

JTG

中华人民共和国行业标准

JTG/T DXX-2027

公路隧道通风照明设计细则 (修订)

Guidelines for Design of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel

(征求意见稿)

2027-xx-xx发布

2027-xx-xx实施

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业推荐性标准

公路隧道通风照明设计细则（修订）

Guidelines for Design of Ventilation and Lighting of Highway
Tunnel

JTG/T DXX-2027

主编单位：北京交科公路勘察设计研究院有限公司

招商局重庆交通科研设计院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

实施日期：2027 年 XX 月 XX 日

前 言

根据交通运输部交公路函〔2025〕474号《交通运输部关于下达2025年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》，由北京交科公路勘察设计研究院有限公司、招商局重庆交通科研设计院有限公司等单位承担《公路隧道通风照明设计细则》（修订）的编制工作。

为了加快建设现代化高质量国家综合立体交通网，突出一体化融合、安全化提升、数智化升级、绿色化转型，本次修订工作坚持“安全、绿色、智能、高效”的理念，借鉴、吸收国内外相关标准及最新技术成果，全面总结了以往我国公路隧道通风及照明设施建设、运营经验，对原《公路隧道照明设计细则》（JTG/T D70/2-01-2014）和《公路隧道通风设计细则》（JTG/T D70/2-02-2014）进行了修订，并将两本细则进行了合并，名称变更为《公路隧道通风照明设计细则》。

修订后的《公路隧道通风照明设计细则》共分为6章和6个附录，分别是1总则、2术语和符号、3基本规定、4总体设计、5通风设施、6照明设施、附录A沿程阻力系数、附录B弯曲与折曲风道压力损失系数、附录C隧道与风道的其他压力损失系数、附录D流体力学中常用的单位及单位换算、附录E测试火源设计、附录F测试方法。与原细则相比，本次修订的主要内容如下：

（1）将原《公路隧道照明设计细则》（JTG/T D70/2-01-2014）和《公路隧道通风设计细则》（JTG/T D70/2-02-2014）两本独立细则合并为一本。并在目录中新增了“基本规定”与“总体设计”章节，加强通风、照明设施与隧道总体设计的协同，强化机电设施与土建、房建等相关专业全生命周期的协调与配合。

（2）顺应低碳与环保趋势，更新计算基准排放量并引入非尾气颗粒物（PM）更新排放基准年。

（3）引入了重点排烟、互补式通风、空气净化系统等新型通风方式及计算方法。

（4）全面增补新能源汽车火灾防控相关条款。

（5）全面贯彻“数智化升级”理念，引入了隧道通风及照明系统的智能化控制，推动隧道管理向数字化、智能化转型。

(6) 细化火灾防排烟设计指标与全尺寸现场通风火灾测试方法。

(7) 为了缓解机动车驾驶员在驶入或驶出水下隧道、下穿隧道以及高日照地区隧道时的强烈视觉反差，新标准细化了减光与衔接照明方案。

(8) 更新了灯具能效与功率因数、路面材料优化色温匹配等多项节能标准

(9) 针对特长隧道和特殊线形隧道带来的视觉疲劳与心理压力，新标准首次规范了景观照明的设置条件。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题与意见，函告本细则日常管理组，联系人：杨秀军（地址：北京市海淀区花园东路 15 号旷怡大厦 12 层，邮编：100191；电话：010-82010896，传真：010-62370155；邮箱：yxj21@tsinghua.org.cn），以便下次修订时研用。

主 编 单 位： 北京交科公路勘察设计研究院有限公司
招商局重庆交通科研设计院有限公司

参 编 单 位：

参 加 单 位：

主 编：杨秀军、吴梦军

主要参编人员：

主 审：杨晓东

参与审查人员：

参 加 人 员：

目 次

1	总则	- 3 -
2	术语和符号	- 4 -
3	基本规定	- 10 -
4	总体设计	- 16 -
5	通风设施	- 18 -
5.1	一般规定	- 18 -
5.2	通风规划与调查	- 20 -
5.3	通风方式	- 28 -
5.4	通风标准	- 35 -
5.5	需风量计算	- 38 -
5.6	通风系统装机功率计算	- 49 -
5.7	风道、风口	- 63 -
5.8	风机房与通风井	- 64 -
5.9	隧道火灾通风	- 77 -
5.10	风机及其他设施选型	- 88 -
5.11	通风控制	- 99 -
5.12	隧道通风测试	- 101 -
6	照明设施	- 105 -
6.1	一般规定	- 105 -
6.2	入口段照明	- 110 -

6.3	过渡段照明	- 115 -
6.4.1	中间段亮度	- 117 -
6.5	出口段照明	- 120 -
6.6	应急照明和洞外引道照明	- 122 -
6.7	节能标准与措施	- 123 -
6.7.1	一般规定	- 123 -
6.7.2	节能标准	- 125 -
6.7.3	节能措施	- 126 -
6.8	照明计算	- 133 -
6.9	照明控制	- 137 -
附录 A	沿程阻力系数	- 141 -
附录 B	弯曲与折曲风道压力损失系数	- 142 -
附录 C	隧道与风道的其他压力损失系数	- 148 -
附录 D	流体力学中常用单位及单位换算	- 153 -
附录 E	测试火源设计	- 155 -
附录 F	测试方法	- 156 -
	本细则用词用语说明	- 160 -

1 总则

1.0.1 为规范公路隧道通风及照明设施设计，确定其建设规模，指导工程建设和运营，制定本标准。

1.0.2 本细则适用于各等级公路隧道的新建和改扩建工程。

1.0.3 公路隧道通风及照明设施设计应纳入隧道总体设计，预留预埋等应与公路土建工程同时设计。

1.0.4 公路隧道通风及照明设施与其他机电设施、公路隧道通风及照明设施与公路隧道土建工程和其他设施之间应互相协调、配合使用。

1.0.5 公路隧道通风及照明设计小时交通量应为混合车型设计高峰小时交通量。

1.0.6 公路隧道通风设计应分别针对正常工况和火灾、交通阻滞等异常交通工况设计。公路隧道照明设计应分别针对正常工况和异常交通工况进行设计。

1.0.7 公路隧道通风及照明设计应统筹，一次设计；隧道通风及照明设施可根据预测交通量变化分期实施。

1.0.8 隧道洞口或排风口等有环境保护要求时，污染气体排放应符合环境保护的有关规定。

1.0.9 公路隧道通风及照明设施设计应积极而稳妥地采用新理论、新技术、新材料、新设备，促进公路隧道运营管理的数字化、智能化。

1.0.10 公路隧道通风及照明设计除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 一氧化碳设计浓度 carbon monoxide concentration

隧道单位体积被污染空气中含有一氧化碳（CO）的体积，用体积浓度计量。

2.1.2 烟尘设计浓度 exhaust/smoke concentration

烟尘对空气的污染程度，通过测定污染空气中 100m 距离的烟尘光线透过率来确定，表示洞内能见度的指标，也称消光系数。

2.1.3 需风量 requested air volume

按保证隧道安全运营要求的环境指标，根据隧道条件计算确定需要的新鲜空气量。

2.1.4 设计风量 designed air volume

以计算得到的隧道需风量为基础，满足运营要求，进行风机配置后达到的通风量。

2.1.5 设计风速 designed wind speed

根据设计风量 Q_r 计算得到的空气在隧道内沿隧道轴向流动的速度。

2.1.6 风压 air pressure

分为静压、动压、全压。作用于各个方向上压强相等的空气压力称为静压；空气以某一速度流动时所产生的压力称为动压；任一测点处静压和动压之和称为全压。本细则所提及静压和全压是指隧道或风机的相对静压和相对全压。

2.1.7 排放系数 emission factor

指汽车单位行驶里程的大气污染物排放量。单位为 $g/(veh \cdot km)$ 。

2.1.8 纵向通风 longitudinal ventilation

通风气流在行车空间沿隧道轴线方向(纵向)的流动。

2.1.9 半横向通风 semi-transverse ventilation

通风气流在行车空间沿垂直于隧道轴线方向(横向)进入(或排出)、沿隧道轴线方向(纵向)排出(或进入)的流动。

2.1.10 全横向通风 transverse ventilation

通风气流在行车空间沿垂直于隧道轴线方向(横向)的流动。

2.1.11 重点排烟 concentrated smoke extraction

隧道纵向设置的专用排烟风道及排烟口(排烟阀),直接从火源附近将烟气快速有效地排出行车道空间的排烟方式。

2.1.12 互补式通风 complementary ventilation

利用上、下行隧道之间设置的换气横通道进行空气交换,使两条隧道内空气质量均能满足通风要求的通风方式。

2.1.13 单通道纵向式通风 single-tunnel longitudinal ventilation

沿隧道全长设置单一行车通道,利用射流风机或通风井等设备,使新鲜空气从隧道一端进入、污染空气从另一端排出的连续纵向气流组织方式。

2.1.14 单通道-竖井组合式纵向通风 single-tunnel with shaft combined longitudinal ventilation

在单通道纵向式通风基础上,于隧道中部或特定位置设置竖井(或斜井),通过竖井进行送风或排风,以缩短纵向通风区段、降低洞内风速并改善火灾等工况下的排烟效果的一种组合通风方式。

2.1.15 通风井 ventilation shaft

为公路隧道运营通风而设置的竖井、斜井和平行导洞。

2.1.16 照度 illuminance

表面上一点的照度是入射在包含该点的面元上的光通量与该面元面积之比。

2.1.17 亮度 luminance

单位投影面积上的发光强度。

2.1.18 接近段 access zone

隧道入口外一个停车视距长度段。

2.1.19 入口段 threshold zone

进入隧道的第一照明段，是使驾驶员视觉适应由洞外高亮度环境向洞内低亮度环境过渡设置的照明段。

2.1.20 过渡段 transition zone

隧道入口段与中间段之间的照明段，是使驾驶员视觉适应由隧道入口段的高亮度向洞内低亮度过渡设置的照明段。

2.1.21 中间段 interior zone

沿行车方向连接入口段或过渡段的照明段，是为驾驶员行车提供最低亮度要求设置的照明段。

2.1.22 出口段 exit zone

隧道内靠近隧道行车出口的照明段，是使驾驶员视觉适应洞内低亮度向洞外高亮度过渡设置的照明段。

2.1.23 洞外亮度 adaptation luminance

距洞口一个停车视距处、离路面 1.5m 高，正对洞口方向 20° 视场范围内环境的平均亮度。

2.1.24 应急照明 emergency lighting

因正常照明的电源失效而启用的照明，供人员疏散、保障安全的照明。

2.1.25 路面平均照度 average road surface illuminance

在路面上预先设定的点上测得的或计算得到的各点照度的平均值。

2.1.26 路面平均亮度 average road surface luminance

在路面上预先设定的点上测得的或计算得到的各点亮度的平均值。

2.1.27 路面亮度总均匀度 overall uniformity of road surface luminance

路面上最小亮度与平均亮度的比值。

2.1.28 路面中线亮度纵向均匀度 longitudinal uniformity of road surface luminance

路面中线上的最小亮度与最大亮度的比值。

2.1.29 养护系数 maintenance factor

照明装置使用一定时期后，受光通量衰减、灯具受污染等影响，该装置提供路面的平均亮度与在相同条件下初装时在同一路面上所得到的平均亮度之比。

2.1.30 利用系数 utilization factor

在相同的使用条件下，灯具发出的、投射到路面上的总光通量与灯具内所有光源发出的总光通量之比。

2.2 符号

A_r ——	隧道净空断面积；
D_r ——	隧道断面当量直径；
f_a ——	车况系数；
f_h ——	海拔高度系数；
f_{iv} ——	纵坡-车速系数；
f_m ——	车型系数；
H ——	隧道内净空高度；
K ——	烟尘设计浓度；
L ——	隧道长度；
N ——	设计小时交通量；
n_c ——	隧道内车辆数；

n_D ——	柴油车车型类别数；
n_+ ——	隧道内与设计风速 v_r 同向的车辆数；
n_- ——	隧道内与设计风速 v_r 反向的车辆数；
p ——	隧址大气压；
p_0 ——	标准大气压；
p_1 ——	风机环境大气压；
Δp ——	通风系统需要的压力；
Δp_b ——	送风口升压力；
Δp_d ——	风道通风阻力；
Δp_e ——	排风口升压力；
Δp_m ——	自然风阻力；
Δp_j ——	射流风机升压力；
Δp_r ——	隧道内通风阻力；
Δp_t ——	交通通风力；
Δp_λ ——	隧道内沿程摩擦阻力；
$\Delta p_{\zeta i}$ ——	隧道内局部阻力；
Q_{co} ——	隧道一氧化碳（CO）排放量；
Q_e ——	排风量；
Q_r ——	隧道设计风量；
Q_{req} ——	隧道需风量；
$Q_{req (CO)}$ ——	隧道稀释一氧化碳（CO）的需风量；
$Q_{req (VI)}$ ——	隧道稀释烟尘的需风量；
$Q_{req (f)}$ ——	火灾排烟需风量；
$Q_{req (ac)}$ ——	隧道换气需风量；
Q_s ——	短道设计风量；
Q_{VI} ——	隧道烟尘排放量；
q_{co} ——	一氧化碳基准排放量；
q_{VI} ——	烟尘基准排放量；
r_1 ——	大型车比例；

r_d ——	柴油车比例；
S_{kw} ——	轴流风机全压输入功率；
S_{th} ——	轴流风机全压输出功率；
v_c ——	临界风速；
v_n ——	自然风作用引起的洞内风速；
v_r ——	隧道设计风速；
v_t ——	设计速度；
v_{ac} ——	隧道换气风速。
E_{av} ——	路面平均照度
f ——	闪烁频率
H ——	灯具光源中心至路面的高度
I_{cy} ——	灯具在计算点的光强值
k ——	入口段亮度折减系数
L ——	隧道长度
$L_{20}(S)$ ——	洞外亮度
L_{av} ——	路面平均亮度
L_{ex} ——	出口段亮度
L_{in} ——	中间段亮度
L_{min} ——	路面最小亮度
L'_{min} ——	路面中线最小亮度
L'_{max} ——	路面中线最大亮度
L_{th} ——	入口段亮度
L_{tr} ——	过渡段亮度
N ——	设计小时交通量
M ——	养护系数
S ——	灯具间距

3 基本规定

3.1 公路隧道设置机械通风可按下列条件初步判定：

1 双向交通隧道，当符合式（3.1.1-1）的条件时，可设置机械通风。

$$L \cdot N \geq 6 \times 10^5 \quad (3.1-1)$$

式中：L——隧道长度（m）；

N——设计小时交通量（veh/h）。

2 单向交通隧道，当符合式（3.1.1-2）的条件时，可设置机械通风。

$$L \cdot N \geq 2 \times 10^6 \quad (3.1-2)$$

条文说明

隧道通风分为自然通风和机械通风两大类。本条提出的两个公式分别为判断是否需要设置机械通风的经验公式，只能作为初步判定的方法。

自然通风是通过气象因素形成的隧道内空气流动，以及机动车从洞外带入新鲜空气来实现隧道内外空气交换。机械通风是通过风机作用使空气沿着预定路线流动来实现隧道内外空气交换。

3.2 长度 $L > 1000\text{m}$ 的高速公路和一级公路隧道、长度 $L > 2000\text{m}$ 的二级公路隧道应设置机械排烟通风、长度 $L > 3000\text{m}$ 的三级、四级公路隧道应设置机械排烟通风。

条文说明

根据国内工程实践，长度 $L \leq 500\text{m}$ 的高速公路和一级公路隧道、长度 $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 的二级公路隧道通常不设置机械防烟与排烟系统。

长度 $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 的高速公路和一级公路隧道、长度 $1000\text{m} < L \leq 2000\text{m}$ 的二级公路隧道是否设置防灾排烟机械通风，与隧道几何条件（长度、纵坡等）、交通条件（交通方式、交通量、交通组成、行车速度等）、有无行人及气象条件等因素有关。例如，对于长期处于三级或四级服务水平的隧道、行车方向平均纵坡 $\leq -3.0\%$ 的隧道等，经调研总结，为保证行车安全，通常设有机防烟排烟系统。

3.3 隧道专用逃生通道、逃生楼梯、长度大于 200m 的人行横洞需要设置机械防烟系统。

条文说明

人员通过长距离人行横洞通往安全区域的过程中，一般耗费时间比较长。另外，考虑到安全门在事故工况下可能处于开启状态。对长距离人行横洞，为防止烟雾进入，需要设置机械防烟系统。

3.4 各等级公路隧道照明设置条件应符合下列要求：

- 1 长度 $L > 200\text{m}$ 的高速公路隧道、一级公路隧道应设置照明；
- 2 长度 $100\text{m} < L \leq 200\text{m}$ 的高速公路光学长隧道、一级公路光学长隧道应设置照明；
- 3 长度 $L > 1000\text{m}$ 的二级公路隧道应设置照明；长度 $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 的二级公路隧道宜设置照明；三级、四级公路隧道应根据实际情况确定；
- 4 有人行需求的隧道，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 不设置照明的隧道应设置视线诱导设施。

3.5 以下隧道宜开展减光棚减光设计：

- 1 洞外亮度大于 $5000\text{cd}/\text{m}^2$ 的隧道入口。
- 2 两隧道间距小于 60m 的连续隧道群的后续隧道入口。
- 3 东西朝向隧道且易产生眩光现象的隧道出口。

条文说明

部分东西朝向隧道且洞口环境比较开阔时，出口朝东的隧道在早上易受到太阳光直射影响，出口朝西的隧道在傍晚易受太阳光直射影响，从而容易造成因太阳光眩光导致的“白洞效应”，设置减光棚有助于减弱太阳光的眩光影响。

3.6 长度在 6km 以上隧道每隔 $2\text{km} \sim 3\text{km}$ 应作警醒设计，警醒设计不宜采用复杂的景观设计方式。

条文说明

驾驶员长时间行驶于隧道内单一照明环境中容易出现视觉疲劳现象，因此，要求根据实际情况设置视觉警醒区域以缓解长大隧道内部行车的视觉疲劳性。驾驶疲劳感随着在隧道内行驶时间的延长而逐渐累积，进入隧道后的前 4min 增长较缓，驾驶员主观难以察觉； $5\text{--}8\text{min}$ 驾驶疲劳快速增长。以往有个别隧道设置的警醒设施观赏性太强，导致驾驶员注意力分散甚至减速或停车观看，由此引发事故的案例也时有发生，故作出不宜设计复杂景观的规定。此

处警醒设计不视为照明设计。

3.7 通风及照明设计采用的设计小时交通量应根据隧道所在路段项目可行性研究报告提出的设计（预测）年平均日交通量（AADT）进行换算，并宜符合下列要求：

1 设计小时交通量系数宜采用项目可行性研究报告提供的数据；当项目可行性研究报告没有明确提出该数据时，山岭重丘区隧道可取 12%、平原微丘区隧道可取 10%、城镇附近的隧道可取 9%。

2 单向交通隧道的方向分布系数宜根据项目可行性研究报告取值，当项目可行性研究报告没有明确提出该值时，可取 55%；双向交通隧道行车上坡较长方向的方向分布系数可取 60%。

3 当设计小时交通量大于隧道所在路段的最大服务交通量时，宜采用最大服务交通量换算的设计小时交通量。

条文说明

交通量是隧道通风及照明设计最为重要的基础数据之一。通风设计时，根据《公路工程技术标准》（JTGB01）“各汽车代表车型与车辆折算系数”，结合各工程的具体交通组成，将标准小客车交通量换算成混合车型设计高峰小时交通量，换算的步骤为：

第一步，将项目可行性研究报告提出的各设计（预测）年平均日交通量 AADT（pcu/d）换算成标准小客车设计高峰小时交通量（pcu/h）；

第二步，根据项目可行性研究报告提出的交通组成百分比，分别计算出各车型对应的标准小客车设计高峰小时交通量；

第三步，按《公路工程技术标准》（JTGB01）“各汽车代表车型与车辆折算系数”，将各车型的标准小客车高峰交通量换算成混合车型设计高峰小时交通量（veh/h）。

1 通过广泛的工程调研，高速公路项目可行性研究报告提出的设计小时交通量系数在 9%~12%之间。为避免设计小时交通量取值偏大导致通风系统浪费，根据广泛工程调研和项目可行性研究报告的总结作出本规定。

2 为便于计算交通量，本款根据《公路工程技术标准》（JTGB01）作出规

定。

3 工程调研表明,工程可行性研究报告提供的“XX 年预测交通量”与工程建成后对应年份的实际交通量差别较大。经济欠发达和落后地区公路的实际交通量往往较大幅度小于工程建设之前预测的交通量;对于经济发达地区公路,实际交通量往往大于预测或设计交通量。因此,避免过度设计通风系统,当设计小时交通量大于隧道所在路段的最大服务交通量时,通风计算采用的交通量是根据隧道车道宽度、侧向净宽、大型车混入率、驾驶员条件等因素,将各等级公路对应服务水平、相应设计车速下的最大服务交通量 $[pcu/(h \cdot ln)]$ 换算为混合车型设计高峰小时交通量。

3.8 对于长度 $L \leq 1000m$ 的隧道可不考虑交通阻滞;对于长度 $L > 1000m$ 的隧道,阻滞段宜按每车道长度为 1000m 计算。以下行驶情况可视为交通阻滞:

- 1 高速公路隧道内各车道平均行车速度不大于 30km/h。
- 2 一级公路隧道内各车道平均行车速度不大于 20km/h。
- 3 二级、三级、四级公路隧道内各车道平均行车速度不大于 10km/h。

条文说明

不同国家和国际组织对交通阻滞的定义有所不同。日本道路协会《道路隧道技术标准(通风换气篇)及其解说》(2001 年 10 月)提出拥堵时的行车速度基本不到 20km/h。世界道路协会公路隧道运营技术委员会(PIARC C5) 2004 年报告提出在通风设计中用阻塞交通速度 10km/h 和停滞段定义设计工况。为了避免长隧道通风设计过量,通过交通控制系统避免全隧道的交通阻滞或停滞是可行的,并给出了相应的交通量,见表 3-2。

表 3-2 PIARC C5《公路隧道汽车尾排和需风量》平均高峰交通密度

项目		平均高峰交通密度 (pcu/h) /每一车道的交通流 (pcu/h)							
		郊区隧道				城区隧道			
		单向交通		双向交通		单向交通		双向交通	
交通状态	车速 v (km/h)	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h
正常	60	30	1800	23	1400	33	2000	25	1500
阻塞	10	70	700-850	60	600	100	1000	85	850
停	0	150	-	150	-	165	-	165	-

滞									
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

通过对国内公路隧道运营情况综合调查,综合考虑上述资料分析结论和我国《公路工程技术标准》(JTGB01)的规定,结合国内相关专业学者的建议,本条按不同等级公路分别定义隧道交通阻滞平均行车速度。

长度在 1km 以上的公路隧道通常均有交通监控设施,且在野外公路隧道中发生 1km 以上的交通阻滞概率较低。因此通风设计应考虑交通监控系统的功能不必考虑 1km 以上的交通阻滞,否则过量的通风设施必定长期(甚至永远)闲置,造成浪费。PIARC(1995)报告中亦指出了这点。同时,依据 PIARC 技术报告的思路,隧道内交通阻滞按“每车道”考虑,故作出本规定。

3.9 火灾工况下交通量计算应遵循下列原则:

- 1 交通量由洞内滞留的车辆数和后续进入洞内的车辆之数确定。
- 2 后续进入洞内的车辆数单向通行隧道宜按 5min 计算,双向通行隧道宜按 10min 计算。

条文说明

一般情况下,当单向通行的隧道发生火灾时,从火点至隧道出口的下游段车辆会按照正常状态驶离隧道,而从隧道进口至火点的上游段往往会滞留一定数量的车辆;这些滞留的车辆会对火灾排烟通风系统形成较大的阻力,洞内滞留车辆越多,通风阻力也就越大。

这些滞留的车辆由两部分构成,一是火灾发生时刻,洞内火点上游已经存在的车辆;二是火灾发生后,由于交通管制滞后,洞外车辆由于并不知道洞内已经发生火灾而后续进入隧道的车辆。

一般情况下,高速公路、一级公路长、特长隧道设置有完善的交通监控系统或专门管理机构,通过问卷调查表明,当隧道内发生火灾后,管控响应时间往往滞后 5min 左右。双向通行的隧道主要为二、三、四级公路隧道,当隧道中点发生火灾时,机械防烟与排烟系统处于最不利条件,此类隧道没有集中的专门管理机构,火灾发生后,发现和报告火灾的时间相对滞后,通过问卷调查表明,管控响应时间往往滞后 10min 左右。故作出本规定。

3.10 隧道通风系统设计应满足正常运营工况下安全性、舒适性的要求,满足火

灾工况下人员疏散和排烟的需求。

3.11 公路隧道照明系统设计应满足亮度、均匀度、闪烁频率等技术指标的要求，满足行车舒适性和安全性的需求。

3.12 应结合项目和路网特征分析结果，从服务、管理、环境、成本等方面提出隧道通风照明设施的设计目标。改扩建项目还应提出既有机电设施及土建设施再利用的设计目标。

3.13 应围绕隧道通风照明设施的功能和设计目标，开展施工、系统检测工作。

3.14 隧道通风照明设施在设计、施工、质量检验评定、养护全生命周期过程中，应加强与土建工程和房建相关单位的协调，合理确定建筑限界、通风井设置位置、风道、风机房等指标。

3.15 对于设置通风井的隧道，应考虑自然风利用的技术方案。

3.16 通风及照明设施应适应隧道内湿度高、盐雾、低温等不良环境。

3.17 隧道通风照明设施设计时，必须考虑公路运营养护因素的影响；施工应符合设计文件的规定，应确保所有工序满足设计规定值或允许偏差。

3.18 公路隧道通风照明设施的设计应积极与数字化、网络化、智能化基础设施建设和改造相协调，实现功能互补。

4 总体设计

4.1 隧道通风照明总体设计应考虑下列内容：

1 资料收集应包括下列内容：

- 1) 收集隧道所在路段平面、纵断面、隧道地形、地物、地质等路线资料。
- 2) 收集隧道所在路段的公路等级、隧道断面、交通量、所在区域的气象和环境条件以及隧址区环境、振动、噪音、航空限高等相关规定。

2 应确定管理体制及危险品运输车辆通行政策，包括下列内容：

- 1) 确定隧道是否允许危险品运输车辆通行的相关要求，作为设计输入条件。
- 2) 确定火灾设计当量。

3 总体设计应包括下列内容：

- 1) 设计界面。确定与主体结构、建筑的界面。确定交通工程与附属设施内部的界面。
- 2) 机电通风设施及照明设施隧道横断面设置图。
- 3) 隧道通风及照明设施布置方案及设备避让原则。
- 4) 预留洞室、管线及预埋件设计。与结构设计单位进行沟通，进行结构预留和加强配筋。
- 5) 洞外区域的风机房、风道、风塔等附属用房的相关设计。

条文说明

隧道由于通风排烟需求，往往需要设置风塔等附属用房，若隧址区有航空限高要求，需要对风塔高度进行考虑。

若隧道洞口区域是环境敏感区，还需要考虑隧道洞口空气质量及噪音、振动带来的影响。

危险品运输车辆是否运输通行涉及到火灾设计当量确定。

隧道通风设施（射流风机、风道等）对隧道横断面的空间布置影响较大，一般需要先确定大的设施安装方案，再确定小的机电设施横断面的安装方案和纵向的设置方案及避让原则，确定横断面是否满足机电设施安装、检修的需求。

4.2 初步设计前，交通工程专业与主体专业及建筑专业进行沟通，应确定下列技术参数及方案：

- 1 照明及通风专业与主体沟通，确定隧道洞口减光设施（含中隔墙长度及形

式)形式。

2 通风专业与主体沟通,提供通风相关的参数,确定隧道通风井设置位置及形式、风塔设置位置及形式、通风口设置方案、风道及风口方案。通风专业与建筑专业沟通风机房、风塔、吊装、降噪减震等方案。

3 相关专业与建筑专业沟通确定机房(供配电、泵房、控制室等)设置形式及暖通空调相关要求。

4.3 应根据机电设施的类型和安装要求,绘制机电设施典型横断面安装图,宜根据机电设施尺寸大小,按从大到小的顺序进行设计,确定合理的机电设施设置方案。

4.4 射流风机安装后,风机下边缘与建筑限界的净距离不宜小于 15cm。对于在隧道洞口采取限高措施的隧道,风机下边缘与建筑限界之间间距不宜小于 10cm。

4.5 应对设备设施进行防护,以保障系统在隧址区环境条件下(极端温度、湿度、盐雾、台风等)正常运行。

1 对于湿度大于 90%的地区宜在设备内部设置加热器等保证设施的正常运行。

2 对于盐雾比较大的地区(如海边)应根据情况,设备宜应采用不锈钢材质或镀锌、防腐漆等防腐方案。

5 通风设施

5.1 一般规定

5.1.1 公路隧道通风设施应包扩通风标准、通风方式、设施选型与配置、系统控制、附属设施（风机房和风道）等内容。

5.1.2 公路隧道通风应能稀释汽车尾气排放的烟尘（VI）、一氧化碳（CO），氮氧化物（NO_x），且宜能稀释汽车非尾气排放产生的颗粒物（PM）。高温区域需要保证隧道内环境温度。

条文说明：

公路隧道通风的主要稀释对象一般限于烟尘、CO、NO_x，并在发生火灾时控制烟雾。机动车排放的废气中有害物质包括CO、NO、NO₂、Pb、CO₂、SO₂、HCHO和烟尘等。其中，CO、NO₂对人体健康的影响比较突出，烟尘对隧道能见度的影响比较突出，故通风设计时将其浓度作为主要的设计或控制指标。

烟尘包含机动车排放的烟气和非尾气颗粒物。隧道内影响能见度的烟尘除了汽车尾气排放的烟气外，还有机动车行驶过程中因刹车和轮胎磨损所产生的颗粒物、隧道内地面扬尘等。随着汽车排放标准的逐步提高，燃油车尾气排放逐渐减少，而非尾气颗粒物在总烟尘量中的比例逐渐增加，因此通风设计需要考虑非尾气颗粒物。

氮氧化物（NO_x）是燃油燃烧过程中产生的污染物。如果隧道排风口（通风井排风口和隧道行车方向出口）位于对NO_x有排放要求的环境敏感区，如居民区等，还需要考虑稀释NO_x。

5.1.3 公路隧道通风设施的设计应包含设计风速、设计风量、装机功率、设施选型与配置、通风控制策略的设计。配合相关专业完成风道、风井、风塔、风机房、洞口中隔墙及遮光棚的设计。

5.1.4 公路隧道通风设计时应根据公路等级、通行方式、隧道长度、隧道工法、设计速度、车道数、交通量、平纵线形、地形地貌、隧道海拔高程、洞内壁面光

滑度、隧址区域自然条件、火灾排烟需求等因素，确定合理的通风方案。

5.1.5 公路隧道通风设计应分别针对正常交通工况、交通阻滞以及火灾等异常交通工况进行系统设计，并应确定通风控制方案。

5.1.6 通风设计采用的交通量应符合下列规定：

- 1 应区分车辆不同动力和燃料类型的组成。
- 2 设计小时交通量应为混合车型设计高峰小时交通量。
- 3 对于有条件采用ETC门架、高清卡口等设施进行交通数据精准采集的隧道，应将数据接入到通风控制模块。

条文说明：

利用公路设置的ETC门架系统、高清卡口等设施对进入隧道的车辆进行精准数据采集，并结合前期输入隧道智能通风控制模块的基本参数和隧道内环境检测系统的反馈数据（CO、VI检测仪器、风速仪等检测设备），通过通风控制模块实现对隧道风机开启位置及数量的智能化控制，达到按需通风的目的，实现了隧道通风系统的节能减排。

5.1.7 毗邻隧道或小间距隧道通风系统设计应考虑洞口污染气体窜流和火灾工况下烟雾蔓延对隧道洞内通风效果的影响。

条文说明：

小净距隧道，在洞口通过设置中隔墙可以有效防止污染气体（烟雾）对相邻隧道的影响。中隔墙应在两洞暗埋段洞口往外延伸延长，延伸长度宜大小于 30m。

5.1.8 地下风机房、服务隧道、中管廊应考虑设备运行环境温度、湿度及通风换气的需要。

5.1.9 改扩建隧道需要根据新的交通量等数据验算通风系统容量是否满足要求，并进行改造。

条文说明：

需要根据核算结果对既有土建设施（风道尺寸、风机房面积等）及机电设施（风机数量及富余预埋件数量）进行核查，看是否满足扩容的要求。

5.1.10 改扩建隧道通风设施应符合下列规定：

1 应根据主体工程改扩建方案，结合调研与评价结果及总体设计方案，按照现行规范、交通量、设计速度等，对隧道通风设施进行改扩建，使其满足运营需求。

2 同向分行隧道，可按所在路段的车道分配方案推算各洞所承担的交通量，再乘以各洞交通分配不均匀系数，据此确定通风设计规模。对于长、特长隧道，调整系数宜为 1.05~1.1；对于中短隧道，调整系数宜为 1.1~1.2。

3 采用分离增建隧道，对于既有隧道应按照预测交通量等数据验算既有土建设施（风道、风机房）及射流风机、轴流风机是否满足要求。验算满足要求的隧道应对隧道内预埋件、风道、风机房等进行隐患排查及必要的加固。验算不满足要求的隧道宜在利旧既有风机预埋件、风道、风机房等设施的前提下进行增设和改扩建设计，利旧的设施应进行隐患排查及必要的加固。

4 采用扩挖形式扩建的公路隧道，应按扩建后的隧道运营通风需求进行设计。

条文说明

公路隧道采用分线扩建时，若单向双洞并列通行，需考虑交通量在不同隧道之间的分配问题。交通分配系数参照《高速公路改扩建交通工程及沿线设施设计细则》（JTG/TL80）取值。建议通过现场调研国内已经通车的同向分行隧道情况最终确定交通分配系数。

5.2 通风规划与调查

5.2.1 通风规划

1 公路隧道通风应结合路线平面、纵断面、隧道断面形式、工程分期建设情况、防灾救援与运营管理等进行整体规划。

2 公路隧道通风设计应按下列步骤实施：

1) 应收集隧道所在路段平面、纵断面、隧道地形、地物、地质等路线资料。

2) 应收集隧道所在路段的公路等级、隧道断面、交通量、交通组成，所在区域的气象和环境条件、海拔高度，以及隧址区域的环保要求等技术资料。

3) 应根据收集的资料进行隧道需风量的初步计算及通风方案比选；当因路

线方案使各通风方案均不满足运营安全、经济、环保要求时，则应重新论证路线方案、隧道长度、纵坡等。

4) 应根据比选确定的通风方案详细计算需风量，确定设计风量；并详细计算通风系统阻力。

5) 应根据通风系统阻力详细计算风机风压、风量、功率等进行风机选型及配置。

6) 通风设备安装前，应针对隧道土建施工、通风设备参数变更情况复核通风系统是否满足隧道运营需求。

3 公路隧道通风系统分期实施的设计应遵循下列原则：

1) 应根据隧道所在路段交通量增长、汽车有害气体基准排放量变化、各分期实施阶段隧道洞内通风标准和洞外环境空气质量标准变化、土建工程及通风设施分期实施的难易程度等因素综合考虑。

2) 各期安装的设备应满足隧道防灾通风需求。

4 通风规划应考虑周边环境、相邻隧道污染空气窜流等对隧道洞内通风效果的影响。隧址区域有环保要求时，应论证洞内污染空气直接排放对周边环境的影响。

5 公路隧道通风系统正常运营通风和火灾工况下防灾通风设计应遵循下列原则：

1) 公路隧道通风设计应对日常运营通风与防灾通风设施进行统筹规划。

2) 公路隧道通风设计应分别明确日常运营工况与火灾工况的风机数量和位置。

3) 服务隧道和相邻非火灾隧道的通风系统应采用正压通风方式。

条文说明

路线纵断面设置会影响隧道需风量的大小、通风系统设置规模，尤其对于需要设置通风井的特长隧道，路线平面位置所在的地形、地貌、地质情况影响通风系统设置的合理性。因此，隧道通风的规划应考虑路线平面及纵断面形式。

对于分期修建的隧道，结合交通量的变化和交通方式的调整做好由单洞双向交通向双洞单向交通转换的通风整体规划。

隧道运营管理模式、防灾救援方案与通风方案的选择密切相关，因此，在通风设计阶段需规划三者之间的衔接与协调。

因此，通风设计应根据工程建设情况进行整体规划，以确保通风系统规模的合理性。

通风设计的一般流程如图 5.2-1 所示，各步骤之间相互关联，必要时，其中一个步骤的分析结果需反馈到之前的分析之中。

通风方案比选主要针对通风方式、通风井位、防灾救援、施工组织、通风系统对周边环境的影响、工程造价等因素进行论证，通风方案的合理性、经济性、环保性是隧道路线方案选定的重要因素。

通风方案的通风系统阻力计算包括自然通风力、交通通风力、火风压、沿程摩阻损失等，通风方案还包括相关风道和风机房的设计，并考虑风机的控制方式。

通风设计与路线、隧道土建结构设计和施工是相互关联和互动的。相关的隧道土建工程在施工过程中往往会发生局部变更，例如设置通风井进行分段通风的隧道，风道和通风井长度、连接方式等；另外，同型号不同品牌的风机，其性能参数略有区别，具体安装方式或参数亦有所不同。因此，在风机安装之前，针对土建变更情况和实际采用的设备情况复核通风系统是否满足需求。

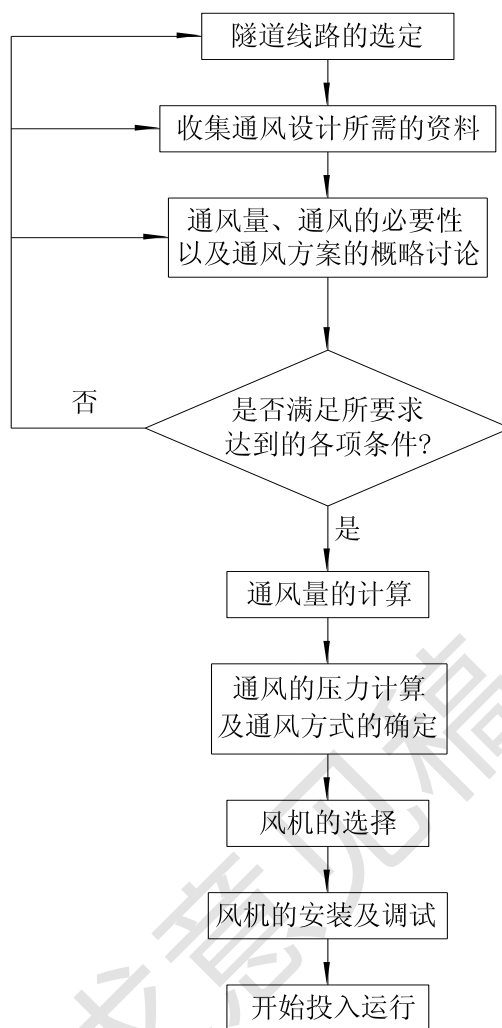


图 5.2-1 通风设计实施流程

隧址区域的污染空气增加了空气的污染物背景浓度,会造成隧道洞内空气的二次污染,如隧道通过环境污染严重的区域、相邻隧道污染空气窜流等情况。若未考虑污染物的背景浓度会造成通风能力不足,带来安全隐患,因此需考虑此类环境条件对隧道通风的影响。

对有环保要求的环境敏感区的隧道,如城市内部的隧道、穿越自然保护区或人口密集区的隧道,其洞口和通风塔集中排出的污染空气可能对周边居民和保护区环境造成影响,通过技术论证采取相应措施避免或减小对周边环境的不利影响,如:高空排放、增设净化除尘装置等。

日常运营通风与防灾通风设施有兼用、分别设置等情况。工程实践中尽可能将日常运营风机兼作防灾风机,达到降低通风系统装机功率的目的,并保证防灾风机有效、可靠运转。当隧道日常运营采用纵向通风,但由于排烟长度等原因不满足排烟要求时,也有设置独立的排烟系统,兼顾运营的经济性和防灾的安全性。

因此,为满足隧道运营的安全与经济,通风设计需对日常运营通风与防灾通风设施是否兼用进行统筹规划。

当隧道内发生火灾时,作为人员疏散救援通道的服务隧道、相邻非火灾隧道等通过机械通风,形成正压通风,防止隧道主洞的火灾烟雾侵入上述区域。

5.2.2 通风调查

1 公路隧道通风设计应对隧道所在区域的交通、气象、环境、海拔及地形、地物、地质等进行调查。

2 公路隧道通风设计的交通调查应包括下列内容:

1) 隧道所在路段设计预测年份的交通量、交通组成、交通阻滞、是否允许行人及非机动车通行等。

2) 隧道通行不同动力类型的车辆构成。

3) 隧道所在路段的交通高峰时间段、交通出行规律。

3 公路隧道通风设计的区域气象调查应包括下列内容:

1) 隧址区域自然风速及风向。

2) 隧道洞口及通风塔位置的气压、风向、风速、温度、湿度等。

3) 特殊气象条件。

4 公路隧道通风设计的环境调查应包括下列内容:

1) 隧道洞口或通风塔周围的敏感地物,以及隧址区域的环境空气背景浓度等。

2) 通风井位和风机房的地质情况,以及通风塔所在区域的地形、地物。

条文说明

1) 交通量和交通组成是隧道通风设计的重要参数。设计采用的交通组成包括各预测年份的各种车型百分比,尤其是混合车型百分比还是标准小客车百分比。

2) 根据动力类型的不同,机动车主要分为新能源车(混合动力汽车、电动汽车等)、汽油车和柴油车三种。柴油车产生的烟尘,会对隧道洞内通风造成很大影响;汽油车排放的烟尘相对较少,且排放成分也与柴油车有所区别;新能源车不直接排放烟尘,但会产生非废气颗粒物(道路扬尘、磨损)。应调查柴油车、汽油车和新能源车的构成比例,以提高隧道需风量的准确度。

调查表明,截至 2025 年 6 月,新能源车在我国保有量中占比约 10.27%,并持续快速增长状态,预测 2030 年占比提升至 70%以上。且核心城市、县市区、乡镇占有比例极度不均衡。世界道路协会(PIARC)2019 年的报告中体现了替代推进系统(混合动力汽车、电动汽车等)对汽车基准排放量的影响,并更新了车辆的基准排放量数据库。故此次修订要求新建隧道应将各类车型动力类型比例纳入交通量预测调查范围;对于通风系统分期实施的二期工程,有条件对即时交通状态进行现场调查,以获得各类动力车型的构成比例。

对隧道所在路段的交通高峰时间段、交通出行规律进行调查的目的,在于合理选定通风最不利工况、控制通风系统规模。

隧址区域的自然风速、风向、气压、温度等是通风计算和设备选型的重要参数。隧道开通后,隧道两洞口间、隧道洞口与通风井地面风塔间的气压差将对隧道通风效果产生影响,为较准确计算通风系统压力和选择风机型号,作出本规定。

当隧道洞口或通风塔直接排放洞内污染空气时,为避免其对环境造成影响或污染空气回流进入相邻隧道,调查洞口附近的局部风速、风向、扩散条件等,可为采取合理工程方案提供基础资料。

对于寒冻、多雾、积雪、潮湿、高温等地区的隧道,调查相关气象因素用于分析对隧道通风系统带来的不良影响,合理设计隧道结构和通风系统,保证隧道安全运营。

隧道洞口或通风塔周围的敏感地物的调查是为了解隧址区域环保要求,对背景浓度的调查是为了解其对洞内空气二次污染的程度;地质、地形、地物情况是影响通风井、风机房、通风塔设置的合理性和安全性的重要因素。因此,设计时需开展环境调查,获取相关资料。

5.2.3 交通量等参数确定

1 通风设计采用的设计小时交通量应根据隧道所在路段项目可行性研究报告提出的设计(预测)年平均日交通量(AADT)进行换算,并宜符合下列要求:

1) 设计小时交通量系数宜采用项目可行性研究报告提供的数据;当项目可行性研究报告没有明确提出该数据时,山岭重丘区隧道可取 12%、平原微丘区隧道可取 10%、城镇附近的隧道可取 9%。

2) 单向交通隧道的方向分布系数宜根据项目可行性研究报告取值,当项

目可行性研究报告没有明确提出该值时,可取 55%;双向交通隧道行车上坡较长方向的方向分布系数可取 60%。

3) 当设计小时交通量大于隧道所在路段的最大服务交通量时,宜采用最大服务交通量换算的设计小时交通量。

2 对于长度 $L \leq 1000\text{m}$ 的隧道可不考虑交通阻滞;对于长度 $L > 1000\text{m}$ 的隧道,阻滞段宜按每车道长度为 1000m 计算。以下行驶情况可视为交通阻滞:

- 1) 高速公路隧道内各车道平均行车速度不大于 30km/h。
- 2) 一级公路隧道内各车道平均行车速度不大于 20km/h。
- 3) 二级、三级、四级公路隧道内各车道平均行车速度不大于 10km/h。

条文说明

交通量是隧道通风设计最为重要的基础数据之一。通风设计时,根据《公路工程技术标准》(JTGB01)“各汽车代表车型与车辆折算系数”,结合各工程的具体交通组成,将标准小客车交通量换算成混合车型设计高峰小时交通量,换算的步骤为:

第一步,将项目可行性研究报告提出的各设计(预测)年平均日交通量 AADT (pcu/d) 换算成标准小客车设计高峰小时交通量 (pcu/h);

第二步,根据项目可行性研究报告提出的交通组成百分比,分别计算出各车型对应的标准小客车设计高峰小时交通量;

第三步,按《公路工程技术标准》(JTGB01)“各汽车代表车型与车辆折算系数”,将各车型的标准小客车高峰交通量换算成混合车型设计高峰小时交通量 (veh/h)。

1 通过广泛的工程调研,高速公路项目可行性研究报告提出的设计小时交通量系数在 9%~12%之间。世界道路协会技术委员会 (PIARC)《公路隧道车辆排放与通风空气需求》2004 年及以后的报告中提出郊区隧道和城市隧道平均高峰交通密度是不同的,高峰交通流可能出现在 60km/h 行车速度时。表 5.2-1 给出了在单向或双向交通营运情况下,郊区或城市隧道每车道的平均高峰交通密度。在车辆较多的城市隧道,交通流峰值可能超过 10%~20%。为避免设计小时交通量取值偏大导致通风系统浪费,根据广泛工程调研和项目可行性研究报告的总结作出本规定。

表 5.2-1 PIARC 《公路隧道汽车尾排和需风量》平均高峰交通密度

项目		平均高峰交通密度 (pcu/h) / 每一车道的交通流 (pcu/h)							
		郊区隧道				城市隧道			
		单向交通		双向交通		单向交通		双向交通	
交通状态	车速 v (km/h)	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h
正常	60	30	1800	23	1400	33	2000	25	1500
阻塞	10	70	700-850	60	600	100	1000	85	850
停滞	0	150	-	150	-	165	-	165	-

2 为便于计算交通量，本款根据《公路工程技术标准》(JTG B01)作出规定。

3 工程调研表明，工程可行性研究报告提供的“XX 年预测交通量”与工程建成后对应年份的实际交通量差别较大。经济欠发达和落后地区公路的实际交通量往往较大幅度小于工程建设之前预测的交通量；对于经济发达地区公路，实际交通量往往大于预测或设计交通量。因此，避免过度设计通风系统，当设计小时交通量大于隧道所在路段的最大服务交通量时，通风计算采用的交通量是根据隧道车道宽度、侧向净宽、大型车混入率、驾驶员条件等因素，将各等级公路对应服务水平、相应设计车速下的最大服务交通量 $[\text{pcu}/(\text{h} \cdot \text{ln})]$ 换算为混合车型设计高峰小时交通量。

不同国家和国际组织对交通阻滞的定义有所不同。日本道路协会《道路隧道技术标准（通风换气篇）及其解说》(2001 年 10 月)提出拥堵时的行车速度基本不到 20km/h。世界道路协会公路隧道运营技术委员会 (PIARC C5) 2004 年报告提出在通风设计中用阻塞交通速度 10km/h 和停滞段定义设计工况。为了避免长隧道通风设计过量，通过交通控制系统避免全隧道的交通阻滞或停滞是可行的，平均高峰交通密度见表 5.2-1。

通过对国内公路隧道运营情况综合调查，综合考虑上述资料分析结论和我国《公路工程技术标准》(JTG B01)的规定，结合国内相关专业学者的建议，本条按不同等级公路分别定义隧道交通阻滞平均行车速度。

长度在 1km 以上的公路隧道通常均有交通监控设施，且在野外公路隧道中发生 1km 以上的交通阻滞概率较低。因此通风设计应考虑交通监控系统的功能不必考虑 1km 以上的交通阻滞，否则过量的通风设施必定长期（甚至永远）闲

置，造成浪费。PIARC（1995）报告中亦指出了这点。同时，依据 PIARC 技术报告的思路，隧道内交通阻滞按“每车道”考虑，故作出本规定。

5.3 通风方式

5.3.1 通风方案的选择

5.3.1.1 机械通风方式可按表 5.1 分类。

表 5.1 机械通风方式的分类

纵向通风方式	半横向通风方式	全横向通风方式	组合通风方式
1) 全射流 2) 集中送入式 3) 通风井送排式 4) 通风井排出式 5) 空气净化系统 6) 互补式	1) 送风式 2) 排风式 3) 平导压入式	1) 顶送顶排式 2) 底送顶排式 3) 顶送底排式 4) 侧送侧排式	1) 纵向组合式 2) 纵向+半横向组合式 3) 纵向+集中排烟组合式 4) 互补+排烟井组合式 5) 互补+通风井送排组合式 6) 单通道+排风井组合式 7) 空气净化系统+纵向通风方式

条文说明

根据隧道条件，可以采用一种或多种通风方式组合构成更合理的通风方式。目前我国隧道运营通风以各种纵向通风方式及其各种组合为主，我国已建的长度大于 5000m 的高速公路隧道普遍采用“通风井送排式+射流风机”组合通风方式，其中以秦岭终南山公路隧道为典型代表。

不同交通状态下主要通风方式的基本特点见表 5.2、表 5.3。

表 5.2 各主要通风方式的特点（单向交通隧道）

通风方式	纵向式				
基本特征	通风风流沿隧道纵向流动				
代表形式	全射流式	洞口集中送入式	通风井排出式	通风井送排式	互补式
形式特征	由射流风机群升压	由喷流送风升压	洞口两端进风、中部集中排风	由喷流送风升压	通过换气系统在两条隧道内部相互通风换气

通风系统略图						
隧道内压						
隧道风速						
浓度分布						
一般特征	非火灾工况的适用长度	-	3000m 左右	5000m 左右	不受限制	-
	交通风利用	很好	很好	部分较好	很好	很好
	噪声	较大	口部噪声较大	噪声较小	噪声较小	较小
	火灾处理	排烟不便	排烟不便	排烟较方便	排烟较方便	排烟方便
	工程造价	低	一般	一般	一般	低
	管理与维护	不便	方便	方便	方便	不便
	分期实施	易	不易	不易	不易	易
	技术难度	不难	一般	一般	稍难	不难
	运营费	低	一般	一般	一般	低
洞口环保	不利	不利	有利	一般	一般	
通风方式		半横向式			全横向式	
基本特征		由隧道通风道送风或排风，由洞口沿隧道纵向排风或抽风			分别设有送排风道，通风风流在隧道内作横向流动	
代表形式		送风半横向式				
形式特征		由送风道送风				
通风系统略图						
隧道内压						
隧道风速						
浓度分布						
通风方式		半横向式			全横向式	
一般特征	适用长度	3000m~5000m		3000m 左右	不受限制	
	交通风利用	较好		不好	不好	
	洞内环境	噪声小		噪声小	噪声小	
	火灾处理	排烟方便		排烟方便	能有效排烟	
	工程造价	较高		较高	高	
	管理与维护	一般		一般	一般	
	分期实施	难		难	难	
	技术难度	稍难		稍难	难	
	运营费	较高		较高	高	
洞口环保	一般		有利	有利		

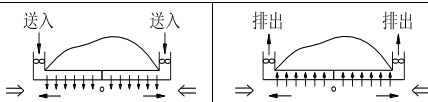
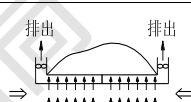
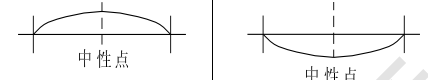
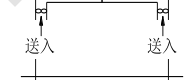
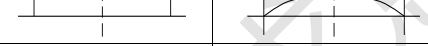
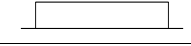
续表 5.2

通风方式		组合式				
基本特征		整合两种及以上单一通风方式，实现优势互补与高效通风排烟				
代表形式		纵向+集中排烟 组合式	互补+排烟井	互补+通风井送 排	单 U+排风井	空气净化+纵 向
形式特征		纵向通风系统搭 配专用集中排烟 设施定向排出火 灾烟气	利用互补通道 平衡需风量， 通过排烟井排 出火灾烟气	互补通风系统与 通风井送排系统 共同调节	由喷流送风升 压	纵向通风系 统搭配空气 净化系统
通风系统略图						
非火灾工况 隧道内压						
隧道风速						
浓度分布						
一般特征	非火灾工况 的适用长度	-	5000m 以上	5000m 以上	5000m 以上	-
	交通风利用	部分较好	很好	很好	很好	很好
	噪声	噪声较小	噪声较小	噪声较小	噪声较小	噪声较小
	火灾处理	排烟较方便	能有效排烟	能有效排烟	排烟较方便	排烟较方便
	工程造价	一般	低	一般	低	低
	管理与维护	方便	方便	方便	方便	方便
	分期实施	不易	不易	不易	不易	不易
	技术难度	一般	一般	一般	一般	一般
	运营费	一般	低	一般	低	一般
	洞口环保	有利	一般	一般	一般	一般

注：表中所示各通风方式的适用长度是指一般情况下的参考值。（增加说明运营期间时候的图，原来的通风方式可以粗一点，放开一个设计的出口）

表 5.3 各主要通风方式的特点（双向交通隧道）

通风方式	纵向式			组合式
基本特征	通风风流沿隧道纵向流动			整合两种及以上单一通风方式，实现优势互补与高效通风排烟
代表形式	全射流式	洞口集中送入式	通风井排出式	纵向+集中排烟组合式
形式特征	由射流风机群升压	由喷流送风升压	洞口两端进风中部集中抽风	纵向通风系统搭配专用集中排烟设施定向排出火灾烟气
通风系统略图				
非火灾工况 隧道内压				
非火灾工况 隧道风速				
非火灾工况 浓度分布				

一般特征	适用长度	(1500~3000) m 左右	1500m 左右	4000m 左右	-
	活塞风利用	不好	不好	不好	部分较好
	洞内环境	噪声较大	口部噪声较大	噪声较小	噪声较小
	火灾处理	排烟不便	排烟不便	排烟较方便	排烟较方便
	工程造价	低	一般	一般	一般
	管理与维护	不便	方便	方便	方便
	分期实施	易	不易	不易	不易
	技术难度	不难	一般	一般	一般
	运营费	低	一般	一般	一般
	洞口环保	不利	不利	有利	有利
通风方式		半横向式		全横向式	
基本特征		由隧道通风道送风或排风，由洞口沿隧道纵向排风或抽风		分别设有送排风道，通风风流在隧道内作横向流动	
代表形式		送风半横向式	排风半横向式		
形式特征		由送风道送风	由排风道排风		
通风方式		半横向式		全横向式	
通风系统略图					
隧道内压					
隧道风速					
浓度分布					
一般特征	适用长度	3000m 左右	3000m 左右	不受限制	
	活塞风利用	不好	不好	不好	
	洞内环境	噪声小	噪声小	噪声小	
	火灾处理	排烟较方便	排烟较方便	排烟方便	
	工程造价	较高	较高	高	
	管理与维护	一般	一般	一般	
	分期实施	难	难	难	
	技术难度	稍难	稍难	难	
	运营费	较高	较高	高	
	洞口环保	一般	有利	有利	

注：表中所示各通风方式的适用长度是指一般情况下的参考值。

5.3.1.3 公路隧道通风方式的选择应综合考虑隧道平纵指标、交通量、气象条件、地貌、经济性等因素。

5.3.1.4 采用纵向通风方式时，单向交通且长度 $L \leq 5000\text{m}$ 和双向交通且长

度 $L \leq 3000\text{m}$ 的隧道可采用全射流纵向通风方案。

条文说明

根据对国内采用通风井送排式纵向通风方式的已建隧道工程调研统计表明：长度在 $5000\text{m} < L \leq 8000\text{m}$ 的隧道通常设置 1 座通风井；长度在 $8000\text{m} < L \leq 12000\text{m}$ 的隧道通常设置 1 座或 2 座通风井；长度在 $12000\text{m} < L \leq 16000\text{m}$ 的隧道通常设置 2 座或 3 座通风井；长度在 $L > 16000\text{m}$ 的隧道通常设置 3 座或 3 座以上通风井。

对于单向交通且长度 $L > 5000\text{m}$ 的隧道和双向交通且长度 $L > 3000\text{m}$ 的隧道，理论计算可采用全射流纵向通风方式时，需结合隧道可能的交通状态、隧道所具备的综合火灾排烟能力、隧道管理机构能力等技术论证的情况，慎重选择是否采用全射流纵向通风方式。全射流纵向通风是由射流风机群升压的接力诱导通风方式，单组风机升压力较小，当火灾的火风压和自然风压大于单组射流风机升压力后，单组射流风机的射流段会发生卷吸作用，使通风系统效率降低、通风能力不足，并造成烟气流动混乱，存在较大安全隐患。（是否修改 6km）

采取隧道火灾排烟安全专项措施包括设置火灾烟雾侦测、态势预报、烟气高效控制、洞口交通管控、高效诱导等措施。

5.3.1.5 通风井送排式纵向通风方式的通风井数量和隧道分段长度应根据隧道长度、防灾排烟需求、通风井设置条件、建设与运营费用等综合考虑。

条文说明

通风井的设置数量与隧道长度及防灾排烟需求密切相关，影响通风效果及工程造价，其合理设置能提高隧道运营的安全性和经济性。根据对国内采用通风井送排式纵向通风方式的已建隧道工程调研统计表明：长度在 $5000\text{m} < L \leq 8000\text{m}$ 的隧道通常设置 1 座通风井；长度在 $8000\text{m} < L \leq 12000\text{m}$ 的隧道通常设置 1 座或 2 座通风井；长度在 $12000\text{m} < L \leq 16000\text{m}$ 的隧道通常设置 2 座或 3 座通风井；长度在 $L > 16000\text{m}$ 的隧道通常设置 3 座或 3 座以上通风井。

5.3.1.7 双洞互补式通风方式的双洞换气系统位置与分段长度应根据隧道长度、双洞换气系统设置条件、建设与运营费用等综合考虑。

条文说明

两条隧道的通风负荷有较大差异,通风负荷较大的一条隧道由于最大风量的限制,单纯采用纵向通风方式不能够满足通风的需求,而通风负荷较小的隧道在采用纵向通风时,最大允许通风量大于其需风量,通过计算可知,两条隧道拟采用互补式通风区段的通风总风量,不大于其最大允许通风量之和时,可采用互补式通风。

根据隧道排风口计算角度和土建结构要求,采用90°直角时的双洞换气气筒最小距离为40m,采用U式互补时,最大距离100m。

5.3.1.8 对于设置通风井较为困难或者洞口排放不满足大气空气质量的隧道可考虑空气净化系统。空气净化系统的类型应根据污染物性质选择。

条文说明

东京湾隧道等采用了空气净化装置。近年来随着国内技术的进步,北京东六环地下道路等项目也采用了空气净化系统。空气净化系统的类型应根据污染物性质选择。烟尘净化采用静电过滤装置。NO_x采用脱硝装置。

5.3.2 隧道通风要求

5.3.2.1 双向交通隧道设计风向宜与行车上坡较长方向一致,洞内通风气流组织方向不宜频繁变化。

条文说明

为更好地利用洞内交通通风力与惯性风,洞内气流的组织方向不应频繁变化。射流风机运转的正向与主流交通方向一致的单洞双向交通的隧道,当主流交通方向发生变化时,为更好地利用交通通风力,运营通风气流的组织方向随之变化。

而且,为避免引起通风压力模式的不断改变,不宜频繁逆转射流风机的喷流方向。双向交通时,自然风向也可能在不断变化,如果频繁逆转风机喷流方向,使得压力模式不断改变,将使通风系统复杂化;同时考虑到空气流动的惯性,经

常使其转向会造成较大的能量损失和气流紊乱。

5.3.2.2 连拱或小净距特长隧道的左右洞相邻洞口间宜采取措施避免污染空气窜流；当不可避免污染空气窜流时，通风设计应考虑窜流带来的影响。

条文说明

连拱或小净距的特长隧道、矩形大断面水下隧道，左右洞两相邻洞口间污染空气窜流会影响洞内通风效果，因此为避免污染空气窜流宜采取相应措施。譬如，可在两洞口间设置隔离墙或种植高大乔木，左右洞两洞口之间的纵向距离不小于10m，见图4-1。当在两洞口间设置中隔墙时，中隔墙应不小于20m。

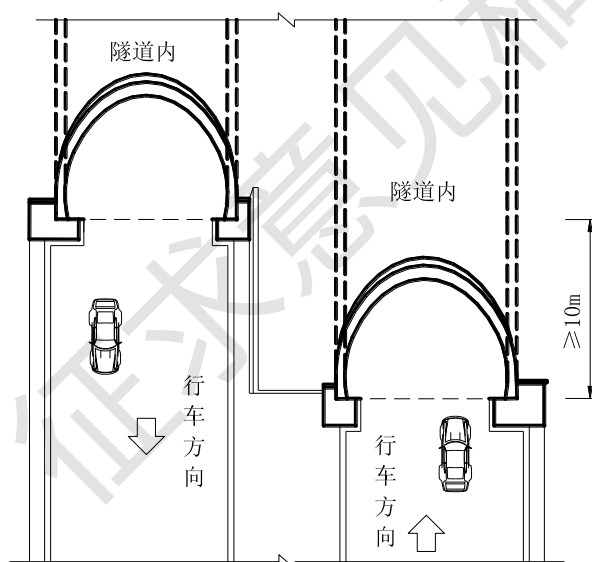


图4-1 避免空气窜流影响的洞口布置示意图

5.3.2.3 上游隧道行车出口排出洞外的污染空气对下游隧道产生二次污染时，应根据污染程度综合考虑上、下游隧道的通风方式。

条文说明

当上、下游隧道洞口纵向间距较小时，上游隧道行车出口集中排放的部分污染空气往往被交通流带入下游隧道，增加了下游隧道洞口空气的污染物背景浓度，

给下游隧道带来二次污染。

根据国内外对上、下游隧道洞口间污染空气窜流的理研究成果表明,通常上、下游隧道洞口纵向间距小于 100m 时存在上下游隧道间的污染空气窜流问题,尤其对于包含有特长隧道的上、下游隧道可能出现污染风的窜流问题。上、下游隧道纵向尺寸比的变化不会影响隧道排出气体和吸入气体的情况,但随着纵向尺寸比增大,污染射流扩散范围增大,被更充分地稀释,进风污染物浓度减小,窜流比减小。

5.3.2.4 当纵向隧道洞口污染物窜流受到地形的影响时,通风设计应考虑窜流带来的影响。

条文说明

山谷的存在有利于污染气体扩散,使窜流比减少,其减少比例与纵向间距有关,间距越大,减少比例越大。山谷深度增加,窜流比随之减小,但变化幅度很小。存在山谷时,在不同上下游隧道风速下,窜流比减少比例基本一致。当洞口周围存在山坡且设置明洞结构时,上下游山坡均不影响洞口大小形状,对窜流无明显影响。洞口周围存在山坡且不设置明洞结构时,洞口形状会造成纵向间距的不一致,此时山坡对污染物窜流造成的影响可以近似考虑为纵向间距变化造成的影响。

5.4 通风标准

5.4.1 单向交通隧道的设计风速不应大于 10.0m/s;双向交通隧道的设计风速不应大于 8.0m/s;行人与车辆混合通行的隧道设计风速不应大于 7.0m/s。

条文说明

本条提到的设计风速均指隧道行车或行人空间的平均风速;人车混合通行的隧道是指设有专用人行道的隧道。

单向交通隧道的设计风速借鉴日本道路协会《道路隧道技术标准(通风换气篇)及其解说》(2001 年 10 月)及挪威《公路隧道设计准则》取值。双向交通和人车混合通行的隧道设计风速借鉴日本《道路隧道技术标准(通风换气篇)及其解说》(2001 年 10 月)和 PIARC 报告取值。

鉴于建设条件复杂，确无条件设置通风井分段通风的隧道；或为把隧道内全长或分段的设计风速降低至 10.0m/s 以下，采取的工程措施，如扩大隧道断面、增设或调整通风井、增设静电除尘设备、变更通风方式，将导致建设或运营费用急剧增加，或者不具备调整通风方案的建设条件等的隧道，作为特殊情况隧道内设计风速可取值 10.0~12.0m/s。

5.4.2 公路隧道风道和通风井内的设计风速取值宜符合下列规定：

- 1 主风道的设计风速宜取 13m/s~20m/s。
- 2 连接风道内的设计风速不宜大于 13m/s。
- 3 竖井、斜井、平行导洞的设计风速宜取 13m/s~20m/s。
- 4 专用排烟道内的设计风速不宜大于 15m/s。当专用排烟道内平均壁面粗糙度不大于 0.15mm 时，设计风速不宜大于 18m/s。
- 5 采用纵向通风隧道排风口的的设计风速不宜大于 8m/s。
- 6 采用纵向通风隧道送风口的的设计风速宜取 25~30m/s，送风方向应与隧道轴向一致。
- 7 用于火灾排烟的隧道排烟口的设计风速不宜大于 10m/s。

条文说明：

- 1 隧道主风道一般于全横向或半横向通风方式通风系统中设置，沿隧道纵向设置于隧道上部、下部或侧部。
- 2 规定排烟道内平均壁面粗糙度不大于 0.15mm 时，设计风速不宜大于 18m/s 的目的是降低隧道风道工程建设成本。

5.4.3 烟尘设计浓度 K 取值应符合下列规定：

- 1 光源相关色温为[2700K, 4000K]的灯具时，烟尘设计浓度 K 应按表5.4.3-1 取值。

表5.4.3-1 烟尘设计浓度 K

运行速度 v_t (km/h)	≥ 90	$60 \leq v_t < 90$	$50 \leq v_t < 60$	$v_t < 50$
烟尘设计浓度 K (m ⁻¹)	0.0065	0.0070	0.0075	0.0090

- 2 采用光源相关色温为[4000K, 5500K]的灯具时，烟尘设计浓度 K 应按表 5.4.3-2 取值。

表5.4.3-2 烟尘设计浓度 K

设计速度 v_t (km/h)	≥ 90	$60 \leq v_t < 90$	$50 \leq v_t < 60$	$30 < v_t < 50$	$v_t \leq 30$
烟尘设计浓度 K (m^{-1})	0.0050	0.0065	0.0070	0.0075	0.009

条文说明:

“烟尘设计浓度”表示烟尘对空气的污染程度，通过测定污染空气中 100m 距离的烟尘光线透过率来确定，也称为 100m 透过率，为洞内能见度指标。

本条仅从光源色温进行区分。一方面是能见度与光源色温相关，另一方面隧道采用的光源可能会有多个类型。

5.4.4 隧道内 CO 设计浓度取值应符合下列规定:

- 1 正常交通时，隧道内CO设计浓度不应高于表 5.4.1 值。

表5.4.1 CO 设计浓度 δ_{CO} 限值

隧道长度 (m)	≤ 1000	> 3000
δ_{CO} (cm^3/m^3)	150	100

注：隧道长度为 $1000\text{m} < L \leq 3000\text{m}$ 时，限值可按线性内插法取值。

- 2 交通阻滞时，阻滞段的平均 CO 设计浓度 δ_{CO} 可取 $150\text{cm}^3/\text{m}^3$ ，同时经历时间不宜超过 20min。

- 3 人车混合通行的隧道，隧道内 CO 设计浓度 δ_{CO} 不应大于 $70\text{cm}^3/\text{m}^3$ 。

条文说明

对于行人的隧道，CO 的设计浓度指标采用了 PIARC 在 1999 年报告提出的通风标准。

- 5.4.5 隧道内 NO_2 设计浓度 δ_{NO_2} 宜取 $1.0\text{cm}^3/\text{m}^3$ 。

条文说明

汽车排放的氮氧化物 (NO_x) 大部分是一氧化氮 (NO)，部分 NO 在氧气的作用下被氧化为一氧化氮 (NO_2)。NOX 对人体的危害主要来源于 NO_2 ，故隧道通风设计以 NO_2 为稀释目标。

- 5.4.6 隧道内环境温度不宜大于 45°C 。

条文说明

当隧道内交通量达到一定规模后会导致隧道内温度升高，尤其是南方地区，上述因素造成隧道内及服务通道内温度持续升高，若温度超过 45°C 会造成司乘

人员舒适性降低，降低隧道内机电设施的可靠性和使用寿命。基于此，提出本规定。

5.5 需风量计算

5.5.1 汽车尾气排放的 VI、CO、NO_x 均应以 2020 年为排放系数的基准年，并结合汽车排放影响因素计算设计目标年份的排放系数。

条文说明：

汽车包括燃油汽车、天然气汽车、混合动力电动汽车和纯电动汽车；燃油汽车包括汽油发动机和柴油发动机的汽车；参考《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（GB 18352.6-2016）术语和定义，混合动力电动汽车是指能够从可消耗的燃料和可再充电能/能量储存装置中获得动力的汽车。

自 2019 年 5 月 1 日起，新修订的在用车排放标准《汽油车污染物排放限值及测量方法（双怠速法及简易工况法）》（GB 18285-2018）和《柴油车污染物排放限值及测量方法（自由加速法及加载减速法）》（GB 3847-2018）正式实施，与旧标准相比，进一步了加严污染物排放限值。2020 年，正式实施了中国轻型汽车污染物排放第六阶段标准，国六标准的实施对环境和健康有显著影响。根据测算国六标准轻型车的污染物排放比国五阶段降低 40~50%左右。同时，参考了《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南（试行）》（2015 年）、《城市大气污染源排放清单编制技术指南》（2024 年）的综合排放系数，故本规范提出以 2020 年为排放系数的基准年。

本规范中给出的排放系数是用于隧道通风设计计算，与用于评估环境对空气质量影响的排放数据相比，VI、CO、NO_x、PM 排放系数的取值相对较保守一些。

汽车排放影响因素包括隧址所在区域的环境、行车速度、车辆劣化、车辆载重系数等。因此，通风设计需结合上述汽车排放影响因素计算设计目标年份的排放系数。

5.5.2 2020 年汽油发动机汽车尾气排放的 CO 基准排放系数正常交通时宜取 1.25 g/（veh·km），交通阻滞时宜取 2.5 g/（veh·km）。

条文说明：

汽油发动机汽车尾气排放的 CO 基准排放系数是指小型客车单位行驶里程内

CO 的综合排放量。该综合基准排放系数是基于行驶工况 (30km/h)、气象条件 (温度为 25℃, 相对湿度为 50%) 和燃油品质 (汽油硫含量为 50 ppm, 汽油无乙醇掺混)。

根据《中国机动车环境管理年报》2010~2018 年汽车保有量按照排放标准阶段分类, 可估算出 2020 年不同排放标准阶段汽车保有量的占比, 从而计算得到 2020 年小型汽油客车 CO 基准排放系数约为 $1.0 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$, 即 $1.0 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km}) / 1250 \text{ g}/\text{m}^3 = 0.0008 \text{ m}^3/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。根据《城市大气污染源排放清单编制技术指南》(2024 年) 计算得出 2020 年小型汽油客车 CO 基准排放系数约为 $1.13 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$, 即 $1.13 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km}) / 1250 \text{ g}/\text{m}^3 = 0.0009 \text{ m}^3/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。考虑一定的设计冗余量, 2020 年小型汽油客车尾气排放的 CO 基准排放系数取 $1.25 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 即 $0.001 \text{ m}^3/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。

5.5.3 2020 年柴油发动机汽车尾气排放的 VI 基准排放系数宜取 $0.13 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。

条文说明:

柴油发动机汽车尾气排放的 VI 基准排放系数是指设计总质量大于等于 4500kg 且小于 12000kg 的中型柴油货车单位行驶里程内 VI 的综合排放量。该综合基准排放系数是基于行驶工况 (30km/h)、气象条件 (温度为 25℃, 相对湿度为 50%)、燃油品质 (柴油硫含量为 350 ppm) 和载重系数 (柴油车载重系数为 100%) 等情景。

根据《中国机动车环境管理年报》2010~2018 年汽车保有量按照排放标准阶段分类, 可估算出 2020 年不同排放标准阶段汽车保有量的占比, 从而计算得到 2020 年中型柴油货车 VI 基准排放系数约为 $0.082 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$, 即 $0.082 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km}) \times 4.7 \text{ m}^2/\text{g} = 0.39 \text{ m}^2/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。根据《城市大气污染源排放清单编制技术指南》(2024 年) 计算得出 2020 年中型柴油货车 VI 基准排放系数约为 $0.111 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$, 即 $0.111 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km}) \times 4.7 \text{ m}^2/\text{g} = 0.52 \text{ m}^2/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。考虑一定的设计冗余量, 2020 年中型柴油货车尾气排放的 VI 基准排放系数取 $0.13 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 即 $0.6 \text{ m}^2/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。

5.5.4 2020 年柴油发动机汽车尾气排放的 NO_x 基准排放系数 $5.2 \text{ g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$ 。

条文说明:

柴油发动机汽车尾气排放的 NO_x 基准排放系数是指设计总质量大于等于 4500kg 且小于 12000kg 的中型柴油货车单位行驶里程内 NO_x 的综合排放量。该综合基准排放系数是基于行驶工况（30km/h）、气象条件（温度为 15℃，相对湿度为 50%）、燃油品质（柴油硫含量为 350 ppm）和载重系数（柴油车载重系数为 100%）等情景。

根据《中国机动车环境管理年报》2010~2018 年汽车保有量按照排放标准阶段分类，可估算出 2020 年不同排放标准阶段汽车保有量的占比，从而计算得到 2020 年中型柴油货车 NO_x 基准排放系数约为 4.56 g/（veh·km），即 4.56 g/（veh·km）/2050 g/m³=0.0022 m³/（veh·km）。根据《城市大气污染源排放清单编制技术指南》（2024 年）计算得出 2020 年中型柴油货车 NO_x 基准排放系数约为 4.05 g/（veh·km），即 4.05 g/（veh·km）/2050 g/m³=0.0020 m³/（veh·km）。考虑一定的设计冗余量，2020 年中型柴油货车尾气排放的 NO_x 基准排放系数取 5.2 g/（veh·km）即 0.0025 m³/（veh·km）。

5.5.5 2020 年天然气车尾气排放污染物的基准排放系数可按下表取值。

表 5.5.5 天然气尾气排放污染物的基准排放系数（g/（veh·km））

车辆类型	CO	NO _x	VI
小型客车	0.75	0.10	0.002
中型客车	1.05	5.18	0.020
大型客车	1.58	8.64	0.020
轻型货车	1.00	4.12	0.020
中型货车	1.31	7.50	0.020
重型货车	1.81	15.00	0.020

条文说明：

参考《城市大气污染源排放清单编制技术指南》（2024 年）中天然气车尾气排放污染物排放系数的相关技术要求。

5.5.6 2020 年混合动力电动汽车尾气排放污染物的基准排放系数可根据其发动机燃料类型参考相应的基准排放系数进行取值。

条文说明：

《轻型混合动力电动汽车污染物排放控制要求及测量方法》（GB 19755-2016）规定了轻型混合动力电动汽车排气污染物的排放量应符合 GB18352 规定的排放

要求,因此混合动力电动汽车尾气排放污染物的基准排放系数取值可根据其发动机的类型参考条文 5.5.2、5.5.3、5.5.4 取值。

5.5.7 非尾气颗粒物 (PM) 排放系数可按下表取值。

表 5.5.7 汽车非尾气颗粒物 (PM) 基准排放系数 $g/(veh \cdot km)$

车辆类型	小型客车、轻型货车 中型客车和货车	大型客车、重型货车
非尾气颗粒物 (PM)	0.014	0.094

条文说明:

非尾气颗粒物 (PM) 主要来自道路磨损、轮胎磨损、制动器磨损和道路粉尘再悬浮。非尾气颗粒物 (PM) 的排放量在很大程度上取决于隧道的整体清洁度、车辆类型和通过隧道运输的货物以及交通运行模式 (单向或双向交通)。尽管纯电动汽车没有尾气排放污染物,但纯电动汽车仍会产生非尾气颗粒物 (PM)。

相关研究成果表明,汽车非尾气排放的颗粒物可分为 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}$ 是影响隧道能见度的主要因素,因此本条文非尾气颗粒物 (PM) 排放系数主要考虑汽车非尾气排放的 $PM_{2.5}$ 颗粒物。本条参考了 PIARC 技术报告关于非尾气颗粒物 (PM) 的相关技术要求。

5.5.8 隧道运营通风设计需风量应满足下列要求:

- 1 确定需风量时,应对稀释 CO 、 VI 、 NO_x 按隧道设计速度以下各工况车速 $10km/h$ 为一档分别进行计算。
- 2 稀释烟尘需风量宜为稀释 VI 需风量与稀释非尾气颗粒物需风量之和。
- 3 运营通风设计需风量应取稀释烟尘、 CO 、 NO_x 所需风量中的最大值。

5.5.9 稀释汽车尾气排放的一氧化碳 (CO) 需风量应按式 (5.5.9-1) 和式 (5.5.9-2) 计算:

$$Q_{req(CO)} = \frac{Q_{CO}}{\delta_{CO}} \times 10^6 \quad (5.5.9-1)$$

$$Q_{CO} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{CO} \cdot \rho_{CO} \cdot f_{u(CO)} \cdot f_{a(CO)} \cdot f_{h(CO)} \cdot f_{iv(CO)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_{m(CO)}) \quad (5.5.9-2)$$

式中: $Q_{req(CO)}$ ——隧道稀释 CO 的需风量 (m^3/s);

- Q_{CO} ——隧道 CO 排放量 (m^3/s);
 δ_{CO} ——CO 浓度, 按第 5.4.3 条取值;
 q_{CO} ——CO 基准排放系数 [$g/(veh \cdot km)$], 按第 5.5.2 条取值;
 ρ_{CO} ——CO 密度, 取 $1250 g/m^3$;
 $f_{t(CO)}$ ——考虑 CO 基准排放系数的时间系数, 按表 5.5.9-1 取值;
 $f_{a(CO)}$ ——考虑 CO 的车况系数, 按表 5.5.9-2 取值;
 $f_{h(CO)}$ ——考虑 CO 的海拔高度系数, 可按表 5.5.9-3 取值;
 $f_{iv(CO)}$ ——考虑 CO 的纵坡-车速系数, 按表 5.5.9-4 取值;
 L ——隧道长度 (m);
 $f_{m(CO)}$ ——考虑 CO 的车型系数, 按表 5.5.9-5 取值;
 n ——车型类别数;
 N_m ——相应车型的交通量 (veh/h)。

表 5.5.9-1 考虑 CO 基准排放系数的时间系数 $f_{t(CO)}$

设计年份	2020	2030	2035	2040
$f_{t(CO)}$	1.00	0.58	0.40	0.30

注: 2040 年以后按 2040 年取值。

表 5.5.9-2 考虑 CO 的车况系数 $f_{a(CO)}$

公路等级	$f_{a(CO)}$
高速、一级公路	1.0
二级及二级以下公路	1.1~1.2

表 5.5.9-3 考虑 CO 的海拔高度系数 $f_{h(CO)}$

车型	小客车	中型客车	大型客车	小型货车	中型货车	重型货车
汽油车	1.58	3.95	3.95	1.58	3.95	3.95
柴油车	1.20	2.46	2.46	1.20	2.46	2.46

注: 当海拔在 1500 米以上时, 需要考虑该系数。

表 5.5.9-4 考虑 CO 的纵坡-车速系数 $f_{iv(CO)}$

工况车速 (km/h)	隧道行车方向纵坡 i (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25
30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25
40	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25

50	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
60	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50
70	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50
80	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50	1.50
100	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.75	1.75	1.75	1.75

表 5.5.9-5 考虑 CO 的车型系数 $f_{m(CO)}$

车型	小客车	中型客车	大型客车	小型货车	中型货车	重型货车
汽油车	1.0	2.8	5.4	2.3	4.3	4.3
柴油车	0.2	2.4	3.0	1.0	1.3	2.2

5.5.10 稀释汽车尾气排放的烟尘 (VI) 需风量应按式 (5.5.10-1) 和式 (5.5.10-2) 计算:

$$Q_{req(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} \quad (5.5.10-1)$$

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{VI} \cdot f_{t(VI)} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_{m(VI)}) \quad (5.5.10-2)$$

式中: $Q_{req(VI)}$ ——隧道稀释烟尘的需风量 (m^3/s);

Q_{VI} ——隧道烟尘排放量 (m^2/s);

K ——烟尘设计浓度 (m^{-1}), 按表 5.4.2 取值;

q_{VI} ——烟尘基准排放系数 [$g/(veh \cdot km)$], 按第 5.5.3 条计算取值;

f_{VI} ——换算系数, 取 $4.7m^2/g$;

$f_{t(VI)}$ ——考虑 VI 基准排放系数的时间系数, 按表 5.5.10-1 取值;

$f_{a(VI)}$ ——考虑烟尘的车况系数, 按表 5.5.10-2 取值;

$f_{h(VI)}$ ——考虑烟尘的海拔高度系数, 取 1.0;

$f_{iv(VI)}$ ——考虑烟尘的纵坡-车速系数, 按表 5.5.10-3 取值;

$f_{m(VI)}$ ——考虑烟尘的车型系数, 按表 5.5.10-4 取值。

表 5.5.10-1 考虑 VI 基准排放系数的时间系数 $f_{t(VI)}$

设计年份	2020	2030	2035	2040
$f_{t(VI)}$	1.00	0.45	0.10	0.10

注: 2040 年以后按 2040 年取值。

表 5.5.10-2 考虑烟尘的车况系数 $f_{a(VI)}$

公路等级	f_a (VD)
高速、一级公路	1.0
二级及二级以下公路	1.2~1.5

表 5.5.10-3 考虑烟尘的纵坡-车速系数 f_{iv} (VD)

