

电力生产过程 PLC 设备国产化替代策略与路径研究

陈小波¹ 邵全¹ 跟家帅¹ 杨文涵² 弹尚文²

1. 国家电投集团东北电力有限公司本溪热电分公司, 辽宁 本溪 117008

2. 中电投东北能源科技有限公司, 辽宁 沈阳 110179

[摘要]可编程逻辑控制器 PLC 是电力生产控制系统的神经中枢, 当前我国电力行业 80%以上的关键 PLC 仍依赖西门子、施耐德、ABB 等外资品牌, 存在供应链断供、网络安全、运维成本高等风险。随着电力行业的快速发展和国家信息安全需求的提升, PLC 设备的国产化替代已成为趋势, 本文通过研究电力生产过程中 PLC 设备国产化替代的策略与路径, 设计开发了一套自动化测试系统平台, 实现了 PLC 产品的自动化测试。研究结果表明自动化测试具有可行性, 本文为提高可编程逻辑控制器 PLC 产品的测试效率以及降低维护成本提供了理论支撑, 为实现 PLC 设备的自主可控, 提升电力系统的安全性和可靠性, 以及电力行业高质量发展提供保障。

[关键词]电力生产; PLC; 自主可控

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17716

中图分类号: TM623

文献标识码: A

Research on the Domestic Replacement Strategy and Path of PLC Equipment in Power Production Process

CHEN Xiaobo¹, SHAO Quan¹, ZONG Jiashuai¹, YANG Wenhan², MI Shangwen²

1. Benxi Thermal Power Branch of SPIC Northeast Electric Power Co., Ltd., Benxi, Liaoning, 117008, China

2. China Power Investment Northeast Energy Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110179, China

Abstract: Programmable logic controller (PLC) is the nerve center of power production control system. Currently, more than 80% of key PLC in Chinese power industry still rely on foreign brands such as Siemens, Schneider, ABB, etc., which poses risks such as supply chain interruption, network security, and high operation and maintenance costs. With the rapid development of the power industry and the increasing demand for national information security, the localization replacement of PLC equipment has become a trend. This article studies the strategies and paths of localization replacement of PLC equipment in the power production process, designs and develops an automated testing system platform, and realizes the automation testing of PLC products. The research results indicate that automated testing is feasible. This article provides theoretical support for improving the testing efficiency of programmable logic controller (PLC) products and reducing maintenance costs. It also guarantees the autonomous controllability of PLC equipment, enhances the safety and reliability of the power system, and ensures the high-quality development of the power industry.

Keywords: electricity production; PLC; self-developed and controllable

引言

随着我国电力行业的快速发展, 自动化控制设备在电力生产过程中的作用日益凸显。作为工业控制的核心设备, 可编程逻辑控制器 PLC 在发电、输电、配电等环节中发挥着关键作用。然而, 长期以来我国电力行业的高端 PLC 设备主要依赖进口, 存在供应链安全和技术受制于人的风险。在当前国际形势下, 推进 PLC 设备的国产化替代具有重要的战略意义。

1 技术背景

1.1 PLC 设备在电力生产中的应用现状

PLC 设备在电力生产过程中扮演着不可替代的角色。在火电厂中, PLC 系统负责锅炉控制、汽轮机监控等重要功能; 在水电站中, PLC 设备用于水轮机组的启停控制和状态监测; 在新能源领域, PLC 系统是风电场和光伏电站控制系统的核心部件。这些应用场景对 PLC 设备

的可靠性、实时性和环境适应性提出了极高要求。

当前我国电力行业 PLC 设备市场呈现外资品牌主导的格局。西门子、施耐德、罗克韦尔等国际巨头占据了大部分市场份额, 特别是在大型发电机组和关键控制系统中。这些外资品牌凭借成熟的技术、完善的生态和长期积累的品牌优势, 形成了较高的市场壁垒。相比之下, 国产 PLC 设备主要应用于中小型项目和辅助系统, 在高端应用领域仍存在明显差距。

