
分类号_____ 密级 _____
UDC _____

学 位 论 文

基于案例推理的连铸二冷配水方法研究

作 者 姓 名： 夏武
指 导 教 师： 谢植 教授
东北大学信息科学与工程学院
申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 工学
学科专业名称： 检测技术与自动化装置
论文提交日期： 2006 年 6 月 10 日 论文答辩日期： 2006 年 6 月 23 日
学位授予日期： 答辩委员会主席：
评 阅 人：

东 北 大 学
2006 年 6 月

A Dissertation in Automation Instrument

Study of Spray Cooling Control Method in the Secondary Cooling Zone

by Xia Wu

Supervisor: professor Xie Zhi

Northeastern University
June 2006

独创性声明

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

学位论文作者签名：

日 期：

学位论文版权使用授权书

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

(如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。)

学位论文作者签名：

签字日期：

导师签名：

签字日期：

基于案例推理的连铸二冷配水方法研究

摘 要

在铸坯的生产过程中，二次冷却是影响铸坯质量的重要因素。本文以某转炉炼钢厂普碳钢连铸机为背景，针对二冷配水的关键问题，进行二冷配水控制方法的研究。本文主要工作如下：

综述了二冷控制技术的研究现状；对案例推理技术及其应用研究状况，包括案例检索、案例调整、案例修正和案例库维护等问题进行了综述；在上述综述的基础上，开展了连铸二冷配水方法的研究。

针对连铸凝固过程强非线性，参数时变，工况非线性变化，铸坯在凝固过程中的表面温度变化不能连续检测等控制难点，进行了方坯连铸二冷智能配水方法研究。由于连铸凝固过程的复杂性，传统的配水方案很难实现连铸二冷的有效控制。因此，本文引入案例推理技术，提出了由回路设定级和回路控制级二层结构组成的连铸二冷智能配水策略；提出了基于案例推理技术的二冷水量的智能配水方法，根据连铸过程中的实时运行工况条件，采用案例推理技术动态设定二冷水量，从而实现二冷控制目标。

在本文提出的案例推理连铸二冷智能配水方法的基础上，开发了基于 Microsoft Windows 平台的方坯连铸温度场软件包。通过采集大量某钢厂连铸机实际运行数据，使用该软件包进行了从结晶器到矫直点的整个连铸过程的温度场的模型验证工作以及本文提出的智能配水方法的验证。实验结果表明了本文提出的连铸二冷智能配水方法的有效性。

关键词：连铸，二次冷却，案例推理，人工神经网络

Study of Spray Cooling Control Method Based on Case Based Reasoning in the Secondary Cooling Zone

Abstract

In a billet mill, control of the secondary cooling solidification process is essential to product quality. This research based on billet caster of a plant aims to intelligent control method for the features of secondary cooling zone. The major contributions of this dissertation are fallows:

Firstly, a survey of control method in secondary cooling zone and case-based reasoning technology is given. The development of case-based reasoning, including the subtasks of case representation, case retrieval, case reuse, case revise, case retention, and case base maintenance and its applications are presented. The intelligent control methods of billet secondary cooling process are researched in depth based on the above surveys.

Secondly, the continuous casting cooling solidification process is a distributed parameter system characterized by time varying dynamics and nonlinearity, moreover, the temperature of the billet cannot be measured continuously in the cooling solidification process. A novel intelligent control method of secondary cooling zone is developed for the control of the process in this paper. The traditional spray cooling method that is not the effective approach because of the complex of secondary cooling process is introduced. To overcome the above problems an intelligent two-layered control strategy consisting of the local loop control layer and the loop setup layer is developed for the secondary cooling process. An intelligent setting method for the water volumes of secondary cooling zone is developed with case-base reasoning, which according to the real time of operating condition reaches the control objective using case-based reasoning.

Lastly, a simulation software package based on intelligent control method of secondary cooling zone proposed in this thesis is developed in Microsoft Windows operating system. Simulation studies are carried out with real operating data from the secondary cooling process of a steel plant using the software package. The results show the effectiveness of the proposed

intelligent control method.

Key words: continuous casting, secondary cooling, case-based reasoning, ANN

目 录

独创性声明	I
摘 要	II
ABSTRACT	III
第一章 绪 论	1
1.1 方坯连铸二次冷却制度	1
1.2 连铸二冷控制方法研究现状	2
1.3 案例推理方法研究现状	3
1.4 本文工作	5
1.5 本文创新点	6
第二章 方坯二冷配水过程被控对象模型	7
2.1 连铸二冷被控对象描述	7
2.2 连铸二冷被控对象机理模型	7
第三章 基于案例推理的二冷配水控制研究	11
3.1 连铸二冷过程控制目标及控制难点	11
3.1.1 二冷过程控制目标	11
3.1.2 控制难点	12
3.2 基于案例推理的二冷配水控制策略	12
3.2.1 基于案例推理的二冷配水控制结构	12
3.2.2 基于案例推理技术的连铸二冷配水控制方案	13
3.3 基于案例推理技术的二冷配水控制实施过程	22
第四章 软件设计	23
4.1 需求建模	23
4.1.1 统一建模语言UML简介	23
4.1.2 用例视图	23
4.2 软件包总体设计	27
4.3 类设计	28
4.4 数据库设计	30
4.5 结构和算法设计	30
4.5.1 结构设计	30
4.5.2 算法设计	34
4.6 软件包的操作与运行	35
第五章 仿真实验	41
5.1 实验对象描述	41

5.1.1 工艺及设备参数	41
5.1.2 温度模型参数设置及工艺指标	41
5.2 连铸二冷智能配水方法仿真实验	42
5.2.1 实验 1	42
5.2.2 实验 2	45
5.2.3 实验 3	47
第六章 结束语	51
参考文献	52
致 谢	57
附 录	58

绪 论

1.1 方坯连铸二次冷却制度

连铸是将液体金属经过一组特殊的冷却和支撑装置连续地浇铸成一定断面形状的铸坯的过程。铸坯的形成要经历钢水的冶炼、精炼，然后钢水经回转台从大包浇注到中间包，经浸入式水口流入结晶器，钢水在结晶器冷却凝固，当凝固坯壳到一定厚度时，铸坯经、引锭杆拉出。这样钢坯被源源不断地拉出，经二次冷却、矫直、切割、打号、冷床冷却后入库。连铸所需的工艺设备如下：

(1) 连铸机

连铸机是连铸赖以进行的设备，连铸机钢包支撑设备、中间包及运输设备、结晶器及振动装置、铸坯导向及支持设备、拉坯设备、定尺切割和铸坯运输设备组成。

(2) 结晶器

结晶器是连铸机核心设备之一，其基本作用是钢液蓄含显热和凝固潜热传出和成形，即使浇注到其中的钢水凝固成规定外壳形成均匀的坯壳厚度，以便承受钢水的静压力，使铸坯能顺利地由结晶器中拉出，防止漏钢，保证生产安全，铸坯地外形尺寸使由结晶器地外形和尺寸决定地。结晶器内钢液地流动伴随着传热、流动等复杂过程现象，因此，必须在传热、传质。结构等方面满足连铸工艺及其使用性能要求。

(3) 二次冷却段

连铸机二次冷却段，又称扇形段，指结晶器出口至水平位置铸坯输送及冷却的区域。二次冷却的目的是对拉出结晶器后的铸坯进行连续冷却，使之逐渐快速凝固，其基本作用包括：对铸坯合理的强制冷却，对铸坯的支撑和导向作用。

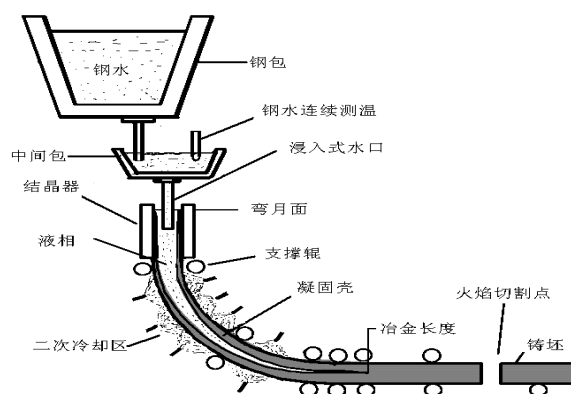


图 1.1 连铸过程示意图

Fig 1.1 Longitudinal section drawing of the continuous casting machine

二次冷却制度包括二次冷却强度、二次冷却区水量的分配、喷雾区的划分以及喷嘴的布置形式。

二次冷却强度的控制原则是：二次冷却强度必须适合裂纹敏感性的钢种。同时，二次冷却强度还取决于铸机的冶金长度和喷嘴类型以及喷嘴分布形式。二次冷却区水量的分配，包括在铸坯长度方向上水量的分配和在弧形段上水量的分配。二次冷却区各段水量分配的原则：既要使铸坯散热快，又要防止铸坯内外有过大的温差而引起热应力，使铸坯产生裂纹。铸坯表面的热流或表面温度在二冷区是从上到下逐渐递减，因而喷水量也应沿铸机高度从上到下递减。理论认为，铸坯液芯在二冷区内凝固速度与时间的平方根成反比，所以二冷区各段的冷却水量也应大致按时间的平方根成比例递减。

二次冷却与铸机产量和铸坯质量密切相关。在其它工艺条件不变时，二冷强度增加，拉速增大，则铸机生产率提高；实践证明，二冷段配水对铸坯质量有着重要影响，二冷段的水冷却强度偏高或偏低都会产生铸坯质量事故（产生偏析、裂纹等）^[1,2-16]。在二冷区铸坯裂纹的形成主要决定于：钢的高温力学行为、铸坯表面温度的分布、铸坯冷却过程的相转变等。这些因素综合作用的结果，创造了铸坯裂纹形成和扩展的条件。通常与二次冷却有关的铸坯缺陷主要有：

（1）内部裂纹

内部裂纹包括中间裂纹、皮下裂纹、三角区裂纹、中心裂纹等。如果铸坯通过二冷区时冷却不均匀，温度回升大而产生的热应力造成中间裂纹，回热是产生中间裂纹的驱动力；二次冷却不均匀，通过二冷区的铸坯表面温度呈周期性变化，铸坯温降速度和温度回升速度过快，铸坯发生多次热循环，造成坯壳多次变形，则形成皮下裂纹；铸坯受到热应力、机械应力及鼓肚应力的作用，当这些热应力或其总应力超过了铸坯高温强度时，就产生三角区裂纹；中心裂纹是由于铸坯通过二冷区时冷却不均匀，温度回升大而产生的热应力造成的。另外，铸坯壳鼓肚或对弧不正造成的外力，作用在正凝固的固液界面，也可产生这种裂纹。

（2）疏松和缩孔

铸坯冷却过程中，通过表面直接喷水冷却提高冷却效果增加铸坯的坯壳厚度，该过程受冷却强度的影响存在不同程度的温降，如果冷却强度较大，则容易形成垂直铸坯表面的单方向强冷，在较大过冷度的作用下形成单方向散热增加，促使该方向柱状晶的迅速增长，在柱状晶晶轴之间容易产生低熔点相和硫磷等易诱发裂纹的元素富集，进一步冷却后，低熔点相冷却收缩，在该封闭区域形成疏松或缩孔。

（3）表面裂纹

表面裂纹包括表面纵裂纹、横裂纹和网状裂纹等。表面横裂纹产生的原因是二次冷却制度不当，对于碳钢和低合金钢，铸坯矫直时表面温度位于 750~900℃ 之间的高温脆性区，降低了钢的延展性，在矫直力的作用下在振痕波谷处产生了横裂纹。

1.2 连铸二冷控制方法研究现状

连铸二冷过程的传统控制方法通常采用预测控制的思想，将整个冷却区划分为三个控制单元，调整每个喷水阀门的开度。目前二冷控制方法主要有以下几种方法：

- (1) 人工配水：开浇前根据钢种设定二冷水总水量和各冷却段的水量。浇注过程之中水量不变，或由操作人员观察铸坯表面温度后作适当的调整，人为经验调节铸坯质量波动较大。
- (2) 比例控制：采用比水量的方法，即根据 $Q=Kv$ （ v 为拉速， K 为系数）确定各冷却段的水量，调节阀门使冷却水量与拉速适应。该调解方式与连铸高温传热的机制差别较大。
- (3) 参数控制：根据钢种，按 $Q=Av^2+Bv+C$ 进行配水。预先设定好 A 、 B 、 C 参数， v 为拉速，拉速改变时，二冷水量随之改变。但缺少连铸过程中过热度变化的分析考虑。生产中为防止漏钢，对于过热度变化的处理在保持拉速尽量不变的情况下，常采用人工过冷的方式，铸坯质量受到较大的影响。裂纹和缩孔等缺陷在大冷却梯度产生的热应力下很容易产生。
- (4) 基于钢种、浇注温度、拉速和水量之间参数关系的二冷动态控制。该方法的特点：采用离线优化在线控制模式，将过热度与拉速同时引入到水量的控制中实现水量动态控制。
- (5) 目标表面温度动态控制：考虑钢种、拉速及浇注状态，由二冷配水控制数学模型每隔一段时间计算一次铸坯的表面温度，并与考虑了二冷配水原则所预先设定的目标表面温度进行比较，根据差值来调整该二冷段的水量，以使得铸坯的表面温度与目标表面温度相吻合。但由于二冷段测温环境极为恶劣，很难获得可靠的实际铸坯表面温度，而使得该控制方式的应用受到很大限制，目前尚无报道成功运用基于表面温度测量的目标温度动态控制。

由于连铸凝固过程具有强非线性、参数分布、不能连续检测过程温度的特性，是一个复杂的工业控制过程，现有的控制方法难以进行有效控制。本文引入基于案例推理的智能方法，提出回路设定级和回路控制级两级系统，提高系统性能和系统可靠性。

1.3 案例推理方法研究现状

1977 年Schank和 Abelson的著作可以看作是案例推理思想的萌芽^[33]，他们指出人们对外界的认识是以脚本的方式储存在大脑中，使得我们能够产生期望，做出判断。Schank在 1982 年出版的专著《Dynamic Memory: A Theory of Learning in Computers and People》第一次系统地阐述了案例推理的思想^[34]，该书提出了动态记忆理论，这一理论用记忆组织包(Memory Organization Packets, MOP)来描述记忆如何随着经验的增长而自动修改和发展。Anderson指出人们在学习解决问题时，尤其在早期的学习中通常是以过去的案例作为模型^[35]。继Schank在耶鲁大学领导的研究小组提出了案例推理的认知模型之后，德州大学的Porter等人提出了另一著名的认知模型^[36]。Porter等人将启发式分类方法与机器学习方法相结合，并将一般领域知识和特定的案例知识相结合，构造了一个统一的知识表示模型^[37]。在欧洲，爱尔兰Trinity College的Keane等人把认知科学引入类比推理的研究中^[38]。

基于案例的推理在许多方面都有别于其它的人工智能方法。与基于规则的推理（RBR）方法不同的是，传统的人工智能方法或者单独依赖于问题领域中的一般性知识，或是在问题描述与结论之间建立一般性的联系，案例推理与其不同之处在于，案例推理能利用过去经验中的特定知识即具体案例来解决新问题，它通过寻找与之相似的历史案例，把它重新应用到新问题的环境中来；另一点明显的区别在于，案例推理的实现是一个持续的、不断改善的学习过程，一旦解决了一个新问题，就

获得了新的经验，可以用来解决将来的问题。案例检索，案例重用，案例修正和案例保存构成了一个案例推理周期，案例推理周期的示意如图 1.2 所示，其中案例表示，案例检索和案例调整是案例推理研究的核心问题。绝大多数现有的案例推理系统基本上都是案例检索和案例重用的系统，而案例的调整通常是由案例推理系统的管理员来完成的。

案例推理通过调整以往相关问题的成功解答来解决新问题，它作为一种新的求解问题的推理计算方法，得到了日益广泛的关注。下面将针对案例推理研究的各个主要问题来介绍案例推理的理论研究情况。

(1) 案例表示

在案例推理系统中存在着两种类型的知识：领域知识和案例知识。案例表示是案例推理的基础。一般来讲，一个案例应当包括下面的三部分：

- 问题描述， 该案例发生时的状态描述；
- 问题的解， 该案例的解决方案；
- 问题求解效果， 应用案例中的解决方案后的状态描述。

为了进行案例的表示，首先需要在众多描述情景状态的要素中选择足以描述案例特点的属性或称特征，并决定特征的类型和取值范围。目前大多数案例推理系统采用的表示方法主要有两种类型：结构表示型和特征-值对表示型。在案例的结构表示中，特征通过一定的结构组织成一个个案例。

(2) 案例索引和存贮

为了方便案例检索并提高检索的速度需要建立案例库的索引。案例的存贮结构一方面需要保存尽可能多的案例信息，另一方面为了保证系统的效率也需要对其进行简化。案例的存贮结构又称作案例记忆模型，目前共有二种影响较大的案例记忆模型：[动态记忆模型]^[34]和[范畴—范例模型]^[36, 37, 48]。

(3) 案例检索

案例检索是利用案例库的索引和组织结构，根据待解决的问题的问题描述在案例库中找到与该问题或情况最相似的案例。常用的案例检索方法有最近相邻法，归纳法，知识导引法和模板检索法等。这些方法可单独或组合使用。案例的相似性匹配方法有许多种，如决策树，粗糙集，神经网络，证据理论，聚类分析等。

(4) 案例重用

根据对新案例特征的描述，决定如何由检索出的匹配案例的解决方案得到新案例的解决方案，这个过程叫做案例的重用。在多数情况下，由于案例库中不存在与新案例完全匹配的存贮案例，所以需要调整对存贮案例的解决方案进行调整以得到新案例的解决方案。

(5) 案例修正

为了检验案例重用得到的解决方案的效果，需要对其有效性进行评价。这一般需要将案例重用得到的解决方案应用于该领域中，以获得关于其效果的反馈信息。具体应用领域不同，评估工作所花费的时间长短也不同。这个步骤一般是在案例推理系统之外发生的^[32]。

(6) 案例库维护

案例推理系统的重要特点之一是能够学习。对于新问题，在进行案例修正后，如果案例修正的结果是正确的，则需要更新案例库。随着案例库中积累案例的增加，案例库中包含了更多的知识，系统解决问题的能力也不断增强。

继八十年代 Schank 关于案例推理的开创性工作之后，出现了大量的案例推理应用软件系统。至今，案例推理已广泛应用于医疗诊断、机械设计、电路设计、故障诊断、软件工程、语言理解和法律法规等各个领域。

总之，从案例推理提出以来，各个国家和行业从自身的需求出发研制和开发许多系统，在模型、方法以及理论上带来不同程度的发展，使案例推理成为近年来人工智能领域的研究热点。

