

引用格式:杨广,彭宏道,黄剑飞,等.大极板铅始极片制造和快速转运关键技术与应用[J].有色设备,2025,39(2):70-75.

YANG Guang, PENG Hongdao, HUANG Jianfei, et al. Key technology and application for manufacturing and rapid transportation of large plate lead cathode[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 70-75.

大极板铅始极片制造和快速转运关键技术与应用

杨 广, 彭宏道, 黄剑飞, 熊家志, 严佳成, 范志刚

(江西瑞林装备有限公司, 江西 南昌 330032)

[摘 要] 现有企业生产使用的大极板铅始极片制造机组存在占地面积大及铅始极片二次转运易变形等缺陷, 导致铅始极片入槽后阴阳极板间易发生短路。本文提出了一种全新的铅始极片制造机组布置方式和快速转运方法。铅片在水平状态完成裁切并装填导电棒压铆后, 通过翻板装置将成片的铅始极片由水平翻转至竖直状态, 机器人将处于竖直状态的铅始极片转运至压纹装置内, 再将压纹后的始极片插入至阴阳极自动排距机的阳极板之间。通过在机器人的作业空间范围内, 合理设置翻板装置、压纹装置以及阴阳极自动排距机工位的相对位置, 尽可能缩短转运距离; 转运过程中合理规划机器人的运行轨迹, 最大限度地减少垂直板面的运动, 降低了铅始极片二次转运的碰撞变形风险。工业生产实践表明, 该机组布局紧凑, 能够减少占地面积、节约投资成本、减少铅始极片在二次转运过程中的变形。

[关键词] 大极板铅始极片; 机组布置; 轨迹规划; 铅电解; 精炼; 转运

[中图分类号] TF812

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)02-0070-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.009

铅电解精炼技术中周期大极板的铅电解工艺具有生产成本低、电能消耗低、短路现象少、残极率低和易于实现自动化作业等优势, 近年来, 在我国得到了迅速发展^[1]。由于大极板本身有效面积达 2.0 m^2 , 厚度仅有 0.9 mm , 同时金属铅塑性好且强度低, 在铅始极片转移过程中, 很难保证铅始极片的垂直度, 入槽后很容易在电解槽内造成阴阳极之间短路, 影响铅电解的电流效率和产量。本文拟通过重新设计铅始极片阴极制造机组成片过程和转运路线, 解决现有铅始极片制造机组占地面积大、成片后的铅始极片垂直度差、入槽通电后容易短路和电流效率低等问题。

1 铅始极片设备应用现状

1.1 设备占地面积大

孙湘等^[2]介绍了早期的铅始极片自动生产线, 包含制片机、牵引装置、飞剪、送片机、压合装置、提升机和排片机, 解决了传统铅始极片人工生产过程中的环境温度高、劳动强度大和作业危害等问题。

2005 年云南驰宏锌锗公司第一次引进了日本的大极板铅阴极制造机组生产成套设备(图 1)^[3]。大极板铅阴极制造机组由铅卷开卷机、成型机、倾斜输送机(含移栽装置)、横向步进输送机、压纹机、点焊机、矫平机、移栽机、插入机等组成, 该设备的引进有效解决了生产的稳定性问题。国内各大铅始极片设备制造厂均在该进口设备基础上进行了小幅度改进, 但整体布局和结构大致保持不变。以进口设备为例, 铅皮需要在水平状态完成开卷、卷边和导电棒装入等工序, 通过倾斜输送机将始极片运送到二楼平台的横向步进输送机, 完成点焊和压纹等工序, 最后经过移栽机和插入机放入阴阳极自动排距机组排距, 经自动行车吊装送入电解槽进行电解。采用此布置方式, 设备横向尺寸约为 10.6 m , 纵向尺寸约为 15.9 m , 高度尺寸约为 5.8 m , 占地面积大, 投资成本高, 不利于操作人员观察、操作和日常生产维护。

