

引用格式:伍祖槐,何飞,赵泽波,等.整体成型阴极筑炉机器人设计研究[J].有色设备,2025,39(3):69-75.

WU Zuhuai, HE Fei, ZHAO Zebo, et al. Design and study of robotic system for monolithic cathode lining construction[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(3): 69-75.

整体成型阴极筑炉机器人设计研究

伍祖槐¹, 何飞^{2*}, 赵泽波^{3*}, 吴中鼎⁴, 张嘉¹, 谭善伟¹

(1. 贵阳铝镁设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国铝业股份有限公司贵州分公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州民族大学物理与机电工程学院, 贵州 贵阳 550025; 4. 贵州交通职业大学机电工程系, 贵州 贵阳 550025)

[摘要] 针对铝电解槽内衬传统筑炉工艺效率低、质量不稳定的问题,本文提出一种基于整体成型阴极的自动化筑炉机器人系统。通过分析 200 kA 铝电解槽筑炉工艺,发现人工施工因压缩比不足 (<0.8 MPa) 及温度分布不均导致内衬裂纹、分层,关键指标(表观密度、电阻率、耐压强度)低于行业标准。为此,设计集成了具备无轴螺旋布料、振动振打、四轴桁架行走及三维激光监测功能的筑炉机器人。该筑炉机器人具备自动行走、自动布料、自行振打、筑炉情况自动监测及电磁兼容等功能,单槽筑炉周期由人工 6~7 d 缩短至 3 d,为电解铝行业实现高效、高精度筑炉提供了创新解决方案,助力降本增效与智能化升级。

[关键词] 铝电解槽; 整体成型阴极; 筑炉机器人; 四轴桁架; 三维点云数据

[中图分类号] TF821 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)03-0069-07

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.03.007

0 引言

铝电解槽内衬是电解铝生产过程理化反应中枢纽,决定了电解铝生产质量和效率。筑炉施工是铝电解槽内衬生产的基础环节,其质量直接影响电解槽内衬电阻率、耐压强度等关键评价指标,是提高电流效率、降低槽电压、延长槽寿命的重要基础。当前,铝电解槽内衬结构主要由预制阴极、导电钢棒、高阻抗预制侧块等采用扎糊连接,经焙烧启动形成一个整体。预制阴极炭块生产需要经过原料筛分—配料—混捏—成型—焙烧等复杂工序,炭块间的均一性难以保证。同时,预制阴极炭块还需要采用专用设备和场地,通过钢棒糊与导电钢棒组装为一体后再装入电解槽,制作工艺复杂,且钢棒与阴极炭块的结合性,尤其是导电性能难以保证。另外,预制阴

极炭块间缝及周边缝均需人工填缝糊扎固^[1],由于这些缝隙宽度较小,深度较深,施工难度大,难以确保电解槽底部阴极的完整性。综上分析可知,由于传统施工工艺的局限性,内衬施工质量难以保证,生产过程中常出现槽电压较高、早期破损率较高等缺陷,大幅增加了电解铝生产成本。

1 铝电解整体成型阴极研究现状

鉴于此,基于小型自焙槽的生产经验提出了整体成型阴极的筑炉工艺方案,从根本上摒弃内衬配套生产线,颠覆阴极内衬的筑炉方式,从而大幅削减电解铝企业投资和运营成本,提高企业竞争力。20世纪30年代以前,国外小型自焙铝电解槽内衬主要采用“整体捣固阴极”结构,用炭素底糊(热捣糊)完全将阴极内衬扎固成一体,形成一个填实、坚固、耐

[收稿日期] 2025-01-29

[项目基金] 贵州省科技支撑计划:阳极导杆组全流程自动化关键技术及生产线成套设备研制(黔科合支撑[2024]一般143); 贵州省科技成果转化联合基金项目:铝及铝合金锭铸造加工智能化生产关键技术集成与应用(黔科合成果LH(2025)重点009)。

