

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190027

# 面向电力变压器虚拟训练的震动触觉提示装置设计

郭建龙, 黄成云, 熊山

(广东电网有限责任公司培训与评价中心, 广东 广州 510000)

**摘要:** 面向电力生产培训的实际需求, 研发了一套虚拟现实电力巡视互动体验系统, 可以为体验者提供沉浸式变电虚拟仿真实操培训等多种业务培训。提出在该互动体验系统中内嵌一套穿戴式震动触觉提示装置。当体验者进行变压器更换虚拟操作培训时, 该互动体验系统能够准确判断体验者的操作是否正确。依据预设的触觉编码方案, 通过该装置向体验者发出特定震动触觉刺激, 从而向体验者传递实时反馈信息。设计并展开了错误操作的震动触觉告警实验, 分析得到了一种最佳触觉编码方案, 初步验证了装置震动触觉提示功能的有效性。

**关键词:** 虚拟现实; 震动触觉; 触觉编码; 反馈信息; 两因素被试内设计

## Design of vibrotactile hint device for virtual training of power transformer

GUO Jianlong, HUANG Chengyun, XIONG Shan

(Training and Evaluation Center of Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** To meet the actual needs of power production training, a virtual reality power inspection interactive experience system is developed, which can provide immersive virtual simulation training and other business training for the experimenter. A wearable vibrotactile hint device is embedded in the interactive experience system. The interactive experience system can accurately judge whether the experimenter's operation is correct or not when the experimenter conducts virtual operation training for transformer replacement. According to the preset tactile coding scheme, specific vibrotactile stimulation is sent to the experimenter through the device, thus real-time feedback information is transmitted to the experimenter. A vibration tactile alarm experiment is designed and carried out, and an optimal tactile coding scheme is obtained. The validity of the device's vibration tactile alarm function has been preliminarily verified.

This work is supported by Science and Technology Project of Southern Power Grid Company (No. 038700KK52170007) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Company (No. 038700KK58170004).

**Key words:** virtual reality; vibrotactile; tactile coding; feedback information; two-factor in-subject design

## 0 引言

北京交通大学某课题组对我国某大型国有电力企业集团近年的 146 起重大事故的调查分析得出结论: 人因为主的事故占 77%; 物因为主的事故占 21%; 其他类事故占 2%<sup>[1]</sup>。人对事物的感觉与反应的不同步, 是人们在日常生产、生活中产生错误的重要根源<sup>[2]</sup>。华南理工大学某课题组对某大型电厂近年来发生人因事件的分析规律表明, 人因事故往往发生在简单的操作任务中, 发生的根源主要是操作人员思想麻痹, 操作随意。人因事故的发生降低

了电网机组安全性和经济性, 轻则引起非计划停运, 重则可能发生人身伤亡事故<sup>[3]</sup>。因此, 操作型人因事故是电力事故预防工作的重中之重。

近年来, 随着我国电网建设水平的逐步提高, 对系统稳定安全运行的要求也越来越高, 所以, 定性定量分析人因事故, 制定综合对策, 组织实施防范措施, 对确保电力企业安全生产至关重要。2007 年, 穆国强等建立了一套实用的电网企业新型防误操作系统。2011 年, 刘伟等提出了一种智能变电站智能告警与辅助决策的实现方案。2013 年, 艾远高等提出了一种基于虚拟现实技术的水电站运行信息虚拟环境信息表达设计方案<sup>[4]</sup>。2015 年, 赵家庆等提出了一种多主题电网设备综合智能告警技术方案<sup>[5]</sup>, 李飞等开发出一套新型调控智能防误操作票

基金项目: 南方电网公司科技项目资助 (038700KK52170007); 广东省电网公司科技项目资助 (038700KK58170004)

