

虚实融合的IC精确分拣定位实验教学系统设计

尚平*, 金城宇, 胡新泓, 李智涵

杭州电子科技大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年6月9日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月13日

摘要

集成电路(IC)装备研发在机械制造业中占据重要地位, 是提升技术水平和国际竞争力的重要因素。在校企协同育人的大背景下, 本文结合IC装备, 设计了一套虚实融合的IC精确分拣定位实验教学系统。该系统利用虚拟模型对机械设计与控制程序进行调试优化, 结合实验设备进行程序验证。本系统融合了光电传感、机电传动和电路设计等多学科知识, 旨在实现机械类专业多课程交叉实验教学。系统支持机电传动控制、虚拟程序调试、可编程控制器编程及IC精确分拣定位等实验。基于IC分拣机设计, 将工业实际应用场景引入实验教学; 虚实融合的教学方法有效满足了大规模学生群体的PLC程序调试实验需求, 为实验教学提供了高效灵活的解决方案。实测数据表明, 系统定位重复精度达 ± 0.15 mm, 虚实通信延迟低于5 ms, 虚实动作同步误差小于30 ms, 能够满足教学实验性能要求。

关键词

IC分拣, 精确定位, 虚实融合, 实验教学系统, 机电传动

Design of IC Precise Sorting and Positioning Experimental Teaching System with Virtual-Reality Integration

Ping Shang*, Chengyu Jin, Xinhong Hu, Zhihan Li

School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang

Received: June 9, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 13, 2026

Abstract

Integrated circuit (IC) equipment research and development occupies an important position in the machinery manufacturing industry, which is an important factor to improve the technical level and international competitiveness. In the context of university-industry collaborative education, this paper

*通讯作者 Email: shangping@hdu.edu.cn

文章引用: 尚平, 金城宇, 胡新泓, 李智涵. 虚实融合的 IC 精确分拣定位实验教学系统设计[J]. 交叉科学快报, 2026, 10(4): 945-956. DOI: 10.12677/isl.2026.104112

combines IC equipment to design an IC precise sorting and positioning experimental teaching system with virtual-reality integration. This system uses the virtual model to debug and optimise the mechanical design and control program, and combines the experimental equipment to verify the program. Also, this system integrates multidisciplinary knowledge of optoelectronic sensing, electromechanical transmission and circuit design, aiming at realising cross-curricular experimental teaching of mechanical majors. The system supports experiments such as electromechanical transmission control, virtual programme debugging, programmable controller programming and IC precise sorting and positioning. Based on the design of IC sorter, it introduces real-world industrial application scenarios into experimental teaching. The teaching method of virtual-real fusion effectively meets the experimental demand of PLC programme debugging of a large number of students, and provides an efficient and flexible solution for experimental teaching. Experimental data show that the system achieves a positioning repeatability of ± 0.15 mm, a communication delay under 5 ms, and a synchronous error between virtual and real movements under 30 ms, meeting the requirements of teaching experiments.

Keywords

IC Sorting, Precise Positioning, Virtual-Real Integration, Experimental Teaching System, Electromechanical Transmission

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

针对我国高校培养人才类型与各行业单位用人需求之间存在较大偏差的问题[1], 亟需深化产教融合的战略实施, 全面推广校企之间的协同育人模式, 以更有效地满足社会的用人需求, 优化人才培养结构[2]。其中, 集成电路(IC)装备研发在机械制造业中占据重要地位[3], 是提升技术水平和国际竞争力的重要因素, 也是中国需要重点突破核心技术瓶颈。目前 IC 产业逐渐转变为“IC 设计 + 硅片制造 + IC 制造 + IC 封测”的分工模式, 其中封测是半导体产业链中不可或缺的重要环节, 相对于其他几个阶段, 封测的技术含量相对较低, 适合本科生探索研究, 了解行业。而市面上的封测设备, 价格昂贵、环境要求高、专业性较强, 限制了其在高校教学中的应用[4]。对于高等学校来说, 需要思考建立怎样的教学平台为国家培养相关技术人才。本文以 IC 分拣机作为封测设备的切入点, 具体研究 IC 的精确分拣定位原理。利用虚拟仿真进行实验教学, 解决了传统实验设备和场地的局限, 为学生提供一个开放, 协作的环境[5]。结合实物样机, 紧密贴合生产实际, 有效提升学生的工程实践能力, 培养在机电控制与系统集成方面具备扎实技能的工程应用型人才。

具体设计了一种虚实融合的 IC 精确分拣定位实验教学系统[6]-[8]。该系统以 PLC 为控制核心, 运用虚拟仿真技术和数字孪生技术[9]-[11], 为学生提供了一个全新的学习平台。通过这一系统, 学生可以接触到目前主流的调试控制技术[12], 特别是精密控制技术[13][14], 了解工程应用案例, 从而更深入地理解并掌握相关知识。这一系统不仅有助于培养学生的创造力和求知欲, 更能激励他们运用工程思维分析和解决实际问题[15]。通过虚实融合的教学方式, 学生可以更加直观地了解 IC 精确分拣定位的工作原理, 从而为其未来的职业发展打下坚实的基础。

2. 实验系统工作原理与性能指标

2.1. 实验系统

系统整体包含执行机构、控制系统和虚拟验证三部分, 实验系统逻辑图如图 1 所示。首先在虚拟环

境中完成对模型的装配以及电路连接，随后进行 PLC 编程，在虚拟环境中完成调试工作，最后，将验证成功的程序导入 IC 精确分拣定位机构中，见图 2，对执行机构进行控制，完成实验。

