

面向新工科建设的智能控制虚拟仿真实验系统

万春秋¹, 李擎¹, 崔家瑞¹, 杨旭¹, 李希胜¹

(1.北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

摘要: 针对智能控制类课程实验设备陈旧、创新性实验教学资源不足、工程应用性差等问题, 设计开发了基于实际工程问题的智能控制虚拟仿真实验系统。首先, 从教学体系设计和整体架构两方面概要介绍了系统的整体设计思路; 然后, 从实验流程和实验模块设计两方面详细介绍了系统的开发方法; 接着, 以鞍钢 1700mm 热连轧为例分类说明了智能控制实验方法; 最后, 围绕工程教育“以学生为中心”的理念, 概要介绍了教学实施各环节均融入思政元素的实验教学管理模式。经过近两年教学实践表明, 实验系统集成冶金工程背景、自动控制及智能控制知识体系、思政育人为一体, 有利于“智能制造”背景下复合创新型人才培养。

关键词: 智能控制; 实验系统; 虚拟仿真; 以学生为中心; 课程思政

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

The intelligent control virtual simulation experimental system for New Engineering Education

WAN Chunqiu, LI Qing, CUI Jiarui, YANG Xu, LI Xisheng

(1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of obsolete experimental equipment, insufficient innovative experimental teaching resources and poor engineering application in intelligent control courses, a virtual simulation experimental system of intelligent control based on practical engineering problems is designed and developed. Firstly, the overall design idea of the experimental system was introduced from two aspects: the teaching system design and the overall structure. Secondly, the development method is described in detail from two aspects of experimental flow and experimental module design. Thirdly, taking Angang 1700mm hot strip mill as an example, the experimental method is separately explained. Lastly, the experimental teaching management mode which integrates ideological and political elements in every stage of teaching implementation is briefly explained based on the Student-Centered concept of engineering education. The teaching

practice in the past two years shows that this experimental system integrates metallurgical engineering background, knowledge system of automatic control and intelligent control, ideological and political education. And it is conducive to the cultivation of compound innovative talents under the background of “Intelligent Manufacturing”.

Keywords: intelligent control; experimental system; virtual simulation; Student-Centered; ideological and political education

0 引言

随着人工智能、大数据等前沿科技的发展，以智能产业牵引的新一轮科技革命和产业改革正在进行。智能制造作为“中国制造 2025”的主要方向，是促进我国传统制造业向智能化制造转型升级，实现我国由制造大国向制造强国跨越的重要基础。在此背景下，我国工科院校以培养智能制造领域的工程科技人才为己任，相继在智能制造人才培养模式、课程体系、实验平台建设等方面开展了一系列研究与探索^[1-3]，为智能制造人才培养提供了有益参考。

智能控制作为伴随人工智能发展而兴起的一门新兴学科，与其配套的实践教学体系虽有一定的发展，但尚不完善，主要体现在以下几方面：

1) 实验设备相对陈旧，特色化学生能力培养支撑不够。现有实验系统多为相对陈旧的电梯、张力等适用于常规 PID 控制的传统实训设备，无法为模糊控制等智能控制知识体系的实践教学提供有效支撑。同时，实验课程体系主要针对课程知识点分类设计，对符合学校学科特色的“复合创新型工程技术人才”培养目标支撑不够。

2) 实验层次不够完善，综合性实验教学资源建设应用不足。专门用于智能控制实践教学的实验装置较少，主要为针对某一知识点的验证性或简单设计型实验，缺乏以提高学生工程实践性、创新性为目的的综合性实验，难以满足综合性、创新性等多层次实验教学的需求。

3) 实验教学模式不够丰富，对学生主体地位考虑不够，思政育人水平不足。智能控制往往用于解决传统控制方法无法解决的复杂工程问题，实验耗时长，传统的基于线下、实物和课堂的教学模式难以满足教学需求，学生主体作用发挥不够，实验教学效果不够理想。同时，教学设计与实施中，实验课程与思政教育的融合度不高，对学生思政育人支撑不够。

基于智能控制类课程实践教学的需求，结合我校自动化学院冶金自动化学科特点，以带钢热连轧精轧自动厚度控制（Automatic Gauge Control, AGC）系统为研究对象，开展了智能控制虚拟仿真实验系统建设的探索与实践。该实验系统将人工智能算法与冶金行业工程实

际问题结合，有利于加强学生对智能控制算法相关知识点及实现方法的理解和掌握，可为自动化专业生产实践和智能控制类课程的实验教学提供有力支撑。

1 系统整体设计思路

1.1 实验教学体系设计

基于新工科建设背景，面向冶金自动化行业需求，从主题选取、内容设计到教学实施整个虚拟仿真实验教学体系的设计过程均贯穿了 OBE 理念，以弥补传统实验装置的不足，满足智能控制类课程实践教学的最新需求，具体设计方案如图 1 所示。

