

基于 TIA Portal 的 PLC 三级递进仿真教学案例设计

——以机械手控制为例

吴桂文

重庆化工职业学院

摘要: 本文针对高职 PLC 课程教学中存在的“三高三难”问题,提出了基于 TIA Portal 平台的“手动—单次—循环”三级递进虚拟仿真教学案例设计框架,并以机械手为典型案例进行 HMI 人机界面设计、PLC 程序设计、仿真运行配置。该方案采用纯软件仿真技术,无需实体设备即可完成 PLC 与 HMI 的联合调试,具有成本低、易推广的显著优势。教学实践表明,该案例能够有效降低初学者的认知门槛与畏难情绪,显著提升 PLC 编程与调试能力,为高职 PLC 课程虚拟仿真教学提供了一种可复制、可推广的解决方案。

关键词: PLC; 虚拟仿真; 机械手; 教学改革

DOI: 10.65976/3105-4838.2026.03.002

可编程控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 作为工业自动化领域的核心控制设备,在智能制造、汽车制造、食品包装等现代工业生产中占据不可替代的地位。近年来,随着制造业数字化转型加速,具备 PLC 编程、调试与系统集成能力的高素质技术技能人才持续紧缺。在人力资源与社会保障部就业司发布的“百日千万招聘专项行动”数据中,仅 2026 年 4 月机械设备行业所涉及的 PLC 电气工程师、调试工程师等岗位的招聘需求已超过 10 万人次。在智能制造领域,PLC 编程工程师缺口已达 144 万人以上,供需比例约为 1:6^[1]。

PLC 相关课程是自动化类专业的核心课程,也是培养 PLC 技术技能人才的主要载体,在自动化类专业金课建设体系中占据核心地位。然而,当前 PLC 课程的教学实施面临职业教育领域普遍存在的“三高三难”问题,高投入、高损耗、高风险,以及难实施、难观摩、难再现。以传统 PLC 实验设备为例,单套设备成本往往高达数十万元,学生在操作时易因接线错误或程序失误造成设备损坏,由此导致实训教学难以大规模、高频次开展。

虚拟仿真技术作为破解“三高三难”的有效手段,近年来在职业教育 PLC 教学中得到广泛研究与应用。在联合仿真技术路线方面,陈祺等基于 Factory I/O 与 TIA Portal 开展了智能化生产实践教学研究,通过搭建货梯设备情景完成了实际生产应用场景下的技

能训练^[2-3];靳雷、位大亮基于 TIA Portal 和 Factory IO 构建了 PLC 虚拟仿真平台,利用 S7-PLCSIM Advanced 实现通信编程和模拟联调^[4]。在纯软件仿真方面,相关研究利用 TIA Portal 集成的 PLCSIM Advanced 与 HMI 仿真功能,实现了无需实体设备的 PLC 与人机界面联合调试^[5];有研究者基于 RobotStudio 与 TIA Portal,通过配置 S7-PLCSIM Advanced 与通信组件,成功构建了包含 HMI 触摸屏的工业机器人实训系统^[6];亦有学者基于 S7-1200 与 KTP700 触摸屏,在 TIA Portal 环境下实现了顺序控制系统的纯软件仿真^[7]。

现有基于 TIA 原生环境的研究多聚焦于技术可行性验证,专门针对“PLC+HMI”纯软件仿真教学案例的系统化设计研究仍相对不足。同时,现有案例普遍缺乏对学生认知规律和工程调试流程的系统化考量,在案例的层次性、递进性设计上存在明显缺口。为此,本文基于 TIA Portal 平台,利用其集成的 PLC 与 HMI 仿真功能,以工业机械手控制为典型案例,设计了一套“手动—单次—循环”三级递进的虚拟仿真教学案例,旨在为高职 PLC 课程虚拟仿真教学提供一种成本可控、易于推广、符合学习规律的设计方案。

一、虚拟仿真教学案例框架设计

根据认知负荷理论和工程调试的阶段性规律,仿真教学案例可依循“手动—单次—循环”三级递进的思路进行设计。

手动阶段仅涉及单一动作的点动控制,认知负荷

基金项目: 重庆化工职业学院 2025 年职业教育教学改革研究项目 (G202513),“数字孪生案例库 + 虚实协同”视域下《PLC 应用技术》金课建设研究与实践研究。

