

尚昱君,王启超,张文杰,等.拖拉机方向盘手传振动评价与驾驶员手臂振动传递特性[J].华中农业大学学报,2022,41(6):277-285.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.033

## 拖拉机方向盘手传振动评价与驾驶员 手臂振动传递特性

尚昱君,王启超,张文杰,徐红梅,徐正

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** 为探究拖拉机方向盘手传振动传递规律,减少拖拉机驾驶员手传振动暴露量,预防手臂振动病发生,本研究以某拖拉机方向盘与驾驶员手臂系统为研究对象,采用ISO 5349评价体系对拖拉机在2种不同路况下的手传振动进行综合评价,并对不同百分位驾驶员手臂系统进行振动传递特性分析。结果显示,该拖拉机的日振动暴露量为 $4.257 \text{ m/s}^2$ ,超过国标GB Z 2.2—2007《作场所有害因素职业接触限值 第2部分:物理因素》规定的日振动暴露量限值( $3.5 \text{ m/s}^2$ ),具有引发手臂振动病的较高风险;方向盘轴向振动远大于切向和径向振动,是引发手传振动的主要因素;径向的振动从手背经过手腕传递到小臂时被大量吸收,切向的振动从小臂经过肘关节传递到大臂时被大量吸收;驾驶员体型越小,各轴向手背测点的振动传递率越大,随着体型的增大,低频范围(20 Hz以下)的振动从手背传递到小臂过程中有明显的增大。研究结果表明,工程实际中小体型驾驶员要注意手掌的振动防护,而大体型驾驶员更应注重手腕部分的振动防护;对驾驶员手腕应主要加强径向的防护,对肘关节主要加强切向的防护。

**关键词** 拖拉机;方向盘;手传振动;振动传递特性;振动传递率

**中图分类号** S219.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0277-09

拖拉机作为农业作业中的关键动力来源,被广泛应用于农业作业过程中的各个环节。由于受到传动系统运转、自身结构特点以及农田不平度等影响,拖拉机在作业过程中会不可避免地产生强烈的振动,通过机体传递到驾驶员的振动会显著影响驾驶员的操纵舒适性,严重情况下还可能威胁到驾驶员的人身安全。通过方向盘传递到人体手臂系统的振动被称作手传振动,长期接触手传振动会引起末梢循环、末神经和骨关节肌肉系统的障碍,严重情况还会发展为国家法定职业病手臂振动病<sup>[1]</sup>。拖拉机驾驶员在进行农业作业时需要长期操纵方向盘,剧烈的振动由机体传递到方向盘,会使驾驶员承受大量的手传振动,严重影响驾驶员的作业效率和疲劳程度。为了降低手传振动对驾驶员的危害,必须对机体传递到驾驶员手臂系统的振动进行科学评价与有效控制。

目前,国内外学者对手传振动相关问题进行了

大量的研究,包括了手传振动的评价方法、传递规律以及防护手段等。经过多年的发展,手传振动主要形成了2种评价体系,分别是吸收功率法与ISO 5349评价体系。吸收功率法的评价指标是人体吸收机械功率的大小,即振动能量沿人体全身衰减传递过程中振动能量随时间的变化率<sup>[2]</sup>。由于吸收功率法计算的是人体各个方向的吸收功率总和,其计算步骤较为繁琐,而且不能对具体轴向的振动进行评价。ISO 5349评价体系是以频率计权加速度均方根值为基本参量,以日振动暴露量为评价指标的手传振动评价体系,由国际标准化组织于1979年颁布,现行的ISO 5349-1—2001《Mechanical vibration-Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration: Part1: General requirements》明确规定了手传振动的测量与评价方法。根据国家的实际生产情况,我国先后于2009年和2014年依据ISO 5349评价体系颁布了适合国家实际情况的新国标

收稿日期:2022-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51875230)

尚昱君,E-mail:825675910@qq.com

通信作者:徐红梅,E-mail:xhm790912@163.com

GB/T 14790.1—2009《机械振动 人体暴露于手传振动的测量与评价 第一部分:一般要求》和 GB/T 14790.2—2014《机械振动 人体暴露于手传振动的测量与评价 第二部分:工作场所测量实用指南》。与吸收功率法相比,ISO 5349 评价体系以日振动暴露量为评价指标,计算更便捷,评价体系更完善。Maeda 等<sup>[3]</sup>通过试验验证了 ISO 5349 评价体系的有效性;Sabu 等<sup>[4]</sup>建立了人体弯曲手臂系统的生物力学模型,预测穿戴不同减振手套的手臂振动传递特性。Wang 等<sup>[5]</sup>开发了一种混合手臂模型,用来模拟内燃叉车操作过程中驾驶员手臂的振动传递;马文凯等<sup>[6]</sup>建立了五自由度手传振动生物力学模型,预测便携式风力发动机作业给人体手臂带来的振动影响;吴明忠等<sup>[7]</sup>根据 ISO 5349 评价体系对割草机和绿篱机的手臂进行手传振动评价,给出了作业人员每日接振时间的建议;Zhang 等<sup>[8]</sup>利用振动手柄对不同握力状态下的手臂振动传递特性进行测试分析,发现握力的增加将导致振动能量更有效的传输到手臂系统。虽然国内外研究人员对手传振动相关问题进行了大量研究,但目前有关手传振动发病机制尚不明确;国内研究机构对手传振动危害的重视程度不够,有关拖拉机手传振动问题以及不同百分位人体手臂振动传递特性的研究鲜见报道。

