

分类号 _____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

热连轧精轧活套控制技术研究与应用

作者姓名： 范建鑫

指导教师： 郑艳 副教授东北大学信息科学与工程学院

企业指导教师： 崔伦凯高级工程师首钢迁钢公司热轧作业部

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2012年5月 论文答辩日期： 2012年6月

学位授予日期： 年 月 答辩委员会席： 高宪文

评 阅 人： 于洪喜 高级工程师、钱晓龙 教授

东北大学

2012年6月

A Thesis in Control Engineering



Research and Application on Hot Strip Rolling Finish Mill of Looper Control Technology

By Fan Jianxin

Supervisor: Associate Professor Zheng Yan

Senior Engineer: Cui Lunkai

Northeastern University

2012

独创性声明

本人声明，所提交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：范建鑫

日期：2012.6.24

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名：范建鑫

导师签名：郑艳

签字日期：2012.6.24

签字日期：2012.6.25

热连轧精轧活套控制技术研究与应用

摘 要

随着工业现代化技术发展，钢铁工业得到了迅速发展，钢铁产量得到大幅度提升，对带钢的品种、规格和质量的要求也日益增高，同时这也对与轧制过程相关的控制系统提出了更高的要求。活套控制是热连轧过程中一项关键技术，它对热连轧过程中轧制的稳定性和带钢的宽度、厚度控制都有着非常重要的作用。该技术一直是国内外轧钢领域的热点研究问题。

本文以首钢迁钢公司 2250 热轧精轧活套为背景，首先对热连轧轧机发展历程及活套控制发展历程进行阐述。其次研究了热轧活套机械结构原理以及机械尺寸，液压控制原理，并对双液压伺服阀控制进行分析；同时对自动化控制系统软硬件以及与活套控制相关的集成化功能块结构进行了探讨，对该轧线的活套计算机控制系统进行了研究。分析了活套套高与张力控制的基本数学模型，研究了活套数学模型中各相关参数计算。针对热连轧控制过程中活套系统的张力和高度控制做了较为全面和深入的探讨，对活套的起套控制、张力闭环控制进行了研究。

实际应用中发现活套起套时，动作速度缓慢，导致带钢头部失张；以及活套抬起至工作点与带钢接触瞬间造成撞击，破坏张力平衡，对前后机架速度造成干扰等问题，由此提出了“软接触”控制器的概念。本文详细研究了“软接触”控制器设计思路、分析了“软接触”控制器数学模型的设计过程，优化了“软接触”控制器的相关参数，最终确定一套适合本单位使用的“软接触控制器”的参数。最后比较了优化前后活套控制精度。

该“软接触”控制器的开发及应用对精轧稳定轧制以及提高产品质量起到了良好作用。该研究结果在实际生产过程中得到了验证，相关产品技术指标有了明显的改善，保证了生产的稳定运行，为企业取得良好的经济效益提供了可靠的技术基础。

关键词：热连轧，精轧，软接触，活套，张力控制

Research and Application on Hot Strip Rolling Finish Mill of Looper Control Technology

Abstract

With the rapid development of modern industrial technology, the steel industry has developed rapidly and steel production has greatly improved. While it grows on the strip of variety, size and quality of increasing demand. Meanwhile, a higher requirement related to rolling process control was proposed as the increasing requirements of varieties, specifications and quality of the strip. Looper control is a key technology in hot-rolling process, which plays an important role in the rolling stability analysis, strip thickness control and width control of hot-rolling process. The technology has been a hot research in the steel rolling areas both at home and abroad.

In this paper, based on Shougang Corporation 2250 Hot Finishing Mill looper as background, Firstly, the development process of hot rolling mill and looper control is Secondly, the principle of mechanical structure, the dimension and Hydraulic control principle of rolling looper is studied, as well as the dual-hydraulic servo valve control, At the same time, the hardware and software of the automation control system as the integrated function block structure is discussed, so is the looper computer control system. The paper studies the basic mathematical model of looper height and tension control and relevant parameters. Then looper system in tension and height control has been discussed in-depth. The looper from the set of control and tension closed loop control is also studied.

In the actual application of the looper from the set, the slow movement speed leading to loss of tension of strip head; and a live set up to work with the strip contact moment of impact damage caused tension imbalance, and the front frame rate causing interference, so "Soft touch" control concept is proposed. The paper mainly studies "Soft touch" controller design, analysis the "Soft touch" control mathematical model for the design process, and optimize the "Soft touch" controller of the relevant parameters, ultimately a suitable soft contact controller

parameters is chosen. And finally the before and after optimization looper control accuracy is compared.

The development and application of "soft touch" controller play a good role in finishing rolling and improving the quality of products. The conclusion in the actual production process has been validated and related products technical indicators have improved significantly to ensure stable operation in production, and obtain good economic benefits for enterprise.

Keywords: Hot strip mill; Finish roll; Soft touch; Looper; Tension control

目录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景.....	1
1.1.1 现代带钢热连轧机技术发展的特点.....	1
1.1.2 活套控制方法发展及研究现状.....	3
1.2 热轧带钢的张力控制方式.....	5
1.2.1 无活套微张力控制.....	5
1.2.2 活套张力控制.....	8
1.3 本文的主要内容.....	9
第 2 章 2250 热连轧精轧活套结构组成	11
2.1 2250 活套设备系统组成.....	11
2.1.1 液压活套的结构.....	11
2.1.2 活套液压系统.....	12
2.1.3 活套技术参数.....	14
2.2 活套控制系统组成.....	16
2.2.1 系统硬件组成.....	16
2.2.2 系统软件组成.....	18
2.3 本章小结.....	19
第 3 章 活套的高度控制和张力控制	21
3.1 活套高度控制.....	22
3.1.1 活套高度控制系统的组成.....	23
3.1.2 活套套量计算的数学模型.....	25
3.1.3 轧机的速度级联.....	27

3.1.4 活套小套量轧制切换策略优化.....	29
3.2 活套张力控制.....	32
3.2.1 带钢的张力力矩.....	33
3.2.2 补偿转矩.....	34
3.2.3 活套装置所需总力矩.....	36
3.2.4 活套的张力控制方式.....	38
3.3 本章小结.....	39
第4章 活套软接触控制的研究.....	41
4.1 活套软接触研究.....	41
4.1.1 活套软接触研究背景.....	41
4.1.2 活套“软接触”控制器设计思路.....	42
4.1.3 含“软接触”控制器活套控制框图.....	42
4.2 “软接触”控制器的数学模型.....	44
4.2.1 基本数学模型.....	44
4.2.2 数学模型标准化.....	45
4.3 “软接触”控制器参数优化与应用.....	49
4.3.1 “软接触”控制器参数优化.....	49
4.3.2 “软接触”控制器比例系数优化.....	50
4.4 活套控制优化前后对比分析.....	56
4.5 本章小结.....	57
第5章 结论与展望.....	59
参考文献.....	61
致谢.....	63

第1章 绪论

热轧带钢作为钢铁工业最重要的钢材产品，一般情况其产量在工业发达国家中占钢材总产量的 50%左右，不断改进和发展热轧带钢生产工艺技术，对钢铁工业的技术进步和经济效益具有重要的影响。

目前大规模高效率生产优质的热轧带钢，主要是在连续式和半连续式带钢热连轧机上进行。近几十年来热连轧板卷的生产，在轧钢生产中发展最为迅速，也是各种新技术应用最为广泛的一个领域。所以热轧带钢轧机的水平，在一定程度上反映了一个国家钢铁工业的技术水平^[1]。由现在国内热轧板卷市场需求和热轧板卷的生产能力来看，国内板卷市场已经严重出现供大于求的现象。

热轧带钢生产过程是一个复杂的综合系统，精轧机组又是整个生产过程的核心，对最终热轧成品质量起着决定性的作用。据统计超过 2%的热轧带钢存在精轧张力超限导致的宽度缺陷，精轧张力的精确控制可以降低带钢宽度拉窄所带来的剪切损耗，提高带钢成材率，给热轧生产创造经济效益^[2]。带钢在水平轧制过程中，通过调节张力可以改变其宽展量，精轧机组内带钢温度较高、宽厚比较大、宽度随张力的变化非常明显。精轧宽度自动控制就是利用张力作为控制手段，但是带钢在精轧区轧制时对拉应力极为敏感，一旦张力控制不好，带钢易被过度拉伸而变窄，导致废品的出现。活套在精轧机组中占有重要的位置，精轧轧制过程是通过活套实现恒张力、微套量轧制的^[3]。

本文将研究活套控制在 2250 热连轧精轧机组中的应用，主要针对活套对带钢生产的稳定性和产品质量的影响，结合在现场实际应用的控制方法，通过对活套控制系统进行研究、优化，满足实际生产的需要。

1.1 课题的研究背景

1.1.1 现代带钢热连轧机技术发展的特点

自上世纪60年代以来，热连轧带钢不仅在数量上增长快，在生产技术上的发展也是很迅速的，热轧技术发展的特点为：生产高速化、工艺连续化、设备大型化和控制自动化。七十年代末和八十年代初，由于钢铁工业不景气，轧机开工率低，大型热轧机的建设速度放慢，而其技术发展重点是在提高产品质量和提高成材率、节约能源，以获得高的经济效益。

(1) 生产能力的提高

早期由于轧机作业率低、轧制速度、板坯重量小，故轧机的生产能力很低。“第一代”轧机的设计年产量，一般为100至200万t，“第二代”为250至350万t，而目前已增加到350至600万t。由此来看，带钢热连轧机的生产能力增长是很快的。

上世纪70年代薄板、带钢产量增长最快的国家是日本，净增了1716万t，增长了60%，板带产量占热轧材产量的比重从1969年的42.6%提高到1977年的46.5%，薄板、带钢比重最大的是美国，最高的1976年达58.3%，大多数国家板带比重在70年代期间都有不同程度的增长。

(2) 机架数量的增加

随着单卷重量的增加，来料板坯尺寸也增大，而板坯宽度由产品规格决定。为了增大轧制的总延伸率，一般来说，首先应将板坯加长，目前板坯的长度已由“第一代”的6m左右增加到15m左右。若再增加长度将使加热炉结构复杂。所以只有增加板坯的厚度，来料板坯厚度已由“第一代”的125~200mm增加到250~360mm，从而导致粗轧机组组成方式的改变及精轧机组数目的增加。过去带钢热连轧机的粗轧机组，一般由1~2架可逆式轧机（半连轧）或4架跟踪式轧机（全连轧）组成。现代带钢热连轧机的粗轧机组，一般在两架可逆式机座后面再增加两架连轧机座（3/4连轧）或由5~6架轧机组组成连轧。为了不使粗轧机组出来的带坯过长，造成头尾温差过大，就要增加粗轧出口中间坯厚度，即需增加精轧机组的延伸系数。目前中间坯厚度已由过去20mm增加到30~50mm，这样就促使精轧机组数目的增加，现大多为7机架。

(3) 板坯重量的增加

提高板坯重量即增大钢卷的重量，也是提高轧机产量的一个重要途径。过去带钢热连轧机轧制的板坯重量一般为5~10t左右，钢卷的单位宽度重量一般为4kg/mm。现代带钢热连轧机轧制速度的提高，为板坯重量的增加创造了条件。目前板坯重量已增加到30~45t，有趋势向更大坯重发展。钢卷的单位宽度重量增加到27~36kg/mm^[1]。

(4) 主传动电机容量的增加

随着板坯重量的增高、轧制速度的提高和升速轧制方式的采用，轧机（特别是精轧机）主传动电机容量也逐渐在加大。

(5) 轧制速度的提高

热连轧轧机的生产能力，一般受精轧轧机能力限制。因此提高精轧机组末架的出口速度，是提高生产能力的主要途径之一。“第一代”轧机，其精轧机组末架的出口速度一直仅为10~12m/s。随着自动化的引入、生产技术的发展，轧制速度得到大幅提高。目前已增加到28~30m/s。但轧制速度的提高，一方面导致主传动电动机功率的增加，

另一方面当轧制速度超过12m/s 时,带钢在精轧机组后面辊道上运行会产生“漂浮”现象,不利于运输,同时由于卷取机结构的原因,一般卷取机的咬入速度仅为10~12m/s 左右。随着轧制技术的提高精轧机组采用了升速轧制的方法,使精轧机组末架的出口速度得以飞跃提高。目前现代带钢热连轧机上均采用升速轧制的方法,即开始以10m/s 左右的低速进行咬钢轧制,待带钢头部被卷取机咬入并卷上两圈之后,精轧机组和卷取机同步加速到正常轧制速度。这种升速轧制,还可以提高带钢尾部的终轧温度,以补偿带钢长度方向的温降,使终轧温度均匀一致^[3]。

(6) 产品规格范围的扩大

由于用户对钢材品种规格的要求越来越高,生产带钢品种规格的范围也随之扩大。“第一代”带钢热连轧机生产的成品带厚一般为2~10mm。而现代带钢热连轧机生产成品厚度可为0.8~25mm左右,向着薄、厚规格两个方向发展,这样不仅可降低冷连轧轧机的加工量,而且又可承担部分中厚板轧机的产品。

(7) 自动化程度不断提高

考虑成品带钢质量的要求日益严格,对高效率生产、高经济效益的要求日趋迫切^[4],因此,就促使在带钢热连轧机上采用一系列自动控制系统(如位置自动控制、厚度自动控制、速度自动控制、温度自动控制、恒定张力自动控制系统等)和在整个生产过程中全部采用计算机控制,并在整个轧制线上配置各种自动化检测仪表。这样就保证带钢热连轧机的高效率、高产量和低消耗的生产。带钢热连轧机自动化水平的迅速提高,在一定程度上各国都以其带钢热连轧自动化程度作为本国轧钢自动化水平的标志。

1.1.2 活套控制方法发展及研究现状

热连轧生产中的活套按照其动力结构不同可分为电动活套、液压活套和气动活套3种^[4]。电动活套控制装置动力源为变频电机,变频电机的尾轴上装有编码器,编码器检测电机的转速及电机转子位置以控制活套高度,通过检测电机负载转矩转换成张力后控制板带张力。其优点为工作稳定、坚固耐用;缺点为结构复杂、且转动惯量大;电动活套主要是在上世纪70年代和80年代初期使用的技术。

气动活套则是采用压缩空气作为驱动活套的动力源。由于空气的可压缩性太大,气动活套的响应速度太慢,控制精度差。由于空气有压缩性,气缸的动作速度易受负载的变化而变化;且气缸在低速运动时候,由于摩擦力占推力的比例较大,气缸的低速稳定性不如液压缸。气动活套一般用于惯性小、动作迅速的场所,一般不应用于板带轧机中,但由于结构简单,维护方便容易,气动活套在棒线材生产线中得到了普遍的应用^[5]。

电动活套采用低惯量快速直流电机驱动，从起套到升至工作角约需0.5s，到建立给定的小张力则共需约1s；而液压活套惯量更小，快速性和追随性更优，从起套到建张的时间远小于1s，因此，液压活套的应用越来越广泛。

不论是电动、气动还是液压的活套机构，其张力控制系统都应具有2个基本性能：一是按工艺要求设定活套机构的带钢张力和带钢重力，从而设定活套的工作转矩；二是使带钢保持给定的张力不变，也就是使带钢张力不受活套辊摆动方向、摆动速度及摆动角度的影响^[2]。

电动活套控制是将电机的电流作为自动调节系统的控制对象，通过调节电流使带钢保持给定的张力恒定不变；液压活套则是将液压缸的压力作为自动调节系统的控制对象，通过调节液压缸的压力使带钢保持给定的张力恒定不变。

板带轧制过程中活套起着非常重要的作用：调整机架间秒流量以及调整轧机速度的作用。采用角度闭环与张力开环控制方式的常规活套在热带轧机中得到了普遍应用。这种活套调试容易在角度控制方面较果较好，但板带张力的控制不很理想，板带张力波动往往较大，而板带张力的不稳定对板带的质量影响较大，有两方面的原因造成了板带张力控制的不稳定：第一：板带张力是由计算得到的，由于一些扰动因素不可能包括在计算公式之内，致使张力计算不准确。第二：板带的张力控制本身就是开环控制，不可能有非常稳定的控制效果。针对活套张力控制不很稳定的状态，许多公司正在从硬件与软件二方面寻求解决问题的方法，如德国西马克公司的“差压活套”与“张力计活套”；日本东芝公司推出了活套的ILQ（Invers Linera Qadratic）控制方式，这种控制方式实现了活套角度与板带张力同时闭环，使板带张力控制的稳定性有了一定程度的改善。并且因为“差压活套”与“张力计活套”检测了板带宽度方向的张力分布，能自动调节轧机辊缝，减少了操作员干涉轧机辊缝的频率。但由于这种“差压活套”与“张力计活套”显著增加了投资与维护成本，并且为这种活套配备的ILQ控制方法也不是非常完善：ILQ控制方法对角度与张力偏差要求严格，一旦偏差超出一定程度，ILQ活套将变得急剧不稳，必须切换到活套的常规控制方式。在ILQ控制方式中，活套的起套与落套的控制仍然使用常规控制方式。改善活套板带张力控制的稳定性以及扩展活套的控制功能，例如使用“差压活套”与“张力计活套”自动调节轧机辊缝的水平是研究活套控制的一个重点。德国西马克公司的“差压活套”与“张力计活套”及日本东芝公司的活套ILQ控制方法为我们提供了有益的尝试^[5]。

不仅活套的高度控制与张力控制存在强耦合现象，同时活套系统还与其它系统存在相互作用，如AGC系统等，这使得活套控制系统较为复杂。到目前为止，活套控制方式

主要包括传统的PI控制方式,无相互作用的控制方式(NIC)、AGC-LP综合控制方式^[6]。

活套装置安装在相邻两机架的中间位置,活套支撑器吸收相邻机架间因轧制速度的差异引起的轧件活套量的变化量,实现秒流量相等;并使轧件在机架间保持适当的张力值,使连轧得以顺利进行。因此对于活套要进行两方面的控制:活套高度控制与张力控制^[7]。

1.2 热轧带钢的张力控制方式

板坯在热轧轧制过程中,张力的变化会引起带钢厚度和宽度等尺寸形状的变化;理想状态下,总希望板坯的张力为零或者保持在很小的范围内。秒流量完全相等是实现无张力轧制的理想状态,然而在实际轧制过程中,压下量的变化、轧辊的磨损、AGC的调节、热膨胀、轴承油膜厚度的变化、偏心、轧制压力和轧制力矩的变化、轧制速度的波动,咬钢时的动态速降,轧件温度的不均匀等等诸多因素都会影响到秒流量的变化,因此也就不可能做到完全无张力轧制^[5]。

实际上轧制过程中秒流量瞬间的不相等,并不影响带钢的精确度,但张力的不恒定却会对带钢的精度产生严重的影响。故在带钢连轧机中常采用以下控制策略:

(1) 一定范围内,追求秒流量相等。控制系统始终不断地按秒流量相等的原则控制,从而使秒流量在一个尽可能小的范围内发生变化。

(2) 恒定的张力控制。在一个小范围内允许秒流量不等,但张力却始终恒定,即秒流量不等时,张力不能改变。

现在有两类方法可实现秒流量相等和微张力恒定:微张力无套轧制和小张力带套连轧。

1.2.1 无活套微张力控制

在热轧生产中,为降低加热炉燃料消耗和提高产品成材率,一般采用增厚粗轧中间坯的方法,这就要求精轧机组完成较大的压下量;但厚度大的中间坯就要求精轧前几机架间的活套装置具有较强的带钢弯曲能力,从而使活套结构复杂、转动惯量增大,减弱了活套装置的控制能力;而且活套控制方式与设备复杂导致成本高,有必要研究无活套微张力控制。用无活套方式代替活套提供张力并进行张力匹配时,带材在相邻机架间被拉紧,通过电机转矩测出带材上的张力,通过调整主电机的速度以保持张力恒定。

目前,无活套微张力轧制主要有自由张力控制(FTC)、最小张力控制(MTC)及无活套最优多变量微张力控制。新日本制铁株式会社室和八幡厂的带钢热连轧机组上已

实际采用无活套方式，并证明该系统较常规活套装置具有动态响应快、控制精度高、穿带与操作性能好等优点。但因主电机的转动惯量很大，造成主电机速度控制响应慢，并且难以从主电机的转矩精确地测量带材张力，控制精度还不太高。所以此种方法很难用于轧制窄带与薄带钢。目前此方法只用于前几架轧机或厚板轧制。

(1) 自由张力轧制（简称FTC）

自由张力轧制是由日本提出的，它适用于带钢轧机上大断面轧件的张力控制。在此之前，美国合众钢铁公司和杨斯顿公司在1967年，都曾用重型活套装置对大断面带钢坯进行轧制，但设备笨重。我国武汉钢铁公司也成功地引进了日本FTC 技术控热带坯连轧，其优点是设备控制简单。

FTC 连轧传动情况为：板坯在R1、R2之间进行连轧，R1轧机用直流电机驱动，R2轧机用同步电机驱动，因同步电机不变速，因此用改变R1轧机速度的方法，维持R1、R2 之间的带钢张力恒定。FTC的基本思想是：FTC检测张力，并通过对R1电机速度的修正来控制张力。其中，张力是用R1轧机在无张力和有张力条件的轧制力矩和轧制力来计算的，在张力计算中存在较大的误差，这使系统的精确性受到影响，因此不适用于精轧机的张力控制。但其优点为：系统设备简单，控制不太复杂，又易于掌握，因而适用于大断面的轧制过程。

