

# 铝电解生产智能优化制造研究综述

桂卫华<sup>1</sup> 岳伟超<sup>1</sup> 谢永芳<sup>1</sup> 张红亮<sup>2</sup> 阳春华<sup>1</sup>

**摘要** 铝电解行业具有战略基础地位, 面临着诸多挑战性难题, 包括原料来源复杂使得工况难以稳定优化运行、多目标协同优化难度大、控制决策智能化水平和数据利用率低以及铝电解企业在内外环境的不确定性影响下难以实时做出正确决策等. 为了解决上述问题, 本文提出构建一种集铝电解智能分布式感知系统、系列槽智能协同优化控制系统、大型槽智能优化控制系统、智能安全运行监控系统和虚拟制造系统于一体的铝电解智能优化制造系统的方法. 同时提出了铝电解制造系统的未来发展目标和愿景功能, 并给出了相关研究方向. 最后给出了技术发展规划, 提出中短期规划和中长期规划“两步走”战略, 并对铝电解生产智能优化制造系统发展前景作出展望.

**关键词** 智能优化制造, 铝电解, 挑战与愿景, “两步走”战略

**引用格式** 桂卫华, 岳伟超, 谢永芳, 张红亮, 阳春华. 铝电解生产智能优化制造研究综述. 自动化学报, 2018, 44(11): 1957–1970

**DOI** 10.16383/j.aas.2018.c180198

## A Review of Intelligent Optimal Manufacturing for Aluminum Reduction Production

GUI Wei-Hua<sup>1</sup> YUE Wei-Chao<sup>1</sup> XIE Yong-Fang<sup>1</sup> ZHANG Hong-Liang<sup>2</sup> YANG Chun-Hua<sup>1</sup>

**Abstract** The aluminum reduction industry has a strategic foundation position, facing problems such as complex source of raw materials, optimized operating condition, multi-objective collaborative optimization with difficulty, low level of decision-making intelligence and data utilization, and real-time control decision-making under uncertainties in both internal and external environment. In order to solve these problems, the strategy of building an aluminum reduction intelligent optimization manufacturing system is proposed, which includes intelligent distributed sensing system for aluminum reduction, intelligent cooperative optimization control systems of series cells, intelligent optimization control system of large cell, intelligent safety operation monitoring system and virtual manufacturing system. In addition, the future development goals and vision of the manufacturing system are put forward with detailed research targets. At last, a road map of development is given, and the strategy of two steps according to mid-short term plan and mid-long term plan is proposed, and, the prospect of intelligent optimal manufacturing system for aluminum reduction production is presented as well.

**Key words** Intelligent optimal manufacturing, aluminum reduction, challenges and vision, “two-step” strategy

**Citation** Gui Wei-Hua, Yue Wei-Chao, Xie Yong-Fang, Zhang Hong-Liang, Yang Chun-Hua. A review of intelligent optimal manufacturing for aluminum reduction production. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 1957–1970

铝电解工业具有战略基础地位, 铝电解过程控制技术是现代铝电解工业高效节能优化运行的关键<sup>[1]</sup>. 铝是仅次于钢铁的第二大有色金属, 是产业关联度极高 (> 91%) 的工业基础原材料, 在国防、交通、机械制造、新能源、建筑、电力电子等领域应用广泛, 铝电解工业是具有战略意义的国民经济支撑

性行业<sup>[2]</sup>. 我国原铝产量和消费量连续十几年保持世界第一, 2015 年产量和消费量分别占全球的 54% 和 53%, 预计 2018 年我国电解铝产量将达到 2984 万吨, 同比增长率达到 1.83%. 尽管发展迅猛, 我国铝行业却也暴露出了深层次矛盾, 即庞大的产业规模 (产能过剩) 与全行业微利 (乃至亏损) 的矛盾, 该矛盾在短时间内难以调和, 这是我国铝电解工业面临的最大挑战. 同时其可持续发展须应对资源、能源和环保等方面的重大难题. 据调查显示, 每生产 1 吨铝, 将会向大气中排放 1500 m<sup>3</sup> 的污染性气体, 消耗大概 500 kg 的阳极. 由此可见, 铝电解工业是一个高耗能和高污染的行业<sup>[3]</sup>. 随着国家对铝电解工业的约束和规范, 我国现代电解铝生产技术必然向大容量及高效节能方向发展<sup>[4]</sup>. 目前铝电解产业一方面产能过剩 30% 以上, 另一方面一些企业集团凭借

收稿日期 2018-04-09 录用日期 2018-09-17  
Manuscript received April 9, 2018; accepted September 17, 2018  
国家自然科学基金 (61725306, 61751312, 61773405, 61533020, 61621062), 中南大学创新创业师生共创项目 (502390003) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61725306, 61751312, 61773405, 61533020, 61621062) and the Innovation Project of Central South University (502390003)  
本文责任编辑 付俊  
Recommended by Associate Editor FU Jun  
1. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083 2. 中南大学冶金与环境学院 长沙 410083  
1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083 2. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083

自己在资源、能源、投资与人力成本方面的比较优势以及新建生产系列先进装备带来的技术优势,还在不断扩张产能,加速了企业朝着大规模、集团化方向发展,产业集中度在快速提高<sup>[5]</sup>。同时,铝电解生产与检测装备的自动化与信息化水平不断提升,生产过程中每天产生海量数据,传统的人工控制决策方式已经难以适应现代铝电解生产要求。

随着计算机技术及自动控制理论与实践的发展,以及现代大型铝电解设备及工艺的进步,铝电解自动控制与管理功能不断加强,不仅极大地减轻了人工劳动强度,也促使铝电解槽逐步大型化与自动化,实现了铝电解过程能耗的大幅下降,对环境的破坏也极大减轻,使得自动控制系统已经成为现代炼铝工业一项最基本的组成部分。现代大型铝电解槽是一种多相(气-熔液-固)-多场(电、磁、热、流、力等物理场)交互作用下的大型复杂高温电化学反应器<sup>[6]</sup>。目前我国在建或拟建项目中,90%以上的产能采用500~600 kA槽型。电解槽的大型化导致临界条件下高效稳定控制难度加大,同时绿色生产的要求导致优化控制的复杂度增加,对自动控制技术水平提出了更高要求。铝电解工艺技术的进一步提升日益困难,例如吨铝直流电耗指标在12 800~13 000 kWh停留了几十年,铝电解过程控制技术已经成为现代铝电解槽高效节能优化运行的关键。

本文对铝电解生产系统的发展现状和我国铝电解生产运行控制研究现状以及存在的问题进行了综述分析;探讨了构建铝电解智能优化制造系统的必要性和可能性;给出了构建铝电解智能优化制造系统的相关研究方向和研究内容,以及铝电解行业的发展目标与愿景;提出了实施两步走战略以实现构建铝电解智能优化制造系统的目标,并对研究铝电解智能优化制造系统作出了展望。

## 1 铝电解生产运行控制系统发展现状

现代大型铝电解槽控制技术的发展经历了从自适应控制到智能控制的发展过程<sup>[7]</sup>,系统架构也经历了单机群控、集中式控制、集散式(或分布式)控制、先进集散式(或网络型)控制几个阶段<sup>[8]</sup>。早期的电解槽系列控制由人工根据生产报表数据进行设定。近年来,随着电解槽的容量与控制数据的增长,开始出现了基于规则的电解槽自动控制系统。这些控制技术支撑了铝电解各项经济技术指标的优化,也是我国大型铝电解槽炼铝技术飞速发展及能耗指标居于国际领先水平的关键因素之一<sup>[9]</sup>。国内外研究学者在电解槽智能控制系统<sup>[10]</sup>与关键工艺技术参数的控制<sup>[11-14]</sup>等方面开展了深入研究,主要集中在以下几方面。

### 1) 氧化铝浓度预测与控制

氧化铝浓度的控制作为铝电解生产控制核心,得到了国内外学者的广泛关注。氧化铝浓度控制方式主要有模糊专家控制系统<sup>[15]</sup>、自适应控制<sup>[16]</sup>、智能跟踪控制<sup>[17]</sup>、槽电阻斜率控制<sup>[18]</sup>以及多种方法的综合控制<sup>[19]</sup>等。文献[3]提出采用将电解质分子比控制在较高范围内,稳定分子比的波动范围,并根据经验规则对氧化铝浓度进行控制。文献[20]针对铝电解生产数据存在噪声的问题,及铝电解槽在不同槽况下氧化铝浓度呈现出不同的特征,提出基于具有除噪功能模糊c均值算法的槽况分类和多支持向量机氧化铝浓度预测方法。文献[21]综合考虑线性回归预测法与正交变换预测法,给出了包含槽电压、电解槽状态和出铝量三输入的铝电解槽氧化铝浓度预测方案。文献[22]采用带遗忘因子的递推最小二乘法辨识氧化铝浓度特征模型参数。文献[23]采用一种自适应模型对氧化铝浓度和槽电阻间的关系进行辨识,以及对氧化铝浓度进行估计。

虽然氧化铝浓度的研究已有许多研究成果,但是铝电解生产是物料平衡和能量平衡相互耦合的过程,并且存在大量的操作干扰,导致采集的数据存在许多误差,基于数据驱动的方法无法精确实现氧化铝浓度的有效控制。同时,耦合性的存在须对多个关键参数进行协同设定,才能保证电解槽的稳定高效生产。