本研究以拖拉机方向盘与驾驶员手臂系统为研究对象,基于 ISO 5349 评价体系对拖拉机方向盘手传振动进行评价,同时对不同百分位驾驶员手臂系统的振动传递特性进行测试分析,探究手传振动传递规律,旨在为减少拖拉机驾驶员手传振动暴露量以及预防手臂振动病发生提供指导和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 手传振动评价方法

比较吸收功率法与 ISO 5349 评价体系 2 种评价方法,ISO 5349 评价体系以频率计权振动加速度均方根值为评价指标计算更为便捷,评价体系更为完善。因此,本研究采用 ISO 5349 评价体系作为拖拉机的手传振动测量与评价标准。

1) ISO 5349 评价体系简介。ISO 5349 评价体系在对手传振动进行评价时主要是基于 3 个轴向的振动总值进行评价<sup>[9]</sup>。因为综合考虑了各个轴向的振动,故更适合对具有多轴振动激励的方向盘进行评价。首先根据标准规定坐标系测量计算方向盘各轴向的振动加速度均方根值  $a_{hi}$ ,之后依据 1/3 倍频率计权因子  $W_{hi}$  计算各轴向的频率计权加速度均方根

值  $a_{hvc}$ ,最后根据 3 个轴向的频率计权加速度均方根值计算手传振动的振动总值,计算出振动总值之后就可以计算振动暴露量,根据 ISO 5349 评价体系,振动暴露量取决于振动的幅值与暴露时间,而日暴露量  $A(8)$  就是在一个工作日内手传振动的暴露量。计算公式为:

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (1)$$

式(1)中, $T$ 为振动  $a_{hvc}$  的日暴露时间; $T_0$ 为参考时间 8 h (28 800 s);日振动暴露量  $A(8)$  的单位为  $m/s^2$ 。考虑到在 1 个工作日内振动装置可能由几种不同振动幅值的作业状态组成,ISO 5349 评价体系给出了不同作业状态下的日振动暴露量  $A(8)$  的计算公式为:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{hvi}^2 T_i} \quad (2)$$

式(2)中, $a_{hvi}$ 为第  $i$  个作业状态的振动总值; $n$ 为作业状态的个数; $T_i$ 为第  $i$  个作业状态的作业时间。对于拖拉机方向盘来说,主要的作业状态在于行进路面的不同,分别有中速挡位沥青路面行进和低速档位田地行进 2 种情况<sup>[10]</sup>,考虑到实际使用情况与测量数据结果,设定在 1 个工作日内路面行进状态的时间为 0.5 h,田地行进状态的时间为 7.5 h。

2) 手传振动限值计算。计算出的日振动暴露量即可用于手传振动的评价,但 ISO 5349 评价体系并未规定具体的安全振动暴露限值,只给出了具有参考价值的报告以及手臂振动病患率的预测函数,认为日振动暴露量小于  $2 m/s^2$  的手传振动很少会引起手臂振动病发生,而日振动暴露量小于  $1 m/s^2$  的手传振动未引起过手臂振动病的发生。欧盟指令 2002/44/EC 《On the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agent (vibration)》与美国国家标准 ANSI S2.70—2006 《Guide for the measurement and evaluation of human exposure to vibration transmitted to the hand》中对日振动暴露量限值进行了规定,其中日振动暴露量安全限值为  $5 m/s^2$ ,作用值为  $2.5 m/s^2$ 。我国的指导性国标 GB Z 2.2—2007 《作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分:物理因素》针对我国实际情况对手传振动 4 h 等能量频率计权振动总值  $a_{hv(eq,4h)}$  进行了职业接触限值的规定,为  $5 m/s^2$ 。为了便于比较不同作业时间的日振动暴露量和适应 ISO 5349 评价体系,需要将 4 h 等能量频率计权振动总值  $A(4)$  转化为 8 h 等能量频率计权振动

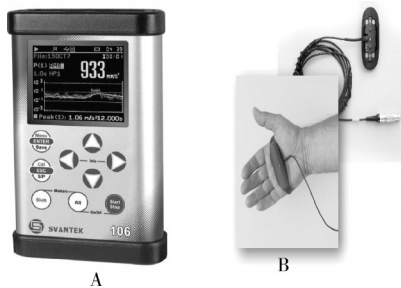
总值 $A(8)$ ,转换公式为:

$$A(8)=A(4)\sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (3)$$

式(3)中, $T$ 代表振动总值 $A(4)$ 的暴露时间,即4 h; $T_0$ 为参考时间8 h。换算之后的8 h等能量频率计权振动总值 $A(8)$ 的日暴露量限值为 $3.5 \text{ m/s}^2$ 。

### 1.2 试验仪器与设备

试验所用拖拉机为东方红LX804型轮式拖拉机,长、宽、高分别为4 350、2 170、2 740 mm,整机质量3 675 kg,发动机额定转速为2 300 r/min。振动测量仪器为波兰Svantek SV106手传振动分析仪和SV105A手臂振动加速度传感器(图1),此传感器为三轴加速度传感器,可同时记录 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 3个轴向的时域信号,适用于手传振动的测量。其测量范围为 $0.2\sim 2\,000 \text{ m/s}^2$ ,灵敏度为 $6.61 \text{ mV/g}$ ,测量频率范围为 $1\sim 1\,500 \text{ Hz}$ ,具有符合ISO 5349评价体系的计权滤波器与相应的频带限制滤波器,仪器设备均经过校准调试。



A:SV106人体振动测量仪 SV106 human body vibration measuring instrument;B:SV105A手带式加速度传感器 SV105A hand belt acceleration sensor.

