

学校编码: 10384

分类号_____密级

学号: 24320131152446

UDC

廈門大學

硕士学位论文

基于数据驱动的铜闪速熔炼能效优化算法
研究

Research on Energy Efficiency Optimization Algorithm for
Copper Flash Smelting Process Based on Data-driven

董云成

指导教师: 姚俊峰 教授

专业名称: 软件工程

论文提交日期: 2015年4月

论文答辩日期: 2015年5月

学位授予日期: 2015年 月

指导教师:

答辩委员会主席:

2015年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

铜闪速熔炼工序具有多变量、非线性、大时滞、强耦合、生产波动大的特点，传统的基于机理模型的优化控制系统很难适应多变的运行条件，预测结果偏差较大，影响最终的控制效果。随着计算机技术的发展，复杂工业过程中积累了大量生产数据，为我们从人工智能的角度进行建模与优化控制提供了数据基础。

本论文以某大型闪速炼铜企业的闪速熔炼生产过程为研究对象。为了实现铜闪速熔炼工序中的节能减耗，本文提出了一种满足三大工艺指标（冰铜品位，冰铜温度，渣中铁硅比）约束的能效优化模型：首先，我们用最小二乘支持向量机对历史数据进行训练得到三大指标预测模型；然后，我们给出优化数学模型并以三大工艺指标为约束，用改进的粒子群优化算法对能源设定值进行优化。实际结果表明该优化模型能够准确预测工艺指标并实现了一定的节能减耗，对铜闪速熔炼工序的能效优化控制具有一定的指导意义。

关键词：闪速熔炼；能效优化；支持向量机；粒子群优化算法

Abstract

The characteristics of the copper flash smelting process include: multiple variable, nonlinearity, strong coupling, long delay and large fluctuations. With the development of computer technology and industrial automation, the complex industrial process has produced a large number of production data, which contains rich information for the mining of their patterns.

In order to improve energy efficiency of the copper flash smelting process, this paper presents a method for minimizing energy consumption with meeting three technical indexes (matte grade, matte temperature and ratio of Fe to SiO₂) as a constraint. Our method is composed of two main parts: firstly, the least square support vector machine model (LS-SVM) is used to predict three technical indexes and we compare it with back propagation (BP) neural network; secondly, the comprehensive energy consumption model based on particle swarm optimization (PSO) is used to find the operational-pattern of lowest energy consumption. Experimental results on practical production data show that our energy efficiency optimization method can accurately predict three technical indexes and find the operational-pattern leading to the lowest energy consumption.

Key words: Copper Flash Smelting; Energy Efficiency Optimization; Least Square Support Vector Machine (LS-SVM); Particle Swarm Optimization (PSO)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究现状	2
1.3 论文研究思路和主要工作	3
1.4 论文组织结构	4
第 2 章 相关概念及技术介绍	7
2.1 铜闪速熔炼工序工艺流程	7
2.2 铜闪速熔炼工序工艺指标	9
2.3 影响工艺指标的主要因素分析	10
2.4 K-means 聚类	12
2.5 最小二乘支持向量机	14
2.6 粒子群算法	17
2.7 本章小结	19
第 3 章 模式优化与算法设计	20
3.1 模式及模式优化	20
3.2 能效优化算法框架	22
3.2.1 框架简述	22
3.2.2 框架分析	23
3.2.3 算法流程	24
3.3 本章小结	27
第 4 章 铜闪速熔炼工序工艺指标预测模型	28
4.1 预测模型的建立	28
4.1.1 数据预处理	28
4.1.2 模型输入	33
4.1.3 三大工艺指标预测模型	33

4.2 模型的训练.....	35
4.2.1 训练步骤.....	35
4.2.2 算法实现.....	36
4.3 本章小结.....	38
第5章 铜闪速熔炼工序能效优化策略.....	39
5.1 能效优化数学模型.....	39
5.2 优化操作模式库的建立与维护.....	40
5.2.1 优化操作模式库的构建.....	40
5.2.2 优化操作模式库的更新.....	41
5.3 粒子群优化算法的改进.....	42
5.4 本章小结.....	46
第6章 实验结果与现场应用.....	47
6.1 工艺指标预测仿真实验.....	47
6.2 能效优化仿真实验.....	49
6.3 现场应用.....	50
6.4 本章小结.....	52
第7章 结论与展望.....	53
7.1 结论.....	53
7.2 展望.....	54
参考文献.....	55
附录.....	58
致谢.....	59

