

一种面向船舶行业的下肢外骨骼机器人 设计与试验

王宏亮^{1,2}

(1. 江苏自动化研究所, 江苏连云港 222061; 2. 中船数字信息技术有限公司, 北京 102609)

摘要: [目的]由于船舶制造等劳动密集型企业存在工作强度大、疲劳强度高、人工成本上升等问题, 船厂的焊接、打磨等人工作业存在挑战。[方法]设计一种下肢外骨骼机器人, 尝试为穿戴者提供有效助力, 降低高强度、高重复工作对身体的冲击, 提高穿戴者的持续作业时间。为探究外骨骼机器人结构设计的合理性, 采用 MATLAB 对下肢外骨骼机器人进行力学分析, 计算外骨骼出力曲线, 通过正交试验设计, 优化结构尺寸参数。[结果]最后, 搭建试验验证平台测试样机性能, 同时, 模拟船舶作业中焊接、打磨等常见的人工作业过程, 对比穿戴与未穿戴外骨骼机器人 2 种作业状态, 评估外骨骼样机助力效果, [结论]试验结果表明所设计外骨骼能够提供有效助力并提高人工作业效率。

关键词: 船舶制造; 人工作业; 下肢外骨骼机器人; 降低疲劳

中图分类号: U671.99 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.09.14

Design and Experimentation of a Lower Limb Industrial Exoskeleton Robot for the Shipbuilding Industry

WANG Hongliang^{1,2}

(1. Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222061, Jiangsu, China; 2. China Shipbuilding Digital Information Technology Co., Ltd., Beijing 102609, China)

Abstract: [Purpose] In labor-intensive industries such as shipbuilding, characterized by high work intensity, elevated operator fatigue, and rising labor costs, manual operations including welding and grinding in shipyards are confronted with prominent operational predicaments. [Method] A lower limb exoskeleton robot is designed to provide effective assistance for the wearer, reduce the physical impact of high-intensity and repetitive work, and extend the wearer's continuous operation time. To investigate the structural rationality of the exoskeleton, mechanical analysis is performed using MATLAB, and the torque output curves are calculated. Through orthogonal experimental design, the structural size parameters are optimized. Subsequently, a prototype is developed and tested on a dedicated experimental platform that simulates real-world welding and grinding scenarios. [Result] Comparative performance evaluations are conducted under two conditions-with and without the exoskeleton-to quantitatively assess the device's assistance effectiveness. [Conclusion] Experimental results show that the designed exoskeleton can provide effective assistance and improve manual operation efficiency.

Key words: shipbuilding industry; manual operations; lower limb exoskeleton robot; fatigue reduction

0 引言

在以船舶制造业为代表的劳动密集型工业领域, 受生产环境及工艺特征影响, 不同船舶的构造各异,

需要工人维持跪姿、蹲姿在狭小空间内进行精细操作, 不方便动用大型工业机器人作业。其中, 焊接、打磨等人工作业环境, 工作强度高, 疲劳强度大,

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2025-06-29; 录用日期: 2025-07-18

作者简介: 王宏亮(1992—), 男, 硕士、工程师。研究方向: 机器人技术、船舶智能制造。

工人长时间保持固定姿势或单一姿势,腰、腿和肩等位置容易产生职业病,影响工人的工作效率和工作质量^[1]。因此,船舶作业目前面临工人老龄化、职业病困扰,从业人员年龄普遍偏大^[2]。

助力负载型外骨骼机器人,主要用于辅助人体承担负载,并可以增加人体的运动能力。按照动力源的不同,可将外骨骼机器人分为主动式外骨骼机器人和被动式外骨骼机器人^[3]。主动式外骨骼机器人配备独立的动力系统和感知系统,其优势是动力强、精准控制,缺点在于自重大、续航时间受限;被动式外骨骼采用机械结构存储/释放人体运动能量,具有轻量化、长续航等优势。针对外骨骼机器人的应用优势,以美国国防高级研究项目署的“人体机能增强外骨骼”(Enhanced Human Performance through Exoskeletons, EHPA)项目^[4]、法国武器装备总署研发的UPRISE被动式外骨骼^[5]为代表,开发了一系列增强人员能力的外骨骼机器人产品。面向工业制造,救灾救援、助老助残等方向,日本筑波大学研制的第5代混合辅助肢体(Hybrid Assistive Limb, HAL-5B)^[6]、哈尔滨工业大学(Harbin Institute of Technology, HIT)研发的下肢助力外骨骼机器人(HIT Load-Carrying Exoskeleton, HIT-LEX)^[7]、傲鲨智能的仿生腰部外骨骼机器人(Bionic Exoskeleton System - High Voltage, BES-HV)^[8]产品为代表的相关产品问世。

在工业制造方面,目前外骨骼机器人的使用包括工业装配^[9]、工业搬运^[10]和施工支持^[11]等一系列工业场景,通过为工人作业腰、腿和臂等提供助力和支撑,减缓疲劳,提高工人的工作效率。相关综述文献梳理了工业外骨骼机器人的分类、关键技术和发展方向,郑凯等^[12]通过对无动力下肢外骨骼机器人的研究机构、适用范围、优劣系及辅助评估等进行总结,梳理了无动力下肢外骨骼机器人的关键技术及其未来发展方向;程鼎豪等^[13]将工业5.0与工业外骨骼相结合,从安全生产角度出发,总结了不同工业场景中安全生产对外骨骼的设计提出的要求,梳理了工业外骨骼的关键技术和主要应用领域。