(2) 最小张力轧制（简称MTC）

MTC是在FTC的基础上开发的，在该系统中，应用轧制塑性理论推导出张力检测模型，特点是应用了压力和力矩信息，并用调节轧机轧辊速度的方法来控制被测张力。此方法在连续式粗轧机上张力的检测和控制十分精确。Tanifuji等人曾建议把这种方法应用到热精轧机上，但由于检测精度不够而未能实现。后来改进了力臂计算和力矩计算的方法，使张力检测精度进一步提高。

80年代初在生产轧机上应用表明，张力可控制在 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 以内。同时，德国也开展了无活套的最小张力控制实验和工业化应用。1984年，由西门子公司建立的一套MTC系统成功地装配在德国某大型热带钢轧机上，其原理与Tanifuji等人研制的方法是一致的，都是在主电机速度控制基础上设置最小张力控制作为外环控制，并由其计算修正的级联速度设定值来控制机架间的秒流量相等。通过轧制力矩、主机电枢电流、励磁电流、轧辊速度、带钢尺寸（入口厚度和宽度）、工作辊直径和每个机架的空载辊缝来精确地计算张力。宝钢2050mm热连轧机部分采用了带张力观测器的微张力控制系统。但是，经过近二十年发展，MTC控制技术未能获得广泛推广应用，其主要原因是控制上未能解决机架间张力强耦合的影响。

(3) 无活套最优多变量控制

以上的无活套控制方法研究的都是如何控制张力,尤其是张力检测方法。实际上,在无活套系统中,机架间张力的相互影响是很强的,如果只是在两机架间考虑张力控制,将不会得到机架间张力、带材板形和平直度的良好控制。1986年, Y.Hori等人研制出一种新的无活套张力控制方法—无活套多变量控制方法。把系统视为多变量系统,考虑到板形和平直度的控制,运用最优控制算法控制系统。

无活套时张力的检测方法

张力检测的方法有直接和间接两种。直接测张的方法即为张力计测张法,不仅精度不太高,而且还有许多不便之处,因此一般都采用间接测张法。目前间接测张的方法主要有如下几种:

(a) 电动机电枢电流记忆法

在第 i 机架咬钢后且进入稳态,而第 $i+1$ 机架尚未咬钢时,测量并记忆第 i 机架电动机电枢电流 I_a ,在第 $i+1$ 机架轧机咬钢后继续测量第 i 机架电动机的电流 I_a ,并与咬钢前的记忆值进行比较,用其差值调节第 i 机架主传动的转速,使第 i 机架电动机在 $i+1$ 机架咬钢前后保持同一电流值。这种用电流变化来检测张力的方法简单、经济。

轧机在突加负荷(如咬钢)时,会产生动态速降,同时主传动速度调节系统在收到动态速降的扰动信号以后,立即加快主电流上升的速度,产生恢复动态速降的动态电流,使动态速降迅速恢复,其动态速降恢复所需要的时间叫做恢复时间 t_d (现代热连轧机一般为 $0.15\sim 0.5s$)。最好是在动态速恢复之后,微张力自动控制系统才开始投入工作。

(b) 直接测量线速度法

各机架间轧件线速度的大小可用测速辊来直接测量,也可以用激光测速仪来直接测量。由于对测速辊的维护比较烦琐,而且检测精度较低,因此这种方法不常采用。

这种直接测量线速度的变化来反映张力大小的方法是:在第 $i+1$ 机架咬钢前把第 i 机架的出口线速度记忆下来,在第 $i+1$ 机架咬钢之后,第 i 机架出口线速度保持不变。当速度出现偏差时,用其差值调节第 i 机架的速度。

(c) 轧制力臂记忆法

轧制力臂记忆法是一种通过检测轧制压力 P 和电动机力矩 M_m 的变化来反映张力值大小的方法。

该间接测张的基本原理为:在第 $i+1$ 机架咬钢前测量第 i 机架的轧制压力 P 和轧制力矩 MR ,算出轧制力臂值 a 并由电控单元的记忆环节记忆下来。在第 $i+1$ 机架咬钢之后(即第 i 、第 $i+1$ 两机架连轧时)的第 i 机架的轧制力臂值与第 $i+1$ 机架咬钢之前的轧制力臂

值相等。当因某种原因两机架之间张力的变化而引起电动机力矩的变化时，调节第 i 机架主传动的速度，使得两机架间的张力维持在给定的微张力水平。

间接测张力的优点为：被控量 P 和 MR 的检测与控制比较容易；对轧制同一块钢而言，力臂值 a 基本上不受轧件温度和厚度的影响。

1.2.2 活套张力控制

无活套张力控制虽有其优点，但张力的变化对连轧成品的影响非常大，因此在最后的几机架轧制中，必须保持恒定的微张力。要达此目的，在设备上，必须保证有低惯性、响应快速的活套机构；在控制上，必须保证有恒定的微张力控制。

活套装置安装在相邻两机架的中间位置，活套支持者吸收相邻机架间因轧制速度的差异引起的轧件活套量的变化量，实现秒流量相等；并使轧件在机架间保持适当的张力值，使连轧得以顺利进行。因此对于活套要进行两方面的控制：活套高度控制与张力控制。

正常连轧时，为防止产生拉钢现象，相邻两机架之间的带钢长度应比机架间距离稍长一些，靠活套将其张紧并产生给定的微张力。设置于两相邻机架间的活套装置主要有三个作用^[5]：

(1) 维持机架的金属秒流量相等

轧制过程中，多种因素会导致上游机架的出口速度同下游机架的入口速度不相等，即机架间金属秒流量不相等。活套检测到套量与设定值的偏差，就会发出调节信号，对上游各机架的主传动速度进行快速调整，使金属秒流量重新达到新的平衡。

(2) 检测相邻机架间的带钢长度

在微张力连轧时，活套辊紧贴带钢，即使带钢长度只发生微小的变化，活套也能检测到。通过检测活套臂的角度，利用相关关系进行计算就可知道此时带钢的长度，因此，活套是一种灵敏的带钢长度检测器。

(3) 实现张力恒定控制

轧制过程中，活套辊能顶起并绷紧带钢，使机架间的带钢之间形成张力，并通过活套机构传动装置本身的“恒张力调节器”使张力恒定。

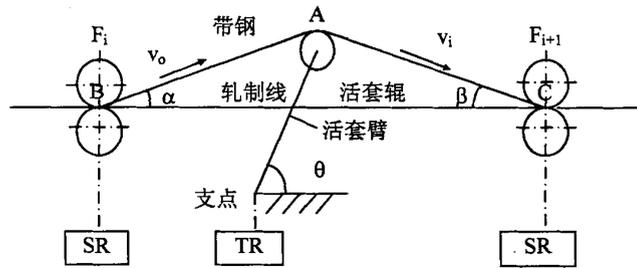


图 1.1 活套原理示意图

Fig.1.1 The drawing of looper

如图 1.1 活套原理图所示。传统的活套控制中，通过调整上游机架轧辊速度使活套高度维持在设定值附近，通过控制活套力矩使机架间张力恒定。此时，若活套高度变化，则机架间张力会发生变化；机架间张力变化，角度也会发生变化，即活套控制是一个耦合系统。排除两者的相互干涉，使活套稳定工作，提高产品的尺寸精度，就成了活套控制的一个重要课题，自热连轧投入运行以来，这方面的研究就在不断进行与发展。现在，各国都向节约能源、提高产量方面努力，主要采取了降低板坯温度，提高轧制速度等方法，这样对活套系统的响应速度和控制精度就提出了更高的控制要求。

国内外大量研究、实验证明，影响热连轧厚度精度进一步提高的原因是活套系统对厚度控制系统的干扰^[8]。尤其在我国，有不少窄带钢生产厂家，由于热连轧带钢为不切边地应用，对宽带公差的要求非常严格：纵长宽度公差仅为 1.0mm 左右，比厚度公差要求更严，而窄带钢宽度对张力变化极为敏感。因此，为了保证产品的宽度、厚度和尺寸形状的精度，研究热连轧相邻机架间的活套控制系统具有重要的现实意义。

1.3 本文的主要内容

本论文的结构安排如下：

第一章为本文的绪论部分；主要介绍了热连轧轧机发展以及特点，对轧机的关键设备——活套种类以及特点等进行了描述；同时对活套控制的关键环节张力控制的发展历程进行了详细介绍。

第二章重本章介绍了 2250 热轧生产线的精轧机活套机械结构和液压控制原理。介绍了一级自动化系统的软、硬件构成和特点。

第三章通过介绍活套对带钢宽度控制和高度控制的影响，说明了活套控制系统研究的重要性。介绍了活套高度控制原理、张力控制原理和各自的控制系统。介绍了活套套量计算模型、带钢张力转矩 MZ 、带钢重力转矩 MB 、活套重量转矩 ME 、带钢屈服力转矩 MD 的计算模型，活套实际转矩 MGI 。

第四章是本文的重点，本章首先分析了传统控制系统在起套阶段的缺点，结合其缺点研究开发了活套软接触控制器。同时对软接触的数学模型进行详细研究，对影响模型的重点参数进行讨论。最后对软接触控制器进行了细化调整，以及影响软接触控制器系数进行优化。

第五章对本文的研究工作进行了总结，并提出了软接触控制的不足和下一步工作重点。

第2章 2250 热连轧精轧活套结构组成

迁钢 2250 热连轧精轧机组是由六架不可逆轧机组成，在机架间布置有 5 个全液压活套，目的是确保两机架之间恒定的带钢张力，以防止过大的张力产生带钢拉窄。本章从该 2250 轧机液压活套的结构分析入手，对活套机械机构、液压控制原理以及自动化控制系统进行说明。

2.1 2250 活套设备系统组成

2.1.1 液压活套的结构

活套由以下几个部分组成（结构图 2.1）：活套轴、传动侧和操作侧轴承支座、带轴承座的活套架、活套辊（内水冷式）、液压缸、角度传感器。

传动侧、操作侧活套轴及活套辊上的轴承是耐磨轴承。在活套轴的传动侧和操作侧都安装有止推块，以限制活套旋转动作的范围。底部是限制活套的最低位置，上部是限制活套的最高位置。上部位置是轧机入口和出口导板更换时所要求的活套抬起位置。活套在最高位置时可以用销轴锁定，主要是为了维护目的，活套的等待位根据轧制水平线高度和带钢厚度计算，一般在 10° 左右，正常工作位置是 26° ，最大抬起位置是 61° 。活套在最大抬起和最低两个极限位置时液压缸的行程留有一定余量，以此保证活套可靠到位。

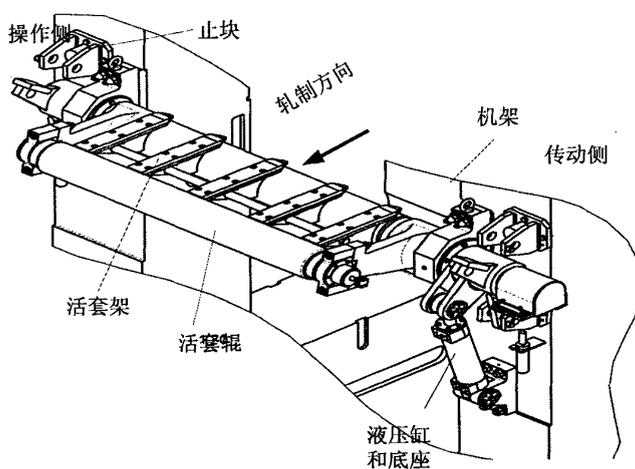


图 2.1 活套示意图

Fig. 2.1 The general view of looper

活套的动作是由液压缸来驱动的，液压缸的底部与传动侧机架相连，活套杆端部接到传动侧活套臂上，到铰结点有一定距离。活套轴安装在前一机架出口侧，轧制线的下方。活套移到最低位时一定要低于轧制线。活套移到最高位时，轧机入口和出口导卫就有一定的窜动空间。

2.1.2 活套液压系统

精轧机每个活套由一个液压缸来驱动。整个系统采用伺服阀控制，本系统采用 D661（型号：D661-4651G35JOAA6VSX2HA）两级机电反馈伺服阀，有很高的动态响应性能，液压系统原理简图如图 2.2。

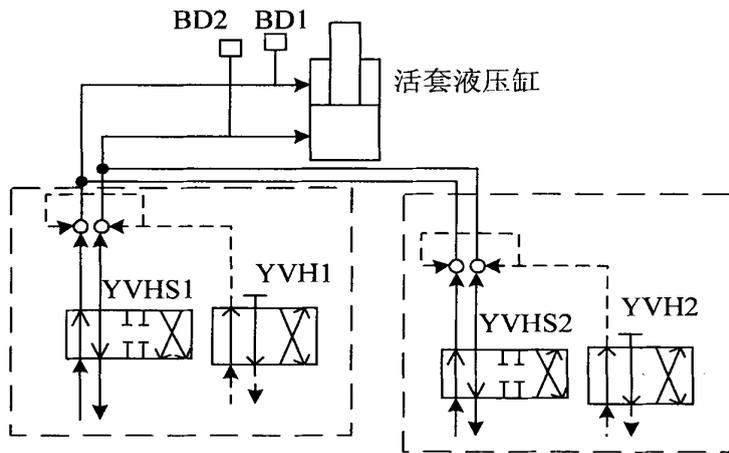


图 2.2 活套液压系统原理图

Fig.2.2 The looper hydraulic syetem drawing

活套辊位置是由旋转编码器测得的，反映到液压系统中为液压缸的位置。该位置信号作为伺服阀的反馈信号通过控制器并转化为电流信号来驱动伺服阀动作，从而形成位置闭环控制。力的控制是通过检测液压缸活塞侧和杆侧压力并比较反馈到伺服阀，形成力的闭环控制。伺服阀的油路由液控单向阀来控制。系统中设置了一个先导溢流阀来限定系统的最高压力，以保护活套装置的安全。伺服阀的先导油路前设置了高精度过滤器，以保证清洁的油进入伺服阀的先导控制油路，防止喷嘴堵塞。蓄能器起减震作用以保证油路中压力恒定。

在使用双伺服阀的情况下，通常对于两个阀的组合有两种方式：

- (1) 两个伺服阀并联模式组合：

图 2.3 为双伺服阀并联模式，其为控制器输出分别平均分配给两个伺服阀，由两个伺服阀同时驱动液压缸动作。

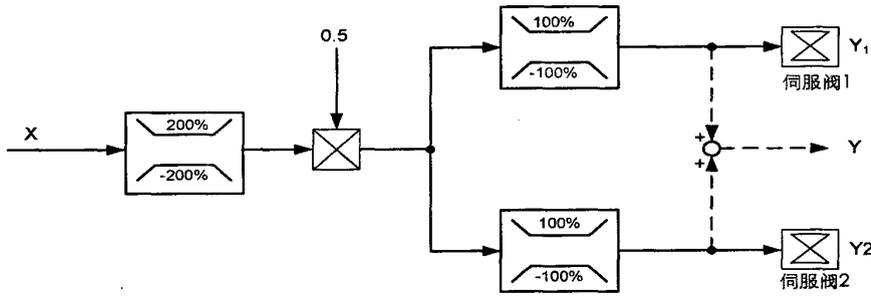


图 2.3 伺服阀并联模式

Fig. 2.3 The parallel mode of Servo valve

在并联模式下，每一个伺服阀的输出都只有控制器给定输出的 50%，这样无论何时都是两个伺服阀工作，保证两个伺服阀磨损量相同。

(2) 两伺服阀主从模式组合：

图 2.4 为双伺服阀主从模式，当控制器输出小于 100% 时，仅主伺服阀工作，而从伺服阀仅在输出超出 100% 后其作用，从而保证动作迅速。

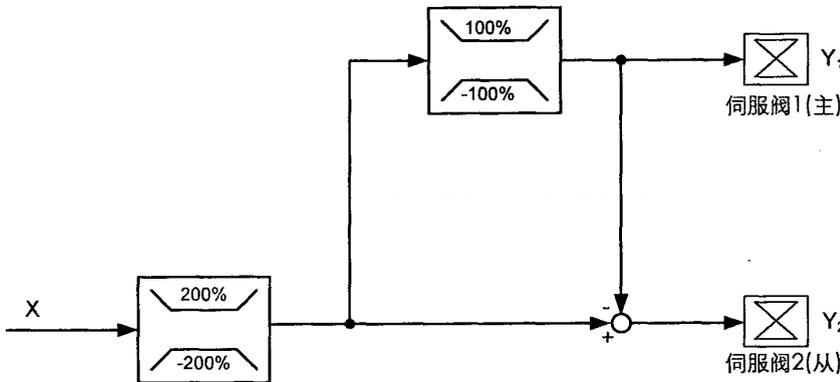


图 2.4 伺服阀主从模式

Fig. 2.4 The master-slave mode of Servo valve

在主从模式下，当给定在 $[-100\%, 100\%]$ 范围内时，只有一个伺服阀会输出，而当给定在 $[-200\%, -100\%]$ 范围内或者 $[100\%, 200\%]$ 范围内时，另一个伺服阀才会输出。显而易见，主从模式组合的伺服阀有更多的优点，因此在活套系统中，一般都采用这种组合方式；同时，在 HMI 界面下，操作人员可以选择那一个伺服阀为主，那一个为从。但考虑若单一回路出现故障不影响系统工作，系统同样设计了模式 1 和模式 2 两种单回路工作，外加两种主从控制模式，因此活套伺服控制分为四种控制模式，分别为模式 1、模式 2、模式 1+2、模式 2+1。

2.1.3 活套技术参数

考虑活套安装位置不同，精轧机机架间活套尺寸有所不同，包括活套辊尺寸等。活套的技术参数包括液压缸尺寸、活套转动角度，活套距上、下游轧机距离，活套动作范围，活套支撑臂尺寸，或讨论半径，活套轮中心距轧机轧制线高度，活套动作后角度以及活套抬起带钢后带钢与上下游轧机的角度等参数，此类参数将参与活套张力，套量的计算，其精度影响活套控制精度。

活套辊尺寸： $\phi 275 \times 2190$ (2435) mm

液压缸： F1: 125/80 \times 430 mm

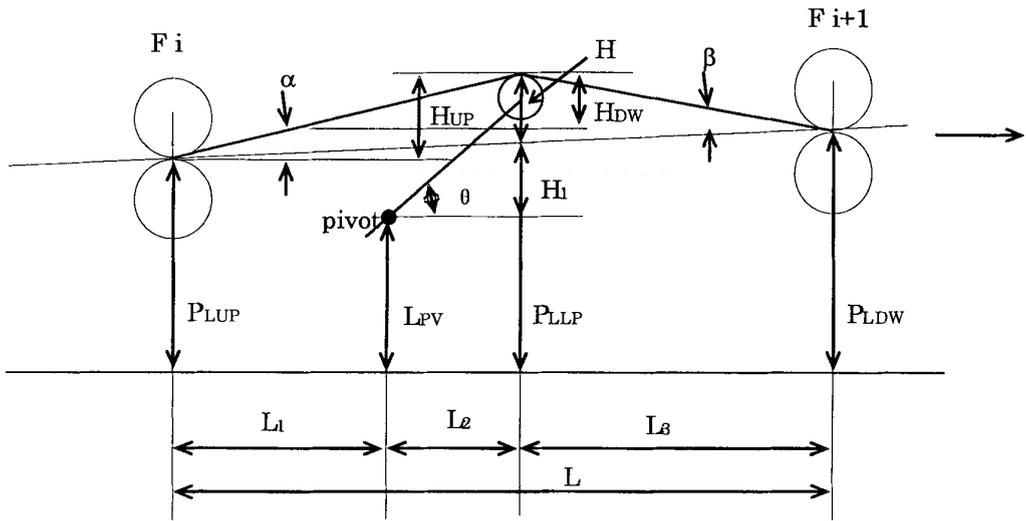
F2~F3: 100/70 \times 430mm

F4~F5: 80/56 \times 430mm

转动角： $9^\circ \sim 61^\circ$

机械限制： 61°

2250 精轧机活套参数如图 2.5 和表 2.1、表 2.2 所示



图

2.5 2250 活套参数说明

Fig.2.5 The parameters of the loop in 2250

表 2.1 活套变量定义
Table 2.1 The definitions of looper variable

变量	说明	单位
L	机架间距离	mm
L_1	上机架到活套轴支撑点的距离	mm
L_2	活套轴支撑点到活套轮中心的距离	mm
L_3	活套轮中心到下一架机架的距离	mm
R_1	活套臂的长度	mm
R_2	活套轮半径	mm
H	活套轮中心到轧制水平线的距离	mm
H_1	在活套轮中心处活套轴支撑点到轧制水平线的距离	mm
H_{UP}	活套轮高出上一架轧机轧制水平线的距离	mm
H_{DW}	活套轮高出下一架轧机轧制水平线的距离	mm
P_{LUP}	上一架轧机到实际轧制水平线的距离	mm
P_{LDW}	下一架轧机到实际轧制水平线的距离	mm
P_{LLP}	活套轮中心到实际轧制水平线的距离	mm
L_{PV}	活套支撑点到实际轧制水平线的距离	mm
θ	活套角度	deg
α	前一架轧机带钢的角度	deg
β	后一架轧机带钢的角度	deg

