doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.039

乘坐式采茶机人体垂向振动模型及减振设计与试验

翁晓星[1,2]　谭大鹏[1]　蔡　勇[3]　王　刚[2]　陈长卿[2]
（1. 浙江工业大学机械工程学院，杭州 310014；2. 浙江省农业机械研究院，金华 321017；
3. 金华市计量质量科学研究院，金华 321000）

摘要：为提高乘坐式采茶机作业舒适性，基于人体生物力学原理，通过建立符合人体振动特性的人体模型，分析人体模型参数对垂向动态等效质量、水平动态等效质量和座椅-头部传递函数的影响，并通过垂直传递率、转动传递率和表观质量仿真后得出低频段共振发生在4~6 Hz、8~10 Hz和20~30 Hz范围内。对整车进行茶田试验，利用加速度传感器获取驾驶员振动加速度等客观数据，分析高频以及低频段共振频率范围内的传递率、时域与频域特性。通过加装聚氨酯泡沫座椅等减振手段，降低传递率，避免产生共振，达到提高乘坐式采茶机舒适性的目的。试验结果表明：在低频段内，座椅处传递率从在0~1.0降低到0~0.2，峰值降低80%，从而改善乘坐式采茶机的噪声和振动性能。该人体模型具有一定的预测精度，可为动态环境下人机界面设计提供重要参考，对在振动环境下舒适性以及进一步研究有关人体振动有一定指导意义。

关键词：乘坐式采茶机；人体垂向振动模型；人体振动舒适性；减振设计
中图分类号：S237；S220.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S2-0380-09

Vertical Vibration Model of Human Body and Vibration Reduction Design and Test of Riding Tea Picker

WENG Xiaoxing[1,2]　TAN Dapeng[1]　CAI Yong[3]　WANG Gang[2]　CHEN Changqin[2]
(1. *College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou* 310014, *China*
2. *Zhejiang Academy of Agricultural Machinery, Jinhua* 321017, *China*
3. *Jinhua Academy of Metrology and Quality Science, Jinhua* 321000, *China*)

Abstract: With the rapid development of agricultural and rural economy, the problem of rural labor shortage has become increasingly prominent. As one of the important links, picking has been developed to develop a riding tea picking machine to improve the mechanization level of tea gardens. Based on the principle of human biomechanics, the effects of human body parameters on vertical dynamic equivalent mass, horizontal dynamic equivalent mass and seat-head transfer function were analyzed by establishing a human body model consistent with human vibration characteristics. Through the simulation of vertical transfer rate, rotational transfer rate and apparent mass, it was concluded that low-frequency resonance occurred in the range of 4 ~6 Hz, 8 ~10 Hz and 20 ~30 Hz. At the same time, tea field test was carried out on the whole vehicle, and objective data such as driver vibration acceleration was obtained by acceleration sensor, and the transmission, time domain and frequency domain characteristics in the resonant frequency range of high frequency and low frequency band were analyzed. Then by installing polyurethane foam seats and other vibration reduction means to reduce the transmission rate and avoid resonance, the purpose of improving the comfort of the riding tea picker was achieved. The test results showed that in the low frequency band, the transmission rate at the seat was reduced from 0~1.0 to 0~0.2, and the peak value was reduced by 80%, thus improving the noise and vibration performance of the riding tea picker. The human body model had a certain prediction accuracy, which can provide an important reference for human-

收稿日期：2024－07－16　修回日期：2024－08－20
基金项目：浙江省重点研发计划项目(2021C02028)和2023年浙江省农机研发制造推广应用一体化试点项目(研发制造项目)
作者简介：翁晓星(1986—)，女，博士生，浙江省农业机械研究院高级工程师，主要从事农业机械研究，E-mail: 390920801@qq.com
通信作者：谭大鹏(1980—)，男，教授，博士生导师，主要从事计算机辅助动力学(流固耦合)等研究，E-mail: tandapeng@zjut.edu.cn

machine interface design in dynamic environment, and has a certain guiding significance for comfort in vibration environment and further research on human vibration.

Key words: riding tea picker; human-chair vertical vibration model; human vibration comfort; vibration isolation design

0　引言

随着农业农村经济快速发展，农村劳动力短缺问题日益凸显。采摘作为重要环节之一，采茶机可提升茶园机械化水平。浙江省农业机械研究院研制的乘坐式采茶机应用于缓坡茶园，其属于坡度小于15°的丘陵地或山脚地，且茶园地面普遍平整程度较差。采茶工作环境、工况复杂，驾驶员的工作时间长，若设备不具有良好的操作舒适性会造成驾驶员身体疲劳、工作效率低下和引起骨骼肌肉疾病，甚至会造成安全事故[1-4]。同时路面激振还会影响机械的行驶稳定性，加剧其磨损和损坏，缩短使用寿命，增加修理和维护成本。但目前乘坐式采茶机研究大多关注机器本身的性能参数，忽略人机系统中“人”的因素，因此本文以乘坐式采茶机为研究对象开展相关研究，提高驾驶员的操作舒适性，延长机械使用寿命，提升采茶工作效率。

通过对目前农用汽车驾驶室布置方面的现状分析，以及对驾驶室操纵件人机工程学布置的国内外研究现状了解，可知农用设备驾驶室布置方面还过多地依赖于经验设计，对于优化设计的方法使用较少；相反国外通过对人机工程学的长期研究、数据积累，以及在实践过程中的持续优化及提高，驾驶室人机工程布置方面使用相对较成熟[5-7]；国内虽然起步晚，但在乘用车等行业驾驶室布置方面做了大量研究[8-11]。因此，随着国民生活水平的日益提高，人们对与舒适性的要求也不断提升[12]。