1.2 PLC 设备国产化替代面临的挑战

PLC 设备国产化替代面临多方面的挑战。技术层面, 国产 PLC 在处理器性能、通信协议兼容性、软件生态等方面与国际领先水平存在差距。特别是在高可靠性设计和极端环境适应性方面, 还需要持续的技术积累和验证。市场层面, 用户对国产设备的信任度不足, 存在“不敢用、不愿用”的心理障碍, 同时外资品牌建立的生态系统也形

成了较高的转换成本。此外，标准体系不完善也是制约国产化替代的重要因素。目前电力行业自动化控制标准多参照国际标准制定，国产 PLC 设备在标准符合性和互操作性方面面临挑战。产业链协同不足也影响了国产化进程，芯片操作系统等关键基础部件仍依赖进口，制约了国产 PLC 的自主可控程度。

1.3 PLC 设备国产化替代策略

针对上述挑战，本文提出分阶段实施 PLC 设备国产化替代的策略。在初期阶段，可在辅助系统和中小型项目中推广国产 PLC，积累应用经验。中期可逐步向主控系统和大型项目扩展；最终实现全领域、全流程的国产化替代。这一过程需要配套的技术研发路径，重点突破高性能处理器设计、实时操作系统开发、工业通信协议兼容等关键技术。标准体系建设是国产化替代的重要保障，应加快制定符合国情的电力行业 PLC 技术标准，推动国产标准国际化，增强在国际标准制定中的话语权。同时加强产业链协同，推动芯片、操作系统、软件开发工具等基础环节的自主创新，构建完整的国产 PLC 产业生态。

2 PLC 设备国产化替代的实施路径

2.1 测试平台设计

本测试平台制定一套统一的高性能 PLC 评价指标，用量化结果直观展示国产 PLC 的功能强弱和性能差距，帮助用户快速判断和选型。同时平台用软件构建出与真实工业现场等效的虚拟被控对象（数字孪生），低成本、高效率地复现整个控制系统环境。

2.2 系统总体设计

此测试平台运用的是四层分布式架构来展开设计工作的。在传统工业控制系统所具备的现场设备层、控制采集层以及监控层这三层的基础之上，又极具创新性地融入了平台管理层，进而搭建起一个完整的闭环测试生态系统。该系统借助统一的测试管理核心来对多套 PLC 控制系统加以协同管控，各个层级彼此间依靠标准化测试案例、统一通信协议以及实时数据流来达成高效的信息交互。系统总体架构如图 1 所示。

平台管理层充当着系统的指挥中枢这一角色，它将综合控制平台以及指标分析系统予以集成起来，进而肩负起测试任务调度、资源分配还有结果评估等一系列的核心管理方面的职能。测试监视层设置了三套相互独立的测试执行环境，而每一套环境当中都涵盖了 PLC 编程平台、运行监视器以及测试执行器这几部分，其主要负责测试案例的管理工作、程序的下装操作以及对工艺过程实施监控等相关事宜。控制采集层是由三套处于并行运行状态的 PLC 设备所组成的，这些设备各自分别去执行控制算法、驱动相应的执行机构并且采集现场的数据信息。现场设备层借助三组虚拟仿真系统来构建起一个高保真的测试环境，从而能够精准地模拟出实际工业场景里面设备的行为状况

以及工况特性方面的相关内容^[1]。

这种分层架构的设计方式，一方面确保了各个功能模块能够保持独立的状态，另一方面借助标准化接口达成了系统的高度集成效果，从而给自动化测试给予了稳固可靠的平台方面的支撑。