表 2.2 活套参数
Table 2.2 The parameters of looper

	F1	F2	F3	F4	F5
H_1 (mm)	270	270	270	270	270
H_2 (mm)	1242	1242	1242	1242	1242
L_1 (mm)	13	13	13	13	13
L_2 (mm)	360	360	260	260	200
R_1 (mm)	750	750	750	750	750
R_2 (mm)	137.5	137.5	137.5	137.5	137.5
ν (deg)	49	49	35	35	43
θ_{\max} (deg)	61	61	61	61	61
θ_{\min} (deg)	9	9	9	9	9
L (mm)	5500	5500	5500	5500	5500
L_1 (mm)	1965	1965	1965	1965	1965
活套液压缸塞腔直径 (mm)	125	100	100	80	80
活套液压缸杆腔直径 (mm)	80	70	70	56	56
液压缸最大压力 (kN)	350	225	225	144	144
液压缸最大转矩 (kN·m)	126	81	58.5	37.4	28.8

2.2 活套控制系统组成

2.2.1 系统硬件组成

活套的控制系统采用西门子公司开发的新一代的基于工业过程自动化的 64 位高速控制器 TDC (Technology and Drive Controller: 工艺与驱动自动化系统) 来实现, 由于 TDC 具有很高的数据处理速度能力、强大的通信功能和先进的控制策略, 从而使得它非常适合于大型自动化控制系统。TDC 由一个或多个模块机架组成, 其中可以插入所需模板, 包括: 适用于墙壁安装和箱柜安装, 配装有一个具有冷却和内部监控功能的集成电源的机架 UR5213, 允许硬件扩展, 具有较高的性能裕量; 中央处理单元 CPU551, 用于具有较高控制要求的开环闭环控制任务; 提供丰富的选项, 用于连接分布式 I/O 的 I/O 模

板 SM500；用于调试、过程控制的通讯模板 CP50M0、CP5100；用于 TDC 机架间通讯的全局数据管理存储器 CP52I0、CP52M0、CP52A0，除了几个机架之间的通讯之外，使用 GDM，还可实现同步（采样时间、时钟时间）和报警功能。刷新时间<1ms。精轧区域网络拓扑见图 2.6 所示。

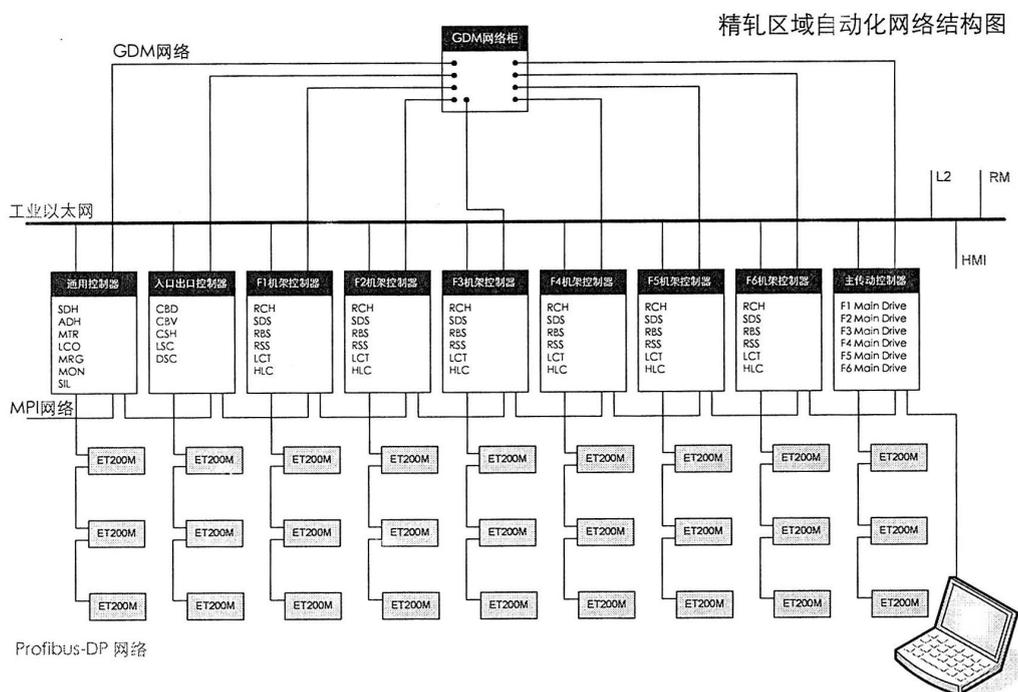


图 2.6 精轧区域网络拓扑图

Fig.2.6 FM network topology

以精轧机组 F1 机架控制为例，TDC 机架模块主要包括 CPU 模块四块、信号模块 4 块、通讯模块 3 类四块分别如下：

(1) 第一块 CPU (CPU551) 模块，主要用于现场硬件信号采集、轧机换辊系统、轧机工艺冷却水控制、出、入口侧导板控制以及与区域轧线协调控制。

(2) 第二块 CPU (CPU551) 模块，轧机压下系统以及轧机标定功能控制。

(3) 第三块 CPU (CPU551) 模块，弯辊、窜辊功能控制。

(4) 第四块 CPU (CPU551) 模块，用于活套控制。

信号模块 SM500 共四块，主要完成现场模拟量（如位置传感器、编码器、压力传感器等）检测信号采集，模拟量信号（如伺服阀、比例阀等）输出以及部分要求响应较快开关量信号输入输出。

通讯模块三类四块。

(1) ProfibusDP 网络（含 MPI）模块 CP50M0，该网络主要为监控和现场 I/O 柜、机旁

箱、以及辅传动控制柜通讯等。

(2) GDM (全局数据通讯) 网络模块 CP52A0, 该网络主要用于连接各个 PLC。另外, PDA 服务器也是挂在 GDM 网络的, 所以 PDA 可以监控几乎所有变量 (其受 PDA 通道数量限制)。

(3) 以太网网络 CP5100, 主要用于连接轧线区域数据通讯 (加热炉、粗轧、精轧以及卷取)、与介质系统自动化 (AB 控制系统)、高压水控制系统系统、仪表、以及过程自动化等通讯。

2.2.2 系统软件组成

TDC 使用已经全球测试的 SIMATIC Manager 自动化系统工具进行组态。图形化处理和标准程序块的使用, 意味着编程人员无需专门的编程知识。TDC 系统使用 STEP 7 硬件组态工具 HW Config 进行组态和参数化。与 TDC 配套的编程软件是 PCS7。该软件环境是用 CFC (连续功能图) 和 SFC (顺序功能图) 进行组态编程, CFC 和 SFC 都是图形化的组态编程工具。用 CFC 进行组态时, 是以功能块为基础的, 丰富的组态库 D7-SYS 提供有大量经过验证的标准功能块, 这些功能块可以在编程时直接调用, 并图形化相互连接。

例如图 2.7 是西门子公司开发的专用于活套转矩计算 LST1F 控制功能块。

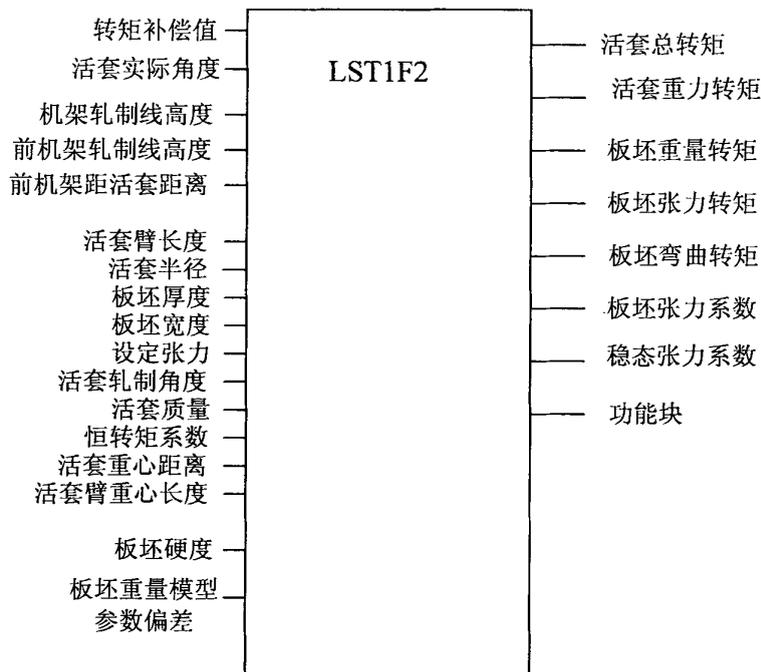


图 2.7 活套转矩计算功能块

Fig. 2.7 The calculation torque function block

图 2.7 为西门子活套转矩计算的专门功能块。该块利用输入的活套实际角度、轧制线高度、活套距前后机架间距离、活套臂长度、活套辊半径、板坯厚度、板坯宽度、过程自动化下发给基础自动化设定张力、活套轧制角度（由设定套量计算）、活套质量、二级下发的板坯硬度和板坯重量模型参数等数据，自动计算活套总的转矩、活套重力转矩、板坯重量转矩、板坯张力转矩、板坯弯曲转矩等参数。其相应的各转矩计算数学模型、计算方法在后续第三章将进行详细说明。

并且在调用每个功能块时，都可以根据不同的工艺需要，在T0~T5采样时间内自由选择功能块所在的工作组。在用CFC进行组态时，是以这些标准功能块为基础的，每个CFC应用程序由若干个CFC图组成，每个CFC图由6页组成，编程时将库中的功能块可以再不同页面进行连接，完成各项复杂的功能任务。

2.3 本章小结

本章重点对活套机械结构、液压控制原理以及自动化软、硬件进行详细介绍，其中机械设备以及液压驱动由德国西马克公司设计，而电控部分则由德国西门子公司设计，控制器选用了当今最流行的TDC控制系统。本章为后续活套控制系统研究奠定基础。

第3章 活套的高度控制和张力控制

小张力和恒定套量轧制是现代热连轧精轧机组的一个基本特征。在实际轧制过程中，轧机穿带时主传动速度总是不可避免的产生动态冲击速降，稳定轧制时又总是存在各种各样的速度扰动，因此不可能始终保持各机架间稳定的速度比例关系，即所谓秒流量平衡关系。活套系统设置的第一个目的就是作为套量检测装置对机架之间的活套量进行测量计算，并通过主传动速度系统的调节，保持套量恒定，保证连轧过程稳定进行。活套的套量由二级过程自动化提供，实际套量的大小决定了活套的实际工作点，它由主传动速度系统决定，而与张力无关。活套机构设置的第二个目的就是作为执行机构进行带钢恒定小张力控制，以避免堆钢、拉刚现象，尽可能减小各机架之间和各功能之间通过带钢张力的变化而产生的耦合和干扰。它与活套的套量大小无关。

(1) 活套张力对带钢厚度的影响

热连轧制带钢系统中，带钢的张力与带钢的宽度、厚度及板形是相互关联的耦合系统，轧制过程中稳定的张力控制是连轧能够顺利进行的前提条件，也是板带能够获得高精度尺寸和良好板形的基础。

轧制力随张力的变化而变化，因此带钢张力的波动将影响成品带钢厚度的精度。以下通过一个厚度计算来说明活套张力对带钢厚度的影响。由弹跳方程 $h = S + \frac{P}{C}$ ，沿带钢长度方向轧制力 P 的波动，将影响带钢纵向厚度的不均匀性。

将厚度为 30mm 的带坯在 2250mm 带钢热轧机的精轧机组 F1 机架的微张力状态下，轧成厚度为 $h_1=11.15\text{mm}$ ，其绝对压下量

$$\Delta h_1 = 30 - 11.15 = 18.85(\text{mm}) \tag{3.1}$$

带钢变形所需的轧制力 $P_1=20\text{MN}$ ，轧机的刚性系数 $C=5500\text{kN/mm}$ ，由机座的弹性变形方式式 $\Delta S = \frac{P}{C}$ 得：

$$\Delta S_1 = \frac{P_1}{C} = \frac{20000}{5500} = 3.64(\text{mm}) \tag{3.2}$$

假设轧制过程中，因某种外来的干扰， F_i 与 F_{i+1} 两机架间带钢所受的张力增加， F_i 机架垂直轧制力 P_1 由 20MN 降为 17MN，则此时该机架的弹跳值便降为：

$$\Delta S_1 = \frac{17000}{5500} = 3.1(\text{mm}) \tag{3.3}$$

由此可见，虽然压下丝杠未动，但由于张力的增加，辊缝减小了

$$3.64 - 3.1 = 0.54(\text{mm}) \quad (3.4)$$

该机架轧辊的出口厚度便由 11.15mm 减至

$$11.15 + 0.54 = 11.69(\text{mm}) \quad (3.5)$$

所产生的厚度偏差为 -0.54mm。由此可见，活套张力对带钢纵向厚度均匀性有很大的影响。

(2) 活套张力对带钢宽度的影响

一般在精轧机组内任意两架轧机之间都安装有活套，以保证精轧机组内的带钢都保持有恒定的小张力，以提高产品厚度精度和板形质量。在正常轧制过程中，带钢所受的张力应很小，仅用来保持正常穿带防止跑偏。当下游机架的速度过大时，通过下游机架的秒流量就会变大，致使带钢产生缩颈现象，更大的张力甚至会使带钢拉断；而下游机架的速度过小时，下游机架的秒流量就会变小，致使在两架轧机之间形成活套，如果套量持续增长，那么带钢就有可能折叠起来进入下游机架。无论如何，这两种情况都是所不愿意看到的。因此必须要对活套的套量和张力进行控制。

活套张力控制的目的是为了为了使带钢在热连轧的过程中保持恒定的小张力轧制，以提高产品厚度精度和板形质量。在正常轧制过程中，带钢所受的张力应很小，仅用来保持正常穿带防止跑偏，张力 σ 约小于高温变形抗力的 10%。带钢张应力随带钢流向逐步增加。据在某种带钢热连轧机上所做的张力试验表明，在带钢热连轧机的精轧机上，机架间带钢单位面积上所受的张应力值若超过 5MPa 左右，带钢将出现被拉窄的现象，而在精轧机组上，当张力达到或超过 17MPa 左右时，带钢将产生缩颈现象。

3.1 活套高度控制

活套高度控制（套量控制），是通过控制上游机架主传动速度来实现的。根据过程自动化计算出设定活套量为基准，调节上游机架主传动速度，来维持套量恒定。传统的活套控制系统中，由主传动速度控制系统及活套机构的套量信号（活套辊角度信号）组成活套高度闭环控制系统。由上游机架出口和下游机架入口速度差的积分决定套量的大小，轧制过程中，当工艺参数（如来料温度、辊缝波动、其它控制系统干扰等）发生变化，导致该速度差发生变化时，活套高度偏离基准值，此偏差用来调节上游机架的速度。

带钢热连轧轧机在调整主传动速度时通常调节上游机架的速度，不调节下游机架的

速度。这是由于现代带钢热连轧机一般采用加速轧制的方式，且因末架轧机与卷取机之间有一定的速度配合关系，而卷取机采取张力卷取；又因末架为成品机架，为保证产品质量，不愿意其轧制速度频繁变化。以精轧机组的末架为基准架，调节上游机架的速度，将多余的套量信号往炉子方向赶，即所谓的逆调^[7]。

当机架间秒流量不相等时，就会导致机架间带钢长度发生变化，从而使活套的高度以及角度发生变化。正是由于这种套量控制，使活套的角度通常保持在一个比较固定的位置，亦即活套的正常工作位。活套高度的任何变化都会立即影响到上游机架速度。而上游机架速度的变化又会影响到活套高度的变化。本机架速度的变化量乘以该机架的相对压下量，由此作为一个速度修正值提供给上游机架，这样所有机架的速度修正值都能与其相对压下量相匹配上，而机架间的带钢张力也就能保持恒定。

活套套量(高度)控制的原理图如图 3.1 所示。

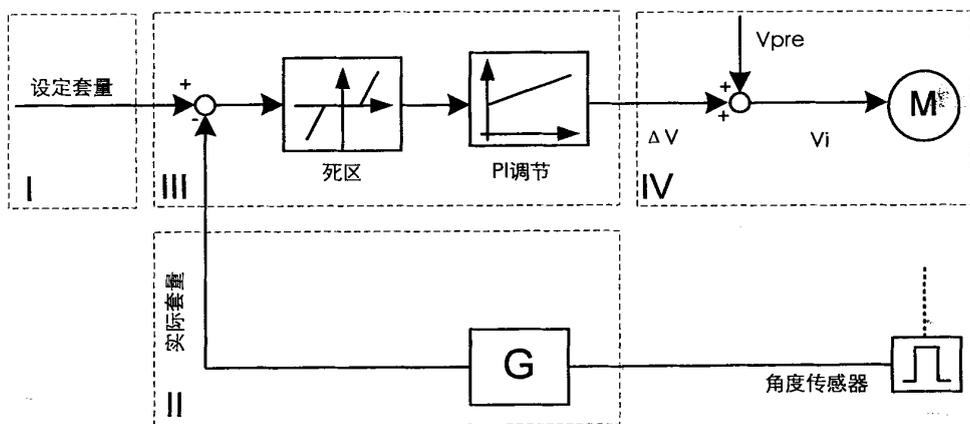


图 3.1 活套高度控制原理图

Fig3.1 The block diagram of looper height control principal

它主要由套量的设定环节 I、活套高度检测环节 II、活套高度控制环节 III 和控制对象 IV 四部分组成。因活套高度系统闭环控制时，活套张力控制系统为液压闭环工作，响应快，活套支撑器贴紧带钢， θ 角检测无滞后，可以忽略活套张力控制系统的惯性。套量的偏差作为控制变量，通过 PI 调节器，来控制本机架的速度。

3.1.1 活套高度控制系统的组成

(1) 套量的设定环节 I

活套高度设定值由过程自动化计算机计算设定。活套量偏差增长快慢是与速度偏差的积分成正比，而与活套角度偏差的积分成非线性关系。所以不能直接用活套角度 θ 作为高度基准，而应将 θ 转换为活套量 ΔL 给出。

当选用过程计算机设定时，需要先将由经验总结出来的活套高度目标值存入计算机存储器内。对于轧制的带钢厚度不同，其活套高度的目标值也不尽相同。然后依据活套机构本身的机械几何关系换算作为活套量给出。某热轧厂 2250mm 精轧机组活套套量目标值如表 3.1 所示。

表 3.1 某热连轧机活套高度目标值
Table 3.1 Reference values of loops' height in a hot strip mill

厚度范围	活套量设定值, (mm)				
	F1-F2	F2-F3	F3-F4	F4-F5	F5-F6
$1.2 \leq h \leq 3.0$	15	15	15	15	15
$3.0 \leq h \leq 7.0$	15	15	15	15	15
$7.0 \leq h \leq 10.0$	17	17	17	17	17
$10.0 \leq h \leq 19$	17	17	17	17	17

在带钢尾部离开上游机架的某一给定距离之前，使活套转入小套轧制，在轧机抛钢前，将活套降到最底部，基本为活套待机位。由于现在热轧机轧制速度很高，当带钢尾部离开上一架轧机时，活套要求快速落下，否则带钢尾部将在活套辊顶起而上翘的状态下高速甩出，就可能发生拍打轧辊或损坏轧机入口侧导板等故障发生。

表 3.2 给出了活套量转小套轧制的转换逻辑。对于所有的活套而言，其转换逻辑都是基于精轧区域基础自动化的物料跟踪系统的。物料跟踪系统在某些确定点，诸如精轧机架处，由轧制力检测设备（通常是压头）检测到带钢进入或者离开该机架时，将跟踪信号同步到该机架位置；而当不在这些确定点时，则是由机架速度通过积分得来。对于活套来说，所有的转小套命令都会提早发出，因此在本机架位置前某个固定位置切换为小套量控制。例如，对于 F2 后活套，在 F2 机架前 4.4m，F2-F3 号活套将接收到转小套的命令。

表 3.2 活套控制转小套开始时刻
Table 3.2 The loops control changes into small height value

活套号	小套轧制位置
F ₁ -F ₂	F ₁ 机架之前 X ₁
F ₂ -F ₃	F ₂ 机架之前 X ₂
F ₃ -F ₄	F ₃ 机架之前 X ₃
F ₄ -F ₅	F ₄ 机架之前 X ₄
F ₅ -F ₆	F ₅ 机架之前 X ₅

在带钢尾部离开连轧机前，活套辊需降至工作零位，以免翘起的带钢尾部高速甩出，发生叠轧事故等。当轧件尾端在本机架 1 米左右，轧制工艺要求活套下降完毕。落套功

能的触发，亦通过上游机架抛钢加延时信号来实现，其原理同转小套时一样，所不同的仅是距离的设定不一样。

(2) 活套高度检测环节 II

活套高度闭环控制中，需要有检测活套角度 θ 的环节。 θ 由安装在活套支撑器传动装置上的活套辊旋转位置传感器（如绝对值式码盘）检测而来，经函数变换器 G 变换成实际套量。

