

DOI: 10.7652/xjtuxb201509019

身高、质量及腰靠凸起对驾驶员腰部载荷的影响

孟祥杰, 王文军, 张超飞, 成波
(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 100084, 北京)

摘要: 在现有 Christophy 脊柱肌骨模型的基础上创建了可求解腰部关节力、肌肉载荷的驾驶员生物力学模型, 通过 Matlab-OpenSim 联合仿真求解了驾驶员人椅接触界面接触反力及摩擦力, 从关节反力及腰部肌肉负载的角度尝试解释了身高、体质量、腰靠凸起厚度对舒适度影响的内在机理。结果表明: 驾驶员腰部载荷随体质量的增加近线性增加, 但与身高的相关度较低; 4 cm 凸起腰靠支撑下的驾驶员较 2 cm 凸起腰靠支撑下的腰部肌肉群等效载荷平均降低了 7.4%, 腰部椎间关节力平均降低了 18.6%。所提出的仿真方法可以实现不同腰靠支撑下腰部载荷的定量评估, 适用于指导人机工程中座椅腰靠的舒适性设计。

关键词: 脊柱肌骨模型; 腰靠; 人机工程; Matlab-OpenSim 联合仿真

中图分类号: TB18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)09-0114-06

Effects of Body Height, Weight and Lumbar Support Prominence on Driver's Lumbarloadings

MENG Xiangjie, WANG Wenjun, ZHANG Chaofei, CHENG Bo
(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper created a driver model that can estimate lumbar vertebral joint reaction forces and muscle forces based on Christophy musculoskeletal lumbar spine model, solved the contact interactions between driver and seat via Matlab-OpenSim co-simulations, and tried to explain inherent mechanism of effects of body weight, height and lumbar support prominence (LSP) on driving comfort with help of the estimated vertebral joint reaction forces and muscle forces. Results: lumbar loadings are almost linearly related to body weight, but have limited relation with body height. Lumbar muscle groups' averaged loadings in balancing drivers' posture under 4 cm LSP was 7.4% lower than that under 2 cm LSP. Similar, joint reaction force at lumbar level L4-L5 under 4 cm LSP was 18.6% lower than that under 2 cm LSP. The proposed method can achieve quantitative assessments of lumbar support's effects which can help design of comfort lumbar support in car seats.

Keywords: musculoskeletal model; lumbar support; ergonomics; Matlab-OpenSim co-simulation

职业腰背痛是导致社会卫生保健支出和残疾率增加的一个主要原因^[1]。职业驾驶员因需要长期在被约束的坐姿下工作而具有高于普通人的腰背痛发

病率^[2]。合理的座椅设计可以降低腰背痛的发病率^[3], 但驾驶员的个体差异性, 特别是身高、体质量的差别, 致使对同一汽车座椅舒适度的感受差异会

很大。

目前,座椅的舒适度评价主要有 2 种,主观评价和体压分布。然而,这 2 种方法在舒适性评价中的可重复性和准确性较差,不能测量人-座椅之间对驾驶舒适性具有重要影响^[4]且大小不可忽视的接触摩擦力^[5-6],特别是不能对直接影响人体舒适性的肌肉载荷和关节力等给出定量评估^[7]。

美国斯坦福大学研发的 OpenSim^[8] 已逐渐发展为肌肉骨骼生物力学领域应用最广泛的仿真平台之一。本文基于该平台下的 Christophy 模型^[9],创建了驾驶员肌肉骨骼生物力学模型,根据实测人体测量数据和驾驶姿势,以 De Carvalho 等对汽车座椅在不同凸起厚度腰靠支撑下人体腰椎及骨盆关节角的 X 光片测量结果^[10]为基础,从腰部椎间关节力、肌肉力的角度,研究了驾驶员身高、体质量以及腰靠凸起厚度对腰部载荷的影响。

1 方 法

1.1 驾驶员-座椅系统仿真模型

基于 OpenSim 肌肉骨骼生物力学仿真平台,Christophy 等创建了一个腰脊肌肉骨骼生物力学模型^[9]。该模型含有胸、骨盆、5 个腰椎共 7 个刚体,并使用 238 个肌肉束表征腰背部、腹部的 8 个主要肌肉群。本文在此基础上添加了四肢、头颈的刚体模型,可以仿真分析与驾驶员四肢接触的外负载及四肢本身重量对腰部肌肉、关节载荷的影响,并在腰椎处添加刚度矩阵^[11]以表征椎间盘、椎间韧带等椎间被动组织的力学特性,如图 1 所示。

