

软件定义智能控制系统未来发展展望

柴天佑^{1,2}, 郑锐¹, 贾瑶^{1,2}, 黄新宇^{1,2}, 宋延杰^{1,2}

(1. 东北大学 流程工业综合自动化全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 国家冶金自动化工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 本文综述了软件定义控制系统研究现状并分析了控制系统在工业革命中的作用和发展状况, 提出了软件定义控制系统的智能化发展方向. 通过软件定义端边云协同的PID(比例-积分-微分)整定智能系统案例, 表明将工业人工智能、工业互联网等新一代信息技术与软件定义控制系统紧密融合与协同, 为发展软件定义智能控制系统开辟了新途径. 最后, 针对软件定义控制系统存在的难题和软件定义控制系统智能化存在的难题, 提出了软件定义智能控制系统的主要研究方向.

关键词: 虚拟PLC(可编程逻辑控制器); 软件定义控制系统; AI驱动的工业控制; 软件定义智能系统

中图分类号: TP 273+.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)07-0001-10

Development and Prospects for Software-Defined Intelligent Control Systems

CHAI Tian-you^{1,2}, ZHENG Rui¹, JIA Yao^{1,2}, HUANG Xin-yu^{1,2}, SONG Yan-jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. National Engineering Research Center of Metallurgy Automation, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHAI Tian-you, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The current state of research on software-defined control systems was reviewed, and the role and development of control systems throughout the industrial revolutions were analyzed. The intelligent development direction for software-defined control systems was proposed. The case study of a software-defined end-edge-cloud collaborative PID (proportional-integral-derivative) tuning intelligence system was presented, which demonstrates that the tight conjoining and coordination between industrial artificial intelligence, industrial Internet, and other new-generation information technologies with software-defined control systems has opened up a new way for the development of software-defined intelligent control systems. Finally, the principal research directions for software-defined intelligent control systems were pointed out by considering the challenges faced by software-defined control systems and those specific to their intelligent transformation.

Key words: virtual PLC (programmable logic controller); software-defined control system; AI-driven industrial control; software-defined intelligent system

目前工业界大多采用基于单片机技术的PLC和DCS(分布式控制系统)的控制系统来实现工业过程或制造装备的闭环控制、开环控制、逻辑控制与监控功能. 上述工业控制系统是基于专用计算机的控制系统, 将硬件和软件组件结合在一起, 控制、协调和监督工业过程^[1]. 由于硬件

扩充成本高昂且通常难以实现, 无法支持工业大数据驱动的工业智能算法等资源密集型任务^[2-3], 加上计算机技术与通信技术的发展, 软件定义控制系统受到学术界和工业界的广泛关注^[3-4].

软件定义控制系统技术的发展分为三个阶段. 第一个阶段是软件定义PLC和监控计算机功

收稿日期: 2025-07-01

基金项目: 辽宁辽河实验室研究项目(LL23ZZ-05-01); 辽宁省重点研发计划项目(2023JH26/10200011); 国家自然科学基金重大基金资助项目(61991404); 国家重点研发计划项目(2024YFB3309700); 辽宁省科技重大专项(2024JH1/11700048).

作者简介: 柴天佑(1947—), 男, 甘肃兰州人, 东北大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士.

能的控制系统技术与产品.随着计算机技术的发展,如产业界倍福和东土科技公司相继推出了软件定义 PLC 控制系统产品,倍福采用计算机、东土科技采用工业服务器.软件定义控制系统将 PLC 和监控计算机的功能在 1 台设备上实现,采用通用计算机和服务器硬件平台.该软件定义的 PLC 具有自己的实时操作系统与实时数据库,采用基于 x86 架构的虚拟 PLC 方案.该方案将逻辑控制功能与 I/O 组件解耦,同时通过实时虚拟机管理程序实现 PLC 逻辑的虚拟化,并提供了强大的算力和可扩展功能^[4].因此,其应用于制造装备如风力发电装备,可实现监控与控制一体化.但应用于多控制回路生产线时,由于有的回路控制在非实时环境中运行,影响实时性和可靠性.

软件定义控制系统技术的第二个阶段是云控制系统.随着云计算、云服务和移动互联网的发展,文献[5]将工业自动化作为 1 种新的云服务,重点研究了基于云的自动化架构,提出控制器的虚拟化可减少硬件成本和相关的劳动成本.文献[6]指出随着云计算和控制理论的发展,出现了 1 种新的云控制系统模式,并对 2012 年以来提出的云控制系统进行了综述.文献[7]讨论了云控制系统的概念,指出云控制系统为大数据处理、控制器设计、性能评估等提供了平台.云控制系统的研究主要集中在将工业控制系统作为云服务和云控制系统的平台设计方面.由于云控制器的控制信号作用于工业现场的被控对象,被控对象的输出引入云控制器,需要无线传输装置,因此,难以保证控制系统的动态性能和安全.

软件定义控制系统技术的第三个发展阶段是基于云和工业边缘计算的软件定义控制系统.工业互联网的端边云技术与边缘计算的发展促使边缘计算在工业生产的设备层面开展智能服务、优化通信、计算和存储资源的研究^[8].文献[9]提出了赋能具身智能的工业边缘计算,指出工业边缘计算是 1 种集成通信、计算与存储资源的分布式平台,旨在实现敏捷连接、实时控制与数据优化,同时支持智能应用、保障高度安全性并保护数据隐私.工业自动化体系的现代化不仅需要实际硬件的更新,而且需要软件定义自动化的新型控制范式^[10-11].位于云—工业云和端—工业生产之间的边部署边缘计算系统开展虚拟 PLC 的研究受到学术界的广泛关注.文献[3]概述了在

商用现有服务器中运行的虚拟 PLC 概念,指出虚拟 PLC 在由虚拟机监控程序管理的虚拟机内运行,对虚拟 PLC 进行实现与评估,提出虚拟 PLC 的确定性需进一步研究.文献[12]基于 Docker 容器研究虚拟化对软件组件时间延迟的影响,表明 Docker 虚拟化技术能够满足软实时需求,可应用于工业自动化领域.工业 PLC 的大型制造商开始推广在边缘计算平台中部署容器化虚拟 PLC (vPLC).文献[1]比较了真实 PLC 与 vPLC 的设计方法,开展了性能对比实验,指出 vPLC 的通信延迟最低可达 3 ms,但存在平均 50 ms 的随机延迟,其原因为 vPLC 采用 IP 协议.借助轻量级虚拟化技术的优势,基于容器化的 vPLC 采用微服务范式,具备可扩展性、可维护性与可追溯性^[13-15].文献[16]重点评估 vPLC 与传感器/执行器之间的实时数据交互性能,表明 vPLC 的抖动率比传统方案高出约 50%.

