示。

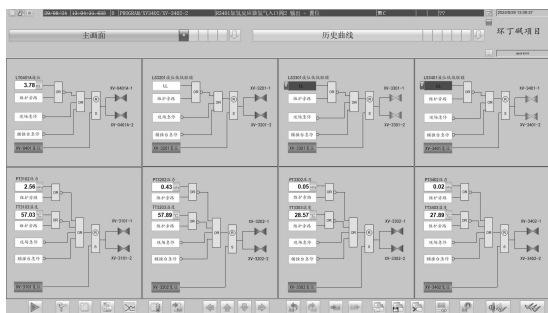


图 7 现场运行画面

6 结束语

2014 年《国家安全监管总局关于加强化工安全仪表系统管理的指导意见》明确指出,所有新建涉及“两重点一重大”(重点监管的危险化工工艺、重点监管的危险化学品和重大危险源)的化工装置和危险化学品储存设施要设计符合要求的安全仪表系统^[9]。SIS 系统对于保障人员、设备和环境安全、提升生产过程的可靠性和稳定性、符合国际安全标准和规范、支持事后分析与追溯以及促进工业自动化的发展等方面都具有极其重要的意义。该 SIS 系统通过使用故障安全型软硬件、电源冗余、CPU 冗余、通信模块冗余等安全手段,与基本过程控制 DCS 系统共同实现环丁砜生产装置的可靠性和自动化。随着工业自动化水平和安全生产需求的不断提升,SIS 系统在工业生产中的应用也将越来越广泛。

参考文献:

- [1] 唐靖伟,施金波,王志鑫. 石化行业中 SIS 安全仪表系统的重要性[J]. 自动化与仪表,2024,39(4):22-25.
- [2] 郭铁石. HIMA SIS 系统在硫酸再生装置中的应用[J]. 化工自动化及仪表,2019,46(5):402-405.
- [3] 刘运洲,周亮,王海群,等. 基于 Tricon SIS 的加热炉 BMS 冗余通信系统[J]. 化工自动化及仪表,2019,46(11):917-923.
- [4] 胡楠. 水煤浆气化工工艺的 SIS 设计[J]. 化工自动化及仪表,2022,49(3):376-380.
- [5] PARK S,LEE T, KANG K, et al. Risk assessment of solid desiccant dehydration package system using safety integrity level - based safety instrumented system design approach[J]. Process Safety Progress, 2024,43(1):126-137.
- [6] 杨建军,崔天鑫. 基于 PCS7 的生活垃圾焚烧发电厂 DCS 设计[J]. 化工自动化及仪表,2021,48(1):63-66.
- [7] 许忠仪. 安全仪表系统(SIS)的 SIL 评估[J]. 化工自动化及仪表,2009,36(5):62-66.
- [8] 张福贵,于嘉霖,钱琳琳. 基于 PCS7 和 SMPT1000 的蒸发器控制系统设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表,2021(8):69-71.
- [9] 国家安全生产监督管理总局. 国家安全监管总局关于加强化工安全仪表系统管理的指导意见(安监总管三(2014)116号)[Z]. 2014.