综合来看,国内外学者对外骨骼机器人的研究取得了很大的进展,但对外骨骼机器人在船舶作业领域,尤其是适应作业空间狭小、姿势固定特点的工业外骨骼机器人缺少研究。因此,本文基于人体运动特征分析,结合船舶狭小空间作业需求,完成被动式下肢外骨骼机器人机构结构设计,通过力学分析和正交试验,完成机器人轻量化结构优化设计。然后,基于超低功耗微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)完成外骨骼机器人嵌入式控制设计,完成机器人的高精度运动感知与控制,实现精准助力。最后,为验证外骨骼机器人的运动性能、穿戴舒适

性,搭建试验验证平台,模拟焊接、打磨等人工作业过程,对比穿戴与未穿戴外骨骼机器人2种作业状态,确定外骨骼样机助力效果,试验结果表明所设计外骨骼能够提供有效助力并提高人工作业效率。综合来看,本文研究的外骨骼相较于现有产品具有轻量化、模块化、易穿戴、续航久等显著特点,更能适配船舶作业场景需求,为后续使用体验与作业效率的提升奠定基础。

1 外骨骼结构设计及计算分析

1.1 人体运动特征分析

外骨骼机器人作为一种并联于人体外部并且辅助人体上肢运动的助力机构,须同时满足在工作条件下人体的运动范围和运动性能。通过对人体解剖学的研究,可以总结出人体上肢结构的特点及运动方式,进而为全身外骨骼机器人的合理化设计提供依据,提高外骨骼的可靠性和实用性。

人体下肢可近似看成一个7自由度的多刚体串联结构^[14],人体下肢骨骼和肌肉分布见图1,即髋关节3个自由度(外展/内收、内旋/外旋、前屈/后伸),膝关节1个自由度(伸展/弯曲),踝关节3个自由度(左旋/右旋、跖屈/背屈以及内翻/外翻)见图2。

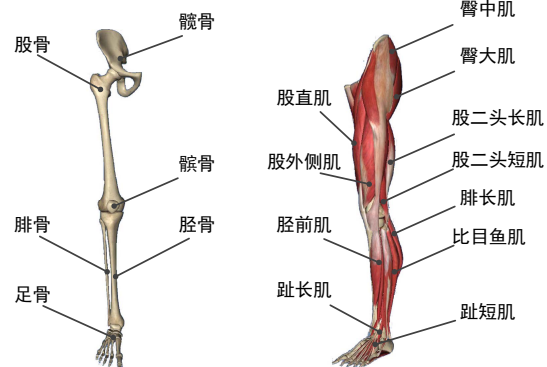


图1 人体下肢骨骼和肌肉分布

Fig. 1 Distribution of Bones and Muscles in the Lower Limbs of the Human Body

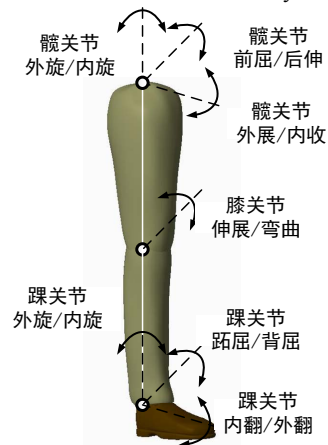


图2 下肢运动示意

Fig. 2 Schematic of Lower Limb Movements

表1为人体各个关节的极限运动角度和日常行走时的运动角度, 所表示的下肢角度对应的初始姿态为正常站立位姿。人体的下肢结构是人的主要支撑部分, 同时也是实现人体运动的关键。

表 1 人体下肢关节运动角度

Tab. 1 Movement Angle of the Lower Limb Joints in the Human Body

关节	关节运动	极限运动范围
髋关节	前屈/后伸	120°/-30°
	外旋/内旋	40°/-50°
	外摆/内收	45°/-20°
膝关节	伸展/弯曲	0°/150°
踝关节	内旋/外旋	20°/-35°
	内翻/外翻	20°/-35°
	背屈/跖屈	20°/-40°

1.2 下肢外骨骼机器人设计

1.2.1 机构原理

下肢外骨骼机器人系统采用被动力储能元件提供下肢助力, 通过嵌入式控制自动识别工作状态及自由状态, 从而自动完成加载及卸载过程, 提高穿戴灵活性及舒适度, 可手动调节2级输出力大小, 并提供2个角度的硬限位, 大腿及小腿部位可根据人体身高快速调节尺寸, 采用模块化设计。系统通过嵌入式控制, 将气弹簧储能转换为腿部支撑力, 减缓关节软骨磨损退化等导致的膝关节疼痛, 关节炎等现象, 系统助力原理见图3。

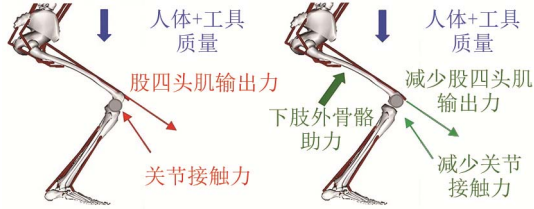


图 3 下肢外骨骼机器人助力原理示意

Fig. 3 Schematic Diagram of the Assistance Principle of the Lower Limb Exoskeleton Robot

1.2.2 力学分析与校核

下肢外骨骼受力情况见图4。图4中: l_1 为移动轴1与旋转轴间距; l_2 为气弹簧初始长度; l_3 为旋转轴与辅助轴1间距; l_4 为旋转轴与辅助轴2间距; l_5 为辅助轴1与辅助轴2间距; l_6 为移动轴2与旋转轴间距; θ 为人体膝关节转动角度; ϕ_1 为 l_3 与水平面夹角; ϕ_2 为 l_4 与水平面夹角; ϕ_3 为 l_5 与水平面夹角; G 为人体下肢所受重力; l_G 为重心到旋转轴的间距。在无外

