0 研究背景及选题依据

全球变暖是近几十年来人类面临的严峻挑战。众所周知，温室气体特别是二氧化碳被认为是全球变暖的主要原因。据美国能源情报署(Energy Information Administration，以下简称EIA)统计，2011年全球能源消费二氧化碳排放总量为3257864.5万吨，其中来自中国的二氧化碳排放量为8715307万吨(EIA，2013年)。

研究显示，中国的碳排放量在2019年达到了92亿吨，占世界总排放的28.8%，并且还在成倍增长[1]。为应对气候变化，2021年全国两会提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的庄严承诺。做好碳达峰、碳中和工作被列为2021年重点任务之一。

随着公路建设的高速发展，公路隧道规模不断扩大，建设数量不断攀升。随着国民经济发展对交通基础设施建设的强烈需求，公路隧道由于具有缩短里程、保护环境、减少用地和提高交通运输效率等特点，得到了广泛的应用。我国的交通隧道工程在世界范围内建设数量最多、规模最大、发展最快。

数据显示，2010年底中国公路的里程数达400.82万公里，10年内增长了29.69％，2020年底达到519.8万公里。其中，公路隧道里程占公路总里程的比例从0.128％增长到0.423％，隧道占比是10年前的3.3倍（2010年~2020年交通运输行业发展统计公报）。

公路作为交通运输的主要组成部分，从设计施工到投入运营，全程均会产生大量的能源消耗和碳排放。其中，隧道路段每公里的温室气体排放量相较于开放路段，通常会高出4到5倍[2]。随着全球气候问题、环境问题和能源问题日益突出，如何使公路走可持续的、低碳化的发展道路，越来越受到关注。

与此同时，隧道工程规模越大意味着运营电费和维护费用越高。随着我国公路隧道的迅猛发展，隧道照明系统的重要性也日益凸显。然而由于我国隧道照明设计规范整体起步较晚，目前规范中存在照明安全设计评价指标单一、节能设计理论方法缺失等问题，从而导致我国目前隧道工程的交通安全运营存在较大隐患，照明设施耗能严重，照明安全与节能的矛盾难以平衡。

照明能耗问题是隧道节能的关键问题，而对隧道照明能耗评估的研究仍较为落后。目前，国内公路隧道照明能耗严重的主要原因在于照明系统设计超标、照明控制方式落后、照明节能理念有误、照明节能措施单一[3]。按照公路隧道运营要求，照明灯具需要长期处于开启状态，在隧道用电费用中占比很大[4]，是运营期间最大的开支[5]。现行隧道照明规范，依托于传统的公路照明研究，只从路面亮度来考虑照明系统的安全性。对于公路照明而言，驾驶员辩视障碍物主要依靠路面单一维度的信息，然而隧道是半封闭的构筑物，公路隧道照明是由侧壁、顶棚、路面及按一定布灯方式布设的灯具构成的多维度系统，驾驶员基于隧道内的立体空间来获取视觉信息。不同构筑物其光环境的构成有很大差异，因而参照传统的公路照明规范，仅从路面亮度来考虑隧道照明，会造成不必要的能源浪费。从光环境的视角，隧道照明的能耗问题实际存在很大的改善空间。

同时，隧道作为封闭路段，其照明相比于传统室内照明存在很大不同。驾驶者处于动态的视觉环境中，光照环境时刻都在发生变化，不仅使得照明机制更加复杂，而且还会产生一系列人眼视觉上的问题。然而目前传统的隧道照明设计仍然停留在依靠理论和经验值层面，缺少对动态环境的解析，难以真正反映实际的情况，无法根据隧道内外光的强度、车流量和车速等参数来合理动态调整照明色温和亮度。

因此，当前的隧道照明研究应该立足于动态视觉中的照明机理，并以低碳节能为目标将照明理论串联起来，形成系统的照明评价体系。

1. 国内外研究现状

1.1公路隧道照明节能研究

在过去十年中，节能已经成为全球性的重要问题。交通运输部门的能源消耗约占总能源消耗的三分之一[6]，道路运输占所有运输方式能源消耗的89%，公路隧道占道路运输总能源消耗的85%。

公路隧道是一种半封闭的构筑物，隧道内部的光照环境和一般道路有很大差异，容易引发交通事故。因此在隧道中通常需要设置照明灯具，以创造全天候的人工照明，为驾驶者提供安全舒适的驾驶环境。研究显示，隧道内过度照明导致70%的电力浪费[7]。根据对各地公路隧道照明的费用调查估算，我国2017年公路隧道的照明费用约为40亿元，相当于消耗约140 万吨标准煤[8]，排放二氧化碳约410万吨[9]。高额的的照明费用不仅给公路运营部门带来了极大的经济负担，同时也造成了大量的能源消耗和环境污染。

因此，人们提出了各种方法和技术来提高运营能源效率，从而最大限度地减少公路隧道的能源消耗[10]- [15]。

总的来说，目前公路隧道照明节能研究主要有四个研究方向：

1）引入自然光或在隧道入口段设置张力结构、棚架等遮光结构，减少隧道内的照明需求。

Wang等[16]利用光带将自然光引入公路隧道入口段，并参考人类视觉适应曲线建立需求的照明亮度。Pena-Garcia和Gil-Martin等[17]通过光管道利用自然光进行隧道内照明。

Pena-Garcia等发现公路隧道中的照明需求取决于三个主要关键参数：隧道中允许的最大速度、隧道洞口朝向及洞口周围特征，对最后一个参数的改善可以显著减少隧道内照明需求。Salam等[18]使用遮阳结构旨在减少隧道入口处的光强，从而减少入口和出口处的人工照明需求。Gil-Martin和Pena-Garcia等[19]首先发现使用聚酯的半透明张力结构可以将入口段延申到隧道外，从而利用阳光进行照明。张拉结构的形状对节能有重大影响，不同的隧道相应最优的形状也不相同，最佳结构类型通常难以确定。为此，他们在接下来的研究中[20]，采用缩尺的隧道模型对三种张拉结构进行了分析。Pena-Garcia和Gil-Martin等[21]又使用棚架结构并与张力结构进行了比较。尽管棚架结构可以有效节约电力照明需求，但这种结构致使照明缺乏均匀性，在他们最新的研究[22]中引入的漫射材料以期实现更均匀的照明环境。Pena-Garcia等[23]还研究了在洞口栽种四种不同种类的攀缘植物对隧道内入口段照明需求的改善效益。

