

## 铝合金转向节自动化锻造生产线控制系统设计

白 鹭, 李思奇, 梁培新, 邵长斌, 袁红霞, 陈钰金, 高丙坤, 石一馨  
(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对铝合金锻造过程中存在的产品质量不稳定、生产效率低等问题, 以汽车铝合金转向节为研究对象, 进行了自动锻造生产线及其控制系统的设计。根据铝合金转向节的锻造工艺, 规划了铝合金转向节生产线的设备构成和整体布局, 分析了各工序主要设备的动作流程。设计了基于 PFOFINET 总线协议的生产线自动控制硬件系统和基于 PLC 的软件系统, 提出了基于 PLC 的结构化程序框架, 分析了铝合金转向节生产线的动作控制逻辑, 解决了自动锻造生产线程序逻辑不清、命令冗长和故障难以排查的问题, 提高了编程效率。生产试验表明: 该生产线设备布局合理, 可视化控制界面操作便捷, 生产节拍达到每件 22 s, 设备运行安全稳定, 生产线故障率低, 产品质量稳定。

**关键词:** 铝合金转向节; 锻造生产线; 自动化系统; 总线控制; PLC

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.030

**中图分类号:** TP273; TG315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0200-07

## Control system design on automatic forging production line for aluminum alloy steering knuckle

Bai Lu, Li Siqi, Liang Peixin, Shao Changbin, Yuan Hongxia, Chen Yujin, Gao Bingkun, Shi Yiqing  
(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In view of the problems of unstable product quality and low production efficiency in aluminum alloy forging process, for automobile aluminum alloy steering knuckle, the automatic forging production line and its control system were designed. Then, based on the forging process of aluminum alloy steering knuckle, the equipment composition and overall layout of aluminum alloy steering knuckle production line were planned, and the action flow of the main equipment in each process was analyzed. Furthermore, the automatic control hardware system of the production line based on PFOFINET bus protocol and the software system based on PLC were designed, the structured program framework based on PLC was proposed, and the action control logic of the aluminum alloy steering knuckle production line was analyzed to solve the problems of unclear program logic, lengthy command and difficult troubleshooting for the automatic forging production line and improve the programming efficiency. The production tests show that the equipment layout of production line is reasonable, the visual control interface is easy to operate, the production cycle reaches 22 s per piece, the equipment operates safely and stably, the failure rate of production line is low, and the product quality is stable.

**Key words:** aluminum alloy steering knuckle; forging production line; automation system; bus control; PLC

“双碳”战略目标对全社会提出了节能减排的要求, 汽车轻量化是节能减排的一个重要途径。铝合金作为轻量化材料在汽车零部件中的应用越来越广泛<sup>[1-2]</sup>。特别是近年来新能源汽车产业蓬勃发展, 铝合金零部件的市场需求量大幅上升, 国内锻造企业投建了大批铝合金锻造生产线。国外诸如 LASCO、SMS 等铝锻企业起步较早<sup>[3-4]</sup>, 生产线自动化

程度高、生产效率高, 但其引进成本高、供货周期长、跨境售后服务不便利。国内的许多厂商、科研院所也纷纷开展了铝合金自动锻造生产线业务, 但其自动化程度低, 部分生产线采取半自动化甚至手工锻造的生产方式, 导致产品质量不稳定、生产效率低、人工成本高等问题。因此, 必须提升整体生产线的自动化水平和生产效率, 才能使锻造企业提升市场竞争力和占有率<sup>[5]</sup>。