作者简介: 吴桂文,男,本科,高级工程师。

最低；单次阶段引入顺序逻辑，但流程固定，学习者可在有限范围内建立状态转移思维；循环阶段加入自动重复与计数逻辑，在前期基础上适度增加复杂度。这种从简单到复杂的层级递进，有助于学习者在每个阶段形成稳定的心智模型，再向更高层级迁移。

工业 PLC 系统的现场调试通常遵循“手动点检→单步调试→单周期运行→连续自动运行”的技术流程。手动点检用于核对 I/O 信号与执行机构的对应关系及动作方向；单步调试用于验证每一步转移条件的正确性；单周期运行用于检验完整工艺流程；连续自动运行则是最终的生产运行状态。将工程调试流程作为教学设计的技术主线，使学生在仿真环境中经历与真实项目一致的调试过程，有助于实现教学过程与生产过程的对接。其设计框架如表 1 所示。

三层模型并非简单的难度叠加，而是具有内在的学习逻辑递进关系。手动模式为后续层级提供基础保障。通过手动操作，学习者逐一验证每个执行机构的动作是否正常、限位信号的反馈是否正确。这一过程既是对硬件逻辑的核对，也是对 PLC 输入输出地址的确认，为后续编程奠定正确的前提条件。单次模式是核心能力培养环节。学习者需要将手动阶段验证过的动作，按照工艺要求的先后顺序组合成完整的动作序列。这一阶段的核心是理解“条件满足则执行下一步”的状态转移思想，这是 PLC 编程的关键能力。循环模式是综合应用与拓展。在单次模式正确运行的基础上，加入循环控制逻辑和计数器，使设备能够自动重复执行工作任务。这一阶段要求学习者综合考虑初始状态复位、循环次数控制、异常处理等工程实际问题，实现从“会编程”到“会设计”的能力跃升。

二、机械手仿真教学案例设计与实现

机械手是工业自动化领域中应用最广泛的执行机构之一，在物料搬运、工件装配、码垛堆叠、机床上下料等场景中承担着替代人工完成重复性、高精度作业的任务。其动作逻辑涵盖直线运动、抓取与释放等多种基本动作类型，控制上涉及点动、顺序控制、限位互锁、循环计数等典型 PLC 编程要素。将机械手作

为 PLC 课程的教学案例，能够以有限的复杂度涵盖指令系统、顺序功能图、人机交互等核心知识点，具有良好的教学代表性和可迁移性。现以三层模型为框架，依托 TIA Portal 平台对工业生产中常见的物料搬运机械手进行仿真设计。其系统架构包括 HMI 人机界面设计、PLC 编程设计及仿真运行配置 3 个部分。

（一）机械手 HMI 界面设计

1. 机械手 HMI 界面设计原则

机械手 HMI 界面是学生与其进行交互的窗口，其设计质量直接影响学生的学习体验和教学效果。设计思路应遵循“清晰反映工作步骤、界面简明易用、避免不必要复杂度”的基本原则。

（1）核心关注工作步骤可视化。机械手控制的核心在于动作顺序的理解与掌握，因此 HMI 设计的首要任务是清晰呈现每一步动作的执行状态。本案例在 HMI 界面中设置机械手动作示意区，用简化的几何图形示意机械手的当前姿态。通过图形对象的颜色变化、位置移动和可见性属性，动态反映“下降”“上升”“夹紧”“松开”“伸出”“缩回”等动作状态。这种示意性表达虽不具备 3D 仿真的逼真视觉效果，但能够准确传递每个步骤的动作信息，且避免了复杂建模带来的开发成本和认知干扰。

（2）界面简明，降低操作门槛。过于复杂的界面设计容易引发学生的畏难情绪，导致其将注意力分散在界面操作的“摸索”上，而非集中于控制逻辑的理解。为此，本案例采用分区布局策略，将 HMI 界面划分为四个功能区域：机械手动作示意区、模式选择与状态监控区、手动操作按钮区、流程控制与参数设置区。各区域功能边界清晰，学生在操作时能够快速定位所需控件。同时，按钮采用直观的图标加文字标注，避免使用晦涩的专业缩写。

（3）聚焦逻辑呈现，不追求 3D 效果。本案例不采用 3D 建模或 Factory I/O 等第三方仿真软件，原因如下：一是 3D 建模需要额外的软件授权和学习成本，不利于方案推广；二是 3D 效果的“炫技”成分可能分散学生对 PLC 控制逻辑这一核心教学目标的关注；