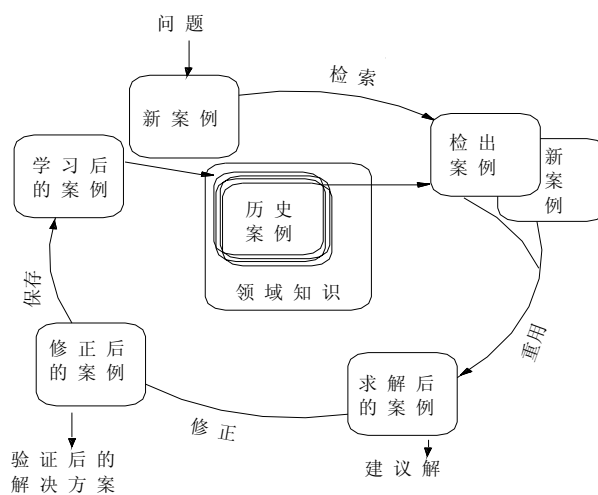


图 1.2 案例推理周期示意图

Fig. 1.2 The CBR cycle

1.4 本文工作

某钢厂采用的是高炉—转炉—连铸长流程工艺，该过程的炉机匹配为 30t 转炉对应 4 机 4 流的普碳钢连铸机，主要生产钢种为 Q235 等普碳钢和 20MnSi 等低合金钢。1995 年 12 月 4# 连铸机建成投产以后经历了多次高效化改造。目前单流生产能力已经达到 10 万吨，虽然产量提高，拉速也由原来的 1.4m/min 提高到目前的 2.0~2.6m/min 左右，但高拉速下不合理的冷却产生的问题也随之出现。本文针对二冷难题，进行了二冷配水方法的研究。

本文将智能方法和机理方法相结合，提出了基于案例推理技术的连铸二冷智能配水方法，并开发了相应的连铸二冷智能配水方法的仿真软件包，通过在某钢铁公司连铸机的实际数据基础上的实验研究，验证了所提出的连铸二冷智能配水方法的有效性。主要包括以下几个方面的内容：

- (1) 连铸二冷智能配水方法研究：由于存在上述的控制难点，传统的配水方案很难实现连铸控制目标。因此，本文引入案例推理技术，提出了由回路设定级和回路控制级二层结构组成的连铸二冷智能配水方法；提出了基于案例推理技术的二冷水量的智能设定方法。

- (2) 连铸坯的温度场模拟软件包开发：开发了基于 Windows 平台的连铸坯的温度场软件包。该软件包使用某钢厂连铸机实际运行数据，对文[17]提出的机理模型进行了算法验证，实验结果表明该机理模型的有效性，可以近似模拟连铸凝固过程。因此，本文将文[17]的机理模型转化为计算机仿真模型，作为仿真对象模型，进行仿真实验。
- (3) 案例推理技术的连铸二冷智能配水方法的仿真软件包开发：基于本文提出的连铸过程二冷智能配水方法，开发了基于 Windows 平台的连铸过程二冷智能配水方法的仿真软件包。

1.5 本文创新点

本文创新工作体现在以下两点：

- (1) 针对连铸二冷控制难点，本文引入案例推理技术、人工神经网络等技术，进行了连铸二冷配水混合智能控制方法的研究，实现了二冷配水量对变化工况的自适应；
- (2) 本文开发了案例式推理的框架，该框架相对现有的案例推理框架具有支持插件、支持并行推理、支持Agent、可以动态配置多种智能算法。(相关内容和源代码详见个人网站<http://www.opencbr.org>)。

第二章 方坯二冷配水过程被控对象模型

2.1 连铸二冷被控对象描述

为了对方坯连铸凝固过程进行研究，需要以二次冷却过程中的方坯作为被控对象，研究其输入与输出之间的关系，从而建立方坯连铸凝固过程的被控对象模型。方坯连铸二冷配水过程的机理非常复杂，影响因素非常多，具有参数时变、强非线性、分布参数等综合复杂特性。冶金工业的连铸过程，首先是一个高温热传输过程，同时也是一个复杂的物理化学变化成型过程。方坯凝固过程中产生的质量问题，其本质是其凝固过程对温度场的影响，因此需要从温度场模型的角度通过建模分析冷却过程的影响。在方坯连铸二冷过程中，钢坯内部的温度场的变化受到以下几类因素的影响。

- (1) 边界条件：浇注钢种成分，浇注温度，冷却水温
- (2) 输入控制量：拉速，二冷区冷却水量
- (3) 其他因素：不同水流冲击密度、水中是否含有油质、冷却设备型式
- (4) 各种随机干扰

因此，连铸二冷过程的输入输出关系可以近似如图 2.1 所示。其中边界条件 Ω 包括浇注钢种成分 G ，浇注温度 T_{in} ，冷却水温 T_w ；二次冷却过程的被控对象输入量 U 为拉速 V_{pull} 和二冷区冷却水量 Q_0, Q_1, Q_2 。二次冷却过程的被控对象的输出 Y 为三维温度场数据 $T_{out_x}, T_{out_y}, T_{out_z}$ 。

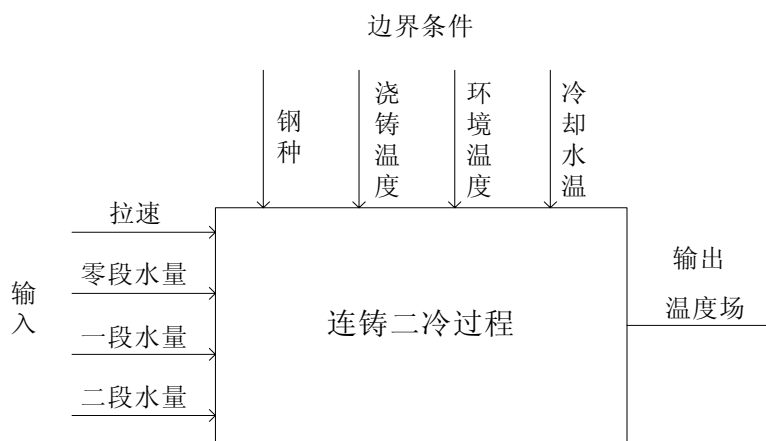


图 2.1 被控对象模型输入输出关系

Fig. 2.1 Input-output relationship of the secondary cooling process

2.2 连铸二冷被控对象机理模型

方坯连铸二次冷却的被控对象模型描述了方坯连铸二冷过程的温度输出 Y 随着方坯连铸二冷过

程输入量的变化规律。根据前面的叙述，方坯连铸二次冷却被控对象模型的边界条件和输入条件可以表示如下：

$$\Omega = [G, T_{in}, T_{en}, T_w]^T$$

$$U = [V_{pull}, Q_0, Q_1, Q_2]^T$$

被控对象模型的输出为

$$Y = [T_{out_x}, T_{out_y}, T_{out_z}]$$

因此，被控对象模型可以表示如下：

$$Y = f(G, T_{in}, T_{en}, T_w, V_{pull}, Q_0, Q_1, Q_2)$$

$$Y = f(\Omega, U) \quad (2.1)$$

其中： f 表示在某种边界条件下，输入量与对象输出之间的非线性关系； Ω 代表边界条件， G, T_{in}, T_{en}, T_w 分别代表钢种、浇注温度、环境温度、冷却水温； U 代表输入控制量， V_{pull}, Q_0, Q_1, Q_2 分别代表拉速、零段水量、一段水量、二段水量； Y 代表输出量， $T_{out_x}, T_{out_y}, T_{out_z}$ 分别代表 x, y, z 三个方向上的温度。

对于所研究的二次冷却过程，由于拉速 V_{pull} 是预先确定的，因此二次冷却的温度场最终由边界条件和二冷区冷却水量决定。本文采用文[17]的连铸二冷过程机理模型计算铸坯的温度场，本文简单列出模型方程，具体推导过程详见文[17]。

采用二维热传导方程，其形式如下：

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

初始条件为：

$$T = T_0 \quad (2.3)$$

边界条件为：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q \quad (2.4)$$

其中：

(1) 结晶器：

$$q = A - B \sqrt{t} \quad (2.5)$$

(2) 二冷区：

$$q = h (T_b - T_w) \quad (2.6)$$

(3) 空冷区：

$$q = \varepsilon \sigma [(T_b + 273)^4 - (T_{en} + 273)^4] \quad (2.7)$$

(2.2) ~ (2.7) 公式中， ρ ：钢的密度， C ：钢的热容， λ ：钢的导热系数， T ：铸坯温度，

t : 时间, x, y : 铸坯断面坐标, q : 铸坯向外传热热流, A, B : 常数, h : 二冷喷嘴传热系数, T_b : 铸坯表面温度, T_w : 二冷水温度, σ : 斯帝芬-波尔兹曼常数, ε : 辐射系数, T_{en} 环境温度, T_0 : 中间包钢水温度。首先把偏微分方程 (2.2) 转换为差分方程, 计算过程中带入初始条件 (2.3) 及在不同的计算阶段带入不同的边界条件 (2.4)~(2.7), 即可计算出铸坯的温度场。

钢的凝固过程中的热物性参数包括固液相线、比热、导热、密度、凝固潜热等:

(1) 固液相线

作为铁碳合金的钢, 完全熔融和凝固主要受钢中碳硅锰硫磷和一些合金元素的影响, 根据大量试验统计获得钢的固相线和液相线与钢中主要元素成分的关系为^[57]:

$$T_L = 1537 - 88(\%C) - 25(\%S) - 5(\%Cu) - 8(\%Si) - 5(\%Mn) - 2(\%Mo) - 4(\%Ni) - 1.5(\%Cr) - 18(\%Ti) - 2(\%V) - 30(\%P) \quad (2.8)$$

$$T_s = 1535 - 200(\%C) - 12.3(\%Si) - 6.8(\%Mn) - 124.5(\%P) - 183.9(\%S) - 4.3(\%Ni) - 1.4(\%Cr) - 4.1(\%Al) \quad (2.9)$$

其中 T_L , T_s 分别表示液相线和固相线温度, (%) 表示成分的质量百分比。

(2) 比热

比热为单位物质单位时间的热容量, 两相区的比热根据调和平均值来确定:

$$\frac{1}{C_{sl}} = \frac{1-f_s}{C_l} + \frac{f_s}{C_s} \quad (2.10)$$

其中 C_{sl} , C_l , C_s 为两相区, 液相和固相的比热, f_s 为凝固分率。

(3) 密度

钢的密度变化不大, 但受钢中组织成分等的影响, 其变化范围, 固相在 7300kg/m^3 至 7600kg/m^3 之间, 液相变化范围在 6990kg/m^3 至 7400kg/m^3 之间^[57], 不同的凝固组织其密度受其组织的影响, 在后一章的讨论中将进行详细讨论。在该研究中两相密度取二者的调和值。

$$\frac{1}{\rho_{sl}} = \frac{1-f_s}{\rho_l} + \frac{f_s}{\rho_s} \quad (2.11)$$

式中: ρ_{sl} , ρ_l , ρ_s 为两相区, 液相和固相的比热, f_s 为凝固分率。

(4) 潜热

对于普碳钢和中高碳钢为简化计算, 取其潜热为 $2.72\text{e}6$ ^[58]。

(5) 结晶器换热系数

由于结晶器设计参数及结构不同, 一般采用以下形式:

$$\bar{q} = 268 - \beta\sqrt{t_m} \quad (2.12)$$

式中 β 为常数, 由实际测定结晶器热平衡计算确定。t: 钢水通过结晶器的时间,

(6) 二冷换热系数

二冷区传热系数 h 表示了铸坯表面与二冷区冷却水之间的传热效率, h 大, 则传热效率就高, 它与喷水高度、水流密度、喷水面积、喷水压力、喷水距离、喷嘴结构、铸坯表面温度、和水温等

因素有关。一般需要通过试验测定统计后，用经验公式表示。

采用 T.Nozaiki 公式

$$h = 1.57W^{0.56}(1 - 0.0075T_b)/\alpha \quad (2.13)$$

其中 h 为对流换热系数， w 为水流密度， T_b 为铸坯表面温度冷却水的温度， α 为其冷却段相关的系数参数。

第三章 基于案例推理的二冷配水控制研究

3.1 连铸二冷过程控制目标及控制难点

3.1.1 连铸二冷过程控制目标

连铸过程中如果工艺参数控制不当,常会出现一些内部和表面质量问题,铸坯的内部质量问题主要包括:内部裂纹、疏松和缩孔等。产生内部质量问题的原因是多方面的,但主要是连铸过程中的二次冷却区的冷却不当造成的,因此,二次冷却条件直接影响铸坯质量的好坏。方坯连铸二冷配水控制的目标是通过控制二冷区的喷水阀门的开启度,调节不同冷却段的水量,在遵循铸坯的冷却凝固机理的前提下,使方坯经过二冷过程后达到下列工艺指标,从而实现合理的铸坯温度场分布获得良好的铸坯质量。

(1) 矫直点铸坯表面温度

连铸机特别是弧形连铸机需要对其切割前进行矫直,为防止矫直时产生矫直裂纹等缺陷,应该避开裂纹敏感区域,因此需要避开塑性口袋区:

$$T_{unbend} \geq T_{up-limit} \quad (3.1)$$

$$T_{unbend} \leq T_{down-limit} \quad (3.2)$$

其中, T_{unbend} 为矫直点的铸坯表面温度, $T_{up-limit}$, $T_{down-limit}$ 分别为铸坯由钢种和成分等确定的铸坯矫直应当避开的塑性口袋区的铸坯表面温度上下限。

(2) 回温限制

在铸坯的冷却过程中,无论采用强冷或缓慢冷却机制,都存在不同程度的回温,铸坯在回温过程中,在凝固前沿的沿晶界处 S、P 等由于冷却和散热不均产生的成分富集区域,促使大量的低熔点相产生,回温情况下,特别是在热应力作用下当回温超过该区域的承受强度很容易在液膜区域诱发或产生热裂纹缺陷。因此需要对其冷却过程的温度作以限制:

$$DT_{up} \leq DT_{up-limit} \quad (3.3)$$

其中, DT_{up} , $DT_{up-limit}$ 分别为温升和不同铸机不同钢种的温升控制限。该控制限根据凝固前沿分率为 0.8~0.99 位置诱发裂纹时最高回温来确定其温升控制限。

(3) 温降限制

国内外试验研究表明裂纹的诱发位置处于凝固前沿凝固分率为 0.8 至 0.99 之间的糊状带区间。不同钢种由于其成分中各元素之间相互影响,对裂纹的敏感性不同,热应力诱发裂纹的回温不同,因此需要按钢种各自确定。

为此需要限制其温降在:

$$DT_{down} \leq DT_{down-limit} \quad (3.4)$$

其中, DT_{down} , $DT_{down-limlit}$ 分别为温降和不同铸机不同钢种的温降控制限。该过程同时需要根据凝固分率 0.8~0.99 区间来确定。

(4) 液芯长度限制

铸坯经过冷却凝固后, 需要对其进行切割运送, 切割点要保证铸坯内部不再有液相产生, 因此要限制如下条件:

$$L_{liquidcore} \leq L_{metur-length} \quad (3.5)$$

其中, $L_{liquidcore}$, $L_{metur-length}$ 分别为液芯长度和不同铸机的冶金长度控制限。

3.1.2 控制难点

方坯连铸二冷过程中的被控量, 即冷却过程中的方坯温度难以实时检测, 难以实现闭环控制。同时, 方坯连铸凝固过程的传热机理复杂, 特性随时间不断变化, 从而导致方坯连铸凝固过程具有时变、非线性、分布参数等综合复杂特性。同时, 随着制造业技术水平的进步, 用户对热轧带钢产品性能的要求不断提高, 并趋于多层次化, 从而对控制质量提出了越来越高的要求, 在这种情况下, 基于精确数学模型的控制方法很难取得满意的控制效果。

方坯连铸二冷控制的复杂性体现在:

- (1) 具有参数时变性和强非线性特性, 导致冷却控制实际上是在很大空间范围内对处于运动中的方坯的分布控制问题。
- (2) 冷却过程中的温度变化无法连续检测, 难以实现常规的闭环控制;
- (3) 过程本身和执行机构常有较大的滞后;
- (4) 实际连铸二冷过程中如果拉速等控制条件发生变化时, 很难保证良好的控制效果。
- (5) 用于过程测量的传感器也常常受到高频测量噪声的影响;
- (6) 连铸过程各环节之间相互耦合。

3.2 基于案例推理的二冷配水控制策略

3.2.1 基于案例推理的二冷配水控制结构

本文针对方坯连铸二冷过程的上述控制难点, 提出了基于案例推理的方坯连铸二冷过程的智能控制方法。案例推理 (CBR) 是一种适于在缺乏领域模型而有丰富经验环境下工作的推理方法^[26-30], 它一经出现就引起了人工智能学者的广泛关注。利用案例推理技术, 可以在没有领域知识或领域知识不完全, 数据不完整或不精确、但经验丰富的情况下直接利用过去解决问题的成功经验, 即经历的具体案例来解决新问题, 从而方便了知识获取, 因而在诊断、决策、分析等大量依赖经验知识的领域取得了很大的成功^[39-51]。

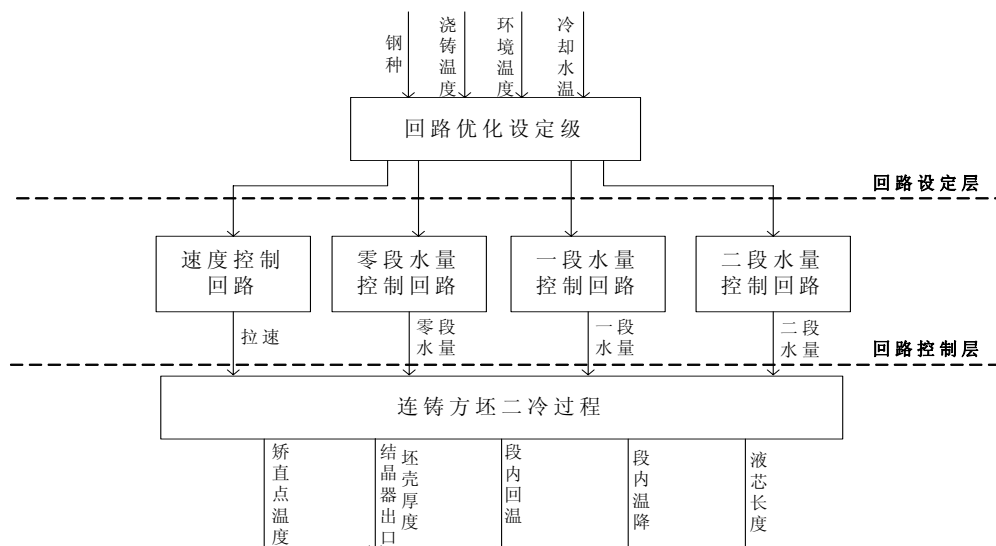


图 3.1 控制方法的层次结构图

Fig. 3.1 Structure diagram of control method

本章提出的方坯连铸二冷过程的智能控制方法由回路设定级和回路控制级两层结构组成，控制方法的层次结构如图 3.1 所示。回路设定级根据工艺对矫直点铸坯表面温度、回温限制、温降限制、液芯长度等的要求，进行拉速和二冷区冷却水量的设定。其中拉速预先确定，本文进行二冷区冷却水量的设定方法研究。二冷区冷却水量的设定由智能设定模块根据当前工况和工艺确定的控制目标，以系统长期运行的成功控制案例以及领域专家的知识为基础，通过基于案例推理技术的智能设定方法来完成，使工艺参数达到工艺给定目标，可以为其后的相同或相似工况的控制提供很好的参考出发点。