[第一作者] 伍祖槐(1992—),男,贵州遵义人,工程师,硕士,主要研究方向为铝冶炼智能装备研发、设计。

[通信作者] 何飞(1972—),男,贵州开阳人,高级工程师,大学本科,主要研究方向为电解铝工艺研究、智能化研究。

赵泽波(1984—),男,贵州六盘水人,副教授,博士,主要研究方向为智能装备研发、设计及行为过程仿真分析。

腐、高导电且筑炉成本低廉的“整体自焙阴极”内衬结构,如图 1 所示。但由于电解槽寿命较短,在 500 ~ 1 000 d,因而在大型槽上几乎未被应用,随着小型槽的淘汰,该类筑炉方式也被淘汰^[2-6]。分析结果表明,排除炉料的因素,内衬材质与筑炉方法在导致槽内衬寿命降低的因素中约占 35%,筑炉质量和焙烧启动是影响整体成型阴极质量的重要因素。

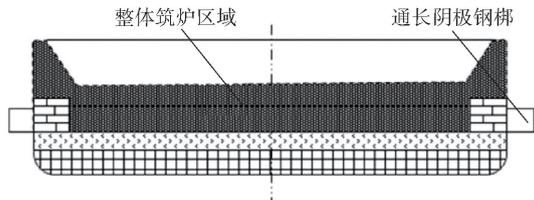


图 1 小型自焙铝电解槽初期的“整体自焙阴极”内衬结构
Fig.1 Integrated self-baking cathode lining structure in early-stage small-scale soderberg aluminum reduction cells

近年来,铝电解行业针对整体成型阴极开展了一些研究。王新华等^[7]针对铝用冷捣糊进行了压实特性仿真研究,得出了铝用冷捣糊的相关特性;张嘉等^[8]研究了筑炉工艺、焙烧工艺,得到了不同工艺对阴极炭块成型后形貌及各项物化指标的影响规律;闫朝宁等^[9]开发了焙烧过程的燃控平台;邓翔等^[10]开发了整体成型烟气收集系统,确定了整体成

型阴极烟气量,提出了烟气收集方法及处理方法等关键技术。上述研究,总结了材料、筑炉工艺、焙烧工艺等因素对整体成型阴极质量的影响,但未提供成套施工装备,筑炉过程仍依托人工进行施工,不仅智能化和自动化水平较低,而且难以保证施工质量的均一性,普遍存在“欠扎”或“过扎”现象。同时,由于筑炉工作量大,劳动强度高,筑炉施工环境较差,严重损害了筑炉工人的身体健康。另一方面,人工筑炉效率较低,1 台电解槽筑炉需要 6 ~ 7 d(按 8 h/d 计算),不能充分发挥整体成型工艺的优势。鉴于此,本文基于前期对筑炉工艺的研究,研发设计了整体成型阴极筑炉机器人,旨在消除人为因素的影响、提高筑炉施工效率和质量、助力整体成型工艺的应用实践。

2 筑炉工艺

2.1 筑炉区域

整体成型阴极筑炉工艺技术研究以某厂 200 kA 电解槽作为实验平台,筑炉区域如图 2 所示。从图中可以看出,钢棒筑炉区域、底部筑炉区域、侧部筑炉区域结构有明显的差异。对于钢棒筑炉区域,由于受到钢棒周期性间距变化的影响,布料过程、振打过程均需采用适当的工具完成相关工序。对于底部筑炉区域,其与侧部筑炉区域交界是传统阴极破损

