

基于本体与物联网的冶金炼焦过程 语义化及建模应用研究

甘健侯 著

非外借



科学出版社

基于本体与物联网的冶金炼焦 过程语义化及建模应用研究

甘健侯 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

炼焦是钢铁冶金生产中的重要过程,其产出的焦炭质量直接影响后续炼铁工艺的效能和质量。而炼焦生产过程的稳定运行及优化管理则是决定焦化产品质量和工艺能耗等重要指标的关键因素。研究炼焦生产过程的语义化及其相关建模应用研究,对促进冶金工业生产的信息化和智能化建设具有重要意义。

本书着眼于炼焦全流程,围绕数据如何获取、信息如何表征、知识如何应用三个科学问题,基于语义本体和描述逻辑引入物联网等技术,研究炼焦生产过程现场数据采集及语义化处理、炼焦过程知识的形式化描述、领域本体知识库构建、炼焦过程知识的语义推理方法;最后从炼焦过程实际出发,在炼焦过程的基础数据管理、多源异构资源处理、海量知识处理以及耗热量影响因素优化等方面进行语义化应用研究,并针对三家大型钢铁企业炼焦生产的实际数据进行实验验证。

本书可供冶金信息化、本体及物联网应用研究领域的教师、研究生及其他相关科研工作者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于本体与物联网的冶金炼焦过程语义化及建模应用研究 / 甘健侯著. —北京:科学出版社,2018.9

ISBN 978-7-03-057157-1

I. ①基… II. ①甘… III. ①炼焦 IV. ①T522.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第078678号

责任编辑:闫悦 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第一版 开本:720×1 000 B5

2018年9月第一次印刷 印张:12

字数:242 000

定价:72.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

冶金炼焦过程不仅是一个复杂性系统,而且各个子过程之间具有强关联性,加之炼焦现场较恶劣的生产环境,影响炼焦生产各个过程的因素很多,结果与因素之间的关系表现存在滞后,导致炼焦过程难以构建精确的智能化控制模型。同时炼焦过程监测人工参与度较高,尤其一些工艺参数的自动测量相对困难。因此,针对炼焦过程存在的特征和问题,研究一种基于本体和物联网技术的炼焦过程语义化建模与应用方法是本书需解决的关键技术和问题,也是本书的创新性所在,主要包括以下三个方面。

(1)结合可拓理论提出了面向炼焦过程的扩展描述逻辑 DL-MCP,给出扩展描述逻辑 DL-MCP 的形式化公理体系,并对炼焦过程进行形式化描述,构建并实现了炼焦过程本体知识库,在炼焦过程的语义形式化方面理论研究有创新。

(2)基于物联网技术设计并构建了炼焦生产过程现场数据采集智能化网络,实现对炼焦现场复杂环境下的数据实时、准确地收集,突破了传统技术、方法的局限性,解决了因现场环境恶劣、人员难以到达、硬件设备受限等因素导致的数据监测精确度低、实时性差等问题,在炼焦生产过程方面物联网技术集成应用有创新。

(3)以炼焦全过程的信息语义化管理与应用为切入点,提出了炼焦过程的知识语义化表示、语义知识推理机制和检索服务模型,最后将炼焦过程语义化在基础数据管理、多源异构信息资源处理、海量知识处理以及耗热量影响因素优化等方面进行了应用。这为冶金炼焦过程的语义化、智能化提供了行之有效的方法,对冶金行业生产过程的语义化、智能化、规范化、科学化管理具有借鉴作用。

本书共 7 章:第 1 章为绪论,主要介绍本书研究背景、国内外研究现状及主要研究内容;第 2 章为基于扩展描述逻辑的炼焦过程语义化研究,主要介绍扩展描述逻辑 DL-MCP 公理体系及炼焦过程所涉及的知识形式化描述,为炼焦过程语义化管理、推理及应用提供逻辑基础;第 3 章为基于物联网的炼焦过程数据采集与语义化处理研究,主要包括冶金过程数据采集网络设计、炼焦过程数据感知与传感网络构建、基于 ZigBee 的炼焦过程组网与网络通信和炼焦过程物联网及传感器网络数据语义化处理,为炼焦过程语义化管理及应用提供自动化、智能化数据采集模型与方法;第 4 章为炼焦过程信息语义化管理,基于对三家大型钢铁企业的实地调研,通过炼焦过程数据库结构设计、炼焦过程数据库到本体库的转换、炼焦过程本体库构建与本体知识的存储以及炼焦过程本体映射问题研究对炼焦过程信息语义化管理进行论述,为基于本体的炼焦过程语义推理和检索服务奠定基础;第 5 章为基于本体的炼