相邻两机架的贮备的活套量 ΔL 可以由两个前、后机架的带钢速度差的时间积分来求得：

$$\Delta L = \int \Delta v dt = \int (v_{i,o} - v_{(i+1),i}) dt \quad (3.6)$$

式中 $v_{i,o}$ 为第 i 机架出口线速度

v_{i+1} 为第 $i+1$ 机架入口线速度

对式(3.1)进行拉氏变换，得：

$$\Delta L = \frac{1}{s} \Delta V = \frac{1}{s} (V_{i,o} - V_{(i+1),i}) \quad (3.7)$$

(3) 活套高度控制环节 III

活套高度控制器以套量 $\delta L = \Delta L_r - \Delta L_a$ 为输入信号。当输入信号有偏差时，为使系统能迅速准确地进行控制，从快速性方面来考虑，应采用比例调节，追求静态高精度应采用积分调节，所以活套高度控制环节采用比例-积分（PI）调节器。当调节器输入端有活套量偏差信号 δL 作用时，其数字控制器的输出端将有一个附加的速度输出 ΔV ，与本机架的速度基准 V_{re} 进行累加，输出一个速度控制信号，通过本机架主电机的传动装置改变本机架的速度，来消除 δL 或将它控制在一定的范围之内；若 $\delta L = 0$ ，则附加的速度输出 ΔV 没有变化，本机架仍按原来的速度运行。

(4) 控制对象 IV

控制系统的对象是主电机、机架间带钢和活套支撑器，通过改变第 i 机架主电机的速度来改变活套长度，从而改变活套支撑器的高度。可把控制对象当成一个惯性加积分的环节来处理。

3.1.2 活套套量计算的数学模型

带钢在两机架之间形成的套量不是一个可以直接测量的量，而是由活套支撑臂的角度间接求得，故所选取的套量数学模型精度在很大程度上决定了活套高度控制系统的控制精度。选取套量模型还需要解决精度和模型实现复杂程度的矛盾。当选用性能更好，

处理速度更高的硬件处理器后，更复杂的模型实现也能在所需要的采样周期内快速完成，因此随着处理器的日新月异，在当前先进的热连轧机组中，模型实现的复杂程度并不是评估活套套量计算的主要指标，而模型实现的精确性更值得关注。在忽略活套辊弧面影响的前提下，套量由活套支撑臂角度的关系求出，活套几何尺寸图如图 3.2 所示。

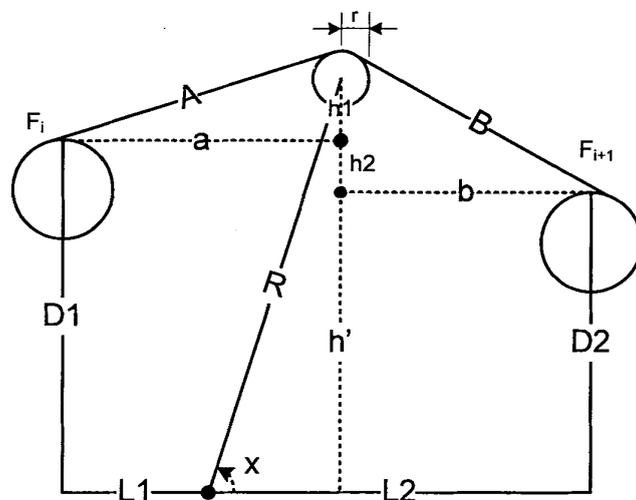


图 3.2 机架间活套几何尺寸图
Fig3.2 The looper structure dimension diagram

其中， x —活套支撑器工作角度； $^{\circ}$

D_1 —活套支撑器支点至上游机架 F_i 轧制平面的高度， mm ；

D_2 —活套支撑器支点至下游机架 F_{i+1} 轧制平面的高度， mm ；

R —活套支撑器支臂长度， mm ；

r —活套辊的半径， mm ；

L_1 —活套支撑器支点至上游机架 F_i 的水平距离， mm ；

L_2 —活套支撑器支点至下游机架 F_{i+1} 的水平距离， mm ；

如上图所示，活套的套量

$$\begin{aligned} \Delta I &= A + B - (L_1 + L_2) \\ &= \sqrt{a^2 + (h_1 + r)^2} + \sqrt{b^2 + (h_2 + r)^2} - (L_1 + L_2) \end{aligned} \quad (3.8)$$

而

$$a = L_1 + R \cdot \cos x$$

$$b = L_2 - R \cdot \cos x$$

$$h_1 = R \cdot \sin x - D_1$$

$$h2 = R1 \cdot \sin x - D2$$

因此

$$\begin{aligned} \Delta I &= A + B - (L1 + L2) \\ &= \sqrt{(L1 + R1 \cdot \cos x)^2 + (R1 \cdot \sin x - D1 + r)^2} \\ &\quad - \sqrt{L2 - R1 \cdot \cos x^2 + (R1 \cdot \sin x - D2 + r)^2} - (L_1 + L_2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

以某 2250mm 热轧机组为例，其活套角度对应的实际套量如图 3.3 所示：

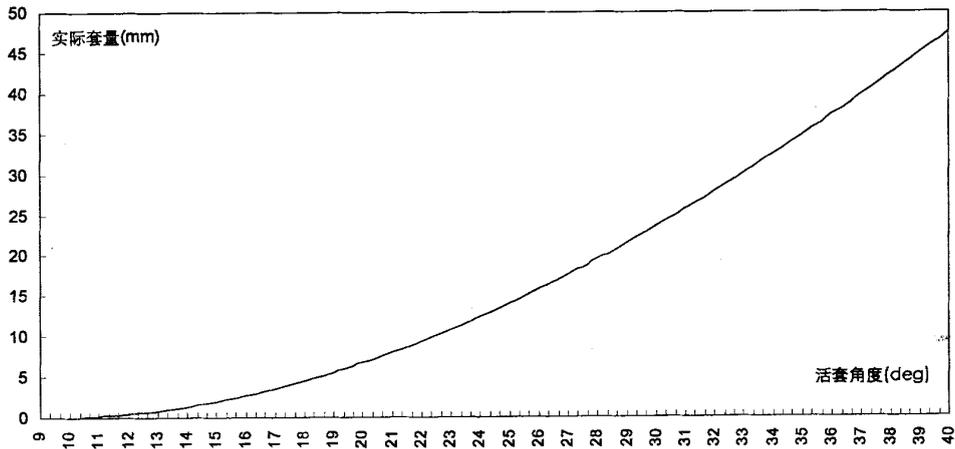


图 3.3 活套角度与套量对应关系图
Fig3.3 The curve of looper angle-stock

由式 (3.9) 与图 3.3 可知，活套套量大小与轧机、活套辊高度、活套臂上抬角度，活套支撑臂长度、活套辊半径相关，且套量与角度呈非线性关系。

3.1.3 轧机的速度级联

在机架之间出现秒流量不相等时，需要活套系统对机架的速度进行修正。但是需要注意的是，对于连轧机来说，为保持连轧机组间的秒流量平衡的关系，下游机架的速度变化也必须在上游机架上有所反映。假设 F4 后活套由于外界干扰的影响，导致活套套量发生变化，由此活套套量控制将会对 F4 后活套的上游机架进行调整，首先对 F4 轧机主传动速度进行调整，此时 F4 与 F3 之间速度平衡就会被打破，因此 F3 活套将会要求 F3 主传动速度开始调整，随后进入新的平衡状态，相应的 F2、F1 主传动速度都会跟随调整。因此，在活套的套量控制方面，必须有一种级联的速度调节关系。级联的速度调节关系如图 3.4 所示：

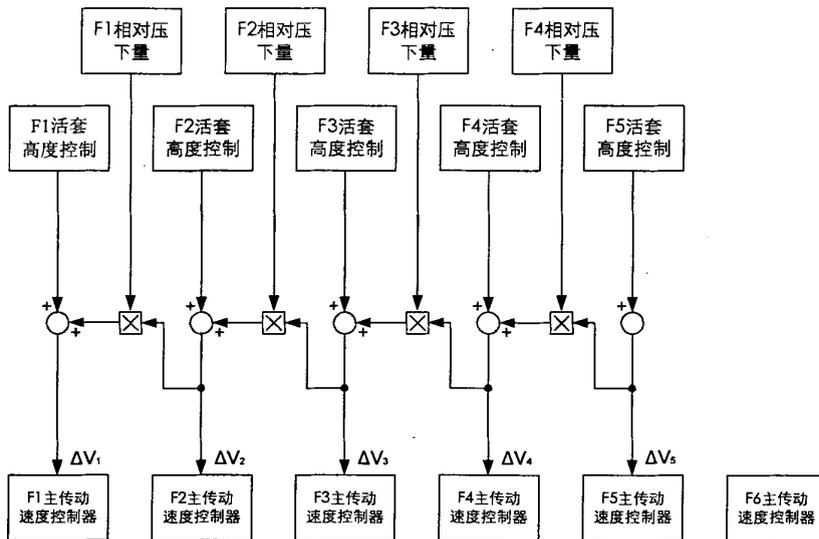


图 3.4 机架间速度级联关系图
Fig3.4 The decades speed in the FM stands

有上图可知，速度级联的活套附加速度如下：

$$\Delta V_6 = 0$$

$$\Delta V_5 = \Delta V_{50}$$

$$\Delta V_4 = \Delta V_{40} + \frac{k_5}{k_4} \cdot \Delta V_5 = \Delta V_{40} + \frac{k_5}{k_4} \cdot \Delta V_{50}$$

$$\Delta V_3 = \Delta V_{30} + \frac{k_4}{k_3} \cdot \Delta V_4 = \Delta V_{30} + \frac{k_4}{k_3} \cdot \Delta V_{40} + \frac{k_5}{k_3} \cdot \Delta V_{50}$$

$$\Delta V_2 = \Delta V_{20} + \frac{k_3}{k_2} \cdot \Delta V_3 = \Delta V_{20} + \frac{k_3}{k_2} \cdot \Delta V_{30} + \frac{k_4}{k_2} \cdot \Delta V_{40} + \frac{k_5}{k_2} \cdot \Delta V_{50}$$

$$\Delta V_1 = \Delta V_{10} + \frac{k_2}{k_1} \cdot \Delta V_2 = \Delta V_{10} + \frac{k_2}{k_1} \cdot \Delta V_{20} + \frac{k_3}{k_1} \cdot \Delta V_{30} + \frac{k_4}{k_1} \cdot \Delta V_{40} + \frac{k_5}{k_1} \cdot \Delta V_{50}$$

其中 k_i 由各机架的相对压下率确定。

这样，如果确定了精轧区域的出口带钢速度 MR_x ，那么各个机架的速度 V_{Fi} 也就随之确定了。各个机架的速度按照如下等式进行分配：

$$V_{Fi} = k_i \cdot V_{MRx} + \Delta V_i (i = 1..6) \tag{3.10}$$

其中， V_{MRx} 为精轧出口带钢速度；

ΔV_i 为活套等产生的速度附加量。

图 3.5 显示了某块带钢在精轧轧制过程中的活套的高度调节量：

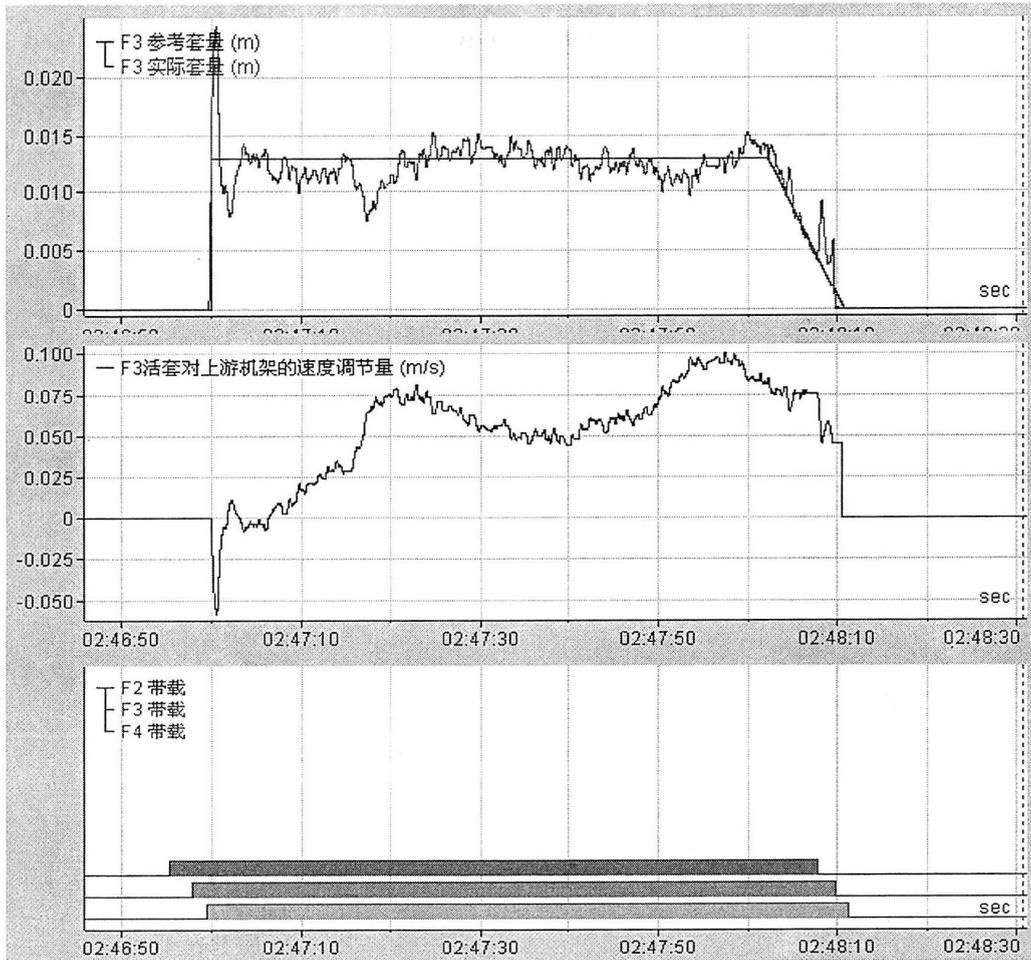


图 3.5 活套套量控制

Fig3.5The looper stock control

由图 3.5 可知，当活套下游机架带载后，活套上升，投入活套套量闭环控制。当活套实际套量大于过程自动化下发的设定套量，活套套量控制附加上游机架负速度，调整上游轧机降速；当活套实际套量大于设定套量，套量附加上游轧机主传动正速度，调整上游主传动加速；当轧机抛钢后，撤销套量控制附加速度。

3.1.4 活套小套量轧制切换策略优化

由活套套量控制可知，在轧制带钢过程中，过程自动化下发设定套量分别包括活套上升套量、活套预下降套量和抛钢套量。其中设计活套预下降套量的目的为在带钢尾部即将到来时，避免由于活套角度过高导致带钢尾部拍打轧辊或入口导卫，尾部轧烂或叠轧事故发生。

原设计的小套量切换为通过带钢尾部物料跟踪来判断，当带钢尾部通过前一机架卸载前固定距离切换。

实际生产过程中，随着轧制带钢种类的增加、带钢规格的多样化，发现最初设计的小套量切换不能满足现场实际情况。特别是轧制窄、薄规格时，活套小套量切换更加不准确。如图 3.6 当根据计算活套控制刚刚切换为小套量，而实际活套并没有进入小套量轧制时，前一机架已经抛钢，从而导致活套小套量无法起到作用，导致板坯仍然是在活套处于高位时离开轧机，引起甩尾。

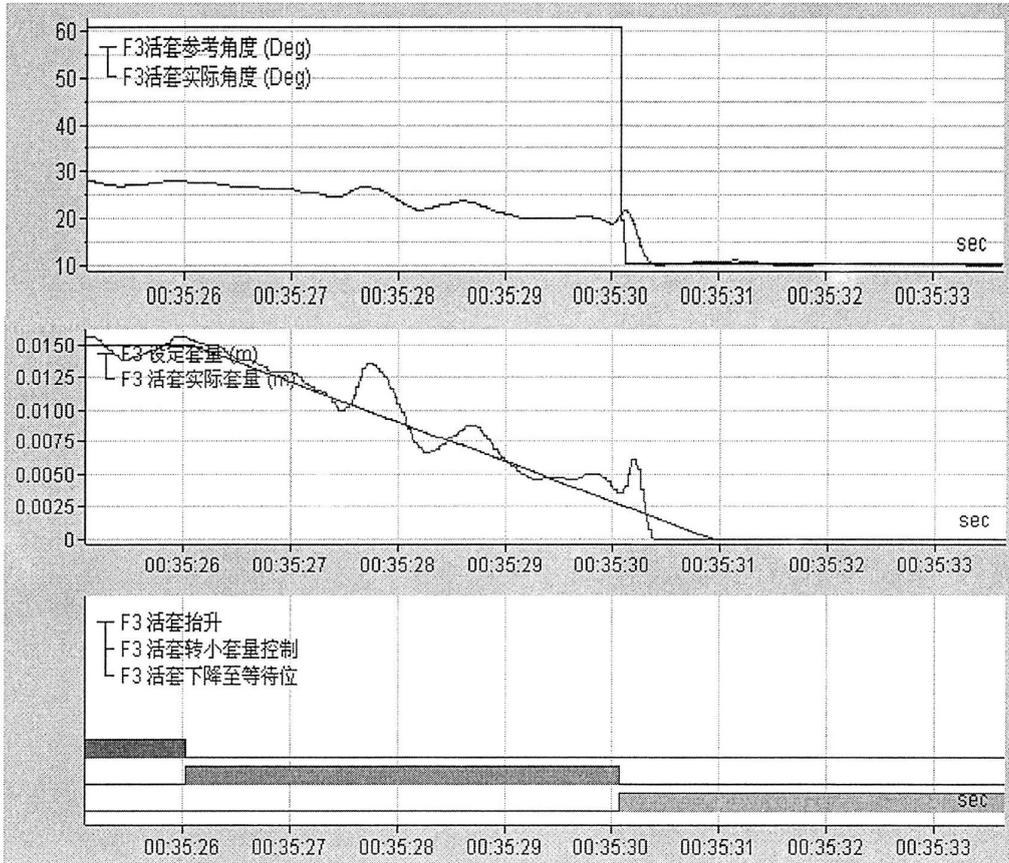


图 3.6 活套小套量控制切换 1
Fig3.6 Control Switch 1 of loop pre-low

由于类似情况发生，导致活套在较高角度抛钢，从而导致尾部甩钢，甚至出现轧烂，碎钢残留在机架内，对后续轧制稳定性造成影响。通过实际运行来看固定时间切换小套量是不合理的，根据实际轧制情况研究，发现当活套的实际工作角度越大时，活套从实际工作点落到工作零位的时间也就越长，小套轧制的时间也就越长。因此对于活套量越大时，就越应该提前进入小套轧制阶段。且根据经验在一级自动化程序中对切换小套量时间线性化，最终优化后活套转小套时间 T 与套量设定的关系如图 3.7 曲线所示。

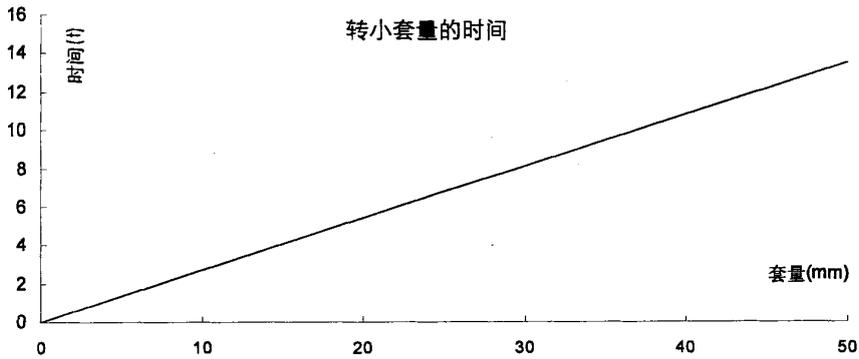


图 3.7 活套转小套量时间图
Fig3.7 The time of looper pre-lowering curve

经过优化后，活套实际套量切换效果如图 3.8 所示：

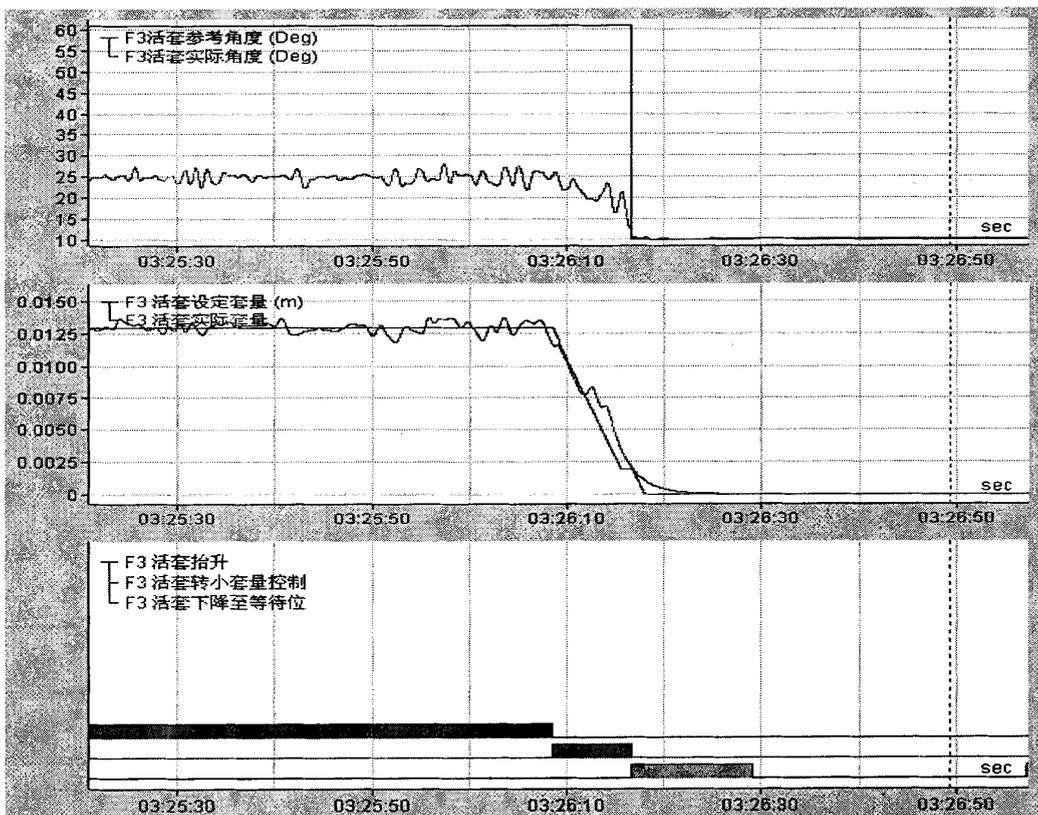


图 3.8 活套小套量控制切换 2
Fig3.8 Control Switch 2 of loop pre-low

由图 3.8 可知，活套在前一机架抛钢前，由套量控制切换为小套量轧制，且实际套量很好的跟随设定套量。活套切换实际准确，在活套真正下降后，板坯尾部到来，很好的控制了现场甩尾现象的发生。