3.2.2 基于案例推理技术的连铸二冷配水控制方案

如图 3.2 所示，基于 CBR 的二冷控制策略是一种混合智能设定方法。由于经验公式是现场长期运行的一种经验总结，但是需要较完备的数据，需要大量有效的数据才可以进行领域知识的获得，难免出现“知识获取瓶颈”的问题；而案例推理仅需要记录以往的成功案例作为初始案例，确定足以描述案例的主要特征，就可以建立一个案例推理系统。但是对于没有有效参考案例时，其推理结果不是非常理想。因此，我们结合经验模型和案例推理的智能技术，互为补充，研究了一种混合智能配水方法。

首先收集以往的成功案例，利用聚类方法，建立初始案例库。运行时根据工况条件、拉速以及控制目标进行案例检索。如果可以检索到有效参考时，切换到基于案例推理的智能设定方法；如果由于案例库的不完备性，没有检索到有效参考案例，则切换到经验公式进行经验计算（相当于目前现场运行状况）。当获得二冷区水量后，送给回路进行控制。然后进入离线评价系统，根据基于连铸二冷机理温度模型计算的工艺指标预报值进行控制量的评价，最后进入案例存储阶段，根据一定的

存储规则进行案例存储。

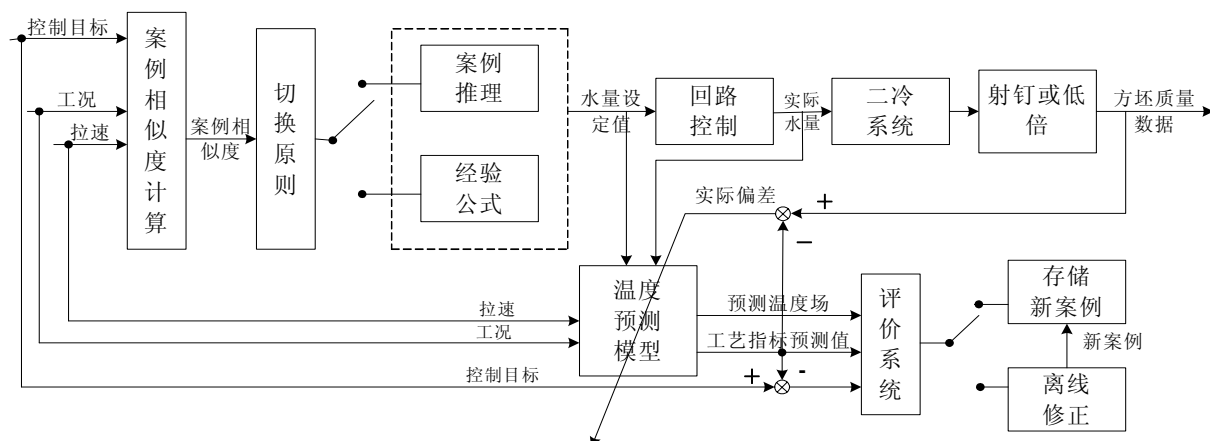


图 3.2 二冷区水量混合智能设定原理图

Fig. 3.2 Architecture of the case-based control methodology

为了实现连铸二冷过程的智能控制，案例推理系统需要确定如何对这些控制信息进行描述，在典型工况中存储哪些知识，以什么样的结构来存储和描述这些知识；如何对工况之间的相似度进行描述；如何对当前工况的控制结果进行评价以及如何更新案例库等。下面详细讨论基于案例推理的智能设定方法。

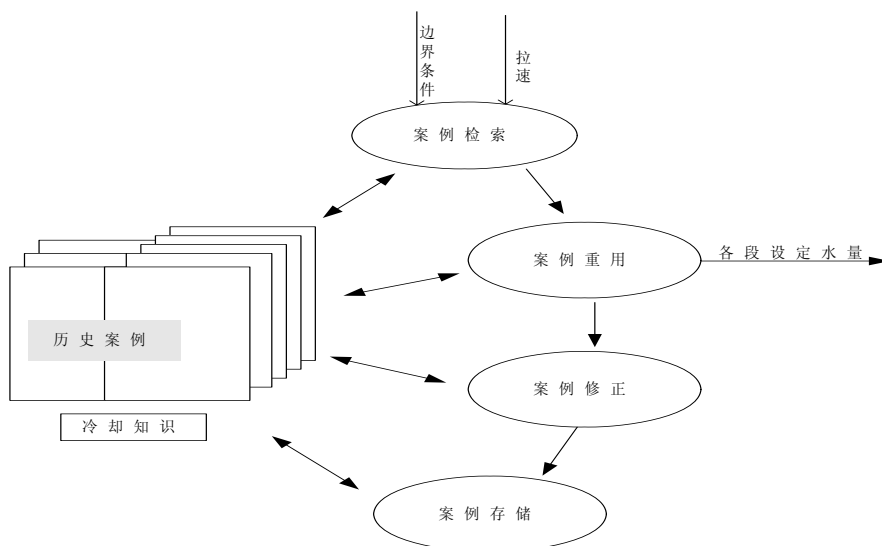


图 3.3 基于案例推理的水量设定方法原理图

Fig. 3.3 Principle of water volume setting method based on CBR

(1) 案例的表示

连铸二冷过程的控制知识按照一定的结构进行组织，并以案例的形式存贮于案例库中。作为过程动态控制特性的结构化描述，每个案例都包括了一种典型工况（边界条件）、相关控制量及其对应的二冷区水量，即由工况描述特征、相关控制量及其解组成。由于连铸二次冷却对象的传热过程动

态特性与钢种、浇铸温度、冷却水温以及拉速有着密切的关系；因此决定选 $(G, T_{in}, T_w, V_{pull})$ 作为工况的检索特征，而连铸二冷过程的二冷区三段水量 (Q_0, Q_1, Q_2) 作为案例的解特征。因此，案例在案例库中的信息存贮结构如表 3.1 所示。

表 3.1 案例结构

Table 3.1 Case structure

检索特征 F				解特征 S		
f_1	f_2	f_3	f_4	S_1	S_2	S_3
G	T_{in}	V_{pull}	T_w	Q_0	Q_1	Q_2

从控制历史数据和专家经验中提取出关于冷却过程的典型工况描述特征及其控制信息，对这些信息进行处理和总结（处理方法下面有介绍），经过运行后选出具有代表性的典型工况，将其中的工况信息和过程的控制信息以案例的形式进行存贮，从而建立了过程控制的初始案例库。这些典型工况以及相关的过程知识以案例(case)的形式存贮于案例库(case base)中，用于其后的相同或相似工况的控制。

(2) 案例检索与重用

如何对工况之间的相似度进行描述，即相似度函数如何选取是案例推理系统的一个关键问题。对于待冷却的方坯，首先根据其边界条件和拉速，利用库的索引结构，根据案例相似度在库中进行匹配检索。根据采样将铸坯沿长度方向进行分段采样。在案件检索匹配过程中，采用二级搜索机制，首先搜索和目前钢种相同的案例库，然后再根据其检索特征值进行二次搜索。

● 案例相似度的计算

不同钢种的二冷水量的设定量差别很大，因此，在作钢种的特征相似度计算时，将钢种特征作为确定符号特征，即当查询在该类特征上的取值等同在案例在该类特征上的取值时，其相似度为 1，否则相似度为 0。

$$\begin{aligned} & \text{if } Q_q \neq Q_p, \text{ then } SM(p_1, q_1) = 0; \\ & \text{if } Q_q = Q_p \text{ then } SM(p_1, q_1) = 1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

其中 Q_q 为当前钢种， Q_p 为案例库钢种， $SM(p_1, q_1)$ 为当前钢种与案例库钢种之间的相似度。

冷却水温、浇铸温度、拉速都是数值特征，因此，可以采用基于距离的方法计算相似度。两个

案例 e_p 和 e_q 在冷却温度、浇铸温度、拉速上的欧几里德空间距离为[76]

$$d_{pq}^w = [\sum_{j=1}^3 w_j^2 (x_{pj} - x_{qj})^2]^{\frac{1}{2}} = (\sum_{j=1}^3 w_j^2 \chi_j^2)^{\frac{1}{2}}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

其中 x_{pj}, x_{qj} 分别代表案例 e_p 和 e_q 的冷却温度、浇铸温度、拉速特征, w_j 为第 j 个特征的加权系数, 案例 e_p, e_q 的相似度定义为

$$SIM_{pq}^w = \frac{1}{1 + \alpha d_{pq}^w} \quad (3.8)$$

其中, α 为一正实数, 本文取 1。当所有特征加权系数相等, 并均取 1 时, $SIM_{pq}^w = SIM_{pq}^1$

● 基于神经网络的特征加权系数的整定方法

加权系数直接影响案例检索的最终结果, 可以经验确定, 也可以采用一些智能方法进行确定, 本文采用文[73]的方法, 引入神经网络技术, 使用大量实际运行数据进行加权系数的整定, 使权重的确定更加具有客观依据。

基于神经网络的加权系数整定方法, 可以自动进行特征权重的学习, 并最终计算出案例的相似度。网络采用三层结构, 输入层为 2×3 个节点, 中间隐层为特征数, 3 个节点, 输出层为 2 个, 分别输出 SIM_{pq}^w 和 SIM_{pq}^1 , SIM_{pq}^1 为 $w_1 = w_2 = w_3 = 1$ 的值。

定义性能评价指标为

$$E(w) = \sum_p \sum_{q(p \neq q)} [SIM_{pq}^w (1 - SIM_{pq}^1) + SIM_{pq}^1 (1 - SIM_{pq}^w)] \quad (3.9)$$

该评价指标特点是

如果 $SIM_{pq}^1 < 0.5$, 当 $SIM_{pq}^w \rightarrow 0$, $E(w) \downarrow$;

如果 $SIM_{pq}^1 > 0.5$, 当 $SIM_{pq}^w \rightarrow 1$, $E(w) \downarrow$ 。

因此, 无论是相似案例相似度增加, 还是不同案例的相似度降低, 都使性能指标函数降低。我们的目的是寻找特征权重, 使 $E(w)$ 最小。

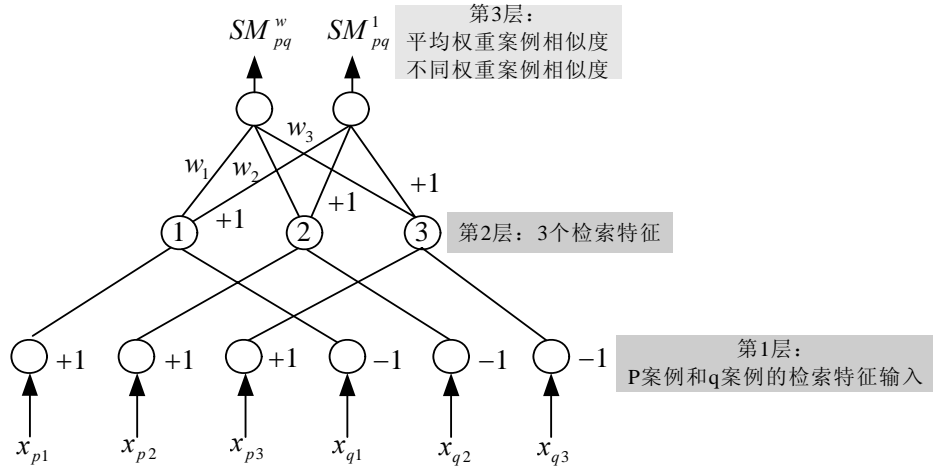


图 3.4 ANN 训练特征相似度的加权系数

Fig. 3.4 ANN training for the weights of retrieval features

采用梯度下降学习方法， w 的学习率为

$$\Delta w_j = -\lambda \frac{\partial E}{\partial w_j}, \quad \lambda = 0.01$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = \sum_p \sum_{q(p \neq q)} (1 - 2 \cdot SM_{pq}^w) \frac{\partial SM_{pq}^w}{\partial d_{pq}^w} \frac{\partial d_{pq}^w}{\partial w_j}$$

$$\frac{\partial SM_{pq}^w}{\partial d_{pq}^w} = \frac{-\alpha}{(1 + \alpha d_{pq}^w)^2}$$

$$\frac{\partial d_{pq}^w}{\partial w_j} = \frac{w_j \chi_j^2}{(\sum_{j=2}^8 w_j^2 \chi_j^2)^{1/2}} \quad \text{其中 } \chi_j^2 = (x_{pj} - x_{qj})^2$$

(3. 10)

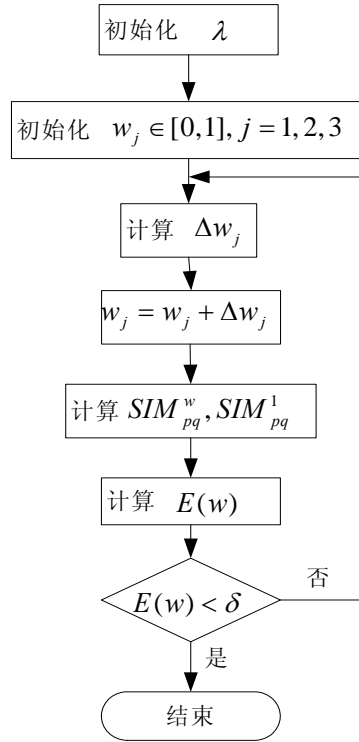


图 3.5 ANN 训练算法

Fig. 3.5 ANN training algorithm

● 案例重用

计算出案例相似度后，与运行工况的相似度最大的历史案例被检出作为匹配案例。如果最大相似度大于 0.9，则在案例重用阶段直接重用匹配案例的解，即将匹配案例的解作为采样段带钢的二冷区水量设定；如果最大案例相似度小于 0.9，则说明没有有效的匹配案例，需要切换到经验公式上求解。

● 经验公式

由大量实际经验以及运行数据，发现水量对拉速变化最为敏感，因此，工程师们总结出一个二冷区水量的计算公式,水量与拉速的关系表示为

$$Q_i = a_i v^2 + b_i v + c_i \quad (3.11)$$

其中 i 代表冷却段数， Q_i 表示第 i 段的冷却水水量， a_i ， b_i ， c_i 表示第 i 段的冷却水配水参数，根据不同钢种具体经验确定，见表 3.2。当案例库中没有相应的可参考案例时，我们将二冷水量设定模型算法切换到该经验模型上，进行水量的经验计算，然后直接送给回路进行回路控制。可以看出，经验公式仅考虑了拉速对冷却过程的影响。

表 3.2 二冷区水量经验公式参数确定

Table 3.2 Water Volume Parameters computed by experimental formula

浇注 断面	冷 却 段	C<0.2%			0.2%<C<0.5%			C>0.5%		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c
150×220	0	29	44	37	29	35	37	20	53	37
	1	20	81	45	20	65	45	20	62	45
	2	14	31	18	14	26	18	0	0	0
130×130	0	20	22	50	18	20	40	18	15	45
	1	18	20	60	16	17	50	12	13	62
	2	5	8	40	5	8	30	5	9	44
150×150	0	15	17	70	15	17	50	18	15	55
	1	14	15	80	14	15	60	12	13	52
	2	5	8	60	5	8	40	5	9	34

(3) 案例评价

设定水量送出后, 应该进行该次水量的控制效果评价。评价系统通过温度机理模型评价回温、温降、矫直点铸坯表面温度以及液芯长度。由于温度机理模型的计算速度慢, 不能进行实时操作, 该评价阶段是离线进行的。

(4) 案例修正

如果案例库中没有合适的参考案例, 需要进行离线的案例修正。修正过程借助于温度机理模型, 首先将本次运行的实际水量送给温度机理模型, 计算各项工艺指标, 根据工艺指标的变化, 不断经验凑试三段水量值, 再送给机理模型, 直至满足工艺指标为止。最后送给案例存储系统。

(5) 案例存储

并非所有的运行案例都进行存储, 案例保存依据检索特征与案例库中案例的最大特征相似度和最大案例相似度, 决定是否将其添加到案例库中。如果最大案例相似度显著不同, 则作为新案例添加到案例库; 如果对应新的钢种, 则添加到案例库中; 如果对应拉速的最大特征相似度显著不同, 则添加到案例库中; 如果对应浇铸温度最大特征相似度显著不同, 则添加到案例库; 如果对应冷却水温最大特征相似度显著不同, 则添加到案例库。其中 *save* 表示将该案例添加到案例库中。推理系统通过案例保存机制, 根据所检索案例得到的控制结果对案例库进行更新, 从而实现了工况变化的自适应。

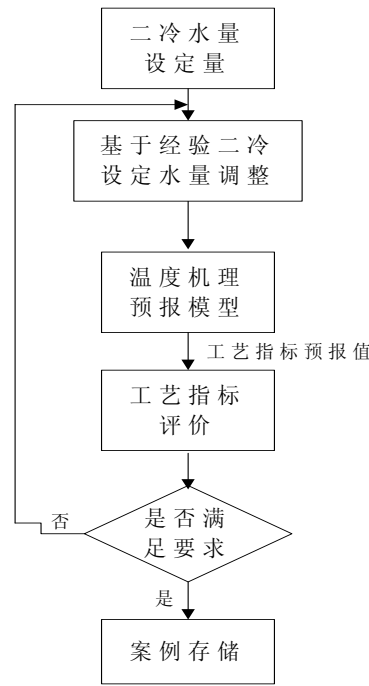


图 3.6 案例修正

Fig. 3.6 Case revising

Begin save

if $Q_q \neq Q_p$, then save it ;

if $SIM_{case,max} < 0.8$, then save it ;

if $SM_{pull,max} < 0.9$, then save it ;

if $SM_{Tin,max} < 0.9$, then save it ;

if $SM_{Tw,max} < 0.9$, then save it ;

End save

(3. 12)

(6) 初

始案例库的建立

前面叙述，从控制历史数据和专家经验中提取出关于冷却过程的典型工况描述特征及其控制信息，对这些信息进行处理和总结，选出具有代表性的典型工况作为案例进行存储建立案例库。本文首先采用减法聚类的思想进行对运行数据进行聚类分析^[75]，找到各中心点后，将中心点的数据送入