表 1 虚拟仿真案例框架设计表

层级	工程对应	PLC 编程要点	HMI 交互特征	学习目标
手动模式	手动点检、I/O 核对	点动控制、自锁互锁、限位保护	独立的点动按钮、状态指示灯	熟悉 I/O 映射关系，掌握基本指令与安全互锁
单次模式	单周期调试	顺序功能图、步进转移、状态保持	“启动”按钮、当前步骤高亮显示	理解顺序控制逻辑，掌握状态转移编程方法
循环模式	连续自动运行	循环跳转、计数器、自动复位	循环次数设定、当前次数显示	掌握循环与计数组合逻辑，具备完整流程设计能力

三是简化的 2D 示意足以完成“手动—单次—循环”三层递进的教学任务。因此, HMI 设计坚持“够用即可”的原则, 将开发资源集中于逻辑功能的实现与人机交互的流畅性。

2. 机械手 HMI 界面设计流程

HMI 设计遵循“先解构、后整合”的流程, 具体步骤如下。

(1) 机械手部件解构。在绘制 HMI 界面之前, 首先对机械手的组成部件进行解构分析。本案例中的机械手可分解为五个基本部件: 底座(固定基座)、水平伸缩臂(左右移动)、垂直升降臂(上下移动)、气动手爪(夹紧与松开)以及工件(被搬运对象)。每个部件均有其独立的状态变量: 水平伸缩臂对应“伸出”与“缩回”两种状态, 垂直升降臂对应“上升到位”“下降到位”与“中间移动”三种状态, 气动手爪对应“夹紧”与“松开”两种状态, 工件对应“未被抓取”“抓取中”“已释放”三种状态。解构完成后, 为每个状态变量分配对应的 PLC 存储地址(如 M 或 DB 块中的位变量), 确保 HMI 图形对象与 PLC 程序变量实时关联。

(2) 图形对象绘制与状态绑定。根据解构结果, 在 TIA Portal 的 HMI 画面编辑器中绘制机械手示意图形。图形对象选用基本图元库中的矩形、圆形及线条组合而成。以垂直升降臂为例, 绘制一个垂直方向的矩形条, 将其“Y 坐标”属性关联至 PLC 中的一个整型变量, 通过改变坐标值模拟升降运动; 以气动手爪为例, 绘制两个对称的小矩形, 将其“可见性”属性分别关联至“夹紧”与“松开”两个布尔变量, 通过切换显示不同的图形对象来模拟手爪的开合动作。这一方法简单高效, 无需编写复杂的脚本代码。

(3) 控件布局与功能验证。完成图形绘制后, 依次放置模式选择按钮、手动操作按钮、状态指示灯、数值输入输出域等控件, 并逐一关联 PLC 变量。设计完成后, 启动 TIA Portal 集成仿真环境, 逐项测试各控件的功能响应是否正常, 确保 HMI 界面与 PLC 程序的通信稳定流畅。

3. 机械手 HMI 界面实现

以上述 3 原则为指导, 按“先解构、后整合”的流程对机械手 HMI 界面设计, 如图 1 所示。

(1) 机械手示意图形。占据界面主要篇幅, 以 2D 几何图形组合呈现机械手的整体结构及各部件的当前状态。通过图形位置移动、颜色变化等方式直观展示动作过程, 帮助学生将程序中的逻辑指令与实际机械动作建立对应关系。

(2) 模式选择控件。位于界面左侧上部, 包含

三个按钮: “手动模式”“单次模式”“循环模式”。当前激活的模式以高亮颜色显示, 模式切换时系统自动触发相应的状态复位逻辑。

(3) 按钮控件。根据模式的不同, 按钮控件分为两类。手动模式按钮: 六个点动按钮(下降、上升、夹紧、松开、伸出、缩回), 每个按钮按下时对应的气缸动作, 释放时停止自动模式按钮: 启动、暂停、恢复、停止、复位等流程控制按钮

(4) 状态显示要素。包括限位开关状态指示灯(上限位、下限位、左限位、右限位、手爪夹紧/松开限位)、手臂移动位置显示、当前循环次数显示等。状态显示要素帮助学生实时了解系统当前所处的状态, 便于进行调试和故障排查。

