

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.042

实体产品操纵舒适性定量测评研究*

刘明周 扈静 李也侗 葛茂根 龚任波

(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

【摘要】 针对实体产品操纵舒适性难以定量评价的问题,从心理和生理角度对操纵机理进行分析,建立可量化的操纵反馈模型,提出操纵舒适性定义。建立关节与体节人体模型,提取连接关节的实际物理量,并生成相关曲线;以力平滑度指标为例,计算其操纵舒适性评分,采用客观逐次比较赋权法确定各指标权重,计算出操纵舒适性指数(I)。最后,构建实体产品操纵舒适性测评系统,并对具有两种操纵装置的典型实体产品进行实际测评,验证了该方法的实用性与有效性。

关键词: 实体产品 操纵舒适性 操纵反馈模型 定量评价

中图分类号: TB18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0205-05

Quantitative Measurement and Evaluation of Entity Product Handling Comfort

Liu Mingzhou Hu Jing Li Yeti Ge Maogen Gong Renbo

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

Aiming at the problem of quantitative evaluation of entity product handling comfort, and based on the analysis of the handling mechanism from psychology and physiology aspects, a quantifiable handling feedback model was built, and the definition of the handling comfort was introduced. With the human model of body joints and segments, the real physical values of connecting joints could be obtained, and the correlative curves were completed. Taking the index of force smoothness as an example, the handling comfort grade was calculated, and the weight of each index was ensured by the method of objective successive comparison, thus the handling comfort index (I) was finally figured out. Finally, a measurement and evaluation system of entity product handling comfort was established. And the representative entity product with two handling devices was measured and evaluated with this system in order to testify the validity and practicability of this method.

Key words Entity product, Handling comfort, Handling feedback model, Quantitative evaluation

引言

操纵舒适性是机电工程与人因工程交叉的前沿课题,突出体现了产品人机环境的优劣,得到国内外研究者的广泛重视^[1~4]。现有研究主要存在两方面问题:着眼于空间位置分析和不同姿态下人体内部应力分析,未对操纵机理及其人-机-环境进行系统和定量研究;采用 CATIA、JACK 等软

件进行三维建模,成本高昂,流程繁琐,故实施范围限于产品设计阶段,不适用于实体产品操纵舒适性测评。

本文对操纵舒适性进行科学描述,并提出实体产品操纵舒适性指数的计算方法,构建实体产品操纵舒适性测评系统,并对具有两种操纵装置的典型实体产品进行实际测评,以验证该研究方法的实用性与有效性。

收稿日期:2010-04-12 修回日期:2010-07-09

* 合肥市重点项目(070205D2)

作者简介:刘明周,教授,博士生导师,主要从事人因工程、制造系统运作与管理 and CIMS 研究, E-mail: liumingzhou0551@163.com

