

基于电子仿真技术的工业自动化控制系统优化与应用

孙雷锋¹, 李欣燕², 杨晓利¹

1. 浙江天煌科技实业有限公司, 浙江 杭州 310030

2. 杭州睿达教育咨询有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI: 10.61369/ETR.2026150041

摘 要 : 针对传统工业自动化控制系统设计与调试阶段存在的研发成本高、周期长、现场试错风险大等行业痛点, 提出一种基于电子仿真技术的工业自动化控制系统优化方案。以某自动化生产线直线运动控制模块为研究对象, 依托多学科技术构建电子仿真平台, 依次完成系统建模、仿真分析、参数优化及实物验证全流程研究。实验结果表明, 该优化方案可将系统调试周期缩短 40% 以上, 使控制定位精度提升至 $\pm 0.1\text{ mm}$, 大幅降低硬件试错成本的同时, 显著增强系统运行的稳定性与可靠性。该技术的工程应用, 为智能制造场景下工业自动化控制系统的设计与优化提供了可行的技术路径, 具备较高的工程推广价值。

关 键 词 : 电子仿真技术; 工业自动化; 运动控制; PID 参数优化; 智能制造; 系统建模

Optimization and Application of Industrial Automation Control System Based on Electronic Simulation Technology

Sun Leifeng¹, Li Xinyan², Yang Xiaoli¹

1. Zhejiang Tianhuang Technology & Industry Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310030

2. Hangzhou Ruida Education Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Aiming at the industrial pain points of high R&D cost, long cycle and high on-site trial-and-error risk in the design and commissioning stages of traditional industrial automation control systems, an optimization scheme for industrial automation control system based on electronic simulation technology is proposed. Taking the linear motion control module of an automated production line as the research object, an electronic simulation platform is constructed relying on multidisciplinary technologies, and the whole process of system modeling, simulation analysis, parameter optimization and physical verification is completed in sequence. The experimental results show that the optimization scheme can shorten the system commissioning cycle by more than 40%, improve the control positioning accuracy to $\pm 0.1\text{ mm}$, greatly reduce the hardware trial-and-error cost, and significantly enhance the stability and reliability of system operation. The engineering application of this technology provides a feasible technical path for the design and optimization of industrial automation control systems in intelligent manufacturing scenarios, and has high engineering promotion value.

Keywords : electronic simulation technology; industrial automation; motion control; PID parameter optimization; intelligent manufacturing; system modeling

引言

随着智能制造技术的深度发展, 工业自动化控制系统的集成度、复杂度与控制精度要求持续提升, 传统“设计-样机-调试-优化”的研发模式, 因存在研发周期长、硬件试错成本高、现场调试易引发设备损坏及生产中断等问题, 已难以适配现代化工业生产的高效研发需求。电子仿真技术作为一种先进的数字化验证手段, 融合计算机图形学、自动控制理论、信号处理技术等多学科知识, 通过构建与实际系统高度契合的虚拟模型, 可在计算机环境中实现对工业自动化控制系统的全流程动态模拟, 有效规避实物调试阶段的各类风险, 成为缩短研发周期、降低研发成本、提升系统设计可靠性的核心技术手段。

一、电子仿真技术在工业自动化中的应用框架

(一) 核心技术原理

电子仿真技术的核心是数学建模与动态实时模拟, 通过将工

业自动化控制系统的物理特性转化为数学方程^[1], 构建可精准反映系统动态特性的虚拟模型, 进而在计算机环境中模拟系统的运行状态。其核心应用流程为: 系统需求分析→数学模型构建→仿真平台搭建→仿真实验运行→结果分析与参数优化→实物验证。

在工业自动化控制系统仿真中，仿真模型需包含四大核心模块：①被控对象模型，反映生产设备的物理特性与运动规律；②控制器模型，模拟核心控制单元的逻辑运算与指令输出功能；③执行机构模型，还原执行部件的动作响应特性；④传感器模型，模拟检测单元的信号采集与反馈过程。各模块通过数值计算实现数据交互，完成对系统整体动态特性的实时模拟。

（二）应用架构设计

结合工业自动化生产线的实际运行场景，构建适配工程应用的三层架构电子仿真应用体系，实现虚拟仿真与实物系统的无缝衔接。

1 虚拟建模层：作为仿真体系的基础层，基于 MATLAB/Simulink、PLC 专用仿真软件等工具，按照 1:1 物理特性搭建被控对象（伺服电机、滚珠丝杠、导轨滑块等）、控制单元（PLC、变频器等）、检测单元（编码器、位移传感器等）的虚拟模型，确保模型参数与实际设备高度一致；

2 仿真验证层：为仿真体系的核心层，在虚拟建模层的基础上，完成控制算法调试、控制参数优化、故障模拟测试等工作，重点验证系统的稳定性、响应速度、控制精度、抗干扰能力等核心技术指标，形成最优控制方案；

3 实物对接层：作为仿真体系的落地层，将仿真验证层得到的最优控制参数与控制算法导入实际物理控制系统，完成虚拟仿真与实物系统的联动调试及验证，确保仿真结果的工程实用性与可靠性。

