动力生产线 PDPS 虚拟调试的应用

陈　浩，荣　誉，孙鹏洋，刘　毅，汪　丹

（宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司，浙江　宁波　315336）

摘要：随着数字化技术的应用，虚拟调试技术对于生产线的调试发挥至关作用。本文以西门子 PDPS 仿真软件和 Portal 软件，应用 PLCSIM 高级仿真器，对动力生产线某工序自主设计的双层循环辊道进行联合调试，对 S7-1500 的控制程序进行虚拟验证，在设备安调前完成 PLC 和 HMI 程序的逻辑验证，实现电机伺服报文的解析，提前规避现场调试过程中存在控制逻辑和接近传感器布局问题，提升辊道上托盘的最大缓存量，并将联调完成的程序离线至现场设备，提高设备调试效率，大大缩短项目调试周期。

关键词：虚拟调试；虚拟验证；伺服报文；离线；调试周期

中图分类号：TP391　　**文献标志码：**A

Application of PDPS Virtual Debugging of Power Product Line

CHEN Hao，RONG Yu，SUN Pengyang，LIU Yi，WANG Dan

（Ningbo Geely Royal Engine Components Co.，Ltd，Ningbo 315336，China）

Abstract：With the application of digital technology，virtual debugging technology plays a vital role in the debugging of production line. In this paper，Siemens PDPS simulation software and Portal software and PLCSIM advanced simulator are used to conduct joint debugging of the self-designed double-layer circulating roller table in a certain process of the power production line，virtual verification of the control program of S7-1500，and logical verification of PLC and HMI program is completed before equipment installation and commissioning. Realize the analysis of motor servo messages，avoid the problems of control logic and proximity sensor layout in the field debugging process in advance，improve the maximum buffer of the pallet on the roller table，and offline the program completed by the joint adjustment to the field equipment，improve the equipment debugging efficiency，and greatly shorten the project debugging cycle.

Keywords：virtual debugging；virtual verification；servo message；offline；debugging period

1　引言

随着产品竞争力的不断增强，生产线正逐步朝着更高的柔性化水平发展。在动力生产线工艺规划的阶段，面临的自主改造任务日益艰巨。采取传统的设备调试方法，往往难以实现工艺设计与设备调试的有效协同作业，导致现场调试周期不断延长。这不仅延误了生产进度，而且无法提前预见到工艺设计中存在的问题，一旦设计或调试出现问题，会因设计返工而导致巨大的经济损失。因此，寻求一种能够集成工艺设计与设备调试的高效方法，变得尤为迫切和重要。虚拟调试技术的应用，改变了传统调试模式。应用 PDPS 和 Portal 软件，搭建虚拟调试平台，实现软件在环和硬件在环的虚拟联调。在 PS 仿真模型中，应用 PLCSIM Advanced，实现 Portal、PS 和 HMI 的信号交互。对于提前发现的设计问题，设计工程师可以提前规避；对于 PLC 控制逻辑问题，电气工程师进行更改和优化，实现机械设计、工艺仿真和电气调试的协同[1]。其虚拟调试路线如图 1 所示。

在动力虚拟调试某项目中，面临调试周期紧迫问题，开发技术能力不足，技术存在短板，项目成本高，开发

周期长，无法适应未来高速发展的研发需求和多变的市场格局。同时自主改造期间需要最大限度减少设备调试的停机时间，避免影响兼容产品的生产。本文虚拟对象为动力生产线某工位，此工位包含输送辊道、托盘、阻挡器和举升机等设备。工艺设计通过机械模块化，快速搭建满足工艺的设备模型，在模型中标注传感器位置信息，对模型进行虚拟调试和电气设计[2]。通过虚拟调试技术，在虚拟模型中完成逻辑块、智能组件的编辑，以及 Portal 软件在线监控程序信号运行，实现 PLC 程序逻辑和人机交互界面的验证，对于其中信号交互的程序报错问题，进行程序的优化和逻辑块的更改，在现场安调阶段，提前完成 PLC 程序离线到现场，从而在设备调试前完成 PLC 程序验证[3]。其虚拟调试流程如图 2 所示。

