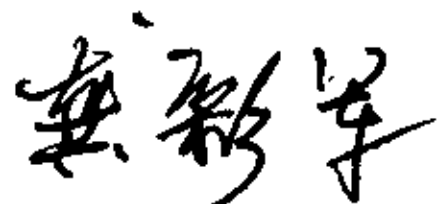


东北大学
硕士学位论文
首钢中厚板厂控制冷却过程跟踪及数学模型
姓名：龚彩军
申请学位级别：硕士
专业：材料加工工程
指导教师：王国栋;刘相华
2003. 3. 1

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外，不包含其他人已经发表的或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其它学位而使用过的材料。与我一同工作过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感谢。

本人签名： 
日 期： 2003.3.4

首钢中厚板厂控制冷却过程跟踪及数学模型

摘 要

钢材轧后的控制冷却是改善钢材性能和质量的重要措施。层流冷却自动化控制系统随着计算机技术的发展,在国外钢铁技术发达国家得到了广泛的应用。近几年来,国内一些中厚板厂也开始积极引进国外的控冷设备和技术。但是大多数中厚板厂的控制冷却系统比较落后。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“首钢中厚板厂四辊轧机 HAGC, 控轧控冷改造工程”,是我国第一次应用国产技术对中厚板生产线进行的现代化改造工程。本文对首钢中厚板厂控冷系统的实际开发与应用进行了初步的探讨,主要包括如下内容:

(1) 在查阅国内外相关文献的基础上,阐述了钢板的静态和动态对流换热机理,并对国内外控冷技术作了简要介绍。

(2) 对中厚板控制冷却系统的过程跟踪进行了详细的论述,包括过程跟踪的触发事件顺序和事件响应处理流程。

(3) 对控制冷却系统的模型结构作了详细介绍,包括:预设定计算、一次修正设定计算和二次修正设定计算模型结构和处理流程;建立了控冷过程的空冷模型和水冷模型;提出了模型的自学习算法。

(4) 对控冷系统进行了仿真分析,包括同一钢板的横向和纵向温度均匀性分析,对同规格钢板的异板温差进行了比较分析。

本系统投入后运行比较良好,已达到首钢中厚板厂的生产要求,为首钢公司创造了良好的经济效益。

关键词: 中厚板 控制冷却 过程跟踪 数学模型 自适应 仿真

PROCESS TRACKING AND MATHEMATICAL MODELS FOR SHOUGANG PLATE MILL

ABSTRACT

Controlled cooling is an important measure to improve steel performance and quality for rolled steel. Automatic control system of laminar flow cooling is widely used by other developed countries, along with the developing of computer technique. These years, some foreign laminar cooling equipments and technology are introduced by national plate mills. But the technology of most plate mills is relatively old. The project of "SHOUGANG Plate Mill", which is responsible with Northeastern University, is the national technique first used on product line. The present paper made the preliminary analysis and discussion about the actual empolder and application of laminar cooling process computer, which are as following:

1. Based on the referring of relational literature at home and abroad, which expounded the mechanism of heat transfer for static plate and moving plate.
2. Process tracking for laminar cooling system was discussed in detail including the tracking events' spring sequence and flow chart for events response.
3. Model frame of control cooling system was introduced detailedly including preset calculation, first modify calculation, second modify calculation. Air cooling and water cooling models were erected. Self-adaptation for models were introduced.
4. Emulation for cooling was done including the uniform in plate's width and plate's length. Temperature difference for various plates were also analyzed.

The study of actual application results in SHOUGANG Plate Mill indicates that this system runs well. Products have reached the Plate Mills demands SHOUGANG Corporation has got obvious economic benefits. The control cooling system runs successfully marked our national technique has matured. It offered an successful paradigm for our country's plate mills.

Key words: medium and heavy plate controlled cooling process tracking
mathematical model self-adaptation emulation

1 绪论

1.1 课题的研究背景

由控制轧制与控制冷却所组成的形变热处理工艺是当前正在大力推广的先进轧制技术。钢板精轧后的控制冷却过程对带钢的质量起着非常重要的作用。控制冷却是对轧后钢材的冷却工艺参数（开冷温度、终冷温度、冷却速度）合理控制，为钢材相变做好组织准备，并通过控制相变过程的冷却速度，以达到控制钢材组织状态、各种组织的组成比以及碳氮化物析出等，从而提高和改善钢材的综合力学性能与使用性能。^[1]对于钢板精轧后的终冷温度控制和冷却速度控制是影响钢板组织性能的关键因素。如何提高终冷温度的精度和实现给定条件下的冷却速度，是中厚板轧制领域关注的重要问题。

中厚板厂控制钢板质量的一个重要手段就是依靠输出辊道上的强制冷却系统。为了提高冷却效果，曾提出过各种冷却方式。试验证明，低压大水量的冷却系统的冷却效果比较好，这种冷却方式称为层流冷却。随着计算机控制技术的发展，层流冷却系统被人们再认识，成为当前中厚板轧线上的重要设备之一。它具有冷却能力强、可控性好、故障率低等优点。它的工作原理是使钢板表面覆盖一层处于层流状态下流动的最佳厚度的水，利用热交换原理使钢板冷却至终冷温度，所使用的具体方法是使大流量的低压水平稳地贴附于钢板上表面，形成薄薄的一层水膜。在冷却辊道的侧面安置有侧喷集管，随着钢板的前进，由侧向喷出的中压水吹动水膜，使冷却水不断更新，从而带走大量的热，来达到冷却要求。60年代以来，所建的热轧带钢轧机，绝大部分都采用低压大水量的层流冷却。在输出辊道的上部有封闭式冷却水箱，装有一定数量的虹吸管，下部则为带压力的喷嘴式冷却系统。层流冷却几乎使钢板表面的水按一定方向流动，使得带钢表面上的水不断更新，大大提高了冷却效率（比喷水式提高30%~40%）。

随着计算机技术的发展，使得层流冷却的控制技术变得越来越成熟。过程控制计算机的引入，解决了许多原来不可克服的困难，层流冷却自动控制系统的功能更加强大。目前我国许多中厚板厂都有冷却设施，但各厂现有的自控设备参差

不齐。有些厂自控设备比较落后,无终轧温度控制手段,没有过程控制计算机等。少数中厚板厂引进了国外的先进控冷设备,但国外控制冷却的核心技术却不能引进或消化。基于这种情况,我国有必要开展这方面的研究工作。在控冷系统中,控制冷却的过程跟踪和控制数学模型是比较关键的部分,它决定着控制冷却系统的自动运行和控制输出量(冷却水量、冷却速率等),从而影响钢板的组织和性能。

本论文以首钢中厚板厂控轧控冷改造工程为研究背景,对中厚板控制冷却系统的过程跟踪及其数学模型进行了输入的研究。

1.2 控制冷却过程的机理分析

如图 1.1 所示,钢板从精轧机出来后,先经过空气对流传热和热辐射,进入冷却区辊道。根据开冷温度、终冷温度和冷却速度的要求,钢板被冷却区上下集管冷却,冷却区长度约占整个出口辊道的 33%。然后钢板又经过空气对流传热和热辐射直到进入矫直机。最后在空气中干燥冷却,钢板由内部热传导重新进行温度分布,消除了水冷区不可避免的非对称冷却。在此冷却过程之中钢板大约从 850°C 降到 700°C 以下,这个过程包括钢板内部的热传导,钢板和输出辊道之间的热传导,钢板和冷却水的静态强制,钢板和冷却水的沸腾强制对流,钢板表面与周围空气的对流传热和热辐射,以及由于钢板产生相变而放热的复杂传热过程。如果要用一个单一的传热方程来描述整个传热过程是不可能的,只能用尽量准确的模型来反映生产实际。尽管钢板与输出辊道的热传导对钢板也产生了较大的局部温降,但是在实际中还是将外部热传导和空气对流合在一起进行处理,得到一个经验的热交换系数。热辐射还是用波尔茨曼规律处理,这种换热由钢板的表面温度,钢板表面黑度和环境温度确定。相变所产生的热量由奥氏体的转变速率确定。

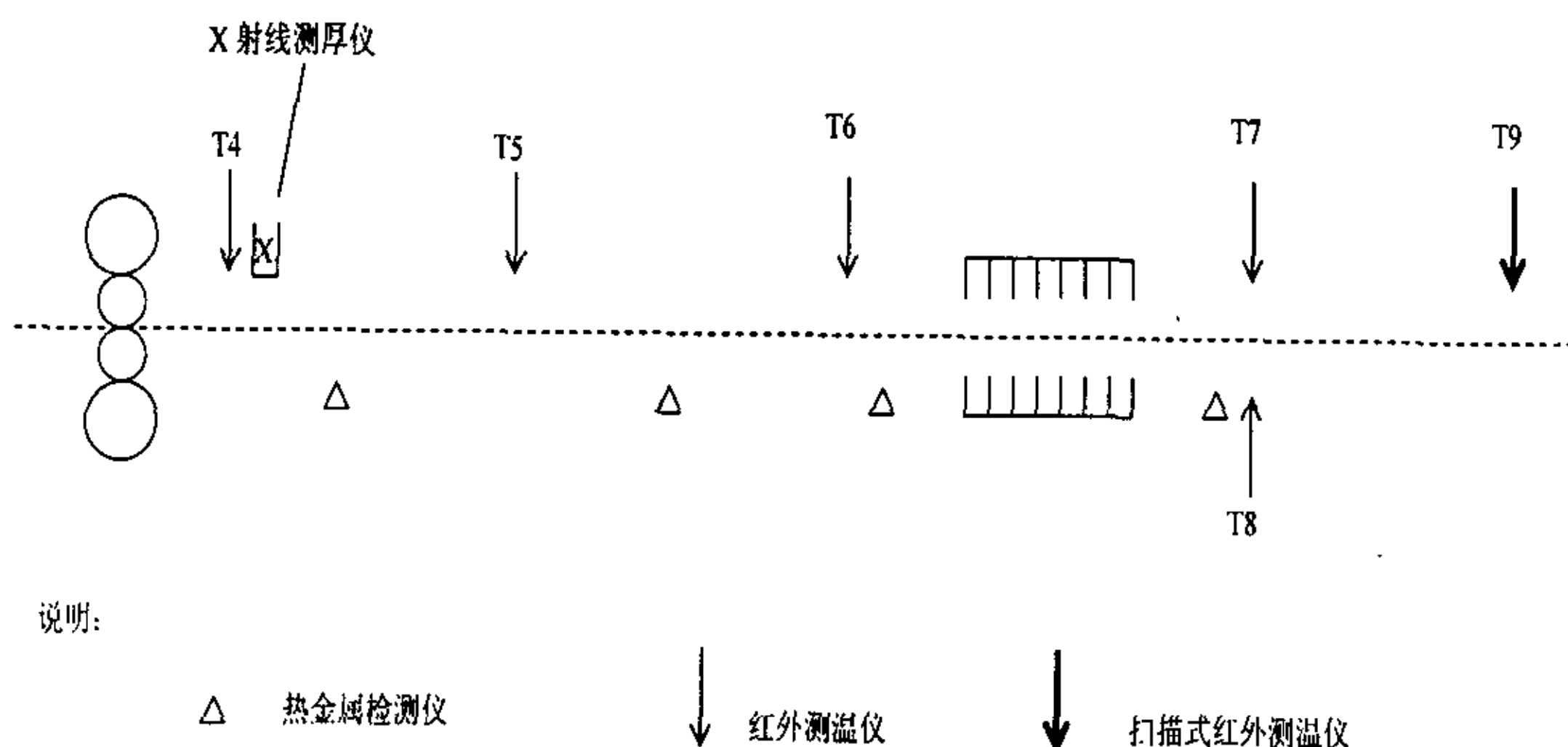


图 1.1 控冷轧线仪表布置图

Fig. 1.1 Line configuration and instrumentation

通过冷却介质的强制对流换热，大约占整个热交换量的 90%。但是对于这个过程的处理却比较复杂，因为此过程包括在移动钢板表面上的冷却水冲击和沸腾交织在一起的复杂现象。因此有必要对钢板在静态和动态时的对流换热机理进行研究。

1.2.1 钢板静态强制对流换热

钢板在层流冷却情况下的对流传热是强制冷却。Zumbrunnen 将喷嘴下方邻近的冲击区粗略地分为五个区域^[2]，如图 1.2 所示。单相强制对流区在喷嘴的正下方（区域 I），接着是核沸腾和过渡沸腾区（区域 II），以及膜沸腾强制对流区（区域 III）和小液态聚集区（区域 IV），然后热交换递减到空气对流和热辐射区（区域 V）。在喷嘴的正下方区域内（区域 I），传热方式是单相强制对流传热。在此区域冷却介质的冷却效率很高，表面温度较低，不产生沸腾。在蒸汽滞止边沿线以外，接近平板的水被加热，喷流区自身的冷却效应已不存在，平板的表面温度增加，开始出现核沸腾，接着可能会形成比较窄的核状沸腾和过渡沸腾区域，即区域 II。在邻近区域 II 的区域会出现膜沸腾强制对流区（区域 III）。在核沸腾和过渡沸腾区，气泡对传热具有较大的影响，它加强了表面与冷却区水之间的传热。在膜沸腾区由于蒸汽的导热性能差，因此表面与冷却水之间的换热系数很小，在膜状沸腾区，钢板除了以汽膜导热的方式被冷却外，还以辐射的方式透过向冷却介质传热。在膜沸腾区域之外，冷却水会在钢板表面聚集形成不连续的小液态聚集区，即区域 IV。在此区域传热方式为对流和辐射。在区域 V，传热方式为

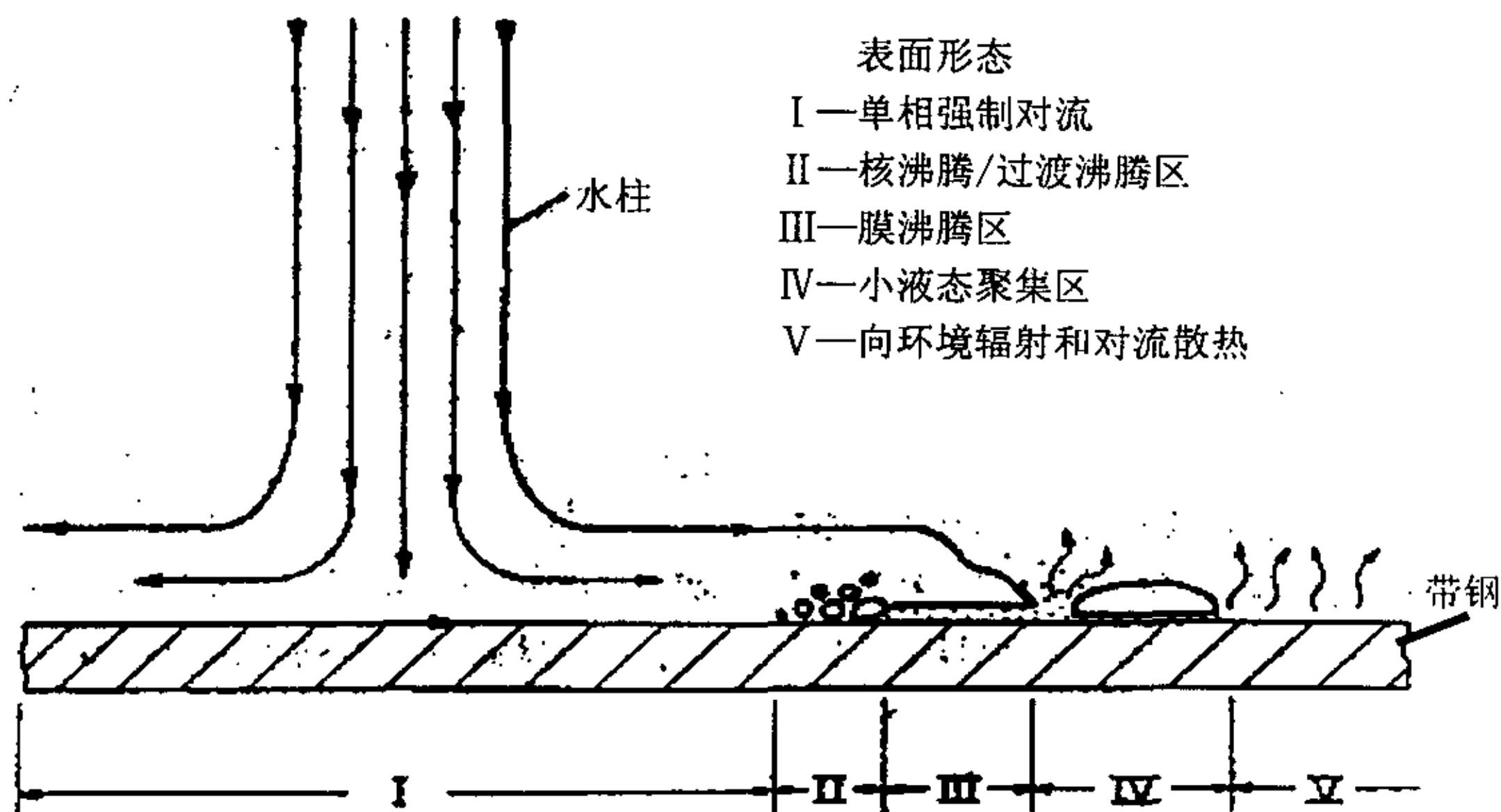


图 1.2 水流冲击静止平板时的传热形式
Fig.1.2 Transfer form of heat when water strikes still flat plate

表面无水的平板与环境之间的辐射和对流。可以将 I、II、III、IV 区合称为“湿区”，将 V 区称为“干燥区”。

冷却水从输出辊道上方的喷嘴流下，喷流到红热的钢板上，形成一个大约是喷嘴直径 2~4 倍（或者等于水幕宽度）的冲击区。在冲击区有一条非常明显的“黑带”，表明在这个区域里热交换可能是最高的。Otomo^[3] 的实验认为只要钢板的表面温度超过 400°C，不管水流的冲击速度和钢板的表面温度是多少，该区域的热交换系数会保持不变，大约为 23.26KW/m²K。Ishigai^[4] 通过实验证实了“黑带”处钢板的温度在 2.5 秒内，由 1000°C 降到了 180°C，平均冷却速度达到了 328°C/S。从水的沸腾曲线上可以看出，核沸腾的转变温度约为 675°C，即 Leidenfrost 点，在 300°C 时的核沸腾热交换达到最大。也有人认为核沸腾时的热流密度并不是水流速度和钢板表面温度的函数。^[5] 通过上面的分析可以得出一个结论，在冲击区域的热交换量是最大的，它取决于钢板的表面温度和沸腾条件。在水流刚开始冲击到钢板表面的时候，热交换系数相对较小，因为这时主要是膜沸腾。经过一段时间后，钢板的表面温度下降到变膜沸腾为过渡沸腾和核沸腾时，热交换迅速上升。将“湿区”称为“有效冷却区”，在喷嘴水流速度一定的情况下，有效冷却区的平均热交换系数与到冲击点的距离成线性关系。

1.2.2 钢板动态强制对流换热

钢板在稳定移动时, 冲击区域的长度仍然与钢板静止时的冲击区域长度一样。然而, “湿区” 的长度在钢板下游却延伸到了 19 倍的喷嘴直径, 而在下游却仅为喷嘴直径的 3 倍, 由此形成了一个非对称的“有效冷却区”。钢板动态时的冷却机制与静态时的冷却机制相似。最高的热交换仍然发生在核沸腾区, 并且在这个区域钢板的表面温度和钢板速度的影响可以忽略不计。核沸腾时的热交换系数大约是膜沸腾时的两倍。但是钢板在运动到喷嘴正下方之前就已经发生了核沸腾, 因而使得热交换的峰值向钢板运动的反向移动。显然最大热交换点是位于核沸腾的初始点, 而不是喷嘴的正下方。但是, Leidenfrost 温度及其发生的位置很难用理论公式进行描述。事实上 Leidenfrost 点与热交换系数是由密切联系的。通常来说它们都依赖于水流的冷却能力和钢板的初始温度。在 Auman^[6] 的早期研究中, 通过不同的钢板初始温度实验得出, 538°C 到 649°C 是核沸腾和过渡沸腾的转折温度区。Zumbrunnen 选取钢板初始温度为 644°C 到 108°C 时, 发现核沸腾在较低的初始温度下是不能发生的。Han 等人选取稍高一点的钢板初始温度 240°C 时, 发现核沸腾区域在 120°C~170°C 之间。因为水的沸点在 100°C, 因此当冲击区钢板表面的初始温度较低时是不能发生沸腾的。较高的初始表面温度在延迟一段时间后可以产生核沸腾, 延迟时间取决于水的冷却效果。

如果图 1.2 中的平板向右运动, 位于小液态聚集区液层下面的和薄膜沸腾区的蒸汽层的厚度会减少, 其原因是平板的运动加剧了蒸汽的流动。然而, 如果平板向左运动的速度足够大, 蒸汽层的厚度会增加, 其原因是蒸汽会因平板运动而被拉向喷流水流。当然, 因为冲击水流在表面上被分开, 所以在运动的带材或平板上, 上述两种现象会同时出现。

尽管层流冷却时在冲击水流附近处的单相强制对流具有较强的传热能力, 但是膜沸腾区可扩展至在热轧带材上 50 倍冲击水流宽度的范围内。因此, 分析膜状沸腾区的冷却规律十分重要, 研究表明, 膜沸腾时表面的运动对传热的影响十分显著, 当冷却液的温度较低时亦是如此, 过冷度的效应很重要, 它取决于普朗特准数和平板速度, 在表面高速运动时, 如果表面的温度不是非常高, 则辐射换热量较少甚至可以忽略。当表面沿着冷却液的反方向以较低的速度运动时, 由于蒸汽层厚度增加, 辐射换热的效应较为显著, 较大的表面速度可以改变蒸汽流动

的方向,并且可能从部分液化区带走蒸汽,这大大增加了模型描述的难度,当表面的速度大于液体的速度时,不能忽略平板的运动效应,需要适当的模型以确定运动情况下钢板和冷却水的传热。

水从下部的喷口流出冲击到钢板上,然后分成两股水流,一股沿着钢板运动方向,另一股沿着钢板运动的反方向,直到重力使水流从钢板落下。由于在钢板的运动方向水膜因钢板运动被拉向下流,其区域得到延长,沿停滞线下流区传热得到加强。相反,在沿停滞线上流区,水膜区域被缩短,因此,此区域的传热有所减少。冲击到钢板上表面的水流也被分成上流和下流两个方向且沿着钢板表面流动直到与从邻近的出水口流出的水流相碰撞。在上表面存在两种不同流动区域:冲击区和平行流动的薄膜沸腾区。

上部和下部喷流存在冷却差异是因为集管口与钢板之间的距离不同以及可产生不同冲击速度的重力的作用不同,无疑,较大的冲击速度加强了当地的传热。然而,从连续性上来考虑,冲击速度的增加减少了冲击区的宽度,因为在下部喷流和钢板之间的距离很小(约100mm),冲击速度几乎保持了水流从喷口流出时的速度,因此,相应的冲击区宽度的变化很小。相反,由于上部水流和带钢之间的距离很大(约1.5m),上部冲击速度的增加减少了冲击区的宽度。所以,如果使上部水流与下部喷流的流速相等,在上表面停滞线处的传热将比下表面处的要大。

分析钢板表面换热时可假定冲击区宽度延伸至整个滞止流动段,这意味着达到停滞段的边缘时,流动就变成了薄膜沸腾平行流动。在下流水流的动量较小,假定其抑制了冲击区薄膜的发展,又因钢板温度非常高(足够产生稳定的薄膜沸腾),假定形成了蒸汽薄膜。在平行流动区的薄膜沸腾,尽管没有冲击区那样高的当地对流换热系数,但仍以薄膜沸腾形式带走了大部分热量。其原因是在此区域内可以形成比下落水流宽度大得多的扩展区域,从而补偿了当地不太高的冷却效率,并且可以起到更为重要的作用。

随着远离停滞线距离的增加,水膜温度增加的现象使薄膜沸腾区域的传热更加复杂。这个效应是很重要的,因为决定传热的过冷参数主要取决于水膜温度^[3]。

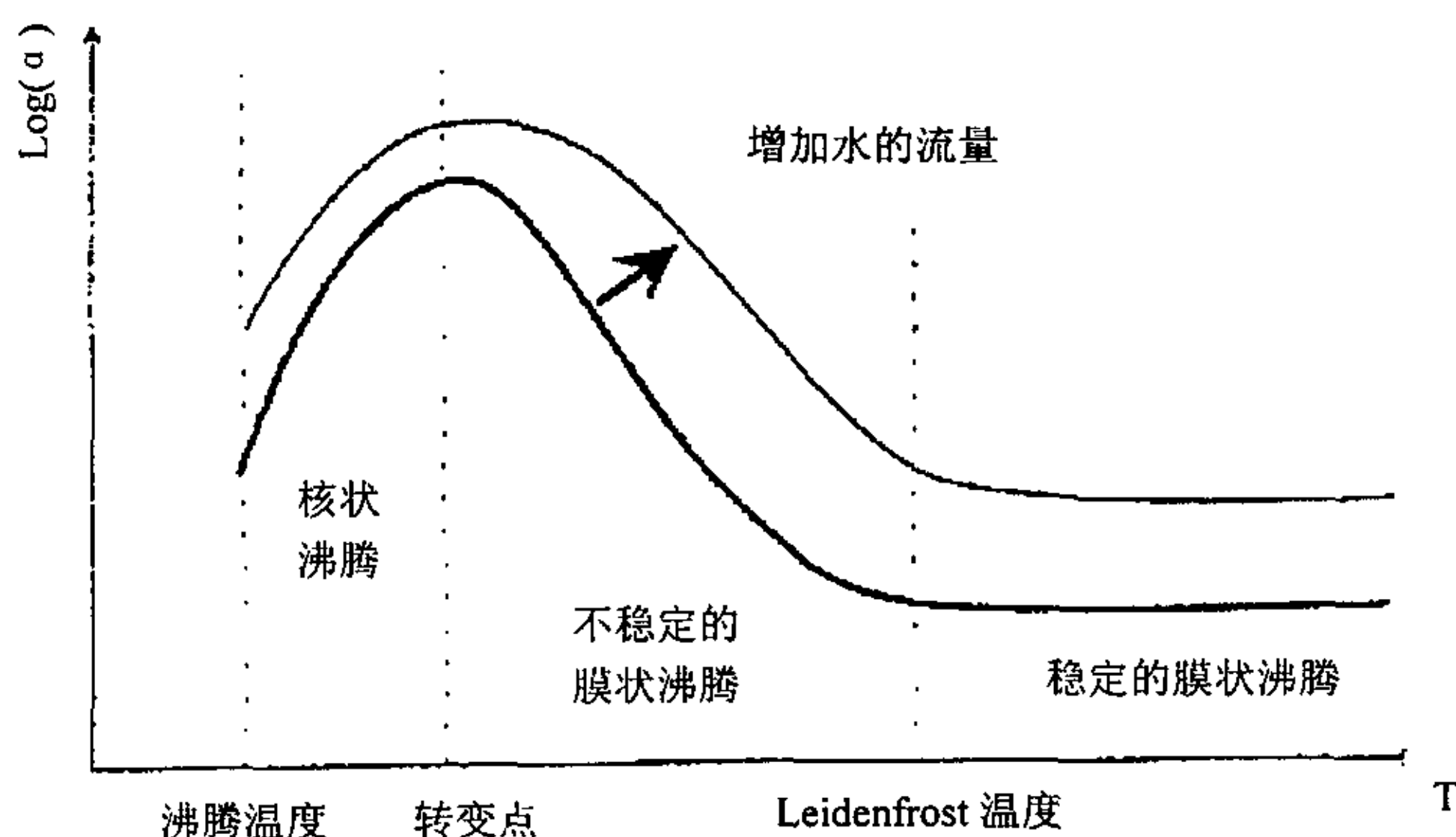


图 1.3 对流换热系数 α 与表面温度之间 T 的关系
Fig.1.3 The relation of coefficient of convection transfer heat α and surface temperature T

钢板和冷却水之间的换热强度与水流速度、表面温度、冷却水温度等因素相关，图 1.3 示出了层流水流冲击钢板表面时不同沸腾区域内强制对流换热系数的变化情况。由图可见，在核状沸腾区和过渡区的换热系数远大于膜状沸腾区，但是在膜状沸腾区的换热系数变化较小，而在核状沸腾区和过渡区的换热系数变化较大，这给模型的精确描述带来了难度。

综上所述，从层流冷却的传热机理上看，因为层流冷却形成的柱状水流以比喷射水流大得多的动能冲击到钢板表面，能击破蒸汽膜，可以形成核状沸腾，而不仅是膜状沸腾，核状沸腾的传热系数比单纯的膜状沸腾大得多，因此，层流冷却具有较强的冷却能力。

1.3 国内外控制冷却技术的发展概况

60 年代以前为了加快轧制后的冷却过程和达到目标卷取温度，出现了简单的冷却装置应用于热连轧生产线。主要使用喷嘴喷射的高压水冷却，此期间的冷却设备有如下的特点：①仅以卷取温度为控制目标，控制的方法是人工控制。②冷却设备的喷流形式是线流或紊流冷却。③没有冷却塔，冷却水的温度波动较大。④冷却设备简单，水冷区长度短。⑤冷却设备的控制单元和控制段很少。⑥冷

却模型的控制精度较差^[7]。

60 年代第一套层流冷却系统应用于英国布林斯奥思 432mm (17in) 窄带钢热轧机^[7]。以后几乎每套热带钢轧机输出辊道上都装有冷却系统,但直到 80 年代以前,其应用仅限于厚度 16mm 以下的板带。在 80 年代初期,开始对控制轧制和控制冷却的基本理论进行研究。80 年代初,日本首次提出并研制成功第一套中厚板加速冷却装置,在日本福山厚板厂投产。随后,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,在日本开展得非常迅速。新日铁在低于 200 度的超低热矫温度下,稳定地生产出双相钢^[8]。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^[9]。层流冷却设备具有如下特点:①可以对精轧出口到卷取的冷却过程进行控制,采用计算机进行控制。②冷却设备的喷流形式是层流状,便于模型控制。③安装了冷却塔,水温波动较小。④水冷区较长,便于对整个冷却过程的控制。⑤冷却设备分为多个控制单元和控制段。⑥模型对于冷却温度的控制比较精确。