工况车速 (km/h)	隧道行车方向纵坡 i (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
10	0.42	0.50	0.56	0.69	0.83	1.00	1.18	1.43	1.74
20	0.42	0.50	0.56	0.69	0.83	1.00	1.18	1.43	1.74
30	0.42	0.56	0.69	0.83	1.00	1.25	1.53	2.01	2.78
40	0.42	0.56	0.76	0.97	1.18	1.53	2.01	3.06	4.10
50	0.42	0.56	0.76	1.04	1.39	2.01	3.06	4.10	5.14
60	0.42	0.56	0.76	1.04	1.39	2.01	3.06	4.10	5.14
70	0.42	0.56	0.76	1.11	1.53	2.50	4.31	5.42	-
80	0.42	0.56	0.76	1.11	1.81	3.61	5.14	6.11	-

表 5.5.10-4 考虑烟尘的车型系数 f_m (VD)

车型	小客车	中型客车	大型客车	小型货车	中型货车	重型货车	拖挂车
汽油车	0.1	0.2	1.1	0.2	1.1	1.1	-
柴油车	0.2	0.6	2.4	0.4	1.0	1.4	3.0

5.5.11 稀释汽车尾气排放的氮氧化物 (NO_x) 需风量应按式 (5.5.11-1) 和式 (5.5.11-2) 计算:

$$Q_{\text{req}(\text{NO}_x)} = \frac{Q_{\text{NO}_x}}{\delta_{\text{NO}_x}} \times 10^6 \quad (5.5.11-1)$$

$$Q_{\text{NO}_x} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{\text{NO}_x} \cdot \rho_{\text{NO}_x} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_{iv} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (5.5.11-2)$$

式中: $Q_{\text{req}(\text{NO}_x)}$ ——隧道稀释 NO_x 的需风量 (m^3/s);
 Q_{NO_x} ——隧道 NO_x 排放量 (m^3/s);
 δ_{NO_x} —— NO_x 浓度, 按第 5.4.4 条取值;
 q_{NO_x} —— NO_x 基准排放量 [$\text{g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$], 按第 5.5.4 条计算取值;
 ρ_{NO_x} —— NO_x 密度, 取 $2050 \text{ g}/\text{m}^3$;
 $f_t (\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 基准排放系数的时间系数, 按表 5.5.11-1 取值;
 $f_a (\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的车况系数, 按表 5.5.11-2 取值;

$f_h(\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的海拔高度系数，可按表 5.5.11-3 取值；

$f_{iv}(\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的纵坡-车速系数，按表 5.5.11-4 取值；

$f_m(\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的车型系数，按表 5.5.11-5 取值。

表 5.5.11-1 考虑 NO_x 基准排放系数的时间系数 $f_t(\text{NO}_x)$

设计年份	2020 年	2030 年	2035 年	2040 年
$f_t(\text{NO}_x)$	1.00	0.58	0.15	0.10

注：2040 年以后年份按 2040 年取值。

表 5.5.11-2 考虑 NO_x 的车况系数 $f_a(\text{NO}_x)$

公路等级	$f_a(\text{NO}_x)$
高速、一级公路	1.0
二级及二级以下公路	1.1~1.2

表 5.5.11-3 考虑 NO_x 的海拔高度系数 $f_h(\text{NO}_x)$

车型	小客车	中型客车	大型客车	小型货车	中型货车	重型货车
汽油车	3.15	0.88	0.88	3.15	0.88	0.88
柴油车	1.35	1.02	1.02	1.35	1.02	1.02

注：当海拔在 1500 米以上时，需要考虑该系数。

表 5.5.11-4 考虑 NO_x 的纵坡-车速系数 $f_{iv}(\text{NO}_x)$

工况车速 (km/h)	隧道行车方向纵坡 i (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25
30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25
40	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
50	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
60	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50
70	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50
80	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50	1.50
100	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.75	1.75	1.75	1.75

表 5.5.11-5 考虑 NO_x 的柴油车车型系数 $f_m(\text{NO}_x)$

车型	小客车	中型客车	大型客车	小型货车	中型货车	重型货车	拖挂车
汽油车	0.03	0.1	0.3	0.05	0.2	0.2	-
柴油车	0.2	0.7	2.5	0.6	1.0	2.0	3.0

5.5.12 稀释汽车非尾气颗粒物（PM）需风量应按式（5.5.12）计算：

$$Q_{req(PM)} = \frac{Q_{PM}}{K} \quad (5.5.12-1)$$

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot f_{a(PM)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (q_{PM} \cdot N_m) \quad (5.5.12-2)$$

式中： $Q_{req(PM)}$ ——隧道稀释非尾气颗粒物的需风量 (m^3/s)；
 Q_{PM} ——隧道非尾气颗粒物排放量 (m^2/s)；
 K ——烟尘设计浓度 (m^{-1})，按表 5.4.2 取值；
 q_{PM} ——非尾气颗粒物基准排放系数 [$g/(veh \cdot km)$]，按第 5.5.7 条计算取值；
 $f_{a(PM)}$ ——考虑烟尘的车况系数，按表 5.5.12-1 取值。

表 5.5.12-1 考虑非尾气颗粒物的车况系数 $f_{a(PM)}$

公路等级	f_a
高速、一级公路	1.0
二级及二级以下公路	1.2~1.5

表 5.5.10-2 考虑烟尘的纵坡-车速系数 $f_{iv(VI)}$

工况车速 (km/h)	隧道行车方向纵坡 i (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
10	0.42	0.50	0.56	0.69	0.83	1.00	1.18	1.43	1.74
20	0.42	0.50	0.56	0.69	0.83	1.00	1.18	1.43	1.74
30	0.42	0.56	0.69	0.83	1.00	1.25	1.53	2.01	2.78
40	0.42	0.56	0.76	0.97	1.18	1.53	2.01	3.06	4.10
50	0.42	0.56	0.76	1.04	1.39	2.01	3.06	4.10	5.14
60	0.42	0.56	0.76	1.04	1.39	2.01	3.06	4.10	5.14
70	0.42	0.56	0.76	1.11	1.53	2.50	4.31	5.42	-
80	0.42	0.56	0.76	1.11	1.81	3.61	5.14	6.11	-

表 5.5.10-3 考虑烟尘的柴油车车型系数 $f_{m(VI)}$

小客车、轻型货车	中型货车	重型货车、大型客车	拖挂车、集装箱车
0.4	1.0	1.5	3

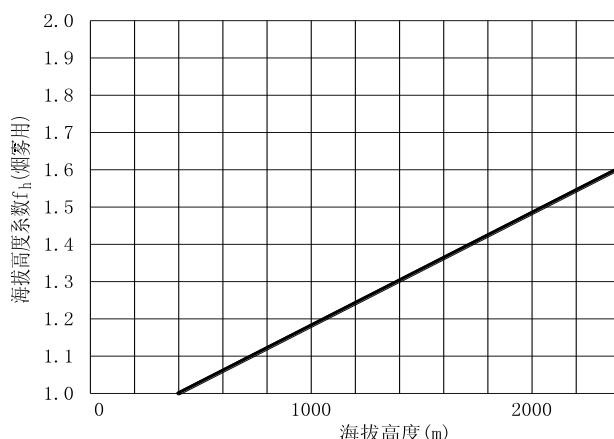


图 5.5.10 考虑烟尘的海拔高度系数 f_h (VD)

注：当取值超出图示范围，可作直线延伸

5.5.11 稀释汽车尾气排放的氮氧化物 (NO_x) 需风量应按式 (5.5.11-1) 和式 (5.5.11-2) 计算：

$$Q_{\text{req}(\text{NO}_x)} = \frac{Q_{\text{NO}_x}}{\delta_{\text{NO}_x}} \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot 10^6 \quad (5.5.11-1)$$

$$Q_{\text{NO}_x} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{\text{NO}_x} \cdot \rho_{\text{NO}_x} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_{iv} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (5.5.11-2)$$

式中： $Q_{\text{req}(\text{NO}_x)}$ ——隧道稀释 NO_x 的需风量 (m^3/s)；

Q_{NO_x} ——隧道 NO_x 排放量 (m^3/s)；

δ_{NO_x} —— NO_x 浓度，按第 5.4.4 条取值；

q_{NO_x} —— NO_x 基准排放量 [$\text{g}/(\text{veh} \cdot \text{km})$]，按第 5.5.4 条计算取值；

ρ_{NO_x} —— NO_x 密度，取 $2050 \text{ g}/\text{m}^3$ ； S

$f_a(\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的车况系数，按表 5.5.11-1 取值；

$f_h(\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的海拔高度系数，可按图 5.5.11 取值；

$f_{iv}(\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的纵坡-车速系数，按表 5.5.11-2 取值；

$f_m(\text{NO}_x)$ ——考虑 NO_x 的车型系数，按表 5.5.11-3 取值；。

表 5.5.11-1 考虑 NO_x 的车况系数 $f_a(\text{NO}_x)$

公路等级	f_a
高速、一级公路	1.0
二级及二级以下公路	1.1~1.2

表 5.5.9-2 考虑 NO_x 的纵坡-车速系数 $f_{iv} (NO_x)$

工况车速 (km/h)	隧道行车方向纵坡 i (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25
30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25
40	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
50	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
60	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50
70	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50
80	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50	1.50
100	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.75	1.75	1.75	1.75

表 5.5.11-3 考虑 NO_x 的柴油车车型系数 $f_m (VI)$

小客车、轻型货车	中型货车	重型货车、大型客车	拖挂车、集装箱车
0.4	1.0	1.5	3

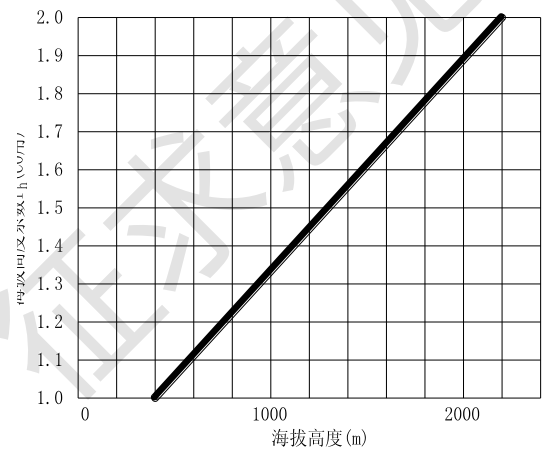


图 5.5.11 考虑 NO_x 的海拔高度系数 $f_h (NO_x)$

5.5.12 稀释汽车非尾气颗粒物（PM）需风量应按式（5.5.12）计算：

$$Q_{req(PM)} = \frac{Q_{PM}}{K} \tag{5.5.12-1}$$

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot f_{a(PM)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (q_{PM} \cdot N_m) \tag{5.5.12-2}$$

式中： $Q_{req(PM)}$ ——隧道稀释非尾气颗粒物的需风量（ m^3/s ）；

Q_{PM} ——隧道非尾气颗粒物排放量（ m^2/s ）；

K ——烟尘设计浓度 (m^{-1}), 按表 5.4.2 取值;

q_{PM} ——非尾气颗粒物基准排放系数 [$\text{g}/(\text{veh}\cdot\text{km})$], 按第 5.5.7 条计算取值;

$f_{\text{a (PM)}}$ ——考虑烟尘的车况系数, 按表 5.5.12-1 取值。

表 5.5.12-1 考虑非尾气颗粒物的车况系数 $f_{\text{a (PM)}}$

公路等级	f_{a}
高速、一级公路	1.0
二级及二级以下公路	1.2~1.5

5.6 通风系统装机功率计算

5.6.1 一般规定。

1 通风系统提供的风量和风压应满足需风量和克服通风阻力的要求。

2 公路隧道通风计算可把空气视为不可压缩流体; 隧道内的空气流可视为不随时间变化的恒定流, 且机动车行驶也可视为恒定流。在标准大气压状态下的空气物理量可按表 5.6.1 取值。其他状态下的空气密度可按式 (5.6.1-1) 计算。

表 5.6.1-1 空气物理量

容重 γ (N/m^3)	11.77
密度 ρ_0 (kg/m^3)	1.20
运动黏滞系数 ν (m^2/s)	1.57×10^{-5}

$$\rho = \rho_0 \times \exp\left(-\frac{h}{29.28T}\right) \quad (5.6.1)$$

式中: ρ ——通风计算点的空气密度 (kg/m^3);

ρ_0 ——标准大气压状态下的空气密度 (kg/m^3);

T ——通风计算点夏季气温 (K);

h ——通风计算点的海拔高程 (m)。

4 沿程阻力系数及局部阻力系数应根据隧道或风道的断面当量直径和壁面粗糙度以及风道结构形状等取值, 当为混凝土壁面时常用阻力系数可按表 5.6.1-2 取值。其他材料、弯道及变断面阻力系数可按附录 A、附录 B 和附录 C 或计算取值。

表 5.6.1-2 常用阻力系数表

阻力系数	取值
------	----

隧道沿程阻力系数 λ_r	0.02
主风道（含竖井）沿程阻力系数 λ_b 、 λ_e	0.022
连接风道沿程阻力系数 λ_d	0.025
隧道入口局部阻力系数 ζ_e	0.5
隧道出口局部阻力系数 ζ_{ex}	1.0

5.6.2 全射流通风方式

1 隧道内压力平衡应满足式（5.6.2-1）：

$$\Delta p_r + \Delta p_m = \Delta p_t + \sum \Delta p_j \quad (5.6.2-1)$$

式中： $\sum \Delta p_j$ ——射流风机群总升压力（N/m²）。

2 射流风机升压力与所需台数应按下列要求计算：

每台射流风机升压力应按式（5.6.2-2）计算：

$$\Delta p_j = \rho v_j^2 \frac{A_j}{A_r} \left(1 - \frac{v_r}{v_j}\right) \eta \quad (5.6.2-2)$$

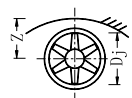
式中： Δp_j ——单台射流风机的升压力（N/m²）；

v_j ——射流风机的出口风速（m/s）；

A_j ——射流风机的出口面积（m²）；

η ——射流风机位置摩阻损失折减系数，当隧道同一断面布置 1 台射流风机时，可按表 5.6.2 取值；当隧道同一断面布置 2 台及 2 台以上射流风机时，射流风机位置摩阻损失折减系数 η 可取 0.7。

表 5.6.2 单台射流风机位置摩阻损失折减系数 η

Z/D _j	1.5	1.0	0.7	图示 
η	0.91	0.87	0.85	

注：表中 D_j 表示射流风机的内径。

在满足隧道设计风速 v_r 的条件下，射流风机台数可按式（5.6.2-3）计算：

$$i = \frac{\Delta p_r + \Delta p_m + \Delta p_t}{\Delta p_j} \quad (5.6.2-3)$$

式中：i——所需射流风机的台数（台）。

备用射流风机宜采用同型号风机成组备用；计算所需射流风机台数为 1~6 组时，可备用 1 组；计算所需射流风机台数大于 6 组时，可考虑所需台数 15% 的备用量。

3 当射流风机紧贴隧道顶部时,宜在隧道出口设置导流罩,提升射流风机的升压效率。

5.6.3 集中送入式纵向通风方式

1 送风机送风口升压力可按式(5.6.3)计算:

$$\Delta P_b = 2 \frac{Q_b}{Q_r} \frac{K_b v_b \cos \beta}{v_r} + \frac{Q_b}{Q_r} \frac{\rho}{2} v_r^2 \quad (5.6.3-1)$$

式中: Δp_b ——送风机送风口升压力 (N/m²);

Q_r ——隧道设计风量, 一般情况 $Q_r = Q_{req}$ (m³/s);

Q_{req} ——隧道需风量 (m³/s);

Q_b ——送风口喷出风量, 即送风机风量 (m³/s);

v_b ——送风口喷出风速, 一般取 20.0 ~ 30.0 m/s;

β ——喷流方向与隧道轴向的夹角(°);

K_b ——送风口升压动量系数, 可取值 $K_b = 1.0$ 。

2 送风口面积 A_b 可按式(7.6.4)计算, 且当为两车道隧道时不宜大于 12.0 m²。

$$A_b = \frac{Q_b}{V_b} \quad (5.6.3-2)$$

3 送风机风量可按式(5.6.3-3)和式(5.6.3-4)计算, 送风机全压可按式(5.6.3-5)计算:

$$Q_b = \frac{Q_r}{2} \sqrt{a^2 + \frac{4\Delta P_b}{\rho v_r^2}} \quad a \quad (5.6.3-3)$$

$$a = \frac{K_b \cdot v_b \cdot \cos \beta}{v_r} - 2 \quad (5.6.3-4)$$

$$P_{tot} = \frac{\rho}{2} v_b^2 + \Delta P_d \times 1.1 \quad (5.6.3-5)$$

式中: p_{tot} ——送风机设计全风压 (N/m²);

Δp_d ——风道、送风口等部位的总压力损失 (N/m²)。

5.6.4 通风井排出式通风方式

1 双向交通隧道合流型通风井排出式纵向通风设计应符合下列规定:

双向交通隧道合流型通风井排出式纵向通风方式的压力模式可见图 5.6.4-1。

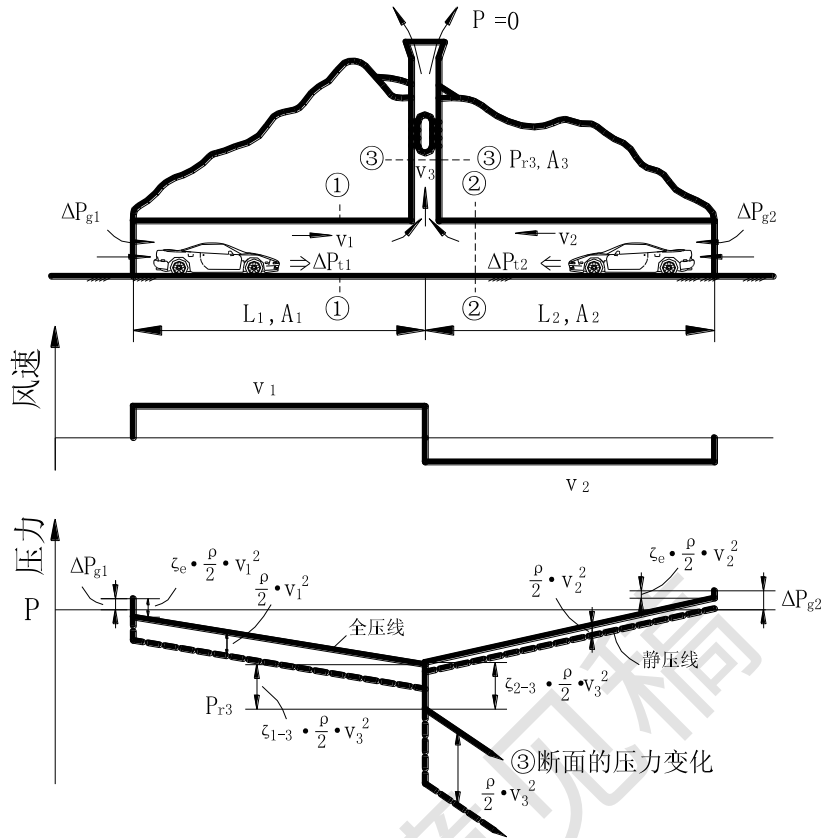


图 5.6.4-1 合流型通风井排出式纵向通风压力模式

通风井底部合流后的全压可用式 (5.6.4-1) 计算：

$$\begin{aligned}
 P_{tot3} &= \Delta P_{g1} + \Delta P_{t1} \left[\zeta_e + \lambda_r \frac{L_1}{D_r} \frac{\rho}{2} v_1^2 \right] + \zeta_{1-3} \frac{\rho}{2} v_3^2 \\
 &= \Delta P_{g2} + \Delta P_{t2} \left[\zeta_e + \lambda_r \frac{L_2}{D_r} \frac{\rho}{2} v_2^2 \right] + \zeta_{2-3} \frac{\rho}{2} v_3^2
 \end{aligned}
 \quad (5.6.4-1)$$

$$\Delta P_{t1} = \frac{A_m}{A_r} \frac{\rho}{2} \left[n_{+1} (v_t - v_1)^2 + n_{-1} (v_t + v_1)^2 \right]
 \quad (5.6.4-2)$$

$$\Delta P_{t2} = \frac{A_m}{A_r} \frac{\rho}{2} \left[n_{+2} (v_t - v_2)^2 + n_{-2} (v_t + v_2)^2 \right]
 \quad (5.6.4-3)$$

式中： p_{tot3} ——通风井底部全压 (N/m^2)；

Δp_{g1} ——第 I 区段隧道口与通风井出口之间的气象压差 (N/m^2)，自然风与隧道通风方向一致时为正；

L_1 ——第 I 区段长度 (m)；

ζ_{1-3} ——以通风井内风速为基准第 I 区段的损失系数；

Δp_{g2} ——第 II 区段隧道口与通风井出口之间的气象压差 (N/m^2)，自然风与

隧道通风方向一致时为正；

- L_2 ——第Ⅱ区段长度 (m)；
 ζ_{2-3} ——以通风井内风速为基准第Ⅱ区段的损失系数；
 v_1 ——第Ⅰ区段①-①断面平均风速 (m/s)；
 v_2 ——第Ⅱ区段②-②断面平均风速 (m/s)；
 v_3 ——通风井内③-③断面平均风速 (m/s)；
 Δp_{t1} ——第Ⅰ区段的交通通风力 (N/m²)；
 $n+1$ ——第Ⅰ区段内由Ⅰ区段往Ⅱ区段行驶的车辆数 (辆)；
 $n-1$ ——第Ⅰ区段内由Ⅱ区段往Ⅰ区段行驶的车辆数 (辆)；
 Δp_{t2} ——第Ⅱ区段的交通通风力 (N/m²)；
 $n+2$ ——第Ⅱ区段内由Ⅰ区段往Ⅱ区段行驶的车辆数 (辆)；
 $n-2$ ——第Ⅱ区段内由Ⅱ区段往Ⅰ区段行驶的车辆数 (辆)。

2 单向交通隧道分流型通风井排出式纵向通风方式的压力可按下列要求计算：

分流型通风井排出式纵向通风压力模式可见图 5.6.4-2。

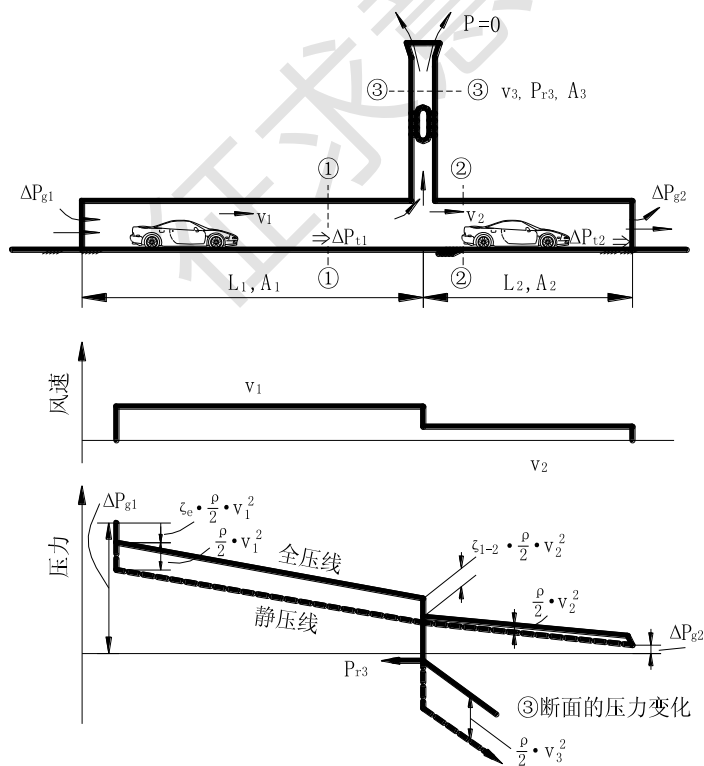


图 5.6.4-2 分流型通风井排出式纵向通风压力模式

隧道第Ⅰ区段末端的全压（分岔前的全压）可按式（5.6.4-4）计算：

$$P_{tot1} = \Delta P_{g1} + \Delta P_{t1} \zeta_e + \lambda_r \frac{L_1}{D_r} \frac{\rho}{2} v_1^2 \quad (5.6.4-5)$$

式中： p_{tot1} ——第 I 区段末端的全压（N/m²）。

隧道第 II 区段始端的全压（分岔后的全压）可按式（5.6.4-6）计算：

$$P_{tot2} = \Delta P_{tot1} - \zeta_{1-2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \quad (5.6.4-6)$$

式中： p_{tot2} ——第 II 区段始端的全压（N/m²）；

ζ_{1-2} ——分流型风道主流分岔损失系数，可按附录 C 取值。

隧道第 II 区段末端（出口）的全压可按式（5.6.4-7）计算：

$$\Delta P_{g2} + \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 = P_{tot2} - \lambda_r \cdot \frac{L_2}{D_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 + \Delta P_{t2} \quad (5.6.4-7)$$

通风井底部的全压可按式（5.6.4-8）计算：

$$P_{tot3} = \Delta P_{tot1} - \zeta_{1-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \quad (5.6.4-8)$$

式中： p_{tot3} ——通风井底部的全压（N/m²）；

ζ_{1-3} ——分流型风道支流分岔损失系数，可按附录 C 取值。

3 通风井排出式宜与射流风机组合，形成通风井与射流风机组合通风方式。

组合通风方式压力平衡应满足式（5.6.4-9）的要求：

$$\Delta P_e + \Delta P_j = \Delta P_r - \Delta P_t + \Delta P_m \quad (5.6.4-9)$$

5.6.5 通风井送排式纵向通风方式

1 通风井送排式纵向通风方式的压力模式可见图 5.6.5-1 和图 5.6.5-2；排风口升压力可按式（5.6.5-1）计算；送风口升压力可按式（5.6.5-2）计算

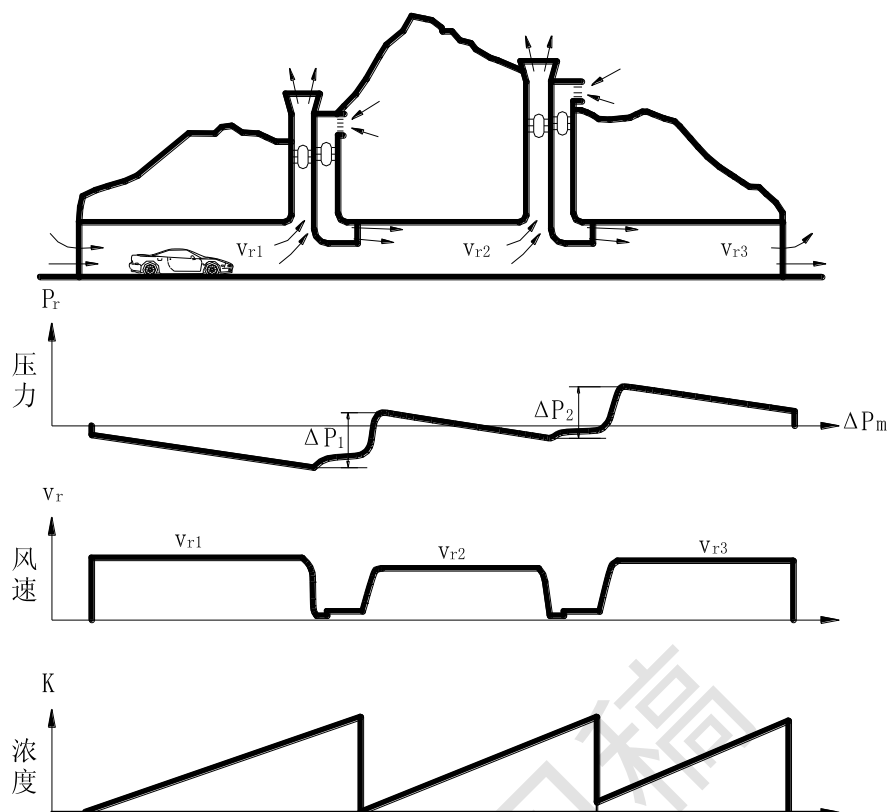


图 5.6.5-1 隧道内风速、压力及污染浓度分布图

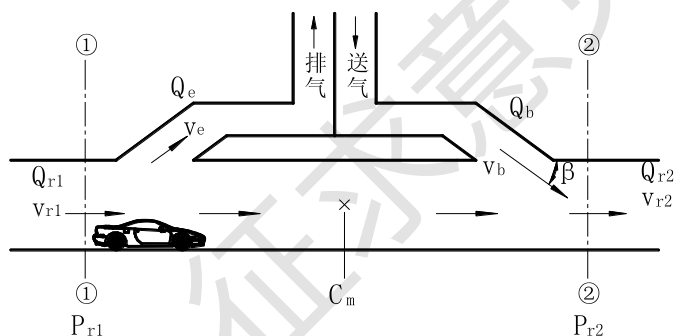


图 5.6.5-2 通风井送排式纵向通风方式模式图

$$\Delta P_e = 2 \cdot \frac{Q_e}{Q_{r1}} \left[\left(2 - \frac{v_e}{v_{r1}} \cos \alpha \right) - \frac{Q_e}{Q_{r1}} \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r1}^2$$

(5.6.5-1)

$$\Delta P_b = 2 \cdot \frac{Q_b}{Q_{r2}} \left[\left(\frac{v_b}{v_{r2}} \cos \beta - 2 \right) + \frac{Q_b}{Q_{r2}} \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2 \quad (5.6.5-2)$$

式中： Δp_e ——排风口升压力 (N/m²)；

Δp_b ——送风口升压力 (N/m²)；

Q_{r1} ——第 I 区段设计风量 (m³/s)；

v_{r1} ——第 I 区段设计风速 (m/s), $v_{r1} = \frac{Q_{r1}}{A_r}$;

Q_{r2} ——第 II 区段设计风量 (m³/s), $Q_{r2} = Q_b - Q_e + Q_{r1}$;

v_{r2} ——第 II 区段设计风速 (m/s), $v_{r2} = \frac{Q_{r2}}{A_r}$;

Q_e ——排风量 (m³/s);

v_e ——与 Q_e 相应的排风口风速 (m/s)。

2 通风井送排式纵向通风设计可遵循下列原则:

隧道气流浓度 C 可用需风量与设计风量之比表示, 通风井排风口的浓度 C_2 可按式 (5.6.5-3) 计算; 通风井底部气流中的等效新鲜空气量 Q_{sf} 可按式 (5.6.5-4) 计算; 隧道出口内侧处的浓度 C_3 可按式 (5.6.5-5) 计算; 送风量 Q_b 与排风量 Q_e 可按式 (5.6.5-6) 计算。

$$C_2 = \frac{Q_{req1}}{Q_{r1}} \quad (5.6.5-3)$$

$$Q_{sf} = Q_{r1} - Q_e - Q_{req1} + \frac{Q_e \cdot Q_{req1}}{Q_{r1}} \quad (5.6.5-4)$$

$$C_3 = \frac{Q_{req2}}{Q_{r1} - Q_e - Q_{req1} + \frac{Q_e \cdot Q_{req1}}{Q_{r1}} + Q_b} \quad (5.6.5-5)$$

$$Q_b = Q_{req} - Q_{r1} + Q_e \cdot \left(\frac{Q_{r1} - Q_{req1}}{Q_{r1}} \right) \quad (5.6.5-6)$$

式中: Q_{req1} ——隧道 I 段需风量 (m³/s);

Q_{req2} ——隧道 II 段需风量 (m³/s)。

排风口与送风口之间的短道不产生回流应满足式 (5.6.5-7)、式 (5.6.5-8) 的条件:

$$\frac{Q_e}{Q_{r1}} \leq 1.0 \quad (5.6.5-7)$$

$$\frac{Q_b}{Q_{r2}} \leq 1.0 \quad (5.6.5-8)$$

设计浓度应满足式 (5.6.5-9)、式 (5.6.5-10) 的条件:

$$0.9 \leq C_2 \leq 1.0 \quad (5.6.5-9)$$

$$0.9 \leq C_3 \leq 1.0 \quad (5.6.5-10)$$

隧道内压力应满足式 (5.6.5-11) 的条件:

$$\Delta P_b + \Delta P_e \geq \Delta P_r - \Delta P_t + \Delta P_m \quad (5.6.5-11)$$

排风机、送风机设计风压可按式 (5.6.5-12) 和式 (5.6.5-13) 计算:

$$P_{tote} = 1.1 \times \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_e^2 + P_{de} - P_{se} \right) \quad (5.6.5-12)$$

$$P_{totb} = 1.1 \times \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_b^2 + P_{db} + P_{sb} \right) \quad (5.6.5-13)$$

式中: p_{tote} ——排风机设计风压 (N/m^2);

p_{totb} ——送风机设计风压 (N/m^2);

p_{de} ——排风口、排风井及其连接风道的总压力损失 (N/m^2);

p_{db} ——送风口、送风井及其连接风道的总压力损失 (N/m^2);

p_{se} ——隧道内排风口处的总升压力 (N/m^2), 由隧道沿程压力分布计算求得;

p_{sb} ——隧道内送风口处的总升压力 (N/m^2), 由隧道沿程压力分布计算求得。

通风井送排式纵向通风宜与射流风机组合, 形成通风井与射流风机组合纵向通风方式。组合纵向通风方式压力平衡应满足式 (5.6.5-14) 的要求:

$$\Delta P_b + \Delta P_e + \Delta P_j = \Delta P_r - \Delta P_t + \Delta P_m \quad (5.6.5-14)$$

5.6.6 互补式通风方式

1 设计风量的确定

假定两条隧道的污染物最大浓度都等于限制值, 则右线隧道的设计风量见下式:

$$Q_A = \frac{q_A + q_B}{\delta} - Q_B \quad (5.6.6-1)$$

式中:

Q_A : 右线隧道设计风量;

Q_B : 左线隧道设计风量;

q_A : 右线隧道污染物排放量 (CO 或 VI);

q_B : 左线隧道污染物排放量 (CO 或 VI);

δ : 隧道内污染物浓度限值

2 双洞互补式系统安装范围的确定

图 5.6.6-1 为双洞互补式换气系统的允许安装范围示意图, 图中两条粗实线表示未安装双向换气系统时左、右线隧道内的污染物浓度分布。双洞互补式换气系统需安装在图 5.6.6-1 所示的 L_m 到 L_n 范围内, 即横坐标上阴影部分。

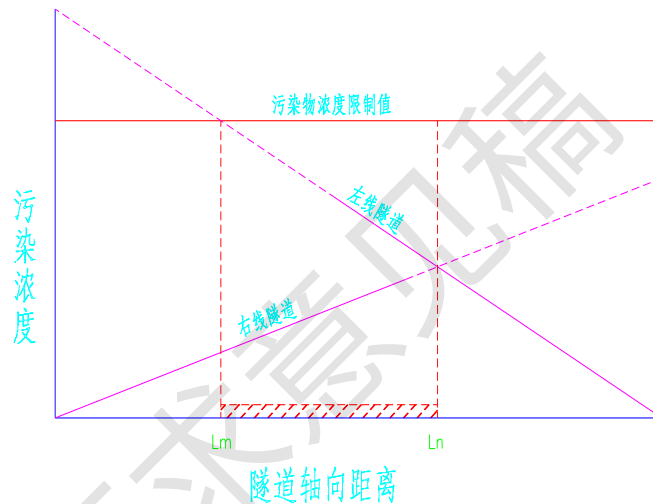


图 5.6.6-1 双洞互补式网络通风安装范围示意图

对于 L_m 的确定可依据公路隧道通风基本理论列出以下计算式:

$$L_m = L_B - L_{Bmax} \quad (5.6.6-2)$$

$$L_n = \frac{q_B \cdot Q_A \cdot L_A \cdot L_B}{q_A \cdot Q_B \cdot L_B + q_B \cdot Q_A \cdot L_A} \quad (5.6.6-3)$$

式中:

L_{Bmax} : Q_B 设计风量下左线隧道污染物浓度达到限制处距离隧道入口距离;

L_A : 右线隧道长度;

L_B : 左线隧道长度。

两条横通道的间距(R_2 、 L_2)不宜大于 50m。

3 双洞互补式系统安装范围的确定

将隧道分段，示意图见图 5.6.6-2，为了防止换气前后隧道内气流产生较大波动，可采用左右横通道内换气风量 Q_{h1} 和 Q_{h2} 相等的原则进行设计。

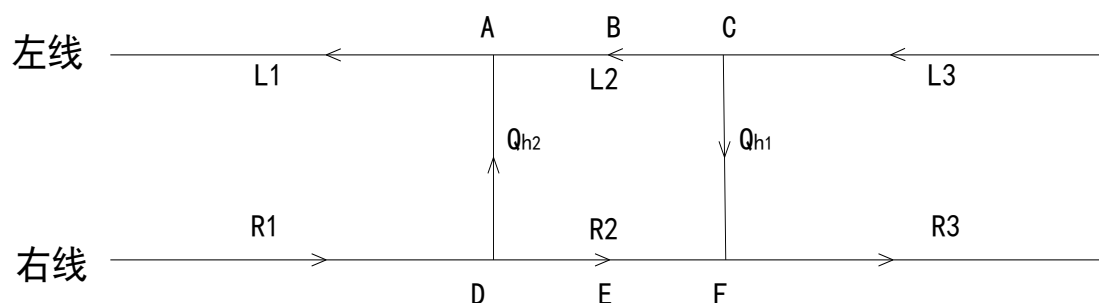


图 5.6.6-2 隧道分段示意图

$$Q_{h1} = Q_{h2} = \frac{Q'_L \cdot Q_R - Q'_R \cdot Q_L}{(Q_L + Q_R) \times \left(\frac{Q'_L \cdot L_3}{L_L \cdot Q_L} - \frac{Q'_R \cdot R_1}{L_R \cdot Q_R} \right)} \quad (5.6.6-4)$$

Q_L : 左线隧道需风量;

Q_R : 右线隧道需风量;

Q'_L : 左线设计风量;

Q'_R : 右线设计风量。

5.6.7 空气净化系统通风方式

1 隧道空气净化系统的类型应根据污染物性质选择。烟尘净化宜选用静电过滤装置，气体污染物宜选用活性炭吸附装置。

2 空气净化方式根据安装方式的不同可分为侧旁通式和顶旁通式，净化方式的选择应根据土建费用、初始投资总额、运营节能、环保要求等因素确定。

3 吸尘式纵向通风模式可见图 5.6.1；吸尘装置前后的隧道空间平均污染物浓度关系可按式 (5.6.7-1) 式计算；短道区间吸尘装置气流流出侧的平均污染物浓度可按式 (5.6.7-2) 计算：

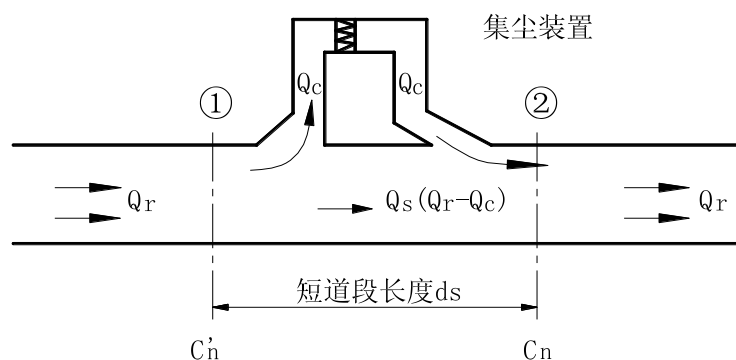


图 5.6.7 吸尘式通风模式

$$C_n = \left(1 - \frac{Q_c}{Q} \cdot \eta\right) \cdot C_n' \quad (5.6.7-1)$$

$$C = C_n' + \frac{Q_{\text{req}(s)}}{Q_s} \quad (5.6.7-2)$$

式中： C_n ——吸尘后的隧道空间平均污染物浓度比；

Q_c ——吸尘装置过滤处理风量(m^3/s)；

C_n' ——吸尘前的隧道空间平均污染物浓度比；

C ——短道区间流出侧的平均污染物浓度比；

η ——污染物净化率(%)，烟尘净化效率小于 85%， NO_2 净化效率不宜小于 80%。

$Q_{\text{req}(s)}$ ——短道区间内的需风量 (m^3/s)；

Q_s ——短道设计风量 (m^3/s)， $Q_s = Q_r - Q_c$ 。

5.6.8 全横向和半横向通风

1 当送风道断面积 A_b 沿隧道轴向不变，并由送风道往隧道内等量输送新鲜空气时，送风道始端动压可按式 (5.6.8-1) 计算，送风道静压差可按式 (5.6.8-2) 计算：

$$p_b = \frac{\rho}{2} \cdot v_{bi}^2 \quad (5.6.8-1)$$

$$P_{bi} - P_{b0} = k_b \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{bi}^2 \quad (5.6.8-2)$$

式中： p_b ——送风道始端动压 (N/m^2)；

v_{bi} ——送风道始端风速 (m/s)， $v_{bi} = \frac{Q_b}{A_b}$ ；

p_{bi} ——送风道始端静压 (N/m^2)；

p_{b0} ——送风道末端静压 (N/m^2)；

k_b ——送风道风压损失系数， $k_b = \frac{\lambda_b}{3} \cdot \frac{L_b}{D_b} - 1$ ；

L_b ——送风道长度 (m)。

2 当排风道断面积 A_e 沿隧道轴向不变,且污染空气等量向排风道排出时,排风道末端动压可按式 (5.6.8-3) 计算,排风道静压差可按式 (5.6.8-4) 计算:

$$P_e = \frac{\rho}{2} \cdot v_{e0}^2 \quad (5.6.8-3)$$

$$P_{ei} - P_{e0} = k_e \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{e0}^2 \quad (5.6.8-4)$$