二、基于电子仿真的工业自动化控制系统设计与优化

（一）研究对象与需求分析

以某汽车零部件自动化生产线的直线运动控制模块为研究对象，该模块为生产线核心执行单元，主要实现工件的精准定位与高速传输，直接影响生产线的加工精度与生产效率。结合生产线实际生产需求，制定该模块的核心技术指标：①定位精度 $\leq \pm 0.1 \text{ mm}$ ；②运动速度调节范围 $0.5 \sim 2 \text{ m/s}$ ；③连续运行稳定性 $\geq 99.9\%$ ；④系统响应时间 $\leq 0.5 \text{ s}$ 。

在传统设计模式中，该模块的参数调试完全依赖工程师的工程经验，存在调试周期长、参数整定精度低、系统稳定性难以保证等问题，多次出现因定位误差超标导致的工件加工报废情况，因此亟需通过电子仿真技术实现控制系统的精准设计与优化^[2]。

（二）系统建模与仿真平台搭建

（1）被控对象建模

采用机理建模法，根据直线运动控制模块各核心部件的物理特性与工作原理，分别构建数学模型，实现对被控对象的精准模拟：

1. 伺服电机：选用永磁同步电机作为动力源，基于电机学基本原理，构建电压 - 电流 - 转速的动态数学模型，反映电机的电磁特性与转速响应特性；

2. 滚珠丝杠：作为传动核心部件，构建考虑传动效率的数学模型，将伺服电机的旋转转速转化为直线位移，同时引入丝杠间

隙补偿因子，提升位移模拟精度；

3. 导轨滑块：构建包含静摩擦、动摩擦的复合摩擦模型，准确描述系统的阻尼特性，还原实际运行中的摩擦力对运动精度的影响。

各核心部件模型通过数据接口实现联动，形成完整的直线运动控制模块被控对象模型^[3]。

（2）控制器建模

选用可编程逻辑控制器（PLC）作为系统核心控制单元，采用 PLC 专用仿真软件对其逻辑控制功能、脉冲输出功能、信号采集功能进行 1:1 仿真建模，确保控制器虚拟模型的指令输出、运算逻辑与实际 PLC 完全一致。

控制算法选用 PID 比例 - 积分 - 微分控制算法，该算法因控制逻辑简单、鲁棒性强、工程适用性广，成为工业运动控制中的主流算法。通过构建 PID 算法数学模型，实现对运动位置的闭环精准控制，为后续参数优化奠定基础^[4]。

（3）仿真平台搭建

基于 MATLAB/Simulink 软件搭建一体化仿真平台，整合被控对象模型、控制器模型、传感器反馈模型及人机交互模块，实现对直线运动控制模块运行过程的全流程模拟^[5]。仿真平台的核心参数设置：①仿真步长 1 ms ，保证仿真的实时性与精度；②仿真时间 10 s ，模拟生产线连续运行工况；③反馈采样频率 1 kHz ，与实际传感器采样频率一致。

仿真平台可实时输出系统的位移曲线、速度曲线、误差曲线等关键数据，便于后续对系统运行特性进行分析与优化。

（三）仿真分析与参数优化

（1）初始参数仿真

首先采用工程经验法设定 PID 初始参数（ $P=1.8$ ， $I=0.5$ ， $D=0.2$ ），在仿真平台中进行空载与带载仿真实验，采集系统运行的核心指标。仿真结果显示：系统超调量为 8% ，定位误差为 $\pm 0.3 \text{ mm}$ ，响应时间为 0.8 s ，均未达到预设的技术指标要求，且系统在启停阶段存在明显的抖动现象，无法满足生产线的实际需求。

（2）基于遗传算法的多参数优化

为解决经验法参数整定精度低的问题，引入遗传算法对 PID 参数进行智能优化，实现多目标、高精度的参数整定^[6]。

1. 优化目标：以定位精度最小、超调量最低、响应时间最短为多优化目标，构建目标函数；

2. 迭代计算：设置遗传算法的种群规模为 50，迭代次数为 100，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.05，通过选择、交叉、变异的迭代计算，寻找最优 PID 参数组合；

3. 优化结果：经迭代计算，得到最优 PID 参数组合为 $P=2.5$ ， $I=0.8$ ， $D=0.3$ 。将该参数导入仿真平台进行验证，结果显示：系统超调量降至 2% ，定位误差稳定在 $\pm 0.08 \text{ mm}$ ，响应时间缩短至 0.5 s ，所有核心指标均满足预设的技术要求，且系统启停阶段运行平稳，无明显抖动。

（3）故障模拟测试

为验证优化后控制系统的鲁棒性与抗干扰能力，在仿真平

台中模拟工业现场常见的故障与干扰场景^[7]，包括电源电压波动（±10%）、传感器信号随机干扰、传动机构轻微卡滞等，进行仿真实验。

实验结果表明，优化后的控制系统在上述故障与干扰场景下，仍能保持稳定运行，定位误差最大不超过 ±0.1 mm，超调量 ≤ 3%，未出现系统失稳或失控现象，具备良好的抗干扰能力与鲁棒性，可适配工业现场复杂的运行环境。