乘坐式采茶机驾驶员在进行操作时其舒适性是身体各部分的综合感受[13]，是驾驶员在一定客观环境和自我认知状态下，与踏板之间生理和心理的相互作用。根据SLATER的观点，舒适性是指人与所处环境在生理学和心理学上达到和谐、舒适、令人愉快的状态[14]。因此，乘坐式采茶机操作舒适性评价包括心理上主观评价与生理上客观评价，即驾驶员的主观舒适性打分与由试验仪器所测得的客观指标（如表面肌电信号、心电信号等）。随着数字人体模型（Digital human models，DHMs）在工程领域的广泛应用，通过将主观舒适性问题量化后进行数学建模研究，从而形成一套客观有效的舒适性评价与预测方法，该模型已成为研究热点[15-17]。

人体模型的研究主要包括集中质量模型、多体动力学模型（MB）和有限元模型（FE）[18-19]。COERMANN[20]通过振动试验测得的驱动点机械阻抗，提出了能够模拟驱动点机械阻抗的单自由度人体垂向振动模型；SUGGS等[21]提出了一种并联的2自由度人体集中参数模型，结合驱动点机械阻抗试验结果对模型的参数进行识别，证明并联2自由度模型能够对人体10 Hz以内的机械阻抗进行准确预测。文献[22]提出了一种3自由度坐姿人体垂向振动模型，模型包括人体臀部和人体头部分块，能够对驱动点机械阻抗和头部-座椅传递函数进行预测。MATSUMOTO等[23]提出了包括躯干的水平旋转运动的4自由度和5自由度的2个多刚体人体模型，该人体模型能够很好地拟合垂向等效质量，通过对人体模型进行模态分析，指出动态等效质量在共振频率5 Hz左右，可能是由于臀部大腿的垂向运动和躯干的旋转运动产生。KIM等[24]提出了一个用8个刚体块和弹簧阻尼构成的坐姿人体多体动力学模型，该模型能够很好地拟合垂向动态等效质量和人体头部传递函数，通过对人体模型进行模态分析，得到了人体10 Hz内的两阶频率。人体在任何振动环境中的动态响应都可以通过该生物力学模型来预测。

通过建立坐姿人体振动模型对座椅舒适性进行研究，能够节约时间和降低成本。垂向振动响应作为座椅舒适性的关键评价指标，建立合理的人体生物力学模型，实现垂向振动响应的预测，是座椅舒适性仿真研究的基础。本文面向座椅动态舒适性，通过坐姿人体垂向振动模型，对乘坐式采茶机进行舒适性分析及改进设计，以提高在正常工况下乘坐式采茶机操作的舒适性。

1　人体垂向振动模型构建及模态分析

乘坐式采茶机行驶过程中，操作者与设备处于振动环境中，作业过程中乘员受到振动激励时的感受即动态舒适性越来越受到关注。由于农用机械工作环境多是凹凸不平的路面，由地面不平度产生的垂向振动更加成为影响人体健康的主要振动，所以农用机械振动特性主要是通过由路面不平度产生的垂向振动对人体的影响来进行研究的[25]。人-机系统主要承受的是座椅传递的垂向激励，人体的垂向振动响应一直是动态舒适性的研究重点。人体垂向振动响应，除了受座椅设计的影响，还与坐姿人体的振动特性有关[26-27]。

人体是一个复杂的动态系统，不同部位的敏感频率有差别。研究发现，将人简化为一个自由振动系统，其中人的眼部、胸部、胃部、躯干和脊柱等器官对振动敏感程度较高[10]。当这些器官与座椅发生共振时，驾驶员会出现眩晕、恶心等不良反应，严重时还会损害人体健康[28-29]，人体各主要器官的共振频率如表1所示。国内外学者对于人体垂向振动的研究，主要采用真人垂向振

动试验和人体动力学模型仿真的方法。

表1 人体各器官共振频率

Tab. 1 Resonance frequencies of human organs

人体振动特性	振动频率/Hz
脊椎骨强烈共振	3~4
胃部共振	3~6
腰椎部共振最大	4
心脏共振	4~6
肩胛部位共振强烈	5
手臂共振	10~20
喉部共振(声音改变)	5~20
头部共振	5~30
膀胱共振(引起尿急)	10~18
眼球共振(难以睁眼)	20~70

1.1 人体垂向振动模型

人体模态是坐姿人体的固有特性,各阶模态频率和振型影响着人体的振动特性,对人体模型的模态进行研究很有必要。人体是一个大阻尼且高度非线性系统,其模态参数很难通过试验直接测出。通过建立符合人体振动特性的人体模型,进行人体垂向振动响应的预测,可以极大提高效率,降低成本,更好地理解人体的振动特性。

1.2 人体垂向振动响应描述函数

由于在行驶过程中,路面不平整、发动机的振动以及车身结构的刚度阻尼,振动通过车身、悬架和座椅传到人体,引起人体臀部振动,最终引起全身振动,使人感到疲劳和不舒适[30]。垂向振动是在行驶过程中受到的主要振动,对于人体垂向振动响应特性的描述,包括:驱动点机械阻抗(Driving-point mechanical impedance, DPM)、座椅-头部传递函数(Seat-to-head transmissibility, STH)和动态等效质量(Apparent mass, AM)。

(1)驱动点机械阻抗

驱动点的机械阻抗定义为座椅面驱动点激励力与驱动点速度之比,即

$$Z(\omega)=\frac{F(\omega)}{v_{\mathrm{seat}}(\omega)} \tag{1}$$

式中 $Z(\omega)$——驱动点机械阻抗,N·s/m

$F(\omega)$——驱动点激励力,N

$v_{\mathrm{seat}}(\omega)$——驱动点速度,m/s

(2)动态等效质量

人体动态等效质量包括垂向动态等效质量和水平动态等效质量。坐姿人体垂向/水平动态等效质量定义为驱动点垂向/水平激励力与驱动点垂向加速度之比,即

$$M(\omega)=\frac{F(\omega)}{a_{\mathrm{seat}}(\omega)}=\frac{S_{\mathrm{af}}(\omega)}{S_{\mathrm{aa}}(\omega)} \tag{2}$$