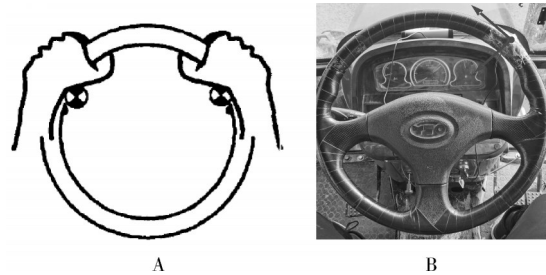
图1 试验所用仪器与设备

Fig.1 Sensor and equipment of test

### 1.3 试验方法

晴天,试验地点分别选择在沥青路面与收割过的耕地上,其中沥青路面与耕地的路面不平度分别

是D级和F级<sup>[11]</sup>。拖拉机在沥青路面上以中二档位行进,在耕地上以低二档行进。受试者为9名健康男性,分别代表第五百分位、第五百分位、第九十五百分位驾驶员,其身高分别为 $(162\pm 2)$ 、 $(170.0\pm 2.5)$ 、 $(180\pm 1) \text{ cm}$ ,体质量分别为 $(45\pm 3)$ 、 $(61\pm 2)$ 、 $(90\pm 3) \text{ kg}$ ,小臂长分别为 $(22.0\pm 0.5)$ 、 $(24.5\pm 2.0)$ 、 $(27\pm 1) \text{ cm}$ ,大臂长分别为 $(29\pm 1)$ 、 $(31.0\pm 1.5)$ 、 $(32\pm 1) \text{ cm}$ ,手长分别为 $(16.5\pm 1.0)$ 、 $(19.5\pm 1.0)$ 、 $(20.5\pm 2.0) \text{ cm}$ ,手宽分别为 $(7.5\pm 0.5)$ 、 $(9\pm 1)$ 、 $(10.0\pm 0.5) \text{ cm}$ 。每种百分位受试者各3人,其中,第五百分位代表矮小体型;第五百分位代表中等体型;第九十五百分位代表高大体型。测试前所有受试者均签署了知情同意书。根据ISO 5349评价体系,在方向盘测点位置安装三轴加速度传感器,同时分别以手背中点、小臂中点、大臂中点作为手臂振动响应的测点,各测点位置如图2和图3所示。其中,手臂各测点加速度传感器的 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴分别代表了各测点处垂直于手臂向内、垂直于手臂向上和沿手臂向上3个方向。此外,在手传振动评价试验中,驾驶员手部握在加速度传感器上,而在手臂振动传递特性试验中,为了模拟实际驾驶姿势,驾驶员手部握在方向盘凸起部位。



A:ISO 5349规定方向盘测点位置 The measuring point position on steering wheel of ISO 5349;B:试验中方向盘测点 Measurement point of steering wheel in test.

图2 方向盘测点布置

Fig.2 Arrangement of steering measuring point



A:手背测点 Back of the hand measuring point; B:小臂测点 Forearm measuring point; C:大臂测点 Upper arm measuring point.

图3 手臂测点布置

Fig.3 Arrangement of arm measuring points

所有受试者均可熟练地操控拖拉机,且在进行试验前24 h内未经历剧烈运动。试验前对拖拉机与

测量装置进行检查调试,确定拖拉机无故障且工作状态良好,同时保证测量装置电量充足,按照ISO

5349评价体系对数据采集系统进行参数设定。试验时要求驾驶员以正常握力握紧方向盘,测试过程中保证测试手臂不离开方向盘。此外,不同百分位驾驶员试验前对拖拉机座椅进行调节,保证座椅处于舒适位置。试验需要分别测量拖拉机在沥青路面上以中二档位行进与在耕地上以低二档位行进时的振动数据,待拖拉机的发动机运行稳定且分析仪上各轴向振动的幅值已趋于平稳时,采集拖拉机方向盘以及手臂各测点的振动数据。每个测点测3次,每次用时为1 min(图4)。



A: 沥青路 Asphalt road; B: 耕地 Arable land.