1.2 转运过程中易造成变形

现有设备在完成制片后, 需要经过横向步进输

[收稿日期] 2024-11-20

[第一作者] 杨广(1989—), 男, 江西吉安人, 硕士, 工程师, 主要从事冶金非标设备设计工作。

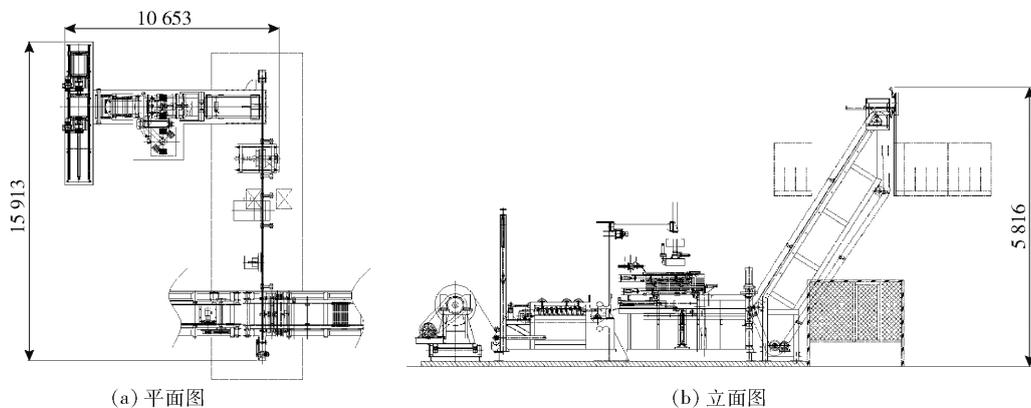


图1 进口设备铅阴极制造机组布置

Fig. 1 Layout of the imported lead cathode manufacturing machine

送机横向输送、移载机纵向转运和插入机竖直插入到阴阳极自动排距机组内。多次的转运对铅始极片垂直度影响较大,通常铅阴极板影响垂直度的主要因素有:1) 阴极板压纹纹路设计不合理,压纹深度不够,板面刚性差;2) 阴极压纹整平后,在进入电解槽之前产生了二次变形^[4]。彭宏道等^[4-5]通过在铅始极片模具增加倾斜方向的加强筋、控制压纹油缸参数和合理选择模具材料等3种方法,将阴极片的平面度控制在2~3 mm内,并提出了一种竖直插入始极片的方法。该方法在铅始极片制作过程中解决了垂直度问题,但是对于二次转运过程中影响垂直度的因素未做深入探讨。为了减少二次转运过程中始极片变形对悬垂度的影响,机器人运行时末端应稳定无冲击,对于工业机器人轨迹规划中避免冲击的问题,通常采用三/五次多项式^[6]或者S形曲线^[7]对轨迹进行插值,保证机器人末端的稳定,降低机器人末端的冲击。

2 设备优化技术方案

2.1 新的铅阴极制造机组主要工作流程和位置布置

针对现有方案铅始极片在压纹整平后二次转运后容易发生变形的问题,在设备结构上采用了新的优化结构和布局(图2)。新的铅阴极制造机组由开卷装置、卷边装置、制片装置、冲孔和电阻焊装置、翻板装置、机器人转运装置和压纹装置组成。铅卷经过开卷装置展平后,在卷边装置将铅皮两外侧折边,定尺裁切和插入导电棒后,送入冲孔及电阻焊装置,将包裹住的铅皮进行电阻焊固定,并将导电棒与铅皮包实,同时在水平姿态对铅始极片进行电阻焊和

冲孔翻边铆接后,步进机构再将始极片送至翻板装置内。翻板装置勾住导电棒两边后将水平状态的铅始极片翻转为竖直状态,供机器人抓取。机器人从翻起的翻板装置上取板并放入压纹装置进行压纹。经过压纹后,板面强度得到强化,再由机器人抓取将其插入到阴阳极自动排距机组内。为了满足生产的需要,在压纹工位设置有2个压纹工位,机器人则需要交替从2个压纹工位取放板。

