

基于测距探针和基坐标的锻造搬运机器人轨迹控制应用

魏 翔, 石一馨, 姚宏亮, 丁宵月, 陈宪明, 李 红, 李 敬, 焦麒安, 赵嘉琦
(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 在锻造生产线自动化集成过程中, 研究基于机器人基坐标功能与测距探针的自适应抓取方法, 以提升物料搬运的精准性和适应性。通过分析 KUKA 工业机器人的基坐标编程原理及其实际应用, 结合传感器对工件位置的实时检测, 计算并动态调整抓取位置。在编程过程中, 采用 KRL 语言建立基坐标系、设计算法以实现 7 种不同品类工件的准确抓取与放置操作, 并进行实验验证。结果表明: 基坐标功能与传感器的协同应用显著提高了生产线的运行效率, 减少了操作误差, 进一步增强了锻造生产的智能化水平和精确性, 验证了上述方法的可行性。该研究为锻造行业的自动化搬运提供了新思路, 并具有广泛的工程应用价值。

关键词: 工业机器人; 锻造自动化; 基坐标; 自适应; 轨迹编程; 测距探针

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.019

中图分类号: TG316.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 06-0153-06

Application on trajectory control of forging and handling robot based on distance measuring probe and base coordinate

Wei Xiang, Shi Yiqing, Yao Hongliang, Ding Xiaoyue, Chen Xianming, Li Hong, Li Jing,
Jiao Qi'an, Zhao Jiaqi

(China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083)

Abstract: In the automation integration process of forging production line, an adaptive gripping method based on the base coordinate function and distance measuring probes of robot was studied to enhance the precision and adaptability of material handling. Then, by analyzing the programming principles of base coordinates in KUKA industrial robots and their practical application, combined with real-time detection of workpiece positions using sensors, the gripping positions were calculated and dynamically adjusted. Furthermore, during the programming process, the base coordinate and design algorithms were established by using language KRL to achieve accurate gripping and placement operations of seven different categories of workpieces, and the experimental verification was carried out. The results show that the collaborative application of base coordinate function and sensors significantly improves the operational efficiency of production line, reduces the operational errors, and further enhances the intelligence and accuracy of the forging production, which verifies the feasibility of the proposed method. Thus, this research provides an innovative ideas for automated handling in the forging industry and has broad engineering application value.

Key words: industrial robot; forging automation; base coordinates; adaptive; trajectory programming; distance measuring probe

在现代工业制造中, 锻造生产线的自动化集成已成为提高生产效率和产品质量不可或缺的一环。随着制造业的发展, 机器人在锻造过程中的应用愈加普及, 为企业带来了更高的生产力和竞争力^[1]。在这一趋势中, 机器人的抓取与搬运环节至关重要, 基坐标的应用则关系到控制过程的便利性和编程效

率的提高^[2]。

本文深入探讨了在锻造生产线自动化集成中机器人的基坐标应用。实验中使用了多层料架、两个双层的箱式加热炉以及 1250 t 卧锻机, 共涉及 7 种工件。基坐标在这一复杂环境下通过计算和调整机器人的运动轨迹, 实现了对不同工位和工件的灵活适应^[3]。该应用不仅优化了机器人搬运任务的准确性, 也简化了针对多种设备和工件组合的调试流程, 为锻造生产提供了高效而可靠的解决方案。本文基于文献 [4] 和文献 [5] 的研究结果着重对其中一种工件在多层料架和箱式加热炉中使用基坐标的方

收稿日期: 2024-02-27; 修订日期: 2024-05-28

作者简介: 魏 翔 (1997-), 男, 学士, 助理工程师

E-mail: rick4451@163.com

通信作者: 姚宏亮 (1978-), 男, 硕士, 研究员

E-mail: Yaohongliang2003@163.com

式计算抓取位置的方法进行详细说明。

1 实验设备与环境

1.1 搬运流程

生产线布局如图 1 所示。工件首先由工人手动上料至多层料架上，随后，装配在多层料架上的位

置传感器会传达工件的位置信息给机器人。机器人依据这些信息，通过基坐标的方式准确地抓取工件，并将其搬运至箱式加热炉中。每个工件均会被单独计时，当工件达到所需的加热时间后，总控通讯系统会向机器人发送工件具体位置信息。机器人再次运用基坐标精确地抓取工件，并将其搬运至卧锻机中，完成生产任务^[6-7]。