式中 $M(\omega)$——垂向/水平方向动态等效质量

$a_{\mathrm{seat}}(\omega)$——座椅面驱动点垂向加速度

$S_{\mathrm{af}}(\omega)$——驱动点垂向/水平方向激振力与驱动点垂向加速度的互功率谱

$S_{\mathrm{aa}}(\omega)$——驱动点垂向加速度的自功率谱

(3)座椅-头部传递函数

座椅-头部传递函数用来表示振动从座椅驱动点到人体头部的传递,定义为人体头部垂向加速度与座椅面振动加速度之比,即

$$H(\omega)=\frac{a_{\mathrm{head}}(\omega)}{a_{\mathrm{seat}}(\omega)} \tag{3}$$

式中 $H(\omega)$——人体头部垂向传递函数

$a_{\mathrm{head}}(\omega)$——头部垂向加速度,m/s^2

首先进行特征频率分析,以确定振动的阻尼和无阻尼固有频率。其次,围绕固有频率进行频率响应分析,以确定垂直传递率(头部垂直加速度与座椅输入加速度之比)、转动传递率(头部角加速度与座椅输入加速度之比)和表观质量(座椅处的力与座椅输入加速度之比)。传递率和表观质量与舒适度直接相关。特别是垂直和转动传递率影响乘坐舒适性和视觉。

2 人体垂向振动频率仿真分析

2.1 几何模型和材料

基于最新人体统计数据和人体解剖特性建立了第95百分位身高、中等胖瘦(BMI约为23 kg/m^2)的中国男性人体几何模型,坐姿人体垂向振动模型与坐姿人体静态体压模型相同,只研究人体垂向和水平方向的振动响应,不考虑侧向振动,且不研究关节肌肉受力和变形,在垂向和水平方向平面内,人体的生物力学模型由不同的身体部位组成,如头部、躯干、骨盆、大腿、内脏和小腿,如图1所示(m为质量,kg;k为刚度,kN/m;c为阻尼系数,N·s/m)。所有身体部位都被视为集总质量,并被定义为刚体。表2给出每个身体部位围绕其质心的质量和惯性矩。内脏不允许转动,小腿不允许平动或转动。因此,表2中不需要相应的惯性矩。

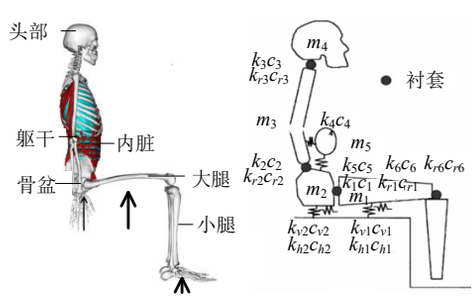

图1 不同身体部位及每个身体部位质心和振动激励位置

Fig. 1 Different body parts and center of mass and location of vibration excitation for each body part

不同位置的骨骼和肌肉具有不同的材料特性,复杂的人体材料很难模拟,为了提高计算效率,根据仿真目的,在保证模型精度的情况下对人体材料进行适当简化。在静态接触过程中,人体和座椅只有臀部和躯干与

表2　不同身体部位质量和惯性矩

Tab. 2　Mass and moment of inertia of different body parts

项目	头部	躯干	骨盆	大腿	内脏	小腿
图例						
质量/kg	7.24	19.90	11.01	29.02	12.92	7.51
惯性矩/(kg·m²)	0.411	1.627	0.692	1.180	—	—

座椅的坐垫和靠背直接接触，不与座椅接触的部分变形很小，其变形对静态体压分布的影响较小，各部位仅通过质量分布影响着压力分布的结果。因此本文对不与座椅直接接触的部分，包括头颈、上肢和手、胸腔组织、腰椎和坐骨以及小腿和脚组织等材料进行简化，采用不变形的刚体材料模拟，调整材料密度以保持各部位的质量合理分布。

2.2　模型关节设置

为了更好地反映人体的振动特性，需要对人体模型关节的刚度和阻尼进行设置。不同身体部位之间的连接可以通过平动和转动弹簧和阻尼器来近似，这些弹簧和阻尼器应用于两个身体部位之间的相对运动。这种类型的连接通过弹性形式的固定关节进行建模。使用弹性形式的关节后，即可提供两个连接部位之间的平动和转动刚度以及阻尼。

在该模型中，振动源（座椅）没有明确建模，而是使用基座运动节点。给模型施加垂直向下惯性加速度 g（9.8 m/s²），以模拟重力载荷，并通过对模型进行动态松弛处理，以使人体模型在重力作用下达到平衡。与振动座椅直接接触的身体部位为小腿、大腿和骨盆。这些身体部位与振动座椅之间的连接也通过固定关节进行建模。只需要对座椅的缓冲效果进行建模，这些关节上的弹性都需要被包括在内。表3提供模型中所有连接件平动和转动刚度及阻尼系数。

表3　关节弹性参数

Tab.3　Joint elastic parameter

固定关节	平动刚度/(N·m⁻¹)	平动阻尼系数/(N·s·m⁻¹)	转动刚度/(N·m·rad⁻¹)	转动阻尼系数/(N·ms·rad⁻¹)
头部－躯干	113 700, 113 700	66, 66	915	340
躯干－骨盆	299, 299	1 790, 1 790	328	724
骨盆－大腿	6 400, 6 400	61, 61	162	30
大腿－小腿	23 550, 23 550	154, 154	220	104
内脏－躯干	1 930, 0	79, 0	0	0
内脏－骨盆	0, 18 370	0, 197	0	0
座椅－骨盆	905, 121 300	15, 47	0	0
座椅－大腿	614, 16 710	14, 8 010	0	0
座椅－小腿	—	—	—	—

2.3　人体模型模态仿真

使用COMSOL软件中的“多体动力学”接口对人体的各个部分和连接进行建模，并研究全身振动。而坐姿人体模型垂向振动激励下的仿真时间长，计算量大，为了提高仿真效率，减少计算机计算时间。垂向振动仿真的边界条件根据文献[31]进行设置。网格模型如图2a所示，网格总数为3 002，最小单元质量为0.372 1，质量直方图整体靠右（图2b），网格质量满足要求。根据垂向振动仿真输出的座椅面驱动点的振动加速度、人体振动响应的垂向、时域信号结果，选取其中稳定振动的域数据。