案例的评价系统，最终将合理的案例作为初始案例存储，建立初始的案例库。为了便于本文使用的二级检索，按照钢种的不同建立不同的子案例库。

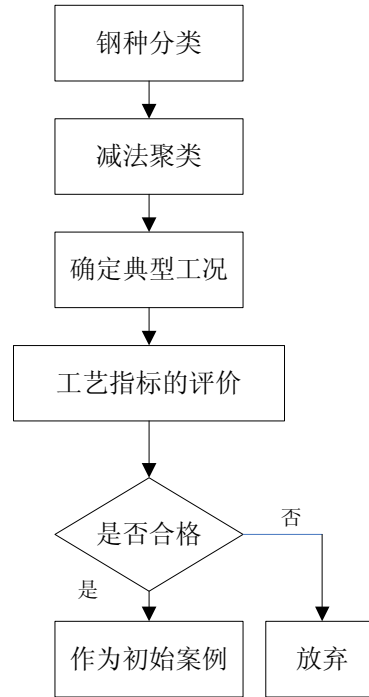


图 3.7 初始案例库建立

Fig.3.7 Building process of the initial case base

减法聚类的聚类中心的候选集为样本数据点，并根据各个数据点周围的数据点密度来计算该点作为聚类中心的可能性，同时该数据点附近的数据点被排除成为聚类中心的可能性。在选出第一个聚类中心后，从剩余的可能作为聚类中心的数据点中，继续采用类似的方法选择下一个聚类中心。一直持续到所有剩余的数据点作为聚类中心的可能性低于某一个阈值。由此可以看出，采用减法聚类的方法可以有效解决案例冗余问题，防止案例的重复存储。

- 对数据进行归一化，给定接受比和拒绝比。
- 计算待聚类的每一个数据对的势值，考虑 r 维空间的 n 个数据点。由于每个数据点都是聚类中心的候选者，因此，数据点处的密度指标定义为

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\frac{4\|x_i - x_j\|^2}{r_a^2}}, r_a > 0. \quad (3.13)$$

开始循环聚类

第 1 步 选出最高势值的数据对作为聚类的参考，每个数据对的新势值由下式更新：

$$P_i = P_i - P_1 \cdot e^{-\frac{4\|x_i - x_1\|^2}{r_b^2}}, r_b \approx 1.5r_a; \quad (3.14)$$

第 2 步 如果 $P_i > \bar{\delta}P_1$ ，则接受 x_i 其为一类，聚类数目加一，并继续；

第 3 步 如果 $P_i < \underline{\delta}P_1$ ，只有在它既有一个合理的势值又远离其他聚类中心时，才接受它为一类，否则拒绝接受为新类。

第 4 步 只要接受为新的一类，就做减小势值运算，然后在剩下的势值中选择一个最高的，返回第 1 步。

这里 $\bar{\delta}$ 和 $\underline{\delta}$ 决定了聚类中心点的个数， $\bar{\delta}$ 定义了一个势值上限，即接受比，大于该值将确定性地该数据点作为一个聚类中心； $\underline{\delta}$ 定义了一个势值下限，即拒绝比，小于该值不把该数据点作为聚类中心。而在 $\bar{\delta}$ 和 $\underline{\delta}$ 之间，算法判断该数据是否具有足够的势值成为聚类中心，而且同现有聚类中心的聚类是否足够远。实验证明，一般取 $\bar{\delta} = 0.5$ 、 $\underline{\delta} = 0.15$ ^[76]。

案例评价同前述过程相同，不再赘述。

3.3 基于案例推理技术的二冷配水控制实施过程

根据图 3.2 给出的连铸二冷过程智能控制方法的架构，形成了适合实际连铸二冷配水控制实施过程。

第一步，采集包括钢种、浇铸温度、冷却水温等冷却过程数据后，上层设定级根据控制目标的要求，预先为回路控制级提供拉速设定值。

第二步，由实时工况数据、拉速和控制目标值构造案例的检索特征，并采用混合智能设定方法，利用案例检索算法在案例库中进行检索，获得与当前工况匹配的存贮案例及其相应的二冷区冷却水量设定。

第三步，将拉速以及上步计算获得的二冷区冷却水量通过回路控制级施加于实际连铸二冷过程，实时控制冷却区的喷水量，完成连铸二冷过程的控制。

第四步，控制量评价、案例修正和案例存储。进入评价系统进行离线的控制效果评价。根据智能设定方法在上一步给出的二冷区冷却水量控制量后，利用连铸方坯二冷区温度模型进行工艺指标的预报，与矫直点铸坯表面温度、回温限制、温降限制、液芯长度限制等进行统计比较分析，通过评价系统进行误差分析控制效果，如果效果好，根据公式 (3.12) 进行案例存储；如果控制失败，则进入案例修正阶段，离线进行控制量调整计算，最后将调整获得的新控制量作为新案例存入案例库，作为案例推理系统推理使用。

第五步，根据射钉试验，得到的坯壳厚度对连铸方坯二冷区温度机理模型进行离线校正，从而不断提高温度机理模型的计算精度。

在实际连铸二冷控制系统中重复实施上述步骤，就实现了本章提出的智能控制方法。

第四章 软件设计

4.1 需求建模

4.1.1 统一建模语言 UML 简介

统一建模语言（UML）是一个通用的可视化建模语言，用于对软件进行描述、可视化处理、构造和建立软件系统制品的文档。它记录了对必须构造的系统的决定和理解，可用于对系统的理解、设计、浏览、配置、维护和信息控制。UML 适用于各种软件开发方法、软件生命周期的各个阶段、各种应用领域以及各种开发工具，UML 是一种总结了以往建模技术的经验并吸收当今优秀成果的标准建模方法。UML 包括概念的语义，表示法和说明，提供了静态、动态、系统环境及组织结构的模型。它可被交互的可视化建模工具所支持，这些工具提供了代码生成器和报表生成器。UML 标准并没有定义一种标准的开发过程，但它适用于迭代式的开发过程。它是为支持大部分现存的面向对象开发过程而设计的。

UML 描述了一个系统的静态结构和动态行为。UML 将系统描述为一些离散的对象并最终为外部用户提供一定的功能的模型结构。静态结构定义了系统中的重要对象的特征和操作以及这些对象之间的相互关系。动态行为定义了对对象的时间特性和对象为完成目标而相互进行通信的机制。从不同但相互联系的角度对系统建立的模型可用于不同的目的。

UML 还包括可将模型分解成包的结构组件，以便于软件小组将大的系统分解成易于处理的块结构，并理解和控制各个包之间的依赖关系，在复杂的开发环境中管理模型单元。它还包括用于显示系统实现和组织运行的组件。

UML 不是一门程序设计语言。但可以使用代码生成器工具将 UML 模型转换为多种程序设计语言代码，或使用反向生成器工具将程序源代码转换为 UML。UML 不是一种可用于定理证明的高度形式化的语言，这样的语言有很多种，但它们通用性较差，不易理解和使用。UML 是一种通用建模语言。对于一些专门领域，例如用户图形界面（GUI）设计、超大规模集成电路（VLSI）设计、基于规则的人工智能领域，使用专门的语言和工具可能会更适合些。UML 是一种离散的建模语言，不适合对诸如工程和物理学领域中的连续系统建模。它是一个综合的通用建模语言，适合对诸如由计算机软件、固件或数字逻辑构成的离散系统建模。

4.1.2 用例视图

当用例视图在外部用户前出现时，它捕获到系统、子系统或类的行为。它将系统功能划分成对参与者（即系统的理想用户）有用的需求。而交互功能部分被称作用例。用例使用系统与一个或多个参与者之间的一系列消息来描述系统中的交互作用。参与者可以是人，也可以是外部计算机系统和外部进程。

软件顶级用例包分为仿真系统包、数学模型包、案例推理包、系统配置包、项目管理包、帮助包组成，如图 4.1 所示

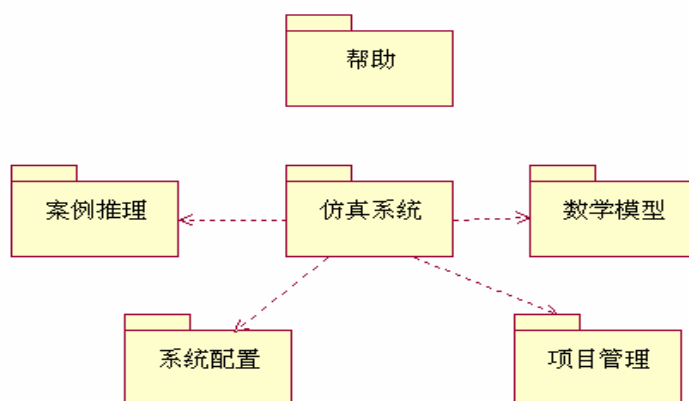


图 4.1 用例包图

Fig. 4.1 Use case package view

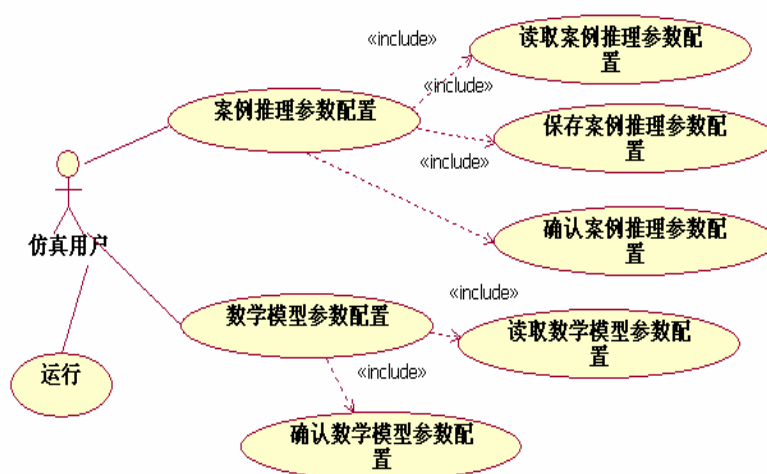


图 4.2 仿真系统包用例图

Fig. 4.2 Use case view of simulation system

其中，仿真系统包包括仿真环境配置、运行等功能，数学模型包包括数学模型参数选择和配置、数学模型验证等功能，项目管理包包括项目参数配置、项目构建等功能，案例推理包包括案例设计、案例库管理、推理引擎配置等功能，帮助包包括软件操作知道、版权等功能。

仿真系统包用例如图 4.2 所示

其中

- (1) 案例推理参数配置

包括读取案例推理参数配置、保存案例推理参数配置、确认案例推理参数配置三个子用例组成。案例推理参数包括案例库类型、推理过程方法选择、案例库详细信息等。

(2) 数学模型参数配置

包括读取数学模型参数配置、确认数学模型参数配置二个子用例。数学模型参数包括铸机参数（铸机名称、弯月面半径、结晶器长度、各段长度）、钢种参数（钢种名称、固相线、液相线）、模型算法参数（网格个数、迭代次数）等。

(3) 运行

数学模型包用例如图 4.3

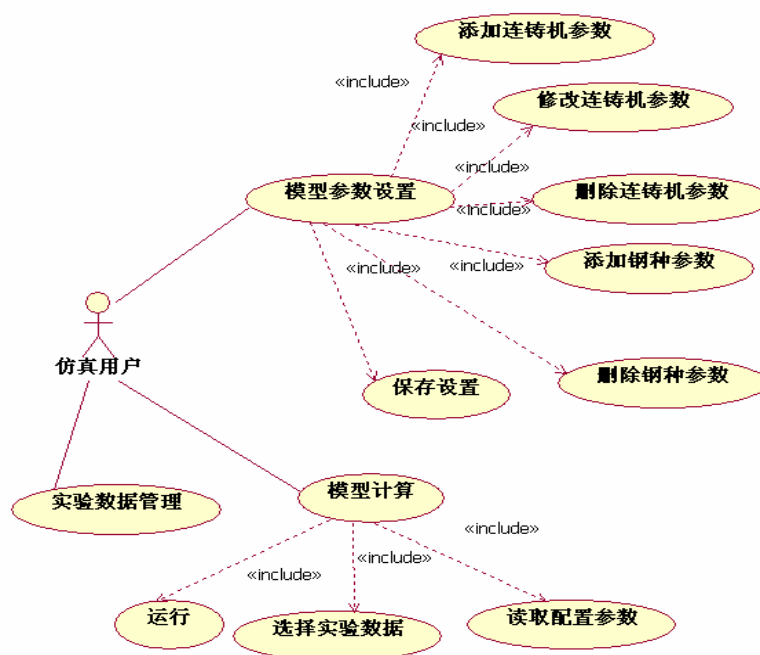


图 4.3 数学模型包用例图

Fig. 4.3 Use case view of mathematic model

其中

- (1) 模型参数设置包括铸机参数、钢种参数、模型参数的管理和设置；
- (2) 模型计算通过调用数学模型计算验证模型有效性；
- (3) 实验数据管理包括实验数据的添加、删除、修改等功能。

案例推理包用例如图 4.4 所示

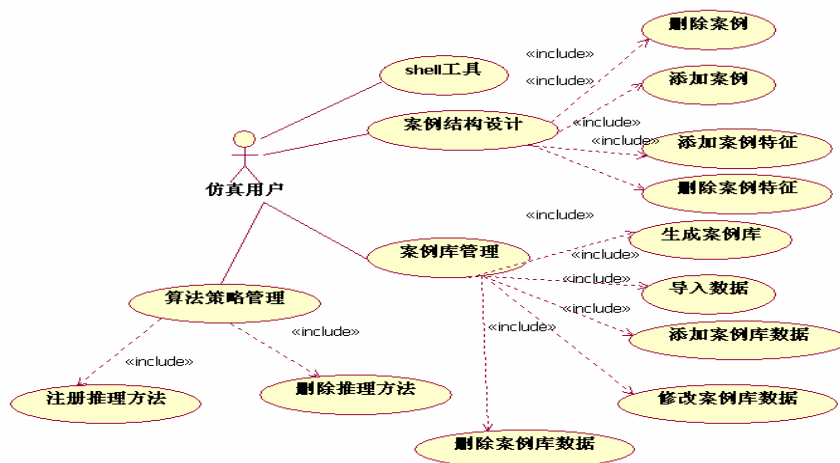


图 4.4 案例推理包用例图

Fig. 4.4 Use case view of Case-Based Reasoning

其中

- (1) 案例结构设计包括案例的管理和特征的管理；
- (2) 案例库管理包括案例库动态生成和案例库数据的添加、删除、修改等功能；
- (3) 算法策略管理包括案例推理算法的注册信息的添加、删除，验证。

项目管理包用例如图 4.5 所示

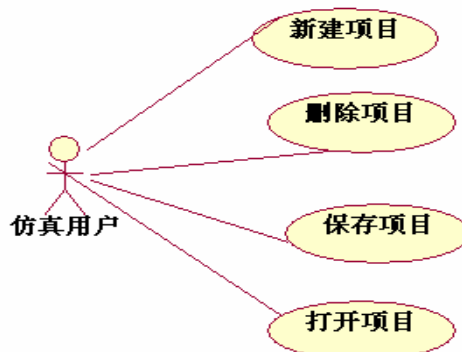


图 4.5 项目管理包用例图

Fig. 4.5 Use case view of project management

其中

- (1) 新建项目包括新项目的配置信息、新建文件夹、默认导入数据等功能；
- (2) 删除项目删除用户不需要的项目，但是保留一个日志文件；
- (3) 保存项目保存当前项目的状态信息；
- (4) 打开项目功能是打开用户已创建的项目。

4.2 软件包总体设计

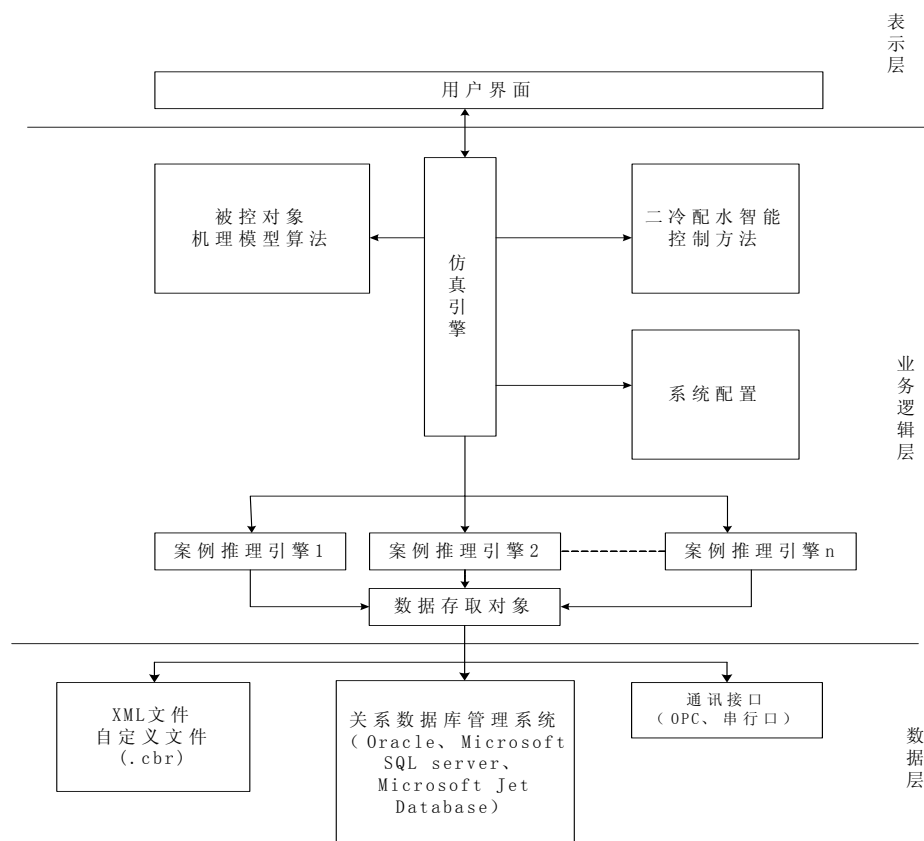


图 4.6 软件包总体结构

Fig. 4.6 Software architecture

软件包主要采用 Microsoft Visual C#.net、Microsoft Visual C++、Compaq Visual Fortran 混合编程实现，利用面向对象的软件技术开发。系统采用菜单驱动的运行方式，运用 XML 可交换的文件格式和强大的数据库技术，具有界面友好，使用方便，功能强大，可移植性好等特点，能够灵活地根据方坯连铸二冷区的数学模型和智能控制算法进行仿真实验。

