

# 面向新工科建设的加热炉智能燃烧控制虚仿平台的研制

蔺凤琴, 杨旭, 李擎\*, 崔家瑞, 陈相, 李希胜

(1. 北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

**摘要:** 遵循新工科建设对人才培养的要求, 顺应国家智能制造规划, 发挥冶金行业院校特色, 开发了加热炉智能燃烧控制虚仿平台。该平台基于本项目组多年来在加热炉领域实际工程研究成果, 采用工厂实际数据, 复现加热炉智能生产的全过程。本平台设计了 6 大类实训项目, 覆盖从工艺认知到生产过程控制再到系统优化的各个阶段。近年来在自动化、冶金和热能等专业的实践教学表明, 该虚仿平台具有现场模拟的真实性、平台构建的完整性、开发手段的先进性和学科知识的交叉性等特点, 在很大程度上培养了学生解决复杂工程问题的能力。

**关键词:** 新工科; 智能制造; 加热炉; 智能燃烧; 虚拟仿真

**中图分类号:** TP 29

**文献标识码:**

**文章编号:**

## Development of virtual simulation platform of reheating furnace intelligent combustion control for New Engineering Education

Lin Fengqin, Yang Xu, Li Qing\*, Cui Jia-ru, Chen Xiang, Li Xi-sheng

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

**Abstract:** In order to comply with the requirements of New Engineering Education construction for talent cultivation, the national intelligent manufacturing plan, and give full play to the characteristics of metallurgical industry colleges, a virtual simulation platform for intelligent combustion control of reheating furnace was developed. Based on the actual engineering research results of our project team in the field of reheating furnace over the years, the platform adopted the actual data of the factory to reproduce the whole process of reheating furnace intelligent production. This platform designed six categories of practical training projects, covering the each stage from process cognition to production process control and system optimization. In recent years, teaching practice in majors such as automation, metallurgy and thermal engineering indicates that the virtual simulation platform possesses features about authenticity of on-site

simulation, integrity of the platform construction, advancement of development methods and intersectionality of subject knowledge. It has greatly cultivated students' ability to solve complex engineering problems.

**Keywords:** New Engineering Education; intelligent manufacture; reheating furnace; intelligent combustion; virtual simulation

## 1 引言

北京科技大学作为具有冶金特色的行业院校，其自动化专业在轧钢生产自动化方向在国内具有一定的领先优势，同时作为国家级特色专业、国家级一流专业建设点和卓越工程师培养计划专业，已通过了两轮工程教育专业认证<sup>[4]</sup>，在智能制造生产培养方面开展了一些卓有成效的探索和实践<sup>[5-9]</sup>。2017年6月，教育部发布了《关于推荐新工科研究与实践项目的通知》，明确提出加快工程教育改革创新，培养创新型卓越工程科技人才以支撑产业转型升级的要求<sup>[1]</sup>。2018年10月，教育部、工信部、中国工程院发布了《关于加快建设发展新工科实施卓越工程师教育培养计划2.0的意见》，提出了加快新工科建设的总体思路、目标和举措<sup>[2]</sup>。2021年12月，工信部等八部门联合印发《“十四五”智能制造发展规划》，明确指出“智能制造是制造强国建设的主攻方向，其发展程度直接关乎我国制造业质量水平。<sup>[3]</sup>”，为新工科背景下的人才培养提出了明确要求。

随着智能制造向冶金领域的不断深入，轧钢产线的智能化已势在必行。本课题组在冶金加热领域深耕多年，与企业在加热炉智能控制方向有持续的产学研课题合作，如2019年南钢中厚板卷厂热处理炉区域控制集成项目、2020年首钢迁钢二热轧加热炉大数据挖掘项目、2020年华菱涟钢2250厂加热炉模型优化项目、2021年沙钢热处理车间集控中心项目等。

为更好地实现科教融合实践反哺教学，本课题组基于实际工程自主研发了加热炉智能燃烧控制虚仿平台，使学生了解加热生产工艺流程和控制性能指标。基于虚仿平台的实训项目可进行自动化、冶金和热能等专业的实践教学。