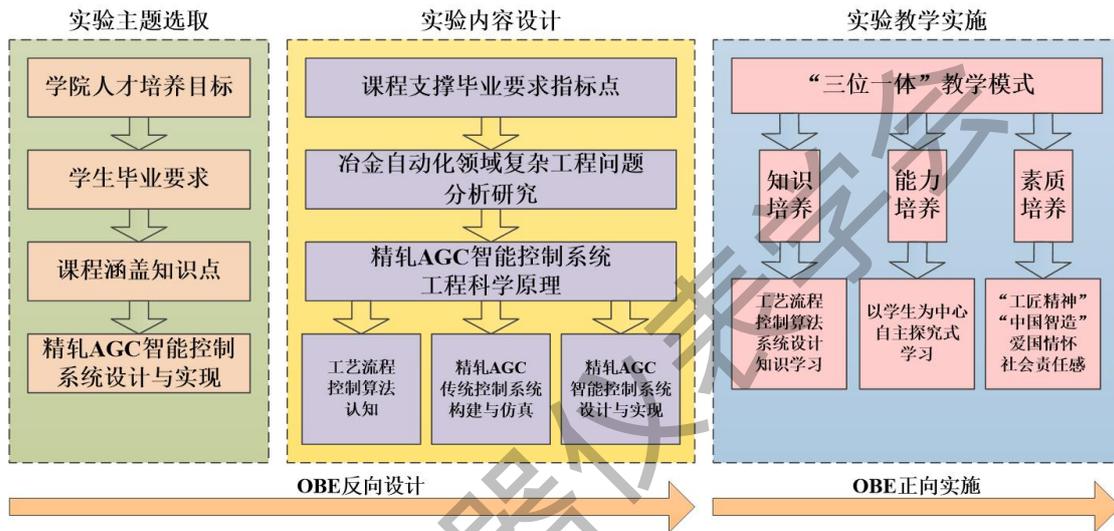


图 1 智能控制虚拟仿真实验教学体系设计方案

(1) 实验主题选取。我院自动化专业人才培养目标为：“培养具有冶金行业特色的自动化领域复合创新型工程技术人才”。根据 OBE 反向设计原则，依据学生培养目标设定毕业要求进而设置课程，需要课程体系涵盖控制理论、人工智能、冶金自动化等领域知识。综合以上因素，实验主题选定为带钢热连轧精轧 AGC 系统，实验主题选取体现了 OBE 理念。

(2) 实验内容设计。实验所属课程支撑的毕业要求指标点重点在于对冶金自动化领域复杂工程问题进行分析和研究。根据 OBE 反向设计原则，实验内容设计需要能呈现出依据工程科学原理进行问题分析、系统设计、系统实现与仿真及获得有效结论的过程。为此，将精轧 AGC 智能控制系统设计所需的工程科学原理与课程目标有机融合完成实验模块设计。

(3) 实验教学实施。OBE 理念教学设计和实施的目标是学生通过教育过程所取得的学习成果^[4]。为此，实验正向教学实施中构建了知识、能力、素质三位一体的教学模式，培养学生解决复杂问题的综合能力和高级思维，保证实验教学达成课程目标进而支持毕业要求。

1.2 系统整体架构

根据新工科建设解决复杂问题学生能力培养目标，设计了由浅入深的递进层次实验系统建设方案，使学生初步认识冶金行业典型生产流程，加深对传统 PID 控制的理解，掌握模糊控制、神经控制等智能控制技术在解决实际工程问题中的应用及研究方法，并根据行业发展需

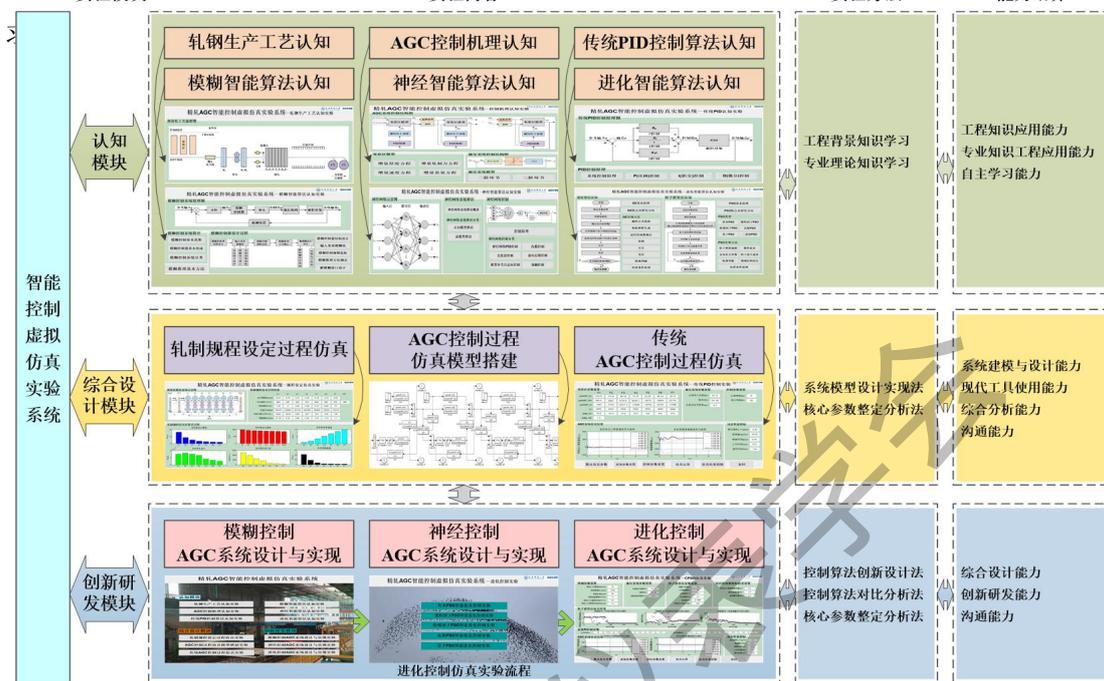


图2 智能控制虚拟仿真实验系统建设方案

(1) 认知性实验。使学生系统地认知了解冶金企业典型环节生产工艺和智能控制典型算法原理，为智能控制系统的设计奠定基础。同时，通过工程背景知识学习培养学生的大国工匠、爱国主义等精神。

