

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209069

# 基于FPGA的模糊PID控制在 下肢外骨骼中的应用研究\*

钟浩杰<sup>1</sup> 罗吉庆<sup>1</sup> 张石磊<sup>1</sup> 陈文浩<sup>2</sup> 宋胜利<sup>1</sup>

(1.陆军工程大学野战工程学院 南京 210007; 2.解放军 32518 部队 三明 365000)

**摘要:** 针对下肢外骨骼机器人的助力需求,提出了一种基于 Verilog HDL 硬件描述语言,现场可编程逻辑门阵列(FPGA)实现的自适应模糊 PID 控制系统设计方法,应用于下肢外骨骼机器人关节的驱动控制。首先,通过 MATLAB/Simulink 系统仿真软件,进行算法模型仿真,检验算法的稳定性及参数的准确性。再以 Quartus II 为开发平台,完成自适应模糊 PID 控制器的 Verilog HDL 分层设计,基于 FPGA 芯片 EP4CE10F17C8 来具体实现及验证。实验结果表明模糊 PID 控制可更快的达到稳定状态,超调量约降低 4.7%,且通过 FPGA 来实现控制算法更好地满足了下肢外骨骼机器人的控制需求。

**关键词:** 下肢外骨骼机器人;Verilog HDL;现场可编程逻辑门阵列;自适应模糊 PID 控制

**中图分类号:** TP242.6;TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Application research of fuzzy PID control based on FPGA in lower limb exoskeleton

Zhong Haojie<sup>1</sup> Luo Jiqing<sup>1</sup> Zhang Shilei<sup>1</sup> Chen Wenhao<sup>2</sup> Song Shengli<sup>1</sup>

(1. College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

2. PLA 32518 Troops, Sanming 365000, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of lower limb exoskeleton robot, an adaptive fuzzy PID control system design method based on Verilog HDL hardware description language and field programmable logic gate array (FPGA) was proposed, which was applied to drive and control the joint of lower limb exoskeleton robot. Firstly, the algorithm model was simulated by MATLAB/Simulink system simulation software to verify the stability of the algorithm and the accuracy of parameters. Then Quartus II was used as the development platform to complete the hierarchical design of Verilog HDL for adaptive fuzzy PID controller, which was realized and verified based on FPGA chip EP4CE10F17C8. The experimental results show that the fuzzy PID control can reach the stable state faster, and the overshoot is reduced by 4.7%, and the control algorithm is realized by FPGA to better meet the control requirements of the lower limb exoskeleton robot.

**Keywords:** lower limb exoskeleton robot; Verilog HDL; FPGA; adaptive fuzzy-PID control

## 0 引言

下肢外骨骼是一种结合了人的智力和机械的强壮性<sup>[1]</sup>,对穿戴者下肢进行运动助力的结构,其在医疗康复、单兵作战、抗震救灾等领域均有广阔的应用前景。目前国内外多家机构已经研发出下肢外骨骼机器人样机,以增强士兵的负重携行能力或帮助病人进行康复训练,如日本筑

波大学研制的 HAL 系列外骨骼<sup>[2]</sup>,通过结合肌电传感器和地面反作用力传感器来获取穿戴者的运动趋势;瑞士 Hocoma 公司的 Lokomat 康复机器人<sup>[3]</sup>使用轨迹跟踪的控制方式,来帮助病人进行康复训练;北京航空航天大学<sup>[4]</sup>和广西大学<sup>[5]</sup>研制的外骨骼采用 PID 控制与前馈、反馈控制相结合的控制方式,组合成闭环控制模型,来调整外骨骼的输出力矩,以逐步迭代的方式使踝关节力矩达到稳定的期