2)优化隧道内照明设施布设或改善材料反射率。

Liang等[24]利用反应时间测量系统对隧道内随机出现的小目标进行测量，并对测量数据处理结果进行分析，得到反应时间与内壁材料、隧道光线、背景亮度的关系，结果发现选用有助于反射的内壁材料可以显著节约照明能耗。Pan等[25]利用照明设计软件DIALUX分析发现侧壁选用高反射系数可以提升隧道内的照度及亮度。Yang[26]在不降低照明效果的前提下，通过LED灯具及反射壁的合理布设，与传统照明方案相比显著节省了灯具数量，实现节能效果。

公路隧道灯具主要采用中心照明、中心线偏侧照明、两侧对称照明、两侧交错照明的形式布置[27]。Yang等[28]以灯具安装高度、安装间距、安装角度、单灯功率为优化参数，以路面照度和亮度满足交通安全要求为约束条件，并以最小的照明系统总功耗为目标函数建立了对称照明的参数优化模型。Fan等[29]建立了交错照明的参数优化模型。Chen等[30]提出隧道内灯具光源、功率、布局方式、设备间距的优化设计模型。Fan等[31]利用对称照明的参数优化模型，在优化隧道灯具安装参数的基础上，开展了隧道照明模拟实验和隧道照明模型实验，研究隧道照明的低成本节能问题

隧道照明设计应在满足视觉要求的前提下尽可能地节约能源，而照明设计很大程度上取决于隧道灯具的光分布。Wei等[32]建立了一个优化模型，以寻求满足国际照明委员会（CIE）制定的照明要求的最节能的光分布。Cengiz等[33]选择了长度为 14.5 km的在建公路隧道，对其建模并利用软件在模拟环境中计算满足隧道内视觉舒适度的最佳亮度值。

3）用发光二极管（Light-Emitting Diode，以下简称LED）替换现有灯具。

合理选择光源是实现隧道照明节能的关键。Yang等[34]利用DIALUX软件展开了对高压钠灯（High-Pressure Sodium Lamp, 以下简称HPS）和LED的模拟实验，完成了光源性能的比较。在相同的照明条件和相同的路面平均亮度下，LED的照明效率更高，比HPS可以节约40%以上的电能，而且LED的路面照明效果比HPS更好，显色性也更好。Karatekin[35]选择了伊斯坦布尔的一条城市隧道来比较HPS和用于隧道照明的高功率 LED 灯的能效变化，结果显示 LED 与HPS相比节省 45.5% 的能量。Jia[36]从发光原理、光学特性和应用范围等方面详细介绍了隧道照明系统中不同类型的灯具，结果表明，LED灯效率高，使用寿命长，显色性好。

4）在隧道照明系统中采用智能控制方法调光灯具亮度。

Fan等[37]针对隧道照明控制系统中存在的行车安全、能耗等问题，设计了一种基于无级控制方法的隧道照明自动控制系统。Yang等[38]以隧道外部环境亮度、交通量和车速信息为输入，隧道内部光亮度为输出，建立了隧道照明控制系统的模糊控制模型。Zhao等[39]进一步完善了模糊控制模型，设计了不同区域的模糊控制规则，并在广西省内的隧道部署并稳定运营。Li等[40]通过隧道内外的亮度和隧道内的交通状况实时控制灯组的开关状态和强度水平，实现自适应的隧道照明控制系统。Sun等[41]根据隧道外光强变化和交通流量，以及相关因素，建立的控制系统通过算法给出调光指令。Li等[42]建立了综合隧道外部亮度、交通流量和速度的需求亮度函数。然后根据隧道内的灯具设备布局和灯具特性推导出实际的隧道亮度曲线。Liu等[43]利用光伏参数建立控制系统。Wang等[44]通过监控摄像头对车流量进行监测，然后根据环境条件和交通信息，将相应的LED灯组调整到需求亮度。Qin等[45]建立基于交通流分布、交通构成、车速分布数据挖掘的动态控制系统。Qin等[46]评估了四种隧道照明控制策略：无控制低功耗灯、时间调度控制策略、日光适应控制策略和智能控制策略，研究了四种控制策略的初始投资和电力成本与隧道长度和日交通量的关系。Zhao等[47]针对传统分级调光控制的不足，提出了以隧道外的交通流量、速度和亮度为输入矩阵的针对高速公路隧道的智能控制算法。

目前的研究着眼于不同方向的照明优化，但缺乏系统地对照明环境的评价体系。并且目前照明优化主要服务于照明节能，缺少系统性的低碳的视角。从碳排放的视角建立照明评价体系能够建立照明优化的全局性理解。

1.2隧道碳排放计算研究

相对于地面建筑，地下建筑领域因为施工的复杂性及不确定性，尚未形成公认的碳排放计算规范。参照国内外现有的研究方法，碳排放的测算方法可以依照评估流程分为排放系数法、质量平衡法和实测法[48]三种类型，从地下工程的应用情况来看，三种方法互有交叉和延伸。Ahn等[49]以独立事件合并隧道开挖与材料运送过程，Guo[50]等利用路面与围岩分级，计算所消耗的水泥建材总量极权寿命的照明消耗。Miliutenko等[51]以累积消耗材料的制造过程和运营过程进行时间序列的能量损耗量化，组合各个事件消耗的材料能源，提出了相对清晰的绿色隧道的概念。上述研究均围绕排放系数法，由材料的消耗量化确定不同阶段的排放量。而Pritchard等[52]调研了与铁路隧道相关的能源消耗和二氧化碳排放，综合了三个实际铁路隧道项目的排放数据样本，从实测法的角度，介绍了计算指标选取及基础设施寿命的核算。此外，也有学者将视角锁定于建设及施工阶段的不同细观层次。李乔松等[53]基于排放系数法，测算了虹梅南路隧道建造阶段每一环管片的实际碳排放。郭春等[54]着眼于隧道建设阶段，利用统计分析法探究影响隧道施工碳排放的关键因素。Wang等[55]以西南地区四个实际项目为例，提出了估算公路建设过程中二氧化碳排放量的实证方法。该方法估算了不同工程类型（如路基、路面、桥梁和隧道）施工过程中不同步骤（原材料生产、材料运输和现场施工）的总排放量。Rodrígue等[56]为生命周期评价方法的简化应用提供了基础，提出了一个简化的计算模型，用以估算采用常规方法（钻爆、盾构或液压破碎）穿越中低强度岩体的隧道施工阶段各步骤的二氧化碳排放量。

