

# 基于刚柔耦合虚拟样机模型的 收获机振动舒适性仿真分析

周杰 徐红梅 林卫国 钟文杰 刘爽 刘海悦

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 采用 SolidWorks、有限元分析软件与 RecurDyn 相结合的方式建立收获机的人-机-路面系统的刚柔耦合虚拟样机模型,以驾驶员全身振动加权加速度均方根值为评价指标,仿真模拟收获机在水稻、小麦以及油菜田行驶时的振动舒适性。结果表明,行驶速度、路面硬度、竖割刀的添加对收获机振动舒适性影响较大,路面硬度越大、收获机行驶速度越快,人体的主观不舒适性感受就越强烈;竖割刀的添加增强了人体的不舒适感。

**关键词** 收获机; 振动舒适性; 刚柔耦合虚拟样机模型; RecurDyn; 仿真分析

**中图分类号** S 225.31 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)02-0123-08

随着农业机械的推广,农业生产中“耕”、“种”、“收”三个环节的机械化程度得到大幅度提升,有效地提高了农业生产力。联合收获机作为农业生产中“收”这个环节的重要机械,主要用于收获小麦、水稻等作物,随着技术的发展,已开发出能用于收获小麦、水稻、油菜的多功能联合收获机<sup>[1]</sup>。联合收获机在田间工作时,受到多方面振动激励的影响,会产生强烈振动,驾驶员在操作收获机时身体多部位接振引发人体不舒适感。人体长时间接振还会引起疲劳甚至引发神经损伤<sup>[2]</sup>。RecurDyn 作为新一代多体动力学软件,已被应用于农业机械、航空航天、印刷机械、机床设备等机械领域<sup>[3-7]</sup>。不仅如此,RecurDyn 的低速履带模块可用于模拟履带与不同路面接触时的相互作用力<sup>[8-9]</sup>,因而可采用 RecurDyn 软件创建收获机的虚拟样机。

目前,虚拟样机技术已被成功应用于农机装备领域,国内外学者已开展了大量的相关研究工作,并取得了一定的研究成果<sup>[10-14]</sup>。但现有的研究主要是以农机装备的某些关键部件的动力学计算、仿真优化为主,未能考虑多部件同时工作时相互作用力与外部环境的影响。目前,关于收获机的人-机-路面耦合系统的虚拟样机仿真分析鲜见报道。本研究以某稻麦油收获机为研究对象,采用有限元分析软件与 RecurDyn 相结合的方式建立收获机的人-机-路

面系统的刚柔耦合虚拟样机模型,仿真模拟收获机在水稻、小麦以及油菜田行驶时的工作状态,分析并评估其振动舒适性,探究行驶速度、路面硬度以及竖割刀的添加对收获机振动舒适性的影响。相关研究成果可为收获机舒适性设计优化提供科学的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 刚体模型的创建

某稻麦油收获机发动机的功率为 55.16 kW;机体长 4 890 mm、宽 2 250 mm、高 2 470 mm;行走部的履带宽 400 mm,履带接地长度为 1 600 mm;割台的割幅为 2 000 mm。为提高建模效率和模型精度,本研究将收获机的刚体模型分为 2 个模块:主机体模块、履带模块。其中,主机体模块由三维造型软件 SolidWorks 创建,履带模块则由多体动力学软件 RecurDyn 创建。

1) 收获机主机体模块三维几何模型的创建。根据现场测量获得收获机相关部件的形位参数,并采用 SolidWorks 软件完成收获机主机体部分的创建,如图 1 所示。

2) 收获机刚体模型的创建。RecurDyn 软件当中的低速履带模块 Track(LM)具备参数化建模功能,应用该模块完成履带三维实体模型的创建。将 SolidWorks 软件中所创建的收获机主机体以 Para-

收稿日期: 2018-04-08

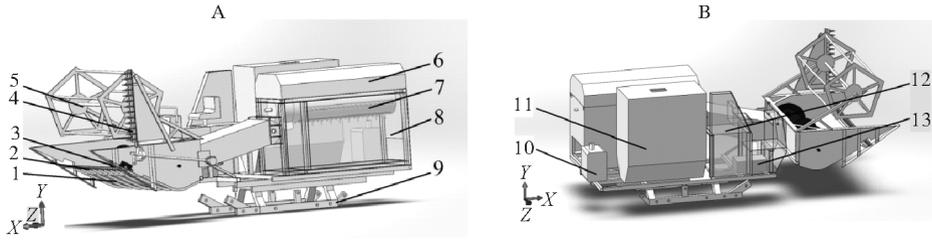
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51405178)