1.3.1 国外控冷设备介绍

目前世界上所采用的层流冷却设备大体上分为柱状层流冷却系统和水幕冷却系统^[8-11]。

1979 年日本专利报道了一种热钢板的水幕装置,如图 1.4 所示。本发明把接近热钢板的冷却喷嘴配置在与热钢板平行的位置上,使冷却水向热钢板的板宽方向流动,不滞留在钢板上,从而提高了冷却能力,又使钢板上下面冷却效果相同,并且可以在冷却过程中控制冷却能力。

1980 年发表的日本专利,介绍了伴流附加型的大冷却水流量在钢板下部的冷却法,它可用较少的供水量得到高冷却能力,在有效利用水的同时可以减少由于不均匀冷却引起的冷却变形和组织不均。

1984 年日本专利报道了一种层流冷却装置,其喷嘴的流量可调,是一种缓急自由的冷却装置。该装置对提高带钢的性能级别,产生很好的效果。就是说不添加或少添加合金元素就可达到提高钢板的强度和韧性的目的,从而节省了合金元素,可用普碳钢代替某些低合金钢,大幅度提高产品质量,得到优质、高韧性、低屈强比的钢板,产品质量波动很小。

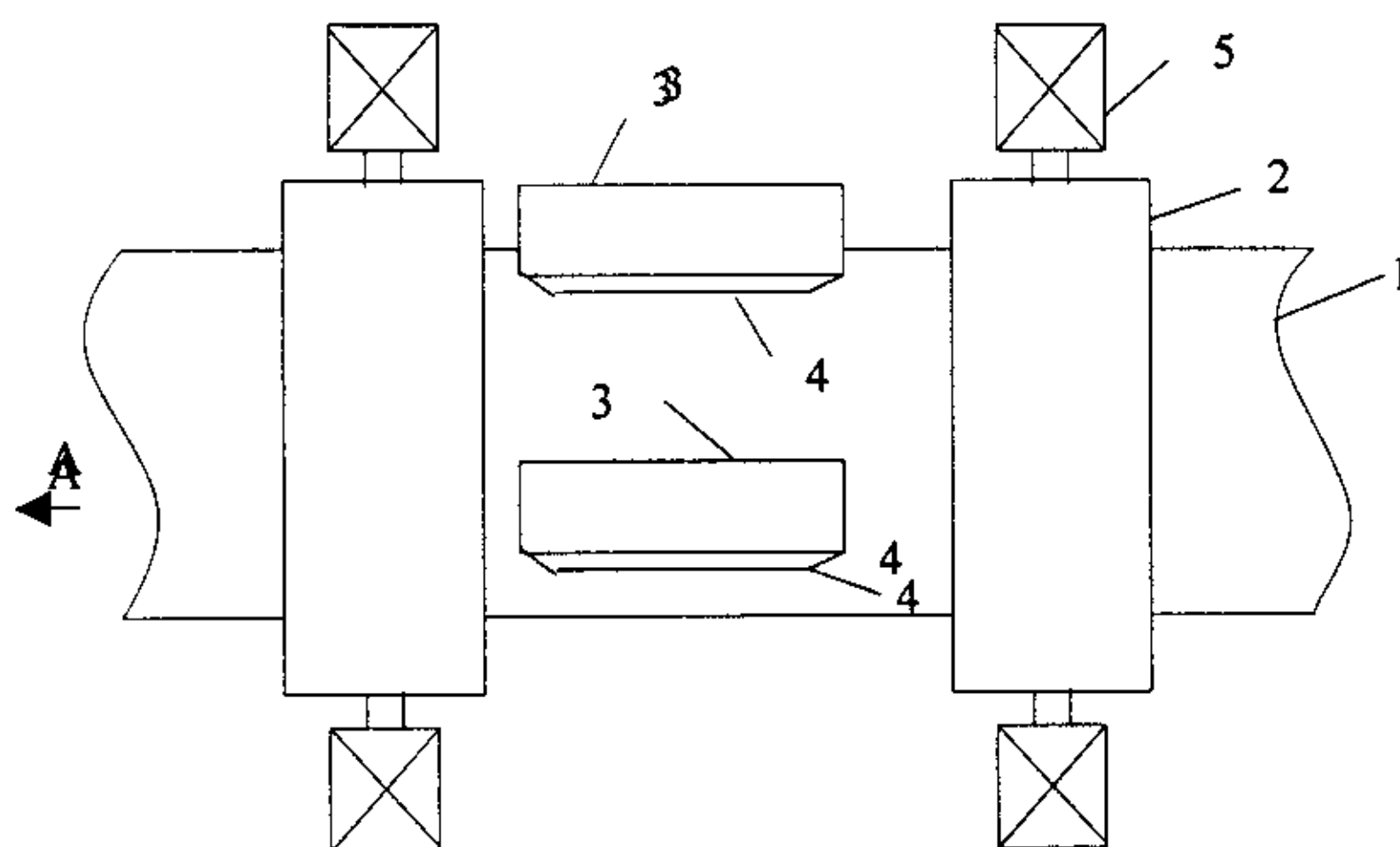


图 1.4 热钢板的水幕冷却装置

Fig. 1.4 Equipment of water-curtain cooling for hot steel

1-钢板 2-压紧辊 3-集管 4-喷嘴
5-驱动装置 A-钢板运行方向

日本钢管公司福山第二热轧厂于 1985 年对其管层流冷却系统进行了改造，通过关水泵的水位最佳化，喷水量的两段切换和引进缝隙层流冷却系统装置，提高了冷却效果，达到了节能和提高卷取温度的目的。

日本住友金属工业公司鹿岛厂 1984 年投产的水幕冷却装置(CWC)包括一个集水箱，一个狭缝喷嘴和一个气动挡板。当冷却水通过喷嘴落向带钢时便形成幕形层流。该厂热带钢轧机的输出辊道上有 15 个这样的水幕冷却装置。CWC 的优点如下：

- (1)冷却效率高(大约为管层流的 2 倍)；
- (2)横向冷却均匀；
- (3)适于可变水量控制；
- (4)对开/闭反应迅速。

前苏联的一项专利报道了一种可调的水幕冷却装置。它带有窄口喷嘴充水槽，在窄口喷嘴下部安装一个能在垂直于水流方向的平面上往返移动的闸板，并在上面给闸板安上一个能伸入喷嘴的小刷子。通过连续改变冷却水的宽度，使之与被冷却的钢板的宽度相适应，清洗窄口喷嘴内部污垢，提高冷却效率。

前苏联新利佩茨克钢铁公司于 1969 年在 2000mm 轧机上安装了层流冷却装

置。切列波维茨钢铁公司于 1975 年 2800mm 轧机上安装了层流冷却装置, 宽 1500~2500mm 钢板经过冷却, 其温度比常规工艺轧制通常下降 80~120℃, 屈服强度和抗拉强度提高了 5~12%, -20℃ 的冲击韧性提高了 7~10%, -40℃ 的冲击韧性提高了 15~25%。

德国专利报道了一种水幕冷却装置, 它是一个水箱和一个垂直于带钢运行方向并延伸到整个被冷却带钢宽度上的缝隙式喷嘴组成, 喷嘴的侧壁控制喷嘴缝隙形成水幕。喷嘴的排出口比输入口大, 并向排出口不断突出扩张, 可以补偿水幕出现的断面收缩现象, 保持均匀良好的水幕形状。

德国和美国的几个钢铁公司安装了层流冷却装置及喷雾冷却装置。美国梯频斯公司在两架可逆式热带钢轧机和一套热带钢连轧机组上都安装了层流冷却系统。

日本典型的板材加速冷却设备见表 1.1, 欧洲的列于表 1.2。

表 1.1 日本典型的板材加速冷却设备

Table1.1 Typical accelerated cooling installations of plates in Japan

	新日铁八幡厂	新日铁君津厂	日本钢管公司福山厂	川崎钢铁公司水岛厂	住友金属公司鹿岛厂	神户钢铁公司加古川厂
	连续在线冷却	连续在线冷却	在线加速冷却	万能加速冷却	动态加速冷却	加速冷却
尺寸(m)	4.8×15.5	4.7×19.8	4.5×44	5.35×40	4.7×27	4.7×44
上喷嘴	水幕	喷射	U 形管	水管	水幕	U 形管
下喷嘴	喷射	喷射	喷射	喷嘴	喷射	喷射
边部遮板	—	上部和下部	上部	上部	上部	上部
与精轧机距离(m)	—	79.8	26	19	25	53
位置	热平整机后	热平整机后	热平整机前	热平整机后	热平整机前	热平整机前

表 1.2 欧洲典型板材加速冷却设备

Table1.2 Typical accelerated cooling installations of plates in Europe

设备名称	曼内斯曼式加速冷却系统	万能间断冷却	加速冷却工艺	集中冷却工艺	可调冷却工艺
尺寸(m)	5×12	2.8×12	4.7×26	3.6×30	—
上喷嘴	水幕	水管	水幕	U 形管	喷射
下喷嘴	水幕	水管	水幕	水管	喷射

边部遮板	下部	—	—	上部和下部	—
与精轧机的距离(m)	16.6	12	—	14.3	—
位置	热平整机前	热平整机前	热平整机前	热平整机前	热平整机前

近几年未见到国外安装新型控制冷却系统的报道,可见目前人们把注意力主要放在冷却设备的改造和自动控制系统的配套上。

1.3.2 控制冷却方式

控制冷却装置的结构形式与钢板的冷却状态及冷却方式有关。冷却状态分为约束型冷却和非约束型冷却。在一套控制冷却装置上,既能进行加速冷却处理,又能进行直接淬火处理,这样的控制冷却装置称为多功能控制冷却装置。冷却方式分为同时式冷却和连续式冷却。从对钢板的冷却均匀程度来说,同时式冷却方式显然优于连续式冷却,但同时式控制冷却装置相对较长,使轧制线变得紧张;连续式控制冷却装置相对较短,有利于轧制节奏的匹配。当轧机轧制产品以中等长度为主,产品又较厚,而轧机后又有足够的空间时,应采用同时式冷却方式;否则,宜采用连续式冷却方式。

近年来又出现了组合式冷却方式,既能在一套控制冷却装置中进行同时式冷却,也可以进行连续式冷却。这种冷却装置的长度介于上述两者之间。当钢板较短时,将其送入控制冷却装置实行同时式冷却;当钢板较长时,就采用连续式冷却方式。同时式冷却装置所占据的辊道要具有摆动功能,摆动速度一般有三个或更多档次,以供使用时选择。为了保证钢板长度方向冷却均匀,应采用不等距离的摆动方式,以避免钢板下表面因辊道的遮挡造成的不均匀冷却,但要保证完成一个摆动周期时钢板回到摆动的起始位置。连续式控制冷却装置前后及其所占据的辊道应有多档运送速度,还要有多档加速度。设置多档运送速度,一是为使钢板的控制冷却过程与轧制节奏匹配,二是增加了钢板冷却速度的调节功能;设置多档加速度,是因为钢板从头至尾开始冷却的温度逐渐降低,为了使钢板终冷温度一致,应令钢板以匀加速运动方式通过控制冷却装置;钢板运送速度和加速度主要是依据板厚和材质来选择。组合式控制冷却装置前后及其所占据的辊道应有多档运送速度和加速度,而冷却装置所占据的辊道,还要有摆动速度。组合式控制冷却装置往往可实行加速冷却和直接淬火两种处理工艺。

冷却方式概括起来主要有压力喷射冷却、层流冷却、水幕冷却、雾化冷却、喷淋冷却、板湍流冷却、水—气喷雾法加速冷却、直接淬火等几种冷却方式^[12~17]。

喷射冷却的优点是可以喷射到需要冷却的部位，同时，通过改变喷嘴配置、喷嘴孔的尺寸、水压等能对喷射水量（冷却能力）进行控制。常采用的喷嘴有扇形喷嘴和带芯子的全圆锥喷嘴两种。当喷嘴孔小时，常发生堵塞。今年来，为防止堵塞，开发了无芯子全圆锥喷嘴及喷雾喷嘴。

在连铸的二次冷却带由于空间狭小，使用喷雾冷却，高速空气流使水滴和铸坯接触均匀，并能排除拉辊和铸坯间的滞留水，使铸坯的冷却不均得到改善。

随着水幕冷却技术的发展，又出现可调水幕。所谓可调水幕是指流量和水流宽度可根据生产工艺要求而变化。目前主要有几种形式：一是出口缝隙保持不变，用改变水的压力使流量变化。从保持层流的观点看，这种调节是很有限的。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，有利于形成稳定的层流。还有一种如图 1.5 所示的可调水幕。该水幕利用分段斜楔控制出水的缝宽，提升或下降斜楔控制出水口开口度。

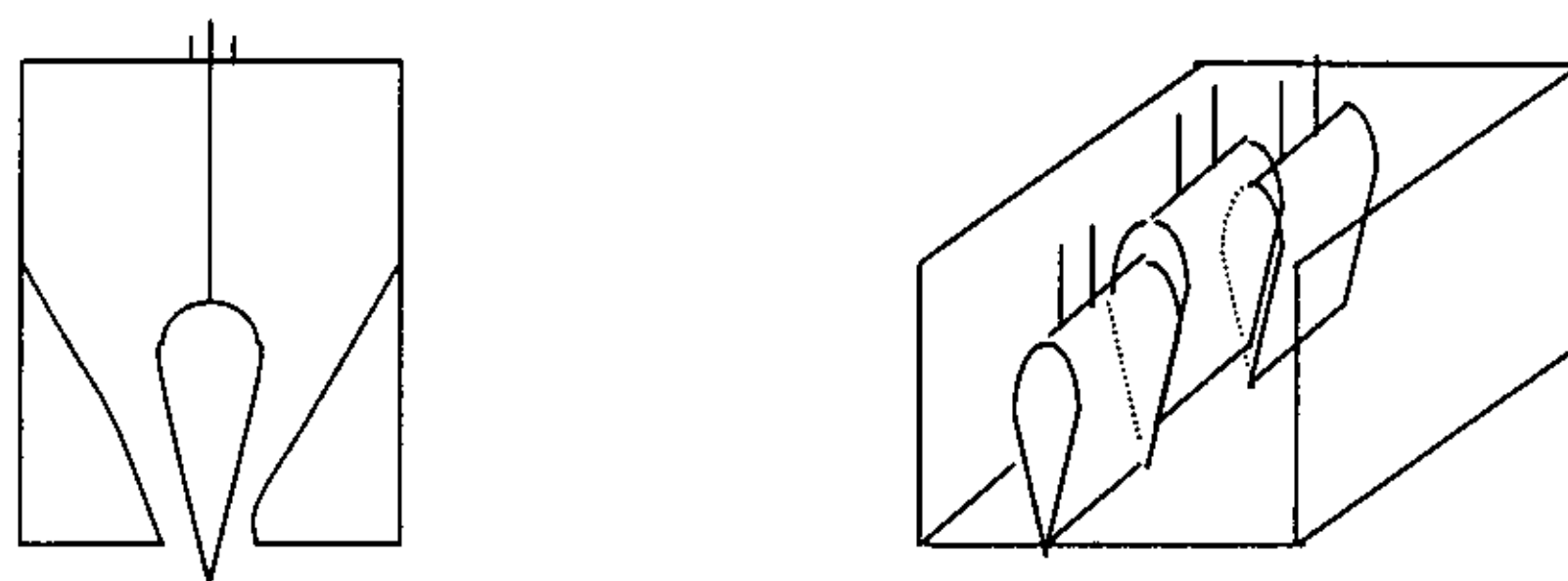


图 1.5 分段斜楔式可调水幕结构示意图
Fig.1.5 Diagram of segmented inclined wedge adjustable water curtain

层流冷却是以大量虹吸管从水箱中吸出冷却水，在无压力情况下流向带钢，使大流量的低压水与带钢平稳接触，冷却水不反溅，并紧贴在带钢表面上按一定方向做宏观运动，因它具有某些层流特点，所以称为层流冷却方式。

高密度管层流冷却是在普通管层流冷却的基础上对其进行改造，利用其结构简单，易于形成稳定的层流状态等优点，增加 U 形管的密度，并结合生产特点，对其在宽度方向上的排列进行调整，使其对各种宽度的产品进行均匀冷却。由于其单根上集管密度增加，使冷却能力提高；通过侧喷装置和集管的组数控制可以使钢板在各集管间形成自回火区，从而控制钢板的组织性能及表面质量；喷嘴采用 10mm 以上的圆管，不易堵塞，便于维修和管理。通过对普通管层流、高密度管层流和水幕冷却进行比较得知，高密度管层流的冷却能力同水幕冷却能力相当，而设备结构、设备维护及投资则是比较低的。

所谓加速冷却,是将热轧后的厚钢板,立即进行水冷,通过控制相变组织来提高机械性能的技术控制冷却方法。过去用大容量的水冷却厚板时,要精确地控制钢板的整体温度是很困难的,日本神钢公司借助新开发的加速冷却方法,确立了高精度、均匀地控制水冷过程中的钢板温度的技术,成功地把加速冷却工艺(Kobe steel controlled Rolling and Accelerated Cooling Process,简称 KCL 工艺)推向了实用化阶段。现今的加速冷却已成为船板、管板和其它低合金高强度钢、低脆变温度和良好的焊接性能钢板现代化大生产必要的加工工艺^[18]。

直接淬火是加速冷却基础上发展起来的又一冷却方式,它较加速冷却水量密度高而且冷却温度区域宽。所谓直接淬火是通过迅速冷却轧制之后的热钢板,在轧制线上使钢板生成淬火组织,是 600MPa 以上高强度钢板的新生产工艺。这种生产工艺的特点是,与离线淬火比较,(1)试图节省工序,(2)为了提高淬透性,可减少能够得到同一强度的合金元素含量,(3)由于采取这种措施可降低碳当量以提高焊接性能。因此直接淬火和加速冷却一样,在今后的高强度钢板生产中,作为必要的生产工序而占有主要位置。

一般的喷射、喷淋、层流、水幕等冷却方式都力图使水穿透由汽化形成的水膜,使水直接与热钢板接触或使热钢板浸泡在冷水中,带走热量,提高冷却效果。而水-气加速冷却则是气流把水分成液滴,并带到整个钢板表面,不介意气流膜层的形成,在“快速冷却”阶段,就是利用不断更新的气膜层均匀冷却,以达到没有带压设施而冷矫直率 $<1\sim 5\%$ 的板形效果。且在低温段冷却($<400^{\circ}\text{C}$),改变冷却模式,可扩展用于直接淬火。

各种冷却方式都有其各自的优点和缺点,见表 1.3。采用哪种冷却方式应根据具体工艺环境和限定条件确定。

国内外使用资料表明,近些年来,中厚板轧机轧后在线加速冷却方式大多数采用柱状层流冷却和水幕冷却方式^[19~23],同时国外也相继采用了喷雾冷却(水-气喷雾)、高密度管层流冷却和直接淬火冷却方式。

表 1.3 几种冷却方式的特点

Table 1.3 Cooling way features

冷却方式	优点	缺点	适用范围
压力喷射冷却	水流为连续的,没有间断现象,呈紊流状态喷到钢板表面;可喷射到需要冷却的部位;带钢上下表面冷却差别显著;其穿透性	比冷却特性很低;冷却效率不高;用水量大,水的飞溅严重,带钢上、下表面的冷却差别显著;对水质的要求较高,喷嘴	适用于一般冷却使用,在实验室和工厂得到了广泛的应用。

	好, 适用于水汽膜较厚的环境。	容易堵塞, 水的利用率较低。	
层流冷却	比冷却特性较高; 水流保持层流状态, 可获得很强的冷却能力; 带钢上、下表面及整个冷却区冷却均匀。	冷却区距离长; 集管之间有一定的距离, 达不到横向冷却均匀; 对水质的要求较高, 喷嘴容易堵塞; 设备庞杂, 维护量较大且难维护。	要求强冷时, 如热轧板出口处。
水幕冷却	比冷却特性最高; 水流保持层流状态, 冷却速度快, 冷却区距离短, 对水质的要求不高, 易维护。冷却速度通常为 $12 \sim 30^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 有时高达 $80^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。	带钢上下表面和整个冷却区冷却不够均匀; 可调节的冷却速度范围较小。	不仅应用于板带钢输出辊道上的冷却, 也有用在连轧机机架间的冷却, 有的正在研究应用在棒材及连铸坯的冷却上。
气雾冷却	用加压的空气使水流成雾状来冷却钢板, 冷却均匀, 冷却速度调节范围大, 可实现单独风冷、弱水冷和强水冷。	需要供风和供水两套系统, 设备的线路复杂, 噪音较大; 对空气和水要求严格; 车间的雾汽较大, 设备容易受腐蚀。	适用于从空水冷到强水冷极宽的冷却能力范围, 尤其适用连铸的二次冷却带。
喷淋冷却	水为破断式, 形成液滴群冲击被冷却的钢板, 比高压喷嘴冷却均匀, 冷却能力较强。	需要较高的压力, 调节冷却能力范围小, 对水质的要求较高。	目前较少使用
板湍流冷却	轧制后的钢板直接进入水中进行淬火或快速冷却, 冷却速度可达到 $30^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。	冷却速度的调节范围小, 水量较大。	目前较少使用
水—气喷雾法快速冷却	可对板材的较冷边部进行补偿, 节省冷矫成本。	冷却不均, 易产生翘曲。	适用于极厚板或低抗拉强度 (低于 600MPa), 含有铁素体及珠光体/贝氏体显微组织。
直接淬火	冷却速度快, 冷却能力范围大; 添加少量合金元素就可以达到同样的强度; 降低碳当量, 改善可焊接性能; 确保钢板低温韧性。	适用钢种有限; 冷却不均, 钢板变形量大多在 10mm 以下, 宽幅钢板在 30mm 以下。	适用于高抗拉强度 (高于 600MPa), 含有贝氏体加马氏体显微组织。

1.4 国外控制冷却系统

影响冷却效果的因素很多, 控制系统的优劣是关键部分。实际使用的控制系统主要采用前馈控制、反馈控制、自适应控制等, 并以前馈控制为主。以下介绍一些正在使用的控制系统。

1.4.1 层流冷却控制系统

[1] 美国印第安纳港 2134mm 热带钢厂冷却控制系统^[24]

该厂层流冷却控制系统具有准确预测卷取温度的特点。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。图 1.6 是系统结构框图。

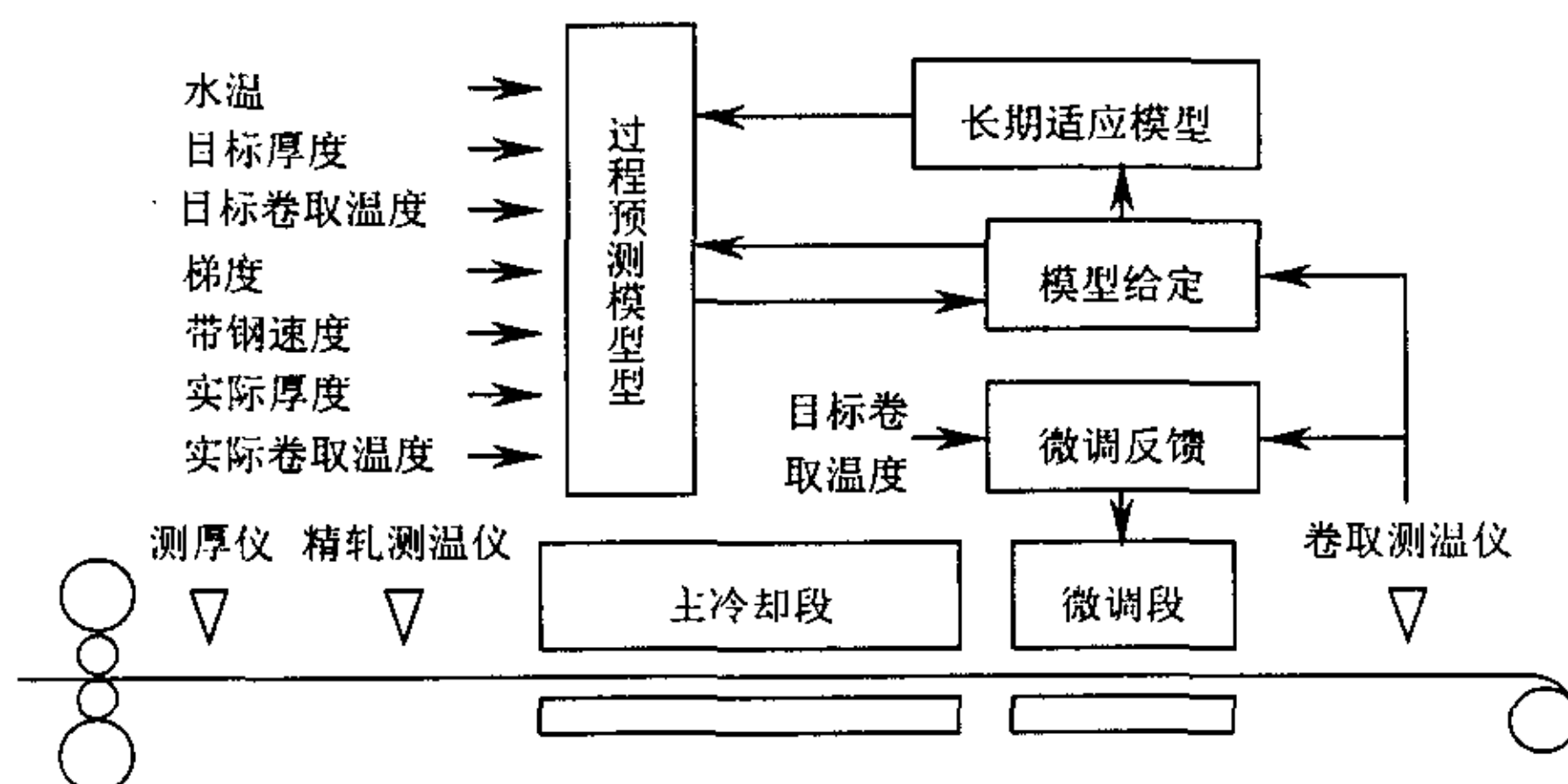


图 1.6 印第安纳港热带钢厂热轧带钢卷取温度控制系统结构框图
Fig.1.6 Structure chart of hot strip coiling temperature control system of hot strip mill in Indiana port

该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。

美国印第安纳港 2134mm 热带钢厂的热轧带钢卷取温度控制系统，采用模型基准控制技术，控制的核心是利用卷取温度偏差修正预测模型，提高预测模型的精度。

[2]宝钢层流冷却系统^[25]

热轧带钢卷取温度控制系统结构如图 1.7 所示，系统由预设定模型、控制器

和反馈修正三个主要部分组成。预设定模型用于描述不同规格带钢对应过程参数的冷却温降，它是控制系统的基础；控制器用于协调系统各部分的机能，根据各部分的响应状态输出当前的控制量控制过程；反馈修正用于调节系统偏差，修正因过程参数变化引起的预设定模型不准确产生的系统偏差。

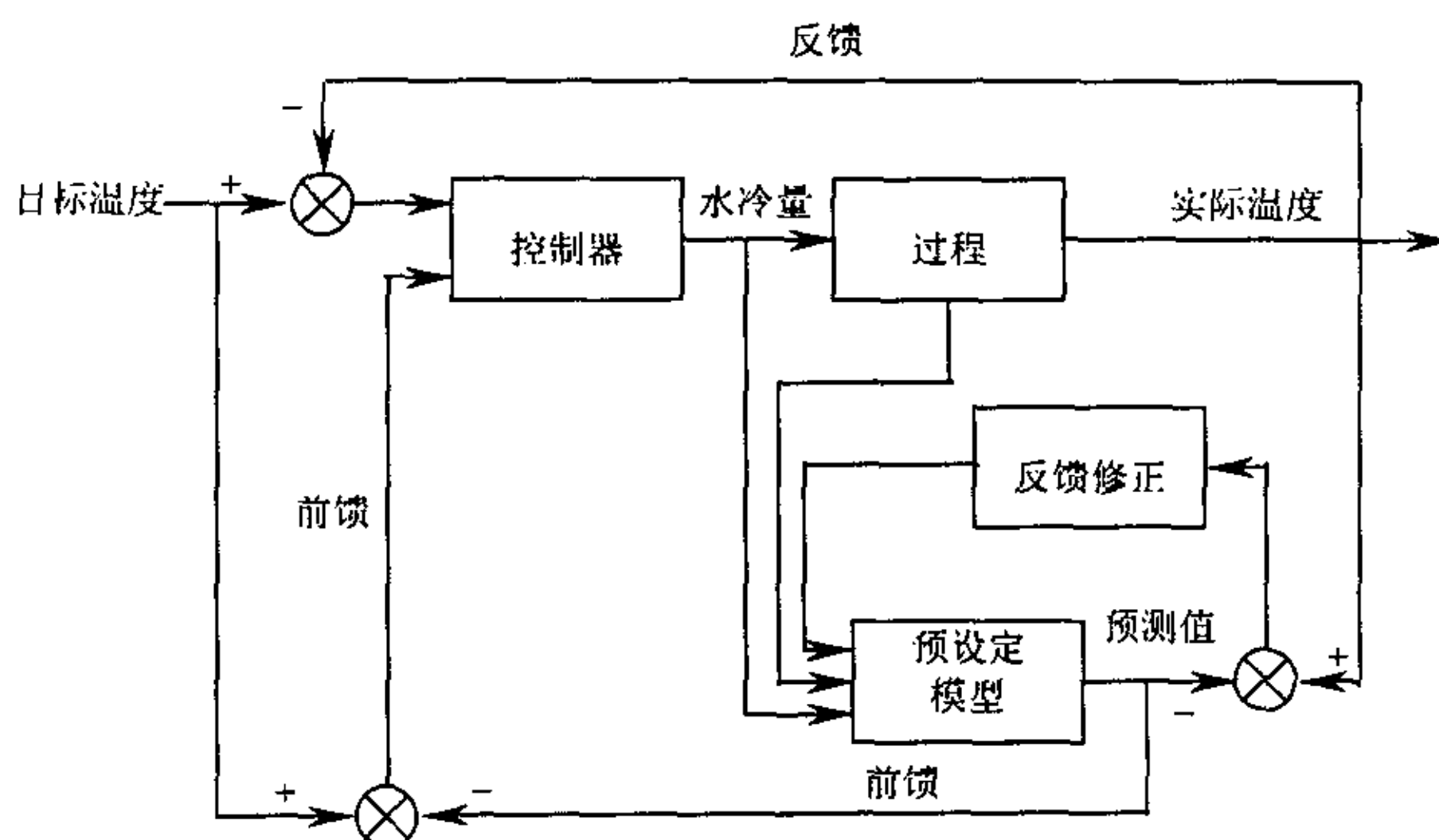


图 1.7 热轧带钢卷取温度控制系统结构图

Fig. 1.7 Structure chart of hot strip coiling temperature control system

[3] 神户钢铁公司加古川厂的层流冷却系统

该系统由动态设定、反馈控制、自适应控制组成，反馈控制用于第一级和第二级冷却设备的后部，自适应控制对初始设定和动态设定进行修正。冷却区上除了有 FDT 和 CT 测温仪外，还有一个中间测温仪 CTM，用于中间温度的测量，提供实测数据进行第一级反馈控制和自适应控制计算，以期能得到更为精确的终冷温度控制。

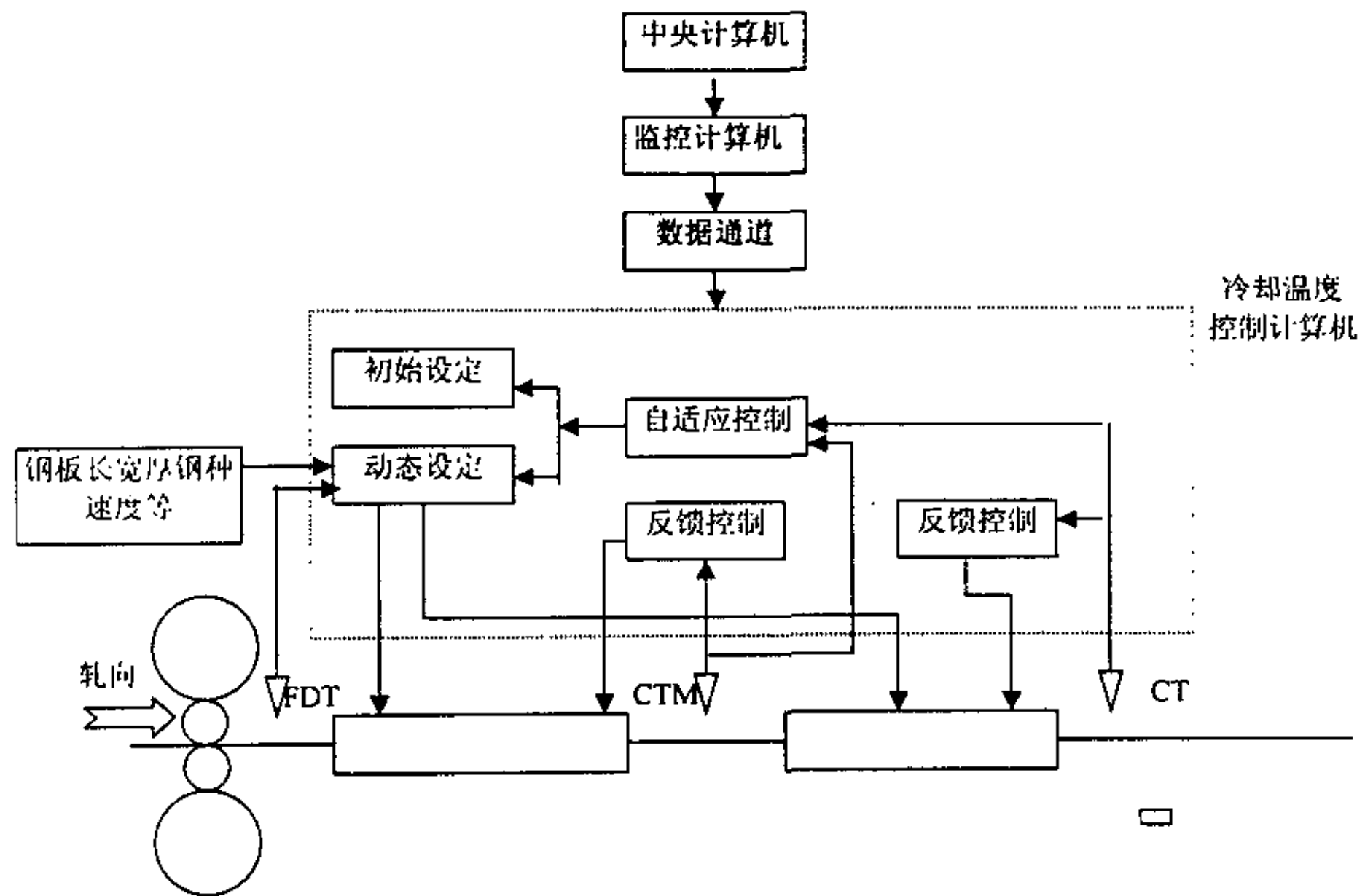
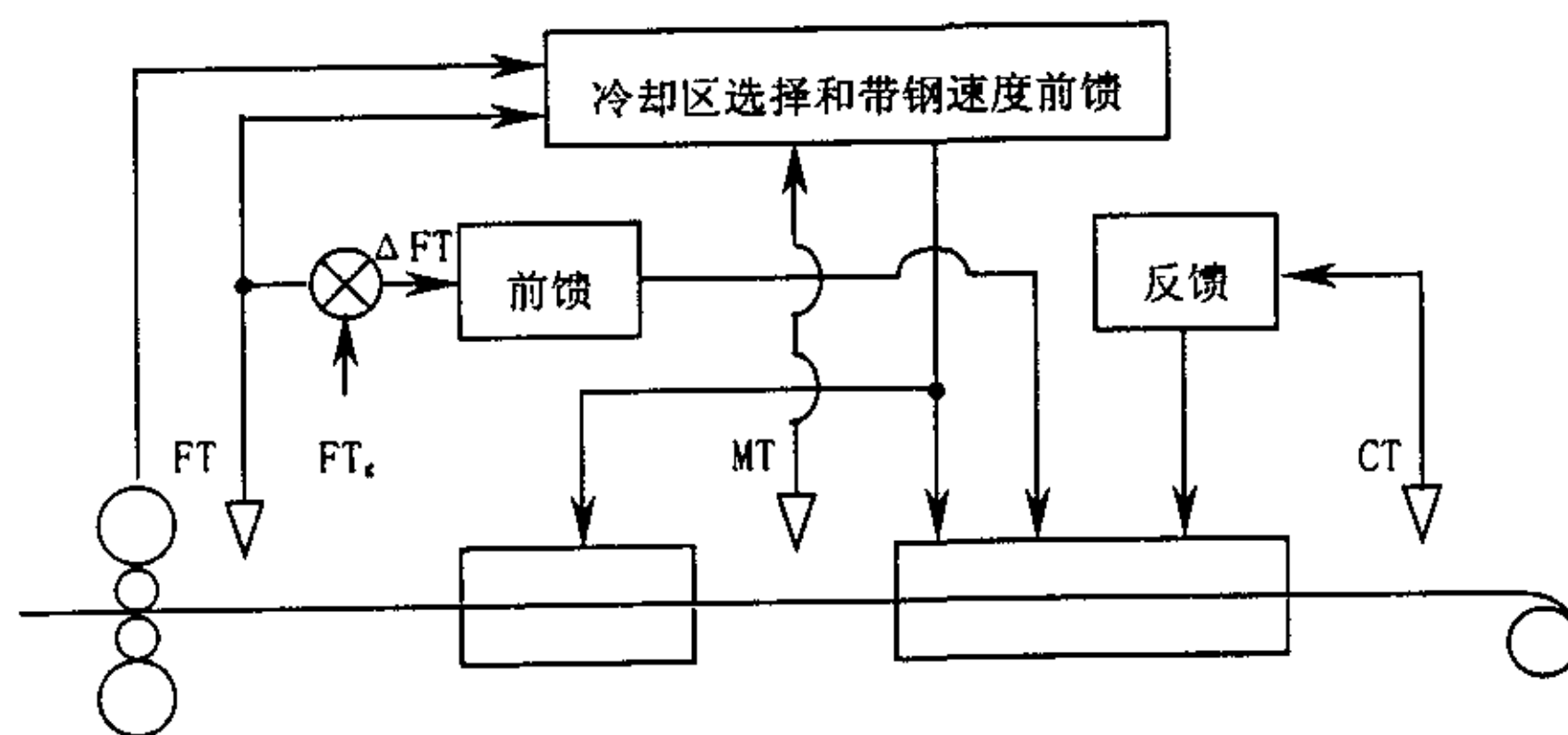


图 1.8 神户钢铁公司加古川厂的层流冷却系统控制系统结构图

Fig. 1.8 Structure chart of hot strip coiling temperature control system in Kajima mill

1.4.2 水幕冷却控制系统

1984 年 7 月日本住友金属工业公司鹿岛厂使用水幕冷却控制系统^[13]，整个冷却区分为两段，前段冷却区和后段冷却区，两段冷却区之间有测温仪，用于测量带钢的中间温度。热轧带钢卷取温度控制系统具有控制带钢卷取温度和控制带钢冷却速度两个特点，在控制卷取温度时，每个采样点的温度是由在线模型计算的，采样点沿带钢长度方向以固定间隔排列，而每个冷却区的水量按预定的卷取温度相应给出。冷却速度是利用中间温度信号进行控制，通过中间温度和带钢经过前段冷却区的时间计算冷却速度。图 1.9 是系统结构框图。



v —带钢速度 FT —终轧温度 FT_s —目标终轧温度

ΔFT —终轧温度偏差 MT —中间温度 CT —卷取温度

图 1.9 鹿岛厂热轧带钢卷取温度控制系统框图

Fig. 1.9 Structure chart of hot strip coiling temperature control system
in Kajima mill

该系统采用前馈和反馈控制方式，前馈控制是以终轧温度偏差作为控制信号，通过调整后段冷却区水量来消除终轧温度偏差，实现前馈控制；反馈控制是以卷取温度作为控制信号，通过调整后段冷却区水量实现反馈控制。

具体算法是计算每个冷却区的冷却水量，采用三个信号对水冷温降模型进行补偿和调整，这三个信号分别是带钢速度、终轧温差和卷取温度。用带钢速度来补偿轧机加、减速对水冷温降模型的影响，用终轧温度的波动来补偿设定计算的误差，在最后冷却区采用测量温度的反馈。

日本住友金属工业公司鹿岛厂的热轧带钢卷取温度控制系统，对速度的变化进行了前馈补偿，可见，系统将带钢速度作为卷取温度控制的重要影响因素。

1.5 本文研究的目的和内容

1.5.1 研究目的

本文是以首钢中板厂层流冷却系统改造为研究背景，在现场硬件环境既定的情况下，如何实现工艺要求所规定的冷却方式和提高数学模型的控制精度。

1.5.2 研究内容

通过查阅国内外控制冷却技术方面的资料，以及层流冷却系统在现场的应用情况。确定钢板层流冷却空冷和水冷的控制数学模型，并提出模型参数的解析方法。具体从以下几个方面开展工作：

- (1) 查阅大量国内外文献的基础上，综述中厚板冷却的发展历程、研究现状及今后的研究方向；
- (2) 对中厚板层流冷却计算机控制系统的跟踪和控制策略进行分析和讨论。
- (3) 建立钢板层流冷却的水冷和空冷数学模型：包括预设定计算模型，修正设定计算模型，热传导差分模型。
- (4) 对钢板冷却后的自学习过程进行分析和建模。
- (5) 控制冷却计算机控制系统投入后的钢板控冷结果分析。

2 首钢中厚厂板层流冷却系统

2.1 系统概况

首钢控制轧制控制冷却系统由 2 级计算机控制系统组成, 其中 1 级为基础自动化, 包括轧机 AGC 基础自动化系统和控制冷却基础自动化系统; 2 级为过程控制系统, 包括轧机 AGC 过程控制系统和控制冷却过程控制系统。计算机的结构图如图 2.1。

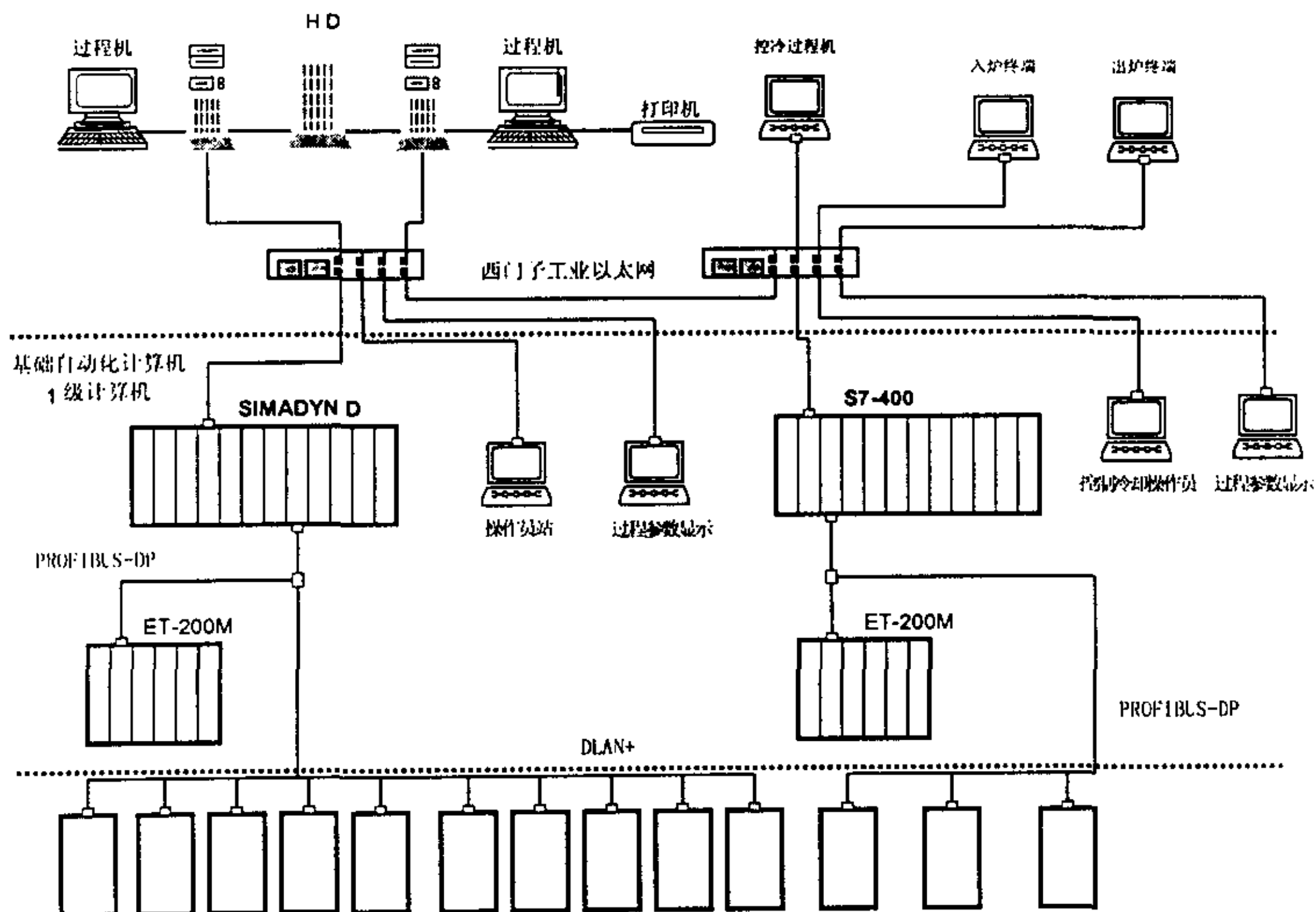


图 2.1 首钢中厚板厂计算机控制系统配置图

Fig.2.1 configuration of Computer controll system in SHOUGANG PLATE PLANT

2.1.1 控制冷却基础自动化系统

控制冷却基础自动化系统接受控制冷却过程机的设定信号, 实现各集管精确定时开闭、各集管水流量的闭环自动控制以及辊道速度和加速度调整控制等。主要包括如下功能的实现:

(1) 钢板的头尾跟踪 钢板头尾精确跟踪; 钢板速度、温度测量数据处理; 重要事件中断信号产生。

(2) 各组喷嘴 on-off 精确时序预测控制 在各事件中断下触发喷嘴 on-off 控制。

(3) 冷却段辊道速度、加速度控制 在各事件中断下触发冷却段辊道速度、加速度控制。

(4) 各组喷嘴的水量闭环控制 在各事件中断下触发各组喷嘴水量设定、各组喷嘴的水量闭环控制。

(5) 边部遮蔽自动调宽控制 边部遮蔽自动调宽控制, 防止边部过冷控冷宽度自适应。

(6) 数据采集和处理 钢板原始数据、钢板入口、出口温度、环境温度、冷却水温度、辊道速度、加速度、实际喷水流量分布。

(7) 报告和记录过程跟踪 冷却数据报告、冷却过程工程记录。

(8) 人机界面 手动干预调节、状态显示、实际数据显示、数据分析。

(9) 故障诊断、记录、报警 系统故障检测、记录、编号、管理、系统报警。

2.1.2 控制冷却过程控制系统

过程控制系统即二级计算机系统, 包括轧机 AGC 过程控制系统和控制冷却过程控制系统; 过程计算机采用美国 COMPAQ 服务器系统 2 台, 1 用 1 备, 镜像磁盘阵列 3*40GB, 与基础自动化级 PLC 通过工业以太网相连, 同时连接有 6 台终端, 用于过程监视和控制。控制冷却计算机采用 1 台工业控制机 (IPC)。控制冷却过程机系统的主要功能是冷却方式的确定、阀门开闭的数量和分布以及控制冷却模型的优化和自适应。控制冷却过程机主要有如下功能:

(1) 初始数据输入 (Primary Data Input) PDI 数据在炉前计算机监控终端进行, 主要包括: 钢板身份证号, 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。

(2) 过程跟踪 过程跟踪依据轧制线采集的信息, 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的位置, 触发计算机中相应的程序, 从数据库中调用相应的数据, 进行计算, 指挥轧制过程的进行。过程跟踪依据如下信息进行: 机后待温段红外测温仪、机后待温段后 HMD、冷却辊道前 HMD、冷却设备前红外测温仪、冷却辊道速度与加速度、冷却设备后 HMD、冷却设备后扫描式红外测温仪等。过程跟踪是保证控制冷却过程有序进行的前提, 是模型与基础自动化的通讯中枢。

(3) 冷却控制模型计算 模型计算包括预设计算, 修正设定计算和自学习计算。预设计算是根据 PDI 数据, 计算使钢板达到设定冷却目标所需的控制量。

修正设定计算是根据现场实际数据数据, 计算使钢板达到设定冷却目标所需的控制量。自学习计算是根据控冷区域各测温仪的实测温度, 对模型参数进行自学习修正。其中控制目标包括: 加速冷却结束温度和加速冷却的冷却速度。现场实际数据包括: 加速冷却开始温度, 冷却水温度, 可使用的集管装置数目, 轧机抛钢速度, 辊道速度, 钢板轧制节奏, 可得到的水量。需要计算的控制量为: 集管开闭的数量、分布和时间, 每组集管的水流量, 辊道速度和加速度, 边部遮蔽宽度。

(4) 人机界面 生产显示, 跟踪数据显示, 辅助系统, 顺序监视, 状态表, 事故和报警。

(5) 报告和记录 提供数据报表、分析报告以及各种数据记录。

(6) 数据通讯 支持各过程机、基础自动化计算机、计算机监控终端之间的数据通讯。

2.1.3 控制冷却系统基本结构

图 2.2 所示为控制冷却原理系统框图。为前馈和反馈的组合控制方式, 并以前馈控制为主, 当钢板长度较长时, 也可以辅以反馈控制。它包括过程由精轧机计算机通过以太网传输过来的原始数据条件, 以及由控冷过程机设定的冷却温度区间, 冷却速度、过程机的跟踪数据、设备操作条件、水温、板温数据。它包括适宜水冷区长度计算 (依据冷却速度、水温、名义板厚计算)、适宜上下比例计算 (依据水温、冷却温度区间、钢板速度、水量密度、板宽计算)、最优通板速度计算 (依据过程条件、板形确定的上限温度、设备区间分割、自学习系数、下面温度确保条件计算)。上述计算的结果给出下述控制因素的控制量: 水冷区长度、水量纵向分布、上下水量比、辊道速度。进一步将上述结果展开, 给出各集管的 on-off、支管入口水量和总水量、这些结果提供给电气控制系统, 控制冷却装置运转。这些冷却装置包括: 给水系统、控制阀组、辊道速度等。冷却后钢板的实际测量结果还要反馈到系统中去, 进行实时控制和自适应。

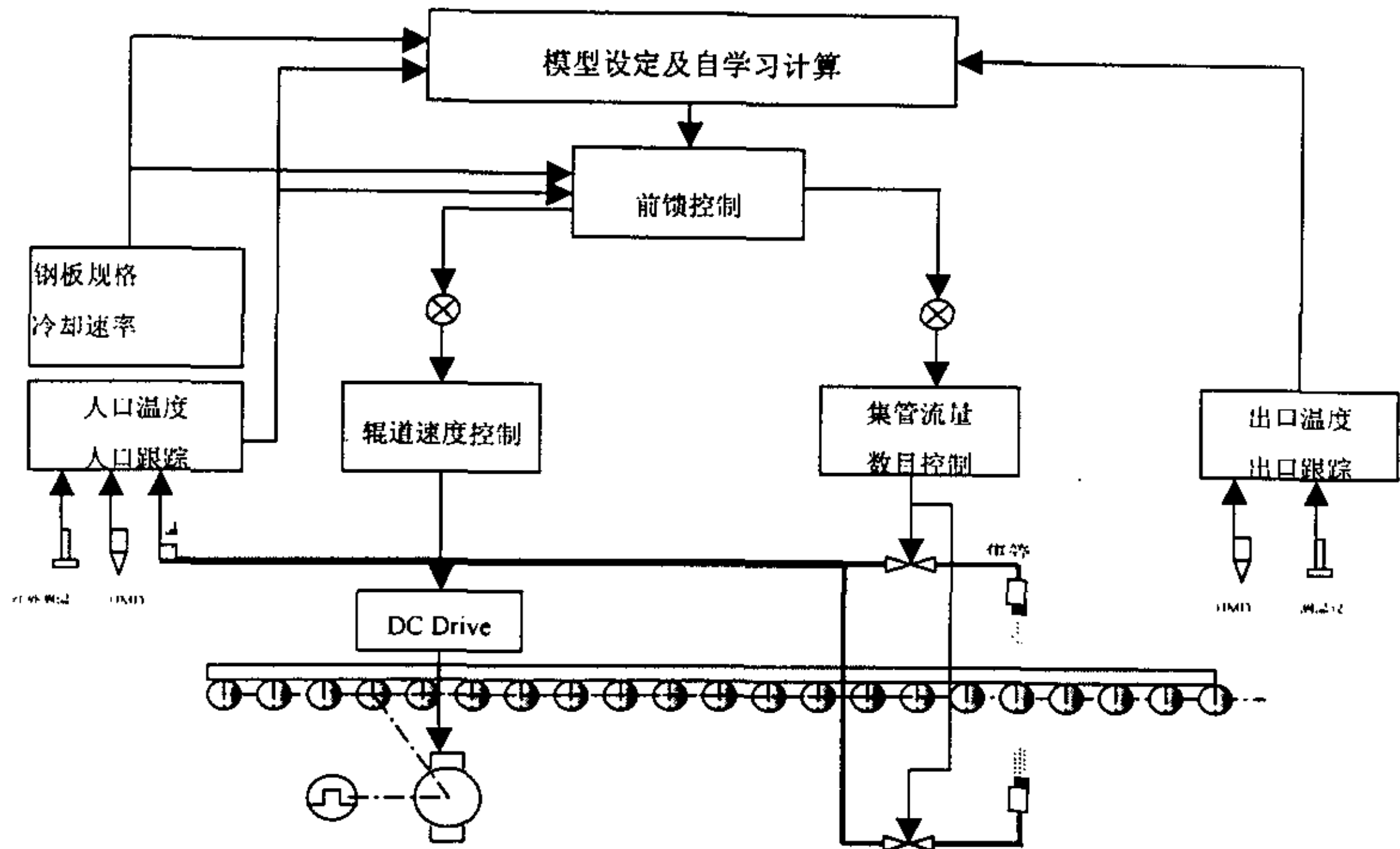


图 2.2 控制冷却原理系统框图

Fig.2.2 Sketch map of controlled cooling principle

2.2 层流冷却系统的控制方式和控制策略

2.2.1 层流冷却系统的控制方式

首钢层流冷却生产线采用高密集管层流冷却。检测设备布置图 2.2 如下：

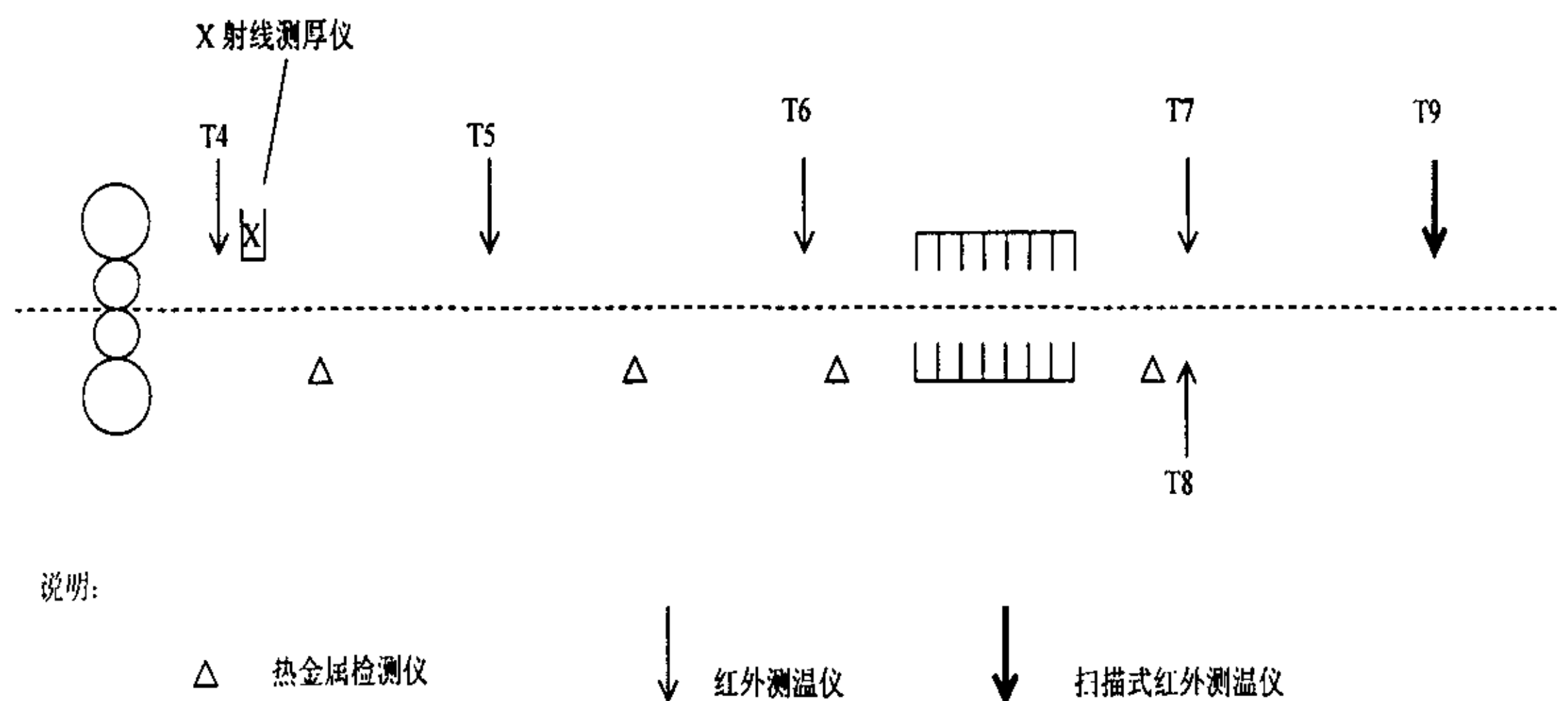


图 2.3 控冷轧线仪表布置图

Fig.2.3 Configuration of cooling line

控制目的是按照要求的冷却速度保证钢板在纵向、横向、上下表面上的温度均匀性,控制参量为集管开闭的数量、流量、边部遮蔽量、上下水量比以及通板速度、辊道加速度等。

控冷方式分为空冷方式与水冷方式。后者又分为模型计算方式和经验调用方式。对同一钢种、同一控冷规程、同一几何尺寸的钢板直接调用该层别命中率较高钢板的控制参数,否则采用模型计算方式,按照其计算结果执行相应的控制冷却。

层流冷却系统的控制方式分三种:手动、半自动、全自动。

(1) 手动方式

集管流量调节阀的开度、遮蔽宽度由操作员设定,气动薄膜阀的开/合手动控制,侧吹、侧喷手动控制,辊道速度设定和运行都由操作员控制。

(2) 半自动方式

集管流量调节阀的开度、遮蔽宽度由操作员设定,薄膜阀的开/合、侧吹、侧喷由程序自动控制,辊道速度设定和运行都由程序控制

(3) 全自动方式

集管流量调节阀的开度、遮蔽宽度由上位机设定、气动薄膜阀的开/合以及辊道及运行速度都由上位机设定,辊道运行都由程序控制。

层流冷却控制主要包括以下几个模块:

1) PDI 校核计算

由传来的 PDI 确认信号,控冷模型根据 PDI 数据,如钢种(钢板级别)、化学成分、几何尺寸(长宽厚)、控冷规程(FRT,FCT,CR),进行 PDI 数据的校核计算,并计算出上(下)部集管流量、辊道速度、各测温仪下的钢板温度、下上水量比等参数,计算结果传给 MMI,并保存在数据文件中。

2) 轧机后修正设定计算

由传来的检测值对预设定结果进行修正计算或重新计算(包括冷却区的集管组态、流量、通板速度等控制参数),以实现终冷目标温度。

3) 冷却区前二次修正设定计算

根据冷却区前实测的钢板开冷温度与计算值之间的偏差进行修正计算,对冷却区后部的集管组态或水量进行微量调整,以实现终冷目标温度。

4) 冷却区前后自学习计算

首钢自学习主要模块包括前段空冷自学习、水冷自学习、后段空冷自学习、上下水量比自学习和边部遮蔽自学习。其中空冷自学习和水冷自学习主要是根据钢板实际温降量与计算温降量的偏差，对换热系数进行修正。上下水量比的自学习主要是为了保证钢板上下冷却的均匀性，其方法是根据钢板上下表面的温差，对上下水量比进行修正。边部遮蔽自学习是根据钢板横向的温度梯度，对水冷时边部遮蔽量进行自学习修正。为了保证钢板在长度方向上温度均匀性，将钢板从头到尾分为三个区域，分别对每个区域进行自学习。

当钢板尾部离开冷却区前的 T6 测温仪时，由跟踪逻辑触发模型管理器 (MODEL)，模型管理器调用前段空冷自学习模块；钢板尾部离开冷却区后的 T7 测温仪时，由跟踪逻辑触发模型管理器 (MODEL)，模型管理器调用水冷自学习主模块、上下水量比自学习主模块和边部遮蔽自学习模块；钢板尾部离开返红时的 T9 测温仪时，由跟踪逻辑触发模型管理器 (MODEL)，模型管理器调用后段空冷自学习模块；图 2.4 是层流冷却系统总体程序框图。

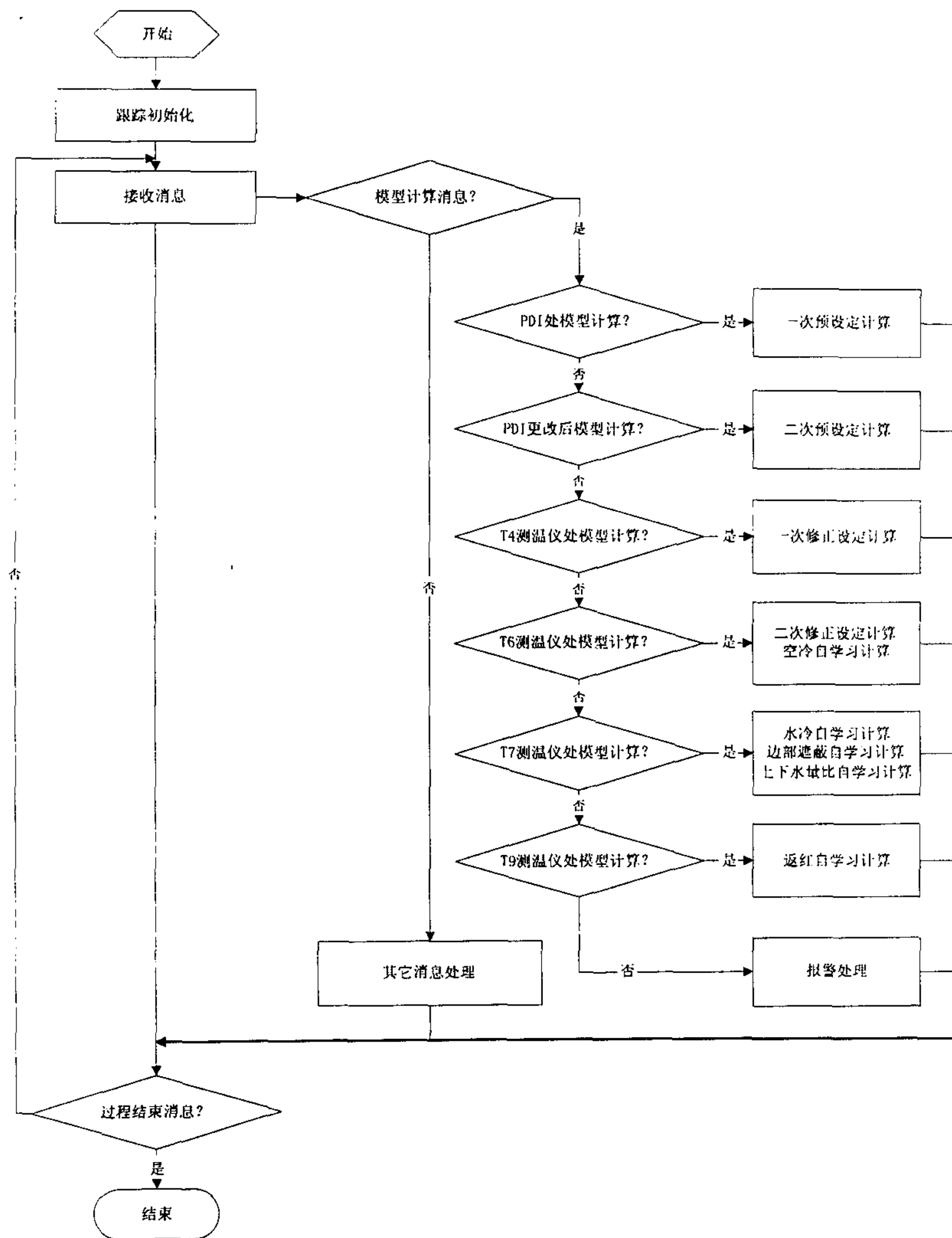


图 2.4 层冷系统总体程序框图

Fig.2.4 Main sketch map of program in laminar system

2.2.2 层流冷却系统的控制策略

在理想的情况下，首先根据钢材的厚度和化学成分选择理想的冷却速率；由

冷却速率和通板速度选择出合适的水流密度；再由水流密度、通板速度、冷却速率、开冷温度和终冷温度确定开启的集管组数。

高温钢板在开始接触冷却水的瞬间，表面温度急剧下降，在厚度方向上产生较大的温度梯度，随着冷却的进行，温度梯度逐渐减小。有资料表明，钢板愈厚，愈要降低冷却速率才能使钢板端面温度梯度变小，增大钢板的淬透性，减小钢板表面和心部间的硬度差。对不同厚度、不同材质的钢板来说，要达到理想的冷却速率，就必须要求冷却装置能提供可变的喷水强度。因此为了实现控冷规程的目标，本套冷却系统设置了以下三种冷却方式：

[1] 连续冷却方式 1

执行冷却方式 1 时，工作集管呈连续分布状态，流量均匀分布。

[2] 连续冷却方式 2

执行冷却方式 2 时，工作集管呈连续分布状态，但集管流量分布不均匀。

[3] 间断冷却

执行间断冷却时，根据冷却规程的要求，集管进行分段喷水，各段集管的流量可以不相同。

以上三种冷却方式可以适应各种冷却速率的要求，并且节省水量，使厚度方向上的温度更加均匀。对这三种方式的选择，主要使依据钢板厚度和冷却速率的范围。

2.2.2.1 纵向均匀冷却控制

钢板长度方向上的温度不均的主要原因，一是因板坯加热不均，特别是推钢式加热炉滑道造成的黑印；二是轧制过程中轧辊冷却水不均匀地淌到钢板表面形成的温度波动。前者是主要原因。为保证钢板纵向温度均匀，主要是对钢板的头尾部实施特殊。

1) 物理分段

为了便于模型计算和实现控制要求，把钢板从头部到尾部进行物理分段，对每一段分别进行信号检测，根据目标偏差分别进行模型计算，求得各段的集管数目和集管流量，然后对其实施分段控制。

兼顾到集管间距和钢板的长度范围，设物理分段长度为 1 米。

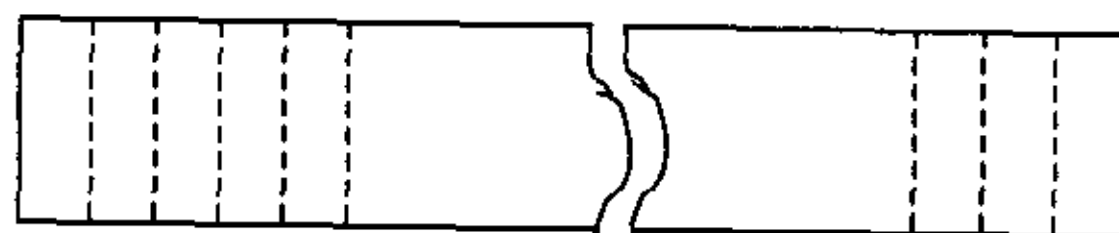


图 2.5 钢板物理分段示意图

Fig. 2.5 Sketch map of physical subsection for steel plate

2) 头尾特殊控制策略

钢板终轧后纵向温度呈阶梯分布，如图 2.5 所示。头尾温度较中部有较大的阶梯，随着进入冷却区的先后，在钢板中部就会产生一温度梯度，如图 2.6b 所示。

对头尾部的低温情况，通常采取延迟开启喷水集管（对头部）和提前关闭喷水集管（对尾部）的策略。头尾控制时开闭集管顺序：对前几组集管，采取与冷却辊道速度方向逆向开，顺向关的顺序。

3) 整体温度梯度时微加减速速度

钢板纵向上除头尾端以外，一般情况下，温度呈递增或递减趋势变化，通常呈递减变化（如图 2.6b 所示），为保证纵向温度均匀，需要对相应的目标终冷温度进行逆向变化控制，这种冷却控制方式叫做渐进冷却，常常是通过调整辊道速度来实现纵向温度均匀一致，因而对图 2.4b 所示的温度情况，采用如图 2.6c 所示的辊道速度形式。

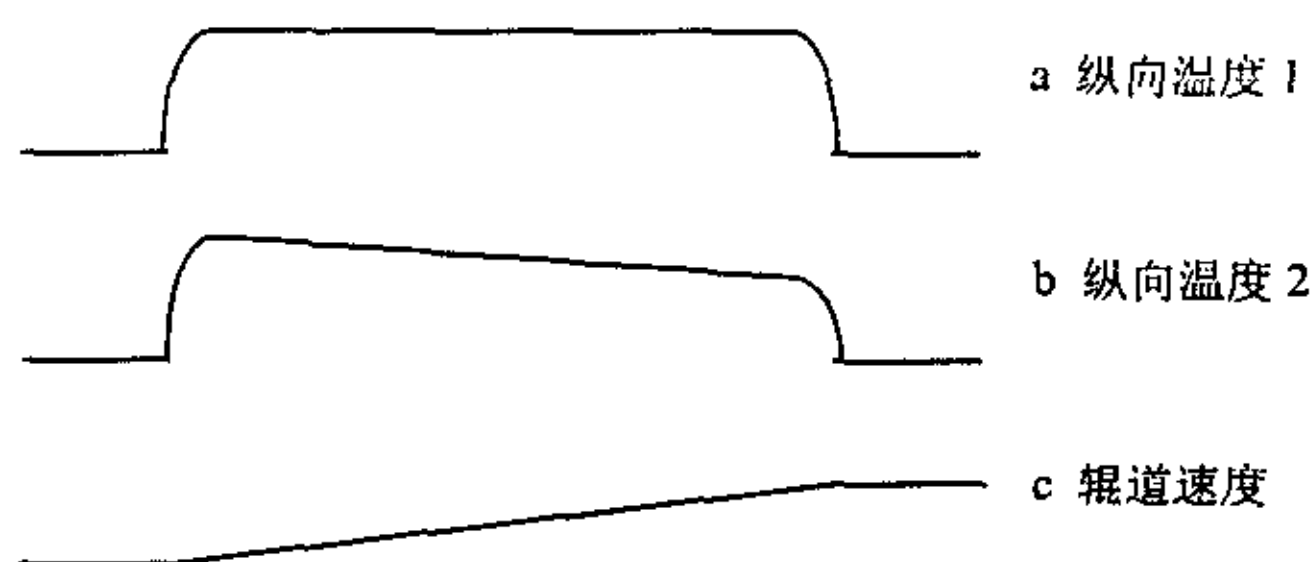


图 2.6 钢板纵向温度分布及辊道速度示意图

Fig. 2.6 Lognitudinal temperature grads of cooling steel and the speed of rollers

4) 出现温度偏差时的调整方法

考虑到水印造成的钢板低温段或由于现场其他因素造成的钢板温度波动，具有一定的随机性，因此根据钢板的物理分段，进行分段调节。

若调节高密度管层流开启组数,则冷却能力有阶梯性的变化,若调节辊速和高密度管层流流量则冷却能力连续变化,但辊速变化会对冷却区内的钢板温度产生影响。因此对末端集管的水量加以微量调整。

2.2.2.2 横向均匀冷却控制

1) 边部遮蔽 向温度均匀性主要是靠上部集管采用横向不均匀的水量分布,如采用集管直径变化或间距变化,形成中凸形的水量分布;或者采用边部遮蔽挡板。有资料介绍,当钢板边部的水流速度约为中心的 75% 时,可达到近似横向冷却均匀的目的。

2) 边部遮蔽凸度 钢板边部的冷却既要保证水流量减小,又要保证边部受到一定的冷却,为确保上述两相原则,采取边部凸度的遮蔽方式,即各个遮蔽挡板的位置参差交错,以边部温度的陡降位置为基准左右分列。如图 2.7 所示。

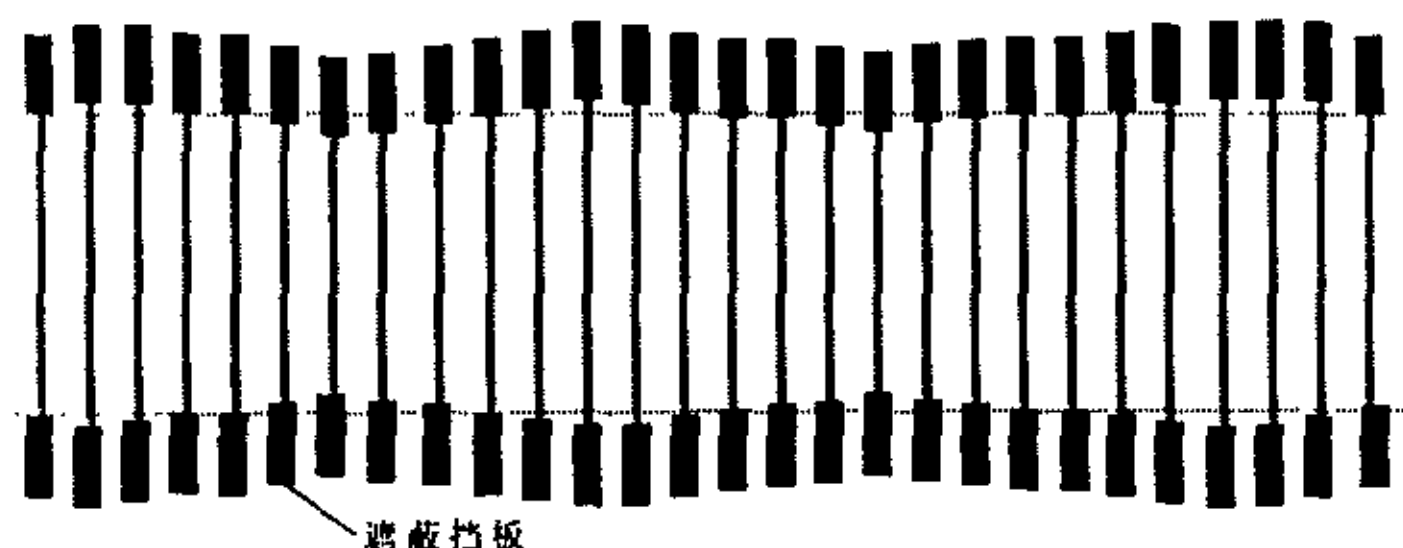


图 2.7 边部遮蔽凸度示意图
Fig.2.7 Crown sketch map of edge-covered

2.2.2.3 上下均匀冷却控制

上下表面冷却的均匀性主要是靠增加下表面的喷水量来实现的。水量比将视总水量而定,总水量越大,下水量/上水量的比值越小。

2.3 本章小结

- (1) 介绍了首钢中厚板厂层流冷却的系统概况。
- (2) 对层流冷却控制系统的控制方式进行了说明。
- (3) 介绍了层流冷却的控制策略,包括钢板纵向温度,横向温度和上下表面温度均匀性控制。

3 控制冷却过程跟踪

3.1 过程跟踪结构及功能

控制冷却作为控制轧制之后的后续工艺对于提高钢板质量、获得良好板形意义重大。首钢控制冷却线采用的是层流冷却设备,采用连续的高密集管冷却方式。轧钢是一门系统工程,是多门学科的综合应用,除了要求有精确的控制控冷模型外,还必须有准确的过程跟踪,以保证基础自动化与过程机之间的适时通讯。首钢控冷过程跟踪要求能及时地将基础自动化信息传递给过程机,同时能将模型的计算结果适时地传送给过程机执行。如果过程跟踪失败,就会严重影响到控冷过程自动化。

控制冷却的过程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;对控冷设备状态进行跟踪;对一级机所传递的轧件测量数据进行管理;根据钢板在控冷辊道上的位置,触发控冷模型预设定计算、一次修正计算、二次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。

过程跟踪起着二级系统管理者的作用,它对一级机的检测消息作出响应,同时根据模型计算结果向一级机发出操作指令。模型计算依赖于跟踪逻辑的触发。过程跟踪还必须对模型计算结果进行保存和打印。

热机械轧制技术的优点在于能够将控制轧制过程和轧后的控冷过程有机的结合起来,充分发挥钢板的潜力。因而钢板的轧后冷却过程离不开冷却前的轧制过程,冷却过程跟踪必须与轧机的过程跟踪联系起来。传统的冷却过程控制与轧制的过程控制相互独立,这样可能导致两种弊端:①轧机过程机的最终轧制参数不能及时的传递给控冷过程机,使得控冷过程机进行冷却模型计算时初始参数不准确,影响控冷模型的计算精度。②控冷过程机不能将轧件的冷却节奏传递给轧机过程机,可能导致轧件在冷却辊道上发生堵塞现象,严重影响轧制过程。因而控制冷却的过程跟踪不能脱离轧机的过程跟踪,控制冷却的过程跟踪必须和轧机

的过程跟踪结合起来才能更好地对轧线进行控制。控制冷却的过程跟踪从加热炉处即已经开始，只是对钢板的轧制过程“视而不见”，待到钢板进行最后一个道次轧制时重新对钢板进行精确跟踪。

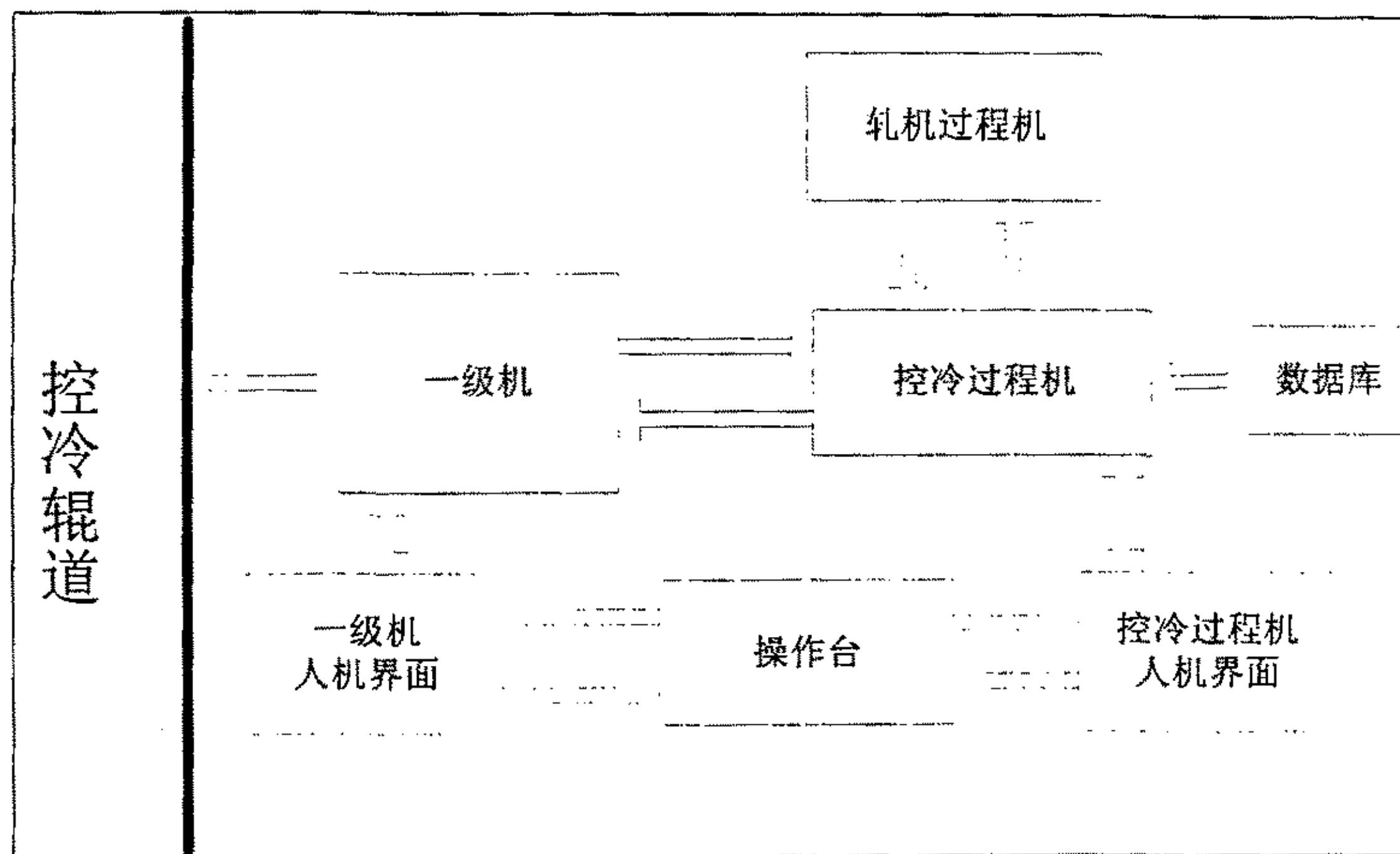


图 3.1 控制冷却系统框图

Fig.3.1 Frame of controll cooling system

3.2 加热炉处的跟踪

加热炉内设有一个炉内文件队列 PLT，操作员把即将进行轧制的板坯 PDI 数据输入到 PLT 数据文件。PLT 数据文件里存放着板坯的序列号、板坯尺寸、板坯存放的炉号、板坯的终轧、终冷温度和板坯的热物理参数。操作员通过加热炉终端确认即将出炉的板坯，轧机过程机在得到板坯 PDI 信息后进行预设定计算，确定轧制策略和轧制规程。轧机过程机将预计算所得终轧温度和辊道速度等数据传递给控冷过程机，这些数据是控冷模型所必要的初始参数。控冷过程机在得到轧机过程机传来的控冷 PDI（控冷轧件原始数据）数据后，控冷模型进行预设定计算并将模型计算的冷却节奏传递给轧机过程机。轧机过程机根据控制冷却节奏确定最终轧制节奏，避免轧后冷却时发生轧件堵塞现象。轧机过程机在预计算结束后将会允许操作员进行出钢操作。

3.3 终轧前的轧件跟踪

板坯出炉后即由轧机过程机对其进行跟踪,在轧制的过程中可能会出现多块坯交叉轧制的情况,因而轧制过程的跟踪比较复杂。控制冷却的板坯跟踪对出炉后到终轧前最后一个道次的轧制过程不作跟踪,此部分的过程跟踪将由轧机过程机完成。在轧制的过程中轧机过程机将会根据温度计、测厚仪等适时检测设备对轧制模型进行修正,轧制规程可能在轧制过程中有一定的调整。控冷过程机关心的是终轧后板坯的状态,控冷过程机把终轧后板坯的参数作为控冷模型的 PDI 数据。终轧前的最后一个道次,轧机过程机将轧制模型预测的板坯终轧状态参数传递给控冷过程机,此后控冷过程机将会对板坯的冷却情况进行跟踪。

3.4 终轧后轧件冷却过程跟踪

终轧前的最后一个道次轧机过程机将预测的终轧板坯参数传递给控冷过程机,触发控冷过程机对轧件的跟踪。控冷过程机将对轧件从终轧最后一个道次到矫直机前的返红温度计的控制冷却过程进行精确的跟踪。通过跟踪可使控冷过程机及时了解冷却辊道上轧件的实际位置和控制状况,过程机将根据轧件的当前状态启动有关的计算程序,将该轧件的控制消息传递给基础自动化执行。在本系统中,计算机对轧件的跟踪方法是将整个控制冷却线划分成不同的区域,在各个区域内设一组相应的数据单元。轧件在生产线上移动时,将会触发生产线上检测仪表信号,跟踪程序对此触发信号作出相应的响应。整个跟踪是基于一种消息触发机制。

3.5 跟踪区域的划分

为了正确判断板坯在控制冷却线上的实际位置,便于对板坯跟踪,将从轧机到返红温度计划分为四个不同的区域。轧件出炉确认后到轧件进行最后一个道次轧制(咬钢)为 PDI 区域(PDI ZONE);从轧件最后一个道次轧制到轧件头部到达控冷设备前的温度计 T6 为轧机出口区域(MILL ZONE);从轧件头部到达温度计 T6 到轧件尾部到达控冷设备后温度计 T7 为冷却区域(COOLING ZONE);从轧

件尾部到达温度计 T7 到轧件尾部到达返红温度计 T9 为出口区域 (EXIT ZONE)。每个区域内都设有一组数据单元 (称为跟踪表), 记录轧件的当前状态。

轧件在生产线上移动时, 通过触发检测仪表信号, 判断出轧件所在区域, 并更新跟踪表的内容。根据跟踪表中轧件所在的位置, 控冷过程机启动控制冷却模型作相应的计算, 并将计算后所得到的结果存入跟踪表的数据区。跟踪表将模型计算的控制结果及时地传递给基础自动化执行。

3.5.1 PDI 区域跟踪

控冷过程机接收到轧件即将出炉的确认消息后, 对轧件进行以预设定计算。轧件将进行最后一个道次轧制前, 轧机过程机将准确的控冷 PDI 数据传递给控冷过程机, 模型将根据控冷 PDI 数据进行二次预设定计算。并将预设定结果传递给基础自动化。当控冷过程机接收到控轧过程机的最后一个道次轧制信息时, 控冷过程机即开始对该轧件进行分段跟踪。同时跟踪表进行初始化。

3.5.2 轧机出口区域跟踪

轧件开始进行最后一个道次轧制。更新跟踪表格。同时对跟踪文档初始化, 跟踪文档记录跟踪过程的适时信息。

轧件头部到达 T4。将 T4 温度计所测得的值与相应的 PDI 数据进行比较, 决定是否进行一次修正计算。将修正计算结果传递给一级机。

轧件头部到达测厚仪处。将测厚仪所测得的值与相应的 PDI 数据进行比较, 检查 PDI 数据是否超限。

3.5.3 冷却区域跟踪

轧件头部到达 T6 温度计。将 T6 温度计所测得的值与相应的 PDI 数据进行比较, 决定是否进行二次修正计算。同时更新跟踪表。

轧件头部到达温度计 T7。记录冷却后的轧件温度。

轧件尾部到达温度计 T7。跟踪表格更新。

3.5.4 出口区域跟踪

轧件头部到达温度计 T9。记录冷却后的轧件温度。

轧件尾部到达温度计 T9。跟踪表格更新, 完成跟踪文档。

模型自适应返回, 生成冷却报告, 清空跟踪文档。

轧件尾部离开 T9 温度计后, 即完成该轧件的跟踪过程。控冷过程机将轧件冷却后的实际信息存入数据库, 这些信息包括测温仪所测轧件实际温度、模型计

算的控冷设备设定参数、自适应模型系数等。可以通过数据库查询控制冷却历史，下一批次的轧件也可以参考数据库中同一规格轧件的冷却参数。

3.6 事件触发顺序表和数据流图

3.6.1 事件触发顺序表

根据上述对跟踪过程的叙述，确定触发事件顺序表如下(表 a 模型计算方式，表 b 经验表方式)：

表 3.1 事件触发顺序表 a

Table 3.1 Timetable a of tracking events calling

DATABASE		ACC LEVEL2		ACC LEVEL1
PDI 数据下载	→	时间储存 PDI 数据 MMI 显示 预设定计算 结果 MMI 显示		
确定轧制节奏	←	冷却节奏上传		
		时间储存	←	将要冷却的下一轧件
		PDI 和预设定结果下载 跟踪表更新	→	PDI 和预设定值 MMI 显示
		厚度检验		
		温度检验 与 PDI 值比较	←	终轧厚度
		如果偏差过大报警 若有必要进行 一次修正计算	←	终轧头部温度
		时间储存 收集和储存所测数据 若有必要进行二次再计算 下一轧件变为当前轧件	←	轧件头部到达温度计 T6
		轧件冷却		
		时间储存 收集和储存所测数据	←	轧件头部到达温度计 T7
		时间储存 收集和储存所测数据	←	轧件头部到达温度计 T9
		时间储存 空冷自学习 停止收集和储存所测数据	←	轧件尾部到达温度计 T6
		时间储存 水冷, 水量比, 遮蔽自学习 停止收集和储存所测数据	←	轧件尾部到达温度计 T7
		时间储存 停止收集和储存 T9 数据 冷却数据处理 返红自学习 生成冷却报告 清空跟踪区域 轧件归档数据库	←	轧件尾部到达温度计 T9

表 3.2 事件触发顺序表 b
Table 3.2 Timetable b of tracking events calling

DATABASE		ACC LEVEL2		ACC LEVEL1
PDI 数据下载	→	时间储存 PDI 数据 MMI 显示 查经验表确定预设设定结果		
确定轧制节奏	←	冷却节奏上传		
		时间储存	←	将要冷却的下一轧件
		PDI 和预设设定结果下载 跟踪表更新	→	PDI 和预设设定值 MMI 显示
		厚度检验	←	终轧厚度
		T4 温度检验 与 PDI 值比较 如果偏差过大报警	←	终轧温度
		时间储存 收集和储存所测数据 如果温度偏差过大报警 下一轧件变为当前轧件	←	轧件头部到达温度计 T6
		轧件冷却		
		时间储存 收集和储存所测数据	←	轧件头部到达温度计 T7
		时间储存 收集和储存所测数据	←	轧件头部到达温度计 T9
		时间储存 停止收集和储存所测数据	←	轧件尾部到达温度计 T6
		时间储存 停止收集和储存所测数据	←	轧件尾部到达温度计 T7
		时间储存 停止收集和储存 T9 数据 冷却数据处理 生成冷却报告 清空跟踪区域 轧件归档数据库	←	轧件尾部到达温度计 T9

3.6.2 过程跟踪数据流图

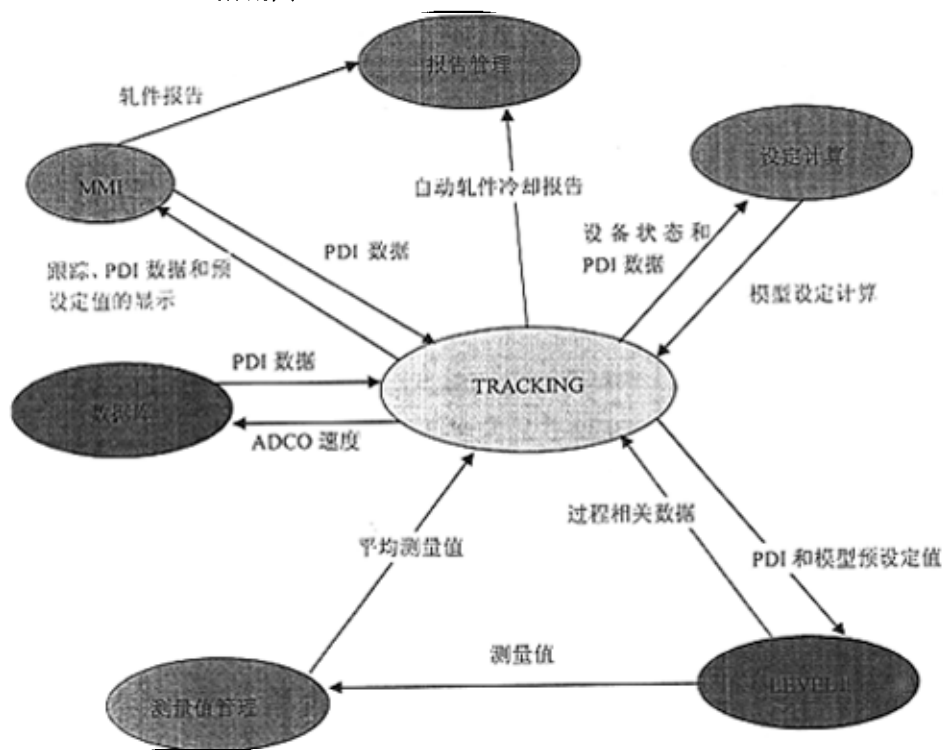


图 3.2 控制冷却过程跟踪数据流图

Fig. 3.2 Data flow in process tracking

3.6.3 控冷过程跟踪主流程

当控冷过程启动时，对控冷辊道上的轧件位置进行跟踪，处理实测数据，触发相应的计算，计算结果的存储和下传，对操作员的指令作出相应的响应。

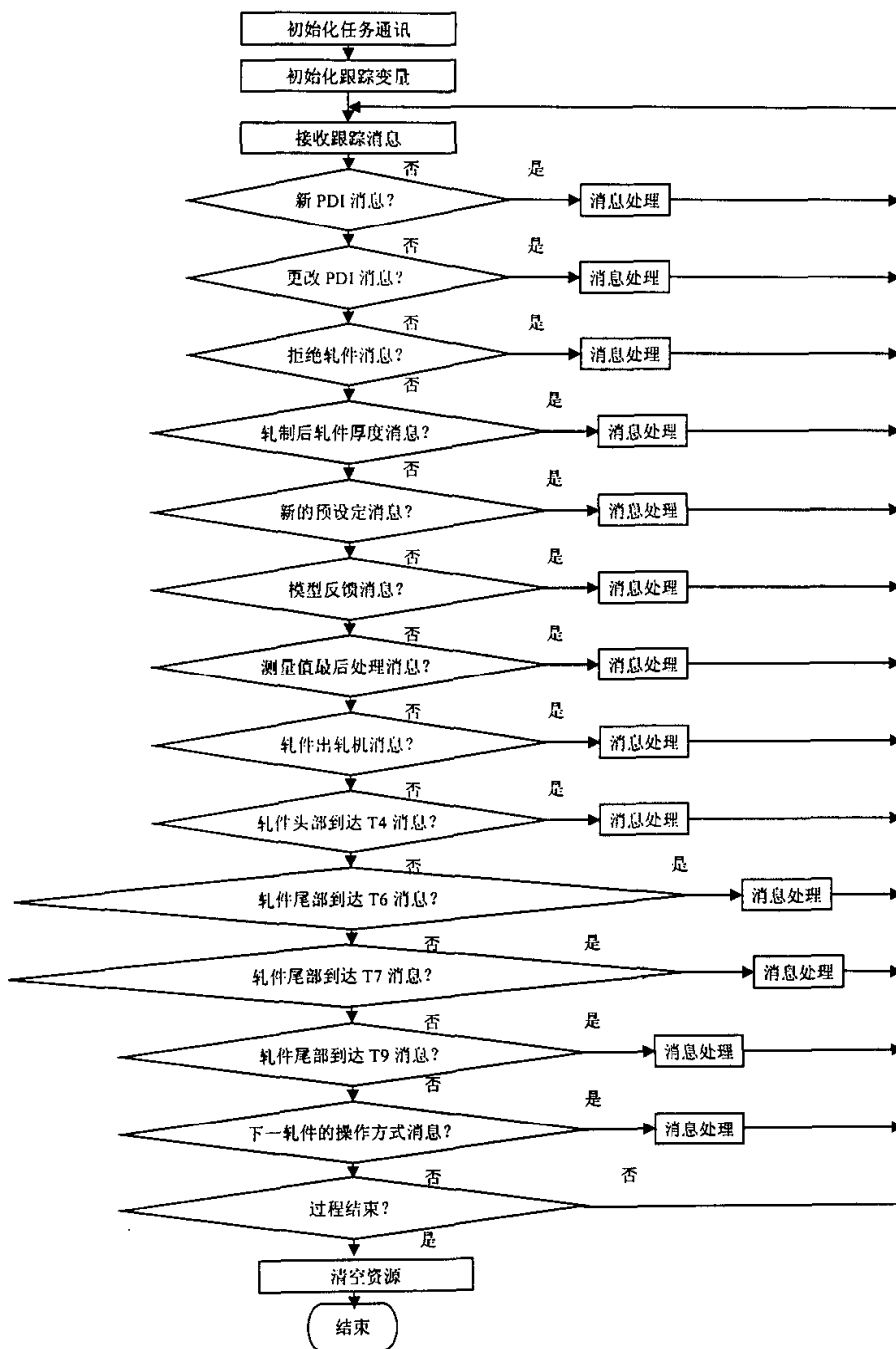


图 3.3 控制冷却过程跟踪主流程图

Fig. 3.3 Main sketch map of process tracking

计算说明:

- (1) 轧制过程开始, 过程机启动, 对跟踪进行初始化。

- (2) 消息循环机制启动由通讯传给控冷过程机消息。
- (3) 控冷过程机对跟踪消息进行分析。
- (4) 如果控冷过程机接收到新 PDI 消息, 则为新轧件分配数据区, 并建立跟踪表。进行预设定计算。
- (5) 在轧件头尾到达控冷辊道上的测温仪和测厚仪时, 进行相应的消息处理。
- (6) 跟踪过程在模型计算时(预设定、修正设定和自学习), 由模型管理器调用各模型计算模块, 跟踪程序负责计算结果的保存和下传。
- (7) 如果控冷过程机接收到过程终止消息, 跟踪程序进行控制终了处理, 并结束消息循环。

3.5 本章小结

- (1) 本章论述了控制冷却系统的过程跟踪结构和功能, 提出了控冷和轧机联合对轧线板坯进行跟踪的思想。
- (2) 对控冷轧线的跟踪区域进行了划分。
- (3) 介绍了控冷过程的事件触发顺序和数据流图。

4 层流冷却数学模型的建立

4.1 传热过程数值分析

4.1.1 传热学基本理论

传热学是研究热量传递规律的一门学科。固体的传热包括两种：一是固体内部的导热——主要是热传导；二是固体和周围介质的热交换（外部传热）过程——主要是辐射、对流和传导（对流和传导在表面热交换的过程中不可分割地同时存在）。任何传热过程都同时存在两个部分，在加热时（加热炉控制）热量首先以周围介质（炉内气氛）按照某种规律传到钢坯表面（边界）然后再由表面向中心传导。因此加热过程是由外部传热和内部导热相互影响相互联系共同组成地。冷却时（自然温降和强迫冷却）过程与此相反。传热过程共有三种基本方式：传导、对流和辐射^[26]。

4.1.1.1 热传导

热传导是传热学的重要分支，它主要是研究固体内部的热量传输，分析固体表面与环境进行热交换时，其内部的温度变化规律。傅立叶定律把物体内部的温度场和热流场联系起来^[27,28,29]，根据傅立叶定律：

$$q = -\lambda \times \text{grad}t \quad (4-1)$$

式中：

q —热流向量，即单位时间内在等温面单位面积上所通过的热量，又称热流密度；

λ —比例系数，称为热传导率， $Kcal/mh^\circ C$

热流向量的绝对值称为比热流：

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (Kcal/m^2h) \quad (4-2)$$

所以

$$dQ = qdFdt = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dFdt \quad (\text{Kcal}) \quad (4-3)$$

由此可以推导出导热微分方程。取导热物体一微分立方单元，设各侧表面上导入热流密度为 q_x, q_y, q_z ，导出热流密度为 q'_x, q'_y, q'_z ；则

$$q'_x = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (4-4)$$

$$q'_y = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (4-5)$$

$$q'_z = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (4-6)$$

在 dt 时间内导入和导出的热量为：

$$dQ_x = q_x dydzdt \quad dQ'_x = \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dydzdt \quad (4-7)$$

$$dQ_y = q_y dxdzdt \quad dQ'_y = \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dxdzdt \quad (4-8)$$

$$dQ_z = q_z dxdydt \quad dQ'_z = \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dxdydt \quad (4-9)$$

经过 dt 时间后，由单元体放出的热量为：

$$\begin{aligned} dQ' &= (dQ'_x - dQ_x) + (dQ'_y - dQ_y) + (dQ'_z - dQ_z) \\ &= \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dxdydzdt \end{aligned} \quad (4-10)$$

另一方面，单元体的初始温度为 T ，单位时间的温度变化为 $\frac{\partial T}{\partial t}$ ， dt 时间内温度变化为 $\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dt$ 。引起温度变化所放出的热量为：

$$dQ = -C_p \rho dV \frac{\partial T}{\partial t} dt = -C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz dt \quad (4-11)$$

式中:

C_p —比热, $Kcal/kg \cdot ^\circ C$;

ρ —密度 kg/m^3 ;

T —温度 $^\circ C$;

t —时间, h;

所以

$$-C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (4-12)$$

$$-C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4-13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4-14)$$

对于板带轧制过程中, $L \gg b$, $L \gg h$ 时, 认为只有宽度和厚度方向存在温差, 即 $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, 所以得:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4-15)$$

4.1.1.2 对流换热

对流换热是物体表面热交换的一种形式。此种热交换的形式不但和物体传热特性有关, 而且更主要是决定于介质流体的物理性质和运动特性。在此种热交换过程中, 一般常伴有流体集态的改变 (产生气泡、汽膜)。因此, 热交换过程是及其复杂的。为便于计算, 常采用下列简单形式的计算公式:

$$dQ = \alpha(T - T_\infty)F d\tau \quad (4-16)$$

式中 F ——热交换面积, m^2 ;

τ ——热交换时间, h;

T ——物体温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_{∞} ——介质温度, $^{\circ}\text{C}$;

α ——强迫对流换热系数, $\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ 。

由式 3-16 可得:

$$q = \alpha(T - T_{\infty}) \quad (4-17)$$

这就是牛顿冷却定律的数学表达。

实际上各种因素的影响都集中在 α 中考虑了。 α 的理论计算比较复杂目前只对一些特例有较满意的理论公式, 通常 α 值主要用实验确定。

4.1.1.3 辐射换热

辐射是由于物体本身温度导致产生电磁波, 其波长范围有 0.1 微米到 1000 微米 (也包括了紫外线、可见光和红外线三个波段, 主要是红外线)。辐射换热过程伴随着能量的转换, 即由热能 $\rightarrow$ 辐射能 $\rightarrow$ 热能。辐射能的传播是以光速进行, 不需要借助中间介质, 更不需要相互接触, 热射线射到物体后其辐射能部分被物体吸收, 变为热能。任何物体不论其温度高低 (除 -273°C 外), 都在不断地向外辐射能量, 同时又在不断地吸收外界辐射能。根据得到的热量和失去的热量的多少决定物体是被加热还是被冷却。

实践证明, 辐射能量 (单位面积和单位时间内的) 和温度的四次方成正比:

$$E = \varepsilon\sigma\left[\frac{T}{100}\right]^4, \text{Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K}^4 \quad (4-18)$$

式中 σ ——斯蒂芬—波尔茨曼常数;

ε ——实际物体的黑度, 又称为发射率, 由实验确定。

T ——物体的绝对温度。

根据式 3-18, 物体因辐射散失的热量为:

$$Q = E_1 F \tau - E_2 F \tau = \varepsilon\sigma\left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\infty}}{100}\right)^4\right] F \tau \quad (4-19)$$

式中 E_1 ——散失到周围介质中去的能量;

E_2 ——散失到周围介质中去的能量;

F ——散热面积, m^2 ;

τ ——时间, h。

$$\text{由此可得边界热流密度为: } q = \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_\infty}{100} \right)^4 \right] \quad (4-20)$$

4.1.2 钢板静态水冷数值分析

钢板的静态水冷是指钢板在静止状态下, 经层流水冷却。对钢板静态水冷的仔细分析有助于了解钢板运动时的层流冷却过程。钢板静态水冷时, 钢板内部是热传导过程, 边界是与水的对流换热过程。由于 $L \gg b$, $L \gg h$ 时, 认为只有宽度和厚度方向存在温差, 即 $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ 。假定钢板在冷却过程中无相变, 可得到钢板的热平衡方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4-15)$$

边界条件:

$$\begin{aligned} T(x, y, 0) &= \Phi(T), (t = 0, 0 \leq x \leq h/2, 0 \leq y \leq B/2) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= q, (x = h/2, t \geq 0) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= q, (y = B/2, t \geq 0) \\ \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, (t \geq 0, x = 0, y = 0) \end{aligned} \quad (4-21)$$

式中:

$\Phi(T)$ ——钢板断面初始温度分布,

h ——钢板半层厚度, m,

B ——钢板半层宽度, m。

式(3-26)中第四式为钢板中心绝热边界条件。在对流换热条件下, 由牛顿冷却定律可得:

$$q = \alpha(T - T_\infty) \quad (4-22)$$

式中:

α ——钢板与冷却介质间的换热系数, ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$),

T_∞ ——冷却介质温度, $^\circ\text{C}$ 。

对上述一组偏微分方程 (3-25) 式采用数值分析法求解。

根据差分原理和能量平衡理论把它们转化为代数方程。将区域离散化, (如图 3.3 所示) 把坐标原点定在板厚中心, 厚度方向为 y 轴方向, 宽度方向为 x 轴方向, 并把钢板半层厚度分成 n 等分, 钢板半宽度分成 m 等分,

$$\Delta x = x_i - x_{i-1}$$

$$\Delta y = y_j - y_{j-1}$$

时间轴可以理解为垂直于 x - y 平面, 也将它离散化,

$$t = t_k = k\Delta t, k = 0, 1, 2, \dots$$

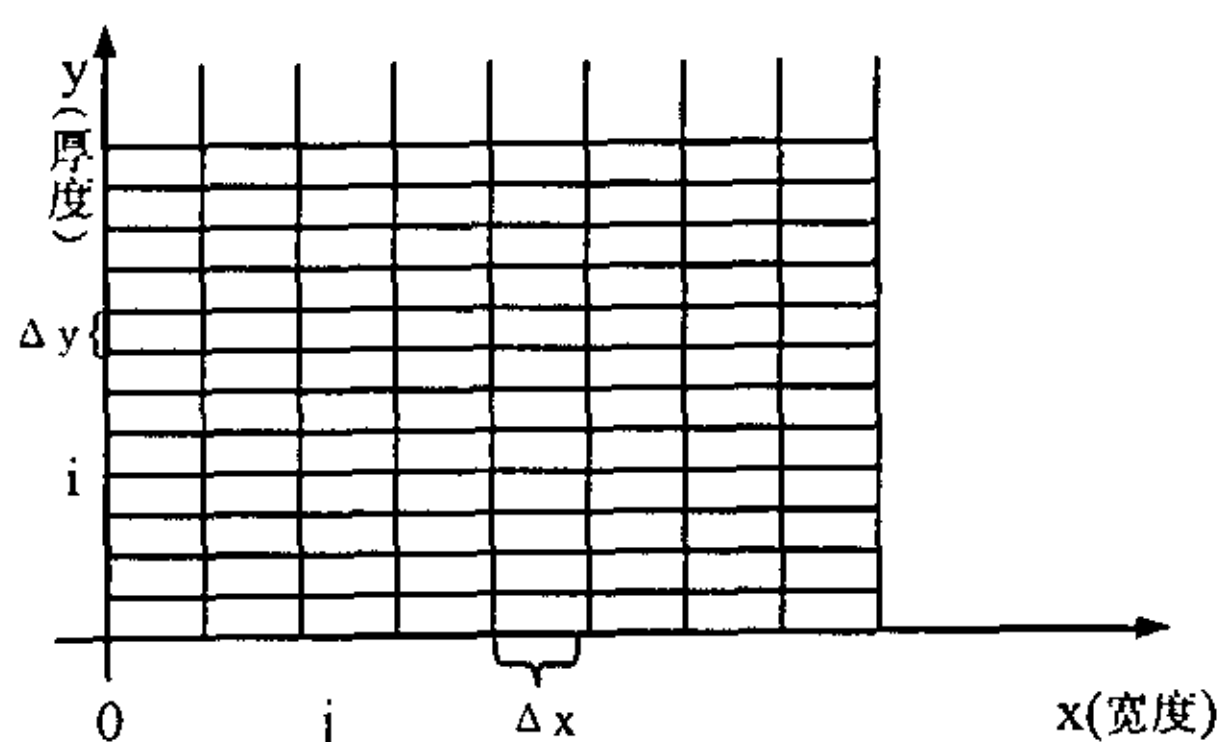


图 4.1 区域离散化示意图

Fig. 4.1 Sketch map of zone divided

区域内节点 (i, j) 在 t_k 时刻的温度记作 $T_{i,j}^k$ 。

对 (4-15) 式进行差分格式展开的完全隐式的 Crank-Nicolson 格式^[28, 29, 30]

为:

$$\frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{(\Delta y)^2} = -\frac{C_p \rho}{\lambda} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} \quad (4-23)$$

式 (4-23) 差分方程中所包含的未知量个数是 6 个, 用一般的迭代法与消元法计算工作量都很大。因此, 针对二维不稳定导热问题, 提出新的计算方法, 即交替方向法^[28, 29]。

交替方向法求解 (4-23) 式差分方程:

若把导热微分方程 (4-15) 应用于节点 (i, j) , 写成如下形式:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{i,j}^{k+1} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)_{i,j}^k = -\frac{C_p \rho}{\lambda} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{i,j}^k \quad (4-24)$$

相应的差分方程为:

$$\frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} = -\frac{C_p \rho}{\lambda} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} \quad (4-25)$$

以上从微分方程到差分方程的过程中, 导热方程中温度对时间的偏微商仍用时间的向前差商代替, 而温度对距离的二阶微商, 在 x 方向上, 用 $k+1$ 时刻; 在 y 方向上, 用 k 时刻。经过这样处理, 尽管这个差分方程仍是隐式的, 但方程中只包含三个未知量, 它所对应的方程组的系数矩阵具有三对角线的特点, 可用追赶法求解。运用这种方法, 计算的工作量可减少很多, 但格式的稳定性不是无条件的了。

为了既能保证格式的绝对稳定性, 又使计算工作量不增加, 可以在使用隐式格式时交换改变方向, 即对一次 $\Delta \tau$ 增量取 x , 方向为隐式格式, 而对下一次 $\Delta \tau$, 取 y 方向为隐式格式。这样, 每增加一次 $\Delta \tau$ 它的计算工作量与上述单一方向使用隐式格式是相同的, 这种格式的具体形式为:

$$\begin{aligned} \frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} &= -\frac{C_p \rho}{\lambda} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} \\ \frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+2} - 2T_{i,j}^{k+2} + T_{i,j-1}^{k+2}}{(\Delta y)^2} &= -\frac{C_p \rho}{\lambda} \frac{T_{i,j}^{k+2} - T_{i,j}^{k+1}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4-26)$$

应用这种格式的稳定性是绝对的。

4.1.3 钢板空冷数值分析

钢板空冷时的换热情况是, 钢板内部是热传导过程, 边界是辐射过程。建立空冷差分模型与水冷方式完全相同, 只是边界条件发生了变化。因此, 钢板的热平衡方程可以这样建立:

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

边界条件:

$$T(x, y, 0) = \Phi(T), (t = 0, 0 \leq x \leq h/2, 0 \leq y \leq B/2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, (x = h/2, t \geq 0)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q, (y = B/2, t \geq 0)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0, (t \geq 0, x = 0, y = 0)$$

其中边界热流密度即为式 (4-20), $q = \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_\infty}{100} \right)^4 \right]$ 。

用隐式差分方法可以稳定的求出上述方程组的解。

4.2 控冷过程数学模型

4.2.1 水冷数学模型

水冷模型的建立有两种方式, 一是直接采用数值模拟方法, 二是建立水冷的解析模型。数值模拟就是通过模拟水冷过程的钢板温度场的变化情况, 给出达到冷却目标的控制量。常用的数值模拟有有限差分法和有限元法, 这两种方法都能比较精确的模拟钢板的温度变化情况。解析模型的建立是根据传热学的基本理论, 用数学公式给出不同时刻钢板的温度表达式。解析模型往往是一种经验的模型。

由式 3-16, $dQ = \alpha(T - T_\infty)F d\tau$ 可推导出下式:

$$\frac{1}{T - T_w} dT = \frac{-2\alpha}{C_p \rho h_F} dt \quad (4-27)$$

式中: α —热传递系数;

c_p —钢板比热, $\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$;

ρ —钢板密度, kg/m^3 ;

h_F —钢板厚度, m ;

以 T_s 表示钢板开冷温度, T_c 表示水冷后钢板的终冷温度, t 为冷却时间, 对上式进行积分并整理后得:

$$T_c = T_w + (T_s - T_w) \exp\left(\frac{-2\alpha t}{C_p \rho h_F}\right) \quad (4-28)$$

对于中厚板的冷却过程来说, 热传递系数 α 亦称换热系数, 它与冷却水温度、冷却水量、钢板温度、钢板运行速度、等一系列因素有关, 为了使理论计算能符合于生产实际, 必须对输出辊道上的冷却结果进行大量的统计, 以便确定 α 的变化规律, 有文献^[30]推荐热传递系数 α (w/m²k) 在各温度区间的回归公式:

$$T_0 = 50^\circ\text{C}, 280 < w < 12600 \quad \text{l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$$

$$\alpha = 225.9 w^{0.646} \times 1.163$$

$$200 < T_0 < 500^\circ\text{C}, 5 < w < 2000 \quad \text{l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$$

$$\alpha = 494.3 w^{0.595} \times 10^{-0.00179 T_0} \times 1.163$$

$$500 < T_0, 100 < w < 2000 \quad \text{l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$$

$$\alpha = 107.2 w^{0.663} \times 10^{-0.00179 T_0} \times 1.163$$

式中: w —水流密度, $\text{l}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$;

T_0 —钢板温度;

日本住友金属和歌山厚板厂推荐用的热传递系数形式为:

$$\alpha = k_0 \times k_1 \times k \times b_0 \times Q^{b_1} \times \exp(-b_2 \times T) \quad (4-29)$$

式中: b_0, b_1, b_2 —模型回归系数;

k —自适应系数, k 取 1.0;

Q —水量密度, $\text{l}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$;

T —钢板表面温度;

k_0 —压力补偿系数;

k_1 —水温补偿系数;

水冷解析模型除了根据热平衡方程推导之外, 还可以根据现场实测数据回归出统计模型^[31]。

采用数值模拟方法和解析模型各有优缺点。数值模拟方式相对于解析模型,

具有更高的计算精度,特别是能计算出钢板内部的温度场。但是数值模拟方式计算次数多,占用很大的内存空间。解析模型比较简单,更有利于计算机控制。利用准确现场数据回归出解析模型的控制参数,解析模型也能达到理想的控制精度。现在国内外的大多数层冷控制模型多采用解析模型进行控制。随着计算机计算速度和存储空间的日益完善,数值模拟方式也得到了推广和应用。

4.2.2 空冷数学模型

中厚板在控制冷却过程中的空冷过程可以分为两个阶段。第一个阶段是轧机抛钢后从轧机出口到控冷设备入口段。由于从轧机出来的钢板温度比较均匀,此一阶段钢板上下表面接近对称冷却。第二个阶段是从水冷结束到矫直机前。钢板水冷后一般温度场不是太均匀,此阶段是不对称冷却。

控冷数学模型的建立和水冷一样也有两种方法,数值模拟方法和解析方法。数值模拟方法一般采用差分法和有限元法。解析模型一般是根据式 3-19 推导出来的,或者才用统计模型。

根据式 3-19,可以推导出如下空冷模型:

$$T_a = \left[(T_h + 273)^{-3} + \frac{At}{h_F} \right]^{-1/3} - 273 \quad (4-30)$$

$$A = 6\varepsilon\sigma 100^{-4} / (C_p \rho) \quad (4-31)$$

式中: A —模型参数。

ε —轧件的热辐射系数(或称为黑度), $\varepsilon < 1$, 对于热轧轧件而言,要视其表面上氧化铁皮的程度不同而取值也不同,当表面氧化铁皮较多时一般取为 0.8, 而刚轧出的平滑表面一般取为 0.55~0.65。

h_F —钢板厚度, m ;

σ —斯蒂芬——波茨曼常数, $\sigma = 4.88$ 千卡/(米²时 K⁴);

c_p —钢板比热, $kcal/kg \cdot ^\circ C$;

ρ —钢板密度, kg/m^3 ;

T_a —经空冷后的钢板温度, $^\circ C$;

t — 空冷时间, s ;

T_h — 钢板空冷前的温度, $^{\circ}\text{C}$;

4.2 控冷系统模型结构

准确的数学模型是实现自动化轧制、提高控制精度和生产效率的必要条件。控制冷却的数学模型是对钢板冷却过程的数学表述,描述了控冷系统的各种控制参数对轧件温降和降温速度的影响。计算机通过优化控制参数,达到控制钢板冷却历程的目的。

首钢中厚板厂的控冷数学模型根据触发计算的先后顺序可以分为:预设定计算模型、一次修正设定计算模型、二次修正设定计算模型、空冷自学习模型、水冷自学习模型、上下水量比自学习模型、边部遮蔽自学习和返红自学习模型。图 3.1 是控冷模型关联图。

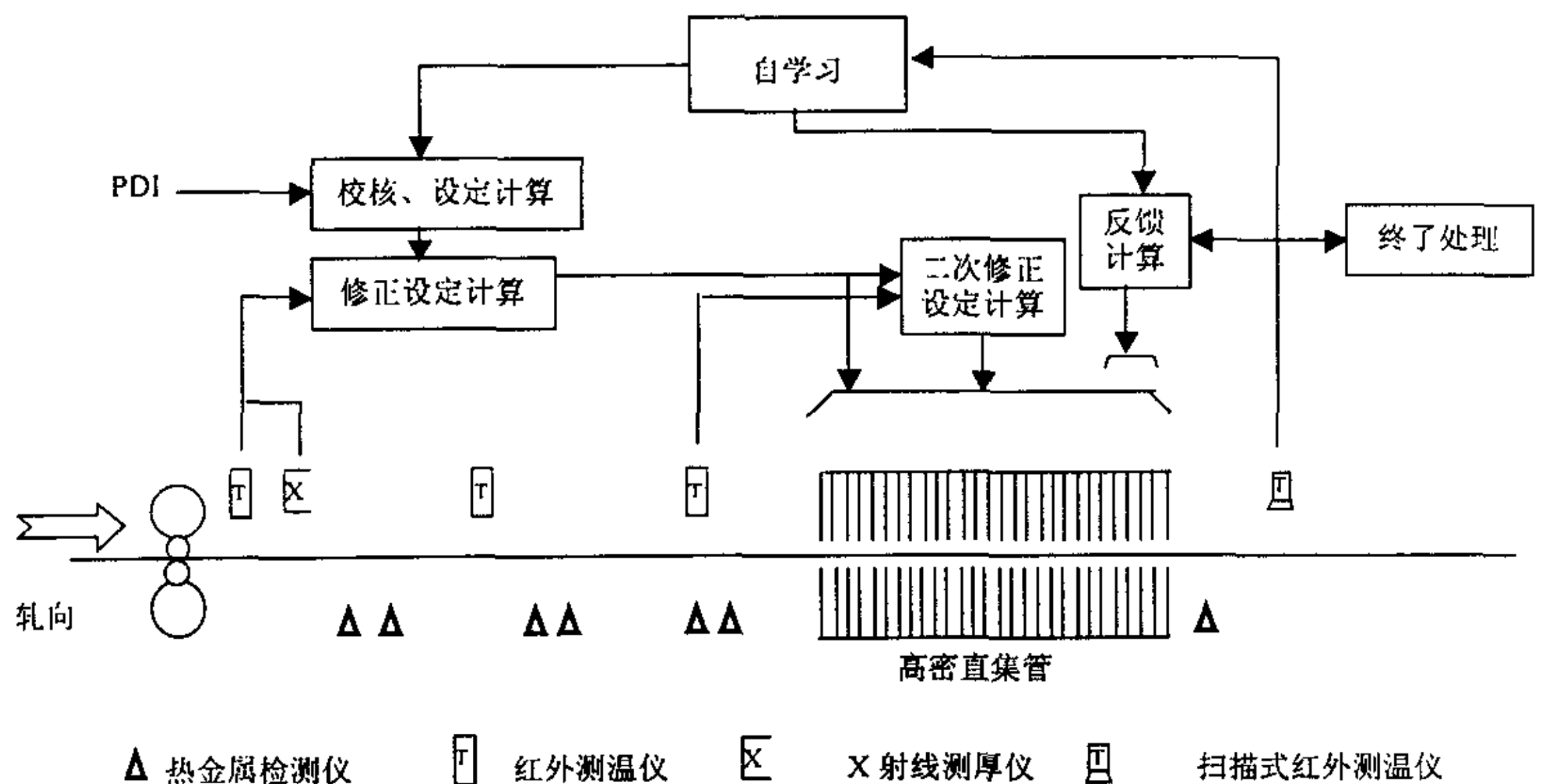


图 4.2 控冷模型关联图

Fig.4.2 Relative map of controlled cooling model

4.2.1 预设定计算

轧件即将出炉时,轧机过程机向控冷过程机传送控冷 PDI 数据。控冷过程机接收到轧机过程机传来 PDI 数据后,触发预设定计算。

轧机过程机传来 PDI 数据校核(含碳量、终轧温度、终冷温度、冷却速率、

钢板几何尺寸等)正确之后,控冷过程机根据 PDI 数据确定控冷模式(空冷或水冷),同时输出集管数目、集管排布形式、水流量、上下水量比、通板速度、遮蔽量以及可能存在的报警信号(如冷却不足)等。

PDI 数据首先在控轧过程机进行合理性判断。判断合理之后,由控轧过程机将 PDI 数据传给控冷过程机,控冷跟踪系统将 PDI 数据及在线实测的水温、水位及设备健康状态、模型计算用的黑度系数、换热系数的学习系数等传给控冷模型。图 3.2 是预计算流程图。

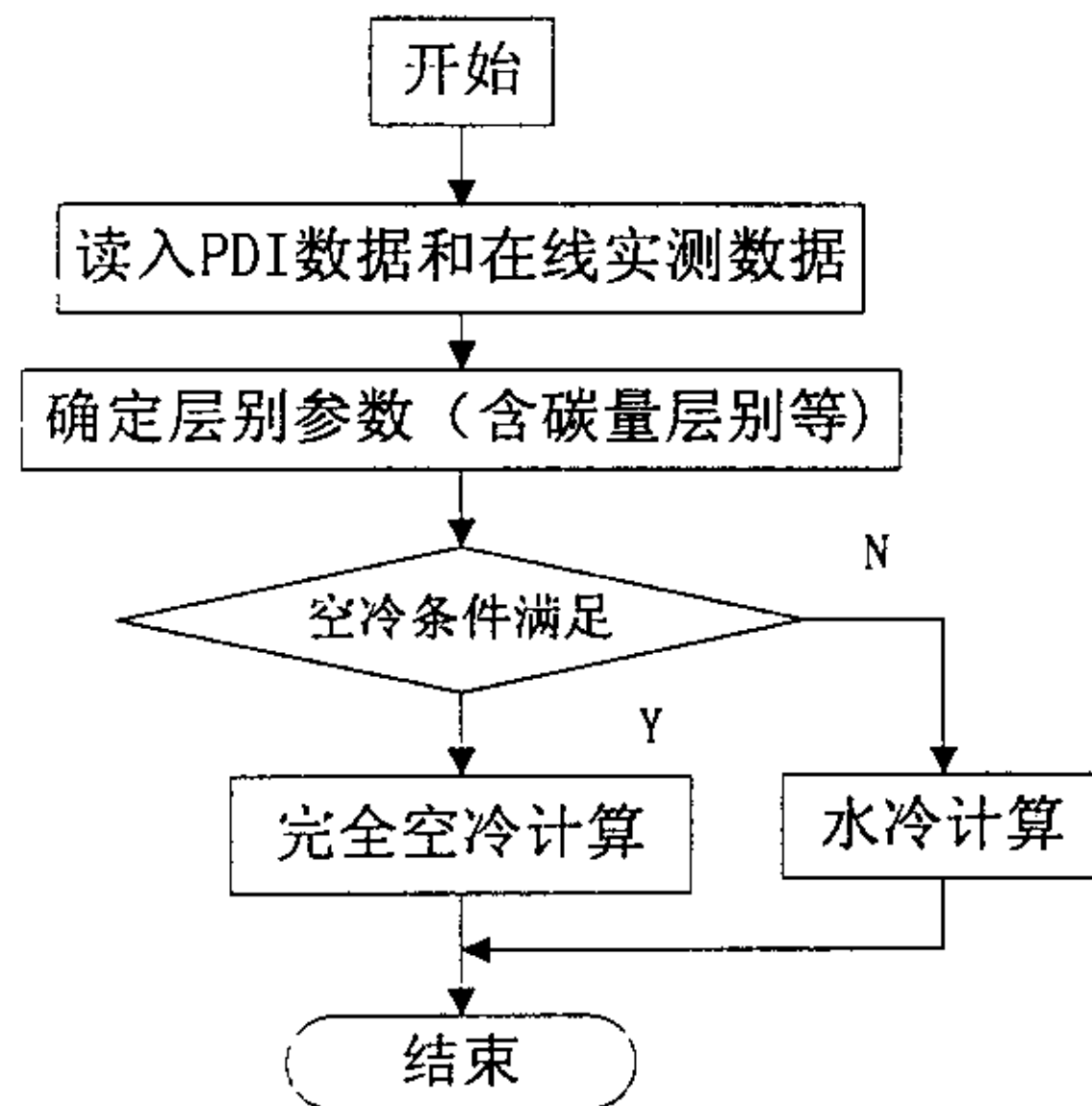


图 4.3 预设计算流程图

Fig. 4.3 Flow chart of preset calculation

4.2.1.1 冷却方式判断

从三个方面进行冷却方式选择,从条件(1)不能判断为空冷时,则执行条件(2),否则不执行条件(2)。

(1) 根据 PDI 数据进行判断

当满足下列条件时,进行空冷。

- 当钢板的厚度小于 10mm 时,只进行空冷计算。
- 当冷却速率小于 $4^{\circ}\text{C}/\text{s}$,且钢板厚度小于 20mm 时,只进行空冷计算。

空冷时不保证终冷目标温度,以尽可能快的速度($V_{\max}-0.4$)通过冷却区。(待定)

(2) 根据极限水冷结果进行判断

极限水冷是指只开一组集管、水量最小、速度最快。极限水冷后，若钢板终冷温度仍低于目标终冷温度时，采用空冷方式；否则采用水冷方式。如果是水冷计算，校核是否满足冷却要求。

图 3.3 是冷却方式判断流程图。

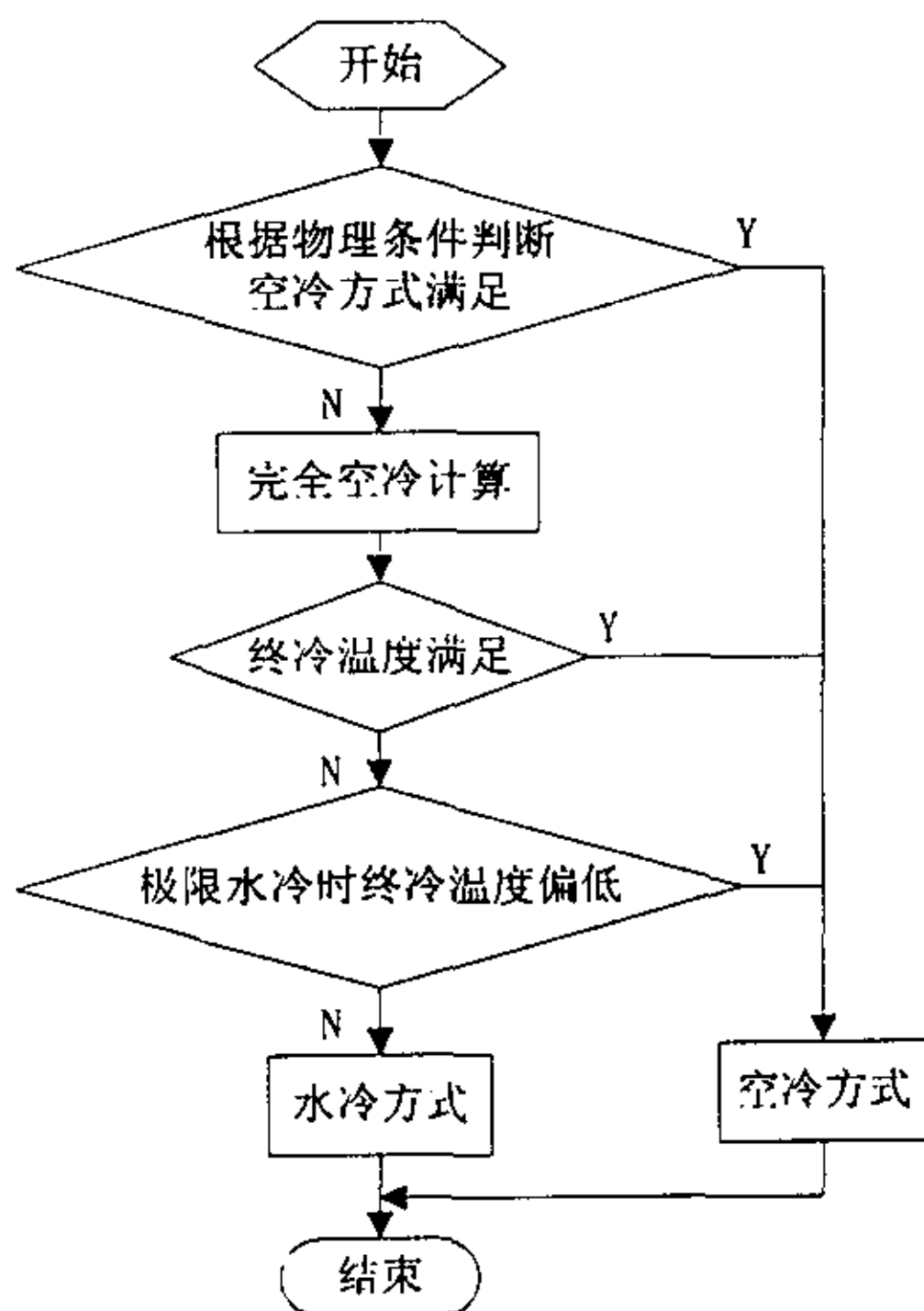


图 4.4 冷却方式判断流程图

Fig. 4.4 Flow chart of cooling mode choice

4.2.1.2 完全空冷计算

根据测温仪在冷却区中的分布，分别计算钢板在轧机到冷却区前的空冷、冷却区前到冷却区后测温仪的空冷、冷却区后测温仪到返红测温仪的空冷三部分。

在空冷方式下，使钢板以尽快的速度通过冷却区，这时给定钢板一个较大的通板速度，并根据此通板速度计算钢板在各个测温仪下的温度。完全空冷方式下，不保证钢板的终冷温度目标。

图 3.4 是完全空冷计算流程图。

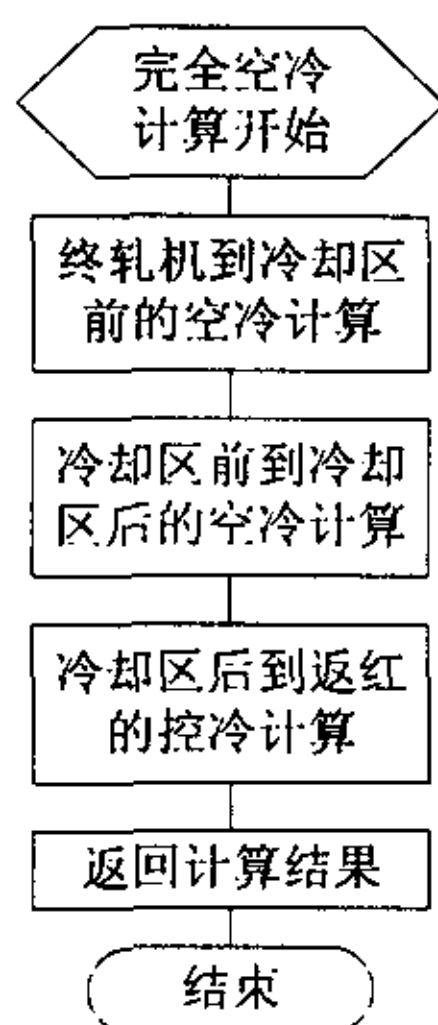


图 4.5 完全空冷计算流程图

Fig. 4.5 Flow chart of completely air cooling

4.2.1.3 水冷方式计算

在确定采用水冷方式的条件下, 计算要实现终冷目标所需的集管排布、水量分布及速度、遮蔽量等控制参数, 并分别计算钢板在经过空冷、水冷、空冷过程中的温度变化。

首先计算钢板从轧机到控冷区前测温仪处的空冷温降, 然后分别计算以最大和最小水流密度冷却钢板后的温度, 当目标终冷温度在其间时, 进行水流密度当迭代计算, 找到最合适的水流密度; 若以最大水流密度进行冷却仍不能满足目标终冷温度时, 则在给出报警信号的同时, 通过降低速度来满足终冷温度, 当达到最小速度时, 给出报警信号, 并以最大水流密度和最小速度通过; 若以最小水流密度冷却仍过冷时, 则在报警的同时, 给定一个较大的通板速度进行水冷计算, 仍过冷, 则逐根减少集管数目直到终冷温度满足要求。

图 4.6 是水冷计算主流程图。

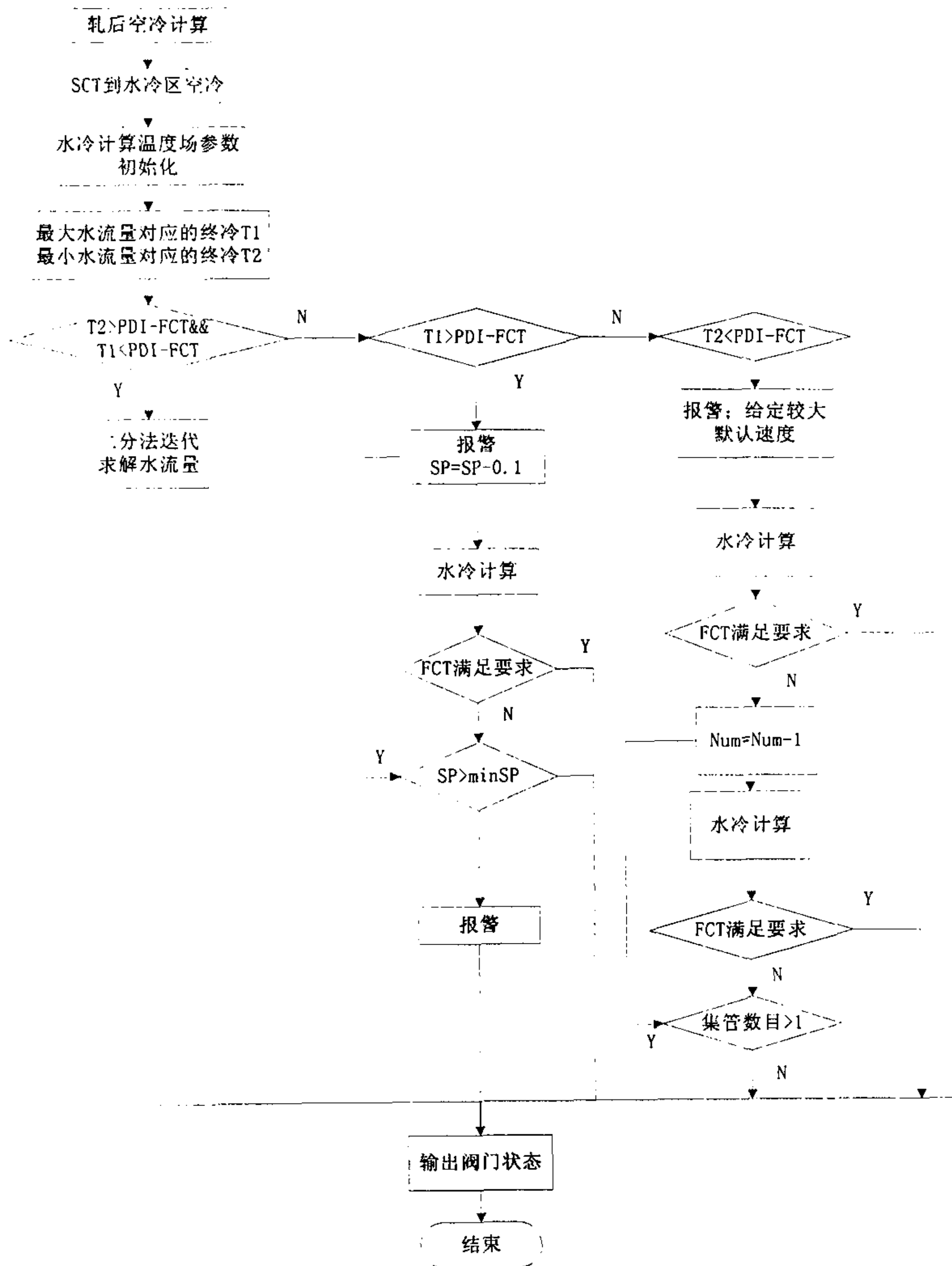


图 4.6 水冷方式计算流程图

Fig.4.6 Flow chart of water cooling

4.2.2 一次修正设定计算

最后一个道次轧制后, 钢板尾部离开轧机后测温仪 T4, 触发一次修正计算。当轧机后传来的钢板实测厚度、速度、表面温度以及设备状态参数等信息,

根据终冷温度计算值和实测值之间的偏差以及厚度、速度的实测值和预测值之间的偏差对预设计算结果进行修正计算或重新进行冷却计算。

图 3.6 是一次修正设定计算处理流程图。

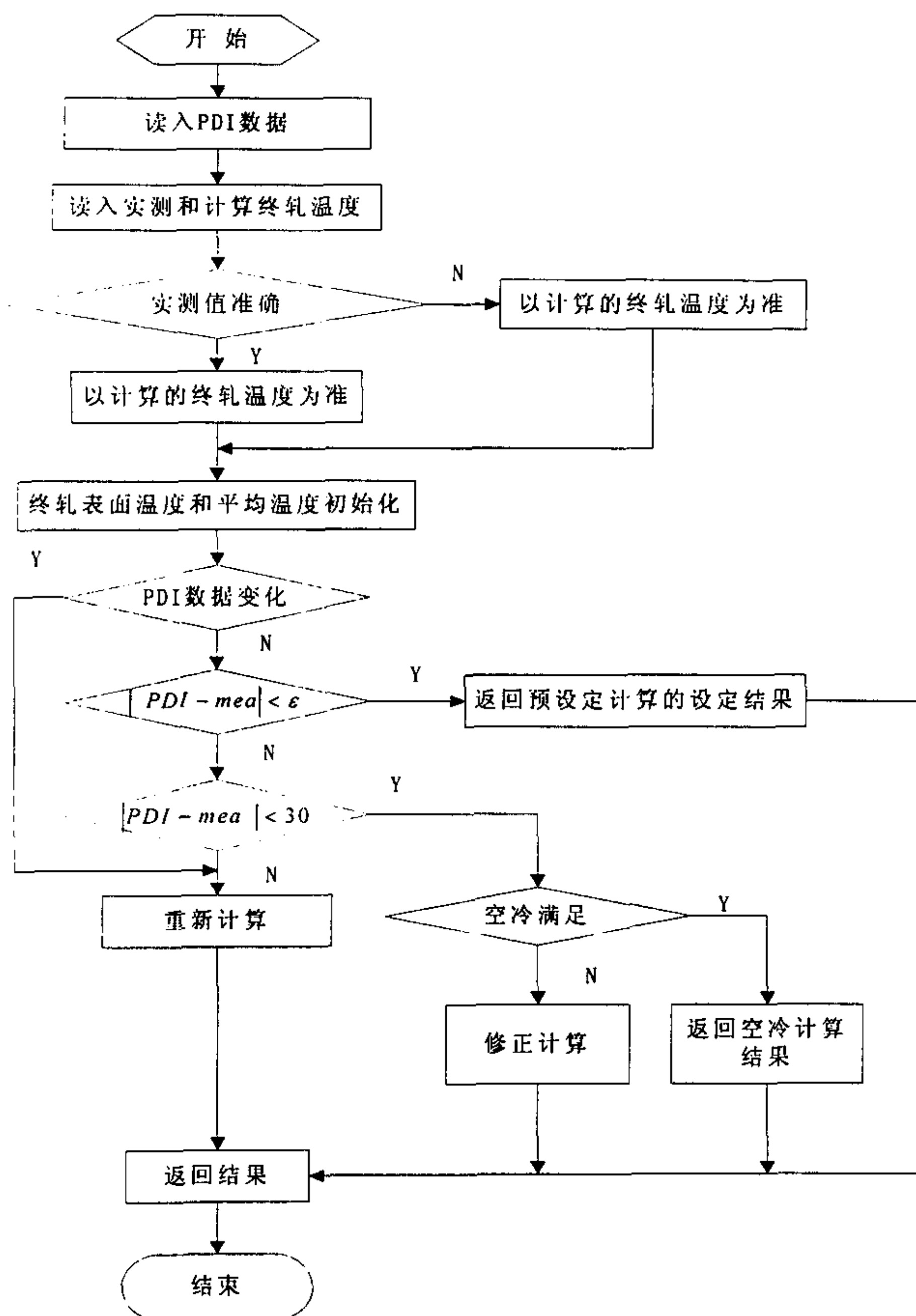


图 4.7 一次修正设定计算流程图

Fig. 4.7 Flow chart of first modify caculation

计算步骤说明:

(1) 实测终轧温度合理性判断 实测终轧温度与计算的终轧温度偏差在

50℃以内时，以实测值为准；否则以计算值为准。

(2) 终轧表面温度和平均温度初始化 当实测终轧温度准确时，将实测的终轧温度赋给程序中的终轧温度表面值，按照计算的厚度上的温度梯度来给定差分计算时厚度上的温度初始值。当实测终轧温度不准时，按照计算值（轧机过程机计算值）给定厚度上的温度初始值。

(3) 修正计算或重新计算判断 首先判断 PDI 数据在轧机前有没有改变，若有改变，则根据新的 PDI 数据进行重新计算；否则判断 PDI 设定的终轧温度与作为计算标准的终轧温度的偏差是否小于一个规定值 A，若小于该规定值，则忽略偏差，直接返回校核计算结果；若偏差小于规定值 B 大于规定值 A，则判断是否满足空冷条件，若满足，执行空冷计算；否则执行修正计算，对后部集管个数和水量进行微调；若偏差大于规定值 B，则进行重新计算。

4.2.2.1 修正计算

当作为计算标准的终轧温度与 PDI 给定的终轧温度偏差小于一定值时，从冷却区后部增加或减少集管数目以及对后部若干根集管的水量进行微调，从而确保目标终冷温度。

根据实测终轧温度和计算值之间的偏差大小，分为以下两种情况进行计算：

(1) 当终轧温度差值绝对值小于 10℃时，对后面的 n 根集管水量进行微调。调整顺序是从后到前，直到终冷温度计算值和目标值的偏差小于 7℃。(n 初定为 4) 当调整 n 根集管后仍不满足终冷要求，则退出。

(2) 当终轧温度差值绝对值不小于 10℃时，按照从后到前的顺序增加（或减少）预设定的集管数目，直到集管全部打开（或全部关闭）或计算的终冷温度和目标终冷温度差值小于一定值（初定 5℃）；当终冷温度计算值和目标值的偏差小于 10℃时，则进行水量的调整。

图 4.8 是修正计算主流程图。

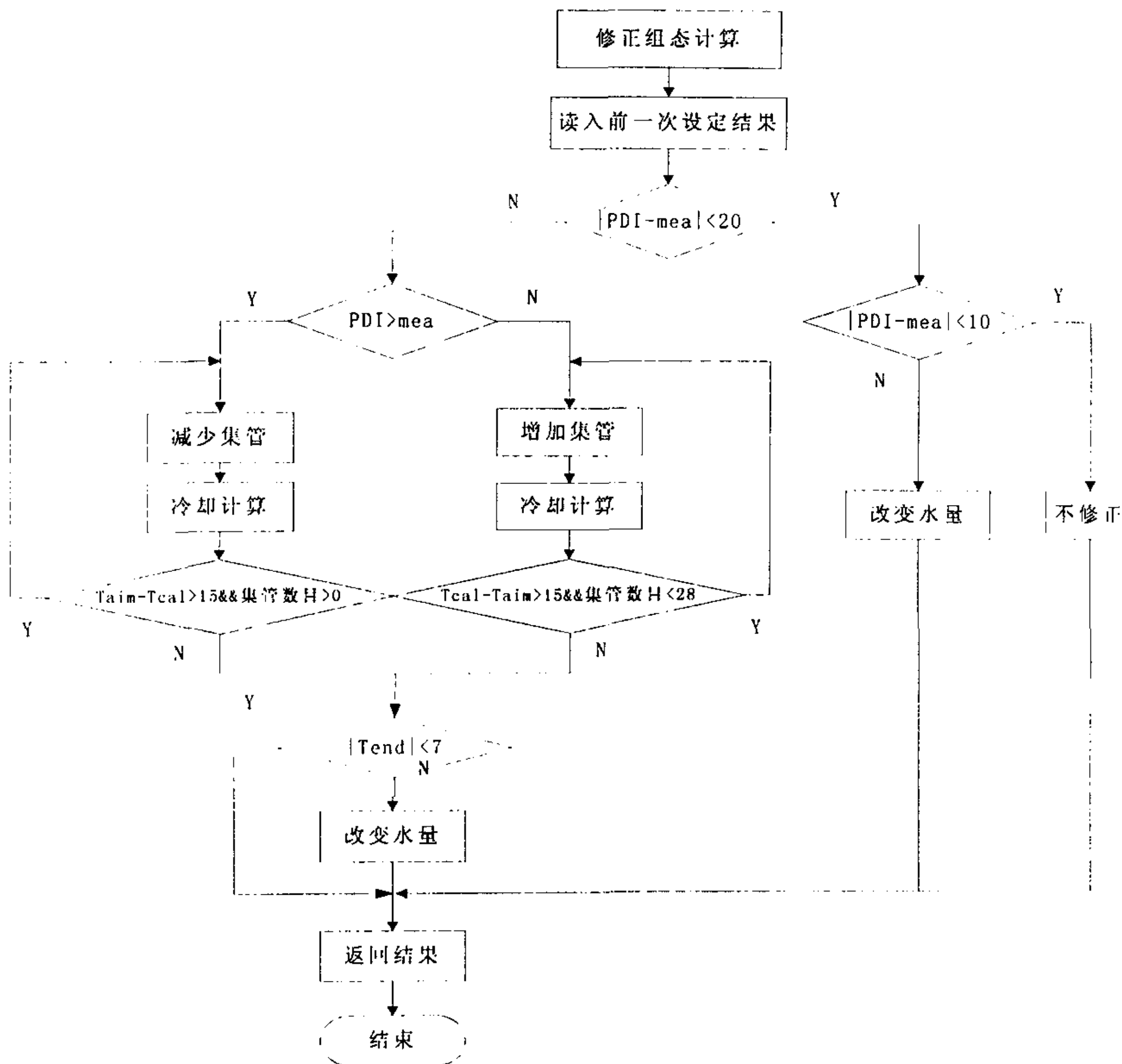


图 4.8 修正计算主流程图

Fig. 4.8 Main flow chart of modify calculation

4.2.2.2 重新计算

在轧机后作为计算标准的终轧温度与 PDI 给定的终轧温度偏差大于一定值时，根据 PDI 参数和计算标准的终轧温度，对集管组态、水量、通板速度等控制参数重新进行计算。

4.2.3 二次修正设定计算

钢板定长通过水冷区前的测温仪时，触发二次修正设定计算。

钢板定长通过水冷区前的测温仪时，根据实测开冷温度和计算的开冷温度差值，进行修正设定计算，对集管的数目和水量进行微调。

若在终轧测温仪处已确定为空冷方式，则不调用该程序。

图 3.8 是二次修正设定计算处理流程图。

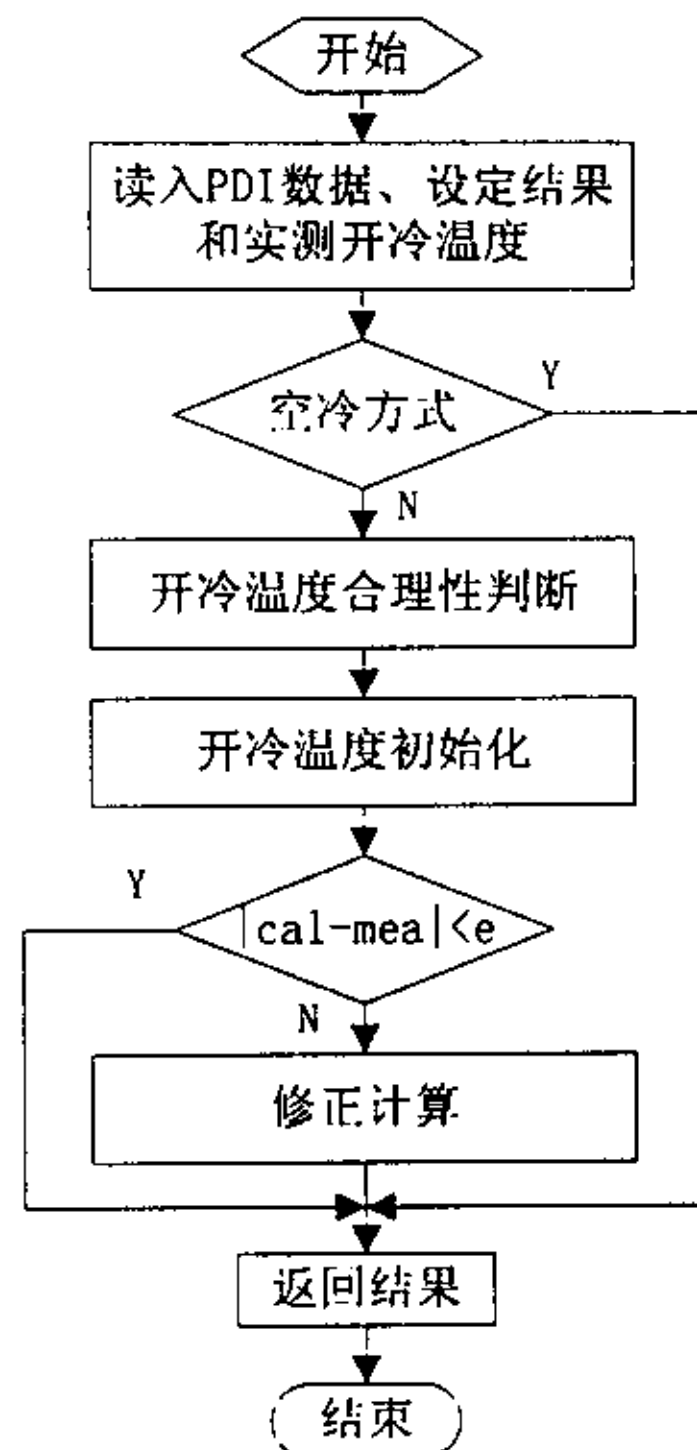


图 4.9 二次修正设定计算主流程图

Fig. 4.9 Main flow chart of the second modify calculation

4.2.3.1 修正设定计算

空冷条件下，不进行二次修正设定计算，直接返回轧机后修正设定结果；若是水冷方式且开冷温度偏差较小，则不进行修正计算，执行轧机后修正设定计算的结果；若是水冷方式，且开冷温度偏差大于一定值，则对后部集管的水量进行修正计算。修正计算框图参见图 4.10。

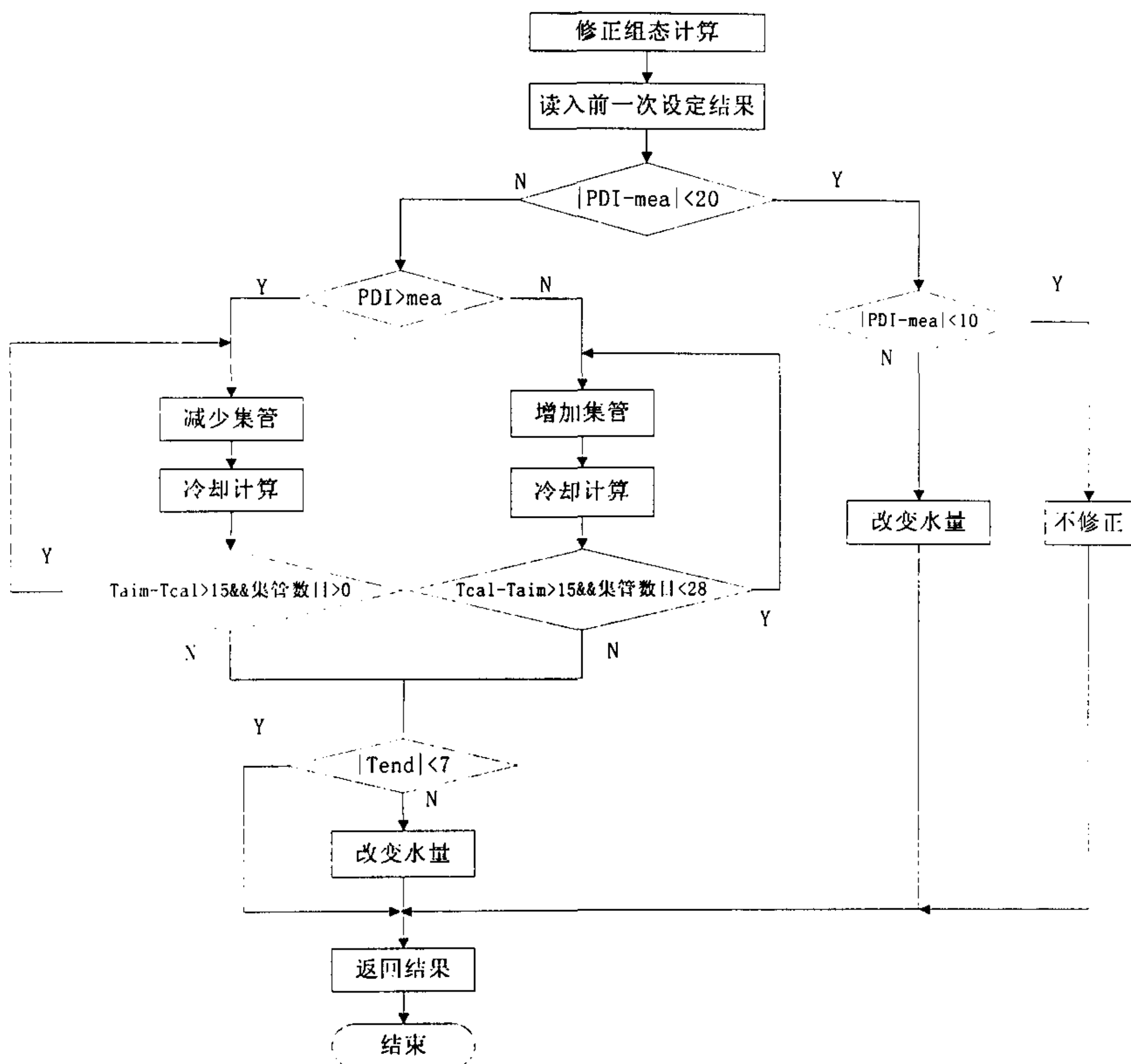


图 4.10 修正计算流程图

Fig.4.10 Flow chart of modify calculation

该框图与轧机后修正设定计算中的修正计算框图类似，不同的是，前者的冷却计算是从控冷区开始，而后者的冷却计算是从轧机后开始。编程时应加以区别对待。

4.4 本章小结

- (1) 本章对控冷系统的模型结构作了详细的介绍，包括预设计算、一次修正设定计算和二次修正设定计算。并给出了模型结构框图和流程处理图。
- (2) 介绍了传热学的基本原理，建立了传热过程的差分方程。对控冷数学模型

进行了简要的介绍。

5 控冷过程自学习

5.1 自学习原理

根据系统状态的变化,不断利用即时信息进行模型参数的修正,以保证模型的精度,称为模型的自学习。

实际应用中所建立的模型,其控制精度是有限的。影响模型精度的主要因素有:

(1) 量测误差 为了进行设定计算需要测取钢板有关参数的实际值,如控冷轧线的测温仪读数等。由于检测仪表都存在一定的误差,因此设定模型中的“已知”参数也存在误差,这将影响预报精度。

(2) 系统特性的变化 模型的建立,特别是模型参数的定量化,需要通过大量实测数据的统计处理才能实现,数据少了不能保证精度(测量值存在误差),数据多了又会产生新的问题,即如何保证大量数据的“环境相同”。

由于本系统中使用的控制模型都是一些简化的理论模型或经验模型,因而在实际使用中很难精确地描述钢板冷却过程。设定模型的计算偏差主要来自于温度的预报偏差、模型系数的精度及模型本身结构的偏差。通过自学习的方法,可以使控制模型的设定值计算精度满足过程控制的要求。模型参数自学习分为短期自学习和长期自学习。短期自学习用于轧件到轧件的参数修正,学习后的参数值自动替代原先的参数值,用于下一块同种轧件,主要是与轧件有关的模型参数自学习。长期自学习用于大量同种轧件长期参数修正,学习后的参数值可以选择性地替代原先的参数值,主要是与层流冷却有关的模型参数自学习。加入自学习功能使得模型参数有了自我调整的能力,提高了模型的控制精度。

首钢自学习主要模块包括前段空冷自学习、水冷自学习、后段空冷(返红)自学习、上下水量比自学习和边部遮蔽自学习。其中空冷自学习和水冷自学习主要是根据钢板实际温降量与计算温降量的偏差,对换热系数进行修正。上下水量比的自学习主要是为了保证钢板上下冷却的均匀性,其方法是根据钢板上下表面的温差,对上下水量比进行修正。边部遮蔽自学习是根据钢板横向的温度梯度,对水冷时边部遮蔽量进行自学习修正。为了保证钢板在长度方向上温度均匀性,

将钢板从头到尾分为三个区域，分别对每个区域进行自学习。

5.1.1 短期自学习

短期自学习主要以指数平滑法取最近冷却的十块钢板进行参数修正，主要过程如下：

- 实测数据正确性检查
- 选择自学习系数和进行极限检查
- 按下式进行参数自学习计算：

$$KI(n+1)=a[10]*KI(n)+a[9]*KI(n-1)+\dots+a[2]*KI(n-8)+a[1]*KI(n-9) \quad (5-1)$$

上式中， $KI(n+1)$ ：第 $n+1$ 次参数的自学习值；

$KI(n)$ ：第 n 次参数的自学习值；

$a[i]$ ：第 i 次自学习系数的权重；

模型参数自学习的具体步骤如下：

- 实测值的可靠性检验。即对自学习所要求的实测值做上下限及一致性检验，以确保实测值可靠可用。
- 实测值处理。即用一些关系式，以实测值为基础来计算出一些可用的间接实测值。
- 选择自学习的增益。要保证自学习参数的稳定性及其收敛速度，对不同的自学习参数及不同的轧制及冷却条件，选择相适应的增益。
- 参数自学习。

5.1.2 长期自学习

长期自学习仍采用在线方式，使用传统的自学习方法。

$$PN=P0+G*(PM-P0) \quad (5-2)$$

式中， PN ：新参数； $P0$ ：旧参数； PM ：实测参数； G ：自学习增益。

5.2 空冷自学习

钢板尾部离开 $T6$ 测温仪时，由跟踪逻辑触发模型管理器，模型管理器调用前段空冷自学习主模块。

前段空冷自学习的基本原理是：根据当前钢板开冷温度的实测值和计算值的偏差，对模型中的热流密度进行修正。学习原理如下：

$$PH^* = PH \times \frac{\Delta T_{mea}}{\Delta T_{cal}} \quad (5-3)$$

$$\text{其中: } \Delta T_{\text{mea}} = \text{FRT}_{\text{mea}}^{-3} - \text{SCT}_{\text{mea}}^{-3}$$

$$\Delta T_{\text{cal}} = \text{FRT}_{\text{cal}}^{-3} - \text{SCT}_{\text{cal}}^{-3}$$

其理论依据是钢板温降与热流密度成正比,热流密度又与热流密度系数成正比,因此钢板温降与热流密度修正系数成正比。

取最近十块钢的自学习系数,并根据它们冷却的时间先后顺序对自学习系数取权重。将这十块钢取权后的平均值作为当前钢板的短期自学习系数自学习系数。将上一块钢的长期自学习系数和本块钢实测瞬时学习系数进行指数平滑处理,所得值作为本块钢的长期自学习系数。

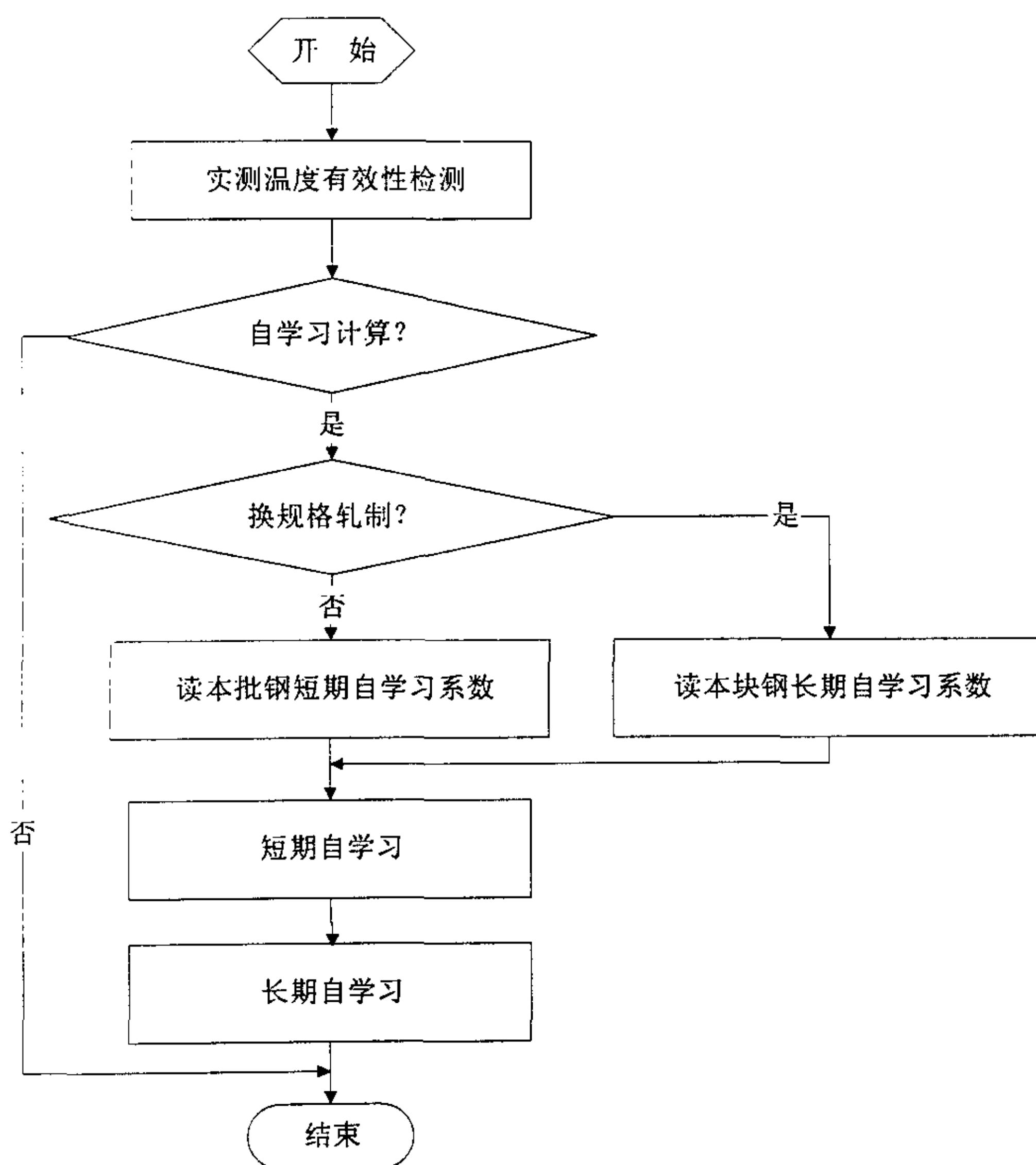


图 5.1 空冷自学习流程图

Fig. 5.1 Flow chart of air cooling adaptation

计算说明:

将带钢分为头、中、尾三段分别进行学习。学习时取最近的十块钢学习系数,如果换规格轧制后不足十块钢,则取自换规格轧制后到现在的几块钢的学习系数。通过加权得到的平均值,作为当前钢板的短期自学习系数。通过将上一块钢的长期自学习系数和本块钢的瞬时学习值作指数平滑处理得到本块钢的长期自学习系数,并确定是否对长期自学习表是否进行更新。

实测温度有效性检测 钢板学习部位的实测温度如果有超过一半的测量值出现测量错误,则该部位不进行自学习。测量值出现错误是指仪器所测数值与模型计算的值相差 50°C 以上。

5.2.1 空冷短期自学习

通过对最近十块钢的自学习系数进行加权平均处理,得到本块钢的短期自学习系数,并确定是否刷新短期自学习表。

图 5.2 是空冷短期自学习处理流程图。

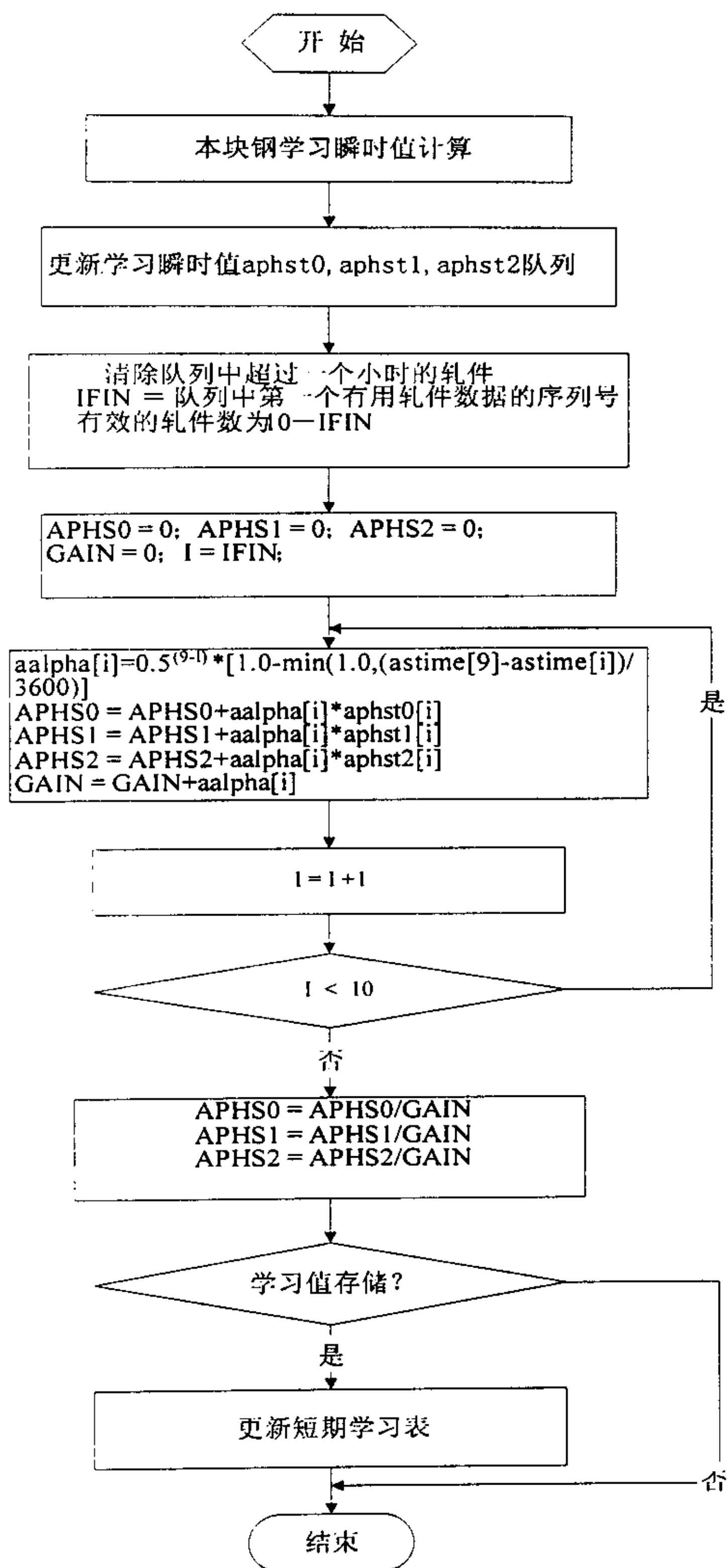


图 5.2 空冷短期自学习流程图

Fig.5.2 Flow chart of air cooling short term adaptation

计算说明:

1) 学习瞬时值计算 钢板所在学习部位(头部、中部或者尾部)的学习瞬

时值的计算方法如下：（以头部为例）

$$FRT_{\text{mea}}^{-3} = (T4[0]^{-3} + T4[1]^{-3} + T4[2]^{-3} + \dots + T4[n-2]^{-3} + T4[n-1]^{-3}) / n$$

$$SCT_{\text{mea}}^{-3} = (T6[0]^{-3} + T6[1]^{-3} + T6[2]^{-3} + \dots + T6[n-2]^{-3} + T6[n-1]^{-3}) / n$$

$$\Delta T_{\text{mea}} = FRT_{\text{mea}}^{-3} - SCT_{\text{mea}}^{-3}$$

$$\Delta T_{\text{cal}} = FRT_{\text{cal}}^{-3} - SCT_{\text{cal}}^{-3}$$

$$APHST0 = \Delta T_{\text{mea}} / \Delta T_{\text{cal}} \quad (5-4)$$

2) 自学习算法 算法考虑的是最后十块冷却的轧件。将轧件分为三个部分头部、中部、尾部，分别为这三个部分建立十个元素的队列，三个部分对应的实测系数分别为 APHST0、APHST1、APHST2。当一个新的轧件通过温度计 T6 时，将测到的三个部分的系数存放到所在队列的第十个位置。当队列的元素个数（轧件块数）小于十个时，往队列里面填充元素。当队列被填满时，最先进入的轧件被清除掉。

在本算法中：

最后进入队列的元素（轧件）序列号为 10，最先进入的元素（轧件）序列号为 1。

- ① 算法对队列中的数据进行过滤，取过滤后的数据进行自适应计算。
- ② 根据轧件在队列中的时间分配权重，权重按时间下降。
- ③ 超过一个小时的轧件数据不用，其权重取为零。
- ④ 自适应系数等于队列中按时间取权重的平均值。

5.2.2 空冷长期自学习

通过对上一块钢板的长期自学习系数和本块钢板的短期自学习系数作指数平滑处理，得到本块钢板的长期自学习系数。

图 4.3 是空冷长期自学习流程处理图。

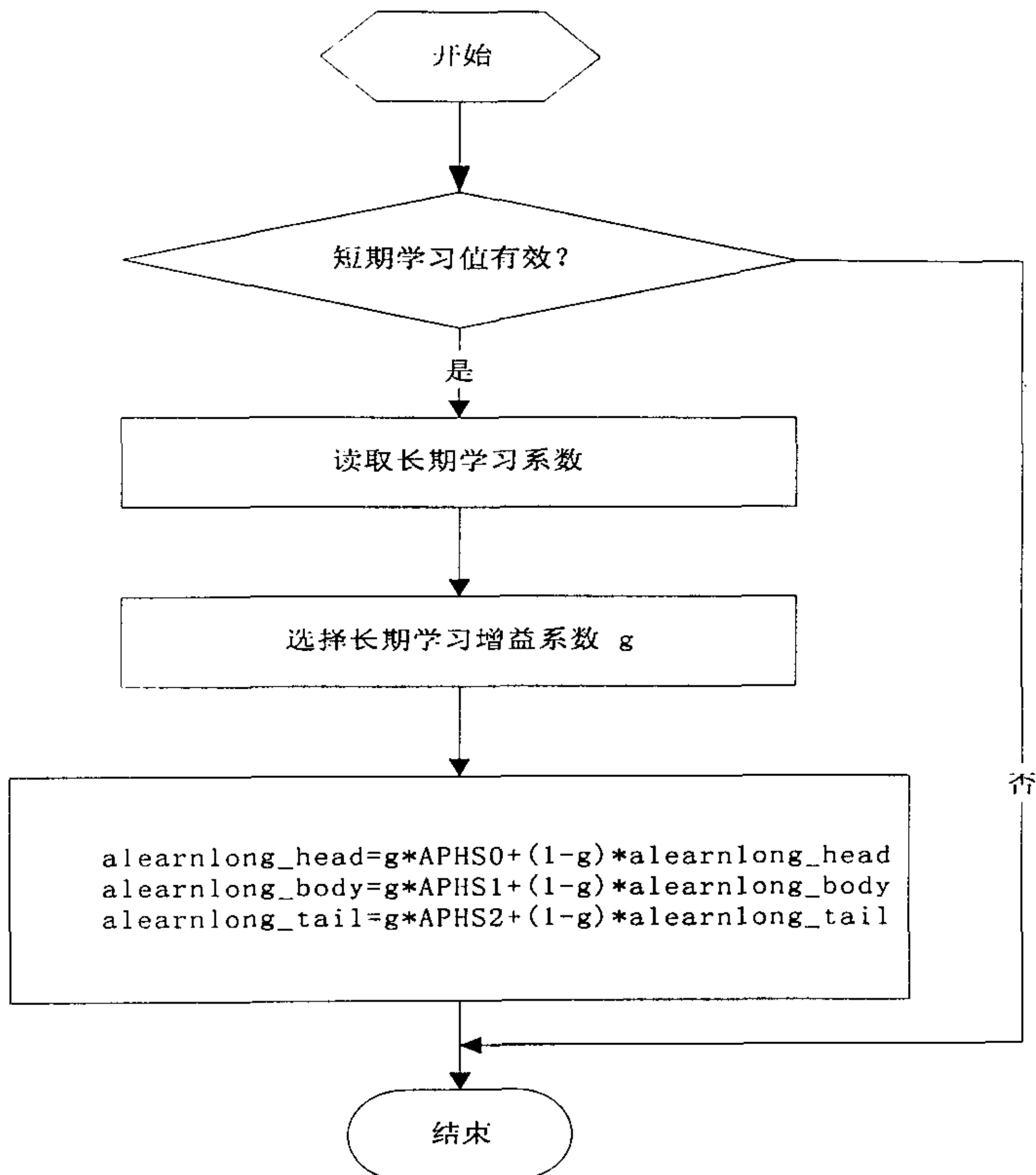


图 5.3 空冷长期自学习流程图

Fig. 5.2 Flow chart of air cooling long term adaptation

计算说明:

- 1) 如果短期自学习值无效, 即短期自学习表不刷新, 则长期自学习就没有必要进行。
- 2) 增益系数的选择原则必须是能反映长期学习系数缓慢变化的趋势, 长期学习系数接近于短期自学习系数。
- 3) 本块钢的长期自学习系数等于上一块钢的长期自学习系数和本块钢的短期自学习系数作指数平滑处理。

5.3 水冷自学习

在层流冷却过程中, 对流换热系数 (简称换热系数) 是表示介质冷却能力的重要参数, 是研究钢板水冷传热特性、计算温度场和确定集管开启状态的参数之一。它与介质自身条件、冷却方式和钢板表面状态等因素密切相关。确定换热系数无疑是一项非常重要的工作, 它对层冷系统的控制精度有很大的影响。但是准确给出换热系数的数学表达式是不可能的, 实际应用过程中是对一些经验模型进行回归处理, 得到相对准确的换热系数表达式。换热系数经验模型的回归处理是离线进行的, 很难反映系统的实际情况。因而对换热系数进行自学习修正, 可以帮助模型提高控制精度。

设 PH 为换热系数的修正系数, 即:

$$hw^* = PH * hw \quad (5-5)$$

式中: hw^* 为实际的换热系数;

PH 为换热系数的修正系数;

hw 为计算的换热系数。

由传热学理论可知: 钢板温降与换热系数成正比, 换热系数又与换热系数的修正系数成正比, 因此钢板温降与热流换热系数的修正系数成正比。即有:

$$\Delta T \propto PH \quad (5-6)$$

由式 (4-6) 可以推导出:

$$PH^* = PH \times \frac{\Delta T_{mea}}{\Delta T_{cal}} \quad (5-7)$$

其中: $\Delta T_{mea} = T7_{mea} - SCT_{mea}$

$\Delta T_{cal} = T7_{cal} - SCT_{cal}$

式中: ΔT_{mea} 是钢板经过水冷区后的测量温降值;

ΔT_{cal} 是钢板经过水冷区后的计算温降值;

PH^* 是本块钢的实际换热系数的修正系数;

PH 是本块钢的计算换热系数的修正系数;

为了准确描述钢板长度方向上的换热情况, 对钢板头、中、尾三个部分的换热系数的修正系数分别进行了自学习。自学习算法与空冷自学习算法相同。

5.4 上下水量比自学习

钢板在层流冷却过程中, 为了便于控制通常给定上下集管的水量比。为了保证钢板冷却后的上下表面温度均匀, 使钢板具有良好的板形和均匀的组织, 钢板的冷却时应该有适当上下水量比。由于系统特性的变化, 在实际冷却中上下水量比也有一定的波动。为了使钢板上下表面的温度一致, 有必要对每块钢板的上下水量比进行自适应。学习原理如下:

$$\begin{aligned} WRATIO^* &= WRATIO * (1 + K * \frac{T8_{mea}}{T7_{mea}}) \\ &= WRATIO * RATST \end{aligned} \quad (5-8)$$

其中: $T8_{mea}$ 为钢板下表面的温度;

$T7_{mea}$ 为钢板上表面的温度;

k 为放大系数;

$RATST$ 为钢板上下水量比的自学习系数;

自学习算法与水冷自学习算法相同。

5.5 返红自学习

钢板从水冷区出来后, 在进入矫直机之前有一段空冷返红过程。对返红过程的钢板黑度进行自学习修正, 有利于控制终冷温度。返红过程的自学习与前段空冷自学习相似。自学习原理和方法参见空冷自学习。

5.6 边部遮蔽自学习

冷却后钢板的横向温度分布精度取决于以下几个方面:

(1) 板从轧机出来时的温度分布;

(2) 冷却装置的冷却能力如果相同, 则边部由于更多的与水接触, 会产生更大的温降;

(3) 边部的下喷水回落到板面上;

对于不均匀温度分布包括冷边必须予以补偿。因此对钢板的横向温度的分布进行控制, 控制方法有:

1) 为了克服下喷水回落到板面, 采用左右两侧向外斜喷的方法。

2) 横向水量控制法: 有资料表明^[32], 边部水量为中部水量的 60%~65%时, 横向温度分布较均匀。

3) 层流水宽度控制法 (即边部遮蔽)。

边部遮蔽的目的是降低冷却区宽度, 以补偿由于边部温度较低造成的温度不均, 保证钢板均匀的终冷温度和平直度。为了提高边部遮蔽的控制精度, 对边部遮蔽量采用了自学习修正。

学习原理如下:

$$\begin{aligned} MASK^* &= MASK * (1 + K * \frac{TM9_{mea}}{TE9_{mea}}) \\ &= MASK * MKS \end{aligned} \quad (5-9)$$

其中: $TM9_{mea}$ 为钢板中部的温度;

$TE9_{mea}$ 为钢板边部的温度;

k 为放大系数;

MKS 为边部遮蔽自学习系数;

自学习算法与上下水量比自学习算法相似。

5.7 本章小结

- (1) 根据中厚板生产实际提出了短期自学习和长期自学习的基本原理。
- (2) 对空冷、水冷、上下水量比、返红和边部遮蔽的自学习过程进行了详细介绍, 并给出了短期自学习和长期自学习的算法和程序流程。

6 控冷系统应用及仿真分析

6.1 控冷系统的实际应用

6.1.1 现场反映

本文所述的控冷系统已经在首钢中厚板厂成功应用，收到了很好的效果，完全达到了中板厂要求的验收标准。控冷系统安全、稳定，操作起来非常方便，手动、半自动和自动方式运行都很正常。系统基本不需操作工维护，减少了人工干预。下图是控冷系统在现场的实际应用照片。

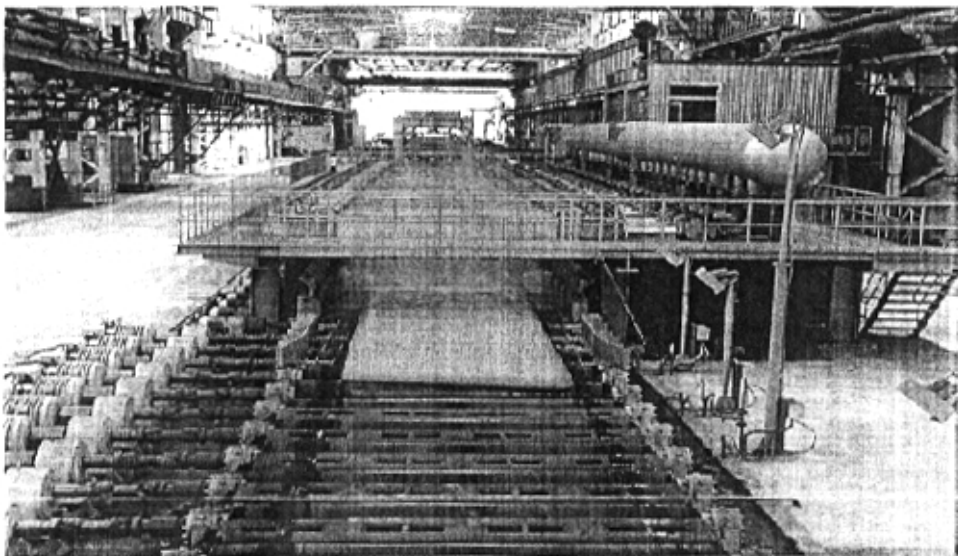


图 6.1 控制控冷系统在首钢中板厂的现场照片

Fig. 6.1 Picture of controlled cooling system in SHOUGANG Plate Mill on the spot

6.1.2 控冷系统人机界面

(1) 控冷操作主画面

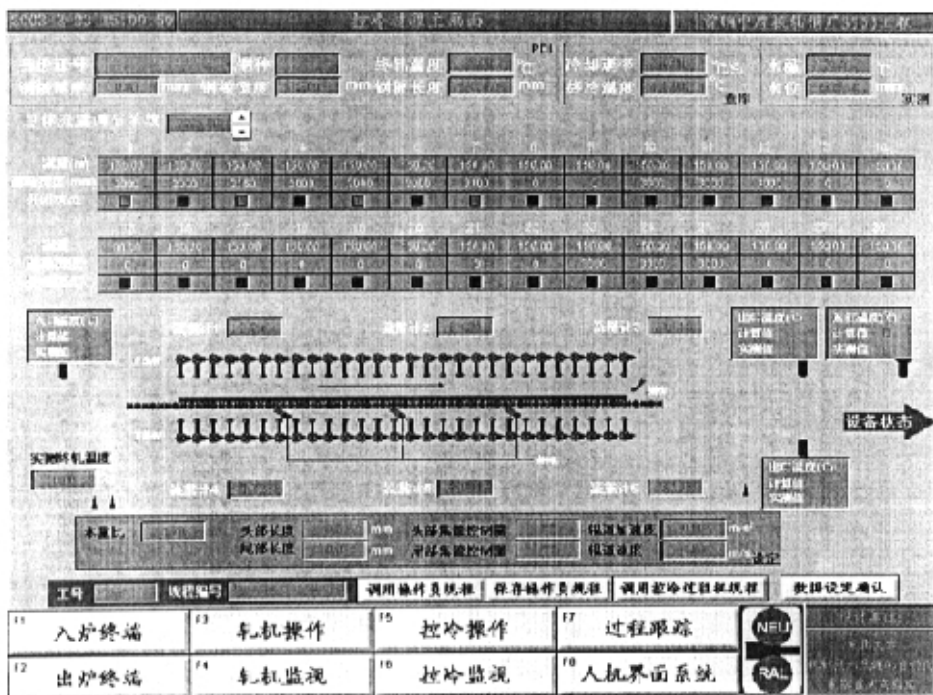


图 6.2 控冷操作主画面

Fig.6.2 Main HMI of cooling operation

在手动状态下，操作员可以根据工艺需要，人工设定开启的集管位置、集管水流量、上下水量比和钢板的通板速度。在半自动状态下，操作员可以调用操作员规程和计算机规程。在自动状态下，不需操作员进行人工干预，控冷系统启动自动跟踪，触发模型计算，控冷系统执行模型计算的控制参数。

(2) 控冷设备状态

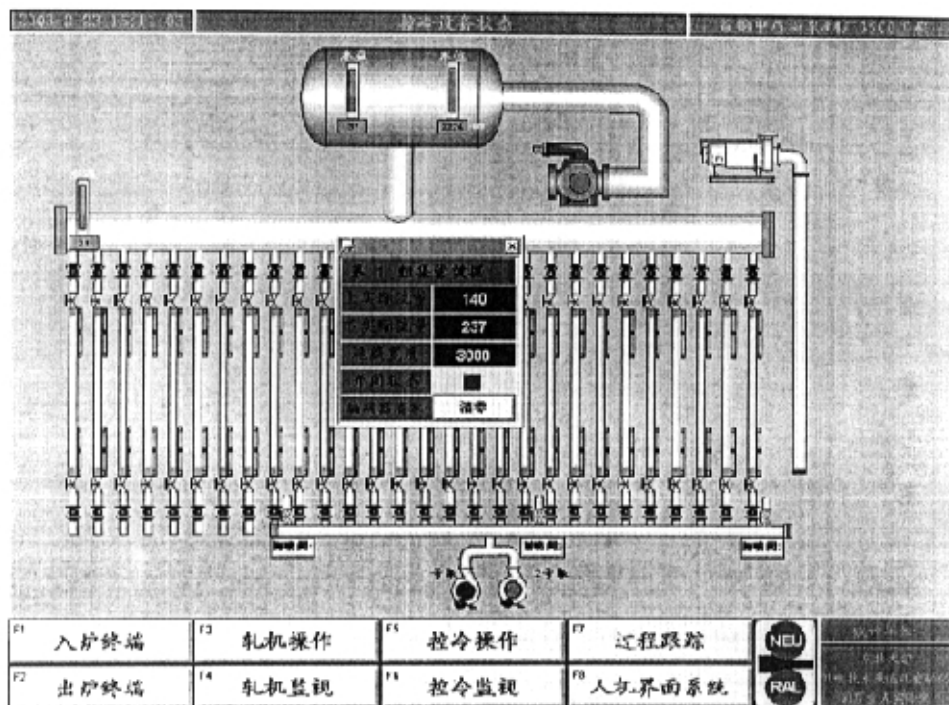


图 6.3 控冷设备状态

Fig.6.3 HMI of cooling equipments' state

通过控冷设备状态画面，可以监视设备是否正常运转和当前设备状态情况。

(3) 控冷棒图监视画面

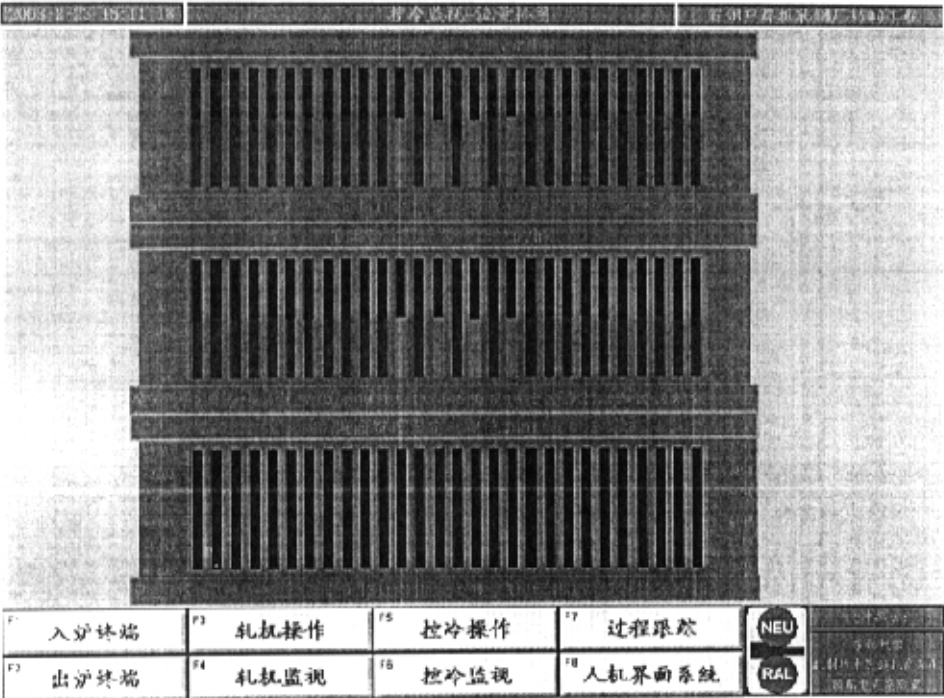


图 6.4 控冷棒图监视
Fig.6.4 HMI of cooling watch

通过棒图监视画面，可以随时监视各个集管的实际流量，检查各集管的开口度是否一致。同时观察遮蔽宽度的实际执行情况。

6.2 仿真分析

6.2.1 集管特性分析

钢板在层流冷却的过程中，设定各组集管的开启水量是一项重要参数，水量调整影响目标终冷温度和冷却速度。因此对设备性能的分析非常重要。表 6.1 是上集管的设备测量数据，表 6.2 是下集管的设备测量数据。

表 6.1 上集管测量数据 （水箱水位 2230mm）
Table6.1 Data of top hearders

流量调节阀开口度	水量 m ³ /h	成流状况
16.8	77.5	不成流
18.5	98.8	最小成流状态
21.4	111.5	成流
27.2	158.4	成流
37.4	220.8	成流
59.3	308.3	成流
95.2	344.4	成流

表 6.2 下集管测量数据 （水箱水位 2230mm）

Table6.2 Data of bottom headers

流量调节阀开口度	水量 m ³ /h	成流状况
23.4	205	不成流
26.6	254	最小有效喷射状态
28.6	282	成流
30.6	313	成流
33.8	357	成流
37	394	成流
40.2	430	成流

图 6.4 和图 6.5 反映了上、下集管开口度与水流量的关系。

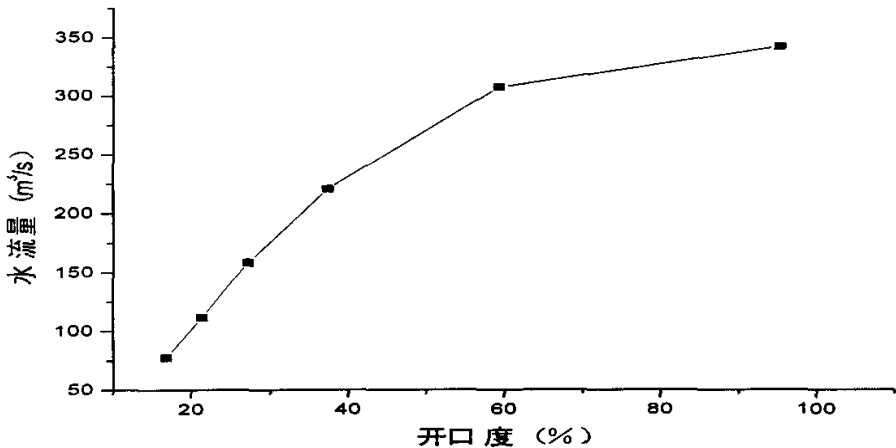


图 6.5 上集管开口度与水流量关系图

Fig. 6.5 Relative map of top pipes' hatch and water flux

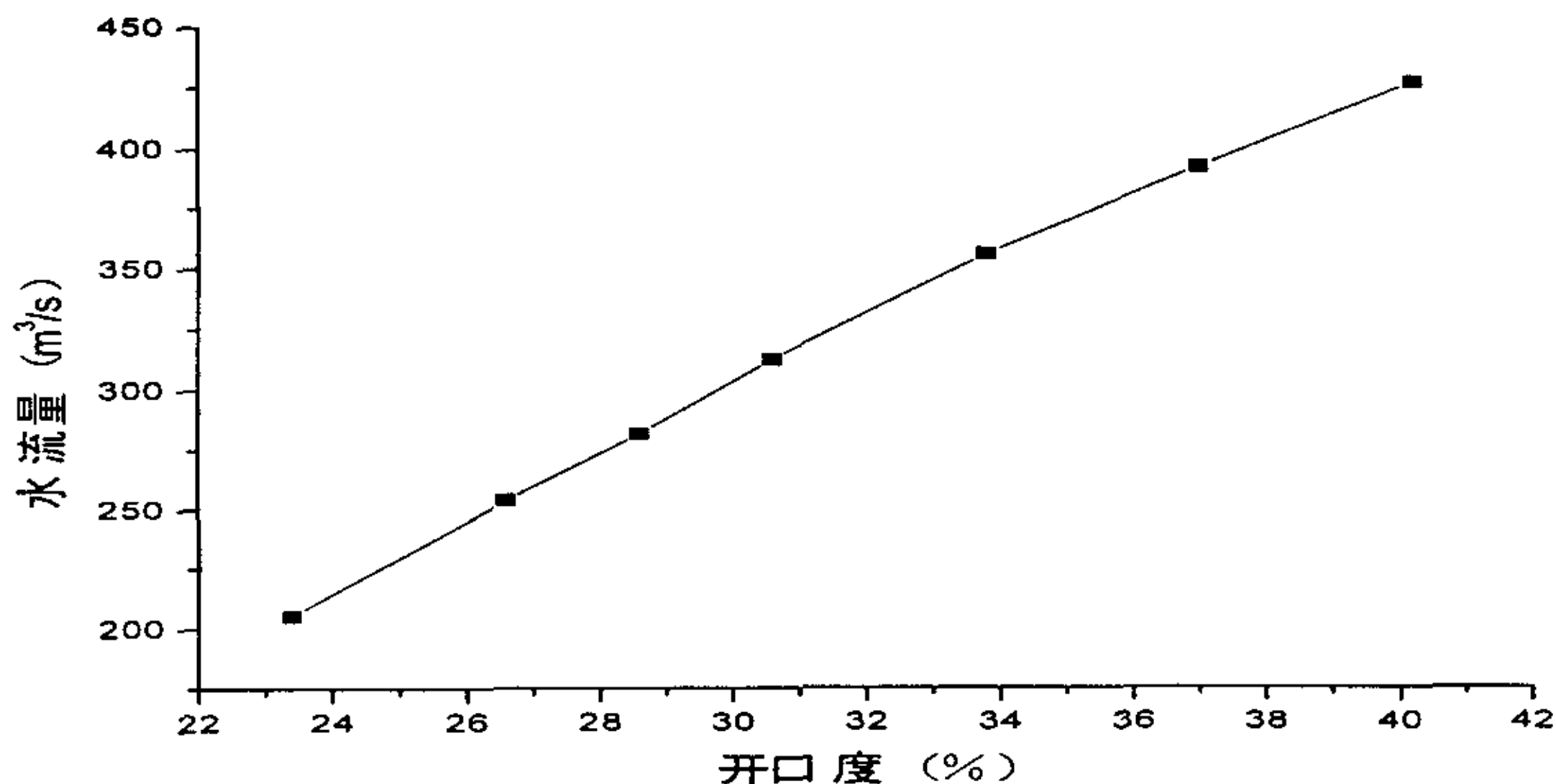


图 6.6 下集管开口度与水流量关系图

Fig. 6.6 Relative map of bottom pipes' hatch and water flux

由表 6.1、6.2 和图 6.5、6.6 知,在水箱水位一定的情况下,流量调节阀的开口度与水流量不是线性关系,开口度在 0~60%之间,随着开口度的增大,水量陡度增大;而后,开口度再增大,水量增加量很小,基本呈平直线。因此,在调节水量时,要注意开口度在 0~50%间的水量激增性。还要注意最小的成流流量。上集管流量必须要大于最小的成流流量才能起到均匀冷却的效果。下水幕在水箱水位一定的情况下,喷水高度与水量基本呈线性关系。需要注意的是,下集管的喷水高度必须高于冷却辊道的辊径(此时的水量称为临界喷水高度流量)。即下集管喷射出的水能接触到钢板,起到冷却的作用。因此在调水量时,上集管流量要大于最小成流流量,下集管流量要大于临界喷水高度流量,控冷才起到效果。

6.2.2 钢板纵向温度分析

钢板在冷却的过程中必须保证钢板在长度方向上的温度均匀,在本系统中采取了两种控制措施:

- (1) 采取延迟开启喷水集管(对头部)和提前关闭喷水集管(对尾部)的策略。
- (2) 采取辊道微加速的措施,消除钢板整体温度梯度。

图 6.7 和 6.8 分别是钢板冷却前和冷却后的纵向温度趋势。

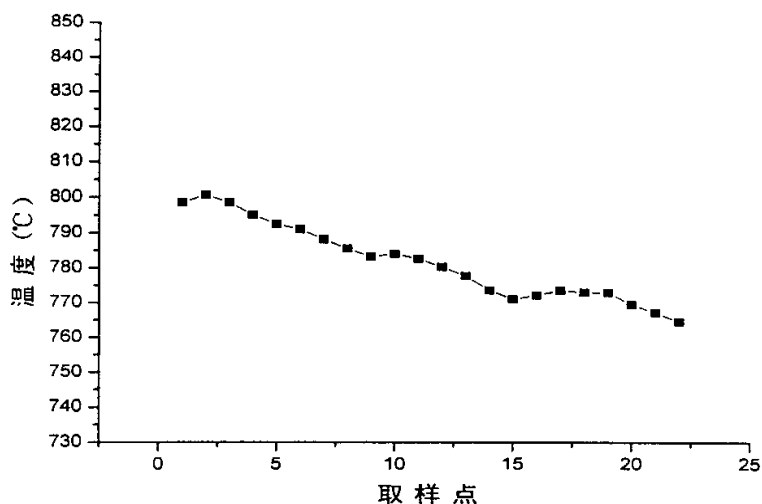


图 6.7 钢板层冷前的纵向温度趋势图

Fig.6.7 Trendline of temperature in plate length before cooling

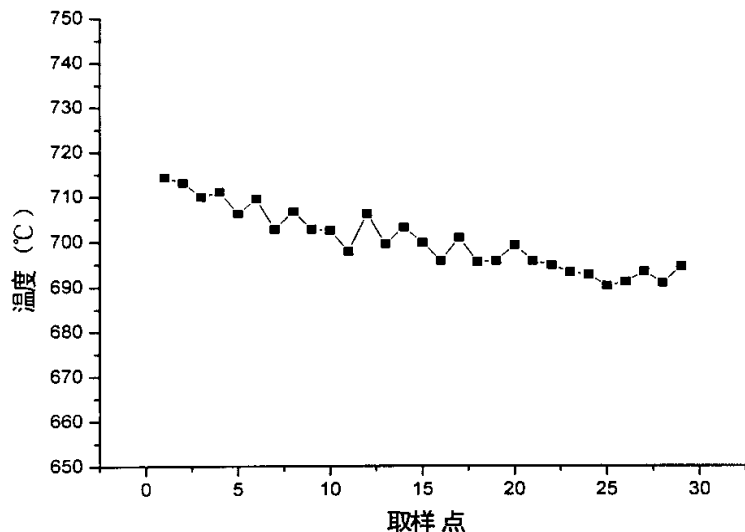


图 6.8 钢板层冷后的纵向温度趋势图

Fig.6.8 Trendline of temperature in plate length after cooling

从图 6.7 和 6.8 可以看出, 钢板冷却前后的纵向温度梯度不大, 冷却后钢板头尾温差在 15°C 左右。达到了中厚板厂的要求。

6.2.3 钢板横向温度分析

如果不采取措施, 冷却后的钢板宽度方向上的温度分布会不均匀。主要是因为: (1) 从轧机出来时的温度分布; (2) 边部与水接触较多, 产生更大温降; (3) 边部的散热面积较大。若不采取措施进行控制, 冷后的钢板由于温度分布的不均

而产生不同的组织从而引起性能的不均,进而钢板整个宽度方向上的性能不均匀。为了解决边部温度的不均匀性,控冷系统采用了边部遮蔽装置。遮蔽的数值和方式采取表格的形式,遮蔽量因钢种和规格的不同而有差异,各钢种和规格的遮蔽值事先离线算出,存放于表格中,预设定时计算时采取调用表格的形式,最后与各输出量一起输出。为了更好地解决边部温度的不均匀性,对边部遮蔽采用了自学习修正处理。

图 6.9 显示,未经遮蔽处理时的钢板横向温度分布情况。

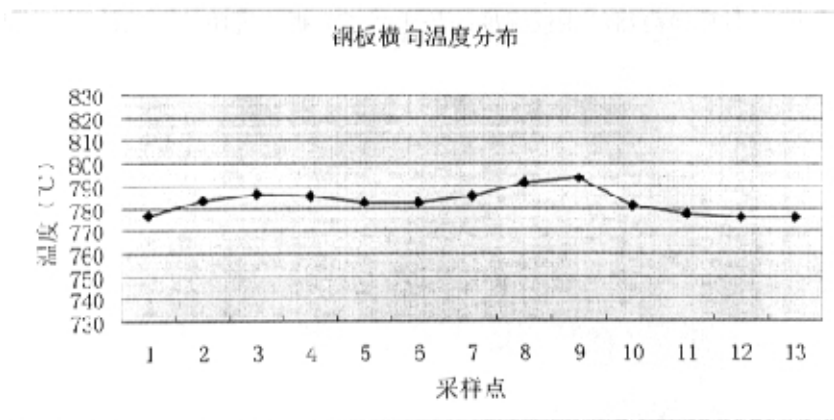


图 6.9 无遮蔽时钢板层冷后的横向温度趋势图

Fig.6.9 Trendline of temperature in no masking plate width

从图 6.9 可以看出,不采取边部遮蔽措施时,钢板横向(宽度方向)温度差达到了 20°C。横向温度不均匀。

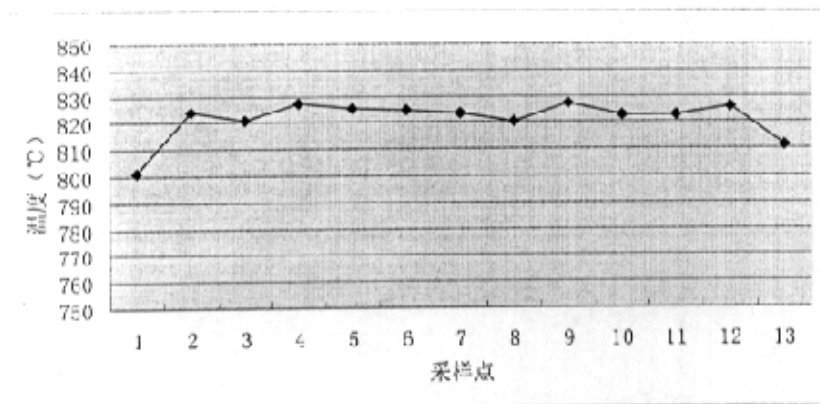


图 6.10 有遮蔽时钢板层冷后的横向温度趋势图

Fig. 6.10 Trendline of temperature in masking plate width

从图 5.8 可以看出,采用边部遮蔽后,钢板的横向温差大大减少了。横向温差可以控制在 10°C 之内。

6.3 本章小结

(1) 本章介绍了层冷系统在首钢中厚板厂的应用情况,对控冷系统的操作界面也作了简要的说明。

(2) 对控冷前后的钢板温度趋势进行了分析,说明控冷系统的精度是可靠的。

7 结论

在参考国内外相关文献资料的基础上,本文结合首钢中厚板厂的控制冷却系统改造工程,进行了控制冷却的理论研究,并将层流冷却的理论知识应用于中厚板厂的现场实际,设计了控冷系统的过程自动跟踪。得出如下结论:

- 1) 根据首钢中厚板厂的生产特点,对轧后的控制冷却采用高密度直集管层流冷却喷淋装置。控冷系统运行良好,冷却后的产品达到了生产要求。
- 2) 针对中厚板轧制特点,降控制冷却的过程跟踪与轧机的过程跟踪结合起来,减少了控冷辊道上的钢板堵塞事故。
- 3) 根据中厚板的轧线结构,降控冷跟踪区域分为四个区域: PDI 区域,轧机区域,冷却区域和出口区域进行分段跟踪。
- 4) 设计了控冷系统的模型关联结构,建立了空冷和水冷的数学模型。
- 5) 对空冷、水冷、上下水量比和边部遮蔽量进行了自学习修正处理。短期自学习算法采用多块钢的加权平均法,长期自学习采用指数平滑法。
- 6) 通过对控冷结果的分析表明模型的控制精度达到了生产的要求,同板温差和异板温差均在允许偏差范围内。

本控冷系统在首钢中厚板厂投产以来运行良好,控制系统的响应速度、控制精度和产品合格率达到或超过了国内外同类装备的技术指标,为首钢公司创造了明显的经济效益。本系统的成功应用标志着我国国产技术的成熟,为我国中厚板轧后控冷设备改造提供了一个成功的范例。

参考文献

- [1] 冯光纯. 控轧控冷技术的现状与发展[J]. 轧钢, 2000, 17 (3): 44-47.
- [2] Zumbrunnen, D. A., et. al., "A method and apparatus for measuring heat transfer distributions on moving and stationary plates cooled by a planar liquid jet"[J], Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 3, No. 2, pp 202-213, 1990
- [3] A. Otomo, S. Yasunaga, and R. Ishida, "Cooling Characteristics of Steel Sheet by Water Film in Hot Strip Mill"[J], J. Iron Steel Inst. Jpn. (JISI), 73, (8), pp 996-1003
- [4] S. Ishigai, S. Nakanishi, and T. Ochi, "Boiling Heat Transfer for Plane Water Jet Impinging on a Hot Surface"[C], in Sixth International Heat Transfer Conference, Toronto, Canada, August 1978.
- [5] D. A. Zumbrunnen, et. al., "Convective heat transfer distributions on a plate cooled by planar water jets"[J], Journal of Heat Transfer, Nov. 1989, Vol. 111, pp 889-896
- [6] P. M. Auman, D. K. Griffiths, and D. R. Hill, "Hot Strip Mill Runout Table Temperature Control"[J], Iron and Steel Engineer, Sept., 1967, pp. 174-179
- [7] 赵其德, 带钢层流冷却装置 [A], 一重技术 (宝钢热连轧机专辑 II) [C]. 1995, No. 3, 95~100;
- [8] 余驰斌, 梁伟刚. 热连轧带钢水幕冷却控制技术的研究, 钢铁, 1993, 28 (1), 37~40
- [9] 梁艳春, 王颜忠. 热轧带钢层流冷却系统的设计, 鞍钢技术, 1998, No. 5, 33~36
- [10] 常崇民, 气雾式在线冷却装置在厚板轧机上的应用, 轧钢, 1997 (6), 45~47
- [11] Masashi, Keiji. Masaahi Mitsut in Croddflow Type Fog Nozzle and Water Flux Distribution of Fog Flow Ejected from It, Transactions ISIJ, 1981, 21, 596~602
- [12] 王笑波, 中厚板轧后控制冷却技术的发展及现状, 轧钢, 2000 (6), 44~46
- [13] 孙本荣, 王有铭、陈英. 中厚板生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [14] 范晓明, 热轧带钢卷取温度的控制[D]. 沈阳, 东北大学, 2000.
- [15] 刘 峰, 钢材的冷却技术 (一), 轧钢, 1995, No. 6, 49~53;
- [16] 刘 峰, 钢材的冷却技术 (二), 轧钢, 1996, No. 1, 39~41;
- [17] 钱振声, 鞍钢厚板厂控制冷却装置的改造方案[J]. 鞍钢技术, 1999, 11: 9~14.
- [18] 许长金、钟成芬. 厚板的控制轧制和控制冷却[J]. 鞍钢技术, 1995, 9: 16~17
- [19] 齊藤良行, 志賀千晃. 高張力鋼の制御圧延・加速冷却にすける 組織変化のコンピュータシミュレーション[J]. 川崎製鐵技報, 1989, 21 (3): 195~201.
- [20] 高延伸性能轧双相钢板的研制 [J], 住友金属, 1981, (4), 39~52;
- [21] T Uenish . 和歌山热带钢轧机卷取温度控制的发展[C]. 第6届国际轧钢会议论文集,

- 1994, 185~190.
- [22] 韩尧坤, 王春铭等编译, 现代热轧板带生产技术, 东北大学出版社, 1992;
- [23] 范晓明, 热轧带钢卷取温度的智能控制, 东北大学博士学位论文, 2000;
- [24] 吴孝娟, 热轧带钢控制冷却技术概况, 鞍钢技术, 1992, No. 5, 33~36;
- [25] 宝钢 1580 热连轧过程机资料;
- [26] 孙一康等 编, 带钢热连轧数学模型基础, 冶金工业出版社, 1979;
- [27] 王国栋等, 板带轧制的理论与实践, 中国铁道出版社, 1990;
- [28] D. R 克罗夫著, 张风禄译, 传热的有限差分方程计算, 冶金工业出版社, 1982;
- [29] 俞品铭著, 热传导及其数值分析, 清华大学出版社, 1981;
- [30] 鋼材の強制冷却, 熱經濟技術部会鋼材強制冷却小委員会編, 1978, p. 16 p. 93, 日本鐵鋼協会;
- [31] 杨节, 轧制过程数学模型, 冶金工业出版社, 1993;
- [32] 刘振宇, 王国栋等, 板带热连轧过程中横向温度不均匀性的计算解析, 钢铁研究学报, Vol.5, No.4, Dec.1993;

科研工作

作者于 2000 年 9 月进入东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室攻读硕士学位。2001 年 6 月参加首钢中厚板厂的改造工程项目，在项目中曾经做过中厚板轧制过程平面形状控制和轧制模型自学习方面的工作。后来根据项目工作的需要一直从事中厚板控制冷却过程跟踪和控制冷却过程模型自学习方面的研究。2001 年 12 月在实验室承担的南钢中板厂改造工程中，从事控制冷却过程跟踪和控制冷却过程模型自学习方面的工作。2002 年 6 月参加攀钢热轧板厂的控制冷却改造详细设计，并顺利通过。2003 年 1 月，改造后的首钢中厚板厂顺利投产。这是我国第一次利用自己的技术成功对中厚板厂的现代化改造，改造后的首钢中厚板厂达到了国内领先，国际先进的水平，为我国中厚板厂的国有化改造创造了一个成功典范。南钢和攀钢项目正在有条不紊的进行当中。

作者在攻读硕士学位期间曾发表过文章：中厚板控制冷却过程的轧件跟踪[J]. 轧钢，2003（3）。

致 谢

本文是在导师王国栋教授、刘相华教授的悉心指导下完成的。无论是在学习、工作和生活方面,导师都给予了作者父母般无微不至的关怀、爱护、支持和帮助,导师渊博的学识、严谨踏实的治学作风使作者受益匪浅;导师的勇于开拓、忘我工作的精神一直深深地启迪、激励着我。在本论文完成之际,谨向导师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。

作者特别感谢国家重点实验室赵德文教授,王君副教授,王昭东副教授感谢几位老师在学习、工作方面所给予的指导、鼓励与帮助。

感谢胡贤磊博士、蔡晓辉博士、矫志杰博士、邱红雷博士给予的大量帮助。硕士研究生魏世政、赵忠、于明也给予作者了大量的帮助,在此表示感谢。办公室的张颖老师、杨子琴老师、李钊老师和沈馨老师在学习、工作中同样给予了作者诸多的帮助,在此深表谢意。同时也对东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室的全体老师和工作人员表示感谢。

本论文研究工作期间,还受到了首钢中厚板厂、计控室、电子公司,攀钢热轧板厂等诸多单位领导和同志的帮助与支持,在此一并表示感谢!

最后,再次衷心感谢重点实验室的全体老师和工作人员,感谢曾给予我支持与帮助的所有同学和朋友们。