

# 铝冷轧机张力控制策略优化与系统稳定性分析

卢 磊

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

**摘要:** 本文针对铝冷轧机张力控制系统中存在的响应滞后、抗干扰能力弱及多变量耦合等问题, 首先深入剖析了张力产生的机理及其动态特性; 其次, 在传统PID控制基础上, 提出一种融合前馈补偿与自适应增益调度的复合张力控制策略; 进一步地, 构建了包含电机、传动系统、张力辊及带材力学特性的多体耦合数学模型, 并基于Lyapunov稳定性理论与频域分析方法对闭环系统的稳定性进行了严格论证; 最后, 通过MATLAB/Simulink平台搭建仿真模型, 并结合某1850mm六辊铝冷轧机组的实际运行数据进行验证。结果表明, 所提出的优化控制策略显著提升了张力控制的动态响应速度与稳态精度, 增强了系统在负载突变、速度波动等扰动下的鲁棒性, 有效保障了轧制过程的稳定性与产品质量的一致性。

**关键词:** 铝冷轧机; 张力控制; 前馈补偿; 自适应控制; 系统建模; 稳定性分析; Lyapunov理论

## 引言

随着航空航天等产业兴起, 市场对高精度、高性能铝板带材需求大增。冷轧是铝材加工核心工序, 过程中带材需维持恒定适宜张力, 以确保轧制平稳、板形与厚度达标, 张力不当会引发跑偏、断带等问题。传统铝冷轧机张力控制多采用间接或直接闭环控制, 核心为PID控制器。但铝带材弹性模量低、塑性变形倾向高, 张力动态响应受多种因素影响, 呈强非线性与时变特性, 且张力系统与其他系统耦合复杂, 单一PID控制器难兼顾快速性、稳定性与鲁棒性<sup>[1]</sup>。近年来, 学者在张力控制领域研究颇多, 如模糊逻辑、滑模控制、神经网络等方法, 但存在计算复杂、参数整定难等问题, 工程实用性受限, 兼顾控制性能与算法简洁可实施性仍是亟待解决的问题。

## 1 铝冷轧机张力系统建模

### 1.1 张力产生机理

在铝冷轧过程中, 张力主要由相邻机架间的线速度差或卷取/开卷电机的转矩差产生。设上游机架出口速度为 $v_1$ , 下游机架入口速度为 $v_2$ , 当 $v_2 > v_1$ 时, 带材被拉伸, 产生张力 $T$ 。根据胡克定律与牛顿第二定律, 张力动态方程可表示为:

$$T = E \cdot A \cdot \frac{v_2 - v_1}{L} + m \cdot \frac{d(v_2 - v_1)}{dt}$$

其中,  $E$ 为铝带材的弹性模量,  $A$ 为横截面积,  $L$ 为两测量点间带材长度,  $m$ 为该段带材质量。由于铝的密度低、弹性模量小(约70GPa), 惯性项 $m \cdot d(v_2 - v_1)/dt$ 在高速轧制中不可忽略。这一特性意味着张力不仅与速度差成正比, 还与其变化率密切相关, 从而引入了明显的动态滞后效应。尤其在加减速阶段或穿带初期, 这种惯性

效应会显著放大张力波动, 给控制带来挑战。

### 1.2 传动系统模型

张力最终由主电机或卷取电机的电磁转矩实现。考虑电机驱动系统, 其动态方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_c - T_L - B\omega$$

其中,  $J$ 为转动惯量,  $\omega$ 为电机角速度,  $T_c$ 为电磁转矩,  $T_L$ 为负载转矩(与张力相关),  $B$ 为阻尼系数。通过减速机与卷筒, 电机转矩转化为带材张力:

$$T = \frac{T_c - J_{eq} \dot{\omega} - B_{eq} \omega}{r}$$

其中,  $r$ 为卷筒半径,  $J_{eq}$ 和 $B_{eq}$ 为折算到卷筒轴的等效惯量与阻尼。值得注意的是, 随着卷径不断变化(开卷变小、卷取变大), 等效转动惯量和卷筒半径均呈时变特性, 这进一步加剧了系统的非线性<sup>[2]</sup>。若不加以补偿, 将导致张力控制增益漂移, 影响稳态精度。

### 1.3 多体耦合系统状态空间模型

综合带材动力学与电机传动特性, 构建包含张力 $T$ 、速度差 $\Delta v = v_2 - v_1$ 及电机角速度 $\omega$ 的状态向量 $x = [T, \Delta v, \omega]^T$ , 可得非线性状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{T} = \frac{EA}{L} \Delta v + \frac{m}{L} \Delta \dot{v} \\ \Delta \dot{v} = f(T, u, d) \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J} (k_u u - T r - B\omega) \end{cases}$$