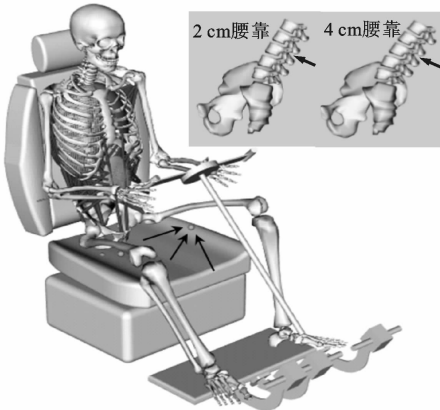


图 1 驾驶员-座椅系统仿真模型

为考虑腹压对腰部载荷的影响,将等效腹压作用力同时作用在胸和骨盆两个刚体上^[12-14]。本文关注身高、体质量及腰靠凸起厚度对腰背部肌肉载荷的影响,只考虑四肢肌肉在相应关节处产生的力矩,

并不考虑四肢各个肌肉所承受的载荷,即在 OpenSim 中采用坐标执行器(Coordinate Actuator)来体现全部可以对该关节产生力矩的肌肉的作用。

本文招募了 20 名实验人员(13 名男性、7 名女性),其中男性年龄(32.2±7.19)岁,女性年龄(35±6.43)岁;男性平均身高 172.97 cm(163~184 cm,标准差 6.07 cm),女性平均身高 161.47 cm(150~168 cm,标准差 7.22 cm);男性平均体质量 68.03 kg(53.60~80.50 kg,标准差 10.02 kg),女性平均体质量 62.84 kg(55~72.8 kg,标准差 7.41 kg)。实验车为改良后的 Builk-Park Avenue(2007SGM),实验者拥有驾照,视力或经矫正视力正常,且没有腰肌劳损病史。实验者自调至舒适驾驶姿势后,姿势关节角通过在实验者关节处加贴标记点并用高像素图像方式进行记录,所得姿势关节角如下:肘关节角 127.71°±19.69°,肩关节角 40.65°±9.07°,躯干后倾角 15.27°±5.35°,髋关节角 98.44°,膝关节角 126.27°±9.57°。

腰椎关节旋转角分布对腰部载荷的影响很大^[10],仿真中相应旋转角的准确度至关重要,但其难以准确测量,所以本文考虑选用文献数据。De Carvalho 等基于 X 光片测量得到在第三腰椎处腰靠凸起厚度分别为 2 cm 和 4 cm 条件下的腰椎旋转关节角 β ^[10],如表 1 所示,其中各个关节的前屈旋转角均以相对直立姿势旋转的数值为基准,L1~L5 表示第一至第五腰椎,S1 表示骶骨。

表 1 不同腰靠支撑下各腰椎旋转关节角

腰靠 凸起 厚度 /cm	$\beta/(^{\circ})$					脊柱 前屈	骨盆 后倾
	L5-S1	L4-L5	L3-L4	L2-L3	L1-L2		
2	7.06	11.94	7.58	4.68	3.39	34.64	40.55
4	5.77	10.24	5.20	3.35	1.57	26.13	38.91

4 cm 凸起腰靠支撑下的躯干后倾角(骨盆后倾角与脊柱前屈角的差值)为 12.78°±3°,基本在本文测得躯干后倾角范围内。所以,本文采用 De Carvalho 等^[10]测得的各椎间关节角作为模型腰部各椎间关节角的输入。通过回归分析发现,身高、体质量均与不同实验者最优舒适性关节角分布的相关度 $R^2<0.07$ 很低,故本文仿真中使用了测得姿势关节角均值,并分别依据 20 名实验者的身高、体质量进行缩放,以研究不同身高、体质量对腰部负载的影响。

1.2 驾驶员与座椅系统的接触载荷

通过在驾驶员肌肉骨骼生物力学模型各刚体上添加支撑点^[7]来实现驾驶员与座椅、方向盘、踏板等处接触载荷的仿真,并参考体压分布测量实验的结果,在压力分布中心位置对各个刚体添加支撑点。

