

基于 PLCSIM Advanced 和 Simulink 的自动化生产线

仿真实训平台设计

安翠娟¹, 张凯¹, 张敏¹, 丁大伟¹

(1.北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

摘要: 为解决《自动化生产线实训》线下课程实验硬件套数不足、实验时长和场地受限等问题, 提升教学质量, 设计了一种基于 PLCSIM Advanced 和 Simulink 的自动化生产线仿真实训平台。该仿真平台以实训设备为依托, 使用 Simulink 搭建仿真被控对象模型, 在 PLCSIM Advanced 仿真控制器中编写控制算法, 通过 API 通信实现对象模型和控制器数据的实时交换和仿真。以纸张张力实训平台为例, 介绍了仿真实训平台搭建和实施过程。实践教学表明, 该仿真平台提高了自动化生产线实训课程的教学成效, 激发了学生的学习兴趣, 提升了学生发现、解决复杂工程问题的能力, 让学生深刻体会到团队合作和有效沟通的重要性。

关键词: 自动化生产线实训; 仿真实训平台; PLCSIM Advanced; Simulink; API

中图分类号: TP29

文献标识码: B

Design of Simulation Training Platform for Automation Production Line Based on PLCSIM Advanced and Simulink

AN Cuijuan¹, ZHANG kai¹, ZHANG min¹, DING Dawei¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing
100083, China;)

Abstract: In order to solve the problems of hardware equipment, experimental duration, and limited space in the offline course of "Automated Production Line Training", and improve the teaching quality and effectiveness, a simulation training platform for automated production lines based on PLCSIM Advanced and Simulink based online is designed. This plan is based on the physical training platform in the laboratory, and uses Simulink to build a simulation model of the controlled object. Control algorithms are written in the PLCSIM Advanced simulation controller, through API communication the real-time exchange between object model and controller data is

achieved and simulated. Taking the paper tension training platform as an example, the construction, and implementation process of the simulation training platform were introduced. Practical teaching has shown that this platform has improved the teaching effectiveness, stimulated students' interest in learning, improved their ability to discover and solve complex engineering problems, and made students deeply realize the importance of teamwork and effective communication.

Key words: Automation Production Line Training ; Simulation Training Platform ; PLCSIM Advanced; Simulink; API

北京科技大学《自动化生产线实训课程》以“OBE+CDIO 培养模式的自动化生产线实训平台”为依托,引导学生深入了解典型工业自动化生产线工艺流程,旨在解决理论与工程实际相对脱节、工程化设计训练相对较少、学生工程师素养相对缺失等问题。通过该课程学习,可有效提高学生解决复杂工程问题能力,特别是与实际工程项目相关的工程实践与创新能力,培养学生系统观、工程意识、科学素养和项目管理与团队协作精神[1-3]。因此该实践课程在自动化专业本科人才培养及工程认证等方面起着至关重要的作用。传统的生产线实训线下教学存在实验场地小、实验时长短、实验设备套数不足、维护成本高、教学效率低等问题,无法满足学生进入实验室反复进行操作调试的需求,制约了学生创新意识和能力的培养 [4-6]。为了解决上述问题,开发设计了一套基于 PLCSIM Advanced 和 Simulink 的自动化生产线仿真实训平台,通过 API 通信方式,建立仿真控制器和 Simulink 对象模型之间的连接,使用仿真控制器实现控制算法的研究,采用上位机软件编写人机交互界面[7-9]。通过该仿真实训平台,学生可随时随地地进行相关实训设备的仿真练习,使学生更深入地了解实际工业中控制系统架构、掌握控制算法在实际工程中的部署过程、熟悉工业控制操作流程等。

1 仿真实训平台结构

自动化生产线仿真实训平台结构如图 1 所示。该平台主要由被控对象模型、仿真控制器以及人机交互界面组成。所有功能均在同一台 PC 机上完成,PC 机上配置 Matlab、S7-PLCSIM Advanced、TIA Portal、Wincc 等软件。

