

商用车驾驶员静态驾驶姿生物力学特性分析

王星月¹, 王丹¹, 丁淳², 李瑞雪¹, 王佳伟¹, 安博野¹

1. 一汽解放汽车有限公司
2. 一汽大众汽车有限公司

【摘要】从人体生物力学角度, 分析驾驶员处于驾驶姿态下人体骨肌力学特性, 基于骨肌力学软件建立了驾驶员驾驶姿势仿真模型, 实现了对真实驾驶环境及驾驶员驾驶姿态的逆向动力学仿真, 得到了典型驾驶室人机布置下驾驶员左上肢、右上肢、右下肢各部分肌肉的激活程度, 确定了驾驶员处于驾驶姿态下主要的工作肌群。为在驾驶员驾驶姿态舒适性评估及驾驶室舒适性人机布置设计中考虑驾驶员骨肌力学特性, 并精准确定驾驶姿态下的主要工作肌群提供了依据。

【关键词】 人因工程, 驾驶室布置, 驾驶舒适性, 骨肌力学模型, Anybody 软件, 肌肉激活程度

Biomechanical Characteristics Analysis of Static Driving Posture of Commercial Vehicle Drivers

Wang Xingyue¹, Wang Dan¹, Ding Chun², Li Ruixue¹, Wang Jiawei¹, An Boye¹

1. Faw Jiefang Group Co., Ltd.
2. Faw-Volkswagen

Abstract: From the perspective of human biomechanics, the biomechanical characteristics of human skeletal muscles under driving posture were analyzed. A driver driving posture simulation model was established based on skeletal muscle mechanics software, which achieved reverse dynamic simulation of the real driving environment and driver driving posture. The activation degree of muscles in the driver's left upper limb, right upper limb, and right lower limb under typical human-machine control arrangement was obtained, Identified the main working muscle groups of the driver in the driving posture. It provides a basis for considering the mechanical characteristics of driver's skeletal muscles in the evaluation of driver's driving posture comfort and the human-computer interaction design of cab controls, and accurately determining the main working muscles under driving posture.

Key words: human factors engineering, interior layout, driving comfort, musculoskeletal models, software of Anybody, muscle activation

引言

驾驶室内各机构的布置位置决定了驾驶员的驾驶姿态, 不合理的驾驶姿态会导致驾驶员动作呆板, 判断力下降, 引发驾驶员疲劳疼痛甚至出现误操作, 诱发交通事故, 影响行车安全。不合理的驾驶室人机布置会导致驾驶员长期处于不合理的驾驶姿态下, 引发颈椎病、腰肌劳损等职业疾病, 影响驾驶员的身体健康。驾驶室的人机布置直接影响着驾驶的舒适性, 以良好的人机布置带来驾驶员合理的驾驶姿态是十分必要的。因此, 研究不同驾驶室人机布置下驾驶员的驾驶舒适性对优化驾驶环境、改善驾驶员驾驶体验具有重要意义。

早期研究人员主要通过分析关节角度评价驾驶的舒适性。Rebiffe 等分析典型驾驶工况下驾驶员的驾驶姿态, 归纳关节角的推荐范围^[1]。Porter 和 Gyi 等通过台架试验测量, 总结了适用于欧洲驾驶员的关节角度范围^[2]。Park 等总结了适用于韩国驾驶员的关节角度推荐范围, 其研究表明韩国驾驶员与欧洲驾驶员舒适姿势存在差异^[3]。

随着研究及应用的不断深入, 研究人员发现针对关节角度的研究难以阐释舒适机理等深层次问题。根据驾驶员关节角度难以准确衡量驾驶舒适性, 更难以据此为驾驶室的人机布置设计提供参考。近年来, 研究人员开始在生物力学领域

进行研究, 也可结合数字人体模型进行仿真分析, 研究驾驶舒适性及其在驾驶室人机布置设计方面应用^[4-6]。Vergnano 等提出了一种用于驾驶舒适性评估的客观测量设备, 通过肌电图监测两个肩膀斜方肌的活动。通过头部跟踪设备监测驾驶员姿势。结果证明其研究的设备在评估不同座椅设计和汽车布局的驾驶舒适性方面是有效的^[7]。Gao 等通过试验测量座椅位置不同的情况下, 控制加速踏板及进行紧急制动时, 驾驶员身体应变、不适感和任务表现, 评估座椅及踏板位置对驾驶舒适性的影响^[8]。Gu 等使用 JACK 人机工程学分析软件对驾驶员驾驶室内的驾驶姿势和操作行为进行模拟分析, 提出了人体工程学的优化和改进方案, 该研究为农用车驾驶室设计提供了重要的参考依据^[9]。Sabri 等研究了人体测量参数与座椅压力变量之间的相关性, 以确定座椅设计对舒适性和安全性的影响^[10]。Gao 等建立了人体肌肉骨骼模型, 研究了坐垫角及靠背角对肌肉激活程度及肌肉力的影响, 得出可缓解疲劳的坐垫及靠背的推荐角度^[11]。Chen 等通过道路测试获取驾驶员下肢在驾驶过程中的踏板行程、踏板力及肌肉激活程度, 分析了踏板行程、座椅高度和 H 点距离的差异对肌肉激活的影响^[12]。Azman 等收集和分析了来自不同制造商地区的三种类型汽车的数据, 将这些汽车的尺寸与初始尺寸进行比较以开发驾驶装置^[13]。Lecocq 等在驾驶模拟器上开展驾驶实验, 在整个驾驶过程中记录包括斜方肌、

