

公路隧道照明设计规范

2025 - 01 - 23 发布

2025 - 04 - 22 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 2

5 一般要求 2

6 入口段照明 4

7 过渡段照明 7

8 中间段照明 7

9 出口段照明 8

10 应急照明 9

11 洞外引道照明 9

12 辅助通道及其它地下构造物照明 9

13 特殊灯光带照明 10

14 隧道照明灯具选用 10

15 调光与控制 10

16 照明供配电与接地 13

17 照明计算 13

附录 A（规范性）光学长隧道的计算方法 17

附录 B（规范性）路面简化亮度系数 19

参考文献 22

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替DB14/ T722-2012《公路隧道照明设计规范》，本文件与DB14/T722-2012相比，主要变化如下：

- 更改并增加了部分规范性引用文件（见第2章）；
- 增加了模拟调光A型、模拟调光B型、数字调光A型、数字调光B型、电源回路调光、时序控制调光系统及灌电流控制的定义（见第3章）；
- 增加了改造公路中隧道不足3年交通量的取值建议（见4.5）；
- 更改了公路隧道不设置照明设施的要求（见5.2）；
- 更改了入口段照明设计取值（见6.4）；
- 更改了过渡段照明设计取值（见7.2）；
- 更改了中间段亮度的选用（见8.1）；
- 更改了出口段1和出口段2的亮度取值，并增加了东西向隧道出口段1和出口段2的亮度冗余（见9.2、9.4）；
- 更改了应急照明的规定（见10.1）；
- 删除了接近段的减光（见2012版第10章）；
- 删除了洞外交通信号灯、可变信息板配合应急照明的要求（见2012版11.2）；
- 增加了辅助通道及其他地下构造物照明有关要求（见12章）
- 增加了特殊灯光带照明远程控制和状态检测功能的建议（见13.5）；
- 修改了照明灯具的要求（见14章）；
- 增加了调光系统的选择（见15.1.1）；
- 增加了节能措施（见15.2）；
- 更改了照明控制软件的要求（见15.3）；
- 更改了照明负荷等级的名称及供电要求（见16.2、16.3）；
- 增加了照明直流供电的要求（见16.17）；
- 更改并增加了参考文献（见参考文献[2]、[3]、[4]、[5]、[6]、[7]）。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会（SXS/TC37）归口。

本文件起草单位：山西省交通规划勘察设计院有限公司、山西交通科学研究院集团有限公司。

本文件主要起草人：王相国、王永强、杨涛、任卫英、孙祎翎、常馨方、朱季萍、武瑞兵、李志鹏、张晨铃、郭婷婷。

公路隧道照明设计规范

1 范围

本文件规定了公路山岭隧道照明设计的一般要求、隧道内各区段照明、应急照明、洞外引道照明、辅助通道及其它地下构造物照明、特殊灯光带的设置、隧道照明灯具选用、调光与控制、照明供配电与接地及照明计算。

本文件适用于山西省境内新建和改建公路隧道照明的设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 18226 公路交通工程钢构件防腐技术条件
- GB/T 19666 阻燃和耐火电线电缆或光缆通则
- GB/T 36558 电力系统电化学储能系统通用技术条件
- GB/T 50034 建筑照明设计标准
- GB 50054 低压配电设计规范
- JTG D70/2 公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施
- JT/T 939.2 公路LED照明灯具 第2部分：公路隧道LED照明灯具

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光学长隧道

距洞口一个停车视距处，在道路中心线、离地1.5m高位置不能完全看到出口且长度不大于500米的曲线隧道。计算方法可参考附录A。

3.2

模拟调光 A 型控制系统（AA）

依据洞内外亮度对隧道照明灯具进行模拟调光的控制系统。

3.3

模拟调光 B 型控制系统（AB）

依据洞内外亮度、交通量对隧道照明灯具进行模拟调光的控制系统。

3.4

数字调光 A 型控制系统（DA）

依据洞内外亮度对隧道照明灯具进行数字调光的控制系统。

3.5

数字调光 B 型控制系统（DB）

依据洞内外亮度、交通量对隧道照明灯具进行数字调光的控制系统。

3.6

电源回路调光控制系统 (PA)

通过隧道照明配电回路分断与闭合对照明灯具调光的控制系统。

3.7

时序控制系统

按照预定的时间表自动调整照明灯具功率的调光控制系统。

3.8

灌电流控制方式

外部控制电流通过灯具控制端引线向灯具“流入”的控制方式。

4 总则

4.1 应遵循安全可靠、经济实用、便于维护、节能环保的设计理念，积极稳妥地采用新理论、新技术、新材料、新设备，合理选取照明设计方案。

4.2 公路隧道照明应结合公路等级、隧道断面、平纵线形、设计交通量、设计时速、路面类型、洞门型式、洞口周围环境、洞内装饰、隧道通风状况综合考虑设计方案。

4.3 隧道照明应结合近期、远期预测交通量统一规划设计。

- a) 高速公路和具有干线功能的一级公路隧道照明近期设计交通量宜采用通车 10 年的预测交通量，远期设计交通量宜采用通车 20 年的预测交通量。
- b) 具有集散功能的一级公路及二级、三级公路隧道照明近期设计交通量宜采用通车 7 年的预测交通量，远期设计交通量宜采用通车 15 年的预测交通量。
- c) 隧道照明近期设计亮度达到远期设计亮度的 60%时，宜按远期设计方案一次实施。

4.4 应结合灯具类型、布置方式、配光方式、控制方式进行隧道照明方案比选。

4.5 改造公路中，交通量数据不足 3 年时，可参考上一年度交通量作为基准交通量；无交通量数据时，可采用本地区同等级公路上一一年度的交通量作为基准交通量。

5 一般要求

5.1 照明设计应开展以下调查工作：

- d) 隧道附近地形、洞口朝向、洞口附近视野情况、植被情况、隧道洞外路段的平纵线形和气象状况等环境条件；
- e) 道路等级、隧道长度、平纵线形、洞门结构型式、横断面布置、建筑限界、路面类型、墙面装饰等土建结构物的设计方案；
- f) 设计交通量、设计时速、交通组成以及交通组织形式；
- g) 灯具的技术指标及调光设施性能；
- h) 变配电所位置、容量、电源质量等；
- i) 隧道运营管理方式。

5.2 下列公路隧道可不设置照明设施：

- a) 长度 $L \leq 100\text{m}$ 的公路隧道；
- b) 长度介于 $100\text{m} < L \leq 150\text{m}$ 之间的高速非光学长隧道、一级公路非光学长隧道；
- c) 长度 $L \leq 200\text{m}$ 且等级在二级及二级以下的公路隧道。