人体的肌肉骨骼系统是冗余静不定的复杂力学系统,不能通过运动和外载荷按反向动力学的方法直接求出各个肌肉力。一般以所有肌肉激活度 α 在0~1之间的平方和最低为优化目标,通过静态迭代的方法,使得强壮的肌肉更多地参与激活、整体的激活度最低,优化求解得到静态姿势下关节力和力矩在各肌肉间的分配式如下^[15]

$$\text{minimize } J(F_i) = \sum_{i=1}^n \alpha^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{F_{i,\max}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: F_i 为第 i 个肌肉的肌肉力; $F_{i,\max}$ 为第 i 个肌肉的最大输出力,可以理解为肌肉的强壮程度。一个具有更大 $F_{i,\max}$ 的肌肉,其产生相同肌肉力时所需激活度更小,因此在优化中具有更高的权重,被优先使用。本文将接触载荷视为肌肉力参与到静态优化中,但给予较骨骼肌更高的最大输出力值,而四肢各关节处的坐标系执行器给予较小的值,从而使得在驾驶员姿势平衡中能由座椅、地面、方向盘提供的支撑力尽量由座椅、地面和方向盘提供,而不是由肌肉提供。

人椅作用力需要满足2个条件:法向力只能为压力;切向力小于最大静摩擦力。肌肉力与接触外负载在联合优化求解的过程中,一方面需要对包括接触界面摩擦力在内的接触外负载设定较大的权重(最大输出力),以体现肌肉负载最小化的原则^[7],另一方面不可将接触界面摩擦力的权重设定得过大而导致其计算结果超过人椅界面间的最大静摩擦力。所以,本文采用迭代计算的方法,对产生过大接触摩擦力的接触点,不断地调低接触界面摩擦力的权重,直至其结果小于最大静摩擦力为止,从而保证接触界面摩擦力的计算得到合理的结果。在肌肉力优化求解中,约束人椅接触界面法向力的激活度仅可处于0~1之间,以保证法向力仅为压力。对于接触界面的摩擦力权重,使用OpenSim软件平台与Matlab的联合仿真接口,通过Matlab在迭代循环中不断调整模型中接触摩擦力的 $F_{i,\max}$ 来实现,直至满足

$$|F_{ti}| < \mu_i f_i \quad (2)$$

式中: F_{ti} 为摩擦力,即与接触反力垂直两坐标轴方向上切向力平方和的平方根; i 为支撑点编号; μ 为摩擦系数, $\mu=0.5$ ^[7]; f_i 为优化获得的接触反力。

具体仿真流程如图2所示,其中每次降低 $F_{i,\max}$ 值的比例可根据仿真结果适当调整,以加快仿真速度或提高仿真的准确度。

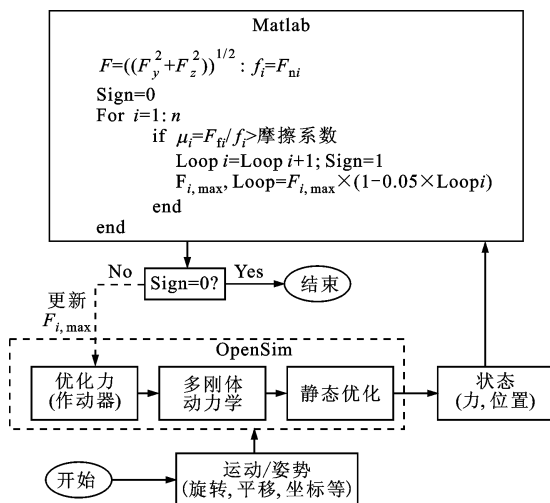


图2 接触摩擦力仿真流程图

静态优化结束后,即可获得驾驶员舒适性评价所需任意肌肉束的激活度、肌肉力及各目标关节的关节反作用力。

人体腰部主要有背部腰最长肌、多裂肌、腰髂肋肌、腰大肌4个肌肉群,如图3所示。各肌肉具体位置请参照文献[16]。本文关注舒适性,将每个肌肉

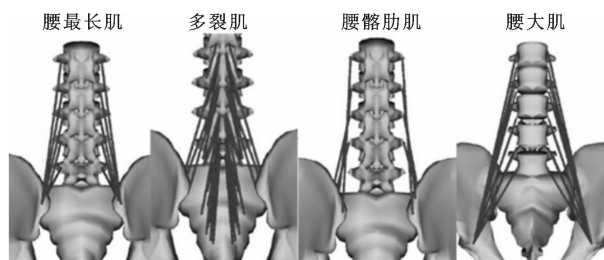


图3 驾驶员腰部主要肌肉群示意图^[16]