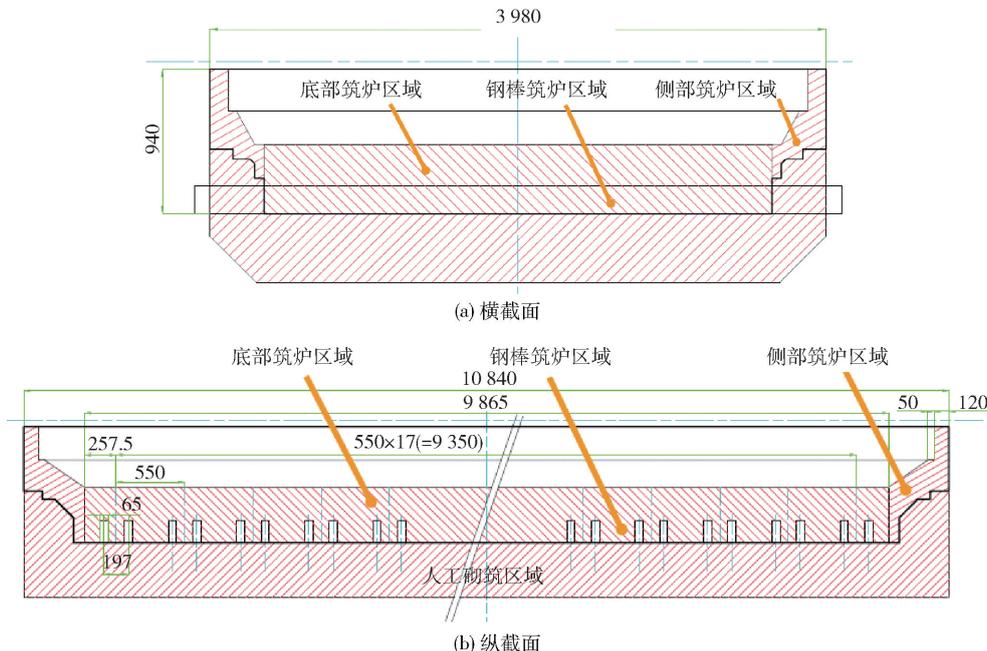


图 2 200 kA 铝电解槽筑炉区域
Fig.2 Lining zone distribution of 200 kA aluminum reduction cell

的主要位置之一,且两侧炉料不同。对于侧部筑炉区域,其不仅有斜坡,还有台阶等形状,人工筑炉时需要加装模具进行筑造。

2.2 筑炉工艺流程

整体成型工艺人工筑炉施工工艺流程如图3所示。在人工筑炉施工过程中,钢棒间部位及上侧部因为宽度较小(120 mm左右),需要采用手持式人工捣固机进行振打作业。槽底平面部位及人造伸腿(斜坡)部位采用振动冲击夯和振动平板夯进行振打作业;上侧部及人造伸腿(斜坡)部位的筑炉作业需采用专用模具且斜坡部位采用人工减材实现。通过分层捣固压实、测量布料厚度和振打厚度,严格控制各层材料的压缩比,逐次完成整体成型。本文将基于上述工艺流程开展筑炉机器人研发设计工作。

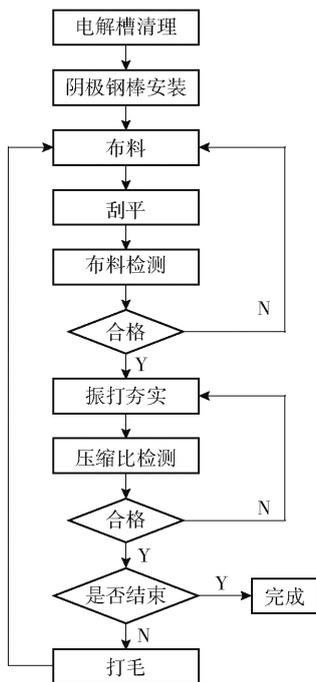


图3 整体成型阴极人工筑炉施工工艺流程

Fig. 3 Manual construction process flow of monolithic preformed cathode lining

3 筑炉机器人系统构成

考虑到整体成型阴极自动筑炉过程中,布料、振打、检测等作业需要遍及电解槽全部区域,且周边槽处于正常生产状态,因此筑炉机器人应具备自动行走、自动布料、自行振打、筑炉情况自动监测及电磁兼容等功能。为此,整体方案拟定筑炉机器人由执行机构、感知系统、控制系统组成,并增加电磁兼容