系统<sup>[6]</sup>。2016年,贾华伟等提出了一种智能变电站分布式智能告警应用方案<sup>[7]</sup>。2017年,文东山等提出了一种针对电力系统领域的人因数据库系统设计方案<sup>[8]</sup>。2018年,漆灿等提出了一种基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统方案<sup>[9]</sup>。2018年,Gopakumar, P.等提出了一种基于PMU测量的电网输电线路故障实时检测与分类远程监控系统设计方案<sup>[10]</sup>。同年,潘佳锋等在防误操作平台上,设计了相应的事故预控系统对不同级别的误操作进行智能化报警,提高了现场人员的工作效率,同时防范因疏忽而导致的各种风险<sup>[11]</sup>。

面向电力生产培训的实际需求,本文研发了一套虚拟现实电力巡视互动体验系统,通过将动作捕捉技术、空间定位技术与虚拟现实场景相结合,并集成其他的定制化辅助设备,为体验者提供沉浸式变电虚拟仿真实操培训等多种业务培训。

人体触觉是人体皮肤受到机械接触所产生的生物感觉,包括震动触觉、温度触觉和电触觉等。触觉能够同时感受皮肤表面接触的物体施加的机械压力、震动和温度等丰富的触觉信息,且可以分辨出刺激的空间落点,进行触觉定位。当前信息的触觉提示技术主要有以下几类应用,(1)提供触觉导航;(2)提供触觉告警;(3)提供动作指挥,帮助用户完成身体精细动作;(4)帮助用户用触觉感知部分替代视觉来获取文字图像信息<sup>[12-14]</sup>。

目前,机械震动被认为是比较理想的触觉刺激方式。其产生过程可分为三个步骤:(1)当震动电机接触皮肤表面时,产生机械震动刺激皮肤组织内触觉感受器;(2)触觉感受器把物理能量转换成神经化学能量,将刺激信息转换为神经活动,送至大脑皮层的触觉皮质感受区;(3)经过触觉皮质感受区对此神经活动的分析综合,人体获得震动触觉感知信息。

国内外很多高校及科研机构都在研究基于震动触觉的信息传递。

2001年,荷兰人力因素研究所提出了一种辅助驾驶任务的震动触觉提示装置设计<sup>[15]</sup>。2009年,美国莱斯大学提出了一种固定在手臂上的震动装置设计方案,可用于病患呼吸信息的触觉提示<sup>[16]</sup>。2011年,韩国工业技术研究院提出了一款手机背板震动刺激装置设计方案,可用于二维方向信息的触觉提示<sup>[17]</sup>。2012年,美国哈佛医学院提出了一款震动触觉背心的设计方案,可用于辅助老年人保持身体平衡<sup>[18]</sup>;2013年,德国富特旺根应用技术大学提出了一种震动触觉腰带装置设计方案,可用于模拟盲人避障实验<sup>[19]</sup>。2015年,以色列内盖夫本古里安大学提出了一种震动触觉提示装置设计方案,用于防撞

撞飞行任务模拟训练<sup>[20]</sup>。2017年,美国休斯顿大学提出了一种震动触觉提示装置设计方案,可用于辅助帕金森患者进行康复训练<sup>[21]</sup>。2018年,太原工业学院提出了一种震动触觉提示装置设计方案,可用于盲人助行任务<sup>[22]</sup>。2018年,东南大学提出了一种震动触觉提示装置设计方案,可用于飞行姿态信息传递任务<sup>[23]</sup>。研究表明,采用合适的设计方案,震动触觉提示既不会增加体验者的认知资源负担,也不会对体验者操作任务的执行产生负面影响<sup>[24]</sup>。

因此,本文提出在电力巡视互动体验系统中内嵌一套穿戴式震动触觉提示装置。当体验者进行变压器更换虚拟操作培训时,本互动体验系统能够准确判断体验者的操作是否正确,并通过该触觉提示装置向体验者发出特定震动触觉刺激,向体验者传递针对其操作的实时反馈信息。

## 1 震动触觉提示装置设计

触觉本质上是一种被动感知行为。人只能被动地感知皮肤表面受到的震动触觉刺激。人对这种震动触觉刺激及其变化比较敏感,因此在设计触觉表达装置时必须充分考虑到这种被动感知特性。震动触觉提示装置是进行信息传递和感知的关键,其设计方案既要能够满足信息表达和人体感知的需求,又要具有参数可调整范围大、重量轻、体积小、功耗低和可穿戴等特点。

