

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

热轧带钢层流冷却控制模型研究

作 者 姓 名：周剑飞

指 导 教 师：高宪文 教授 东北大学信息科学与工程学院

副导师：于洪喜 高级工程师 首钢迁钢公司

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：2011 年 12 月 论文答辩日期：2011 年 12 月

学位授予日期：2012 年 1 月 答辩委员会主席：井元伟

评 阅 人：王明顺 李鸿春

东 北 大 学

2011 年 12 月

A Thesis in Control Engineering



Research of Control Models for Hot Strip Mill Laminar Cooling System

By Zhou Jianfei

Supervisor: Associate Professor Gao Xianwen

Senior Engineer Yu Hong xi

**Northeastern University
December, 2011**

独创性声明

本人声明，所呈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：) 刘刘

日期：2011.12.26

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：) 刘刘

签字日期：2011.12.26

导师签名：刘刘

签字日期：2011.12.26

热轧带钢层流冷却控制模型研究

摘 要

层流冷却作为控制轧制和控制冷却技术的一个主要的组成部分,直接影响钢板的组织和性能,所以层流冷却过程成为热轧厂生产过程中非常重要的环节。冷却温度控制精度是保证钢板质量和板型良好的关键因素。本文以首钢迁钢 2250mm 热轧层流冷却系统为背景,对如何提高层流冷却过程的冷却温度的预报精度进行了较深入系统的研究。

首先介绍了首钢层流冷却控制模型中几个重要模块的功能。预计算模块其预测由预设模型来完成,即利用精轧机组提供板带的信息数据,应用预设模型对带钢头部各控制量进行预计算,将计算值通过报文形式发送到一级基础自动化系统,由一级自动化系统执行,从而可有效地消除整个控冷系统动作滞后的影响。实时控制模块的主要任务即为监视层冷的实际状态,基于板坯的尺寸、当前的传热系数以及运行的环境等计算阀门的设置以达到目标的卷取温度。自适应控制模块是根据当前带钢卷取温度的实测值和计算值之间的偏差信号与可调系统的过程输出产生反馈作用,以修改控制器的参数,促使可调系统与设定模型相一致,使误差趋向零的控制。

然后通过对系统的分析,提出问题:温度控制死区设置范围不当造成的温度的超调现象;低温卷取管线钢的卷取温度无法得到模型的自动控制;保证卷取温度控制精度的反馈控制、自学习控制功能未能投入使用,预计算偏差过大等。

再次通过配置相应的设备,设置故障阀,模型根据低温高温计反馈的实测卷取温度进行反馈控制,从而保证了模型反馈控制功能的投入使用,解决了实时计算反馈控制无法投入使用的问题;也是通过故障阀设定,从而保证其参与自学习的带钢段其实测得中间高温计的温度和卷取温度的平均值大于或等于 100℃,从而保证此块带钢的数据能成功写入到自学习文件中,以用于修正后期所轧制的低温管线钢,从而保证了自学习功能的成功投入使用。

最后通过对层流冷却系统控制功能的优化,很好的解决了本文所提出的问题,并且通过现场应用实现了预定目标。

关键词: 热轧带钢; 层流冷却; 控制模型; 补偿系数; 过程控制

Research of Control Models for Hot Strip Mill Laminar Cooling System

Abstract

Laminar cooling is a part of the technique for the control of rolling and cooling, it effects the tissue and properties of plate directly. So laminar cooling process plays an important role in hot plate production. The control accuracy of the coiling temperature of the hot plate laminar cooling system is the plate mill to guarantee the better quality and flatness of plate. This paper takes a laminar cooling system of hot plate mill for ShouGang QianGang 2250mm, and has a deep study for how to raise the accuracy of cooling temperature of the hot rolled plate.

First, ShouGang laminar cooling control model in several important modules is introduced. The pre-set module is completed by the pre-computed model, that is to say, the strip finishing mill provides information and data, then application of pre-set model calculates control of the strip head, the value of message is sent to basic automation system, from an automated system to perform, which can effectively eliminate the entire cooling system control actions lag effect. The main task of real-time control module is to monitor the actual state of the cold layer, based on the size of slab, the heat transfer coefficient and the current operating environment are calculated to achieve the target set of valves coiling temperature. Adaptive control module based on the current strip coiling temperature measured and calculated values of the deviation between the signal and process output adjustable system influent the feedback, then the parameters of the controller is modified, so that the control error tends to zero.

Second, through the systematic analysis, raised issues: temperature control dead zone caused by improper temperature settings range is overshoot, the coiling temperature of pipeline steel cannot be automatically controlled, coiling temperature feedback control and self-learning control cannot be inputted, the pre-computed deviation is too large.

Third, by configuring the appropriate equipment and setting valve failure, according to the pyrometer measured temperature, the model automatically feedback controls, thus ensuring the feedback control is input to the model used to solve a real-time feedback control, which cannot be put into use in the calculation the problem, in order to ensure participation from the study of strip segments, the middle model and coiling pyrometer temperature greater than or equal to the average temperature of 100 degrees, so that ensuring the data block strip is successfully written to the self-study documents, for the late correction of pipeline steel rolling, thus ensuring the success of self-learning function is used.

Finally, the optimization of laminar flow cooling system control functions, which solves the problem in this paper and through field application, achieves the target.

Key words: hot-rolled strip steel, laminar cooling, control model, compensation coefficients, process control

目 录

独创性声明..... I

摘 要..... II

Abstract..... III

第1章 绪论..... 1

1.1 课题背景 1

1.2 控制冷却的原理 2

1.3 热轧带钢生产控制冷却设备的发展 3

1.3.1 国外控制冷却设备的发展 3

1.3.2 国内控制冷却设备的发展 4

1.3.3 几种冷却设备的比较 4

1.3.4 三种冷却设备的优缺点 7

1.4 本文主要工作 8

第2章 热轧层流冷却工艺..... 11

2.1 首钢迁钢 2250mm 热轧带钢层流冷却设备 11

2.2 控制冷却工艺 12

2.2.1 加速冷却技术的发展 12

2.2.2 直接淬火技术的发展 13

2.2.超快冷却技术的发展 14

2.3 热轧带钢层流冷却过程控制技术发展 15

2.3.1 数学模型和算法的发展 15

2.3.2 层流冷却控制系统的发展 16

2.3.3 冷却均匀性分析 18

2.4 本章小结 19

第3章 层流冷却控制模型剖析..... 21

3.1 热轧带钢层流冷却数学控制模型 21

3.1.1 经典传热理论 21

3.1.2 傅立叶偏微分导热方程 21

3.1.3 牛顿冷却对流换热方程 22

3.1.4 斯蒂芬-波尔茨曼辐射换热方程 23

3.2 西门子热轧带钢层流冷却数学控制模型剖析 24

3.2.1 层流冷却与其他功能的关系 24

3.2.2 层流冷却模型的控制简介 26

3.2.3 层流冷却模型的进程介绍 26

3.2.4 预计算模型 28

3.2.5 实时控制模型 29

3.2.6 自适应模型 32

3.2.7 层流冷却控制策略 33

3.3 现有模型存在的问题 35

3.4 热轧带钢卷取温度控制的难点 36

3.5 本章小结 37

第4章 层流冷却模型修正 39

4.1 优化模型 39

4.1.1 增加设备配置 39

4.1.2 配置模型参数 40

4.1.3 反馈控制和自学习投入 40

4.1.4 优化低温卷取管线钢自学习参数 44

4.2 优化水量配置 45

4.3 优化参与自适应的带钢的位置 46

4.4 本章小结 47

第5章 生产应用实现 49

5.1 层流冷却 HMI 画面的介绍： 49

5.1.1 层流冷却设定画面各按钮作用的介绍： 49

5.1.2 层流冷却设定画面各模块功能的介绍 50

5.2 应用效果 53

5.4 模型优化前后效果对比 54

第6章 总结和展望 55

参考文献.....	56
致谢.....	61

第1章 绪论

1.1 课题背景

近年来,随着社会发展与科学技术的进步,低合金高强度、高韧性并具有良好的焊接性能的钢材已在民用建筑、桥梁建造、船舶制造、汽车制造、机车和客车制造、农机制造、重型机械制造、矿山机械制造、干线管道以及海上采油平台的建造等方面得到了广泛的应用。各行各业对热轧带钢质量、品种、性能的要求越来越高。卷取温度控制精度作为一种衡量板带材的重要质量指标,成为国内外冶金行业普遍关注的焦点。

在热轧带钢的输出辊道上对带钢进行控制冷却的目的就是要获得尽可能细的晶粒和满意的微观组织结构,从而提高钢材的综合性能。对热轧带钢,其性能不仅决定于热轧工艺,更决定于轧后的冷却制度。水被称为“钢的最有效的合金化添加剂”,这既说明了廉价水的作用,也概括了在线控制冷却的原则^[1]。

卷取温度对带钢的金相组织影响很大,是决定成品带钢加工性能、力学性能、物理性能的重要工艺参数之一。卷取温度能否控制在要求范围之内,则主要取决于对精轧机后带钢冷却系统的控制。当实际卷取温度超出要求范围时,带钢的组织性能就会变差,所以保证热轧带钢卷取温度保持在规定的目标温度范围内,提高卷取温度控制精度一直是热轧领域关注的重要问题^[2-3]。

热轧带钢层流冷却控制系统的目的,是通过对层流冷却区域喷水水阀的动态调节,将不同工况(温度、厚度、速度)的带钢从较高的终轧温度迅速冷却到所要求的卷取温度,使带钢获得良好的组织性能和力学性能,因此控制带钢最终的卷取温度是层流冷却控制的主要内容^[4-6]。

为了提高板带卷取温度精度及同板温度均匀性,有必要对层流冷却系统的数学模型及控制策略进行研究及分析,并对其进行优化,从而提高带钢的卷取温度控制精度,增强产品的市场竞争力^[7]。

带钢的卷取温度控制精度直接影响其组织性能和力学性能,是保证板带质量和板形良好的关键因素。因此,对带钢层流冷却系统的分析和研究具有深远的现

实意义。

本文将以前钢迁钢公司热轧带钢层流冷却控制系统为背景,在硬件环境确定的前提下,从层流冷却控制策略、数学模型两方面入手,通过对层流冷却控制功能中的预设模型、前馈控制、反馈控制、自适应模型进行分析,从而优化二级数学控制模型中的相应参数,如优化控制温度高温计在程序中的位置,优化系统配给水量和实际给水量的误差,达到提高卷取温度控制精度的目的。

1.2 控制冷却的原理

控制冷却是利用轧材余热进行热处理的技术,通过改变热轧钢材轧后的冷却条件来合理控制钢材的相变过程,从而控制相变产物的组织状态和组成及碳化物析出行为等来改善钢材的组织 and 性能。进行在线控制冷却,在保证板材要求的板形尺寸规格的同时,控制和提高板材的综合力学性能。它能防止奥氏体晶粒长大,阻止或减少网状碳化物的析出,保持其碳化物固溶状态,达到固溶强化的目的。同时减少珠光体球团尺寸,改善珠光体形貌和片层间距,从而改善钢板性能。钢从奥氏体转变为铁素体或珠光体型组织时是以扩散方式进行的;钢从奥氏体转变为马氏体或贝氏体组织时,则是以切变方式进行的。因此,就相变机理而言,加速冷却工艺主要是利用扩散相变机理和细化晶粒来改善钢材的性能;而直接淬火工艺则主要是利用切变机理和提高淬透性来改善钢材的性能^[8-9]。

考虑到大多数带钢的质量,采用连续冷却,相变的开始温度越低,铁素体的形核率就会越高。冷却速度越快,形核率越高,晶粒度就越小,再加上珠光体层间距减小,带钢的强度增大。反之,冷却速度低,形核率就小,造成晶粒度大,则带钢屈服强度相对较低。在冷却过程中,奥氏体发生分解相变。在不同的冷速下,可形成铁素体、珠光体、贝氏体、马氏体或上述组织的混合物。因此根据产品的不同性能要求,可通过控冷来得到满意的产品。

目前热轧带钢冷却曲线有以下几种,如图 1.1 所示。在生产中采用哪种冷却曲线处理热轧带钢,要根据对产品组织和性能的要求、产品的厚度以及产品的成分等来确定。后三种冷却曲线与(a)所示的冷却曲线的最大不同点就是要对带钢的冷却过程实行控制,使产品的内在质量达到一个新的水平。

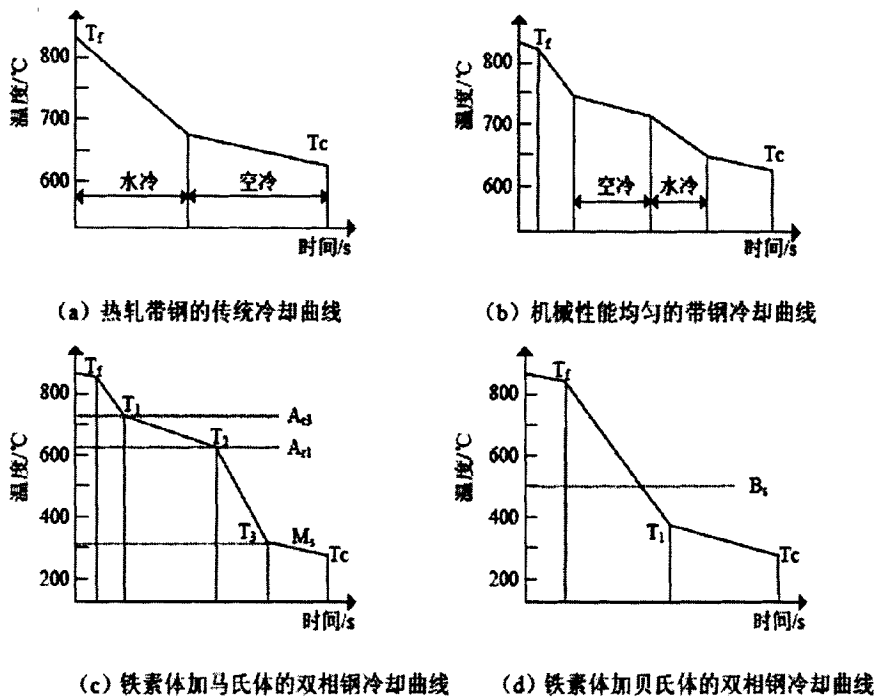


图 1.1 带钢轧后冷却曲线

Fig1.1 Cooling curves after strip rolled

1.3 热轧带钢生产控制冷却设备的发展

1.3.1 国外控制冷却设备的发展

国外控制冷却设备发展很早, 20世纪60年代第一套层流冷却系统应用于英国布林斯奥思432mm窄带钢热轧机, 以后几乎每套热带钢轧机输出辊道上都装有冷却系统, 其应用仅限于厚度为16mm以下的板带。

20世纪80年代初, 日本钢管(NKK)在福山制铁所厚板厂安装了世界上第一套控制冷却装置, 即: OLAC(On-line Accelerated Cooling)装置, 随后有关热轧双相钢的控制轧制和控制冷却的基本理论研究, 开展得非常迅速。新日铁在低于200℃的超低热矫温度下, 稳定地生产出双相钢。

日本和欧洲各大钢铁公司相继开发控制冷却装置及技术, 这些冷却设备的冷却方式主要是层流冷却和水幕冷却方式。20世纪90年代, 为了解决冷却设备存在的问题, 日本再次对冷却设备进行改造。

1.3.2 国内控制冷却设备的发展

70年代,国内开始应用热轧带钢的控制冷却技术。武钢引进的1700mm热带钢轧机采用上部柱状层流冷却和下部喷水冷却的控冷技术。80年代鞍钢半连续轧钢厂采用了水幕冷却系统。宝钢的2050mm和1580mm热带钢轧机采用的均为层流冷却系统。近年来,各冶金工厂都未建新的控冷设备,而是把着眼点放在现有系统的更新和设备的完善配套上。

国内典型的热轧带钢生产线有武钢1700mm, 宝钢2050mm, 攀钢1450mm, 太钢1549mm, 梅钢1422mm, 鞍钢1780mm等。

1.3.3 几种冷却设备的比较

冷却装置包括许多种喷流形式,相应地有不同的名称,如高压力喷射冷却、柱状层流冷却(即集管层流)、水幕层流冷却、雾化冷却、喷淋冷却、板湍流冷却、水-气喷雾式冷却等。

下面主要介绍常用的层流冷却、水幕冷却以及水-气喷雾式冷却装置。

(1) 层流冷却设备

层流冷却装置主要由上集管、下集管、侧喷、控制阀、供水系统及检测仪表和控制系统组成。上部层流为大流量的低压水,下部喷射为高压水,侧喷为中压水。侧喷的主要作用是把钢表面的冷却水吹走,以提高冷却效果。

层流冷却装置上虹吸管的数量很多,排列又很密集,带钢表面上的水层时刻可以更新,且随着带钢的前进,由侧向喷出的中压水吹动水膜,使其不断更新,从而带走大量的热量来达到冷却的目的。层流冷却装置设备多、控制复杂,但精度较高。图1.2为常用的层流冷却设备布置简图。

(2) 水幕冷却设备

水幕冷却形式保持了柱状层流冷却的优点,实现了横向冷却均匀,冷却能力大大提高,从而缩短了冷却区长度,而且设备和控制都比较简单。因其喷水装置的出水口为横向条幕状,喷出的水呈幕帘状,故称之为水幕冷却^[10]。