设计确保系统在强磁环境下正常工作。执行机构主要实现自动布料和振打等筑炉作业的实施,主要包括桁架机构、布料机构和振打机构。感知系统完成对布料高度和振打后的三维外形的监测和反馈,并将其与工艺卡中规定的所需三维外形之差异反馈给控制系统。控制系统基于筑炉施工检测数据,通过控制算法控制执行机构实施后续布料、振打作业。电磁兼容设计主要解决数据传输稳定性和可靠性,避免被强磁场所干扰。

采用筑炉机器人开展整体成型阴极筑炉施工时,由系统控制的筑炉机器人逐层、逐行进行内衬材料的直接布料、振打,从底层向上层依次开展作业。每层料、每行料的作业完成后,系统均需要对该层料、该行料的作业结果进行监测和反馈,包括对布料高度、振打后的三维外形进行监测,将其与工艺卡中规定的所需三维外形之差异反馈给控制系统,并进行结果分析,从而指导后续的布料、振打作业。

4 执行机构设计

4.1 桁架机构

分析现有行走机器人、关节机器人和桁架机器人等多种方案,考虑到机器人行走时跨距较大,负载较重,筑炉机器人的自行走功能采取如图4所示的四轴搬运桁架机械手,实现 xyz 直线轴和一个旋转轴4个自由度运动,具体参数详见表1。机器人整体安装在摇篮架上,通过机械手实现对 $14\ 000\ \text{mm} \times 4\ 700\ \text{mm} \times 1\ 060\ \text{mm}$ 槽内衬区域的全覆盖,其中 x 轴行走方向沿摇篮架纵向, y 轴行走方向沿摇篮架横向, z 轴行走方向沿铅垂方向, z 轴末端转动 360° ,主要实现对侧块及四角区域的操作。为了便于数据采集和控制,将机械手的零点位置设置在固定桁架

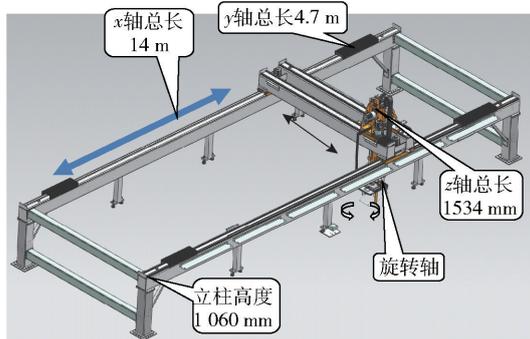


图4 桁架机构设计图

Fig. 4 Design drawing of the gantry mechanism

上一点,据此控制各作业施工时机械手末端的位置和姿态。

表1 四轴搬运桁架机械手参数

Table 1 Technical parameters of 4-axis gantry manipulator for material handling

参数	取值
机械手末端负载/kg	100
末端3 m半径处综合定位精度/mm	±5
末端抗扭扭矩/(N·m)	100
行程/mm	≥9 000
总长度/mm	14 000(不限定)
x轴	
重复定位精度/mm	< ±5
绝对位置精度/(mm/9 m)	< ±10
最大运行速度/(mm·s ⁻¹)	500
行程/mm	3 000
总长度/mm	4 700(不限定)
y轴	
重复定位精度/mm	< ±5
绝对位置精度/(mm/m)	< ±5
最大运行速度/(mm·s ⁻¹)	500
行程/mm	800
到达高度(法兰相对地面)/mm	500~2 500
z轴	
重复定位精度/mm	< ±5
绝对位置精度/(mm/m)	< ±5
最大运行速度/(mm·s ⁻¹)	500
角度范围/(°)	±360
旋转轴	
绝对位置精度/mm	< ±5(在半径1 000 mm处误差)
最大运行速度/((°)·s ⁻¹)	5

4.2 布料机构

前期试验研究结果表明,筑炉原料呈现多粒度分布,且具有一定的黏性。布料机构不仅需要达到一定的布料速度,而且需要保证这种多粒度分布介观稳定、宏观均匀。同时,由于温度变化对炉料性能有很大影响,因而不能采用会引起炉料温度剧烈变化的输送方式。这限制了布料机构的可选方案。通过试验和调研发现,当采用料斗进行布料时,由于黏性影响,炉料在料斗中易粘结成块,无法依靠重力自然下落。即使将出料口扩大,炉料仍会在出口附近粘结,一定时间后再次堵死出料口。因此,采用自重布料方式是不可行的。当采用气力输送布料时,由