群中肌肉束激活度最高值作为该肌肉群的激活度^[7]。已证明腰髂肋肌主要在内旋时参与平衡^[16],理论上该肌肉在本文驾驶姿势下应没有明显的肌肉力输出,亦得到了本模型计算结果的验证,仿真所得其激活度可以忽略。本文综合考虑了最长肌、多裂肌、腰大肌3个肌肉群的激活度来衡量驾驶员腰部的肌肉负载,即采用该腰部肌肉的等效载荷

$$\chi = \left(\sum_{i=1}^n \alpha^2 / n \right)^{1/2} \quad (3)$$

一方面,该方法在综合考虑所有肌肉束的激活度影响的同时,需保证所得等效肌肉激活度处于0~1之间,且与单个肌肉束的激活度处于同一数量级;另一方面,每个肌肉束的激活度的平方和恰是静态优化

中求解每个肌肉激活度时的优化目标。

2 结 果

2.1 身高、体质量对腰部椎间关节力的影响

随着身高的逐渐增加,2 种腰靠厚度(2 cm、4 cm 凸起腰靠支撑图中简称 2cm、4 cm)下,男性的第 4 至第 5 腰椎(L4-L5)的椎间关节力整体呈上升趋势,但女性却呈下降趋势。由线性回归分析知,男、女性身高均对腰部椎间关节力影响较小($R^2 < 0.15$),腰部椎间关节力与身高无显著的相关性,如图 4 所示。

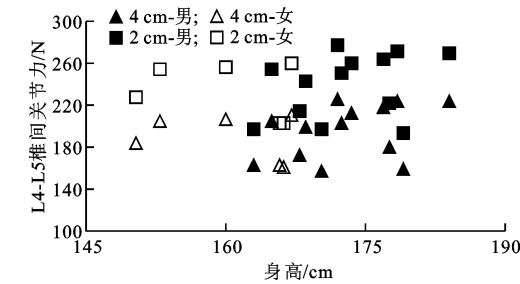


图 4 身高对 L4-L5 椎间关节力的影响

随着体质量的逐渐增加,男、女性的 L4-L5 椎间关节力均近线性增加($R^2 > 0.96$, 呈显著相关性),女性的增加速率略微高于男性。如图 5 所示,4 cm 凸起腰靠支撑下的 L4-L5 椎间关节力($192.5 \text{ N} \pm 24.19 \text{ N}$)均明显较 2 cm 凸起腰靠支撑下 L4-L5 椎间关节力($236.5 \text{ N} \pm 28.78 \text{ N}$)低,平均下降了 18.6%。

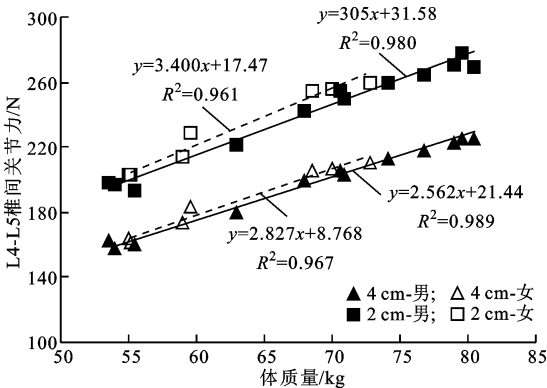


图 5 体质量对 L4-L5 椎间关节力的影响

2.2 腰靠的凸起厚度对腰部肌肉载荷的影响

仿真结果表明,驾驶姿势下多裂肌(MF)、最长肌(Long)、腰大肌(PS)是主要参与姿势平衡的腰部肌肉。由图 4、5 可知,4 cm 凸起腰靠支撑下 L4-L5 椎间关节力较 2 cm 凸起腰靠支撑明显降低。仿真分析结果表明,不同腰靠凸起厚度下,参与姿势平衡