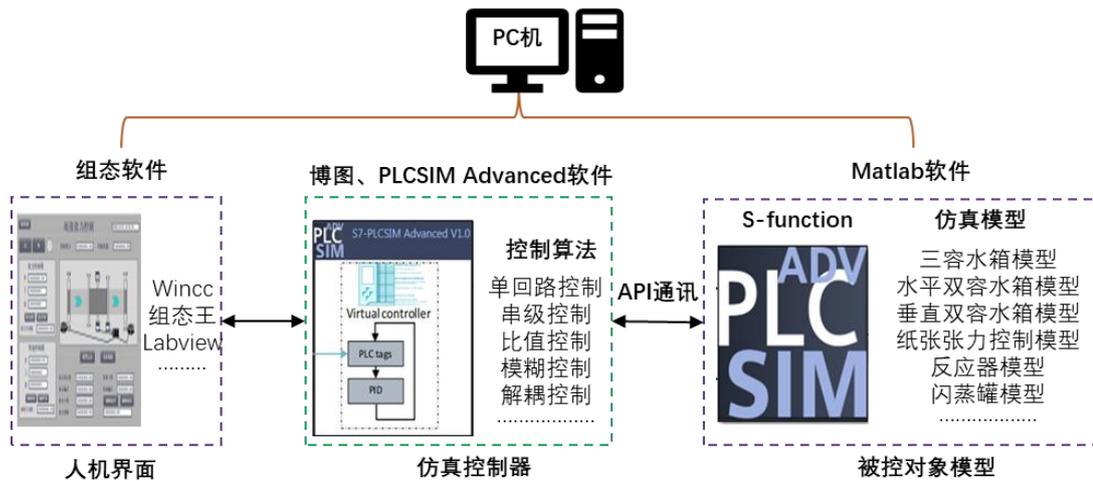


图1 自动化生产线仿真实训平台结构图

Simulink 提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的环境，它具有仿真精细、贴近实际、效率高等优点[7,9]。依托实验室三容水箱、纸张张力、流程工业自动化等实际工业设备，通过实验法在 Simulink 中搭建三容水箱、水平双容水箱、垂直双容水箱、纸张张力、反应器、闪蒸罐等多种仿真的工业对象模型，替代实际工业被控对象。

S7-PLCSIM Advanced 是西门子推出的高级虚拟控制器，它基于 PC 操作系统可模拟一个或多个虚拟的 PLC 控制器以替代实际的 S7-1500 控制器[10]。用户可在该控制器中对系统单回路、比值、串级、模糊等控制策略进行仿真测试。

采用组态软件如 Wincc、组态王、Labview 等开发设计人机交互界面。人机交互界面主要用于工艺流程展示、控制策略选择、控制器参数整定、过程数据趋势显示等。

本文以纸张张力实训平台为例，介绍了被控对象的 Simulink 建模、仿真控制器控制策略设计、人机交互界面的开发以及 API 通讯实现等。

2 仿真实训平台案例开发

2.1 张力控制系统工艺图

纸张张力控制系统工艺如图 2 所示，由图可知该控制系统主要由放卷辊、收卷辊、导向轴、检测辊（张力传感器）、转速编码器、电机、控制器 PLC、变频器等组成。其中收放卷辊为被控对象，PLC 为控制器，变频器和电机为执行机构，张力传感器和转速编码器作为检测机构采集张力、速度信号。

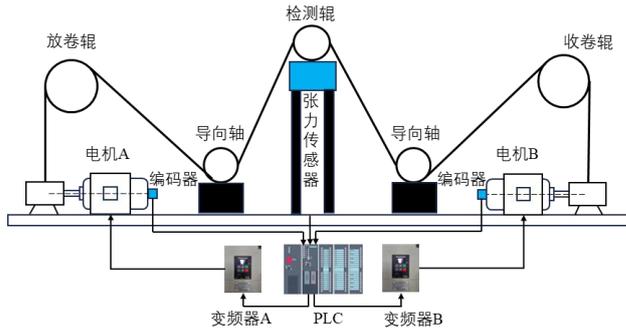


图2 纸张张力控制系统工艺图

2.2 控制方案设计

由图2的工艺可知，该系统以控制器为中心，给定变频器A一定频率使电机A转速不变，从而保

证放卷的速率恒定，然后根据工艺要求设定张力，将张力设定值与张力测量值在控制器中进行偏差计

算后输出给变频器B以控制电机B的转速，从而调整收卷的速度，收卷速度的变化引起张力的变化，从而实现纸张张力的控制[11-13]。系统的总体控制目标是实现纸张的平稳放卷和收卷，在保持一定张力的情况下，控制电机的转速。因此本文采用串级PID控制，纸张张力控制作为外环，电机速度控制作为内环，控制方案如图3所示：

