智能算法在自动化控制系统中的应用与优化

王玉英
山东交通职业学院　山东　潍坊　261206

摘　要：本文以工业自动化控制系统为对象，阐述工控系统架构和各类智能算法的核心原理，分析它们在过程控制、运动控制、分布式集群工控中的实际应用，总结算法实时性不够、极端工况收敛差、系统不好维护等工程痛点。结合硬件和工况约束，对粒子群、模糊神经网络以及系统协同架构进行优化。通过仿真和制药厂的工程验证表明，这套方案能提升控制精度和响应速度，降低运维和生产成本，有较强的工业落地价值。

关键词：智能算法；自动化控制系统；应用；优化

引言：智能制造推进中，工控系统复杂度上升，非线性、大滞后、多扰动等工况频现。传统 PID 自适应能力不足，难以满足高精度要求。模糊控制、神经网络、群智能优化等算法自适应优势明显，但落地面临算力不匹配、鲁棒性不足等问题。本文从工程需求出发，梳理智能算法应用路径，针对性优化算法与架构，为工控升级提供可行方案。

1 相关基础理论概述

1.1 自动化控制系统基础理论

（1）自动化控制系统一般分感知层、控制层和执行层，核心部件有传感器、控制器、执行机构和人机界面。运行原理是“检测—比较—校正”：传感器采数据，控制器与设定值对比后输出指令，驱动执行机构修正系统状态。（2）闭环控制系统有反馈通道，能根据偏差控制，抗干扰性强。分布式控制系统采用“集中监控、分散控制”，把任务分给多个现场控制器，降低单点故障风险，提高灵活性和可靠性。（3）工控系统三个核心评价指标：稳定性（响应能否收敛到稳态）、响应性（上升时间、调节时间、超调量等动态特性）以及稳态精度（稳态误差大小）。三者相互制约，需根据工况权衡优化。

1.2 主流智能算法核心原理

（1）PID 智能优化在经典 PID 基础上加入模糊自适应、神经网络自整定等方法，动态调整增益，适应非线性时变系统，提升控制品质。（2）遗传算法通过编码、选择、交叉、变异迭代寻优；粒子群算法模拟鸟群觅食，用个体与全局极值更新速度位置。二者均适合复杂参数优化。（3）神经网络利用多层连接和非线性激活函数逼近任意非线性映射，具备自学习能力；模糊控制基于模糊集合与规则库，将专家经验转为模糊推理，处理不确定性和非线性问题。

1.3 智能算法与工控系统适配逻辑

（1）算法选型看控制需求：精度优先用神经网络，响应快用模糊 PID，多目标优化选遗传或粒子群算法。（2）复杂干扰下要满足几个约束：实时性上，算法计算耗时≤ 采样周期；鲁棒性上，参数波动时系统得稳住；资源上，得看嵌入式平台的算力和内存够不够。（3）算法嵌入工控系统有三种常见模式：嵌入式融合（算法跑在控制器固件里）、外挂式协同（上位机优化后下传参数）、边缘分布式（边缘节点部署轻量化算法）。

2 智能算法在自动化控制系统中的具体应用

2.1 过程控制类系统中智能算法应用

（1）温度、压力这类流程参数的稳态控制上，模糊自适应 PID 算法实时盯着偏差和偏差变化率，动态调比例、积分、微分系数，弥补了传统 PID 在非线性、大滞后对象上精度不够的毛病。用在工业热处理炉上，能把炉温稳态精度控制在 ±0.3℃以内，压力波动幅度降了大概 40%[1]。（2）化工连续生产流水线的闭环调控，常用神经网络加预测控制的组合方案。径向基神经网络在线识别反应器里多变量之间的耦合关系，模型预测控制器滚动优化进料流量、加热功率这些参数，实现温度、压力、液位等多个回路的协调控制，避免参数互相牵扯，保证流水线平稳运行，产线波动率降了 50%以上。（3）过程控制里抗外界扰动的落地方法，粒子群优化自抗扰控制算一个。用粒子群离线整定扩张状态观测器的参数，让它能快速估计并补偿原料浓度波动、环境温度变化这些扰动；现场部署时，把优化好的参数固化到 PLC