图4 测试现场图

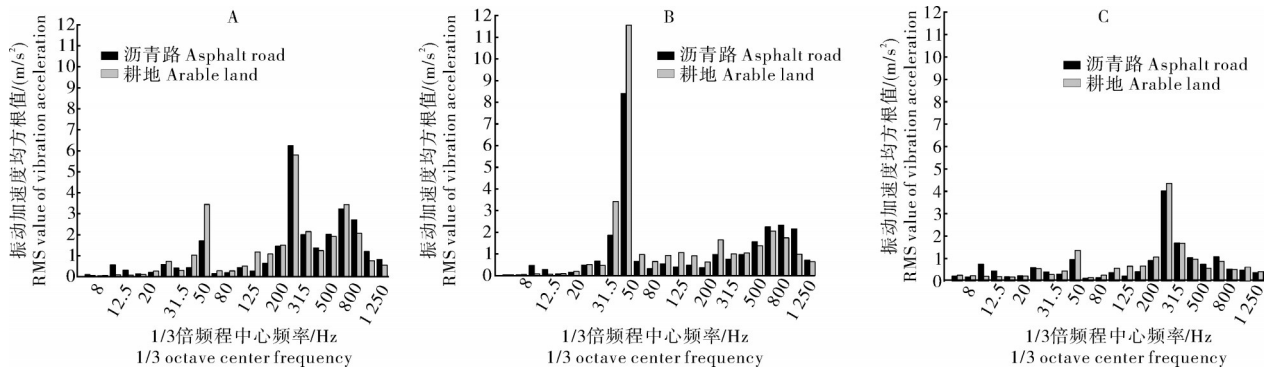
Fig.4 Test scene diagram

## 2 结果与分析

### 2.1 拖拉机手传振动评价

通过振动测试系统的后处理软件 Supervisor 对 2

种路况下的方向盘测点数据进行频谱分析,并根据 ISO 5349 评价体系计算 6.3~1 250 Hz 频率范围内方向盘的各轴向 1/3 倍频程加速度均方根值,且所有样本的振动幅值都采用线性平均进行均方根平均,结果如图 5 所示。分析 2 种路况下方向盘 3 个轴向 1/3 倍频程谱发现,在 2 种路况下 X 轴和 Z 轴的峰值都出现在 250 Hz, Y 轴峰值出现在 50 Hz,其中沥青路况行进时方向盘的 X、Y、Z 3 轴的振幅峰值分别是 6.245、8.408、4.018 m/s<sup>2</sup>;耕地路况行进时方向盘的 X、Y、Z 3 轴的振幅峰值分别是 5.806、11.558、4.352 m/s<sup>2</sup>。2 种路况下 Y 轴的峰值都要明显大于 X、Z 轴,原因可能是振动由发动机通过转向轴传递到方向盘的过程中,发动机安装以及转向轴的轴向约束不足造成<sup>[12]</sup>。分别对比 2 种路况下的方向盘各轴向 1/3 倍频程谱发现,在耕地路况行进时方向盘 X、Z 轴的高频振动(200~1 250 Hz)强度要小于在沥青路行进,而中低频段振动强度较大,其原因可能是耕地土质相较于沥青路面更为松软,对方向盘切向和径向的高频振动有一定的吸收<sup>[13]</sup>。耕地路况行进时 Y 轴的振动强度明显大于沥青路行进,可能是由于耕地的路面不平度增加而加大了拖拉机在垂直方向的振动<sup>[14]</sup>。



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

图5 2种路况行进时方向盘处 1/3 倍频程振动加速度均方根值

Fig.5 RMS value of 1/3 octave vibration acceleration at steering wheel on two road conditions

根据拖拉机在 2 种路况行进时各轴向的 1/3 倍频程谱,计算各轴向的加速度均方根值、振动总值以及 8 h 等能量频率计权振动总值即日暴露量 A(8),如表 1 所示。通过计算可知,拖拉机每天在 7.5 h 的

耕地行驶和 0.5 h 的沥青路行驶的情况下,8 h 等能量频率计权振动总值为 4.257 m/s<sup>2</sup>,已经超过了我国指导性国标 GB Z 2.2—2007 转换的日振动暴露量限值 3.5 m/s<sup>2</sup>,具有较高引发手臂振动病的风险。

表1 8 h 等能量频率计权振动总值

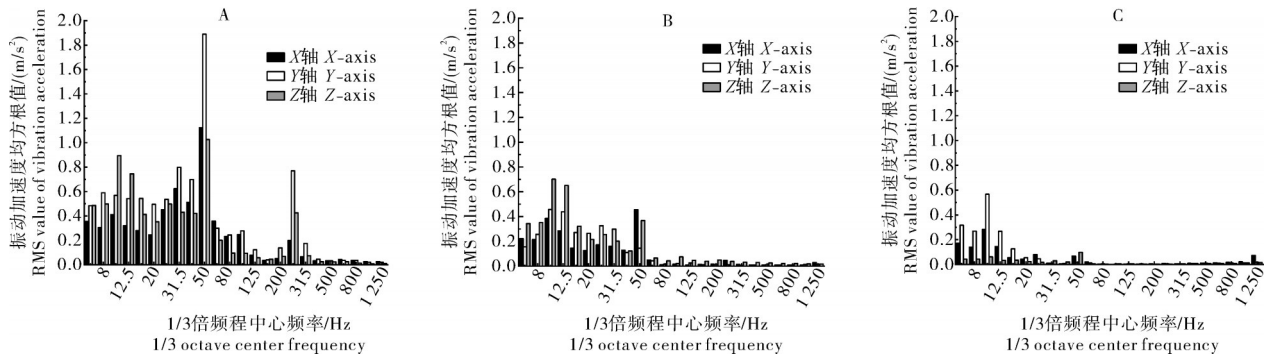
Table 1 8 h equal energy frequency weighted total value of vibration

路况 Road condition	$a_{hwz}/(m/s^2)$	$a_{hwY}/(m/s^2)$	$a_{hwz}/(m/s^2)$	$a_{hw}/(m/s^2)$	$T_i/h$	$A(8)/(m/s^2)$
沥青路 Asphalt road	1.077	2.775	1.079	3.166	0.5	4.257
耕地 Arable land	1.400	4.002	0.831	4.320	7.5	