1 操纵舒适性描述

1.1 可量化的操纵反馈模型

产品的操纵过程涉及操纵者、产品与操纵环境,前两者构成典型的人机系统,而操纵环境可被视为系统影响因素。图1为操纵者和产品的抽象。

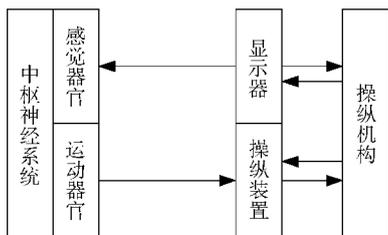


图1 人机系统

Fig.1 Human-machine system

建立如图2所示的可量化操纵反馈模型,继而对产品操纵机理进行量化描述。

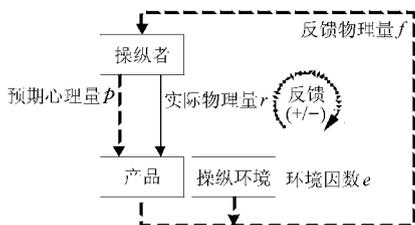


图2 可量化的操纵反馈模型

Fig.2 Quantifiable handling feedback model

该模型可表示为

$$r = \varphi(I, p, f, e) \quad (1)$$

式中 p ——预期心理量,操纵者对操纵过程的反应预期形成的操纵物理量

r ——实际物理量,操纵者对产品实际施加的操纵物理量

f ——反馈物理量,产品依据自身性能等因素对 p 修正而成的操纵物理量

e ——环境因数,人机系统中操纵环境对预期物理量影响程度

I ——操纵舒适性指数

I 表示产品操纵舒适性水平。 $I \in [0, 1]$,其值越大,产品操纵舒适性水平越高。

1.2 操纵机理分析

(1) p 生成

操纵过程开始,操纵者首先产生一定的反应预期^[5],据此生成 p ,此为心理量。

(2) 积极/消极反馈

操纵者首先向产品施加等同于 p 作用的实际物理量 r' ,产品根据 I 和 e 对 r' (代替 p) 进行反馈;在因数 e 可控的条件下,若操纵舒适性较高(表现为较

高的 I),则称之为积极反馈(+),反之则为消极反馈(-);反馈的结果即生成 f ,并反馈至操纵者。

(3) r 修正

根据 f ,操纵者改变初次由 p 确定的实际物理量 r' 值,为了适应产品操纵需要,修正产生新的 r 值,并对产品施加该物理量,实现产品操纵。

在操纵过程中,由于中枢神经系统高级思维活动获得的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。

1.3 操纵舒适性定义

操纵舒适性是指在一定环境因数(e)下,产品对于预期物理量(p)的积极反馈水平。

1.4 实体产品操纵舒适性描述

根据式(1)可用 p, r, f 和 e 表示 I 。然而该方法仅在数学上存在意义,因为对于实体产品, p 为心理量, e 为影响因数,均为模糊量,难以通过测量获得具体数值。

(1) 对于实体产品,通过传感器可采集实际操纵中的 r 物理量(力、位移、力矩和角度等),采集结果可生成待评曲线。

(2) r 的反作用首先发生于与产品接触的人体部位,继而由近及远作用于与之相连的各关节。因此,操纵舒适性应从操纵者全身角度进行研究,即可通过对人体建模,从生物力学角度出发推知若干物理量,如关节应力。藉此可提出相应评价指标,细化评价模型。

(3) 根据 r 的不同物理意义,选用相应的评价指标 C 和标准库 S (如图3所示)。

(4) 各指标之间、各操纵装置之间,通过大量实验逐步确定权重,称之为客观逐次赋权。避免主观权重带来的不确定性。

(5) 计算 I 。

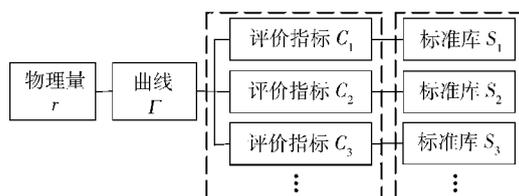


图3 r 与 C, S 对应关系

Fig.3 Corresponding relationship among r, C and S

2 操纵舒适性指数

2.1 关节与体节人体模型

依照生物力学原理建立如图4的关节与体节人体模型。根据 GB/T 17245—2004^[6],人体被划分为8个主要关节和9个主要环节;以 J_1, J_2, \dots, J_8 分别

代表颈、腰、肩、肘、腕、髌、膝和踝等人体关节;以 P_1, P_2, \dots, P_9 分别代表头部、胸部、骨盆、上臂、前臂、手、大腿、小腿和足等人体环节。

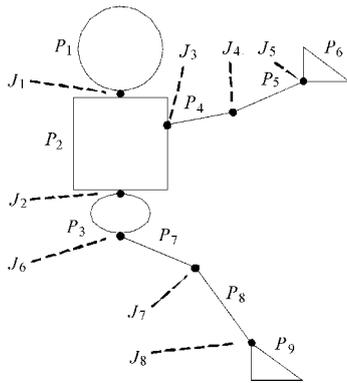


图4 关节与体节人体模型

Fig. 4 Human model of body joints and segments

足(手)与产品直接接触,称之为接触环节;与之相连的踝、膝、髌(或腕、肘、肩),依次称为第一、第二和第三连接关节。表1为本文实例产品分析情况。

表1 实例产品操纵过程环节与关节

Tab. 1 Parts and joints in operation process of example product

序号	操纵过程分类	接触环节	第一连接关节	第二连接关节	第三连接关节
1	踏操纵	P_9	J_8	J_7	J_6
2	拉操纵	P_6	J_5	J_4	J_3

从接触环节到各连接关节,实际物理量依次记为 r_1, r_2, r_3, r_4 (如图5所示)。

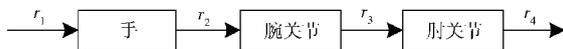


图5 r 对操纵者反作用实际效果(手操纵装置)