图 4.6 给出了方坯连铸二冷智能配水仿真软件包的总体结构。软件系统采用分层设计，表示层包括用户界面的交互，业务逻辑层包括各种算法、流程，数据层包括对数据的存取操作算法。其中被控对象机理模型算法采用第二章的连铸凝固过程温度场模型算法，二冷配水智能控制方法采用第三章的基于案例推理的二冷智能配水方法。案例推理引擎采用自己开发的开发源代码的 OpenCBR 框架，关系数据库管理系统采用 Microsoft SQL Server2000, 并且支持 Oracle 等其他关系数据库管理系统。自定义文件采用 CBR 文件格式，详细格式见后文。软件包支持通过 OPC 协议与组态软件进行通讯，也支持自定义协议通过串行口与组态软件通讯。数据库存取对象采用 Microsoft ADO.net, 并且支持 JDBC 接口。

可以看出，被控对象机理模型算法和二冷智能配水方法模块是整个软件包的核心，软件系统的所有功能设计都围绕他们展开。由此，下面将给以被控对象机理模型算法模块和二冷智能配水方法模块为主线，给出软件包的类设计、数据库设计，然后讨论软件包的结构、算法设计，并简单介绍软件包的运行情况。

4.3 类设计

在面向对象的程序设计中，类的设计是软件系统的基础。本文下面将用统一建模语言 UML 对软件包中类的设计进行介绍。在 UML 中，类可以分为实体类、边界类、控制类，本文按照这种分类列出软件包中的部分类。

表 4.1 实体类

Table 4.1 Entity class

序号	类名	功能描述
1	Case	案例结构
2	Feature	特征结构
3	ConfigInfo	配置文件信息
4	MachineVO	铸机参数信息
5	SteelVO	钢种参数信息
6	DataSource	数据源
7	RunningEnvironment	运行环境参数信息
8	ModelParamVO	数学模型参数信息
9	SystemProperty	系统特征信息

表 4.2 控制类

Table 4.2 Control class

序号	类名	功能描述
1	EuclideanSimilarity	欧几里德相似度
2	NeighborSimilarity	近邻法相似度
3	DefaultCaseBase	案例库

5	CBRContextManager	运行上下文管理器
7	MssqlDatabase	Mysql 数据库
8	OracleDatabase	Oracle 数据库
9	DefaultEngine	案例推理引擎
10	DefaultOCBRFile	CBR 文件
11	DefaultCaseRestore	案例存储方法
12	DefaultCaseRetrieval	案例检索方法
13	DefaultCaseReuse	案例重用方法
14	DefaultCaseRevise	案例修正方法
15	MaxCaseReuseStrategy	最大案例重用策略
16	MeanCaseReuseStrategy	平均案例重用策略
18	MappingBO	方法映像文件信息操作
19	CaseBaseBO	案例库操作
20	StructureBO	案例结构操作
21	DataManagingBO	数据管理操作
22	MachineBO	连铸机信息管理操作
23	SteelBO	钢种信息管理操作

表 4.3 边界类

Table 4.3 Boundary class

序号	类名	功能描述
1	MainUI	主界面
2	StartupPage	起始界面
3	AddCaseFrm	添加案例窗体
4	AddingFeatureFrm	添加特征窗体
5	AlgorithmManagingFrm	算法管理窗体
6	CaseBaseManagingFrm	案例库管理窗体

7	ModifyingFeatureFrm	修改特征窗体
8	StructureDesigningFrm	案例结构设计窗体
9	StructureDetailsFrm	案例结构详细信息窗体
10	HelpFrm	帮助窗体
11	NewProjectFrm	新建项目窗体
12	CBRParameterConfigFrm	案例推理参数配置窗体
13	ChooseBoundaryFrm	仿真边界条件选择窗体
14	DataChoosingFrm	数据选择窗体
15	ModelParameterConfigFrm	模型参数配置窗体
16	ProcessRunningFrm	仿真运行窗体

4.4 数据库设计

表 4.4 数据库表

Table 4.4 Database table

序号	数据表名称	数据内容
	tbl_casedict	案例结构
	tbl_data	案例库数据
	tbl_machine	连铸机信息
	tbl_process	实验数据
	tbl_steel	钢种信息
	tbl_case_base_XXX	案例库 XXX（其中 XXX 表示案例的名称）

4.5 结构和算法设计

4.5.1 结构设计

软件包的结构设计充分考虑了可扩展性、可交换性，文件案例库的存储采用自定义的文件格式 CBR，推理引擎配置信息、项目信息、模型配置信息、仿真引擎配置信息采用 XML 格式。本文下

面将简要介绍一下这二种结构。

(1) CBR 文件结构

CBR 文件结构充分考虑案例推理案例库和案例结构设计的特点，非常容易将数据库表、Excel 表格等转化为 CBR 文件，并且 CBR 文件简单易用，适合于小规模案例库存储和实验仿真。文件的具体格式如下：

```
# the case base of secondary cooling
@Case cooling(speed,temp,quality)
#           type, key, index,weight
@Feature    speed(float, false, true, 0.5)
@Feature    temp(float, false, true, 0.5)
@Feature    quality(float,true,true, 1)
@Data

23. 2, 45, 34
~ ~ ~ ~ ~
```

图 4.7 CBR 文件格式

Fig. 4.7 Format of CBR file

其中，以#开头的行表示该行是注释，以@Case开头的行表示该行是案例定义，以@Feature开头的行表示该行是案例特征定义，@Data以后的行表示案例数据。

用户可以很方便地将 EXCEL 或 SQL SERVER、ACCESS 的数据表直接复制到文件中，经过配置马上就可以生成 CBR 文件。

(2) 案例推理引擎配置文件

为了案例推理引擎的可扩展性，软件包采用基于 XML 格式的配置文件。图 4.8 是配置文件的样本。其中 Mapping 节点表示案例推理方法的定义，用户可以修改 Mapping 子节点 Method 中的 impl 特征来定制要使用的方法。例如如果想使用自己写的相似度计算类 MySimilarity，在路径 C:\Similarity.dll 中，可以将

```
<method
  interface="org.opencbr.core.Similarity.ISimilarity"
```

变为

```
<method  
  interface="org.opencbr.core.Similarity.ISimilarity"  
  impl="MySimilarity"
```

这样就可以在相似度比较使用自己写的方法了。在 `parameters` 节点中可以设置推理引擎参数，`CaseBaseInputType` 表示案例库存储介质，现在支持的选项是数据库和 CBR 格式文件。

`SimilarityThreshold` 表示相似度阈值，可以设定在案例重用阶段从案例库中选择相似案例的最小值。`CaseBaseURL` 表示案例库的 URL，根据案例库类型的不同，配置不同。


```
<?xml version="1.0" encoding="gb2312" ?>
<opencbr-config>
  <mapping>
    <method      interface="org.opencbr.core.method.ICaseRetrievalMethod"
    impl="org.opencbr.core.method.DefaultCaseRetrievalMethod" />
    <method      interface="org.opencbr.core.method.ICaseReuseMethod"
    impl="org.opencbr.core.method.DefaultCaseReuseMethod" />
    <method      interface="org.opencbr.core.method.ICaseReviseMethod"
    impl="org.opencbr.core.method.DefaultCaseReviseMethod" />
    <method
    interface="org.opencbr.core.Similarity.ISimilarity"
    impl="org.opencbr.core.Similarity.EuclideanSimilarity" />
    <method      interface="org.opencbr.core.strategy.ICaseReuseStrategy"
    impl="org.opencbr.core.strategy.MaxCaseReuseStrategy" />
    <method
    interface="org.opencbr.core.casebase.ICaseBase"
    impl="org.opencbr.core.casebase.DefaultCaseBase" />
    <method
    interface="org.opencbr.core.method.ICaseRestoreMethod"
    impl="org.opencbr.core.method.DefaultCaseRestoreMethod"/>
    <method
    interface="org.opencbr.core.casebase.ICaseBaseInput"
    impl="org.opencbr.core.casebase.DefaultCaseBaseInput" />
  </mapping>
  <parameters>
    <parameter name="CaseBaseInputType" value="database" />
    <parameter name="SimilarityThreshold" value="0.9" />
    <parameter name="CaseBaseURL"
    value="$CaseID=cooling&$DbType=Access&$DataSource=Provider=Microsoft.Jet.
    OL.FDR.4.0;DataSource=E:\xw\workspace\db.mdb&$DictionaryTable=tbl_casedict&$D
```

图 4.8 案例推理引擎配置文件格式

Fig. 4.8 Format of Case-Based Reasoning engine configuration file

4.5.2 算法设计

软件包中的主要算法设计是数学模型算法和案例检索算法。

(1) 数学模型算法

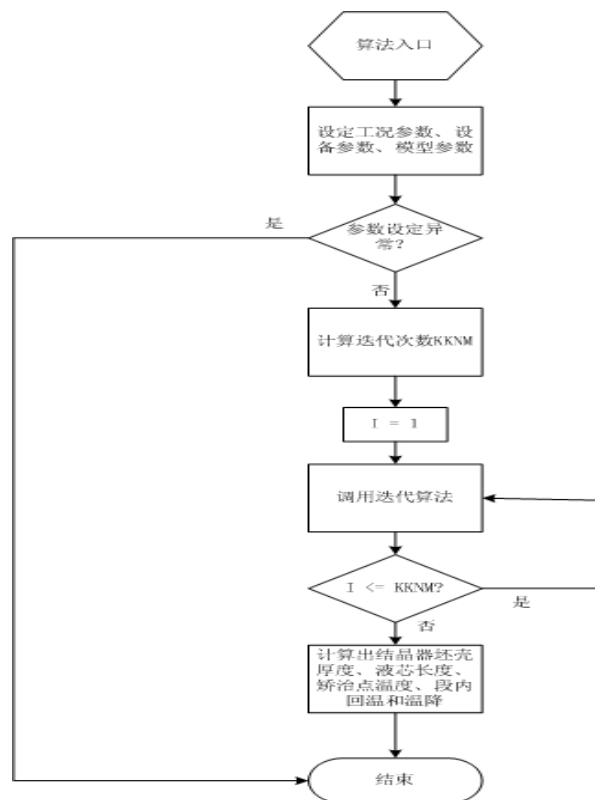


图 4.9 数学模型算法流程图

Fig. 4.9 Flow diagram of mathematic model algorithm

如图 4.9 所示，首先设定工况参数、设备参数、模型参数，如果设定的参数异常，推出程序。如果设定的参数合理计算迭代次数 $KKNM$ ，然后调用迭代算法模块求出每次迭代的温度。在迭代 $KKNM$ 次之后计算铸坯液芯长度、矫直点温度、每段的最高回温和温降，然后算法结束。

(2) 案例检索算法

如图 4.10 所示，案例检索算法的流程如下：首先设定要解决的问题案例，然后查找推理引擎中是否已经装载了相似度算法模块，如果没有装入则装入该模块。接着设定检索条件，如果检索条件没有在引擎中建立了索引这建立索引，然后调用相似度算法检索相似的案例，同时按相似度大小进行对堆排序，下一步输出相似案例到推理的下一阶段。

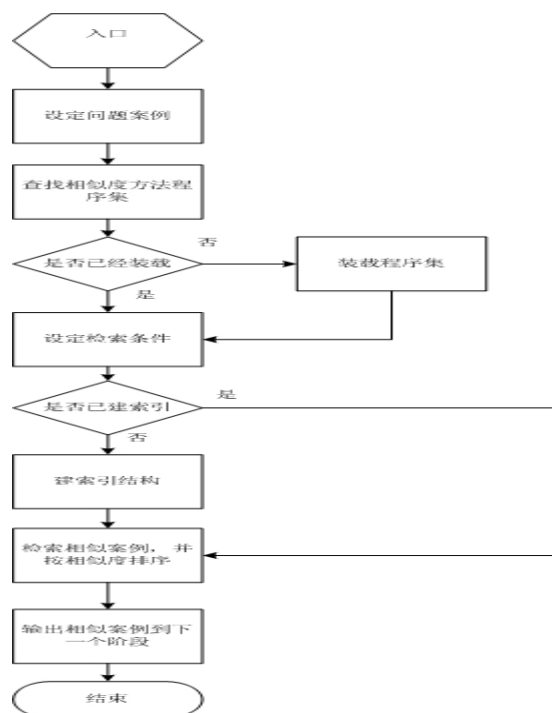


图 4.10 案例检索算法流程图

Fig. 4.10 Flow diagram of case retrieval algorithm

4.6 软件包的操作与运行

图 4.11 是软件运行的初始界面。用户选择“模型”菜单中的子菜单“模型参数配置”，进入模型参数配置界面，如图 4.12。用户点击标签“第二步：选择试验数据”，进入选择试验数据界面，如图 4.13。用户点击“第三步：计算”，进入模型计算界面，如图 4.14。用户选择“案例推理”菜单中的子菜单“案例结构设计”，进入案例结构设计界面，如图 4.15。用户选择“案例库管理”菜单，进入案例库管理界面，如图 4.16。用户选择“仿真系统”菜单中的仿真运行子菜单，进入仿真运行界面，然后选择“单步运行”按钮进入单步仿真运行界面，如图 4.17，选择“连续运行”按钮进入连续仿真运行界面，如图 4.18。



