

分类号: X914

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210720115



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 施工现场安全标志组合设置
 对安全感知影响研究

论 文 作 者 贺先庆

指 导 教 师 周晓宏 教授

学 科 (专 业) 管理科学与工程

研 究 方 向 工业工程与管理

论文提交日期: 2024 年 6 月 3 日

分类号: X914

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2210720115

题 目 施工现场安全标志组合设置对安全感知影响研究

英文并列

题 目 RESEARCH ON THE IMPACT OF COMBINED SETTING
OF SAFETY SIGNS ON SAFETY PERCEPTION IN
CONSTRUCTION SITES

学生姓名: 贺先庆

指导教师: 周晓宏 教授

专 业: 管理科学与工程

研究方向: 工业工程与管理

论文答辩日期: 2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：贺先庆

日期：2024年6月3日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：贺先庆
日期：2024 年 6 月 3 日

指导教师签名：周明志
日期：2024 年 6 月 3 日

施工现场安全标志组合设置对安全感知影响研究

摘 要

随着社会进步与科技发展，人们对于公共安全的需求日益提升。安全标志作为一种直观且高效的安全信息传递手段，广泛的应用于各类施工场所中，旨在引导人们采取正确的安全行为，避免潜在风险的发生。单一的安全标志设置在某些复杂环境中可能不足以提供全面的安全指导，因此安全标志的组合设置在现实生活中更为常见。然而，安全标志组合设置不合理的情况多有发生，这可能导致警示信息混乱、误解甚至遗漏，从而无法有效发挥安全标志的预警作用。探究安全标志组合设置对安全感知的影响，提高组合设置合理性，减少安全事故的发生，目前已成为重要研究课题。

本文首先深入探究以往关于安全标志认知过程相关研究，结合人的信息流动与加工过程理论模型及其他安全标志认知过程理论，构建了安全标志组合设置安全感知模型，深入分析了安全标志组合设置下个体因素及标志组合设置自身特征对安全感知的影响，并根据分析提出研究假设。参照《安全标志及其使用导则》选取了 27 个常见标志作为研究材料，采用眼动追踪技术分别进行了施工人员脑力负荷对安全标志的安全感知影响实验、安全标志组合设置数量及信息量对安全感知影响实验、安全标志组合设置类型对安全感知影响实验。研究结果发现：（1）脑力负荷显著影响被试识别安全标志，被试对不同类型安全标志的感知也存在显著差异。被试脑力负荷越高对安全标志的

安全感知越弱。不同类型安全标志对被试的各项眼动指标影响不一，其中指令标志相较于其他两者引起的视觉注意较弱。（2）标志组合中标志数量显著影响被试对安全标志组合的安全感知，标志数量越多被试对标志组合的安全感知越差；相同数量标志情况下不同信息量标志组合对被试的安全感知影响不具备显著性；不考虑标志数量情况下，标志信息量越大，施工人员对组合标志的安全感知越差。（3）禁止、警告、指令标志两两组合设置情况下：禁止标志与警告标志之间不具有显著性差异；警告与指令标志组合设置时，警告标志更能引起被试的安全感知；禁止与指令标志组合设置时，禁止标志更能引起被试的安全感知。禁止、警告、指令标志同时组合设置情况下：禁止标志更能引起被试的安全感知，警告标志次之，提示标志最低。

根据实验分析结果，对安全标志组合设置各影响因素进行量化分析，结合功效系数法构建了安全标志组合设置感知有效性评价模型，并利用该模型对实例进行分析验证，提出相关改善建议。

关键词：安全标志，标志组合，施工现场，安全感知，眼动实验

RESEARCH ON THE IMPACT OF COMBINED SETTING OF SAFETY SIGNS ON SAFETY PERCEPTION IN CONSTRUCTION SITES

ABSTRACT

With the progress of society and the development of technology, people's demand for public safety is increasing. As an intuitive and efficient means of safety information transmission, safety signs are widely used in various construction sites, aiming to guide people to adopt correct safety behaviors and avoid potential risks. In some complex environments, a single safety sign may not be sufficient to provide comprehensive safety guidance, so the combined setting of safety signs is more common in real life. However, there are many cases of unreasonable combined setting of safety signs, which may lead to confusion, misunderstandings, and even omissions of warning information, thus failing to effectively play the warning role of safety signs. Exploring the impact of combined setting of safety signs on safety perception, improving the rationality of combined setting, and reducing the occurrence of safety accidents have become important research topics at present.

This article begins with an in-depth exploration of previous research on the cognitive process of safety signs. By integrating theoretical

models of human information flow and processing, as well as other theories related to the cognitive process of safety signs, a safety perception model for the combined setting of safety signs is constructed. This model comprehensively analyzes the impact of individual factors and the inherent characteristics of the combined setting of safety signs on safety perception. Based on this analysis, research hypotheses are proposed. Referring to the "Guidelines for Safety Signs and Their Use," 27 commonly used signs are selected as research materials. Using eye-tracking technology, experiments are conducted to investigate the influence of construction workers' mental workload on their safety perception of safety signs, the impact of the number and information content of combined safety signs on safety perception, and the effect of different types of combined safety sign settings on safety perception. The research findings reveal the following: (1) Mental workload significantly affects participants' recognition of safety signs, and there are also significant differences in their perception of different types of safety signs. The higher the mental workload of the participants, the weaker their safety perception of the safety signs. Different types of safety signs have varying impacts on various eye movement indicators of the participants, with instruction signs causing weaker safety perception compared to the other two types. (2) The number of signs in a sign combination significantly affects participants' safety perception of the combination. The more signs there are, the worse the

participants' safety perception of the combination. When the number of signs is the same, the combination of high and low information content signs does not have a significant impact on participants' safety perception. Regardless of the number of signs, the more information the sign contains, the worse the construction workers' safety perception of the combined sign.

(3) When combining prohibition, warning, and instruction signs in pairs: there is no significant difference when combining prohibition and warning signs; when combining warning and instruction signs, warning signs tend to evoke stronger safety perception among participants; and when combining prohibition and instruction signs, prohibition signs tend to evoke stronger safety perception. When prohibition, warning, and instruction signs are combined simultaneously, prohibition signs evoke the strongest safety perception among participants, followed by warning signs, and instruction signs evoke the weakest perception.

Based on the results of experimental analysis, this study conducts a quantitative analysis of various influencing factors in the combined setting of safety signs. By combining with the efficiency coefficient method, a perception effectiveness evaluation model for the combined setting of safety signs is established, and this model is used to analyze and verify practical examples, thus putting forward relevant improvement suggestions.

Author: Xianqing He(industrial engineering and management)

Supervised by: Professor Zhou Xiaohong

KEY WORDS: Safety sign, sign combination, construction site, safety perception, eye tracking experiment

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 文献综述.....	2
1.3.1 安全标志有效性影响因素相关研究	2
1.3.2 安全标志设置有效性相关研究	3
1.3.3 安全标志组合设置相关研究	4
1.3.4 评述	5
1.4 研究内容.....	5
1.5 研究方法与技术路线.....	6
1.5.1 研究方法	6
1.5.2 研究技术路线	6
1.6 主要创新点	7
第 2 章 理论分析与模型构建.....	9
2.1 安全标志组合设置安全感知过程.....	9
2.1.1 安全标志认知行为理论分析	9
2.1.2 安全标志组合设置安全感知过程模型构建	12
2.2 安全标志组合设置安全感知影响因素分析.....	13
2.2.1 个体因素的影响	13
2.2.2 标志组合自身特征的影响	15
2.2.3 安全标志组合设置安全感知影响因素结构模型	18
2.3 本章小结	19
第 3 章 施工现场个体因素（脑力负荷）对安全标志的安全感知影响.....	20
3.1 实验设计	20
3.1.1 实验内容	20
3.1.2 实验被试与材料选择	20
3.1.3 实验流程	21

3.2 实验数据分析.....	22
3.2.1 首次进入时间	23
3.2.2 首次注视持续时间	25
3.2.3 热点图	27
3.3 结果讨论	29
3.3.1 不同脑力负荷的安全感知差异	29
3.3.2 不同安全标志类型的安全感知差异	30
3.3.3 建议	30
3.4 本章小结	31
第 4 章 施工现场安全标志组合设置自身特征对安全感知影响.....	32
4.1 组合标志数量及信息量对安全感知影响实验	32
4.1.1 标志信息量度量	32
4.1.2 实验设计	35
4.1.3 实验数据分析	37
4.1.4 结果讨论	39
4.2 组合标志类型对安全感知影响实验	41
4.2.1 实验设计	41
4.2.2 实验数据分析	42
4.2.3 结果讨论	47
4.3 本章小结	48
第 5 章 施工现场安全标志组合设置感知有效性评价模型.....	50
5.1 评价指标权重	50
5.2 评价模型构建	51
5.3 实例分析	54
第 6 章 结论与展望.....	58
6.1 研究结论	58
6.2 研究不足与展望	59
参考文献.....	60
攻读硕士学位期间参与的科研项目工作及研究成果.....	66
致谢.....	67

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

我国近年以来，建筑业日益庞大，同时安全问题也日益凸显。据中华人民共和国住房和城乡建设部的数据统计，2023 年全国发生房屋市政工程生产安全事故 583 起、死亡 634 人，其中较大及以上事故共 8 起，较大及以上事故死亡人数共 28 人，生产安全形势依然严峻^[1]。研究表明，物的不安全状态和人的不安全行为共同导致安全事故的发生，其中人的不安全行为是主因^[2]。安全标志能够提醒工作人员潜在的危險，从而避免安全事故的发生。安全标志作为增强施工人员安全意识的一个重要手段，若失效可能会直接引发安全事故^[3]。在众多安全事故与问题中，因安全标志缺失、设置不合理或是施工人员对安全警示的漠视与麻木所导致的损失占有很大比例，这些损失不仅广泛存在于生产经营的各个环节，也渗透至交通运输、城市建设、教育以及日常生活的方方面面^[4]。这表明，对于安全标志的设置以及提升施工人员安全意识方面仍需加强，以确保生产建设更加安全稳定。

为了保护施工人员和公众的安全，施工现场必须设置各种安全标志来提醒人们注意周围的危險。施工现场一般危險因素较为密集，多数场景需要集中设置大量安全标志，因此安全标志组合设置在施工现场中是常见的情况，如图 1-1 所示。然而，安全标志设置过多可能会导致施工人员对安全标志反应麻痹，增加施工现场发生安全事故的风险。标志组合设置同时带来的是信息量的增大，使得施工人员认知和信息处理能力过载，难以有效执行其他任务。

综上所述，探讨安全标志组合设置对安全感知的影响，提出更加合理的标志组合设置建议，对保护施工人员人身安全避免安全事故的发生有重要研究意义。本文以施工现场安全标志组合为研究对象，探讨标志组合设置各因素对安全感知的影响，构建安全标志组合设置感知有效性模型，以提高标志设置的合理性，降低安全事故的发生率。



图 1-1 安全标志组合设置示例

1.2 研究目的

本研究希望通过理论分析与实验相结合的方法达到以下研究目的：

- （1）通过实践和文献分析，探究安全标志组合设置对施工人员安全感知的影响因素，建立安全标志组合设置安全感知模型。
- （2）基于人因工程相关理论及研究方法，探究安全标志组合设置时标志数量、类型、信息量及人的脑力负荷对安全感知的影响。
- （3）综合考虑安全标志组合设置影响因素，构建安全标志组合设置感知有效性评价模型。对安全标志组合设置实例分析，并提出安全标志组合设置的改善措施。

1.3 文献综述

1.3.1 安全标志有效性影响因素相关研究

2000 年前后，学者们对安全标志的有效性研究主要集中于个体特征及标志自身特征，例如，Wogalter 等（1999）^[5]主要从个体特征和信息来源上来寻找安全标志有效性的影响因素；Rogers 等（2000）^[6]认为影响安全标志有效性的因素主要有两类，即标志自身特征以及个体特征。近年来随着研究的进行，学者们发现了更多的安全标志有效性影响因素，主要分为三种，即安全标志自身特征、个体特征以及环境因素。如 Chan 等（2021）^[7]通过实验证明标志的可理解性会显著影响其有效性；Laughery（2006）^[8]提出“信息沟通理论”模型，认为信息发送者、安全标志自身特征、情景信息和个体特征都会对安全标志的有效性产生影响。

安全标志自身特征方面, 由国际标准化组织 (ISO) 规定的安全标志设计标准明确指出, 颜色、形状、位置等诸多要素对安全标志的有效性均有重要影响^[9]。Williams (2007)^[10]等认为安全标志的三个基本要素: 信号词、颜色以及外框都会影响其有效性。胡祎程 (2013)^[11]通过问卷调查等方法对安全标志的五维特性进行了研究, 认为标志特性的熟悉性、具体性、简明性、明确性、语义接近性与安全标志的识别性具有显著正相关。张坤 (2014)^[12]等通过实验研究了安全标志形状及颜色的视觉注意特征, 发现被试不同颜色及形状的注意程度均有显著不同。牛国庆 (2014)^[13]等通过眼动追踪技术研究辅助文字对安全标志识别性的影响, 发现辅助文字对安全标志的识别有显著影响, 添加辅助文字会降低安全标志的识别难度。

个体特征方面, 大量学者研究表明人口统计学变量会影响人们对安全标志的识别有效性。Liu 等 (2012)^[14]通过对比实验研究了年轻人与老年人对地铁标志的识别性差异, 发现老年人更难理解地铁标志。李世波等 (2015)^[15]研究个体因素对煤矿工作场所里安全标志理解的影响, 发现性别、学历、工作年限等都对安全标志的理解具有显著影响。王春雪等 (2016)^[16]设计识别率试验探究情绪对安全标志识别性的影响, 结果表明恐惧、悲伤、愤怒等不同情绪下的个体对安全标志的识别能力存在显著差异。

环境因素包括情境因素和物理环境等多个方面。情景因素方面, 朱小光 (2015)^[17]通过完全随机试验发现安全培训可以明显提高人们对安全标志的理解水平, 不同的培训方式效果也存在显著差别; Ortiz 等 (2000)^[18]认为风险倾向和安全行为呈现负相关关系, 危险感知较低的风险偏好者会更不愿意去遵从安全标志。在物理环境上, 汪琨 (2019)^[19]对道路交通标志夜间识别性进行研究, 发现夜间环境下人们对交通标志的五个特性感知水平皆有所下降。

1.3.2 安全标志设置有效性相关研究

煤矿领域安全标志研究, 田水承等 (2016)^[20]建立通过文献研究分析影响煤矿安全标志有效性的影响因素并建立指标体系, 发现安全标志设置位置显著影响其有效性。陈盈等 (2017)^[21]选取主井驱动机房、井下皮带煤矿场景图, 通过眼动实验来探究位置设置对煤矿安全标志有效性的影响, 发现煤矿安全标志设置位

置的不同对工人识别标志具有显著性差异。周丹等（2020）^[22]对文献进行深入剖析，总结出煤矿井下安全标志设置存在的问题，提出安全标志设置顺序和位置显著影响煤矿工人对安全标志的识别。

在其他场景下，学者们通过数学模型、神经人因学等多种方法对安全标志的设置有效性进行了研究。李梦潇（2014）^[23]对大型铁路客运站旅客引导标识进行研究，分析了旅客引导标识的设置形式所存在的问题，通过构建数学模型并求解，提出引导标识空间位置优化原则和方法。方娟等（2011）^[24]从标识的基本概念出发对静态标识的摆放位置进行研究，以旅客特性为出发点计算安全标识的最佳摆放高度，建立静态标识高度设计模型。郑颖琇等（2022）^[25]对建筑施工场地门架式出入口进行研究，从观察者角度出发分析并计算人的视野、行走路径等与安全标志可见域的关系，并通过眼动追踪技术检验内门架式安全标志布置位置的有效性。杨金茹等（2022）^[26]探究不同位置特征下施工安全标志引发的自动化注意行为，发现安全标识引发的自动化注意效果显著受到位置因素的影响。景国勋等（2022）^[27]对不同安全标志类型的设置顺序进行研究，选取国标中 4 种安全标志(警告、禁止、指令、提示)进行排列组合，结果显示国标的顺序设置更能增强安全标志的显著性。

1.3.3 安全标志组合设置相关研究

目前针对施工现场安全标志组合设置的相关研究较少，但在交通标志中由于存在指路标志等包含有大量信息的标志，学者研究较多。

国外学者研究中，Guo 等（2016）^[28]通过模拟驾驶环境研究方法，对不同前置距离的车道出口预告标志有效性进行了研究，发现交通标志的信息量增加会延长驾驶员的视觉认知时间，从而增加操作错误的可能性。Liu Y 等（2005）^[29]研究了交通标志版面信息量大小对驾驶员信息识别的影响，发现标志版面信息量越大会使得驾驶员的信息识别越困难。由于人类可以处理的信息量有限，驾驶员对于具有大量信息的交通标志组合可能无法有效识别，Shao 等（2017）^[30]研究表明交通标志版面显示信息少于六条时驾驶者能够有效识别。Tyganov 等（2009）^[31]研究发现交通标志信息量与安全事故数量呈现 U 形关系，即交通标志信息量识别有效性存在一个最优值。Du 等（2022）^[32]发现对信息密度过大的交通标志

的识别会增加驾驶员的视觉工作记忆负荷,即标志信息密度过大将导致识别率下降。

国内研究方面,王振国(2019)^[33]通过三维虚拟现实及模拟驾驶等技术研究了绕城高速出入口指路标志最佳的信息量,发现不同支撑方式下的交通标志信息量阈值也不同。祖永昶(2012)^[34]通过实验发现车速及信息量会影响驾驶人对指路标志的识别,车速较高时标志识别时间随着信息量增大而增加。赵淑婷(2018)^[35]通过仿真实验研究交通指路标志版面信息量阈值,发现交通指路标志识别率与版面信息量呈负相关关系,并得出交通标志版面信息量阈值为7条。

1.3.4 评述

经过综述发现,目前鲜有施工现场安全标志组合设置相关研究,但在交通标志中由于存在指路标志等包含有大量信息的标志,学者研究较多。学者们对交通标志组合设置的研究多数是通过计算交通标志的信息量,以信息量的大小为指标测定其对识别率的影响。但考虑施工安全标志与交通标志存在的不同,在施工安全标志组合中,不仅要考虑信息量的影响还要考虑安全标志自身属性的影响。另外,在现有安全标志研究中鲜有将施工人员个人因素考虑在内的研究,考虑到施工人员一般作业强度较大、脑力负荷较高,可能会对其识别安全标志造成影响,因此有必要研究施工人员脑力负荷对安全标志组合安全感知的影响。