式中: p_e ——排风道末端动压 (N/m²);

v_{e0} ——排风道末端风速 (m/s), $v_{e0} = \frac{Q_e}{A_e}$;

p_{ei} ——排风道始端静压 (N/m²);

p_{e0} ——排风道末端静压 (N/m²);

k_e ——排风道风压损失系数, $k_e = \frac{\lambda_e}{3} \cdot \frac{L_e}{D_e} + 2$;

L_e ——排风道长度 (m);

3 送风道所需末端压力应保证送风量分布的均匀性,送风道所需末端压力可取 150N/m²。

4 排风道所需始端压力应保证排风的均匀性,排风道所需始端压力可取 100N/m²。

5 当采用全横向通风方式时,标准大气压状态下的隧道内静压可取零。

6 当采用送风式半横向通风方式时,隧道 x 点的设计风速可按式 (5.6.8-5) 计算:

$$v_r(x) = \frac{q_b}{A_r} \cdot x \quad (5.6.8-5)$$

式中: $v_r(x)$ —— x 点的隧道风速 (m/s);

q_b ——每单位长度的送风量[m³/(s·m)];

x ——距中性点 ($v_r=0$) 的距离 (m)。

1) 单向交通隧道的入口至中性点区段,隧道内风压分布可按式 (5.6.8-6) 计算:

$$P_{rc} - P_r(x_1) = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{x_1}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2(x_1) + \alpha \cdot \frac{x_1}{L} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left[v_t^2 + v_t \cdot v_r(x_1) + \frac{1}{3} \cdot v_r^2(x_1) \right]$$

(5.6.8-6)

式中: x_1 ——距中性点朝隧道入口的距离 (m);

$p_r(x_1)$ —— x_1 点的隧道静压 (N/m²);

p_{rc} ——中性点的静压 (N/m²);

$v_r(x_1)$ —— x_1 点的隧道风速 (m/s);

α ——交通风力系数,
$$\alpha = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{N \cdot L}{3600 \times v_t}。$$

单向交通隧道的中性点至隧道的出口区段, 隧道内静压分布可按式 (5.6.8-7) 计算:

$$P_{rc} - P_r(x_2) = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{x_2}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2(x_2) - \alpha \cdot \frac{x_2}{L} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left[v_t^2 - v_t \cdot v_r(x_2) + \frac{1}{3} \cdot v_r^2(x_2) \right]$$

(5.6.8-7)

式中: x_2 ——距中性点朝隧道出口的距离 (m);

$p_r(x_2)$ —— x_2 点的隧道静压 (N/m²);

$v_r(x_2)$ —— x_2 点的隧道风速 (m/s)。

3) 当双向交通且上下行交通量相等时, 隧道内风压分布可按式 (5.6.8-8) 计算:

$$P_{rc} - P_r(x) = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{x}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2(x) + \alpha \cdot \frac{x}{L} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_t \cdot v_r(x) \quad (5.6.8-8)$$

7 连接风道的压力损失可按式 (5.6.8-9) 计算:

$$\Delta P_d = \sum_{i=1}^m \zeta_i \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{L_i}{D_i} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 \quad (5.6.8-9)$$

式中: Δp_d ——连接风道的压力损失 (N/m²);

ζ_i ——第 i 个局部损失系数;

λ_i ——第 i 段的沿程摩阻损失系数;

v_i ——第 i 段的风速 (m/s);

L_i ——第 i 段的长度 (m);

D_i ——第 i 段的当量直径 (m);

m ——连接风道局部变化个数;

n ——连接风道段数。

8 风机设计全压可按下列原则确定：

送风式半横向通风或全横向通风的送风机设计全压 p_{btot} ，可按式（5.6.8-10）计算：

$$p_{btot}=1.1\times(\text{隧道风压}+\text{送风道所需末端压力}+\text{送风道静压差}+\text{送风道始端动压}+\text{连接风道压力损失}) \quad (5.6.8-10)$$

全横向通风的排风机设计全压 p_{etot} ，可按式（5.6.8-11）计算：

$$p_{etot}=1.1\times(\text{排风道所需始端压力}+\text{排风道静压差}-\text{排风道末端动压}+\text{连接风道压力损失}) \quad (5.6.8-11)$$

最终确定风机设计全压时，还应考虑风机本身的压力损失。

5.7 风道、风口

5.7.1 一般规定

- 1 风道设计应综合考虑通风系统的建设和运营费用。
- 2 风道设计应减少断面变化和转弯次数。
- 3 风道的弯曲、折曲、扩径、缩径、分岔、合流等处宜平顺过渡，内壁面应平滑。
- 4 在通风井底部及风道各弯道处可设置导流叶片，在风道变断面处、合流处及送排风口等处可设置整流板；风机前后附近的风道不应产生偏流、回流及涡流等。
- 5 风机房内的连接风道设计应考虑风量调节、应急时的风机运转方式等因素，确定合理的风道形状及切换方式。
- 6 排风道与主线隧道交叉口可设置冷却隧道火灾高温烟雾的水喷雾装置。
- 7 风道应具有良好的气密性、耐腐蚀性、耐火性；隔板结构应满足强度和耐久性的相关规定。
- 8 风道口应设置防护网，防止异物进入。
- 9 风道内应采取防排水措施，避免渗漏水 and 积水；并应防止风道口结冰。
- 10 风道应设置检修用进出口及照明灯具。
- 11 各类风道的压力损失系数可按附录 C 取值。当风道在短距离内连续出现变形时，应考虑压力损失的富余量，必要时可通过模拟试验确定具体的压力损失

值。

5.7.2 主风道。

1 主风道宜沿隧道纵向布置，宜设置在隧道的上部或侧面。

2 主风道分段数与断面尺寸应综合考虑隧道通风区段划分、初期建设费、通风系统运行及维护费用等因素，经技术经济比较确定。

3 设置于隧道上部的主风道，顶隔板设计应符合下列规定：

设计荷载应由顶隔板及其附属构件自重等恒载和风荷载、人群荷载等可变荷载组成，风荷载可按通风设计的送(排)风最大风压取值，人群荷载可按 1000N/m^2 取值。

恒载与风荷载和人群荷载中较大者之和作用下的最大挠度值不应大于顶隔板跨度的 $1/400$ 。

顶隔板的标准厚度不宜大于 20cm ，特殊情况下顶隔板厚度可适当增加。

4 当主风道兼作排烟道时，应考虑火灾高温对风道结构的影响。主风道隔板的建筑耐火极限不应低于 1.0h 。（是否写主体结构耐火极限保持一致）

5 风道应满足在设计风压情况下的密封性。

5.7.3 联络风道。

1 设计时应注意连接风道间、连接风道与两端结构物间的衔接。

5.7.4 风口。

1 送风口送风方向应与隧道轴向一致。送风口断面积应根据隧道送风量和送风口设计风速确定。

2 排风口设计应符合下列规定：

排风口宜设置于隧道侧墙，其底面与隧道检修道高度一致；

排风口断面积不宜大于隧道主洞断面积。

排风口应设置防护网，并应进行防锈处理。

双向交通隧道中，排风口与隧道主洞的夹角宜取 90° ；单向交通隧道中，排风口与隧道主洞的夹角可取 $30^\circ\sim 90^\circ$ 。

5.8 风机房与通风井

5.8.1 一般规定

1 风机房与通风井设计应综合考虑功能要求、位置选择、建设条件、环境保护、养护维修、运营管理及景观协调等因素。

2 风机房应具有布置轴流风机、电气设备、控制设备、其他辅助设备的空间及预留设备检修空间，并应设置大型设备搬运通道和工作通道等。

3 风机房与风道连接处应预留检修条件。

4 风机房与风道的连接应严密封闭。

5 风机房与通风井内应采取防排水措施。

6 风机房宜设置隧道自然通风条件。

7 风机房的设计除应符合本细则的规定外，尚应满足房屋建筑设计相关规范要求。通风井的设计除应符合本细则的规定外，尚应满足现行《公路隧道设计规范》(JTG D70)中隧道结构设计的要求。

条文说明

风机房的设置需满足通风系统及相关设施安装、检修、维护等要求。风机房与通风井设置位置受地形、地质、建设及管理的便利性等因素限制，其设置是否合理影响工程造价及运营管理费用。因此，要求风机房满足功能要求，位置合适，结构可靠，外观协调，便于养护维修及运营管理。隧道热压作用引起的自然通风的效果受隧道内外温差、隧道内围护结构热工特性和车辆排热的影响，难以准确分析，隧道大气压力梯度作用引起的自然通风效果受洞外风向、大小、洞口地形多重因素影响难以精确量化。因此自然通风的设计计算方法比较复杂，在确定自然通风方案之前，应收集隧道洞口、通风井处的气象参数，进行自然通风潜力分析，再基于潜力分析结果制定相应的自然通风策略。

5.8.2 地面风机房。

1 地面风机房设计应根据隧道洞口或通风井周围地形条件、大型设施设备运输、管理人员工作便利性、供电方案、两隧道洞口轴向间距等因素确定位置，并应与环境协调。

2 地面风机房的设置应避免对附近居民生活、环境景观等产生影响。

条文说明

当采用集中送入式或横向通风方式时，风机房通常设置在隧道洞口处，其设置位置和形式需根据隧道洞口地形条件确定。一般分为在两洞口间设置的形式和

路堑单侧设置的形式，两洞口间设置的形式见图 5.8-1。当采用分段通风方式时，风机房设在通风井口地面处，见图 5.8-2。

当地面风机房设在通风井口地面处，山岭隧道的斜井口距离正线较远，且很难达到，应考虑检修便道的全天候通行配套；地面风机房供电方案也应纳入到方案设计中，供电方式、路由及设备选型等均应提前筹划。

当在两隧道洞口间设置风机房时，为避免对行车造成压抑感，需注意与隧道洞口环境的协调。

征求意见稿

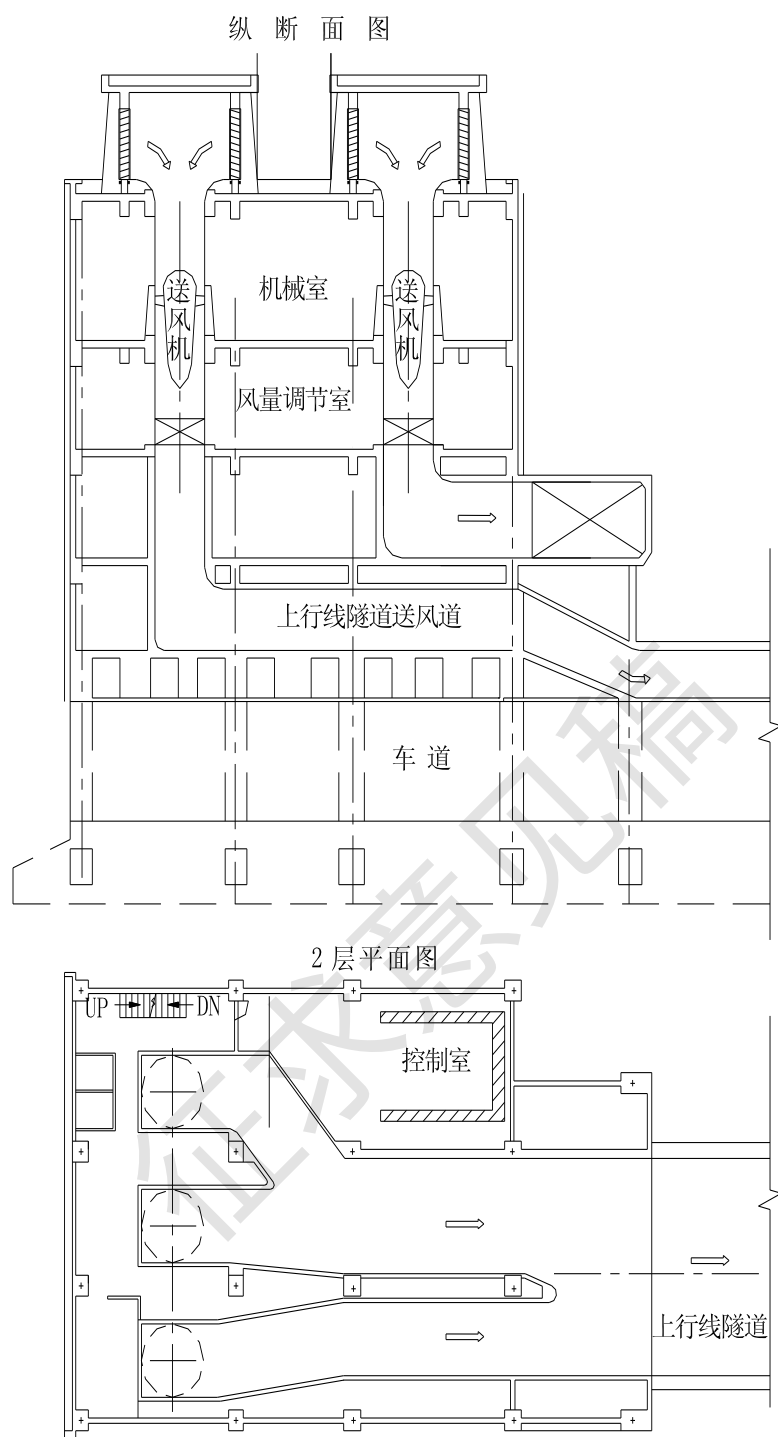


图 5.8-1 两洞口间设置地面风机房实例

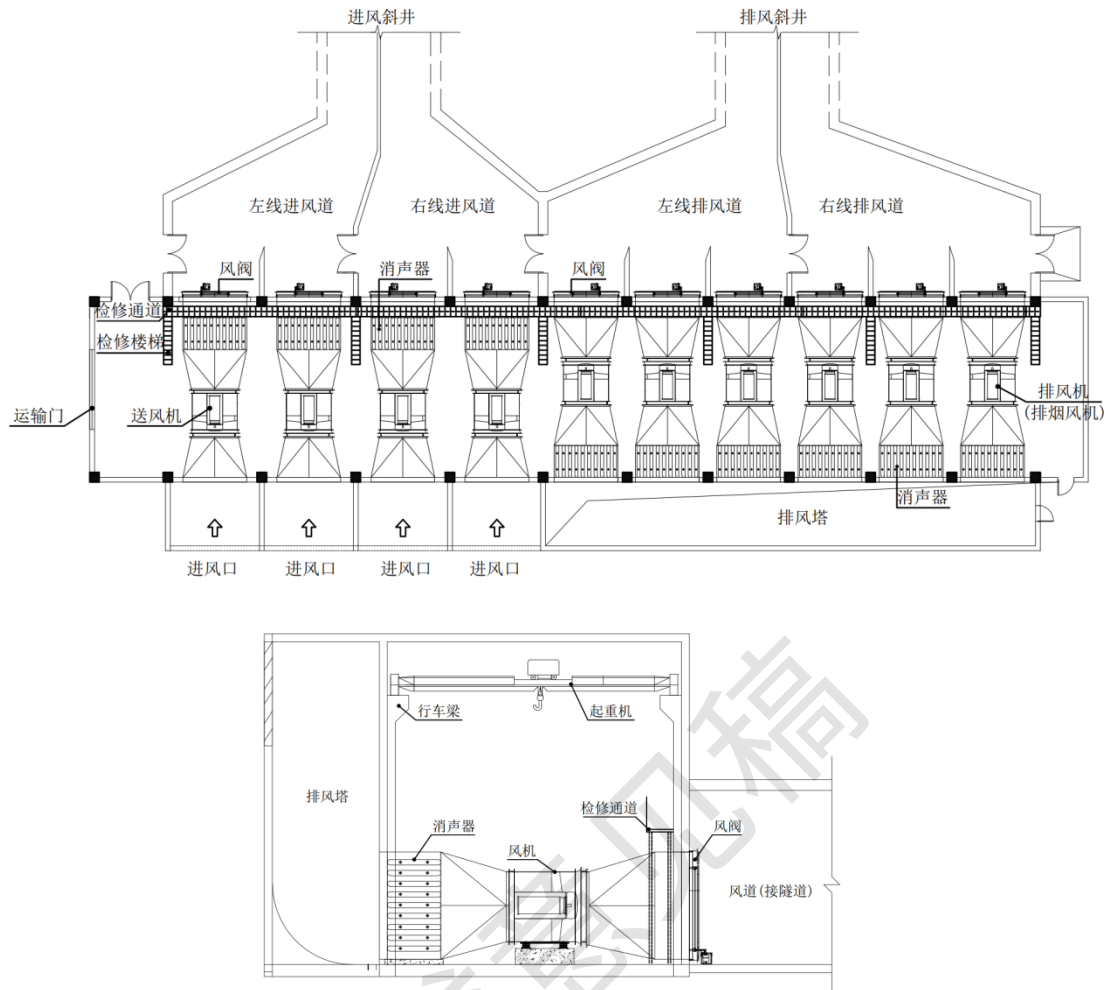


图 5.8-2 斜井口设置地面风机房实例

地面风机房的设置可能破坏自然环境景观，影响附近居民生活，设计时需对该类影响加以考虑。例如，城镇附近的隧道地面风机房的设置可能对附近居民带来噪声、空气质量的影响，同时可能影响环境景观等。

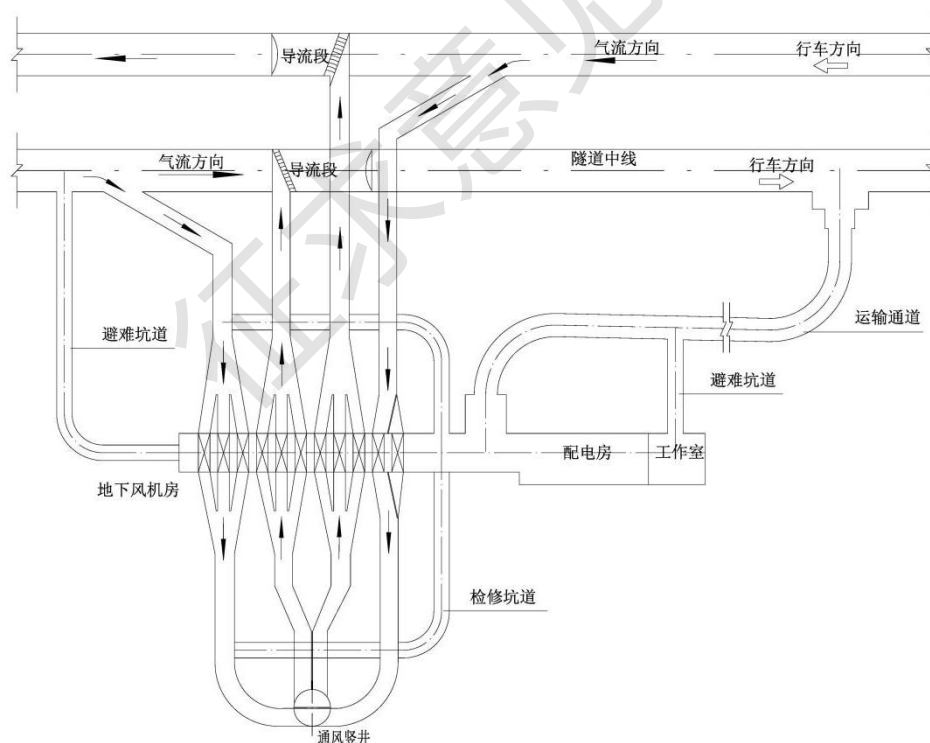
5.8.3 地下风机房。

- 1 地下风机房的设计应综合考虑地质条件、安全性和经济性等因素确定设置位置，暗挖机房宜选择在围岩条件较好地段。
- 2 地下风机房与隧道的位置关系，可根据地质条件，隧道与通风井、连接风道的位置关系确定。
- 3 地下风机房的布局应满足风机及其配套设施的综合布置、运输、安装、检修等各项要求，通风机宜集中布置。
- 4 地下风机房与隧道之间应设置大型设备运输通道和人员逃通道，通道应设置防火门；地下风机房与连接风道之间应设置检修通道。

5 公路隧道通风设计应进行地下风机房的通风、防潮、防尘、降噪和温度调节等设计。

条文说明

当隧道采用通风井分段通风且设置地面风机房有困难时,可设置地下风机房。隧道地下风机房一般设在通风井底部与主洞连接处的岩体内,便于设备的维护管理和工作人员的进出。这种设置方式在工程费用方面一般高于洞外设置方式,但可节省土地,保护植被环境。经过多年的发展,我国公路建设与运营技术正进入世界先进行列。在长大隧道方面,截至 2025 年底,全国公路隧道 30502 处,其中特长隧道 2546 处,长隧道 8756 处。如秦岭终南山特长公路隧道、天山胜利隧道、青岛胶州湾海底隧道、港珠澳海底隧道、深中通道、汕头海湾隧道等一批特长隧道,风机房的建设取得了丰富的经验。矿山法隧道地下风机房设置形式见图 5.8-3。水下隧道地下风机房可以结合盾构工作井或沉管段端头上方设备房设置,节约用地。盾构法和沉管法隧道地下风机房设置形式见图 5.8-4、5.8-5。



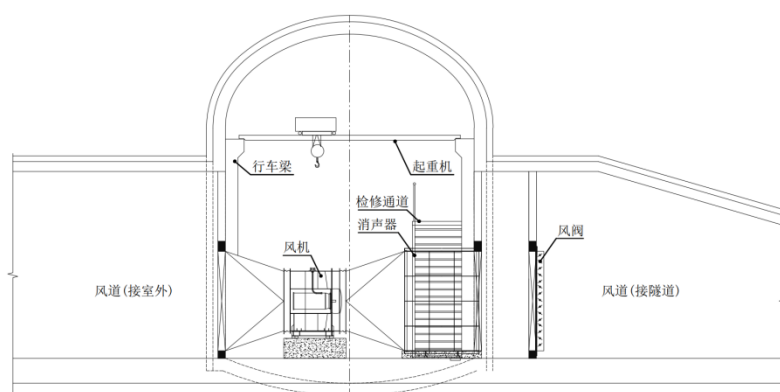


图 5.8-3 矿山法隧道地下风机房实例

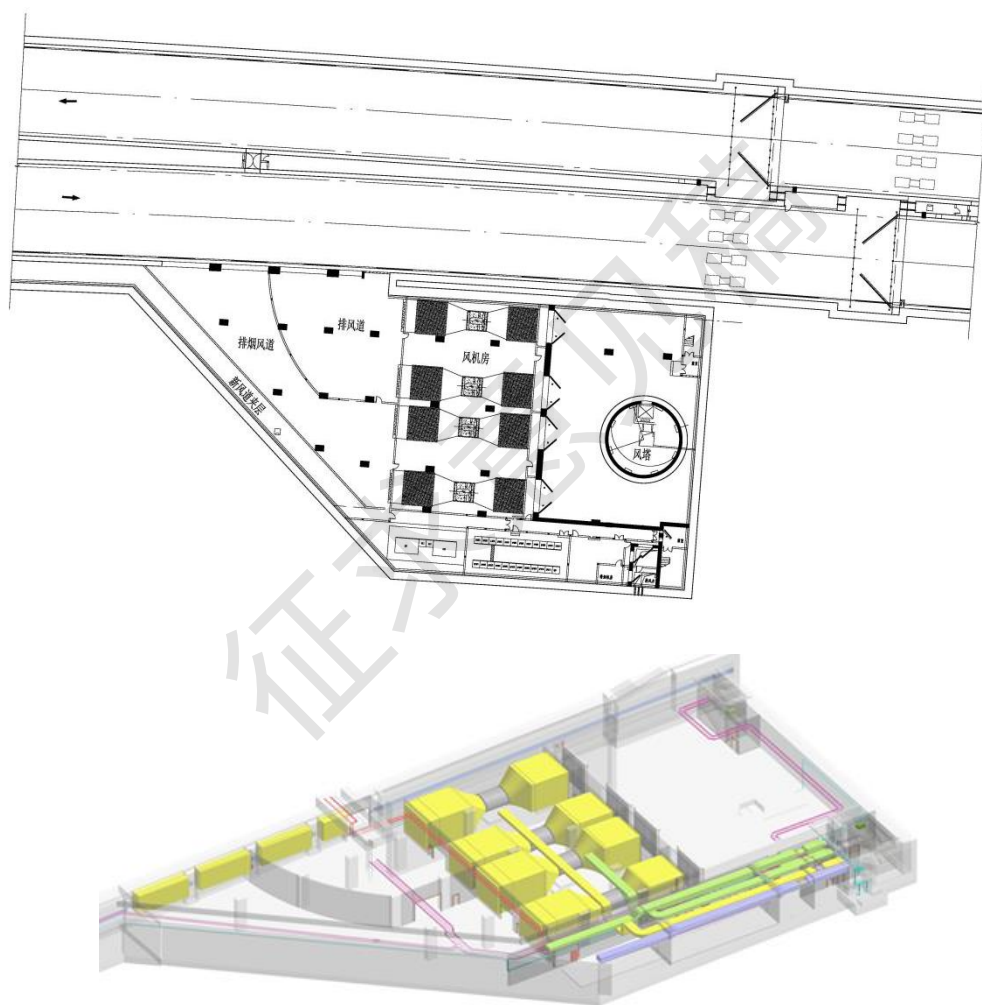


图 5.8-4 盾构法隧道地下风机房实例

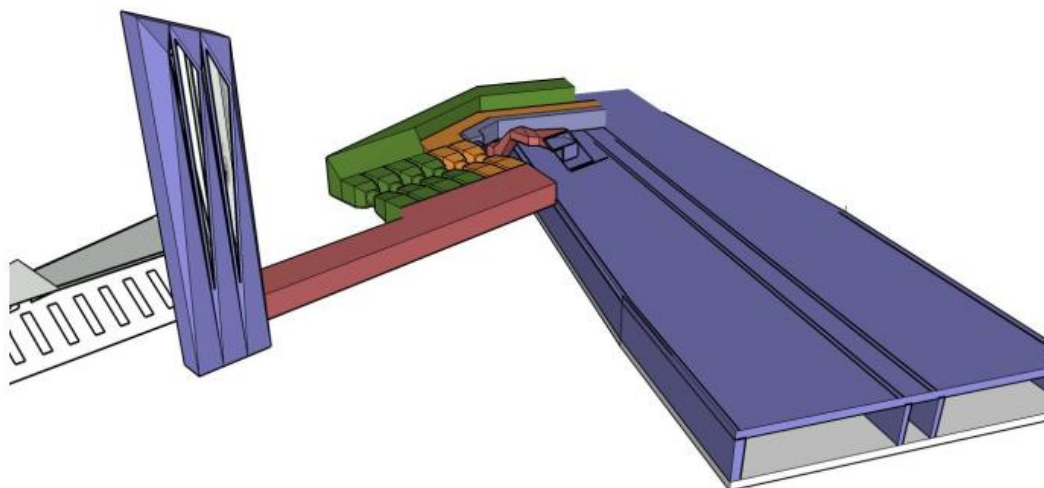


图 5.8-5 沉管法隧道地下风机房示意图

由于设备运行散发出的热量会造成地下风机房的温度升高，同时地下空间环境湿度较大，均对风机房内设备运行和管理人员造成不利影响。因此，可通过设置通风、空调等系统对风机房内的空气质量、噪声等进行调节控制，以满足人员的生理及心理条件要求和设备正常运行的需求。

5.8.4 通风井

- 1 隧道通风竖井、斜井和平行导洞可单独设置，也可组合选用。
- 2 隧道宜采用竖井进行通风排烟。
- 3 通风井设置应结合隧道通风分段、通风井工程规模、隧道平纵线形、工程和水文地质条件、地形地貌、施工与运营条件等因素进行方案比选。
- 4 通风井应设置在地质条件总体较好的地段，应避免穿越断层破碎带、煤层、涌突水等不良地质地段。
- 5 通风井口宜选择在地形平坦、地势开阔、扩散效果良好的地带。通风井口高程应至少高于设计洪水频率 1/100 的水位 0.5m。
- 6 排烟风井不应作为隧道火灾情况下的逃生通道。
- 7 通风井的设计风速宜取 13.0~20.0m/s。
- 8 通风井顶部宜设置井帽，防止雨、雪等进入；寒冷地区应采取措施，防止通风井内与井口结冰。
- 9 通风竖井设计应满足下列要求：
 - 1) 竖井深度不宜超过 500m，当竖井深度超过 500m 时，宜结合路线选择、施工安全、工程造价等进行专题论证。

2) 竖井内轮廓宜采用圆形断面形式。

10 通风斜井设计应满足下列要求:

1) 斜井长度不宜过 1500m 当斜井长度超 1500m 时, 宜结合路线选择、施工安全、工程造价等进行论证。

2) 当斜井长度不大于 700m 时, 斜井内设计风速可取 16.0~20.0m/s 当斜井长度大于 700m 时, 斜井内设计风速可取 13.0~16.0m/s。

3) 斜井的倾角应根据斜井施工的提升方式确定, 箕斗提升时不宜大于 35° , 串车提升时不宜大于 25° , 胶带输送机提升时不宜大于 15° , 无轨运输时不宜大于 12° 。

11 送风井与排风井合建时, 应满足下列要求:

1) 当送风井与排风井合建时, 应根据隧道送风量和排风量分别所需净空断面积划分通风井的各自独立空间。

2) 当隧道采用地面风机房, 不同通风区段的送风井合建或排风井合建时, 应根据不同通风区段送风量或排风量分别所需净空断面积划分通风井的各自独立空间。

3) 当隧道采用地下风机房, 不同通风区段的排风井合建时, 风机房外侧的排风道可合用, 风道面积应根据不同通风区段分别计算的送风量或排风量之和进行确定。

12 平行导洞设计应满足下列要求:

1) 平行导洞的设计宜结合路线选择、通风效果、工程造价、运营费用、养护管理及火灾时的逃生救援预案等进行方案比选。

2) 平行导洞的设计风速可取 13.0~20.0m/s; 当平行导洞转换为人员逃生救援通道时, 平行导洞的设计风速不宜大于 7.0m/s。

条文说明

考虑到烟囱效益, 隧道通风换气, 竖井既有里程短, 烟囱效应明显的优势, 在条件允许的情况下, 竖井对通风排烟更具有优势。

通风井口宜选择在地形平坦、地势开阔、扩散效果良好的地带, 以便于井口施工和建筑布置; 并勘察井口周围的工程地质和水文地质情况, 避免山体滑坡、洪涝灾害等给隧道通风系统和隧道运营带来安全隐患。

通风井与周边建筑合建时, 为减少污染物的扩散对建筑的影响, 提出本条要

求。

通风井的设计风速取值直接影响通风井的断面大小,从而较大程度影响工程初期投资。通风井风速取值与其断面大小成反比。通风井断面偏小有利于节约工程投资,但较大的通风井风速势必增加通风系统风机的配置电机功率,导致通风系统长期运营费用增加。因此,根据国内外技术资料、工程应用情况及研究成果总结,通风井设计风速在 13.0~20.0m/s 范围内较为经济合理。

通风竖井和斜井的深度和长度均通过计算比选和论证来确定,而目前特长山岭隧道的竖井和斜井建设的深度和长度远超 300m 深和 1000m 长,甚至深度超过 500m 和长度达到 2000m 以上,且随着风机性能的提升和优化,风机风压能够满足长通风井的阻力要求,因此对竖井深度和斜井长度限值进行修订。

我国部分特长山岭隧道斜竖井深度和长度参数

序号	隧道名称	隧道长度 (m)	竖井深度 (m)	斜井长度 (m)	通风方案
1	秦岭终南山隧道	18020	1#190 2#661 3#392	—	3 竖井 4 区段送排 式纵向通风
2	米仓山隧道	13792	432	1#1855 2#1592	2 斜井 1 竖井 4 区 段分段纵向通风
3	大相岭 (泥巴 山) 隧道	左 9962 右 10007	—	1#1532/1356 2#912/906	4 斜井 3 区段送排 式纵向通风
4	雅康二郎 山隧道	13400	—	雅安 2246/2305; 康定 1716/1734	左右线各 2 座斜 井 3 区段分段纵向 通风
5	坪林隧道 (雪山隧 道)	12900	1#480/501 2#648/639 3#438/459	—	左右洞分别设置 3 座竖井分段纵向通 风
6	天山胜利 隧道	22130	1#573/571 2#707/704 3#645/642 4#513/510	—	4 竖井 5 区段分段 纵向通风
7	宜攀高速 白鹤滩隧	左线 6644 右线 6714	547	—	1 竖井分段纵向通 风

序号	隧道名称	隧道长度 (m)	竖井深度 (m)	斜井长度 (m)	通风方案
	道				
8	格萨拉隧道	左 11916 右 11990	256	1933	1 竖井 1 斜井分段 纵向通风
9	东天山特长隧道 (G575 巴哈高速)	左 11764 右 11775	—	1#2160 2#1340	2 斜井 3 区段分段 纵向通风
10	北天山特长隧道 (G577 精伊)	左 11091 右 11885	—	1#1917 2#1849	2 斜井 3 区段分段 纵向通风
11	贡觉高山隧道 (西昭高速)	左 12095 右 12037	—	1#2214/2163 2#1252/1224	4 斜井 3 区段分段 纵向通风

当采用地面风机房时，风机房内侧合用风道长度长，左、右线通风系统关联性较强，当左洞（或右洞）的通风系统启动时，将影响右洞（或左洞）的通风系统，一旦设计或运营管理不合理，就可能互为阻力，影响通风效果。为保证隧道左右线各自通风系统的可靠性和稳定性，当隧道不同通风区段的送风井与送风井或排风井与排风井合建时，需要根据不同通风区段送风量或排风量分别所需净空断面积独立划分各自通风井空间。

对于地下风机房而言，风机房内侧左右线送风道或排风道相互独立，风机房排风道外侧风道合用时，两线之间影响相对较小，且左右线交通量一般不会同时达峰，合用风道可以更为高效地得以利用，降低风道阻力，节约风机能耗。故当风井断面紧张时，可以考虑地下风机房外侧的排风道可合用，但需要通过通风网络计算，精确选定风机性能参数。

5.8.5 通风塔。

1 采用地面风机房时，宜通过通风塔将新风送入通风井或将隧道内污染风排出。通风塔宜设置在通风井口附近。

2 通风塔的进风口宜设置于上风方向，排风口宜设置于下风方向；设置于山坳中的通风塔，风口宜朝开阔方向。

3 通风塔的排风口高程应大于进风口高程，其高差不应小于 5m；进风口与排风口之间的平面间距不应小于 5m；进风口与排风口不应同方向布置，防止窜流。

4 城市隧道采用高风塔时，风塔宜与周边建筑合建，排风口应高出结合建筑不小于 5m。

5 海中或海边风塔宜设置可远程控制的风阀并与风速风向仪联动，避免出风口受外界高风速影响，造成烟气无法排出。

6 进风口底部距地面的高度不宜小于 2m；当进风口布置在绿化带内时，进风口距地面的距离可适当降低，但不应低于 1m，且应满足防淹要求。

7 进风塔的进风风速不宜大于 8.0m/s，排风塔的排风风速不宜大于 15m/s。

8 通风塔应采取安全防护措施，防止人和动物误入；并应设置风帽，防止雨、雪等进入。

9 通风塔的排风扩散可按下列公式计算：

通风塔的排风口有效高度可参照图 5.8-6，并按照式（5.8-1、5.8-2）计算；排风口构造形式与排风上升效果可参见表 5.8-1。

$$H_e = H_0 + \Delta H \quad (5.8-1)$$

$$\Delta H = \frac{3.1005}{1 + 0.43 \times \frac{v}{v_g}} \cdot \frac{\sqrt{Q_e \cdot v_g}}{v} \quad (5.8-2)$$

式中： H_e ——排风口有效高度（m）；

H_0 ——排风口结构高度（m）；

ΔH ——排风上升高度（m），

Q_e ——排风量（m³/s）；

v_g ——通风塔排风口风速（m/s）；

v ——大气平均风速（m/s）。

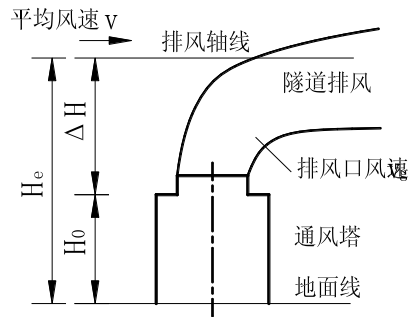
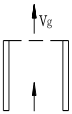
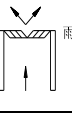
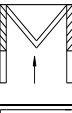
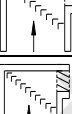


图 5.8-6 排风口有效高度

表 5.8-1 通风塔排风口构造形式与排风上升效果

排风口形式			排风上升效果
朝上吹出	A		构造与工厂烟囱基本相同,其排出速度可以有效地改变上升高度
	B		排气吐出方向由于有叶片而变成斜向,对上升高度的改变不利
	C		与 B 同
侧面吹出	D		排气的排出速度不能左右上升高度
	E		由于有叶片朝下,排出速度减小了排风高度,是一种不利的形式

10 当隧道洞口污染物浓度预测值无法达标时，污染空气排放宜采用高风塔集中排放，当高风塔实施困难时可采用机械式分散排放或污染空气净化除尘方案。隧道污染空气的排放方案宜结合环境影响报告书制定。

11 风塔出风口的净面积应考虑外立面装饰板的不利影响。

条文说明

为防止排风对进风的污染，故做出此规定。

通风塔是隧道内污染空气排出及新鲜空气进入的与外界相连通的设施，影响着隧道通风系统运营效果的好坏。本条中关于通风塔设置位置、风塔风速的规定等参照现行《地铁设计规范》（GB50157）的相关规定。

通风塔的安全防护设计，是为预防动物、垃圾等异物进入风塔损坏设备，预防人员跌入等。隧道的污染空气排放方案可采用风井集中高空排放、分散排放或净化处理方式，其中高空排放技术成熟。当风井设置确实有困难时，可结合工程环

境,采用机械分散排放的方式。经对长沙、南昌等城市多条公路隧道洞口污染物浓度(CO、NO₂)的实际监测,长度在3km以下的单向交通隧道,除隧道洞口外污染物浓度均能满足环境空气质量的二级标准要求。因此要求当隧道洞口污染物浓度预测值无法达标时,再行考虑设置高风塔集中排放。

污染空气净化受国内净化装备的不成熟、进口设备费用高昂的影响,制约了其在工程中的应用,目前国内仅有深圳市桂庙路快速化改造工程、春风路隧道等少数应用案例。隧道污染空气的排放方案,包括洞口允许排放量、集中排风井高度、分散排放时的各点排放量和排放点等宜结合工程环境影响报告书制定。

5.9 隧道火灾通风

5.9.1 隧道火灾排烟机械通风设置应符合下列规定:

- 1 长度 $L>1000\text{m}$ 的高速公路和一级公路隧道应设置机械防烟与机械排烟系统。
- 2 长度 $L>2000\text{m}$ 的二级公路隧道应设置机械防烟与机械排烟系统。
- 3 长度 $L>3000\text{m}$ 的三级、四级公路隧道应设置机械防烟与机械排烟系统。

条文说明

公路隧道火灾造成的损害和影响较大、救援困难。尤其是长隧道和特长隧道,火灾防烟与排烟是通风设计的重要组成部分。

“火灾防烟”是指通过主动送风在需保护的疏散通道或安全区域内形成正压,以阻止高温有毒烟气侵入、确保人员安全疏散的主动防控措施。“火灾排烟”是指采用自然排烟或机械排烟的方式,将隧道内火灾产生的烟气及时排至洞外的系统。区别于“排烟”将已产生的烟气排出洞外,“防烟”的核心在于通过气流组织将烟气控制在有限范围内,为人员逃生和应急救援创造安全环境。

注:参照《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251-2017)的相关定义,并结合公路隧道的工程特点进行调整。

根据国内工程实践,长度 $L\leq 500\text{m}$ 的高速公路和一级公路隧道、长度 $500\text{m}<L\leq 1000\text{m}$ 的二级公路隧道通常不设置机械防烟与排烟系统。

长度 $500\text{m}<L\leq 1000\text{m}$ 的高速公路和一级公路隧道、长度 $1000\text{m}<L\leq 2000\text{m}$ 的二级公路隧道是否设置防灾排烟机械通风,与隧道几何条件(长度、纵

坡等)、交通条件(交通方式、交通量、交通组成、行车速度等)、有无行人及气象条件等因素有关。例如,对于长期处于三级或四级服务水平的隧道、行车方向平均纵坡 $\leq -3.0\%$ 的隧道等,经调研总结,为保证行车安全,通常设有机防烟排烟系统。

5.9.2 隧道防烟、排烟系统的设置应遵循下列原则:

- 1 隧道防烟与排烟宜按一座隧道全线同一时间内发生一次火灾设计。
- 2 应利于人员安全疏散,避免火灾隧道的烟气侵入横通道、相邻隧道、专用疏散通道、附属用房等安全区域。
- 3 应能抑制火灾烟气的扩散,并将火灾烟气及时排至洞外,为人员疏散和灭火救援创造有利条件。
- 4 与通风系统合用时,通风系统应具备在火灾时快速转换的功能,并应符合防烟、排烟系统的要求。

条文说明

对于新能源车辆占比较高(如超过日均交通量的 20%)的隧道,或交通量大、事故风险较高的特长隧道,宜进一步评估多车连锁火灾或锂电池爆燃等更不利火灾场景的可能性,并针对性地加强排烟系统的设计冗余。

5.9.3 公路隧道火灾设防规模应按表 5.9.3 取值。

表 5.9.3 隧道火灾设防规模(最大热释放率)(MW)

通行方式	隧道长度 L	公路等级		
		高速公路	一级公路	二级、三级、四级公路
单向交通	L>6000m	30/50	30/50	-
	1000m<L≤6000m	20/30	20/30	-
双向交通	L>2000m	-	-	20