### 2) 铝电解生产过程操作决策优化

铝电解关键参数的优化决策关系到高效、稳定、绿色化生产,在这方面也获得了相应的研究成果。文献[24]提出一种基于并行细胞熵的多目标细菌觅食优化方法找到电解槽最优的操作方式,能够使电流效率、能耗和CF<sub>4</sub>排放量得到优化。文献[1]提出强跟踪平方根无迹Kalman神经网络并用其建立铝电解槽工艺能耗的动态演化模型。文献[25]建立了温度和槽棒厚度的三维动态仿真模型来捕获电解槽的动态特征,进而能够优化电解槽的操作。文献[26]利用统计过程控制方法设计的氟化铝添加策略和调控电解槽热平衡方式,能够保障在降低铝水平和槽电压的同时保持电解生产稳定运行。文献[27]通过多神经网络获得铝电解过程异构信息的软测量模型,能够对不合理工况给出操作建议。虽然这些研究拟解决测量装置缺失造成关键参数难以测量的问题,但是关键参数测量问题并未得到根本解决,同时电解槽的智能化程度也未得到有效的提升。文献[28]构建一种基于模糊贝叶斯网络的知识推理模型,此模型融合经验知识、机理知识和从数据中提取的知识形成了一种多源知识表示模型,能够对异常槽况进行溯因分析,在一定程度上弥补了由于铝电解知识传承困难和经验丰富工艺人员在业内频繁流动造成判断准确率下降的缺陷。

铝电解生产过程中的操作决策是一项复杂的知识型工作, 并且铝电解槽具有强耦合和高温强腐蚀的反应环境等特点, 无法实现数字化操作决策优化。因此, 知识自动化是铝电解槽实现铝电解槽操作优化决策的必由之路<sup>[28]</sup>。虽然在这方面已有相关成果, 但离实际应用还有很大差距。

### 3) 阳极电流采集与应用

随着铝电解信息控制技术和装备的发展, 阳极电流采集装置得以在铝电解槽上应用<sup>[29-30]</sup>。文献 [30] 认为阳极电流是最有价值也是最有可能是测量的信号之一, 提出了一种阳极电流测量的新方法。文献 [31-32] 认为阳极电流信号可以提供电解槽中局部阳极的信息, 通过对阳极电流进行时频分析获得阳极的状态。文献 [33] 提出了基于阳极电流信号的铝电解槽能量分布及其对局部环境影响的热模型, 并对阳极短路对电池热平衡的影响进行了模拟研究。文献 [34] 对电解槽氧化铝浓度分布不均进行详细分析, 得到的每个阳极电流的分布也不尽相同, 根据这一信息构建仿真模拟器指导铝电解生产, 提高电流效率以及稳定生产。

阳极电流采集装置在一定程度上为铝电解智能化控制提供了重要变量, 但目前基于阳极电流的铝电解槽研究较少, 未来这种方法可以为实现分布式下料提供新思路。

### 4) 阳极效应预报与控制

阳极效应是铝电解生产过程中, 阳极和电解质之间电流的传输受到抑制而产生的阻塞现象, 导致槽电压急剧升高, 造成能量的巨大浪费并伴随产生大量的有害气体。因此, 阳极效应的预报也是铝电解生产过程的研究重点。文献 [35] 对铝电解生产过程特征建立动态模型, 根据参数估计偏差来实现阳极效应预报。文献 [36] 开发了以槽电阻斜率和累积斜率为主要判据, 以物料平衡估算值和电阻针振强度为辅助判据的阳极效应智能预报方法。文献 [37] 认为每次下料后, 槽电压的变化最初是小的, 并且在阳极效应开始之前急剧变化, 在考虑气相作用下对槽电压构成进行估计, 从而做出相应的操作措施防止阳极效应的发生。

由于电解槽控制系统水平的日益提升, 阳极效应发生次数较少, 但在大型电解槽炉底容易产生沉淀, 有的工艺人员会通过阳极效应提升槽温来溶解沉淀。但是总体看来, 阳极效应预报与控制方面的研究日趋减少。

### 5) 铝电解槽故障识别与诊断

铝电解生产控制是一项知识型工作, 如何将经验知识、机理知识和数据中提取的知识进行有效融合成为提升铝电解生产控制智能化的重要途径。基于知识的故障诊断方法不需要系统的定量数学模型,

引入了诊断对象的许多信息, 特别是可以充分地利用专家的诊断知识等。文献 [38] 针对铝电解生产过程故障诊断问题优化了相对变换矩阵, 克服了传统方法丢失特征的缺点, 提高了诊断的准确性。文献 [39] 围绕铝电解过程多维决策和数据挖掘开展了系统设计与开发工作, 取得了应用效果。文献 [40] 提出了一种直觉模糊超图语义网络知识表示模型, 结合火眼信息和专家经验知识构建一种可进行知识推理的模型, 为现场工人对电解槽状态的判断提供了一种参考。文献 [41-42] 构建一种基于多路主成份统计分析的故障诊断系统, 利用历史数据进行训练后分别建立多路模型, 将新的观测值与参考模型进行比较, 实现对阳极效应或阳极长包的提前预报。

### 6) 氟盐添加量决策与分子比控制

现代铝电解普遍采用了低分子比的工艺技术条件, 电解质成分的控制越来越受到重视。由于  $\text{AlF}_3$  浓度与电解质的初晶温度的紧密联系, 同时为保持电解工艺技术条件的稳定, 正确的  $\text{AlF}_3$  下料控制对于铝电解控制系统提出了更高的要求。当前添加方法可归纳为下列几种类型: 基于槽温和分子比实测值的查表法<sup>[43]</sup>、基于分子比和槽温等参数间的回归方程控制法<sup>[44]</sup>、基于初晶温度实测值的控制法<sup>[45-46]</sup>和基于先进控制理论的控制法<sup>[47]</sup>。文献 [48] 认为  $\text{AlF}_3$  浓度的较大波动主要是由于电解槽热平衡的波动引起的, 温度与  $\text{AlF}_3$  浓度存在较好的线性关系, 提出了一种关于温度差和  $\text{AlF}_3$  浓度差的线性模型来确定  $\text{AlF}_3$  每天的添加量。文献 [49] 基于模型和工艺知识提出了一种新的电解质温度与  $\text{AlF}_3$  添加控制方法, 实现铝电解槽能量平衡与物料平衡的解耦控制。文献 [50] 证明了温度与过剩  $\text{AlF}_3$  浓度的线性关系, 基于温度变化确定每天氟化铝的添加量。

传统的铝电解温度和电解质分子比是分开控制, 没有考虑温度和  $\text{AlF}_3$  浓度两者的相互关系, 往往会造成温度及  $\text{AlF}_3$  浓度的过控制或欠控制, 这也是控制不够精确的主要原因。随着铝电解过程控制的自动化需求不断提高, 人们开始寻求更加精确的控制手段, 温度与  $\text{AlF}_3$  浓度的耦合控制开始成为主流, 一些温度与  $\text{AlF}_3$  浓度耦合控制模型的提出在不同程度上改善了电解槽的热平衡。通过上述的研究分析可知,  $\text{AlF}_3$  浓度的控制主要是基于专家经验或基于分子比和温度等参数的控制。然而, 铝电解是一个能量平衡与物料平衡相互耦合的系统, 需要将更多的参数考虑进来, 建立起一个整槽控制系统, 协调各工艺参数之间的关系, 将复杂电解槽的运行转化为一个可控的过程。

### 7) 铝电解槽过热度估计与状态识别

过热度是电解质温度与初晶温度的差值, 合适

的过热度是保证氧化铝有效溶解的必要条件,同时也是合理槽况的综合表征。然而,过热度的测试周期长、成本较高,难以应用到实际生产过程中<sup>[7]</sup>,因此,过热度状态的在线判断对评估槽况和高效绿色生产具有重要意义。文献 [51] 确定了温度和氟化铝为主因素的氟化铝挥发速率模型,并通过电解质成分的分析计算,给出了过热度的软测量模型。文献 [52] 通过机理分析和实验测试确定了过热度测试方案,并结合实际情况验证了方案的正确性。文献 [40] 基于知识模型对过热度状态进行推理分析,根据灰度变化速率确定电解槽的过热度状态,不仅融合了火眼信息还包括经验知识和机理知识等,更符合工艺人员判断过热度状态的方式。文献 [53] 构建氟化铝挥发率模型,通过对电解液成分的分析计算,给出了过热软测量模型,并通过实测值对模型进行了在线修正。文献 [54] 中利用电解温度、电解槽工作电压、出铝量和  $\text{AlF}_3$  添加量等历史数据,构建了动态回归方程,通过正交矩阵变换得到回归相关系数,确定  $\text{AlF}_3$  添加量的决策模型。文献 [55] 采用光流法对铝电解槽火眼口处电解质跳动频率和幅度进行跟踪计算,基于专家规则并结合跳动频率和幅度值对过热度状态进行估计,实验表明具有较高的准确率。文献 [56] 采用粗糙集理论中值约简方法对历史生产数据进行静态规则提取,基于新定义的规则树构造了规则增量更新方法,从而能够对过热度状态作出估计。文献 [57] 采用相对密度噪声过滤的随机森林方法对铝电解过热度预测,从而达到控制过热度的目的。

在实际生产过程中,过热度的判断通常是工艺人员根据报表信息并结合经验知识做出判断决策,需要数据与知识进行协同推理计算。然而现有的研究成果更多是采用数据驱动方法,难以囊括铝电解槽的复杂特征,从而影响电解槽过热度状态的判断。而基于经验知识的判断方法难以避免主观上的影响,导致过热度状态判断准确率下降。

