

隧道智能运维与管养

王玉文 廖志鹏 夏杨于雨 赵明 王子豪 / 著



# 公路隧道 照明节能关键技术



西南交通大学出版社

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

公路隧道照明节能关键技术 / 王玉文等著. —成都:  
西南交通大学出版社, 2021.11  
ISBN 978-7-5643-8396-1

I. ①公… II. ①王… III. ①公路隧道 - 照明技术 -  
研究 IV. ①U453.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2021 ) 第 239742 号

---

Gonglu Suidao Zhaoming Jieneng Guanjian Jishu  
公路隧道照明节能关键技术

王玉文 廖志鹏 夏杨于雨 赵 明 王子豪 著

---

责任编辑	杨 勇
封面设计	原谋书装
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	<a href="http://www.xnjdcbs.com">http://www.xnjdcbs.com</a>
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成 品 尺 寸	170 mm × 230 mm
印 张	21.25
字 数	337 千
版 次	2021 年 11 月第 1 版
印 次	2021 年 11 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8396-1
定 价	68.00 元

---

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

截止到 2020 年年末,全国在役公路隧道总里程达 21 999.3 km,比 2019 年增加了 3 032.7 km,中国已经成为世界上拥有公路隧道数量最多、里程最长的国家。在正常运营条件下,隧道照明是对行车安全和舒适影响最大的隧道机电电子系统。由于不可间断性,照明系统电能消耗无疑是巨大的,一般占隧道总耗电量的 80%左右。2020 年我国在联合国大会上明确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,在此时代背景下,如何科学、合理地降低隧道照明系统的碳排放,同时兼顾行车安全和舒适,已成为当前亟待研究的重要课题。

隧道照明是一个复杂的系统工程,它融合了机电工程、土建工程、人体生理科学工程、光学工程、控制工程等多个领域,其学科交叉性与延伸性较强。本书以国内外近年来隧道照明取得的最新理论与技术进步为基础,开展了创新性的视觉实验与数值模拟,并融入了作者大量的研究成果与见解。第 1 章对公路隧道照明技术的研究现状做出了总结;第 2 章利用计算机数值模拟手段掌握了照明灯具最优适配方案;第 3 章针对夜间特殊的隧道行车环境,采用现场试验得出了隧道路面照明亮度的合理取值及调控方法;第 4 章结合数值模拟与依托工程现场实测,充分考虑日光照射“零碳化”的特点,设计出一种具有良好视觉缓冲作用的隧道洞口减光构筑物,给出了最佳结构配置参数,最后分析了减光构筑物的经济及社会效益;第 5 章基于

毗邻隧道光环境变化剧烈的实际情况，通过设置减光棚构筑物与隧道内照明系统进行联动调控，达到节能的目的；第 6 章对国内外隧道照明规范及技术报告中与节能技术相关的条文进行了节选和介绍。

本书由广东惠清高速公路有限公司王玉文、招商局重庆交通科研设计院有限公司廖志鹏、中铁长江交通设计集团有限公司夏杨于雨、广东省路桥建设发展有限公司赵明和中铁城市规划设计研究院有限公司王子豪编写。全书共分为 6 章，其中第 1、2 章由王玉文、夏杨于雨编写，第 3、4、5 章由王玉文、廖志鹏编写，第 6 章由赵明、王子豪编写。

在本书编写过程中，作者得到了招商局重庆交通科研设计院有限公司隧道与地下工程院丁浩、马非、朱凯、刘鹏等大力帮助和支持，同时书中借鉴和引用了国内外大量与隧道照明相关的研究成果，在此对其原创作者一并致以诚挚的谢意。由于作者知识水平、资料收集等方面的局限，书中不可避免地会出现疏漏与不足，敬请读者批评指正。

著者

2021 年 3 月

# 目 录

第 1 章	公路隧道照明技术研究现状·····	001
	1.1 研究背景·····	001
	1.2 公路隧道照明研究历程·····	002
	1.3 照明灯具研究现状·····	003
	1.4 夜间照明研究现状·····	003
	1.5 自然光在隧道照明中的应用·····	005
	1.6 隧道照明计算评估现状·····	008
第 2 章	基于光线跟踪的隧道设备配光最优适配 节能技术研究·····	010
	2.1 隧道照明质量评价体系·····	010
	2.2 计算模型·····	014
	2.3 研究工况·····	017
	2.4 本章小结·····	132
第 3 章	高速公路隧道夜间照明节能技术研究·····	134
	3.1 人的视觉特征·····	134
	3.2 高速公路隧道夜间光环境·····	139
	3.3 试验流程·····	144
	3.4 试验数据分析·····	148
	3.5 本章小结·····	150

