

Gap效应对搜索目标显著性和绩效的影响

徐新然, 郭肖亚, 于瑞峰

(清华大学 工业工程系, 北京 100084)

摘要: 探究了gap效应对视觉搜索任务中搜索目标的显著性和搜索绩效的影响。采用gap值(11种时间值)×极性(正极性和负极性)×角度(30°/60°, 20°/70°) 3因子组内设计实验, 18名被试在不同gap值、极性和角度组合条件下完成一系列视觉搜索任务, 测量指标为发现目标物的概率和反应时间。结果表明, gap值、角度及二者的交互作用对搜索目标的显著性有显著影响, gap值和极性对反应时间有显著影响, 即gap效应对视觉搜索任务中搜索目标的显著性和搜索绩效均有显著影响。

关键词: 视觉搜索; 显著性; gap效应; 显示极性; 人因工程

中图分类号: TB18; C93-05

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2021)01-0117-06

Gap Effect on Target Salience and Visual Search Performance

XU Xinran, GUO Xiaoya, YU Ruifeng

(Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The study aimed to investigate the gap effect on the salience of search target and performance in visual search tasks considering two display polarity modes and two angle combination modes. In this study, a three-factor within-subjects design experiment was conducted (11 gap value $\times$ 2 polarity $\times$ 2 angle combination). 18 subjects participated in this study and completed a series of visual search tasks under different combinations of gap values, display polarity modes and angle combination modes. The target detection probability and reaction time were measured. The results indicated that the main effects and interaction of gap value and angle combination on target salience were significant while the main effects of gap value and polarity on reaction time were significant. Gap effect showed significant influences on target salience and search performance.

Key words: visual search; salience; gap effect; display polarity; human factors

视觉搜索是在视觉环境中将目标对象或者特征从其他对象或者特征中找到或区分出来的认知任务^[1]。显著性是让目标从周围环境中突显出来, 使得目标更加容易引起人的视觉注意而被发现的一种特性^[2]。人的注意力选择是靠显著性来主导的^[3]。显著性有大小之分, 通过调节颜色、位置、方向、尺寸、形状、运动情况等特性可以改变目标物和周围环境中的物体的差异, 从而改变其发现概率^[4]。目标的发现概率越高即目标的显著性越高, 因此发现概率的大小可以作为衡量显著性大小的指标^[5]。搜索目标的显著性提高会加快搜索效率, 而非目标的

显著性提高则会降低搜索效率。

在眼跳研究的任务范式中, 根据注视点消失与目标刺激呈现之间时间间隔的有、无或注视点持续存在, 可以分为gap条件、step条件和overlap条件。gap条件(gap condition)是指注视点消失与目标刺激的出现之间存在一个时间间隔, 这个时间间隔的值即为gap值。step条件(step condition)是指注视点一消失, 目标刺激就出现, 没有时间间隔。overlap条件(overlap condition)是指目标刺激出现后一段时间内中央注视点一直存在^[6-7]。眼跳是一种快速的注视点转移, 是眼球的注视点或者注视方位突然发生改变

收稿日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471098; 71771134)

作者简介: 徐新然(1995-), 女, 山东省人, 博士研究生, 主要研究方向为人因工程。

的眼动行为^[6]。眼跳潜伏期是从刺激呈现到正确眼跳发动的时间间隔^[8]。研究表明当gap值为200 ms时,眼跳潜伏期最短^[9-11]。gap效应是指gap条件下,眼跳潜伏期比overlap条件下短。在step条件下的眼跳潜伏期也小于overlap条件,但大于gap条件^[6]。

目前有2种理论来解释gap效应的产生:一个是注意力分离理论,另一个是两因素理论。注意力分离理论认为眼跳的发生分为注意力从原来的注视点离开,作出眼球运动的决定,最后大脑作出扫视的指标计算3个环节。在gap条件下,注视点消失,注意力自行脱离注视点,只需要作出眼球运动决定和扫视指标计算2个环节。相对于overlap条件下的3个环节,gap条件只需要2个环节,因此眼跳潜伏期缩短^[12]。两因素理论认为gap效应是由2个因素导致的。一个是警报效应,即当任务目标出现之前注视点消失,人会通过变化意识到新的目标将会到来。另一个是注视点消失因素,由大脑上丘的抑制解除。眼跳的发生是上丘控制的,当集中注视时,上丘细胞会被额叶视区抑制,这会减少眼跳发生机会,而当注视消失后,上丘就会解除抑制,从而使眼跳得以更快发生^[11,13-14]。