基于上述研究，研究学者对隧道工程从各分项工程完整的生命周期进行评估。Youngguk等[57]利用碳排放因子量化道路、桥梁和隧道建设的主要和基础材料消耗所排放的二氧化碳。Akan等[58]研究调查了一家土耳其建筑公司对一个主要隧道项目的温室气体排放总量的测量和管理。王贤卫[59]将高速公路建设过程界定在原材料生产、原材料运输和机械施工3个阶段, 对西南地区某拟建高速公路上的路基、路面、桥涵和隧道工程分别进行各阶段碳排放计算。Liu等[60]对20个沥青工程和18个混凝土路面工程进行了生命周期评估。Liu等[61]试图通过生命周期评估（Life Cycle Assessment，以下简称LCA）方法阐明中国公路建设和维护过程中二氧化碳排放量的大小，为此，将浙江省2000年至2011年建设的227个实际公路项目细分类后通过多元线性回归模型，结合数据质量评估和敏感性分析，揭示了LCA结果的显着影响因素。Hanson等[62]从旧金山到阿纳海姆的高速铁路基础设施建设生命周期温室气体清单的估计。

总的来说，隧道工程中碳排放的研究起步较晚，且尚未形成统一性的流程，在公路隧道领域的碳排放计算目前仍以片面的事件叠加为主，从全寿命周期的角度建立关键因素的有效关联的视角仍然十分有限。

1.3隧道照明对驾驶员动态视觉研究现状

由于视觉信息对驾驶的重要性及其与事故的因果关系，人们对与驾驶安全有关的驾驶员眼动特征进行了大量研究[63-66]。隧道照明对驾驶员动态视觉的研究，国内外大部分学者利用眼动仪研究瞳孔面积、眼动速度和注视时间等指标来表示驾驶员生理心理特征。

文献[67]利用眼动仪设计视觉实验，构建了隧道出入口行车安全的表征函数，提出了隧道出入口行车顺适特性的评价体系。文献[68]利用眼动仪分析了驾驶员在道路中的各个眼动指标的数据拟合特征，提出了驾驶员视觉搜索模式分类和识别的方法。对于基于视觉功效法的隧道照明对驾驶员动态视觉研究比较少，文献[69]描述了一种基于视觉功效法的隧道照明视觉功效评价系统，该系统可模拟夜间道路中可能出现的障碍物，获得受测人员的反应时间，并同时利用眼动仪获得人眼的瞳孔变化情况，来衡量不同色温对人眼视觉功效的影响。文献[70]基于视觉功效法，利用开发的软硬件设置模拟光环境，得到了目标 80km/h 和 60km/h 的速度范围内，高色温 LED 的反应时间比较短，反应时间随环境亮度和亮度对比度的增大而减小。

许多研究通过分析司机的眼球运动参数来研究新手和有经验的司机之间的差异[71-73]。一些结果证实，新手司机倾向于搜索视觉场景中的小区域，并且固定在离车辆较近的地方[74-75]。许多人关注的是道路状况对驾驶员眼球运动的影响。Gramann等人[76]设计了一个实验，通过计算机模拟隧道在昏暗的房间里，评估司机在直线段和进行转弯操作时眼球运动的变化。Miyoshi和Nakayasu[77]利用汽车驾驶模拟器进行了两个不同驾驶配置的实验。第一个实验是在晴朗的条件下，在一个没有任何建筑物和移动物体的开阔场地上模拟道路。第二个实验是位于城市环境中的模拟道路，道路两侧有建筑物、商店和交通设备，在阳光明媚的日子里，预测发生危险。

此外，关于驾驶员在进入隧道时的眼动行为的研究可以分为两大类，如下所述。第一类是那些在驾驶模拟器或其他模拟环境中进行的研究。Akamatsu等人[78]在真实道路和驾驶模拟器环境中进行了实验，研究隧道和其他道路结构对驾驶行为的影响。Calvi和D'Amico[79]使用驾驶模拟器虚拟复制了八个现有的隧道，并记录了二十五个司机的各种驾驶参数，以研究公路隧道对驾驶行为和道路安全的影响。Xiao等人[80]使用驾驶模拟器和眼动仪设备进行实验，研究天气条件和道路安全之间的关系。结果表明，能见度明显影响司机的速度控制，大雾阻碍了司机对交通信号的识别能力，这将导致更多的交通事故。虽然在驾驶模拟器上进行的实验比在实际道路上进行的实验更便宜，更容易完成，而且风险更低[81]，但它们也有局限性，因为司机的行为可能与实际道路上的行为不同[79]。

第二类是在真实道路环境中进行的研究。Verwey. WB[82]通过测量眼球眨动、心率和皮肤电化学反应，讨论了隧道入口对驾驶员生理和操作行为的影响。这项研究发现，当进入隧道口时，眼睛的眨动率下降，然而，不同隧道的眨动率不同。Pan等人[83]使用EMR-8B系统分析了司机在白天的瞳孔直径和移动固定情况。该研究的实验结果表明，进入隧道口后，瞳孔直径迅速增加。此外，还发现在隧道入口前50米处的移动固定指数比隧道内低很多。Zhao等人[84]用9名司机研究白天的视觉信息感知和变化，并通过BP神经网络模拟视觉特征变化。该研究的实验数据显示，在隧道入口前，定格时间和扫射幅度逐渐减少，进入入口后首先增加，在隧道内250米开始平稳变化。相反，在接近隧道入口时，定格次数增加，进入入口后次数缓慢减少。Yan等人[85]通过分析9名司机的眼动数据，研究了司机在隧道入口和隧道内路段的定点变化。结果显示，在进入隧道前，平均固定时间明显增加，进入隧道后逐渐减少。然而，71.4%的司机的平均固定次数逐渐减少，特别是在隧道入口前100米处。Hu等人[86]进行了实验来研究驾驶员在开车进入隧道时的瞳孔大小。在进入四个不同的隧道时，8名男性司机的瞳孔大小数据被眼球追踪器设备记录下来。实验结果表明，当车辆进入隧道时，司机的瞳孔大小有所增加，然而，司机的瞳孔大小存在明显的个体差异。一些研究获得了与这里观察到的瞳孔 大小增加相似的结果[87-90]。Wang等人[91]在中国调查了18名司机在进入实际隧道路段时的视觉特征。结果表明，在隧道入口前，固定的次数迅速增加，然后在隧道内略有下降，最后增加到一个恒定的值。相反，在隧道入口前，平均固定时间减少，然后在进入隧道后略有增加，最后减少到一个恒定值。He等人[92]通过分析眼球运动参数，研究了不同隧道照明环境对驾驶安全的影响。在这项研究中，驾驶员的视野区域被划分为安全和不安全区域。该研究结果表明，安全区域的固定时间比例和总固定时间比例随着亮度的增加而减少。另外，当视觉环境亮度增加时，瞳孔直径也会减少。Shao等人[93]在西安某隧道进行了一个现场实验，通过测量驾驶员的行为来评估隧道出入口的安全性。实验结果显示，当黑洞（入口区）和白洞（出口区）出现在司机的视野中时，瞳孔直径和心率发生了明显的变化，这对交通安全有一定的影响。

