

基于数据分析的电解铝生产过程故障诊断方法研究

魏建军

国家电力投资集团有限公司铝电投资有限公司宁东铝业分公司，宁夏 银川 750021

DOI:10.61369/ERA.2025090006

摘 要： 电解铝是国内重要的有色金属生产行业，其生产质量、产量不仅会影响到建筑、航空航天等多个领域的发展，还会影响到国民经济的发展。新时期，传统故障诊断方法已经逐渐落后，存在着检测效率低、准确性低等问题，难以发现潜在的故障隐患。基于数据分析的故障诊断方法开始应用在电解铝生产过程中，能够准确识别故障、提升生产效率、节约生产成本等。本文将聚焦电解铝生产过程，探索常见的故障类型及影响，提出基于数据分析的电解铝故障诊断方法。希望推动电解铝行业安全生产、高效运行。

关 键 词： 电解铝；故障诊断；数据分析

Research on Fault Diagnosis Method of Electrolytic Aluminum Production Process Based on Data Analysis

Wei Jianjun

Ningdong Aluminum Industry Branch, Aluminum and Electricity Investment Co., Ltd. State Power Investment Corporation Limited, Yinchuan, Ningxia 750021

Abstract： Electrolytic aluminum is an important non-ferrous metal production industry in China. Its production quality and output not only affect the development of multiple fields such as construction and aerospace, but also the development of the national economy. In the new era, traditional fault diagnosis methods have gradually fallen behind, with problems such as low detection efficiency and low accuracy, making it difficult to identify potential fault hazards. Fault diagnosis methods based on data analysis have begun to be applied in the production process of electrolytic aluminum, which can accurately identify faults, improve production efficiency, and save production costs, etc. This article will focus on the production process of electrolytic aluminum, explore common types of faults and their impacts, and propose a fault diagnosis method for electrolytic aluminum based on data analysis. It is hoped to promote the safe production and efficient operation of the electrolytic aluminum industry.

Keywords： electrolytic aluminum; fault diagnosis; data analysis

引言

电解铝生产过程十分复杂，涉及到了多个环节、不同型号的生产设备等，极易出现各种故障。一些故障不仅会降低生产效率、提升生产成本，还有可能引发安全事故。因此，及时准确地判断电解铝生产过程中的故障是非常有必要的。

一、电解铝生产过程分析

（一）电解铝生产原理

电解铝生产利用了冰晶石-氧化铝融盐电解法，需要将冰晶石和氧化铝放置在电解槽中，前者为溶剂后者为溶质，通入直流电后就会产生电化学反应，进而分解出铝液与氧气。这个过程工作人员必须严格把控冰晶石和氧化铝的比例，如果比例合理，电解反应就能稳定进行。如果比例失调，不仅会降低电解反应的效

率，还会降低铝液的产量与质量。

（二）电解铝生产流程

电解铝生产涉及到了三个环节：原料制备、电解槽作业、铝液铸造。

第一，原料制备。工作人员需要做好氧化铝原料的预处理工作，包括：破碎、研磨、干燥处理等。这个过程能够清除其中的杂质与水分。同时还需要调配冰晶石，确保其分子比在合理的范围内。

作者简介：魏建军（1994-），男，汉族，宁夏银川人，大学本科，助理工程师，主要从事铝电解安全生产技术研究。

第二，电解槽作业。工作人员要将经过预处理的原材料放置在电解槽中，之后通入直流电进行电解反应。电解槽是生产过程中最重要的设备，内部结构比较复杂，包含：阴极、阳极以及电解质等部分。在电解槽作业时工作人员要精准控制温度、电流及电压等各项参数，还要根据实际情况添加氧化氯、调整电解质成分等。

第三，铝液铸造。工作人员需要从电解槽中抽出电解产生的铝液，并进行净化处理。通过净化清除其中的杂质与气体，提高铝业纯度。之后根据产品需求选择合适的铸造工艺，完成铝业铸造工作。

二、电解铝生产过程中的常见故障类型及影响

（一）阳极相关故障

第一，阳极效应。这是电解铝生产过程中较为常见的故障，如果阳极表面的氧化铝浓度比较低，表面就会生成一层气体膜。阳极电压会快速升高、电流效率则会快速下降，这会影响到电解槽的稳定运行，产生大量的热量与有害气体。例如：某电解铝厂在发生阳极效应后，电解槽电压从4V突然升高至10V，消耗了约10%的电能。同时还产生了一氧化碳和氟化物等有害气体，不仅污染了车间环境，还损害了工作人员的身体健康。

第二，阳极脱落。在电解过程中阳极可能会从阳极导杆上脱落，进而导致电解槽局部电流分布不均匀，这既会降低铝液质量，又会引发停槽问题，给电解铝厂造成经济损失。例如：某电解铝厂在正常电解时因机器振动导致阳极从导管上脱落，生产的铝液出现了大量杂质，只能停槽修复，这期间产生了数十万的经济损失。