(2) 综合设计性实验。使学生能够应用冶金企业生产工艺原理、传统控制算法原理进行精轧 AGC 控制系统的设计与实现，通过综合性项目训练培养学生运用所学理论知识解决冶金行业复杂工程问题的能力。同时，通过核心参数整定研究培养学生精益求精的工匠精神。

(3) 创新研发性实验。使学生能够针对精轧 AGC 系统的复杂性和传统控制算法的局限性，应用智能控制理论知识完成系统的设计与实现，提高学生有效运用所学知识和新技术进行实际工程问题分析与研究的能力。同时，通过控制算法的创新研究培养学生的创新思维。

2 系统开发与设计

系统开发及实验流程为：开发环境搭建→人机界面设计→后台程序编制→系统调试与运行→实验结果研究分析。以基于 PSO 算法的智能控制实验为例，说明系统的具体设计方法。

2.1 实验流程设计

智能控制实验流程如图 3 所示。实验过程中，由学生通过人机交互界面完成系统及算法参数设置，并通过点击“仿真运算”按钮实现智能控制算法的仿真运算，仿真结果通过人机交互界面进行展示。学生根据实验结果判断是否符合控制精度等要求，若符合要求则输出结果，否则重新设置相关参数进行实验研究，实现控制效果的最优化和实验流程的闭环管理。

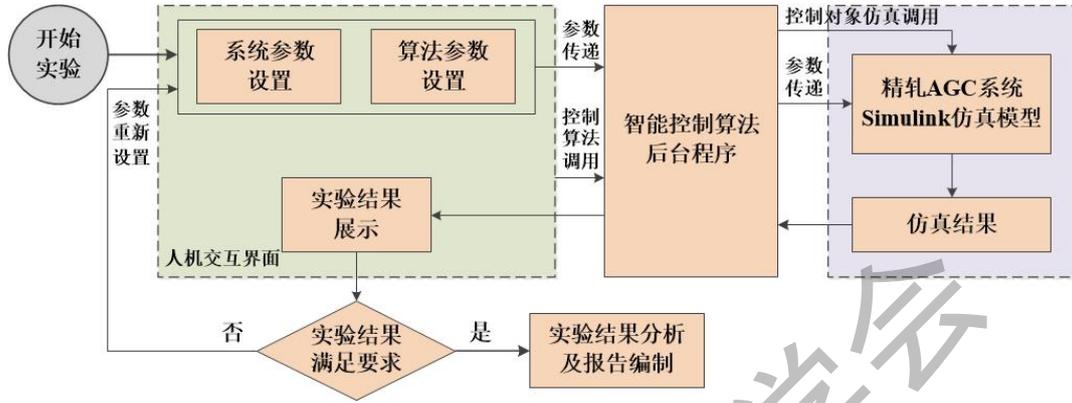


图 3 智能控制实验仿真流程

根据图 3，智能控制实验设计主要由人机交互界面、后台程序和控制对象模型三部分组成，各部分关系如下：

(1) 人机交互界面基于 Matlab/GUI 设计，实现系统及算法参数设置功能和实验结果展示功能，并通过回调程序实现系统及算法参数传递和控制算法程序调用；

(2) Simulink 仿真模型为基于冶金企业真实生产过程搭建的控制对象仿真模型，智能控制算法后台程序通过调用 Simulink 仿真模型实现控制方案性能指标的仿真运算。

通过以上实验方案的设计与实施，主要实现以下教学目标：

(1) 熟悉精轧 AGC 系统工艺及控制原理的基础上，能够开展 Simulink 仿真模型设计；
 (2) 通过智能控制算法后台程序的设计，在深入理解智能控制算法相关理论知识的基础上，熟悉程序设计流程，掌握控制系统的数字仿真和软件编程技术；

(3) 通过智能控制仿真实验的实施，探究各类智能控制算法在精轧 AGC 系统中的应用效果，以及各设计参数对系统性能的影响规律，掌握先进控制算法在实际工程问题中的研究方法，培养提升学生的工程伦理、工程实践能力和工程创新思维。

2.2 实验模块开发设计

根据图 3 实验流程，虚拟仿真实验的开发设计主要包括三个模块：人机交互模块、控制对象仿真模块和智能控制算法模块。

1) 人机交互界面设计

根据 2.1 节实验方案,智能控制实验人机交互界面主要包括三部分:仿真参数设置区域、功能按钮区域和仿真结果展示区域,实验界面整体设计方案如图 4 所示。

(1) 仿真参数设置区域。主要包括系统参数和算法参数设置,用于带钢、液压系统等系统参数和 PSO、适应度函数指标权重等算法参数设置。

(2) 仿真结果展示区域。主要包括 3 类实验结果,一是 PSO 算法优化运算中控制指标优化迭代过程,二是 PSO 算法最优 PI 控制方案,三是基于最优 PI 控制方案的精轧 AGC 系统仿真结果,向学生直观展示 PSO 算法的优化迭代过程和不同算法参数对控制效果的影响。

(3) 功能按钮区域。主要包括“默认仿真参数”、“系统参数重置”、“算法参数重置”、“仿真运算”等功能按钮,用于学生实验过程中实施参数设置、仿真运算等实验操作。

2) 控制对象仿真模型设计

精轧 AGC 系统为典型的多变量、非线性、强耦合且具有高阶次特性的复杂控制系统,通过群智能优化算法与传统控制方法的融合,可实现带钢厚度的自适应优化控制,降低传统方法控制参数整定的难度,明显提升系统的控制性能。综上,基于 PSO 算法的精轧 AGC 智能控制系统结构如图 5 所示。