1.4 研究内容

(1) 理论分析与模型构建

首先结合前人研究对安全标志认知行为过程进行深入分析,结合人的信息流动与加工过程模型及安全标志认知过程建立安全标志组合设置安全感知过程模型。以之为基础,分析个体因素及标志组合自身属性对感知有效性的影响,提出研究假设,构建标志组合设置感知有效性影响因素结构模型。

(2) 个体因素及安全标志组合设置自身特征对安全感知影响实验研究

针对高低脑力负荷状态的建筑施工人员对不同视觉特征的安全标志的视觉注意程度进行研究。通过眼动实验采集施工人员对不同类型安全标志视觉刺激下的眼动数据,探讨施工人员不同脑力负荷对安全标志的安全感知影响,验证研究

假设。基于眼动实验，探究安全标志组合设置时不同标志数量、信息量以及不同类型标志对安全感知的影响，对实验数据进行分析总结，验证研究假设。

（3）施工现场安全标志组合设置感知有效性评价模型构建

结合功效系数法，对安全标志组合各影响因素进行量化分析，构建安全标志组合设置感知有效性评价模型，并对实例进行分析验证，提出相关改善建议。

1.5 研究方法与技术路线

1.5.1 研究方法

（1）文献研究法。

本文通过广泛阅读安全标志相关研究，聚焦研究问题、范围以及可行性，学习安全标志认知理论，分析安全标志组合设置下各因素对安全感知的影响，了解并掌握眼动实验的相关知识，为本文实验研究奠定理论基础。

（2）实验研究。

本文主要通过眼动实验进行研究。通过制图软件设计制作实验刺激材料，进行眼动实验收集被试的眼动数据，通过统计学方法对实验数据进行分析总结，得出实验结论。

1.5.2 研究技术路线

本文的研究技术路线如图 1-2 所示。

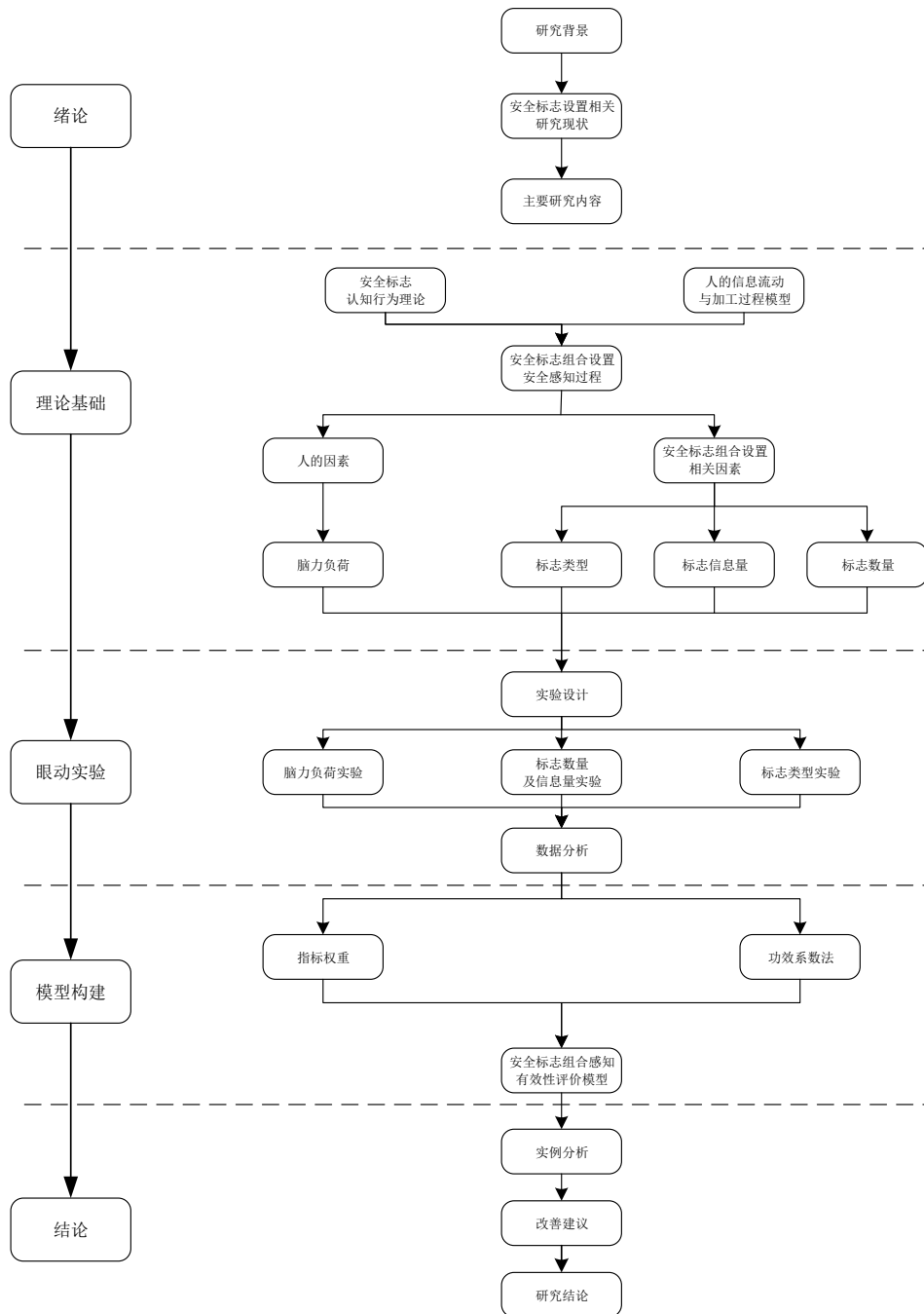


图 1-2 本文研究技术路线

1.6 主要创新点

本文创新点如下：

(1) 构建出安全标志组合设置安全感知模型及标志组合设置感知有效性影响因素结构模型。结合人的信息流动与加工过程模型、信息处理（C-HIP）模型以及安全标志认知过程，分析出施工人员脑力负荷对安全标志组合的感知过程影

响，构建施工现场安全标志组合设置下的安全感知过程模型。结合前人研究，明确施工人员脑力负荷及安全标志组合设置自身特征对安全标志识别的潜在影响，构建了安全标志组合安全感知影响因素结构模型。

（2）验证了施工人员脑力负荷对安全标志的安全感知影响。发现脑力负荷过高会减少施工人员的闲置信息处理能力，进而导致其对安全标志的平均注意力水平降低，影响其关注和识别安全标志。明确了标志组合设置下标志数量、信息量以及标志类型对安全感知的影响。发现标志组合中标志数量越多，被试对标志组合的安全感知越差，另外标志组合的信息量与数量影响一致；发现在标志组合中，禁止标志更能引起被试的安全感知，警告标志次之，提示标志最低。

（3）结合功效系数法，对安全标志组合各影响因素进行量化分析，构建了安全标志组合设置感知有效性评价模型。并对实例进行分析验证，提出相关改善建议。通过该模型可以判断施工人员不同工作状态下对安全标志组合感知的有效性。

第 2 章 理论分析与模型构建

施工现场一般环境复杂，危险因素较为集中，因此安全标志常采用组合设置方式。施工人员作业强度较大，感知觉较为麻痹，其主要通过眼睛观察安全标志获取危险信息来防止安全事故的发生。然而安全标志组合设置与单独设置存在一定的区别，施工人员需要更多的精力去获取危险信息。因此，有必要分析安全标志组合设置的安全感知过程，明确其对施工人员感知的作用机理，并以此为基础分析标志组合设置各因素的安全感知的影响，建立影响因素结构模型，为后文实验研究奠定理论基础。

2.1 安全标志组合设置安全感知过程

2.1.1 安全标志认知行为理论分析

在施工人员、安全标志所处的人机系统中，陈永明等（1989）^[36]提出“人的信息流动与加工过程模型”，如图 2-1 所示。信息源是信息的起点，在该系统中即为安全标志、周围环境等，施工人员通过感受器对安全标志的视觉刺激转化为神经信号，将神经信号信息短时存储，这些信息在这里被加工和组织，以便进一步的处理和存储，短期记忆的容量有限，在短时的反应、处理过程中，施工人员不可能记住过多的信息。施工人员根据自身经验筛选和过滤信息，决定哪些信息将被进一步处理。在处理完信息后，根据大脑指令做出决策，即是否做出安全标志遵守的行为。最后，效应器将决策系统的输出转化为实际行动，最终完成安全标志遵守行为。此外，不同的施工人员具有不同的施工经验和知识，这些信息以条件概率长时存储在施工人员大脑中，会影响施工人员对信息的筛选和做出的行为反应。

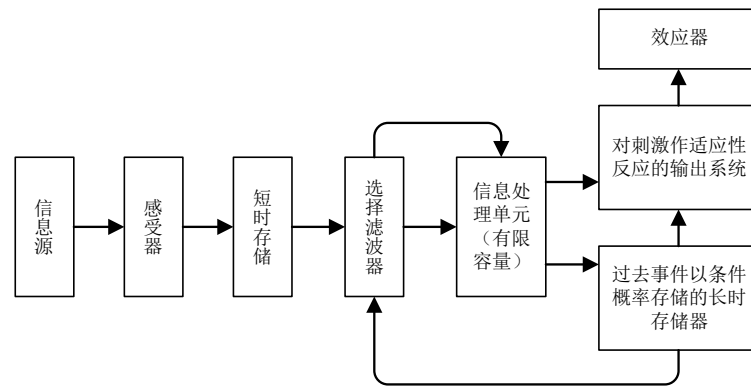


图 2-1 人的信息流动与加工过程模型

Wogalter 等（1999）^[5]将信息沟通理论和信息处理理论相结合，构建了 C-HIP 模型。该模型将人对安全标志信息的处理过程划分为五个核心步骤：注意与编码、理解、态度与相信、动机以及行为，如图 2-2 所示。在该模型中，安全标志是信息的来源也是风险信息传递的媒介。施工人员首先需要注意到安全标志并进行简单的信息转换，之后才会对其所传达的信息进行深入理解，识别到其传达的风险信息，继而采取不同的态度，并在此基础上为后续的动机和行为提供依据，即安全标志遵守行为。

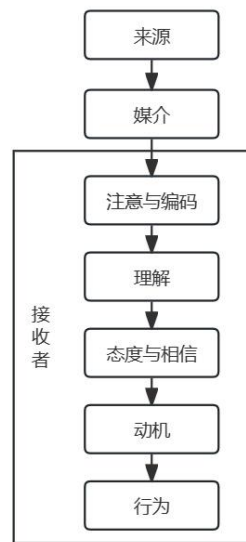


图 2-2 信息处理（C-HIP）模型

以上安全标志理论模型过于主观，难以揭示隐藏在行为背后的深层次机理。Ma 等（2010）^[37]运用事件相关电位（ERPs）实验手段，深入探讨了安全标志信号词在风险信息处理中的应用，并创新性地提出了两阶段模型，将人的神经感知用于阐述人们对安全标志的认知过程。这一模型主要包括两个阶段：首先是快速

识别阶段,即个体对信号词进行初步的感知与识别,快速侦测所传达的危险信息;之后是量化与理解阶段,即个体对信号词进行深入分析、理解,判断其所传达的风险程度。

唐贤伟(2010)^[38]运用神经工业工程的方法,从情绪的角度出发,创新性地将负性注意偏向和负性情感偏向融入安全标志的认知过程中,构建出“双偏向模型”,如图 2-3 所示。该模型详细描述了人们在认知安全标志时的心理过程,从神经工业工程的视角对现有的认知过程模型进行了深入的解释。这一研究不仅深化了我们对安全标志认知过程的理解,也为优化安全标志的设计和应用提供了新的理论支撑。

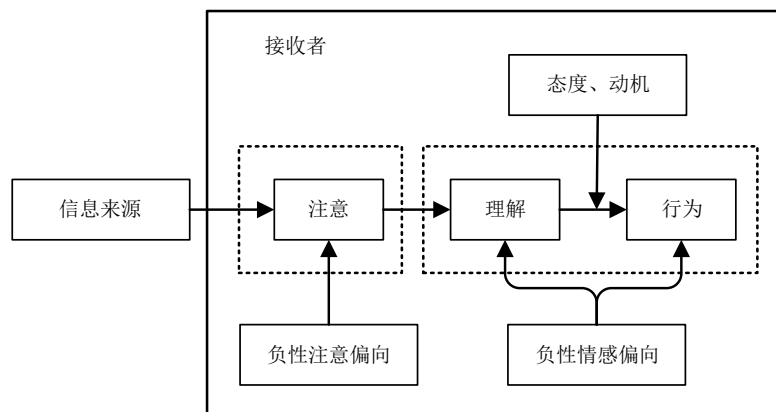


图 2-3 双偏向模型

胡祎程(2012)^[39]参照驾驶员识别交通标志的顺序,将施工人员对安全标志的使用过程划分为四个阶段,如图 2-4 所示。首先是注意阶段,即施工人员在施工现场作业过程中注意到安全标志的过程。若施工人员在安全标志离开其视线范围前成功识别并理解标志信息内容,注意阶段结束并进入识别与判断阶段。在该阶段,施工人员将根据自身的安全倾向性对安全标志所传达的危险信息进行深入分析与判断,并根据判断结果决定是否进入行为阶段即采取安全遵守行为。这四个阶段呈现出递推性,意味着施工人员必须按照顺序逐一完成,不能跳过任何一个阶段,也不能将某个阶段提前或延后。每个阶段的完成情况都会直接影响到下一阶段的发生和进行,因此,确保每个阶段都能得到有效执行对于保障施工现场安全至关重要。

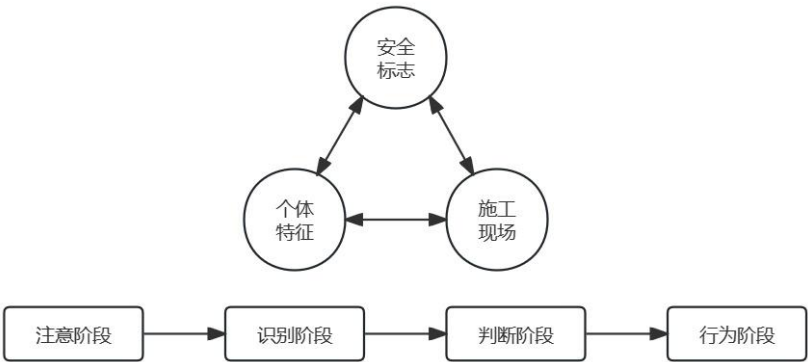


图 2-4 施工现场安全标志认知过程模型

综上所述，随着研究的深入，对于安全标志认知行为过程的研究范围正在不断扩大，学者们对安全标志认知行为过程已经形成了广泛的共识。人的信息流动与加工过程模型作为安全标志认知理论的基础，其中的选择过滤器和长时存储等概念细化了安全标志信息加工处理的过程，为后续深入研究奠定了基础。近年来，随着神经工业工程方法的崛起，学者们在认知神经科学的框架下展示了个体在识别安全标志并做出安全遵守行为的神经认知与决策过程。

2.1.2 安全标志组合设置安全感知过程模型构建

由于安全标志组合一般情况下存在信息较多，而施工人员在作业过程中识别安全标志会受到个体脑力负荷的影响。根据前文分析，结合人的信息流动与加工过程模型，本文构建如图 2-5 所示安全标志组合的安全感知过程模型。

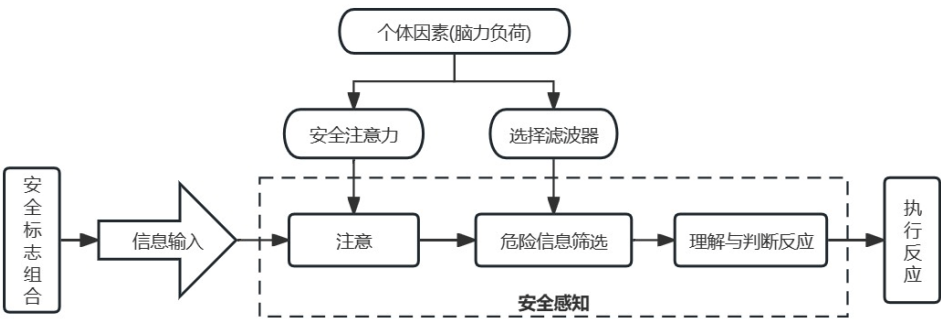


图 2-5 安全标志组合的安全感知过程模型

由模型可以看出,安全标志组合作为信息源即信息的起点,施工人员首先通过感觉器官注意到安全标志。由于安全标志组合一般存在较多信息,施工人员不能在短时间内全部理解识别,所以施工人员需要短时间内根据自身经验筛选和过滤标志组合中的重点危险信息,并决定哪些信息将被进一步处理。在处理完信息后,施工人员将决出转化为实际行动,最终完成安全标志遵守行为。施工人员快速注意到安全标志组合、筛选出重点危险信息并作出判断即为安全标志组合的安全感知过程。在整个过程中,施工人员的安全注意力、反应速度和准确性将受到他们个体因素(脑力负荷)的影响,具体内容见下文分析。

2.2 安全标志组合设置安全感知影响因素分析

2.2.1 个体因素的影响

(1) 脑力负荷对安全感知的影响分析

Proctor 等(2008)^[40]将脑力负荷定义为在一定时期内完成给定任务所需的脑力工作量或努力程度。相较之下,Young 等(2015)^[41]则从业绩标准的角度出发,认为脑力负荷是工作者为满足客观和主观业绩标准所付出的注意力,该观点强调了脑力负荷与任务需求、个人差异以及环境因素之间的紧密关联。在国内,廖建桥等(1995)^[42]提出了另一种观点,他们将脑力负荷定义为人的信息加工系统在处理信息时资源被占用的程度,认为脑力负荷主要由时间压力和信息量两个因素决定,并通过单位时间内信息处理量的多少来衡量脑力负荷的大小。崔凯等(2008)^[43]则将脑力负荷看作是一个描述人在工作中所承受的心理压力或信息处理能力的概念,该观点强调脑力负荷的心理层面和功能性。Wickens(2008)^[44]通过多资源理论提供了一个全新的视角,即人在信息处理过程中所涉及的心理资源并非单一,而是一组性质类似、功能有限且容量固定的资源。目前这一定义仍有待完善,它未能充分考虑个体的主观体验、脑力负荷随任务过程而发生的动态变化,以及随着年龄增长能力下降等因素对脑力负荷的影响。综上所述,脑力负荷是一个多维度的概念,它不仅涉及信息处理能力和注意力分配,还受到多种因素的影响,包括任务需求、个人差异、环境因素以及学习和年龄等。