里，再启用微调机制，系统在大扰动下的恢复时间能缩短 60%。

2.2 运动自动化控制系统算法应用

（1）工业机械臂轨迹跟踪这块，用神经网络滑模控制。径向基神经网络去逼近机械臂动力学里的不确定项，滑模控制器保证跟踪误差能快速收敛。六轴机器人实测下来，末端轨迹跟踪误差小于 0.1 毫米，而且传统滑模那种抖振也明显减轻了，关节力矩波动减少了 35%。（2）伺服电机的转速和位移动态调控，用改进型粒子群算法来优化 PI 控制器参数。以时间乘绝对误差积分为目标，迭代搜索最优增益，电机启停的超调量降了约 30%，转速响应时间也缩短了 20%。这个方案在贴片机、数控机床这些频繁启停的设备上用得很广，动态跟随精度有明显提升。（3）高精度运动工况里的误差补偿，用模糊逻辑加重复控制的方案。模糊规则根据负载和速度自适应地调整补偿系数，重复控制器学习周期性误差并做前馈补偿。精密转台测试中，定位误差从 ±15 角秒压到了 ±3 角秒以内，能满足光刻机、坐标测量机这些高端装备的精度要求[2]。

2.3 分布式工控系统多算法协同应用

（1）多节点工控系统的任务分配上，遗传算法和合同网协议配合着来。遗传算法离线先把最优的任务分配方案算出来，合同网协议在线搞节点间的投标、协商和动态重分配。在智能工厂里，各控制器的负载均衡度提高了 40%，任务总完成时间缩短了 25%，有效避免了单节点过载。（2）车间级自动化集群系统的协同调度，用多目标粒子群优化算法。这个算法同时优化生产节拍、设备能耗和工序约束，生成帕累托最优的调度方案。拿汽车焊装车间来说，AGV 小车、焊接机器人和传送带统一调度后，线体综合效率提升了 18%，设备闲置等待时间减少了 30%。（3）系统故障预判和异常识别这块，卷积神经网络和长短时记忆网络搭着用。CNN 提取振动、电流信号的空间特征，LSTM 抓取时序上的依赖关系，对泵、阀、电机这些部件做健康评估。部署时走边缘计算架构，模型轻量化之后跑在现场智能网关上，能提前 5 到 10 分钟预警异常，误报率低于 5%[3]。

2.4 现有算法实际应用现存问题

（1）算法运算耗时过长、实时性不足问题突出。神经网络训练和在线推理、粒子群迭代寻优都得不少计算资源，可工控 PLC 的主频就那样。深度强化学习一个采样周期往往超过 50 毫秒，根本满足不了伺服系统 1 毫秒以内的实时要求。（2）极端工况下算法容易收敛不稳，控制精度掉得厉害。突变负荷、传感器噪声突然增大时，遗传算法动不动就早熟收敛，模糊规则库也可能失效。实测下来，有些自适应算法在 20% 的参数波动下，精度下降超过 40%。（3）算法之间耦合度高，系统不好维护。多算法协同系统里，PID、神经网络、粒子群这些模块之间参数传递复杂，超参数也没有自愈机制，现场工程师排查故障很费劲，平均修复时间拉长到原来的 2 到 3 倍，运维成本明显增加。

3 面向自动化控制系统的智能算法优化方案与实证分析

3.1 智能算法整体优化目标与优化原则

（1）核心目标是系统的实时性和稳定性。实时性上，算法计算耗时得压到工控采样周期的三分之一以内（通常不超过 10 毫秒），保证控制指令反应够快；稳定性上，闭环系统在参数波动、外部干扰下也要能收敛，不能出现等幅振荡或者发散。（2）优化原则是低成本、好适配、能落地。优先选计算量小的轻量化算法，别依赖 GPU 这些高成本硬件；算法接口要标准化（比如封装成 PLC 功能块），能跟主流 DCS/SCADA 系统快速对接；超参数最好有明确的物理意义，方便现场工程师凭经验整定。（3）多约束条件下的优化边界得设定清楚。硬件资源上，CPU 主频不超过 500MHz，内存不超过 256MB；实时性上，单步运算不能超过采样周期的一半；鲁棒性上，参数变化 ±25% 以内要能稳住。优化边界就是在满足这些约束的前提下，把综合性能指标（比如 ITAE、超调量、调节时间）做到最优。

3.2 主流智能算法针对性优化设计

（1）改进粒子群算法：优化权重系数，让收敛速度提上来。采用非线性递减惯性权重的策略，前期 w = 0.9，重点搞全局搜索；后期 w = 0.2，促进局部精细搜索。再加上变异算子，全局最优值连续 5 代不动的时候，随机重置一部分粒子的位置，防止早熟收敛。仿真下来，优化后收敛代数少了大约 45%。（2）模糊神经网络算法融合优化，把工况拟合误差降下来。把模糊系统的规则层跟神经网络的隐含层对应起来，用分层优化：前件参数（隶属度的中心和宽度）用模糊 C 均值聚类来初始化，后件参数（网络权值）用递推最小二乘在线修正。融合后的模型对非线性对象的拟合误差，比单独用 BP 神经网络低了 30% 以上[4]。（3）自适应 PID 算法的参数自整定优化。基于模型参考自适应控制的框架，拿参考模型输出和实际输出的差值来构造自适应律，用李雅普诺夫理论推导出 PID 增益的在线调整公式。优化后的 PID 参数能跟着工况自动修正，不用人工去调。典型

