

冷轧铝带厚度控制中高精度速度反馈机制研究

吕 华 焦志强 祖程博

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘 要：在追求极致尺寸精度的现代铝加工领域，冷轧作为决定产品最终厚度的关键工序，其自动厚度控制系统（AGC）的性能直接决定了产品的市场竞争力。本文聚焦于AGC系统中常被忽视却至关重要的环节——速度反馈机制，深入探究高精度速度反馈对冷轧铝带厚度控制的核心作用与内在机理。文章首先系统梳理了冷轧厚度控制的基本原理，特别是“秒流量恒定”法则在多机架连轧中的核心地位；其次，详细剖析了当前主流的非接触式高精度测速技术（如激光多普勒测速和空间滤波测速）的工作原理、性能边界及误差构成；在此基础上，重点论证了高精度速度反馈如何通过支撑前馈AGC、保障张力AGC稳定性、校准轧制力模型以及实现精确的动态补偿等多个维度，全面提升厚度控制的精度、响应速度和鲁棒性。最后，本文提出了构建高可靠性速度反馈系统的综合性策略，涵盖设备选型、安装规范、信号处理及维护体系等方面。

关键词：冷轧铝带；自动厚度控制（AGC）；高精度速度反馈；秒流量恒定

引言

随着新能源汽车、航空航天等战略性新兴产业爆发式增长，市场对铝带材厚度精度的要求已从微米级迈向亚微米级。冷轧作为最后一道塑性变形工序，其厚度控制水平是国家铝加工技术的重要标志。自动厚度控制系统（AGC）历经数十年发展，已集成反馈、前馈、张力等多种控制模式。然而，在持续优化测厚仪、液压伺服等核心组件的同时，作为AGC数据流基础的速度反馈环节却常被低估。速度信号不仅是计算带材流量、维持机架间张力平衡的基础，更是前馈AGC实施的前提。实际生产中，速度测量的微小误差会通过复杂控制回路被放大，最终表现为难以消除的厚度波动，尤其在高速、薄规格轧制过程中更加突出。因此，系统研究高精度速度反馈机制及其与厚度控制的定量关系，对推动我国铝加工业向价值链高端攀升具有重大理论价值和现实意义。

1 冷轧厚度控制基本原理与速度的核心角色

冷轧过程中的厚度控制本质上是一个对抗各种内外扰动动态调节过程。入口坯料的厚度波动、硬度不均、轧辊的热膨胀与磨损、轴承油膜变化等因素，都会导致出口厚度偏离目标值。AGC系统的目标就是实时感知这些扰动，并通过快速调节执行机构（如液压压下缸、主电机转速、卷取张力等）来抵消其影响。

1.1 秒流量恒定法则

在多机架连轧机组中，维持生产的稳定性和连续性依赖于一个根本性的物理法则——“秒流量恒定”。该法则指出，在稳态轧制条件下，单位时间内流经任意两个相邻机架间的金属体积必须相等，即：

$$Q = h_n \cdot v_n = h_{n+1} \cdot v_{n+1}$$

其中， Q 为体积流量， h_n 和 v_n 分别为第 n 机架出口处的带材厚度和线速度。这一等式构成了连轧过程的物质守恒基础。任何对 h 或 v 的精确控制，都必须以对方的精确测量为前提。若速度 v 的测量存在偏差，则基于此计算出的厚度 h 必然失真，进而导致整个AGC系统的误判和误操作。

1.2 AGC的主要控制模式及其对速度的依赖

现代AGC系统通常包含以下几种主要控制模式，它们均不同程度地依赖于高精度的速度反馈：①反馈AGC（Feedback AGC）：利用出口测厚仪的实测厚度与目标厚度的偏差，通过闭环控制器调节压下位置。虽然看似不直接使用速度信号，但其控制效果的评估、滤波器的设计以及与其他控制模式的协调，都需要准确的速度信息作为时间基准^[1]。②前馈AGC（Feedforward AGC）：这是对入口扰动最有效的抑制手段。它利用入口测厚仪检测到的来料厚度波动 Δh_{in} ，结合入口速度 v_{in} 和出口速度 v_{out} ，根据秒流量法则提前计算出所需的压下量调整量 ΔS 。其核心公式为 $\Delta S \propto (\Delta h_{in} \cdot v_{in}) / v_{out}$ 。由此可见，前馈AGC的精度完全建立在高精度速度反馈的基础之上。③张力AGC（Tension AGC）：通过调节前后机架或卷取机的速度差来控制机架间的张力。张力的变化会直接影响带材的纵向延伸，从而间接影响厚度。精确的速度测量是实现张力精确控制的先决条件。④监控AGC（Monitor AGC）：利用轧制力、辊缝等间接参数，结合轧机弹跳方程来推算出口厚度。为了提高模型的准确性，需要利用实际的速度和厚度数据进行在线校准，速度精度同样