于不同粒度输送速度不一致,小颗粒速度快,大颗粒速度慢,输送过程中存在不同粒度颗粒间分离,导致介观形貌失稳,从而导致宏观不均,出口炉料不能直接用于筑炉施工,因此气力输送布料也不具有可行性。综合现场调研和试验研究成果,最终采用无轴螺旋输送布料方案,如图5所示。该方案主要优点如下:①结构紧凑,适用于有限筑炉空间的情况;②动力输送避免炉料黏性影响,不易粘接,可实现连续运转;③可通过对电机转速和螺距选择实现对布料量的精确控制,满足精准布料需求。

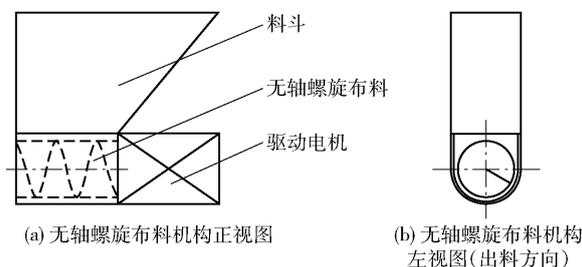


图5 无轴螺旋布料机构

Fig. 5 Shaftless screw feeding assembly

4.3 振打机构

振打作业是筑炉施工最重要的环节,在传统电解槽内衬筑炉过程中,夯实密度是评判电解槽筑炉质量优劣的重要参数指标^[10]。在前期试验中^[11],研究了0.4 MPa、0.6 MPa及0.8 MPa的振打压力下制作的整体阴极。采用相同的温升曲线经燃气焙烧后的振打阴极炭块试样,依据YS/T623^[12]铝电解用石墨质阴极炭块的相关标准要求分析检测了体积密度、抗折强度、抗压强度等理化指标,结果如图6所示。分析结果表明,振打压力与体积密度、抗折强度、抗压强度等呈指标正相关,与电阻率呈负相关,同时,随着振打压力的增大,阴极炭块分层现象得到

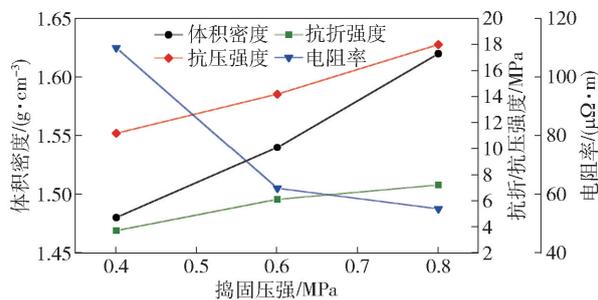


图6 捣固压强与阴极试样理化指标间关系

Fig. 6 Correlation between ramming pressure and physicochemical properties of cathode samples

明显改善。因此,在筑炉时的振打压力应保持在 0.8 MPa 及以上。

在人工筑炉施工过程中,振打工具主要有凿岩机改造的捣锤、平板夯和振动夯等,均需要人工操作,主要性能参数如表 2 所示。3 种设备工作原理相同,均为

外力驱动捣锤反复捣固振打,筑炉机器人据此考虑将类似机构安装在机械手上模拟该动作。根据前期试验结果,当振打压力达到 0.8 MPa 以上时,阴极试样的电阻率等理化指标才满足现有技术标准的要求。采用该压力与作用面积乘积可以算出冲击力不小于 10 kN。

表 2 人工筑炉振打工具性能参数

Table 2 Performance parameters of manual furnace vibration tools

名称	型号	参数	取值
振动平板夯	HZD-120	离心力/kN	18
		离心深度/mm	30
振动冲击夯	HCD-100	冲击力/kN	2
		冲击能量/Nm	90
		冲击次数/(次·min ⁻¹)	460~650
凿岩机	YO20	冲击力/kN	0.5
		冲击功/J	≥26
		冲击频率/Hz	≥33

