

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201901054



手臂系统手传振动的研究现状

吴明忠, 杨帆

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 概述手传振动的危害,介绍手传振动响应特性的测试系统和手部的握持姿势,并对手臂系统的振动响应特性及减振手套的减振性能进行综述.结果表明:工效学因素和试验条件是机械阻抗特性与振动传递率特性的主要影响因素;手传振动响应特性具体的响应幅值存在较大差异,但基本趋势大体一致;应加强手传振动响应特性和减震手套的研究,弥补相关标准存在的不足.

关键词: 手传振动; 手臂振动病; 手臂系统; 响应特性; 减振手套

中图分类号: TB 53; X 593 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0281-10

Review of Hand-Transmitted Vibration in Hand-Arm System

WU Mingzhong, YANG Fan

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The hazards from hand-transmitted vibration, the test system for response characteristic of hand-transmitted vibration and the gripping posture of the hand were introduced first. Second, the characteristics of vibration response of the hand-arm system and the vibration-reducing effectiveness of vibration-reducing gloves were reviewed. The literatures show that ergonomic factors and experimental conditions are the main factors which take an effect on mechanical impedance and vibration transmissibility and there is a large difference on the amplitude of specific responses but their basic trends are approximately similar to each other. Research on response characteristic of hand-transmitted vibration and vibration-reducing gloves should be strengthened, improve the related standards.

Keywords: hand-transmitted vibration; hand-arm vibration disease; hand-arm system; response characteristics; vibration-reducing golves

手传振动(HTV)是指在生产中使用手持振动工具或接触受振工件时,直接作用或传递到人的手臂的机械振动或冲击^[1].在现代化生产的诸多领域,有相当数量的工人从事手传振动作业.常见的手传振动作业主要包括:1)操作锤打工具,如操作凿岩机等;2)手持转动工具,如操作电钻等;3)使用固定轮转工具,如使用砂轮机;4)驾驶交通运输车辆或使用农业机械,如驾驶汽车和使用脱粒机等^[2].手臂振动病(HAVD)是长期从事手传振动作业而引起的,以手部末梢循环障碍、手臂神经功能障碍为主的疾病,可引起手臂骨关节-肌肉的损伤,其典型表现为振动性白指(VWF),或称职业性雷诺氏现象^[3].手

收稿日期: 2019-01-26
通信作者: 吴明忠(1978-),男,讲师,博士研究生,主要从事振动分析与控制、人机工程学的研究. E-mail:jdwmz62@hqu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61733006);福建省教育厅科研课题(JAT160028);福建省泉州市科技计划项目(2018Z016)

臂振动病已成为工业/农业国家的常见职业病. 目前, 手臂振动病的发病机理尚未明确, 因此, 如何有效地防治手臂振动病已成为国内外研究的热点^[4-5]. 手臂系统的响应特性是理解振动性失调机制, 建立振动危害评估的重要基础, 也是建立力学等效模型的基础^[6], 国内外学者围绕手传振动响应特性开展了大量的研究工作. 本文对手臂系统手传振动的研究现状进行综述.

1 手传振动的危害

1911 年, Loriga 首次提出雷诺氏现象与使用手持振动工具有关. 1918 年, Hamilton 发现使用振动工具的工人出现振动白指以来, 受手传振动暴露影响的人日益增多^[7]. 据统计, 在全球 30 亿的工人中, 有 25% 的工人在工作场所中暴露于振动^[8]. 在美国, 超过 200 万工人暴露于过度振动, 其中, 有 25 万人暴露于手传振动日接振值超过国际标准化组织(ISO)规定的日暴露限值; 在瑞典, 有 17% 的工人暴露于手传振动, 受影响人数约 200 万; 在英国, 约有 400 万人接触手臂振动, 其中, 约 100 万人接触的振动超过 ISO 规定的极限值, 17 万人有血管振动损伤的症状^[9]; 而在中国, 估计有 300 万以上的工人使用振动工具, 但这是 2000 年之前的不完全统计数据, 实际的数据将更为巨大^[10].

这些手传振动暴露通常会导致手指/手部出现一种不可恢复的疾病, 称为手臂振动综合症或手臂振动病^[11]. 1958 年, 我国首次报道砂轮机工出现雷诺氏现象^[12]. 目前, 手臂振动病已遍及我国大部分省、市, 在行业和工种中的分布也相当广泛, 有的工种患病率高达 80% 以上^[13-14]. 严重的手臂振动病会导致作业人员丧失劳动能力和生活能力, 甚至出现手指坏疽, 导致有限用工人口不断减少, 给用人单位和国家带来巨大的经济负担.

2 手传振动的测量

为保护作业人员免受手传振动的伤害, 国际标准化组织制定了相关标准^[15], 虽然规定的是手套掌部振动传递率的测量方法, 但也为手传振动传递特性的研究提供搭建试验平台的方法. 手传振动响应特性的测试系统^[15], 如图 1 所示. 其原理是振动台按给定的激励信号随机或正弦振动, 安装在振动台上的手柄支架带动圆柱手柄相应振动; 振动的手柄用于模拟作业现场的动力工具手柄; 沿轴线被对半分开的手柄用于安装力传感器, 测量手部的握力; 手柄支架与振动台间的力传感器用于测量手臂的推力.

手部握持手柄的姿势和手部的坐标系, 如图 2 所示. 该坐标系为右手正交坐标系, z_h, y_h, x_h 3 个轴向相互垂直, 且共有同一原点. 在手传振动的测量中, 手的坐标系应与文献^[16-17]规定的一致.