（二）电解质相关故障

第一，电解质成分异常。冰晶石分子比例失调、氧化铝的浓度过高或过低都是电解质成分异常的表现。前者会影响到电解质的熔点与导电性，降低电解槽的生产效率。后者可能会提高电解质的熔点或降低导电性，影响正常生产工作的开展。例如：某电解铝厂出现了冰晶石分子失调的问题，当日电解质熔点急剧升高。工作人员将电解槽温度提升至50℃才能够正常生产，这个过程消耗了大量电能。

第二，电解质温度异常。电解质温度过高或过低都是温度异常的表现。如果温度过高可能会加快阳极的氧化反应，导致阳极消耗过快，进而增加整体的生产成本。例如：某电解铝厂的冷却系统出现故障后电解质温度持续升高。导致阳极消耗速度达到了平时的130%，工作人员只能频繁更换阳极，这既会增加生产成本，又降低了生产效率。

（三）电解槽内衬故障

第一，内衬破损。电解槽的内衬材料如果使用时间较长，就会出现裂缝、剥落的现象。这会导致电解质泄漏、外壳腐蚀等情况发生，不仅会缩短电解槽的使用寿命还会造成环境污染。例如：某电解铝厂的内衬材料质量不达标，在使用阶段产生了裂缝。电解质泄漏后腐蚀后腐蚀了电解槽外壳。工作人员只能够停

产更换内衬材料。这不仅降低了生产效率，还消耗了大量资金。^[1]

第二，内衬侵蚀。电解质会侵蚀内衬材料，导致其不断变薄，进而逐步失去保温性能。这会加快电解槽的散热速度，为了维持电解槽的温度，就需要消耗更多的电能。例如：某电解铝厂电解质成分中的氟化物含量较高，严重侵蚀了内衬材料，导致内衬材料变薄，无法发挥正常的保温作用。一段时间后电解槽的电能消耗达到了平时的115%。

（四）供电系统故障

第一，整流器故障。整流器是供电系统的核心设备，在出现故障后就无法稳定的输出直流电。不仅会影响到电解槽的正常运行，还有可能引发短路造成安全事故。例如：某电解铝厂的整流器由于元件老化出现故障引发了短路事故，导致部分设备出现问题，产生了数十万设备维修及更换费用。

第二，母线故障。母线连接着整流器与电解槽，如果其出现问题就会影响到电流的均匀分布。这会导致电解槽过热、出现故障，进而无法稳定运行。例如：某电解铝厂的母线接头松动后接触电阻突然增加，出现了过热现象，进而导致部分电解槽电流分布不均，生产效率大幅度降低。^[2]

三、基于数据分析的电解铝故障诊断方法

（一）数据采集与预处理

第一，数据采集。在电解铝生产过程中会产生大量的数据，这些数据是故障诊断的基础依据。因此工作人员需要在重要位置安装传感器，以获取电解槽电压、电解质成分、电流等相关数据。可在电解槽上安装电压传感器实时监测两端的电压变化。根据电压波动情况判断电解过程是否产生异常。例如：在出现阳极反应时电压会快速升高。工作人员还可以电解槽上安装电流传感器，如果电流不稳定则表明可能出现电路故障、电解反应等异常情况。在电解槽的阳极、阴极以及电解质内部都要安装温度传感器，全面监测温度分布及变化情况。除这些基础参数外，工作人员还要利用化学分析传感器监测电解质的成分。包括：冰晶石分子比与氧化铝浓度。如果这些成分出现异常，也会影响到电解过程的稳定性。^[3]

此外，工作人员还要获取生产管理系统中的数据，根据生产计划数据判断现阶段的生产状态是否正常，根据设备运行状态数据判断各项设备是否处于健康运行状态。综合分析已采集到的数据，就能全面把握电解铝生产过程的运行情况。

第二，数据预处理。工作人员采集到的原始数据一般存在噪声、缺失值等问题，如果不进行预处理就会影响到后续数据分析的准确性与可靠性。因此，工作人员要通过数据清洗去除原始数据的噪声和异常值。这个过程可利用均值滤波、终止滤波等滤波算法处理数据。还要通过设定合理阈值范围的方式修正正常范围外的数据；工作人员可以通过数据化归一的方式，将数据统一到相同的尺度上，方便后续的分析处理；工作人员还可以利用移动平均法等数据平滑方式，提高数据的稳定性。移动平均法是通过计算数据的滑动窗口平均值平滑数据的一种方式。