- 5.3 对于单洞长度小于 200m，需要设置照明设施且远离电力系统的隧道，通过经济性比较，当太阳能供电方案优于市电供电方案时，可采用太阳能供电方案，并配置供电时间不小于 4 天的电化学储能系统。储能系统的功率控制、主要设备性能应满足《电力系统电化学储能系统通用技术条件》GB/T 36558 的要求。
- 5.4 灯具布置可采用中线布置、中线侧偏布置、双侧布置等形式。
- 5.5 加强段的照明由基本照明和加强照明两部分组成，基本照明灯具布置方式宜与中间段灯具布置方式一致。
- 5.6 有人行通行需求的隧道，应根据隧道长度和环境条件设置满足行人通行需求的照明设施。
- 5.7 不设置照明的隧道应设置视线诱导设施，诱导设施宜采用自发光诱导设施或有源诱导设施。
- 5.8 平均亮度与平均照度间的换算关系如无实测资料时，黑色沥青路面可按 $15\text{ lx}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$ 取值；水泥混凝土路面可按 $10\text{ lx}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$ 取值。
- 5.9 隧道内两侧墙面 2m 高范围内的平均亮度不宜低于路面平均亮度的 60%。
- 5.10 隧道内两侧墙面 2m 高范围内宜采用反射率不小于 0.7 的墙面材料装饰。
- 5.11 单向交通隧道照明各区段构成可用图 1 表示。

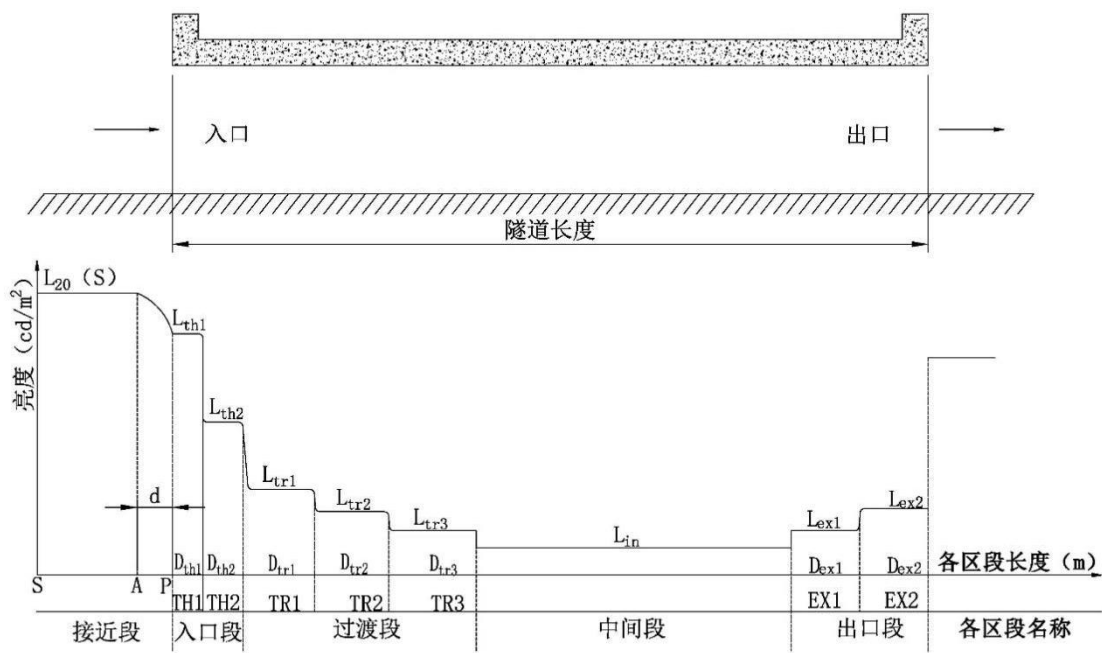


图1 单向交通隧道照明各区段构成图

- 5.12 双向交通隧道照明各区段构成可用图 2 表示。

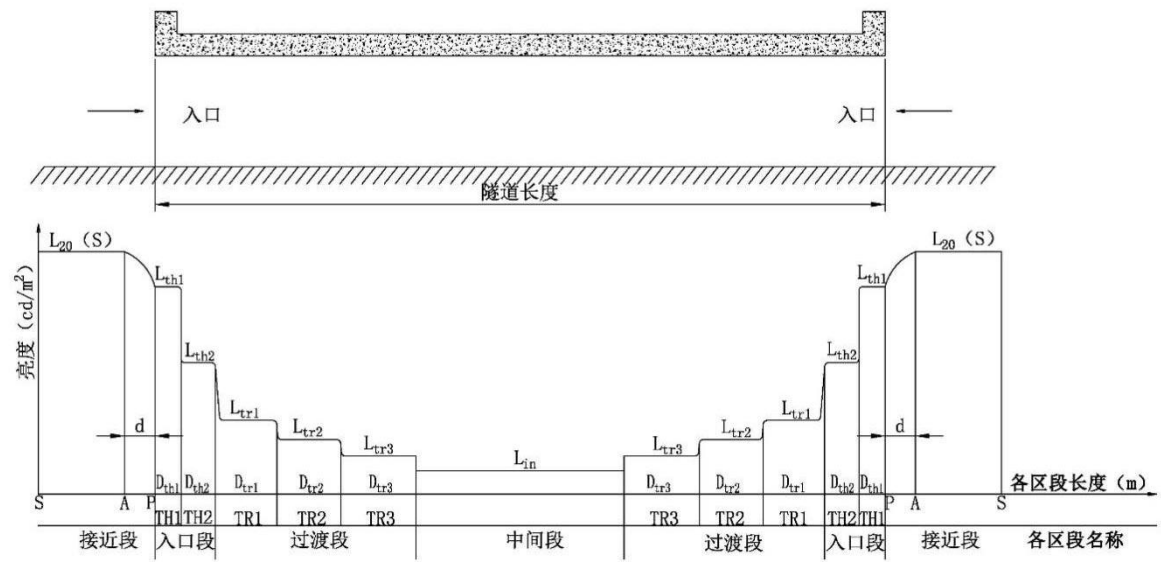


图2 双向交通隧道照明各区段构成图

图中：

- S —— 接近段起点，即隧道外距入口一倍停车视距长度处；
- A —— 适应点；
- P —— 洞口；
- d —— 适应距离；
- $L_{20}(S)$ —— 洞外亮度；
- L_{th1} 、 L_{th2} —— 入口段1、入口段2亮度；
- L_{tr1} 、 L_{tr2} 、 L_{tr3} —— 过渡段1、过渡段2、过渡段3亮度；
- L_{in} —— 中间段亮度；
- L_{ex1} 、 L_{ex2} —— 出口段1、出口段2亮度；
- D_{th1} 、 D_{th2} —— 入口段1、入口段2长度；
- D_{tr1} 、 D_{tr2} 、 D_{tr3} —— 过渡段1、过渡段2、过渡段3长度；
- D_{ex1} 、 D_{ex2} —— 出口段1、出口段2长度。

5.13 隧道照明设计应明确照明参数取值、照明灯具性能指标、计算结果。

6 入口段照明

6.1 洞外亮度

- 6.1.1 在隧道接近段起点 S 处，距地面 1.5 米高正对洞口方向 20° 视场实测得到的平均亮度。
- 6.1.2 当洞外亮度不具备实测条件时，宜按表 1 选取。