的主要肌肉群的激活度发生变化是 4 cm 凸起腰靠支撑降低腰椎椎间关节力的内在原因。

如图 6 所示,较 2 cm 凸起腰靠支撑下多裂肌、最长肌和腰大肌的激活度,虽然 4 cm 凸起腰靠支撑下最长肌的激活度平均增加了约 3.6%(2 cm、4 cm 凸起腰靠支撑下平均激活度分别为 $0.093 2 \pm 0.023 2$ 、 $0.096 6 \pm 0.026 1$),但多裂肌、腰大肌的激活度分别平均降低了 13.1%、34.2%。

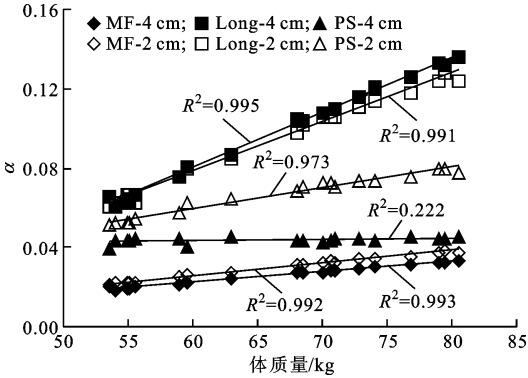
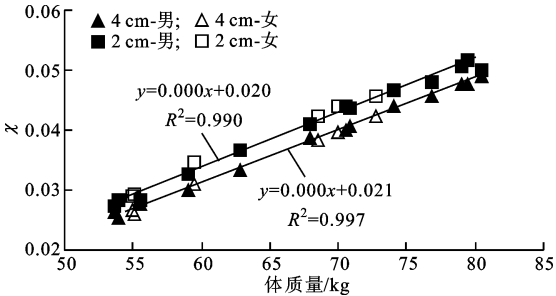


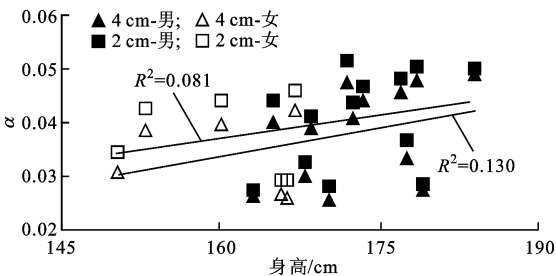
图 6 体质量对 L4-L5 腰部肌肉载荷的影响

2.3 身高、体质量对驾驶员整体肌肉载荷的影响

仿真结果表明,不同腰靠凸起厚度下驾驶员的整体肌肉负载均随着体质量、身高的增加而增加,如图 7 所示。由线性回归分析结果知,驾驶员肌肉负载的变化与体质量因素近线性相关($R^2 \geq 0.99$, 呈显著相关性),但与身高因素相关度较低($R^2 \leq 0.13$, 无明显相关性)。不同身高、体质量的男、女驾



(a) 体质量



(b) 身高

图 7 身高、体质量对驾驶员平均肌肉负载的影响

驶员仿真所得肌肉整体激活度在 0.02~0.06 之间,且 4 cm 凸起腰靠支撑下的平均等效肌肉负载较 2 cm 降低了 7.4%(2 cm、4 cm 凸起腰靠支撑下等效激活度分别为 $0.039\ 3\pm0.008\ 4$ 、 $0.036\ 4\pm0.008\ 1$)。

3 讨 论

本文基于 Christophy 腰脊肌骨模型创建了可求解腰部关节力、肌肉载荷的驾驶员生物力学模型。通过 Matlab 不断修改产生过大接触摩擦力的接触点处接触摩擦力优化权重的方法,不断地降低仿真计算中摩擦力参与姿势平衡的优先级,直至仿真求解的摩擦力小于静摩擦力。Wilke 等^[17]测量了有靠背的不同坐姿和正直站立时 L4-L5 关节压力,L4-L5 关节反力应为正直站立关节力的 54%~76%。本文中驾驶员均值模型(身高 168.7 cm、体质量 65.3 kg)正直站立时 L4-L5 关节力为 329 N,而本文计算所得 2 cm、4 cm 凸起腰靠支撑下在不同身高、体质量时的平均值分别为 236 N 和 192 N,分别为站立姿势下的 71.73% 与 58.36%,与 Wilke 等^[17]测量值相近。本文计算所得驾驶员整体肌肉负载亦与 Grujicic 等^[7]基于 ANYBODY 肌肉骨骼生物力学模型的计算结果相近,激活度处于 0~0.06 之间。