## 2 加热炉智能燃烧控制系统

加热炉是热轧产线的重要工序，它将钢坯加热到满足下游工序要求的温度，是连接上游工序（连铸）及下游工序（轧制等）的纽带。加热质量包括钢坯温度的精确性和均匀性直接影响到最终轧制产品的质量。由于高温、高尘的生产环境，以及系统多变量耦合的非线性特点，致使加热炉成为轧钢产线自动控制水平最为薄弱的环节，因此也是生产智能化改造的重点。加热炉

工艺流程从钢坯上料开始，经炉前对中、装炉、炉内加热直至出炉结束，如图 1 所示。

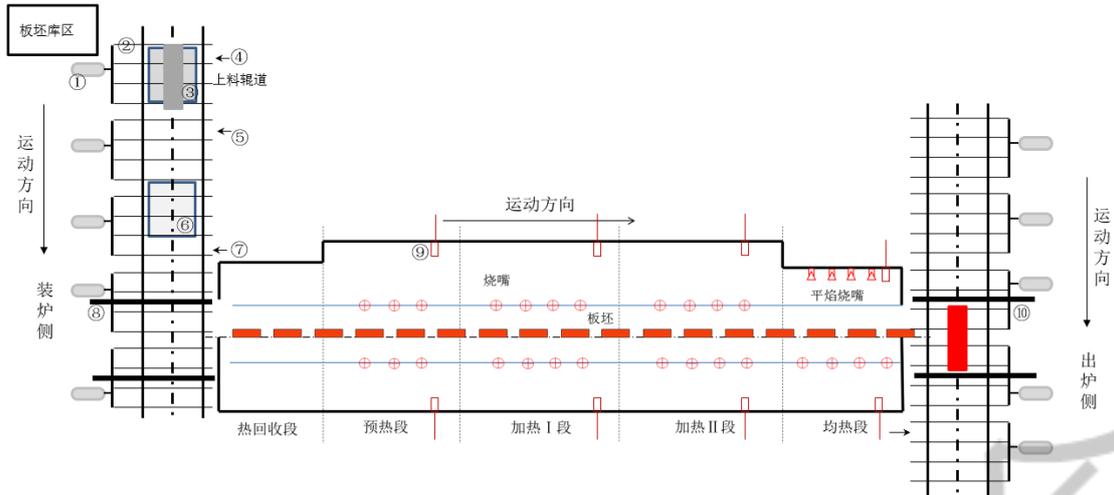


图 1 加热炉工艺流程图

注：①辊道电机；②辊道；③上料称重装置；④激光检测器；⑤识别摄像头；⑥测宽测长装置；⑦入炉测温仪；⑧装钢机；⑨热电偶；⑩出钢机

上料辊道是加热工序的起点，根据实际轧制计划将钢坯从钢坯库送至上料辊道，依次对其进行称重、坯号识别、测长、测宽、测温后，送入指定的炉门装料口，并按照炉内布料图进行定位。

轧钢加热炉通常为步进式连续加热炉，采用三段或多段式加热，分别为热回收段、预热段、加热段（一加/二加）和均热段。钢坯入炉后，步进梁动作，将钢坯以一定的步进周期依次送至加热炉的不同加热段，对钢坯进行充分均匀的加热。

钢坯在加热炉内达到目标温度后，将其运送至出炉口，经过出料端的激光检测和炉内坯料跟踪系统计算，将钢坯在炉内准确位置信号送至出钢机。出钢机将钢坯托起出炉并放入出料辊道中心线，完成对钢坯的加热过程<sup>[12]</sup>。

随着智能化技术地飞速发展，以异构数据融合、BKVision 视觉算法（自主知识产权）、K-Means 聚类优化、Apriori 挖掘关联规则算法等大数据挖掘技术为支撑，构建了加热炉智能燃烧控制系统。加热炉智能燃烧控制系统与传统控制系统相比，优势如表 1 所示。

