

基于眼动和生理信号的放疗软件用户界面 设计要素可用性研究

江明尹, 李强, 王道雄, 孙冬杰, 徐璇

(华中科技大学 同济医学院附属同济医院, 武汉 430030)

摘要: **目的** 探究利用眼动和生理指标评价放疗治疗软件操作系统用户界面可用性设计水平。**方法** 首先, 通过专家咨询法在放疗治疗软件操作系统用户界面选定了 5 个重要的用户界面设计要素, 利用专家咨询为 5 个重要用户界面设计要素设计了 2 种不同风格的设计水平。其次, 利用 SPSS 统计分析软件, 通过正交设计实验法构建了 8 个放疗治疗软件操作系统用户界面模型, 用于实验测试。制定了具体的实验测试任务, 并纳入了 8 个眼动指标和 4 个生理指标作为放疗治疗软件操作系统用户界面可用性评估指标。招募了 20 名放疗治疗技师作为实验测试者参与放疗治疗软件操作系统用户界面可用性测试, 并采集了眼动指标和生理指标数据用于放疗治疗软件操作系统用户界面可用性评价。**结果** 皮肤导电性在 8 个不同页面中表现出了显著性统计学差异, 适用于放疗治疗软件操作系统用户界面可用性评价及建模; 利用最小偏二乘回归法建立了放疗治疗软件操作系统用户界面设计要素与皮肤导电性的可用性评估预测模型, 并验证了模型的有效性。**结论** 该模型可有效用于放疗治疗软件操作系统用户界面可用性评价、预测及优化设计改进。

关键词: 放疗治疗软件操作系统; 可用性; 评价模型; 设计要素; 优化设计

中图分类号: TB472; R318.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)04-0163-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.04.019

Usability Study of User Interface Design Elements of Radiotherapy Software Based on Eye Movement and Physiological Signals

JIANG Ming-yin, LI Qiang, WANG Dao-xiong, SUN Dong-jie, XU Xuan

(Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper is to explore the use of eye movement and physiological indicators to evaluate the usability design of the radiotherapy software user interface. First, five important radiotherapy software interface design elements were selected through the expert consultation method, and two different styles of design levels were designed for five design elements by using expert consultation. Secondly, eight radiotherapy software interface prototypes were designed through orthogonal experimental design methods by using the SPSS statistical analysis software for experimental testing. Subsequently, specific experimental test tasks were formulated, and 8 eye movement indicators and 4 physiological indicators were included as the evaluation indicators for the usability of the radiotherapy software interface. At the same time, 20 radiotherapy technicians were recruited to participate in this radiotherapy software usability test, and data of eye movement indicators and physiological indicators were collected for usability evaluation of radiotherapy software. The results of the study show that the electrodermal activity showed significant statistical differences in 8 different pages, which can be used to evaluate and model the usability of radiotherapy software. Then, the partial least squares regression

收稿日期: 2021-09-10

作者简介: 江明尹 (1990—), 男, 博士, 湖北人, 华中科技大学同济医学院附属同济医院中级工程师, 主要研究方向为医疗器械人因工程。

通信作者: 徐璇 (1992—), 女, 本科, 湖北人, 华中科技大学同济医学院附属同济医院中级工程师, 主要研究方向为医疗器械管理、医院管理。

method was used to establish the usability predictive model for interface design elements and electrodermal activity, and the validity of the model was verified. This model can be effectively used to evaluate and predict the usability of the radiotherapy software interface and optimize the usability design of the radiotherapy software interface.