在隧道中，驾驶员人眼处于动态视野中，外界的光环境变化容易对驾驶员人眼产生一定影响，模拟实验平台加入环境变化因素，对驾驶员视觉功效进行衡量，才能更好地反映驾驶员在隧道内部行车时的视觉响应状态。

驾驶员在驾车的过程中，观察道路上的障碍物时，都具有一相对速度，此时驾驶员的视觉状态是动态视觉，模拟实验平台需考虑加入视标的变化，才能利用反应时间进行准确地描述驾驶员在隧道内部行车时的动态视觉作业。

驾驶员在以一定相对运动速度观察外界事物的能力，可被认为是目标朝向被测者人眼近似直线接近移动的视觉能力。因此，为模拟隧道光环境对驾驶员的动态视觉的影响，视标则需以一定速度、一定规律从小变大。辛德胜等[94]根据相对运动原理进行动视力检测，视标模拟汽车的运动，利用视认距离满足停车视距需要时，交通标志的汉字高度为标准，得到视标与被测者之间的距离和动视力大小的对应关系。王仕洋[95]根据物体成像的原理和关系式，分析得到了不同速度下的动态视标的大小和对应的视力值。李鸣皋等[96]设计了一种动态视力测试系统，设定显示屏的单个像素宽度和视标生产频率获得相邻帧视标，从而调整相邻帧在显示屏运动像素，来调节视标的速度。参考这些研究者的设置方法，本实验以相对运动原理为出发点，在检测时，被测者静止不动，视标由远而近地向被测者运动，即视标符号由小变大。

总的来说，目前的隧道照明及节能研究在各个方向都有长足的发展，并且大部分研究都是站在静态的研究视角，即假设驾驶员在隧道内静止，对静态的照明环境的光强进行评价，但隧道驾驶是一个复杂视觉状态下动态识认路况的过程，驾驶员需要在动态驾驶状态下对隧道交通状况进行有效判断处理。这种静态的分析与实际驾驶情况之间有很大差异。

He等[97]研究了视觉环境亮度对反应时间的影响。Fu等[98]研究了使用三个驾驶行为指标（速度、减速和位置）和两个视觉感知指标（定格和扫视）比较分析了20名司机在六个隧道（每个条件两个隧道）的驾驶表现。Qin等[99]调查车辆速度如何影响白天和夜间高速公路隧道入口处的司机眼球运动特征。胡馨月[100]得到了隧道内驾驶员动态视觉的反应时间与亮度变化的关系。

综上所述，研究照明光源特性和识别小目标物的方法多采用静态检测方法，约束了研究成果的科学性，对一定设计速度下的隧道照明标准没有一个准确的研究成果。因此，公路隧道照明的合理性应根据本国驾驶员在隧道内行驶的动态视觉安全舒适性的特性，采用合适的评价方法深入研究。同时隧道节能缺少规范的评价标准，不同研究之间的结果无法进行比较。隧道照明节能需要依托于碳排放量的计算，建立一个系统的评价体系。

2 研究内容及研究方案

2.1 研究内容

（1）隧道动态视觉下的光生物效应分析

通过隧道动态视觉下的照明实测实验，以分析受试者在不同照明环境条件下的人体指标响应。基于实验数据，提升完善数字孪生理论的隧道光环境虚拟仿真平台，并应用于更多在现场不易达到的试验工况。

（2）动态视觉下的隧道照明节能优化方法

以动态光学理论和虚拟仿真平台为基础，研究驾驶者处于运动的状态中，光源波长、色温及光源光谱特性与环境亮度，路面均匀度等指标在叠加运动速度状态时对驾驶者的动态可视距离的影响，建立运动状态下的照明优化模型。

（3）基于碳排放计算的照明系统低碳评价体系

建立照明系统的碳排放计算理论，利用隧道光环境设计参数搭建以碳排放量为目标函数，在保证驾驶安全的基础上建立照明环境的低碳评价体系。

2.2 研究方案

（1）通过公路隧道现场实车实验，针对不同照明环境下的眼动、心率、血压等人体生理响应，分析动态环境下的受试者的光生物效应。研发基于数字孪生模型的隧道光环境虚拟仿真平台，根据实测数据和虚拟仿真试验，修正和优化数字光环境参数。

（2）通过隧道照明虚拟现实平台的数字化技术，分析隧道照明设计参数对可视距离的影响机理和量化理论。通过现场试验、模拟实验等手段验证该优化方法的节能效果、计算模型的正确性和算法优化性能，对结论进行可靠性分析。

（3）针对我国公路隧道照明评价体系缺失的问题，首先需要建立评价指标。基于对照明系统的碳排放量的计算实现对照明系统评价的量化，首先建立一套完善的隧道照明系统碳排放计算方法。然后将利用隧道光环境设计参数搭建以碳排放量为目标函数，并将安全性作为约束条件的照明系统低碳评价体系。最后，结合实际案例，对目前公路隧道设计要素进行分析，给出基于评价体系的选型建议，依照建立的评价指标可以形成隧道照明系统的定性和定量判断。