3.2 活套张力控制

从带钢被轧辊咬入开始，连轧的全过程基本上可分为“咬入”和张力“连轧”两个阶段。咬入阶段约占 1s，最大可达 3s 左右，从带钢头部被咬入开始到建立张力为止，连轧机经历以下几个变化阶段：

主传动因轧辊咬入带钢，受到突加负载，在带钢头部咬入后的 0.3~0.5s 时间内，因下游机架（如 F4）产生了动态速降，带钢处于无张力的松弛状态。

当下游机架（如 F4）咬入带钢产生动态速降的同时，它的负载检测设备(压头)检测到轧制力，物料跟踪系统就认为 F4 机架带载，给出活套起套信号，使活套辊抬升。当 F4 机架咬入带钢约 1s，活套便绷紧带钢，连轧机进入了“微张力”连轧阶段。这是连轧生产决定成品质量的主要阶段。

稳定轧制时，两机架之间的带钢距离比机架间距离略长一些，靠活套辊将其张紧，使带钢产生给定的小张力，活套机构的张力控制系统是一个与主传动速度、辊缝密切相关的系统，它实际上是主传动速度、活套液压缸力矩的耦合系统。

稳态时，活套张力控制所需的力矩包括三个部分：一是带钢张力所需的力矩；二是重力力矩，包括活套辊及框架自身重量产生的力矩和机架间带钢重量产生的力矩；三是带钢弯曲力矩。考虑到摩擦及其他因素的影响，通常在计算力矩时附加了一定的额外力矩，图 3.9 为活套力矩组成。

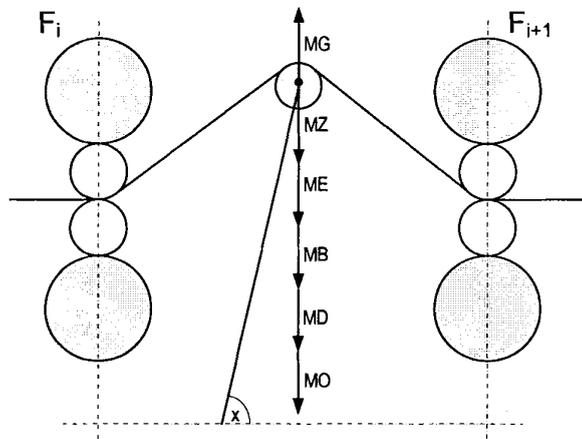


图 3.9 活套转矩图

Fig3.9 The sketch of looper torque

如图 3.9 所示：

$$MG = MZ + ME + MB + MD + MO \tag{3.11}$$

其中，MG = 总力矩

MZ = 带钢张力力矩

ME = 活套重力力矩

MB = 带钢重力力矩

MD = 带钢弯曲力矩

MO = 力矩偏置

3.2.1 带钢的张力力矩

带钢绝对张力可按如下计算： $F_z = \sigma \cdot b \cdot h$ 。

其中， σ = 带钢单位张力， N/mm^2

b = 本机架出口带钢宽度， mm

h = 本机架出口带钢厚度， mm

图3.10为带钢张力转矩图，其与活套臂角度关系由图进行分解。

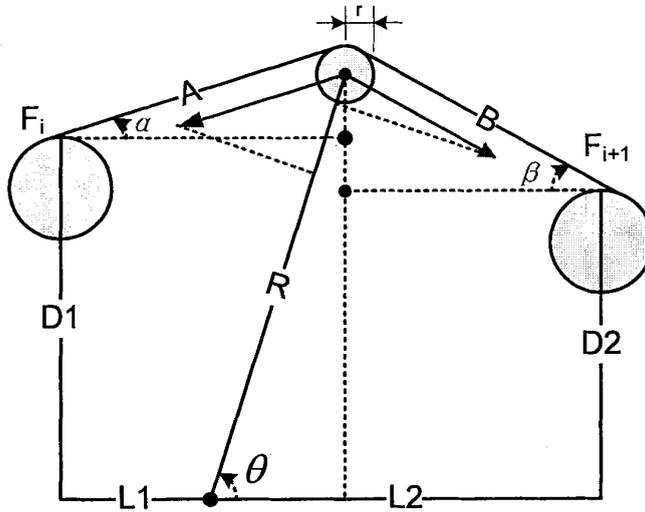


图 3.10 活套张力转矩图

Fig3.10 The sketch of looper tension torque

如图 3.10 所示，带钢的张力力矩可以被计算为绕活套支持器转轴在活套辊与带钢接触点沿带钢方向的两个张力向量所产生的力矩的总和。

因此，带钢张力转矩计算有：

$$M_z = F_z \cdot R \cdot [\sin(\theta + \alpha) - \sin(\theta - \beta)] \quad (3.12)$$

其中， θ —活套支撑器工作角度； $^{\circ}$

α —带钢与上游机架轧制平面的角度， $^{\circ}$ ；

β —带钢与下游机架轧制平面的角度， $^{\circ}$ ；

R —活套支撑器支臂长度, mm ;

F_z —活套上带钢的张力, N ;

若活套处在轧制线以下, 按照上式, 假定带钢与活套保持连续的接触 (但实际上是不接触的), 所计算的张力矩的符号则取反。因此带钢张力矩将被限定到一个小值, 相当于活套稍稍高出轧制线位置时的力矩值。图 3.11 为活套角度与张力力矩的对应关系。

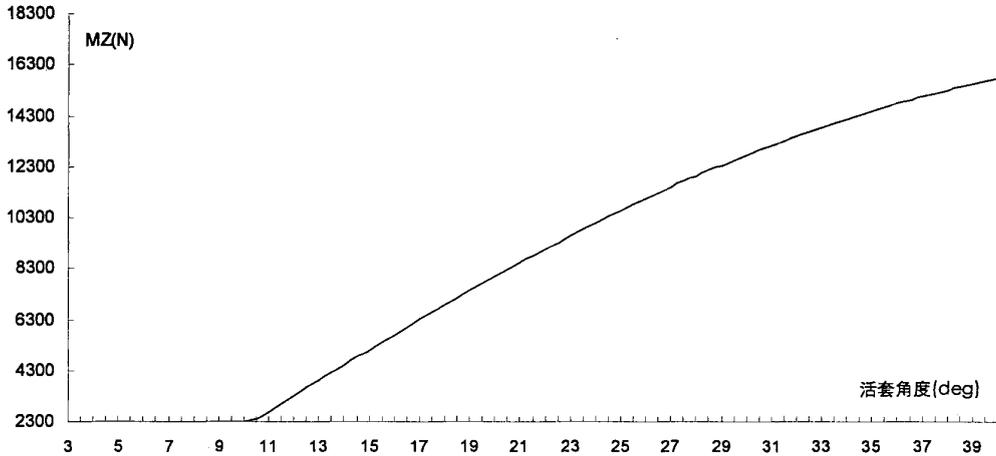


图 3.11 活套角度与张力转矩对应关系图

Fig3.11 The curve of looper angle-tension torque

由图 3.11 可知, 带钢张力力矩与活套角度关系, 当活套角度大于 10 度后, 带钢张力力矩随着活套角度的增大, 力矩呈非线性增长, 其与 $[\sin(\theta + \alpha) - \sin(\theta - \beta)]$ 呈比例关系。

3.2.2 补偿转矩

活套补偿转矩主要是为了补偿由于带钢本身重力、板坯弯曲力以及活套本身重力所需要额外附加的转矩, 其分别按照如下方式进行计算。

(1) 带钢重力转矩

将活套上的带钢分成两部分, 从前一架机架到活套辊出口部分和从活套到后一架机架的入口部分, 同时假定两部分带钢的重量一半落在工作辊上, 一半落在活套辊上, 就可以得出这样的结论: 两机架间带钢全部重量的一半落在活套辊上。

因此由整个带钢重量 G_{ws} 所产生的转矩为:

$$MB = 0.5 \cdot G_{ws} \cdot r \cdot \cos \theta \tag{3.13}$$

其中, r : 活套辊半径。

整个带钢的重量通过 $G_{RS} = (A + B) \cdot b \cdot h \cdot \rho \cdot g_e$ 计算，这里 A 和 B 都取决于活套的几何位置。这个补偿仅在活套带载时有效。图 3.12 为带钢重力力矩与活套角度对应关系。

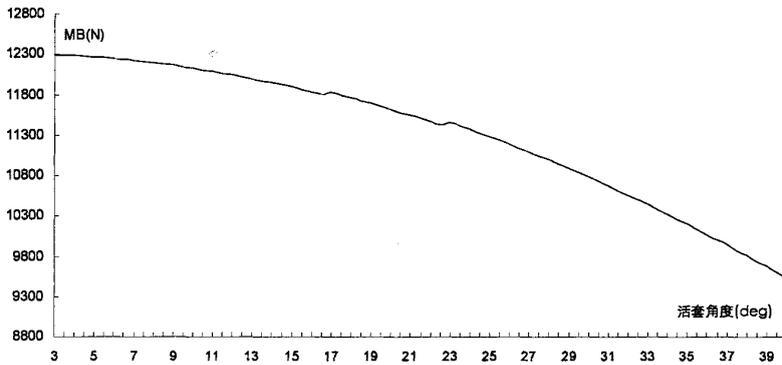


图 3.12 活套角度与带钢重力力矩对应关系图
Fig3.12 The curve of looper angle-strip grave torque

由图 3.12 以及式 (3.13) 可知，带钢重力力矩与活套臂角度 $\cos\theta$ 成正比，随着活套支撑臂角度增大，带钢重力力矩减小。

(2) 带钢的弯曲力矩

带钢在精轧机组轧制时，需要活套辊提供一定的力使带钢弯曲，在带钢弯曲之后，才会产生实际套量和相应的张力。当带钢较厚时，使带钢弯曲需要较大的力，因此带钢的弯曲力矩相比就更为重要。而带钢厚度较薄时，带钢的弯曲力矩就会变得非常小，在整个力矩中只起一个次要的作用。一般情况下，带钢弯曲力矩按照如下公式计算：

$$MD = \sigma \cdot k_d \cdot b \cdot h \cdot h / (L_1 + L_2) \cdot R \cdot \cos \theta \cdot \tag{3.14}$$

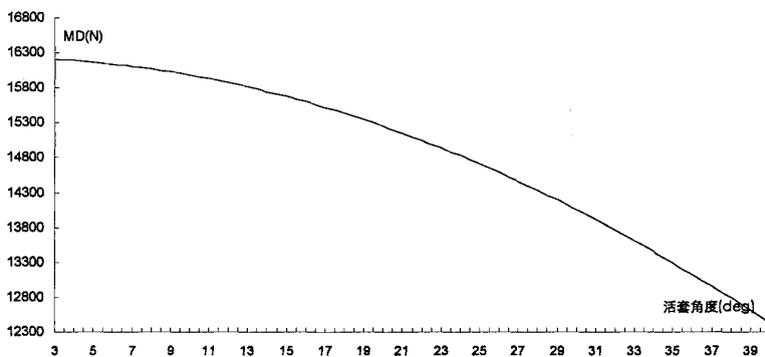


图 3.13 活套角度与带钢弯曲力矩对应关系图
Fig3.13 The curve of looper angle-strip bending torque

由图 3.13 以及式 (3.14) 可知，活套张力力矩同样与活套臂角度 $\cos\theta$ 成正比，随着活套支撑臂角度增大，活套张力力矩减小。

3) 活套重力转矩

活套辊及相应支架的重力 $Ge = m_l \cdot g_e$ 产生了一个绕转轴的转矩。这个转矩大小为：

$$MG = k_1 \cdot GE \cdot R \cdot \cos\theta \tag{3.15}$$

其中， R ：活套的重心半径。

图3.14为活套角度与活套重力的对应关系，其具体如下所示。

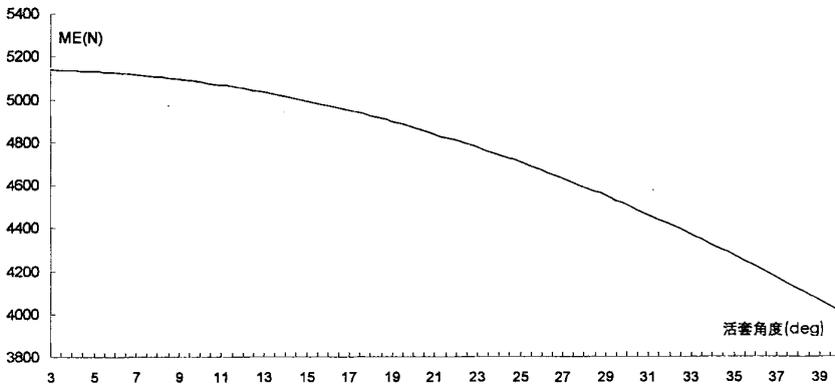


图 3.14 活套角度与活套重力力矩对应关系图

Fig3.14 The curve of looper angle - looper grave torque

由图 3.14 以及式 (3.15) 可知，活套重力力矩同样与活套臂角度 $\cos\theta$ 成正比，随着活套支撑臂角度增大，活套重力力矩减小。

3.2.3 活套装置所需总力矩

正常轧制时，活套装置所需的总力矩 M 为各个力矩分量之和：

$$MG = MO + ME + MB + MZ + MD \tag{3.16}$$

为保持张力恒定，当 θ 变化时，张力力矩 ME 应与 $[\sin(\theta + \alpha) - \sin(\theta - \beta)]$ 成正比变化，带钢重力力矩 MB 和活套辊重力力矩 MZ 与 $\cos\theta$ 成正比，同样带钢的弯曲力矩 MD 与 $\cos\theta$ 成正比，但均为非线性关系。

如果不考虑系统的动态情况，则如果按 (3.12) ~ (3.16) 五个函数之和调整活套装置液压缸输出的力矩，则在轧制过程中，相邻两机架间带钢所受的张力将不受活套辊摆角变动的影晌而保持张力的恒定。

根据式 $MG = MO + ME + MB + MZ + MD$ 可以得到如图 3.15 所示的活套力矩与活套摆角的关系曲线 $MG = f(\theta)$ 图。

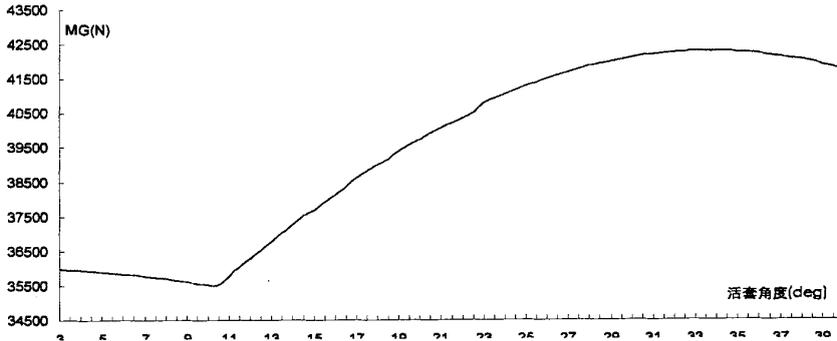


图 3.15 活套力矩与活套辊摆角关系曲线

Fig3.15 The relation curve of the looper torque vs. angle

液压介质系统提供给活套的实际力矩，可以依据其几何关系如图 3.16 所示，按照计算如下：

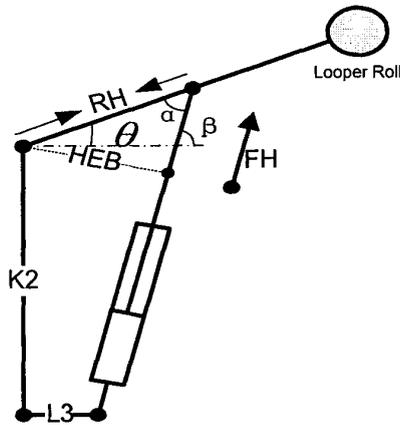


图 3.16 活套实际转矩计算图

Fig3.16 The sketch of looper actual torque

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{RH \cdot \sin \theta + K2}{RH \cdot \cos \theta - L3}$$

$$\alpha = \beta - \theta$$

$$HEB = RH \cdot \sin \alpha = RH \cdot \sin(\beta - \theta)$$

故力矩

$$\begin{aligned} MGI &= FH \cdot HEB \\ &= FH \cdot RH \cdot \sin(\beta - \theta) \\ &= FH \cdot RH \cdot \sin \left[a \tan \left(\frac{RH \cdot \sin \theta + K2}{RH \cdot \cos \theta - L3} \right) - \theta \right] \end{aligned} \tag{3.17}$$

3.2.4 活套的张力控制方式

1、轧制过程中张力的建立

带钢在精轧轧制过程中，要经历起套、张力连轧和抛钢三个阶段。从带钢被轧机咬入到建立稳定的张力连轧过程中，带钢以及相应活套设备要经历以下两个阶段：

当下游机架咬入带钢时，下游机架主电机受到突加负载而导致产生动态速降，经恢复时间 t 之后，在相邻两机架之间积累了一定长度的带钢，此时带钢处于无张力松弛状态。

在下游机架咬钢的同时，轧机给活套辊液压缸发出起套信号，活套辊液压缸迅速动作，使活套辊抬升。当下游机架咬入带钢头部约 1s 之后，活套辊张紧带钢并产生给定的张力。张力控制投入运行，使带钢处于恒张力连轧阶段。这一阶段为连轧过程的关键阶段，其控制精度的高低将直接关系到成品带钢的质量的好坏。

2、活套张力的自动控制

由上述可知，活套辊液压缸所需的总力矩是补偿力矩和张入力矩之和，并且是张力 T 和活套辊支撑臂摆角 θ 的函数，而且活套套量与活套摆角也成函数关系。实际轧制过程中，即使活套液压缸提供的力矩不变，但带钢张力也会随活套角的波动而变化。即 θ 小时，张力大； θ 大时，张力小。所以，要保证张力不变，需使活套液压缸提供的力矩随 θ 角的变化按上述公式而变化。

活套的张力控制是通过驱动活套液压缸伺服阀来控制的，一个完整的活套高度和张力控制系统大体上采用位置，速度，力矩三环系统，其控制结构如如图 3.15 所示。

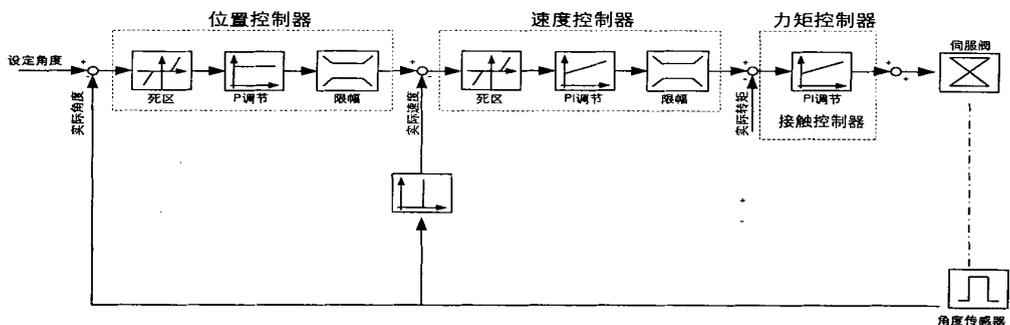


图 3.17 活套张力详细控制系统框图

Fig3.17 The principal block diagram of looper detailed tension control

活套张力控制实质是控制活套液压缸伺服阀的驱动电流，它分为起套、调整、落套三个阶段：

起套阶段：活套需快速升起并张紧带钢形成稳态轧制所需的微张力。接收到起套信号后，活套液压缸伺服阀应以较大的开口度在较短的时间内抬起活套并张紧带钢。

调整阶段：起套过程结束后，即进入稳定的微张力连轧阶段。此时，伺服阀驱动电流由起套时的大电流切换到恒张力控制的小电流阶段。

落套阶段：活套液压缸接收到落套信号后，伺服阀驱动电流由恒张力控制的状态切换到落套电流基准，伺服阀开口度反向，时间也要求在1s左右的时间内。

在调整（连轧）阶段，当活套处于稳态时，活套的实际位置通常称作是活套的工作位置。活套的实际工作位置通常由套量设定值所确定，一旦套量确定，依据其几何关系，工作点的位置也基本确定。通常情况下，活套的套量设置为15mm-19mm,因此其实际工作点大概在26度左右。

