

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.035

基于 RAMSIS 的拖拉机驾驶室人机工程布置设计与测试

任德良^{1,2} 徐书雷^{1,2} 王兴伟^{1,2} 陈廷坤^{3,4} 郭 晖^{1,2}

(1. 拖拉机动力系统国家重点实验室, 洛阳 471039; 2. 洛阳拖拉机研究所有限公司, 洛阳 471039;
3. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 4. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 针对目前拖拉机驾驶室设计中人机工程操纵性和舒适性存在的不足, 根据 GB/T 21935—2008 标准对人体各个关节部位角度及长度的定义, 结合 GB/T 6235—2004 对座椅标志点位置的推荐, 通过理论计算建立人体各关节的数学模型。基于 RAMSIS 软件对人体操纵进行仿真分析, 提出针对 GB/T 21935—2008 标准中规定的人机操纵舒适区和可及区优化后的范围, 构建驾驶座椅两侧人体操作舒适区三维模型, 结合 RAMSIS 软件对现有的拖拉机驾驶室内部操纵部件进行了校核优化。脚油门踏板面由最初与地板面夹角 45° 调整为 35°, 并将脚油门位置整体向外移 25 mm, 制动踏板面宽度减短 40 mm, 同时将主变速杆距离地面 265 mm 处结构向外调整 20 mm, 手制动初始位置抬高 45 mm。对优化后样机内各部件操纵力和行程进行实际测量及场地试验, 验证了提出的人体操作舒适区三维模型的正确性。本研究为拖拉机驾驶室人机工程设计提供了一个操纵部件布置位置舒适区的数学模型, 为后续拖拉机驾驶室设计提供参考, 拓展了人机工程学在拖拉机设计领域内的应用, 并提高拖拉机驾驶的舒适性。

关键词: 拖拉机; 驾驶室; 人机工程; RAMSIS; 操纵布置; 设计

中图分类号: S220.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0303-07

Design and Test of Ergonomic Layout for Tractor Cab Based on RAMSIS

REN Deliang^{1,2} XU Shulei^{1,2} WANG Xingwei^{1,2} CHEN Tingkun^{3,4} GUO Hui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Power System of Tractor, Luoyang 471039, China

2. Luoyang Tractor Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China

3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

4. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Due to the shortcomings of ergonomics and comfort in the design of tractor cabs, the mathematical model of each joint of the human body was established by theoretical calculation. The model was based on a definition of the angle and length of each joint of the human body in GB/T 21935—2008 standard, and the recommendation of GB/T 6235—2004 on the seat marking points position. Based on the simulation analysis of human manipulation based on RAMSIS software, a three-dimensional model of human manipulation comfort zone on both sides of the driver's seat was constructed based on the optimized range of human manipulation comfort zone and accessibility zone specified in GB/T 21935—2008 standard. Combined with RAMSIS software, the existing tractor cab internal control components were optimized. The included angle between the foot accelerator pedal surface and the floor surface was adjusted from 45° to 35°. The overall position of the foot accelerator was shifted outward by 25 mm, and the width of the brake pedal surface was reduced by 40 mm. At the same time, the structure at the 265 mm distance from the ground of the main gear lever was adjusted outward by 20 mm, and the initial position of the hand brake was raised by 45 mm. Experiments were carried out on the optimized prototype, and the control force and stroke of each component were measured to verify the correctness of the proposed three-dimensional model of the human operation comfort zone. During the present study, a mathematical model of the comfort zone and the arrangement position of the control components was provided for the ergonomic design of the tractor cab. The research result could provide a reference for the

收稿日期: 2022-06-18 修回日期: 2022-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700104)和拖拉机动力系统国家重点实验室开放项目(SKT2022002)

作者简介: 任德良(1987—),男,高级工程师,主要从事大型轮式拖拉机设计研究,E-mail: rd2014@163.com

通信作者: 陈廷坤(1989—),男,讲师,博士,主要从事工程仿生学及农业动力机械研究,E-mail: chentk@jlu.edu.cn

tractor cab design. Also, it would expand the application of ergonomics in the field of tractor design and improve the driving comfort of tractors.

