

农业装备人机操作界面评价计算方法研究

祁丽霞

(华北水利水电大学 管理与经济学院, 郑州 450046)

摘要 为更加简便地评判农业装备中人机操作界面的设计质量,研究一种农业装备人机操作界面匹配评价计算方法。建立人机操作界面元件位置与操作人体的定量关联模型,并运用牛顿迭代法进行模型求解,形成一种基于操作姿态的人机操作界面评价计算方法。运用该方法对某农业车辆进行计算,结果表明:该方法可以得到与操作者主观评价相吻合的评价结果,从而让设计人员在不建虚拟模型和进行实际操作测试的情况下了解人机界面的匹配情况,减少设计费用、提升装备设计制造质量。

关键词 农业装备;人机界面;操作姿态;评价;计算模型

中图分类号 TB 18 **文章编号** 1007-4333(2014)05-0192-05 **文献标志码** A

Research on the calculation method of agricultural equipment Human-machine interface evaluation

QI Li-xia

(School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract In order to evaluate the design quality of human-machine operation interface for agricultural equipment, a calculation method of matching evaluation was researched in this paper. The quantitative correlation model of human-machine interface element position and operator body size was established, and Newton iterative method was used to solve the model. An agricultural vehicle was used to test the method, and the results showed that the assessment derived from the model was consistent with the drivers' sensation. The method can obtain evaluation results of man-machine interface without building virtual model and the actual operation test. Using the method could effectively reduce the design cost and enhance the quality of equipment design.

Key words agricultural equipment; human-machine interface; operation posture; evaluation; calculation model

人机界面是人与机械装备进行信息交换的通道,在装备的设计和制造中有很重要的作用。随着科学技术的进步,各类装备人机界面的安全性和舒适性越来越受到关注。不合理的人机操作界面容易使人产生动作失误,长期的疲劳累积还会导致操作人员产生职业性病变。Anjelic^[1]在21世纪工业产品设计的新领域中特别强调了人机交互界面的设计。Gotz等^[2]则指出在满足产品功能条件下,还要满足消费者使用舒适度才能称为真正的完美产品。在我国,飞机、舰桥、特种车辆等大型装备均有针对人机界面的相关研究^[3-7],本研究主要针对农用车辆驾驶操作人机界面进行探讨。

操作人机界面本质是操作员肢体与操纵器结合部分中心点的散布区。现有人机界面评价常用方法有2种:一种方法是建立机器和操作者人体的三维模型,通过虚拟模型来评价人机界面的匹配情况^[8-9];另一种方法则是进行大量人机工程试验,通过驾驶员的主观感受评价人机界面的设计质量^[10]。由于我国现在的农机装备设计和制造还没有积累足够的人机匹配数据,同时也因为考虑成本因素,大多数企业并不进行人机界面设计的评价工作,一般是在国家标准规定区域内定出操作元件位置。常用的大型农业装备,如拖拉机、联合收割机、播种机等大

收稿日期:2013-12-05

基金项目:“十二五”国家科技支撑项目(2011BAD20B00)

第一作者:祁丽霞,副教授,博士,主要从事人机工程及工业工程研究,E-mail:qlx@ncwu.edu.cn

多采用坐姿进行，主要参照标准为 GB/T 6235—1997《农业拖拉机驾驶座及主要操纵装置位置尺寸》^[11]。田新民等^[12-13]运用测量学原理，仿照眼椭圆概念，提出了拳椭圆和足椭圆的概念，研究和确定了较国标更为精确的手、脚操作区域范围，这一研究成果也为部分设计者采用。但是我国不同地域人体尺寸差异较大，传统评价方法缺乏与人体的关联性，即使针对同一人机界面，不同的个体主观评价可能也很不一致，极易造成用户满意度不高的情况，制约了农业装备设计质量的提升。笔者认为，无论人体尺寸差异多大，由于解剖学构造，人体关节的舒适活动范围是基本一致的。基于此，本研究拟从人机评价中人（操作员）的角度出发，研究一种基于操作姿态的元件位置评价计算方法，以期在不用建立虚拟模型或进行实际人机匹配测试的情况下，通过计算即可简便得出驾驶操作界面的人机匹配评价结论，从而减少设计费用、提升装备设计制造质量。