眼跳潜伏期与目标显著性之间存在相关性。Donk等^[15]的研究中采用角度不同的2个搜索项,发现存在一个高显著性的目标项和一个低显著性的干扰项时,眼跳潜伏期越短,高显著性的目标项的首次发现概率越高;目标项与干扰项的显著性差别也会影响高显著性目标的发现概率,表现为目标项和干扰项的显著性差别越大,高显著性目标被发现的概率越高。gap效应可以调节眼跳潜伏期的大小,但通过设置gap条件是否会对搜索目标的显著性和视觉搜索绩效产生影响目前尚不明确。

自然场景中的文字和背景的组合有常见的2种极性,一种是正极性,即在明亮背景上显示黑暗字符;另一种是负极性,即在黑暗背景上显示明亮字符^[16]。正极性可以增强对比敏感度、视觉辨别能力和对运动识别^[17],但是也有研究表明负极性下的视力和搜索绩效好于正极性^[18]。但是,正负2种极性对目标显著性的影响目前还没有相关结论。

综上所述,本文基于视觉搜索作业,以发现概率作为衡量目标显著性的指标,反应时间作为视觉搜索绩效的指标,探索gap效应、极性、目标项与干扰项的差别大小3个因素对目标显著性、视觉搜

索绩效的影响。研究gap效应对目标显著性和搜索绩效的影响可以补充视觉搜索的显著性理论,对制造业企业的产品视觉检测等视觉搜索类作业和任务的设计提供指导。

1 方法

1.1 被试

18名清华大学在校生参与了此次实验,其中男性6人,占比33.3%,女性12人,占比66.7%,平均年龄为21.1岁。所有被试均没有视觉障碍,矫正视力为1.0以上。所有被试之前都没有参加类似实验的经历或者关于视觉搜索的相关知识背景。

1.2 实验设计

本文采用3因子组内设计方式,组内因子包括gap值、极性和角度。实验中gap条件、overlap条件和step条件下的自变量水平统一用gap值表示,分别为正值、负值和0。将overlap条件中的注视点设计成延迟消失,用负值表示。gap值有11个水平,分别为0、 ± 100 ms、 ± 200 ms、 ± 400 ms、 ± 600 ms、 ± 800 ms。极性因子有2个水平,分别为正极性和负极性。角度因子有2个水平,即目标项和干扰项间的差异分别为较大和较小,借鉴Donk等^[15]的研究,采用倾斜角度一大一小的一对线段作为目标项和干扰项,差异较大的为 20° 和 70° ,差异较小的为 30° 和 60° 。

实验测量的显著性指标为目标项的发现概率,绩效指标为正确反应的反应时间。发现概率指被试选择大小角度线段中较大线段的次数占总选择次数的比值。反应时间指刺激出现到被试作出按键反应的时间长度。

1.3 实验素材

实验采用视觉搜索任务,任务的搜索目标项为倾斜线段中角度较大的一个,倾斜角度较小的线段为干扰项。角度的组合有2种,一种是 20° 和 70° ,另一种是 30° 和 60° ,2种情况随机出现,倾斜方向随机(可能是2条都左倾,或者都右倾,或者一个左倾一个右倾)。2条倾斜线段随机对称出现在屏幕上,即到中心距离相同。刺激项和背景的组合方式一种是正极性,即在白色背景屏幕上,刺激项由 31×31 共961条黑色线段组成,其中除了2条倾斜的线段外其他959条全部竖直,线段长为0.5 cm,粗0.15 cm(图1);

另一种是负极性, 即黑色背景白色线段, 其他的设定与正极性相同(图2)。

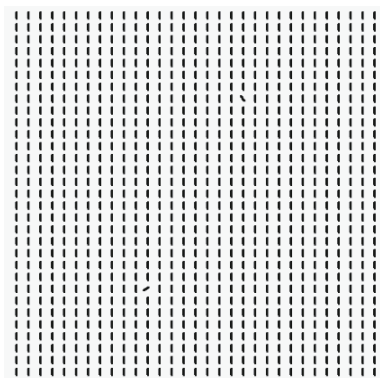


图1 正极性实验素材

Figure 1 Experimental material of positive polarity

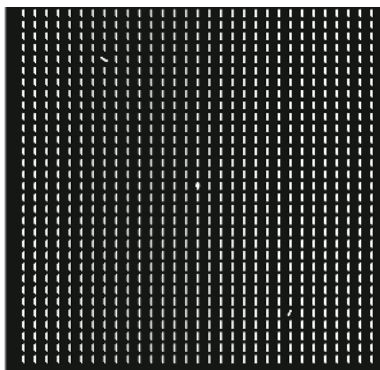


图2 负极性实验素材

Figure 2 Experimental material of negative polarity

搜索区域为屏幕靠近中央的区域, 但是为了避免被试没有进行眼球运动就搜索到目标, 中心点视野附近不能出现目标, 且实验中被试需要快速判断目标是出现在上方还是下方, 因此设定中间11~21行不出现倾斜线段。