收稿日期:2022-02-23

\* 基金项目:陆军工程大学基础前沿科技创新项目(KYGYJQZL2210)、“机动保障工程”重点学科研究生预先研究课题项目(GYJDBZXK2102)资助

望值;太原理工大学张政团队根据传统PID算法,设计了BangBang-PD轨迹跟踪算法<sup>[6]</sup>,用于外骨骼的控制。经典PID虽然控制结构简单且被广泛的使用,但是下肢外骨骼机器人其工作环境及动力学模型具有很强的非线性和时变性<sup>[7]</sup>,需要适应不同的人群,不同的穿戴条件,因此系统的参数会时时发生变化,经典PID控制算法有时已经不能很好地满足需求。在对神经网络、滑模控制、模糊控制等智能算法进行对比后,由于模糊控制结构清晰,能够适用于各种复杂非线性问题,能够动态改变系统参数<sup>[8-9]</sup>,所以选取其与经典PID一起构成自适应模糊PID控制(Fuzzy-PID)来实现下肢外骨骼机器人的运动。

下肢外骨骼机器人采用无刷直流电机进行驱动,对于控制硬件通常采用的是单片机、DSP等。此外,在实际生产中,绝大多数模糊PID控制器也都是基于单片机来实现的。但是随着系统控制的不断复杂化,对于控制芯片也提出了更高的要求,例如数据计算速度要更快、可使用的储存资源要更大<sup>[10]</sup>。而FPGA芯片是伴随着超大规模集成电路技术发展而来的<sup>[11]</sup>,与单片机STM等控制芯片相比具有集成度高、灵活性好、实时性强等优点,另外由于FPGA的体系结构特别适用于并行预算的实现<sup>[12]</sup>,所以利用FPGA具有很高的实用价值。

## 1 自适应模糊PID控制器建立

对于常规数字式PID控制器,其表达式为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{K_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

相应的增量形式为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) = u(k-1) + K_0 e(k) + K_1 e(k-1) + K_2 e(k-2) \quad (2)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别代表比例系数、积分系数、微分系数;  $K_0 = K_p + K_i + K_d$ ,  $K_1 = -K_p - 2K_d$ ,  $K_2 = K_d$ 。

而模糊PID控制算法就是在经典PID控制算法的基础上引入一个模糊控制器,结构如图1所示。

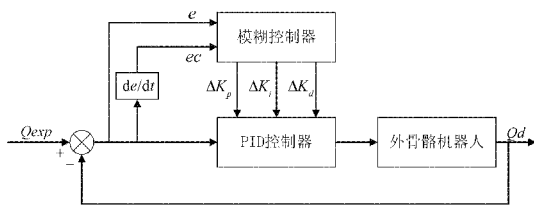


图1 自适应模糊PID结构

在本研究中将外骨骼机器人关节角度的期望值和实际值之间的误差与其微分形式<sup>[13]</sup>作为模糊控制器的输入,定义为  $e$ 、 $ec$ 。再通过模糊控制器进行模糊化、近似推理、清晰化处理<sup>[14]</sup>,输出修正量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  至PID控制器,由此实现对参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的自整定调节。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  为系统的初始参数,可由传统PID参数整定方法得到。

控制器具体参数设置如下:

### 1) 确定隶属度函数

如图2所示,将输入  $e$ 、 $ec$  和输出  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊子集均设定为 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)} 7档,这样能使模糊规则制定灵活,适应各种工况所需。同时将模糊论域范围均定义在区间  $[-3, 3]$ , 量化等级划分为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。

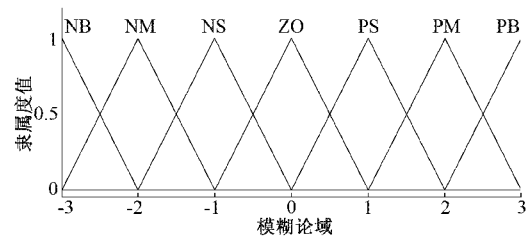


图2 e和ec的隶属度函数

对于隶属度函数选取三角形(trimf)隶属度函数。因为下肢外骨骼控制系统要求有较高的分辨率和灵敏度,此函数形状较尖,在论域范围内分布均匀,能对误差做出快速反应<sup>[15]</sup>。

### 2) 建立模糊规则

自适应模糊PID控制系统的核心部分就是模糊规则的制定,规则的好坏决定了控制系统能不准确、快速地对输入量进行正确的识别与输出。根据专家和实际操作者经验总结得出,模糊规则的形式如表1所示。

Rule1: if(e is NB)and(ec is NB)then(  $\Delta K_p$  is PB)and(  $\Delta K_i$  is NB)and(  $\Delta K_d$  is PS);

...