焦过程语义推理与检索服务研究,主要包括基于本体的炼焦过程语义推理、炼焦过程的知识检索以及基于语义的炼焦过程知识服务模型研究,为后续的炼焦过程语义化应用提供有效的机制和方法;第6章为基于本体的炼焦过程语义化应用研究,在炼焦过程语义推理的基础上,针对炼焦过程实际存在的几个关键问题进行应用研究和实验验证;第7章为结论与展望,主要对本书的内容进行总结,并结合实际存在的问题提出一些可深入研究的思路。

在本书的写作过程中,谢刚教授在选题、构思和修改等方面给予了大力支持和帮助;李荣兴教授、唐晓宁副教授、俞小花副教授在基础数据获取、生产调研等方面给予了悉心指导;另外,还得到了文斌、袁凌云、周菊香、邹伟、夏跃龙、唐明靖以及云南师范大学民族教育信息化教育部重点实验室各位同事的大力支持;除此之外还得到了许多同行和业内人士的大力支持和帮助,在此深表感谢。同时,特别感谢云南师范大学民族教育信息化教育部重点实验室及云南省高校民族教育与文化数字化支撑技术工程研究中心等研究基地,以及国家自然科学基金项目(61562093)和云南省应用基础研究计划重点项目(2016FA024)的资助。

由于作者水平有限,书中难免会有不足之处,敬请广大读者批评和指正。

甘健侯

2017年8月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	冶金炼焦过程信息化与智能化现状分析	1
1.1.2	存在的问题	4
1.1.3	关键科学问题	6
1.2	国内外研究现状	7
1.2.1	本体技术与描述逻辑在冶金领域应用研究现状	7
1.2.2	物联网技术在冶金炼焦领域应用研究现状	10
1.2.3	冶金炼焦过程语义化及建模应用研究现状	12
1.3	本书研究内容	13
第 2 章	基于扩展描述逻辑的炼焦过程语义化研究	16
2.1	炼焦过程领域描述逻辑扩展模型	16
2.2	DL-MCP 的形式化公理体系	16
2.2.1	描述逻辑 DL-MCP 的语法	17
2.2.2	描述逻辑 DL-MCP 的语义	18
2.2.3	描述逻辑 DL-MCP 的公理及其解释说明	20
2.3	描述逻辑 DL-MCP 的基本性质	24
2.4	描述逻辑 DL-MCP 形式化系统的可靠性	25
2.5	基于描述逻辑 DL-MCP 炼焦过程的形式化描述	25
2.5.1	炼焦过程工艺流程简述	25
2.5.2	炼焦过程语义化要素的提取	26
2.5.3	炼焦过程语义化描述	35
第 3 章	基于物联网的炼焦过程数据采集与语义化处理研究	44
3.1	冶金过程数据采集网络设计	44
3.1.1	钢铁冶金过程数据采集平台总体框架	45
3.1.2	钢铁冶金过程数据采集网络构建	46
3.2	炼焦过程数据感知与传感网络构建	46

3.2.1	炼焦过程数据感知与监测需求分析	47
3.2.2	传感器网络感知属性描述	48
3.2.3	炼焦各子过程数据采集与传感网络构建	50
3.2.4	炼焦全流程数据采集与管理系统设计	54
3.3	基于 ZigBee 的炼焦过程组网与网络通信	55
3.3.1	网络架构需求分析	55
3.3.2	网络拓扑结构设计	56
3.3.3	网内数据传输与处理	57
3.4	炼焦过程物联网及传感器网络数据语义化处理	61
3.4.1	炼焦过程传感器网络本体描述模型	62
3.4.2	炼焦过程传感器网络本体构建	64
3.4.3	炼焦过程传感器数据感知过程描述	65
3.4.4	炼焦过程传感器网络感知数据描述	66
第 4 章	炼焦过程信息语义化管理	70
4.1	炼焦过程数据库结构设计	70
4.1.1	数据库概念结构设计	70
4.1.2	数据库逻辑结构设计	70
4.2	炼焦过程数据库到本体库的转换	77
4.2.1	转换过程	78
4.2.2	转换规则	78
4.2.3	转换实例	80
4.3	炼焦过程本体库构建与本体知识的存储	87
4.3.1	炼焦过程本体构建方法与步骤	88
4.3.2	炼焦过程本体的构建	88
4.3.3	炼焦过程本体知识的存储	90
4.4	炼焦过程本体映射问题研究	92
4.4.1	炼焦过程的本体映射	92
4.4.2	炼焦过程本体映射评估	95
4.4.3	炼焦过程本体映射的实验验证	95
第 5 章	基于本体的炼焦过程语义推理与检索服务研究	99
5.1	基于本体的炼焦过程语义推理	99
5.1.1	基于本体的炼焦过程语义推理模型	99
5.1.2	基于本体的炼焦过程语义推理规则	99
5.1.3	基于本体的炼焦过程语义推理机制	114