骨骼情况下, 人体通过肌肉收缩提供助力 F_m , 人体膝关节所承受力矩 M_e 可表示如下:

$$M_e = Gl_G \sin \theta \quad (1)$$

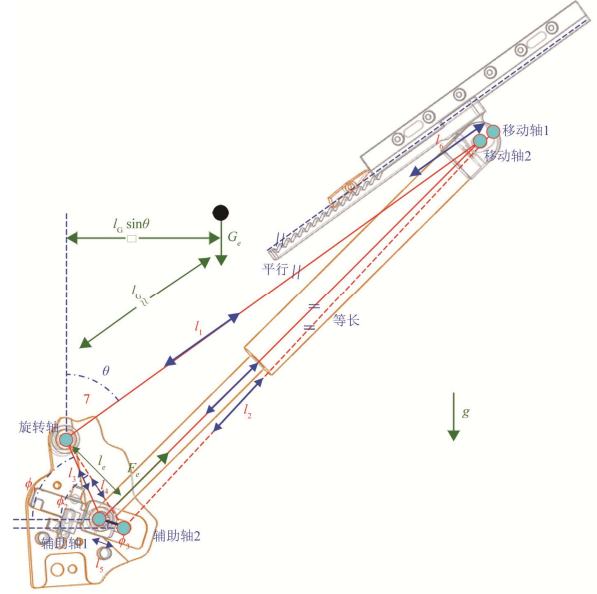


图 4 下肢外骨骼的力学计算与分析

Fig. 4 Mechanical Calculation and Analysis of Lower Extremity Exoskeletons

下肢外骨骼通过提供反向力矩 τ 来减小肌肉出力, 外骨骼提供的支撑力为 F_e , 则穿戴外骨骼后人体膝关节所承受力矩 M_{ew} 可表示为

$$M_{ew} = M_e - \tau = Gl_G \sin \theta - F_e l_e \quad (2)$$

根据图5, 气弹簧输出力为 F_e , 根据气弹簧特性, 其输出力的幅值大小与气弹簧伸缩量近似为线性关系, 力臂为膝关节至输出力 F_e 间的距离 $l_e(\theta)$ 。当档位设定在辅助轴1位置时, 根据几何关系可得:

$$\begin{cases} F_{e-1} = F_0 + k[l_{2-1}(\theta) - l_0] \\ l_{2-1}(\theta) = \sqrt{l_1^2 + l_3^2 - 2l_1l_3 \cos(90^\circ - \theta + \phi_1)} \\ l_{e-1}(\theta) = l_1l_3 \sin(90^\circ - \theta + \phi_1) / l_{2-1}(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_{e-1} 为档位设定在辅助轴1位置时气弹簧的输出力; F_0 为气弹簧的预紧力; k 为气弹簧的刚度系数; $l_{2-1}(\theta)$ 为档位设定在辅助轴1位置时气弹簧的长度; $l_{e-1}(\theta)$ 为档位设定在辅助轴1位置时的力臂长度。

则下肢外骨骼设定在档位1时, 所提供力矩为

$$\begin{aligned} \tau_1 &= F_{e-1} l_{e-1}(\theta) \\ &= \frac{\{F_0 + k[l_{2-1}(\theta) - l_0]\} l_1 l_3 \sin(90^\circ - \theta + \phi_1)}{\sqrt{l_1^2 + l_3^2 - 2l_1l_3 \cos(90^\circ - \theta + \phi_1)}} \quad (4) \end{aligned}$$

同理, 当档位设定在辅助轴2位置时, 根据几何

关系可得:

$$\begin{cases} F_{e-2} = F_0 + k(l_{2-2}(\theta) - l_0) \\ l_{2-2}(\theta) = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4\cos(90^\circ - \theta + \phi_2)} \\ l_{e-2}(\theta) = l_1l_4\sin(90^\circ - \theta + \phi_2)/l_{2-2}(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_{e-2} 为档位设定在辅助轴2位置时气弹簧输出力; $l_{2-2}(\theta)$ 为档位设定在辅助轴2位置时气弹簧长度; $l_{e-2}(\theta)$ 为档位设定在辅助轴2位置时的力臂长度。

则下肢外骨骼设定在档位2时, 所提供力矩为

$$\begin{aligned} \tau_2 &= F_{e-2}l_{e-2}(\theta) \\ &= \frac{\{F_0 + k[l_{2-2}(\theta) - l_0]\}l_1l_4\sin(90^\circ - \theta + \phi_2)}{\sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4\cos(90^\circ - \theta + \phi_2)}} \quad (6) \end{aligned}$$

由式(6)可知, 下肢外骨骼力矩 τ 与 l_1 、 l_3 、 l_4 、 θ 、 ϕ_1 、 ϕ_2 等变量相关。因此, 基于正交设计^[15], 以

外骨骼机器人质量 M 与下肢外骨骼力矩 τ 为优化目标, 以外骨骼壳体厚度 T 、移动轴到旋转轴距离 l_1 、辅助轴到旋转轴距离 l_3 、 l_4 及 l_3 、 l_4 与水平轴的夹角 ϕ_1 、 ϕ_2 等变量为优化变量。考虑到机器人的刚度 K 对结构优化的约束, 每个因素选取3个水平, 各水平的参数见表2。设计6因素正交表 $L_{18}(3^6)$, 依据正交试验表计算, 计算结果、极差分析结果见表3, 各影响因素的初始值和最优水平见表4。

表2 影响因素及其水平值

Tab. 2 Influence Factors and its Level Values

水平	T	l_1/mm	l_3/mm	l_4/mm	$\phi_1/(\circ)$	$\phi_2/(\circ)$
1	2.2	177	30	40	75	65
2	2.5	182	35	45	70	60
3	2.8	187	40	50	65	55