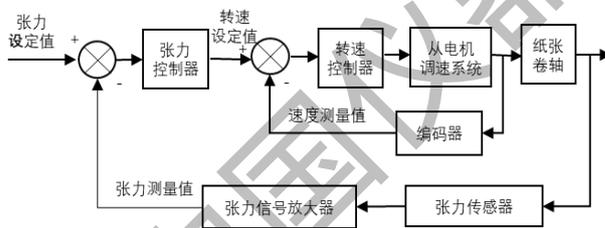


图3 纸张张力控制系统方案图

2.3 被控对象建模

根据3.1和3.2可知，张力值偏差通过张力控制器处理后可得到电机的转速，转速可控制电机的输出转矩，再通过转矩来控制张力，因此张力控制系统的对象模型如图4所示：



图4 张力控制系统对象模型框图

- 1) 电机功率一定时，电机的转速与电机转矩成比例关系，设为 K_1 ，则 $G_1(S) = K_1$ 。
- 2) 纸张线速度 V 与电机转矩 M_d 的传递函数 $G_2(S)$

由角动量定理可得电机输出转矩与纸张线速度的关系如式 1 所示^[14]:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M_d - T * \frac{D}{2} - B_f \omega \quad (1)$$

假定系统加速瞬间，纸张转动惯量不变且收卷半径不变，则电机的输出转矩如式 2 所示:

$$M_d = \frac{2}{D} \left[J_0 + \frac{1}{32} \rho b \pi (D^4 - D_0^4) \right] \frac{dv}{dt} + \frac{TD}{2} + \frac{2vB_f}{D} \quad (2)$$

由式 1 和式 2 得到纸张线速度与电机输出转矩的传递函数 $G_2(s)$ 如式 3 所示:

$$G_2(s) = \frac{V(s)}{M_d(s)} = \frac{D}{2} \frac{1}{Js+B_f} = \frac{K_2}{T_1s+1} \quad (3)$$

其中 M_d 为电机输出转矩； D 为卷纸卷径； D_0 为卷辊直径； ω 为开卷辊的角速度； v 为纸张线速度； b 为纸张宽度， T 为纸张张力， B_f 为摩擦系数， ρ 为纸张体积密度。

3) 纸张速度与纸张张力的传递函数 $G_3(s)$

由胡克定律可得纸张张力 T 与纸张速度 V 之间的关系如式 4 所示:

$$T = \frac{EA(L-L_0)}{L_0} = \frac{EA}{L_0} \int (V_2 - V_1) dt \quad (4)$$

由式 4 可知张力与速度差是一个积分环节，通常用一阶惯性描述，式 4 经拉式变换后

得到如式 5 所示的传递函数 $G_3(s)$:

$$G_3(s) = \frac{T(s)}{\Delta V(s)} = \frac{K_3}{s+1} \quad (5)$$

其中 T 为纸张张力， E 为纸张弹性模量， A 为

纸张横截面积， L_0 为纸张未拉伸的长度。

由 1)、2)、3) 分析计算可得张力系统被控对象模型传递函数如式 6 所示:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(s+C)} \quad (6)$$

2.4 创建 Simulink 张力控制对象模型

首先采用实验法测得各个环节的阶跃响应的曲线，确定各环节传递函数的系数为:

$K_1=0.6$, $K_2=1$, $T_1=0.9$, $K_3=4$, $C=1$, 从而得知各环节传递函数如下:

$$G_1(s)G_2(s) = \frac{0.6}{0.9s+1}$$

电机 B 调速系统:

纸张卷轴： $G_3(s) = \frac{4}{s+1}$

张力传感器和张力信号放大器：1

编码器：0.6

然后打开 Matlab，依据控制系统方案图及各环节的传递函数在 Simulink 中创建如图 5 所示的对象模型。图中两个 PID 控制器分别为张力控制器和速度控制器。