表 1 智能燃烧控制系统较传统控制系统的优势

功能实现	传统过程控制系统	智能燃烧控制系统
炉前钢坯上料	人工指挥行车吊取对应垛位钢坯	与钢坯库管系统对接、自动获取对应垛位钢坯信息
炉前钢坯核对	钢坯停留在称重辊道，人工进行实际钢坯与计划的匹配	行进中进行钢坯坯号智能识别，与生产计划进行自动匹配

钢坯温度预报	模型参数随时间漂移，钢温预报精度持续下降	自动感知炉况、工况的变化，修正模型相关参数
炉温优化设定	人工根据操作者经验设定	基于加热策略的知识决策库，动态设定各段炉温
炉温闭环控制	经典双交叉 PID 控制	基于传统控制，增加前馈补偿
钢坯加热质量分析	只能分析钢坯出炉温度精度	多维度分析，如出炉温度精度、同板差、炉间差、坯间差、断面温差等
加热炉能效分析	无	实时计算钢坯单耗、计算加热炉燃气消耗与加热钢坯所需热量

### 3 虚仿平台的设计

#### 3.1 平台教学目标

对标工程教育专业认证毕业要求，并基于热连轧产线智能制造的需求，本虚仿平台的教学目标主要有以下几个方面：

(1) 了解加热生产工艺流程

通过观看加热炉炉体构造、加热原理介绍以及加热炉生产现场的录像，使学生对加热工艺建立感性的认知。

(2) 理解加热控制核心指标及其影响参数

明确钢坯出炉温度精度和钢坯温度均匀性是加热控制的核心指标，与炉压、炉温、空燃比、燃气的热值、燃气压力、生产节奏等参数密切相关。

(3) 掌握建模控制优化方法

建立钢坯号智能识别模型、单神经元自适应 PID 的炉压控制模型，增加前馈补偿的经典双交叉 PID 炉温控制模型，以及基于炉况（如耐火材料性能下降、燃气热值和压力波动、炉压波动等）、工况（生产节奏、品规混装、冷热混装等）变化的炉温优化模型。

(4) 掌握现代工程工具

运用 ANSYS、MATLAB、WinCC 组态软件等现代工程工具，解决复杂工程问题。采用基于 VUE 框架的 HTML/CSS/JS B/S 前端开发工具，进行交互友好的浏览器式 HMI 页面开发。

#### 3.2 平台架构

虚仿平台的开发基于自主知识产权的 PCDP (Process Control Development Plateform) 中间件支撑平台，中间件屏蔽了操作系统的异构，提供强大的支撑服务和公共组件服务，使控制系统应用模块的开发人员聚焦功能逻辑本身，提高开发效率。基于 PCDP 的虚仿平台结构如图 2