1 评价计算坐标系

在坐姿状态下，人的身躯绕髋关节横向水平轴线进行活动，可以选择评价计算的固定点。在评价操作中，由于髋关节是虚点，考虑测算方便，将人体坐标系选至实体点作为评价基准坐标系。

1) 坐标原点：将正常坐姿人体髋关节点向工作座椅纵对称面上表面做铅垂投影，过投影点沿座椅上表面引直线，并做出靠背切面与座椅上表面的交线，将两条线交点作为操作评价的坐标原点。根据 GB 10000—88《中国成年人人体尺寸》^[14]、GB/T 15759—1995《人体模板设计和使用要求》^[15]、GB/T 14779—1993《坐姿人体模板功能设计要求》^[16]的相关数据，考虑人体尺寸和功能修正量，就可以推算出评价坐标原点和人体间的数据关联。

2) 坐标方向：按照右手螺旋定则建立三维直角坐标系，向上为 Z 轴正方向；指向前进方向为 X 轴正方向；指向左侧方向为 Y 轴正方向。

2 评价计算模型

坐姿的操作状态下，手操纵元件决定了人体上身操作姿态，脚操纵元件决定了下肢操作姿态，上下肢操作姿态通过人体髋关节点相连。为使计算清晰，将上身操作姿态和下肢操作姿态进行分别计算。

2.1 下肢操作姿态的计算模型

根据人机工程学原则，脚操纵元件的操纵位置

不能超出腿的可及范围。若超出，评价即为极差。当不超出时，Y 向视图下的驾驶员的下肢操作姿态如图 1 所示。设 (x', y', z') 为评价坐标系中髋关节点坐标， (x, y, z) 为脚操纵元件的足接触点坐标（踏板中心点）， α, β, γ 分别表示大腿、小腿与脚与水平面的夹角。设髋关节至膝关节长为 l_1 ，膝关节至踝关节长为 l_2 ，踝关节至足趾间关节长为 l_3 。根据人体测量学统计数据， l_3 约为 $2/3$ 足长。由图 1 所示的操作姿态几何关系可知：

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x'-l_3\cos\gamma)^2+(z-z')^2} \leq l_1+l_2 \\ x-x'-l_3\cos\gamma = l_1\cos\alpha+l_2\cos\beta \\ z-z' = l_1\sin\alpha-l_2\sin\beta \end{cases} \quad (1)$$

令 $t_1 = x - x' - l_3 \cos \gamma, t_2 = z - z'$ ，得

$$\frac{t_1^2 + t_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} = \cos(\alpha + \beta) \quad (2)$$

所以

$$\alpha + \beta = \arccos\left(\frac{t_1^2 + t_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (3)$$

由式(3)可解得 $\alpha + \beta$ 。令 $\alpha + \beta = \theta$ ，则 $\alpha = \theta - \beta$ ，代入式(3)得

$$t_1 = l_1 \cos(\theta - \beta) + l_2 \cos\beta \quad (4)$$

即

$$(l_1 \cos\theta + l_2) \cos\beta + l_1 \sin\theta \sin\beta - t_1 = 0 \quad (5)$$

式(5)中，除 β 外均为已知量，理论上可解得 β ，进而解得 α 。由此可知，在驾驶员(人)操作踏板时，膝关节角为 $[(90^\circ - \alpha) + (90^\circ - \beta)] = [180^\circ - (\alpha + \beta)] = [180^\circ - \theta]$ ；踝关节角为 $(180^\circ - \beta - \gamma)$ 。

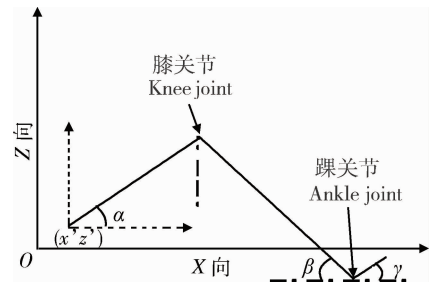


图 1 操控脚踏板时下肢操作姿态(Y 向视图)
Fig. 1 Lower limbs posture when controlling pedal (Y-direction view)