总之,尽管在铝电解生产控制方面取得了一系列成果,但由于铝电解生产电化学反应剧烈复杂、环境恶劣、工况变化大、影响因素多,特别是铝电解工艺技术正向大容量和高效节能方向发展,大型铝电解槽的生产一直面临着关键参数检测难、建模难、自动控制难等挑战。在检测方面,现行铝电解过程能够在线检测的仅有槽电压和系列电流这两个参数,离线检测的诸如电解温度、电解质成分、电解质高度和铝液高度等参数采样周期差异大、测量精度和可靠性不高,反映电解槽工况时空分布变化状态的手段有限。为了改进铝电解过程控制效果,增加在线监测的工况参数一直是过程检测的研究热点,主要包括侧壁温度、阴极温度、阴极电流和阳极电流分布等。在建模和控制方面,我国铝电解过程控制的智能

化水平不高。在铝电解过程控制上,一方面依赖经验建立了一系列的电解槽自动控制系统,能够依据槽电压变化进行自动下料操作,但控制规则和关键控制参数依靠工艺专家结合电解槽槽况分析调试给定,本质上仍是基于经验的人工操作,难以自动对工况分类建模,敏捷设定控制参数,未能实现人机灵敏协同的智能优化控制。

## 2 铝电解生产运行控制系统存在的问题

随着铝电解企业朝着大型化和集团化的方向发展,现有的铝电解生产运行控制系统存在的问题日益突出,主要体现在以下两个方面。

### 2.1 原料、能源供应波动给控制技术带来巨大挑战

#### 1) 原料来源复杂给控制技术带来巨大挑战

我国铝电解工业的原材料(氧化铝、炭素与氟盐等)品质差异大,杂质成分与含量波动频繁,导致电解铝工艺生产的原料来源复杂,铝电解工业过程控制在电解生产工况稳定优化运行方面面临巨大挑战。加之来源多样,导致资源不断劣质化。而资源劣质化与生产工艺调整导致氧化铝产品中的一些以前氧化铝工业从来不用考虑净化的微量杂质,近些年来含量大幅上升,导致了原料价格和成分具有很大的不确定性。例如我国铝电解阳极生产厂为降低成本而采购配用低价高硫焦,但硫升高不仅影响阳极质量,而且对铝电解槽况也会产生不利影响。上述氧化铝和阳极等铝电解生产原料的变化特点给我国铝电解企业(特别是大型企业集团)的工艺技术选择、生产组织与经营决策带来了重大挑战。由此可见,原料复杂导致的电解质成分复杂和电解工艺参数难控是中国铝电解工业面临的重大技术难题。这一问题的关键是生产工况不稳定和恶化风险难以预知,对于电解槽多物理场耦合系统缺乏敏感、可靠的分布参数感知手段,导致运行控制的精确性、稳定性、前瞻性存在不足。

#### 2) 外部不确定性增加控制决策难度

能源供应模式和原料、产品双重价格不确定性对电解槽的控制与决策产生严重影响。在我国原铝的成本中,能源消耗成本占比最大,达到 40%~50%,因此能源价格(即电价)对于我国铝电解有着决定性的影响。当前由于电网的峰谷电价、季节电价和地域电价差异较大,铝电解集团内各企业面临的电价差异极为复杂,能源价格和供应模式的差异对操作条件和控制方案具有重大影响。铝电解生产的原料和产品价格具有不确定性,特别是原铝价格受到市场影响很大,且短时间内发生波动的幅度不可预测。集团化运行的铝电解企业决策将受到产品市场价格不确定的极大影响,必须系统地将市场大数

据与企业的生产、技术和经营智能决策融合起来,才能有效规避生产决策失误带来的经济风险. 如何在能源供应模式和原料、产品双重价格不确定性影响下,实现精细、可靠、智能的铝电解生产,管控决策一体化势在必行.

## 2.2 智能化水平不高和数据利用率低给控制技术带来的挑战

铝电解过程是一个高度复杂的非线性过程,具有大时变、大时滞和多输入多输出的特点<sup>[28]</sup>. 而铝电解槽作为炼铝的核心设备,自身具有电、热、磁、流、力和物料分布间交互耦合的作用,同时由于必不可少的人工介入,例如周期性的出铝、换极等,严重干扰铝电解槽的运行状态,使得对铝电解槽的管理与控制难度极大. 铝电解槽中的高温、高腐蚀氟化盐熔体环境,限制了对铝电解槽的参数测量和控制操作动作,能进行实时检测的参数只有电流和槽电压,可执行的操作仅有阳极移动、物料下料和调节出铝量<sup>[58]</sup>.

铝电解作为高能耗生产过程,面临日益严格的环保排放要求,多目标综合运行优化难度大,控制与操作的智能化水平不高,数据利用率低. 目前我国铝电解的智能优化控制水平不高,对蕴含机理知识、运行特性和控制响应规律的生产数据利用率低,主要依赖人工进行槽况判断、趋势分析和运行操作决策. 铝电解每个生产系列中数百台铝电解槽和其他辅助流程会产生海量的结构化生产数据,蕴含着丰富的知识,这些知识如何获取,如何与人工决策的非结构化经验知识进行融合,实现基于生产大数据的知识自动获取和数据-知识集成控制,目前缺乏有效的方案和技术途径.

## 3 构建铝电解智能优化制造系统的必要性与可能性分析

从整体来看,我国铝电解行业处于国际领先水平,但铝电解工业可持续发展也面临资源、能源、环保和人力资源等方面的多重挑战和一系列难题,亟需通过智能优化制造实现铝电解的绿色化与高效化.

目前,铝电解行业普遍采用是由企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)、制造执行系统(Manufacturing execution system, MES)和过程控制系统(Process control system, PCS)三层结构组成的综合自动化系统架构,而且大部分企业都部署了三层结构系统或MES和PCS两层结构系统,但是其主要实现信息集成和管理功能,企业目标、资源计划、调度、运行指标、生产指令与控制指令的决策处于人工凭经验决策的状态,并且ERP, MES和PCS无法实现无缝集成. 底层的控制系统也只是

实现了回路控制,运行过程中异常工况诊断与处理,均由运行工程师靠观测运行工况和相关的运行数据,凭经验判断与处理单个电解槽或电解系列的异常工况,难以实现与其他工序控制系统的协同优化,难以实现综合生产指标的优化,难以决策出优化运行指标目标值,当生产条件与运行工况发生变化时,难以及时准确的预测、判断与处理异常工况,难以实现安全优化运行;高温、强腐蚀等恶劣的生产环境,使得铝电解生产过程高度黑盒化,缺乏协同控制、优化决策、异常工况诊断与自优化控制仿真实验及可视化功能,没有实现铝电解的虚拟制造,也无法做到工艺优化和全流程的整体优化. 未来铝电解智能优化制造要实现高效化和绿色化,亟需摆脱或减少对知识型工作者的依赖.

当前,智能制造被公认为提升制造业整体竞争力的核心技术,我国也提出了“中国制造2025”及“互联网+”行动计划等一系列战略部署. 铝电解工业是典型的流程工业,迫切要实现新一代信息技术与铝电解工业的全方位融合. 以工业大数据、工业云、物联网、工业互联网、虚拟制造、知识自动化等为技术支撑的智能优化制造是实现铝电解过程高效化和绿色化发展的有效解决方法和必经之路,开展铝电解智能优化制造系统的研究对促进多学科交叉融合发展、铝电解生产技术进步、智能优化制造实施战略等方面具有重大科学意义和实际价值.

为应对我国铝电解行业智能优化制造面临着种种难题,研发具有自主控制系统、全流程智能协同优化控制系统、智能优化决策系统和虚拟制造系统的铝电解智能优化制造系统是提升我国铝电解行业抢占新一轮制造技术制高点的重要手段,也是世界制造业发展的客观趋势. 开发铝电解智能优化制造系统既符合我国铝电解行业发展的内在要求,也是重塑我国铝电解行业新优势,实现转型升级的必然选择.

## 4 铝电解智能优化制造系统的构成和愿景目标

未来铝电解智能优化制造要实现高效化和绿色化,实现生产工艺优化和生产全流程的整体优化,亟需摆脱或减少对知识型工作者的依赖,研发集智能优化决策系统、智能协同优化控制系统、智能优化控制系统、智能安全运行监控系统和虚拟制造系统于一体的智慧优化生产系统,具体构成如图1所示.