2.3 研究基础与可行性分析

2.3.1隧道光环境虚拟仿真平台

目前课题组已经搭建了视觉辅助设计系统的虚拟仿真实验平台。依托3ds max软件建立不同的隧道内环境模型导入至隧道内环境智能辅助决策系统中，被试者先穿戴设备HTC VIVE Pro EYE眼动仪，能够渲染游戏虚拟摄像机前面的内容。同时，为了模拟真实驾驶体验，采用罗技momo力反馈方向盘，使实验提供尽可能接近真实驾驶。罗技方向盘采用完全仿真的外形设计，并配备油门、刹车踏板，并使用独特的力回馈系统。被试者按照既定路线进行虚拟驾驶，在虚拟驾驶过程中，为了定量衡量驾驶员的疲劳状况，本研究收集驾驶员的脑电波数据。赋思头环通过采集使用者的脑电波、追踪专注力数据并对其进行量化，从而能够实时反映使用者的注意力集中程度，从而进一步反映使用者的疲劳程度。

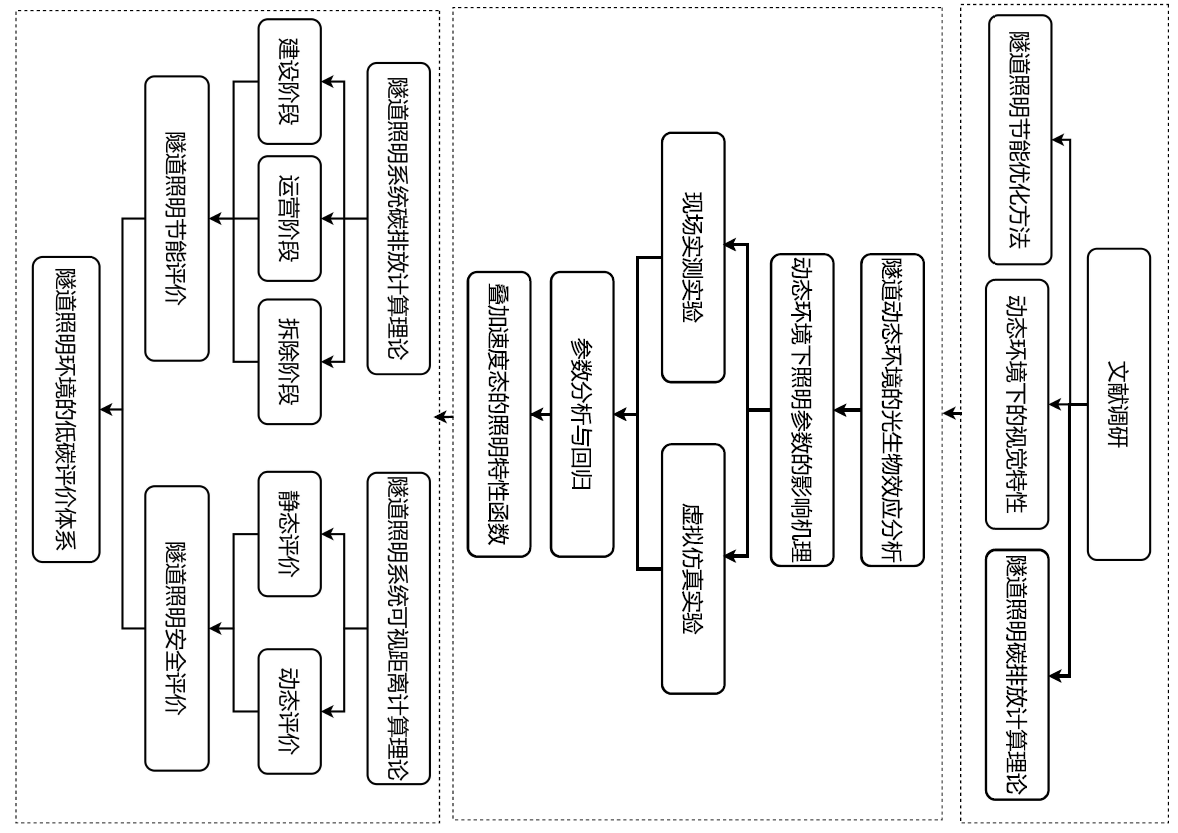
视觉辅助设计系统基于Unity开发，在Canvas面板界面，主要包括四个区域，隧道概况区域、隧道参数配置区域、隧道场景区域和实验数据记录与显示区域。可以实现隧道动态驾驶的虚拟仿真模拟。

2.3.2隧道光环境碳排放计算

依托包括杭州市博奥隧道在内的实际项目，目前已经提出了一种估算公路隧道照明环境全寿命周期的二氧化碳排放量计算模型。该方法估算了建设过程中不同步骤（原材料生产、材料运输和现场施工）的总排放量，并结合运营过程的用电及维护情况，对各个照明方案的全寿命周期碳排放量进行了测算。提出的碳排放量的经验估算方法可供其他公路隧道照明环境碳排放量估算参考。

中国公路学会标准《公路隧道碳排放计算指南》已经完成了大纲编制阶段。本标准以公路隧道工程为研究对象，对公路隧道原材料生产、施工和运营的能耗进行了定量分析，为公路隧道碳排放评价提供了系统的方法，以支持公路隧道建设节能减排的发展。根据公路隧道低碳建设实际需求出发，本标准重点提出适用于公路隧道碳排放计算指南，以期对不同环境不同类型的公路隧道建立统一的评价标准，搭建隧道领域的碳排放观念，减少隧道工程中的碳强度，使隧道建设在长期内具有可持续。

2.4 技术路线



2.5 技术难点

（1） 考虑多重因素耦合对驾驶者行为的影响

在公路隧道照明规范基础上，引入色温，波长，光谱特性对驾驶者反应时间影响的分析。分析灯具色温、波长、壁面亮度、地面亮度等因素耦合关系对驾驶者的行为的影响。

（2） 从静态照明过渡到动态照明理论

动态视觉下的照明特性及驾驶行为变化，分析动态视觉下照明参数和可视距离间的关系。针对提升路面亮度、路面均匀度，灯具安装高度、夹角在动态视觉下的优化。

（3） 验证虚拟仿真实验数据结论的可靠性

虚拟仿真实验与实测实验得到的数据的精度能否满足实验的要求，需要对虚拟仿真实验与实测实验数据进行比对，结合理论基础形成两者间的交叉验证，对虚拟平台进行多维度的修正。

2.5 关键创新点

（1） 建立动态视觉下的隧道照明节能优化方法，以安全、节能、舒适为前提，基于隧道照明环境的参数化设计模型，通过虚拟实验、实测实验与理论分析互相迭代，得到更具可靠性的照明理论。