表3 $L_{18}(3^6)$ 正交试验表

Tab. 3 $L_{18}(3^6)$ Orthogonal Array

No.	1	2	3	4	5	6	试验结果		
	T	l_1	l_3	l_4	ϕ_1	ϕ_2	M/kg	$\tau_{1\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\tau_{2\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$
1	1	1	1	1	1	1	2.68	35.18	53.16
2	1	1	2	2	3	3	2.48	35.96	53.43
3	1	2	1	3	3	2	2.62	36.28	54.03
4	1	2	3	1	2	3	2.66	37.26	54.14
5	1	3	2	3	2	1	2.54	36.89	54.12
6	1	3	3	2	1	2	2.71	37.63	54.19
7	2	1	1	3	2	3	2.82	38.98	54.44
8	2	1	3	1	3	2	2.86	36.79	54.11
9	2	2	2	2	2	2	2.93	38.16	54.28
10	2	2	3	3	1	1	2.72	36.78	54.10
11	2	3	1	2	3	1	2.83	37.81	54.23
12	2	3	2	1	1	3	2.88	39.12	54.98
13	3	1	2	3	1	2	2.93	38.18	54.32
14	3	1	3	2	2	1	2.92	36.89	54.14
15	3	2	1	2	1	3	2.92	36.67	53.99
16	3	2	2	1	3	1	2.92	36.11	54.01
17	3	3	1	1	2	2	2.93	37.18	54.09
18	3	3	3	3	3	3	2.94	38.36	54.38
R	1.41	0.96	0.39	0.64	0.68	1.11	1.41	0.96	0.39
最优水平	2	3	2	3	2	3	2	3	2

表4 各影响因素最优水平及优化结果

Tab. 4 Optimal Levels of Influence Factors and Optimization Results

	T	l_1/mm	l_3/mm	l_4/mm	$\phi_1/(\circ)$	$\phi_2/(\circ)$	M/kg	$\tau_{1\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\tau_{2\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$
原始值	2.2	177	30	40	75	65	2.68	35.18	53.16
优化值	2.5	187	35	40	75	55	2.88	39.12	54.98

由表4可知, 优化后外骨骼机器人质量增加0.2 kg, 但一档和二档位峰值输出力矩分别增加3.94 N·m和1.82 N·m, 优化后下肢外骨骼随人体膝关节转动的输出力矩曲线见图5。由于气弹簧初始力不为零, 因此在支撑力切换角前, 外骨骼助力矩大于人体重力矩, 人体膝关节支撑力与重力方向相同, 共同克服外骨骼助力; 膝关节经过支撑力切换角后, 外骨骼助力矩小于人体重力矩, 人体膝关节支撑力与外骨骼助力方向相同, 共同克服人体重力, 减轻人体下肢疲劳强度。

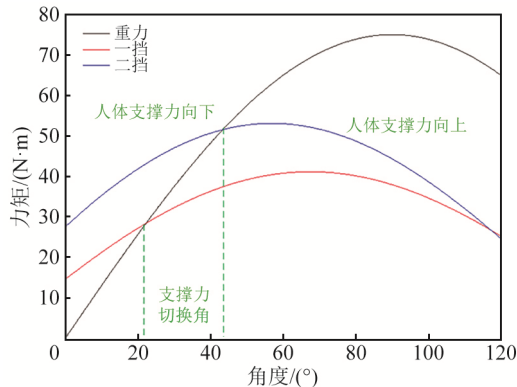


图5 下肢外骨骼力矩输出曲线

Fig. 5 Torque Output Curve of the Lower Limb Exoskeleton

2 外骨骼机器人嵌入式控制设计

下肢外骨骼机器人嵌入式控制系统是将微处理器嵌入设备内部, 针对特定应用设计的计算机系统, 微处理器采用单片机。嵌入式控制系统由主、从两路控制模块组成, 主模块与从模块硬件电路完全一样, 可通过软件设定主从, 两模块间通过低功耗蓝牙进行通讯, 当下肢外骨骼开机并完成蓝牙通信后, 在人体下蹲过程中提供助力。

2.1 主从控制设计

外骨骼嵌入式控制架构见图6, 选择超低功耗MCU作为控制芯片, 主从控制板卡间通过蓝牙芯片进行通信。步态识别用于辨识人体下肢下蹲及行走状态, 通过加速度计陀螺仪及磁编码器检测人体双腿膝关节角度及角速度信息, 并通过蓝牙主从通信分析人体是否为双腿并拢下蹲, 从而判断此种状态为人体下蹲工作状态, 并驱动执行器动作进行加载。

主控制板卡与外围位置传感器、加速度计、闪存等器件间的连接通过RS232, 集成电路间总线(Inter-Integrated Circuit, IIC), 串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI), 安全数字输入输出接口(Secure Digital Input Output, SDIO)等接口总线实现。

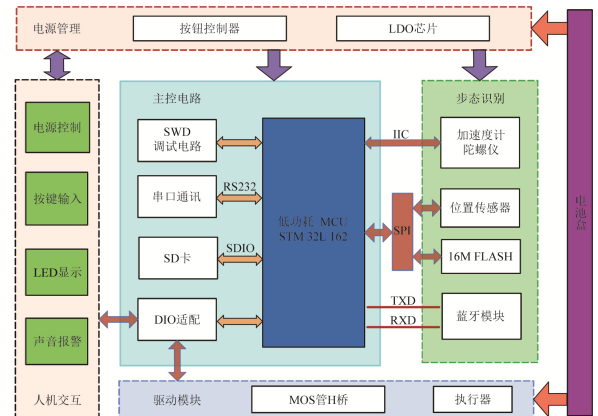
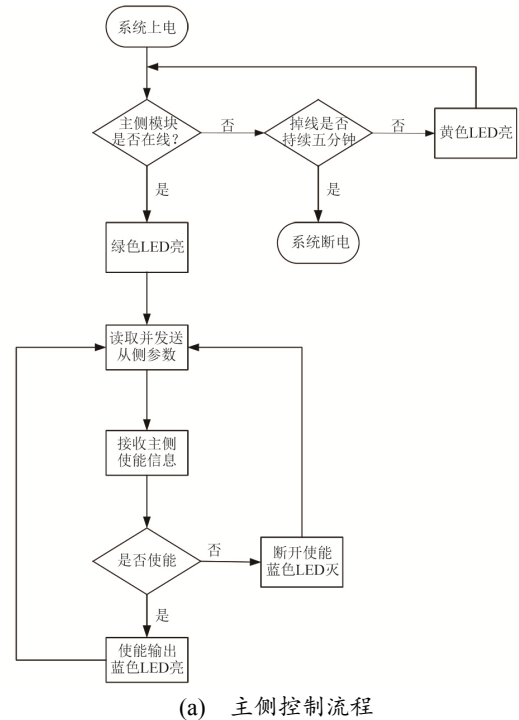


