



双辊铸轧计算机控制策略 及近期科研工作浅悟

报告人：张文宇

报告日期：2018-5-12



1 典型科研项目-双辊铸轧控制策略

2 其他科研项目

3 学术论文及其他科研成果

4 科研工作一点理解

5 之后科研思路

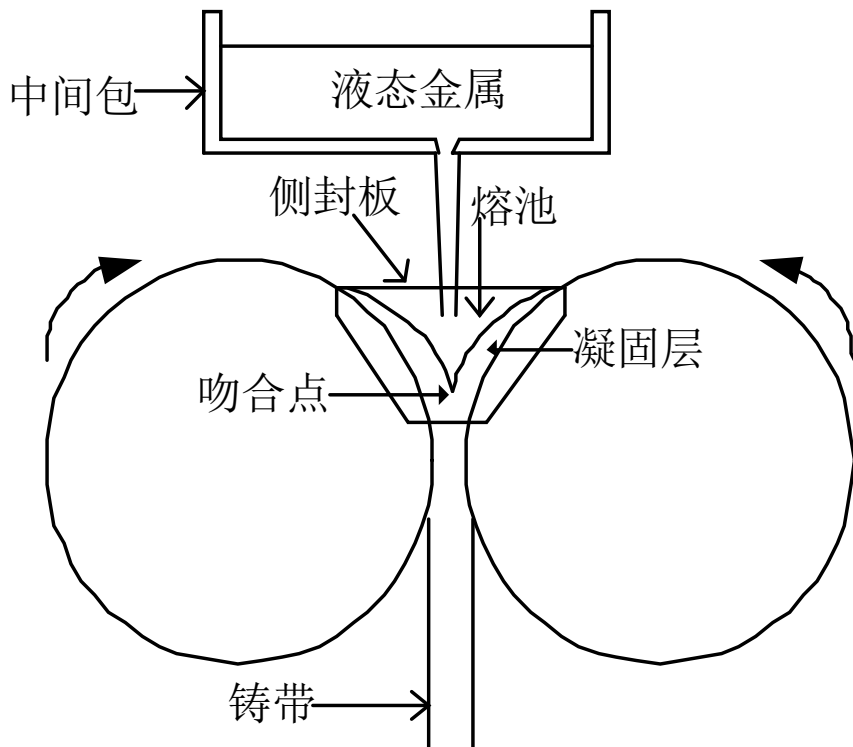
1.1 双辊薄带铸轧技术简介

工艺特点:

将铸造与轧制合为一体，液态金属在极短的时间内结晶凝固，并同时承受压力加工及塑性变形，直接生成近终形金属薄板

优势:

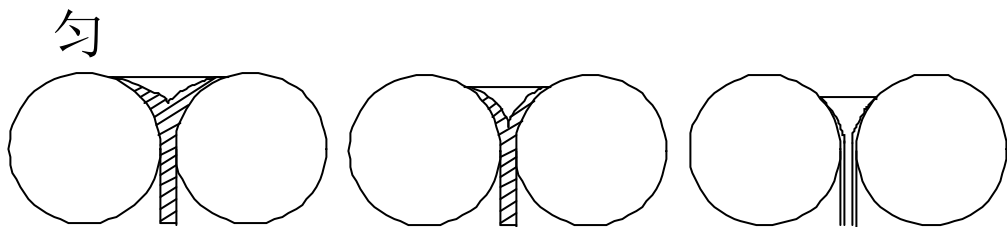
- 生产流程更短、投资更少
- 节能
- 降低环境污染
- 提高板材性能



1.2 控制要点

模型： 温度场、流场、应力场及其相互耦合模型；微观组织演化模型，用于反映金属流动、凝固及变形的基本规律，并据此优化铸轧过程参数

控制策略： 目标：厚度一致→板型好；铸轧力稳定→微观组织分布均匀



- 金属熔池液位控制策略
- 铸轧力控制策略
- 铸轧速度控制策略
- 薄板厚度控制策略
- 解耦控制策略

相关检测技术与监控系统

- 熔池液位检测方法：电视法、激光法、CCD检测、图像识别
- 监控系统：单片机→PLC
集中式→分布网络式
一级仪表采集→二级控制→三级管理

1.3 铸轧机及其相关参数



主要参数

- 辊宽：0.26m
- 辊半径：0.15m
- 成品厚度：2-6mm
- 最大铸轧速度：1m/s
- 额定铸轧力：13.5kN

1.4 监控系统

铸轧过程:

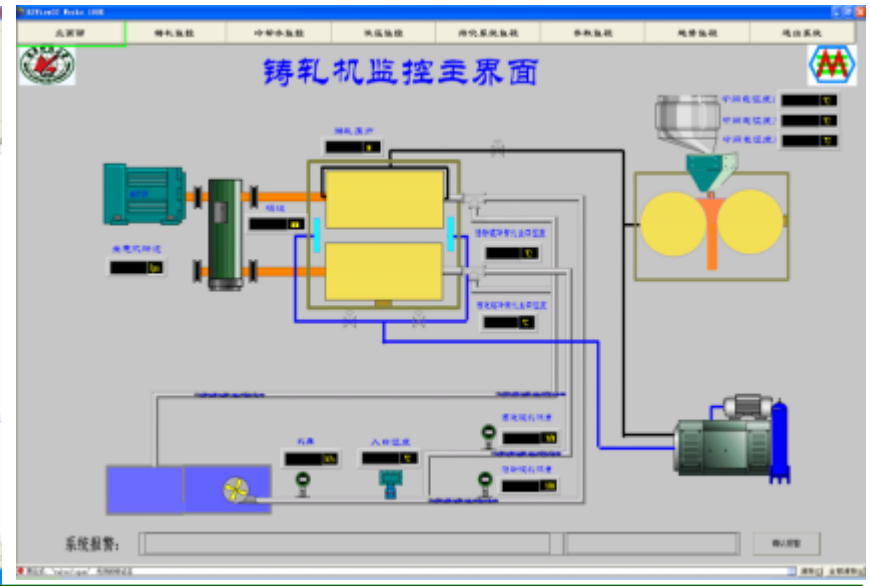
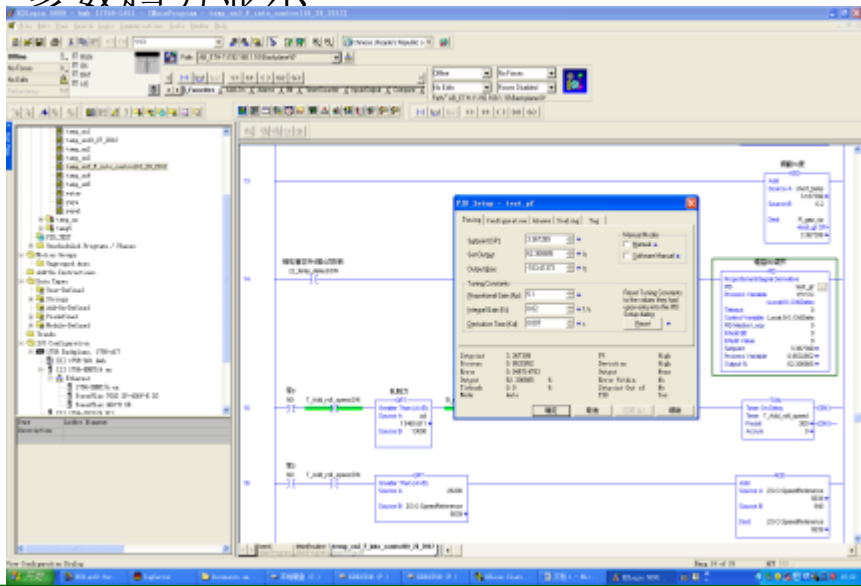
铸轧准备、开浇暂态、稳定生产

PLC程序实现:

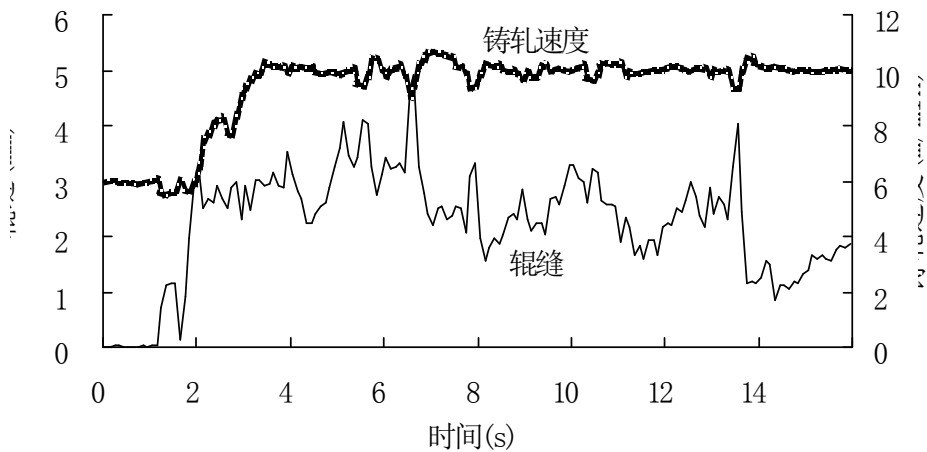
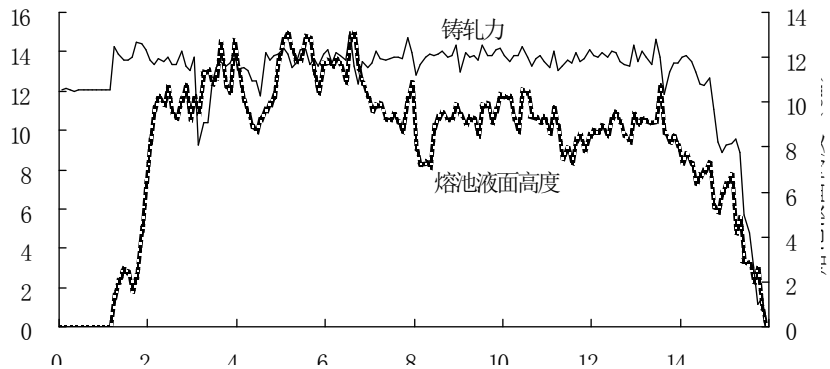
prepare_stage、temporary_stage、stable_stage三个一级程序
辊速、熔池液面、液压、熔化供料、冷却水及其它附属设备

监控界面:

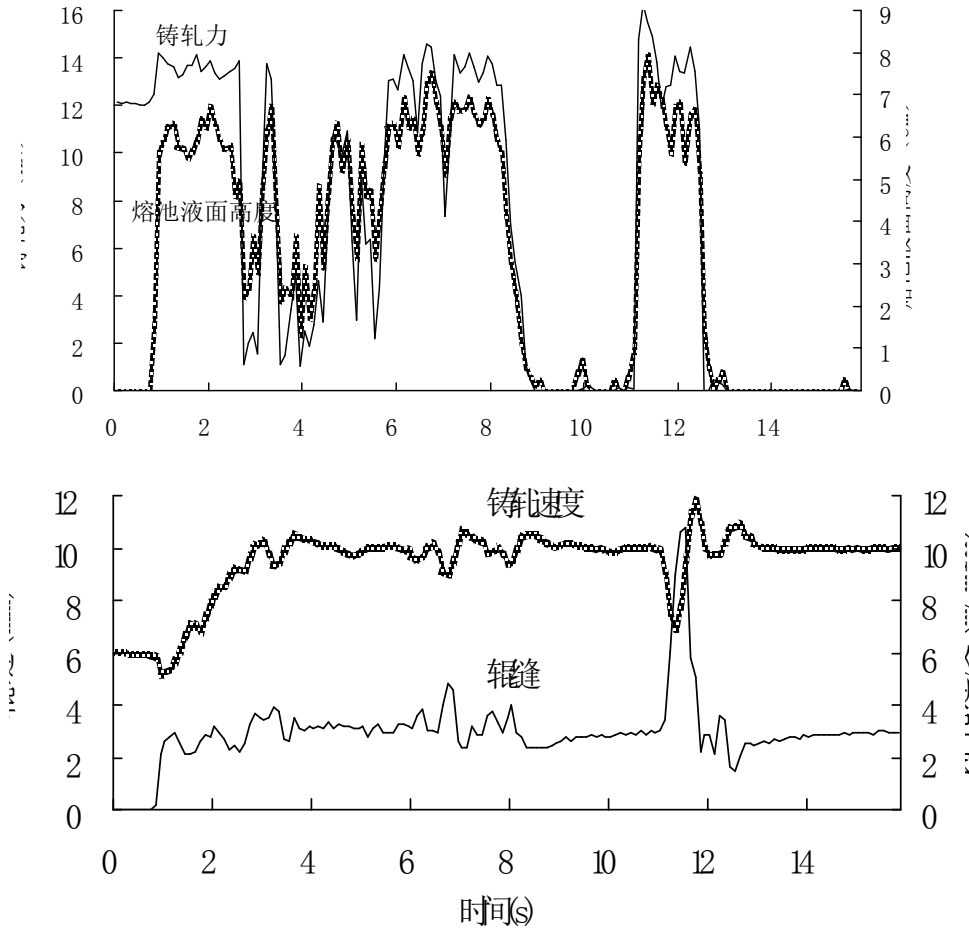
主界面、铸轧监控、冷却水监控、熔化供料监控、液压监控、主要参数监视、参数趋势显示



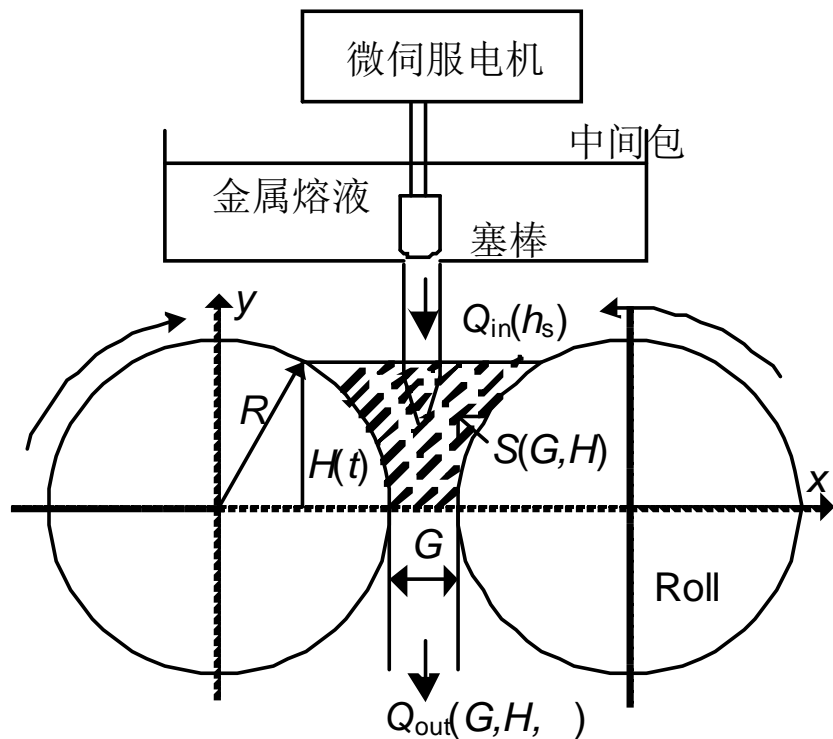
1.5 实验效果 (一)



1.5 实验效果 (二)



1.6 建模（一）：熔池液面模型



$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

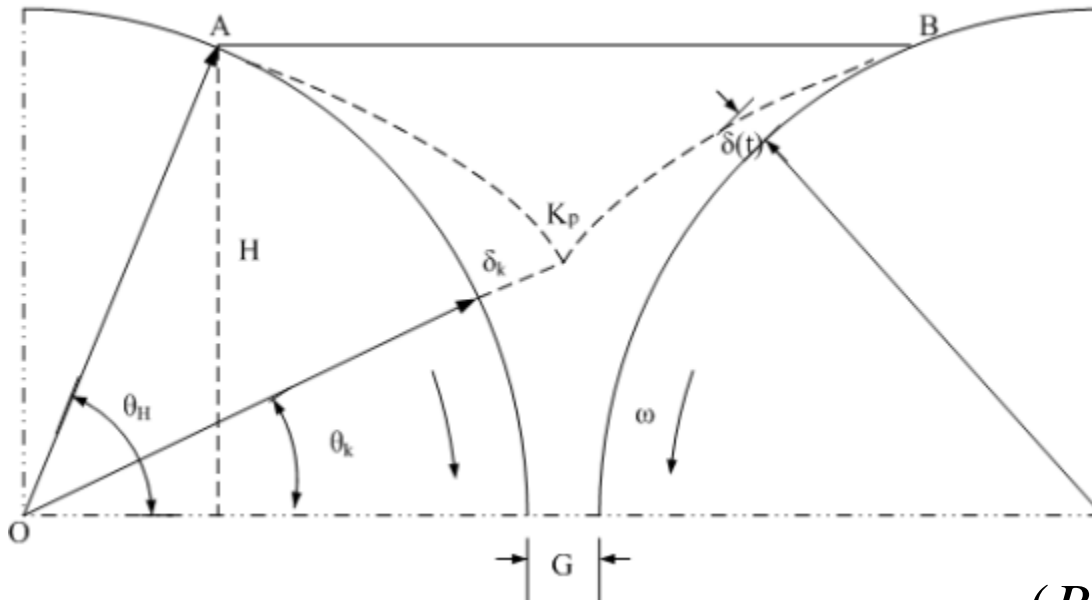
$$S = \int_0^H G \cdot 2R \cdot 2\sqrt{R^2 - H^2} dH$$

$$Q_{in} = k_s h_s$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{k_s h_s - LG - R LH \frac{dG}{dt}}{L(G - 2R - 2\sqrt{R^2 - H^2})}$$