不可或缺。综上所述,速度信号如同AGC系统的“脉搏”,贯穿于所有控制逻辑之中,其质量直接决定了整个系统的上限。

2 高精度速度反馈技术及其性能分析

为满足冷轧AGC的严苛要求,接触式测速方法已被淘汰,取而代之的是两类主流的非接触式高精度测速技术。

2.1 激光多普勒测速(LDV)

LDV基于物理学中的多普勒效应。仪器发射两束相干激光,在被测带材表面相交形成明暗相间的干涉条纹。当带材表面的微粒随带材移动并穿过这些条纹时,散射光的频率会发生偏移(多普勒频移)。通过光学外差技术检测该频移量 f_d ,即可根据公式 $v = (\lambda \cdot f_d) / (2 \sin(\theta/2))$ 精确计算出线速度,其中 λ 为激光波长, θ 为两束激光的夹角。LDV的优势在于其极高的固有精度(可达 $\pm 0.02\%$)、超快的动态响应($> 50\text{kHz}$)以及真正的非接触特性,不会对超薄、高光洁度的铝带表面造成任何损伤。其局限性在于对带材表面的散射特性有一定要求,且成本相对较高。

2.2 空间滤波测速(Spatial Filtering Velocimetry, SFV)

SFV技术利用带材表面的自然纹理作为测量标记。高亮度光源照射带材,其表面纹理通过透镜成像到一个特殊的光栅(即空间滤波器)上。当带材移动时,成像的纹理随之移动,在光栅后方的光电探测器上产生一个频率与速度成正比的交流信号。通过频谱分析即可解算出速度^[2]。SFV的优点是对带材表面状态(如反光、油污)的适应性更强,抗干扰能力出色,且成本效益比高。其精度和动态响应略逊于LDV,但对于绝大多数冷轧应用场景已绰绰有余。

2.3 速度反馈的误差构成与量化

无论采用何种技术,速度反馈的总误差可分解为系统误差和随机误差。系统误差源于仪器的固有偏差、安装几何误差(如余弦误差)等,通常可以通过校准进行修正。随机误差则由带材振动、表面状态瞬时变化、环境噪声等因素引起,表现为信号的抖动。AGC系统对这两种误差的敏感度不同:系统误差会导致厚度的稳态偏移,而随机误差则会直接转化为厚度的高频波动。因此,评估一个速度反馈系统的优劣,不仅要关注其标称精度,更要考察其在真实工况下的长期稳定性与信号平滑度。

3 高精度速度反馈对厚度控制性能的提升机制

高精度速度反馈的价值并非体现在单一指标上,而是通过赋能整个AGC系统,实现全方位的性能跃升。

3.1 赋能前馈AGC,实现扰动的超前抑制

前馈AGC是提升厚度控制精度的最有效手段,因为它能在扰动(如入口厚度波动)影响到出口之前就采取行动。然而,前馈控制的有效性完全取决于其预测的准确性。高精度的速度反馈确保了秒流量计算的可靠性,使得前馈控制器能够精确地预判出口厚度的变化趋势,并发出恰到好处的调节指令。这不仅大幅减小了出口厚度的波动幅度,还显著降低了对反馈AGC的依赖,从而减轻了液压系统的负担,延长了设备寿命。

3.2 稳定张力控制,消除间接厚度扰动

在冷轧过程中,张力是除压下量外另一个影响厚度的关键变量。张力的变化会改变带材的纵向应力状态,从而影响其在变形区的流动行为。高精度的速度反馈使得张力控制系统能够精确地感知和调节各机架间的速差,将张力波动控制在极小的范围内。稳定的张力环境消除了一个重要的间接厚度扰动源,为获得高平直度和均匀厚度的产品提供了保障。

3.3 校准轧制力模型,提升监控AGC的精度

监控AGC依赖于一个精确的轧机弹跳方程(Mill Stretch Equation)和轧制力模型。这些模型的参数会随着轧辊磨损、温度变化等因素而漂移。高精度的速度和厚度(由秒流量法推算)数据可以作为“黄金标准”,用于在线辨识和校准这些模型参数^[3]。一个经过良好校准的模型,即使在测厚仪信号短暂丢失或受到干扰的情况下,也能提供可靠的厚度估计,极大地增强了系统的鲁棒性。

