

分类号：
学号：20232109090

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于上肢负荷的国产采棉机驾驶室舒适性 优化研究

学位申请人

唐昊成

指导教师

赵永满 教授

魏子凯 讲师

赵鹏达 高级工程师

申请学位类别

专业硕士

专业名称

机械

研究领域

机械工程

所在学院

机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

分类号:
学号: 20232109095

密级:
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于上肢负荷的国产采棉机驾驶室舒适性优化研究

学位申请人	唐昊成
指导教师	赵永满 教授
	魏子凯 讲师
	赵鹏达 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	机械工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

**Research on Comfort Optimization of Domestic Cotton Picker Cabins
Based on Upper Limb Load**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Tang Hao-cheng

(Mechanical Engineering)


Dissertation Supervisor: Prof. Zhao Yong-man

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

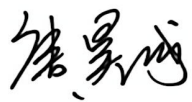

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：  时间： 2026 年 5 月 25 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：  时间： 2026 年 5 月 25 日
导师签名：  时间： 2026 年 5 月 25 日



摘要

采棉机作为新疆棉花产业的关键装备，其驾驶室人机工程设计的合理性直接影响驾驶员的作业舒适性与职业健康。针对国产采棉机驾驶室缺乏专用设计标准、进口机型存在人体尺寸不匹配而导致驾驶员在高强度集中作业时诱发上肢肌肉疲劳及工作相关肌肉骨骼疾病的工程实际问题，本文综合运用人机工程学理论、生物力学仿真、表面肌电实验与智能优化算法，围绕采棉机驾驶室人机工程学优化开展了系统研究，主要研究工作如下：

(1) 驾驶室舒适性影响因素分析与实验平台搭建。通过对比国内与国际人体坐姿关键尺寸，揭示了中国驾驶员肩颈、肘部肌肉易疲劳的深层诱因；结合问卷调查与回归分析 ($R^2=0.68$, $p<0.05$)，验证操纵杆、方向盘及座椅布局是影响上肢舒适性的关键设计因素；搭建采棉机驾驶室实验平台，明确可调参数范围与数据采集方案，为后续研究奠定硬件基础。

(2) 基于sEMG实验与AnyBody仿真的驾驶舒适性生物力学分析。招募10名符合第50百分位标准的男性被试，完成被测肌肉的最大自主收缩力 (Maximum Voluntary Contraction, MVC) 标定与sEMG信号采集，通过预实验筛选出左上肢三角肌、肱二头肌、桡侧腕屈肌及右上肢三角肌、肱二头肌作为核心分析肌肉；利用AnyBody软件构建采棉机驾驶员-驾驶室生物力学耦合模型，通过对比仿真肌肉力与实测sEMG数据验证模型有效性 ($ICC=0.695$)；基于验证模型开展单因素仿真分析，揭示了方向盘与操纵杆关键布局参数对上肢肌肉激活度的影响规律。

(3) 不同操控装置布局参数下的上肢肌肉负荷优化。采用Box-Behnken设计构建左、右上肢综合肌肉激活度的二次回归模型，模型拟合精度高 ($R^2_{左}=0.9965$, $R^2_{右}=0.9742$)，方差分析表明各因素及其交互作用显著；基于模型求解得到最优参数组合：方向盘倾角 $\theta=32^\circ$ 、前后距离 $L1=426\text{mm}$ 、高度 $H1=741\text{mm}$ ；操纵杆前后距离 $L2=322\text{mm}$ 、高度 $H2=760\text{mm}$ 、水平距离 $M=389\text{mm}$ ；贡献度分析明确了参数优化优先级 (左上肢： $L1>\theta>H1$ ；右上肢： $L2>M>H2$)；通过李克特量表主观评价与配对t检验 ($p>0.05$)，验证优化参数与驾驶员主观舒适评价，具有较好一致性。