国际标准 IEC 61499 提出后,支持可移植性、互操作性和可配置性的工业自动化系统的分布式架构设计受到广泛关注^[17-18].工业自动化系统的架构正由传统的 ISA-95 金字塔模型向“工业云—边缘计算”的双层架构演进.这一新型架构对工业软件和工业通信技术提出新要求^[19-20].文献[21]提出了云/雾的虚拟化和融合通信网络相结合的云雾自动化.基于云雾自动化,通过控制—通信—计算协同设计,开展内模控制驱动的时延感知无线控制方法和实验的研究^[22-24].

上述研究采用新一代的计算设备和软件技术,即工业云和工业边缘系统,将企业资源计划(ERP)、制造执行系统(MES)和控制系统在“工业云—边缘计算”的双层架构上实现,但无法实现 ERP、MES 和控制系统集成优化.在工业边缘平台中实现虚拟 PLC,但无法实现在虚拟 PLC 运行的控制器参数在线优化整定.工业人工智能、工业互联网、工业元宇宙等新一代信息技术的发展势必将资源计划、制造执行、工业过程或装备控制系统三层信息化架构变革为人机合作的管理与决策智能化系统和智能自主控制系统两层智能化架构的智能化制造新模式^[3,25-26].文献[27-29]将工业人工智能与建模、控制和优化深度融合和协同,提出了系统辨识与自适应深度学习、数字孪生与强化学习相结合的 PID 和抗干扰控制器参数在线自学习自优化智能算法.采用工业互联网和工业元宇宙技术,研制了端—工业现场控制系统、边—基于服务器的控制器参数自学习自

优化系统、云—基于AI计算平台的控制过程数字孪生系统,通过端边云协同,实现控制器参数的在线自学习自优化,并在工业电熔镁炉和商用5G成功应用.但未涉及软件定义云边协同控制器参数自学习自优化系统.

本文在上述软件定义控制系统研究现状分析基础上,通过分析控制系统在工业革命中的作用和发展,提出了软件定义控制系统的智能化发展方向.通过软件定义端边云协同的PID整定智能系统案例,表明工业人工智能和工业互联网与

控制系统技术紧密融合与协同,为解决软件定义控制系统智能化提供新的途径.最后,提出软件定义智能控制系统的主要研究方向.

1 控制系统在工业革命中的作用和发展状况

工业生产过程是物质流、能源流和信息流交互作用的动态过程,三流发生变革会引起工业革命.控制系统在工业革命中的作用如图1所示.

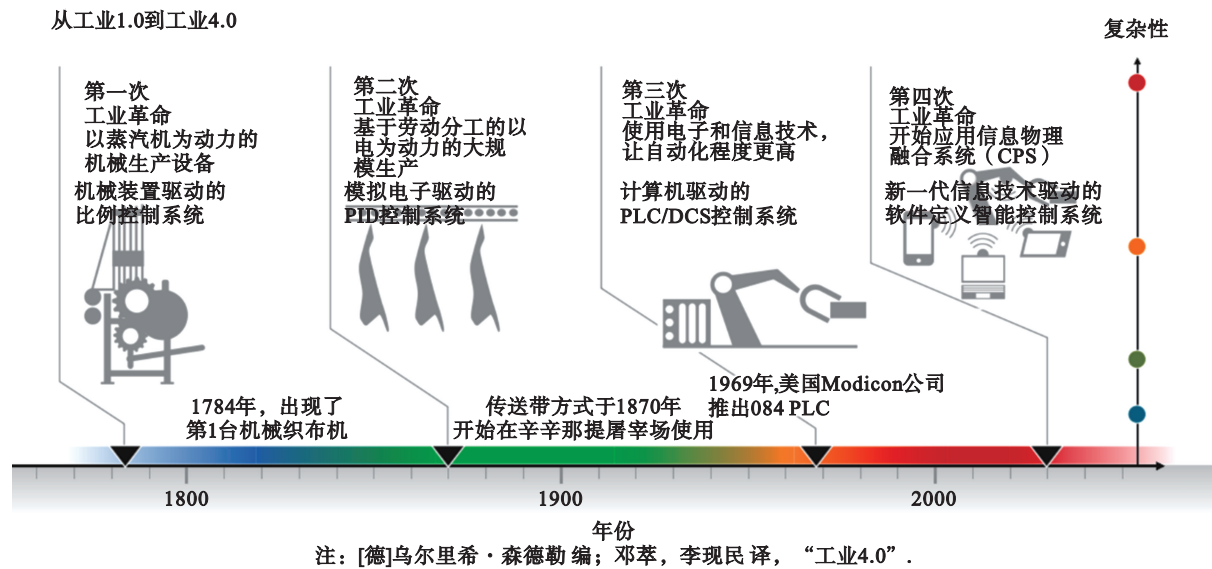


图1 控制系统在工业革命中的作用和发展状况

Fig. 1 Role and development of control systems throughout industrial revolution

第一次工业革命中能源流首先发生变革.以蒸汽机为动力的工业生产装备代替了人力在生产过程中产生能源流.以蒸汽机为动力的工业生产装备应用于工业生产过程中必须解决机器的调速问题.1788年,詹姆斯·瓦特成功地发明了离心调速器.离心调速器采用离心力原理,由齿轮、转轴、钢球、杠杆、弹簧以及套筒等组件组成^[30].蒸汽机启动后通过锥齿轮将转动传递到离心调速器的转轴上,带动连杆机构上的2个钢球绕转轴转动,钢球的惯性令其做离心运动,而弹簧则对2个钢球提供向心力.钢球的离心运动带动套筒向上运动,杠杆将套筒的运动传递到蒸汽阀门,调节阀门的开度,而阀门的开度又调节了蒸汽进给量,从而调节蒸汽机转速.转速不同,产生的离心力不同,从而调节阀门开度.由于采用比例反馈技术,因此蒸汽机转速始终保持在一个稳定的设定值区间内.蒸汽机与反馈控制技术的广泛应用推动了第一次工业革命.