5.1.4	基于本体的炼焦过程语义推理实例	115
5.2	炼焦过程的知识检索	118
5.2.1	炼焦过程知识预处理	119
5.2.2	炼焦过程知识的 RDF 语义表示与转换	119
5.2.3	炼焦过程知识的 SPARQL 查询	121
5.2.4	数据库与本体库相融合的炼焦过程知识检索模型与算法设计	122
5.3	基于语义的炼焦过程知识服务模型研究	126
5.3.1	基于语义的炼焦过程知识服务模型总体框架	126
5.3.2	基于语义的炼焦过程知识服务过程与推送策略	127
5.3.3	基于语义的炼焦过程知识服务系统设计	128
第 6 章	基于本体的炼焦过程语义化应用研究	131
6.1	数据库与本体库技术在炼焦过程的基础数据管理中的应用	131
6.1.1	炼焦过程基础数据管理系统框架设计	131
6.1.2	炼焦过程领域数据库实现	132
6.1.3	炼焦过程领域本体库实现	132
6.1.4	基础数据管理系统的主要功能实现	135
6.2	炼焦过程语义融合技术在多源异构信息资源处理中的应用	139
6.2.1	多源异构信息资源的 RDF(S)描述	139
6.2.2	多源异构信息资源本体知识库构建模型	140
6.2.3	多源异构信息资源本体知识库构建算法	142
6.2.4	实验验证	144
6.3	基于 RDF 图语义推理方法在炼焦过程海量知识处理中的应用	145
6.3.1	炼焦过程 RDF 图分子库构建	145
6.3.2	炼焦过程 RDF 图 MapReduce 并行化推理算法设计	149
6.3.3	实验验证	154
6.4	基于语义推理的炼焦过程耗热量影响因素优化设计	157
6.4.1	炼焦过程的耗热量影响因素分析	157
6.4.2	基于语义规则的炼焦过程耗热量影响因素优化	159
6.4.3	基于本体的炼焦过程耗热量影响因素优化	167
第 7 章	结论与展望	171
7.1	主要结论	171
7.2	展望	172
	参考文献	174

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 冶金炼焦过程信息化与智能化现状分析

1. 冶金行业信息化现状

进入 21 世纪,中国冶金行业面临国内外竞争加剧、产能增长过量、市场需求增长过缓、供大于求、利润空间缩小、物流成本上升,以及资源、能源和环境约束等一系列挑战,这意味着冶金行业迫切需要进行结构调整,加大信息化力度,以提升管理水平、增强竞争优势^[1]。

冶金行业在利用新兴信息技术改造传统产业方面起步较早,20 世纪 80 年代初,宝钢等一大批大型钢铁企业在炼钢、烧结等生产工艺环节上已经实现了可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)控制,并建成了管理信息系统(management information system, MIS)。在冶金工业自动化过程中,先进的一体化系统逐渐代替了传统的电控、仪控和通信系统,仿真技术和人工智能技术等新技术在钢铁工艺各个环节中的应用已取得重大突破。能源监管系统和可视化监控系统在企业生产、经营活动中发挥了高效作用,互联网制造执行系统(manufacturing execution systems, MES)、过程控制系统(process control systems, PCS)、企业资源规划系统(enterprise resource planning, ERP)和能源管理系统(energy management system, EMS)等广泛应用于钢铁企业管理,中国冶金行业的信息化建设正迈向一个新的高度^[2]。

然而相比之下,国外钢铁企业信息化发展普遍更早,自 20 世纪 70 年代以来,其信息化建设主要经历了信息系统起步阶段、应用功能横向扩展阶段、应用功能纵向扩展阶段和集成信息系统阶段等四个发展阶段。中国钢铁行业的信息化建设相对发达国家起步要晚 10~15 年,其信息化发展大致可分为两个阶段:2000 年以前是探索阶段,2000 年以后是发展并逐步走向成熟阶段,图 1.1 为国内外钢铁企业信息化发展历程^[2]。

近年来,在两化融合的战略目标下,以信息化带动工业化,工业生产过程自动化、智能化、管理信息化和管控一体化等方面都取得了一些进步^[3,4],然而和国外钢铁企业信息化的发展相比,国内钢铁企业生产过程的信息化程度普遍偏低。近十年来,国内各类型钢铁企业经历了迅速扩展、产能扩大的飞速发展过程,又经历了压