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and Significance	1
1.2 Research Status	2
1.3 Main Research Work	3
1.4 Thesis Structure	4
Chapter 2 Related Concepts and Technologies	7
2.1 The copper flash smelting process	7
2.2 Parameters of the copper flash smelting process	9
2.3 The main factors affecting process index	10
2.4 K-means	12
2.5 Least squares support vector machine	14
2.6 Particle Swarm Optimization	17
2.7 Summary	19
Chapter 3 System Design	20
3.1 Pattern and Pattern Optimization	20
3.2 Algorithm Framework of Energy Optimization	22
3.2.1 Framework Description.....	22
3.2.2 Framework Analysis.....	23
3.2.3 Steps of Algorithm.....	24
3.3 Summary	27
Chapter 4 Prediction Model of Index of Copper Flash Smelting	28
4.1 Establish The Prediction Model of the Index	28
4.1.1 Data Preprocessing	28
4.1.2 Inputs of The Model.....	33
4.1.3 Three Forecasting Model of The Index	33
4.2 Training Model	35

4.2.1 Training Steps.....	35
4.2.2 Implementation of LS-SVM.....	36
4.3 Summary	38
Chapter 5 Copper Flash Smelting Energy Efficiency Optimization ...	39
5.1 Optimization Mathematical Model of Efficiency	39
5.2 Establishment and Maintenance of the Optimized Pattern Database	40
5.2.1 Establishment of the Optimized Pattern Database	40
5.2.2 Cluster the Optimized Pattern	41
5.3 The improved PSO Algorithm	42
5.4 Summary	46
Chapter 6 Experimental Results and Discussion	47
6.1 Simulation Test of Index Prediction	47
6.2 Simulation Test of Energy Optimization	49
6.3 Field application	50
6.4 Summary	52
Chapter 7 Conclusion and Prospect	53
7.1 Conclusion	53
7.2 Prospect	54
References	55
Appendix	58
Acknowledgements	59

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

铜闪速熔炼工序具有参数变量多且耦合强、工艺指标滞后以及非线性等特点,难以采用精确的数学模型进行描述,因此在实际生产中通常仅凭现场人员的经验进行操作,主观性大、时效性差,生产波动大,严重影响了铜闪速熔炼工序的优化运行^[1]。现有的基于机理的优化控制系统在一定程度上能够对生产过程起到指导作用,但是机理模型对生产过程进行了大量简化,许多参数凭经验设定,随着铜产量的日益增加,铜精矿成分不稳定,工况存在波动等原因,模型中许多参数值会随生产过程动态变化,导致机理模型的计算误差较大。另外,闪速熔炼过程工艺指标的测量具有大时滞性,缺少对工艺指标的实时预测机制,这就导致操作人员在调整能源设定值以后很难获得实时的工艺指标反馈信息,影响生产过程优化控制的效果,甚至造成不必要的能耗损失。本文从铜闪速熔炼工序能效优化的角度出发,设计了一种铜闪速熔炼工序控制系统,该系统基于对操作模式进行优化,对于稳定闪速熔炼中的一些工艺指标、降低过程综合能耗取得了不错的效果。

闪速熔炼工艺是炼铜的主要工艺方法,其产能约占世界矿铜产量的 50%^[19]。上世纪 80 年代以来,闪速熔炼工艺在国内发展十分迅速,目前我国铜产量的 50% 以上、镍产量的 70% 以上是由闪速熔炼工艺生产的。2005 年“双闪”(指闪速熔炼、闪速吹炼)炼铜工艺首次引入中国,由于其环境指标优良、自动化水平高、工艺成熟可靠等,受到了国内铜冶炼行业非常大的关注以及认可,已有数家年产能 40 万吨以上的大型“双闪”铜冶炼厂投产或正在建设。闪速炼铜工艺的产能还在迅速提高,将成为我国铜冶炼的主导工艺技术。由于国内铜矿产资源缺乏,我国铜冶炼企业大多为买矿型,铜精矿原料依赖进口,是国际化程度很高的行业,稳定产品质量、降低生产能耗是国际化竞争的生存需要。