塞棒高度，辊速，辊缝等三个参数耦合在一起，均直接影响熔池液面的稳定

1.6 建模（二）：凝固过程模型



$$(t) \quad C(t)$$

$$(T_p - T_0) / V_c$$

凝固点处壳坯厚度为：

$$(t_k) \quad C(t_k)$$

设铸轧速度保持不变，则

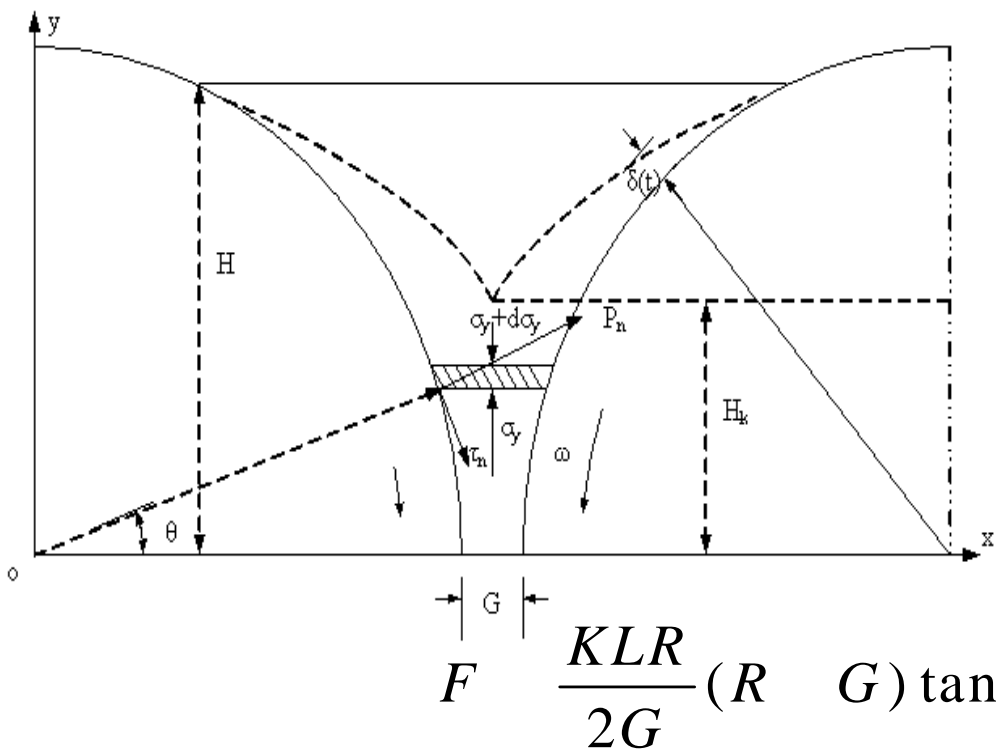
$$(R - (t_k)) \cos \theta_k = R - G/2$$

$$(R - C(t_k)) \cos(\theta_H - t_k) = R - G/2$$

熔池液面高度、辊速、辊缝相互耦合在一起，均直接决定凝固点的位置，进而影响整个铸轧过程。



1.6 建模（三）：铸轧力计算模型



$$F = L \int_0^{H_k} P_n dy = \int_0^{H_k} n \tan \alpha dy = F_0$$

垂直合力为零

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{y}{x} \frac{2P_n}{dy} \frac{dx}{dy} \right) = 2 \frac{n}{x} = 0$$

水平合力为零

$$\int_x P_n$$

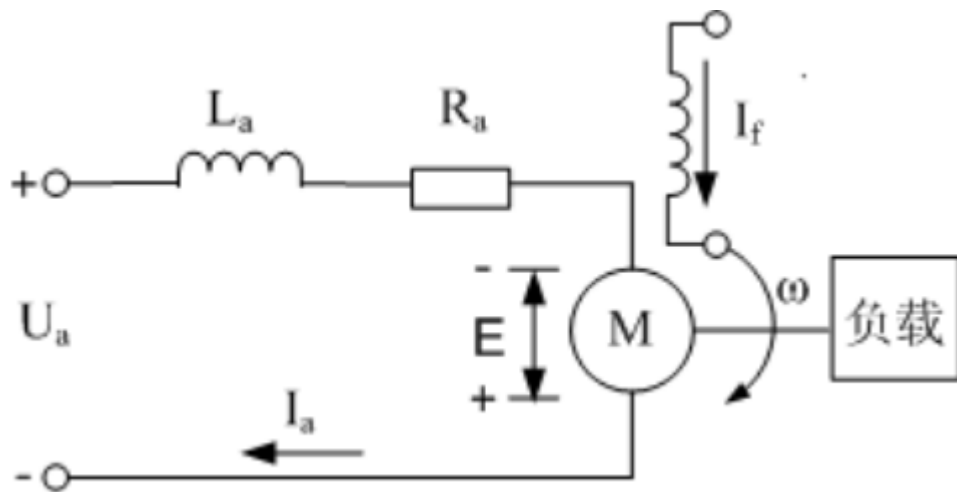
Mises屈服准则

$$\frac{d}{dx} \frac{d}{dy}$$

变形满足最大摩擦力准则

$$n = \frac{K}{2}$$

1.6 建模（四）： 铸轧速度控制模型



电枢回路电压平衡方程

$$U_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a$$

电磁转矩方程

$$M_m = C_m I_a$$

转矩平衡方程

$$M_m = J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + M_c$$

$$U_a = \left[\frac{R_a}{C_m} M_c + \frac{L_a}{C_m} M_c s \right] + \left[\frac{L_a}{C_m} J_m s^2 + \left(\frac{L_a B_m}{C_m} + \frac{R_a}{C_m} J_m \right) s + \left(\frac{R_a}{C_m} B_m + C_e \right) \right] \omega$$

