

东北大学

硕士学位论文

热轧带钢层流冷却控制模型的研究

姓名：杨莎

申请学位级别：硕士

专业：材料加工工程

指导教师：徐建忠;龚殿尧

20090701

热轧带钢层流冷却控制模型的研究

摘 要

层流冷却对热轧带钢产品的组织和性能具有重要的意义。首钢迁钢 2160mm 层流冷却系统完全由国外引进，其代码存在大量的所谓“黑箱”，限制了模型的进一步开发、应用和维护。本文以迁钢 2160mm 过程控制模型的消化和吸收项目为背景，通过查阅相关资料，归纳了其控制思想，提取了层流冷却数学模型、冷却控制模块，为热轧带钢层流冷却控制系统的开发和应用提供了依据，为进一步优化层流冷却过程控制系统打下了基础。主要研究结果如下：

(1) 迁钢 2160mm 层流冷却系统采用过程机预设与基础自动化动态在线修正相结合的方式，实现带钢在热输出辊道上的卷取温度控制以及冷却路径控制。

(2) 提取了带钢温度计算数学模型，包括膜沸腾的热流密度计算模型、辊道冷却热流密度模型、空冷热流密度模型和喷射水冷热流密度模型。该系统采用 Gauss-Lobatto-Net 法进行节点划分，采用后向欧拉有限差分方法计算带钢在输出辊道上任意位置的温度分布，提取了材料的物性参数计算模型，包括热传导率曲线模型、温度与热焓的曲线模型，在此基础上得出热平衡方程的热动态特征值的解法。

(3) 迁钢 2160mm 层流冷却过程控制系统的修正设定计算过程中采用了冷却监测器和冷却控制器的控制思想。冷却监测器可以实时计算冷却区上任意点的中间温度，结合 46 种阀态组合优先列表，为控制器进行阀组态的实时设定提供很大的方便。通过归纳总结冷却控制器和冷却监视器的控制思想，总结出该系统阀态动态控制的思路。

(4) 同板自适应是提高层流冷却首块钢命中率的有效手段，迁钢 2160 层流冷却系统具有同板自适应功能和异板自学习功能。本文提取了同板自适应和异板自学习的方法。为提高层流冷却控制精度提供参考依据。

(5) 现场数据表明该层流冷却过程控制系统控制精度较高，对该系统的理解为对层冷过程控制模型的二次开发与调试奠定了基础。

(6) 通过消化和吸收迁钢 2160 层流冷却控制模型，总结和其优势与劣势，为层流冷却系统的功能优化和二次开发提供参考。

关键词：热轧带钢，层流冷却，数学模型，冷却策略，软件消化

Study on Control Model of Laminar Cooling for Hot Strip Mill

ABSTRACT

It is very significant to control the properties and structure of hot strips by laminar cooling technology. The laminar cooling system in Qian'an Steel was imported. It is difficult for the further development, application and maintenance of the model as to a large number of "black boxes" in the code. The paper is based on comprehending 2160 laminar cooling system in Qian'an Steel by consulting many references. The paper summarizes the control principle and extracts the mathematical model and the cooling control module. It provides foundation for the further exploiting, applying and optimizing laminar cooling control system. The main ideas are as follows:

(1) It is precaculation in process automation and dynamic online correction in basic automation used in 2160 laminar cooling system in Qian'an Steel that controls coil temperature and cooling path on the rolling table.

(2) The hot strip temperature mathematical models are extracted, which mainly includes: film-boiling heat flux calculation model, cooling roller heat flux model, air-cooled heat flux model and spray cooling heat flux model. Gauss-Lobatto-Net was used for nodes discretization, temperature distribution on any points of the strip is calculated by using Euler Back PDE-solving method. Material models have been extracted, which mainly include: thermoconductivity curve model, relationship model between temperature and enthalpy. The solutions of dynamic eigenvalues in heat balance are found.

(3) The control ideas of cooling monitor and cooling controller are used in modification setting calculation process in laminar cooling system in Qian'an Steel. Cooling monitor will calculate the intermediate temperatures of any points in the cooling space with 46 kinds of valve priority list, which makes it easy to set valves online. The paper summarizes the control ideas of the cooling monitor and the cooling controller and the dynamic control method of the valve-state.

(4) Inner strip adaption is an effective way to improve the hit rate of the first steel in the laminar cooling system. There are two strategies in Qian'an 2160 laminar cooling system:

inner strip adaption and strip to strip adaption. Both of them are extracted in this paper, which provide basis for improving the control accuracy of the laminar cooling system.

(5) Data collected on-site shows that 2160 laminar cooling system owns a high control precision. It is valuable for redevelopping and debugging laminar cooling control model to study on the system.

(6) The advantages and disadvantages of the control model were summarized through studying on the control model of 2160 laminar cooling system in Qian'an steel, then gives a reference to laminar cooling system optimization and a further development.

Key words: hot rolled strip, laminar cooling, mathematic model, cooling strategy, software comprehension

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：

日 期：

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：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

第1章 绪 论

1.1 课题背景

随着我国钢铁产量的大幅提高,钢铁工业也越来越快地发展起来。虽然我国钢产量已经连续9年居世界第一,但钢铁产品质量,特别是热带产品质量使我国在国际竞争中仍处于劣势。2008年下半年开始的世界性金融危机加强了钢铁企业的危机意识,对产品的高附加值和高技术含量的重视程度明显提高。企业的目标由追求产量的最大化逐渐向追求质量的最优化转变,在这种情况下,国内厂家纷纷对现有轧线进行改造或者加大新工艺新技术在新线建设中的投入力度。国内各科研院所在老线改造过程中起到了重要作用,国外厂家如西门子、德马克、三菱和GE等分别承担和准备承担国内热带生产线项目。因此,迅速掌握开发国产带钢过程控制技术成为重要课题。

控制轧制和控制冷却工艺是现代钢铁工业取得的最重要技术成就之一,ASTM和JIS已经把这一工艺列入标准中,命名为形变热处理工艺(TMCP,即Thermo-Mechanical Control Process)^[1]。轧后层流冷却的自动化控制是实现TMCP的重要手段,其控制目标为目标卷取温度。轧后冷却控制是一个复杂的工业控制过程:带钢在输出辊道运行过程中,其传热过程包括辐射传热、输出辊道上部的层流冷却水冷换热、下部的喷射冷却换热、带钢和热输出辊道的接触热传导,还有在冷却过程中因发生相变而产生的相变潜热。水冷换热与带材的材质、终轧温度、厚度、速度、冷却水的水量、水压、水温及水流运动形态、冷却装置的设备工况等多种因素有关,这些因素使水冷换热系数的确定成为理论上的难题;带钢在冷却区的速度随轧制过程的进行实时变化,使带钢在冷却区内的位置跟踪和冷却时间的精确确定成为难题。

本文研究工作依托于首钢迁钢2160mm热轧带钢生产线新建项目展开,该生产线的层流冷却过程控制系统完全由西门子引进,存在大量的所谓“黑箱”,程序代码不可见,这为后续的软件维护与功能开发设置了巨大的障碍,消化和吸收该控制模型对于提高卷取温度控制精度以及促进我国过程控制模型的发展具有一定的意义。

1.2 国内外研究状况

自从1926年第一台热带钢轧机在美国诞生以来,虽然热轧带钢投资很大,但由于可以大批生产、质量优良、生产成本又低,故短期内在各国得到了迅速的发展。到目前为止,在世界上已经设置了近200套热带钢轧机。1960年代中期,日本开始在热连轧

机组上采用计算机控制, 1964 年新日本钢铁公司钢铁厂的 1420mm 带钢热连轧机部分采用计算机控制。1971 年 11 月投产的新日本钢铁公司大分厂 2235mm 带钢热连轧机全部采用计算机控制, 成为先进设计的典型。

进入 80 年代, 有关热轧双相钢的控制轧制(CR)和控制冷却(CC)的基本理论研究, 在日本开展的非常迅速^[2-5]。新日铁、川崎制铁和神户制钢分别进行了控制冷却的热轧双相钢的研制, 新日铁为此改造了热轧作业线上的冷却设备, 在低于 200℃ 的超低卷取温度下, 稳定地生产出了双相钢。1980 年代, 带钢热连轧计算机控制系统发展日臻成熟, 实现了高精度轧制、控制轧制、来料热装热送轧制(直接轧制)和节能型约低温轧制。控制的范围也从热轧生产线向两侧扩展, 包括对板坯库、钢卷库、成品库的控制和管理。国外新建的带钢热连轧机都配备计算机控制系统, 而且在对旧有轧机的改造工程中, 最重要的一项内容就是采用计算机控制。在冶金工业中, 带钢热连轧计算机控制系统是发展最迅速、成熟, 效果最明显的计算机系统, 不仅提高了生产效率, 而且大大改进了尺寸精度和性能, 带来了巨大的经济效益。

到了 90 年代, 为了解决冷却设备存在的问题及冷却能力的不足, 日本再次对冷却设备进行了改造。改造后, 卷取温度的精度得到了提高, 到 1994 年, 对于 213mm 厚, 卷取温度为 550℃ 的普通性能钢, 卷取温度合格率达到 95% 以上的占 99%; 带钢宽度和长度方向上的机械性能均匀; 减少了两面的硬度差; 降低了炼钢成本; 降低了后工序的生产成本。此时欧、美各国也相继在现有设备改造、新技术的引进、全面生产跟踪、管理系统自动化等诸多方面做了大量的工作, 从而提高了精轧温度, 改善了卷取温度, 改善了带钢全长板形质量^[6-11]。

综上所述, 从 60 年代的带钢层流冷却到 90 年代的层流冷却系统的技术改造, 各国的科技工作者做了大量的工作, 注意力集中在工艺技术的改造和控制技术(即控制器的设计, 控制策略的给出)的改进。目前控制模型的建立基本上是遵循: 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^[12-14]。这主要是因为该过程是一复杂的物理过程。冷却水和灼热的带钢初接触时, 带钢和水之间的巨大的温差引起迅速的热传导, 可是由于在带钢表面迅速形成隔离的蒸汽层, 即“膜状沸腾”, 结果出现一段低导热期, 待到蒸汽层不再稳定地附着在带钢表面时, 钢和水重新接触, 进入“泡核沸腾”期, 此时产生很强烈的热传导。之后带钢逐渐变冷, 热传导也相应地逐渐降低。任何强制冷却的效果, 取决于蒸汽层的破坏及达到“泡核沸腾”的程度。冷却时生成的蒸汽层膜, 对传热系数影响比较大, 使传热系数在 1000~16000W/(m²·K)之间波动, 而且带温无法实时检测。显然该过程具有多变量、强耦合、非线性和时变, 且关

键控制参数不能连续在线检测的特点, 缺乏采用先进控制技术对此复杂的过程给出完满的、切合实际的方案。

我国对于控制轧制控制冷却技术的起步较晚, 20 世纪 70 年代末, 我国武钢 1700mm 热带轧机从日本全套引进层流冷却系统, 上部采用柱状层流冷却, 下部采用喷水冷却, 这是我国引进的第一套带钢热连轧计算机控制系统。90 年代, 武钢将控冷模型改进移植到新一代计算机中, 不仅得到了本厂的实践验证, 而且在太钢和梅钢得到推广^[15]。宝钢 2050mm(德国引进)和 1580mm(日本引进)生产线也均采用柱状层流冷却, 设备运行稳定, 卷取温度控制精度高^[16,17]。

2004 年由东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室、北京冶金自动化研究院和攀钢 1450mm 热轧厂共同对攀钢热轧过程控制系统特别是轧后层流冷却控制系统进行了改造, 改造后取得了较高的精度^[18,19]。2005 年, 由东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室承担的四川川威 950mm 热轧带钢层流冷却控制系统的项目也取得了良好的效果。

层流冷却过程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实验室的大量实验, 模型中的参数由实际装置状况给定。所以, 各国学者及技术人员在冷却模型方面做了大量的工作, 得到了各种约束条件下的不同的冷却模型。而我国的生产状况常常是边界条件得不到保证, 如终轧温度, 国外一般要求在 $\pm 15^{\circ}\text{C}$, 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。从查阅的参考文献^[3,4,7,8,20]可知, 国外的带钢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。反馈控制算法采用带有滤波的 PI 调节器用以修正实际卷取温度与目标卷取温度的偏差; 前馈控制算法用以补偿边界条件的波动; 预测控制模型给出层流冷却区域内的温度变化过程; 学习控制用以完成对卷取温度预测模型中参数的自适应修正等。这些控制方法的采用使卷取温度合格率由最初的 70%多, 经过几年的运行及设备改造和技术改造后, 达到目前卷取温度合格率 90%以上。参考文献^[8]中表明, 先进冷却控制技术是以冷却模型为基础的。所以, 研究建立带钢层流冷却过程的动态模型和控制模型是十分重要的。

1.3 层流冷却设备

层流冷却设备布置在输出辊道的上下方, 上部集管采用常规 U 形管、高密度 U 形管和隙缝式直集管几种方式, 下集管喷嘴形式主要有传统喷射式、柱状多孔喷嘴以及水没式喷嘴^[21]。这几种集管的布置见图 1.1。

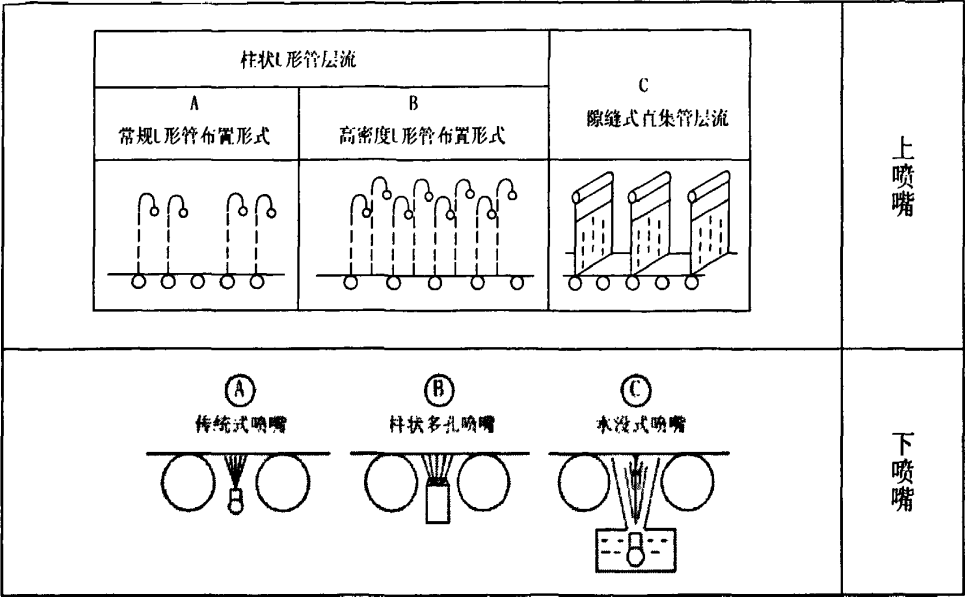


图 1.1 几种方式的集管布置形式
Fig.1.1 Several kinds of layout of laminar headers

(1) 上喷装置

上喷装置采用集水管冷却方式。每根集水管上都布置两排相互交错的鹅颈管(微调集水管上的鹅颈管为单排)，并且每根鹅颈管的根部都放置一个节流孔板，以保证带钢沿其宽度方向冷却均匀。上喷装置由若干个冷却区段组成，每个冷却区段包含 4 个集水管，且由一个液压缸带动翻转。当检修辊道及处理事故时，将集水管翻起。上喷装置的控制可按单元划分为粗调(双集水管或 4 排鹅颈管控制)和精调(单集水管或 2 排鹅颈管控制)。此外，上喷装置的每个控制单元配置两个旋转接头，用来连接供水管路和各冷却单元，以满足各冷却单元的倾翻功能^[22]。

(2) 下喷装置

下喷装置和上喷装置一样采用集水管冷却方式，集水管分别布置在冷却辊道的每两个辊子之间，并且与上喷装置一一对应由若干个冷却区段组成，单元控制同样分为粗调(6 根集水管为一个单元)和精调(2 根集水管为一个单元)。武钢 1700mm 带钢层流冷却装置将一排喷嘴布置在下喷集水管上，通过调整各喷嘴角度来保证带钢上的冷却水沿宽度方向上的一致性，每个控制单元有一个气动三通球阀。但该装置的缺点是上下喷冷却水量的配比不均(约 2：1)而引起冷却不均，带钢表面的氧化铁皮极易堵塞喷嘴，且喷嘴的维护和更换极不方便。宝钢 2050mm 带钢层流冷却装置注重冷却效果，改变了上下喷冷却水的比例(1：1)，而且各排集管上的喷管都交错布置，同时喷管不是垂直向上而是成一定角度，避免了堵塞。

(3) 侧喷装置

为了提高冷却水的利用率，在各冷却单元之间均布置有侧喷嘴，即当上喷冷却水吸

收一定热量后，快要形成气膜前用中压水按一定角度冲刷带钢表面，实现新旧冷却水的交换。新设计的侧喷装置每组由单个喷嘴均改为双喷嘴，改善冲刷效果及测温环境，提高了冷却水的热交换率。

从精轧出口到卷取机入口，层流冷却设备按功能分为主冷段和精冷段，主冷段按过程模型设定结果确定集管组态，精冷段主要按反馈控制确定集管开闭组态。一般在精轧出口处和卷取机入口处分别配置高温计，也有在主冷段的中部钢板下方配置高温计，以提高层流冷却控制精度^[23]。

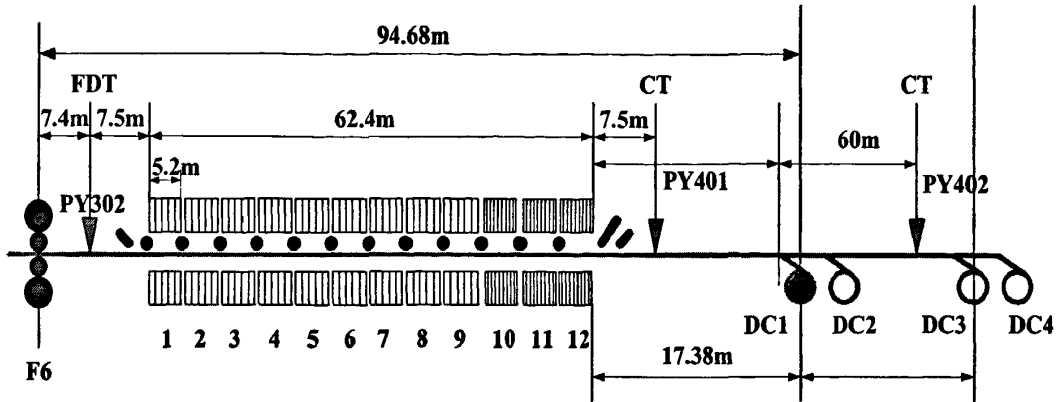


图 1.2 某 1450mm 热连轧层流冷却区设备布置简图
Fig.1.2 Layout of laminar cooling facility on the run out table of 1450HSM

典型的层流冷却区设备布置如图 1.2 所示。层流冷却装置长度根据处理带钢的厚度、轧制速度和温降来确定。层流冷却装置位于精轧末架后约 15m 远的位置上，冷却区域的范围定义为从精轧后的测温仪开始到卷取机前的测温仪为止，其中冷却装置区为 62.4m。采用了上部层流，下部喷射的喷水方式。冷却装置主要由上部冷却、下部冷却和侧喷三部分组成。整个冷却区分为主冷段和精冷段，主冷段有 9 个集管组，每个集管组包括 6 个集管，精冷段有 3 个集管组，每个集管组包括 12 个集管，每个集管为一个控制单元，整个冷却区上下共 180 个控制单元，上下各 90 个，在每两个集管组之间都设有侧喷装置，在精轧末架后出口附近和卷取机夹送辊前，各设有两个空气喷嘴，吹掉带钢表面的积水和雾气，以便较准确地测厚和测温。红外测温仪 PY302、PY401、PY402 分别测量带钢终轧温度、1#卷取温度和 3#卷取温度。

1.4 冷却控制系统

随着计算机和自动化技术的飞速发展，带钢的冷却控制系统已普遍实现了计算机自动控制，其中过程机控制系统的投入使用，使热连轧带钢的冷却控制精度有很大的提高。总结国内外各个热轧带钢厂所采用的冷却控制系统^[24-27]，可以发现尽管不同的带钢生产线应用的冷却装置各式各样，其冷却控制系统却大体一致，基本都是包括前馈控制、反