### 1.1 装置硬件组成

震动触觉提示装置由信息处理模块和震动单元模块组成,如图1所示。其中,信息处理模块包括接口子模块、编码子模块和驱动子模块。



图1 震动触觉提示装置

Fig. 1 Vibrotactile hint device

### 1.2 装置工作原理

本装置的工作过程可分为三个步骤:(1)装置

接收电力巡视互动体验系统提供的告警信息；(2) 装置根据触觉编码方案，将告警信息转化为相应的震动触觉刺激时空组合序列；(3) 装置控制接触人体皮肤的震动单元，施加不同震动强度和不同持续时间的震动触觉刺激。

接口子模块提供了与互动体验系统的接口，用于接收体验者操作实时反馈信息。当系统判断体验者操作成功时，会向接口子模块发送“正确”，此时不告警；当系统判断体验者操作失败时，会向接口子模块发送“错误”，此时触发告警。当编码子模块接收到接口子模块发送的“告警”时，会根据预设的触觉编码方案，将“告警”转换为控制信号。当驱动物子模块接收到编码子模块发送的“告警”对应控制信号时，会驱动震动单元模块发出相应的震动刺激人手腕部皮肤。

本震动触觉提示装置采用一个体积小巧的圆盘形微型空心杯电机做为震动单元模块。这种电机具有质量轻、控制方便的优点，其控制驱动的原理和实现都相对简单。因此，本装置可以较低成本实现人体手腕部单点震动刺激。

## 2 触觉编码实验设计和数据分析

针对电力变压器更换训练中刀闸断开操作结果反馈环节的触觉告警，设计触觉编码实验，实验设计为重复测试的2×2两因素被试内实验，四种编码方案。实验任务要求被试判断“操作正确 Y”或是“操作错误 N”，是重复的选择反应实验。实验记录判断正确率和反应时。

本实验的目的是确定四种编码方案中哪一种是最优方案，从而得到一套优化的震动触觉刺激设计方案，可以有效地向体验者提供触觉告警。

### 2.1 实验设计

错误操作的触觉告警要求实时快速反应，具有鲜明的时间特征，选择时间参数、震动强度变量来设计编码方案。

1) 控制变量：基于人体触觉感知阈限可知，手腕是很敏感的区域，所以选取左手腕作为空间落点来表达错误操作的触觉告警信息。“操作正确 Y”选项的震动触觉表达用 1 个方波为一组，表达多组，“操作错误 N”选项的震动触觉表达用连续 2 个方波为一组，表达多组。方波持续时间设置相同数值 100 ms，同组里两个方波的间隔 50 ms，

#### 2) 变量

自变量 A——方波组间间隔时间，用多组方波震动表达告警信息，通过变化组间间隔时间 A 来变化方案。如图 2 和图 3 所示，A 有 2 个水平：A1：

组间间隔为 100 ms；A2：组间间隔为 300 ms。

自变量 B——震动强度，包括 1.2 N(B1)、1.6 N(B2) 2 个水平。

3) 因变量：实验结果记录 2 个：正确率，操作错误告警信息触觉表达的选择反应正确率；反应时，从呈现震动触觉刺激开始到被试做出判断反应为止的时间。被试完成所有测试后依据感知舒适度选出最佳震动触觉编码方案。

