

汽车椅面倾角对驾驶员乘坐舒适性的影响分析*

高振海¹,高菲¹,沈传亮^{1†},程悦²

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,吉林 长春 130022;

2. 中国第一汽车集团公司技术中心,吉林 长春 130011)

摘要:考虑到车用座椅椅面倾角变化对驾驶员乘坐舒适性的影响,开展了不同身材驾驶员在不同椅面倾角下的人体骨肌力学特性的仿真分析与实验测试.首先基于人体骨肌力学软件分别建立了第5,50,95百分位中国男性驾驶员在驾驶姿态下的骨肌力学模型;然后通过椅面倾角参数动态调整并结合相关性分析方法,描述了驾驶员下肢腿部不同肌肉的受力情况和激活程度;最后开展了真实驾驶员下肢肌肉肌电测试.结果表明,当座椅椅面倾角增大时,驾驶员的臀大肌、髂腰肌、半腱肌、股直肌、缝匠肌、腓肠肌、胫骨前肌肌肉激活程度较大,10°~16°为椅面倾角的理想变化区间.

关键词:汽车座椅;乘坐舒适性;骨肌力学模型;座椅椅面倾角;肌肉激活程度

中图分类号:TP24

文献标志码:A

Analyses of Driver Sitting Comfort in Different Automotive Seat-pan Angle

GAO Zhenhai¹,GAO Fei¹,SHEN Chuanliang^{1†},CHENG Yue²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control,Jilin University,Changchun 130022,China;

2. China FAW Group Corporation R&D Center,Changchun 130011,China)

Abstract: As the different automotive seat-pan angle affects driver sitting comfort, musculoskeletal biomechanical characters of different figure drivers were analyzed by simulation and experimental tests. Firstly, based on human musculoskeletal biomechanical computational software, the musculoskeletal models of the 5th, 50th and 95th percentile Chinese male drivers were built. Secondly, using the dynamic adjustment of seat-pan angle and the method of correlation analysis, the force and muscle activation of driver lower limb different muscles were described. Finally, a set of EMG tests on real driver leg muscles were carried out in a real vehicle. The result shows that when the automotive seat-pan angle increases, muscles activation of driver gluteus maximus, iliopsoas, semitendinosus, rectus femoris muscle, sartorius, gastrocnemius muscle and tibialis anterior are larger. The ideal variation of seat-pan angle is between 10° and 16°.

Key words: automotive seat; sitting comfort; musculoskeletal model; seat-pan angle; muscle activation

车用座椅作为驾驶员与汽车直接接触的人机交互部件,其乘坐舒适性好坏直接影响着用户的驾

* 收稿日期:2017-02-14

基金项目:国家自然科学基金—中国汽车产业创新发展联合基金资助项目(U1564214), Natural Science Foundation of China (U1564214); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120061110028), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20120061110028); 吉林省科技发展计划项目(20150204055GX), Jilin Provincial Research Foundation for Technology Guidance (20150204055GX); 长春市科技计划项目(14KG029), Changchun Science and Technology Plan(14KG029)

作者简介:高振海(1973—),男,吉林长春人,吉林大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: shencl@jlu.edu.cn

乘体验感,近年来越来越受到汽车座椅乃至整车厂家的关注,也成为汽车人机工程学研究的核心技术.

早期的车用座椅乘坐舒适性研究大多集中在压力和不舒适感之间的关系^[1-2].文献资料调查表明,在所有的客观评价方法中,压力和不舒适感的关系最为显著^[3].20世纪90年代徐明等提出表征体压分布的8个指标,并结合座椅的舒适性对其物理意义进行了初步分析^[4];Goossens等^[2]对臀部所受到的压力转化为不适感进行了分析;Zenk等^[5]则通过绘制人体理想体压分布图来指导设计椅子的外形轮廓;Akgunduz等^[6]通过对体压分布图及其指标进行对比分析3款座椅的舒适程度;Zemp等^[7]搭建了一个可以改变重量的黏土臀部模型,根据其数据计算出一个修正因子公式,从而矫正得到8个体压分布指标.

近年来研究人员开始导入人体生物电信息和建模的方法进行骨肌受力分析^[8].赵江洪等^[9]从乘客舒适性多级评估法、人体曲线测量、肌电测量与坐姿与行为观察4个角度对座椅的舒适性进行了研究;Ellegast等^[10]通过测量肌电信号、人体坐姿各关节角度等研究了不同坐姿对人体肌肉的影响;韩国的Park等^[11]、德国的Kilincsoy等^[12]和意大利的Naddeo等^[13]先后研究了人体各个部位呈现不同角度对驾驶舒适性的影响.