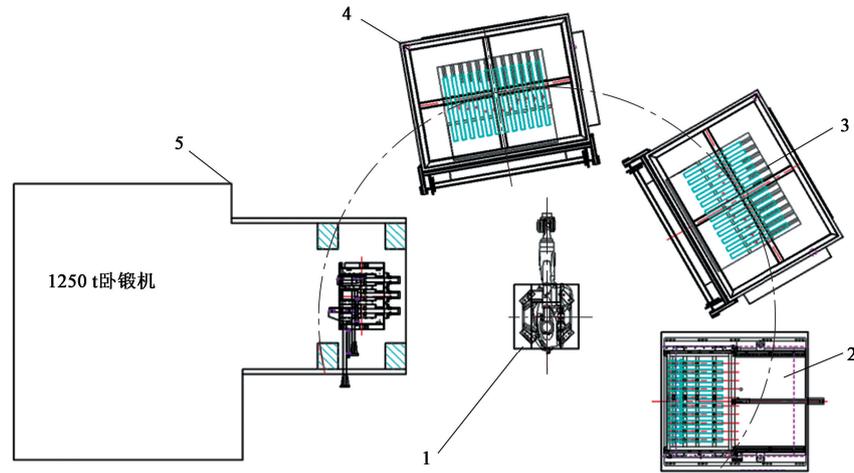


图 1 生产线布局图

1. KUKA 机器人 2. 多层料架 3. 箱式加热炉① 4. 箱式加热炉② 5. 1250 t 卧锻机

Fig. 1 Production line layout diagram

1.2 KUKA 机器人

工业机器人在锻造行业中广泛应用，其灵活性、精准性以及高效性使其成为锻造生产过程中的重要工具。在恶劣工作环境下，例如高温、高压、有毒气体等，机器人可以代替人工进行操作，确保生产的安全性和可靠性，执行诸如原材料的搬运、热处理、冷却以及最终产品的抓取和放置等任务。这样的自动化流程大大提高了生产线的效率，减少了人力投入，同时提高了产品质量^[8-9]。

本条生产线综合考虑负载能力、工作范围、可靠性和安全性等指标，选用了 KR210 型号机器人，其具体参数如表 1 所示。

1.3 末端执行器

执行机构是连接在机器人末端的专用夹钳，如图 2 所示。夹钳底部配备有测距探针，其主体部分位于炉口外侧，并在隔热层中装有石棉隔热。工作时，夹钳仅在炉口停留 12 s，这样设计确保了探针在高温环境下的可靠性。每次夹取工件时，夹钳会向 PLC (Programmable Automation Controller) 传送探针测得的模拟量信号，PLC 会将这个信号与标准夹取位置进行比较，并计算出补偿参数，然后将其传回至机器人。机器人会根据这些参数通过基坐标应

表 1 KUKA KR210 机器人参数

Table 1 Parameters of KUKA KR210 robot

参数	数值
类型	KR210-R2700
质量/kg	1275
轴数	6
动作范围/mm	0~2711
重复定位精度/mm	±0.05
最大负载能力/kg	210
最大工作速度/(mm·s ⁻¹)	400
电源电压需求/V	3AC 480
电源频率需求/Hz	50 或 60
电机功率/kW	4.8
控制系统	KRC4

用进行微调，确保夹爪在前后方向上的位置精准。这样，每次夹取工件的位置均能保持一致，从而确保工件能够安全地从多层料架上转移出来，并且能够规范地放置于箱式加热炉中的模具中的固定位置。这种精准的夹取和放置过程提高了产品的一致性，同时也增强了自动化生产线的稳定性^[10-12]。