表1 洞外亮度 L_{20} (S) (单位: cd/m²)

天空面积百分比	洞口朝向或洞外环境	设计速度 v_t (km/h)			
		40	60	80	100
35%~50%	南洞口	—	—	4000	4500
	北洞口	—	—	5500	6000
25%	南洞口	3000	3500	4000	4500
	北洞口	3500	4000	5000	5500
10%	暗环境	2000	2500	3000	3500
	亮环境	3000	3500	4000	4500
0%	暗环境	2000	2500	3000	3500
	亮环境	2500	3000	3500	4000
注1: 天空面积百分比指20° 视场中天天空面积百分比; 注2: 南洞口指北行车辆驶入的洞口, 北洞口指南行车辆驶入的洞口; 注3: 东洞口与西洞口取用南洞口与北洞口之平均值; 注4: 暗环境指洞外景物反射率低的环境, 如洞口采用削竹式或采用树木、草地绿化时; 注5: 亮环境指洞外景物发射率高的环境, 如洞口采用端墙式时。					

6.1.3 当隧道洞门土建及绿化工程完成后, 洞外亮度 L_{20} (S) 宜进行补充实测, 若实测值与设计取值的误差超出±25%时, 应调整隧道照明设计, 实测方法有计算查表法、黑度法、环境简图法、数码相机测试法、成像亮度仪法等。

6.2 照明停车视距取值

照明停车视距 D_s 按表2取值。

表2 照明停车视距 D_s (单位: m)

设计速度 v_t (km/h)	纵坡 (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
100	179	173	168	163	160	158	157	155	154
80	113	113	112	111	110	109	108	108	107
60	77	77	76	75	75	75	74	74	73
40	48	48	48	48	47	47	47	47	47

6.3 入口段照明亮度和长度计算

6.3.1 入口段宜由 TH1、TH2 两个照明段组成, 与之对应的亮度 L_{th1} 、 L_{th2} 可按式 (1) 和式 (2) 计算:

$$L_{th1} = k \times L_{20} \text{ (S)} \dots\dots\dots (1)$$

$$L_{th2} = \frac{1}{2} \times k \times L_{20} \text{ (S)} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- L_{th1} ——入口段 TH1 亮度, 单位为坎德拉每平方米 (cd/m²) ;
- L_{th2} ——入口段 TH2 亮度, 单位为坎德拉每平方米 (cd/m²) ;

- k ——入口段亮度折减系数，可按表 3 选取；
 L_{20} (S) ——设计洞外亮度，单位为坎德拉每平方米 (cd/m^2)。

表3 入口段亮度折减系数 k

设计小时交通量 $N[\text{veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})]$		设计速度 v_t (km/h)			
单向交通	双向交通	100	80	60	40
≥ 1200	≥ 650	0.045	0.035	0.022	0.012
≤ 350	≤ 180	0.035	0.025	0.015	0.010
注1：设计小时交通量 N 指单洞每车道混合车型高峰小时交通量；					
注2：当交通量在中间值时，按线性内插计算取值。					

6.3.2 入口段长度可按式 (3) 计算：

$$D_{th1} = D_{th2} = \frac{1}{2} \left(1.154 D_S - \frac{h-1.5}{\tan 10^\circ} \right) \dots\dots\dots (3)$$

- 式中：
 D_{th1} ——入口段TH1长度，单位为米 (m) ；
 D_{th2} ——入口段TH2长度，单位为米 (m) ；
 D_S ——照明停车视距，按表2选取，单位为米 (m) ；
 h ——洞内轮廓净空高度，单位为米 (m) 。

6.4 入口段照明设计取值

- 6.4.1 长度 $150\text{m} < L \leq 300\text{m}$ 的非光学长隧道，入口段照明设计亮度 L_{th1} 和 L_{th2} 分别按式 (1) 和式 (2) 计算值的 20%取值，布置长度 D_{th1} 和 D_{th2} 按式 (3) 计算取值。
6.4.2 长度 $300\text{m} < L \leq 500\text{m}$ 的非光学长隧道，入口段照明设计亮度 L_{th1} 和 L_{th2} 分别按式 (1) 和式 (2) 计算值的 50%取值，布置长度 D_{th1} 和 D_{th2} 按式 (3) 计算取值。
6.4.3 长度 $100\text{m} < L \leq 300\text{m}$ 的光学长隧道，入口段照明设计亮度 L_{th1} 和 L_{th2} 分别按式 (1) 和式 (2) 计算值的 50%取值，布置长度 D_{th1} 和 D_{th2} 按式 (3) 计算取值。
6.4.4 长度 $L > 500\text{m}$ 的非光学长隧道及长度 $> 300\text{m}$ 的光学长隧道，入口段照明设计亮度 L_{th1} 和 L_{th2} 分别按式 (1) 和式 (2) 计算取值，布置长度 D_{th1} 和 D_{th2} 按式 (3) 计算取值。

6.5 入口段照明灯具布设

入口段的加强照明灯具宜从洞门建筑顶部以内10m开始布设，入口段基本灯具可从洞门建筑顶部以内4m~6m开始布设。

6.6 入口段照明亮度的折减

两座隧道间的行驶时间 t 按设计速度计算小于15s，且通过前一座隧道内的行驶时间大于30s时，后续隧道的入口段照明设计亮度应折减，折减率可按表4选取。

表4 后续隧道入口段亮度折减率

两隧道之间的行驶时间 t (s)	$t < 2$	$2 \leq t < 5$	$5 \leq t < 10$	$10 \leq t < 15$
--------------------	---------	----------------	-----------------	------------------

后续隧道入口段亮度的折减率（%）	50	30	25	20
------------------	----	----	----	----

7 过渡段照明

7.1 过渡段照明亮度和长度计算

7.1.1 过渡段宜由 TR1、TR2、TR3 三段组成，各过渡段照明亮度 L_{tr} 应按表 5 计算。

表5 过渡段亮度 L_{tr} （单位：cd/m²）

照明段	过渡段 I （TR1）	过渡段 II （TR2）	过渡段 III （TR3）
亮度 L_{tr}	$L_{tr1}=0.15L_{th1}$	$L_{tr2}=0.05L_{th1}$	$L_{tr3}=0.02L_{th1}$

7.1.2 过渡段 TR1 照明长度 D_{tr1} 应按式（4）计算。

$$D_{tr1} = \frac{D_{th1}+D_{th2}}{3} + \frac{v_t}{1.8} \dots\dots\dots (4)$$

7.1.3 过渡段 TR2 长度 D_{tr2} 、TR3 长度 D_{tr3} 应按表 6 选取。

表6 过渡段 2、过渡段 3 长度（单位：m）

设计速度 v_t (km/h)	D_{tr2}	D_{tr3}
100	111	167
80	89	133
60	67	100
40	44	67

7.2 其他要求

7.2.1 长度 $L \leq 300m$ 的隧道，可不设置过渡照明段。长度 $L > 300m$ 的隧道，各过渡段设计亮度 L_{tr} 按表 5 计算取值，布置长度 D_{tr} 分别按公式（4）和表 6 计算取值。