负载力矩（铸轧力）对电机转速呈反向扰动

1.6 建模（五）： 液压AGC模型

1. 液压缸数学模型

液压缸流量连续方程

$$Q_L(s) = C_{ie} P_L(s) - \frac{V_t}{ef} s P_L(s) - A_1 s Y(s)$$

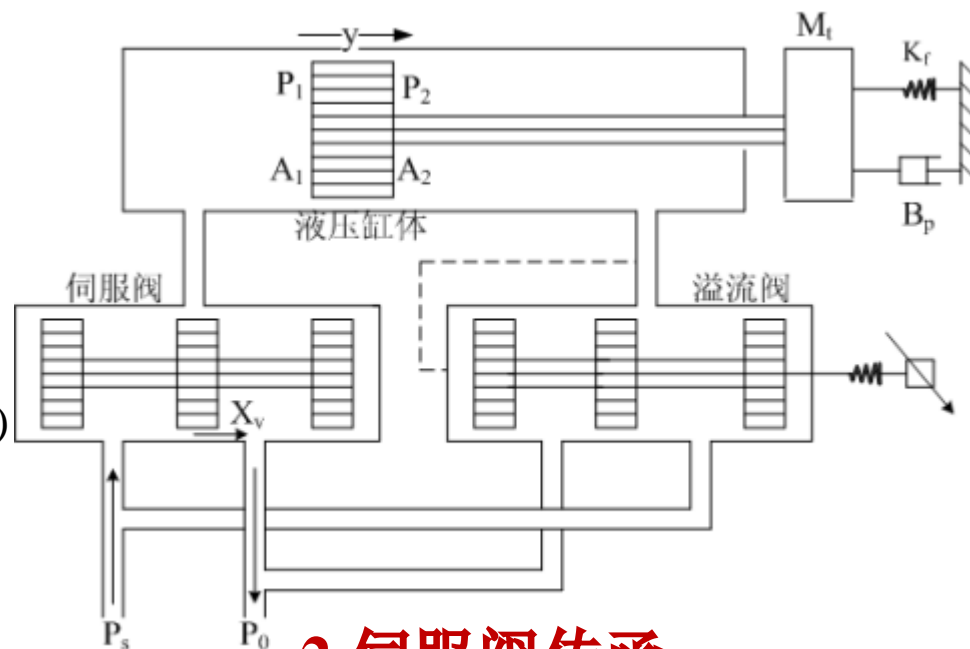
控制阀的负载流量方程

$$Q_L(s) = K_q X_v(s) - K_c P_L(s)$$

液压缸和负载的力平衡方程

$$A_1 P_L(s) = (M_t s^2 + B_p s + K_L) Y(s) + F_L(s)$$

$$Y(s) = \frac{\frac{K_q}{A_1} X_v(s) - (K_{ce} - \frac{V_t}{ef} s) \frac{F(s)}{A_1}}{\frac{V_t M_t}{ef A_1^2} s^3 + (\frac{V_t B_p}{ef A_1^2} + \frac{K_{ce} M_t}{A_1^2}) s^2 + s}$$



2. 伺服阀传函

$$W(s) = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{W_{sv}} + \frac{2sv}{W_{sv}} s + 1}$$

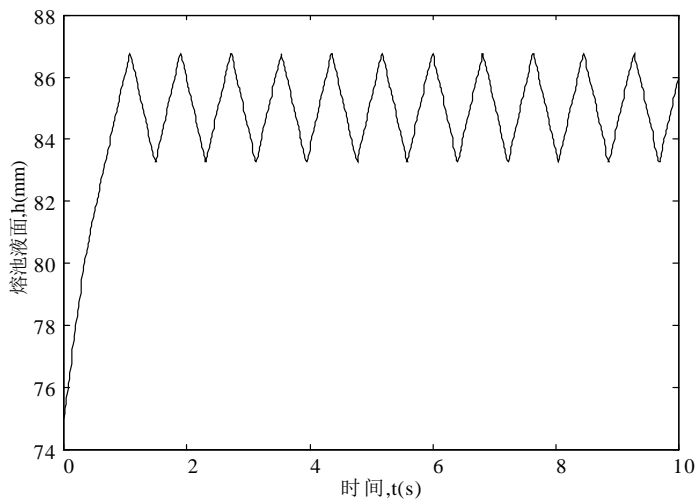
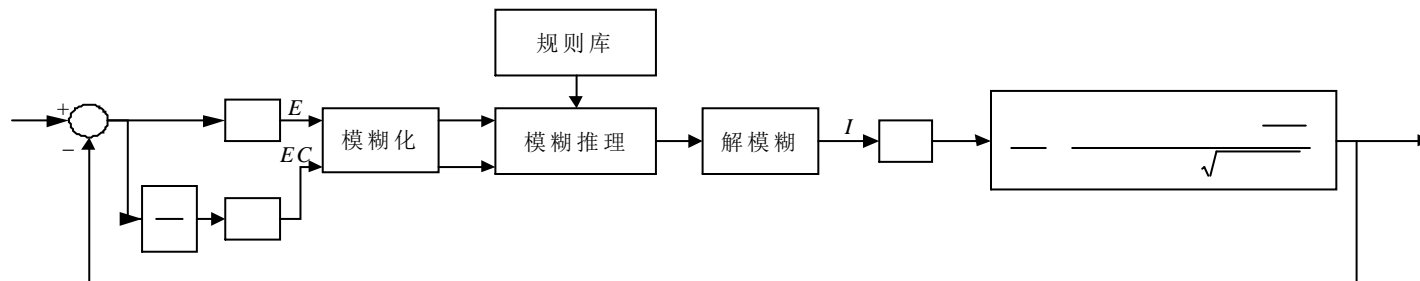
3. 伺服阀放大器及位移传感器的传递函数