图6 下肢外骨骼机器人控制架构

Fig. 6 Control Architecture Diagram of Lower Limb Exoskeleton Robot

下肢外骨骼机器人主从控制流程见图7, 按钮控制器检测到按键开机信号后, 使能电源, 主控制系统上电, 并广播搜索从站, 此时LED显示绿色; 从站上电后, 与主站自动建立连接, 此时LED显示蓝色, 若长时间未建立主从通信, 则LED显示黄色; 主从控制器MCU检测得到陀螺仪加速度计、磁编码传感器等参数信息, 从控制将检测的参数信息通过蓝牙发送给主控, 主控对两路参数信息进行分析判断, 得出当前人体状态: 如行走、站立和下蹲等, 并根据状态执行相应动作, 如使能执行器(线圈)、LED显示、电源休眠与唤醒等。



(a) 主侧控制流程

图7 下肢外骨骼机器人主从控制流程

Fig. 7 Flowchart of Master-Slave Control for Lower Limb Exoskeleton Robot

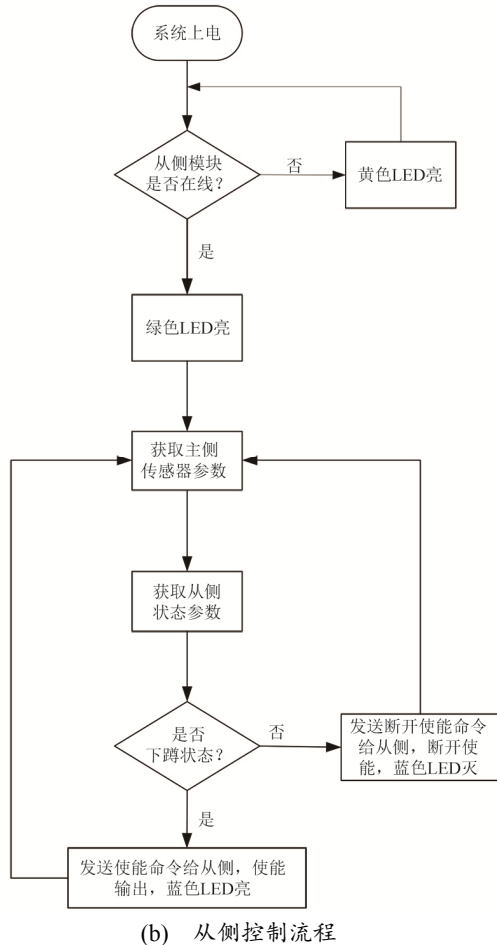


图7 下肢外骨骼机器人主从控制流程(续)

Fig. 7 Flowchart of Master-Slave Control for Lower Limb Exoskeleton Robot (Continued)

2.2 步态识别算法设计

运动状态识别算法由参数数据预处理和系统状态判别两部分组成，预处理程序的执行控制流见图8，数据预处理程序的控制流见图9。

由于主侧控制板与从侧控制板空间位置上属于镜像对称关系，当两侧向同一方向运动时，传感器测得的垂直于电路板方向的角速度值为大小相等、方向相反的3个值，因此需要对主侧角速度测量值进行取反。以第一档结构限位 110° 为基准，对角度值基准标定主侧为 $M110^\circ_{De}$ ，从侧为 $S110^\circ_{De}$ ，则主侧任意位置角度 φ 可由式(7)得到实际角度：

表5 变量与实际限位位置对应

Tab. 5 Correspondence Between Variables and Actual Limit Positions

实际关节位置	变量	传感器值	备注
主侧直立状态结构限位	M°_{Min}	此时为主侧传感器测得值最小值	主从侧为镜像位置关系，角度方向相反
主侧弯曲状态结构限位	M°_{Max}	此时为主侧传感器测得值最大值	
从侧直立状态结构限位	S°_{Max}	此时为从侧传感器测得值最大值	
从侧弯曲状态结构限位	S°_{Min}	此时为从侧传感器测得值最小值	