### 4.1 铝电解智能优化制造系统的构成

#### 4.1.1 铝电解槽分布式智能感知系统

对于400 kA以上的大型铝电解槽,槽内各区域状态分布的差异性变得十分显著,运行故障往往是

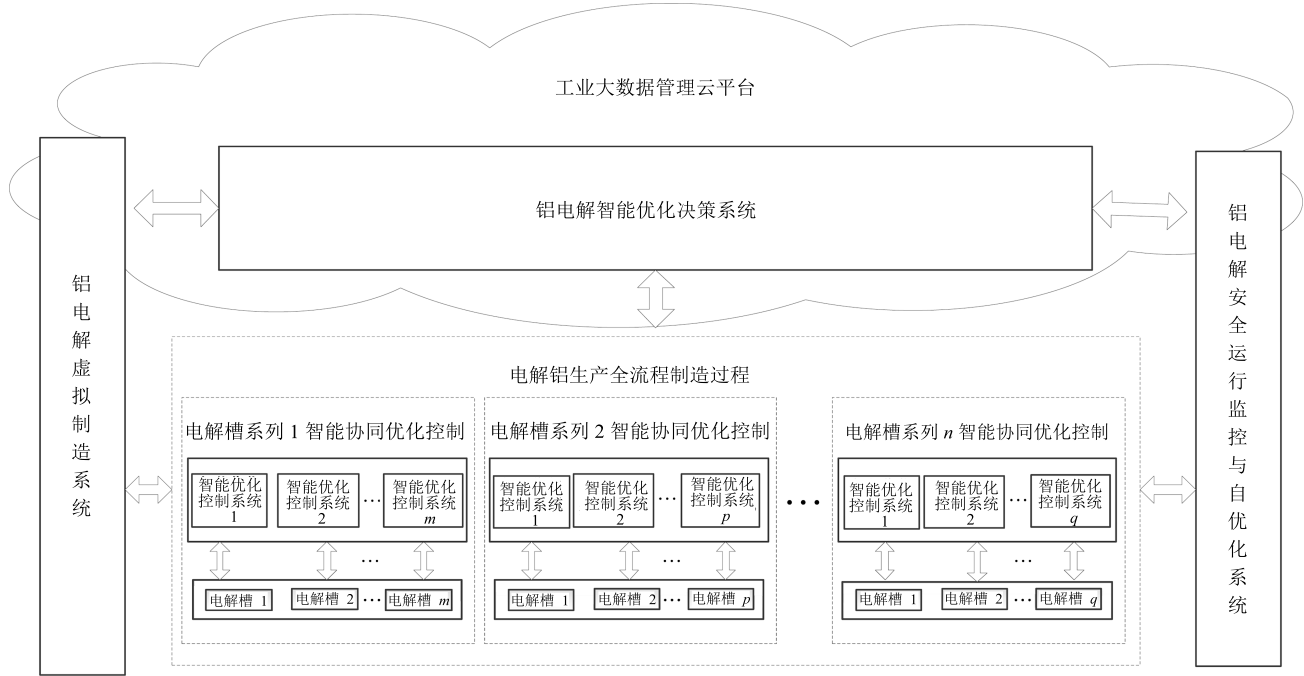


图1 铝电解智能优化制造系统

Fig.1 Aluminum reduction intelligent optimization manufacturing system

从槽内某个局部开始,再逐步扩展到全槽.然而,现有铝电解控制技术均属于集总参数控制技术,依赖的在线实时采集信号只有槽电压和系列电流这两个集总参数信号,因此解析出的电解槽状态只是反映电解槽物料平衡、热平衡和运行稳定性的整体状态,缺乏反映电解槽不同区域状态的分布信息.

针对铝电解槽关键可测分布式状态参数(主要包括阳极电流、侧部槽壳温度、阴极钢棒温度和电流等),获得铝电解槽分布式状态;通过机器视觉等方法智能感知铝电解槽内运行状态,实现分布式多物理场建模,对反映工况变化的多时空状态参数实现智能感知系统集成,研究内容主要包括:

1) 铝电解槽分布式状态参数在线检测方法装置.针对铝电解槽关键可测分布式状态参数(主要包括阳极电流、侧部槽壳温度、阴极钢棒温度和电流等),通过优化核心传感器并优化检测系统设计,获得高精度、快速响应的分布式参数检测方法;同时,通过研究检测参数的分布式并行计算模型,完成检测参数的初步融合,形成铝电解槽分布式关键状态参数在线检测基础理论,并研制分布在线检测分析样机.

2) 基于机器视觉的铝电解槽运行状态感知理论与方法.研制高质量铝电解槽槽面火眼图像视觉信号采集与比色测温系统,研究火眼图像纹理特征分析、火眼大小与形状、图像中炭渣的图像识别等算法,建立火眼图像处理与槽内运行状态的机器识别

方法,开发基于火眼视觉信息的槽内状态参数的理论基础模型,智能辨识电解槽内电解质温度、过热、流动状态及火眼等信息,实现对铝电解槽内运行状态的智能感知.

3) 基于在线仿真及实测参数的关键物理场软测量模型.研究铝电解槽多相-多场系统的在线仿真计算机模型的建立,分析多相-多场数学模型计算问题的时间和空间复杂度,研究多维参数对计算复杂性的影响,确定相关计算问题的易解性和难解性;在此基础上,基于分布式参数检测系统获得的实测参数,建立铝电解槽关键物理场(主要包括电流、温度、流速、磁场与浓度等)的在线软测量理论模型,对各物理场的在线分布进行计算,形成槽内物理场信息的计算机断层软扫描技术.

4) 铝电解智能感知系统集成方法.研究铝电解感知系统的构建方法,实现对铝电解槽的实时控制信息、在线分布式传感信息、火眼机器视觉信息、现场移动状态下的测量信息、天车状态信息等集成;开发感知终端储备多种功能的处理算法库及在线更新算法,使感知系统可适用于监测不同状态的电解槽,并针对不同工况参数检测的需求和特点,采取并行计算的模式同时实现多种在线感知任务.

#### 4.1.2 大型铝电解槽智能优化控制系统

大型铝电解槽智能优化控制系统的功能是智能感知铝电解生产条件变化,自适应决策控制回路设



定值,使回路控制层的输出跟踪设定值,实现运行指标的优化控制;对运行工况进行实时可视化监控,及时预测和诊断异常工况,当异常工况出现时,通过自愈、控制和排除异常工况,实现安全优化运行.铝电解生产过程积累了大量不同频率和性质的结构化数据,同时也能够实时获得图像、视频等非结构化数据,这些数据反映了生产运行规律与工艺操作之间关系的潜在信息,因此亟需研究充分利用铝电解槽运行大数据实现铝电解操控过程综合控制方法.以生产大数据为基础,研究数据和知识融合的智能优化集成控制方法,建立铝电解槽绿色高效生产的智能优化集成操控系统.主要研究内容包括:

1) 基于铝电解工业大数据的知识发现技术.在现代流程工业生产过程中,存在大量结构化数据源,包括在线检测、离线分析和运行统计数据,但这些数据价值稀疏,活化其价值的的能力受限,从中进行数据挖掘和知识分析具有重要意义,是人工智能驱动决策方法优于人类专家决策的重要方面.为此需要研究基于深度学习等方法研究如何发现不同工况条下生产过程的高效操作模式,基于频繁项集对结构化数据源进行大数据价值分析和标定,根据个性化数据特征敏感度设计知识发现触发策略和潜在知识处理方法,形成人工智能驱动的生产大数据价值分析方法与知识发现触发机制.

2) 数据驱动与知识引导融合的铝电解智能优化集成控制方法.在推理决策过程中,机理和经验知识更多反映对象的一般性描述和共性规律,而生产数据可以体现运行过程局部的、短期的、个性化的特征,特别是对于一些具有较多工序和系统的流程工业运行过程较为明显.运行操作优化决策要求在局部、短期、个性化数据特征的驱动下,敏感发现运行特性的动态变化,从知识库中提取引导性知识进行决策,做出就地即时的快速响应,同时将数据特征反馈到动态知识增量式关联和自学习部分.因此需要研究如何将知识引导下的推理过程与个性化数据特征进行协同,包括数据信息对经验知识和机理知识的丰富和补充,以及对知识属性和知识关联强度的数据学习方法,使决策结果既满足一般的物理化学反应规律和工艺约束条件,又符合局部系统和一定时域内过程运行的个性行为特征.

3) 非结构化领域知识的有效获取和显性化描述.传统框架表示等知识模型表示操作决策知识时难以表达跨领域非结构化知识元之间的联系,容易出现选择难、多义性和可理解性差等问题,造成决策知识难以应用,必须结合其他后验信息进行有效性度量和显性化描述.为此将后验有效性概率信息与传统知识网络相结合,研究建立具有后验有效性的跨域网络化领域知识库,围绕生产过程运行条件、操

作参数、决策对象等信息建立现象/参数状态、工况特征、原因和操作对策等不同层级间的知识元联系,从运行数据中获取后验有效性信息,形成具有数据频繁度支撑的知识元节点.

4) 决策知识多属性的深度分析.知识自动化系统中决策知识不是静态固定不变的,而是根据决策需要、工况变化和数据的积累自主动态更新演化的.需要根据以下差异对各种知识进行多属性的动态智能分析. a) 知识的不同来源; b) 应用于管理决策、调度决策和操作决策等不同方面; c) 数据支持积累的成熟度不同; d) 根据其他知识源对其可靠性程度的协同判定.因此,决策知识应当是来源可分类、功能可分型、成熟度和可靠性可分级的.此外,还应当考虑知识的冗余度和相似性,以利于后续推理中的约简.所以必须基于动态多属性智能分析方法研究分型分类知识的可靠性辨识、相似性度量和分级评价,形成知识的动态演化更新策略.

5) 具有后验关联性的分层跨域知识关系网络模型.传统知识模型表示铝电解的槽况知识时凸显出了许多不足.主要体现在: a) 电解槽知识包含物理、化学、冶金和控制等多领域的知识,并且各知识元的有效范围和关联层级不同,例如氧化铝在电解质中的溶解速度有半经验公式、化学反应动力学方程、传质扩散控制模型等多种适用范围不同的知识,因此传统的语义网等知识模型难以表达分层跨域知识元之间的联系. b) 槽况知识具有模糊性和不确定性,例如电解槽冷槽和热槽的判断没有明确的界线,电解槽火眼中某一种特征现象的出现既可能是冷槽特征也可能是热槽特征,采用传统的语义网等模型将出现选择难、多义性和可理解性差等问题,必须结合其他后验信息进行判断.为此本课题将后验关联概率信息与传统知识网络相结合,提出研究具有后验关联性的分层跨域知识关系网络模型.该模型围绕铝电解生产过程工艺条件的知识关联建立分层语义网络模型,在知识元节点之间添加后验关联信息,不仅能有效解决槽况判断中模糊性、不确定性和知识表示选择多义性的问题,而且可以根据实时数据特征学习自修正后验关联权重,实现知识关系模型的智能化更新.