KEY WORDS: radiotherapy software; usability; evaluation model; design element; optimized design

伴随着放射治疗技术的不断发展,不少先进放疗设备快速应用于临床,用于提高肿瘤患者的诊疗质量。新技术的引用在提高患者诊疗质量的同时,不可避免会引入临床使用风险。2016 年,美国医学物理师协会发表的《The Report of Task Group 100 of the AAPM: Application of Risk Analysis Methods to Radiation Therapy Quality Management》报告指明,人为使用失误是引发放疗失误的主要诱因^[1]。研究表明,医疗器械产品的可用性设计水平与人为使用失误的发生密切相关^[2]。可用性设计低劣的放疗产品未能较好地考虑使用人员的身体、能力和使用环境等因素限制,易引发使用安全问题^[3]。因此,提高放疗产品的可用性设计,是减少人为使用失误,提高放射治疗系统运行安全和保障患者就医安全的关键。已有部分学者针对放疗产品的可用性设计展开了相关研究。Chan 等人^[4]研究表明,优化放射治疗系统界面可用性设计可有效降低使用人员的任务完成时间和错误率。Marks 等人^[5]研究表明,放疗产品人机交互界面可用性设计优劣会影响使用者的正确使用。Chan 等人^[6]采用启发式可用性评估方法,对在用放射治疗系统的可用性进行评估,发现现有放射治疗系统可用性设计存在一定缺陷,易引发使用风险。Shier 等人^[7]对在用放射治疗系统可用性进行重新设计,发现提高放射治疗系统人机交互界面可用性设计,可有效降低操作人员使用错误和用户满意度。Jiang 等人^[8]综合利用启发式评估和可用性测试,评测在用放射治疗系统的可用性设计,结果发现在用放射治疗系统可用性设计均存在一定缺陷。研究结果还表明,可用性设计良好的放射治疗系统对比于同类产品,具有较好的用户体验。在国内,部分学者对放射治疗系统的可用性设计展开了探索性研究。如学者王慧亮^[9]介绍了可用性在放射治疗设备开发过程中的应用。江明尹等人^[10]利用专家现场评估和可用性测试综合评估法,对两种国产放射治疗系统可用性设计展开评估,结果表明国产放射治疗系统的可用性设计还存有较大的改进空间。

当前,较少有研究定量分析放射治疗系统人机交互界面设计元素对产品可用性的影响,研究界面设计元素设计水平的不同对可用性评估指标的影响。本文拟对临床在用放射治疗软件操作系统人机交互界面设计要素可用性展开研究,定量分析设计要素设计水平的不同对产品可用性的影响。同时建立设计要素与可用性评估指标的关系模型,为放射治疗软件操作系统用户界面的可用性优化提供解决方案。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

研究以临床在用某国产放射治疗软件操作系统人机交互主界面设计要素为研究对象,邀请了 6 名放射治疗软件操作系统临床使用专家参与访谈会议,通过反复查看和研究该放射治疗软件操作系统人机交互主界面设计特点,筛选出了 5 个需要进行可用性重设计的设计要素,分别为重要放疗参数的显示、放疗参数的呈现方式、设备联锁报警的内容显示、设备运行状态和界面重要功能按键配色使用。同时,课题组邀请了 6 名专家进行讨论分析,确定了 5 设计要素的 2 水平设计,见表 1,用于探究设计元素对放射治疗软件操作系统可用性的影响程度。

利用正交实验设计原理,针对确定的界面设计要素及其设计水平,利用 SPSS 软件生成了 8 种界面组合设计原型,放射治疗软件操作系统主界面设计要素正交实验设计见表 2。通过正交实验设计确定的 8 个主界面模型,开发了 8 个放射治疗软件操作系统主界面页面,用作后续的实验研究。

1.2 实验被试

20 名具有放射治疗软件操作系统操作经验的放射治疗技师参与了本次研究。被试年龄分布为 25~30 岁,平均年龄为 27 岁。参与测试前,所有被试保持良好的休息和身体状态,确保数据采集的真实性和准确性。

1.3 实验测试任务

依据放射治疗技师日常操作任务,提炼出了以下实验测试任务:(1)核查放射治疗疗程总放疗次数和当前放射治疗的分次数;(2)查看当前直线加速器状态;(3)查看相关治疗参数(机架角度、准直器角度、治疗床参数);(4)在用户界面搜寻“终止治疗”按钮,点击并核查软件用户界面联锁报警的具体内容。