7.2.2 当过渡段 TR3 的设计亮度不大于中间段照明设计亮度的 2 倍时，可取消该过渡段。

8 中间段照明

8.1 中间段照明亮度

中间段照明亮度宜按表7选用。

表7 中间段亮度 L_{in} （单位：cd/m²）

设计速度 v_t (km/h)	L_{in}		
	单向交通		
	$N \geq 1200 [veh / (h \cdot ln)]$	$350 [veh / (h \cdot ln)] < N < 1200 [veh / (h \cdot ln)]$	$N \leq 350 [veh / (h \cdot ln)]$
	双向交通		
	$N \geq 650 [veh / (h \cdot ln)]$	$180 [veh / (h \cdot ln)] < N < 650 [veh / (h \cdot ln)]$	$N \leq 180 [veh / (h \cdot ln)]$
100	6.5	4.5	3.0

80	3.5	2.5	1.5
60	2.0	1.5	1.0
40	1.0	1.0	1.0
注：当设计时速为100km/h时，中间段亮度可按表中80km/h对应亮度取值；			

8.2 中间段照明亮度的设计取值其它要求

8.2.1 以设计速度通过单向交通隧道的行车时间超过 135s 时，隧道中间段宜分为两个区段，第一个区段为设计速度 30s 行车时间的长度，设计亮度可按表 7 取值；第二个区段设计亮度不应小于第一个区段亮度的 80%，且不应低于 1.0cd/m^2 。

8.2.2 人车混合通行的隧道，中间段亮度不应低于 2.0cd/m^2 。

8.3 中间段灯具布置

8.3.1 隧道中间段处于圆曲线半径在 1000m 以下的曲线段内，且采用中线侧偏布置方式时，灯具应靠近曲线外侧布置，布设间距宜为直线段间距的 0.5 倍~0.7 倍，转弯处的灯具不应安装在直线段灯具的延长线上。

8.3.2 隧道中间段处于圆曲线半径在 1000m 以下的曲线段内，且采用双侧布置方式时，宜采用对称布置。

8.3.3 路面亮度总均匀度应不低于表 8 所示值。

表8 路面亮度总均匀度 U_0

设计小时交通量 $N[\text{veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})]$		U_0
单向交通	双向交通	
≥ 1200	≥ 650	0.4
≤ 350	≤ 180	0.3
注：当交通量在中间值时，按线性内插计算取值。		

8.3.4 路面中线亮度纵向均匀度应不低于表 9 所示值。

表9 路面中线亮度总均匀度 U_l

设计小时交通量 $N[\text{veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})]$		U_l
单向交通	双向交通	
≥ 1200	≥ 650	0.6
≤ 350	≤ 180	0.5
注：当交通量在中间值时，按线性内插计算取值。		

8.4 紧急停车带和车（人）行横洞照明

8.4.1 紧急停车带宜采用显色指数高的灯具，其亮度应不低于 4cd/m^2 。

8.4.2 车行、人行横洞照明亮度应不低于 2cd/m^2 。

9 出口段照明

- 9.1 出口段照明宜分为出口段 1、出口段 2，每段长度宜取 30m。
- 9.2 出口段 1 亮度应按中间段亮度的 3 倍取值，出口段 2 亮度应按中间段亮度的 5 倍取值。
- 9.3 长度不大于 300 米的直线隧道可不设置出口段加强照明。
- 9.4 东西朝向隧道且出口区域开阔的隧道，出口段亮度宜在 9.2 条规定的基础上增加 20%，可根据时段进行调光。
- 9.5 出口段灯具宜从洞门建筑顶部以内 10m 开始布置。

10 应急照明

- 10.1 长度大于 500m 的高速公路隧道、长度大于 1000m 的一级和二级公路隧道均应设置应急照明系统，应急照明应采用应急电源供电，照明中断时间不应大于 0.2s，在正常供电电源失电时应急照明维持时间不应小于 30min。应急电源参考《公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施》JTG D70/2 中应急电源的要求。
- 10.2 应急照明启用时，洞内路面亮度不应小于中间段亮度的 10%，且不应低于 0.2cd/m²。
- 10.3 无特殊要求时，应急照明灯具应选用快速再启动的灯具。
- 10.4 应急照明灯具宜采用集中供电方式，正常时可作为基本照明的一部分。

11 洞外引道照明

- 11.1 当隧道设置有夜间照明且洞口一个停车视距范围内无照明设施时，洞外引道宜设置路灯。
- 11.2 洞外引道布灯长度与路面亮度宜不低于表 10 中数值。

表10 洞外引道布灯长度与路面亮度表

设计速度Vt (km/h)	路面亮度 (cd/m ²)	长度 (m)
100	2.0	180
80	1.0	130
60	0.5	95
40	0.5	60

12 辅助通道及其它地下构造物照明

12.1 辅助通道及其它地下构造物组成

辅助通道及其它地下构造物包括平行通道、地下变电所、地下风机房、地下水泵房。

12.2 平行通道照明设计

- 12.2.1 平行通道宜设置照明，路面亮度不应低于 2 cd/m²。
- 12.2.2 灯具宜采用快速再启动的灯具，可采用顶部中线单排布置。
- 12.2.3 应具有本地控制和远程控制功能，本地控制宜采用双控方式。
- 12.2.4 长度大于 500m 的高速公路平行通道、长度大于 1000m 的一级公路平行通道均应设置应急照明系统。应急照明启用时，路面亮度应不低于 1 cd/m²。

12.3 隧道地下变电所、地下风机房、地下水泵房照明设计

12.3.1 隧道地下变电所、地下风机房、地下水泵房内应设置照明。照度标准可参照《建筑照明设计标准》GB/T 50034 公共建筑和工业建筑通用房间或场所照明标准取值。

12.3.2 需人员长期值班时，照明系统应采用应急电源供电，应急维持时间不小于 60min。

13 特殊灯光带照明

13.1 7km 及以上的特长隧道可设置特殊灯光带，特殊灯光带应综合考虑地质条件和地下变电所、地下风机房等因素进行选址。

13.2 特殊灯光带布置间距宜介于 3.5km~5km，每处灯光带设计长度宜介于 200m~250m。

13.3 宜选用与主洞照明色彩和色温显著不同、节能效果好的灯具，实现与主洞照明不同的视觉效果。特殊灯光带照明不应影响中间段的路面功能性照明。

13.4 特殊灯光带照明应采用独立回路供电。

13.5 隧道管理站应具有远程控制及状态监测功能。

14 隧道照明灯具选用

14.1 以稀释烟尘作为隧道通风控制工况的隧道，宜选用透雾性较好的灯具；不以稀释烟尘作为隧道通风控制工况的隧道，宜选用高光效、显色指数高的隧道 LED 照明灯具。

