

JTJ

中华人民共和国行业标准

JTJ 026.1—1999

公路隧道通风照明设计规范

Specifications for Design of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel

2000—01—07 发布

2000—06—01 实施

中华人民共和国交通部发布

统一书号：15114 · 0397
定 价：16.00 元

中华人民共和国行业标准

公路隧道通风照明设计规范

**Specifications for Design of Ventilation and Lighting
of Highway Tunnel**

JTJ 026.1—1999

主编部门：交通部重庆公路科学研究所

批准部门：中华人民共和国交通部

施行日期：2000 年 6 月 1 日

人民交通出版社

中华人民共和国行业标准
公路隧道通风照明设计规范

JTJ 026.1—1999

交通部重庆公路科学研究所 主编

版式设计:刘晓方 责任校对:尹 静 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

中国纺织出版社印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:5.5 字数 140 千字

2000 年 5 月第 1 版

2001 年 6 月 第 1 版 第 2 次印刷

印数:8001—14000 册 定价:16.00 元

统一书号:15114·0397

关于发布《公路隧道通风照明 设计规范》的通知

交公路发〔2000〕31号

各省、自治区交通厅，北京市公路局，上海市市政工程管理局，天津市公路局，重庆市交通局，部属公路设计、施工、科研、监督单位，公路院校：

现批准发布《公路隧道通风照明设计规范》(编号JTJ 026.1—1999)，作为行业标准，自2000年6月1日起施行。《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)中相关内容同时废止。

该规范由交通部重庆公路科学研究所主编并负责解释，由人民交通出版社出版。请各单位在实践中注意积累资料，总结经验，及时将发现的问题和修改意见函告交通部重庆公路科学研究所，以便修订时参考。

中华人民共和国交通部

2000年1月2日

前 言

随着我国公路建设的发展，公路隧道建设规模及其技术需求越来越大，而公路的长隧道和特长隧道的营运通风照明有其特殊的要求，需要制定专门的设计规范。为此，交通部以交公路发(94) 1265 号文下达了编制《公路隧道通风照明设计规范》的决定。根据该文通知，由交通部重庆公路科学研究所为主编单位，重庆交通学院为参编单位，并邀请有关技术专家，组成《公路隧道通风照明设计规范》编制组。

在编制过程中，编制组对全国已建和在建的公路隧道进行了较广泛的调查研究，搜集并分析了大量设计文件、工程报告、营运管理报告以及有关流体力学和光学的应用科研成果等技术资料。考虑到我国公路隧道技术起步较晚，其经验和基础性工作不足，因此在我国经验的基础上又采用或借鉴了国外公路隧道的成功经验和先进技术。

本规范既采纳了新技术、新方法，又兼顾到较传统技术的存在；既考虑到随着汽车工业的发展其尾排污染下降的必然性，又考虑到我国目前混合车辆排污仍然严重的实际情况。本规范的各项条文规定，均以可靠的技术依据和较成熟的经验为基础，对于一些目前我国没有实践经验或不够成熟的技术内容，本规范没有纳入或仅作出原则性的规定。

本规范主要由总则、通风、照明三部分构成，内容包括通风规划、通风调查、通风方式、污染空气稀释标准、需风量、通风计算、风机选型与布置、风道、风机房与竖井口扩散、通风运转控制、照明系统构成、洞外亮度与减光、隧道各照明段的长度与亮度、照明总均匀度与纵向均匀度、调光分级、光源与灯具、应急照明、灯具布置等。

本规范由交通部重庆公路科学研究所负责解释。为使本规范更能符合我国公路建设的实际情况，请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见及时函告交通部重庆公路科学研究所（地址：重庆市南岸区五公里，邮编：400067）。

主 编 单 位：交通部重庆公路科学研究所

参 编 单 位：重庆交通学院

主要起草人：蒋树屏 郑汉璋 刘 伟 王晓雯 涂 耘
林 勇

目 录

1	总则	1
2	符号	3
3	通风	7
3.1	调查	7
3.2	通风方式	7
3.3	污染空气的稀释标准	9
3.4	需风量	10
3.5	通风计算	14
3.6	风机的选型与布置	32
3.7	风道	34
3.8	风机房与通风井	37
3.9	火灾时的通风	37
3.10	通风监控	38
4	照明	41
4.1	一般规定	41
4.2	中间段照明	42
4.3	入口段照明	43
4.4	过渡段照明	46
4.5	出口段照明	46
4.6	调光	46
4.7	光源与灯具	47
4.8	接近段的减光	47
4.9	应急照明	48
4.10	洞外引道照明	48
4.11	照明计算	48

附录 A	隧道与风道的压力损失系数	52
附录 B	汽车正面投影面积与空气阻力系数	60
附录 C	路面简化亮度系数	64
附录 D	流体力学中常用单位及单位换算	67
附录 E	本规范用词说明	69
附件	公路隧道通风照明设计规范条文说明	71
1	总则	73
3	通风	76
3.1	调查	76
3.2	通风方式	76
3.3	污染空气的稀释标准	80
3.4	需风量	85
3.5	通风计算	91
	通风计算简例	110
	简例 1 射流风机纵向通风方式	110
	简例 2 集中送入纵向通风方式	114
	简例 3 竖井送排式通风方式	117
	简例 4 竖井送排式与射流风机组合通风方式	121
	简例 5 电吸尘机纵向通风方式	125
	简例 6 横向通风方式	127
3.6	风机的选型与布置	130
3.7	风道	133
3.8	风机房与通风井	141
3.9	火灾时的通风	146
3.10	通风监控	146
4	照明	152
4.1	一般规定	152
4.2	中间段照明	154
4.3	入口段照明	155
4.4	过渡段照明	159

4.5 出口段照明	161
4.7 光源与灯具	161
4.8 接近段的减光	161
4.11 照明计算.....	162
照明计算简例.....	164

1 总 则

1.0.1 为公路隧道通风与照明设计及营运管理提供技术准则，特制定本规范。

1.0.2 本规范适用于高速公路，一、二级公路的新建隧道和改建隧道，三、四级公路的新建隧道和改建隧道可参照执行。

1.0.3 本规范所采用的设计交通量为由远景设计年限年平均昼夜交通量换算的混合车高峰小时交通量；计算行车速度为洞内线形计算行车速度，一般不宜大于 100km/h。

1.0.4 公路隧道的通风与照明应纳入隧道建设总体设计周密考虑，以保证隧道内安全行车和经济营运为宗旨，选择适宜的通风方式和照明方式。

1.0.5 应根据公路等级、车道数、设计交通量、计算行车速度、车辆种类与排放量、隧道海拔高程、隧道所经路线及洞口附近的自然条件、隧道断面与平纵线形、洞内装饰情况等因素进行通风与照明设计。

1.0.6 通风设施宜按近、远期交通量的变化分期设置，但应统一规划，一次设计。隧道由双向交通变更为单向交通时，应充分考虑机械通风的衔接。

1.0.7 隧道通风设计可按下列顺序实施：

- 1 根据隧道长度和交通量，初步确定通风方式；
- 2 收集交通、气象、环境、地质、地形、地物等通风设计基础资料；
- 3 根据有关调查资料尤其是车辆情况，计算需风量；
- 4 从安全、技术、经济等方面进行通风方式比较，选择最佳通风方式；
- 5 计算通风压力、风量和风速等；

6 确定风机的规格和配置，并对风道、风机房等进行结构设计。

1.0.8 隧道照明设计可按下列顺序实施：

1 收集隧道设计有关资料，初勘现场自然环境；
2 初步判定或现场测定洞外亮度，制定洞外减光方案；
3 确定入口段、过渡段、中间段及出口段的亮度与长度指标；

4 选择光源与灯具，并确定灯具安装位置与角度；
5 根据路面材料与灯具光强分布表，计算各段亮度、均匀度；

6 洞口土建完工后，对洞外亮度进行验核，必要时修正照明设计。

1.0.9 公路隧道通风与照明设计应贯彻国家的技术经济政策，积极而慎重地采用新理论、新技术、新材料、新设备、新工艺，使通风与照明达到安全实用、质量可靠、经济合理、技术先进的要求。

1.0.10 通风与照明设计除应考虑正常交通工况外，还应考虑洞内发生火灾等工况。

1.0.11 隧道口或通风竖井出口的废气排放应符合环保的有关规定。

1.0.12 公路隧道通风与照明设计除应遵守本规范外，尚应符合国家和交通部现行的有关标准、规范。

2 符 号

2.0.1 通风中的主要符号

A_b ——送风道断面积

A_c ——汽车正面投影面积

A_e ——排风道断面积

A_j ——射流风机的出口面积

A_m ——汽车等效阻抗面积

A_{kW} ——理论功率

A_r ——隧道断面积

b ——下角码，表示送风道空间

C ——隧道气流浓度

C_n ——烟雾浓度

D_a ——轴流风机的叶轮直径

D_b ——送风道断面当量直径

D_c ——排风道断面当量直径

D_j ——射流风机的叶轮直径

D_r ——隧道断面当量直径

e ——下角码，表示排风道空间

F ——风机喷流推力

f_d ——车密度系数

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_e ——有效排风口高度
 H_0 ——排风口结构高度
 H ——排风上升高度
 K ——烟雾设计浓度
 K_b ——送风口升压动量系数
 K_e ——排风口升压动量系数
 L ——隧道长度
 L_a ——噪声级水平
 L_{sa} ——比噪声级
 N ——设计交通量（混合车辆）
 p_0 ——标准大气压
 Δp_b ——送风口升压力
 Δp_d ——风道压力损失
 Δp_c ——排风口升压力
 Δp_m ——自然风阻力
 Δp_j ——射流风机升压力
 Δp_r ——通风阻抗力
 Δp_1 ——交通通风力
 p_{tot} ——全风压力
 q_b ——单位长度送风量
 Q_b ——送风量
 Q_e ——排风量
 q_{CO} ——一氧化碳基准排放量
 Q_{CO} ——隧道全长一氧化碳排放量
 Q_{req} ——需风量
 Q_s ——短道风量
 Q_r ——隧道内设计风量
 q_{VI} ——烟雾基准排放量

