

DOI:10.11918/201901045

面向站立姿态的操纵舒适性评价模型研究

赵 川,余隋怀,陈 晨,寸文哲,王 龙

(陕西省工业设计工程实验室(西北工业大学),西安 710021)

摘 要:良好的操纵舒适性不仅减少工作中的疲劳,而且提高工作效率.针对站立姿态下操纵舒适性评价的不确定性和模糊性,构建基于 T-S 模糊神经网络(Takagi-Sugeno Fuzzy Neural Network, T-S FNN)的站立姿态操纵舒适性评价模型.通过实验,收集模型的训练和测试数据.选取 20 名被试者参与本次实验,实验要求每个被试者完成 100 项目操纵任务,共有 4 个面板位置,每个面板上有 25 个圆形贴纸,代表不同操纵位置.在实验过程中分别记录被试者的关节角度、脚底压力、人体尺寸、操纵目标位置及主观舒适性数据.选取 90% 的实验数据对模型进行训练,10% 的实验数据对所提出的方法进行验证,并与 BP 神经网络模型预测的主观舒适性进行比较,结果表明:T-S FNN 模型具有较小的均方根误差(1.2 VS 4.5).最后随机选取 15 组不同操纵任务进行检验,结果表明:该方法的预测值和实际值相关性系数为 0.962($P < 0.01$),与快速上肢评估(RULA)计算结果的相关性系数为 0.833($P < 0.01$),与工作体位分析系统(OWAS)计算结果的相关性系数为 0.694($P < 0.01$),说明该方法能够良好的反应真实结果.

关键词:操纵舒适性;站立姿态;T-S 模糊神经网络;人机工效

中图分类号: TB47 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)05-0194-07

Research on the control handing comfort evaluation model for standing posture

ZHAO Chuan, YU Suihuai, CHEN Chen, CUN Wenzhe, WANG Long

(Shaanxi Engineering Laboratory for Industrial Design (Northwestern Polytechnical University), Xi'an 710021, China)

Abstract: Good control handing comfort not only reduces fatigue but also improves efficiency. Aiming at the uncertainty and fuzziness of control handing comfort evaluation, this study builds up a control handing comfort evaluation model for standing posture based on Takagi-Sugeno Fuzzy Neural Network (T-S FNN). Training and testing data were collected during the experiment. Twenty adult test subjects were asked to complete 100 different operation tasks. Test subjects' joint angle, foot pressure distribution, anthropometric dimensions, target position, and subjective comfort rating were collected during the experiment. The proposed model was trained using 90% of the data obtained from the experiment and was verified by the remaining 10% experiment data. It was then compared with the subjective comfort rating estimated by BP Neural Network. Results show that the proposed model had smaller root mean square error than BP Neural Network (1.2 vs. 4.5). Subsequently, 15 groups of different tasks were randomly selected to further test this model. Results show that the correlation coefficients between the value obtained by this model and the actual value, and those obtained by the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) and the Ovako Working Posture Analysing System (OWAS) were 0.962 ($P < 0.01$), 0.833 ($P < 0.01$), and 0.694 ($P < 0.01$), respectively. This study demonstrates that the proposed model is effective in estimating control handing comfort.

Keywords: control handing comfort; standing posture; T-S Fuzzy Neural Network (T-S FNN); ergonomics

站立姿态下手部的操纵舒适性是人机工效主要的评价内容之一.良好的操纵舒适性不仅减少操作人员疲劳,提高动作协调性和灵活性,而且影响生产效率和产品质量^[1].目前,国内外针对操纵舒适性

进行了大量研究,发现操纵人员的年龄、性别、操纵位置及操纵力等因素是影响上肢疲劳及肌肉负荷的重要因素^[2-4],而且采用固定站立操作姿势的工作人员肌肉骨骼损伤检出率高于采用坐姿操作的人员^[5].

理想情况下设计师应该了解用户不同操纵位置相对应的舒适性,提高产品的设计质量.对于舒适性评价主要有两类方式:主观和客观评价^[6].主观评价主要是获取被试者的心理感受,结果受被试者影

收稿日期:2019-01-08

基金项目:工信部民机专项(MJ-2015-F-018);高等学校学科创新引智计划 B13044

作者简介:赵 川(1988—),男,博士研究生;

余隋怀(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者:余隋怀,ysuihuai@vip.sina.com

响较大^[7]. 客观评价是指借助相关标准、设备和评价方法对心理或生理参数进行测量^[6].