多裂肌等 8 块肌肉的肌电图，分析不同座椅在长时间驾驶期间对神经肌肉疲劳及驾驶舒适性的影响^[14]。

针对驾驶室人机布置设计问题，国内整车企业已经建立了较为完善的主观评价方案及客观调校经验。目前仍然存在的问题是，设计通常依据欧美人体体征，缺乏对中国驾驶员的本土化参数设计；概念设计时只能提出主观需求，无法导入具体产品设计要求及关键控制参数约束范围。测试分析往往在形成实车后才能进行评价反馈，可改进空间小，耗时长，缺乏设计阶段的仿真性能优化提升解决方案。

我国商用车产销规模巨大，是汽车行业产值的重要组成部分。其驾驶员驾驶时间更长，改善商用车驾驶环境，优化驾驶员驾驶姿态对减少职业病的产生，提升驾驶安全性及舒适性具有重要意义。

为此，本文面向商用车，采用 Anybody^[15,16] 软件建立了驾驶员驾驶姿态仿真模型来模拟驾驶员在真实驾驶环境下的驾驶姿势，并通过该模型分析驾驶姿态下驾驶员左上肢、右上肢及右下肢肌肉的激活程度，进而确定了人体处于驾驶姿态下主要的工作肌群，为驾驶员驾驶姿态舒适性评估及驾驶舒适性人机布置优化设计提供理论基础及试验测试方法指导。

1 驾驶姿势下人体骨肌力学特性理论分析

人体是由骨、软骨、肌肉、肌腱、关节等组成的复杂系统^[17]，依据肌肉骨骼系统生物力学理论，骨骼、肌肉及关节是人体运动控制系统的重要组成部分。人体骨骼与关节相连，共同构成人体的支架。骨骼肌附着于骨骼之上，在中枢神经系统的控制之下进行收缩或舒张，牵引骨骼改变位置及角度，从而实现各种不同的动作。

负责人体运动控制的肌肉数目众多，人体的运动控制是依靠不同的工作肌群协同工作实现的。本文主要对驾驶员处于驾驶姿态时的主要工作肌群进行研究。驾驶员处于驾驶姿态时，驾驶员左上肢操纵方向盘，右上肢操纵变速杆，右下肢操纵加速踏板，因此分别对驾驶员上肢主要工作肌肉及右下肢主要工作肌肉进行分析，人体上下肢肌肉如图 1、图 2 所示。

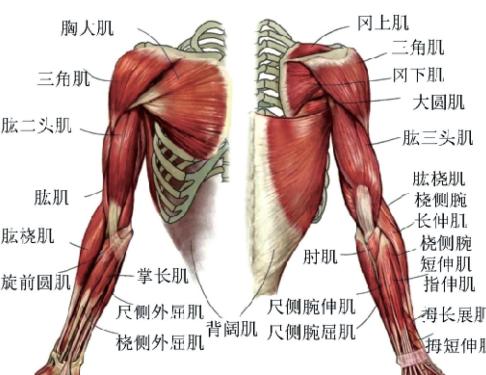


图 1 上肢肌肉

1.1 驾驶姿态下人体上肢骨肌力学分析

驾驶员处于驾驶姿态时，支撑驾驶员左上肢及右上肢工作的主要关节是肩关节及肘关节。驾驶员保持驾驶姿态时，

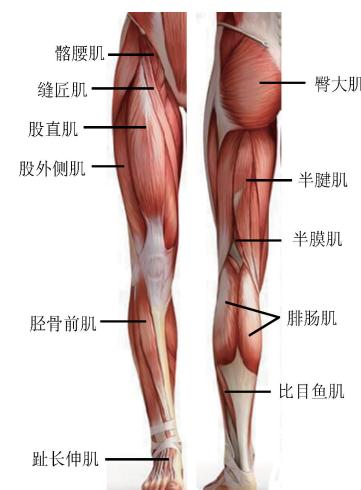


图 2 下肢肌肉

肩关节主要完成前举、外展及内外旋动作。三角肌和胸大肌位于肩部外层。三角肌分为前、中、后三部分，三角肌前束的主要功能是带动肩关节前屈及内旋，中束的主要功能是带动肩关节外展，后束的主要功能是带动肩关节伸展、水平外展及外旋。胸大肌的功能是带动肩关节内收及内旋。肩关节的前举及外展都需要三角肌提供力矩。冈上肌、冈下肌及肩胛下肌附着于盂肱关节周围，冈上肌和冈下肌负责肩关节的外展及外旋，肩胛下肌负责肩关节的内收及内旋。同时冈上肌、冈下肌、背阔肌及肩胛下肌可在进行前举及外展动作时维持盂肱关节的稳定性。斜方肌位于人体的颈部及背部位置，对于稳定肩关节及产生肩颈动作起重要作用，可使肩关节前举及外旋。

肘关节主要完成伸肘、屈肘、旋前及旋后动作。肱三头肌位于手臂后部，可使肩、肘关节伸直，是伸展动作主要的发力肌肉。由于拉伸反射的特点，随着屈肘的动作，肱三头肌的活性会增大^[17]。肱三头肌是肱二头肌的拮抗肌，肱三头肌、肱二头肌、肱肌、肱桡肌与肘关节屈伸动作密切相关。旋前圆肌、旋前方肌与前臂旋前动作密切相关。肱二头肌在前臂完全旋后时相较于旋前时活跃度更高。