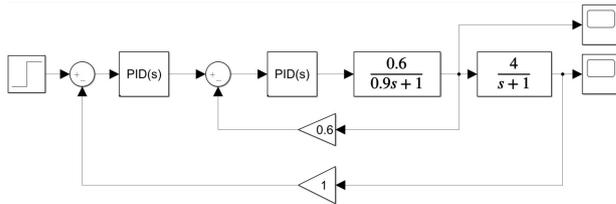


图 5 张力控制系统 Simulink 模型

2.5 Simulink 中整定 PID 参数

在 Simulink 中根据工程经验值反复调试内环、外环控制器的 P, I, D 参数，获取不同参数下系统响应曲线，从曲线获知控制系统的性能，如超调量、调节时间、静态误差等。通过对仿真结果对比分析，确定外环张力控制器参数 $P=2.5$, $I=3$, $D=0.5$ ，内环速度控制器参数 $P=8$, $I=0.1$ ，仿真响应曲线如图 6 所示，此时系统超调量为 14%，调节时间约为 4s，满足控制系统的要求。该组 PID 参数将被作为初始值用于虚拟控制器的软件程序设计。

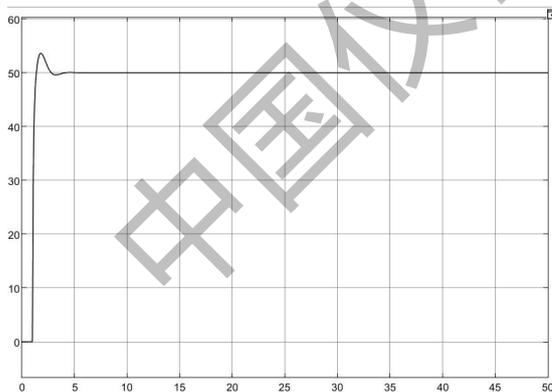


图 6 控制系统仿真模型响应曲线图

2.6 控制系统软件设计

纸张张力控制系统软件总体结构如图 7 所示，共包括 3 个组织块：初始化块 (OB100)、主程序块 (OB1) 和循环块 (OB35)；三个功能块：张力信号采集 (FC1)、速度信号采集 (FC2)、频率输出转换 (FC3) 和一个数据块 DB1。