活套起套过程与一般位置控制有所不同。在活套辊接触带钢的瞬间，活套装置的设定速度不能为零，否则，当活套贴紧带钢后，当套量由于其它原因增加时，活套辊就无法再贴紧带钢，这时活套张力控制就会失控，产生难以预测后果。为避免类似情况，须在活套升起以及接触带钢的时候，提供一定的速度，因此，一级自动控制所给出的活套设定角度都比较大，大概在61度左右，这样在轧制过程中由于套量的限制，角度位置控制器不可能到达，位置控制器一直处于过饱和状态，因此其下游速度控制器的设定输入由位置控制器的限幅决定。

同样由于套量限制，速度控制器的PI调节器很快也达到饱和状态，力矩控制器的输入由速度控制器的输出限幅决定。这样，在稳定轧制阶段，位置控制和速度控制都被甩掉，只有转矩控制在起作用。速度控制器的输出限幅即最大的转矩设定值，由当前活套辊的位置所计算的转矩确定。由于在活套辊上升到实际工作点之前，带钢的实际张力(包括带钢弯曲力矩)无法建立,因此，所计算出的最大转矩一直大于活套液压缸所提供的实际转矩，由此产生加速度，使活套辊上升。

转矩控制器为一PI调节器，然而在活套上升接触带钢1s之后，PI调节器的积分分量即被保持，此时只有比例控制器在起作用。依据所设定的转矩与实际活套液压缸所提供的转矩的控制偏差，对转矩控制形成闭环。

3.3 本章小结

本章重点对活套套量控制以及张力控制部分进行说明。套量控制重点对其控制部分进行详细讲解，同时对小套量不合理控制切换过程进行优化；而张力控制重点对重力转矩、弯曲转矩以及张力转矩的计算进行了推导，对影响张力因素进行分析，同时对活套张力控制过程进行分解。

第4章 活套软接触控制的研究

迁钢 2250 热连轧在精调和生产期间遇到的主要问题是：在带钢穿带过程中，由于活套前后机架速度、辊缝等因素的影响，造成秒流量的不匹配，引起活套在起套过程中起套角过高或过低，造成带钢边部刮蹭或者带钢拉窄。由于此时适当调节活套的起套速度可以缓解该问题，结合此情况开发了活套软接触控制器来提高活套动作速度。其设计目的为：在控制器上要解决活套快速抬起与接触带钢建立恒定张力间的平滑过渡，减轻由于活套动作速度缓慢导致的头部张力不足导致的头部超宽，或形成鱼头状。根据现场调试。经过现场实际生产验证，效果良好。

4.1 活套软接触研究

4.1.1 活套软接触研究背景

在带钢热连轧过程中，活套对连轧关系的形成和稳定起着重要作用。轧制过程中，虽然活套高度控制并不由活套装置本身来完成，而是通过调节前后机架主传动的速度实现的，活套装置本身只为带钢提供张力，但活套辊的升起并贴紧带钢的控制却是由活套装置本身完成的。同时，从控制上来说，如果活套辊失去了和带钢的接触或者接触还没有建立，那么接触（转矩）控制器就会处于开环状态。在这种情况下，活套辊将在一个不确定的时间和位置接触到带钢。

狭义地说，无接触（开环）意味着实际力或者转矩为零。广义地说，无接触意味着在建立接触的过程中，没有转矩或者力的分量，而其他的常态分量（如重力补偿分量等）一直存在（被包含）。

2250 热轧生产线精轧活套接触控制器的增益为常值参数，为了实现一个恒定的带钢张力，不可避免的将会带来一个比较硬地接触。较硬接触必将导致活套辊接触带钢时对带钢的撞击，导致带钢在大张力下造成变形。活套撞击带钢带来的影响：

（1）这种撞击导致带钢头部厚度变薄拉窄，影响带钢产品质量。

（2）这种撞击破坏张力闭环控制稳定。因为活套起套撞击导致张力迅速增大，导致张力闭环控制快速响应调节，引起活套下降甚至产生震荡，大大影响活套进入张力稳定时间。

（3）撞击也会严重影响前后机架速度波动，主要是其影响前后机架的后、前滑系

数。

从总体上而言，对于接触时所设定的参考转矩来说，固定的常数增益仅仅能够带来一个比较低的抬起速度与对带钢的撞击，因此仅仅依靠接触控制器并不能合理地调整接近速度。鉴于此需要有一个带有非线性增益的调节器，它依据转矩设定值和实际控制偏差进行调节。两控制器并行工作，两个控制器的输出将被叠加，作为伺服阀的输出。

4.1.2 活套“软接触”控制器设计思路

活套的起套阶段（即趋近阶段），接触控制处于开环状态，活套辊应该达到一个特定的趋近速度。这样趋近过程就可以被控制，随后活套辊接触到带钢，以避免产生上述的缩颈现象。

为了实现这样平滑的软接触，需要在活套的接触控制器之外，并联上一个趋近（软接触）控制器，其不能仅靠一个常参数的简单控制器实现。软接触控制器是一个非线性的附加控制器，它仅仅在上升阶段起作用，使用它只是为了提高了趋近阶段活套辊运动的速度，而在接触带钢时则会实现软接触。在正常工作点接触控制器被冻结仅仅接触控制器能够工作。

如果没有接触，软接触控制器会提供一个额外的速度分量以达到所需要的趋近速度。如果接触已经存在（也就是仅仅存在一个比较小的控制偏差），那么软接触控制器的输出就会很小甚至被冻结。因此软接触控制器的特性曲线（非线性比例增益）在控制偏差为零时必须有一个水平的正切线。

软接触控制器作为一个非线性控制器，在其到达张力设定值和刚接触带钢时的工作点附近，对张力的波动不需太敏感。而在这两点之内的范围内，却对张力波动有着高敏感性。这样就能在趋近状态使活套有一个快速的响应，而在稳态情况下又能有一个可以接受的稳定性。

软接触控制器不能有任何的存储功能，也就是它不能有任何的微分能力，积分能力以及磁滞特性。因为根据不同的设定值需要有不同的特性曲线，因此软接触控制器需要有一组特性曲线。

同时，软接触控制器的设定输入为过程计算机所给出的设定张力，实际反馈为活套所提供力矩中的张力分量；这样就能够实现一个精确的张力控制。

4.1.3 含“软接触”控制器活套控制框图

活套的张力控制是通过驱动活套机构的液压缸伺服阀来控制的，一个完整的活套高度和张力控制系统大体上采用位置，速度，力矩三环系统，其控制结构如如下图所示：

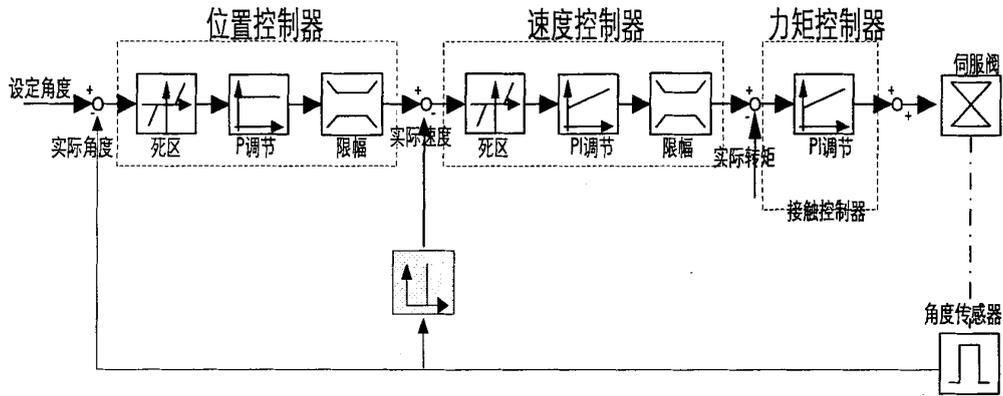


图 4.1 优化前活套控制系统框图

Fig4.1 Principal block diagram of looper control system before optimization

在正常的控制过程中，活套的控制从起套到落套需要三个命令也就是活套的上升、预下降和下降三个命令，在上升命令到来的时候，活套的角度设定值为最大角度 60 度；预下降，此时是活套的套量控制阶段，会给出一个小套量控制，从而活套会在正常轧制的情落下一定的角度；在下降的阶段，此时已经失张，设定角度有 60 度下降为 10.2 度，也就是活套落在轧制线的位置。

从以上活套的正常工作过程来看，在活套上升阶段也就是有 10.2 度上升到 60 度(实际无法达到)的过程中，在活套没有和带钢接触的时候，是没有张力存在的，所以由图 4.1 可以发现这个闭环控制是无法建立的，在此过程活套处于开环控制，起套速度会很慢，而且输出会逐渐增大，因此很难做到与带钢接触的平稳过渡。

鉴于以上情况，就需要在原有的控制基础之上附加一个控制器，其活套控制框图优化如下：

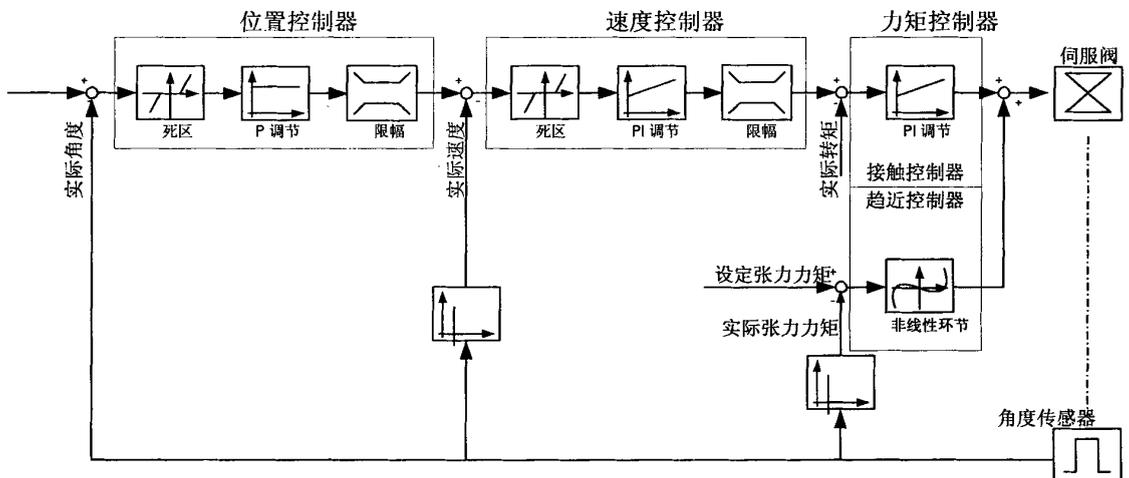


图 4.2 优化后活套控制系统框图

Fig4.2 Principal block diagram of looper control system after optimization

优化后控制系统在张力闭环控制基础之上增加一非线性、不带记忆功能的控制环节，

本文称之为“软接触”控制。其作用是：接触控制（张力闭环控制）没有建立张力之前也就是处于开环控制阶段，该控制器的输出很大，叠加在接触控制器之上，驱动液压伺服阀快速抬升活套，而在即将接触带钢的时候该控制器输出能够迅速下降为 0 被封锁，单独有接触控制器控制活套张力。因此该控制器是非线性的，将其称为趋近控制器。

4.2 “软接触”控制器的数学模型

软接触控制器是一个非线性的附加控制器，它仅仅在起套和落套阶段起作用，使用它只是为了提高了趋近阶段活套辊运动的速度，而且在接触带钢时则会实现软接触。在正常工作点仅仅接触控制器能够工作。该控制器是一个纯比例控制，没有积分、微分控制，因此也就是说该控制器没有任何存储功能。该控制器是根据转矩差值进行比例控制，从而产生控制器的输出。

4.2.1 基本数学模型

根据活套控制要求，可以得到软接触控制器输出的基本数学模型为：

$$dx_{appr}^* = \begin{cases} X_{ref} \times (\Delta M / M^*)^m \\ Y_{ref} \times (\Delta M / M^*)^m \end{cases} \quad (4.1)$$

其中：dx*appr:软接触控制器的输出

ΔM :为力矩偏差值 ($\Delta M = M^* - M$)

M^* : 设定力矩

M : 实际力矩

X_{ref} 、 Y_{ref} : 软接触控制器产生最大速度设定值

$$X_{ref} = K_{PL} \times M^*$$

$$Y_{ref} = K_{drew} \times M^*$$

K_{PL} 、 K_{drew} : 比例增益

m :指数

因此式 (4.1) 对应的曲线如下图所示。

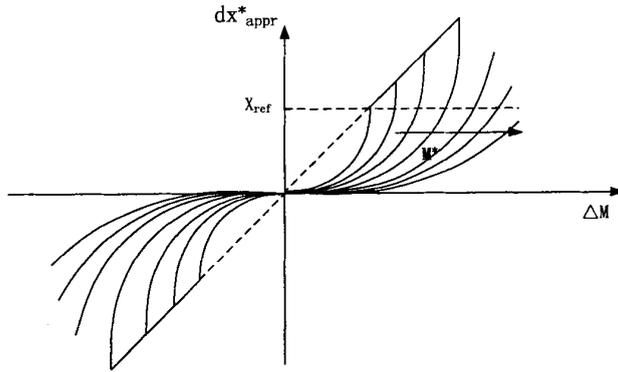


图 4.3 软接触控制器输出特征曲线 1
Fig4.3 The curve 1 of soft touch control

图 4.3 中,对每一个设定值 M^* ,由于设定控制器的参考速度(转矩)的不同,那么就会有—个确定的特征曲线族与之对应。 ΔM 为自变量, X_{ref} 为实现理想趋近速度而设定。指数 m 使控制器的增益渐进增长。

从上图可以看出控制器的输出是非线性的,在活套与带钢接触的时候,控制器输出为零,因此在控制偏差的零点有水平切线。

4. 2. 2 数学模型标准化

(1) 模型标准化 1

为了表述更简洁、更容易表达,将式(4.1)进行标准化处理。通过引入变量 $W(z)$ 和 z , 其中:

$$W(z) = \frac{dx_{ref}^*}{x_{ref}}$$

$$z = \frac{\Delta M}{M^*}$$

则式(4.1)变为:

$$W(z) = \begin{cases} -z^m & z < 0 \\ z^m & z > 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

由公式(4.2)可以看出,其曲线是关于原点对称的曲线,因此式(4.2)所对应的曲线(仅仅第一象限中的 $0 < z < 1$ 部分)见图 4.4。

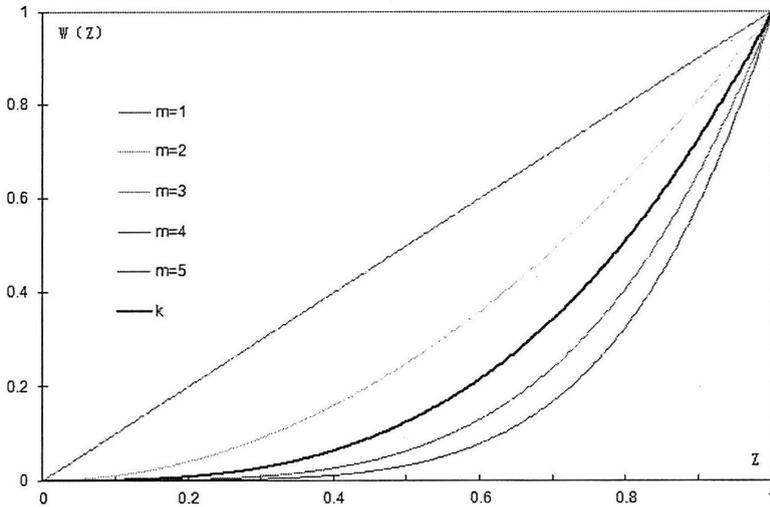


图 4.4 软接触控制器输出特征曲线 2

Fig4.4 The curve 2 of soft touch control

在正常轧制的时候， Z 的取值间接反映出活套实际张力的大小，当 Z 为 0 的时候即设定张力与实际张力相等($M^*=M$)，此时活套与带钢完全接触，定义为完全接触点；而 Z 为 1 的时候即实际张力为 0($M=0$)，此时活套由轧制线开始上升定义为初始接触点。而从曲线上可以明显看出当 $Z=1$ 的时候曲线是非常陡峭的，也就是说此时 $W(z)$ 在初始接触点附近对 z 变化的敏感度很高，轻微的扰动会引起控制器输出很大的变化。因此图 4.4 所示曲线，在趋近过程的平均时间内，控制器的输出很难达到理想的趋近速度 X_{ref} ，而且不能产生一个清晰稳定的接触带钢信号。

鉴于上述问题的存在，考虑对其进行改善，消除在 $Z=1$ 时曲线变化的陡峭，就是输出变化的敏感性。使在 $Z=1$ 和在 $Z=0$ 时具有同样的对 Z 的变化不太敏感，而且还要能够在平均时间内达到一个理想的速度。为了容易分析，在此仅仅以 $Z>0$ 为讨论对象，而 $Z<0$ 仅仅是 $Z>0$ 的取反，在此不做赘述。

从图 4.2 中可以看出曲线 $W(z)=Z^m$ 的斜率逐渐增大，陡峭度逐渐增大，且在 $Z=0$ 时斜率变化不明显。而控制要求 $W(z)$ 在初始接触点附近对 z 变化不要太敏感，特别是在 $Z=1$ 时，斜率变化不明显的曲线。基于这样的目的，考虑使用 $Z=0$ 的曲线用作 $Z=1$ 处，也就是将原来的的曲线翻转过来，就可以实现此想法了，但是同时考虑到 Z 的取值范围 $[0,1]$ ，因此需要首先将原有曲线缩小二分之一，然后将缩小之后的曲线围绕点 $(0.5,0.5)$ 顺时针旋转 180 度，旋转之后的图像如下图所示：

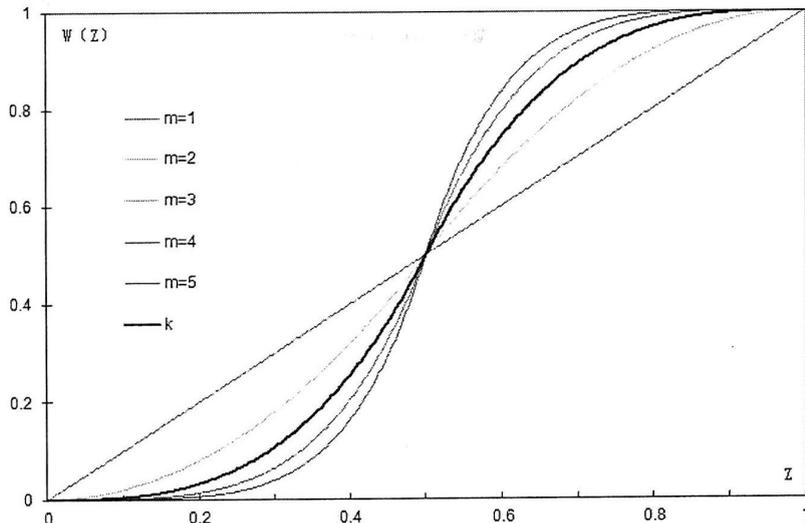


图 4.5 软接触控制器输出特征曲线 3

Fig4.5 The curve of soft touch control 3

图 4.5 可以看出其基本能够达到控制要求，那么上图的函数表达式根据函数的初等变换可得：表达式 $Y=Z^m$ 经过函数的初等变换缩小 0.5 倍，即 $W(Z)=0.5(Z/0.5)^m$ ， $0 < Z < 0.5$ ；翻转部分的曲线表达式为： $W(Z)=1-0.5((1-Z)/0.5)^m$ ， $0.5 < Z < 1$ ；而 $Z > 1$ 时 $W(z)=1$ ，因此综合以上可得图 4.3 的函数表达式为：

$$W(Z) = \begin{cases} -W(-Z) & Z < 0 \\ 0.5\left(\frac{1}{0.5} * Z\right)^m & 0 < Z < 0.5 \\ 1 - 0.5\left(\frac{1}{0.5} * (1-Z)\right)^m & 0.5 < Z < 1 \\ 1 & Z > 1 \end{cases} \quad (4.3)$$

从图 4.5（类型 2）的曲线可以看出通过改变 m 值可以改变在 $z=1$ 和 $z=0$ 两端曲线的形状，而且从控制活套的实际情况来看，如果在 $z=1$ 也就是在活套初始抬起的时刻 m 值较大效果比较好，但是在 $z=0$ 也就是活套接触带钢时刻 m 值较小对实际控制更加有益。这就要求在曲线类型 2 的上下两部分是非对称比较好，其中有两个方法可以做到：（1）在整个控制过程中，不断修改 m 值；（2）在曲线 2 形状的基础上对曲线形状进行修改，让两部分曲线形状是非对称的。