（二）特征提取与选择

第一，特征提取。工作人员要在原始数据中找到可以反映故障特征的信息，以此为参考进行故障诊断。在电解铝生产过程中工作人员可以应用不同方式、从多个角度提取特征。例如：时域分析法。是一种分析数据在时间域上的变化规律进而提取特征的方式。在分析电压数据时，工作人员可以从平均值、标准差、最小以及最大值等角度入手统计特征。平均值能够反映电压的总体水平，标准差可以看到电压的波动程度。在出现阳极效应后电压的标准差会明显增大。工作人员在提取到该特征后就能够进行故障判断；温度分析法。能够根据温度在空间上的变化率、温度梯度判断电解槽内部是否出现问题。如果电解槽内部局部过热就会出现温度梯度异常的问题。工作人员在提取到该特征后，就能够进行故障判断。

第二，特征选择。由于原始数据量大，提取到的特征数量可能较为庞大，其中一部分特征在故障诊断环节是无意义的，还会增加计算难度。因此工作人员要做好特征选择，选出有代表性、有区分性的特征。例如：某电解铝厂会利用相关性分析法筛选特征。也就是计算特征间的相关性，找出与故障相关性较高的特征，将其设定为筛选标准。一般情况下，温度变化率与电解质温度异常故障的相关性较高。工作人员可以将其设定为筛选标准，纳入筛选范围；主成分分析法也是一种应用较为广泛的方式。工作人员需要将原始特征进行线性组合，获取新特征。新特征具有最大的方差，可以代表原始特征的大部分信息。工作人员在进行主成分分析后可以筛选出方差较大的主成分，将其设定为筛选标准。

（三）故障诊断模型构建

第一，基于机器学习的故障诊断模型。机器学习是一种数据驱动的方式，需要学习大量的历史数据，在此基础上建立故障诊断模型。神经网络、决策树是较为常见的机器学习算法。例如：某电解铝厂基于决策树建立了故障诊断模型。在学习历史故障数据与正常运行数据后，该模型可以根据输入的特征数据，判断其是否存在故障、故障类型。

第二，基于深度学习的故障诊断模型。深度学习可以看作是机器学习的分支，能够自主从数据中学习特征，具有强大的泛化和学习能力。卷积神经网络、循环神经网络等是较为常见的深度

学习模型。例如：某电解铝厂利用卷积神经网络分析，电解铝生产过程的图像数据。在学习电解槽内部图像后该模型能够快速识别内衬破损、阳极脱落等故障。该模型在处理空间结构数据方面优势明显，因此可利用该模型分析电解槽内部分布数据等带有空间分布特征的数据；电解铝厂还可以利用循环神经网络处理序列数据。包括：电压与电流在时间序列上的数据，以此预测故障的发生趋势。

（四）故障诊断模型评估与优化

第一，模型评估。模型评估是指评估故障诊断模型的性能，包括：准确率、召回率等。例如：准确率能够反映一个模型的整体预测能力。某电解铝厂在评估故障诊断模型时应用了大量的测试数据。发现该模型在判断阳极效应故障时准确率达到92%，表明该模型的性能良好。这个过程工作人员需要注意，如果模型样本占比较小，即使模型将所有的样本都预测为非故障样本，依然可以得到较高的准确率。因此工作人员需要处理好这些不平衡数据集。

第二，模型优化。如果经过模型评估发现某些模型的性能不佳，工作人员就需要通过增加训练数据、调整模型参数等方式进行模型优化。例如：增加训练数据。这是一种提高模型泛化能力的方式。工作人员要搜集更多的历史数据、做好数据增强，增加训练数据的数量。如果是时间序列数据，可利用平移、播放等方式生成新的时间序列样本；调整模型参数。这种优化方式较为常见，不同类型的模型有不同的参数。包括：决策树的树深度、神经网络的学习率等。工作人员要利用随机搜索、网格搜索等方式找到最优的参数组合。通过此类方式可以优化模型，逐步改善其性能。

四、结束语

本文深入分析了电解铝的生产过程，结合以往经验及参考资料分析了生产过程中常见的故障类型及影响。并基于数据分析技术提出了电解铝故障诊断方式。包含：数据采集和预处理、特征提取和选择等多个环节。希望通过此类故障诊断方式高效识别电解铝生产过程中的故障，帮助电解铝厂节约生产成本、提升生产效率。

参考文献

- [1] 邓卫贵，梁秉敦. 浅谈电解铝电解槽出铝称重电子秤常见故障及处理方法 [J]. 世界有色金属, 2020, (14): 24-25.
- [2] 于世福，陈兆娜. 基于主元分析的铝电解槽故障诊断 [J]. 电子世界, 2019, (22): 174-175.
- [3] 杨林峰. 电解铝多功能液压比例泵组的使用与故障诊断探究 [J]. 中外企业家, 2018, (34): 233.