所示。

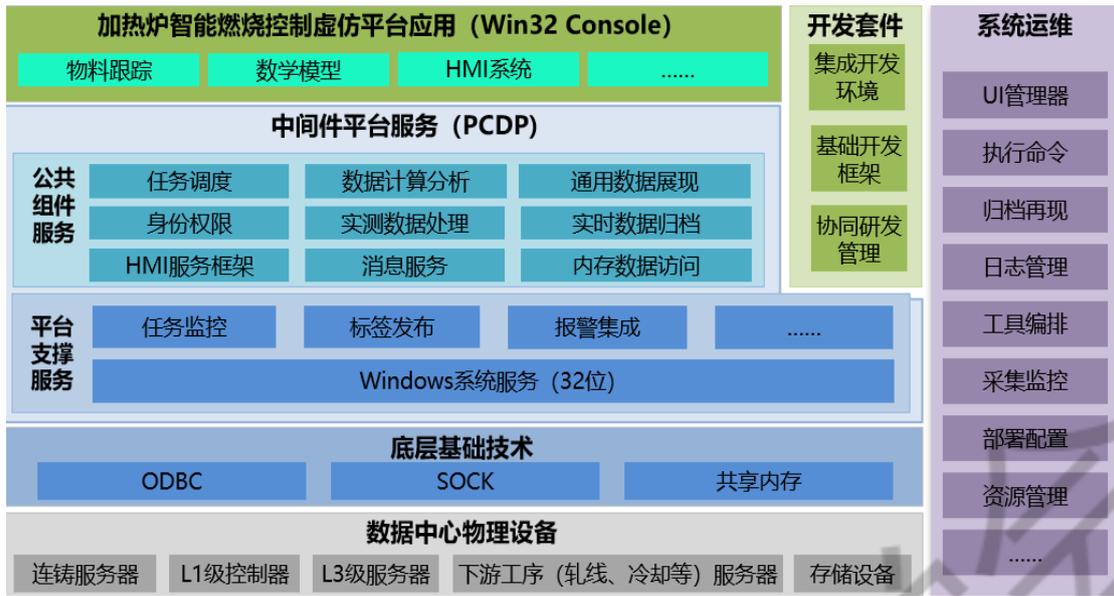


图 2 基于 PCDP 的虚仿平台架构图

加热炉智能燃烧控制虚仿平台软硬件配置如表 2 所示。

表 2 加热炉智能燃烧控制虚仿平台软硬件配置

设备	技术参数	软件环境
服务器	CPU: 双 CPU, IntelXeon-Gold 5118 处理器; 内存: 64 GB DDR4-2666 MT/s; 硬盘: 600GB×3, Raid5; 以太网卡: 1000Mbps 331FLR 四端口服务器专用以太网卡 KVM 切换器	操作系统: Windows Server 2016 64bit; 数据库: Oracle 12c 标准版 Server 中间件: PCDP for Windows v3.0 HMI 框架: TomCat 运行包
PLC 控制器	S7-1500 CPU1515-2PN, 500KB 程序, 3M 数据, 30ns; PM1507 电源模板, 3A	博图: Step7 V17 SP1 (TIA Portal)
PC 机 (用于应用和 HMI 开发)	CPU: intel i5-8500 3.0G/9M/6 核; 内存: 8G DDR4 2666 硬盘: 1TB 3.5", SATA 显示器: E243I	操作系统: Windows 10 64bit 仿真软件: ANSYS 17、MATLAB 2019a 编程语言: WinCC 7、Visual Studio 2017、Python 3.6、BKVision 视觉算法库、Visual Studio Code, HTML+CSS+JS 数据库: Oracle 12c 标准版

### 3.3 平台实物

本着“虚实结合，能实不虚”的建设原则，平台实物如图 3 所示。



图 3 加热炉智能燃烧控制虚仿平台实物

上图中，PLC 控制器主要完成钢坯的顺控、装出钢机及加热炉步进梁的控制；2 台 PC 服务器，分别作为数学模型和数据库服务器；交换机完成平台各系统之间的通信；HMI 展示屏用于显示各虚仿项目的输出结果。平台实物与工程实际场景高度相似，使学生对加热炉智能燃烧系统的硬件及网络结构有更加感性的认识。

## 4 虚仿平台实现

### 4.1 实训项目整体设计

本虚仿平台设计了 6 大类，共 24 个实训项目，可用于本科相关专业课的实践教学。涉及自动化、冶金和热能等 5 个专业，10 余门课程的知识。对应关系如表 3 所示。

表 3 实训项目知识点、课程对应关系

实验模块	实训项目	知识点	对应课程
生产	生产工艺流程录像	加热工艺	工业热工基础
工艺	加热原理录像	加热原理	热过程模化控制

认知			
生产过程感知	钢坯实物检测		
	钢坯重量检测	激光传感器工作原理	
	钢坯号识别	称重传感器工作原理	参数检测与仪表
	钢坯长度检测	图像处理技术	现代传感器技术
	炉气温度检测	激光测速技术	数据图像处理
	炉压检测	实测数据滤波	
控制对象建模	坯号识别模型建立	基于 DNN 的识别算法	模式识别
	炉压模型建立	数据驱动的神经网络	系统辨识
	炉温模型建立	各炉段动态热平衡方程	自动化线生产实训
	钢温预报模型建立	二维传热方程有限差分法	
生产过程控制	炉压控制	单神经元自适应 PID 算法	自动控制原理
	炉温控制	基于前馈补偿的双交叉 PID 算法	电力拖动
	自动装、出钢控制	FOC 闭环矢量控制	PLC 编程技术
	步进梁控制	前馈-反馈复合	自动化线生产实训
控制系统优化	加热质量分析	基于知识图谱的规则挖掘	计算机技术应用
	能耗分析	产生式推理的原理	人工智能
	炉况、工况在线感知	生产经验规则的知识抽取	智能控制理论及应用
	各段炉温设定优化	启发式权交叉遗传算法	
人机交互设计	装、出钢界面	WinCC 的应用	计算机技术应用
	炉内参数显示界面	基于 IIS 的 Web 页面开发	工业组态软件
	钢坯温度预报界面	基于 VUE 框架的前端开发	软件工程
	炉温设定界面		自动化线生产实训