以上研究的出发点集中在通过座椅靠背角度的调节和人体自身角度的改变,改善车辆驾驶员体压分布特性.近年来车用座椅除提供座椅靠背角度调节外,椅面倾角也可以动态调节以适应驾乘人员的个性化需求.由于人体骨骼肌肉协同工作机理,驾驶员下肢踩踏踏板等特定驾乘姿态,势必引起驾驶员与椅面处的接触压力和腿部肌肉受力的改变,从而影响驾驶员乘坐舒适性.但现有研究大多是分析椅面靠背倾角和座椅骨架发泡材料特性影响,并采用驾乘人员主观打分方法进行车用座椅各参数调节后的乘坐舒适性评价,缺乏椅面倾角变化对驾驶员乘坐舒适性的定量化分析.

针对以上问题,本文基于人体骨肌力学特性分析软件Anybody,建立了描述驾驶员操纵坐姿的人体骨肌力学模型,并通过座椅椅面角度的调整,分析了车辆驾驶员腿部肌肉的肌肉激活程度,并进行了真实驾驶员下肢肌肉肌电测试,为车辆驾驶员座椅的精细化设计提供了适用于不同人体体证的骨肌力学变化规律和椅面倾角调节范围的定量化设计依据.

1 坐姿下人体腿部骨肌生物力学特性理论分析

有研究表明当人体处于坐姿状态时,人体75%的重量由座面来承担的,一个好的坐垫不仅有好的舒适性,而且还能控制臀部压力的分布.同时人体肌腱组织会受到拉伸或者挤压的影响,导致肌肉活动量增大,长时间会造成肌肉酸痛^[6].

基于人体生物力学理论和活体研究表明,当驾驶员坐在汽车驾驶座椅上,脚放在制动踏板上,座椅椅面倾角增大时,驾驶员髋关节的角度、膝关节的角度和踝关节的角度均产生变化,故下肢的髂腰肌和缝匠肌收缩,腓肠肌和胫骨前肌拉伸,臀部的臀大肌和大腿背面的腓绳肌(包括半腱肌、半膜肌、股二头肌长头、股二头肌短头)受到挤压,大腿前面的股四头肌肌群(包括股直肌、股外肌、股内肌和股中肌)受到拉伸^[14].具体腿部肌肉分布如图1所示.

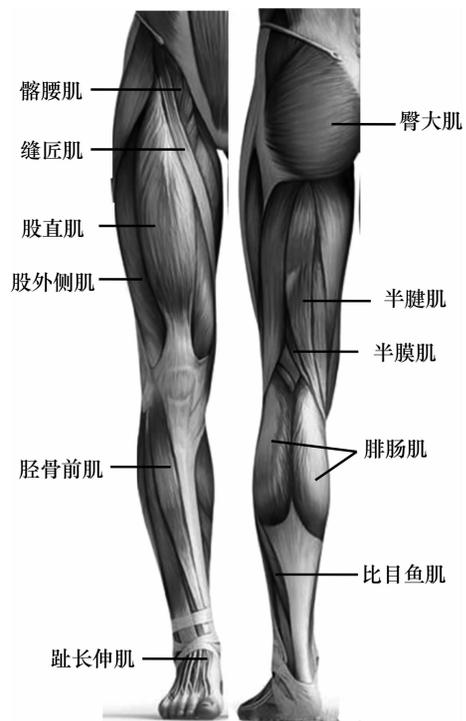


图1 人体腿部肌肉分布图

Fig.1 Human muscles of leg

根据以上理论分析,本文在后续的仿真分析中选取具有代表性的肌肉进行骨肌力学特性研究及相关性分析,主要包括臀大肌、髂腰肌、半腱肌、股直肌、缝匠肌、腓肠肌、胫骨前肌等,力求科学定量化地确定当椅面角度增大时驾驶员下肢主要的工作肌肉(群),分析它们的骨肌力学特性变化,为考

考虑驾驶员肌肉激活特性的汽车座椅乘坐舒适性设计提供理论基础。

2 驾驶员下肢肌肉激活程度和受力特性分析

本文建立的驾驶员驾乘姿态的骨肌力学模型是基于人体生物力学仿真软件 Anybody5.0.0 中提供的基础人体骨肌模型基础上,根据 GB10000-88 中采用的第 5,50,95 百分位中国成年男性的人体尺寸,建立了驾乘姿态下第 5,50,95 百分位中国男性驾驶员下肢骨肌力学模型,具体数据见表 1。