$$K_a \frac{I}{U} K_y \frac{U}{y}$$

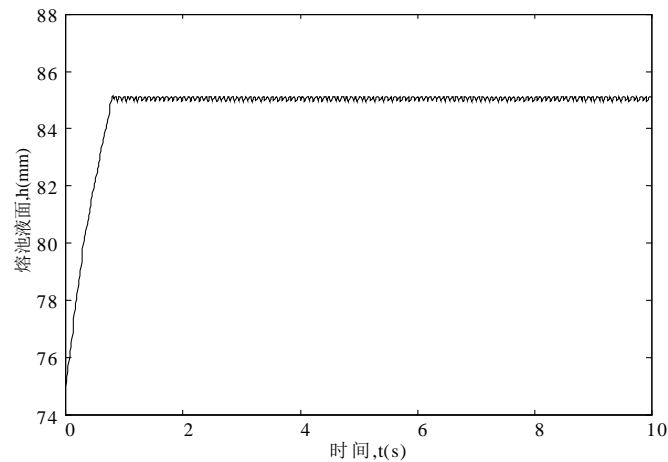


1.7 GA_Fuzzy 熔池液位控制策略

模糊控制器的基本工作原理



Fuzzy控制效果



GA_fuzzy控制效果



1.8 (1) 基于摄动法的解耦模型

摄动法是指将复杂系统首先简化为理想模型，然后通过研究理想模型的参数或结构在扰动作用下的结果来探究整个现实系统运动过程的数学方法。

其基本思路是：如果一个复杂系统 S_ε 中有一个不可精确确定或呈缓慢变化的参数 ε ，则可令 $\varepsilon = 0$ ，使复杂系统 S_ε 首先简化为理想模型 S_0 ，进而将复杂系统 S_ε 视为是理想模型 S_0 受到参数 ε 摄动而形成的受扰系统，如此达到了简化数学处理的目的。

现有研究表明，对非线性系统的控制问题，如果可将非线性耦合部分看做是对简单线性系统的摄动，则可得到较好的控制效果，故摄动法在复杂系统解耦问题的研究正在逐步深入，并取得了较好的实际应用效果。



1.8 (2) 基于摄动法的解耦模型

1. 辊缝与铸轧力均直接受液压缸位移影响

2. 液压缸所产生的液压力与铸轧力瞬间动态平衡时

3. 系统最大铸轧力

4. 铸轧力与辊缝控制的非线性方程

$$Y(s) = \frac{\frac{K_q}{A_1} X_v(s) (K_{ce} \frac{V_t}{ef} s) \frac{F(s)}{A_1^2}}{\frac{V_t M_t}{ef A_1^2} s^3 + (\frac{V_t B_p}{ef A_1^2} + \frac{K_{ce} M_t}{A_1^2}) s^2 + s}$$

$$Y(s) = \frac{K_1 X_v(s) + K_2 F(s)}{L_H(s)}$$

$$G(s) = Y(s)$$

$$F_{\max} = \frac{KL}{2G} R(R + G)$$

$$G(s) L_H(s) = \frac{K_2 KL}{2G(s)} R(R + G(s)) + K_1 X_v(s)$$



1.8 (2) 基于摄动法的解耦模型

5. 凝固壳厚度做为摄动量

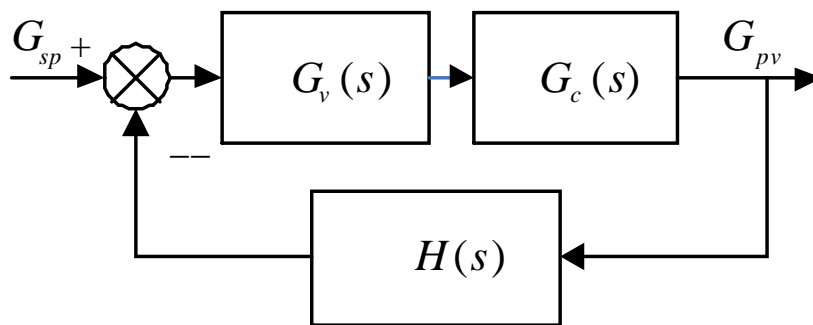
$$G(s)L_H(s) = \frac{K_2 KL}{2_K} R^2 \quad \frac{K_2 KL}{2_K} RG(s) \quad K_1 X_v(s)$$

6. 将辊缝与凝固壳厚度的比值做为二次摄动量乘到上式的干扰量，得到线性解耦方程

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{X_v(s)} = \frac{K_1}{L_H(s) \frac{K_2 KLR}{2_K} \frac{K_2 KLR^2}{2_k}}$$

7. 摄动值范围

$$0.0025 \quad K \quad 0.064$$



解耦后的液压控制方框图



1.8 (3) : 自适应控制策略

仿真确定的PI自适应控制策略

$$K = \begin{matrix} K_{0.03} & \frac{K_{0.03} K_{0.06}}{75} (H > 75) & H > 75\text{mm} \text{ 且 } H < 150\text{mm} \\ K_{0.03} & \frac{K_{0.005} K_{0.03}}{74} (75 > H) & H > 1\text{mm} \text{ 且 } H < 75\text{mm} \end{matrix}$$