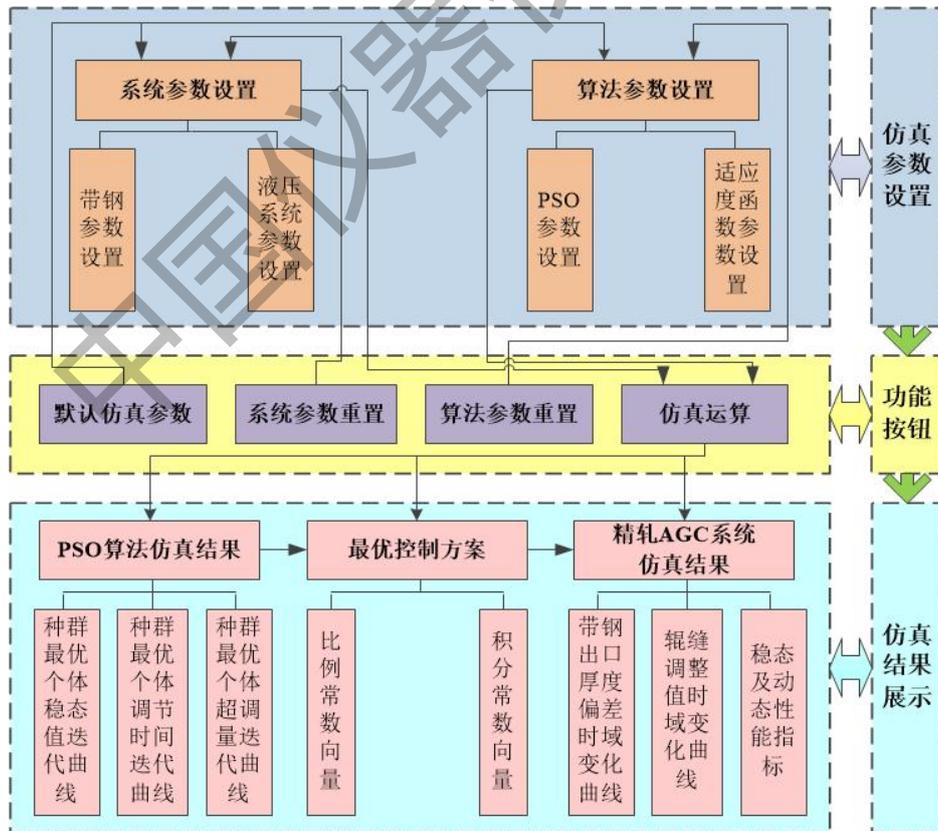


图 4 人机交互界面结构和功能示意图

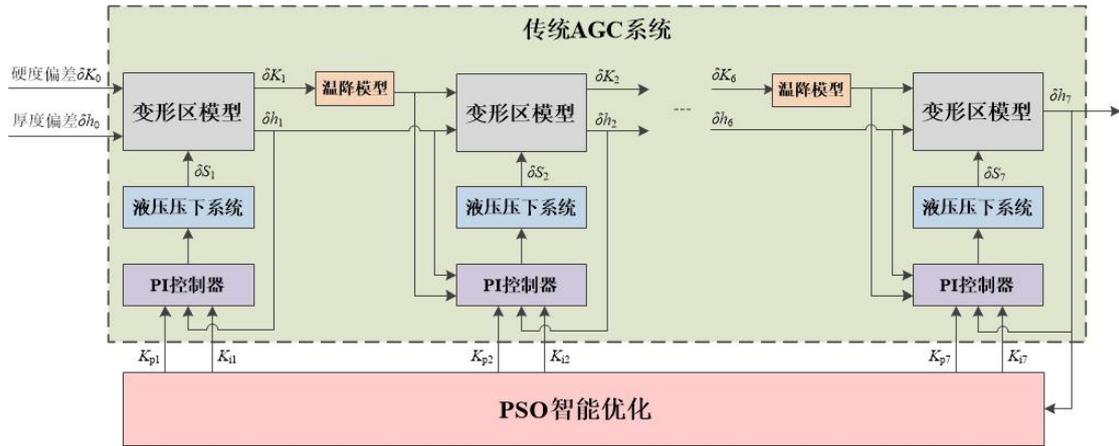


图5 精轧 AGC 智能控制系统结构图

精轧 AGC 智能控制系统包括传统 AGC 系统和 PSO 智能优化两部分,各部分功能如下:

(1) 传统 AGC 系统。核心为 Simulink 组件搭建的 AGC 系统控制过程仿真模型,用于执行控制算法的仿真运算,涉及的数学模型主要包括变形区模型、液压模型和温降模型^[5-8]。

(2) PSO 智能优化。核心为 PI 控制参数的优化整定,实现精轧 AGC 系统的智能优化控制,算法迭代通过调用 Simulink 仿真模型实现智能控制问题各项性能指标的仿真运算。

3) 智能控制算法设计

(1) 粒子群算法

粒子群 (Particle Swarm Optimization, 简称 PSO) 算法是受鸟群的捕食行为启发而提出的一种基于种群的全局随机优化算法。该算法不需要计算优化问题的导数,代码简单,收敛速度快,比较适用于非线性实值优化问题的求解^[9],在冶金、电网等领域复杂系统的自适应优化控制研究中获得了广泛应用^[10-11]。

