

DOI: 10.3901/JME.2016.12.192

基于操纵力感知场的人机系统操纵舒适性 度量方法研究*

刘明周¹ 张淼¹ 扈静¹ 刘正琼² 汪海洋¹

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009;

2. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)

摘要: 操纵舒适性度量是人机系统研究的一项重要内容。针对操纵舒适受多方面复杂因素的影响,难以准确、稳定地进行度量的问题,重点围绕人与机器二者的关系,构建人机系统操纵力感知场,将各影响因素以及相关的测评方法映射到场结构中进行归类分析。提取人、机接触应力和操纵者的肌肉应力作为场源核心参量,以同二者相对应的感知强度作为场强参量,利用史蒂文斯幂定律定量描述接触应力、肌肉应力与其对应的感知强度的映射关系,并以高斯势函数表征感知强度与舒适性之间的关系,最终依据操纵力感知场的分布特性,从局部和整体两方面实现操纵舒适性综合度量。应用该方法进行汽车刹车踏板操纵舒适性测评实验,实例分析结果表明,所得操纵舒适性指数与主观测评结果一致,该方法能够作为主观测评的有效补充,为人机系统操纵舒适性优化设计提供理论依据和数据支持。

关键词: 人机系统; 操纵舒适性; 操纵力感知场; 操纵舒适性指数

中图分类号: TB18

Research on the Method of Measuring the Handling Comfort of the Man-machine System Based on the Perception Field of Operating Forces

LIU Mingzhou¹ ZHANG Miao¹ HU Jing¹ LIU Zhengqiong² WANG Haiyang¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Handling comfort measurement is a significant part of the study of man-machine system. As influenced by many complex factors, it is difficult to measure the handling comfort accurately and stably. Aiming at the problem, the perception field of operating forces of man-machine system is constructed, by which the influencing factors and related evaluation methods are classified and analyzed. The contact stresses and the muscle stresses are extracted as the key parameters of the field source. Their corresponding perceived intensities are taken as the parameters of field intensity. Stevens' power law is used to describe the mapping between the contact stress and its perceived intensity as well as the muscle stress and its perceived intensity quantitatively, and the relationship of the perceived intensity and the comfort is characterized by Gaussian potential function. According to the distribution characteristic of the perception field of operating forces, comprehensive measure of handling comfort is implemented in local and holistic ways. The method is applied to the handling comfort test of automobile brake pedal. The experimental results show that the comfort index is consistent with the result of subjective assessment. The method can be a useful addition to subjective methods, and can provide a theoretical basis and data supports for the optimization design of handling comfort of man-machine system.

Key words: man-machine system; handling comfort; perception field of operating forces; comfort index

0 前言

从简单的工具使用到现代化的复杂机电系统

操控,人机交互广泛存在于日常生产与生活实践中。随着人机结合理论与应用研究受到工程界和学术界共同关注^[1],操纵舒适性成为人机系统的一项重要性能指标。操纵舒适性是指建立在人机交互基础上的舒适性感受,随着科技的发展和产品的丰富,人机交互的形式多样化,然而鉴于力触觉对于人的

* 国家自然科学基金资助项目(51375134)。20150803 收到初稿,20160301 收到修改稿

感知反馈辅助功能^[2], 由操纵力触发系统运行始终是主要的交互方式。综合相关学者的观点^[3-4], 操纵舒适性的内涵可总结如下: 操纵者在一定时间内施加力于操纵对象以改变其运行状态的过程中, 系统反映出的适应操纵者生理与心理特征的程度进而使操纵者能够安全、健康、高效地工作。

操纵舒适性的测评方法多种多样, 大体分为主观和客观两种方式, 由于舒适性的本质是人一种心理物理量, 以心理学等级划分为主, 根据自身感受进行的舒适性主观评级或评分是最为直接的方法; 客观测评方法主要是借助影响操纵舒适性的潜在因素来表征操纵舒适性水平, 是间接的测评方法。同主观测评相比, 客观测评方法具有耗时短、所需参与者少、不易受误差或偏见的影响以及能够提前应用于设计过程等优势^[5], 因此, 客观测评方法更加符合操纵舒适性定量测评的需求, 成为当前人机工程学领域的研究热点。国内外学者所关注的能够用以测评操纵舒适性的客观潜在因素主要包括: 人体姿态及关节运动^[6-8], 人、机接触力及其分布^[9-11], 肌肉发力及其相关的肌电信号^[12], 以及影响操纵发力的操纵者自身差异^[13-14]和操控对象设计特征^[4, 15-16]等。