周杰, 硕士, 研究方向: 农机装备噪声与振动控制, E-mail: zjhazou@163.com

通信作者: 徐红梅, 博士, 副教授, 研究方向: 农机装备噪声与振动控制, E-mail: xhm790912@163.com

solid(.x\_t)通用格式文件保存,并将其导入到 RecurDyn 软件中,赋予材料属性为钢(steel),然后与

履带进行组合,即可得到收获机整机刚体模型,如图 2 所示。



A: 主机体左侧部件分布情况 Component distribution on left side of the main body; B: 主机体右侧部件分布情况 Component distribution on right side of the main body; 1.割台 Header; 2.横割刀 Horizontal cutting knife; 3.绞龙 Auger; 4.竖割刀 Vertical cutting knife; 5.拨禾轮 Reel; 6.脱粒滚筒盖 Cover of threshing roller; 7.脱粒滚筒 Threshing roller; 8.脱粒精选仓 Threshing and cleaning bin; 9.履带架 Track frame; 10.油箱 Gas box; 11.谷仓 Barn; 12.驾驶平台 Cab; 13.发动机等效质量块 Engine equivalent mass block.

图 1 收获机主机体模块各部件分布情况

Fig.1 Component distribution of main body module of the combine harvester

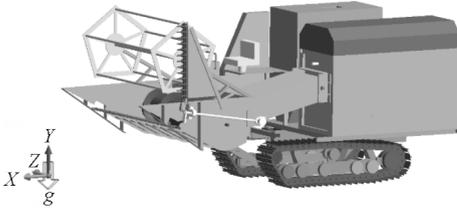


图 2 收获机整机刚体模型

Fig.2 Rigid model of the combine harvester

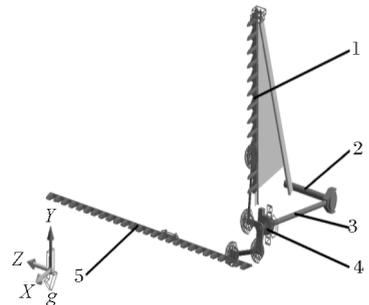
## 1.2 收获机刚柔耦合虚拟样机的创建

1) 收获机车身模态柔性体的创建。收获机机体的振动由振动激励产生,经由车身最终传递到人体。振动在传递过程中因传递的介质不同,振动强度会在一定程度上缩放,为更加真实地模拟车身材料对振动的作用效果,本研究将传递振动的收获机车身进行柔性化处理。

本研究首先采用 HyperMesh 软件对收获机车身进行前处理,其过程包括抽壳、网格划分、赋予材料属性、定义壳网格厚度等基本操作。同时,将面板部分厚度设为 2 mm,骨架部分厚度设为 5 mm;之后,将前处理获得的柔性体文件导入 ANSYS 软件中,在 ANSYS 中设置参数并进行计算,获取制作模态柔性体的关键文件,包括界面点信息(.cm)文件、单元矩阵数据(.emat)文件、材料属性(.mp)文件以及结果(.rst)文件;最后,将相关文件导入 RecurDyn 软件模态柔性体模块中,获得车身的模态柔性体模型。创建模态柔性体过程中,因收获机车身较薄,故采用壳网格创建车身柔性体。较之三维网格,采用壳网格创建柔性体,其单元与节点数量更少,计算速度更快。此外,为了提高计算效率,本研究采用模态

柔性体技术进行刚柔耦合多体动力学分析<sup>[15]</sup>。

2) 收获机关键部件虚拟样机的创建。① 切割器虚拟样机的创建。对收获机切割器部分进行运动学分析发现,收获机切割器的摆轴与轴承之间为旋转副,机体与轴承、主轴、护刃器之间为固定副,护刃器与动刀片之间为移动副,割刀与各连杆以及各连杆与摆轴之间为球副。根据分析结果在相应部件添加运动约束和驱动,驱动施加在摆轴旋转副上,驱动参数为  $18^\circ \cdot \sin(14\pi \cdot t)$ ,图 3 所示为切割器虚拟样机模型。



1.竖割刀 Vertical cutting knife; 2.主轴 Main axle; 3.摆轴 Pendulum axle; 4.轴承 Bearing; 5.横割刀 Horizontal cutting knife.

