

面向虚拟驾驶工效的水电工程施工 道路几何参数优化研究

(申请三峡大学工学博士学位论文)

培养单位：水利与环境学院

学 科：水利工程

研 究 生：余 晓 云

指 导 教 师：周 宜 红 教 授

联 合 导 师：廖 再 肖 教 授

二〇二〇年四月

Optimization Construction Site Road Based On Drivers Efficiency

Dissertation Submitted to
China Three Gorges University

in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Engineering

in
Hydraulic Engineering

by

Yu Xiaoyun

Dissertation Supervisor: Professor, Zhou Yihong

Cooperate Supervisor: Professor, Liao Zaiyi

April, 2020

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解三峡大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

三峡大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；（3）根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》，向国家图书馆报送可以公开的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____

导师签名：_____

日期：_____

日期：_____

摘要

本论文选取水利水电工程施工现场道路的自卸车驾驶员驾驶行为为研究对象，以认知心理学和驾驶员行为学为理论指导，以施工道路优化设计为研究目标，以车辆行驶速度、平曲线半径、纵坡为主要控制变量，深入分析施工道路的安全特性和驾驶员的适应性，提出大型施工现场施工道路驾驶员安全适应性模型，并测度其安全性指数和适应性。

分析驾驶人的视距期望，兼顾效率和安全的平曲线半径、纵坡角度和行驶速度匹配模型。基于施工道路虚拟行车环境与驾驶人的交互作用，探究不同施工道路工况下驾驶人的眼动规律，建立不同线形组合下的驾驶人视距期望函数，构建施工道路几何参数和驾驶人主观视距的关系模型，探究施工道路几何参数设计的人-车-路-环匹配规律，反演分析施工道路规划设计几何参数，弥合施工道路线形理论设计与现实需求的差距，为施工道路规划设计与运管安全性评价提供理论依据

研究成果可以为大型水利水电工程施工现场道路设计、道路设施设计提供理论指导，改善和优化施工现场道路设计规范，指导驾驶员进行适应性训练，预防施工现场交通安全事故，提高施工现场自卸车驾驶员的作业效率具有一定的参考价值。

本论文的研究成果包括如下几个部分：

第一章：绪论，介绍论文的研究背景和研究意义，国内外研究现状，针对大型水利水电工程施工现场道路实际情况，施工道路设计规范的基本情况，驾驶员作业的安全风险和效率提升等，综述国内外学者的主要研究成果和结论，提出本文的研究目标、任务和内容。

第二章：

本文的创新点主要有：

- 利用 BIM 技术研究施工道路设计；
- 眼动等心理学工具研究驾驶员作业安全；
- 道路几何线形设计参数。

关键词：建筑信息模型；施工道路；安全；眼动；视距

Abstract

Key Words: BIM; Construction Road; Safety; Eye-Tracking; Sight Distance

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.1.1 施工安全风险的需要	1
1.1.2 施工现场驾驶与普通道路驾驶的区别	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 施工安全管理	3
1.2.2 道路安全设计	3
1.2.3 驾驶员安全行为研	3
1.2.4 驾驶员工作空间研究	4
1.2.5 虚拟驾驶技术应用	5
1.3 研究方法和主要研究内容	5
1.3.1 研究方法	5
1.3.2 主要研究内容	10
1.4 论文的组织	10
1.4.1 本研究主要仪器设备	10
1.4.2 论文的主要结构	11
1.4.3 眼动技术在施工安全中的应用	11
第2章 施工道路参数化模型	12
2.1 倾斜摄影	12
2.2 三维地形建模	13
2.3 道路信息的提取	13
2.4 模型参数化	13
第3章 施工路段驾驶员行为数据采集与分析	14
3.1 实验目标	14
3.2 实验设计与实验方案	14
3.2.1 试验方案	15
3.2.2 实验场地选择	15
3.2.3 试验人员选择	17
3.2.4 被试车辆选择	19
3.2.5 试验参数的选择	20
3.2.6 眼动实验数据采集	22

目 录

3.3 驾驶员心理状态分析	23
3.3.1 视野平面划分	23
3.3.2 预瞄时间和驾驶负荷	25
3.4 不同纵坡状态下驾驶员行动轨迹分析	25
3.5 不同平曲线半径驾驶员行为分析	25
3.6 基于行驶速度驾驶员的行为分析	25
3.7 基于道路状况的驾驶员行为分析	25
第 4 章 施工道路驾驶员视觉特征规律	26
4.0.1 对面来车 (O)	26
4.0.2 上坡路段 (U)	26
4.0.3 下坡路段 (P)	26
4.0.4 左转 (L)	26
4.0.5 右转 (I)	27
4.1 注视点关注分析	27
4.1.1 瞳孔变化率	27
4.1.2 注视点眼跳	27
4.1.3 累计注视时间	27
4.1.4 关注点分析	27
4.1.5 数据分析	27
4.2 典型环境下停车视距	27
4.2.1 正常驾驶视距	27
4.2.2 停车视距	27
4.2.3 转弯视距	27
4.2.4 超车视距	27
4.2.5 会车视距	27
第 5 章 驾驶员行车风险机理以及特征	28
5.1 施工场地自卸车驾驶员眼动特性研究	28
5.1.1 纵坡加速度特性的风险分析	28
5.1.2 弯道特性的驾驶风险分析	28
5.1.3 标示标牌反应的驾驶风险分析	28
5.2 眼动数据分析	28
5.2.1 注视固定研究	28
5.2.2 眼跳检测	28
5.2.3 三维眼动分析	28
5.3 视觉认知与心理负荷研究	28

目 录

5.3.1 危险行为的识别	28
5.3.2 风险的量化	28
5.3.3 驾驶员安全风险认知.....	28
第 6 章 施工道路几何线形反演分析以及优化设计	29
6.1 施工道路主要技术参数优化	29
6.1.1 视距不良	29
6.1.2 平曲线半径	29
6.1.3 纵坡	29
6.1.4 平整度	29
6.2 施工道路设施布置与优化	29
6.2.1 安全标识	29
6.2.2 灯光以及辅助设施	29
6.3 施工道路速度设计	29
6.3.1 行驶速度的变化特性	29
6.3.2 行驶速度的离散程度	29
第 7 章 结论和展望	30
参考文献	31
致 谢	32

第1章 绪论

1.1 研究目的及意义

1.1.1 施工安全风险的需要

水利工程施工现场几乎都是大型机械化作业，在有施工道路条件下，施工中物料的运送工具主要是自卸车，自卸车的安全运营主要靠驾驶员以及驾驶员对道路的适应性上，驾驶员对信息的感知有90%来自于视觉，视觉是导致现场作业人员安全事故的主要致因。

大型水利水电工程施工涉及大量的高强度土石方运输作业，施工道路规划设计不仅影响施工效率，而且影响施工安全。由于土石方运输作业环境复杂、车辆操控难、临时人员多等原因，导致安全事故频繁发生。例如某水电工程土石方运输过程中，由于路况较差，驾驶员为赶工，导致自卸车相撞、2人重伤、车辆损毁的安全事故发生，如图1.1所示。



图 1.1 某水电工程土石方运输安全事故现场

Fig. 1.1 Accident Sample

在土石方运输作业系统中，人、车、路、交通环境组成驾驶工效场景，其中人是核心要素。要使施工道路运行达到安全、畅通、舒适、经济、低公害的目的，必须以人为本，从系统的观点出发使人、车、路、交通环境等要素相互协调。《公路项目安全性评价规范》(JTGB05-2015)明确指出：“从公路使用者的角度，按一定的评价程序，采用定性和定量的方法，对公路交通安全进行全面、系统的分析和评价”；《水利水电工程场内施工道路技术规范》(DL/T5243-2010)仅规定了视距、转弯半径、加宽、超高等几何参数^[1]。可见，现行规范未考虑施工使用者的人因

特性、未考虑驾驶人对驾驶环境的心理期望要求、未考虑驾驶人的视觉感知、操作反应等行为因素。

水利水电工程施工多是机械化作业，大型施工机械作业人员操作机械是未来施工的主要力量，施工作业人员的安全作业环境研究和改善，是有效防范安全事故发生的手段。基于施工道路虚拟行车环境与驾驶人的交互作用，探究不同施工道路工况下驾驶人的眼动规律，建立不同线形组合下的驾驶人视距期望函数，构建施工道路几何参数和驾驶人主观视距的关系模型，探究施工道路几何参数设计的人-车-路-环匹配规律，反演分析施工道路规划设计几何参数，弥合施工道路线形理论设计与现实需求的差距，为施工道路规划设计与运管安全性评价提供理论依据。