根据粒子位置迭代方程的表达形式,粒子群算法的发展经历了多种形式,包括基本形式 PSO (Basic PSO, 简称 BPSO) ^[9]、惯性因子形式 PSO (Inertia Weights PSO, 简称 IPSO) ^[12]、收缩因子形式 PSO (Constriction Factors PSO, 简称 CPSO) ^[13]、高斯形式 PSO (Gaussian PSO, 简称 GPSO) ^[14]、量子形式 PSO (Quantum-behaved PSO, 简称 QPSO) ^[15]等。其中,CPSO 算法在实际工程问题研究中应用较多,其粒子运动的速度和位置迭代方程为

$$\begin{aligned} V_i(t+1) &= \chi(V_i(t) + c_1 r_1(Z_i^p(t) - Z_i(t)) + c_2 r_2(Z^s(t) - Z_i(t))) \\ Z_i(t+1) &= Z_i(t) + V_i(t+1) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $Z_i = [z_{i,1}, z_{i,2}, \dots, z_{i,n}]^T$ 为粒子 i 位置,即解向量, $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}]^T$ 为粒子 i 速度, $Z_i^p = [z_{i,1}^p, z_{i,2}^p, \dots, z_{i,n}^p]^T$ 为自身经历最好位置, $Z^s = [z_1^s, z_2^s, \dots, z_n^s]^T$ 为种群经历最好位置; $i \in \{1, \dots, N\}$ 为粒子编号, N 为粒子数量; $j \in \{1, \dots, n\}$ 为粒子维数, n 为解向量维数;

$t \in \{1, \dots, T_{\max}\}$ 为当前迭代代数, T_{\max} 为最大迭代次数; $\chi = \frac{2}{|2 - c - \sqrt{c^2 - 4c}|}$ 为收缩因子, 满足 $c = c_1 + c_2 (c > 4)$, c_1 为认知参数, c_2 为社会参数, r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 内均匀分布随机数。

(2) 适应度函数

根据产品质量控制要求, 精轧 AGC 系统的性能指标主要为带钢出口厚度的控制精度和控制过程的调节时间及超调量, 为多目标优化控制问题, 智能参数优化整定的目标函数为

$$\begin{cases} \min f(Z) = \omega_1 \delta h'(Z) + \omega_2 t_s'(Z) + \omega_3 \sigma_p'(Z) \\ \text{s.t. } \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (\omega_1 > 0, \omega_2 > 0, \omega_3 > 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $Z = [K_{p1}, \dots, K_{p7}, K_{i1}, \dots, K_{i7}]^T$ 代表 PI 控制器的比例常数和积分常数, 为精轧 AGC 智能控制问题的优化变量, $f(Z)$ 代表控制方案 Z 的综合性能指标, $\delta h'(Z)$ 为归一化处理后的带钢出口厚度偏差, $t_s'(Z)$ 为调节时间, $\sigma_p'(Z)$ 为超调量, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为相应权重系数。