图 4.11 软件包运行初始界面

Fig. 4.11 The initial user interface



图 4.12 模型参数配置界面

Fig. 4.12 Parameter configuration user interface of mathematic model

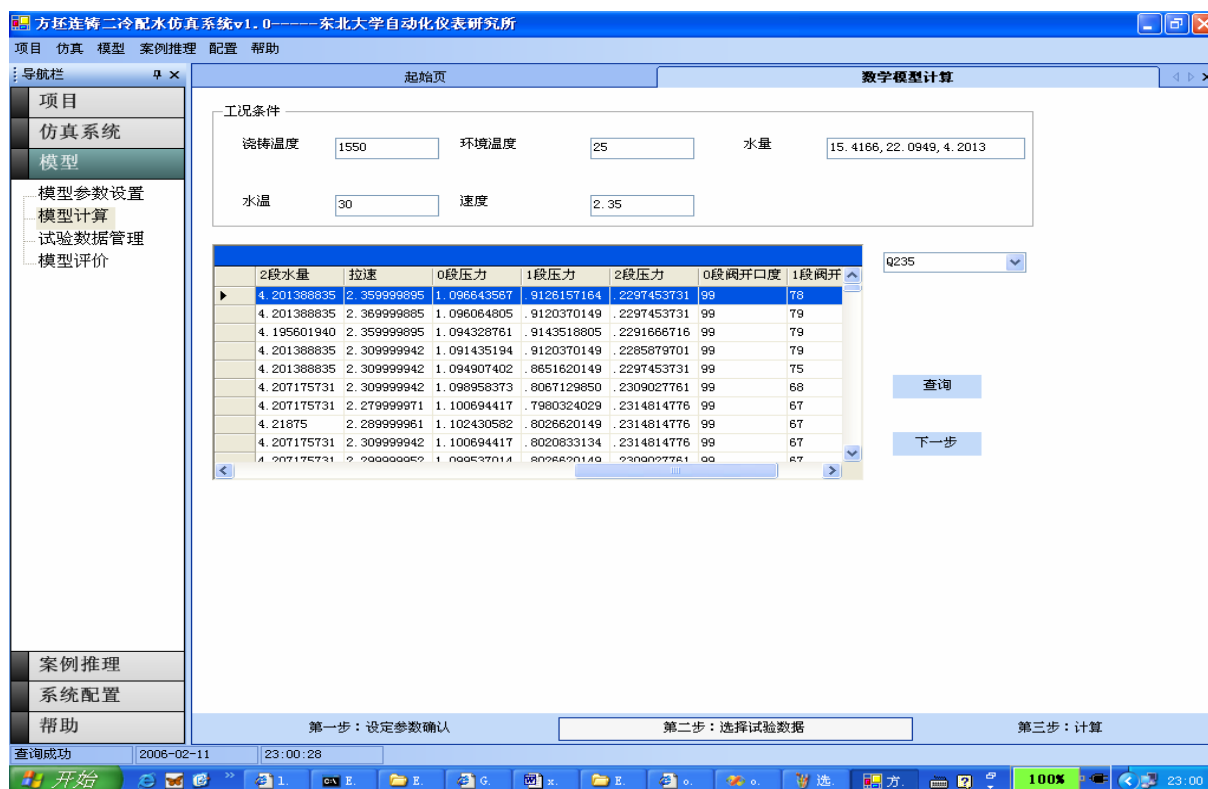


图 4.13 选择试验数据界面

Fig. 4.13 The experimental data user interface

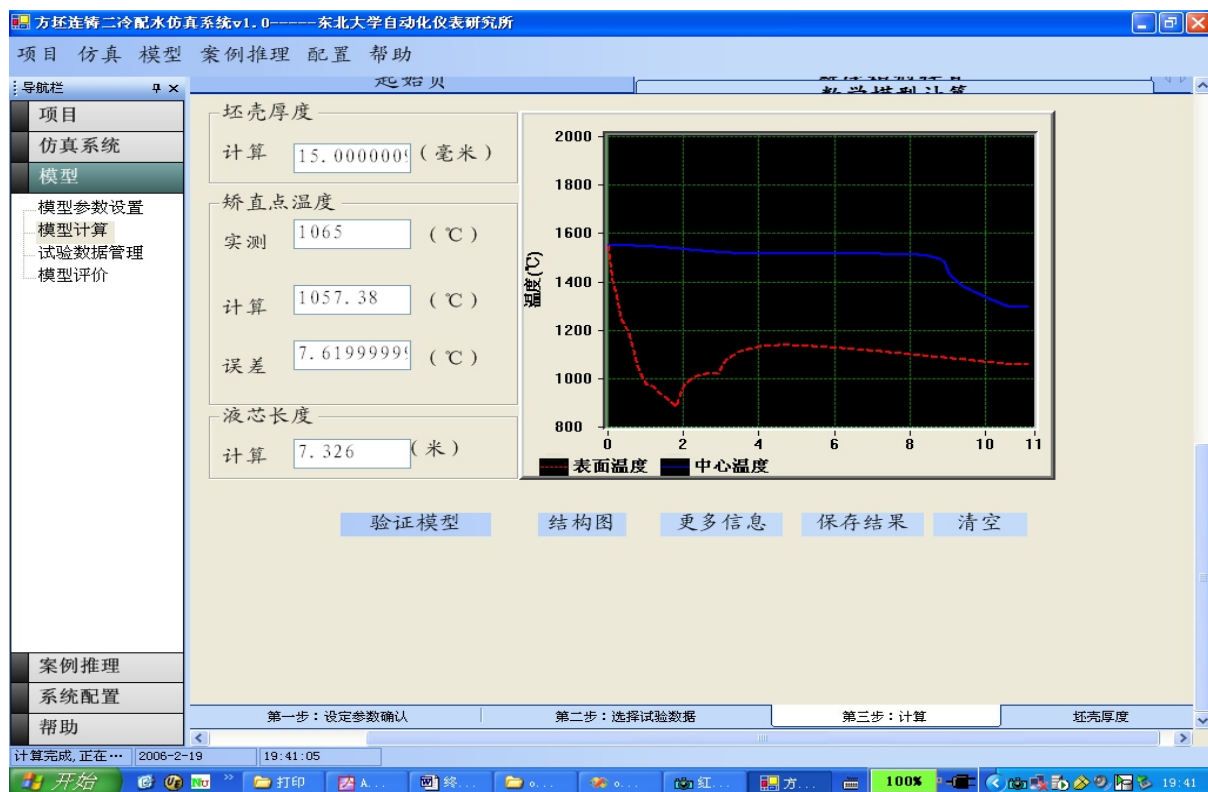


图 4.14 数学模型计算界面

Fig.4.14 The computing user interface of mathematic model



图 4.15 案例结构设计界面

Fig.4.15 The design user interface of case structure



图 4.16 案例库管理界面

Fig. 4.16 The management user interface of case base

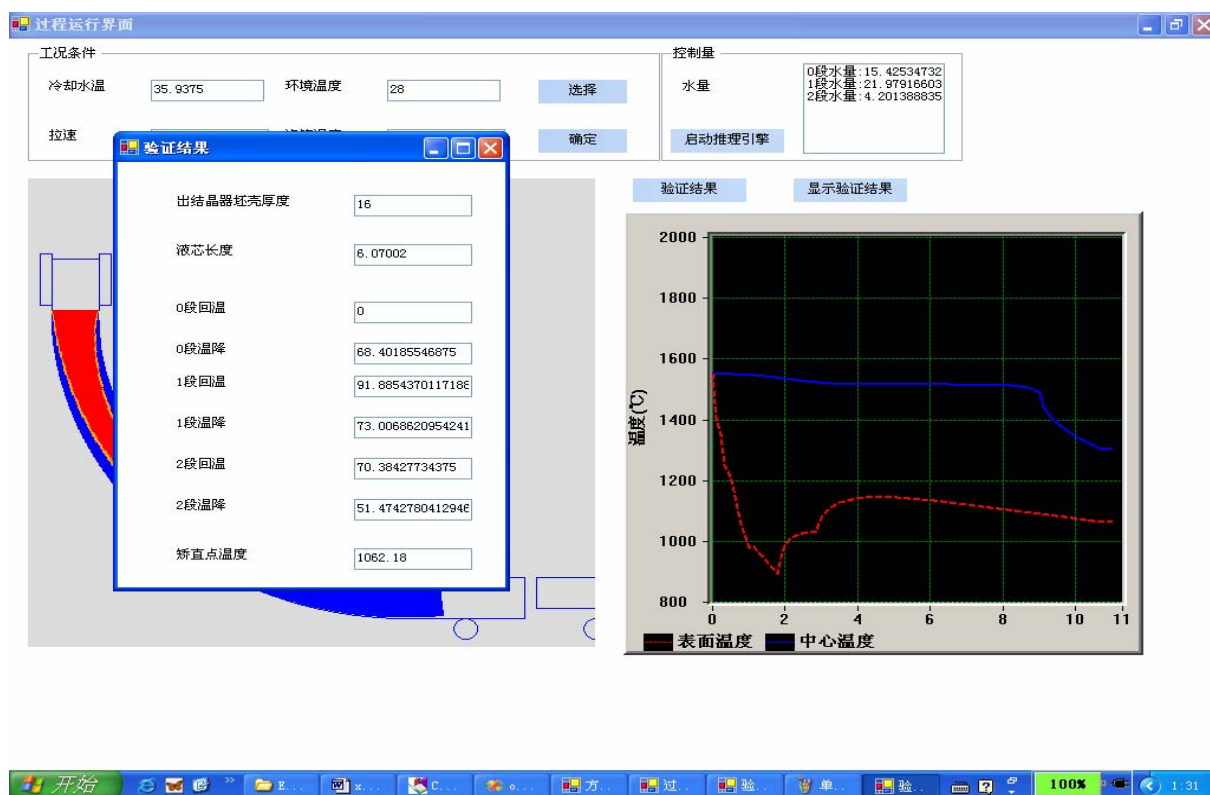


图 4.17 某一工况条件下仿真运行界面

Fig.4.17 The step simulation user interface

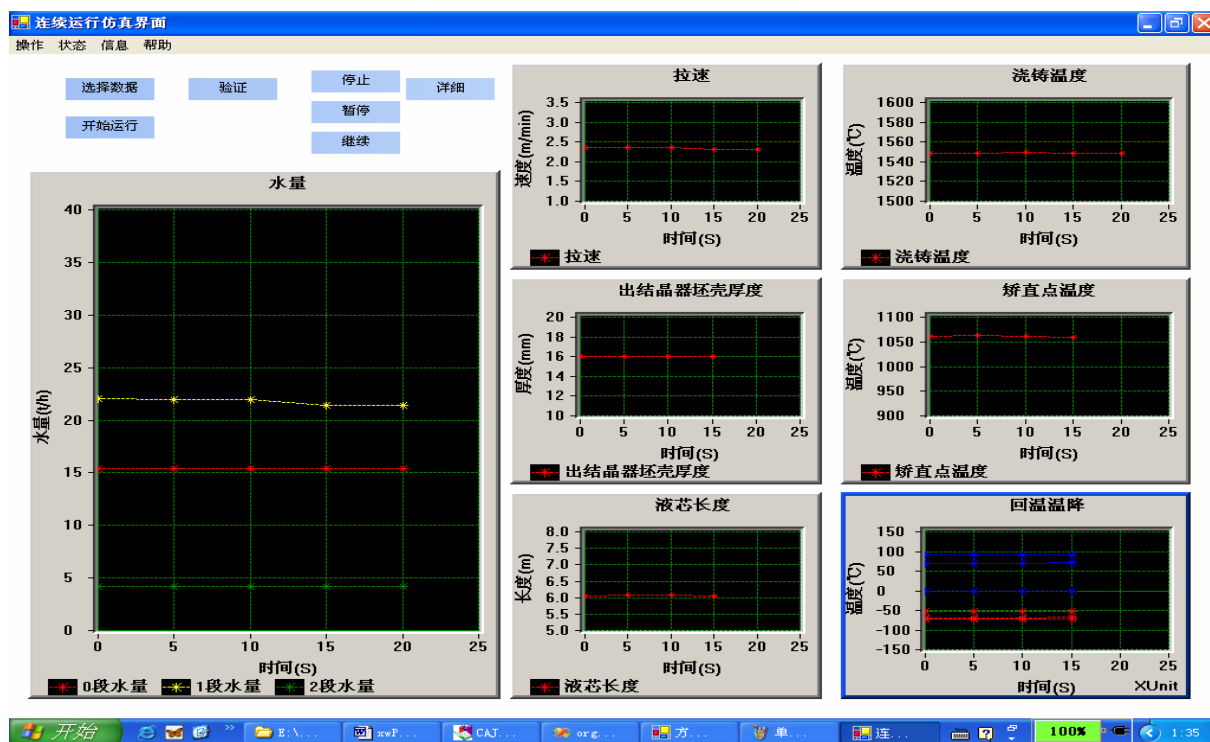


图 4.18 工况条件连续变化时仿真运行界面

Fig. 4.18 The continuous simulation user interface

第五章 仿真实验

5.1 实验对象描述

5.1.1 工艺及设备参数

某钢厂采用的是高炉—转炉—连铸长流程工艺，该过程的炉机匹配为 30t 转炉对应 4 机 4 流的普碳钢连铸机，主要生产钢种为 Q235 等普碳钢和 20MnSi 等低合金钢。1995 年 12 月 4# 连铸机建成投产以后经历了多次高效化改造。目前单流生产能力已经达到 10 万吨，虽然产量提高，拉速也由原来的 1.4m/min 提高到目前的 2.0~2.6m/min 左右。

表 5.1 普碳钢连铸机工艺参数

Table 5.1 Technology parameters of continuous casting machine for plain carbon steel

钢包容量	中间包容量	中间包控制方式	结晶器振动方式	二冷区冷却方式	切割方式
30t	15t	塞棒敞口控制	正弦振动、	水冷	火焰切割

表 5.2 普碳钢连铸机基本参数表

Table 5.2 Configuration of continuous casting machine for plain carbon steel

弧形半径 m	浇注断面 (mm×mm)	结晶器 m	足辊段 m	一段 m	二段 m
7.0	120×120	0.9	0.27	1.46	1.560
	150×150,				
	160×200				

表 5.3 二冷喷淋设备参数

Table 5.3 Spray equipment parameters in the secondary cooling zone

位 置	型 号	数 量	排数	备 注
足辊段	9565 和 5965	8+12	2	上排 8 个，下排 12 个
一段	5965	4×11	11	
二段	4565	4×11	11	

5.1.2 温度模型参数设置及工艺指标

(1) 温度模型物性参数^[57]

表 5.4 物性参数

Table 5.4 Thermal physical parameters

钢种	参数	单位	取值
Q235	比热	J/(K _g K)	C _S =685, C _L =866
	导热系数	J/(m℃)	$\lambda_L=48.2, \lambda_\lambda=26.3$
	潜热	K _j /K _g	272
	拉速	m/min	2.2
	密度	Kg/m ³	$\rho_1=7300 \rho_\lambda=7600$

(2) 工艺指标

● 矫直点温度

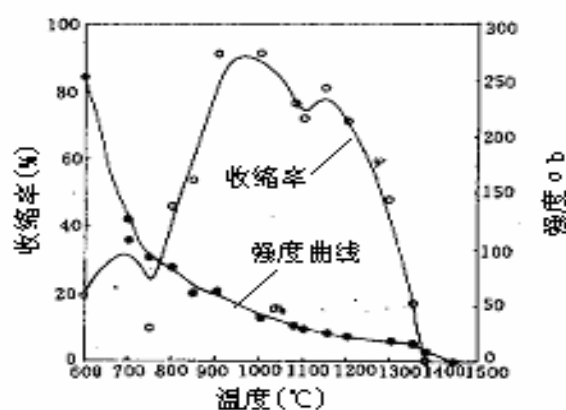


图 5.1 Q235 高温热塑性曲线^[80]

Fig 5.1 Thermal plastic curve of Q235 in high temperature

从图 5.2 中可见该钢种的最大收缩率出现在 950℃附近，避免矫直时产生裂纹，首先确定其热塑性达到 60%的温度（MDT）范围是 850~1250℃，再考虑下一道工序对轧制温度的要求，为此该钢种冷却过程中的矫直温度应当设定 1050℃左右。

● 温升温降

普碳钢 Q235 钢种属于在包晶反应区域内的裂纹敏感性钢种，该过程也同样适用于 20MnSi 钢种。结合现场分析计算确定该裂纹敏感钢种的回温和温降控制限分别为 80 和 100℃。

● 液芯长度控制限

该铸机要求液芯控制长度为小于 10.99m。

5.2 连铸二冷智能配水方法仿真实验

5.2.1 实验 1

(1) 实验目的:确定检索特征的加权系数

(2) 实验过程

第一步：导入实际运行数据

第二步：根据 3.2.2 提出的基于神经网络的特征相似度加权系数的确定方法 (3.9~3.10)，应用梯度下降法进行加权系数的整定。选择学习率 $\alpha = 0.1$ ，浇铸温度、拉速、冷却水温的初始权重均为 0.5，初始 $E(\omega_j) = 0.19268$ 。学习的过程评价曲线如图 5.2 所示，经过 688 次的学习， $E(\omega_j) = 0.1$ ，对应的拉速、浇铸温度、水冷温度的权重分别为 0.7566、0.3287、0.1535。因此最终确定未归一化的 $W_1 = 0.1535$ ， $W_2 = 0.3287$ ， $W_3 = 0.7566$ 。

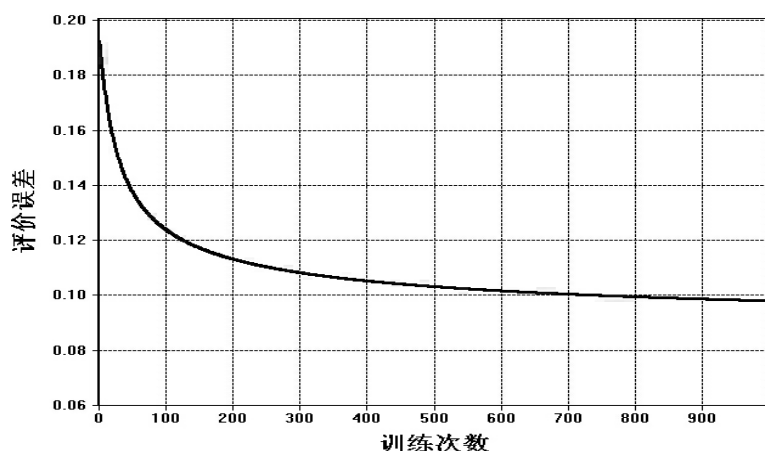
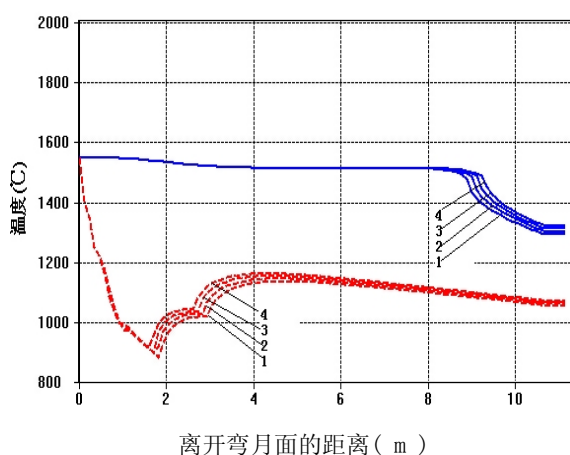


图 5.2 神经网络学习过程指标曲线

Fig 5.2 ANN training process

第三步：实验验证加权系数。本文作了几组实验来验证基于神经网络整定的特征相似度加权系数实验结果。将其他条件固定后，依次改变拉速条件、浇铸温度和冷却水温条件，仿真研究对冷却过程的影响。

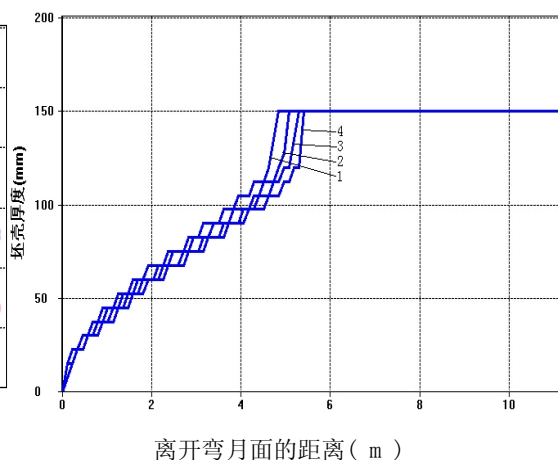


离开弯月面的距离 (m)

1 = 2.0m/min, 2 = 2.1m/min, 3 = 2.2m/min, 4 = 2.3m/min

图 5.3 拉速对铸坯表面温度和中心温度的影响

Fig.5.3 Speed's influence on surface and middle



离开弯月面的距离 (m)

图 5.4 拉速对坯壳厚度的影响

Fig.5.4 Speed's influence on thickness

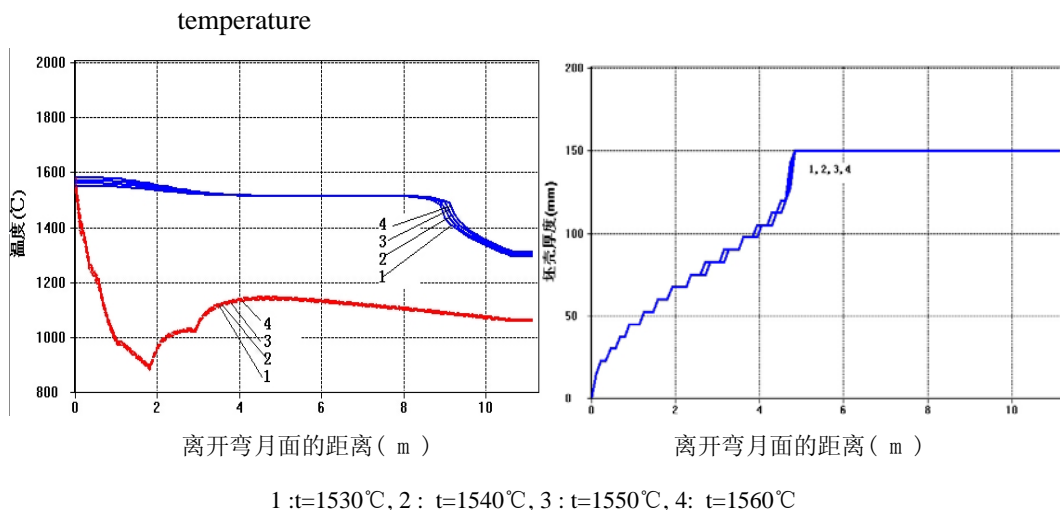


图 5.5 浇铸温度对铸坯表面和中心温度的影响

图 5.6 浇铸温度对坯壳厚度的影响

Fig. 5.5 Casting temperature's influence on surface and middle temperature

Fig. 5.6 Casting temperature's influence on thickness

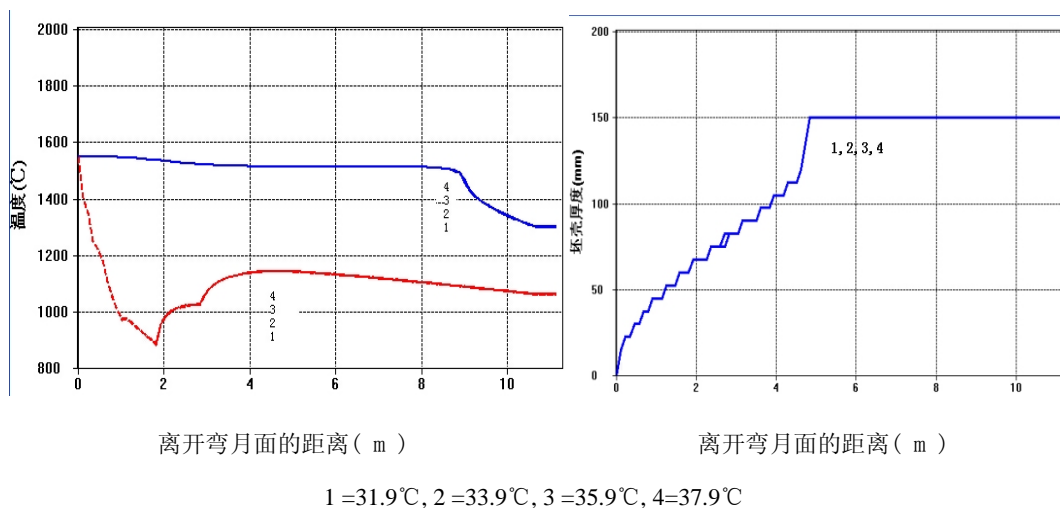


图 5.7 冷却水温对铸坯表面和中心温度的影响

图 5.8 冷却水温对坯壳厚度的影响

Fig.5.7 Water temperature's influence on surface and middle temperature

Fig.5.8 Water temperature's influence on thickness

由图 5.3~5.4 可以看到，拉速对冷却过程的影响相当显著，随着拉速的变化，二冷区铸坯表面、中心温度以及坯壳厚度的变化都很明显；从图 5.5 可以看出，浇铸温度对冷却过程中的表面温度影响较之拉速的影响要小，但是对铸坯中心的温度有一定影响，图 5.6 显示浇铸温度对冷却过程的坯壳厚度的影响较之拉速的影响也小；而图 5.7~5.8 显示冷却水温对各项指标的影响均不大。因此按照对工艺指标的影响从大到小排列应该是拉速，浇铸温度，冷却水温。这和现场的经验一致，同时，也和神经网络的学习结果一致。