Key words: tractor; cab; ergonomics; RAMSIS; handling arrangement; design

0 引言

近年来拖拉机驾驶员对驾驶工作环境越来越重视,对操纵杆件方便性、空调及方向盘操控舒适性、工作空间安全性等都提出很高的要求^[1-2]。拖拉机人机工程是根据驾驶员生理与心理特征、运动特征及习惯等因素,对拖拉机驾驶室内部各操纵杆件、旋钮按键、仪表座椅等结构与分布进行合理设计、优化,并尽量减小驾驶舱内噪声和振动,为驾驶员提供一个舒适的工作环境^[3-7]。

国外 HENRY 对驾驶室外观造型进行了研究,随后又提出了按颜色和形状区分操纵手柄的方法,并提出了对驾驶室座椅的舒适性改进设计^[8]。随着人机工程学理论研究发展,近年来国外研究人员针对拖拉机驾驶室座椅舒适度^[9-10]、驾驶室内部各操纵装置、电器显示元件^[11-13]、振动噪声及驾驶微气候环境^[14-17]等进行深入研究。基于大量的实践经验及知识的积累,国外研究人员对拖拉机人机工程的研究逐渐形成了相应的理论和设计方法,并建立了一套完整的评价体系。国内人机工程学研究多集中在高校,侧重于理论分析^[18-19]。通过对座椅舒适度研究^[20]、骨骼关节识别研究^[21]及拖拉机振动系统研究^[22],提高了拖拉机驾乘舒适度。基于三维软件模型^[6,23]、人体测量学^[2]及生物力学模型^[24],对拖拉机人机工程进行研究分析,提出了设计理论及评价方法。

目前,国外已开发了多种人机工程领域的仿真模拟软件,如 RAMSIS、JACK、ANTHROPOS、SAMMIE、CAVA 等,其中 RAMSIS 应用最为广泛,已经被全球 70% 以上的轿车制造商所使用^[7]。本文根据人机工程学原理,基于 RAMSIS 软件对拖拉机驾驶室操纵空间及操纵杆件布置进行设计,并综合理论与试验测试结果,提出操纵杆件操作舒适区域,为后续拖拉机人机工程设计提供参考。

1 拖拉机人机工程模型建立

1.1 人体二维模型建立

为满足多数人体要求,参考国家标准^[25-26]及文献^[2]对人体尺寸的测量数据,采用 18~60 周岁第 5 百分位和第 95 百分位人体进行设计,人体模型数据见表 1。

为研究和分析拖拉机驾驶室内部各部件与人体

表 1 部分中国成年男性人体尺寸数据

Tab.1 Selected anthropometric data of Chinese

参数	adult male		mm	
	平均值	标准差	百分位数	
			5	95
身高	1 678	58.4	1 583	1 775
上臂长	313.5	25.1	289	338
前臂长	236.8	21.8	216	258
大腿长	466.5	39.3	428	505
小腿长	370.4	33.7	338	403
坐姿颈椎高	658	43.3	615	701
坐姿眼高	798	29.8	749	847
坐姿肩高	598	25.5	557	641
坐姿肘高	263	16.4	228	298
坐姿膝高	493	23.1	456	532
小腿加足高	415.2	32.7	383	448
立姿肩高	1 367	52.9	1 281	1 455
立姿肘高	1 024	43.2	954	1 096
手功能高	741	36.8	680	801
手长	183	7.9	170	196

