

手持控制器操作的上肢关节舒适性 评估与作业优化研究

杨延璞¹, 杨沁夏², 卓玥鸣¹, 姬丽静³

(1.长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2.中国航发成都发动机有限公司, 四川 成都 610503;
3.中国兵器工业集团有限公司 兵器工业卫生研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:无人装备手持控制器的长时间操作易给作业人员带来上肢肌肉骨骼损伤风险,为提高手持控制器作业中人员的上肢关节舒适性,利用 JACK 人机工程分析软件进行数字人与作业场景建模,分别构建了关节力矩和角度的舒适度评估模型,研究了寰枕关节不同前屈角度下的上肢关节舒适度变化关系,建立了手持控制器上肢姿态优化多目标函数,引入带精英策略的快速非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)进行最优上肢姿态求解,获取手持控制器作业的最佳姿势并设计了辅助装置方案,进而引入直觉模糊数处理决策者在评估设计方案时的不确定与犹豫性,实现了最优姿态下手持控制器操作辅助装置设计方案优选。

关键词:人机工效;上肢关节舒适性评估;多目标优化;直觉模糊数;手持控制器

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2025)04-0741-10

随着数字化、自动化和网络化等技术的发展,以远程控制为操作方式的无人装备的应用日益广泛^[1]。其中,手持控制器因其使用环境灵活多变,常用于无人机、地面移动机器人、无人艇等多任务操控、目标跟踪定位及武器控制等^[2]。由于集成多种元器件与功能,无人装备手持控制器通常具有质量大、作业时间长、操作重复性高等特点,易对操作人员造成工作相关的肌肉骨骼损伤(work-related musculoskeletal disorders, WMSDs),甚至影响无人装备的操控准确性。目前,WMSDs已成为我国防控职业病所面临的重点问题之一^[3-4],研究手持控制器作业中的上肢舒适性并对其进行优化,对预防操作人员的 WMSDs、保障无人装备的效能具有重要意义。

上肢操作舒适性受关节角度、关节力矩等要素影响,常借助数字人建模(digital human modelling, DHM)仿真、表面肌电(surface electromyography,

sEMG)实验、主观量表、生物力学建模等方式进行研究。在 DHM 仿真方面,文献[4]利用 JACK 软件的 DHM 分析了车载雷达天线维修中的上肢关节力矩、能耗及关节舒适度,并进行作业优化;文献[5]利用 JACK 动态仿真模块对飞机操纵杆推拉任务进行虚拟仿真,基于模拟实验获取的关节角度和关节力矩等上肢力学参数,使用 multi-BiLSTMs 模型实现上肢关节舒适度的预测评估。在 sEMG 实验与主观量表方面,文献[6]采集了手过头作业的 sEMG,并利用残差神经网络(residual neural networks, ResNet)建立了上肢关节角度与肌肉疲劳程度之间的非线性关系;文献[7]进行上肢负载屈肘实验,同步采集肱二头肌 sEMG 信号与上肢动作捕捉数据,并同时运用 Borg 疲劳度主观自觉量表记录受试者疲劳感受;文献[8]结合主客观测量,利用 sEMG 与主观用力程度分级表评估了汽车装配作业不同工件质量、肩部姿势、手臂抬起与放下时间组合对肩部疲劳的影响;文献[9]通过获取关节角度和主观评价数据,提出了一种人体测量参数和上肢姿势的舒适性量化评估方法。在生物力学建模方面,文献[10]结合生物力学模型和 Kano 动力学方程构建上肢动力学模型,建

收稿日期:2024-08-08

基金项目:长安大学中央高校基本科研业务费(300102253107)资助

作者简介:杨延璞(1984—),教授

通信作者:杨延璞(1984—) e-mail:thomasyang2005@126.com

立了基于关节力矩的石油钻机控制室上肢作业舒适性评估模型;文献[11]利用生物力学仿真和 sEMG 分析单轨吊车井下运输的操作舒适性,建立了驾驶员-操作系统生物力学耦合模型。此外,文献[12]利用关节力矩对肩、肘、腕部的舒适性进行评估,构建了上肢舒适度评估体系;文献[13]使用快速上肢评估方法对上肢作业姿势的风险进行分析。

以上研究从不同角度对上肢舒适性进行评估,但手持控制器长时操作时,上肢舒适性受作业力矩和关节角度活动范围等因素影响,如何确定舒适的上肢操作姿态还需进一步研究。为此,本文借助 JACK 软件定义手持控制器的上肢作业姿态,获取上肢力矩与关节角度数据,构建上肢舒适度评估模型并进行了仿真计算,利用 NSGA-II 算法建立手持控制器的上肢作业姿态多目标优化模型,根据求解的最优姿态设计了上肢操作辅助装置方案,并结合直觉模糊数进行了方案的优选。

1 手持控制器操作上肢舒适度评估

1.1 关节力矩与角度数据获取

根据 GB/T 10000—2023 最新 18~70 周岁的中国成年人人体尺寸^[14],利用 JACK 软件对手持控制器作业进行模拟实验任务构建。某型手持控制器基本尺寸为 340 mm(长)×200 mm(宽)×70 mm(高),质量约 3.2 kg,利用 Rhino 软件构建三维模型,将其转换为 stl 格式并导入至 JACK 软件中。由于手持控制器作业无特殊要求,采用第 50 百分位立姿人体尺寸数据,调整数字人视线与控制器屏幕正中心对齐,设定数字人视距为 40 cm,最佳视锥为 40°。结合 JACK 软件中的 Comfort Assessment 工具和 Force-Solver 模块采集实验过程中肩关节和肘关节的关节角度与力矩数据,主要动作涉及肩关节的收展、屈伸、旋转及肘关节的屈伸。虚拟评估场景搭建如图 1 所示。