1.4 实验平台与设备

实验采用一台25英寸DELL一体机电脑, 用来显示刺激材料, 分辨率为1 600×900 pixel。实验软件是根据实验要求基于LabView软件平台开发的程序, 可以设置搜索范围、次数等, 并可以在后台自动记录选择结果和反应时间。

1.5 实验流程

实验前, 主试向被试介绍实验内容, 请被试阅读并填写实验知情书和基本个人信息。主试向被试介绍并演示整个实验过程, 然后被试完成10 min练习任务。正式实验时(以正极性实验为例), 被试打开实验软件, 点击开始后, 屏幕中心出现一个黑色

实心圆点, 被试首先注视圆点。随后, 在不同的gap值下搜索界面出现与注视点消失之间的时间间隔有不同的设定。在gap条件下, 注视点出现500 ms~1 000 ms之间的随机时间长度后消失, 一定的时间间隔(100 ms、200 ms、400 ms、600 ms或800 ms)后呈现搜索界面(图1); overlap条件下, 注视点呈现500 ms~1 000 ms之间的随机时间长度后搜索界面出现, 搜索界面呈现后经过一定的时间间隔(100 ms、200 ms、400 ms、600 ms或800 ms)后注视点消失; step条件下, 注视点呈现500 ms~1 000 ms之间的随机时间长度后消失, 同时搜索界面出现。搜索界面呈现后, 被试被要求用最快速度注视到一条倾斜线段, 看到的同时按下空格键即进入搜索结果选择界面。在选择界面, 被试需要按键盘上“↑”或“↓”选择最先注视到的线段在搜索区域的上半部分或下半部分。被试完成一次搜索任务的选择后自动进入下一次实验。负极性时, 只有搜索区域背景颜色和线段颜色与正极性不同(图2), 其余设定与正极性实验相同。每个被试先做正极性或负极性是随机的, 每种极性下被试需要做400次, 分4组进行, 每组之间被试进行充分的休息。每一种极性下, 倾斜角度、gap值是随机出现的。

2 结果与讨论

2.1 发现概率

2.1.1 发现概率的描述性统计分析

在不同gap值、极性和倾斜角度下的发现概率的描述性统计分析结果如表1所示, 其中, 负的gap值代表overlap情况下的设定时间值。由表1可知, gap值从小到大变化时, 在角度和极性的4种组合下的发现概率变化规律相同: 先逐渐增大, 达到最大值之后再逐渐减小(图3)。这说明overlap条件下, 随着注视点继续呈现的时间长度的减小, 目标显著性增加; 从overlap条件变为step条件时, 目标显著性增加; 从step条件变为gap条件时, 目标显著性继续增加; gap条件下目标显著性不会随着gap值的增加持续变大, 有一个使目标显著性最大的gap值, 超过这个gap值后目标显著性会下降。极性和gap值相同时, 20°和70°组合下比30°和60°组合下的大角度线段的被发现概率更大, 说明20°和70°两个倾斜线段中70°线段的显著性比30°和60°组合中60°线段的显著性更高。

表 1 发现概率的描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistics of the detection probability				
gap值	60°负极性	60°正极性	70°负极性	70°正极性
-800	0.598	0.630	0.650	0.650
-600	0.591	0.629	0.656	0.654
-400	0.629	0.632	0.711	0.684
-200	0.651	0.648	0.742	0.723
-100	0.697	0.672	0.786	0.797
0	0.711	0.691	0.804	0.833
100	0.716	0.687	0.811	0.868
200	0.748	0.733	0.846	0.852
400	0.722	0.743	0.870	0.854
600	0.709	0.672	0.854	0.832
800	0.698	0.636	0.821	0.835