(4) 不同关节角度下的上肢肌肉负荷优化。以动作捕捉实验获取的上肢关节角度为输入，构建基于随机森林的肌肉激活度预测模型，与Ridge、GBR、XGBoost等模型对比，随机森林 (Random Forest, RF) 模型表现最优 ($R^2=0.82$, $RMSE=0.006$)；针对蜣螂优化算法 (Dung Beetle Optimizer, DBO) 算法易陷入局部最优、收敛精度不足等问题，引入多组合策略混沌搜索与思维创新策略进行改进，提出改进IDBO算法，在23种标准测试函数及CEC2022测试集上验证了其收敛精度与鲁棒性优势；集成RF预测模型与IDBO寻优算法，以最小化肌肉激活度为目标求解最优关节角度组合，最大肌肉激活程度平均降低14.2%。

关键词：采棉机驾驶室；驾驶舒适性；Anybody；表面肌电信号；关节角度优化

Abstract

As a critical piece of equipment in the Xinjiang cotton industry, the ergonomic design of the cotton picker cab directly affects the operator's working comfort and occupational health. In response to the engineering challenges posed by the lack of dedicated design standards for domestically manufactured cotton picker cabs and the anthropometric mismatches in imported models — which contribute to upper limb muscle fatigue and work-related musculoskeletal disorders during high-intensity, prolonged operations — this study systematically investigates the ergonomic optimization of cotton picker cabs through an integrated application of ergonomics theory, biomechanical simulation, surface electromyography experiments, and intelligent optimization algorithms. The main research work is as follows:

(1) Analysis of factors influencing cab comfort and construction of an experimental platform. By comparing domestic and international key dimensions of the human body in seated postures, this study reveals the underlying causes of Chinese drivers' susceptibility to shoulder, neck, and elbow muscle fatigue. Through questionnaire surveys and regression analysis ($R^2=0.68$, $p < 0.05$), it validates that the layout of the control lever, steering wheel, and seat are key design factors affecting upper limb comfort. A cotton picker cab experimental platform was established to define the range of adjustable parameters and the data collection protocol, laying the hardware foundation for subsequent research.

(2) Biomechanical Analysis of Driving Comfort Based on sEMG Experiments and AnyBody Simulation. Ten male subjects meeting the 50th percentile anthropometric criteria were recruited to complete maximum voluntary contraction (MVC) calibration and sEMG signal acquisition for the tested muscles. Through preliminary experiments, the deltoid, biceps brachii, and flexor carpi radialis of the left upper limb, along with the deltoid and biceps brachii of the right upper limb, were selected as the core muscles for analysis. A biomechanical coupling model of the cotton picker operator and cab was constructed using AnyBody software, and the model validity was verified by comparing simulated muscle forces with measured sEMG data ($ICC = 0.695$). Based on the validated model, single-factor simulation analysis was conducted to reveal the effects of key layout parameters of the steering wheel and control lever on upper limb muscle activation.

(3) Optimization of Upper Limb Muscle Load Under Different Control Device Layout Parameters. A quadratic regression model for the comprehensive muscle activation of the left and right upper limbs was constructed using the Box-Behnken design, achieving high fitting accuracy ($R^2_{left} = 0.9965$, $R^2_{right} = 0.9742$). Analysis of variance indicated that individual factors and their interactions were significant. The optimal parameter combination derived from the model was as follows: steering wheel

inclination $\theta = 32^\circ$, forward/backward distance $L1 = 426$ mm, height $H1 = 741$ mm; control lever forward/backward distance $L2 = 322$ mm, height $H2 = 760$ mm, horizontal distance $M = 389$ mm. Contribution analysis clarified the priorities for parameter optimization (left upper limb: $L1 > \theta > H1$; right upper limb: $L2 > M > H2$). Subjective evaluations using the Likert scale and paired t-tests ($p > 0.05$) verified good consistency between the optimized parameters and the drivers' subjective comfort ratings.

(4) Optimization of Upper Limb Muscle Load at Different Joint Angles. Using upper-limb joint angles obtained from motion-capture experiments as inputs, a muscle activation prediction model based on Random Forest (RF) was established. Compared with Ridge, GBR, XGBoost, and other models, the RF model showed the best performance ($R^2 = 0.82$, $RMSE = 0.006$). To address the tendency of the basic Dung Beetle Optimizer (DBO) to fall into local optima and its insufficient convergence accuracy, a multi-strategy chaotic search and an inspiration-based innovation strategy were introduced, and an improved IDBO algorithm was proposed. Its superiority in convergence accuracy and robustness was validated using 23 benchmark functions and the CEC2022 test suite. By integrating the RF prediction model with the IDBO optimization algorithm, the optimal joint angle combination was solved with the objective of minimizing muscle activation. After optimization, the driver's maximum muscle activation decreased by an average of 14.2%, effectively reducing upper-limb muscle load.