注:运煤专用通道、客车专用通道等特殊隧道火灾设防规模(最大热释放率)取值宜根据交通流实际条件具体确定。“*/”前者为山岭隧道取值,后者为水下隧道取值。

条文说明

本细则结合国内公路隧道安全隐患严重的实际情况,参考了 PIARC2007 年报告引用的文献,并考虑了道路等级、隧道长度、交通方式(单向还是双向)、隧道位置(山岭还是水下)等主要因素,提出了表 5.9.3 的建议值。由于交通量与道路等级密切相关,因此这里没有再单独列出交通量的指标。

5.9.4 采用纵向排烟的公路隧道，排烟需风量宜按式（5.9.4）计算：

$$Q_{\text{req}(f)} = A_r \cdot v_c \quad (5.9.4)$$

式中： $Q_{\text{req}(f)}$ ——隧道火灾排烟需风量（ m^3/s ）；

A_r ——隧道净空断面积（ m^2 ）；

v_c ——隧道火灾临界风速（ m/s ），可根据火灾热释放率、隧道断面积和隧道净空高度等因素综合确定，且可按表 5.9.4 取值。

表 5.9.4 隧道断面的临界风速

设防规模（MW）	20	30	50
临界风速（m/s）	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0

注：以行车方向为准，上坡方向可取小值，下坡方向可取大值。

5.9.5 公路隧道火灾排烟设计应考虑火风压的影响，火风压可按式（5.9.5-1）、式（5.9.5-2）计算：

$$\Delta P_f = \rho \cdot g \cdot \Delta H_f \cdot \frac{\Delta T_x}{T} \quad (5.9.5-1)$$

$$\Delta T_x = \Delta T_0 \cdot e^{-\frac{c}{G}x} \quad (5.9.5-2)$$

式中： Δp_f ——火风压值（ N/m^2 ）；

ρ ——通风计算点的空气密度（ kg/m^3 ）；

g ——重力加速度， 9.8m/s^2 ；

ΔH_f ——高温气体流经隧道的高程差（ m ）；

T ——高温气体流经隧道内火灾后空气的平均绝对温度（ K ）；

x ——沿烟流方向计算烟流温升点到火源点的距离（ m ）；

ΔT_x ——沿烟流方向距火源点距离为 x 米处的气温增量（ K ）；

ΔT_0 ——发生火灾前后火源点的气温增量（ K ）；

G ——沿烟流方向 x （ m ）处的火烟的质量流量（ kg/s ）；

c ——系数， $c = \frac{k \cdot C_r}{3600 C_p}$ ；

C_r ——隧道断面周长（ m ）；

k ——岩石的导热系数， $k = 2 + k' \cdot \sqrt{v_1}$ ， k' 值为 $5 \sim 10$ ， v_1 为烟流速度（ m/s ）；

C_p ——空气的定压比热容，取 $1.012 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

条文说明

隧道内发生火灾时出现的附加热风压,称为火风压或浮力效应烟流阻力。火风压是由于火灾烟流变化引起的自然风压的增量。火灾烟流区火风压作用方向以沿隧道上坡方向为正,下坡方向为负,火风压随高温烟流扩散不断变化。

5.9.6 采用纵向排烟的单向交通隧道,排烟设计应符合下列规定:

- 1 隧道内排烟方向应与隧道行车方向相同,烟雾应由隧道出口或就近排烟口排出。
- 2 对于山岭隧道火灾烟雾最大行程在隧道内不宜大于 6000 m;当大于 6000 m 时应开展技术论证,并应采取专项措施。
- 3 对于水下隧道、城市隧道火灾烟雾最大行程在隧道内不宜大于 3000 m;当大于 3000 m 时应开展技术论证,并应采取专项措施。
- 3 人员疏散阶段,纵向排烟风速不宜大于 2.0 m/s。
- 4 排烟灭火阶段,纵向排烟风速不应小于临界风速。
- 5 起火点下风方向的车行横通道防火卷帘应关闭。

条文说明

- 1 此处专项措施通常包括设置火灾烟雾侦测、态势预报、烟气高效控制、洞口交通管控、高效诱导等措施。
- 2 相关研究表明,在火灾早期的人员疏散阶段,采用亚临界风速可以兼顾火源上游和下游的烟气控制,既能限制烟气在火源上游的蔓延距离,又能避免火源下游烟气分层被扰乱;当纵向排烟风速为隧道单位宽度浮力通量的立方根的 0.56 倍(约为 0.5 倍临界风速)时,火源上游的烟气逆流底部显著高于人眼特征高度,且火源下游烟气分层稳定性也得以维持,有利于火源下游因交通堵塞而滞留的人员进行步行疏散。
- 3 因单向交通隧道中的排烟方向与行车方向相同,为防止起火点下游区域烟雾通过横通道扩散至另一侧隧道,因此起火点下风方向的车行横通道防火卷帘应关闭。

5.9.7 采用纵向排烟的单洞双向交通隧道,火灾排烟设计应遵循下列原则:

- 1 隧道内排烟方向和排烟风速应根据洞内火灾位置、交通情况、自然排烟条件、通风井设置情况等因素确定,应缩短烟雾在隧道内的行程。
- 2 火灾烟雾最大行程在隧道内不宜大于 3000 m;当大于 3000 m 时应开展

技术论证，并应采取专项措施。

- 3 人员疏散阶段，纵向排烟风速不应大于 2.0 m/s。
- 4 排烟灭火阶段，纵向排烟风速不应小于临界风速。

5.9.8 采用重点排烟的隧道，排烟设计应符合下列规定：

- 1 排烟量应根据火灾烟气生成率、排烟口的设置、排烟道漏风量等因素综合确定，且不应小于烟气生成率。火灾烟气生成率可按表 5.3.4 取值。

表 5.3.4 隧道火灾烟气生成率

火灾热释放率 (MW)	20	30	50
火灾烟气生成率 (m ³ /s)	50~60	60~80	80~100

- 2 隧道行车道内纵向诱导风速不宜大于 2.0 m/s。
- 3 排烟口宜设置在隧道顶部或靠近顶部的侧壁上部，且纵向间距不宜小于 60m。
- 4 全横向通风系统转换为排烟系统时，起火点附近应停止送入新鲜空气；隧道送风型半横向系统应转换为排风型半横向系统进行排烟。

条文说明

1 烟气的生成速率主要由烟气羽流所卷吸的空气量决定，而可燃物的消耗对烟气量的贡献不大，而计算烟气生成速率需要基于一定的羽流模型，通常采用 NFPA92B 提出的火灾产烟量的计算方法。烟道漏风量主要取决于排烟阀漏风量、排烟阀面积、排烟道与主隧道之间的压差、烟气温度等因素。根据 PIARC 技术报告和国外大量文献报告可知，当排烟口设置在隧道侧部时，在火灾排烟过程中会将隧道内的新鲜空气吸入到排烟道内，且吸入量较大。国内科研单位在开展港珠澳沉管隧道火灾排烟试验过程中也发现类似现象。

2 采用排烟道重点排烟的公路隧道，控制烟雾蔓延的目的是使人们滞留的通行空间尽可能长时间地处于无烟状态，那么就要保持烟雾层的完整，使烟雾层的下面保留干净和可呼吸的空气，而上部分层的烟雾通过位于顶棚或侧墙顶部的排烟口排出隧道。当隧道内纵向排烟风速较大时，烟雾和新鲜空气之间的剪流层就会垂直紊动，并快速冷却上层烟雾，使烟雾在整个隧道横断面上混合，从而给滞留洞内的人员带来危害。

5.9.9 采用重点排烟的隧道，排烟设计应符合下列规定：

- 1 排烟口宜设置在隧道顶部，火灾工况下通过远程开启排烟风机及电动排烟口实现集中排烟。
- 2 沉管隧道排烟口设置在侧壁时，考虑到结构安全可采用多孔组合的方案。
- 3 对于超宽断面沉管隧道应采用顶部横向烟道方案。
- 4 排烟风机设计排烟量应考虑烟雾排出量之外还需考虑沿程设施的漏风量。
- 5 火灾工况下宜开启火源上游及下游 2-3 组电动排烟口。
- 6 排烟道距离过长时，宜在排烟道内设置风机进行接力排烟。
- 7 采用排烟道集中排烟时，设置的排烟口（组）短边宜与行车方向平行。

条文说明

根据国际道路协会等相关文献及港珠澳大桥沉管隧道和深中通道沉管隧道排烟的相关成果，侧向集中排烟模式下新风汇入率较顶部集中排烟的要提升 10%~20%，在进行通风计算时需要考虑该部分的影响。

根据隧道排烟道设置特点，发生漏风的地方主要有电动排烟口、排烟道检修口等，结合深中通道沉管隧道排烟的相关成果，排烟口漏风量可按照 $0.1\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ 进行考虑，另外可以考虑 5% 新风吸入量。

对于超宽断面沉管隧道直接采用侧向集中排烟方案，新风混入量过高。通过在顶部设置横向排烟道，横向排烟道与侧壁排烟口相连接，实现火灾工况下顶部集中排烟。根据深中隧道的研究结果，采用顶部横向排烟道方案，排烟效率提升 40% 左右。

集中排烟方案通过研究确定排烟口的设置尺寸、间距及排烟策略，从而确定排烟口的设置方案，火灾工况下纵向风速控制及电动排烟口开启方案。

采用排烟道集中排烟时，排烟口设置在隧道顶部或侧壁上部，通过物理模拟试验、数值模拟及现场实测表明。排烟口（组）为长方形时，当设置的排烟口短边与行车方向平行、长边与行车方向垂直较短边与行车方向垂直、长边与行车方向平行其排烟口的排烟效率更高。

5.9.10 隧道机械防烟系统的设计应根据隧道构造、使用性质、设备布置等因素，采用机械加压送风系统。隧道下列场所应设置机械加压送风防烟设施：

- 1 专用疏散通道；
- 2 疏散楼梯间；

5.9.11 机械加压送风系统通用设计应符合下列规定：

- 1 机械加压送风系统的设计风量不应小于计算风量的 1.2 倍。
- 2 加压送风机应设置在专用机房内，风机从静态转换为事故状态的时间不应大于 30s。
- 3 送风口应靠近专用疏散通道、横通道和入口设置，送风口风速不宜大于 7.0m/s。
- 4 送风方向宜与隧道横通道或专用疏散通道纵轴线方向一致。
- 5 当隧道采用重点排烟方式时，应校核排烟系统运行对防烟系统余压的影响，必要时适当提高防烟系统的加压送风量。
- 6 隧道内附属用房的机械加压送风系统应与通风空调系统分别设置；确需合用时，通风空调系统应采取可靠的防火措施，其设置应符合机械加压送风系统的设置要求，并应具备火灾时快速转换功能。

条文说明

送风风速不宜大于 7.0m/s，参考了《建筑防烟排烟系统技术标准》GB 51251 和 DB42/T 2013—2023 第 4.5.3 条的规定，以避免送风口风速过大产生噪声或影响门扇开启。

设计风量按计算风量的 1.2 倍取值，依据 DB42/T 2013—2023 第 4.5.1 条及 GB 51251 的相关规定，以弥补施工误差、风道漏风等不确定因素。

风机启动时间不应大于 30s，参考 DB42/T 2013—2023 第 5.6.3 条，确保火灾时防烟系统能及时投入运行。

重点排烟方式下，排烟风机开启后会使车行道内形成负压，可能削弱防烟系统的正压效果。设计时需进行压力平衡校核，必要时提高加压送风量或采取其他补偿措施。本条参考了 DB42/T 2013—2023 第 4.2.3 条条文说明中的相关要求。

当具备火源实时诊断条件时，机械加压送风系统可进一步实现基于火源位置的动态调压。随着火灾智能诊断技术的发展，未来的机械加压送风防烟系统，应具备基于火源实时位置与规模的动态调压能力。通过联动火源诊断系统，在火灾极早期预先启动相关区域的加压防烟，并根据火势发展实时调节风机转速与送风

量，以最小能耗在最关键的区域建立精准的防烟屏障，实现从“固定参数控制”到“按需防烟”的跨越。

强调防烟系统与通风空调系统分开设置的优先性。合用时，必须确保火灾工况下的快速转换，避免因阀门切换过多、风机反转等导致延误。

5.9.12 疏散通道防烟设计应符合下列规定：

1 疏散通道的防烟设计应根据其长度和净空，选择合理的机械加压送风方式：

- 1) 当疏散通道长度不大于 3000m 时，可采用单端加压送风；
- 2) 不大于 5000m 时，宜采用双端加压送风；
- 3) 超过 5000m 时，应采用分段加压送风。

2 专用疏散通道内的机械加压送风余压值宜为 30Pa~50Pa；

条文说明

疏散通道加压送风方式与负担长度的关系，参考了 DB42/T 2013—2023 第 4.2.4 条及国内多条盾构隧道的实测数据，增强了可操作性。

余压值的分段取值考虑了不同排烟方式对车行道负压的影响。当隧道采用重点排烟时，排烟口（阀）开启后会在车行道内形成负压（实测可达 20Pa 以上），故适当降低防烟系统余压值下限，避免过度设计；当采用自然排烟或纵向排烟时，车行道内无额外负压，余压值按常规 30Pa~50Pa 取值。

余压值为设计控制目标值，并非要求被保护区域内处处均达到该值。实测时以被保护区域与相邻危险区域交界处（如疏散门洞处、防火门门缝处）作为测点，以确保在关键气流屏障处形成有效正压。对于专用疏散通道等长大空间，设计中应以疏散门洞断面风速及交界处余压作为主要控制指标。

5.9.13 疏散楼梯间的前室与事故隧道之间压差应为 25Pa~30Pa；楼梯间与事故隧道之间的压差应为 40 Pa~50Pa。

5.9.12 新能源汽车通行下，计算需风量时：

- 1 应需确定新能源纯电动汽车和燃油汽车的通行比例。
- 2 可仅考虑新能源纯电动汽车非尾气颗粒物（PM）排放，排放系数可在表 5.5.7 的基础上按表 5.9.12 取值进行修正。
- 3 新能源混动车辆应同时考虑尾气和非尾气排放颗粒物，其排放基准可参考燃油汽车。

表 5.9.12 新能源汽车非排放颗粒基准排放量修正因子

车辆类型	小型车	中型车	大型车
修正因子	1.127	1.093	1.088

条文说明

本条文规定了隧道需风量应同时考虑燃油车和新能源车辆的排放。随着新能源车辆行驶比例的逐年增加，其排放对需风量产生影响。新能源汽车在行驶过程中虽然不产生排放类污染物，但仍产生非排放类污染类，其产生途径包括道路磨损、轮胎磨损、刹车磨损和再悬浮，且同性能的新能源汽车重量大于燃油汽车，其产生的非排放类污染物 PM 要大于内燃机汽车。在计算需风量时，可参照表 5.9.12 对其进行修正，同时，也需要考虑新能源电动汽车的同行比例。

5.9.13 隧道通风设计应根据运营期车辆能源类型组成确定火灾设计工况。当新能源车辆占设计交通量比例达到 15%及以上时，应开展新能源车辆火灾风险分析，并校核新能源车辆火灾条件下的通风排烟能力。

5.9.14 对于长度大于 10 km 的公路隧道、海底隧道、特长城市隧道以及交通量较大的隧道，即使新能源车辆比例低于 15%，应针对新能源车辆火灾开展专项分析。

5.9.15 当新能源车辆比例超过 30%时，新能源车辆火灾宜作为隧道通风设计控制火灾工况之一。

条文说明

当前，全国汽车保有量中新能源汽车占比达 12.01%，其中纯电动汽车占新能源汽车总量的 68.74%。且销量渗透率逐年增高，截至 2025 年底，乘用车市场中新能源车辆全年渗透率达到 53.9%，年度渗透率首次超过传统燃油车。此现象在部分先行地区占比更高，如海南省新能源汽车在新增车辆中的占比已达 58.23%。从总量占比来看，虽然新能源汽车占比尚小，但绝对体量较大，火灾事故频发，其在隧道封闭空间中火灾危险性更大，因此，在通风设计、排烟设计中应考虑新能源车辆火灾风险。

5.9.16 新能源电动汽车单车火灾热释放速率宜按下列规模选取：

- 1 小轿车火灾规模宜按 7.0 MW 取值；
- 2 新能源公共汽车、大巴车等大型车辆火灾规模宜按 30MW 取值；
- 3 新能源重载货车火灾规模宜按 50 MW 取值。

条文说明

国内外相关机构开展了大量的火灾试验，测试电动汽车火灾热释放速率，多针对小型客车，如同济大学、韩国建设生活环境试验研究院、奥地利格拉茨技术大学、美国 UL 消防安全研究所、中国矿业大学、天津泰达消防科技有限公司，对于纯电动汽车，热释放速率范围为 4.2-11.8 MW，热释放速率值多集中在 6-8 MW 之间，平均值为 6.7 MW；对于插电混动车辆，测试数据较少，报道给出热释放速率为 6.0-7.9 MW，平均值可取 7.0 MW。综合上述数据，对于新能源电动小轿车汽车，热释放速率可按 7.0 MW 取值，相关测试数据可参考下列资料和文献。

目前新能源公交车、大巴车等客运车辆以及货车渗透率也不断增加，其火灾事故也时有发生，然而，目前尚未有相关热释放速率的测试数据。根据新能源小轿车火灾规模的研究结论，电池热释放速率对于整车的热释放速率贡献量较小，因此，针对新能源公交车、大巴车、货车的最大热释放速率可参照燃油汽车进行取值。

值得注意的是，本细则给出的火灾热释放率均为单车的设计火灾规模。设计时应根据隧道内交通组成和可能的灾害场景（如考虑电动汽车着火车辆数、火势蔓延等）确定隧道最终的火灾最大设计规模。

5.9.17 新能源公共汽车、大巴车和载重货车火灾产烟量可根据第 5.9.16 条中所规定的热释放速率参照表 5.3.4 进行取值。新能源小轿车，火灾产烟量可按 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 选取。

条文说明

新能源汽车火灾产烟量主要与热释放速率和隧道高度相关，因此，可参照燃油汽车火灾产烟量进行选取。

5.9.18 当采用新能源车辆作为设计火灾工况时，临界风速应根据新能源车辆火灾热释放率重新计算：

$$V_{EV} = V_{c,0} \left(\frac{Q_{EV}}{Q_0} \right)^{1/3} \quad (5.9.18-1)$$

其中:

V_{EV} ——新能源车辆火灾临界风速, m/s;

$V_{c,0}$ ——传统车辆设计火灾临界风速, m/s;

Q_{EV} ——新能源车辆火灾热释放率, MW;

Q_0 ——传统车辆设计火灾热释放率, MW。

5.9.19 隧道内应设置氟化氢(HF)浓度测试点,测点数量与布置位置宜与一氧化碳(CO)测点保持一致。

条文说明

新能源车辆发生火灾时,与传统燃油车火灾相比,会产生氟化氢(HF)等对司乘人员产生威胁的气体,为支撑火灾时隧道内的排烟组织,需获取隧道内氟化氢等有毒气体的含量。

5.9.20 新能电动汽车火灾烟气宜采用纵向通风控制方式,临界风速的选取应根据车辆类型不同,依据第 5.9.14 条火灾规模的取值,按表 5.9.12 取值。纵向通风控制宜与第 5.9.15 条火灾防控措施联合使用。

5.9.21 新能源电动汽车火灾防排烟系统应维持满足人员安全疏散逃生标准的时间应不小于 15 min,且距行车道 2 m 高度处烟气温度及浓度应满足表 1 的规定。

表 5.9.18 烟气温度及浓度控制标准

评价指标	距行车道 2m 高度处						
	烟气温 度	最小能 见度	一氧化碳 (CO)浓度	氟化氢(HF)浓 度	氰化氢 (HCN)	五氟化 磷(PF ₅)	辐射热
安全标 准	≤60℃	≥10 m	≤225ppm	≤3 ppm	≤2 ppm	≤2 ppm	≤2.5 kW/m ²

条文说明

新能源电动汽车火灾发生后,将产生大量的 CO、CO₂、THC、NO、NO₂、HF、HCl, HCN 气体,且 HF 气体产率远高于燃油汽车,且电池模组在燃烧过程中将释放其他大量具有刺激性的烷烃类气体,对人体健康的影响极大。因此,当新能

源电动汽车发生热失控和火灾事故时，隧道内被困人员应尽量避免烟气的影响。采用重点排烟、竖井排烟时，火源两侧均存在有毒有害烟气，其沉降必然影响事故车辆后方的被困人员的逃生安全。因此，建议采用纵向通风控制的方式，为火源上游人员提供安全的呼吸环境。此外，考虑火源上下游阻塞情况，为了降低烟气在隧道中的蔓延，应尽量采用物理覆盖、水喷淋和通风协同的控烟方式。通过物理覆盖和水喷淋作用，新能源电动汽车火灾高温烟气可以被控制在覆盖罩内，即降低了产烟量。此外，水喷淋也起到一定的净化作用，稀释有毒有害气体，使得隧道内有毒有害气体浓度大幅降低，利于人员的疏散逃生。

5.9.22 新能源电动汽车火灾烟气控制可采用水幕方式对烟气进行屏蔽。发生火灾后，开启火源两侧各一处水幕，将烟气控制在水幕围挡区间内，阻止烟气扩散。相邻水幕间距应不大于 60 m。

5.9.23 新能源电动汽车应根据是否起火采取不同防控措施快速抑制烟气积聚和蔓延：

- 1 新能源电动汽车热失控未起火时，宜采用自动喷淋系统对车辆进行持续喷水；
- 2 新能源电动汽车起火时，宜联合采用物理覆盖和自动喷淋系统；物理覆盖应能阻止喷射火和爆燃火焰的穿透。

条文说明

新能源电动汽车发生热失控但未起火时，电池模组会释放大量的可燃性气体，并且产生漏液。当外界没有点火源时，事故车辆将处于长时间的热失控状态，其虽然危险，但危险性相对起火状态下的车辆较小。为了防止热失控释放可燃性气体和液体燃烧，应采用水喷淋对所电池模组所释放的可燃性气体进行净化和稀释，同时可起到对电池模组的降温作用，抑制热失控的发展。当新能源电动汽车电池模组发生剧烈热失控且快速起火时，火势将在极短时间内蔓延整个车辆，存在多次喷射火且具有爆炸危险性，存在引燃周围车辆的风险，因此，采用物理覆盖方式与自动喷水方式联合作用，可以将火灾控制在覆盖范围内，降低其火灾危险性。

5.10 风机及其他设施选型

5.10.1 公路隧道通风系统设备主要包括射流风机、轴流风机、离心风机、空气净化装置等。

条文说明

射流风机为固定参数的轴流风机，根据工作方式，可分为单向射流风机和双向可逆射流风机。

长度超过 5000m 的特长隧道通风一般采用大风量低风压的轴流风机，但当送、排风机全风压达到 5000N/m^2 时，通常在轴流风机和离心风机进行比选。从总体看，轴流风机具有体积小、与土建易配合、效率高、火灾排烟逆转方便的优点，但存在价格高、噪声大的缺点。

空气净化装置包括静电集尘及脱硝装置。该设备对节约能源、保护环境较为有利。

5.10.2 通风设备应满足隧道通风系统使用要求，并应具有高可靠性、节能、环保的特性。

5.10.3 隧道射流风机设计应符合下列规定：

1.射流风机选型应满足下列要求：

1) 射流风机应选用具有消声装置的公路隧道专用风机，宜选用大推力射流风机。

2) 射流风机的组件应包括主机体、两端消音器、进出口端防护网、安全吊挂钢索、吊架或支架、减振器、安全运行监控装置等。

3) 射流风机气动性能参数，如：流量、风速、推力、推功比、噪声、振动、启动时间、耐高温特性等，其数据的符合性，应提供由国家认可资质的第三方专业检测机构出具的检验报告。

4) 对于双向交通隧道应选择双向风机，双向可逆射流风机反转时的风量和推力不宜低于正转的 95%。在额定转速下，风机的实测流量、出口风速、推力及推力功率比不得低于规定值的 95%。

5) 可逆射流风机通电启动后，15 秒内达到额定转速；

6) 当隧道内发生火灾时，在环境温度为 250°C 情况下，射流风机应能正常可靠运转 60min。排烟风机消声器应在 250°C 的烟气中保持性能稳定。

7) 在野外距风机出口 10m 且成 45° 夹角处测量射流风机的 A 声级应小于 77dB

(A)。

8)射流风机全速运行时,其主机体的整机动平衡振动速度值,不宜大于 4mm/s,主机筒体外应设置水平、垂直方向的动平衡振动信号传感器。

9)射流风机电机防护等级不应低于 IP55,绝缘等级不应低于 155 (F) 级。

10)射流风机支架与预埋件之间宜设置减振装置。

11)在额定工作条件下,风机整体设计使用寿命不应低于 20 年,第一次大修前的安全运转时间不应少于 20000h。

2.射流风机在隧道纵向上的布置应满足下列要求:

1)射流风机的设置位置应结合隧道运营通风需求、火灾防烟与排烟、风机供电系统的合理性等综合考虑。

2)口径不大于 1000mm 的射流风机间距宜小于 120m,口径大于 1000mm 的射流风机间距宜大于 150m。

3)长度不大于 3000m 的直线隧道,射流风机可布置在两端洞口段;特长隧道的射流风机宜在两端洞口段、洞内中部等位置不少于 3 段分布;长度大于 2000m 的曲线隧道,曲线段宜布置射流风机。

4)单向交通隧道采用洞外变电所对洞内射流风机集中供电时,行车进口段第一组风机与洞口的距离宜取 100m。

5)射流风机与其他机电设备不宜相互干扰,风机预埋件宜避开车行横通道、人行横通道、紧急停车带等段落。

6)隧道曲线段内射流风机的纵向布置距离不宜大于 100m。

3.射流风机在隧道横断面上的布置应满足下列要求:

1)射流风机不应侵入隧道建筑限界,射流风机的边沿与隧道建筑限界的净距不宜小于 15cm。

2)宜采用固定式或悬吊式安装;当采用壁龛式安装时,应注意隧道结构的过渡设计,可在风机进出口设置导流叶片。

3)应根据隧道断面形状、断面大小、全隧道射流风机总体布置情况,以及供电系统实施的合理性,确定同一断面上风机的设置数量。

4)当同一断面布置 2 台及 2 台以上射流风机时,相邻 2 台风机的净距不宜小于 1 倍风机叶轮直径,该断面的各风机型号应完全相同。

4.射流风机安装应注意下列事项:

- 1) 风机运转的正向应与隧道通风设计的主要气流方向一致。
- 2) 支承风机的结构承载力不应小于风机实际静荷载的 15 倍, 风机安装前应做支承结构的荷载试验。
- 3) 风机主机体两端应安装安全吊链, 并保持适当的松弛度; 当安全吊链受力时, 应能够承担射流风机及其安装支架的静荷载。
- 4) 风机的安装连接件应选用钢构件, 其表面应做防腐处理; 滨海附近的隧道或洞内污染腐蚀严重的隧道, 宜做好防盐雾腐蚀等处理。
- 5) 风机的安装连接件与风机支承结构预埋件之间可采用连续焊缝工艺焊接或螺栓连接。风机连接件与风机之间或与风机支承结构预埋件之间应考虑安装弹簧减振器的减振措施。
- 6) 风机轴线应与隧道轴线平行, 误差不宜大于 5mm。
- 7) 水下隧道风机预埋件的数量宜考虑 20%以上的富余量。
- 8) 沉管隧道射流风机预埋件应结合沉管的节段设计, 采用标准化制作布置方案, 并在沉管浮运之前完成拉拔试验。

5.射流风机的运行应符合下列规定:

- 1) 射流风机宜成组启动; 当一次需要运行多组射流风机时, 应采用延时方式启动。
- 2) 日常通风时, 应优先启动累计运行时间最短的机组。
- 3) 可逆式风机应能在 60s 内完成反向。

6.改扩建隧道射流风机选型与布置应符合下列规定:

- 1) 采用分离增建隧道, 对于既有隧道宜尽可能利旧射流风机预埋件, 利旧预埋件应保证支承风机的结构承载力不应小于风机实际静荷载的 15 倍, 风机安装前应做旧支承结构的荷载试验。
- 2) 采用扩挖形式扩建的公路隧道, 射流风机应按扩建后的隧道运营通风需求进行设计。

条文说明

- 1) 射流风机是通过其出口喷出的高速气流诱导隧道内空气形成一定速度来实

现通风的。根据多项工程现场测试，从射流风机群的开启到隧道内形成一定的平均风速，往往需要一定的时间，譬如 3~5min。因此，对于特长隧道，特别是为了防灾而设置的全射流通风系统，为提高通风系统的可靠性和效率，宜在洞内分多段布置射流风机。

2) 根据实测与经验，在距洞口约 200m 范围内，汽车能带进足够的新鲜空气量，因此在该段落可不布置射流风机。但当单向交通隧道采用洞外变电所对洞内射流风机集中供电时，一旦行车进口段第一组风机与洞口的距离取值过大，势必造成该段落每台风机的配电电缆长度增加，从而造成较大的浪费。根据工程经验，取值 100m 较为合理。

3) 射流风机实际静荷载包括风机的安装支架。设置安全吊链的目的，是便于隧道运营管理人员能够简单地根据安全吊链是否受力来判断射流风机吊挂预埋件和连接件是否出现安全隐患；另外，安全吊链也是射流风机吊挂的安全储备。

4) 对于水下隧道，尤其是沉管隧道由于进行工厂化制作，风机预埋件一旦预制完毕，无法进行后期的增加或者修复。考虑到水下隧道一般交通量增长较大，为保证水下隧道资源的有效利用以及远期通风系统的拓展要求，需要考虑一定的富余量，故作出本规定。

5) 当一次需要运行多组射流风机时，为避免多组风机同时启动的启动电流太大造成对隧道供电设备的冲击，采用延时方式启动。

6) 为保证各组（台）射流风机均衡运行，在日常通风时，应优先启动累计运行时间最短的机组。

7) 通过对国内既有隧道通风设施调研情况，对于长隧道一般均采用机械通风，相应预留射流风机预埋件，考虑到主体工程仅进行加固改造，若重新预埋风机预埋件，可能会对隧道主体结构产生破坏，因此提出尽可能利旧预埋件。对于预埋件间距不满足现行标准的隧道，应开展技术论证。

8) 对于扩挖形式扩建的隧道，一般采用单侧扩挖、两侧扩挖或周围扩挖方式，射流风机及预埋件均按照新建来进行设计。

9) 射流风机的运行，应具备就地及远程集中控制模式，包括人工控制、自动或智能控制，以便于对通风系统设备的运行状态、检修维护信号的反馈，实施监控，以提高全隧道通风系统射流风机运营管理的工作效率。

5.10.3 隧道轴流风机设计应符合下列规定：

1.轴流风机的选型应满足下列要求：

1) 应根据设计要求确定风机特性，并应根据不同设置场所和环境条件选择轴流风机。

2) 应结合建筑特点和检修需求确定布置方案；风道突变处应设置导流叶片或圆弧过渡等措施来减少局部阻力系数。

3) 在通风系统土建工程施工完毕、轴流风机安装之前，应结合土建施工情况、轴流风机性能，根据通风系统摩擦阻力和风机全压效率等对轴流风机配备参数进行验算。

4) 轴流风机应采用隧道工程专用风机，风机的气动性能曲线均应显示无驼峰、无喘振工况点的稳定工作区。轴流风机气动性能参数，如：流量、压力、功率、效率、噪声、振动、启动时间、耐高温特性等，其数据的符合性，应提供由国家认可资质的第三方专业检测机构出具的检验报告。

5) 在规定的风机转速条件下，所对应的流量 $\geq$ 规定值的 95%。

6) 在规定的风机转速条件下，所对应的压力 $\geq$ 规定值的 95%。

7) 额定风量风机效率 $\geq$ 75%。

8) 在风机额定工况点处，其声压级不应高于 110dB(A),检测位置为野外、风机主机风筒体进风口或出风口外 45° 角、3 米处。

9) 隧道轴流风机在开机后的 60 秒时间内，即可从启动状态达到额定转速。

10) 轴流风机全速运行时，其主机体的整机动平衡振动速度值，不宜大于 6mm/s,主机体应设置水平、垂直方向的动平衡振动信号传感器。

11) 排烟型轴流风机可保证风道在 250° C 高温工况条件下，能连续有效运行工作 1 小时。

12) 火灾工况排烟型轴流风机，其绝缘等级不应低于 H 级，其他类型轴流风机的绝缘等级不应低于 F 级，轴流风机的防护等级均不应低于 IP55，电机功率因数不小于 0.79。

13) 轴流风机内置电机内，应配置防潮加热器，当电机在关机时可自动启动工作，当电机启动时可自动停止工作；电机的前后端应配置轴承温度传感器、电机三相绕组温度传感器；上述保证电机正常工作的防护监控措施，其工作状态信号，

应在就地或远程操作控制面板上清晰显示；

14) 风机主机体，与风机支承底座之间，宜采用组合式弹簧减振器或者固体阻尼器，在风机全速运行工作时，其减振器隔振效率在 95%以上。

17) 轴流风机主机体内应设置防喘振装置；风机主机体各结构表面的处理，其耐腐烤漆层厚度不低于 120um，或镀锌层厚度不低于 70 um，海底隧道等特殊工况环境，按特殊表面防腐要求处理。

18) 轴流风机机组的构成组件，除轴流风机主机风筒外，一般配置有主机体两端软连接、进气端集气风管、出风端扩压风管、矩形消音器、进风端组合式风阀、进出风口防护钢网：

19) 轴流风机的软连接材料应为高强度、耐压、耐腐柔性材料，且可保证风道在 250° C 高温工况条件下，至少能连续有效运行工作 2 小时，且软连接的紧固用抱箍，应经防腐涂层处理，材质强度、紧固形式可满足风机工况需求的钢制构件。

20) 进、出风端风管的钢制材料壁厚不应低于 5mm。宜采用分体式结构，易于吊运，且安装有可靠支承架，其表面涂层防护处理工艺要求，同轴流风机主机体；

21) 出风端扩压风管设计长度尺寸，一般宜大于 1.2 倍风机叶轮直径，以提升风机气动静压效率，且应在进、出风端风管的一侧各设置检修门。

22) 组合式风阀一般安装在轴流风机机组的进风端；风阀框架为钢制防腐涂层处理，调节挡风板热浸镀锌冲压成型，传动轴及连杆为不锈钢材质，最大工作压力差 3000Pa,可保证风道在 250° C 高温工况条件下，能连续有效运行工作 2 小时，全开全闭总行程时间小于 30 秒。

23) 火灾排烟轴流风机的绝缘等级不应低于 H 级，其他轴流风机的绝缘等级不应低于 F 级；轴流风机的防护等级不应低于 IP55，绝缘等级不应低于 155(F)。电机功率因数不小于 0.79。

24) 隧道轴流风机开机运行宜采用软启动方式，送风轴流风机可采用变频启动方式。

条文说明

轴流风机的技术参数包括风量、全压、全压效率、电机功率、转速、电压等级、噪声、直径、质量限制等规格。

1) 公路隧道轴流风机一般由风机(含电机及其电机支承座、叶轮及其导流罩、

喘振环、风机主体内置后导叶等)、风机主机体底座、减振器组、进风端集气风管、出风端扩压风管、软连接、模组式矩形消音器、电动组合风阀、进出风口端防护钢网、安全运行监控装置等组成。轴流风机的安装形式有卧式和立式,国外两种形式均有采用,目前我国多采用卧式风机。

2) 在通风系统土建工程完工以后、轴流风机安装之前,对轴流风机的配置参数进行校验,是通风设计必不可少的环节。

2.轴流风机的功率计算应满足下列要求:

1) 轴流风机的全压输出功率应按式(5.10.3-1)计算:

$$S_{th} = \frac{Q_a \cdot P_{tot}}{1000} \times \left(\frac{273+t_0}{273+t_1} \right) \times \frac{P_1}{P_0} \quad (5.10.3-1)$$

式中: S_{th} ——轴流风机的全压输出功率,即理论功率(kW);

Q_a ——轴流风机的风量(m^3/s);

p_{tot} ——轴流风机的设计全压(N/m^2);

t_1 ——风机环境温度($^{\circ}C$);

t_0 ——标准温度($^{\circ}C$),取 $20^{\circ}C$;

p_1 ——风机环境大气压(N/m^2);

p_0 ——标准大气压(N/m^2)。

2) 轴流风机的全压输入功率应按式(5.10.3-2)计算:

$$S_{kw} = \frac{S_{th}}{\eta_f} \quad (5.10.3-2)$$

式中: S_{kw} ——轴流风机的全压输入功率,即轴功率(kW);

η_f ——风机的全压效率,可取80%。

3) 轴流风机所需配用的电机输入功率应按式(5.10.3-3)计算:

$$M_1 = \frac{S_{kw}}{\eta_m} \times k_l \quad (5.10.3-3)$$

式中: M_1 ——电机输入功率(kW);

η_m ——电机效率(%),可取90~95%;

k_l ——电机容量安全系数,可取1.05~1.10。

条文说明

轴流风机的轴功率不可能全部转变为有效功率,用效率来反映通风机电能损失

的大小。

3.轴流风机的设置应满足下列要求：

1) 宜选择卧式安装的轴流风机；设置条件有限、安装场地不足时，可选用立式安装的轴流风机。

2) 轴流风机宜 2~3 台并联设置；采用 4 台并联运行时，应事先根据风机的规格和性能参数，进行必要的技术论证。并联运行的各风机型号和性能参数应完全一致。并联风机安装时，两相邻风机轴心线间距，应大于 2 倍风机直径尺寸，以减缓风机并联运行时的扰流损失影响。

3) 并联的各轴流风机宜设置防喘振装置。

4) 同一送风系统或排风系统可考虑 1 台同型号备用轴流风机。

4.轴流风机的风量调节宜选用转速控制法和台数控制法相结合的方法，并应充分考虑风机的动力消耗。隧道通风的风量分档应根据交通量随时间的变化确定，宜按有级分档划分。

条文说明

轴流风机的风量调节方法有转速控制法、台数控制法及其组合等方法。

5.根据环保和使用环境要求，宜在风机的两端或一端配置主动式消声器对轴流风机进行消声；轴流风机的噪声可按式（5.10.3-4）推算：

$$L_a = L_{sa} + 10 \cdot \lg(Q_a \cdot P_{tot}^2) \quad (5.10.3-4)$$

式中： L_a ——噪声级水平 [dB (A)]；

L_{sa} ——比噪声级 [dB (A)]。

6.轴流风机运行时的振速不宜大于 6mm/s。

7.轴流风机的电机应为全封闭风冷式鼠笼型三相异步电机，电机的防护等级不应低于 IP55，电机的制造应满足下列要求：

1) 风机配备电机的输出功率不应小于风机所需的输入功率。

2) 在满足通风系统需求的前提下，实际安装风机所配备电机的输入功率不应大于通风设计阶段确定的风机配备电机输入功率。

3) 轴流风机配备电机的电压等级应根据供电电压、设置空间、控制装置等设施综合选择；风机电机宜采用降压启动方式。

条文说明

公路隧道通风所采用的轴流风机配备电机的电压等级通常有 380V、3000V、6000V、10kV 四个等级，根据各电压等级的适用条件选择经济的电压等级。

5.10.4 电动排烟口

- 1、电动排烟口应与风机联动，其结构应具有良好的气密性；在不大于 3000Pa 压差的情况下，风阀单位面积的漏风量不应大于 $0.1\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。
- 2、电动排烟口应具备现场或远程开启和关闭的功能。
- 3、阀体、驱动装置、所有相关设备以及供电与控制线路，必须确保在 250°C 的温度下至少能正常运行两小时。
- 4、阀门应使用具备手动开启方式的启闭装置。手动操作启闭装置开启阀门应能方便、灵活、可靠。手动开启操作力应小于 70N。
- 5、阀门应使用具备电动开启方式的启闭装置。在实际电源电压低于额定工作电压 15%和高于额定工作电压 10%时，阀门应能正常进行电控操作。
- 5、处于正常工作状态下的阀门，当叶片开启时，应有体现叶片位置的反馈信号输出。阀门使用具备电动远程复位功能的启闭装置时，当痛点复位关闭动作后，应具有体现叶片位置的反馈信号输出。
- 6、电动排烟口运行状态从“关闭”变为“开启最大角度”或反之所需的时间，不得超过 25 秒。

编制说明

电动排烟口是隧道重点排烟系统最重要的组成部分。为了保证整个排烟系统的有效性，需要对电动排烟口的密封性做出相关要求。编制过程中参照了港珠澳大桥和深中通道等项目的技术参数。

5.10.5 风阀设计应符合下列规定：

- 1.当隧道采用 2 台及以上通风机并联设置时，应在每台通风机的前端或后端设置风阀。
- 2.连接风道内通风机的风阀应符合下列规定：
 - 1) 风阀宜采用平行式多叶调节阀。
 - 2) 风阀应与通风机联动，其结构应具有良好的气密性；在不大于 3000Pa 压差的情况下，风阀单位面积的漏风量不应大于 $0.1\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。
 - 3) 风阀的开闭时间不应大于 30s。

4) 海洋环境下宜选不锈钢构件。

3.主风道送（排）风孔的风阀应符合下列规定：

1) 当主风道兼作火灾排烟道时，送（排）风孔应设置可调节的排烟阀。

2) 风阀应具有良好的气密性。

条文说明

风量调节阀的气密性好，其相对漏风量可控制在 5% 左右，调节性能好，因此风阀可选用调节阀。风量调节阀叶片分为对开式和顺开式，风阀有平行式多叶调节阀、对开式多叶调节阀、菱形多叶调节阀、闸阀等，并可随通风机的运转与停止而开闭。

