

智能算法在铝冷轧机板厚自动控制系统 (AGC) 中的应用研究

王向平

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 铝冷轧作为铝材深加工的关键工序,其产品质量的核心指标之一是板厚精度。传统的板厚自动控制系统 (AGC) 主要依赖于基于物理模型的反馈、前馈及张力补偿等控制策略,在面对复杂的非线性、时变性和强耦合干扰时,往往难以满足现代高精度、高效率、柔性化生产的需求。随着人工智能技术的飞速发展,以神经网络、模糊逻辑、支持向量机、深度学习等为代表的智能算法为提升AGC系统性能提供了全新的解决思路。本文首先系统阐述了铝冷轧工艺特点及传统AGC系统的构成与局限性;其次,深入探讨了多种主流智能算法的基本原理及其在AGC系统中不同功能模块(如轧制力建模、厚度预测、控制器设计、自适应优化等)的应用方式;再次,构建一个融合BP神经网络与模糊PID的混合智能AGC控制模型;最后,对智能算法在AGC领域应用面临的挑战与未来发展趋势进行了展望。

关键词: 铝冷轧;板厚自动控制 (AGC);智能算法;神经网络;模糊控制

引言

铝及铝合金性能优异,广泛应用于国民经济各重要领域。下游产业对铝材质量要求愈发严苛,板带材厚度公差达微米级,给铝冷轧工艺带来巨大挑战。冷轧中,板厚自动控制系统 (AGC) 负责精确控制板厚,传统AGC系统多采用经典控制理论及相关策略。但铝冷轧是多变量、强耦合、大滞后、非线性的复杂过程,涉及多学科,传统基于线性化假设和固定参数的控制模型难以精确描述,工况变化时控制性能下降,甚至失控。近年来,新一代信息技术变革制造业,智能算法凭借强大能力为解决复杂工业过程控制难题提供新途径。将其引入AGC系统,可构建更精确模型、设计智能控制器,提升产品厚度精度与生产稳定性。因此,研究智能算法在铝冷轧AGC中的应用,兼具理论价值与工程实践意义。

1 铝冷轧AGC系统概述

1.1 铝冷轧工艺特点

铝冷轧通常在室温下进行,其主要目的是将热轧后的铝卷进一步减薄并改善其表面质量和力学性能。与钢铁冷轧相比,铝材硬度较低、塑性更好,但对轧制过程中的温度、张力和润滑条件更为敏感。轧制过程中,轧件在轧辊的巨大压力下发生塑性变形,同时产生大量的变形热,导致轧辊温度升高而发生热膨胀,进而改变辊缝形状。此外,铝材的加工硬化效应、轧辊的弹性变形以及液压伺服系统的动态特性等因素共同构成了一个高度复杂的动态系统。

1.2 传统AGC系统构成与控制策略

1.2.1 系统构成

一个典型的AGC系统主要由以下几个部分组成:①测厚仪 (X-ray或 β -ray):安装在轧机出口侧,用于在线、非接触式地测量带材的实际厚度。②位置传感器与压力传感器:分别用于检测轧辊的实际位置(辊缝)和轧制力。③液压压下系统 (HGC):作为执行机构,根据控制指令快速、精确地调整上工作辊的位置。④主控制器:核心部分,负责接收来自各传感器的信号,运行控制算法,并输出控制指令给HGC系统。

1.2.2 控制策略

传统AGC的主要控制策略包括:①反馈AGC:基于出口实测厚度与目标厚度的偏差,通过PID等控制器计算出辊缝修正量。这是最基础也是最重要的控制回路,但由于存在测量滞后,对突发性扰动的抑制能力有限。②前馈AGC:利用入口测厚仪检测到的来料厚度偏差,提前计算出所需的辊缝调整量,以补偿入口扰动。其效果依赖于对轧机刚度和塑性系数的精确建模。③轧制力AGC:根据弹跳方程 $h = S_0 + \frac{P}{K}$ (其中 h 为出口厚度, S_0 为辊缝设定值, P 为轧制力, K 为轧机刚度系数),通过控制轧制力恒定来间接保证厚度恒定。这种方法响应速度快,但前提是假设轧件的塑性系数不变,而这在实际生产中很难满足。④张力AGC:通过调节机架间张力来微调厚度,常用于连轧机组。这些策略的组合使用构成了传统AGC的基础,但其核心瓶颈在于对轧制过程的数学模型过度依赖,且模型参数(如 K 、塑性系数)往往是静