本文主要针对汽车用铝合金转向节的锻造工艺, 进行了自动锻造生产线及其控制系统的设计, 适用于规模化生产, 控制逻辑简洁、安全, 大幅提高了锻造生产线的生产效率。

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2023-09-06

作者简介: 白鹭 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 997137378@qq.com

通信作者: 石一馨 (1982-), 男, 学士, 研究员

E-mail: shiyiqing1005@163.com

## 1 铝合金转向节的锻造生产线设计

某汽车用铝合金转向节锻件的生产工艺流程如

图 1 所示，主要为：下料—加热—镦粗—预锻—终锻—切边。

本文基于图 1 中的工艺设计了汽车铝合金转向节锻造生产线，其布局如图 2 所示。该生产线以

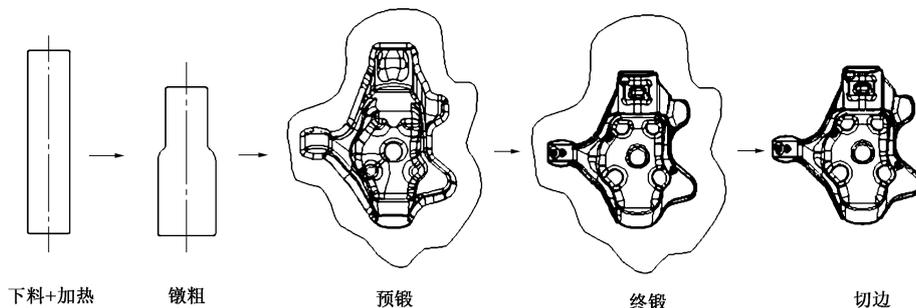


图 1 铝合金转向节的锻造工艺流程

Fig. 1 Forging process flow of aluminum alloy knuckle

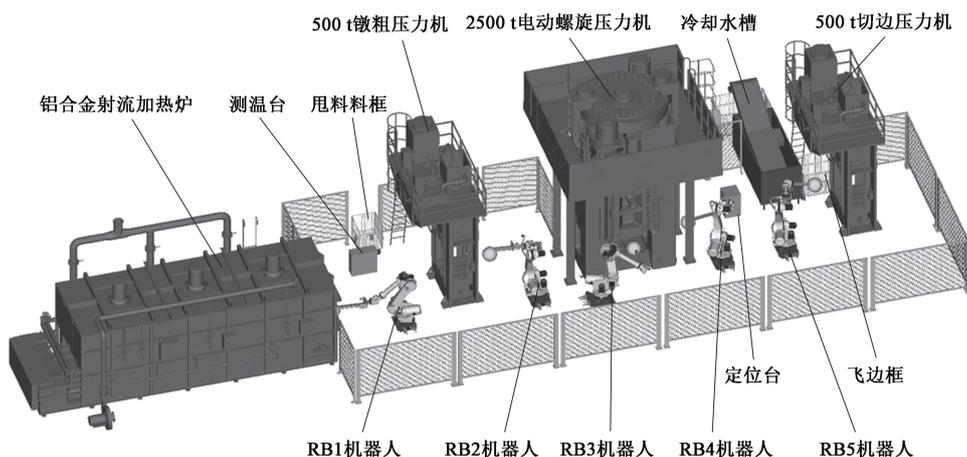


图 2 铝合金转向节的锻造生产线布局图

Fig. 2 Layout diagram of forging production line for aluminum alloy knuckle

2500 t 电动螺旋压力机为主机，此外，还包括铝合金加热炉、500 t 镦粗压力机、自动上下料机器人 (RB1、RB2、RB4、RB5)、喷涂机器人 (RB3)、500 t 切边压力机和冷却水槽等辅机设备。由于铝合金的锻造温度范围窄<sup>[6]</sup>，锻造时需对坯料进行严格控温，在 500 t 镦粗压力机和 2500 t 电动螺旋压力机上均设计了模具加热控温系统，以补偿锻造过程中坯料与模具接触时的温降。为解决铝合金锻造时易粘模的问题<sup>[7]</sup>，设计了脱模剂喷涂系统，具有脱模剂自动配比和自动喷涂功能<sup>[8]</sup>。在 RB2 机器人上安装带有喷嘴的喷涂臂和夹爪，可对镦粗模具型腔进行喷雾润滑，并将坯料从镦粗模具抓取至预锻模具。在 RB3 机器人上安装带有喷嘴的喷涂臂，可对预锻和终锻模具型腔进行喷雾润滑。