水幕设备如图1.3所示,水流从一狭长条缝状流道流出,由于流体的收缩和表面张力作用,水幕两端形成哑铃,哑铃形状的冷却水会造成钢板边部的过冷。

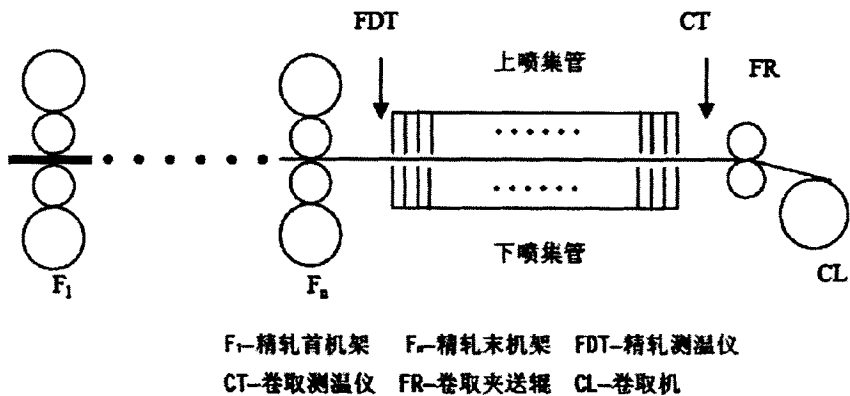


图1.2 层流冷却设备布置简图

Fig1.2 Arrangement of laminar cooling installations

解决的措施有：出水口两端附加引流装置；流水道截面按水流速度变化规律而变化；流水道入口加分流隔板，使水流流量分布和速度分布在出口处保持一致，形成等宽板状水流。

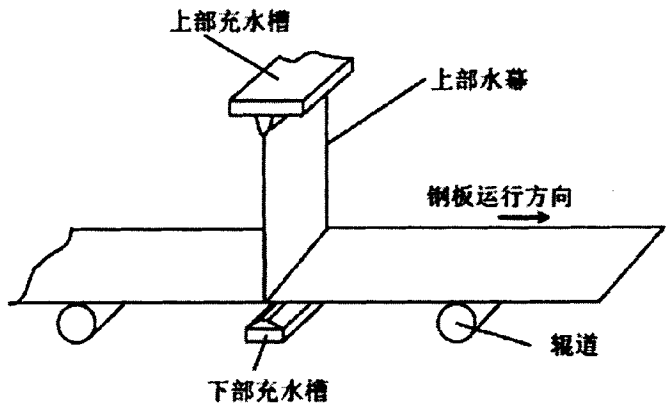


图1.3 水幕装置示意图

Fig1.3 Sketch map of water curtain equipment

随着水幕冷却技术的发展，又出现可调水幕（即流量和水流宽度可根据生产工艺要求而变化），目前主要有两种调节形式：一是出口缝隙保持不变，用改变水的压力使流量变化。但为了保持层流，这种方式的调节范围被限制得很窄。另一种是保持水头不变，而改变出水口的开口度和缝隙宽度，这样利于形成稳定的层流。

（3）水-气喷雾式

水-气喷雾式冷却装置是20世纪80年代法国BERTIN公司开发研制的专利技术，又称ADCO(Adjustable Cooling)快冷装置，使用的冷却介质为汽水，图1.4为

水-汽加速冷却装置。

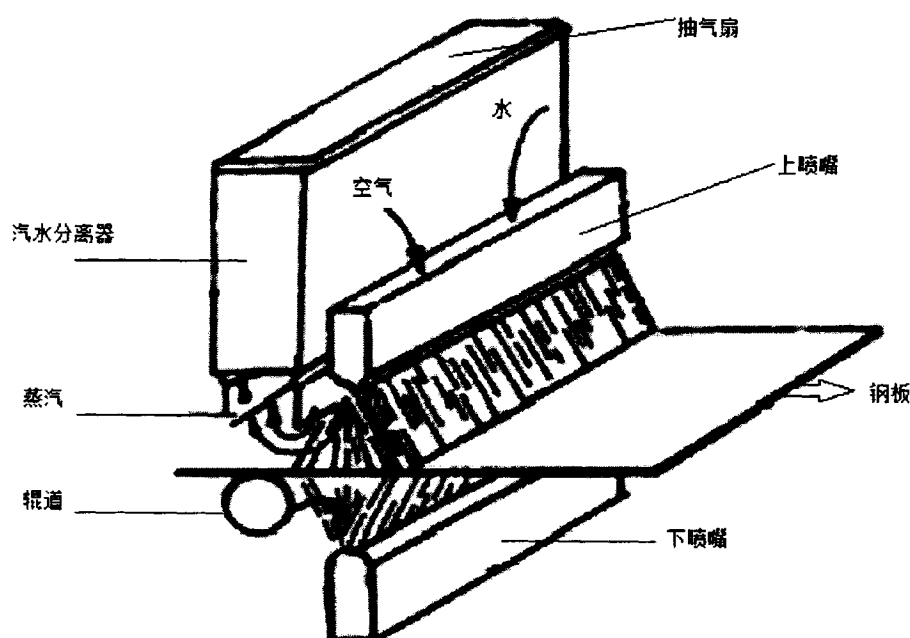


图1.4 ADCO 上、下喷嘴示意图

Fig1.4 Sketch map of ADCO up-down nozzles

目前世界上共有四套ADCO冷却装置，分别建在法国GTS厂(1989年)，韩国浦项POSCO2#厚板厂(1989年)，美国ESCO公司(1995年5月)和酒钢2800mm中板厂(1995年底)。

水-气喷雾冷却系统是以模块式结构设计的，一般由4~7个组件组成，每个组件包括4~5个喷嘴，上、下对称。其喷嘴是由连续的线性狭缝组成，中间的一条用于喷水，两侧的用于喷射空气。喷嘴喷出恒定的低压水和空气，空气将水雾化许多小液滴，将它们均匀地喷射到钢表面上。水流量在很大范围内可调节。喷水的狭缝有足够宽(6mm)，可避免出现阻塞问题。每个组件还配有气水分离器和蒸汽收集装置，同时在边部设有遮蔽系统。

1.3.4 三种冷却设备的优缺点

在西德克虏伯公司波鸿厂的宽带钢热轧机上，对输出辊道上冷却热带钢的层流、水幕和喷射冷却系统进行了对比研究，如图 1.5 所示。

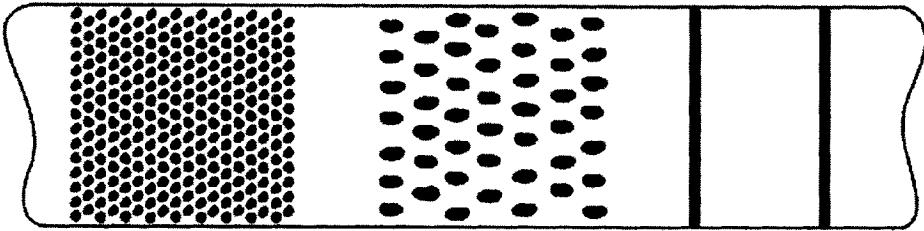


图1.5 三种喷流形式的冲击区分布示意图

Fig1.5 Sketch map of three kinds of impingement zone

得到的结论是：水幕冷却系统具有最高的“比冷却特性”，但缺点是对带钢上、下表面和整个冷却区长度冷却不够均匀；喷射系统的“比冷却特性”最低，且带钢上、下表面的冷却差别很显著；而层流冷却系统的“比冷却特性”只比水幕稍低，但它能对带钢上、下表面和整个冷却区长度进行均匀冷却。川崎钢铁公司水岛人带钢厂，为改善质量和产量，对控冷系统的引进和水冷设备的改善进行了研究，通过实验室和现场的试验发现层流冷却非常有效。

图 1.6 为水幕冷却、层流冷却、喷射冷却以及空冷在两个不同温度点，随带钢厚度变化冷却速度的变化曲线。

目前世界上采用的控制冷却设备大体上分为层流冷却系统和水幕冷却系统，人们的注意力主要放在冷却设备的改造和自动化控制系统的配套上。

为了满足板带轧后的快速冷却的要求，不论什么形式的冷却装置，都应具备以下特点：

- (1) 控制冷却的范围要宽，以满足不同钢种、不同厚度板带的不同冷却速度要求；
- (2) 具有板带厚度、宽度和长度方向上温度控制措施，确保各方向温度均匀；
- (3) 高的冷却效率和冷却能力。即对一定规格的板带，能用最少的冷却水达到目标冷却速度。也就是，应散失的热量与喷水强度（单位面积上，单位时间水流量）的比值最佳，从而节约冷却水和缩短输出辊道长度；
- (4) 具有对控制信号快速响应的冷却系统，以便在板带进入冷却区之前调整水量，并能在线进行控制阀门的改变和调节，提高阀门的响应时间；
- (5) 在大生产中，在同样轧制的条件下，冷却装置必须保证大量重复操作

中具有同样的冷却效果，确保冷却条件的稳定；

- (6) 冷却装置内部和外部结构，应便于维护、操作、清除污垢；
- (7) 在满足正常冷却条件下节省能源。

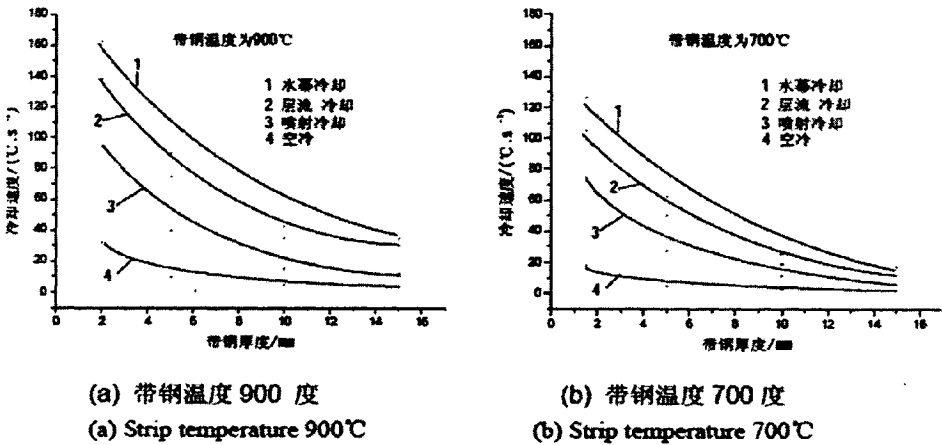


图1.6 各种冷却状态下带钢冷却速度随带钢厚度变化曲线
Fig1.6 Strip cooling velocity curves under cooling conditions

1.4 本文主要工作

本文将以首钢迁钢 2250mm 热轧带钢层流冷却控制系统为背景，分析层流冷却控制模型，并通过研究模型参数的意义，通过多次对比，找出影响卷取温度控制精度的重要因子，通过不断优化、改善，从而提高卷取温度控制精度。

以西门子层流冷却控制模型为研究对象，以层流冷却控制策略及数学模型为研究内容，通过对层流冷却控制功能中的预设定模型、前馈控制、反馈控制、自适应模型进行分析，并探讨提高卷取温度控制精度的预设定值及前馈值。具体内容如下：

首先介绍了首钢层流冷却控制模型中几个重要模块的功能。预计算模块其预测由预设定模型来完成，即利用精轧机组提供板带的信息数据，应用预设定模型对带钢头部各控制量进行预计算，将计算值通过报文形式发送到一级基础自动化系统，由一级自动化系统执行，从而可有效地消除整个控冷系统动作滞后的影响。实时控制模块的主要任务即为监视层冷的实际状态，基于板坯的尺寸，当前的传热系数以及运行的环境等计算阀门的设置以达到目标的卷取温度。自适应控制模块是根据当前带钢卷取温度的实测值和计算值之间的偏差信号与可调系统的过

程输出产生反馈作用，以修改控制器的参数,促使可调系统与设定模型相一致，使误差趋向零的控制。

然后通过对系统的分析，提出问题：温度控制死区设置范围不当造成的温度的超调现象。低温卷取管线钢的卷取温度无法得到模型的自动控制，保证卷取温度控制精度的反馈控制、自学习控制功能未能投入使用，预计算偏差过大。

再次通过配置相应的设备，设置故障阀，模型根据低温高温计反馈的实测卷取温度进行反馈控制，从而保证了模型反馈控制功能的投入使用，解决了时时计算反馈控制无法投入使用的问题；也是通过故障阀设定，从而保证其参与自学习的带钢段其实测得中间高温计的温度和卷取温度的平均值大于或等于 100°C ，从而保证此块带钢的数据能成功写入到自学习文件中，以用于修正后期所轧制的低温管线钢，从而保证了自学习功能的成功投入使用。

最后通过对层流冷却系统控制功能的优化，很好的解决了本文所提出的问题，并且通过现场应用实现了预定目标。

第2章 热轧层流冷却控制工艺

2.1 首钢迁钢 2250mm 热轧带钢层流冷却设备

带钢冷却系统的目的将离开精轧的高温带钢冷却到卷取温度，冷却部分由一系列不同冷却效果的冷却区组成。

层流冷却装置主要由上集管、下集管、侧喷、控制阀、供水系统及检测仪表和控制系统组成。上部层流为大流量的低压水，下部喷射为高压水，侧喷为中压水。侧喷的主要作用是把钢表面的冷却水吹走，以提高冷却效果。

层流冷却装置上虹吸管的数量很多，排列又很密集，带钢表面上的水层时刻可以更新，且随着带钢的前进，由侧向喷出的中压水吹动水膜，使其不断更新，从而带走大量的热量来达到冷却的目的。层流冷却装置设备多、控制复杂，但精度较高。

首钢迁钢 2250mm 层流冷却工艺布置如图 2.1 所示。其层流冷却区包括精调区和修正区，应用于带钢上下表面的冷却控制。每个修正区的水量是精调区的一半，每个区装有独立供水阀，精调区的水阀数量为 144 个，修正区的水阀数量为 32 个。每个阀的实际状态都可被显示出来。所有的操作在卷取区操作台上通过对屏幕或键盘的操作来实现。

输出辊道上方 4 个精调区或 8 个修正区(每个区包含 1 根集管)组成一组，可以翻转。下冷却区以同样方法分组(但每个下冷却区，精调区包括 3 根集管，修正区包括 2 根集管)，精调区分为 18 组，修正区分为 2 组。

每个精调区包括上、下部集管各 4 根，总共 144 组集管。每个修正区包括上、下部集管各 8 根，总共 32 组集管。

在层流冷却区的前段部分，每个冷却段的后边有 1 个侧喷单元，最后一个冷却段的后面有 2 个侧喷单元，整个层流冷却区共有 21 组侧喷单元。

在层流冷却的前边以及每个冷却段的后边都设有侧喷单元，用来把带钢表面的残余水冲走。

带钢冷却水的提供利用位于输出辊道带钢上下的喷嘴，每个冷却区上下表面的阀能单独交换相互独立，位于各组之间的是侧喷，它沿轧制方向的将冷却水流吹走，这样带钢在整个宽度方向获得确定的和一致的冷却。控制阀布置在冷却水

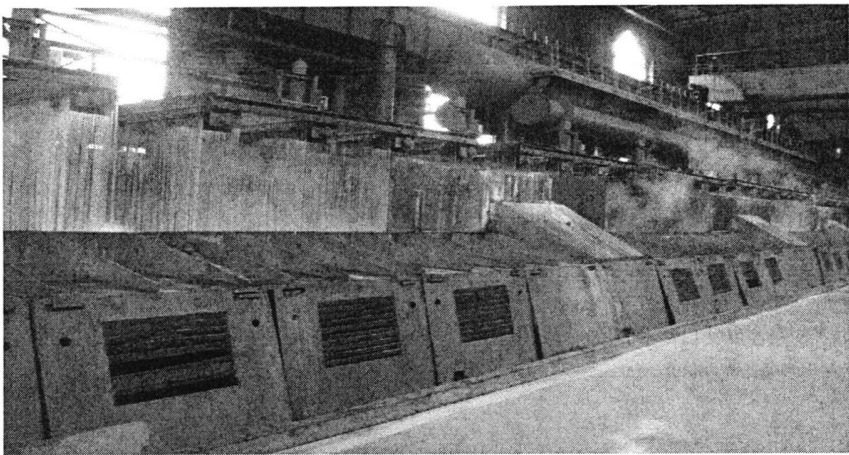


图2.1 2250mm层流冷却现场设备布置图

Fig2.1 Arrangement of 2250mm laminar cooling installations on-set

箱分配器管路和各自的冷却区之间的连接管路上。在控制阀后面，冷却水将再分配到下部冷却集管。每一个冷却区安装一个控制阀，用于激活和取消。

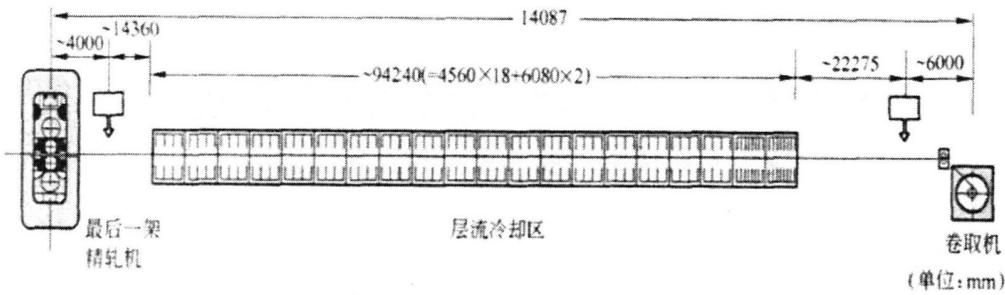


图2.2 2250mm层流冷却设备布置简图

Fig2.2 Arrangement of 2250mm laminar cooling installations

2.2 控制冷却工艺

2.2.1 加速冷却技术的发展

加速冷却是指将热轧后的钢材立即进行水冷，通过控制相变过程，得到期望的组织来提高钢材综合力学性能的控制冷却技术。从改变组织方面来讲，通过轧后加速冷却技术的应用可以获得尽可能细化的铁素体和微细分散的贝氏体，以提高钢的强度和改善韧性。加速冷却已成为目前生产船板、管线钢板和其它低合金高强度钢、低脆变温度和良好焊接性能钢板必不可少的加工工艺。