6) 多粒度知识关联模型的联合推理计算.知识的多粒度结构是在考虑知识领域、知识级别和时效关联的基础上提出的,能够降低大数据环境下的决策计算规模.多粒度联合计算的核心是构建以决策问题为导向的多层求解器,研究多层求解器层数的确定、层间关系的建立和逐层求解器的构造等问题,研究知识决策自动跨层学习的广播式或迁移式策略,有效跨越车间/企业/集团不同层级之间的信息壁垒,研发层次化和组件式的知识自推理学习方法.

7) 异构关联数据的个性化特征提取与知识协同方法. 铝电解生产数据包括自动检测的槽电压, 人工检测的项目(槽温、氧化铝浓度、电解质水平、铝水平等), 以及操作相关的下料方式、氟盐添加量、操作状态(换极、出铝)等. 同时, 通过阳极电流分布监测系统和火眼视频自动监测系统新技术能够自动获取新的槽况信息(例如火眼中电解质跳动的频率和幅度以及火苗情况与电解槽过热度之间存在密切关系), 结合下料时槽电压变化特征可以对过热度进行识别. 由此可见, 铝电解生产过程中不同类型的数据具有异构关联性. 对于电解生产来说, 不同系列、不同槽龄、不同槽况电解槽的反应行为特征都不完全一样, 这些个性化特征反映在异构关联的实时生产数据信息中, 同时又遵循一般的物理化学反应规律和工艺约束条件. 为此, 根据智能化操作决策需要, 研究如何从生产数据中提取和学习电解槽个性化特征, 将基于数据的个性化特征和共性知识关系模型进行联接和融合, 建立自治统一的分层跨域知识协同机制, 从而为实现铝电解生产从数据到知识一体化的溯因控制奠定基础.

#### 4.1.3 大型铝电解槽系列智能协同优化控制系统

目前铝电解槽的管控基本以人工经验为主, 造成了同样的工艺技术条件, 不同的车间甚至不同的工区最终的技术指标均不一样的现象. 由于铝电解企业的原料、能源与设备状态经常变化, 人工管控智能化程度低, 难以实现铝电解槽系列的智能协同优化控制. 大型铝电解槽系列智能协同优化控制系统主要以系列铝电解槽生产的协同优化为目标, 研究铝电解槽系列工艺条件的协同优化控制与管理, 主要内容包括:

1) 能源供应波动条件下的铝电解槽工艺与控制智能优化. 对铝电解过程的能耗进行系统的理论与机理分析, 在现代规模化铝电解系列企业的产能、设备布局、生产节奏等条件下, 揭示铝电解生产工艺约束及主体用能设备和系统的负荷运行特性; 并基于现代铝电解集团企业能耗的特点, 例如自备电厂、孤网运行、独立电网等, 研究基于能源供应的变负荷理论响应潜力评估量化模型及技术经济适应性理论模型, 研究在不同的能源供应条件下, 规模铝电解系列在不同的能源供应条件下的工艺与控制优化策略.

2) 铝电解槽系统运行性能指标动态优化分解与协同控制方法. 铝电解槽系统是一个物料平衡和能量平衡相互耦合的系统, 在运行过程中需要保证多个目标在理想或可控范围内, 即不仅要保证系统的效率, 同时还应尽可能降低能耗, 减少废气的产生. 由于电解槽的特殊性, 运行过程有许多工艺条件限制, 在调节关键参数时应尽可能小地减少对电解槽

的干扰等. 因此, 研究电解槽系统运行性能指标可进行优化分解, 并进行协同控制, 从而实现电解槽能够平稳高效运行.

3) 铝电解槽系列协同优化控制系统的软硬件平台实现技术. 大型铝电解槽系列智能协同优化控制系统主要以系列铝电解槽生产的协同优化为目标, 研究铝电解槽系列工艺条件的协同优化控制与管理, 主要包括: a) 大型铝电解槽系列优化运行性能指标、铝电解槽运行指标及控制变量之间特性分析; b) 多电解槽运行过程智能协同优化策略; c) 铝电解槽系统运行性能指标动态优化分解与协同控制方法; d) 铝电解槽系列协同优化控制系统的软硬件平台实现技术.

#### 4.1.4 铝电解生产智能优化决策系统

铝电解生产智能优化决策系统在外部市场动态需求和内部企业生产动态状况(设备能力、资源消耗、环保)等约束条件下, 以尽可能提高包含产量、质量、能耗、排放、成本等指标在内的制造综合效益为目标, 采用虚拟仿真制造实现前馈决策, 通过工业大数据实现反馈智能决策, 人机交互动态优化决策反映质量、效率、成本、消耗、安环等方面的企业全局指标、生产流程指标和工艺过程指标, 进而决策出规模化铝电解生产系统在不同的原料和能源供应条件下的工艺指标、生产计划及调度, 为生产制造全流程的协同控制提供优化目标. 研究内容主要包括:

1) 电解铝智能优化决策系统体系架构实现技术. 主要研究电解铝智能优化决策系统体系架构实现技术, 基于机器学习与智能优化技术的决策算法, 大数据与知识驱动的一体化智能决策实现技术, 铝电解生产计划、调度及生产资源配置智能决策实现技术.

2) 面向决策的铝电解工业云计算与智能云服务平台构建技术. 物联网、互联网与过程控制网络为铝电解工业生产和管理提供了海量的数据、信息和知识, 对这些资源进行高效利用为生产和管理服务, 是铝电解工业智能工厂构建的一个核心技术. 因此, 需要研究铝电解工业云计算与云服务技术, 为海量信息的处理和智能计算提供重要的技术支持, 为铝电解工业仿真优化、生产计划、管理、决策提供高效服务. 包括: 铝电解工业各种资源的虚拟化; 云服务平台的体系架构与构建; 云计算技术与应用; 高性能计算算法应用; 数据、信息与知识的智能处理、可视化与应用技术; 基于大数据和云计算的智能工厂服务模式的标准框架; 云服务安全技术.

3) 铝电解生产计划、调度及生产资源配置智能决策实现技术. 铝电解企业现如今朝着集团化、电解槽朝着大型化方向发展, 生产计划、调度及生产资



源配置的人工决策已经难以满足铝电解行业的发展需求. 需要研究铝电解在需求不确定以及资源不确定的情况下, 如何根据获取的市场变化、原料供应、能源保障等, 并综合考虑自身情况, 对资源实现智能决策, 从而达到在生产计划、调度及生产配置智能决策下的综合收益最大化的目标.

4) 原料供应波动条件下的铝电解槽工艺与控制智能优化. 针对大型铝电解企业的原料来源复杂和原料性质波动频繁的特性, 基于机器学习理论, 建立外界原料市场数据、电化学机理知识与检测数据知识融合的工艺技术指标、效益和成本的智能过程模型; 以原料的杂质含量 (例如炭素阳极中硫含量、氧化铝中锂、钾含量等)、原料物性参数 (例如氧化铝的安息角、粒度及晶型等)、原料价格及原料库存情况等作为条件, 以经济效益最大化为目标, 研究铝电解槽的工艺条件和集成控制参数的优化.

5) 多类型操作决策知识的融合与演化. 在结构化关联知识库中, 需要解决多属性知识相互转化利用的问题, 特别是数据知识、经验知识和机理知识的融合, 能够消除知识中的不确定性, 提升决策价值. 为此, 需要研究具有不同属性的知识的融合、重组与演化方法, 形成新的知识关联, 甚至产生更高层次上的综合知识. 对于决策中常常遇到的未知情境 (例如未记录的工况), 可以从相似条件中提取知识关联进行演化, 完成推理演化决策, 并通过反馈自学习获得校验.

6) 生产过程多操作参数精细化协同决策. 现代流程工业中, 随着工艺水平提升, 理想工艺条件下的最优工作区域逐渐被掌握. 但是由于原料波动等原因运行过程始终处在动态变化中, 需要通过各个操作参数的协同优化保持或趋于最优的临界工作区域. 这一精细的协同操作优化需要解决两个决策问题: a) 根据知识关联模型的联合推理计算确定当前工况下的多参数最优工作区间, 形成基于知识推理的优化操作模式, 包含操作参数、工况条件和运行性能指标. b) 操作参数的调整不是一蹴而就的, 需结合具体流程的动态特性, 研究从当前工况过渡到最优工作区间的多参数协同迁移操作策略及滚动优化方法.

#### 4.1.5 铝电解运行安全监控与自优化系统

铝电解运行安全监控与自优化系统基于大数据实现铝电解的智能化管理控制系统、智能协同控制系统、智能优化决策系统的可视化和远程移动监控, 预报异常工况进行自优化控制. 主要研究内容包括:

1) 铝电解生产运行监控与自优化系统架构. 主要研究: a) 基于运行大数据与知识自动化驱动的铝电解生产运行监控与最优化系统架构; b) 基于运行大数据的铝电解关键参数演变特征分析; c) 基于多

信息源趋势分析的铝电解生产运行安全智能预警; d) 基于运行大数据和可视化的铝电解生产全流程一体化优化运行的监控; e) 基于模型、图像、数据特征的感知提取与人工智能学习的铝电解异常工况监控; f) 基于决策-控制-设备溯源机制的铝电解自愈与自优化控制技术.

2) 基于运行大数据的铝电解关键参数演变特征分析方法. 关键参数在铝电解生产过程中主要用于调节电解槽的热平衡和物料平衡, 从而实现电解槽能够在较为理想的平衡状态下运行. 基于运行大数据的分析方法对电解槽关键参数进行分析, 了解电解槽的运行特性. 同时为电解槽关键参数的演变做出判断, 从而能够为工艺人员提供一种操作参考, 减少人工设定关键参数不准确情况的发生.