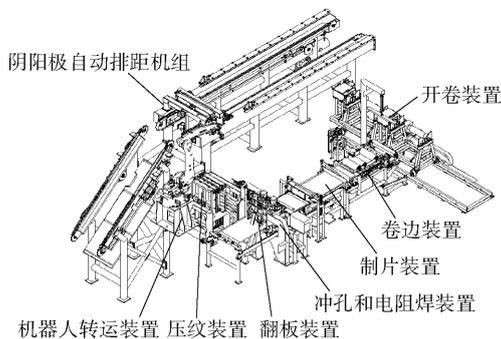


图2 铅阴极制造机组的组成

Fig. 2 Composition of the lead cathode manufacturing machine

如图3所示,在设置翻板装置、压纹装置和阴阳极自动排距机组插入位置三者的相对位置时,应尽量限制铅始极片沿垂直于铅始极片板面方向的运动范围,将翻板装置的取板工位A、压纹装置的压纹工位C和阴阳极自动排距机组的插入的终点位置D在Y方向设置在同一坐标值,将取板工位和插入工位D设置在Z方向设置在同一高度。同时,在满足结构等相关限制的条件的前提下,将压纹工位B和C的相对位置尽量靠近。为了满足铅始极片快速转

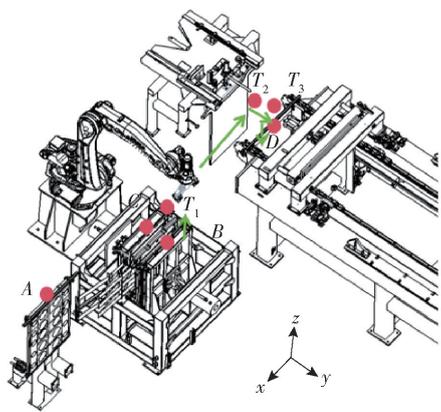
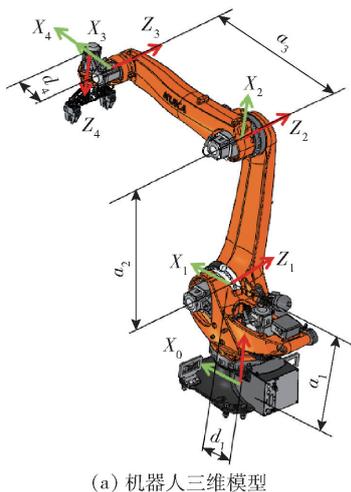


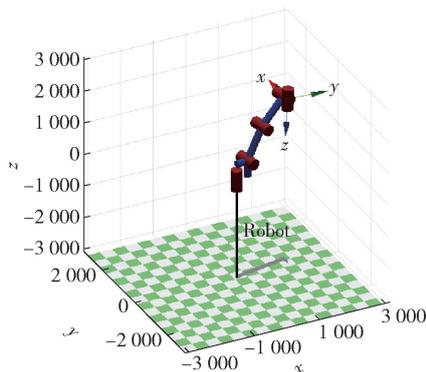
图 3 翻板装置、压纹装置和插入位置的相对位置关系

Fig. 3 Relative positions of the flipping device, embossing device and insertion position

运的要求,在翻板工位 A、压纹工位 B 和压纹工位 C 之间设置挡板,当机器人沿 x 方向转到压纹工位



(a) 机器人三维模型



(b) 机器人运动学模型

图 4 机器人三维模型及运动学模型

Fig. 4 3D and kinematic model of the robot

利用上述的运动学模型,结合表 1 中各关节可运动范围,得到机器人的可达作业空间,如图 5 所示。根据在 2.1 节中确定好的取板 A、压纹工位 B 和压纹工位 C 和插入放板位置 D 相对位置关系,选定机器人基座的位置,使各个工位均位于机器人的作业空间内,同时尽量缩短始极片的转运距离。

本文以从压纹工位 B 取出放置到插入工位 D 这一段转运轨迹作为分析对象(图 5)。首先机器人从压纹工位取出后,需要先往 z 轴方向提起至 T₁,将板身高过压纹装置的底部横梁,其次顺着垂直于板

B 和压纹工位 C 时,有效抑制板面底部的摆动,确保将铅始极片导入到压纹装置内进行压纹处理。

2.2 成型后铅始极片的转运

始极片在经过压纹工位压纹后,应严格保证其板面平面度以及板身与触点平面的垂直度。铅始极片从压纹工位 B 和压纹工位 C 转运至插入位置 D 的过程中,需确保平面度和垂直度的要求,并实现快速转运,要求机器人末端执行器不得有急剧的加减速,需要对这两段转运轨迹进行合理的规划,确保各个关节平滑运行。