1985年8月在美国匹兹堡举行的首届关于钢材加速冷却的国际会议上证实了加速冷却是一种可行的工艺。

在制定加速冷却工艺时,一般主要考虑以下三个工艺参数:开冷温度、冷却速度和终冷温度。

开冷温度应高于钢的奥氏体开始转变温度,并尽量接近终轧温度,以防止奥氏体的再结晶和奥氏体长大;而冷却速度对抗拉强度和脆性转化温度有明显影响,冷却速度增加抗拉强度提高,当冷却速度大于 $15^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,脆性转化温度提高,韧性恶化,对Si-Mn钢、含Nb、V低合金钢来说,最佳的冷却速度范围为 $10^{\circ}\text{C}/\text{s} \sim 15^{\circ}\text{C}/\text{s}$,所得到的分散贝氏体不会恶化脆性转化温度,还能提高强度。因此冷却速度的选择必须考虑这两方面因素,在进行工艺制定时,冷却速度一般是随板厚的增大而减少;终冷温度应低于材料的相变终了温度,通常控制在 500°C 以上。

控制冷却参数的选择要依据钢板厚度、材质和要求的组织及工艺性能来确定,同时还要考虑到轧制设备具体条件。一般加速冷却的开冷温度为 $\text{Ar}_3+30^{\circ}\text{C}$,终冷温度为 $500^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$,适宜的冷却速度为 $5^{\circ}\text{C}/\text{s} \sim 15^{\circ}\text{C}/\text{s}$,加速冷却工艺常用于处理抗拉强度 600MPa 以下的钢材,它可以取代离线的正火工序。

2.2.2 直接淬火技术的发展

直接淬火是加速冷却基础上发展起来的又一冷却技术,它较加速冷却水量密度高而且冷却温降区域宽。它是相对于离线再加热淬火而言,对轧制之后的热板带立即进行迅速冷却,在轧制线上使板带生成淬火组织,是 600MPa 以上高强度钢板的新生产工艺。可以节省工序;提高淬透性,减少能够得到同一强度的合金元素含量;同时可降低碳当量以提高焊接性能。

当控制冷却后钢的组织为马氏体或贝氏体时,这种控制冷却称为直接淬火,简称为DQ;如果直接淬火后,靠钢材自身热量进行回火,称为直接淬火自回火工艺,简称为QST;如果直接淬火后,再将钢材加热回火,则称为直接淬火回火工艺,简称为DQ+T。

直接淬火与再加热淬火钢相比,直接淬火钢由于省去再加热工序,降低了成本,此外直接淬火钢的性能也优于再加热淬火钢。

直接淬火,主要也是考虑开冷温度、终冷温度和冷却速度这三个工艺参数。开冷温度一般为 $\text{Ar}_3+50^{\circ}\text{C}$,终冷温度低 400°C 或 200°C ,冷却速度大于 $15^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。直

接淬火装置可以安置在加速冷却的冷却区后（如日本水岛厂），也可以平行地安置在冷却区侧旁。直接淬火由于其经济性和有利于性能的提高，成为今后的发展方向。

2.2.超快冷却技术的发展

随着用户对钢材内部质量要求越来越高，相继开发出一批高附加值的新产品，如超级钢（SS, super steel）、双相钢（DP, dual phase）、相变诱导塑性钢（TRIP, transformation induce plasticity）以及铁素体区热轧无间隙原子钢（IF, interstitial free）等，这些新钢种对轧线上的加速冷却系统提出了新的、更为严格的要求。

为了满足这些要求，比利时的 CRM 研究所开发了一种布置在轧线上的超快速冷却装置(UFC, ultra fast cooling system)。超快速冷却的要点是：减小每个出水口的孔径，加密出水口，增加水的压力，保证小流量的水流也有足够的能力和冲击力，能够大面积地击破气膜，这样，在单位时间内有更多的新水直接作用于钢板的表面，大幅度提高换热效率，实现超快速冷却。UFC 装置的特点为：

- (1) 压力为 0.3MPa~1.0MPa 的供水系统；
- (2) 由 5~10 个喷水枕组成的喷水枕组，每个喷水枕上布满密集的出水口；
- (3) UFC 装置入口和出口处设有挡水辊，以把冷却水隔挡在指定的区域内；
- (4) 为有效击破汽膜，出水口距轧件较近，一般为 500mm~600mm；
- (5) 为防止轧件翘头撞坏喷水枕，在 UFC 的入口设有保护装置。

图 2.3 为布置在轧线上的 UFC 装置。

UFC 在轧线上的位置，根据用途不同，UFC 可以布置在精轧机和层冷之间、卷取机和层冷之间、保温辊道和精轧机之间或者保温辊道和粗轧机之间。

目前 UFC 已经在热轧带钢生产线得到应用，有的应用在薄板坯连铸连轧(CSP)短流程生产线，有的应用在传统流程(CT)生产线。

利用超快冷却技术可以缩短冷却区长度，生产高强度钢材，开发新的钢种，由于少用合金元素故降低了生产成本。

文献中对位于层流冷却与卷取机间的超快速冷却进行了工业实验和实验室实验，说明后期超快速冷却可以生产出高强度低合金钢，同时，含硅钢和加钛钢可获得满意的机械性能。通过层流冷却和超快速冷却的结合，对同样化学成分的

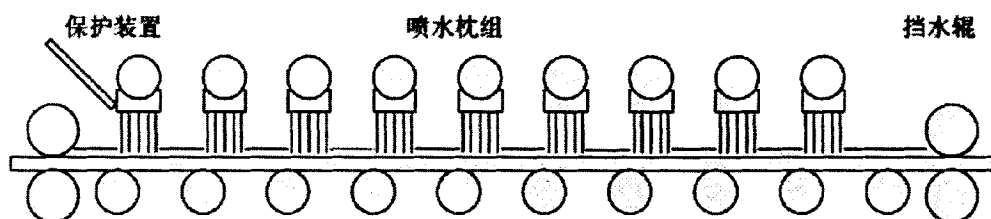


图2.3 布置在轧线上的UFC 装置

Fig2.3 UFC system arranged on rolling line

钢种，可以获得大范围的强度（以含硅钢为例，其强度可以变化范围为 500MPa 到 850MPa），能规避针状铁素体的出现，增加延展性。

2.3 热轧带钢层流冷却过程控制技术发展

热轧带钢层流冷却过程控制非常复杂，它涉及温度、速度、厚度、流量、轧件内部的组织结构以及相变等多方面的问题。从控制角度来看，具有典型的多变量、非线性、强耦合特征，因此热轧带钢卷取温度控制的发展经过了一个比较长的时间。随着计算机控制技术全面渗透到层流冷却控制过程后，其控制发生了质的飞跃。

2.3.1 数学模型和算法的发展

国内引进以及使用的比较成熟层流冷却数学模型主要有指数模型、统计理论模型、差分模型和神经网络模型。

卷取温度控制模型主要依赖经验模型和模型的自适应功能进行修正，虽然效果较好，但也不能否认，生产中卷取温度控制超差的现象也普遍存在，一般认为这种超差主要是由于水冷区对流换热系数的计算不准确造成的，而带钢冷却过程的热交换是非常复杂的非线性过程，并且带钢在冷却过程中要发生组织转变，这些都难以用数学模型精确表达^[11-13]。

目前国内外都认为数学模型和神经网络相结合来提高卷取温度的控制精度。具体的结合形式有两种，一是以数学模型为主，神经网络为辅，利用神经网络来修正层流冷却热传导系数，从而提高卷取温度控制精度；二是以数学模型为辅，神经网络为主，通过实测值和数学模型的计算结果作为网络的输入参数来预报卷取温度。神经网络数学模型综合了数学模型的工艺特征和神经网络的非线性特

点，模型简单，容易理解，对对流换热系数采取“黑箱”计算，从而回避了复杂的水冷热交换系数的理论计算^[14-17]。

2.3.2 层流冷却控制系统的发展

为满足冷却工艺要求，需要对各冷却组的层流冷却水实行频繁的开关控制，因此要求控制阀具有较高的时间响应性和使用可靠性，其工作状态的好坏、稳定与否都将直接影响卷取温度的控制精度乃至最终的产品质量。

MDS 公司设计了一种无阀控制系统，这种系统并不是不设控制阀。与有阀控制相比，系统在每一冷却组内增加了挡板装置，控制阀仅负责各集管内水流的开闭控制。各控制组上部冷却水的开闭控制最终由挡板完成，即水流是否作用在带钢上由挡板决定。这种控制系统响应速度快、控制精度高、控制效果稳定且冷却质量好、使用可靠性高且成本低。

板带层流冷却过程的控制方法从以冷却模型为基础的静态开环控制发展到以冷却模型为基础的使用先进控制技术实现的动态闭环控制。最初的开环控制的精度完全由冷却模型决定，而冷却模型又依靠边界条件的严格约束以及现场或者实验室的大量实验，模型中的参数由实际装置状况给定。在冷却过程中，带钢任意一点从精轧末机架出口穿越层流冷却区运行到卷取测温仪时，该点及其后相当长一段带钢的受控冷却过程实际已经结束，而在冷却过程中又不可能对该点状况进行实际跟踪测量和适时修正调节量，并且由于随机扰动和不确定因素的影响，使模型参数具有复杂和不确定性。因此，这种开环控制通过优化预设模型难于提高带钢卷取温度控制精度。图 2.4 为静态开环控制结构框图。



图2.4 层流冷却开环控制结构框图

Fig2.4 Structure of laminar cooling open loop control system

下面以美国印第安纳港 2134mm 热带钢厂层流冷却控制系统为例，说明闭环控制系统的结构。

美国印第安纳港 2134mm 热带钢厂使用的层流冷却装置，采用了模型基准控制技术，具有准确预测卷取温度的特点。模型基准控制是用某种在线过程模型来预测，用预测值与后来的实测值或分析值之差修正模型参数。系统给基本前馈控

制模型增加了两个重要特性，即预测和跟踪，一旦前馈模型设定了目前还在精轧出口测温仪下的带钢区段的喷组数，立刻进行计算，预报该段带钢预期的卷取温度，预测值与目标值之差不超过半个喷组^[18-20]。

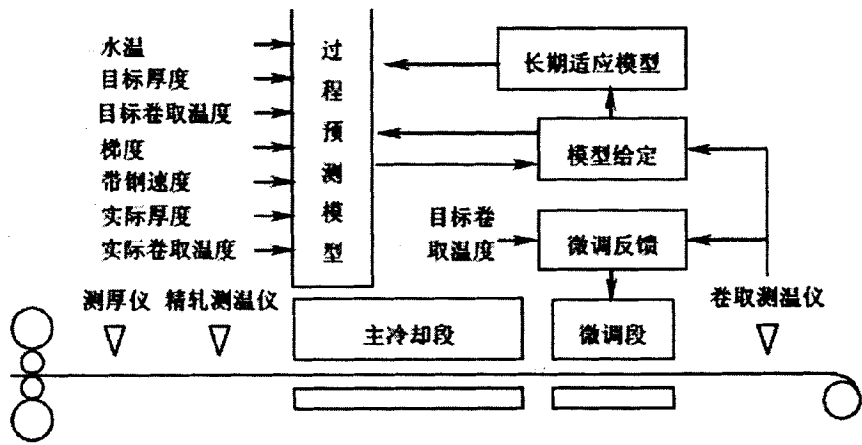


图 2.5 印第安纳港热带钢厂热轧带钢卷取温度控制系统结构框图

Fig2.5 Structure chart of hot strip coiling temperature control system

of hot strip mill in Indiana port

系统采用了前馈控制方式、反馈控制方式和自适应控制方式，以前馈控制方式为主。模型基准控制可以对每段带钢进行滤波调节，以便随时用卷取温度偏差修正预测值。

前馈和反馈控制的具体算法是调节每段带钢的预测值，离卷取测温仪最近的带钢段温差调节量最大，离精轧测温仪最近的带钢段温差调节量最小，前馈修正值是精轧出口温差修正值和卷取温差修正值之和，这个修正值用于离开精轧测温仪的下一段带钢的前馈计算。

自适应控制的具体算法分为卷对卷自适应算法和长期自适应算法。卷对卷自适应算法是以前馈修正值作为模型偏差修正下块带钢，但下块带钢的头部用模型偏差的 50%修正；长期自适应算法是根据不同的卷取温度范围和不同喷水方式采用不同的模型修正值，这个模型修正值的估计是一个迭代过程，通过建立修正值表格实现。这种闭环控制系统具有较高的控制精度。

2.3.3 冷却均匀性分析

板带在冷却过程中，若冷却不均匀，不仅会造成板带的性能不均匀，而且也影响板带的板形。因此实现板带的均匀冷却也是控制冷却的重要目标之一。对板

带均匀冷却的控制能力，既决定着所处理板带性能的一致性，也决定着每批板带性能的再现性水平，因此人们总是从各个方面入手来实现板带的均匀冷却。

影响板带冷却均匀性的各种因素往往是交互作用的。因此，很难找到一种有效的方法来消除这些不利影响，只能根据影响冷却均匀性的主要因素采取措施，同时兼顾其它因素的影响。板带冷却后的温度梯度是由冷却速度和板厚决定的，为使其控制在一定范围内，要根据板带的材质、厚度以及对产品性能的要求，选择适宜的冷却速度，并在冷却过程中适时调低冷却速度，这既可以缩小断面温度差，又有利于减小板带变形。

2.4 本章小结

本章主要是介绍热轧控制冷却的控制工艺。

首先，介绍了首钢迁钢 2250mm 热轧带钢层流冷却控制系统冷却设备及主要的控制参数；

其次，介绍了常用的控制冷却工艺，包括加速冷却、直接淬火及超快冷冷却三种。

最后，基于首钢迁钢 2250mm 热轧带钢层流冷却及工艺，提出过程控制技术的发展，最终提出卷取温度控制的思路。

第3章 层流冷却控制模型剖析

热轧带钢层流冷却过程控制非常复杂，它涉及温度、速度、厚度、流量、轧件内部的组织结构以及相变等多方面的问题。从控制角度来看，具有典型的多变量、非线性、强耦合特征，因此热轧带钢卷取温度控制的发展经过了一个比较长的时间。随着计算机控制技术全面渗透到层流冷却控制过程后，其控制发生了质的飞跃。

3.1 热轧带钢层流冷却数学控制模型

轧后冷却控制是整个热轧生产成品的一个重要环节，研究带钢在层流冷却区的温度变化规律，建立热轧层流冷却数学模型和控制模型对实现层流冷却高精度自动控制具有关键性的作用^[21-22]。

3.1.1 经典传热理论

冷却水和炽热的带钢初接触时，带钢和水之间的巨大温差引起迅速的热传导，冷却水在带钢表面迅速形成蒸汽层，隔断冷却水和带钢的直接对流换热，带钢只能通过与蒸汽层进行热传导散热。随着带钢温度降低，蒸汽层不再稳定地附着在带钢表面，带钢和冷却水重新接触进行对流换热。在整个冷却过程中伴随着带钢与冷却水的对流换热、与空气的辐射换热、与辊道的接触热传导以及在带钢内部相变潜热的扩散^[23-24]。

3.1.2 傅立叶偏微分导热方程

带钢在冷却过程中，因上下表面受到冷却水的强制对流换热和空气的辐射换热，表面温度大幅度降低，而中部受内部热传导的影响，温度缓慢降低，此时在带钢内部就形成了一个对称的温度梯度，热流从内部向表面传递^[25]。这种热传导满足傅立叶定律即：

$$q = -k\bar{\nabla}T \quad (3.1)$$

上式中， q 为热流密度； $\bar{\nabla}T$ 为温度梯度； k 为热传导系数；负号表示与温度梯

度方向保持一致。由传热学可知，常物性、无内热源、第三类边界条件的一维非稳态导热微分方程即傅立叶偏微分方程如下所示：

$$\mu \cdot C_p \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) \quad (3.2)$$

式中， μ 为带钢密度（单位：Kg/m³）； C_p 为带钢比热（单位：J/（Kg.K））； λ 为带钢导热系数（单位：W/（m.K））； T 为带钢温度（单位：℃）； t 为冷却时间（单位：s）； X 为带钢截面温度分布的法线方向。在非稳态导热的正规状况阶段，其解如下：

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} \cdot \cos(\mu_n \cdot \frac{x}{\delta}) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot FO) \quad (3.3)$$

其中： θ 为过余温度， $\theta = t - t_w$ ； μ_n 为超越方程 $\tan \mu_n = \frac{Bi}{\mu_n}$ 的解； Bi 、 FO 是

以带钢厚度的一半（ δ ）作为特征长度的毕渥数和傅立叶数；由相似原理可知，无

量纲过余温度 $\Theta = \frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0}$ 的解必为 Bi 、 FO 及 $\frac{x}{\delta}$ 的函数，即：

$$\Theta = f(FO, Bi, \frac{x}{\delta}) \quad (3.4)$$

由于热输出辊道上的测温仪测得的是表面温度，因此对（3.3）式令 $x=\delta$ ，当 $FO>0.2$ 时，由于采用该级数的第一项与采用完整的级数计算平板中心温度的差别小于1%，于是可以简化为：

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = \frac{2 \sin \mu_1 \cdot \cos \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cdot \cos \mu_1} \exp(-\mu_1^2 \cdot FO) \quad (3.5)$$

则（3.4）式变为：

$$\Theta = f(FO, Bi) \quad (3.6)$$

由此可以看出 θ 是 Bi 与 FO 的函数。

3.1.3 牛顿冷却对流换热方程

从集管喷射出的冷却水和炽热的带钢之间存在着巨大的温差，紊流的冷却水和带钢之间进行着强烈的对流换热，水冷结束后带钢也与空气进行对流换热。两种换热形式都满足牛顿冷却定律：

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (3.7)$$

上式中, q 为热流密度; T_s 为带钢温度; T_∞ 为空气温度。牛顿冷却公式只是对流换热系数 h [W/m^2K]的一个定义式, 并没有揭示出与影响它的有关物理量之间的内在联系。研究对流换热的中心任务就是揭示这种内在联系, 确定计算 h 的具体表达式。