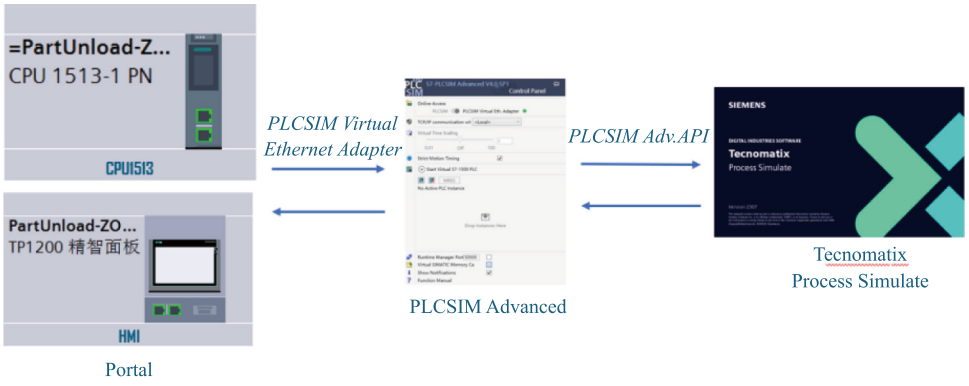

图 1　虚拟调试路线

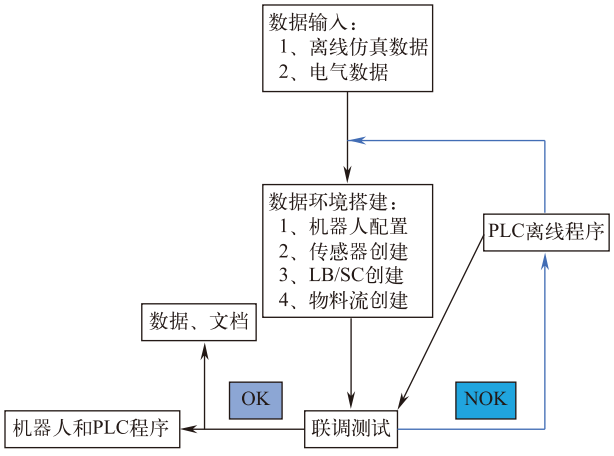

图 2　虚拟调试流程

2　虚拟模型搭建

将工艺设计提供设备和产品模型进行轻量化处理，转换为 cojt 格式的文件，在 PD(Process Designer) 模块进行工艺规划与管理，建立资源库和产品库，根据导入的资源进行产线和工位分配[4]。PS(Process Simulate) 模块用于虚拟环境中的设备仿真与路径规划，其设备模型如图 3 所示。

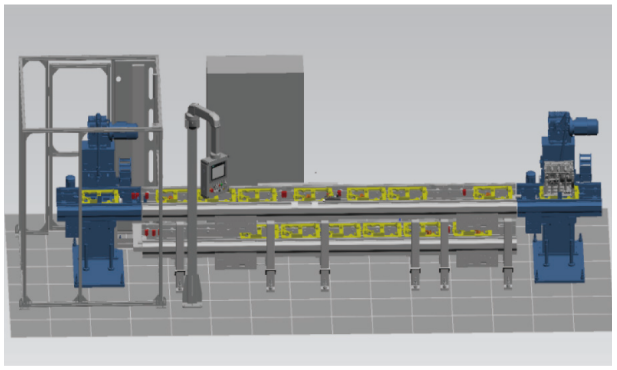

图 3　设备模型

根据设备模型中的机构运动和机械原理，选择适合的四连杆机构定义类型，本文中举升辊道的机构包含三个运动副和直线运动方向，选择“PRRR”型四连杆机构定义，如图 4 所示。对机构创建编辑修改部件之间的连接关系，将机构运动行程设定在合理范围，参考机构的具体动作定义机构姿态，如图 5 所示。

在标准模式下，将定义好的操作序列从开始到结束进行仿真模拟，在仿真模拟的一个生产周期，对所选对象的当前位置进行干涉检查，查看是否存在机构干涉情况。在本项目仿真过程中，辊道阻挡器伸缩档杆和传感