图 3 收获机切割器虚拟样机

Fig.3 Cutter virtual prototype of the combine harvester

② 履带虚拟样机的创建。履带虚拟样机的创建主要是以 RecurDyn 软件的低速履带模块为基础。首先采用其参数化建模工具创建履带三维实体模型,之后,将履带架设为履带系统的母体,并设置各部件之间的约束关系。刚性悬架与导向轮、支重轮以及托轮设为旋转副,履带架与刚性悬架设为固定副,履带架与驱动轮设为旋转副。通常由驱动轮驱

动履带系统运转,因而将驱动设置在驱动轮上。图 4 所示为履带虚拟样机模型。

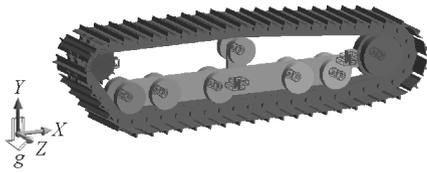


图 4 收获机履带虚拟样机

Fig.4 Track virtual prototype of the combine harvester

3) 收获机刚柔耦合虚拟样机模型的创建。在 RecurDyn 软件中导入车身模态柔性体文件,代替原有的车身刚体部件。为创建收获机整机虚拟样机,应在已创建的关键部件虚拟样机的基础上,为收获机其他运动部件添加约束和驱动。对各部件进行运动学分析,将拨禾轮、脱粒滚筒以及绞龙与收获机车身之间设为旋转副,其他部件与车身之间设为固定副,同时为拨禾轮、脱粒滚筒以及绞龙与车身之间的约束添加驱动。收获机在田间行走时,路面激励通常低于 3 Hz,割刀往复运动所产生的激振频率约为 7.3 Hz 左右,发动机正常工作时的激振频率约为 38.3~41.7 Hz,脱粒滚筒的转动频率为 15~18.3 Hz<sup>[16]</sup>。据此设置收获机各部件的驱动函数,其中脱粒滚筒的驱动函数为  $30\pi t$ ,拨禾轮驱动函数为  $\pi t$ ,绞龙  $5\pi t$ ,摆轴的驱动函数为  $18^\circ \cdot \sin(14\pi \cdot t)$ 。图 5 所示为收获机的刚柔耦合虚拟样机模型。

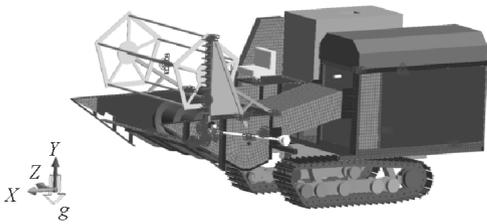


图 5 收获机的刚柔耦合虚拟样机

Fig.5 Rigid-flexible coupled virtual prototype model of the combine harvester

### 1.3 人体模型的创建

本研究主要采用 SolidWorks 软件创建驾驶员人体三维模型。根据国家标准 GB 10000 — 1988 中国成年人人体尺寸确定人体模型尺寸,根据所确定尺寸创建人体三维模型。完成人体三维模型的创建后,以 Parasolid(.x\_t)通用格式文件保存,并将其导入到 RecurDyn 软件中,再根据国家标准 GB/T 17245 — 2004 成年人人体惯性参数赋予人体各部位惯性参数。

创建人体虚拟样机时,人体各肢体部位除具备一定的尺寸和质量外,还包含阻尼和刚度。本研究主要参考 Kumbhar 等<sup>[17]</sup>的研究成果,将人体的脚部与收获机的脚踏板设为点线副约束、人体的手掌与收获机的扶手设为点线副约束、人体躯干与大腿之间设为旋转副约束、人体躯干与手臂之间设为旋转副约束、大腿与小腿之间设为旋转副约束、臀部与座椅设为固定副约束。在各个旋转副上施加螺旋弹簧力模拟人体关节处的刚度和阻尼的作用。其中,人体大腿关节的刚度设为  $328 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ 、阻尼设为  $724 \text{ (N} \cdot \text{m} \cdot \text{s)/rad}$ ;人体膝关节处的刚度设为  $220 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ 、阻尼设为  $104 \text{ (N} \cdot \text{m} \cdot \text{s)/rad}$ ;人体肩关节处的刚度设为  $300 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ 、阻尼设为  $600 \text{ (N} \cdot \text{m} \cdot \text{s)/rad}$ 。图 6 所示为人体虚拟样机模型。

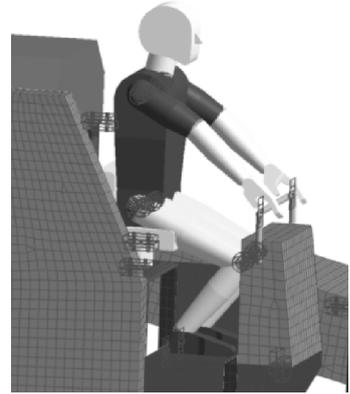


图 6 人体虚拟样机模型

Fig.6 Virtual prototyping of the human body

### 1.4 随机路面激励模型的创建

本研究主要参考国标 GB 7031 — 1986 测量振动输入-路面平度表示方法,创建路面激励。路面等级按照功率谱密度通常划分为 A 到 H 8 个等级<sup>[18]</sup>,农田耕地一般属于 F 级路面<sup>[19]</sup>。目前创建随机路面的方法主要包括谐波叠加法、白噪声法等<sup>[20]</sup>。其中,谐波叠加法是通过将随机相位的正弦或者余弦函数进行叠加来拟合随机路面的不平度。本研究主要采用谐波叠加法创建随机路面激励模型,并采用 MATLAB 软件编制相应的计算程序,生成国标 F 级路面文件,路面长为 1 500 m,宽为 4 m。