实际上和许多因素有关, 它不仅取决于流体的物性(导热系数、密度、比热和动力粘度)以及换热表面的形状、大小与布置, 还与流速等运动特性有着密切的关系, 这些因素的复杂影响都集中在一个参数中, 使得很难准确地描述出诸多影响因素的关系表达式, 目前值主要通过实验确定。

对于管式层流冷却, 对流换热系数可以表示为:

$$\alpha = \frac{9.72 \times 10^5 \cdot w^{0.355}}{t_s - t_\infty} \times \left[\frac{(2.50 - 1.5 \times \log t_w) \cdot D}{P_1 \cdot P_c} \right]^{0.645} \times 1.163 \quad (3.8)$$

式中, w 、 t_w 、 P_1 、 P_c 以及分别为水流密度(单位: $m^3/min \cdot m^2$)、水温(单位: $^\circ C$)、轧制线方向喷嘴间距(单位: m)与轧制线方向垂直的喷嘴间距(单位: m)及喷嘴直径(单位: m)。

3.1.4 斯蒂芬-波尔茨曼辐射换热方程

在冷却过程中炽热的带钢和环境进行着辐射热交换, 辐射换热的强度主要与带钢的温度有关, 斯蒂芬-波尔茨曼定律揭示了黑体在单位时间内发出的热辐射热量和温度的四次方成正比, 即

$$q = \sigma T^4 \quad (3.9)$$

式中, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$ 为波尔茨曼常数; T 为黑体热力学温度。由于一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体, 实际物体辐射热流量可采用斯蒂芬-波尔茨曼定律的经验修正形式:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.10)$$

式中, ε 为实际物体的发射率(又称黑度), 其值总小于1, 它和物体的种类、表面温度和表面状态有关。斯蒂芬-波尔茨曼定律是辐射换热计算的基础, 所求的是物体自身向外辐射的热流量, 而不是辐射换热量, 对于带钢和环境的单位热辐射换热量可以根据下式进行计算:

$$q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) = [\varepsilon \sigma (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty)] \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.11)$$

控制模型的建立基本是遵循：机理模型→实验室或现场大量数据→简化模型→模型现场修正为基础的建模方法，这主要是因为该过程是一个复杂的物理过程。

卷取温度控制模型主要依赖经验模型和模型的自适应功能进行修正，虽然效果较好，但也不能否认，生产中卷取温度控制超差的现象也普遍存在，一般认为这种超差主要是由于水冷区对流换热系数的计算不准确造成的，而带钢冷却过程的热交换是非常复杂的非线性过程，并且带钢在冷却过程中要发生组织转变，这些都难以用数学模型精确表达^[26-28]。

传统的模型需求解复杂的微分方程此外，数学模型都需要大量的参数来辨识，有些参数不能精确的获得采用人工神经网络的方式来训练模型参数即模型误差，大大提高了卷取温度的精度。

目前国内外都认为数学模型和神经网络相结合来提高卷取温度的控制精度。具体的结合形式有两种，一是以数学模型为主，神经网络为辅，利用神经网络来修正层流冷却热传导系数，从而提高卷取温度控制精度；二是以数学模型为辅，神经网络为主，通过实测值和数学模型的计算结果作为网络的输入参数来预报卷取温度。神经网络数学模型综合了数学模型的工艺特征和神经网络的非线性特点，模型简单，容易理解，对对流换热系数采取“黑箱”计算，从而回避了复杂的水冷热交换系数的理论计算^[29-31]。

3.2 西门子热轧带钢层流冷却数学控制模型剖析

3.2.1 层流冷却与其他功能的关系

层流冷却过程控制模型作为过程控制系统软件包在过程控制系统平台上运行，其数据来源于过程控制系统所获取的实测数据、操作工干预数据、历史数据、组别数据等，模型计算结果由过程控制系统发送到基础自动化级并由基础自动化级执行。层冷控制模型与其他功能之间的关系如图 3.1 所示。

二级模块里直接与 MosCs 通讯的有进程 STA，STA 对来自于一级和二级的有关特定的板坯的设定值计算请求进行管理。当 STA 接收到请求，经 TAO 接口触发进程 MosPcCs，计算完成之后，MosCs 把预计算的结果返回给进程 STA，进程 STA 对这些数据进行储存或者把数据发动给一级自动化模块 SDH 并可以触发层冷的监

测器/控制器 MosCS 动作。

二级模块里间接与层冷的模型进行通讯的模块有 PDH，无论三级还是由操作工手动的改变原始数据（即入口数据）都会通知 PDH，PDH 接收到通知后，会自动地向 STA 进行设定值计算请求。

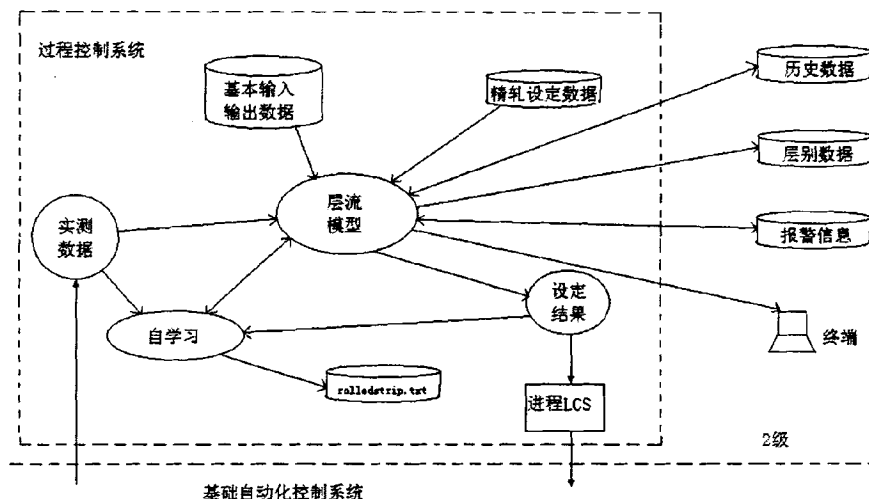


图 3.1 层冷模型与其它功能的关系

Fig3.1 The relationship between laminar cooling model and others

另外一个与层冷模型间接通讯的模块是 HMI，HMI 和 MosCS 通过 HMI 的进程和数据库表相互影响，如图 3.2 所示。

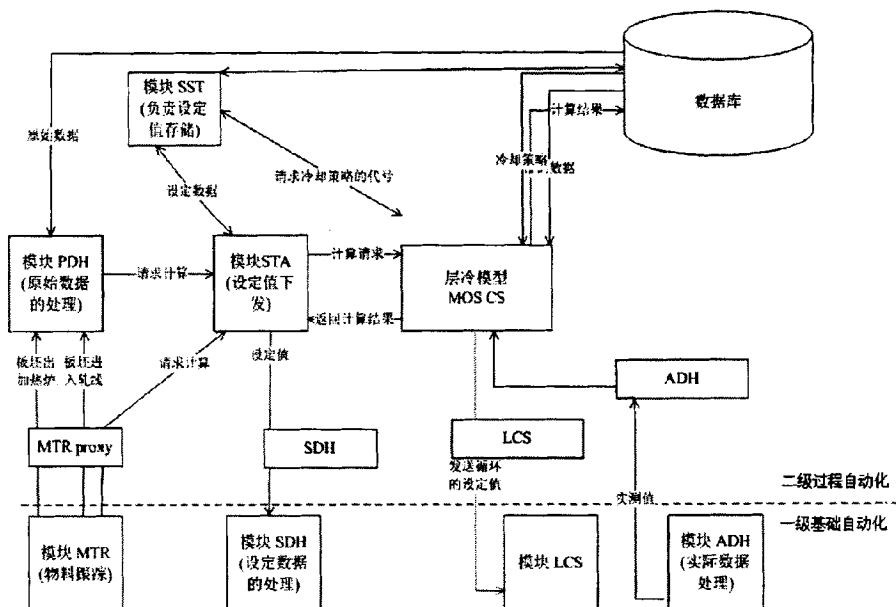


图 3.2 层冷模型控制计算数据流通的总流程图

Fig3.2 Overview of the environment in which the LFE MOS CS is embedded

3.2.2 层流冷却模型的控制简介

在热轧带钢生产过程中，需要在轧制后卷取前使用层流冷却装置对带钢进行冷却，通过控制带钢的卷取温度和冷却速率来获得理想的金相组织和机械性能。首钢迁钢 2250mm 热轧层流冷却采用的是西门子控制模型，层冷装置现场布置如图 3.3 所示。

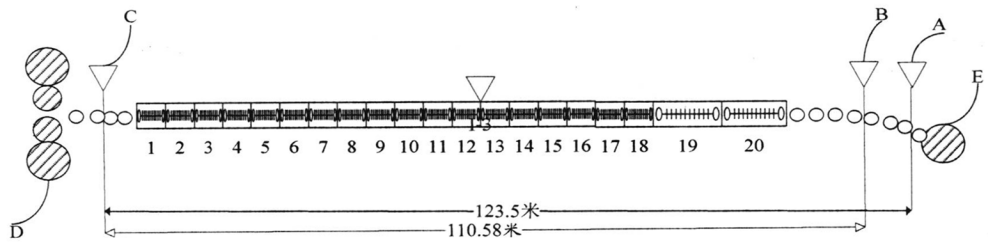


图 3.3 冷却区的基本结构示意图

Fig3.3 Arrangement of 2250mm laminar cooling installations

如上图所示，该图为冷却区的基本结构示意图。冷却区定义为从精轧出口高温计 C 到地下卷取机入口的高温计 B 为止。冷却区划分为粗冷区和精冷区。其中 1~18 组为粗冷区，19、20 组为精冷区。其中，粗冷区作为前馈控制的阀门，精冷区作为反馈控制使用的阀门。

卷取温度控制过程中计算在一定流量水平下为达到目标卷取温度所必需打开的阀门数量。所需打开的所有阀门在粗冷区和精冷区间分配，在粗冷区的阀门用于前馈控制，在精冷区的阀门用于闭环反馈控制。

卷取温度控制计算在二级计算机上执行，由卷取温度模型自动完成计算功能，将计算结果通过通讯模块发送给一级基础自动化，由一级执行器执行。卷取温度模型包括预计算、动态控制计算以及自学习计算功能。

3.2.3 层流冷却模型的进程介绍

西门子的卷取温度模型由进程 MospcCs、MosCcCs、MosOdsCS 和 LCS 完成，分别完成卷取温度控制的预计算、实时控制计算、离线数据的收集以及数据的下发等功能，如图 3.5 所示。

MosPcCS—MOS Precalculation Cooling Section: 进程 MospcCs 用来计算层冷段阀门的设置，包括一级自动化的设定值以达到层冷的预调整，从而让下块即将轧制的板坯的冷却尽可能的接近我们的目标值。为选择有效的冷却策略，读取不

同“源”的输入数据，使用这些有效的冷却策略，对阀门设置进行计算。时时地接受来自于 STA 的触发信号，执行收集有效数据的所有动作，对阀门设置的预调整进行计算并把计算的结果发送给一级自动化的模块 SDH，同时触发 MosCcCs 动作。

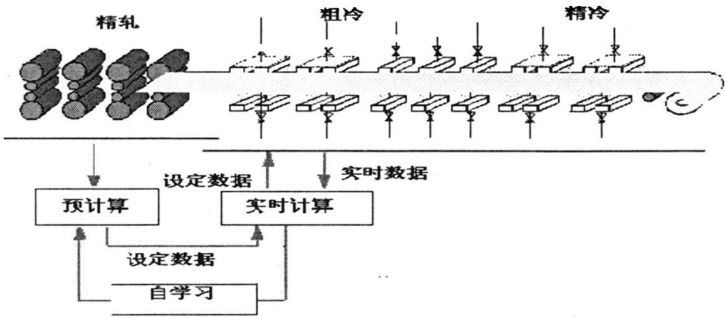


图 3.4 层冷冷模型主要模块功能结构示意图

Fig3.4 The general view of control module of laminar cooling

以下几个位置 STA 触发 MosPcCs 进行计算：

- (1) 板坯进入加热炉/接收到 PDI 数据；
- (2) 当板坯进入加热炉或者接收到 PDI 数据时，触发第一次计算，这次计算主要是确保此板坯可以进行轧制并检查其原始数据匹配性；

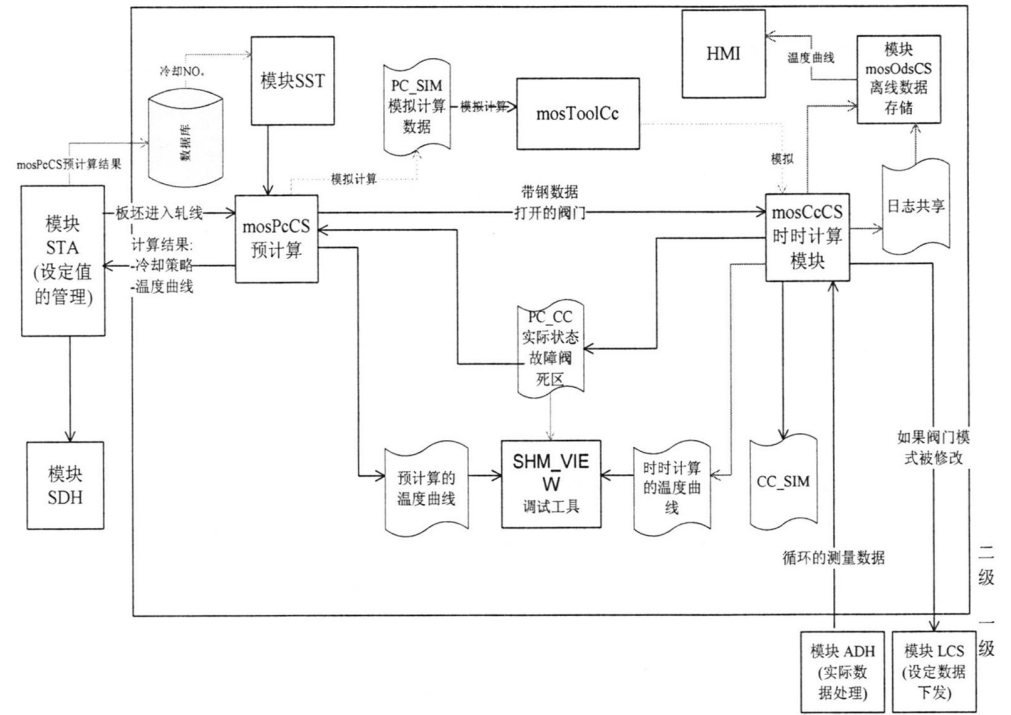


图 3.5 层冷模型的内部结构

Fig3.5 Internal structure of the LFE MOS CS

(3) 板坯出加热炉时；

(4) 板坯一出加热炉, 触发精轧的预计算, 此计算对加热炉下块板坯的轧制节奏进行预设置并对精轧的宽展进行预计算, 由此可得出粗轧最适宜的宽度, 计算得结果发送给轧制节奏和 STA;

(5) 操作工触发;

(6) 操作工通过改变厚度触发计算;

(7) 模拟计算。

MosCcCs—MOS Calculation Process Cooling Section: 进程 MosCcCs 包含两个主要的部分监测器和控制器。主要的任务是对层冷的状态进行监控, 基于所给的板坯的尺寸、当前的自适应系数、工艺以及操作的条件进行阀门设置的计算, 以尽可能的达到我们所设定的温度。

此功能每 200ms 触发一次为当前的板坯计算新的阀门设置并把这些数据发送给一级自动化。此进程还可以触发 MosOdsCs。

MosOdsCS—MOS Offline Data Server CS: 模块 MosOdsCS 储存时间处理的数据。穿带过程中临时的储存在共享区域里的这些数据被收集、处理并被写入到数据库和特定的 text/matlab 的文件里。这些数据以后可能用来工程日志的创建、模型的优化、故障的诊断和错误的发现。当板坯离开层冷区域或者执行必要的动作时由进程 MosCcCS 来触发 MosOdsCs。

LCS—Laminary Cooling Section: 一级自动化的模块。如果设定值发生变化, 需要在每次计算的预计算时间或者在板坯穿带时, 需要把这些时时控制的设定值还有其它所需的一些信息 (比如头部不冷却的长度, 尾部不冷却长度等) 发送给此模块。

3.2.4 预计算模型

层流冷却过程是复杂的时变过程, 因此影响卷取温度的因素很多, 卷取温度的控制与带钢材质、运行速度及带钢厚度方向的温度分布等众多因素密切相关。因此在轧制过程中, 对带钢信息进行预测非常重要, 其预测由预设定模型来完成, 即利用精轧机组提供板带的信息数据, 应用预设定模型对带钢头部各控制量进行预计算, 将计算值通过报文形式发送到一级基础自动化系统, 由一级自动化系统执行, 从而可有效地消除整个控冷系统动作滞后的影响^[32-33]。

预计算为带钢进入冷却区前, 为带钢的头部确定冷却区阀门打开的数量以在正常冷却状态下达到目标卷取温度。确定为达到目标卷取温度所需打开的阀门后, 打开阀门的数量在粗冷区和精冷区以一定的分配原则进行合理分配。

其分配原则为当所需打开阀门总数量小于或等于反馈区可用阀门数量时, 首先确定精冷区所需打开阀门数量等于所需打开阀门总数量除 2(取整数), 粗冷区打开阀门数量等于所需打开阀门总数量减粗冷区打开阀门数量; 当所需打开阀门总数量大于反馈区可用阀门数量时, 精冷区所需打开阀门数量等于反馈区可用阀门数量除 2(取整数), 粗冷区打开阀门数量等于所需打开阀门总数量减粗冷区打开阀门数量。确定粗冷区和精冷区打开阀门数量后再进行计算; 计算过程中, 精冷区打开阀门数量保持不变, 通过修改粗冷区打开阀门数量, 直到温度偏差在可接受的范围之内。模型预计算的计算流程如下图 3.6 所示。