目前,闪速熔炼过程控制存在以下问题:

1、过程控制主要以稳定工艺指标为主,缺少以降低过程综合能耗,提高关键设备热效率为目标的优化控制模型。实际生产中能耗控制主要依赖现场操作人

员的经验和自觉程度，主观性大，影响能源调优的效率和准确率。

2、当前生产过程优化控制主要基于机理模型和人工经验相结合的方式。机理模型是建立在一定条件下推导出的物料平衡和热平衡的数学模型。基于机理模型的控制采用前馈-反馈控制策略。通过机理模型预估，求出使工艺指标稳定的操作参数的基本值，进而再根据工艺指标的实测值和目标值的偏差，通过反馈数学模型求出操作参数的修正值，将操作参数的基本值和修正值综合输出送往DCS系统，作为DCS中相关控制回路的优化设定值，由DCS完成对反应塔操作参数的自动控制。机理模型虽然能反应一定的生产实际，但是机理模型是基于很多假设获得的，是对生产过程的简化。在实际生产中，工况会随时间而变化，机理模型中的相关参数都会因此变化，但是机理模型属于静态模型，适应能力差，许多参数仍然取常量或经验值，这就使得机理模型的预测结果存在误差，偏离实际工况的预测结果会导致生产波动，进而引起能耗的提高、炉体寿命缩短和冰铜品位下降等问题。因此建立自适应的实时优化控制系统，实现工艺指标的动态预测模型具有重要意义。

本文的研究课题来源于国内某大型炼铜企业能效优化控制系统开发项目，该企业的规模处于国内领先水平，其主要生产工艺流程、生产设备和自动化管理水平具有典型的代表性。为响应国家“十二五”规划关于加强工业节能，推动能效水平提高的号召，企业计划在原有生产控制系统的基础上建立能效计算和多层级能源优化调度系统。因此本文将以此炼铜企业为代表，对其闪速熔炼生产过程的能效优化控制进行研究，通过对生产历史数据的分析以及训练集的选取，利用支持向量机训练工艺指标在线预测模型，建立闪速熔炼综合能耗优化数学模型，最后利用粒子群算法进行能源调度的寻优，在满足工艺指标的约束条件下寻找综合能耗最低的操作模式。

1.2 研究现状

铜闪速熔炼工序生产过程的优化控制具有关系变量多、反应机理复杂、过程关联耦合严重、过程信息繁杂，工艺指标无法在线测量等难点^[1]。针对这些特点，已有不少专家学者对铜闪速熔炼工序优化控制做研究并取得了一些成果。Goto等开发了符合热力学反应条件和物料衡算、热量衡算的操作参数优化模型^[19]。但

是该数学模型大大简化了反应过程，很难用于操作参数的优化。近年来，随着计算机技术的发展，大量人工智能方法被引入到工业生产自动化控制中。曾青云等利用闪速熔炼三大工艺指标的回归分析，分析铜闪速熔炼工序工艺指标的影响因素与工艺指标的关系^[8]。谢永芳等利用基于最小二乘法的支持向量机训练铜闪速熔炼工序中三大指标的预测模型，实现了小样本下工艺指标的实时预测^[9]。桂卫华等提出了基于工业历史数据的铜闪速熔炼工序中操作模式的一系列优化，引入了模式识别和模糊控制的方法，实现了铜闪速熔炼工序工艺指标的稳态优化控制^[11]。然而上述研究都忽略了能耗对系统生产的影响，缺少以能源消耗和工况相结合的综合能耗 E 为目标的优化数学模型。优化过程中往往会因为追求好的工艺指标而增加了能源消耗。

本文针对以上问题，提出了铜闪速熔炼工序能效优化数学模型，借助模式识别和数据挖掘的思想，将来自不同数据源的生产数据组织成模式，采用人工智能方法训练工艺指标预测模型，并以综合能耗最低，工况性能最优为目标，对操作模式寻优，使铜闪速熔炼工序生产过程在满足稳态生产的前提下降低能耗，节省能源成本。结合某企业铜闪速熔炼工序实际生产过程，证明了能效优化数学模型能够很好地利用到铜闪速熔炼工序生产优化过程。