本文以钢坯号识别为例，说明实训项目的具体内容。

## 4.2 实训项目举例—钢坯号识别案例

坯号识别是在上料辊道对钢坯进行坯号、品规的识别，实现钢坯与生产计划的一一对应，以此建立加热区域的数字板坯体系，为加热炉及下游工序数学模型提供数据输入。本项目基于深度神经网络 (Deep Neural Network)，构建坯号识别模型。

### (1) 现场部署场景

学生选择各钢厂识别系统部署的图片或视频，了解坯号识别系统的组成，如图 4 所示。主要包含工业相机、LED 光源、工业镜头、支架和计算终端。



图 4 具体应用场景部署

## (2) 基于 DNN 的识别模型

深度神经网络能够逐层提取图片的特征，一级一级学习出更加复杂的特征<sup>[17]</sup>。基于 DNN 的坯号识别模型如图 5 所示。

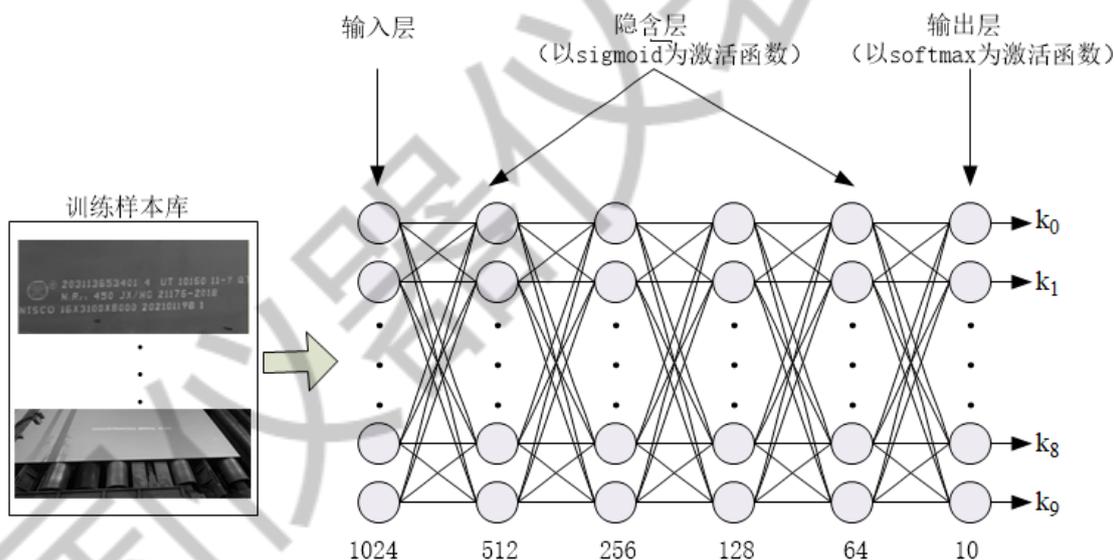


图 5 DNN 坯号识别模型

模型采用 6 层网络结构，包含 4 个隐含层。钢板号图片为  $32 \times 32$  的灰度图像，输入层为 1024 个神经元，第一隐含层 512 个，第二隐含层 256 个，第三隐含层 128 个，第四隐含层 64 个，输出层 10 个。选用 sigmoid 函数作为神经元的激活函数，输出层采用 softmax 函数进行归一化处理。为提升网络学习的速度，将均方差损失函数改进为交叉熵损失函数，采用 Adam 优化器执