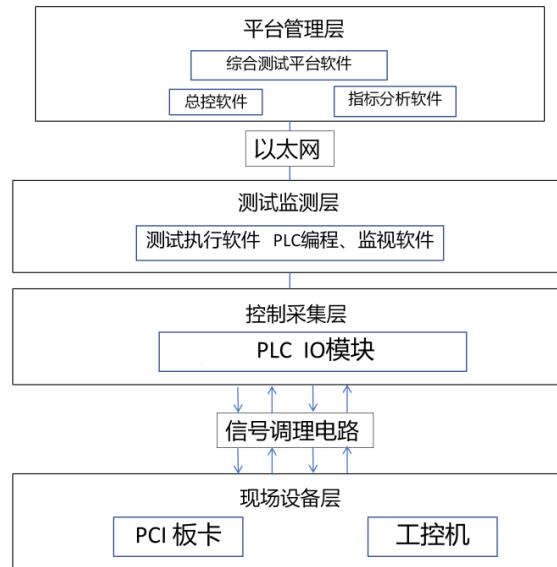


图 1 系统总体架构

2.3 硬件设计

系统硬件架构由综合测试平台、PLC 控制系统和等效仿真系统三大核心组件构成。

(1) 综合测试平台在系统当中充当着中枢控制单元的角色，其选用的是工业级计算机架构，并且还配备了多通道数据采集卡以及高速以太网通信模块。该平台借助专用的人机交互界面来达成对测试流程的全链路管理目的，能够支持测试用例实现动态加载，同时也可对测试参数做到实时配置，并且还能对测试结果完成自动采集以及分析操作。其核心功能涵盖了测试方案管理、测试任务调度、数据可视化展示以及测试报告生成等方面。

(2) PLC 控制系统有着三套彼此独立的控制单元，在这当中有两组选用的是国产高性能 PLC，其型号分别为 NA400 以及 LK210，而作为对照的那一组则采用的是西门子 S7-400PLC。每一个控制单元都配备了完整的 I/O 模块、通信模块还有专用的编程软件，由此便形成了一条完整的控制回路。凭借模块化的设计方式，该系统能够很好地支持不同类型 PLC 实现快速的接入操作以及切换操作，进而确保测试平台具备通用性以及扩展性这两个方面的特性。

(3) 等效仿真系统是以 PCIe 总线架构为基础来搭建的，其运用了 NI 公司所出产的高精度数据采集卡，同时结合 LabVIEW 虚拟仪器平台，进而构建出一个设备仿真的环境，这个环境有着相当高的保真度。此系统当中内置

有电机、阀门以及传感器等一系列在工业设备中较为常见的设备模型，它还支持借助图形化编程的方式去快速地搭建起测试场景。凭借参数化建模技术，用户能够依据实际需求灵活地对模型的各项参数加以调整，以此来模拟处在不同工况之下的设备具体的运行状态^[2]。

三大系统借助千兆工业以太网达成数据互联互通的状态，由此搭建起完整的硬件在环测试环境，进而形成一个完整的闭环测试体系，这个体系涵盖了从指令下发开始，经过逻辑执行这一环节，一直到状态反馈为止的整个过程。

2.4 软件设计

软件系统采用了分层架构来开展设计工作，依照标准化的开发流程顺利完成了需求分析、系统设计、模块开发以及集成测试等一系列相关事宜。在开发环境方面，选用了跨平台框架 Qt，同时搭配 MySQL 数据库，并且还借助 Rational Rose 等建模工具来助力系统架构的设计工作。

系统软件功能划分为两大模块：

系统管理模块，其中囊括了多级用户权限管理方面的内容，还有操作日志追踪的相关功能，另外自动报表生成以及人机界面管理等也都包含在内，以此来保障系统的安全性以及可维护性。

业务应用模块方面，其集成了像平台导航这类功能，还有设备状态的监控功能，另外指标测试分析以及实时数据的显示功能也都包含其中，当然文档输出的核心功能同样具备，进而能够给出完整的测试解决方案。

核心算法模块运用 C++ 和 Python 混合编程的方式予以实现，数据处理层凭借 MATLAB 引擎来构建，达成了测试数据的实时分析以及可视化呈现。借助插件化架构，该系统能够对功能模块实现动态加载以及拓展操作。

在报告生成这个阶段当中，当测试工作全部完成之后，系统会自动去生成一份完整的报告，这份报告里面包含了测试概要、数据分析以及性能评价等内容，并且还支持报告预览、打印以及导出这些功能，进而形成一个完整的测试闭环。