Key words: Cotton Picker Cabin; Driving Comfort; Anybody; Surface Electromyography Signals; Joint Angle Optimization

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 驾驶室舒适性优化研究.....	2
1.2.2 基于生物力学的舒适性评价研究.....	4
1.2.3 关节角度优化及智能算法应用研究.....	6
1.2.4 文献评述.....	8
1.3 研究目标与研究内容.....	9
1.3.1 研究目标.....	9
1.3.2 研究内容.....	9
1.4 研究方法与技术路线.....	10
1.5 本章小结.....	11
第2章 上肢舒适性影响因素分析与实验平台搭建.....	12
2.1 上肢舒适性界定与研究边界.....	12
2.2 采棉机驾驶室舒适性关键影响因素分析.....	13
2.2.1 驾驶室整体布局与操控装置概述.....	13
2.2.2 国内外驾驶员人体尺寸对比分析.....	14
2.2.3 上肢肌肉疲劳关联的关键因素调查与分析.....	15
2.3 实验平台搭建.....	18
2.3.1 平台搭建目标与总体思路.....	18
2.3.2 平台组成与功能实现.....	19
2.3.3 关键模块的组装与调节方式.....	19
2.3.4 数据采集系统集成.....	21
2.3.5 平台实物与搭建结果.....	22
2.4 本章小结.....	23

第3章 基于sEMG实验与Anybody仿真的驾驶舒适性生物力学分析	24
3.1 人体肌肉骨骼系统概述	24
3.2 sEMG信号概述	25
3.3 台架实验方案设计	27
3.3.1 自变量的选择	27
3.3.2 被试的选择	28
3.3.3 被测肌肉的选择与MVC标定	28
3.3.4 实验设备	31
3.3.5 实验程序	33
3.4 肌电信号处理与肌肉激活程度的计算	33
3.5 基于Anybody的采棉机驾驶员-驾驶室耦合环境建立	34
3.5.1 人体肌肉骨骼模型的建立	34
3.5.2 驾驶室模型的建立	36
3.5.3 驾驶员-驾驶室耦合模型的建立	37
3.5.4 生物力学模型有效性验证	38
3.6 采棉机驾驶室布局对上肢舒适性的影响分析	39
3.6.1 驾驶过程中单一因素对上肢肌肉激活度的影响	39
3.6.2 上肢综合肌肉激活度的计算	41
3.7 本章小结	42
第4章 不同操控装置布局参数下的上肢肌肉负荷优化	43
4.1 响应面优化法概述	43
4.2 响应值的确定	44
4.2.1 θ 、L1和H1对左上肢整体肌肉激活的影响	44
4.2.2 L2、M和H2对右上肢整体肌肉激活的影响	44
4.2.3 因素因子水平的确定	45
4.3 上肢综合肌肉激活度回归分析	47
4.4 贡献度的计算	49
4.5 操控装置位置参数优化分析	49
4.5.1 方向盘位置参数优化与舒适性分析	49
4.5.2 操纵杆位置参数优化与舒适性分析	52
4.6 优化前后肌肉激活程度对比分析	54
4.7 基于李克特量表法的舒适性主观评价	55
4.7.1 主观舒适性评价方案	55
4.7.2 主观舒适性评价与分析	55

4.8 本章小结	57
第5章 不同关节角度下的上肢肌肉负荷优化	59
5.1 关节角度优化对采棉机驾驶舒适性的影响机制及原因分析	59
5.2 传统DBO优化算法	60
5.3 基于改进DBO算法的关节角度优化实现	61
5.3.1 TIS策略	61
5.3.2 MSCS策略	62
5.3.3 IDBO优化算法的实现	63
5.3.4 IDBO的收敛与稳定性对比分析	64
5.4 上肢关节角度优化	74
5.4.1 动作捕捉实验设计	74
5.4.2 实验数据处理与预测模型构建	75
5.4.3 RF预测模型构建	76
5.4.4 上肢关节角度优化结果分析	77
5.5 本章小结	78
第6章 结论与展望	79
6.1 结论	79
6.2 展望	80
参考文献	81
致谢	89
作者简介	90
附录A	91
附录B	93