表 1 不同百分位中国成年男性的人体尺寸

	第 5 百分位	第 50 百分位	第 95 百分位
身高/cm	158.3	167.8	177.5
体重/kg	48	59	75

模型建立中,重点对人体模型的几何参数、各体节坐标点、运动部位、运动方式、路径及时间历程等人体运动参数进行了修改。其中,考虑到驾驶员操纵坐姿特点,添加了方向盘模型(直径 0.3 m)及油门踏板模型(具体位置、尺寸依据乘用车车身内部布置推荐尺寸进行布置^[15],具体布置见图 2),在双手与方向盘之间设置合理的球铰约束使人体左右手握住方向盘,右脚踩在油门踏板上;在座椅模型与人体模型之间添加了运动学连接,从而能够进行体压相互作用力传递;在头枕(1 个支撑点)、椅面(大腿前后 4 个,坐骨处 8 个支撑点)及脚部(前后各 2 个支撑点)均添加了支撑点,可以使人体坐姿随着座椅椅面角度参数的改变而改变。

表 2 为驾驶员下肢各部分占总体重的比例和与身高长度比例的计算。表 3 为驾驶座椅的尺寸参数设计。

表 2 驾驶员下肢骨肌模型参数

部位	比例长度/cm	质量/kg
大腿	$0.4098 \times \text{身高} / 1.8$	$0.1 \times \text{体重}$
小腿	$0.4073 \times \text{身高} / 1.8$	$0.0465 \times \text{体重}$
脚部	$0.2571 \times \text{身高} / 1.8$	$0.0145 \times \text{体重}$

表 3 座椅尺寸参数

部位	长度/m	宽度/m	厚度/m
头枕	0.20	0.20	0.05
靠背	0.75	0.40	0.05
椅面	0.50	0.40	0.05
腿部支撑	0.35	0.30	0.05
脚部支撑	0.50	0.40	0.05

驾驶员模型初始状态如图 2 所示。椅面倾角 β 指椅面与水平之间的夹角。为了防止人体臀部向前滑动而使椅面前缘向后倾,此角不易过大,否则会增加大腿下平面与座垫前缘的压力^[16]。

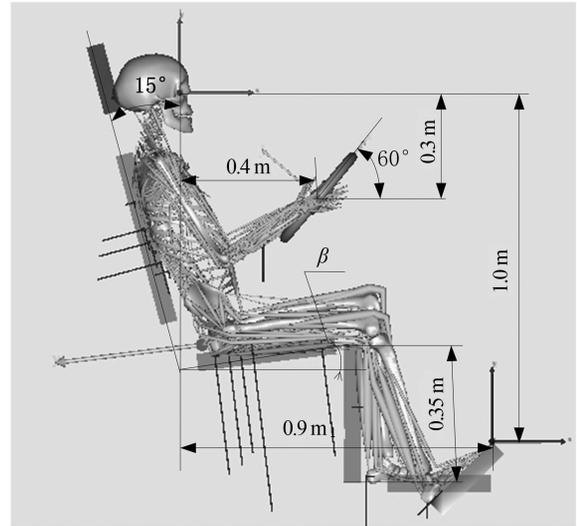


图 2 驾驶员模型

Fig.2 Driver model

在人体骨肌力学研究中,通常采用肌肉激活程度(即肌肉受力与其肌肉力量强度的比率)来直观反映人体肌肉在受到外界环境作用力的作用下肌肉利用强度。在前述的理论分析基础上,本文重点分析了臀大肌、髂腰肌、半腱肌、股直肌、缝匠肌、腓肠肌、胫骨前肌的肌肉激活程度变化。仿真工况的输入条件是座椅椅面倾角由 0° 变化至 20° ,每次增量是 2° 。

臀大肌的作用是收缩时后伸和外旋大腿。如图 3 所示,由于左腿是自然的放在脚垫上,而右腿位于油门踏板之上,故右腿的肌肉激活程度普遍大于左腿。右腿的臀大肌的肌肉激活程度都随着座椅椅面倾角的增加而减小,但左腿的臀大肌变化并不相同。第 5 百分位的驾驶员左臀大肌激活程度很小,几乎为零。第 50 百分位的驾驶员左臀大肌在椅面平行于地面时激活程度较大,但随着椅面倾角的增大而减小,在 6° 时也趋近于零。第 95 百分位的驾驶员左臀大肌开始激活程度很小,但在椅面倾角为 8° 到 10° 之间有一个突然增大的变化,然后又趋于零。

髂腰肌主要协助完成抬腿作用。如图 4 所示,由于驾驶姿势左右脚放置位置的不同,右腿的髂腰肌肌肉激活程度依然大于左腿的髂腰肌激活程度。第 5 百分位的驾驶员左右腿的髂腰肌肌肉均随着椅面倾角的增加而受到拉伸,故肌肉激活程度增大。第