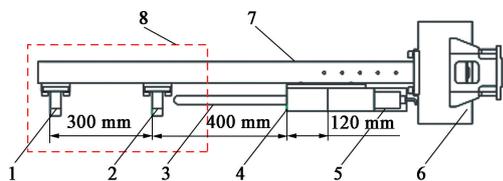


图 2 夹钳示意图

- 1. 前夹钳块 2. 后夹钳块 3. 测距探针 4. 隔热层 5. 气缸
- 6. 安装支座 7. 夹钳臂 8. 进炉区域

Fig. 2 Schematic diagram of clamp

2 基坐标编程

2.1 基坐标建立方法

基坐标系测量分两步：确定坐标原点和定义坐标方向，具体操作如下^[13-14]。

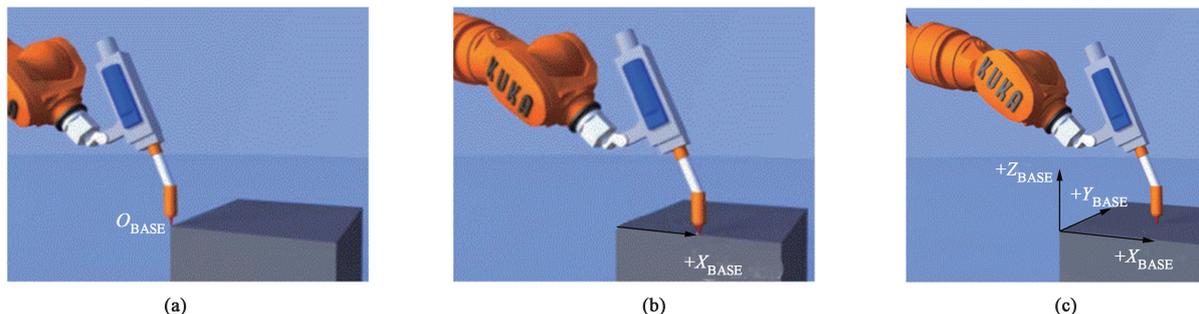


图 3 基坐标建立方法

- (a) 建立原点 (b) 沿 X_{BASE} 轴测量 (c) 沿 $X_{BASE} Y_{BASE}$ 平面测量

Fig. 3 Base coordinate establishment method

- (a) Establish origin (b) Measure along X_{BASE} axis (c) Measure along $X_{BASE} Y_{BASE}$ plane

2.2 基坐标应用方法

实验中所采用的设备包括 5 层 10 工位的标准料架、两个 10 工位的双层箱式加热炉以及 1 个 3 工位的 1250 t 卧锻机，而工件的种类共有 7 种。在这样一个复杂多变的生产环境中，机器人的调试变得尤为困难，尤其是在多工位与多种工件之间的匹配问题上。传统的示教方法面临巨大的工作量，需要逐一调试每一个工位和工件的组合，耗费了大量时间和精力。

为了解决这一问题，机器人编程中引入了基坐标，从而改善了机器人的调试难度。基坐标的设置 为机器人提供了一个统一的空间参考框架，使得其能够更加灵活、精准地适应不同工位和工件的组合。通过在基坐标系统中进行坐标计算，机器人可以根据特定工件和工位的几何信息，实现准确的搬运动作，从而极大地简化了调试的工作流程。

此外，为了进一步提高机器人的适应性和准确

(1) 在主菜单中选择投入运行—测量—基坐标系—3 点。

(2) 为基坐标分配 1 个号码和 1 个名称，点击“继续”键确认。

(3) 输入需用 TCP (Transmission Control Protocol) 测量基坐标的工具的编号，点击“继续”键确认。

(4) 将 TCP 移至新坐标系的原点 O_{BASE} 。点击“测量”键并用“是”键确认位置，见图 3a。

(5) 将 TCP 移至新坐标系正向 X_{BASE} 轴上的一个点。点击“测量”并用“是”键确认位置，见图 3b。

(6) 将 TCP 移至 $X_{BASE} Y_{BASE}$ 平面上一个带有正 Y_{BASE} 值的点。点击“测量”并用“是”键确认位置，见图 3c。

(7) 按下“保存”键。

(8) 关闭菜单。

性，机器人执行器末端还额外安装了探针。这个探针可以对工件的放置误差进行自适应调整，确保每次抓取和放置的位置都能保持一致。这样的自适应调整机制使得机器人能够在复杂的生产环境中更为稳定地执行搬运任务，大大提高了整个生产系统的可靠性和效率。