在第二次工业革命中,电力代替了蒸汽成为工业生产过程中产生能源流的动力,使能源流发生了变革.1912年,Sperry通过观察有经验的领航员操作船舶时的动作,基于陀螺仪、液压伺服电机、气动连杆、操作杆等装置实现了船舶陀螺驾驶仪.随后在莱特兄弟设计的飞机上实现了飞机的自动陀螺驾驶仪,通过陀螺仪感知姿态的偏差,方向舵和副翼通过气动部件驱动,实现了飞机的稳定驾驶^[31].这是典型的PID控制器.由于比例控制会产生动态误差,因此将积分作用引入比例反馈控制,发明了PID控制技术^[30,32].采用继电器、定时器、模拟放大器等和PID控制技术研制了模拟控制系统,使信息流发生了变革,实现了传送带的自动化.1870年,自动化的传送带首次应用于辛辛那提屠宰场,推动了基于劳动分工和以电力为动力的大规模生产.以电力为动力的工业生产装备和模拟PID控制系统的广泛应用推动了第二次工业革命.

20 世纪 50 年代末到 60 年代初,数字计算机的出现促使计算机和通信技术与工业控制技术相结合,催生了一种专门的计算机控制系统——可编程逻辑控制器(PLC).1969 年,美国 Modicon 公司推出了 084 PLC^[33].该控制系统将多个回路的传感器和执行机构通过设备网与控制系统连接起来,可以方便地进行多个回路的控制、设备的顺序控制和监控.1975 年, Honeywell 和 Yokogawa 公司研制了可以应用于大型工业过程的 DCS^[34].以组态软件为基础的控制软件、过程监控软件和 PLC/DCS 应用于生产过程使信息流发生了变革,使生产线的自动化程度更高,推动了第三次工业革命.

从上述控制系统在工业革命中的作用和发展状况的分析可以看出,在总结人的反馈、保持和预测智能行为基础上,发明了基于控制误差的比例、积分和微分的控制模型.今天,工业装备和运动体,包括机器人、航空、航天、轨道交通、汽车、海洋运载工具的控制约 95% 以上采用 PID 控制器^[35-38].国际自动控制联合会(IFAC)的行业工作组对各种控制方法的影响力进行了调查,结果显示 PID 控制器影响力最强,高影响率达 100%^[36].虽然 PID 控制算法没有改变,但实现 PID 的控制系统随机械、模拟电子、计算机技术的发展而改变:第一次工业革命,工业控制系统为机械驱动的比例控制系统;第二次工业革命,发展为模拟电子驱动的 PID 控制系统;第三次工业革命,发展为计算机驱动的 PLC/DCS 控制系统.工业人工智能、工业互联网、工业元宇宙等新一代信息技术的发展必将使生产过程中的感知、识别、决策与控制组成的信息流发生变革,引起新一轮工业革命,推动软件定义控制系统智能化发展.

2 软件定义智能控制系统未来发展方向

工业控制系统存在的问题如下:

1) 需要人工凭经验与知识来设计和调试控制系统.当生产条件变化或受到未知随机干扰导致被控对象动态特性变化时,无法在线优化控制系统参数,只能依靠人工离线调整.

2) 针对无法采用工业控制技术的复杂工业场景,只能依靠操作人员凭经验与知识总结控制规则,依靠人工化验或人工观测获得被控对象输

出,反馈信息滞后,无法及时优化控制规则.

3) 操作人员通过监控画面观测被控对象输入输出数据,难以及时准确识别控制过程的动态特性变化和调整控制系统.

总之,目前采用工业控制系统实现自动化还需要依靠人的感知、识别、分析与决策能力和经验与知识.工业人工智能为将控制系统设计与调试的知识工作实现自动化与优化提供了新方法.工业互联网为解决 PLC/DCS 控制系统无法获得工业大数据和无法执行工业大数据驱动的智能算法的难题提供了新的实现技术.工业人工智能、工业互联网等新一代信息技术与工业控制技术紧密融合与协同,将工业控制中依靠人的知识工作实现自动化与优化成为软件定义控制系统智能化的主要目标.

文献[39]指出工业控制智能化的发展方向:工业控制智能化驱动人工化验被控对象输出向工业大数据驱动的实时检测与预报智能系统发展;驱动人工观测与识别被控对象动态特征向工业大数据驱动的智能感知系统发展;驱动人工观测与识别被控对象动态性能和设备运行状况向元宇宙驱动的工业控制过程远程移动可视化监控的智能系统发展;驱动复杂工业场景的人工控制向高性能智能控制系统发展;驱动人工离线调整控制系统参数向控制系统参数在线自学习自优化智能系统发展;驱动人工观测视频图像和控制向感知与控制一体化智能系统发展.采用新一代信息技术,软件定义上述智能系统,实现感知与控制一体化、控制系统参数在线自学习自优化,使控制系统具有最优的动态性能,即在其运行的所有时间内将控制系统优化设定值与被控对象输出之间的跟踪误差与控制输入的波动控制在生产工艺确定的目标区间范围内并使其尽可能小,成为软件定义控制系统的智能化发展方向.

3 软件定义端边云协同的 PID 整定智能系统案例

3.1 软件定义的智能控制系统架构

端边云协同的自学习自优化智能控制系统如图 2 所示.其中,端为基于 PLC 的工业控制系统,边为基于工业服务器的控制器参数自学习自优化系统,云为基于 AI 计算平台的控制过程数字孪生系统^[27-28].针对该系统的云端之间长距离无

线传输影响系统安全可靠运行的难题,本文采用新一代软件技术,使用1台工业服务器、通过软件定义实现:端—PLC监控系统、边—基于边缘系统的控制器参数自学习自优化系统和云—基于AI计算平台的控制过程数字孪生系统.本文采用IEC 61499标准的分布式、模块化、事件驱动和可重构等设计理念,结合云和软件定义计算机控制系统的优势,将云服务器作为智能控制系统软件的开发平台,工业服务器作为控制、监控、控制器参数整定、控制过程数字孪生、基于数字孪生的

控制器参数自学习自优化组成的智能控制软件运行平台,系统结构如图3所示.