### 1.5 人-机-路面耦合系统多体动力学模型

将已创建的 F 级路面文件及人体模型导入 RecurDyn 软件,并与收获机的刚柔耦合虚拟样机模型进行组合,通过对人体各部位添加相应的约束与载荷,即可得到收获机-人-机-路面耦合系统多体动力学模型,如图 7 所示。

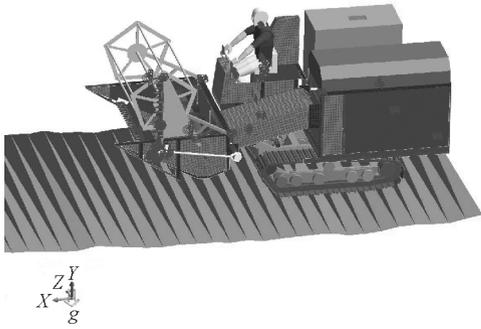


图 7 人-机-路面耦合多体动力学模型

Fig.7 Multi-body dynamic model of the human-machine-pavement coupled system

## 2 结果与分析

### 2.1 收获机振动舒适性的评价方法

本研究主要采用加权加速度均方根值对收获机 如表 1 所示。

表 1 1/3 倍频程加权因子

Table 1 1/3 octave weighting factor

频率/Hz Frequency	垂直方向 (Y 轴方向)加权因子 Weighted factor of Y axis	水平方向 (X、Z 轴方向)加权因子 Weighted factor of X、Z axis	频率/Hz Frequency	垂直方向(Y 轴方向) 加权因子 Weighted factor of Y axis	水平方向 (X、Z 轴方向)加权因子 Weighted factor of X、Z axis
0.40	0.352	0.713	6.30	1.054	0.323
0.50	0.418	0.853	8.00	1.036	0.253
0.63	0.459	0.944	10.00	0.988	0.212
0.80	0.477	0.992	12.50	0.902	0.161
1.00	0.482	1.011	16.00	0.768	0.125
1.25	0.484	1.008	20.00	0.636	0.100
1.60	0.494	0.968	25.00	0.513	0.080
2.00	0.531	0.890	31.50	0.405	0.063 2
2.50	0.631	0.776	40.00	0.314	0.049 4
3.15	0.804	0.642	50.00	0.246	0.038 8
4.00	0.967	0.512	63.00	0.186	0.029 5
5.00	1.039	0.409	80.00	0.132	0.021 1

2) 轴向加权。国际标准 ISO 2631-1-1997(E) 对各轴向加权的权重系数以及加权计算公式进行了明确规定。根据该标准,座椅水平方向的权重系数应取  $k=1.4$ ,垂直方向的权重系数应取  $k=1$ ,本研究 X、Z 轴方向为水平方向,Y 轴方向为垂直方向。驾驶员全身振动联合加权加速度均方根值  $a_w$  采用公式(2)进行计算。

$$a_w = \sqrt{(1.4a_{wx})^2 + (1.4a_{wz})^2 + a_{wy}^2} \quad (2)$$

式(2)中, $a_{wx}$ 、 $a_{wy}$ 、 $a_{wz}$  分别表示 X、Y、Z 轴向的加权加速度均方根值,  $m/s^2$ 。表 2 所示为驾驶员全身振动联合加权加速度均方根值  $a_w$  与人体主观

振动舒适性进行分析与评价,其计算主要参考国标 GB/T 8421-2000、国际标准 ISO 2631-1-1997(E) 以及国标 GB/T 13876-2007。

1) 频率加权。将采集的振动加速度时域函数  $a(t)$  进行傅里叶变换,获得功率谱密度函数  $G_a(f)$ ,之后按照公式(1)计算各轴向加权加速度均方根值。

$$a_{wf} = \sqrt{\int_{0.5}^{80} W^2(f) G_a(f) df} \quad (1)$$

式(1)中: $a_{wf}$  为各轴向频率加权加速度均方根值,单位为  $m/s^2$ ;  $W(f)$  为频率加权函数;  $G_a(f)$  为功率谱密度函数。

本研究采用国标 GB/T 8421-2000 农业轮式拖拉机驾驶座传递振动的试验室测量与限值中规定的 1/3 倍频程带宽法创建加权函数,具体加权因子

如表 1 所示。

感受之间的关系。

表 2  $a_w$  与人体主观感受的关系Table 2 Relations between feelings and  $a_w$ 

$a_w / (m/s^2)$ Joint weighted RMS	人体主观感受 Subjective feelings of human body
<0.315	没有不舒适 No discomfort
0.315~0.63	有一些不舒适 Some discomfort
0.50~1.00	比较不舒适 Relatively discomfort
0.80~1.60	不舒适 Discomfort
1.25~2.50	很不舒适 Great discomfort
>2.00	极不舒适 Extremely discomfort