行梯度下降，并加入 dropout 方法防止过拟合。

### (3) 识别模型训练

钢板图像来自不同现场，坯号的定义规则不同，因此模型训练需基于指定的场景。依据平台提供的实际场景，学生首先确定图像库的来源。在 DNN 网络参数配置中，开放迭代次数、学习率和防止过拟合 dropout 方法的节点保留概率 (keep\_prob) 三个参数进行调整，并实时显示训练过程中的 loss 曲线和准确率，学生可以直观地了解参数调整带来的变化，观察趋势、发现规律，有助于更深入地掌握 DNN 模型的原理，如图 6 所示。此外，将每次训练的数据均保存至硬盘，方便学生课后进行更加深入的分析 and 总结。

图 6 展示了“加热炉智能燃烧控制虚仿平台”的 DNN 坯号识别模型训练界面。界面左侧为功能菜单，包括生产工艺认知、生产过程感知、钢坯实物检测、钢坯重量检测、钢坯号识别、钢坯长度检测、炉气温度检测、炉压检测、控制对象建模、生产过程控制、控制系统优化、人机交互设计等。右侧主区域包含训练配置和实时监控。配置部分包括训练图像库加载、神经网络参数配置（如激活函数、防止过拟合方法、输出函数、迭代次数、损失函数、学习率、优化算法、keep\_prob 等）以及开始/停止按钮。下方显示了文件列表，包含文件名、日期时间和文件大小。右侧有一个准确率曲线图，显示了训练过程中的准确率变化。底部状态栏显示了文件数量、准确率、损失、迭代次数和耗时。

图 6 DNN 坯号识别模型训练

### (4) 坯号识别测试

深度学习神经网络模型经训练图像集训练达到既定准确率后，便可用于测试图像集的识别测试。训练和测试图像集来自同一场景不同的图像库。为便于快速定位识别对象，测试图像集将现场的拍摄图像与生产计划进行匹配，以实际的钢板号来命名个体图像文件。测试结果显示识别的钢板号和识别率，钢板号绿色背景表示识别正确，红色背景表示识别错误，如图 7 所示。



图 7 DNN 坯号识别测试

### 4.3 相关的获奖和知识产权成果

作为加热炉技术支撑的“面向多品规高精度轧制的 CSP 过程控制系统关键技术”项目获得冶金科学技术一等奖；基于以上平台，教师和学生开展了相关科研工作，取得的成果如：转化为“基于知识驱动的热轧加热炉炉温优化燃烧技术研究”等毕业设计论文 10 余项，授权“一种基于机器视觉的板坯号检测全自动装钢策略”等发明专利 5 项，登记“CSP 隧道炉炉温优化软件”等软件著作权 10 余项。



图 8 项目取得获奖和知识产权成果

## 5 应用效果

(1) 该平台应用于我校自动化、冶金和热能等 5 个专业相关课程的实验实践教学，近两年

共计 2300 余名本科生完成了课内实验、课程设计、生产实训。学生表示虚仿平台有很强的代入感，基于工厂实际数据的加热炉全生产过程的复现使他们真正了解了加热工艺、控制对象和控制目标。同时，智能化现代工具的引入，使他们对智能制造在冶金行业的深入推进更加了解，激发他们对先进技术应用于传统钢铁行业的兴趣，传承我校自动化学院在冶金领域的沉淀，赓续钢铁情怀。此外，在实训项目教学实施中，深切体会了团队协作的重要性，锻炼了自己沟通、协调和项目管理能力。

(2) 近两年，本平台的实验实践教学在学生教评中成绩优秀，平均 96.63 分，排名前 20%。学生一致认为能有效地利用实践教学过程中使用的现代工具，结合理论知识，以解决复杂的实际工程问题。

(3) 基于平台学院在各类竞赛中也取得了一系列成果：近三年在“西门子杯”中国智能制造挑战赛“离散行业运动控制”和“流程行业自动化”两个方向取得了 3 项国家级、7 项省部级奖励，获奖证书如图 9 所示。