的关系,对二维人体模型进行简化,如图 1 所示。二维人体模型可简化为眼点、躯干、上臂、前臂、手掌、大腿、小腿和脚等 8 个关节。

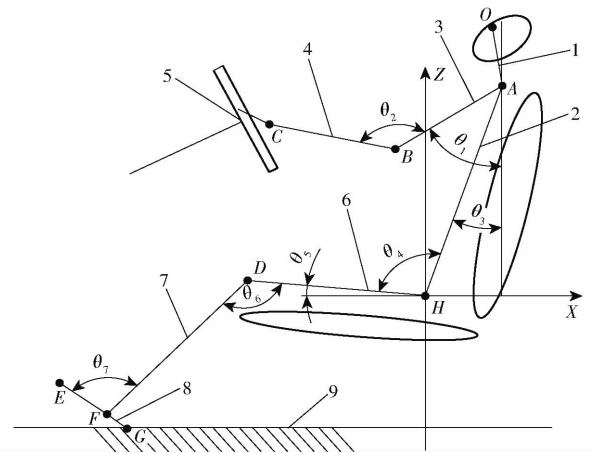


图 1 人体简化二维模型

Fig.1 Simplified 2D model of human body

1. 眼点到颈椎长度 2. 躯干 3. 上臂 4. 前臂到手掌长度 5. 方向盘 6. 大腿 7. 小腿到足底长度 8. 脚 9. 驾驶室地板面

根据相关标准^[25-26]及图 1 中人体各关节部件,人体简化模型中各部分尺寸与表 1 中数据关系见表 2。

根据 GB/T 21935—2008《土方机械 操纵的舒适区域与可及范围》对人体各主要关节的一般性要求,确定人体各关节动作的舒适角度和最大角度。表 3 为人体简化模型主要关节的角度。

表 2 人体简化模型各部分尺寸关系

Tab.2 Dimensional relationship of each part of simplified human body model

参数	对应关系
AO 长度	坐姿眼高-坐姿肩高
AB 长度	上臂长
BC 长度	前臂长 + 1/2 手长
AH 长度	坐姿肩高
DH 长度	大腿长
DF 长度	小腿加足高

表 3 人体主要关节角要求

Tab.3 Main joint angle requirements of human body (°)

参数	动作	GB/T 21935—2008 推荐角度		RAMSIS 推荐角度
		舒适	最大	
θ_1	弯曲	-35 ~ 85	-50 ~ 180	15 ~ 45
θ_2	弯曲	60 ~ 180	45 ~ 180	80 ~ 120
θ_3	弯曲	10	5 ~ 15	10
θ_4	弯曲	75 ~ 100	60 ~ 110	88 ~ 97
θ_6	弯曲	75 ~ 160	75 ~ 170	90 ~ 130
θ_7	弯曲	85 ~ 108	78 ~ 115	85 ~ 100

根据 GB/T 6235—2004《农业拖拉机驾驶员座位装置尺寸》规定座椅平面与水平面夹角 θ_5 推荐值为 $3^\circ \sim 12^\circ$, 本文依据选型座椅参数将其定义为 7° 。

1.2 座椅标志点确定

座椅标志点 (Seat index point, SIP) 又被称为 H 点 (Hip point, 为人体胯点), 是拖拉机驾驶室内部操作部件布置及驾驶员工作空间的基准点。

GB/T 6235—2004 中推荐 SIP 距离地板面 (不含覆盖层) 高度为 450 ~ 520 mm。根据拖拉机主要销售区域的人体特征, 本文选定 SIP 距驾驶室地板面 490 mm。由此也确定了图 1 中点 H 位置。

1.3 人体数学模型建立

以图 1 中点 H (SIP) 为基础参考点, 根据图 1 中人体简化模型中各关节尺寸关系可以计算出各关节点坐标。

根据三角函数关系求得:

点 A 坐标为

$$X_A = l_{AH} \sin \theta_3 \quad (1)$$

$$Z_A = l_{AH} \cos \theta_3 \quad (2)$$

点 B 坐标为

$$X_B = l_{AB} \sin \theta_1 - X_A \quad (3)$$

$$Z_B = Z_A - l_{AB} \cos \theta_1 \quad (4)$$

点 C 坐标为

$$X_C = X_B + l_{BC} \sin (\theta_2 - \theta_1) \quad (5)$$

$$Z_C = Z_B + l_{BC} \cos (\theta_2 - \theta_1) \quad (6)$$

点 D 坐标为

$$X_D = l_{DH} \cos \theta_5 \quad (7)$$

$$Z_D = l_{DH} \sin \theta_5 \quad (8)$$

点 F 坐标为

$$X_F = X_D + l_{DF} \sin (\theta_6 - \theta_4 + \theta_3) \quad (9)$$

$$Z_F = Z_D + l_{DF} \cos (\theta_6 - \theta_4 + \theta_3) \quad (10)$$

式中 l_{AH} ——点 A 与点 H 间长度

l_{AB} ——点 A 与点 B 间长度

l_{BC} ——点 B 与点 C 间长度

l_{DH} ——点 D 与点 H 间长度

l_{DF} ——点 D 与点 F 间长度

将表 2 和表 3 数据代入上式中可得到人体各关节点坐标区域值。

1.4 基于 RAMSIS 的人机舒适区优化

参照理论计算, 依据 RAMSIS 软件分析, 本文优化了 GB/T 21935—2008 标准中拖拉机人机操纵舒适区范围, 如图 2 所示, 提出了正常驾驶姿态下, 手臂自然下垂舒适区, 手臂在右侧操纵台处舒适区及弯腰时右手操纵舒适区。其中虚线半球体为标准推荐的人体手部可达域。

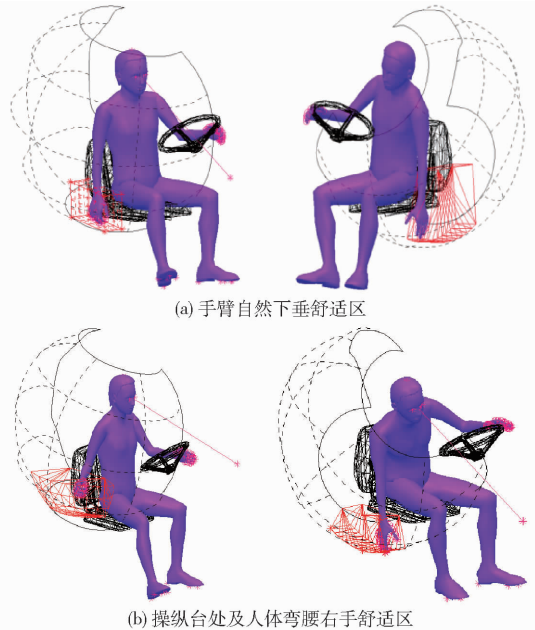


图 2 优化后的舒适区

Fig. 2 Optimized comfort zone

2 人机仿真分析

选取中国一拖集团有限公司生产的某型号拖拉机, 结合上述理论所得结果, 分析驾驶室内部操纵布置 (图 3)。图 3 中蓝色部分为 GB/T 21935—2008 标准推荐的可达域, 绿色部分为脚部和方向盘处操纵舒适区, 粉色、紫色、青色部分为与 1.4 节描述相对应的操纵舒适区。

将布置完操纵的拖拉机三维模型导入 RAMSIS 软件中进行模拟分析, 并重点介绍座椅及其右侧部

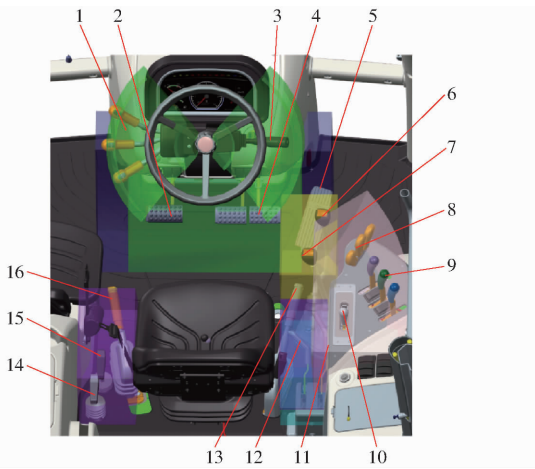


图3 操纵布置

Fig. 3 Manipulation arrangement

1. 换向操纵 2. 主离合踏板 3. 组合开关 4. 制动踏板 5. 脚油门
6. 主变速操纵 7. 副变速操纵 8. 手油门 9. 液压输出操纵
10. 快速升降操纵 11. 位调节操纵 12. 力调节操纵
13. 手制动操纵 14. PTO 操纵 15. 分动箱操纵 16. 副离合操纵