### 2.2 稻麦油收获机振动舒适性仿真分析

采用收获机人-机-路面系统刚柔耦合虚拟样机进行仿真分析时,应设置履带与路面的接触。表 3 所示为不同类型土壤的力学参数。根据不同类型土壤的力学特性,本研究分别采用黏质土、低塑性黏土以及重质黏土模拟水稻田、油菜田以及小麦田中的泥土。

表 3 不同类型土壤的力学参数  
Table 3 Parameters of soil mechanics

参数 Parameter	黏质土 Clayey soil	低塑性黏土 Lean clay	重质黏土 Heavy clay
内聚变形模量/(N·m <sup>-(n+1)</sup> ) Cohesive modulus	0.417	4.127	5.173
摩擦变形模量/(s·m <sup>-(n+2)</sup> ) Friction deformation modulus	0.021 9	0.433 0	0.633 0
土壤变形指数 Soil deformation index	0.50	0.20	0.13
内聚压力/Pa Cohesion pressure	0.004 1	0.069 0	0.069 0
剪切阻力角/(°) Shear resistance angle	13	20	34
剪切变形模量/(N·m <sup>(n+1)</sup> ) Shear deformation modulus	25	25	25
下沉率/% Sink rate	5	5	5

收获机进行收获作业时其行驶速度一般为 2~4 km/h<sup>[21]</sup>。设收获机在油菜田行驶的速度分别为 2、3、4 km/h,因 STEP 函数的加速过程比较平缓,能较好地模拟大型机械系统的加速过程,故本研究采用 STEP 函数模拟收获机履带的驱动过程。根据履带驱动轮的尺寸参数以及收获机的行驶速度,当收获机的行驶速度为 2 km/h 时,驱动轮的驱动函数设为 STEP(time, 0, 0, 2, 270 d);当收获机的行驶速度为 3 km/h 时,驱动轮的函数设为 STEP(time, 0, 0, 2, 406 d);当收获机的行驶速度为 4 km/h 时,驱动轮的驱动函数设为 STEP(time, 0, 0, 2, 540 d)。

1) 油菜田行驶时的振动舒适性仿真分析与评价。对收获机进行仿真分析前还应设置履带与路面之间的接触,在 RecurDyn 低速履带模块中将履带与路面之间的接触设置为低塑性黏土,以此模拟油菜田的土质,之后设置履带驱动轮的驱动函数以确保仿真分析时收获机的行驶速度分别为 2、3、4 km/h。图 8 所示为收获机在油菜田行驶时的状态。

以 2 km/h 的速度在油菜田行驶为例,首先应设置仿真时必要的参数、合理的仿真时间以及仿真步长,之后应用 Scope 命令测量人体躯干质心振动

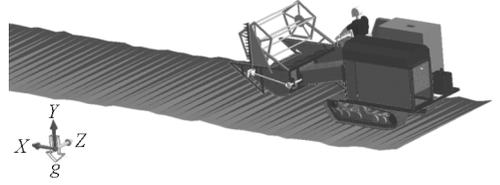


图 8 油菜田行驶仿真模拟

Fig.8 Simulation of the process when riding the machine in the rape field

加速度,完成虚拟样机的多体动力学仿真分析,获得加速度时域函数  $a(t)$ ,对加速度时域函数  $a(t)$  进行快速傅立叶变换,获得其频谱函数与功率谱密度函数,如图 9、10 所示。

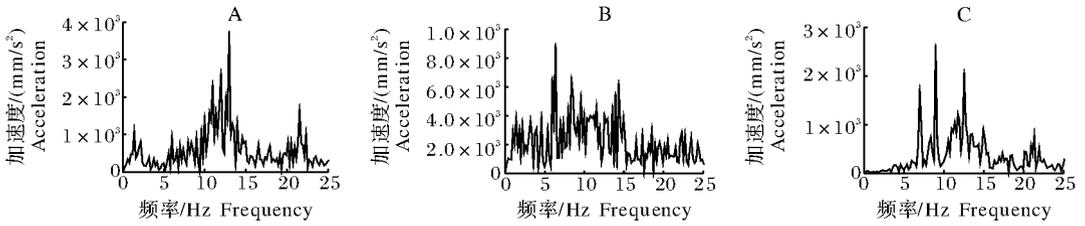
由图 9 可知,X 轴向上的振动在 13 Hz 处均出现峰值,说明 X 轴向上的振动主要由脱粒滚筒激励引起,Y 轴向上的振动在 6、8、14 Hz 处均出现峰值,且 3 Hz 以内的振动幅值较大,无突出峰值,符合路面激励特征,说明 Y 轴向上的振动主要由割刀激励、脱粒滚筒激励以及路面激励引起,Z 轴向上的振动在 7、9、12.5 Hz 处均出现峰值,说明 Z 轴向上的振动主要由割刀激励与脱粒滚筒激励引起。