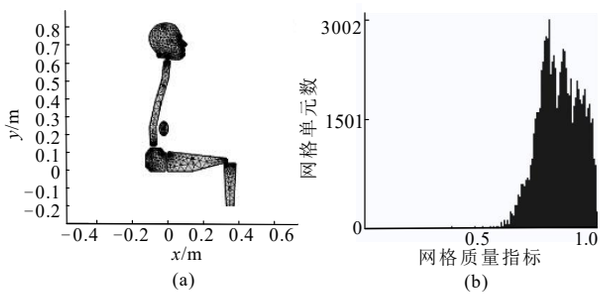

图2　人体网格模型和单元质量直方图

Fig. 2　Human body grid model and cell mass histogram

2.3.1　特征频率分析

由于人体在水平方向的固有频率为3~6 Hz，竖直方向固有频率为4~8 Hz。这一特性对于保障操作人员的安全与健康具有重要意义。基于此，模拟不同激发频率下人体特征模态，重点观察频率在3~10 Hz区间内的情况。如图3所示，频率为（5.409 3+0.864 52i）Hz时，头部、骨盆和内脏会向下移动，而身体的其他部位不会移动太多，此时主要由胸部共振产生，对胸腔内脏影响最大。

频率为（9.331 6+4.409 6i）Hz时，头部、躯干和骨盆等身体部位向下移动，而内脏向上移动，此时由腹部等部位共振产生，对多部位均有较大影响。而频率为（22.818+1.229 2i）Hz时，头部有明显的向上移动，其他部位移动不明显。以上频率状态下，只存在垂直方向的移动，不存在水平移动。而（0.555 73+0.202 3i）Hz时头部、躯干和内脏均有水平移动；频率为（6.239 3+1.022 7i）Hz时，存在躯干骨盆和大腿的水平移动。以上特征频率模拟结果与表1一致。

2.3.2　垂直传递率

由图4可知，频率在3~10 Hz区间内第1共振频率和第2共振频率分别在4~6 Hz和8~10 Hz范围内，即人体全身垂直振动在4~6 Hz处有个最大的共振峰以及在10 Hz附近的一个较小共振峰。此外，频率在20~30 Hz之间还存在第3共振频率，之后随着频率的增加垂直传递率迅速降低。当驱动力频率与人体固有频率相等时，人体会发生共振，造成晕车等现象，人体各器官固有频率为3~70 Hz，头部固有频率为8~12 Hz，腹部内脏固有频率为4~6 Hz。因此驱动力频率尽量避免第1共振频率、第2共振频率和第3共振频率，由于大于70 Hz时，超出人体固有频率，减少了共振出现。

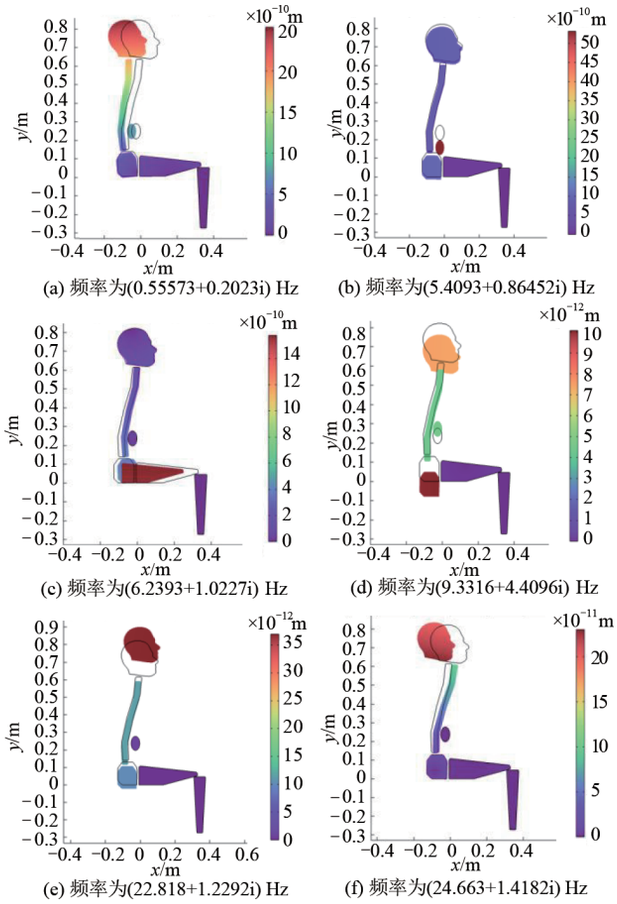

图3 不同特征频率下人体模型模态模拟

Fig. 3 Modal simulation of human body model with different characteristic frequencies

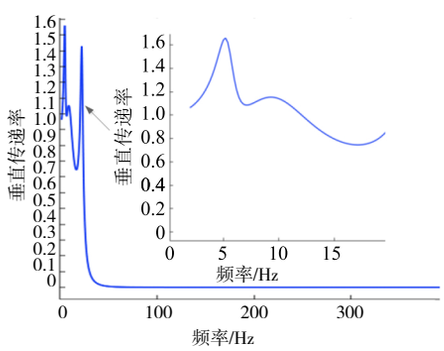

图4 垂直传递率与激发频率关系

Fig. 4 Relationship between vertical transmissibility and excitation frequency

2.3.3 转动传递率

图5为转动传递率随激发频率的变化。转动传递率是头部角加速度和座椅输入加速度之比。如果传递率较高,可能会增加不适感,并影响视野,所以应尽量避免。不建议使用高转动传递率,这是因为除了降低舒适度外,它还直接影响视力。而转动传递率的取值范围与垂直传递率一致,且取值在约22 Hz后有明显下降趋势。