3) 基于多信息源趋势分析的铝电解生产运行安全智能预警. 铝电解生产过程积累了不同频率和性质的大量结构化数据, 同时也能够实时获得图像和视频等非结构化数据, 呈现出一种多信息源的情况. 通过铝电解大数据处理的方法对结构化数据和非结构化数据进行分析, 对电解槽当前的安全性能做出评估, 并对未来电解槽的安全性能变化趋势做出判断. 为电解槽生产运行安全提供一种全面的、多方位的评估和预警.

4) 基于大数据的电解槽生命周期智能评估. 根据铝电解生产需求, 以铝电解系列的核心设备铝电解槽为对象, 基于其运行状态的历史大数据, 分析自启动日开始累计的各类电流、炉底压降、原铝铁含量、槽壳温度等数据的演变特征, 研究槽内衬材料的电化学渗透机理与热应力分布模型, 建立电解槽寿命智能评估模型. 同时基于对多源趋势的分析, 建立铝电解槽生产运行安全预警模型. 通过模型的运行, 实现对电解槽的寿命状态进行智能化安全监控与预警, 预防重大安全事故发生.

5) 基于模型、图像、数据特征提取的铝电解异常工况监控. 铝电解生产以提高电流效率和降低能耗为主要目标, 稳定工况是实现此目标的重要保障. 利用模型以及多源异构信息融合技术, 从海量复杂的历史数据和电解槽火眼图像中发现异常工况发生及演变的规律, 实现铝电解生产过程表征异常工况信息的一致性描述. 从信息时间空间的角度对数据、机理知识和经验知识进行获取和融合, 采用递进式特征提取实现未来电解槽况的预测与评估, 并结合专家经验知识对提取的特征进行定性标注. 根据电解槽当前的生产数据、火眼图像、外来信息和标注特征实现电解槽况监控的目标.

#### 4.1.6 铝电解生产虚拟制造系统

铝电解生产虚拟制造系统采用多物理场仿真和

可视化技术呈现电解过程全时空的定量信息,为解析铝电解机理、实现精细化调控创造条件,构建铝电解生产过程物质转化和能量传递的虚拟现实场景,为实现铝电解过程优化控制、协同控制、优化决策、异常工况诊断与自优化控制等各环节的仿真实验和可视化创造条件. 主要研究内容包括:

1) 融合机理、数据和经验知识的铝电解槽多场多相反应体系建模方法. 铝电解槽是一种多场多相的反应体系,夹带着剧烈的电化学和物理反应,同时产生大量气体. 多相多场在铝电解槽内产生、演变并相互作用,影响铝电解生产的能耗、效率、槽寿命等技术经济指标. 同时由于电解槽内是一个高温、高腐蚀的环境,造成许多关键参数测量困难,导致电解槽内存在诸多测量盲区. 因此仅采用机理、数据或经验知识难以捕获电解槽主要特征,在基于数据分析建模的基础上,需借助于机理分析和经验知识进行指导建模,实现构建铝电解槽多场多相的模型体系.

2) 铝电解多相多场数据的可视化理论与方法. 从铝电解的具体应用出发,例如铝电解状态分析、生产工艺与控制参数的调整等,研究基于多粒度的分级挖掘算法,基于铝电解工业大数据,建立各类型各种目的的数据仓库;研究多相多场计算数据与实时采集数据的融合理论方法,构建一体化的高维数据场,结合铝电解实际生产与管理对数据精度的需要,研究面向可视化的高维数据降维理论与方法,给出铝电解过程的多维、多尺度信息表达模型;研究多相多场交互作用过程的图形映射,实现铝电解时变高维数据场的可视化.

3) 铝电解虚拟生产与可视化. 采用多物理场仿真和可视化技术呈现电解过程全时空的定量信息,为解析铝电解机理、实现精细化调控创造条件,实现铝电解生产过程物质转化和能量传递的虚拟现实场景. 针对铝电解过程气-液-固多相、分子-微团-设备多尺度、速度-温度-浓度多场相互耦合的复杂体系等特点,研究多场多相反应体系下铝电解过程的物质转换与能量传递机理,以及大数据环境下融合机理、数据和经验知识的多场多相反应体系建模方法、铝电解过程多尺度耦合计算方法、多相多场数据的可视化理论与方法以及可视化的实现和分析技术、全流程虚拟生产系统的构建和实现.

4) 铝电解过程运行控制、工况诊断、优化决策的仿真平台与虚拟实现. 由于所研究方法难以保证铝电解生产控制系统能够安全稳定运行,需研发一种集铝电解运行控制、工况诊断、优化决策的仿真平台,避免在铝电解槽系统上直接运行,并在该平台进行虚拟现实以保证铝电解槽的运行安全稳定.

## 4.2 铝电解智能优化制造系统的目标与愿景

铝电解智能优化制造系统的目标和愿景是在外

部市场动态需求、内部企业生产动态状况(电解槽生产能力、资源消耗、环保)、国家相关政策以及铝价、原材料价格等市场环境约束条件下,能够实时地做出正确决策,尽可能提高铝电解包含产量、质量、能耗、排放、成本等指标在内的制造综合效益.

采用铝电解虚拟仿真制造实现前馈决策,通过工业大数据和知识自动化方法实现反馈智能决策. 人机交互动态优化决策反映质量、效率、成本、消耗、安环等方面的铝电解企业全局指标、生产流程指标和工艺过程指标,为生产制造全流程的协同控制提供优化目标. 最终真正实现企业目标、资源计划、调度、运行指标、生产指令与控制指令集成优化,而且实现远程、移动与可视化监控与决策,达到尽可能提高生产效率与产品质量,降低生产成本,实现生产过程环境足迹最小化,确保环境友好地可持续发展的目标.

## 5 技术发展规划与展望

### 5.1 技术发展规划

铝电解智能优化制造系统技术发展规划如图 2 所示. 发展路线实施两步走战略,包括中短期规划(2017 年~2025 年)和中长期规划(2025 年~2050 年). 到 2025 年,基本解决铝电解工业目前面临的挑战性难题,并在大型铝电解企业进行相关理论方法及技术验证;到 2050 年,实现铝电解生产智能优化制造系统的主要 6 大系统研发,并取得明显成效. 各规划的具体目标如下:

#### 1) 中短期规划(2017 年~2025 年)

到 2025 年,基本解决铝电解工业过程控制中面临的挑战性难题,攻克铝电解槽智能感知与工况识别、协同优化控制、生产智能优化决策等关键技术,开发形成铝电解虚拟制造系统、安全评估与自优化系统、智能云服务平台,并在大型铝电解企业进行相关理论方法及技术验证.

#### 2) 中长期规划(2025 年~2050 年)

到 2050 年,建立涵盖感知、协同、决策、诊断、可视化的铝电解智能制造服务体系,并取得明显成效;形成具有世界领先水平的铝电解智能制造科学理论和技术平台,产生显著国际学术影响,引领铝电解智能制造技术潮流,孕育出世界级的产学研用联合体,依托专利技术产品形成相关高技术产业.

### 5.2 发展展望

本文结合未来铝电解的发展趋势以及现有运行控制系统的研究现状提出了构建一种铝电解智能优化制造系统. 未来通过对铝电解智能优化制造系统构成的研究,突破基于知识自动化的全流程操作决

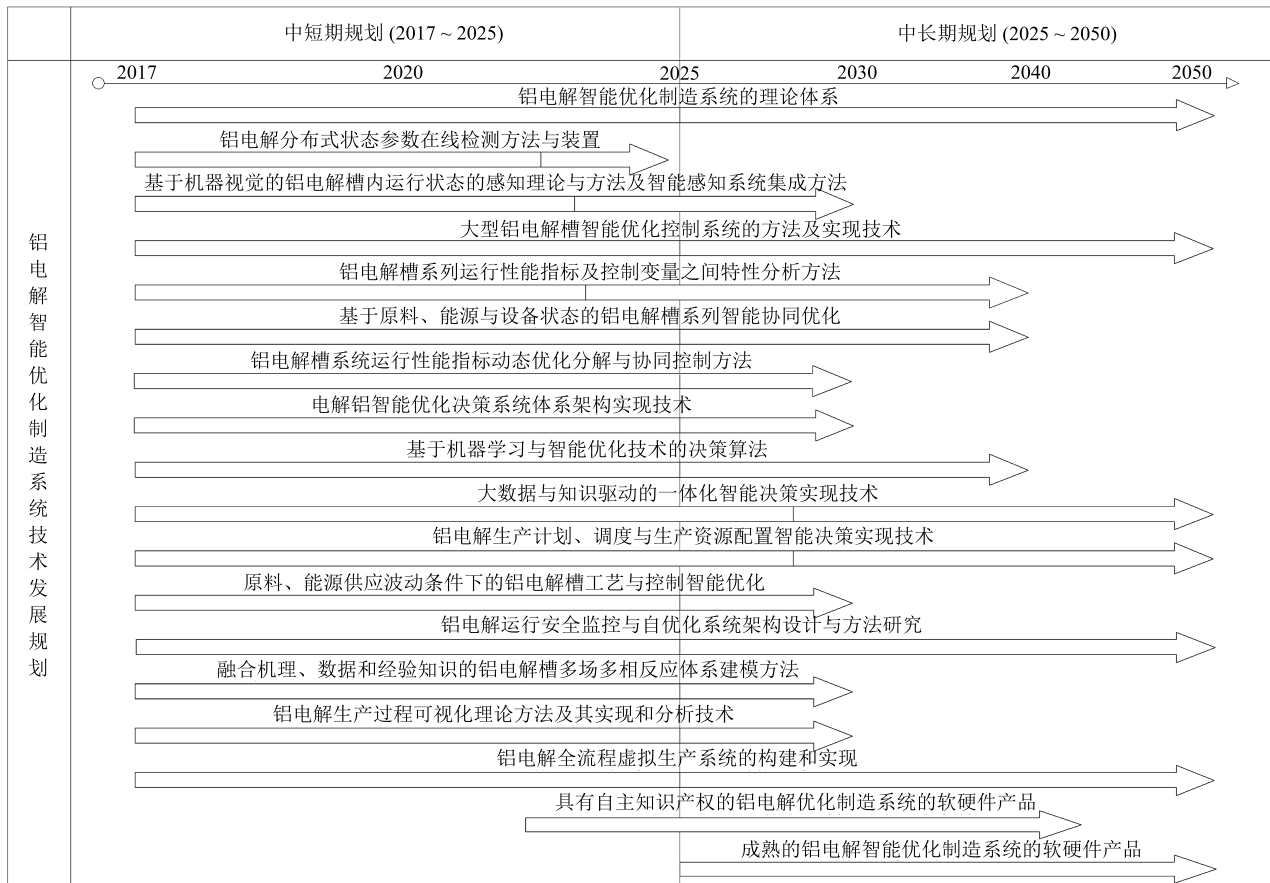


图 2 铝电解智能优化制造系统技术发展规划

Fig. 2 Development planning of aluminum reduction intelligent manufacturing system