2.2 上身操作姿态计算模型

人体上肢的操纵动作要比腿部灵活的多，操作姿态情况也相对复杂。根据人机工程学的动作经济原则，当元件距离人体较近时，操作者会依靠上臂和前臂的弯曲来接触物体，当元件距离人体较远时，则需要上身前倾补偿手臂长度不足(图 2)。

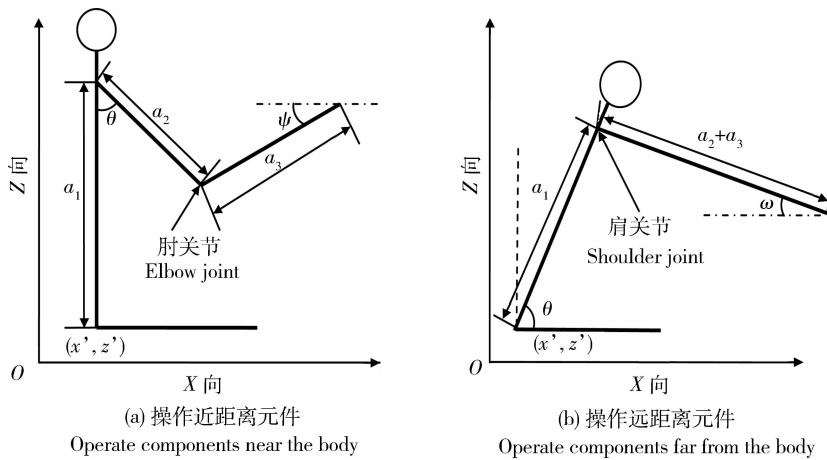


图2 操作手动元件时上身姿态示意图(Y向视图)

Fig.2 Upper body posture when operating manual components(Y-direction view)

在上身操作姿态中,涉及的人体尺寸数据有:肩-髋关节距(a_1),肩-肘关节距(a_2),肘关节至手抓握半径之间的距离(a_3);以手抓握点的位置坐标作为研究操作姿态的运算点,此点坐标可根据手控操作元件安装和其结构尺寸推算,设为 (x, y, z) 。与下肢操作姿态运算相同,髋关节的坐标为 (x', y', z') 。 θ 为上臂与躯干夹角, φ 为前臂与水平面的夹角, ω 为躯干与水平面夹角。图2(a)所示的操作姿态几何关系满足式方程组(6):

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x')^2 + (z-z'-a_1)^2} \leq (a_2 + a_3) \\ x-x' = a_2 \sin\theta + a_3 \cos\varphi \\ a_1 + z' - z = a_2 \cos\theta - a_3 \sin\varphi \end{cases} \quad (6)$$

对其求解:令 $t_1 = x-x'$, $t_2 = a_1 + z' - z$,换元可得

$$\theta - \omega = \arcsin\left(\frac{t_1^2 + t_2^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3}\right) \quad (7)$$

设 $\theta - \varphi = \eta$,则 $\theta = \eta + \varphi$,代回式(6)得

$$(a_2 \sin\eta + a_3) \cos\varphi + a_2 \cos\eta \sin\varphi - t_1 = 0 \quad (8)$$

式(8)中除 φ 外均为已知量,可解得前臂的表征角度 φ ,进而解得肩关节摆角 θ 。因人体结构中肘关节比较灵活,舒适范围大,而且式(6)保证了肘关节活动角不超过 180° ,不需要对肘关节角进行计算。

同理,图2(b)所示的人体姿态几何关系满足方程组(9)

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x')^2 + (z-z'-a_1)^2} > (a_2 + a_3) \\ x-x' = a_1 \cos\omega + (a_2 + a_3) \cos\varphi \\ z-z' = a_1 \sin\omega - (a_2 + a_3) \sin\varphi \end{cases} \quad (9)$$

方程组(9)中,需要确定的未知量为躯干与水平线夹角 ω 和手臂与水平线夹角 φ 。肩关节前摆角与 ω 和

φ 存在线性关系,由其几何位置,可知肩关节前摆角为 $(180^\circ - \varphi - \omega)$ 。结合脚操纵元件的所得的髋关节转角 α ,躯干与大腿的实际夹角为 $(\omega - \alpha)$ 。

令 $t_1 = x-x'$, $t_2 = z-z'$,推导可得

$$\omega + \varphi = \arccos\left(\frac{t_1^2 + t_2^2 - a_1^2 - (a_2 + a_3)^2}{2a_1(a_2 + a_3)}\right) \quad (10)$$