2.3.4 表观质量

图6为系统表观质量随激发频率的变化。表观质量是座椅的力与座椅的输入加速度之比。垂直和转动传递率描述模型的端点特性,而表观质量传达驱动点特性,非末端点的特征,将座椅上的力和运动联系起来。可以看出频率达到第1共振频率(最大表观质量为125.129 2 kg)之后,便开始降低。在15 Hz之后,表观质量维持在20 kg以下。其表示人对频率为4~8 Hz的振动感觉最敏感,频率高于8 Hz,敏感性逐渐减弱。

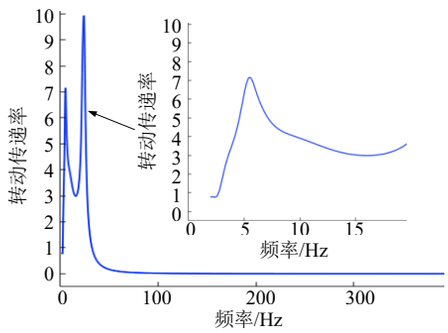

图5 转动传递率与激发频率关系

Fig. 5 Relationship between rotational transmissibility and excitation frequency

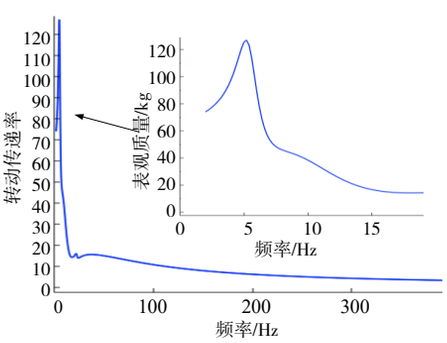

图6 表观质量与激发频率关系

Fig. 6 Plot of apparent mass versus excitation frequency

综上所示,垂直传递率、转动传递率和表观质量变化趋势相似。低频段内有3次共振分别在4~6 Hz、8~10 Hz和20~30 Hz范围内。为了防止振动机械的频率与人体固有频率接近,导致人体内部器官振动幅度增大,进而可能发生共振现象,对人体健康造成危害,乘坐式采茶机的振动频率应尽量避开共振频率,降低传递率。

3 试验验证

通过对国内外学者的试验方案总结与分析,认为加速度比惯性力更适合用于表征舒适性[32-33]。结合现有硬件条件,设计坐姿人体振动试验方案,其试验原理如下:在宜机化的茶园道路(行驶长度为50 m)进行试验,平坦土路地面随机激励频率一般低于3 Hz[34]。由于机械设备在高转速下,受到的惯性力增大,设备轴承负荷加大,以及轴承内部的滚珠撞击等造成的机械振动,使得振动幅值增加。因此试验行驶速度取正常加速模式为1.25 m/s(发动机转速为2 500 r/min)驾驶乘坐式采茶机,用多个采样通道、以连续记录、多次采集的采样方式

采集数据，进行舒适特性分析。如图 7 所示，在发动机（采集信号 CH1）、脚踏板（采集信号 CH2）、座椅支架（采集信号 CH3）和座椅表面（采集信号 CH4）放置加速度传感器，通过使用动态信号采集分析系统对加速度信号采集，最后对采集到的信号进行处理。

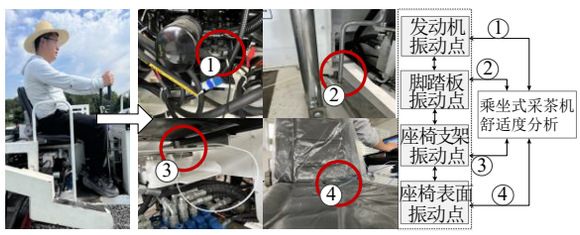

图 7　采茶机振动测试点设置

Fig. 7　Tea picking machine vibration test point set

3.1　试验仪器

采集设备为美国晶钻仪器公司开发的振动控制与动态信号采集分析仪（Spider-80X 型），可广泛应用于多种领域中的结构振动测试、机械状态监测等，以直观、形象的彩色图像实时显示各种数据，并对整个测量过程进行“录像”、储存，用户可随时对测量记录进行查看、分析。传感器采用美国压电公司生产的加速度传感器，其型号为 357B03。随机招募健康青年人参与试验，试验对象以舒适坐姿坐在乘坐式采茶机上进行试验操作（图 8）。



(a) 采集设备　　(b) 试验场所

图 8　采集设备及试验现场

Fig. 8　Acquisition equipment and test site

3.2　坐姿人体振动模型试验验证

利用人-椅界面间的速度对时间的变化率（即加速度）作为指标描述人体在振动下的不舒适感[35]。参考仿真结果给出的共振范围，对采茶机实际工作过程进行振动监测分析。通过离散傅里叶逆变换方法得到 1 s 的加速度时域信号如图 9 所示。

图 9 监测结果显示，在正常运行作业过程中发动机振动范围在-5 g~3 g 之间（图 9a），踏板位置的振动范围在-2 g~6 g 之间（图 9b），驾驶员座位底部固定支架的振动范围在-3 g~3 g 之间（图 9c），而驾驶员座椅上部的振动范围在-1.5 g~1.5 g 之间（图 9d）。对比图 9c 与图 9d 可知，振动幅度降低 1/2。聚氨酯泡沫是座椅坐垫和靠背的主要组成部分，对人-椅间的相互作用有很大影响，可降低振动作业，从而提高坐姿人体舒适性。

从传递率与激发频率的关系（图 10）可知，各振动测试点的传递率随着激发频率的增加而逐渐减小。由图 10d 发现，座椅传递率的波峰主要集中在 100~200 Hz 之