基于多种客观参量, 研究者采用不同的数学方法测评操纵舒适性, 主要有多指标决策、人体参数建模以及结合主客观评价的启发式算法等。较有代表性的有: KUIJIT-EVERS 等^[15]采用主成分分析法, 对手工工具的设计特征及使用性能进行操纵舒适性测评, 该方法需要较多的被试者参与, 且需要对不同的客观参量进行主观比较; ZACHER 等^[6]以肌肉和关节的实时负荷与最大可承受负荷之间的比值作为不舒适度模型, 虽然符合人体对不舒适度的感知特征, 但忽略了触觉刺激对舒适性的影响, 且未考虑人机交互过程中必要的力反馈; 孙贤安等^[16]采用神经网络方法建立双离合式自动变速器的运动及动力方面的客观参量与主观评价之间的联系, 进而利用网络模型测评换挡品质, 该方法结合了主、客观方法的优点, 然而对于不同的操控对象, 需要先筛选对应的客观测评指标。

根据以上研究可知, 人、机接触力和操纵者的肌肉力是测评操纵舒适性时所关注的焦点, 可以作为测评操纵舒适性的关键参量。由于接触力的存在必然伴随着肌肉力, 二者具有较强的关联性, 在此将其统称为操纵力。本文针对现有操纵舒适性测评研究中存在的问题, 面向人机系统操纵过程, 构建操纵力感知场模型, 综合分析多种操纵力并定量描述其与操纵舒适性之间的映射关系, 实现具有较强

普适性的人机系统操纵舒适性度量, 为人机系统的优化设计提供理论基础。

1 操纵作业主要研究对象

人机系统是由人、机器、环境三者共同组成的系统, 人为了特定的目标即作业任务, 与机器发生相互作用, 而人与机器共同完成作业任务的过程是处在特定的作业环境中, 因此, 人机作业的研究对象是三者的基本特征及其相互之间的影响, 如图 1 所示。

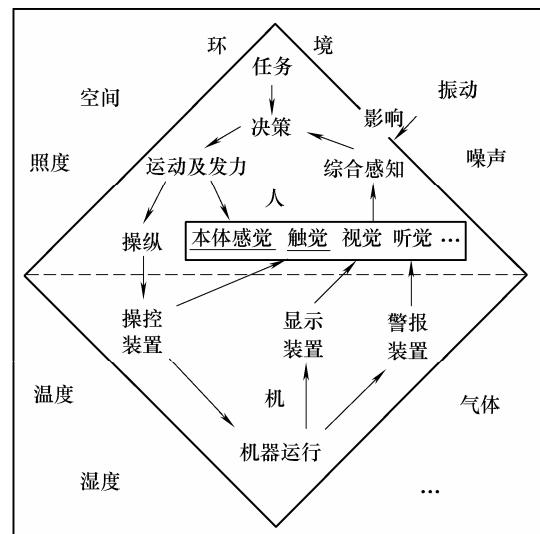


图1 人、机关系示意图

一方面, 人要改变机器的运行状态, 需要通过手或脚施加力于机器的操控装置, 根据人体运动机理, 骨骼肌收缩, 并以关节为支点牵引骨骼运动, 并对操纵对象产生力的作用, 从而传递操控指令; 另一方面, 机器对于作业者具有反馈作用, 主要是通过操控装置的力反馈、仪表显示的变化以及警报装置的声音提示等方式, 引起人相应的感知, 使作业者能够了解机器的实时运行状态, 对操控决策提供辅助以便顺利完成作业任务; 此外, 人和机器都处在一定的作业环境中, 作业空间、照度、温湿度、振动条件以及特殊气体等因素都会对人的感受与机器的运行产生影响。在人机作业过程中, 人的感知包含了对自身肌肉力的感知(即本体感觉)、触觉、视觉、听觉以及其他方面的知觉, 多种知觉共同形成的综合感知特征决定着人的舒适性。

对于操纵作业而言, 其主要形式是接触力, 即人的主动发力和操控装置的力反馈这一对相互作用力, 而接触力的产生及维持又必然伴随着肌肉力, 因此, 确定操纵作业研究的主要对象为: 人(操纵