Fig. 5 Actual reaction effect of r to manipulator (hand controller)

以踏操纵过程为例,分析踝关节、膝关节的受力状况,受力分析如图6所示。此过程中的实际物理量 r 为脚踏板操纵力。

(1) 踝关节压应力

P_9 受到垂直于足平面方向上的操纵力 r 和自身重力 M_9 ,而 θ_1 为足平面与水平面的夹角。以足平面方向为 x 轴建立平面直角坐标系,两个力关于 x 轴和 y 轴分解,得到 M_{9x} 和 M_{9y} 。其中, M_{9y} 对于足部为轴向施力,在 J_8 踝关节处产生压应力,此时人体依靠肌肉和韧带作用产生的收缩作用,在关节连接的骨骼分布该应力。则

$$M_{9x} = M_9 \cos \theta_1$$

$$M_{9y} = M_9 \sin \theta_1$$

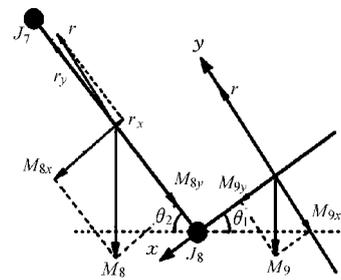


图6 踏操纵过程受力分析图

Fig. 6 Stress analysis of tread operation process

y 轴方向上的合力为

$$r - M_{9x} = r - M_9 \cos \theta_1 \quad (2)$$

综上,踝关节所受压应力为

$$\sigma_8 = \frac{M_{9y}}{S_8} = \frac{M_9 \sin \theta_1}{S_8} \quad (3)$$

式中 S_8 ——踝关节横截面积, m^2

(2) 膝关节压应力

θ_2 为小腿平面与水平面的夹角。根据类似推导,得到膝关节所受压应力为

$$\sigma_7 = \frac{M_{8y} - r_y}{S_7} = \frac{M_8 \sin \theta_2 - r \sin(\theta_1 + \theta_2)}{S_7} \quad (4)$$

式中 S_7 ——膝关节横截面积, m^2

2.2 物理量对应曲线生成

根据不同的 r 类型,曲线可分为直接曲线和间接曲线。

(1) 直接曲线

涉及接触环节的操纵力、角度、行程等。此类 r 可用传感器直接采集。在本文实例中涉及的直接曲线包括:踏操纵力(P_9)、拉操纵力(P_6)、足平面与水平面的夹角(θ_1)、小腿平面与水平面的夹角(θ_2)等(如图7所示)。

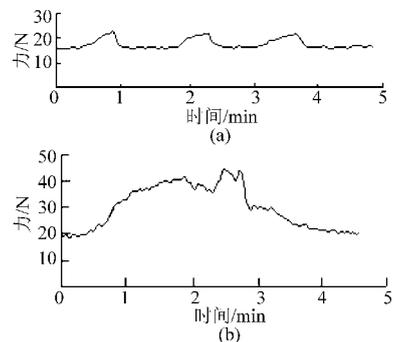


图7 部分直接曲线

Fig. 7 Parts of direct curves

(a) 踏操纵力曲线 (b) 拉操纵力曲线

(2) 间接曲线

涉及各相连关节上的 r ,无法通过传感器直接测量,如关节应力、关节弯矩;另外包括描述操纵舒适性累积效应的若干 r ,如能量消耗。则间接曲线须通过建模而得的表达式,计算生成曲线函数。

$$x = \eta(r) \quad (5)$$

式中 x ——间接曲线函数值

传感器特性决定了 r 为一定时间轴上的离散数值,将各离散点用直线连接,即成曲线 Γ 。

2.3 评价指标确定

设一定时间范围内,采集时刻为 t_1, t_2, \dots, t_l ,待测产品涉及 m 种实际物理量,为 r_1, r_2, \dots, r_m ;则对于第 i 种实际物理量,记其分别对应于各时间点的量值为 $r_i(t_1), r_i(t_2), \dots, r_i(t_l)$,满足 $1 \leq i \leq m$,组成矩阵

$$\begin{bmatrix} r_1(t_1) & r_1(t_2) & \dots & r_1(t_l) \\ r_2(t_1) & r_2(t_2) & \dots & r_2(t_l) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_m(t_1) & r_m(t_2) & \dots & r_m(t_l) \end{bmatrix}$$