### 2.2 手臂各测点振动响应

由于拖拉机在沥青路路况行进时方向盘振动比较稳定且驾驶员操纵比较平顺,其振动响应趋势较为明显,故选用对沥青路路况行进时的驾驶员手臂系统进行振动传递特性分析。利用Supervisor对沥青路路况行进时驾驶员手臂各测点数据进行频谱分析,可得到不同百分位驾驶员手臂各测点的振动响应,如图6~8所示。分析3个不同百分位驾驶员手臂各测点振动响应图发现,振动传递到手背与大臂时,

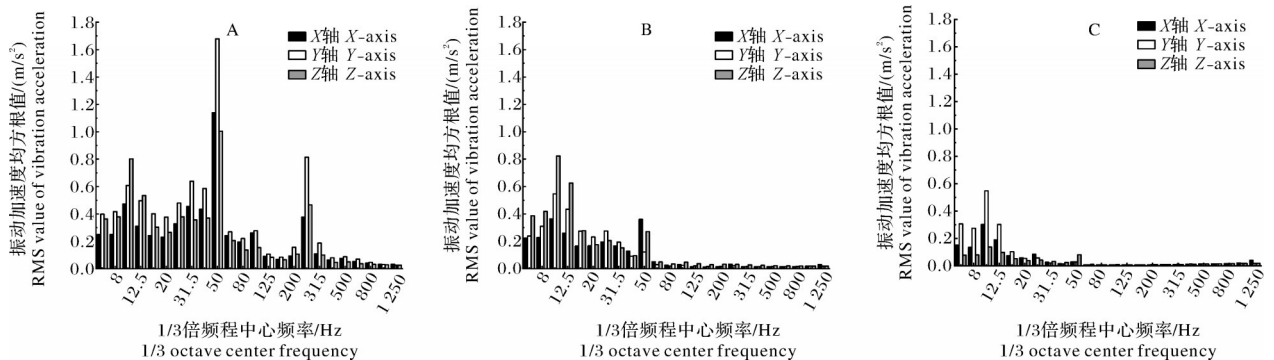
Y轴的振动强度最大,传递到小臂时Z轴的振动强度最大。当振动从手背传递到小臂测点时,X轴出现了迅速衰减,其原因可能是手腕有径向(X轴)的活动度,径向的振动从手背经过手腕传递到小臂时被大量吸收;而当振动从小臂传递到大臂时,Z轴出现了迅速衰减,同样是因为肘关节弯曲状态具有切向(Z轴)的活动度,切向的振动从小臂经过肘关节传递到大臂时被大量吸收<sup>[15]</sup>。3个不同百分位驾驶员的手背测点的X、Y、Z3轴的振动峰值都出现在50 Hz,



A:手背 Back of the hand;B:小臂 Forearm;C:大臂 Upper arm.

图6 第五百分位驾驶员手臂各测点处1/3倍频程振动加速度均方根值

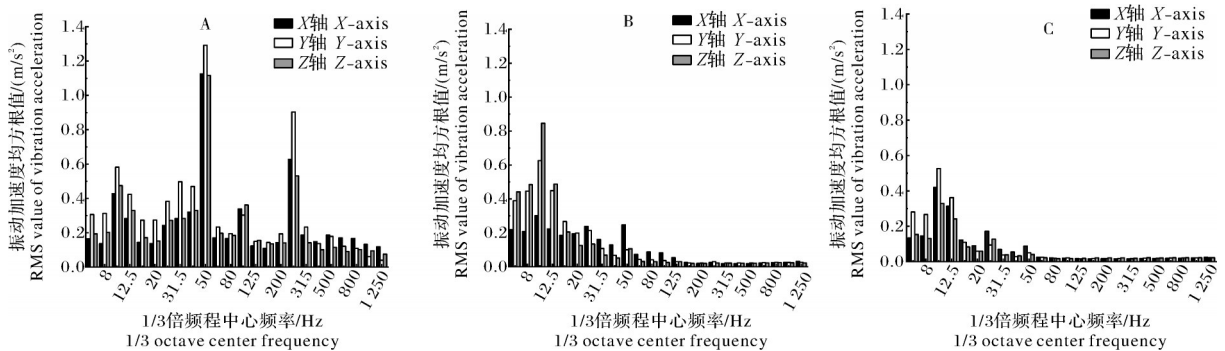
Fig.6 RMS value of 1/3 octave vibration acceleration at each measuring point of the fifth percentile driver's arm



A:手背 Back of the hand; B:小臂 Forearm; C:大臂 Upper arm.

图7 第五十百分位驾驶员手臂各测点处1/3倍频程振动加速度均方根值

Fig.7 RMS value of 1/3 octave vibration acceleration at each measuring point of the 50th percentile driver's arm



A:手背 Back of the hand; B:小臂 Forearm; C:大臂 Upper arm.

图8 第九十五百分位驾驶员手臂各测点处1/3倍频程振动加速度均方根值

Fig.8 RMS value of 1/3 octave vibration acceleration at each measuring point of the 95th percentile driver's arm

小臂测点的X、Y、Z 3轴的振动峰值依次出现在50、10、50 Hz,大臂测点的X、Y、Z 3轴的振动峰值都出现在10 Hz,说明随着振动在手臂上的传递,高频振动衰减迅速,因此振动主要集中在低频范围。此外,不同百分位驾驶员虽然各测点的各轴向振动强度不同,但振动峰值的出现频率以及振动沿手臂的衰减趋势大致相同。