由于建筑工地工作强度较大,施工人员的自身因素对安全标志的视觉注意影响问题较为突出。叶贵等(2023)^[45]通过建立结构方程模型与层次回归分析方法证明体力疲劳直接正向影响建筑施工人员不安全行为。施工人员长时间在高负荷状态下工作,容易引起生理上的疲惫和安全心理的不健康,导致对安全状态变得麻木,从而使施工人员对安全标志的视觉注意下降。杨小涵(2022)^[46]通过事件相关电位技术研究疲劳对建筑施工人员注意力的影响,表明生理疲劳与个体注意力衰减程度正相关。目前多数的研究都针对施工人员身体负荷、工作压力等进行研究,如牛莉霞等(2016)^[47]通过建立假设模型及问卷调查证明工作压力直接负向影响安全注意力。MCVAY 等(2009)^[48]认为疲劳会增加人的注意力分散程度。但高强度工作造成施工人员身体疲惫的同时,也会使得施工人员处于高脑力负荷状态,而高脑力负荷会影响对安全标志的识别率及反应时间^[49]。夏曦^[50]通过时间相关电位技术揭示了脑力负荷导致人因失误的机理。因此,研究脑力负荷下建筑施工人员对安全标志的安全感知影响是有必要的。

基于已有研究及理论,本文做出假设:

H1: 不同脑力负荷被试对安全标志的安全感知存在显著差异,高脑力负荷会降低被试对安全标志的安全感知。

H2: 不同类型安全标志识别性存在差异,被试对指令标志的安全感知更弱。

(2) 个体其他因素对安全感知的影响分析

研究表明,很多其他个人因素也会影响对安全标志的安全感知,包括人口统计变量如年龄、性别、文化背景等。景国勋等(2016)^[51]通过眼动追踪技术研究不同工龄煤矿作业人员对警示语标识的视觉注意特征,发现煤矿作业人员的工龄越大,对警示语标识的识别越容易。Al-Madani 等(2002)^[52]研究发现部分国家中,男性司机对交通标志的理解要优于女性司机。此外,随着电子设备的发展,电子产品操作界面很多由图标及符号构成,因此经常使用电子设备的人可能对安全标志有更高的感知能力。受过良好教育的人通常具有更高的阅读和理解能力,人们可能更加倾向于遵守权威和规定,能够更快地识别和理解安全标志所传达的信息,因此他们可能更愿意接受并遵守安全标志所传达的信息。

2.2.2 标志组合自身特征的影响

(1) 组合标志信息量对安全感知的影响

信息这一概念具有广义与狭义之分。广义信息，更接近于哲学范畴，它是对物质存在和运动状态的整体描述，展现了事物的普遍特征和规律。而狭义信息，通常指的是概率信息，它依据事件发生的概率来度量信息量，因此，在信息论的语境下，这种信息量是统计学意义上的量化表达，代表着一种抽象化的信息概念。本文在对安全标志组合的研究中着重研究标志所传达的狭义信息。

香农信息论由美国科学家克劳德·香农在 20 世纪 40 年代创立，是关于信息传输与处理的数学理论。它根植于概率论与随机过程的理论基石，深入探索广义通信系统的完整运作过程，而非仅仅局限于其中的某一特定环节。香农信息论中的信息量是一个关键概念，它衡量了一条消息或事件发生后所带来的信息大小或不确定性的减少程度。信息量与信息熵、概率等概念紧密相关，彼此间存在着深厚的内在联系。信息熵作为一种衡量随机变量不确定性的指标，反映了随机变量分布的混乱程度，具体来说，当信息熵增大时，则随机变量的不确定性增高，进而使得所需传输的信息量也相应增大。而信息量则是衡量一个具体事件发生后所带来的信息大小或不确定性的减少程度。可以认为，信息量是信息熵的一个具体实例，它对应于一个具体事件的信息量。小概率事件的发生对于整个系统来说具有更大的不确定性，因此需要更多的信息来进行描述。所以信息量的大小与事件发生的概率成反比。具体而言，当一个事件发生的概率较低时，它所带来的信息量往往更为显著；反之，若事件发生的概率较高，则其携带的信息量则相对较小。

Liu 等（2005）^[53]通过模拟驾驶人的搜索行为实验，研究发现，标志版面中的信息量对驾驶人的搜索行为具有显著影响。具体而言，当标志中的信息量较大时，驾驶人需要花费更长的时间来仔细阅读和理解其中的内容。王大恒等^[54]发现驾驶员对交通标志的视认时间与标志信息量存在着显著的正相关关系。因此，标志版面中的信息量是一个关键因素，需要合理控制，以确保驾驶人在行驶过程中能够快速、准确地获取所需信息，提高道路行驶的安全性和效率。

以上研究主要为交通标志版面的相关研究，施工安全标志组合与交通标志版面有相似之处都具有大量的信息量。虽然两者场景存在有明显的区别，但就个体

识别时间而言,施工人员由于工作强度较大,对安全标志组合的识别时间也较为有限,因此有必要研究信息量对安全标志组合安全感知的影响。

(2) 组合标志数量对安全感知的影响

资源保存理论的核心观点在于,个体天生具备获取、保存和保护自身资源的本能倾向。当面临潜在的资源损失威胁或已发生的实际资源损失时,这种倾向会促使个体产生紧张和压力,进而采取相应的应对策略。该理论阐释了个体在资源管理方面的五大核心原则。首先,损失优先原则强调,资源损失对个体产生的影响比资源获取更为显著、迅速且持久。其次,资源投资原则指出,个体会通过投入资源的方式来防止资源的进一步流失,并从已发生的损失中恢复,进而获取新的资源。此外,获得悖论原则表明,在资源损失的情况下,增加和补充资源对个体来说尤为重要,这些行动将为个体带来更大的价值。当个体面临资源耗尽的绝境时,根据资源绝境原则,个体可能会表现出自我保护行为,甚至在某些情况下出现非理性的反应。最后,资源车队与通道原则揭示了个体所拥有的资源并非孤立存在,它们之间相互关联、相互影响,构成了一个复杂的资源网络。

在交通标志领域已有研究表明,多元素交通标志存在潜在的负面安全影响。一种解释是交通标志刺激的数量和种类会导致复杂的视觉呈现,从而扰乱驾驶员的注意力,使得驾驶员难以识别重要信息。杨曼娟等(2014)^[55]基于认知心理学的相关理论,分别开展室内静态模拟试验和室外动态实车试验,发现地名信息数量越多使得驾驶员的认知时间越长。由于人类可以处理的信息量有限,在驾驶员的有效视野中使用超过一个标志或具有大量信息的标志将导致无法有效识别。我国《道路交通标志和标线—第2部分:道路交通标志》^[56]对指路标志的信息量进行了规定:一块指路标志版面中各方向指示的目的地信息量之和不宜超过6个。根据资源保存理论,个体的资源储备是有限的。当面临过量的安全标志信息量时,这种有限的感知资源可能无法应对额外的需求。一方面,由于资源不足,个体难以继续提升对安全标志的感知分配;另一方面,出于对自身资源的保护机制,个体可能会减少对安全标志的感知资源投入。因此,安全标志数量的过多呈现,实际上可能对个体的安全注意力产生损耗效应,降低了其应有的警觉性和专注度。

结合前文组合标志信息量的影响分析,组合标志与交通标志版面具有相似之处,因此作出假设:

H3: 安全标志组合设置下标志数量增加会降低施工人员对安全标志组合的安全感知。

考虑到不同安全标志的信息量不同,组合标志总信息量可能不与标志数量正相关,使得实验结果与实际情况不符,因此在本实验中同时考虑标志组合设置的数量及信息量。作出假设:

H3a: 相同标志数量下组合标志信息量越高,施工人员对组合标志的安全感知越差。

H3b: 不考虑标志数量情况下,标志信息量越多,施工人员对组合标志的安全感知越差。

(3) 组合标志类型对安全感知的影响

常用安全标志依据其功能和用途的不同,主要可划分为禁止类、警告类、指令类和提示类四大类别。它们在实际应用中存在着不同的使用方式以及使用目标,同时在设计属性上也有显著的差异,如形状、颜色、图形等元素。根据现行国家标准《安全标志及其使用导则》^[57],安全标志有四种形状:斜杠圆(禁止标志)、三角形(警告标志)、圆形(指令标志)以及正方形(提示标志)。Yu 等(2010)^[58]研究了个体对不同形状标志的危险感知情况,发现正三角形所传达的危险程度最为显著,倒三角形其次,随后分别为菱形、圆形和矩形。标志的形状并不会直接影响个体对其的理解性,而是由于外观差异导致吸引力不同,即主要影响个体的注意力。然而,当形状与颜色相结合时,它们可以共同传达出更加丰富的含义和信息。这一发现为关于如何利用形状和颜色在标志设计中更有效地传达安全信息提供了更深入的理解。安全标志的颜色构成涵盖了安全色、图形颜色、边框颜色以及衬边颜色这四个关键部分。安全色是一种被赋予特殊意义和属性的颜色,它在标志设计中不仅起到吸引人们注意力的作用,更能够直接传达潜在的危险信息。这种颜色的选择是经过精心考虑的,旨在确保人们在第一时间就能对标志所表达的信息产生警觉和反应。每一种类型的标志都有其独特的颜色组合,以警告标志为例,其安全色通常采用醒目的黄色,图案颜色为黑色,边框颜色同样是黑色,而衬边颜色则与安全色相呼应为黄色。Luximon 等(1998)^[59]研究发现红色所代表的危险等级最高,紧随其后的是黄色、橙色、蓝色和绿色,白色的危险等级最低。

综上所述,不同类型的安全标志在提升公众安全感知方面发挥着综合性的作用。它们通过不同的设计元素和传达方式,共同构建了一个全面的安全信息体系,提醒人们注意潜在的危险、规范行为、提供指导和方向,并增强人们的安全意识和自我保护能力。在安全标志组合中,往往同时存在多种类型的安全标志,因此有必要研究安全标志组合中标志类型对安全感知的影响。相关研究表明提示标志与其他三种类型的标志相比具有完全不同的物理特征^[60],因此本研究未选取提示标志作为刺激材料。本文作出假设:

H4a: 警告标志与禁止标志组合设置时,警告标志更能引起被试的安全感知

H4b: 警告标志与指令标志组合设置时,警告标志更能引起被试的安全感知

H4c: 禁止标志与指令标志组合设置时,禁止标志更能引起被试的安全感知

H4d: 三种标志组合设置时,警告标志引起的安全感知评分最高,禁止标志次之,提示标志最低。

2.2.3 安全标志组合设置安全感知影响因素结构模型

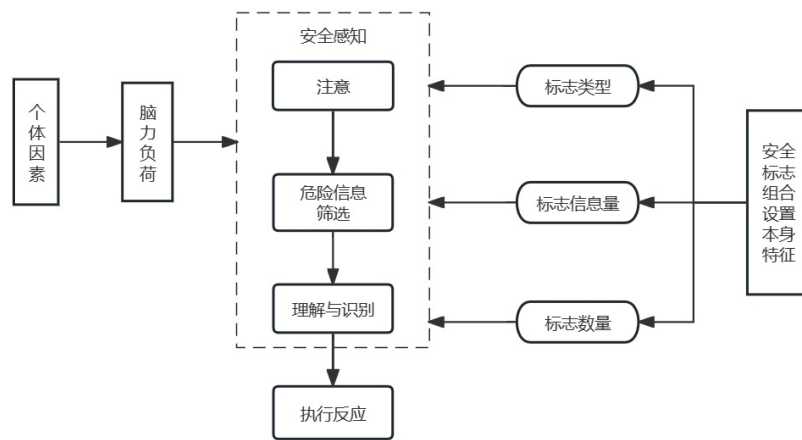


图 2-5 安全标志组合设置安全感知影响因素结构模型

基于安全标志组合设置安全感知模型,结合前文对脑力负荷及安全标志组合设置属性的分析,构建了如图 2-5 所示的安全标志组合设置安全感知影响因素结构模型。

从模型可以看出:(1)人的脑力负荷会影响标志组合安全感知过程。安全标志组合存在较多数量的标志,施工人员在对其感知的过程中会受到安全注意力和安全相关记忆资源储备的影响,而脑力负荷会影响人的认知资源利用情况,因

此脑力负荷可能会对安全感知的注意阶段与危险信息筛选阶段造成影响。(2) 标志组合设置自身特征中标志类型、标志信息量以及标志数量会影响安全感知过程。不同类型标志的安全色、性状、图形都存在差异,对人的唤醒程度存在强弱之分,因此施工人员对不同类型标志分配的注意力资源存在区别。施工人员在注意到安全标志组合后会根据自身经验筛选和过滤标志组合中的重点危险信息,并决定哪些信息将被进一步处理,因此标志组合中的标志信息量过大或数量过多会影响施工人员的认知资源分配。

2.3 本章小结

本章结合前人研究,分析了安全标志认知行为相关理论,并结合人的信息流动与加工过程模型,构建了安全标志组合的安全感知过程模型,同时明确施工人员脑力负荷在安全感知过程中的影响。通过多个角度分析了安全标志组合设置安全感知的影响因素,根据研究内容提出相关研究假设,并基于分析结果建立了安全标志组合设置安全感知影响因素结构模型。

第3章 施工现场个体因素（脑力负荷）对安全标志的安全感知影响

通过第二章对安全标志组合设置安全感知影响因素的分析发现,施工现场工作强度较大,脑力负荷偏高可能是施工人员的常态,而高脑力负荷可能造成施工人员无法有效识别潜在的危险信息。因此,本章节从视觉信息处理理论出发,研究施工人员高低脑力负荷对安全标志的安全感知影响,并考虑不同类型安全标志的差异。利用眼动实验采集施工人员对不同类型安全标志视觉刺激下的眼动数据,基于数理统计理论对数据进行分析,得出脑力负荷对安全标志的安全感知影响。

3.1 实验设计

3.1.1 实验内容

为了研究脑力负荷对施工人员识别安全标志的影响,根据视觉信息处理理论,采用眼动追踪实验方法,并考虑不同类型安全标志差异。针对高低脑力负荷状态的建筑施工人员对不同视觉特征的安全标志的视觉注意程度进行研究。利用眼动追踪技术采集施工人员对不同类型安全标志视觉刺激下的眼动数据,基于数理统计理论对数据进行分析,得出不同脑力负荷建筑施工人员对安全标志的安全感知影响,为降低安全事故发生率提出合理意见。

3.1.2 实验被试与材料选择

研究表明,具有建筑工程课程学习经验的在校大学生与经验丰富的建筑工人在危险识别方面具有相似的视觉搜索模式,在眼动实验中大学生能够代表新手建筑工人^[61]。因此本研究招募 32 名在校大学生作为受试者,所有被试均有建筑工程课程学习经验。所有受试者均经过体检身体健康,视力正常或经过矫正后正常,没有任何精神疾病史。被试将被随机均分为低负荷组和高负荷组,低负荷组将在早上 9 时左右参与实验;负荷组将在工作学习 8 小时后的晚上 6 时参与实验。最后共得到 30 名被试的有效实验数据,其中高负荷组 15 名,低负荷组 15 名。

安全标志包括禁止标志、警告标志、指令标志，其中禁止标志为红色圆形带有斜线，警告标志为黄色背景的三角形，指令标志则为蓝色背景的圆形。据住建部于 2020 年发布的“房屋市政工程生产安全事故情况通报”的数据显示，事故发生率排名前三的安全事故种类分别是高处坠落事故、物体打击事故和起重机械伤害事故^[62]，因此本文参照《安全标志及其使用导则》^[57]选取了与上述三类事故相关的安全标志。安全标志示例如图 3-1 所示。

刺激材料在 24 英寸彩色显示器上呈现，通过资料收集和分析选取两处建筑施工现场典型场景作为背景，如图 3-2 所示，并以图像处理软件对图片进行修改使其符合实验要求，将安全标志作为兴趣区域，记录被试在该区域的眼动数据。



图 3-1 安全标志示例

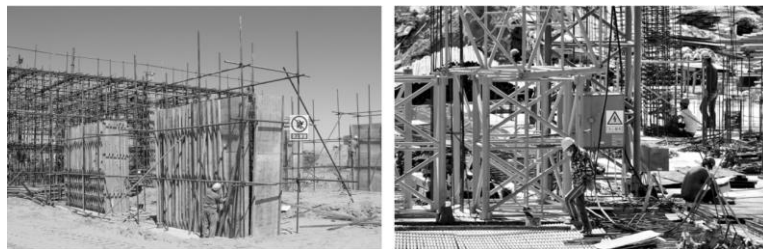


图 3-2 刺激材料示例

3.1.3 实验流程

采用型号为 TobbiX3-120 型眼动仪，并运用配套软件 ErgoLAB 软件进行采集存储数据。眼动仪连接在一台分辨率为 1280*1024 的惠普台式电脑。眼动仪的采样率为 120HZ。电脑显示器是 24 寸。

本研究采用 2 (脑力负荷: 高负荷 vs. 低负荷) $\times$ 3 (安全标志类型: 禁止标志 vs. 警告标志 vs. 指令标志) 的双因素重复测量设计，脑力负荷为被试间变量，安全标志类型为被试内变量，以首次进入时间 (Time to First Fixation, TFF)、首次注视持续时间 (First Fixation Duration, FFD)、注视点数 (Fixation Count, FC) 和热点图 (Heat Map) 为因变量。被试对目标的首次进入时间越短，说明目标更容易引

起被试的注意，在本实验中该指标反映高、低脑力负荷被试对安全标志的视觉注意力水平差异；被试对目标的首次注意持续时间越短，说明目标更容易识别^[63]。

实验过程中，为了消除因首个注视点的不同而造成的实验误差，在目标刺激图片呈现前先播放一段工地作业的视频，时间长度为 10s，之后呈现实验刺激图片。为了减少被试主观因素对实验的干扰，在实验前不告诉被试实验目的。实验过程如下。

1) 宣读实验指导语。在被试对象准备好后，为其宣读指导语，使其理解实验过程和要求。

2) 眼动校准。在计算机上启动 ErgoLAB 软件，被试就坐于屏幕前 60-80 cm 处并被告知实验全程平视电脑屏幕。对被试进行眼动实验校准，当误差满足要求时开始正式实验。

3) 正式实验。首先在屏幕中间呈现书面实验指导语，告知被试实验全程不需要操作和判断。刺激图片随机顺序呈现，每张呈现 15s。在两张图片切换中间以空白屏掩蔽。

4) 实验结束。实验结束后告知被试离场，软件将自动保存被试眼动数据。

3.2 实验数据分析

眼动参数在衡量脑力疲劳时表现出明显的差异敏感性，在疲劳情况下，个体的注视范围往往呈现出扩大的趋势，注视点的个数则相反^[64]。基于这些特征，本文利用注视点的个数对脑力疲劳程度进行定性识别。表 3-1 为被试注视点数描述性统计。