器位置存在设计问题，在仿真过程中进行精准测量，将工艺设计存在的问题，在工艺规划阶段进行规避，快速锁定项目最终设备模型，同时也确保了虚拟调试的工作[5]。

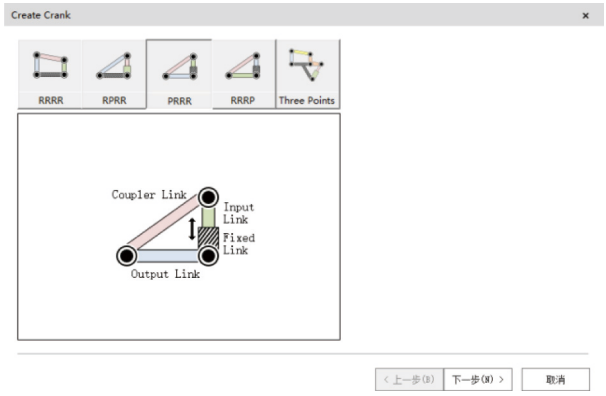

图 4　四连杆机构类型

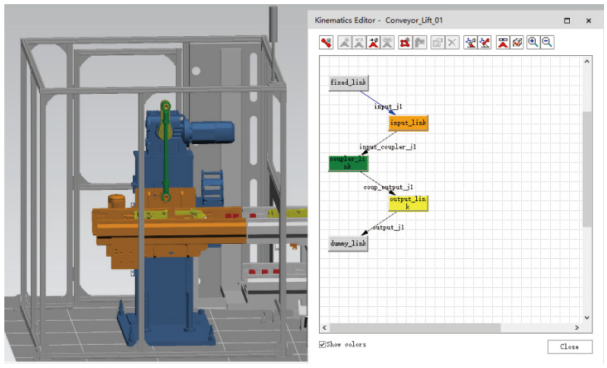

图 5　四连杆机构定义

3　虚拟调试介绍

在生产线仿真模式 CEE（Cyclic Event Evaluator）仿真，可以基于事件和触发器来仿真模拟多个动态生产周期，而不是预定义的序列。在生产模式下，Process Simulate 中的操作（除符合操作之外）都能够自动生成 Operation_end 信号，在仿真过程中需要执行对应操作时，这些信号都被用作默认转换条件，在周期内进行重复此操作[6]。要实现操作序列的循环仿真，需要创建循环仿真结构，基于“信号”“过渡条件”“信号事件”等要素，从而实现整个操作序列的循环仿真。以下是对虚拟调试项目中常用功能模块的介绍。

3.1　物料流应用

物料流是指在生产线仿真过程中，零部件或者生产物料在各操作工序间的流转传递的过程。通过在虚拟仿真过程中，模拟实际生产过程中物料流动情况。在虚拟调试过程中，通过传感器信号触发物料控制，物料在工艺过程中进行流转，实现控制仿真循环满足设定的物料状态，检查控制信号的传递与执行情况。

3.2　机运线应用

在动力生产线上，机运线常用于工件传送，本文传送机类型为滑撬式机运线，为满足设计理念，在模型中定义了上下两层机运线引导线，将其作为两个传送带，通过选择机运线的起始点、结束点和阻挡器停止点。通过编辑机运线的逻辑行为，实现传送机功能控制，例如启动、停止、改变方向和改变速度等，具体选项指令见表 1。

表 1　机运线指令

命令	选项	描述
	定义线性机运线	创建线性传送机，用于在指定位置之间传送物体（常规式或滑撬式传送机）
	定义角度机运线	创建角度传送机，用于在练习中指定位置之间沿圆弧路线传送物体（常规式或滑撬式传送机）
	编辑机运线	修改现有的机运线的设置
	定义传送零件	选择常规式（非滑撬式）传送机传送的零件
	定义滑撬	对现有资源定义为滑撬式传送机用于传送物体的滑撬（线性或角度）
	编辑滑撬	修改现有滑撬的设置
	编辑机运线逻辑行为	传送机添加选择的逻辑行为，比如启动、停止等

3.3 传感器应用

在虚拟调试中，传感器是一种虚拟设备模型，用于模拟真实生产环境中传感器的功能，检测生产过程中的各种物理量、状态和事件，将信息反馈给控制系统，实现对虚拟生产过程的精准控制和监控。在工业领域传感器的种类较多，其中光电传感器和接近传感器是常见的传感器。光电传感器和接近传感器能够检测到接近或进入传感器检测范围的零部件（物料）和设备资源[7]。在虚拟调试中，设定的传感器通过虚拟信号与控制系统进行信号交互。当传感器检测到设定的事件或物理量变化时，会产生一个虚拟信号，这个信号会被发送到控制系统，从而控制系统根据接收到的信号执行相应的控制逻辑。