5.10.6 吸尘设备技术要求

1、空气净化系统技术性能指标应符合下列规定：

a) PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的净化效率不宜小于 85%；

b) NO₂ 的净化效率不宜小于 80%。

2、空气净化装置的设计应符合下列规定：

a) 空气净化装置迎面风速不应大于净化装置的额定风速；

b) 空气净化器在空气净化过程中不应产生二次污染；

c) 空气净化装置应设置故障报警措施和检修口；

d) 静电除尘器应与风机连锁启停。

3、除尘过滤器的设计应符合下列规定：

a) 除尘过滤器宜由初效过滤器和静电除尘器组成；

b) 通过除尘过滤器的风速不宜大于 9m/s；

c) 除尘过滤器应配备运行可靠的自动清洗系统和废水处理系统。

4、NO₂ 过滤器的设计应符合下列规定：

a) NO₂ 过滤器的吸附材料宜为活性炭，活性炭自燃点不应小于 250℃，水分含量宜小于 15%；

b) 通过 NO₂ 过滤器的风速宜为 0.5 m/s~1.0m/s。

编制说明

参考北京市地方标准《公路隧道空气净化系统设计规范》(DB11T 2422-2025) 相关条款。详见附件 4。

5.11 通风控制

5.11.1 一般规定

- 1.设置机械通风系统的隧道应合理确定通风控制方案。
- 2.采用机械通风方式的隧道风机均应具备手动控制功能，手动控制优先级应高于自动控制。
- 3.通风控制系统应与照明控制系统、火灾报警与消防系统、交通监控系统、中央控制系统等实现联动控制。
- 4.自动控制可采用下列三种控制方法之一或组合：
 - 1) 检测隧道内的能见度、NO₂ 浓度、CO 浓度和风速风向，控制风机运转。
 - 2) 根据隧道内交通量、行车速度、车辆构成等，计算出车辆排放量，控制风机运转。
 - 3) 按时间区间预先编制程序控制风机运转。

5.11.2 隧道正常运营通风应满足以下要求：

- 1.正常运营工况下，采用自动控制方式为主，手动控制方式为辅。
- 2.风机不应频繁启闭，风机可单台启动或成组启动，启动时间间隔不应小于 30s。
- 3.通风系统控制方案应明确不同工况下风机控制具体要求。
- 4.应结合通风系统设备配置和营运条件进行适当的风量级档控制。轴流送风风机可采用变频器对风机进行控制，以满足实际运营需求。
- 4.宜采用智能化通风控制系统。
- 5.应编制射流风机、轴流风机，在正常运行、事故工况、防灾工况下的运行控制策略及当自动或智能控制系统失效，或发生特殊、突发异常工况时，可适应以人工控制方法。

条文说明

- 1.考虑到同一时间大量风机启动会造成对电网的冲击，尤其对于轴流风机，基于此，提出单台/成组风机的启动间隔时间的最低要求。
- 2.随着数字化技术的快速发展，可以实现基于 ETC 门架、高清卡口等精准数据采集，基于隧道内污染气体浓度的风机智能化控制，实现“按需通风”的目的。

5.11.3 隧道封闭限值 若满足以下任一条件，隧道应自动封闭：

- 1 CO 浓度 $\geq 200 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ 且持续时间超过 10 分钟。
- 2 烟尘设计浓度 $K \geq 12 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 且持续时间超过 1 分钟。
- 3 NO₂ 浓度 $\geq 1.5 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ 且持续时间超过 15 分钟。
- 4 若满足以下条件，且数值低于限值并呈下降趋势持续超过 1 分钟，隧道封闭应自动解除：CO 浓度低于 100ppm，或消光系数低于 $7 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

条文说明

关闭隧道时，隧道入口红灯亮起，降下入口挡车栏杆（或柔性阻拦设施）。广播系统及调频广播频段切入“禁止入洞，洞内车辆保持车距缓慢驶离或按指示避险”广播。射流风机/风道风机开启最高等级排风模式（若判定为火灾衍生烟雾，则切入火灾排烟模式）。

5.11.4 隧道火灾工况下紧急通风控制应满足以下要求：

- 1.隧道火灾工况下紧急通风控制应具备手动控制功能，其装置应设置在安全且便于操作的地方，同时应有明显的标志和保护措施。
- 2.火灾工况下的防烟与排烟控制应与隧道火灾报警、闭路电视监视、交通监控等隧道其他监控系统联合使用。
- 3.应根据人员疏散阶段、排烟灭火阶段风速要求，考虑起火点位置、隧道纵坡、自然风速、风机设置情况等因素，制定排烟风机控制策略。
- 4.应具备根据火灾现场的实际情况和要求，实时调整防排烟系统的控制功能。
- 5.防烟与排烟系统应设置自动控制和手动控制装置，应具有现场控制、远程控制 and 联动控制功能。火灾工况下，现场控制装置发出的控制指令应优于其他控制指令。
- 6.排烟风机的电机启动器、驱动装置、断开装置及其控制装置应与风机气流隔离。
- 7.当双洞单向交通隧道其中一洞发生火灾需进行通风排烟和救援时，双洞均应进行交通管制，同时启动相应的通风排烟系统。
- 8.风机排烟方案按照预案要求宜采用智能化控制系统，能够根据平台指令启动事故隧道火源点上、下游以外的数组射流风机及电动排烟口（如有）和区段末端处的排烟风机（如有）；同时启动非事故隧道射流风机和轴流风机（如有），从而实现火灾工况下的风机排烟设施一键式启动和关闭。

条文说明

火灾情况下，隧道烟气控制最关键的问题是隧道内防烟排烟设施能及时、准确地启动。就控制设备而言，现场控制比远程控制更能实现这一要求。现场人员对火灾情况、交通状况等现场实际情况的了解，比远端监控更直接、详细，所确定的通风控制要求更切合实际，因此要求现场控制优于远程控制。

火灾情况下，烟气温度较高，为避免风机的驱动、控制设备因高温烟气造成损坏，导致风机不能正常工作，影响通风和灭火救援，需要对排烟风机的电气、驱动、监控装置采取必要的防止烟气侵入的隔离措施。

隧道通风排烟是火灾工况下联动系统重要的组成部分，借鉴智慧隧道建设的相关成果，对联动系统中的通风排烟控制进行（包括风机开启位置和数量等、排烟口等）规定。

5.12 隧道通风测试

5.12.1 隧道通车前运营单位应对隧道通风系统进行现场实验功能性验证。

5.12.2 隧道火灾实验的火源规模应不小于 2.5MW。

5.12.3 对于设置正压送风的隧道，应验证如下工况是否满足设计要求：

- 1.送风口最大风速是否满足设计风速要求。
- 2.风机是否能本地、远程及远程手动控制。
- 3.近端及最不利点风压是否满足设计要求。

5.12.4 采用全射流通风的隧道应验证如下工况是否满足设计要求：

- 1.入口段、中间段、出口段最大风速是否满足设计风速要求。
- 2.验证风机是否能本地、远程及远程手动控制。
- 3.在隧道入口段、中间段、出口段分别验证火灾工况下排烟策略的有效性。

5.12.5 采用纵向送排式通风的隧道应验证如下工况是否满足设计要求：

- 1.每个通风区段的风速能否满足设计要求。
- 2.风机、风阀、电动排烟口等是否能本地、远程及远程手动控制。
- 3.每个排烟区段火灾工况下排烟策略的有效性及排烟口风速是否满足设计要求。

5.12.6 正常工况采用纵向通风，火灾工况下采用重点排烟的隧道，应验证如下工况是否满足设计要求：

1. 每个通风区段的风速能否满足设计要求。
2. 风机、风阀、电动排烟口等是否能本地、远程及远程手动控制。
3. 每个排烟区段火灾工况下纵向风速控制及排烟口开启策略的有效性。验证排烟道风速及排烟口风速是否满足设计要求。

条文说明

通风排烟系统是隧道火灾工况下人员逃生的关键。通过现场火灾实验对排烟效果的验证,能够找出系统存在的漏洞(管道漏风、风机功率不足、策略不合理等),在通车前进行修补和完善。另外,通过设计火灾场景对火灾报警、通风排烟、自动灭火等关键系统进行验证,可以验证整个消防救援系统的可靠性。

5.12.7 隧道火灾通风测试全尺寸实验基本要求。测试区域应完成全部土建作业并通过施工质量验收。测试区域应完成通风排烟系统安装调试,隧道射流风机和排烟风机、风阀、电动排烟口、控制设备能正常工作,排烟系统的风压、流速和排烟速率应达到设计参数,排烟系统的烟气控制能力符合设计要求。

5.12.8 隧道火灾通风测试全尺寸实验范围划定。测试范围应根据实际隧道结构划分尽可能包含完整的隧道区段。火源位置以靠近测试范围中部为原则,并兼顾危险性较高的火灾场景。

5.12.9 隧道火灾通风测试全尺寸火源系统。火源系统包括燃烧装置、发烟装置。燃烧装置由一系列厚度不小于 2 mm 的钢板焊接而成的燃烧盘组成。燃料应采用纯度在 99%以上的工业甲醇合格品、纯度在 95%以上的工业乙醇合格品作为燃料,稳定燃烧时间应不少于 10 mins。发烟装置应采用无毒烟饼作为发烟材料,烟气发生量应根据设计火灾场景规模设置,并保证示踪烟气能够完整标识燃料燃烧产生的热烟层轮廓。

条文说明

火源系统应采用附录 A 的设计形式。燃烧盘内部尺寸参考 XF/T 999-2012 防排烟系统性能现场验证方法 热烟试验法 4.3 条相关规定。在确保实验区域结构、设施、设备和人员安全的原则下,应尽可能选择较大的火灾规模和盘组尺寸。对于乙醇池火,推荐注入燃料量及火源热释放速率参考 XF/T 999-2012 防排烟系统性能现场验证方法 热烟试验法 4.7 条相关规定。示踪烟气生成过程应平稳、连续且不应受测试火源的影响。火源系统包括燃烧装置与燃料。根据实验目的与观测需求,可选择以下两类火源之一: a) 无烟燃料火源: 采用纯度不低于 99%的

工业甲醇或纯度不低于 95% 的工业乙醇。此类燃料燃烧时烟气生成量极少，必须配合发烟装置使用。发烟装置应能产生无毒、稳定的示踪烟气，其发生量须与设计火灾规模相匹配，并能清晰、完整地勾勒出热烟气流边界。b) 有烟燃料火源：采用商用柴油或汽油。此类燃料燃烧自身可产生足量烟气，一般无需额外设置发烟装置。实验过程中使用粒子图像测速（PIV）等光学测量方法辅助观测烟气流状态。

5.12.10 隧道火灾通风测试全尺寸实验现场保护装置。现场保护装置由机电设施防护、隧道结构防护、测试系统防护等模块组成。采用防火石棉布包裹形式保护电缆、管道、照明灯具等设施，采用保护罩保护隧道顶部结构。对于火源附近的测温、数据、通信线缆，采用防火石棉布包裹覆盖形式保护。

条文说明

机电设施防护模块石棉布厚度应大于 3 mm，防护区域长度以火源区域为中心，两侧长度应分别大于 3 m。隧道结构防护模块面积不小于 3 m×3 m，保护罩应包含至少 1 层铁板及 1 层隔热防火板，防火板厚度应大于 10 mm，铁板厚度应大于 1 mm。测试系统防护模块的石棉布厚度应大于 3 mm，火源两侧覆盖区域长度应大于 10 m。

5.12.11 隧道火灾通风排烟性能测试。采用电子天平对燃料质量进行实时测量，基于获取的燃料质量变化数据，计算质量损失速率，进而获得火源热释放速率。测量记录排风管道进风口截面平均气流速度，计算排烟风量。测量记录排风管道进风口截面的平均颗粒物浓度，根据截面尺寸计算烟气颗粒流量，计算排烟效率。

条文说明

在隧道内布置热电偶树或热电偶阵列，测量温度的空间与时间变化。测点应至少覆盖火源上游、火源正上方及火源下游 100m 范围，并应能捕捉隧道横断面内，特别是竖直方向上的温度分层现象。温度测点布置原则：a) 测点范围：温度测试范围应根据设计火灾规模与隧道通风能力确定，以能完整记录烟气蔓延范围与关键危险截面的温度情况为原则。b) 竖直方向分布：在隧道横断面内，设置热电偶树以测量竖向温度分布。最低测点应靠近隧道路面，最高测点应贴近隧道拱顶。中间测点间距不宜大于 2 米，在顶棚以下 3 米范围内应适当加密（如间距 0.5 米至 1 米），以精确捕捉顶棚射流厚度与烟气层高度。c) 纵向与横向布置：沿隧道纵向，测点间距在火源附近 50 米范围内应当较密，建议为 5~10 米，此后

可适当增大至 20 米，距离火源最近的测点与火源距离应小于 10 米。在关键断面（如火源处、排烟口处、坡度变化处）应布置横向测点，以评估烟气在隧道全宽范围内的分布均匀性。实验流速应按附录 B 要求设置流速传感器，记录从火源起火至火源熄灭后至少 600 s 时间段内的流速变化。火源热释放速率计算如下：

$$Q=\chi\cdot m\cdot\Delta H$$

其中 Q 为火源热释放速率(kW)， ΔH 为燃料热值(kJ/g)， m 为燃料质量损失速率(g/s)， χ 为燃烧效率。

6 照明设施

6.1 一般规定

6.1.1 公路隧道照明应满足路面平均亮度、路面亮度总均匀度和路面中线亮度纵向均匀度、频闪、眩光和诱导性要求。

6.1.2 设置照明的隧道长度应遵循以下原则：

- 1 长度 $L > 200\text{m}$ 的高速公路、一级公路隧道应设置照明。
- 2 长度为 $100\text{m} < L \leq 200\text{m}$ 的高速公路光学长隧道、一级公路光学长隧道应设置照明；
- 3 长度 $L > 1000\text{m}$ 的二级公路隧道应设置照明，长度为 $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 的二级公路宜设置照明，三级、四级公路应根据实际情况确定。
- 4 有人行需求或非机动车通行的隧道，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 不设置照明的隧道应设置视线诱导设施。

6.1.3 公路隧道照明设计应充分收集和了解隧道工程及交通工程设计相关资料进行统筹设计，并应遵循下列原则：

- 1 应调查洞口朝向及洞外环境。
- 2 初步判定或现场测定洞外亮度，必要时制定洞外减光方案；
- 3 应根据交通量变化分别确定各分期设计年限入口段、过渡段、中间段和出口段亮度指标；
- 4 应选择节能光源与高效灯具，结合隧道断面形式与灯具类型等因素确定灯具安装方式、位置；
- 5 根据路面材料与灯具光强分布表，计算各段灯具布置间距、路面均匀度等；
- 6 洞口土建完工后，宜对洞外亮度进行现场实测验核。
- 7 应根据隧道遮光棚设置情况确定隧道加强段照明方案。

6.1.4 公路隧道照明设计小时交通量应根据隧道所在路段项目可行性研究报告提出的设计年份平均日交通量（AADT）进行换算，并宜符合以下要求：

1 设计小时交通量系数宜采用项目可行性研究报告提供的数据；项目可行性研究报告没有明确提出该数据时，山岭重丘区隧道可取 12%、平原微丘区隧道可取 10%、城镇附近的隧道可取 9%；

2 单向交通隧道方向分布系数宜采用项目可行性研究报告提供的数据；项目可行性研究报告没有明确提出该数据时，方向分布系数可取 55%。

条文说明

通过广泛的工程调研，各高速公路项目可行性研究报告提出的设计小时交通量系数通常在 9~12%之间。为避免高峰小时交通量取值偏大导致照明系统浪费，根据工程调研和项目可行性研究报告的总结作出本规定。

照明设计时，根据《公路工程技术标准》(JTG B01)“各汽车代表车型与车辆折算系数”和各工程的具体交通组成，将标准小客车交通量换算成混合车型高峰小时交通量，换算的步骤为：

第一步，将项目可行性研究报告提出的各设计年份平均日交通量 (pcu/d) 换算成标准小客车高峰小时交通量 (pcu/h)；

第二步，根据项目可行性研究报告提出的交通组成百分比，分别计算出各车型对应的标准小客车高峰小时交通量；

第三步，按《公路工程技术标准》(JTG B01)“各汽车代表车型与车辆折算系数”，将各车型的标准小客车高峰交通量换算成混合车型高峰小时交通量 (veh/h)。

6.1.5 单向交通隧道照明可划分为入口段照明、过渡段照明、中间段照明、出口段照明、洞外引道照明以及洞口接近段减光设施；隧道照明区段构成如图 6.1.5 所示。

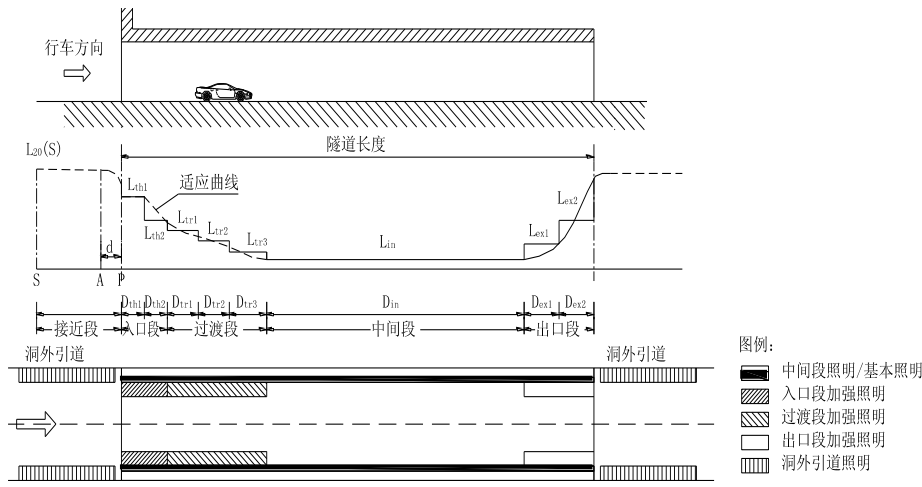


图 6.1.5 单向交通隧道照明系统分段图

P ——洞口； S ——接近段起点； A ——适应点； d ——适应距离； $L_{20}(S)$ ——洞外亮度； L_{th1} 、 L_{th2} ——入口段亮度； L_{tr1} 、 L_{tr2} 、 L_{tr3} ——过渡段亮度； L_{in} ——中间段亮度；

D_{th1} 、 D_{th2} ——入口段 TH_1 、 TH_2 分段长度； D_{tr1} 、 D_{tr2} 、 D_{tr3} ——过渡段 TR_1 、 TR_2 、 TR_3 分段长度； D_{in} ——中间段长度； D_{ex1} 、 D_{ex2} ——出口段 EX_1 、 EX_2 分段长度。

6.1.6 双向交通隧道照明可划分为入口段照明、过渡段照明、中间段照明、洞外引道照明以及洞口接近段减光设施；隧道照明区段构成如图 6.1.6 所示。

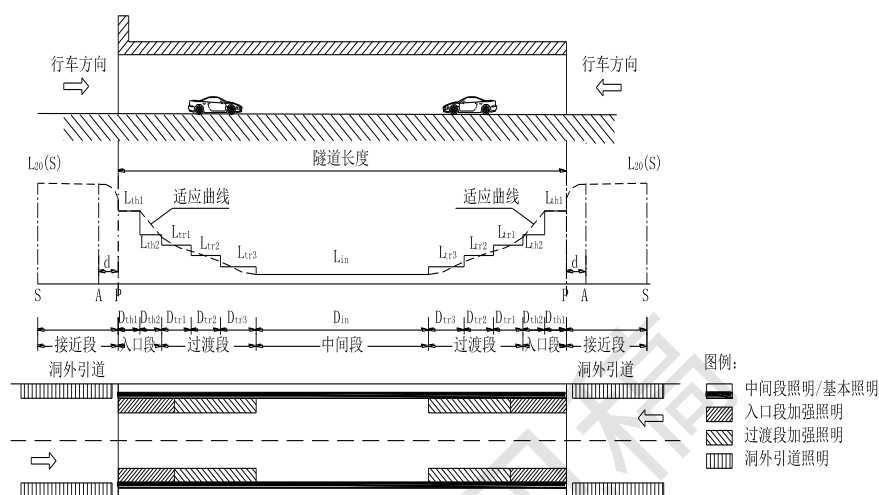


图 6.1.6 双向交通隧道照明系统分段图

条文说明

6.1.5~6.1.6 中隧道照明分区段设置是为满足驾驶员视觉从高亮度向低亮度，或从低亮度向高亮度变化适应的需求。视觉从高亮度向低亮度适应的反应时间通常较长，反之则较短，因此行车进口端加强照明段长度大于行车出口端加强照明段长度。

6.1.7 隧道入口段、过渡段、出口段照明应由基本照明和加强照明组成；基本照明应与中间段照明一致。

条文说明

基本照明是为保障行车安全沿隧道全长提供基本亮度的措施；加强照明是解决驾驶员白昼驶入、驶出隧道时适应洞内外亮度反差的措施。

6.1.8 隧道两侧墙面 2m 高范围内的平均亮度，不宜低于路面平均亮度的 60%。

条文说明

隧道侧壁亮度是隧道内背景亮度的组成部分，起到满足机动车驾驶员的视觉适应性和视觉诱导的作用。本条参照《隧道与地下通道照明指南》（CIE 88-2004）和《照

明设备——隧道照明》(CR 14380: 2003)的相关规定提出。

6.1.9 平均亮度与平均照度间的换算系数宜实测确定；无实测条件时，黑色沥青路面可取 $15 \text{ lx}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$ ，水泥混凝土路面可取 $10 \text{ lx}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$ 。

条文说明

路面平均亮度与平均照度间的换算系数与路面材料、颜色有关，条文中所列换算系数参考了《城市道路照明设计标准》(CJJ 45-2006)的有关条文。

6.1.10 公路隧道照明设计应考虑运营期灯具受污状况和养护情况，养护系数 M 值宜取 0.7；纵坡大于 2% 且大型车比例大于 50% 的特长隧道宜取 0.6。

条文说明

隧道运营中照明系统灯具的管理及定期养护至关重要。细致、完善的养护管理可使照明系统维持所需的照明亮度水平、延长光源及灯具寿命且降低运营成本，使隧道照明系统经济、节能运行。

养护系数的取值影响因素众多，包括光源的光通量衰减、光源和灯具上尘埃等污染物质的长期侵蚀引起灯具灯罩和反射器效率的下降、隧道墙面反射率的降低以及灯具附件的损坏等，养护系数 M 反映了上述因素的综合影响。鉴于各隧道的纵坡条件、大型车比例、运营管理方式等大不相同，对灯具、光源等设施的养护管理要求不尽相同，故作出本规定。

6.1.11 照明灯具的布置宜采用两侧交错和两侧对称形式，也可采用中线形式、中线侧偏形式。

条文说明

照明灯具的布置形式影响照明系统的效率，两侧交错和两侧对称方式方便运营期更换、清洗。通常的照明灯具布置形式见图 6-1。

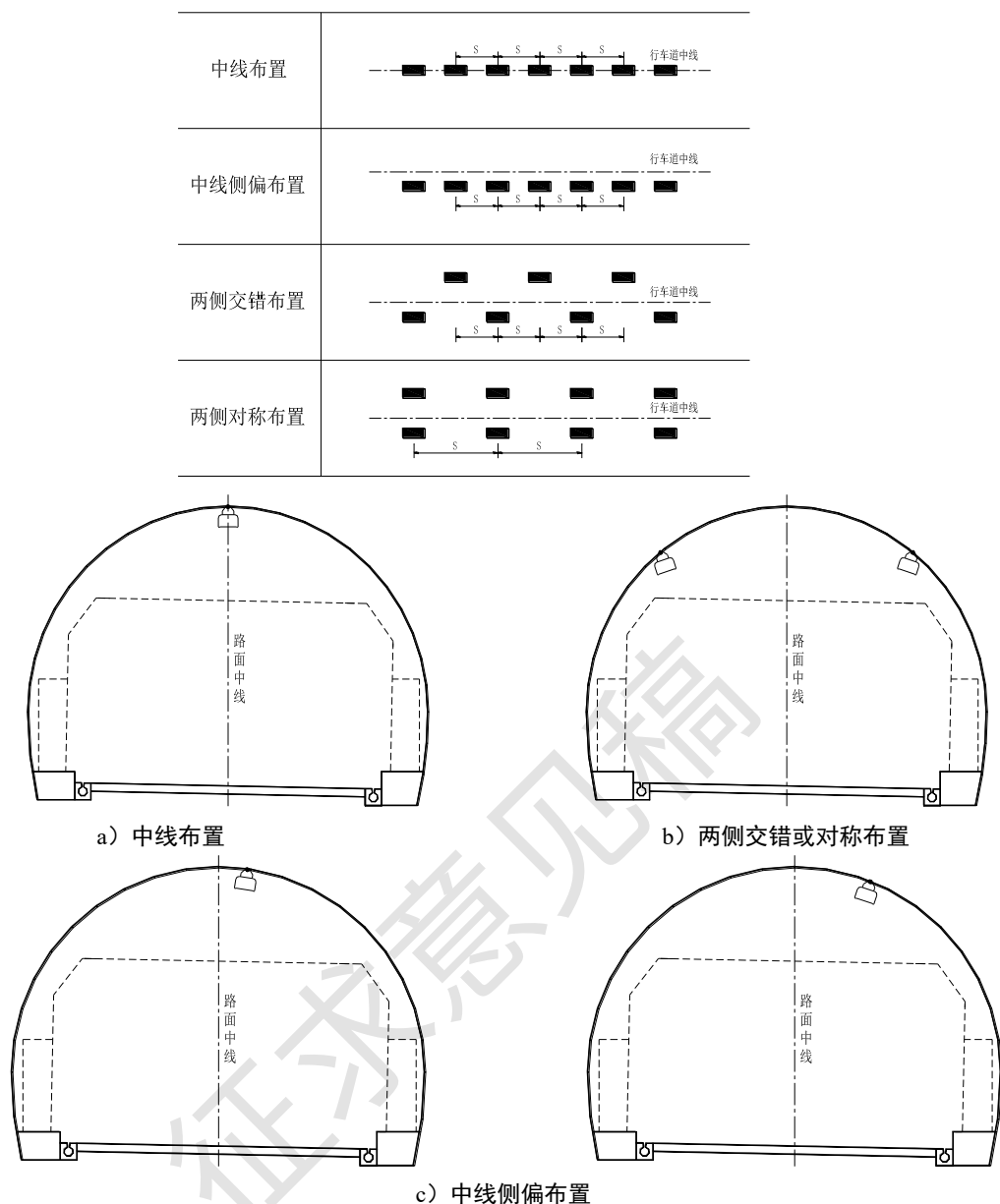


图 6-1 灯具布置型式示例图

6.1.12 入口段和出口段的加强照明灯具宜自隧道洞口顶部以内 10m 处开始布设。

条文说明

由于洞外自然光的投射进入，洞口以内一定范围内有较高亮度。研究结果表明这种自然光可利用作为入口段加强照明的组成部分，故作出本规定。英国、日本等国家和 CIE、CEN 等国际组织在其相应的标准和技术文件中也有相同的考虑和规定。

6.1.13 隧道照明灯具性能应满足下列要求：

- 1 防护等级不低于 IP65；

- 2 具有适合公路隧道特点的防眩装置；
- 3 光源和附件便于更换；
- 4 灯具零部件具有良好的防腐性能；
- 5 灯具安装角度易于调整；
- 6 LED 隧道灯具的功率因数不应小于 0.95。
- 7 宜选用一级能效产品。

条文说明

1 IP65 的含义是：防尘达到 6 级，无尘埃进入；防水达到 5 级，任何方向喷水无有害影响。

6.2 入口段照明

6.2.1 入口段亮度

1 入口段宜划分为 TH₁、TH₂ 两个照明段，与之对应的亮度应分别按式(6.2.1-1)、式(6.2.1-2)计算：

$$L_{th1} = k \times L_{20} \quad (S) \quad (6.2.1-1)$$

$$L_{th2} = 0.5 \times k \times L_{20} \quad (S) \quad (6.2.1-2)$$

式中： L_{th1} ——入口段 TH₁ 的亮度 (cd/m²)；
 L_{th2} ——入口段 TH₂ 的亮度 (cd/m²)；
 k ——入口段亮度折减系数，可按表 6.2.1 取值；
 $L_{20} (S)$ ——洞外亮度 (cd/m²)。

表 6.2.1 入口段亮度折减系数 k

设计小时交通量 N (veh/ (h·ln))		设计速度 v_t				
单向交通	双向交通	120 km/h	100 km/h	80 km/h	60 km/h	20~40 km/h
≥ 1200	≥ 650	0.070	0.045	0.035	0.022	0.012
≤ 350	≤ 180	0.050	0.035	0.025	0.015	0.010

注：当交通量在其中间值时，按线性内插取值。

条文说明

本条规定了入口段照明按 TH₁、TH₂ 两个照明段进行设置。对近 10 年来建设的公路隧道的广泛调研表明，入口段后半段亮度偏高，所以入口段采用了分段设置的方

法。英国、日本等国家和 CIE、CEN 等国际组织在其相应的标准和技术文件中也有相同的考虑和规定。

本细则采用 k 值法计算入口段加强照明亮度。入口段亮度折减系数 k 的取值参考了 CIE、CEN 等国际组织以及一些国家的照明标准,并充分考虑了目前我国的经济水平发展和隧道照明状况。

2 长度 $L > 500\text{m}$ 的非光学长隧道及长度 $L > 300\text{m}$ 的光学长隧道,入口段 TH_1 、 TH_2 的亮度应分别按式 (6.2.1-1) 及式 (6.2.1-2) 计算。

3 长度 $300\text{m} < L \leq 500\text{m}$ 的非光学长隧道及长度 $100\text{m} < L \leq 300\text{m}$ 的光学长隧道,入口段 TH_1 、 TH_2 的亮度宜分别按式 (6.2.1-1) 及式 (6.2.1-2) 计算值的 50% 取值。

4 长度 $200\text{m} < L \leq 300\text{m}$ 的非光学长隧道,入口段 TH_1 、 TH_2 的亮度宜分别按式 (6.2.1-1) 及式 (6.2.1-2) 计算值的 20% 取值。

条文说明

4.1.2~4.1.4 本细则中不属于光学长隧道范畴的隧道即为非光学长隧道。

短隧道对照明的要求与长隧道不尽相同,主要与隧道的通视程度有关。影响隧道通视程度的主要因素是隧道的长度,对于短隧道还包括隧道的宽度、高度、平纵线形等。短隧道照明与公路等级、设计速度、交通量、长度、平面线形、日光强弱等因素有关。CIE、CEN 等国际组织和一些国家在其相应的标准和技术文件中也有相同的考虑和规定。《隧道与地下通道照明指南》(CIE 88-2004) 根据照明的要求,短隧道的照明亮度水平根据隧道平面线型、日照强弱、墙壁反射率和交通量大小等因素可有所不同。

5 当两座隧道间的行驶时间按设计速度计算小于 15s,且通过前一座隧道的行驶时间大于 30s 时,后续隧道入口段亮度应进行折减,亮度折减率可按表 6.2.1-5 取值。

表 6.2.1-5 后续隧道入口段亮度折减率

两隧道之间行驶时间 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折减率 (%)	50	30	25	20

6 当隧道入口设置有减光棚时,应符合下列规定

(1) 当减光棚内自然亮度低于入口段 TH_1 计算亮度时,则应将减光棚视为入口

段的一部分来开展照明设计。

(2) 当减光棚内自然亮度高于入口段 TH1 计算亮度时, 则应根据减光棚的型式、长度和透光率情况进行满足视觉适应性需求的亮度设计。

7 当毗邻隧道设置有减光棚时, 应符合下列规定

(1) 后续隧道洞外亮度应按遮光棚自然亮度确定。

(2) 前续隧道出口段亮度宜根据遮光棚自然亮度进行相应的折减, 如折减后亮度低于基本段照明亮度, 按基本段照明亮度进行设置。

条文说明

此处自然亮度是指无电光照明条件下晴天中午路面亮度。

由于减光棚具备一定的透光性, 因此要求根据实际减光情况进行入口段亮度设计。

6.2.2 洞外亮度

1 公路隧道照明设计的洞外亮度 L_{20} (S) 可按表 6.2.2-1 取值。

表 6.2.2-1 洞外亮度 L_{20} (S) (cd/m^2)

天空面积百分比	洞口朝向或洞外环境	设计速度 v_t (km/h)				
		20~40	60	80	100	120
35%~50%	南洞口			4000	4500	5000
	北洞口			5500	6000	6500
25%	南洞口	3000	3500	4000	4500	5000
	北洞口	3500	4000	5000	5500	6000
10%	暗环境	2000	2500	3000	3500	4000
	亮环境	3000	3500	4000	4500	5000
0%	暗环境	1500	2000	2500	3000	3500
	亮环境	2000	2500	3000	3500	4000

- 注: 1 天空面积百分比指 20°视场中天空面积百分比;
 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;
 3 东洞口与西洞口取用南洞口与北洞口之中间值;
 4 暗环境指洞外景物(包括洞门建筑)反射率低的环境; 亮环境指洞外景物(包括洞门建筑)反射率高的环境;
 5 当天空面积百分比处于表中两档之间时, 按线性内插取值。

2 在洞口土建完成时, 宜进行洞外亮度实测; 实测值与设计取值的误差超出-25%~+25%时, 应调整照明系统的设计。

3 照明停车视距可按表 6.2.2.3 取值。

表 6.2.2.3 照明停车视距 D_s (m)

设计速度 v_t (km/h)	纵坡
-------------------	----

	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%
120	260	245	232	221	210	202	193	186	179
100	179	173	168	163	158	154	149	145	142
80	112	110	106	103	100	98	95	93	90
60	62	60	58	57	56	55	54	53	52
40	29	28	27	27	26	26	25	25	25
20~30	20	20	20	20	20	20	20	20	20

4 高海拔路段隧道停车视距应考虑增加 5%~10%。

条文说明

洞外亮度 $L_{20}(S)$ 是指在接近段起点 S 处，距地面 1.5m 高正对洞口方向 20° 视场实测得到的平均亮度，如图 6-2 所示。洞外亮度 $L_{20}(S)$ 是照明系统的设计基准参数之一，该参数的合理设定对工程投资和运营电费均有极大影响，不容忽视。日本东京湾海底隧道曾于设计中做过详细比较，在其他条件（包括车速）相同的情况下，如 $L_{20}(S)$ 分别设定为 4000cd/m^2 与 6000cd/m^2 ，则设备费相差 34%，年电耗量 (kWh) 相差达 30%。因此，宜通过洞口山坡绿化或对结构物进行减光处理，尽量降低隧道洞口的洞外亮度。

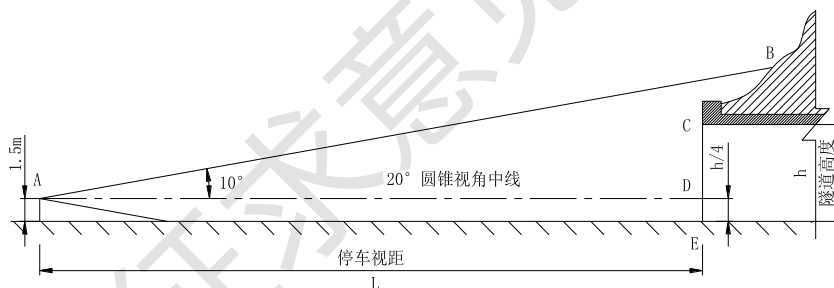


图 6-2 洞外亮度 $L_{20}(S)$ 测试示意图

隧道洞外亮度值的合理确定需要待隧道洞口工程完工后才能通过现场实测获得，因此在设计之初，需要对洞外亮度值进行预估。通过对福建省、广东、重庆、陕西等省份近百座隧道洞外亮度的现场测试和分析，根据现场实测结果分析，所测山岭公路隧道的洞口天空面积百分比通常为 0%，其实测值普遍在 $2300\text{cd/m}^2 \sim 3300\text{cd/m}^2$ 之间，削竹式洞门隧道洞外亮度通常在 2500cd/m^2 左右，端墙式洞门隧道洞外亮度通常在 3000cd/m^2 左右。同时，对我国大量已建和在建的高速公路、一级公路山岭隧道现场勘察情况表明，其洞口方向 20° 圆锥视场内的天空面积百分比基本为 0%。本条文提出了公路隧道洞外亮度的建议值。

由于 $L_{20}(S)$ 随纬度、季度、气象变化，本条所提供的仅是照明设计阶段的建议值。雪地环境中 $L_{20}(S)$ 会较高，但行车速度亦相应下降，故未提及雪地环境中的 L_{20}

(S)。

在隧道洞口土建完成后,设计采用的洞外亮度值可能与实际洞外亮度值存在较大差异,为避免运营安全隐患或设计过度,需通过实测确定洞外亮度值,当实测值与设计取值的误差超出-25%~+25%时,需进行照明系统的调整。

洞外亮度测试宜采用快捷、准确的测试方法。洞外亮度测试方法通常有:环境简图法、黑度法、数码相机法。数码相机法由于操作简便、测试结果较为准确,是目前较为常用的一种测试方法。

本条所采用的照明停车视距参数主要参考了 CIE、CEN 等国际组织相应的标准和技术报告的建议值。

6.2.3 入口段长度

1 入口段 TH_1 、 TH_2 长度应按式 (6.2.3-1) 计算:

$$D_{th1} = D_{th2} = \frac{1}{2} \left(1.154 D_s - \frac{h-1.5}{\tan 10^\circ} \right) \quad (6.2.3-1)$$

式中: D_{th1} ——入口段 TH_1 长度 (m);

D_{th2} ——入口段 TH_2 长度 (m);

D_s ——照明停车视距 (m), 可按表 4.2.3 取值;

h ——隧道内净空高度 (m)。

2 设计速度为 20~40km/h 时, 入口段总长度可取一倍照明停车视距。

条文说明

入口段长度 D_{th} 根据照明停车视距、最小衬托长度、洞口净空高度、适应距离进行计算。为保证机动车驾驶员对路面上障碍物 (0.2 m×0.2 m×0.2 m) 的视认能力, 在障碍物背后应有一段最小长度为 b 的明亮路面, 见图 4-2。

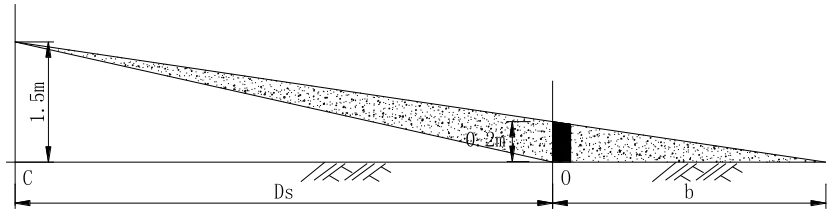


图 6-3 照明停车视距与最小衬托长度

隧道照明所采用的障碍物尺寸借鉴了 CIE《隧道与地下通道照明指南》的建议值,

即采用尺寸为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 、反射系数为 0.2 的正方体小目标物体。

车辆驶至洞外适应点 A 时, 机动车驾驶员的 20° 视场范围内, 洞外景物基本消失, 开始适应隧道暗环境。适应点 A 与洞口 P 间的距离 d 称为适应距离, $d = \frac{h-1.5}{\tan 10^\circ}$, 见图 6-4。

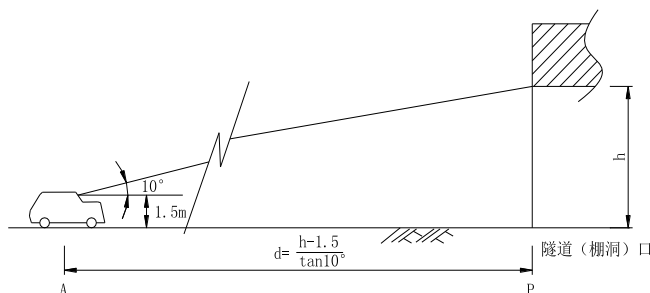


图 6-4 适应距离

设计速度为 $20 \sim 40\text{ km/h}$ 时, 参考了 CIE、CEN 等国际组织相应的标准和技术报告的建议值。若采用式 4.3.1 计算, 得出的入口段长度为负值, 故作出本规定。

6.3 过渡段照明

6.3.1 过渡段宜按渐变递减原则划分为 TR1、TR2、TR3 三个照明段, 与之对应的亮度应按式 (6.3.1-1) ~ 式 (6.3.1-3), 计算:

$$L_{\text{tr1}} = 0.15 \times L_{\text{th1}} \quad (6.3.1-1)$$

$$L_{\text{tr2}} = 0.05 \times L_{\text{th1}} \quad (6.3.1-2)$$

$$L_{\text{tr3}} = 0.02 \times L_{\text{th1}} \quad (6.3.1-3)$$

条文说明

本细则参照 CIE 有关标准规定的适应曲线 $L_{\text{tr}} = L_{\text{th1}}(1.9+t)^{-1.4}$ 过渡段照明亮度划分依据。在过渡段区域里, TR_1 、 TR_2 、 TR_3 三个过渡照明段的亮度比例按 3:1 划分, 见图 5-1。