1.1.2 施工现场驾驶与普通道路驾驶的区别

1.1.2.1 心理负荷不同

1.1.2.2 低速重载

1.1.2.3 道路条件不同

1.1.2.4 虚拟现实技术的利用

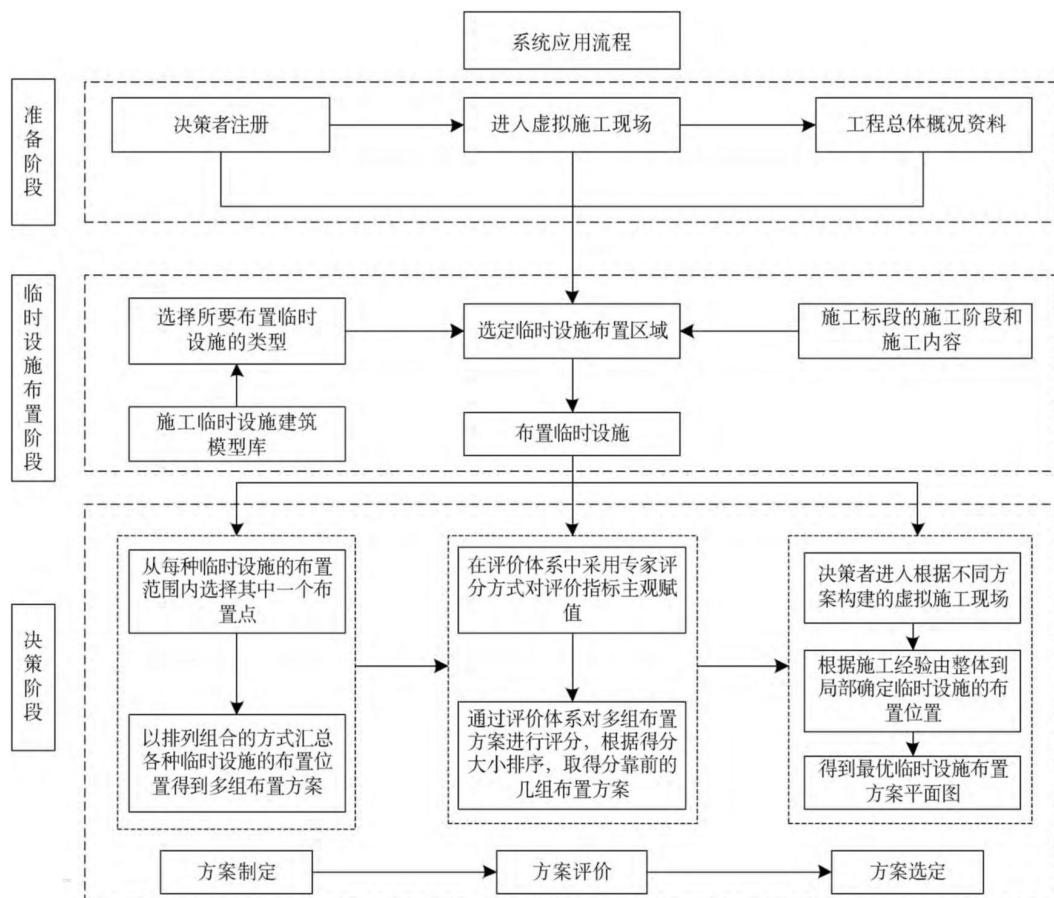


图 1.2 VR 施工场地布置辅助系统

Fig. 1.2 Construction site support system

1.2 国内外研究现状

1.2.1 施工安全管理

当前的安全管理已经由被动的安全预防转为主动的安全管理,^[2]，Hassan Malekitabar^[3] 利用 BIM 技术在设计过程中的应用，为施工安全信息集成在设计模型中的信息中，其提供了五组可能影响事故可能性或后果的安全风险驱动因素，将其应用于建设项目中，为 40% 以上的潜在死亡事故提供分析依据，取得了较好的效果。

“风险驱动”和“风险源”是两个互相交互的概念，通常可以把危险源看成不断产生危险的土壤，但是风险驱动则是引起事故的一个事件或者条件，当这个事件发生或者条件满足，则事故必然发生。

建筑信息模型技术能够在安全风险发生之前对风险进行检测和干预。利用基于建筑信息模型技术的工具对照安全规范检测信息模型，可以降低大部分的安全事故风险。

张世杰等^[4] 开发了一个基于规则的系统，该系统可以在特定的里程碑自动检查常规建筑物的 3D 模型，以检查是否按照职业安全与健康管理局（OSHA）的要求采取了防坠落措施。正如作者指出的那样，开发此类系统时的主要问题是规则的手动解释，这些规则必须翻译为机器语言。

1.2.2 道路安全设计 n

对于道路安全和设计，赵亮^[5] 对公路弯道路段行车危险区域及驾驶行为模型进行了研究。利用建筑信息模型技术（BIM）对施工现场道路进行三维建模并参数化，会得到比较直观的效果。

秦涛^[6] 建立道路信息模型（RIM），实现道路宏微观相结合的道路可视化表达，重点论述了道路信息模型参数化构建技术，实现了道路信息模型快速构建。

黄骞等^[7] 利用倾斜摄影技术进行公路设计，探讨倾斜摄影三维建模技术应用于公路勘察设计的技术框架、应用方法。倾斜摄影基于无人机等航空载具拍摄的多视角影像自动化生成地形数字模型，具有低成本、高灵活特点，应用于“预可-采集建模-工可-两阶段设计”公路勘察设计全工作流程。结合视觉三维重建、虚拟现实仿真展示和其他辅助技术等关键技术，可在选线、平纵横设计、多方案比选和综合评价展示中提高自动化率、准确度与评估核算精度。

1.2.3 驾驶员安全行为研

当前普遍利用眼动仪来研究安全行为^[8]，李文删总结了当前眼动追踪技术对于不同的实验范式和实验场景、眼动仪的选择、眼动应用实验的研究范式，并选取业内最具代表性的 SR 公司的 EyeLink 系列和 Tobii 公司的 Tobii 系列眼动仪最新款产品。孙楚怡^[9] 提出了眼动仪数据可视化方法，为本研究提供了参考。张昀利用 matlab 建模方法对眼动数据进行分析^[10]。

张辉等^[4] 为了探寻驾驶人分心判别方法，构建了驾驶人分心状态判别模型。首先设计分心

模拟驾驶试验,采集正常驾驶和发送语音信息过程中的驾驶绩效特征和驾驶人眼动特征数据,建立驾驶人分心状态判别指标备选集;其次,采用基因选择算法对备选指标进行筛选,得到29个备选指标的重要度排序;然后,依次选取重要度较高的部分指标作为BP神经网络的输入指标,利用遗传算法(GA)全局搜索的性能优化BP神经网络的初始权值和阈值,将优化后的GA-BP神经网络作为弱分类器,再将多个弱分类器组合成Adaboost强分类器,建立基于Adaboost-GA-BP组合算法的驾驶人分心状态判别模型。

驾驶员的注视持续时间、水平和垂直方向视觉搜索广度、扫视幅度和扫视速度均随着交通环境的改变而变化,复杂公路(纵坡以及平曲线复杂的施工道路)上驾驶员水平方向视觉搜索广度明显高于其它道路,山区公路上坡路段垂直方向视觉搜索广度最大。^[11]

1.2.3.1 道路弯道

1.2.3.2 道路标识系统

张殿业等^[12]对道路标线对驾驶行为模式的影响进行了研究,研究结果表明,车辆在有边缘线的道路上行驶比在仅有中心线或无标线的道路上行驶时更居中,尤其是在晚间行车时。边缘线能促使驾驶员准确、稳定驾驶,提高交通安全度。对驾驶员心率变异系数和稳定性测试表明,在有边缘线的道路上行驶不易疲劳。刘兵等^[13]为了揭示非对称边缘率标线对弯道驾驶人横向位置调整的影响机理,在高速公路弯道上开展路上试验,实验结果表明:驾驶人偏离感知速度大的一侧,驾驶人通过降低车速来减小内外侧感知速度差异,内外侧感知速度差异越大,减速幅度越大,越偏向曲线内侧,两侧感知速度差异增大能提高驾驶人弯道车速危险性感知,使驾驶人降低车速进而影响车辆横向位置,边缘率标线通过增大驾驶人感知速度间接影响车辆横向位置,各路径影响效果合成后,驾驶人整体上偏离速度感知大的一侧。

1.2.3.3 道路纵坡

徐进等^[14]对山区公路纵坡段驾驶人脚操纵特征及驾驶负荷进行了研究,证明了下坡路段由制动踏板操作产生的体力负荷更高,纵波的加速踏板和制动踏板的作用力反应了驾驶员的心理不同压力负荷。踏板力仍是能够较好表征驾驶人精神负担的指标参数,曲线比例大、纵面高差和坡度值频繁变化。

1.2.4 驾驶员工作空间研究

徐立友等^[15]针对中国拖拉机驾驶员工作空间设计在操纵性、舒适性、方便性和安全性等方面存在的不足,从人机工程学角度出发,基于中国成年男性人体测量尺寸,计算出设计所需的28项人体主要尺寸的平均值、标准差和百分位数值,建立了拖拉机驾驶员人体关节生物力学模型,确定了模型中连接与人体测量尺寸的数值关系。以乘坐基准点为参考,对驾驶员工作空间内的座椅、踏板、方向盘、变速杆、液压操纵杆和仪表盘等进行了设计布置。徐进等^[16]对自然驾驶试