1.2 驾驶姿态下人体下肢骨肌力学分析

驾驶员处于驾驶姿态时，支撑驾驶员右下肢工作的主要关节分别是髋关节、膝关节及踝关节。驾驶员保持驾驶姿态时，髋关节及膝关节均处于屈曲状态，小腿发力完成跖屈动作，大腿处于屈曲状态配合小腿发力。此时，髋关节主要完成前屈及外旋动作。膝关节及踝关节主要完成屈曲动作。人体下肢肌肉可划分为盆带肌、大腿群、小腿肌及足肌四个肌群。盆带肌包括髂腰肌、臀大肌等，大腿肌包括股四头肌、缝匠肌、胭绳肌等，小腿肌包括胫骨前肌、腓肠肌、比目鱼肌等^[18]。髂腰肌、股直肌、缝匠肌与髋关节屈曲动作密切相关，其中，髂腰肌是最主要的发力肌肉^[19]。大腿及小腿均需在膝关节处完成屈曲，腓肠肌、股四头肌、胭绳肌等与膝关节屈曲动作密切相关。小腿发力带动踝关节完成跖屈动作，胫骨前肌、拇长伸肌等与踝关节屈曲动作密切相关^[20]。

2 基于生物力学的驾驶姿势仿真

2.1 商用车驾驶员的人体骨肌力学建模

本文建立的商用车驾驶员骨肌力学模型，是在 Anybody7.3 版本软件提供的人体骨肌模型的基础上针对驾驶员驾驶姿态进行的二次开发。

Anybody 软件的模型库中提供的基础人体模型包括刚性骨骼、关节，以及具有生理学性质的肌肉和肌腱组合。通过对骨骼、肌肉等进行逆向动力学分析，即可计算肌肉及关节受力、肌肉激活程度、肌腱弹性势能等多项生物力学指标参数^[21]。

本文通过 Anybody 软件建立了驾驶员驾驶姿态仿真模型，该模型可模拟商用车驾驶员在实际环境下的驾驶姿态，并输出驾驶员各肌肉的激活程度、受力情况等指标的仿真结果。为分析不同驾驶姿态下肌肉生理特性的规律性，评估不同人机布置下驾驶员的舒适性，考虑骨肌力学的驾驶室人机交互设计等提供仿真支持。

为模拟真实驾驶环境及驾驶员驾驶姿态，本文以 Anybody 模型库中提供的坐姿下的人体骨肌模型为基础，增加了新的体节，调整了体节的载入点及部分模型参数以匹配实际环境，调整了人体模型的几何尺寸以匹配不同人体体征的驾驶员，具体调整细节如下。

(1) 修改人体模型的尺寸参数

软件中自带的人体模型的尺寸参数和骨肌特性都是根据欧美人体体征设计的。通过函数可对人体模型进行修改得到不同身材尺寸的人体模型。模型中可修改的人体尺寸参数见表 2 第一列。

为了能充分考虑中国驾驶员的人体体征，进行本土化的参数设计，本研究前期对 634 名成年男性驾驶员进行了问卷调查，根据调查问卷中收集的驾驶员身高、年龄地域等基础信息，归纳出各省市中国商用车驾驶员人体体征的分布规律，以此作为采样依据选取了 100 名具有代表性的驾驶员参加体征尺寸的测量及采集工作。人体测量的指标包括了以站姿及坐姿为主要姿态的 64 项人体尺寸。整理测量结果，建立了中国商用车人体数据库，并根据此数据库重新划分了中国商用车驾驶员的身高及百分位分布，如表 1 所示。

表 1 中国商用车驾驶员人体体征数据库身高百分位分组

百分位范围	身高取值范围（单位：mm）
P0~P5	1527~1616
P5~P10	1616~1633
P10~P20	1633~1665
P20~P30	1665~1688
P30~P50	1688~1710
P50~P60	1710~1730
P60~P80	1730~1760
P80~P95	1760~1820
P95~P100	1820~2030

根据数据库及百分位划分结果对各驾驶员的体征进行分析，推算出软件中需修改的人体参数的推荐值，结果见表 2。在可实地测量驾驶员人体尺寸的情况下，可直接测量的表 1 中的人体参数，如无实地测量的条件或需求，可通过身高推算出仿真所需的人体参数数值。

表 2 骨肌力学仿真模型构建的人体模型可变特征尺寸的指导值

英文名称	中文名称	推荐预测值
Body Height	身高	P5 = 1616mm P50 = 1710mm P95 = 1820mm
Body Mass	体重	27.1×身高 ²
Thigh Length	大腿长	0.2826×身高
Shank Length	小腿长	0.2264×身高
Upper Arm Length	上臂长	0.1882×身高
Lower Arm Length	前臂长	0.1321×身高
Hand Length	手长	0.1088×身高
Foot Length	足长	P5 = 250mm P50 = 261mm P95 = 281mm

(2) 建立驾驶环境模型

本研究涉及的环境模型包括方向盘、变速杆、加速踏板及座椅。座椅模型由头枕、靠背、坐垫及腿部支撑组成。各个体节之间以铰链的形式相连接，连接处设有转向副，可实现对头枕角、靠背角及坐垫角的调节。Anybody 提供的原模型不包含操纵件，本研究将方向盘、变速杆及加速踏板体节插入模型中，对插入的各体节进行定义及显示以实现环境模型的建立。本模型全局坐标系的原点定义在人体模型双眼连线的中心处，如图 3 所示。