Rule49: if(e is PB)and(ec is PB)then(  $\Delta K_p$  is NB)and(  $\Delta K_i$  is PB)and(  $\Delta K_d$  is PB)。

### 3) 去模糊化

经过49条模糊规则推理后,输出的值为模糊量,因此要进行解模糊计算,即对输出值进行去模糊处理。对于下肢外骨骼机器人系统其模糊量集合是多个精确量的集合,故采用重心法(centroid)进行解模糊,表达式为:

$$u = \frac{\sum_{i=0}^n x_i u(x_i)}{\sum_{i=0}^n u(x_i)} \quad (4)$$

式中:  $u$  表示控制器输出,  $u(x_i)$  表示为隶属度函数值。

## 2 控制器参数仿真实验

以膝关节为研究对象,建立人机耦合系统模型,所设计的下肢外骨骼机器人其传递函数模型<sup>[16]</sup>如式(5)所示。

表 1  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  模糊规则

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PM NM NB	PS NS NB	ZO ZO NM	ZO ZO PS
NM	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PS NS NM	PS NS NM	ZO ZO NS	NS ZO ZO
NS	PM NB ZO	PM NM NS	PM NS NM	PS NS NM	ZO ZO NS	NS PS NS	NS PS ZO
ZO	PM NM ZO	PM NM NS	PS NS NS	ZO ZO MS	NS PS NS	NM PM NS	NM PM ZO
PS	PS NS ZO	PS NS ZO	ZO ZO ZO	NS PS ZO	NM PS ZO	NM PM ZO	NM PB ZO
PM	PS ZO PB	ZO ZO PS	NS PS PS	NS PS PS	NM PM PS	NB PB PS	NB PB PB
PB	ZO ZO PB	ZO ZO PM	NS PS PM	NM PM PM	NM PM PS	NB PB PS	NB PB PB

$$G(s) = 1/(2s^2 + 3.5s + 1) \quad (5)$$

仿真部分利用单关节传递函数模型构建 Simulink 模型, 结合自适应模糊 PID 算法与传统 PID 算法, 进行仿真, 如图 3 和 4 所示。

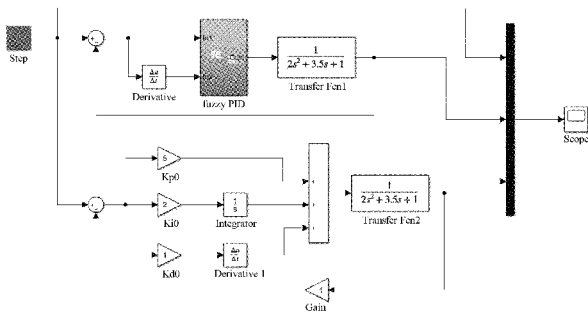


图 3 Simulink 算法模型

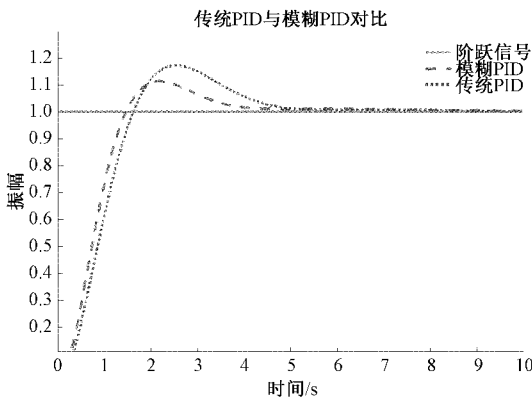


图 4 Simulink 仿真结果

通过图 4 仿真结果可以看出, 较比于传统 PID 控制, 模糊 PID 控制更为精确, 超调量约降低 4.7%, 且模糊 PID 控制能更快的到达稳定状态。基于上述, 控制器参数设置合理, 拟采用自适应模糊 PID 控制算法作为下肢外骨骼机器人控制系统的核心算法。