### 2.3 手臂振动传递特性

振动传递率(vibration transmissibility, TR)是研究振动传递特性的典型评价指标,广泛应用于分析接振系统的振动传递与耗散规律。人体对振动的吸收与耗散是造成手臂振动病的关键因素,通过分析人体手臂各关键节点处的振动传递率可以清晰地看出振动在手臂系统中的耗散情况。振动传递率的定义为在频率范围内接振系统某点位的振动响应与振源处的振动激励之比<sup>[16-17]</sup>,公式为:

$$TR = a_{out} / a_{in} \quad (4)$$

式(4)中,TR为接振系统某点位的振动传递率; $a_{out}$ 为接振系统某点位的振动响应; $a_{in}$ 为振源处的振动激励。本研究中,振动从方向盘传入人体手臂系统,方向盘处的振动是激励振动,手背中点、小臂中点、大臂中点为手臂系统的测点。

根据公式(4)可计算出不同百分位驾驶员各测点3个方向的振动传递率,其中垂直于手臂向上的方向由于手臂呈弯曲状态,各测点的这个方向在空间中不在同一位置且会形成夹角,相互对比意义不大。故仅对垂直于手臂向内和沿手臂向上2个方向进行分析比较,如图9所示。由图9可知,各百分位以及各方向的振动传递率沿手背、小臂、大臂基本呈现逐渐降低趋势,振动在手臂上的传递整体呈现衰减趋势。其中,较高频率(100 Hz以后)的振动传递率在各方向上衰减都最为强烈,说明高频振动在从方向盘传递到手背的过程中就被大量吸收耗散掉。研究表明,作用于手指和手掌的机械振动会通过皮肤表面、皮下组织、肌肉组织和骨骼组织传递到人体,且肌肉组织与皮下组织之间的联结作用较弱,100 Hz以上的振动会解除肌肉组织与皮下组织之间的联结作用,进而引发振动性白手指症状<sup>[18]</sup>。此外,较低频率(10 Hz以下)的振动传递率基本都有所增大,说明方向盘的低频振动传递到手背的时候被放大,由于人体手臂的固有频率就在5 Hz左右,且手臂系统对8~16 Hz的频率最为敏感<sup>[19-20]</sup>,所以有可能是低频振动引起手背共振造成的振动传递率增大。

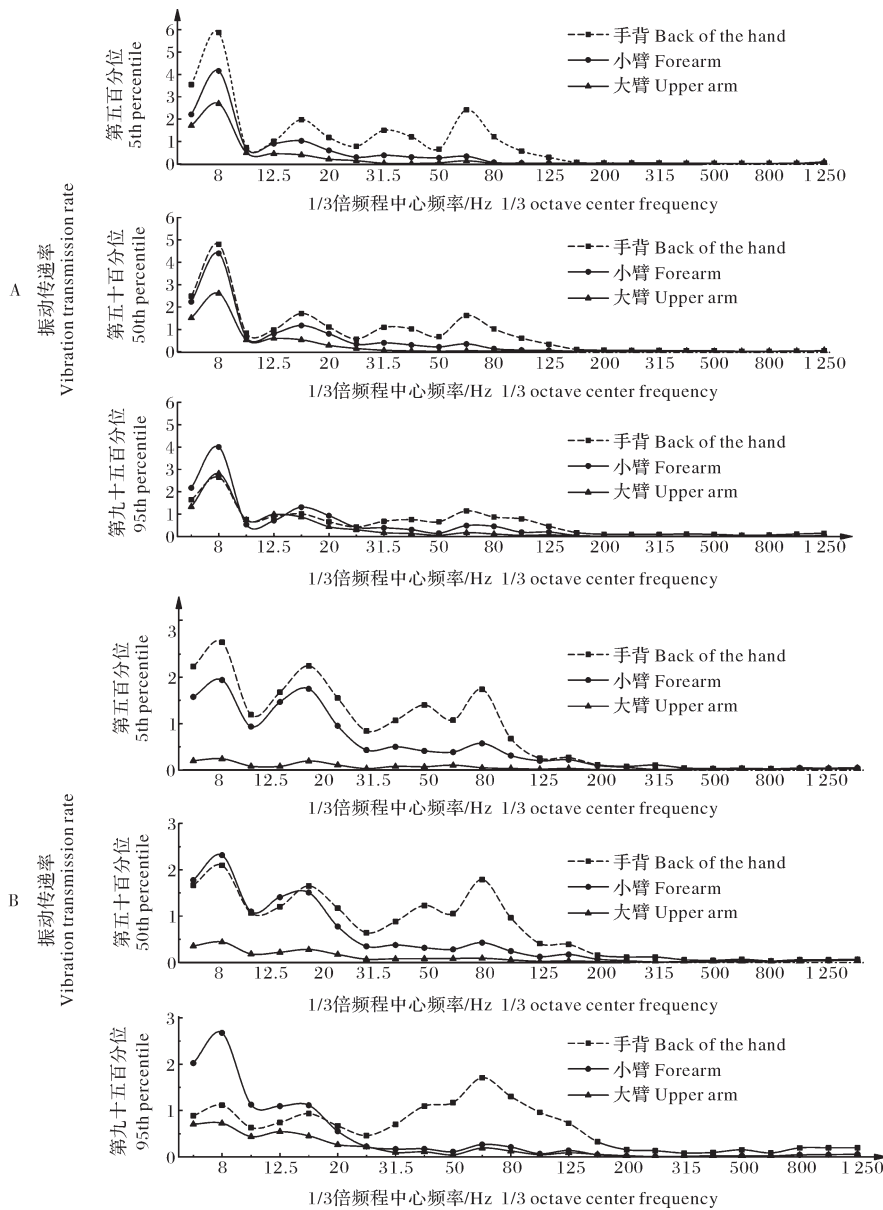
观察垂直于手臂向内和沿手臂向上2个方向发现。8 Hz的振动从小臂传到大臂处时有明显的下降趋势,说明8 Hz的振动从小臂经过肘部传向大臂的过程中在左右(垂直于手臂向内)和前后(沿手臂向上)方向被大量耗散,而63 Hz的振动从手背传到小臂时有明显的下降趋势,说明腕部在左右(垂直于手臂向内)和前后(沿手臂向上)方向吸收耗散了大量63 Hz的振动。此外,在沿手臂向上方向中,16 Hz的振动从小臂传向大臂时也被大量吸收耗散掉,说明16 Hz的振动从小臂经过肘部传向大臂的过程中在前后(沿手臂向上)方向也被大量耗散掉。