参与实验的放射治疗技师必须在 8 个放射治疗软件操作系统用户界面完成对应的 4 个测试任务。放射治疗技师在构建的放射治疗软件操作系统用户界面完成特定实验任务时,其眼动及生理数据通过相应的仪器设备进行采集和处理。

1.4 指标数据采集

当前,已有部分学者将眼动和生理指标用于产品界面的可用性研究^[11-14]。纳入研究的指标集见表 3,

表 1 5 设计要素的 2 水平设计
Tab.1 Two design levels for five design elements

设计元素（编号）	设计水平（编号）	释义
重要放疗参数的显示 A	无差别显示 A1（原始设计）	和其他治疗参数无差别显示
	标签及内容加黑显示 A2（修改后设计）	将该显示参数的标签及内容加黑加粗予以显示
放疗参数的呈现方式 B	两行文字显示 B1（原始设计）	该显示界面，将治疗分次数用两行中文加以描述，第一行显示治疗总次数，第二行显示当前治疗次数
	一行简化描述 B2（修改后设计）	用一行文字简要描述，格式如，治疗分次：3/25
设备连锁报警的内容显示 C	全部显示 C1（原始设计）	所有连锁的信息（报警和未报警）全部显示出来
	只显示连锁报警内容 C2（修改后设计）	只显示出现连锁报警的信息
设备状态指示 D	文字+填充框 D1（原始设计）	状态用文字描述，并填充在显示框内，并用不同色彩显示机器状态
	文字+信号灯 D2（修改后设计）	文字与信号灯显示，文字在下，信号灯在上，用信号灯指示状态
界面重要按钮颜色使用 E	灰白色 E1（原始设计）	和其他按钮无差别现实
	红色 E2（修改后设计）	用红色标示

注：每个页面设计元素对应的设计水平 1 为界面原始设计水平，水平 2 为修改后的设计水平

表 2 放射治疗软件操作系统主界面设计要素正交实验设计
Tab.2 Orthogonal experimental design for user interface design elements of radiotherapy system

实验号	A	B	C	D	E
界面 1	A1	B1	C1	D1	E1
界面 2	A1	B1	C2	D2	E2
界面 3	A1	B2	C1	D2	E1
界面 4	A1	B2	C2	D1	E2
界面 5	A2	B1	C2	D1	E1
界面 6	A2	B1	C1	D2	E2
界面 7	A2	B2	C2	D2	E1
界面 8	A2	B2	C1	D1	E2

表 3 纳入研究的指标集
Tab.3 Set of indicators included in the study

指标类别	序号	指标名称	单位
眼动指标	1	瞳孔直径	mm
	2	注视点个数	Count
	3	平均注视时间	S
	4	总注视时间	S
	5	平均眨眼时间	S
	6	眨眼频率	Count/S
	7	眼跳个数	Count
	8	总眼跳时间	S
生理指标	1	脉搏	Bpm
	2	皮肤导电性	μS
	3	皮肤温度	℃
	4	呼吸频率	Rpm

用于表征放射治疗软件操作系统用户界面设计要素因设计水平的不同对用户界面可用性的影响程度，用

作客观、定量优化改进放射治疗软件操作系统用户界面可用性设计水准。

1.5 实验设备

放射治疗技师完成任务时，测试人员眼动数据通过眼动仪 Tobii Glasses 设备获取，生理指标数据通过人体生理指标采集 PsyLAB 系统获取。

1.6 实验流程

放射治疗技师在进行测试实验前，须处于良好的身体状态和充足的睡眠，确保测试数据的有效性。具体的实验研究流程如下：（1）研究人员向参与测试放射治疗技师介绍实验目的、流程及注意事项，收集人口学资料；（2）放射治疗技师在研究人员的指引下熟悉测试软件，同时可进行与实验任务无关的操作；（3）研究人员告知放射治疗技师测试的实验步骤及任务，确保放射治疗技师熟知测试流程；（4）安装并调试眼动和生理数据采集设备，使数据采集设备能正常使用；（5）正式测试前，需采集每位放射治疗技师静息状态下的眼动和生理指标基线数据，用作后续的数据分析；（6）在研究人员的引导下，每位放射治疗技师在 8 个页面完成相同的测试任务，完成单个页面测试任务后，每位放射治疗技师需经过充分休息，然后开始下一页面测试。