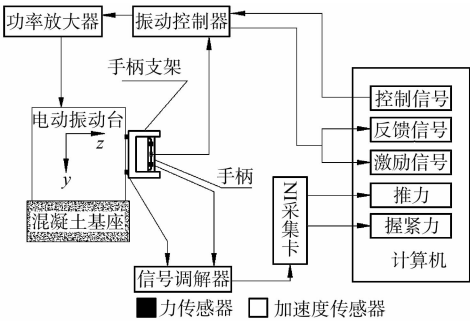
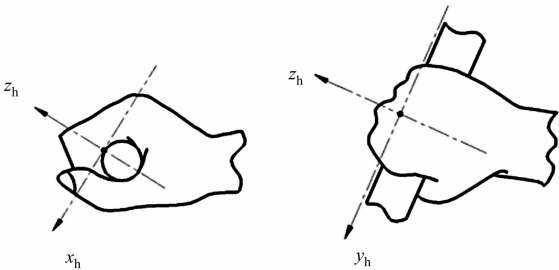


图 1 手传振动响应特性的测试系统

Fig. 1 Test system for response characteristics of hand-transmitted vibration



(a) x - z 平面 (b) y - z 平面

图 2 手的坐标系

Fig. 2 Coordinate system for hand

3 手传振动的响应特性

人体手臂对手传振动的响应在生物动力学响应(BR)方面已被广泛地研究^[6]. 手臂系统手传振动的 BR 大多采用 3 种表示方式: 1) 以驱动点的力-运动关系表示的机械阻抗(MI)、视在质量、振动能量吸收^[18-22]; 2) 振动传递率(VT)^[23-25]; 3) 力学等效模型^[26-29]. 目前, 已有许多学者围绕 MI 和 VT 开展手传

振动响应特性的研究. 有关力学等效模型的研究, 限于篇幅, 不做总结. 文中主要基于文献[15, 30]规定的试验方法和测量评估方法, 总结手传振动响应特性的研究进展.

3.1 机械阻抗的定义^[31]

人体手臂的驱动点机械阻抗 $Z_V(j\omega)$ (DPMI, 又称速度阻抗) 是通过测量驱动点的力和速度后计算得到的. 驱动点的力与加速度之比称为视在质量 $Z_A(j\omega)$ (又称加速度阻抗), 驱动点的力与位移之比称为动刚度 $Z_D(j\omega)$ (又称位移阻抗), 其计算式分别为

$$Z_V(j\omega) = \mathbf{F}(j\omega)/\mathbf{V}(j\omega), \quad Z_A(j\omega) = \mathbf{F}(j\omega)/\mathbf{A}(j\omega), \quad Z_D(j\omega) = \mathbf{F}(j\omega)/\mathbf{X}(j\omega).$$

上式中: ω 为激励频率; $\mathbf{F}(j\omega)$ 为施加于驱动点的力; $\mathbf{A}(j\omega)$, $\mathbf{V}(j\omega)$, $\mathbf{X}(j\omega)$ 分别为在驱动点测量的复数加速度矢量、复数速度矢量和复数位移矢量.

又因 $\mathbf{A} = j\omega\mathbf{V} = (j\omega)^2\mathbf{X}$, 可得 3 种阻抗之间的换算关系为

$$Z_D(j\omega) = j\omega Z_V(j\omega) = (j\omega)^2 Z_A(j\omega).$$

3.2 手臂姿势对阻抗特性的影响

手-工具手柄界面(即掌部)的驱动点机械阻抗已被广泛应用于表征暴露于工具手柄振动的手臂系统动力学响应^[32]. 在文献[33]发布后, 关于手臂系统阻抗特性影响因素的研究较多^[15, 30], 这与手臂系统手传振动响应特性的影响因素尚未明确有关.

手臂姿势是手臂系统手传振动响应特性的主要影响因素, 不论 ISO 相关标准还是其他文献, 都把手臂姿势作为影响手臂系统响应特性的主要因素. 文献[33]对手臂姿势进行定义和描述, 并要求在手传振动响应特性的报告中, 必须说明操作的手臂姿势. 文献[34]规定了 DPMI 参考值适用的手臂姿势: 肘部弯曲角度为 90° , 即上臂与前臂之间的弯曲角度为 90° , 腕部在中间位置, 既不弯曲, 也不外展的位置.

Burström^[32]研究 5 种不同手臂姿势对手臂系统阻抗特性的影响, 发现随着肘部角度的增大, 阻抗越高, 当频率低于 20 Hz 时, 阻抗相位的差异尤为明显, 并指出身体与肩部之间的角度对抗没有影响. Cronjäger 等^[35]研究 4 种不同姿势对手臂系统阻抗幅值和相位的影响, 发现当频率低于 100 Hz 时, 肘部弯曲角度对抗有影响, 但超过 200 Hz 时, 影响很小. Burström^[36]发现频率低于 50 Hz, 伸直手臂时, 阻抗最高, 当肘部弯曲 120° 时, 阻抗最低, 当频率低于 50 Hz 时, 肘部弯曲角度对抗相位的影响在 3 个振动方向都是明显的, 但频率高于 100 Hz 时, 对其影响不明显. Jandák^[37]发现手臂姿势的变化会导致生物力学响应出现较大的变化, 并指出伸直手臂姿势的机械阻抗幅值更高. Aldien 等^[38]研究手臂姿势对手臂系统机械阻抗的影响, 发现手臂姿势对抗的影响显著, 当频率低于 30 Hz 时, 伸直手臂姿势与振动手柄的耦合相对更大, 伸直手臂的阻抗幅值明显高于弯曲手臂, 在较低频段, 伸直手臂表现出类阻尼特性. Besa 等^[39]研究 3 种不同的姿势对抗特性的影响, 发现伸直手臂的阻抗共振频率比弯曲手臂低, 当频率低于 30 Hz 时, 伸直手臂的阻抗幅值比弯曲手臂高得多.