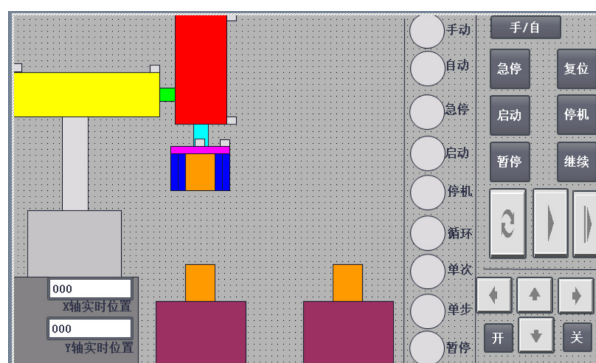


图 1 机械手 HMI 界面图

(二) 机械手 PLC 编程设计

PLC 程序设计应遵循规范的工程实践流程, 即“功能分析→程序设计→调试优化”三步法。首先, 对控制任务进行功能需求分析, 明确输入输出信号、动作流程及安全保护逻辑; 其次, 依据分析结果进行模块化程序设计, 合理划分功能模块并编写相应代码; 最后, 通过仿真调试验证程序的正确性与可靠性, 根据调试结果进行优化完善。该流程符合工业现场 PLC 系统开发的标准作业规范, 有助于培养学生严谨的工程思维和良好的编程习惯。

1. 机械手仿真案例功能分析

从编程视角出发, 需将机械手的工艺流程和控制需求转化为 PLC 程序的功能规范, 明确输入输出信号、状态转换条件及模式切换逻辑。

(1) 机械手动作流程分析。机械手单次工作循环包含八个顺序步骤: 初始状态检测—下降取料—夹紧工件—上升复位—水平伸出—下降放料—释放工件—上升复位—水平缩回。每个步骤的转移需依赖限位开关信号(如上限位、下限位、左限位、右限位)及定时器延时信号。程序中需为每一步定义唯一的标志, 并通过条件判断实现步骤间的顺序切换。

(2) 三层模式的功能需求。依据“手动—单次—循环”三层递进设计框架，将案例功能需求划分为三个等级，对应不同的教学阶段和学习目标。各等级功能需求设计如表 2。

2. 机械手 PLC 编程设计

模块化编程是工业 PLC 项目开发的标准范式，其工程意义在于提高程序可读性与可维护性，便于团队协作开发，实现功能复用降低重复编码，同时简化调试排错流程。针对高职学生初学 PLC 时容易陷入“全写在一个程序块”的惯性思维问题，引入模块化编程方式有助于培养其结构化编程意识，形成“分而治之”的问题解决能力。本案例中手动、单次、循环三层功能既有独立逻辑，又共用底层驱动（如气缸动作），模块化设计可避免重复编写相同代码，降低程序出错概率。具体设计如表 3。

通过模块化编程，学生能够完成一个模块即验证一个模块，从而获得阶段性成就感，降低学习挫败感。因此，模块化编程既是工程规范的要求，也是提升教

学效果的有效手段。

(三) 仿真运行配置

本案例采用纯软件仿真方案，无需任何实体 PLC 或硬件设备，所有开发与调试工作均在 TIA Portal 集成环境中完成。PLC 仿真器与 HMI 仿真器之间通过 TIA Portal 内部的虚拟以太网自动建立连接。配置时，需在 HMI 连接设置中将“在线访问路径”指向 PLCSIM，设置相同的 IP 地址网段（如 PLC 为 192.168.0.1，HMI 为 192.168.0.2），系统即可自动完成通信握手，无需硬件驱动或外部网络支持。仿真运行时，在 TIA Portal 项目树中，依次启动 PLC 仿真与 HMI 仿真，将程序下载至 PLCSIM，点击 HMI 仿真器的运行按钮，即可进入联合调试状态。学生可在 HMI 界面上进行操作，实时观察 PLC 程序变量的变化及机械手示意动作的反馈。

三、机械手仿真案例教学实施设计

本案例采用“线上+线下”混合式教学模式，以问题导向学习（PBL, Problem-Based Learning）为教学方法，将“手动—单次—循环”三层递进设计贯穿