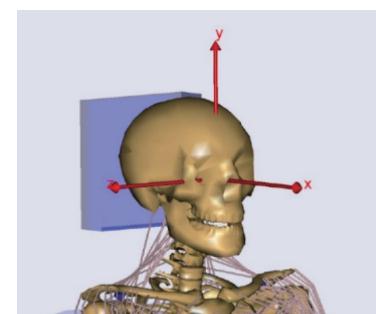


图 3 原点和全局坐标系

在此坐标系下定义插入体节的铰链点，该点为对应体节局部坐标系的原点，通过改变该点的坐标即可调节该体节在模型中的位置，涉及的铰链点见表 3 所列。插入体节后需设置其基础属性参数，如质量、惯性张量等，另外还需设置插入体节的尺寸等其余参数，如方向盘的倾角、力矩，踏板的倾角、初始位置等。

表 3 插入体节的铰链点

铰链点	模型中名称
方向盘中心点	Wheel_Hinge
踏板铰链点	Pedal_Hinge
变速杆球头中心点	ManualShift_Hinge

(3) 人体模型与环境模型的连接

将人体模型与环境模型连接起来，使得环境模型与人体模型之间能够实现力的传递，且人体姿势可随着环境中座椅参数及操纵件尺寸、位置的调节而变化，更加切合驾驶员驾驶姿态的实际情况。

人体模型与座椅模型的连接通过在座椅靠背及座椅椅面添加支撑点来实现。其中，座椅靠背处：第五胸椎、第六胸椎、第九至第十一胸椎、骶骨及第一至第五腰椎共添加 11 个支撑点；坐垫处：左右大腿及左右坐骨共添加 12 个支撑点。

人体模型左手与方向盘模型的连接采用球铰连接，持握位置为方向盘 9 点钟处。在方向盘持握点位置设置节点作为方向盘与人体手部的连接，在节点处设置球形关节以实现方向盘模型与人体模型的连接。考虑到 Anybody 中人体模型体节及方向盘体节均为刚体，强度无穷大，本研究在方向盘与人体左手之间添加手套体节，避免强度过大与实际情况不符的问题，以真实模拟驾驶员持握姿势。人体模型右手与变速杆模型的连接及右脚与加速踏板的连接均采用球铰连接，原理与方向盘相同，原模型中右脚与地板相连，需将此连接释放，再将右脚与油门踏板相连。

在将人体模型与环境模型连接的过程中增加的约束会使整个骨肌模型的约束与自由度不一致，出现过约束问题，需要释放原模型中某些经调整后不需要或不合理的约束，如肘部关节角、肩部屈曲、肘关节屈曲等。

(4) 初始数值设置

依据商用车驾驶室推荐布置，结合车型 1 实际部件尺寸及布置位置，设置环境模型中参数的初始值。将某车型座

椅、方向盘、变速杆、踏板的 stl 文件导入模型中。修改部分肘关节及腕关节的初始角度，使得驾驶员以合理驾驶姿势操纵各操纵机构。最终搭建的驾驶员驾驶姿态仿真模型，如图 4 所示。

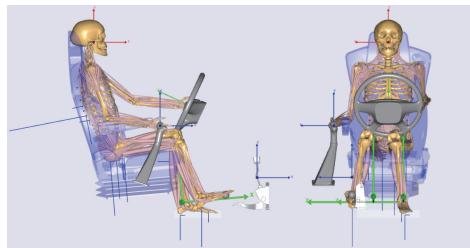


图 4 基于 AnyBody 的商用车驾驶员驾驶姿态仿真模型

2.2 驾驶姿态下商用车驾驶员主要工作肌群分析

建立商用车驾驶员驾驶姿态仿真模型之后，即可通过修改模型中的人体参数及环境中各部件的尺寸及位置，模拟驾驶员真实驾驶环境下的驾驶姿势，输出不同人机布置下驾驶员生理特性指标的仿真结果。结合上文中驾驶姿态下人体骨肌力学特性理论分析的结果，采用此仿真模型分析商用车驾驶员处于驾驶姿态时主要的工作肌群。

上文已对驾驶姿态下人体主要工作肌肉进行了理论分析。驾驶员保持静态驾驶姿势时，与驾驶员上肢操纵动作密切相关的肌肉有三角肌、斜方肌、胸大肌、肱三头肌、冈下肌等；与驾驶员下肢操纵动作密切相关的肌肉有比目鱼肌、腓肠肌、胫骨前肌及大腿骨四头肌肌群。采用驾驶姿态仿真模型对不同驾驶姿态下与操纵动作密切相关的肌肉进行分析，分析的生理特性指标是肌肉激活程度。肌肉激活程度是肌肉受力与肌肉力量强度的比率，表征不同姿态下肌肉受力的大小，反映肌肉的活跃程度。