3.2.5 实时控制模型

卷取温度的实时控制由模块 MosCcCs 完成。模块 MosCcCs 的主要任务即为监视层冷的实际状态, 基于板坯的尺寸, 当前的传热系数以及运行的环境等计算阀门的设置以达到目标的卷取温度。当精轧出口的高温计检测到终轧温度之后, 每 200ms 触发一次模型进程 mosCcCs, 根据精轧出口的厚度、实测的终轧温度、精轧出口的速度等实测的数据, 触发层冷的前馈控制, 在预计算设定结果的基础上, 实时对粗冷打开的阀门进行修正如图 3.7 所示。

前馈控制主要应用于预设定和在线控制过程, 可有效地消除反馈控制的滞后性。

自带钢头部到达精轧出口高温计后, 每隔 200ms 触发一次前馈控制计算。前馈控制通过每隔 200ms 测量的精轧出口的终轧温度、精轧出口带钢的速度、厚度等依据由每个钢种 CCT 曲线制定的特定冷却速度, 在恒定流速和压力条件下来时时计算前馈控制阀门(即粗冷区阀门)所需打开阀门数量用以时时修正预设定计算的偏差, 通过前馈控制阀门的打开或关闭来达到目标卷取温度。例如当实测精轧出口温度高于预测精轧出口温度时, 在粗冷区现有开启阀门组态中沿轧制方向逐个增加开启阀门数量, 直到满足温降要求; 当实测精轧出口温度低于预测精轧出口温度时, 在粗冷区现有开启阀门组态中逆方向逐个减少开启阀门, 直到满足温降要求。

$$\text{精冷区的前馈控制: } \lambda(T_{Fi} - T_{ZA}) / (K \cdot T_N) \quad (3.12)$$

$$\text{修正区的前馈控制: } \lambda(T_{Fi} - T_{ZA}) / T_N \quad (3.13)$$

式中 T_{Fi} 为实施反馈控制后, 每间隔一段时间采样计算带钢的平均温度 T_{ZA} 为反馈前带钢的终轧温度, λ 为前馈控制参数, K 为冷却能力系数, T_N 为精冷区能

力。由式(3.12)、式(3.13)可以确定精冷区和修正区开启的集管组数。

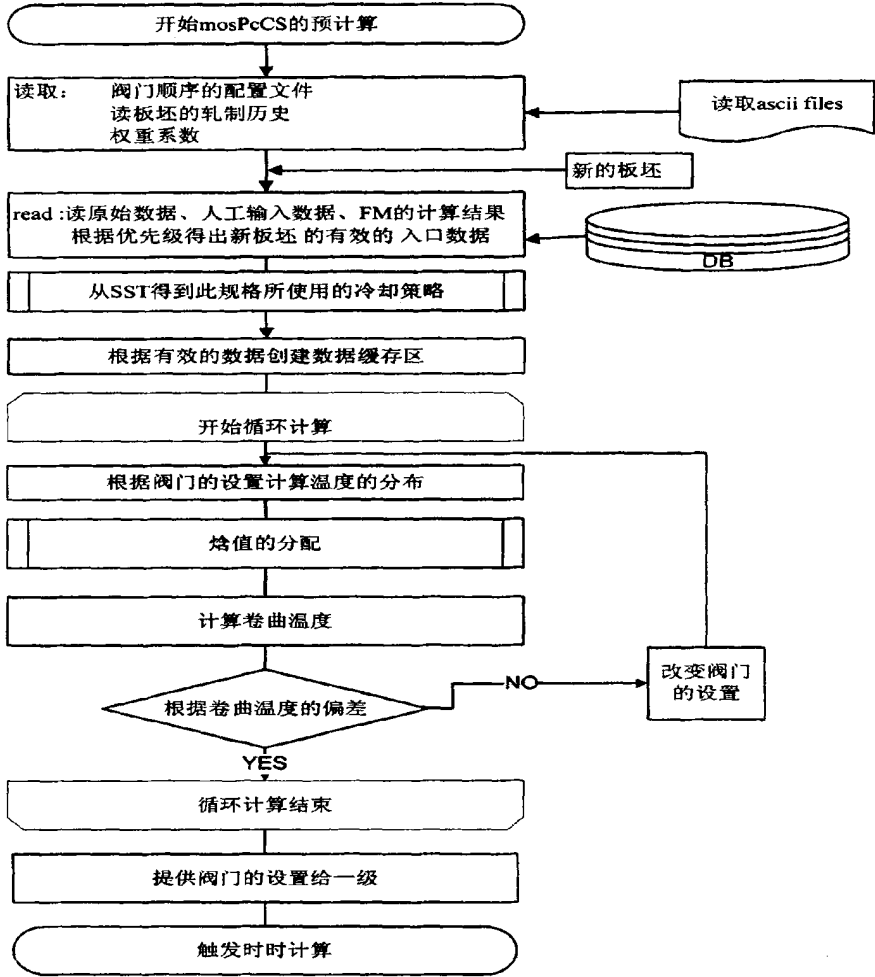


图 3.6 预计算的总流程图

Fig3.6 The flow chart of precalculation

反馈控制计算用于修正目标温度与实测温度的偏差。当带钢段经过地下卷取机入口高温计时，实测卷取温度反馈给卷取温度模型之后，每 200ms 触发一次卷取温度模型的反馈控制计算，通过对实测卷取温度、预测卷取温度以及目标卷取温度的比较，调节精冷区阀门打开数量已达到目标卷取温度。

精冷区的反馈控制: $(TCM - TCA) / (K \cdot TN)$ (3.14)

修正区的前馈控制: $(TCM - TCA) / TN$ (3.15)

式中，TCM 为实测卷取温度；TCA 为目标卷取温度。

根据带钢的实测卷取温度和目标卷取温度的差值以及精冷区和修正区的冷却能力，计算出精冷区和修正区开启的集管组数。

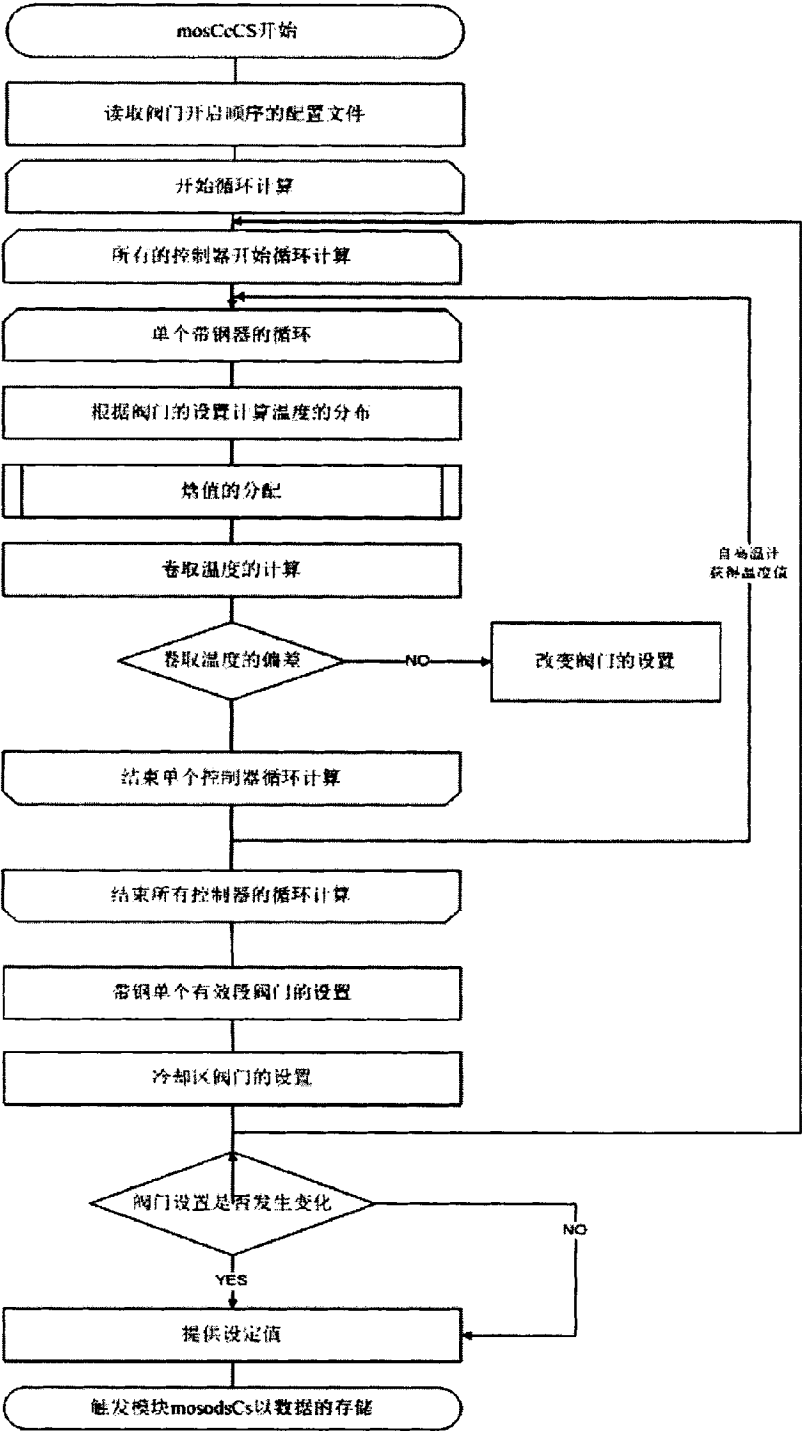


图 3.7 实时控制总流程图

Fig3.7 The flow chart of online caculation

3.2.6 自适应模型

自适应控制是根据当前带钢卷取温度的实测值和计算值之间的偏差信号与可调系统的过程输出产生反馈作用,以修改控制器的参数,促使可调系统与设定模型相一致,使误差趋向零的控制^[34-35]。

自适应分为长期自学习和短期自学习,短期自学习一般指轧制同一批次的板坯,即同一规格、同一钢种的板坯。长期自学习是轧制变规格或变钢种的第1块板坯,这时模型会搜寻以前轧制过与当前板坯最相似的板坯,从而计算出自适应学习系数。

当带钢尾部出卷机入口高温计后,触发此块带钢卷取温度模型的自学习计算。自学习计算功能是基于目标实测值和模型计算值间的偏差,对温度模型中的学习项传热系数进行修正,纠正模型预报偏差,比如带钢实际的水冷、空冷温降与计算的水冷、空冷温降间的偏差,以提高模型预报精度,改善控制效果。

卷取温度模型的自学习模型根据学习段(学习段的定义在模型的配置文件中通过公式计算得出,与带钢精轧出口的厚度有关)的一系列参数,如实测精轧出口温度、厚度、速度、粗冷区和精冷区打开阀门数量、实测地下卷取机入口的温度、目标卷取温度及计算的地下卷取机入口的温度等,来确定优化下一次设定计算的修正系数,此修正系数连同初始数据(如化学成分、厚度、阀门开启模式、终轧温度、卷取温度等)按照其轧制先后顺序保存在自学习文件 rolledstrip.txt 中。

带钢在进行预计算之前,首先得到自学习文件 rolledstrip.txt 中所存板坯个数、起始索引和终止索引号。根据当前坯的化学成分、厚度、宽度、速度、当前板坯卷取温度的设定和终轧温度的设定等一些基本的设定参数之后,开始从自学习文件 rolledstrip.txt 中自下而上查找相似坯(相似坯为与此块带钢的输入参数相近的板坯。如果其速度或温度等参数相差甚远,那么此板坯的数据用于修正当前此块板坯的传热系数的计算,那么其修正结果是不够精确地,可能还会起反效果);然后得到此块相似板坯的有关信息,其中包括上下阀门模式,上下起始阀的阀门、临界温度、各个化学成分、设定的厚度、宽度、温度及卷取高温计、中间高温计和终轧温度的实测值,以及计算的修正系数和此块相似坯在自学习文件的位置。相似坯的个数 ≤ 99 块,根据相似坯的修正系数计算此块带钢的修正系数,其中相似板坯生产的时间离当前板坯生产时间越近,其权重系数越大,对此块带钢的影响效果就越大。如果在自学习文件 rolledstrip.txt 中未找到相似坯,则默认其修正系数

为 1，不做任何修正。

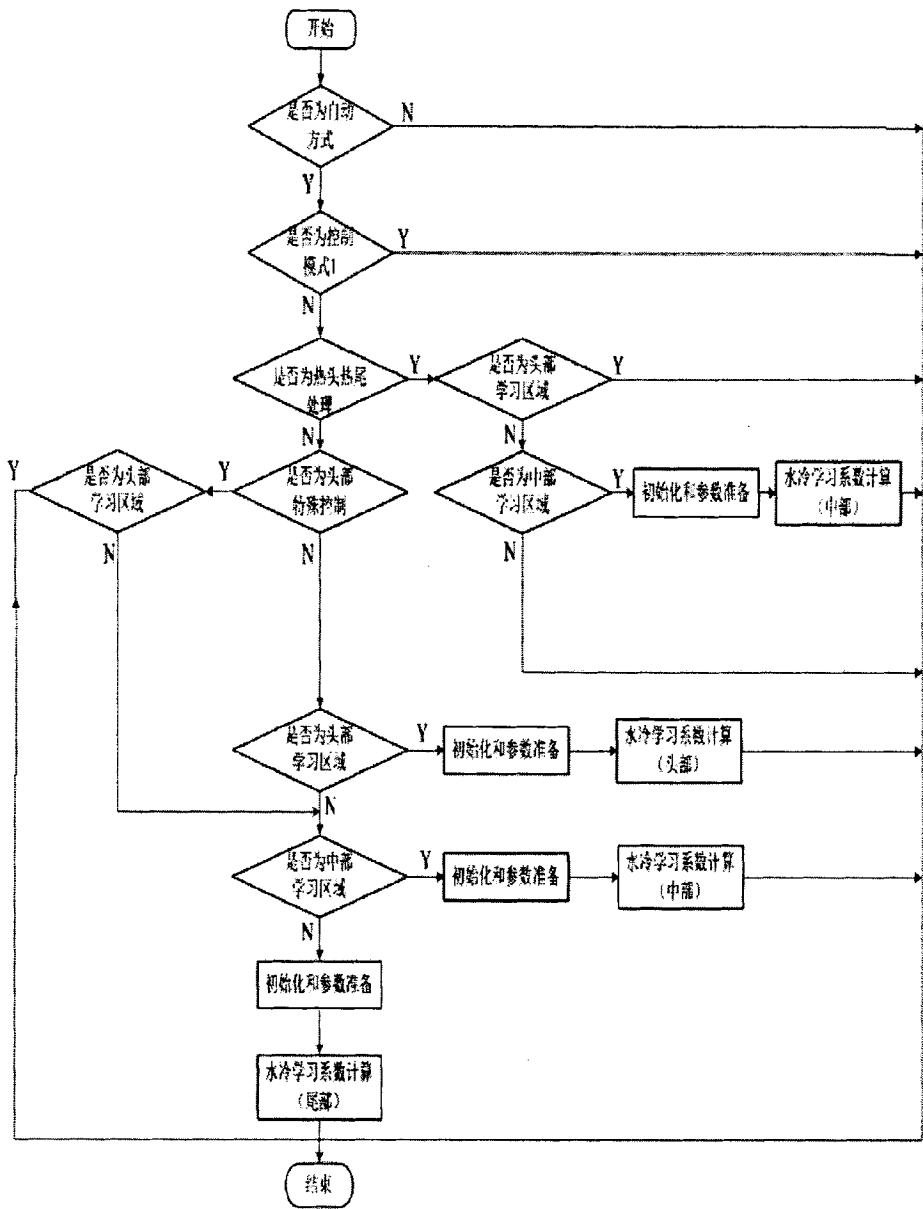


图 3.8 自学习控制总流程图

Fig3.8 The flow chart of adaption

3.2.7 层流冷却控制策略

为满足不同规格、不同钢种和不同性能要求产品对于卷取温度和冷却速度的要求，层流冷却系统具有前段主冷、后段主冷和稀疏冷却控制策略^[36-37]，如图 3.9 所示。前段主冷用于显微组织以铁素体和珠光体为主的普碳钢和优质结构钢；后