第 4 章	基于日光利用的隧道加强照明“零碳化” 节能技术研究 .....	151
	4.1 洞外亮度的影响因素及计算模型 .....	151
	4.2 依托工程洞外亮度计算 .....	153
	4.3 生态减光棚 .....	158
	4.4 洞外减光结构物亮度及长度适应性研究 .....	162
	4.5 减光结构物长度的确定 .....	185
	4.6 生态减光结构参数优化配置 .....	190
	4.7 生态减光结构物模型试验研究 .....	228
	4.8 依托工程实施 .....	238
	4.9 经济及社会效益分析 .....	242
	4.10 本章小结 .....	244
第 5 章	基于洞外光环境特性的毗邻隧道联动节能技术研究 .....	247
	5.1 计算模型 .....	247
	5.2 最佳减光棚配置分析 .....	249
	5.3 最佳透光率分析 .....	286
	5.4 研究依托工程 .....	311
	5.5 设计方案 .....	311
	5.6 亮度仿真分析结果 .....	314
	5.7 本章小结 .....	317
第 6 章	国内外隧道照明相关规范及技术报告简介 .....	319
	6.1 《公路隧道照明设计细则》 .....	319
	6.2 CIE 88—2004 .....	324
	参考文献 .....	329

## 【 第 1 章 】>>>>

# 公路隧道照明技术研究现状

---

### 1.1 研究背景

我国隧道及地下工程事业始自 20 世纪 80 年代。随着经济的持续发展、综合国力的不断提升及高新技术的不断应用,进入 21 世纪后,我国隧道及地下工程得到了前所未有的迅猛发展。据统计,中国已是世界上隧道和地下工程数量最多、里程最长、发展速度最快的国家,截止到 2019 年年末,全国在役公路隧道 19 067 处,总里程达 1 896.66 万米,比 2018 年分别增加了 1 329 处、173.05 万米。

在隧道内行车,人的视觉所获得的信息是最主要的,对驾驶者的行为决策和情绪有着直接的影响,在车辆通过隧道的整个过程中,驾驶者经历的视觉适应过程为暗视觉—中间视觉—明视觉。从以上人的视觉适应性特征可以看出,进入隧道后从暗视觉至中间视觉的转换过程是快速的,而驶出隧道后从中间视觉转换至明视觉的过程则是缓慢的,在视觉转换的过程中存在较大的安全风险。因此,隧道照明系统对行车的安全性和舒适性有着非常重要的影响,良好的照明条件能够大大降低隧道内发生交通事故的概率。

然而,伴随着高速公路网向西部山区等不发达地区延伸,照明系统在隧道和隧道群的运营过程中将消耗大量的电能。与世界其他国家相比,中国能源消费的最大特点是煤炭消费比重很大。2005 年中国煤炭消费占能源消费总量的比重为 74%,2015 年煤炭消费占比为 63.7%,仍然位于世界主要国家之首。煤炭比重超过世界煤炭平均消费水平 34.5 个百分点,且分别超过欧盟和美国 47.6 和 46.3 个百分点。我国煤炭人均可采储量少,

仅为世界平均水平的 2/3, 煤炭资源开发和利用方式难以支撑经济和社会长远发展, 中国煤炭资源的耗竭速度高于国际平均水平。公路隧道照明系统的电能消耗占隧道总电能消耗的比重约为 80%, 电费支出往往成为运营企业的沉重负担。在全社会节能减排的大背景下, 隧道照明系统的节能是必须长期坚持的一个方向。

当前我国已全面建成小康社会, 推进生态文明建设也处于关键时期, 绿色发展理念将深度融入经济社会发展全过程, 节能减排工作面临重大战略机遇。与此同时, 全国范围内经济社会发展的资源环境制约因素日益突出, 节能减排潜力不断下降, 工作难度持续加大, 应积极推动交通运输的节能减排。

## 1.2 公路隧道照明研究历程

公路隧道照明的根本目的在于为驾驶员提供安全行车的视觉条件, 提供可获得足够视觉信息的亮度, 满足不同层次的驾驶员的视觉功能和心理需求, 确保车辆无论是在白天还是在夜间, 都能够以给定的设计速度安全行车, 使车辆如同在一般的公路上一样安全行驶。