2.5 PLC 指标分析过程

2.5.1 测试流程

本系统采用标准化的自动化测试流程，具体包含以下五个阶段：

(1) 测试准备阶段：用户通过身份验证登录系统后，首先选择待测 PLC 设备（支持单设备或多设备并行测试），然后根据测试需求选择基础性能测试或应用场景测试模式。基础测试主要评估 PLC 固有性能参数，场景测试则模拟实际工业应用环境。

(2) 测试执行阶段：系统根据测试方案生成标准化测试指令，通过 TCP/IP 协议将指令集下发至各 PLC 监控主机。测试控制终端自动执行测试脚本，从案例库中提取

对应测试案例，完成程序下载与启动^[3]。

(3) 数据采集阶段：PLC 执行测试程序过程中，通过 PCIe 接口与等效仿真系统进行实时数据交换。仿真系统接收控制指令并反馈设备状态信号，PLC 依据输入信号计算各项性能指标。

(4) 数据分析阶段：测试平台自动采集各 PLC 的测试数据，采用多维度对比分析方法，支持表格、柱状图、曲线图等多种可视化展示方式。系统提供专业数据分析工具，支持用户自定义图表样式和统计分析参数。

(5) 报告生成阶段：测试完成后，系统自动生成包含测试概要、数据分析和性能评价的完整报告，支持报告预览、打印和导出功能，形成测试闭环。

2.5.2 PLC 指标分析

2.5.2 PLC 指标分析

此测试平台搭建起了完备的 PLC 性能评估体系，该体系包含处理器核心效能以及输入输出特性这两个维度。就处理器性能来讲，系统针对工作速度、中断响应速度、满载运行速度还有持续运行稳定性等关键参数展开量化的评估操作。而在输入输出性能这个层面上，平台着重对输出响应时间、抗干扰输出响应时间、信号采集精度以及灵敏度等核心指标予以测试。

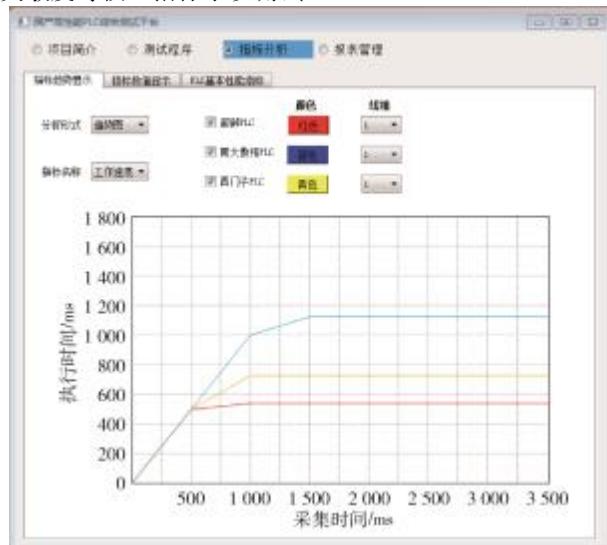


图 2 指标分析界面

在测试期间运用标准化的测试程序以及精密的计量办法。就处理器工作速度测试来讲，借助执行 $a=a+1$ 这一基础指令的循环运算，把单次执行的时间累积放大 5000 倍，以此来精准测量各个型号的 PLC 完成相同计算任务所耗费的时间周期。执行的时长和处理器的运算效率呈现出负相关的态势，进而能够客观地反映出不同设备在性能方面存在的差异。指标分析界面如图 2 所示，该界面集成多维度数据可视化功能，支持测试结果的实时对比与分析研判。

3 PLC 硬件自动化测试的设计与实现

3.1 PLC 硬件自动化测试的设计方案

PLC 硬件自动化测试系统采用的是软硬件深度融合这样的技术路线,由此成功构建起了完整的自动化验证平台。

(1) 在硬件架构这块,系统把美国国家仪器(NI)所出品的高性能数据采集卡当作核心测试硬件来选用。此板卡有着相当不错的测量精度,其运行特性也极为稳定,并且还配有丰富的用户接口,这些都能够很好地契合工业级测试方面的诸多需求。凭借着经过精心设计而成的测试电路,该系统可针对 PLC 的各个输入输出通道展开全面检测,这里面既涉及对模拟量信号采集精度的测试,也有对数字量通道逻辑功能的验证^[4]。