此外,分析不同百分位驾驶员的手臂振动传递率,对于不同百分位驾驶员的各轴向和测点的振动传递率整体趋势是一致的,但各轴向的手背测点的振动传递率随着驾驶员体型变大而减少,说明体型越小的驾驶员对方向盘振动的放大效应越强。不仅如此,小体型驾驶员在各频率段的手背振动传递率>小臂振动传递率>大臂振动传递率,说明振动沿手臂整地呈现衰减趋势,而随着体型的增大,在低频范围(20 Hz以下)的振动从手背传递到小臂过程中有明显的增大,说明体型越大的驾驶员在低频振动由手背经过腕部传递到小臂过程中具有更强的放大效应。因此,在工程实际中,小体型驾驶员要注意手掌的振动防护,而大体型驾驶员更应注重手腕部分的振动防护。

## 3 讨论

本研究基于ISO 5349评价体系对拖拉机的手传振动进行复合评价,并对驾驶员的手臂系统进行了振动测试,运用振动强度、振动传递率等方法分析了不同百分位驾驶员手臂各测点的振动传递特性。

研究结果显示,拖拉机在1个工作日以L2挡位在耕地行驶7.5 h,以M2挡位在沥青路面行驶0.5 h,其日振动暴露量为 $4.257 \text{ m/s}^2$ ,超过了我国指导性国标GB Z 2.2—2007《作场所有害因素职业接触限值 第2部分:物理因素》规定的日振动暴露量限值 $3.5 \text{ m/s}^2$ ,具有较高引发手臂振动病的风险。根据患手臂振动病的振动暴露时间预测可知,当拖拉机以L2挡位在耕地上行驶时,患手臂振动病的暴露年限较短,其工作条件最为危险。此外,对方向盘与驾驶员手臂各测点振动响应分析发现,方向盘轴向振动是引发手臂振动病的主要因素,应加强对拖拉机发动机与方向盘转向轴垂直方向的约束。在工程实际



A:垂直于手臂向内方向 Perpendicular to the arm inward direction;B:沿手臂向上方向 Upward along the arm.

图9 各百分位驾驶员手臂测点振动传递率

Fig.9 Vibration transmission rate of each percentile driver arm measuring point

中,应加强驾驶员手腕的径向防护,而对肘关节则应加强其切向的防护,同时对于小体型驾驶员应注重手掌的振动防护,而大体型驾驶员则应注重手腕部分的振动防护。本研究中对于方向盘、驾驶员手臂系统的振动分析都是在频域中进行分析,得出了方向盘与不同百分位驾驶员手臂系统振动响应的频域峰值与范围,后续研究可依据驾驶员手臂振动响应的频率峰值对拖拉机方向盘进行优化,避免方向盘与驾驶员手臂系统产生共振,降低驾驶员患手传振动病的风险。

参考文献 References

[1] 张龙连. 职业病危害与健康监护[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2010. ZHANG L L. Occupational disease hazards and health monitoring [M]. Beijing: China Labor & Social Security Publishing House,2010(in Chinese).

[2] 万里翔,许明恒. 汽车行驶平顺性评价方法的研究[J].西南交通大学学报,2001,36(1):71-74. WAN L X, XU M H. Study on evaluating methods for human exposure to whole-body vibration of automotive ride[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(1): 71-74(in Chinese with English abstract).