14.2 应具有良好的防腐性能，防腐性能应满足《公路交通工程钢构件防腐技术条件》GB/T 18226 的相关规定，灯具整体防护等级应不低于 IP65。

14.3 灯具应具有抑制眩光措施，可具备自清洁功能。

14.4 隧道照明可结合灯具布设方式选用对称、非对称、逆向非对称配光类灯具。

14.5 LED 灯具整灯光效不宜小于 130lm/W。

14.6 LED 灯具显色指数 Ra 应不小于 70，色温宜介于 2800K~5500K。

14.7 LED 灯具宜采用恒流驱动电源供电，恒流驱动电源应具有±15%额定输入宽电压适应能力，转换效率应不小于 86%；功率因数不应小于 0.95。

14.8 LED 灯具控制端宜采用灌电流控制方式，控制端输入电阻宜不小于 5MΩ。

14.9 具有无级调光功能的 LED 灯具电源宜采用电压控制电流源亮度控制方式，亮度调整范围宜在 10%~100%范围内；控制信号宜选 0V~5V 或 0V~10V 模拟信号传输方式，0V 对应最大亮度，5V 或 10V 对应最低亮度，中间呈线性关系。

14.10 在额定电流下，LED 灯具持续点亮 50000h 时，其光通量维持率应不低于 70%。

14.11 隧道 LED 灯具其它指标应符合 JT/T 939.2 的技术要求。

15 调光与控制

15.1 调光与控制的要求

15.1.1 宜根据公路隧道的长度和设计小时交通量等因素选择调光控制系统，可按表 11 选取。

表11 公路隧道调光系统的选择

隧道长度L (m)	设计小时交通量N[veh/ (h · ln)]		
	单向交通：N≤350 双向交通：N≤180	单向交通：350<N<1200 双向交通：180<N<650	单向交通：1200≤N 双向交通：650≤N
L≤1000	AA、DA、PA	AA、DA、PA	AA、DA、PA
1000<L≤3000	AA、DA	AA、DA、AB、DB	AA、DA
3000<L	AA、DA	AA、DA	AA、DA
注1：表中“、”表示“或”的关系。			

15.1.2 《公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施》JTG D70/2 中对亮度检测器设置不作要求或不设置隧道管理站的隧道可采用时序控制系统调光。时序控制系统应具备根据天文规律计算当地日出、日落的时刻，调整调光时间的功能。

15.1.3 采用 AA、DA 或 PA 调光系统的公路隧道，照明系统在白天应具有按实时洞外亮度调节各加强照明区段亮度的功能，可按表 12 所示四档控制调光。

表12 调光表一

洞外环境亮度分级		调光亮度 (cd/m ²)
I	晴天	L ₂₀ (S)
II	云天	0.5×L ₂₀ (S)
III	阴天	0.25×L ₂₀ (S)
IV	重阴天	0.13×L ₂₀ (S)

15.1.4 设置有洞外亮度采集和交通量采集设施并采用 AB 或 DB 调光系统的公路隧道，照明系统在白天可按表 13 所示分档控制调光。

表13 调光表二

洞外环境亮度分级		实时交通量N分级[veh/（h·ln）]		相应设计速度下的入口 段亮度折减系数	调光亮度（cd/m ² ）
		单向交通	双向交通		
晴天	I	N≤350	N≤180	k1	k×L ₂₀ （S）
	II	350<N<1200	180<N<650	k2	
	III	N≥1200	N≥650	k3	
云天	I	N≤350	N≤180	k1	0.5×k×L ₂₀ （S）
	II	350<N<1200	180<N<650	k2	
	III	N≥1200	N≥650	k3	
阴天	I	N≤350	N≤180	k1	0.25×k×L ₂₀ （S）
	II	350<N<1200	180<N<650	k2	
	III	N≥1200	N≥650	k3	
重阴天	I	N≤350	N≤180	k1	0.13×k×L ₂₀ （S）
	II	350<N<1200	180<N<650	k2	
	III	N≥1200	N≥650	k3	
注1：实时交通量在Ⅰ档对应的交通量范围内时，入口亮度折减系数k1从表3选取； 注2：实时交通量在Ⅱ档对应的交通量范围内时，入口亮度折减系数k2从表14选取； 注3：实时交通量在Ⅲ档对应的交通量范围内时，入口亮度折减系数k3从表3选取。					

表14 k2 与实时交通量平均值 N 关系表

交通方式	设计速度 v_t (km/h)	k_2 与 N 关系式	实时交通量平均值 $N[\text{veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})]$
单向交通	100	$k_2=0.045-0.01 \times (1200-N)/850$	$350 < N < 1200$
	80	$k_2=0.035-0.01 \times (1200-N)/850$	
	60	$k_2=0.022-0.007 \times (1200-N)/850$	
	40	$k_2=0.012-0.002 \times (1200-N)/850$	
双向交通	100	$k_2=0.045-0.01 \times (650-N)/470$	$180 < N < 650$
	80	$k_2=0.035-0.01 \times (650-N)/470$	
	60	$k_2=0.022-0.007 \times (650-N)/470$	
	40	$k_2=0.012-0.002 \times (650-N)/470$	

15.1.5 隧道洞外引道照明宜采用时序控制方式。

15.1.6 相邻档调光切换宜有 2min~3min 的时间延迟。

15.1.7 主洞照明控制系统宜同时具有现场手动控制、远程控制、自动控制多种功能，且现场手动控制级别最高，级别依次降低。

15.1.8 隧道内处于火灾工况时，隧道照明控制应具有将所有照明灯具开启到最大的功能。

15.1.9 车行横洞的灯具应能与横通道门实现联动控制；应具备远程控制和现场手动控制功能，手动控制级别高于远程控制。

15.1.10 人行横洞的灯具应具备感应控制或与门联动控制功能。

15.1.11 地下变电所、地下风机房、地下水泵房内照明灯具宜处于常关闭状态，应具备远程控制、现场手动控制灯具的功能，现场手动控制级别高于远程控制。

15.2 节能措施

15.2.1 当中间段采用显色指数 $R_a \geq 70$ 且色温介于 3500K~5500K 的 LED 灯具时，中间段亮度宜按如下要求取值。

- 设计速度不大于 80km/h 时，中间段设计亮度可按表 7 规定值的 50%取值，但亮度不应低于 $1.0\text{cd}/\text{m}^2$ 。
- 设计速度为 100km/h 时，且隧道中间段亮度按表 7 的注 1 取值，不应再次折减。

15.2.2 采用 PA 调光系统，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。

15.2.3 夜间应关闭隧道入口段、过渡段和出口段加强照明灯具。

15.2.4 公路设有照明时，其路段上的隧道夜间照明亮度应与道路亮度水平一致；公路未设置照明时，高速公路和一级公路隧道夜间照明亮度可取 $1.0\text{cd}/\text{m}^2$ ，二级公路隧道夜间照明亮度可取 $0.5\text{cd}/\text{m}^2$ 。

15.3 照明控制应用软件

15.3.1 照明控制应用软件应与采用的调光控制系统相适应。

15.3.2 应具有信息采集、数据处理、控制方案执行、信息显示、远程设置、远程手动调光、数据查询、数据存储、分级保密、故障报警等功能。

15.3.3 软件界面宜显示洞外亮度和交通量的实时数值及变化曲线。

15.3.4 宜实时显示照明不同回路的调光状态。若采用数字调光，宜显示对应地址的灯具组状态。

15.3.5 在各隧道软件界面首页宜设有一键满功率操作键，级别高于手动调光、自动调光控制。

15.3.6 远程手动调光级别高于自动调光控制。

15.3.7 故障报警时，软件应能将灯具的工作状态调为满功率状态。

16 照明供配电与接地

- 16.1 应按照照明负荷等级设置照明供配电系统。
- 16.2 隧道的应急照明、照明控制设施应按特级负荷供电，非应急照明宜按二级负荷供电。
- 16.3 隧道特级负荷应由三个电源供电，由满足一级负荷要求的两个电源和一个应急电源组成，电池维持供电时间不小于 30min。二级负荷的供电系统宜由两回路电源线路供电。
- 16.4 照明配电回路不应将中性线接入功能性开关电器。
- 16.5 紧急停车带照明、人行横洞照明、车行横洞照明灯具可接入应急照明供电回路。
- 16.6 隧道的动力和照明共用变压器对照明质量及灯具寿命有不利影响时，可设照明专用变压器。
- 16.7 照明供配电回路中可配置电力滤波装置，滤波后电网谐波电流允许值应能满足 GB/T 14549 中注入公共连接点谐波电流允许值的要求。
- 16.8 正常情况下，照明设备端子处供电电压偏差宜在 $\pm 5\%$ 额定电压范围内，对于远离变电所的个别回路，难以满足上述要求时，电压偏差可按 $+5\%$ 、 -10% 控制。
- 16.9 变电所至照明配电箱之间的照明主供电干线电缆宜敷设于隧道强电侧电缆沟内；照明配电箱配出的支线电缆宜敷设于隧道侧壁的电缆桥架或线槽内。桥架或线槽内应急照明与非应急照明线缆应采取有效措施分隔。
- 16.10 应急照明主供电干线及桥架内的支线电缆应采用耐火电缆，其余照明主供电干线及桥架内的支线电缆宜采用阻燃电缆。阻燃或耐火电缆应满足 GB/T 19666 燃烧性能要求。
- 16.11 照明灯具应按 A、B、C 相序分别接入，尽可能使三相平衡，最大相负荷电流宜不超过三相负荷电流算术平均值的 115%，最小相负荷电流宜不小于三相负荷电流算术平均值的 85%。
- 16.12 隧道内照明宜分段供电，照明配电箱布置间距宜介于 300m~500m。
- 16.13 隧道照明支线电缆或绝缘护套线可采用金属桥架或其它难燃材料制作的桥架保护，金属桥架或线槽应做热镀锌防腐处理，镀锌量应满足 GB/T 18226 要求；线缆在桥架或线槽内横断面的填充率不应大于桥架横断面的 40%。
- 16.14 隧道照明供配电宜采用 TN-S 接地系统，金属桥架或线槽之间宜采用编织铜带跨接。
- 16.15 照明接地干线应与隧道供配电系统在电缆沟内敷设的总接地干线应可靠连接，照明接地干线与总接地干线连接点不少于 2 处，隧道较长时，应每隔 300m~500m 连接一次。
- 16.16 隧道内所有的照明设备外露可导电部分均应与接地系统可靠连接，照明配电线路的接地故障保护应能满足 GB 50054 中 TN 接地制式保护的有关规定。
- 16.17 当隧道照明采用直流系统供电时，整流装置的额定电流不应小于负荷计算电流的 1.2 倍。

17 照明计算

17.1 一般要求

- 17.1.1 隧道照明可采用等照度曲线法、利用光强表数值计算法、利用系数曲线图计算法进行计算，也可采用照明软件模拟计算。
- 17.1.2 应考虑不同路面类型、隧道内壁装饰材料等因素对路面亮度的影响。
- 17.1.3 大型车比例大于 50%且洞内纵坡大于 2%的特长隧道，灯具养护系数 M 宜取 0.6，其它情况 M 宜取 0.7；灯具利用系数由灯具利用系数曲线查取，无资料时，LED 灯具利用系数可取 0.8。

17.2 照明计算

17.2.1 照明计算需确定的参数

17.2 照明计算

17.2.1 照明计算需确定的参数

照明计算需确定的参数如下：

- a) 隧道净空断面形式；
- b) 路面材料及其亮度系数或简化亮度系数；
- c) 灯具布置方式及安装高度、仰角；
- d) 灯具的类型、规格；
- e) 灯具的光强分布表、利用系数曲线图、等光强曲线图、亮度产生曲线图等数据；

17.2.2 照度计算

17.2.2.1 利用光强表的数值计算方法及步骤：

- a) 某一灯具在洞内路面计算点产生的水平照度可按式（5）计算：

$$E_{pi} = \frac{I_{cy}}{H^2} \cos^3 \gamma \times \frac{\phi}{1000} \times M \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- E_{pi} ——灯具在洞内路面计算点P产生的水平照度，单位为勒克斯（lx）；
- γ ——P点对应的灯具光线入射角，单位为度（°）；
- I_{cr} ——灯具在计算点P的光强值，单位为坎德拉（cd），按灯具厂家提供的灯具光强表取值；
- M ——灯具养护系数；
- ϕ ——灯具的额定光通量，单位为流明（lm）；
- H ——灯具光源中心至路面的高度，单位为米（m）。
- b) 数个灯具在计算点P所产生的照度可按式（6）计算：

$$E_p = \prod_{i=1}^n E_{pi} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- E_p ——P点的水平照度，单位为勒克斯（lx）；
- n ——灯具的数量，计算时可取计算区域前后各一组灯，约2个~4个。
- c) 路面平均照度可按式（7）计算：

$$E_{av} = \frac{\prod_{p=1}^m E_p}{m} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- E_{av} ——路面平均水平照度，单位为勒克斯（lx）；
- m ——计算区域内计算点的总数。

17.2.2.2 利用系数曲线图计算方法：

路面平均水平照度可按式（8）计算。

$$E_{av} = \frac{\eta \cdot \phi \cdot M \cdot \omega}{W \cdot S} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

E_{av} ——路面平均水平照度，单位为勒克斯（lx）；

ω ——灯具布置系数，对称布置时取2，交错及中线布置时取1；

W ——隧道内的路面宽度，单位为米（m）；

S ——灯具间距，单位为米（m）。

η ——利用系数。

17.2.3 亮度计算方法及步骤

17.2.3.1 亮度计算应满足下列计算条件：

- 计算区域不小于灯具间距；
- 观察点距计算区域取 60m ~ 160m，应位于行车道中心线，并距路面高度为 1.5m。
- 计算区域内纵向计算点间距不宜大于 1m，横向计算点应不少于 5 点；
- 计算灯具应包括计算区域前后各一组，约 2 ~ 4 盏。