验的山区公路汽车行驶时，驾驶员脚的工作负荷进行了研究。

1.2.5 虚拟驾驶技术应用

Vahdatikhaki^[17] 提供了一种利用可视化方法建立模型研究的思路。

1.3 研究方法和主要研究内容

1.3.1 研究方法

1.3.1.1 BIM 技术施工道路场景再建

通过无人机倾斜摄影建模技术，还原真实道路场景，并将道路模型导入到模拟驾驶台，通过组织大量的实验室实验研究驾驶员对道路的适应情况。

1.3.1.2 人体工效学研究

通过对驾驶室座位的研究，确定安全性。

1.3.1.3 眼动追踪技术

眼动追踪技术是研究人的心理和行为的方式之一，眼动追踪技术在研究驾驶员的行为适应施工道路条件问题上比较灵活方便。通常情况下我们需要研究眼动的几个主要技术指标：

1. 注视点（Fixation）和采样点 也称为注视固定，这一名词代表的是注视点的集合。注视点是基于指定的聚合区域和时间跨度而产生的。聚合区域通常约为 20 到 50 像素，时间跨度介于 200 到 300 毫秒之间。用于注视的常见指标是注视计数（即注视次数），注视持续时间（以毫秒为单位），注视位置（以像素的 x 和 y 坐标表示），注视密度和重复注视等。

当我们使用眼动追踪时，注视点（Fixation）是感兴趣的基本输出量度，通常是最常用的术语之一。注视点能够显示眼睛正在看什么目标。如果您的眼动仪以 1000 Hz 的采样率收集数据，在最终的数据中将获得每秒 1000 个单独的采样点，也可以称为凝视点。如果一系列采样点非常接近 - 在时间和 / 或空间中，该凝视簇构成固定的注视点，表示眼睛正锁定在该目标上。

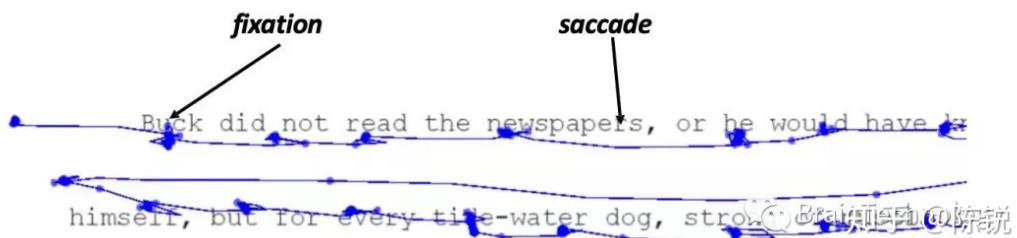


图 1.3 注视点示意图

Fig. 1.3 fixation

2. 眼跳 (Saccade)

也称为扫视，它描述了从一种注视到另一种注视的快速眼动。它们通常持续约 30 到 80 毫秒，是人体可以执行的最快运动。在这段时间内，视觉信息被抑制。典型的量度是振幅，以毫秒为单位的扫视持续时间，以及在每秒度扫视速度。

两个注视点之间的眼睛运动通常被称为眼跳。如上图，当我们再阅读句子或者文章时，我们的眼睛并不能顺利地进行下去，而是将眼睛锁定在每 7-9 个英文字母上（当然也取决于字体类型和大小，中文 1-2 个汉字）。这是因为人眼的中央“视觉范围”决定的，“视觉范围”是指我们可以在当前固定的单词之前和之后阅读多少单词，更专业的术语解释是由于中央凹、副中央凹和眼球周围神经所决定的。



图 1.4 眼跳示意图

Fig. 1.4 saccade

眼跳的解读反应着眼球运动的轨迹如何变化，注视的位置是否发生改变，这是在眼动追踪中空间上的指标体现。

3. 热图

热图是可视化，显示注视点的总体分布情况。它们通常在所呈现的图像或刺激上显示为颜色梯度叠加。红色，黄色和绿色按降序表示指向图像部分的注视点的时间长度，颜色越红表示眼球注视该目标的时间越长。使用热图是一种比较直接的指标，可以快速可视化哪些元素比其他元素更受关注。可以在单个受访者和参与者组之间比较热图，这有助于了解不同人群如何以不同的方式查看目标刺激的。

4. 感兴趣区 (Interest Area 简写 IA)

感兴趣区是选择一个显示的刺激目标区域，并且专门在该区域提取的一些眼动指标来进行

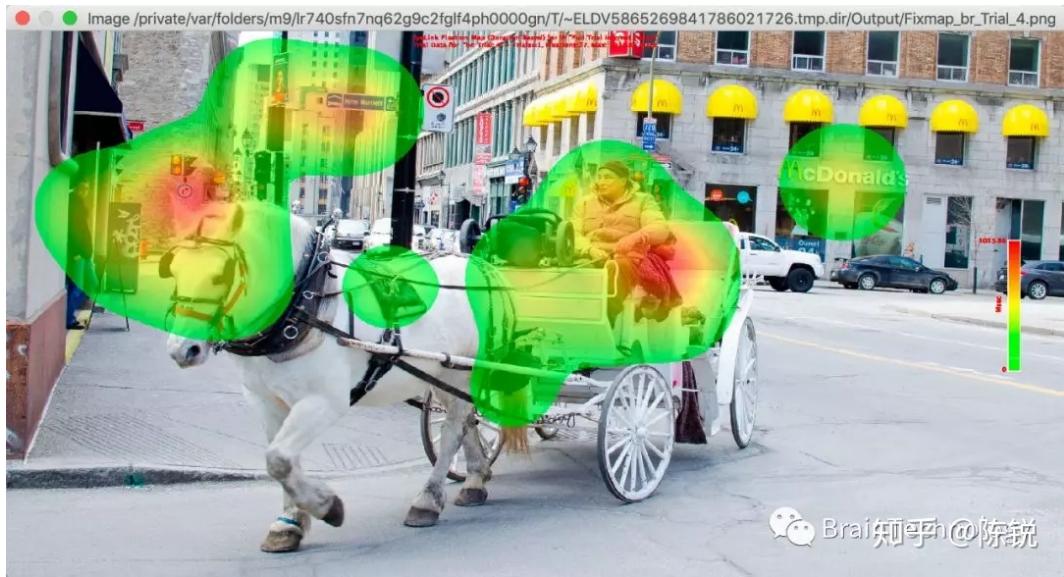


图 1.5 热图

Fig. 1.5 Heatmap

统计学分析。虽然这不是严格意义上的度量标准，但它定义了计算眼动指标度量标准的区域。有时候也称为兴趣领域（AOI），它是指在实验中，通常用户可能会有不同行为模式的区域，将呈现给参与者的刺激内容分区。在三维空间的刺激中，兴趣区域也可以是感兴趣的模型或对象。对于动态刺激，研究人员必须定义动态兴趣区域，但是兴趣区域可以在眼睛追踪实验之前或之后创建，可以根据研究需要调整。通常，兴趣区域是基于刺激内容的语义信息创建的。研究人员往往会关注，从一个兴趣区域到另一个兴趣区域的移动，我们称之为过渡。兴趣区域的典型指标是过渡计数，在兴趣区域内的停留时间（以毫秒为单位）以及兴趣区域的命中值，该值定义了注视点是否在兴趣区域内。

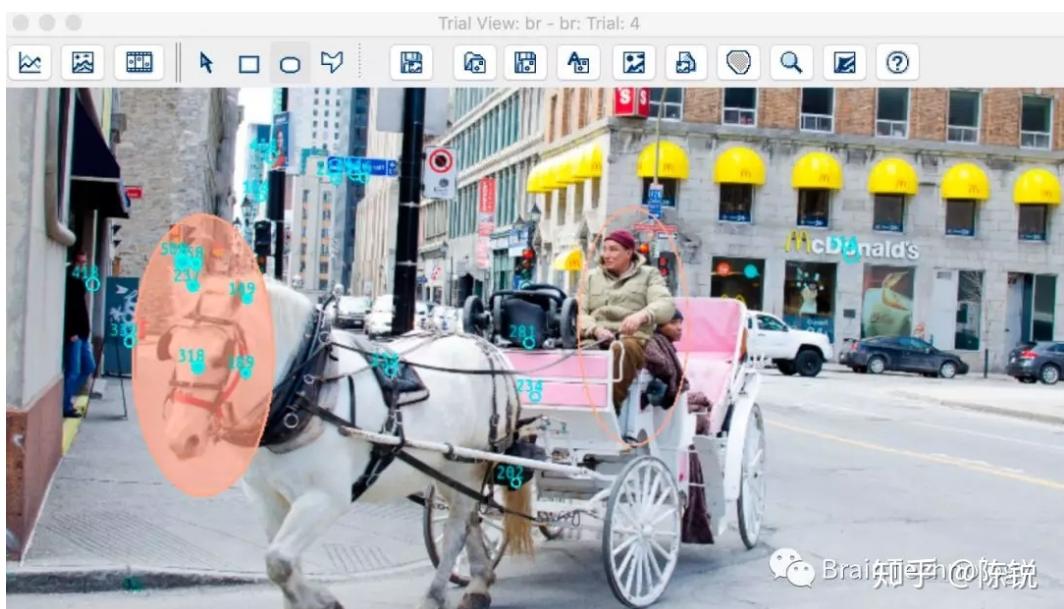


图 1.6 感兴趣区

Fig. 1.6 interest area

如上图，如果我们想要查看眼睛注视马头和人坐位置区域的信息，则可以在上图中在马头和人坐位置上绘制单独的 IA 区域。然后，我们就能够分别显示每个区域的指标，例如从刺激开始到参与者查看该区域的时间，参与者在该区域花费了多少时间，有多少人将视线移开然后回来。在评估同一视频，图片，网站或程序界面中两个或多个区域的性能时，这些指标都会非常有用。