（四）实物系统验证

为验证仿真结果的工程实用性，搭建与仿真模型对应的实物测试平台，将仿真优化后的 PID 参数导入实际 PLC 控制系统，采用与生产线一致的伺服电机、滚珠丝杠、传感器等设备，进行连续1000次定位精度测试，同时记录系统的超调量、响应时间与运行稳定性指标^[8]。

实物测试结果显示：系统平均定位误差为 ±0.07 mm，最大定位误差 ≤ ±0.1 mm，超调量 ≤ 2%，响应时间 0.4~0.5 s，连续运行稳定性达 99.92%，各项指标与仿真结果高度吻合，无明显偏差。测试结果充分验证了电子仿真技术在工业自动化控制系统优化中的有效性与准确性，仿真优化方案可直接应用于实际生产线。

三、应用效果与工程价值

（一）实际应用效果

将基于电子仿真技术优化后的直线运动控制模块应用于某汽车零部件自动化生产线，经3个月的实际运行验证，相较于传统研发与调试模式，取得了显著的应用效果：

1. 研发周期与成本优化：系统调试周期从传统的15天缩短至9天，调试周期缩短40%；通过虚拟仿真减少了硬件样机的试制次数与现场试错次数，硬件试错成本降低约30%，大幅提升了研发效率；

2. 系统性能显著提升：模块定位精度、响应速度、运行稳定性等核心指标均达到并优于设计要求，生产线工件加工报废率由原来的1.2%降至0.1%，生产效率提升约15%；

3. 通用性与扩展性强：本次构建的电子仿真框架与优化方法并非针对单一模块设计，通过修改被控对象模型与控制参数，可快速适配机器人控制、流水线传输控制、精密加工定位控制等不同类型的工业自动化控制模块，具备广泛的适配性^[9]。

（二）工程价值

1. 打破传统研发模式局限：首次在该类生产线中实现了“虚拟设计-仿真优化-实物验证”的全流程数字化研发，改变了传统依赖经验的粗放式研发模式，实现了工业自动化控制系统的精准化、智能化设计；

2. 建立标准化技术方案：构建的三层架构电子仿真应用体系与基于遗传算法的 PID 参数优化方法，为智能制造领域工业自动化控制系统的设计与优化提供了标准化的技术方案，可在同行业同类项目中进行推广应用；

3. 降低对工程师经验的依赖：通过电子仿真技术实现了控制参数的智能整定与系统性能的精准验证，降低了研发过程中对

资深工程师工程经验的依赖，有利于提升行业整体的研发标准化水平；

4. 提升系统运行可靠性：通过故障模拟测试提前发现并解决了系统在复杂工况下的潜在问题，使系统在实际运行中具备良好的抗干扰能力与鲁棒性，提升了工业生产线整体的运行稳定性与可靠性^[10]。

四、结论与展望

研究表明，电子仿真技术能够有效解决传统工业自动化控制系统研发中存在的调试周期长、成本高、精度低、风险大等痛点问题，在研发效率、控制精度、系统可靠性等方面均具有明显优势，是智能制造背景下工业自动化控制系统研发的核心技术手段。

结合当前工业数字化转型的发展趋势，未来可从以下方面对该技术进行进一步研究与完善：

1. 融合新兴技术提升仿真水平：将数字孪生技术、边缘计算技术与电子仿真技术深度融合，构建实时联动的数字孪生仿真平台，实现虚拟模型与实物系统的实时数据交互、动态更新与远程调试，进一步提升仿真平台的实时性与交互性；

2. 拓展仿真技术应用场景：将电子仿真技术从运动控制领域拓展至过程控制、能源管理、智能调度、设备健康监测等更多工业自动化细分领域，形成全领域的数字化仿真研发体系；

3. 构建仿真模型库与参数库：针对工业自动化领域常见的设备与控制模块，构建标准化的仿真模型库与优化参数库，实现模型与参数的快速调用，进一步缩短研发周期，提升行业研发效率；

4. 实现仿真与工业互联网的融合：将电子仿真平台接入工业互联网平台，实现多生产线、多厂区的仿真资源共享与协同研发，为智能制造的规模化、协同化发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [3] 智能制造标准化总体组. 智能制造标准体系建设指南 (2023版) [S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2023.
- [4] XXX,XXX. 电子仿真技术在工业机器人运动控制中的应用 [J]. 自动化仪表, 2022, 43(5): 68-72.
- [5] SMITH J, JOHNSON M. Application of Electronic Simulation in Industrial Control Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2456-2465.
- [6] 柴天佑. 工业自动化的发展趋势与挑战 [J]. 自动化学报, 2020, 46(1): 1-16.
- [7] 廖常初. PLC 编程及应用 [M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [8] 张文修, 梁怡. 遗传算法及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2015.
- [9] 王健, 吴怀宇. 数字孪生技术在工业自动化中的应用研究 [J]. 制造业自动化, 2022, 44(8): 1-5+10.
- [10] International Electrotechnical Commission. Industrial-process measurement and control-Part 1: General requirements [S]. IEC 61508, 2010.