图 9 学生竞赛获奖证书

## 6 结论

在新工科建设背景下，以实际工程项目为载体，构建了加热炉智能燃烧控制虚仿平台。平台具有以下特点：

- (1) 现场模拟的真实性：基于实际生产数据，复现加热炉生产过程，使学生身临其境；
- (2) 平台构建的完整性：涵盖从炉前上料辊道开始，经加热，至轧后温度反馈的整个加热工艺流程；
- (3) 开发手段的先进性：基于中间件平台支撑，采用 ANSYS、DNN 视觉算法库、Apriori 等大数据算法、结合 VUE 框架的 HTML/CSS/JS 前端工具完成平台研制；
- (4) 学科知识的交叉性：实训项目的设计融合了跨学科的工业热工基础及传热学等相

关知识。

该平台应用于我校自动化、冶金和热能等 5 个专业的实验实践类教学中, 全面提高了学生的工程实践能力。它具有鲜明的冶金行业特色, 可以对外开放, 作为行业内兄弟院校相关专业的教学实践平台, 同时也可以为冶金企业加热工序的技术人员提供培训服务, 充分发挥高校科研优势, 助力冶金行业智能制造发展。

### 参考文献 (References)

- [1] 教育部办公厅. 教育部办公厅关于推荐新工科研究与实践项目的通知: 教高厅函 (2017) 33 号[Z]. 2017.
- [2] 教育部 工业和信息化部 中国工程院. 教育部 工业和信息化部 中国工程院关于加快建设发展新工科实施卓越工程师教育培养计划 2.0 的意见: 教高 (2018) 3 号[Z]. 2018.
- [3] 工业和信息化部等八部门. 关于印发“十四五”智能制造发展规划的通知: 工信部联规 (2021) 207 号[Z]. 2021.
- [4] 李擎, 崔家瑞, 杨旭, 等. 自动化专业三创能力培养方案的构建与实施[J]. 高等工程教育研究, 2021(2): 55-61.
- [5] 王健全, 李卫, 马彰超, 等. 5G 工业互联网赋能智慧钢铁[J]. 钢铁, 2021, 56(9): 56-61, 73.
- [6] 崔家瑞, 李文浩, 苏成果, 等. 面向智能制造的大型铝电解槽分布式全要素模型研究进展[J]. 轻金属, 2021(11): 30-38.
- [7] 阎群, 李擎, 李希胜, 等. 依托智能制造挑战赛探索创新人才培养模式[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(4): 20-23.
- [8] 肖成勇, 杨旭, 苗磊, 等. 新工科背景下冶金行业智能制造综合实训平台设计与实施[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(12): 230-234, 238.
- [9] 李江昀, 杨志方, 郑俊锋, 等. 深度学习技术在钢铁工业中的应用[J]. 钢铁, 2021, 56(9): 43-49.
- [10] 李擎, 崔家瑞, 杨旭, 等. 面向解决复杂工程问题的自动化专业实践能力培养体系研究[J]. 高等理科教育, 2017, (03): 113-118.
- [11] 董晓旭. 步进式加热炉过程控制模型研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017.
- [12] 蔡乔方. 加热炉. 北京:冶金工业出版社, 1996.

- [13] 张佳. 加热炉步进梁控制策略的研究[D]. 安徽:合肥工业大学, 2014.
- [14] 王健, 邵林. 自主学习模糊神经网络 PID 加热炉炉压控制[J]. 自动化与仪表, 2009, 24(8): 25-28.
- [15] 王帝杰. 板坯热轧过程轧制计划编制和加热制度优化[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
- [16] 李柠, 王锡准, 李少远, 等. 步进式加热炉炉温建模与优化仿真系统设计[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 361-363.
- [17] 宋晓茹, 吴雪, 高嵩, 等. 基于神经网络的手写数字识别模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 193-196.
- [18] Katy Warr, 增强深度神经网络, 杜春晓译. 北京:中国电力出版社. 2020.11,

中国兵器工业集团