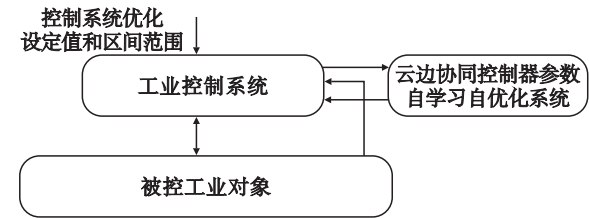


图2 工业智能控制系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of industrial intelligent control system

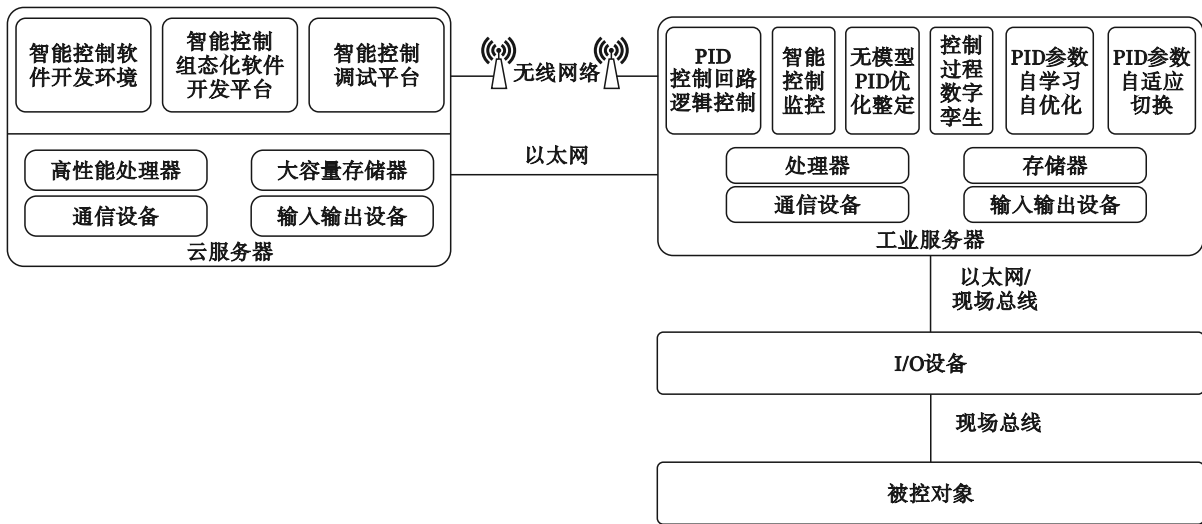


图3 软件定义的智能控制系统结构

Fig. 3 Structure of software-defined intelligent control system

利用云服务器强大的软件开发能力,集成开源时序数据库和文档数据库、实时操作系统、缓存服务、Web框架、代码托管平台,并采用微服务架构设计与容器化运行环境作为支撑,进行功能块驱动、跨域协同的软件定义智能控制系统开发.设计与开发了由智能控制软件开发环境、智能控制组态化软件开发平台、智能控制调试平台组成的软件定义智能控制系统开发平台.其中,智能控制组态化软件开发平台由控制系统交互界面组态化开发软件和控制算法组态化开发软件组成.控制系统交互界面组态化开发软件采用动态组件技术和响应式渲染技术,实现了自动布局配置智能控制系统交互界面.控制算法组态化开发软件采用模型即服务设计思想和容器化微服务架构技术,实现了控制算法的参数与输入输出的前端界面动态配置.

件;2)采用PID优化整定算法,开发了PID优化整定软件;3)采用系统辨识与自适应深度学习相结合的PID控制过程数字孪生模型算法,开发了控制过程数字孪生软件;4)采用数字孪生驱动的PID在线优化整定算法,开发了PID参数自学习自优化软件;5)采用基于规则推理的自适应切换算法,开发了控制器参数自适应切换软件.

采用控制算法组态化开发软件、适合智能算法开发的Python语言和控制算法开发了不同的控制软件:1)采用PID控制和逻辑控制算法、软件定义PLC,开发了PID控制回路和逻辑控制软

件;2)采用控制系统交互界面组态化开发软件开发了智能控制监控软件,包括控制过程监控界面、控制器参数整定界面、数字孪生模型监控界面和控制器参数自学习自优化界面.

采用工业服务器的基于虚拟化技术与多核隔离的运行管理软件、操作系统和共享内存软件与开源时序数据库,实现PID控制回路和逻辑控制软件在工业服务器的实时核运行,智能控制监控软件、无模型PID优化整定软件、控制过程数字孪生软件、PID参数自学习自优化软件、控制器参数自适应切换软件分别在5个非实时核上运行,实现了基于PLC的控制功能、基于计算机的监控功能、基于边缘系统的控制器参数自学习

自优化功能和基于云—AI计算平台的控制过程数字孪生功能。

3.2 软件定义的智能控制系统研究实验平台及实验验证

采用东土科技的具有自主知识产权的工业服务器,研发上述智能控制软件,基于计算机的

仿真实验系统、热风流量与冷风流量控制系统组成的换热装置、交换机和输入输出信号装置,研制了软件定义的智能控制系统研究实验平台,如图4所示.采用该研究实验平台,进行了自学习自优化PID控制方法与文献[40]抗干扰PID控制方法仿真对比和在换热装置中的实验验证。

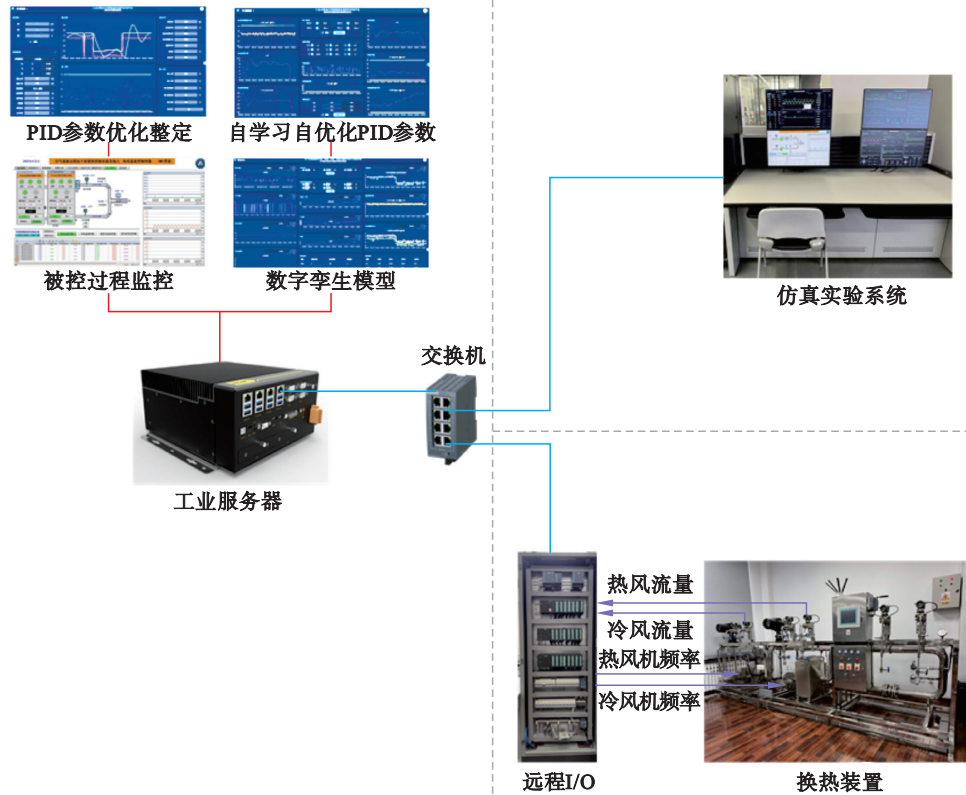


图4 软件定义的智能控制系统研究实验平台

Fig. 4 Research experiment platform for software-defined intelligent control system

