

KUKA 制孔机器人自动换刀系统设计

朱卫国^a, 齐琦^b

(安徽建筑大学 a. 机械与电气工程学院, b. 电子与信息工程学院, 合肥 230601)

摘要:针对现代工业中大型工件制孔加工存在的效率和精度不高的现状,设计了一款 KUKA 制孔机器人自动换刀系统。将西门子 PLC 与 KUKA 机器人控制柜进行 PROFINET 协议通讯,实现对机器人运动的控制,使机器人与刀库相配合,完成自动换刀操作,从而缩短加工过程中非制孔的时间,提高制孔工作效率。

关键词:KUKA 机器人;刀库;自动换刀系统

中图分类号:TG659 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2020)06-0001-05

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2020.06.001

Design of Automatic Tool Changer for KUKA Hole-Making Robot

ZHU Wei-guo^a, QI Qi^b

(a. School of Mechanical and Electrical Engineering; b. School of Electronic and Information Engineering,

Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency and accuracy of hole making for large workpiece in modern industry, an automatic tool changer of KUKA hole-making robot is designed. In this system, the PROFINET protocol communication is conducted between Siemens PLC and KUKA robot control cabinet to control the robot movement, and the robot cooperates with the tool magazine to complete the automatic tool change, which can shorten the waiting time during the process and improve the working efficiency for hole making.

Key Words: KUKA robot; tool magazine; automatic tool changer

在以往的工业加工生产过程中,需要对大型的工件进行制孔加工,由于传统的数控机床加工方式单一,往往无法灵活地完成此项任务,而且在加工过程中需要人工辅助,加工效率和成品工件的质量由工人的技术水平所决定,导致加工生产线效率低,工件加工的精度和可靠性不高,无法满足用户的实际需要。随着时代的不断发展,工业机器人被广泛地应用到各种领域,对应不同生产线的要求,工业机器人可以分为多种类型并具有各种功能。制孔机器人可

以提高制孔加工速度和精度,同时它可以适应各种复杂、恶劣的工作环境^[1-5]。

我们根据大型工件加工制孔的实际情况,对机器人制孔换刀系统进行了研究,设计出一款自动换刀系统:选用六自由度的工业机器人,主轴末端安装制孔执行器,它具有对工件识别、定位、检测、压紧、钻孔和排屑等功能。在以往的实际加工过程中,由于待加工工件的材料差异、制孔大小不同以及刀具的磨损,需要对刀具进行频繁更换,而此款自动换刀系统可以与机器人相配

作者简介:朱卫国(1962—),男,安徽怀宁人,教授,博士,主要从事机电一体化产品设计研究。

合,不仅可以缩短非制孔时间,进一步提高生产效率,而且可以降低生产投入和人力资源的成本。

1 自动换刀系统的硬件结构

自动换刀系统包括斗笠式刀库、西门子 PLC S7-1200, 西门子交换机 CSM1277, KUKA 机器人控制柜及机器人。西门子 PLC 作为主站, KUKA 机器人控制柜作为从站; 通讯协议选用 PROFINET 协议; 系统总线选用 RJ45 双绞线。KUKA 机器人控制柜通过 KLI 接口与西门子交换机(CSM1277)相连接, 同时配备控制 PC 对自动换刀系统和运行状态进行组态及监控。自动换刀系统网络拓扑结构如图 1 所示。

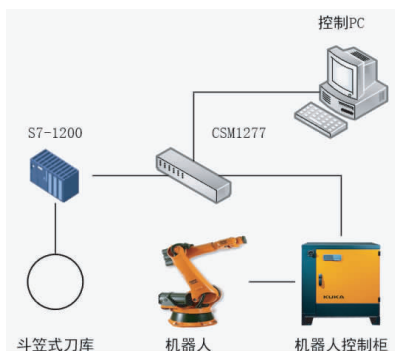


图 1 自动换刀系统网络拓扑结构

自动换刀系统包含以下两个主要部分。

(1) 刀库。斗笠式刀库由圆形刀盘和驱动装置组成。圆形刀盘最多可容纳 12 把刀具, 每个位置的刀具都有编号。刀库驱动装置由伺服电机及减速器组成, 伺服电机转动圆形刀盘将刀具转到待卸/取刀具位置, 再由机器人主轴制孔执行器卸下刀具到刀库中, 或从刀库拾取刀具到机器人主轴制孔执行器。