Q_{VI} ——隧道全长烟雾排放量

r_l ——大型车比例

S_{kw} ——风机轴功率

T ——隧道夏季的设计气温

T_0 ——标准气温

v_b ——送风道（口）风速

v_e ——排风道（口）风速

v_j ——射流风机的出口速度

v_n ——自然风作用引起的洞内风速

v_r ——隧道设计风速

v_t ——计算行车速度

α ——交通通风力系数

β ——喷流方向与隧道轴向的夹角

γ ——空气容重

δ ——一氧化碳设计浓度

Δ ——平均壁面粗糙度

ζ_d ——各位置的形状损失系数

ζ_e ——隧道入口损失系数

η ——风机效率

η_{VI} ——烟雾净化率

λ ——壁面摩阻损失系数

ν ——运动粘滞系数

ξ_c ——汽车空气阻力系数

ρ ——空气密度

2.0.2 照明中的主要符号

b ——最小衬托长度

d ——适应距离

D_{ex} ——出口段长度

D_{th} ——入口段长度
 D_{tr} ——过渡段长度
 E_{av} ——路面平均水平照度
 h ——隧道洞口内净空高
 H ——灯具安装高度
 I_{cr} ——灯具的光强值
 $L_{20}(A)$ ——适应点亮度
 $L_{20}(S)$ ——洞外亮度
 L_{av} ——路面平均亮度
 L_{ex} ——出口段亮度
 L_{in} ——中间基本亮度
 L_{max} ——路面最大亮度
 L_{min} ——路面最低亮度
 L_{th} ——入口段亮度
 L_{tr} ——过渡段亮度
 M ——灯具养护系数
 S ——灯具间距
 U_0 ——路面亮度总均匀度
 U_1 ——车道中线上亮度纵向均匀度
 W ——隧道路面宽度
 η ——灯具利用系数
 ρ ——反射率
 Φ ——灯具额定光通量

3 通 风

3.1 调 查

3.1.1 通风规划和设计时，应对交通量、气象及环境进行调查。

1 交通量调查的内容包括车辆类型、数量及其历时变化等，应了解汽车发动机的种类和汽车实载情况。

2 气象调查的内容包括隧道进出口气压、风向、风速、温度、湿度、冻害及相关地区的气象资料，并根据需要作实地观测。

3 环境调查包括地形、地物、地质、洞口及竖（斜）井口附近的建筑物分布，居民分布，重要设施等。

3.1.2 调查的同时还应对通风噪声、废气排放及竖（斜）井施工可能对周围环境和居民生活造成的影响进行初步评价。

3.2 通 风 方 式

3.2.1 可按下列方法初步判定是否设置机械通风：

1 双向交通隧道，当符合式（3.2.1-1）的条件时，宜设置机械通风。

$$L \cdot N \geq 6 \times 10^5 \quad (3.2.1-1)$$

式中 L ——隧道长度（m）；

N ——设计交通量（辆/h）。

2 单向交通隧道，当符合式（3.2.1-2）的条件时，宜设置机械通风。

$$L \cdot N \geq 2 \times 10^6 \quad (3.2.1-2)$$

3.2.2 通风方式的选择

1 机械通风方式可分为纵向式、半横向式、全横向式以及

在这三种基本方式基础上的组合通风方式。机械通风方式的种类见表 3.2.2。

表 3.2.2 机械通风方式的种类

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)射流风机式 2)集中送入式 3)竖(斜)井送排风式 4)竖(斜)井排出式 5)静电吸尘式	1)送风半横向式 2)排风半横向式	—	—

2 应充分考虑各通风方式的特点，并根据隧道长度、平曲线半径、纵坡、海拔高程、交通条件、气象条件、环境条件，经综合比较后，选择较为安全、经济和营运维护方便的通风方式。

3 选择机械通风方式考虑下列因素：

- 1) 交通条件；
- 2) 地形、地物、地质条件；
- 3) 通风要求；
- 4) 环境保护要求；
- 5) 火灾时的通风控制；
- 6) 维护与管理水平；
- 7) 分期实施的可能性；
- 8) 工程造价、营运电力费、维护管理费。

3.2.3 隧道通风要求：

1 单向交通的隧道设计风速不宜大于 10m/s，特殊情况可取 12m/s；双向交通的隧道设计风速不应大于 8m/s；人车混合通行的隧道设计风速不应大于 7m/s。

2 风机产生的噪声及隧道中废气的集中排放均应符合环保的有关规定。

3 确定的通风方式在交通条件等发生变化时，应具有较高的稳定性，并便于防灾时的气流组织。

4 隧道内营运通风的主流方向不应频繁变化。

3.3 污染空气的稀释标准

3.3.1 隧道通风主要应对一氧化碳 (CO)、烟雾和异味进行稀释。

3.3.2 CO 设计浓度

1 采用全横向通风方式与半横向通风方式时, CO 设计浓度可按表 3.3.2-1 取值; 采用纵向通风方式时, CO 设计浓度可按表 3.3.2-1 所列各值提高 50ppm 取值。

表 3.3.2-1 CO 设计浓度 δ

隧道长度 (m)	≤ 1000	≥ 3000
δ (ppm)	250	200

注: 隧道长度为 1000m~3000m 时, 可按插入法取值。

2 交通阻滞 (隧道内各车道均以怠速行驶, 平均车速为 10km/h) 时, 阻滞段的平均 CO 设计浓度可取 300ppm, 经历时间不超过 20min。阻滞段的计算长度不宜大于 1km。

3 人车混合通行的隧道, 长度不宜超过 2000m, 其 CO 设计浓度应按表 3.3.2-2 取值。

表 3.3.2-2 CO 设计浓度 δ

隧道长度 (m)	≤ 1000	≥ 2000
δ (ppm)	150	100

注: 隧道长度为 1000m~2000m 时, 可按插入法取值。

3.3.3 烟雾设计浓度

1 采用钠灯光源时, 烟雾设计浓度应按表 3.3.3 取值; 采用荧灯光源时, 烟雾设计浓度应提高一级。

表 3.3.3 烟雾设计浓度 K

计算行车速度 (km/h)	100	80	60	40
K (m^{-1})	0.0065	0.0070	0.0075	0.0090

2 当烟雾浓度达到 0.012m^{-1} 时, 应按采取交通管制等措施考虑。

3 隧道内进行养护维修时, 应按现场实际烟雾浓度不大于 0.0035m^{-1} 考虑。

3.4 需风量

3.4.1 一般规定

1 通风设计中, 车辆有害气体的排放量以及与之对应的交通量, 都应有明确的远景设计年限, 两者应相匹配。计算近期的需风量及交通通风力时应采用相应年份的交通量。

2 确定需风量时, 应对计算行车速度以下各工况车速按 20km/h 为一档分别进行计算, 并考虑交通阻滞状态, 取其较大者作为设计需风量。

3 在双向交通隧道中, 上坡较长方向的交通量按设计交通量的 60% 进行计算。

3.4.2 CO 排放量应按式 (3.4.2) 计算:

$$Q_{\text{CO}} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{\text{CO}} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_{iv} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (3.4.2)$$

式中 Q_{CO} ——隧道全长 CO 排放量 (m^3/s);

q_{CO} ——CO 基准排放量 ($\text{m}^3/\text{辆} \cdot \text{km}$), 可取 $0.01 \text{ m}^3/\text{辆} \cdot \text{km}$;

f_a ——考虑 CO 的车况系数, 按表 3.4.2-1 取值;

f_d ——车密度系数, 按表 3.4.2-2 取值;

f_h ——考虑 CO 的海拔高度系数, 按图 3.4.2 取值;

f_m ——考虑 CO 的车型系数, 按表 3.4.2-3 取值;

f_{iv} ——考虑 CO 的纵坡—车速系数, 按表 3.4.2-4 取值;

n ——车型类别数;

N_m ——相应车型的设计交通量 (辆/h)。

表 3.4.2-1 考虑 CO 的车况系数 f_v

适用道路等级	f_v
高速公路、一级公路	1.0
二、三、四级公路	1.1—1.2

表 3.4.2-2 车密度系数 f_d

工况车速 (km/h)	100	80	70	60	50	40	30	20	10
f_d	0.6	0.75	0.85	1	1.2	1.5	2	3	6

表 3.4.2-3 考虑 CO 的车型系数 f_m

车型	各种 柴油车	汽 油 车			
		小客车	旅行车、轻型货车	中型货车	大型客车、拖挂车
f_m	1.0	1.0	2.5	5.0	7.0

表 3.4.2-4 考虑 CO 的纵坡—车速系数 f_{iv}

i (%)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
v_t (km/h)									
100	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4
80	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2
70	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2
60	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
50	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
40	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
30	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
20	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
10	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

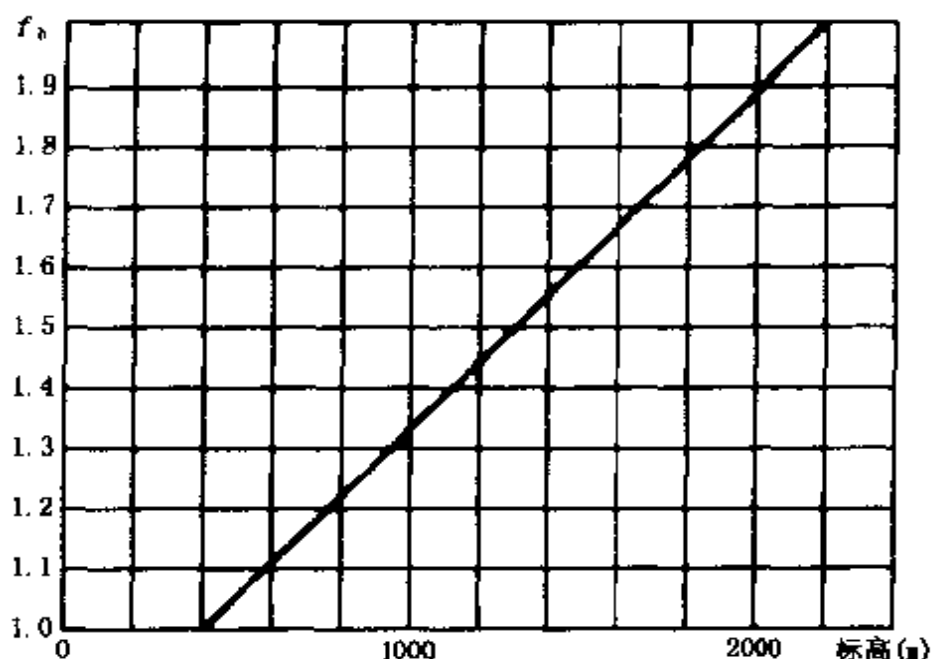


图 3.4.2 考虑 CO 的海拔高度系数 f_h

注：当取值超出图示范围时，可作直线延伸。

3.4.3 稀释 CO 的需风量应按式 (3.4.3) 计算：

$$Q_{\text{req(CO)}} = \frac{Q_{\text{CO}}}{\delta} \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0} \times 10^6 \quad (3.4.3)$$