3.4 逻辑块和智能组件应用

在虚拟调试项目中，标准逻辑块包括输入信号、输出信号，以及一个或多个在一个公式或等式中定义的逻辑关系。智能组件是可以根据设备控制器而执行的控制行为，对设定的信号执行操作。逻辑块应用于表达在外部信号作用下设备机构行为的模块，将 PLC 的输入和输出信号通过逻辑接口与设备的运行控制相连接，实现对设备在虚拟环境中的精确控制和行为模拟。对于设备资源通过设置预定义信息控制设备机构动作，进行创建逻辑块和智能组件，标准逻辑块包括输入条件、输出信号和等式中定义的逻辑关系如图 6 所示，智能组件可以根据设备资源所执行的控制行为，对已设置的信号执行操作。

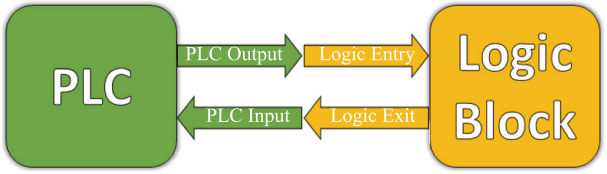

图 6 逻辑块功能图

3.5 建立通信

Tecnomatix 平台支持多种通信接口，根据实际 PLC 的配置（如 CPU 型号、I/O 点数等），创建虚拟 PLC 实例。设置虚拟 PLC 的相关参数，包括 IP、子网掩码等网络参数。应用 PLCSIM Advance 高级仿真器充当通信桥梁，将模型中的信号与 PLCSIM Advance 中的 PLC 程序变量进行映射与关联，达成 Portal 的 PLC 逻辑控制程序与 PDPS 仿真软件的双向通信，PLCSIM Advance 经由以太网与虚拟 PLC 进行通信，可以在不连接实际 PLC 硬件的情况下，对 PLC 程序进行仿真测试，模拟真实 PLC 程序的运行环境，实现在虚拟环境中模拟实际生产过程。

3.6 创建虚拟 PLC

电气工程师在 Portal 中编写 PLC 控制程序和 HMI 画面，如图 7 所示。编程和 HMI 编译完成后，启动 PLCSIM Advanced 建立虚拟 PLC，模拟真实 PLC 具有的功能，并将 PLC 控制程序下载到虚拟 PLC 中，并启动 HMI Simulation 建立虚拟 HMI，本项目中电机控制程序如图 8 所示。