者), 机(操控装置)和操纵力(接触力和肌肉力)。操纵舒适性感受主要源于同操纵力相关的人体感知, 而伴随着操纵力的刺激主要包括接触、压力刺激和肌肉收缩、牵拉刺激, 由这两种刺激引起的人体知觉分别称为触觉和本体感觉。人体生理学研究表明, 人体具有多种感受器, 其中, 能够感受接触、压力刺激的主要是位于皮肤中的游离神经末梢、环层小体、触觉小体等, 而能够感受肌肉收缩、牵拉刺激的主要是位于骨骼肌中的肌梭和腱梭^[17]。对应于这两类感受器的功能, 操纵过程中操纵者的舒适性感受主要取决于触觉和本体感觉。

2 操纵力感知场

2.1 定义

操纵力感知场是借鉴机器人研究领域用人工势场抽象描述运动环境的思想, 以人机作业中的操纵力为核心要素构建的虚拟场, 利用场强定量描述操纵力感知强度, 并最终表征人机系统操纵舒适性。

2.2 组成

操纵力感知场由三层结构组成, 分别是场源层, 场强层和探测层, 具体组成如图 2 所示。

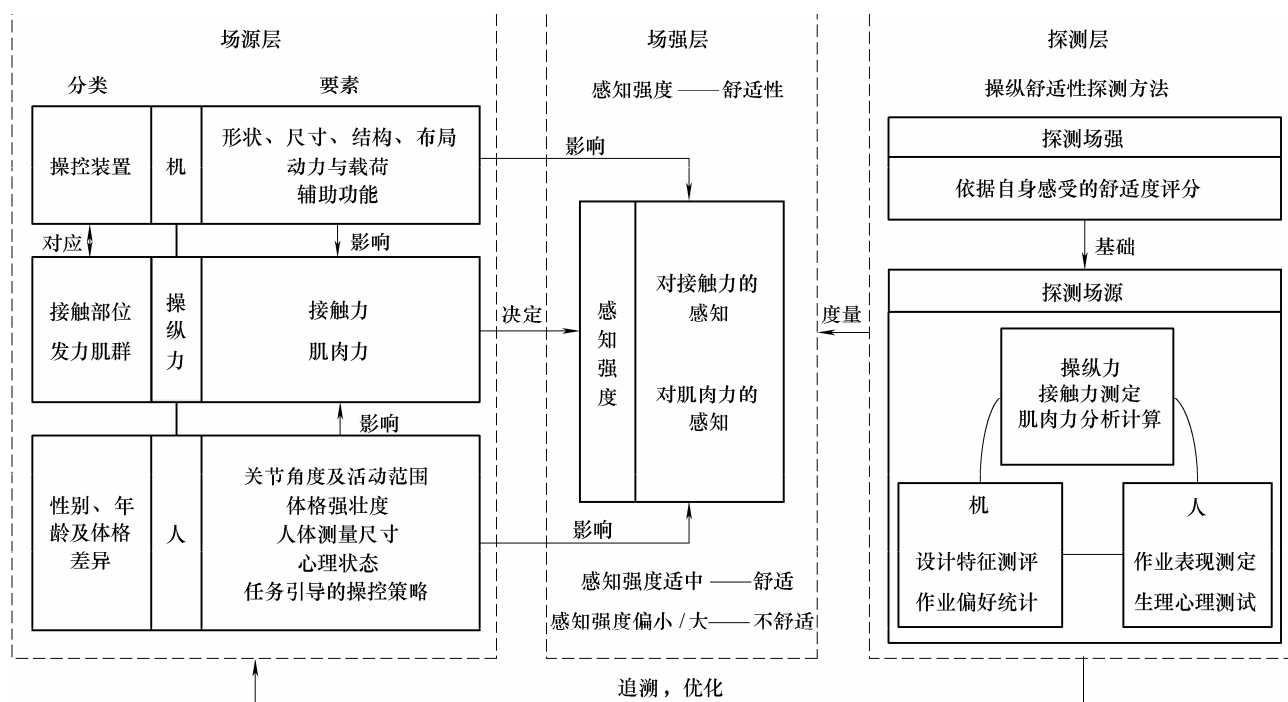


图2 人机系统操纵力感知场结构

(1) 场源层是构成操纵力感知场的主体, 对应于操纵舒适性的主要影响因素, 操纵力(接触力和肌肉力)是其核心因素, 可以根据不同操纵动作中的人机接触部位和发力肌肉的差异划分为不同类型。