3.2.1 仿真对比实验

使用图4所示的软件定义的智能控制系统实验平台,采用文献[40]的被控对象模型(式(1)),与本文方法进行仿真对比实验。

$$G(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}. \quad (1)$$

式中: $G(s)$ 为被控对象模型; s 为拉普拉斯算子。

$$\begin{aligned} \text{采样周期 } T_0 = 1 \text{ s, 将被控对象式(1)离散化为} \\ y(k) - 2.714y(k-1) + 2.456y(k-2) - \\ 0.741y(k-3) = 0.088u(k-1) + \\ 0.049u(k-2) - 0.109u(k-3). \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $y(k)$ 为被控制对象输出; $u(k)$ 为控制输入; k 为采样时间, $k=1$ 表示采样周期。

设定值 $y_{sp}(k)$ 为

$$y_{sp}(k) = \begin{cases} 2, & 0 \leq k < 4000; \\ -2, & 4000 \leq k < 8000; \\ 2, & 8000 \leq k < 12000; \\ -2, & 12000 \leq k \leq 16000. \end{cases} \quad (3)$$

干扰 $v(k)$ 为

$$v(k) = \begin{cases} 0.5, & 1000 < k \leq 5000; \\ 0.5 \cos(0.5k), & 5000 < k \leq 8000; \\ 0.5 \sin(0.1k) \cos(0.5k), & k > 8000. \end{cases} \quad (4)$$

跟踪误差 $e(k)$ 目标值上界 $\delta=0.5$,控制输入 $u(k)$ 波动的上界 $u_{\max}=15$.采用文献[40]的PID控制器参数为

$$K_p = 0.92, K_i = 0.04, K_D = 0.57. \quad (5)$$

采用PID优化整定算法^[41],可得临界点频率 $\theta_\phi = 0.51$,临界点增益 $K_\phi = 0.52$,基于临界点的参数 $\rho_K = 0.254, \rho_T = 0.877$,PID控制器参数为

$$K_p = 0.49, K_i = 0.045, K_D = 1.34. \quad (6)$$

性能指标如下:

$$\begin{aligned} \text{minimize } J(k) &= \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k e^2(i), \\ |e(k)| &< \delta, |u(k)| < u_{\max}. \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\delta=0.5, u_{\max}=15$.

采用上述性能指标和数字孪生驱动 PID 在线优化整定算法^[27],可得 PID 控制器参数为

$$K_p^* = 0.09, K_i^* = 0.02, K_d^* = 20.3. \quad (8)$$

自适应切换机制的时间限定区间 $T = 600, J$

和 J_1 的上限值 $\delta_j = 10.5, J_e$ 和 J_{e_1} 超出目标值上界 $\delta_e = 150, J_u$ 和 J_{u_1} 超出目标值上界 $\delta_u = 100$.

本文方法与文献[40]方法的控制效果对比曲线如图 5 所示.

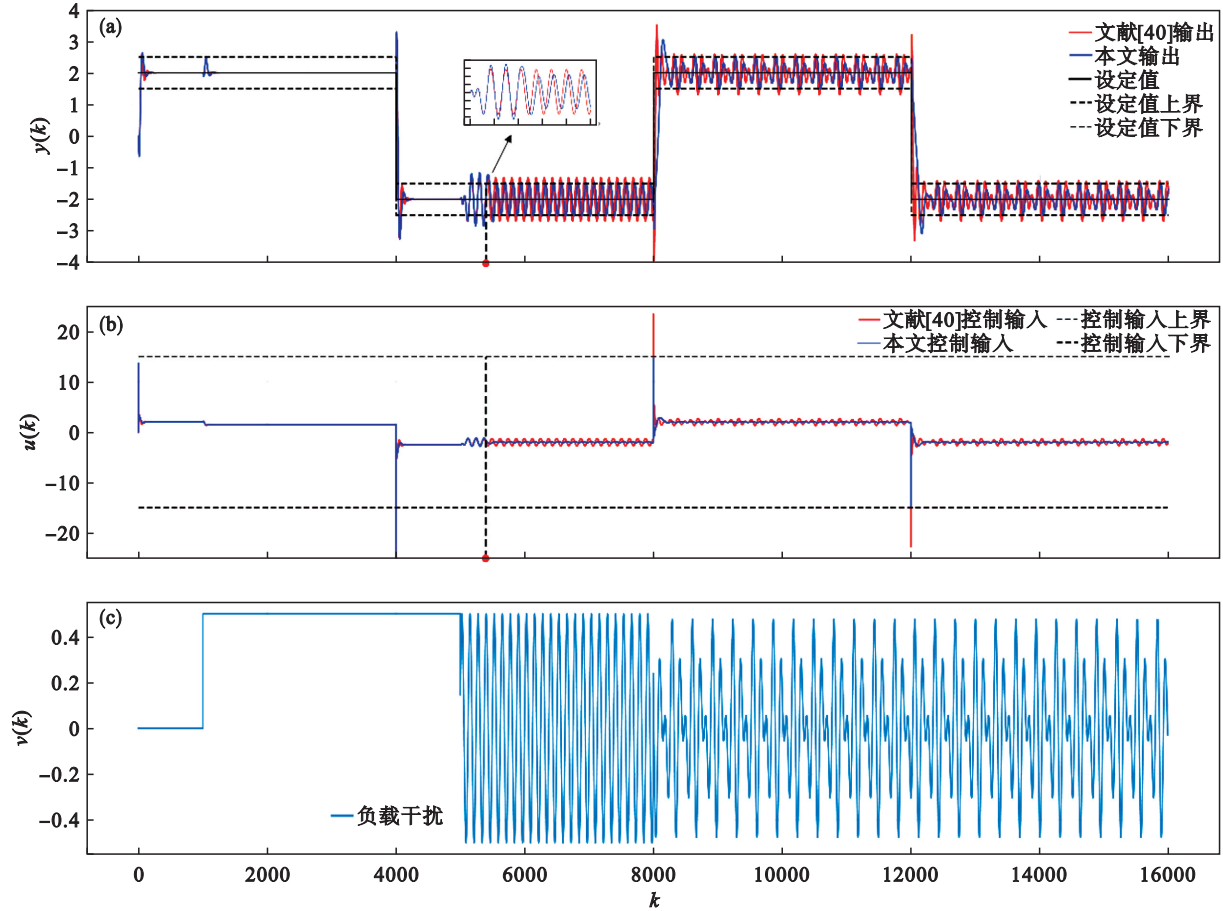


图 5 本文方法与文献[40]方法的输入输出对比曲线

Fig. 5 Input and output comparison curves between proposed method and method in reference [40]

(a) — 输出; (b) — 控制输入; (c) — 负载干扰.