式中 $Q_{\text{req(CO)}}$ ——隧道全长稀释 CO 的需风量 (m^3/s)；

p_0 ——标准大气压 (kN/m^2)，取 $101.325\text{kN}/\text{m}^2$ ；

p ——隧址设计气压 (kN/m^2)；

T_0 ——标准气温 (K)，取 273K；

T ——隧道夏季的设计气温 (K)。

3.4.4 烟雾排放量应按式 (3.4.4) 计算：

$$Q_{\text{VI}} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{\text{VI}} \cdot f_{\text{a(VI)}} \cdot f_{\text{d}} \cdot f_{\text{h(VI)}} \cdot f_{\text{w(VI)}} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_b} (N_m \cdot f_{\text{m(VI)}}) \quad (3.4.4)$$

式中 Q_{VI} ——隧道全长烟雾排放量 (m^2/s)；

q_{VI} ——烟雾基准排放量 ($\text{m}^2/\text{辆} \cdot \text{km}$)，可取 $2.5 \text{ m}^2/\text{辆} \cdot \text{km}$ ；

$f_{\text{a(VI)}}$ ——考虑烟雾的车况系数，按表 3.4.4-1 取值；

$f_{h(VI)}$ ——考虑烟雾的海拔高度系数，按图 3.4.4 取值；
 $f_{iv(VI)}$ ——考虑烟雾的纵坡—车速系数，按表 3.4.4-2 取值；
 $f_{m(VI)}$ ——考虑烟雾的车型系数，按表 3.4.4-3 取值；
 n_D ——柴油车车型类别数。

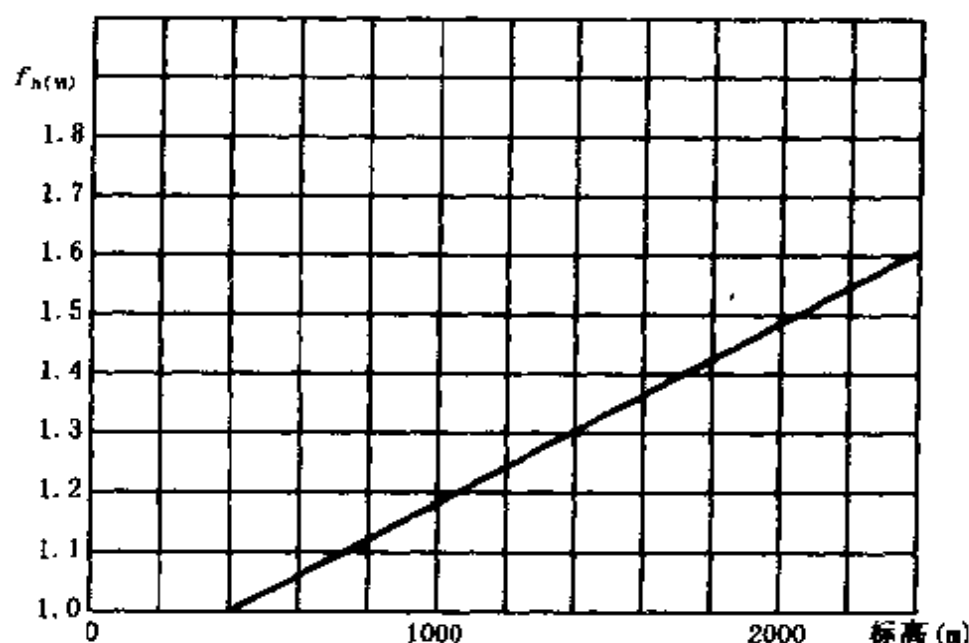


图 3.4.4 考虑烟雾的海拔高度系数 $f_{h(VI)}$

注：当取值超出图示范围时，可作直线延伸。

表 3.4.4-1 考虑烟雾的车况系数 $f_a(VI)$

适用道路等级	$f_a(VI)$
高速公路、一级公路	1.0
二、三、四级公路	1.2~1.5

表 3.4.4-2 考虑烟雾的纵坡—车速系数 $f_{iv(VI)}$

i (%)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
v_c (km/h)									
80	0.3	0.4	0.55	0.8	1.3	2.6	-	-	-
70	0.3	0.4	0.55	0.8	1.1	1.8	3.1	-	-
60	0.3	0.4	0.55	0.75	1.0	1.45	2.2	-	-
50	0.3	0.4	0.55	0.75	1.0	1.45	2.2	-	-
40	0.3	0.4	0.55	0.7	0.85	1.1	1.45	2.2	-
30	0.3	0.4	0.5	0.6	0.72	0.9	1.1	1.45	2.0
10~20	0.3	0.36	0.4	0.5	0.6	0.72	0.85	1.03	1.25

表 3.4.4-3 考虑烟雾的車型系数 $f_{m(VI)}$

柴 油 車			
輕型貨車	中型貨車	重型貨車、大型客車、拖掛車	集裝箱車
0.4	1.0	1.5	3~4

3.4.5 稀釋烟雾的需风量应按式 (3.4.5) 计算:

$$Q_{\text{req}(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} \quad (3.4.5)$$

式中 $Q_{\text{req}(VI)}$ ——隧道全长稀釋烟雾的需风量 (m^3/s);

K ——烟雾设计浓度 (m^{-1}), 按表 3.3.3 取值。

3.4.6 稀釋空气中异味的需风量

隧道空间不间断换气频率, 不宜低于每小时 5 次; 交通量较小或特长隧道, 可采用每小时 3~4 次。

采用纵向通风的隧道, 隧道内换气风速不应低于 2.5m/s 。

3.5 通 风 计 算

3.5.1 一般规定

1 在所设计的通风系统中, 风机及交通通风力提供的风压和风量必须满足需风量的要求。

2 应根据通风计划、初步设计、技术设计和施工图设计等不同阶段, 进行粗略或详细的通风计算。

3 在隧道通风计算中可把空气作为不可压缩流体对待; 隧道内的空气流可作为不随时间变化的恒定流处理, 且视汽车行驶也为恒定流。在标准大气压状态下的空气物理量可按表 3.5.1-1 取值。

表 3.5.1-1 空 气 物 理 量

容重 γ (kN/m^3)	11.77
密度 ρ (kg/m^3)	1.20
运动粘滞系数 ν (m^2/s)	1.52×10^{-5}

4 隧道壁面摩阻损失系数及入口损失系数应根据隧道或风

道的断面当量直径和壁面糙率以及风道结构形状等取值, 当为混凝土壁面时常用损失系数可按表 3.5.1-2 取值。其他材料、弯道及变断面摩阻损失系数可按附录 A 计算或取值。

表 3.5.1-2 损 失 系 数

隧道壁面摩阻损失系数 λ_r	0.02
主风道 (含竖井) 壁面摩阻损失系数 λ_b 、 λ_e	0.022
连接风道壁面摩阻损失系数 λ_d	0.025
隧道入口损失系数 ζ_e	0.6

5 通风设计中应尽可能减少风道断面积变化和转弯次数, 损失系数的取值应充分考虑隧道和风道壁面粗糙程度、结构形状。

6 交通通风力必须针对具体工程的通风系统进行分析。交通通风力在交通阻塞或双向交通情况下宜作为阻力考虑; 在单向交通情况下宜作为推力考虑。

7 应针对计算行车速度以下各工况车速分别计算汽车交通通风力。

3.5.2 自然风阻力

1 在通风计算中, 一般可将自然通风力作为阻力考虑。

2 自然风阻力应按式 (3.5.2-1) 计算:

$$\Delta p_m = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \quad (3.5.2-1)$$

式中 Δp_m ——自然风阻力 (N/m^2);

v_n ——自然风作用引起的洞内风速 (m/s), 可取 2m/s ~ 3m/s ;

ζ_e ——隧道入口损失系数, 可按表 3.5.1-2 取值;

λ_r ——隧道壁面摩阻损失系数, 可按表 3.5.1-2 取值;

ρ ——空气密度 (kg/m^3), 按表 3.5.1-1 取值;

D_r ——隧道断面当量直径 (m)。

隧道断面当量直径按下式计算:

$$D_r = \frac{4 \times A_r}{\text{隧道断面周长}} \quad (3.5.2-2)$$

式中 A_r ——隧道净空断面积 (m^2)。

3.5.3 交通通风力可按式 (3.5.3-1) 计算:

$$\Delta p_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_+ \cdot (v_{t(+)} - v_r)^2 - \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_- \cdot (v_{t(-)} + v_r)^2 \quad (3.5.3-1)$$

式中 Δp_t ——交通通风力 (N/m^2);

n_+ ——隧道内与 v_r 同向的车辆数 (辆), $n_+ =$

$$\frac{N_+ \cdot L}{3600 \times v_{t(+)}};$$

n_- ——隧道内与 v_r 反向的车辆数 (辆), $n_- =$

$$\frac{N_- \cdot L}{3600 \times v_{t(-)}};$$

v_r ——隧道设计风速 (m/s), 一般情况 $v_r = \frac{Q_{\text{ren}}}{A_r}$;

$v_{t(+)}$ ——与 v_r 同向的各工况车速 (m/s);

$v_{t(-)}$ ——与 v_r 反向的各工况车速 (m/s);

A_m ——汽车等效阻抗面积 (m^2)。

汽车等效阻抗面积可按式 (3.5.3-2) 计算:

$$A_m = (1 - r_l) \cdot A_{cs} \cdot \xi_{cs} + r_l \cdot A_{cl} \cdot \xi_{cl} \quad (3.5.3-2)$$

式中 A_{cs} ——小型车正面投影面积 (m^2), 可取 2.13m^2 , 或参照附录 B 取值;

ξ_{cs} ——小型车空气阻力系数, 可取 0.5, 或参照附录 B 取值;