工作时，铝合金转向节锻造生产线上的设备按

照工艺要求依次或同步动作，如图 3 所示。采用铝合金专用的射流加热炉对铝合金棒料进行加热；随后 RB1 机器人从加热炉内抓料放至出炉测温定位台，同时，RB2 机器人对镦粗模具型腔进行喷雾润滑。若温度合格，RB1 机器人则将棒料抓至 500 t 镦粗压力机进行镦粗；若料温不合格，则抓料至甩料料框。RB3 机器人按设定轨迹对预锻型腔进行喷雾润滑，RB2 机器人将镦粗后棒料放至 2500 t 电动螺旋压力机上的预锻型腔进行预锻。RB4 机器人将预锻件移至终锻型腔（此时 RB3 机器人对预锻型腔进行喷雾润滑），并将终锻件抓出放至中转定位台（此时 RB3 机器人对终锻型腔进行喷雾润滑）。RB5 机器人将终锻件从中转定位台移至 500 t 切边压力机，切边完成后，RB5 机器人抓取零件放至水槽，同时抓取飞边放至飞边框。

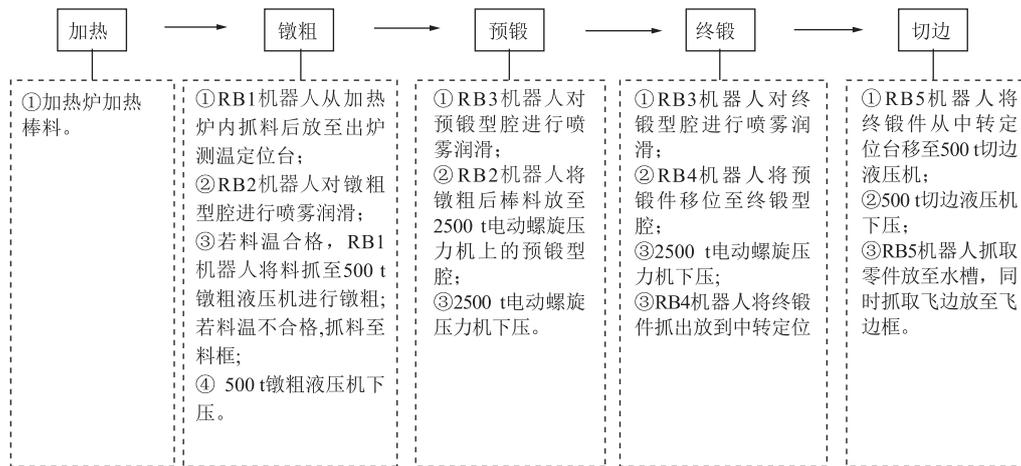


图 3 生产线动作流程图

Fig. 3 Action flow chart of production line

## 2 生产线自动化控制系统设计

针对上述铝合金转向节锻造生产线,进行了自动化控制系统的设计,包括硬件系统和软件系统两部分。

### 2.1 硬件系统设计

生产线采用现场总线控制技术<sup>[9-10]</sup>,现场总线控制系统可以将生产线在同一局域网内实现设备互联,具有简单、可靠和实用等优势。选用西门子1515F-2PN做为总控PLC<sup>[11]</sup>与各设备进行通讯,

通讯协议采用 PFOFINET。PLC 向生产线的设备发出指令,控制各设备的动作并监控其运行状态,图 4 为生产线的通讯网络拓扑图。人机界面选用西门子 KTP1200 Basic 触摸屏,可通过触摸屏显示设备状态和生产数据、写入生产工艺参数和监控生产线运行状态。此外,西门子 1515F-2PN 是安全型 PLC,采用冗余控制的工作方式,具有 CPU 处理自检、电源监视自检以及安全输入输出点电路板状况的自检功能,搭配安全输入输出模块以及专用安全逻辑程序,可有效保证生产线的安全、可靠运行。