3.4 实现精确的动态补偿与同步

在加减速、穿带、甩尾等非稳态轧制阶段,带材的动态行为极为复杂。高精度、高动态响应的速度反馈能够为控制系统提供准确的瞬时状态信息,使其能够实施精确的动态补偿策略,例如动态变规格(Flying Gauge Change)过程中的平滑过渡。此外,在多电机传动的大型轧机中,高精度速度反馈也是实现各传动单元之间精密同步的基础,防止因速度不同步而产生的内部应力和厚度不均。

4 构建高可靠性速度反馈系统的综合策略

将高精度速度反馈的潜力转化为实际的厚度控制性能,是一项涉及设备选型、安装、信号处理、系统集成与长期运维的系统工程,需采取全生命周期、多维度协同的综合策略。

4.1 基于需求的精准选型与前瞻性规划

选型应置于整条生产线的技术框架内考量。首先需量化关键工艺参数:最高轧制速度决定动态响应带宽;最小厚度及表面光洁度要求对测速技术的非接触性和抗

干扰能力提出挑战；粉尘、油雾、电磁干扰等环境因素则决定防护与电磁兼容等级。在此基础上，对比激光多普勒（LDV）与空间滤波（SFV）技术：LDV精度高但成本高，适合高端产线；SFV总体拥有成本更优，适用宽泛。同时，需前瞻性地考虑与现有自动化控制系统（如西门子TDC）的接口兼容性，确保数据低延迟融入AGC回路。

4.2 规范化、精细化的安装与调试

“七分安装，三分设备”。必须制定标准化作业指导书：采用激光对中仪确保光轴与带材运行方向的几何关系，严格控制距离和入射角以规避余弦误差；使用刚性减振支架隔离轧机振动；光斑避开带材边部，选择中心稳定区^[4]。调试阶段除静态零点校验外，更需在不同速度段进行动态比对测试（如利用主电机编码器或参考测速仪），验证线性度和动态跟随性，修正微小偏差。

4.3 先进的信号处理、诊断与信息融合

充分利用测速仪内置的数字信号处理器：合理配置滤波器参数，在抑制高频噪声（如带材振动）与保持动态响应之间取得平衡。启用信号质量诊断功能，实时监测信噪比等指标并接入上位系统，实现从“被动维修”到“主动预防”。对可靠性要求极高的场合，采用冗余设计（如末机架出口安装两套独立测速仪），通过信息融合算法进行交叉验证与故障隔离，显著提升鲁棒性。

4.4 制度化的预防性维护与周期性校准

将速度反馈系统纳入工厂全面生产维护（TPM）体系，制定预防性维护计划，明确日常点检（清洁光学窗口、检查电缆）与深度保养的周期与内容。建立严格的周期性校准制度，结合设备运行状况动态调整校准间隔。校准使用可溯源至国家或国际标准的计量器具，在

模拟真实工况下进行。所有维护与校准活动形成电子化记录，实现全生命周期追溯。通过这套制度化保障，确保速度反馈系统在其服役寿命内始终提供高保真速度信息，为铝冷轧卓越厚度控制奠定坚实的数据基石。

5 结语

本文通过对冷轧铝带厚度控制机理的深入剖析，系统论证了高精度速度反馈在AGC系统中的基石作用。研究表明，速度反馈远非一个简单的辅助信号，而是决定AGC系统整体性能上限的关键因素。它通过赋能前馈控制、稳定张力系统、校准工艺模型和实现动态补偿等多种路径，全方位地提升了厚度控制的精度、速度和鲁棒性。在迈向智能制造的新时代，数据的质量决定了智能的上限。高精度速度反馈所提供的高质量数据流，正是构建下一代智能AGC系统不可或缺的“血液”。因此，行业从业者必须转变观念，将速度反馈系统提升到与测厚仪、液压伺服系统同等的战略高度，投入必要的资源进行科学规划、精心部署和精细维护。唯有如此，才能真正突破现有厚度控制的技术瓶颈，为我国铝加工产业的高质量发展注入强劲动力。

参考文献

- [1]张卫红,李明轩.铝板带冷轧厚度控制技术研究进展[J].有色金属加工,2021,50(4):1-7.
- [2]周国盈.铝带箔冷轧工艺与质量控制[M].长沙:中南大学出版社,2020.
- [3]刘万强.铝带冷轧机自动降速功能的实现与完善[J].有色金属加工,2020,49(2):48-51.
- [4]王桥医,张秋波,崔明超,等.1850四辊铝带冷轧机动力学特性与机理研究[J].振动.测试与诊断,2021,41(5):991-998+1038-1039.