1.3 论文研究思路和主要工作

论文从闪速熔炼生产机理、工艺指标及其影响因素的分析，叙述了铜闪速熔炼工序综合能耗优化控制的研究价值，从而展开了对铜闪速熔炼工序操作模式优化与应用的研究，主要研究工作如下：

1、基于操作模式优化的闪速熔炼过程能效控制系统设计

研究了操作模式智能优化，给出操作模式和操作模式优化的定义，并在此基础上提出了基于工业历史数据的操作模式优化算法框架。该框架首先利用工艺指标预测模型对工艺指标进行实时预测，在工况条件波动时启动优化流程。

2、一种基于支持向量机（SVM）的工艺指标预测模型

利用该模型对铜闪速熔炼工序工艺指标进行实时预测，解决了冰铜品位、温度、渣铁硅比无法在线测量的问题，确定了支持向量机预测模型的基本结构，实现了对工艺指标的在线实时预测。

3、优化操作模式库的建立和维护

建立优化操作模式库意在把各种工业运行条件下的经验数据作为优化操作模式收集起来,作为今后操作模式优化控制的指导。对于优化操作模式的数量大,空间分布广,直接搜索难度较大的问题,本文采用 K-means 算法对操作模式库进行聚类。同一聚类下的优化操作模式具有相似的运行条件,聚类中心作为该组优化操作模式集的索引负责操作模式匹配。优化操作模式库的建立加快了操作模式匹配和搜索的效率。

4、操作模式优化算法的研究

操作模式优化的目的是在保证冰铜品位、温度、渣铁硅比处于合理范围的前提下,以过程综合能耗最低为目标对由工况条件、能源参数组成的操作模式进行寻优。该问题本身是一个带约束的单目标优化问题,我们采用了一种改进型粒子群(PSO)优化算法对优化问题进行求解,粒子群算法全局搜索能力强,能够找到最优解,能够为操作模式优化提供算法支撑。

1.4 论文组织结构

论文分为七章,各章内容安排如下:

第一章简要介绍了冰铜闪速熔炼工序优化控制的方式、存在的问题和难点,介绍了该课题的研究现状,提出了闪速熔炼过程能效优化的项目背景、系统目标和研究意义。

第二章内容包括两个部分,第一部分概述系统中闪速熔炼工艺流程,分析了冰铜熔炼工艺指标和影响工艺指标的主要因素;第二部分介绍了系统使用到的算法。本章详细介绍了铜闪速熔炼工序能效优化系统所涉及到的概念及知识,其中主要的内容大致分为两个部分。第一部分概述了铜闪速熔炼工序的工艺流程,介绍了铜闪速熔炼工序三大工艺指标及其影响因素,重点分析了各影响因素如何对工艺指标产生影响,为能效优化系统操作模式的确定奠定基础。第二部分介绍了能效优化系统所使用的模型和主要算法,主要包括基于最小二乘法的支持向量机和传统粒子群算法。

第三章介绍了操作模式优化的概念并详细描述了本文算法的总体结构和优化控制流程。本章首先介绍了模式与模式优化的概念。基于模式优化的思想,提

出了铜闪速熔炼工序能效优化控制系统,分析了系统中各组成部分的任务和用途,引入工艺指标综合性能评判对操作模式对应的生产效果进行判断。之后介绍了能效优化控制系统的优化流程。系统集成优化模式库和工艺指标在线预测模型的构建和操作模式寻优算法。基于操作模式匹配的寻优方案借鉴了历史生产经验,大大缩短了寻优速度,提高了结果的准确率。工艺指标在线预测模型解决了工艺指标检测滞后的问题,使系统能够对不断波动的工况做出实时反应,有助于提高优化控制的有效性。

第四章首先介绍了数据的预处理并重点研究了样本组织中的时间对齐问题,给出了完整的时间对齐方法。接着详细叙述了工艺指标预测模型的输入、输出以及模型的网络结构。最后介绍了预测模型的训练步骤,给出了代码实现。本章主要介绍铜闪速熔炼工序三大工艺指标预测模型的建模过程。首先具体阐述了数据预处理的流程,重点介绍了数据样本时间对齐的策略。接着,本章详细阐述了工艺指标模型的构建过程,经过去噪、缺失填补和时间对齐后的数据样本还需要经过进一步计算得到模型的输入。模型的输入由第二章中工艺指标的影响因素确定,本章最后讲述了模型的训练步骤和具体实现。