虽然 NASA^[8] 和 Society of Automotive Engineers (SAE)^[9] 提供的标准非常全面,但是规定的可达域和舒适操作范围比较宽泛,在工程应用中有一定局限性^[10]. 表面肌电图技术(sEMG)和脑电图(EEG)等能够精确获取被试者的数据,但通常受场景和经费限制^[11-12]. 随着数字人体模型(Digital human models, DHMs)越来越多地应用于工程领域,良好的舒适性预测模型也是该类工具的主要期望功能之一. 因此,将主观舒适度问题量化之后再行数学建模,形成一套客观有效的舒适度评价方法具有重要意义.

文献[13]通过上肢关节力矩的动态变化值和上肢主要肌力变化量来分析舒适性,但是只考虑了三个关节角度,而且没有验证模型的精确性. Kolich M 等^[14]利用压力特征量和人体测量学量建立了舒适度评价的多元线性回归模型和神经网络预测模型. Kee^[15]基于主观舒适性提出了 3D iso-comfort 舒适性曲面,通过关节角度建立回归模型分析主观舒适性,可以对桌面控制装置进行评价,但是只考虑了三个关节角度(肩部、肘部、手部),因此不能对多自由度的姿势进行分析. 基于数据驱动的评价方法被大量提出. 沈阳^[16]等采用线性回归方法,建立了微商车在四种路况(如:沥青、水泥、砂石和颠簸)下的不舒适度预测模型. 文献[17]通过实验,收集被试者操纵姿势、目标位置、人体尺寸和主观舒适性数据,并利用实验数据建立舒适性预测模型. 类似方法也被应用于汽车内饰评价和坐姿操纵舒适性评价^[18-19].

由于人体姿势、运动控制以及主观评价的高变异性,通过实验方法研究操纵舒适性预测模型是非常有效的方法,但是目前对于站立姿势下的舒适性评价研究较少. T-S 模糊神经网络(Takagi-Sugeno Fuzzy Neural Network, T-S FNN)作为一种将模糊逻辑与神经网络有机结合的系统,具有较强的容错能力和自适应学习性能,被广泛应用于处理各种不确定性和模糊性问题^[20],恰好符合主观舒适性预测问题不确定性、模糊性的需求. 鉴于此,本文针对站立姿态下,基于 T-S 模糊神经网络建立手部操纵舒适性评价模型,该模型输入参数为操纵目标位置、关节角度、人体尺寸及脚部压力数据,输出参数为舒适性得分.

1 站立操纵作业研究对象

用户在站立姿态下操纵产品过程中涉及用户本

身、产品和操纵环境,三者共同构成典型人机系统. 在作业过程中,人的感知包含了对自身感知(即本体感觉)、触觉、视觉、听觉以及其他方面的知觉,多种知觉共同形成综合感知特征决定着舒适性.

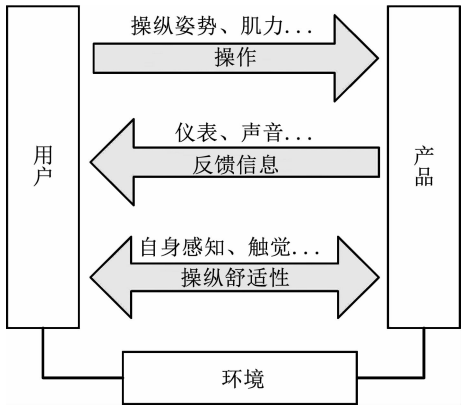


图1 人机关系示意

Fig. 1 Schematic illustration of the human machine system

人要改变机器的运行状态,需要通过手或脚施加力于产品的操纵装置,对于操纵作业而言,其主要形式是操纵力,而操纵姿势直接关系到操纵力^[21]. 机器对于用户具有反馈作用,主要通过仪表显示变化以及警报装置的声音提示等方式,引起人相应的感知,使用户能够了解产品的实时运行状态,以便完成作业任务. 此外,人和产品都处在一定作业环境中,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产品的运行产生影响,如图1所示. 在操纵过程中,由于操纵目的和产品运行状态在不断变化,故上述过程形成持续运行的闭环反馈模型. 本研究主要对模型中产品位置及操纵姿势变化引起的感知变化进行预测.

2 操纵舒适性实验

根据上述分析,建立操纵舒适性分析评价模型首先需要获取与舒适性相关的用户、产品及操纵环境等数据. 20名右手利者参与了本次实验,其中女性11名、男性9名. 根据《中国成年人人体尺寸 GT 10000-88》,男性身高所占百分位数为50%~95%,女性身高所占百分位数为40%~99%,身体测量数据见表1.