振打机构由吊葫芦、支撑板、活动定位板、石墨铜套、两侧防偏板、冲击夯扶手、仿手前推板、冲击夯等构成,结构示意图如图 7 所示。将冲击夯扶手固定在仿人手前推板以及活动定位板上;吊葫芦勾住

连接板拖动桁架上下移动,桁架工作时,吊葫芦挂钩往下放一定的线,使冲击夯能自由冲击(上下浮动),前后由仿手前推板向前推动,加长石墨铜套受力。

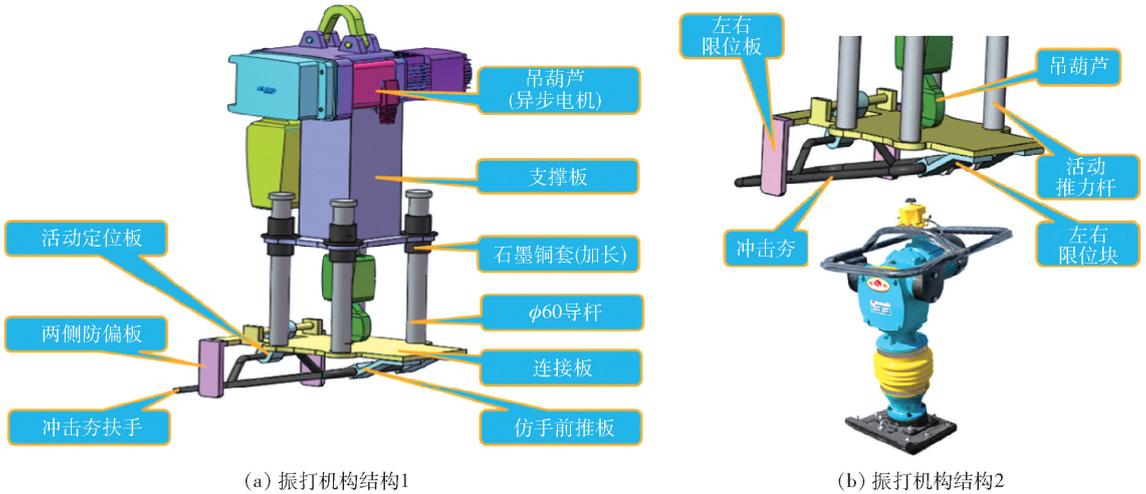


图 7 振打机构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the ramming mechanism

5 感知系统设计

5.1 感知系统功能

为实现自动筑炉作业,在整体成型阴极筑炉过程中,对每次布料结果和捣固振打结果的三维外形进行监测,并将结果与预设工艺结果的三维外形差反馈给控制系统,从而指导布料与捣固振打作业。将 3D 扫描系统的结果拼接成一张完整的点云图形,其材料研究人员也可及时了解和分析材料捣固

的效果,分层、行的外形监测结果合并后可形成材料捣固结果的整体三维模型,为后续的材料工艺技术改进提供了依据。感知系统工作流程如图 8 所示。

根据实际需求,感知系统应包含以下功能。

- 1) 位置检测,可采集三维曲面上任意点的三维坐标信息;
- 2) 三维建模,可虚拟构建三维炉膛外观形貌;
- 3) 布尔运算,可对虚拟的三维炉膛与理论炉膛进行比较、分析和计算,获取筑炉施工过程中布料

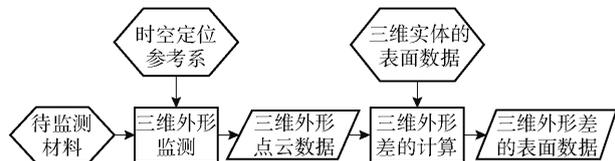


图 8 感知系统工作流程

Fig. 8 Workflow of the perception system

量、振打高度等工艺参数信息；

4) 信息交换, 可与控制系统进行数据交换。

5.2 感知系统设计

感知系统采用线激光传感器及其配套设备, 并与执行机构的实时定位信息相结合, 实现外形监测的目的。感知系统由线激光传感器、激光测距仪、电缆和管线、控制软件等组成。

传感器、测距仪、电缆和管线需要在已有机械装置上安装布置, 控制软件需要用传感器的开发包来定制开发, 并与机械装置的已有控制软件进行接口。传感器的定位控制, 主要由控制软件从机械装置的已有控制软件接口中获取实时定位信息。也可使用间隔标识进行平差, 以提高定位可靠性。