考虑现场实际情况，活套抬起过程时间短暂（也就是趋近控制器的作用时刻很短），时时改变 m 值控制难度较大，因此考虑改善曲线形状来解决。

（2）数学模型标准化 2

由图 4.5 可以很容易发现通过修改拐点 k_{knot} 的位置，可以起到改变曲线形状的目的；

而且同样要考虑 z 的范围 $[0,1]$ ，通过曲线的反转来实现，假定拐点位置 k_{knot} ，其方法为：

当 $z \in [0, k_{knot}]$ 范围，将曲线在类型 1 的基础上缩小 k_{knot} 倍，即可得到该范围曲线。根据函数的初等变换的伸缩变换，将原函数图像缩小 k_{knot} 倍，得到的关系式为：

$$W(z) = k_{knot} \left(\frac{1}{k_{knot}} * Z \right)^m \quad z \in [0, k_{knot}]$$

在 $z \in [k_{knot}, 1]$ 范围，将原函数 $W(z) = z^m$ ， $z \in (0,1)$ 伸缩变换为原来的 $(1-k_{knot})$ 倍，则函数的表达式为：

$$W(z) = (1-k_{knot}) \left(\frac{1}{1-k_{knot}} * z \right)^m, \quad z \in (k_{knot}, 1)$$

将函数图像以 $(1-k_{knot}, 1-k_{knot})$ 点顺时针旋转 180 度，横纵坐标为 $(2(1-k_{knot})-z, 2(1-k_{knot})-y)$ ，则函数表达式变为：

$$2(1-k_{knot}) - W(z) = (1-k_{knot}) \left(\frac{2(1-k_{knot}) - z}{1-k_{knot}} \right)^m$$

最后将图像向左平移 $1-2k_{knot}$ ，向下平移 $1-2k_{knot}$ ，则函数表达式变为：

$$W(Z) = 2 - 2k_{knot} - (1-k_{knot}) \left(\frac{2(1-k_{knot}) - z - (1-2k_{knot})}{1-k_{knot}} \right)^m - (1-2k_{knot})$$

即： $W(Z) = 1 - (1-k_{knot}) \left(\frac{1-z}{1-k_{knot}} \right)^m \quad z \in (k, 1)$ 。其特征曲线见图 4.6。

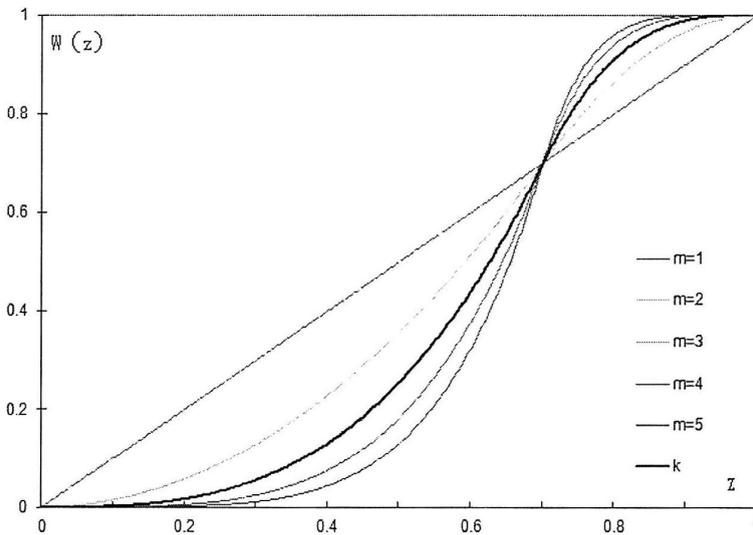


图 4.6 软接触控制器输出特征曲线 4

Fig4.6 The curve of soft touch control 4

综合以上可得图 4.4 曲线的函数表达式为：

$$W(Z) = \begin{cases} -W(-Z) & Z < 0 \\ k_{knot} \left(\frac{1}{k_{knot}} * Z\right)^m & 0 < Z < k_{knot} \\ 1 - (1 - k_{knot}) \left[\frac{1}{1 - k_{knot}} * (1 - Z)\right]^m & k_{knot} < Z < 1 \\ 1 & Z > 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

由图 4.6 可以明显看出，如果将 k_{knot} 的值定为 0.5，那么式 (4.4) 就与 (4.3) 完全相同，也就是说式 (4.3) 是图 (4.4) 的一个特殊形式。而且任意修改 k_{knot} 值，可以随意改变曲线两端形状，来满足现场控制的需要。通过上图可见，当转折点 k_{knot} 右移时控制器输出对扰动的灵敏度增大；当转折点 k_{knot} 左移时，控制器输出对扰动的灵敏度降低。

4.3 “软接触”控制器参数优化与应用

4.3.1 “软接触”控制器参数优化

本厂调试软接触控制器的初衷是为活套快速起套，从而保证接触控制器中的张力闭环控制快速投入，同时降低活套建张瞬间套量波动。同时根据活套控制特征，按照以下要求对活套软接触控制器进行的调试和参数优化：

- 1) 当设定转矩与实际转矩偏差较大时，软接触控制器反应灵敏；
- 2) 当设定转矩与实际转矩偏差较小时，软接触控制器反应相对迟缓；
- 3) 当实际转矩小时，软接触控制器输出尽量放大。

根据上述标准对软接触控制器数学模型中指数 m 以及节点 Knot 值。通过不断调整最终确定参数为 $m=3$, $Knot=0.35$ 。其控制器输出如下：

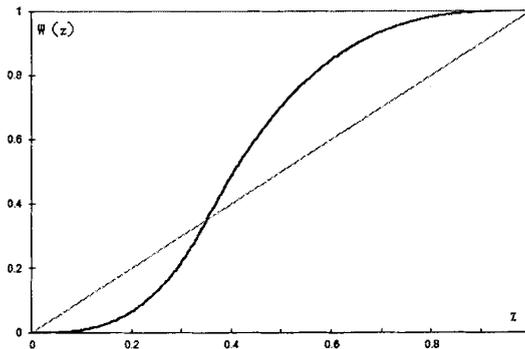


图 4.7 实际软接触控制器输出特征曲线
Fig4.7The act curve of soft touch control

通过图 4.7 可以明显看出, 当 Z 值等于 1 时, 即设定转矩与实际转矩偏差最大时, 接触控制器为满负荷输出; 软接触控制器输出为非线性的, 在 Z 值(转矩偏差)大于 0.35 时, 整个控制器输出较大, 而当 Z 值接近于 0(转矩偏差)时, 软接触控制器输出很小, 基本被锁定, 且 Z 值 0 附近时, 软接触控制器输出基本不变, 从而保证了在活套接触带钢后, 即便是存在转矩波动, 那么趋近控制基本不参与调整, 而仅由接触控制对张力进行闭环控制, 从而避免了外部存在张力扰动后, 快速稳定, 避免此时投入接触控制器后增加系统扰动, 延长系统稳定时间。

4.3.2 “软接触”控制器比例系数优化

为保证活套快速起套建张, 发挥“软接触”控制器趋近作用, 最终设计软接触控制器输出为: $Y = W(z) \times f_{(H, W)} \times \alpha$, 即最终软接触控制器作用于伺服阀的输出与增益参数 $f_{(H, W)}$ 和 α 密切相关。其中 $f_{(H, W)}$ 和与板坯宽度、板坯厚度相关, 为带钢面积增益; 而 α 则与活套设定工作角度和活套动作时实时角度相关。

(1) 带钢面积增益 $f_{(H, W)}$ 优化

对于软接触控制器, 当活套在等待位置(10度)或换辊位置(60度)附近时, 为了避免由于软接触控制器输出增加系统不必要扰动, 此时通过参数 $f_{(H, W)}$ 再次限制其输出。而当轧制时, 则投入趋近控制。对此在一级自动化程序中设定如下条件投入软接触控制器:

- A: 精轧机没有进行模轧;
- B: 活套控制器激活;
- C: 活套角度大于 12 度小于 55 度;
- D: 板坯到来后, 控制要求活套抬起接近带钢。

当上述四个条件全部满足时, 则活套软接触控制器投入运行, 其中任何一个条件不具备, 都将撤销软接触控制器投入。

在对软接触控制器调试初期, 并没有考虑带钢面积即板坯宽度、厚度等因素对软接触控制器的影响, 仅设定固定比例系数 $f_{(H, W)}$ 。

经过现场带钢实际轧制对软接触控制器的应用, 发现由于板坯宽度、厚度参数将会导致板坯重量不同, 从而导致计算的设定转矩不同, 最终影响接触控制器的输出; 由于软接触控制器输出仅考虑了转矩偏差, 因此当设定转矩相同时, 由于宽度、厚度的不同, 导致最终活套起套期间伺服阀输出不同, 起套建张时间不尽相同, 导致部分规格活套起套时间过长, 影响头部宽度、厚度尺寸。如图 4.8 所示, 为调试初期 PDA 曲线记录的某

钢种带钢头部宽度曲线。

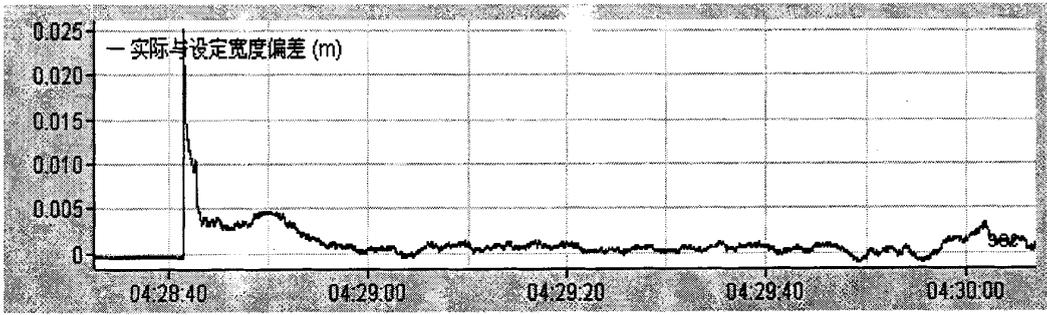


图 4.8 实际板坯头部尺寸

Fig4.8 The act size of strip head

由图 4.8 看出板坯头部 5~6m 长度实际宽度超出设定最大为 20mm，最小 10mm，超出了工艺要求。

结合此类带钢头部宽度缺陷，考虑建立软接触控制器输出与实际板坯宽度、厚度建立相应联系。由于板坯种类繁多，无法针对每种钢种、每种规格制定相应的比例参数。最终考虑按照板坯硬度不同，选择相应的参数优化。按照板坯实际厚度不同进行分类选择，利用 PDA 曲线记录接触控制器输出、软接触控制器输出以及总的输出大小进行对比，由活套开始动作到活套建立实际张力时间等参数综合对比，优化 $f_{(H, w)}$ 的参数，其根据中间坯宽度与厚度进行选择。根据厚度不同选择不同的参数，其参数选择曲线见图 4.9 和图 4.10。

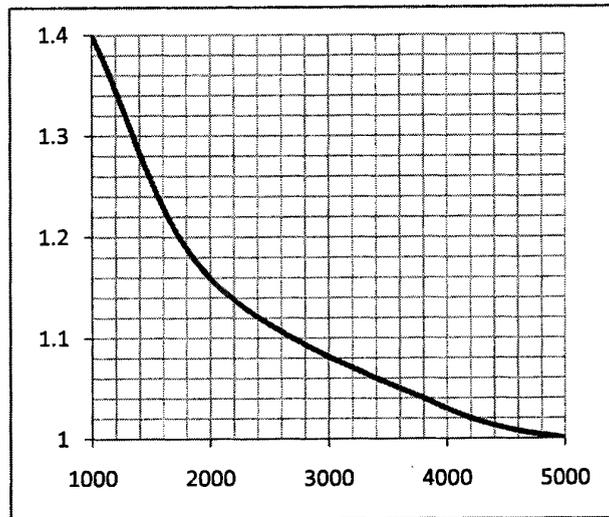


图 4.9 厚度小于 5mm

Fig4.9 The Thickness Less than 5mm

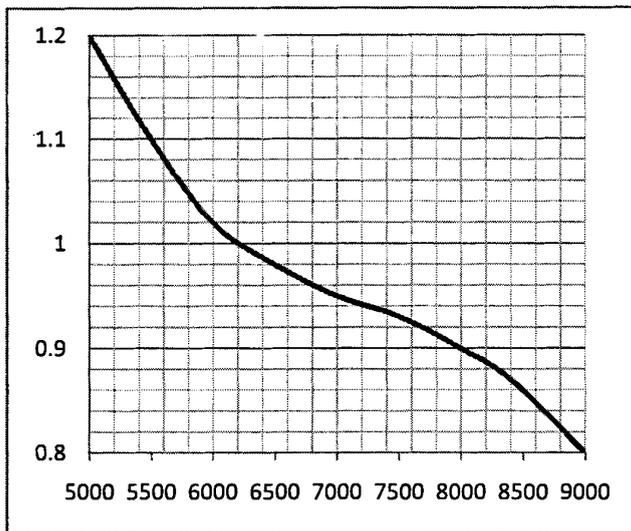


图 4.10 厚度大于 5mm

Fig4.10 The Thickness greater than 5mm

由图 4.9 与图 4.10 可知，该比例系数 $f_{(H, W)}$ 当轧制窄薄规格时其数值较大，而在轧制宽厚规格时，该比例系数则较小。

基础自动化根据二级过程过程自动化下发的轧机出口设定厚度与宽度，综合考虑其比例放大系数，从而动态调整控制器输出，保证活套起套速度与张力建立的及时性，降低由于活套张力建立导致的板坯头部宽度超出范围质量发生。

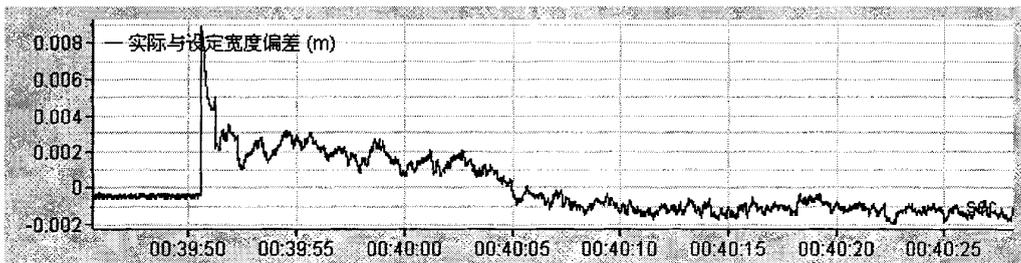


图 4.11 优化后实际板坯头部尺寸

Fig4.11 The act size of strip head after optimization

由图 4.11 可知，成品带钢头部 2mm 左右宽度最大值为超出设定宽度 8mm 左右，其它部分宽度不超出设定偏差 2mm，控制相对较好。经过软接触控制器参数优化，提高了活套起动快速性，缩短了活套建立张力的时间，提高了部分钢种成品头部宽度命中率。

(2) 活套角度控制参数 α 设计与优化

设计软接触控制器目的主要是保证活套起套时快速性，同时在即将接触带钢时降低活套控制速度。由上述软接触控制器设计可知，从自动控制角度来讲，很难产生或制定一个清晰稳定的活套接触带钢时刻信号，因此软接触控制器的投入或冻结(取消)主要是由实际张力或转矩来决定的。考虑中间坯钢种硬度不同、厚度不同对活套产生的张力就

不同，且活套接触板坯时产生的实际转矩波动量不同；若完全按照转矩偏差来对活套软接触控制器进行控制，那么对于较硬、厚钢种，则在板坯接触带钢时软接触控制器输出将产生较大波动，不利于活套稳定控制。

鉴于上述原因，设计了软接触控制器高度控制系数 α ，设计其目的为活套起套过程放大软接触控制器输出，而在活套即将接触带钢时缩小软接触控制器输出，从而降低活套接触带钢时速度，避免产生不必要的控制振荡。该控制参数计算框图如下：

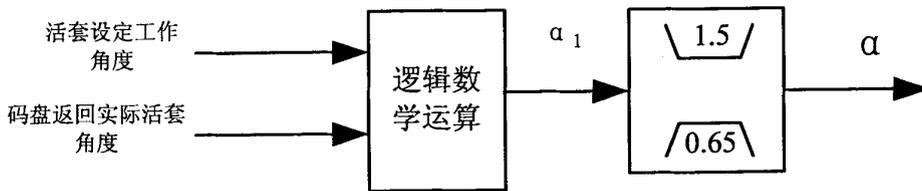


图 4.12 α 参数计算框图

Fig4.12 The calculation block diagram of parameter α

由 4.12 可知，活套角度控制参数 α 的确定涉及活套实际角度和设定活套工作角度。其中实际角度检测由由现场安装旋转编码器返回；而设定角度则使用二级下发的固定工作角度。在调试期间发现，二级下发的设定工作角度偶尔出现不准确现象，从而导致 α 参数计算不准确，出现活套动作速度缓慢或者接触带钢时刻活套上升速度仍然很快，从而导致活套对板坯头部造成撞击，产生张力波动，引起张力控制和套量控制连锁调整，引起轧机速度变化，HGC 压下调整等，不利于板坯头部穿带。图 4.13 为带钢头部咬入时活套控制曲线：

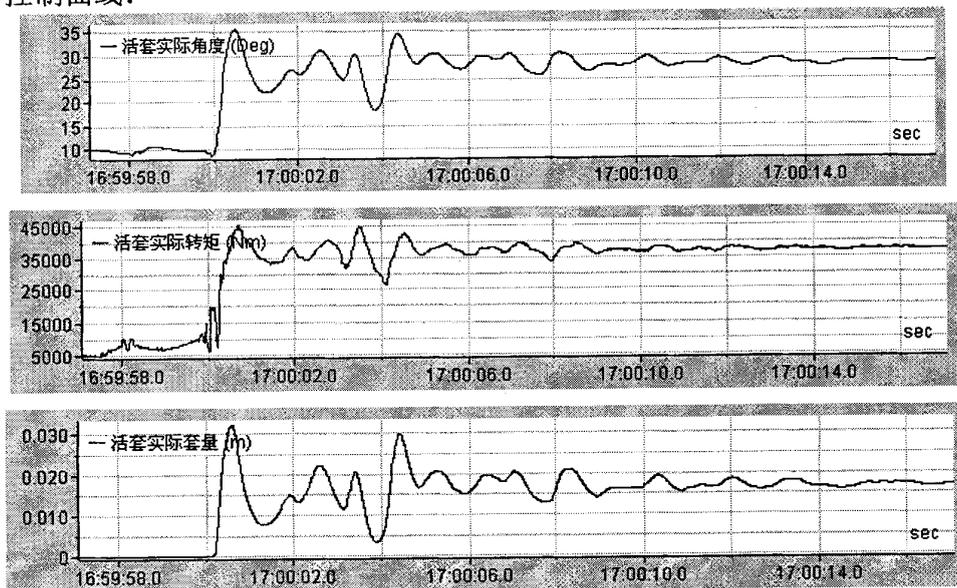


图 4.13 活套控制曲线

Fig4.13 The curve of Looper control

结合此问题,由于二级模型本身缺陷其计算不精确,换言之,即便是二级计算准确,由于实际板坯温度不同等,也会导致活套工作角度有所不同。为此决定在一级内部设计活套工作角度自学习功能。其学习控制框图如下:

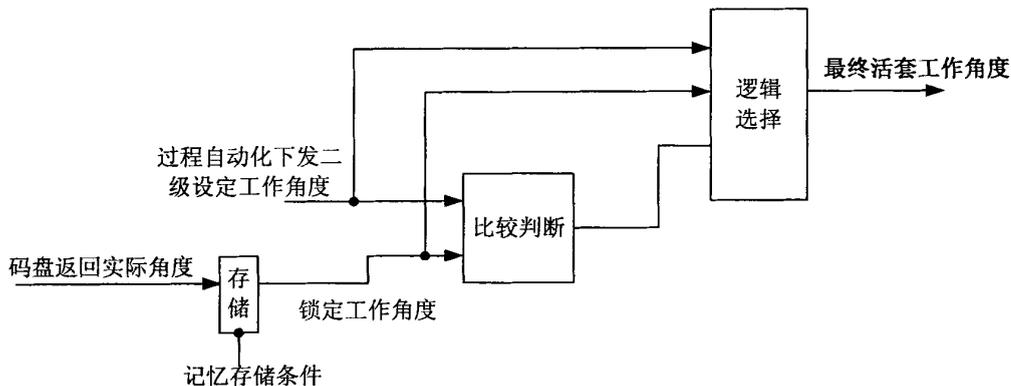


图 4.14 工作角度计算选择

Fig4.14 The Selection of calculation work point

图 4.14 说明了活套工作角度的学习及确定过程。当活套上升到工作角度后,由判定条件判定何时记忆锁定工作角度,然后由锁定的活套工作角度与二级下发的设定活套工作角度进行比较,若锁定的工作角度与二级设定的工作角度偏差 5 度,或锁定工作角度(二级设定工作角度)大于 40 度小于 15 度,则选择二级设定工作角度(锁定工作角度),若均不满足条件,则选择 23 度作为活套最终设定工作角度。故在工作角度计算过程中选择何时对工作角度进行记忆是至关重要的。