A_{cl} ——大型车正面投影面积 (m^2), 可取 5.37m^2 , 或参照附录 B 取值;

ξ_{cl} ——大型车空气阻力系数, 可取 1.0, 或参照附录 B 取值;

r_l ——大型车比例。

3.5.4 通风阻力可按式 (3.5.4) 计算:

$$\Delta p_r = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \quad (3.5.4)$$

式中 Δp_r ——通风阻力 (N/m^2)。

3.5.5 射流风机通风方式

1 通风压力模式

射流风机的通风方式模式如图 3.5.5 所示。

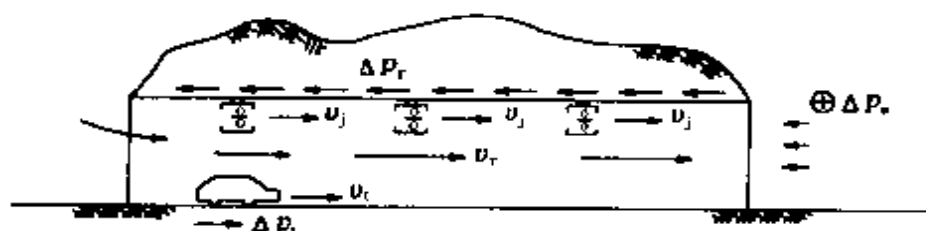


图 3.5.5 射流风机通风方式模式图

2 隧道内压力平衡应满足式 (3.5.5-1):

$$\Delta p_r + \Delta p_m = \Delta p_t + \sum \Delta p_j \quad (3.5.5-1)$$

式中 $\sum \Delta p_j$ ——射流风机群总升压力 (N/m^2)。

3 射流风机所需台数计算

在满足隧道设计风速 v_r 的条件下, 射流风机台数可按式 (3.5.5-2) 计算:

$$i = \frac{\Delta p_r + \Delta p_m - \Delta p_t}{\Delta p_j} \quad (3.5.5-2)$$

式中 i ——所需射流风机的台数 (台);

Δp_j ——每台射流风机升压力 (N/m^2)。

每台射流风机升压力应按式 (3.5.5-3) 计算:

$$\Delta p_j = \rho \cdot v_j^2 \cdot \frac{A_j}{A_r} \cdot \left(1 - \frac{v_r}{v_j} \right) \cdot \eta \quad (3.5.5-3)$$

式中 v_j ——射流风机的出口风速 (m/s);

A_j ——射流风机的出口面积 (m^2);

η ——射流风机位置摩阻损失折减系数, 可按表 3.5.5 取值。

表 3.5.5 射流风机位置摩阻损失折减系数 η

Z/D_1	1.5	1.0	0.7	图示
η	0.91	0.87	0.85	

3.5.6 集中送入通风方式

1 集中送入通风方式模式如图 3.5.6 所示。

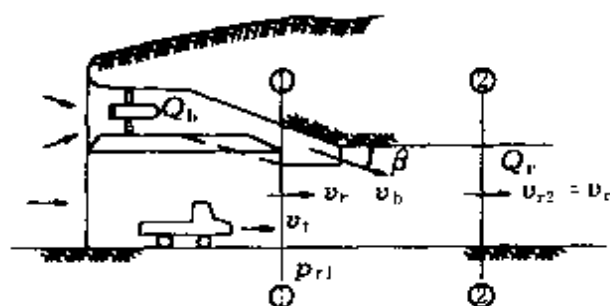


图 3.5.6 集中送入通风方式模式图

2 送风机送风口升压力，可按式 (3.5.6-1) 计算：

$$\Delta p_b = 2 \times \frac{Q_b}{Q_r} \cdot \left(\frac{K_b \cdot v_b \cdot \cos \beta}{v_r} - 2 + \frac{Q_b}{Q_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \quad (3.5.6-1)$$

式中 Δp_b ——送风机送风口升压力 (N/m^2)；

Q_r ——隧道设计风量，一般情况 $Q_r = Q_{req}$ (m^3/s)；

Q_b ——送风口喷出风量，即送风机风量 (m^3/s)；

v_b ——送风口喷出风速，一般取 $20m/s \sim 30m/s$ ；

β ——喷流方向与隧道轴向的夹角；

K_b ——送风口升压动量系数。

3 送风口面积可按式 (3.5.6-2) 计算：

$$A_b = \frac{Q_b}{v_b} \quad (3.5.6-2)$$

式中 A_b ——送风口面积 (m^2)，当为双车道隧道时不宜大于

12m²。

4 送风机风量、全风压

1) 送风机风量可按式 (3.5.6-3) 计算:

$$Q_b = \frac{Q_r}{2\rho \cdot v_r^2} \cdot \left(\sqrt{a^2 \rho \cdot v_r^2 + 4\Delta p_b} - a \right) \quad (3.5.6-3)$$

式中 a ——系数, $a = \frac{K_b \cdot v_l \cdot \cos\beta}{v_r} - 2$ 。

2) 送风机所需全风压可按式 (3.5.6-4) 计算:

$$p_{\text{tot}} = \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_b^2 + \Delta p_d \right) \times 1.1 \quad (3.5.6-4)$$

式中 p_{tot} ——送风机所需全风压 (N/m²);

Δp_d ——风道、送风口等部位的总压力损失 (N/m²)。

5 集中送入通风方式应符合下列规定:

1) 应充分比选送风机房结构形式和风道连接方式, 减少压力损失; 对送风口结构形式亦应作比选, 确定经济、合理的风口形式。

2) 应结合结构工程尽可能使送风口喷流方向与隧道轴向一致, 并在弯道部位设置导流装置。

3) 该通风方式可与其他通风方式组合采用, 宜用于单向交通隧道。

3.5.7 竖井排出通风方式

1 压力模式

1) 当应用于双向交通隧道时, 竖井宜设置在隧道轴向中央附近。合流型竖井排出式通风压力模式可用图 3.5.7-1 表示。竖井底部合流后的全压力可用式 (3.5.7-1) 计算:

$$p_{\text{tot3}} = \Delta p_{g1} + \Delta p_{t1} - \left(\zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_1}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 - \zeta_{1-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_3^2 \quad (3.5.7-1)$$

$$p_{\text{tot3}} = \Delta p_{g2} + \Delta p_{t2} - \left(\zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_2}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 - \zeta_{2-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_3^2 \quad (3.5.7-1a)$$

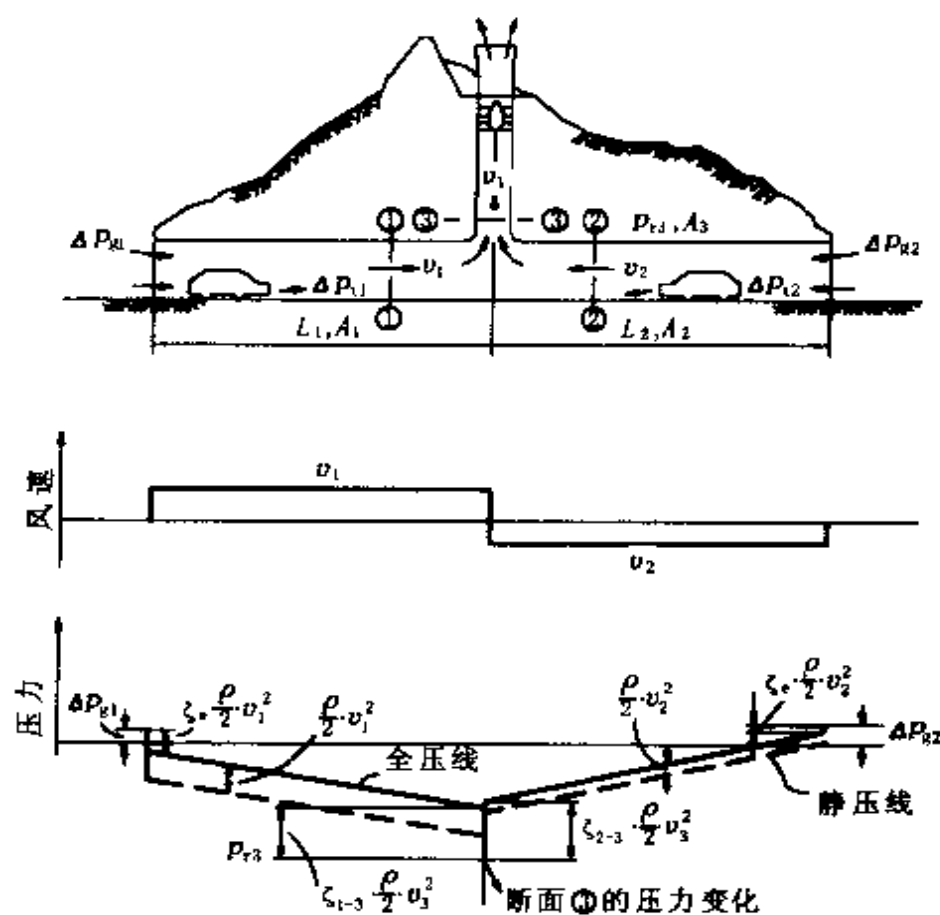


图 3.5.7-1 合流型竖井排出式通风压力模式

- 式中 p_{tot3} ——竖井底部合流全压力 (N/m^2);
- Δp_{g1} ——第 I 区段隧道口与竖井出口之间的气象压力差 (N/m^2), 自然风朝隧道方向时为正;
- L_1 ——第 I 区段长度 (m);
- ζ_{1-3} ——以竖井内风速为基准第 I 区段的损失系数;
- Δp_{g2} ——第 II 区段隧道口与竖井出口之间的气象压力差 (N/m^2), 自然风朝隧道方向时为正;
- L_2 ——第 II 区段长度 (m);
- ζ_{2-3} ——以竖井内风速为基准第 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 ——竖井内③—③断面平均风速 (m/s)。

I 区段交通通风力可按式 (3.5.7-2) 计算:

$$\Delta p_{t1} = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot [n_{+1} \cdot (v_t - v_1)^2 - n_{-1} \cdot (v_t + v_1)^2] \quad (3.5.7-2)$$

式中 Δp_{t1} ——I 区段的交通通风力 (N/m^2)