17.2.3.2 某灯具在路面计算点产生的亮度可按式（9）计算：

$$L_{pi} = \frac{I_{cy}}{H^2} r(\beta, \gamma) \dots\dots\dots (9)$$

式中：

L_{pi} ——灯具在i点产生的亮度，单位为坎德拉每平方米（cd/m²）；

$r(\beta, \gamma)$ ——简化亮度系数，参见附录B；

β ——观察面与光入射面之间的夹角，单位为度（°）。

17.2.3.3 数个灯具在计算点产生的亮度可按式（10）计算：

$$L_p = 15 \sum_{i=1}^n L_{pi} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

L_p ——P点产生的亮度，单位为坎德拉每平方米（cd/m²）。

17.2.3.4 计算区域内路面的平均亮度可按式（11）计算：

$$L_{av} = \frac{\sum_{p=1}^m L_p}{m} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

L_{av} ——计算区域内路面的平均亮度，单位为坎德拉每平方米（cd/m²）。

17.2.4 均匀度计算

17.2.4.1 路面亮度总均匀度可按式（12）计算：

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{L_{av}} \dots\dots\dots(12)$$

式中：
 U_0 ——路面亮度总均匀度；
 $L_{\min}$ ——计算区域内路面最小亮度，单位为坎德拉每平方米（ cd/m^2 ）。

17.2.4.2 路面中线亮度纵向均匀度可按式（13）计算：

$$U_1 = \frac{L'_{\min}}{L'_{\max}} \dots\dots\dots(13)$$

式中：
 U_1 ——路面中线亮度总均匀度；
 $L'_{\min}$ ——路面中线最小亮度，单位为坎德拉每平方米（ cd/m^2 ）；
 $L'_{\max}$ ——路面中线最大亮度，单位为坎德拉每平方米（ cd/m^2 ）。

附 录 A
(规范性)
光学长隧道的计算方法

A.1 光学长隧道的长度可根据隧道平曲线半径、隧道车道数以及隧道设计速度等参数按式 (A.1) 计算：

$$L_{op} = \frac{R}{\sqrt{R^2 - (W'/2)^2}} \arccos \frac{R - W'/2}{R} + \frac{R}{\sqrt{R^2 - (W'/2)^2}} \arccos \frac{R - W'/2}{R + W'/2} + R - D_s \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

L_{op} ——光学长隧道长度，单位为米（m）；
 R ——隧道平曲线半径，单位为米（m）；
 W' ——隧道建筑限界净宽，单位为米（m）。

A.2 光学长隧道长度可根据在不同类别隧道平曲线的曲线半径、车道数以及设计速度进行计算。不设超高且路拱 < 2% 时的光学长隧道长度最小值见表 A.1，不设超高且路拱 > 2% 时的光学长隧道长度最小值见表 A.2、设超高时的光学长隧道长度最小值见表 A.3。

表 A.1 不设超高且路拱 < 2% 时的光学长隧道长度最小值（单位：m）

设计速度	60 (km/h)			80 (km/h)			100 (km/h)		
车道数	2 车道	3 车道	4 车道	2 车道	3 车道	4 车道	2 车道	3 车道	4 车道
隧道宽度 W'	9.75	13.5	17.25	10.25	14	17.75	10.5	14.25	18
停车视距 D_s	56	56	56	100	100	100	158	158	158
平曲线最小半径 R	1500	1500	1500	2500	2500	2500	4000	4000	4000
光学长隧道长度 L_{op}	235.81	287.30	331.99	286.34	351.46	408.27	336.66	418.22	489.57

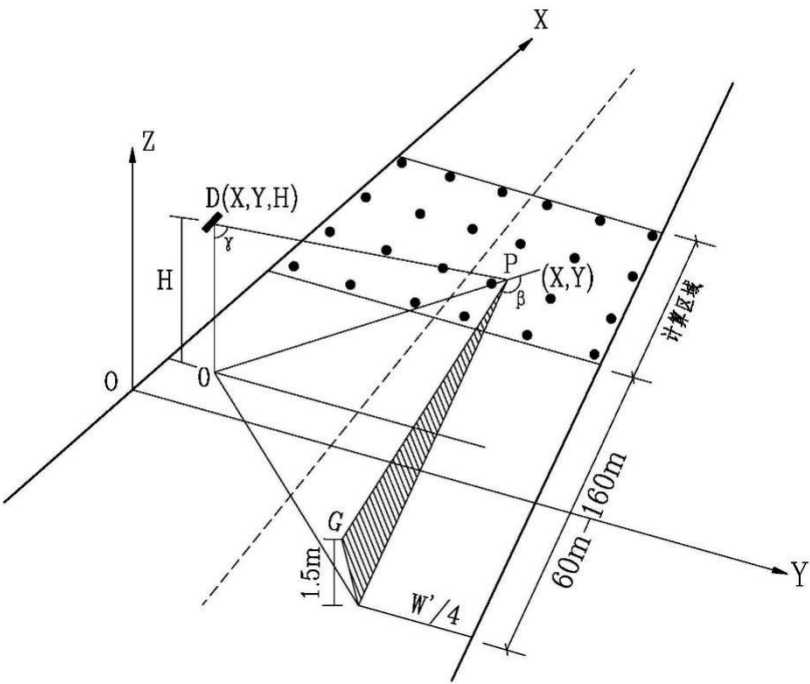
表 A.2 不设超高且路拱 > 2% 时的光学长隧道长度最小值（单位：m）

设计速度	60 (km/h)			80 (km/h)			100 (km/h)		
车道数	2 车道	3 车道	4 车道	2 车道	3 车道	4 车道	2 车道	3 车道	4 车道
隧道宽度 W'	9.75	13.5	17.25	10.25	14	17.75	10.5	14.25	18
停车视距 D_s	56	56	56	100	100	100	158	158	158
平曲线最小半径 R	1900	1900	1900	3350	3350	3350	5250	5250	5250
光学长隧道长度 L_{op}	272.46	330.43	380.75	347.25	422.66	488.45	408.74	502.19	583.95

设计速度	60（km/h）			80（km/h）			100（km/h）		
车道数	2 车道	3 车道	4 车道	2 车道	3 车道	4 车道	2 车道	3 车道	4 车道
隧道宽度 W'	9.75	13.5	17.25	10.25	14	17.75	10.5	14.25	18
停车视距 D _s	56	56	56	100	100	100	158	158	158
平曲线最小半径 R	200	200	200	400	400	400	700	700	700
光学长隧道长度 L _{op}	50.20	68.78	84.85	54.25	80.16	102.71	48.73	82.73	112.44