考虑操作时人体颈部的活动,将寰枕关节角度与舒适度变化纳入上肢舒适性评估范围。基于颈椎组成的复杂性与手持控制器的操纵方式,将寰枕关节的活动与受力简化。设 β 为人体直立站立时寰枕关节前屈角,根据 GB/T 17245—2004《成年人人体惯性参数》^[15] 中头、颈质量及质心数据,寰枕关节力矩可表达为

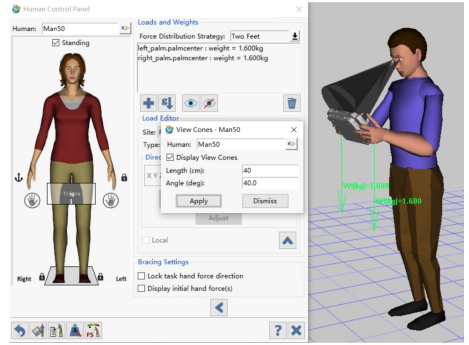


图 1 虚拟评估场景

$$T_1 = Gl \sin \beta \quad (1)$$

式中: T_1 为寰枕关节力矩; G 为头部重量; l 为头部质心到第 5 节颈椎的距离。

1.2 关节力矩舒适度评估

由于关节角度与当前姿势下的最大关节力矩存在相关性,而且关节不同方向的敏感性不同,使用当前实际关节力矩与最大关节力矩的相对关系衡量关节的舒适度,在实验过程中对单关节不舒适度 D_r 按(2)式进行评估^[5,10]。

$$D_r = \frac{M_r}{M_{rmax}} \quad (2)$$

式中: M_r 为当前姿势下关节力矩; M_{rmax} 表示当前姿势下最大关节力矩,由(3)式计算获取。

$$M_{rmax} = a_0 + a_1 \eta + a_2 \eta^2 \quad (3)$$

式中: η 表示当前姿势下关节角度值; a_0, a_1, a_2 表示关节最大力矩回归系数^[16],可根据转动方向、转动角度和转动角速度查系数表获得,其他角速度可以用插值法求得。

则关节舒适性 C_r 可定义为

$$C_r = 1 - D_r \quad (4)$$

由(2)~(4)式可得,实际关节力矩 M_r 越小,关节舒适度 C_r 就越大,即当前作业姿势越舒适。若取 $C_r = 0.4$,即当前姿势下关节力矩值未超过该关节最大关节力矩值的 60%,即为较舒适的作业姿势^[17]。

获取各关节在不同人体测量基准面上舒适度后,则关节 i 的舒适度可表示为^[18]

$$C_i = \sum_{j=1}^{n_i} K_{ij}^{DOF} \times C_{ij}^{DOF} \quad (5)$$

式中: n_i 为关节 i 自由度的数目; K_{ij}^{DOF} 表示关节 i 的第 j 个自由度方向的权重; C_{ij}^{DOF} 为关节 i 在第 j 个自由度方向的舒适度。依据 Kee 和 Karwowski 建立的关节分级系统^[19],将全身舒适度评估时各个关节及单

个关节在各自由度上的相对等级排序,如表 1 所示。根据表 1 可得关节 i 的第 j 个自由度方向权重为

$$K_{ij}^{DOF} = R_{ij}^J / \sum_{j=1}^{n_i} R_{ij}^J, \text{ 关节 } i \text{ 的权重为 } W_i = R_i^J / \sum_{i=1}^m R_i^J \text{ (} m \text{ 为某一姿态包含的关节数目)}。$$

表 1 各关节及自由度的评价等级

关节	等级	肩关节自由度	等级
肩关节 R_1^J	3	肩关节收展 R_{11}^J	4
肘关节 R_2^J	1	肩关节旋转 R_{12}^J	2
寰枕关节 R_3^J	2	肩关节屈伸 R_{13}^J	3

综合考虑作业人员颈、肩、肘关节的整体舒适度,得到在某特定作业姿势下的上肢综合舒适度为

$$C_r^A = \sum_{i=1}^m W_i C_i \quad (6)$$

1.3 关节角度舒适度评估

人体关节系统作为肢体的重要组成部分,其生理结构较为复杂,各关节在旋转动作上能达到不同的角度范围,具有很强的灵活性。当关节处于较为合适的角度范围内,肌肉组织相对放松,关节能够自如转动且不易产生疲劳感;然而,在关节旋转逐渐接近最大关节角度的过程中,相关的肌肉群会因过度拉伸而承受较大负荷,该状态下常伴随着肌肉酸痛。同时该部位的血液循环受到压迫,血液中无法获得足够氧气,这会进一步加剧肌肉疼痛感和不适感。因此在作业中,作业人员倾向于选择较为舒适的关

节活动范围,以确保作业者身体状态与工作需求相协调^[20]。根据以上分析,可采用梯形模糊集对关节角度进行评估,如图 2 所示。

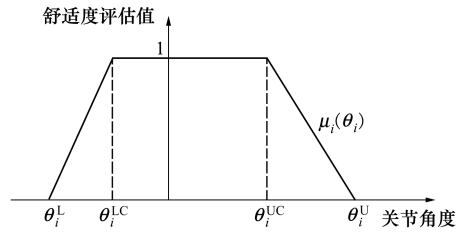


图 2 关节角度舒适度评价函数

图 2 中, θ_i^U 和 θ_i^L 表示关节角度 θ_i 的范围边界; θ_i^{UC} 和 θ_i^{LC} 为是关节角度 θ_i 的舒适角度范围边界。当 $\theta_i \in [\theta_i^{LC}, \theta_i^{UC}]$, 评估值为 1; 否则, 评估值随之单调递减。用梯形模糊集表示图 2 的隶属度函数为

$$\mu_i(\theta_i) = \begin{cases} \frac{\theta_i - \theta_i^L}{\theta_i^{LC} - \theta_i^L}, & \theta_i^L \leq \theta_i < \theta_i^{LC} \\ 1, & \theta_i^{LC} \leq \theta_i < \theta_i^{UC} \\ \frac{\theta_i^U - \theta_i}{\theta_i^U - \theta_i^{UC}}, & \theta_i^{UC} \leq \theta_i < \theta_i^U \end{cases} \quad (7)$$