馈控制、自适应控制三大部分(如图 1.3 所示)。

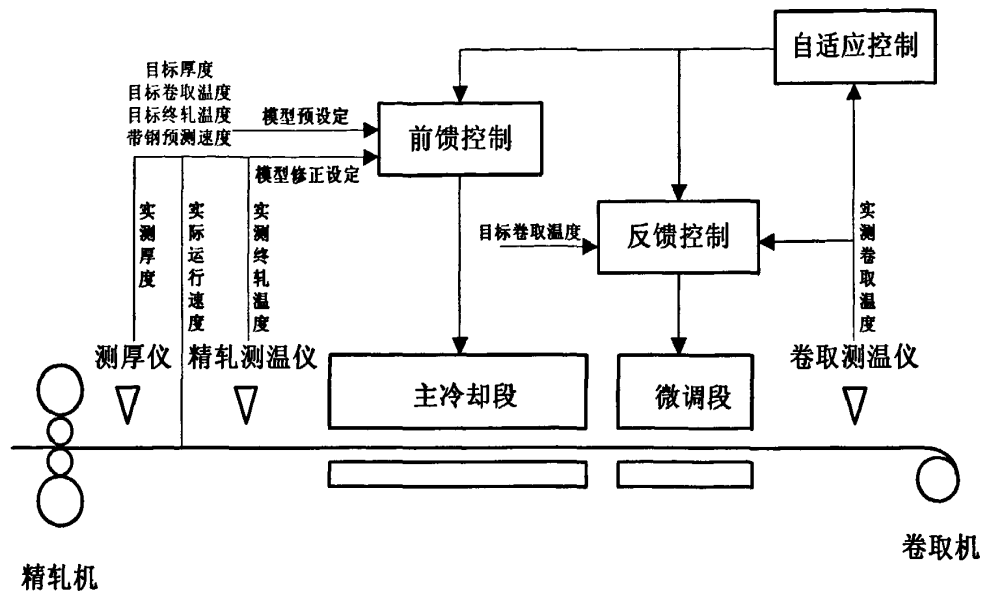


图 1.3 热连轧带钢冷却控制系统构成示意图
Fig.1.3 Structure diagram of the cooling control system in hot rolling strip mill

(1) 前馈控制

前馈控制的两个重要的功能就是预设定和跟踪修正。预设定功能是在带钢进入精轧机时，根据带钢精轧出口的预报温度、速度、目标厚度预先计算需要开启的阀门的组数以及排布位置，以便跟踪修正时只对部分阀门的开/闭进行调整，提高在线控制的及时性。跟踪修正是在带钢头部到达精轧出口测温仪后，对带钢实施分段跟踪，检测带钢各个区段实际的终轧温度、速度和厚度，如果实测值和预报值之间存在偏差，则应根据预报值得到的预设定结果进行修正，计算需增减阀门的数量(主要是调整后段冷却区阀门的开启数量)，同时对每段进行位置跟踪，对不同段实行不同的修正控制，开启对应需要增加的阀门使之正好喷到相应的区段上或对应关闭需要减少的阀门。

(2) 反馈控制

反馈控制在冷却区中通常对应有一个单独的控制区域(位于冷却区尾端)，该区内包括一定数量的阀门，是通过比较实测的卷取温度和目标卷取温度来调整反馈区阀门的开/闭，使得实测的卷取温度在目标卷取温度上下振荡趋近，保证同板温差在目标范围内。反馈具有滞后的特点，每次的反馈量都是刚刚通过卷取测温仪的带钢区段对应的实测卷取温度和目标卷取温度比较的结果，而这个结果总是应用在该段之后马上要经过反馈区域的小段带钢上，由于卷取测温仪距离反馈区域较远，这两段也相距较远，所处的状态未必一样，有时反馈控制的结果恰恰适得其反，因此前馈控制比较成熟之后，常常以前馈控制为主，反馈控制仅作微量调节。

(3) 自适应控制

自适应控制是通过比较卷取温度的实测值和前馈给出的计算值之间的偏差,对模型中的参数进行学习计算,以修正模型。在实际工业控制中,力求模型简单化,一般都是把现场诸多不可知的或难以精确描述的因素归纳成一个或多个参数,放到模型中去,但由于硬件环境以及其它随机变化因素的影响,使得这些参数并不稳定,如果固化归纳出的参数,将使模型不能适应实时变化的环境,计算精度降低。当主要依赖前馈进行控制时,自适应控制是非常好的辅助手段,不断修正模型系数,从而获得较高的前馈预设定精度。模型的自适应有如下几种方法:1)利用历史带钢数据进行自适应;2)神经网络;3)递归线形回归。方法1)的缺点是当历史带钢数据较少时,无法进行在线的长期自学习,不能适应产品组别的变化。当控制过程没有精确的数学模型,神经网络技术是适用的。递归自适应适于在线控制模型的精度需要不断提高的场合,虽然物理模型涵盖了相关的过程参数,但有些参数的影响不能事先确定,所以提高模型预报精度的关键在于模型要有自适应的能力,即在过程实测数据的基础上,模型参数能自动地进行自适应调整。当带钢的样本到达卷取机前的测温仪时,预报的温度值和实测值的温度值进行比较,利用偏差值对冷却过程的换热系数进行调整,调整后的参数用于相同组别的后续带钢生产时的设定计算。

带钢层流冷却控制系统的目标卷取温度是带钢成品的关键指标^[28],卷取温度控制面临的问题有^[29]:带钢任意一点从精轧机架运行到卷取温度测温仪时,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温度进行实测和适时调节冷却水量;但同时又要求带钢各点到达卷取温度计时,温度处于精度要求的范围之内,即对卷取温度控制的带钢全长进行质量控制,不对带钢的被调量状态进行观测,保证带钢各点到达控制终点时,被调量的值满足精度要求,这就必然受预设定模型的限制,一些科技工作者对冷却过程的数学模型进行了研究^[30-33]。

1.5 研究的意义和内容

随着热带轧制过程计算机的普遍应用,研究热轧带钢温度过程控制模型与相关控制策略,对于提高热带产品科技含量与附加值,提高国内钢铁企业竞争能力甚至对国民经济的可持续发展,都具有重要的理论意义和实际价值。

本文结合层流冷却过程控制模型的开发和应用过程,就热轧带钢轧后层流冷却模型的优化与改进做了较为详细的论述,主要研究目的为:破解程序中的所谓“黑箱”,消化吸收迁钢 2160mm 层流冷却过程控制模型,提取其卷取温度过程控制策略和数学模型,为层流冷却过程控制模型的二次开发与调试打下基础。

结合首钢迁钢 2160mm 热轧带钢生产线现场实际,在查阅相关文献的基础上,消化

和吸收其层流冷却过程控制模型，分析模型的优势与劣势，为二次开发与功能优化奠定基础，为完善 TMCP 控制手段提供理论依据，具体研究内容如下：

- (1) 消化吸收迁钢 2160mm 层流冷却过程控制数学模型，研究传热过程中热流密度的计算模型，研究控制模型的有限差分方法和离散化方法，对材料模型的计算方式进行详细分析；
- (2) 提取迁钢 2160mm 层流冷却控制策略，并分析控制策略的特点以及修正设定过程的设定方式，研究层流冷却自适应过程学习系数的确定模型；
- (3) 针对过程控制模型的现场应用，分析模型的应用效果，验证模型的控制精度。

第2章 层流冷却过程控制模型研究

带钢热连轧生产过程中，温度是一个十分重要的因素。轧后冷却是在线 TMCP 的重要环节，也是在线过程控制的最终环节，其控制精度直接关系到成品的组织性能，因此准确计算各个环节的温度变化并给出层流冷却集管的实时组态具有重要的研究意义。

在轧后层流冷却区，主要通过温度计算模型预测带钢进入冷却区不同时刻的温度，求出需要的冷却水量，以使带钢达到目标卷取温度。层流冷却过程控制系统将计算得出的必要冷却水量转换成开启阀门数，并根据工艺要求，按照不同的控制策略给出喷水阀门阵列，由基础自动化完成对喷水阀门的开闭操作。除了必须采用高效率的冷却装置外，为了提高卷取温度控制精度，还需要有一个能较好反映带钢在冷却区中冷却行为并实时得出带钢在冷却区内各位置温度的计算模型。

2.1 层流冷却的传热学基础

轧件在冷却辊道上的温度变化过程包括带钢内部各节点之间的热传递和带钢表面与外部介质之间的热传递，带钢的内部由于相变形成内热源产生较大热量，使轧件表面与中心温度存在温差，并形成热量的传递；在外部由于轧件表面与周围介质间的热交换，存在三种不同的热交换方式：辐射、对流和热传导。

传热学在层冷区域研究的就是带钢不同温度的各部分之间热量传递的规律，基本公式包括辐射换热，对流换热和热传导三方面的内容。

2.1.1 辐射换热

带钢在空气中的时候不断通过辐射方式散出热量造成温降，此时实际上同时存在空气对流，但其产生的温降和辐射温降相比只为后者的 5%~7%，因此，一般将其归于辐射温降。

由辐射散失的热量为：

$$Q = E_1 F \tau - E_2 F \tau = \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F \tau \quad (2-1)$$

其热流密度为：

$$q = \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \quad (2-2)$$

而热流量为:

$$\phi = qF \quad (2-3)$$

式中: σ —绝对黑体的辐射系数, 又称斯蒂芬—玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ε —实际物体的黑度, 又称为辐射率($\varepsilon < 1$), 当表面氧化铁皮较多时为 0.8, 刚轧出的平滑表面为 0.55~0.65, 需根据实验来确定;

T —物体绝对温度, $T = t + 273$, K;

T_0 —环境温度, K;

E_r —散失到周围介质中的能量(单位面积和单位时间内散失的);

E_2 —吸收的能量(单位面积和单位时间内吸收的);

Q —热量, J(工程上常用 kcal);

F —散热面积, 对板坯来说 $F = 2Bl$ (B 为板坯宽度, l 为长度), m^2 ;

τ —时间, s。

上式由于 $T_0 \ll T$, 因此一般可以忽略环境温度, 采用微分形式可写成:

$$dQ = \varepsilon \sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 F d\tau \quad (2-4)$$

2.1.2 对流换热

对流换热的强度不但和物体传热特性有关, 而且更主要决定于介质的物理性能和运动特性, 在这种热交换过程中, 常伴随流体集态的改变(产生气泡、汽膜)。其过程极其复杂, 为便于计算, 常采用简单形式如下:

$$dQ = \alpha (t - t_0) F d\tau \quad (2-5)$$

式中: F —热交换面积, m^2 ;

τ —热交换时间, s;

t —带钢温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_0 —介质温度, $^{\circ}\text{C}$;

α —强迫对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

对流传热系数 α 值集中考虑了各种因素的影响, α 值理论计算较复杂, 通常由实验确定。

热流密度:

$$q = \frac{dQ}{Bld\tau} = \frac{-h\rho C}{d\tau} dt \quad (2-6)$$

式中: h —厚度, m;

ρ —密度, kg/m^3 ;

C —比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (不同温度下 C 值不同)。

实际上, 把对流冷却的换热系数 α 归结到热流密度 q 中, 通过现场试验来确定 q 而不是 α 值。

2.1.3 热传导

热传导有两种类型: 一是接触热传导, 即当两件接触的物体存在温差时将产生热量传导; 二是当物体表面温度和中心温度有差别时将发生热传导。带钢热传导过程取决于内部温度分布, 温度场随时间变化。

取导热物体内一微立方单元, 设各侧表面上导入的热流密度为 q_x , q_y 或 q_z , 导出热流密度为 q'_x , q'_y 或 q'_z , 则

$$\left. \begin{aligned} q'_x &= q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\ q'_y &= q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \\ q'_z &= q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

在 $d\tau$ 时间内导入和导出的热量为:

$$\begin{aligned} dQ_x &= q_x dydzd\tau & dQ'_x &= \left[q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right] dydzd\tau \\ dQ_y &= q_y dxdzd\tau & dQ'_y &= \left[q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right] dxdzd\tau \\ dQ_z &= q_z dxdydzd\tau & dQ'_z &= \left[q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right] dxdydzd\tau \end{aligned} \quad (2-8)$$

经 $d\tau$ 时间后, 由单元体内放出热量为:

$$dQ_x = (dQ'_x - dQ_x) + (dQ'_y - dQ_y) + (dQ'_z - dQ_z) = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dxdydzd\tau \quad (2-9)$$

另一方面, 单元体的初始温度为 t_0 , 单位时间的温度变化为 $\frac{\partial t}{\partial \tau}$, $d\tau$ 时间内温度变化量为 $\frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$ 。此温度变化所放出的热量为:

$$dQ = -C\gamma dV \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau \quad (2-10)$$

由于 $dV = dxdydz$, 所以

$$-C\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (2-11)$$

由 Fourier 定律知

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2-12)$$

$$q_y = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \quad (2-13)$$

$$q_z = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \quad (2-14)$$

所以

$$C\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C\gamma} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2-16)$$

式中： λ —比例系数，称为热传导系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

$a = \frac{\lambda}{C\gamma}$ 称为导温系数，单位为 m^2/s 或 m^2/h 。对于带钢温降来说，可将此问题看

为无限大薄板，认为只有一个厚度方向存在温差，热流由厚度中心流向表面，此时

$\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0$ ，所以

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (2-17)$$

其表面的边界条件由表面热交换来确定。

2.2 层流冷却过程控制数学模型

从带钢离开精轧末机架到达卷取测温仪，带钢交替处于水冷区和空冷区，在空冷区带钢主要是以辐射形式散热，而在水冷区主要是以对流的形式散热，带钢在冷却过程中发生相变并产生大量的相变潜热。在卷取温度控制中，数学模型的控制精度直接影响到卷取温度的控制精度。

带钢冷却过程中温度场在空间、时间上呈非线性变化，但内部热传导却遵循着一定的规律。Fourier 定律是首钢迁钢 2160 层流冷却控制系统模型理论的基础，描述了热流量和温度分布之间的关系，如式(2-12)所示，因此热流量的计算是带钢冷却过程温降计算的关键，下面将重点分析 2160mm 层流冷却过程控制模型中热流量计算模型。

2.2.1 层流冷却过程中热流密度计算

2.2.1.1 膜沸腾的热流密度计算

人们往往认为水幕、集管的水流以流股状与带钢平稳接触，冷却水不反溅，紧贴在带钢表面上按一定方向作宏观运动，在速度分布上具有某些层流特点，于是称之为水幕层流或管层流；但是对比临界雷诺数计算的临界流速，实际设计的流速是临界流速的 10 多倍，显然实际生产过程中水幕、集管喷射的水流不是层流，而是湍流^[34]。下面计算了湍流层流水的膜沸腾的热流密度，是运动带钢受大量层冷喷水冷却的热行为。

(1) 计算中间温度时液相和气相物理性质

$$A = c_4 x^4 + c_3 x^3 + c_2 x^2 + c_1 x + c_0 \quad (2-18)$$

A 代表各类物理参数，包括液相和气相的普朗特常量 Pr ，热容 c_p ，密度 ρ ，热传导率 λ ，动力黏度 μ 以及液体的表面张力等，各参数的系数分别已经给出，这些参数是关于温度的四次函数。

(2) 计算低温冷却参数

$$\beta = Pr_g \times c_{p,l} \times \frac{T_l - T_w}{Pr_l \times (T_w - T_l)} \quad (2-19)$$

式中： T_l —水的沸点，100℃；

Pr_g —气体普朗特数；

Pr_l —液体普朗特数；

$c_{p,l}$ —液体的热容，J/(kg·K)；

T_w —水温参考量，取 25℃；

T_w —带温参考量，取 750℃。

(3) 气液界面上特征速度计算

气液界面上特征速度计算，是一个经验模型，由 Filipovic 提出，为气液界面膜沸腾热流密度计算提供依据。

$$usl = \frac{u_{inf} + \beta \times Pr_l^{1-P} \times v_{strip}}{(1 + \beta \times Pr_l^{1-P}) ui} \quad (2-20)$$

式中： P —1/3，经验常数；

v_{strip} —带钢速度，m/s；

u_{inf} —流体速度，m/s；

ui —带钢速度达到系统最大值的参考速度，为 u_{inf} 和 v_{strip} 中绝对值较大者。

(4) 气液界面实际速度计算

$$us = us1 \times ui \quad (2-21)$$

(5) 液体边界层速度

$$UI = |\mu_{inf} - us| \quad (2-22)$$

(6) 液体边界层速度无穷小量

$$UI_- = \frac{UI}{ui} \quad (2-23)$$

(7) 气体边界层速度

$$Uv = |us - v_{strip}| \quad (2-24)$$

(8) 气体边界层速度无穷小量

$$Uv_- = \frac{Uv}{ui} \quad (2-25)$$

$$d_2 = 2 \times us1 + \frac{n \times u_{inf}}{ui} \quad (2-26)$$

$$c_0 = c_2^d \times (1+m)^{-a_2} \times \beta \times UI_-^{a_1} \times \frac{\mu_l}{\mu_v} \times (T_{\#} - T_1) \times \left(\frac{d_2}{a_1}\right)^{a_2} \times Pr_l^{1-p} \times \left(\frac{ui}{\gamma}\right)^d \times \lambda_v \quad (2-27)$$

于是膜沸腾的热流密度是:

$$q_{film_boil} = \left(\frac{c_0 \times x^d}{d \times x} + 2 \times 10^5 \right) \times 10^{-3} \quad (2-28)$$

式中: x —特征长度, 1-20 之间, m;

a_1 —经验常数, 8.74;

n —经验常数, 7.0;

$m = \frac{2}{n+1}$, 模型常量 1;

$d = \frac{1}{m+1}$, 模型常量 2;

$c_1 = \frac{1-m}{m+1}$, 模型常量 3;

$a_2 = \frac{m}{m+1}$, 模型常量 4;

$c_2 = a_1^{-m \times n}$, 模型常量 5;

$a_1 = (n+1) \times (n+2)$, 模型常量 6。

2.2.1.2 辊道冷却热流密度计算

假设辊道和带钢之间有一个小接触区，这个模型是辊道停运所对应辊道冷却模型。辊道冷却热流密度是：

$$q_{roll_cool} = \sqrt{\frac{\lambda \times \rho \times c_p}{3.1416 \times t_c}} \times \frac{(T_{steel} - T_{roll}) \times r_c}{1000} \quad (2-29)$$

式中： λ —带钢的热传导率，W/(m·K)；

ρ —带钢的密度，kg/m³；

c_p —带钢的热容，J/(kg·K)；

W_c —辊道与带钢的接触宽度，2mm；

$r_c = \frac{0.04 \times W_c}{x}$ 接触率，只有一小部分直接接触；

T_{steel} —750℃，用于计算阀门影响的温度，也是传热参考量；

T_{roll} —65℃，传热辊道温度参考量；

$t_c = \frac{W_c}{7}$ 接触时间，假设速度特征量是 7m/s。

2.2.1.3 空冷热流密度计算

计算空冷区热流密度，用特征长度 x 进行调节， x 在 1-20m 范围内变化，与带钢类型有关，如果冷却段很长并且带钢大部分时间段上是空冷，将选择一个较长的 x 值。

雷诺数：

$$Re_x = \frac{1.0 \times v_{strip} \times x}{\mu} \quad (2-30)$$

湍流努赛尔数：

$$Nu_{tur} = \frac{0.037 \times Re_x^{0.8} \times Pr \times (Pr^{0.666} - 1)}{1 + 2.443 \times Re_x^{-0.1}} \quad (2-31)$$

于是得空冷热流密度为：

$$q_{air_cool} = \frac{\lambda \times Nu_{tur}}{1000x} (T_{steel} - T_{air}) \quad (2-32)$$

2.2.1.4 喷射水冷热流密度计算

根据带钢不同的温度状态，其对应的湍流扩散因子按温度从 50 度到 950 度划分为 12 个阶段(根据 Hohenlimburg 数据)，即 $T_{turb}[\text{MAX}] = \{150.0, 250.0, 350.0, 450.0, 550.0, 600.0, 650.0, 700.0, 750.0, 800.0, 850.0, 900.0, 950.0\}$ ， $v_{turb}[\text{MAX}] = \{5.0, 20.0, 60.0, 100.0, 143.8, 195.7, 247.5, 299.3, 351.1, 402.9, 454.8, 506.6, 558.4\}$ ，依据 T_{steel} 处于不同的温度区

间求相应的湍流扩散因子，假设在第 $i-1$ 和 i 之间， $i-1$ 和 i 分别表示 T_turb 数组中的第 $i-1$ 和第 i 个元素，那么

$$dT = T_{steel} - T_{turb[i]} \quad (2-33)$$

$$\Delta T = T_{turb[i]} - T_{turb[i-1]} \quad (2-34)$$

用线性内插法求湍流粘度，有效粘度为：

$$\nu_{eff} = \left(\nu_{turb[i-1]} + \frac{(\nu_{turb[i]} - \nu_{turb[i-1]}) \times dT}{\Delta T} \right) \times \nu_{ref} \quad (2-35)$$

式中： ν_{ref} —层流粘度 5.0×10^{-7} ；

给定条件下水的相关物理特性 $T = \frac{T_{water} + T_{norm}}{2}$ ， $T_{norm} = 100^\circ\text{C}$ ，冲击区平均压力为：

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho \times v_{jet}^2}{2 \times 10^5} + 2 \times p_{norm} \right) \quad (2-36)$$