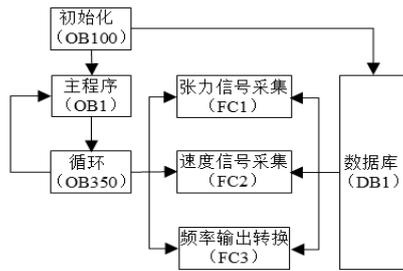


图7 控制系统软件总体

2.7 初始化模块 OB100

初始化模块 OB100 主要实现各个变量数据如转速设定值、纸张张力过载设限、纸张张力偏差设限、纸张张力设定值、控制器 PID 参数、控制器手动值等的初始化。

1) 主程序块 OB1

主程序块 OB1 主要实现电机正、反向启动，联控模式启动，张力控制模式启动及编码器计数功能。

2) 循环块 OB35

循环块 OB35 中断时间设置为 100ms，循环块实现张力信号检测，纸张张力计算、张力滤波、报警、PID 控制、频率输出转换等功能。其流程如图 8 所示：

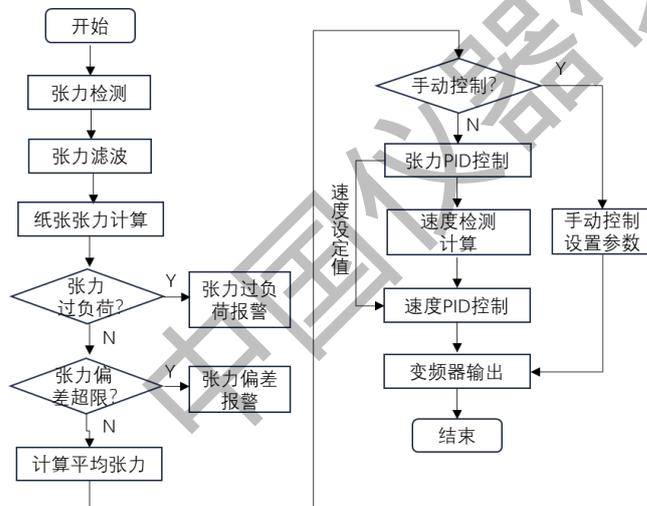


图8 循环块 OB35 软件设计流程图

2.8 API 通讯设计

API（Application Programming Interface）是应用程序接口，它是一组事先定义好的函数，对外封装完整，调用时无需访问源码，只需按照 API 文档功能说明设置并连接输入输出接口即可。API 接口有助于提高系统的可操作性和可靠性，为便于 PLCSIM Advanced 与 Simulink 之间的通讯，西门子官网提供了一组 API 应用案例，通过其中的“PLCSIM Advanced”-S 函数即可对 PLCSIM Advanced 中的变量进行读写操作，从而实现 Simulink 被

控对象模型与虚拟控制器之间的数据交换。通讯实施过程如下：

1) 打开西门子官网提供 API 案例文件夹, 将其中的“S-Function_SourceCode”文件夹存放在 Matlab 可访问的电脑路径。

2) 打开 Matlab, 在路径栏找到 “S-Function_Source Code”文件夹, 并双击文件夹中已经封装好的函数文件“PLCSimAdvancedBlockLibrary.slx”, 打开“PLCSIM Advanced”S-函数接口模块。

3) 打开 Simulink 对象模型文件, 删除对象模型中的 PID 控制器及将由 Step7 执行的功能部分, 并将步骤 2)中打开的“PLCSIM Advanced” S-function 函数接口模块拖拽至 Simulink 模型的控制功能部分。如图 9 所示:

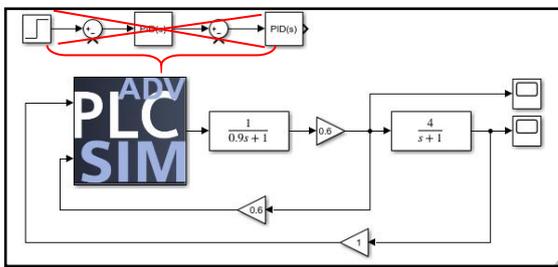


图 9 带 S 函数接口模块的控制对象

4) 双击“PLCSIM Advanced” S-function 函数接口模块, 设置该模块参数, 如表 1 所示:

表 1 S-function 接口模块参数设置

参数名称	参数值	备注
Instance name	'zhangli PID'	与“PLCSIM Advanced”中设置的虚拟控制器名称保持一致, 实例名称一定要加单引号
Number of inputs	默认为“-1”	“-1”表示输入数量自动从PLC的输入标签量中获得。
Number of outputs	默认为“-1”	“-1”表示输出数量自动从PLC的输出标签量中获得。
Time scale factor for PLC emulation	默认为“-1”	-
Enable time synchronization	默认为“-1”	-

S-function 函数块的输入和输出直接从控制器标签获取并自动生成, 输入和输出的个数取决于 Step7 软件编程中默认变量地址为 I 和 Q 变量的个数, 地址为 M 的变量以及数据块 DB 中的变量不会影响 S-function 函数块的输入输出个数。图 10 是张力控制系统中 S-function 接口模块的输入输出变量, 从图中可知有两个输入变量和一个输出变量, 分别是 I0.0、I8.0 和 Q0.0。Simulink 通过 I0.0、I8.0 将张力值和速度值反馈至虚拟控制器。虚拟控制器通过 Q0.0 将 PID 控制输出值输出至 Simulink 对象模型, 从而实现控制系统数据的交换。

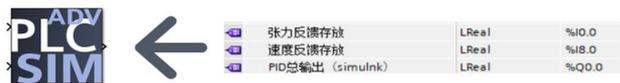


图 10 S-function 块输入输出变量接口

2.9 人机交互界面设计

WinCC (Windows Control Center) 是西门子公司开发的过程监视系统，其最重要的功能是过程可控化及可视化，搭建的画面可真实还原设备工作状态，达到监控生产过程状态的目的[15]。本仿真平台使用 WinCC 设计如下人机交互界面：