### 3 外骨骼控制系统

#### 3.1 控制架构

如图 5 所示。基于上述研究, 外骨骼硬件平台采用 FPGA 作为主控制器, 驱动电机为 Maxon 公司的 EC 60 系

列, 安装于下肢外骨骼机器人的髋关节和膝关节处, 驱动关节转动。此外, 电机上已集成霍尔传感器和编码器, 利用 Altium Designer 软件绘制电机连接板(板上放置了与霍尔传感器、编码器等连接的相关插座), 来实现将采集到的外骨骼每个关节变化的角度信息通过 CAN 通信的方式反馈至 FPGA 主控制芯片, 并以模糊 PID 为核心控制算法, 使外骨骼能够实时准确地跟踪穿戴者的步态曲线。

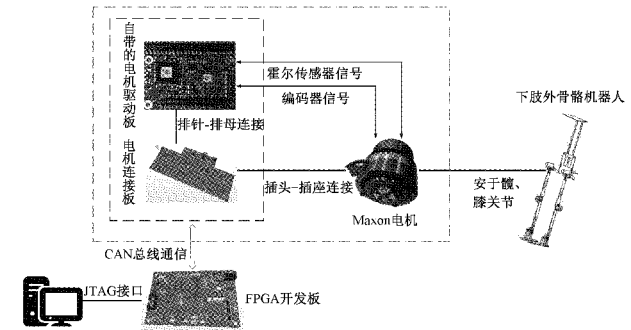


图 5 外骨骼硬件平台

#### 3.2 控制器的 Verilog HDL 分层设计

Verilog HDL 采用模块化的编程思路。本次程序主体主要分为误差生成模块、模糊量化模块、模糊处理模块、增量式 PID 模块。FPGA 芯片采用的是 Inter 公司的 Cyclone IV E 系列 EP4CE10F17C8, 工作频率 50 MHz, 程序设计具体如图 6 所示。

##### 1) 误差生成模块

该模块主要的功能是生成输入误差  $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$  及其  $e(k)$  的变化率  $ec(k)$ , 分别对应管脚 ek0、ek1、ek2、eck。这些误差及误差变化率, 一方面输送至模糊量化模块, 实现对  $e$ 、 $ec$  的模糊量化处理。另一方面输送至增量式 PID 模块, 根据式(2)进行相应计算。另外, 在模块功能框图中, 管脚 clk 代表系统时钟信号。管脚 rst\_n 代表系统复位信号, 低电平有效。管脚 rt 和 yt 分别代表设定期望值和实际测量值, 通过求差来计算  $e(k)$ 。

##### 2) 模糊量化模块

模糊量化设计就是将精确的数字量进行模糊化处理, 从而得到相应的模糊量, 本模块中模糊量化的对象是误差

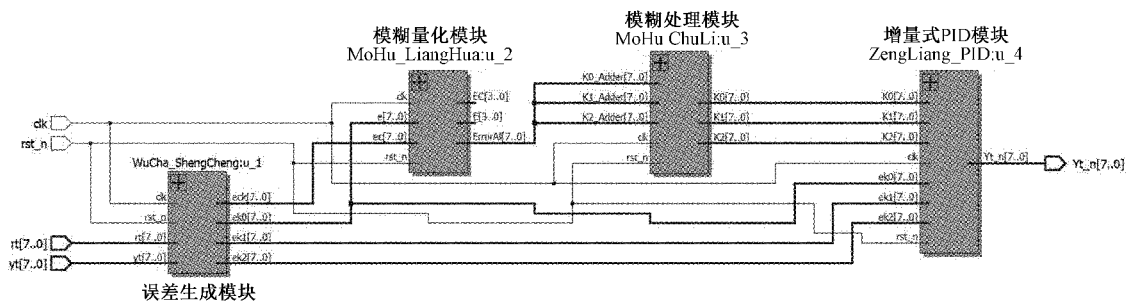


图6 模糊PID控制器系统功能框图

$e$  和误差变化率  $ec$ 。在上述控制器建立的过程中,就已经确定了  $e$  和  $ec$  的模糊子集、模糊论域、量化等级等相关参数。以误差  $e$  为例,模糊量化的具体思路为:假设  $e$  的数值范围是  $[-30, 30]$ ,由于采用了7级编码机制,结合四舍五入的方式,数值范围可划分为以下  $[-30, -25]$ 、 $[-25, -15]$ 、 $[-15, -5]$ 、 $[-5, 5]$ 、 $[5, 15]$ 、 $[15, 25]$ 、 $[25, 30]$  7个区间,对应到模糊论域量化等级上,即  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。也就是说当  $e$  的输入值为17时,此精确值在  $[15, 25]$  区间,因此对应的模糊量为2。误差变化率  $ec$  也是同样道理。