分的操纵布置。

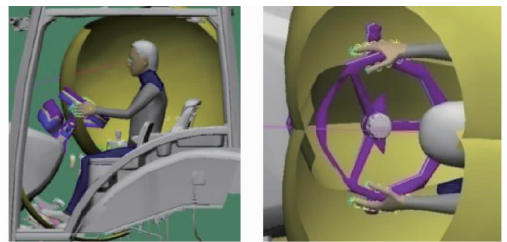
2.1 座椅、方向盘位置

已知该型号拖拉机驾驶座椅调节范围如下:悬浮行程 ± 40 mm, 上下行程 ± 30 mm, 前后行程 ± 80 mm。方向盘调节行程:前后行程 $\pm 20^\circ$ 、高低行程 $0 \sim 80$ mm。

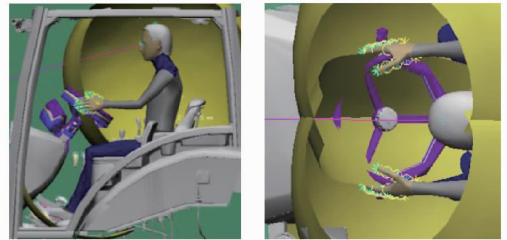
将第5百分位人体模型通过坐标系放置在座椅标志点处,人体调整到正常自然驾驶状态。驾驶员座椅向前调整 75 mm, 向下调整 30 mm 并将座椅调至最低位置,方向盘向上调整 40 mm(座椅、方向盘均在已知调整范围内),人体驾驶姿态双手抓握点在可达域内,如图 4a 所示。

将第95百分位人体模型通过坐标系放置在座椅标志点处,调整人体到正常自然驾驶状态。同时座椅向前调整 20 mm, 向上调整 20 mm, 方向盘向上调整 80 mm(座椅、方向盘均在已知调整范围内),如图 4b 所示,人体驾驶姿态双手抓握点在可达域包括的方向盘最高位置处。

通过上述分析,座椅和方向盘位置布置合理,可满足正常驾驶姿态要求。



(a) 第5百分位人体模型



(b) 第95百分位人体模型

图4 座椅及方向盘位置分析

Fig. 4 Seat and steering wheel position analysis

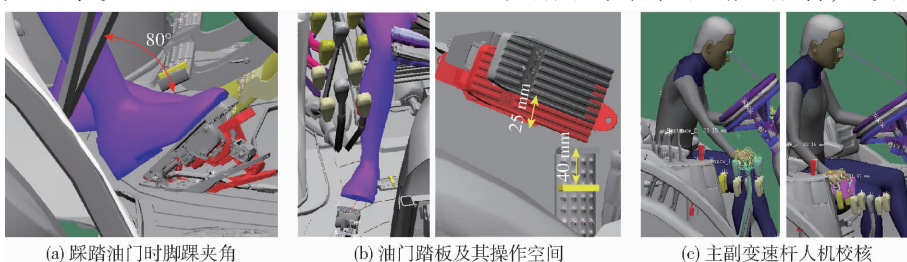
2.2 脚油门、变速杆位置

由上文可知人机推荐脚踝舒适夹角 θ_7 为 $85^\circ \sim 100^\circ$ 。已知脚油门踏板与水平面夹角为 45° , 初始位置至最大油门处行程为 $(15 \pm 2)^\circ$ 。

如图 5a 所示,人体在踩踏油门时脚踝夹角为 80° ,超出了人体推荐舒适角度。油门踏板初始位置应与水平面夹角优化为 35° 。不同身高的人体通过调节座椅前后的位置,满足踩踏油门时的舒适角度。

其次分析脚油门周围空间及附近其它操纵的布置对其被踩踏时的影响,如图 5b 所示。由图 5b 可知,在踩踏油门时,油门与制动踏板距离太近,易产生误操作。油门需向外移 25 mm, 同时减短制动踏板面宽度 40 mm(此处更改后满足 GB/T 6235—2004 标准中制动踏板距离拖拉机对称面的规定)。在踩踏油门时,人腿与主变速右前挡(I挡)位置距离较近,不便于换挡操作。将主变速杆在距离地板面 265 mm 处,向外移 20 mm,避免踩踏油门时腿与其干涉。