(2) 机器人系统。外部卸/取刀装置由西门子 PLC S7-1200, 控制 PC, KUKA 机器人控制柜和机器人组成, 用户通过控制 PC 发送换刀指令, PLC 与机器人控制柜进行通讯, 将具体任务传送到机器人控制柜, 控制机器人作出相应的响应, 从而实现换刀操作。

2 自动换刀系统的硬件配置及程序设计

2.1 斗笠式刀库

2.1.1 斗笠式刀库的配置

本系统刀库中放置了不同规格的钻头、锥

丝等 10 把刀具, 并配备对刀机构。钻孔攻牙斗笠式刀库如图 2 所示(攻牙范围 M3—M12)。

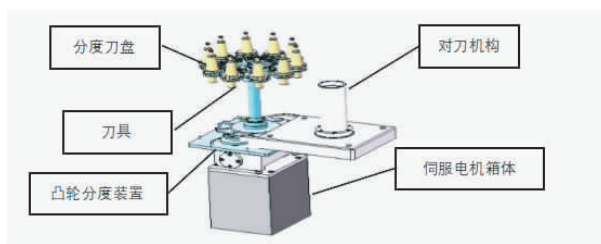


图 2 钻孔攻牙斗笠式刀库

刀库的特点: ①钻孔攻牙斗笠式刀库分度盘采用铝合金材料, 具有重量轻、体积小、易于安装的优点; ②特殊的弹簧夹爪, 夹刀时更稳定; ③选刀、换刀精度高, 运行平稳, 冲击性小; ④适用于 BT, CDT, CAT, HSK 型刀柄。

选用西门子 S7-1200 CPU 1214C PLC 对斗笠式刀库驱动装置进行控制^[6-8], 由 PLC 对刀库进行相应输入/输出分配, 定义的输入/输出点分配如表 1 所示。

表 1 刀库与 PLC 输入/输出点分配表

输入点	名称	输出点	名称
I0.0	选择 1 号刀具	Q1.0	1 号刀具到达待卸/取刀位
I0.1	选择 2 号刀具	Q1.1	2 号刀具到达待卸/取刀位
I0.2	选择 3 号刀具	Q1.2	3 号刀具到达待卸/取刀位
I0.3	选择 4 号刀具	Q1.3	4 号刀具到达待卸/取刀位
I0.4	选择 5 号刀具	Q1.4	5 号刀具到达待卸/取刀位
I0.5	选择 6 号刀具	Q1.5	6 号刀具到达待卸/取刀位
I0.6	选择 7 号刀具	Q1.6	7 号刀具到达待卸/取刀位
I0.7	选择 8 号刀具	Q1.7	8 号刀具到达待卸/取刀位
I1.0	选择 9 号刀具	Q2.0	9 号刀具到达待卸/取刀位
I1.1	选择 10 号刀具	Q2.1	10 号刀具到达待卸/取刀位
I1.2	启动	Q0.0	伺服电机驱动刀库正转
I1.3	卸刀任务	Q0.1	伺服电机驱动刀库反转
		Q0.2	卸刀/取刀完成

2.1.2 刀库卸刀的程序设计

(1) 用户通过控制 PC 对系统进行换刀操作, 系统启动 PLC, PLC 接收到卸刀任务指令, 并进行卸刀操作。同时 PLC 读取主轴末端制孔执行器当前刀具号, 即待卸刀具号, 将数据传送到存储器 MW2 中。

(2) PLC 读取刀库待卸/取位置的当前刀具号, 将数据传送到存储器 MW0 中, 并对待卸刀具号和刀库待卸/取位置的当前刀具号进行

比较。①当 $MW2 > MW0$, 则进行运算 $MW2 - MW0$, 将其结果数据传送到存储器 $MW4$ 中。若 $MW4 < 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照正方向转动; 若 $MW4 > 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照反方向转动, 将待卸刀具转到刀库待卸/取位置。②当 $MW2 = MW0$, 即待卸刀具号与刀库待卸/取位置的当前刀具号相同, 无需转动刀盘。③当 $MW2 < MW0$, 则进行运算 $MW2 + 10 - MW0$, 将其结果数据传送到存储器 $MW4$ 中。若 $MW4 < 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照正方向转动; 若 $MW4 > 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照反方向转动。将待卸刀具转到刀库待卸/取位置。

