

薄膜舱波纹板自动焊接机器人系统设计

韩晴清,蒋毅,周超

(江南大学 机械工程学院,江苏 无锡 214122)

摘要:针对液化天然气运输船 Mark III 型薄膜舱制造时存在焊接工况特殊、手工焊接效率较低的现状,设计一种对薄膜舱波纹板焊接有良好适应性的轻量型冗余自由度焊接机器人系统。该机器人能够在检测装置和控制系统的配合下实现预定轨迹的焊接运动,并通过结构设计实现不同工位间的快速切换。通过对焊接工艺及实际需求的分析,对机器人的结构构型、控制系统架构、系统软件、误差补偿策略以及人机界面进行设计,搭建了机器人平台进行实验验证。结果表明:机器人系统设计合理,轨迹误差小于 0.6 mm,能够满足薄膜舱波纹板自动焊接需求。

关键词:薄膜舱;焊接机器人;串并混联;PID 控制;运动控制

中图分类号:TP242.3;TG433 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0159-05

Design of Welding Robot System for Membrane Tank Corrugated Plate Automatic Welding

HAN Qingqing, JIANG Yi, ZHOU Chao

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In view of the special welding conditions and low welding efficiency of manual welding in the manufacturing of Mark III membrane tank of LNG ships, a lightweight redundant degree of freedom welding robot with good adaptability to the welding of corrugated plate of membrane tank was designed, by which the welding motion of predetermined trajectory with the cooperation of detection device and control system was realized, and fast switching between different stations through mechanism design was fulfilled. Through the analysis of welding process and actual requirements, the structure configuration, control system architecture, system software, error compensation strategy and human-machine interface of the robot were designed, and a robot experimental platform was built for experimental verification. The results show that the design of the robot system is reasonable with trajectory error less than 0.6 mm, which meets the requirements of automatic welding of corrugated plate in membrane tank.

Keywords: membrane tank; welding robot; series-parallel hybrid; PID control; motion control

0 引言

薄膜型液货舱因抗冲击能力好、舱容利用率高、蒸发率低以及维护费用少等优点,在国际液化天然气的船舶运输领域得到越来越广泛的应用^[1-2]。薄膜型液货舱主屏壁层由厚 1.2 mm 的 304L 不锈钢冲压波纹板焊接而成。该薄膜波纹板上有相互交叉、大小不一的槽型结构,结构交错处呈褶皱^[3],形状较为复杂,目前采用手工钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)进行焊接。但手工焊接需搭建高空作业平台,不仅过程复杂、效率低下,也难以保证焊接质量。因此研发适用于薄膜舱自动焊接的设备和方法具有重要意义与应用价值。

目前,针对机器人自动化焊接的研究多聚焦于基于光学手段的高精度焊缝识别与跟踪技术^[4-6],而薄膜舱波纹板焊接存在焊材反光率高、热变形明显和焊缝长度大等特点,且焊接位置通常在 3 m 以上的舱顶及侧壁,因此通用型焊接机器人难以到达预定工作位置准确完成焊缝检测与焊接任务。针对上述问题,本文设计了一种用于薄膜舱

波纹板焊接的串-并-串混联的机器人构型,采用分层设计与模块化的思想完成了控制系统设计,针对焊接过程中存在的热变形问题进行了焊接误差补偿策略研究,最后搭建机器人实验平台并通过实验证明了机器人系统设计的可行性。

1 总体方案设计

1.1 设计要求

薄膜型液货舱采用全封闭大空间构造,舱壁呈三明治多层结构,主屏壁层由薄膜波纹板采用 TIG、不填丝搭接方式焊接而成。这种焊接方式电弧自调性较差,因此对焊接距离较为敏感。薄膜舱波纹板焊接机器人的功能是对人工初步点焊固定于舱壁的波纹板进行连续 TIG 焊接,基于以上分析,机器人需满足以下 4 个要求:

- 1) 适应高空作业,同时兼顾不同焊接位置切换时的效率;
- 2) 能够控制焊枪始终与焊缝保持一定距离和夹角,

基金项目:国家自然科学基金项目(51675233)

第一作者简介:韩晴清(1996—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,研究方向为机械电子工程。

满足薄膜舱 TIG 焊接标准;