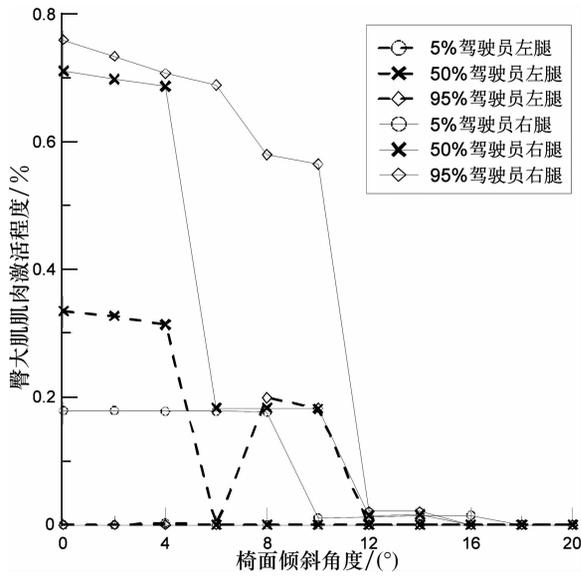


图3 驾驶员臀大肌肌肉激活程度

Fig.3 Muscle activity of driver's gluteus maximus

50百分位的驾驶员左右腿的髂腰肌肌肉随着椅面倾角的增加而得到放松,故肌肉激活程度降低.第95百分位的驾驶员左腿的髂腰肌肌肉激活程度在椅面倾角为8°到10°之间突然降低,然后又恢复;而右腿的髂腰肌肌肉激活程度则随着椅面倾角的增加而迅速下降.

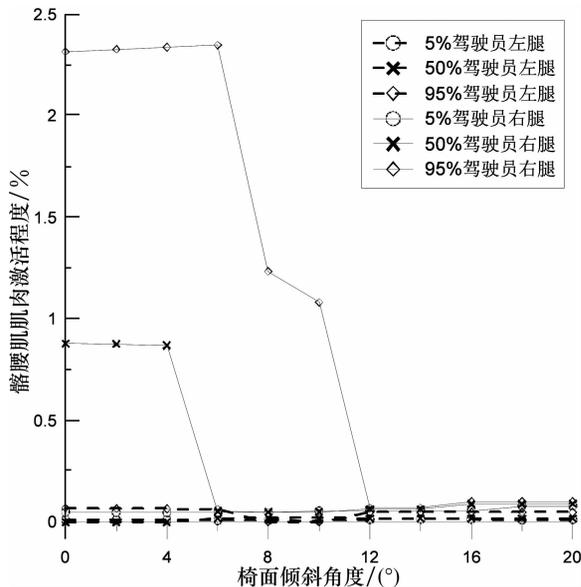


图4 驾驶员髂腰肌肌肉激活程度

Fig.4 Muscle activity of driver's iliopsoas

半腱肌的作用主要是伸髋关节、屈膝关节.如图5所示,右腿的半腱肌肌肉激活程度普遍大于左腿的半腱肌肌肉激活程度,但右腿的下降趋势远大于左腿,故当座椅椅面倾角大于10°时,右腿半腱肌肌肉激活程度与左腿相同甚至远小于左腿的肌肉激

活程度.第5百分位的驾驶员左腿半腱肌几乎无拉伸,右腿半腱肌随着座椅椅面倾角的增加而放松,故肌肉激活程度下降.第50百分位的驾驶员左右腿的半腱肌均随着椅面倾角的上升而下降,故肌肉激活程度下降.第95百分位的驾驶员左腿的半腱肌肌肉激活程度在椅面倾角为8°到10°之间突然降低,然后又回升;右腿的髂腰肌肌肉激活程度随着椅面倾角的增加而下降,在12°时趋近于零.