综合而言，实验装备的复杂性和多样性要求了更高水平的机器人调试和运行灵活性。基坐标系统的引入不仅简化了调试工作流程，还提高了机器人在复杂生产环境中的适应性，为实现高效的搬运操作奠定了坚实的基础。

3 基坐标在多层料架取件的应用

3.1 多层料架取件概述

料架共 5 层，每层 10 工位，共 50 个工位，为

方便工人上料,料架采用可升降的设计,每当给指定层上料时,会将其降低至可操作高度,见图 4。料架第 1 层最右侧第 1 工位设置为坐标系原点 $O(0, 0, 0)$,由于料盘层高一致、工位间距一致,在 XOZ 平面上可设置机器人按顺序抓取工件。料架装填完毕后,在抓取前通过夹钳底部安装的测距探针微调夹钳位置,保证工件与夹钳相对位置的一致性,故不同工件抓取位置不同,需要对 Y 方向进行单独编程。当料架未放满就进行生产时,此时也使用基坐标参数的方式进行搬运,由每层料架边缘的检测传感器通过红外线检测确定工件所在位置,如图 5 所示。由 PLC 处理后,向机器人发出指令,此时机器人根据基坐标参数的方式计算出指定工件所在位置,并进行精准移动,以达到无论料架上工件是否规律地排布,均能保证机器人到有料的地方进行抓取^[15]。

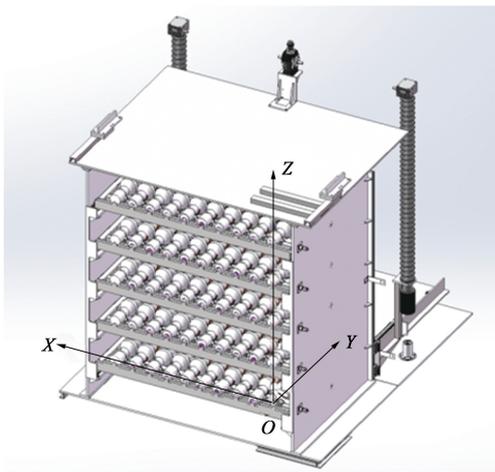


图 4 多层料架

Fig. 4 Multi-layer material rack

3.2 多层料架取件参数定义

在 Config 程序中定义参数位置至关重要,尤其是在与 PLC 通讯时,这样做可以实现 PLC 将数据实时传递给机器人,从而通过基坐标的方式对运动轨迹进行精准控制。在与 PLC 通讯时,通常需要明确定义要读取或写入的数据位置。通过在 Config 程序中定义这些位置,可以轻松地在通讯代码中引用这些位置,并确保与 PLC 的通讯顺利进行。将参数位置集中定义在 Config 程序中有助于更好地进行统一管理,这样做可以确保参数的命名和使用方法保持一致,并且方便对参数进行修改和更新,而无需在整个程序中进行大规模修改。表 2 为与多层料架相关的变量定义代码。