5. 首次注视时间（First Fixation time）

首次注视时间是落在兴趣区（IA）上的第一个注视点的持续时间。首次注视时间是眼动指标中，时间上重要的参考指标之一，尤其在阅读研究中显得更为重要，它反应着眼球注视阅读时的词汇通达的早期特征。在其它视觉场景（广告、工业设计等）上，它也被用来提供关于视觉场景的某些方面如何被优先化的信息提取。

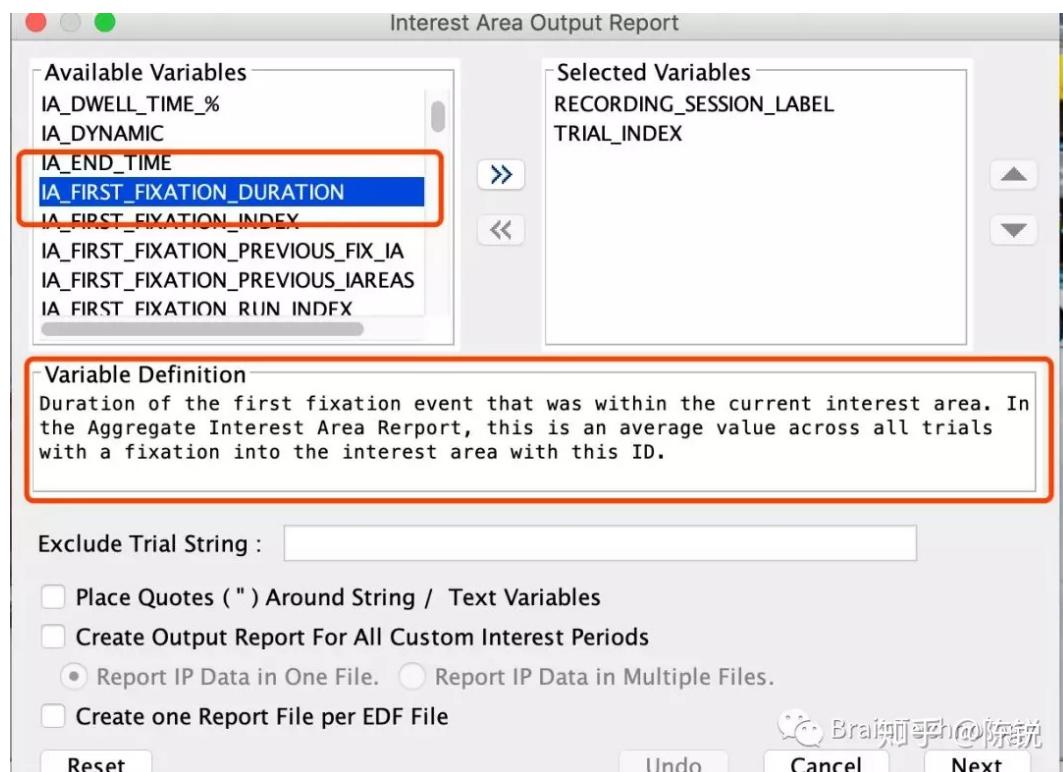


图 1.7 首次注视时间

Fig. 1.7 First Fixation Time

6. 比率（rate）

当我们在做视觉场景刺激时，由于视觉的加工难度，参与者会通过眼跳（saccade）来进行扫视。在视觉场景中的比率是指参与者注视在目标兴趣区内的注视信息与其余非目标区域的比重，在广告、网页设计上常用来量化人眼对事物的集中表现加工。它可以揭示视觉场景上的哪些部分对不同参与者更具吸引力。

在阅读中的比率其实可以指代为跳读率（Skipping rate）：是指目标兴趣区会有多少的概率被跳读，在已有的研究中，研究者发现词长和单词在句中的高低预测性对跳视率有重要的

影响。跳视率在阅读研究中，可以揭示眼球注视加工词语的熟悉程度，熟悉性的高低。

7. 回视次数 (regression count)

回视次数反映了参与者对之前信息的再加工过程，它提供了有关参与者将注视返回到由所定义的兴趣区的特定目标上的次数信息，这将允许研究人员检查哪些区域反复吸引着参与者（无论好坏），哪些区域被看到，然后被移动。虽然眼动追踪无法告诉研究人员参与者在看某事时的心理感受，但它可以为研究提供有关详细的信息加工数据，进而可以进一步分析数据。

8. 平均注视时间或总注视时间

在平均注视时间中，它显示了参与者在某目标上平均注视持续了多久，它可以为个人或团体确定一个衡量标准，在任何一种情况下，这都可以作为基线测量有用，但也可以通过刺激目标来观察。如果某张图导致的平均注视持续时间远远高于另一幅图，则可能值得探究其原因。此外，通过对兴趣区的比较，也可以确定哪些区域实际上比其它区域更重要。如果您正在尝试传达消息，那么相对于其它区域，您最有可能希望平均注视持续时间在具有该消息的区域内更高。

总注视时间是不区分首次注视时间和第二次甚至多次加工时间，它更多的指在兴趣区内或者是单个目标上的所有注视时间的总和，它反映的是总体时间上的加工信息。也就是总注视时间的长短也反映着认知加工过程的快慢。

通过研究眼动数据的这几个指标，获得自卸车驾驶员对道路适应性的分析，从而改进道路的设计。

1.3.1.4 GPS 位置信息采集

通过 GPS 专用数据采集软件采集到数据项目，包括样本点采集时间、海拔高度、经纬度、速度和行驶距离等。通过对 GPS 数据的处理，可以实现对车辆运行速度的分析，确定任意时刻或地点施工车辆运行速度和加速度、运行线路等。

1.3.2 主要研究内容

- 1.3.2.1 施工场地 BIM 建模
- 1.3.2.2 驾驶室空间 BIM 建模
- 1.3.2.3 自卸车驾驶员安全行为研究
- 1.3.2.4 施工场地道路设计
- 1.3.2.5 自卸车驾驶员施工安全预测模型

1.4 论文的组织

本研究围绕着施工现场自卸车运行环境、自卸车驾驶员、自卸车的运行效率为主要研究对象，运用眼动数据采集设备分析驾驶员在实际活着模拟驾驶环境下的心理状态，以期改善驾驶环境和道路环境，利用建筑信息模型（BIM）技术模拟自卸车的真实运行场景，并调整运行环境的各种变量（包括平曲线半径、纵坡率、速度、光照等）。

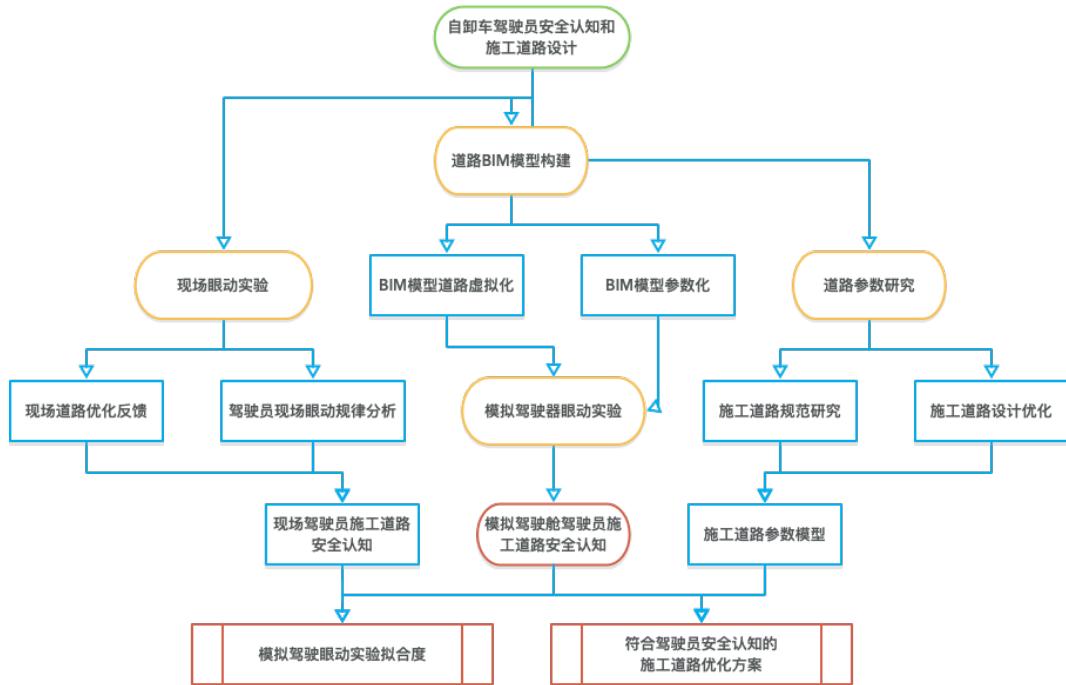


图 1.8 技术路线

Fig. 1.8 Research Route

1.4.1 本研究主要仪器设备

1.4.1.1 眼动数据采集系统

眼动数据采集系统包括 Tobii Pro 眼动追踪硬件和软件，其中 Tobii Pro Glasses 2 眼动仪是带有无线实时观察功能的可穿戴式眼动仪，能够提供真实视域。Tobii Pro Lab 软件功能覆盖整个研