5.3 感知系统数据处理

通过感知系统扫描得到的三维线状点云数据, 经时空定位参考系转换后, 可合并形成如图 9(a) 所示的三维点云数据, 设置相应生成参数后, 将点云转换成如图 9(b) 三维表面。图中三维表面由若干个三角形组成, 三角形的颜色是白色, 蓝色小短线表示三角形顶点的法向。点云中的每个点是三角形的顶点。生成参数包括顶点搜索距离、角度等, 可在实际工程试验时找到合适的缺省参数。生成完三维表面数据后, 可以读入捣固振打目标的三维模型, 用三维面求交功能, 实现用三维点云的表面数据剪切三维模型, 并得到三维外形差的计算结果。将计算结果存入数据文件。

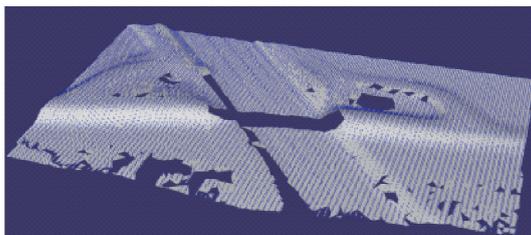
6 电磁兼容设计

以某厂 500 kA 电解槽为测量对象, 实测电解槽中磁场的空间分布, 在检测电解槽的磁场分布时, 以电解槽的供电侧为出发点, 非供电侧为终止点, 在此区间内沿中的 3 个空间方向, 利用磁场检测设备进行检测, 得到了电解槽周围磁场的分布状态, 如图 10 所示。

本系统中被测的电压信号是微小信号, 只有几



(a) 经时空定位参考系转换后的三维点云图



(b) 从三维点云生成的三维表面图

图 9 点云数据转换成的三维表面图

Fig. 9 3D surface map converted from point cloud data

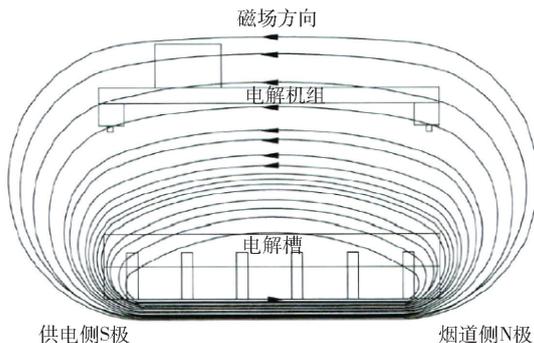


图 10 电解槽周围磁场分布

Fig. 10 Magnetic field distribution around the electrolytic cell

十毫伏, 而现场的电磁干扰严重, 既有电解槽本身产生的强大的直流磁场, 也有天车等大功率设备产生的交流干扰。用示波器录制的现场原始等距电压信号可以观察到, 信号波动的峰-峰值甚至可达几十毫伏。因此, 信号传输和调理电路的抗干扰设计就是一个很重要的内容。在监测系统中, 信号的传输采用屏蔽电缆, 调理电路采用了高共模抑制比的放大器和巴特沃斯滤波器, 各测量通道供电隔离, 从而实现了微小等距电压的测量。由于电磁干扰来源于铝电解槽, 本系统装备在电路元件、滤波部件、系统屏蔽、电缆布线、接地系统等多个方面采取相应的措施。

7 结论

在前期筑炉工艺研究的基础上, 本研究开发出

筑炉机器人样机,其关键结论归纳如下。

1)通过对筑炉工艺流程的解析及前期试验数据的分析,阐明了筑炉机器人需具备自动导航行走、物料自动布设与振实、布料过程在线监测与闭环反馈以及电磁兼容防护等核心功能特性。