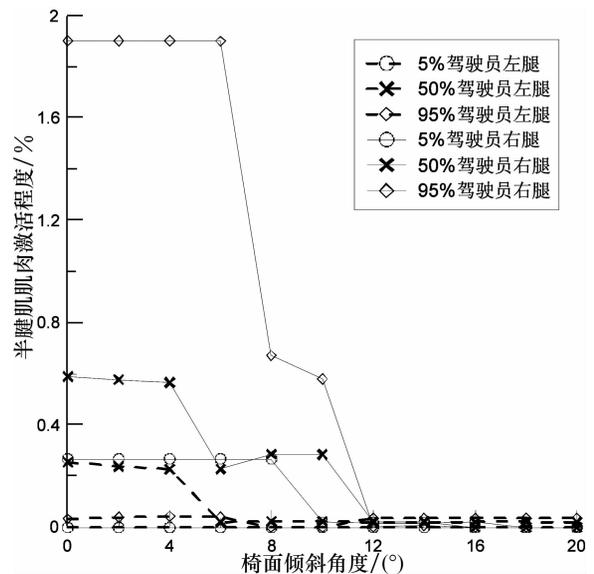


图5 驾驶员半腱肌肌肉激活程度

Fig.5 Muscle activity of driver's semitendinosus

股四头肌收缩时使膝关节伸直.股直肌作为股四头肌的一个重要组成部分,如图6所示,由于驾驶员的操纵姿势的特殊性,左腿的股直肌在椅面平行于地面时处于拉伸状态,而当椅面倾角增加时,逐渐放松;而右腿的股直肌在初始时处于放松状态,当椅面倾角增大到14°以上时,才开始出现拉伸状态.但其中第95百分位的驾驶员的左腿股直肌肌肉激活程度在椅面倾角为4°到10°时出现大幅上升,表明在此期间受力较大.

缝匠肌的作用是屈髋和膝关节.如图7所示,由于驾驶姿势左右脚放置位置的不同,驾驶员右腿的缝匠肌肌肉激活程度远大于左腿,并且右腿的缝匠肌肌肉激活程度均随着椅面倾角的上升而下降,大约在10°左右达到最低点.第5百分位和第50百分位的驾驶员均在椅面刚开始倾斜时,右腿缝匠肌均受到拉伸,肌肉激活程度上升,在椅面倾角分别达到10°和6°时,骤然下降趋于零.第95百分位驾驶员则在初始时处于放松状态,椅面倾角在8°到10°之间时右腿缝匠肌受的拉伸较大,然后又急剧减小到零.

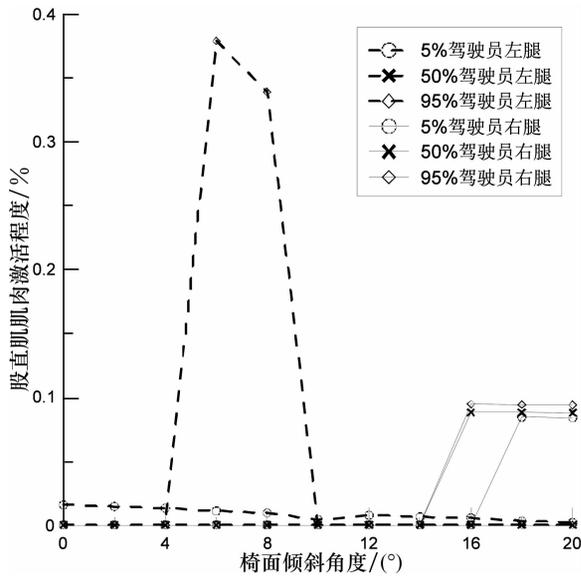


图 6 驾驶员股直肌肌肉激活程度
Fig.6 Muscle activity of driver's rectus femoris muscle

逐渐趋近于零.