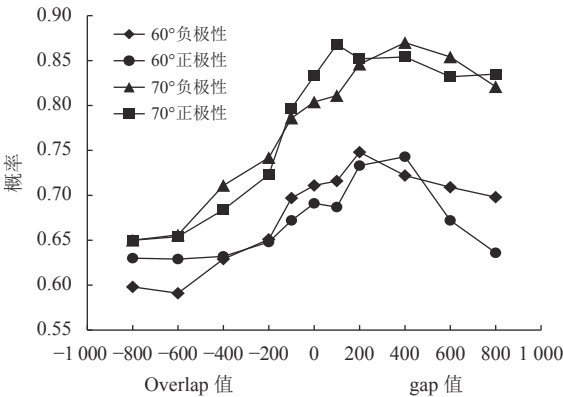


图 3 发现概率变化趋势图
Figure 3 Trend chart of detection probability

2.1.2 发现概率的重复测量方差分析

发现概率的重复测量方差分析结果表明(表2), gap值对发现概率有显著影响($F=16.86, p<0.001$), gap条件下的发现概率($M=0.775$)高于overlap条件下的发现概率($M=0.672$); 角度对发现概率有显著影响($F=132.59, p<0.001$), 20°和70°组合下70°线段的发现概率($M=0.779$)比30°和60°组合下60°线段的发现概率($M=0.675$)更高。极性对发现概率没有显著影响($F=0.04, p=0.83$), 正极性下($M=0.725$)和负极性下($M=0.728$)发现概率差异不大。gap值和角度的交互作用显著($F=3.82, p=0.019$), 角度组合不同时gap值的变化对发现概率有不同的影响, 20°和70°组合下发现概率的变化幅度($M_{\text{最大}}-M_{\text{最小}}=0.212$)比30°和60°组合下变化幅度($M_{\text{最大}}-M_{\text{最小}}=0.136$)更大。

表 2 发现概率的重复测量方差分析结果

Table 2 Repeated measures ANOVA results of the detection probability					
来源	自由度	SS	MS	F值	P值
gap值	10	0.150	0.015	16.86	0.000
极性	1	0.000	0.000	0.04	0.837
角度	1	0.118	0.118	132.59	0.000
gap值*极性	10	0.003	0.000	0.72	0.694
gap值*角度	10	0.018	0.002	3.82	0.019
极性*角度	1	0.000	0.000	0.09	0.870
gap值*极性*角度	10	0.004	0.000	0.97	0.523

2.2 反应时间

2.2.1 反应时间的描述性统计分析

在不同gap值、极性和倾斜角度下的反应时间描述性统计如表3所示。每种极性和角度的组合下gap条件的反应时间都比overlap条件的反应时间短, 而且在gap值为200 ms时反应时间最短, 说明gap条件下视觉搜索绩效更好。对于极性变量, gap值和角度变量相同时, 负极性比正极性刺激的反应时间长, 说明正极性刺激时视觉搜索的绩效更高。当极性相同时, 20°/70°组与30°/60°组的曲线没有明显差别(图4)。

2.2.2 反应时间的重复测量方差分析

反应时间的重复测量方差分析结果表明(表4), gap值对反应时间有显著影响($F=36.76, p<0.001$), 整体上gap条件下的反应时间($M=574.6$)低于step条件下的反应时间($M=584.0$), step条件下的反应时间($M=584.0$)低于overlap条件下的反应时间($M=607.9$); 极性对反应时间有显著影响($F=146.16, p<0.001$), 负极性的反应时间($M=601.1$)比正极性的反应时间($M=580.2$)长。角度对反应时间没有显著影响, 20°/70°组的反应时间($M=591.6$)与30°/60°组的反应时间($M=589.6$)没有显著差异。gap值和极性, gap值和角度, 极性和角度以及3个因子的交互项都没有显著的交互作用。

2.2.3 反应时间的配对t检验

为了研究gap值变量在哪些区间的变化对反应时间影响显著, 对相邻gap值下的反应时间进行配对t检验。结果显示, 在正极性30°/60°组合时, gap值从-100 ms($M=595$)变为0 ms时($M=574$)反应时间减小, 有显著的变化($p=0.049$); 在负极性30°/60°组合时, gap值从0 ms($M=601$)变为100 ms时($M=593$)

表 3 反应时间的描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistics of response time ms