段主冷用于显微组织以铁素体和贝氏体为主的双相钢，以及厚度小于 1.7mm 的碳素钢和低级硅钢的冷却；稀疏冷却用于控制微合金元素的碳氮化物的析出为主的微合金化钢。

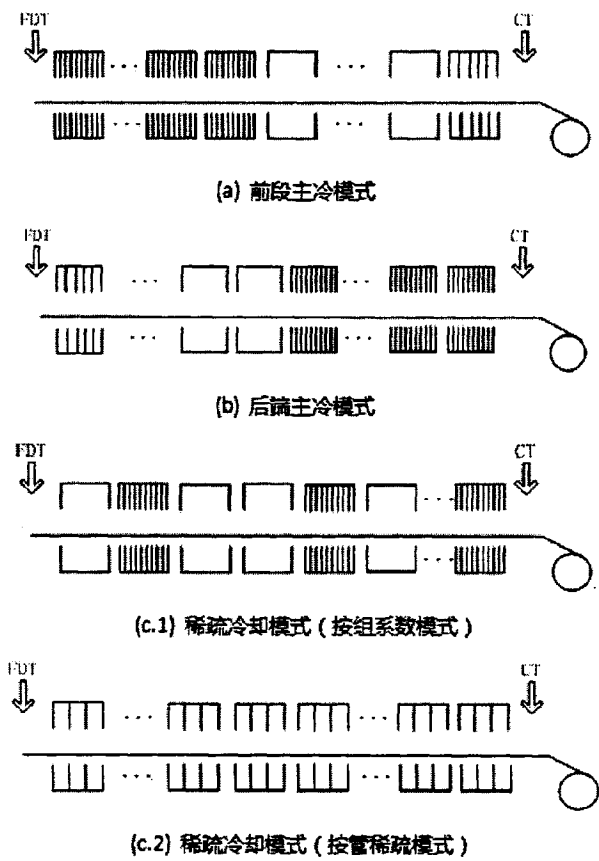


图 3.9 四种层流冷却策略

Fig3.9 The four strategies of laminar cooling control

根据板厚层别和特定钢种规格对冷却速率的要求，在上述层冷策略中，选择一种冷却策略。冷却策略代码将在生产计划中用代码给出，以便层流冷却模型识

表 3.1 基础阀门模式

Table 3.1 The basic spray pattern of cooling section

编号:	模式	备注
1	X X X X	
2	X X X O	X: 阀门开
3	X O X O	
4	X O O O	O: 阀门关
5	O O O O	

别，操作工可通过终端进行修正。通过使用冷却计划编号来选择某种冷却策略，阀门模式的设定如表 3.1 所示。冷却过程自动计算阀门设定，包括上阀门和下阀门

的开启到向卷取机方向加入喷射水流，直到找到可以达到设定卷取温度的正确水量。如果现有模式下水量不足，则提高喷射密度。

如果规定了“临界温度”，那么阀门设定会被计算至尽快达到临界温度的状态，从第一组阀门开始实行全开（模式 XXXX）。因此，在特定的集管喷水下使用冷却策略可以达到特定的卷取温度。

3.3 现有模型存在的问题

（1）温度控制死区设置范围不当造成的温度的超调现象。死区就是输出变量值不随输入变量值的变化而变化，这个输入变量的区域范围就可以理解为死区。温度控制的死区即当预计算的温度与实测的温度以及目标温度的偏差在死区温度范围之内时，则模型不予对其进行调节。那么就需要死区范围设置的合理性，当死区范围设置过大时，则会造成实际卷取温度偏离目标温度过大，而模型无调节。而当死区范围设置过小时，则造成模型频繁的调节，从而造成温度超调的现象，形成一定程度的波动。针对现场温度出现小幅度波动的情况，考虑为模型设定的死区范围较小所致，故将此死区范围由 5°C 修改为 8°C ，温度控制得到一定的改善。

（2）低温钢卷取温度无法实现卷取温度的自动控制。卷取温度控制是通过模型的自动过程控制保证带钢在特定的位置达到目标的卷取温度，以保证带钢性能的合格率。原低温卷取管线钢的卷取温度控制，由于受现场高温计及原有西门子控制程序的制约及限制（西门子控制程序只能保证 450°C 以上卷取温度的控制精度，低温卷取管线钢的目标卷取温度在 $300^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ 之间），低温卷取管线钢的卷取温度无法得到模型的自动控制，保证卷取温度控制精度的反馈控制、自学习控制功能未能投入使用，预计算偏差过大，从而导致卷取温度在目标温度 $\pm 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围之内温度的命中率为 0，实际温度一般控制在 $100^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围之内，有时卷取会因温度太低而无法卷取造成废钢，并且对我们的卷取设备危害极大。

（3）配置水量与现场实际水量偏差过大导致预计算的不准确。cofa 系数对参与计算的参数和现场实际的参数的偏差进行修正补偿，当实际的水量和配置的水量存在的过大偏差时，即造成 cofa 系数越学越大，cofa 系数过大弊端就在于当轧制新的钢种规格或者由于化学成分、阀门模式的改变找不到相似坯时，默认 cofa 系数为 1，此时所控制的实际的卷取温度将和目标值偏差很大。

3.4 热轧带钢卷取温度控制的难点

热轧带钢卷取温度控制是相对复杂和困难的,从工艺设备的角度出发,主要有四个方面的控制难点:

(1) 影响卷取温度的因素多而复杂,包括:带钢材质、厚度、速度、冷却水量、水压、水流运动形态、终轧温度、热传导、对流、辐射条件和层流冷却装置的设备状况等,这些因素大多具有较强的时变性,机理复杂,因而难以在数学模型中全部考虑和精确描述。

(2) 在层流冷却中,冷却装置分布在输出辊道上下方,带钢任意一点通过冷却区需要5~20秒,由于采用加减速轧制技术,带钢各点通过层流冷却区的时间差异也很大,因此,控制冷却实际是在很大的空间范围内对处于变速及高速运动中的钢材沿长度方向逐点实施的,这使得卷取温度控制本质上是一个十分复杂的分布控制问题。

(3) 卷取测温仪通常安装在层流冷却区外10~25米的位置,相对控制点,检测滞后很大,严重制约了常规反馈控制方式的使用。此外,控制阀的开闭及冷却水从U型管出水口溅落到带钢表面,都存在较大的滞后效应,给动态控制带来不利影响。

(4) 冷却水量的调节一般是非连续的,其控制“粒度”为由一个阀所控制的水量。卷取温度控制精度本质上受此粒度大小的制约,特别是薄材,更为敏感。

(5) 可知但不可控干扰因素的影响,如带钢终轧温度、厚度不能保证恒定。如终轧温度,国外一般要求 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 之间,而我国钢厂很难达到这一指标,因此,边界条件波动大,引进的设备及控冷模型得不到很好的应用。不可知也不可控随机干扰的影响,如水膜造成的测量偏差,病态阀门的存在,不稳定的水压等。

从控制算法的角度来看,现行的热轧带钢卷取温度控制系统基本上以设定控制为主。由于数学模型高度简化,计算中产生偏差,预测卷温和实测卷温偏差较大,降低了控制精度。采样周期较大,采样控制系统对高频噪声干扰抑止能力就会变差,影响控制效果。定时间控制不能保证自适应样本空间的一致性,在带钢出现温度波动时影响自适应控制效果。有时带钢厚度分级不合理,使温度补偿不合理,造成控制精度降低。

上面分别从工艺设备和控制两方面阐述了带钢卷取温度控制的难点,这表明带钢的冷却过程是难以用精确数学模型描述与控制的不确定的复杂过程。

层流冷却过程是具有多变量、强耦合、非线性和时变的特点，缺乏采用先进控制技术对此复杂的过程给出完美的、切合实际的方案。

层流冷却普遍存在的问题：带钢头部和尾部温差大，低目标卷取温度控制精度低，换规格适应能力差，随机超差。反馈滞后影响较为突出，温度波动范围大。控制精度明显降低；当板厚、入口温度（精轧温度）及钢种等有较大变化时，控制精度降低。

3.5 本章小结

本章主要介绍了四种常用的热轧带钢层流冷却数学控制模型，基于上述四种模型，详细剖析了首钢迁钢 2250mm 热轧带钢层流冷却控制系统所使用的西门子热轧带钢层流冷却数学控制模型，详细介绍了系统内主要的功能模块预计算模块、实时计算模块和离线存储模块。通过详细剖析提出现有模型存在温度控制死区设置范围不当造成的温度的超调现象问题，低温钢卷取温度无法实现卷取温度的自动控制以及配置水量与现场实际水量偏差过大导致预计算的不准确的问题。并且详细介绍了热轧带钢卷取温度控制的难点。

第4章 层流冷却控制模型修正

4.1 优化模型

提高低温钢卷取温度控制精度的方法,旨在解决目前低温钢由于过低的目标卷取温度导致其温度模型的反馈控制和自学习功能无法正常投入以及由于温度模型部分功能无法正常投入,卷取温度无法得到有效控制,从而使整个带钢长度上卷取温度波动过大、无法满足卷取温度控制精度和机械性能高稳定性的要求的问题。

4.1.1 增加设备配置

卷取前在冷却区出口增配一个 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 测量范围的卷取高温计,并为该高温计配置一台风机参见图 3.3 所示,该图示出了冷却区从精轧出口到地下卷取机的高温计及设备布局;在与精轧末机床 D 精轧出口处相邻的冷却区有高温计 C,靠近地下卷取机 E 的冷却区出口处原 $300^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 测量范围的卷取高温计 B 后 13m 处设有一个 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 测量范围的卷取高温计 A。

在冷却区出口增配一个测量范围为 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的卷取高温计,当目标卷取温度 $\leq 400^{\circ}\text{C}$ 时,投入使用 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 测量范围的高温计,可以保证高温计检测到卷取温度并成功发送给控制模型,解决由于温度波动造成实际卷取温度 $< 300^{\circ}\text{C}$ 时,造成 $300^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 测量范围的高温计无法检测到实测卷取温度的问题;并在高温计处增加风机,以避免由于低温卷取钢由于雾气过大影响高温计测量的准确性和精确度。

由于 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 测量范围的卷取高温计测量精度有限,且其安装在 $300^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 度测量范围高温计后 13m 处,故限制了控制模型反馈控制的控制精度,故只有在轧制 X80、X70 低温管线钢时,投入使用 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 测量范围的高温计,其他钢种规格仍然使用 $300^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 测量范围的高温计。两个高温计彼此切换的条件为厚度、钢种和目标的卷取温度。

在一级程序中对 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 测量范围的卷取高温计和 $300^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 测量范围的卷取高温计根据钢种自动切换,以保证不同范围的目标卷取温度使用不同的高温计检测反馈温度给模型,保证反馈温度的真实性。

在一级程序中,通过钢种(低温卷取管线钢包括 X80、X70)、厚度(目标厚度 $\geq 10\text{mm}$)以及目标卷取温度(目标卷取温度 $\leq 400^\circ\text{C}$)时, $0\sim 1000^\circ\text{C}$ 测量范围的高温计投入使用,否则投入使用 $300^\circ\text{C}\sim 1100^\circ\text{C}$ 测量范围的高温计,从而实现高温计的自动切换。

4.1.2 配置模型参数

在模型配置文件中将该 $0\sim 1000^\circ\text{C}$ 测量范围的卷取高温计的测量范围修改为 $100^\circ\text{C}\sim 1100^\circ\text{C}$,在温度高于 100°C 时向二级卷取温度模型发送实测值并置有效位,低于 100°C 时置无效位;将该 $0\sim 1000^\circ\text{C}$ 测量范围的卷取高温计的所处位置修改为 325 段。

在增加 $0\sim 1000^\circ\text{C}$ 测量范围的高温计之后,相应的,在配置文件 coolsec.txt 中需要分别定义哪个高温计、物料跟踪所定义该高温计所在的相对位置(以精轧后高温计的位置为 0 点做参考)、上表面温度或下表面温度、高温计所测温度最小值、最大值、权重系数以及温度补偿值,用于高温计位置有效跟踪和温度的精确计算,以及所测量的实际反馈高温计所反馈的实际温度有效性的正确判断。

具体的,轧制低温卷取管线钢时,在相应配置文件 coolsec.txt 中对高温计的测量范围由 $351^\circ\text{C}\sim 1100^\circ\text{C}$ 相应修改为 $100^\circ\text{C}\sim 1100^\circ\text{C}$,并且温度高于 100°C 时向二级卷取温度模型发送实测值并置有效位,低于 100°C 时置无效位,在二级卷取温度模型中显示为 -9999°C ,保证 $0\sim 1000^\circ\text{C}$ 高温计实测到的温度成功反馈给模型后,模型能够真实判定此温度的有效性。

在轧制低温卷取管线钢,投入使用 $0\sim 1000^\circ\text{C}$ 高温计时,配置文件中定义的该高温计位置相应由 291 段修改为 325 段。

4.1.3 反馈控制和自学习投入

轧制过程中将精冷区第 19 组前 6 个阀门设置为可用阀门,其余设为故障阀,由模型根据所述卷取高温计反馈的实测卷取温度进行反馈控制;在粗冷区将 12 组之后的阀门全部设置为故障阀。

具体执行过程是这样的,在轧制过程中,通过模型配置画面将精冷区第 19 组前 6 个阀门设置为可用阀门,其余设为故障阀,模型根据低温高温计反馈的实测卷取温度进行反馈控制,从而保证了模型反馈控制功能的投入使用,解决了时时

计算反馈控制无法投入使用的问题，而且也保证了在高温计前无水汽，进而保证了高温计的测量精度。粗冷区将 12 组之后的阀门全部设置为故障阀，在此设置的前提下实际粗冷有 10 组阀门打开，通过故障阀设定，从而保证其参与自学习的带钢段其实测得中间高温计的温度和卷取温度的平均值大于或等于 100°C ，从而保证此块带钢的数据能成功写入到自学习文件中，以用于修正后期所轧制的低温管线钢，从而保证了自学习功能的成功投入使用。详细的模型优化如下：

模型无修正的原因主要是由于在带钢完全离开层冷区域时，需要将此块带钢相关的数据发送给预计算模块的相关程序，触发预计算的相关程序对其进行检查校核。当此带钢的数据 $0 < \text{Carbon} \leq 1.5$ 、 $0.5 < \text{Thickness} \leq 30$ 、 $0.5 < \text{Speed} \leq 30$ 、 $700 \leq \text{FM Exit Temp} \leq 1050$ 、 $100 \leq \text{CS Exit Temp} \leq 900$ 、 $0.5 \leq \text{Cofa} \leq 1.5$ 满足以上条件时，将此带钢的相关数据写入到相应的文件 rolledStrip.txt 文件中，以用于以后预计算在计算过程中带钢与带钢之间模型的修正。当不满足此条件时，此带钢的相关数据将不被写入到 rolledstrip.txt 文件中。而在轧制 X80 的过程中，如以下日志文件所输出：

日志文件输出 1:

```
01 c#####

01 ----- Check Adaptation data -----

01 -- ptel->sdH.fmTempMv      : 829.312

01 -- ptel->sdH.csTempMv[0]   : 13.2882

01 -- ptel->sdH.csTempMv[1]   : 7.27844

01 -- ptel->sdH.vMv[0]        : 2.5106

01 -- ptel->sdH.vMv[1]        : 2.71998

01 -- ptel->sdH.cofas[0]       : 0.983394

01 -- ptel->customerTerm      : 082066261204

01 -- ptel->cofaPrecalc[0]    : 1

01 Calling storeActualStrip

-1 Adaption: <e> CSExit Temp Error!! value: 13.2882; E:\na\sghrm\src\mosCS\basis\src\Adaption.cpp(1817)

-1Adaption: <e> appendvec() cancelled due to data check error !;
```

比如上块钢由于 $\text{sdH.csTempMv}[0]=13.2882$ ，小于 100°C ，所以无法将此板坯

的数据写入到自学习的文件中，这就导致 X80 在预计算中无自学习的修正系数。针对此情况查看了模型 CC 的相关程序，发现此温度值是取其带钢自学习段所获得的温度的平均值，每个带钢自学习的段都有明确的定义，完全取决于其厚度。自学习起始段和终止段位置在程序中定义的公式如下：

如果带钢的厚度大于 0.1mm 小于 30mm，定义源程序如下：

```
dcAdaption.m_sec_b=dcAdaption.m_offset_b+dcAdaption.m_thick_b /stripData.Ed.dThicknessSP
```

```
// 自学习起始段的位置
```

```
dcAdaption.m_sec_e=dcAdaption.m_offset_e+dcAdaption.m_thick_e/ stripData.Ed.dThicknessSP;
```

```
// 自学习结束段的位置
```

如果带钢的厚度小于等于 0.1mm 或者大于等于 30mm，那么用以下公式计算并报以错误警示，定义程序如下：

```
dcAdaption.m_sec_b = dcAdaption.m_offset_b + dcAdaption.m_thick_b; // 起始段的位置
```

```
dcAdaption.m_sec_e = dcAdaption.m_offset_e + dcAdaption.m_thick_e; // 终止段的位置
```

其中以下四个变量在配置文件 DCPParam.txt(数据收集的相关参数的配置文件)中有定义，分别为：

```
m_offset_b = 20m ;
```

```
m_thick_b = 20m ;
```

```
m_offset_e = 40m ;
```

```
m_thick_e = 100m;
```

dThicknessSP 为厚度的设定值。

所以对于 X80 来说，厚度的设定值为 18.5mm，那么自学习起始段的位置 $m_sec_b=20+20/18.5=21.08m$;

自学习结束段的位置 $m_sec_e=40+100/18.5=45.41m$;

csTempMv[0]为精冷前卷取高温计所测得的温度，因为卷取前高温计所在的位置段号在配置文件为第 207 段，因为每段的长度为 0.38m，所以精冷前所在的高温计所在的位置为 $207 \times 0.38=78.66m$ ，那么此高温计所测自学习段的温度的平均值即为从带钢自学习起始位置 $78.66+21.08=99.74m$ 到自学习结束位置 $78.66+45.01=124.07m$ ，这段带钢温度的平均值（有关此段程序在日志文件的输出中通过收集大量板坯的数据并进行计算已经得以证明）。

csTempMv[1]为卷取前高温计所测得的温度，卷取前高温计所在位置的

SectionNo 为第 291 段，那么此高温计所在的位置为 $291 \times 0.38 = 110.58\text{m}$ ，那么此高温计所测得自学习段的温度的平均值即为从带钢自学习起始位置 $110.58 + 21.08 = 131.66\text{m}$ 到自学习的结束位置 $110.58 + 45.01 = 155.59\text{m}$ ，这段带钢温度的平均值即为 csTempMv[1]。

在获得自学习起始位置和终止位置之后，会调用函数 CoolingSection::SetPyrometerTemp(int noPyrometer, double temp)来对获得的每个温度进行检查判断，如果此温度在高温计测量范围最小值和最大值的范围之内，那么将为 ADH 反馈过来实际温度，如果没有在高温计测量的范围之内，那么将认为测得的数据无效，将其设置为 0，csTempMv[0]和 csTempMv[1]就是将所测温度的累加和除以所测的次数求得的平均值。计算的过程如表 4.1 所示，表 4.1 为自己根据对程序的理解所做的计算，日志文件输出 1 为模型所做计算的结果，这两个为同一块钢，虽有所偏差，但是共以此计算将近 20 块带钢的数据与日志文件的输出都相差甚少（认为计算不够精确所致）。