图 5 位置传感器

Fig. 5 Position sensor

表 2 多层料架相关变量代码

Table 2 Multi-layer material rack related variable code

序号	代码	说明
1	SIGNAL Zrf \$IN[145] TO \$IN[160]	定义料架指定层高度
2	SIGNAL Xr \$IN[161] TO \$IN[176]	定义料架指定工位位置
3	SIGNAL Yr \$IN[177] TO \$IN[192]	定义 Y 方向补偿量
4	SIGNAL Zr \$IN[193] TO \$IN[208]	定义料架工件 Z 轴偏移量
5	SIGNAL Yljte \$IN[337] TO \$IN[352]	定义退出料架时与原点比较的偏移量
6	SIGNAL Yljl1 \$IN[353] TO \$IN[368]	定义料架内第 1 段伸进量
7	SIGNAL Yljl2 \$IN[369] TO \$IN[376]	定义料架内第 2 段伸进量
8	SIGNAL Zljl1 \$IN[377] TO \$IN[384]	定义料架内降至测量点偏移量
9	SIGNAL Zljl2 \$IN[385] TO \$IN[392]	定义料架内的抓料后提升高度

3.3 多层料架取件代码实现

根据上述料架相关变量的定义和基坐标的建立,通过表 3 中的代码可以实现理想的运动轨迹。图 6 对相关轨迹进行了描述。

4 基坐标在加热炉取件的应用

4.1 箱式加热炉取件概述

由机器人搭载的夹钳在工作前会停靠在加热炉 O' 点,如图 7 所示,也称为停车位。当需要进行抓取任务时,会根据总控信号到达指定层前的等待位 A' 。收到抓取指定工件的信号后,会先平移至加热炉内,即 B' 点,然后平移至 C' 点(工件斜上方),

表 3 多层料架取件代码

Table 3 Pickup code of multi-layer material rack

序号	程序	代码	说明
1	LJ1()	\$BASE=BASE_DATA[1]	调用基坐标系 1, 工具
		\$TOOL=TOOL_DATA[1]	坐标系 1, 平移至料架
		LIN Pht	原点
2	LJ2()	pul. x=Xlj+Xr	运行至 A 点
		pul. z=Zlj+Zrf	
3	LJ3()	pul. y=Ylj-Yljcl1	平移至工位上方 B 点
4	LJ4()	pul. z=Zlj+Zrf-Zljcl	下降至工件面前 C 点
5	LJ5()	pul. y=Ylj-Yljcl1-Yljcl2	前进至工件测量位 D 点
6	LJ6()	pul. y=Ylj-Yljcl1-Yljcl2-Yrr	通过探针补偿位置误差至取件位 E 点
7	LJ7()	pul. z=Zlj+Zrf-Zljcl+Zljs	夹取后抬升至 F 点
8	LJ8()	pul. y=Ylj+Yljtc	退出料架

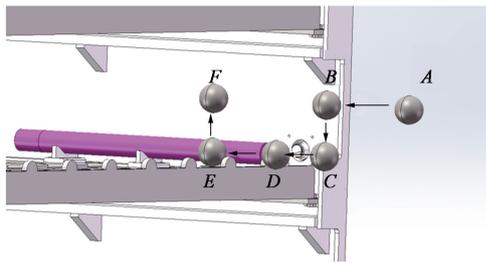


图 6 多层料架取件点位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of pickup points for multi-layer material rack

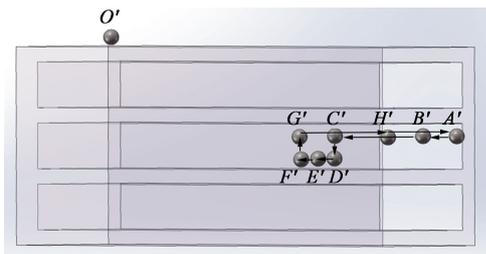


图 7 箱式加热炉取件轨迹示意图

Fig. 7 Schematic diagram of pickup trajectory for box heating furnace

若直接平移至工件正上方再下降至工件会导致抓取位置不统一。所以，在斜上方下降至 D' 点后再向前平移至 E' 点，此时通过探针检测工件位置偏差，再根据计算结果前进或后退至 F' 点，保证夹具与工件的相对位置不变，此时夹钳闭合夹紧工件。最后，依次平移至 G'、H'、A' 点，完成带件出炉的操作。