最初调试选择活套下游机架带载延时 1s 后的活套角度作为下一块相同规格板坯工作角度,但经过在轧制过程中比较,发现存在很大问题。如图 4.15 和 4.16 所示:

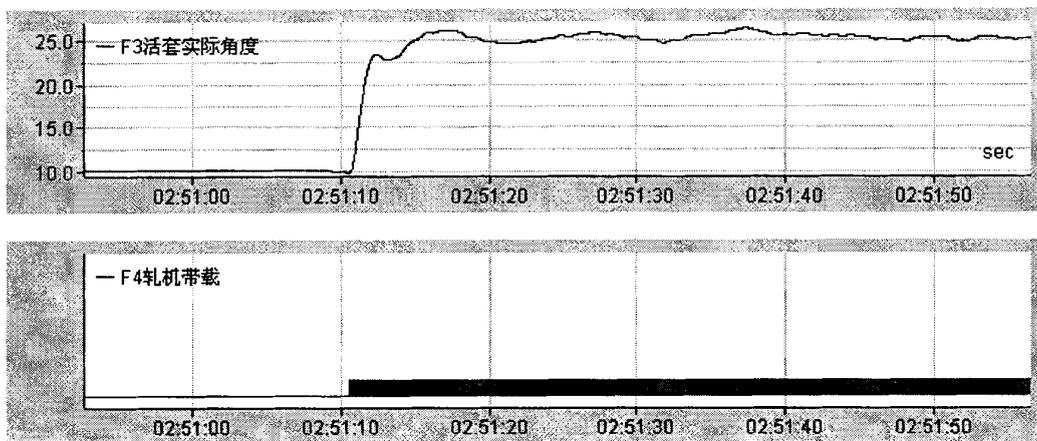


图 4.15 F3 后活套起套过程

Fig.4.15 The processes of looper F3 raising up

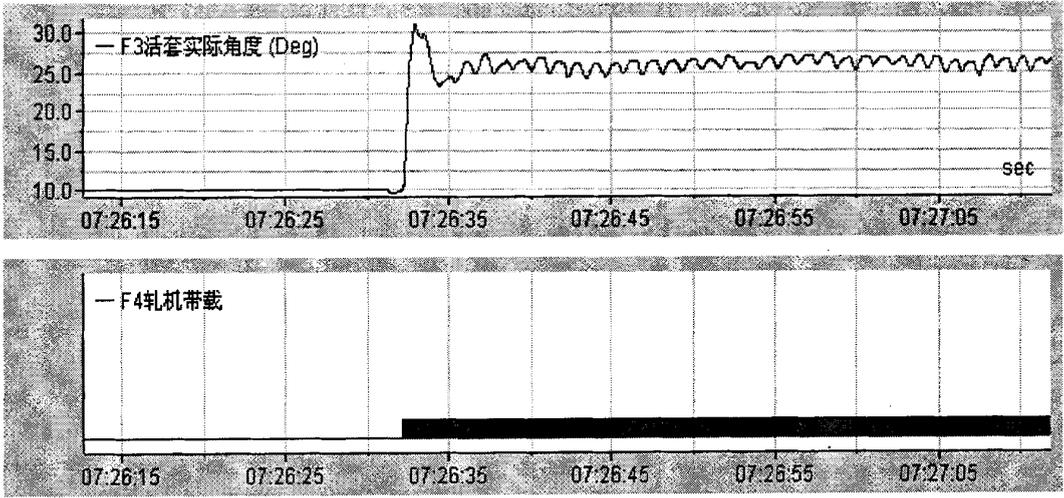


图 4.16 F3 后活套起套过程

Fig.4.16 The processes of looper F3 raising up

由图 4.15 和 4.16 可见，第一种情况活套工作角度为 25° ，锁定的起套角为 23° ，基本与实际情况相吻合。但第二种情况活套工作角度为 25° ，但实际锁定的起套角却为 31° ，与现场实际情况相反，这样就会造成自学习方向相反，本来需要降低软接触控制器速度，实际却增大了软接触控制器速度，这样会造成活套接触带钢时速度仍然很高，对带钢造成更严重冲击，且需要活套调整时间延长。

最后经过分析总结确定方案如下：以下游机架带载作为起点，投入套量控制后，锁定一定时间内的活套角度。由于精轧机主传动受到冲击产生速降后，传动系统会自动调整使系统恢复到设定速度，该过程大概持续 500ms 左右，所以决定锁定开始起套到投入套量控制 500ms 之内活套实际角度的最大值。经过和实际生产过程比较，这种方案比较符合实际情况。

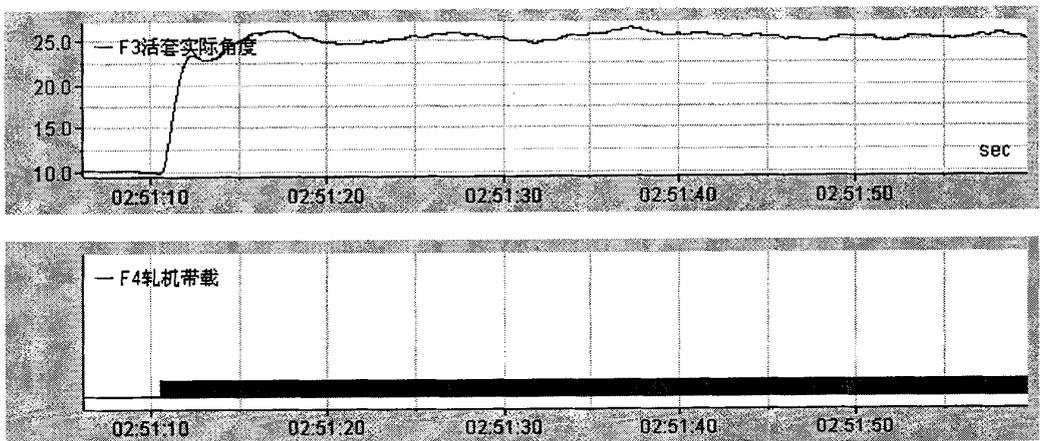


图 4.17 优化后 F3 活套起套过程

Fig. 4.17 The processes of F3 looper raising up after optimization

经过优化后，活套起套平稳，角度超调量基本控制 3%以内，且现场查看轧机咬钢平稳，活套角度波动小，起到了很好的“软接触”效果。

4.4 活套控制优化前后对比分析

通过对活套控制系统进行优化和改进，精轧活套控制器由原设计的仅含张力控制器(接触控制器)优化为张力控制器和“软接触”控制器共同作用。通过增加软接触控制器，提高了活套起套速度，减轻了活套对带钢头部的冲击，提高了产品质量。

以精轧 F1 活套，轧制钢种 SPHC 1512*5mm 为例，对比软接触控制器调试前后控制效果对比情况。以下为活套在板坯轧制过程中活套抬升过程中角度波动、套量超调等具体对比情况如下：

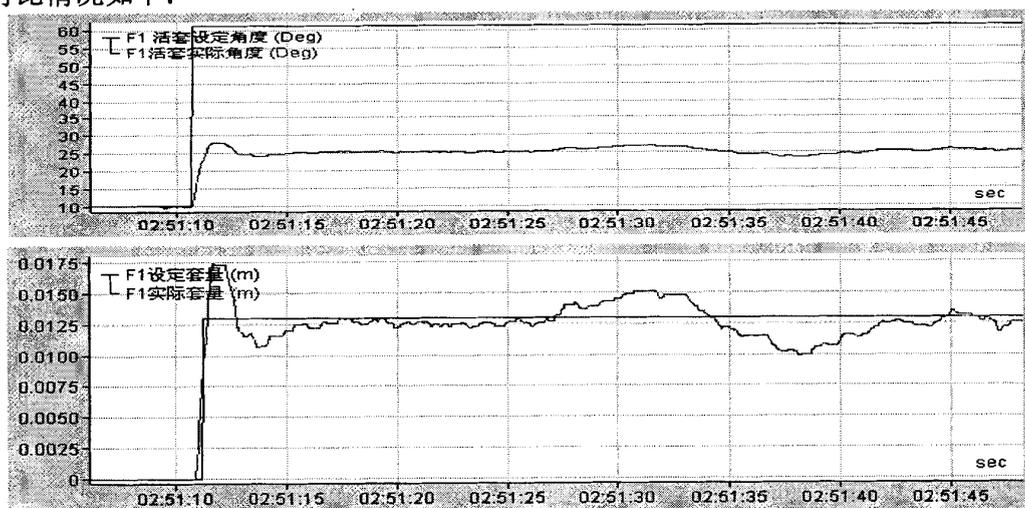


图 4.18 优化前 F1 后活套起套过程

Fig. 4.18 The processes of looper F1 raising up before optimization

由图 4.18 可知，软接触控制器没有投入前，活套角度最高达到 27 度左右，而实际工作点位置为 24 度，超调量大约 12.5%，套量超调量大约 30%左右，且控制器趋于稳定时间大约 3 秒时间。

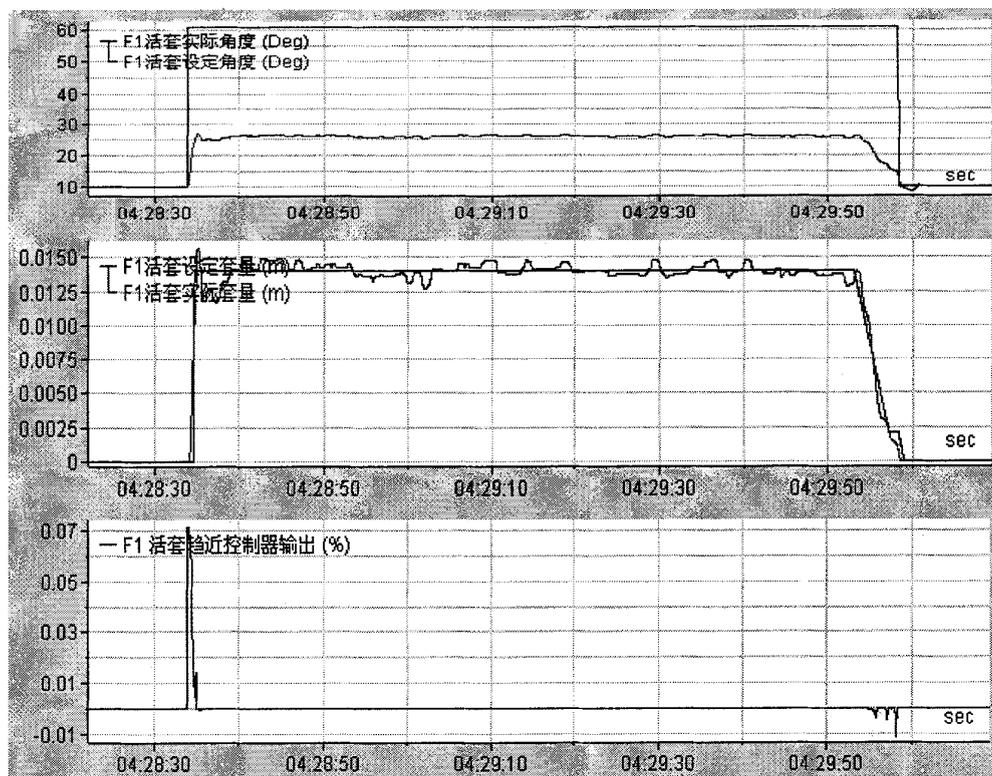


图 4.19 优化后 F1 后活套起套过程

Fig. 4.19 The processes of looper F1 raising up after optimization

由图 4.19 PDA 曲线可知，软接触控制器投入后，活套抬起角度最高为 25 度，活套工作角度为 24 度，其超调量为 4.2%，套量超调量约为 11.9%。由起套到稳定轧制控制器稳定时间约为 1.5 秒，相比优化前活套动作相应速度明显提高，且缩短了活套稳定轧制时间，提高了精轧轧制稳定性。

4.5 本章小结

本章重点讲述软接触控制器的设计思想、设计思路以及完整的活套控制框图。从软接触控制器的初步设计至完整设计的数学模型进行了深入详细的推导，对相应的数学模型曲线进行了仿真绘制。对影响软接触控制器的参数 K_{not} 、 m 值选择做出了说明解释。最后根据现场实际情况确定相应参数值，且对影响软接触控制器输出的截面系数 $f_{(H,W)}$ 、工作角度 α 进行了优化，并最终给出典型控制曲线。

第 5 章 结论与展望

(1) 结论

课题的主要成果包括以下几个方面：

活套相关数学模型的研究。通过对活套的机械机构进行研究，建立了活套控制相关的计算数学模型，包括套量计算的数学模型和转矩计算的数学模型。转矩计算数学模型包含了活套张力转矩数学模型、活套重量补偿转矩数学模型、带钢重量补偿数学模型、带钢弯曲转矩计算数学模型。

以首钢迁钢公司 2250 热连轧生产线为背景，对热连轧生产中活套控制系统的不同控制阶段进行了研究。通过对活套小套量控制和落套过程的重要性分析，进行了参数优化，保证了精轧机架抛钢时，活套的准确落套，从一定程度上抑制了甩尾现象的发生。对实际生产过程中的带钢头部起套过程进行了研究。通过头部起套的研究，重点指出头部活套起套过程速度缓慢，在此过程无法实现张力闭环控制，无法对活套接触带钢时刻进行控制的问题。

作者根据现场实际工作经验和调试过程，针对起套过程中活套处于开环控制，起套速度无法保证，且活套接触带钢瞬间速度高，易造成活套对带钢头部撞击问题，提出活套“软接触”的概念。本文对软接触思想的建立、模型的设计以及优化，不断提高活套软接触数学模型控制效果。根据现场实际带钢轧制情况不断优化软接触模型参数，提高活套抬升速度，最终确定一套适合现场实际应用的控制参数。据现场实际，该控制方法对提高穿带时活套起套的快速性，避免带钢头部拉窄和失张有良好的作用。

(2) 展望

虽然本文通过使用“软接触”控制器，提高了带钢穿带时刻活套动作快速性。但是在实际应用过程中，也发现由于该系统的控制参数无法完全根据钢种进行变化，仅对普通钢种活套头部起套效果控制较好，但当轧制厚硬规格时，活套起套瞬间波动较大，套量超调严重、活套稳定时间仍然较长，不利于现场活套的稳定控制。接下来的工作中，我们将对考虑如何继续对软接触控制增加带钢硬度补偿，实现不同规格硬度采用不同参数，提高活套控制稳定性。

此外，活套转入小套控制瞬间，张力的波动问题。虽然目前经过优化，活套小套量控制切换相对准确很多，但是在切换瞬间由于没有考虑张力变化的影响，导致活套波动相对频繁，从而影响带钢尾部轧制。在后续工作中将考虑如何避免或降低活套波动，从而稳定带钢尾部轧制。

最后，轧机咬钢瞬间，主传动速度产生冲击速降，从而导致轧机间秒流量不平衡，同样能够对带钢宽度、厚度产生影响。而本厂活套控制没有考虑轧机冲击速降补偿，导致部分钢种板坯头部尺寸精度较低，今后工作中将重点联合传动以及工艺人员对此冲击补偿进行设计。

参考文献

1. 吕维松. 宽带钢热连轧机装备技术水平综合评价[J]. 冶金自动化.1991
2. 中国金属学会热轧板带学术委员会编著. 中国热轧带钢轧机及生产技术[M], 北京冶金工业出版社. 2002.
3. 彭开香,董洁,童朝南. 带钢热连轧机活套的综合控制研究[J], 冶金设备, 2005 年 02 期.
4. 韩强, 潘英. 瑞典 ABB 活套自动控制系统介绍[J], 宝钢科技, 2005,31 (1):50-52
5. 刘立华, 阳春花. 活套控制技术及应用[J], 湖南冶金, 2005.4.
6. 刘小光. 液压活套在梅钢的应用研究[D], 沈阳东北大学, 2007
7. 赖新涛. 带钢轧制中活套的控制[M], 江西冶金, 2003.04.
8. 汪祥能, 丁修坤. 现代带钢连轧机控制[M], 沈阳: 东北大学出版社, 1996: 78—80.
9. ZONG Shengyue, TONG Chaonan, PENG Kaixiang. Intelligent control technology and application in the closed loop control for looper height in hot strip rolling system[J], Metallurgical Industry Automation, 2004, 28(2):22—25.
10. 金兹伯格 VB. 板带轧制工艺学[M], 北京: 冶金工业出版社, 1998, 7—10.
11. 王珩.1500mm 热连轧活套控制技术, 莱钢科技, 4.
12. 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002, 130—133.
13. FU Jian, YANG Weidong, LIU Tong, et al Polynomial approach algorithm in real time calculation of looper tension moment [J], Control Engineering of China, 2004,11(3):226-228.
14. 刘同锋, 穆至纯. 基于微分几何的带钢热连轧活套解耦控制 [J], 控制工程, 2007.
15. 张殿华,郑芳,王国栋;板带热连轧机活套高度和张力系统的解耦控制[J], 控制与决策, 2000.2
16. 费正峰, 陈俊, 陈志荣, 王健玉. 2050mm 热轧精轧活套附加主传动速度分析及改进 [J], 宝钢技术, 2011.6.
17. 何虎, 孙一庚.热连轧活套系统控制分析与比较, 北京科技大学学报, 2000.10.
18. 贾大鹏、张殿华、刘相华. 热连轧过程中活套辊与带钢_软接触_定位控制,轧钢, 2005.06.
19. 唐谋凤. 现代带钢热连轧机的自动化, 北京: 冶金工业出版社, 1998.
20. 丁修. 轧制过程自动化, 北京: 冶金工业出版社, 1980.
21. BYOUNGJA, SUNG HP, BAEKYK, etal. Tension control system for hot strip mills[C], Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Pusan: IEEE,

- 2001, 1452—1457.
22. 赵定期. 自动活套控制常见的故障处理[J]. 设备管理与维修, 2009.10
23. 刘元钢. 热连轧活套计算机控制系统的研究与设计[J], 山东科技大学, 2005
24. 王霞. 热连轧中精轧机组活套自动控制系统的研究与应用[D], 河北工业大学.
25. 石勇, 张进之, 王保罗, 赵厚信. 热连轧穿带过程的分析及预补偿控制的研究[J], 宝钢技术, 2001.06.
26. HE Hu, SUN Yikang. Looper system analysis and control methods study in hot rolling Processing [J], Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000, 5(22): 482-485.
27. Kazuya Asano. Kazuhiro Yamamoto. Takashi Kawase. Nobuaki Nomura. Hot strip mill tension-looper control based on decentralization and coordination, Control Engineering Practice, 2000, 8, 337-344.
28. 陈景浒. 传统热连轧生产技术的发展[J], 南方金属, 2002.02.
29. 童朝南, 李洪贺, 孙一康. 精轧机组主速度链及活套计算机控制系统[J], 北京科技大学学报, 1995.06 .
30. 唐狄, 郭强, 宋勇. 热连轧自动化系统的发展和技术进步[J], 钢铁, 2009.02.
31. 杨自厚. 自动控制原理[M], 北京: 冶金工业出版社, 1980: 83—87.
32. 刘玠, 孙一康. 带钢热连轧计算机控制[M], 北京: 机械工业出版社, 1997: 126—136.
33. 童朝南, 吴延坤, 刘磊明. 液压活套多变量系统的建模及积分变结构控制[J], 2008, 34
34. WANG Tingkuan, LI Shaoyang, WU Jiachang. Electric looper control system of hot strip mill [J], Electric Transmission, 2005, 35(1): 53-55.
35. 王廷溥, 齐克敏. 金属塑性加工学轧制理论与工艺[M], 北京: 冶金工业出版社, 1997, 135—142.
36. H. Aura, S. Nakagawa, S. Fukushima, J. Hasaki. Gauge and tension control system for hot strip finishing mill[J], IEEE Trans on Circuits and System, 1993, 463-468.
37. 王文天. 鞍钢集团热连轧厂 1780mm 精轧机活套控制功能分析[J], 冶金自动化, 2005, 7(12):292-294.
38. 余小勇. 热轧带钢活套起落自动控制系统的改进, 现代冶金, 2011.8
39. 碗里雄, 陈舒霞. 带钢热连轧机活套预套高控制系统的分析和运行[J], 电气传动, 1991, 1.
40. 王晓东, 陈伟、李树国, 王晓飞. 咬钢抛钢信号与活套起套落套的关系及改进措施, 北方钒钛, 2009.

致谢

本论文是在导师郑艳副教授悉心指导下完成的。在本文创作期间，郑艳副教授给予我无微不至的关怀和帮助，特别是严谨的治学态度和渊博的知识使我受益匪浅。在论文即将完成之际，首先向辛勤培养我的郑艳副教授表示衷心的感谢。

在模型和实际数据分析中，本人得到了企业指导老师崔伦凯的大力支持和耐心指导，得到了领导于洪喜以及同事马军伟、薛金成和冯树森的帮助和指导，在此深表感谢。本人还十分感谢东北大学信息科学与工程学院相关老师的关心帮助。

最后谨以此论文献给哺育我长大的父母，献给长期默默关心、爱护和支持我的爱人与朋友！