1.7 数据处理及分析

为评估用户界面设计要素设计水平对放射治疗软件操作系统可用性影响程度，需要对采集的眼动和生理数据进行处理。将采集的部分眼动数据（瞳孔直径）和全部生理指标数据与放疗技师静息状态下基线值差值作为分析数据来源，确保分析结果科学有效。

2 实验数据处理与评估模型建立

2.1 基于单因素方差分析建模指标筛选

通过放射治疗软件操作系统可用性测试实验,获得了 20 名放射治疗技师在 8 个设计页面的眼动和生理指标数据。同时,为挑选出能表征用户界面设计要素设计水平的不同对放射治疗软件操作系统用户界面可用性影响程度,将 8 个设计页面作为单因素方差分析的影响因素,对所采集的眼动和生理指标数据进行方差齐性分析和单因素方差分析。

SPSS 软件方差齐性分析的结果表明,放射治疗技师完成特定实验任务时,注视点个数、总注视时间、眨眼频率、眼跳个数、总眼跳时间 5 个评价指标其显著性小于 0.05,方差不齐,其余眼动和生理评价指标其显著性大于 0.05,可用作下一步单因素方差分析。眼动和生理指标方差齐性检验结果见表 4,眼动和生理指标单因素方差分析结果见表 5。生理指标皮肤导电性在满足方差齐性前提下,单因素方差分析结果显著性满足小于 0.05 的条件,表明生理指标皮肤导电

表 4 眼动和生理指标方差齐性检验结果

Tab.4 Homogeneity of variance test results for eye movement and physiological indicators

指标类别	指标名称	Levene 统计	df1	df2	显著性
眼动指标	瞳孔直径	0.449	7	152	0.869
	注视点个数	8.047	7	152	<0.001
	平均注视时间	0.641	7	152	0.722
	总注视时间	3.791	7	152	0.001
	平均眨眼时间	0.498	7	152	0.835
	眨眼频率	2.593	7	152	0.015
	眼跳个数	10.729	7	152	<0.001
	总眼跳时间	5.086	7	152	<0.001
生理指标	脉搏	0.541	7	152	0.802
	皮肤导电性	1.897	7	152	0.074
	皮肤温度	0.852	7	152	0.546
	呼吸频率	0.464	7	152	0.859

注:显著性水平为 0.05

表 5 眼动和生理指标单因素方差分析结果

Tab.5 One-way ANOVA statistical analysis results for eye movement and physiological indicators

指标类别	指标名称	F	显著性
眼动指标	瞳孔直径	0.463	0.860
	平均注视时间	0.383	0.911
	平均眨眼时间	0.560	0.788
生理指标	脉搏	0.315	0.946
	皮肤导电性	3.571	0.001
	皮肤温度	0.139	0.995
	呼吸频率	0.412	0.894

注:显著性水平为 0.05

性与界面设计元素设计水平变化相关,可用作放射治疗软件操作系统可用性评价预测。

2.2 关系模型的建立

为定量分析放射治疗软件操作系统用户界面设计要素设计水平不同对放射治疗软件操作系统用户界面可用性的影响程度,拟用生理指标皮肤导电性作为因变量,以 5 个放射治疗软件操作系统用户界面设计要素不同设计水平为自变量,采用最小偏二乘回归法(Partial Least Squares Regression, PLSR)作为本研究建模方法,利用 Matlab R2017a 软件建立可用性回归预测模型。此外,由于界面设计元素为定性语言描述,无法作为模型定量变量输入,所以在本研究中,将元素的设计水平量化描述,并依据元素对应设计水平进行 0-1 编码,使之成为可输入变量。同时,由于皮肤导电性(μS)具有对应量纲,需对采集的数据指标集进行标化处理。本研究利用 Z-Score 函数对采集的皮肤导电性数据进行标化处理,具体处理方法见公式(1)。

$$x_0 = \frac{x - x_{mean}}{\delta} \tag{1}$$

公式中, x 为实验获得的生理指标皮肤导电性数据, x_{mean} 总体数据的均值, δ 为总体数据的标准差, x_0 为标化后的皮肤导电性数据。

此外,为了验证所建模型的有效性,本研究选取前 7 个页面的生理指标皮肤导电性数据及其页面设计元素设计水平作为建模数据,剩余页面 8 数据作为模型验证数据,用作模型的有效性验证。