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)。

II 区段交通通风力可按式 (3.5.7-3) 计算:

$$\Delta p_{t2} = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot [n_{+2} \cdot (v_1 - v_2)^2 - n_{-2} \cdot (v_1 + v_2)^2] \quad (3.5.7-3)$$

式中 Δp_{t2} ——II 区段的交通通风力 (N/m^2);

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) 当应用于单向交通隧道时, 竖井宜设置在隧道出口侧的位置, 其通风系统的气流形态可分为合流型和分流型两种, 分流型的竖井排出式通风压力模式如图 3.5.7-2 所示。

隧道第 I 区段末端的全压力 (即分叉前的全压力) 可按式 (3.5.7-4) 计算:

$$p_{tot1} = \Delta p_{g1} + \Delta p_{t1} - \left(\zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_1}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \quad (3.5.7-4)$$

式中 p_{tot1} ——第 I 区段末端的全压力 (N/m^2)。

隧道第 II 区段始端的全压力 (分叉后的全压力) 可按式 (3.5.7-5) 计算:

$$p_{tot2} = \Delta p_{tot1} - \zeta_{1-2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \quad (3.5.7-5)$$

式中 $p_{\text{tot}2}$ ——第 II 区段始端的全压力 (N/m^2);
 ζ_{1-2} ——分流型风道主流分叉损失系数, 可按附录 A.0.4 取值。

隧道第 II 区段末端(出口)的全压力可按式(3.5.7-6)计算:

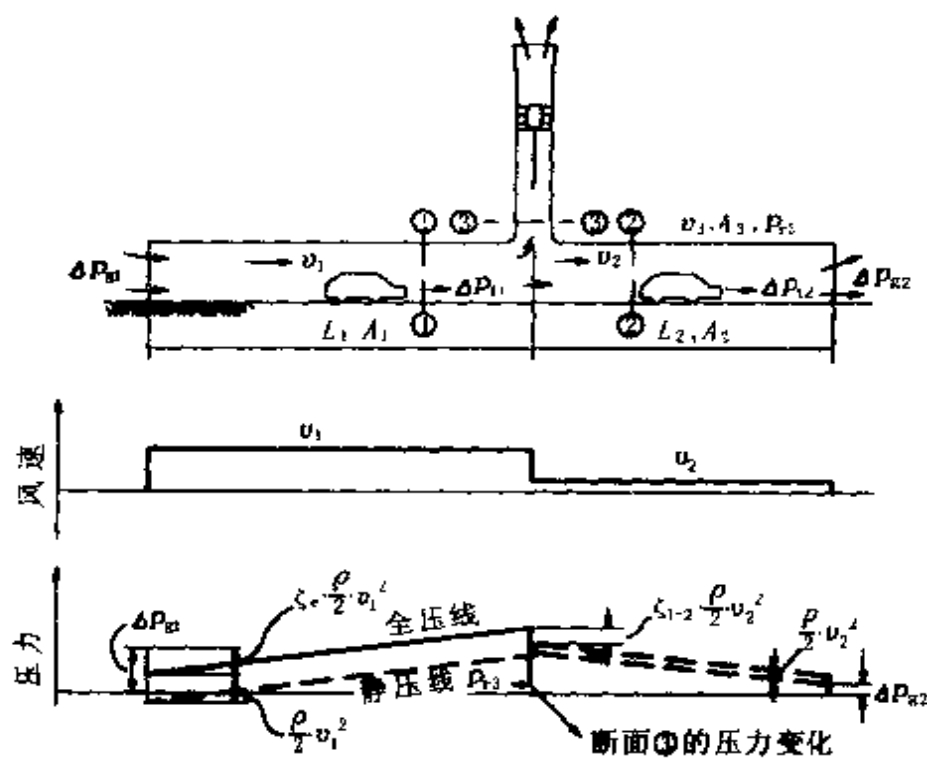


图 3.5.7-2 分流型竖井排出式通风压力模式

$$\Delta p_{g2} + \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 = p_{\text{tot}2} - \lambda_r \cdot \frac{L_2}{D_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 + \Delta p_{g2} \quad (3.5.7-6)$$

竖井底部的全压力可按式 (3.5.7-7) 计算:

$$p_{\text{tot}3} = p_{\text{tot}1} - \zeta_{1-3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \quad (3.5.7-7)$$

式中 $p_{\text{tot}3}$ ——竖井底部的全压力 (N/m^2);
 ζ_{1-3} ——分流型风道支流分叉损失系数, 可按本规范附录 A.0.4 取值。

2 排风机设计风压

排风机的设计风压可按式 (3.5.7-8) 计算:

$$p_{\text{tot}} = (p_{\text{tot}3} + \Delta p_d) \times 1.1 \quad (3.5.7-8)$$

式中 p_{tot} ——排风机设计风压 (N/m^2);
 Δp_d ——竖井及连接风道总压力损失 (N/m^2)。

3.5.8 竖井送排式纵向通风方式

1 压力模式

竖井送排式通风模式如图 3.5.8-1 所示。采用该通风方式时,排风口与送风口之间可能产生短道流动,设计中应考虑尽量减少这种短道流动,以利于空气交换。

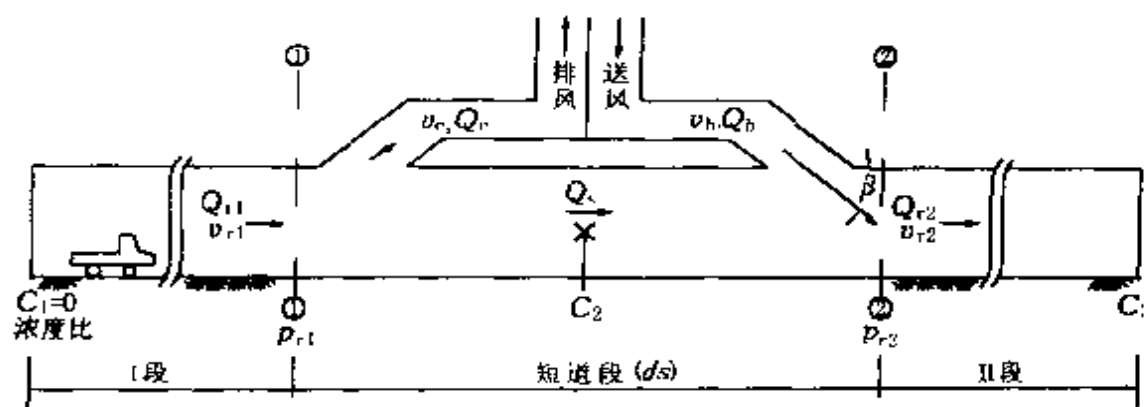


图 3.5.8-1 竖井送排式通风方式模式图

排风口升压力可按式 (3.5.8-1) 计算:

$$\Delta p_e = 2 \times \frac{Q_e}{Q_{r1}} \left[\left(2 - \frac{K_e \cdot v_e}{v_{r1}} \right) - \frac{Q_e}{Q_{r1}} \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r1}^2 \quad (3.5.8-1)$$

送风口升压力可按式 (3.5.8-2) 计算:

$$\Delta p_b = 2 \times \frac{Q_b}{Q_{r2}} \left[\left(\frac{K_b \cdot v_b \cdot \cos \beta}{v_{r2}} - 2 \right) + \frac{Q_b}{Q_{r2}} \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2 \quad (3.5.8-2)$$

式中 Δp_e ——排风口升压力 (N/m^2);

Δp_b ——送风口升压力 (N/m^2);

Q_{r1} ——第 I 区段设计风量 (m^3/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 (m^3/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 (m^3/s);

v_e ——与 Q_e 相应的排风口风速 (m/s);

K_e ——排风口的升压动量系数;

K_b ——送风口的升压动量系数。

2 设计判定

1) 隧道气流浓度 C 可用需风量与设计风量之比表示, 竖井底部的浓度 C_2 可按式 (3.5.8-3) 计算:

$$C_2 = \frac{Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} \quad (3.5.8-3)$$

竖井底部气流中的等效新鲜空气量 Q_{sf} 可按式 (3.5.8-4) 计算:

$$Q_{\text{sf}} = Q_{r1} - Q_e - Q_{\text{req1}} + \frac{Q_e \cdot Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} \quad (3.5.8-4)$$

隧道出口内侧处的浓度 C_3 按式 (3.5.8-5) 计算:

$$C_3 = \frac{Q_{\text{req2}}}{Q_{r1} - Q_e - Q_{\text{req1}} + \frac{Q_e \cdot Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} + Q_b} \quad (3.5.8-5)$$

式中 Q_{req1} ——隧道 I 段需风量;

Q_{req2} ——隧道 II 段需风量。

送风量 Q_b 与排风量 Q_e 可按式 (3.5.8-6) 计算:

$$Q_b = Q_{\text{req}} - Q_{r1} + Q_e \cdot \left(\frac{Q_{r1} - Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} \right) \quad (3.5.8-6)$$

2) 排风口与送风口之间的短道不得产生回流, 应满足下列条件:

$$\frac{Q_e}{Q_{r1}} \leq 1.0 \quad (3.5.8-7)$$

$$\frac{Q_b}{Q_{r2}} \leq 1.0 \quad (3.5.8-8)$$

3) 设计浓度应满足下列条件:

$$0.9 \leq C_2 \leq 1.0 \quad (3.5.8-9)$$

$$0.9 \leq C_3 \leq 1.0 \quad (3.5.8-10)$$

4) 隧道内压力应满足下列条件:

$$\Delta p_b + \Delta p_e \geq \Delta p_t - \Delta p_t + \Delta p_m \quad (3.5.8-11)$$

3 排风机、送风机设计风压可按式 (3.5.8-12) 和 (3.5.8-13) 计算:

$$p_{\text{tote}} = 1.1 \times \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_e^2 + p_{de} - p_{\infty} \right) \quad (3.5.8-12)$$

$$p_{\text{totb}} = 1.1 \times \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_b^2 + p_{db} + p_{sb} \right) \quad (3.5.8-13)$$

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_{∞} ——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。

4 竖井送排式通风应符合以下要求:

1) 竖井送排通风方式适用于单向交通隧道, 对远期为单向交通而近期为双向交通的隧道也可采用。

2) 采用竖井送排式通风方式时, 隧道设计风速宜取 $6\text{m/s} \sim 8\text{m/s}$ 。

3) 竖井位置的选择应充分考虑地形、地质条件及营运费等, 进行技术与经济综合比较。

4) 送风量计算应充分考虑短道风量及其污染浓度。

5) 送风口宜设置于隧道拱部, 断面平均风速宜取 25m/s

~30m/s, 送风方向宜与隧道轴向一致。

6) 排风口宜设置于隧道侧墙, 其底面与隧道检修道标高一致, 断面平均风速宜取 5m/s~6m/s, 排风方向宜与隧道轴向垂直。

7) 在竖井底部及连接风道各弯道处应设置导流叶片。在风道变断面处、合流处及送排风口等处宜设置整流板, 减小气流阻抗。应在排风口和竖井塔口设置钢丝网门。

8) 应防止短道内出现回流, 短道长度不得小于 50m。

9) 排风口断面积不得大于隧道正洞断面积; 送风口断面积可在 $11\text{m}^2 \sim 15\text{m}^2$ 范围取值。

10) 为防止排出的废气被重新吸入, 地面通风井的排风口标高宜高出吸风口标高 5m 以上。

11) 设计计算中应分别考虑交通堵塞、怠速行驶、火灾等异常工况, 以及实际交通量、自然风速与风向等因素的变化情况, 给通风控制提供依据。

3.5.9 竖井与射流风机组合通风方式

当竖井送排式或竖井单排式通风难以达到洞内风压力平衡时, 宜采用射流风机与之组合, 形成竖井与射流风机组合通风方式。

1 组合通风方式压力平衡应满足式 (3.5.9) 的条件:

$$\Delta p_b + \Delta p_e + \Delta p_j = \Delta p_r - \Delta p_i + \Delta p_m \quad (3.5.9)$$

2 设计计算中, 应就竖井位置以及竖井与射流风机的相对位置, 针对各方案相应的需风量、设计风量、风速等反复试算, 以获得合理的沿程压力分布。其他事项应按本规范第 3.5.8 条执行。

3.5.10 静电吸尘通风方式

对于特长公路隧道, 可设置静电吸尘装置, 增加纵向通风方式的适用长度。

1 通风模式

静电吸尘通风模式如图 3.5.10 所示。

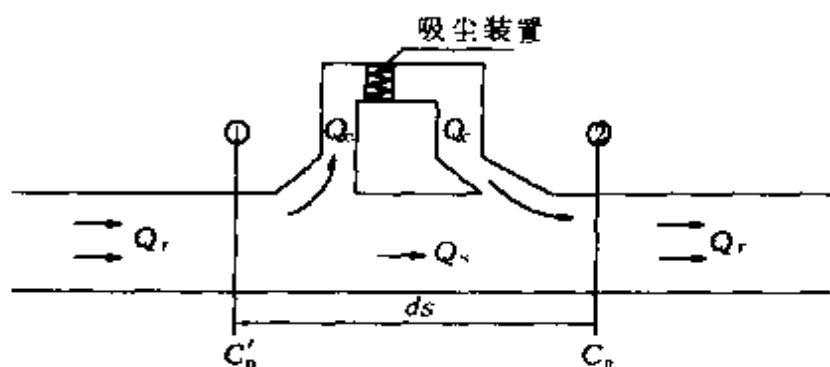


图 3.5.10 静电吸尘通风模式

静电吸尘装置前后的隧道空间平均烟雾浓度关系可用式 (3.5.10-1) 表示:

$$C_n = \left(1 - \frac{Q_c}{Q_r} \cdot \eta_{VI}\right) \cdot C'_n \quad (3.5.10-1)$$

式中 C_n ——吸尘后的隧道空间平均烟雾浓度比;

Q_c ——吸尘装置过滤处理风量 (m^3/s);

η_{VI} ——烟雾净化率 (%);

C'_n ——吸尘前的隧道空间平均烟雾浓度比。

短道区间 ds 流出侧的平均烟雾浓度可按式 (3.5.10-2) 计算:

$$C = C'_n + \frac{Q_{\text{req}(s)}}{Q_s} \quad (3.5.10-2)$$

式中 C ——短道区间流出侧的平均烟雾浓度比;

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

ds ——短道长度 (m);

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

2 静电吸尘装置的升压力应按本规范 3.5.8 条规定进行计算, 并可按 $Q_c = Q_e = Q_b$ 考虑。

3 静电吸尘通风方式应符合下列要求:

1) 应在隧道空间平均烟雾浓度达到允许浓度处设置吸尘装置。

2) 宜用烟雾净化率表示吸尘装置的除尘效率, 烟雾净化

率可取 70%~80%。

3) 当以烟雾浓度 (VI 值) 为主要控制指标时, 经吸尘装置过滤后的空气可再利用, 当以一氧化碳 (CO) 为主要通风控制指标时, 必须考虑空气再利用的限度。

4) 设计吸尘装置时, 应充分考虑吸尘装置的各种压力损失和始端动压等。静电吸尘装置本身的压力损失可按 150N/m^2 计算。

5) 靠近吸尘装置前部的风道断面风速应尽可能呈均匀分布, 通过吸尘装置的风速一般不宜大于 7m/s 。

6) 当隧道发生火灾时, 必须采取其他排烟措施。

7) 吸尘装置滤除的粉尘可作固化处理, 并妥善弃放。

3.5.11 全横向和半横向通风方式

1 全横向、半横向通风方式压力模式可用图 3.5.11 表示。

2 送、排风道的风压

1) 送风道始端动压与静压差

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,

①送风道始端动压可按式 (3.5.11-1) 计算:

$$p_b = \frac{\rho}{2} \cdot v_{bi}^2 \quad (3.5.11-1)$$

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), $v_{bi} = \frac{Q_b}{A_b}$ 。

②送风道静压差可按式 (3.5.11-2) 计算:

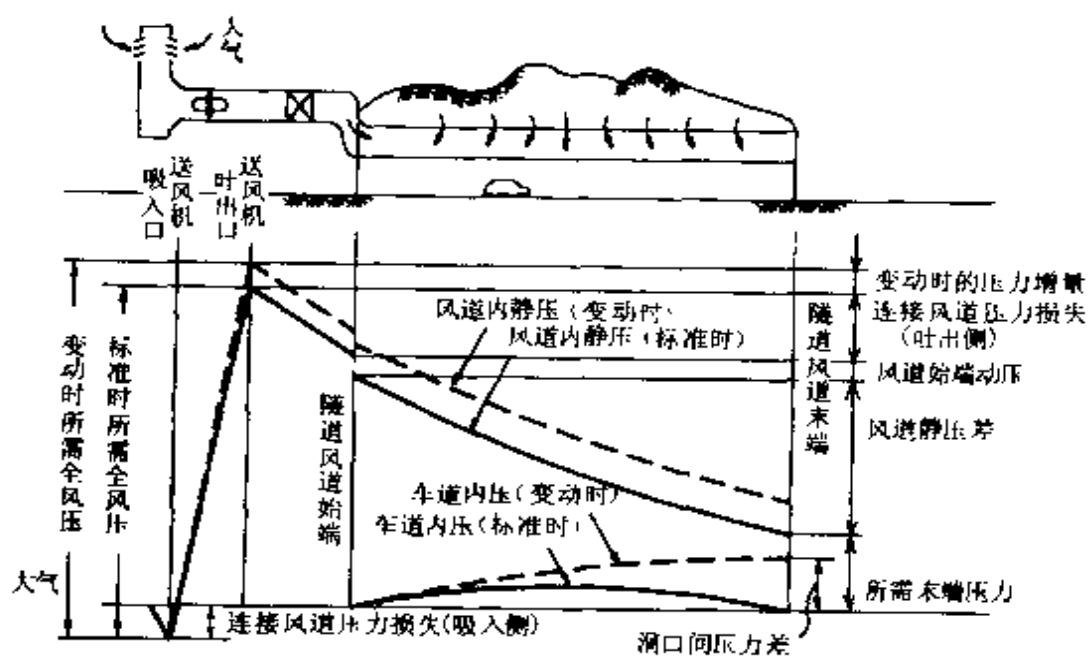
$$p_{bi} - p_{b0} = k_b \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{bi}^2 \quad (3.5.11-2)$$

式中 p_{bi} ——送风道始端静压 (N/m^2);

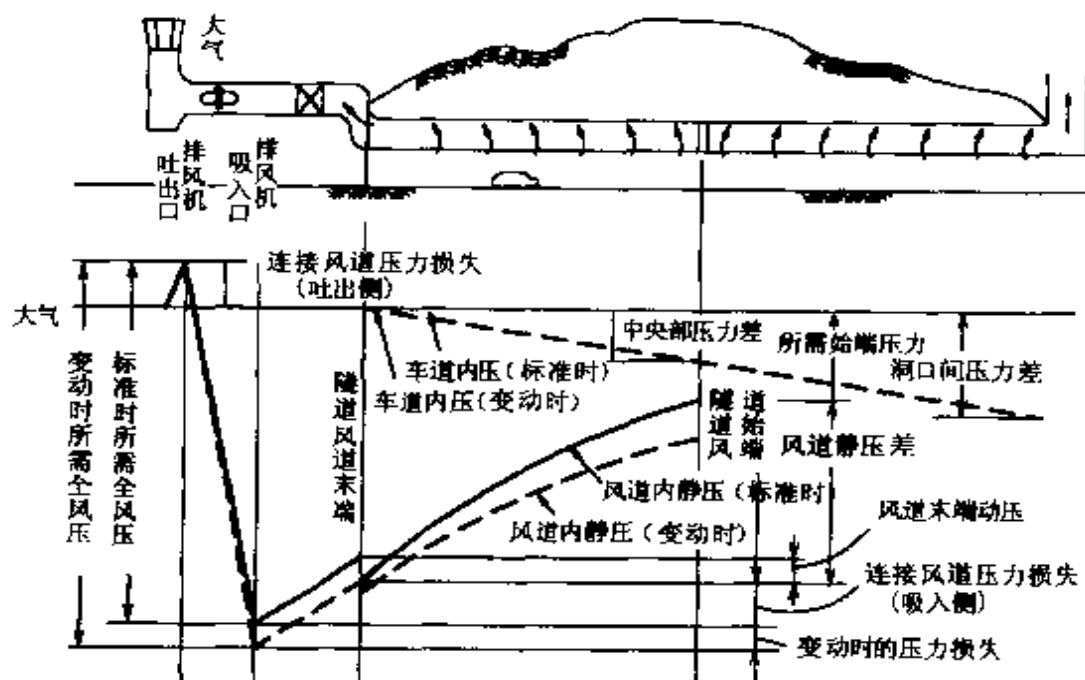
p_{b0} ——送风道末端静压 (N/m^2);

k_b ——送风道风压损失系数, 按式 (3.5.11-3) 计算:

$$k_b = \frac{\lambda_b}{3} \cdot \frac{L_b}{D_b} - 1 \quad (3.5.11-3)$$



(a) 送风道系统的压力分布(一条风道的情况)