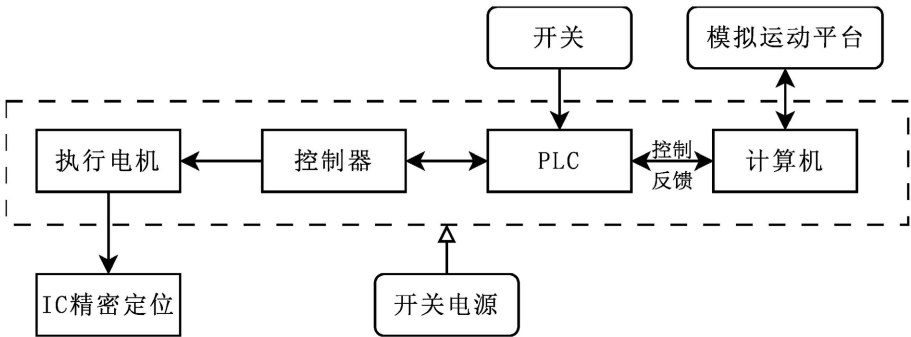


Figure 1. Logic diagram of the experimental system
图 1. 实验系统逻辑图

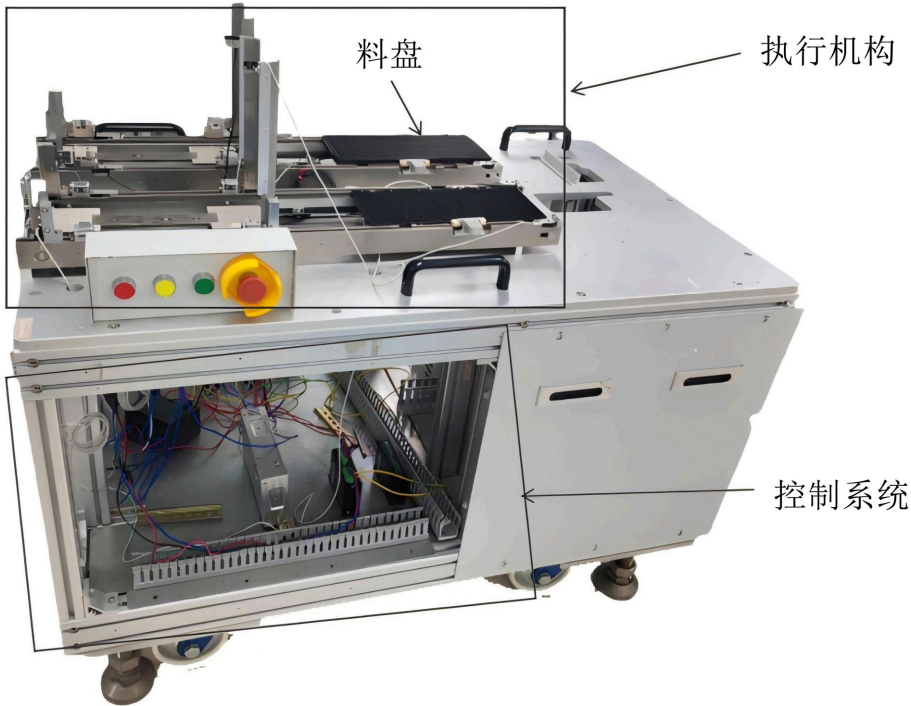


Figure 2. Structure diagram of IC precise sorting and positioning
图 2. IC 精确分拣定位结构图

IC 即为芯片，需要依托料盘存储，实现 IC 的精确分拣定位就是将托盘精确输送到指定位置，本实验系统的执行机构结构如图 3 所示，主要由托盘机构、分盘机构、料盘输送机构、料盘定位机构、料盘存储挡边五个模块组成。可以实现料盘下放，收集，锁紧，传送等功能。

控制系统基于时间敏感网络调试，通过不同协议 PLC 控制器对虚拟环境中设备数字模型的控制，实现对控制程序的调试与验证。虚拟验证模型采用 MCD 软件对于执行机构机型虚拟仿真的方式建立。

实验系统的具体工作原理如下所述：

1) 虚拟调试原理

本仪器的虚拟平台基于 Unity 引擎构建，将 SolidWorks 上建立的模型优化处理后的模型导入 Unity，

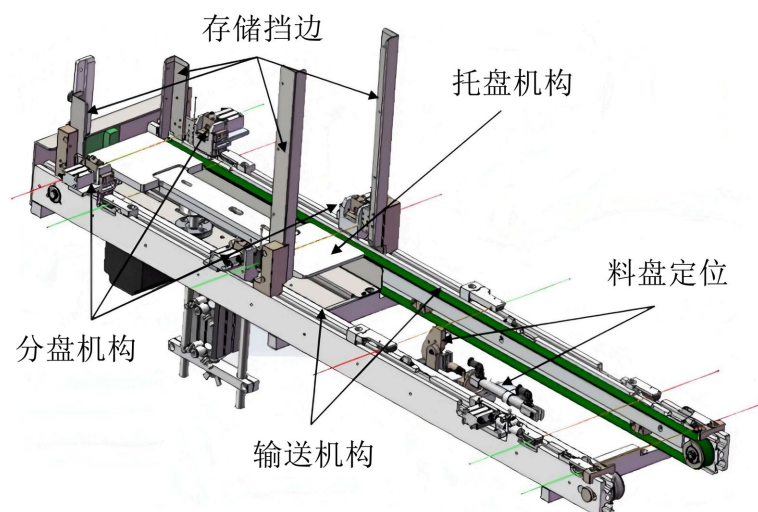


Figure 3. Actuator structure diagram
图 3. 执行机构图

并利用 CSharp 语言编写程序脚本, 实现 IC 精确分拣定位的运动学建模。电气部分建模利用控制器中的信号控制虚拟传感器, 实现对数字模型的控制, 而虚拟传感器则可以将信号输出到控制器中, 实现控制器程序对数字模型状态的感知。

基于运动学及电气部分的数字模型, 学生可以在软件上实现 IC 精确分拣定位结构搭建, 程序的编写及验证。

2) 虚实数据传输原理

本仪器以可编程控制器(PLC)作为核心外部控制单元, 运用基于以太网的 Socket 网络编程技术, 实现 PLC 数据的高效采集, 增强了与各类硬件设备的兼容性。针对控制器数据统一传输的难题, 数据传输系统实时将 PLC 数据转换为 OPC UA 标准格式, 确保数据无缝传输至 Unity 虚拟环境。针对西门子 S7-200SMART 型号 PLC, 本仪器特别开发了适配的设备驱动, 实现 PLC 数据的直接读写与现场 PLC 间的通信, 进而保障虚实数据的实时同步传输。