为了方便描述机器人末端执行器对于基座的位置关系,使用标准 D-H (Standard D-H) 表示方法对铅始极片制造机组中用于转运始极片某品牌的五轴机器人进行运动学建模,各坐标系建立和参数如图 4(a) 所示,由此可得到如表 1 所示 D-H 参数表格。采用 Matlab Robot Toolbox 工具箱,利用表 1 中的 D-H 参数得到该机器人映射模型,如图 4(b) 所示。

表 1 机器人的 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of the robot

参数	$\Theta_n / (^\circ)$	d_n / mm	a_n / mm	$\alpha_n / (^\circ)$
关节 1	-185 ~ 185	$d_1 (485)$	$a_1 (375)$	90
关节 2	-140 ~ -5	0	$a_2 (1035)$	0
关节 3	0 ~ 165	0	$a_3 (1015)$	0
关节 4	-55 ~ 150	$d_4 (185)$	0	90
关节 5	± 350	0	0	0

身方向沿 x 轴方向移动 T₂, 往 y 轴方向移动到 T₃,

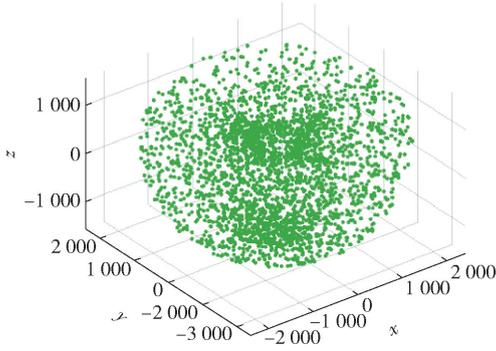


图5 机器人的作业空间

Fig. 5 Robot reachable workspace

最后放置到插入工位 *D*。在笛卡尔坐标系空间对此转运过程使用五次多项式插值,得到如图6所示的机器人轨迹。利用插值得到的三维坐标点,进行机器人逆动力学运算,得到各个关节的转角,确保末端执行器在整个过程中不会发生速度的突变,在确保铅始极片快速转运的过程中,避免由此过程引起的二次变形。

3 应用效果

重新设计布局的铅始极片制造机组,将全部装置布置在同一个平面,同时将导电棒装填动作由2个工位压缩到1个工位完成,将进口设备中冲孔

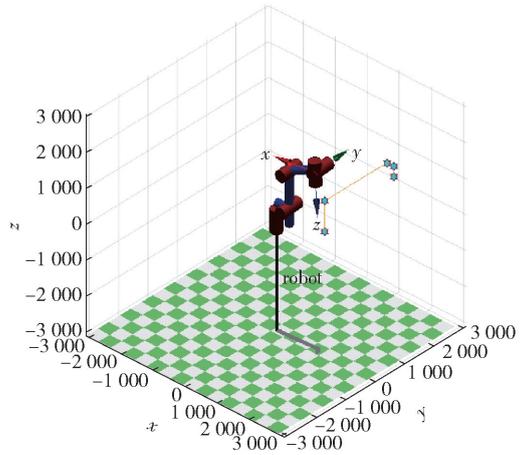


图6 机器人转运轨迹

Fig. 6 Robot transfer trajectory

压铆及电阻焊接2个工位压缩到1个工位完成,减少了设备的占地面积,取消了提升链运机及二楼平台,为操作人员日常观察、生产操作及维护保养提供了便利条件。在水平完成装填导电棒后,使用翻板装置将铅始极片翻转到垂直状态。在翻转过程中,翻板架承托铅始极片板身,避免了进口设备上倾斜提升链运机在输送过程中铅始极片变形问题。如图7所示,采用新的布局后,设备横向尺寸、纵向尺寸和高度尺寸均有缩减,数据如表2所示。