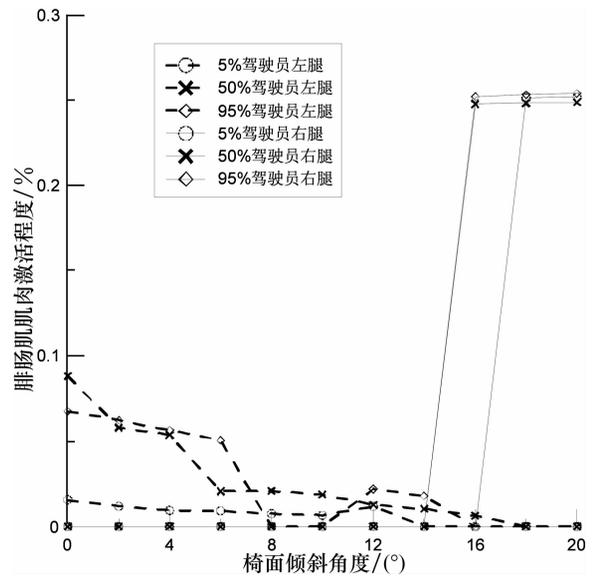


图 8 驾驶员腓肠肌肌肉激活程度
Fig.8 Muscle activity of driver's gastrocnemius muscle

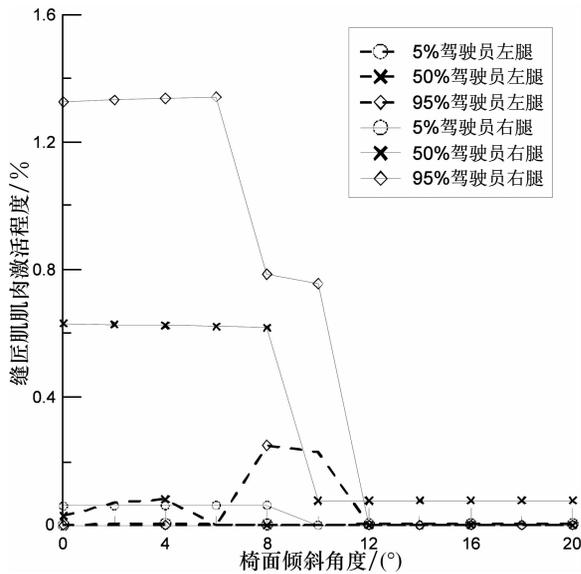


图 7 驾驶员缝匠肌肌肉激活程度
Fig.7 Muscle activity of driver's Sartorius

腓肠肌作用主要是屈踝.如图 8 所示,驾驶员左腿的腓肠肌在初始时即处于拉伸状态,随着椅面倾角的增大而逐渐放松.而驾驶员右腿的腓肠肌在初始时处于放松状态,在椅面倾角增大到 14°以上时才受到突然拉伸,所以肌肉激活程度突然上升.

胫骨前肌位于胫骨的外侧面,使足内翻.如图 9 所示,驾驶员左腿的胫骨前肌拉伸程度很小,故肌肉激活程度很小,且随椅面倾角的增加而增大.右腿因脚部踩踏在踏板上,故胫骨前肌拉伸程度较大,且均随着椅面倾角的增加而降低,约在 12°以上时

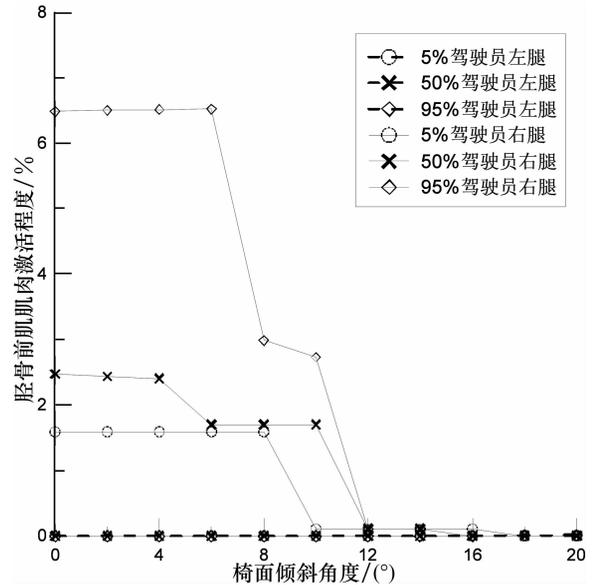


图 9 驾驶员胫骨前肌肌肉激活程度
Fig.9 Muscle activity of driver's tibialis anterior muscle

3 主要工作肌群特性分析

为了准确地获得驾驶员下肢随椅面倾角增加而受力的主要工作肌群,本文对驾驶座椅椅面倾角与第 50 百分位驾驶员所涉及到的左腿和右腿的臀大肌(GM)、髂腰肌(IL)、半腱肌(ST)、股直肌(RF)、缝匠肌(SA)、腓肠肌(GA)、胫骨前肌(TA)

共7块肌肉(群)两两进行相关性分析,其中椅面倾角用 β 表示,相关系数接近1则表示有极高的相关性。

由表4,表5可知,所研究分析的7块肌肉(群)大多与驾驶座椅椅面倾角显示出较高的相关性。其中,由表4可见,臀大肌与髂腰肌、半腱肌、缝匠肌、腓肠肌的相关性很高。由表5可见,臀大肌与髂腰肌、半腱肌、缝匠肌、胫骨前肌的相关性很高。故综上所述,驾驶员左右腿的臀大肌、髂腰肌、半腱肌、缝匠肌均呈现较高的相关性。

表4 第50百分位驾驶员左腿主要工作肌肉(群)激活程度相关系数

Tab.4 Correlation coefficient between main working muscles of 50 percentile driver's left leg

β	GM	IL	ST	RF	SA	GA	TA	
β	1.000	-0.778	0.728	-0.784	0	-0.657	-0.904	0.756
GM	1.000	-0.995	0.999	0	0.904	0.927	-0.338	
IL		1.000	-0.993	0	-0.911	-0.896	0.284	
ST			1.000	0	0.889	0.937	-0.341	
RF				0	0	0	0	
SA					1.000	0.721	-0.309	
GA						1.000	-0.522	
TA							1.000	

表5 第50百分位驾驶员右腿主要工作肌肉(群)激活程度相关系数

Tab.5 Correlation coefficient between main working muscles of 50 percentile driver's right leg