式中： $p_{norm} = 1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ ，大气压；

根据平均压力计算带钢上的水温 T_{eff} ，略高于 100°C ，计算带钢和水之间的最大湍流粘度 $\nu_{max} = \nu_{eff} + \nu_{lam}$ ，于是喷射水冷热流密度是：

$$q_{jet} = \left(0.3148 \times \rho \times c_p \times \sqrt{\frac{\nu_{jet} \times \nu_{max}}{w_{jet}}} \times (T_{eff} - T_{water}) \right) \times 10^{-3} + 10^3 \quad (2-37)$$

式中： ν_{lam} —运动粘度，按(2-18)用平均温度 T 计算；

w_{jet} —喷嘴宽度。

2.2.2 上下集管组热流密度计算

在上下集管组热流密度的计算中，都考虑了水温，水压和水量的影响，水温影响因子，水压影响因子和水量影响因子计算如下：

水温影响系数：

$$f_{T_w} = 1 + f_{T_0} \cdot (T_w - T_0) \quad (2-38)$$

式中： f_{T_0} ， T_0 ， T_w —温度预定因子，参考水温(25°C)，平均水温。

水压影响系数：

$$f_{P_w} = 1 + f_{P_0} \cdot (P_w - P_0) \quad (2-39)$$

式中： f_{P_0} ， P_0 ， P_w —压力预定因子，参考水压(0.8bar)，平均水压。

水流量影响系数：

$$f_{m_w} = 1 + f_{m_0} \cdot (m_w - m_0) \quad (2-40)$$

式中: f_{m_0} , m_0 , m_w —预定因子, 参考水量(100m³/h), 平均水量。

2.2.2.1 计算带钢上部热流量

(1) 带钢在阀开启冷却段上

上部阀组开启时带钢的上部热流量是:

$$Q = \frac{Q_{jet} \times f_{T_w} \times f_{P_w} \times f_{m_w} \times f_c \times w_{top_c}}{w_{max_top}} \quad (2-41)$$

式中, f_c , w_{top_c} , w_{max} 分别是喷射常数, 冷却段上顶阀已开启集管流量和一段冷却段上集管全部开启的总流量。 Q_{jet} 是蒸汽阀冲击的热流量, 由沸腾曲线求得, 关于带钢速度和温度的函数。

(2) 冷却段未开启, 有喷雾冷却时

上部阀未开启, 但有喷雾影响时上部热流量是:

$$Q = \frac{Q_{spray} \times f_{T_w} \times f_{P_w} \times f_{m_w} \times f_c \times w_{top_c}}{w_{max_top}} \quad (2-42)$$

式中: Q_{spray} —喷雾热流量, 关于带钢速度和温度的函数。

(3) 无阀开启也没有喷雾影响

既无开启阀, 也无喷雾影响的上部热流量:

$$Q_f = Q_{film} \times f_{film_c} \times f_{film} \times f_{cross} \times f_{T_w} \times f_{P_w} \times f_{m_w} \quad (2-43)$$

式中, Q_f , f_{film_c} , f_{film} , f_{cross} 分别是蒸汽膜热流量, 薄膜常量, 薄膜影响因子, 侧喷影响热流量;

$$Q_{film_rad} = \sigma \times \varepsilon \times (T_2^4 - T_1^4) \quad (2-44)$$

式中: Q_{film_rad} —蒸汽膜的辐射传热量;

T_2 —带钢绝对温度, $T_2 = T_{strip} + 273.16$;

T_1 —水的沸点绝对温度, $T_1 = 100 + 273.16$ 。

$$Q_a = Q_{air} \times f_{air_c} \times f_{air} \quad (2-45)$$

式中, Q_a , f_{air_c} , f_{air} 分别是空冷热流量, 空冷常量, 空冷影响因子。

水位影响因子 $R_0 = \frac{h_{top}}{H_{semi}}$;

式中: h_{top} —段装水量, m^3/h ;

$H_{semi}=28\text{m}^3/\text{h}$ 参考值(从 Hohenlimburg 得到);

水量影响量不大于 1, 为 $R=\frac{R_0}{1+R_0}$;

薄膜热流总量:

$$Q_{Film} = R \times (Q_f + Q_{film_rad}) \quad (2-46)$$

空冷热流总量:

$$Q_{Air} = (1-R) \times (Q_a + Q_{air_rad}) \quad (2-47)$$

无喷射和喷雾时总热流量是 $Q = Q_{Film} + Q_{Air}$ 。

2.2.2.2 计算带钢下部热流量

带钢下部热流量除了受空冷和水冷因素的影响以外,还与辊道接触传热有关,与辊道之间的传热计算考虑了辊道受喷水的影响,分为干辊道和湿辊道两种类型,辊道温度影响因子为:

干辊道温度影响因子:

$$f_{dry} = 1 + f_{roll_tmp} \times \frac{T_{roller} - T_{ref_roller_tmp}}{T_{ref} - T_{ref_roller_tmp}} \quad (2-48)$$

湿辊道温度影响因子:

$$f_{wet} = 1 + f_{roll_tmp} \times \frac{T_{roller} - T_{ref_roller_tmp}}{100} \quad (2-49)$$

式中, $T_{ref_roller_tmp}$, T_{roller} , T_{ref} , f_{roll_tmp} 分别是辊道传热温度参考量(65°C), 辊道温度, 带钢传热温度参考量(750°C)和辊道温度影响因子。

$$Q_{roll_flow} = Q_{roll} \times f_{roll_c} \times f_{roll} \times f_{dry} + \frac{f_{roll_spray_c} \times f_{roll_spray} \times f_{wet} \times Q_{bot_water}}{l \times s} \quad (2-50)$$

式中, Q_{roll_flow} , Q_{bot_water} , Q_{roll} , f_{roll_c} , f_{roll} , $f_{roll_spray_c}$, f_{roll_spray} 分别是输出辊道传热量, 辊道底部水冷热流量, 带钢与冷却辊道间的热流量, 辊道冷却常量, 辊道冷却影响因子, 喷射对辊道冷却影响常量, 喷射对辊道冷却影响因子; l , s 分别是冷却段宽度, 冷却段长度(所有冷却段长度一样)。

(1) 下部阀组开启时带钢的下部热流量

冲击喷射区的带钢底部热流总量=喷射冷却热流量+冷却辊道热流量(忽略了辐射,

计入到喷射冷却热流量中):

$$Q_{jet_bot} = \frac{Q_{jet} \times f_{T_w} \times f_{P_n} \times f_{m_n} \times f_{bot_jet} \times W_{bot_c}}{W_{max_bot}} \quad (2-51)$$

下部总热流量为:

$$Q_0 = Q_{jet_bot} + Q_{roll_flow} \quad (2-52)$$

(2) 下部阀未开启, 但有喷雾影响时, 下部热流量

$$Q_{bot_spray} = \frac{Q_{spray} \times f_{bot_c} \times f_{T_w} \times f_{P_w} \times f_{m_w} \times W_{bot_c}}{W_{max_bot}} \quad (2-53)$$

下部总热流量为:

$$Q_0 = Q_{roll_flow} + Q_{bot_spray} \quad (2-54)$$

(3) 下部阀未开启, 也没有喷雾影响时, 下部热流量

$$Q_{air_rad} = \sigma \times \varepsilon \times (T_2^4 - T_1^4) \quad (2-55)$$

下部总热流量是:

$$Q_0 = Q_{roll_flow} + Q_{air_rad} \quad (2-56)$$

考虑到带钢甩尾的情况热流状况不同, 下部总热流还要考虑一个抖动因子, 于是有:

$$Q = [coil + (1 - coil) \times f_w] \times Q_0 \quad (2-57)$$

式中: $coil$ —带钢甩尾因子, 带钢头部未进入卷取机时取 0, 带钢进入卷取机后取 1;

f_w —抖动因子, 带钢头部未进入卷取机时不稳定, 产生抖动。

2.3 热带温度计算有限差分模型

热带温度的有限差分计算以数学分析为基础, 求解导热微分方程定解问题或其他形式散热问题, 得到用函数形式表示的解为分析解。分析解的优点在于整个求解过程中物理概念与逻辑推理都比较清晰; 求解过程所依据的数学基础大都已有严格的证明; 求解的最后结果比较清楚地表示出各种因素(如边界条件、物性条件、时间条件)对物体内部温度分布的影响。因为分析解具备以上优势, 可用它的结果作为其他各种方法尤其是数值求解方法精确性的检验。然而, 分析解法只能用于求解比较简单的问题, 对于稍微复杂的情况, 例如几何形状不规则的物体, 材料的热物性参数随温度等因素变化, 辐射换热的边界条件等问题, 分析求解几乎无能为力。

带钢冷却过程中的温度场在空间、时间上均呈非线性变化。同时带钢的物性参数也

随温度变化,伴随着钢的组织转变,物性变化更加复杂,而无法用数学分析方法求解导热微分方程^[35-39]。建立在有限差分基础上的数值求解方法是有效的解决办法之一^[40-43]。有限差分法通过离散,将一个有限连续区域用一系列网线划分开。再通过求解按一定方法建立起来的关于这些离散点对应值的代数方程,来获得离散点上的温度值。

要解 Fourier 热平衡方程,一定要得到带钢表面的边界条件,这由传热模型来获取带钢表面的热流密度。热流密度主要与阀开启范围和带钢速度有关,这些是传热模型的输入变量。为了计算带钢上的温度分布,做如下假设:

(1) 沿着带钢运行方向和带钢宽度方向的热流密度可以忽略。通过比较带钢内的温度梯度可以很明显看出:温度梯度沿带钢运行方向和宽度方向都是 10-100K/m,而沿厚度方向是 10000K/m,因此,为了计算带钢内部温度分布,只需要解热平衡方程对时间及对一维尺寸即厚度的偏导数。

(2) 落在带钢表面的水量几乎是一个常数,并且在带钢宽度方向上不能调整,因此,不需要计算沿带钢宽度方向的横向温度分布,只需要计算沿带钢运行方向中轴线上的温度分布。

在本论文中主要对一维温度场进行分析求解。与一维导热方程相对应的方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2-58)$$

初始条件为:

$$T(x) = \Phi(T), (t=0, 0 \leq x \leq d) \quad (2-59)$$

带钢表面热流边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\lambda} \cdot j_0(t) \quad (2-60)$$

式中: $\Phi(T)$ —钢板断面初始温度分布;

$j_0(k)$ —从带钢上表面到环境的热流密度。

为了得到数值解,迁钢冷却过程计算提供了两种差分方式,分别为后向欧拉方法和 Crank-Nicolson 差分方法,下面分别用这两种方法分别进行差分求解。

用有限差分法求解导热微分方程^[44]的第一步是将区域离散化,迁钢 2160 的离散化方法是使用 Gauss-Lobatto-Net 法,把坐标原点定在带钢横断面的上表面,厚度方向为 x 轴方向,下表面到原点的距离即 d ,将带钢厚度分成 n 层。设 $x_1 = -1$, $x_n = 1$, $x_k (k=2,3,\dots,n-1)$ 是多项式 $P'_{n-1}(x)$ 的零点。 $P_{n-1}(x)$ 是 $n-1$ 次勒让德多项式, Gauss-Lobatto-Net 求积公式如下^[45]:

$$I(f) = \int_{-1}^1 f(x)dx \approx \frac{2}{n \times (n-1)} [f(-1) + f(1)] + \sum_{k=2}^{n-1} A_k f(x_k) \quad (2-61)$$

第 k 层的坐标值按下式计算:

$$G_{[k]} = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{k\pi}{n-1} \right) \quad (2-62)$$

图 2.1 是 Gauss-Lobatto-Net 法离散化示意图, 令 x 代表垂直方向(=厚度方向), $x=0$ 为带钢上表面, $x=d$ 为下表面, $x=0$ 时 $x_1 = -1$, 而 $x=d$ 时 $x_n = 1$, 在 $x=0$ 和 $x=d$ 处指定边界条件。

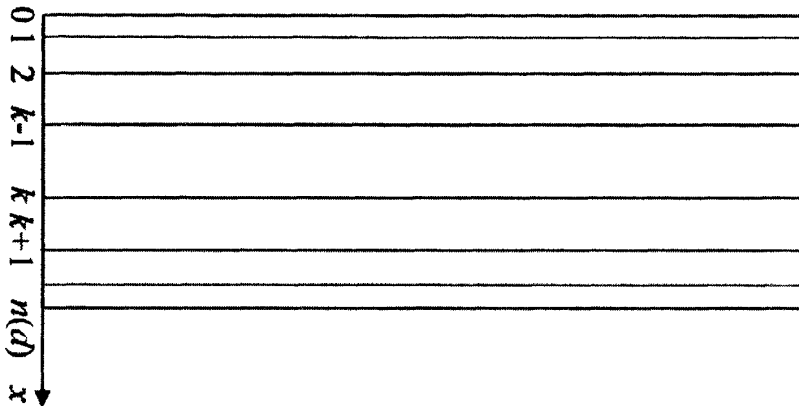


图 2.1 Gauss-Lobatto-Net 法离散化示意图
Fig.2.1 Diagram of Gauss-Lobatto-Net discretization

表 2.1 中可以看到, 离散节点越多, 靠近带钢表面分布越密集。这样分布的节点在计算表面温度时比较准确, 因为带钢较薄, 表面的传热进行较快, 这样划分节点可以更快更准确地得到沿带钢厚度上的温度分布。这种离散化方法集中更多点在带钢表面而不是中心, 不利于数值精确度, 尤其对于厚板。

第二步是建立差分格式, 下面分别按照后向欧拉法和 Crank-Nicolson 差分法解偏微分方程的数值解。

(1) 后向欧拉方法解(2-58)式偏微分方程

用后向欧拉法把导热微分方程(2-15)应用于节点 i , 对应 t_k 时刻, 可写成二阶导数的后向隐式差分格式如下形式:

$$A \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{\Delta x^2} = \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta t} \quad (2-63)$$

表 2.1 Gauss-Lobatto-Net 法求节点分布
Table 2.1 Node distribution in Gauss-Lobatto-Net

n	x_k
3	0
	± 1
	± 0.447214
4	± 1
	0
	± 0.654654
5	± 1
	± 0.285232
	± 0.765055
6	± 1

其中 $A = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ 为导温系数，对上式整理得：

$$-rT_{i-1}^k + (1 + 2r)T_i^k - rT_{i+1}^k = T_i^{k-1} \tag{2-64}$$

式中： $r = A \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$ ， $i=1, 2, \dots, n-1$ ，是以 Δx 为特征长度的傅里叶数。

由(2-60)带钢表面热流边界条件得差分式为：

$$\frac{T_1^k - T_{-1}^k}{2\Delta x} = \frac{1}{\lambda} \cdot j_0(k) \tag{2-65}$$

等式 $-rT_{i-1}^k + (1 + 2r)T_i^k - rT_{i+1}^k = T_i^{k-1}$ 中取 $i=0$ ，得到：

$$-rT_{-1}^k + (1 + 2r)T_0^k - rT_1^k = T_0^{k-1} \tag{2-66}$$

综合(2-65)，(2-66)得：

$$(1 + 2r)T_0^k - 2rT_1^k = T_0^{k-1} - 2r \frac{1}{\lambda} \cdot j_0(k) \Delta x \tag{2-67}$$

整理成矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} 1+2r & -r & 0 & 0 & 0 \\ -r & 1+2r & -r & 0 & 0 \\ 0 & -r & 1+2r & \dots & 0 \\ & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1+2r & -r \\ 0 & 0 & 0 & & -r & 1+2r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^k \\ T_1^k \\ T_2^k \\ \vdots \\ T_{n-2}^k \\ T_{n-1}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_0^{k-1} - 2r \frac{1}{\lambda} \cdot j_0(k) \Delta x \\ T_1^{k-1} \\ T_2^{k-1} \\ \vdots \\ T_{n-2}^{k-1} \\ T_{n-1}^{k-1} + r T_n^k \end{bmatrix} \quad (2-68)$$

(2) Crank-Nicolson 差分方法解(2-58)式偏微分方程

用 Crank-Nicolson 差分法把导热微分方程(2-15)应用于节点 i , 对应 t_k 时刻, 可写成二阶导数的中心差分格式如下形式:

$$\frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^{k+1} - 2T_i^{k+1} + T_{i-1}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{(\Delta x)^2} = \frac{c_p \rho}{\lambda} \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} \quad (2-69)$$

式中, T 、 λ 、 ρ 、 c_p 、 x 分别为钢板的表面温度、导热系数、密度、比热及厚度方向坐标。

由(2-60)带钢表面热流边界条件在 k 时刻和 $k+1$ 时刻的差分式分别为:

$$\frac{T_1^k - T_{-1}^k}{2\Delta x} = \frac{1}{\lambda} \cdot j_0(k) \quad (2-70)$$

$$\frac{T_1^{k+1} - T_{-1}^{k+1}}{2\Delta x} = \frac{1}{\lambda} \cdot j_0(k+1) \quad (2-71)$$

对(2-69)式整理, 得:

$$-r \cdot T_{i+1}^{k+1} + 2(1+r)T_i^{k+1} - r \cdot T_{i-1}^{k+1} = r \cdot T_{i+1}^k + 2(1-r)T_i^k + r \cdot T_{i-1}^k \quad (2-72)$$

其中 $k=0, 1, 2, \dots, i=1, 2, 3, \dots$

式(2-72)中取 $i=0$, 得到:

$$-r T_1^{k+1} + 2(r+1)T_0^{k+1} - r T_{-1}^{k+1} = r T_1^k - 2(r-1)T_0^k + r T_{-1}^k \quad (2-73)$$

综合(2-70)、(2-71)和(2-73)得

$$T_1^k + T_1^{k+1} - (T_{-1}^k + T_{-1}^{k+1}) = \frac{2}{\lambda} (j_0(k+1) + j_0(k)) \Delta x \quad (2-74)$$

整理成矩阵形式为:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 2+2r & -r & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -r & 2+2r & -r & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -r & 2+2r & \cdots & 0 & 0 \\ & & & \cdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2+2r & -r \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -r & 2+2r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \end{bmatrix}^{k+1} \\
 &= \begin{bmatrix} 2-2r & r & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ r & 2-2r & r & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & r & 2-2r & \cdots & 0 & 0 \\ & & & \cdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2-2r & r \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & r & 2-2r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \end{bmatrix}^k + \begin{bmatrix} \frac{2r}{\lambda}(j_0(k+1)+j_0(k))\Delta x \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ rT_{n-2}^{k+1}+rT_{n-1}^k \end{bmatrix} \quad (2-75)
 \end{aligned}$$

在给定热流密度边界条件时,如果知道带钢某一时刻各节点的温度,其后任一时刻钢板的温度分布变化情况即可由上述差分方程联立求得。可以看出,交替方向隐式差分得到的方程组中,每个方程都包括三个未知数,所对应的方程组的系数矩阵具有三对角线的特点,这里用追赶法求解,将三对角线矩阵分解为一个两对角线下三角形矩阵 L 和一个两对角线上三角形矩阵 U ,分别求出各点的温度值。迁钢 2160mm 层流冷却过程控制模型采用后向欧拉法进行有限差分,采用 Gauss-Lobatto-Net 法进行离散化。

假定终轧时钢板断面温度分布是均匀的,钢板从轧机出来到冷却区的过程中,处于空冷状态下,散热方式主要是辐射和对流。给出此时的综合换热系数,仍可以把这种边界条件当作热流边界条件去处理,即上述方程依然适用。这就是说求出开冷时的温度分布,以此作为水冷时的初始条件,并利用给定的边界条件,即可继续求得带钢水冷过程中温度分布随时间的变化情况。

2.4 材料模型

首钢迁钢 2160 层流冷却的预计算主要核心层冷模型基于 Fourier 热平衡方程,从 Fourier 热平衡方程可以计算出模型温度,要解热平衡方程还需要材料模型。

材料模型就是用来计算热平衡方程的热动态特征值,热动态特征值都是随冷却过程的进行发生变化的量,如温度,热焓,热传导率等。带钢的合金含量是统计模型的输入值,用来计算相变率 p (奥氏体转变成珠光体/铁素体的百分比)。相变率是材料模型的输入量,用来计算带钢关于热焓的温度函数和热传导率函数,这两个函数用于热平衡方程的计算。

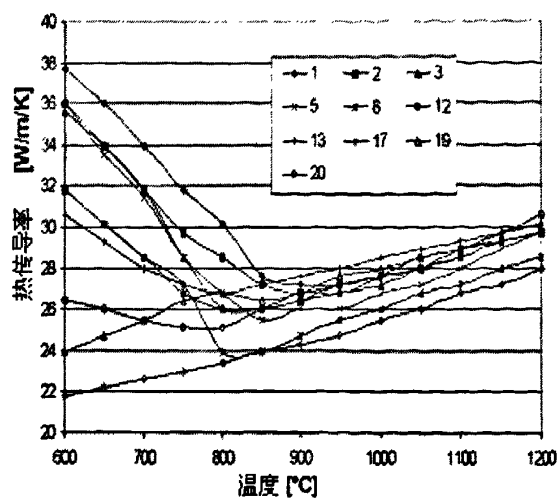


图 2.2 热传导率与温度关系曲线
Fig.2.2 Relationship between thermal conductivity and tamperature