(3) 结果分析

无论是现场经验，还是实验结果，都和基于神经网络的学习结果一致。因此，本文利用实际运

行数据整定加权系数的方法是可行的，并有效的，相对于经验整定加权系数更有说服力，增加了客观依据。

5.2.2 实验 2

(1) 实验目的:

当案例库中存在有效参考案例时，验证本文提出的基于案例推理的连铸二冷智能配水方法

(2) 实验过程

第一步，某钢厂实际运行数据准备。本文对建筑结构常用的 Q235 钢种在拉速为 2.2m/min，浇注温度为 1550℃时的工况条件下进行算法仿真验证。

表 5.5 检索特征及工艺指标确定

Table 5.5 Retrieval features and control requirements

工况条件	浇铸温度	1550℃
	环境温度	28℃
	冷却水温	35℃
相关控制量	拉速	2.2m/min
	矫直点温度	1050℃ ± 50℃
工艺指标	温升温降	< 80 和 < 100℃
	液芯长度控制限	< 10.99m

第二步，根据检索特征检索有效案例解。最终检索到三条有效参考案例，案例相似度分别为 0.98, 0.92, 0.9，对应案例解，即 0 段水量、1 段水量、2 段水量分别如表 5.6 所示。采用最大相似度法，选择相似度为 0.98 的历史案例直接作为问题解，即 0 段水量、1 段水量、2 段水量分别为 15.53 t/h, 18.18 t/h, 4.17 t/h。

表 5.6 检索有效参考案例解

Table 5.6 Effective keys of problem

案例 1	0 段水量	15.53 t/h
	1 段水量	18.18 t/h
	2 段水量	4.17 t/h
	案例相似度	0.98

案例 2	0 段水量	15.63 t/h
	1 段水量	19.21 t/h
	2 段水量	4.05 t/h
	案例相似度	0.92
案例 3	0 段水量	15.50 t/h
	1 段水量	18.53 t/h
	2 段水量	4.16 t/h
	案例相似度	0.9

第三步，直接送给回路执行。

第四步，进入评价系统进行离线评价。由温度模型计算矫直点温度、温升温降、液芯长度控制限数据进行离线评价，计算结果如表 5.7 所示。

表 5.7 实验 1 控制结果

Table5.7 Results of control

矫直点上表面温度		1056.55 °C
最大回温	0 段	0 °C
	1 段	71.02 °C
	2 段	61.51 °C
最大温降	0 段	80.11 °C
	1 段	50.30 °C
	2 段	40.73 °C
液芯长度		7.41 m

第五步，案例存储。由于矫直点温度、温升温降、液芯长度控制限符合工艺指标，因此该案例不做修正。再根据存储公式 3.12，由于新案例与库中案例重复，因此该案例不作为新案例存储。

(3) 结果说明

在基于案例推理的连铸二冷控制方法下，获得的温度场如图 5.9 所示，从图中可见，零段、一段、二段的最大温降均小于 100℃，相应的回温分别均小于 80℃；矫直点温度 1050℃ ±50℃ 范围内，液芯长度小于 10.99m，因此，均满足要求的工艺指标。控制的结果不仅会使由于热应力引起的裂纹大为减少，而且钢种抗对中等机械应力和矫直的拉压应力的性能也得到了相应的提高，裂纹缺陷下降的同时，铸坯冷却过程中的等轴晶区增加，而且柱状晶区降低，铸坯质量将会得到明显的改善。

采用案例推理技术，无需进行复杂的领域知识的抽象，也无需进行准确的建模工作，这样节省了大量的工作，仅仅需要历史的成功案例进行参考，就可以得到很好的控制。

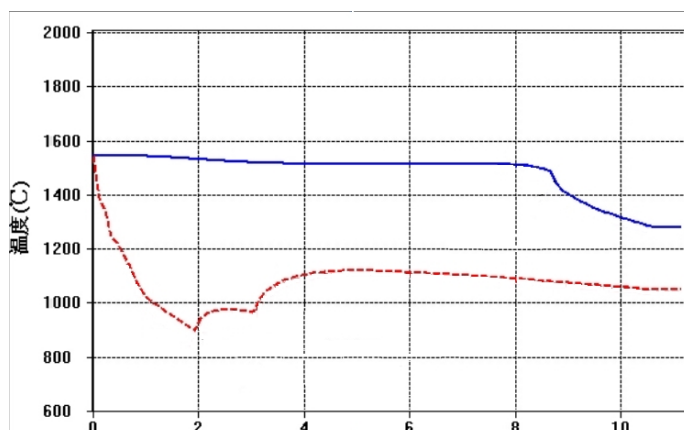


图 5.9 案例库中有有效参考案例时的铸坯表面温度和中心温度

Fig.5.9 Control result with the existence of matched case in case base

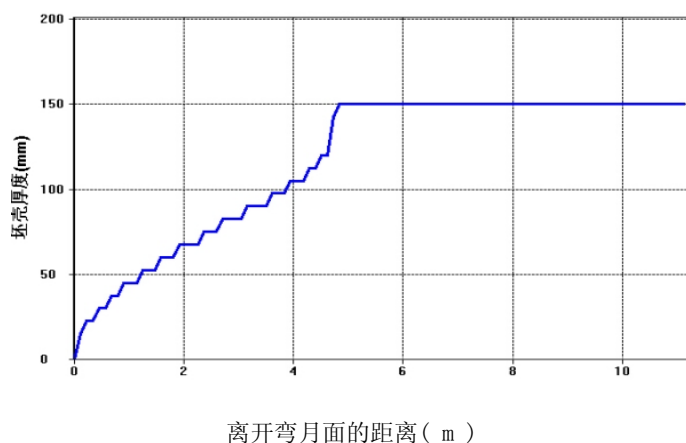


图 5.10 案例库中有有效参考案例时的坯壳厚度变化

Fig.5.10 Control result with the existence of matched case in case base

5.2.3 实验 3

(1) 实验目的

当工况发生变化时，案例库中没有有效参考案例，比较本文提出的基于案例推理的二冷水量智能设定方法和现场的经验表格法的控制效果。

(2) 实验过程

第一步，某钢厂实际运行数据准备。钢种拉速从 2.2m/min 变化到 2.35m/min，浇注温度由 1550℃变化到 1555℃，冷却水温变为 35.2℃。

表 5.8 工况条件及工艺指标确定

Table 5.8 Retrieval features and control requirements

工况条件	浇铸温度	1555 °C
	环境温度	28 °C
	冷却水温	35.2 °C
相关控制量	拉速	2.35 m/min
	矫直点温度	1050°C ± 50°C
工艺指标	温升温降	< 80 和 < 100°C
	液芯长度控制限	< 10.99 m

第二步，案例匹配。该实验中，由于工况发生变化，而初始案例库的案例非常有限，因此检索到最大相似案例的相似度仅为 0.72，说明没有有效的参考案例。因此，根据本文的控制策略，需要切换到经验公式 3.11 进行专家经验求解。从而获得二冷区冷却水量（0 段水量、1 段水量、2 段水量）分别为 15.63 t/h， 20.74 t/h， 4.27t/h。

表 5.9 检索到的最大相似案例解

Table 5.9 The best key

最大相似案例	相似度	0.72
对应案例解	0 段水量	14.04 t/h
	1 段水量	22.62 t/h
	2 段水量	4.08 t/h

表 5.10 经验公式案例解

Table 5.10 The key of case using experience formula

经验解	0 段水量	15.63 t/h
	1 段水量	20.74 t/h
	2 段水量	4.27 t/h

第三步，将经验解直接送给回路执行。

第四步，进入评价系统进行离线评价。将实际二冷区冷却水量以及边界条件代入连铸二冷温度机理模型进行温度场计算，分析评价计算获得的矫直点上表面温度、温升温降、液芯长度控制限数据，评价结果如表 5.11 所示。

表 5.11 经验计算的控制效果

Table 5.11 Results of experimental control

矫直点上表面温度	1040.48 °C
----------	------------

最大回温	0 段	0 ℃
	1 段	108.45 ℃
	2 段	102.28 ℃
最大温降	0 段	101.82 ℃
	1 段	130.54 ℃
	2 段	47.89 ℃
液芯长度控制限		7.33 m

第五步，案例修正。将实际三段水量送入温度预报模型，查看工艺指标预报值，由表 5.11 可以看出不符合控制要求，因此需要离线调整水量，再将调整后的水量送入温度机理模型重新计算，如此往复，直至预报的工艺指标符合工艺指标，得到最终经过调整后的水量分别为 13.89 t/h, 18.56 t/h, 4.11t/h。

表 5.11 调整后的工艺指标预报值

Table 5.11 Control results after adjusting

矫直点上表面温度		1055.48 ℃
最大回温	0 段	0 ℃
	1 段	73.45 ℃
	2 段	75.86 ℃
最大温降	0 段	88.56 ℃
	1 段	70.58 ℃
	2 段	36.22 ℃
液芯长度控制限		8.47 m

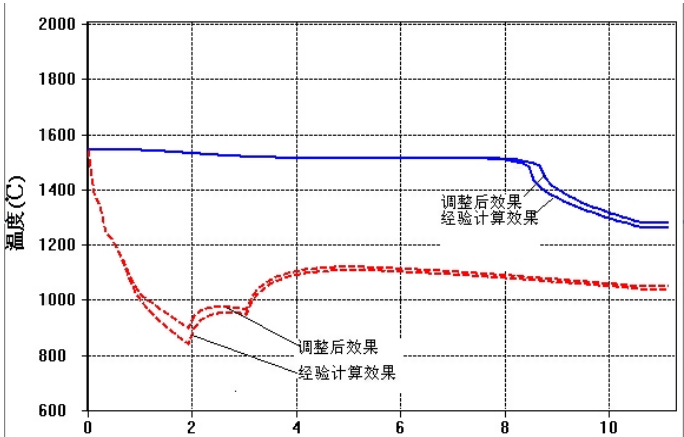


图 5.11 经过调整后的控制效果和现场控制效果的比较

Fig. 5.11 Comparison of control results

第六步：案例存储。根据案例存储公式 3.12，需要将该条案例作为新案例，进行案例存储，供以后案例推理使用。

(3) 结果说明

在第一次运行时，由于案例的不完备性，得到最大案例相似度为 0.72，因此直接采用现场使用的经验表格法计算得到的控制量，切换到经验运行相当于现场的目前控制状况，从温度预报模型计算的工艺指标看，本次控制不满足控制要求，因此，进行了离线的经验调整，并将调整后的案例作为新案例存入案例库。通过这种方法可以不断丰富案例库，从而实现对不同工况条件的自适应。从结果也可以看出，经过本文调整后水量要优于现场的水量。

第六章 结束语

连铸二冷过程是关系铸坯质量的关键工序，直接决定了铸坯的质量。强非线性、参数时变、大滞后等综合复杂特性都增加了建模和控制的难度。本文的主要研究内容包括以下几个方面：

- (1) 针对连铸二冷控制的难点，引入案例推理技术，提出了基于案例推理技术的二冷水量的智能设定方法，根据连铸过程中的实时运行工况条件，采用案例推理技术动态设定二冷水量的设定，从而实现二冷目标。
- (2) 利用本文开发的软件包可以方便地进行各种过程建模和控制方法的验证。另外，利用该软件包，可以仿真研究浇铸温度、拉速等边界条件对冷却过程的影响。
- (3) 利用本文开发的软件包进行了本文提出的连铸二冷智能配水方法的仿真验证。实验结果表明了所提出的连铸二冷智能配水方法的有效性。

连铸二冷过程是非常复杂的工业控制问题，仍然存在很多问题，下一步的研究方向可以集中在以下几个方面：

- (1) 连铸二冷智能配水方法研究：本文提出的案例推理方法是一个值得深入研究的方法，可以结合多种智能技术，提出完整的混合智能设定方法。
- (2) 工业实践永远是最有力度的验证，应该结合实际连铸二冷过程，开展对所提出的连铸二冷水量智能设定方法的工程应用研究。

参考文献

1. 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺. 北京. 冶金工业出版社. 1994
2. 史宸兴. 实用连铸冶金技术. 北京. 冶金工业出版社. 1998
3. 陈家祥. 连续铸钢手册. 北京. 冶金工业出版社. 1991
4. 殷瑞钰. 21 世纪初中国钢铁企业发展战略的初步评估. 炼钢. 2002(1): 1-8
5. 殷瑞钰. 关于 21 世纪发展连续铸钢的若干认识. 连铸. 2001(1): 1-3
6. 吴长寿, 夏祥生. 谈中国钢铁连铸的发展. 江西冶金. 2002(6): 1-4
7. 许中波. 我国连铸技术的现状与展望. 炼钢. 2000(6): 1-5
8. 苏天森, 兰德年等. 我国“十五”连铸技术发展方向及预测. 冶金信息. 2000(2): 9-12
9. 蔡开科. 连续铸钢 500 问. 北京. 冶金工业出版社. 1994
10. 曹广畴. 现代板坯连铸. 北京. 冶金工业出版社. 1994
11. Pritz Peter, Lothar Parschat. Secondary cooling systems for slab caster: From air mist to dry casting. Iron and Steel Engineer. 1987(1): 51-55
12. 张富强, 王久彬. 连铸坯凝固过程中传输现象讲座: 连铸二次冷却的优化和控制. 鞍钢技术. 1999(1): 54-58
13. Hiroshi Kametani. Fractal Analysis of the Surface Cracks of Continuously Cast Steel Slabs. Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 29B, No.1998: 1261-1267
14. 史宸兴. 连铸坯质量. 北京. 冶金工业出版社. 1980
15. 卢盛意. 连铸坯质量(第二版). 北京. 冶金工业出版社. 2000
16. 蔡开科. 连铸坯裂纹. 钢铁. 1982(9): 45-48
17. 武荣阳. 小方坯连铸二冷动态配水控制建模与粒子群优化研究及应用[D], 东北大学, 2005.
18. 蔡开科. 浇注与凝固[M], 北京: 冶金工业出版社, 1992, 19-21
19. 马竹梧. 钢铁工业自动化进展与展望[J], 中国冶金, 1996, No.6: 27-36
20. J.K.Brimacombe. Design of continuous casting machines based on a heat-flow analysis: state-of-the-art review [J]. Canadian metallurgical quarterly, 1976, Vol.15 (2): 163-175
21. Brian G. Thomas. Continuous Casting of Steel[M], O. Yu, editor, Marcel Dekker, New York, NY, 2001: 499-540.
22. M. El-Bealy, N. Leskinen, H. Fredriksson. Simulation of cooling conditions in secondary cooling zone in continuous casting process[J]. Ironmaking and Steelmaking 1995, Vol.22(3): 169-184
23. Laitinen Erkki, Rekkila Mika, Tolvanen Mikko. Control of steel solidification in continuous casting [J], Metallurgical Transactions B, 1993, Vol.24(9): 685-680
24. M.Salcudean, Z.Abdullah, Mackenbrock, A, Tacke, K. H. Generalized enthalpy method for

- multi-component phase change[J], Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, Vol.27(5): 871-882.
25. E. Laitinen, P. Neittaanmäki. On Numerical Simulation of the Continuous Casting Process [J], J. Engrg. Math., 1988, Vol.22 (5). 335-354.
26. Lally, B., Biegler, L.T., Henein, H. Optimization and Continuous Casting: Part I. Problem Formulation and Solution Strategy [J], Metallurgical Transactions B, 1991, Vol.22 (7): 641-648.
27. Riesbeck, C. K., and Schank, R. S. 1989. Inside casebased reasoning. Northvale, NJ: Erlbaum.
28. Kolodner, J. 1992. An introduction to case-based reasoning. Artificial Intelligence Review 6(1), pp. 3-34.
29. Kolodner, J. Case-Based Reasoning[M]. Morgan Kaufmann. 1993.
30. Leake, D.B. (Ed.). 1996. Case-Based Reasoning: Experiences, Lessons, & Future Directions, AAAI Press / The MIT Press, Menlo Park, Calif., US.
31. Mark Kriegsman and Ralph Barletta, Building a Case-Based Help Desk Application, IEEE EXPERT, 1993, 8(6):18-26
32. Aamodt, A., and Plaza, E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches[J]. AI Communications, 1994, 7(1): 39-59
33. Schank, R., & Abelson, R. (Eds.) Scripts, Plans, Goals and Understanding. Hillsdale, NJ: Erlbaum.1977.
34. Schank, R. (Ed.) . Dynamic Memory: A Theory of Learning in Computers and People. New York: Cambridge University Press.1982
35. Anderson, J. R. The architecture of cognition. Harvard University Press, Cambridge.1983.
36. Porter, B.W. & Bareiss, E.R. . PROTOS: An experiment in knowledge acquisition for heuristic classification tasks. In Proceedings of the First International Meeting on Advances in Learning (IMAL), Les Arcs, France, 1986 pp.159-74.
37. Bareiss, E. R., PROTOS: A Unified Approach to Concept Representation, Classification, and learning. Ph.D. thesis, Department. of Computer Science, University of Texas.1988.
38. Keane, M., Where's the Beef? The absence of pragmatic factors in theories of analogy. In, ECAI-88: pp.327-32.1988.
39. Simoudis E. Special issue on case-based reasoning, International Journal of Expert systems. 1991.4(2).
40. Birnbaum, L. and Collings, G. Reminders and Engineering Design Themes: A Case Study in Indexing Vocabulary. In, Proceedings of the Second Workshop on Base-Based Reasoning, Pensacola Beach, FL.1989.
41. Hammond, K J. Explaining and Repairing Plans that Fail. In, Proceedings International Joint Conferences on Artificial Intelligence, IJCAI-87, 1987.August, Milan, Italy.