2) 水稻田行驶时的振动舒适性仿真分析与评价。稻麦油收获机在收获油菜时通常会将竖割刀拆下以降低收获机功耗和振动。当收获机在水稻田行驶时,若要对其振动舒适性进行仿真分析,首先需要去掉模型中的竖割刀及其附件。同时还需要将履带与路面的接触设为黏质土,设置履带驱动轮的驱动函数,以确保收获机的行驶速度分别为 2、3、4 km/h,然后测试人体躯干质心位置的振动加速度,并计算其功率谱密度函数。

3) 小麦田行驶时的振动舒适性仿真分析与评价。当收获机在水稻田行驶时,同样需要去掉竖割刀及其附件。同时需要将履带与路面的接触设为重质黏土,设置驱动轮的驱动函数,以确保仿真时收获机的行驶速度分别为 2、3、4 km/h,然后测试人体躯干质心位置的振动加速度,计算其功率谱密度函数。

### 2.3 仿真结果

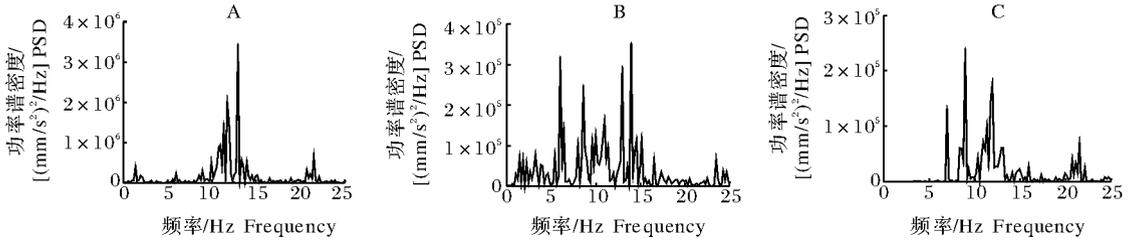
根据公式(1),将各轴向的功率谱密度函数  $G_a(f)$  进行频率加权,加权后得到各轴向的加权加速度均方根值  $a_{wf}$ ,然后根据公式(2)对各轴向的加权加速度均方根值  $a_{wf}$  进行轴向加权,得到驾驶员全身振动联合加权加速度均方根值  $a_w$ ,根据  $a_w$  与人体主观感受的关系评价人体振动舒适性。



A: X 轴 X axis; B: Y 轴 Y axis; C: Z 轴 Z axis.

图 9 人体质心位置的加速度频谱

Fig.9 Acceleration spectrum of the mass center of human body



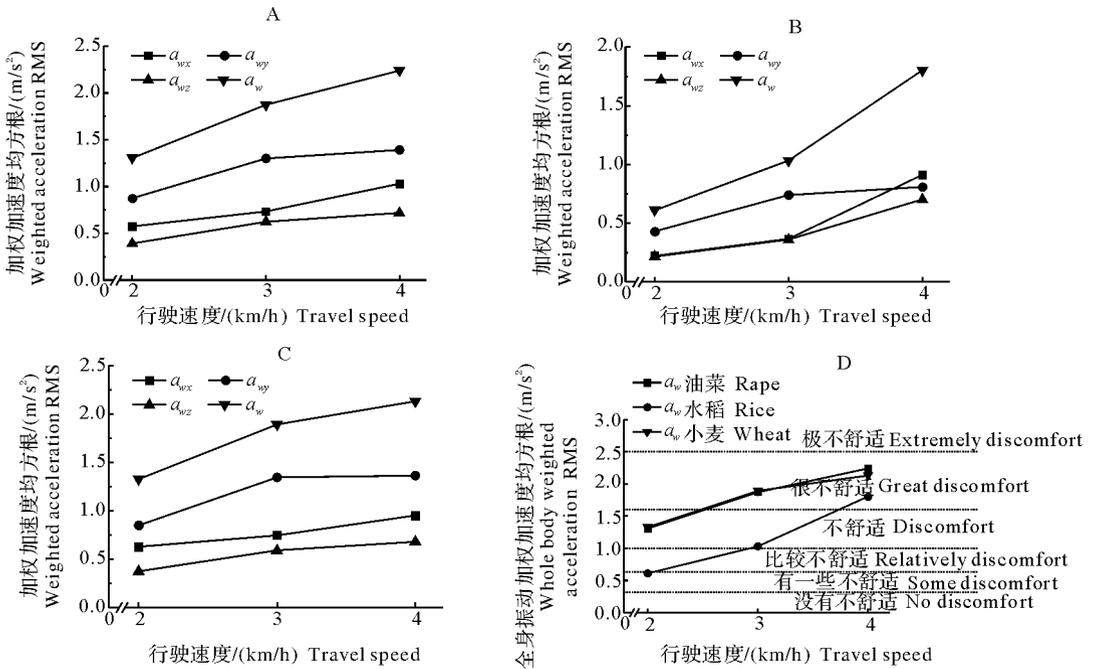
A: X 轴 X axis; B: Y 轴 Y axis; C: Z 轴 Z axis.