热平衡方程包含与带钢成分密切相关的两个函数： $T(e)$ ——关于热焓的温度函数， $\lambda(e)$ ——关于热焓的传导率函数，如果两板的化学成分不一样，这两个函数也不一样。图 2.2 显示了热力平衡材料的热传导率是温度的函数。表 2.2 是这些合金代码所代表的化学成分。

表 2.2 合金代码与化学成分表
Table 2.2 Alloy code to chemical composition

No	[C]	[Mn]	[Cr]	[Ni]
1	0.060	0.380	0.022	0.055
2	0.080	0.310	0.045	0.070
3	0.230	0.635	—	0.074
5	0.415	0.690	0.030	0.040
8	1.220	0.350	0.110	0.130
12	0.325	0.550	0.710	3.410
13	0.340	0.550	0.780	3.530
17	1.220	13.000	0.030	0.070
19	0.280	0.370	19.110	8.140
20	0.715	0.250	12.950	0.140

从图 2.2 中可以看出奥氏体的热传导率与温度之间近似呈线性关系，不同钢种奥氏体热传导率与温度之间的关系曲线趋于平行。在相变温度以下，热传导率随着温度的降低迅速升高，各钢种升高趋势基本一致。

2.4.1 热传导率曲线模型

(1) 奥氏体热传导率的计算

根据热焓值, 计算奥氏体热传导率。假定热传导率与热焓之间呈线性关系, 如下:

$$\lambda_A = k_{\text{aust}}(0) + k_{\text{aust}}(1) \cdot h \quad (2-76)$$

式中, λ_A —奥氏体热传导率, W/(m·K);

h —热焓值, J/g;

$k_{\text{aust}}(0)$ 和 $k_{\text{aust}}(1)$ 分别是热传导率系数。

$\lambda_A \in [15, 40]$, W/(m·K), 若按上式计算的热传导率超出了范围, 则取对应的极限值。

(2) 铁素体热传导率的计算

根据热焓值, 计算铁素体热传导率。铁素体热传导率与热焓之间呈线性关系且随着热焓值的降低而升高, 且与奥氏体热传导率曲线相交于相变点 AC_3 , 如下:

$$\lambda_F = k_{\text{fer}} \cdot (h - h_{AC_3}) + \lambda_{AC_3} \quad (2-77)$$

式中: λ_F —铁素体热传导率, W/(m·K);

h 和 h_{AC_3} —给定的热焓值和相变点 AC_3 的热焓值, J/g;

λ_{AC_3} —相变点 AC_3 的热传导率, W/(m·K);

$k_{\text{fer}} = -11/(3 \times 10^5)$;

$\lambda_F \in [15, 50]$ W/(m·K), 若按上式计算的热传导率超出了范围, 则取对应的极限值。

(3) 轧件热传导率的计算

根据热焓值和相组成(铁素体所占的百分比)计算轧件的热传导率。根据相组成分三种情况:

a) 奥氏体区($p=0$)

铁素体所占的百分比 $p \leq 0$, 轧件处于奥氏体区, 根据热焓值按奥氏体热传导率与热焓关系曲线计算轧件热传导率。

b) 铁素体区($p=1$)

铁素体所占的百分比 $p \geq 1$, 轧件处于铁素体区, 根据热焓值按铁素体热传导率与热焓关系曲线计算轧件热传导率。

c) 两相区($0 < p < 1$)

铁素体所占的百分比 $0 < p < 1$, 轧件处于两相区, 根据热焓值分别计算出奥氏体热传导率和铁素体热传导率, 然后根据 p 值, 进行加权处理, 如下所示:

$$\lambda = (1-p) \cdot \lambda_A + p \cdot \lambda_F \quad (2-78)$$

式中: λ —轧件热传导率, W/(m·K);

λ_A —与给定热焓值对应的奥氏体热传导率, W/(m·K);

λ_F —与给定热焓值对应的铁素体热传导率, W/(m·K)。

2.4.2 温度与热焓的曲线模型

图 2.3 是部分钢种的温度与热焓的关系曲线。从图中可以看出在奥氏体区范围内，温度与热焓成线性关系，并且不同钢种之间差别不大，也就是说在奥氏体区钢的比热为常数，且各钢种的比热近似相等。

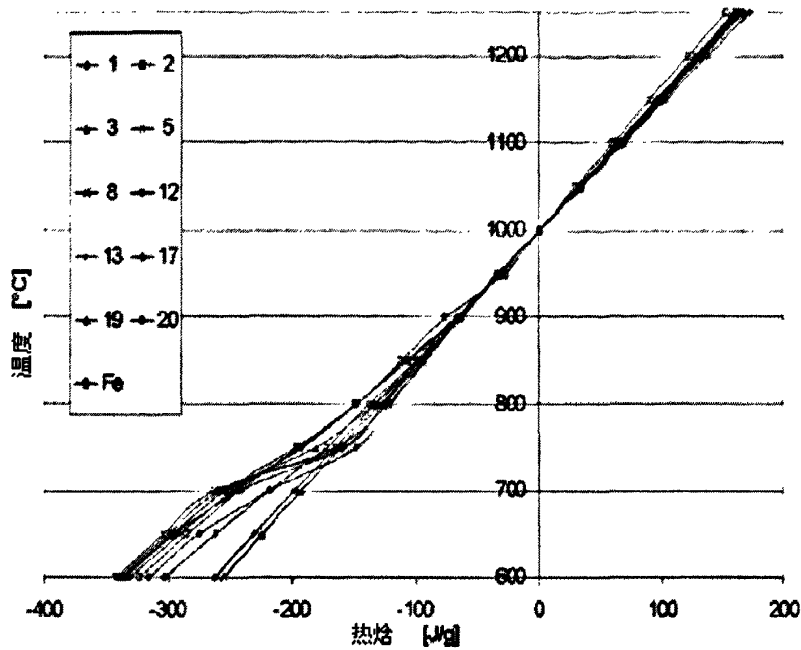


图 2.3 热焓与温度关系曲线
Fig.2.3 Enthalpy and temperature relationship curve

在相变温度以下，相对各自的相变转变点，各钢种温度与热焓关系曲线按相似的规律变化。

(1) 奥氏体温度的计算

根据输入的热焓值，计算对应的奥氏体温度。由于奥氏体温度与热焓成线性关系，并且不同钢种之间差别不大，所以所有钢种的温度与热焓的关系曲线可以用同一条直线来拟合。即：

$$T_A = k_{t_aust}(0) + k_{t_aust}(1) \cdot h$$

(2-79)

式中： T_A —奥氏体温度，K；

h —热焓值，J/g；

$k_{t_aust}(0)$ 和 $k_{t_aust}(1)$ 分别是温度与热焓关系系数。

材料物理参数模型假定上述奥氏体温度计算公式在整个温度区间内(奥氏体区及两相区)都有效。

(2) 铁素体温度的计算

根据输入的热焓值计算对应的铁素体温度。因为在相变温度以下，相对各自的相变

转变点, 各钢种温度与热焓关系曲线按相似的规律变化, 所以, 假设纯铁的温度与热焓关系曲线可以用三次多项式来拟合, 而其他钢种的铁素体温度与热焓关系曲线通过坐标平移的方法获得。

纯铁的温度与热焓关系的三次多项式如下所示,

$$T_{\text{iron}} = k_{t_{\text{fer}}}(0) + k_{t_{\text{fer}}}(1) \cdot h + k_{t_{\text{fer}}}(2) \cdot h^2 + k_{t_{\text{fer}}}(3) \cdot h^3 \quad (2-80)$$

任一钢种的铁素体温度与热焓关系, 可通过对上式进行坐标平移或得, 即:

$$T_F + (911 - T_{Ac_3} + 273) = k_{t_{\text{fer}}}(0) + k_{t_{\text{fer}}}(1) \cdot (h + \Delta h) + k_{t_{\text{fer}}}(2) \cdot (h + \Delta h)^2 + k_{t_{\text{fer}}}(3) \cdot (h + \Delta h)^3 \quad (2-81)$$

所以:

$$T_F = k_{t_{\text{fer}}}(0) + k_{t_{\text{fer}}}(1) \cdot (h + \Delta h) + k_{t_{\text{fer}}}(2) \cdot (h + \Delta h)^2 + k_{t_{\text{fer}}}(3) \cdot (h + \Delta h)^3 - (911 - T_{Ac_3} + 273) \quad (2-82)$$

式中: T_F —铁素体温度, K;

T_{Ac_3} —钢种相变转变点温度, K;

$k_{t_{\text{fer}}}(0)$ 、 $k_{t_{\text{fer}}}(1)$ 、 $k_{t_{\text{fer}}}(2)$ 和 $k_{t_{\text{fer}}}(3)$ 分别为温度与热焓关系的各项系数。

Δh 可根据奥氏体温度与热焓关系曲线(图 2.4 红线所示)求得:

$$\Delta h = \frac{dh}{dT} \cdot \Delta T = \frac{911 - T_{Ac_3}}{k_{t_{\text{must}}}(1)} \quad (2-83)$$

(3) 轧件温度的计算

根据输入的热焓值和相组成(铁素体所占的百分比)计算轧件的温度。根据相组成分三种情况:

a) 奥氏体区($p=0$)

铁素体所占的百分比 $p \leq 0$, 轧件处于奥氏体区, 根据热焓值按奥氏体温度与热焓关系曲线计算轧件温度。

b) 铁素体区($p=1$)

铁素体所占的百分比 $p \geq 1$, 轧件处于铁素体区, 根据热焓值按铁素体温度与热焓关系曲线计算轧件温度。

c) 两相区($0 < p < 1$)

铁素体所占的百分比 $0 < p < 1$, 轧件处于两相区, 根据热焓值分别计算出奥氏体温度和铁素体温度, 然后根据 p 值, 进行加权处理, 如下所示:

$$T = (1 - p) \cdot T_A + p \cdot T_F \quad (2-84)$$

式中: T —轧件温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_A —与给定热焓值对应的奥氏体温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_F —与给定热焓值对应的铁素体温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.5 统计模型

统计模型的作用是根据化学成分含量的不同，分别计算各钢种对应的热焓值。纯铁的热焓值为 e_{iron} ，各种化学元素对应的热焓值分别为 e_i ，各种化学元素的含量分别为 W_i 。厚带钢经过冷却辊道时比薄带钢慢得多，而相变在厚带钢中容易发生，在薄带钢中不易发生，那么就要增加一个带厚补偿量，并注意到对未合金化钢不需要补偿，而 C、Mn、Cr 等加速了相变，Si 减少了相变，因而还需要乘以 C、Mn、Cr 的总量且减去 Si 的热焓量，于是可以得到化学成分与热焓关系的统计模型为：

$$e = e_{iron} - \sum_{i=0}^{22} W_i e_i - \frac{h}{15} e_C (W_C + W_{Mn} + W_{Cr} + W_{Si}) \tag{2-85}$$

h —带钢厚度，mm；

列出合金元素，有铁、碳、硅、锰、磷、硫、铝、钴、铬、铜、钼、铌、镍、钛、钒、钨、氮、氧、锡、硼、砷、铈、铅共 23 种。

2.6 本章小结

本章研究了首钢迁钢 2160 层流冷却过程控制系统的数学模型，主要有层流冷却中热流密度计算模型和上下集管组热流密度计算模型，并详细说明了材料模型和统计模型，重点介绍了有限差分方法两种差分方式，目前该系统使用的差分方式是后向欧拉差分方法，其网格划分方式为 Gauss-Lobatto-Net 法，这种方法网格不均匀分布，靠近带钢表面的网格密集，靠近中间的网格稀疏。

第 3 章 层流冷却控制模块

热轧带钢层流冷却控制策略的选择需要依据钢的冷却转变曲线进行，冷却曲线分为等温冷却转变 TTT(Time Temperature Transformation) 曲线和连续冷却转变 CCT(Continuous Cooling Transformation)曲线。轧后冷却工艺是在连续冷却的条件下进行的，钢的 CCT 曲线给出了不同冷却速度下所得到的组织和性能以及临界淬火速度，因此，根据 CCT 曲线选择合适的冷却速率制定合适的冷却工艺，就可以得到我们想要的产品。层流冷却工艺制度就是结合 CCT 曲线与设备的冷却能力以及对终产品组织和性能的要求制定出来的。

带钢轧后层流冷却的控制目标是根据实测的带钢终轧出口温度、速度、厚度以及工艺所确定的冷却速度曲线，经过模型运算(包括预设定计算、修正设定计算、自学习计算)确定相应的集管组态(阀门开启个数和位置)，使卷取温度尽可能接近目标卷取温度，通过改变阀门数来控制带钢的卷取温度，实现对带钢冷却模式、卷取温度、冷却速度的控制，达到工艺规程要求，确保带钢的质量及产量。

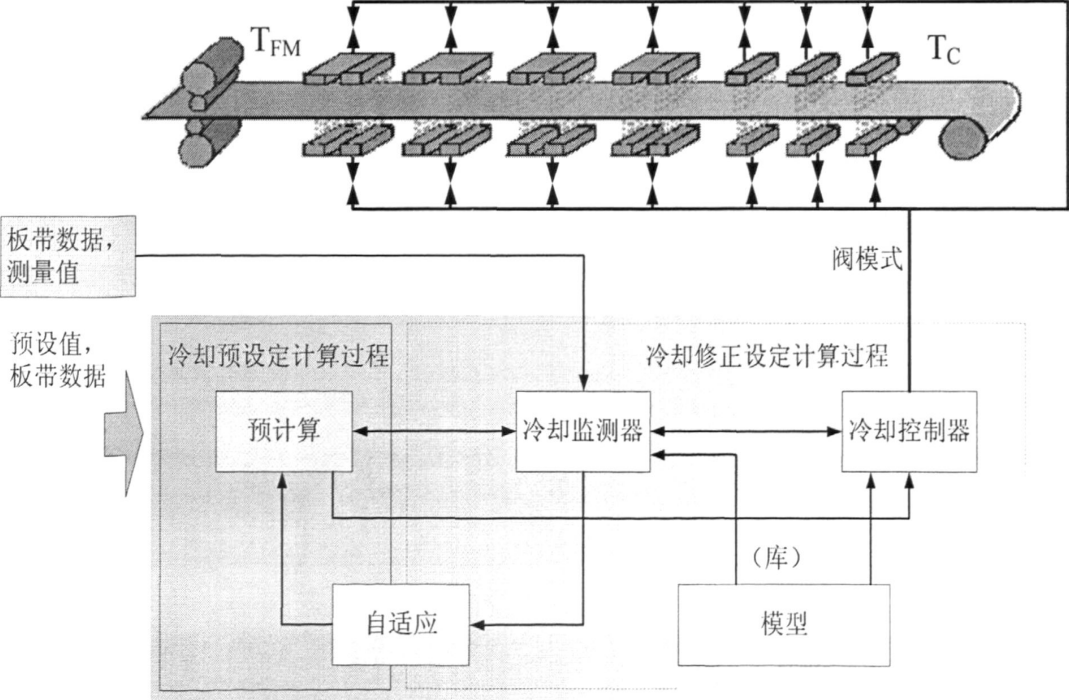


图 3.1 层流冷却过程控制结构图
Fig.3.1 Laminar cooling process control structural diagram

图 3.1 是首钢迁钢 2160mm 冷却过程控制模型的结构。整个层流冷却在线控制过程可以分为三个部分，即冷却预设定计算过程，冷却修正设定计算过程和自适应过程。带

钢进入冷却区之前，过程控制系统根据预设的精轧出口温度，冷却速度，带钢厚度，目标卷取温度值以及带钢初始 PDI 数据，以数学模型为基础初步计算冷却所需水量及集管开启范围，按照预选的冷却策略进行阀门开启方式和数目的预计算，将预设定的阀设定组态传送到冷却控制器。当带钢(或半无头轧制的下一块带钢)头部运行到精轧出口测温仪处时，启动修正设定，修正设定过程将带钢沿长度方向分为若干样本，针对样本进行冷却集管状态的设定，并实时更新。冷却监测器根据带钢数据和精轧出口温度测量值实时计算带钢全长各样本点的温度值，对冷却控制器进行阀设定修正，控制器将阀设定值发送到基础自动化。在本块带钢尾部离开冷却区域之后，自适应功能根据预计算设定值和监测器得到实测值之间的差值修订冷却模型关键参数，使模型设定精度不断提高。

3.1 预设定计算

预设定计算的作用是为冷却段计算阀设定值，将结果传送给控制冷却区的 L1 级计算机进行预设定控制，使到来的带钢(带钢的头部或半无头轧制的下一块带钢)尽可能冷却到接近预设目标温度，其控制量为开启阀门位置和开启阀门数。

基于精轧目标值(精轧出口预报速度、终轧温度和厚度)和带钢材质，层流冷却过程计算机将选择带钢的控制模式和冷却策略，确定带钢开冷温度、各冷却段中的平均冷却速度和卷取温度，计算所需开启冷却集管的组数(冷却区长度)和各组开启根数，预计算为即将到来的带钢(或者半无头轧制的下一块带钢)确定的阀设定值作为冷却控制器的初

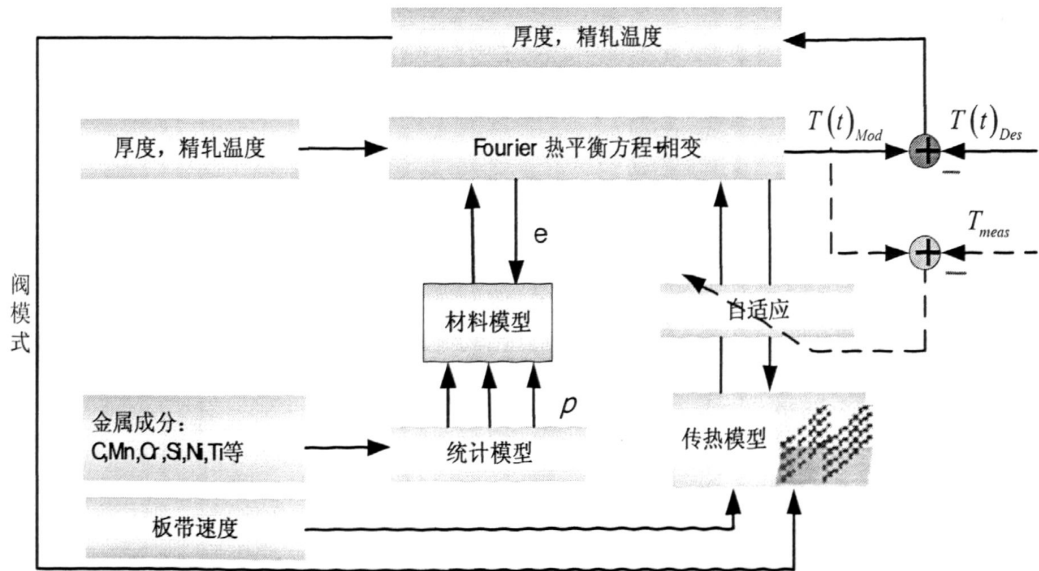


图 3.2 层流冷却预计算冷却模型控制过程
Fig.3.2 Control process of precalculation of laminar cooling model

始化。预计算在带钢进入冷却区之前就开始了。内部计算首先检验可能的冷却能力是否

足够达到目标卷取温度，如果不可能达到目标温度，冷却段将再次带着偏差温度或速度设定值激发预计算。

预计算的主要核心是层冷模型，它基于 Fourier 热平衡方程，从 Fourier 热平衡方程可以计算出模型温度，根据第二章的材料模型和传热模型就可以求解热平衡方程。冷却段上的带钢温度用模型可以计算出给定阀范围，假定初始化阀范围为所有阀关闭，计算带钢温度经过冷却区后温度变化，并与目标温度比较，根据偏差大小决定下一步怎样调整阀开启范围，这个过程迭代往复，直到计算值与目标温度的偏差降低到特定范围以内，这就是传递到基础自动化的阀范围。

图 3.2 是层流冷却预计算冷却模型控制过程，系统首先根据带钢的金属成分利用统计模型计算带钢在经过层流冷却区时的相变率 p ，然后通过相变率根据材料模型计算带钢在当前温度下的热传导率。由热传导率和厚度及精轧温度预测值，根据 Fourier 热平衡方程和相变情况计算带钢各点温度，通过比较各点温度和目标卷取温度值，得到带钢冷却需要的水量，再计算相应阀需要开启的个数，并根据预先设定的带钢的冷却策略进行阀组态的设置。

图中也描述了自适应的主要思想，假设带钢运行在冷却段上，可以得到当前带钢温度的测量值，与对应的模型计算温度进行比较，如果是带钢与环境的传热计算不准确引起的偏差，就进行自适应，引进一个与通过带钢表面的热流密度相关的修正因子。测得了带钢温度后，调整修正因子以使计算温度与测量值相一致，如果冷却段输出更复杂，那么可以将冷却段分为若干部分，使每一部分使用独立的修正因子。