为了分析不同操纵位置对用户舒适性的影响,25个圆形贴纸用来代表不同的操控位置. 圆形贴纸的直径为3 cm,5行、5列均匀排列于塑料板上,每个圆形贴纸之间的间距均为20 cm. 被试者要求自然站立,向前伸出右臂,上臂与躯干为90°,肘关节与肩部保持水平. 调整塑标板位置使中指指尖触碰到第3行、第3列圆形贴纸的中心,此位置为被试者最大操纵范围为B3. 在此基础上,增加塑料板水平

距离 10 cm 为 B4;减少水平距离 15 cm 为 B2;减少水平距离 30 cm 为 B1,如图 2 所示. 目标中心位置

根据每个被试者肩高和肩部到中指指尖的长度来决定.

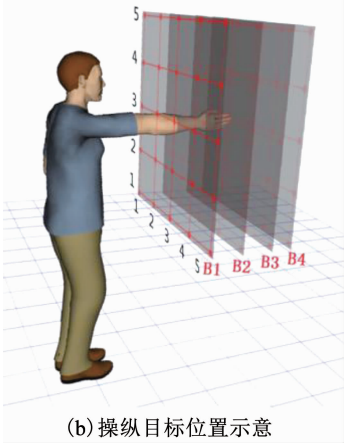
表 1 被试者人体测量数据

Tab.1 Test subjects' anthropometric dimensions

性别	年龄/ yrs	人数	身高/ cm	体重/ kg	肩高/ cm	立姿举高/ cm	侧面手臂长/ cm	肩部指尖长/ cm	坐高/ cm	坐姿下肢长/ cm
男	25.6 ± 2.5	9	176.7 ± 5.1	73.6 ± 8.9	146.0 ± 6.6	219.5 ± 9.2	87.1 ± 2.9	86.1 ± 4.5	102.0 ± 14.5	107.3 ± 4.3
女	24.3 ± 3.2	11	164.6 ± 7.4	50.9 ± 6.7	130.9 ± 15.8	202.9 ± 10.6	78.6 ± 4.9	79.4 ± 5.7	87.9 ± 2.4	98.6 ± 11.0



(a) 实验过程



(b) 操纵目标位置示意

图 2 操纵舒适性实验

Fig. 2 The experiment of control handing comfort

实验开始后,被试者根据实验员的指示,用食指点击圆形贴纸中心,并保持 5 s. 点击过程中被试者可以自由弯腰、调整肩部和肘部来完成操作. 但是不能调整站立位置和目标位置. 塑料板和圆形贴纸的点击顺序都是随机决定,首先随机决定塑料板位置,然后随机决定要点击圆形贴纸的位置. 一个点击任务完成后被试者需要休息 1~2 分钟,然后进行下次点击实验. 被试者一共需要完成 100 次操纵任务(5 行×5 列×4 个塑料板位置).

每次点击实验结束后,被试者要求完成 CP-50 (10)主观不舒适性问卷调查^[22]. 问卷从 0 分~5 分,分成 6 个类别,分别表示极端不舒适、非常不舒

适、不舒适、中等、舒适和非常舒适. 每个类别又细分成 10 个得分,得分低于 10 表示极端不舒适. 实验开始前被试者需要熟悉该问卷.

实验过程中将不同颜色的贴片放置于被试者右侧的主要关节部位(颈部、肩部、上臂、下臂、手腕、腰部和腿部). 利用 1 台 SONY 摄像机 (HDR-CX510)进行拍摄,将摄像机放置在被试者右侧,观测角度与矢状面垂直,拍摄被试者整个身体的运动姿势. 将视频数据导入 Tracker (4. 11. 0, Open Source Physics)获取关节角度运动轨迹^[23],根据夹角计算公式获取关节角度,如图 3 所示.

采用压力座垫 (Body Pressure Measurement System, Tekscan),不间断地记录脚部体压分布. 压力座垫包含 1 024 (32 × 32) 个传感器,厚度为 1.78 mm,测力范围从 0 mmHg 到 250 mmHg (5PSI). 压力座垫检测面积为 471 mm × 471 mm. 在实际测量过程中,体压分布的平均压力 (Mean pressure)和峰值压力 (Maximum pressure)可以用来解释 76.2% 的体压分布数据变化,平均压力梯度 (Mean gradient) 和峰值压力梯度 (Maximum gradient),与被试者主观舒适性具有显著相关性^[24-26]. 因此,本研究选择平均压力、峰值压力、平均压力梯度和峰值压力梯度 4 个体压分布参数对主观舒适性进行预测.