3) 精确分拣定位机构运动与感知部分工作原理

如图 3 所示, 目前实验中使用到的有托盘机构: 对料盘进行托举, 与分盘机构配合, 实现料盘单独下落以及料盘回收功能; 料盘输送机构由直线导轨、步进电机驱动部件和皮轮构成, 实现料盘的输送; 料盘储存挡边有四组 L 型挡边构成的“口”字形框框, 用于料盘的存储。

鉴于机构设计的复杂性, 本实验采取模块化策略, 将整体系统拆分为多个子实验进行深入探究。PLC 负责向伺服驱动器发送正向指令脉冲, 驱动伺服电动机牵引传送同步带旋转, 实现芯片的传输。当光纤传感器检测到料盘到达预定位置时, PLC 会向伺服驱动器发送停止指令脉冲。此外, PLC 还负责向气缸发送脉冲信号, 调控气缸在上、中、下三个关键位置的停留, 实现芯片的精确输送。

2.2. 实验系统的具体性能指标

本实验系统主要性能指标如下:

- ① 顶托气缸输出力 $F > 10 \text{ kg}$, 运动精度 0.2 mm ;
- ② 料盘输送机构长度 1000 mm ;
- ③ 虚拟调试时数据传输速度 $> 8 \text{ MB/s}$;
- ④ 传感器数据传输延迟 $< 5 \text{ ms}$ 。

3. 实验系统机械结构设计

3.1. 上料机结构

上料机结构由托盘、气缸、直线轴承、光轴、连杆、活动套、顶托气缸、分盘机构，储存挡边等组成。如图 4、图 5 所示，可以实现里料盘单独下落和回收等功能。

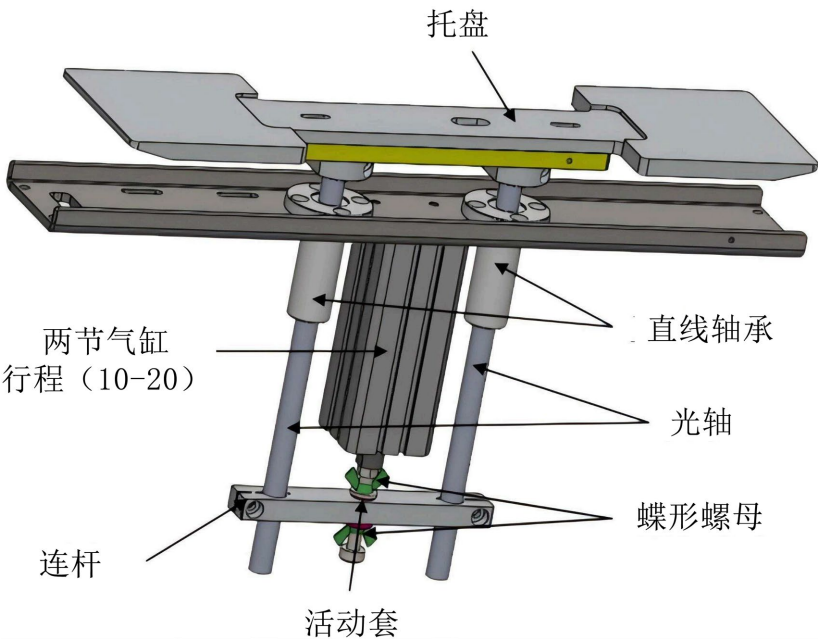


Figure 4. Structure diagram of the feeding mechanism
图 4. 上料机结构图

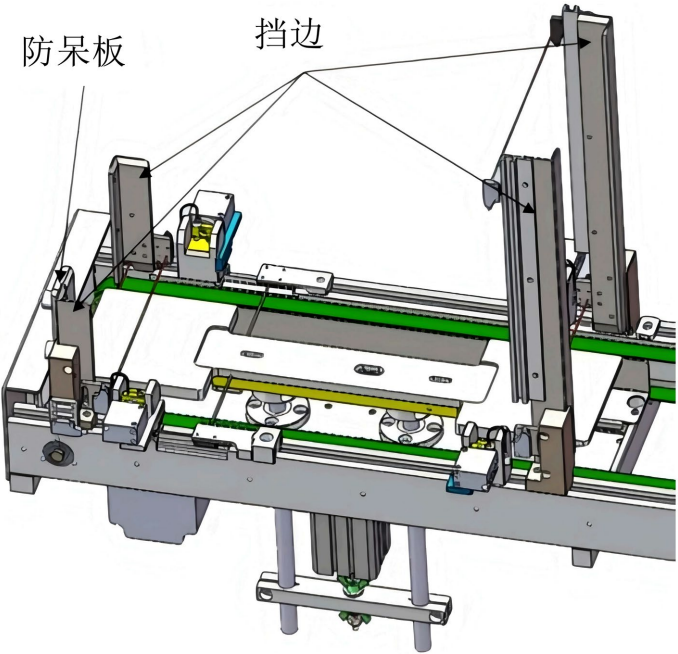


Figure 5. Structure diagram of the tray storage mechanism
图 5. 料盘存储机构图

引导槽通过螺栓与型材支架固定，对存放的料盘进行限位，保证料盘存放的方向与高度；直线轴承与光轴构成移动副，可以实现相对位移；顶托气缸推动托盘，沿光轴实现上下运动，根据实验需求，可以运动至上中下三个位置并停留；分盘检测由两组红外光纤传感器组成，检测料盘下落位置及在位情况，控分盘机构弹出与收回。

实现料盘下落具体工作流程如下：1) 托盘初始位置位于位置下，分盘机构处于弹出状态，顶托气缸将托盘托举至位置上，此时分盘机构上无料盘压力；2) 分盘机构收回，料盘可以顺利下落；3) 顶托气缸下降至位置“中”；位置“中”略低于分盘机构，但第二块堆叠的料盘高于分盘机构，随后分盘机构弹出，分离底端两块料盘。4) 顶托气缸下降至位置下，完成料盘单独下落至传输机构上。