在模块功能框图中,管脚 E、EC 代表量化处理后的模糊量,为了使编程更为简洁,对量化等级元素进行编码,即二进制编码 0000 代表 -3、0001 代表 -2、0010 代表 -1、0011 代表 0,依次类推。另外,考虑到在模糊处理模块中,要联合 MATLAB 进行离线查表计算,为了节省 FPGA 芯片资源,方便进行寻址,引入输出管脚 ErrorAll[7:0],其中高4位为误差的量化编码,低4位为误差变化率的量化编码。

### 3) 模糊处理模块

模糊处理模块是控制器设计当中的核心模块,主要包含了模糊推理和解模糊两个方面的工作。从设计思想上讲,基于 FPGA 来实现模糊处理大致有两种方法,一种是 FPGA 上直接硬件实现,但这种方法计算非常繁复,编程困难;另一种是联合 MATLAB 的间接实现法,先利用 MATLAB 的模糊工具箱进行模糊推理,再按照一定的规则离线计算得出修正后的参数并存储到 Quartus II 软件中的 ROM(MIF 文件),以便通过查表方式进行解模糊清晰化并输出相应参数,这种方法可改善 FPGA 的工作效率,缓解编程困难。基于上述,在本次设计中将采用联合 MATLAB 的间接实现法。

该模块主要针对式(2)和(3)来进行,先借助 MATLAB 强大的计算能力,完成整个模糊规则表的建立及模糊推理和解模糊过程,最后形成各 PID 参数的模糊控制输出规则查询表,分别存储到3个不同的 MIF 文件中,以便对 PID 参数的修正量进行查询,然后再加上各自参数的初始值,完成对  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的自整定调节。再通过式子计算出  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  的数值,并输送至增量式 PID 模块中进行调用。

### 4) 增量式 PID 模块

在上述模块的基础之上,此模块的主要功能就是完成最后控制增量  $\Delta u(k)$  的计算,并根据式(2)计算出自适应模糊 PID 控制器的调整输出值,用于其他电机模块的控制输入。

## 4 试验研究

上述自适应模糊 PID 算法进行 Verilog 程序化处理后,基于图5所示的硬件平台进行试验。

以左膝关节为研究对象,以人体垂直站立时的关节状态为  $0^\circ$  初始状态,设定膝关节预期转动的角度为  $45^\circ$ ,并建立起底层 CAN 通信环境。从图7试验结果中可以看出,在采样时间 950 ms 左右,关节即完成一次预计转动,关节角度的实际变化输出量其波形变化曲线符合预期料想,并最终趋于稳定,与前期所设置的期望值相一致。试验结果表明,采用上述模糊 PID 算法并基于 FPGA 进行程序化处理用于实现下肢外骨骼机器人关节的运动控制是可行的,具有良好的动态特性和稳态精度,提高了控制系统的柔顺性。

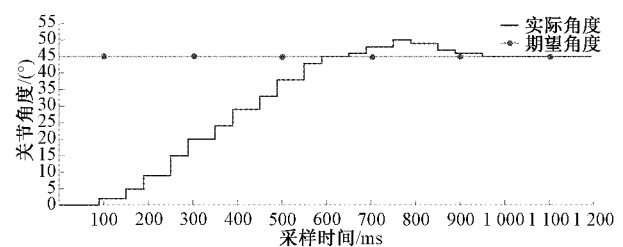


图7 试验结果

## 5 结论

本文搭建自适应模糊 PID 与传统 PID 相对比的仿真模型,采用 FPGA 的自适应模糊 PID 控制器,应用于下肢外骨骼机器人关节的驱动控制。首先,针对传统 PID 控制的不足,在原有算法的基础上引入模糊控制概念,建立起自适应模糊 PID 控制器模型,再通过 MATLAB/Simulink 及结合膝关节传递函数模型,进行仿真,仿真结果表明自适应模糊 PID 控制器参数设置合理,算法的控制效果得到了明显的改善,确定了以自适应模糊 PID 为核心控制算法