$$\varphi = 110 + (V_a - M110^\circ_{De}) / 45.5 \quad (7)$$

式中： V_a 为任意位置下的传感器实际测得的角度值，从侧任意位置的角度值计算与此同理。

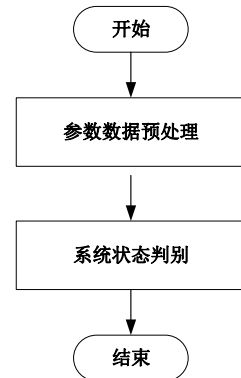


图8 运动状态识别程序的控制流

Fig. 8 Control Flow Diagram of the Motion State Recognition Program

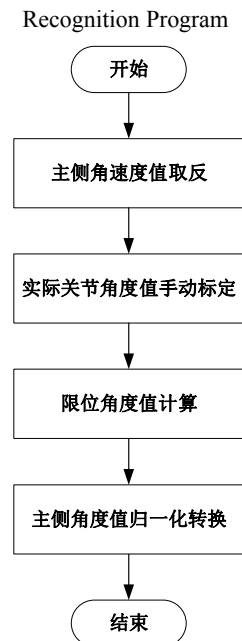


图9 数据预处理程序的执行控制流图

Fig. 9 Execution Control Flow Diagram of Data Preprocessing Program

实际关节最大限位位置与变量对应关系见表5，可据式(7)得到限位位置角度值。

根据人体运动特征分析及系统控制要求，角度使能范围为最小 85° ，最大 150° ，可通过式（7）计算得到此2个位置的传感器值，变量与实际位置对应说明见表6。

表6 变量与实际使能角度位置说明

Tab. 6 Description of Variable and Actual Enable Angle

Positions		
实际关节位置	变量	变量说明
主侧最小使能角度限位	$M85^\circ_{De}$	主侧实际角度小于此值时，主从侧均断使能
主侧最大使能角度限位	$M150^\circ_{De}$	主侧实际角度大于此值时，主侧单侧断使能
从侧最小使能角度限位	$S85^\circ_{De}$	从侧实际角度小于此值时，主从侧均断使能
从侧最大使能角度限位	$S150^\circ_{De}$	从侧实际角度大于此值时，从侧单侧断使能

由于主侧与从侧角度值变化方向相反，而且两侧参考的传感器零点没有相对关系，因此需要将两侧角度值进行归一化处理，计算主从侧传感器值的相对差值：

$$M^\circ_{Attr} = S150^\circ_{De} - M85^\circ_{De} \quad (8)$$

主侧角度值测量值 M° 取反处理：

$$M^\circ = M150^\circ_{De} + M85^\circ_{De} - M^\circ \quad (9)$$

归一化后的主侧角度值：

$$M^\circ_{Norm} = M^\circ + M^\circ_{Attr} \quad (10)$$

根据下肢外骨骼机器人系统的控制要求，整理得到系统状态判别程序的执行控制流见图10，将归一化后的主侧角度值 M° 与从侧角度值 S° 进行对比，判断系统是同步/异步状态，评估是否为工作状态，控制系统完成双侧/单侧使能。

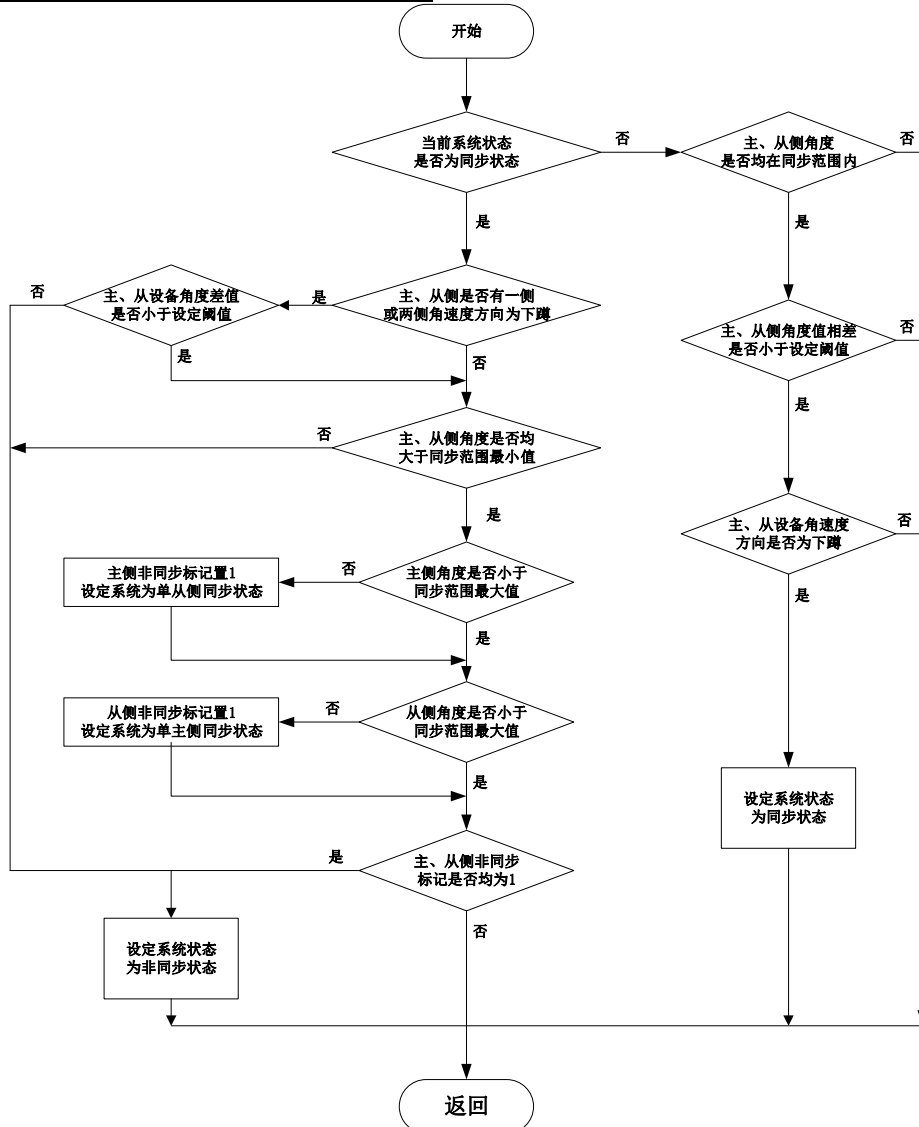


图10 步态识别算法控制流程图

Fig. 10 Gait Recognition Algorithm Control Flow Diagram

3 外骨骼测试与分析

3.1 试验环境测试与分析

由于外骨骼机器人的动力来源是被动力储能元件,无法主动运动以提取数据,为验证所设计的外骨骼机器人系统的稳定性和助力性能,搭建见图11的试验平台对外骨骼机器人进行测试。外骨骼机器人安装在测试平台上后,由旋转卡盘带动外骨骼机器人进行系统响应周期、动作意图识别准确性等功能和性能测试。