如图 5c 所示,主变速杆(青色)和副变速杆(粉红色)空挡位置均在人体舒适区域,但在操作主变速杆时人体需向前倾斜。同时由于驾驶室内部空间的局限及该拖拉机底盘限制,主变速杆在挂接前部



(a) 踩踏油门时脚踝夹角

(b) 油门踏板及其操作空间

(c) 主副变速杆人机校核

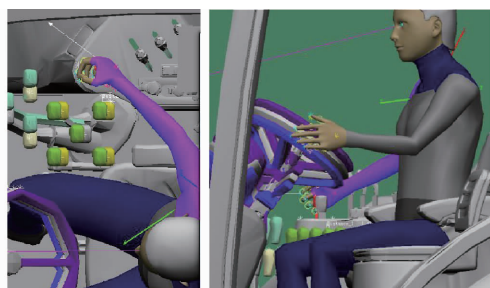
图5 脚油门及变速杆位置分析

Fig. 5 Foot accelerator and gear lever position analysis

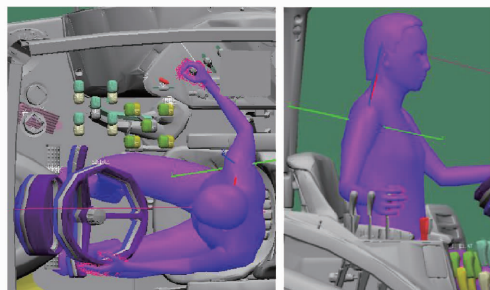
两挡位时超出了人体舒适区,仅满足处于人体可达域内,可进一步优化杆件行程。

2.3 手油门、液压输出操纵纵位置

如图 6a 所示,手油门操作时右手与其他杆件不发生干涉,布置位置合理。



(a) 手油门操纵纵校核



(b) 液压输出操纵纵校核

图 6 手油门及液压输出操纵纵位置分析

Fig. 6 Analysis of hand throttle and hydraulic output manipulation position

如图 6b 所示,液压输出手柄位置合适,操作时手臂与其他杆件无干涉。操作时手臂有一定倾斜角度,适合人体发力,较舒适。

2.4 力位调节操纵纵位置

如图 7 所示,力位调节手柄高低位置在人体舒适范围之内,但操作时人体手臂自然下垂会与座椅扶手干涉,受座椅扶手限制,操作时手臂需绕过扶手。此处因受拖拉机驾驶室内部空间的限制,布置位置在可接受范围内。

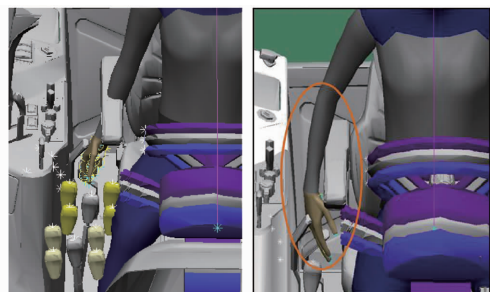


图 7 力位调节操纵纵位置分析

Fig. 7 Analysis position of force and position manipulation

2.5 手制动操纵纵位置

如图 8 所示,在操作手制动时人脸已贴近方向盘,需优化手制动初始位置,将其安装底座抬高 45 mm。

根据上述的分析及改进建议,最终调整了脚油



图 8 手制动操纵纵位置分析

Fig. 8 Analysis of hand brake manipulation position

门、脚制动踏板、主变速杆及手制动位置,产品实物如图 9 所示。



图 9 产品实物

Fig. 9 Physical product

3 人机舒适性测试

试验中采用 Guide Choice(盖德朝日)人机性能测试设备、管型测力计(LTZ-50 型,江苏常熟衡器厂)及数字斜度仪(DP-45 型,广东康宇测控仪器厂),对样机各操纵杆件的操纵力及操纵行程进行测试(图 10),测试结果见表 4。