身高、体质量对腰部椎间关节反力、腰部肌肉载荷的研究结果表明,腰部的椎间关节反力及肌肉载荷均与体质量呈近线性相关,但与身高因素的相关性很低,即体质量是影响驾驶员腰部负载的关键因素。Bayramoglu 等报道肥胖者腰痛患病率较正常人高^[18]。Fanuel 等认为肥胖引起的腰痛可能与腰部机械负荷增加有关^[19]。本文从仿真实验的角度证明了体质量增加会使得驾驶员的腰部载荷增加,这在一定程度上支持了 Fanuel 等^[19]的肥胖导致腰背痛发病率提高的假设。与此同时,本文研究发现,4 cm 凸起腰靠支撑下驾驶员的腰部载荷较 2 cm 凸起腰靠支撑下明显降低。进一步分析 2 种凸起厚度的腰靠支撑下驾驶员的腰部肌肉束的激活度,发现主要参与驾驶姿势平衡的肌肉群载荷发生变化是内在原因,特别是在 4 cm 凸起腰靠支撑下,腰最长肌更积极地参与驾驶姿势平衡,腰大肌、多裂肌肌肉负载大幅度下降,从而使得驾驶员腰部椎间关节力及腰部等效肌肉载荷大大下降。Reed 等^[20]在对座椅舒适性设计进行调研后,也曾推荐驾驶员腰靠厚度应该超过 2 cm。本研究从腰部关节、肌肉载荷角度

解释了以上报道的内在机理。

王波等曾开展腰靠在驾驶员脊柱上最佳支撑位置的研究^[2],发现较身高,体质量对腰靠支撑凸起厚度及支撑高度具有更明显的影响。本文的仿真研究也表明体质量对腰部载荷的影响远大于身高的影响。王波等的实验进一步发现,腰靠凸起厚度和体质量指数具有显著的正相关性,即越胖的人倾向于选择更加凸起的腰靠支撑。由图 5、7 知,过大的体质量会使得驾驶员的腰部等效肌肉载荷显著增加,但更高的腰靠支撑可以使得驾驶员腰部肌肉载荷相对降低。这在一定程度上解释了越肥胖的人越倾向于更凸起的腰靠支撑,即通过提高腰靠支撑凸起厚度来减小腰部生物力学载荷,以抵消体质量导致的腰部载荷的增加。

采用同一组实验者的腰椎姿势关节角和其他驾驶姿势关节角作为模型输入最为理想,本文所用 De Carvalho 等^[10]的腰部姿势关节角和国人驾驶姿势关节角作为仿真姿势的输入存在一定的局限性,这两组数据均是在驾驶环境下、实验者在最舒适位置测得的结果,且基于 De Carvalho 等^[10]的腰部姿势关节角获得的躯干后倾角落在本文测量所得躯干后倾角范围内,在现有测量设备难以准确测量腰部椎间关节角的情况下,综合这两组实验数据进行仿真计算有一定的合理性。此外,除了腰靠凸起厚度外,腰靠的支撑位置亦对腰部的载荷有较大的影响^[2],这些都有待后续进一步研究。

4 结 论

本文基于现有 Christophy 脊柱肌骨模型创建了可求解腰部关节力、肌肉载荷的驾驶员生物力学模型,通过 Matlab-OpenSim 联合仿真求解驾驶员人椅接触界面接触反力及摩擦力,从关节反力及腰部肌肉负载的角度尝试解释了身高、体质量、腰靠凸起厚度对舒适度影响的内在机理。

(1)驾驶员腰部载荷随体质量的增加近线性增加($R^2>0.96$),但与身高的相关度较低($R^2<0.15$)。

(2)较凸起 2 cm 腰靠,凸起 4 cm 的驾驶员腰部肌肉群等效载荷平均降低了 7.4%,腰部椎间关节力平均降低了 18.6%。

本文提供了可以在汽车及其他各类座椅腰靠设计中,不依赖于实验测量结果,对不同驾驶员、不同腰靠支撑条件下腰部载荷进行有效评估的虚拟仿真设计平台,对开展相关设计研究具有较高的工程应用价值。