第五章内容包括综合能耗优化数学模型的建立、最优模式库的构建。深入研究了粒子群算法,并采用该算法求解最优操作模式。本章以铜闪速熔炼工序三大工艺指标预测模型为约束函数,以综合能耗和工况综合性能指标的加权和最小为优化目标,建立铜闪速熔炼工序能效优化数学模型,提出了模式匹配和优化算法相结合的操作模式寻优方案。实际生产中随着大量工业数据的积累,它们包含有过去各种工况条件下的优化操作模式。针对不断变化的工况条件,从历史数据中选择与当前工况条件最相近的优化操作模式,不仅对当前工况条件下操作模式的优化具有指导意义,而且能够加快可行解的搜索效率。针对优化操作模式数量多,空间分布大的特点,本章详细叙述了优化操作模式库的构建和更新策略。首先采用 K-means 算法对优化操作模式进行聚类处理。对优化操作模式的聚类能够加快操作模式的搜索效率,方便优化操作模式库的管理和维护。最后,本章重点介绍了粒子群算法的操作模式寻优过程。

第六章介绍了本文操作模式优化策略的实验结果,通过与实测数据的对比,分析操作模式优化方案的有效性。本章的主要内容是对四五两章中的三大指标预

测模型和操作模式优化算法的仿真实验。本章首先介绍了数据预处理，叙述了样本规模和实验方法，接着利用 2013 年 11 月至 2015 年 4 月的生产数据训练冰铜品位、温度、渣铁硅比工艺指标预测模型，通过对模型的测试，我们发现工艺指标网络模型挖掘出了隐含在历史数据中的生产规律，有较好的预测能力，能够对工艺指标进行实时预测，然后采用第五章中介绍的改进粒子群算法对 2015 年 5 月的工况进行操作模式寻优。本章最后通过对比优化前后铜闪速熔炼工序的综合能耗指标，说明铜闪速熔炼工序能效优化系统能够在稳定工艺指标的前提下，降低综合能耗，节约能源成本。

第七章总结了论文所做的工作，并对下一步的改进做了展望。

第2章 相关概念及技术介绍

2.1 铜闪速熔炼工序工艺流程

闪速熔炼过程包括闪速熔炼系统、闪速熔炼余热锅炉、闪速熔炼收尘系统 3 个子项。闪速熔炼过程主要是将干燥后的混合精矿（含水量小于 0.3%）的精矿粉末，在闪速炉喷嘴处与工艺氧和工艺空气等混合以后，以一个很高的速度喷进反应塔（闪速熔炼炉反应塔内尺寸：直径 7m，高度 7.93m，反应塔至上升烟道中心距离为 19.5m），此时反应塔内呈高温状态，然后混合精矿粉末在此产生剧烈熔炼反应，最后生成高品位（约 70%左右）的冰铜。精矿喷嘴中央设有天然气油枪，反应塔顶精矿喷嘴周围均匀设置了 3 个天然气烧嘴，在反应热量不足的情况下补烧天然气。反应塔的工艺风富氧浓度为 65.5%；目标冰铜品位是 70%。熔炼反应后，回收利用烟气的余热以及烟尘，在熔炼过程中，消耗的主要能源有电、天然气、蒸汽、压缩空气、氧气和工艺风。

在熔炼过程中，并不是任意的原料都能满足反应的要求，闪速熔炼炉对原料的水分、化学成分甚至粉末的粒度都有着严格的要求。由现场走访工作人员得知，闪速熔炼炉中进行的是自热反应，这就是说，当炉中正在进行反应时，工人不需要对其进行加热，或者说只需要提供少量的天然气，因为炉中的反应是放热反应。另外，精矿粉末的含水量要小于 0.3%，其含铜量和硫铜比也要适合，因为过高的硫铜比会使反应过程中产生的热量过剩，反之则产生的热量不足，这样将会导致炉中的渣和烟灰等积累，时间久了将不利反应进行，甚至无法反应。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.