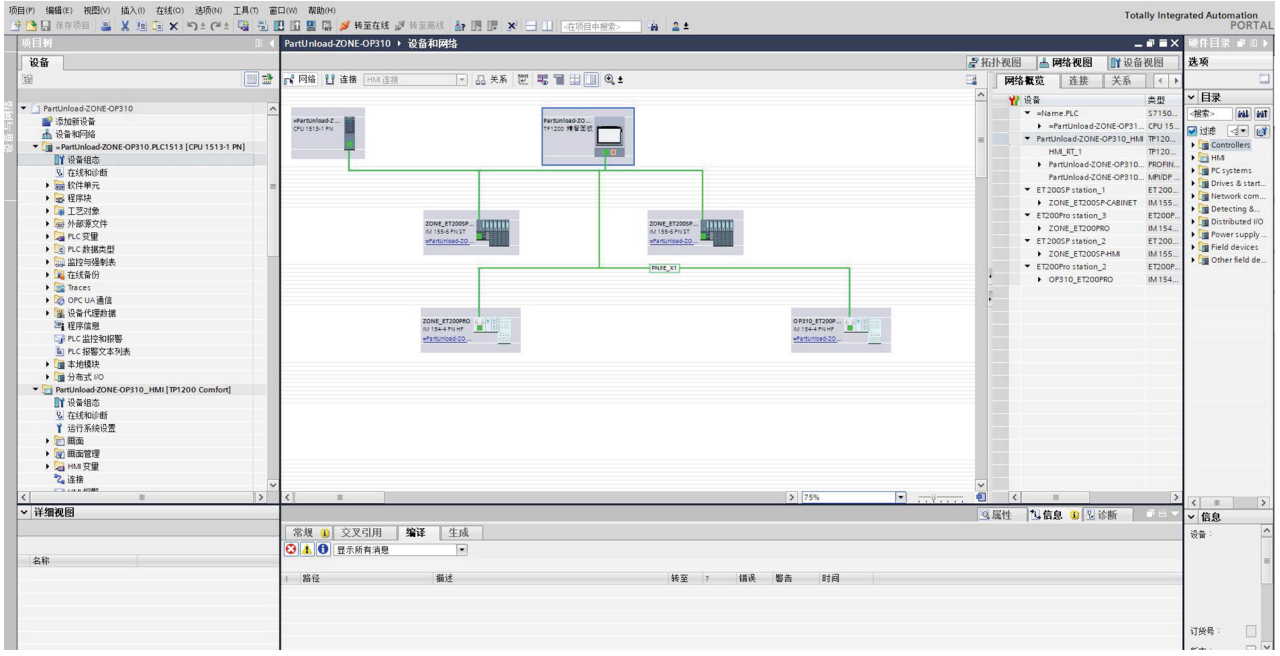

图 7 程序编辑

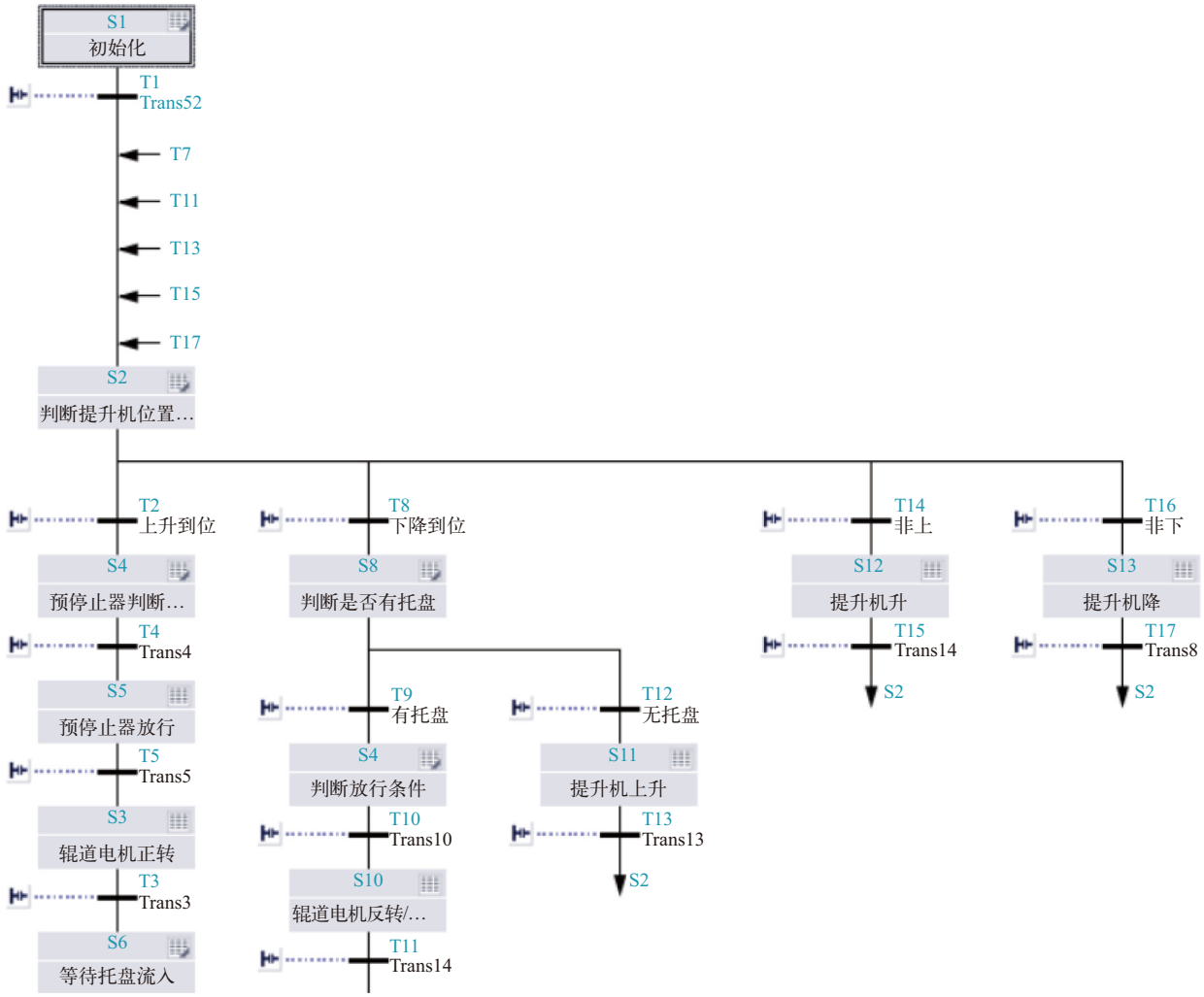

图 8　PLC 程序

3.7　创建 PS 与 PLC 信号映射

在 Portal 程序中的 PLC 变量表中，依据设备控制器所执行的控制行为，配置相关 I/O 信号的数据类型和地址，将 PLC 中的输入、输出变量与 PS 中输入、输出信号建立关系，从而实现 PLC 中的输出信号作为 PS 的输入信号，反之 PLC 中输入信号作为 PS 的输出信号，如图 9 所示。

将映射的 PLC 的信号进行通信测试，在 PS 中进行 PLC 连接属性配置，在逻辑块中定义变量的输入和输出，在生产模式下，测试通道是否有效。

4　虚拟调试

4.1　PS 在线仿真

根据生产工艺和控制要求，电气工程师编写 PLC 和 HMI 程序，包括逻辑控制程序、通信程序等 [8]。在虚拟调试前，在 PLCSIM Advanced 中对 PLC 程序进行初步调试，确保程序的基本逻辑正确，如检查输入输出信号的状态变化是否符合预期、定时器和计数器的功能是否正常等。将编写的 PLC 程序 I/O 点位，PS 中的 I/O 点位和 PLC 对应控制信号进行软件层面交互，将虚拟设备信号与 PLCSIM Advanced 中的 PLC 程序变量进行准确的映射和关联，实现 PDPS 与 Portal 之间通过数据交换同步，其设备中的其他功能信号（电柜开关、空调、气源）等信号，在 PS 中创建初始化逻辑块，将信号进行匹配。

4.2　虚拟联调

虚拟联调过程中，模拟真实的生产流程，观察 PLC 程序对虚拟设备的控制效果，验证控制逻辑是否正确，实时查看设备的运行状态和信号变化情况 [9]。本项目借助 PDPS 信号面板与 HMI（人机界面）实现对信号的精准把