表 3-1 被试注视点数描述性统计

安全标志 类型	脑力负荷	N	平均值	标准差	标准 误差	平均值 95%置信区间		最小值	最大值
						下限	上限		
禁止标志	高负荷	15	4.600	2.667	0.689	3.123	6.077	1.0	9.0
	低负荷	15	7.000	2.726	0.704	5.491	8.509	3.0	12.0
警告标志	高负荷	15	5.867	2.722	0.703	4.359	7.374	2.0	11.0
	低负荷	15	8.400	2.874	0.742	6.809	9.991	3.0	14.0
指令标志	高负荷	15	4.533	2.532	0.654	3.131	5.935	0.0	8.0
	低负荷	15	6.933	3.348	0.865	5.079	8.787	1.0	11.0

由表 3-1 中数据可知,高负荷组被试平均注视点数在三类安全标志实验中均小于低负荷组。对数据进行独立样本 T 检验,结果中 $P_1=0.021<0.05$, $P_2=0.019<0.05$, $P_3=0.035<0.05$,说明两组被试在兴趣区的注视点数差异性显著。这与相关研究结果是一致的^[64],说明本实验被试符合实验要求。

3.2.1 首次进入时间

依据模拟场景的实验数据,统计每个被试在每个兴趣区域的首次进入时间。使用 SPSS 27.0 进行数据分析,输入首次进入时间进行统计分析。对不同类型安全标志和脑力负荷条件下被试注视兴趣区的首次进入时间进行多重测量方差分析,对数据进行球形检验,显示主体内效应的检验结果。

(1) 场景一重复测量结果

表 3-2 场景一首次进入时间的主体效应检验

变异源	III 类平方和	自由度	均方	F	P 值	偏 η^2
脑力负荷	17.884	1	17.884	20.993	0.000	0.428
安全标志类型	3.028	2	1.514	2.824	0.048	0.092
安全标志类型 * 脑力负荷	0.553	2	0.277	0.516	0.600	0.018
误差(脑力负荷)	23.853	28	0.852			
误差(安全标志类型)	30.022	56	0.536			

由表 3-2 可知,脑力负荷的主效应显著($F=17.884$, $P=0.000<0.05$, 偏 $\eta^2=0.428$)。安全标志类型的主效应显著($F=3.028$, $P=0.048<0.05$, 偏 $\eta^2=0.092$),说明从首次进入时间来看,三种安全标志类型中至少有一类型与其他类型有显著性差异。进一步使用 LSD 法对安全标志类型进行多重比较分析,结果见表 3-3。脑力负荷和安全标志类型的交互效应不显著($P>0.05$),因此不进行简单效应检验。

表 3-3 场景一安全标志类型对首次进入时间多重比较分析

(I) 安全标志类型	(J) 安全标志类型	平均值差值 (I-J)	标准误差	显著性 ^b	差值的 95% 置信区间 ^b	
					下限	上限
禁止标志	警告标志	0.178	0.162	0.282	-0.155	0.511
	指令标志	-0.268	0.208	0.209	-0.695	0.159
警告标志	禁止标志	-0.178	0.162	0.282	-0.511	0.155
	指令标志	-0.446	0.193	0.029	-0.842	-0.050
指令标志	禁止标志	0.268	0.208	0.209	-0.159	0.695
	警告标志	0.446	0.193	0.029	0.050	0.842

表 3-3 的结果显示, 指令标志比警告标志高出 0.446 (95%置信区间: 0.050-0.842), 该差异显著 ($P=0.029<0.05$); 指令标志与禁止标志间不具有显著性差异 ($P>0.05$), 禁止标志与警告标志间不具有显著性差异 ($P>0.05$)。该结果表明, 安全标志不同类型对被试首次进入时间产生了显著性影响, 其中指令标志显著高于警告标志。虽然指令标志与禁止标志、禁止标志与警告标志之间未产生显著性差异, 但不代表不具有统计学意义。场景一首次进入时间变化趋势如图 3-3 所示。

图 3 显示, 同类型标志情况下, 高脑力负荷被试首次进入时间显著高于低脑力负荷被试, 即被试脑力负荷越高对安全标志的视觉注意越差; 高脑力负荷情况下首次进入时间指令标志>禁止标志>警告标志, 低脑力负荷下, 指令标志大于其他二者, 这说明指令标志更难以引起被试的注意。

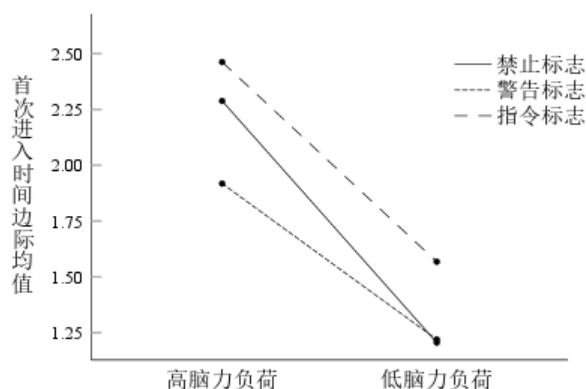


图 3-3 场景一首次进入时间变化趋势图

(2) 场景二重复测量结果

表 3-4 的结果显示, 脑力负荷的主效应显著 ($F=22.511$, $P=0.001<0.05$, 偏 $\eta^2=0.333$), 安全标志类型的主效应不显著 ($P>0.05$), 但不代表不具有统计学意义, 首次进入时间的变化趋势如图 3-4 所示。脑力负荷和安全标志类型的交互效应不显著 ($P>0.05$), 因此不进行简单效应检验。

表 3-4 场景二首次进入时间的主体效应检验

变异源	III 类平方和	自由度	均方	F	P 值	偏 η^2
脑力负荷	22.511	1	22.511	13.978	0.001	0.333
安全标志类型	4.222	2	2.111	1.727	0.187	0.058
安全标志类型 * 脑力负荷	1.029	2	0.514	0.421	0.659	0.015
误差 (脑力负荷)	45.094	28	1.610			
误差 (安全标志类型)	68.465	56	1.223			

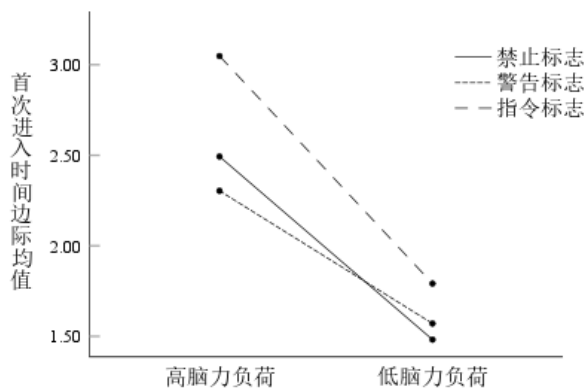


图 3-4 场景二首次进入时间变化趋势图

由图 3-4 所示，同类型标志情况下，高脑力负荷被试首次进入时间显著高于低脑力负荷被试，即被试脑力负荷越高对安全标志的视觉注意越差；同等脑力负荷情况下首次进入时间指令标志大于其他标志，这说明指令标志更难以引起被试的注意。

3.2.2 首次注视持续时间

依据模拟场景的实验数据，统计每个被试在每个兴趣区域的首次进入时间。使用 SPSS 27.0 进行数据分析，输入首次注视持续时间进行统计分析。对不同类型安全标志和脑力负荷条件下被试注视兴趣区的首次注视持续时间进行多重测量方差分析，经球形度检验，显示主体内效应的检验结果。

(1) 场景一重复测量结果

由表 3-5 可知，脑力负荷的主效应显著 ($F=6.511$, $P=0.016<0.05$, 偏 $\eta^2=0.189$)。安全标志类型的主效应显著 ($F=3.913$, $P=0.026<0.05$, 偏 $\eta^2=0.123$)，说明从首次注视持续时间来看，三种安全标志类型中至少有一类型与其他类型有显著差异。使用 LSD 法对安全标志类型进行多重比较分析的结果见表 3-6。脑力负荷和安全标志类型的交互效应不显著 ($P>0.05$)，因此不进行简单效应检验。

表 3-5 场景一首次注视持续时间的主体效应检验

变异源	III 类平方和	自由度	均方	F	P 值	偏 η^2
脑力负荷	0.192	1	0.192	6.511	0.016	0.189
安全标志类型	0.086	2	0.043	3.913	0.026	0.123
安全标志类型 * 脑力负荷	0.012	2	0.006	0.524	0.595	0.018
误差 (脑力负荷)	0.825	28	0.029			
误差 (安全标志类型)	0.618	56	0.011			

表 3-6 的结果显示, 指令标志比警告标志高出 0.074 (95%置信区间: 0.026-0.121), 该差异显著 ($P=0.004<0.05$); 指令标志与禁止标志间不具有显著性差异($P>0.05$), 禁止标志与警告标志间不具有显著性差异($P>0.05$)。该结果表明, 安全标志不同类型对被试首次注视持续时间产生了显著性影响, 其中指令标志显著高于警告标志。虽然指令标志与禁止标志、禁止标志与警告标志之间未产生显著性差异, 但不代表不具有统计学意义。场景一首次注视持续时间变化趋势图如图 3-5。

表 3-6 场景一安全标志类型对首次注视持续时间多重比较分析

(I) 安全标志类型	(J) 安全标志类型	平均值差值 (I-J)	标准误差	显著性 ^b	差值的 95% 置信区间 ^b	
					下限	上限
禁止标志	警告标志	0.021	0.023	0.365	-0.025	0.067
	指令标志	-0.053	0.034	0.132	-0.122	0.017
警告标志	禁止标志	-0.021	0.023	0.365	-0.067	0.025
	指令标志	-0.074	0.023	0.004	-0.121	-0.026
指令标志	禁止标志	0.053	0.034	0.132	-0.017	0.122
	警告标志	0.074	0.023	0.004	0.026	0.121

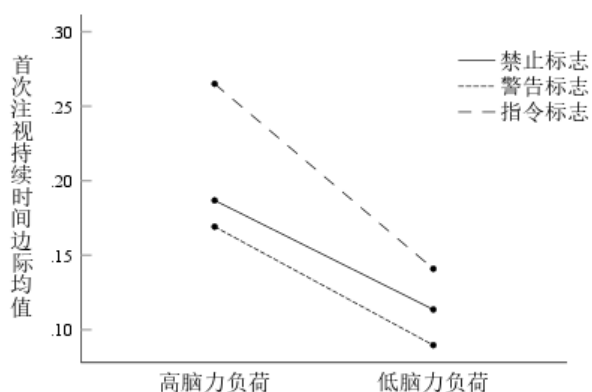


图 3-5 场景一首次注视持续时间变化趋势图

由图 3-5 可以得出, 同类型标志情况下, 高脑力负荷被试首次注视持续时间显著高于低脑力负荷被试, 即被试脑力负荷越高对安全标志的视觉注意越差; 三种安全标志之间指令标志更难以使人理解识别, 禁止标志次之, 警告标志最容易理解。

(2) 场景二重复测量结果

表 3-7 的结果显示, 脑力负荷的主效应显著 ($F=14.820$, $P=0.001<0.05$, 偏 $\eta^2=0.346$), 安全标志类型的主效应不显著 ($P>0.05$), 但不代表不具有统计

学意义，首次注视持续时间的变化趋势如图 3-6 所示。脑力负荷和不同安全标志类型的交互效应不显著（ $P>0.05$ ），因此不进行简单效应检验。

表 3-7 场景二首次注视持续时间的主体效应检验

变异源	III 类平方和	自由度	均方	F	P 值	偏 η^2
脑力负荷	0.228	1	0.228	14.820	0.001	0.346
安全标志类型	0.032	2	0.016	2.723	0.074	0.089
安全标志类型 * 脑力负荷	0.019	2	0.010	1.654	0.200	0.056
误差（脑力负荷）	0.431	28	0.015			
误差（安全标志类型）	0.328	56	0.006			

图 3-6 显示，高脑力负荷被试首次注视持续时间显著高于低脑力负荷被试；高脑力负荷情况下指令标志大于其他标志，但低脑力负荷情况下差异不明显。

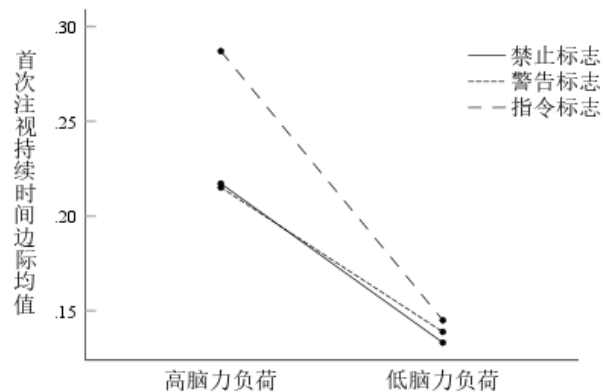


图 3-6 场景二首次注视持续时间变化趋势图

3.2.3 热点图

热点图可以直观反映被试注视刺激材料的频率和关注点分布情况，注视频率越高则该区域颜色越深，表明该区域更能引起注意、更难以使人理解识别。

a. 场景一

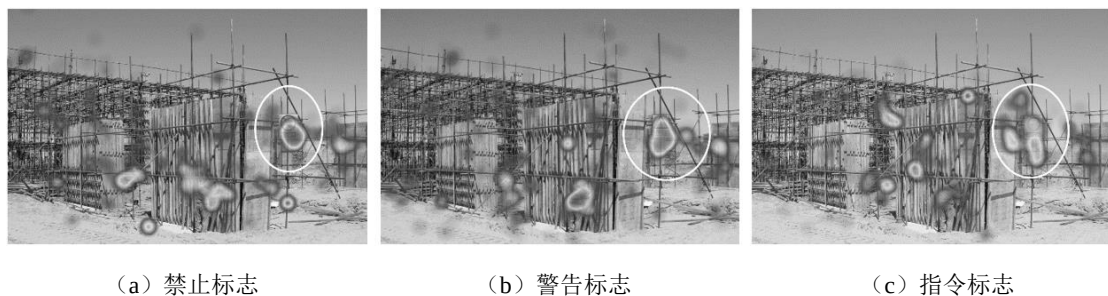


图 3-7 场景一高脑力负荷热点图

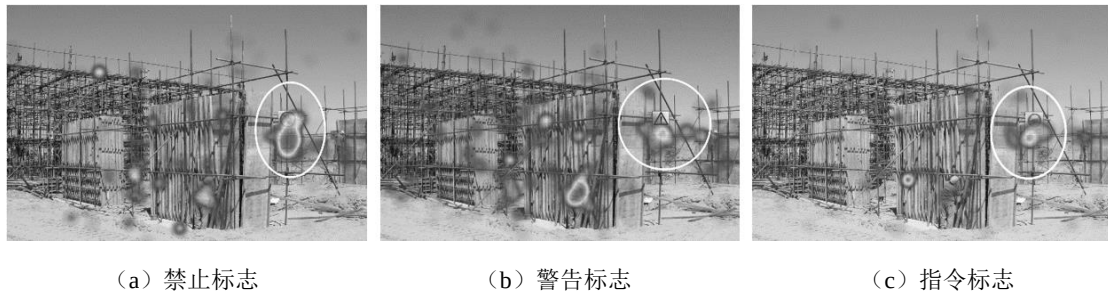


图 3-8 场景一低脑力负荷热点图

b.场景二

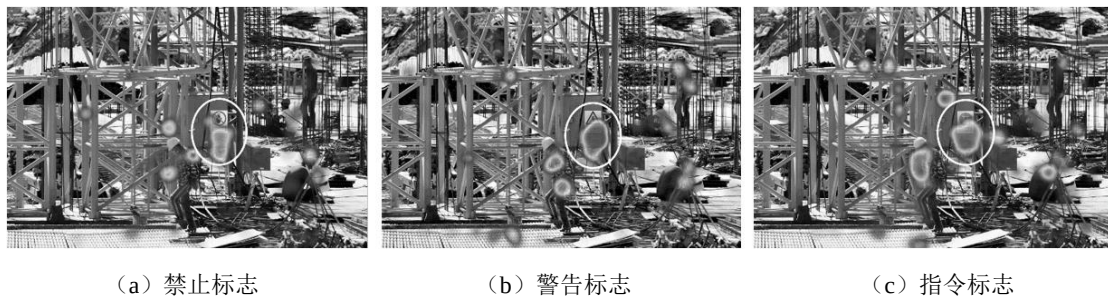


图 3-9 场景二高脑力负荷热点图

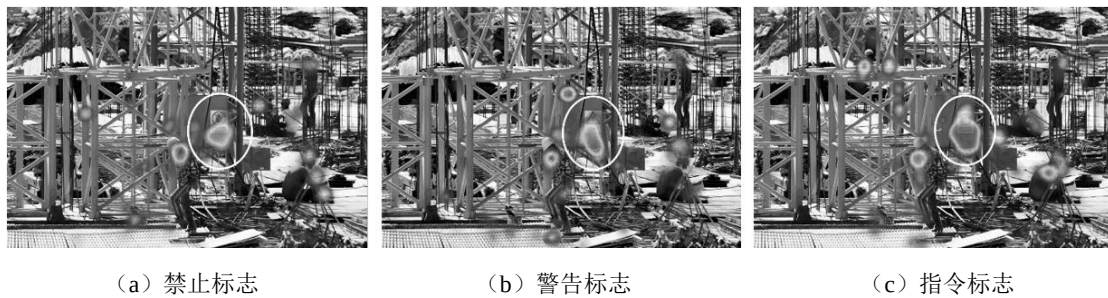


图 3-10 场景二低脑力负荷热点图

通过场景一高脑力负荷热点图（图 3-7）可以发现，不同标志类型的热点图都出现了较多的深色区域，且在标志兴趣区（图中白线圈出）都出现了明显的深色区域，说明安全标志能够在一定程度上吸引被试注意力。相较于其他两者，指令标志兴趣区颜色要浅一些，说明指令标志更难以引起人的注意。禁止标志与警告标志之间没有明显差异。

场景一低脑力负荷热点图（图 3-8）对比高脑力负荷热点图有明显不同，虽然标志兴趣区也同样都出现了明显的深色区域，但整体上比高脑力负荷热点图深色面积要少且关注点较为聚集，说明低脑力负荷被试信息加工速度更快，且提取关键信息精准性好。与高脑力负荷热点图相同，相较于其他两者指令标志兴趣区颜色要浅一些，这再次说明指令标志更难以引起被试的注意。

场景二高脑力负荷热点图（图 3-9）显示，深色区域较多，面积较大且分布较为广泛。与高脑力负荷热点图相比，低脑力负荷热点图（图 3-10）深色区域较少，面积较小，更集中在标志兴趣区附近。这说明低脑力负荷被试关注点更为集中，信息加工速度更快。

与场景一不同的是，场景二中高、低脑力负荷不同类型标志热点图之间没有明显差异，分析认为这是由于场景二中标志兴趣区设置位置靠近正中心，不论什么类型标志都能够被被试关注到。

3.3 结果讨论

3.3.1 不同脑力负荷的安全感知差异

分析不同脑力负荷被试的首次进入时间发现，两个场景中高、低脑力负荷被试的首次进入时间差异均显著，且高负荷被试首次进入时间显著高于低负荷被试，表明前者较之后者更难注意到安全标志。这是因为脑力负荷过高会减少被试的闲置信息处理能力，进而导致被试对周围事物的平均注意力水平降低，影响其发现和识别安全标志。

分析不同脑力负荷被试的首次注视持续时间可以发现，两个场景中高脑力负荷被试首次注视持续时间均显著高于低脑力负荷被试，而首次注视持续时间越长表示被试对目标的敏感性越低，即高脑力负荷被试对安全标志的视觉注意越弱。这说明脑力负荷过高致使被试的信息处理能力下降。

通过热点图比较，两种场景中不同脑力负荷的热点图均具有显著性差异。高脑力负荷的热点图深色区域较多且分布较为广泛，而低脑力负荷的热点图深色区域更少且分布主要集中在标志兴趣区，由此可以看出高脑力负荷的被试注意力不够集中、信息加工速度慢、关键信息提取精准度低，对安全标志的视觉注意弱。

相关研究表明，脑力负荷过高的情况下人因失误更容易发生，且脑力负荷存在一定的阈值，超过阈值后人的工作效率及业绩急剧下滑并维持在很低的水平^[50]。工程施工一般工作强度较大，对于施工人员来说，长时间高强度的工作会导致其身体处于高负荷状态。安全标志作为防范安全生产事故的关键防线，施工人员对其的识别至关重要。本研究结果表明高脑力负荷被试对安全标志的视觉注意

相较于低负荷被试有显著的下降,说明脑力负荷过高对建筑施工人员具有负面影响。

3.3.2 不同安全标志类型的安全感知差异

分析安全标志类型的差异发现,场景一中标志类型的各项眼动指标均有显著性差异,但场景二中均不具有显著性差异,笔者推测可能是由于场景二的标志兴趣区设置位置靠近正中心,标志很容易被注意到,导致三种类型的标志差异性不显著。

整体分析安全标志类型的首次进入时间与首次注视持续时间差异发现,指令标志与警告标志有显著性差异;指令标志与禁止标志不具有显著性差异,禁止标志与警告标志不具有显著性差异。虽然指令标志与禁止标志、禁止标志与警告标志之间未产生显著性差异,但不代表不具有统计学意义。通过比较边际均值发现高脑力负荷情况下指令标志>禁止标志>警告标志;低脑力负荷下,指令标志最大,禁止标志与警告标志则差异不明显。这是因为安全标志标志背景颜色对被试的唤醒程度不同^[65],较之其他颜色,指令标志的蓝色背景呈现出一定的“弱势”,即对被试的唤醒程度弱,更难以引起被试的注意,因此指令标志的视觉注意较弱。

通过比较场景一热点图发现,在相同脑力负荷水平下,指令标志兴趣区的颜色要比其他两者更浅一些,禁止标志与警告标志之间差异不明显,这再次说明指令标志引起的视觉注意弱。场景二热点图则因为安全标志设置位置的原因,三种安全标志类型均无明显差异。

3.3.3 建议

在建筑工程领域里,人的自身因素是整个安全管理系统中最复杂的因素。脑力负荷过高会导致施工人员对安全标志的视觉注意变低。现代建筑工程施工生产运作中,越来越完善的规章制度规范着工作人员的动作,以保障施工人员的安全。然而针对工作人员的脑力负荷还无法制定准确的劳动规范。因此在工程施工中应当采取相关措施,关注工作人员的脑力负荷大小,给予工作人员足够的休息时间;施工现场应尽量减少不必要的信息展示,如广告牌等;合理规划作业内

容，避免长时间进行高脑力需求作业；采取措施监测工作人员的脑力负荷，及时消除安全隐患。

同时，指令标志是强制人们必须做出某种动作或采用防范措施的的安全标志，其在安全生产的过程中是必不可少的。但其背景颜色在实际使用中的视觉注意有效性还有待进一步研究。

3.4 本章小结

本章基于眼动实验，以施工现场典型场景为背景，不同类型安全标志为兴趣区，研究了个体因素脑力负荷对安全标志组合设置安全感知的影响。对实验数据进行统计分析发现，脑力负荷显著影响被试识别安全标志，被试对不同类型安全标志的感知也存在显著差异。被试脑力负荷越高对安全标志的安全感知越弱；不同类型安全标志对被试的各项眼动指标影响不一，其中指令标志相较于其他两者引起的安全感知较弱。分析数据发现，安全标志类型与脑力负荷之间的交互效应均不显著。研究不足之处在于本研究实验方法单一且被试的选择可能存在个体差异，后续可以改进实验方法并让施工工人直接参与实验。

本章结论验证了前文构建的安全标志组合设置安全感知过程模型，证明了脑力负荷会影响施工人员对安全标志的平均注意力水平。

第4章 施工现场安全标志组合设置自身特征对安全感知影响

本文在第三章中针对个体因素对标志组合安全感知的影响进行了研究。然而标志自身特征对安全感知也存在较大的影响。结合前文分析，施工现场标志组合中标志常常具有较多数量，同时带来较大的信息量，因此本文设计实验同时考虑标志组合设置的数量及信息量。此外，安全标志不同类型的标志其形状、颜色、图形等设计属性皆存在较大差异，因此本文设计组合标志类型眼动实验，探讨安全标志不同类型标志组合设置的影响。

4.1 组合标志数量及信息量对安全感知影响实验

4.1.1 标志信息量度量

在实际情况中，施工人员对不同标志的反应程度不同，识别率存在差异，因此考虑施工人员对不同标志的识别率权重分别计算不同标志的信息量。

(1) 实验设计

通过计算机屏幕向被试依次展示删除提示词的安全标志，之后由被试者在 5s 内判断是否能够识别，若能够识别则按“1”，不能识别则按“0”，统计标志信息能够被识别的频率。

(2) 实验被试与材料选择

本次实验招募了来自安徽工程大学的 37 名有建筑施工课程学习经验的学生志愿者作为被试。被试者均视力正常或矫正后正常，没有任何精神疾病史，均签订参与实验知情同意书，实验前均了解实验过程与任务。

通过资料收集选取 27 个常见组合设置的安全标志，其中 10 个禁止标志、9 个警告标志、8 个指令标志。通过图形处理软件将标志中的提示词删去。部分实验材料如图 4-1 所示。



图 4-1 标志信息量实验材料

(3) 实验结果

统计标志信息能够被识别的频率，结果如表 4-1 所示。

表 4-1（a） 禁止标志被识别的频数

禁止标志	被试者				频数合计
	1	2	m	36	
禁止触摸	0	0		1	21
禁止带火种	1	1		1	35
禁止堆放	1	0		0	10
禁止靠近	0	0		0	12
禁止入内	1	0		1	19
禁止停留	1	1		1	24
禁止通行	1	0		1	22
禁止吸烟	1	1		1	35
禁止烟火	1	1		1	35
禁止用水灭火	1	0		0	23

表 4-1（b） 警告标志被识别的频数

警告标志	被试者				频数合计
	1	2	m	36	
当心爆炸	1	0		1	20
当心触电	1	0		0	29
当心电离辐射	0	0		1	26
当心感染	0	0		1	11
当心火宅	1	1		1	34
当心落物	1	1		0	32
当心中毒	1	1		0	34
当心坠落	1	0		0	31
注意安全	1	1		1	34

表 4-1 (c) 指令标志被识别的频数

指令标志	被试者				频数合计
	1	2	m	36	
必须穿防护服	1	1		1	19
必须穿防护鞋	1	0		1	18
必须戴安全帽	0	1		0	17
必须戴防毒面具	0	1		0	19
必须戴防护手套	1	0		0	16
必须戴防护眼镜	1	0		0	19
必须加锁	1	1		1	24
必须系安全带	0	0		0	19

经过数据整理与分析，得出 27 个安全标志的平均信息量如表 4-2 所示。

表 4-2 安全标志平均信息量

安全标志		平均信息量
指令标志	必须穿防护服	0.528
	必须穿防护鞋	0.500
	必须戴安全帽	0.472
	必须戴防毒面具	0.528
	必须戴防护手套	0.444
	必须戴防护眼镜	0.528
	必须加锁	0.667
	必须系安全带	0.528
警告标志	当心爆炸	0.556
	当心触电	0.806
	当心电离辐射	0.722
	当心感染	0.306
	当心火宅	0.944
	当心落物	0.889
	当心中毒	0.944
	当心坠落	0.861
禁止标志	注意安全	0.944
	禁止触摸 1	0.583
	禁止带火种	0.972
	禁止堆放 1	0.278
	禁止靠近	0.333
	禁止入内 1	0.528
	禁止停留	0.667
	禁止通行 1	0.611
	禁止吸烟	0.972
	禁止烟火	0.972
	禁止用水灭火	0.639

4.1.2 实验设计

(1) 实验被试与材料选择

本次实验招募了来自安徽工程大学的 37 名有建筑施工课程学习经验的学生志愿者作为被试。被试者均视力正常或矫正后正常，没有任何精神疾病史，均签订参与实验知情同意书，实验前均了解实验过程与任务。

参照《安全标志及其使用导则》选取了前文 27 个安全标志，按照常见标志组合分别将 2、3、4、5、6、7、8 个安全标志设置为标志组合，每个数量组有两个组合方式。标志组合中的标志排列顺序参照《安全标志及其使用导则》所规定，多个标志同时放置时，应按警告、禁止、指示、提示等顺序进行放置，刺激材料示例如图 4-2。按照高信息量、低信息量将相同数量标志组合分为两组。具体组合方式见表 4-3。



图 4-2 组合标志信息量实验刺激材料示例

(2) 实验流程

本次实验采用型号为 Tobii Pro Spectrum 桌面式眼动仪，并运用配套软件 ErgoLAB 软件进行采集存储数据。眼动仪的采样率为 600HZ，眼动精度为 0.08°；眼动仪连接屏幕分辨率为 1920*1080P，屏幕尺寸为 23.8 寸。

本实验采用被试内实验设计，以组合标志数量和组合标志信息量为自变量，以扫视频率为因变量。扫视频率是指人在搜索信息时眼睛扫视的次数，扫视频率越高表示被试在该标志组合上搜寻信息越困难，即对安全标志的安全感知越差。

实验首先呈现上述选取的组合标志刺激图片，每个刺激图片将呈现 10s，呈现刺激后以中间有十字的空白屏幕间隔 10s，之后呈现该刺激的判断图片。判断图片中将询问被试者“该刺激图片中是否含有 xx 标志？”，被试根据问题回答“是”-单击鼠标左键，“否”-单击鼠标右键，在被试做出判断后，呈现下一个刺激图片。考虑到施工作业中施工人员在注意安全标志到识别安全标志的过程中

将一直处于工作中的状态，因此本实验为模拟施工人员脑力负荷状态，在间隔时间内将会呈现一次简单的数学计算，被试需口头给出答案。

实验在安徽工程大学人因工程实验室进行，实验室为自然光、无噪音环境。在正式实验前进行预实验，被试自然坐立在实验设备前，眼睛距离屏幕 70-80cm。选取部分被试进行培训，确保实验流程无误，以减少偶然误差。预实验所用刺激材料与正式实验不一致，且符合实验要求。预实验结束后即开始正式实验。

表 4-3 信息量实验标志组合方式

标志组合数量	标志组合	信息量	
2	当心电离辐射+禁止停留	1.39	
3	当心触电+禁止触摸+必须加锁	2.06	
4	当心爆炸+禁止吸烟+禁止烟火+必须戴防毒面具	3.03	
5	当心中毒+当心爆炸+禁止带火种+禁止用水灭火+必须戴防毒面具	3.64	高 信 息 量
6	当心中毒+当心爆炸+禁止停留+禁止烟火+必须穿防护服+必须戴防毒面具	4.19	
7	当心火灾+当心爆炸+禁止带火种+禁止吸烟+禁止烟火+禁止用水灭火+必须戴安全帽	5.53	
8	注意安全+当心触电+当心火灾+禁止带火种+禁止吸烟+禁止烟火+必须戴防护手套+必须穿防护鞋	6.56	
2	当心感染+必须穿防护服	0.83	
3	当心落物+禁止停留+必须戴安全帽	2.03	
4	当心触电+当心电离辐射+禁止触摸+必须加锁	2.78	
5	当心触电+当心电离辐射+禁止靠近+必须穿防护服+必须加锁	3.06	低 信 息 量
6	注意安全+当心坠落+当心落物+禁止堆放+必须戴安全帽+必须系安全带	3.97	
7	当心感染+当心中毒+禁止烟火+禁止停留+必须穿防护服+必须戴防护手套+必须戴防毒面具	4.39	
8	当心火灾+当心感染+当心中毒+禁止烟火+禁止停留+必须穿防护鞋+必须戴防护手套+必须戴防毒面具	5.31	

4.1.3 实验数据分析

经过数据整理与分析,37 名被试对 14 个刺激图片的扫视频率如表 4-4 所示。

由于被试注意力不集中等个人原因,原始数据中存在部分异常值,通过 spss 箱型图对异常值剔除后,对处理后的数据进行数据分析。

表 4-4 组合标志数量及信息量实验被试扫视频率

扫视频率	图 1	图 2	图 3	图 4	图 5	图 6	图 7	图 8	图 9	图 10	图 11	图 12	图 13	图 14
被试 1	28	33	24	35	33	34	32	35	32	29	19	36	36	33
被试 2	27	28	24	23	29	21	25	29	30	18	36	27	33	33
被试 3	13	18	18	22	22	31	23	25	28	27	34	22	28	22
被试 4	20	14	23	20	22	20	22	23	25	29	25	24	22	31
被试 5	31	31	18	29	36	36	34	36	28	28	43	32	42	33
被试 6	27	22	25	19	24	33	35	43	41	41	41	30	39	33
...														
被试 32	18	23	25	13	22	27	21	27	26	21	28	20	23	28
被试 33	27	19	23	27	28	27	16	24	20	24	26	32	29	30
被试 34	32	28	28	22	30	31	32	31	29	28	33	34	33	28
被试 35	36	23	34	32	38	35	32	37	38	28	33	40	33	27
被试 36	19	22	21	29	23	30	33	32	30	29	38	33	29	32
被试 37	32	28	27	18	30	24	30	25	27	30	35	26	28	27

(1) 标志组合信息量分析

通过 SPSS 27 对相同标志数量的标志组合,按照高、低信息量进行配对样本 T 检验差异分析,结果如表 4-5 所示。

表 4-5 组合标志不同信息量扫视频率配对样本 T 检验

标志组 合数量	配对差值					t	自由 度	显著性 (双尾)
	平均值	标准差	标准误差 平均值	差值 95% 置信区间				
				下限	上限			
2	0.568	5.510	0.906	-1.270	2.405	0.627	36	0.535
3	-1.378	6.313	1.038	-3.483	0.726	-1.328	36	0.192
4	0.811	5.901	0.970	-1.157	2.778	0.836	36	0.409
5	1.405	3.869	0.636	0.115	2.695	2.209	36	0.034
6	0.216	4.888	0.804	-1.414	1.846	0.269	36	0.789
7	-0.189	7.785	1.280	-2.785	2.406	-0.148	36	0.883
8	0.270	5.342	0.878	-1.511	2.051	0.308	36	0.760

由表可知,配对 T 检验发现,在七对相同标志数量的组合标志中,六对均不具有显著性 ($P>0.05$), 只有标志数量 5 配对中扫视频率具有显著性 ($P=0.034<0.05$)。分析认为,可能由于实验的样本量较少,导致出现标志数量 5 配对扫

视频率具有显著性的偶然事件。总体可以说明，相同标志数量下组合标志信息量差异引起被试的安全感知差异不显著。

不考虑标志数量情况下，对不同信息量标志组的扫视频率进行相关性分析，结果如表 4-6 所示。

表 4-6 标志组合信息量-扫视频率相关性分析（不区分数量）

		信息量	扫视频率
信息量	皮尔逊相关性	1	.289**
	显著性（双尾）		0.000
	个案数	518	518
扫视频率	皮尔逊相关性	.289**	1
	显著性（双尾）	0.000	
	个案数	518	518

**．在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

由表 4-6 可知，相关性分析结果显示，sig 值小于 0.05，且皮尔逊相关性值大于 0，由此可认为扫视频率与标志组信息量之间具有显著的正相关关系，即扫视频率随着标志组信息量的增大而增加。如图 4-3 所示。

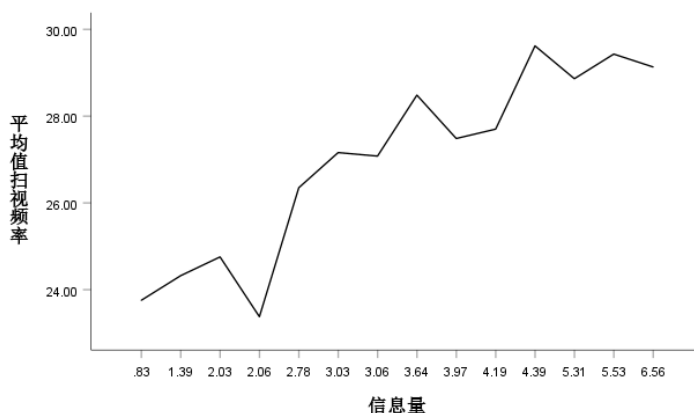


图 4-3 扫视频率与标志组合信息量关系

(2) 标志组合数量分析

通过 SPSS 27 对不同标志数量的标志组合，进行相关性分析，结果如表 4-7 所示。相关项分析结果显示，sig 值小于 0.05，且皮尔逊相关性值大于 0，由此可认为扫视频率与标志组合数量之间具有显著的正相关关系，即扫视频率随着标志组合数量的增加而增加。如图 4-4 所示。

表 4-7 标志组合数量-扫视频率相关性分析

		标志数量	扫视频率
标志数量	皮尔逊相关性	1	.295**
	显著性（双尾）		0.000
	个案数	518	518
扫视频率	皮尔逊相关性	.295**	1
	显著性（双尾）	0.000	
	个案数	518	518

**．在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

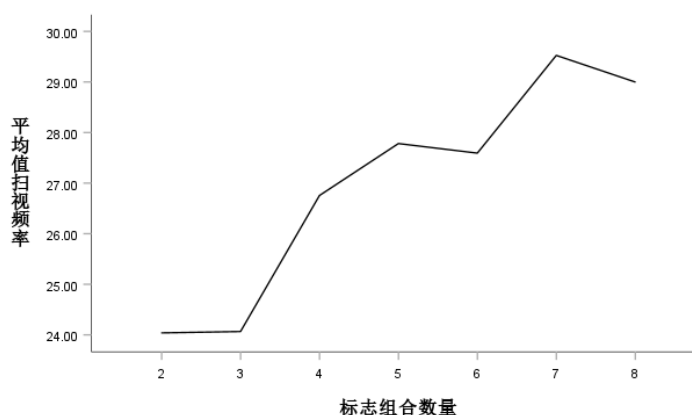


图 4-4 扫视频率与标志组合数量关系

4.1.4 结果讨论

本实验通过分析不同组合标志数量以及信息量，探讨施工人员对安全标志组合设置的安全感知情况。首先进行了安全标志信息量的测量实验，通过被试的主观感知情况确定了实验所用的 27 个安全标志的信息量。