缩产能、结构重组阵痛等。目前，大型钢铁联合集团的先进主体企业已基本实现了管理一体化，而重组过程中的老旧企业和中小企业由于技术落后、规模较小、资金薄弱等多方面因素，仍没有实现企业的信息化管理。目前钢铁行业产能过剩、能源消耗高、浪费严重、利润率低，企业市场竞争力随着市场波动受到严重的影响。全国钢铁产量不断增长的状态已经过去，开始压缩钢铁产量，表 1.1^[5]所示为 1998~2015 年全国钢铁产量统计表。其中，2015 年钢铁产量开始出现下滑状态。这样的发展趋势说明，在国民经济新常态发展、注重环保和低碳要求的今天，企业生产及管理的信息化势在必行，并已成为企业生存与发展的决定因素，将直接影响企业生产的效益。

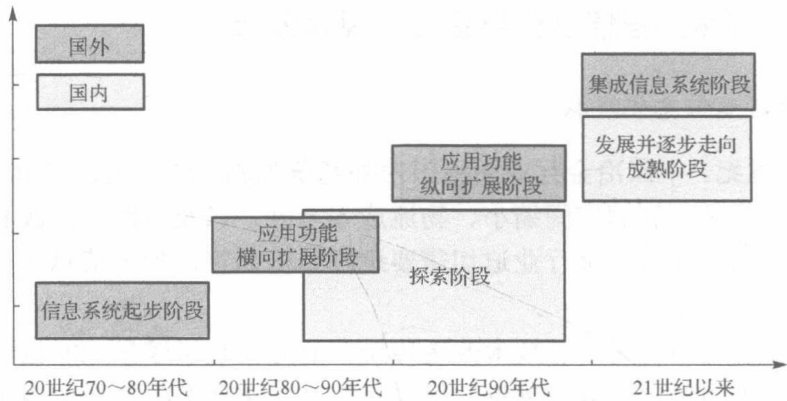


图 1.1 国内外钢铁企业信息化发展历程

表 1.1 全国钢铁产量统计

年度	生铁产量/万吨	粗钢产量/万吨	钢材产量/万吨
2015 年	69141.30	80383.00	112350.00
2014 年	71374.78	82230.63	112513.12
2013 年	71149.88	81313.89	108200.54
2012 年	66354.40	72388.22	95577.83
2011 年	64050.88	68528.31	88619.57
2010 年	59733.34	63722.99	80276.58
2009 年	55283.46	57218.23	69405.40
2008 年	47824.42	50305.75	60460.29
2007 年	47651.63	48928.80	56560.87
2006 年	41245.19	41914.85	46893.36
2005 年	34375.19	35323.98	37771.14
2004 年	26830.99	28291.09	31975.72
2003 年	21366.68	22233.60	24108.01
2002 年	17084.60	18236.61	19251.59
2001 年	15554.25	15163.44	16067.61
2000 年	13101.48	12850.00	13146.00
1999 年	12539.24	12426.00	12109.78
1998 年	11863.67	11559.00	10737.80

2. 冶金行业智能化现状

现代信息技术的不断进步促使人工智能领域获得了进一步发展, 人工智能已发展成为一门广泛交叉的前沿科学, 并在很多领域有着广泛的应用, 其中智能自动化是人工智能的一个重要应用领域。冶金智能化是人工智能技术在冶金自动化中的重要应用, 与其密切相关的人工智能领域包括专家系统、计算智能、分布式人工智能、机器学习、机器人学、模式识别与机器视觉、智能控制、智能决策与调度和智能信息管理等多个方面^[6-8]。

(1) 冶金专家系统。

专家系统是一类智能计算机程序系统, 由知识库、综合数据库、推理机、解释器和接口五个部分组成。基于规则的专家系统是专家系统的典型代表, 也是冶金专家系统的基础技术。在冶金工业生产中专家系统已被普遍应用, 许多先进的高炉系统^[9,10]已在美国、德国、日本、印度和中国等国被开发和应用, 例如, 基于 Volterra 级数的高炉系统数据驱动建模、高炉热风炉流量设定、高炉炉温预测、铁水含硅量、预报数据采集处理、布料状态评估、炉况分析与监控、诊断与决策支持等专家系统, 用以实现高炉炼铁过程的智能化^[2]。专家系统还广泛应用于冶金生产的其他领域^[11], 如转炉氧枪吹炼、炉外精炼、铁水脱硫烧结矿配料优化、链条炉控制策略、冶金工厂设计、焊接工艺设计、冶金机械故障诊断、铝电解槽参数优化与控制等。

(2) 基于模式识别与机器视觉的冶金生产系统。

在国外, 模式识别与机器视觉技术广泛应用于冶金生产过程中^[12,13]。例如, 西班牙 Oviedo 大学采用数据挖掘和机器视觉技术提出了一种焊接测试智能决策支持系统, 该系统需要提取过程数据和红外摄像数据, 建立一个用于估计焊接可靠性的目标模型, 并用于冷轧带钢焊接测试的操作者在线支持智能系统。该系统能够减少 30% 不必要的重复焊接, 从而达到在提高生产率的同时降低生产成本。国内也出现了一些基于模式识别与机器视觉的冶金生产系统, 如用于冶金材料结构识别与成分分析的智能系统, 以及用于冶金生产过程的监控及产品质量检验和蒸汽管网压降系数辨识的智能系统等。