- 3) 能连续焊接 1.5 m 以上的长焊缝;
- 4) 在工况恶劣的焊接条件下保持良好鲁棒性。

1.2 总体方案

为满足上述要求,机器人结构上拟采用轻量化、可分离的方案,通过 3 个正交的平移自由度实现焊缝长度(x)、宽度(y)和高度(z)方向上的距离调整,通过 1 个旋转自由度(B)实现焊枪与焊缝的夹角调节,并进行自由度冗余设计;通过一个独立的焊枪伸缩自由度(W)对焊缝变形误差进行动态补偿,根据轴关节运动特性和工作空间需求,设计各轴传动参数如表 1 所示。

表 1 轴关节传动参数

轴号	轴类型	传动方式	行程	减速比	导程/mm
x	平动轴	齿轮齿条	2 m	1 : 30	π
y	平动轴	同步带+滚珠丝杆	50 mm	1 : 1	4
z	平动轴	滚珠丝杆	100 mm	1 : 1	10
B	转动轴	齿轮	$\pm 60^\circ$	1 : 80	—
W	平动轴	滚珠丝杆	100 mm	1 : 1	4

根据上节中的设计要求 4),应尽量降低控制系统各功能模块的耦合度并保证数据交互的稳定性。设计控制系统结构如图 1 所示。上层是监控系统,由 IPS 触摸屏和手持终端实现人机交互功能;搭载 ARM-A72 处理器的 Raspberry Pi 4B 开发板作为主控系统上位机,接收监控系统指令和各类传感器反馈,完成机器人的运动控制和误差补偿计算;台达泛用型控制器 AS332P-A 作为从控系统下位机并以 RS485 总线为通信介质与主控系统进行 Modbus 通信,将接收到的运动控制指令转换为脉冲和方向信号下发至各关节步进电机驱动器,实现机器人运动控制。

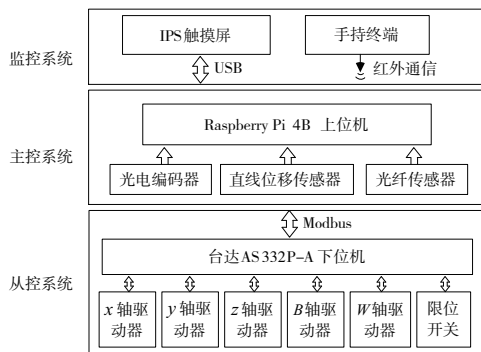


图 1 控制系统结构框图

2 机器人结构设计

2.1 整体设计

所设计的机器人^[7]平焊工位三维图如图 2 所示,整体采用轻小设计,包括行走机构、快速装拆机构、位姿调整机构和末端装置共 4 个部分。其中,行走机构可使用专用

夹具固定于任意波纹褶皱处,使机器人可以沿焊缝方向移动,扩大机器人的工作空间;位姿调整机构负责改变机器人位姿,使焊枪始终与波纹板保持一定的距离和角度,满足焊接工艺需求;快速装拆机构可将机器人本体与行走机构导轨快速分离,完成不同焊接工位相互切换,提高生产效率;末端装置搭载焊枪及各类传感器,实现检测和焊接功能。

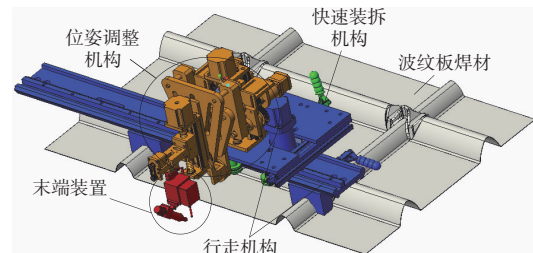
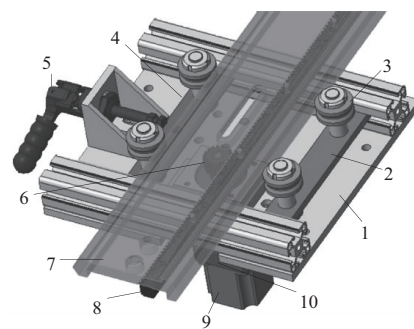