操纵力受到人、机特征的共同影响。机的方面, 可根据不同的操控装置进行分类, 包含的因素有: 操控装置的形状、尺寸、结构、布局、动力载荷特性以及辅助装置(如助力系统)特性等; 而人的方面, 可以根据不同人群的性别、年龄及体格差异进行分类, 包含的因素如下: 操纵者的关节角度及其活动范围、体格强壮度、人体测量尺寸、心理状态以及任务引导的操控策略等。两方面因素共同影响着操纵力及其感知特性。

(2) 场强层由描述操纵力感知强度的参量组成, 包括操纵过程中涉及的接触力和肌肉力的感知, 并最终感知强度表征操纵舒适性。操纵舒适性根

据感知强度区间确定, 其关联关系表现为: 感知强度过大, 易引起局部不适、作业疲劳甚至是组织损伤; 而感知强度过小, 不能给操纵者以足够的感知反馈信息, 不利于安全和高效的作业。李铁柱等^[18]将前者视为舒适性约束, 后者视为安全性约束, 并根据两方面约束对人机系统进行多学科设计优化。事实上, 安全、高效的作业也是操纵舒适性的内在要求, 因此, 感知强度过大或过小都不属于舒适的操纵感受。场强由场源特征决定, 即操纵力的特征决定了其感知强度, 进而决定了操纵舒适性。

(3) 探测层是操纵舒适性的探测方法体系。其中, 主观方法即根据自身感受进行舒适度评分, 是针对场强的探测方法; 客观方法是基于操纵力特征或与其相关的人与机器的特征等客观指标进行测评, 是针对场源要素的探测方法。只有先建立起客观指标与舒适性之间的关联关系, 客观方法才能成

为主观方法的有效补充^[19]。因此, 探测场强是探测场源的基础。

此外, 利用探测层所得到的测评结果, 最终追溯到场源层, 揭示影响操纵舒适性的可控影响因素, 例如机器的设计参量和操纵者的操控策略等, 可以从这些可控因素入手优化人机系统操纵舒适性。

2.3 分布特性

操纵力感知场的分布特性是指由场源特征所决定的场强在场域中的分布特性, 以及由各局部场强所决定的局部舒适性对于整体操纵舒适性的贡献度。操纵力感知场的场域是指人体中能够感知操纵力的部位, 即人机接触部位的皮层以及与操纵发力相关的肌肉。人体不同部位的操纵力共同构成场源, 其分布位置或作用方向不同, 影响着局部场强即身体局部的接触力和肌肉力感知强度, 进而影响局部舒适性, 而整体的操纵舒适性是基于各局部舒适性, 依据场强叠加原理得出的整体感受。

操纵力感知场的分布特性主要体现在以下几方面。

(1) 场源具有一定的分布特性, 即不同的人机接触部位所受接触力大小、方向、受力面积以及不同肌肉的张力有所差异。

(2) 人体不同部位的感受器的敏感程度不同, 感知阈值及痛阈有所差异; 并且, 对于不同类型的操纵作业, 安全、高效的操作对反馈刺激及感知强度的需求不同。

(3) 各局部舒适性对于整体舒适性的贡献度存在差异。一方面, 操纵过程中持续时间长、频次多的作业动作所涉及的操纵力对整体舒适性的影响程度更大; 另一方面, 不舒适的局部感受更易引起操纵者的注意, 对整体舒适性体验的贡献度更大。

鉴于以上操纵力感知强分布特征, 构建既能反映局部操纵力及其感知强度的差异, 又能反映其对整体的操纵舒适性的贡献度的模型, 是实现操纵舒适性度量及优化的基础。

3 基于操纵力感知场的舒适度模型

3.1 场源参量

影响操纵舒适性的机与人的多方面特征因素构成场源, 将由各因素共同决定的操纵力特征参量作为场源核心参量, 包括接触力和肌肉力特征参量。

接触力的方向及受力面积存在差异, 因此, 根据与接触面垂直的法向接触分力 F_{hi} 、平行于接触面的切向分力 F_{ti} 和接触面积 S_i 计算法向接触应力 σ_{hi} 和切向接触应力 σ_{ti} , 以之作为接触力特征参量。