3.2. 一维运动结构

所述料盘传输机构主要由输送电机、传动轴、输送带、圈皮带、光纤传感器等组成，见图6。输送电机固定在输送带下方，减小机器占地，放置误触电机；圈皮带摩擦转动传动轴，实现输送带运动；减速检测与到位检测均为光纤传感器，检测料盘位置，发送相应信号，实现芯片在机构中的精确运动。

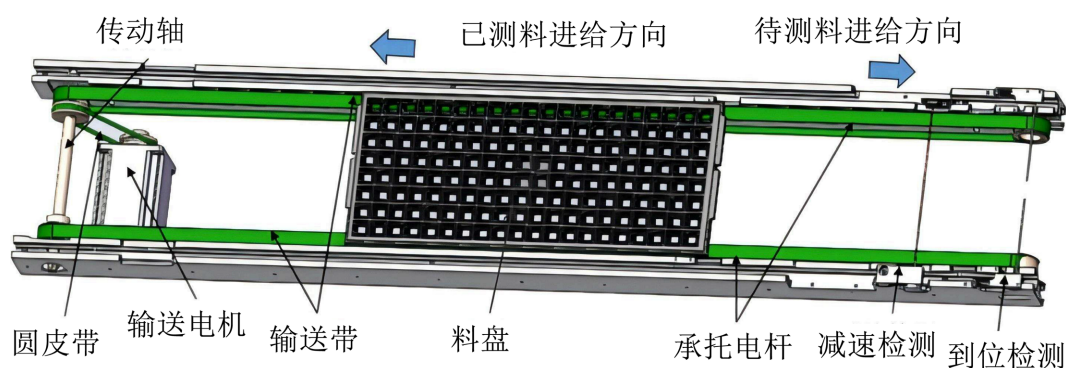


Figure 6. Structure diagram of the tray conveying mechanism

图 6. 料盘输送机构图

4. 虚拟实验平台设计

4.1. 虚拟环境构建

运动学建模剖析数字模型中运动副及其耦合关系的复杂交互，精确模拟设备在虚拟环境中的运动状态，能够实现对设备运动轨迹、速度和加速度等运动特性的精确预测与分析。电气行为建模则侧重于创建电机和传感器的数字模型，全面反映设备在虚拟环境中的电气特性与行为。

物理模型以 IC 精确分拣定位为核心进行设计，利用 Unity 虚拟引擎中的 Prespective 插件完成了在虚拟场景中的搭建工作。数字模型如图7所示。为了提高 Unity 引擎中模型的渲染效率，对 IC 精确分拣定位进行了简化设计，删除了在虚拟调试环节中并不起关键性作用的一系列外围组件，包括型材支架、线轨以及集线盒等，从而降低模型的复杂度，优化了其在虚拟环境中的表现。

IC 精确分拣定位的运动形式主要包括电机驱动的旋转运动、同步带驱动的平移运动以及气缸驱动的平移运动。在数字模型中，这些运动对应为旋转副和平移副。通过调整脚本中的相关参数，可以限定转动副和移动副的运动范围，实现动力学建模。这为后续的虚拟实验和性能分析提供了理论支持。

在电气行为建模中，首先创建电机，通过 DDCMotor.cs 脚本模拟其行为。同时，使用 DBeamEmitter.cs 脚本模拟传感器，通过状态变化判断虚拟组件是否到位。虚拟调试系统旨在预先在虚拟环境中调试控制程序。

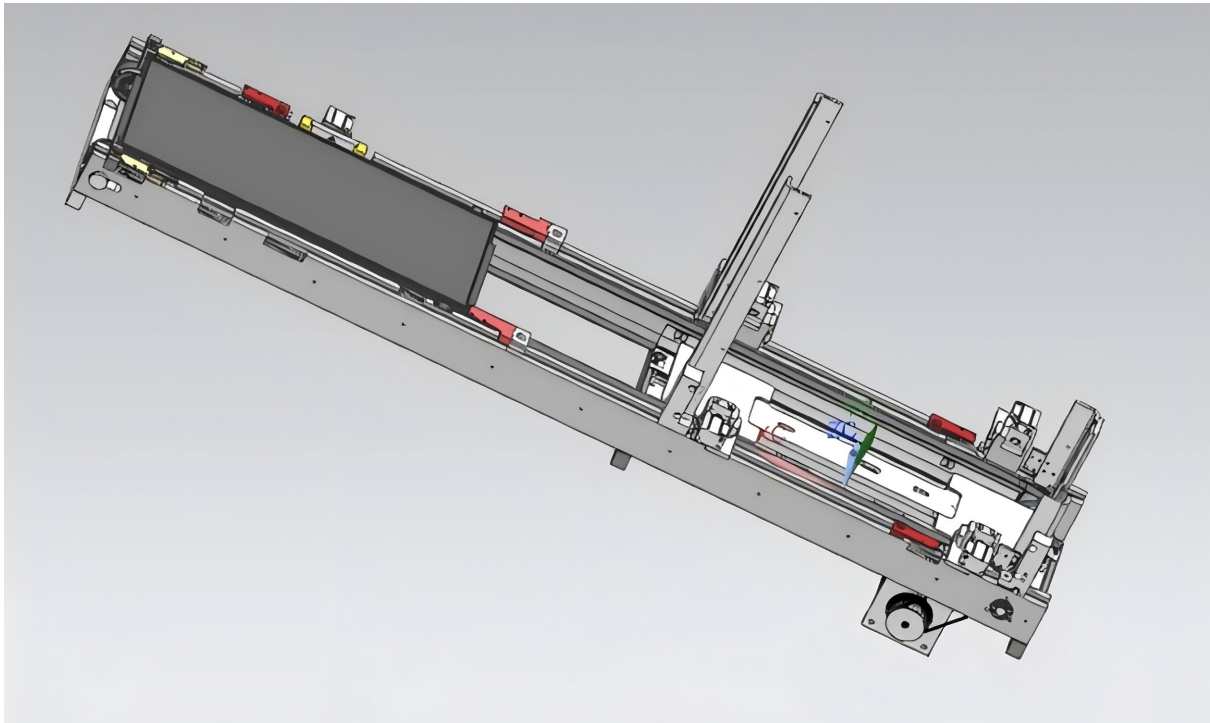


Figure 7. Digital model diagram
图 7. 数字模型图

4.2. 数据传输系统设计

为确保 PLC 数据与 Unity 虚拟环境之间的实时传输，本文构建了一套精细化、高效化的数据传输系统，见图 8，该系统在数据的实时性、准确性、完整性和传输稳定性方面进行了深入优化与提升。