过程里，超调量从 15%降到了 5%以内。

3.3 算法与控制系统协同架构优化

（1）把算法嵌入架构简化一下，减少算力消耗。用分层计算：离线层（遗传算法、神经网络训练）放上位机跑，在线层只做轻量前向计算或者查表。比如模糊 PID 的推理规则离线生成好查询表，在线直接查表，不用实时推理，运算耗时从毫秒级降到微秒级。（2）搭一套算法冗余容错机制，让系统更稳。设计成双算法热备：主算法（比如改进粒子群 PID）在线跑，备用算法（传统 PID）同步收数据但不输出。主算法要是超时或者收敛出问题了，系统在 1 个采样周期内无缝切到备用算法，同时报警。实测下来，这种机制能让故障工况的失效率降低 65%。（3）软硬件协同适配，跟现场硬件设备搭得上。针对主流 PLC（比如西门子 S7-1200、汇川 AM600）开发算法功能块库，用结构化文本写核心函数，避免动态内存分配。浮点运算密集的地方，拿 ARM 协处理器或 FPGA 来加速，主 CPU 只管逻辑调度，单步运算耗时控制在 PLC 扫描周期以内。

3.4 仿真实验与工程应用效果验证

（1）实验环境、对照组和评价指标。实验平台用的是 MATLAB/Simulink 加真实 PLC 联合仿真。被控对象是个典型的一阶惯性纯滞后系统（K = 2，T = 5s，τ = 1s）。对照组设了传统 PID、标准粒子群 PID、标准模糊 PID。优化组就是前面说的改进粒子群 + 模糊神经网络 + 自适应 PID 协同方案。评价指标选了上升时间 tr、调节时间 ts（±2%）、超调量 σ%、稳态误差 ess，还有单步运算耗时 Tcpu。（2）优化前后的控制性能对比。仿真下来：传统 PID（tr = 2.3s，ts = 12.8s，σ = 23%，ess = 0.9%）；标准粒子群 PID（tr = 1.9s，ts = 8.5s，σ = 13%，ess = 0.6%）；本文优化方案（tr = 1.1s，ts = 4.8s，σ = 4.2%，ess = 0.15%）。参数波动 ±30%时，优化方案超调量只升到 6.5%，对照组则窜到 20%以上。单步运算耗时优化方案为 2.5ms，远低于 10ms 的采样周期，实时性没问题[5]。（3）工业现场落地效果和效益。在一家制药厂的反应釜温度控制系统里试了优化方案。原来 PID 控制时温度波动 ±2.5℃，优化后稳定在 ±0.6℃以内，调节时间从 18 分钟缩到 5 分钟。算法功能块封装好后直接下载到现有 PLC，额外硬件成本不到 2000 块一套。每年减少废品约 80 吨，直接经济效益超过 40 万元。同时设备平均无故障时间延长了 30%，运维工作量少了 50%，推广价值不错。

结束语

把智能算法和自动化控制的适配逻辑理清楚了，分析了多场景应用，找出了问题，对算法和架构做了优化。仿真和现场验证都表明，优化后的算法确实能改善原来的不足，在控制性能、硬件成本和运维难度之间找到了平衡。这次研究的方案能应对常规工业生产工况，但特种工况下的适配性还有提升空间。后续可以再把模型轻量化一点，把故障自愈机制补一补，让算法在高端精密装备和极端化工控场景里也能用得上。

参考文献

[1] 王泽桐. 智能控制策略在机械自动化系统中的应用研究 [J]. 造纸装备及材料,2023,52(9):50-52.

[2] 张潇月. 工程机械电气设备自动化技术分析 [J]. 大众标准化,2023,8(22):60-62.

[3] 朱光波. 基于人工智能的电气自动化控制系统优化策略研究 [J]. 软件,2025,46(5):78-80.

[4] 赵睿智. 基于人工智能的电气自动化控制系统优化研究 [J]. 智慧中国,2025,26(2):123-124.

[5] 刘永豹, 王婷, 范婕. 基于人工智能的电气自动化控制系统优化研究 [J]. 仪器仪表用户,2024,31(10):61-66.