(b) 排风道系统的压力分布(两条风道的情况)

图 3.5.11 全横向、半横向通风方式的压力模式

式中 L_b ——送风道长度 (m);

D_b ——送风道当量直径 (m)。

2) 排风道末端动压与静压差

当排风道断面积沿隧道轴向不变, 并且污染空气等量向排风

道排出时,

①排风道末端动压可按式 (3.5.11-4) 计算:

$$p_e = \frac{\rho}{2} \cdot v_{e0}^2 \quad (3.5.11-4)$$

式中 p_e ——排风道末端动压 (N/m^2);

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

②排风道静压差可按式 (3.5.11-5) 计算:

$$p_{ei} - p_{e0} = k_e \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{e0}^2 \quad (3.5.11-5)$$

式中 p_{ei} ——排风道始端静压 (N/m^2);

p_{e0} ——排风道末端静压 (N/m^2);

k_e ——排风道风压损失系数, 可按式 (3.5.11-6) 计算:

$$k_e = \frac{\lambda_e}{3} \cdot \frac{L_e}{D_e} + 2 \quad (3.5.11-6)$$

式中 L_e ——排风道长度 (m);

D_e ——排风道当量直径 (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/m^2 , 该值包含两洞口间自然风引起的压力差 Δp_m 。

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/m^2 , 该值包含两洞口间自然风引起的压力差 Δp_m 。

3 隧道内风压

1) 当采用全横向通风时, 标准大气压状态下的隧道内静压可取零。

2) 当采用送风型半横向通风时, 隧道风速可按式 (3.5.11-7) 计算:

$$v_r(x) = \frac{q_b}{A_r} \cdot x \quad (3.5.11-7)$$

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 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);

x —— 自中性点 ($v_r=0$) 的距离 (m)。

①在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 (3.5.11-8) 计算:

$$p_{rc} - p_r(x_1) = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{x_1}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2(x_1) + \alpha \cdot \frac{x_1}{L} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left[v_i^2 + v_i \cdot v_r(x_1) + \frac{1}{3} \times v_r^2(x_1) \right] \quad (3.5.11-8)$$

式中 x_1 —— 自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/m^2);

p_{rc} —— 中性点的静压 (N/m^2);

$v_r(x_1)$ —— x_1 点的隧道风速 (m/s);

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

②在单向交通隧道的中性点至隧道出口区段, 隧道内静压分布可按式 (3.5.11-9) 计算:

$$p_{rc} - p_r(x_2) = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{x_2}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2(x_2) - \alpha \cdot \frac{x_2}{L} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left[v_i^2 - v_i \cdot v_r(x_2) + \frac{1}{3} \times v_r^2(x_2) \right] \quad (3.5.11-9)$$

式中 x_2 —— 自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/m^2);

$v_r(x_2)$ —— 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 (3.5.11-10) 计算:

$$p_{rc} - p_r(x) = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{x}{D_r} + 2 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2(x) + \alpha \cdot \frac{x}{L} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_i \cdot v_r(x) \quad (3.5.11-10)$$

4 连接风道的压力损失可按式 (3.5.11-11) 计算:

$$\Delta p_d = \sum_{i=1}^m \zeta_i \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{L_i}{D_i} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 \quad (3.5.11-11)$$

式中 Δp_d ——连接风道的压力损失(N/m²);

ζ_i ——第 i 个形状损失系数;

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 ——连接风道形状变化个数;

n ——连接风道段数。

5 风机所需全风压

1) 送风机

送风型半横向式通风或全横向式通风中的送风机所需全风压 p_{btot} , 可按式(3.5.11-12)计算:

$$p_{btot} = (\text{隧道风压} + \text{送风道所需末端压力} + \text{送风道静压差} \\ + \text{送风道始端动压} + \text{连接风道压力损失}) \times 1.1 \quad (3.5.11-12)$$

2) 排风机

全横向式通风中的排风机所需全风压 p_{etot} , 可按式(3.5.11-13)计算:

$$p_{etot} = (\text{排风道所需始端压力} + \text{排风道静压差} - \text{排风道末端动压} \\ + \text{连接风道压力损失}) \times 1.1 \quad (3.5.11-13)$$

3) 当最终确定风机所需风压时, 还应考虑风机本身的压力损失。

3.6 风机的选型与布置

3.6.1 公路隧道营运通风机械可采用射流风机、轴流风机, 也可采用静电吸尘装置。

3.6.2 射流风机的选型、布置与控制

1 射流风机的选型

射流风机应选用具有消音装置且可逆转的公路隧道专用风机，宜选用大推力射流风机，并应满足下列要求：

1) 对于双向交通隧道，逆转反向风量大于正转正向风量的 70%；单向交通隧道可不作此要求。特殊情况下，射流风机的逆转反向风量达到正转正向风量的 95%。

2) 当隧道内发生火灾时，在环境温度为 250℃ 情况下射流风机应能正常可靠运转 60min。

3) 在野外距风机出口 10m 且 45° 处测量射流风机的 A 声级应小于 77dB (A)。

4) 射流风机电机防护等级应不低于 IP55。

2 射流风机布置

射流风机应设置于建筑限界以外 15cm~20cm 处，风机轴线与隧道轴线平行。设置方法宜采用固定式或悬吊式，支承风机的结构强度应保证在实际静荷载的 15 倍以上，风机安装前应做支承结构的载荷试验。同一断面上射流风机设置数量应视隧道断面形状、大小而定。射流风机纵向布置及设置间距应综合考虑风机效率、交通通风力的利用、火灾对策、经济性等因素。

3.6.3 轴流风机的选型、设置与控制

1 轴流风机的选型

应结合使用条件、隧道需风量、全风压及全性能曲线选择风机。

1) 轴流风机的轴功率与电机功率

轴流风机的轴功率可按式 (3.6.3-1) 计算：

$$S_{kw} = \frac{Q_a \cdot p_{tot}}{1000 \eta} \cdot \left(\frac{273 + t_0}{273 + t_1} \right) \cdot \frac{p_1}{p_0} \quad (3.6.3-1)$$

式中 S_{kw} ——轴流风机轴功率 (kW)；

Q_a ——轴流风机的风量 (m^3/s)；

p_{tot} ——轴流风机的全风压 (N/m^2)；

η ——风机效率 (一般取 80%);
 t_0 ——标准温度 ($^{\circ}\text{C}$), 取 20°C ;
 t_1 ——风机环境温度 ($^{\circ}\text{C}$);
 p_0 ——标准大气压 (N/m^2), 取 $101.325\text{N}/\text{m}^2$;
 p_1 ——风机环境大气压 (N/m^2)。

轴流风机所需配用的电机功率可按式 (3.6.3-2) 计算:

$$M_1 = \frac{S_{kw}}{\eta_m} \cdot k \quad (3.6.3-2)$$

式中 M_1 ——电机功率 (kW);
 η_m ——电机效率 (%), 可取 90% ~ 95%;
 k ——电机容量安全系数, 可取 1.15。

2) 轴流风机的耐热性

当隧道内发生火灾时, 轴流风机应能在环境温度为 250°C 情况下可靠运转 60min 以上, 恢复常温后, 轴流风机不需大修即可投入正常运转。

2 轴流风机的设置

轴流风机宜并联设置, 每一通风系统一般设置 2~3 台。

3 轴流风机的风量控制

风量控制方法宜采用转速控制法、台数控制法及其组合方法。风量分档根据交通量随时间的变化确定, 不宜太细。在进行风机台数与转速的组合选择时应充分考虑动力消耗。

4 轴流风机的噪声

轴流风机噪声可按式 (3.6.3-3) 推算:

$$L_a = L_{sa} + 10 \times \log (Q_a \cdot p_{tot}^2) \quad (3.6.3-3)$$

式中 L_a ——噪声级水平 (dB (A));
 L_{sa} ——比噪声级 (dB (A))。

3.6.4 静电吸尘装置吸尘率应大于 80%。

3.7 风 道

3.7.1 一般规定

1 风道设计应在满足技术要求的前提下,综合考虑建设费用和养护费用等因素。

2 风道内设计风速宜在 $13\text{m/s} \sim 18\text{m/s}$ 范围内取值。

3 内壁面应平滑,减小摩阻力。

4 风道在弯曲、折曲、扩径、缩径、分叉等变形处应采用曲线相连接,平顺过渡。

5 送风机前后附近的风道内不得产生偏流、回流及涡流等。当弯道为 90° 时,应在转角处设置导流叶片。

6 在风道吸入口应设置网状门,防止异物吸入。

7 应防止风道内与风道口结冰。

8 风机房内的连接风道应充分考虑风量控制、应急时风机运转等因素,确定合理的风道形状及切换方法。

9 当隧道发生火灾时,应由排风机排烟。为冷却空气,宜在排风道内设置水喷雾装置。

10 风道内必须采取防排水措施,严禁渗漏水。

11 风道隔板必须密封并具有耐久性,不得漏风。

12 当隧道照明设施和应急设施的管线和器械设置于通风道内时,应在合适位置设置检修用进出口、楼梯和照明灯具。

3.7.2 隧道主风道

1 隧道主风道宜设于隧道的上部。

2 顶隔板设计应符合下列要求:

1) 顶隔板材料应具有耐腐蚀性、阻燃性、气密性、板面摩阻力小的特点。

2) 设计荷载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。

3) 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应小于顶隔板跨度的 $1/600$ 。

4) 顶隔板的标准厚度不宜大于 15cm ,特殊情况下顶隔板厚度可适当增加。

5) 当顶隔板采用金属构件时, 构件应进行防锈处理。

3.7.3 送风孔与排风孔

1 送风孔

按最大需风量条件下送风孔全开时吹出的风速为 $6\text{m/s} \sim 8\text{m/s}$ 计算确定送风孔面积。送风孔间距宜取 $5\text{m} \sim 6\text{m}$ 。