设 $\omega + \varphi = \psi$,则 $\varphi = \psi - \omega$,代回式(9),得

$$\begin{aligned} (a_1 + (a_2 + a_3) \cos\psi) \cos\omega + \\ (a_2 + a_3) \sin\psi \sin\omega - t_1 = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中,仅 ω 为未知数,可以解得 ω ,进而求出 φ 。从而驾驶员的上肢操作姿态可以确定。

本模型可以反映不同人体尺寸下操纵元件的X与Z向安装位置是否适当。操纵元件的Y向安装位置由Z向视图确定,主要影响肢体的内收外展角,下肢Z向投影几何关系简单,上肢则由于人体解剖学非常灵活,内收外展角对人体舒适性影响不大,评价时参照现行国标划分的区域范围评价即可。

2.3 关节角度的求解方法

在本评价模型中,需要求解一元三角方程才能得出人体的操作姿态。由于直接采用解析式求解比较困难,所以采用数值求解方法。根据数值计算理论,若非线性方程 $f(x) = 0$ 有近似根 x_k ,将函数在点 x_k 处进行Taylor展开,忽略高阶导数值,可得

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_k) + f'(x_k)(x-x_k) + O(x_k) \approx \\ &f(x_k) + f'(x_k)(x-x_k) \end{aligned}$$

则方程 $f(x) = 0$ 可以近似地表达为

$$f(x_k) + f'(x_k)(x-x_k) = 0$$

可以证明,假定 x^* 为 $f(x)$ 的一个单根,即 $f(x^*) = 0$

0, 则 $\varphi'(x^*)=0$, 构造原方程的根为 x_{k+1} , 则

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (12)$$

式(12)也即牛顿迭代算法, 按此算法即可逐步逼近并得出方程(5)、(8)、(11)的解, 从而确定出人体的操作姿态。

3 评价实例

为验证设计算法的有效性, 以某型号农用四轮

拖拉机驾驶操纵人机界面为试验样本进行计算, 样本的设计尺寸符合国家标准的相关规定。评价计算采用五级评价制, 计算用人体模型选用年龄在 26~35 岁男性标准人体模型。根据人体关节活动规则将 GB/T15759—1995《人体模板设计和使用要求》^[16]和 GB/T 14779—1993《坐姿人体模板功能设计要求》^[17]中相关关节活动范围角构建模糊评价函数, 对计算得出的关节角进行模糊评价。计算结果如表 1 所示。可见:

表 1 某农用四轮拖拉机驾驶人机界面评价结果

Table 1 Evaluation results of human-machine interface on an agricultural four-wheel tractor

评价元件 Elements	设计尺寸 Design size		评价人体 百分位数 Percentile of human body size	操作姿态计算值 Calculation value of operating posture	计算评价 结论 Conclusion of calculate evaluation	驾驶员评价 结论 Conclusion of drivers evaluation
	项目名称 Items	设计值 Data				
油门踏板 Accelerator pedal	踏板中心坐标/mm Coordinates of accelerator pedal centre	(837, -218.5, -30)	1	膝关节转角 116.8°, 踝关节转角 104.2°	优	很好
	踏板倾角/(°) Angle of accelerator pedal	45	50	膝关节转角 109.1°, 踝关节转角 100.3°	良	良好
			99	膝关节转角 98.7°, 踝关节转角 89.3°	中	一般
制动踏板 Brake pedal	踏板中心坐标/mm Coordinates of brake pedal centre	(858.5, -102.5, 100)	1	膝关节转角 121.7°, 踝关节转角 85.3°	优	很好
	踏板倾角/(°) Angle of brake pedal	75	50	膝关节转角 112°, 踝关节转角 75.7°	良	一般
			99	膝关节转角 99.8°, 踝关节转角 70.4°	中	一般
转向机构 Steering Wheel	安装点坐标/mm Coordinates of installation position	(709,0, -189)	1	手臂伸直, 上身前倾 18°, 肩关节转角 126°	差	不好
	杆长/mm Length of the rod	300	50	手臂伸直, 上身前倾 8°, 肩关节转角 112°	中	一般
	轮径/mm Diameter of the wheel	450	99	手臂伸直, 上身前倾 4°, 肩关节转角 97°	中	一般
变速杆 Shift lever	旋转轴中心坐标/mm Coordinates of installation position	(320, -340, -105)	1	肘关节转角 139.6°, 肩关节转角 21.6°	中	一般
	杆长/mm Length of the lever	400	50	肘关节转角 129.2°, 肩关节转角 18.3°	良	一般
			99	肘关节转角 124.7°, 肩关节转角 15.4°	良	良好