通过眼动实验分析不同标志组合信息量对安全感知的影响，结果如下。

在相同数量不同信息量的情况下，不同信息量标志组合对被试扫视频率的影响不显著，即相同数量标志情况下标志组合信息量大小对被试的安全感知影响不具备显著性，这与假设 H3a 不相符。分析认为，相同标志数量情况下，标志组合信息量的差异较小，不足以引起被试扫视次数的较大差异。本次实验中共七组实验，在标志数量为 5 的配对实验结果显著，分析认为是由于实验样本较少加之被试个人因素、测量仪器等的偶然因素造成的偶然误差，因此不考虑该实验结果。

不考虑标志数量情况下，标志组合的信息量与被试的扫视频率相关性显著，且标志组合信息量越大，被试的扫视频率越高，即标志组合的信息量显著影响被试对安全标志组合的安全感知，信息量越大被试对标志组合的安全感知越差，这与假设 H3b 相符。分析认为这是由于被试的信息处理能力有限，在相对有限的时间内不足以感知大量信息量，导致标志组合信息量大时被试扫视频率上升。这也说明标志组合信息量大时，被试难以找到关键信息，进而导致被试对安全标志组合反映出的危险信息无法及时感知。

分析标志组合数量对被试的安全感知影响发现，标志组合的数量与被试的扫视频率具有显著的正相关关系，即标志组合中标志数量显著影响被试对安全标志组合的安全感知，标志数量越多被试对标志组合的安全感知越差，这与标志组合信息量对安全感知的影响一致，与假设 H3 相符。分析认为标志数量的增加，使得标志组合的面积增大，使得被试在对安全标志组合感知时扫视频率上升，也势必导致被试难以关注到标志组合中的关键信息，进而导致被试对安全标志组合反映出的危险信息无法及时感知。另外，考虑到标志组合的信息量与标志数量之间的关系，对标志组合信息量与数量进行相关性分析，结果如表 4-8，标志组合数量与信息量的相关性显著。如图 4-5，标志组合数量与信息量呈正相关关系，即标志组合数量越多，信息量越大，这表明标志组合的数量与信息量影响是一致的。

表 4-8 标志组合数量-信息量相关性分析

		标志数量	标志信息量
标志数量	皮尔逊相关性	1	.970**
	显著性（双尾）		0.000
	个案数	14	14
标志信息量	皮尔逊相关性	.970**	1
	显著性（双尾）	0.000	
	个案数	14	14

**，在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

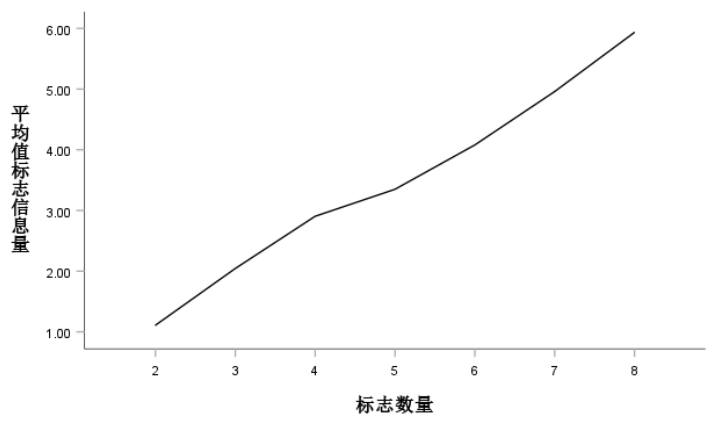


图 4-5 标志信息量与标志组合数量关系

4.2 组合标志类型对安全感知影响实验

4.2.1 实验设计

(1) 实验被试与材料选择

本次实验招募了来自安徽工程大学的 37 名有建筑施工课程学习经验的学生志愿者作为被试。被试者均视力正常或矫正后正常，没有任何精神疾病史，均签订参与实验知情同意书，实验前均了解实验过程与任务。

本次实验共选取前文 27 个安全标志中的 15 个标志，将标志组合为 2 标志和 3 标志样式，共 8 个组合方式，具体见表 4-9。标志组合中 2 标志样式共 3 个刺激图片，分别为警告+禁止、警告+指令、禁止+指令；3 标志样式共 5 个刺激图片，均为警告+禁止+指令。以上标志组合中标志的排列顺序《安全标志及其使用导则》所规定，多个标志同时放置时，应按警告、禁止、指示、提示等顺序进行放置。将每个刺激图片中的安全标志作为一个兴趣区域，共 21 个兴趣区域，刺激材料示例如图 4-6。

表 4-9 标志类型实验标志组合

序号	组合数量	标志组合
图片 1	2	当心落物+禁止停留
图片 2	2	当心感染+必须穿防护服
图片 3	2	禁止触摸+必须戴安全帽
图片 4	3	当心感染+禁止停留+必须穿防护服
图片 5	3	当心火宅+禁止用水灭火+必须戴安全帽
图片 6	3	当心触电+禁止触摸+必须加锁
图片 7	3	注意安全+禁止堆放+必须戴安全帽
图片 8	3	当心坠落+禁止通行+必须系安全带



图 4-6 组合标志类型实验刺激材料示例

(2) 实验流程

本次实验采用型号为 Tobii Pro Spectrum 桌面式眼动仪，并运用配套软件 ErgoLAB 软件进行采集存储数据。眼动仪的采样率为 600HZ，眼动精度为 0.08° ；眼动仪连接屏幕分辨率为 1920*1080P，屏幕尺寸为 23.8 寸。

本实验采用单因素重复测量设计 (安全标志类型:禁止标志 vs.警告标志 vs.指令标志)，以组合标志类型为自变量，以注视点数、注视持续时间及注视热点图为因变量。

实验首先呈现上述选取的组合标志刺激图片，要求被试观察出现的安全标志感知潜在的危险以及应该注意的事项。实验共 8 张刺激图片，每张图片呈现 5s，被试在感知到标志反映出的潜在危险之后立即点击鼠标左键，之后将切换为下一张刺激图片。若被试在 5s 内未做反应，则自动切换下一张刺激图片。统计被试对刺激图片的注视点数以及注视持续时间。

实验在安徽工程大学人因工程实验室进行，自然光、无噪音环境。被试自然坐在实验设备前，眼睛距离屏幕 70-80cm。在正式实验前进行预实验。选取部分被试进行培训，确保实验流程的流程无误，以减少偶然误差。预实验所用刺激材料与正式实验不一致，且符合实验要求。正式实验流程与预实验基本一致。

4.2.2 实验数据分析

(1) 标志类型注视点数分析

经过数据整理与分析，37 名被试对 8 个刺激图片的 21 个兴趣区域的注视点数如表 4-10 所示。

表 4-10 组合标志类型实验被试注视点数

注视 点数	图 1 区域 1	图 1 区域 2	图 2 区域 1	图 2 区域 2	图 3 区域 1	...	图 7 区域 2	图 7 区域 3	图 8 区域 1	图 8 区域 2	图 8 区域 3
被试 1	5	12	6	2	18		8	3	6	8	5
被试 2	20	16	7	7	31		14	10	7	6	8
被试 3	8	13	7	8	14		3	5	10	10	13
被试 4	6	7	4	1	15		11	7	4	3	0
被试 5	11	13	5	7	11		4	5	8	8	8
被试 6	12	11	7	4	10		4	2	5	4	4
...											
被试 32	17	17	10	5	14		6	4	7	5	5
被试 33	11	17	11	5	11		4	6	11	15	4
被试 34	12	12	17	3	10		6	4	11	9	4
被试 35	3	7	6	5	9		5	3	10	6	9
被试 36	13	16	4	5	7		2	3	4	2	1
被试 37	11	5	4	3	6		13	3	4	2	7

由于被试注意力不集中等个人原因,原始数据中存在部分异常值,通过 spss 箱型图对异常值剔除后,对处理后的数据进行数据分析。

通过 SPSS 27 对刺激图片 1、2、3 中的兴趣区域进行配对样本 T 检验差异分析,结果如表 4-11 所示。

表 4-11 标志类型注视点数配对样本 T 检验

刺激 图片	标志 类型	配对差值					t	自 由 度	显著性 (双 尾)
		平均值	标准 差	标准误差 平均值	差值 95% 下限 上限	置信区间			
图片 1	禁止-警告	-0.892	5.285	0.869	-2.654	0.870	-1.026	36	0.312
图片 2	警告-指令	2.108	3.550	0.584	0.925	3.292	3.613	36	0.001
图片 3	禁止-指令	3.946	6.004	0.987	1.944	5.948	3.997	36	0.000

配对 T 检验发现,禁止、警告、指令标志两两组合设置时,禁止标志与警告标志注视点数不具有显著性 ($P=0.312>0.05$),说明被试对禁止标志与警告标志的安全感知不具有显著差异。警告标志与指令标志注视点数差异显著 ($P=0.001<0.05$),警告标志注视点数均值显著大于指令标志,说明警告与指令标志组合设置时,警告标志更能引起被试的安全感知。禁止标志与指令标志注视点数差异显著 ($P<0.001$),禁止标志注视点数均值显著大于指令标志,说明禁止与指令标志组合设置时,禁止标志更能引起被试的安全感知。

通过 SPSS 27 对刺激图片 4-8 中的兴趣区域进行单因素重复测量方差分析,结果如表 4-12 所示。

表 4-12 标志类型注视点数 Mauchly 球形度检验 a

主体内效应	Mauchly W	近似卡方	自由度	显著性	Epsilon ^b		
					格林豪斯-盖斯勒	辛-费德特	下限
标志类型	0.972	0.991	2	0.609	0.973	1.000	0.500

球形度检验 $P=0.609>0.05$ ，因此符合球形度检验。主体内效应检验如表 4-13 所示。

表 4-13 标志类型注视点数主体效应检验

变异源	III 类平方和	自由度	均方	F	P 值	偏 η^2
标志类型	457.459	2	228.730	29.950	0.000	0.454
误差（标志类型）	549.874	72	7.637			

可见，不同标志类型间对注视点数的影响有统计学差异， $F=29.950$ ， $P=0.000$ ，偏 $\eta^2=0.454$ ，说明从注视点数来看，三种安全标志类型中至少有一类型与其他类型有显著性差异。进一步使用 LSD 法对安全标志类型进行多重比较分析，结果见表 4-14。

表 4-14 标志类型对注视点数多重比较分析

(I) 安全标志类型	(J) 安全标志类型	平均值差值 (I-J)	标准误差	显著性 ^b	差值的 95% 置信区间 ^b	
					下限	上限
禁止标志	警告标志	2.919*	0.622	0.000	1.658	4.180
	指令标志	4.946*	0.609	0.000	3.711	6.181
警告标志	禁止标志	-2.919*	0.622	0.000	-4.180	-1.658
	指令标志	2.027*	0.694	0.006	0.620	3.434
指令标志	禁止标志	-4.946*	0.609	0.000	-6.181	-3.711
	警告标志	-2.027*	0.694	0.006	-3.434	-0.620

表 4-14 的结果显示，禁止、警告、指令标志组合设置时，禁止标志引起的安全感知评分最高，警告标志次之，提示标志最低。

禁止标志与警告标志注视点数差异显著 ($P<0.001$)，禁止标志注视点数均值高出警告标志 2.919 (95%置信区间：1.658-4.180)。

警告标志与指令标志注视点数差异显著 ($P=0.006<0.001$)，警告标志注视点数均值高出指令标志 2.027 (95%置信区间：0.620-3.434)。

禁止标志与指令标志注视点数差异显著 ($P<0.001$)，禁止标志注视点数均值高出指令标志 4.946 (95%置信区间：3.711-6.181)。

(2) 标志类型注视持续时间分析

经过数据整理与分析，37 名被试对 8 个刺激图片的 21 个兴趣区域的注视持续时间如表 4-15 所示。

表 4-15 组合标志类型实验被试注视持续时间

扫视 频率	图 1 区域 1	图 1 区域 2	图 2 区域 1	图 2 区域 2	图 3 区域 1	...	图 7 区域 2	图 7 区域 3	图 8 区域 1	图 8 区域 2	图 8 区域 3
被试 1	1.16	2.61	1.93	0.47	5.55		1.89	0.78	1.44	2.04	1.05
被试 2	3.12	3.06	1.36	1.28	5.83		2.61	1.77	1.39	0.86	1.63
被试 3	1.50	2.76	1.03	1.33	2.37		0.61	1.19	1.48	1.81	2.54
被试 4	1.65	1.25	0.67	0.27	2.99		2.56	2.08	0.73	0.64	0.00
被试 5	1.94	2.33	0.94	1.57	2.28		1.07	1.21	1.85	2.44	1.95
被试 6	3.30	2.49	1.24	0.53	2.94		0.71	0.45	0.73	0.70	0.80
...											
被试 32	4.22	3.80	2.04	1.26	2.77		1.73	0.85	1.58	1.06	1.16
被试 33	2.08	2.79	2.34	0.89	2.10		0.71	1.26	1.81	4.07	0.98
被试 34	2.97	6.01	6.58	0.91	4.83		2.58	0.85	3.63	3.38	1.46
被试 35	0.55	1.30	1.37	1.20	2.27		0.74	0.89	1.88	1.33	1.45
被试 36	3.92	3.29	0.89	0.97	1.19		0.28	0.57	0.46	0.37	0.35
被试 37	2.58	1.05	0.69	0.52	1.77		3.68	1.18	0.76	0.31	1.98

由于被试注意力不集中等个人原因，原始数据中存在部分异常值，通过 spss 箱型图对异常值剔除后，对处理后的数据进行数据分析。

通过 SPSS 27 对刺激图片 1、2、3 中的兴趣区域进行配对样本 T 检验差异分析，结果如表 4-16 所示。

表 4-16 标志类型注视持续时间配对样本 T 检验

刺激 图片	标志 类型	配对差值					t	自 由 度	显著性 (双 尾)
		平均值	标准 差	标准误差 平均值	差值 下限	95% 置信区间 上限			
图片 1	禁止-警告	-0.162	1.505	0.247	-0.663	0.340	-.653	36	0.518
图片 2	警告-指令	0.541	1.310	0.215	0.104	0.977	2.510	36	0.017
图片 3	禁止-指令	0.892	1.717	0.282	0.320	1.465	3.160	36	0.003

配对 T 检验发现，禁止、警告、指令标志两两组合设置时，禁止标志与警告标志注视点数不具有显著性 ($P=0.518>0.05$)，说明被试对禁止标志与警告标志的安全感知不具有显著差异，与注视点数结果分析一致。警告标志与指令标志注视点数差异显著 ($P=0.017<0.05$)，警告标志注视点数均值显著大于指令标志，说明警告与指令标志组合设置时，警告标志更能引起被试的安全感知，与注视点数结果分析一致。禁止标志与指令标志注视点数差异显著 ($P=0.003<0.001$)，

禁止标志注视点数均值显著大于指令标志,说明禁止与指令标志组合设置时,禁止标志更能引起被试的安全感知,与注视点数结果分析一致。

通过 SPSS 27 对刺激图片序号 4-8 中的兴趣区域进行单因素重复测量方差分析,结果如表 4-17 所示。

表 4-17 标志类型注视持续时间 Mauchly 球形度检验 a

主体内效应	Mauchly W	近似卡方	自由度	显著性	Epsilon ^b		
					格林豪斯-盖斯勒	辛-费德特	下限
标志类型	0.996	0.147	2	0.929	0.996	1.000	0.500

球形度检验 $P=0.929>0.05$, 因此符合球形度检验。主体内效应检验如表 4-18 所示。

表 4-18 标志类型注视持续时间主体效应检验

变异源	III 类平方和	自由度	均方	F	P 值	偏 η^2
标志类型	17.934	2	8.967	18.598	0.000	0.341
误差(标志类型)	34.714	72	0.482			

可见,同注视点数数据结果一样,不同标志类型间对注视持续时间的影响有统计学差异, $F=18.598$, $P=0.000$, 偏 $\eta^2=0.341$,说明从注视持续时间来看,三种安全标志类型中至少有一类型与其他类型有显著性差异。进一步使用 LSD 法对安全标志类型进行多重比较分析,结果见表 4-19。

表 4-19 标志类型对注视持续时间多重比较分析

(I) 安全标志类型	(J) 安全标志类型	平均值差值 (I-J)	标准误差	显著性 ^b	差值的 95% 置信区间 ^b	
					下限	上限
禁止标志	警告标志	0.608	0.156	0.000	0.291	0.926
	指令标志	0.975	0.162	0.000	0.645	1.304
警告标志	禁止标志	-0.608	0.156	0.000	-0.926	-0.291
	指令标志	0.366	0.165	0.033	0.031	0.702
指令标志	禁止标志	-0.975	0.162	0.000	-1.304	-0.645
	警告标志	-0.366	0.165	0.033	-0.702	-0.031

表 4-19 的结果显示,禁止、警告、指令标志组合设置时,禁止标志引起的安全感知评分最高,警告标志次之,提示标志最低。这与注视点数数据分析结果一致。

禁止标志与警告标志注视点数差异显著 ($P < 0.001$)，禁止标志注视点数均值高出警告标志 0.608 (95%置信区间: 0.291-0.926)。警告标志与指令标志注视点数差异显著 ($P = 0.033 < 0.001$)，警告标志注视点数均值高出指令标志 0.366 (95%置信区间: 0.031-0.702)。禁止标志与指令标志注视点数差异显著 ($P < 0.001$)，禁止标志注视点数均值高出指令标志 0.975 (95%置信区间: 0.645-1.304)。

4.2.3 结果讨论

本实验分析不同组合标志类型对安全标志组合设置的安全感知情况，结果如下。

分析被试对不同标志类型的注视点数结果如下。(1) 禁止、警告、指令标志两两组合设置情况下，禁止标志与警告标志组合设置时不具有显著差异，与假设 H4a 不相符；警告与指令标志组合设置时，警告标志更能引起被试的安全感知，与假设 H4b 相符；禁止与指令标志组合设置时，禁止标志更能引起被试的安全感知，与假设 H4c 相符。(2) 禁止、警告、指令标志同时组合设置时，禁止标志更能引起被试的安全感知，警告标志次之，提示标志最低，与假设 H4d 不相符。