2)通过采用集成创新方法,本研究设计并实现了无轴螺旋布料机构、振动压实机构、自主移动机构等核心执行系统,并构建了相应的感知与控制系统。该机器人样机的成功运行,标志着人工筑炉工艺向自动化方向迈出了关键一步,为筑炉质量的稳定提升奠定了重要的技术基础。

[参考文献]

- [1] 刘业翔,李劫. 现代铝电解[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008.
- [2] 侯金龙,欧朝宇,闫飞,等. 240 kA 系列化铝电解槽深度节能改造和电流强化实践[J]. 有色设备, 2023, 37(4): 8-13.
- [3] 张树生. 施工过程中提高铝电解槽寿命的几种方法[J].

- 山西建筑, 2009, 35(18): 116-117.
- [4] 刘驰. 延长石墨化阴极铝电解槽寿命的探析[J]. 有色设备, 2021, 35(6): 96-100.
- [5] 李伟波,杨幸雨. 大型铝电解槽槽壳结构变形与槽寿命关系及校正措施论述[J]. 有色设备, 2021, 35(6): 15-21.
- [6] 侯金龙,胡红武. 500 kA 铝电解槽新式节能阴极结构技术的应用研究[J]. 有色设备, 2018, 32(4): 19-22.
- [7] 王新华,陈才荣,吴中鼎. 铝用冷捣糊压实特性仿真研究[J]. 云南冶金, 2019, 48(6): 66-70, 74.
- [8] 张嘉,曹斌,邓翔,等. 整体成型阴极炭块分层现象研究[J]. 轻金属, 2022(11): 39-44.
- [9] 邓翔,曹斌,张嘉,等. 整体成型阴极实验排烟分析及控制[J]. 轻金属, 2021(5): 60-62.
- [10] 闫朝宁,颜非亚,路辉,等. 阴极焙烧实验平台燃气控制系统[J]. 轻金属, 2023(5): 59-62.
- [11] 莫顿·索列,哈拉德 A. 欧耶著. 铝电解槽阴极[M]. 彭建平,王耀武,狄跃忠,冯乃祥译. 北京:化学工业出版社, 2015.
- [12] 铝电解用高石墨质阴极炭块. YS/T 623—2007[S].

Design and study of robotic system for monolithic cathode lining construction

WU Zuhuai¹, HE Fei^{2*}, ZHAO Zebo^{3*}, WU Zhongding⁴, ZHANG Jia¹, TAN Shanwei¹

(1. Guiyang Aluminum Magnesium Design & Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

2. Guizhou Branch of CHALCO, Guiyang 550081, China;

3. School of Physics and Mechatronic Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;

4. Department of Mechatronic Engineering, Guizhou Communications Polytechnic University, Guiyang 551400, China)

Abstract: To address the challenges of low efficiency and inconsistent quality in traditional furnace-lining processes for aluminum electrolysis cells, this study proposes an automated robot system based on integrally formed cathodes. Analysis of the furnace-lining process in 200 kA aluminum electrolysis cells identified manual construction as the primary cause of defects such as lining cracks and delamination, attributed to insufficient compaction pressure (< 0.8 MPa) and uneven temperature distribution. Key performance metrics—including bulk density, resistivity, and compressive strength—were found to fall below industry standards. To address these constraints, a robotic furnace-lining system was developed, integrating shaftless spiral material distribution, vibration compaction, a four-axis gantry mechanism, and 3D laser monitoring. The system achieves autonomous navigation, automated material placement, self-regulated compaction, real-time process monitoring, and electromagnetic compatibility (EMC). Implementation reduced the furnace-lining cycle per cell from 6–7 days (manual operation) to 3 days, providing an innovative solution for high-efficiency, high-precision furnace construction. This advancement supports cost reduction, operational optimization, and intelligent transformation in industrial practice.

Keywords: aluminum electrolysis cell; monolithic cathode; potlining robot; four-axis gantry; 3D point cloud data