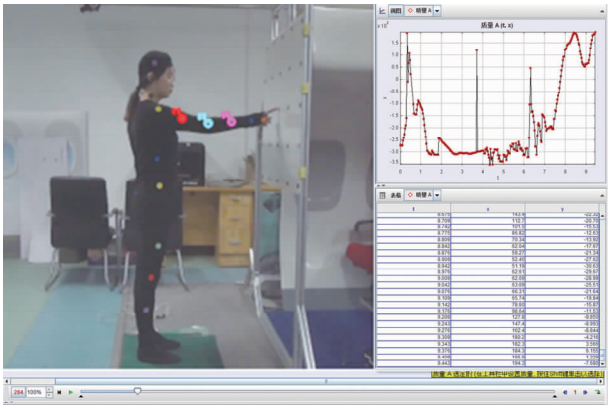


图 3 关节角度计算

Fig. 3 Joint angle calculation

3 数据处理及操纵舒适性模型建立

实验结束后可以得到预测模型相应输入数据和输出数据. 输入数据包括被试者身体测量数据、关节角度和操纵目标位置、压力座垫数据, 输出为主观舒适性得分.

然而在实验过程中, 由于问卷的主观不确定性, 不同被试者对主观舒适性的判断也不同, 所以在相同操纵位置舒适性得分也会有较大差异. 而 T-S FNN 网络结构和参数需要根据样本的差异而自行调整, 需要有较好的自适应能力. 针对上述问题考虑到预测模型的结构辨识复杂、模糊规则选取较困难等弊端, 本研究将箱式图 (box-plot) 引入到数据样本预处理中^[27]. 针对不同被试者和操纵位置的舒适性得分差异, 确定相应参数初始值, 对样本数据进行筛选. 有利于提高 T-S FNN 的效率和精确性, 并增强网络的自适应性.

如图 4 所示. 异常值 (outlier) 为偏离总体数据的数值, 会对模型产生不可靠影响. IQR 为上、下 4 分位之差, 主要用以测量数据的离散程度, 其中包含了 50% 的数据. 上、下 4 分位 (upper/lower quartile, Q3/Q1), 为第 75% 位数和 25% 位数. 内上限 (upper fence) 为 $Q3 + 1.5 * IQR$, 内下限 (lower fence) 为 $Q1 - 1.5 * IQR$. 内上限和内下限以外的值为异常值. 利用 SPSS 对主观舒适性数据进行异常值处理, 结果表明共有异常值 22 个, 剩余 1 978 个数据将用来训练舒适度评价模型.

该模型使用 T-S FNN 模糊推理系统, 具备两组可训练参数. 依据实验数据, 可确定 T-S FNN 各层节点数和隶属度函数的参数初始值, 如图 5 所示. 有 4 类共 21 个输入, 其中身体数据包括: 性别、身高、

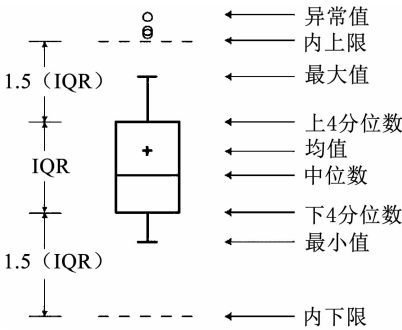


图 4 箱型
Fig. 4 Boxplot

体重、立姿举高、侧面手臂长、肩部指尖长、坐高和坐姿下肢长. 关节角度包括: 颈部、躯干、上臂、下臂、手腕和膝盖的角度. 压力座垫数据包括: 平均压力、峰值压力、平均压力梯度和峰值压力梯度. 操纵目标位置: 塑料板位置和圆形贴纸坐标 X 轴、Y 轴坐标. 每个输入有 2 个隶属度函数. 该模型利用了典型 T-SFNN 结构, 输出端每个端点都具有识别函数, 根据训练数据设定阈值. 给定训练网络的输入输出样本对后, 建立 T-S FNN 模糊推理系统过程如下:

第 1 层: 第 1 层节点的数量 (N) 为每个输入自变量的数量 ($m = 21$) 及相应隶属度函数 ($n = 2$). 输出节点被定义为

$$O_{ij} = \mu_{i,j}(X_i), \quad \text{for } i = 1, m, j = 1, n. \tag{1}$$

式中: μ_{ij} 为第 j 个隶属度函数, 采用高斯函数作为隶属度函数, X_i 定义为

$$\mu(X) = \exp\left\{-\left[\left(\frac{x-c}{a}\right)^2\right]^b\right\}. \tag{2}$$

式中: a, b, c , 为高斯函数的预定参数.