致谢 本研究中驾驶员肌肉骨骼生物力学模型,是作者在美国哈佛大学 Buxsein 实验室访问学习期间,在 Prof. Buxsein、Dr. Anderson 及国内导师的共同指导下研发的,期间曾得到美国 NIH 基金资助。

参考文献:

- [1] NELSON-WONG E, CALLAGHAN J P. The impact of a sloped surface on low back pain during prolonged standing work: a biomechanical analysis [J]. *Applied Ergonomics*, 2010, 41(6): 787-795.
- [2] 王波, 金晓萍, 成波, 等. 腰靠在驾驶员脊柱上最佳支撑的研究 [J]. *汽车工程*, 2012, 34(12): 1081-1084.
WANG Bo, JIN Xiaoping, CHENG Bo, et al. A study on the optimal lumbar support against driver's spine [J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(12): 1081-1084.
- [3] WILLIAMS M M, HAWLEY J A, MCKENZIE R A, et al. A comparison of effects of two sitting postures on back and referred pain [J]. *Spine*, 1991, 16(10): 1185-1191.
- [4] RASMUSSEN J, TØRHOLM S, ZEE M D. Computational analysis of the influence of seat pan inclination and friction on muscle activity and spinal joint forces [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2009, 39(1): 52-57.
- [5] BADER D L, BOWDER P. Mechanical characteristics of skin and underlying tissues in vivo [J]. *Biomaterials*, 1980, 4(4): 305-308.
- [6] BENNETT L, KAUFER D, LEE B Y, et al. Shear vs. pressure as causative factors in skin blood flow occlusion [J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1979, 60(7): 309-314.
- [7] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, XIE X, et al. Musculoskeletal computational analysis of the influence of car-seat design/adjustments on long-distance driving fatigue [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2010, 40(3): 345-355.
- [8] SETH A, SHERMAN M, REINBOLT J A, et al. OpenSim: a musculoskeletal modeling and simulation framework for in silico investigations and exchange [J]. *Procedia IUTAM*, 2001, 2: 212-232.
- [9] CHRISTOPHY M, SENAN N A F. A musculoskeletal model for the lumbar spine [J]. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 2012, 11(1/2): 19-34.
- [10] DE CARVALHO D E, CALLAGHAN J P. Influence of automobile seat lumbar support prominence on spine and pelvis postures: a radiological investigation [J]. *Applied Ergonomics*, 2012, 43(5): 876-882.
- [11] GARDNER-MORSE M K, STOKES I A F. Structural behavior of human lumbar spinal motion segments [J]. *Journal of Biomechanics*, 2004, 37(2): 205-212.
- [12] ARJMAND N, SHIRAZI-ADL A. Role of intra-abdominal pressure in the unloading and stabilization of the human spine during static lifting tasks [J]. *European Spine Journal*, 2006, 15(8): 1265-1275.
- [13] SCHULTZ A, ANDERSSON G, ORTENGREN R, et al. Loads on the lumbar spine: validation of a biomechanical analysis by measurements of intradiscal pressures and myoelectric signals [J]. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 1982, 64(5): 713-720.
- [14] MARRAS W S, MIRKA G A. Intra-abdominal pressure during trunk extension motions [J]. *Clinical Biomechanics*, 1996, 11(5): 267-274.
- [15] MODENESE L, PHILLIPS A T M, BULL A M J. An open source lower limb model: hip joint validation [J]. *Journal of Biomechanics*, 2011, 44(12): 2185-2193.
- [16] CHRISTOPHY M. A detailed open-source musculoskeletal model of human lumbar spine [D]. Berkeley, USA: University of California, 2009.
- [17] WILKE H J, NEEF P, HINZ B, et al. Intradiscal pressure together with anthropometric data—a data set for the validation of models [J]. *Clinical Biomechanics*, 2001, 16(1): S111-S126.
- [18] HELIOVAARA M. Body height, obesity and risk of herniated lumbar intervertebral disc [J]. *Spine*, 1987, 12(5): 469-472.
- [19] BAYRAMOGLU M, AKMAN MN, KILINE S, et al. Isokinetic measurement of trunk muscle strength in women with chronic low-back pain [J]. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2001, 80(9): 650-655.
- [20] REED M P, SCHNEIDER L W, RICCI L L. Survey of auto seat design recommendations for improved comfort, UMTRI-94-6 [R]. Michigan, USA: University of Michigan, 1994.

(编辑 苗凌)