3.1.1 操作模式

层流冷却系统的操作模式有两种：自动控制模式和手动控制模式。

(1) 自动控制模式

采用自动控制方式时，层流冷却的初始设定和前馈控制过程由过程控制计算机完成，基础自动化按照过程计算机所给出的喷水组态控制相应喷水阀门的开闭。在此工作模式下，人工干预无效。在过程机和传感器正常工作的情况下，自动控制方式应为主要操作方式。由基础自动化完成带钢的头尾跟踪、反馈和精轧机抛钢后的前馈控制功能。

(2) 手动控制模式

当过程计算机不能投入时，采用人工手动控制模式。冷却制度和规程将由操作员在 HMI 输入，并可对其进行存储，供操作员选择调用。在此种工作模式下，由基础自动化完成带钢的头尾跟踪、反馈和精轧机抛钢后的前馈控制功能。

3.1.2 预计算触发与输入数据来源

预计算在以下点接收到设定代理逻辑功能单元发出的触发：

(1) 板坯进入加热炉或收到 PDI

当板坯进入加热炉或者收到了带钢的 PDI 数据时，第一次计算就启动。这主要是为实现轧机跟踪的目的，也为了确保带钢能在匹配原始数据的设定下顺利完成轧制。

(2) 板坯出加热炉

只要板坯一出加热炉，精轧机预计算就触发轧机跟踪到的从加热炉过来的下一块板坯计算预设，以便找到粗轧得到的最适宜宽度，然后将结果返回到轧机跟踪。

(3) 操作工触发

每当操作工使用人机界面功能就会触发一次材料的设定计算，当板材通过处没有返回值时，计算便被阻止。

(4) 厚度变更时由操作工触发

当操作工发现带钢轧不到目标出口厚度时，或者探测到带钢不能实现目标厚度的其它信息时，便可以启动选择替换厚度的计算。

(5) 测试计算

让操作工或技术人员能做测试计算，并触发模拟计算，计算结果不下发给基础自动化，也不执行，这样不会对轧机的正常运行产生影响。

预计算模块收到触发号后，会得到不同来源的数据。按照某种优先级并考虑一定的限制条件，对带钢模式设定计算的有效数据进行选择这样就建立了带钢数据缓冲区，启动预计算。输入数据的逻辑来源有：

- 来自更高一级或上位机的基本数据
- 操作工输入
- 精轧设定计算结果
- 冷却计划中定义的数据
- 带钢参数和限制条件
- 模型修正因子，源于以前轧制的相似带钢检测结果

这些数据来自数据库、共享存储区、二进制文件系统或通过界面来自其它 LFE(逻辑功能单元)文件等多种来源。

3.1.3 阀态布置

阀态布置有 5 种方式，如表 3.1 所示，程序启动时，预计算调用一些包含冷却方向、

上部模式、下部模式、临界温度和温度梯度等数据的文件，这些文件包含了所有冷却策略的阀优先级列表。

表 3.1 阀态模式
Table 3.1 Valve patterns

序号	分布方式
0	OOOO
1	XOOO
2	XOXO
3	XXXO
4	XXXX

X: 开 O: 闭

例如：ValveSequence23b1.txt 说明了优先级列表为 pattern top=x0x0，pattern bottom=xxx0，方向向后及使用 1#卷取机。有 5 种上部阀方式，5 种下部阀方式，最多 2 组卷取机组和最多 2 种方向，因此一共最多 100 个文件。调用文件时，按照需要的方式进行选择，依据如下式子：

$$n=a\cdot(N_p\times N_d\times N_c)+b\cdot(N_c\times N_d)+c\times N_c+x$$

(3-1)

式中：*a*—上部阀开启阀态编号；

b—下部阀开启阀态编号；

c—当前带钢卷取时所用卷取机号；

N_p—上部阀或下部阀模式总数，如表 3.1，取 5；

N_d—层流冷却水开启方向总数，取 2，沿带钢运行方向或逆带钢运行方向；

N_c—卷取机数，取 1；

x—当冷却水开启方向沿带钢运行方向时即*f*=1，*x*取 0；当冷却水开启方向逆着带钢运行方向时即*f*=0，*x*取 1。

3. 1. 4 冷却模式

不同的带钢有不同的冷却模式，以满足不同规格、不同钢种和不同性能需求的产品对卷取温度和冷却速度的要求，如果产品需要在较高温度区快速降温，可以采用前段主冷，此时优先将冷却入口侧的集管阀门打开；当产品需要在较低温度区快速降温，可以采用后段主冷的模式，此时优先将冷却出口侧的集管阀门打开；当需要均匀冷却强度时，

可以采用稀疏冷却方式，根据冷却均匀性的需要可以选择按组稀疏或者按管稀疏的冷却模式，表 3.2 显示了不同冷却模式对应的产品种类。

表 3.2 层流冷却的冷却方式所对应的产品种类
Table 3.2 Production types under different cooling mode

冷却方式	对应的产品种类
前段主冷	适于有抗拉强度级别要求的硬质钢产品及 IF 钢
后段主冷	适于待进一步加工的软质材料及部分冷轧产品
按组稀疏	适于具有中间温度(如两个中间温度 T1、T2)及有冷却速率要求的产品，如双相钢、C-Mn 钢、TRIP 钢及需要涂镀的产品
按管稀疏	适于需要涂镀的产品
两段冷却	适于较薄的硬质带钢

根据首钢迁钢 2160 的数据，下面详细说明其中主要用到的两种冷却方式。该层冷段有 18 组粗调段和 2 组精调段，粗调段上部每组 4 根集管，每根集管由阀门单独控制，下部每组 12 根集管，每 3 根集管由一个阀门控制，精调区上部共 8 根集管，每根集管由一个阀门控制，下部共 16 根集管，每 2 根集管由一个阀门控制。

(1) 前段主冷方式

当产品需要在温度较高区快速降温时，采用这种冷却模式，此时优先将层流冷却区入口侧的集管阀门集中打开，快速冷却区集中在层冷区前部。

采用此种冷却模式时，在尽量靠近第一组集管的第一根喷管选择 1 根喷管作为起始阀门，由起始阀门开始，根据层冷模型算出的所需冷却长度的计算结果，来确定打开阀门的组数，沿轧制方向依次将所需的阀门打开，实现前段主冷。

下面为迁钢 2160mm 使用前段主冷模式的实际冷却设定结果。

由图 3.3 看到，前段主冷温降主要发生在刚进入层冷区时，经过冷却水的快速降温，使带钢立即降到一个较低的温度，然后进入空冷段缓慢冷却，得到均匀的组织。

表 3.3 前段主冷设定结果
Table 3.3 Setup for early cooling

PDI 数据	钢种	速度(m/s)								厚度(mm)								终轧温度(℃)								卷取温度(℃)							
	SS400	3.96								7.5								850								610							
集管组		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22										
上集管组态		1111	1111	1110	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1111	1111									
下集管组态		1111	1111	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1111	1111									

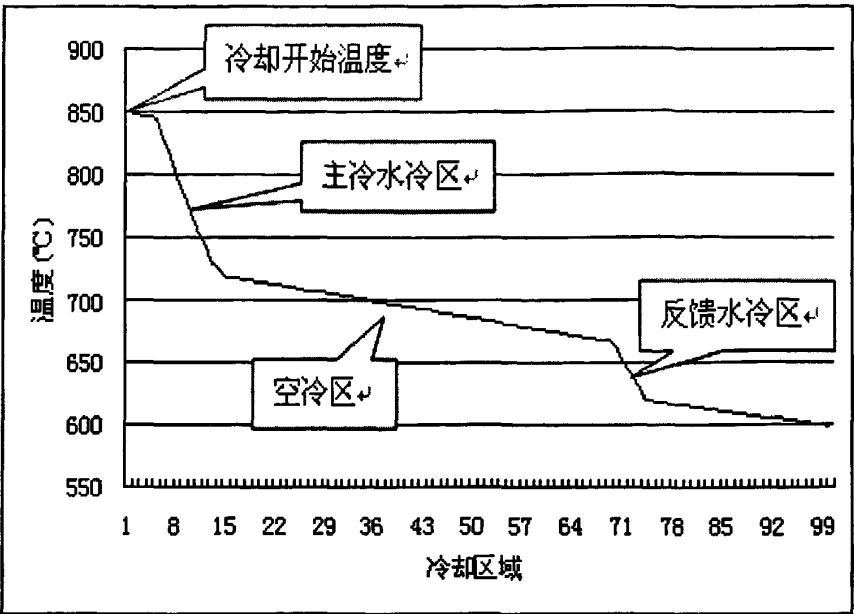


图 3.3 前段主冷温降过程
Fig.3.3 Temperature drop for early cooling at ROT

(2) 按管稀疏冷却方式

当产品需要在较为均匀的冷却强度时，采用这种冷却模式。此时按照水量均匀的原则，确定层流冷却主冷区的集管阀门开关顺序，而精调区冷却策略保持不变。

采用此种冷却模式时，选择某组集管的第一根喷管作为起始阀门，由起始阀门开始，根据层冷模型算出的所需冷却长度的计算结果，来确定打开阀门的组数，沿轧制方向依次按集管组将所需的阀门打开。

下面为迁钢使用的按管稀疏冷却模式的实际冷却设定结果。

表 3.4 按管稀疏冷却设定结果
Table 3.4 Setup results of interrupted cooling

PDI 数据	钢种	速度(m/s)										厚度(mm)										终轧温度(℃)										卷取温度(℃)									
	Q345B	3.60										7.75										840										590									
集管组		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22																		
上集管组态		1010	1010	1010	1010	1010	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1010	1010	1010	1010																	
下集管组态		1010	1010	1010	1010	1010	1010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1010	1010	1010	1010																

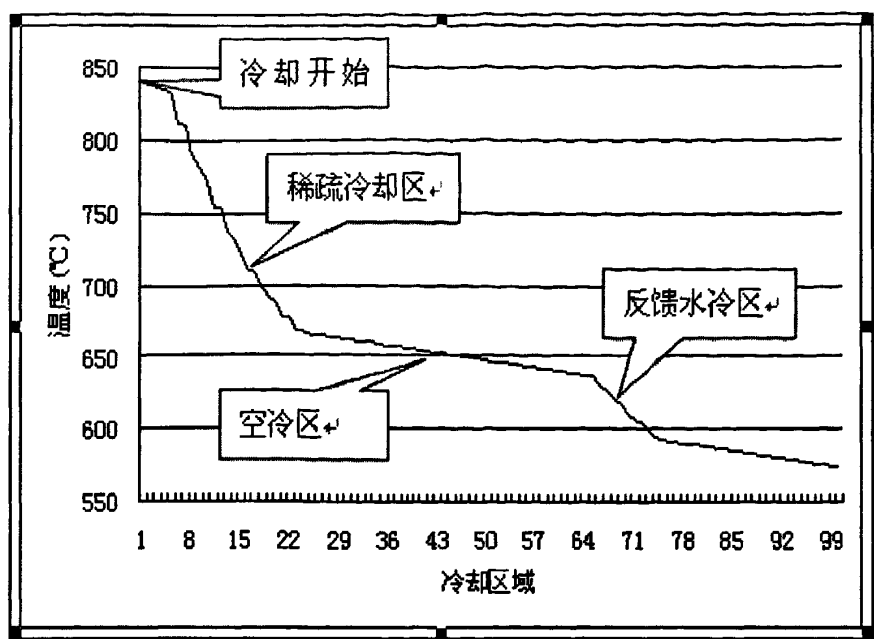


图 3.4 按管稀疏冷却温降过程
Fig.3.4 Temperature drop process for sparse cooling at ROT

由图 3.4 看到，稀疏冷却过程中，带钢经过几个台阶式的冷却过程，逐步降到要求的卷取温度，得到带钢需要的组织。

3.2 修正设定计算

在精轧出口采用高温计测得(带钢头部通过)温度时，系统控制逻辑触发修正设定计算，其控制量为开启阀门组态。当带钢的某一段离开精轧机组后，根据实际测量的速度、厚度和温度来计算该段的阀门组态。当该段经过热输出辊道时，动态控制阀门的开关，以便实时更新其在前馈控制计算的冷却状态。在带钢到达卷取前高温计时，根据实际落到带钢上的水量来计算温度变化，利用测量的卷取温度和预报的卷取温度的差别进行反馈控制并确认和修正模型。

迁钢 2160 层流冷却修正设定计算总的过程如图 3.5 所示，修正设定计算由预设定计算的带钢数据初始化，从精轧出口测温仪测到带钢温度开始，每一个计算周期(约 200ms)得到一个样本点，并在冷却段上进行跟踪(监测)，重新进行阀设定计算，即时更新基础自动化的阀设定值。

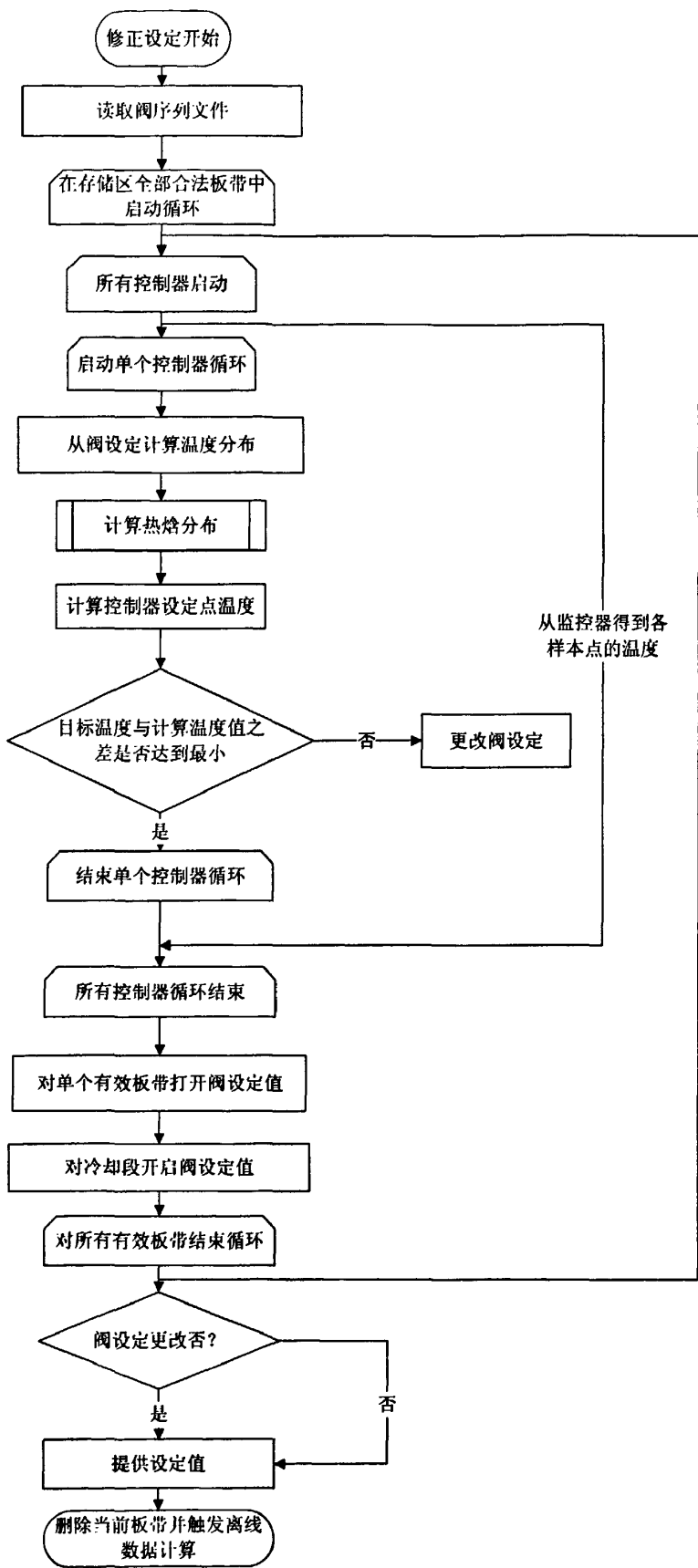


图 3.5 修正设定计算流程图
Fig.3.5 Flow chart of modified setting calculation

假设带钢已经到达了冷却区,首先可以得到卷取温度测量值,如果测量值与预计算得到的计算值有些区别,则需要重新进行计算,由冷却修正设定计算过程完成并计算出冷却段新的阀门组态,每一个时间步长做一次计算,循环进行。

冷却设定计算模块过程可以分为两部分:冷却监控器与冷却控制器。

3.2.1 冷却监测器

冷却监测器的任务是对冷却区域内的参数进行计算(比如所有的中间温度),以模型为基础,不仅计算带钢在卷取机前高温计处的带钢温度,而且在从精轧机出口到卷取机任意时刻冷却段上的整个带钢的温度。冷却监测器的输出变量为实时模型修正因子。

冷却监测器的输入参数都是测量值(如带钢速度,带钢温度,水温和水压)和阀设定组态。监测器基于卷取温度测量值进行在线调整,也就是说在卷取温度测量点处,测量温度和模型计算温度出现任何偏差,沿带钢长度方向整个层流冷却区域内各中间温度都要随之在线更新。但是,冷却监测器既不核实阀设定组态的可行性,也不重新计算阀的设定组态,以使带钢达到目标卷取温度。

对于每一个时间步长(也可以称之为控制周期),冷却监测器在精轧出口引进一个新的点(带钢尾部还没有到达精轧出口),并在该点使用精轧温度测量值初始化热焓分布,以及对厚度方向的热焓分布做出假设。对于所有的带钢上的点,带钢以速度 v 运行,这里 v 代表实际带钢速度,代表一个时间步;计算单一时间步的热平衡方程。这些计算实时进行,当带钢运行在冷却区内时,可以得到沿带钢长度方向任何位置的温度分布(在相邻点间用内插法)。

3.2.2 冷却控制器

冷却控制器的任务是计算下一时间步的阀门组态,要完成这项任务,控制器需要评估监测器计算的数据,由于监测器提供了所有的中间温度,所以可以使用非常灵活的控制算法。从监测器计算的实际情况,控制器可以做一些预测。比如,卷取计算温度和卷取目标温度比较,由其偏差就可以得到下一时间步的阀设定组态。

控制器将阀设定组态传送到冷却监测器。控制器计算冷却段带钢上虚拟点的温度分布,以最后一个开启阀为起点,直到卷取温度测量设备,根据计算温度和目标卷取温度的差确定是否需要再开启一组阀门。

基于控制器和预计算的共同计算,确定阀的开关组态,以使带钢达到目标卷取温度。计算过程分成三步:

(1) 根据不同位置的不同目标温度,每一块带钢由多个控制器控制,每一个控制器

有一个开关指令优先列表，当控制器运行的时候就会按照优先列表开启阀门。

(2) 进行开关列表的阀开启过程计算，将开关列表中的多个阀开启指令一一进行计算，最后选择最接近目标卷取温度的冷却阀开启方式。

(3) 当前带钢的开关指令存储在对应的层冷部分。如果冷却区没有其它带钢，那么这个优先列表就可以作为正确的冷却结果，预设定可能为最终结果发送给基础自动化。如果部分阀下刚好有其它带钢，优先列表控制就不能成为最终结果。

3.2.3 监测器与控制器对层流冷却控制的主要思想

热输出辊道上条件较为复杂，受到水汽以及带钢表面残留水的影响，带钢中间温度的测量非常困难，热输出辊道上只有少量的位置有条件设置高温计，典型的情况是只在精轧机架后和卷取机前可以进行温度测量，在这种情况下就没有中间温度测量值。

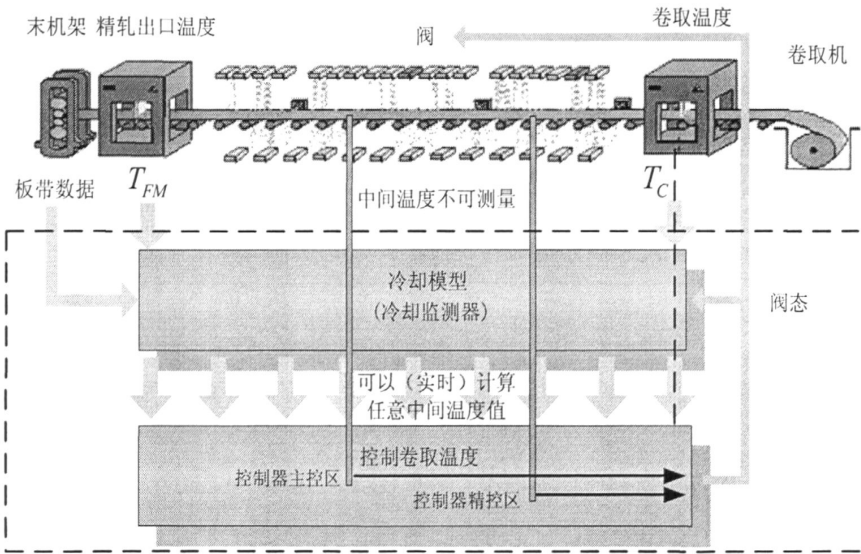


图 3.6 控制器与监控器控制的原理图
Fig.3.6 controller and monitor control schematic diagram

如果冷却自动化系统任何位置中间计算温度都可以实时得到，那么就可以用来进行冷却控制：沿冷却段对应冷却曲线进行控制，或控制几个中间温度，及在得不到测量值的地方进行对应的温度控制，例如：末阀后几米处的温度测量值，可以降低自适应时滞，在卷取前迅速控制温度。