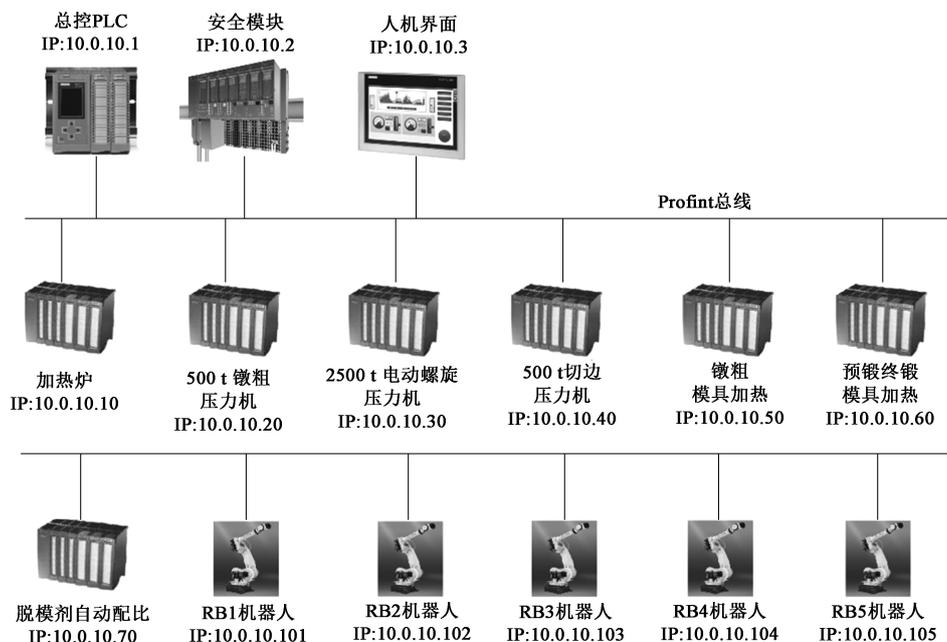


图 4 生产线的通讯网络拓扑图

Fig. 4 Communication network topology diagram of production line

### 2.2 软件系统设计

该锻造生产线的工艺流程长，设备与辅助系统多，若软件系统的程序架构设计不当，会导致程序命令冗长、逻辑混乱，将耗费大量精力编程且不易排查问题。为方便 PLC 编程和设备调试，本文提出了一种 PLC 程序结构框架，可应用于类似的锻造生产线中，大幅提高编程效率。

#### 2.2.1 PLC 程序结构框架

采用结构化编程的方式<sup>[12]</sup>编写 PLC 程序，按照功能划分程序模块，程序结构清晰明了，可以更加高效地编写程序，排查程序故障。本文中铝合金转向节自动锻造生产线的 PLC 程序框架结构如图 5 所示，程序包含 3 个层级，分别为最高层级程序、一级子程序以及二级子程序。其中，“中断程序”、“安全控制程序”和“主程序”为最高层级程序。“中断程序”可以为 PLC 内部或外部的特殊事件提供快速反应。“安全控制程序”及其 4 个子程序使用西门子安全 PLC 的专用安全指令进行编程，实时检测生产线各设备、总控的急停安全信号以及安全门锁的安全锁闭信号，在发生安全故障时会触发安全模块进入安全状态，以保证生产线安全运行。

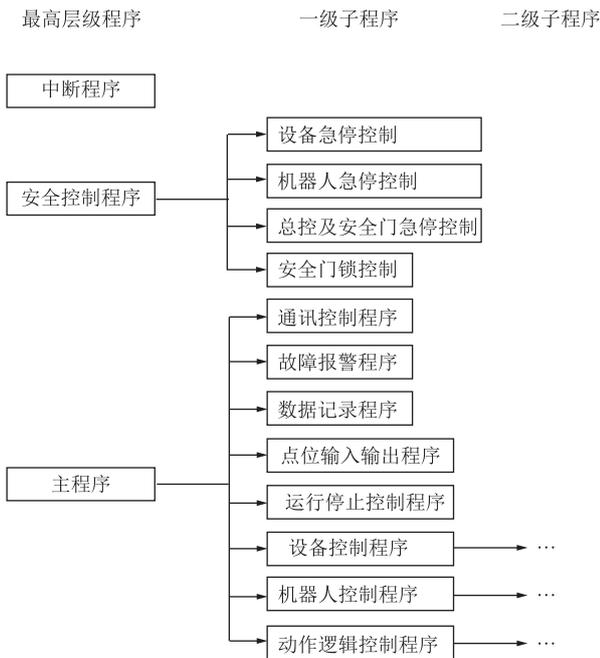


图 5 PLC 程序框架结构图

Fig. 5 Structure diagram of PLC program framework

“主程序”是 PLC 程序的主体，调用 8 个一级子程序。其中，“通讯控制程序”控制 PLC 与各单机设备以及机器人的数据信息通讯；“故障报警程序”可以监控生产线的设备故障、连续生产故障、