(2) 在软件开发这一层面,凭借 LabVIEW 所营造的图形化编程环境来着手构建测试平台。此平台运用了虚拟仪器方面的技术,借助模块化的方式去开展设计工作,进而达成了对测试资源加以灵活配置的目的。其系统所具备的核心功能涵盖了如下方面:和 PLC 控制器之间能够实现双向的数据通信;可以对 NI 板卡予以精确的控制操作;能够针对测试过程展开图形化的实时监控;并且还能够对测试数据实施智能且细致的分析与处理工作。硬件自动化测试环境如图 3 所示。

测试平台凭借软硬件系统密切配合起来,可对 AI/AO 模块的精度特性、稳定性状况、通道隔离度予以全面评估,还能检测 DI/DO 接口的逻辑功能,进而给 PLC 硬件性能给出客观且准确的量化依据。

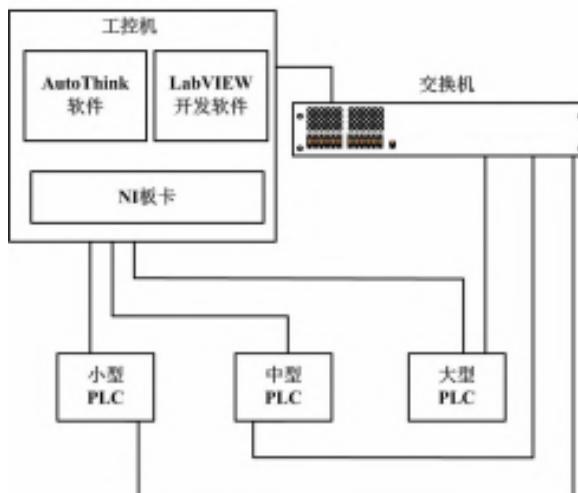


图 3 硬件自动化测试环境

3.2 PLC 硬件自动化测试的测试流程

PLC 硬件自动化测试遵循标准化的作业流程,确保测试结果的一致性和可靠性:

在测试准备阶段,要先借助专用编程软件来创建标准化的测试工程,并且通过 LabVIEW 平台去调用系统接口,进而把组态程序下载到目标 PLC 当中,同时完成对硬件

通道工作模式的配置^[5]。

在测试执行这个阶段当中,LabVIEW 测试软件能够精准地对 NI 板卡加以操控,进而生成多种多样的测试信号,像模拟量输入信号、数字量激励信号以及通信指令等都包含在内,并且还借助动态链接库技术同 PLC 构建起实时的数据互通通道,以此来采集测试进程里各项性能参数的具体情况。在结果处理这个阶段,测试系统会自动去完成数据的记录以及分析方面的工作,进而生成一份详细的报告,这份报告里面包含了测试所得到的数据、性能呈现出的曲线状况以及相应的结论与建议等内容,并且还能够实现将测试数据以结构化的形式进行存储。

3.3 流程框架设计及测试场景

系统采用 Jenkins 持续集成平台实现测试流程的自动化调度,具体执行流程如下:

(1) 环境准备: 自动去运行部署脚本,还要安装下最新版本的编程软件,并且记得更新 PLC 固件,通过这些操作来保证测试环境能够保持一致性。

(2) 软件测试: 执行用户界面测试套件,以此来验证编程软件的各项功能,并且能够自动生成 UI 测试报告。

(3) 固件测试: 运行嵌入式软件测试案例,评估控制器固件的稳定性和可靠性,输出固件测试报告。

(4) 结果反馈: 将全部测试报告通过邮件系统自动分发至项目相关人员。

测试流程方面,其支持灵活的配置方式,用户依据自身的实际需求状况,可自主选择去执行 UI 测试、固件测试或者完整的测试套件。PLC 自动化测试系统平台示意图如图 4 所示。