4.2 箱式加热炉取件参数定义

由于该条生产线共有 7 种不同形状的工件，为保障加热炉门开启时间最短使炉温恒定，需要对不同工件设置单独的炉前等待原点。本程序通过调用不同子程序的方式实现自动选择坐标原点。如图 8 所示，当总控执行型号为 2001 的工件时，机器人会

```

DEF r1_2001_1()
INI
gongjian200101()
PTP HOME VEL=100% DEFAULT
OUT 115 'JIAQIAN' STATE=TRUE
WAIT TIME=1.0 SEC
Resetsignals()

loop
CycSart:
WAIT FOR(IN81'RITO 等待位(81)'OR(IN112'TO CELL'))
    
```

图 8 主程序中调用指定工件原点代码

Fig. 8 Call origin code for specified workpiece in main program

在执行程序前先选择子程序 DEF gongjian200101() 进行执行，确定工件在加热炉前等待时的坐标原点。

表 4 为与箱式加热炉相关的变量定义代码。

表 4 箱式加热炉相关变量代码

Table 4 Box heating furnace related variable code

序号	代码	说明
1	SIGNAL yh \$IN[209]	定义在加热炉内下降至工件前的参数
	TO \$IN[224]	
2	SIGNAL Ch \$IN[225]	定义加热炉内机器人六轴偏转量
	TO \$IN[240]	
3	SIGNAL xh \$IN[241]	定义加热炉内取料 X 轴偏移量
	TO \$IN[256]	
4	SIGNAL xhs \$IN[257]	定义加热炉内避让 X 轴偏移量
	TO \$IN[272]	
5	SIGNAL Zh \$IN[273]	定义加热炉内取放 Z 轴偏移量
	TO \$IN[288]	
6	SIGNAL Zht1 \$IN[393]	定义加热炉内下降至工件位置的偏移量
	TO \$IN[400]	
7	SIGNAL Xht1 \$IN[401]	定义加热炉内进至 1/2 的偏移量
	TO \$IN[416]	
8	SIGNAL Xht3 \$IN[417]	定义退出加热炉，与原点相比的偏移量
	TO \$IN[432]	
9	SIGNAL Xht2 \$IN[433]	定义加热炉内进至测量位的偏移量
	TO \$IN[441]	

4.3 箱式加热炉取件代码实现

表 5 为箱式加热炉取件代码，相关轨迹示意图见图 7。

5 结论

(1) 详细研究了在锻造生产线中采用 KUKA 工业机器人时，传统示教方法面临的巨大工作量和效率低下的问题。通过引入基坐标系统，成功简化了

表 5 箱式加热炉取件代码

Table 5 Pickup code of box heating furnace

序号	程序	代码	说明
1	HTb0()	\$BASE=BASE_DATA[2] \$TOOL=TOOL_DATA[1] LIN Pht	调用基坐标系 2, 工具坐标系 1, 平移至 A'点, 加热炉前
2	HTb1()	pht. X=Xb+Xht1	进加热炉 B'点
3	HTb2()	pht. Y=Yb+Yh	平移至工位斜上方 C'点
4	HTb3()	pht. Z=Zb-Zht1+Zh	下降至工件面前 D'点
5	HTb4()	pht. X=Xb+Xht1+Xht2	前进至工件测量位 E'点
6	HTb5()	pht. X=Xb+Xht1+Xht2+Xhh	微调至达取料位 F'点
7	HTb6()	pht. Z=Zb	夹取后抬升至 G'点
8	HTb7()	pht. Y=Yb	平移回出料位 H'点
9	HTb8()	pht. X=Xb+Xht3	退出加热炉

机器人的调试流程, 为机器人在复杂环境中的搬运任务提供了更为灵活和高效的解决方案。

(2) 在机器人执行器末端安装探针装置, 通过自适应调整机制, 对工件的放置误差进行实时调整, 确保每次搬运任务的位置保持一致。这项创新的设计显著提高了机器人的适应性和精确性, 为复杂生产环境下的搬运操作提供了更可靠的保障。