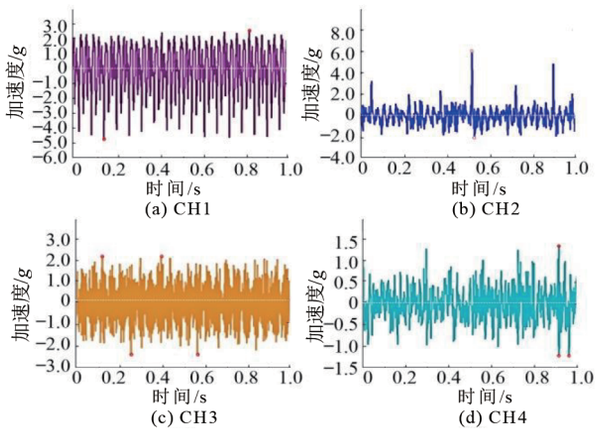

图 9　振动激励时域信号

Fig. 9　Vibration excitation time domain signal

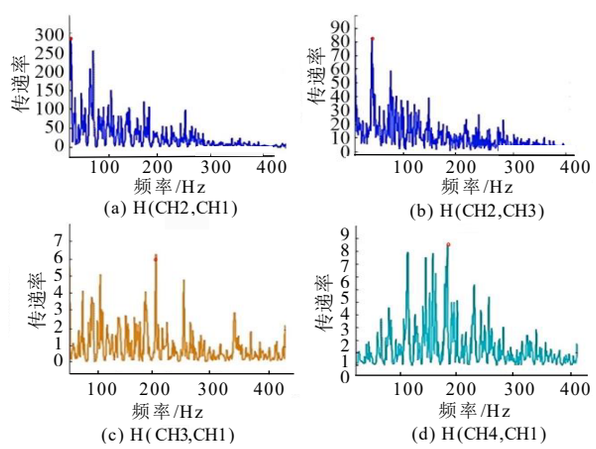

图 10　传递率与激发频率关系

Fig. 10　Relationship between transfer rate and excitation frequency

间，人体的固有频率（表 1）为 3~70 Hz，不在该范围内，对人体影响较小。而小于 100 Hz 低频状态下，特别是在 3 次共振范围内，踏板和座椅处传递率峰值分别达到 80 和 4 以上。如何使频率降低至 70 Hz 以下，尤其是降低 3 个共振频率范围内的传递率，是提高舒适度的关键。发动机是机械主要振动源，如图 10a 所示，其振动的传播直接影响到机械的整机可靠性和使用寿命，使驾驶人员的乘坐舒适性变差，降低工作效率，须采取有效方法来减少振动。

3.3　减振设计试验验证

为了降低振动，在发动机附近加装 4 个 BE-85 型橡胶减振器（图 11）。其采用吸振材料、减振弹簧和气袋衬垫等结构，能够隔绝机械设备与基础建筑的振动，减少机械振动对周围环境和其他机器设备的干扰。通过减少振动和噪声，提高行驶稳定性和乘坐舒适度，改善采茶机行驶平顺性。图 9 与图 12，图 10 与图 13 分别进行对比，减振作用下垂直振动加速度与传递率均有明显降低。同时图 14 减振前振动激励频域加速度变化幅度，与减振后相比也呈下降趋势。频率在 0~49 Hz 区间内，传递率从 0~1.0 降低到 0~0.2，最大值降低 80%，从而改善采茶机噪声和振动性能。而减振后 CH4 采集信号在该

区域的加速度降至0.1 m/s²以内，其中3个共振频率范围内小于0.08 m/s²，不会对人体内脏与脊椎等产生较大影响。



图11 橡胶减振器安装位置示意图

Fig. 11 Installation position diagram of rubber vibration isolator

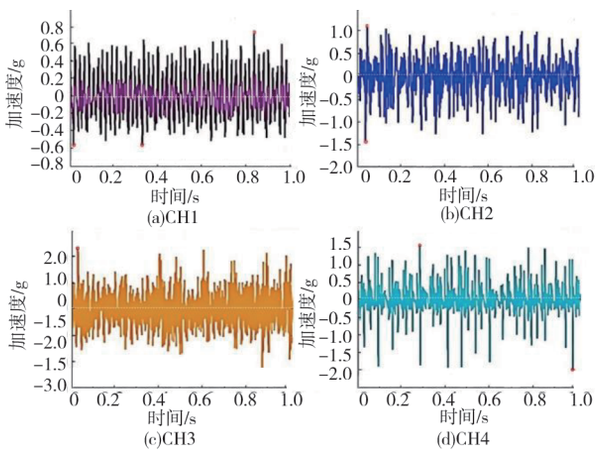

图12 减振作用下振动激励时域信号

Fig. 12 Vibration excitation time domain signal under damping action

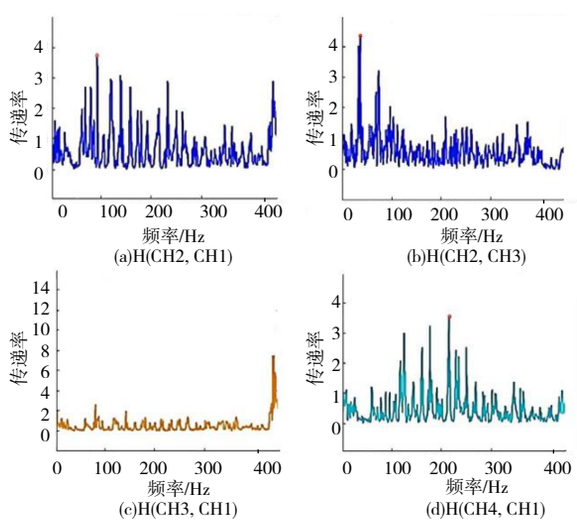

图13 减振作用下传递率与激发频率关系

Fig. 13 Relationship between transfer rate and excitation frequency under shock absorption

4 结论

（1）通过建立坐姿人体模型，进行人体垂向振动响应特性预测，得出人体不同身体部位的运动以及相应垂直传递率、转动传递率和表观质量变化趋势。在不同强弱振动刺激作用下，人体身体部位响应会不同。模拟分析结果显示：低频段内有3次共振，分别在4~6 Hz、8~10 Hz和20~30 Hz范围内。这表明该模型具有一定的预测精度，人体在振动环境中的动态响应可以通过该生物力学模型来预测。