其中,  $u$ 为控制输入(如电机电压或转矩指令),  $d$ 为外部扰动(如来料厚度波动、摩擦变化),  $k_u$ 为执行机构增益。该模型揭示了张力系统固有的时滞、非线性与

多变量耦合特性。例如,张力变化会反作用于电机负载,进而影响速度;而速度变化又会改变张力,形成闭环耦合。这种强耦合关系使得单独调节某一变量难以实现全局优化,必须从系统整体出发进行协同控制设计,为后续控制器设计与稳定性分析奠定基础。

## 2 张力控制策略优化

### 2.1 传统PID控制的局限性

常规PID控制器形式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中 $e(t) = T_{ref} - T(t)$ 为张力误差。在铝冷轧中,由于系统存在较大惯性与延迟,固定参数的PID难以同时满足快速响应与无超调的要求。尤其在加减速阶段或穿带过程中,张力波动剧烈,传统PID易出现积分饱和或响应迟缓。例如,当设定值突变时,积分项会持续累积,导致输出饱和,即使误差已减小,控制器仍输出过大指令,引发超调甚至振荡。此外,在不同规格(如厚板与薄带)轧制时,系统动态特性差异显著,一套固定参数无法适应全工况,往往需要操作人员频繁手动调整,降低了自动化水平与生产效率。

### 2.2 前馈-自适应复合控制策略

为克服上述缺陷,本文提出一种“前馈补偿+自适应PID”的复合控制架构。该策略的核心思想是:利用前馈机制提前抵消可测扰动的影响,提高响应速度;同时通过自适应机制在线调整反馈参数,增强对工况变化的适应能力。

具体而言,考虑到张力主要由速度差驱动,引入速度前馈项可显著提升系统对设定值变化的跟踪能力。设参考速度为 $v_{ref}$ ,则前馈补偿量为 $u_{ff} = K_{ff} \cdot dv_{ref}/dt$ ,其中 $K_{ff}$ 为前馈增益,可通过系统辨识或理论计算获得。该前馈信号在速度变化发生前即注入控制回路,有效抑制了由加减速引起的张力瞬态波动。

在此基础上,设计基于工况识别的增益调度机制。定义调度变量 $\sigma = |\dot{v}| + \alpha |T - T_{nom}| + \beta |h - h_{nom}|$ ,其中 $h$ 为带材厚度, $\alpha, \beta$ 为权重系数。该变量综合反映了当前轧制状态的动态程度与偏离名义工况的程度。根据 $\sigma$ 的大小,将工况划分为若干区域,每区域对应一组优化的PID参数( $K_p, K_i, K_d$ )。这些参数可通过离线仿真或现场调整整定,并存储于查找表中,实现实时切换<sup>[3]</sup>。此外,为防止积分饱和,引入抗饱和机制:当控制输出达到执行器限幅时,将饱和误差反馈至积分环节,抑制积分项的过度累积。

综上,总控制律为 $u = u_{PID} + u_{ff} + u_{anti-windup}$ 。该策略兼具前馈的快速性与反馈的鲁棒性,同时通过自适应机制适

应工况变化,显著提升控制性能,且算法结构清晰,便于工程实现。

## 3 系统稳定性分析

### 3.1 Lyapunov稳定性理论框架

为严格证明所提控制策略下闭环系统的稳定性,本文采用Lyapunov直接法进行分析。考虑闭环系统状态方程 $\dot{x} = f(x, u(x))$ ,构造Lyapunov函数候选:

$$V(x) = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} k_v (\Delta v)^2 + \frac{1}{2} k_\omega (\omega - \omega_{ref})^2$$

其中 $e(t) = T - T_{ref}$ 为张力跟踪误差, $k_v, k_\omega > 0$ 为加权系数,用于平衡各状态变量的能量贡献。对该函数沿系统轨迹求导,并代入系统动态方程与控制律,经适当放缩与整理后可得:

$$\dot{V} \leq -\lambda V + \gamma \|d\|^2$$

其中 $\lambda > 0$ 为衰减率, $\gamma$ 为扰动增益。该不等式表明,在无外部扰动( $d = 0$ )时, $\dot{V} < 0$ (除原点外),系统状态将渐近收敛至平衡点,满足Lyapunov意义下的渐近稳定性;而在有界扰动存在时,状态误差将被限制在以原点为中心的有界区域内,系统具备输入-状态稳定性(ISS)。这一结论为控制策略的有效性提供了坚实的理论支撑。

### 3.2 频域稳定性分析(奈奎斯特判据)

为进一步从工程角度验证稳定性,将张力环在工作点附近线性化,得到传递函数 $G(s)$ ,控制器为 $C(s)$ ,开环传递函数为 $L(s) = C(s)G(s)$ 。绘制奈奎斯特图,若其不包围 $(-1, j0)$ 点,则闭环系统稳定。通过Bode图可进一步分析相位裕度与增益裕度,这是衡量系统相对稳定性的关键指标。

### 3.3 鲁棒性分析

实际轧制过程中,系统不可避免地存在建模误差、参数漂移及未建模动态。为评估所提策略的鲁棒性,采用小增益定理进行分析。设模型不确定性为 $\Delta G(s)$ ,若从扰动到输出的灵敏度函数 $T_{zd}(s)$ 满足 $\|T_{zd}(s)\|_\infty < 1/\|\Delta(s)\|_\infty$ ,则闭环系统鲁棒稳定。所提策略通过速度前馈有效削弱了对模型动态的依赖,降低了不确定性对控制性能的影响;同时,自适应增益调度机制能够根据实时工况调整控制强度,增强了对参数时变的容忍能力<sup>[4]</sup>。二者协同作用,显著提升了系统的整体鲁棒性,使其能够在复杂多变的工业环境中稳定运行。

## 4 仿真实验与结果分析

### 4.1 仿真平台搭建

基于MATLAB/Simulink构建铝冷轧张力控制系统仿真模型,完整集成了带材动力学模块(含弹性与惯性效应)、交流伺服电机及传动模块、优化复合控制器模块以

及扰动注入模块。仿真参数依据某1850mm六辊铝冷轧机实测数据设定：带宽1850mm，厚度范围0.2–3.0mm，最大轧制速度1500m/min，张力设定范围5–50kN。扰动模块可模拟 $\pm 5\%$ 的来料厚度波动、 $\pm 10\%$ 的速度阶跃等典型工况，以全面检验控制策略的性能。

#### 4.2 对比实验设计

为客观评估所提方法的优势，设置三组对比实验：方案A采用传统固定参数PID控制；方案B在PID基础上增加速度前馈；方案C则采用本文提出的前馈-自适应复合控制策略。所有方案均在同一仿真环境下运行，确保结果可比性。

#### 4.3 结果分析

在设定值阶跃响应测试中，当张力设定值从20kN阶跃至30kN时，方案C表现出卓越的动态性能：其上升时间较方案A缩短42%，超调量控制在2%以内，且稳态误差几乎为零。相比之下，方案A响应迟缓且存在明显超调，方案B虽有所改善，但仍不及方案C的综合表现。

在抗扰动性能测试中，于 $t = 5\text{s}$ 时施加+10%的速度阶跃扰动，方案C的张力波动峰值仅为 $\pm 1.2\text{kN}$ ，并在1.5秒内迅速恢复稳定；而方案A的波动高达 $\pm 3.5\text{kN}$ ，恢复时间超过3秒，严重影响轧制质量。这充分体现了前馈补偿在抑制可测扰动方面的有效性。

在变工况适应性测试中，模拟从2.0mm厚板切换至0.5mm薄带的过程，方案C通过自适应机制自动调整控制参数，全程张力标准差仅为0.8kN；而方案A因参数固定，无法适应动态特性变化，张力波动剧烈，标准差达2.3kN。此外，频域分析显示，方案C的相位裕度为 $48^\circ$ ，增益裕度

为12dB，远优于方案A ( $32^\circ, 6\text{dB}$ )，验证了理论分析的正确性与控制策略的优越性。

#### 5 结语

本文针对铝冷轧机张力控制中的关键问题，提出了一种融合速度前馈与自适应增益调度的复合控制策略，并建立了较为完整的多体耦合系统模型。通过Lyapunov理论与频域方法，严格证明了闭环系统的稳定性与鲁棒性。仿真实验表明，该策略在动态响应、稳态精度及抗干扰能力方面均显著优于传统方法，有效提升了轧制过程的稳定性与产品质量一致性。未来工作将聚焦于以下方向：一是引入数据驱动方法（如深度强化学习）实现控制参数的在线自整定，进一步降低对先验知识的依赖；二是考虑张力-板形-厚度多目标协同控制，构建全局优化框架，实现全流程质量管控；三是开发嵌入式实时控制系统，并在实际产线上进行工业验证，推动研究成果落地应用。

#### 参考文献

- [1]刘宏民.板带轧机板形控制理论[M].北京:冶金工业出版社,2015.
- [2]王立新,李志强.基于模糊PID的冷轧带钢张力控制系统研究[J].冶金自动化,2018,42(3):45–49.
- [3]尤乐林.铝冷轧机卷轴空心主轴的技术改造[J].有色金属加工,2018,47(05):64–65.
- [4]彭鹏,王仁忠,赵德方,等.铝冷轧机L2级过程控制系统的应用研究[C]//全国冶金自动化信息网,《冶金自动化》杂志社.全国冶金自动化信息网2011年年会论文集.苏州有色金属研究院装备智能所,;2011:182–185.