策关键技术, 为降低或摆脱对高水平操作决策人员的依赖创造条件. 在稳定生产指标、降低能耗物耗、降低人力成本和运维成本、提高生产经济效益方面具有十分可观的应用前景, 有望为铝电解行业的精细化、绿色化、高效化、智能化生产开辟新的技术路径. 为构建智能化、协同化和人机物高度融合的铝电解生产决策系统奠定科学基础, 并且能够满足高效、绿色、智能制造的新要求和中国制造 2025 的战略行动纲领, 适应两化深度融合的信息网络和大数据环境. 同时, 对提升我国铝电解行业整体运行技术水平和国际竞争力, 实现铝电解行业的可持续发展具有重要应用价值和现实意义.

References

1 Li Tai-Fu, Yao Li-Zhong, Yi Jun, Hu Wen-Jin, Su Ying-Ying, Jia Wei. An improved UKFNN based on square root filter and strong tracking filter for dynamic evolutionary modeling of aluminum reduction cell. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(3): 522-530  
(李太福, 姚立忠, 易军, 胡文金, 苏盈盈, 贾威. 强跟踪平方根 UKFNN 的铝电解槽工耗动态演化模型. 自动化学报, 2014, **40**(3): 522-530)

2 Jiang Yu-Jing. Development of global aluminum electrolysis

industry in the last 30 years and its enlightenment. *World Nonferrous Metals*, 2007, (11): 15-18  
(姜玉敬. 近 30 年世界铝电解工业的发展与启示. 世界有色金属, 2007, (11): 15-18)

3 Wang Zuo-Bang, Li Cheng-Ming, He Wen-Yi. Control of alumina concentration in aluminum electrolysis production. *Nonferrous Metals Design*, 2018, **45**(2): 101-103  
(王佐邦, 李呈明, 贺文毅. 铝电解生产过程中氧化铝浓度的控制. 有色金属设计, 2018, **45**(2): 101-103)

4 Hu Hong-Wu, Cao Xi. Technology upgrading and application of high amperage aluminum reduction pots. *Light Metals*, 2017, (5): 18-21  
(胡红武, 曹曦. 大型铝电解槽技术升级改造与应用. 轻金属, 2017, (5): 18-21)

5 Deng Wen-Qiang. Technology application and industry progress of NEUI600kA large capacity aluminum reduction potcell. *World Nonferrous Metals*, 2018, (8): 44-45  
(邓文强. NEUI600kA 超大容量铝电解槽技术应用与行业进步. 世界有色金属, 2018, (8): 44-45)

6 Zhan S Q, Li M, Zhou J M, Yang J H, Zhou Y W. CFD simulation of dissolution process of alumina in an aluminum reduction cell with two-particle phase population balance model. *Applied Thermal Engineering*, 2014, **73**(1): 805-818

7 Li J, Liu Y X, Huang Y Z, Wang H Z, Han N, Yang X R. Bath temperature model for point-feeding aluminium re-

- duction cells. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1994, **4**(1): 26–32
- 8 Boadu K D, Omani F K. Adaptive control of feed in the hall-heroult cell using a neural network. *JOM*, 2010, **62**(2): 32–36
- 9 Guo Jun, Gui Wei-Hua, Wen Xin-Hai. Multi-objective optimization for aluminum electrolysis production process. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, **43**(2): 548–553  
(郭俊, 桂卫华, 文新海. 铝电解生产过程的多目标优化. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(2): 548–553)
- 10 Saenz de Ugarte B, Hajji A, Pellerin R, Artiba A. Development and integration of a reactive real-time decision support system in the aluminum industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, **22**(6): 897–905
- 11 Kolås S. Defining and verifying the “correlation line” in aluminum electrolysis. *JOM*, 2007, **59**(5): 55–60
- 12 Kolås S, Støre T. Bath temperature and  $\text{AlF}_3$  control of an aluminium electrolysis cell. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(9): 1035–1043
- 13 Stam M A, Taylor M P, Chen J J J, Mulder A, Rodrigo R. Development of a multivariate process control strategy for aluminium reduction cells. In: Proceedings of the 2009 Minerals, Metals and Materials Society. California, USA: Springer, 2009. 311–315
- 14 Majid N A A, Taylor M P, Chen J J J, Stam M A, Mulder A, Young B R. Aluminium process fault detection by multiway principal component analysis. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(4): 367–379
- 15 Shen Ning. Progress in the control of aluminum electrolytic alumina concentration in China. *Light Metals*, 1998, (6): 25–31  
(沈宁. 我国铝电解氧化铝浓度控制的进展. 轻金属, 1998, (6): 25–31)
- 16 Wang Ying-Chun, Geng Chang-Fu, Wu Hong-Xin. An adaptive fuzzy controller and its application in the process control of aluminum electrolysis. *Aerospace Control*, 2001, (4): 22–28  
(王迎春, 耿长福, 吴宏鑫. 一种自适应模糊控制器及其在电解铝过程控制中的应用. 航天控制, 2001, (4): 22–28)
- 17 Yang Zhen-Hai, Sun Shu-Ping, Qiu Zhu-Xian. Review and prospect of computer control system for aluminum smelters in China. *Journal of Northeast University (Natural Science)*, 1999, **20**(3): 283–285  
(杨振海, 孙淑萍, 邱竹贤. 中国铝电解槽计算机控制技术发展的回顾与展望. 东北大学学报(自然科学版), 1999, **20**(3): 283–285)
- 18 Zhou Tie-Tuo, Yin En-Sheng, Liu Yong-Gang, Yang Zhi-Xu. A comprehensive review of computer control technology for aluminum reduction Cell. *Light Metals*, 1998, (4): 35–38  
(周铁托, 殷恩生, 刘永刚, 杨之旭. 铝电解槽计算机控制技术综合评述(上). 轻金属, 1998, (4): 35–38)
- 19 Zou Zhong, Zhang Hong-Liang, Lu Hong-Jun. Control of alumina concentration in aluminum electrolysis. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2004, **24**(5): 49–52, 56  
(邹忠, 张红亮, 陆宏军. 铝电解过程中氧化铝浓度的控制. 矿冶工程, 2004, **24**(5): 49–52, 56)
- 20 Cui Gui-Mei, Yang Hai-Jin, Liu Pi-Liang, Yu Kai. Prediction of alumina density in aluminum electrolysis based on data. *Computer Simulation*, 2018, **35**(2): 305–309  
(崔桂梅, 杨海新, 刘丕亮, 于凯. 基于数据的铝电解槽氧化铝浓度预测. 计算机仿真, 2018, **35**(2): 305–309)
- 21 Lin Jing-Dong, Li Ling, Zhang Peng. Research of predicting alumina concentration based on orthogonal transformation. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2010, **32**(9): 9–13  
(林景栋, 李岭, 张鹏. 基于正交变换的氧化铝浓度预测. 武汉工程大学学报, 2010, **32**(9): 9–13)
- 22 Ren Xiao-Ning, Zeng Shui-Ping. Parameter estimation of alumina concentration model based on least square method. *Metallurgical Industry Automation*, 2012, (S2): 136–138  
(任晓宁, 曾水平. 基于最小二乘法的氧化铝浓度模型参数估算. 冶金自动化, 2012, (S2): 136–138)
- 23 Aalbu J. Adaptive control of alumina reduction cells with pointfeeders. *IFAC Proceedings Volumes*, 1987, **20**(8): 199–201
- 24 Yi J, Huang D, Fu S Y, He H B, Li T F. Multi-objective bacterial foraging optimization algorithm based on parallel cell entropy for aluminum electrolysis production process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(4): 2488–2500
- 25 Cheung C Y, Menictas C, Bao J, Skyllas-Kazacos M, Welch B J. Spatial thermal condition in aluminum reduction cells under influences of electrolyte flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, **100**: 1–14
- 26 Chen Ting, Kang Zi-Hua, Cao Bin. Optimization of aluminum electrolysis production process and energy efficiency by statistical process control method. *Nonferrous Metals Engineering and Research*, 2018, **39**(3): 14–19  
(陈婷, 康自华, 曹斌. 基于统计过程控制方法的铝电解生产工艺优化. 有色冶金设计与研究, 2018, **39**(3): 14–19)
- 27 Li H S, Jiang C W. Development and application of soft sensor model for heterogeneous information of aluminum reduction cells. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(10): 1109–1115
- 28 Yue W C, Chen X F, Gui W H, Xie Y F, Zhang H L. A knowledge reasoning fuzzy-Bayesian network for root cause analysis of abnormal aluminum electrolysis cell condition. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2017, **11**(3): 414–428
- 29 Cui J R, Xing B B, Zhang Y M, Yin Y X, Wang Z Q, Huang R Y, et al. Design and implementation of online measuring instrument for aluminum electrolytic anode current distribution. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation. Lijiang, China: IEEE, 2015. 1877–1881
- 30 Yang S, Zou Z, Li J, Zhang H L. Online anode current signal in aluminum reduction cells: measurements and prospects. *JOM*, 2016, **68**(2): 623–634
- 31 Cheung C Y, Menictas C, Bao J, Skyllas-Kazacos M, Welch B J. Characterization of individual anode current signals in aluminum reduction cells. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, **52**(28): 9632–9644