(3) PLC 对待卸刀具号与刀库待卸/取位置的当前刀具号进行确认, 确认无误后, 由外部机器人进行卸刀操作。

2.1.3 刀库取刀的程序设计

(1) 用户通过控制 PC 对系统进行换刀操作, 系统启动 PLC, PLC 接收到取刀任务指令, 并进行取刀操作。同时 PLC 读取刀库待卸/取位置的当前刀具号, 将数据传送到存储器 $MW0$ 中。

(2) PLC 读取待取刀具号, 将数据传送到存储器 $MW2$ 中, 并对待取刀具号和刀库待卸/取位置的当前刀具号进行比较。①当 $MW2 > MW0$, 则进行运算 $MW2 - MW0$, 将其结果数据传送到存储器 $MW4$ 中。若 $MW4 < 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照正方向转动; 若 $MW4 > 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照反方向转动, 将待取刀具转到刀库待卸/取位置。②当 $MW2 = MW0$, 即待取刀具号与刀库待卸/取位置的当前刀具号相同, 无需转动刀盘。③当 $MW2 < MW0$, 则进行运算 $MW2 + 10 - MW0$, 将其结果数据传送到存储器 $MW4$ 中。若 $MW4 < 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照正方向转动; 若 $MW4 > 5$, 则伺服电机驱动刀盘按照反方向转动。将待取刀具转到刀库待卸/取位置。

(3) PLC 对待取刀具号与刀库待卸/取位置的当前刀具号进行确认, 确认无误后, 由外部

机器人进行取刀操作。

2.2 机器人系统

2.2.1 机器人的配置

选用型号为 KR60 的 KUKA 机器人对大型工件进行自动制孔加工, 这款工业机器人采用 KRC4 控制管理系统, 它集智能化的机器人操作过程控制、逻辑过程控制、运动过程控制、安全控制和工艺流程管理控制于一体, 控制系统的各个模块之间可以相互实时通信, 也可利用以太网实现快速通讯, 数据的传输及信号通信有专门的软件安全防火墙, 使得通讯网络更加安全。在 KUKA 机器人主轴末端安装制孔执行器用于完成对斗笠式刀库待卸/取位置上刀具的卸/取任务, 从而实现上级控制器 PLC 对机器人运动的管理和控制。为此需要在机器人控制柜端配置 CELL SRC 程序, 以及输入和输出端信号的外部自动运行接口, 在上级控制器 PLC 侧编辑外部自动程序。机器人控制柜在外部自动程序运行方式下, 通过外部自动运行接口与上级控制器 PLC 进行通讯。上级控制器 PLC 可以通过外部自动运行接口发送与机器人外部自动运行相关的信号: 机器人控制柜的启动和停止信号、机器人程序启动和编号信号以及故障确认信号等。机器人控制系统也向上级控制器 PLC 发送相关的反馈信号, 如运行状态信号、故障状态信号^[9-10]。

2.2.2 KUKA 机器人与 PLC 通讯的配置

KUKA 机器人选用 PROFINET 通讯协议与西门子 PLC S7-1200 CPU1214 进行通讯, 其通讯方式的优点在于, 机器人在外部自动运行时需要与上级控制器 PLC 进行信号的交互, 采用 PROFINET 通讯协议, 可以解除机器人和上级控制器 PLC 的通讯限制, 使其信号交互更加稳定^[11]。所以, 我们建立了一个以西门子 PLC 为核心、包含 KUKA 机器人控制柜和机器人的通讯系统。在 workvisual 软件中对 KRC4 控制柜进行 PROFINET 项目配置: 将 KRC4 的输入输出端口映射到 PROFINET I/O 地址上, 将 PLC IP 地址与 KUKA 机器人控制柜 IP 地址改成同网段; 在 TIA Portal V15