图 2 薄膜舱自动焊接机器人三维模型

2.2 行走与快速装拆机构的设计

为实现上节 1) 和 3) 两个设计要求,即实现对长焊缝的焊接并兼顾人机结合的工作效率,设计行走机构、快速装拆机构如图 3 所示。



- 1—机体底板;2—固定侧滚轮底板;3—梯形槽滚轮;
- 4—滑动侧滚轮底板;5—快速夹具;6—齿轮;7—导轨;
- 8—齿条;9— x 轴步进电机;10—行星减速机。

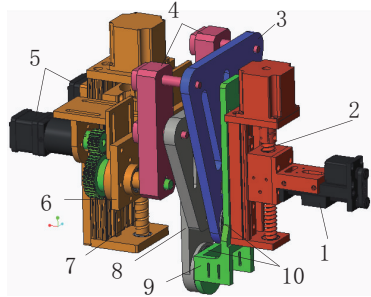
图 3 行走与快速装拆机构

机器人本体通过梯形槽滚轮 3 和导轨 7 的配合实现固定和导向,通过带行星减速机 10 的步进电机 9 带动齿轮 6 和齿条 8 进行传动,实现 x 方向的行走功能。在完成一条长焊缝的焊接后,只需打开自锁型快速夹具 5 使滑动侧滚轮底板 4 带动滚轮与导轨分离,将机器人移动至其他工位的导轨上并再次锁紧快速夹具,即可实现平焊、横焊和立焊等不同焊接位置间的快速切换。

2.3 位姿调整机构设计

机器人位姿调整机构以串-并-串混联的形式传动,三维模型如图 4 所示。为提高传动链的整体刚度并防止机器人转动关节与焊材产生干涉,使用并联机构代替单独旋转关节实现机器人旋转自由度;采用左右对称的双平行四边形构型方案,由并联定/动平台 6/9、大臂 4、前/后三角连接板 3/8 和交叉滚子轴承 10 组成。这种设计可以使 B 轴驱动电机 5 通过齿轮啮合带动大臂 4 转动时,并联动

平台 9 以相同的角速度跟随大臂转动,从而实现焊枪的角度调整并避免转动控制的复杂化;并联机构的定平台 6 搭载于 z 轴丝杆 7 上,通过丝杆实现 z 方向运动; W 轴丝杆 2 与 y 轴丝杆 1 串联搭载于并联机构动平台 9 上,分别实现焊枪伸缩运动和 y 向移动。整个机构通过 z 轴-并联机构- W/y 轴(串-并-串)运动链配合实现末端的位置和姿态调整,从而满足 TIG 焊接工艺要求,在结构设计上满足上节设计要求 2)。



1— y 轴丝杆;2— W 轴丝杆;3—前三角连接板;4—大臂;
5— B 轴驱动电机;6—并联定平台;7— z 轴丝杆;
8—后三角连接板;9—并联动平台;10—交叉滚子轴承。

图 4 位姿调整机构

3 控制系统设计

3.1 软件设计

所设计的控制系统软件包括运行于 Linux 操作系统的上位机软件和 AS332P-A 运动控制系统的下位机软件两部分。上位机软件采用基于 QT 框架的多线程架构,在 PC 中开发并通过交叉编译部署到 Raspberry Pi 4B 中运行,如图 5 所示。

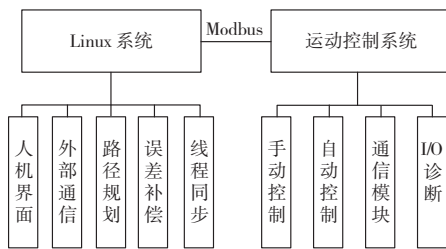


图 5 控制软件结构图

该软件 Linux 系统包括人机界面、外部通信、路径规划、误差补偿和线程同步 5 个部分,主要实现人机交互和各轴运动控制量的计算和下发。下位机 AS332P-A 内置高速脉冲运动控制函数,可对各轴运动位置、速度、加速度及启动/结束速度等参数进行设定。软件运动控制系统包括手动控制、自动控制、通信模块和 I/O 诊断 4 个部分,主要功能是利用运动控制函数将上位机指令转换为轴驱动命令,衔接焊接轨迹点之间的速度并通过梯形加减速实现焊接过程平稳过渡。