图 11 下肢外骨骼机器人试验平台

Fig. 11 Lower Limb Exoskeleton Robot Test Platform

1) 系统响应周期测试

下肢外骨骼膝关节从开始同步动作到控制系统成功识别同步动作的时间为系统响应周期。在测试平台上引出标记信号A,用以标记平台开始同步动作的时刻 T_a ;在主设备控制板上引出标记信号B,用以标记同步动作识别成功的时刻 T_b ,将信号A、信号B分别连接到示波器输入端;通过测试平台将主、从设备角度同时减小,使系统进入使能状态;通过示波器测量信号A与信号B之间的时间差 $t=T_b-T_a$ 。测试不同转速下响应时间差模拟不同下蹲速度。系统周期响应速度检测结果记录见表7。

表 7 系统响应周期速度记录

Tab. 7 System Response Cycle Speed Record

序号	试验实例/ (r/min)	外骨骼机器人算法 响应周期/ ms
1	10	6.955
2	20	6.967
3	30	7.068
平均值		6.997

通过实际测试数据可以得出,系统的平均响应时间为6.997 ms,低于10 ms,能够满足工作过程中的使用。

2) 意图识别测试

意图识别分为同步动作识别和异步动作识别,

用于判断工作状态和行走状态。同步动作状态下系统进入使能状态,加载助力装置;异步动作状态下进入断使能状态,卸载助力装置同步动作识别精度测试:通过测试平台模拟人体下蹲动作,设置平台运动速度为10 r/min,使主、从设备同时从107°(第一硬限位状态)减小,直至设备进入使能状态,记录此时角度值为 a_1 ,计算角度差值 $a=107-a_1$;更换平台运动速度分别为30 r/min和60 r/min,重复上述流程。测试结果详见表8。

表 8 测试结果

Tab. 8 Experimental Results

序号	测试项目	备注	测试结果	结论
1	同步运动状态识别精度	对于同步动作,系统能辨识到的最小运动角度应小于5°	2°	合格
			2°	
			1°	
2	异步运动状态识别精度	对于异步动作,系统识别的主从设备最大角度差值应<35°	32°	合格
			33°	
			32°	
3	同步运动辨识准确率	对于同步动作,系统辨识准确率应≥98%	100%	合格
			100%	
			100%	
4	异步运动辨识准确率	对于异步动作,系统辨识准确率应≥98%	100%	合格
			100%	
			100%	

异步动作识别精度测试:通过测试平台模拟人体下蹲动作,设置主、从设备同时从180°减小直至设备进入使能状态,记录此时角度值为 a_1 ;保持从设备角度值 a_1 不变,缓慢减少主设备角度直至系统进入断使能状态,记录此时主设备角度值 a_2 ,并计算 a_1 与 a_2 的角度值 β 。更换平台运动速度分别为30 r/min, 60 r/min,重复上述流程。异步动作识别测试结果详见表8。

3.2 外骨骼机器人穿戴试验分析

在完成外骨骼设备的基础功能测试后,为了全面验证本文设计的下肢外骨骼机器人助力效果的有效性,选择8位工作人员穿戴下肢外骨骼机器人对焊接、打磨等模拟船舶制造工业情景进行作业试验,工作人员信息见表9,图12是穿戴下肢外骨骼机器人进行焊接作业现场图。工作人员通过调节大腿部件和小腿部件的尺寸调节开关,调整到适应个人穿戴的尺寸高度,在穿戴和未穿戴外骨骼的工况下分别工作1小时,2组对照试验间隔1 h,以保证工人有足够时间恢复体力,进行外骨骼设备的穿戴舒适性、行走、同步识别、异步识别、意图识别等测试,记录测试结果见表10。

表 9 穿戴外骨骼工作人员信息统计

Tab. 9 Statistics of Information on Staff Wearing Exoskeletons

序号	性别	年龄	工龄	身高/cm	体重/kg
1	男	28	3	182	78
2	男	26	2	171	76
3	男	32	4	165	66
4	男	29	6	188	90
5	男	35	8	168	83
6	男	43	18	170	76.6
7	男	51	28	165	89
8	男	46	22	162	72



图 12 下肢外骨骼机器人模拟焊接场景应用

Fig. 12 Application of Lower Limb Exoskeleton Robot Simulation Welding Scenarios

表 10 外骨骼机器人测试应用结果统计

Tab. 10 Statistics of the Test Application Results of Exoskeleton Robots

作业场景	未穿戴设备/(m/h)	穿戴外骨骼设备/(m/h)	相对差值/(m/h)	效率提升/%	作业场景	未穿戴设备/(块/h)	穿戴外骨骼设备/(块/h)	相对差值/(块/h)	效率提升/%
焊接作业 1	18.8	22.6	3.8	20.21	打磨作业 1	35	45	10	28.57
焊接作业 2	17.2	20.7	3.5	20.35	打磨作业 2	38	46	8	21.05
焊接作业 3	17.3	21.1	3.8	21.97	打磨作业 3	30	37	7	23.33
焊接作业 4	18.5	22.4	3.9	21.08	打磨作业 4	32	41	9	28.13
焊接作业 5	19.2	22.8	3.6	18.75	打磨作业 5	36	43	7	19.44
焊接作业 6	19.5	23.2	3.7	18.97	打磨作业 6	34	44	10	29.41
焊接作业 7	18.9	22.2	3.3	17.46	打磨作业 7	31	39	7	21.88
焊接作业 8	18.5	22.3	3.7	19.89	打磨作业 8	32	38	6	18.75