(3) 冶金智能机器人。

由于大部分工业生产都在高温、有毒、危险等恶劣环境中进行, 因此工业机器人已在工业生产和制造行业进行了应用。近年来, 发展机器人学的雄伟计划在先进工业国家首先推出, 中国也不甘落后, 制定了智能制造等发展战略, 鼓励更多学者在智能机器人领域进行探索和研究。令人鼓舞的是, 在上海举行的 2013 年中国国际金属成型展览会上^[14], 工业机器人在铸造自动化生产线上的应用首次亮相。

3. 冶金炼焦过程智能化管理与控制研究现状

随着计算机技术和相关智能化技术的发展, 模糊逻辑、人工神经网络、进化计

算及其集成智能化模型等先进管理技术也慢慢被引入冶金过程管理和冶金工业生产, 包括对冶金生产过程的建模和控制等, 以期实现其自动化、智能化管理与控制^[15]。炼焦工业过程自动化和智能化管理与控制作为冶金过程中最为复杂也最为关键的环节, 吸引了国内外很多学者进行相关的研究和探索, 研究最多的主要集中在对智能化要求较高的集气管压力控制^[16-23]、推焦作业调度^[24-28]和加热燃烧过程控制^[29-43]三个子过程。

上述研究基本都是侧重于某个子过程控制进行研究, 很少从整个炼焦过程去考虑。随着对炼焦生产流程研究的不断深入, 已有一些研究者着眼于整个炼焦过程, 考虑炼焦生产各个子过程的控制及其对整个过程的控制及优化。严文福等通过对焦炉加热的热工特性、气体流动原理等进行深入的研究与分析, 从炼焦过程的最核心目标即焦炭质量方面考虑, 构建了目标火道温度线性模型^[44]。Jin 等采用变焦混沌优化方法, 以炼焦过程的又一核心目标即耗能最小化为目标, 从配煤过程煤水含量配比、作业结焦时间寻优及结焦最佳温度为考虑前提, 构建最佳火道温度设定模型^[45]。鲍立威等提出基于人工神经网络自学习的结焦终点在线预报模型^[46]。李爱平等采用多元线性回归与改进 BP 神经网络方法建立了炼焦生产过程非线性不等式约束的多目标优化模型, 从而达到优化焦炭产量和焦炉能耗的目标^[47]。赖旭芝等提出了一种基于多目标遗传算法的炼焦生产过程优化控制, 他们以焦炭产量最大化、焦炉能耗最小化为优化目标, 把焦炭质量与生产工艺作为约束条件, 利用多目标遗传算法求解多目标优化问题, 获得局部优化目标值的方法^[48]。李公法等提出了一种通过 Agent 以及 Agent 之间的协调优化实现冶金炼焦生产过程智能控制技术^[49]。刘俊提出了一种包括基础自动化层、过程控制优化层和综合生产目标优化与集中监视层的三级拓扑结构, 并基于该结构建立了炼焦生产过程智能优化控制实验系统^[50]。

1.1.2 存在的问题

当前冶金行业信息化与智能化还存在以下三点核心问题。

1. 冶金行业“信息化孤岛”问题严重

尽管近年来冶金企业的信息化建设取得了长足进步, 但也存在不少问题, 其中, 普遍而突出的一个问题就是, 冶金行业局部“信息化孤岛”严重。例如, 一些企业虽然实现了生产过程自动化控制, 但生产管理依然通过人工作业完成; 一些企业车间/工厂一级的生产执行系统严重缺乏, 使得生产人员优化、细分和执行生产计划无法得到应有的帮助; 有些不能及时监控和保留生产过程信息, 使得企业资源规划 (enterprise resource plan, ERP) 系统不能很好地运行, 从而达不到企业资源优化的目标。诸如此类的问题在很多冶金企业中都存在, 企业的信息化出现了只实现局部优化却没实现全局优化、只提高了部门效率却没有提高整体效益的局面, 使得生产效

率和效益的进一步提升受到了严重的制约^[1]。当前，中国的冶金行业正在经历着深刻的变革和严峻的挑战，迫切期望通过迅速而成功的信息化建立“冶金企业信息化一体化”和“一站式解决方案”，提升企业的竞争力。