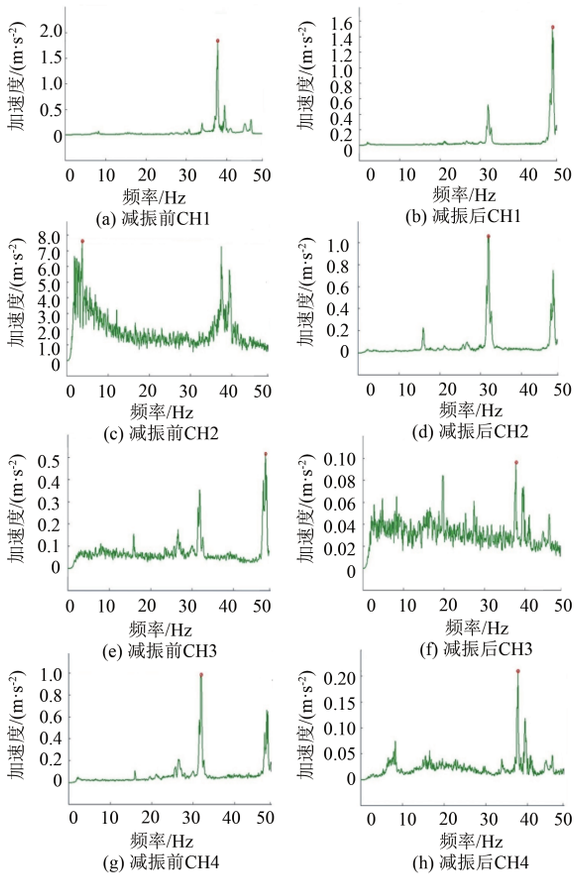

图14 减振前后振动激励频域信号

Fig. 14 Vibration excitation before shock absorption frequency domain signal and after shock absorption frequency domain signal

（2）通过在发动机、脚踏板、座椅支架和座椅表面放置加速度传感器，监测各采集点时域、频域和传递率的变化情况。将采集数据与模型分析结果以及人体各器官共振频率进行对比分析，座椅传递率最大波峰主要集中在100~200 Hz之间，不在共振频率范围内，对人体影响较小。而小于100 Hz低频状态下，特别是在3次共振范围内，踏板和座椅处传递率峰值分别达到80和4以上。

（3）座椅舒适性是舒适性设计的重要内容。由试验对比可知，加装聚氨酯泡沫座椅可降低振动作业。而发动机是机械主要振动源，通过在其周围安装减振器，达到减振效果。为了检验减振效果，对座椅处的振动激励频谱进行了现场测试，试验结果表明，座椅处的振动激励频谱峰值较减振前降低80%，有效地提高了乘坐式采茶机整车平顺性及乘坐舒适性。

参 考 文 献

[1] FABIO G, MARGHERITA P, LUCA Z, et al. An automatic procedure based on virtual ergonomic analysis to promote human-centric

manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 38: 488 - 496.
[2] 杨乐. 农机安全事故原因分析与预防措施[J]. 农机使用与维修, 2021(8): 80 - 81.
[3] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1 - 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1 - 18.(in Chinese)
[4] CAFFARO F, ROCCATO M, CREMASCO M, et al. Falls from agricultural machinery: risk factors related to work experience, worked hours, and operators' behavior[J]. Human Factors, 2018, 60(1): 20 - 30.
[5] OYEKAN J, CHEN Y, TURNER C, et al. Applying a fusion of wearable sensors and a cognitive inspired architecture to real-time ergonomics analysis of manual assembly tasks[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 61: 391 - 405.
[6] SINCHUK K, HANCOCK A L, HAYFORD A, et al. A 3-step approach for introducing computer-aided ergonomics analysis methodologies[C]//International Conference on Human Computer Interaction. Springer, Cham, 2020: 243 - 263.
[7] SAJEEV C P, CHINMAY P D, ZHU W J, et al. Computer-automated ergonomic analysis based on motion capture and assembly simulation[J]. Virtual Reality, 2015, 19(2): 119 - 128.
[8] 翁晓星, 陈长卿, 王刚, 等. 基于CFD-DEM的机采鲜叶管道集叶过程数值模拟研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 424 - 432.
WENG Xiaoxing, CHEN Changqin, WANG Gang, et al. Numerical simulation of leaf gathering process of fresh leaf collecting pipeline based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11):424 - 432. (in Chinese)
[9] 周文明. 基于NX农用三轮汽车驾驶室人机建模及人机舒适性设计[D]. 济南: 山东大学, 2017.
ZHOU Wenming. Design of human-machine-modeling and comfort for three-wheel farm vehicles cab based on NX[D]. Ji' nan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
[10] 王贺. 自走式喷雾机驾驶室的人机优化设计研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
WANG He. Study on man-machine optimal design of self-propelled sprayer cab[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[11] 朱新悦. 自走式收获压捆机驾驶室人机优化设计研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
ZHU Xinyue. Research on man-machine optimization design of cab of self-propelled harvester baling machine[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
[12] 李亘, 黄莎. 城轨车辆乘坐舒适度提升措施[J]. 电力机车与城轨车辆, 2024, 47(5): 118 - 122.
LI Gen, HUANG Sha. Measures to improve the ride comfort of urban rail vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2024, 47(5): 118 - 122(in Chinese).
[13] SUN H. Configuration and maintenance management of highway engineering machinery and equipment[J]. Journal of Architectural Research and Development, 2019, 3(5): 16 - 19.
[14] 高开展. 面向坐姿人体振动舒适性的有限元建模和体压分布研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
GAO Kaizhan. Research on finite element modelling and body pressure distribution for vibration comfort of seated human body[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
[15] 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)
[16] 任德良, 徐书雷, 王兴伟, 等. 基于RAMSIS的拖拉机驾驶室人机工程布置设计与测试[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 303 - 309.
REN Deliang, XU Shulei, WANG Xingwei, et al. Design and test of ergonomic layout for tractor cab based on RAMSIS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 303 - 309. (in Chinese)
[17] 许泽亚, 谢金萍, 雷飞兵, 等. 基于THUMS数字人体模型的大倾角座椅正面碰撞乘员损伤分析[J]. 汽车技术, 2024 (4): 15 - 23.
XU Zeya, XIE Jinping, LEI Feibing, et al. Damage analysis of occupant in front collision of high tilt seat based on THUMS digital human body mode[J]. Automobile Technology, 2024 (4): 15 - 23. (in Chinese)
[18] FAHSE N, MILLARD M, KEMPTER F, et al. Dynamic human body models in vehicle safety. An overview[J]. GAMM-Mitteilungen, 2023, 46(2):1.
[19] 董瑞春. 人体-座椅系统三维有限元建模及其动态特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
DONG Ruichun. Three-dimensional finite element modeling of human body-seat system and its dynamic characteristics research[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017. (in Chinese)
[20] COERMANN R R. The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequencies[J]. Human Factors, 1962, 4(5): 227.
[21] SUGGS C W, ABRAMS C F, STIKELEATHER L F. Application of a damped spring-mass human vibration simulator in vibration testing of vehicle seats[J]. Ergonomics, 1969, 12(1): 79.
[22] International Organization for Standardization. ISO 5982. Mechanical vibration and shock range of idealized values to characterize seated-body biodynamics response under vertical vibration[S]. 2001.
[23] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Modelling the dynamic mechanisms associated with the principalresonance of the seated human body