50 百分位驾驶员在 5 组不同的商用车人机布置下主要工作肌肉的激活程度的仿真结果见表 4~表 6。

表 4 右上肢部分主要操纵肌肉激活程度

组别	三角肌	斜方肌	肱三头肌	肱肌	冈下肌	尺侧腕伸肌	肱骨旋后肌	肱二头肌
1	1.70×10^{-2}	5.51×10^{-3}	3.78×10^{-2}	2.18×10^{-2}	6.14×10^{-3}	2.48×10^{-2}	2.89×10^{-15}	1.14×10^{-15}
2	4.94×10^{-2}	4.01×10^{-15}	6.10×10^{-2}	2.22×10^{-2}	2.11×10^{-2}	4.18×10^{-2}	4.20×10^{-15}	1.68×10^{-15}
3	6.38×10^{-2}	1.67×10^{-2}	3.02×10^{-3}	2.57×10^{-2}	6.28×10^{-15}	1.38×10^{-14}	9.57×10^{-16}	8.69×10^{-16}
4	6.43×10^{-2}	1.53×10^{-2}	9.65×10^{-3}	1.97×10^{-2}	4.69×10^{-15}	1.09×10^{-14}	1.25×10^{-15}	1.30×10^{-15}
5	6.24×10^{-2}	1.37×10^{-2}	1.52×10^{-2}	2.10×10^{-2}	4.10×10^{-15}	1.24×10^{-14}	2.21×10^{-15}	3.25×10^{-15}

表 5 左上肢部分主要操纵肌肉激活程度

组别	三角肌前部	三角肌中部	斜方肌	肱三头肌内侧头	肱三头肌外侧头	胸大肌锁骨部	肱肌	喙肱肌
1	9.90×10^{-3}	6.60×10^{-15}	3.35×10^{-2}	4.58×10^{-2}	3.35×10^{-2}	1.43×10^{-2}	1.13×10^{-15}	1.13×10^{-15}
2	2.68×10^{-2}	4.73×10^{-16}	3.38×10^{-2}	4.62×10^{-2}	3.38×10^{-2}	6.21×10^{-2}	6.56×10^{-16}	6.56×10^{-16}
3	7.69×10^{-2}	2.82×10^{-2}	4.89×10^{-2}	6.69×10^{-2}	4.89×10^{-2}	2.08×10^{-2}	4.48×10^{-16}	4.48×10^{-16}
4	6.78×10^{-2}	2.73×10^{-2}	5.11×10^{-2}	7.00×10^{-2}	5.11×10^{-2}	7.51×10^{-3}	5.52×10^{-16}	5.52×10^{-16}
5	5.44×10^{-2}	2.65×10^{-2}	4.76×10^{-2}	6.53×10^{-2}	4.76×10^{-2}	4.05×10^{-2}	1.14×10^{-15}	1.14×10^{-15}

表 6 右下肢部分主要操纵肌肉激活程度

组别	比目鱼肌	腓肠肌	胫骨前肌	股外侧肌	股内侧肌	股直肌	半腱肌	股二头肌
1	9.14×10^{-2}	10.40×10^{-2}	4.84×10^{-2}	0.75×10^{-2}	2.16×10^{-2}	2.08×10^{-2}	2.02×10^{-15}	9.02×10^{-16}
2	5.78×10^{-2}	6.90×10^{-2}	4.81×10^{-2}	0.87×10^{-2}	2.41×10^{-2}	2.37×10^{-2}	1.21×10^{-15}	3.37×10^{-15}
3	4.10×10^{-2}	5.75×10^{-2}	5.25×10^{-2}	1.27×10^{-2}	1.69×10^{-2}	2.63×10^{-2}	2.60×10^{-15}	1.53×10^{-16}
4	3.87×10^{-2}	4.87×10^{-2}	5.66×10^{-2}	1.21×10^{-2}	2.52×10^{-2}	1.67×10^{-2}	9.77×10^{-15}	4.15×10^{-14}
5	3.01×10^{-2}	3.97×10^{-2}	5.98×10^{-2}	1.00×10^{-2}	2.46×10^{-2}	3.10×10^{-2}	8.20×10^{-16}	8.79×10^{-14}

肌肉激活程度一般处于 0~1 之间，肌肉激活程度为 0 表征肌肉未被利用，为 1 表征肌肉已被完全利用^[22]。由表 4~表 6 可见，右上肢肱骨旋后肌、肱二头肌；左上肢肱肌、喙肱肌；右下肢半腱肌、股二头肌肌肉的激活程度接近 0，这些肌肉在商用车驾驶员保持驾驶姿势时几乎未被利用。右上肢三角肌、肱三头肌等，左上肢斜方肌、胸大肌等，右下肢比目鱼肌、腓肠肌等激活程度数值较大，在驾驶员保持驾驶姿态时被激活。有些肌肉对于不同的驾驶姿势激活程度变化较大，如右上肢三角肌、左上肢肱三头肌、右下肢腓肠肌及胫骨前肌等。有些则变化较小，如右下肢股外侧肌、股直肌等。

此研究结论可用于后续对驾驶舒适程度的客观量化评估及考虑驾驶员生理特性的驾驶室人机布置设计中。后续研究时可直接针对当前确定的驾驶员处于驾驶姿态时的主要工作肌群进行分析，采用肌肉激活程度描述某人机布置下驾驶员驾驶姿态的舒适性。具体驾驶员肌肉的激活程度与主观评分之间是否存在映射关系，存在何种映射关系，如何建立基于驾驶员生理特性指标的人机布置舒适性评估及预测方法还有待下一步的研究。

3 实车试验验证

为对前文建立的驾驶姿势仿真模型进行验证，本文开展了实车试验，选取不同百分位的驾驶员，驾驶 4 辆不同型号的商用车。在驾驶员保持标准驾驶姿势的条件下，采集驾驶员关键肌肉的肌电信号。对试验数据进行处理，将获得的实测结果及仿真结果进行一致性分析，验证仿真模型的有效性。