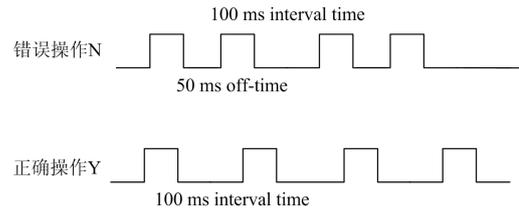


图 2 组间间隔 100 ms, A1 编码方案

Fig. 2 A1 coding scheme with 100 ms interval between groups

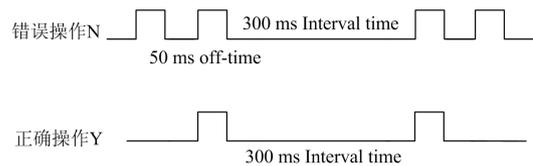


图 3 组间间隔 300 ms A2 编码方案

Fig. 3 A2 coding scheme with 300 ms interval between groups

### 2.2 被试

共有 20 位健康青年被试参与实验，年龄在 19 至 23 岁之间，平均年龄为 22 岁，所有被试都没有参与过类似实验。实验中，所有被试都使用左手腕部进行实验。

### 2.3 实验程序

本实验是重复测试的选择反应实验，备选的两个选择项是：“正确操作 Y”、“错误操作 N”。测试设计的四种编码方案表达触觉告警信息，采用假随机法安排实验顺序。

每种编码方案实验前，每个被试都要进行震动触觉感知训练以掌握编码规则，训练过程采用标准化设置，由程序从两个选择项中随机选择一个生成震动触觉刺激，要求被试尽量快速完成判断，判断完，告知被试正确结果，视情况重复测试 2 组，每组判断 10 次，组间休息 2~5 min。

正式实验，由程序在备选的两个选择项中随机选取一个生成震动触觉刺激，施加给被试，要求被试又快又准地作出选择判断，记录辨识正确率和反应时。每种编码方案重复测试 20 次，两次测试间隔 1 000~2 000 ms，不同编码方案测试之间休息 10~15 min，被试完成所有方案测试后依据感知舒适

度选出最佳方案。

## 2.4 实验结果

错误操作的震动触觉告警实验总共测试了 1 600 次(20 名被试\*4 种组合条件\*20 个测试), 其中反应超时未选择、或反应过短的测试共 47 次

表 1 震动触觉告警实验正确率数据汇总

Table 1 Data summary of accuracy of vibrotactile alarm experiment

A1B1	A1B2	A2B1	A2B2
(92.50±5.50)%	(97.75±3.43)%	(89.25±7.83)%	(94.50±6.05)%

Mean±SD, n=20.

表 2 震动触觉告警实验反应时数据汇总

Table 2 Data summary of response time of vibrotactile alarm experiment

A1B1	A1B2	A2B1	A2B2
(1.27±0.15) s	(1.12±0.13) s	(1.46±0.15) s	(1.41±0.14) s

Mean±SD, n=20

表 3 震动触觉告警实验主观最佳方案选择人数数据汇总

Table 3 Data summary of number for subjective optimum scheme selection data for vibrotactile alarm experiment

A1B1	A1B2	A2B1	A2B2
3	11	0	6

## 2.5 实验讨论

数据处理采用 SPSS 软件进行处理。对错误操作震动触觉告警实验正确率数据进行方差分析, 结果表明:

(1) 方波组间间隔 A 对正确率的主效应具有较高的显著性( $F(1,19)=13.9, P<0.01$ )。

(2) 震动强度 B 对正确率的主效应同样具有较高的显著性( $F(1,19)=9.32, P<0.01$ )。

对错误操作震动触觉告警实验的反应时数据进行方差分析, 结果表明:

(1) 方波组间间隔 A 对反应时的主效应极其显著( $F(1,19)=41.066, P<0.001$ )。

(2) 震动强度 B 对反应时的主效应极其显著( $F(1,19)=24.516, P<0.001$ )。

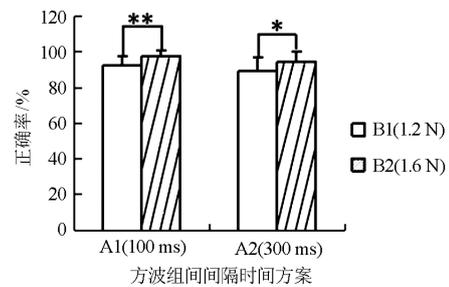
所以, 方波组间间隔 A 和震动强度 B 对错误操作震动触觉告警表达的主效应均显著。方波组建间隔和震动强度的合适选择能显著地影响震动触觉表达的感知判断。

在方差分析的基础上。应用双侧 t 检验进一步比较相同方波组建间隔水平下不同震动强度方案的均值差异, 结果如图 4 和图 5 所示。

图 4 直观地表明 A1、A2 两种方波组间间隔时间水平下, 采用震动强度 B2(1.6 N)方案被试的正确率均明显高于采用震动强度 B1(1.2 N), A2 条件下差异具有显著性( $P<0.05$ ), A1 条件下差异具有更高的显著性( $P<0.01$ )。图 5 直观地表明方波组间间隔

(2.93%), 共有 1 553 个(97.06%)有效数据进行进一步分析。错误操作震动触觉告警实验数据汇总如表 1—表 3 所示, 表中正确率和反应时数据为所有被试的判断实验结果的平均数值。

时间 A1 水平下, 采用震动强度 B2(1.6 N)方案被试的反应时明显低于采用震动强度 B1(1.2 N), 差异具有较高的显著性( $P<0.01$ ), A2 条件下采用震动强度 B2(1.6 N)方案被试的反应时低于采用震动强度 B1(1.2 N), 但差异不具有显著性( $P>0.05$ )。因此, 在同样方波组间间隔时间方案条件下, 采用震动强度 B2(1.6 N)方案对错误操作的震动触觉告警感知, 被试的表现显著优于采用采用震动强度 B1(1.2 N)方案: 正确率更高, 反应时更短。



\*\* $P<0.01$ , \* $P<0.05$ , n=20

图 4 震动强度方案对错误操作的震动触觉告警表达正确率的影响

Fig. 4 Impact of vibration intensity scheme on the accuracy of vibration tactile alarm expressions for error operations

为甄选出最佳编码方案, 在震动强度 B2 方案下应用双侧 t 检验进一步比较方波组间间隔方案 A1、A2 的均值差异, 结果如图 6 和图 7 所示。

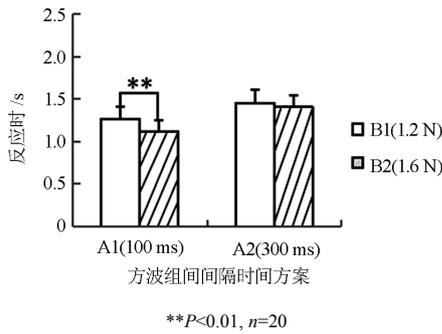


图 5 震动强度方案对错误操作的震动触觉告警表达反应时的影响

Fig. 5 Impact of vibration intensity scheme on the reaction time of vibration tactile alarm expressions for error operations

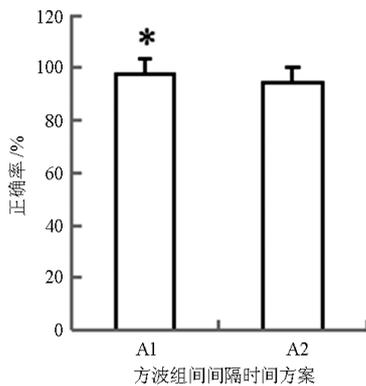


图 6 方波组间间隔方案对错误操作的震动触觉告警表达正确率的影响

Fig. 6 Impact of square wave intergroup interval scheme on the accuracy of vibration tactile alarm expressions for error operations

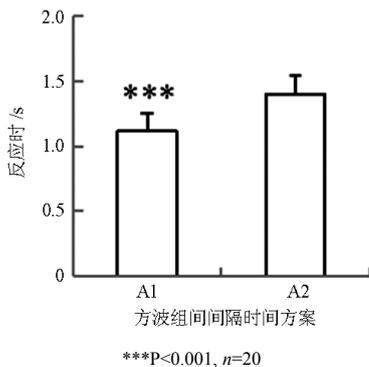


图 7 方波组间间隔方案 A 对错误操作的震动触觉告警表达反应时的影响

Fig. 7 Impact of square wave intergroup interval scheme on the accuracy of vibration tactile alarm expressions for error operations