控制器与监控器控制的的原理如图 3.6 所示。假设现在需要决定是否开启阀 k(在时间 t)，那就要完成下面几步：

- (1) 找到样本位置和阀 k 的空载时间；
- (2) 计算当前样本点的位置，阀 k 开启了，样本点位置受落下水影响，如果 x 代表目标位置， x_k 是阀 k 的位置，v 为板速而 T_k 为阀 k 的空载时间，那么 $x \cong x_k - vT_k$ ，我们

把该点标记为控制器的预报点：

(3) 从监控器找到在 x_k 处关于带钢厚度的热焓分布，对冷却区上的一个样本点在该位置用这一热焓分布初始化；

(4) 输入预报计算的信号，例如带钢速度，对下一位置的目标温度做模型预测计算；

(5) 比较预测温度和对应的目标温度，如果阀 k 关闭了，但预测温度比目标温度加上开启阀 k 所改变的温度要大，那么立即开启阀 k ，如果阀 k 已经开启了，预测温度比目标温度减去阀开启改变的温度要低，那么立即关闭阀 k ，否则保持原样。

进行卷取控制时，可以使用多个这种控制器，下面用一个实例进一步说明：一个主控和一个精控的控制过程。

表 3.5 层流冷却控制实例 1
Table 3.5 Cooling section control example 1

H1	H33	H3	H32	H5	H6	H36	H31	H8	H9
0_1	1_1	2_1	3_1	4_1	5_1	6_1	7_1	8_1	9_1
0_0	1_0	2_0	3_0	4_0	5_0	6_0	7_0	8_0	9_0
H2	H34	H4	H35	H7	H37	H10			

H38	H30	H11	H12	H40	H29	H14	H15	H42	H28	H17	H18	H44	H27
10_1	11_1	12_1	13_1	14_1	15_1	16_1	17_1	18_1	19_1	20_1	21_1	22_1	23_1
7_0	8_0	9_0	10_0	11_0	12_0	13_0	14_0	15_0	16_0	17_0	18_0	19_0	20_0
H39	H13	H41	H16	H43	H19	H45							

H20	H21	H46	H26	H23	H24	F8	F7	F5	F4	F2	F1
24_1	25_1	26_1	27_1	28_1	29_1	30_1	31_1	32_1	33_1	34_1	35_1
14_0	15_0	16_0	17_0	18_0	19_0	20_0	21_0	22_0	23_0	24_0	25_0
H22	H47	H25	F9	F6	F3						

表 3.5 显示了一个层流冷却实例的设计，顶部的阀标记为 0_1, 1_1, ... 35_1，底部阀标记为 0_0, 1_0, ... 19_0，因此，共 36 个上部阀和 20 个下部阀。阀 0_1, ... 3_1 各有 4 个喷嘴，阀 4_1, ... 35_1 各有 2 个喷嘴，所有喷嘴的规格都相同。

为了便于控制，将冷却段分为两部分，主冷段和精冷段，所有带字母 H 的阀都属于主控制器(红色)，而所有带字母 F 的阀都属于精控器(蓝色)。下面需要说明阀开启的顺序，如果主控制器还没有开启阀门，H1 就是启动的第一个阀，即阀 0_1；如果主控制器要加开一个阀，则开启阀 H2=0_0；如果需要移除一个阀，就是已开启的最后一个阀即 H1=0_1，上面的例子中可以看到，主控制器开启阀的顺序是 0_1, 0_0, 2_1, 2_0, 4_1, 5_1, 4_0, 8_1, ...就是说通常冷却率大概是最大冷却率的一半(稀疏冷却方式)，最后一个已开启阀的位置代表开关点。如果开关点达到了冷却段末尾，在上例中转折点向精轧机架方向移回，然后再向卷取机方向开启，直到所有主控制器的阀全部开启。精控器也进行相似的

过程，从上面的例子中可以看到，精控器从冷却段末端开始向精轧机方向开启，实例列表或叫优先级列表，定义了控制器的阀开启顺序，可以用 ASCII 文件定义，免去了重编译的过程，多种优先级列表定义了冷却策略，根据板跟板的不同选择不同的冷却策略，详细情况将在第四章说明。

以上是冷却策略控制方式的基本情况，有两个控制器，主控器和精控器，两者有一个优先级列表定义了阀开启次序，假若主控器开启了 10 个阀，精控器开启了 3 个阀，那么从表 3.5 来看，主控器的阀 k=11 就是阀 12_1，精控器的阀 k=4 就是阀 33_1，两个控制器在冷却段末都要比较目标卷取温度，因此，主控器和精控器分别向卷取机方向的阀 12_1 前的一个点和阀 33_1 之前的一个点计算预测值，两个控制器比较预测值和目标卷取温度从而决定是开启阀还是关闭阀(关闭前面的阀)。

精控器的预报时间比主控器的要短，因为精控器的对应预报点较之主控器的对应预报点，位于离卷取机较近的地方，因此，精控器的预报值比主控器的预报值更精确，然而，有两个控制器控制同一个目标卷取温度，因此设置一个附加的自由度，它可以对目标操作点使用精控器进行再控制，也就是说有 4 个阀的开启是由精控器控制的，如表 3.5 所示。如果主控器预报结果中由精控器开启的阀数目也是 4 个，并假设当对应样本点到达精控器的预报点时，主控器的预报仍然正确，那么通过精控器控制开启 4 个阀得到的结果是理想的，精控器将自动返回到操作点。只有在主控器预报的结果中后段的阀态发生变化时，才会产生改动。

表 3.6 层流冷却控制实例 2
Table 3.6 Laminar cooling control example 2

H1	D1	H3	D3	H5	H6	D5	D6	H8	H9
0_1	1_1	2_1	3_1	4_1	5_1	6_1	7_1	8_1	9_1
0_0	1_0	2_0	3_0	4_0		5_0		6_0	
H2	D2	H4	D4	H7		D7		H10	

D8	D9	H11	H12	D11	D12	H14	H15	D14	D15	H17	H18	H29	H30
10_1	11_1	12_1	13_1	14_1	15_1	16_1	17_1	18_1	19_1	20_1	21_1	22_1	23_1
7_0		8_0		9_0		10_0		11_0		12_0		13_0	
D10		H13		D13		H16		D16		H19		H31	

H20	H21	H27	H26	H23	H24	F8	F7	F5	F4	F2	F1
24_1	25_1	26_1	27_1	28_1	29_1	30_1	31_1	32_1	33_1	34_1	35_1
14_0		15_0		16_0		17_0		18_0		19_0	
H22		H28		H25		F9		F6		F3	

如果冷却段上一开始就已经开启了一个阀,但没有报告控制器,那么将会因开启的阀使带钢冷却到更低的温度。但是,只要带钢的这一部分没有达到任何控制器的预报点,就不会出现偏差,在带钢对应部分刚好达到第一个预报点时(这里指主控器的预报点),对应控制器立即关掉一个阀以补偿带钢上该点的温度。这时主控制器用来控制开启阀数目。上面的例子中主控制器开启了第21个阀25_1,如果希望再开启一个阀的水量,将开启位于冷却初始段的一些阀门,以确保主控制器保留有靠近冷却段尾的一些操作空间,这就保持了预报点靠近卷取机的优势,节约了计算时间也增加了预报精度。

不预先发送开启阀的预报而开启阀的方式被称为致密化,表3.6就是用致密化方式安排的优先列表。致密化的阀以字母D(绿色)打头,多数情况下要避免预报值位于多个开启阀之前,防止导致极不安全预报。测量值不是控制的一部分,控制完全基于计算温度,控制器不去核对计算温度是否与测量温度相吻合。

3.3 自学习计算

自学习计算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系统的过程输出产生反馈作用,修改控制器的参数,使系统与设定模型相一致,使误差趋向极小甚至减小到零。

自学习也可以分为两部分,第一部分,当前带钢的模型修正计算可以直接从监测器的模型修正计算中实现,这一部分实际上是同板自适应;另一部分在冷却预计算过程中执行,是对下一块带钢的模型修正初始化。下一块带钢的PDI数据,如化学成分,冷却策略及目标温度,都作为输入变量,输出变量是下一块带钢的修正因子,在预计算中使用并作为冷却监测器的初始化。

冷却预计算和冷却设定计算过程都用到了模型库,因此,如果带钢运行到冷却区时与预计算的假设之间没有偏差,那么设定计算和预计算的阀态设定值是相同的。

自适应被分为两部分:带钢间自学习和内部自适应,这两部分的主要思想基本相同。

3.3.1 同板自适应

同板自适应,它基于测量值做在线模型修正,也就是前面描述的控制反馈。

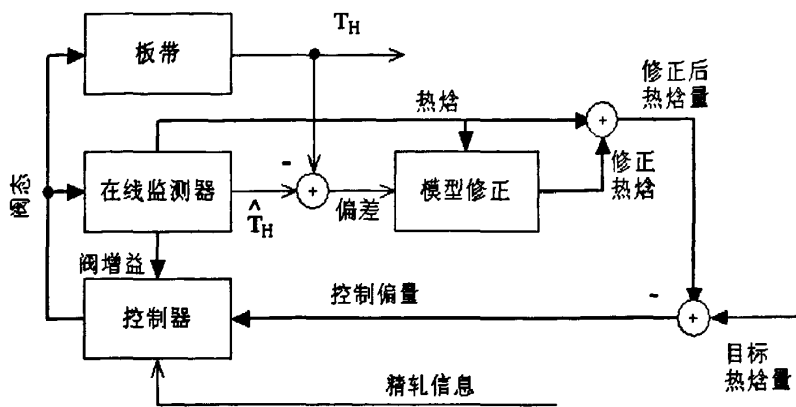


图 3.7 带钢同板自适应控制过程
Fig.3.7 Process of adaptation control

所有中间温度都来源于在线监测，模型基于热焓做温度计算，然后用 2.4 节介绍的函数 $T(e)$ 从热焓值计算温度值，如图 3.7 所示，粗线代表沿整个冷却段的结果，细线代表单一点结果。如果带钢没有收到测量值，那么模型修正还不存在，修正后热焓值等于在线监测器计算出的热焓值，这样控制过程就是一个简单的前馈控制。如果带钢收到了温度测量设备得到的测量值，从在线监测器得到一个计算温度值 $\hat{T}_H$ 并与温度测量值 T_H 相比较，偏差可以用来计算沿整个层冷段上热焓值的修正量，当前控制完全是在修正热焓值的基础上，和模型修正设备建立一个密切的循环，于是当前表现为反馈性质的控制。

这就是带钢同板自适应的过程，是在测量值可靠的前提下，使修正计算后模型计算结果接近测量值。如果测量设备出现故障，将不使用同板自适应方式，在没有测量值的情况下继续进行卷取温度的控制。

3.3.2 异板自学习

从带钢自适应可以得到模型修正量和对应的修正因子的变化量 $\Delta\kappa$ ，带钢一些基本特征数据需要和得到的修正因子 $\kappa = \kappa_0 + \Delta\kappa$ 存储在一起。图 3.8 说明了板对板自学习原理，自学习方法为即时模型法。

即时学习法是当下一块带钢将进入冷却区时，带钢存储区将备份文件中所有带钢数据临时调入，根据下一块带钢的 PDI 数据查找相似带钢数据，通过局部模型得到模型修正因子，将修正因子发送给预计算模块以进行带钢预设，得到阀设定组态即冷却段集管开启数目和位置，再通过在线监测进行模型系数的修正，重新得到适应该带钢的模型修正因子，最后存入备份文件数据库中。图 3.9 是自学习系数计算的流程图。

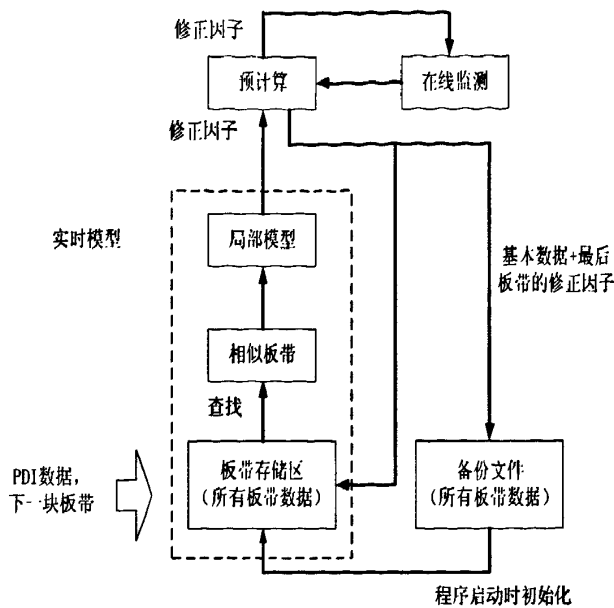


图 3.8 用即时学习法进行自学习示意图
Fig.3.8 Schematic diagram Just in Time Modelling method

带钢将进入层流冷却区时，得到带钢的 PDI 数据，根据 PDI 数据提取索引参数，比较层别数据，找出相似的带钢数据，如果没有相似的数据，使用近似相似的带钢数据代替，根据实际带钢 PDI 数据和相似带钢基本数据的差别进行自学习系数的修正计算。如果没有相似的或近似相似的带钢，那么自学习系数取 1。

进行检索的 PDI 数据包括：(1)阀模式；(2)上部阀启动；(3)下部阀启动；(4)临界温度；(5)化学成分；(6)厚度；(7)宽度；(8)测量速度(2 个)；(9)目标温度；(10)目标精轧出口温度；(11)测量温度(精轧出口及其他位置)。

比较相似带钢与当前实际带钢的 PDI 数据，得到偏差方式如下：

$$dif_{[i]} = D_{sim[i]} - D_{acr[i]} \tag{3-2}$$

式中， $dif_{[i]}$ ， $D_{sim[i]}$ ， $D_{acr[i]}$ 分别是第 i 项基本数据的差别，相似带钢数据的第 i 项基本数据和实际带钢数据的第 i 项基本数据。

$$dist = \sum_{i=0}^N dif_{[i]}^2 \times ge_{[i]} \tag{3-3}$$

式中， $dist$ ， $ge_{[i]}$ 分别表示相似带钢和实际带钢的所有层别数据的总差别，及各项基本数据的加权值，加权值由系统设定。

$$g_k = \frac{6 \times (1 - dist_{[k]})^2}{dist_{[k]}} \tag{3-4}$$

式中， g_k ， $dist_{[k]}$ 分别表示第 k 块相似带钢的自学习中间系数，第 k 块相似带钢的

$$\text{差别值。} cofa = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} g_k \times dist_{[k]}}{\sum_{k=0}^{n-1} g_k}$$

(3-5)

式中，*cofa* 即当前带钢所得到的自学习系数。系统中设定自学习系数在 0.6~1.5 范围内取值。选取相似带钢时，相似的标准用两个参量来界定，这两个参量分别是 MAX_dist=3·max_dist 和 max_dist=1.0，如果计算得到的带钢 dist<max_dist,那么算作相似带钢，如果 max_dist<dist<MAX_dist，算作近似相似带钢，如果 dist>MAX_dist，那么表示当前带钢为换规格的第一块带钢，没有相似带钢，自适应系数取为 1。如果搜索结果既得到了相似带钢数据，又有近似相似带钢数据，那么只取相似带钢数据进行自适应系数的计算。

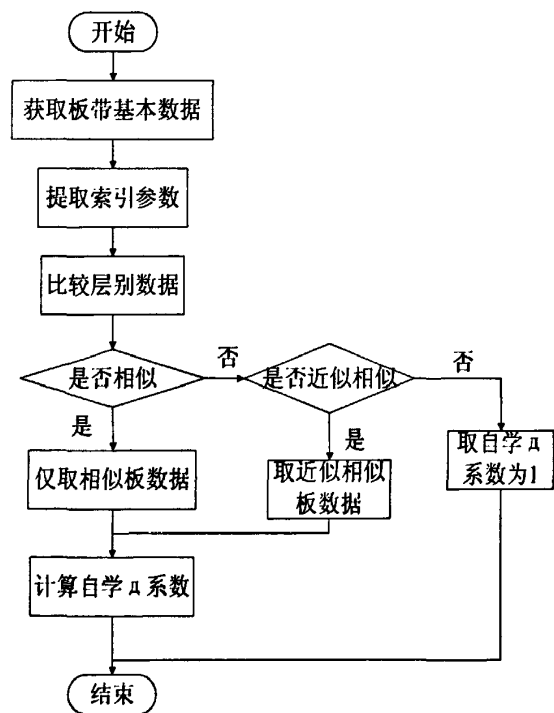


图 3.9 自学习系数计算流程图
Fig.3.9 Flow chart of adaptation coefficient

在迁钢 2160 层流冷却控制系统中长期自学习和短期自学习没有区别，都用(3-5)式计算修正系数，如果找不到相似板就用原始模型并设定模型修正系数κ=1.0，倘若所有找出的相似板都是相对较久的板，自学习就是长期自学习，只要有一块相似板是相对较近时间冷却的，自学习就是短期自学习。两者的概念不是绝对的，例如，两个冷却段而每两块相邻的板都完全不同，但每相隔的两块板又分别相似，这种情况就是相似板的短期自学习。

如果生产周期中出现新规格的带钢，第一块板的模型修正系数以 $\kappa=1.0$ 开始，依据带钢的 PDI 数据按照原始模型进行设定，如果这种规格的带钢出现第二第三次，这种材料的自适应过程也将随着冷却板数目的增加而增加，不影响其它非相似板的结果。

3.4 本章小结

本章主要介绍了层流冷却控制模块的功能及控制逻辑，重点阐述了修正设定过程中冷却控制器和冷却监控器的使用原理，冷却监控器可以实时计算从精轧机出口到卷取机任意时刻冷却段上的整个带钢的温度，为冷却控制器预测计算下一时间步的阀态设定提供依据，控制器和预计算共同计算阀开关组态以达到控制带钢卷取温度的目的。

研究了带钢自适应和带钢自学习的实现方式，通过模型修正为带钢达到目标卷取温度进行控制反馈，介绍了即时学习法的思想，给出了自学习系数的求解方法和过程。

第 4 章 层流冷却控制策略

常用的冷却策略包括前段主冷，后段主冷，按组或按管稀疏冷却 4 种常用的方式，冷却方向有从精轧出口向卷取机方向逐步开启集管或从卷取机向精轧出口方向逐步开启集管 2 种方式。迁钢 2160 层流冷却控制系统在冷却策略选择上具有灵活的特点——将可能用到的冷却策略一一列举，制成配置文件，调用更加快捷简便。

4.1 带钢冷却策略选择

在第三章中说明了为控制目标实时计算中间温度的一种控制方式的详细过程，用实例说明了将两个向卷取机方向的控制器的预报值和哪一个阀应该完成预报联合起来，这种方式很好地解释了优先列表的作用。

如表 4.1 和表 4.2 所示，迁钢 2160 热轧带钢冷却策略以基本集管组集管的 5 种排布为基础，列出了可能用到的 46 种冷却优先列表，详尽地说明了集管开启的顺序和方向，基于带钢进入冷却区的 PDI 数据，目标卷取温度，利用冷却控制模型进行计算，求出集管开启的数量和位置，根据结果选择合适的冷却策略，简单快捷地完成冷却策略的选择。为了能清楚地看出各策略数据表的启动安排，表 4.1 用不同颜色标记集管开启的顺序，表中 1、2、3、4 分别代表第一级、第二级、第三级、第四级开启的集管，每个策略表中最大的数字都表示紧急启用集管，当冷却集管开启的数目不足以将带钢冷却到目标卷取温度时，启动紧急集管。表 4.2 是对表 4.1 中各级集管开启方向(向卷取机方向开启为向前，逆向卷取机方向开启为向后)的说明。

以 01b0 为例说明：上集管按表 3.2 中 0 号方式开启，即 0000 方式，下集管按表 3.2 中 1 号方式开启，即 X000 方式，集管的开启方向“b”即从后向前开启(即从卷取机附近的第 17 组集管向精轧机后的第 1 组集管开启)，最后的“0”代表卷取机号，该系统共有两台卷取机，其编号分别为 0 和 1。

表 4.1 迁钢层流冷却优先列表
Table 4.1 Laminar cooling priority list in QianGang

文件号	阀序号																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
00b0																		
00f0																		
01b0	4	4	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	3	3	3	2