基于 OPC UA 标准，设计了以 Linux 系统为基础的点对点时间敏感网络实验平台。融合了以太网控制器，实现了时间同步、时间感知整形器、时间感知队列和门控机制等核心功能，从而确保了数据传输的高效性与稳定性。为进一步提升数据传输性能，本系统将时间敏感网络与 OPC UA C/S 架构进行融合，既发挥了 OPC UA 标准在工业自动化领域的优势，又通过时间敏感网络实现了虚拟调试系统中数据的确定性传输。在底层数据交互模块的设计层面，采用基于 TCP/IP 协议栈的 Socket 编程接口，通过 TCP 连接的方式，实现了

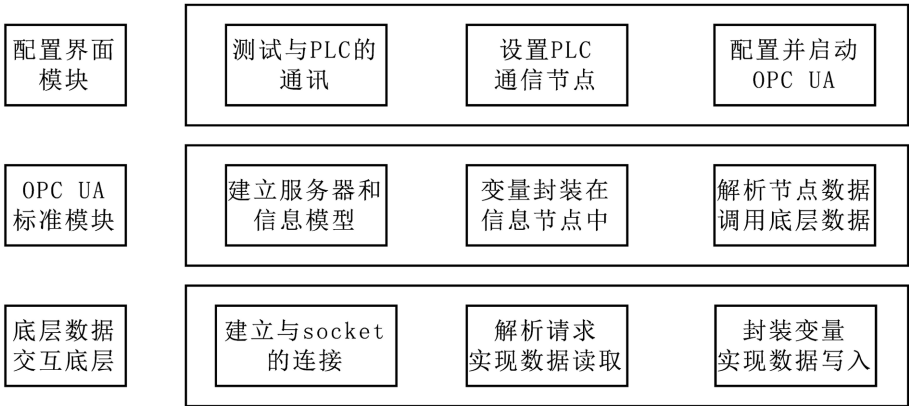


Figure 8. Functional module diagram of the data transmission system
图 8. 数据传输系统功能模块图

PLC 作为服务器与数据交互模块作为客户端之间的数据通信,从而实现了 PLC 中数据的精确读写。

本文提出的基于 OPC UA 标准的时间敏感网络实验平台,结合 TCP/IP 协议栈的 Socket 编程接口,实现了 PLC 数据向 Unity 虚拟环境的实时传输。

4.3. 实验设计

根据实验系统的组成与特点,可进行的教学实验如下:

1) 基于交流伺服电动机的机电传动控制实验。

本实验可与《电子精密机械设计》这一专业必修课程紧密结合,作为课程设计的重要实践环节,特别针对交流伺服电动机和气缸运动控制的实验提供深入指导。通过本实验系统的伺服系统,学生将有机会更深入地探究单相交流伺服电动机的内部结构、配线技巧、安装调试的完整流程以及其工作原理。本实验有助于增强学生对机电传动系统的感性认知,更能有效提升他们解决实际问题的能力,进而更加熟练地掌握机电传动领域的理论知识。

2) 基于可编程控制器 PLC 的编程实验。

本实验旨在进行可编程控制器(PLC)的深入研究。让学生了解 PLC 的基本组成、核心功能、工作方式以及软件应用等方面的知识。利用编程软件深入剖析梯形图的设计和编程技巧,并依托实验装置的硬件组成,完成基本指令的编程实践、电动机正反转实验、气缸运动实验以及传感器信号接收与电动机控制实验等。

3) 基于虚拟环境的机电联调实验

本实验可配合《3D 虚拟现实基础》专业核心选修课和《虚拟仿真》实践必修课。相较于传统的数字孪生虚拟仿真,本实验处理需要构建数字模型,更强调编程调试的实践应用,见图 9。学生需要实现 PLC 信号与虚拟环境之间的数据传输,确保两者之间的稳定连接。当虚拟环境中的调试取得成功之后,将编写的程序导入实际的 IC 精确分拣定位中,进一步验证其可行性与实用性。这一设计不仅有效地解决了学校实验室设备有限而学生人数众多的难题,更确保了每位学生都有机会亲身参与并验证程序的正确性与有效性,从而全面提升了学生的实践能力与问题解决能力。