第 2 层: 该层输出代表每个规则的强度. 由输入层决定

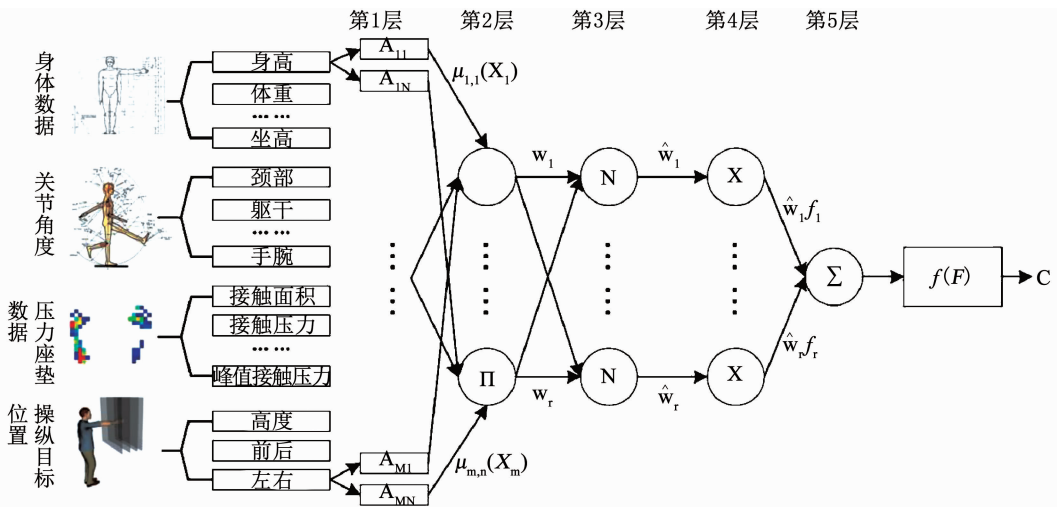


图 5 操纵舒适性预测 T-S FNN 模型

Fig. 5 The handing comfort estimation model based on T-S FNN

$$O_k = W_k = \mu_{1,i}(X_1)\mu_{2,i}(X_{21})\cdots\mu_{m,i}(X_m). \quad (3)$$

第3层:该层将输入节点 k 的权重进行无量纲处理

$$O_k = \hat{W}_k = \frac{W_k}{W_1 + W_2 + \cdots + W_r}. \quad (4)$$

第4层该层输出为 if-then 规则的加权值:

$$O_k = \hat{W}_k f_k. \quad (5)$$

式中: f_k 为第 K^{th} 个模糊规则

$$f_k = \sum_{i=1}^m P_{ij} X_i R_k. \quad (6)$$

如果 $(X_1 \text{ is } A_{11})$ 与 $(X_2 \text{ is } A_{22}) \cdots$ 与 $(X_m \text{ is } A_{mm})$.

那么 $f_k = \sum_{i=1}^m P_{ij} X_i R_k$.

式中: P_{ij} 和 R_k 为后件参数, $i = 1; mj = 1; nk = 1; r$.

第5层:该单节点层根据前4层的权重计算ANFIS最终结果(F)

$$F = \sum_{k=1}^N \hat{W}_k f_k. \quad (7)$$

最终,判别函数 $f(F)$ 根据 F 的数值输出主观舒适性得分 c.

90% (1780 条) 的实验数据用来对模型进行训练,10% (198 条) 的实验数据用来验证模型. T-S FNN 的实现及计算过程通过 Matlab (2016a) 实现,如图 6 所示为操纵目标 X 轴和 Y 轴坐标位置对主观舒适度影响.在模型训练过程中使用反向传播算法与最小二乘法的混合方法,使该模型的前件参数和后件参数在训练过程中都经过了优化.

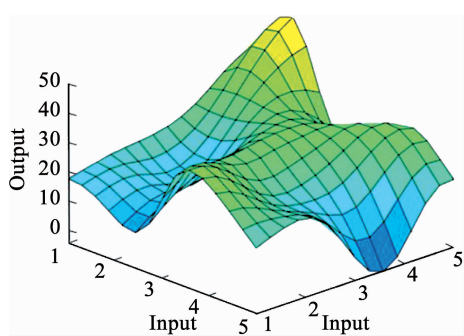


图 6 目标位置对舒适性得分影响

Fig. 6 Effect of target position on comfort rating

最后通过对比该模型的预测舒适性值和实际舒适性得分均方根误差 (REMS) 验证该模型的有效性. RMSE 用来表示实际值 C_{act} 和预测值 C_{est} 差别

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N |C(s)_{act} - C(s)_{est}|^2}. \quad (8)$$

式中: s 为被试者数据索引, $m = 1, 2, \cdots, 198, N$ 为样本数量, $N = 198$.