放疗软件界面设计元素设计水平对可用性影响程度回归模型见公式(2)。

$$Y_{\text{皮肤导电性}} = 1.6683 + \begin{bmatrix} +0.2804A_1 \\ -0.2804A_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +0.2089B_1 \\ -0.2089B_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +0.0409C_1 \\ -0.0409C_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +0.0112D_1 \\ -0.0112D_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +0.1209E_1 \\ -0.1209E_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

公式中, Y 皮肤导电性为模型输出预测生理指标皮肤导电性数据, A_1 、 A_2 、 $\cdots$ 、 E_1 、 E_2 表示 5 个设计元素不同设计水平。此外,每个设计元素在对应页面只取一种对应的设计水平,如页面设计元素 A 处于 A_1 状态时,对应设计水平取值 0;处于 A_2 状态时,对应设计水平取值 1。

2.3 模型解释

从得到可用性评估指标皮肤导电性预测模型可知,对进行可用性测试的放射治疗技师皮肤导电性影响最大的页面设计元素为重要治疗参数的显示方式(A),其次为放疗参数的呈现方式(B),接着为界面重要按钮颜色使用(E)。同时,通过获得的预测模型可知,页面设计元素修改后的设计水平会降低放射治疗技师的皮肤导电性。

表 6 皮肤导电性配对样本 *t* 检验结果
Tab.6 Paired samples test results for electrodermal activity indicator

生理指标	成对差分					t	df	Sig(双侧)
	均值	标准差	标准误	差分 95%置信区间				
				下限	上限			
皮肤导电性	-0.196	1.008	0.225	-0.668	0.278	-0.870	19	0.395

2.4 模型有效性验证

为了进一步验证模型的有效性,将预留的第 8 个页面实验数据作为模型验证数据,将其带入模型后,比较皮肤导电性实际值与预测值的差异性,利用 SPSS 软件对皮肤导电性实际值与预测值进行配对样本 *t* 检验,皮肤导电性配对样本 *t* 检验结果见表 6。结果显示,显著性水平大于 0.05,表明皮肤导电性预测值与实际值不存在明显差异性,研究获得的皮肤导电性预测模型具有良好的适用性。

3 讨论

研究表明,放射治疗技师在不同测试用户界面完成特定实验任务时,放射治疗技师生理信号皮肤导电性在不同测试页面存在统计学差异。已有国外学者研究结果表明,测试人员的生理指标皮肤导电性和测试页面的可用性设计优劣有关。Muter 等人^[15]对银行在用管理软件用户界面可用性展开了评估,发现使用人员皮肤导电性在可用性设计良好的软件用户界面其数值远小于可用性设计低劣的软件用户界面。Ward 等国外学者^[16]已发表的研究结果也同样证实,在可用性设计良好的软件用户界面执行实验任务,使用人员的皮肤导电性水平较低。

在本研究中,获得的生理指标皮肤导电性与页面设计元素可用性回归预测模型中,各用户界面设计要素设计水平的系数极差反映了设计要素对放射治疗软件操作系统用户界面可用性的作用大小。在模型中,对界面可用性影响最大的为重要治疗参数的显示方式(系数极差值为 0.5608),其次为放疗参数的呈现方式(系数极差值为 0.4178),接着为界面重要按钮颜色使用(系数极差值为 0.2418)。分析该三种设计元素可用性设计水平可知,重要治疗参数的突出显示、放疗参数的简化显示和重要按钮使用醒目颜色,可有效降低放疗技师在完成操作任务时的皮肤导电性,增强软件界面使用时的可用性。依据本研究建立的生理指标皮肤导电性与界面设计元素的关系模型,可以针对性地为放射治疗软件操作系统用户界面可用性优化改进提供解决方案。此外,在进行页面迭代设计评价时,该模型还可为页面设计人员提供预测值参考,更好地应用于页面设计实际解决方案。