态标定的,无法适应动态变化的工况。

1.3 传统AGC系统的局限性

传统AGC系统面临三大主要局限:一是模型失配问题:弹跳方程等物理模型是对复杂现实的高度简化,忽略了诸多非线性因素(如摩擦、温度场变化),导致模型与实际过程存在固有偏差^[1]。二是参数时变性:轧机刚度 K 会因轧辊磨损、轴承间隙变化而改变;材料的塑性系数会随合金成分、温度、变形程度而动态变化。固定参数的控制器难以应对这种时变性。三是抗干扰能力弱:对于未建模的动态扰动(如油膜厚度突变、来料硬度不均)或强耦合干扰,传统线性控制器往往束手无策,容易引发系统振荡。正是这些局限性,催生了将智能算法引入AGC系统的研究热潮。

2 智能算法在AGC系统中的应用

2.1 基于神经网络的AGC应用

神经网络以其强大的非线性映射和自学习能力,成为解决AGC建模与控制难题的有力工具。在轧制力建模方面,可以利用多层感知器(MLP)或径向基函数(RBF)网络,以入口厚度、入口张力、轧制速度、辊缝设定值等易测变量为输入,以实际轧制力为输出,构建一个高精度的数据驱动模型。该模型能够有效捕捉传统弹跳方程无法描述的复杂非线性关系,从而为前馈和反馈控制提供更为可靠的依据。此外,针对厚度预测这一关键问题,循环神经网络(RNN)及其变体长短期记忆网络(LSTM)因其对时间序列数据的卓越处理能力而备受关注。它们能够学习并记忆轧制过程的历史状态,从而对未来出口厚度进行准确预测,为实现超前控制奠定基础^[2]。在控制器设计层面,神经网络PID(NN-PID)是一种成功的融合方案。它利用神经网络在线辨识系统动态,并实时整定PID控制器的比例、积分和微分三个参数,使控制器能够根据当前工况自适应地调整其控制律,从而在宽泛的操作范围内保持最优性能。

2.2 基于模糊逻辑的AGC应用

模糊控制的核心优势在于能够将人类专家的经验 and 语言规则形式化,并应用于那些难以建立精确数学模型的复杂系统。在AGC领域,模糊逻辑最常见的应用形式是模糊PID控制器。该控制器将传统PID的输入——厚度偏差 e 及其变化率 ec ——作为模糊推理系统的输入变量。通过预先制定一套符合操作人员经验的模糊规则库(例如,“如果偏差为正且较大,同时偏差变化率为负且较小,则应适当增大比例增益 K_p ”),系统能够动态地调整PID参数,使其控制行为更加“人性化”和鲁棒。这种方式巧妙地将定性的专家知识与定量的控制算法相结合,显

著提升了系统在面对模型不确定性和外部扰动时的稳定性。另一种更为激进的应用是直接模糊控制器,它完全摒弃了PID的结构框架,直接根据偏差和偏差变化率,通过模糊推理得出对液压缸的最终控制量。这种控制器的设计关键在于模糊规则库的完备性和合理性,需要深厚的领域知识作为支撑。

2.3 基于支持向量机(SVM)的AGC应用

支持向量机在处理小样本、高维非线性回归问题上展现出独特的优势,这使其在数据相对稀缺的工业场景中具有重要价值。在AGC系统中,SVM常被用于构建高精度的软测量模型。当某些对控制至关重要的过程变量(如瞬时的材料塑性系数或轧辊热凸度)因技术或成本原因无法在线直接测量时,可以利用SVM根据一系列易测变量(如轧制力、速度、温度等)来估计这些难测变量,从而为AGC提供更全面、更准确的状态信息。此外,SVM强大的分类能力也使其在AGC系统的故障诊断与预警方面大有用武之地。通过训练SVM分类器识别正常工况与异常模式(如传感器漂移、液压系统内泄、轧辊偏心等)之间的特征差异,可以在故障发生的早期阶段发出预警,避免因设备异常而导致的产品质量事故或设备损坏,保障整个轧制过程的连续稳定运行。

2.4 基于深度学习的AGC应用

深度学习通过构建深层神经网络架构,能够自动从原始数据中逐层提取抽象特征,代表了当前人工智能发展的前沿方向。在AGC领域,深度强化学习(DRL)提供了一种革命性的“端到端”控制思路。它将AGC问题建模为一个马尔可夫决策过程,其中智能体(Agent)通过与虚拟或真实的轧制环境不断交互(即试错),学习从原始传感器数据流(包括厚度、轧制力、速度、张力等)直接映射到最优控制动作(辊缝调整量)的策略。这种方法有望突破传统分层控制架构的局限,实现全局性能的最优化^[3]。另一方面,面对现代轧机日益丰富的多源异构数据(如来自板形仪的二维板形分布图、红外热像仪的轧辊表面温度场等),卷积神经网络(CNN)等深度学习模型能够有效处理这些空间信息,并将其与一维的时间序列数据进行深度融合。这种多源信息融合的能力有助于构建一个更加高保真、全方位的轧制过程数字孪生模型,为AGC决策提供前所未有的洞察力和精准度。