表 2 “手动—单次—循环”三级功能需求表

模式	工程阶段	功能需求
手动模式	手动点检阶段	1. 各气缸的点动控制：分别设置“下降”“上升”“夹紧”“松开”“伸出”“缩回”六个点动按钮； 2. 限位开关状态监测：在上限位、下限位、左限位、右限位及手爪夹紧/松开位置设置状态指示灯； 3. 互锁保护：同一气缸的动作方向不可同时触发（如上升与下降互锁）；手爪夹紧与松开互锁； 4. 急停保护：设置急停按钮，按下后所有动作停止
单次模式	单周期运行阶段	1. 启动控制：按下“启动”按钮后，机械手自动完成一个完整的取料—搬运—放料工作循环 2. 状态监控：HMI 界面实时显示当前执行的步骤序号及步骤名称 3. 暂停与恢复：设置“暂停”按钮，按下后当前步骤暂停，按下“恢复”后继续执行 4. 单步执行：设置“单步”按钮，每按一次执行下一步，便于分步调试与教学演示
循环模式	连续自动运行阶段	1. 连续循环：单次模式完成后自动开始下一个工作循环，无需重复按启动按钮 2. 停止控制：设置“停止”按钮，完成当前循环后停止运行 3. 复位功能：在任何模式下按下“复位”按钮，机械手自动返回初始状态

表 3 程序块功能表

程序块	功能
主程序块	负责模式选择判断及对应功能块的调用
手动控制功能块	实现点动控制、互锁逻辑及限位保护
单次控制功能块	基于顺序功能图实现单周期流程控制
循环控制功能块	在单次控制基础上集成循环计数与自动重启逻辑
公用功能块	封装各气缸动作的驱动逻辑，供各模式调用

教学全过程。

(一) 线上环节 (课前与课后)

课前,教师通过在线教学平台发布机械手控制项目任务书及学习资源(包括TIA Portal操作微课、机械手工艺流程动画、三层功能需求说明文档)。学生自主完成PLC编程基础知识的复习与预习。课后,学

生利用TIA原生仿真环境自主完成程序的修改与拓展练习,通过平台提交程序截图与调试视频。

(二) 线下环节 (课中)

线下课堂以项目小组形式开展,按照“手动—单次—循环”三个递进阶段分步实施。实施过程如表4。

表4 “手动—单次—循环”三级教学实施表

阶段	实施内容
手动模式编程与调试	各小组根据任务书要求,编写手动控制程序。教师设置故障情境(如限位开关信号异常),引导学生排查互锁逻辑错误。
单次模式编程与调试	在手动模式基础上,学生完成顺序功能图设计与单周期流程编程。教师组织小组间交叉调试,相互验证程序逻辑的正确性。
循环模式编程与拓展	完成循环控制及计数功能后,教师提出拓展问题(如“如何实现循环过程中急停后从断点继续运行”),各小组进行方案讨论与程序改进。

四、小结

本文针对高职PLC课程教学中存在的“三高三难”问题,提出了基于TIA Portal平台的“手动—单次—循环”三级递进虚拟仿真教学案例设计框架,并以机械手为典型案例进行HMI人机界面设计、PLC程序设计、仿真运行配置。该方案采用纯软件仿真技术,无需实体设备即可完成PLC与HMI的联合调试,具有成本低、易推广的显著优势。教学实践表明,该案例能够有效降低初学者的认知门槛与畏难情绪,显著提升PLC编程与调试能力,为高职PLC课程虚拟仿真教学提供了一种可复制、可推广的解决方案。

参考文献:

[1]周莉,车良有,董泽豪,等.基于RobotStudio与TIA Portal的工业机器人实训设备联合仿真系统设计[J].电工技术,2024(24):33-38.

[2]陈祺,夏燕玲,万蕾.基于Factory I/O的智能化生产实践教学研究[J].2025(12):135-139.

[3]Andrzejewski G,Zajc W,Artur Karasiński,etal.Simulation of a sequential system using the S7-1200 platform and touch panel KTP700 in the context of technical education[J].Procedia Computer Science,2024,246(000):4833-4842.

[4]靳雷,位大亮.基于TIA Portal和Factory IO的PLC虚拟仿真平台[J].电工电气,2025(09):42-45.

[5]杨婷婷,刘春霞,金建.基于PLC的8盏流水灯控制程序与仿真[J].科技与创新,2025(04):50-52.

[6]杨轶霞.基于PLC和力控组态软件的搬运机械手模拟仿真系统设计[J].中国设备工程,2024(05):152-154.

[7]谢小四,刘军,庄琳.基于TIA Portal的HMI+PLC虚拟仿真探究[J].现代制造技术与装备,2024,60(09):216-220.