对于某 $r_i (1 \leq i \leq m)$,设有 n 种评价指标,记为 $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}$;根据不同评价要求,与各自的标准库 $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}$ 比较,得到各指标操纵舒适性评分为 $I_{i1}, I_{i2}, \dots, I_{in}$,均以百分数表示。

仅重点分析操纵力平滑度指标,其余从略。测量发现,操纵舒适性较差的操纵装置,在操纵力上普遍发生抖动现象;产生原因包括操纵机构设计、振动环境等。从操纵者角度而言,操纵力应满足平顺、光滑变化,因此需要减少抖动。

以操纵力平滑度指标衡量操纵平顺程度,可用李氏指数^[7]衡量力曲线各点奇异性。但是,计算量过大,实测系统难以负担,故采用向径平滑法^[8]替代。

设操纵力为 $r(t_i) (i = 1, 2, \dots, l)$,对应于各采集时刻。记 $(1, r(1))$ 为坐标原点,对于 t_1, t_2, \dots, t_l 依次计算关于原点的向径

$$d_i = \sqrt{(t_i - 1)^2 + (r(t_i) - r(1))^2} \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (6)$$

建立平滑曲线作为标准库 S ,其上各点向径

$$d'_i = (d_{i-1} + 4d_i + d_{i+1})/6 \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (7)$$

对各点评分后归一处理,得到操纵力平滑度指标操纵舒适性评分为

$$I_e = \frac{\sum_{i=1}^l \frac{|d_i - d'_i|}{d'_i}}{l} \quad (8)$$

2.4 客观逐次比较赋权

产品操纵舒适性由各指标操纵舒适性评分综合评判。根据操纵舒适性定义,评分低的指标,操纵舒适性水平较差,应赋以较小权重。利用客观逐次赋权确定权重如下:

(1) 对指标 $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{mn}$, 设定初始权重

$\omega_{11} = \omega_{12} = \dots = \omega_{mn}$, 满足 $\sum \omega_{ij} = 1$ 。

(2) 在正式测量之前,先进行多次试测,生成合理权重。设第 k 次测量时,得到各指标操纵舒适性评分为 $I_{11}, I_{12}, \dots, I_{mn}$;提取第 $k-1$ 次测量后的权重为 $\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{mn}$ 。

(3) 将 $I_{11}, I_{12}, \dots, I_{mn}$ 排序,由小到大分别记 $1, 2, \dots, mn$ 分值;将前 $k-1$ 次测量中每个指标的各自分值逐次累加,分别得到 x_1, x_2, \dots, x_{mn} ,归一化处理

$$\omega_{ij} = \frac{x_i}{k \sum_{j=1}^{mn} x_j} \quad (1 \leq i \leq mn) \quad (9)$$

式中 ω_{ij} ——第 i 种实际物理量第 j 个指标的权重

(4) 多次试测保持各指标权重基本稳定后,可进行同等实验条件下的正式测评。

2.5 操纵舒适性指数计算

采用操纵舒适性指数评价实体产品的整体舒适水平。其计算方法为

$$I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij} I_{ij} \times 100\% \quad (10)$$

3 实体产品操纵舒适性测评系统

实体产品操纵舒适性测评系统包括采集模块、ARM 智能终端、PC 评价中心等(图8)。

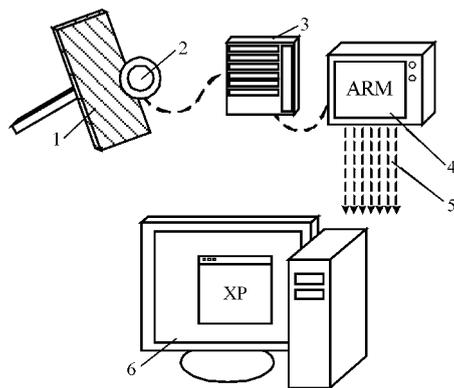


图8 操纵舒适性测评系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of handling comfort measurement and evaluation system