3.1 试验设备及方法

上文已说明本研究前期建立了商用车驾驶员人体尺寸数据库，并据此重新划分了中国驾驶员的身高百分位分布。根据划分结果，选取 50 百分位、75 百分位、95 百分位驾驶员各一人参与实车试验。被试人员需具备一定驾驶经验，无残疾或相关疾病，肌肉功能正常。

本试验采用 Bio Pac 公司的 MP150 型多导生理记录仪采集驾驶员关键肌肉的表面肌电信号。上文已确定驾驶员处于驾驶姿态时主要的工作肌群，从中筛选出数值相对较大、对于不同的人机布置数值变化较为明显、属于表层肌肉且容易粘贴电极片的 8 块肌肉作为实车试验测试肌肉。最终选定右上肢三角肌、斜方肌、肱三头肌，左上肢三角肌、斜方肌、肱三头肌，右下肢腓肠肌、胫骨前肌。

选取 4 辆不同型号的商用车进行实车试验，包括牵引车

2 辆、拉臂载货车 1 辆、轻型车 1 辆。

具体试验流程如下。

- 1) 试验开始前，告知被试人员试验方案及注意事项。
- 2) 测量驾驶员的身体尺寸。
- 3) 在被测肌肉所在部位粘贴电极片，粘贴前需先用酒精棉片擦拭贴片位置的皮肤，去除毛发及死皮，保证肌电信号质量。具体粘贴位置如图 5 所示。



图 5 被测肌肉与电极贴片粘贴位置

4) 将试验设备的信号发射模块与粘贴好的电极片连接，确认设备通信良好。

5) 按照各关键肌肉的标定动作，采集被测肌肉在最大自主收缩强度下的表面肌电信号。

6) 驾驶员按照自身喜好调整试验车辆的座椅及可调操纵纵件的位置。调整完毕后，驾驶员摆出并保持静态驾驶姿势，规定驾驶员统一左手握于方向盘 9 点钟位置；右手握于变速杆球头位置，此时，变速杆处于空档处；右脚轻踏于加速踏板上，保持 3min。从驾驶员保持静态驾驶姿势开始，启动信号采集设备，记录驾驶员关键肌肉的表面肌电信号，待 3min 测试结束后保存数据。

7) 试验结束后，驾驶员离开车辆，试验人员测量当前车型的人机布置参数以备仿真中使用。

每位驾驶员均需在 4 辆试验车辆上重复此试验流程。图 6 为 75 百分位驾驶员驾驶车型 1 牵引车进行实车试验。

3.2 试验数据处理

根据实车试验中测得的驾驶员人体尺寸及驾驶室人机布置参数，修改仿真模型中的人体参数及环境参数，模拟驾驶员实车人机布置下的驾驶姿势，进而计算出驾驶员 8 块关键肌肉激活程度的仿真结果。



图 6 试验过程记录

三位受试人员肌肉激活程度的仿真结果如图 7~图 9 所示。

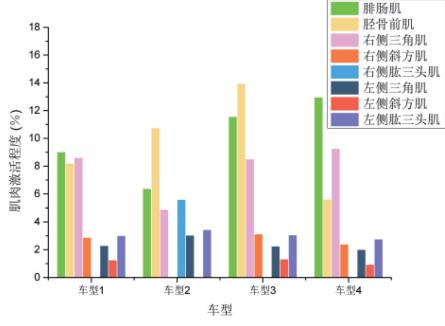


图 7 50 百分位驾驶员仿真

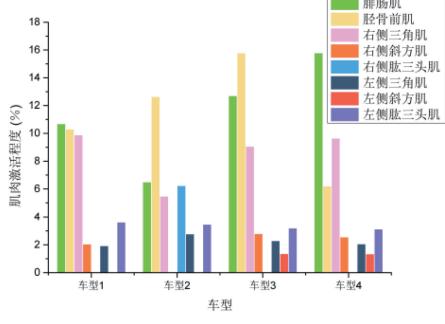


图 8 75 百分位驾驶员仿真

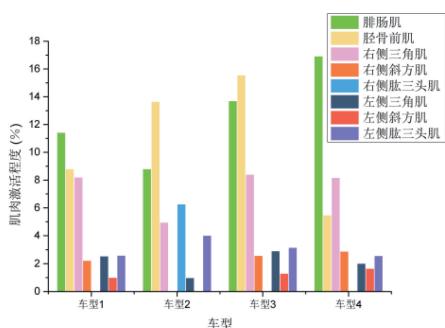


图 9 95 百分位驾驶员仿真

对实车试验过程中采集的驾驶员表面肌电信号进行处理，据此计算驾驶员关键肌肉激活程度的实测结果。考虑到表面肌电信号在采集过程中受采集设备、电磁环境及受试者自身生理信号等多方面干扰，需对信号进行降噪处理以消除各类噪声的影响。本研究采用 25~350Hz 的带通滤波消除人体微弱震颤和肌肉收缩引起检测电极移动造成的基线漂移；采用 50Hz 陷波器消除系统接入市电及环境中其他用电设备