3 混合智能AGC模型设计

为了充分发挥不同智能算法的优势,本文设计了一种融合BP神经网络与模糊PID的混合智能AGC控制器。该混合控制器的核心思想是:利用BP神经网络强大的非线性辨识能力,构建一个高精度的轧制过程逆模型,用

于初步计算所需的控制量；再利用模糊PID控制器对BP网络的输出进行精细化的动态修正，以应对模型误差和外部扰动。

具体结构如下：

3.1 BP神经网络逆模型

该网络以期望的出口厚度 h_{set} 和当前工况（入口厚度 h_{in} ，轧制速度 v ，入口张力 T_{in} ）为输入，以理想的辊缝设定值 S_{ideal} 为输出。通过离线训练大量历史数据，使网络学会轧制过程的逆映射关系。

3.2 模糊PID修正器

将出口实测厚度 h_{real} 与 h_{set} 的偏差 e 及偏差变化率 ec 作为模糊PID的输入。模糊推理系统根据预设的规则库，实时计算出对PID参数的增量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。经过修正的PID控制器接收 e 作为输入，输出一个微增量 ΔS 。

3.3 最终控制量

总的辊缝控制指令 $S_{cmd} = S_{ideal} + \Delta S$ 。

这种结构结合了数据驱动模型的前瞻性和模糊控制的鲁棒性，理论上能取得更好的综合性能。

4 挑战与展望

4.1 挑战

尽管智能算法在AGC领域展现出巨大潜力，但在实际工业应用中仍面临诸多挑战：①数据质量与数量：智能算法的性能高度依赖于高质量、大规模的标注数据。工业现场数据往往存在噪声、缺失和不一致性，且获取覆盖所有工况的完备数据集成本高昂。②模型可解释性与安全性：“黑箱”特性是深度学习等复杂模型的通病。在关乎产品质量和设备安全的关键控制环节，缺乏可解释性的决策可能难以被工程师信任和接受。如何在保证性能的同时提升模型的透明度，是亟待解决的问题^[4]。③在线学习与部署：如何将离线训练好的复杂模型高效、安全地部署到实时性要求极高的工业PLC或DCS系统中，并支持在线增量学习以适应长期的工况漂移，对计算资源和软件架构提出了严峻考验。④多目标协同优化：AGC不仅要保证厚度精度，还需兼顾板形、板面质量、能耗等多个目标。如何设计能够进行多目标权衡的智能协同控制策略，是未来

的重要方向。

4.2 展望

一是数字孪生驱动的AGC：构建高保真的铝冷轧过程数字孪生体，作为智能算法训练和验证的虚拟沙盒，降低试错成本，并实现虚实联动的闭环优化。二是联邦学习与边缘智能：在保护各工厂数据隐私的前提下，通过联邦学习聚合多方数据，训练更通用的AGC模型；同时，将轻量化的智能模型部署在边缘设备上，实现本地实时决策。三是人机协同智能：将人类专家的知识和经验以更结构化的方式（如知识图谱）融入智能算法，形成人机优势互补的协同控制新模式。

5 结语

本文系统地研究了智能算法在铝冷轧板厚自动控制系统（AGC）中的应用。研究表明，以神经网络、模糊逻辑、深度学习为代表的智能算法，能够有效克服传统基于物理模型的AGC系统非线性、时变性和抗干扰能力方面的固有缺陷。通过构建数据驱动的高精度过程模型和自适应的智能控制器，可以显著提升AGC系统的动态响应速度、稳态控制精度和整体鲁棒性。尽管在数据、可解释性、部署等方面仍存在挑战，但随着人工智能技术的持续进步和工业互联网基础设施的不断完善，智能算法必将成为新一代高性能AGC系统的核心引擎，为推动铝加工行业向高端化、智能化、绿色化转型升级提供强有力的技术支撑。未来的AGC系统将不再是简单的反馈回路，而是一个具备感知、认知、决策和自进化能力的智能体，引领铝冷轧控制技术迈入一个全新的时代。

参考文献

- [1]张彩金,张起部.铝冷轧板型失真分析[J].中国科技信息,2024,(24):86-89.
- [2]陈晓琳.一种铝冷轧机板形控制的实时仿真方法[J].有色金属加工,2014,43(01):58-60.
- [3]常东旭.铜铝冷轧复合工艺控制及界面生成演变机制研究[D].东北大学,2019.
- [4]常东旭.铜铝冷轧复合工艺控制及界面生成演变机制研究[D].东北大学,2019.