3.2 控制流程

薄膜舱波纹板焊缝包括平面焊缝和波纹面焊缝两种类型,平面焊缝在 x 方向的长度通常不同且可能存在 y 方向偏移,因此在焊前一般需要进行少量点位示教才能获得焊接轨迹点和速度序列;而波纹面焊缝规格较为固定且不存在 y 方向偏移。因此可预先建立焊缝轨迹的数学模型并将之存储为本地 TXT 文件,每次焊接时将 TXT 文件读入内存,在使用时直接进行指令下发。机器人自动焊接控制流程如图 6 所示。

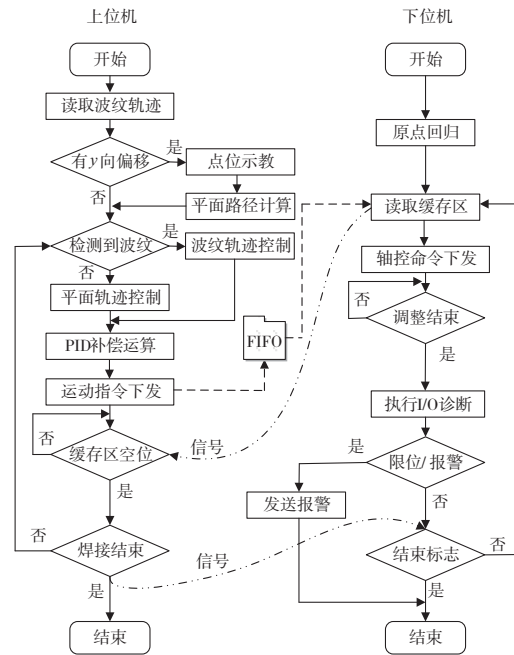


图 6 机器人自动焊接控制流程

上位机获取平面焊缝和波纹面焊缝轨迹后,以光纤传感器检测状态为依据执行相应的控制程序,并在每个控制周期对直线位移传感器 (linear variable differential transformer, LVDT) 的数据进行 PID 运算,得到 W 轴焊缝变形补偿信息,实现对焊缝变形误差的动态补偿。在执行运动控制程序时,由于数据计算和指令下发时间小于轴位置调整时间,为防止数据紊乱和内存溢出,在下位机数据寄存器中为每个轴开辟先入先出 (first input first output, FIFO) 缓存区,存储后续运动位置和速度信息。当轴调整到位时,下位机从 FIFO 中读出数据并继续进行运动控制,同时由输出口发送缓存区空位信号,该信号将触发上位机外部中断,致使上位机再次发送运动指令,保证通信过程有序进行。

3.3 轴关节驱动设计

步进电机是一种工业上应用非常广泛的驱动系统,有着良好的位置精度和可靠性^[8]。本文所设计的机器人 5 个运动轴均使用步距角为 1.8° 的两相混合式步进电机进行驱动。经计算,各运动轴电机选型及相关参数如表 2 所示。

表2 各轴电机型号及参数

轴号	驱动器型号	电机型号	细分数	额定电流/A	额定转矩/(Nm)
x	HB808C	57HBM20	2 000	4.2	2.20
y	FY28EL180BC1	FYDB504T	1 600	1.8	0.16
z	HBS57	57HSE2N	4 000	4.0	2.20
B	MS-2500	42CME04	1 600	2.0	0.48
W	HSC42A	42HS34ES	1 600	1.7	0.40

为减小步进电机运行时的振动并提高分辨率,对步进电机进行细分控制,细分后直线轴及转动轴的运动速度 V 和脉冲频率 F 的转换关系分别如下所示:

$$V = \frac{H \cdot R}{S} \cdot F \quad (1)$$

$$V = \frac{2\pi R}{S} \cdot F \quad (2)$$

式中: H 为导程; R 为减速比; S 为电机驱动脉冲细分数。

各轴驱动原理如图7所示,步进电机驱动器根据下位机控制脉冲的频率与个数,控制步进电机以指定角速度转动指定角度。通过编码器的反馈信息实现步进电机和驱动器间的位置闭环控制,驱动器内部运行矢量型控制算法,对步进电机速度和电流进行闭环控制,解决步进电机丢步和高速运转时转矩下降的问题。通过以上位置、速度和电流3个闭环,可实现对机器人各轴的精确运动控制。上位机可通过记录编码器脉冲信号并代入机器人运动学正解模型,从而计算机器人末端所在位置,并通过插补算法实现点位示教功能。