肌肉力只能是沿着肌肉拉伸的方向, 但其所作用的不同肌肉的粗壮程度有所差异, 因此, 根据肌肉力 F_j 和肌肉的生理截面积 P_j 计算肌肉应力 σ_j , 以之作为肌肉力特征参量。

各特征参量的计算方法如式(1)所示, 其中, i 、 j 分别指代某项操纵作业所对应的 m 处人机接触部位和 n 个主要参与发力的骨骼肌或肌群。 $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

$$\sigma_{hi} = \frac{F_{hi}}{S_i} \quad \sigma_{ti} = \frac{F_{ti}}{S_i} \quad \sigma_j = \frac{F_j}{P_j} \quad (1)$$

接触力和接触面积可直接测得; 肌肉的生理截面积可以参照人体解剖学数据, 并依据不同人体的体格强壮度进行调整; 而肌肉力的计算较为复杂, 较为广泛采用的方法是通过对人体骨骼与肌肉进行三维建模, 将关节简化为理想的铰链或球窝, 并沿着施力方向将肌肉简化为若干根力线单元, 进而根据操纵者肢体方位及所受外力数据, 利用逆向动力学结合静态优化方法得到近似计算结果。根据图3所示的原理, 利用开源的人体骨骼建模与分析软件 Opensim 能够较为便捷地计算肌肉力。

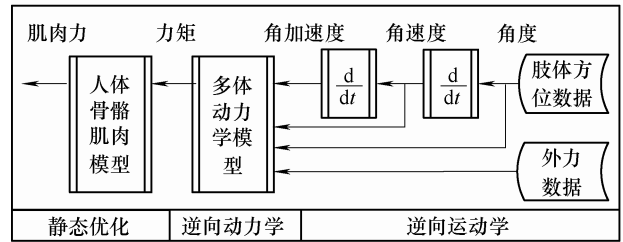


图3 肌肉力计算方法流程

为了便于对接触力和肌肉力特征参数进行综合分析, 需要对其进行归一化处理, 引入对应于接触部位 i 的接触应力痛阈 $\sigma_{hi\max}$ 和 $\sigma_{ti\max}$ 以及肌肉 j 所能承受的最大应力 $\sigma_{j\max}$, 最终以归一化的结果 $\sigma_{hi}/\sigma_{hi\max}$ 、 $\sigma_{ti}/\sigma_{ti\max}$ 和 $\sigma_j/\sigma_{j\max}$ 作为场源参量。

3.2 场强参量及其与场源参量的关系

以与法向接触应力相对应的感知强度 U_{hi} 和与切向接触应力相对应的感知强度 U_{ti} 定量描述触觉, 以与肌肉应力相对应的感知强度 V_j 表征本体感觉。 U_{hi} 、 U_{ti} 和 V_j 即为场强参量, 直接决定操纵者的舒适性水平。

由特定的刺激引起的人体感知强度可以通过史蒂文斯幂定律^[20]来计算, 感知强度 ψ 和刺激强度 φ 的关系式为

$$\psi = a(\varphi - \varphi_0)^b \quad (2)$$

该模型能够用以描述场源参量与场强参量的

关系,即操纵力与其感知强度的关系。其中, a 是一个常数, φ_0 是感知阈值,指数 b 描述感知强度随刺激强度的变化速率。将式(2)转化为式(3),从而可以通过线性回归来确定变化速率 a 和常数 b 。

$$\lg \psi = a \lg(\varphi - \varphi_0) + \lg b \quad (3)$$

将场源参量 $\sigma_{hi}/\sigma_{hi\max}$ 、 $\sigma_{ti}/\sigma_{ti\max}$ 和 $\sigma_{ji}/\sigma_{ji\max}$ 作为引起操纵力感知的刺激参量,分别代入式(2)中的 φ ,计算得到对应 ψ 的接触力感知强度值 U_{hi} 、 U_{ti} 和肌肉力感知强度值 V_j 。

3.3 操纵舒适性探测模型

前文已经建立了场源参量与场强参量的关系模型,下面需要探索场强参量与操纵舒适性之间的关系。由接触力感知强度及肌肉力感知强度决定的特定接触部位和肌肉的舒适性,是局部舒适性;而操纵舒适性是依据操纵力感知场的分布特性整合各局部舒适性得到的整体舒适性。