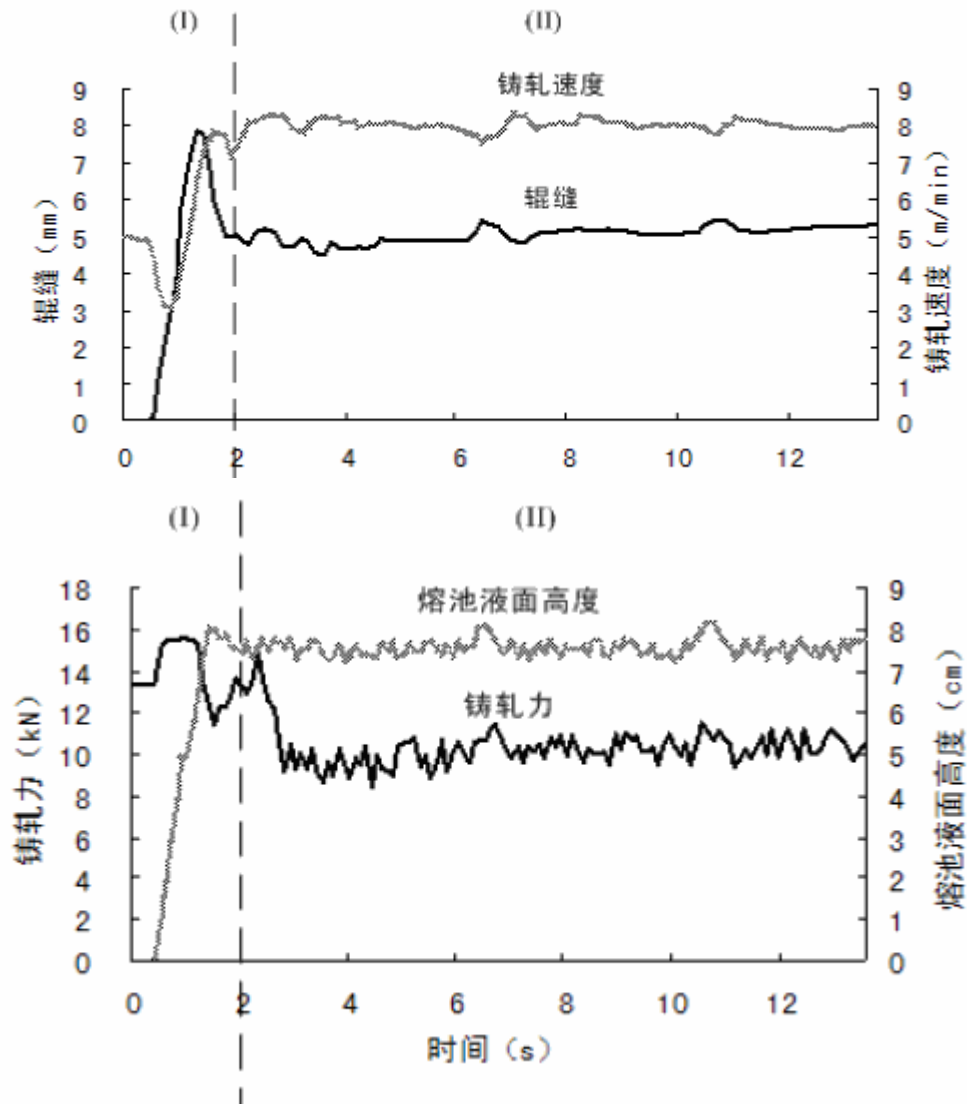
实验修订的PI自适应参数

$$K_p = \begin{matrix} 0.9 & 0.01 & (H > 75) & H > 75\text{mm} \text{ 且 } H < 150\text{mm} \\ 0.9 & 0.03 & (75 > H) & H > 1\text{mm} \text{ 且 } H < 75\text{mm} \end{matrix}$$

$$K_i = \begin{matrix} 40 & 0.4 & (H > 75) & H > 75\text{mm} \text{ 且 } H < 150\text{mm} \\ 40 & 0.4 & (75 > H) & H > 1\text{mm} \text{ 且 } H < 75\text{mm} \end{matrix}$$

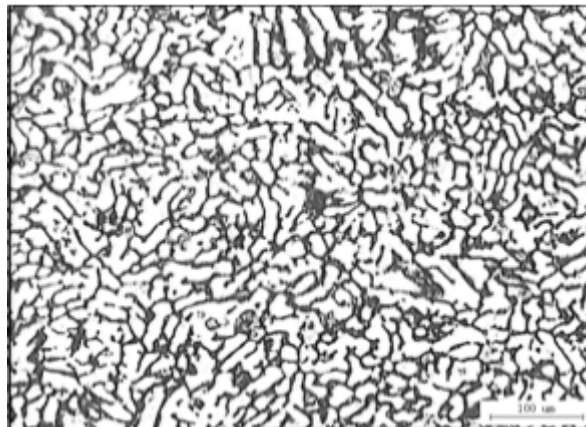
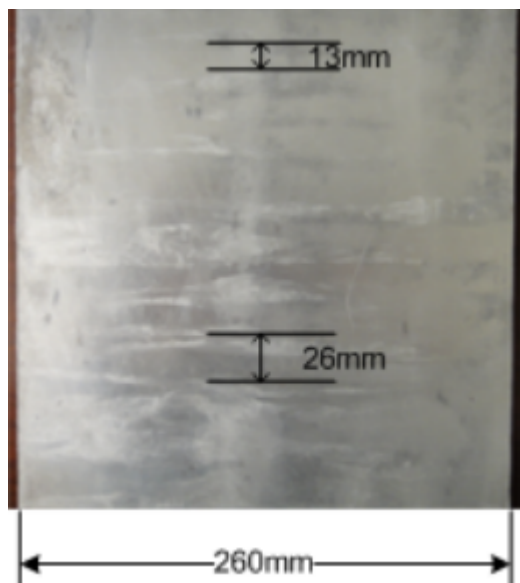
1.8 (4) : 关键参数曲线