1. 待测产品的踏板操纵装置 2. 传感器 3. 放大电路 4. ARM 采集终端 5. WLAN 数据链路 6. PC 评价中心

由于传感器获得的电信号微弱,放大电路最高可达1000倍率;ARM终端基于低成本的RISC指令处理器,可运行基于.Net CF框架的采集软件,并将采集数据录入数据库;PC评价中心为台式计算机,采用基于.Net框架的评价软件。数据采集结束后,经由WLAN数据链路将数据从ARM终端同步至计算机内,由评价中心实现操纵舒适性定量评价。

4 实例分析

某实体机电产品具有两种典型操纵装置:钢质脚踏板(踏操纵)与钢质手柄(拉操纵)。实例中,采用4种指标进行操纵舒适性评价。根据所述方法进行的操作,得到表2所示结果。根据式(10),计算该

表2 实例测评结果

Tab.2 Results of the example

物理量		C_1	C_2	C_3	C_4
ω	r_1 操纵力(踏)	0.194			
	r_2 操纵力(拉)	0.083			
	r_3 应力(踏)		0.167	0.139	0.222
	r_4 应力(拉)		0.056	0.028	0.111
$I/\%$	r_1 操纵力(踏)	97.0			
	r_2 操纵力(拉)	78.9			
	r_3 应力(踏)		98.2	96.3	99.8
	r_4 应力(拉)		76.4	72.7	80.4

实体机电产品操纵舒适性指数,得 $I = 92.5458\%$ 。测评结果表明该实体机电产品具有较好的操纵舒适性,已经满足该企业内部自定标准($I \geq 80\%$)。

5 结论

(1) 从心理和生理角度,提出可量化的操纵反馈模型,对操纵机理进行科学描述;在此基础上对操纵舒适性概念进行了合理表述。

(2) 建立人体关节力学模型,提取连接关节的实际物理量;以力平滑度指标为例,计算其操纵舒适性评分,采用客观逐次比较赋权法确定各指标权重,避免主观因素造成的评价误差,最终计算出操纵舒适性指数。

(3) 建立实体产品操纵舒适性测评系统,对典型实体产品实现了快速评价,并给出操纵舒适性指数作为最终结果,为改善产品人机环境提供了客观依据。

参 考 文 献

- Adarsh Kumar, Gaikwad Bhaskar, Singh J K. Assessment of controls layout of Indian tractors[J]. Applied Ergonomics, 2009, 40(1):91~102.
- 王睿,庄达民. 基于舒适性分析的舱室手操纵装置优化布局[J]. 兵工学报, 2008, 29(9):1150~1152.
Wang R, Zhuang D M. Layout optimization of cockpit based on human comfort[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(9):1150~1152. (in Chinese)
- 赵亚蕾,刘维平,蒋科林. 面向人机工程的坦克驾驶员三维生物力学模型[J]. 车辆与动力技术, 2007(4):51~58.
Zhao Y L, Liu W P, Jiang K L. A three-dimensional biomechanical human model of tank driver for ergonomics[J]. Vehicle & Power Technology, 2007(4):51~58. (in Chinese)
- Lars Hanson, Willfried Wienholt, Lena Sperling. A control handling comfort model based on fuzzy logics[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2003, 31(2):87~100.
- 张春兴. 现代心理学[M]. 上海:上海人民出版社, 2005.
- GB/T 17245—2004 成年人人体惯性参数[S].
GB/T 17245—2004 Inertial parameters of adult human body[S]. (in Chinese)
- Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8):1627~1639.
- 林瑛. 一种面积守恒的曲线平滑[J]. 现代计算机(专业版), 2003(6):55~57.
Lin Y. Curve smoothing with conservation of area[J]. Modern Computer, 2003(6):55~57. (in Chinese)