图 10 人体质心位置的加速度功率谱密度

Fig.10 Acceleration power spectral density of the mass center of human body

仿真模拟收获机在水稻田以及在小麦田行驶时,均去掉了竖割刀激励。根据不同土壤力学参数可知水稻田土质较之于小麦田土质更为松软。对比

图 11B 以及图 11C 的仿真结果可知,当行驶速度相同时,收获机在水稻田行驶时驾驶员全身振动加权加速度均方根值  $a_w$  小于小麦田,说明收获机在硬度



A: 油菜田行驶仿真结果 Simulation results when the machine travels over the rape field; B: 水稻田行驶仿真结果 Simulation results when the machine travels over the rice field; C: 小麦田行驶仿真结果 Simulation results when the machine travels over the wheat field; D: 人体主观感受评价 Subjective feeling evaluation.

图 11 不同条件下人体质心位置的加权加速度均方根

Fig.11 Acceleration of human body center mass under different operating conditions

较大路面行驶时,人体的不舒适感更为强烈,硬度较大的路面能提供更为强烈的随机振动。

仿真模拟收获机在油菜田行驶时,保留了竖割刀激励。根据不同土壤力学参数可知油菜田较之于小麦田土质更为松软因而小麦田路面能提供更为强烈的随机振动。对比图 11A 以及图 11C 的仿真结果可知,当行驶速度相同时,收获机在油菜田行驶时驾驶员全身振动加权加速度均方根值  $a_w$  与小麦田接近,说明竖割刀提供了重要的振动激励,竖割刀的添加加剧了人体的不舒适感。

由图 11 可知,收获机行驶速度与各轴向的加权加速度均方值  $a_{wf}$  以及全身振动加权加速度均方值  $a_w$  成正相关,收获机行驶速度越快人体的主观不舒适性感就越强烈。由图 11D 可知,收获机在不同工作条件以不同速度在硬度不同的路面行驶时,驾驶员的主观感受表现不佳。

### 3 讨论

本研究以某稻麦油收获机为研究对象,综合考虑路面激励、收获机自身振动激励、人体振动敏感特性等因素对收获机振动舒适性的影响,采用 Solid-Works 软件、有限元分析软件与 RecurDyn 相结合的方式,建立收获机的人-机-路面系统的刚柔耦合虚拟样机模型,仿真模拟了收获机在水稻、小麦以及油菜田行驶时的振动舒适性。结果表明,行驶速度、路面硬度以及竖割刀激励对其振动舒适性有较大影响,竖割刀激励会加剧人体的不舒适感;随着收获机行驶速度以及路面硬度的提升,人体振动不舒适感会明显增强;当收获机以不同速度在水稻、小麦以及油菜田行驶时,对仿真结果分析发现,驾驶员的主观感受均为不舒适及以上。但本研究未针对人体的不舒适感受提出解决方案,因此,后续研究可以本研究所建立的收获机刚柔耦合多体动力学模型为基础,通过增加座椅悬架系统或底盘悬挂系统来改善其振动舒适性。

本研究所创建的人-机-路面耦合虚拟样机的振动激励主要包括路面激励、割刀激励以及脱粒滚筒激励,这些振动激励的频率在 20 Hz 以内<sup>[22]</sup>。相关研究表明,人体振动的“敏感频率”主要集中在 20 Hz 以内<sup>[23]</sup>,国际标准 ISO 2631-1—1997(E)规定了各轴向上振动频率加权函数值较大的区域在 20 Hz 以内,因此,创建振动激励在 20 Hz 以内的虚拟样机进行仿真试验虽然可以真实地反映出人体的振动舒