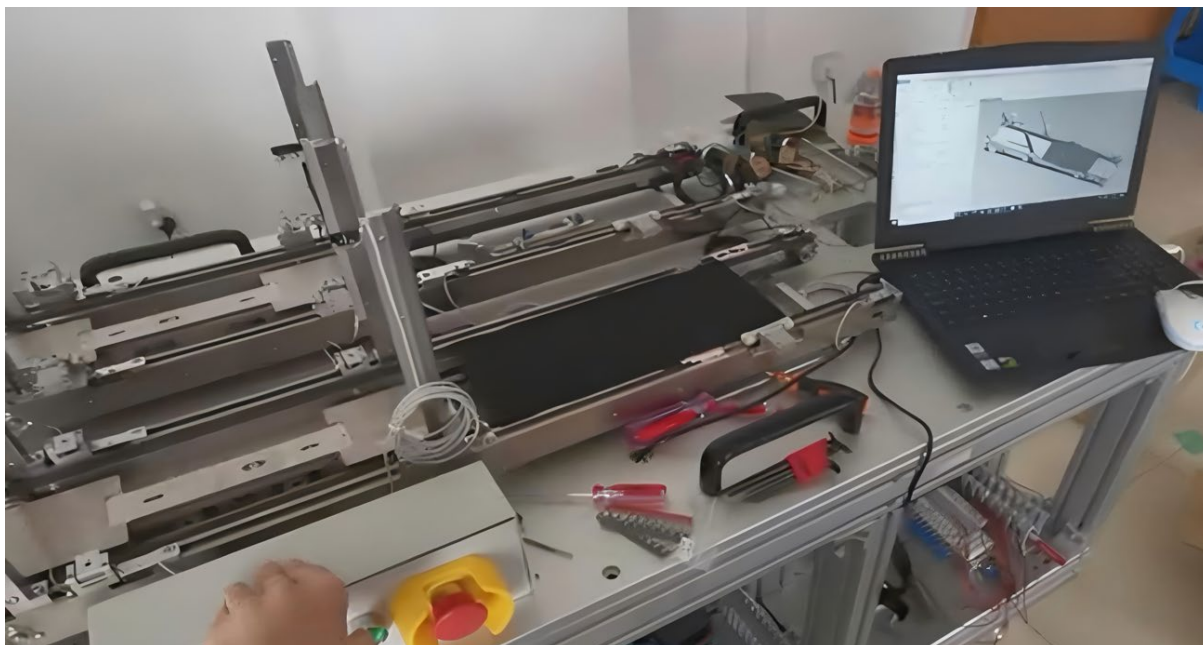


Figure 9. Example of mechanical and electrical joint debugging experiment

图 9. 机电联调实验案例

4) 基于信号反馈的精密机电控制实验

本实验的主要目的在于使学生全面理解信号反馈在机电控制系统中的作用原理、实现方式及其在提高系统精度和稳定性方面的关键作用。通过本实验，学生将掌握系统的基本构成、信号反馈机制的设计与实施、运动补偿激励实现等。本实验主要基于光电传感器反馈的信号，结合信号处理和理论，进行一系列处理，实现精密驱动与定位。通过本实验，学生将更深入地了解信号反馈在机电控制中的应用，掌握精密机电控制系统的设计与调试方法。

5) 基于 Unity 的虚拟模型搭建实验

本实验可配合《虚拟仿真》实践必修课进行课程设计。通过实际操作，学生将掌握 Unity 的基础操作、模型创建以及简单场景设计。运用所学知识，搭建一个完整的虚拟模型场景。通过本实验，学生将能够初步掌握 Unity 引擎的使用，掌握不同建模软件之间的文件转化与传输，了解数字孪生的基本概念。

5. 实验与结果分析

为验证本实验教学系统的性能与教学效果，设计了系统性能测试与教学评估两部分实验。

5.1. 系统关键性能指标实测

1) 定位重复精度测试。在未加载料盘的空载状态下，令料盘输送机构执行 20 次“回原点 - 正转 200 mm - 停止 - 反转回原点”的循环动作。使用激光位移传感器(基恩士 LK-G5000 系列，重复精度 $0.01\ \mu\text{m}$) 测量并记录每次到达目标位置时的实际位移，计算其最大偏差。实测数据如图 10 所示，20 次测量的最大偏差值为 $0.12\ \text{mm}$ ，定位重复精度达到 $\pm 0.15\ \text{mm}$ 以内，满足教学实验对精度的要求。

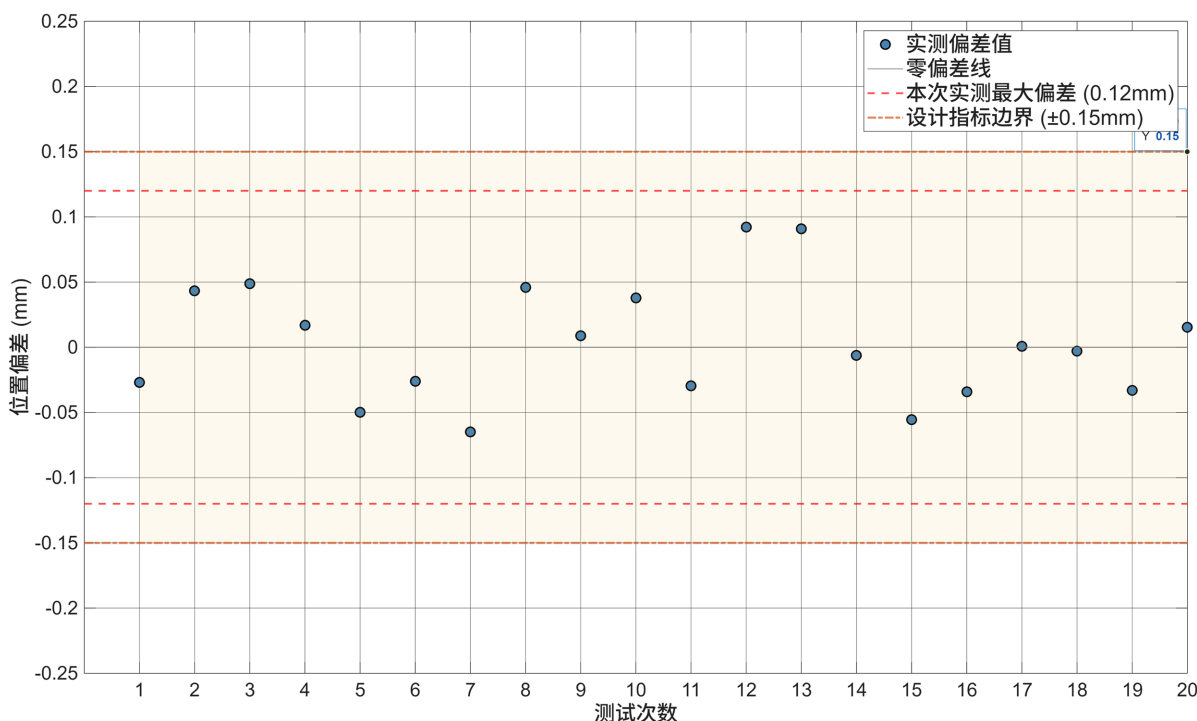


Figure 10. Positioning repeatability test data

图 10. 定位重复精度测试数据

2) 虚实通信延迟测试。在局域网环境下，通过 Wireshark 抓包工具，连续监测并记录 1 小时内从 PLC 端数据变化到虚拟模型端状态更新的时间间隔。图 11 展示了随机采样的 1000 个数据包的传输延迟分布，