隧道照明与道路照明的显著区别, 是夜间不仅需要照明, 白天更需要照明, 而且白天照明比夜间照明更加复杂, 其不只像道路照明那样仅仅提供一定的亮度, 还应综合考虑设计(实际)运营车速、交通量、隧道线型等因素, 并注意司乘人员的安全性和舒适性, 特别要注意隧道入口与相邻区段的视觉适应过程。

驾驶员从洞外亮度较高的日光环境进入隧道内较暗环境时, 人眼对路面上障碍物的识别能力需要一段时间恢复。当洞内外的亮度差别越大, 识别能力需要恢复的时间越长, 安全风险越大, 对人工照明的亮度要求越高; 当洞内外的亮度差别越小, 识别能力需要恢复的时间越短, 安全风险越低, 对人工照明的亮度要求越低。

我国在 20 世纪 90 年代初开始关注高速公路隧道照明的相关技术, 直到 2000 年, 国内第一部有关公路隧道照明设计的专用技术规范才正式发布。为了与国际隧道照明的发展进一步接轨, 交通运输部在 2014 年又发布了《公路隧道通风照明设计规范》的修订版, 即《公路隧道照明设计细则》。

### 1.3 照明灯具研究现状

灯具是隧道照明系统的核心组成部分，它关系到隧道内光环境的安全和舒适、节能以及建设和运营成本。

公路隧道照明光源研究，主要集中在LED灯和电磁感应灯。2010年以前国内公路隧道照明大多采用高压钠灯和荧光灯（主要用于洞内紧急停车带和横通道照明）。受国家“节能减排”战略的导向，以LED灯和电磁感应灯为代表的新型高效节能光源得到广泛关注。重庆交通科研设计院首次采用“中间视觉”“视觉功效法”等视觉理论开展此类新型光源在公路隧道内应用指标参数等关键技术研究，并取得了重大技术创新，可实现公路隧道运营照明节能30%以上。广东、重庆、福建、陕西、河北、安徽、浙江等省、市开展了研究成果的试点应用工作，积累了大量的工程经验。如广东省交通运输厅积极研究并推广LED灯照明、太阳能、风能在交通机电工程及隧道安全设施中的应用，龙头山双洞八车道高速公路隧道采用LED光源，节能约40%，且显色性好，无频闪，有利于公路隧道交通安全。

目前，高速公路隧道人工照明采用的灯具以高压钠灯和LED灯具为主，仅有少量的高速公路隧道采用金卤灯、无极灯等其他灯具。近年来荧光灯一般应用到城市隧道的照明系统中，在高速公路隧道内较少采用。随着LED灯具光效的不断提升和成本的持续降低，LED灯具正逐渐取代其他类型的照明灯具。

### 1.4 夜间照明研究现状

在夜间，行驶在高速公路上的车辆在进入隧道前，仅仅有车灯为驾驶者提供光通量，车辆前方路面一定的距离内有光线分布，其他区域则无光线分布，整个视野基本上处于暗环境中。当车辆进入隧道后，由于隧道内基本照明或者应急照明回路开启，隧道内的亮度一般在 $1 \sim 3 \text{ cd/m}^2$ ，其亮度环境是介于暗视觉和明视觉之间的中间视觉。

在车辆通过隧道的整个过程中，驾驶者经历的视觉适应过程为暗视觉—中间视觉—暗视觉。从人的视觉适应性特征可以看出，进入隧道后从暗视觉至中间视觉的转换过程是快速的，而驶出隧道后从中间视觉转

换至暗视觉的过程则是缓慢的。

在夜间照明方面,从美国关于隧道夜间照明指南 *Practice for Tunnel Lighting* (IESNA-RP-22—2005) 可以看出,隧道夜间照明要求要比白天照明要求要低。国际照明学会 *Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses* (CIE 88—2004) 不仅对平均亮度等级提出了最低要求,而且对亮度总均匀度、纵向均匀度也提出了相应要求。国际照明协会、丹麦等在要求亮度水平的同时,特别强调隧道内路面均匀性。

现有的隧道照明设计指导细则(指南)主要将关注点放在了白天照明上,而针对夜间照明的内容较少,忽略了驾驶员的夜间视觉特性。在亮度要求上只是简单地取一个定值,也没有考虑车灯对隧道路面的影响,缺乏相应的基础研究。