42. Hammond, K.J. On Functionally Motivated Vocabularies: An Apologia. In, Proceedings of the Second Workshop on Case-Based Reasoning, Pensacola Beach, FL, US.1989.
43. Acorn, T. & Walden, S. . SMART: Support management cultivated reasoning technology Compaq customer service. In, Proceedings of AAAI-92 . Cambridge. MA: AAAI Press/MIT Press.1992
44. Lebowitz, M., Experimental with incremental concept formation: UNIMEM. Machine Learning, 2(ii): 1987. pp 103-38.
45. Goodman, M. CBR in battle planning. In Proceedings of the Second Workshop on Case-Based Reasoning, Pensacola Beach, FL, US.1989.
46. Barletta, R & Mark, W., Explanation-based indexing of cases. In, Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence. Minneapolis, MN, US.1988
47. Simoudis, E., Mendall, A. & Miller, P. Automated support for developing retrieve-and-propose systems. In Proceedings of Artificial Intelligence XI Conference, Orlando, Florida.1993.
48. Branting, K. Exploiting the complementarity of rules and precedents with reciprocity and fairness. In, Proceedings of the Case-Bases Reasoning Workshop 1991, Washington, DC, May 1991. Sponsored by DARPA. Morgan Kaufmann.
49. Bain, W.M. Case-Based Reasoning: A Computer Model of Subjective Assessment. Ph.D. Thesis, Yale University, Yale, CT, US.1986.
50. A.G.Francis, A. Ram. The utility problem in case-based reasoning. In Proceedings AAAI CBR workshop, Washington, 1993.
51. Smyth B., Keane M. T. Remembering to Forget: A Competence Preserving Case Deletion Policy for CBR Systems. Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 377-382. Canada, 1995.
52. Kalyan Moy Gupta, Ali R. Montazent. Empirical evaluation of retrieval in case-based reasoning system using modified cosine matching function[J]. IEEE Trans. SMC. 1997, 127(6): 601-612
53. Janet Kolodner. Maintaining organization in a dynamic long-term memory. Cognitive Science, 1983. Vol.7, s.243-280.
54. Janet Kolodner. Reconstructive memory, a computer model. Cognitive Science, 1983.Vol.7, s.281-328.
55. Simpson, R. L. A computer model of case-based reasoning in problem solving: An investigation in the domain of dispute mediation. Georgia Institute of Technology, School of Information and Computer Science Technical Report no. GITICS85/18.1985. Atlanta.
56. Hammond, K.J. CHEF: A Model of Case-Based Planning. In Proc. American Association for Artificial Intelligence, AAAI-86, August 1986. Philadelphia, PA, US.
57. Sycara, K. Using case-based reasoning for plan adaptation and repair. Proceedings Case-Based Reasoning Workshop, DARPA. Clearwater Beach, Florida. Morgan Kaufmann, 1988. pp.

- 425-434.
58. Koton, P. Using experience in learning and problem solving. Massachusetts Institute of Technology, Laboratory of Computer Science, 1989. Ph.D. Thesis MIT/LCS/TR-441.
59. Hinrichs, T.R. Problem solving in open worlds. Lawrence Erlbaum Associates.1992.
60. Sharma, S. & Sleeman, D.REFINER: A Case-Based Differential Diagnosis Aide for Knowledge Acquisition and Knowledge Refinement. In, EWSL 88; Proc. European Working Session on Learning: 1988. pp201-10.
61. Althoff, K.D. Knowledge acquisition in the domain of CBC machine centres: the MOLTKE approach. In, EKAW-89, Third European Workshop on Knowledge-Based Systems, Boos, J., Gaines, B. & Ganascia, J.G (eds.), 1989. pp.180-95. Paris, July 1989.
62. Richter, A.M. & Weiss, S. Similarity, uncertainty and case-based reasoning in PATDEX. In, Automated reasoning, essays in honour of Woody Bledsoe. Kluwer R.S. Boyer (ed.): 1991. pp249-265.
63. Aamodt, A., Towards robust expert systems that learn from experience - an architectural framework. In, EKAW-89: Third European Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop, Boose, J., Gaines, B. & Ganascia J.-G (eds.), pp.311-326. Paris, July 1989.
64. Aamodt, A. A Knowledge intensive approach to problem solving and sustained learning, PhD. dissertation, University of Trondheim, Norwegian Institute of Technology, May 1991. University Microfilms PUB 92-08460.
65. Watson, I.D., Abdullah, S. Developing Case-Based Reasoning Systems: A Case Study in Diagnosing Building Defects. In, Proc. IEE Colloquium on Case-Based Reasoning: Prospects for Applications, Digest No: 1994/057, pp.1/1-1/3.
66. Yang, S., & Robertson, D. A case-based reasoning system for regulatory information. In, Proc. IEE Colloquium on Case-Based Reasoning: Prospects for Applications, Digest No: 1994/057, pp.3/1-3/3.
67. Moore, C.J., Lehane, M.S. & Proce, C.J. Case-Based Reasoning for Decision Support in Engineering Design. In, Proc. IEE Colloquium on Case-Based Reasoning: Prospects for Applications, Digest No: 1994/057, pp.4/1-4/4.
68. Oxman, R.E., PRECEDENTS: Memory structure in design case libraries. In CAAD Futures 93, Elsevier Science Publishers, 1993.
69. Oxman, R.E., Case-based design support: Supporting architectural composition through precedent libraries. Journal of Architectural Planning Research.1993
70. Venkatamaran, S., Krishnan, R. & Rao, K.K. A rule-case based system for image analysis. In, Proc. 1st. European Workshop on Case-Based Reasoning, Posters & Presentations, 2:1993. pp.410-15.

71. Kitano, H. Challenges for massive parallelism. In, Proc. 13th. Int. Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-93:1993 pp813-34.
72. A. Ram, et al. Case-based reactive navigation: A method for on-line selection and adaptation of reactive robotic control parameters. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1997, 27(3), 376-394, Jun .
73. Pal S K, De P K , Basak J . Unsupervised feature evaluation: a neuro-fuzzy approach. IEEE Transactions on neural networks (J). 2000, 11(2): 366~376.
74. 周美立, 王浣尘.相似系统的分析与度量.系统工程, 1996, 76 (4): 1-6
75. Chiu S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1994, 2(2): 267- 278.

致 谢

时光飞逝，日月如梭，回想这近三年的硕士求学之路，真是感慨万千。全部研究工作都是在导师谢植教授精心指导下完成的。在与谢老师的接触中，作者深深地被他严谨治学所感动。谢老师旺盛的精力，忘我的工作作风，渊博的知识和活跃的学术思想，海纳百川的胸怀，对学术发展的敏锐洞察力和在自动控制领域发展方向上的真知灼见，都让学生我终生难忘，在今后的学习和研究生活将受益终生。在此，向导师谢植教授表示深深的敬意和感谢！

感谢岳国胜老师、纪振平老师、贾光霖老师、孟红记老师、梅国晖老师、张华老师、费文伯老师在科研和项目实践中对我所做的指导，在生活上的无私帮助。

感谢我的研究室的付国根硕士、张达博士、王彪博士、刘文红博士、徐永利硕士、董建伟硕士、胡振伟硕士、王海红硕士等给予了作者很大的帮助，和他们共同学习、共同实验、共同探讨非常愉快，终生难忘。

在研究生学习期间，朋友王彪、胡国梁、bill xu 等给予了我极大的帮助。

最后，我要谨以此文献给多年来支持、鼓励我学习研究的父亲，在我人生的任何细微之处我都能看见自己有一个伟大的父亲，父亲是我能走到今天的最大动力源泉。

再次向所有关心和帮助我的老师、同学、朋友及家人致以最诚挚的谢意！

夏 武

2006 年 6 月

附录

仿真数据

时间	2#中包	0 段	1 段	2 段	拉速	表面测温
#2004-07-19 00:00:02#	1544.62	16.7014	20.48611	3.9931	2.27	1096.875
#2004-07-19 00:00:12#	1544.97	16.6667	20.70602	3.9931	2.3	1092.9688
#2004-07-19 00:00:22#	1544.44	16.684	20.91435	3.9873	2.31	1092.9688
#2004-07-19 00:00:32#	1544.44	16.7014	20.8912	3.9873	2.27	1098.0325
#2004-07-19 00:00:42#	1544.44	16.684	20.71759	3.9873	2.3	1101.9387
#2004-07-19 00:00:52#	1544.1	16.7014	20.72917	3.9931	2.27	1098.0325
#2004-07-19 00:01:02#	1544.1	16.684	20.53241	3.9931	2.28	1094.9943
#2004-07-19 00:01:12#	1543.75	16.684	20.6713	3.9873	2.3	1094.9943
#2004-07-19 00:01:22#	1543.4	16.6667	20.70602	3.9931	2.26	1096.875
#2004-07-19 00:01:32#	1543.4	16.684	20.84491	3.9931	2.31	1098.0325
#2004-07-19 00:01:42#	1542.88	16.7101	20.83333	3.9931	2.26	1094.9943
#2004-07-19 00:01:52#	1542.53	16.7014	20.49768	3.9931	2.22	1093.9814
#2004-07-19 00:02:02#	1542.53	16.7101	19.98843	3.9988	2.23	1092.1007
#2004-07-19 00:02:12#	1542.53	16.7448	19.6412	3.9988	2.18	1092.1007
#2004-07-19 00:02:22#	1542.36	16.7274	19.44444	4.0046	2.26	1093.9814
#2004-07-19 00:02:32#	1541.84	16.7188	19.78009	3.9988	2.23	1096.007
#2004-07-19 00:02:42#	1541.49	16.7448	19.79167	3.9757	2.21	1100.9259
#2004-07-19 00:02:52#	1541.67	16.7535	19.79167	3.9699	2.26	1101.9387
#2004-07-19 00:03:02#	1541.49	16.7188	19.86111	3.9699	2.25	1100.9259
#2004-07-19 00:03:12#	1541.49	16.7101	19.93056	3.9641	2.17	1096.875
#2004-07-19 00:03:22#	1541.49	16.7448	19.57176	3.9583	2.22	1092.9688
#2004-07-19 00:03:32#	1541.49	16.7274	19.40972	3.941	2.18	1091.8114
#2004-07-19 00:03:42#	1541.49	16.7274	19.17824	3.9352	2.21	1093.9814
#2004-07-19 00:03:52#	1541.67	16.7535	19.40972	3.9294	2.24	1093.9814
#2004-07-19 00:04:02#	1541.84	16.7274	19.46759	3.9294	2.21	1091.8114
#2004-07-19 00:04:12#	1541.84	16.7274	19.62963	3.9294	2.26	1090.9434
#2004-07-19 00:04:22#	1542.36	16.7014	19.79167	3.9178	2.24	1098.0325

#2004-07-19 00:04:32#	1542.36	16.7014	19.93056	3.9178	2.21	1100.0579
#2004-07-19 00:04:42#	1542.53	16.7014	19.96528	3.9178	2.3	1098.9005
#2004-07-19 00:04:52#	1542.53	16.7014	20.2662	3.912	2.23	1092.9688
#2004-07-19 00:05:02#	1542.53	16.6753	20.20833	3.912	2.25	1085.0116
#2004-07-19 00:05:12#	1543.75	16.7014	20.10417	3.9352	2.28	1087.9052
#2004-07-19 00:05:22#	1543.75	16.658	20.24306	4.022	2.23	1091.8114
#2004-07-19 00:05:32#	1544.44	16.7014	20.06944	4.0278	2.28	1098.9005
#2004-07-19 00:05:42#	1544.62	16.6667	20.41667	4.022	2.3	1100.0579
#2004-07-19 00:05:52#	1545.31	16.658	20.71759	4.0162	2.24	1096.007
#2004-07-19 00:06:02#	1546.01	16.6667	20.2662	4.0046	2.3	1088.9178
#2004-07-19 00:06:12#	1546.18	16.6753	20.42824	3.9931	2.27	1085.0116
#2004-07-19 00:06:22#	1546.18	16.6667	20.60185	3.9931	2.28	1088.9178
#2004-07-19 00:06:32#	1547.57	16.6406	20.61343	3.9873	2.3	1100.9259
#2004-07-19 00:06:42#	1547.74	16.6406	20.61343	3.9873	2.28	1109.8959
#2004-07-19 00:06:52#	1548.09	16.658	20.76389	3.9873	2.31	1102.9514
#2004-07-19 00:07:02#	1548.61	16.6233	21.01852	3.9873	2.34	1093.9814
#2004-07-19 00:07:12#	1548.96	16.6233	21.36574	3.9873	2.26	1090.9434
#2004-07-19 00:07:22#	1549.31	16.6319	21.11111	3.9873	2.3	1096.875
#2004-07-19 00:07:32#	1549.65	16.6146	20.9375	3.9873	2.3	1098.0325
#2004-07-19 00:07:42#	1549.83	16.6319	20.94907	3.9873	2.29	1094.9943
#2004-07-19 00:07:52#	1550.69	16.658	21.03009	3.9873	2.33	1089.9305
#2004-07-19 00:08:02#	1550.69	16.6233	21.11111	3.9988	2.32	1088.0498
#2004-07-19 00:08:12#	1551.56	16.6319	20.9375	4.0799	2.29	1090.0752
#2004-07-19 00:08:22#	1552.08	16.6233	20.8912	4.0856	2.34	1096.875
#2004-07-19 00:08:32#	1552.26	16.6233	21.2037	4.0799	2.32	1102.9514
#2004-07-19 00:08:42#	1552.26	16.6146	21.37732	4.0741	2.32	1102.9514
#2004-07-19 00:08:52#	1552.78	16.6146	21.49306	4.0567	2.33	1094.9943
#2004-07-19 00:09:02#	1552.95	16.6146	21.2963	4.0336	2.25	1088.0498
#2004-07-19 00:09:12#	1552.95	16.6233	20.82176	4.0336	2.3	1081.9734
#2004-07-19 00:09:22#	1553.3	16.658	20.82176	4.022	2.29	1088.9178
#2004-07-19 00:09:32#	1553.82	16.6406	20.79861	4.0162	2.28	1092.9688
#2004-07-19 00:09:42#	1553.82	16.658	20.79861	4.022	2.29	1094.9943
#2004-07-19 00:09:52#	1553.82	16.6319	20.60185	4.0046	2.25	1093.9814

#2004-07-19 00:10:02#	1553.82	16.6406	20.47454	3.9988	2.28	1092.9688
#2004-07-19 00:10:12#	1553.99	16.6406	20.49768	3.9931	2.3	1094.9943
#2004-07-19 00:10:22#	1554.51	16.6667	20.53241	3.9988	2.23	1096.875
#2004-07-19 00:10:32#	1554.17	16.6753	20.24306	3.9873	2.26	1093.9814
#2004-07-19 00:10:42#	1554.17	16.6753	20.3588	3.9931	2.3	1093.9814
#2004-07-19 00:10:52#	1554.17	16.6753	20.59028	3.9873	2.22	1098.0325
#2004-07-19 00:11:02#	1554.17	16.6667	20.18518	3.9873	2.26	1108.8831
#2004-07-19 00:11:12#	1554.17	16.658	20.06944	3.9757	2.26	1109.8959
#2004-07-19 00:11:22#	1554.51	16.6406	20.09259	3.9757	2.22	1102.9514
#2004-07-19 00:11:32#	1554.17	16.6667	19.90741	3.9757	2.27	1096.875
#2004-07-19 00:11:42#	1554.51	16.6667	20.0463	3.9699	2.26	1094.9943
#2004-07-19 00:11:52#	1554.17	16.6667	20.16204	3.9699	2.25	1096.007
#2004-07-19 00:12:02#	1553.82	16.6753	20.01157	3.9641	2.23	1098.0325
#2004-07-19 00:12:12#	1553.82	16.6667	19.66435	3.9468	2.2	1096.875
#2004-07-19 00:12:22#	1554.69	16.6667	19.52546	3.9468	2.24	1092.9688
#2004-07-19 00:12:32#	1554.69	16.7014	19.6412	3.9468	2.24	1090.9434
#2004-07-19 00:12:42#	1554.69	16.684	19.89583	3.9583	2.2	1093.9814
#2004-07-19 00:12:52#	1554.69	16.7448	19.74537	3.9699	2.28	1100.0579
#2004-07-19 00:13:02#	1554.69	16.6753	19.93056	3.9583	2.2	1100.9259
#2004-07-19 00:13:12#	1554.17	16.7014	19.69907	3.9583	2.23	1100.9259
#2004-07-19 00:13:22#	1554.17	16.7188	19.50232	3.9583	2.23	1096.875
#2004-07-19 00:13:32#	1554.17	16.7274	19.56018	3.9468	2.21	1093.9814
#2004-07-19 00:13:42#	1554.17	16.684	19.50232	3.9352	2.23	1093.9814
#2004-07-19 00:13:52#	1554.51	16.684	19.57176	3.9352	2.21	1092.9688
#2004-07-19 00:14:02#	1554.51	16.7101	19.6875	3.941	2.22	1092.9688
#2004-07-19 00:14:12#	1554.17	16.7188	19.75694	3.941	2.24	1090.9434
#2004-07-19 00:14:22#	1554.17	16.7101	19.61806	3.941	2.2	1090.9434
#2004-07-19 00:14:32#	1553.82	16.7274	19.57176	3.9468	2.22	1088.9178
#2004-07-19 00:14:42#	1553.82	16.7448	19.38657	3.9468	2.22	1090.0752
#2004-07-19 00:14:52#	1553.82	16.7188	19.58333	3.941	2.22	1091.8114
#2004-07-19 00:15:02#	1553.99	16.684	19.7338	3.941	2.28	1096.875
#2004-07-19 00:15:12#	1553.3	16.7014	19.97685	3.9352	2.22	1100.0579
#2004-07-19 00:15:22#	1553.3	16.6753	19.86111	3.9352	2.21	1100.7813

#2004-07-19 00:15:32#	1553.3	16.6753	19.66435	3.941	2.24	1098.9005
#2004-07-19 00:15:42#	1553.3	16.7014	19.57176	3.9352	2.21	1100.0579
#2004-07-19 00:15:52#	1553.3	16.7101	19.66435	3.941	2.27	1100.9259
#2004-07-19 00:16:02#	1553.3	16.7014	19.96528	3.9352	2.25	1100.9259
#2004-07-19 00:16:12#	1553.3	16.7101	20.09259	3.9352	2.2	1098.0325
#2004-07-19 00:16:22#	1553.3	16.7101	19.75694	3.941	2.26	1092.9688
#2004-07-19 00:16:32#	1553.3	16.684	19.89583	3.941	2.21	1090.0752