造成的工频干扰；采用小波阈值去噪消除采集信号中的背景噪声。对原始信号进行一系列滤波处理后，求取信号的均方根值 (RMS)。肌肉激活程度是试验实测肌电信号的均方根值与目标肌肉在标定动作最大自主收缩力下肌电信号的均方根值 (RMS_{MVC}) 的比值。激活程度计算公式如下。

$$Activity = \frac{RMS}{RMS_{MVC}} \quad (1)$$

三位受试人员激活程度的实测结果如图 10~图 12 所示。

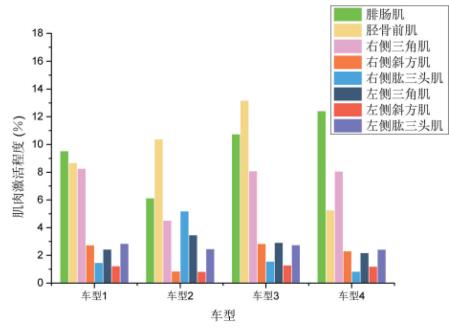


图 10 50 百分位驾驶员实测

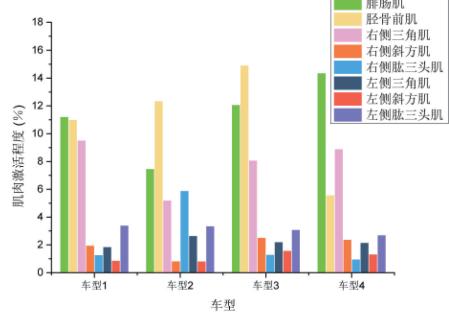


图 11 75 百分位驾驶员实测

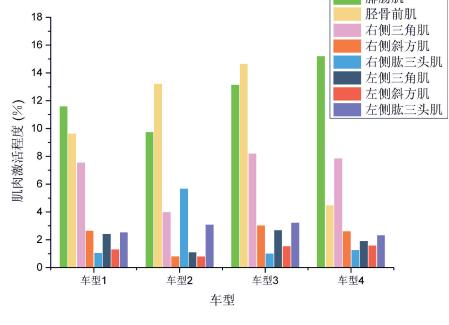


图 12 95 百分位驾驶员实测

3.3 实测仿真一致性分析

分析仿真模拟获得的肌肉激活程度与实车测试获取的肌肉激活程度之间的一致性关系，验证仿真模型的真实性及有效性。图 13 中是 75 百分位驾驶员驾驶 4 辆商用车进行的 4 次实车试验仿真的激活程度与实测激活程度的对比结果。

由图 13 可见，实车实测与仿真模拟的激活程度结果基本一致。运用 SPSS 软件对 75 百分位驾驶员每辆车的实测及仿真结果进行分析。皮尔逊相关系数均大于 0.8，说明实测结果与仿真结果显著相关，存在良好的一致性。实测与仿真

数据之间虽然存在一定的误差，但平均相对误差小于 15%，仿真模型的精度达 85%以上。对仿真及实测之间存在误差的原因进行分析。由于仿真模型对人体肌肉进行了细致的划

分，计算的是每一细小肌肉的激活程度；实车试验中采取非侵入式电极片，测量的肌电信号是被测点附近肌群电信号的叠加，因此与仿真结果有 15%左右的误差。

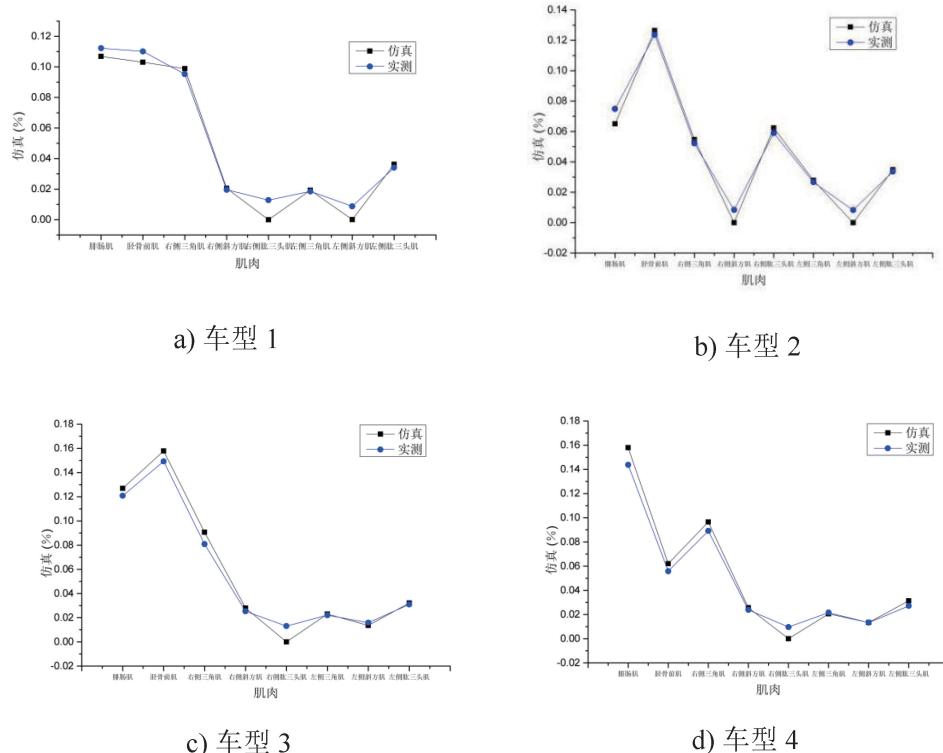


图 13 75 百分位驾驶员仿真与实测结果一致性分析

4 结论

1) 本文研究了一种驾驶员驾驶姿势仿真模型，并通过实车试验进行验证。结果表明，该模型可模拟真实驾驶环境及驾驶员驾驶姿态并输出驾驶员生物力学指标的仿真结果。模型准确性较高，与真实驾驶状态存在良好的一致性。