《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01—2014)中对夜间调光提出了如下要求:

- (1) 夜间应关闭隧道入口段、过渡段和出口段的加强照明灯具。
- (2) 长度  $L \leq 500$  m 且设置有连续自发光诱导设施和定向反光轮廓标的高速公路和一级公路隧道,夜间可关闭全部灯具。
- (3) 长度  $L \leq 1000$  m 且设置有连续定向反光轮廓标的二级及以下等级公路隧道,夜间可关闭全部灯具。
- (4) 当隧道位于有照明路段时,隧道夜间照明的亮度应与该路段的亮度水平一致;当隧道位于无照明路段时,高速公路和一级公路隧道夜间照明路面亮度可取  $1.0 \text{ cd/m}^2$ ,二级及以下等级公路隧道夜间照明路面亮度可取  $0.5 \text{ cd/m}^2$ 。

(5) 当单向交通隧道夜间交通量不大于  $350 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$ 、双向交通隧道夜间交通量不大于  $180 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$  时,可只开启应急照明灯具。

《公路隧道和地下通道照明指南》(CIE 88—2004)对隧道照明要求如下:

(1) 当隧道位于设置照明的路段时,隧道夜间照明的亮度应同该路段的亮度水平、均匀性、眩光指数以及隧道外道路的参数值设置保持一致。隧道夜间照明的均匀性应不低于白天隧道照明的均匀性。

(2) 如果隧道外道路没有照明,隧道内的路面平均亮度应不低于  $1 \text{ cd/m}^2$ ,路面亮度总均匀度应不低于 0.4,纵向均匀度应不低于 0.6。

《美国隧道照明技术指南》(ANSI/IESNA RP-22-05)对夜间的隧道照

明进行了规定。在夜间,驾驶员的眼睛已经适应了洞外较暗的亮度水平,因此,建议隧道内的平均亮度应不低于  $2.5 \text{ cd/m}^2$  (该亮度值的确定已得到专家的共识)。在隧道入口前和出洞口外一个停车视距内,路面的亮度应不低于隧道洞内亮度的  $1/3$ 。在白天当车速为  $80\text{km/h}$  时,隧道内的亮度要求分别是  $4 \text{ cd/m}^2$ ,  $6 \text{ cd/m}^2$ ,  $8 \text{ cd/m}^2$ 。

《丹麦公路隧道照明指南》(Report No.4: 1995)对夜间照明要求如下:当隧道存在照明时,隧道平均亮度为  $2 \text{ cd/m}^2$ ,亮度总均匀度不小于  $0.4$ ,纵向均匀度不小于  $0.6$ 。当隧道外道路存在照明时,隧道内的平均亮度要求为  $1.0 \text{ cd/m}^2$ ,亮度总均匀度不小于  $0.4$ ,纵向总均匀度不小于  $0.6$ 。

从中国、国际照明协会、美国关于隧道夜间照明指南(细则)可以看出,隧道夜间照明要求要比白天照明要求低,国际照明学会不仅对平均亮度等级提出了最低要求,而且对亮度总均匀度、纵向均匀度也提出了相应要求。

国际照明协会、丹麦等在要求亮度水平的同时,特别强调隧道内路面均匀性。

## 1.5 自然光在隧道照明中的应用

一天内从日出至日落的时段内,洞外亮度随着太阳方位角的变化而不断变化,一般来说,洞外亮度的最大值是在太阳处于中天位置时。一年当中,每天的最高洞外亮度随着地球所在公转轨道的位置而不断变化,太阳出现在天空的位置也不断变化。在研究洞外减光结构物时,结构物的形式、长度、材料等关键参数的确定须结合洞外亮度的时域变化特征,因此隧道洞外亮度的时域变化特征是首先要进行的基础性研究。

如何在不增加电能消耗的前提下提升隧道入口段行车的安全性和舒适性为目前面临的难题之一。太阳光为取之不尽、用之不竭的绿色资源,利用太阳光资源提升隧道照明水平是近年来业界关注的热点之一,大致分为三个方向:一是在隧道洞外设置格栅或者减光棚,在降低隧道洞外亮度的同时利用自然光对格栅或者减光棚下路面进行照明。二是通过设立太阳能光伏电站,将光能转换为电能,为隧道内照明灯具供电。三是利用透镜和光导管将太阳光输送到隧道内部提高隧道内的亮度,即天然