究过程的软件-从眼动追踪实验设计和数据采集到结果的诠释和呈现。因此，融合眼动追踪、模拟驾驶设备和行为采集技术，可以创建道路驾驶情景可穿戴操作的虚拟实验仿真平台。为基于BIM场景虚拟驾驶行为的施工道路反演规划设计提供研究支撑。



图 1.9 Tobii Pro 眼动追踪系统

Fig. 1.9 tobiipro

1.4.1.2 地形数据采集系统

1.4.1.3 模拟驾驶系统

本研究的模拟驾驶系统来自于安全功效研究实验室的自卸车模拟驾驶系统。

1.4.2 论文的主要结构

1.4.2.1 第一章绪论

1.4.2.2 第二章施工道路参数化模型

1.4.2.3 第三章施工路段驾驶员行为数据采集与分析

1.4.2.4 第四章施工驾驶员行车风险机理及特征

1.4.2.5 第五章施工道路设计优化

1.4.3 眼动技术在施工安全中的应用

第2章 施工道路参数化模型

倾斜摄影技术是近几年出现的新型航空遥感技术，该技术以无人机低空拍摄照片方式获取调查区域高分辨率全要素地理信息，可快速、高效地获取目标物侧面及顶面信息，结合实时定位技术和三维重建技术生成真实三维模型。

2.1 倾斜摄影

实验中选择大疆无人机，设定倾斜摄影范围，拍摄施工现场，并建模。作业之前，需要选定实验所需场地的空间信息，本文研究选取的是某工地的施工，如图2.1所示。



图 2.1 施工场地选择

Fig. 2.1 site map

2.2 三维地形建模

2.3 道路信息的提取

2.4 模型参数化

施工场景构建以后，需要对场景进行参数化的操纵。

第3章 施工路段驾驶员行为数据采集与分析

人是构成交通系统诸因素中最不稳定的因素，也是造成交通事故的主要原因。在交通心理学中，汽车驾驶员心理学是其中的一项重要内容。有人对汽车驾驶员的特点进行了概括：第一，输入、输出的信息多；第二，信息变化大；第三，连续处理信息的时间长；第四，即时性的信息筛选，驾驶员必须对行车中的各种信息进行及时的筛选，选择重要的信息进行反应；第五，高速度的信息处理；第六，高速运动使驾驶员的视觉特征产生了变化，视野收缩，视力下降。上面所论及的几个方面，都与驾驶员的视觉有密切关系。还有人提出了不同工龄驾驶员存在不同程度的不良注视模式。这些不良注视模式的提出是基于调查和总结，如果能够通过眼动仪对这些问题做进一步的研究，使注视模式以量化的形式表示出来，这对驾驶员的培训具有重要的参考意义。遗憾的是，由于种种原因，国内对驾驶员的眼动研究几乎是一个空白。事实上，通过眼动仪分析驾驶员在驾驶汽车时的眼动情况，可以了解驾驶员对视觉信息进行加工时的心理特征。国外在20世纪60年代就已经开始通过眼动分析方法对驾驶员进行眼动研究，随着眼动记录和分析技术的飞速发展，特别是80年代以后，这个领域的研究在国外已经成为一个热点。

现场施工道路条件复杂，风险因素多，驾驶员心理负荷比较大，施工道路和驾驶员的驾驶作业互相影响，互为因果，为了确实弄清驾驶员适应施工道路的机理，改善道路设计，防范驾驶风险，提高作业效率。本章将从保障数据真实有效情况下，设计现场试验和模拟试验环境，并进行试验，阐述数据获取的途径和数据分析的理论和应用基础，建立眼动分析特征模型，为定性和定量分析驾驶员的心理特征、驾驶员的行为特征和规律奠定基础。

3.1 实验目标

通过在施工现场和室内模拟驾驶器上进行实验，详细记录驾驶人在行车过程中的视觉变化数据、生理心理特征参数、施工道路几何线性参数等，定性和定量分析相关参数在陡坡、平曲线半径过小、视距不良路段、路面情况较差和路面较窄路段的变化规律，获得在施工现场道路上驾驶人对信息认知和加工的相关规律，为施工道路的设计、施工自卸车驾驶员安全运营进行深一层次的基础理论探索。

3.2 实验设计与实验方案

施工道路在路面、平曲面半径、纵坡规模都不同于普通交通道路，施工道路多为低速、临时性道路，现场试验在施工期间存在安全隐患，所以本研究采用现场试验和模拟驾驶器内模拟试验相结合的方式进行，不同的方案在被试人员选择，试验实施过程过程有差别，对于两种不同的试验方案可以得到相似的研究结果。

3.2.1 试验方案

为了研究的方便并在不影响试验效果的情况下,本研究的试验分为在施工现场的实车试验和在室内的模拟驾驶器上,利用三维地形建模软件实现的虚拟施工场景进行的试验两个不同阶段的试验,试验方案如3.1所示.

3.2.1.1 现场试验方案

在施工现场,组织被试人员谈话,讲解试验的要求和注意事项,被试人校准眼动仪数据采集器,根据被试人员的脸型,调整眼动仪眼镜的笔架到最佳位置,佩戴好眼动仪后,被试人员和试验控制人员一同进入驾驶室开始试验,驾驶室内固定位置位置记录仪,记录自卸车行驶轨迹(包括轨迹和海拔高度等数据).

3.2.1.2 模拟试验方案

在模拟试验中,在高保真的重建施工现场的作业环境的情况下,还设计可变参数模型,以模拟现场的作业环境,并可根据试验的需要进行参数调整,以模拟出不同于真实场景的模拟测试环境进行试验,同时,模拟试验也可以减少对熟练驾驶员的依赖,降低试验人员的安全风险,在一个可以调节试验参数的场景下进行试验,对施工道路参数的设计有较好的适应性.

3.2.2 实验场地选择

3.2.2.1 现场试验场地

1. 场地选择依据 本实验选择一个实际的土石方运输工地(道路施工或者水利工程施工),如图3.9所示。

根据水电工程施工现场道路设计规范的要求,对道路设计的最大纵坡,平曲线半径以及停车视距都有明确的规定,但是对施工道路没有明确的说明,如3.2。

在土石方运输作业系统中,人、车、路、交通环境组成驾驶工效场景,其中人是核心要素。要使施工道路运行达到安全、畅通、舒适、经济、低公害的目的,必须以人为本,从系统的观点出发使人、车、路、交通环境等要素相互协调。《公路项目安全性评价规范》(JTGB05-2015)明确指出:“从公路使用者的角度,按一定的评价程序,采用定性和定量的方法,对公路交通安全进行全面、系统的分析和评价”;《水利水电工程场内施工道路技术规范》(DL/T5243-2010)仅规定了视距、转弯半径、加宽、超高等几何参数。可见,现行规范未考虑施工使用者的人因特性、未考虑驾驶人对驾驶环境的心理期望要求、未考虑驾驶人的视觉感知、操作反应等行为因素。

2. 试验场地现场 在现场,我们选取了黑虎山的水利工程施工现场,其现场如3.3,为了室内模拟试验更加拟合现场实际情况,我们把试验现场用无人机倾斜摄影技术建模,并进行了处理,形成三维模型,其结果如图3.4。