- 32 Yao Y, Cheung C Y, Bao J, Skyllas-Kazacos M, Welch B J, Akhmetov S. Detection of local cell conditions based on individual anode current measurements. *Light Metals 2016*. Cham: Springer, 2016. 595–600
- 33 Cheung C Y, Menictas C, Bao J, Skyllas-Kazacos M, Welch B J. Spatial temperature profiles in an aluminum reduction cell under different anode current distributions. *AIChE Journal*, 2013, **59**(5): 1544–1556
- 34 Dion L, Kiss L I, Poncsák S, Lagacé C L. Simulator of non-homogenous alumina and current distribution in an aluminum electrolysis cell to predict low-voltage anode effects. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, **49**(2): 737–755
- 35 Li Jie-Jia, Chai Tian-You. Applications of identification and fault detection techniques to aluminum electrolysis process. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(2): 275–277  
(李界家, 柴天佑. 辨识及故障检测技术在铝电解生产过程中的应用. *自动化学报*, 1998, **24**(2): 275–277)
- 36 Li Jie, Ding Feng-Qi, Li Min-Jun, Xiao Jin, Zou Zhong. An intelligent prediction method for anode effect of prebaked aluminum reduction cell. *Journal of Central South University of Technology*, 2001, **32**(1): 29–32  
(李劫, 丁凤其, 李军民, 肖劲, 邹忠. 预焙铝电解槽阳极效应的智能预报方法. *中南大学学报*, 2001, **32**(1): 29–32)
- 37 Vogt H, Thonstad J. The voltage of alumina reduction cells prior to the anode effect. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2002, **32**(3): 241–249
- 38 Yi J, Huang D, Fu S Y, He H B, Li T F. Optimized relative transformation matrix using bacterial foraging algorithm for process fault detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(4): 2595–2605
- 39 Song W, Liu Y, Li J H. Mining high utility itemsets by dynamically pruning the tree structure. *Applied Intelligence*, 2014, **40**(1): 29–43
- 40 Chen Z G, Li Y G, Chen X F, Yang C H, Gui W H. Semantic network based on intuitionistic fuzzy directed hyper-graphs and application to aluminum electrolysis cell condition identification. *IEEE Access*, 2017, **5**: 20145–20156
- 41 Majid N A A, Taylor M P, Chen J J J, Young B R. Multivariate statistical monitoring of the aluminium smelting process. *Computers and Chemical Engineering*, 2011, **35**(11): 2457–2468
- 42 Majid N A A, Taylor M P, Chen J J J, Stam M A, Mulder A, Young B R. Aluminium process fault detection by multiway principal component analysis. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(4): 367–379
- 43 Del Campo J J, Sancho J P. Low bath ratio operation in side breaking v. s. s. pots. *Aluminium*, 1994, **70**(9–10): 587–589
- 44 Desclaux P. AlF<sub>3</sub> additions based on bath temperature measurements. In: *Proceedings of the 1987 Minerals, Metals and Materials Society*. Warrendale, USA: Springer, 1987. 309–313
- 45 Wilson M J. Practical considerations used in the development of a method for calculating aluminium fluoride additions based on cell temperature. In: *Proceedings of the 1992 Minerals, Metals and Materials Society*. Warrendale, USA: Springer, 1992. 375–378
- 46 Rieck T, Iffert M, White P, Rodrigo R, Kelchtermans R. Increased current efficiency and reduced energy consumption at the TRIMET smelter Essen using 9 box matrix control. In: *Proceedings of the 2016 Essential Readings in Light Metals*. Cham: Springer, 2016. 817–824
- 47 Li Min-Jun. Study on fuzzy expert controller and novel heat balance control model for large pre-baked aluminum reduction cell [Ph.D. dissertation], Central South University, China, 1999.  
(李军民. 大型预焙铝电解槽模糊专家控制器及新颖热平衡控制模型的研究 [博士学位论文], 中南大学, 中国, 1999.)
- 48 Hyland M M, Patterson E C, Stevens-McFadden F, Welch B J. Aluminium fluoride consumption and control in smelting cells. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2001, **30**(6): 404–414
- 49 Drengstig T, Ljungquist D, Foss B A. On the AlF<sub>3</sub> and temperature control of an aluminum electrolysis cell. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1998, **6**(2): 157–171
- 50 Huang Y B, Qu X D, Zhou J M. Coupled heat/mass-balance model for analyzing correlation between excess AlF<sub>3</sub> concentration and aluminum electrolyte temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, **19**(3): 724–729
- 51 Zeng S P, Li J H, Wei Y Q, Cao D Y. Calculation and control of equivalent superheat for 300kA prebake aluminum electrolysis. In: *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Ji'nan, China: IEEE, 2010. 4755–4760
- 52 Friedrich B, Arnold A, Kryukov V, Ermushina E. Electrolyte superheat during electrolytic production of Al. In: *Proceedings of the 2007 European Metallurgical Conference*. Dusseldorf, Germany: GOMB, 2007. 1–12
- 53 Zeng S P, Yi W C. Design and application of multidimensional decision system for aluminum electrolysis. In: *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation*. Lijiang, China: IEEE, 2015. 1808–1811
- 54 Zeng S P, Cui F W. Dynamic decision model for amount of AlF<sub>3</sub> addition in industrial aluminum electrolysis. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation*. Shenzhen, China: Atlantis Press, 2015. 787–791
- 55 Chen X F, Ying X W, Huang K K. Identification of superheat of aluminum electrolytic cell based on computer vision and expert rule. In: *Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress*. Ji'nan, China: IEEE, 2017. 4705–4710
- 56 Yang J S, Yu H, Chen X F. Soft measuring model of superheat degree in the aluminum electrolysis production. In: *Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress*. Ji'nan, China: IEEE, 2017. 160–166
- 57 Liu Y S, Xia S Y, Yu H. Prediction of aluminum electrolysis superheat based on relative density noise filtering random forest. In: *Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress*. Ji'nan, China: IEEE, 2017. 323–328
- 58 Taylor M P, Chen J J J. Advances in process control for aluminium smelters. *Materials and Manufacturing Processes*, 2007, **22**(7–8): 947–957



**桂卫华** 中国工程院院士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 1981 年获得中南矿冶学院硕士学位. 主要研究方向为工业大系统递阶和分散控制理论及应用, 复杂工业过程建模, 优化与控制应用和知识自动化. E-mail: gwh@csu.edu.cn

(**GUI Wei-Hua** Academician of the Chinese Academy of Engineering, and

professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. He received his master degree from Central South Institute of Mining and Metallurgy in 1981. His research interest covers the theory and application of hierarchical and decentralized control of industrial large systems, complex industrial process modeling, optimization and control applications, and knowledge automation.)



**岳伟超** 中南大学博士研究生. 2011 年获得郑州轻工业大学学士学位. 主要研究方向为迭代学习控制, 知识自动化, 知识表示与知识推理, 工业大数据.

E-mail: yue.weichao@163.com

(**YUE Wei-Chao** Ph.D. candidate at Central South University. He received his bachelor degree from Zheng-

zhou University of Light Industry in 2011. His research interest covers iterative learning control, knowledge automation, knowledge representation and knowledge reasoning, and industrial big data.)



**谢永芳** 中南大学信息科学与工程学院教授. 1993 年获得中南工业大学学士学位. 主要研究方向为分散控制和鲁棒控制, 过程控制, 工业大数据和知识自动化. 本文通信作者.

E-mail: yfxie@mail.csu.edu.cn

(**XIE Yong-Fang** Professor at the School of Information Science and En-

gineering, Central South University. He received his bachelor degree from Central South University of Technology in 1993. His research interest covers decentralized control and robust control, process control, industrial big data, and knowledge automation. Corresponding author of this paper.)



**张红亮** 中南大学冶金与环境学院副教授. 2002 年获得中南大学学士学位. 主要研究方向为有色金属反应器的设计, 诊断与工艺优化的电-磁-流-热-应力场的高效工程化仿, 新型仿真算法的开发, 反应器的物理场测试.

E-mail: csu13574831278@csu.edu.cn

(**ZHANG Hong-Liang** Associate

professor at the School of Metallurgy and Environment, Central South University. He received his bachelor degree from Central South University in 2002. His research interest covers non-ferrous metal reactor design, high efficiency engineering simulation of electromagnetic-fluid-thermal-stress field for diagnosis and process optimization, development of new simulation algorithm, and physical field test of reactor.)



**阳春华** 中南大学信息科学与工程学院教授. 1985 年获得中南工业大学学士学位. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化, 分析检测与自动化装置, 智能化系统. E-mail: ychh@mail.csu.edu.cn

(**YANG Chun-Hua** Professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. She

received her bachelor degree from Central South University of Technology in 1985. Her research interest covers complex industrial process modeling and optimization, analysis, detection and automation, and intelligent system.)