3.3.1 局部舒适性

设局部舒适性指数 CI_k ,用以定量描述局部舒适性, k 为感知部位编号。针对操纵力感知强度与舒适性之间的关联特性,采用具有钟形曲线特征的高斯势函数描述二者的映射关系,如式(4)所示

$$CI_k = \exp\left[-\frac{(\psi - \psi^*)^2}{c^2}\right] \quad (4)$$

式中, ψ^* 为根据特定作业任务要求设定的操纵力感知强度适宜标准,可根据操纵偏好及作业表现进行测定和调整。 c 为与 ψ^* 相关的参量,表示舒适性随感知强度变化的速率。设感知强度为0时 CI_k 的值为0.1,则根据式(4)可得

$$c = \frac{\psi^*}{\sqrt{\ln 10}} \quad (5)$$

3.3.2 整体舒适性

根据操纵力感知场的分布特性,对各局部舒适性指数进行加权聚合,得到整体舒适性指数 CI ,用以面向具体的作业动作乃至完整的作业过程描述操纵舒适性。第2.3节中总结的前两点分布特性已在场源和场强参数中得以体现,第三点分布特征可以通过构建局部舒适性对于整体舒适性的贡献度参量 ω_k 来描述,如式(6)所示

$$\omega_k = \frac{\varepsilon_k / CI_k}{\sum_{k=1}^{m+n} (\varepsilon_k / CI_k)} \quad (6)$$

式中, ε_k 为时间系数,根据一个操纵动作周期中特定操纵力持续的时间 T_k 以及操纵过程中该操纵动

作发生的频次 t_k 确定,如式(7)所示

$$\varepsilon_k = \frac{T_k t_k}{\sum_{k=1}^{m+n} (T_k t_k)} \quad (7)$$

最终,整体舒适性可表述为

$$CI = \sum_{k=1}^{m+n} (\omega_k CI_k) \quad (8)$$

利用贡献度参量对形式统一的势函数进行赋权,能够很方便地对整体的操纵舒适性及其感知分布特征进行定量描述,体现了借助场模型来研究人机系统操纵舒适性的优势。

4 实例分析

运用上述方法,由3位测评者对10种不同车型的刹车踏板进行操纵舒适性测评试验。利用压力传感器(1 000 N)测量操纵过程中的接触力即踏板力,由于该力垂直于踏板,因此该实例中不必考虑切向接触应力;利用基于六轴陀螺加速度仪(MPU6050)开发的肢体姿态检测系统^[21]实时监测下肢动作,使用绷带将三个陀螺加速度仪固定在右腿的大腿和小腿外侧以及右脚背上,如图4所示。按照统一的操纵流程每人每车踩踏10次后进行主观舒适性评级,按“舒适”、“较舒适”、“一般”、“较不舒适”、“不舒适”归为5个舒适度等级。

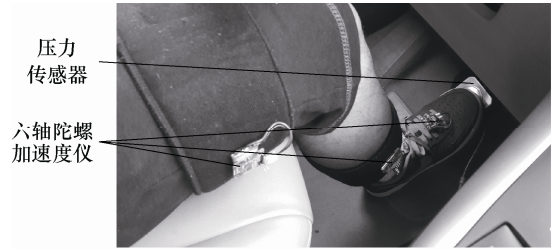


图4 汽车刹车踏板操纵舒适性测评试验

ANDERSON 等^[22]在研究人体步行过程中的肌肉力时,模拟实际的人体生理结构及运动特征构建了下肢骨骼肌肉模型,通过形状及尺寸比例相对应的刚体及运动副组合模拟下肢骨架,并将各肌肉简化为两端附着在骨架上且仅承担轴向拉力的弹性元件,驱动骨架运动。以该模型为基础,根据3名测评者的人体测量数据分别调整对应的模型尺寸参量,进而依照图3所示方法,借助Opensim软件进行运动仿真与计算。最终,针对踏板操纵过程中人体下肢主要的发力肌肉(图5),利用操纵过程中实测的踏板力、肢体方位、受力面积等数据算法向接触应力和各肌肉应力。