1)该型号的农用四轮拖拉机操作人机界面尺寸虽然都符合国家标准规定,但是操作人机界面的评价结果并不全部为好,这与驾驶员的主观感受结果是一致的。

2)产生评价差异的主要原因为该操作人机界面没有经过统一的人机工程学设计。从计算结果可以看出:脚控操作元件安装位置比较适合个子较小的驾驶员进行操作,而转向机构的操作点则较远,比较适合大尺寸人体数据的驾驶员操作,需要在再设计中进行改进。这也是本驾驶人机界面的进一步优化方向。

3)评价结果说明不同人体尺寸对同一人机界面的评价结论有差异性,因此从保证舒适安全的角度,应将一些使用频繁的元件位置设计为可以调节的形式,以满足不同人体尺寸驾驶员的需求。还可以采取相对可调的方式,比如通过可调式座椅改变坐标原点和元件的相对位置关系也是一种较好的提高人机界面满意度的方式。

4 结束语

随着科学技术的进步,各类装备的人机界面安全性和舒适性越来越受到人们的关注。操作人机界面在总体人机界面中具有重要意义,需要对其进行认真研究。常规操作人机界面不能与操作者的直观感受进行结合,因此符合国家标准的人机界面也可能是不良的人机界面。本研究提出了一种用人体关节角度评价元件位置的计算方法,采用该方法可以得到与人体主观感受一致的结论。该方法可以在不建立虚拟数字模型和进行操作测试的情况下,针对不同尺寸的人体模型给出简要评价结论和设计建议,从而提高设计及制造质量,节省设计费用。该方法计算简单、易于计算机编程实现,对人机匹配的相关软件开发也具有一定启发意义。

参 考 文 献

- [1] Anjelic Z. Opening the new frontiers in the industrial products design domain [J]. *Decomposition Methods in Science and Engineering*, 2008, 60: 3-20
- [2] Gotz A, Maier T. Dependency of the product gestalt on requirements in industrial design engineering [J]. *The Future of Product Development*, 2007, 57: 225-234
- [3] 徐海玉,张安,汤志荔,等. 飞机驾驶员人机界面综合评估[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(4): 940-943, 960
- [4] 康卫勇,王黎静,袁修干. 战斗机座舱人机界面基本模型分析[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(1): 49-54
- [5] 余昆. 基于工效学的舰桥人机界面评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010
- [6] 曹伟国,刘维平,陈正宏,等. 装甲车辆舱室人机界面虚拟评估系统[J]. *兵工学报*, 2011, 32(9): 1145-1148
- [7] 邓迎宾. 小型挖掘机驾驶室人机工程设计及舒适性评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2008
- [8] 顾文艳. 机械系统人机界面虚拟设计方法的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005
- [9] 卞锋. 机械系统人机界面虚拟设计[D]. 北京: 中国农业大学, 2008
- [10] 毛恩荣,宋正河,周一鸣. 机械系统人机界面优化匹配试验评价方法的研究[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(2): 55-59
- [11] 国家标准化管理委员会. GB/T 6325—1997 农业拖拉机驾驶室及主要操纵装置位置尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
- [12] 田新民,田泉,田原. 中国汽车驾驶员 P95 拳椭圆测量[J]. *汽车工程*, 2000, 22(4): 251-255
- [13] 田新民,田泉,田原. 中国汽车驾驶员 P95 离合及制动足椭圆测量[J]. *汽车工程*, 2000, 22(5): 310-312
- [14] 国家标准化管理委员会. GB10000—1988 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988
- [15] 国家标准化管理委员会. GB/T15759—1995 人体模板设计和使用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
- [16] 国家标准化管理委员会. GB/T 14779—1993 坐姿人体模板功能设计要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993

责任编辑: 刘迎春