手臂姿势对抗的影响未普遍显示一致或类似的结果, 这可能是由于使用不同的试验技术和试验条件所致^[36]. 但结果均表明手臂姿势会影响手臂系统的阻抗特性, 伸直手臂的阻抗特性比弯曲手臂大, 在一定的频率范围内, 手臂系统的阻抗特性随着肘部弯曲角度的增大而增大, 肘部弯曲 90° 的手臂姿势是最佳的工作姿势^[40].

3.3 影响阻抗特性的其他因素

ISO 除了规定测量响应特性的手臂姿势外, 还要求测试时应报告握力与推力的大小、振动方向、激励的幅值和频率范围等. Burström^[32], Gurram 等^[18]和 Besa 等^[39]指出振动方向、振动强度、握力、推力、人体测量学、激励类型、激励频率等因素对手臂阻抗特性均存在一定的影响. Aldien 等^[38]通过多元方差分析的方法确定影响 DPMI 的主要因素为握力、推力、手臂姿势、手柄尺寸和激励强度, 发现手柄尺寸几乎在整个频率范围内都对阻抗特性有较大影响. 此外, 也有学者围绕驱动点、激励和多因素的联合作用对抗特性的影响开展研究. 大部分驱动点动力学的响应数据都是在手掌-手柄界面的单个驱动点的振动激励下获得的^[41]. 虽然文献[19, 39, 42]表明阻抗响应可以表示整个手臂系统的总体响应, 并已广泛应用于获得手臂系统总体的振动能量吸收方面, 但它不能得到具体的手部子结构的振动响应信息, 尤其是临床和医学上所关心的手指部位. 单驱动点方式也不能正确预测减振手套在掌部或手指的振动传递率. 为了解决单驱动点方法的不足, Dong 等^[43]提出两个驱动点的方法, 该方法是在手-手柄界面上设

置手掌与手指两个驱动点. 已有研究提出基于两个驱动点的手臂系统动力学模型, 并证明这种模型更能真实模拟手臂系统.

基于单轴振动测试系统研究手臂系统的机械阻抗特性, 忽视了不同轴动力学响应之间的动态耦合, 也很难在单轴测试系统中测量垂直于前臂方向的阻抗. 为了解决单轴测试系统的不足, Welcome 等^[44]提出基于三轴手臂的测试系统, 研究在三轴激励下分布在手指和掌部的驱动点机械阻抗的基本特性, 结果表明: 分布的驱动点机械阻抗随着手的具体位置、振动方向和个体有很大的变化. 此外, 虽然单轴激励振动的动力学响应不同于三轴, 但响应的基本趋势和特性与三轴测试系统一致.

Marcotte 等^[19]研究施加于振动手柄的握力、推力、手柄尺寸对手-手柄界面的驱动点机械阻抗的影响, 指出驱动点阻抗响应随着握力与推力组合和手柄尺寸的变化出现相当大的变化, 确定手柄尺寸与施加于手柄的握持力之间强烈的相互作用, 手柄尺寸对手臂系统动力学响应有明显的影响. Aldien 等^[38]指出在弯曲手臂时, 低频段范围内推力和握力对阻抗影响不明显, 而伸直手臂时, 随着握力或推力的增大, 阻抗值出现明显地增大. 部分手臂系统阻抗特性研究采用的试验条件和影响因素, 如表 1 所示.

表 1 机械阻抗测量的试验条件和影响因素

Tab. 1 Experimental conditions and influence factors for measuring mechanical impedance

来源	激励信号	肘部角度/(°)	测量部位及方向	握持力/N	手柄直径/mm	性别和人数	频率/Hz
文献[33]	加速度 不超过 $50.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	90 ± 15	手掌 x_h, y_h, z_h	握力: $25\sim50$ 推力 ≤ 50	$19\sim45$	适用于 男性、女性	$10\sim500$
文献[18]	$10.0, 20.0, 30.0$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (正弦) $0.2, 0.5, 0.7$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (随机)	90	手掌 x_h, y_h, z_h	握力: $10, 25, 50$ 推力未报告	38	4 个成年男性	$10\sim1\ 000$
文献[38]	$2.5, 5.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (随机, 计权加速)	$90, 180$	手掌 z_h	握力: $10, 30, 50$ 推力: $25, 50, 75$	$30, 40, 50$	7 个成年男性	$8\sim1\ 000$
文献[32]	$8.0, 14.0, 25.0, 45.0$ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (正弦)	$60, 90, 120,$ $150, 180$	手掌 x_h, y_h, z_h	握力: $25, 50, 75$ 推力: 0	非圆柱型	5 个成年男性 5 个成年女性	$2\sim1\ 000$
文献[36]	$6.5, 13.0, 19.5,$ $26.0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (正弦)	$60, 90, 120,$ $150, 180$	手掌 x_h, y_h, z_h	握力: $25, 50, 75$ 推力: $20, 40, 60$	非圆柱型	5 个成年男性 5 个成年女性	$2\sim1\ 000$
文献[39]	$15.0, 30.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (正弦, 计权)	$90, 110,$ $140, 180$	手掌 x_h, y_h, z_h	握力: $20, 80, 110$ 推力: $0, 60$	非圆柱型	5 个成年男性	$1\sim700$
文献[41]	$19.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (x_h, y_h, z_h 随机)	$90\sim120$	手指、手掌 x_h, y_h, z_h	握力: 30 ± 5 推力: 50 ± 8	40	7 个成年男性	$16\sim500$

由表 1 可知: 各学者对手臂系统手传振动的阻抗响应特性进行研究时, 大部分采用正弦激励, 只有少数采用随机激励, 且激励强度各不相同; 大多以手掌部位作为阻抗的驱动点, 只有文献[41]以手掌和手指部位作为阻抗的驱动点; 研究皆有考虑 90° 的手臂姿势进行试验^[15,33], 并考虑了更多的其他姿势; 使用的握力、推力, 以及手柄的直径大小、形状各有差异; 受试人数一般在 10 人以内, 主要以男性为主; 频率范围都在 1 000 Hz 以内.