(3) 算法流程

根据精轧 AGC 智能控制系统设计思路和 PSO 算法实现原理, 算法流程如图 6 所示。

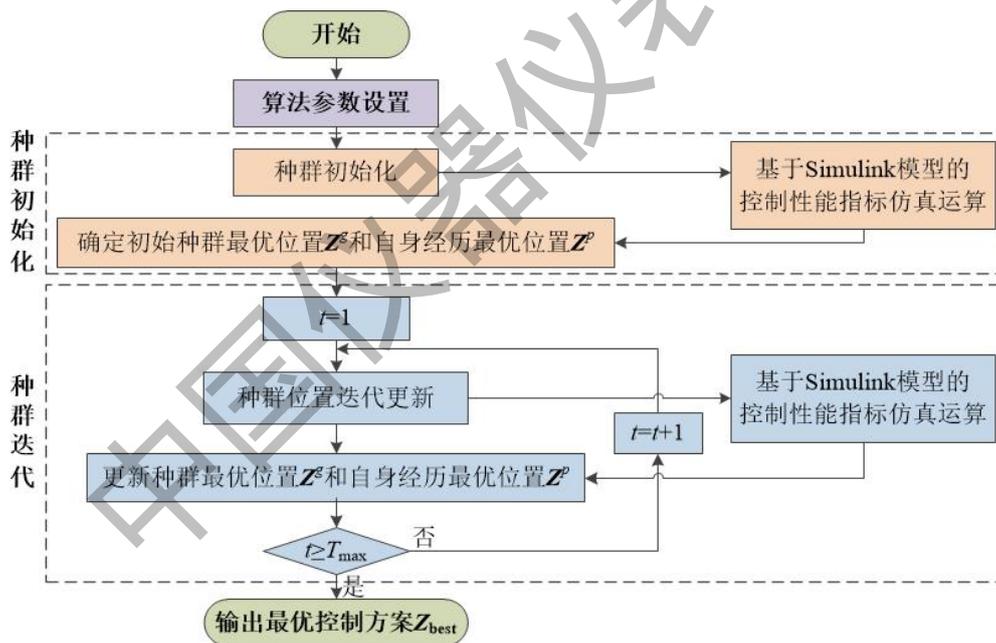


图 6 精轧 AGC 智能控制算法流程图

4) 实验系统代码设计

完成人机交互界面、智能控制算法等设计之后, 通过回调函数进行控制算法仿真功能实现, 具体代码设计流程及调用关系如图 7 所示。

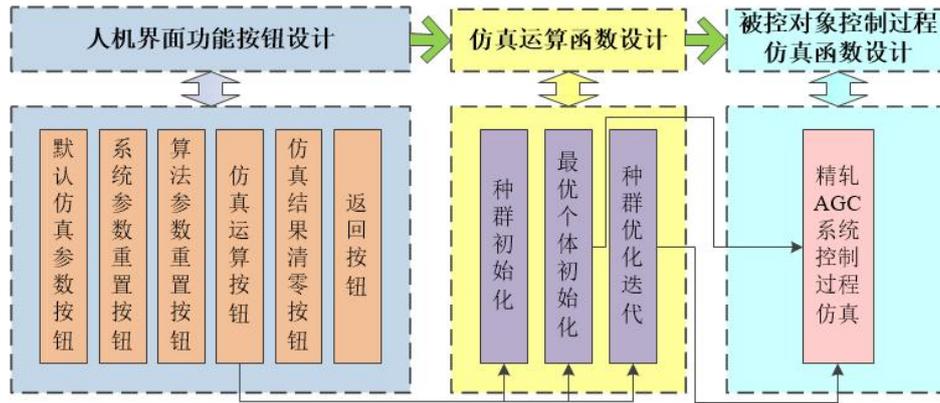


图 7 程序代码设计结构框图

(1) 人机交互界面功能按钮代码设计

根据人机交互界面各按钮功能，分别完成回调函数代码设计，具体如下：

- ① ParameterDefault_pushbutton_Callback, “默认仿真参数”按钮回调函数；
- ② SystemParameterReset_pushbutton_Callback, “系统参数重置”按钮回调函数；
- ③ AlgorithmParameterReset_pushbutton_Callback, “算法参数重置”按钮回调函数；
- ④ SimulationCalculation_pushbutton_Callback, “仿真运算”按钮回调函数；
- ⑤ ResultClear_pushbutton_Callback, “仿真结果清除”按钮回调函数；
- ⑥ Return_pushbutton_Callback, “返回”按钮回调函数。

(2) 仿真运算函数代码设计

仿真运算回调函数实现的主要功能包括：系统参数和算法参数调用、智能控制仿真运算、仿真结果输出和仿真图形绘制。智能控制仿真运算通过调用以下 PSO 算法迭代函数实现：

- ① initPop.m, 种群初始化函数；
- ② initPBestGBest.m, 最优个体初始化函数；
- ③ regulateRenewCPSO.m, 种群优化迭代函数（面向 CPSO 算法）。

(3) 被控对象控制过程仿真函数代码设计

initPBestGBest.m 和 regulateRenewCPSO.m 两个函数中均需要调用 CalculateFitness.m 函数完成 PI 控制方案性能指标的运算。

CalculateFitness.m 函数通过以下指令实现精轧 AGC 系统的仿真：

```
options=simset('SrcWorkspace','current');%设置 Simulink 从当前工作空间运行
[t,x,y]=sim('SimulinkControlModelAGC',[],options);%精轧 AGC 系统仿真
```

3 实验案例分析

以鞍钢 1700 mm 热连轧为例，通过 Matlab 仿真对基于 PSO 算法的精轧 AGC 智能控制系统实验方法进行说明。钢种为 Q235，带钢入口厚度 $h_0=32$ mm，成品厚度 $h=2$ mm，带钢来料厚度偏差 $\delta h_0=1.5$ mm，温度偏差 $\delta T=20^\circ\text{C}$ 。7 机架 AGC 系统 PI 控制器参数合计为 14 个，因此 PSO 算法优化变量的个数为 $n=14$ 。PI 控制方案适应度函数中，带钢出口厚度偏差权重均取 $\omega_1=0.5$ ，调节时间权重均取 $\omega_2=0.3$ ，超调量权重均取 $\omega_3=0.2$ 。

3.1 案例 1—算法对比分析

首先进行传统 PI 算法和基于各形式 PSO 的智能控制算法的效果分析。为保证实验的客观性，各形式 PSO 算法的粒子个数 N 、位置下界 Z_{\min} 和上界 Z_{\max} 、最大速度 V_{\max} 、最大迭代次数 T_{\max} 均相同，仅位置迭代公式的学习因子 (c_1, c_2) 等根据不同形式 PSO 算法的运行机制略有不同，实验结果如图 8 所示。