β	GM	IL	ST	RF	SA	GA	TA	
β	1.000	-0.888	-0.725	-0.916	0.774	-0.869	0.775	-0.938
GM	1.000	0.958	0.953	-0.516	0.795	-0.516	0.897	
IL		1.000	0.860	-0.340	0.660	-0.340	0.733	
ST			1.000	-0.683	0.796	-0.683	0.928	
RF				1.000	-0.558	1.000	-0.674	
SA					1.000	-0.558	0.870	
GA						1.000	-0.674	
TA							1.000	

除去显著相关的肌肉参数,第50百分位驾驶员下肢不舒适度主要参考肌肉是左侧的臀大肌、股直肌和胫骨前肌与右侧的臀大肌、股直肌和腓肠肌。综合前文的驾驶员腿肌肉激活程度变化曲线可知,左腿的臀大肌和右腿的臀大肌、缝匠肌的肌肉激活程度在椅面倾角为 12° 时都已趋于零,而左腿的胫骨前肌和右腿的股直肌的肌肉激活程度在椅面倾角为 16° 时出现突然急剧增加,故椅面倾斜角度在 12° 到 16° 之间比较理想。

4 实车试验验证分析

在仿真分析同时,本文进行了15名中国男性驾驶员的对比性实车座椅的肌电试验测试,并与仿真

分析进行了对比分析。

试验过程中采集的数据是驾驶员腿部的肌电信号,使用仪器为Biopac生理记录仪,试验车辆为哈弗H7(座椅椅面倾角可调范围为 $10^\circ\sim 16^\circ$),测试人员遴选是按照中国成年男性第5,50,95百分位分别遴选了5名相近尺寸的驾驶员。试验中要求驾驶员双手扶方向盘右脚踩在油门踏板上,并选择其舒适的姿态落座于驾驶座椅上。

参照文献中所提出的肌电测试的方法^[17],本文对驾驶员下肢的股直肌、胫骨前肌和腓肠肌的肌肉激活尺度进行了肌电测试。肌肉激活程度等于测量当前肌肉肌电信号的RMS值除以肌肉最大自主收缩(MVC)时的肌电信号RMS值。具体电极片贴片方式如图10所示。

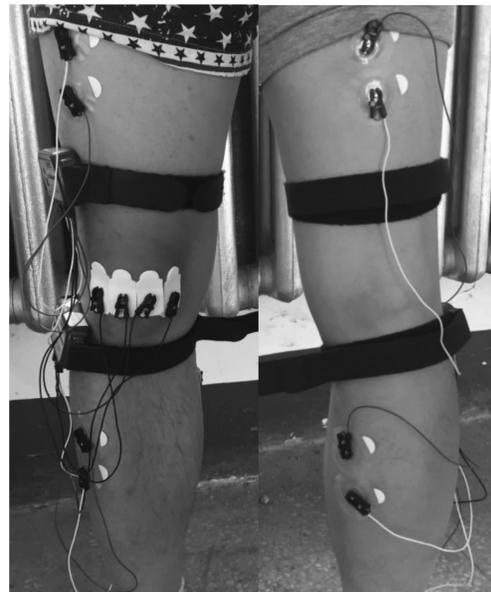


图10 驾驶员腿部电极片贴法

Fig.10 Electrode slices on driver's legs

表6为第95百分位男性驾驶员的前述腿部肌肉在实车试验与仿真分析中的肌肉激活程度对比结果。实车试验结果为被测驾驶员肌肉激活程度的平均值。

表6 实车试验结果与模拟仿真结果对比

Tab.6 The real vehicle test results compared with the simulation results

部位	实车试验结果	模拟仿真结果	相对误差/%
股直肌	0.025 98	0.023 67	8.89
胫骨前肌	0.659 78	0.730 79	10.76
腓肠肌	0.071 25	0.061 98	13.01

实车试验结果与仿真分析结果具有较好的一致性。但由于仿真分析是对下肢每一细小肌肉的力学分析,而真人试验采用的是非侵入式的肌电贴片

测试,其测试位置是被测量肌肉发力最为清晰的点。由于肌肉所处位置的相互叠加,测得的肌电信号实际上是测试点周边的肌肉群叠加,为此导致了目前存在10%~15%的相对误差。

5 结 论

本文结合驾驶员下肢的生物力学特性,基于人体骨肌动力学仿真分析了在不同椅面倾角时驾驶员下肢的肌肉激活程度受力变化,并进行了多名驾驶员的下肢肌电测试试验验证。主要结论如下:

1)在驾驶姿态下,人体腿部肌肉受到挤压或拉伸,起到稳定坐姿和操纵的目的。由于驾驶员右脚踩在踏板上,所以右腿主要受力肌肉的肌肉激活程度大多大于左腿。

2)绝大多数的受力肌肉都是随着椅面倾斜角度的增加而逐渐放松的,但此倾斜角度不可以过大,不应大于 16° 。

3)不同身材的驾驶员的驾驶姿态因为身高体重的不同而引起的人体主要肌肉激活程度趋势相似但局部又有所不同。依据相关性分析得到第50百分位的驾驶员的理想椅面倾角在 $12^\circ\sim 16^\circ$ 之间;第5百分位的驾驶员因身材、体重较小的缘故,理想椅面倾角在 $10^\circ\sim 14^\circ$ 之间;第95百分位的驾驶员理想椅面倾角应在 $10^\circ\sim 16^\circ$ 之间。

以上结论为车用座椅椅面倾角可调节范围提供了基于不同身材驾驶员的骨肌力学特性变化规律的设计依据。在后续的研究中,将选取不同身材、不同性别、不同年龄段等不同体征驾驶员进行实验,进一步挖掘数据的统计性规律,同时也将座椅的安全性与舒适性进行综合考虑,重点分析椅面倾角增大时,驾驶员制动刹车时下潜影响。

参考文献

- [1] GOOSSENS R H M. Measuring factors of discomfort in office chairs[C]//Proceedings of the Ergonomics Conference. Amsterdam; Elsevier Science, 1998; 371-374.
- [2] GOOSSENS R H M, TEEUW R, SNIJDERS C J. Sensitivity for pressure difference on the ischial tuberosity [J]. Ergonomics, 2005, 48(7): 895-902.
- [3] DE LOOZE M P, KUIJT-EVERS L F M, VAN D J. Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures[J]. Ergonomics, 2003, 46(10): 985-997.
- [4] 徐明,夏群生.体压分布的指标[J].中国机械工程,1997,8(1): 65-68.
- [5] XU Ming, XIA Qunsheng. Index of body pressure distribution [J]. China Mechanical Engineering, 1997, 8(1): 65-68. (In Chinese)
- [6] ZENK R, FRANZ M, BUBB H, *et al.* Technical note: Spine loading in automotive seating[J]. Applied Ergonomics, 2012, 43(2): 290-295.
- [7] AKGUNDUZ A, RAKHEJA S, TARCZAY A. Distributed occupant-seat interactions as an objective measure of seating comfort[J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65(4): 293-313.
- [8] ZEMP R, TAYLOR W R, LORENZETTI S. Seat pan and backrest pressure distribution while sitting in office chairs[J]. Applied Ergonomics, 2016, 53(A): 1-9.
- [9] 张冠军,魏嵬,曹立波,等.行人下肢有限元模型的建立与验证研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(2): 48-54.
- [10] ZHANG Guanjun, WEI Wei, CAO Libo. Development and validation of finite element models for the lower limb of pedestrians[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(2): 48-54. (In Chinese)
- [11] 赵江洪,唐龙. JT6120 乘客座椅靠背曲线静态舒适性评价研究[J].湖南大学学报:自然科学版,1992,19(6): 94-100,107.
- [12] ZHAO Jianghong, TANG Long. An evaluation on seat comfort of the bus seat JT6120[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 1992, 19(6): 94-100, 107. (In Chinese)
- [13] ELLEGAST R P, KRAFT K, GROENSTEIJN L, *et al.* Comparison of four specific dynamic office chairs with a conventional office chair: Impact upon muscle activation, physical activity and posture[J]. Applied Ergonomics, 2012, 43(2): 296-307.
- [14] PARK S J, KIM C B, KIM C J, *et al.* Comfortable driving postures for Koreans[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2000, 26(4): 489-497.
- [15] KILINC SOY Ü, WAGNER A, BENGLER C, *et al.* Comfortable rear seat postures preferred by car passengers[C]//5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Netherland; Springer, 2014: 30-39.
- [16] NADDEO A, CAPPETTI N, D'ORIO C. Proposal of a new quantitative method for postural comfort evaluation[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015, 48: 25-35.
- [17] AAGAARD P, SIMONSEN E B, ANDERSEN J L, *et al.* Antagonist muscle co-activation during isokinetic knee extension [J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2000, 10(2): 58-67.
- [18] 王望予.汽车设计[M].北京:机械工业出版社,2010:42-43.
- [19] WANG Wangyu. Automotive design [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 42-43. (In Chinese)
- [20] 冯飞燕,侯俊杰.基于人机工程学的抗疲劳汽车座椅设计[J].机械管理开发,2010,25(3): 16-17.
- [21] FENG Feiyan, HOU Junjie. Based on the ergonomics of the anti-fatigue car seat design[J]. Mechanical Management and Develop, 2010, 25(3): 16-17. (In Chinese)
- [22] NORDIN M, FRANKEL V H. Basic biomechanics musculo-skeletal system [M]. USA: Lippincott Williams & Wilkins, 1989: 105.