2. 炼焦过程缺乏针对全流程的管控

钢铁冶金过程是一个典型的复杂系统，包括炼焦、烧结、炼铁、炼钢、热轧钢、冷轧钢等。其中，尤以炼焦过程最为关键，也最为复杂。作为复杂工业过程的典型代表，炼焦生产过程具有强非线性、大惯性、强耦合、慢时变等特征，其过程机理复杂，设计精确的工业对象数学模型十分困难，从而导致难以根据数学模型对整个生产过程进行有效管理与控制。由于炼焦工艺流程长、工艺对象机理复杂，现有技术大多只是对某个工段、某个子过程进行信息化、智能化管控，尤以模糊控制、神经网络、专家系统、软测量技术、智能优化算法等计算智能技术在冶金过程管理中的应用最为广泛^[15-43]。

然而，由于炼焦生产各个局部过程之间具有复杂的耦合关系，其中任何一个子过程异常情况的出现都将直接影响其他过程的正常生产，因此针对某个局部过程的管理依然缺乏全局有效性。而在当前的研究与应用中，要么是针对炼焦过程的某个子过程而进行，要么是针对炼焦过程的某个控制目标而进行优化控制研究，很少有研究能从整个炼焦全流程出发，并且基本都是从纯控制角度考虑，很少考虑现场数据的自动、实时收集和有效利用问题，系统地考虑整个炼焦生产过程的智能化管理与控制。但焦炭的质量、产量及能耗等指标直接受到炼焦生产过程管理是否有效的影响，是各种生产要素和控制因素综合作用的结果。另外受节能降耗、优化产能等影响，焦炭产量从2014年出现下滑，尤其是2015年焦炭产量同比下滑约8%，表1.2^[51]为全国2000~2015年焦炭生产量统计。

表 1.2 全国焦炭产量统计

年份	焦炭产量/万吨
2015 年	44778.00
2014 年	47980.86
2013 年	48179.38
2012 年	43831.45
2011 年	43433.00
2010 年	38657.83
2009 年	35744.05
2008 年	32313.94
2007 年	33105.28
2006 年	30074.36
2005 年	26511.70
2004 年	20619.00
2003 年	17775.71

续表

年度	焦炭产量/万吨
2002 年	14279.81
2001 年	13130.70
2000 年	12184.02

因此，冶金炼焦过程中迫切需要寻求一种更为有效的针对全过程的智能化管理与控制方法。

3. 物联网等新一代技术在冶金炼焦过程应用不够广泛

钢铁企业信息化的重要目标和核心任务是“产供销一体、管控衔接、三流同步”。信息化的关键在于将销售、质量、计划、生产、财务成本、制造执行、资产管理、能源环保管控、设备故障诊断、安全防护等重点业务管理进行有机集成^[2]，其中物联网等新一代信息技术成为实现钢铁企业信息化重要目标和任务的关键技术。

物联网是一种实现对物品的智能化识别、定位、跟踪监控和管理的网络，它将物品与互联网相连接并进行信息交换和通信，其关键技术包括射频识别技术、无线传感网络技术和云计算技术等，已成功应用于多个领域。在钢铁企业信息化建设中，物联网等新一代信息技术也将迅速全面地推广应用。在工业化和信息化建设的经验与成果和已有的物联网良好应用的基础上，各种传感器和通信网络在中国冶金行业得到了探索性的应用，例如，在生产过程中通过物联网实现对加工产品的宽度、厚度、温度实时监控，对生产、运输设备进行定位、跟踪、监控管理，提高产品质量、优化生产流程、促进节能减排，提高安全生产水平。目前，物联网等技术在冶金炼焦过程的应用还不够广泛，未来几年，冶金行业将成为物联网应用的重要领域^[3]。

1.1.3 关键科学问题

结合冶金炼焦过程信息化与智能化现状，为了更好地解决现存几方面的问题，本书围绕以下三个关键科学问题展开相关理论及应用研究。

(1)在生产环境复杂的情况下，针对炼焦过程数据量大，存在“各环节技术参数和数据如何全面、准确和实时获取”的问题。

冶金炼焦是一个极其复杂的系统工程，整个炼焦过程包括焦炉加热燃烧过程监测、焦炉煤气收集过程监测、焦炉装煤/推焦过程监测、焦炉熄焦过程监测等多个工艺环节，而每个环节均产生若干技术参数和数据。然而，对于炼焦生产过程，炼焦工艺本身的复杂性、现场环境因素的影响及当前炼焦企业所用技术的局限性等往往导致数据采集大量由人工完成，且数据不全面，准确性和实时性较差。数据已经成为新时代重要的“金矿”，在信息化与智能化过程中起着至关重要的作用，数据的不全面、不准确、不及时将有可能给后续分析带来严重的偏差和延迟。因此，从实