（2） 隧道照明环境的低碳评价体系对安全、舒适、节能提出控制性量化指标，建立统一的环境设计标准及标准化评价体系。系统能够给出优化的隧道环境设计可以减少的碳排放量的具体数值，该光环境下可视距离的具体量值，综合分析这些数据形成隧道照明环境的标准化评价。

3 研究进度安排

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **起讫日期** | **主要研究内容** | **预期结果** |
| 2021.11.1～2021.11.30 | 文献整理，初步建立隧道照明理论，确定影响驾驶行为的参数系统。 | 确定隧道照明理论参数系统 |
| 2021.12.1～2021.12.31 | 建立参数系统的隧道照明安全理论及评价指标 | 确定照明参数的影响机理 |
| 2022.1.1～2022.1.31 | 建立隧道照明碳排放量计算理论， | 确定碳排放计算原理及计算方法 |
| 2021.2.1～2021.5.31 | 完成隧道照明实验设计，结合虚拟仿真实验平台及现场实测实验，取得实验指标的数据关联 | 实验设计及数据获取 |
| 2022.6.1～2022.6.31 | 数据比对及实验修正，修正后进行二次实验 | 实验验证，提升数据准确性及可靠度 |
| 2022.7.1～2022.7.31 | 实验结果整理及分析评价，揭示照明参数的影响机理，建立隧道照明可视距离计算理论 | 数据挖掘，揭示隧道照明可视距离计算理论 |
| 2022.8.1～2022.8.31 | 整理阶段性成果，撰写小论文 | 原理整理及修正补充 |
| 2022.9.1～2022.10.31 | 完成隧道照明环境低碳评价体系 | 结论整合及可靠性评价 |
| 2022.11.1～2023.1.15 | 撰写毕业论文 | 完成成果整理 |
| 2023.1.16～2023.3.31 | 准备答辩 | 完成研究要求 |