光光纤照明技术。

国外在自然光利用中设置减光格栅的案例较多，早前的设置原理是利用格栅对太阳光的散射来提高路面亮度，通过控制格栅的宽度、高度、间距来避免太阳光线直接照射在路面上。实践表明，此种格栅的透光率严重依赖于云层的情况和太阳的位置，格栅下路面往往难以达到令人满意的亮度。于1967年通车的荷兰 Benelux 隧道就设置了铝质格栅，纵向长度130 m，在任何情况下，阳光都不能直接照射在路面上或者隧道墙壁上。由于格栅的严重腐蚀，该隧道的减光格栅的透光效果严重下降。

在1979年至1984年间，荷兰研究者陆续在该隧道开展了一系列的格栅试验，其中方案之一允许阳光直接照射在格栅下的路面上，该方案格栅下的亮度有所改善，但由于光线的散射和光幕影响，对行车造成严重的干扰，如图1-1所示。

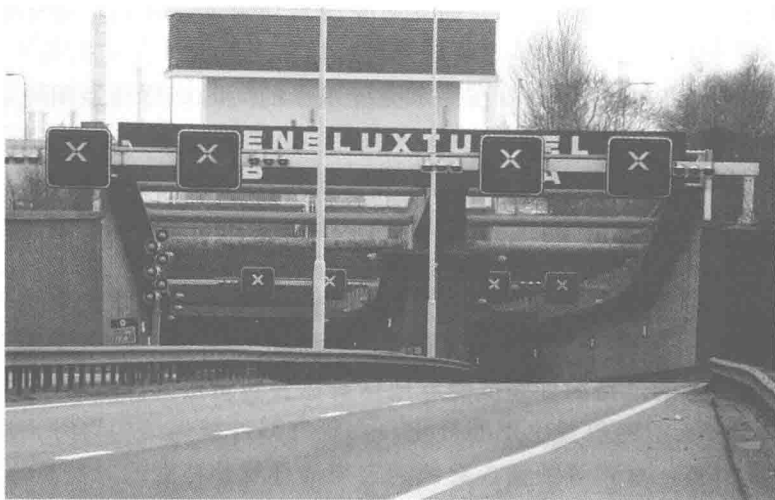


图 1-1 荷兰的隧道自然光利用案例

近年来，国外陆续出现了一些公路隧道减自然光利用案例，部分设施结合太阳能发电站进行设置，如图1-2所示。从国外能够查阅的设施案例可以看出以下特点：

(1) 除格栅外，大部分减光结构的光线从两侧进入内部空间，光线从顶部进入内部空间的案例较少。

(2) 减光结构物采用钢结构等轻型建筑形式的较多，而采用混凝土

结构形式的减光结构物较少。

(3) 从已有的资料来看, 目前还没有通过藤蔓+网架减光的自然光利用形式。

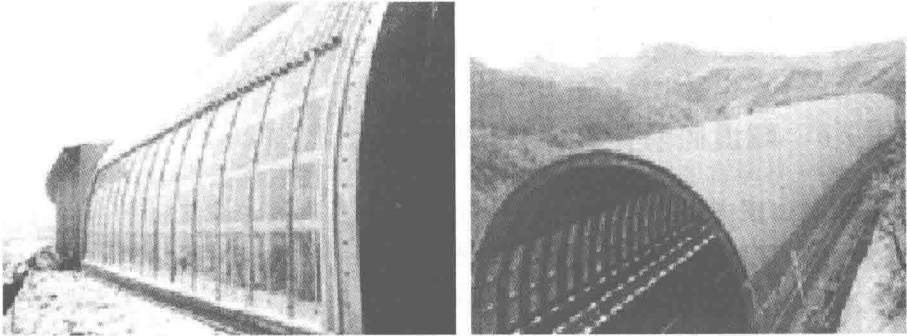
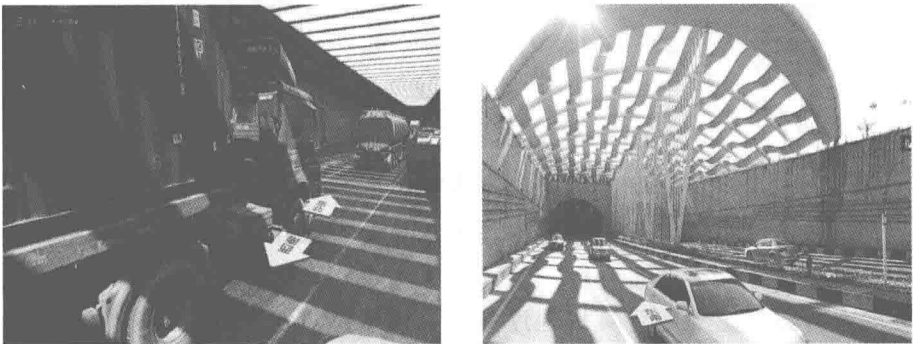


