

铝冷轧机张力控制系统的建模与自适应PID算法应用

王向平

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 现代铝板带材冷轧生产中,精确控制带材张力对保障产品质量、提高成材率及确保设备安全运行至关重要。传统固定参数PID控制器难应对轧制速度变化、来料厚度波动、卷径动态变化及摩擦系数非线性等系统不确定性,易致张力波动大、响应滞后甚至断带。本文针对铝冷轧机张力控制系统,基于质量守恒定律和牛顿第二定律,建立含卷径动态变化等的张力动力学模型;设计基于模糊推理的自适应PID控制器,能根据张力偏差及其变化率实时调整PID参数,增强系统鲁棒性和动态响应性能;通过MATLAB/Simulink平台构建仿真模型,与传统PID控制策略对比分析。结果显示,自适应PID控制策略在典型工况下能显著减小张力超调量、缩短调节时间、抑制稳态误差,验证了其优越性与工程应用价值。

关键词: 铝冷轧机; 张力控制; 系统建模; 自适应PID; 模糊控制; MATLAB仿真

引言

下游产业对铝板带材质量要求提升,使冷轧这一铝材精整核心工序的自动化与智能化水平亟待提高。冷轧中维持稳定适当张力对防止带材跑偏、减少板形缺陷等至关重要。但铝冷轧张力控制系统是多变量、强耦合、时变且有不确定扰动的非线性系统,面临卷径动态变化、速度耦合效应、材料特性变化、外部扰动等挑战。传统固定参数PID控制器虽结构简单、应用广泛,但在复杂工况下控制性能难达高精度要求,存在响应迟缓等问题^[1]。因此,研究适应系统参数变化和外部扰动的先进控制策略意义重大。近年来,多种智能控制方法引入张力控制领域,自适应PID控制结合经典与现代控制优势成研究热点。本文旨在建立更实际的铝冷轧张力系统数学模型,设计基于模糊推理的自适应PID控制器并仿真验证其有效性。

1 铝冷轧机张力控制系统建模

1.1 系统结构概述

典型的铝冷轧机张力控制系统主要包括开卷机、入口张力辊、轧机机架、出口张力辊和卷取机。本文以入口段(开卷机与第一机架之间)的张力控制为例进行建模。该区段的张力由开卷机的制动转矩和入口张力辊的驱动转矩共同作用产生。控制系统的目标是通过调节开卷机的制动电流(或扭矩指令),使实际张力 T 跟踪设定值 T_{ref} 。

1.2 动力学模型推导

根据物理学原理,带材张力的变化源于其单位长度质量的加速度。设带材密度为 ρ ,宽度为 w ,厚度为 h ,则单位长度质量 $m = \rho wh$ 。

考虑一个微元段带材,其两端分别受到来自上游和下游的张力 T_1 和 T_2 ,以及由于速度差产生的净拉力。根据

牛顿第二定律,可得张力动力学方程:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{EA}{L}(v_2 - v_1) - \frac{T}{mL}(v_2 - v_1)$$

其中:

E 为铝带的弹性模量;

$A = wh$ 为带材横截面积;

L 为张力区段的有效长度;

v_1 和 v_2 分别为上游(开卷侧)和下游(轧机入口侧)的线速度。

上式右边第一项表示由速度差引起的弹性伸长产生的张力变化率,第二项为阻尼项。

为了简化并突出核心控制关系,常采用“质量-弹簧-阻尼”模型或直接基于卷取/开卷动力学进行建模^[2]。对于开卷机侧,其动力学方程可表示为:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = T_1 r_1 - T_b - B_1 \omega_1$$

其中:

J_1 为开卷机转动惯量(含带材);

ω_1 为开卷机角速度;

r_1 为当前卷径对应的半径;

T_b 为制动转矩(控制输入);

B_1 为粘性摩擦系数。

由于线速度 $v_1 = \omega_1 r_1$,且卷径 r_1 随时间变化,有:

$$r_1(t) = \sqrt{r_{10}^2 - \frac{2h}{\pi w} \int_0^t v_1(\tau) d\tau}$$

其中 r_{10} 为初始卷径。

将上述关系代入张力方程,并考虑到 $T_1 = T$ (即所控张力),最终可得到以制动转矩 T_b 为输入、张力 T 为输

出的状态空间模型。该模型清晰地揭示了系统参数（如 J_1, r_1 ）的时变特性。

1.3 模型线性化与传递函数

在某一工作点附近，可对非线性模型进行局部线性化。假设卷径变化缓慢，在短时间尺度内可视为常数，则系统可近似为线性时不变（LTI）系统。忽略高阶小量后，张力 $T(s)$ 与制动转矩 $T_b(s)$ 之间的传递函数可表示为：

$$G_p(s) = \frac{T(s)}{T_b(s)} = \frac{-K_p}{(J_1/r_1)s + B_1 + K_p r_1/v_2}$$

其中 $K_p = EA/L$ 为张力刚度系数。该一阶模型虽简化，但足以反映系统的主要动态特性，为控制器设计提供基础。

2 自适应PID控制器设计

2.1 传统PID控制的局限性

传统PID控制器的输出为：

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

其中 $e(t) = T_{ref}(t) - T(t)$ 为张力偏差。 K_p, K_i, K_d 为固定增益。在系统参数（如 J_1, r_1 ）发生较大变化时，固定的PID参数无法同时保证快速性、稳定性和鲁棒性，往往需要牺牲某一方面的性能。

2.2 模糊自适应PID控制器结构

为克服上述缺点，本文设计一种基于模糊逻辑的自适应PID控制器。其核心思想是利用模糊推理系统（FIS）根据实时的张力偏差 e 及其变化率 $ec = de/dt$ ，动态调整PID的三个参数增量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。

控制器结构如下所述：

输入层：采集张力偏差 e 和偏差变化率 ec 。

模糊化：将 e 和 ec 映射到预定义的模糊语言变量集，如 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ （负大、负中、负小、零、正小、正中、正大）^[3]。

模糊规则库：建立多条“IF-THEN”规则，例如：“IF e is PB AND ec is NB THEN ΔK_p is PB, ΔK_i is ZO, ΔK_d is PM”。规则的设计基于专家经验或对系统动态行为的理解。

模糊推理与解模糊：采用Mamdani或Sugeno推理方法，并通过重心法（COG）等解模糊策略，得到清晰的参数调整量。

参数更新：将调整量叠加到初始PID参数上，形成实时变化的控制参数：

$$K_p(t) = K_{p0} + \Delta K_p(t)$$

$$K_i(t) = K_{i0} + \Delta K_i(t)$$

$$K_d(t) = K_{d0} + \Delta K_d(t)$$

其中 K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 为通过Ziegler-Nichols等方法整定的初始值。

2.3 模糊规则设计

模糊规则的设计是控制器性能的关键。本文遵循以下原则：

当 $|e|$ 较大时，应增大 K_p 以加快响应，同时增大 K_d 以抑制超调； K_i 应较小，以防积分饱和。

当 $|e|$ 较小时，应增大 K_i 以消除稳态误差； K_p 和 K_d 可适当减小以保证平稳性^[4]。

当 ec 与 e 同号时，说明偏差在增大，应加强控制作用；反之则应减弱。

基于此，为 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 分别设计了49条（7x7）模糊规则。限于篇幅，此处仅列出部分核心规则：

表1：模糊规则

| $e \setminus ec$ | NB | ... | ZO | ... | PB |
|------------------|--|-----|--|-----|--|
| PB | $\Delta K_p: PB$ $\Delta K_i: NB$ $\Delta K_d: PB$ | ... | $\Delta K_p: PB$ $\Delta K_i: NB$ $\Delta K_d: PM$ | ... | $\Delta K_p: PM$ $\Delta K_i: ZO$ $\Delta K_d: ZO$ |
| ZO | $\Delta K_p: ZO$ $\Delta K_i: ZO$ $\Delta K_d: NB$ | ... | $\Delta K_p: ZO$ $\Delta K_i: ZO$ $\Delta K_d: ZO$ | ... | $\Delta K_p: ZO$ $\Delta K_i: ZO$ $\Delta K_d: PB$ |
| NB | $\Delta K_p: PM$ $\Delta K_i: ZO$ $\Delta K_d: ZO$ | ... | $\Delta K_p: PB$ $\Delta K_i: PB$ $\Delta K_d: NM$ | ... | $\Delta K_p: PB$ $\Delta K_i: PB$ $\Delta K_d: NB$ |

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真平台与参数设置

在MATLABR2023a/Simulink环境下搭建仿真模型。系统主要参数如下：

铝带参数： $P = 2700 \text{kh/m}^3, E = 70 \text{GPa}, w = 1.2 \text{m}, h = 0.002 \text{m}$

初始卷径： $r_{10} = 0.6 \text{m}$ ，芯轴半径： $r_{core} = 0.3 \text{m}$

张力区段长度： $L = 10 \text{m}$

开卷机转动惯量（空卷） $J_{empty} = 50 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ：

粘性摩擦系数： $B_1 = 10 \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$

张力设定值： $T_{ref} = 20 \text{kN}$

轧机入口线速度： $v_2 = 5 \text{m/s}$ （阶跃至 8m/s ）

分别实现了传统PID控制器和本文提出的模糊自适应PID控制器，并在以下三种典型工况下进行对比测试：

工况一：轧制速度阶跃变化（ $5 \text{m/s} \rightarrow 8 \text{m/s}$ ）。

工况二：卷径从最大值（ 0.6m ）变化至最小值（ 0.3m ）。

工况三：在稳态运行时施加一个 -2kN 的阶跃负载扰动。

3.2 仿真结果与讨论

3.2.1 工况一：速度阶跃响应

在速度阶跃工况下,传统PID控制器表现出明显的动态不足。当速度突增至8m/s时,由于下游速度骤增而开卷机未能及时响应,张力迅速上升至23kN,超调量达15%,随后经历约4秒的振荡才趋于稳定。相比之下,自适应PID控制器凭借对偏差及其变化率的敏锐感知,在速度变化初期迅速增大 K_p 和 K_d ,有效抑制了张力的瞬时冲击,最终超调量控制在5%以内,调节时间缩短至2.5秒,且无明显振荡,展现出优异的动态跟随能力。

3.2.2 工况二:卷径动态变化

在卷径动态变化工况中,传统PID的局限性更为突出。随着卷径从0.6m减小至0.3m,系统惯量显著降低,导致原有PID参数不再匹配,张力响应逐渐变慢,稳态值出现约0.8kN的持续漂移,反映出控制器无法适应参数时变。而自适应PID则通过持续监测偏差信号,识别出系统“变软”的趋势,自动增大 K_i 以补偿稳态误差,同时微调 K_p 维持响应速度,使得在整个开卷过程中张力始终稳定在设定值 ± 0.2 kN范围内,充分体现了其良好的参数自适应能力。

3.2.3 工况三:外部负载扰动

在外部扰动工况下,当系统受到-2kN的阶跃负载干扰时,传统PID控制下的张力瞬间跌落至18.5kN,恢复过程缓慢,耗时约3秒。而自适应PID控制器在检测到偏差突然增大且变化率为负后,立即提升所有增益,增强了系统的抗干扰能力,使张力最低仅降至19.2kN,并在1.8秒内完全恢复至设定值。这一结果表明,所设计的模糊规则能够有效捕捉扰动特征并作出合理响应,显著提升了系统的鲁棒性。

综合三项测试,自适应PID控制器在动态响应速度、

稳态精度和鲁棒性方面均全面优于传统PID控制器。

4 结语

本文针对铝冷轧机张力控制这一复杂工程问题,完成了从系统建模到先进控制器设计与验证的完整研究。建立了包含卷径动态变化、速度耦合及材料特性的张力动力学模型,为控制器设计提供了准确的理论依据。设计了一种基于模糊推理的自适应PID控制器,该控制器能够根据实时工况在线调整控制参数,有效克服了传统PID在时变和不确定系统中的性能瓶颈。通过多场景仿真实验,验证了所提控制策略在应对速度阶跃、卷径变化和外部扰动等典型挑战时的优越性,显著提升了张力控制的精度、快速性和鲁棒性。未来的工作将聚焦于将该算法移植到实际PLC或DCS系统中进行工业现场验证,并探索将神经网络等数据驱动方法与模型驱动方法相结合,进一步提升控制性能。

参考文献

- [1]秦大伟,张栋,孙瑞琪,等.冷轧20辊轧机张力闭环控制技术研究[C]//中国金属学会.第十四届中国钢铁年会论文集—13.冶金设备与工程技术.鞍钢集团北京研究院有限公司,2023:77-82.
- [2]王少飞,窦爱民,孙抗,等.冷连轧机张力偏差自动调整功能控制与应用[C]//中国计量协会冶金分会,《冶金自动化》杂志社.中国计量协会冶金分会2017年会论文集.首钢京唐钢铁联合有限责任公司生产技术室,2017:52-54.
- [3]顾栋.可逆冷轧机张力控制系统简述及故障分析[J].中国设备工程,2022,(21):123-125.
- [4]苗青,王铁成,冯慧娟,等.冷连轧机张力系统模糊PID控制仿真研究[J].轧钢,2016,33(06):63-66+84.