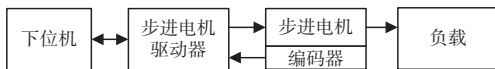


图7 关节驱动控制方案

3.4 基于PID的误差补偿控制

在实际焊接中,因存在焊材热应力变形、波纹板制造误差等因素,焊枪与焊缝的实际距离可能存在一定偏差,此时机器人按照预定轨迹运动将难以保证焊接质量,因此需要对这种偏差加以补偿和修正,实现原理如图8所示。

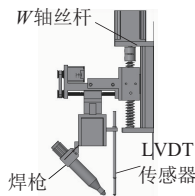


图8 误差补偿原理图

LVDT传感器的探头略低于焊枪尖端且处于压缩状态,机器人移动过程中,通过LVDT实时测量焊枪末端与焊材的距离,并对W轴丝杆进行调整,控制过程采用增量式PID算法,其基本控制规律可用式(3)表示^[9]。

$$\Delta u(k) = K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] + K_i \cdot e(k) + K_d \cdot [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3)$$

式中: $\Delta u(k)$ 是第 k 个控制周期 W 轴步进电机的速度增量; $e(k)$ 代表第 k 个采样时刻焊枪高度与设定值的差; $k=0,1,2,3,\dots$; K_p 、 K_i 、 K_d 分别是比例、积分、微分环节系数。

在PID运算中,积分环节的作用是消除静态误差,提高系统精度,但在实际焊接过程中发现,瞬间的热变形可能使偏差值 $e(k)$ 产生较大突变,造成PID运算积分积累进而引发超调,使焊枪高度出现振荡,这在波纹板TIG焊接过程中是绝对不允许的。因此本文对积分系数 K_i 作式(4)所示修正,修正系数 γ 取值如式(5)所示。

$$K'_i = \gamma K_i \quad (4)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1, & |e(k)| \leq \alpha \\ \frac{\beta - |e(k)|}{\beta - \alpha}, & \alpha < |e(k)| < \beta \\ 0, & |e(k)| \geq \beta \end{cases} \quad (5)$$

通过实验测试,将LVDT压缩量设定为2mm, $\alpha=1$, $\beta=0.3$,并使用临界比例法^[10]完成PID参数整定。此时,积分项的累加速度与焊枪高度偏差值线性相关:在偏差增大时削减乃至去除积分作用,防止积分饱和引起系统调整时间过长,而在偏差较小时逐渐恢复积分作用,快速消除静态误差。通过改变积分速度,保证误差补偿过程快速、焊枪高度控制准确。

3.5 人机界面设计

系统人机界面使用QT自带的UI设计器进行开发,通过Micro HDMI和USB接口将IPS触摸屏连接至Raspberry Pi 4B开发板实现人机交互,包括主界面、手动和自动模式3部分。其中,主界面如图9所示,主要实现I/O状态显示、各轴回零以及参数读写功能;手动模式可控制焊枪开关并对各轴进行点动和定长移动;自动模式可在选定波纹板规格参数和焊接参数后,实现模拟焊接运动或自动焊接。



图9 人机主界面

4 实验验证

4.1 不同工位下的运动实验

为验证上述机器人结构方案的可行性,搭建机器人样

机实验平台,机身以 6061 铝合金为主体材料,本体底座尺寸为 270 mm×280 mm,总高度 350 mm,本体质量仅 13 kg。如图 10 所示,当机器人分别处于平焊、立焊及横焊位置时,通过手持式终端遥控器对机器人进行点动控制。在运动过程中,机器人各关节运动顺滑,未出现干涉、噪声和抖动现象。