图 1-2 韩国隧道的自然光利用案例

国内近年来实施的隧道照明自然光利用案例中, 主要目的为提升洞口的景观效果, 次要目的为降低隧道洞外亮度, 没有根据人的亮度适应曲线进行结构物长度和其下路面亮度的精确计算, 同时也没有根据洞口地理位置和朝向精确计算其时空特性及利用效能。如图 1-3 所示, 路面上存在着严重的纵向或者竖向条纹, 路面的亮度均匀度较差, 影响了驾驶者的识认能力和视觉的舒适性。在目前自然光利用设施中, 减光棚使用较多, 采用绿化减光方式较少。



(a) 上海外环隧道

(b) 深圳龙华隧道

图 1-3 国内隧道自然光利用案例

综上所述可以看出目前公路自然光利用设施存在的问题如下:

(1) 亮度均匀度差, 存在明显的横向或者竖向条纹, 眩光严重, 影响行车安全。

(2) 长度和亮度设置随意, 不符合人眼的视觉适应特性。

(3) 造价高, 初期投资高, 经济效益不佳, 后期维护费用高。

(4) 隧道照明系统的控制与洞外结构无关, 节能效果有限。

## 1.6 隧道照明计算评估现状

目前, 国内在进行隧道照明设计时, 一般利用系数法, 根据灯具的总光通量和布灯形式, 以路面平均照度为控制指标, 计算灯具的纵向间距, 忽略灯具光强分布、路面类型等因素的影响。传统的研究方法仅能计算灯具直射光线对隧道照明环境的影响, 而无法评估反射光线对照明环境的影响, 如图 1-4 所示。如何忽略反射光对隧道光环境的影响, 计算结果与工程实际有较大的差距。



图 1-4 隧道模型光环境

随着计算机技术和图形图像技术的进步, 采用计算机进行隧道照明的研究和设计变得切实可行。

大多数隧道照明计算机程序具有光线跟踪算法和光能传递算法。光线跟踪算法是由几何光线衍变而来, 最早应用于道路照明计算和隧道照明计算。在道路和隧道照明应用方面, 该算法主要基于路面反射特性表和灯具的光强分布表, 通过路面反射特性矢量与灯具的光线矢量相乘得出路面上一点的亮度值, 该算法的计算量小, 计算速度快。当路面的漫

反射程度较高时，光线跟踪算法的计算效率和精度都较低。由于该算法仅能计算直射光，采用该算法无法精确计算隧道墙壁的亮度水平，也无法评估隧道内表面材料对隧道照明环境的影响，具有一定的应用局限性。光能传递算法是基于能量守恒原理发展而来的算法，不仅可以计算直射光的能量传播，而且可以计算表面反射光的传播。当表面（如路面）的漫反射程度较高时，计算精度较高。能够计算场景中任意一个表面的亮度，如隧道墙壁的亮度，适用于隧道照明的计算和评估。目前，尚没有将光线跟踪算法和光能传递算法融合的技术，从而发挥各自的优势。

目前的模型和算法已经能够精确计算隧道路面的亮度，但还没有相应的隧道内壁计算模型，如图 1-5 所示。目前仅能够粗略计算隧道墙壁的照度，因此对隧道照明整个空间内的视觉特征难以进行全面评估。