变量	gap值	均值	最小值	中位数	最大值
60°负极性	-800	623	333	566	858
	-600	624	370	558	891
	-400	615	390	557	895
	-200	617	394	569	835
	-100	608	391	547	884
	0	601	383	569	892
	100	593	411	586	894
	200	582	389	589	894
	400	583	369	602	889
	600	584	410	611	883
	800	584	403	603	891
60°正极性	-800	598	375	577	880
	-600	600	331	561	886
	-400	597	384	560	859
	-200	586	343	551	879
	-100	595	342	553	872
	0	574	415	570	890
	100	566	412	585	887
	200	546	401	601	897
	400	560	418	613	895
	600	554	368	608	885
	800	579	371	583	885
70°负极性	-800	613	384	543	1 083
	-600	619	338	543	864
	-400	626	354	539	869
	-200	624	327	534	1 043
	-100	608	339	547	886
	0	590	363	542	899
	100	587	373	574	1 062
	200	580	344	598	891
	400	585	378	598	899
	600	587	407	574	893
	800	588	350	574	1 113
70°正极性	-800	596	365	544	898
	-600	606	314	543	892
	-400	595	376	547	882
	-200	605	326	542	886
	-100	600	295	546	1 049
	0	571	337	544	888
	100	566	328	580	899
	200	560	345	588	898
	400	566	375	584	897
	600	566	374	585	891
	800	576	313	584	892

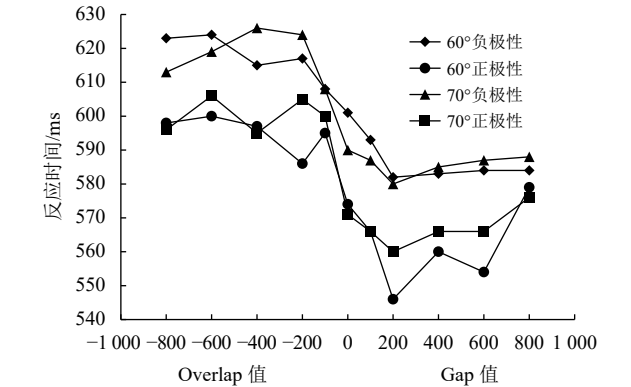


图 4 反应时间变化趋势图

Figure 4 Trend chart of response time

表 4 反应时间的重复测量方差分析结果

Table 4 Repeated measures ANOVA results of response time					
来源	自由度	SS	MS	F值	P值
gap值	10	11 968.1	1 196.8	36.76	0.000
极性	1	4 759.0	4 759.0	146.16	0.000
角度	1	43.7	43.7	1.34	0.255
gap值*极性	10	391.4	39.1	1.61	0.224
gap值*角度	10	350.2	35.0	1.44	0.279
极性*角度	1	40.2	40.2	1.50	0.316
gap值*极性*角度	10	339.2	33.9	1.79	0.215

反应时间减小, 有显著的变化($p=0.046$); 在正极性 20°/70°组合时, gap值从-100 ms($M=600$)变为0 ms 时($M=571$)反应时间减小, 有显著的变化($p=0.049$); 在负极性 20°/70°组合时, gap值从-200 ms($M=624$)变为-100 ms时($M=608$)反应时间减小, 有显著的变化($p=0.045$), gap值从-100 ms($M=608$)变为0 ms时 ($M=590$)反应时间减小, 有显著的变化($p=0.047$)。因此, 从overlap条件变为step条件反应时间会发生显著的变化, 从step条件变为gap条件时反应时间也会发生显著的变化。

3 讨论

过去的研究表明眼跳潜伏期会受到中央注视点和刺激出现之间的时间间隔的影响, 即gap效应。gap条件下的眼跳潜伏期短于overlap条件下和step条件下的眼跳潜伏期^[6]。在本研究中, gap条件下目标的发现概率高于overlap条件下和step条件下, 说明当注视点和搜索界面之间的时间间隔大于0(即处于gap条件下)时, 目标的显著性高于overlap条件和

step条件。由此说明, gap效应对搜索目标显著性的影响与gap效应对眼跳潜伏期的影响是一致的。根据两因素理论, 一方面gap效应是一种警报效应, 在gap条件下由于注视点消失, 人会意识到搜索目标即将出现, 预先对搜索目标的出现有一定的心理准备, 提高对目标的分辨能力。另一方面gap条件下注视点提前消失会解除大脑上丘对额叶视区的抑制作用, 使眼睛能更准确地识别目标^[11, 13-14]。