图 6 表明, 采用 A1B2 方案被试的正确率明显高于采用 A2B2 方案, 差异具有显著性(P<0.05); 图 7 表明, 采用 A1B2 方案被试的反应时明显短于采用 A2B2 方案, 差异具有更高的显著性(P<0.001)。

因此, 实验结果表明错误操作震动触觉告警的最佳方案是 A1B2 方案, 即采用方波组间间隔时间 100 ms, 震动强度 1.6 N 的编码方案, 被试对错误操作的震动触觉告警表达辨识最为清晰可靠, 正确率最高, 反应时最短。同时, 20 名被试主观选择结果表明, 有 11 人选择 A1B2 方案为最佳方案。所以被试的主观判断与实验结论也是一致的。

### 3 结论

为预防及减少电力行业中的操作型人因事故, 本文研发的虚拟现实电力巡视互动体验系统, 内嵌了穿戴式震动触觉提示装置。当体验者进行变压器更换虚拟操作培训时, 系统准确判断体验者的开关操作顺序是否正确, 并通过该触觉提示装置采用上述实验甄选出的最佳编码方案向体验者发出特定震动触觉刺激, 从而有效地提高业务培训的效率。

在通过震动触觉进行信息提示时, 如何选取震动刺激参数和组合是信息有效提示的关键, 研究者也通过大量的基础特性感知实验得出了一些影响触觉编码的因素, 包括频率、强度及时间等<sup>[25]</sup>。

本触觉提示装置以较低成本实现了基于人体手腕部单点震动刺激的装置设计方案。通过设计并实施重复测试的 2×2 两因素被试内实验, 分析得到了一种最佳触觉编码方案, 初步验证了装置震动触觉提示功能的有效性。

触觉通道的合理使用, 能够减轻体验者视觉负担, 提高告警信息传递的可靠性, 从而有效实现电力虚拟仿真实操培训的触觉告警, 增强电力巡视互动体验系统的沉浸感。

### 参考文献

[1] 刘鑫. 电力企业生产事故人因差错及其心理因素研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.  
LIU Xin. Research on human errors and psychological factors of production accidents in electric power enterprises[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.

[2] 雷欣. 关于误操作事故原因的探讨[J]. 西北电力技术, 2004, 32(6): 88-89.  
LEI Xin. About the discussion on the reason of wrong operating[J]. Northwest China Electric Power, 2004, 32(6): 88-89.

- [3] 魏伟. 某大型电厂人因意外事件分析及防范对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
WEI Wei. Human accident analysis and preventive measures of a large power plant[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [4] 穆国强, 魏宾, 刘海莹, 等. 电网企业新型防误操作系统的设计与实现[J]. 陕西电力, 2007, 35(8): 20-26.  
MU Guoqiang, WEI Bin, LIU Haiying, et al. Design and implementation of new-type anti-misoperation system for power grid enterprises[J]. Shaanxi Electric Power, 2007, 35(8): 20-26.
- [5] 赵家庆, 唐胜, 丁宏恩, 等. 多主题电网设备综合智能告警技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 116-122.  
ZHAO Jiaqing, TANG Sheng, DING Hong'en, et al. Multi-subject intelligent integrated alarm technology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 116-122.
- [6] 李飞, 褚罡, 李芸, 等. 调控智能防误操作票系统及其应用研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(8): 30-33.  
LI Fei, CHU Gang, LI Yun, et al. Application of anti-misoperation ticket in integrated dispatch and control system[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(8): 30-33.
- [7] 贾华伟, 郭利军, 叶海明, 等. 智能变电站分布式智能告警研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 92-99.  
JIA Huawei, GUO Lijun, YE Haiming, et al. Research and application of distributed intelligent alarm in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 92-99.
- [8] 文东山, 暴英凯, 章禹, 等. 电力系统操作人因可靠性分析及其数据库系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 35-42.  
WEN Dongshan, BAO Yingkai, ZHANG Yu, et al. Analysis of human reliability in power system operation and research on its database system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 35-42.
- [9] 漆灿, 李庆武, 郑云海, 等. 基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 135-141.  
QI Can, LI Qingwu, ZHENG Yunhai, et al. Infrared monitoring system for substation based on intelligent visual internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 135-141.
- [10] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.
- [11] 潘佳锋, 朱和剑, 高捷, 等. 防误操作平台在智能操作票系统中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 158-163.  
PAN Jiafeng, ZHU Hejian, GAO Jie, et al. Research and application of fuzzy comprehensive judgment in dispatching anti-misuse platform[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 158-163.
- [12] VISELL Y, LAW A, COOPERSTOCK J R. Toward iconic vibrotactile information display using floor surfaces[C] // Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, March 18-20, 2009, Salt Lake City, UT, USA: 267-272.
- [13] VELÁZQUEZ R, PISSALOUX E E. A compact tactile display for the blind with shape memory alloys[C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 15-19, 2006, Orlando, FL, USA: 3905-3910.
- [14] VIDAL-VERDÚ F, HAFEZ M. Graphical tactile displays for visually-impaired people[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 15(1): 119-130.
- [15] VAN VEEN H A H C, VAN ERP J B F. Tactile information presentation in the cockpit[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001, 2058(3118): 174-181.
- [16] ISRAR A, ENG D P, VEDAM S S, et al. A low cost vibrotactile array to manage respiratory motion[C] // The Third Joint Euro haptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperation Systems, World Haptics Conference 2009, Salt Lake City, USA: 619-620.
- [17] YANG G, JIN Y, JIN M S, et al. Vibrotactile display for hand-held devices and its preferable pattern generation[C] // IEEE 15th International Conference on Advanced Robotics: New Boundaries for Robotics, ICAR 2011, 2011: 223-228.
- [18] WALL C, WRISLEY D, ODDSSON L. Vibrotactile feedback of mediolateral trunk tilt or foot pressure increases locomotor performance in healthy older adults-a pilot study[C] // 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,