现考虑,如何低成本、高效能地充分获取炼焦全流程的数据是本领域实现信息化和智能化的一个关键科学问题。

(2)所获取的数据需进行加工、表示和转化为有效的、可处理的信息,针对炼焦全过程进行语义化描述的要求,存在“信息如何表征、语义要素的提取”的问题。

拥有海量数据只是进行分析应用的基础,从看起来杂乱无章的数据到有意义的且具有高层语义特征的信息需要建立一套完整的信息表达体系。在炼焦过程中,将所获取的数据表示为炼焦过程的相关知识并对其进行形式化描述是一个重要难题。同时,这种形式化描述所对应的逻辑模型应具有完整的语法、语义以及公理体系,并可以推导出一系列的定理,具备系统级的完备性。因此,如何构建这样的知识描述体系,有效地将所获取的数据转化为具有语义特征的有效信息,实现语义化要素的提取,并对炼焦全过程进行语义化描述是另一个关键科学问题。

(3)对于炼焦过程所构建的知识需要进行组织、管理与存储,进而服务于炼焦生产管理,因此存在“知识体系的构建和应用”的问题。

孤立的信息并不能直接用于指导生产应用。如何在知识之间建立有效关联,形成完整的知识体系,对其进行组织、管理与存储,是一个难题。同时,如何进行知识之间的转换,并结合实际应用和已有的专家知识形成一套完备的知识推理机制,并对知识进行推理与检索服务,使得单一、独立的信息上升为有价值的知识,并进而指导冶金炼焦产业的应用过程,是第三个关键科学问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 本体技术与描述逻辑在冶金领域应用研究现状

1. 本体在冶金领域的应用

本体(ontology)原本属于哲学领域的一个概念,在古希腊时期,亚里士多德曾经对世界上的事物分类做过尝试,这就是最原始的一种对本体的描述。哲学领域,曾经有研究者对本体进行定义,即本体是对客观事务的描述^[52]。在韦氏词典里面,本体被定义为:与存在的本质相关的形而上学的分支,或者不同的知识领域谈论各种本体时,应该使用本体的复数形式,目的是便于表示总的本体集合,也就是本体论^[53]。因此,本体可以说已经存在了很长时间。近些年,随着信息技术不断发展、语义 Web 研究不断深入,本体已经被研究者、工程技术人员广泛地应用到计算机领域。本体被应用于计算机领域,主要是因为本体具有较强的信息资源描述和较强的推理能力。王芳在文献[54]中运用本体理论和方法对冶金设备信息进行概念、属性的定义,构建冶金设备领域本体。在此基础上,提出了更加科学和实用的基于本体

论的冶金设备分类编码构想,满足了冶金设备信息共享和利用的需求。谷俊在文献[55]中把本体运用到冶金行业构建了专利文献本体模型 PATENT_ONT0,使用 Protégé 工具以网络本体语言(ontology web language, OWL)对概念模型进行描述。张德钦等在文献[56]中讨论了冶金工业联合体数据集成的基本需求及基于本体的数据集成基本架构,以冶金行业工业联合体数据集成为研究对象设计了一个基于语义的数据集成模型。

2. 描述逻辑及其应用

描述逻辑是一种知识表示的形式化方法,其知识表示时主要是采取基于对象的措施,描述逻辑的应用领域包括语义 Web^[57]、概念建模^[58]、知识表示^[59,60]、生物信息集成^[61]、信息系统、语言理解、软件工程^[62]、数字图书馆^[62]、数据库^[63-67]等,其特点如下:①具有较强的表达能力;②具有可判定性;③基于它的推理算法总能停止。

一般可以采用经典扩展方式、非经典扩展方式对描述逻辑进行扩展。其中,经典扩展方式下主要是通过增加概念构造器、关系构造器来扩展描述逻辑。Baader 等在 ALC(attributive concept description language with complements)的基础上建立了描述逻辑 ALCN(attributive concept description language with complements and number restriction),其主要做法是添加数量约束^[68,69]。Baader 建立了描述逻辑 ALC-trans,其主要做法是在 ALC 上添加关系并、关系复合、关系传递^[62]。印俊采用限定由交、并构造器构造的复杂关系长度是相同的,提出了 ALCQ(attributive concept description language with complements and quantify number restriction)($\cap, \cup, \sqcap$)的子语言 ALCQ_S($\cap, \cup, \sqcap$)^[70]。Horrocks 建立了描述逻辑 ALCI_{R+},主要做法是在 ALC 上添加反关系、关系传递^[71]。王静等引入可拓学中的可拓集合代替经典集合,把可拓集合看做描述逻辑 ALCQ 的集合论基础,提出一种带限定性数目约束的可拓描述逻辑 ALCQ_{DES}^[72]。