如图 5 所示,当 $k = 5400$ 时, $J_e = 178 > 150, J_{e_1} = 93 < 150$,触发切换机制,优化的 PID 参数(式(8))开环自校正被控对象控制器参数(式(6)),控制效果的评价如表 1 所示.

表 1 文献[40]与本文方法的性能指标对比
Table 1 Comparison of performance metrics between proposed method and method in reference [40]

方法	性能指标		
	$J(k)$	$ e(k) < 0.5$ 的占比/%	$ u(k) < 15$ 的占比/%
文献[40]	0.2318	78.8	99.8
本文方法	0.2276	89.9	99.9

本文方法与文献[40]相比,当 $k = 16000$ 时, $J(k)$ 下降 1.8%, $|e(k)| < 0.5$ 占比提高 11.1%,

$|u(k)| < 15$ 占比提高 0.1%.

3.2.2 实验验证

以图 4 所示的换热装置为被控对象,以热风频率为控制输入 $u(k)$,以热风空气流量为输出 $y(k)$,通过控制冷风机频率改变冷风空气流量作为未知变化干扰 $v(k)$.采样周期为 500 ms.采用式(7)作为热风流量 PID 的性能指标,其中, $\delta = 10, u_{\max} = 14$.

设定值为

$$y_{sp}(k) = \begin{cases} 60, & 0 < k < 500; \\ 90, & 500 \leq k < 1000; \\ 75, & k \geq 1000. \end{cases} \quad (9)$$

按式(10)改变冷风机频率 $u_d(k)$,产生的冷风流量作为干扰,

$$u_d(k) = C(k) + A(k) \sin(20\pi k). \quad (10)$$

其中: $A(k)$ 为正弦波幅值; $C(k)$ 为偏移量. 即

$$A(k) = \begin{cases} 0, & 0 < k < 100, \\ 2.5, & 100 \leq k < 900, \\ 3, & k \geq 900; \end{cases} \quad C(k) = \begin{cases} 0, & 0 < k < 100, \\ 1.5, & 100 \leq k < 900, \\ 3, & k \geq 900. \end{cases}$$

采用 PID 优化整定算法, 可得 $\theta_\phi = 0.54, K_\phi = 2.75, \rho_K = 0.25, \rho_T = 0.89$. PID 控制器参数为

$$K_p = 0.089, K_i = 0.01, K_D = 0.23. \quad (11)$$

采用系统辨识与自适应深度学习相结合的热风流量 PID 控制过程的数字孪生模型为

$$y(k) = b_0 u(k-1) + \tilde{v}(k). \quad (12)$$

式中: $b_0 = 1.021$. $\tilde{v}(k)$ 的自适应深度学习模型的单个神经元的输入变量 $x(k) = [y(k), e(k), u(k), \tilde{v}(k-1)]$. 采用文献[27]的自适应深度学习模型结构与训练方法, 确定神经元个数 $n=4$, 节点数 $h=250$, 层数 $L=3$. 数字孪生驱动的 PID 在线优化整定算

法的价值神经网络、策略神经网络采用全连接层与层归一化组织的多层感知神经网络^[27], 价值神经网络层数 $L=3$, 每层神经元个数 $n=128$, 基于时序差分校正网络参数的加权因子 $\alpha_1 = 0.01$, 策略神经网络层数 $L=2$, 各层神经元个数 $n=128$. 基于梯度上升校正网络参数的加权因子 $\alpha_2 = 0.001$. 优化的 PID 参数为

$$K_p^* = 0.055, K_i^* = 0.001, K_D^* = 0.067. \quad (13)$$

自适应切换机制的时间限定区间 $T=50$, J 和 J_1 的上限值 $\delta_J = 60$, J_e 和 J_{e_1} 超出目标值上界 $\delta_e = 3$, J_u 和 J_{u_1} 超出目标值上界 $\delta_u = 10$.

采用图 3 所示的软件定义的智能控制系统结构实现上述 PID 控制方法, PID 优化整定算法与自学习自优化 PID 控制方法的控制效果如图 6 所示.