作业仿真中,数字人手持控制器,双手从上往下移动,以寰枕关节前屈角度变化为自变量(变化角度为 $0^\circ \sim 25^\circ$),视线中线与手持控制器屏幕垂直作为约束,记录寰枕关节每增加 1° 时,寰枕关节的力矩变化,以及肩关节与肘关节的角度与力矩变化,部分数据见表 2,关节活动示意如图 3 所示,寰枕关节前屈角与肩、肘的舒适度关系变化如图 4 所示。

表 2 寰枕、肩、肘关节的关节角度及力矩变化(部分)

寰枕关节前屈/ $(^\circ)$	角度/ $(^\circ)$				力矩/ (Nm)				
	肩关节内收	肩关节内旋	肩关节后伸	肘关节后伸	寰枕关节前屈	肩关节内收	肩关节内旋	肩关节后伸	肘关节后伸
0	69.5	78.2	-41.4	86.9	0	-11.8	-2.2	-2.4	-2.6
1	63.4	75.7	-34.7	88.6	0.13	-11.4	-2.5	-2.5	-2.9
2	60.7	74.4	-31.6	88.9	0.27	-11.3	-2.6	-2.5	-3

根据表 2 和图 4 结果,有如下变化关系:

1) 肩关节内收舒适度随肩关节内收角度增加而降低;肩关节内旋舒适度随肩关节内旋角度增加而先降低后上升;肩关节后伸舒适度随肩关节后伸负向角度到正向角度的变化而上升;肘关节后伸舒适度随肘关节后伸角度的增加而降低;寰枕关节舒

适度随寰枕关节前屈角度的增加而降低,且降低速率很快,至 25° 时寰枕关节舒适度约降低一半。

2) 寰枕关节前屈角度从 0° 到 25° 逐渐增加的过程中,肩关节内收角度从 69.5° 逐渐减少到 24.2° , 其舒适度逐渐上升;肩关节内旋角度从 78.2° 逐渐减少到 14.3° , 其舒适度先降低后上升;肩关节后伸角

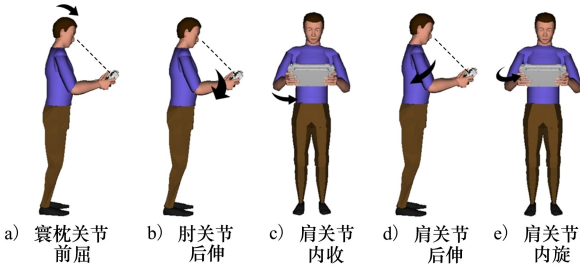


图 3 关节活动示意

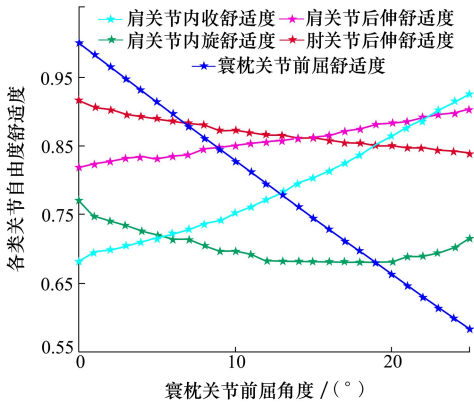


图 4 寰枕关节前屈角与肩、肘的舒适度关系

度从 -41.4° 逐渐变化至 18.2° ,其舒适度逐渐上升;肘关节后伸角度从 86.9° 增加到 102° ,其舒适度逐渐降低。

2 基于 NSGA-II 的手持控制器作业姿势优化

2.1 目标函数

手持控制器作业的肩关节、肘关节及寰枕关节的力矩与关节角度的舒适性相互影响并存在矛盾,如某一个姿势下关节力矩很小,而关节角度却偏离了舒适范围,或另一个姿势很舒适,但某一关节所受力矩较大,因此很难找到综合姿势达到最优的上肢姿态。为此,构建如(8)式所示多目标模型,将手持控制器的上肢姿态优化转化为多目标优化问题。

$$\min \begin{cases} f_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) \\ f_2(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g_k(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) = 0 \\ \theta_i^L \leq \theta_i \leq \theta_i^U \end{cases}$$

式中: f_1 为关节力矩不舒适度; f_2 为关节角度不舒适度; θ_i 为第 $i(1 \leq i \leq p)$ 个关节角度值; p 为关节转角

自由度数量,此处 $p = 5$; g_k 为各关节角度间约束关系。

1) 关节力矩舒适度子目标函数

在手持控制器作业过程中,肢体姿势的改变会引起颈、肩、肘关节的关节角度和关节力矩也发生改变,利用 1.1 节数字人作业仿真获取的关节力矩实验数据,建立肩关节 3 个自由度,肘关节和寰枕关节的角度与力矩的线性回归方程,构建关节力矩舒适度子目标函数如(9)式所示。

$$\min f_1(\theta) = \lambda_1(3.516\theta_1^2 \times 10^{-5}) - 1.76\theta_1 \times 10^{-2} + 1.001) + \lambda_2(1.343\theta_2^2 \times 10^{-4} - 1.727\theta_2 \times 10^{-2} + 1.249) + \lambda_3(6.164\theta_3^2 \times 10^{-5} - 5.285\theta_3 \times 10^{-3} + 0.7862) + \lambda_4(9.047\theta_4^2 \times 10^{-6} + 1.581\theta_4 \times 10^{-3} + 0.8686) + \lambda_5(1.24\theta_5^2 \times 10^{-4} - 2.802\theta_5 \times 10^{-2} + 2.41) \quad (9)$$