手臂系统手传振动的响应取决于多种因素, 主要有振动方向、被握物体的几何形状、握持力、姿势和个体差异等. 表 1 中试验条件的不同是造成试验数据存在差异的主要原因, 同时也违背了标准的本意: 为了促进在这一领域的进一步发展, 允许对暴露数据进行定量比较, 希望人体暴露于手传振动的测量和报告采用统一方法. 这些研究对标准的修订具有一定的参考价值, 但也暴露了原标准的不足之处, 如标准化的阻抗值是否适用于女性、是否适用于不同的人群等, 这些都有待进一步研究.

3.4 振动传递率的计算方法^[45]

为了观察手柄加速度和手-臂各部位加速度的关系, Griffin^[11]提出量化的振动传递率. 振动传递率 T_1 是指手臂某一部位的均方根加速度 a_h 与手柄上参照点的均方根加速度 a_z 之比, 即 $T_1 = a_h/a_z$.

根据人体对不同频率振动的感觉响应及产生的生理效应规律,定义频率计权加速度^[30],其计权因子在文献[46]中作了详细的规定.在计算有关人体振动传递率时,要求采用频率计权加速度,单轴向计权传递率 $T_{1,w}$ 为

$$T_{1,w} = a_{h,w}/a_{z,w}. \tag{1}$$

式(1)中: $a_{h,w}, a_{z,w}$ 分别为与 a_h, a_z 对应的频率计权均方根加速度, $a_{h,w} = \sqrt{\sum_i (W_{h,i} a_{h,i})^2}$, $W_{h,i}$ 是第 i 个 1/3 倍频程的计权因子, $a_{h,i}$ 是在第 i 个 1/3 倍频带测得的均方根加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

文献[15]定义的标准化试验方法,是将单轴加速度计固定在传感器安装座上测量手掌-手柄界面的加速度,而传感器安装座错位产生的测量误差最大会超过 20%^[47]. Dong 等^[45] 提出用三轴加速度计替换安装座中的单轴加速度计,则未计权传递率 T_2 和三轴向计权传递率 $T_{2,w}$ 为

$$T_2 = \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}{a_z}, \quad T_{2,w} = \frac{\sqrt{A_{x,w}^2 + A_{y,w}^2 + A_{z,w}^2}}{a_z}. \tag{2}$$

式(2)中: A_x, A_y, A_z 为手柄沿 x_h, y_h, z_h 轴方向振动的未计权均方根加速度; $A_{x,w}, A_{y,w}, A_{z,w}$ 为 A_x, A_y, A_z 相应的计权均方根加速度.

这种方法解决了错位问题,但是不能用于处理非轴向振动问题,且式(2)只适用于激励振动沿着 z_h 轴方向.实际上,大部分工具传递 3 个轴向的振动,且实验中使用的单轴振动台与人体手臂耦合时,也可能沿着非轴向方向传递振动.此外,非轴向方向的推力往往会导致 x_h, y_h 方向相当大的振动.为此, Dong 等^[45] 提出一种全致加速度传递率的计算方法,以解决推力导致的偏载问题,即

$$\text{TEAT}_u = \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}}, \quad \text{TEAT}_w = \frac{\sqrt{A_{x,w}^2 + A_{y,w}^2 + A_{z,w}^2}}{\sqrt{H_{x,w}^2 + H_{y,w}^2 + H_{z,w}^2}}. \tag{3}$$

式(3)中: $\text{TEAT}_u, \text{TEAT}_w$ 分别为全三轴向未计权传递率和全三轴向计权传递率; H_x, H_y, H_z 分别为手柄上参照点沿 x_h, y_h, z_h 轴方向振动的均方根加速度; $H_{x,w}, H_{y,w}, H_{z,w}$ 分别为 H_x, H_y, H_z 相应的计权均方根加速度.

该方法解决了传感器安装座错位和推力非轴向加载而造成较大误差的问题.目前,文献[15]中规定的传递率计算方法就是引用 Dong 等^[45] 提出的方法.

3.5 传递率的特性

机械阻抗主要描述手臂系统整体的动力学特性,而振动传递率可以表征手臂系统局部的动力学特性.仅仅基于驱动点动力学响应建立的模型可以满足某些工具和减振装置的设计与分析,却不足以预测手臂系统特定位置的响应,尤其是手指^[48].为了更好地了解手臂系统局部的动力学特性,建立更加有效的动力学模型,国内外学者围绕手臂系统不同部位振动传递率的测量与分析,以及振动传递率的影响因素等方面开展研究.

为了消除皮肤、肌肉和骨头之间相对运动导致的测量误差, Abrams 等^[49] 在尸体手臂的骨骼上固定传感器,进行振动传递特性的测量,该方法可以较精确地反映手臂系统子结构的动力学特性,但这种方法存在两个问题^[50-51]:1) 尸体手臂的肌肉张力不同于活体;2) 无法给定不同的握力和推力.此外,采用侵入式的方法在活体上进行振动传递特性的测量也是不现实的,且难度较大.因此,学者大都是在人体手指-手-手臂系统的表面上,采用加速度传感器或激光测振仪进行运动量的测量.基于激光测振仪、手部姿势、测量部位和握持力衡量方法进行传递率特性有如下 4 个研究进展.