本文目标项和干扰项的差异来源于角度差的大小。当2个角度的差异比较大时, 较大倾斜角度的线段的显著性更高。这个结果验证了以往的研究中提出的目标项与干扰项的差别大小会影响高显著性目标的发现概率, 且目标项和干扰项的差别越大, 高显著性目标被发现的概率越高^[15]。实验结果表明, gap值和角度的交互效应显著, 当gap值的变化相同时, 角度差较大的一组显著性变化幅度更大, 表现为: 当gap值变化时, 20°/70°组的发现概率变化范围(最大值与最小值的差)比30°/60°组更大。

gap值和极性对视觉搜索绩效影响方面, 本文选取反应时间作为视觉搜索绩效的指标, 实验结果显示, gap条件下搜索绩效比overlap条件、step条件下高, 正极性搜索界面下视觉搜索绩效比负极性时高。gap效应对反应时间有影响, 验证了gap效应能缩短眼跳潜伏期, 使眼跳更快发生^[11], 缩短了视觉搜索的时间。极性对反应时间有影响, 验证了正极性可以增强对比敏感度、视觉辨别能力的研究结果^[17]。

4 结论

本文探索了gap效应、显示极性、目标物与干扰物差异大小对目标显著性和视觉搜索绩效的影响。实验结果表明, gap效应、目标物与干扰物差异大小以及二者的交互效应对目标显著性有显著影响, gap效应、显示极性对视觉搜索绩效有显著影响。实验结果可以补充视觉搜索显著性理论并对视觉搜索任务和作业的设计具有指导价值。

参考文献:

- [1] BALDASSI S, BURR D, CARRASCO M, et al. Visual attention[J]. *Vision Research*, 2004, 44(12): 1189-1191.
- [2] WOLFE J M. Visual search[G]//Attention. Hove, England: Psychology Press/Erlbaum (UK) Taylor & Francis, 1998: 13-73.
- [3] TREISMAN A M, GELADE G. A feature-integration theory of attention[J]. *Cognitive Psychology*, 1980, 12(1): 97-136.
- [4] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [5] NOTHDURFT H C. Saliency and target selection in visual search[J]. *Visual Cognition*, 2006, 14(4-8): 514-542.
- [6] 李娟. 眼跳过程中的GAP效应[D]. 天津: 天津师范大学, 2010. LI Juan. The GAP effect during saccade[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2010.
- [7] LESTER B D, VECERA S P. Active listening delays attentional disengagement and saccadic eye movements[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2018, 25(3): 1021-1027.
- [8] 宣宾, 彭苏浩. 手动与眼动反应抑制的认知神经机制[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2015, 42(4): 329-336. XUAN Bin, PENG Suhao. Cognitive and neural mechanisms of response inhibition in hand and eye movements[J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2015, 42(4): 329-336.
- [9] SASLOW M G. Effects of components of displacement-step stimuli upon latency for saccadic eye movement[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(8): 1024-1029.
- [10] REULEN J P H. Latency of visually evoked saccadic eye movements: I. saccadic latency and the facilitation model[J]. *Biological Cybernetics*, 1984, 50(4): 251-262.
- [11] YONEDA M, SAITOH K. Nonspecific effects of gap paradigm on swallowing[J]. *Physiology & Behavior*, 2017, 169: 141-146.
- [12] FISCHER B, WEBER H, BISCALDI M, et al. Separate populations of visually guided saccades in humans: reaction times and amplitudes[J]. *Experimental Brain Research*, 1993, 92(3): 528-541.
- [13] KINGSTONE A, KLEIN R M. Visual offsets facilitate saccadic latency: does predisengagement of visuospatial attention mediate this gap effect?[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1993, 19(6): 1251-1265.
- [14] MICHALCZYK Ł, BIELAS J. The gap effect reduces both manual and saccadic inhibition of return (IOR)[J]. *Experimental Brain Research*, 2019, 237(7): 1643-1653.
- [15] DONK M, VAN ZOEST W. Effects of saliency are short-lived[J]. *Psychological Science*, 2008, 19(7): 733-739.
- [16] TSANG S N H, CHAN A H S, YU R F. Effect of display polarity and luminance contrast on visual lobe shape characteristics [J]. *Ergonomics*, 2012, 55(9): 1028-1042.
- [17] MAYR S, BUCHNER A. After-effects of TFT-LCD display polarity and display colour on the detection of low-contrast objects[J]. *Ergonomics*, 2010, 53(7): 914-925.
- [18] WESTHEIMER G, CHU P, HUANG W, et al. Visual acuity with reversed-contrast charts: II. clinical investigation, optometry and vision[J]. *Optometry and Vision Science*, 2003, 80(11): 749-752.