分析认为，不同标志类型引起被试的安全感知存在差异的主要原因是安全标志对被试的唤醒程度不同^[65]。需要说明的是，卞^[65]通过 ERP 脑电实验证明，人们对警告类安全标志的危险感知最高，禁止标志次之，指令标志最低。这与本次实验的结果存在差异，主要差异点为本文结果认为禁止标志引起的安全感知要大于警告标志，而卞^[65]的结果则相反。分析认为，差异的主要原因在于标志的呈现方式。卞^[65]的实验材料为单个安全标志，本文第三章中同样以单个标志呈现的方式对标志类型影响进行了研究，实验结果与其结论是一致的。而本实验的研究对象为标志组合，这会导致被试观察和感知安全标志受到标志设置顺序的影响。本次实验材料的安全标志顺序为警告标志在前，其次为禁止标志，最后为指令标志，而当该标志组合呈现给被试时，被试可能首先关注到图片的中心位置，即禁止标志，故而导致本次实验结果。热点图可以更直观反映被试注视刺激材料的频率和关注点分布情况，如图 4-7 所示。在三个数量为二的标志组合中，警告标志与禁止标志形成的组合中二者热点区域范围几乎相当，其余两个组合则较为明显

的看出指令标志热点区域较少。在其余五个数量为三的标志组合中，都可以看出处于中间位置的禁止标志的热点区域范围最大，其次为左边位置的警告标志，右边位置的指令标志范围最小。

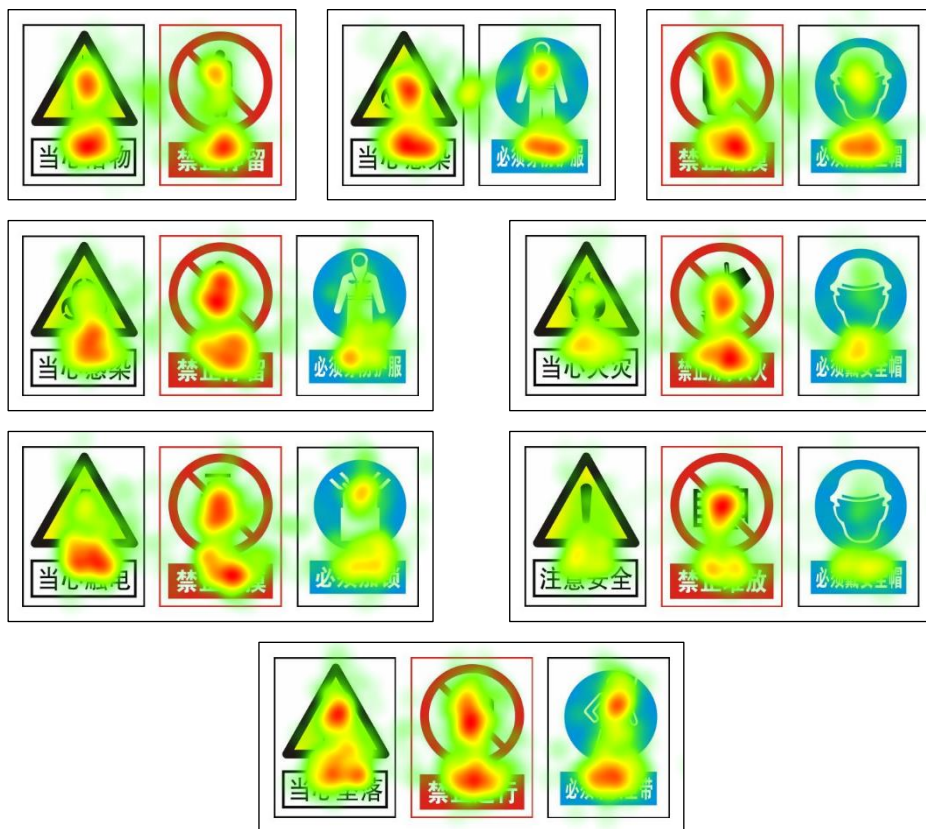


图 4-7 刺激材料热点图

分析被试对不同标志类型的注视持续时间结果如下。（1）禁止、警告、指令标志两两组合设置情况下，禁止标志与警告标志组合设置时不具有显著差异；警告与指令标志组合设置时，警告标志更能引起被试的安全感知；禁止与指令标志组合设置时，禁止标志更能引起被试的安全感知。（2）禁止、警告、指令标志同时组合设置时，禁止标志更能引起被试的安全感知，警告标志次之，提示标志最低。这与注视点数分析结果一致。表明了本次标志类型对安全感知的影响实验结果的一致性。

4.3 本章小结

本章通过眼动实验对组合标志的数量、信息量以及标志类型的影响进行研究。在对组合标志数量及信息量的研究实验中，通过信息熵理论测量选定的 27 个常见安全标志的信息量。实验以 37 名具有工程施工课程学习经验的在校大学生位

被试，获取眼动数据。对数据进行统计分析发现，标志组合中标志数量显著影响被试对安全标志组合的安全感知，标志数量越多被试对标志组合的安全感知越差；相同数量标志情况下不同信息量标志组合对被试的安全感知影响不具备显著性；不考虑标志数量情况下，标志组合信息量越大，施工人员对组合标志的安全感知越差。在标志类型实验中，（1）三种标志两两组合设置情况下，禁止标志与警告标志不具有显著差异；相比指令标志，警告标志以及禁止标志都更能引起被试的安全感知。（2）禁止、警告、指令标志同时组合设置情况下，禁止标志更能引起被试的安全感知，警告标志次之，提示标志最低。

第 5 章 施工现场安全标志组合设置感知有效性评价模型

本文在前两章对施工现场安全标志组合对安全感知的影响进行了研究，明确了相关因素的影响，但结论主要为语言主观描述，在实际生活中无法根据前文结论直观的判断施工现场安全标志组合的有效性。因此，本章节对安全标志组合各影响因素进行量化分析，构建施工现场安全标志组合设置感知有效性评价模型。

5.1 评价指标权重

根据前文研究结果，确定安全标志组合的影响因素指标为标志组合数量、标志组合信息量、标志组合类型、施工人员脑力负荷。

首先确定标志组合数量、标志组合信息量、标志组合类型、施工人员脑力负荷的权重，再结合功效系数法构建安全标志组合评分体系。为写出判断矩阵，引入合适的数值来表示各指标重要性，采用 1-9 标度法计算三个指标的权重值。其中 1 表示两个指标相同重要，3 表示前一个元素比后一个元素稍微重要，5 表示前一个元素比后一个元素明显重要，7 表示前一个元素比后一个元素特别重要，9 表示前一个元素比后一个元素极端重要，2、4、6、8 是上述两相邻判断的折中判断。

根据标度评分建立判断矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

a_{ij} 表示第 i 个指标和第 j 个指标的重要程度之比； w_i 作为指标 i 的权重估计值， $w_i = \sqrt[n]{\prod D_{ij}}$ ，然后对 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 进行归一化，将归一化的结果作为四个指标的权重。之后按照以下公式进行一致性检验：

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

其中, CI 用于检验判断思维的一致性, RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标, CR 为随机一致性比率, 通常 $CR \leq 0.1$ 代表该判断矩阵一致性检验通过。

根据评估打分, 对三个指标进行两两比较, 判断重要程度, 结果如表 5-1 所示。

表 5-1 指标重要程度比值

	标志组合数量 (A1)	标志组合信息量 (A2)	标志类型 (A3)	工人脑力负荷 (A4)
标志组合数量 (A1)	1	1	3	2
标志组合信息量 (A2)	1	1	2	2
标志类型 (A3)	1/3	1/2	1	1/3
工人脑力负荷 (A4)	1/2	1/2	3	1

由此本文得出判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

得出权重集为 $w = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.356, 0.322, 0.11, 0.212)$ 。

计算得 $CI=0.039$, 查表得 RI 值为 0.882, 因此 $CR=CI/RI=0.045 < 0.1$, 判断矩阵一致性检验通过。各指标权重值如表 5-2 所示。

表 5-2 指标权重值

评价指标	标志组合数量	标志组合信息量	标志组合类型	工人脑力负荷
权重	0.356	0.322	0.11	0.212

5.2 评价模型构建

根据前文所得实验数据, 为消除各指标间数值差异, 避免各指标数据单位量纲不同带来的影响, 对数据进行标准化处理, 归一化至 $[0,1]$ 区间内。将各指标数据按照功效系数法及其权重计算评分结果。

标准化公式:

$$y = \frac{\alpha - \alpha_{min}}{\alpha_{max} - \alpha_{min}} \quad (5-1)$$

(1) 标志组合数量

根据前文实验分析, 标志组合数量越多其影响越大即功效越低。有研究指出, 标志信息量能被正确识别的阈值为 6 条, 当标志信息超过 6 条时, 识别率将会下降^[35]。因此拟定标志组合数量为 6 时为标志组合数量的临界值 N_{min} , 其功效系

数为 0；标志组合数量为 2 时为标志组合数量的最优值 N_{max} ，其功效系数为 1；，则标志组合数量的功效函数为：

$$F_1 = \frac{N - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} \quad (5-2)$$

式中： F_1 为标志组合数量的功效， N 为标志组合数量实际值， N_{max} 为标志组合数量最优值， N_{min} 为标志组合数量临界值。

（2）标志组合信息量

施工人员在作业过程中获取的安全标志信息量与标志组合理论信息量之比称为信息认度率^[66]。安全标志的可理解性存在显著差异，这种差异直接影响了施工人员的接受程度。易于理解的安全标志更易被施工人员接受并遵守，因此其有效性更高，而难以理解的安全标志则相反。因此，以信息认度率作为评价标志组合信息量有效性的指标，可有效衡量标志组合信息理解程度。

根据信息熵理论度量施工人员对标志组合理解的信息量及安全标志组合的理论信息量的比值。则标志组合信息认度率为：

$$P = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mn}}{MN} \quad (5-3)$$

式中： P 为标志组合信息认度率，取值范围为 0~100%， C_{mn} 为第 m 个被试者能正确理解第 n 个标志的频数， M 为被试者数量， N 为标志组合中标志数量。

按照信息认度率的特性，拟定 P_{max} 为信息认度率的最优值为 100%，其功效系数为 1； P_{min} 为信息选取率的临界值为 60%，其功效系数为 0。则标志信息认度率功效函数为：

$$F_2 = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (5-4)$$

式中： F_2 为标志组合信息认度率的功效， P 为信息认度率实际值， P_{max} 为信息认度率最优值， P_{min} 为信息认度率临界值。

（3）标志组合类型

根据前文分析，以三类标志同时组合设置的注视点数均值比值作为三类标志的影响权重。结果如表 5-3 所示。

表 5-3 标志类型权重值

标志类型	禁止标志	警告标志	指令标志
权重	0.466	0.318	0.216

对三种标志的权重进行标准化得：禁止标志的标准化权重=1；警告标志的标准化权重=警告标志权重 / 禁止标志权重 = 0.318 / 0.466=0.682；指令标志的标准化权重=指令标志权重 / 禁止标志权重 = 0.216 / 0.466=0.464。

由前文分析，标志组合中禁止标志比例越大施工人员对标志组合的安全感知越强，指令标志比例越大则相反。因此拟定标志组合中标志类型的成分系数为：

$$C = \frac{N_P + 0.682 \times N_W + 0.464 \times N_I}{N} \quad (5-5)$$

式中： C 为标志组合类型的成分系数， N 为标志组合数量实际值， N_P 为禁止标志实际数量， N_W 为警告标志实际数量， N_I 为指令标志实际数量。

由上式，拟定当禁止标志比例为 100%时， C_{max} 为成分系数最优值 1，其功效系数为 1；当指令标志比例为 100%时， C_{min} 为成分系数临界值 0.464，其功效系数为 0。则标志组合类型功效函数为：

$$F_3 = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (5-6)$$

(4) 工人脑力负荷

根据前文实验分析，工人脑力负荷可以按照工人劳作时间进行量化。根据其特性，假设劳作时间为 8h 时为脑力负荷的临界值 θ_{min} ，其功效系数为 0；劳作时间为 0h 时为脑力负荷的最优值 θ_{max} ，其功效系数为 1。则工人脑力负荷的功效函数为：

$$F_4 = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (5-7)$$

式中： F_4 为工人脑力负荷的功效， θ 为工人劳作时间实际值（单位：小时）， θ_{max} 为工人劳作时间最优值， θ_{min} 为工人劳作时间临界值。

表 5-4 各指标功效函数

评价指标	功效函数
标志组合数量	$F_1 = \frac{N - N_{min}}{N_{max} - N_{min}}$
标志组合信息量	$F_2 = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}}$
标志组合类型	$F_3 = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}$
工人脑力负荷	$F_4 = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}}$

结合前文所得各指标权重可求得各指标功效值,为直观地展示标志组合设置感知有效性评价结果,将功效值转化为百分制,取临界值为基准,以 60 分即及格分作为基准分,得到安全标志组合评分模型。

$$e_i = (F_i * 40 + 60) \tag{5-8}$$

$$E = \sum_{i=1}^4 w_i * e_i \tag{5-9}$$

式中： E 为安全标志组合有效性的评分结果， w_i 为第 i 个指标的权重， F_i 为第 i 个指标的功效系数。

其中评分结果的评判标准参考表 5-5:

表 5-5 标志组合有效性百分制评判标准

评分	(0, 60)	(60, 70)	(70, 80)	(80, 90)	(90, 100)
有效性	不及格	及格	中等	良好	优秀

5.3 实例分析

通过网络随机选取施工现场安全标志组合 3 个，如图 5-1 所示。

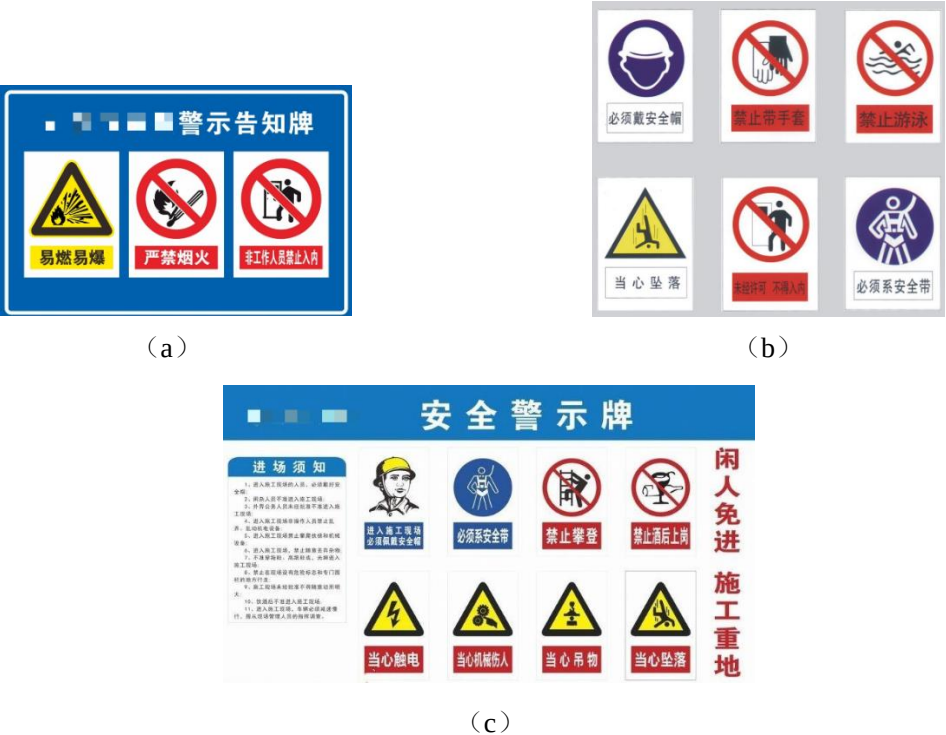


图 5-1 警示告知牌（来自网络）

根据前文安全标志组合评分体系，评分如下：

(1) 标志组合数量

由图可知，三个标志组合的数量如表 5-6 所示。

表 5-6 标志组合数量

图片	图 5-1 (a)	图 5-1 (b)	图 5-1 (c)
标志数量	3	6	8

根据标志组合数量的功效函数 (5-2) 及公式 (5-8) 计算得三个标志组合的标志组合数量指标得分如表 5-7。

表 5-7 标志组合数量指标得分

图片	图 5-1 (a)	图 5-1 (b)	图 5-1 (c)
指标得分	90	60	40

(2) 标志组合信息量

首先测定各标志组合的信息认度率。选取来自安徽工程大学的 36 名学生志愿者作为被试 (被试者均有建筑施工课程学习经验, 视力正常或矫正后正常, 没有任何精神疾病史, 均签订参与实验知情同意书, 实验前均了解实验过程与任务), 对以上三个标志组合中的标志进行识别, 实验数据如表 5-8。

表 5-8 各标志组中标志被识别的频数

标志名称	被试者				频数合计
	1	2	m	36	
易燃易爆	0	0		1	21
禁止烟火	1	1		1	35
禁止入内	1	0		1	19
必须戴安全帽	0	0		1	21
禁止戴手套	1	1		0	22
禁止游泳	0	1		0	27
当心坠落	1	0		1	31
必须系安全带	0	0		1	19
必须佩戴安全帽	1	1		1	28
禁止攀登	0	1		1	31
禁止酒后上岗	1	1		1	34
当心触电	1	0		0	29
当心机械伤人	0	0		0	17
当心吊物	0	1		0	15

根据信息认度率计算公式 (5-3) 计算得各标志组信息认度率如下:

$$\text{标志组 (a) 信息认度率为: } P = \frac{21+35+19}{36 \times 3} = 69.4\%$$

$$\text{标志组 (b) 信息认度率为: } P = \frac{21+22+27+31+19+19}{36 \times 6} = 64.4\%$$

$$\text{标志组 (c) 信息认度率为: } P = \frac{28+19+31+34+29+17+15+31}{36 \times 8} = 70.8\%$$

根据信息认度率功效函数（5-4）及公式（5-8）计算得三个标志组合的标志组合信息量指标得分如表 5-9。

表 5-9 标志组合信息量指标得分

图片	图 5-1（a）	图 5-1（b）	图 5-1（c）
指标得分	69.4	64.4	70.8

（3）标志类型

由图可知，三个标志组合的标志类型及数量如表 5-10 所示。

表 5-10 标志组合类型数量

	图 5-1（a）	图 5-1（b）	图 5-1（c）
禁止标志数量	2	3	1
警告标志数量	1	1	7
指令标志数量	0	2	0

根据标志类型成分系数公式（5-5）计算各标志组标志类型成分系数如下：

$$\text{标志组（a）标志类型成分系数为：} C = \frac{2+0.682 \times 1}{3} = 0.894$$

$$\text{标志组（b）标志类型成分系数为：} C = \frac{3+0.682 \times 1+0.464 \times 2}{6} = 0.768$$

$$\text{标志组（c）标志类型成分系数为：} C = \frac{2+0.682 \times 4+0.464 \times 2}{8} = 0.707$$

根据标志组合数类型的功效函数（5-6）及公式（5-8）计算得各标志组合的标志类型指标得分如表 5-11。

表 5-11 标志组合类型指标得分

图片	图 5-1（a）	图 5-1（b）	图 5-1（c）
指标得分	92.09	82.69	78.13

（4）施工人员脑力负荷

施工人员脑力负荷与现实情况下施工人员的工作时间相关，本例假设三个场景的工人劳作时间分别为 5、3、1 小时。

根据施工人员脑力负荷的功效函数（5-7）及公式（5-8）计算得三个标志组合的脑力负荷指标得分如表 5-12。

表 5-12 标志组合脑力负荷指标得分

图片	图 5-1（a）	图 5-1（b）	图 5-1（c）
指标得分	75	85	95

综合以上，根据安全标志组合有效性评分公式（5-9）计算得各标志组合的感知有效性评分如表 5-13。

表 5-13 标志组合设置感知有效性评分

图片	图 5-1（a）	图 5-1（b）	图 5-1（c）
得分	80.42	69.21	65.77

根据上表可以看出，三个安全标志组合的有效性依次降低，总体处于及格到良好的水平。从各个指标分析发现：从标志组合数量上可以明显看出，图 5-1(a) 标志组合由于标志数量最少其数量指标评分最高，而图 5-1(b)、图 5-1(c) 标志数量较多，评分依次降低；从标志组合信息量来看，图 5-1(a) 与图 5-1(c) 的信息认度率相近，略高于图 5-1(b)；与根据标志类型组成来看，图 5-1(a) 禁止标志比例较多，且不含有指令标志，因此该组合评分最高；脑力负荷评分则与工作时长负相关，三个标志组脑力负荷评分按照施工人员工作时长依次降低。

根据以上分析，三组标志组合间感知有效性评分存在较大差异。原因之一在于不同标志组的标志数量差距较大，数量越少其信息量也越低，则施工人员更能识别危险信息。另一原因是不同场景下的施工人员脑力负荷差异较大，现实施工场景施工人员一般工作强度较大且工作时长较长。最后，安全标志类型的影响差异较小，可以适当减少标志组合中的指令标志数量，将指令标志单独设置。

标志组合设置时，标志数量对有效性影响最大，因此建议优化标志组合版面设置，尽量减少标志组合数量，对于危险因素较为密集的场所可以适当降低标志设置密度。施工人员一般工作强度大、时间长，因此脑力负荷是影响能否有效识别标志组合的重要因素，建议增加施工人员工作间隙休息时间，减少不必要的信息展示，适当安排工作内容，降低工作强度。

第6章 结论与展望

6.1 研究结论

为避免安全事故的发生,人们广泛采用安全标志来直观地展示当前环境下的不安全因素,以指导人员行为安全规范。施工现场环境复杂,危险因素较为密集,因此安全标志一般采用组合设置的方式,但标志组合设置可能导致信息量较大,施工人员无法短时间内识别,安全感知效果差,使得工人出现不安全行为,导致事故发生。本文以施工安全标志组合作为研究对象,探究安全标志组合对安全感知的影响。

首先,对已有安全标志研究进行综述,发现标志组合设置相关研究在施工安全标志领域较少,但交通领域研究已取得一定成就。为此,本文学习交通标志领域研究方法,对安全标志认知行为理论进行分析,将施工人员个人因素考虑在内,认为工人脑力负荷会影响其对标志信息识别,结合人的信息流动与加工过程模型明确了安全标志组合设置安全感知的过程。对安全标志组合设置影响因素进行分析,认为施工人员的脑力负荷以及标志组合的信息量、标志数量、标志类型皆会影响安全感知过程,以此提出研究假设并构建了安全标志组合设置安全感知影响因素结构模型。

其次,探究脑力负荷对安全标志的感知影响。实验采用眼动追踪实验方法,对施工人员高低脑力负荷状态以及不同类型安全标志进行研究,选取首次进入时间以及首次注视持续时间作为分辨施工人员对安全标志感知效果的依据。结果发现:(1)脑力负荷会显著影响施工人员识别安全标志,脑力负荷过高会导致被试对周围事物的平均注意力水平降低,对安全标志的安全感知变弱。(2)被试对不同类型安全标志的感知影响不一,其中指令标志相较于其他两种标志引起的安全感知较弱。

最后,探究标志组合设置因素对安全感知的影响。基于眼动实验,分别对标志组合的信息量、数量以及标志类型进行研究,并根据研究结果构建安全标志组合设置感知有效性评价模型。研究结果如下:(1)标志组合中标志数量显著影

响被试对安全标志组合的安全感知,标志数量越多被试对标志组合的安全感知越差;相同数量标志情况下标志组合信息量大小对被试的安全感知影响不具备显著性;不考虑标志数量情况下,标志信息量越大,施工人员对组合标志的安全感知越差。(2)三种类型标志在不同组合设置情况下影响不一。两两组合设置情况下,禁止标志与警告标志组合设置时两者不具有显著差异,其他两种组合下指令标志都弱于其他标志。三种标志同时组合时,禁止标志更能引起被试的安全感知,警告标志次之,提示标志最低。根据以上研究结果,采用功效系数法以施工人员脑力负荷、组合标志数量以及组合标志类型为指标构建出安全标志组合设置感知有效性评价模型。

6.2 研究不足与展望

本研究结合标志认知过程相关理论,研究了施工现场安全标志组合设置下对安全感知的影响,取得了一定研究成果,具有一定的理论及现实意义。然而,由于实验条件以及其他客观因素的限制,当前研究仍存在一些不足之处:(1)本文实验所选被试皆为在校大学生,与真实条件下施工人员具有一定差异,在今后的研究中应完善被试选择方式,扩大被试选择范围。(2)本文实验环境皆为室内安静、舒适的环境,与现实施工场地具有较大差异,今后进一步研究可以结合实际施工环境,获取更客观的实验结果。(3)本文研究方法有待改善,眼动实验方法虽较之问卷调查等主观测量方式更具有科学性,但在实验过程中容易受到个体行为等客观条件的限制。后续研究可以引入事件相关电位等实验方法,提高数据科学性与真实性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.全国工程质量安全监管信息平台公共服务门户[EB/OL]. <https://zlaq.mohurd.gov.cn/fwmh/bjxcjgl/fwmh/pages/default/index.html?ydreferer=aHR0cHM6Ly96bGFxLm1vaHVyZC5nb3YuY24vZndtaC9ianhjamdsL2Z3bWgvcGFnZXMvZGVmYXVsdC9pbmRleC5odG1sP3RzenRQaklkPTY5MDA3>, 2024-03-01.
- [2] Akhmad Suraji and A. Roy Duff and Stephen J. Peckitt. Development of Causal Model of Construction Accident Causation[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2001, 127(4):337-344.
- [3] Kenneth R. Laughery. Safety communications: Warnings [J]. Applied Ergonomics, 2006, 37(4):467-478.
- [4] 袁京鹏.安全标志有效性影响因素实证研究[D].浙江大学,2009.
- [5] Wogalter M S, Kalsher M J, Rashid R. Effect of Signal Word and Source Attribution on Judgments of Warning Credibility and Compliance Likelihood[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24(2):185-192.
- [6] Rogers A W .Warning Research: An Integrative Perspective[J].Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society, 2000, 42(1):102-139.
- [7] Chan Alan-H .S., Ng Anie-W,Y, The Guessing of Mine Safety Signs Meaning: Effects of User Factors and Cognitive Sign Features[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2021, 18(2):195-208.
- [8] Kenneth R. Laughery. Safety communications: Warnings [J]. Applied Ergonomics, 2006, 37(4):467-478.
- [9] Gao J, Wu X, Luo X, et al. Scientometric Analysis of Safety Sign Research: 1990-2019[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(1):273.
- [10] Williams J D ,Noyes M J .How does our perception of risk influence decision-making? Implications for the design of risk information[J]. Theoretical Issues in

- Ergonomics Science, 2007, 8(1):1-35.
- [11]胡祎程,周晓宏,王亮.安全标志识别性研究:标志特性及用户因素[J].中国安全科学学报,2013,23(3):16-21.
- [12]张坤,崔彩彩,牛国庆,景国勋.安全标志边框形状及颜色的视觉注意特征研究[J],安全与环境学报,2014,14(6):18-22.
- [13]牛国庆,崔彩彩,张坤.辅助文字对安全标志识别性影响的眼动研究[J].河南理工大学学报(自然版),2014,33(4):410-415.
- [14]Liu Y C, Ho C H. The effects of age on symbol comprehension in central rail hubs in Taiwan[J]. Applied Ergonomics, 2012, 43(6):1016-1025.
- [15]李世波,姜伟,张亚男等.煤矿工作场所安全标志理解的个体影响因素分析[J].矿业安全与环保,2015,42(04):113-116,120.
- [16]王春雪,吕淑然.情绪对安全标志识别影响研究[J].中国安全科学学报,2016,26(03):15-20.
- [17]朱小光.基于认知记忆理论的安全标志识别培训有效性研究[D].安徽工程大学,2015.
- [18]Ortiz J ,Resnick L M ,Kengskool K .The Effects of Familiarity and Risk Perception on Workplace Warning Compliance[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2000, 44(28):826-829.
- [19]汪琨.道路交通标志夜间认知过程及其影响因素研究[D].安徽工程大学,2019.
- [20]田水承,陈盈,邹元,李广利.煤矿安全标志有效性影响因素分析[J].中国安全科学学报,2016,26(02):146-151.
- [21]田水承,陈盈,邹元.位置设置对煤矿安全标志显著性影响的眼动分析[J].西安科技大学学报,2017,37(05):649-654.
- [22]周丹,魏艳敏,袁月心,杨代凯.安全标志在煤矿井下设置中存在的问题及建议[J].内蒙古科技与经济,2020(24):110-111.
- [23]李梦潇.大型铁路客运站旅客引导标识合理设置研究[D].西南交通大学,2014.
- [24]方娟,徐良杰.基于旅客特性的离站静态标识空间布局设计[J].西部交通科技,2011(06):61-65.
- [25]郑颖琇,陈星,徐俞凯,刘孔科,何华刚.施工场地内安全标志位置的有效性研究

- 及其应用[J].安全与环境工程,2022,29(01):17-25.
- [26]杨金茹,韩豫.施工安全标识位置特征驱动的自动化注意行为研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(11):191-196.
- [27]景国勋,孙妍琳,蒋方.安全标志排列顺序的视觉注意特征研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(11):197-202.
- [28]Guo Z, Wei Z, Wang H. The Expressway Traffic Sign Information Volume Threshold and AGS Position Based on Driving Behaviour[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14:3801-3810.
- [29]Liu YC.A simulated study on the effects of information volume on traffic signs viewing strategies and sign familiarity upon driver's visual search performance[J]International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(12):1147-1158.
- [30]SHAO Hai-peng, MUWei, YE Yi-xiang. A Quantitative Model for the Validity of Guide Sign Information at Intersection[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(4):70-75.
- [31]Tsyganov A R, Machemehl R B. Driver Responses at Different Information Loads on Urban Freeways[C]//Transportation Research Board 88th Annual Meeting. 2009.
- [32]Jianwei D ,Gang R ,Wei L , et al. How is the visual working memory load of driver influenced by information density of traffic signs?[J].Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour, 2022, 8665-83.
- [33]王振国.绕城高速公路出入口指路标志信息量及版面设置研究[D].长安大学,2019.
- [34]祖永昶,李娅,王运霞,等.城市道路指路标志信息量限值研究[J].交通信息与安全,2012,30(6):38-42
- [35]赵淑婷.城市主干路交通标志版面信息量阈值和密度阈值研究[D].西南交通大学,2018.
- [36]陈永明,罗东.现代认知心理学[M].北京:团结出版社,1989.
- [37]Ma, Q.G., Jin,J.& Wang,L. The neural Process of hazard Perception and evaluation for waring signal words: evidence from event-related potential [J].Neuroscience

- Letters, 2010,48(3):206-210.
- [38]唐贤伟.基于神经工业工程的安全标志认知心理过程研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [39]胡祎程,周晓宏,王亮.工程项目现场安全标志有效性评价[J].中国安全科学学报,2012,22(08):37-42.
- [40]Proctor R W , Van Zandt T. Human Factors in Simple and Complex Systems[M]. New York: CRC Press., 2008.
- [41]Young M S, Brookhuis K A, Wickens C D, et al. State of science: mental workload in ergonomics[J]. Ergonomics, 2015, 58(1):1-17.
- [42]廖建桥.脑力负荷及其测量[J].系统工程学报,1995,3:119-123.
- [43]崔凯,孙林岩,冯泰文,等.脑力负荷度量方法的新进展述评[J].工业工程,2008,11(005):1-5.
- [44]Wickens, C. D . Multiple resources and mental workload.[J]. Human Factors, 2008, 50(3):449-455.
- [45]叶贵,王妍,任梦雪等.体力疲劳对建筑工人不安全行为的影响效应研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(01):122-127.
- [46]杨小涵. 疲劳对建筑工人注意力影响的 ERP 研究[D].重庆大学,2022.
- [47]牛莉霞,刘谋兴,李乃文,黄敏.工作倦怠、安全注意力与习惯性违章行为的关系[J].中国安全科学学报,2016,26(06):19-24.
- [48]Jennifer C MCVAY, Michael J KANE. Conducting the train of thought: working memory capacity, goal neglect, and mind wandering in an executive-control task [J].Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 2009, 35(1):196-204.
- [49]汪琨,周晓宏.脑力负荷对安全标志认知影响差异研究[J].宿州学院学报,2019,34(02):79-84.
- [50]夏曦.脑力负荷下人因失误的实验研究[D].西南交通大学,2013.
- [51]景国勋,雒赵飞.不同工龄矿工对警示语标识的视觉注意特征[J].安全与环境学报,2016,16(06):163-168.
- [52]Al-Madani H ,Al-Janahi A .Assessment of drivers' comprehension of traffic signs based on their traffic, personal and social characteristics[J].Transportation

- Research Part F: Psychology and Behaviour, 2002, 5(1):63-76.
- [53] Yung-Ching Liu. A Simulated study on the effects of information volume on traffic signs viewing strategies and sign familiarity upon driver's visual search Performance[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, (35):1147-1158.
- [54] 王大恒.基于信息度量的指路标志认知能力与极限信息量研究[J].公路交通科技(应用技术版),2010,6(04):179-181+191.
- [55] 杨曼娟,周志伟,王成虎等.高速公路组合式指路标志信息数量与认知时间关系研究[J].中国安全科学学报,2014,24(05):15-20.
- [56] GB 5768.2-2022,道路交通标志和标线-第 2 部分:道路交通标志[S].北京:人民交通出版社,2022.
- [57] GB 2894-2008,安全标志及其使用导则[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [58] Yu R F, Chan A, Salvendy G. Chinese perceptions of implied hazard for signal words and surround shapes[J].Human Factors & Ergonomics in Manufacturing & Service Industries,2010, 14(1):69-80.
- [59] Luximon A, Chung L W, Goonetilleke R S .Safety signal Words and Color Codes: the perception of Implied Hazard by Chinese[C].The 5th Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics, 1998:30-33.
- [60] Bian J, Fu H J, Jin J. Are We Sensitive to Different Types of Safety Signs? Evidence from ERPs.[J]. Psychology research and behavior management, 2020, 13(default) : 495-505.
- [61] Dzeng RJ, Lin CT, Fang YC. Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification[J]. Safety science, 2016,82:56-67.
- [62] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房和城乡建设部办公厅关于 2020 年房屋市政工程生产安全事故情况的通报:建办质(2021)17 号 [EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202210/20221026_768565.html. 2021-05-21/2024-03-18.
- [63] 谭海松.煤矿井下安全标志设计的视认性眼动研究[D].西安科技大学,2021.

- [64]郑欣,郝腾腾,王慧宇等.基于眼动指标的脑力疲劳识别研究[J].安全,2021,42(04):71-75.
- [65]卞军.安全管理中安全标志及其设计要素的感知机理研究[D].浙江大学,2014.
- [66]刘伟,杜建玮,陈科全.基于视知觉的交通可变标志信息认度评价[J].中国公路学报,2020,33(01):163-171.

攻读硕士学位期间参与的科研项目工作及研究成果

发表学术论文情况

1. 贺先庆,周晓宏.工人脑力负荷对安全标志视觉注意影响—基于眼动实验的分析[J].安徽工程大学学报（已录用）
2. 贺先庆,周晓宏.施工现场安全标志组合设置属性对识别的影响（审稿中）

参与科研项目情况

1. 参与《发挥人工智能优势 助力芜湖经济增添新动能》（芜湖市科学技术协会项目）

致谢

时光荏苒，岁月如梭。转眼间，三年的硕士学习生涯已接近尾声。在即将结束硕士生涯之际，我的内心充满了感慨与感激。这段旅程虽充满挑战，但在众多人的支持与鼓励下，我得以砥砺前行。

首先，我要深深感谢我的导师周晓宏教授。研究生期间，从论文主题到论文框架，再到论文撰写及修改，是您一直对我精心指导并提出宝贵建议。您严谨的治学态度、深厚的学术造诣和敏锐的学术洞察力深深地影响着我，指引我在学术的海洋中探索前行，使我在学术上受益匪浅。同时，您的人格魅力和高尚师德也深深感染着我，让我学会了如何做一个有担当、有责任、有追求的人，教会我如何面对人生的起起伏伏。

其次，我要感谢经管学院的众多老师以及学院提供的丰富学术资源和优质环境。老师们倾心传授的专业知识以及科研方法使我受益匪浅，学院为我们提供的学术环境以及科研设施赋予了我们无限的学术可能。在这里我要特别感谢丁一老师和操雅琴老师，两位老师都对我的研究给予了很大帮助。

此外，我还要感谢我的同学以及学长学姐们。我们一同度过了无数个日夜，共同面对挑战，分享喜悦。尤其我的舍友们，三年的时光我们一起聊天、一起熬夜奋战、一起畅想未来……你们的陪伴让我的硕士生涯更加丰富多彩，你们的帮助让我更加坚定地走向未来。

同时，我要感谢我的家人。是你们无条件的爱与支持，让我在追求学业的道路上从不孤单。在我遇到困难时，是你们给我勇气和力量，让我能够坚持下去。你们的爱是我前进的动力，也是我心中最温暖的港湾。

最后，我要向参与论文评审和答辩的各位专家教授表示衷心的感谢。您的宝贵意见和建议使我的论文更加完善，您的严谨治学态度让我深受启发。

回首这段旅程，我深感幸运与感激。在未来的日子里，我将带着这份感激与收获，继续前行，不断追求更高的学术成就和更美好的人生。在这里，祝愿所有给予我关心、帮助和支持的人都能够享受一个充满幸福喜悦的美好人生！