软件中将 KUKA 机器人硬件分配到 PROFINET 子网传送过来的信号映射到 PLC IO 上,通过 MOVE 指令完成机器人程序号选择和程序号选中监控。

2.2.3 KUKA 机器人任务程序的编写

换刀任务可分为刀库卸刀任务和刀库取刀任务。主轴末端制孔执行器无刀,取刀任务;主轴末端制孔执行器有刀,卸刀任务;主轴末端制孔执行器有刀卸刀,再取刀任务。KUKA 机器人对这些任务进行模块化编程,与上级控制器 PLC 进行信号交互,保证机器人的运动与刀库的卸/取刀指令一致,实现机器人在接收到上级控制器 PLC 的任务信号时可以对信号做出相应的动作,配合刀库完成卸/取刀具任务^[12]。在遇到紧急故障的时候,上级控制器 PLC 有相应的中断程序对故障进行处理。主要交互信号表如表 2 所示。

表 2 主要交互信号表

交互数据信号	类型	上级 控制器	机器人
刀库卸刀任务	BOOL	OUT	IN
刀库取刀任务	BOOL	OUT	IN
主轴末端制孔执行器无刀,取刀任务	BOOL	OUT	IN
主轴末端制孔执行器有刀,卸刀任务	BOOL	OUT	IN
主轴末端制孔执行器有刀卸刀,再取刀任务	BOOL	OUT	IN
故障	BOOL	OUT	IN
启动	BOOL	OUT	IN
主轴末端制孔执行器上的刀具号	INT	IN	OUT
主轴末端制孔执行器是否有刀	BOOL	IN	OUT
主轴末端制孔执行器到达待卸/取刀位置	BOOL	IN	OUT
主轴末端制孔执行器卸刀应答	BOOL	IN	OUT
主轴末端制孔执行器取刀应答	BOOL	IN	OUT
任务完成准确	BOOL	IN	OUT

3 自动换刀系统卸/取刀功能的实现

自动换刀系统需要各个部分协调工作才能完成自动换刀任务,系统控制流程图如图 3 所示。

(1)用户通过控制 PC 对系统进行换刀操作,系统启动 PLC,同时 PLC 启动 KUKA 机器人做换刀操作准备。

(2)机器人对主轴末端制孔执行器进行刀具检测,若无刀具,上级控制器 PLC 对机器人

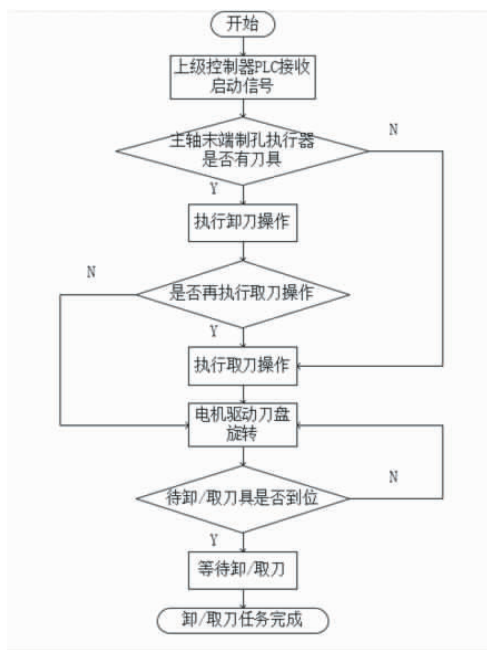


图 3 自动换刀系统控制流程图

发出主轴末端制孔执行器无刀,取刀任务;同时上级控制器 PLC 对刀库、机器人发送取刀任务。刀库驱动装置将待取刀具转至刀库待卸/取刀具位置,上级控制器 PLC 确认后,对机器人发送取刀任务,主轴末端制孔执行器到达待卸/取刀位置,机器人完成取刀。机器人向上级控制器 PLC 发送主轴末端制孔执行器取刀应答;同时机器人对所取刀具号与目标刀具号再次进行比较,确认无误后,发送任务完成确认信号。