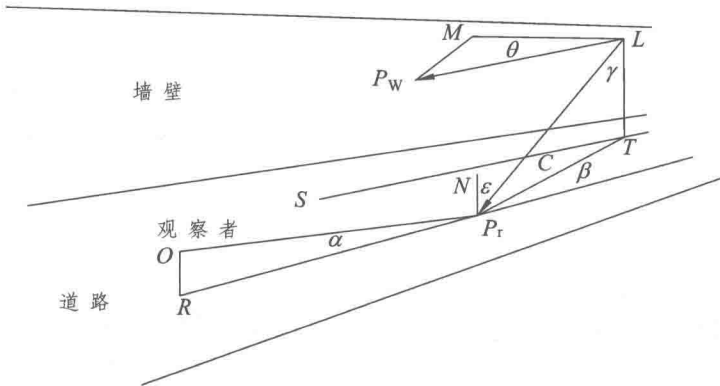


图 1-5 隧道路面和墙壁计算模型

## 【 第 2 章 】>>>>

# 基于光线跟踪的隧道设备配光最优适配 节能技术研究

---

### 2.1 隧道照明质量评价体系

隧道照明质量评价指标体系中，主要评价指标为：亮度、亮度总均匀度、亮度纵向均匀度、照度、照度均匀度、阈值增量和 GR 眩光等。

#### 1. 亮 度

亮度可以表达为单位面积光源在给定方向上，在每单位立体角（sr）内所发出的总光通量，单位为坎德拉每平方米（ $\text{cd}/\text{m}^2$ ），如图 2-1 所示。亮度与观察方向相关，观察者从某一方向观察发光面  $S$ ，在  $S$  上取足够小的面元  $dA$ ，其光强为  $dI$ ，如下图，观察视线与面元法线的夹角为  $\theta$ ，则亮度可表达为：

$$L = \frac{dI}{\cos \theta dA} = \frac{d^2 \Phi}{dA d\Omega \cos \theta} \quad (2-1)$$

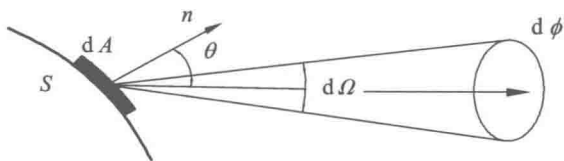


图 2-1 亮度定义示意图

在道路照明中，路面亮度是一个重要的指标，其大小与灯具的光通量大小、光强分布、灯具高度、灯具角度以及路面类型相关，路面上一点  $P$  的亮度计算公式如下：

$$L = \frac{I(C, \gamma) \cdot r(\beta, \varepsilon) \cdot \Phi \cdot MF \cdot 10^{-3}}{H^2} \quad (2-2)$$

式中  $L$ ——路面上  $P$  点的亮度 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ );

$I(C, \gamma)$ ——方向上的光强 ( $\text{cd}/\text{klm}$ ), 如图 2-2 所示;

$r(\beta, \varepsilon)$ ——入射光线指向  $\beta, \varepsilon$  的亮度系数, 与路面类型相关;

$\Phi$ ——灯具的光通量 ( $\text{klm}$ );

$MF$ ——灯具的光通量维持系数;

$H$ ——灯具的在路面上方的高度 ( $\text{m}$ )。

在计算路面的亮度时, 需要将计算点均匀地布设在所计算的车道上, 如图 2-2 所示, 其中  $W_L$  为车道宽度。观察者距离计算区域第一条横线的距离为 60 m。在横向上, 观察者应处于每个车道的横向中心。

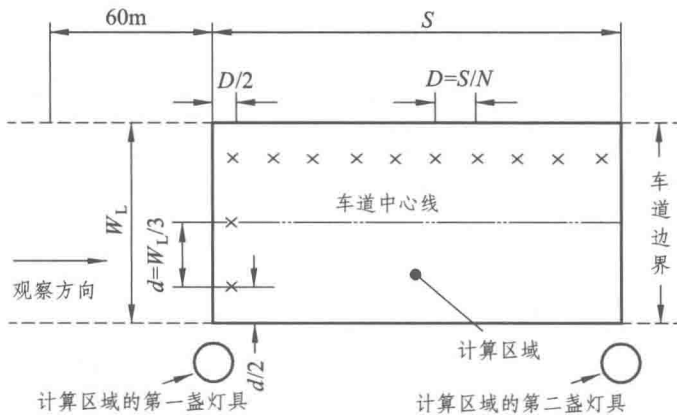


图 2-2 道路亮度计算点布置

## 2. 照 度

照度表示光源投射到物体表面单位面积上的光通量, 单位为勒克斯 ( $\text{lx}$ ), 其公式为:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2-3)$$

照度是客观可精确测量的物理量, 与人眼的视觉感受无关, 因测量方便, 照度被作为道路照明质量评价标准之一。

灯具在路面  $P$  点上产生的水平照度计算公式如下: