

分类号: TP273

密 级:

U D C:

单位代码: 1 0 1 4 6

学 号: C64097

# 遼寧科技大學

## 碩 士 學 位 論 文



论文题目: 中厚板加热炉计算机过程控制研究

作 者: 孙世辉

指导教师姓名: 陈雪波 于政军

专 业 名 称 : 控制理论与控制工程

2011 年 12 月

# 辽宁科技大学硕士学位论文

论文题目：中厚板加热炉计算机过程控制研究

**SUBJECT: Research on Computer Process Control  
of Reheat Furnace for Medium Heavy Plate**

研究生姓名：孙世辉

指导教师姓名： 于政军、陈雪波      单      位： 辽宁科技大学电信学院

论文提交日期： 2011 年 11 月 10 日      答辩日期： 2011 年 12 月 16 日

学位授予日期： \_\_\_\_\_      授予单位： 辽宁科技大学

论文评阅人   ： \_\_\_\_\_      单      位： \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_      单      位： \_\_\_\_\_

## 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得辽宁科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料，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了谢意。

签名: 孙世辉 日期: 2011.11

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解辽宁科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签名: 孙世辉 导师签名: 孙世辉 日期: 2011.11

## 摘 要

中厚板生产过程中，加热炉是第一道工艺生产设备，而且是耗能大户。钢坯加热的技术直接影响板材产品的质量、能源消耗和轧机寿命。因此加热炉过程控制方法的推广对钢铁企业意义重大。加热炉的生产目标是满足轧制要求的钢坯温度分布，并实现钢坯表面氧化烧损最少和能耗最小。本文对中厚板加热炉计算机过程控制进行了研究，本文做了如下工作：

- 1、建立了基于热力学的钢坯温度预报模型，解决加热炉生产过程中炉内钢坯温度难以测量的问题，并为加热炉炉温设定控制提供重要依据。
- 2、开发中厚板加热炉计算机过程控制系统，采用面向对象用例驱动设计方法，编写加热炉过程控制软件系统设计文档，并用 VC++ 实现该系统。
- 3、根据中厚板生产的实际情况，本系统温度场模型可靠，系统抗干扰性强。

**关键字：**过程控制，加热炉，数学模型，中厚板

## ABSTRACT

The most important equipment on steel rolling line is Reheat furnace which has a large energy consumer. For reheat furnaces of steel enterprises ,the technology of slabs heating directly affects strip steel product quality, energy consumed and mill life. So it is important to extend optimal setting control technology. The purpose of reheat furnace production is to achieve the fewest stock scale loss and energy consumption, and the important is to acquire the slab temperature distribution rolling required. Aiming at above problems, this paper includes the work as follows:

1. Based on thermodynamics, the slab temperature prediction model is established, which solves the problem that slab temperature is immeasurable and makes important foundation for optimal setting control of reheat furnace.

2. Reheat furnace process control is designed according to the actual situation of the medium and heavy plate, a software system of reheat furnace control is developed by using the object-oriented use case analysis and design method and compiles cooling control software system design documents, realizes this system using VC++.

3. According to the actual situation of plate production, the system temperature field model is reliable, strong resistance to interference.

Keywords: process control, reheat furnace, mathematics model, medium heavy plate

# 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪 论.....	1
1.1 课题背景及意义.....	1
1.2 加热炉控制研究现状 .....	2
1.3 加热炉控制中存在的问题 .....	2
1.4 本文研究的主要内容 .....	4
第二章 中厚板加热炉计算机过程控制研究.....	5
2.1 中厚板步进式加热炉介绍.....	5
2.2 加热炉的控制系统结构 .....	6
2.3 加热炉炉温设定 .....	7
2.3.1 钢坯温度预测 .....	7
2.3.2 炉温设定 .....	8
2.4 本章小结.....	11
第三章 加热炉钢坯温度场数学模型.....	12
3.1 钢坯温度场模型建模.....	12
3.2 钢坯温度场模型离散化处理 .....	15
3.3 传热学基本理论 .....	19
3.3.1 导热系数.....	19
3.3.2 比热容.....	20
3.4 边界条件.....	20
3.5 本章小结.....	22
第四章 加热炉计算机过程控制系统设计.....	23
4.1 UML .....	23
4.2 加热炉过程控制系统用例设计 .....	23
4.2.1 过程状态监视系统用例描述 .....	24
4.2.2 过程状态优化系统用例描述 .....	28
4.2.3 “人机交互”系统控制用例描述.....	30
4.3 对象模型设计.....	35
4.3.1 对象类选择原则 .....	35
4.3.2 基于对象直接映射原则对象类选择 .....	36
4.3.3 基于负责任务剥离原则对象类选择 .....	36

4.3.4 基于用例实现的对象类间关系 .....	36
4.4 基于对象类的用例实现 .....	38
4.4.1 “钢板信息初始化”用例实现 .....	38
4.4.2 “加热过程跟踪”用例实现 .....	39
4.4.3 “钢坯温度修正”用例实现 .....	39
4.4.4 “炉温优化设定”用例实现 .....	40
4.4.5 “显示钢坯记录”用例实现 .....	41
4.4.6 “保存钢坯记录”用例实现 .....	41
4.4.7 “显示工作模式”用例实现 .....	42
4.4.8 “保存工作模式”用例实现 .....	42
4.5 部分关键操作流程介绍 .....	43
4.5.1 “计算预期炉温”活动流程 .....	43
4.5.2 “寻找烧透点”活动流程 .....	44
4.6 本章小结 .....	44
第五章 加热炉计算机过程控制系统实现 .....	45
5.1 系统配置介绍 .....	45
5.2 系统服务器 .....	45
5.2.1 加热炉过程控制系统程序 .....	45
5.2.2 WINCC_OPCServer .....	46
5.2.3 数据库 .....	47
5.3 人机接口 (HMI) .....	48
5.4 系统生产实绩结果 .....	49
5.5 本章小结 .....	51
结    论 .....	52
参考文献 .....	53
致    谢 .....	56

# 第一章 绪 论

## 1.1 课题背景及意义

世界人口急剧增长以及国民经济的迅猛发展，能源危机日趋严重，工业企业特别是钢铁企业面临严峻挑战<sup>[1]</sup>。现代轧机向连续、高精度、大型等多品种方向发展，这样就对待轧钢坯的加热质量提出的要求越来越高。只有高精度的控制加热炉才能实现提高钢坯加热质量的目标<sup>[2, 3]</sup>。在现代钢铁企业中，加热炉是轧钢行业的耗能大户，也是加热炉是轧钢生产线上最重要的设备之一，其自动控制水平的高低直接影响到能耗、废钢率、烧损率、产量和质量等指标，而钢坯加热占钢铁工业总能耗的百分之三十左右，因此对加热炉进行优化控制，可以大大提高加热炉的热效率、降低能耗，对整个钢铁行业乃至整个国民经济的节能具有重要意义<sup>[4]</sup>。

随着世界能源危机的日益加深，轧机向着大型化、高速化发展，对产品质量要求也越来越高，加热炉过程控制目标是出炉钢坯温度分布满足轧机要求并且尽量减少钢坯表面脱碳程度和最小的能耗指标。加热炉过程控制问题中，解决最佳燃烧比，是从燃烧过程本身的控制探求节能与提高产品质量等问题，这无疑是加热炉过程控制的基础。当然加热炉过程控制不能局限于燃烧过程本身，应从加热到轧制的整个过程，并考虑钢坯在炉内的加热过程来全面综合进行，只有这样才能达到节能与提高产品质量的目的。

加热炉基础自动化级由调节阀自动调节，配以适合空燃比，采用双交叉限幅控制方法控制炉温以提高加热效率。然而，加热炉过程控制目标是钢坯加热整个过程，而不是基础自动化级的控制回路精度。过程控制目标是一个综合指标，其中包括工艺要求、成本规范，即出炉钢坯温度要满足轧机要求并且钢坯表面脱碳最少、加热炉能耗最低。

然而，加热炉作为轧制生产过程中的重要设备，钢坯加热是否满足工艺要求直接关系到钢板产品的内在质量<sup>[4]</sup>。对于钢坯加热过程而言，钢坯在炉内温度难以测量，加热过程非线性，耦合，高阶和时变等原因，同时考虑到来料尺寸、形状差异以及加热材质等多方面因素的影响，致使钢坯出炉温度存在着不可测扰动，因此能否精确的表述钢坯升温过程，建立钢坯温度升温数学模型，是加热炉过程控制的重点。因而，对加热炉过程控制系统的研究具有普遍意义。



本文课题依托“鞍钢鲅鱼圈 3.8 米中厚板加热炉过程控制系统开发项目”，对加热炉过程控制进行细致研究。

## 1.2 加热炉控制研究现状

多年来世界各国的钢铁企业，在加热炉的技术方面取得了很大的进步，从最原始的一段式加热炉逐步改造成目前比较先进的多段式多控制点的加热炉，使加热炉的技术性能指标有了大幅度的提高<sup>[7]</sup>。

到目前为止，发达国家的热轧系统普遍具有完备的加热炉优化控制系统。国外人工智能和发展的实用化，特别是模糊控制和专家系统取得成功，已用于加热炉控制中，如日本川崎钢铁的加热炉控制系统。发展中国家在新建加热炉项目中也开始重视对加热炉的优化控制。

在国内，加热炉优化控制还主要集中在几个一线钢铁企业的热轧系统，大部分是随引进系统一切配套引进，也有一部分是国内企业在消耗引进技术的基础上自主开发而成<sup>[4]</sup>。

然而，国内多数加热炉还停留在只有基础控制系统的控制水平，钢坯温度无法进行在线精确跟踪，更难以实现加热炉的最佳状态控制。因此造成的直接后果表现为两个方面：一是钢坯开轧温度波动过大，影响最终产品的质量稳定性；二是铁损和能耗过大，加大了最终产品成本。

随着产品结构的逐步升级，生产过程中对钢坯开轧温度的约束越来越严格。然而，在没有加热炉优化控制系统的情况下，操作人员只能通过“实测开轧温度”估计加热炉中钢坯的温度，由于钢坯温度调整具有明显的大滞后特征，简单地通过反馈方式调整钢坯温度难以实现钢坯开轧温度的高命中率，以至于影响产品质量的稳定性<sup>[4]</sup>。

其次，由于无法实时监视加热炉中钢坯温度，钢坯过烧现象很难避免。如果钢坯温度长时间过高，不但造成大量的燃气浪费，还将引起钢坯表面深度脱碳，以及产生大量的氧化铁损，从而导致吨钢消耗的大幅提升，严重时，甚至致使产品质量出问题<sup>[4]</sup>。

## 1.3 加热炉控制中存在的问题

加热炉过程控制具有大滞后，强耦合，并受原材料及燃气质量因素影响的复杂工业过程。由于钢坯温度闭环控制难以实现，加热过程中的钢坯温度控制主要依靠

操作人员的经验,钢坯温度控制精度可能因为操作人员经验不同钢坯温度控制结果也会不同。由于操作人员根据经验预测炉内钢坯温度,无法精确的设定各炉段炉温,而只能根据钢坯出炉时刻颜色及开轧钢坯温度,调整各炉段炉温,然而钢坯的初始温度,钢种以及轧制节奏经常发生变化,根据出炉钢坯的反馈信息并不能有效的对炉温做出的调整,往往造成钢坯的过烧或者欠烧,无法达到加热炉过程控制目标。

尽管加热炉优化控制在加热炉控制设计中占据着重要地位,然而,由于诸多环境因素的影响,控制系统的应用效果并不理想,以至于一些用户对加热炉的优化控制存在着某种抵触情绪<sup>[5]</sup>。

在控制设计中存在的问题,是造成优化控制系统应用效果不尽理想的重要原因,具体表现为以下几方面:

#### (1) 过渡的主观臆断

在常规的加热炉优化过程控制设计中,人们制定炉温设定参考的主要依据有两项:“温度场数学模型”和“钢坯理想升温曲线”,这种设计模式来自于对引进项目的消耗移植。然而,由于受到国内外生产环境差异的影响,在国外加热炉控制中应用相对较成熟的设计方法遇到了一些问题。首先,钢坯温度场模型的“可靠性的持久度”大打折扣;其次,钢坯理想升温曲线的获取存在着很大的不确定性,这也同样制约着优化控制的有效性<sup>[5]</sup>。

#### (2) 盲目的高自动化预期

在加热炉优化控制设计中,存在着某种盲目追求高度自动化预期的设计理念,以至于忽略了实际生产过程对优化控制的层次控制需求。虽然实现高度自动化的钢坯加热过程自动控制是加热炉优化控制系统的理想设计目标,然而,实际上,利用现有的控制技术和信息处理技术,帮助操作人员做出及时正确的判断和决策,也是优化控制设计的重要任务和成果<sup>[5]</sup>。

#### (3) 全局解决方案缺失

国内加热炉优化控制系统多少存在着某种程度的“孤岛”现象,即在设计上,简单地围绕着加热炉控制需求,就事论事地制定解决方案。这种设计方式常常导致加热炉优化控制系统孤悬于整体系统之外,无法从上、下游工艺环节中获得必要的信息支持<sup>[5]</sup>。

这些问题的存在影响了钢坯加热质量,造成钢坯氧化现象严重,煤气资源浪费,并最终影响了企业的效益。因此,需要综合考虑工艺要求、节能、环保以及安全性

等因素，研究新的方法以解决钢坯加热过程的产量、质量和能耗等多目标非线性问题<sup>[5, 6]</sup>。

## 1.4 本文研究的主要内容

本课题以鞍钢鲅鱼圈 3.8 米中厚板加热炉过程控制系统研究为背景。对加热炉的过程控制方法进行研究。

本文主要研究以下几个方面内容：

1、基于金属凝固和传热学基本理论，建立钢板传热模型。通过炉温预测钢坯的升温过程，解决了炉内钢坯温度不能直接测量的难题，从而达到通过炉温间接控制钢坯温度的目的。

2、采用面向对象用例驱动设计方法，编写加热炉过程控制软件系统设计文档，并用 C++ 编程实现该系统，开发适合现场实际的加热炉计算机过程控制系统。

3、系统 OPC、1 级通讯，HMI 画面设计。

4、现场实际应用情况。

## 第二章 中厚板加热炉计算机过程控制研究

本文研究的中厚板加热炉计算机过程控制系统是以鞍钢鲅鱼圈 3.8 米加热炉控制系统为研究背景。

### 2.1 中厚板步进式加热炉介绍

在步进式加热炉里，钢坯的移动是通过固定梁和移动梁进行的，经过移动梁反复地上升、前进、下降、后退的矩形运动，每个循环过程使钢坯前进一步。加热炉的装钢要保持特定的时间间隔，用推钢机或输送机将钢坯装入炉内。加热好的钢坯出钢多采用出钢装置进行出钢<sup>[7]</sup>。

任何热轧钢生产线（包括热连轧和中厚板）都必备钢坯加热炉，且步进式加热炉占据主导地位。

步进式加热炉主要由炉体、加热系统、步进系统和相关的辅助系统组成，其工艺目的是为后续的轧制系统提供“满足生产计划要求”的热钢坯，即依据生产计划规定的钢坯出炉温度，生产出既能满足计划产量需要，又能满足产品质量要求的待轧钢坯。另外，加热炉是整个轧钢系统中能耗的主要工艺环节，其燃气消耗和钢坯氧化铁损直接影响着企业的吨钢消耗，因此加热炉的辅助工艺目的是实现低成本钢坯加热<sup>[11、12]</sup>。

为了对钢坯实现有效的加热，步进式加热炉沿炉长方向分为：预热段、加热段 1、加热段 2、加热段 3 和均热段，如图 2.1 所示。

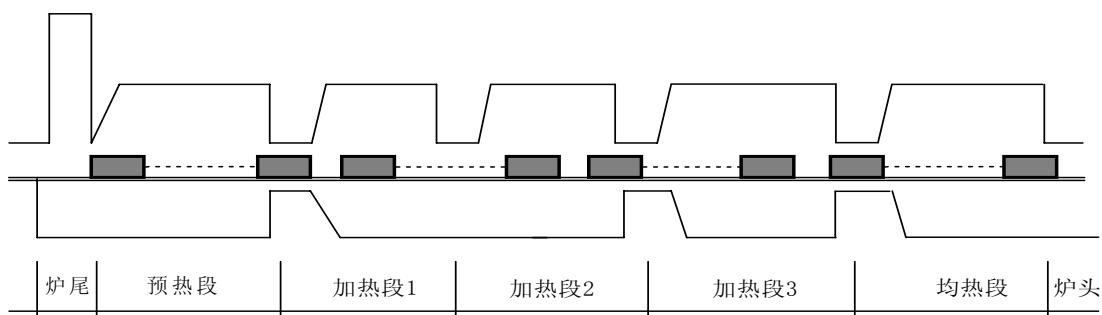


图2.1 加热炉侧面图

为了尽可能利用烟气余热，降低炉尾的排气烟温度，提高燃料的利用率，炉子设有预热段，预热段长度约占有有效炉长的 30%。充分利用烟气来预热钢坯。钢坯经过预热段预热之后进入加热段，加热段分为加热段 1、加热段 2、加热段 3，加热段的目的是将钢坯表面温度加热到目标出炉温度，加热段后是均热段，主要将钢坯

均匀加热到规定的出钢温度。若均热段温度过高,将出现钢体打滑现象,温度过低,则不能出钢。三段的温度互相耦合,互相影响。各部分之间有鼻部分割,以便实现各部分的单独控制<sup>[12]</sup>。

## 2.2 加热炉的控制系统结构

根据“控制为工艺目的实现服务”的基本控制设计原则,加热炉的最终控制目标是以最低成本生产出满足生产计划要求的热钢坯。然而,钢坯的加热过程具有明显的复杂系统特征,根据现有的控制技术水平,还无法建立可以有效形式化的整体被控对象模型。为此,当前主流加热炉控制设计多采用分级控制模式,即将控制系统分为两级:基础控制系统(又称一级控制系统)和过程控制系统(又称二级控制系统,或优化控制系统)。其中,基础控制系统负责加热炉炉内温度和压力等过程状态控制,以及钢坯入炉、炉内传输、出炉等顺序逻辑控制;优化控制系统则根据当前的边界条件,确定当前的最佳炉温,在基础控制系统的支持下,共同实现加热炉的工艺目的<sup>[13]</sup>。

原则上,优化控制系统的控制目标是保证工艺目标的实现。根据加热炉的工艺目标要求,优化控制目标可以进一步分解为两部分:质量控制目标和成本控制目标。

### (1) 质量控制目标

加热炉优化控制的“质量控制目标”是最大限度地提高“加热炉出炉钢坯目标开轧温度命中率”,同时最大限度地降低“钢坯表面脱碳深度”,以便确保产品满足生产计划指定的质量指标约束。

### (2) 成本控制目标

加热炉优化控制系统的“成本控制目标”是最大限度地降低因钢坯过烧所引起的“燃气使用量”和“氧化铁损”,借以提升产品的成本竞争力。

加热炉加热过程控制就是根据炉内钢坯当前情况以及轧制节奏设定各段炉温,即预期炉温设定值。由于加热炉加热过程复杂,钢坯加热边界条件波动很大,钢坯温度过程跟踪一般很难用精确的数学模型来描述,而且加热过程存在着各种扰动,对炉内钢坯温度动态跟踪带来很大影响。针对上述问题,本文提出一种基于生产目标的加热炉过程控制方法,该方法集前馈、反馈、自适应控制于一体,实现了工艺指标和经济指标的综合优化。控制系统结构如图 2.2 所示<sup>[4-7]</sup>。

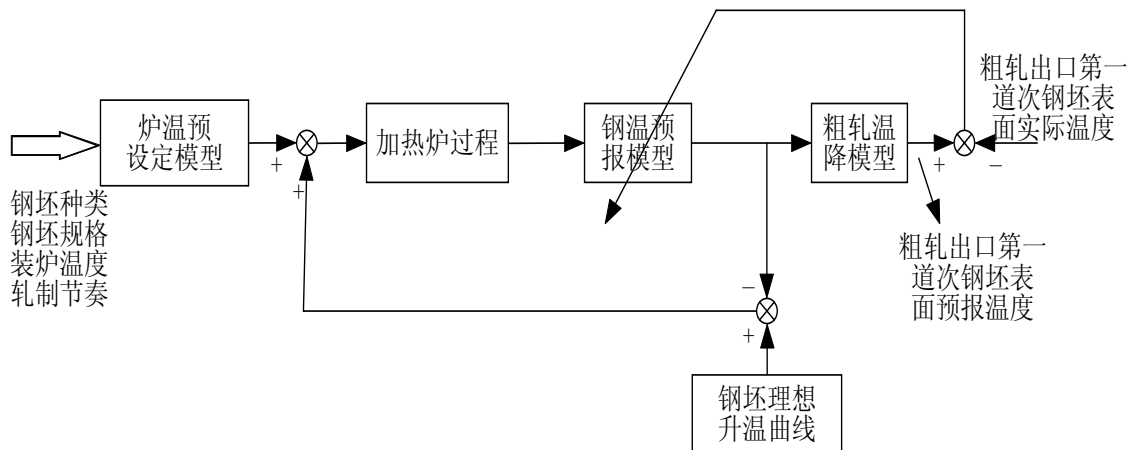


图 2.2 加热炉过程控制系统结构图

## 2.3 加热炉炉温设定

### 2.3.1 钢坯温度预测

由于加热炉是大滞后不可逆系统,如果等钢坯出炉之后才采集钢坯的温度数据作为炉温控制的反馈只能为以后的钢坯修正炉温,会出现很多加热不合格的钢坯,严重降低了对钢坯加热的控制效率,为此必须提前计算钢坯达到参考点(加热段I、II出口处和均热段出口处)的温度以求得钢坯达到目标温度所需的炉温,本文在第三章建立了基于传热机理的钢坯温度场数学模型,为了计算钢坯到达所在区间出口处的温度,需要获取当前炉温、钢坯的温度、位置等信息<sup>[7]</sup>。

炉内共分5段,有上、下各10各热电偶高温计,在预热段、加热1段1、加热2段、加热3段和均热段的上、下方两侧分别并排安装四对热电偶。炉温是根据各段热电偶的测量值求得平均值,段段间温度是根据钢坯所在位置进行差分计算。以计算上炉温为例,下炉温计算方法相同<sup>[7]</sup>。

#### (1) 炉长方向炉温计算方法

##### a) 当钢坯位于加热段之间的鼻部位置时

$$T_{air} = T1_w + (P_l - P1_l) \frac{T2_w - T1_w}{P2_l - P1_l} \quad (2.2)$$

其中  $T_{air}$  为钢坯上方炉温,即沿炉长方向炉温的线性差值,  $P_l$  表示钢坯沿炉长方向中心处实际位置,  $T1_w$ ,  $T2_w$  表示沿炉长方向钢坯相邻的两个加热区热电偶沿炉宽方向的线性插值,  $P1_l$ ,  $P2_l$  表示沿炉长方向钢坯相邻的两个加热区热电偶实际位置。

##### b) 当钢坯位于各加热区非鼻部位置时

$$T_{air} = T_w \quad (2.3)$$

其中  $T_{air}$  为钢坯上方炉温， $T_w$  表示沿炉宽方向钢坯所处位置炉温的线性插值。

## (2) 炉宽方向炉温计算方法

推钢机将炉门钢坯横向推入加热炉，沿炉宽方向，钢坯中心位置上方炉温的计算方法为：首先读取此钢坯所在加热区钢坯两端的两个热电偶的测量值，然后根据钢坯所处位置计算炉温的线性插值<sup>[7]</sup>。

$$T_w = T1_w + (P_w - P1_w) \frac{T2_w - T1_w}{P2_w - P1_w} \quad (2.1)$$

其中  $T_w$  表示钢坯上方沿炉宽方向炉温的线性差值， $P_w$  表示钢坯沿炉宽方向中心处实际位置， $T1_w, T2_w$  表示沿炉宽方向钢坯两端热电偶温度测量值， $P1_w, P2_w$  表示沿炉宽方向钢坯两端热电偶实际位置。

## (3) 当钢坯在装钢炉门和预热段热电偶之间时

$$T_{air} = T_w - \frac{P_l}{P} \Delta T \quad (2.4)$$

其中  $T_{air}$  为钢坯上方炉温， $T_w$  表示沿炉宽方向钢坯所处位置炉温的线性插值， $P_l$  表示钢坯沿炉长方向中心处实际位置， $P$  表示装钢炉门与预热段热电偶之间的距离， $\Delta T$  表示预热段热电偶与装钢炉门处的温差<sup>[4]</sup>。

## (4) 当钢坯在均热段热电偶和出钢炉门之间时，计算方法与式（2.4）相同。

## 2.3.2 炉温设定

在加热炉中，由于钢坯温度不可测，且加热炉的生产过程是滞后不可逆的，不能取得钢坯的实际温度作为反馈信号来修正炉温，本文采用钢坯温度预测模型预测钢坯在每段出口处的温度，以此为基础使用二分法对使钢坯在本区间出口达到目标温度所需的炉温进行搜索，如下图 2.3 所示<sup>[4]</sup>。

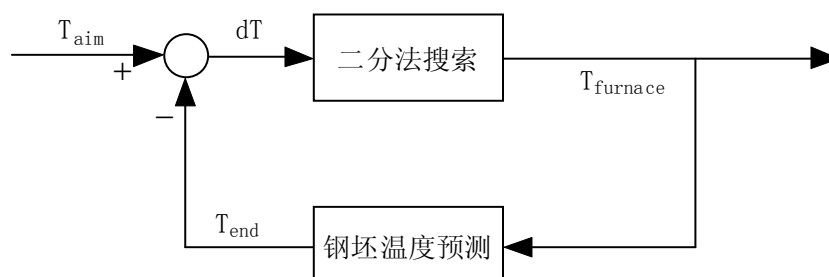


图 2.3 炉温搜索示意图

在每个炉温设定周期, 首先使用当前炉温预测钢坯到该段区间出口的温度, 如果该温度与目标温度的偏差满足约束条件, 则跳过此过程不重新进行炉温设定, 如果不满足约束条件, 在炉温区间取中值作为虚拟炉温进行重新预测, 再与目标温度比较, 重复此过程知道搜索到满足约束条件的炉温为止。下面结合程序计算流程(如图 2.4)阐述使用二分法对最佳炉温的搜索过程<sup>[4]</sup>。

首先, 使用钢坯温度预测模型计算钢坯到达所在区出口处(以下称为预测点)的温度  $T_{\text{end}}$ , 设钢坯在预测点的目标温度为  $T_{\text{aim}}$ , 则预测温度与钢坯在预测点的目标温度之差  $dT = T_{\text{end}} - T_{\text{aim}}$ , 判断  $|dT|$  是否满足前面提出的控制目标的约束条件  $\varepsilon$ , 如果满足, 则不用重新设定炉温直接跳出, 否则继续。为了增加炉温搜索速度, 根据  $dT$  是否大于 0 确定初始炉温搜索区间, 如果大于 0, 说明炉温过高, 则理想炉温应该在当前炉温  $T_p$  与最低炉温  $T_{\min}$  之间, 如果小于 0, 即钢坯预测温度要低于目标温度, 说明炉温不够, 这种情况理想炉温应该在当前炉温与加热炉的炉温上限  $T_{\max}$  之间, 根据前面的方法确定理想炉温的搜索区间为  $(TF_{\text{up}}, TF_{\text{down}})$ , 根据二分法的思想, 取搜索区间的中值作为拟定的当前炉温, 以此炉温预测钢坯在预测点的温度, 然后判断预测温度与目标温度偏差是否满足约束条件, 根据偏差情况重新确定搜索区间, 重复此过程, 直至满足约束条件为止, 这时得到的炉温即是最终需要设定的炉温, 对于每块钢坯都进行此过程, 在炉内钢坯全部搜索到最佳炉温后, 将其值交给炉温设定模块<sup>[4]</sup>。



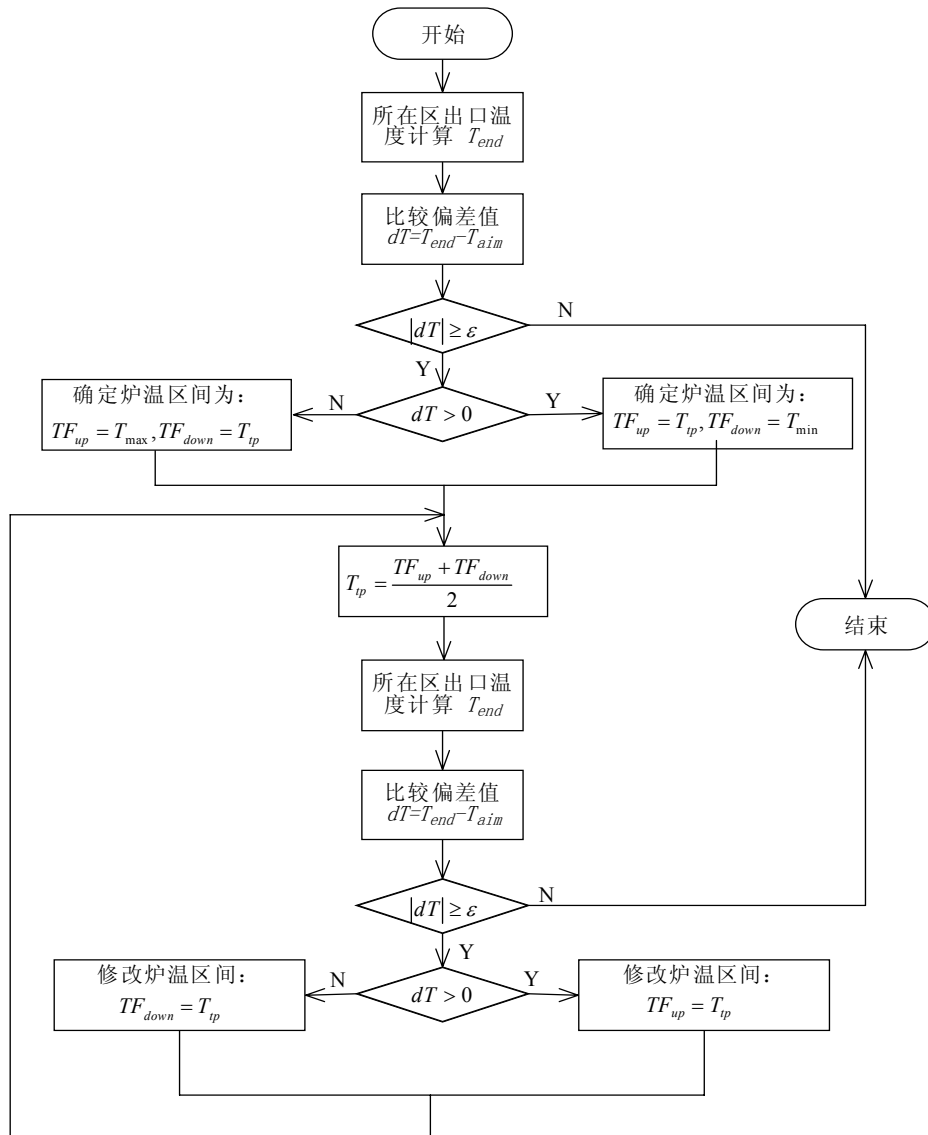


图 2.4 二分法搜索炉温计算流程图

计算了使每块钢坯在到达预测点时的达到目标温度所需要的炉温，但由于钢坯的在炉时间不同，入炉时钢坯的初始温度、钢种等信息不同，需要综合考虑各块钢坯的需要炉温再对炉温进行设定。由于本文以加热炉每个区间的出口处作为预测点，在从区间出口到入口的方向上，前一节计算得到的钢坯需要的炉温对此区间钢坯温度的影响从小到大，这和钢坯在此区间继续停留的时间长短成正比，如果钢坯马上要离开此区间，重新设定的此区间的炉温对它几乎没有影响。综合前述原因，对每块钢坯的需求炉温进行加权处理<sup>[4]</sup>。

我们设钢坯所在区间为  $k$ ，此区间需要设定的炉温为  $T_{\text{set}}(k)$ ，在此区间的钢坯数为  $N$ ，从此区间出口处至入口处钢坯的次序号为  $i=1, 2, \dots, N$ ，那么取  $i/N$  作为第  $i$  块钢坯的加权系数，设第  $i$  块钢坯的需求温度为  $T_{\text{need}}(i)$ ，则此区间该设定的炉

温为:

$$T_{set}(k) = \frac{\sum_{i=1 \sim N} i \times T_{need}(i)}{\sum_{i=1 \sim N} i} \quad (2.5)$$

## 2.4 本章小结

- (1)简单介绍了中厚板加热炉控制系统的结构组成;
- (2)叙述了中厚板加热炉过程控制策略;
- (3)详细介绍了加热炉炉温设定方法。

通过本章介绍的内容可知,加热炉控制的目标是出炉温度,钢坯预测数学模型是关键。因此钢坯温度数学模型对于整个控制系统的控制有着决定性的影响,应对其深入研究。在下一章将重点介绍加热炉钢坯温度场数学模型所作的研究。

### 第三章 加热炉钢坯温度场数学模型

加热炉内钢坯温度难以进行实时测量,所以人们需要采用其他方法间接地得到炉内钢坯温度,得以控制钢坯加热升温过程。钢坯温度计算模型是对过程控制的重要基础,通过建立钢坯温度场可以对钢坯温度进行实时预报,根据钢坯目标出炉温度、目标断面温差合理地设定各段炉温,减小氧化烧损和降低能耗并满足钢坯出炉目标温度<sup>[7, 23]</sup>。

#### 3.1 钢坯温度场模型建模

加热炉过程只能得到各时刻热电偶高温计炉温信息,本文建立加热炉钢坯温度场数学模型,用加热炉过程的可测变量来估计炉内钢坯温度,然后根据各钢坯目标出炉温度合理设定各炉段炉温,将炉温控制与钢坯温度直接联系起来。钢坯在加热炉中运动并受热,必须根据热力学原理,研究钢坯温度场模型,利用炉膛温度计算各时刻各位置钢坯温度,并跟踪钢坯直到出炉。以下做出假设:

(1) 钢坯在炉内由固定梁,步进梁进行步进,固定梁上装有绝热垫,故忽略钢坯与固定梁的热传递;

(2) 由于加热炉内的热辐射能在较短距离内被吸收以及各控制段之间都设有隔墙,段间辐射可以忽略,而炉气的对流传热影响不大,因而认为在同一炉段内的总括吸收率、辐射角系数、黑度系数、对流传热系数视为常数;

(3) 钢坯的温度分布沿  $x$  方向的温差较小,可以认为其热传导主要沿  $z$  轴和  $y$  轴方向进行;

(4) 在炉温制度不变的情况下,位于同一  $X$  位置的钢坯热状态视作相同;

(5) 以钢坯所在位置对应的炉温曲线所代表的温度作为炉内传热计算的基准温度;

(6) 假设钢坯上,下表面在炉内受热均匀,即认为钢坯上,下表面温度相同。

下面我们以长方形钢坯作为研究对象,以钢坯内部某一微元体为研究对象,从热力学原理上分析它的温度变化规律,进而推导钢坯三维温度场分布的微分方程。在假设加热钢坯的热物性参数为常值的情况下,取钢坯内的一个微元体,边长分别为  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$ ,如图 3.1 所示<sup>[7]</sup>。

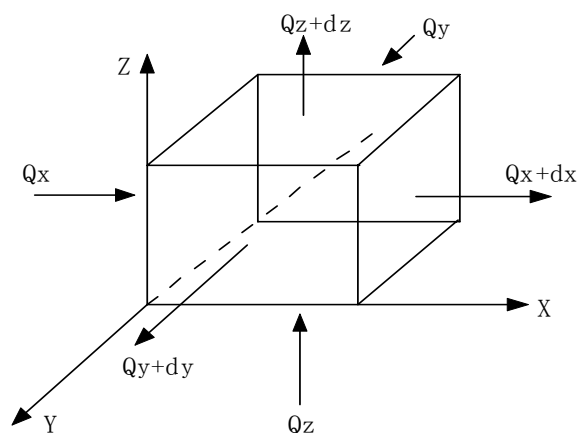


图 3.1 微元网格体热量传递示意图

我们先考虑在  $x$  轴方向的情况，设钢坯温度场为  $T$ ， $yz$  面的热流密度为  $q_1$ ， $dydz$  面的热流密度为  $q_2$ ，那么在此方向上单位时间变化的热量为：

$$dQ = q_2 dydz - q_1 dydz = (q_2 - q_1) dydz \quad (3.1)$$

根据热流密度的定义——单位时间通过单位等温面的热量，及傅里叶定律： $q = -\lambda \text{grad}T$ ，( $\text{grad}T$  为温度梯度)得在  $x$  方向上热流密度为：

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.2)$$

其中  $\lambda$  称为导热系数( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )，一般在温度变化不大的情况下，可以取常值，但在这里我们应该取为关于温度  $T$  的变量，由于  $q$  的分布是连续的，并且我们取的是一个微元，可以对  $q$  进行局部线性化，定义在  $x \rightarrow x+dx$  热流密度的变化率为  $\partial q / \partial x$ ，那么：

$$q_2 - q_1 = \frac{\partial q}{\partial x} (x + dx - x) = \frac{\partial q}{\partial x} dx \quad (3.3)$$

将(3.3)代入(3.1)得：

$$dQ = \frac{\partial q}{\partial x} dx dy dz \quad (3.4)$$

将(3.2)代入(3.4)得：

$$dQ = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz \quad (3.5)$$

其中的负号表示温度梯度和热流方向相反，那么对于微元的在  $x$  方向的热量变化为：

$$\Delta Q_x = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz \quad (3.6)$$

同理可得 y、z 方向上的热量变化

$$\Delta Q_y = \lambda \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dz$$

$$\Delta Q_z = \lambda \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz$$

微元体得到的总热量是上述三项之和：

$$\Delta Q = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz + \lambda \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dz + \lambda \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (3.7)$$

对于所取的微元体而言，根据能量守恒定律，在单位时间内有热平衡关系<sup>[23]</sup>：  
导出的总热流量 + 热力学能(即内能)增量 = 导入的总热流量 + 内热源的生成热，其中：

$$Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.9)$$

$$E = \dot{Q} dx dy dz \quad (3.10)$$

式中： $\rho$ —密度，单位： $kg/m^3$ ；

$c$ —比热，单位： $kJ/(kg \cdot K)$ ；

$t$ —时间位：s；

$\dot{Q}$ —单位时间、单位体积中内热源的生成热，单位： $W/m^3$ ；

将式(3.7)、(3.9)和(3.10)代入(3.8)中，整理得到：

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad (3.11)$$

该式即为三维非稳态导热微分方程的一般形式。

由能量守恒定律可知，在没有内热源的情况下，(3.11)式可以化简为：

$$\frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.12)$$

式中， $\lambda/\rho c$  称为导温系数，值越大，表明钢坯温度变化越快，钢坯容易被加热。

由于钢板的长度和宽度都远大于厚度，可以认为只在厚度方向上有热量传递，则在以上假设的条件下，钢坯升温过程数学模型可简化成如下形式：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.13)$$

### 3.2 钢坯温度场模型离散化处理

建立钢板温度场模型的微分形式不是最终目的, 最终目的是通过计算机编程语言实现对钢板冷却过程进行温度预报, 那么需要对模型微分方程进行离散化处理。

建立离散方程的常用方法有四种, 即多项式拟合法, Taylor(泰勒)级数展开法, 控制容积积分法及平衡法<sup>[23]</sup>。前两项方法偏重于从数学角度进行推导, 将方程的各阶导数用相应的差分算式来表示, 离散方程易于进行数学特性分析, 但是建立的离散方法各系数物理特性不明了。后两种方法的推导过程物理概念清晰, 离散方程的系数具有一定的物理意义, 只是不便对方程进行数学特性的分析。本文考虑以上方法优缺点, 采用控制容积积分法建立了物理概念比较清晰的数学模型<sup>[7]</sup>。

控制容积积分法是把物体分成若干微小控制单元, 将能量守恒方程在任意控制容积对空间与时间作积分。控制容积积分法侧重从物理观点来分析, 每一个离散方程都是有限大小容积上某种物理量守恒的表示式<sup>[7]</sup>。

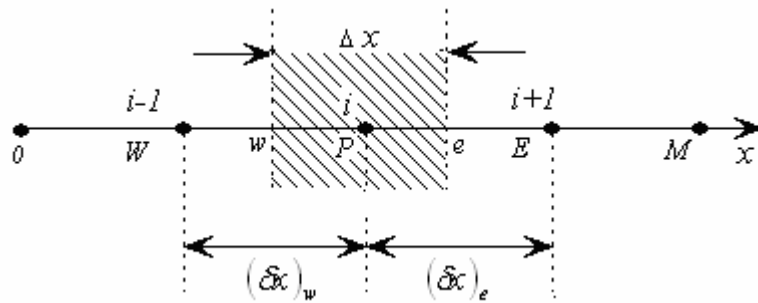


图 3.2 控制容积图

在这里沿厚度方向由下向上均匀划分成  $M$  层不重叠的子区域, 节点位于子区域中心, 这时子区域就是控制容积。在这里以底面为坐标原点, 沿厚度方向上选取  $P$  点作为所研究的点, 点  $W$  和点  $E$  是点  $P$  的两个相邻的节点, 点  $W, P, E$  也分别表示成  $i-1, i, i+1$ 。  $w$  和  $e$  分别表示节点  $W$  和节点  $E$  的界面,  $(\Delta x)_w$  和  $(\Delta x)_e$  表示相邻两节点间的距离,  $\Delta x$  表示相邻两界面间的距离。图中阴影部分为控制容积如图 3.2 所示。

将钢板一维数学模型方程对上图所示的控制容积  $P$  在  $\Delta t$  时间间隔内作积分, 得:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (3.14)$$

$$1、 \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \rho c \int_w^e (T^{t+\Delta t} - T^t) dx$$

这里选定  $T$  随  $x$  变化的型线是阶梯式的, 即同一控制容积中各处的  $T$  值相同, 等于节点  $P$  上的值  $T_p$ , 于是有:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \rho c \int_w^e (T^{t+\Delta t} - T^t) dx = \rho c (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) \cdot \Delta x = \rho c (T_i^{n+1} - T_i^n) \Delta x \quad (3.15)$$

$$2、 \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \lambda_e \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \lambda_w \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt$$

这里选取  $T$  随  $x$  呈分段线性的变化, 则  $\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e$  和  $\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w$  可以表示成:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e = \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} \quad (3.16)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w = \frac{T_P - T_w}{(\delta x)_w} \quad (3.17)$$

得到:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left[ \lambda_e \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \lambda_w \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \left( \lambda_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_P - T_w}{(\delta x)_w} \right) dt \end{aligned} \quad (3.18)$$

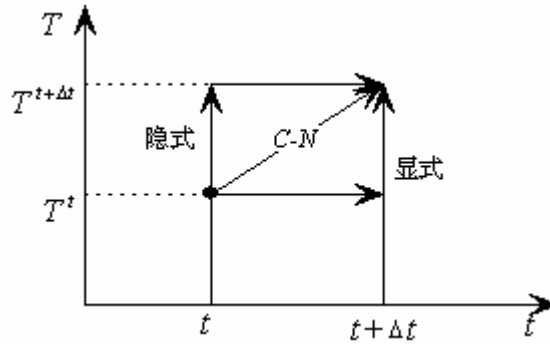


图 3.3 积分路径(型线)

为了完成(3.18)式中的积分, 需要对上式右端项中  $T$  如何随时间而变的型线<sup>[25]</sup>做出选择, 常用的型线有 3 种, 如图 3.3 所示。

根据数值传热学里的介绍, 它们都可以用以下通式来表示:

$$\int_t^{t+\Delta t} T dt = [fT^{t+\Delta t} + (1-f)T^t] \cdot \Delta t = [fT^{n+1} + (1-f)T^n] \cdot \Delta t \quad (3.19)$$

其中:  $f=0$  时, 为显式格式;  $f=1$  时, 为隐式格式;  $f=\frac{1}{2}$  时, 为 C-N 格式。

把上(3.18)式以(3.19)式的方式展开得:

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \\ &= \left[ f \left( \lambda_e \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{(\delta x)_w} \right) + (1-f) \left( \lambda_e \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{(\delta x)_w} \right) \right] \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (3.20)$$

式子(3.22)与式子(3.26)左右相等, 得到钢坯一维数学模型的通式:

$$\rho c (T_i^{n+1} - T_i^n) \frac{\Delta x}{\Delta t} = f \left( \lambda_e \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{(\delta x)_w} \right) + (1-f) \left( \lambda_e \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{(\delta x)_w} \right) \quad (3.21)$$

$f = \frac{1}{2}$  为 C—N 格式:

$$\begin{aligned} 2\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_i^{n+1} - T_i^n) &= \lambda_e \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{(\delta x)_w} \\ &\quad + \lambda_e \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{(\delta x)_w} \end{aligned} \quad (3.22)$$

其中  $\lambda_w$  和  $\lambda_e$  分别是界面 e、w 的导热系数。在计算时, 物性参数值是取存储在节点的位置上的点, 而式子里的是界面上的点的值。在数值传热学中, 介绍了两种解决了这个问题。它给出了两种方法实现了用节点上的物性值来计算相应界面上的数值, 即算术平均法与调和平均法。这里采用调和平均法确定界面 e、w 处的导热系数  $\lambda_w$  和  $\lambda_e$ 。

由调和平均法得:

$$\frac{(\delta x)_e}{\lambda_e} = \frac{(\delta x)_{e-}}{\lambda_i} + \frac{(\delta x)_{e+}}{\lambda_{i+1}} \quad (3.23)$$

因为网格沿 x 方向等分, 即有:

$$\frac{1}{\lambda_e} = \frac{1}{2\lambda_i} + \frac{1}{2\lambda_{i+1}} \quad (3.24)$$

$$\lambda_e = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_i} + \frac{1}{2\lambda_{i+1}}} \quad (3.25)$$

同理可得:



$$\lambda_w = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_{i-1}} + \frac{1}{2\lambda_i}} \quad (3.26)$$

本文采用一维传热模型的 C-N 格式，因为网格均匀划分，所以：  
 $(\delta x)_e = (\delta x)_w = \Delta x$ ，则化简(3.22)得：

$$\begin{aligned} & -\lambda_w T_{i-1}^{n+1} + \left( 2\rho c \frac{\Delta x^2}{\Delta t} + \lambda_e + \lambda_w \right) T_i^{n+1} - \lambda_e T_{i+1}^{n+1} \\ & = \left( 2\rho c \frac{\Delta x^2}{\Delta t} - \lambda_e - \lambda_w \right) T_i^n + \lambda_e T_{i+1}^n + \lambda_w T_{i-1}^n \end{aligned} \quad (3.27)$$

为了便于定义边界条件，钢坯在厚度方向上采用图 3.4 所示的分层方式，由图可见，这里把钢坯沿厚度方向分为 5 层。

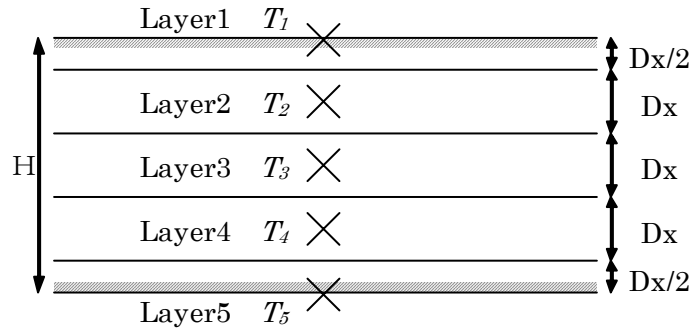


图 3.4 钢坯沿厚度方向 5 层分层示意图

当控制容积处于上下表面边界时，(3.22)式可化简为：

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_i^{n+1} - T_i^n) = \lambda_e \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{(\delta x)_e} - q_{\text{上}} + \lambda_e \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{(\delta x)_e} - q_{\text{上}} \quad (3.28)$$

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_i^{n+1} - T_i^n) = q_{\text{下}} - \lambda_w \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{(\delta x)_w} + q_{\text{下}} - \lambda_w \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{(\delta x)_w} \quad (3.29)$$

由(3.27)、(3.28)、(3.29)式可得钢板温度场一维数学模型：

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} \frac{\rho c_0 \Delta x^2}{\Delta t} + \lambda_{0,1} & -\lambda_{0,1} & \cdots & 0 & 0 \\ -\lambda_{0,1} & 2\frac{\rho c_1 \Delta x^2}{\Delta t} + \lambda_{0,1} + \lambda_{1,2} & -\lambda_{1,2} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\lambda_{9,10} & \frac{\rho c_{10} \Delta x^2}{\Delta t} + \lambda_{9,10} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \cdots \\ T_{10} \end{pmatrix}^{n+1} \\
& = \begin{pmatrix} \frac{\rho c_0 \Delta x^2}{\Delta t} - \lambda_{0,1} & \lambda_{0,1} & \cdots & 0 & 0 \\ \lambda_{0,1} & 2\frac{\rho c_1 \Delta x^2}{\Delta t} - \lambda_{0,1} - \lambda_{1,2} & \lambda_{1,2} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{9,10} & \frac{\rho c_{10} \Delta x^2}{\Delta t} - \lambda_{9,10} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \cdots \\ T_{10} \end{pmatrix}^n + \begin{pmatrix} 2\Delta x q_{\text{上}} \\ 0 \\ \cdots \\ 2\Delta x q_{\text{上}} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

### 3.3 传热学基本理论

#### 3.3.1 导热系数

导热系数 ( $\lambda$ ) 表示在钢板内部热传导能力的大小, 是一个物理属性参数, 与钢坯材质、温度有关。图 3.6 给出了部分典型钢种的导热系数, 由图可以看出, 在低于  $800^\circ\text{C}$  区间, 四种碳钢的导热系数随温度升高基本上呈下降直线趋势。 $800^\circ\text{C}$  以上时, 趋势均偏离原直线或抛物线随温度升高而略有上升。从图中还可以看出, 碳钢碳含量的增大, 导热系数变小, 钢板的含碳量不在这四个值之中时, 可以用线性插值求取导热系数<sup>[26、27]</sup>。根据钢板的含碳量和某一时刻的温度, 利用线性插值的方法可确定相应的导热系数。这样, 针对控制容积中各个节点区间, 在一个时间步长内, 认为是处于一个温度下, 则相应的导热系数根据插值得到一个值, 即可认为在这一节点范围内导热系数是一个常数。因为冷却过程中, 钢板厚度方向的温度不均匀, 所以按照线性插值的方法把不同温度区间的导热系数值代入模型计算得出的温度场更准确<sup>[26、27]</sup>。

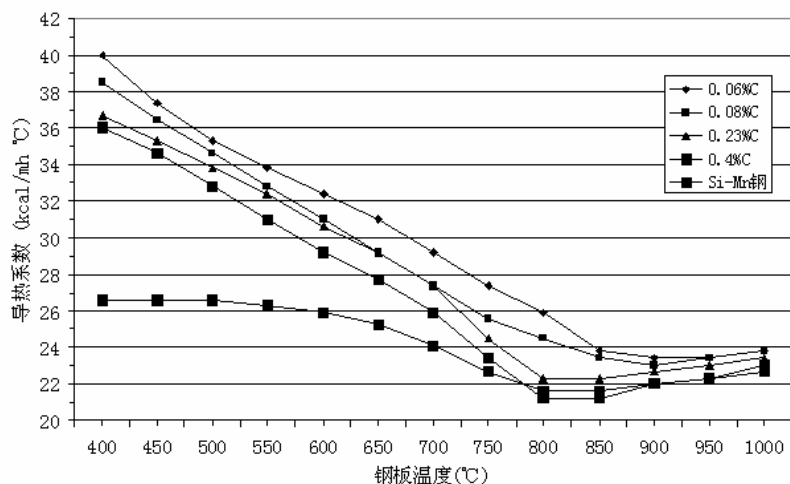


图 3.5 典型钢种的导热系数

### 3.3.2 比热容

比热容(C)表示单位质量物体改变单位温度时吸收或释放的内能，单位  $kJ/(kg \cdot K)$ 。图 3.7 给出了 400~1050℃温度范围内的比热值。由图可以看出，碳钢在 700~750℃温度区间内的比热明显变大，说明此阶段对应相变过程发生，将相变潜热算进了比热之中。而且可以看出该范围内含碳量越高，比热值越大，这和高碳钢的相变发热量很大而低碳钢的相变发热较小的规律是相符的。可以直接依据温度选取对应的比热值模型计算。同样，当含碳量处于 0.06%C, 0.08%C, 0.23%C, 0.4%C 这四种钢划分的某一区间内时，也可以利用线性插值，近似取得对应的比热值<sup>[26, 27]</sup>。

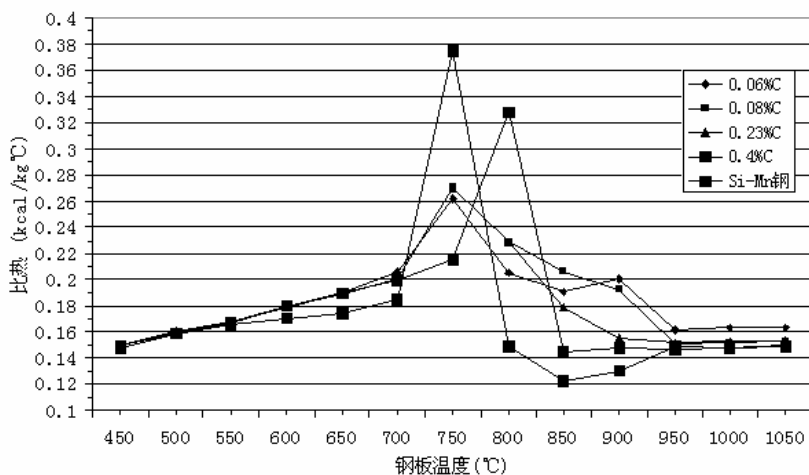


图 3.6 典型钢种的比热容

## 3.4 边界条件

边界条件可分为以下三类：

(1)边界温度值，称为第一类边界条件。这类边界条件最简单的例子就是对应于稳态导热过程，规定边界温度保持常数，不随时间而发生变化。对于非稳态导热过

程，这类边界条件表示为<sup>[26, 27]</sup>：

$$T_b = f_l(t) \quad (t > 0) \quad (3.30)$$

(2) 第二类边界条件是边界面上的热流密度值，边界上的热流密度值为常数，即： $q$  为常数；对应于非稳态导热过程，这类边界条件表示为：

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_b = f(t) \quad (t > 0) \quad (3.31)$$

其中  $\mathbf{n}$  为边界法线方向单位向量， $b$  为边界点， $\lambda$  为该方向导热系数。

(3) 第三类边界条件是边界面上物体与周围流体间的换热系数  $h$  及周围流体的温度  $T_f$ 。以物体被冷却的场合为例，第三类边界条件可表示为：

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_b = h(T_b - T_f) \quad (t > 0) \quad (3.32)$$

在加热过程中，热量主要是从上下表面传递出去的。所以主要考虑的是上下表面的边界条件。

求解状态空间模型的关键所在是计算钢坯上下表面的热流密度。热流密度是指在单位时间内流过物体单位面积的热量。热流密度的大小与钢坯种类、钢坯在炉内的温度、炉温等关系密切。文献[23]把各种因素对热流密度的影响等效成总括热吸收率系数，由此导出的热流密度最常见的形式为  $q = \sigma\phi(T_f^4 - T_s^4)$ 。文献[24]从分析加热炉内的热力学原理入手，建立热流密度的机理公式，公式中各项参数都有明确的物理含义，便于分析工况变化对热流密度的影响，从而为调节热流密度提供了理论依据<sup>[23]</sup>。

钢坯在加热过程中以三种方式进行温度传递，热辐射、对流传热、内部热传递，即炉壁通过辐射方式传递给钢坯表面的热量，炉气通过辐射方式传递给钢坯表面的热量及由炉气通过对流方式传递给钢坯表面的热量，以及钢坯内部热传递<sup>[23]</sup>。

#### 1) 炉气、炉壁通过辐射传递给钢坯的热量

由文献[14]推导的钢坯获得的净热量公式可知钢坯获得的净热量与炉气的热辐射和钢坯的热辐射之差成正比。有如下公式

$$Q_r = HFC1_{con} BC_{con} [(T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4] S_s \quad (3.33)$$

其中  $HFC1_{con}$  表示热流系数 1， $BC_{con}$  表示波尔兹曼常数，值为  $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ， $T_f$  表示炉温， $T_s$  表示钢坯表面温度， $S_s$  表示钢坯的辐射面积。

#### 2) 由炉气通过对流方式传递给钢坯表面的热量

设强制对流给热系数为  $HFC2_{con}$ ，则有<sup>[18]</sup>

$$Q_f = HFC2_{con} (T_f - T_s) S_s \quad (3.34)$$

### 3.5 本章小结

本章首先介绍了三维温度场模型的建模过程，并且将其离散化为一维通式。通过对模型的分析可知，求解模型的关键是确定边界条件中的换热系数以及物性参数(热传导和比热容等)，在对生产实际情况的前提下，并借鉴前人的经验和结论，选择符实际的换热系数和各个参数值。

## 第四章 加热炉计算机过程控制系统设计

### 4.1 UML

统一建模语言, 简称 UML (Unified Modeling Language) 是基于面向对象技术的标准建模语言, 是 OMG(Object Management Group)组织在 1997 年发布的图形化建模语言。它不仅支持从需求分析开始的软件开发的全过程, 还支持面向对象的分析与设计<sup>[17, 18]</sup>。

标准建模语言 UML 的重要内容可以由下列五类图来定义:

第一类是用例图 (Use case): 从用户角度描述系统功能, 并指出各功能的操作者。

第二类是行为图(Behavior diagram): 包括状态图、活动图。描述系统的动态模型和组成对象间的交互关系。其中状态图描述类的对象所有可能的状态以及事件发生时状态的转移条件。活动图描述满足用例要求所要进行的活动以及活动间的约束关系, 有利于识别并行活动。活动图用于简化描述一个过程或者操作的工作步骤。类似流程图, 可以清晰地描述复杂的工作流程<sup>[17, 18]</sup>。

第三类是静态图(Static diagram): 包括类图、对象图。其中类图描述系统中类的静态结构。不仅定义系统中的类, 表示类之间的联系如关联、依赖、聚合等, 也包括类的内部结构(类的属性和操作)。对象图是类图的实例。他们的不同点在于对象图显示类的多个对象实例, 而不是实际的类。一个对象图是类图的一个实例。由于对象存在生命周期, 因此对象图只能在系统某一段时间段存在<sup>[17, 18]</sup>。

第四类是实现图(Implementation diagram)。其中, 包括组件图、部署图。组件图描述代码部件的物理结构及各部件之间的依赖关系。部署图定义系统中软硬件的物理体系结构, 有助于分析和理解部件之间的相互影响程度<sup>[17, 18]</sup>。

第五类是交互图(Interactive diagram): 包括顺序图、协作图。描述对象间的交互关系。其中顺序图显示对象之间的动态合作关系, 它强调对象之间消息发送的顺序; 合作图描述对象间的协作关系。如果强调时间和顺序, 则使用顺序图; 如果强调上下级关系, 则选择合作图<sup>[17, 18]</sup>。

### 4.2 加热炉过程控制系统用例设计

用例建模是 UML 建模的一部分, 也是 UML 里的基础部分, 它的最主要功能就是用来表达系统的功能性需求或行为。

用例建模可分为用例图和用例描述。由参与者(Actor)、用例(Use Case)、系统边界、箭头组成, 描述参与者(对系统有影响的外部对象)与用例(系统功能或目标)

的关系。用例描述用来详细描述用例图中每个用例<sup>[17, 18]</sup>。

#### 4.2.1 过程状态监视系统用例描述

钢板信息初始化用例定义：

- 用例名称：钢坯信息初始化；
- 用例类型：基本用例；
- 用例概述：描述执行服务器端“钢坯信息初始化”控制任务的系统行为；
- 相关外部对象：OPCserver
- 激活事件：通信定时器启动；
- 前置条件：
- 主事件流：
  1. 用例开始；
  2. 系统从 OPCserver 的“进程通信标识数据区”中读取“PDI 更新标识”；
  3. 系统判断“PDI 更新标识”是否变更；
  4. 用例结束。
- 被选事件：
  - 3a. 如果“PDI 更新标识”有变化：
    - 3a1. 系统从 OPCserver 中读取钢板基本信息（PDI），并检测信息完整性，PDI 信息包括：
      - 钢坯 ID；
      - 钢板规格（长、宽、厚、重）；
      - 钢种；
      - 计划入炉时间；
      - 计划驻炉时间；
      - 计划待炉时间；
      - 计划出炉温度；
      - 计划开轧温度；
    - 3a2. 系统根据该钢坯的 PDI 建立钢坯的数据记录，记录内容为：
      - 钢坯 ID；

- 钢板规格（长、宽、厚、重）；
- 钢种；
- 计划入炉时间；
- 计划驻炉时间；
- 计划待炉时间；
- 计划出炉温度；
- 计划开轧温度；
- 钢坯位置；
- 钢坯计算温度（厚度方向分层温度向量，初始值为当前环境温度）；
- 实际入炉时间；
- 实际驻炉时间；
- 实际待炉时间；
- 实际出炉时间；
- 实际出炉温度；
- 实际开轧温度；
- 出炉温度补偿；

3a3. 系统将当前钢坯的“钢坯 ID”、“钢坯宽度”写入 OPCserver 的“钢坯 ID 下装数据区”；

3a4. 系统将“钢坯信息初始化成功事件”写入 OPCserver 的“日志显示数据区”；

3a1a: 如果 PDI 信息不完整：

3a1a 1: 系统将“钢坯信息初始化失败事件”写入 OPCserver 的“日志显示数据区”

3a1a 2: 用例结束。

- 后置条件：系统建立了针对入炉钢坯的钢坯记录。

加热过程跟踪用例定义：

- 用例名称：加热过程跟踪；
- 用例类型：基本用例；
- 用例概述：描述执行服务器端“加热过程跟踪”控制任务的系统行为；



- 相关外部对象: OPCserver, 数据库系统;
- 激活事件: 过程信息更新定时器启动;
- 前置条件:
- 主事件流:
  1. 用例开始;
  2. 系统从 OPCserver 的“炉体基础控制系统专属数据区”中读取并保存当前加热炉的各段炉温的设定值;
  3. 系统从 OPCserver 的“炉体基础控制系统专属数据区”中读取并保存当前加热炉的各炉温检测点的检测值, 同时计算钢坯运行速度, 具体内容包括:
    - 系统将炉内每个钢坯的驻炉(或待炉)时间增加一个时间片长度;
    - 修改运行轨迹记录:
      - ◆ 加入最新轨迹记录, 记录号为 1;
      - ◆ 所有原记录号+1;
      - ◆ 删除 n+1 号记录;
    - 计算钢坯平均运行速度:
      - ◆ 平均炉内速度  $V = (\text{钢坯当前位置} - \text{钢坯入炉位置}) / \text{驻炉时间}$ ;
      - ◆ 最新炉内速度  $v = (1 \text{ 号记录中的位置} - n \text{ 号记录中的位置}) / \text{轨迹时间长度}$ ;
  4. 系统从 OPCserver 的“一、二级通信标识数据区”中读取“钢坯操作变更标识”;
  5. 系统判断“钢坯操作变更标识”是否变更;
  6. 系统提示加热过程工作状态, 内容包括:
    - 加热炉设定炉温和实测炉温;
    - 加热系统工作模式状态, 具体内容包括:
      - 加热炉设定模式状态;
      - 加热炉温修模式状态;
      - 加热炉待炉模式状态;

7. 系统将加热系统的“待出炉钢坯信息”写入 OPCserver 的“待出炉钢坯信息显示数据区”，内容包括：
    - 待出炉钢坯驻炉信息；
    - 待出炉钢坯待炉信息；
    - 待出炉钢坯的运行速度；
  8. 系统加热系统的“炉内钢坯状态信息”写入 OPCserver 的“炉内钢坯状态信息显示数据区”，内容包括：
    - 炉内钢坯温度；
    - 炉内钢坯位置；
  9. 系统将所有钢坯的过程信息保存到数据库中，过程信息包括：
    - ◆ 钢板位置；
    - ◆ 当前炉温；
    - ◆ 钢坯表面温度；
    - ◆ 钢板实际温度；
  10. 用例结束。
- 被选事件：
- 5a. 如果钢坯位置状态标识变化：
    - 5a1. 系统读取钢坯炉内位置列表；
    - 5a2. 系统按炉分解钢坯列表；
    - 5a3. 系统更新钢坯位置状态：
      - 5a3.1. 按炉段分割钢坯列表；
      - 5a3.2. 搜索钢坯离段事件；
      - 5a3.3. 更新钢坯位置状态；
  - 5a3a: 如果钢坯离开非“均热段”：
    - 5a3a1: 系统将炉段中“待出段钢坯”从炉段去除；
    - 5a3a2: 系统将离开炉段的钢坯放入“下游邻接炉段”；
  - 5a3b: 如果钢坯离开“均热段”：
    - 5a3b1: 系统将出炉钢坯的 PDI 归类保存，以便用于钢坯温度修正；
    - 5a3b2: 系统将出炉钢坯的 PDI 写入 OPCserver 的“轧钢控制系统专属数据区”的“PDI 数据项中”，同时变更“进程通信标识数据区”中的

“接收出炉钢坯 PDI 标识”;

5a3b3: 系统将“钢坯出炉操作事件”写入 OPCserver 的“日志显示数据区”;

- 后置条件: 系统更新了炉内钢坯的温度状态, 并处理了相应的入/出炉处理。

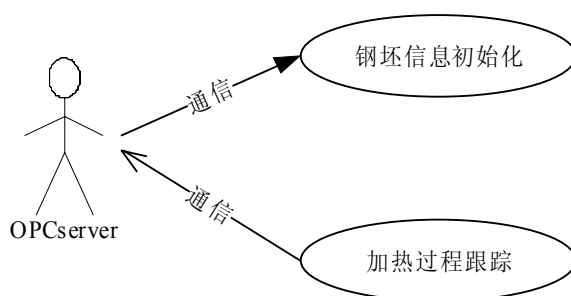


图 4.1“过程状态监视系统”控制用例图

#### 4.2.2 过程状态优化系统用例描述

钢坯温度补偿修正用例定义:

- 用例名称: 钢坯温度补偿修正;
- 用例类型: 基本用例;
- 用例概述: 描述执行服务器端“钢坯温度补偿修正”控制任务的系统行为;
- 相关外部对象: OPCserver;
- 激活事件: 通信定时器启动;
- 前置条件:
- 主事件流:
  1. 用例开始;
  2. 系统从 OPCserver 的“进程通信标识数据区”中读取“开轧温度样本更新标识”;
  3. 系统判断“开轧温度样本更新标识”是否变更;
  4. 用例结束。
- 被选事件:
  - 3a. 如果开轧温度样本更新标识变化:
    - 3a1. 系统从 OPCserver 的“轧钢控制系统专属数据区”中读取“钢坯

开轧温度样本”；

3a2. 系统根据“钢坯开轧温度样本”的“钢坯 ID”保存该钢坯的“实际开轧温度”；

3a3. 系统将钢板的 PDI 保存到数据库系统中；

3a4. 系统检测样本的反馈有效性，并计算出炉温度补偿值；

3a4a: 如果开轧温度样本无效：

3a4a1: 系统将“样本失效事件”写入 OPCserver 的“日志显示数据区”；

3a4a2: 用例结束；

3a4b: 如果系统处于自动钢坯温度修正状态：

3a4b1: 系统修正“样本坯”曾经驻过加热炉中所有钢坯的“温度补偿值”；

3a4b2: 系统将“钢坯温度修正操作事件”写入 OPCserver 的“日志显示数据区”；

■ 后置条件：系统完成了钢坯温度补偿修正。

炉温优化设定用例说明：

■ 用例名称：炉温优化设定；

■ 用例类型：基本用例；

■ 用例概述：描述执行服务器端“炉温优化设定”控制任务的系统行为；

■ 相关外部对象：OPCserver；

■ 激活事件：炉温设定定时器启动；

■ 前置条件：系统处于自动优化设定工作模式；

■ 主事件流：

1. 用例开始；
2. 系统根据“均热段”中每个钢坯的“计划出炉温度”计算钢坯的“预期炉温”；
3. 系统根据“均热段”中所有钢坯的“预期炉温”计算“均热段”的“最佳炉温”；
4. 系统根据“均热段”的“最佳炉温”，以及“加热段 3”中每个钢坯的“计划出炉温度”计算钢坯的“预期炉温”；

5. 系统根据“加热段 3”中所有钢坯的“预期炉温”计算“加热段 3”的“最佳炉温”；
6. 系统根据“均热段”和“加热段 3”的“最佳炉温”，以及“加热段 2”中每个钢坯的“目标出炉温度”计算钢坯的“预期炉温”；
7. 系统根据“加热段 2”中所有钢坯的“预期炉温”计算“加热段 2”的“最佳炉温”；
8. 系统将各炉段的“设定炉温”写入 OPCserver 的“炉体基础控制系统的设定炉温专属数据区”；
9. 系统将“加热炉优化设定操作事件”写入 OPCserver 的“日志显示数据区”；
10. 用例结束。

■ 被选事件：

后置条件：系统制定了加热炉优化设定，并下装到炉体基础控制系统。

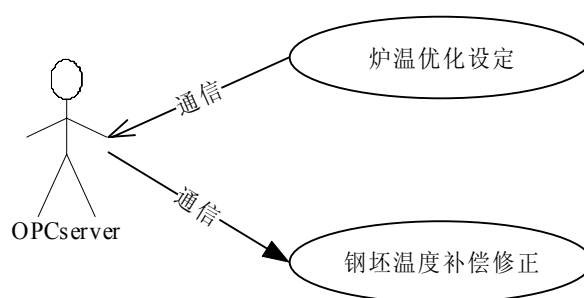


图 4.2 “过程状态优化系统”控制用例图

### 4.2.3“人机交互”系统控制用例描述

显示钢坯记录用例定义：

- 用例名称：显示钢坯记录；
- 用例类型：基本用例；
- 用例概述：描述执行服务器端“显示钢坯记录”控制任务的系统行为；
- 相关外部对象：OPCserver；
- 激活事件：通信定时器启动；
- 前置条件：
- 主事件流：
  1. 用例开始；

2. 系统从 OPCserver 的“前后台通信标识数据区”中读取“请求显示钢坯记录标识”
3. 系统判断“请求显示钢坯记录标识”是否变更;
4. 用例结束。

■ 被选事件:

- 3a. 如果“请求显示钢坯记录标识”变化:

3a1. 系统将指定钢坯 ID 的“钢坯记录信息”写入 OPCserver 的“钢坯记录专属数据区”, 内容包括:

- ◆ 钢坯 ID;
- ◆ 钢板规格 (长、宽、厚、重);
- ◆ 钢种;
- ◆ 计划入炉时间;
- ◆ 计划驻炉时间;
- ◆ 计划待炉时间;
- ◆ 计划出炉温度;
- ◆ 设定开轧温度;
- ◆ 钢坯位置;
- ◆ 钢坯计算温度 (表面, 芯部);
- ◆ 实际入炉时间;
- ◆ 实际驻炉时间;
- ◆ 实际待炉时间;
- ◆ 出炉温度补偿;
- ◆ 实际待炉时间;
- ◆ 剩余待炉时间;
- ◆ 平均运行速度;
- ◆ 最新运行速度;
- ◆ 加权运行速度;

■ 后置条件: 系统显示了指定待冷钢坯记录信息。

保存钢坯记录用例定义:

■ 用例名称: 保存钢坯记录;

- 用例类型：基本用例；
- 用例概述：描述执行服务器端“保存钢坯记录”控制任务的系统行为；
- 相关外部对象： OPCserver；
- 激活事件：通信定时器启动；
- 前置条件：
- 主事件流：
  1. 用例开始；
  2. 系统从 OPCserver 的“前后台通信标识数据区”中读取“请求保存钢坯记录标识”；
  3. 系统判断“请求保存钢坯记录标识”是否变更；
  4. 用例结束。
- 备选事件流：
  - 3a. 如果“请求保存钢坯记录信息标识”状态保持不变：
    - 3a1. 系统从 OPCserver 的“钢坯记录专属数据区”中读取“钢坯记录信息”；
    - 3a2. 系统根据“钢坯记录”中的“钢坯 ID”更新指定钢坯记录，内容包括：
      - ◆ 钢坯 ID；
      - ◆ 钢板规格（长、宽、厚、重）；
      - ◆ 钢种；
      - ◆ 计划入炉时间；
      - ◆ 计划驻炉时间；
      - ◆ 计划待炉时间；
      - ◆ 计划出炉温度；
      - ◆ 设定开轧温度；
      - ◆ 钢坯位置；
      - ◆ 钢坯计算温度（表面，芯部）；
      - ◆ 实际入炉时间；
      - ◆ 实际驻炉时间；
      - ◆ 实际待炉时间；

- ◆ 出炉温度补偿;
- ◆ 实际待炉时间;
- ◆ 剩余待炉时间;

3a3. 系统系统将“钢板记录修改事件”写入 OPCserver 的“日志显示数据区”;

- 后置条件: 系统保存了指定钢坯记录信息。

显示工作模式状态用例定义:

- 用例名称: 显示工作模式状态;
- 用例类型: 基本用例;
- 用例概述: 描述执行服务器端“显示工作模式状态”控制任务的系统行为;
- 相关外部对象: OPCserver;
- 激活事件: 通信定时器启动;
- 前置条件:
- 主事件流:
  1. 用例开始;
  2. 系统从 OPCserver 的“前后台通信标识数据区”中读取“请求显示工作模式状态标识”;
  3. 系统判断“请求显示工作模式状态标识”是否变更;
  4. 用例结束。
- 备选事件流:

3a. 如果“请求显示工作模式状态”变化:

3a1. 系统组织工作模式状态列表, 内容为:

- 自动设定允许状态[2];
- 自动温修允许状态[2];
- 自动待炉允许状态[2];

3a2. 系统将“工作模式状态列表”信息发写入到 OPCserver 的“工作模式状态显示数据区”;

- 后置条件: 系统显示了系统当前的工作模式状态;

显示工作模式状态用例说明:



- 用例名称：显示工作模式状态；
- 用例类型：基本用例；
- 用例概述：描述执行服务器端“显示工作模式状态”控制任务的系统行为；
- 相关外部对象： OPCserver；
- 激活事件：通信定时器启动；
- 前置条件：
- 主事件流：
  - 1、用例开始；
  - 2、系统从 OPCserver 的“通信标识数据区”中读取“请求显示工作模式状态标识”；
  - 3、系统判断“请求显示工作模式状态标识”是否变更；
  - 4、用例结束。
- 备选事件流：
  - 3a. 如果“请求显示工作模式状态”变化：
    - 3a1. 系统组织工作模式状态列表，内容为：
      - ◆ 自动设定允许状态；
      - ◆ 自动温修允许状态；
    - 3a2. 系统将“工作模式状态列表”信息发写入到 OPCserver 的“工作模式状态显示数据区”；
- 最小保证：
- 后置条件：系统显示了系统当前的工作模式状态。

保存工作模式状态：

- 用例名称：保存工作模式状态；
- 用例类型：基本用例；
- 用例概述：描述执行服务器端“保存工作模式状态”控制任务的系统行为；
- 相关外部对象： OPCserver；
- 激活事件：通信定时器启动；
- 前置条件：
- 主事件流：
  1. 用例开始；

2. 系统从 OPCserver 的“前后台通信标识数据区”中读取“请求保存工作模式状态标识”；
3. 系统判断“请求保存工作模式状态标识”是否变更；
4. 用例结束。

■ 备选事件流：

3a. 如果“请求保存工作模式状态”变化：

3a1. 系统从 OPCserver 的“工作模式状态显示数据区”中读取“工作模式状态”，内容为：

- 自动设定允许状态[2]；
- 自动温修允许状态[2]；
- 自动待炉允许状态[2]；

3a2. 系统更新当前工作模式状态信息；

■ 后置条件：系统保存了新的系统工作模式状态。

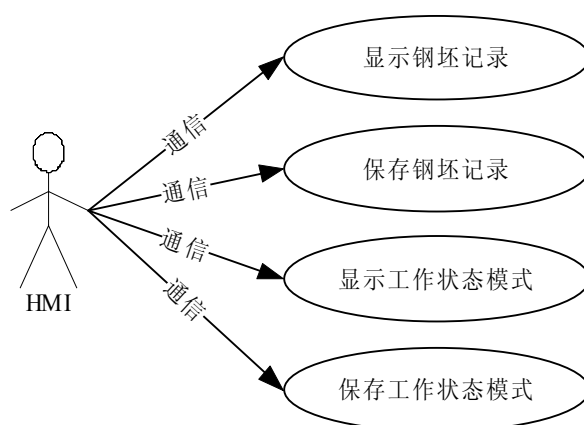


图 4.3 “人机交互系统”控制用例图

## 4.3 对象模型设计

### 4.3.1 对象类选择原则

#### (1) 对象直接映射原则

原则 1.1：如果用例存在外部相关对象，针对每个外部相关对象，选择一个接口对象类，用于封装对外部相关对象的访问操作；

原则 1.2：如果在需求分析阶段已经定义了实体分析类，针对每个实体分析类，定义一个对象类，用于封装实体分析类所承担的控制任务。

#### (2) 复杂任务剥离原则：

原则 2.1: 如果存在对某种工件对象属性特征的模型预测需求, 针对该工件对象类, 定义一个状态模型对象类, 用于封装工件状态追踪服务任务;

原则 2.2: 如果存在针对某种工件对象目标属性特征的处理设定需求, 针对该工件实体类, 定义一个设定模型对象类, 用于封装制定工件处理设定信息服务任务。

(3) 设计模式扩展原则:

原则 3.1: 以构建结构稳定, 技术成熟的设计模式为目的, 定义必要的对象类, 使对象模型的(部分)结构能够尽量向固定设计模式靠近。

#### 4.3.2 基于对象直接映射原则对象类选择

根据直接对应的对象类初选原则, 确定对应于实体类的对象类映射如下:

- DBI 对象类: 对应于外部相关对象数据库系统, 用于支持对数据库系统的访问;
- OPCClient 对象类: 对应相关外部对象 OPCserver, 用于支持对 OPCserver 的访问;
- 钢坯对象类: 对应钢坯实体类;
- PDI 对象类: 对应 PDI 实体类;
- 炉前辊道对象类: 对应炉前辊道实体;
- 加热炉对象类: 对应加热炉实体类;
- 加热系统对象类: 对应加热系统实体类;
- 轧制系统对象类: 对应轧制系统实体类。

#### 4.3.3 基于负责任务剥离原则对象类选择

依据复杂任务剥离原则, 确定复杂任务服务对象类如下:

- 设定模型对象类: 负责根据“目标温降速率”、“返红温度”和“初始温度场”, 计算针对指定钢板的“设定冷却水流量”和“设定辊道速度”;
- 温度场模型对象类: 负责根据“钢板温度场”、“冷却水流量”, 计算 $\Delta t$  时间间隔后“钢板温度场”。

#### 4.3.4 基于用例实现的对象类间关系

根据用例实现所需要的对象类实例之间的连接需求, 可以得到对象类之间的关联关系如下:

- “OPC 接口”与“加热系统”之间存在关联；（加热过程使用 OPC 接口）
- “加热系统”与“轧制系统”之间存在关联；（加热过程通过轧制过程访问已出炉钢坯的 PDI）；
- “加热系统”与“加热炉”之间存在聚合关联；（加热过程含有两个加热炉）；
- “加热炉”与“炉前辊道”之间存在的组合关系；（每个加热炉有两段炉前辊道）；
- “炉前辊道”与“钢坯”之间存在聚合；（每个炉前辊道可能含有多个钢坯）；
- “加热炉”与“钢坯”之间存在聚合；（每个炉段可能含有多个钢坯）；
- “轧制过程”与“PDI”之间存在聚合关联；（轧制过程可能包含已出炉钢坯的 PDI）；
- “钢坯”与“PDI”之间存在组合关联；（每个钢坯一定伴随着一个 PDI）；

原则上，“预期炉温模型对象类”和“温度场模型对象类”属于“加热炉对象类”，然而，为了便于钢坯（钢坯对象类实例）访问，在创建钢坯时，系统为其建立了与两个服务类实例（预期炉温模型和温度场模型）的链接，因此“钢坯对象类”分别对“温度场模型对象类”和“预期炉温模型对象类”存在单项关联。同时，由于“预期炉温模型”需要“温度场模型”提供服务支持，因此存在“预期炉温模型对象类”到“温度场模型对象类”的单项关联。