4 实例分析及性能验证

针对剩余 10% (198 条) 实验数据,利用建立的 T-S FNN 预测模型获取被试者的操纵舒适性参数.如图 7 所示.为了说明 T-S FNN 预测模型的精确性,将该方法与 BP 神经网络的求解方法进行比较.通过 Matlab,在相同运行环境、软件平台及实验数据下,设定 BP 神经网络的最大迭代次数 Epochs = 10 000,网络训练误差 $ET = 10^{-7}$.对操纵舒适性数据进行预测,如图 7 所示.由式(8)计算两种方法的预测值和实际值的差别,结果显示 T-S FNN 预测结果的均方根误差为 1.53,BP 神经网络预测结果的均方差为 4.99,因此 T-S FNN 预测模型能够更好地反应被试者的真实情况.

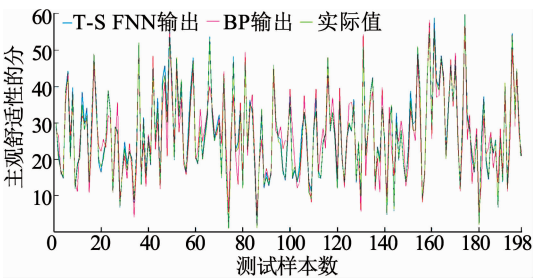


图 7 模型预测得分

Fig. 7 The model's estimation of comfort rating

为进一步分析 T-S FNN 预测模型的有效性,随机选取了 15 组不同操纵任务,利用西门子人机工程仿真软件 JACK^[28,29] 将被试者的关节角度作为输入计算相应的 RULA^[30] 和 OWAS^[31] 的评估结果.并采用 Spearman 等级相关,验证相关性,见表 2.结果表明 T-S FN 的预测值与实际值相关性系数 $r = 0.962$,

表 2 Spearman 相关性分析

Tab. 2 Results of Spearman correlation analysis

变量	操纵 1	操纵 2	操纵 3	操纵 4	操纵 5	操纵 6	...	操纵 10	操纵 11	操纵 12	操纵 13	操纵 14	操纵 15
目标位置	B2(3,3)	B4(3,5)	B3(3,4)	B1(4,4)	B2(5,1)	B4(1,2)	...	B2(3,5)	B3(1,4)	B2(3,3)	B4(1,2)	B2(1,5)	B4(5,2)
舒适性实际得分	33	10	18	26	22	16	...	17	13	35	16	32	19
T-S FNN 得分	35	9	17	28	21	14	...	15	12	37	15	35	16
RULA 得分	3	7	4	3	5	5	...	6	6	3	5	3	4
OWAS 得分	1	2	1	1	1	2	...	2	2	1	2	1	2

与 RULA 得分相关性系数 $r=0.833$, 与 OWAS 得分相关性系数 $r=0.694$, 通过查询《Spearman 秩相关系数临界值表》^[32], 当样本数 $n=15$, 相关性系数 $r>0.654$ 时, 我们有 99% 的置信度认为两个随机变量相关. 所以在 $P=0.01$ 的置信水平上来看, T-S FN 的预测值不仅和实际值是等级相关, 而且与 RULA 和 OWAS 的评估结果显著相关.

5 结论

本文在数据驱动的方法基础上提出一种基于 T-S FNN 的站立姿态操纵舒适性预测模型. 通过站立操纵实验收集主观舒适性得分、目标位置、关节角度、人体尺寸及脚部压力数据. 针对主观舒适性得分差异, 通过箱式图对样本数据进行筛选, 提高了 T-S FNN 的预测效率和精确性, 最后构建了针对站立姿态的 T-S FNN 舒适性预测模型, 从而实现站立姿态下不同操纵位置的主观舒适性预测. 与 BP 神经网络预测模型进行比较, 也可看出 T-S FNN 模型可以对样本精确学习, 具有较强泛化能力, 并且预测精度高. 最后随机选取 15 组不同操纵任务, 采用 Spearman 等级相关, 验证了 T-S FN 的预测值不仅和实际值有显著相关性, 而且与 RULA 和 OWAS 的评价结果显著相关. 以该方法为基础, 可以进一步构建各影响因素与操纵舒适性指数的映射模型, 并将其导入数字人体模型中, 对站立姿态下的操纵舒适性进行预测, 可有效地减少工作中上肢疲劳及肌肉负荷问题. 但是, 由于被试样本量较少、年龄众分布较集中等因素, 使得大量历史数据信息需要不定时维护与更新, 以不断提高预测结果对实际操纵舒适性动态变化的适应性, 下一步将结合手臂和肩部的肌电数据展开更深入研究.