(3)机器人对主轴末端制孔执行器进行刀具检测,若有刀具,再进行卸刀后是否取刀的判断,若卸刀后无需取刀,上级控制器 PLC 对机器人发出主轴末端制孔执行器有刀,卸刀任务;同时上级控制器 PLC 对刀库、机器人发送卸刀任务。刀库驱动装置将待卸刀具转至刀库待卸/取刀具位置,上级控制器 PLC 确认无误后,对机器人发送卸刀任务,主轴末端制孔执行器到达待卸/取刀位置,机器人完成卸刀。机器人向上级控制器 PLC 发送主轴末端制孔执行器卸刀应答;同时机器人对所卸刀具号与目标刀具号再次进行比较,确认无误后,发送任务完成确认信号。若卸刀后再进行取刀,上级控制器 PLC 对机器人发出主轴末端制孔执行器有刀

卸刀,再取刀任务;同时上级控制器 PLC 对刀库、机器人发送卸刀任务。刀库驱动装置将待卸刀具转至刀库待卸/取刀具位置,上级控制器 PLC 确认后,对机器人发送卸刀任务,主轴末端制孔执行器到达待卸/取刀位置,机器人完成卸刀。机器人向上级控制器 PLC 发送主轴末端制孔执行器卸刀应答。此时上级控制器 PLC 再对刀库、机器人发送取刀任务。刀库驱动装置将待取刀具转至刀库待卸/取刀具位置,上级控制器 PLC 确认后,对机器人发送取刀任务,机器人完成取刀。机器人向上级控制器 PLC 发送主轴末端制孔执行器取刀应答;同时机器人对所取刀具号与目标刀具号再次进行比较,确认无误后,发送任务完成确认信号。

4 制孔机器人配备装置及生产车间设计

在实际加工生产中,可以在机器人的底部加装水平移动工作台,方便制孔机器人进行卸/取刀和制孔加工的操作,机器人移动工作台如图 4 所示。

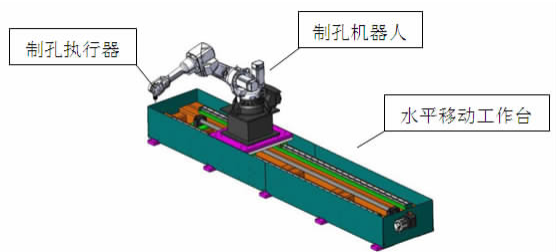


图 4 机器人移动工作台

由于机器人的工作范围有限,可以配置柔性翻转装置,将待加工工件放入设备舱中,这样制孔机器人进行制孔作业时,舱体可以随着柔性翻转装置进行 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 转动,实时调整设备舱,将设备舱调整到合适的位置,以方便制孔作业。柔性翻转装置如图 5 所示。

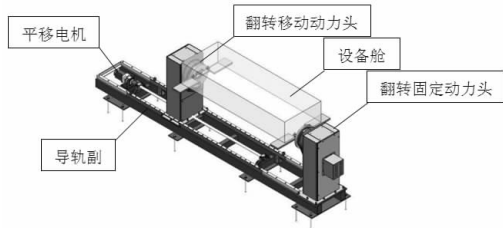


图 5 柔性翻转装置

工件加工完成后需要进行搬运,对于体积较大、质量较重的工件,可以增加移动吊臂对其进行转移。移动吊臂如图 6 所示。



图 6 移动吊臂

制孔机器人加工车间的效果图如图 7 所示。

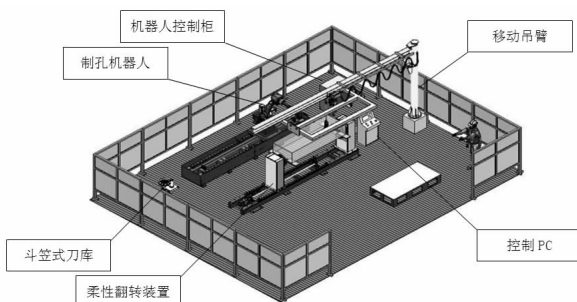


图 7 制孔机器人加工车间效果图

5 结论

本文针对大型工件制孔加工存在效率不高、难以控制其加工精度的现状,设计了 KUKA 制孔机器人自动换刀系统,相对于传统的制孔加工程序,机器人自动换刀系统具有更高的效率和精度,同时换刀操作简单、安全。