急停故障以及安全门故障等信息；“数据记录程序”可以记录生产线生产过程中的温度、压力机打击力、生产节拍以及生产数量等数据；“点位输入输出程序”控制 PLC 的输入输出点信号，如按钮信号和指示灯信号等；“运行停止控制程序”控制生产线各种状态下的停止动作，如设备异常时停止、有突发状况时操作员立即终止生产以及生产线连续生产时正常停止；“设备控制程序”调用与设备运行相关的二级子程序；“机器人控制程序”调用与机器人控制相关的二级子程序；“动作逻辑控制程序”调用与生产线设备动作逻辑相关的二级子程序，如图 6~图 8 所示。

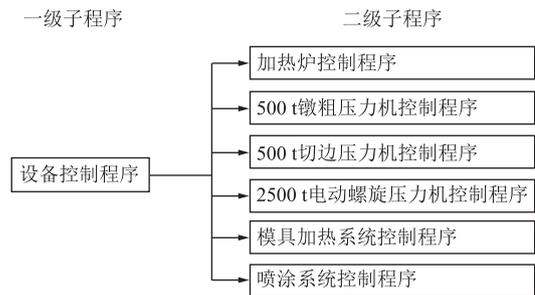


图 6 设备控制程序的结构图

Fig. 6 Structure diagram of device control program

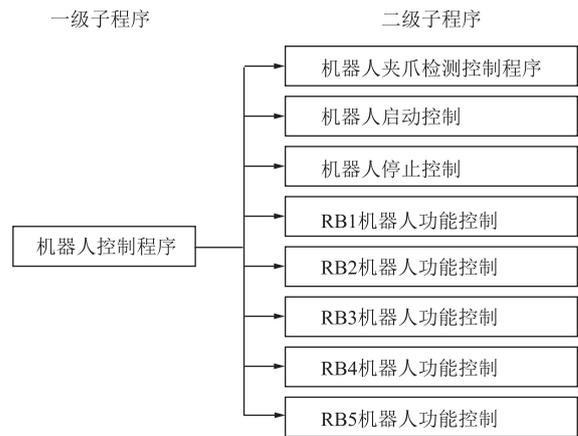


图 7 机器人控制程序的结构图

Fig. 7 Structure diagram of robot control program

图 6 为一级子程序中“设备控制程序”的结构图，该程序调用 6 个二级子程序。其中，“加热炉控制程序”监控加热炉的状态，控制加热炉的前进以及炉门开关动作。“500 t 墩粗压力机控制程序”、“500 t 切边压力机控制程序”以及“2500 t 电动螺旋压力机控制程序”分别监控 3 台压力机的运行状态，以及控制压力机的打击和顶杆动作信号。“模具加热系统控制程序”监控模具加热系统的运行状

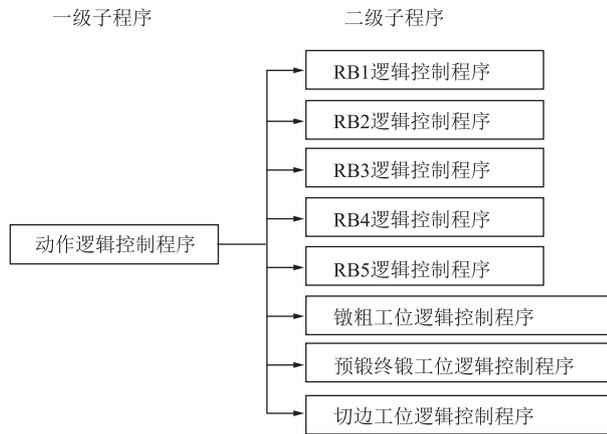


图 8 动作逻辑控制程序的结构图

Fig. 8 Structure diagram of action logic control program

态。“喷涂系统控制程序”监控喷涂系统的运行状态。

图 7 为一级子程序中“机器人控制程序”的结构图，该程序调用 8 个二级子程序。其中，“机器人夹爪检测控制程序”监控机器人夹爪动作时的状态，包括夹爪夹空、夹爪未动作和夹爪传感器失效的判断。“机器人启动控制”根据生产线运行条件，远程触发机器人程序的启动。“机器人停止程序”根据生产线运行状态，相应触发各机器人的停止程序。“RB1~RB5 机器人功能控制程序”可以监控机器人的运行状态，写入和读取机器人当前的运行工步。