参考文献

[1] 张俊, 孔庆华. 流水线作业姿势的疲劳分析[J]. 现代制造工程, 2009(10): 65
ZHANG Jun, KONG Qinghua. Study of working posture on assembly line based on fatigue analysis[J]. Modern Manufacture Engineering, 2009(10): 65. DOI:10.3969/j. issn. 1671-3133. 2009. 10. 015

[2] CHOW A Y, DICKERSON C R. Shoulder strength of females while sitting and standing as a function of hand location and force direction [J]. Applied Ergonomics, 2009, 40 (3): 303. Applied Ergonomics, 2009, 40(3): 303. DOI:10.1016/j. apergo. 2008. 12. 003

[3] KÖISCH M, BEALL A C, TURK M. The Postural Comfort Zone for Reaching Gestures [J]. Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, 2003, 47(4): 787. DOI:10.1177/154193120304700427

[4] O SULLIVAN L W, GALLWEY T J. Effects of gender and reach distance on risks of musculoskeletal injuries in an assembly task[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2002, 29(2): 61. DOI:10.1016/S0169-8141(01)00049-X

[5] 冯文艇, 张镗琢, 黄红英, 等. 某电解铝厂作业工人慢性肌肉骨骼损伤调查分析[J]. 职业卫生与应急救援, 2016, 34(3): 189
FENG Wenting, ZHANG Liuzhuo, HUANG Hongying, et al. Investigation on chronic musculoskeletal injury of workers in an electrolytic aluminium factory [J]. Occupational Health and Emergence Rescue, 2016, 34(3): 189. DOI:10.16369/j. oher. issn. 1007-1326. 2016. 03. 004

[6] GOLABCHI A, HAN S U, FAYEK A R. A fuzzy logic approach to posture-based ergonomic analysis for field observation and assessment of construction manual operations [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2016, 43. DOI:10.1139/cjce-2015-0143

[7] DAVID G C. Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders [J]. Occupational Medicine, 2005, 55(3): 190. DOI:10.1093/ocemed/kqi082

[8] CHURCHILL E, LAUBACH L L, MCCONVILLE J T, et al. Anthropometric source book. Volume I: Anthropometry for designers [M]. Yellow Springs: National Aeronautics and Space Administration, 1978

[9] Society of Automotive Engineers. Driver hand control reach SAE recommendation practice, SAE J287 [S]. Warrendale, PA: SAE International, 1988

[10] WANG X, TRASBOT J. Effects of target location, stature and hand grip type on in-vehicle reach discomfort[J]. Ergonomics, 2011, 54(5): 466. DOI:10.1080/00140139.2011.564312

[11] BAO S, HOWARD N, SPIELHOLZ P, et al. Two posture analysis approaches and their application in a modified Rapid Upper Limb Assessment evaluation [J]. Ergonomics, 2007, 50(12): 2118. DOI:10.1080/00140130701458230

[12] ZENK R, FRANZ M, BUBB H, et al. Technical note: Spine loading in automotive seating[J]. Applied Ergonomics, 2012, 43(2): 290. DOI:10.1016/j. apergo. 2011. 06. 004

[13] 李兆波, 陶庆, 康金胜, 等. 基于动作捕捉技术的人体上肢运动舒适性评价[J]. 工程设计学报, 2018(3): 338
LI Zhaobo, TAO Qing, KANG Jinsheng, et al. Evaluation of human upper limb motion comfort based on motion capture technique[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2018(3): 338. DOI:10.3785/j. issn. 1006-754X. 2018. 03. 013

[14] KOLICH M, SEAL N, TABOUN S. Automobile seat comfort prediction: Statistical model vs. artificial neural network [J]. Applied Ergonomics, 2004, 35(3): 275. DOI:10.1016/j. apergo. 2004. 01. 007

[15] KEE D. A method for analytically generating three-dimensional isocomnfort workspace based on perceived discomfort [J]. Applied Ergonomics, 2002, 33(1): 51. DOI:10.1016/S0003-6870(01)00047-3