参考文献：

**References：**

1. Long Ruyin, Li Jinqiu, Chen Hong, et al. Embodied carbon dioxide flow in international trade: A comparative analysis based on China and Japan.[J]. Journal of environmental management,2018,209.
2. James A. Pritchard, John Preston. Understanding the contribution of tunnels to the overall energy consumption of and carbon emissions from a railway[J]. Transportation Research Part D, 2018,65:551-563.
3. 涂耘,王少飞,邓欣.基于低碳理念的公路隧道绿色照明技术研究[J].公路隧道,2013(03):10-15.
4. 王炳刚,冯雷,陈霞.公路隧道智能照明系统设计[J].科技风,2014(23):131-132.
5. 田军. 公路隧道照明智能节能系统设计与研究[D].长安大学,2015.
6. Wang Y F , Li K P , Xu X M , et al. Transport energy consumption and saving in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29(7):641-655.
7. A A C R , C G I C , D J C , et al. Psycho-biological factors associated with underground spaces: What can the new era of cognitive neuroscience offer to their study?[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55:118-134.
8. 潘国兵, 刘圳, 刘毅,等. 基于瞳孔变化的隧道内饰材料辅助照明研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017(03):282-288.
9. 王少飞, 涂耘, 张琦,等. "低碳经济"背景下公路隧道照明节能策略[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3):14-21.
10. Shu G , Gang T A , Qz B . An optimal design model for tunnel lighting systems[J]. Optik, 2020.
11. Shijuan, Fan, Chao, et al. Experimental Study on Energy-saving of Highway Tunnel Lighting with Central Lamp Distribution[C]// 2019.
12. Moretti L , Cantisani G , Mascio P D . Management of road tunnels: Construction, maintenance and lighting costs[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 51(JAN.):84-89.
13. Cantisani G , Mascio P D , Moretti L . Comparative Life Cycle Assessment of Lighting Systems and Road Pavements in an Italian Twin-Tube Road Tunnel[J]. Sustainability, 2018, 10.
14. Peeling J , Wayman M , Mocanu I , et al. Energy Efficient Tunnel Solutions[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14:1472-1481.
15. Zhao L , Qu S , Zhang W , et al. An Energy-saving Fuzzy Control System for Highway Tunnel Lighting[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2018, 180.
16. Wang B L , Ye Y , Yan B . Experimental Research on Application of the Natural Light to Tunnel Lighting Engineering[J]. Journal of Light & Visual Environment, 2015, 39:43-51.
17. Gil-Martín, L.M, Pena-García, A, A Jiménez, et al. Study of light-pipes for the use of sunlight in road tunnels: From a scale model to real tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2014, 41:82-87.
18. Salam A , Mezher K A . Energy Saving in Tunnels Lighting using Shading Structures[C]// Renewable & Sustainable Energy Conference. IEEE, 2014.
19. Gil-Martin L M , Pena-Garcia A , Hernandez-Montes E , et al. Tension structures: A way towards sustainable lighting in road tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2011, 26(1):223-227.
20. A Pena-García, LM Gil-Martín, Escribano R , et al. A Scale Model of Tension Structures in Road Tunnels to Optimize the Use of Solar Light for Energy Saving[J]. International Journal of Photoenergy,2011,(2011-9-15), 2011, 2011:413-422.
21. Pena-Garcia A , Gil-Martin L M . Study of pergolas for energy savings in road tunnels. Comparison with tension structures[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2013, 35(APR.):172-177.
22. Gil-Martin L M , Gomez-Guzman A , Pena-Garcia A . Use of diffusers materials to improve the homogeneity of sunlight under pergolas installed in road tunnels portals for energy savings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 48(apr.):123-128.
23. Pena-Garcia A , Lopez J C , Grindlay A L . Decrease of energy demands of lighting installations in road tunnels based in the forestation of portal surroundings with climbing plants[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 46(feb.):111-115.
24. Liang B , Pan G B , Pi Y H , et al. Energy-Saving Experimental Study on Reflective Material Auxiliary Tunnel Lighting Based on Visual Effect[J]. Advanced Materials Research, 2012, 594-597:1193-1196.
25. Pan G B , Shi L N , Liang B , et al. Illumination Energy Conservation Analysis of Reflective Material on the Tunnel Sidewall[J]. Advanced Materials Research, 2012, 594-597:1197-1200.
26. Yang P . Design of Tunnel Lighting Arrangement and Intelligent Control System[C]// International Conference on Computer Systems, Electronics and Control. 0.
27. Chen M , Wang Q , Zhen J , et al. A review of researches on lighting energy saving technology methods for highway tunnels[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510(5):052046 (5pp).
28. Yang, C, Huang, CM, Fan, SJ. Study on Energy Saving of Symmetrical Luminaire Distribution Style of Highway Tunnel Lighting [C]// International Conference on Mechanics, Building Material and Civil Engineering 2015.
29. Fan S , Chao Y . Parameters Optimization and Energy-saving of Highway Tunnel Stagger Luminaire Distribution Lighting with LED[C]// 2016 International Conference on Civil, Transportation and Environment. 2016.
30. Chen, Xiaodong, Qin, et al. A "vehicle in, light brightens; vehicle out, light darkens" energy-saving control system of highway tunnel lighting[J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 66(Jun.):147-156.
31. Fan S , Yang C . Experimental Study on Energy-saving of Highway Tunnel Lighting with Central Lamp Distribution[C]// Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Sustainable Energy, Environment and Information Engineering (SEEIE 2019). 2019.
32. Wei, Lai, Xianming, et al. Optimization Optical Design for Tunnel Lamps with LED Source[C]// 第十一届中国国际半导体照明论坛. 0.
33. Cengiz M S . Simulation and Design Study for Interior Zone Luminance in Tunnel Lighting[J]. Light & Engineering, 2019, 27(2):42-51.
34. Yang C , Fan S J . Energy-Saving Performance Studies of Road Tunnel Luminaries[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 291-294:654-660.
35. Karatekin C . Tunnel lighting design with high power led lamps of an urban tunnel in Istanbul[J]. Light and Engineering, 2017, 25(4):69-75.
36. Jia Z . Comparison on Lamp Characteristics of Highway Tunnel Lighting System[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 510:052095.
37. Fan S , Yang C , Wang Z . Automatic Control System for Highway Tunnel Lighting[C]// 0.
38. Yang C , Fan S , Wang Z , et al. Application of fuzzy control method in a tunnel lighting system[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54(3-4):931-937.
39. Zhao L , Qu S , Zhang W , et al. An Energy-saving Fuzzy Control System for Highway Tunnel Lighting[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2018, 180.
40. Li L R , Wang Z H , Li Z , et al. The Adaptive Control Method of the Energy-efficient Tunnel Lighting System[C]// 2015 International Conference on Advances in Management Engineering and Information Technology(AMEIT 2015). 0.
41. Sun S , Li B , Zou N . LED Tunnel Lighting Control Based on ZigBee[C]// 2018 15th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS). 2018.
42. Li S . An optimal model for tunnel lighting control systems[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 49:328-335.
43. Liu, L; Huang, F, Lan, ZL. Study on the Method of Tunnel Lighting Control by Using the Photovoltaic Parameters[C]. International Conference on Electrical Engineering and Mechanical Automation (ICEEMA), 2015: 491-496
44. Wang Y , Cui Y , Chen F , et al. An "Illumination Moving with the Vehicle" Intelligent Control System of Road Tunnel Lighting[J]. Sustainability, 2020, 12.
45. Qin L , Shi X , Leon A S , et al. Dynamic luminance tuning method for tunnel lighting based on data mining of real-time traffic flow[J]. Building and Environment, 2020, 176.
46. Qin L , A Pea-García, Leon A S , et al. Comparative Study of Energy Savings for Various Control Strategies in the Tunnel Lighting System[J]. Applied Sciences, 2021, 11(14):6372.
47. Zhao, JD, Feng, YZ, Yang, C.Intelligent control and energy saving evaluation of highway tunnel lighting: Based on three-dimensional simulation and long short-term memory optimization algorithm[J]. Tunnelling and Uuderground Space Technology. 2021, 109
48. 蔡伟光,蔡彦鹏.全国建筑碳排放计算方法研究与数据分析[J].建设管理研究,2019(02):61-76.
49. Ahn C , Hua X , Lee S H , et al. Carbon Footprints Analysis for Tunnel Construction Processes in the Preplanning Phase Using Collaborative Simulation[C]// Construction Research Congress 2010.