1) 基于激光测振仪的传递率特性研究.机械阻抗的测量主要在手掌部位进行,但手指却是 VWF 出现的部位^[52-53],手指的动力学响应不能从文献[33]定义的整个手臂系统的驱动点机械阻抗推断得到,因此,也需要研究手指的动力学响应.为了提高对手部子结构分布动力学响应的认识,帮助建立改进的有限元模型, Scalise 等^[24], Xu 等^[48], Concettoni 等^[53] 采用扫描激光测振仪测量和分析手指部位的振动传递特性. Scalise 等^[24] 在握持圆柱手柄的情况下,测量 3 根手指上 6 个点的振动传递率,并分析振动传递率与握力、推力、手部体积和身体质量指标(BMI)的相关性.结果表明,手指末梢的 VT 值高于根部,所有测量点都出现一个共振峰,其峰值频带为 55~80 Hz; VT 并未显著单独依赖于 BMI、手部体积和推力,但 VT 显著单独依赖于握力,以及测量点、握力与推力的共同作用^[24]. Concettoni 等^[53] 在手指-

掌部与振动台面 7 种不同接触情况下,对手指、手背和手臂上 41 个点的振动进行测量,发现不同点的传递率不同,指尖的共振频率较高,这与 Scalise 等^[24]的研究结果一致.

2) 手部展平下的传递率特性. 大部分研究是基于手部握紧圆柱手柄进行振动传递率的测量研究^[6,44,47]. Xu 等^[48]在手臂展开平放于振动台面上,测量分布于手指和手背的振动传递率,发现分布于手指和手背的响应与受试者个体、每个手指的具体部位、振动频率和施加的推力有关,还观察到每个个体测量的传递率都存在两个峰值,从指尖到手背的第一个峰值一般是增大的. Xu 等^[48]与 Concettoni 等^[53]虽然试验条件有所不同,但手指对应位置传递率函数的基本特征是类似的. 例如,平均共振频率和传递率的幅值. 以上研究表明:在握持手柄与展开在平台上的手指上测量的振动传递率差别较大,但共振频率随着施加力的增大而增大,随着测量点从指尖到手掌而减小.

3) 不同部位的传递率特性. 为了更好地了解手臂系统各部位的振动传递特性,提高对手臂系统损伤机制的认识. Adewusi 等^[6]研究 z_h 轴方向振动传递到人体手臂系统的手腕、肘和肩 3 个部位的振动传递率. Xu 等^[20,48]不仅测量了人体掌部、手腕、前臂和上臂的振动传递率,还测量了肩膀、背部、颈部和头部的振动传递率,该研究还测量了左右手的振动传递率,结果表明:肩膀、背部、颈部和头部存在一定的振动传递,但仅出现在低频振动的情况下,且其传递率比在手腕和上臂测量的小得多. 该研究偏向于模拟操作实际的动力工具,手臂姿势和握持方式也不同于之前的研究,但手腕和前臂的振动谱的基本趋势与试验环境下单手测量的基本不变. 这说明基于单手的测量方式也是可行的. 然而,响应的幅值不同,说明通过试验方法测量的振动传递率预测工作场所振动工具传递的振动,或与其进行比较,应该更多地考虑实际的暴露条件.

4) 不同的握持力衡量方法下的传递率特性. 大部分研究都是在固定的握力和推力下(如握力 30 N,推力 50 N),测量手臂系统某一部位的振动传递率. Marchetti 等^[23]在受试者施加各自最大握持力的 20%,30%,40%下,测量手臂系统肘部的振动传递率,为了避免身体皮肤表面或轻质传感器对测量结果的影响,采用激光测振仪测量肘部骨头表面的振动传递率,仅仅选择肘部骨头部位作为测量点,主要是因为在该部位测量与侵入式测量最为接近,能较好地反映肘部解剖结构的动力学特性. Pan 等^[54]研究手臂系统振动传递率与逐渐增大的握力的关系,发现传递率随着握力的增大而增大,当握力增大到一定大小时,传递率随着握力的进一步增大而缓慢减小,或保持基本不变,振动传递率随着振动激励的变化相差不大,手腕和前臂的共振频率随着施加力的增大而增大,而上臂的共振频率本质上不受施加力的影响. 部分手臂系统振动传递率测量的试验条件和影响因素,如表 2 所示.

表 2 传递率测量的试验条件和影响因素

Tab. 2 Experimental conditions and influence factors for measuring vibration transmissibility

来源	激励信号/ $m \cdot s^{-2}$	肘部 角度/ $^{\circ}$	测量部位 及方向	握持力/N	手柄直径/ mm	受试者 性别和人数	频率/Hz
文献[24]	6.00 (随机)	90±10	第 2,4,5 手指 的远端点和近 端点,共 6 个点	推力:25,50,75 握力:最大值和 正常值	40	9 个 成年男性	16~400
文献[6]	2.65,5.25 (随机)	90,180	手腕 y,z , 肘 x,y,z , 肩 y,z ,	握力:10,30,50 推力:25,50,75	40	6 个 成年男性	2.5~2 500.0
文献[20]	10.78,5.88	90,120	左右手:上臂、 肩、背、颈部, 共 5 个点	推力:50,75,100 握力:10	—	6 个成年 男性,2 个 成年女性	4~100
文献[23]	2.00(随机,6~100 Hz), 以指数方式 从 2.00 降到 12.00 (随机,100~500 Hz)	90	肘部	握力:最大握力 的 20%,30%, 40%;推力:0	41	15 个成年 女性,19 个 成年男性	6~500
文献[44]	19.00 (随机,三轴激励)	90	手指、手背、 前臂、上臂、肩膀	握力:30 推力:50	—	7 个 成年男性	16~500