平均延迟为 3.65 ms，最大延迟不超过 5 ms，满足了设计的时延指标，保障了虚实联动的实时性。

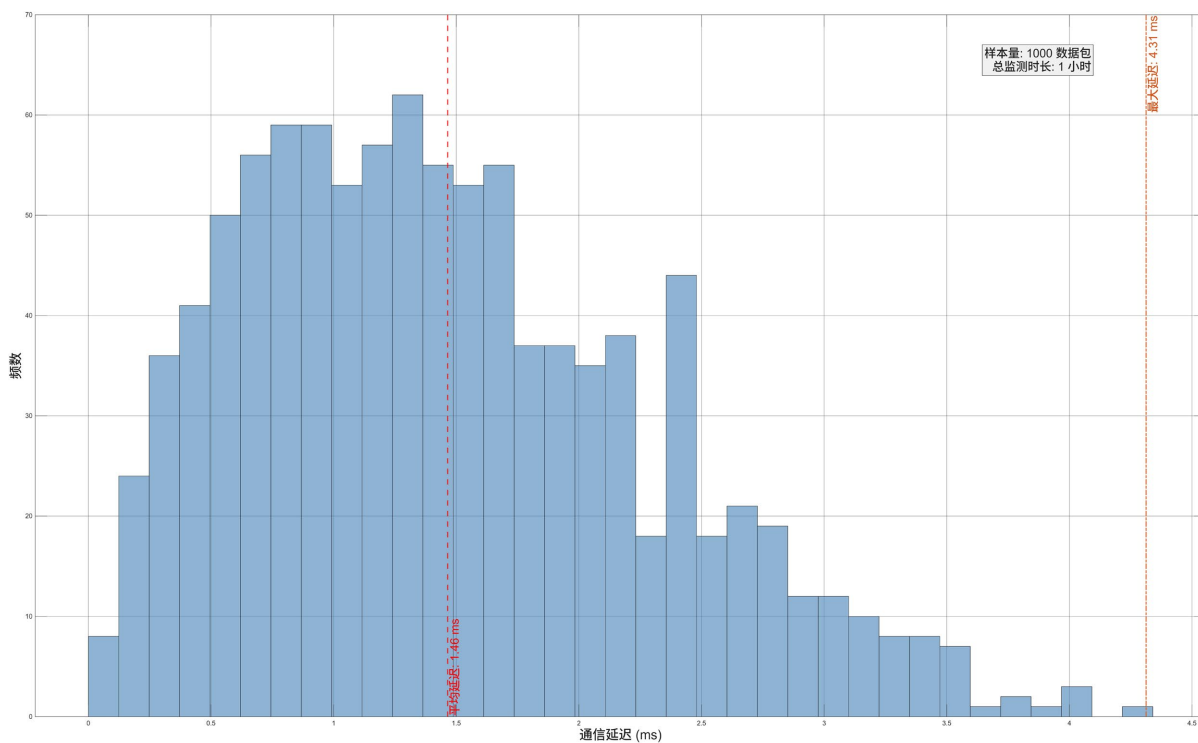


Figure 11. Histogram of communication delay distribution

图 11. 通信延迟分布直方图

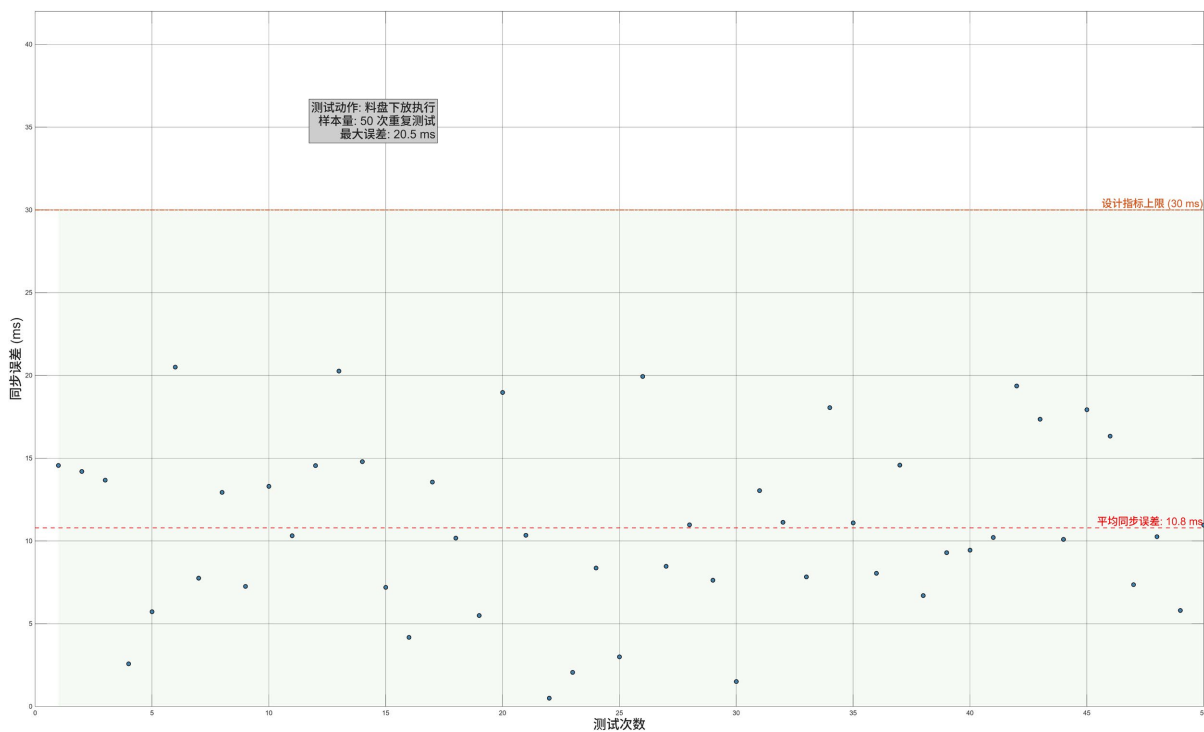


Figure 12. Synchronization error distribution of virtual-real motion

图 12. 虚实动作同步误差分布

3) 虚实动作同步误差测试。启动系统执行一个完整的分拣周期,同时录制实体设备与虚拟界面的运行画面。通过视频逐帧分析,对比实体气缸开始动作与虚拟模型对应动作开始的时刻。选取“料盘下放执行”这一关键动作,重复测试 50 次。结果(图 12)显示,虚实动作启动的同步误差均控制在 30 ms 以内,视觉上可实现流畅的同步,达到了良好的虚实融合效果。