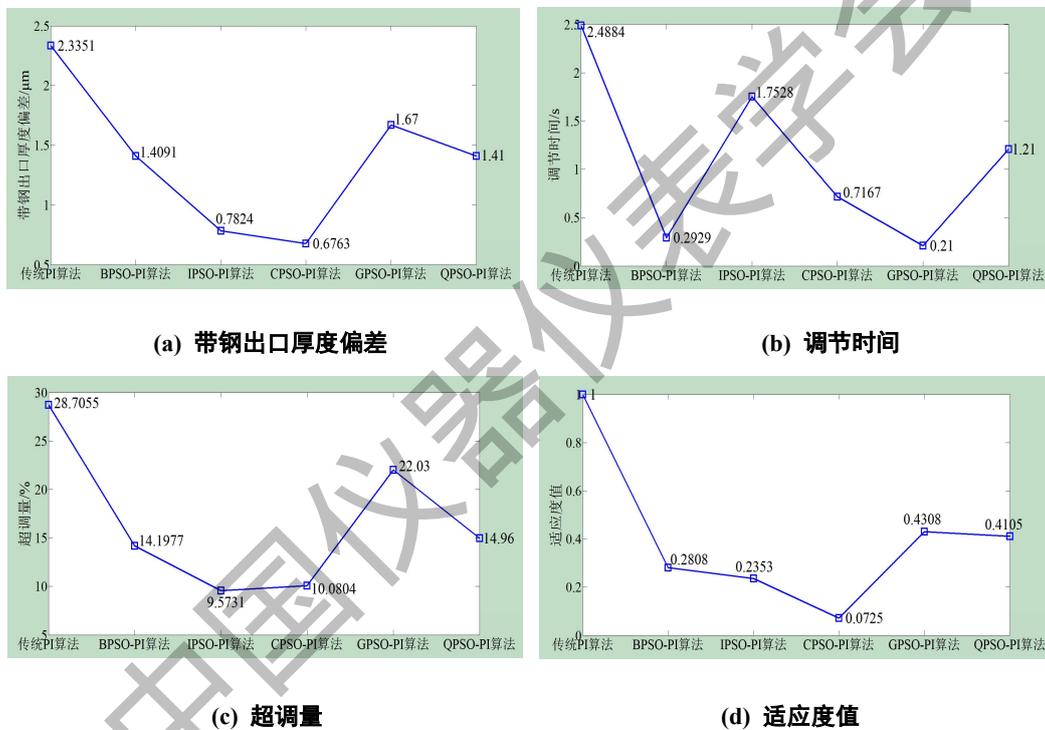


图 8 不同控制算法仿真实验结果

根据图 8，基于不同形式 PSO 的智能控制算法性能指标均优于传统 PI 算法，其中 CPSO-PI 算法综合适应度值最低，在控制精度、快速性和波动性方面均明显优于传统 PI 算法，取得最优综合控制结果。

3.2 案例 2—算法参数研究分析

在基于粒子群算法的智能控制问题研究中，种群粒子个数 N 、认知参数 c_1 、社会参数 c_2 等参数取值对系统的控制精度、稳定性、快速性等控制性能具有很大影响，需要根据具体问题的特性通过实验确定。以下以 CPSO 算法为例，对算法参数对系统控制性能的影响效果进行分析，实验结果如图 9 所示。

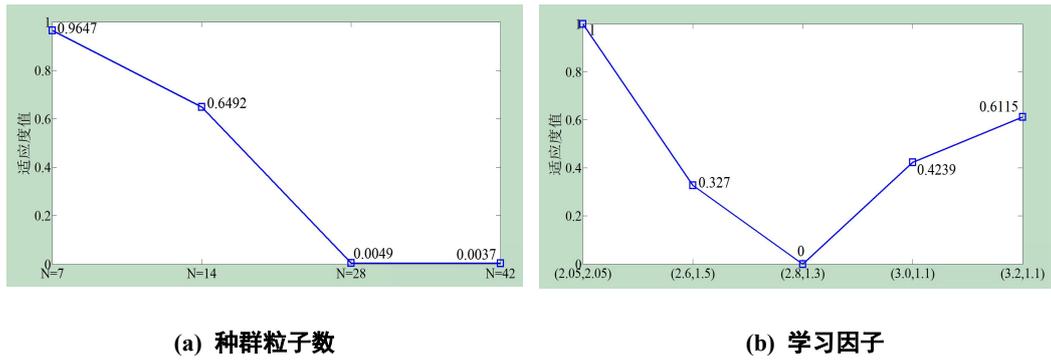


图9 不同算法参数仿真实验结果

(1) 种群粒子数对算法性能的影响。令粒子个数 N 分别为 7、14、28 和 42，其他参数同 3.1 节，实验结果如图 9(a)所示。当粒子个数 $N=7、14$ 时，由于粒子个数较少，种群多样性较低，仿真实验更容易陷入局部极值，系统的控制精度、快速性等综合性能明显偏低。当粒子个数 N 分别为 28 和 42 时，系统的综合性能明显提升并基本一致，而粒子个数 $N=28$ 计算量比 $N=42$ 低 33.33%。由此表明，粒子个数取 $N=28$ 可兼顾系统的优化性能和计算效率。

(2) 学习因子对算法性能的影响。令认知参数 c_1 、社会参数 c_2 和为 4.1 但取不同组合，其他参数取值同 3.1 节，实验结果如图 9(b)所示。当认知参数 c_1 和社会参数 c_2 取组合 (2.8, 1.3) 时，带钢厚度偏差等指标取得最优综合性能。由此表明， $c_1=2.8, c_2=1.3$ 为精轧 AGC 智能控制问题研究中 CPSO 算法的最优取值，达到了粒子种群自我认知和社会信息的平衡。

4 系统教学实施

遵从工程教育“以学生为中心”的理念，教学实践采用“教师为主导、学生为主体”管理模式，突出学生主体地位、激发学生实验积极性的同时，教学实施各环节均融入思政元素，注重学思结合、知行统一，寓价值观培养于能力培养之中^[16]，提升实践育人水平，具体教学方法及实现思路如图 10 所示。