与表 1 不同,表 2 是手臂系统手传振动传递率特性研究的试验条件,试验都采用随机激励,但激励

的大小不同；手臂也都有考虑 90°的姿势；传递率测量的部位和方向侧重点不一；握力和推力也不完全相同，对其大小的衡量方法不一；手柄直径除了未报告的，基本都是采用 40 mm；受试者人数与表 1 相似，基本是 10 人以内；除了 Adewusi 等^[6]之外，频率范围基本都在 500 Hz 内。虽然文献^[15]规定了试验所采用的激励信号和测量的频率范围（最高为 1 250 Hz），但这些研究未按标准规定的试验方法开展，这样的数据也不利于传递率标准的制定（目前还没有与文献^[33]类似的传递率标准），这可能与现行的标准对试验平台和实验条件的规定^[15]不够详细或不合理有关。

3.6 减振手套的减振性能

通过研究手传振动的响应特性，可以提高对手臂系统手传振动损伤机制的理解，为临床诊断、病理学的研究和相关卫生标准的修订提供了重要的参考资料。当手柄的振动与冲击不可避免时，为了降低手传振动对人体手臂系统造成的危害，可采用隔离的方法减少振动向人体手臂系统的传递，这是一种直接而有效的预防方法。为此，学者围绕减振手套或减振材料的有效性和减振机制开展了相关的研究工作。

文献^[15]规定了减振手套掌部振动传递率的测试和减振性能的评估方法。由此，Dong 等^[55]研究手套掌部的振动传递特性，发现手套的振动传递率与手臂系统的视在质量有关，减振手套随着手臂系统视在质量的增大，减振效果更为明显，但这些都是试验环境下进行的。Dong 等^[56]还研究减振手套在特定工具下，对降低手掌部位振动传递的性能，虽然可以了解减振手套在实际工作场所下的减振效果，但并不能反映在其他工作环境和特定工具下的减振效果。李建庆等^[57]测试和分析多种不同材料的减振手套的减振性能，发现热水袋胶片、脚垫胶片和手掌、掌心贴泡沫塑料的手套减振效果较好。吴国梁^[58]对 7 种不同材料及不同厚度的减振手套的振动传递特性进行测试，发现增大减振手套的厚度，可提高手套的减振性能。汪先国等^[59]通过仿真的方法，研究橡胶隔震器对摩托车手柄的减振效果，其效果非常理想。

然而，文献^[15]未规定手套手指部位振动传递率的测试方法，而手传振动导致的振动性白指却出现在手指部位。Hamouda 等^[60]对 12 种不同减振手套的掌部和手指部位的振动传递特性进行测试和分析，当频率为 10~200 Hz 时，大多手套可以衰减传向手指的振动，当频率高于 200 Hz 时，则放大中指的振动，手套掌部大大减少振动的传递。此外，手套会减少 29%~41% 的握力，但导致握力减小的原因还未明确。因此，建议结合手部握力分析，并采用混合手套以改善手套的减振性能。Welcome 等^[61]从手套手指部位的减振性能和手套的工作机制方面开展研究，发现手套手指部位的减振性能不但取决于减振手套，还取决于手指接触刚度的分布和握力。此外，当频率在 250 Hz 以内，减振手套不能有效地减少手指部位的振动，但当频率高于 400 Hz 时，可有效降低手指部位的振动。

以上研究均表明：不同材质或不同厚度的减振手套的减振效果不同，且减振手套仅在一定的频率范围内起到减振的作用，在有些频段反而会放大传递的振动；减振手套的减振效果还与手套手臂系统的耦合特性有关，包括人体手臂系统的视在质量、握力大小和握力的分布等。除此之外，还可以采用有限元方法对手套中的减振垫进行精确的设计^[62]，以满足特定工具在特定作业下的减振要求。

4 研究展望

手臂系统手传振动的响应特性不但是手传振动暴露的测量、估计和评价标准化的重要基础，也是改进与分析动力工具和减振装置的重要基础。阻抗特性和传递率特性受多种因素影响，工效学因素和试验条件是主要的影响因素。工效学因素包括手臂姿势、握力、推力、测量部位和个体差异等；试验条件包括激励类型、振动方向、振动强度、振动频率、手柄形状、手柄直径大小和测量方法等。综述的文献表明：虽然手传振动响应特性具体的响应幅值存在较大的差异，但基本趋势大体一致，这可能是由于个体差异和实验条件的不同引起的。因此，手传振动测量标准化具有重要意义。

手传振动响应特性的研究是手传振动相关标准制定和修订的基础，而在手传振动方面，我国主要从手传振动作业的现场卫生学调查、职业性手臂振动病的诊断和机制等方向开展研究，而基于试验条件的手传振动响应特性的研究几乎没有。因此，我国现行的手传振动相关标准大多是等同采用或等效采用 ISO 的标准，而这些标准是否适用于我国的国情或特定人群有待进一步的研究和验证。为了更好地防治手臂振动病，保护劳动者的职业健康权益，我国应该加强手传振动响应特性和减振手套的研究，为手臂振动病的防治和手传振动相关标准的制定与修订提供必要的数据参考。

参考文献：

[1] 中华人民共和国卫生部. 工作场所物理因素测量 手传振动: GBZ/T 189. 9—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[2] 《中国职业医学》编辑部. 科学防治职业性手臂振动病[J]. 中国职业医学, 2018, 45(6): 785.

[3] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 职业性手臂振动病的诊断: GBZ 7—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[4] 王林. 正确理解和实施《职业性手臂振动病诊断标准》[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2004, 22(6): 473-474. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1001-9391. 2004. 06. 030.

[5] 陈嘉斌, 陈青松, 王建新, 等. 《职业性手臂振动病的诊断》标准修订说明[J]. 中国职业医学, 2015, 42(2): 212-216. DOI: 10. 11763/j. issn. 2095-2619. 2015. 02. 021.

[6] ADEWUSI S A, RAKHEJA S, MARCOTTE P, *et al.* Vibration transmissibility characteristics of the human hand-arm system under different postures, hand forces and excitation levels[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(14): 2953-2971. DOI: 10. 1016/j. jsv. 2010. 02. 001.

[7] LAWS J. The hazards of HAVS[J]. Occupational Health and Safety, 1998, 67(12): 45-46.

[8] KUCUK H O, EYUBOGLU M, KUCUK U, *et al.* Occupational exposure to hand-arm vibration[J]. International Journal of Cardiology, 2016, 203: 959. DOI: 10. 1016/j. ijcard. 2015. 11. 122.

[9] BRAUCH R. Vibration analysis and standards[R]. Florida: AIHA Florida Spring Conference, 2009.

[10] 王林. 振动与振动病防治[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[11] GRIFFIN M J. Handbook of human vibration[M]. London: Academic Press, 1990.

[12] 肖建民, 郑凡颖, 戴友春, 等. 职业性手传振动危害及其对策[J]. 劳动保护科学技术, 1990, 51(3): 54-58.

[13] 黄永顺, 金佳纯, 温贤忠, 等. 2006—2012 年广东省物理因素所致职业病发病特点分析和对策探讨[J]. 中国职业医学, 2013, 40(6): 544-546. DOI: 10. 11763/j. issn. 2095-2619. 2013. 06. 014.

[14] 王林, 张凯, 聂继池, 等. 局部振动病国内研究的进展和诊断标准的修订[J]. 济宁医学院学报, 1998, 21(3): 1-4.

[15] British Standards Institution. Mechanical vibration and shock-hand-arm vibration; Method for the measurement and evaluation of the vibration transmissibility of gloves at the palm of the hand; ISO 10819: 1996[S]. London: British Standards Institution, 1996.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 机械振动 人体暴露于手传振动的测量和评价 第 1 部分 一般要求: GB/T 14790. 1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[17] British Standards Institution. Mechanical vibration and shock-human exposure-biodynamic coordinate systems; ISO 8727: 1997[S]. London: British Standards Institution, 1997.

[18] GURRAM R, RAKHEJA S, GOUW G J. Mechanical impedance of the human hand-arm system subject to sinusoidal and stochastic excitations[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1995, 16(2): 135-145. DOI: 10. 1016/0169-8141(94)00092-H.

[19] MARCOTTE P, ALDIEN Y, BOILEAU P É, *et al.* Effect of handle size and hand-handle contact force on the biodynamic response of the hand-arm system under z_h -axis vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3): 1071-1091. DOI: 10. 1016/j. jsv. 2004. 06. 007.

[20] XU X Y S, DONG R G, WELCOME D E, *et al.* Vibrations transmitted from human hands to upper arm, shoulder, back, neck, and head[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2016, 62: 1-12. DOI: 10. 1016/j. ergon. 2016. 07. 001.

[21] KIHLEBERG S. Biodynamic response of the hand-arm system to vibration from an impact hammer and a grinder[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1995, 16(1): 1-8. DOI: 10. 1016/0169-8141(94)00060-G.

[22] DONG R G, WELCOME D E, MCDOWELL T W, *et al.* Measurement of biodynamic response of human hand-arm system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4): 807-827. DOI: 10. 1016/j. jsv. 2005. 12. 047.

[23] MARCHETTI E, SISTO R, LUNGHI A, *et al.* An investigation on the vibration transmissibility of the human elbow subjected to hand-transmitted vibration[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2017(62): 82-89. DOI: 10. 1016/j. ergon. 2017. 04. 001.

[24] SCALISE L, ROSSETTI F, PAONE N. Hand vibration: Non-contact measurement of local transmissibility[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2007, 81(1): 31-40. DOI: 10. 1007/s00420-007-0190-3.

- [25] DEWANGAN K N, TEWARI V K. Characteristics of vibration transmission in the hand-arm system and subjective response during field operation of a hand tractor[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(4): 535-546. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.05.002.
- [26] ADEWUSI S, RAKHEJA S, MARCOTTE P. Biomechanical models of the human hand-arm to simulate distributed biodynamic responses for different postures[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2012, 42(2): 249-260. DOI: 10.1016/j.ergon.2012.01.005.
- [27] RAKHEJA S, WU J Z, DONG R G, *et al.* A comparison of biodynamic models of the human hand-arm system for application to hand-held power tools[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 249(1): 55-82. DOI: 10.1006/jsvi.2001.3831.
- [28] DONG R G, DONG J H, WU J Z, *et al.* Modeling of biodynamic responses distributed at the fingers and the palm of the human hand-arm system[J]. *Journal of Biomechanics*, 2007, 40(10): 2335-2340. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2006.10.031.
- [29] WU J Z, WELCOME D E, MCDOWELL T W, *et al.* Modeling of the interaction between grip force and vibration transmissibility of a finger[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2017, 45: 61-70. DOI: 10.1016/j.medengphy.2017.04.008.
- [30] International Organization for Standardization. Mechanical vibration-measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration (Part1): General requirements; ISO 5349-1: 2001[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2001.
- [31] 陆秋海, 李德葆. 工程振动试验分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [32] BURSTRÖM L. Measurements of the impedance of the hand and arm[J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1990, 62(6): 431-439. DOI: 10.1007/BF00379059.
- [33] International Organization for Standardization. Mechanical vibration and shock-free, mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point; ISO 10068: 1998[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [34] 中国国家标准化管理委员会. 机械振动与冲击 人体手臂系统驱动点的自由机械阻抗: GB/T 19740—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [35] CRONJÄGER L, HESSE M. Hand-arm system response to stochastic excitation[C]// *Proceeding of the Fifth Conference on Hand-Arm Vibration*. Kanzawa: [s. n.], 1990: 85-86.
- [36] BURSTRÖM L. The influence of biodynamic factors on the mechanical impedance of the hand and arm[J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1997, 69(6): 437-446. DOI: 10.1007/s004200050172.
- [37] JANDÁK Z. Driving-point mechanical impedance of the hand-arm system at exposure to stochastic vibration[C]// *Proceedings of the Eighth International Conference on Hand-Arm Vibration*. Umea: [s. n.], 1998: 111-112.
- [38] ALDIEN Y, MARCOTTE P, RAKHEJA S, *et al.* Influence of hand-arm posture on biodynamic response of the human hand-arm exposed to z_h -axis vibration[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2006, 36(1): 45-59. DOI: 10.1016/j.ergon.2005.07.001.
- [39] BESA A J, VALERO F J, SUÑER J L, *et al.* Characterisation of the mechanical impedance of the human hand-arm system: The influence of vibration direction, hand-arm posture and muscle tension[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2007, 37(3): 225-231. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.10.019.
- [40] FREIVALDS A. Biomechanics of the upper limbs mechanics, modeling and musculoskeletal injuries[M]. Boca Raton: CRC Press, 2004. DOI: 10.1080/00140130600971127.
- [41] DONG R G, WELCOME D E, XU X S, *et al.* Mechanical impedances distributed at the fingers and palm of the human hand in three orthogonal directions[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(5): 1191-1206. DOI: 10.1016/j.jsv.2011.10.015.
- [42] GURRAM R, RAKHEJA S, BRAMMER A J. Driving-point mechanical impedance of the human hand-arm system: Synthesis and model development[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 180(3): 437-458. DOI: 10.1006/jsvi.1995.0089.
- [43] DONG R G, RAKHEJA S, MCDOWELL T W, *et al.* Estimation of the biodynamic responses distributed at fingers and palm based on the total response of the hand-arm system[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2010, 40(4): 425-436. DOI: 10.1016/j.ergon.2010.02.001.