图 8 为一级子程序中“动作逻辑控制程序”的结构图，该程序调用 RB1~RB5 机器人的单机逻辑控制程序以及镦粗、预/终锻、切边工位的逻辑控制程序。机器人的逻辑控制程序可以控制单个机器人的顺序动作，各锻造工位的逻辑控制程序可以将该工位的机器人动作和压力机动作串联起来，构成生产线的整体动作逻辑。

### 2.2.2 生产线主要动作逻辑设计

上述对生产工艺流程进行了详细的介绍，在软件编程时需要分析生产线上各设备的动作逻辑，在设备能力范围内尽可能地缩短动作间隙，提升生产节拍，发挥出生产线的最佳生产能力。

图 9 为铝合金转向节自动锻造生产线的主要动作逻辑。

(1) 生产线启动前，检测各设备是否符合启动条件，如模具是否加热至预设温度，喷涂系统是否开启，各设备是否处于自动启动就绪状态，所有条件均满足后，才可以启动生产线自动运行。

(2) 生产线启动后，首先，RB2 机器人和 RB3 机器人分别运行喷涂程序，预喷涂镦粗模具以及预/终锻模具，与此同时，RB1 机器人开始从加热炉内抓料。

(3) RB1 机器人抓料至定位台后，在定位台进行工件测温。若料温不合格，则 RB1 机器人执行甩料程序，将棒料放至料框，并再次抓料。若料温合格，则 RB1 机器人将棒料放至镦粗工位进行镦粗。

(4) 镦粗打击完成后，RB2 机器人从镦粗工位抓料，并再次喷涂镦粗模具。

(5) 主机打击完成预锻后，RB4 机器人将工件从预锻工位移至终锻工位，同时，当 RB4 机器人抓取工件离开预锻型腔时，RB3 机器人立即喷涂预锻工位。

(6) 主机打击完成终锻后，RB4 机器人将工件从终锻工位移至定位台，同时，当 RB4 机器人抓取工件离开终锻型腔时，RB3 机器人立即喷涂终锻工位。在 RB3 机器人喷涂的同时，RB2 机器人再次向预锻工位放入 1 个镦粗工件。

(7) RB5 机器人将工件从定位台抓取至切边工位。

(8) 切边打击后，RB5 机器人将切边的零件抓至水槽，并将飞边抓至飞边框。

其中，为了提升生产线节拍，RB2、RB3、RB4 这 3 个机器人在压力机内的动作需要穿插进行，密切衔接。在终锻打击完成后，RB4 机器人抓终锻件、RB3 机器人喷涂终锻型腔的同时，需要 RB2 机器人立即再次向预锻型腔内放入镦粗工件。由于镦粗工序的时间较长，需要 RB1 机器人提前从加热炉内抓出棒料。

根据各设备和机器人的运行时间测算，在 RB2 机器人向预锻型腔内放料之前，预锻前工序需要有 2 个工件处于生产状态中。

定义生产线初始运行，将抓出的第 1 根棒料运行时的状态，或 RB1 机器人执行甩料程序后再次抓出的第 1 根棒料运行时的状态，定为“首次循环”状态。在“首次循环”状态下，执行镦粗打击动作时，即触发一次 RB1 机器人从加热炉抓料的动作，预锻打击时，再次延时触发一次 RB1 机器人从加热炉抓料的动作，这样预锻前工序就会有 2 个工件处于生产状态中。

从抓取第 2 根棒料开始，生产线退出“首次循环”状态，此后执行镦粗打击动作时，不再触发 RB1 机器人从加热炉抓料的动作，只由预锻打击时的信号延时触发 RB1 机器人从加热炉内抓料动作。