针对此种情况，在程序中寻找高温计测量范围在二级中定义的数据来源，最终发现在配置文件 CoolSec.txt 中对此有定义，定义如下：

分别定义了哪个高温计、物料跟踪所定义此高温计所在的相对位置（以精轧后的高温计的位置为 0 点做参考）、上表面温度或下表面温度、高温计所测温度最小值、最大值、权重系数、温度补偿值。源程序输出如下：

```
// Pyrometer for tempFM location 1 top / 0 bottom T_min T_max weight Temp-Offset
pyrometer_tempFM          0          1 MEAN          651      1600

// 1. Pyrometer location (section number) 1 top / 0 bottom T_min T_max
Pyrometer（精冷前高温计） 207          1 MEAN          351      1100      0.0      0.0

// 2. Pyrometer
Pyrometer（卷取前高温计） 291          1 MEAN          351      1100      1.0      0.0
```

因此在一级将高温计的测量范围修改为 0~1000℃之后，由于二级在配置文件中并未将此高温计的测量范围做相应的修改，以至于假若在轧制 X80 过程中高温计测量的温度为 184.9℃，和高温计的测量范围作比较之后，发现没有在高温计的测量范围之内，故将此数据认为无效，将其设置为 0。精轧前的高温计测量范围仍然是 300℃~1100℃，小于 300℃以下，将无法测量到实际值，也将其温度值设置为 0，从而就导致在自学习段的温度的平均值很小，经常为 0 并且一般小于 100℃，

在自学习段平均温度小于 100℃的情况下，将认为此板坯不适用于其它带钢的自学习，不将此板坯的数据写入到自学习的文件 RolledStrip.txt 中，从而导致前期 X80 的轧制无学习，自学习系数默认为 1。再后来将粗冷 13 组及 13 组之后阀门和精冷的阀门全部设置为故障阀，温度有所提高的情况下，精冷前面的中间的高温计测量的数据稍多一些，求得自学习段的温度的平均值就有时会高于 100℃，从而此块板坯的数据就写入到自学习的文件中用于其他板坯的学习，但是卷取前的温度一般不会高于 351℃，所以就造成卷取前自学习段温度的平均值还是特别小甚至为 0，但是用于其它带钢进行自学习的时候就会出现如下情况，从而使使用此板坯进行自学习的板坯使用一个错误的修正系数和错误的 Coiler Temperature，从而导致预计计算和轧制过程中的前馈控制的计算不准确。

程序输出如下：

Similar strips found: 1

Data of the similar strips:

Strip ID	Pattern	Thickness	Speed	Area1	Area2	FM Temperature	Coiler Temperature	Cofa measured
31970	48	18.50	2.4	2.6		835.3	0.0	1.036

故将高温计测量的范围 T_min 由 351 改为 100℃，从而保证了卷取温度(Coiler Temperature)的真实性，然后将 12 组及 12 组之后阀门全部设置为故障阀，然后精冷第 19 组的前 4 个阀门打开，其余全部设置为故障阀，这就保证了前馈和反馈控制全部用上，在此设置的前提下实际粗冷大约有 10 组阀门打开，根据实际温度进行反馈控制的过程中，精冷第 19 组的前 4 个阀门在时时变化控制，说明反馈在起作用，并且一般打开一个两个或者并不打开，因为卷取温度一般还是低于目标温度 360℃。在这种情况下，一般精冷前的高温计的温度一般大于 300℃仪表能够测量到实际的温度，所以也就保证了板坯的数据能够写入到自学习的文件中，长此积累下去从而能够慢慢优化自学习的系数，保证 X80 卷取温度的命中率。

4.1.4 优化低温卷取管线钢自学习参数

删除自学习文件中存储的人为干预参与自学习的带钢数据，将参与计算的自学习系数范围扩展为 0.6~1.7。

运用时，首先将前期手动设置故障阀等人为干预参与自学习带钢的数据从自学习文件中手动删除，以保证参与自学习的带钢的数据的准确性和精确性，减少由于人为干扰造成的卷取温度模型计算的误差，提高卷取温度的控制精度。

自学习文件 rolledstrip.txt 中最大存储 10000 条带钢的数据记录,若此文件中存储的数据量未达到饱和,则每轧一块带钢,此块带钢的数据依次增加到此文件中,若数据量已经达到饱和,则模型将此文件中已经存储的第一条记录自动删除,将最新轧制的带钢的数据依次存储到第 10000 条记录的位置,以此类推,以求达到自学习文件 10000 条记录的数据平衡。

在消化模型程序中,查看程序内对写入自学习文件数据的限制条件,将自学习系数的范围由 0.6~1.4 扩展为 0.6~1.7,以解决低温卷取管线钢等需快速冷却的钢种由于自学习修正系数过大导致带钢的自学习数据无法成功写入自学习文件的问题,以保证所轧制的低温卷取管线钢的相关数据成功写入到自学习文件中,以用于后期所轧制的低温卷取管线钢温度模型传热系数修正系数的计算,以提高模型的预计算精度,改善控制效果。

同时,要定期对自学习文件备份,对低温卷取管线钢及不经常轧制钢种的自学习数据积累备份,轧制前拷贝修正,提高自学习的控制精度。

4.2 优化水量配置

优化水量配置,解决配置水量与现场实际水量偏差过大导致预计算不准的问题。根据计算的自学习系数计算达到目标温度所需水量,在模型程序中根据该计算的水量设定所需水量,并使模型配置文件中的配置水量与现场实际水量相匹配。

由于层流冷却的水量经过了几次调整,现在的实际水量与原来的设计水量存在偏差,如表 4.1 所示。

表 4.1 实际水量与设计水量偏差

Table4.1 Form1 the difference of water flow between measured and calculated

阀门类型	上阀门（粗冷）		上阀门（精冷）		下阀门（粗冷）		下阀门（精冷）	
水量类型	实际水量	计算水量	实际水量	计算水量	实际水量	计算水量	实际水量	计算水量
水量（m3/h）	480	366	460	390	480	430	570	460

水量配置优化目的在于提高低温卷取管线钢头部命中率,现场实际水量为 480m3/h,配置文件中配置水量仅为 270m3/h,现场实际水量与配置水量偏差过大,会导致其温降传热系数的自学习系数达 1.4 以上;当自学习系数与 1 偏差过大时,降低了计算精度,导致管线钢头部卷取温度过低。

针对此问题,在预计算中,在自学习系数为 1 的基础上计算达到目标温度所

需的水量，再在自学习系数为 1 时所需的水量的基础上计算在实际自学习系数上所需的水量。一方面在模型程序中将所需要的水量修改为在所计算的自学习系数基础上计算达到目标温度所需的水量；另一方面优化完善配置文件中配置的水量与现场的实际水量相匹配。

4.3 优化参与自适应的带钢的位置

为防止头部因为有水或者其他的外界条件造成头部温度测量的不稳定性，在头部一定长度上没有段适应的修正计算，此长度根据厚度的不同而不同，根据以下公式进行计算：

$$\text{offset length} = a + b / \text{thickness}$$

$$a = 10; \quad b = 20$$

参数 a、b 分别在配置文件 general.txt 文件中定义。因此头部不进行段自适应的 offset 长度根据厚度的不同而不同，X80 的厚度为 18.4mm，故 $\text{offset length} = 10 + 20 / 18.4 = 11.08\text{m}$ 。如果我们想通过修改头部不修正的长度来改善头部温度的问题，可以在一定程度上缩短头部温度低的长度，但是前提必须是头部测量的温度要准确，无任何干扰。从我们在轧制过程中现场的监控来看，头部无积水，无雾气，现场没有对高温计测量的干扰信号，因此优化 a、b 的值，从而优化参与自适应的带钢的位置，提高头部计算的准确性。

由于在实时计算时，两点之间求热传导系数的偏差和 cofa 系数的偏差时都会用到参数 vlern，模型学习的比率，也就是说模型学习的速度。根据不同厂有不同的值，一般为 0.04 就可以，这个值如果太大也会造成超调的现象。如果 vlern 定义的范围为 0.08~0.12，那么对于带钢头部模型学习的速率就过大，那么带钢头部受此参数影响的效果最明显。此参数的计算公式程序输出如下：

double Strip::Learning::calcVlern(double pos, double speed)根据带钢的实际速度和头部到达自学习的高温计的位置来计算出 Vlern。

```
double Strip::Learning::calcVlern(double pos, double speed)
{
    double vlern;
```

```

const double posRef = vlern_offsetLength + vlern_offsetThickLength * speed(带钢此计算点的速度)

const double x = posRef/(posRef + pos);

vlern = vlernEnd + (vlernStart - vlernEnd) * x * x;

return vlern;
}

vlern_offsetLength:   offsetLength vlern = 10

vlern_offsetThickLength:  speeddependant additional offset length of vlern, multiplied with speed = 5

vlernStart:   vlern for very first measurements  = 0.12

vlernEnd:     = 0.08
    
```

为减小此参数的影响幅度，避免温度的超调现象，优化以上 4 个参数，将参数 vlern 控制在 0.04 以内。

4.4 本章小结

本章主要对首钢迁钢 2250mm 热轧层流冷却控制模型进行修正，一方面通过增加设备配置、优化配置模型参数、反馈控制和自学习投入、优化低温卷取管线钢自学习参数，另一方面，通过优化水量及优化参与自适应的带钢位置，达到优化带钢卷取温度的目。

第 5 章 生产应用实现

5.1 层流冷却 HMI 画面的介绍:

HMI 画面又称为人机操作界面，是 Human machine interface 的简称。它的作用是用于操作人员和相关专业根据现场的实际情况，对模型的设定做出及时快速的修改。点击如下图所示的“Setpoints CS”画面进入层流冷却的设定画面。

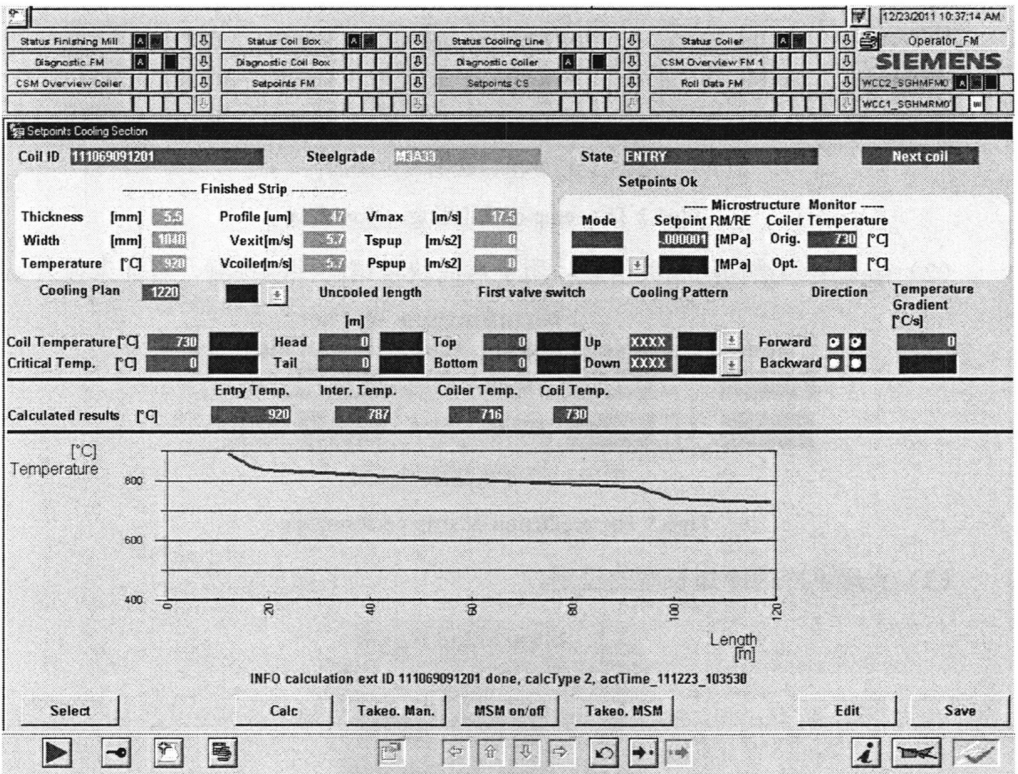


图 5.1 层流冷却的设定画面

Fig5.1 The setup of cooling section

5.1.1 层流冷却设定画面各按钮作用的介绍

(1) 按钮“Coil ID”表示当前参与计算的带钢的板坯号，按钮“Steelgrade”表示钢种，按钮“State”表示目前带钢的状态，按钮“Next coil”表示此块带钢是否下块即将轧制的板坯，按钮“Calc”表示触发一个新的计算，按钮“Takeo.MSM”表示微观组织结构的相关功能，按钮“Cooling Plan”是层冷的冷却策略号，用于确定层冷冷却方式。

5.1.2 层流冷却设定画面各模块显示内容的介绍

在层流冷却的设定画面上，我们看以看到许多子设定画面，它们的功能具体介绍如下：

（1）精轧出口的设定数据，其中包括厚度、凸度、最大的轧制速度、宽度、精轧出口的抛钢速度、温度加速度、精轧出口的温度、卷机的速度和功率加速度等相关信息。

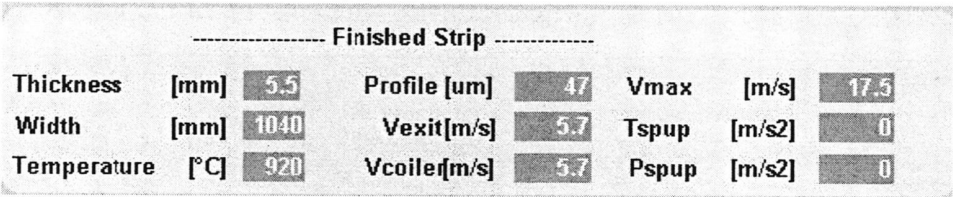


图 5.2 精轧出口数据设定画面

Fig5.2 The setup of finishing export data

（2）微观组织结构的相关信息，用于对此块带钢的性能预测，目前未投入。

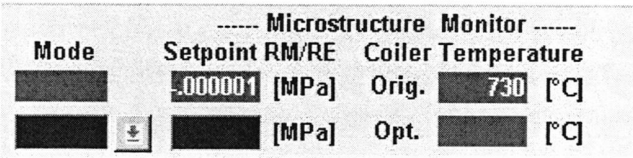


图 5.3 带钢性能预测画面

Fig5.3 The prediction of strip performance

（3）头尾不冷的冷却长度的设定。

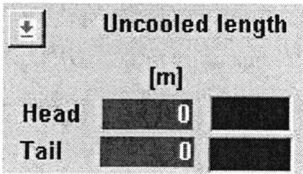


图 5.4 不冷却长度设置画面

Fig5.4 The Setting of the screen length is not cooling

（4）第一个阀门的开启，上阀门或者下阀门。

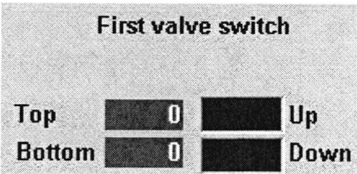


图 5.5 阀门开启画面

Fig5.5 The screen of valve opening

(5) 层冷的冷却模式，密集冷却或者稀疏冷却。此在第 3 章层流冷却的控制策略中已作详细的介绍。

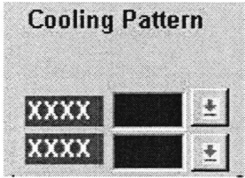


图 5.6 冷却模式画面

Fig5.6 The screen of cooling mode

(6) 阀门的开启顺序，自前向后或者自后向前。

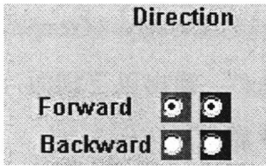


图 5.7 阀门开启顺序画面

Fig5.7 Valve opening sequence of images

(7) 温度梯度。

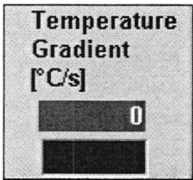


图 5.8 温度梯度画面

Fig5.8 Temperature gradient

(8) 目标的卷取温度和临界温度。

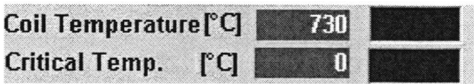


图 5.9 目标卷取温度和临界温度画面

Fig5.9 Coiling temperature and the critical temperature of the target

(9) 模型计算的结果。自左向右为层冷的入口温度、中间高温计的温度、卷机的温度、卷机前高温计的温度。

	Entry Temp.	Inter. Temp.	Coiler Temp.	Coil Temp.
Calculated results [°C]	920	787	716	730