	4	1	4	2	4	1	4	2	4	1	4	2	4	1	3	2	3	1
01f0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	2	2	1	2
02b0	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	4	3	3	2	3	3	3
	4	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	2	1
02f0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	1	2
03b0	4	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	3	3	3	2	3
	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
03f0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
04b0	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
04f0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10b0	4	1	4	4	2	1	4		2	1	4	4	2	1	3	3	2	1
	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2		4	4	2	3	3	3
10f0	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	2	2	1	2
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
11b0	4	1	4	2	4	1	4	4	2	1	4	4	2	1	3	3	2	1
	4	1	4	4	4	1	2	4	4	1	2	4	3	1	2	3	3	1
11f0	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	2	2	1	2
	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	2	2	1	2
12b0	4	1	4	4	2	1	4	4	2	1	4	4	2	1	3	3	2	1
	4	1	4	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	2	1	3	1
12f0	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	2	2	2	1	2
	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	1	2
13b0	4	1	2	4	2	1	4	4	2	1	4	4	2	1	3	3	2	1
	1	1	4	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
13f0	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	2	2	2	1	2
	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
14b0	4	1	4	2	4	1	2	4	2	1	2	4	2	1	3	2	3	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14f0	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	2	2	2	1	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20b0	4	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	2	1
	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	4	3	3	2	3	3	3
20f0	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
21b0	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	2	1	3	1
	4	1	4	4	2	1	4	4	2	1	4	4	2	1	3	3	3	1
21f0	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	1	2
	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	2	2	2	1	2

22b0	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	2	1	3	1
	4	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	2	1
22f0	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	1	2
	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	1	2
23b0	4	1	2	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	3	1
	1	1	4	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
23f0	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1		1	2	1	2	1	2
	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	2
24b0	4	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	3	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24f0	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1		1	2	1	2	1	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
30b0	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	3	1	1	1
	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	3	2	3
30f0	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
31b0	1	1	4	1	1	1	2	1	1	1	4	1	1	1	2	1	1	1
	4	1	2		2	1	4	4	2	1	2	4	2	1	3	3	3	1
31f0	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	2	2	2	1	2
32b0	1	1	4	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
	4	1	2	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	3	1
32f0	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
	1	1	3	3	1	1	3	3	1	1	3	3	1	1	2	2	1	1
33b0	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1
33f0	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
34b0	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
34f0	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40b0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	3	2	3
40f0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
41b0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	2	4	2	1	2	4	2	1	2	4	2	1	2	3	2	1
41f0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	2	2	2	1	2
42b0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	3	1	2	1	3	1
42f0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	1	2
43b0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
43f0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	2
44b0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
44f0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 4.2 各级阀开启顺序及方向
Table 4.2 Valves starting order and directions in all levels

文件号 1-4 级集管开启方向

00b0	集管无需开启
00f0	集管无需开启
01b0	1 从后向前 2 从前向后从下向上 3 从后向前，从下向上 共 18 个 4 紧急启动阀，从前向后，自上而下，共 18 个
01f0	1 从前向后，只开启下集管 2 从后向前，自下而上 共 12 个 3 紧急启动阀，从前向后，自下而上，但每组启动方式是每组第 2 对集管下、上到第一对集管上，启动完再开第三对集管下共 24 个
02b0	1 从后向前，只开启下集管 2 从前向后，上下轮替 3 从后向前 共 23 个 4 紧急启动阀，从前向后，逐空填充，共 13 个
02f0	1 从前向后开启下集管 2 从后向前，自下而上逐个开启共 12 个 3 紧急启动阀，从前向后，逐空填充 共 19 个
03b0	1 从后向前 2 从前向后，上下轮替 3 从后向前，逐个开启 共 26 个 4 紧急阀 从前向后，共 10 个
03f0	1 从前向后开启集管，2 从后向前，自下而上开启 共 20 个 3 紧急阀 从前向后，自下而上 共 16 个
04b0	1 白后向前 2 从前向后 3 从后向前共 30 个 3 紧急阀 从前向后共 6 个
04f0	1 由前到后 2 由后到前 共 24 个 3 紧急阀 由前到后 共 12 个
10b0	1 从后到前 2 从前到后，从下到上交替开启 3 从后到前，从上到下，共 18 个 4 紧急阀，从前到后，从上到下，共 16 个
10f0	1 从前到后 2 从后到前 从上到下共 12 个 3 从前向后，每组先从上到下开启第二对再开启第一对下，然后从上到下开启第三对共 24 个
11b0	1 从后向前 自上而下 2 从前向后，上下交替开启 3 从后向前，自上而下共 22 个 4 从前向后 从上到下 共 14 个
11f0	1 从前向后 自上而下开启 2 从后向前，自上而下 共 16 个 3 紧急阀 从前向后，自上而下，共 20 个

-
- | | |
|------|---|
| 12b0 | 1 从后向前, 从上到下 2 从前到后, 上下交替开启 3 从后向前, 逐个开启共 25 个
4 紧急阀 从前向后, 自上而下 共 11 个 |
| 12f0 | 1 从前到后, 自上而下 2 从后向前 共 21 个
3 紧急阀, 从前向后, 自上而下共 15 个 |
| 13b0 | 1 从后向前, 自上而下 2 从前向后自上而下 3 从后向前 共 29 个
4 紧急阀, 从前向后 共 7 个 |
| 13f0 | 1 从前向后 自上而下 2 从后向前 共 24 个
3 紧急阀 从前向后 共 12 个 |
| 14b0 | 1 从后向前 从上到下 2 从前到后 3 从后到前共 31 个
4 紧急阀 从前先后 共 5 个 |
| 14f0 | 1 从前到后, 从上到下 2 从后到前 共 27 个
3 紧急阀 从前到后 共 9 个 |
| 20b0 | 1 从后向前 2 从前向后下上交替开启 3 从后向前 共 23 个
4 紧急阀 从前到后从上到下 共 13 个 |
| 20f0 | 1 从前到后 2 从后向前 从上到下 共 15 个
3 紧急阀 从前到后 自上而下 共 21 个 |
| 21b0 | 1 从后向前 自上而下 2 从前向后上下交替 3 从后向前, 自上而下 共 26 个
4 紧急阀 从前到后自上而下 共 10 个 |
| 21f0 | 1 从前向后 从上到下 2 从后到前 从上到下 共 21 个
3 紧急阀 从前到后自上而下 共 15 个 |
| 22b0 | 1 从后向前 自上而下 2 从前向后 上下交替开启 3 从后向前 共 29 个
4 紧急阀从前向后自上而下 共 7 个 |
| 22f0 | 1 从前到后 自上而下 2 从后到前自上而下 共 24 个
3 紧急阀 从前向后, 自上而下 共 12 个 |
| 23b0 | 1 从后向前 自上而下 2 从前向后 3 从后向前 共 32 个
4 紧急阀 从前向后共 4 个 |
| 23f0 | 1 从前向后自上向下 2 从后向前自上而下 共 27 个
3 紧急阀 从前向后自上而下共 8 个 |
| 24b0 | 1 从后先前 自上而下 2 从前向后 3 从后向前 共 32 个
4 紧急阀 从前向后共 4 个 |
| 24f0 | 1 从前向后 自上而下 2 从后向前, 自上而下 共 30 个
3 紧急阀 从前向后 共 5 个 |
| 30b0 | 1 从后向前 2 从前向后 3 从后向前 共 26 个
4 紧急阀 从前向后共 10 个 |
| 30f0 | 1 从前向后 2 从后向前自下向上 共 20 个
3 紧急阀 从前向后, 自下向上 共 16 个 |
| 31b0 | 1 从后向前, 自上而下 2 从前向后 3 从后向前共 29 个
4 紧急阀 从前向后, 共 6 个 |
| 31f0 | 1 从前向后自上而下 2 从后向前自上而下 共 24 个
3 紧急阀 从前向后自上而下 共 12 个 |
| 32b0 | 1 从后向前 自上向下 2 从前向后 3 从后向前 共 32 个
4 紧急阀 从前向后共 4 个 |
| 32f0 | 1 从前到后自上而下 2 从后到前自上而下 共 27 个
3 紧急阀 从前向后自上而下 共 9 个 |
-

33b0	1 从后向前 自上而下 2 从前向后自上而下 共 33 个 3 紧急阀 从前向后 共 3 个
33f0	1 从前到后 自上而下 2 从后到前自上而下 共 30 个 3 紧急阀 从前向后自上而下, 共 6 个
34b0	1 从后到前自上而下 2 从前到后 共 36 个
34f0	1 从前到后自上而下 2 从后到前 共 33 个 3 紧急阀 从前到后 共 3 个
40b0	1 从后向前 2 从前向后 3 从后向前 共 30 个 4 紧急阀从前向后 共 6 个
40f0	1 从前到后 2 从后到前 共 24 个 3 紧急阀 从前向后 共 12 个
41b0	1 从后向前自上而下 2 从前向后 3 从后向前 共 32 个 4 紧急阀 从前向后 共 4 个
41f0	1 从前向后 自上而下 2 从后向前 共 24 个 3 紧急阀从前到后共 9 个
42b0	1 从后到前 自下向上 2 从前到后 3 从后到前 共 33 个 4 紧急阀 从前向后 共 4 个
42f0	1 从前向后 自上而下 2 从后向前 共 30 个 3 紧急阀 从前向后共 6 个
43b0	1 从后向前 自上而下 2 从前向后 共 36 个
43f0	1 从前向后 自上而下 2 从后向前 共 33 个 3 紧急阀 从前向后 共 3 个
44b0	1 从后向前 自上而下共 36 个
44f0	1 从前向后, 自上而下, 共 36 个

有了这些优先列表，系统在进行预设定计算时，按照式(3-1)计算出一个索引编号，将这个编号送入主控制器，由主控制器对基础自动化的集管排布进行分配，直接调用冷却策略表中的相应冷却策略安排，灵活便捷地完成冷却策略的计算。

4.2 带钢样本的跟踪

控制冷却的带钢跟踪主要有如下功能：对控冷辊道上的钢板位置及其状态进行跟踪；对控冷设备的运行状态进行跟踪；对一级机所传递的实测数据进行管理；根据钢板在控冷辊道上的位置，触发控冷模型预设定计算、修正计算和自学习计算；将模型计算的结果传给基础自动化执行；对人机界面的指令和一级机传递的消息做出相应的响应；协调轧机过程机的轧制节奏；生成冷却报告。

带钢跟踪对一级机的检测消息做出响应，同时将模型给定的控制模式传给一级机，是过程控制模型与基础自动化的通讯中枢。带钢跟踪也是保证控制冷却过程有序进行的

前提,模型计算依赖于跟踪逻辑的触发。过程跟踪实时从轧制线采集相关的信息—主要是轧机后红外测温仪和待温段后的热金属检测仪(HMD)、冷却设备前红外测温仪及HMD、冷却辊道速度与加速度、冷却设备后红外测温仪、HMD及扫描式红外测温仪等检测仪表的信号数据,依据这些信息,对轧制线上的轧件进行跟踪,一方面为操作工显示正确的轧件位置和有关数据,另一方面依据实际轧件不同位置,触发计算机中相应的程序,进行计算,指挥过程机工作有序地进行。

在冷却过程中,基础自动化对带钢进行分段跟踪(每段的长度由过程机根据钢种和规格给出),并把每一段对应的速度、厚度和终轧温度平均值上传给过程机。过程机则把每段作为一个控制点来进行计算。在层冷区控制点的最大个数为冷却区集管组数的倍数,当样本长度等于集管组长,则控制点个数为集管组数;当样本长度等于半个集管组,则控制点个数为集管组数的2倍。

在精轧出口每检得一个样本时,激活设定计算模块和再设定模块,设定模块根据带钢的PDI数据、精轧出口带钢的温度、速度、厚度、自学习系数和换热系数,计算当前样本所需要的开阀个数;再设定采用当前带钢的速度,对已经进入热输出辊道的样本的组态进行修正,即动态设定。反馈控制主要通过PID控制器或智能控制器对温度偏差进行调节。前馈控制虽然计算出了样本所需要的喷水组态,即带钢层流冷却温度控制的静态模型,但要实现运动带钢的温度控制必须引入组态跟踪控制,即动态跟踪模型。

(1) 首开阀门位置分析

层流冷却装置为控制冷却的执行装置,因此有必要分析层流冷却的喷水延时时间的构成。喷水总延时的构成可表达为 $t_{\text{delay}}=t_{\text{net}}+t_{\text{cal}}+t_{\text{valve}}+t_{\text{drop}}$,其中阀门的老化程度影响阀门响应时间 t_{valve} ,因此 t_{valve} 的时变常数较大;水压波动影响水流下落时间 t_{drop} ,由于供水系统设有高位水箱,集管层流冷却系统处于恒压状态,因此 t_{drop} 基本为常数;模型的输入参数影响层流冷却模型计算时间 t_{cal} ;网络状态影响网络延时时间 t_{net} 。虽然喷水总延时受诸多因素影响,但阀门响应时间 t_{valve} 和水流下落时间 t_{drop} 为喷水总延时主要时间分量。因此,喷水总延时基本为常数。由于喷水延时的存在,为实现样本到达相应的冷却区时能够得到所需要的喷水组态,需要提前执行阀门的开关状态,即将层流冷却系统的第1个可用喷水集管后移,称第1个可用喷水集管为首开阀门。

(2) 样本跟踪长度分析

层流冷却系统中的基础自动化每检测到一个样本后,触发层流冷却模型,计算样本所需要的喷水组态,改变层流冷却系统中的阀门喷水组态,因此,相邻样本组态的切换时间间隔为 $t_{\text{sample}}=L_{\text{sample}}/v$ 。为保证样本间组态正确切换,集管组必须能够在 t_{sample} 时间

间隔内,即在 $t_{\text{delay}} \leq t_{\text{sample}}$ 的条件下,完成喷水组态的切换,对不等式 $t_{\text{delay}} \leq t_{\text{sample}}$ 左右乘以带钢速度 v ,即可得到样本间组态正确切换的另一标准, $DL \leq L_{\text{sample}}$ 。因此,样本跟踪长度选择标准为 $DL \leq L_{\text{sample}}(1)$, $t_{\text{delay}} \leq t_{\text{sample}}(2)$,由式(1)可知,在样本间组态正确切换时,样本跟踪长度的存在最小值 $L_{\text{sample}} \geq DL$,即样本切换时间 t_{sample} 必须大于 t_{delay} ,否则将产生组态的重迭,同时也说明喷水延时长度存在最大值 $DL \leq L_{\text{sample}}$ 。由于分段控制的逻辑不能反映样本段内部的参数变化,因此,如果样本长度选择的很大,虽然满足跟踪长度选择标准,将不能精确反映精轧出口带钢的温度、速度、厚度的变化,引起轧制方向上温度控制目标的均匀性较低;然而若要选择短样本跟踪,则需要高响应速度的阀门,增加了层流冷却系统的成本,但是在轧制方向上,带钢温度控制的均匀性较好。

(3) 喷水相对位置

由于带钢轧制速度波动和喷水延时时间估计不准确,导致喷水提前长度计算存在误差,因此在集管组 i 完全执行样本 j 的组态(水流下落到带钢上或水流被完全关断)时,集管组 i 与样本 j 的相对位置存在很多情况。定义此种相对位置为喷水相对位置,用 α 表示。 $\alpha = -1$,表示集管组 i 提前一组执行样本 j 的组态; $\alpha = 0$,表示样本 j 头部进入集管组 i 时,即在 t_{in} 时刻,集管组 i 执行样本 j 的组态; $\alpha = 1$,表示样本 j 尾部进入集管组 i 时,即在 t_{mid} 时刻,集管组 i 执行样本 j 的组态; $\alpha = 2$,表示样本 j 尾部退出集管组 i 时,即在 t_{out} 时刻,集管组 i 执行样本 j 的组态。

将所有带钢送入冷却段并做相应的计算,有:

- a) 在精轧出口测温仪处对带钢引入新样本点;
- b) 删除已经卷取完毕的带钢的样本点;
- c) 计算所有在冷却段上的带钢监测器数据;
- d) 计算所有运行在冷却段上的带钢控制器数据并合并算得的开关指令;
- e) 将算得的阀模式发送到基础自动化;
- f) 记录测量值和带钢数据以备后用(如模型优化,过程通信等)。

4.3 本章小结

阐述了迁钢 2160mm 层流冷却过程系统的冷却控制策略,给出了 46 种阀门组态控制优先列表。阐述了该系统的样本跟踪策略。

第 5 章 层流冷却控制系统的应用

5.1 主要产品与设备布置

5.1.1 主要产品

迁钢 2160mm 热轧是首钢的第一条热轧带钢生产线，现代化程度较高，过程控制系统从德国西门子公司引进。主要产品有：优质碳素结构钢、高强度低合金钢、深冲钢、汽车用钢、锅炉和压力容器用钢、船板、管线钢、双相钢、多相钢和 IF 钢。设计产量为 400 万吨。

5.1.2 层流冷却工艺设备

层流冷却设备位于精轧机组与卷取机之间，其作用主要体现在两个层次的控制指标，表观的指标为实现高精度卷取温度控制，较高层次的指标为实现带钢轧后冷却路径的控制，层流冷却的最终目的是通过控制冷却实现对带钢产品组织和性能的控制。

层流冷却区域的范围定义为从精轧后的测温仪开始到卷取机前的测温仪为止，全长约 140.87m，其中冷却装置区为 94.24m。层流冷却区域按照功能区别分为粗调区和精调区，粗调区共 18 组集管，每组上部共 4 根集管，由 4 个阀门分别控制，下部共 12 根集管，下部每 3 根集管由一个阀门控制，下部共 4 个阀门。粗调区按照可控制阀门数分为 $72 \times 4 = 144$ 个控制单元。精调区共 2 组集管，其上部共 8 根集管，每根集管由一个阀门控制开闭，下部集管共 16 根，每 2 根集管由一个阀门控制开闭，精调区按照可控制阀门数分为 $16 \times 2 = 32$ 个控制单元。层流冷却区设备布置简图如图 5.1 所示。

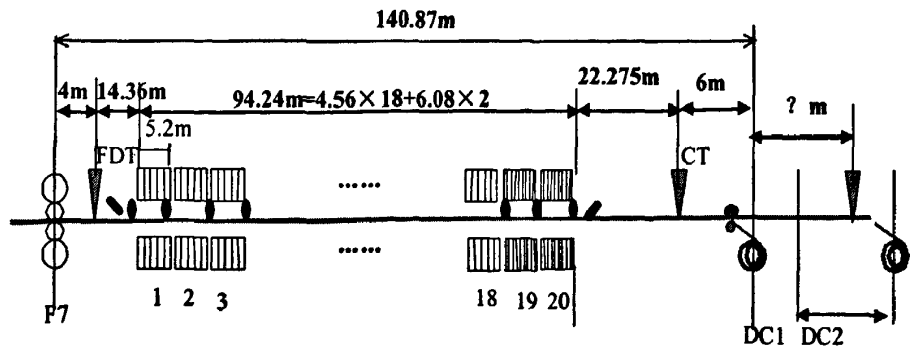


图 5.1 迁钢 2160 层流冷却设备简图
Fig.5.1 Laminar cooling equipment in QianGang diagram of Qiangang 2160

在层冷区每组后设置一个侧喷嘴，以清除钢板表面残水，便于准确测厚和测温，

在最后一组后设立两个侧喷嘴，侧喷嘴总数为 21 个。

5.1.2.1 冷却设备基本参数

表 5.1 是迁钢 2160 热轧带钢层流冷却设备的基本参数。

表 5.1 层流冷却设备基本参数 Table 5.1 Laminar cooling equipment essential parameters		
序号	基本参数	参数值
1	有效冷却宽度/mm	2250
2	每组冷却集管长度/m	4.56
3	层流冷却最大水量/m ³ /h	20460
4	侧喷最大水量/m ³ /h	210
5	冷却能力/℃	200~850
6	供水温度范围/℃	4~70
7	前空冷区/m	4+14.36=18.36
8	阀门的平均响应时间/s	≤1
9	阀头宽度/m	1.6
10	上集管喷嘴出口与带钢表面近似距离/m	2
11	下集管喷嘴出口与带钢表面近似距离/m	1
12	上集管喷射散度因子	3(3 倍于完全垂直喷射区)
13	下集管喷射散度因子	1(完全垂直喷射区)
14	上集管喷头直径/mm	15
15	下集管喷头直径/mm	8

5.1.2.2 层流冷却检测设备

层流冷却温度检测设备红外测温仪分别置于精轧出口、冷却段中间和卷取机之前的位置，表 5.2 所示为层流冷却系统温度检测仪器，分别测量带钢终轧温度，中间温度和卷取温度。冷却段共 291 段，从精轧出口测温仪处开始计数。

表 5.2 层流冷却系统温度检测仪器 Table 5.2 Laminar cooling system temperature detecting instruments		
编号	位置	可测温度范围/℃
0#高温计	冷却段 0 段上部	600~1600
1#高温计	冷却段 206 段上部	300~1100
2#高温计	冷却段 291 段上部	300~1100

在层冷段上配置有 4 个 HMD(hot metal detector)，安装在冷却段中轧线上 2m 以上的位置，向控冷系统提供钢板的位置跟踪信号。在冷却段上分别配备了水量测量，水压测量和水温测量装置。