参考文献:

- [1] 杜兆才,姚艳彬,王健. 机器人钻铆系统研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015(4):26-31.
- [2] BI S S, LIANG J. Robotic drilling system for titanium structures[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54:767-774.
- [3] FANG Q, CHEN W D, ZHAO A A, et al. Control system designing for correcting wing-fuselage assembly deformation of a large aircraft[J]. Assembly Automation, 2017, 37(1):22-23. (下转第 30 页)

- 准出版社,2007.
- [12] 王家宏,雷思莉. 磺酸基改性磁性吸附剂去除水中的 $\text{Cu}(\text{II})$ [J]. 环境化学,2019,38(8):1-8.
- [13] 王喜洋. 果胶修饰的磁性纳米材料吸附剂的制备及其去除重金属的研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [14] 曹向宇,李垒,陈灏. 羧甲基纤维素/ Fe_3O_4 复合纳米磁性材料的制备、表征及吸附性能的研究[J]. 化学学报,2010,68(15):1461-1466.
- [15] GÉRENTE C, MESNIL P C D, ANDRÈS Y, et al. Removal of metal ions from aqueous solution on low cost natural polysaccharides: Sorption mechanism approach[J]. Reactive & Functional Polymers,2000,46(2):135-144.
- [16] LIANG S, GUO X Y, FENG N C, et al. Isotherms, kinetics and thermodynamic studies of adsorption of Cu^{2+} from aqueous solutions by $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$ type orange peel adsorbents[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,174(1):756-762.
- [17] 刘延湘,黄彪,张丽. 花生壳生物炭对水中重金属 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 的吸附研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(13):81-85.
- [18] 余峻峰,陈培荣,俞志敏,等. KOH 活化木屑生物炭制备活性炭及其表征[J]. 应用化学,2013,30(9):1017-1022.
- [19] 赵涛,蒋成爱,丘锦荣,等. 皇竹草生物炭对水中磺胺类抗生素吸附性能研究[J]. 水处理技术,2017,43(4):56-65.
- [20] 吕宏虹,宫艳艳,唐景春,等. 生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展[J]. 农业环境科学学报,2015,34(8):1429-1440.
- [21] 叶协锋,于晓娜,周涵君,等. 不同秸秆生物炭的孔隙结构及其差异[J]. 生物质化学工程,2019,53(2):41-46.
- [22] 安增莉. 生物炭的制备及其对 $\text{Pb}(\text{II})$ 的吸附特性研究[D]. 泉州:华侨大学,2011.
- [23] 近藤精一,石川达夫,安部郁夫. 吸附科学[M]. 李国希,译. 北京:化学工业出版社,2006:96.

(责任编辑:李秀荣)

(上接第 5 页)

- [4] OLSSON T, HAAGE M, KIHLMAN H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing,2010,26(1):24-38.
- [5] LIANG J, BI S S. Design and experimental study of an end effector for robotic drilling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2010,50:399-407.
- [6] 牛军燕,顾寄南. 基于 PLC 的自动换刀系统研究[J]. 制造业自动化,2010,32(6):35-36.
- [7] 王蕊,张孝元,高昆,等. 基于 PLC 的刀库自动换刀控制系统设计[J]. 电子技术与软件工程,2018(13):110-111.
- [8] 刘媛媛. FANUC 斗笠式刀库换刀的控制与实现[J]. 机械工程与自动化,2018(4):163-164.
- [9] PIGAN R. 西门子 PROFINET 工业通信指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2007:25-38.
- [10] 林燕文,李曙生. 工业机器人应用基础——基于 KUKA 机器人[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016:192-195.
- [11] 郭磊,王培光,宗晓萍. 基于 KUKA 机器人的 PROFINET 协议通讯分析[J]. 电子世界,2017(6):113-114.
- [12] 李维臣,沙伟,孙德志,等. KUKA 机器人在 840D 刀库管理中的应用研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(2):150-153.

(责任编辑:夏玉玲)