1) 登录界面：在该界面输入用户名和密码进入纸张张力控制系统画面，不同的用户登录具有不同的操作权限。

2) 系统画面：用户可在该画面查看系统工艺流程，监视系统的运行状态，查看张力、速度等实时数值，控制系统手自动运行，修改设定 PID 控制器参数等。

3) 实时数据趋势界面：该界面可查看张力、速度等实时数据的变化趋势，从而直观地判断系统的控制性能如何，以调整控制器参数。

4) 报警记录界面：用户在该界面可查看系统重要报警信息，如张力过大，张力偏差过大等，根据报警信息对控制系统实施安全措施处理。

3 仿真平台实验步骤

控制程序、人机交互画面及通讯设置完成后，即可进行仿真实训平台的实验。步骤如下：

1) 在同一台电脑上安装如下软件：

- 博图 (内含 Step7 编程软件和人机交互界面设计软件 WINCC)
- PLCSIM Advanced (虚拟控制器)
- Matlab (建立 Simulink 被控对象模型)

2) 打开博图软件创建新项目并命名为“zhangli PID”，然后打开项目视图，在创建的项目中添加 S7-1500 控制器并设置控制器的 IP 地址为 192.168.0.22，子网掩码为 255.255.255.0。然后在项目中添加 PC Station，并在 PC station 中插入 Wincc 应用程序，用于编写人机交互画面。

3) 依据控制程序设计方案在 S7-1500 控制器中编写控制程序，并根据人机交互界面设计在 PC Station 中添加和编辑画面，并将画面中的状态数据等信息与控制器中的变量一一

对应连接。

4) 打开 PLCSIM Advanced 软件, 输入设备名称”zhangli PID”, IP 地址和子网掩码与博图 S7-1500 控制器的设置保持一致, 然后点击“Start”。

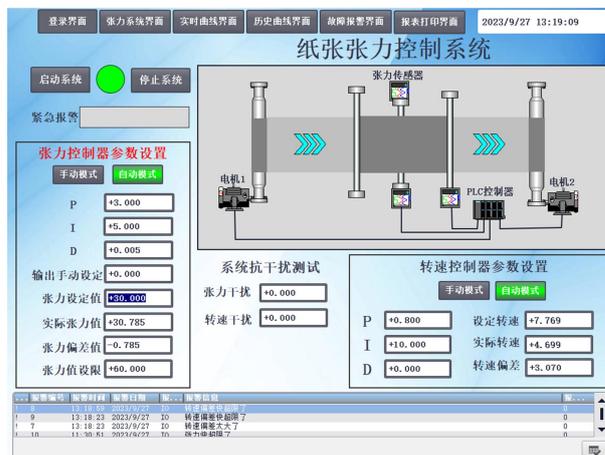
5) 打开 Matlab, 在 Matlab 的文件路径栏找到 “S-Function_Source Code”文件夹, 双击文件夹中已经封装好的 S 函数文件“PLCSimAdvancedBlockLibrary.slx”, 打开“PLCSIM Advanced”接口模块。 然后打开 Simulink, 创建如图 9 所示的 Simulink 对象模型。

6) 将 Step7 控制程序下载到 PLCSIM Advanced 并点击“Run”; 然后在 Simulink 中将运行时间设置为无穷大 inf, 点击“运行”, 最后运行人机交互画面。

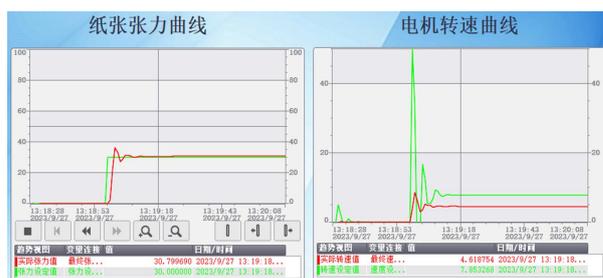
7) 在登录界面输入登录用户的账号和密码, 然后点击登录进入控制系统界面。 分别设置张力最大值, 主副控制器的 PID 参数 (初始值可参考 Simulink 仿真整定出的参数), 然后点击启动按钮, 输入张力设定值即可正常运行。 根据运行曲线, 观察控制系统的性能, 从而进一步调整 PID 参数直到控制效果能达到要求。 系统稳定运行时, 可加入张力或速度扰动验证系统的抗干扰性能。