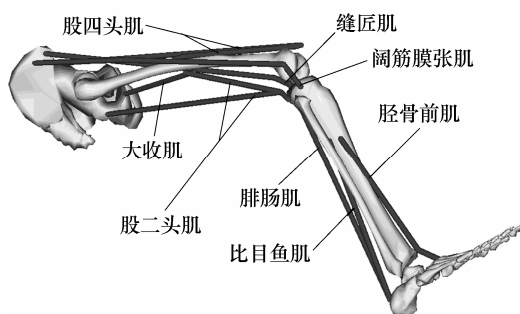


图5 人体右下肢骨骼肌肉简化模型

针对操纵过程中力的大小及方向实时变化的问题, 对其作简化处理, 即取测评者以最小的发力完成操纵动作过程中的法向接触应力和肌肉应力极大值的归一化结果作为场源参量, 最终计算得到的刹车踏板整体操纵舒适性指数 CI 以及主观评级结果见表 1。

表 1 刹车踏板操纵舒适性测评结果

车号	测评者 A		测评者 B		测评者 C	
	CI	评级	CI	评级	CI	评级
1	0.40	较不舒适	0.32	一般	0.35	较不舒适
2	0.88	舒适	0.85	舒适	0.79	较舒适
3	0.47	较舒适	0.50	一般	0.51	一般
4	0.35	较不舒适	0.37	较不舒适	0.32	较不舒适
5	0.50	一般	0.45	一般	0.49	较舒适
6	0.25	较不舒适	0.21	不舒适	0.18	不舒适
7	0.45	一般	0.48	一般	0.55	一般
8	0.67	一般	0.70	较舒适	0.65	较舒适
9	0.95	舒适	0.88	较舒适	0.93	舒适
10	0.78	较舒适	0.75	一般	0.70	一般

将根据三名测评者的刹车踏板操纵测试计算得到的 CI 与其主观评级结果对比如图 6 所示, 在图中分别以三种不同的标记点表示。

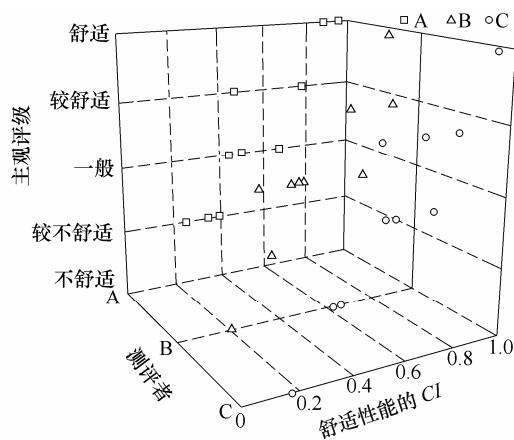


图6 测评结果散点图

对舒适度评级进行赋值, 由“不舒适”到“舒适”分别取 1 至 5 的整数, 针对 A、B、C 三名测评者, 分别对 CI 和赋值后的评级进行相关性分析,

所得结果为如下: 测评者 A, Pearson 相关系数为 0.891, 对应的显著性为 5.36×10^{-4} ; 测评者 B, Pearson 相关系数为 0.848, 对应的显著性为 1.94×10^{-3} ; 测评者 C, Pearson 相关系数为 0.899, 对应的显著性为 3.98×10^{-4} 。由此可见, 通过模型求解得到的整体操纵舒适性指数与主观评级结果具有较高的一致性。

5 结论

(1) 利用场模型研究操纵舒适性, 将人和机器的多方面因素与操纵力相关联, 基于操纵力及其感知强度客观、定量地测评操纵舒适性, 借鉴了人工势场思想、人体生物力学分析技术以及传统的舒适度建模方法, 最终形成即能描述局部舒适性, 又能表征整体舒适性的综合度量体系。

(2) 对刹车踏板操纵舒适性测评的实例研究表明, 该方法能够作为主观评价的有效补充。模型基础参量是接触力和肌肉力, 可以针对不同的动作及不同的作业对象构建模型, 因此, 该方法具有较强的普适性。

(3) 以该方法为基础, 可以进一步研究机器和人的特征因素对操纵力的影响, 进而构建各影响因素与操纵舒适性指数的映射模型, 并将其作为目标函数, 为机电产品设计及操控策略优化提供指导。