(3) 通过实际的代码编写展示, 深入阐述了基坐标系如何优化机器人的运动规划, 确保其在不同工位和工件组合下能够高效、精准地执行搬运任务。这一研究为工业机器人在锻造行业的应用提供了新思路, 并为其在其他工业场景中的推广提供了有益经验。

参考文献:

- [1] 林祥. KUKA 工业机器人编程高级教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
Lin X. KUKA Industrial Robot Programming Advanced Tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [2] 谢杨春. 基于 PLC 的工业机器人搬运系统现状研究 [J]. 内燃机与配件, 2024 (1): 58-60.
Xie Y C. Research on current situation of industrial robot handling system based on PLC [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2024 (1): 58-60.
- [3] 李正祥, 宋祥弟. 工业机器人操作与编程 (KUKA) [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
Li Z X, Song X D. Industrial Robot Operation and Programming (KUKA) [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.
- [4] 李培根. 工业机器人操作与编程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Li P G. Industrial Robot Operation and Programming [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [5] 许怡赦, 邓三鹏. KUKA 工业机器人编程与操作 [M]. 北

京: 机械工业出版社, 2019.

- Xu Y S, Deng S P. KUKA Industrial Robot Programming and Operation [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [6] 杨晓华, 李天祥. KUKA 工业机器人借助 KRL 进行运动编程案例设计 [J]. 机电信息, 2023 (22): 53-55.
Yang X H, Li T X. Case design of motion programming for KUKA industrial robot with KRL [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023 (22): 53-55.
- [7] 郭爱云, 刘天宋. 基于 PLC 与工业机器人控制的物料搬运及分拣系统的设计 [J]. 仪器仪表用户, 2023, 30 (1): 5-8, 104.
Guo A Y, Liu T S. Design of material handling and sorting system based on PLC and industrial robot [J]. Instrumentation, 2023, 30 (1): 5-8, 104.
- [8] 杨跃. 工业机器人与可编程控制器 PLC 的通信技术 [J]. 集成电路应用, 2022, 39 (6): 198-199.
Yang Y. Study on communication technology between industrial robot and PLC [J]. Application of IC, 2012, 39 (6): 198-199.
- [9] 赵勇, 李洋. PLC 在工业机器人控制系统中的应用 [J]. 南方农机, 2023, 54 (19): 152-155.
Zhao Y, Li Y. Application of PLC in industrial robot control system [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2023, 54 (19): 152-155.
- [10] 谭春林. PLC 技术在工业机器人控制系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40 (7): 236-237.
Tan C L. Application of PLC technology in the control system of industrial robots [J]. Application of IC, 2023, 40 (7): 236-237.
- [11] 赖刘生. 基于 PLC 和工业机器人的物料输送智能系统设计 [J]. 机械工程与自动化, 2021 (1): 161-162, 168.
Lai L S. Intelligent system design of material handling on PLC and industrial robot [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021 (1): 161-162, 168.
- [12] 信义兵, 高跃飞, 刘海涛. 夹紧机械手的设计与优化 [J]. 制造业自动化, 2015, 37 (7): 145-147.
Xin Y B, Gao Y F, Liu H T. Design and optimization of clamping mechanism [J]. Manufacturing Automation, 2015, 37 (7): 145-147.
- [13] 杨晓华, 李天祥, 孙雨晴. KUKA 工业机器人码垛程序的优化设计 [J]. 机电信息, 2023 (13): 39-42.
Yang X H, Li T X, Sun Y Q. Optimization design of KUKA industrial robot palletizing program [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023 (13): 39-42.
- [14] 刘文光, 王亮. KUKA 工业机器人离线编程技术应用实例 [J]. 山东工业技术, 2021 (3): 118-123.
Liu W G, Wang L. Example of offline programming technology for KUKA industrial robot [J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2021 (3): 118-123.
- [15] 田小龙, 王国章. 基于 ABB 搬运工业机器人离线编程与仿真研究 [J]. 科技风, 2022 (34): 4-6.
Tian X L, Wang G Z. The research on off-line programming and simulation of handling industrial robot based on ABB [J]. Technology Wind, 2022 (34): 4-6.