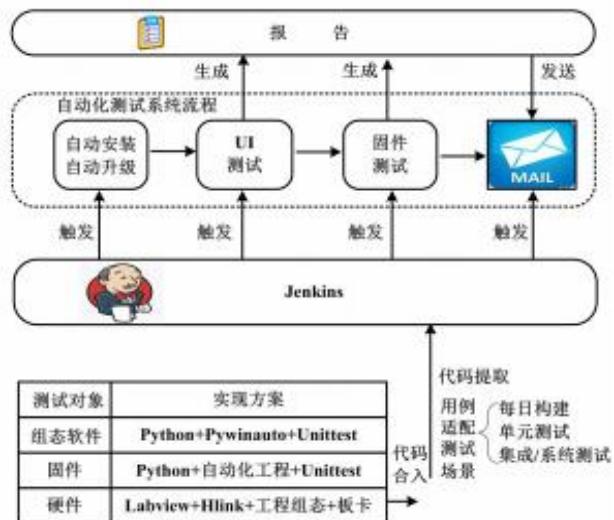


图 4 PLC 自动化测试系统平台示意图

该测试平台已然在和利时 LE、MC、LK 系列 PLC 产品以及 AutoThink 编程软件方面获得了实际的应用。系统能够支持三种较为典型的测试场景:

(1) 每日构建测试：挑选出那些能够针对关键功能的测试案例，进而将其组合成一个快速验证套件，以此来确保每日构建所得软件版本的基本质量得以保障。

(2) 就单元测试而言，会采用一套专门针对核心功能的测试案例集，以此来保证在把代码提交到集成仓库之前，其基本功能能够保持正确的状态。

(3) 集成或者系统测试，依据版本变更的具体范围来开展全面或是定向的测试工作，以此来验证新增功能和既有功能在兼容性以及稳定性方面的状况。

4 结论

本文设计并实现了以 PLC 产品及其编程软件为对象的自动化测试系统平台。该平台对不同的被测对象选取了不同的测试方案，并使用 Jenkins 将各部分流程串接起来，实现了整体的自动化测试。该平台可满足每日构建测试、单元测试和集成测试场景的使用。该平台的投用大大提升了 PLC 产品的测试效率及产品稳定性。

PLC 设备国产化替代是提升我国电力行业自主可控能力的重要举措。通过分阶段实施策略、关键技术攻关、标准体系建设和产业链协同，可逐步实现电力生产过程中 PLC 设备的自主可控。这一过程需要政府、企业、科研机构和用户的共同努力，形成推进国产化替代的合力。未来随着技术的进步和应用的深入，国产 PLC 设备有望在

性能、可靠性和服务等方面达到国际领先水平，为我国电力行业的高质量发展提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1] 史腾虎, 李少波, 于丽娅, 等. PLC 编程方法研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(7):31-36.
- [2] 董凯.“十四五”智能制造发展规划解读及趋势研判[J]. 中国工业和信息化, 2022(1):26-29.
- [3] 王奚, 王新月, 李航, 等. 面向 PLC 产品的自动化测试系统平台设计与实现[J]. 自动化仪表, 2022, 43(5):9-11.
- [4] 许大好, 李询, 谢倩. 用 Matlab 控制 NI 数据采集卡实现实时数据采集[J]. 常州工学院报, 2006, 19(5):35-38.
- [5] 邢玲玲. 基于 labview 的自动控制原理虚拟实验系统[J]. 电子测试, 2020, 1(15):32-34.

作者简介：陈小波（1973—），男，汉族，辽宁阜新人，本科，辽宁工程技术大学，研究方向：控制技术；邵全（1988—），男，汉族，辽宁沈阳人，本科，沈阳工程学院，研究方向：电气工程自动化；踪家帅（1993—），男，汉族，辽宁沈阳人，本科，沈阳工程学院，研究方向：自动化；杨文涵（1994—），女，汉，辽宁沈阳人，硕士，东北大学，研究方向：自动化控制；弭尚文，（1968—），男，汉，辽宁抚顺人，本科，东北电力大学，研究方向：自动化控制。