[J]. Clinical Biomechanics, 2001, 16(Supp.1): 31 - 44.

[24] KIM T H, KIM Y T, YOON Y S. Development of a biomechanical model of the human body in a sitting posture with vibration transmissibility in the vertical direction[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(9): 817 - 829.

[25] 倪伟强, 江庆, 许良元, 等. 悬挂装置参数对拖拉机振动特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 175 - 181.
NI Weiqiang, JIANG Qing, XU Liangyuan, et al. Effects of suspension parameters on vibration characteristics of tractor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 175 - 181. (in Chinese)

[26] ZHANG Xiaolu, YU Peijin, LI Yuejuan, et al. Dynamic interaction between the human body and the seat during vertical vibration: effect of inclination of the seat pan and the backrest on seat transmissibilities[J]. Ergonomics, 2021, 65(5): 51 - 54.

[27] LIU Chi, QIU Yi. Mechanism associated with the effect of backrest inclination on biodynamic responses of the human body sitting on a rigid seat exposed to vertical vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 510(1): 116299.

[28] 宋增峰, 赵晓昱. 某轿车复合材料座椅骨架轻量化研究[J]. 机械设计与制造, 2020 (7): 84 - 88.
SONG Zengfeng, ZHAO Xiaoyu. Study on the lightweight of a car composite seat[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020 (7): 84 - 88. (in Chinese)

[29] 毛恩荣, 齐道新, 顾进恒, 等. 基于分层控制的大功率拖拉机前桥悬架减振系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 404 - 413.
MAO Enrong, QI Daoxin, GU Jinheng, et al. Design and experiment of vibration system for front axle suspension of high-power wheeled tractor based on hierarchical control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 404 - 413. (in Chinese)

[30] 李春雨. 面向静态体压分布和垂向振动响应的坐姿人体模型建模[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
LI Chunyu. The seated human modeling based on body pressure distribution and vertical vibration response[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)

[31] NAWAYSEH N, GRIFFIN M J. Non-linear dual-axis biodynamic response to vertical whole-body vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 268(3): 503 - 523.

[32] 罗巧, 贺岩松, 邱茂昌, 等. 机械冲击下坐姿人体舒适性主客观评价[J]. 声学学报, 2024, 49(2): 238 - 245.
LUO Qiao, HE Yansong, QIU Maochang, et al. Subjective and objective evaluation of seated human discomfort caused by mechanical shocks[J]. Acta Acustica, 2024, 49(2): 238 - 245. (in Chinese)

[33] 丁翰韬, 陈树人, 周巍伟, 等. 喂入量扰动下联合收获机振动特性机理研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 20 - 27, 51.
DING Hantao, CHEN Shuren, ZHOU Weiwei, et al. Mechanism analysis of combine harvester's vibration characteristics under feeding interference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 20 - 27, 51. (in Chinese)

[34] 郑航, 傅童, 薛向磊, 等. 茶叶机械化采摘技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 28 - 35.
ZHENG Hang, FU Tong, XUE Xianglei, et al. Research status and prospect of tea mechanized picking technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 28 - 35. (in Chinese)

[35] International Organization for Standardization, ISO 2631 - 1. Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: general requirements[S]. 1997.

(上接第360页)

[20] 李晓东. 经济海藻裙带菜品种培育和养殖相关问题的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2021.
LI Xiaodong. Study of the economic alga *Undaria pinnatifida*: on its breeding and cultivation of cultivar related issues[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)

[21] 芦莹. 裙带菜优良品系选育的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2018.
LU Ying. Study on improvedstrains breeding of *Undaria pinnatifida*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2018. (in Chinese)

[22] 曹卫彬, 孙胃岭, 牛驰, 等. 基于ANSYS/LS-DYNA的梳夹式红花采摘装置研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 123 - 131.
CAO Weibin, SUN Weiling, NIU Chi, et al. Combed safflower picking device based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 123 - 131. (in Chinese)

[23] 谢卢鑫, 王俊, 程绍明, 等. 整秆式甘蔗收割机剥叶过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 56 - 65.
XIE Luxin, WANG Jun, CHENG Shaoming, et al. Simulation analysis and experiments of leaf stripping process for whole-stalk sugarcane harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 56 - 65. (in Chinese)

[24] ZHANG Hanbing, HUANG Weirong, KANG Huanyu, et al. Research on the biomechanical characteristics of salted wakame (*Undaria pinnatifida*)[J]. Processes, 2023, 11(2): 552 - 569.

[25] 中国人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 16798-2023 食品机械安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.