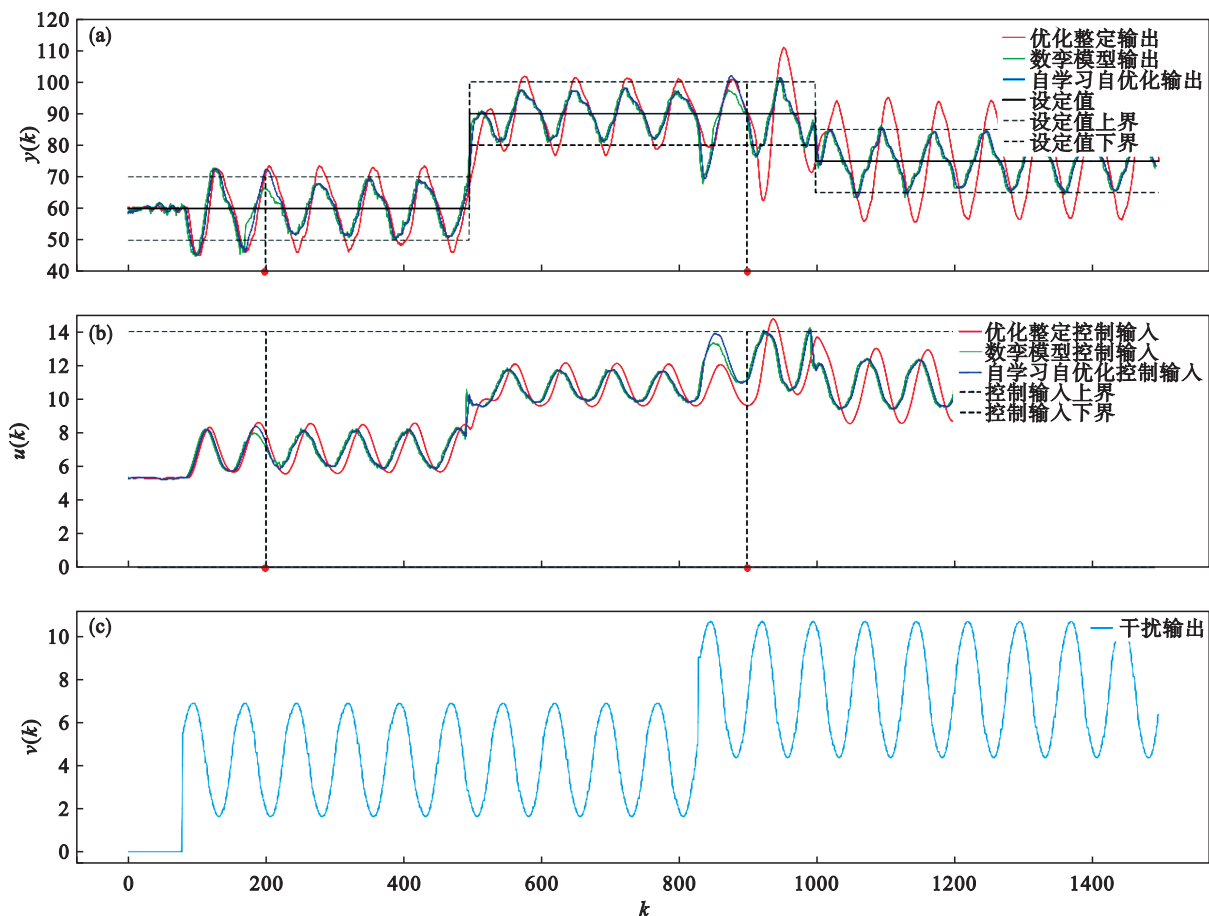


图 6 PID 参数自优化前后控制效果对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of control effect before and after self-optimization of PID parameters

(a)—被控输出; (b)—控制输入; (c)—干扰.

当 $k=200$ 时, $J = 114.03 > 60$, $J_1 = 56.48 < 60$, 触发切换机制, 优化的 PID 参数(式(13))开环自校正被控对象控制器参数(式(11)). 当 $k=895$ 时刻, 数字孪生驱动的 PID 在线优化整定算法优化的 PID 参数为

$$K_p^* = 0.08, K_i^* = 0.02, K_D^* = 0.05. \quad (14)$$

当 $k=900$ 时, $J = 104.84 > 60$, $J_1 = 58.89 < 60$, $J_e = 4 > 3$, $J_{e_1} = 0 < 3$, 触发切换机制, 优化的 PID 参数(式(14))开环自校正被控对象控制器参数(式(13)), 采用性能指标(式(7))对控制效果进行评

价,结果如表2所示。

表2 PID优化整定与自学习自优化PID的控制效果对比结果

Table 2 Comparison results of control effects of PID optimization tuning and PID self-learning and self-optimization

方法	性能指标		
	$J(k)$	$ e(k) < 10$ 的占比/%	$ u(k) < 14$ 的占比/%
PID优化整定	101.63	57.16	98.34
自学习自优化PID	41.14	90.47	99.54

自优化PID与PID优化整定相比,当 $k=1600$ 时, $J(k)$ 下降59.52%, $|e(k)| < 10$ 占比提高33.31%, $|u(k)| < 14$ 占比提高1.2%。

4 软件定义智能控制系统的研究方向

软件定义智能控制系统的研究方向需问题驱动,并将计算机与软件技术、通信技术、控制技术与工业自动化技术深度融合与协同,围绕攻克软件定义控制系统存在的难题和实现软件定义控制系统智能化存在的难题开展研究。

针对虚拟PLC的抖动率和随机延迟高于真实PLC的难题,开展如下研究:1)软件定义PLC的先进工业通信技术与软件技术;2)计算机技术、通信技术、控制技术协同设计与深度融合的虚拟PLC;3)实时环境与非实时环境协同的高性能虚拟PLC;4)基于IEC 61499标准的云端协同软件定义控制系统。

针对软件定义控制系统智能化缺乏工业控制智能算法无法实现智能化的难题,开展如下研究:1)因果关系不清的复杂工业被控对象动态特性和控制过程数字孪生智能建模算法;2)视频与变量融合的复杂工况的智能感知与识别算法;3)自学习自优化高性能智能控制算法;4)感知与控制一体化智能算法;5)元宇宙驱动的控制系统智能监控算法;6)虚拟PLC与工业控制智能算法相结合的软件定义智能控制系统。

5 结 论

本文在综述软件定义控制系统的研究现状和分析控制系统在三次工业革命中的作用和发展状况的基础上,提出软件定义控制系统智能化

发展方向和软件定义智能控制系统是控制系统在新一轮工业革命中的发展方向。软件定义端边云协同的PID整定智能系统案例表明:将工业人工智能、工业互联网等新一代信息技术与软件定义控制系统紧密融合与协同为发展软件定义智能控制系统开辟了新途径。最后,提出了软件定义智能控制系统的主要研究方向。

参考文献:

- [1] Gaffurini M, Bellagente P, Depari A, et al. Virtual PLC in industrial edge platform: performance evaluation of supervision and control communication [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 3511810.
- [2] 柴天佑. 工业人工智能与工业互联网协同实现生产过程智能化及其未来展望[J]. *控制工程*, 2023, 30(8): 1378-1388.
(Chai Tian-you. Industrial AI and industrial Internet collaboratively achieving production process intelligence and its future perspectives [J]. *Control Engineering of China*, 2023, 30(8): 1378-1388.)
- [3] Perez D J, Waltl J, Prenzel L, et al. How real (time) are virtual PLCs? [C]//2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Stuttgart: IEEE, 2022: 1-8.
- [4] Cruz T, Simões P, Monteiro E. Virtualizing programmable logic controllers: toward a convergent approach [J]. *IEEE Embedded Systems Letters*, 2016, 8(4): 69-72.
- [5] Hegazy T, Hefeeda M. Industrial automation as a cloud service [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 26(10): 2750-2763.
- [6] Xia Y Q, Zhang Y, Dai L, et al. A brief survey on recent advances in cloud control systems [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(7): 3108-3114.
- [7] Xia Y Q. Cloud control systems [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015, 2(2): 134-142.
- [8] Shi W S, Cao J, Zhang Q, et al. Edge computing: vision and challenges [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646.
- [9] Dai W B, Nishi H, Vyatkin V, et al. Industrial edge computing: enabling embedded intelligence [J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2019, 13(4): 48-56.
- [10] Langner R. To kill a centrifuge: a technical analysis of what Stuxnet's creators tried to achieve [EB/OL]. (2013-12-15) [2025-06-10]. <http://www.langner.com/en/wp-content/uploads/2013/11/To-kill-a-centrifuge.pdf>.
- [11] Reeser J, Jankowski T, Kemper G M. Maintaining HMI and SCADA systems through computer virtualization [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(3): 2558-2564.
- [12] Sollfrank M, Loch F, Denteneer S, et al. Evaluating docker for lightweight virtualization of distributed and time-sensitive applications in industrial automation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 17(5): 3566-3576.
- [13] Taibi D, Lenarduzzi V, Pahl C. Processes, motivations, and issues for migrating to microservices architectures: an empirical investigation [J]. *IEEE Cloud Computing*, 2017, 4(5): 22-32.
- [14] Sarkar S, Vashi G, Abdulla P P. Towards transforming an