4 结论

文中提出了利用眼动和生理指标对放射治疗软

件操作系统用户界面可用性进行定量评估方法,对界面设计元素对用户界面可用性的影响程度进行了研究,探索性解决放射治疗软件操作系统用户界面可用性优化改进。该研究建立的可用性评估模型,有效利用眼动和生理指标,选择关键界面设计元素,针对性提高元素可用性设计水平,进而提高用户界面整体可用性。文中的研究方法不仅适用于放射治疗软件操作系统用户界面可用性设计评价,还可延伸应用于其他种类医疗器械。该研究可为医疗器械制造厂商优化用户界面可用性设计提供评估方法及工具,有利于可用性工程在医疗器械领域的应用与扩展。

参考文献:

[1] Huq M S, Fraass B A, Dunscombe P B, et al. The Report of Task Group 100 of the AAPM: Application of Risk Analysis Methods to Radiation Therapy Quality Management[J]. Medical Physics, 2016, 43(7): 4209-4262.

[2] Crowley J J, Kaye R D. Identifying and Understanding Medical Device Use Errors[J]. Journal of Clinical Engineering, 2002, 27(3): 188-193.

[3] 梁广立. 放射治疗科放疗设备使用安全性初探[J]. 医疗卫生装备, 2010, 31(4): 389.

LIANG Guang-li. Safety in Using Radiotherapy Equipment in Radiotherapy Department[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2010, 31(4): 389.

[4] Chan A J, Islam M, Rosewall T, et al. The Use of Human Factors Methods to Identify and Mitigate Safety Issues in Radiation Therapy[J]. Radiotherapy and Oncology, 2010, 97(3): 596-600.

[5] Marks L B, Jackson M, Xie L, et al. The Challenge of Maximizing Safety in Radiation Oncology[J]. Practical Radiation Oncology, 2011, 1(1): 2-14.

[6] Chan A J, Islam M, Rosewall T, et al. Applying Usability Heuristics to Radiotherapy Systems[J]. Radiotherapy and Oncology, 2012, 102(1): 142-147.

[7] Shier A, Morita P P, Dickie C, et al. Design and Evaluation of A Safety-centered User Interface for Radiation Therapy[J]. Practical Radiation Oncology, 2018, 8(5): 346-354..

[8] Jiang M, Liu S, Gao J, et al. A Usability Study of 3 Radiotherapy Systems: A Comparative Evaluation Based on Expert Evaluation and User Experience[J]. Medical Science Monitor, 2019, 25: 578-589.

[9] 王慧亮. 可用性工程在大型医用电气设备研发中的应用——以放射治疗设备为例[J]. 中国医疗器械信息,

- 2018, 24(15): 28-32.
- WANG Hui-liang. Application of Usability Engineering in the Development of Large-scale Medical Electrical Equipment: Take Radiotherapy Equipment as An Example[J]. China Medical Device Information, 2018, 24(15): 28-32.
- [10] 江明尹, 王骁踊, 付艳, 等. 基于专家评估和用户测试的国产放疗设备的可用性研究[J]. 工业工程, 2019, 22(4): 64-70.
- JIANG Ming-yin, WANG Xiao-yong, FU Yan, et al. A Usability Study of Two Radiotherapy Devices Based on Expert Evaluation and User Testing[J]. Industrial Engineering Journal, 2019, 22(4): 64-70.
- [11] 江明尹. 基于多模态测量的放疗软件可用性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- JIANG Ming-yin. Usability Study of Radiotherapy Software Based on Multimodal Measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [12] 孙贵磊, 李琴, 孟燕华, 等. 基于眼动分析的汽车仪表盘设计[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 148-153.
- SUN Gui-lei, LI Qin, MENG Yan-hua, et al. Design of Car Dashboard Based on Eye Movement Analysis[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(2): 148-153.
- [13] 张宇红, 朱昊. 基于眼动仪的智能冰箱人机界面评估方法研究[J]. 包装工程, 2019, 40(24): 223-227.
- ZHANG Yu-hong, ZHU Hao. Evaluation Method of Human-machine Interface of Intelligent Refrigerator Based on Eye Tracker[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(24): 223-227.
- [14] 关斯斯, 于帆. 基于眼动追踪的自动售货机人机界面设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 230-236.
- GUAN Si-si, YU Fan. Human-machine Interface Design of Vending Machine Based on Eye Tracking[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 230-236.
- [15] Muter P, Furedy J J, Vincent A, et al. User-hostile Systems and Patterns of Psychophysiological Activity[J]. Computers in Human Behavior, 1993, 9: 105-111.
- [16] Ward R D, Marsden P H. Physiological Responses to Different WEB Page Designs[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2003, 59(1): 199-212.