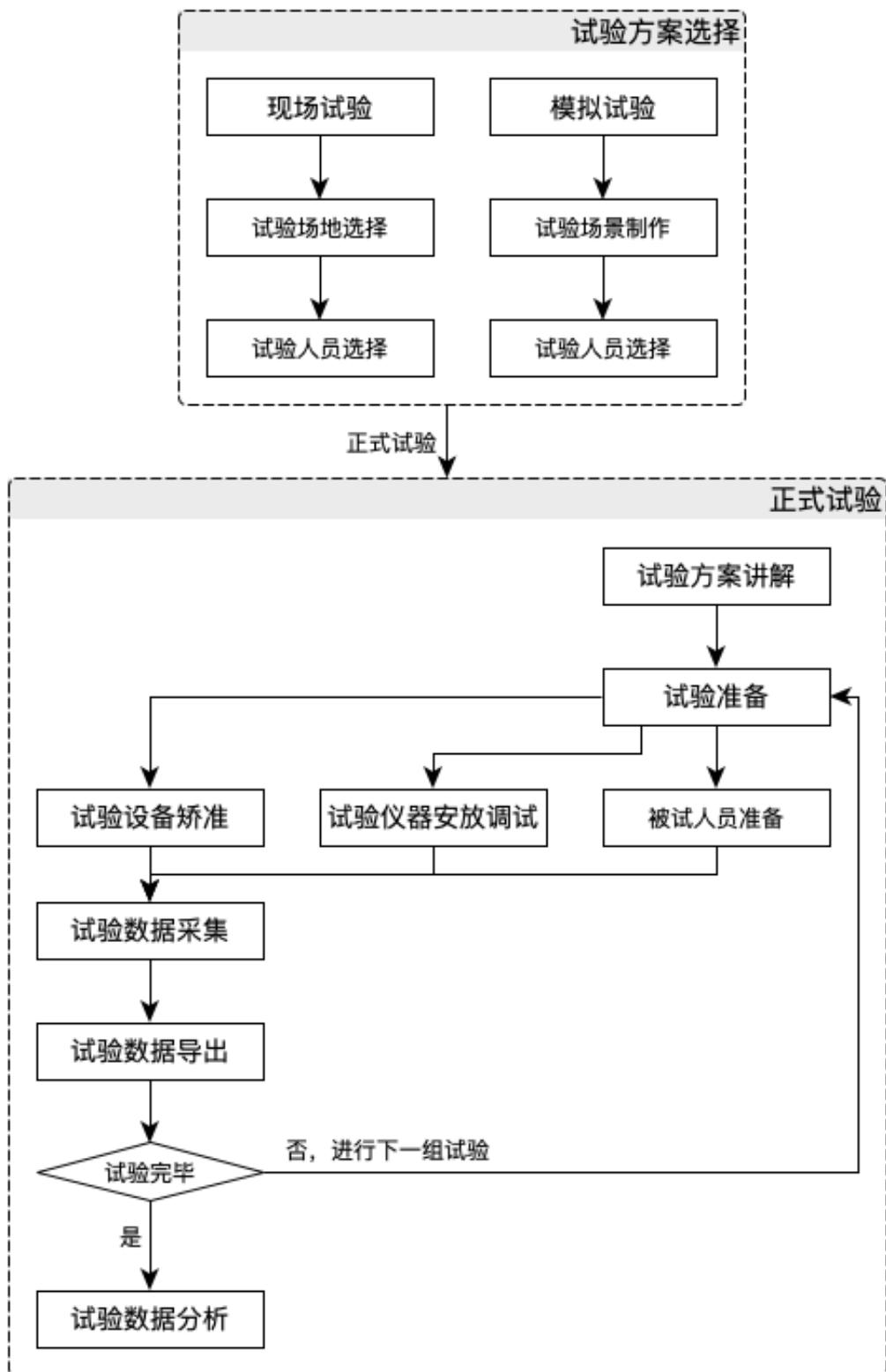


图 3.1 试验方案流程

Fig. 3.1 Test Process

表 A.1 主要道路主要技术指标

项 目	道 路 等 级			备 注
	一	二	三	
年运量 $1 \times 10^4 t$	>1200	250~1200	<250	
行车密度 辆/单向小时	>85	25~85	<25	
计算行车速度 km/h	40	30	20	
最大纵坡 %	8	9	9	在条件受限时可增加 1%， 三级道路个别路段可增加 2%；但在积雪严重及海拔 2000m 以上地区不宜增加
最小平曲线半径 m	45	25	15	
不设超高的最小平曲线半径 m	250	150	100	
视距 m	停车	40	30	20
	会车	80	60	40
竖曲线 最小半径 m	凸形	700	400	200
	凹形	700	400	200

图 3.2 现有施工道路设计规范参数

Fig. 3.2 Parameters of Construction site road base on standard

3.2.2.2 虚拟场景测试（驾驶模拟器测试）

1. 无人机倾斜摄影建模
2. 场地模型导入虚拟驾驶仪器方便测试
3. 场地模型参数调整

3.2.3 试验人员选择

根据施工道路作业人员的基本要求选定测试人员，根据《道路交通安全法》的相关规定，申请城市公交车、中型客车、大型货车、无轨电车或者有轨电车准驾车型的，应当在 21 周岁以上，50 周岁以下，申请大型客车、牵引车、城市公交车、大型货车、无轨电车准驾车型的，身高为 155 厘米以上；

试验人员我们分为现场试验和模拟仿真试验两组，考虑到施工现场的复杂性，以及试验的风险，施工现场选取了 10 名驾驶员进行了试验，模拟驾驶试验我们选取了 20 人进行了试验。

由于条件限制，现场试验人员均为男性，且为一线自卸车驾驶员，从文化程度来看，大专及以上 4 人，高中以及以下 6 人，其文化程度结构如?? 所示，年龄最小的有 22 岁的新手，也有 55 岁的老将，这些试验人员在测试期间身体状况，精神状况均良好，其人员基本信息如3.1所示，所有的测



图 3.3 施工现场实景

Fig. 3.3 construction site



图 3.4 无人机倾斜摄影建模模型

Fig. 3.4 Site Model

试均同施工作业现场沟通好,在不影响现场施工作业的情况下进行的试验,每个试验人员完成完整的一个施工作业循环(包括上料、行驶、卸料、返程),每个作业流程中在中途均有管理人员进行工作计量.

图 3.5 现场测试人员文化程度分布

Fig. 3.5 On-site tester background

表 3.1 现场试验人员信息

Tab. 3.1 On site testers

实验人员	年龄	性别	驾龄	文化程度
测试员 A	30	男	5	大专
测试员 B	45	男	15	初中
测试员 C	22	男	1	大专
测试员 D	28	男	5	大专
测试员 E	33	男	2	中专
测试员 F	40	男	13	初中
测试员 G	30	男	5	大专
测试员 H	55	男	30	初中
测试员 I	31	男	10	高中
测试员 J	28	男	8	中专

由于模拟试验在室内使用模拟驾驶舱进行试验,导入现场的地形模型,仿真现场试验,相对风险较小,对驾驶经验没有太多要求,但是现场试验人员都经过一天的培训和训练,让被试者熟悉试验环境,熟练操纵模拟器,所以模拟试验随机选取的研究人员、学校教师和在校学生,测试时期身体状态良好,精神饱满. 其中,男性 17 人,女性 3 人,从文化程度来看,研究生 4 人,本科生 6 人,专科生 6 人,高中及初中文化程度的 4 人,其文化程度结构如3.6, 模拟测试人员信息如3.2.

从文化结构来看,试验人员的选择具有一定的代表性.

3.2.4 被试车辆选择

本文的研究选择矿山自卸车,矿山自卸车属于非公路自卸车,是在非公路的野外场地,如大型露天矿、水利工程中,用于运输煤矿、沙石的自卸车。在土木工程中,经常与挖掘机、装载机、带式输送机等工程机械联合作业,构成装、运、卸生产线,进行土方、砂石、散料的装卸运输工作。由于矿山自卸车的巨大尺寸与全重,其驾驶员的视野非常受限。因此在其作业区域内的其他传统汽车(如皮卡、SUV、普通卡车)必须随车树立一根 5-6 米高的旗杆,上面挂上红旗,用以提示矿山自卸车的驾驶员注意避让。

表 3.2 模拟试验人员信息

Tab. 3.2 hometester

实验人员	年龄	性别	文化程度
测试员 1	30	男	本科
测试员 2	22	男	大专
测试员 3	20	女	本科
测试员 4	28	女	研究生
测试员 5	33	男	大专
测试员 6	45	男	高中
测试员 7	19	男	大专
测试员 8	55	男	大专
测试员 9	19	男	本科
测试员 10	28	男	中专
测试员 11	26	女	研究生
测试员 12	30	男	大专
测试员 13	22	男	本科
测试员 14	20	男	本科
测试员 15	28	男	研究生
测试员 16	33	男	本科
测试员 17	33	男	初中
测试员 18	30	男	大专
测试员 19	45	男	初中
测试员 20	31	男	研究生

3.2.5 试验参数的选择

相关研究表明, 眼动参数可以体现驾驶员的心理负荷, 从而影响驾驶安全, 由于一般情况施工道路路况较差, 道路交通环境复杂, 驾驶员需要应付诸如安全驾驶、作业效率等方面的心理压力, 而这些心理压力会通过眼动的一些特征来表现出来, 在本研究中, 我们选择如下两类参数来进行研究:

3.2.5.1 道路参数

1. 平曲线半径
2. 纵坡率
3. 道路宽度
4. 道路状况 对于施工道路状况, 我们设计出三个道路状况等级, 一级道路状况、二级道路状况和三级道路状况.

一级道路状况 等级最好的道路, 路面平整的水泥路或者平整度非常高的土石路.

二级道路状况 一般的施工现场道路, 路面平整度一般, 有直径不大于 100mm 的石头或者直

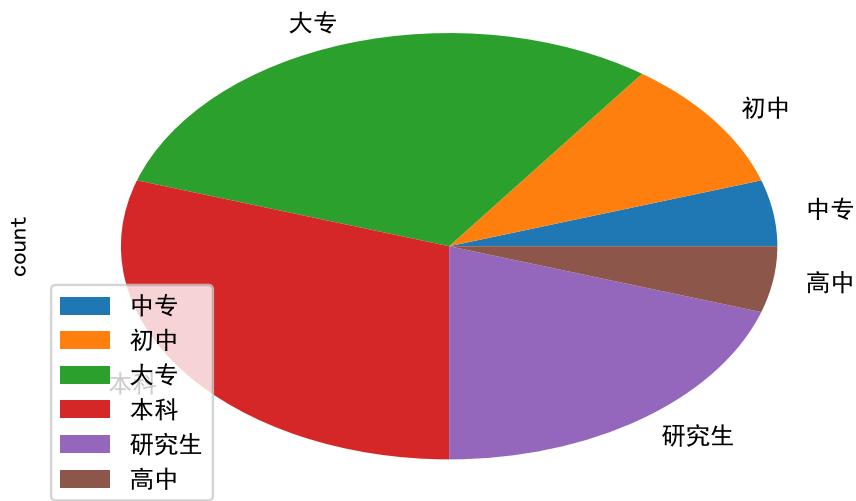


图 3.6 室内模拟试验人员文化程度结构

Fig. 3.6 Indoor Tester Background

径不大于 100mm 的坑。

三级道路状况 较差的施工现场道路,路面坑洼不平,通行难度较大.¹

3.2.5.2 眼动参数

1. 关注特性

(a) 兴趣区域 (AOI) 兴趣区域 (Area of Interest) 表明被试者在试验过程中关注视野的区域,关注区域主要有关注次数决定. 通过数据分析,找出被试者对某个区域关注的程度,也就是总共关注此区域的次数.