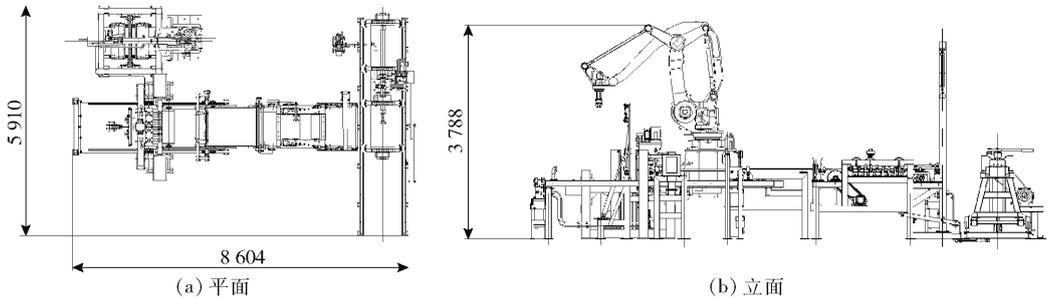


图7 阴极制造机组的新布局

Fig. 7 The new layout of the lead cathode manufacturing machine

表2 新旧布局铅阴极制造机组尺寸对比

Table 2 Dimension comparison of the two layouts of the lead cathode manufacturing machine

参数	进口设备/	新布局	缩小百分
	m	设备/m	
横向尺寸 <i>L</i>	10.6	8.6	-18.9
纵向尺寸 <i>W</i>	15.9	5.9	-62.9
高度尺寸 <i>H</i>	5.8	3.7	-36.2

通过合理控制翻板装置的取板位置、压纹装置和阴阳极自动排距机组插入位置的相对位置关系,使用机器人进行转运,利用了机器人的生产柔性,降低了安装过程中的精度要求。同时,由于机器人的高重复精度,能够精准控制铅始极片在自动排距机组上的相对位置,保证铅始极片与阳极板中心线对齐,可减少始极片左右两侧电力线密度不同而出现析出铅厚度不均匀、飞边毛刺和短路等现象。采用5次多项式插值规划压纹后始极片的转运轨迹,减

少始极片压纹后二次变形。图8为机器人在图3中机器人从 T_1 到 T_2 转运过程中机器人各关节的速度和加速度,从图中可以看到机器人在转运过程中,没

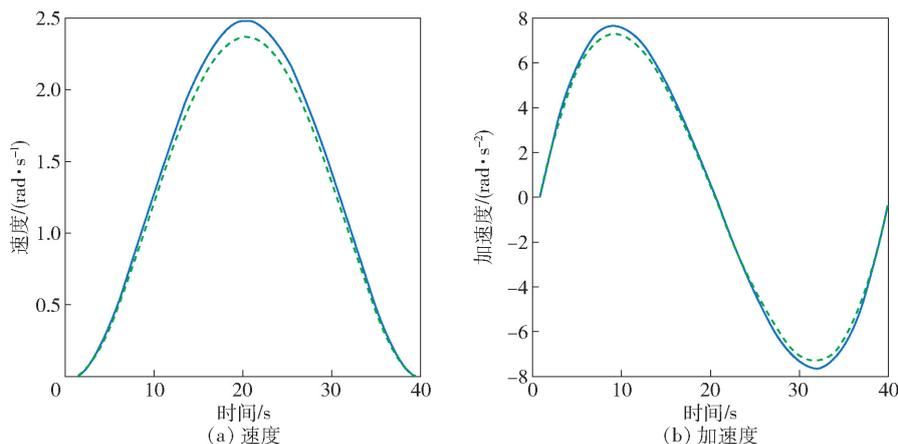


图8 机器人各关节速度和加速度曲线

Fig.8 Speed and acceleration curves of robot joints

采用技术优化后和新布局的铅始极片阴极制造机组的作业效率达到11.8 s/片,能够满足车间生产的使用要求。铅始极片制作完成后插入排距机组进行排距过程中,机器人运行轨迹平稳无冲击,能够确保铅始极片压纹后的垂直度。在某铅电解车间项目实测,采用本文所述方法,铅始极片排距后的垂直度小于 ± 8 mm。