增加了服务类的系统对象类图如图 4.4 所示。

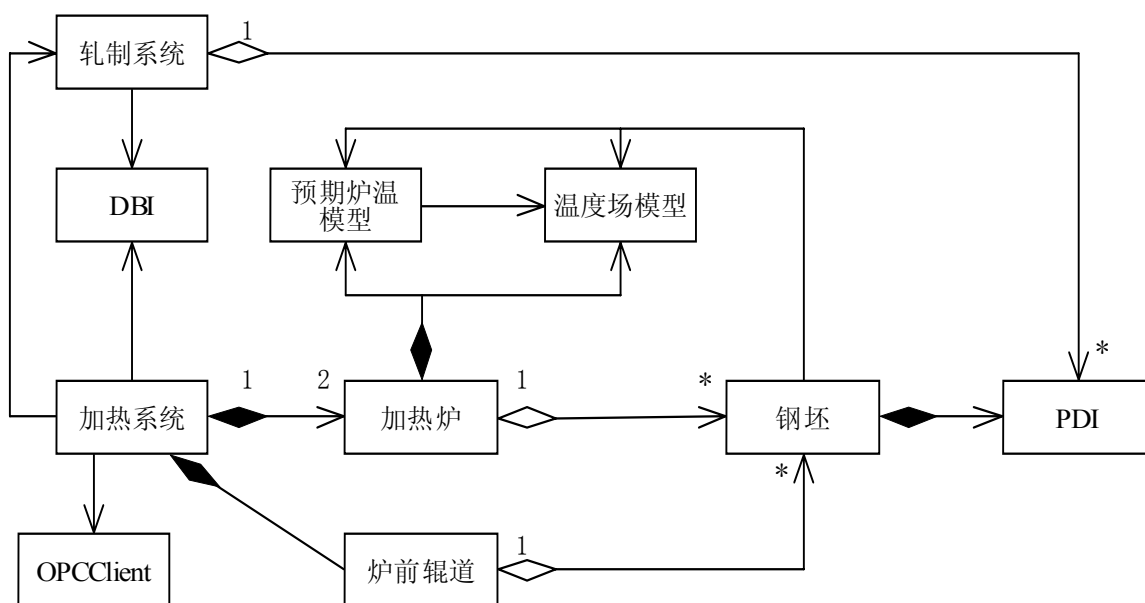


图 4.4 加热炉过程控制系统对象类图

4.4 基于对象类的用例实现

4.4.1“钢板信息初始化”用例实现

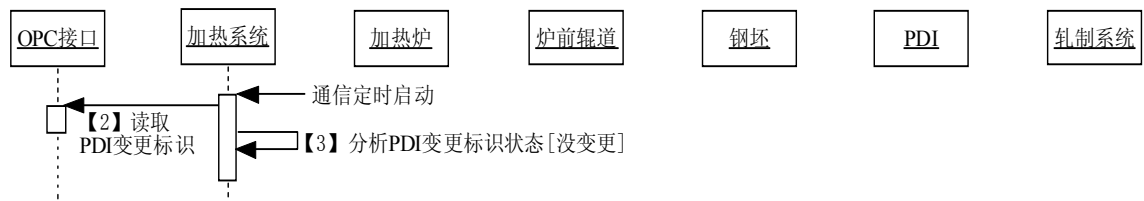


图 4.5 钢板信息初始化用例主事件流实现交互图

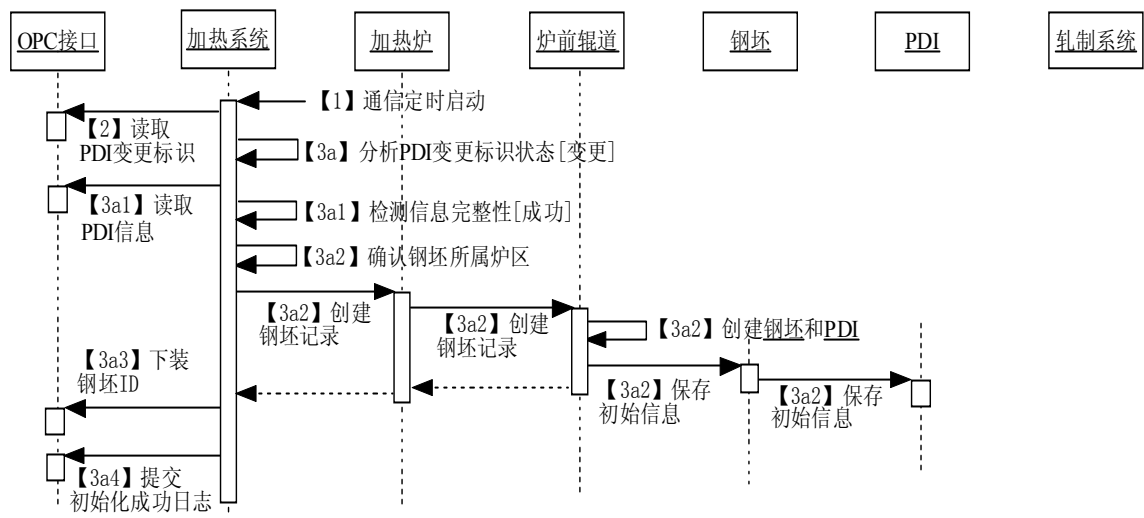


图 4.6 钢板信息初始化用例 3a 备选事件流实现交互图

4.4.2“加热过程跟踪”用例实现

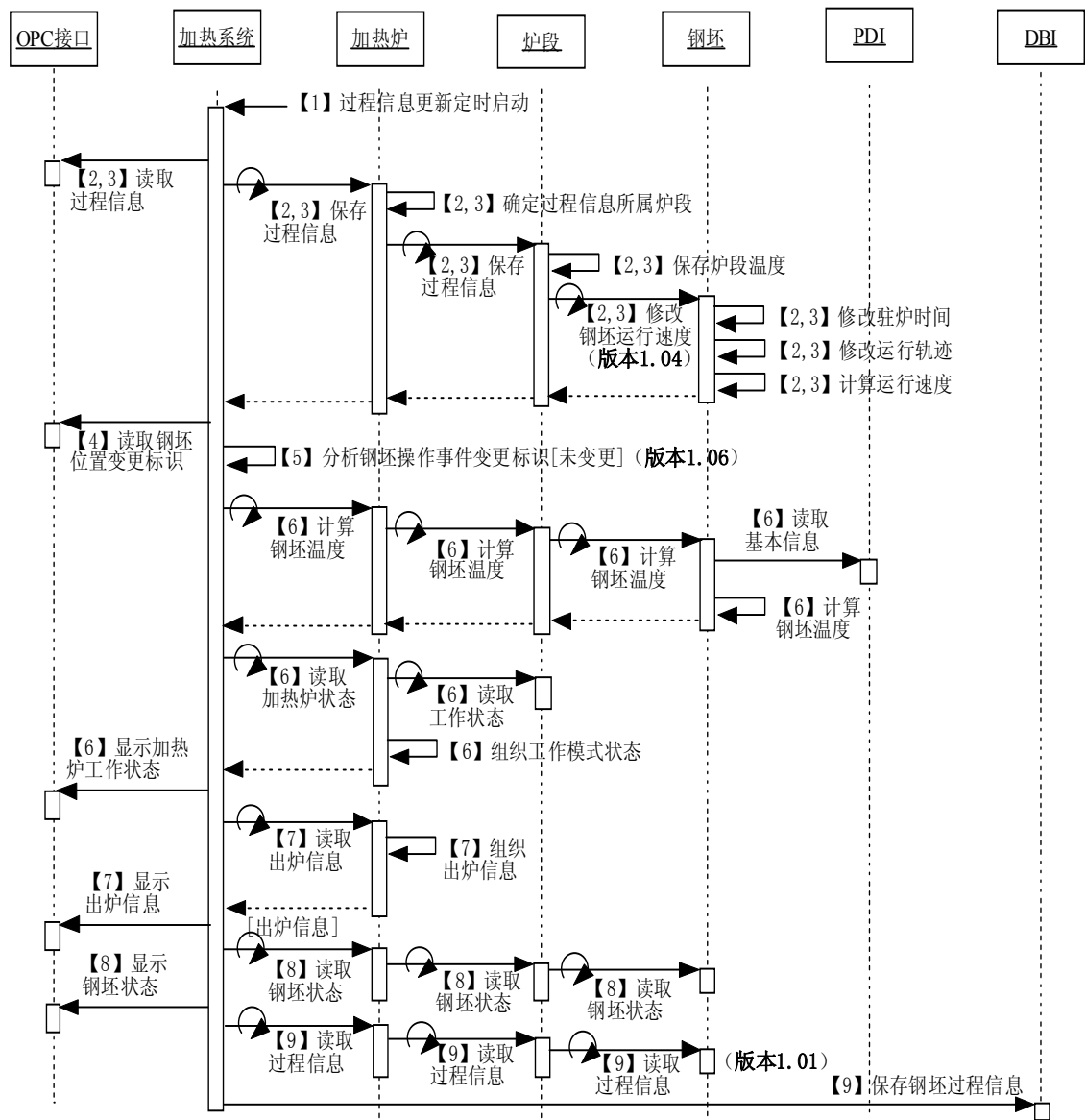


图 4.7 加热过程跟踪用例主事件流实现交互图

4.4.3“钢坯温度修正”用例实现

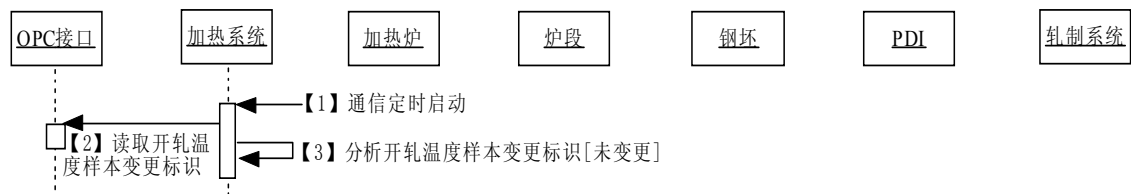


图 4.8 钢坯温度修正用例主事件流实现交互图

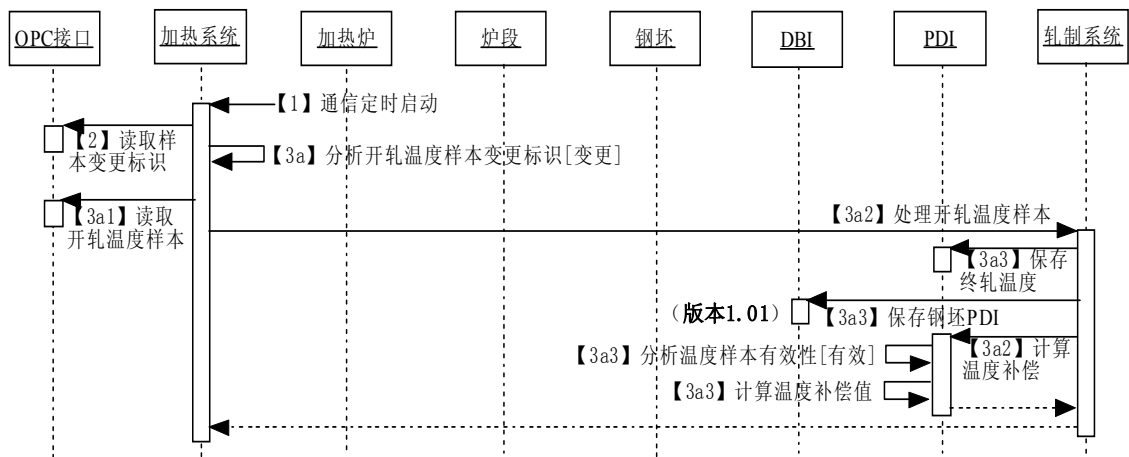


图 4.9 钢坯温度修正用例 3a 备选事件流实现交互图

#### 4.4.4“炉温优化设定”用例实现

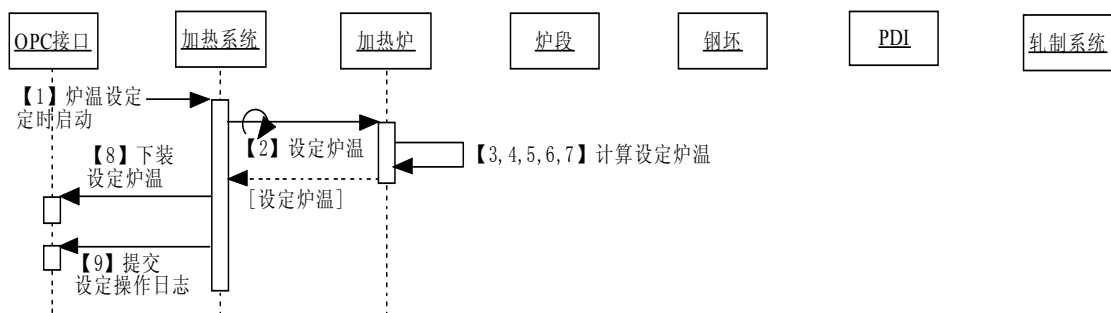


图 4.10 炉温优化设定用例主事件流实现交互图

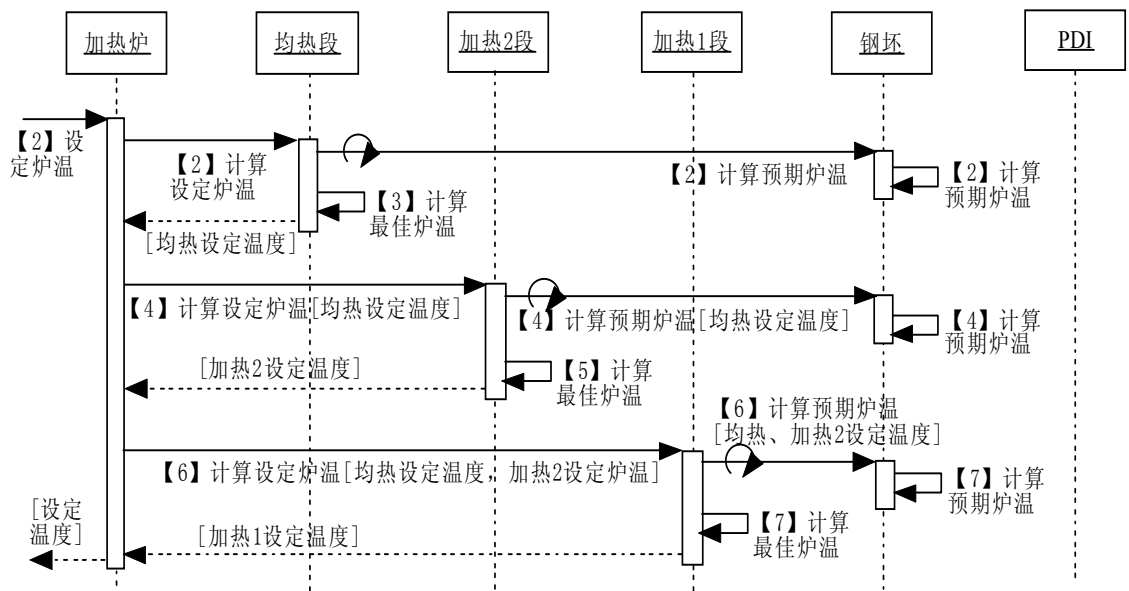


图 4.11 加热炉设定炉温操作实现交互图

4.4.5“显示钢坯记录”用例实现

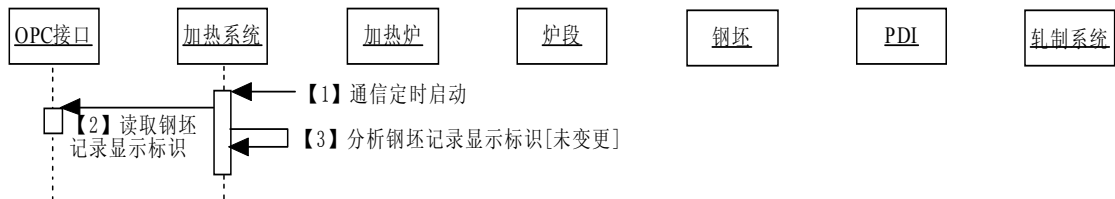


图 4.12 显示钢坯记录用例主事件流实现交互图

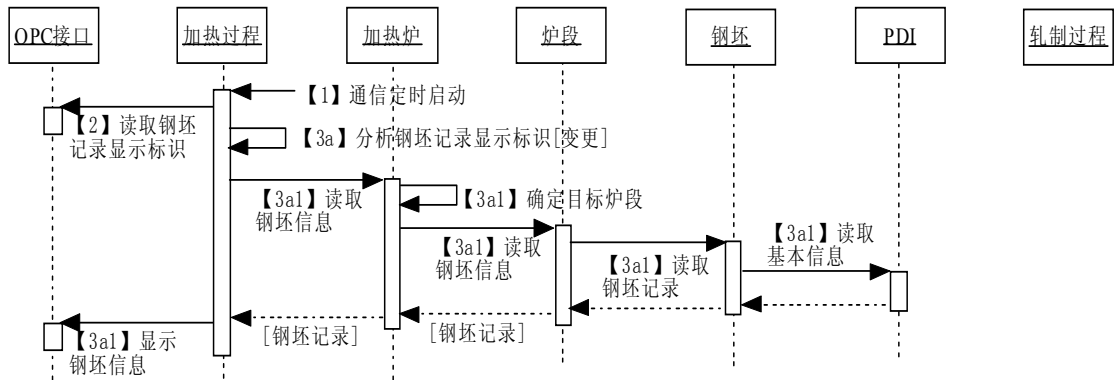


图 4.13 显示钢坯记录用例 3a 备选事件流实现交互图

4.4.6“保存钢坯记录”用例实现

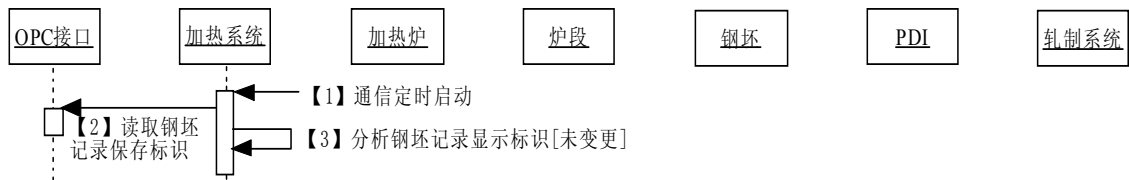


图 4.14 保存钢坯记录用例主事件流实现交互图

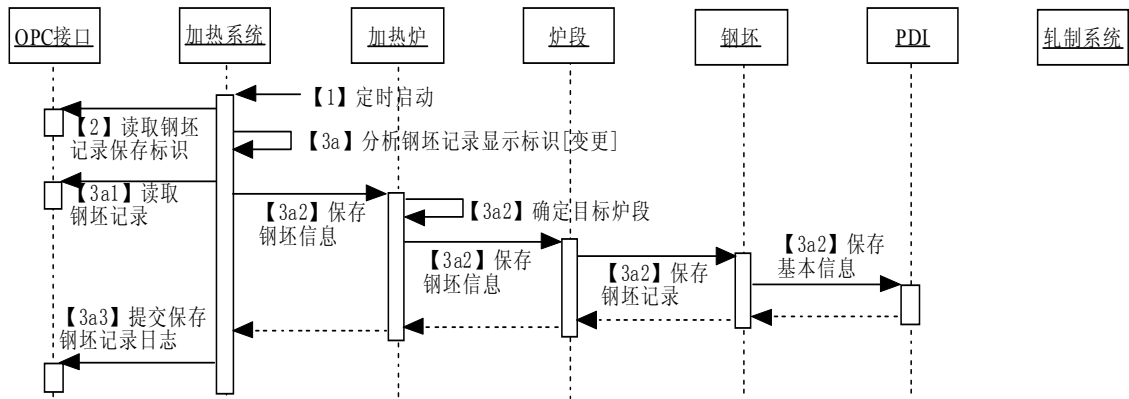


图 4.15 保存钢坯记录用例 3a 备选事件流实现交互图



4.4.7“显示工作模式”用例实现

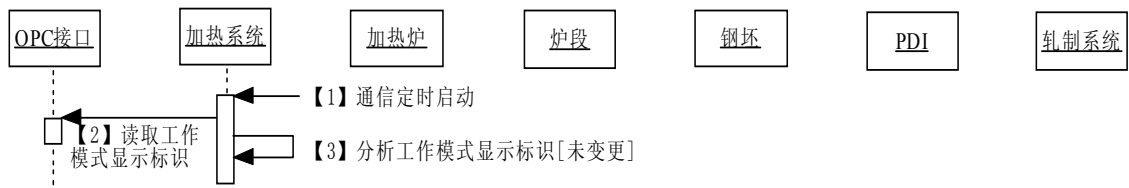


图 4.16 显示工作模式状态用例主事件流实现交互图

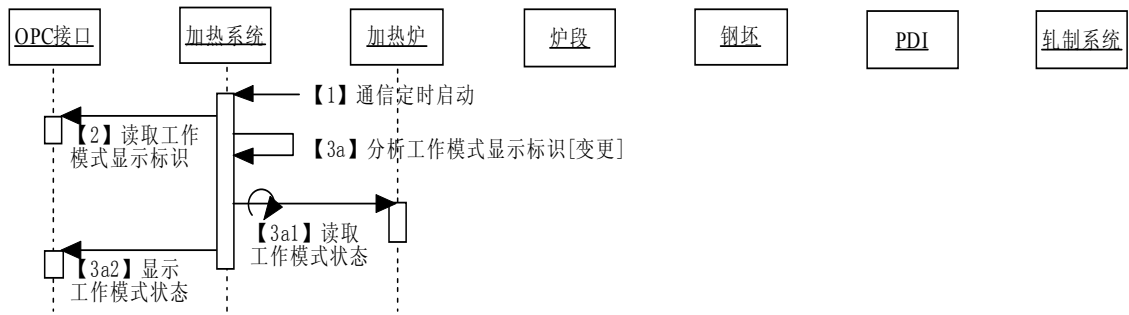


图 4.17 显示工作模式状态用例 3a 备选事件流实现交互图

4.4.8“保存工作模式”用例实现

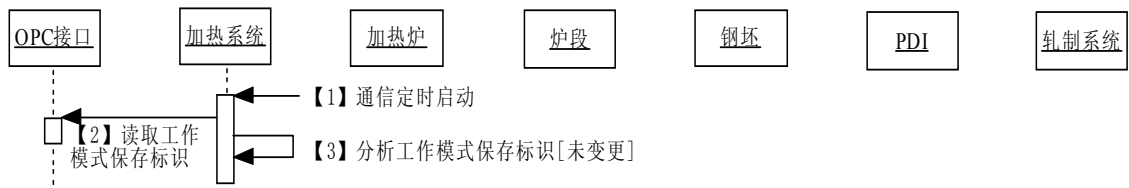


图 4.18 保存工作模式状态用例主事件流实现交互图

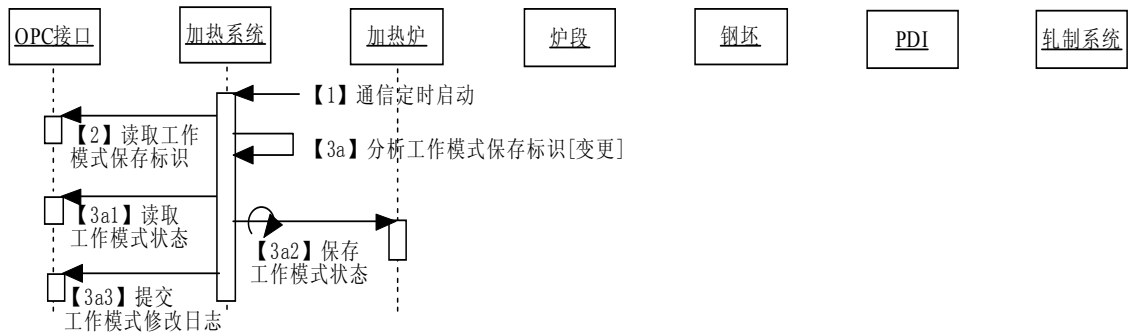


图 4.19 保存工作模式状态用例 3a 备选事件流实现交互图

4.5 部分类关键操作流程介绍

4.5.1“计算预期炉温”活动流程

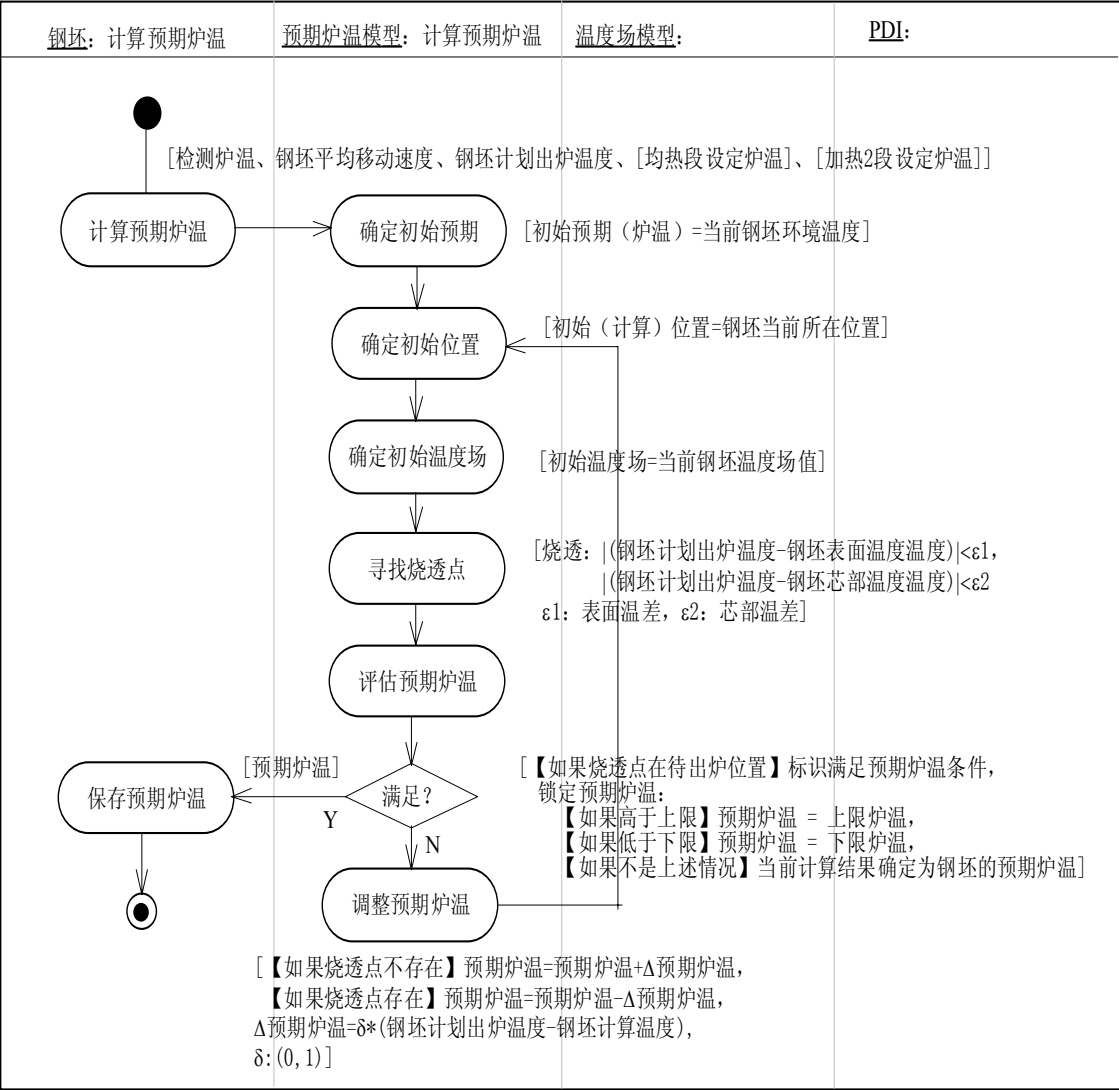


图 4.20 计算预期炉温活动图

4.5.2“寻找烧透点”活动流程

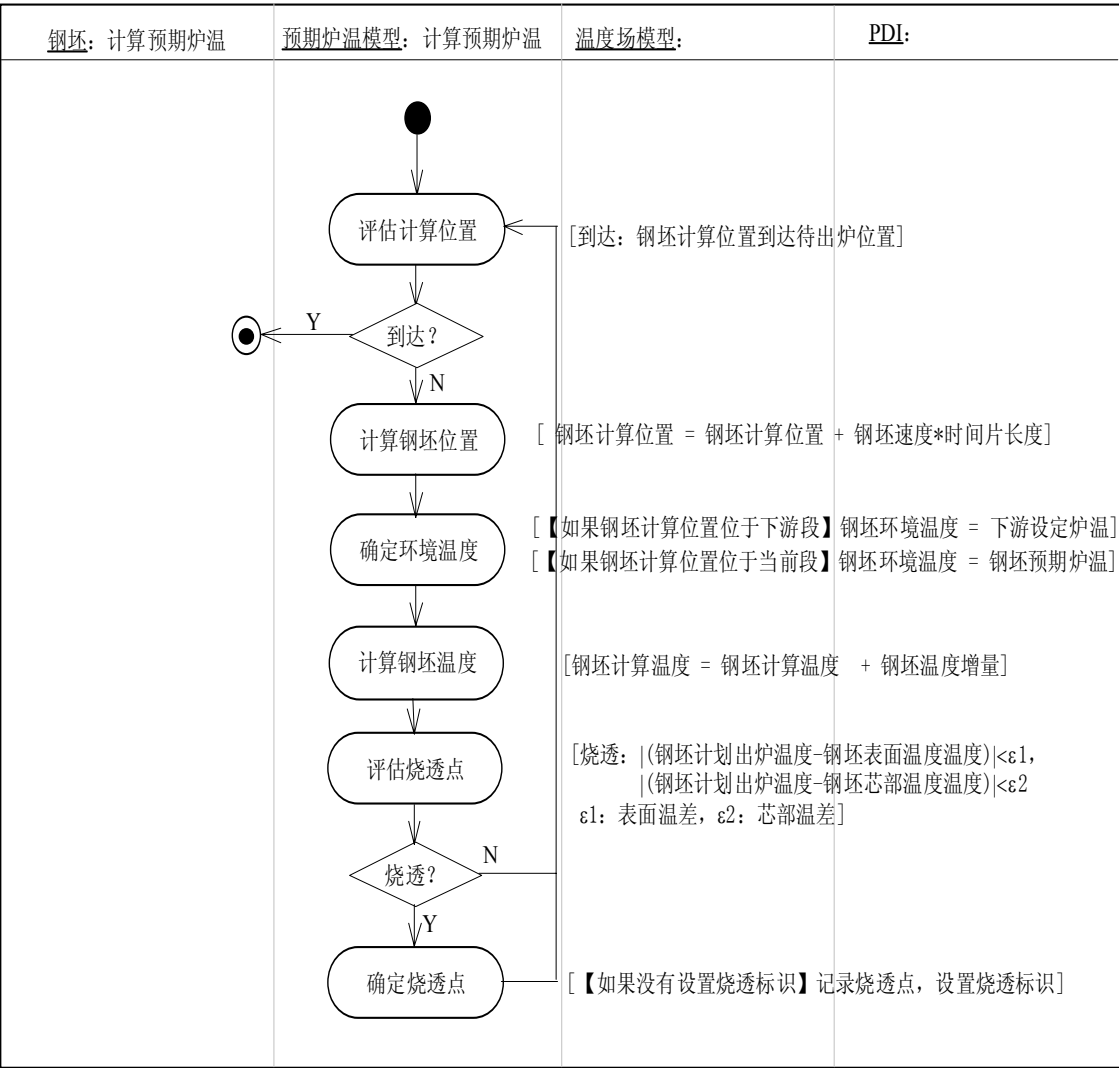


图 4.21 寻找烧透点活动图

4.6 本章小结

本章依据鞍钢鲅鱼圈 3.8 米厚板厂的工艺设计，针对加热炉系统的实际生产情况，采用基于用例驱动的分析、设计方法开发、实现中厚板加热炉计算机过程控制的软件系统。该设计将基于用例驱动的处理问题思路引入到控制问题分析中，建立了结构清晰的软件架构，并以计算预期炉温和寻找烧透点为例做程序详细流程介绍。

## 第五章 加热炉计算机过程控制系统实现

### 5.1 系统配置介绍

本系统是在 Windows 2003 系统平台下开发的，系统硬件平台主要采用 1 台工业控制计算机作为 HMI，一台服务器作为加热炉过程控制系统计算机。一级之间通过 ProfiBus\_DP 网通讯，二级通过以太网进行互联。系统配置图如图 5.1 所示。由于现场生产需要，不同地点的操作人员需要访问相同的数据，所以设计成分布式系统(C/S)。加热炉过程控制系统程序、OPCServer 和数据库共同放在后台服务器上运行。分布在不同地点的客户端进程同样通过以太网访问 OPCServer，这样实现了跨区域的数据共享和数据同步<sup>[32]</sup>。

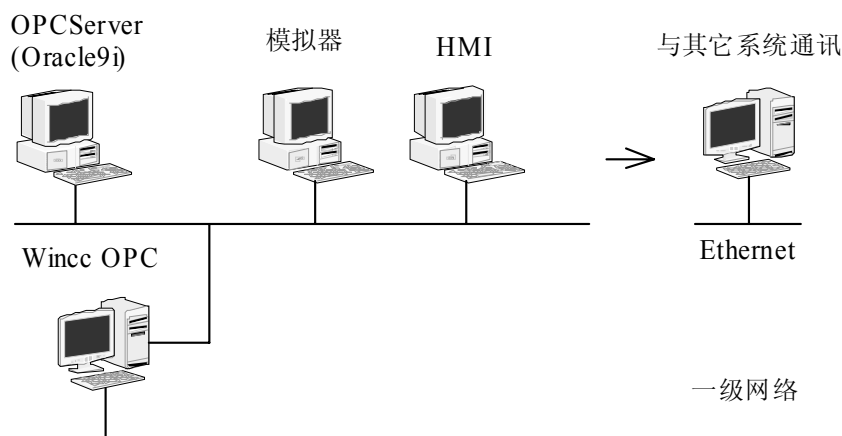


图 5.1 控制系统配置图

### 5.2 系统服务器

#### 5.2.1 加热炉过程控制系统程序

加热炉计算机过程控制系统程序如第四章所述，负责读取轧钢系统发出的钢板 PDI 信息，将待入炉钢坯的 PDI 信息发送给辊道系统，辊道系统完成对中后，向一级 PLC 系统发送钢坯入炉指令，钢坯入炉后将该块钢坯信息保存到数据库中，并跟踪该钢坯在炉内的位置同时计算钢坯温度，预报钢坯出炉温度。钢坯出炉后将该钢坯出炉信息发送给轧钢系统。

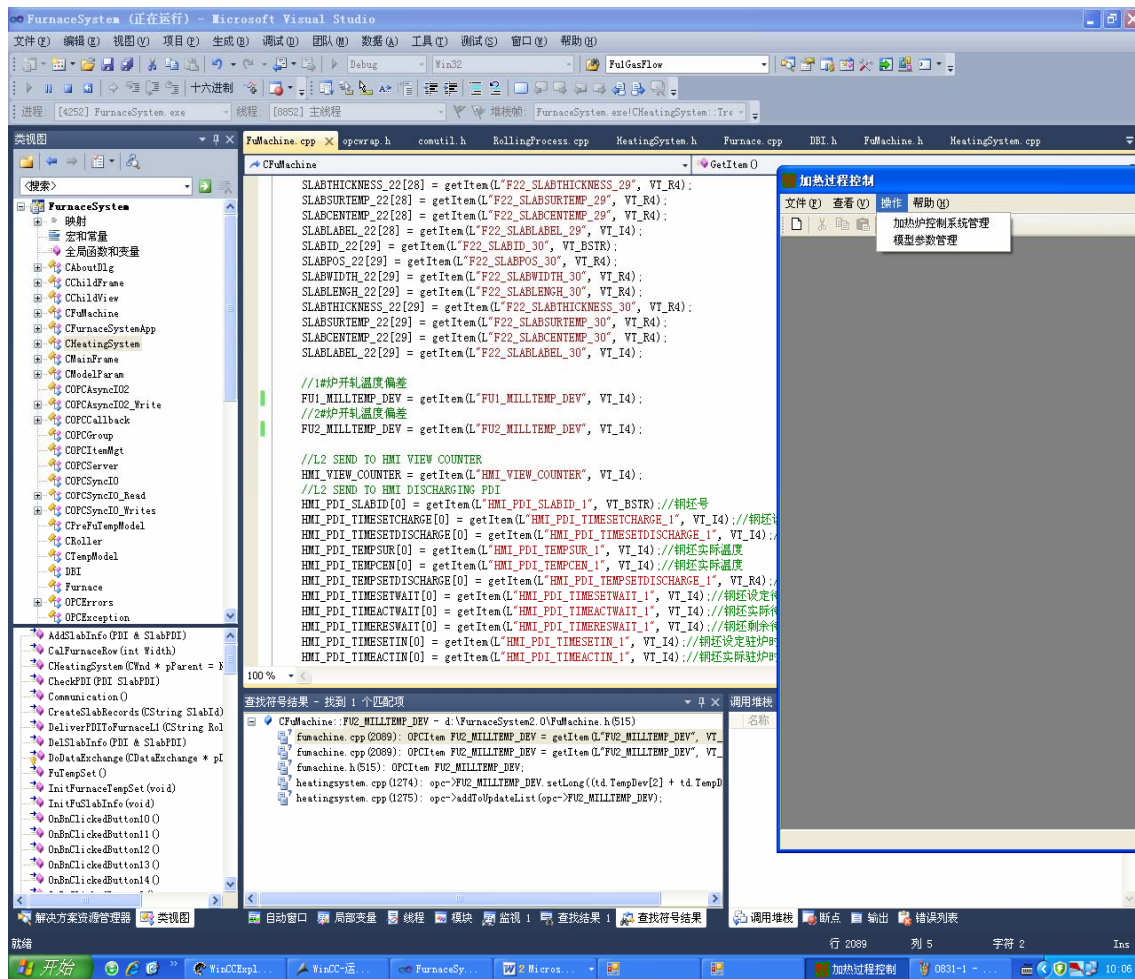


图 5.2 加热炉计算机过程控制系统后台程序

## 5.2.2 WINCC\_OPCServer

WINCC 采用西门子最新亚洲版本 7.0，负责 1 级（基础自动化级）、2 级（过程控制级）及轧钢系统信息中转，所有的数据信息都将写入 WINCC\_OPCServer 供其他用户使用。

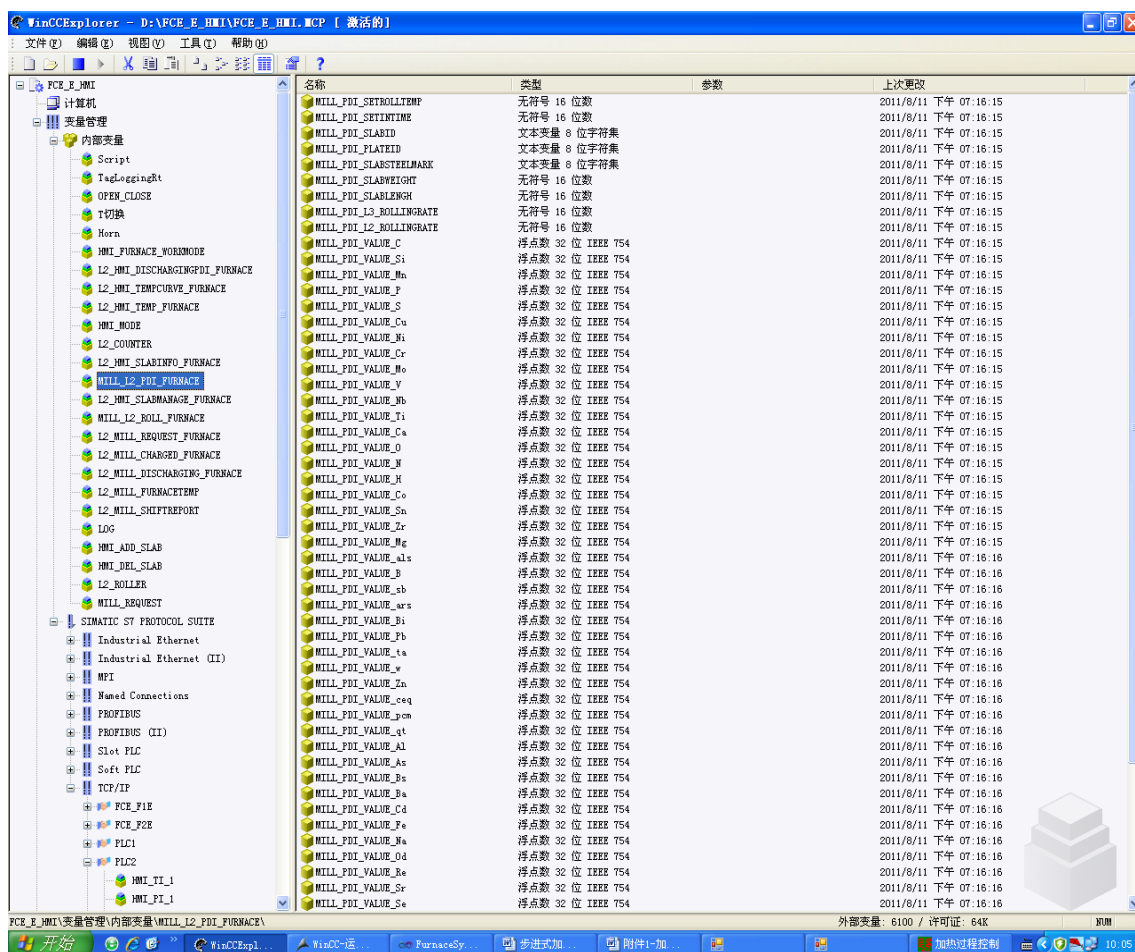


图 5.3 加热炉系统 OPCServer 通讯变量

## 5.2.3 数据库

数据库采用 Oracle 10g，负责加速冷却系统程序数据的存储、查询、修改。每块入炉钢坯的过程信息都要写入数据库中，轧钢系统发出的 PDI 电报信息也要保存在数据库中。