适性,但还不够精准。后续研究可以本研究所建立的收获机虚拟样机模型为基础,创建发动机激励等高频振动激励,以提升仿真分析的真实性和舒适性评价结果的可靠性。

### 参 考 文 献

- [1] 李海同,黄鹏,舒彩霞.我国稻麦油机械化收获技术研究现状与趋势[J].农业工程,2013,3(5):1-6.
- [2] 董霜,朱元清.环境振动对人体的影响[J].噪声与振动控制,2004,24(3):22-25.
- [3] 周孔亢,陆建辉,侯永涛,等.基于 RecurDyn 的钢板弹簧动力学模型的建立与参数辨识[J].机械工程学报,2014,50(4):128-134.
- [4] 毛君,张瑜,刘占胜,等.间隙条件下刨煤机刨头接触碰撞动态特性研究[J].振动与冲击,2015,34(19):224-229.
- [5] 李耀明,陈劲松,梁振伟,等.履带式联合收获机差速转向机构设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(7):127-134.
- [6] 药晓江,高峰,周煜,等.可变直径轮全地形车辆越障性能分析[J].农业机械学报,2013,44(2):6-11.
- [7] BAE J J, KANG N. Design optimization of a mecanum wheel to reduce vertical vibrations by the consideration of equivalent stiffness[J]. Shock & vibration, 2016(4):1-8.
- [8] 徐飞军,黄文倩,陈立平.履带拖拉机软土地行走动力学仿真[J].农机化研究,2009,31(12):204-207.
- [9] 陈安成,穆希辉,杜峰坡,等.基于 RecurDyn 的小型履带车的建模与仿真[J].机械设计,2013,30(10):36-39.
- [10] EHTONEN T J, JUHALA M. Predicting the ride behaviour of a suspended agricultural tractor[J]. International journal of vehicle systems modelling and testing, 2005,1(1/2/3):131-142.
- [11] HATTON B, GAGNOL V, BOUZGARROU B C, et al. Modeling and simulation of an harvester head mechanism[J]. Mechanics & industry, 2017,18(3):309.
- [12] 张宗玲,韩增德,李树君,等.玉米穗茎兼收割台切割夹持输送装置仿真与试验[J].农业机械学报,2016,47(S1):215-221.
- [13] 周杰,徐红梅,王君,等.基于 ADAMS 的轮式拖拉机行驶平顺性研究[J].华中农业大学学报,2017,36(3):93-100.
- [14] 鲁云松,朱明,陈海军,等.二自由度振动筛运动学分析及仿真试验[J].华中农业大学学报,2017,36(3):107-112.
- [15] 刘义. RecurDyn 多体动力学仿真基础应用与提高[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [16] 李耀明,孙朋朋,庞靖,等.联合收获机底盘机架有限元模态分析与试验[J].农业工程学报,2013,29(3):38-46.
- [17] KUMBHAR P, XU P, YANG J. Evaluation of human body response for different vehicle seats using a multibody biodynamic model[J]. AE technical paper, 2013(1):994.
- [18] 罗竹辉,魏燕定,周晓军,等.随机激励三维路面空间域模型建模与仿真[J].振动与冲击,2012,31(21):68-72.
- [19] 谢斌,鲁倩倩,毛恩荣,等.基于 ADAMS 的联合收割机行驶平顺性仿真[J].农机化研究,2014,36(11):38-41.

- [20] 贾进峰,张进秋,张建,等.基于路面谱随机激励的履带车辆舒适性仿真研究[J].系统仿真学报,2012,24(6):1350-1354.
- [21] 李守斌.联合收割机的作业速度如何确定[J].农机安全监理,2001(5):44.
- [22] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(下册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [23] 陈勇,朱思洪,马然.拖拉机振动对驾驶员舒适性影响的试验研究[J].拖拉机与农用运输车,2013(5):13-15.

## Simulation analysis of vibration comfort of combine harvester based on rigid-flexible coupled virtual prototype model

ZHOU Jie XU Hongmei LIN Weiguo ZHONG Wenjie LIU Shuang LIU Haiyue

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*

**Abstract** A rigid-flexible virtual prototype model of the man-machine-pavement system of the harvester was established by combining finite element analysis software with the software of SolidWorks and RecurDyn. Weighted root mean square values of acceleration was used to evaluate the vibration comfort of the harvester. On the basis of the virtual prototype model of the system, the vibration comfort of the harvester was simulated when it harvests the rice, wheat and rapeseed. The results showed that the driving speed, the road surface hardness and the vertical cutting knife influence the vibration comfort of the harvester greatly. With the increase of driving speed of the harvester, the weighted acceleration RMS of the mass center of human body in different axis and the whole-body vibration acceleration RMS increased rapidly, enhancing the subjective discomfort feeling of the driver. In addition, the vertical cutting knife enhanced the discomfort feeling of the human body. The subjective discomfort feeling of the drive enhanced with adding the vertical cutting knife.

**Keywords** combine harvester; vibration comfort; rigid-flexible coupled virtual prototype model; RecurDyn; simulation analysis

(责任编辑:陆文昌)