[16] 沈阳, 李豆, 黄煜, 等. 微商车的垂直振动不舒适度模型和实验研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 52
SHEN Yang, LI Dou, HUANG Yu, et al. The discomfort model and experimental research of vertical vibration for micro commercial

- vehicles[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(1): 52. DOI:10.3969/j.issn.1006-1355.2019.01.010
- [17] CHEVALOT N, WANG X. An experimental investigation of the discomfort of arm reaching movements in a seated position[J]. SAE Transactions, 2004. DOI:10.4271/2004-01-2141
- [18] HULKA K, CUBEREK R, SVOBODA Z. Time-motion analysis of basketball players: A reliability assessment of Video Manual Motion Tracker 1.0 software[J]. Journal of Sports Sciences, 2014, 32(1): 53. DOI:10.1080/02640414.2013.805237
- [19] 张森, 张彦如, 陈子昂, 等. 基于驾驶员关节应力的踏板操纵舒适性研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(2): 221
- ZHANG Miao, ZHANG Yanru, CHEN Ziang, et al. A study on pedal handling comfort based on driver's joint stresses[J]. Automatic Engineering, 2018, 40(2): 221. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2018.02.016
- [20] 李聪波, 冯亚, 杜彦斌, 等. 基于改进模糊神经网络的废旧零部件再制造工艺方案决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 728
- LI Congbo, FENG Ya, DU Yanbin, et al. Decision-making method for used components remanufacturing process plan based on modified FNN[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3): 728. DOI:10.13196/j.cims.2016.03.016
- [21] CHOW A Y, DICKERSON C R. Shoulder strength of females while sitting and standing as a function of hand location and force direction[J]. Applied Ergonomics, 2009, 40(3): 303. DOI:10.1016/j.apergo.2008.12.003
- [22] HANSON L, WIENHOLT W, SPERLING L. A control handling comfort model based on fuzzy logics[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2003, 31(2): 87. DOI:10.1016/S01698141(02)00177-4
- [23] HULKA K, CUBEREK R, SVOBODA Z. Time-motion analysis of basketball players: A reliability assessment of Video Manual Motion Tracker 1.0 software[J]. Journal of Sports Sciences, 2014, 32(1): 53. DOI:10.1080/02640414.2013.805237
- [24] WININGER M, CRANCE B A. Assessment of the minimally sufficient spatial sampling in pressure mapping the wheelchair seating interface[J]. Technology and Disability, 2015, 27(4): 119. DOI:10.3233/TAD-150434
- [25] HEFFERNAN C, FREIVALDS A. Optimum pinch grips in the handling of dies[J]. Applied Ergonomics, 2000, 31(4): 409. DOI:10.1016/S0003-6870(99)00064-2
- [26] ZEMP R, TAYLOR W R, LORENZETTI S. Seat pan and backrest pressure distribution while sitting in office chairs[J]. Applied Ergonomics, 2016, 53: 1. DOI:10.1016/j.apergo.2015.08.004
- [27] 黄飞, 张慧. 箱式图在结核病防控工作中的应用[J]. 中国防痨杂志, 2017, 39(4): 329
- HUANG Fei, ZHANG Hui. Application of boxplot in tuberculosis control and prevention[J]. Chinese Journal of Antituberculosis, 2017, 39(4): 329
- [28] MCINNES B, STEPHENS A, POTVIN J. Within and between-subject reliability using classic jack for ergonomic assessments[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Human Modeling: Held As Part of HCI. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, 5620: 653. DOI:10.1007/978-3-642-02809-069
- [29] DE MAGISTRIS G, MICAELLI A, EVRARD P, et al. Dynamic control of DHM for ergonomic assessments[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2013, 43(2): 170. DOI:10.1016/j.ergon.2013.01.003
- [30] MCATAMNEY L, NIGEL C E. RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders[J]. Applied Ergonomics, 1993, 24(2): 91. DOI:10.1016/0003-6870(93)90080-0
- [31] KARHU O, HARKONEN R, SORVALI P, et al. Observing working postures in industry: Examples of OWAS application[J]. Applied Ergonomics, 1981, 12(1): 13. DOI:10.1016/0003-6870(81)90088-0
- [32] Spearman 秩相关系数界值表[EB/OL]. (2014-06-26)[2018-12-31]. <https://wenku.baidu.com/view/ba8471aaef8941ea76e05d0.html>

(编辑 苗秀芝)