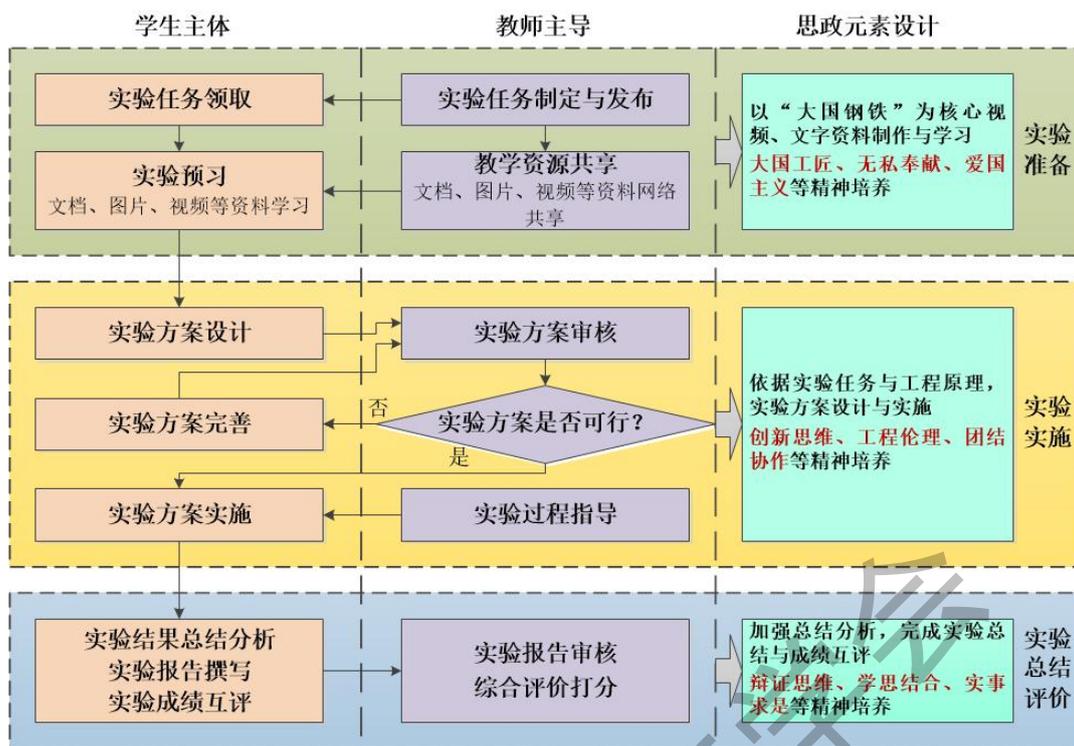


图 10 智能控制虚拟仿真实验教学实施方案

(1) 学生主体地位。实验准备、实施和总结各阶段均由学生作为主体完成，以充分调动学生参与实验的积极性和主动性，激发学生的学习兴趣 and 潜能，让学生能够“学得好”。

(2) 教师主导作用。整个实验过程中，教师在制定与发布实验任务、指导学生实验方案设计与完善、引导学生实验问题思考等方面均发挥着主导作用，让教师能够“教得好”。

(3) 思政元素融入。教学实施各阶段均融入课程思政元素，实现专业知识技能与思政教育的融合，增强学生勇于探索的创新精神、善于解决问题的实践能力，提升综合素质水平。

5 结论

针对智能控制类课程实验教学中存在的问题，面向新工科建设需求，设计开发了精轧 AGC 智能控制虚拟仿真实验系统。将传统控制与人工智能技术相结合，有利于系统地掌握自动控制、智能控制相关的知识，加强对实际工程问题智能控制系统结构及算法设计、系统实现等方面的理解，提升实践创新能力，为实践教学案例设计、虚拟教研室建设等提供支撑。

实验系统教学实施中遵从工程教育“以学生为中心”的理念，发挥教师主导作用的同时突出学生主体地位，充分调动学生参与实验的积极性和主动性。教学实施各环节均融入课程思政元素，有利于增强学生大国工匠、工程伦理、创新思维等精神培养，提升实践育人水平，满足“智能制造”背景下行业对人才培养的最新要求。

参考文献 (References):

- [1] 武晓莉, 介婧, 侯北平, 等. 虚实融合的“智能控制”课程教学改革 [J]. 教育教学论坛, 2021(42): 61-64.
- [2] 高宏岩, 卞瑶瑶, 韩斌. 智能控制综合实验教学设计 [J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(5): 190-196.
- [3] 汤龙飞, 陈炜, 许志红. 智能控制理论与智能电器教学的融合 [J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(6): 187-193.
- [4] 李志义, 朱泓, 刘志军, 等. 用成果导向教育理念引导高等工程教育教学改革 [J]. 高等工程教育研究, 2014(2): 29-34, 70.
- [5] 孙一康. 冷热轧板带轧机的模型与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [6] 孙一康, 瞿寿德, 马正午. 热连轧自动厚度控制系统最优化的仿真研究 [J]. 北京钢铁学院学报, 1982(1): 104-120.
- [7] 王正林, 童朝南, 孙一康, 等. 带钢热连轧 AGC 系统实时仿真 [J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(5): 600-603.
- [8] 庄野, 张辉, 刘新婷. 鞍凌热连轧自动厚度控制系统的实时仿真 [J]. 冶金自动化, 2013, 37(6): 54-58.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1995(4): 1942-1948.
- [10] 冯茜, 李擎, 王耀祖, 等. 约束多目标粒子群算法在烧结配矿优化中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39(05): 923-932.
- [11] 高波, 彭程, 路文梅, 等. 基于改进粒子群算法的电网系统无功电压控制 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 86-90.
- [12] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1998: 69-73.
- [13] EBERHART R C, SHI Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2000(1): 84-88.

- [14] KROHLING R A. Gaussian swarm: a novel particle swarm optimization algorithm [C]//
Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligence Systems,
Singapore, 2004: 372-376.
- [15] SUN J, XU W, FENG B. A global search strategy of quantum-behaved particle swarm
optimization [J]. IEEE Conference on Cybernetics& Intelligent Systems, 2005, 1(11):
111-116.
- [16] 教育部. 关于印发《高等学校课程思政建设指导纲要》的通知[EB/OL]. (2020-06-01)
[2023-10-10]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html.

中国仪器仪表学会