图 5.10 模型计算结果画面

Fig5.10 The results of calculated

(10) 此带钢在整个层冷区域内计算的温降曲线。

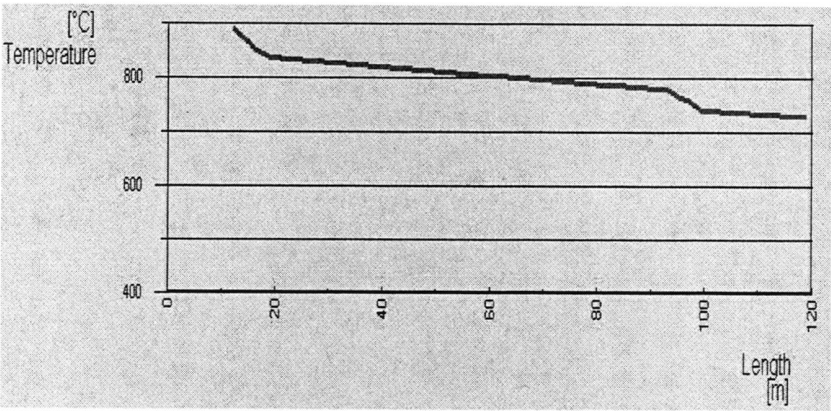


图 5.11 温降曲线画面

Fig5.11 The curve of temperature drop

(11) 点击此按钮 “Select”，弹出以下画面，自 “coil ID” 中选择某个板坯的板坯号，用于层冷模型的计算。

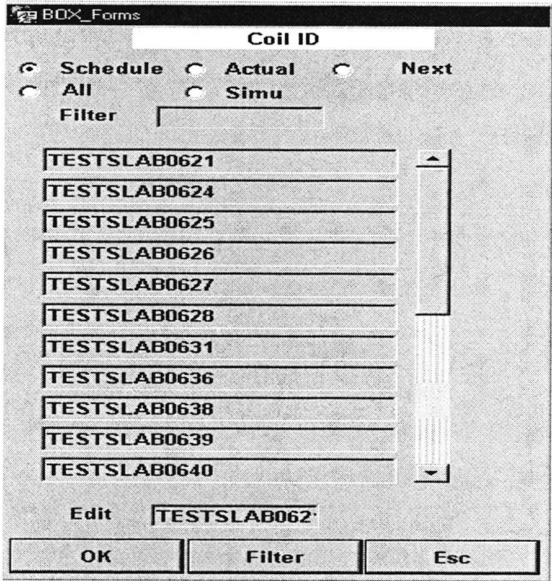


图 5.12 板坯选择画面

Fig5.12 Slab selection screen

(12)、点击按钮 “Takeo.Man” 弹出以下所示对话框，若选择 “Set” 则操作工手动输入的相关数据将继承到以下轧制的所有带钢，若选择 “Reset” 则操作工手动输入的相关数据只继承到下一块轧制的带钢。

点击、按钮 “Edit”，可以对层冷设定画面内所有此蓝色框内的数据进行编辑。编辑完成之后，点击 “Save” 保存按钮，则对编辑的数据进行保存，从而触发对此块带钢因数据修改而引起的再次计算。

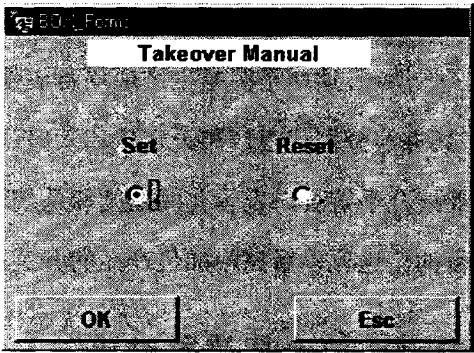


图 5.13 继承方式选择画面

Fig5.13 The selection of inheritance

5.2 应用效果

通过对层冷系统控制模块的优化，解决了我厂目前低温钢由于过低的目标卷取温度导致其温度模型的反馈控制和自学习功能无法正常投入以及由于温度模型

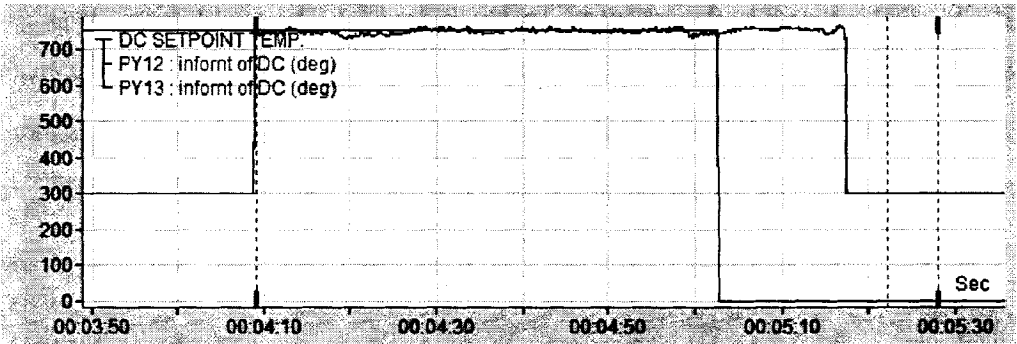


图 5.14 带钢卷取温度控制图

Fig5.14 Control chart of strip coiling temperature

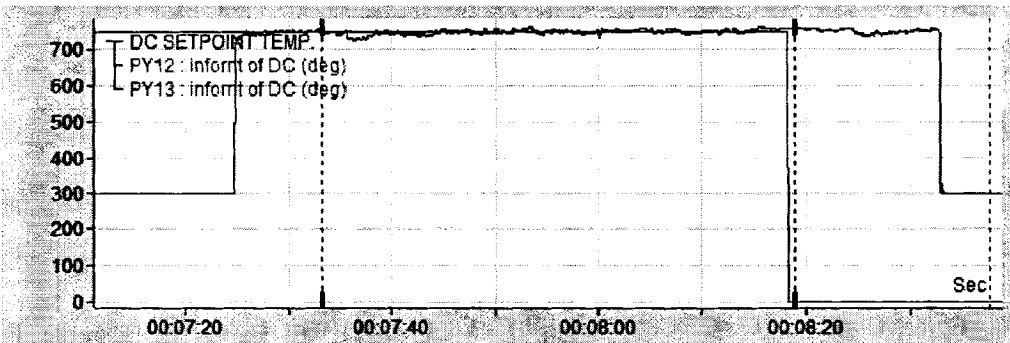


图 5.15 带钢卷取温度控制图

Fig5.15Control chart of strip coiling temperature

部分功能无法正常投入，卷取温度无法得到有效控制，从而使整个带钢长度上卷

取温度波动过而无法满足卷取温度控制精度和机械性能高稳定性的要求的问题。其实际应用如图 5.14、5.15 所示,这两个图是生产现场两块带钢温度的控制曲线,从图中可以看出,共有三条曲线分别代表模型设定值和入口两个高温计的实测值,很明显的可以看到三条曲线几乎重合,表示实测温度和系统设定温度基本一致,同时也表明优化达到了目的。这位以后高附加值产品的开发打下了坚实的基础。

5.4 模型优化前后带钢头部冷却效果对比

原低温卷取管线钢的卷取温度控制, 由于受现场高温计及原有西门子控制程序的制约及限制 (西门子控制程序只能保证 450℃以上卷取温度的控制精度, 低温卷取管线钢的目标卷取温度在 300℃~400℃之间), 低温卷取管线钢的卷取温度无法得到模型的自动控制, 保证卷取温度控制精度的反馈控制、自学习控制功能未能投入使用, 预计算偏差过大, 从而导致卷取温度在目标温度±100℃温度范围之内温度的命中率为 0, 实际温度一般控制在 100℃~200℃范围之内, 有时卷取会因温度太低而无法卷取造成废钢, 并且对我们的卷取设备危害极大。如图 5.16 为模型优化前同一钢种规格 (厚度 18.4mm 的低温管线钢) 的卷取温度控制曲线。

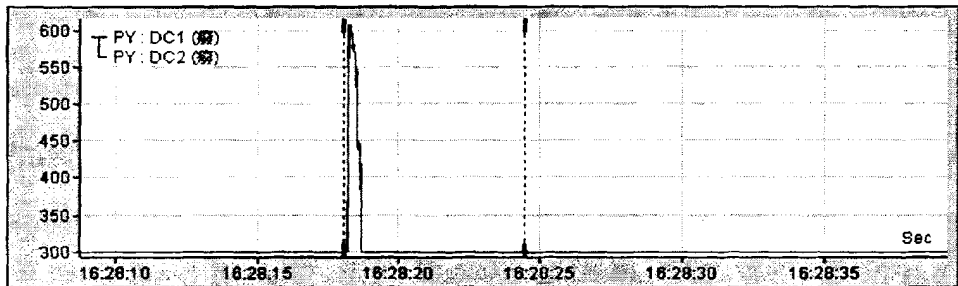


图 5.16 模型优化之前的实测卷取温度

Fig5.16 measured coiler temperature before model modified

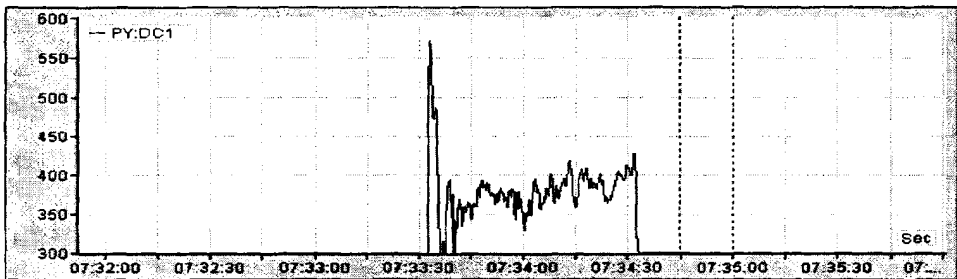


图 5.17 模型优化之后实测的卷取温度

Fig5.17 measured coiler temperature after model modified

模型优化之后,系统能够确保保证卷取温度控制精度的反馈控制、自学习控制功能投入使用,卷取温度控制得到明显的改善。卷取温度控制情况见图 5.17 所示。由图可见,由于反馈控制功能和自学习功能的成功投入以及卷取温度模型的完善与优化,卷取温度大幅波动现象被消除,均匀性也有所提高,带钢全长 ± 40 度卷取温度命中率高达 90%以上。

第6章 总结和展望

本文以迁钢 2250 热轧中宽带层流冷却项目为背景,以带钢层流冷却策略为研究对象,从带钢温度控制、冷却速度控制和力学性能均匀性控制出发,建立了现场使用的层流冷却策略。自投产以来层流冷却系统运行稳定、可靠,卷取温度控制精度高;只有低温卷取管线钢温度难以得到控制,后经模型优化,已经得到明显的改善。本文的主要结论如下:

(1) 从层流冷却过程的传热分析入手,建立了设定计算数学模型,详细分析了模型的预设定计算以及修正设定计算的程序实现,同时介绍了层流冷却控制系统的组别划分和控制系统的数流。

(2) 本文控冷模型为线性回归模型,它不同于理论的指数温降模型,因此既具有模型结构简单、精度高的特点,又可以根据现场数据进行分析更新参数,更符合现场的实际情况。本模型在现场应用效果良好,具有较宽的冷却速率控制范围,能较好控制热轧带钢卷取温度以及实现新钢种开发。

(3) 为提高低温卷取管线钢的卷取温度的控制精度。增加设备,修改模型参数,反馈控制功能和自学习功能的成功投入以及卷取温度模型的完善与优化,卷取温度大幅波动现象被消除,均匀性也有所提高,提高了低温卷取管线钢卷取温度控制精度的同时,满足了低温卷取管线钢机械性能稳定性的高要求,稳定了控制系统和模型。提高了此类带钢性能的合格率和产品质量。

(4) 根据所轧制钢种,新的卷取温度控制模型能够进行前段主冷(集管沿着轧制线方向依次开启)、后段主冷(集管逆着轧制线方向依次开启)、以集管组为单位的稀疏冷却等多种冷却速度控制,为品种扩展和新品种的开发奠定基础。

(5) 需进一步开发冷却路径控制技术并在热轧厂得到在线应用。实现过程控制系统不仅可对卷取温度进行单目标控制,还可以对卷取温度、中间目标温度和 CCT 曲线制定的冷却速度进行多目标控制。可以按照给定的中间目标温度和要求的冷却速度进行冷却路径控制,为钢种开发和冷却工艺优化提供强有力的技术手段。

(6) 需为层流冷却系统开发了 U 型冷却控制方法,实现对带钢头部和尾部的一定长度在实际卷取过程中要求卷取温度高于带钢中部的要求。以便大幅度地改善钢卷全长力学性能的均匀性。

此页不缺内容

参考文献

1. 中国金属学会热轧板带学术委员会. 中国热轧宽带钢轧机及生产技术[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002,79-80.
2. 孙蓟泉, 陈娟, 曲杨. 轧后冷却工艺对热轧窄带钢组织性能的影响[J], 上海金属, 2006,28(5): 36.
3. 谢海波, 邱长军, 刘相华, 王国栋. 热轧带钢层流冷却温度优化控制策略研究[J], 华南大学学报, 2010, 24(3): 44-48.
4. 刘忠满, 任吉堂. 热轧带钢层流冷却系统的技术开发与应用[J], 河北理工大学学报, 2009, 31(4): 38-42.
5. Lawrence W J, Mac Alister A F, Reeve P J. On line modeling and control if strip cooling[J]. Iron Making and Steel Making. 1996, 23(2) :74-781.
6. 余海. 热轧带钢轧后冷却技术的发展和应[J], 轧钢, 2006, 23(3): 38-41.
7. 翁庆宁. 轧钢新技术 3000 问[M], 北京:中国科学技术出版社, 2005, 5-7.
8. 马丽坤, 王君, 王国栋. 热轧带钢层流冷却自适应控制系统[J], 控制工程, 2005, 12(3): 228~230.
9. Henrich, Holz R, Knepe G. Physically based cooling line model to meet growing demands in temperature and flexibility[J]. Iron Making and Steel Making. 1996, 23 (1): 79-81.
10. 秦国庆, 韩静涛. 水幕冷却系统浅析[J], 钢铁研究, 1999, 108(3): 20-23.
11. Wang Xiaodong, Yang Quan, He Anrui. Calculation of Thermal Stress Affecting Strip Flatness Change During Run Out Table Cooling in Hot Steel Strip Rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 7 (2):130.
12. 彭良贵, 余明, 王昭东. 热轧带钢层流冷却数学模型述评[J], 轧钢, 2003, 20(6): 25-29.
13. Pinson Mark W. Wang Ting. Effects of leading-edge roughness on fluid flow and heat transfer in the transitional boundary layer over a flat plate [J], International Journal of Heat and Mass transfer, 1977, 40(12): 2813-2823.
14. Chiaki OUCHI. Development of steel plates by intensive of TMCP and direct quenching processes [J], ISIJ International, 2001, 41(6): 542-553.

15. 黄徐晶. 1450mm 热连轧机层流冷却过程仿真研究[D], 昆明: 昆明理工大学, 2007.
16. 孙明军, 卞皓谭, 耘宇, 袁军. 热轧带钢卷取温度精度优化[J], 技术材料与冶金工程, 2010, 38(5): 27-29.
17. 袁建光, 黄传清. 热轧带钢卷取温度控制及其改进[J], 轧钢, 1994, 108(4): 17-20.
18. 蔡晓辉. 热轧带钢卷取温度控制的优化[D], 沈阳: 东北大学, 2001.
19. 蔡晓辉, 时旭, 王国栋. 控制冷却方式和设备的发展[J], 钢铁研究学报, 2001, 13(6): 56-60.
20. 宁立国, 申群太, 王桂芳, 贾维卿. 热轧带钢层流冷却系统的前馈-反馈控制及其优化[J], 计算机测量与控制, 2008, 16(1): 51-53.
21. 片锦香, 柴天佑. 热轧带钢层流冷却过程混合智能控制方法[J], 东北大学学报, 2009, 30(11): 1535-1537.
22. Henrich L, Holz R, Knepe G. Physically based cooling model to meet growing demands in temperature and flexibility[J]. Iron making and Steel making, 1996, 23(1): 79~81.
23. 戴干策, 任德呈, 范自晖. 传递现象导论[M], 北京: 化学工业出版社, 2008, 142.
24. 朱跃钊, 廖传华, 史勇春. 传热过程与设备[M], 北京: 中国石化出版社, 2008, 11.
25. 张美杰. 材料热工基础[M], 北京: 冶金工业出版社, 2006, 127-157.
26. Lawrence W J, MacAlister A F, Reeve R J. On line modeling and control of strip cooling [J]. Iron making and Steel making, 1996, 23(1): 74- 78.
27. 谢海波, 张中平, 刘相华, 王国栋. 热轧层流冷却系统优化与模型参数自适应[J], 中南大学学报, 2006, 37(2): 317-323.
28. 雷刚, 董志远. 适应 X80 生产的层流冷却改造[J], 重庆工学院学报, 2008, 22(11): 47-50.
29. 彭良贵, 刘相华, 王国栋. 热轧带钢控制冷却技术的发展[J], 钢铁研究学报, 2007, 35(3): 59-62.
30. Guan S P, Li H X, Tso S K. Multivariable fuzzy supervisory control for the laminar cooling process of hot rolled slab[J]. IEEE Transactions on Control

- Systems Technology , 2001 ,9(2) :348-356.
31. 彭熹, 吴敏, 曹卫华, 冯春. 基于卷取温度预测的层流冷却优化控制模型[J], 计算机测量与控制, 2007, 12(02): 176-178.
32. M.R.Pais, L.C.Chow, E.T.Mahefkey. Surface roughness and its effects on the heat transfer mechanism in spray cooling[J]. ASME International of Heat Transfer, 1992, 114(4):211-215.
33. SAROJ K, BISWAS. Optimal Temperature Tracking for Accelerated Cooling Processes in Hot Rolling of Steel[J]. Dynamics and Control, 1997, (7): 327-340.
34. 彭良贵. 热轧带钢层流冷却策略研究及其应用[D], 沈阳: 东北大学, 2007.
35. 彭良贵, 刘相华, 王国栋. 热轧带钢层流冷却控制策略的演变[J], 钢铁研究学报, 2005, 17(3): 5-9.
36. Auzinger D. Recent development in process optimization for laminar cooling in hot strip mills[J] . Iron Making and Steel Making , 1996 ,23 (1) :84 - 87.
37. Wang J, Wang G D, Liu X H. Hot strip laminar cooling control model[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2004, 11(5): 13- 17.

致谢

本论文是在导师高宪文教授悉心指导下完成的。在本文创作期间，高宪文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高宪文教授表示衷心的感谢。

在课题研究以及论文撰写期间，得到了学长和同学们的鼎力帮助。在此，向给予我支持与关心的所有老师、同学和同事表示衷心的感谢。

在模型和实际数据分析中，本人得到了同事王凤美、王淑志和热轧作业部板型研究小组的帮助和指导，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和同学的关心与帮助。

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！