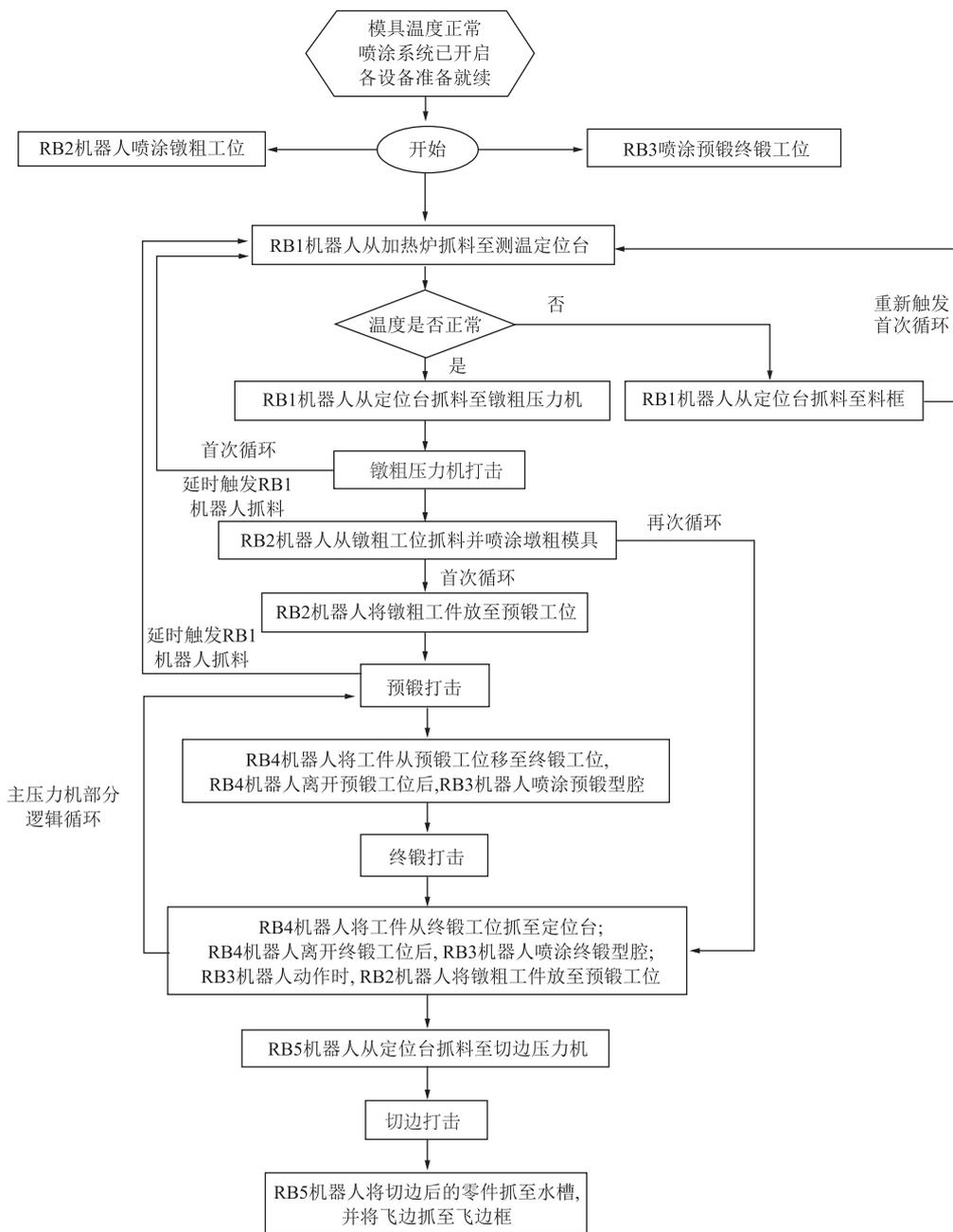


图 9 铝合金转向节锻造生产线的动作逻辑图

Fig. 9 Action logic diagram of forging production line for aluminum alloy knuckle

### 3 生产线验证

本文所述程序构架已在中国机械总院集团北京机电研究所有限公司设计开发的铝合金转向节自动锻造生产线上进行生产验证，设备联机调试后，生产节拍达到每件 22 s，其控制界面如图 10 所示。“总览图”可显示当前各设备状态，显示生产线“生产计数”、“模具温度”和“生产节拍”等数据

信息；“当前报警”界面可显示正在触发的报警信息；“历史报警”界面可记录曾触发的报警信息；“配方界面”可保存多组产品数据，切换不同的产品，只要调用不同的配方即可；“信号屏蔽”界面可用于调试时屏蔽某些设备及信号；“喷涂控制”界面可控制喷涂系统的运行，如图 11 所示。在“总览图”界面单击每个设备的图标，还可以打开总控和相应设备的信号交互表，方便随时查看各设备的信号交互信息。