- industrial automation system from monolithic to microservices [C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Turin: IEEE, 2018: 1256–1259.
- [15] Ferrari P, Sisinni E, Bellagente P, et al. On the use of LoRaWAN and cloud platforms for diversification of mobility-as-a-service infrastructure in smart city scenarios [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 5501109.
- [16] Gaffurini M, Brandão D, Rinaldi S, et al. Characterizing the real-time communication performance of virtual PLC in industrial edge platform [J]. *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*, 2025, 4: 5500311.
- [17] Vyatkin V. IEC 61499 as enabler of distributed and intelligent automation: state-of-the-art review [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, 7(4): 768–781.
- [18] Lyu G L, Brennan R W. Towards IEC 61499-based distributed intelligent automation: a literature review [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 17(4): 2295–2306.
- [19] Dai W B, Zhang Y Y, Kong L B, et al. Design of industrial edge applications based on IEC 61499 microservices and containers [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 19(7): 7925–7935.
- [20] Jin J, Pang Z B, Kua J, et al. Cloud-fog automation: the new paradigm towards autonomous industrial cyber-physical systems [J/OL]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025: 3574587 [2025-06-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11016756>.
- [21] Lyu H H, Yan J, Zhang J L, et al. Cloud-fog automation: heterogenous applications over new-generation infrastructure of virtualized computing and converged networks [J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2024, 18(4): 30–42.
- [22] Xia C Q, Liu Y Q, Xia T H, et al. Control-communication-computing co-design in cyber-physical production system [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(6): 5194–5204.
- [23] Lyu H H, Pang Z B, Bengtsson A, et al. Latency-aware control for wireless cloud-fog automation: framework and case study [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 22: 5400–5410.
- [24] Bhimavarapu K, Pang Z B, Dobrijevic O, et al. Unobtrusive, accurate, and live measurements of network latency and reliability for time-critical Internet of Things [J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2022, 5(3): 38–43.
- [25] 柴天佑, 丁进良. 流程工业智能优化制造 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(4): 51–58.
(Chai Tian-you, Ding Jin-liang. Smart and optimal manufacturing for process industry [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(4): 51–58.)
- [26] 柴天佑, 刘强, 丁进良, 等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望 [J]. *中国科学(技术科学)*, 2022, 52(1): 14–25.
(Chai Tian-you, Liu Qiang, Ding Jin-liang, et al. Perspectives on industrial-Internet-driven intelligent optimized manufacturing mode for process industries [J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2022, 52(1): 14–25.)
- [27] 柴天佑, 周正, 郑锐, 等. 端边云协同的PID整定智能系统 [J]. *自动化学报*, 2023, 49(3): 514–527.
(Chai Tian-you, Zhou Zheng, Zheng Rui, et al. PID tuning intelligent system based on end-edge-cloud collaboration [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 514–527.)
- [28] Chai T Y, Xing F X, Zheng R, et al. An anti-latency intelligent control for 5G wireless networks based on end-edge-cloud collaboration [J/OL]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025: 3574593 [2025-06-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11020608>.
- [29] Chai T Y, Zhou Z, Cheng S Y, et al. Industrial metaverse-based intelligent PID optimal tuning system for complex industrial processes [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, 54(11): 6458–6470.
- [30] Carlson W B. A history of control engineering, 1800–1930 Stuart Bennett [J]. *Technology and Culture*, 1982, 23(4): 657–658.
- [31] Cruiser E. “Mechanical mike” (the evolution of the modern airplane autopilot) [EB/OL]. (2013-06-24) [2025-06-10]. <https://dodlithr.blogspot.com/2013/07/mechanical-mike-1930s-forefather-of.html>.
- [32] Mayr O. Zur frühgeschichte der technischen regelungen [M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1970: 272–274.
- [33] Morley D. Programmable controllers: how it all began [M]. Downers Grove: WTHW Media, LLC, 2008: 82–86.
- [34] Strothman J. M&C technology history more than a century of measuring and controlling industrial processes [J]. *Inter-International Journal for Measurement Control*, 1995, 42(6): 52–78.
- [35] Guo L. Feedback and uncertainty: some basic problems and results [J]. *Annual Reviews in Control*, 2020, 49: 27–36.
- [36] Samad T. A survey on industry impact and challenges thereof [technical activities] [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2017, 37(1): 17–18.
- [37] Borase R P, Maghade D K, Sondkar S Y, et al. A review of PID control, tuning methods and applications [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2021, 9(2): 818–827.
- [38] Åström K, Hägglund T. PID controllers theory, design and tuning [M]. 2nd ed. Research Triangle Park: ISA, 1995: 64–69.
- [39] 柴天佑, 郑锐, 邢方新, 等. 工业过程控制智能化及未来发展展望 [J]. *中国科学(信息科学)*, 2025, 55(7): 1555–1570.
(Chai Tian-you, Zheng Rui, Xing Fang-xin, et al. Intelligence for industrial process control: development and prospects [J]. *Scientia Sinica(Informationis)*, 2025, 55(7): 1555–1570.)
- [40] Nie Z Y, Li Z Y, Wang Q G, et al. A unifying Ziegler-Nichols tuning method based on active disturbance rejection [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, 32(18): 9525–9541.
- [41] 刘宁, 柴天佑. PID控制器参数的优化整定方法 [J]. *自动化学报*, 2023, 49(11): 2272–2285.
(Liu Ning, Chai Tian-you. An optimal tuning method of PID controller parameters [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(11): 2272–2285.)