50. Guo C , Xu J , Yang L , et al. Life cycle evaluation of greenhouse gas emissions of a highway tunnel: A case study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211(FEB.20):972-980.
51. Miliutenko S , J Åkerman, A Björklund. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions during the Life Cycle Stages of a Road Tunnel-the Swedish Case Norra Länken[J]. European Journal of Transport & Infrastructure Research, 2012, 12(1):39-62.
52. James A. Pritchard, John Preston. Understanding the contribution of tunnels to the overall energy consumption of and carbon emissions from a railway[J]. Transportation Research Part D, 2018,65:551-563.
53. 李乔松,白云,李林.盾构隧道建造阶段低碳化影响因子与措施研究[J].现代隧道技术,2015,52(03):1-7.
54. 郭春, 徐建峰, 张佳鹏. 隧道建设碳排放计算方法及预测模型[J].隧道建设, 2020, 40(8): 1140-1146.
55. Xianwei Wang, Zhengyu Duan, Lingsheng Wu, et al. Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China[J]. Journal of Cleaner Production,2015,103.
56. Rodríguez Rafael, Pérez Fernando. Carbon foot print evaluation in tunneling construction using conventional methods[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2021,108.
57. Youngguk, Seo, and, et al. Estimation of materials-induced CO2 emission from road construction in Korea[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013.
58. Akan M A , Dhavale D G , Sarkis J . Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2017:S0959652617316815.
59. 王贤卫, 吴灵生, 杨东援. 高速公路建设CO2排放计算分析[J]. 公路交通科技, 2014.
60. Liu Y , Wang Y , D Li. Estimation and uncertainty analysis on carbon dioxide emissions from construction phase of real highway projects in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144(FEB.15):337-346.
61. Liu Y , Wang Y , An D . Life-cycle CO2 emissions and influential factors for asphalt highway construction and maintenance activities in China[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2018.
62. Hanson C , Noland R , Cavale K . Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Materials Used in Road Construction[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2287:174.
63. Underwood D E C G . Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers[J]. Ergonomics.
64. Underwood G , Chapman P , Brocklehurst N , et al. Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers[J].
65. Rotman M M , Shinar D . Eye movements of younger and older drivers[C]// International Conference on Safety & the Environment in Century. 1997.
66. Falkmer T , Gregersen N P . A comparison of eye movement behavior of inexperienced and experienced drivers in real traffic environments.[J]. Optometry & Vision Science Official Publication of the American Academy of Optometry, 2005, 82(8):732.
67. 袁伟. 城市道路环境中汽车驾驶员动态视觉特性试验研究[D].长安大学,2008.
68. 白翰. 高速公路隧道出入口车辆安全运行顺适过渡理论相关基础研究[D].长安大学,2015.
69. 杨春宇,梁树英,张青文.用视觉功效理论研究城市隧道出入口段与洞外道路照明[J].灯与照明,2012,36(04):1-4+8.
70. Moretti L , Cantisani G , Mascio P D , et al. Technical and economic evaluation of lighting and pavement in Italian road tunnels[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 65(MAY):42-52.
71. Li L , Jin Z , Yu D . Differential effects of road situations and driving behaviors on eye movements in experienced and novice drivers[J]. Journal of Vision, 2013, 13(9):1117-1117.
72. Kojima Y . Driving Characteristics of Novice and Experienced Drivers - Part 1: Characteristics of Visual Search[J]. Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, 1997, 28(1):73-78.
73. Leeuwen P V , Happee R , Winter J D . Changes of driving performance and gaze behavior of novice drivers during a 30-min simulator-based training[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3:3325-3332.
74. Mourant R R , Rockwell T H . Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers[J]. Human Factors, 1972, 14(4):325.
75. Falkmer T , Gregersen N P . Fixation patterns of learner drivers with and without cerebral palsy (CP) when driving in real traffic environments[J]. Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour, 2001, 4(3):171-185.
76. Gramann K , Sharkawy J E , Deubel H . Eye-movements during navigation in a virtual tunnel.[J]. International Journal of Neuroscience, 2009, 119(10):1755-1778.
77. Miyoshi T , Nakayasu H . Analysis of relationship between characteristics of driver's eye movements and visual scene in driving events[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 2011.
78. Akamatsu M , Imachou N , Sasaki Y , et al. SIMULATOR STUDY ON DRIVER'S BEHAVIOR WHILE DRIVING THROUGH A TUNNEL IN A ROLLING AREA. 2003.
79. Calvi, A.; D’Amico, F. A study of the effects of road tunnel on driver behavior and road safety using driving simulator[J]. Adv. Transp. Stud. 2013, 30, 59–76
80. Xiao D , Yong F , Zhang Y , et al. Analysis of driving behavior at the bridge-tunnel transition section in reduced visibility situations[C]// 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). 2017.
81. Bella F . Can Driving Simulators Contribute to Solving Critical Issues in Geometric Design?[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2138(1):120-126.
82. Verwey W B . EFFECTS OF TUNNEL ENTRANCES ON DRIVERS' PHYSIOLOGICAL CONDITION AND PERFORMANCE. AN EXPLORATORY STUDY[J]. Drivers, 1995.
83. Pan X , Du Z , Zhen Y . Safety Research during Entrance and Exit of Highway Tunnel Based on Drivers' Eye Movement Experiment[C]// Seventh International Conference of Chinese Transportation Professionals Congress (ICCTP). 2014.
84. 赵炜华,刘浩学,刘玮,林淼,朱彤.高速公路隧道群出、入口段驾驶人视觉特征[J].交通科学与工程,2011,27(03):75-81.
85. Yan Y , Yuan H , Wang X , et al. Study on Driver's Fixation Variation at Entrance and Inside Sections of Tunnel on Highway[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 2014(1):273427-273427.
86. Hu Y , Chen Z , Zhang Q , et al. Changing rule of drivers' pupil size as driving into tunnels[J]. Journal of Civil,Architectural & Environmental Engineering.
87. Sunan W U , Chen X , Guo T . A Study on Differences of Physiological Characteristics of Drivers Driving Through Urban Tunnels[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016.
88. Du Z G , Huang F M , Yan X P , et al. Light and Dark Adaption Times Based on Pupil Area Variation at Entrance and Exit Areas of Highway Tunnels[J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2014, 8(1):73-77.
89. Du Z , Zheng Z , Miao Z , et al. Drivers' visual comfort at highway tunnel portals: A quantitative analysis based on visual oscillation[J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2014, 31(aug.):37-47.
90. Xu, B.P.; Zhang, J.; Liang, J.; Zhang, P. Study of drivers’ pupil size changing at entrance and exit of tunnels[J].Highw. Automot. Appl.2011,5, 54–58.
91. Wang, Y.; Wang, L.; Wang, C.; Zhao, Y. How eye movement and driving performance vary before, during, and after entering a long expressway tunnel: Considering the differences of novice and experienced drivers under daytime and nighttime conditions[J]. Springerplus 2016, 5, 538:1–538:10.
92. He, S.; Liang, B.; Pan, G.; Wang, F.; Cui, L. Influence of dynamic highway tunnel lighting environment on driving safety based on eye movement parameters of the driver[J]. Tunn. Undergr. Space Technol. 2017, 67, 52–60.
93. Shao, F.; Xu, Q.; Xu, X.; Ma, C. Measuring safety for urban tunnel entrance and exit based on nanoscopic driving behaviors[C]. In Proceedings of the Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Macau, China, 11–12 March 2016; pp. 386–392.
94. 辛德胜, 林晓珑, 卢云华. 驾驶员动视力对交通安全的影响及检测系统的研究[J]. 汽车工程, 1998(03):183-183.
95. 王仕洋. 多功能动态视力检测与训练装置研制[D].吉林大学,2015.
96. 李鸣皋, 徐建中, 高原,等. 一种动态视力测试系统及方法.
97. He S Y , L Tähkämö, Maksimainen M , et al. Effects of transient adaptation on drivers' visual performance in road tunnel lighting[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 70:42-54.
98. Fu X , He S , Du J , et al. Variations in Naturalistic Driving Behavior and Visual Perception at the Entrances of Short, Medium, and Long Tunnels[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020:1-16.
99. Qin L , Dong L L , Xu W H , et al. Influence of Vehicle Speed on the Characteristics of Driver's Eye Movement at a Highway Tunnel Entrance during Day and Night Conditions: A Pilot Study[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2018, 15(4):656-.
100. 胡馨月. 公路隧道照明对驾驶员动态视觉影响研究[D]. 长安大学.