辊缝基本稳定在预定值、铸轧力在液压工作压力值附近波动、熔池液位因模糊控制器特性及中间包出口金属粘性而在75mm处上下波动



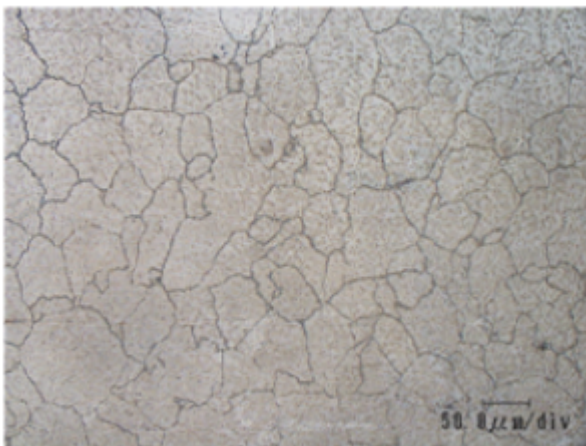
1.8 (5) : 效果

铸轧镁合金薄板



薄板微观组织

不规则分布的 - Mg、纤维状的富Al固熔体及颗粒状的Mg₁₇Al₁₂共晶所组成



均匀化退火处理的薄板微观组织

晶粒大部分为等轴晶，分布均匀，尺寸多为50 μm

2 其他科研项目



- 2010-2012年：镁合金铸轧机研发平台建设（纵向，200万）
2011-2013年：镁合金连铸连轧实验轧机开发（纵向，150万）
2012-2014年：镁合金薄板高速连续铸轧工艺装备开发（纵向，80万）
2014-2016年：性能镁合金冲压板材制备和温冲技术的开发（纵向，50万）
- 2011-2013年：鞍山供电公司后勤服务信息管理系统（横向，44.9万）
2013-2014年：基于物联网的温室田间信息采集与智能监控系统（横向，29.8万）
2010-2011年：空一师场站训练计划自动优化生成系统（横向，7万）
- 2006-2007年：基于dhcp Server的鞍山广电局宽带收费控制系统（横向，10万）
- 2005-2006年：鞍钢2150生产线2.5L生产信息分析决策系统（横向，230万）
2004-2005年：鞍钢烧结厂生产质量监督系统（横向，30万）

3 学术论文及其他科研成果



[1]Wenyu Zhang, Dongying Ju, et al. A Decoupling Control Model on Perturbation Method for Twin-Roll Casting Magnesium Alloy Sheet. Journal of Materials Science and Technology

[2]Wenyu Zhang, Dongying Ju, et al. Roll-Gap Control System of Twin Roll Strip Caster Based on Feed Forward-Feedback. Materials Science Forum. 2013,750:64-67.

[3]Wenyu Zhang, Dongying Ju, et al. Fuzzy Controller Optimized by Genetic Algorithm for the Molten Metal Level in the Twin Roll Strip Casting Process. Materials Science Forum, 2015, 833:197-200.

[4]Wenyu Zhang, Jinzhu Shi. Model Reference Adaptive Speed Control of 2-Phase Travelling Wave Ultrasonic Motor. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11(11):6337-6343.

[5]张文字, 马宇翔, 巨东英,等. 双辊铸轧过程金属熔池液面的优化控制. 辽宁科技大学学报, 2016,

[6] 张文字, 高青, 刘安琪, 等.一种轧制镁合金薄板表面缺陷检测系统. 辽宁科技大学学报, 2017

[7] Nonlinearity Of PMSM's Low-Speed Operation Caused By Dead-Time. Advanced Materials Research, 2012, 383-390:1518-1523.

[8] 2-Phase Symmetrical PWM Generator Using CPLD For Ultrasonic Motor Drive Advanced Materials Research, 2012, 383-390:1513-1517.

[9] 超声波电机推挽式驱动电路研究.电气传动,2010-2.中文核心

- 2014年：基于物联网的鞍山君子兰温室生产控制技术，获鞍山市科技成果二等奖
- 2013年：镁合金薄板铸轧技术与产品研发平台，获鞍山市科技成果三等奖

□ 2015年：大学生入校二次遴选信息管理系统，获软件著作权：2015SR286704

□ 2012年：后勤服务管理信息系统，获软件著作权：2012SR095671

□ 2011年：面向企事业的房产管理系统，获软件著作权：2011SR079073



4 科研工作一点理解

1. 科研的创新性

- 领域交叉：将成熟的算法成功应用到一个新的应用领域，取得良好效果
- 算法融合：将几个算法（包括热点算法）融合在一起（扬长避短），解决经典问题，取得显著提高
- 独创：算法改变、生产流程改变、新标准、新体系

2. 科研论文的写作要点

- 创新性：结论要明确，有数据支撑
- 逻辑性：围绕创新点或核心问题，递进性分析。（要自成逻辑，避免大而空）
- 完整性：数学模型→问题或改进细节分析→实验仿真及分析→明确结论

3. 横向和纵向（工程师&科研工作者）

- 横向重实用；纵向重创新
- 横向重技术；纵向重理论
- 横向重化繁而简；纵向化简而繁
- 横向承揽重调研、重业绩；纵向申报重前期成果
- 横向重结果、重应用；纵向重过程、重分析、重逻辑
- 横向团队成员方向相近、人数较少；纵向团队成员方向要交叉、人数较多

4. 平台及团队

- 平台：起点提高，减少基础工作
- 团队：领域交叉，工作完整性，成果共享型的创新



5 之后科研思路

之后的科研想法：

1. 围绕镁合金铸轧中心的问题

(1) 轧制薄板表面缺陷检测（贝叶斯、深度学习）

(2) 熔池液面的检测与控制（图像识别、神经网络控制、滑模自适应控制）

(3) 铸轧及轧机专家系统（表面质量：材质质量→优化生产过程参数）

2. 围绕数据挖掘做决策支持方面的工作

(1) 鞍钢三化融合 (2) 金融 (3) 物联网

团队需求：

希望和有冶金背景、物联网、图像处理、数据挖掘、工业智能控制、信息管理系统等老师组成团队

个人优劣分析：

优势：有一定的纵、横向科研基础；有一定的项目信息及相应资源；有一定团队管理经验

劣势：管理工作多，精力投入是个问题



谢谢各位老师
敬请指正