PLC 变量

	名称	变量表	数据类型	地址	保持	从 H...	从 H...	在 H...
19	电柜信号_主继电器吸合	IO	Bool	%I0.1		☑	☑	☑
20	电柜信号_电流分配器1上电...	IO	Bool	%I0.2		☑	☑	☑
21	电柜信号_电流分配器2上电...	IO	Bool	%I0.3		☑	☑	☑
22	电柜信号_安全门安全通道	IO	Bool	%I0.4		☑	☑	☑
23	电柜信号_空调报警	IO	Bool	%I0.7		☑	☑	☑
24	电柜信号_电机电源上电正...	IO	Bool	%I1.1		☑	☑	☑
25	电柜信号_电机电源上电正...	IO	Bool	%I1.2		☑	☑	☑
26	电柜信号_空调电源上电正常	IO	Bool	%I1.3		☑	☑	☑
27	电柜信号_开关电源上电正常	IO	Bool	%I1.4		☑	☑	☑
28	ZONE_升降台_安全门锁正常	IO	Bool	%I1.5		☑	☑	☑
29	ZONE_气源板_主气源压力...	IO	Bool	%I2.0		☑	☑	☑
30	OP310_急停按钮盒_急停按...	IO	Bool	%I2.1		☑	☑	☑
31	ZONE_升降台_安全门按钮...	IO	Bool	%I2.2		☑	☑	☑
32	ZONE_升降台_安全门按钮...	IO	Bool	%I2.3		☑	☑	☑
33	ZONE_升降台_安全门按钮...	IO	Bool	%I2.4		☑	☑	☑
34	ZONE_升降台_安全门按钮...	IO	Bool	%I2.5		☑	☑	☑
35	ZONE_升降台_安全门急停...	IO	Bool	%I2.6		☑	☑	☑
36	ZONE_辊道后侧急停按钮盒...	IO	Bool	%I2.7		☑	☑	☑
37	ZONE_操作面板_上电确认...	IO	Bool	%I50.0		☑	☑	☑
38	ZONE_操作面板_自动模式...	IO	Bool	%I50.1		☑	☑	☑
39	ZONE_操作面板_手动模式...	IO	Bool	%I50.2		☑	☑	☑
40	ZONE_操作面板_故障复位...	IO	Bool	%I50.3		☑	☑	☑
41	ZONE_操作面板_手动使能...	IO	Bool	%I50.4		☑	☑	☑
42	ZONE_操作面板_循环启动...	IO	Bool	%I50.5		☑	☑	☑
43	ZONE_操作面板_循环停止...	IO	Bool	%I50.6		☑	☑	☑
44	ZONE_塔灯_蜂鸣器	IO	Bool	%Q1.3		☑	☑	☑
45	ZONE_塔灯_红	IO	Bool	%Q1.4		☑	☑	☑
46	ZONE_塔灯_黄	IO	Bool	%Q1.5		☑	☑	☑
47	ZONE_塔灯_蓝	IO	Bool	%Q1.6		☑	☑	☑
48	ZONE_塔灯_绿	IO	Bool	%Q1.7		☑	☑	☑
49	电柜信号_急停回路通电	IO	Bool	%Q0.0		☑	☑	☑
50	电柜信号_急停安全继电器...	IO	Bool	%Q0.1		☑	☑	☑
51	ZONE_升降台_安全门_开门	IO	Bool	%Q0.2		☑	☑	☑
52	ZONE_操作面板_上电确认...	IO	Bool	%Q50.0		☑	☑	☑
53	ZONE_操作面板_自动模式...	IO	Bool	%Q50.1		☑	☑	☑
54	ZONE_操作面板_手动模式...	IO	Bool	%Q50.2		☑	☑	☑

图 9　PLC 变量

控。对 PLC 运行程序进行在线监控，观察 HMI、传感器、执行机构和整个设备的运行逻辑，在 PS 内机构的关闭和打开信号的地址是否正确，在 HMI 控制面板报警后，点击复位按钮，PLC 能够执行报警复位功能。依据设备运行逻辑逐步验证 PLC 程序控制逻辑、控制信号交互、设备节拍等方面进行评估是否满足设计要求，对联调过程中的逻辑问题进行优化，输出 PLC 离线程序、接近传感器和阻挡器布局、PLC 变量表等文件。其控制逻辑优化清单见表 2。

表 2　控制逻辑优化清单

工位号	问题描述	程序优化
OP310	ZONE_ 升降台 _ 提升机上升减速位传感器丢失	模型中设置检测范围和调整检测位置
OP310	ZONE_ 升降台 _ 电动工作位异常报警	程序中增加骑缝检测传感器，在升降电机块使用引脚中增加条件判断
OP310	ZONE_ 升降台预停止器上升报警	预停止器上升程序中增加上升到位常闭信号条件
OP310	手动放行按钮对工件不放行	程序中增加骑缝检测传感器，在升降电机块使能引脚中增加条件判断
OP310	ZONE_ 升降台 _ 停止器 _ 托盘离开信号升降台下降信号报警	预停止器上升程序中增加预停止器 _ 托盘离开常闭信号条件
OP310	ZONE_ 升降台电机下降异常报警	电机 FB 块中使能回原位增加提升机上升到位和提升机下降到位常开条件
OP310	ZONE_ 升降台防坠落安全信号丢失报警	在电机 FB 块中使能工作位增加防坠落检测常开条件
OP310	ZONE_ 升降台电机加速和减速参数设计不合理问题	在电机 FB 块中电机速度值进行参加设置