通过模拟工作场景来看，8名工作人员通过调整外骨骼的大腿、小腿挡位能够穿戴外骨骼机器人且穿戴后不影响正常行走过程，双腿外骨骼能够完成正常通信，能够有效识别工作过程中同步、异步下蹲意图识别。穿戴外骨骼机器人开展焊接、打磨作业相较于未穿戴外骨骼的情况下效率分别提升了19.83%和23.82%，表明外骨骼机器人能够有效助力，提高工作效率。

4 结论

本文针对船舶及船舶中间件制造过程中的焊接、打磨等疲劳强度大、质量要求高的人工作业场景研制了一款下肢外骨骼机器人，该外骨骼机器人能够为穿戴者提供有效助力，适用于频繁蹲坐、持续久

蹲等膝盖持续受力的工作场景。通过正交试验设计和MATLAB分析计算，搭建试验平台分析设备数据，分析试验结果得出以下结论。

1)通过正交试验设计和MATLAB分析计算得出，膝关节经过支撑力切换角后，外骨骼助力矩小于人体重力矩，人体膝关节支撑力与外骨骼助力方向相同，共同克服人体重力，减轻人体下肢疲劳强度。

2)通过试验平台分析及搭建的模拟试验环境分析，可以看出外骨骼机器人有效识别工作意图，完成左右腿协同工作。同时，在焊接、打磨等船舶生产制造环节人工作业试验中能够有效分别提高19.83%、23.82%，证明了所设计的双下肢外骨骼机器人对人工作业和工人身体保护有积极效果。

参考文献:

- [1] 吕虹, 马雪松, 王红军. 大连市船舶行业电焊工人职业健康现状调查[J]. 公共卫生与预防医学, 2018, 29(1): 93-94.
LYU H, MA X S, WANG H J. Survey on the Occupational Health Status of Welders in the Shipbuilding Industry in Dalian City[J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2018, 29(1): 93-94.
- [2] 应婷. 工作满意度对离职倾向的影响研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
YING T. Research on the Impact of Job Satisfaction on Turnover Intention [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [3] 刘建辉, 骆祎岚, 白云峰. 基于人机耦合的下肢外骨骼机器人动力学仿真与样机试验[J]. 制造业自动化, 2022, 44(7): 60-64.
LIU J H, LUO Y L, BAI Y F. Dynamic Simulation and Prototype Test of Lower Limb Exoskeleton Robot Based on Human-Machine Coupling[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(7): 60-64.
- [4] 丁逸苇, 涂利娟, 刘怡希, 等. 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人研究进展[J]. 机器人, 2022, 44(5): 522-532.
DING Y W, TU L J, LIU Y X, et al. Progress of Wearable Lower-Limb Exoskeleton Rehabilitation Robots[J]. ROBOT, 2022, 44(5): 522-532.
- [5] JANSEN J, BIRDWELL J, BOYNTON A, et al. Phase I Report: DARPA Exoskeleton Program[M]. United States: Department of Energy, 2004.
- [6] 贾山. 下肢外骨骼的动力学分析与运动规划[D]. 南京: 东南大学, 2016.
JIA S. Dynamics and Motion Planning of Lower Extremity Exoskeleton [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [7] 张超. 下肢助力外骨骼机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
ZHANG C. Research on Lower Limbs Powered Exoskeleton Robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [8] 刘政鑫. 傲鲨智能: 外骨骼机器人助力工业制造[J]. 机器人产业, 2023, 10(1): 62-65.
LIU Z X. Aoshark Intelligence: Exoskeleton Robots Assist Industrial Manufacturing[J]. Robot Industry, 2023, 10(01): 62-65.
- [9] PACIFICO I, MOLteni F, GIOVACCHINI F. An Experimental Evaluation of the Proto-MATE: a Novel Ergonomic Upper-Limb Exoskeleton to Reduce Workers' Physical Strain[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2020, 7(1): 54-65.
- [10] ZHANG T, HUANG H H. A Lower-Back Robotic Exoskeleton: Industrial Handling Augmentation Used to Provide Spinal Support[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, 25(2): 95-106.
- [11] CHEN S, STEVENSON D T, YU S. Wearable Knee Assistive Devices for Kneeling Tasks in Construction[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(4): 1989-1996.
- [12] 郑凯, 刘利利, 王永奉. 无动力下肢外骨骼机器人研究综述及发展趋势[J]. 机械传动, 2021, 45(4): 166-176.
ZHENG K, LIU L L, WANG Y F. Overview and Development Trends of Unpowered Lower-Limb Exoskeleton Robots[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(4): 166-176.
- [13] 程鼎豪, 娄山河, 郑浩. 面向人本智造的工业外骨骼: 挑战、进展和展望[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(12): 4179-4197.
CHENG D H, LOU S H, ZHENG H. Industrial Exoskeletons for Human-Centered Smart Manufacturing: Challenges, Progress, and Prospects[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2024, 30(12): 4179-4197.
- [14] 黄文辉, 徐英帅, 曾江. 下肢康复外骨骼机器人结构设计及动力学仿真[J]. 机电工程技术, 2024, 53(10): 52-56.
HUANG W H, XU Y S, ZENG J. Structural Design and Dynamic Simulation of Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Robot[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2024, 53(10): 52-56.
- [15] 胡明伟, 王洪光, 潘新安. 基于正交设计的协作机器人全域结构优化设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(1): 370-378.
HU M W, WANG H G, PAN X A. Global Structural Optimization Design of Collaborative Robots Using Orthogonal Design [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(1): 370-378.