- [44] WELCOME D E, DONG R G, XU X S, *et al.* An examination of the vibration transmissibility of the hand-arm system in three orthogonal directions[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2015, 45(2): 21-34. DOI: 10.1016/j.ergon.2014.11.001.
- [45] DONG R G, RAKHEJA S, SMUTZ W P, *et al.* Effectiveness of a new method (TEAT) to assess vibration transmissibility of gloves[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2002, 30(1): 33-48. DOI: 10.1016/S0169-8141(02)00076-8.
- [46] International Organization for Standardization. Human response to vibration: Measuring instrumentation; ISO 8041: 2005[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
- [47] HEWITT S. Assessing the performance of anti-vibration gloves: A possible alternative to ISO 10819: 1996[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1998, 42(4): 245-252. DOI: 10.1016/s0003-4878(98)00030-1.
- [48] XU X S, WELCOME D E, MCDOWELL T W, *et al.* The vibration transmissibility and driving-point biodynamic response of the hand exposed to vibration normal to the palm[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2011, 41(5): 418-427. DOI: 10.1016/j.ergon.2011.05.007.
- [49] ABRAMS C F, SUGGS C W. Chain saw vibration: Isolation and transmission through the human arm[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1969, 12(4): 423-425. DOI: 10.13031/2013.38856.
- [50] WU J Z. Three-dimensional finite element simulations of the dynamic response of a fingertip to vibration[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2008, 130(5): 054501. DOI: 10.1115/1.2947199.
- [51] WU J Z, DONG R G, WELCOME D E, *et al.* A method for analyzing vibration power absorption density in human fingertip[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(26): 5600-5614. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.07.022.
- [52] MANSFIELD N J. Human response to vibration[M]. New York: CRC Press, 2005.
- [53] CONCETTONI E, GRIFFIN M. The apparent mass and mechanical impedance of the hand and the transmission of vibration to the fingers, hand, and arm[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 325(3): 664-678. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.03.033.
- [54] PAN D, XU X S, WELCOME D E, *et al.* The relationships between hand coupling force and vibration biodynamic responses of the hand-arm system[J]. *Ergonomics*, 2017, 61(6): 1-38. DOI: 10.1080/00140139.2017.1398843.
- [55] DONG R G, MCDOWELL T W, WELCOME D E, *et al.* Correlations between biodynamic characteristics of human hand-arm system and the isolation effectiveness of anti-vibration gloves[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2005, 35(3): 205-216. DOI: 10.1016/j.ergon.2004.08.009.
- [56] DONG R G, WELCOME D E, PETERSON D R, *et al.* Tool-specific performance of vibration-reducing gloves for attenuating palm-transmitted vibrations in three orthogonal directions[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2014, 44(6): 827-839. DOI: 10.1016/j.ergon.2014.09.007.
- [57] 李建庆, 杨晓英, 于永中. 防振手套等护具减振效果的研究[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2000, 18(3): 191-192. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2000.03.032.
- [58] 吴国梁. 抗振手套及其传递特性的试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 1991, 21(3): 129-133.
- [59] 汪先国, 罗继高, 蹇开林. 橡胶隔振器在某型号摩托车手传振动优化中的应用[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 29(10): 83-88. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2015.10.015.
- [60] HAMOUDA K, RAKHEJA S, DEWANGAN K N, *et al.* Fingers vibration transmission and grip strength preservation performance of vibration reducing gloves[J]. *Applied Ergonomics*, 2018, 62: 121-138. DOI: 10.1016/j.ergon.2016.11.012.
- [61] WELCOME D E, DONG R G, XU X S, *et al.* The effects of vibration-reducing gloves on finger vibration[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2014, 44(1): 45-59. DOI: 10.1016/j.ergon.2013.10.003.
- [62] 赖雅琳, 吴明忠. 粘弹性材料减振垫的设计方法分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(2): 319-320. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2008.02.0319.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)