式中, $\lambda_i(1 \leq i \leq 5)$ 为各关节自由度的权重系数,由表 1 中各关节及自由度的评价等级可得,且 $0 \leq \lambda_i \leq 1, \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_5 = 1$ 。

根据实验数据分析可得肩关节内收、内旋、后伸及肘关节后伸、寰枕关节前屈间的角度关系为

$$\begin{cases} 0.6089\theta_1 - \theta_5 = -87.49 \\ -1.721\theta_1 - \theta_2 = -62.71 \\ -2.417\theta_1 - \theta_3 = -84.68 \\ 2.277\theta_1 - \theta_4 = 36.69 \end{cases} \quad (10)$$

其中,寰枕关节前屈的活动范围为 $0^\circ \sim 25^\circ$,肩关节内收的活动范围为 $24.2^\circ \sim 69.5^\circ$,肩关节内旋的活动范围为 $14.3^\circ \sim 78.2^\circ$,肩关节后伸的活动范围为 $-41.4^\circ \sim 18.2^\circ$,肘关节后伸的活动范围为 $86.9^\circ \sim 102^\circ$ 。由此对 θ_i 的范围约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq \theta_1 \leq 25 \\ 24.2 \leq \theta_2 \leq 69.5 \\ 14.3 \leq \theta_3 \leq 78.2 \\ -41.4 \leq \theta_4 \leq 18.2 \\ 86.9 \leq \theta_5 \leq 102 \end{cases} \quad (11)$$

2) 关节角度舒适度子目标函数

手持控制器作业过程中,作业者面临作业时间长、上肢负荷重的问题,利用 1.1 节数字人作业仿真获取的关节角度实验数据及其舒适度,构建关节角度舒适度子目标函数如(12)式所示。

$$\begin{aligned} \min f_2(\theta) = & \lambda_1(-5.703\theta_1^3 \times 10^{-5} + \\ & 1.71\theta_1^2 \times 10^{-3} - 1.294\theta_1 \times 10^{-2} + 1.017) + \\ & \lambda_2(-9.811\theta_2^2 \times 10^{-20} - 5.556\theta_2 \times 10^{-3} + 1) + \\ & \lambda_3(-6.862\theta_3^2 \times 10^{-20} - 1.111\theta_3 \times 10^{-2} + 1) + \\ & \lambda_4(-4.012\theta_4^2 \times 10^{-4} + 3.319\theta_4 \times 10^{-3} + 1.031) + \\ & \lambda_5(-5.577\theta_5^2 \times 10^{-18} - 1.333\theta_5 \times 10^{-2} + 1.867) \end{aligned} \quad (12)$$

各关节的活动范围如表 3 所示。

表 3 各关节活动范围

关节类型	运动形式	最大活动范围/(°)	最佳活动范围/(°)
肩	内收	(-50,180)	0
	内旋	(-90, 90)	0
	后伸	(-50,180)	(-13,33)
肘	后伸	(-10,140)	(0,65)
寰枕	前屈	(-35,40)	(-19,22)

2.2 基于 NSGA-II 的上肢作业姿态求解

1) 算法流程

由于关节力矩舒适度与关节角度舒适度间存在强耦合关系,单独改变关节角度数值可能引起力矩舒适度和关节舒适度呈现相反变化,为典型的多目标问题。为此,论文引入带精英策略的快速非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II,NSGA-II)进行求解。NSGA-II 算法有如下优势^[21]:①精英策略有利于保留优势解;②快速非支配排序方法有助于提高计算效率;③拥挤距离算子使解集具有良好的均匀分布性。其算法流程如下:

步骤 1 设最大进化代数数为 t_{\max} ,初始进化代数数为 $t = 1$,随机产生数量为 N 的初始父代种群 P_t 。

步骤 2 对 P_t 进行选择、交叉、变异操作,产生数量为 N 的子代种群 Q_t 。

步骤 3 将 P_t 与 Q_t 合并为数量为 $2N$ 的合成种群 R_t 。

步骤 4 根据目标函数对 R_t 中个体进行快速非支配排序,并进行拥挤度计算。根据非支配排序结果和拥挤度,选择前 N 个个体组成新父代种群 P_{t+1} ;

步骤 5 重复步骤 2 ~ 4,直至达到预设最大进化代数。

2) 算法参数设置

① 种群初始化:采用实数编码。对 $\theta_i(1 \leq i \leq p)$,令随机实数 $\mu_i \in [0,1]$,且满足 $\theta_i = \theta_i^L + \mu_i \cdot \theta_i^U$,

则以 μ_i 为基因构建一条染色体 $U_i = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p\}$ 。设种群规模为 N ,进化代数数为 G ,则种群为 $U = \{\mu_{ij}\}_{p \times N}(1 \leq j \leq N)$ 。

② 变异操作:采用多项式变异方式对染色体进行变异操作^[22]。随机选择实数 $r_a(j) \in [0,1]$,构建扰动变量 d_j ,使得

$$d_a(j) = \begin{cases} [2r_a(j)]^{1/(1+\psi)-1}, & r_a(j) < 0.5 \\ 1 - [2(1 - r_a(j))]^{1/(1+\psi)}, & r_a(j) \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\psi \in [2,5]$ 为变异参数。则有变异后的基因为 $\mu'_{ij} = \mu_{ij} + d_a(j)$ 。

③ 交叉操作:设随机选择的 2 个交叉父代个体为 U_1, U_2 ,随机选择实数 $r_b(j) \in [0,1]$,构建如(14)式所示变量。

$$d_b(j) = \begin{cases} [2r_b(j)]^{1/(1+\tau)}, & r_b(j) < 0.5 \\ [2(1 - r_b(j))]^{-1/(1+\tau)}, & r_b(j) \geq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\tau \in [2,5]$ 为交叉参数。则子代个体 O_1, O_2 可采用(15)式进行交叉操作。

$$\begin{cases} O_1(j) = 0.5[(1 + d_b(j))U_1(j) + (1 - d_b(j))U_2(j)] \\ O_2(j) = 0.5[(1 - d_b(j))U_1(j) + (1 + d_b(j))U_2(j)] \end{cases} \quad (15)$$

④ 选择操作:将父代个体与变异和交叉操作产生的子代个体放在一起采用锦标赛选择机制进行选择操作。

3) 求解结果

对(9)式和(12)式利用 NSGA-II 算法进行 Pareto 最优解集求解。设最优前端个体系数为 0.3,种群大小为 100,最大进化代数数为 200,停止代数数为 200,适应度函数值偏差为 10^{-6} ,由 Matlab 计算得到 Pareto 前沿解集如图 5 所示。

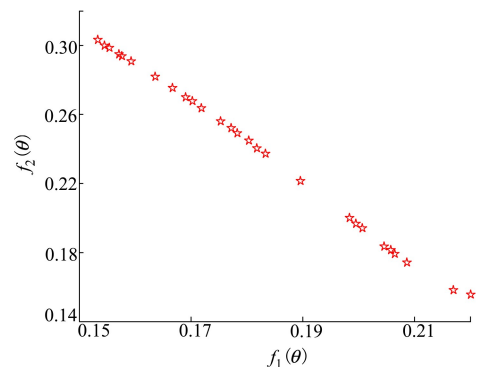


图 5 Pareto 前沿解集

根据图 5 所示 Pareto 前沿,可得满足力矩舒适度和关节舒适度函数的最佳解集取值范围。由于手持控制器质量较大,长时间保持该姿势进行作业易引发上肢 WMSDs,进而导致作业效能急剧下降。因此,设计一款上肢作业辅助装置将有利于提升手持控制器作业的舒适度和效率。

为从最优解集中选择合适姿势进行上肢作业辅助装置设计,进一步利用 JACK 软件对该解集进行多次检验,最终选择手持控制器作业的最佳姿势为寰枕关节前屈 17.1°、肩关节内收 33.3°、肩关节内旋 43.4°、肩关节后伸 2.2°、肘关节后伸 97.8°。由于实际手持控制器作业时难以对上肢关节角度进行准确监控与调整,为减轻长时间操作引起的舒适度降低、疲劳累积、体力消耗等问题,基于优化后的最佳姿势从安全性、穿戴舒适性、美观性和轻量化 4 个方面进行手持控制器操作的辅助装置设计,方案如图 6 所示。

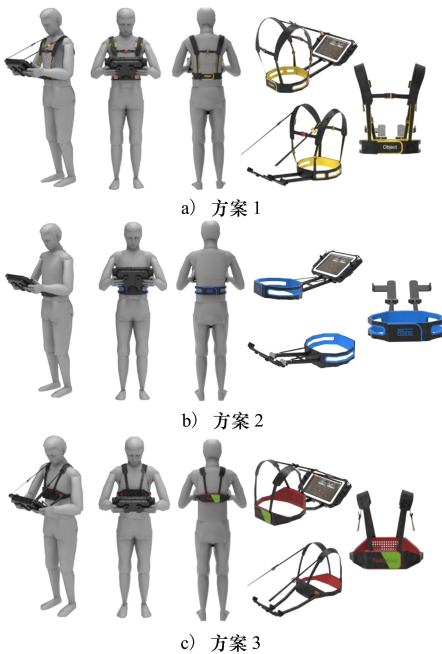


图 6 手持控制器操作的辅助装置设计方案

3 手持控制器设计方案优选

设手持控制器设计方案集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$, 评价指标集为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$, 决策者集为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_K\}$; 决策者 $e_k (1 \leq k \leq K)$ 对 $x_i (1 \leq i \leq M)$ 在 $c_j (1 \leq j \leq N)$ 的评价为 A_{ij}^k ; 指标权重为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$, 且 $w_1 + w_2 + \dots + w_N = 1$; 决策者权

重为 $Z = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_K\}$, 且 $\zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_K = 1$ 。根据第 2 节设计目标,采用 Likert7 级量表 $\{s_1: \text{很差}, s_2: \text{较差}, s_3: \text{差}, s_4: \text{一般}, s_5: \text{好}, s_6: \text{较好}, s_7: \text{很好}\}$ 对手持控制器设计方案从安全性、穿戴舒适性、美观性和轻量化 4 个方面进行评价。为便于对语言变量进行处理,同时考虑决策者在评估设计方案时的不确定与犹豫性,采用直觉模糊数对 Likert7 级量表的语言评价进行转换。

3.1 直觉模糊数

设 $F = \{\langle y, \mu_F(y), v_F(y) \rangle \mid y \in Y\}$ 表示直觉模糊集 (intuitionistic fuzzy set, IFS), $\mu_F(y), v_F(y)$ 分别表示 $y \in Y$ 的隶属度与非隶属度,且 $0 \leq \mu_F(y) + v_F(y) \leq 1$, 同时用 $\pi_F(y) = 1 - \mu_F(y) - v_F(y)$ 表示 $y \in Y$ 的不确定度,则对 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$ 的 2 个直觉模糊集 A 和 B , 其距离为^[23]

$$d(A, B) = \left[\frac{1}{2l} \sum_{i=1}^l [(\mu_A(y_i) - \mu_B(y_i))^2 + (v_A(y_i) - v_B(y_i))^2 + (\pi_A(y_i) - \pi_B(y_i))^2] \right]^{1/2} \quad (16)$$

为便于表示与计算,可令 $\alpha = \langle \mu_\alpha, v_\alpha \rangle$ 为一个直觉模糊数,且 $\mu_\alpha, v_\alpha \in [0, 1]$, 犹豫度为 $\pi_\alpha = 1 - \mu_\alpha - v_\alpha$ 。对于 3 个直觉模糊数 (intuitionistic fuzzy number, IFN) α, α_1 和 α_2 , 其运算规则如下^[23]:

- ① $\alpha_1 \oplus \alpha_2 = \langle \mu_{\alpha_1} + \mu_{\alpha_2} - \mu_{\alpha_1}\mu_{\alpha_2}, v_{\alpha_1}v_{\alpha_2} \rangle$;
- ② $\alpha_1 \otimes \alpha_2 = \langle \mu_{\alpha_1}\mu_{\alpha_2}, v_{\alpha_1} + v_{\alpha_2} - v_{\alpha_1}v_{\alpha_2} \rangle$;
- ③ $\lambda \alpha = \langle 1 - (1 - \mu_\alpha)^\lambda, v_\alpha^\lambda \rangle, \lambda > 0$;
- ④ $\alpha^\lambda = \langle \mu_\alpha^\lambda, 1 - (1 - v_\alpha)^\lambda \rangle, \lambda > 0$;
- ⑤ 若 $(\mu_{\alpha_1} - v_{\alpha_1}) > (\mu_{\alpha_2} - v_{\alpha_2})$, 则 $\alpha_1 > \alpha_2$;
- ⑥ 若 $\mu_{\alpha_1} - v_{\alpha_1} = \mu_{\alpha_2} - v_{\alpha_2}$, 则当 $\mu_{\alpha_1} + v_{\alpha_1} = \mu_{\alpha_2} + v_{\alpha_2}$ 时, $\alpha_1 = \alpha_2$; $\mu_{\alpha_1} + v_{\alpha_1} > \mu_{\alpha_2} + v_{\alpha_2}$ 时, $\alpha_1 > \alpha_2$ 。

语言变量与直觉模糊数的对应关系如表 4 所示。则决策者 e_k 对手持控制器设计方案在各指标上的语言评价 A_{ij}^k 可用直觉模糊数表示为 $U_k = \{\langle \mu_{ij}^k, v_{ij}^k \rangle\}_{M \times N}$ 。

表 4 语言变量与直觉模糊数的对应关系

语言变量	直觉模糊数
s_1 很差	$\langle 0.05, 0.95 \rangle$
s_2 较差	$\langle 0.20, 0.70 \rangle$
s_3 差	$\langle 0.35, 0.55 \rangle$
s_4 一般	$\langle 0.50, 0.40 \rangle$
s_5 好	$\langle 0.65, 0.25 \rangle$
s_6 较好	$\langle 0.80, 0.10 \rangle$
s_7 很好	$\langle 0.95, 0.05 \rangle$

3.2 决策者权重

决策矩阵犹豫度反映了决策者的不确定程度,犹豫度越大则决策者不确定性程度越大,则其权重应越低^[24]。决策者 E_k 的整体犹豫度 π_k 为

$$\pi_k = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \pi_{ij}^k \quad (17)$$

则考虑 E_k 的犹豫度权重为

$$\zeta_k^1 = \frac{\pi_k^{-1}}{\sum_{k=1}^K \pi_k^{-1}} \quad (18)$$

同时,由于决策者间认知的差异性,其对手持控制器评价的结果不同,可通过决策者个体与整体决策之间的相似度反映,相似度越大,则决策者个体与整体决策的一致性越强,则权重也应越大。根据(16)式,计算决策者 E_k 和 $E_{k'}$ 的相似度为 $1 - d(E_k, E_{k'})$, 则得到 E 的相似度权重为

$$\zeta_k^2 = \frac{\sum_{k'=1}^K [1 - d(E_k, E_{k'})] - 1}{\sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{k'=1}^K [1 - d(E_k, E_{k'})] - 1 \right\}} \quad (19)$$

综合考虑 ζ_k^1 和 ζ_k^2 , 得到 E_k 的综合权重为

$$\zeta_k = \varepsilon \zeta_k^1 + (1 - \varepsilon) \zeta_k^2 \quad (20)$$

式中, $\varepsilon \in [0, 1]$ 为调节参数,反映 E_k 的决策犹豫度和相似度的重要性程度。当 $\varepsilon > 0.5$, 则 E_k 的犹豫度更重要; 当 $\varepsilon < 0.5$, 则 E_k 的相似度更重要。

3.3 决策指标权重

采用直觉模糊熵和熵权法的基本思想^[25], 令 $\langle \mu_{ij}^k, v_{ij}^k \rangle$ 的模糊熵为 $E(\mu_{ij}^k, v_{ij}^k) = \cos \frac{(\mu_{ij}^k)^2 - (v_{ij}^k)^2}{2}$, 则决策指标权重计算如(21)式所示。

$$w_j^k = \frac{1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E(\mu_{ij}^k, v_{ij}^k)}{N - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M E(\mu_{ij}^k, v_{ij}^k)} \quad (21)$$

3.4 方案排序

根据 IFS 的集结算子, 可对决策者 E_k 的直觉模糊数矩阵 U_k 进行集结, 如(22)式所示。

$$F_{ik} = \langle 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \mu_{ij}^k)^{w_j^k}, \prod_{j=1}^N (v_{ij}^k)^{w_j^k} \rangle \quad (22)$$

设 $Z_{ik}(\mu) = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \mu_{ij}^k)^{w_j^k}$, $Z_{ik}(v) =$

$\prod_{j=1}^N (v_{ij}^k)^{w_j^k}$, 进而利用(22)式计算所有决策者的总体评价结果, 得到方案 x_i 的总体 IFN 为

$$F_i = \langle 1 - \prod_{k=1}^K (1 - z_{ik}(\mu))^{\zeta_k}, \prod_{k=1}^K (z_{ik}(v))^{\zeta_k} \rangle \quad (23)$$

利用 3.1 节 IFN 的运算规则, 可对各方案进行优劣排序。

3.5 手持控制器设计方案优选过程

3 名决策者以直觉模糊数的形式给出初始评价价值, 如表 5 所示。

表 5 直觉模糊数初始评价价值

决策者	方案	决策指标			
		安全性 c_1	穿戴舒适性 c_2	美观性 c_3	轻量化 c_4
e_1	x_1	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$
	x_2	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.50, 0.40, 0.10 \rangle$	$\langle 0.50, 0.40, 0.10 \rangle$	$\langle 0.35, 0.55, 0.10 \rangle$
	x_3	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$
e_2	x_1	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$
	x_2	$\langle 0.50, 0.40, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.50, 0.40, 0.10 \rangle$
	x_3	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$
e_3	x_1	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.50, 0.40, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$
	x_2	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.50, 0.40, 0.10 \rangle$	$\langle 0.50, 0.40, 0.10 \rangle$	$\langle 0.35, 0.55, 0.10 \rangle$
	x_3	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.80, 0.10, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$	$\langle 0.65, 0.25, 0.10 \rangle$

通过(20)式计算出每个决策者的权重分别为:
 $\zeta_1 = 0.3264, \zeta_2 = 0.2917, \zeta_3 = 0.3819$ 。由(21)式
 计算出每个决策指标的权重分别为: $w_1 = 0.2682,$
 $w_2 = 0.2536, w_3 = 0.2343, w_4 = 0.2439$ 。

利用(22)~(23)式计算设计方案的总体评价价值:
 $F_1 = \langle 0.7381, 0.1539 \rangle, F_2 = \langle 0.5690, 0.3396 \rangle,$
 $F_3 = \langle 0.6840, 0.2112 \rangle$ 。

最后利用 3.1 节 IFN 的运算规则对方案进行优劣排序,则有 $F_1 > F_2 > F_3$,即方案 1 最优,方案 2 次之,方案 3 最劣。

4 结 论

为减轻无人装备手持控制器的长时间操作给作业人员带来的上肢 WMSDs 风险,本文利用基于 JACK 的虚拟人建模与评估,获取上肢关节角度与力矩数据,分别构建了上肢关节角度和力矩的舒适度模型,利用 NSGA-II 算法求解了上肢最优操作姿势,设计了手持控制器的作业辅助装置,借助直觉模糊数算法进行了设计方案的优选。但论文仅借助数字人建模进行手持控制器操作的上肢舒适性评估与优化,后续可结合设计方案决策结果进行实体作业装置开发,并设计上肢肌电实验进行进一步评估与验证。

参考文献:

- [1] 刘思宇,张德雨,明致远,等.基于脑机接口与人机闭环的远程脑控无人机系统[J].兵工学报,2024,45(9):3191-3203
 LIU Siyu, ZHANG Deyu, MING Zhiyuan, et al. Remote brain-controlled UAV system based on brain-computer interface and man-machine closed loop[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(9): 3191-3203 (in Chinese)
- [2] 董泽委.陆战场低空多域场景下的集群目标威胁动态评估[J].清华大学学报,2024,64(8):1380-1390
 DONG Zewei. Cluster target threat dynamic assessment in low-altitude multi-domain scenarios of land battlefields[J]. Journal of Tsinghua University, 2024, 64(8): 1380-1390 (in Chinese)
- [3] 王越,张麟.矿工肌肉疲劳状况及事故预防研究[J].中国安全科学学报,2021,31(3):191-196
 WANG Yue, ZHANG Lin. Research on muscle fatigue status and accident prevention in miners[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 191-196 (in Chinese)
- [4] YANG Y P, LYU L W, HAN Z J, et al. Ergonomics assessment of the overhead maintenance of vehicle-mounted radar antenna using digital human modelling[J]. Advanced Design Research, 2023, 1(2): 63-70
- [5] 张栋,李艳军,曹愈远.基于深度学习的飞行员上肢关节操纵舒适性预测方法[J].机械设计,2023,40(3):55-64
 ZHANG Dong, LI Yanjun, CAO Yuyuan. Pilot upper limb joint handling comfort prediction method based on deep learning[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(3): 55-64 (in Chinese)
- [6] 赵晓一,赵川,杨文鑫,等.面向手过头任务的残差神经网络肌肉疲劳预测模型[J].医用生物力学,2024,39(3):482-488
 ZHAO Xiaoyi, ZHAO Chuan, YANG Wenxin, et al. A residual neural network muscle fatigue prediction model for overhead tasks[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2024, 39(3): 482-488
- [7] 徐兆,吕健,潘伟杰,等.基于表面肌电信号和动作捕捉的上肢运动疲劳分析[J].生物医学工程学杂志,2022,39(1):92-102
 XU Zhao, LYU Jian, PAN Weijie, et al. Upper limb motion fatigue analysis based on surface EMG and motion capture[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2022, 39(1): 92-102 (in Chinese)
- [8] GARG A, HEGMANN K, KAPELUSCH J. Short-cycle overhead work and shoulder girdle muscle fatigue[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2006, 36: 581-597
- [9] NADDEO A, CAPPETTI N, D'ORI C. Proposal of a new quantitative method for postural comfort evaluation[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015, 48: 25-35
- [10] 邓丽,陈波,余隋怀.面向舱室布局优化的上肢操作舒适性评估方法研究[J].机械科学与技术,2017,36(1):108-113
 DENG Li, CHEN Bo, YU Suihuai. Evaluation method of upper limb handling comfort for cabin layout optimization[J]. Mechan-

- cal Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(1): 108-113 (in Chinese)
- [11] 辛运胜, 金泓懿, 张丽莉, 等. 基于人机耦合模型和肌电实验的单轨吊车司机生物力学分析[J]. 中国机械工程, 2025, 36(1): 168-176
XIN Yunsheng, JIN Hongyi, ZHANG Lili, et al. Biomechanics analysis of monorail crane drivers based on man-machine coupling model and electromyoelectric experiments[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1): 168-176 (in Chinese)
- [12] CHIHARA T, IZUMI T, SEO A. Perceived discomfort functions based on joint moment for various joint motion directions of the upper limb[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(2): 308-317
- [13] MARTINS A B, LOPES E S, PAGNUSSAT M B, et al. Upper limb posture and movement during tracked versus wheeled harvester operation on Pinus thinning[J]. International Journal of Forest Engineering, 2020, 31(3): 263-271
- [14] 全国人类工效学标准化技术委员会(SAC/TCT). 中国成年人人体尺寸[S]. GB/T 10000—2023, 2023
- [15] 中国标准研究中心. 成年人人体惯性参数[S]. GB/T 17245—2004, 2004
- [16] PANDYA A K, HASSON S M, ALDRIDGE A M, et al. Correlation and prediction of dynamic human isolated joint strength from lean body mass[R]. NASA-TP-3207, 1992
- [17] ZACHER I, BUBB H. Strength based discomfort model of posture and movement[J]. SAE Transactions, 2004, 113: 87-92
- [18] 滕俊章, 李焱, 吕治国, 等. 基于虚拟人的驾驶员踏板操作舒适性分析方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(增刊1): 193-196
TENG Junzhang, LI Yan, LYU Zhiguo, et al. Analysis method of driver's pedal operation comfort based on virtual human[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(suppl.1):193-196 (in Chinese)
- [19] KEE D, KARWOWSKI W. Ranking systems for evaluation of joint and joint motion stressfulness based on perceived discomforts [J]. Applied Ergonomics, 2003, 34(2): 167-176
- [20] 武维维, 叶林梅, 邵晓东, 等. 基于多目标遗传算法的虚拟人作业姿态仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 155-164
WU Weiwei, YE Linmei, SHAO Xiaodong, et al. Working posture simulation method for virtual human based on multi-objective genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 155-164 (in Chinese)
- [21] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197
- [22] ARUN M, JEBARANI M R E. Efficient design and analysis of microstrip patch antenna array with real coded genetic algorithm [J]. Measurement; Sensors, 2024, 32: 101062
- [23] XU Z S. Some similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and their applications to multiple attribute decision making[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2007, 6(2): 109-121
- [24] 梁昌勇, 张恩桥, 戚筱雯, 等. 一种评价信息不完全的混合型多属性群决策方法[J]. 中国管理科学, 2009, 17(4): 126-132
LIANG Changyong, ZHANG Enqiao, QI Xiaowen, et al. A method of multi-attribute group decision making with incomplete hybrid assessment information[J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17(4): 126-132 (in Chinese)
- [25] 刘满凤, 任海平. 基于一类新的直觉模糊熵的多属性决策方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(11): 2909-2916
LIU Manfeng, REN Haiping. A study of multi-attribute decision making based on a new intuitionistic fuzzy entropy measure[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(11): 2909-2916 (in Chinese)

Assessing upper limb joint comfort and optimizing handheld controller operations

YANG Yanpu¹, YANG Qinxia², ZHUO Yueming¹, JI Lijing³

(1.Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2.AECC Chengdu Engine Co., Ltd., Chengdu 610503, China;
3.Institute of Industrial Hygiene of Ordnance Industry, China North Industries Group Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The prolonged operation of a handheld controller for unmanned equipment can pose the risk of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) to its operator. To enhance the comfort of upper limb joints during such operations, the digital human and task scenario model was established with the JACK ergonomic analysis software. Comfort assessment models of joint moments and angles were established respectively, and the relationship between upper limb joint comfort and different forward inclination angles of the atlanto-occipital joint was studied. A multi-objective function for optimizing the upper limb posture during handheld controller use was formulated. The non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) with the elite strategy was introduced to solve the optimal upper limb posture, obtaining the optimal postures for handheld controller operations and designing supportive devices. Intuitionistic fuzzy numbers were then employed to handle the uncertainty and hesitation in a decision-maker's assessment of design solutions, selecting the optimal design for supportive devices used with the handheld controller in its optimal posture.

Keywords: ergonomics; upper limb joint comfort assessment; multi-objective optimization; intuitionistic fuzzy number; handheld controller

引用格式: 杨延璞, 杨沁夏, 卓玥鸣, 等. 手持控制器操作的上肢关节舒适性评估与作业优化研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 741-750

YANG Yanpu, YANG Qinxia, ZHUO Yueming, et al. Assessing upper limb joint comfort and optimizing handheld controller operations[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(4): 741-750 (in Chinese)