图 10 铝合金转向节自动锻造生产线的控制界面

Fig. 10 Control interface of automatic forging production line for aluminum alloy knuckle

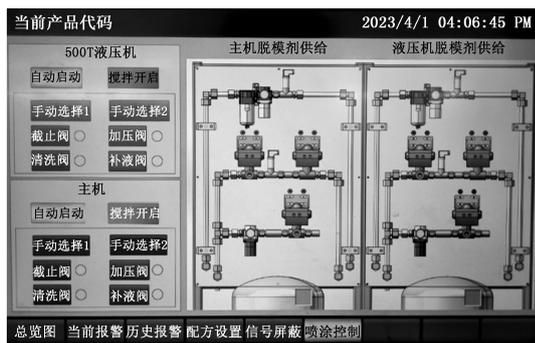


图 11 喷涂控制系统的界面

Fig. 11 Interface of spray control system

## 4 结语

本文分析并规划了铝合金转向节锻造生产线的整体布局,设计了其自动化控制系统,提出了一种锻造生产线 PLC 程序框架结构,可为类似产品或设备的生产线的程序编写提供参考,简化编程人员的设计流程。工程应用表明,该生产线的自动化控制系统逻辑清晰、安全可靠,生产节拍达到每件 22 s,产品质量稳定,且已通过装车验证。

### 参考文献:

- [1] 王科学,王东波,黄勇,等. 铝合金材料在汽车轻量化领域应用的研究现状 [J]. 铝加工, 2022, 269 (6): 3-6.  
Wang K X, Wang D B, Huang Y, et al. Research status of application of aluminum alloy materials in the field of automobile lightweight [J]. Aluminium Fabrication, 2022, 269 (6): 3-6.
- [2] 李光霁,刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 47-61.  
Li G J, Liu X L. Literature review on research and development of automotive lightweight technology [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 47-61.
- [3] 李兵. LASC0 汽车铝合金锻造的全新工艺解决方案 [J]. 锻造与冲压, 2023, (7): 35-36.  
Li B. A new automotive aluminum forging process developed by LASC0 [J]. Forging & Metalforming, 2023, (7): 35-36.
- [4] Saberi S, Fischer J, Stockinger M, et al. Theoretical and experimental investigations of mechanical vibrations of hot hammer forging [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114 (9-10): 1-9.
- [5] 张继明. H 公司铝合金锻造线生产效率提升研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.  
Zhang J M. Research on Production Efficiency Increasing of H Plant Aluminum Alloy Forging Line [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [6] 殷剑,黎诚,金康,等. 铝合金汽车前下摆臂成形工艺的有限元模拟与优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 74-82.  
Yin J, Li C, Jin K, et al. Finite element simulation and optimization on forming process of automobile front lower sway arm for aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 74-82.
- [7] 闫军芳,严小娜. 铝合金接触网零件锻造自动化工艺关键点分析 [J]. 电气化铁道, 2019, 30 (S1): 153-156.  
Yan J F, Yan X N. Analysis of key points in the forging automation process of aluminum alloy contact network parts [J]. Electric Railway, 2019, 30 (S1): 153-156.
- [8] 王珣. 模锻生产中的自动吹风喷墨系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
Wang X. Research of Automatic Blowing and Spraying System Used in Forging Production [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [9] 张燕红,马金祥,姚文卿. 计算机控制技术 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2020.  
Zhang Y H, Ma J X, Yao W Q. Computer Control Technology [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2020.
- [10] 赵升吨. 高端锻压制造装备及其智能化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.  
Zhao S D. High-end Forging Manufacturing Equipment and Its Intelligence [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [11] 赵中敏,张秋云,杨广才. PLC 控制系统设计 [J]. 机床电器, 2007, 34 (2): 37-40.  
Zhao Z M, Zhang Q Y, Yang G C. The design of PLC control system [J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2007, 34 (2): 37-40.
- [12] 倪伟,刘斌,侯志伟,等. 电气控制技术与 PLC [M]. 南京: 南京大学出版社, 2017.  
Ni W, Liu B, Hou Z W, et al. Electrical Control Technology and PLC [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2017.