的设计思想。最后,利用 Quartus II 软件对控制器进行程序化处理,编写误差生成模块、模糊量化模块、模糊处理模块、增量式 PID 模块的 Verilog HDL 程序语段,基于 FPGA 芯片 EP4CE10F17C8 来具体实现及验证。

此设计方案合理可靠,取得了较好地控制效果,为下肢外骨骼机器人控制系统的优化及实现 4 个关节的联合运动轨迹跟踪控制提供了一定参考。

### 参考文献

- [1] 姚健,张乾勇. 人体步态数据测量系统的设计与实现[J]. 电子测量技术,2017,40(8):184-188.
- [2] HASSAN M, KADONE H, UENO T, et al. Feasibility of synergy-based exoskeleton robot control in hemiplegia [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2018, 26: 1233-1242.
- [3] SHI D, ZHANG W X, ZHANG W, et al. A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(4): 2-11.
- [4] WANG T M, PEI X, HOU T G, et al. An untethered cable-driven ankle exoskeleton with plantarflexion-dorsiflexion bidirectional movement assistance[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(5): 723-739.
- [5] 胡鸿越,胡立坤,刘贻达,等. 一种柔性下肢外骨骼控制策略研究[J]. 仪器仪表学报,2020, 41(3):184-191.
- [6] 李根生,倡国宁,徐飞. 下肢外骨骼机器人控制策略研究进展 [J]. 中国康复医学杂志,2018, 33(12): 1488-1494.
- [7] 尹贵,张小栋,陈江城,等. 模型不确定的下肢康复机器人轨迹跟踪自适应控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(11):1750-1757.
- [8] PANDIANGAN R M S, ARIFIN A, RISCIWAN A, et al. Design of fuzzy logic control in functional electrical stimulation(FES) cycling exercise for stroke patients [C]. 2020 International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia(CENIM), Indonesia Surabaya, 2020.
- [9] WATANABE T, TADANO T. Design of closed-loop fuzzy FES controller and tests in controlling knee extension movements [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2017, 100(9): 2261-2264.
- [10] NOORSAL E, IBRAHIM I R, RAHIM A F A, et al. Multilevel inverter switching controller using field programmable gate array (FPGA) [J]. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2017, 9(6): 684-709.
- [11] 张鹏. 浅谈 FPGA 器件设计技术发展综述[J]. 电子测试,2014(10):41-43.
- [12] ARUN PRASAD K M, NAIR U. Intelligent fuzzy sliding mode controller based on FPGA for the speed control of a BLDC motor[J]. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2020, 11(1): 477-486.
- [13] GUO X P, ZHANG W J, ZHANG J X, et al. Research on key technologies of elders' exoskeleton robot assisted by physical exercise based on fuzzy PID control[J]. Materials Science and Engineering, 2020, 782: 1-6.
- [14] NOORSAL E, AROF S, YAHAYA S Z, et al. Design of an FPGA-based fuzzy feedback controller for closed-loop FES in knee joint model [J]. Micromachines, 2021, 12(8): 1-34.
- [15] 程思远,陈广锋. 下肢康复外骨骼机器人模糊 PID 控制研究与仿真[J]. 测控技术,2019,38(12):22-28.
- [16] CHEN W H, SONG S L, FAN H S, et al. Control of lower extremity exo-skeleton based on admittance method[C]. International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics. Springer, Cham, 2017: 455-460.

### 作者简介

钟浩杰,硕士研究生,主要研究方向为机器人嵌入式控制技术。

E-mail:1003732633@qq.com

宋胜利,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为机器人智能控制技术及应用。

E-mail:390515988@qq.com