2) 驾驶员处于驾驶姿态时（左上肢操纵方向盘，右上肢操纵变速杆，右下肢操纵加速踏板），主要工作肌群有右上肢三角肌、斜方肌、肱三头肌、肱肌；左上肢三角肌、斜

方肌、肱三头肌、胸大肌；右下肢比目鱼肌、腓肠肌、胫骨前肌、股直肌等。

以上结论为驾驶员驾驶姿势舒适性评价及汽车驾驶室人机交互设计中考虑驾驶员骨肌力学特性，并准确定位主要工作肌群奠定了基础。在后续研究中，将开展座椅及操纵部件不同人机布置位置下，驾驶员的骨肌力学特性及主观舒适评价测试。并建立与主观评价具有高度一致性的基于驾驶员骨肌力学指标的客观舒适性评价方法及驾驶室人机布置舒适性预测方法。并尝试提出商用车驾驶室关键人机因子布置范围，为商用车驾驶室人机设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] REBIFFÉR. Seat of The Driver: It's Adaptation to Functional and Anthropometric Requirements [J]. Ergonomics, 1969, 12 (2): 246-261.
- [2] PORTER J M, GYI D E. Exploring the Optimum Posture for Driver Comfort [J]. International Journal of Vehicle Design, 1998, 19 (3): 255-266.
- [3] PARK S J, KIM C-B, KIM C J. Comfortable driving postures for Koreans [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2000, 26 (4).
- [4] 陈子昂, 张森, 钱佩伦. 基于驾驶员关节力矩的转向操纵不舒适性研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54 (7): 21-24, 29.
- [5] 张森, 张彦如, 陈子昂. 基于驾驶员关节应力的踏板
- [6] 苗伟. 基于生物力学的乘用车踏板舒适性评价与优化设计 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [7] VERGNANO A, PEGREFFI F, LEALI F. Correlation of Driver Head Posture and Trapezius Muscle Activity as Comfort Assessment of Car Seat [J]. Intelligent Human Systems Integration 903: 241-247
- [8] GAO Y L, FISCHER T, PATERNOSTER S, et al. Evaluating Lower Body Driving Posture Regarding Gas Pedal Control and Emergency Braking: A Pilot Study [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2022, 91: 1-8
- [9] GU S, SU S, HUANG C, A JACK-Based Ergonomic A-

- nalysis and Design of the Cockpit of Agricultural Material Handling Vehicle [J]. Advances in Ergonomics in design, 2020, 955: 538-550
- [10] SABRI N, KHAMIS N K, TAHIR M F M, et al. Impact of Anthropometric Parameters on Pressure Variables for Determining Comfort and Safety of Automotive Seat: A Systematic Review [J]. Iranian Journal of Public Health, 2022, 51 (2): 240-252
- [11] GAO F, ZONG S, HAN ZW, et al. Musculoskeletal Computational Analysis on Muscle Mechanical Characteristics of Drivers' Lumbar Vertebrae and Legs in Different Sitting Postures [J]. Revista Da Associacao Medica Brasileira, 2020, 66 (5): 637-642
- [12] CHEN L Q, LI W J, YANG Y, et al. Evaluation and Optimization of Vehicle Pedal Comfort based on Biomechanics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 2020, 234 (5): 1402-1412
- [13] AZMAN A H N, MOKHTAR N H. Vehicle Analysis Design of Vehicle Occupant Packaging Analysis [J]. Proceedings of Mechanical Engineering Research Day, 2019, 8: 122-123
- [14] LECOCQ M, LANTOINE P, BOUGARD C, et al. Neuromuscular Fatigue Profiles depends on Seat Feature during Long Duration Driving on A Static Simulator [J]. Applied Ergonomics, 2020, 87: 1-10
- [15] ZHANG W J, WANG Q C, XU Z, et al. Development of A Tractor Operator-Operation Environment Coupled Biomechanical Model and Analysis of Lower Limb Muscle Fatigue [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2023, 93: 1-9
- [16] WANG Q C, HUO Y H, XU Z, et al. Effects of Backrest and Seat-Pan Inclination of Tractor Seat on Biomechanical Characteristics of Lumbar, Abdomen, Leg and Spine [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2023, 26 (3): 291-304
- [17] NORDIN M, FRANKEL V H. 肌肉骨骼系统基础生物力学 [M]. 邝适存, 郭霞, 译. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
- [18] 杭成成. 基于 sEMG 信号的下肢运动意图识别研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [19] 单丽君, 胡忠安. 基于 AnyBody 的髋关节康复训练肌肉力的分析 [J]. 大连交通大学学报, 2014, 35 (1): 50-52.
- [20] 孙一, 梁志威, 娄景冰. 踝关节背屈肌肉力臂值的测量 [J]. 青岛大学医学院学报, 2016, 52 (5): 581-583.
- [21] DAMSGAARD M, RASMUSSEN J, CHRISTENSEN S T, et al. Analysis of Musculoskeletal Systems in the AnyBody Modeling System [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2006, 14 (8): 1100-11
- [22] 丁晨, 王君泽, 高瞻. 基于 AnyBody 的汽车驾驶中人体腿部逆向动力学仿真 [J]. 中国生物医学工程学报, 2013 (1): 124-128.