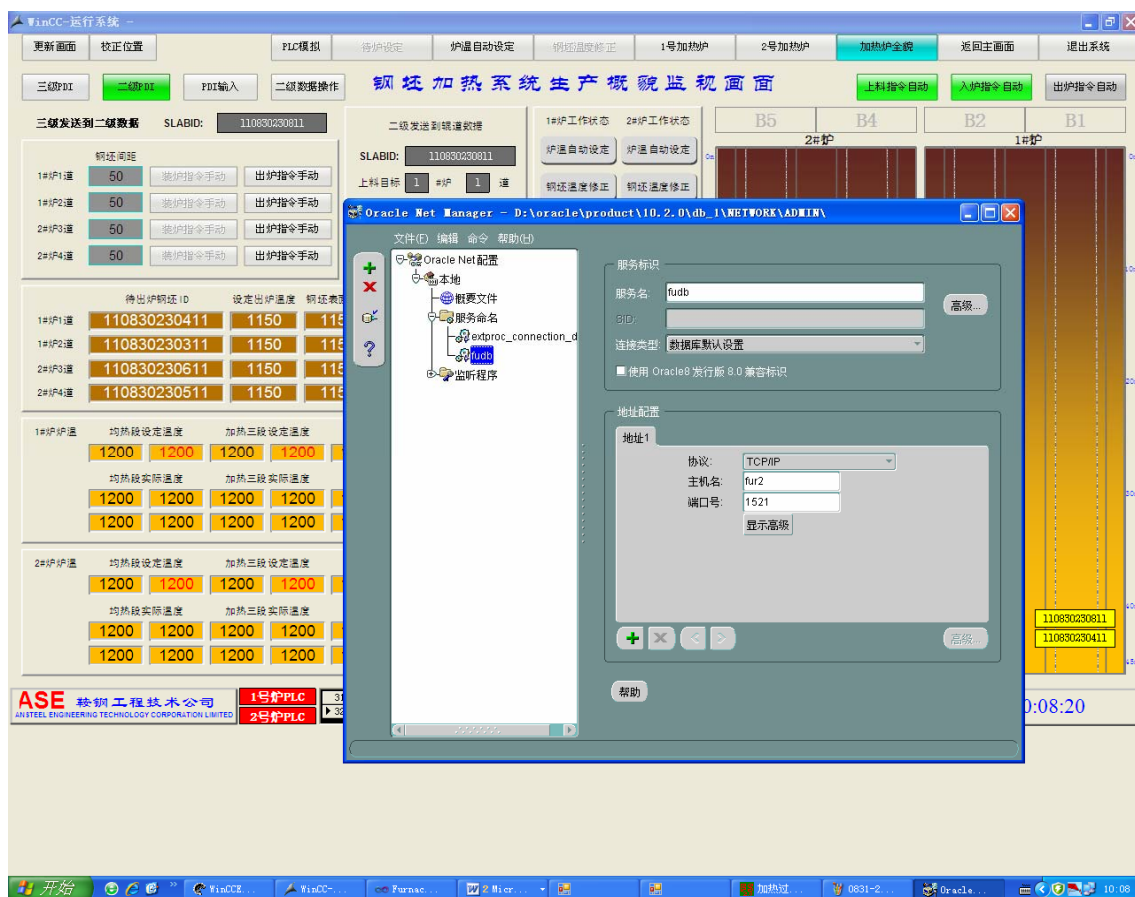


图 5.4 ACC 系统数据库

### 5.3 人机接口（HMI）



图 5.5 HMI 画面



5.4 系统生产实绩结果

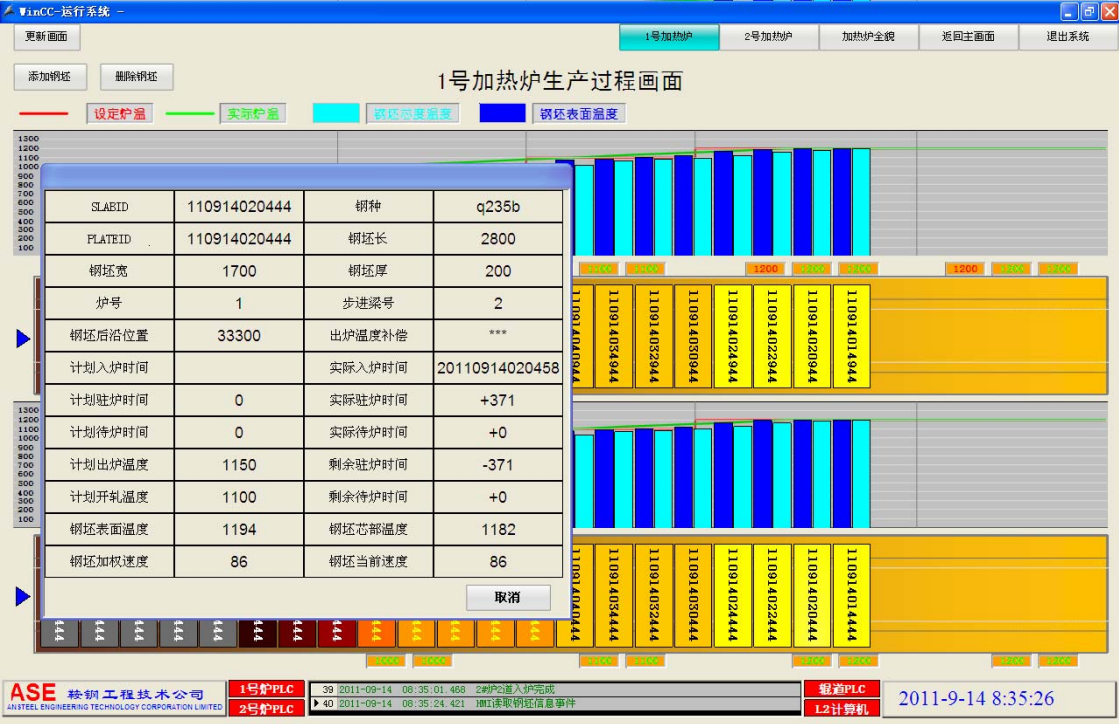


图 5.6 加热炉系统生产实绩

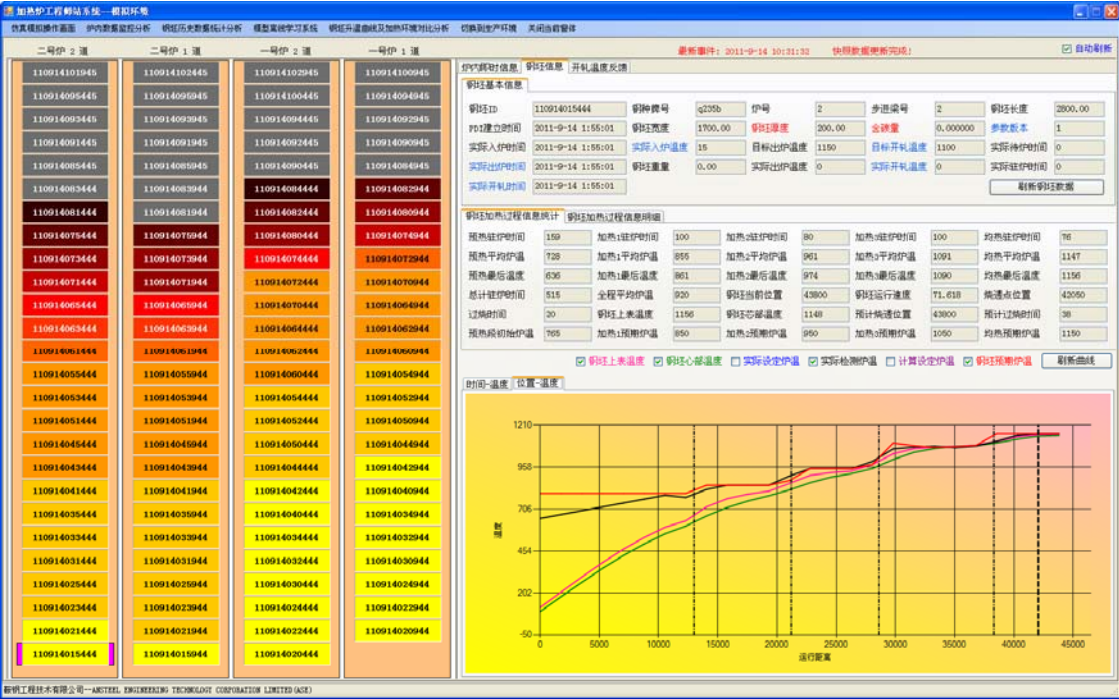


图 5.7 钢坯炉内温度升温曲线

图 5.6 是系统在线生产实绩，图 5.7 是钢坯炉内温度变化曲线，图中纵坐标为钢板温度（℃），横坐标为炉长距离（m），虚线为炉段分界线，粗虚线为钢坯“烧透点”。



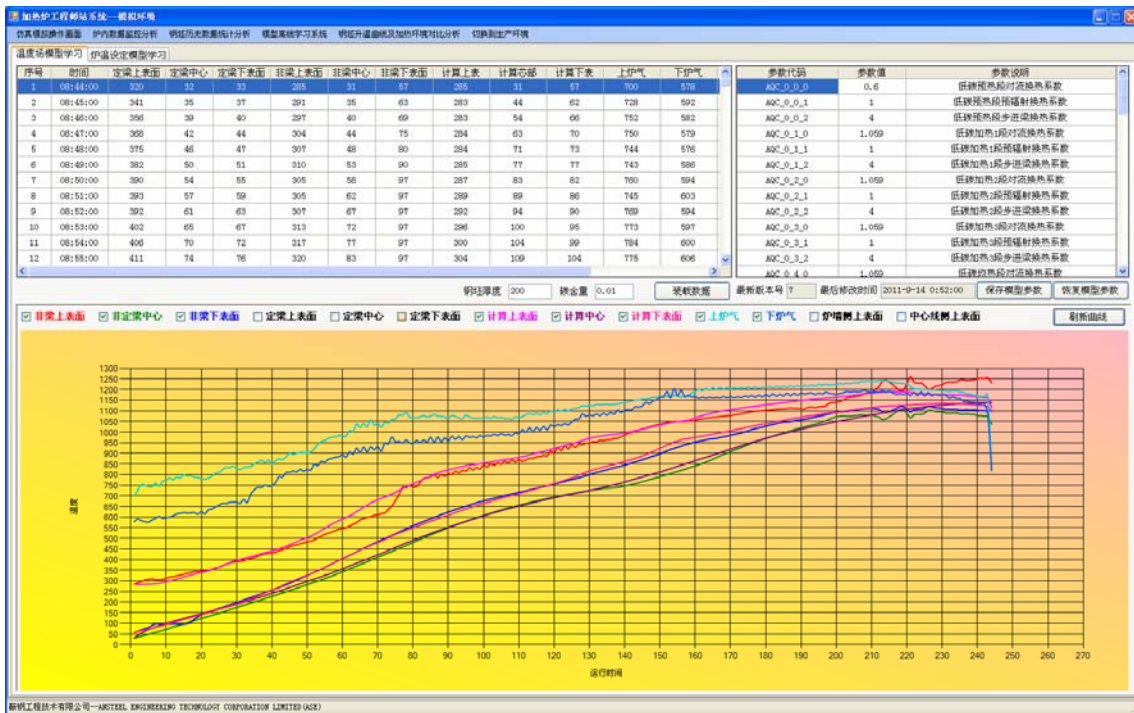


图 5.8 黑匣子实验数据与温度场模型比较 (a)

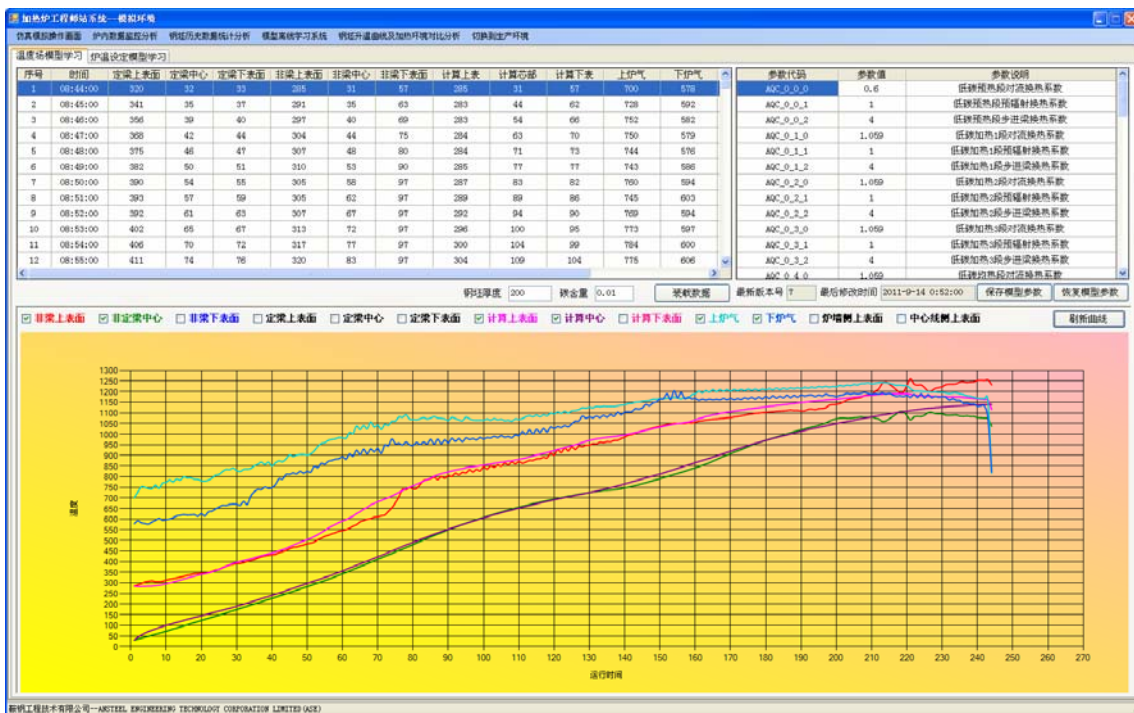


图 5.9 黑匣子实验数据与温度场模型比较 (b)



图 5.10 钢坯最佳升温曲线

## 5.5 本章小结

本文主要是完整的加热炉过程控制系统的实现。重点介绍中厚板加热炉计算机控制系统服务器构成，并介绍了该套软件在现场实际应用情况。结果证明该软件具有良好的可操作性，加热炉内钢坯加热过程清晰直观，达到现场生产要求。

## 结 论

本文在研究国内加热炉过程控制方法的基础上，借鉴鞍钢中厚板厂生产经验，并结合项目具体情况，主要完成了以下工作：

- 1、建立钢坯温度场数学一维模型，并将该模型应用于加热炉过程控制系统。
- 2、设计中厚板加热炉计算机过程控制系统，并采用基于用例驱动方法实现该模型。
- 3、详细描述用例驱动方法开发控制类软件。
- 4、该软件系统现场生产情况良好，系统运行稳定，钢坯温度预报准确。

通过对加热炉过程控制方法的研究以及现场实践，本文得出以下的主要结论：

- 1、建立的钢坯温度场数学模型充分考虑了炉气传热，炉壁辐射和步进梁传热等因素对钢坯温度的影响，从而提高了钢坯温度的预报精度。
- 2、钢坯温度场模型是加热炉过程控制的基础，而现场生产由于需要更换钢种、冷热坯、回炉坯等影响炉内边界条件，因此，热流密度的计算需要进一步完善，以免造成能源和钢材的浪费。

下一步要做的工作：

由于实际生产过程非线性、不确定和控制滞后等因素都会不同程度地影响控制效果，该系统有待进一步在线检验。

## 参考文献

- [1] 李文涛,李胜玉.步进式连续加热炉炉温最优控制方案的实施.包头钢铁学院学报,1994,13(3):30-33
- [2] 汤秀琴,王云川,张东平.加热炉加热过程优化控制系统的应用.控制工程,2006,13(3):218-220
- [3] A. D. Acharya, S. Chattopadhyay Reheat furnace temperature control and performance at essar steel.Iron and Steel Engineer,1998,75(11):31-36
- [4] 张力.步进式加热炉的炉温优化控制.辽宁科技大学硕士论文.2007
- [5] 周沛, 步进式加热炉控制系统的应用. 重庆大学硕士论文 2008
- [6] 冯春. 加热炉燃烧过程智能优化控制策略的研究. 中南大学硕士论文,2007
- [7] 姜磊,王德慧,朱里红. 基于 RBF 网络的钢坯温度预报软测量模型研究. 热加工工艺.2009
- [8] 柴天佑,王中杰,张莉.加热炉的炉温优化设定模型.自动化学报,2000,26(4):537-541
- [9] 李柠,王锡淮,李少远.步进加热炉炉温建模与优化仿真系统设.系统仿真学报,2010
- [10] 高国丽;陈洪军. 基于 RBF 神经网络的钢坯温度预报软测量模型研究, 工业控制计算机, 2004, 12: 65-74.
- [11] 巢海,王伟,李小平.步进梁式加热炉钢温预报的数学模型[J].东北大学学报, 1998.10,19(5)
- [12] 张力,于政军. 加热炉的炉温模糊优化设定. 冶金企业自动化、信息化与创新——全国冶金自动化信息网建网 30 周年论文集, 2007.
- [13] 刘日新,宁宝林.钢坯连续加热炉动态操作与优化控制的数学模型.钢铁研究学报,1992,3(4):31-36
- [14] 柴天佑,王中杰,王伟.加热炉控制技术的回顾与展望.冶金自动化,1998,5:1-5
- [15] 刘显军. 带钢热连轧加热炉控制系统的改造及加热优化, 武汉科技大学硕士论.2007.
- [16] 张力,于政军,陈雪波. 加热炉自适应钢坯温度预报模型, 石油化工高等学校学报.2007.
- [17] 统一建模语言 UML 概述[程序开发其它程序].  
<http://it.cq139.com/f/edu/055/13/113096.htm>.
- [18] 杨峻. 基于 UML 的项目信息管理系统设计.电脑知识与技术,2010

- [19] 董伟等.加热炉热过程动态操作数学模型[J].工程热物理学报,2003,24(2),295-297
- [20] 李季.面向对象技术在关系数据库中的应用与研究. 重庆大学硕士论文.2002.
- [21] 石勇. 步进式加热炉自动控制系统设计及研究.东北大学硕士论文.2005
- [22] 巢海,王伟,李小平.步进梁式加热炉钢温预报的数学模型[J].东北大学学报, 1998.10,19(5)
- [23] 万俊. 热轧层流冷却过程有限元模型与仿真研究. 沈阳工业大学硕士论文,2008
- [24] 王为晓. 步进式加热炉炉温的优化控制方法研究.大连理工大学硕士论文,2008.
- [25] 刘刚. 中厚板轧制过程中温度高精度设定与应用.东北大学硕士论文 2008.
- [26] 陆波, 华祖耀. 面向对象的软件工程与统一建模语言 UML[J].电脑开发与应, 2002,15(9):18-20
- [27] 马德楠. 一种基于表面温度反馈连铸板坯二冷水控制方法的研究. 辽宁科技大学硕士论文, 2008
- [28] 赵志芳. 面向对象技术和 UML[J].宁波职业技术学院学报, 2001,1:62-64
- [29] 鲁博, 柴跃廷.关于统一建模语言—UML[J].计算机工程与科学, 2000,22(4):57-60
- [30] S.P. Arethas. Energy conservation efforts at Inland Steel Company[J], Proceedings of the American Control Conference, New York, NY, USA, 1984,1(1):583-585.
- [31] 刘日新,宁宝林.钢坯连续加热炉动态操作与优化控制的数学模型.钢铁研究学报,1992,3(4):31-36
- [32] 张凯举,邵诚.基于生产目标的热轧过程综合集成控制方法的研究.系统仿真学报,2004,16(1):48-51
- [33] 梁军.轧钢加热炉计算机集成控制系统的研究及实现.钢铁,1998,33(8):50-53
- [34] 杨永耀,周晓昕.连续加热炉计算机控制系统.冶金自动化,1987,11(6):9-13
- [35] 袁宝歧,蔡惕民,袁名炎.加热炉原理与设计.北京:航空工业出版社,1989:168
- [36] 张晶涛,钱晓龙,王伟,等.步进式加热炉燃烧控制的新方法.控制与决策,2001,16(3):269-272
- [37] 朱宏样,温治等.加热炉待轧控制数学模型研究[J],工业炉,2001,23(4)1-3
- [38] 梁军,吕勇哉.轧钢加热炉混合智能控制系统[J],钢铁,1996,31(51),113-117
- [39] 顾根香译.加热炉最佳曲线的计算和优化控制[J],国外钢铁,1998,No3,118-122
- [40] 易继措,候媛斌.智能控制技术.北京工业大学出版社.1999
- [41] 涂植英,朱麟章.过程控制系统[M],北京机械工业出版社,2000,120-132

- [42] 蒋炯,杨永耀,吕勇哉.步进加热炉计算机优化控制.冶金自动化,1989,13(1):36-44
- [43] Yao L, Postlethwaite I, Browne W. Design, implementation and testing of an intelligent knowledge-based system for the supervisory control of a hot rolling mill[J]. Journal of Process Control, 2005, 15: 615-628.
- [44] 吴铁军,吕永哉.均热炉最佳加热策略的开发[J].自动化学报,1986, 12(2):113-119.
- [45] 吴小芳.步进式加热炉优化与控制.(硕士学位论文).上海:上海交通大学,2007
- [46] 柴天佑,王中杰,张莉.加热炉的炉温优化设定模型.自动化学报,2000,26(4):537-541
- [47] 蒋炯,杨永耀,吕勇哉.步进加热炉计算机优化控制.冶金自动化,1989,13(1):36-44
- [48] 杨永耀.步进加热炉动态控制模型的开发.控制与决策,1988,3(3):51-53
- [49] 乌江津.加热炉优化控制方法与仿真系统研究, 大连理工大学硕士论文.2006.

## 致 谢

在大家的帮助下，本次毕业论文才得以顺利完成，为此，我对所有帮助过我的人表示由衷的谢意。

感谢我的两位导师于政军、陈雪波教授，在课题完成期间他们给了我许多指导和建议，使我在工作和学习中得到了宝贵的知识和经验。对导师的感谢之情是语言无法表达的，谨此向两位老师表示我诚挚的谢意。

同时感谢参加本论文评阅和答辩的各位专家。