5.2. 教学应用效果评估

为评估系统的教学效果,设计了包含前后测与问卷调查的评估方案。选取修读《机电传动控制》课程的 2 个班共 60 名学生作为被试,分为实验组(30 人,使用本系统)和对照组(30 人,使用传统 PLC 实验箱)。

1) 前后测成绩对比。在实验前后,分别对两组学生进行包含 PLC 编程、机电系统认知等内容的测试(满分 100 分)。前测结果显示,两组平均分无显著差异。后测结果显示,实验组平均分(85.3 分)显著高于对照组(77.8 分),且成绩标准差更小(实验组 6.5,对照组 9.2),表明采用本系统不仅能提升整体成绩,还有助于减少学生间的学习效果差异。

2) 问卷调查与访谈。对实验组 30 名学生进行问卷调查(回收有效问卷 28 份)。结果显示,92.8%的学生认为虚实融合的方式“非常有助于”或“有助于”理解抽象的控制逻辑;89.3%的学生同意该系统“激发了学习兴趣”;85.7%的学生表示,虚拟调试提升了他们程序编写的效率和信心。访谈中,学生普遍反映虚拟环境“安全且允许试错”,降低了他们对损坏设备的顾虑。

评估结果表明,该实验教学系统能够有效提升学生的 PLC 编程能力与机电系统理解水平,具有积极的实践教学效果。

6. 结语

本文结合 IC 装备,针对半导体封测设备设计了虚实融合的 IC 精确分拣定位实验教学系统,与普通教学实验设备相比,本系统具有以下特色:

1) 系统集成机电伺服驱动、PLC 控制与光电传感技术,并提供了可验证的性能指标:定位重复精度达 ± 0.15 mm,虚实通信延迟低于 5 ms,动作同步误差小于 30 ms。在此平台上,可完成机电传动、PLC 控制、光电传感等基础性教学实验。

2) 系统基于 Unity 平台构建了数字孪生模型,支持在虚拟环境下进行程序的多轮次预调试与模型优化,实现了“先虚后实”的实践流程。评估显示,这一方法有效应对了学生人数多、设备少的矛盾,在提升学生编程效率与信心方面效果显著。

3) 系统针对 S7-200SMART 等 PLC 开发了数据驱动,实现了虚实数据的实时同步。在对 60 名学生的对比教学实验中,使用该系统的实验组后测平均分(85.3 分)较对照组(77.8 分)有显著提升,证实了其教学有效性。

4) 当前系统也存在局限性。首先,虚拟模型对物理环境的摩擦、气动延时等非线性因素进行了简化,导致虚实动作的瞬态过程存在一定误差。其次,数据传输系统当前主要适配西门子 S7-200SMART,对三菱、汇川等其他主流 PLC 品牌的兼容性有待扩展。此外,系统的长期教学应用效果评估数据尚不充分。

5) 未来工作将重点围绕以下几点展开:① 提升模型保真度,在虚拟模型中引入更精确的物理参数,以缩小虚实动作的瞬态误差;② 开发通用性更强的多协议数据网关,实现对主流品牌 PLC 的广泛支持;③ 持续跟踪多轮次教学应用效果,收集更丰富的实验数据,用于指导系统的迭代优化。

基金项目

2025 年杭州电子科技大学高等教育教学改革研究项目“新工科背景下《精密机械测控综合实践》课

程 PBL 模式教学改革”(编号: YBJG202531)。

参考文献

- [1] 吴文强, 萧仲敏, 朱大昌, 等. “科产教融合”机器人实践课程教学改革探索[J]. 高教学刊, 2024, 10(8): 15-19.
- [2] 唐未兵, 温辉, 彭建平. “产教融合”理念下的协同育人机制建设[J]. 中国高等教育, 2018(8): 14-16.
- [3] 李华. 虚拟仿真实训技术在集成电路复合型教学中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 335-337.
- [4] 李严, 殷树娟, 邓伟, 等. 基于 CDIO 的集成电路工艺课程的理论与实践教学一体化研究[J]. 中国现代教育装备, 2023(23): 135-137+140.
- [5] 蒙臻, 陈星, 蔡均, 等. 科研项目导引式教学模式的创新研究——以“机电传动控制”课程为例[J]. 科教导刊, 2021(4): 132-133.
- [6] 陆文祥. 面向智能制造生产线的虚拟调试系统设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [7] 张琛, 黑晨菲, 李晶. 自动上下料系统的数字孪生模型构建与虚拟仿真调试方法[J]. 制造业自动化, 2024, 46(1): 45-50.
- [8] 刘奇. 基于时间敏感网络的虚拟调试系统设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [9] 梁广昱, 庞新宇, 李硕杰, 等. 数字孪生在控制课程虚拟仿真实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(3): 175-183.
- [10] 袁林江, 戚豪俊, 郑洁, 等. 基于虚实结合的工业机器人实验教学探索与实践[J]. 实验室科学, 2024, 27(1): 120-123.
- [11] 王二敏, 马前帅. 基于数字孪生的搬运机械手仿真实验平台设计[J]. 工业技术与职业教育, 2023, 21(6): 11-15+45.
- [12] 杨依领. 新工科背景下机电控制理论课程教学改革研究[J]. 高教学刊, 2023, 9(36): 49-52.
- [13] 张辛, 房东辉, 姜浩, 等. 机电控制探究性实验设计[J]. 电子测试, 2022, 36(10): 93-95+70.
- [14] 张爱英, 王明清. PLC 技术在机电控制系统中的应用研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(2): 47-48+72.
- [15] 何利华, 施锦磊, 冯凯, 等. 狭缝间液滴行为检测实验系统的开发[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(11): 146-151.