[3] MAEDA S, TAYLOR M D, ANDERSON L C, et al. Determi-

- nation of hand-transmitted vibration risk on the human[J]. International journal of industrial ergonomics, 2019, 70:28-37.
- [4] SABU S, VARUN TEJA K S R, MOHAN S, et al. A biomechanical model to predict hand-arm vibration when using different vibration damping gloves[J]. Materials today: proceedings, 2022, 56: 3527-3533.
- [5] WANG Z M, QIU Y, ZHENG X, et al. Biomechanical models of the hand-arm system to predict the hand gripping forces and transmitted vibration[J/OL]. International journal of industrial ergonomics, 2022, 88: 103258 [2022-03-11]. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103258>.
- [6] 马文凯, 李文彬, 文剑, 等. 便携式风力灭火机作业手传振动生物力学建模实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 38-44. MA W K, LI W B, WEN J, et al. Biodynamic modeling and tests for operator arm's hand-transmitted vibration during using portable pneumatic extinguisher [J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(19):38-44(in Chinese with English abstract).
- [7] 吴明忠, 杨帆. 工作场所手传振动的测量与评估——以割草机和绿篱机为例[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 168-173. WU M Z, YANG F. Measurement and evaluation of hand-transmitted vibration in workplace: taking grass trimmer and hedge trimmer as examples[J]. Journal of safety science and technology, 2019, 15(6): 168-173 (in Chinese with English abstract).
- [8] ZHANG W J, LI H, DONG J J, et al. An investigation of the effect of hand-arm posture and grip force on vibration transmission rate of human hand-arm system[J]. Iranian journal of science and technology, transactions of mechanical engineering, 2022, 46: 667-677.
- [9] 谢晓霜. 手传振动测量与评价标准比较及测量方法研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2015. XIE X S. Comparison of measurement and evaluation criteria for hand-transmitted vibration and research on measurement methods[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [10] DEWANGAN K N, TEWARI V K. Characteristics of hand-transmitted vibration of a hand tractor used in three operational modes[J]. International journal of industrial ergonomics, 2009, 39(1): 239-245.
- [11] 徐竹凤, 薛新宇, 崔龙飞, 等. 农田地面振动谱的研究综述[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 251-255. XU Z F, XUE X Y, CUI L F, et al. Review on farmland ground vibration spectrum [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(7):251-255(in Chinese with English abstract).
- [12] 左曙光, 胡坤, 周大为. 工况传递路径分析在方向盘振源识别中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1):73-77. ZUO S G, HU K, ZHOU D W. Application of operational transfer path analysis in steering wheel vibration source identification [J]. Noise and vibration control, 2019, 39(1): 73-77 (in Chinese with English abstract).
- [13] 闫建国. 基于农田地面不平激励的拖拉机振动特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. YAN J G. Study on vibration characteristics of tractor based on excitation of agricultural terrain roughness [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘爽, 徐红梅, 李航, 等. 手扶插秧机手传振动评价及振动传递特性试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(1): 151-160. LIU S, XU H M, LI H, et al. Hand vibration transmission evaluation and vibration transmission characteristics test of hand-held rice transplanter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1): 151-160 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张睿明, 柳忠起, 周前祥, 等. 人体上肢关节活动范围的舒适性评价[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 75-80. ZHANG R M, LIU Z Q, ZHOU Q X, et al. Comfortableness evaluation of range of motion of human upper limb joint [J]. China safety science journal, 2018, 28(8): 75-80 (in Chinese with English abstract).
- [16] 周琪涵, 李文彬, 王林杰, 等. 便携式风力灭火机振动及其沿人体手臂传递特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(6): 120-125. ZHOU Q H, LI W B, WANG L J, et al. Experimental research on the pneumatic extinguishers based on vibration characteristics and vibration transmission along human arm [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(6): 120-125 (in Chinese with English abstract).
- [17] 路世青, 杨鹏, 陈昌明, 等. 操控因素影响下微耕机人机系统手传振动特性[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(9): 37-43. LU S Q, YANG P, CHEN C M, et al. Hand transmitted vibration characteristics of power tiller under the influence of grip force and engine speed [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(9): 37-43 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈位宫. 人手臂振动的生物力学模型与振动病[J]. 噪声与振动控制, 1988, 8(2): 33-39. CHEN W G. Biomechanical model of human arm vibration and vibration disease [J]. Noise and vibration control, 1988, 8(2): 33-39 (in Chinese).
- [19] XU X S, DONG R, WELCOME D E, et al. Vibrations transmitted from human hands to upper arm, shoulder, back, neck, and head [J]. International journal of industrial ergonomics, 2017, 62: 1-12.
- [20] BYLUND S H, BURSTRÖM L. Power absorption in women and men exposed to hand-arm vibration [J]. International archives of occupational and environmental health, 2003, 76(4): 313-317.



## Evaluation of hand-transmitted vibration of tractor steering wheel and characteristics of vibration transmission of different percentiles driver arm

SHANG Yujun, WANG Qichao, ZHANG Wenjie, XU Hongmei, XU Zheng

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

**Abstract** There are problems including intense vibration and unclear vibration transmission characteristics during manipulating the steering wheel by the tractor operators. The ISO 5349 evaluation method was used to evaluate the hand-transmitted vibration of the steering wheel system under two different conditions and analyze the characteristics of vibration transmission of operators' arm systems at different percentages. The results showed that the daily vibration exposure of the tractor was  $4.257 \text{ m/s}^2$ , which exceeded the limit of daily vibration exposure of  $3.5 \text{ m/s}^2$  specified in the national standard, and had a high risk of causing hand-arm vibration disease. The steering wheel vibration in the axial direction was greatly higher than that in the tangential and radial directions, which was the main factor causing hand-transmitted vibration. The radial vibration was largely absorbed during the transmission from the hand back to the forearm, while the tangential vibration was greatly absorbed in the transmission from the forearm to the upper arm. Moreover, the smaller the operator's physical size, the greater the vibration transmission rate at the hand back. The significant increase in vibration from the hand back to forearm was found under the frequency of 20 Hz. Therefore, smaller operators in engineering practice should pay attention to the vibration protection at the palms, while larger ones are suggested to focus on the vibration protection at the wrists. In addition, the radial protection should be mainly strengthened for the driver's wrist, and the tangential protection should be mainly strengthened for the elbow joint.

**Keywords** tractor; steering wheel; hand-transmitted vibration; characteristics of vibration transmission; vibration transmission rate

(责任编辑:陆文昌)