在现场试验中, 我们选择后视镜作为左转弯和右转弯时候的兴趣区域 (如3.8所示), 选择视野平面的远视野平面、中距视野平面和近距离视野平面作为上坡和下坡路况时候的兴趣区域 (如3.12所示)。



图 3.7 距离视野平面设置

Fig. 3.7 Eye Sight settings



图 3.8 后视镜兴趣区域设置

Fig. 3.8 Back Mirror AOI settings

- (b) 兴趣片段 (TOI) 兴趣片段指在眼动试验中，被试者具有特征的时间片段，兴趣片段一般通过眼动事件来分割形成。兴趣片段有助于将研究特征集中在类似场景中，从而消除移动不同被试者试验中的差异性。
2. 扫视特性 在研究中，我们规定注视事件少于 100ms 的注视行为为扫视，扫视特性可以评价被试者观察的效率，通常情况下，我们用扫视速度和扫视幅度来衡量
 - (a) 扫视速度 扫视速度是指驾驶人眼睛在单位时间内所扫视过的距离。扫视速度越大，表明驾驶人的视觉搜索效率越高。因此，扫视速度可以有效地衡量驾驶人在单位时间内获取道路信息的能力。
 - (b) 扫视幅度 扫视幅度是衡量驾驶人注意深度的指标，具体指驾驶人从上一次注视结束到下一次注视开始眼睛扫视过的范围。当道路环境良好时，驾驶人通常经过一次注视就能获得所需的道路信息，转移到下一次注视时就可以经过较大的距离。但当道路条件复杂时，驾驶人经过一次注视仅能获得有限的道路信息，因此紧随其后的扫视幅度就会较小。
 3. 瞳孔直径变化率 瞳孔的变化反应了被试人员对信息处理的状况，一般情况下，瞳孔的变化快慢又表明了被试人员作业时候的“努力程度”，现有研究表明，在同等的光照情况下，瞳孔直径的变大表明被试者对所见事物表示出明显的兴趣。瞳孔直径变化率计算方式如公式3-1所示：

$$\overline{D} = \frac{D_{interest}}{D_{station}} \quad (3-1)$$

其中， D 表示瞳孔的直径， \overline{D} 表示瞳孔直径的变化率， $D_{interest}$ 表示关注时刻的瞳孔直径， $D_{station}$ 表示非关注时刻的瞳孔直径。

3.2.6 眼动实验数据采集

在试验现场，被试者佩戴好眼动仪，驾驶自卸车正常运行，采集数据，试验现场如图3.9 所示。

眼动数据研究主要是研究被研究者的注意力行为，眼动信号分析的目标就是对典型的眼动

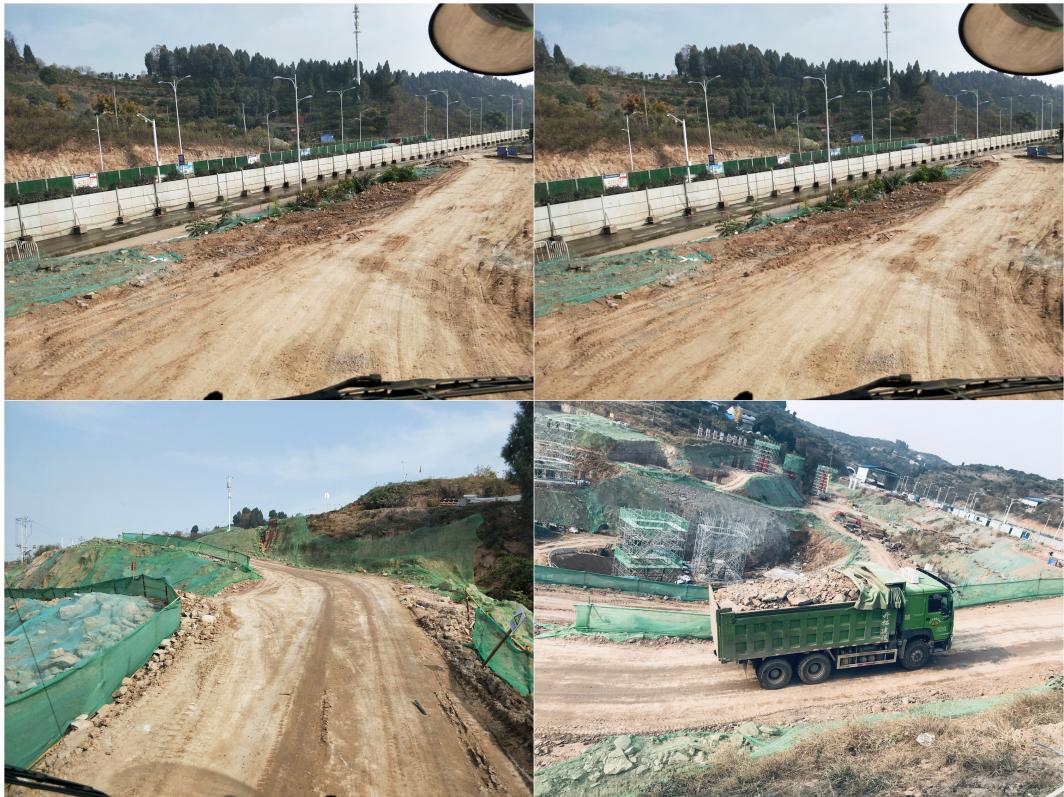


图 3.9 现场实况

Fig. 3.9 Site Condition

过程进行特征化，比如眼跳、注视等特征。

3.3 驾驶员心理状态分析

不同道路类型、不同交通复杂程度给驾驶员造成的心智努力和工作负荷不同，工作负荷高会导致驾驶员的紧张程度增加，驾驶员易于疲劳，过高的工作负荷还与高事故率相关联。本文讨论试验采集的驾驶员生理指标中哪些反映了驾驶员的工作负荷，分析道路类型如交叉口和路段，平面交叉口与立体交叉口等对驾驶员工作负荷的影响，以及在相同道路环境下熟练程度对驾驶员工作负荷的影响，最后讨论反映驾驶员工作负荷的眼动行为和眼动参数。

3.3.1 视野平面划分

通常情况下我们需要将眼睛注视区域分为 9 个区域，如图3.11所示。

根据现场试验的情况，在本研究中我们重新界定了视野平面，如3.12所示。

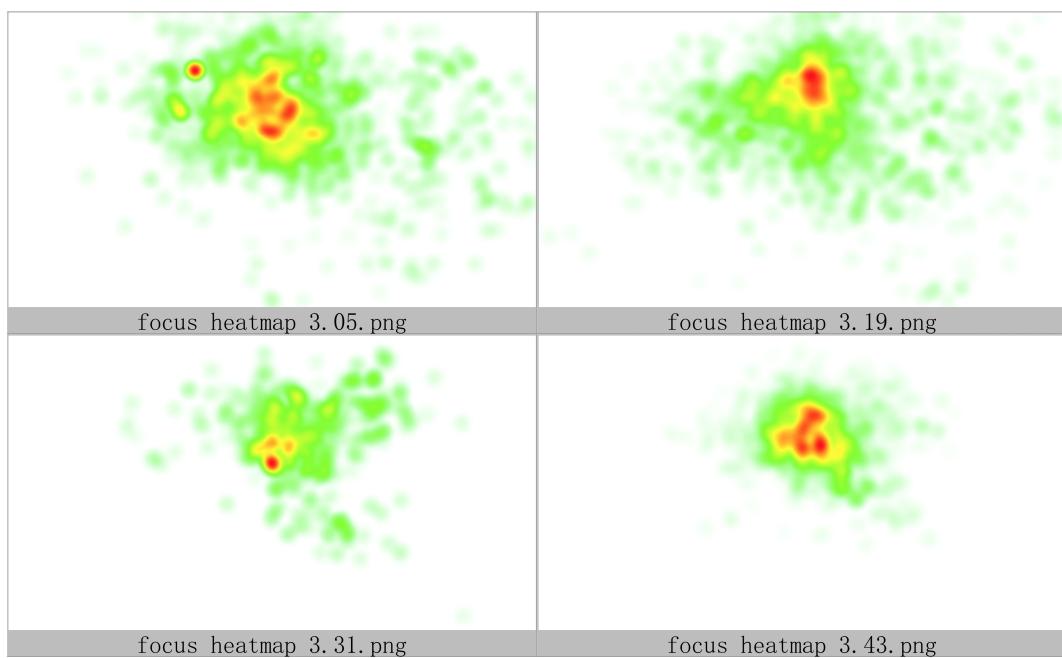


图 3.10 不同测试者对同一道路驾驶的关注平面比较

Fig. 3.10 Focus Area between participates

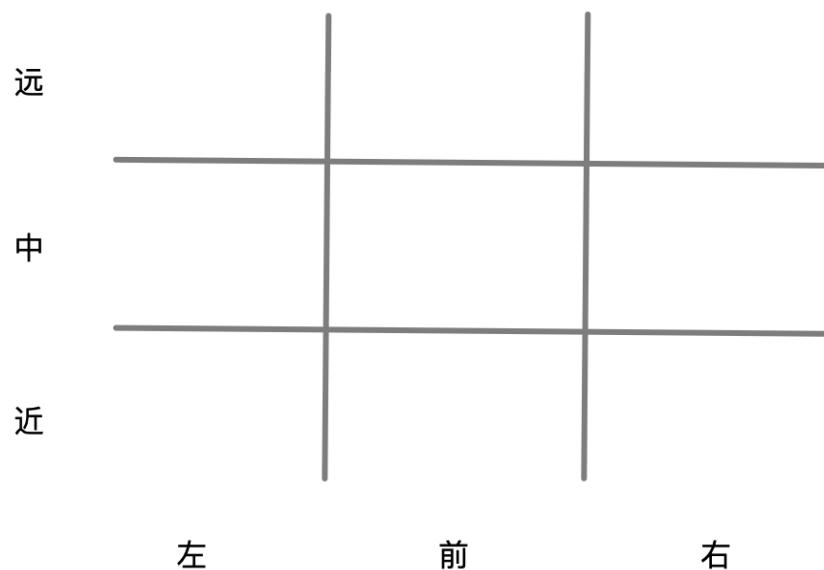


图 3.11 注视区域分布图

Fig. 3.11 Focus Area



图 3.12 驾驶员实际视野平面划分

Fig. 3.12 Eye-sight Area design

3.3.2 预瞄时间和驾驶负荷

3.4 不同纵坡状态下驾驶员行动轨迹分析

3.5 不同平曲线半径驾驶员行为分析

3.6 基于行驶速度驾驶员的行为分析

3.7 基于道路状况的驾驶员行为分析

第4章 施工道路驾驶员视觉特征规律

在施工现场,根据道路的不同状况,我们可以将施工场地驾驶员驾驶工况分为如下几种情况,每种工况的场景如下:



图 4.1 施工工况图

Fig. 4.1 Construction Drive conditions

在实验过程中,如果道路条件有限,部分路段无法同时通行两辆车的情况下,所有的驾驶员都遵循普遍的礼让原则:也就是空载车辆给重载车辆让行,这也是现场试验中的假设条件。

4.0.1 对面来车 (O)

4.0.2 上坡路段 (U)

4.0.3 下坡路段 (P)

4.0.4 左转 (L)

在研究过程中发现,驾驶员在左转弯的时候,关注区域在左侧后视镜.

表4.1 参与实验的驾驶员基本情况

Duration of interval	Participant	驾龄	年龄	性别
Recording036	陈进	1-5	30-40	男
Recording037	李会琴	1-5	30-40	女
Recording038	杨亮	1-5	20-30	男
Recording039	韦娜娜	<1	20-30	女
Recording040	黄万华	1-5	20-30	男

4.0.5 右转(l)

4.1 注视点关注分析

4.1.1 瞳孔变化率

4.1.2 注视点眼跳

4.1.3 累计注视时间

在驾驶中, 驾驶员的累计注视时间也存在一定的规律, 我们分析 20 个被试者在同一路段进行眼动试验研究.

4.1.4 关注点分析

4.1.5 数据分析

4.2 典型环境下停车视距

4.2.1 正常驾驶视距

4.2.2 停车视距

4.2.3 转弯视距

4.2.4 超车视距

4.2.5 会车视距

第5章 驾驶员行车风险机理以及特征

5.1 施工场地自卸车驾驶员眼动特性研究

5.1.1 纵坡加速度特性的风险分析

5.1.2 弯道特性的驾驶风险分析

5.1.3 标示标牌反应的驾驶风险分析

*

5.2 眼动数据分析

5.2.1 注视固定研究

5.2.2 眼跳检测

5.2.3 三维眼动分析

5.3 视觉认知与心理负荷研究

5.3.1 危险行为的识别

5.3.2 风险的量化

5.3.3 驾驶员安全风险认知

第6章 施工道路几何线形反演分析以及优化设计

6.1 施工道路主要技术参数优化

6.1.1 视距不良

停车视距 (stopping sight distance) 指的是同一车道上，车辆行驶时遇到前方障碍物而必须采取制动停车时所需要最短行车距离。停车视距可分解为反应距离、制动距离和安全距离等三部分来研究。简单的说，停车视距就是驾驶员在发现障碍物前停住所需要的最短距离。

6.1.2 平曲线半径

平曲线半径即圆曲线半径，当道路由一段直线转到另一段直线上去时，其转角的连接部分均采用圆弧形曲线，这种圆弧的半径称为平曲线半径。

平曲线由圆曲线和缓和曲线组成，部分道路没有缓和曲线。

6.1.3 纵坡

纵坡指的是路线纵断面上同一坡段两点间的高差与其水平距离之比，以百分率表示。顺着施工道路前进方向的上下坡，叫施工道路纵坡。它与自卸汽车的动力特性、安全特性有很大关系。施工道路纵坡包含最大纵坡、最小纵坡、最大（或陡坡）的缓坡，以及相应坡长。

6.1.4 平整度

施工道路的平整度也影响自卸车的运行安全和效率。

6.2 施工道路设施布置与优化

6.2.1 安全标识

6.2.2 灯光以及辅助设施

6.3 施工道路速度设计

6.3.1 行驶速度的变化特性

6.3.2 行驶速度的离散程度

第 7 章 结论和展望

施工道路设计参数和方案

[18]

参考文献

- [1] 水电水利工程场内施工道路技术规范[Z]. [出版地不详: 出版者不详], 2010.
- [2] SOLIHIN W, EASTMAN C. Classification of rules for automated BIM rule checking development[J/OL]. Automation in Construction, 2015, 53:69-82. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.003.
- [3] MALEKITABAR H, ARDESHIR A, SEBT M H, et al. Construction safety risk drivers: A BIM approach[J/OL]. Safety Science, 2016, 82:445-455. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.11.002.
- [4] 张辉, 钱大琳, 邵春福, 等. 模拟驾驶环境下驾驶人分心状态判别[J]. 中国公路学报, 2018, 31(04):43-51.
- [5] 赵亮. 农村公路复杂条件下驾驶人典型生理心理指标变化规律及驾驶行为研究[D]. [出版地不详]: 长安大学, 2018.
- [6] 秦涛, 龚晓晖, 于洪武, 等. 基于 BIM 的道路信息模型参数化构建技术研究[J]. 中外公路, 2017, 37(01): 302-304.
- [7] 黄骞, 代成, 张金海, 等. 倾斜摄影技术在公路勘察设计中的应用初探[J]. 公路, 2018, 63(03):170-174.
- [8] 李文清, 张珊珊, 徐琨鹏. 眼动仪在认知行为实验中的应用及选择[J]. 软件导刊:1-4.
- [9] 楚怡孙. 眼动追踪数据的可视化方法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(22):150-151.
- [10] 张昀, 牟轩沁. 视线跟踪技术及基于 Matlab 的眼动人因实验开发和建模方法[J]. 工业工程与管理, 2014, 19 (02):89-95+106.
- [11] 郭应时. 交通环境及驾驶经验对驾驶员眼动和工作负荷影响的研究[D]. [出版地不详]: 长安大学, 2009.
- [12] 张殿业, 张开冉, 金键. 道路标线对驾驶行为模式的影响[J]. 中国公路学报, 2001(04):90-91.
- [13] 刘兵, 朱顺应, 王红, 等. 非对称边缘率标线对弯道驾驶人横向位置调整的影响机理[J]. 中国公路学报, 2015, 28(02):104-111.
- [14] 徐进, 汪旭, 王灿, 等. 山区公路纵坡段驾驶人脚操纵特征及驾驶负荷[J]. 中国公路学报, 2018, 31(01):91-100.
- [15] 徐立友, 吴依伟, 周志立. 基于人体测量学的拖拉机驾驶员工作空间设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 124-129.
- [16] 徐进, 罗骁, 张凯, 等. 基于自然驾驶试验的山区公路汽车行驶轨迹特性研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29 (07):38-51.
- [17] VAHDATIKHAKI F, EL AMMARI K, LANGROODI A K, et al. Beyond data visualization: A context-realistic construction equipment training simulators[J/OL]. Automation in Construction, 2019, 106:102853. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102853.
- [18] DZENG R J, LIN C T, FANG Y C. Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification[J/OL]. Safety Science, 2016, 82:56-67. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.08.008.

致 谢

衷心感谢导师周宜红教授和廖再毅教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。