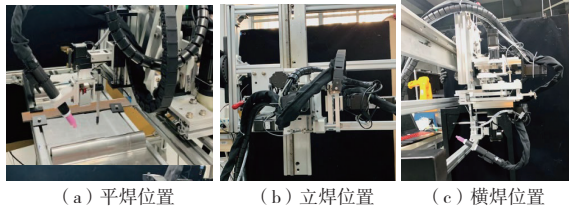


图 10 不同工位运动实验

4.2 波纹板焊接实验

为验证机器人系统实际工作性能,使用标准薄膜波纹板进行平焊位置的焊接实验,具体实施过程为:在自动模式下选定焊材规格为大波纹板,平均焊接速度 3 mm/s,此时,焊枪与波纹板表面距离为 1.9 mm。在运动过程中,每隔一段时间记录各关节绝对编码位置并代入机器人运动学正解模型。因 LVDT 可压缩,由此可获得 LVDT 的理论运动轨迹。实验结果如图 11 所示,由图可知:LVDT 末端理论运动轨迹与波纹板曲线有着较高的重合度,轨迹法向偏差值小于 0.6 mm,即运动过程中焊枪与焊缝的实际距离为 (1.9 ± 0.6) mm。焊缝形貌如图 12 所示,从图中可以看出:搭接焊缝温度场分布均匀,焊缝成形较好。

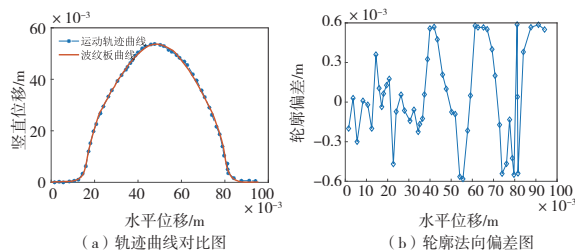


图 11 轨迹对比与偏差图

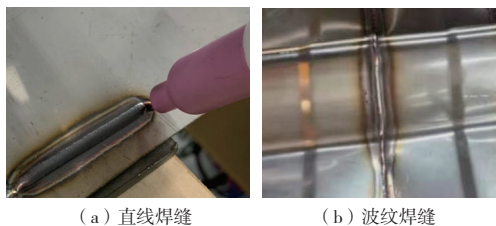


图 12 焊缝形貌

5 结语

针对目前液化天然气船 MARK III 型薄膜舱焊接制造时存在的工况复杂、手工 TIG 焊接效率低的问题,设计了一种适用于薄膜舱波纹板焊接的机器人系统。

1) 根据薄膜舱波纹板焊接的工艺特点和需求,采用轻量化、可分离的方案设计了串-并-串混联且具有冗余自由度的机器人构型及结构,实验结果表明:该机器人能够实现不同工位间的快速切换且移动平稳,因此结构设计较为合理。

2) 基于分层理念和模块化的设计思想实现了控制系统和软件设计,实验结果表明:机器人轨迹控制准确,焊接时焊枪高度可以保持在 (1.9 ± 0.6) mm,焊缝成形较好,能够满足不锈钢 TIG 焊接的要求。焊接速度相比于人工焊接(平均速度 8 m/h)提高了 35%,能够在保证焊接质量的同时提高薄膜舱焊接生产效率,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 谷林春,何萧. LNG 船舶液货舱技术市场发展现状[J]. 船舶物资与市场,2019(7):17-20.
- [2] 何继强. 小型 LNG 运输船在中国的发展前景[J]. 船舶工程,2012,34(4):4-6.
- [3] 谷云飞,陈熙,王亮,等. 薄膜型 LNG 货物围护系统模拟舱的建造关键技术[J]. 船舶与海洋工程,2015,31(2):62-67,73.
- [4] 倪伟峰. 基于 PSO 算法的焊接机器人视觉系统标定与初始位引导[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [5] 洪亚鲁. 基于焊缝激光跟踪技术的波纹板焊接机器人控制系统研发[D]. 济南:济南大学,2017.
- [6] BANAFIAN N, FESHARAKIFARD R, MENHAJ M B. Precise seam tracking in robotic welding by an improved image processing approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(1/2):251-270.
- [7] 蒋毅. 一种波纹板自动焊接机器人及其控制系统: 中国, CN113649741A[P]. 2021-11-16.
- [8] 曾康玲. 两相混合步进电机开环性能优化与闭环控制研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [9] 胡雪刚,王涛,张军,等. 基于国产 FPGA 的天线指向机构伺服控制器的设计[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):164-167.
- [10] LIU Z, CHEN C, ZHANG Y. Decentralized robust fuzzy adaptive control of humanoid robot manipulation with unknown actuator backlash [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(3):605-616.

收稿日期:2022-01-05