(a) 变速杆及踏板

(b) 操纵手柄

图 10 操纵力及行程测试

Fig. 10 Handling force and stroke test

表4 各部件操纵力及行程

Tab.4 Operating force and stroke of each component

操纵部件	操纵力/N		操纵行程/mm	
	实测值	RAMSIS 人机推荐值	实测值	RAMSIS 人机推荐值
脚油门	28	12~48	52	<75
主变速杆	41	20~80	60(前)、65(后)、40(左)、40(右)	<80
副变速杆	39	20~80	75(前)、60(后)、70(左、右)	<80
手油门手柄	16	12~48	155	<100
液压输出操纵	23	12~48	80(前)、70(后)	<100
力调节手柄杆	80(升)、55(降)	20~100	231	<280
位调节手柄杆	110(升)、30(降)	20~100	252	<280
手制动	210	≤300(机械操纵)	193	<210

注:操纵力均为操纵过程中最大力,操纵行程为手柄或踏板中心处行程。

由表4可知,除位调节手柄杆提升操纵力外,实测的其余各操纵杆件操纵力均在人机推荐范围之内,并且操纵力均在规定操作范围的下限值,操纵轻便。由于拖拉机使用的提升器装置是一个复杂的力和位移反馈机构,并受拖拉机空间限制,位调节手柄杆操纵力过大,需进一步优化提升机构传动比,使操纵行程和操纵力达到平衡点,以降低操纵力并提升人机舒适性。

操纵行程除手油门手柄外,其余均在人机推荐范围之内。可适当调整手油门机构传动比,增大操纵力减小操纵行程。

4 结论

(1)通过理论计算建立了人体各关节的数学模

型,基于RAMSIS软件人体操作姿势,进一步优化了GB/T 21935—2008标准规定的人机操纵舒适区。建立了座椅左右两侧及操纵台区域,布置相应各操纵杆件的理论舒适区三维模型。

(2)根据建立的操纵舒适区三维模型,设计了拖拉机各操纵部件的布置位置。结合RAMSIS软件分析,采用人机性能测试设备对设计的各杆件操纵力及行程进行实际测量,对比人机推荐值,进一步验证了三维舒适区模型的正确性。

(3)本文为拖拉机驾驶室人机工程设计提供了一定的参考依据,因拖拉机型式种类很多,本文主要针对通用型拖拉机进行了人机布置设计,可为其他型式拖拉机研究提供理论基础。

参 考 文 献

- [1] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2018,49(8):1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. (in Chinese)
- [2] 徐立友,吴依伟,周志立. 基于人体测量学的拖拉机驾驶员工作空间设计[J]. 农业工程学报,2016,32(11):124-129.
XU Liyou, WU Yiwei, ZHOU Zhili. Design of workplace for tractor operator based on anthropometry[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 124-129. (in Chinese)
- [3] 李世海,任金东,高晓娴,等. 适用于乘用车人机设计验证的人机台架系统开发[J]. 中国机械工程,2014,25(4):559-563.
LI Shihai, REN Jindong, GAO Xiaoxian, et al. Development of an equipment system used for passenger car ergonomic design and evaluation[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(4): 559-563. (in Chinese)
- [4] 杨飞,光震宇,康敏. 基于RULA方法的拖拉机驾驶室人机优化研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(4):88-93.
YANG Fei, GUANG Zhenyu, KANG Min. Ergonomics optimization research of tractor cab based on RULA[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(4): 88-93. (in Chinese)
- [5] 杨洋,程尚坤,齐健,等. 基于人机工效学的农机座椅自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(6):434-442.
YANG Yang, CHENG Shangkun, QI Jian, et al. Design and test of automatic leveling system for agricultural machinery seat based on ergonomics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 434-442. (in Chinese)
- [6] 杨飞,史庆春,万小玲,等. 基于Pro/E Manikin的拖拉机驾驶室人机工程评价方法[J]. 农业工程学报,2013,29(9):32-38.
YANG Fei, SHI Qingchun, WAN Xiaoling, et al. Ergonomics evaluation method of tractor cab based on Pro/E Manikin[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 32-38. (in Chinese)
- [7] 刘畅. 基于RAMSIS的某城市客车操纵舒适性改进研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
LIU Chang. Handling comfort improve research for a city bus based on RAMSIS[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [8] 梁海莎. 基于人机工程学的拖拉机驾驶室设计研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.
LIANG Haisha. Study tractor cab design based on ergonomics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)