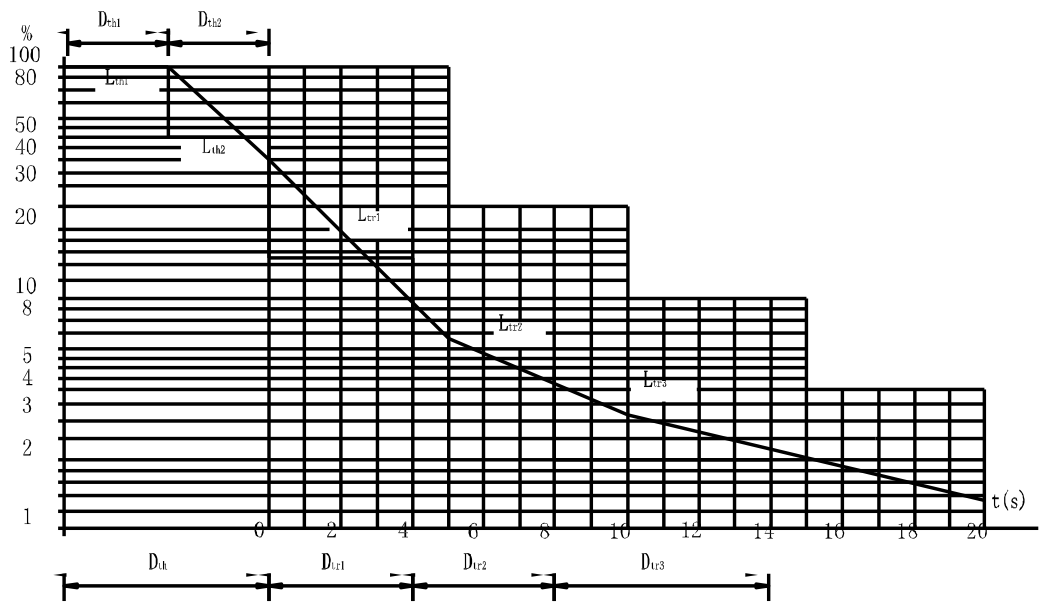


图 6-5 过渡段长度与相应亮度

6.3.2 长度 $L \leq 300\text{m}$ 的隧道，可不设置过渡段加强照明；长度 $300\text{m} < L \leq 500\text{m}$ 的隧道，当在过渡段 TR1 能完全看到隧道出口时，可不设置过渡段 TR2、TR3 加强照明；当 TR3 的亮度 L_{tr3} 不大于中间段亮度 L_{in} 的 2 倍时，可不设置过渡段 TR3 加强照明。

条文说明

对于长度 $300\text{m} < L \leq 500\text{m}$ 的隧道，其是否设置过渡段主要取决于隧道的通视程度。对于非光学长隧道，当交通量较小时，隧道出口占很大一部分背景，洞内低亮度和出口处的高亮度形成鲜明对比，可以轻易看见往来车辆和其他物体，通常设置有过渡段 TR₁；当交通量较大，使得隧道出口处的背景亮度比例较小，通常设置有过渡段 TR₂、TR₃。

对于光学长隧道，当交通量较小且位于过渡段 TR₁ 能完全看到出口时，通常设置有过渡段 TR₁；当交通量较大，使得隧道出口处的背景亮度比例较小，且位于过渡段 TR₁ 仍不能完全看到出口时，通常设置有过渡段 TR₂、TR₃。

6.3.3 过渡段长度计算应按式 (6.3.3-1) ~ 式 (6.3.3-3)，计算：

1 过渡段 1 长度应按式 (6.3.3-1) 计算：

$$D_{tr1} = \frac{D_{th1} + D_{th2}}{3} + \frac{v_t}{1.8} \quad (6.3.3-1)$$

式中： v_t ——设计速度 (km/h)；

$v_t/1.8$ ——2s 内的行驶距离。

2 过渡段 2 长度应按式 (6.3.3-2) 计算:

$$D_{tr2} = \frac{2v_t}{1.8} \quad (6.3.3-2)$$

3 过渡段 3 长度应按式 (6.3.3-3) 计算:

$$D_{tr3} = \frac{3v_t}{1.8} \quad (6.3.3-3)$$

条文说明

各过渡段的长度基本上沿着 CIE 有关标准规定的适应曲线分割。过渡段 1 的长度相当于 4s 内的行驶距离; 过渡段 2 的长度相当于 4s 内的行驶距离; 过渡段 3 的长度相当于 6s 内的行驶距离。

根据式 (6.3.3-1) ~ 式 (6.3.3-3) 计算各过渡段长度, 见表 5-1。

设计速度 v_t （km/h）	D_{tr1}			D_{tr2}	D_{tr3}
	隧道内净空高度 h （m）				
	6	7	8		
120	139	137	135	133	200
100	108	106	103	111	167
80	74	72	70	89	133
60	46	44	42	67	100
40	26	26	26	44	67

6.4 中间段照明

6.4.1 中间段亮度

1 中间段亮度宜按表 6.4.1 取值

表 6.4.1 中间段亮度 $L_{in}(\text{cd/m}^2)$

设计速度 V_t (km/h)	Lin		
	单向交通		
	$N \geq 1200 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$	$350 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln}) < N < 1200 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$	$N \leq 350 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$
	双向交通		
	$N \geq 650 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$	$180 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln}) < N < 650 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$	$N \leq 180 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$
120	10.0	6.0	4.5

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：1.当显色指数 $Ra \geq 65$ ，色温介于 3300~6000 K 的灯具用于隧道中间段照明时，设计亮度可按 6.4.1 所列亮度标准的 50%取值，但不应低于 1.0cd/m²。

2.当中间段采用逆光照明方式时，设计亮度可按表 6.4.1 所列亮度标准的 80%取值，但不应低于 1.0cd/m²。

条文说明

该条各参数是借鉴了《欧盟隧道照明标准》(EURO STD 1997 版)和《日本隧道照明指针》(1990 版)的有关规定，并充分考虑了我国公路隧道运营实情和基于小目标物体发现距离的人体生物效应照明效果测试结果。设计速度为 120km/h 时的中间段亮度取值参照了《隧道与地下通道照明指南》(CIE 88—2004)和《照明设备—隧道照明》(CR14380: 2003)的推荐值。

2 行人与车辆混合通行的隧道，中间段亮度不应小于 2.0cd/m²。

3 单向交通且以设计速度通过隧道的行车时间超过 135s 时，隧道中间段宜分为两个照明段，与之对应的长度及亮度不应低于表 6.4.3 取值。

表 6.4.3 中间段各照明段长度及亮度取值

项 目	长度(m)	亮度(cd/m ²)	适用条件
中间段第一照明段	设计速度下 30s 行车距离	L_{in}	—
中间段第二照明段	余下的中间段长度	$L_{in} \times 80\%$ ， 且不低于 1.0 cd/m ²	
		$L_{in} \times 50\%$ ， 且不低于 1.0 cd/m ²	采用连续光带布灯方式，或隧道壁面反射系数不小于 0.7 时

条文说明

本条规定是参照《公路隧道和地道照明指南》(CIE 88—2004)制定，当通过隧道的行车时间超过 135s，机动车驾驶员有充分的适应时间，故第二照明段亮度可适当降低。

6.4.2 中间段灯具布置

1 当隧道内行车时间超过 20s 时，如布灯方式为两侧布灯，照明灯具布置间距应满足闪烁频率低于 4 Hz 或高于 11Hz 的要求；如布灯方式为洞顶布灯，照明灯具布置间距宜满足闪烁频率低于 4 Hz 或高于 11Hz 的要求；

2 路面亮度总均匀度不应低于表 6.4.4-1 所示值。

表 6.4.4-1 路面亮度总均匀度 U_0

设计交通量 $N(\text{veh}/(\text{h} \cdot \text{ln}))$		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，按线性内插取值。

3 路面中线亮度纵向均匀度不应低于表 6.4.4-2 所示值。

表 6.4.4-2 亮度纵向均匀度 U_1

设计交通量 $N(\text{veh}/(\text{h} \cdot \text{ln}))$		U_1
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，按线性内插取值。

4 半径在 1000m 及以上的曲线路段，其照明可按直线路段处理；半径在 1000m 以下的曲线路段，灯具应沿曲线外侧布置，灯具间距宜为直线路段灯具间距的 50%~70%。在反向曲线路段上，宜固定在一侧设置灯具，产生视线障碍时可在曲线外侧增设附加灯具。

5 分合流端照明的平均亮度应比主线基本路段高 50%~100%。

6 中间段照明的阈值增量 TI 应低于 15%。

条文说明

CIE 和美国隧道照明标准均提出在行驶时间超过 20 秒的区域内应避免频闪介于 2.5Hz 和 15Hz 之间。当隧道灯具按一定间距离散布设时，行车过程中人眼能感觉到灯具明暗变化的闪烁容易造成生理心理的不舒适感，特别驾驶员长时间行驶于照明闪烁频率介于 4Hz 和 11Hz 之间的环境时，不舒适感尤为严重，具体不同车速下应避免频率的布灯间距如下图所示，在目前灯具技术条件下，选择合理的灯具基本上

可实现符合安全与舒适性频闪布灯间距要求。

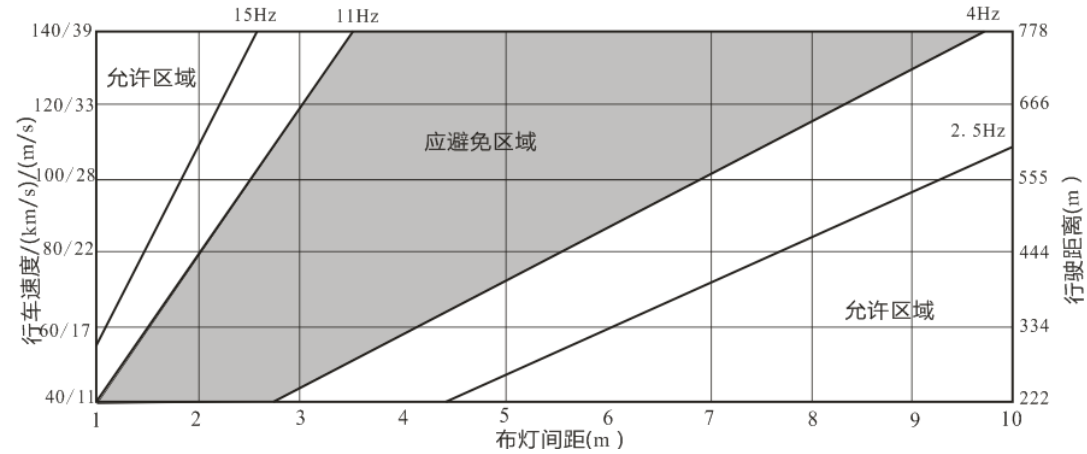


图 6.4.4-1 不同车速下应避免频闪的布灯间距要求

6.4.3 紧急停车带和横通道照明

- 1 紧急停车带照明亮度不应低于 4.0 cd/m^2 ，宜采用显色指数大于 75 的光源。
- 2 横通道使用时，其路面照明亮度不应低于 2.0 cd/m^2 。

条文说明

紧急停车带是为车辆提供检修维护的场所，有可能需做一定的细致工作，故作出本规定。

横通道照明是为人员疏散逃生及救援提供必要的环境亮度。

6.5 出口段照明

6.5.1 出口段宜划分为 EX1、EX₂两个照明段，每段长度宜取 30m, 与之对应的亮度应按式(6.5.1-1、6.5.1-2)计算：

$$Lex1=3\times Lin \tag{6.5.1-1}$$

$$Lex2=5\times Lin \tag{6.5.1-2}$$

条文说明

在隧道出口附近，前车背后的小型车辆常难以发现、视认，容易发生事故。设置出口加强照明后，有助于消除这类问题，见图 6-8。

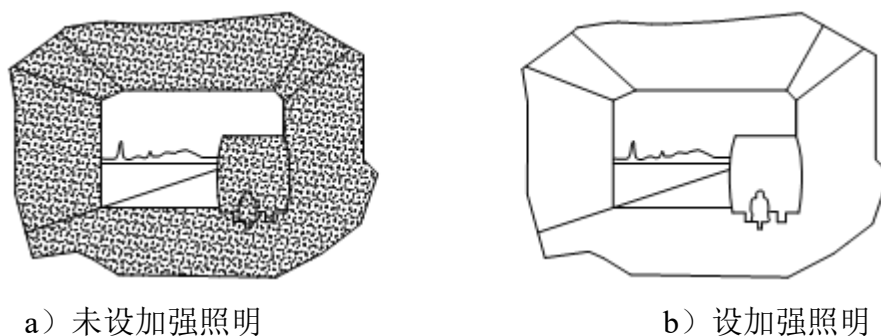


图 6-8 出口加强照明效果

《公路隧道和地道照明指南》(CIE 88—2004) 推荐白天隧道出口段的亮度应线性增加, 在隧道出口前的 20m 范围内, 隧道内的亮度应由中间段亮度变化到 5 倍中间段亮度。根据这一建议, 作出本规定。

6.5.2 长度 $L \leq 300\text{m}$ 的直线隧道可不设置出口段加强照明; 长度 $300\text{m} < L \leq 500\text{m}$ 的直线隧道可仅设置 EX2 的加强照明。

6.5.3 东西朝向隧道且出口区域开阔的隧道, 出口段亮度宜在式 (6.5.1-1) 和式 (6.5.1-2) 的基础上增加 20%, 并根据时段进行出口段调光控制。

条文说明

对于出口为东西朝向且无遮挡的隧道, 晴天容易出现白洞效应, 存在一定安全隐患, 因此, 可以通过增加出口段亮度来降低驾驶员由洞内驶至洞外的视觉适应性时间。

6.5.4 当隧道入口设置有减光棚时, 应符合下列规定

1 如果减光棚内自然亮度低于入口段 TH1 计算亮度, 则应将减光棚视为入口段的一部分来开展照明设计。

2 如果减光棚内自然亮度高于入口段 TH1 计算亮度, 则应根据减光棚的型式、长度和透光率情况进行满足视觉适应性需求的亮度设计。

条文说明

此处自然亮度是指无电光照明条件下晴天中午路面亮度。

由于减光棚具备一定的透光性, 因此要求根据实际减光情况进行入口段亮度设计。

6.6 应急照明和洞外引道照明

6.6.1 应急照明

1 长度 $L > 500\text{m}$ 的高速公路隧道应设置主洞应急照明系统，并应采用不间断供电系统；长度 $L > 1000\text{m}$ 的一级、二级公路隧道应设置主洞应急照明系统；三级、四级公路隧道应根据实际情况确定。

2 应急照明灯具可利用部分基本照明灯具；应急照明供电电源维持时间不应少于 30 min。

条文说明

隧道部分基本照明灯具可兼作应急照明灯具。当日常的照明电源出现故障或停电时，利用不间断应急电源为照明系统的“应急”灯具供电。

3 主洞照明中断时间不应超过 0.3s；

4 当处于应急照明状况时，宜及时将洞内照明状况信息发布，有条件时可采用可变情报板发布信息。

5 主洞应急照明亮度不应小于表 6.4.1 所列中间段亮度的 10%，且不应低于 0.2cd/m^2 。

6 横通道使用时，其路面照明亮度不应低于 2.0cd/m^2 。

7 平行通道使用时，其路面照明亮度不应低于 1.0cd/m^2 。

6.6.2 洞外引道照明

1 以下路段可设置洞外引道照明：

- (1) 隧道外引道曲线半径小于一般值的路段；
- (2) 隧道设夜间照明且处于无照明路段的洞外引道；
- (3) 隧道与桥梁连接处；
- (4) 间距不大于以设计速度行驶 6s 行程的设有照明的相邻两隧道之间的路段。

条文说明

当隧道处于无照明路段时，容易出现因洞内外亮度反差引起的视觉偏差，故规定适当设置引道段照明，以利于驾驶员提前察觉隧道状况或洞外道路状况。

2 洞外引道设置亮度与长度不宜低于表 6.6.2 所示值。

表 6.6.2 洞外引道设置亮度与长度

设计速度 v_t (km/h)	亮度 (cd/m^2)	长度 (m)
----------------------	------------------------	-----------

120	2.0	240
100	2.0	180
80	1.0	130
60	0.5	95
20~40	0.5	60

3 连续隧道间洞外路段长度小于表 6.6.2 所规定值时,可按实际洞外路段长度设置引道照明。

4 洞外引道照明灯具布置可按道路照明进行设计。

条文说明

道路照明通常采用灯具安装在高度 15m 以下的灯杆上,按一定间距有规律地连续设置在道路的一侧、两侧或中央分隔带上进行照明的一种方式。采用这种照明方式时,灯具的纵轴垂直于路轴,灯具所发出的大部分光射向道路和纵向。

6.6.3 隧道景观照明

1 以下隧道可设置隧道景观照明:

- (1) 长度大于 7Km 的山岭隧道;
- (2) 水下隧道。
- (3) 螺旋型隧道。

2 景观照明设置长度宜取 200~250m;

3 景观照明应采用独立的控制回路。

4 景观照明的设置不应影响功能性照明。

条文说明

景观照明设置长度过短,无法达到缓解驾驶疲惫需求,设置长度过长,工程造价较高。

6.7 节能标准与措施

6.7.1 一般规定

6.7.1.1 公路隧道照明设计应根据交通量、洞外亮度等合理选择设计参数,通过多方案的经济技术分析论证,确定合理、节能的照明方案。

条文说明

合理设计是实现隧道照明节能的核心环节。隧道照明节能在满足照明标准的前提下,通过细致分析隧道所处地理位置、隧道规模、交通量大小等工程特点,合理选定设计参数,并进行不同光源、灯具选型、灯具布置形式以及分期实施方案等多种照明方案的全寿命周期经济技术比较,“因隧制宜”地确定最佳设计方案,避免凭经验的模式化设计。

6.7.1.2 公路隧道照明设计应根据交通量变化、洞外亮度变化、季节更替等多种工况制定调光及运营管理方案。

条文说明

隧道照明系统通常按最不利工况进行设计,不分工况开启照明设施必然会造成能耗增加或引起安全隐患。应根据交通量变化、洞外亮度变化、不同季节等制定适宜的调光及运营管理方案,以确保隧道照明系统在不同运营条件下的安全与节能运行,并实现科学管理。

公路隧道照明通常采用分级调光或动态调光。例如,白天加强段照明可采用晴天、阴天、云天、重阴天四级调光方案或时序多级调光方案;夜间中间段照明根据交通量变化可采用动态调光。

6.7.1.3 公路隧道照明设计宜根据实时洞外亮度、路面亮度反馈值等动态调整日常运营的调光控制策略,调光控制的主要输入参数传感器宜进行冗余设计,当传感器发生故障时应自动输出报警信息,整个系统故障时,应具备应急处置能力,输出亮度应按照 6.7.1.2 规定的调光及运营管理方案执行。

条文说明

隧道洞外亮度受天气等因素影响,存在短时剧烈波动的特征;同时,灯具—路面系统因光源衰减、灯具污损、路面反射率下降等因素,运营期的实际路面亮度会逐渐偏离设计预期。传统的时序控制难以响应上述实时变化和长期偏离,常因预留过大的亮度裕量而造成能源浪费。通过增设洞外亮度传感器和洞内路面亮度传感器,为调光

控制提供实时、准确的输入变量，可减少因临时性洞外亮度变化导致的过度照明，有效提高隧道照明的节能水平。

隧道洞外亮度传感器采用两组同样参数的传感器实现冗余设计，当两个传感器都正常时，将亮度测试值加权平均，作为实测值；当两者输出参数值相差大于 20% 时，默认为系统故障，照明控制器自动输出报警信息，提醒检修，并自动关闭智能调光功能，切换到时序控制或手动控制，避免输出亮度不符合规范要求的情况。

6.7.2 节能标准

6.7.2.1 当显色指数 $Ra \geq 65$ 、色温介于 3500 K~6500 K 的 LED 光源用于隧道基本照明时，亮度可按表 6.1.1 所列亮度标准的 50% 取值，但不应低于 1.0 cd/m^2 。

条文说明

我国和世界上大多数国家照明设计目前所采用的亮度标准均是在明视觉条件下 2° 视野范围内的亮度，这不能完全反映人眼对亮度的感知。为此，学术界开始应用“中间视觉理论”和“对目标物体反应时间的视觉功效法”对隧道照明进行研究。根据“基于反应时间的视觉功效法”实验，得出反应时间相等时 LED 光源对高压钠灯光源的亮度对比系数见表 6-1，进而可计算 LED 光源中间视觉的等效亮度，因此其亮度值作相应折减。

表 6-1 LED 对 HPS 的亮度对比系数值

背景亮度 (cd/m^2)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.6	4.5
亮度对比系数	0.3107	0.3881	0.4777	0.4613	0.4031	0.3491

6.7.2.2 当基本照明采用逆光照明方式时，亮度可按表 6.1.1 所列亮度标准的 80% 取值，但不应低于 1.0 cd/m^2 。

条文说明

逆光照明灯具的特点是光束投射方向和交通车流方向相反，驾驶员主要通过负对比效应看到路面的障碍物和车辆。根据“小目标物体可见度”理论，在目标物体所在

路面亮度相同的情况下，物体朝向驾驶员表面的亮度越低，相应的目标物可视度就越高，就越容易被驾驶员发现，故作出本条规定。

6.7.3 节能措施

6.7.3.1 隧道照明光源的选择应遵循下列原则：

- 1 隧道照明灯具宜选择发光效率高的光源，灯具初始光效宜符合 JT/T 939.2-2025 中 5.13 的规定，灯具寿命宜符合 JT/T 939.2-2025 中 5.21 的规定；
- 2 以稀释烟尘作为隧道通风控制工况的隧道，宜选择透雾性能较好的光源；不以稀释烟尘作为隧道通风控制工况的隧道，基本照明宜选择显色性好的光源；
- 3 紧急停车带、横通道可选用显色性较好的光源。

条文说明

LED 隧道照明灯具产品种类丰富，其可选择的产品相关色温从 2000K 到上万 K，从显色指数不低于 70 的常规产品，到 90 以上的高显色指数产品也都可选择，考虑到 LED 灯具良好的动态响应特性与公路隧道调光控制策略的良好匹配性，以及较高的光效和较长的使用寿命，可选择不同参数的 LED 灯具应用于对相关色温、显色指数有特殊要求隧道和特殊地段。

光源、透过率（烟尘浓度）对照明水平有较大影响。烟尘浓度不但与车速（要求视距）有关，而且与亮度（或照度）、光源有关，见表 6-2。日本照明专家经大量测试后得出图 6-1 所示的烟尘浓度（透过率）、车速、照度和光源四者之间关系。

表 6-2 设计速度—路面亮度—烟尘浓度之关系

设计速度(km/h)	100	80	60	40
路面平均亮度(cd/m ²)	9.0	4.5	2.5	1.5
K(m ⁻¹)	0.0069	0.0070	0.0075	0.0090

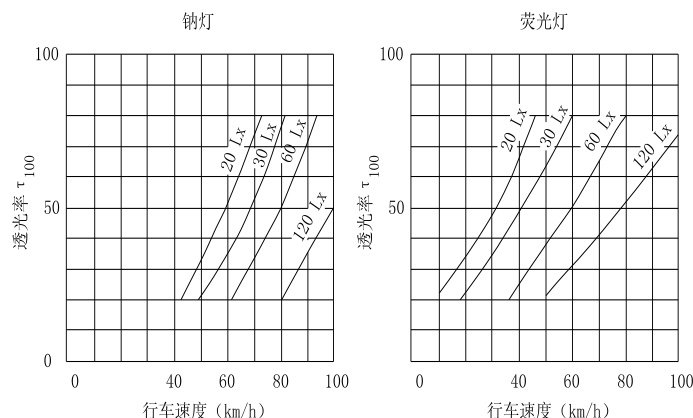


图 6-1 透过率、车速、照度和光源之间关系

对透雾性能要求较高的隧道，照明光源可选择高压钠灯。

6.7.3.2 隧道照明采用中线或中线侧偏布置形式时，基本照明宜选用逆光型灯具；隧道照明采用两侧交错或两侧对称布置形式时，宜选用宽光带对称型照明灯具。

6.7.3.3 接近段可采用下列减光措施：

- 1 可采用削竹式洞门形式，并进行坡面绿化；
- 2 洞口采用端墙形式时，墙面可采用暗色调，其装饰材料的反射率应小于 0.17；
- 3 经硬化处理的隧道洞口边仰坡可进行暗化处理；
- 4 洞口外至少一个照明停车视距长度的路面可采用黑色路面。

条文说明

洞外亮度 $L_{20}(S)$ 对隧道加强照明规模的影响极大，若对洞门作明亮装饰会使洞外亮度值增大，加剧“黑洞效应”，导致照明能耗增加。在隧道接近段采取洞外减光措施，可以降低隧道洞外亮度，达到节能目的。

本条提出的洞外减光措施为常用办法，也可根据洞口现场情况采用其他减光措施，如洞口种植常青树。此外，隧道洞口设计遵循“早进晚出”原则，采取前置洞口工法，实现零仰坡开挖，以及大面积绿化洞口等，尽量降低隧道洞外亮度。

采用削竹式洞口时，其洞外亮度低于端墙式洞口，即使隧道洞口处于微丘地段即 20° 视场范围内天空面积百分比较高也是如此，因此从降低洞外亮度考虑，推荐削竹式洞口。图 6-2 所示为洞口（门）形式对洞外亮度的影响情况。

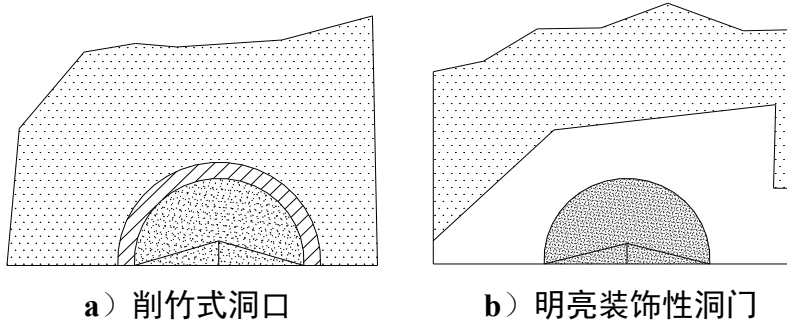


图 6-2 洞口（门）形式对洞外亮度的影响

6.7.3.4 隧道白昼照明调光设计应满足下列要求：

1 加强照明应根据洞外亮度和交通量变化，进行入口段、过渡段和出口段的调光方案设计，可按表 6-3 进行调光分级组合；

表 9-3 加强照明调光分级

季节及天气	调光分 级	洞外亮度 (cd/m^2)	交通量 N (veh/ (h·ln))	
			单向交通	双向交通
夏季晴天	I	$L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	II		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	III		≥ 1200	≥ 650
其他季节晴天/夏季 云天	IV	$0.5L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	V		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	VI		≥ 1200	≥ 650
其他季节云天/夏季 阴天	VII	$0.25L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	VIII		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	IX		≥ 1200	≥ 650
其他季节阴天/重阴 天	X	$0.13L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	XI		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	XII		≥ 1200	≥ 650

2 基本照明应根据交通量变化，按第 6.1.1 条~6.1.3 条的亮度值进行调光方案设计。

条文说明

按不同季节、不同天气、交通量变化，调节隧道入口段、过渡段的亮度水平，以

使隧道内加强照明亮度适应于洞外亮度的变化,从而使得隧道照明更加科学合理,获得节能效果。

按交通量变化调节隧道基本照明的亮度水平,以使隧道内基本照明亮度适应于交通量的变化,从而获得节能效果。

6.7.3.5 隧道夜间照明调光设计应满足下列要求:

- 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 $L \leq 500\text{m}$ 且设有发光型诱导设施和逆反射轮廓标的高速公路和一级公路隧道,夜间可只开启应急照明灯具;
- 3 长度 $L \leq 1000\text{m}$ 且设有逆反射轮廓标的二级公路隧道,夜间可只开启应急照明灯具;
- 4 当公路设有照明时,其路段上的隧道夜间照明亮度应与道路亮度水平一致;当公路未设置照明时,高速公路和一级公路隧道夜间照明亮度可取 1.0 cd/m^2 ,二级公路隧道夜间照明亮度可取 0.5 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。

条文说明

隧道入口段、过渡段、出口段处的加强照明是为消除白天驾驶员接近及通过隧道时由于洞内外亮度差别极大引起的“黑洞效应”、“视觉适应滞后”等视觉现象,因此所有加强照明灯具在夜间均应关闭;若仍开启这些照明,不但耗能严重,而且驾驶员在进入隧道时会引起强烈眩光,驶离隧道时产生“黑洞效应”,存在安全隐患。

本条参照《城市道路照明设计规范》(CJJ 45-2006)道路照明路面亮度取值的相关规定,规定了各等级公路隧道的夜间亮度。

根据编制组对国内隧道较多的省(市)调研发现,对于夜间交通量较少的公路隧道,在车辆均开车灯行驶时,隧道内仅开启应急照明灯具供隧道内监控摄像机及诱导行车使用,运营情况正常。

6.7.3.6 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 veh/ (h·ln) 时, 隧道照明调光设计可采用以下方式:

1 应以不小于一个停车视距的长度作为最小照明控制区。在车辆驶入隧道照明区时, 车辆所在照明控制区、行驶下游不少于两个照明控制区(如有)和行驶上游不少于一个照明控制区(如有)的路面亮度应达到 6.7.1.2 的要求, 其他照明控制区路面亮度应不低于 6.7.1.2 要求的 10%。随车辆移动, 各照明控制区路面亮度动态调整。

2 路面亮度调整应以车辆行驶位置为基础, 并根据交通事件检测结果进行增强控制。交通事件包括车辆行驶, 逆行、停车、行人及抛洒物等。当检测到逆行、停车、行人事件后, 其对应的照明控制区路面亮度应调为设计最大亮度的 100%, 直到事件解除, 且其亮度控制优先级高于车辆行驶事件的亮度控制。当检测到抛洒物后, 其所在的照明控制区路面亮度应调为设计最大亮度的 100%, 直到事件解除, 且其亮度控制优先级应高于车辆行驶事件的亮度控制。

3 交通事件检测设备安装应迎向车辆行驶方向, 且检测有效范围覆盖自身所在照明控制区全并向上游相邻照明控制区延伸至少 10m 范围。交通事件检测设备应具备行驶、逆行、停车、行人事件检测功能, 在相应隧道照明段路面亮度条件下、实际安装工况下的漏报率为 0%。交通事件检测设备宜具备抛洒物检测功能, 漏报率不大于 2%。

4 各照明控制区在路面亮度调整的过程中, 亮度变化应保持连续、平滑。

5 车辆行驶事件或异常事件, 自检测到事件发生起至照明控制完成的总延时应不大于 200 ms。

6 当交通事件检测设备、传感器、通信链路或控制设备等发生故障时, 相关照明区段照明应符合 6.7.1.2 的要求。

7 照明控制不应采用定时关闭的方式。

条文说明

在交通流量较小时段, 若全线维持设计亮度运行, 将产生不必要的能源浪费。采用车辆行驶位置和交通事件检测结果的按需调光方式, 可在保障行车安全的前提下显著降低, 照明能耗。

停车视距是车辆在行驶中发现前方障碍物到安全停车所需的最短距离。最小照明

控制区的长度规定为不小于一个停车视距,且车辆所在区及行驶前方不少于两个照明控制区路面亮度应符合 6.7.1.2 的要求,覆盖了驾驶人正常行驶时的主要视觉关注区域,确保驾驶人识别前方路况所需的安全视距不被压缩。后方不少于一个照明控制区的保持 100%设计亮度,起到了后方安全缓冲区的作用;其余区段不低于 10%,可维持视觉连续性和避免黑洞效应,在节能与视觉引导之间取得平衡。

逆行、停车、行人等事件直接关系到行车及人身安全,其危险程度远高于正常行驶场景。因此规定上述事件触发后,对应照明控制区亮度强制提升至设计最大亮度的 100%,且控制优先级高于正常车辆行驶的亮度控制。抛撒物事件虽危险程度略低,但亦可能引发车辆避让等二次事故,故同样规定触发后提升至 100%亮度,并优先于正常行驶控制。

关于车辆行驶事件或异常事件自检测到起,至灯具及控制单元完成照明状态切换的链路总时延的限定,综合考虑了车辆行驶速度、照明控制区长度以及驾驶人对亮度变化的感知响应特性,确保在车辆到达目标区段前,照明状态已完成调整,不产生照明盲区。

交通事件检测设备对行驶、逆行、停车、行人事件的漏报率规定为 0%,是指在隧道照明段规定亮度条件下、设备按实际工况安装后,经设计验证和工程验收确认,不应出现对上述安全相关事件的漏检,体现的是功能安全等级的可靠性要求,而非统计学意义上的绝对零值。抛撒物检测因目标尺寸、形态差异较大,检测难度更高,故其漏报率放宽至不大于 2%,且作为推荐性指标。

动态调光过程中,要求各照明控制区的亮度变化保持连续、平滑,目的是避免因亮度的阶跃突变对驾驶人造成视觉干扰或引发眩光不适,保障行车过程中的视觉舒适性和安全性。

基于“失效安全”原则,调光控制系统在不确定状态下,宁可多亮、不可少亮,以确保故障期间的行车安全不因照明不足而降低。因此规定在设备故障、系统无法可靠判断车辆行驶状态或交通事件时,相关照明区段路面亮度应符合 6.7.1.2 的要求。

定时关闭属于无车辆感知的固定时序控制,无法响应实时交通状态,可能造成隧道内无车时灯具不必要地点亮、有车时反而关闭的安全隐患。本条所规定的按需调光方式,与定时关闭在控制逻辑和安全理念上有本质区别且存在一定冲突,因此规定照明控制不应采用定时关闭的方式。

6.7.3.7 路面两侧 2m 高范围内墙面宜铺设反射率高的材料。

条文说明

墙面的反射与衬托作用在隧道照明中非常重要，不容忽视。

6.7.3.8 隧道入口段和过渡段宜选择黄色或蓝色的路面材料，不宜选择红色路面材料。

条文说明

路面亮度与路面材料的反射特性紧密相关，在当前公路隧道照明以白光 LED 灯具为主要光源的情况下，考虑到常规白光 LED 灯具的发射光谱峰值分别位于黄绿光区域（约 550-580nm）蓝光区域（波长约 440-460nm）附近，颜色接近的路面材料可以在路面照度不变的情况下提高路面亮度，而由于常规白光 LED 灯具发射光谱缺少红光部分，采用红色路面材料会在同等照明条件下降低路面亮度。

6.7.3.9 沉管隧道、下穿隧道应在隧道入口、出口外设置减光结构，减光结构应设置照明设施，白天和夜间减光结构区段路面亮度平均值不低于入口段 1 的要求，路面亮度总均匀度不应小于表 6.2.2 的要求，亮度纵向均匀度不应小于表 6.2.3 的要求。

表 6.2.2 路面亮度总均匀度 U_0

设计小时交通量 $M[\text{veh} / (\text{h} \cdot \text{ln})]$		U_0
单向交通	双向交通	
≥ 1200	≥ 650	0.4
≤ 350	≤ 180	0.4

表 6.2.3 路面亮度纵向均匀度 U_1

设计小时交通量 $M[\text{veh} / (\text{h} \cdot \text{ln})]$		U_1
单向交通	双向交通	
≥ 1200	≥ 650	0.7
≤ 350	≤ 180	0.6

条文说明

水下沉管隧道、下穿隧道及洞口天空面积占比较高隧道的洞外亮度往往远高于临

近区域隧道的洞外亮度，这会大幅提高公路隧道照明灯具的安装功率和运营能耗，在隧道入口外设置减光结构有助于利用太阳光缓解隧道入口内外的亮度差，从而降低日间隧道照明系统的光输出，实现节能的目的。另一方面，沉管隧道、下穿隧道入口、出口外路段往往具有较大的纵坡，容易由于日照导致眩光，在隧道入口、出口外设置减光结构也有利于减小日照眩光的影响。

由于隧道外减光结构多为非封闭结构，太阳光照射在梁柱和空隙间会在路面形成明暗不同的区域，造成障碍物辨识困难的同时，车辆快速通过时可能造成高频明暗闪烁导致视认能力下降，形成安全隐患，因此需要结合地理位置、朝向等合理设计减光结构，或通过在减光结构区域设置照明灯具提高其下方路面亮度均匀度的水平。

6.8 照明计算

6.8.1 一般规定

1 照明计算应补充收集下列资料：

- 1) 路面材料及其亮度系数或简化亮度系数；
- 2) 灯具布置方式及安装高度、间距、仰角；
- 3) 光源及灯具的类型、规格；
- 4) 灯具的光强分布表、利用系数曲线图、等光强曲线图、亮度产生曲线图等光度数据。

2 照明计算应包括下列方面：

- 1) 应结合各隧道工程特点选取合理的计算参数；
- 2) 应根据选用照明灯具类型、布置方式等按本细则第 9.2 节的要求考虑节能标准；
- 3) 应按本细则第 9.3.4 条、9.3.5 条的调光要求考虑灯具的布置；
- 4) 应根据确定的亮度、照明类型和布置方式，计算照明灯具的数量及其功率。

条文说明

照明计算除与灯具的规格、型号、光源类型、隧道断面形式、灯具布置方式直接有关外，灯具制造厂还应根据国家和 CIE 的有关规定、测试方法，提供灯具的性能指标、光度数据等。按 CIE 的要求，需要提供 36 个 γ 角，52 个 c 角所对应的光强表，共计 1872 个数值，才能进行照明数值计算。

6.8.2 照度计算

1 利用灯具的光强分布表,可按下列步骤计算路面平均水平照度:

1) 某一灯具在洞内路面计算点 p 产生的水平照度可按式 (6.8.2-1) 计算:

$$E_{pi} = \frac{I_{cy}}{H^2} \cos^3 \gamma \times \frac{\phi}{1000} \times M \quad (6.8.2-1)$$

式中: E_{pi} ——灯具在洞内路面计算点 p 产生的水平照度 (lx);

γ —— p 点对应的灯具光线入射角 ($^\circ$);

I_{cy} ——灯具在计算点 p 的光强值 (cd);

M ——灯具的养护系数;

ϕ ——灯具额定光通量 (lm);

H ——灯具光源中心至路面的高度 (m)。

2) 数个灯具在计算点 p 所产生的照度可按式 (6.8.2-2) 计算:

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{pi} \quad (6.8.2-2)$$

式中: E_p —— p 点的水平照度 (lx);

n ——灯具数量,计算时可取计算区域前后各一组。

3) 路面平均水平照度可按式 (6.8.2-3) 计算:

$$E_{av} = \frac{\sum_{p=1}^m E_p}{m} \quad (6.8.2-3)$$

式中: E_{av} ——路面平均水平照度 (lx);

m ——计算区域内计算点的总数。

2 利用灯具利用系数曲线图,可按式 (6.8.2-4) 计算路面平均水平照度:

$$E_{av} = \frac{\eta \cdot \phi \cdot M \cdot \omega}{W \cdot S} \quad (6.8.2-4)$$

式中: ω ——灯具布置系数,对称布置时取 2,交错、中线及中央侧偏单光带布置时取 1;

η ——利用系数,由灯具的利用系数曲线图查取;

W ——隧道路面宽度 (m);

S ——灯具间距 (m)。

条文说明

照明计算的方法很多,传统的如经验表格法、等照度曲线法、利用系数法等,但是计算精度均不高,不能全面评价照明的效果与质量。随着计算机技术的发展与普及,根据厂家提供的光度数据表,已经可以实现繁锁的重复计算工作,得出路面上乃至隧道墙面上任意一点的照度与亮度。本细则推荐数值计算方法(CIE法)的同时,也列出了利用系数曲线图计算方法。灯具光强示意图,见图 6.8.2-1。

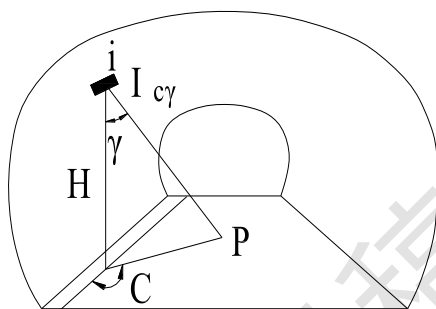


图 6.8.2-1 灯具光强示意图

本条文式(6.8.2-1)中 $I_{c\gamma}$ 光强值由厂家提供,按 CIE 规定为 1872 个数据;在灯具仰倾角为 0° ,光通量为 1000 lm 条件下,所得的光强表,实际计算时按额定光通量换算,并考虑光源的衰减与灯具的养护系数。

当灯具安装有平面转角、仰倾角时,通过平面公式的转换,求出与测试 c 、 γ 角相一致的角度,内插求出 $I_{c\gamma}$ 值。

关于计算灯具的选取数量 n 值,通过相关计算表明,隧道内距计算区域(假定为 S_0) 1 倍以上的灯具影响较小,可以不考虑。故一般情况下,取计算区域前后各 1 组,计算区域之外,另计 2~4 盏灯具,见图 10-2。

为保证计算精度,且符合计算平均照度、亮度,特别是亮度均匀度与纵向均匀度的要求,计算区域内需有足够的计算点,并且在车道中心线上布点。

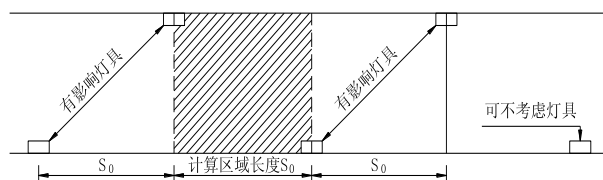


图 6.8.2-2 计算区域

6.8.3 亮度计算

1 亮度计算应满足下列条件:

- 1) 计算区域不应小于灯具间距;
- 2) 观察点距计算区域宜取 60~160m, 应位于行车道中线, 并距路面高 1.5m;
- 3) 计算区域内纵向计算点间距不宜大于 1.0m, 横向计算点不应少于 5 个;
- 4) 计算灯具应包括计算区域前后各一组。

2 某灯具 i 在路面计算点 p 产生的亮度可按式 (10.3.2) 计算:

$$L_{pi} = \frac{I_{cr}}{H^2} r(\beta, \gamma) \quad (10.3.2)$$

式中: L_{pi} ——灯具 i 在计算点 p 产生的亮度 (cd/m^2);

$r(\beta, \gamma)$ ——简化亮度系数, 按附录 A 取值;

β ——观察面与光入射面之间的角度。

3 数个灯具在计算点 p 产生的亮度可按式 (10.3.3) 计算:

$$L_p = \sum_{i=1}^n L_{pi} \quad (10.3.3)$$

式中: L_p —— p 点的亮度 (cd/m^2)。

4 计算区域内路面的平均亮度可按式 (10.3.4) 计算:

$$L_{av} = \frac{\sum_{p=1}^m L_p}{m} \quad (10.3.4)$$

式中: L_{av} ——计算区域内路面的平均亮度 (cd/m^2)。

条文说明

亮度计算比较复杂, 除涉及照度计算有关内容外, 它还与观察点的位置、路面材料等有关, 为可靠起见, 没有考虑墙面反射光对路面亮度提高的影响。查对国内外有关资料, 机动车驾驶员注意力集中的区域大致是前方 60~160m, 因此视点纵向距离, 取距计算区域 60~160m, 侧向距离取 1/4 路面宽, 视点高为 1.5m。由于视角大多在 $0.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 之间, 不计其影响。

关于路面简化亮度系数 $r(\beta, \gamma)$ 的取值, 目前我国公路隧道路面几乎都是水

泥混凝土路面，在没有实测资料的情况下，引用 CIE 的推荐值。本细则附录 A 只列出了一种路面的 $r(\beta, \gamma)$ 值。 $r(\beta, \gamma)$ 表中所有的 r 值是按 $Q_0=1$ 测量计算得出的。实际计算时，乘以表中的 Q_0 值，并且表中各 r 值均乘了 1000。经推断 L_{Pi} 可按式 (10-1) 计算：

$$L_{Pi} = \frac{I_{c\gamma}}{H^2} \times \frac{\phi}{1000} \times M \times r(\beta, \gamma) \times \frac{Q_0}{1000} \quad (10-1)$$

照明计算举例见附录 B。

6.8.4 均匀度计算

- 1 路面亮度总均匀度可按式 (10.4.1) 计算：

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{av}} \quad (10.4.1)$$

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 (cd/m^2)。

- 2 路面中线亮度纵向均匀度可按式 (10.4.2) 计算：

$$U_l = \frac{L'_{min}}{L'_{max}} \quad (10.4.2)$$

式中： U_l ——路面中线亮度纵向均匀度；

L'_{min} ——路面中线最小亮度 (cd/m^2)；

L'_{max} ——路面中线最大亮度 (cd/m^2)。

6.9 照明控制

6.9.1 照明控制应结合洞外亮度、时间、交通量、设计速度、供电电压、天气条件、光源特性等设计运营方案。

条文说明

对照明设施进行有效地控制，不仅可提高隧道运营安全水平，也能实现节能减排。

6.9.2 照明控制设计应具备正常和异常交通工况的控制功能。

6.9.3 照明控制设计宜具备手动控制和自动控制功能。

条文说明:

手动控制方式是隧道管理人员根据洞外亮度、交通量等参数,人工选择控制方案,手动控制的优先级最高。

自动控制常采用下列三种控制方法:

- 1 智能控制:检测洞口内外亮度值,经计算处理后,控制照明工况。
- 2 分级控制:根据洞内外亮度、时间、交通量、平均车速、供电电压、天气条件等控制参数,并结合光源特性制定控制方案,控制照明工况。
- 3 时序控制:按时间区段预先编制程序,控制照明工况。

6.9.4 照明控制方式宜按照下表选取。

表 6.9.3 隧道照明控制方式和响应条件

序号	控制方式	响应条件
1	手动控制	养护工况
		交通异常工况
		火灾工况
2	自动控制	正常交通工况

6.9.5 隧道照明正常运营应采用自动控制为主、手动控制为辅的控制方式。采用自动控制时,加强照明的控制级数不应少于 24 级;基本照明的控制级数不应少于 12 级。在照明控制柜附近应张贴手动调节照明亮度的操作指南。

6.9.6 隧道进行养护维修作业地点前后的照明灯具应开启到最大程度。

6.9.7 隧道内发生交通事故、火灾或进行交通管制时,隧道内所有照明灯具宜开启到最大程度。

6.9.8 隧道时序控制应根据不同季节、不同时段隧道洞外亮度的变化提出隧道加强照明开启和关闭时间。

6.9.9 隧道分级控制宜按表 6.9.9 进行调控。

表 6.9.9 分级控制方式下加强照明段调光

季节及天气	调光分级	洞外亮度 (cd/m^2)	交通量 N (veh/ (h·ln))	
			单向交通	双向交通
夏季晴天	I	$L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	II		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	III		≥ 1200	≥ 650

其他季节晴天/夏季云天	IV	$0.5L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	V		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	VI		≥ 1200	≥ 650
其他季节云天/夏季阴天	VII	$0.25L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	VIII		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	IX		≥ 1200	≥ 650
其他季节阴天/重阴天	X	$0.13L_{20}(S)$	≤ 350	≤ 180
	XI		$350 < N < 1200$	$180 < N < 650$
	XII		≥ 1200	≥ 650

6.9.10 隧道内智能控制应按照洞外亮度和交通量进行自动调光。

1 隧道智能控制时间间隔宜不小于 10 分钟。

2 隧道亮度调控比例超过 10%时，调控等级宜按照 10%进行调控，每次调控时间间隔不得小于 30 秒。

6.9.11 横通道、平行通道、紧急停车带的照明控制应符合下列规定：

- 1 横通道、平行通道和紧急停车带的照明宜具备远程控制和现场手动控制功能。
- 2 横通道及平行通道照明均应具备“门开灯亮”的联动功能。

6.9.12 亮度检测器的设置应符合下列规定：

1 洞外亮度检测器宜设置在离洞口一倍停车视距位置处，高度宜为 2.5m，检测器探头方向应指向洞口中心。

2 洞内亮度检测器宜设置在洞内离洞门一倍隧道净高的侧壁上，检测器探头方向应指向行车前进方向且离检测器一个停车视距位置路面中心处，检测器安装高度宜为 2.5m。

6.9.13 亮度检测器应能满足洞内外长期工作条件，且应符合下列规定：

1 亮度检测器探头镜头立体视角应为 20° 。

2 洞外亮度检测器测量量程不宜低于 $1 \sim 6000 \text{cd/m}^2$ ，最大允许误差不应大于 $\pm 5\%$ 示值；洞内亮度检测器测量量程不宜低于 $1 \sim 500 \text{cd/m}^2$ ，最大允许误差不应大于 $\pm 5\%$ 示值。

3 洞外亮度检测器宜配备带雨刷的防护罩。

4 亮度检测器应具有通讯接口和工况状态反馈功能。

征求意见稿

附录 A 沿程阻力系数

A.0.1 直线风道沿程阻力系数可按式 (A.0.1) 计算:

$$\lambda = \frac{1}{(1.1138 - 2 \lg \frac{\Delta}{D})^2} \quad (\text{A.0.1})$$

式中: Δ ——平均壁面粗糙度 (mm), 可按表 A.0.1 取值;

D ——风道断面当量直径 (m)。

表 A.0.1 平均壁面粗糙度 Δ

壁面材料及特征		Δ (mm)
混凝土壁面	抹平度良好	0.3~0.8
	抹平度一般	2.5
	粗糙	3~9
水泥浆壁面	抹平度良好	0.3~0.8
	抹平度一般	1.0~2.0
	粗糙	2.9~6.4
陶瓷贴面		1.4

A.0.2 平面曲线半径 $R < 2000\text{m}$ 的曲线段, 沿程阻力系数可按式 (A.0.2) 计算:

$$\lambda_c = 1.8235\lambda \cdot R^{-0.078} \quad (\text{A.0.2})$$

式中: λ_c ——曲线隧道壁面摩阻损失系数;

λ ——隧道壁面摩阻损失系数;

R ——曲线段平面曲线半径 (m)。

附录 B 弯曲与折曲风道压力损失系数

B.0.1 不带导流叶片弯曲风道压力损失系数可按下列规定取值：

1 90°圆形弯曲风道不带导流叶片弯曲(图 B.0.1-1)的压力损失系数 ζ_b 可按表 B.0.1-1 取值。
当弯曲风道不是 90°时，应乘以修正系数 ε_θ 进行修正，修正系数可按表 B.0.1-2 取值。弯曲管道的曲率半径 R 宜在 $(1\sim4)D$ 范围内。

表 B.0.1-1 90°圆形风道弯曲压力损失系数 ζ_b

R/D	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5
ζ_b	0.71	0.5	0.25	0.15	0.13	0.12

注： D 为风道的当量直径 (m)。

表 B.0.1-2 圆形风道弯曲压力损失修正系数 ε_θ

$\theta(^{\circ})$	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
ε_θ	0	0.31	0.45	0.6	0.78	0.9	1.0	1.13	1.2	1.28	1.4

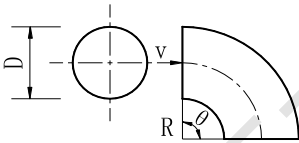


图 B.0.1-1 90°圆形风道弯曲图例

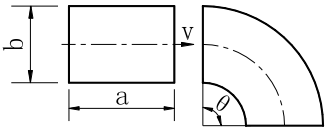


图 B.0.1-2 90°矩形风道弯曲图例

2 90°矩形风道不带导流叶片弯曲(图 B.0.1-2)的压力损失系数 ζ_b ，当雷诺数 $Re \geq 20 \times 10^4$ 时，可按表 B.0.1-3 取值；当 $Re < 20 \times 10^4$ 时，可按式 (B.0.1-1) 计算。

$$\zeta_b' = \varepsilon_{Re} \times \zeta_b \tag{B.0.1-1}$$

式中： ε_{Re} ——修正系数，可按表 B.0.1-4 取值。

表 B.0.1-3 90°矩形风道弯曲压力损失系数 ζ_b

R/b	a/b										
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
0.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
0.75	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.0	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.27	0.21
1.5	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.0	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15

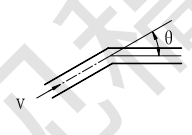
表 B.0.1-4 90°矩形风道弯曲压力损失系数修正系数 ϵ_{Re}

R/b	$Re \times 10^4$								
	1	2	3	4	6	8	10	14	≥ 20
0.5	1.40	1.26	1.19	1.4	1.09	1.06	1.04	1.0	1.0
≥ 0.75	2.0	1.77	1.64	1.56	1.46	1.38	1.30	1.15	1.0

3 圆形折曲风道的压力损失系数 ζ_b 可按式 (B.0.1-2) 计算或按表 B.0.1-5 查取。

$$\zeta_b = 0.946 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + 2.05 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{B.0.1-2}$$

表 B.0.1-5 圆形折曲风道的压力损失系数 ζ_b

θ	ζ_b	图 示
15°	0.022	
30°	0.073	
45°	0.183	
60°	0.365	
90°	0.99	
120°	1.86	

4 矩形折曲风道压力损失系数 ζ_b 可按图 B.0.1-3 取值。

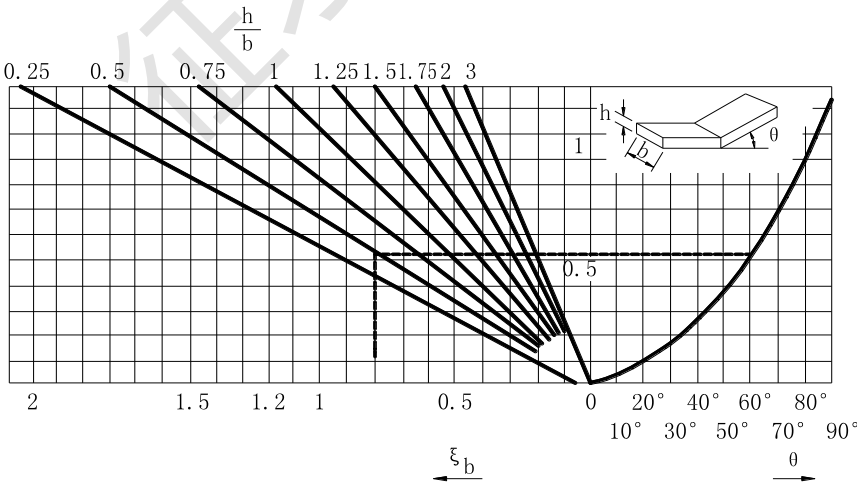
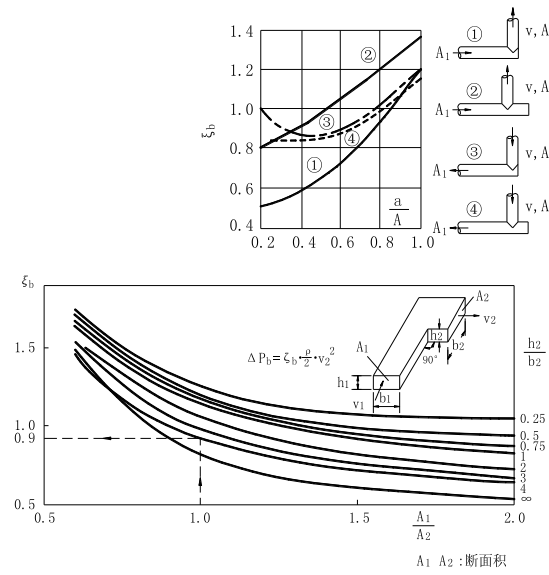


图 B.0.1-3 矩形折曲风道压力损失系数 ζ_b

5 圆形或矩形变断面折曲风道压力损失系数 ζ_b 可按图 B.0.1-4 取值。



a) 圆形断面

b) 矩形断面

图 B.0.1-4 变断面折曲风道压力损失系数 ζ_b

B.0.2 带导流叶片弯曲风道压力损失系数可按下列规定取值：

1 在压力损失较大的圆形或矩形风道弯曲段，在以下两种情况下应安装导流叶片，以尽量减少通风风道的压力损失：

- 1) $R < 1.6D$ 时，应安装导流叶片；
- 2) 在空气经过弯曲/折曲风道段后，对于通风机吸入侧、风道前端部附近等不希望出现偏流、涡流的位置，应安装导流叶片。

2 弯曲管道中设置导流叶片时，在矩形断面的急剧弯曲部位，其弯曲角 θ 与 ζ_b 之间关系应满足下列规定：

- 1) 当 θ 的数值较小时， ζ_b 几乎与 θ 成正比；
- 2) 当 θ 为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时， ζ_b 基本不会随 θ 的变化而变化；
- 3) 确定弯曲角度的相对值可参照图 B.0.2-1。

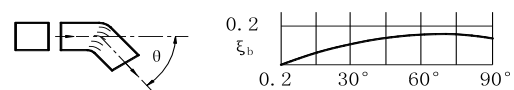


图 B.0.2-1 设导流叶片弯曲风道角度 θ 与 ζ_b 关系图

3 导流叶片的设计尺寸应结合图 B.0.2-2，通过式 (B.0.2-1) ~ 式 (B.0.2-3) 来计算确定；导流叶片在构造上应确保检查人员可以穿行通过。导流叶片可做成两种形状，一种为简化弯曲圆柱

面形状的翼型；另一种为同心圆弧形状的薄圆型，如图 B.0.2-3 所示。翼型导流叶片的剖面尺寸可按表 B.0.2-1 制作。

$W/d=4\sim6$ (B.0.2-1)

$R/d=1.5\sim2.6$ (B.0.2-2)

$L/d=2.0\sim3.0$ (B.0.2-3)

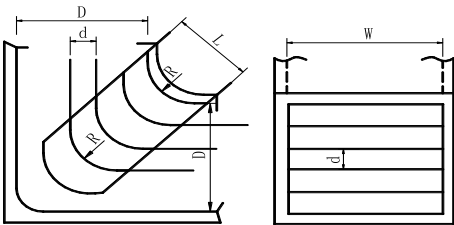


图 B.0.2-2 导流叶片尺寸设计图示

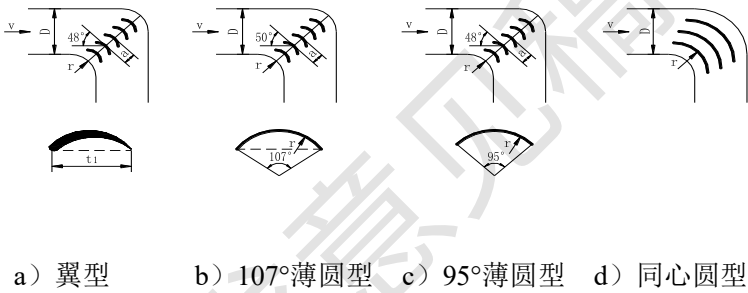


图 B.0.2-3 弯曲风道中的导流叶片

表 B.0.2-1 翼型导流叶片的剖面尺寸

代号	相对尺寸	代号	相对尺寸	图 示	
x_2	$0.519t_1$	y_2	$0.215t_1$		
x_2	$0.489t_1$	z_1	$0.139t_1$		
r_1	$0.663t_1$	z_2	$0.338t_1$		
r_2	$0.553t_1$	z_3	$0.268t_1$		
y_1	$0.463t_1$	1	$0.033t_1$		

注：其弦长 t_1 可取 90° 圆弧的弦长，即 $t_1=\sqrt{2}r$ 。

导流叶片正常数目 n 可按式 (B.0.2-4) 计算：

$n=2.13\times(\frac{r}{D})^{-1}-1$ (B.0.2-4)

导流叶片最少数目 n_{min} 可按式 (B.0.2-5) 计算：

$n_{min}=0.9\times(\frac{r}{D})^{-1}$ (B.0.2-5)

导流叶片减少数目 n' 可按式 (B.0.2-6) 计算:

$$n' = 1.4 \times \left(\frac{r}{D}\right)^{-1} \quad (\text{B.0.2-6})$$

若减少叶片数目, 可从靠近弯曲管外壁的叶片开始, 依次取掉。

4 带导流叶片的弯曲风道的损失系数, 可按表 B.0.2-2~表 B.0.2-4 取值, 必要时可进行模型试验确定损失系数值。

表 B.0.2-2 带翼型导流叶片矩形弯曲风道压力损失系数 ζ_b ($\theta=90^\circ$)

叶片数目	r/D						
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
正常叶片数目	0.35	0.25	0.19	0.19	0.20	0.25	0.35
减少叶片数目	0.35	0.25	0.17	0.14	0.16	0.22	0.34
最少叶片数目	0.47	0.35	0.29	0.26	0.20	0.18	0.21

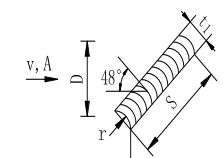
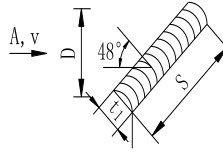
注: 若 $Re < 10^5$ 时, 表中数据应乘以修正系数 k_{Re} , k_{Re} 可按表 B.0.2-5 取值。

表 B.0.2-3 带薄圆型导流叶片矩形弯曲风道压力损失系数 ζ_b ($\theta=90^\circ$)

叶片数目	r/D						
	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
正常叶片数目	0.44	0.37	0.32	0.28	0.25	0.25	0.23
减少叶片数目	0.44	0.37	0.32	0.26	0.22	0.21	0.17
最少叶片数目	0.59	0.50	0.45	0.41	0.37	0.34	0.31

注: 若 $Re < 10^5$ 时, 表中数据应乘以修正系数 k_{Re} , k_{Re} 可按表 B.0.2-5 取值。

表 B.0.2-4 带翼型导流叶片圆形弯曲风道压力损失系数 ζ_b ($\theta=90^\circ$)

弯曲管特点	损失系数 ζ_b	图 示
平滑转弯, 正常叶片数目 $a = 3D/t_1 - 1$	$\zeta_b = 0.23k_{Re} + 1.28\lambda$	
平滑转弯, 减少叶片数目 $a = 2D/t_1$	$\zeta_b = 0.15k_{Re} + 1.28\lambda$	
转弯边缘削边, 正常叶片数目 $a = 3D/t_1 - 1$	$\zeta_b = 0.30k_{Re} + 1.28\lambda$	
转弯边缘削边, 减少叶片数目 $a = 2D/t_1$	$\zeta_b = 0.23k_{Re} + 1.28\lambda$	
转弯边缘削边, 减少叶片数目 (从外壁拿掉第一个和第二个叶片)	$\zeta_b = 0.21k_{Re} + 1.28\lambda$	

注: 损失系数计算式中 k_{Re} 是与雷诺数 Re 有关的参数, 可按表 B.0.2-5 取值。

表 B.0.2-5 修正系数 k_{Re}

$Re \times 10^{-5}$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.4	2.0	3.0	> 6.0
k_{Re}	2.10	1.80	1.60	1.50	1.35	1.23	1.12	1.0	0.9	0.8

5 作为一种特殊的断面型式，当隧道吊顶风道（半圆锥体形）上设置导流叶片时，其压力损失系数可按图 B.0.2-4 确定。

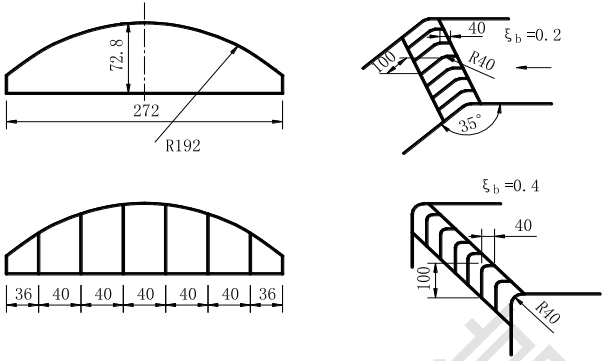


图 B.0.2-4 吊顶风道弯曲损失系数

附录 C 隧道与风道的其他压力损失系数

C.0.1 缩径风道与扩径风道压力损失系数可按下列规定取值：

1 突扩与突缩风道压力损失系数以风速相对较大者为标准来定义时，可按图 C.0.1-1 取值。

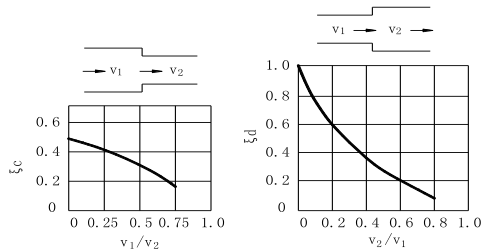


图 C.0.1-1 突变断面压力损失系数

2 渐扩与渐缩管道示意如图 C.0.1-2 和图 C.0.1-3 所示，其压力损失系数可按表 C.0.1-1、表 C.0.1-2 取值。

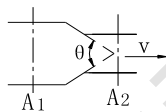
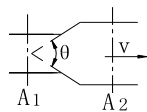


图 C.0.1-2 圆形渐变风道示意图

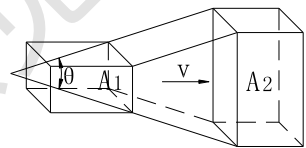


图 C.0.1-3 矩形渐扩风道示意图

表 C.0.1-1 圆形渐变风道压力损失系数

类型	ζ												
渐扩	$\xi = k \cdot (\frac{A_2}{A_1} - 1)^2$	θ	8°		10°		12°		15°		20°		25°
		k	0.14		0.16		0.22		0.30		0.42		0.62
渐缩	$\xi = k_1 \cdot k_2$	θ	10°		20°		40°		60°		80°		100°
		k_1	0.40		0.25		0.20		0.20		0.30		0.40
		A_2/A_1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
		k_2	0.40	0.38	0.36	0.34	0.30	0.27	0.20	0.16	0.10	0	

表 C.0.1-2 矩形渐扩风道压力损失系数

A_2/A_1	θ				
	10°	15°	20°	25°	30°
1.25	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07

续表 C.0.1-2 矩形渐扩风道压力损失系数

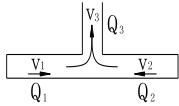
A_2/A_1	θ
-----------	----------

	10°	15°	20°	25°	30°
1.50	0.03	0.06	0.10	0.12	0.13
1.75	0.05	0.09	0.14	0.17	0.19
2.00	0.06	0.13	0.20	0.23	0.26
2.25	0.08	0.16	0.26	0.30	0.33
2.50	0.09	0.19	0.30	0.36	0.39

C.0.2 分流与合流段压力损失系数可按下列规定取值：

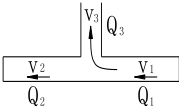
1 当为合流型时，其压力损失系数 ζ_{1-3} 、 ζ_{2-3} ，可按表 C.0.2-1 取值。

表 C.0.2-1 合流型风道的压力损失系数

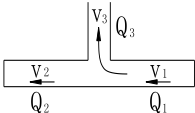
Q_1/Q_3	Q_2/Q_3	ζ_{1-3}	ζ_{2-3}	图 示
1.00	0	0.91	0.55	
0.95	0.05	0.84	0.50	
0.90	0.10	0.78	0.46	
0.85	0.15	0.71	0.42	
0.80	0.20	0.64	0.38	
0.75	0.25	0.58	0.35	
0.70	0.30	0.52	0.33	
0.65	0.35	0.46	0.31	
0.60	0.40	0.40	0.29	
0.55	0.45	0.34	0.29	
0.50	0.50	0.31	0.31	

2 当为分流型时，其压力损失系数 ζ_{1-2} 、 ζ_{1-3} ，可按表 C.0.2-2 取值。

表 C.0.2-2 分流型风道的压力损失系数

A_2/A_1	主流的分岔压力损失系数 ζ_{1-2}									
	Q_2/Q_1									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.5	0.72	0.48	0.28	0.13	0.05	0.04	0.09	0.18	0.31	0.50
1.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.13	0.22	0.30	0.38	0.48
图示										

续表 C.0.2-2 分流型风道的压力损失系数

A_3/A_1	支流的分岔压力损失系数 ζ_{1-3}									
	Q_3/Q_1									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.25	0.55	0.50	0.60	0.85	1.20	1.80	3.10	4.35	6.00	9.00
1.0	0.67	0.55	0.46	0.37	0.32	0.29	0.29	0.30	0.37	0.48
图示										

C.0.3 入口、出口及其他局部阻力系数可按下列规定取值：

- 入口、出口及其他局部的压力损失计算，应以管道内的平均流速 v 作为计算基础。
- 入口局部阻力系数可按表 C.0.3-1 取值。

表 C.0.3-1 入口损失系数

形 状	ζ_e	图 示
直角锐缘	0.50~0.60	
圆缘、倒角	0.03~0.05	

3 出口局部阻力系数应根据不同型式确定取值：

- 直管出口（如图 C.0.3-1 所示）： $\zeta_{ex}=1.0$ ；
- 90°弯头出口（如图 C.0.3-1 所示）， ζ_{ex} 可按表 C.0.3-2、表 C.0.3-3 取值；
- 扩散型出口局部阻力系数可按图 C.0.3-2 取值。

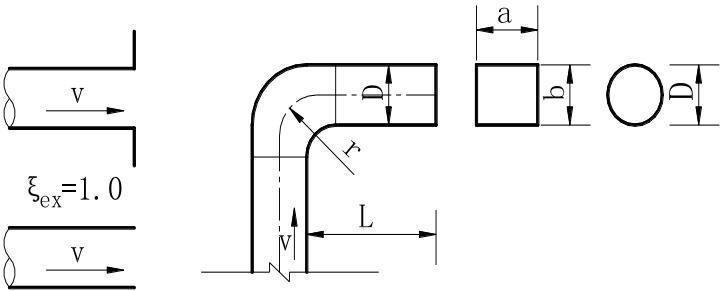


图 C.0.3-1 直管及 90°弯头出口图示

表 C.0.3-2 矩形风管 90°弯头出口局部阻力系数 ζ_{ex}

r/b	L/b
-------	-------

	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	12.0
0.50	3.0	3.1	3.2	3.0	2.7	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0
0.75	2.2	2.2	2.1	1.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5
1.00	1.8	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
1.50	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
2.50	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 C.0.3-3 圆形风管 90°弯头出口局部阻力系数 ζ_{ex}

r/D	0	0.28	0.5	1.0
ζ_e	3.0	1.9	1.6	1.4

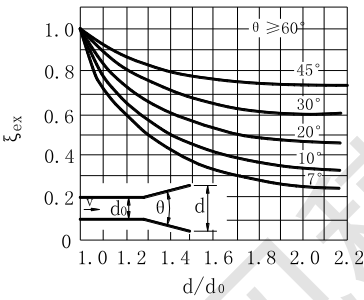


图 C.0.3-2 扩散型出口局部阻力系数

4 对于装有网格（图 C.0.3-3）的矩形或圆形风道压力损失系数可按表 C.0.3-4 取值，表中 n 可按式（C.0.3-1）计算。

$$n=A_0'/A_0 \tag{C.0.3-1}$$

式中： n ——网格的过风面积比；

A_0' ——网格的有效面积（mm²）；

A_0 ——风道断面积（mm²）。

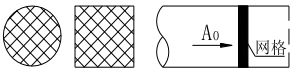


图 C.0.3-3 风道中网格图示

表 C.0.3-4 装有网格的风道压力损失系数 ζ_0

n	0.30	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.90	1.0
ζ_0	6.20	3.00	1.70	1.30	0.97	0.75	0.58	0.44	0.32	0.14	0

5 对于在风道出口、入口、变断面处等局部风道段，装有网格时，其局部阻力系数 ζ_0 应按式（C.0.3-2）进行修正。

$$\zeta_b = \zeta'_b + \zeta_0 \quad (\text{C.0.3-2})$$

式中： ζ_b ——安装网格时的风道局部综合阻力损失系数；

ζ'_b ——未安装网格时的风道局部损失系数；

ζ_0 ——网格的局部阻力系数，可按表 C.0.3-4 取值。

征求意见稿

附录 D 流体力学中常用单位及单位换算

D.0.1 常用单位

	量	名 称	代 号	
			中文	字母
基本单位	长度	米	米	m
	时间	秒	秒	s
	质量	千克	千克	kg
导出单位	力	牛顿	牛	N
	密度	千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³
	重度	牛顿每立方米	牛/米 ³	N/m ³

D.0.2 单位换算

1 力单位换算

单位	牛顿 (N)	千克力 (kgf)	磅力 (lbf)	达因 (dyn)
牛顿 (N)	1	0.102	0.225	10 ⁵
千克力 (kgf)	9.807	1	2.21	9.8×10 ⁵
磅力 (lbf)	4.45	0.454	1	4.45×10 ⁵
达因 (dyn)	10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁶	2.25×10 ⁻⁶	1

2 质量单位换算

单位	吨 (t)	千克 (kg)	英吨 (UKton)	磅 (lb)
吨 (t)	1	1000	0.9842	2205
千克 (kg)	0.001	1	9.842×10 ⁻⁴	2.205
英吨 (UKton)	1.0161	1016.1	1	2240.5
磅 (lb)	4.535×10 ⁻⁴	0.454	4.463×10 ⁻⁴	1

3 功率单位换算

单位	瓦 (w)	千克力·米/秒 (kgf·m/s)	卡/秒 (cal/s)	马力 (PS)
瓦 (w)	1	9.807	0.2388	1.36×10 ⁻³
千克力·米/秒 (kg)	0.10197	1	0.0243	1.39×10 ⁻⁴
卡/秒 (cal/s)	4.187	41.058	1	5.69×10 ⁻³
马力 (PS)	735.5	7212.8	175.64	1

4 压力单位换算

单位	牛/米 ² (N/m ²) (Pa)	巴 (bar)	工程大气压 (at)	标准大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)	毫米水柱 (mmH ₂ O)
牛/米 ² (N/m ²) (Pa)	1	10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁵	9.87×10 ⁻⁶	7.5×10 ⁻³	0.102
巴 (bar)	10 ⁵	1	1.02	0.987	75	10200
工程大气压 (at)	98067	0.98	1	0.9678	735.6	10 ⁴
标准大气压 (atm)	101325	1.01325	1.033	1	760	10332
毫米汞柱 (mmHg)	133.32	133.32×10 ⁻⁵	1.36×10 ⁻³	1.32×10 ⁻³	1	13.6
毫米水柱 (mmH ₂ O)	9.807	9.807×10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	9.679×10 ⁻⁵	7.356×10 ⁻²	1

附录 E 测试火源设计

现场测试火源系统用于模拟真实火灾场景，产生同等规模的热烟气，主要包括燃烧装置、发烟装置和现场保护装置，其主体结构如图 E.1 所示。

燃烧装置由钢板焊接的若干燃烧盘组成，可以根据设计火灾场景动态调整燃烧盘数量、组成形式和摆放方式。通过向燃烧盘中加注燃料并点燃，可生成功率较为稳定，燃烧时长较长的油池火源。

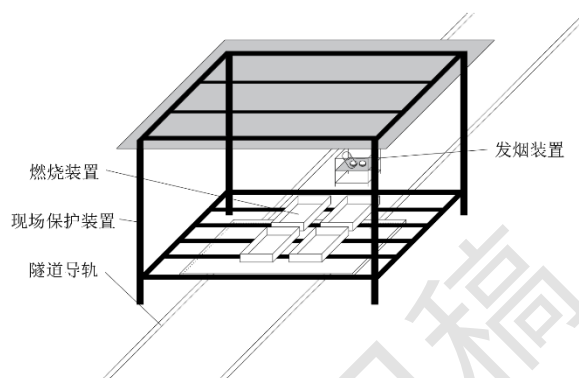


图 E.1 测试火源示意图

发烟装置由主体箱、导烟管组成。主体箱尺寸为 0.5 m（长） $\times$ 0.5 m（宽） $\times$ 0.6 m（高），骨架采用角钢焊接组成，其余组件由厚度 1mm 以上铁板焊接而成，并确保主体箱焊接处的密封性，主体箱底部留有 0.1 m 宽度的方形通风口。在主体箱正面顶部焊接有直径为 150 mm 的导烟管，其仰角推荐为 40°-45°，总长度 50-60 cm。在主体箱背面装配有 0.5 m（长） $\times$ 0.4 m（宽）的门，并在两侧留有把手。主体箱内部距离地面 0.2 m 处布置有钢丝网，阴燃的烟饼放置在钢丝网上，不断生成烟雾颗粒，并由主体箱前方的圆管注入火羽流中，充分混合后向外扩散，为烟气扩散过程提供标识。

现场保护装置由顶部保护罩、保护支架、机电设施防护及底部隔热板组成。顶部保护罩位于火源正上方，放置在保护支架上，由厚度为 5 mm 以上的铁板及厚度大于 20 mm 的防火板组合而成，用于保护火源顶部隧道结构及电气设备不受火焰的直接灼烧。保护支架由宽度 0.15 m 的方钢焊接而成，包含 4 根立柱，8 根横梁及 4 根底部支撑梁。立柱长度 2.5 m，横梁及支撑梁长度为 2 m。为方便拆卸，横梁、支撑梁与立柱之间采用螺栓连接。

附录 F 测试方法

1. 火源与通风模式设置

1.1 火源功率与火源位置设置

在公路隧道中开展火灾通风测试，要求火源规模不小于 2MW；对于断面尺寸较大的隧道，在确保测试不会损坏隧道以及场地内其他设施的原则下，火源规模可适当增加。

根据隧道结构、截面形状、断面尺寸以及实验现场的情况，在确保测试不会损坏隧道以及场地内其他设施的原则下，选取测试区段长度及宽度方向中间位置布置火源。

当公路隧道存在联络隧道、救援隧道、紧急停车带时，需在各区段内均设置火源位置。

1.2 通风模式设置

在不同火灾场景下，设置相应的通风排烟模式，通过现场烟流观测、参数采集分析等，验证通风排烟模式的可行性。

2. 测点布设

下文中用 H 表示隧道顶棚最高点到道床面的距离。

2.1 温度测点

在竖直方向上至少布置 7 个温度传感器，需满足以下要求：

- a) 最高处传感器位于顶棚下方 $0.01H$ 范围内。
- b) 前 4 个传感器间距为 $0.1 H$ 。
- c) 后 3 个传感器间距为 $0.2 H$ 。

在水平方向上，需符合以下要求

a) 在火源所在的隧道区段，行车方向两侧 $40 H$ 范围内，至少各设置 10 个温度纵向测点。

b) 当公路隧道存在联络隧道、救援隧道、紧急停车带时，与火源所在区段连接的其他隧道区段内至少设置 10 个温度纵向测点。

c) 温度纵向测点应优先设置于隧道中线位置。

2.2 风速测点

a) 在火源所在的隧道区段, 行车方向两侧 $4H$ 范围内, 至少各设置 1 个风速测点。

b) 当公路隧道存在联络隧道、救援隧道、紧急停车带时, 与火源所在区段连接的其他隧道区段内设置 2 个风速测点。

c) 风速测点位置离洞口的距离应不小于隧道断面当量直径的 10 倍, 宜设置于隧道侧壁且距侧壁 $20\text{cm}\sim 30\text{cm}$, 高度宜为 $2.7\text{ m}\sim 3.0\text{m}$ 。

2.3 能见度测点

a) 在火源所在的隧道区段, 行车方向两侧 $0\sim 4H$ 和 $4\sim 8H$ 长度范围内, 至少各设置 1 个能见度测点。

b) 当公路隧道存在联络隧道、救援隧道、紧急停车带时, 与火源所在区段连接的其他隧道区段内至少设置 2 个能见度测点。

c) 能见度测点宜设置在隧道侧壁, 于疏散路径的人眼高度处。

2.4 气体成分测点

a) 在火源所在的隧道区段, 行车方向两侧 $0\sim 4H$ 和 $4\sim 8H$ 长度范围内, 至少各设置 2 个气体成分测点。

b) 当公路隧道存在联络隧道、救援隧道、紧急停车带时, 与火源所在区段连接的其他隧道区段内至少设置 4 个气体成分测点。

c) 气体成分测点宜设置在隧道侧壁, 于疏散路径的人眼高度处。

2.5 热辐射计测点

竖直方向上, 在 $0.25H$ 、 $0.5H$ 和 $0.75H$ 高度处设置共 3 个热辐射计竖直测点。

水平方向上, 火源附近 $0.5H$ 长度范围内, 设置 1 个热辐射计纵向测点。

2.6 摄录设备测点

在火源附近 $2H$ 长度范围内, 至少设置 1 个摄录设备测点, 摄录范围应包含完整测试火源。

3. 测试步骤

3.1 前期调研

a) 实地踏勘测试区域, 确定测试区域结构、面积, 核实排烟系统是否符合测

试条件。

b) 根据踏勘情况制定实验方案，合理设计火源位置、火源规模和测点布置形式。

3.2 测试准备

a) 根据实验工况设计调整实验区域排烟系统工作模式，确保排烟系统达到设计参数。

b) 部署和调试火源系统及测试系统，确保数据采集稳定。

c) 设施保护，应采用防火石棉布包裹形式保护电缆、管道、照明灯具等设施，石棉布厚度应大于 3 mm，保护长度不应小于火源两侧 6 m。

d) 隧道地面及底部设备保护，火源底部应布设隔热防火板，防火板厚度应大于 20 mm，保护区域长度不应小于火源两侧 6 m。

3.3 测试开展

a) 应采用点火工具引燃火源。

b) 点火人员距离燃烧盘边缘水平距离不应小于 1.5 m。

c) 点燃火源时，应同步点燃发烟装置内的烟饼，并保证实验过程中示踪烟气生成过程平稳、连续且能够完整标识热烟层轮廓。

d) 火源熄灭后应保持数据采集状态，直至测试区域各参数恢复至初始状态，烟气全部排空后方可进行下一组测试。

3.4 测试区域恢复

回收全部实验设备，整理分类并确认实验现场无可燃物遗留后，方可离开测试区域。

3.5 安全要求

a) 人员在进入实验现场前应穿戴防尘口罩、工作手套、反光背心及安全鞋。在施工未完成区域开展实验时，还应佩戴安全帽及其他施工现场要求的劳动保护装备。实验中人员应与火源保持安全距离。

b) 现场应配备专职灭火人员及相应灭火设备，并由专人看守火源区域并监督测试过程。

c) 燃料及发烟材料应储存在不受火源热辐射影响的区域，并由专人看守。

d) 当出现现场保护装置失效、火源上方顶棚温度超过安全限值、溢流起火

等事故时，应采用合适的灭火器快速灭火，然后向燃料盘内注水冷却，减少燃料蒸发。

e) 燃料加注应在完成全部测试准备后进行。燃料在燃料盘内放置时间不宜超过 3 min，以免燃料蒸发引起爆炸。

f) 现场应配备专人监测温度、气体组分浓度测试结果，当发现温度或气体组分浓度超过人员耐受极限时，应采用合适的灭火器快速灭火，然后向燃料盘内注水冷却，减少燃料蒸发。

征求意见稿

本细则用词用语说明

1 本细则执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本细则的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。
- 3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本细则第×章的有关规定”、“应符合本细则第×.×节的有关规定”、“应符合本细则第×.×.×条的有关规定”或“应按本细则第×.×.×条的有关规定执行”。