参 考 文 献

- [1] 滕弘飞, 王奕首, 史彦军. 人机结合的关键支持技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 1-9.
TENG Hongfei, WANG Yishou, SHI Yanjun. Key supporting techniques of human-computer cooperation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 1-9.
- [2] JIA D W, BHATTI A, NAHAVANDI S, et al. Human performance measures for interactive haptic-audio-visual interfaces[J]. IEEE Trans, Haptics, 2013, 6(1): 46-57.
- [3] HANSON A L, WIENHOLTB W, SPERLING C L. A control handling comfort model based on fuzzylogics[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2003, 31(2): 87-100.
- [4] 杨晓明, 邱清盈, 潘双夏, 等. 基于 Hausdorff 距离的摩托车制动器操纵舒适性优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 170-173.
YANG Xiaoming, QIU Qingying, PAN Shuangxia, et al. Optimization design method for motorcycle brake handling comfort based on Hausdorff distance [J].

- Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 170-173.
- [5] LEE J, FERRAIUOLO P, TEMMING J. Measuring seat comfort[J]. Automotive Engineering, 1993, 101(7): 25-30.
- [6] ZACHER I, BUBB H. Strength based discomfort model of posture and movement [C/CD]/SAE International, 2004.
- [7] YANG Yiyong, LIU Yahui, WANG Man, et al. Objective evaluation method of steering comfort based on movement quality evaluation of driver steering maneuver[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(5): 1027-1037.
- [8] 任金东, 王登峰, 王善坡, 等. 适合重型商用车人机设计的数字人体模型研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 69-75.
- REN Jindong, WANG Dengfeng, WANG Shanpo, et al. Research on digital human model system used for heavy commercial vehicle ergonomic design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 69-75.
- [9] VIGOUROUX L, ROSSI J, FOISSAC M, et al. Finger force sharing during an adapted power grip task[J]. Neuroscience letters, 2011, 504(3): 290-294.
- [10] KONG Y K, KIM D M, LEE K S, et al. Comparison of comfort, discomfort, and continuum ratings of force levels and hand regions during gripping exertions[J]. Applied Ergonomics, 2012, 43(2): 283-289.
- [11] WANG X, LE BRETON-GADEGBE KU B, BOUZON L. Biomechanical evaluation of the comfort of automobile clutch pedal operation[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2004, 34(3): 209-221.
- [12] LIU Yahui, JI Xuewu, HAYAMA R, et al. A novel estimating method for steering efficiency of the driver with electromyography signals[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 460-467.
- [13] EKSIOGLU M, KIZILASLAN K. Steering-wheel grip force characteristics of drivers as a function of gender, speed, and road condition[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008, 38(3-4): 354-361.
- [14] EKSIOGLU M. Endurance time of grip-force as a function of grip-span, posture and anthropometric variables[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2011, 41(5): 401-409.
- [15] KUIJT-ECERS L F M, VINK P, De LOOZE M P. Comfort predictors for different kinds of hand tools: Differences and similarities[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37(1): 73-84.
- [16] 孙贤安, 吴光强. 双离合器式自动变速器车辆换挡品质评价系统[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 146-151.
- SUN Xianan, WU Guangqiang. Shifting quality evaluation system for dual clutch transmission vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 146-151.
- [17] KROEMER H E K, KROEMER H J, KROEMER-ELBERT K E. Engineering physiology: Bases of human factors engineering/ergonomics[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [18] 李铁柱, 李光耀, 顾纪超, 等. 汽车乘员舱安全性与舒适性多学科设计优化[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 138-145.
- LI Tiezhu, LI Guangyao, GU Jichao, et al. Multidisciplinary design optimization of passenger compartment safety and comfort[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 138-145.
- [19] De LOOZE M P, KUIJT-ECERS L F M, Van DIEEN J. Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures[J]. Ergonomics, 2003, 46(10): 985-997.
- [20] AUGUSTIN T. Stevens' power law and the problem of meaningfulness[J]. Acta Psychologica, 2008, 128(1): 176-185.
- [21] 刘正琼, 胡丽莉, 唐璇, 等. 基于虚拟仪器的肢体姿态检测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 907-913.
- LIU Zhengqiong, HU Lili, TANG Xuan, et al. Research of limb posture detection system based on virtual instrument[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 907-913.
- [22] ANDERSON F C, PANDY M G. Dynamic optimization of human walking[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2001, 123(5): 381-390.

作者简介: 刘明周, 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为人机工程、制造过程监测与控制。

E-mail: liumingzhou0551@163.com

张淼(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为人机工程。

E-mail: hfutzm@163.com