Lutz 在文献[73]中在数字领域对描述逻辑进行扩展,包括非负整数领域描述逻辑扩展、全体整数领域描述逻辑扩展、实数领域描述逻辑扩展。Baader 等把关系数据库视为一个具体领域,然后在此基础上扩展描述逻辑,把字段值集合看做领域,SQL 定义的关系看做角色^[74]。Haarslev 等在描述逻辑 ALC(D)的基础上,添加了空间信息表示的具体域、关系构建谓词算子,结合语义推理与空间推理,提出描述逻辑 ALCRP(attributive description language with complements and roles defined as predicates)(D)^[75]。霍林林基于区间模糊理论扩展了空间描述逻辑 ALCRP(D),得到区间值模糊空间描述逻辑 IF-ALCRP(D)^[76]。Aiello 等在时间上做描述逻辑领域扩展 DL(description logics),把时间段构成一个集合并将其看做领域,把基本时间段(如 before, after, ...)用布尔算子连接建立角色。另外,把时间段用空间区域替换可以进行空间领域扩展,把基本空间关系采用布尔算子连接建立角色关系^[77]。

由于 DL 只能表示静态知识,无法对信念、义务、责任等动态知识进行表示,为了弥补此缺陷, Wolter 等在 ALC 的基础上,结合命题动态逻辑(propositional

dynamic logic, PDL)建立了PDL^[78]。Shi等把DL、动态逻辑、动作理论相结合建立了一种动态描述逻辑^[79]。张建华等在动态描述逻辑(dynamic description logic, DDL)推理和(distributed dynamic description logic, D3L)推理的基础上,提出了支持链式桥规则的分布式动态描述逻辑(CD3L)推理算法^[80]。常亮等基于描述逻辑ALCO(attributive concept description language with complements and nominals)来动态描述逻辑扩展,建立了D-ALCO,给出了D-ALCO的概念可满足性判定Tableau算法,并证明了该判定算法的性质^[81]。赵专政等针对认知角色不能表达个体间双向关系的问题,在描述逻辑ALCK(attributive concept description language with complements and K operator)中加入逆角色得到ALCIK,以扩充其表达能力^[82]。

时态逻辑中对时间的解释与一般模态逻辑不一样,具有独特性,因而Bettini和Artale等基于时态来扩展描述逻辑,并对时态描述逻辑的相关性质进行讨论^[83-85]。李岫等在文献[86]中把描述逻辑ALC同分支时态逻辑(computation tree logic, CTL)进行结合,建立了分支时态描述逻辑ALC-CTL。该逻辑将时态算子引入公式的构造,使其不仅具有较强的刻画能力,还让公式可满足性问题的复杂度保持在EXPTIME这个级别。印俊在ALCN的基础上加入认知算子 K 提出了描述逻辑ALCNK,在Tbox为空集和Abox中无认知算子的情况下,设计了ALCNK概念的认知查询表算法^[70]。

Heinsohn在文献[87]中提出了描述逻辑的概率扩展,主要是把概率和描述逻辑进行结合。Straccia等在文献[88]中把描述逻辑ALC与模糊逻辑相结合建立了模糊描述逻辑ALC,定义了模糊描述逻辑ALC的语法、语义,并研究了模糊描述逻辑ALC的推理问题及其复杂性。康达周等基于描述逻辑SHOIQ进行描述逻辑的模糊扩展提出SHOIQFC,SHOIQFC不仅具有模糊描述逻辑FSHOIQ的全部表达能力,还支持涉及多隶属度值及其比较复杂的模糊知识的表示与推理^[89]。Sanchez等对模糊描述逻辑ALC进行扩展,主要是在其基础上增加数量约束限制^[90]。Stoilos等在模糊描述逻辑ALC的基础上增加关系传递、关系包含、关系逆、无限定的数量约束进行扩展,建立了描述逻辑f-SHIN,提出了其满足性推理算法^[91]。冉婕等针对现实生活中信息的时间性和模糊性,在模糊描述逻辑和时态逻辑的基础上提出了一种模糊时态描述逻辑(fuzzy temporal description logic, FTDL)^[92]。王驹等建立了模糊动态描述逻辑(fuzzy dynamic description logic, FDDL),主要是在动态描述逻辑的基础上进行模糊扩展,给出FDDL的语法、语义定义,还研究了FDDL的推理问题^[93]。蒋运承对SROIQ(D)进行了扩充,提出了直觉模糊粗描述逻辑IFRSROIQ(D)^[94]。

为了能对单调知识、不完备知识进行描述和推理,Baader等在文献[95]中对描述逻辑进行缺省扩展建立了缺省描述逻辑。董明楷等在文献[96]中对描述逻辑进行缺省扩展,主要是在描述逻辑基础上添加缺省规则。为了能够描述数据库中实体-关系模型和实体-关系模式,Calvanese等建立了描述逻辑DLR(dynamic language runtime)和描述逻辑ALNUI,其中,DLR是基于 n 元关系的描述逻辑,ALNUI是