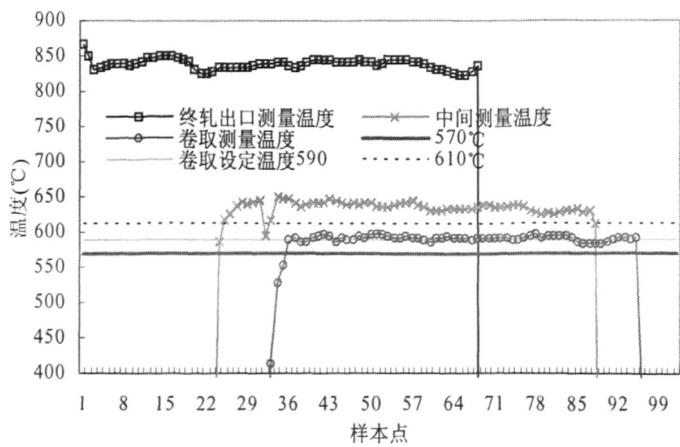
5.2 冷却模型应用效果分析

控制冷却过程级控制系统的主要功能是通过跟踪钢板的温度，于不同时刻触发控冷模型进行运算，给出满足工艺要求的冷却方式、阀门开闭的数量和排布形式，作为设定结果传给一级机，并从一级机获取温度、辊道速度等实际数据，分析处理后通过自学习来优化控制冷却模型。具体实现功能如下：

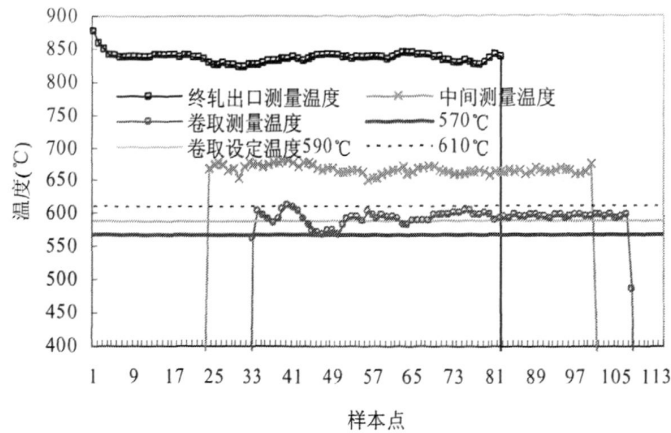
- 钢板的位置及其状态跟踪；
- 为冷却控制模型获取初始数据(PDI)，主要包括钢板编号、化学成分、钢种、成品厚度、宽度、长度、开冷温度、终冷温度、冷却速度；
- 调用冷却控制模型进行预设、实时修正计算和自学习计算；
- 对一级机传来的实测温度数据进行处理，用于自学习，从而优化模型；
- 提供数据报表、分析报告以及各种数据记录；
- 和其它过程机、基础自动化计算机、监控终端进行数据通讯；
- 具备友好的人机界面，进行操作显示、各种数据显示及人工干预，具有事故自动诊断和自动记录、报警功能。

根据现场控冷线上配置的测温仪，可以采集到精轧出口温度，冷却区中间温度(冷却段 207 段)和卷取前的实测温度值(冷却段 291 段)，通过分析卷取温度的变化情况，考察冷却模型和策略的应用效果，下面是现场实测终轧出口测量温度，中间测量温度和卷取测量温度的采样结果。

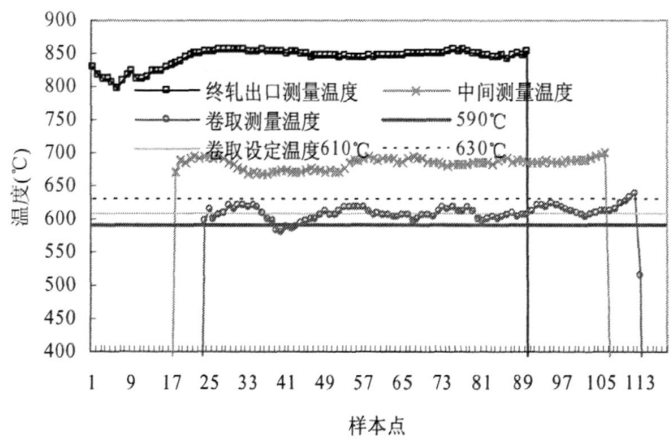
为了更好地反映冷却规程的设定规律，图 5.2 给出了同一钢种不同厚度规格的带钢在相应的冷却规程下冷却区前后的实测温度曲线。



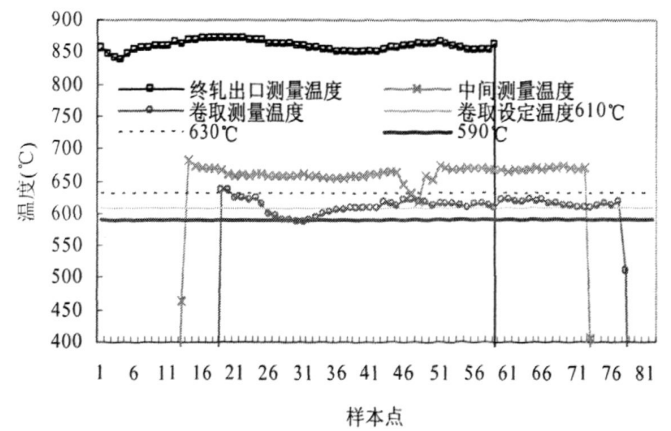
(1) 钢种: Q345B ID 号: 082014751201 厚度: 9.5mm 宽度: 1500mm
速度: 3.57m/s 相似带钢数: 99 自学习系数: 1.010



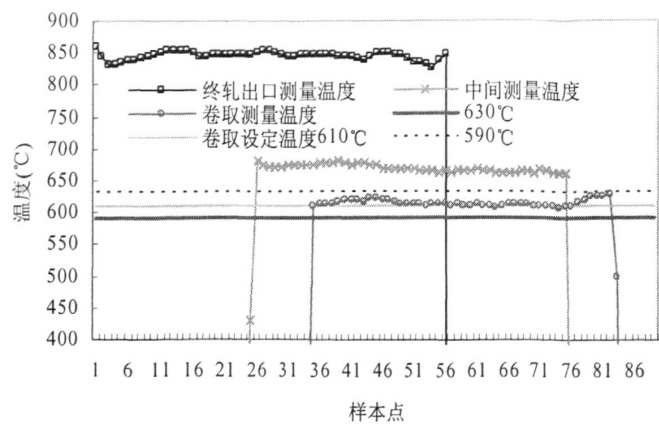
(2) 钢种: Q345B ID 号: 081018241203 厚度: 7.75mm 宽度: 1500mm
速度: 3.64m/s 相似带钢数: 99 自学习系数: 1.266



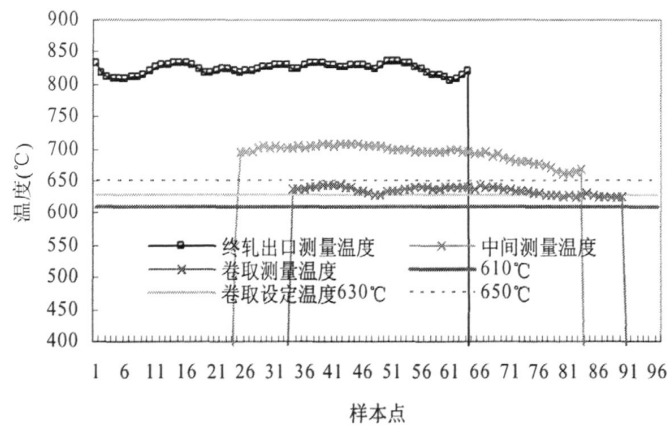
(3) 钢种: Q345B ID 号: 082014771201 厚度: 5.75mm 宽度: 1500mm
速度: 4.37m/s 相似带钢数: 99 自学习系数: 1.085



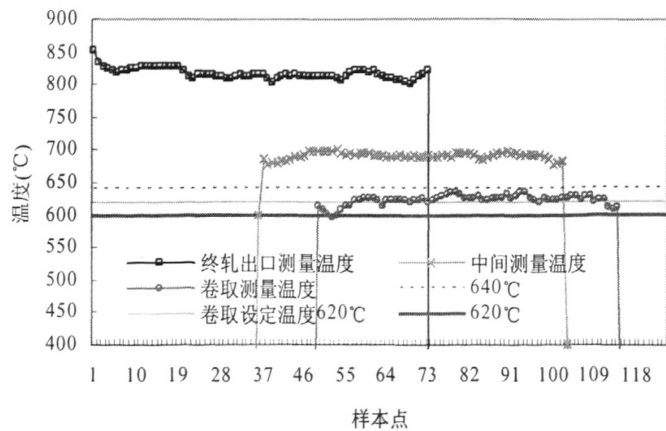
(4) 钢种: SS400 ID 号: 081018332101 厚度: 5.75mm 宽度: 2000mm
速度: 6.22m/s 相似带钢数: 49 自学习系数: 0.903



(5) 钢种: SS400 ID 号: 083017841101 厚度: 11.5mm 宽度: 1575mm
速度: 3.18m/s 相似带钢数: 88 自学习系数: 0.946



(6) 钢种: API5L-B ID 号: 083017151104 厚度: 9.5mm 宽度: 1280mm
速度: 3.28m/s 相似带钢数: 21 自学习系数: 0.897



(7) 钢种: API5L-B ID 号: 081017761104 厚度: 12.7mm 宽度: 1590mm
速度: 2.34m/s 相似带钢数: 9 自学习系数: 0.986

图 5.2 带钢实测温度曲线
Fig.5.2 Temperature measured curve of strips

根据工艺要求, 终冷温度应控制在 $570\sim 650^{\circ}\text{C}$ 之间。图 4.2 给出钢种为 Q345B, SS400, API5L-B 的不同厚度带钢冷却温度曲线, 从曲线中的卷取温度设定值及实测温度可以看出, 冷却区出口温度值基本上控制在 $570\sim 650^{\circ}\text{C}$ 之内。从实测温度曲线可以看出, 带钢实现了温度均一, 同一带钢温差基本上控制在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 之内, 有的达到了 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 的精度。经统计, 同一块带钢温差在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 之内的最高合格率分别都是 100%, 95% 以上的带钢同板温差控制在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 内。

采样实测数据充分说明了迁钢 2160mm 层流冷却数学模型具有较高的精度, 具体实施的冷却策略可以实现产品的均匀冷却, 达到了生产工艺要求。

5.3 层流冷却过程控制系统的特点

- a) 该系统的控制策略采用配置文件的形式预先设定了 46 种控制优先列表, 可以适应轧制速度频繁变化的情形, 有利于提高控制精度; 但是这种优先列表的形式增加了调试的难度, 使调试时间延长。
- b) 在线自适应的应用使带钢温度计算模型的关键参数及时更新, 有利于带钢特别是某规格的首块钢卷取温度命中率的提高;
- c) 系统中较多用到经验常数, 虽然简化了计算过程, 但不便于操作人员对系统的理解, 将给系统参数优化带来困难。

5.4 本章小结

迁钢 2160 层流冷却控制系统具有较高的控制精度, 其控制精度最高可达同板 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 命中率 100%, 一般情况下同板 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 命中率在 95% 以上。

总结了该系统的优势和劣势, 为层流冷却控制系统功能的进一步完善提高参考。

第6章 结论

本文以迁钢 2160 过程控制模型的消化和吸收项目为背景,查阅了相关资料,通过对该层流冷却控制模型的系统消化,总结和归纳了其控制思想,提取了层流冷却数学模型、冷却控制模块,为热轧带钢层流冷却控制系统的开发和应用提供依据,为进一步优化层流冷却过程控制系统打下了基础。得到以下研究结果:

(1) 迁钢 2160mm 层流冷却系统采用过程机预设与基础自动化动态在线修正相结合的方式,通过预设模块、修正设定模块和自学习模块完成层流冷却控制功能,实现带钢在热输出辊道上的卷取温度控制以及冷却路径控制,并实时优化模型参数。

(2) 提取了带钢温度计算数学模型,包括膜沸腾的热流密度计算模型、辊道冷却热流密度模型、空冷热流密度模型和喷射冷却热流密度模型。该系统采用 Gauss-Lobatto-Net 法进行节点划分,采用后向欧拉有限差分方法计算带钢在输出辊道上任意位置的温度分布,提取了材料的物性参数计算模型,包括热传导率曲线模型、温度与热焓的曲线模型,在此基础上得出计算热平衡方程的热动态特征值的解法。

(3) 总结和归纳了冷却监测器和冷却控制器的控制思想。冷却监测器可以实时计算冷却区上任意点的中间温度,结合 46 种阀态优先组合列表,为控制器进行阀组态的实时设定提供很大的方便。通过归纳总结冷却控制器和冷却监视器的控制思想,总结出该系统阀态动态控制的思路。

(4) 同板自适应是提高层流冷却首块钢命中率的有效手段,迁钢 2160 层流冷却系统具有同板自适应功能和异板自学习功能。本文提取了同板自适应和异板自学习的方法。为提高层流冷却控制精度提供参考依据。

(5) 通过提取现场实际数据,分析了该层流冷却系统的控制效果。现场数据表明该层流冷却过程控制系统控制精度较高,对该系统的理解对层冷过程控制模型的二次开发与调试有实际价值。

(6) 通过消化和吸收迁钢 2160 层流冷却控制模型,总结和其优势与劣势。该系统的控制策略可以适应轧制速度频繁变化的情形,有利于提高控制精度;在线自适应的应用有利于首块钢卷取温度命中率的提高;系统中较多用到经验常数,虽然简化了计算过程,但不便于操作人员对系统的理解,将给系统参数优化带来困难。

参考文献

1. 小指军夫. 制御压延制御冷却[M], 北京: 地人书馆, 1997:30.
2. Hitoshi Narita, et al. Development of Gradual Cooling Nozzle[C]. CAMP-ISIJ, 1993.
3. M Saito, et al. New Temperature Control System of Hot Strip Mill Run-out Table[J]. NKK Technology Press (Japan), 1989(29):9-14.
4. Youichi Haraguchi, et al. Observation of Nonuniformity Occurred by Laminar Water Flow Cooling[C]. CAMP-ISIJ, 1994.
5. Takayuki Ito, et al. Outline of Improvement on Water Cooling Equipment in Mizushima Plate Mill[C]. CAMP-ISIJ, 1996.
6. Hitoshi Narita, et al. High Precise Strip Temperature Control by Using Gradual Cooling[J]. CAMP-ISIJ, 1994(7):431-434.
7. R. M. Guo, S. T. Wang. Investigation of Strip Cooling Behavior in The Run-out Section of Hot Strip Mill [J]. J Mater Processing Manufacturing Sci. 1996, 4(4):339-351.
8. H. Yoshida, et al. An Analysis of Temperature Thermal Stress and Shape Defect During Accelerated Cooling Steel Plates Iron and Steel(Japan) [J] 1997, 83(2):121-126.
9. L. Henrich, et al. 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. P. J. Lee, et al. Development of New Strip Cooling Device in POSCO Pohang#1HSM[J]. CAMP-ISIJ 1998, (11):357-360.
11. P. J. Le, et al. Development of New Strip Cooling Software in POSCO Pohang#1HSM[J]. CAMP-ISIJ, 1998, (11):358-361.
12. W. J. Lawrence, et al. On Line Modeling and Control of Strip Cooling[J]. Iron Making and Steel Making, 1996, 23(1):74-78.
13. G. V. Ditzhuijzen, et al. The Controlled Cooling of Hot Rolled Strip: A Combination of Physical Modeling Control Problems and Practical Adaption[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1993, 28(7):1060-1065.
14. T. O. Masahisa, et al. The Computer Control of Hot Strip Cooling Temperature[C]. Paper for the World Congress of IFAC, June 12 - 16, 1978. 159-166.
15. 赵刚, 杨永立. 轧制过程的计算机控制系统[M], 冶金工业出版社. 北京: 2002, 1:13-15.
16. 韩斌. 热轧带钢层流冷却过程的建模与控制研究[D], 东北大学博士学位论文, 2005.3-4.
17. Braun Pfeiffer Joachim, Rosenthal and Dieter Martin et al. Baoshan 2050 mm hot strip mill, an example of a modern rolling concept. Metallurgical Plant and Technology International[J], v 14, n4, Aug, 1991, 7.
18. 张中平, 童永, 张殿华等. 攀钢 1450 mm 热连轧机层流冷却控制系统的开发及应用[J]. 冶金自动化. 2006 年第 1 期. 30-33.
19. M. 格罗斯兰伯特, 等. 用于钢板加速冷却的(多用途间断冷却) 过程的自动控制. 板带轧制科学和技术[C]. 第四届国际轧钢会议论文集, 北京: 冶金工业出版社, 1990.
20. Xie Haibo, Liu Xianghua, Wang Guodong, et al. Optimization and Model of Laminar Cooling Control System for Hot Strip Mill[J]. Journal of Iron And Steel Research, International. 13(1), 2006: 18-22.
21. 钱振声, 姜成木. 鞍钢新建厚板生产线设置加速冷却装置的探讨, 钢铁[J], 1991, 26(1): 28-33.
22. 张辉, 姜益强. 带钢层流冷却装置的设计及研究[J]. 一重技术, 2006, 6(111): 6-8.
23. 左军, 张中平, 余广夫. 攀钢热轧层流冷却系统改造设想[J], 四川冶金. 2001.5.

24. 中国金属学会热轧板带学术委员会编著. 中国热轧宽带钢轧件及生产技术[M], 冶金工业出版社, 2002.
25. 卢仁军, 廖重庆. 层流冷却控制系统在热连轧线上的应用[J], 鞍钢技术, 1998, No.6, 22-25.
26. Andrzej, G.Groch. Automatic control of laminar flow cooling in continuous and reversing hot strip mills[J], Iron and Steel Engineer, 1990, Vol.67, No.9: 16-20.
27. 魏士政等. 中厚板控冷过程机设计及其应用[J], 控制工程, 2002, Vol.9, No.6: 54-56.
28. 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.
29. 杨卫东, 刘杰. 带钢热连轧卷取温度控制与改进算法[J], 钢铁, 1997, 32 (2): 38-42.
30. 柴天佑, 王笑波. RBF 神经网络在加速冷却控制系统中的应用[J], 自动化学报 2000, 26 (2): 219-225.
31. Kigawa Y. Development of new strip cooling system in hot strip mill[J], CAMP-ISIJ, 1994, 7: 420-423.
32. Guo R M, Wang S T. Investigation of strip cooling behavior in the run2out section of hot strip mill[J], J Mater Processing Manufacturing Sci, 1996, 14 (4): 339-351.
33. Yoshida H, Takanoti T, Takayuki I, et al. An analysis of temperature thermal stress and shape defect during accelerated cooling steel plates[J]. Iron and Steel (Japan), 1997, 83 (2): 121-126.
34. 彭良贵. 热轧带钢层流冷却数学模型[D], 博士论文, 沈阳东北大学, 2004.
35. Hatta N. A numerical study on cooling process of hot steel plates by a water curtain[J]. ISIJ international, 1989, 29(8): 673-679.
36. J.Filipovic. A parametric study of the accelerated cooling of steel strip[J], Steel research, 1992, 63(11): 496-499.
37. Hadrian.U.T. The cooling efficiency of laminar orthogonal water(LOW) curtains in hot strip mills[J], MPT, 1984, (6): 44-49.
38. 蔡正, 谷力军, 王国栋等. 层流冷却中带钢温度分布模型的开发[J], 钢铁, 1998, 33 (8): 31-34.
39. 朱启建, 金永春, 孙凤花等. 中厚板轧后管层流控冷瞬态温度场数值模拟[J], 材料热处理学报, 2004, 25(2): 72-75.
40. 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M], 北京: 高等教育出版社, 1998.
41. D.R 克罗夫著, 张风禄译. 传热的有限差分方程计算[M], 北京: 冶金工业出版社, 1982.
42. 俞品铭著. 热传导及其数值分析[M], 北京: 清华大学出版社, 1981.
43. 唐晓萍. 数据挖掘与知识发现综述[J], 电脑开发与应用, 2002, 4(15): 31-35.
44. 刘高琪. 温度场的数值模拟[M], 重庆大学出版社, 1990
45. 马振华. 现代应用数学手册计算与数值分析卷[M], 清华大学出版社, 北京: 2005: 196-197.

致 谢

在论文完成之际，谨向我的导师徐建忠教授致以衷心的感谢，感谢恩师两年来对我无私的关心和教诲。导师严谨的治学态度、渊博的专业知识和高尚的人格品质使学生受益非浅，学生无以忘怀，只有在今后的工作中，勤奋努力，诚实做事，以此报答导师的培养与教诲。

在论文研究过程中，得到龚殿尧老师真诚地指导和大力地帮助，在此向他表示诚挚的感谢！李海军老师还有赵旭亮博士对我的论文研究给予了大量的指导和帮助，在此也向他们致以真诚的感谢！

感谢我的同门同学张晓琳，李传喜还有李新文同学，感谢他们一直以来给我的支持和鼓励！

此外，我也十分感谢首钢迁钢公司的领导和技术人员，感谢他们对我的研究提供的帮助与支持！

最后，再次衷心感谢重点实验室的全体老师和工作人员，感谢给予我支持和帮助的所有同学们！