附录 B
(规范性)
路面简化亮度系数

图B. 1示出隧道内某观察点G、灯具安装点D、计算点P相对空间位置下亮度计算参数 β 、 γ 的关系，表B. 1为水泥混凝土路面下的简化亮度系数 $r(\beta, \gamma)$ 值，表B. 2为沥青混凝土路面下的简化亮度系数 $r(\beta, \gamma)$ 值。



注：图中 D 点为灯具安装位置，G 点为距路面高位 1.5m 的观察点，P 点为计算点， W' 为路面宽。

图 B. 1 亮度计算示意图

表 B.1 水泥混凝土路面简化亮度系数 r (β, γ)

tany	β (°)															
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120
0	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655
0.25	619	619	619	619	610	610	610	610	610	610	610	610	610	601	601	601
0.5	539	539	539	539	539	539	521	521	521	521	521	503	503	503	503	503
0.75	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	395	386	371	371	371	371
1	341	341	341	341	323	323	305	296	287	287	278	269	269	269	269	269
1.25	269	269	269	269	260	251	242	224	207	198	189	189	180	180	180	180
1.5	224	224	224	215	198	180	171	162	153	148	144	144	139	139	139	139
1.75	189	189	189	171	153	139	130	121	117	112	108	103	99	99	103	103
2	161	162	157	135	117	108	99	94	90	85	85	83	84	84	86	90
2.5	121	121	117	95	79	66	60	57	54	52	51	50	51	52	54	58
3	94	94	86	66	49	41	38	36	34	33	32	31	31	33	35	38
3.5	81	80	66	46	33	28	25	23	22	22	21	21	22	22	24	27
4	71	69	55	32	28	20	18	16	15	14	14	14	15	17	19	20
4.5	63	59	43	24	17	14	13	12	12	11	11	11	12	13	14	14
5	57	52	36	19	14	12	10	9.0	9.0	8.8	8.7	8.7	9.0	10	11	13
5.5	51	47	31	15	11	9.0	8.1	7.8	7.7	7.7	6					
6	47	42	25	12	8.5	7.2	6.5	6.3	6.2							
6.5	43	38	22	10	6.7	5.8	5.2	5.0								
7	40	34	18	8.1	5.6	4.8	4.4	4.2								
7.5	37	31	15	6.9	4.7	4.0	3.8									
8	35	28	14	5.7	4.0	3.6	3.2									
8.5	33	25	12	4.8	3.6	3.1	2.9									
9	31	23	10	4.1	3.2	2.8										
9.5	30	22	9.0	3.7	2.8	2.5										
10	29	20	8.2	3.2	2.4	2.2										
10.5	28	18	7.3	3.0	2.2	1.9										
11	27	16	6.6	2.7	1.9	1.7										
11.5	26	15	6.1	2.4	1.7											
12	25	14	5.5	2.2	1.6											

注：水泥混凝土路面平均亮度系数 Q₀=0.10,表中 r 值已扩大 1000 倍，实际使用时应乘以 10⁻³。

表 B.2 沥青混凝土路面简化亮度系数 r (β, γ)

tany	β (°)																			
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329
0.25	362	358	371	364	371	369	362	357	351	349	348	340	328	312	299	294	298	288	292	281
0.5	379	368	375	373	367	359	350	340	328	317	306	280	266	249	237	237	231	231	227	235
0.75	380	375	378	365	351	334	315	295	275	256	239	218	198	178	175	176	176	169	175	176
1	372	375	372	354	315	277	243	221	205	192	181	152	134	130	125	124	125	129	128	128
1.25	375	373	352	318	265	221	189	166	150	136	125	107	91	93	91	91	88	94	97	97
1.5	354	352	336	271	213	170	140	121	109	97	87	76	67	65	66	66	67	68	71	71
1.75	333	327	302	222	166	129	104	90	75	68	63	53	51	49	49	47	52	51	53	54
2	318	310	266	180	121	90	75	62	54	50	48	40	40	38	38	38	41	41	43	45
2.5	268	262	205	119	72	50	41	36	33	29	26	25	23	24	25	24	26	27	29	28
3	227	217	147	74	42	29	25	23	21	19	18	16	16	17	18	17	19	21	21	23
3.5	194	168	106	47	30	22	17	14	13	12	12	11	10	11	12	13	15	14	15	14
4	168	136	76	34	19	14	13	11	10	10	10	8	8	9	10	9	11	12	11	13
4.5	141	111	54	21	14	11	9	8	8	8	8	7	7	8	8	8	8	10	10	11
5	126	90	43	17	10	8	8	7	6	6	7	6	7	6	6	7	8	8	8	9
5.5	107	79	32	12	8	7	7	7	6	5										
6	94	65	26	10	7	6	6	6	5											
6.5	86	56	21	8	7	6	5	5												
7	78	50	17	7	7	5	5	5												
7.5	70	41	14	7	4	3	4													
8	63	37	11	5	4	4	4													
8.5	60	37	10	5	4	4	4													
9	56	32	9	5	4	3														
9.5	53	28	9	4	4	4														
10	52	27	7	5	4	3														
10.5	45	23	7	4	3	3														
11	43	22	7	3	3	3														
11.5	44	22	7	3	3	3														
12	42	20	7	4	3															
注：沥青路面平均亮度系数 Q ₀ =0.07, 表中 r 值已扩大 1000 倍, 实际使用时应乘以 10 ⁻³ 。																				

参 考 文 献

- [1] GB51348 民用建筑电气设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [2] JTG/T D70/2-01 公路隧道照明设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.
- [3] JT/T939.1 公路 LED 照明灯具 (第 1 部分: 通则).
- [4] JT/T939.5 公路 LED 照明灯具 (第 5 部分: 照明控制器).
- [5] T/CECS G: D85-11 公路隧道 LED 照明调光系统设计标准[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [6] T/CECS G: D85-08 公路直流供电系统设计标准[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [7] 公路隧道提质升级行动技术指南[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [8] 韩直, 方建勤, 洪伟鹏. 公路隧道节能技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [9] 涂耘, 王少飞, 侯伶. 浙西南山区高速公路隧道洞外亮度研究[J]. 公路, 2012 (1).
- [10] 胡英奎, 陈仲林, 刘英婴. 道路照明常用光源在视觉条件下的光效[J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2007 (1).
- [11] 金鹏, 喻春雨、周奇峰. LED 在道路照明的光效优势[J]. 光学精密工程, 2011 (1).
- [12] 周健, 吕晓峰, 杨洋. 公路隧道 LED 灯照明系统无级调光控制方式研究[J]. 公路隧道, 2010 (3).
- [13] 胡英奎, 陈仲林, 孙春红. 公路隧道洞外亮度的确定方法对比分析[J]. 灯与照明, 2010 (6).
- [14] 黄艳国, 倪艳明, 许伦辉. 公路隧道照明无级调光模糊控制方法[J]. 广西师范大学学报, 2011 (3).
- [15] 邹吉平, 李丽, 解全花. 重识道路和隧道照明中亮度与照度的关系[J]. 建筑电器, 2010 (29) 7 期.