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

《国家统计局关于2025年棉花产量的公告》数据表明2025年全国棉花播种面积为4468.7万亩，其中新疆棉花机采面积占全国90%以上，机械化采收率持续升高。然而传统的人工采摘棉花方式不仅劳动强度大、效率低，还面临劳动力短缺和成本上升的挑战。因此，机械化采棉成为解决这一问题的有效途径。2026年中央一号文件中提出要加快高端智能、普遍适用农机装备研发应用。要提升采棉机的市场竞争力，必须充分发挥采棉机的潜力，实现高效、精准的棉花采摘。因此，采棉机驾驶室舒适的人机布置参数的优化显得尤为关键。

随着工业5.0理念的推进，“以人为本”的设计思想已深入人心，成为工程机械驾驶室设计的重要准则^[1]。与此同时，国内外职业健康体系的不断完善，对劳动者的工作环境与健康保护提出了更高要求，人类工效学与人机工程学在该领域的应用价值日益凸显。

在农业机械领域，采棉机驾驶员长期处于高强度、重复性的作业环境中，其驾驶舒适性与职业健康风险尤为值得关注。驾驶员在操作过程中，上肢肌肉需要持续承担方向盘操控、换挡等任务，不同的人机布置参数会直接影响这些肌肉的负荷水平。不合理的驾驶姿势不仅会导致疲劳感加剧，更是诱发工作相关的肌肉骨骼疾病（WMSDs）的重要风险因素。特别是上肢肌肉，在长时间静态作业中易产生累积性疲劳，进而影响驾驶员的注意力与操作准确性，对作业安全构成潜在威胁。

为降低驾驶员的肌肉负荷，现有研究主要从两条路径展开：一是通过优化驾驶室人机布置参数，改善操作界面的外部力学环境；二是从人体自身的运动机制出发，关注驾驶过程中的关节角度变化。人体的肩、肘关节构成驾驶操作链的关键环节，其角度直接决定了肌肉的发力效率。不恰当的关节角度会迫使肌肉群在不利的力学杠杆状态下工作使其需要产生更大的肌力才能完成同样操作，这是加剧肌肉疲劳的重要内在原因^[2]。然而，当前多数研究往往将肌肉负荷分析与关节角度优化分开进行，缺乏对二者的综合考量。事实上，关节角度的舒适范围与肌肉负荷水平密切相关——合理的关节角度能够优化肌肉发力条件，从根本上降低肌肉的激活程度。因此，在采棉机驾驶室的人机布置优化中，有必要将上肢关节角度舒适范围与肌肉受力分析相结合，建立更为完整的生物力学评价体系。

基于此,本研究拟通过生物力学建模仿真,系统分析不同人机布置参数下驾驶员上肢肌肉的受力特征及关节角度变化规律,探讨二者之间的内在关联,旨在从“外部环境优化”与“内部发力机制改善”两个层面协同降低上肢肌肉的激活程度与疲劳风险,为采棉机驾驶室的“以人为本”设计提供科学依据。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

本研究通过Anybody仿真和动捕技术,从肌肉负荷与关节角度双重视角揭示了采棉机驾驶室人机布置参数对驾驶员上肢生物力学响应的影响机理,深化了对长时间驾驶诱发上肢肌肉疲劳与职业损伤内在机制的认识。在此基础上,研究建立了基于上肢疲劳的多维度舒适性评价体系,并构建了能够响应不同人体尺寸与操作习惯的个性化舒适性预测模型,为驾驶室人机工效学研究提供了新的方法论参考,丰富了采棉机驾驶室人机工程学的理论体系。

(2) 实践意义

研究成果可直接指导采棉机驾驶室的工效学优化设计,通过量化分析确定最优布置参数与最佳关节角度范围,有效减轻驾驶员上肢肌肉疲劳,降低职业性肌肉骨骼疾病的发病风险,为一线农机驾驶员营造安全、健康、舒适的工作环境。同时,舒适的驾驶姿态有助于提升操作精准度与注意力集中度,进而促进采收效率与采净率的双重提升,保障作业质量与设备运行可靠性。此外,本研究构建的舒适性预测模型可实现设计阶段的快速评估与优选,缩短研发周期、降低设计成本,并满足不同操作员群体的个性化需求,全面提升用户满意度。研究积极响应工业5.0“以人为本”的发展理念,为推动农业机械向智能化、人性化方向转型升级、助力农业现代化进程提供了重要的技术支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 驾驶室舒适性优化研究

驾驶室舒适性早期研究主要集中在乘坐舒适性主观与客观评价的相关性上。这一领域的研究始于对车辆乘坐过程中人体感受的探讨,旨在通过科学的方法评估和优化驾驶室的舒适性。

国外早期的研究,如1935年发表的关于乘坐舒适性的论文,标志着这一领域的起步。随后研究者们提出了多种评价方法和标准,Janeway在1948年提出的舒适性标准,Dickman在1957年提出的K系数法,以及Lee R.A.和Pradko F等人在1968年提出的吸收功率法等为后来的驾驶室舒适性研究奠定了基础^[3]。后来,Thomas等人通过MBS仿真的

方法^[4]，对乘坐舒适性进行直接的评估，可以实现对输入数据的预处理，反映在现实中无法体验的驾驶条件，能够有效提高乘坐舒适性。Velikanov^[5]等人设计了一套针对矿用挖掘机人机工效性能评估的创新方案，这一方法能够细致地衡量不同人机工效因素的重要性，并据此对挖掘机驾驶室的设计变量进行精准调整与优化，显著提升了矿用挖掘机操作过程中的人机协同效率与操作员的工作舒适性。21世纪，Qin^[6]等人针对农业机械离合器踏板，构建了综合舒适性评估系统，优化了踏板位置参数，提高了驾驶舒适性。Wang^[7]等人建立了模糊综合评价模型、评价指标集和评语集。通过计算得出对挖掘机驾驶室舒适性相对客观的结论。国内对舒适性评价方法的研究开始于20世纪80年代，叶元瑜提出了一种驾驶座舒适性评价方法^[8]，对乘坐振动影响因素进行分析，为拖拉机驾驶室设计提供参考。李华等人建立三种拖拉机力学模型^[9]，对各种座位系统作了评价，改善拖拉机乘坐舒适性。随着科学技术的日益普及与成熟，我们已从单一的舒适性评价方法进阶至一个更为综合且人性化的设计优化体系。这一过程不仅局限于评价体系的完善，更深刻体现在利用仿真软件对驾驶室的视野区域、手可达界面以及动力学模型等进行精细化建模与分析。

随着人机工程仿真软件的普适性升级，越来越多的学者利用人机工程仿真软件优化驾驶舒适性的问题。国内学者如杨飞^[10]等人以H点为参考基准，利用人机工程学原理，对拖拉机驾驶室内的座椅及操作装置进行布局设计。在Pro/E中构建了拖拉机驾驶室的三维模型，用Pro/E Manikin模块，针对驾驶员的操作空间、视野性能以及坐姿舒适性这三个关键方面进行了仿真评估，提出了一种利用Manikin模块作为评价人机工程设计方案的工具。钟文杰^[11]等人以LX854型拖拉机驾驶室为研究对象，利用CATIA软件建立了拖拉机人机系统模型，并针对第5、50、95百分位人体模型进行了坐姿舒适性、操作台可达域和工作视野的仿真分析。赵雪莲^[12]针对电动拖拉机进行了造型设计、驾驶室建模与优化，并利用RAMSIS软件仿真验证了驾驶员的操作舒适性，结果显示设计符合人机工程学标准，提升了驾驶舒适性与操作便捷性。陈震寰^[13]根据人性化设计指导思路进行驾驶室方案设计，并建立重型卡车驾驶室的三维模型。最后通过Creo搭建数字人体模型对最终方案进行整体的人机工程合理性评价与验证，结果标明重型卡车驾驶室舒适性得到了提升。陈登凯^[14]等人以CATIA软件为平台，利用人机工程分析模块对驾驶员的作业姿态进行模拟仿真，对汽车驾驶室的方向盘、仪表盘、换挡装置等操纵部件的布局进行改进设计，能够有效提高驾驶室的舒适性。周艾^[15]等人以JACK为主要仿真工具，对工业搬运车虚拟模型仿真分析，并结合人机工程学原理分析驾驶员所处的人-机-环境系统，分析座椅H点和座椅设计、可视域仿真、双手可达域仿真、人体脊椎受力仿真、关节舒适性分析，提出优化建议。杨秀芳^[16]等人在CREO中创建了东方红拖拉机模型，对其舒适性、可达域、可视域进行虚拟仿真，结果表明驾驶室的各个操作装置都在可达范围内，满足舒适性要求，能够为拖拉机驾驶室的设计提供参考依据。Kang等人^[17]基于Matlab/Simulink软件建立了可变形地形与滚筒相互作用下振动压路机的非线性动力学模

型,发现液压气动悬置的非线性阻尼特性和高静态刚度可以大大减少驾驶员座椅的垂直振动和驾驶室晃动,提高舒适性。还有学者利用RAMSIS软件对现有的拖拉机驾驶室内操纵部件进行了校核优化,调整了各部件相对位置,高拖拉机驾驶的舒适性^[18]。

随着工业5.0的提出,以人为中心的设计理念在国内驾驶室布局优化和驾驶员舒适性提升方面得到了更深入的发展和应⽤,综合各种评价方法以及建模研究,对驾驶室舒适性⽇题展开研究。国外学者如Kuijt-Evers^[19]等人对叉车驾驶员进行的深⽤户研究,总结出应该优化内部结构、驾驶员视野范围及操作范围等人机性能的主要参数,显著提升叉车内部的工作舒适性与操作便捷性。Kim^[20]等人以操作者舒适性为出发点,评估拖拉机驾驶操作装置的适用性,建立了拖拉机操作适应性的评估设备和检查方法,为拖拉机制造商提供了一种以舒适性为宗旨的设计指南。起初虽然有应用,但是不够深⽤。Kam^[21]等人设计了一种先进的集成的透明平视显示器,可以帮助飞行员在SPO运动时保持最佳的性能,同时提出了将AR集成到飞机驾驶舱并引入以人为中心的交互方式。在国内的相关研究中,郑子晗^[22]等人基于人机工程学理论,从作业空间、驾驶员视野、人机界面的控制元件布置及其功能设计等方面开展了安全和舒适性分析与评估,为国产压雪车的人因安全与舒适性设计提供理论依据。于彦风等人^[23]通过调查问卷法找到影响驾驶员舒适性的各种因素,有微气候、噪声、空气湿度等,运用工业工程人因工程学理论、问题分析法对存在的问题进行分析和优化,提高驾驶员工作效率。Yang等人^[24]根据中国设计规范设计了一种旋转座椅,整合了座椅上的零部件。同时缩小了驾驶室空间,使得布局更加紧凑,这样使驾驶员操作起来更加方便,提高了驾驶舒适性。

1.2.2 基于生物力学的舒适性评价研究

近年来,许多学者对农业及工程机械驾驶室的优化进行了探索,主要集中在仿真建模和既定的舒适性评价指标上。然而,过度依赖预定义的仿真工具使得难以精确计算肌肉负荷和关节应力等生物力学指标,存在一定的局限性。当前大多数研究依赖于通用的仿真工具,如JACK、RAMSIS、SAMMIE或有限元分析软件。国内学者如Wu等人^[25]使用JACK建立了拖拉机模型,用于人机界面的人机工程学评估;Wang等人^[26]基于同一软件提出了挖掘装载机驾驶室的改进方案;Xu等人^[27]通过JACK分析操作可达性来优化设备布局;Cheng等人^[28]通过Hypermesh优化工程机械座椅的舒适性;在国外,Rathod及其研究团队则采用RAMSIS优化商用卡车驾驶室的人机工程学设计^[29]。

生物力学评估方法因能对舒适性和健康风险进行定量精确评估而成为日益重要的研究领域^[30]。其核心优势在于可将人体工学舒适性与生物力学特征直接关联,进而更深入地揭示驾驶员、作业人员及特殊人群的健康状况与肌肉疲劳规律^[31]。目前,相关研究已广泛覆盖驾驶、负重作业、康复训练、日常活动等多个场景,研究者通过表面肌电信

号（Surface Electromyography, sEMG）、特征参数分析、智能模型优化等多种技术路径，开展了大量针对性研究，具体如下：

国内在人机优化方面，如Lecocq等人^[32]比较了不同座椅对驾驶过程中神经肌肉疲劳的影响；Chi等^[33]通过考量手掌宽度与键盘尺寸的交互关系优化了操作界面；Xu等人^[34]对拖拉机方向盘的旋转过程建立生物力学模型进行反动力学分析，评估了三个位置参数（方向盘倾角、前后距离和上下高度）对驾驶员手臂肌肉活化程度的影响。Li等人^[35]构建了3个百分位中国汽车驾驶员肌肉骨骼模型，对车辆座椅、踏板、方向盘等人机布置参数进行优化设计。Zhang等人^[36]基于生物力学模型的单因素实验和响应面实验对下肢主要活动肌肉和关节的生物力学负荷进行研究，得到了离合器踏板设计参数的最佳范围。国外学者如Kuta等人^[37]通过最大自主收缩（MVC）参数肘部角度以及转向柱竖直倾角，确定驾驶员双手的最佳位置，这种方法有助于确定人体位置与人体肌肉产生的负荷之间的关系。

在运动与负重场景的肌肉疲劳评估方面，不同研究者针对特定人群和问题提出了相应的分析方法。王蒙^[38]等人针对运动员上肢肌疲劳分析不足问题，提出综合时域与频域参量的sEMG分析方法。通过Mega Win采集上肢肌电信号，利用SPSS分析这些参数与肌疲劳的关系。宋海燕^[39]等人研究人体双肩背负重行走时肌电信号，评估肌肉功能及疲劳特性，发现男性斜方肌、女性颈伸肌最易疲劳，负重增加致MPF显著下降。男女负重上限分别为体重的12%和9%，超限时肌电信号显著差异（ $p < 0.05$ ），为优化负重系统提供数据支持。邢聪^[40]等人通过收集腰伸肌群肌电信号，利用中值频率以及MVC分析肌肉疲劳，发现腰伸肌群疲劳影响了上肢鞭打动作环节间的相对运动节奏，削弱了环节间动量矩的传递效率。在日常活动与特殊人群肌肉疲劳评估中，研究者们聚焦不同场景下的疲劳特征，提出了针对性的评价模型与解决方案。贾淼^[41]等人针对地铁“低头族”颈部肌肉疲劳与使用时间的关系提出基于幅频联合分析法的疲劳评价模型。结果显示随着低头时间增加，斜方肌和头夹肌的肌电信号中位频降、均方根升，表明肌肉疲劳加剧。模型验证有效，可预警疲劳，促乘客健康习惯，支撑智能穿戴系统开发。张潇雅^[42]等人通过sEMG技术，采集进行前后向置物-返回运动时躯干肌的肌电频域指标平均值（MPF），利用MPF值的差异探讨卒中患者上肢运动时躯干肌疲劳情况，发现卒中患者双上肢活动时躯干肌群容易出现疲劳。

在驾驶与作业场景的舒适性及疲劳评估领域，相关研究重点围绕驾驶人员、作业人员的肌肉疲劳特征及舒适性优化展开。祝荣欣^[43]对比研究联合收获机驾驶与静坐对腰部肌肉疲劳的影响，采集10名驾驶人120分钟内腰部竖脊肌肌电信号。分析iEMG、RMS、MPF、MF及样本熵随驾驶时间变化，发现驾驶导致显著疲劳，样本熵相比线性指标更稳定，能有效表征腰部疲劳，为开发防疲劳系统提供依据。程川泰^[44]提出基于体征识别的智能座椅调节方法。采用Kinect实现驾驶员无接触体征测量，通过正交实验探究不同