Chinese)

- [9] BAZIL B, MICHAEL J G. The application of SEAT values for predicting how compliant seats with backrests influence vibration discomfort[J]. *Applied Ergonomics*, 2014, 45(6):1461-1474.
- [10] BASHIRI B, MANN D. Automation and the situation awareness of drivers in agricultural semi-autonomous vehicles[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 45(6):8-15.
- [11] PAUL G, WANG X G, YANG J. An introduction to the special issue on digital human modeling (DHM) in ergonomics 4.0 [J]. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics & Human Factors*, 2021, 9(3-4): 107-110.
- [12] HARARI Y, BECHAR A, RASCHKE U, et al. Automated simulation-based workplace design that considers ergonomics and productivity[J]. *International Journal of Simulation Modeling*, 2017, 16(1): 5-18.
- [13] WEI D. Based on RULA analysis comfort evaluation tractor driver method[C]// *Proceedings of 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*, 2017: 1134-1137.
- [14] CVETANOVIC B, CVRTKOVIC D, PRASCEVIC M, et al. An analysis of the impact of agricultural tractor seat cushion material to the level of exposure to vibration[J]. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 2017, 36(2): 116-123.
- [15] MIHALIC F, KURAMA S. Design of alternative composition material to available tractor cabins[J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2016, 52(1):78-82.
- [16] RUŽIĆ D, ČASNJI F. Agricultural tractor cab characteristics relevant for microclimatic conditions[J]. *Journal of Applied Engineering Science*, 2011, 9(2):323-330.
- [17] QIU B B, ZHOU J P, ZHENG Z X, et al. Establishing a dynamic ergonomic evaluation index system for complex product designs based on the theory of product life cycle[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2019, 69: 153-162.
- [18] 仇莹, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 农业装备驾驶室虚拟人机工程学设计与评价[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3):117-121.
CHOU Ying, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Application of ergonomics to tractor moulding[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 117-121. (in Chinese)
- [19] 钟文杰. 拖拉机换挡操纵舒适性评价方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
ZHONG Wenjie. Research on comfort evaluation method of tractor shift control [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [20] 范沁红, 江星辰, 武学良, 等. 基于理想压力的机车座椅优化设计与舒适度试验研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(10): 383-394.
FAN Qinrong, JIANG Xingchen, WU Xueliang, et al. Experimental research on optimization design and comfort of locomotive seat based on ideal pressure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(10): 383-394. (in Chinese)
- [21] 张开兴, 张澜, 杨刚, 等. 基于骨骼关节识别的拖拉机驾驶室座椅舒适度评价[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊 2):521-529.
ZHANG Kaixing, ZHANG Lan, YANG Gang, et al. Evaluation of seat comfort in tractor cab based on bone joint recognition [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp.2):521-529. (in Chinese)
- [22] 薛金林, 汪珍珍, 伊力达尔·伊力亚斯, 等. 轮式拖拉机振动系统横向固有频率理论建模及验证[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19):51-56.
XUE Jinlin, WANG Zhenzhen, YILIDAER Yiliyasi, et al. Lateral natural frequency modeling and verification for vibration systems of wheeled tractors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(19): 51-56. (in Chinese)
- [23] 钟文杰, 徐红梅, 徐奥. 基于 CATIA 的拖拉机驾驶室人机系统舒适性分析与评价[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(1):47-51.
ZHONG Wenjie, XU Hongmei, XU Ao. Comfort analysis and evaluation of man-machine system in tractor cab based on CATIA [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(1): 47-51. (in Chinese)
- [24] 杨洋, 李宛骏, 李延凯, 等. 基于生物力学模型的拖拉机离合踏板人机工程设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3):82-91.
YANG Yang, LI Wanjun, LI Yankai, et al. Ergonomics design of tractor clutch pedal based on biomechanical model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(3): 82-91. (in Chinese)
- [25] 全国人类工效学标准化技术委员会. 中国成年人人体尺寸:GB/T 10000—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [26] 全国人类工效学标准化技术委员会. 工作空间人体尺寸:GB/T 13547—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.