(上接第 134 页)

- [17] 宁科, 沈信生, 邵晓军. 3~6 岁幼儿移动性动作发展与感知身体能力关系的实证研究[J]. 北京体育大学学报, 2016, 39(12): 74-81.
- NING Ke, SHEN Xin-sheng, SHAO Xiao-jun. The Relationship between Locomotor Development and Perceived Physical Competence in Children Aged 3-6 Years: An Empirical Study[J]. Journal of Beijing Sport University, 2016, 39(12): 74-81.
- [18] 刘焱. 儿童游戏通论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2004: 192.
- LIU Yan. General theory of Children's play[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2004: 192.
- [19] 马松影, 李锴. 基于交往理念的儿童家具设计研究[J]. 包装工程, 2016, 37(16): 192-195.
- MA Song-ying, LI Kai. Children's Furniture Design Based on Social Communication Idea[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(16): 192-195.
- [20] 耿晓杰, 李超. 是家具, 也是玩具——关于儿童纸板家具的设计思考[J]. 家具与室内装饰, 2012(6): 104-105.
- GENG Xiao-jie, LI Chao. The Furniture is not only Furniture but also toy: The Thought of Children Cardboard Furniture Design[J]. Furniture & Interior Design, 2012(6): 104-105.
- [21] 张璐霞, 耿晓杰. 儿童纸板家具的可玩性设计研究[J]. 家具与室内装饰, 2015(4): 64-65.
- ZHANG Lu-xia, GENG Xiao-jie. Research on Playability Design of Children Cardboard Furniture[J]. Furniture & Interior Design, 2015(4): 64-65.
- [22] 陈书琴. 儿童纸家具设计实践案例分析[J]. 设计, 2017(10): 122-123.
- CHEN Shu-qin. Case Analysis of Children Paper Furniture Design[J]. Design, 2017(10): 122-123.
- [23] 徐园, 石兰. 为孩子而设计——学龄前儿童身心发展与儿童家具设计[J]. 装饰, 2008(11): 80-81.
- XU Yuan, SHI Lan. Design for Children: The Development of Pre-School Children's Body & Mind and Children's Furniture Design[J]. Art & Design, 2008(11): 80-81.
- [24] 孙瑞雪. 捕捉儿童敏感期: 珍藏版[M]. 北京: 中国妇女出版社, 2013.
- SUN Rui-xue. Capture the Sensitive Period of Children[M]. Beijing: China Women's Publishing House, 2013.
- [25] 弓引花, 宗明明. 基于生命周期评估的儿童家具可持续设计[J]. 家具与室内装饰, 2009(12): 24-25.
- GONG Yin-hua, ZONG Ming-ming. Sustainable Design of Children Furniture Based on Whole Life Cycle[J]. Furniture & Interior Design, 2009(12): 24-25.
- [26] 朱云, 刘秀, 肖潭. 基于可成长理念的学前儿童家具设计[J]. 包装工程, 2015, 36(16): 61-64.
- ZHU Yun, LIU Xiu, XIAO Tan. Pre-School Children Furniture Design Based on the Concept of Growth[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(16): 61-64.