4 仿真平台运行结果

纸张张力控制系统人机交互画面如图 10 所示, 在系统界面中依据实验室张力控制系统平台绘制了工艺流程图, 学生可通过流程图直观地了解和掌握测量仪表、控制器、执行器及被控对象在实际控制系统中的分布。 学生可通过系统界面启停控制系统、设置 PID 控制器参数、设置张力设定值及最大值等, 还可直观的观测设备运行状态及报警信息。 在实时数据趋势界面, 学生可根据曲线的变化趋势判断控制系统性能的优劣, 从而调整 PID 控制器参数。 在反复调整 PID 参数的实验过程中, 学生可充分理解比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 三个参数对控制系统的作用。



(a) 系统界面



(b) 张力、转速实时数据趋势

图 10 仿真实训平台人机交互界面

5 结语

本文设计的仿真实训平台有效解决了《自动化生产线实训》课程实验硬件资源紧张、实验空间和时长不足等问题。仿真平台功能与实训设备保持一致，学生通过该仿真平台可深入地了解系统结构、调试设备、整定 PID 参数，加深和巩固对相关控制理论知识和原理的理解。仿真平台丰富了实训的教学内容，让学生更直观更全面地认识实际工程项目的复杂性，充分调动了学生参与实践教学积极性，增强了学生自主学习的能力，培养了学生团结协作的意识，提升了学生解决复杂工程问题的能力。该仿真平台自 2021 年投入使用以来，学生实训成绩提高了 20% 以上，参与国家级、省部级各类学科竞赛的学生人数是往届的 2-3 倍，且获奖率达到了 90% 以上，教学成果显著提高。

参考文献(References):

- [1] 阎群, 李擎, 崔家瑞, 等. CDIO 在高校实验教学可持续发展中的应用探索[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(11): 131-134.
- [2] 温国强, 关志伟, 常文爽, 等. BE-CDIO 理念下机电类专业留学生实践类课程构建——以“自动化生产线设计与调试”课程为例[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(3): 214-218.
- [3] 朱正伟, 赵慧慧, 王其红. CDIO 在高校实验教学可持续发展中的应用探索[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(8): 231-234.
- [4] 罗晓东, 尹立孟, 王青峡, 等. 基于虚拟仿真技术的实验教学平台设计 [J]. 实验研究与探索, 2016, 35 (4): 104-107.
- [5] 郑超, 宋立彬, 王新洪, 等. 材料成型及控制工程专业虚拟仿真实验室的建设和实践 [J]. 实验技术与管理, 2019, 36 (3): 261-265.
- [6] 冯翠云. 智能制造虚拟仿真实验实训平台建设[J]. 中国冶金教育, 2021, 204(3): 71-74.

- [7] 雷振伍, 吴秀冰, 孙德辉, 等. 基于 PCS7 和 Simulink 的过程控制虚拟仿真实验平台开发[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(1): 135-139.
- [8] 危双丰, 庞帆, 刘振彬, 等. 基于 SIMIT 和 MCD 的并联机器人数字孪生实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(06): 135-141.
- [9] 张华健, 钱钧. 基 Simulink 和 Labview 的脉冲电源虚拟仿真实验平台[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(01): 138-142.
- [10] 全鸿伟, 胡华丽, 陈韶光, 等. 基于 S7-PLCSIM Adv 的工业机器人集成系统仿真技术的创新应用[J]. 装备制造技术, 2022, 6: 143 -147.
- [11] 王景良, 徐海黎, 朱天成. 轮转胶印机张力控制系统设计[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(8): 30-34.
- [12] 赵芸, 赵敏. 基于 PID 的造纸机收卷部恒张力稳定性自动化控制方法[J]. 造纸科学与技术, 2022, 41(4): 47-51.
- [13] 刘伟, 胡昂, 何勇. 基于 PLC 的恒张力恒速度卷绕控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(4): 117-121.
- [14] 张飞. 造纸机恒张力控制系统研究[D]. 南京: 中南大学, 2012.
- [15] 高兴泉, 肖新宇, 王子硕, 等. 基于 WinCC 的水箱液位控制系统实时仿真平台开发[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(01): 93-97.