- August 28 - September 1, 2012, San Diego, CA, USA: 6145-6148.
- [19] REYES A M, MÖLLER K, SEEMANN E. Wearable navigation aids for visually impaired people based on vibrotactile skin stimuli[C] // IFMBE Proceedings, 13th Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013 – MEDICON, 2013, 2014, 41: 1763-1766.
- [20] SALZER Y, ORON-GILAD T. Evaluation of an “on-thigh” vibrotactile collision avoidance alerting component in a simulated flight mission[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2015, 45(2): 251-255.
- [21] LEE B C, FUNG A, THRASHER T A. The effects of coding schemes on vibrotactile biofeedback for dynamic balance training in Parkinson’s disease and healthy elderly individuals[J]. IEEE Transactions on Neural Systems Rehabilitation Engineering, 2018, 26(1): 153-160.
- [22] 王瑞荣, 李晓红, 陈瞳. 基于触觉感知的盲人助行系统研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 11-14.  
WANG Ruirong, LI Xiaohong, CHEN Tong. Research on haptic perception-based walking aid system for blind people[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2018, 34(5): 11-14.
- [23] 杨怀宁, 吴涓, 欧阳强强. 用于表达飞行姿态信息的组合式震动触觉编码[J]. 传感技术学报, 2018, 31(5): 700-704.  
YANG Huaining, WU Jun, OUYANG Qiangqiang. Composite vibration tactile coding for expressing flight attitude information[J]. Journal of Sensing Technology, 2018, 31(5): 700-704.
- [24] HANCOCK P A, MERCADO J E, MERLO J, et al. Improving target detection in visual search through the augmenting multi-sensory[J]. Ergonomics, 2013, 56(5): 729-738
- [25] BREWSTER S A, BROWN L M. Tactons: structured tactile messages for non-visual information display[C] // Australasian User Interface Conference 2004, ACS Conferences in Research and Practice in Information Technology, 2004, Dunedin, New Zealand: 15-23.

---

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-03-22

作者简介:

郭建龙(1982—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级经济师, 研究方向为电力仿真与应用; E-mail: 369285579@qq.com

黄成云(1985—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为虚拟现实教育应用; E-mail: 64762425@qq.com

熊山(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真。E-mail: 286180177@qq.com

(编辑 周金梅)