4 结语

本文针对现有进口铅始极片阴极制造机组存在的占地面积大和二次转运易变形的问题,在其基础上进行了重新设计和布局,与现有进口设备相比,其具有以下优势。

1)使用翻板装置替代了倾斜输送机,将成片以后的铅始极片由水平状态变换为竖直状态。整个翻转过程中,翻板装置承托住铅始极片板面,使其在翻转过程中处于受控状态,避免了板身大幅度变形,并减少了进入压纹装置时的故障率。

2)使用机器人替代了横向步进输送机和移栽装置,将铅始极片插入到阴阳极自动排距机组内。通过建立使用标准的D-H矩阵对机器人运动学建模,求得机器人的作业空间。在机器人空间内,通过合理布置翻板装置、压纹装置和阴阳极自动排距装置的相对位置,缩短机器人的转运距离。

3)通过使用多项式插值的方法,合理规划机

有加速度的突变,转运过程平稳,可保证铅始极片的平面度和垂直度。

器人的转运轨迹,使插入到阴阳极自动排距机组的铅始极片转运过程中,机器人轨迹平稳,速度和加速度曲线连续,无冲击,保证了铅始极片成形后的垂直度。

4)将装填导电棒和包裹导电棒的工序由原来的2个工位压缩到1个工位,降低了设备的复杂度,减少了设备在长度方向的尺寸;采用机器人转运的方式减少了设备的宽度方向的尺寸,使得机备的整体尺寸比进口设备大幅减小,可降低厂房建设投资。在生产过程中,由于整个机组处于同一个高度,方便设备的日常操作和后期的维护保养。

5)使用机器人转运的方式,可通过小幅度修改机器人的轨迹方式来弥补其他装置的安装误差,降低了设备的安装要求。

[参考文献]

- [1] 闫琼琼,闫相林. 大极板铅电解过程的工艺控制[J]. 有色冶金节能,2022,38(2):58-60.
- [2] 孙湘,张国山. 铅始极片生产自动线设计与应用[J]. 有色设备,2002(3):12-14,17.
- [3] 李涛,张杰磊. 大极板铅电解工艺技术与应用[J]. 世界有色金属,2015(2):31-33.
- [4] 彭宏道,刘文彬,杨广,等. 铅电解设备相关技术改进与应用[J]. 有色冶金设计与研究,2024,45(4):24-27,57.
- [5] 邓爱民,彭宏道,熊家志,等. 铅始极片竖立及插入阳极排距系统:CN114808040A[P]. 2022-03-04.

[6] 张红彬, 常旭. 协作机器人分段式轨迹规划算法研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(7): 120 - 127.

[7] 杨锦涛, 姜文刚, 林永才. 工业机器人冲击最优的轨迹规划算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(28): 64 - 69.

Key technology and application for manufacturing and rapid transportation of large plate lead cathode

YANG Guang, PENG Hongdao, HUANG Jianfei, XIONG Jiazhi, YAN Jiacheng, FAN Zhigang
(Jiangxi Nerin Equipment Co. Ltd., Nanchang 330032, China)

Abstract: This paper addresses the issues of large occupation and the susceptibility of the lead cathode to deformation during secondary transportation in the large-plate lead cathode manufacturing machine currently used in industrial production, which often lead to short circuits between the anode and cathode after the cathodes are placed in the cells. A novel layout and rapid transportation method for the lead cathode manufacturing unit is proposed. After the lead sheets are cut and conductive rods are inserted in a horizontal state, a flipping device is used to rotate the formed lead cathodes from a horizontal position to a vertical position. An industrial robot then transports the vertically oriented cathodes to an embossing device. Once embossing is completed, the cathodes are inserted between the anodes of an automatic anode-cathode spacing machine. By optimizing the relative positions of the flipping device, embossing device, and automatic anode-cathode spacing machine within the robotic workspace, the transportation distance is minimized. Additionally, the robot's motion trajectory is carefully planned to reduce vertical movements relative to the sheet plane, thereby mitigating collision-induced deformation during secondary transportation. Industrial production practices demonstrate that this compact unit layout reduces the required occupation, saves investment costs, and minimizes deformation of lead cathodes during secondary transportation.

Keywords: large plate lead cathode; machine layout; trajectory planning; lead electrolysis; refining; cathode transfer