（续）

工位号	问题描述	程序优化
OP310	HMI 画面添加 Graph 概览视图，但是显示连接失败问题	对 Graph 的变量 DB 进行更改
OP310	S7-1513 控制的 V90 驱动器轴正反转出现位置监视错误	在 Portal 与编码器进行数据交换界面进行精度参数设置
OP310	ZONE_ 升降台 _ 电机回原位异常报警	程序中增加骑缝检测传感器，在升降电机块使能引脚中增加条件判断
OP310	HMI 手动复位按钮对程序无法复位	对 HMI 手动复位变量进行更改和变量配置

在现场设备安调阶段，测量设备模型中阻挡器、接近传感器和光电传感器的位置，指导现场传感器的安装，同时将控制程序离线至现场设备，在短时间内顺利完成设备的调试。在虚拟调试项目中，共优化 PLC 控制逻辑 12 处，解决了 PLC 控制程序的逻辑问题，以及组态中变频器的信号控制顺序问题，通过导入按钮模型，解决了在虚拟环境中模拟手动放行的信号交互，能够真实模拟现场人机放行控制，验证了安全互锁的控制问题，提前规避现场作业的安全问题。通过电气程序的持续优化，顺利完成设备的安调，进而缩短了项目的调试周期，解决了项目调试时间紧迫的问题。

5 结束语

本文系统完成了虚拟调试项目，Portal 作为西门子自动化系统的编程与配置环境，提供了丰富的 PLC 编程、HMI 设计及设备网络配置等功能。两者相结合，构成了一个完整的数字孪生虚拟调试，改变传统设备的调试模式，实现机械设计、工艺仿真和电气调试的协同，能够在产品设计阶段或生产线布局规划阶段实现对整个生产流程全面仿真与验证 [8]。借助 PLCSIM Advanced 高级仿真器，在虚拟模型中完成逻辑块和智能组件的编辑，以及在 Portal 软件中在线监控程序信号运行，实现设备功能逻辑的验证。对其中信号交互的程序报错问题，进行程序的优化和逻辑块的更改，最终实现 PLC 程序的离线调试，在设备安装之前完成程序调试。原项目设备安调周期计划为 65 天，缩短设备安调周期约 30 天，从而降低企业项目成本 [10]。

随着数字化技术的加快，虚拟调试技术已应用各行业，从而实现了工艺设计与现场调试的协同，提升产品的核心竞争力，同时为智能制造的快速发展提供强有力的技术支持，为后续的实际生产提供了有力支持。在未来的项目中，将进一步深化虚拟调试技术的应用，结合人工智能、大数据等技术，实现更高效、智能的生产调试。IM

参考文献

[1] 朱国良．数字化双胞胎之虚拟调试技术应用 [J]．中国仪器仪表，2020 (6)：19-23．

[2] 黄初敏．西门子 Process Simulate 与三菱 PLC 通讯研究 [J]．时代汽车，2020 (5)：27-28．

[3] 王刚，郭艳丽．虚拟调试技术在白车身生产线中的应用 [J]．湖北汽车工业学院学报，2019，33 (4)：38-41．

[4] 陈明鑫，孔庆玲．虚拟调试技术在汽车焊装线上的应用 [J]．汽车工艺与材料，2019 (7)：19-21．

[5] 张向文，王子涵，张月飞．基于数字孪生的虚拟调试技术的研究与实践 [C]// 中国航空工业技术装备工程协会，中国航空学会测试技术分会．2021 年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集．北京航天发射技术研究所，2021：137-140．

[6] 成正勇，黎亮，李小灿，等．基于 TIA 与 TECNOMATIX 的联合虚拟调试研究 [J]．汽车工艺与材料，2020 (2)：66-71．

[7] 庄菁雄．虚拟调试技术在汽车制造业中的应用分析及发展趋势 [J]．汽车实用技术，2024，49 (7)：189-194．

[8] 王佩蓓．智能制造中的自动化生产线规划与优化 [J]．电子技术，2024，53 (6)：330-331．

[9] 程芝群，杨林，樊水晶．浅谈海外项目车身焊装线的设计与调试技术 [J]．科技创新与应用，2017 (22)：34-36．

[10] 张铭．基于机械设计与制造的自动化生产线优化与改进 [J]．家电维修，2024 (9)：55-58．

作者简介：陈浩（1993—），男，本科，数字化技术工程师，主要研究方向为西门子 PDPS 仿真分析和虚拟调试。

收稿日期：2024-12-17