送风孔宜设于隧道侧壁下部, 其标高宜与汽车尾排气管距路面高度大致相等, 主送风道与送风孔之间用引风道连接。

2 排风孔

按最大需风量且全开排风孔时吸入的风速不大于 4m/s 确定排风孔面积, 排风孔间距宜取送风孔间距的 2 倍, 设于两送风孔间且交错布置。

排风孔宜设于隧道顶隔板处, 直接与排风道相通。

3 送排风孔的开度调节

风孔的开度调节应满足隧道设计状态下的等风量分布, 风孔宜以 10 个为 1 组进行同一开度设定。风孔开度调节可按以下顺序进行:

- 1) 测试风道内摩阻损失系数 λ_b ;
- 2) 初次调整风孔开度;
- 3) 测试风道内静压分布及风速分布;
- 4) 再调整风孔开度;
- 5) 设定风孔开度。

3.7.4 连接风道

连接风道包括风机房与主风道、隧道主洞、竖井等之间的风道。设计时应注意与两端结构物的衔接, 减少风压损失。

3.7.5 各类风道的压力损失

各类风道的压力损失系数可按本规范附录 A 取值。当风道连续出现变形时, 应考虑压力损失的富余量, 必要时可通过模拟实验来确定具体的压力损失值。

3.8 风机房与通风井

3.8.1 一般规定

1 风机房与通风井应从功能要求、位置选择、外观协调、环境保护、养护维修及营运管理等方面综合考虑，作出合理规划与设计。

2 风机房空间应能布置轴流风机、电气设备、控制设备和其他辅助机电设备，并有大型设备搬运通道和工作通道等。

3 风机房宜靠近隧道布置。

4 当风机分期安装时，应考虑预留空间和连接装置。

5 风机房与风道的连接处，其周壁必须密封，严禁漏风。

6 风机房与通风井内应采取严格的防排水措施，严禁渗漏水。

7 通风井顶部应设井帽，防止雨水进入井内。

3.8.2 洞外风机房

风机房可设于洞口和通风井附近，应根据洞口或通风井周围地形条件、两洞口轴向间距等因素，确定风机房位置，并注意与环境的协调。城镇附近的隧道还应考虑对洞口附近居民及城市设施的影响。

3.8.3 洞内风机房

洞内风机房应考虑防潮、防尘、降噪和温度调节。

3.8.4 通风井的排风扩散要求

通风井的设计应考虑排风对周围大气环境的影响，地处城镇附近的隧道，必要时应作专门调查并采取防范措施。

通风井口应设置在扩散效果良好的地带。设于山坳中的通风井，井口应朝开阔方向。

3.9 火灾时的通风

3.9.1 通风设计时必须考虑火灾对策，长度大于1500m且交通量较大的隧道应考虑排烟措施。

3.9.2 火灾时排烟风速可按 $2\text{m/s} \sim 3\text{m/s}$ 取值。

3.9.3 火灾时排烟应按长度分区，分区长度可取 1000m ，各分区应有相应的火灾排烟要求及人车逃离方案。

3.9.4 火灾时半横向和全横向通风方式应通过主风道排烟；纵向通风应视隧道内火灾点的位置确定风机的正反转，应尽量缩短火灾烟雾在车道内的行程。

3.9.5 运送易燃易爆危险品的车辆通过长或特长隧道时，应有引导车在规定时间内引导通过。

3.9.6 设置横洞的隧道，横洞门应有防烟功能。

3.10 通风监控

3.10.1 应根据隧道营运过程中的交通状况，适时调整通风量，在保证交通安全的前提下，以最经济的动力给隧道提供满足营运条件的通风量。

3.10.2 控制方式

高速公路和一级公路的隧道宜采用自动控制方式，并用手动控制方式辅助，其他等级公路的隧道可采用自动控制方式或手动控制方式。

3.10.3 控制方法

控制方法分为直接控制法、间接控制法、程序控制法。每座隧道应根据其具体情况选择一种或多种控制方法。

3.10.4 风量级档的设定

应设定相应于营运条件的风量级档，作为风量控制依据。

风量级档的划分不宜过细，并应充分考虑营运动力消耗与风机运行时间。当隧道通风系统中有送风机、排风机与射流风机时，应针对各种风机确定合理的组合风量级档。

3.10.5 监控设施

1 传感仪器

传感仪器包括烟雾透过率传感器、一氧化碳浓度传感器、车辆检测器、风向风速仪等。

1) 烟雾透过率传感器 (VI 仪) 的设置位置与台数应根据通风方式及烟雾浓度分布特征确定。高速公路的特长隧道一般可按 300m~500m 间距布设, 其他等级的公路隧道布设间距可适当放宽。洞内通风井口等特征点处应布设 VI 仪。

2) 一氧化碳浓度传感器 (CO 仪) 的布设间距与 VI 仪相同, 宜采用红外线传感器。

3) 车辆检测器分为环行线圈式、超声波式和光电式, 应根据具体情况选用。

4) 风向风速检测仪 (W 仪) 宜采用叶片螺旋式风向风速仪, 风向与风速应同时检测。

2 监视装置

监视装置应集中在中央监控室, 其控制平台应尽量小型化。当为特长隧道时, 宜设置屏幕监视器。

3 自动控制装置

控制装置的构成与功能应根据隧道的等级和长度来确定, 对于较简易的情况, 可采用小型信息处理机作控制; 对于较复杂的情况, 宜采用大容量计算机进行控制。

4 信息传输装置

信息传输的方式及装置应根据传输项目、传输线路和传输距离来确定, 一般可采用数字循环传输方式及其装置。

3.10.6 火灾时的通风监控要求

1 通风监控系统应有排烟控制功能。

2 通风监控系统应有火灾时的风机运转控制模式。

3 通风监控系统应结合排烟分区, 确定相应的风量控制模式。

3.10.7 通风监控设施规模

通风监控设施规模应与隧道类别和交通需求相适应, 既应满足当前交通需求, 又应考虑监控系统将来扩展需要。

通风监控设施配置可按表 3.10.7 选定。

表 3.10.7 通风监控设施配置

k	>2100	$1400 \sim 2100$	$700 \sim 1400$	<700
车辆检测器	布设间距取 200m~500m	布设间距 大于 500m	布设间距适量, 隧道 两端与洞中各一组	无
环境检测设施	必须有	有	可有	可无
通风控制设施	自动与手动控制	自动控制	手动控制	可无

注: $k = v \cdot L \cdot N / v_R$, v_R 为实际平均行车速度。

3.10.8 通风控制应遵循下列原则:

- 1 电机的启闭次数不应过频, 防止风机出现振荡现象。
- 2 当每日交通量较为固定或柴油车混入率变化较小时, 应采用程序控制方式。
- 3 应将监控装置采集的模拟数据进行数字变换, 并将交通量数据与风机运转状况作对应性归纳。
- 4 通风监控系统应在隧道营运过程中不断完善。

4 照 明

4.1 一 般 规 定

4.1.1 长度大于100m的隧道应设置照明。

4.1.2 照明设计应进行下列调查：

1 环境条件：隧道附近地形、洞口朝向、洞口附近视野情况、植被条件、洞外路段的平纵线形和气象条件。

2 土建结构物的设计方案：隧道长度、平纵线形、洞门结构形式、横断面布置及建筑限界。

3 交通状况：设计交通量、计算行车速度、实际平均行车速度、单向或双向交通、汽车专用或混合通行。

4 通风方式、布置方案及烟雾浓度。

5 供电条件：配电所位置、容量，电源电压及其变动幅度。

6 营运管理方式。

4.1.3 隧道照明系统包括：

1 中间段照明；

2 入口段照明；

3 过渡段照明；

4 出口段照明；

5 接近段减光设施；

6 应急照明；

7 洞外引道照明。

隧道照明系统的各照明段如图 4.1.3 所示。

4.1.4 隧道照明设计所采用的计算行车速度不宜大于100km/h，如大于100km/h，应作特殊设计。

4.1.5 亮度

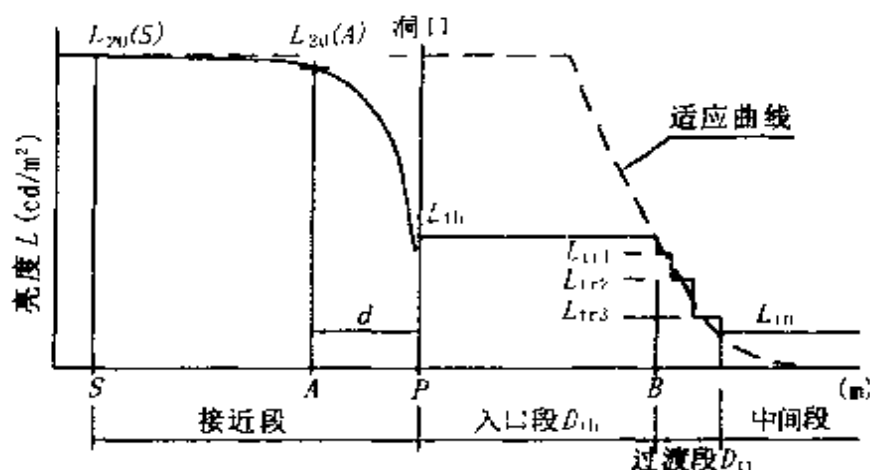


图 4.1.3 各照明段亮度与长度

P ——洞口(或棚口); S ——接近段起点; A ——适应点; d ——适应距离; $L_{20}(S)$ ——洞外亮度; $L_{20}(A)$ ——适应点亮度; L_{th} ——入口段亮度; L_{tr1} 、 L_{tr2} 、 L_{tr3} ——过渡段亮度; L_{in} ——中间段亮度; D_{tr1} 、 D_{tr2} 、 D_{tr3} ——过渡段 1、2、3 分段长度

1 路面左、右两侧墙面 2m 高范围内的平均亮度, 应不低于路面平均亮度。

2 平均亮度与平均照度间的换算关系一般可按沥青路面 ($15 \sim 22$) $\text{lx}/\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$, 水泥混凝土路面 ($10 \sim 13$) $\text{lx}/\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 取值。

4.2 中间段照明

4.2.1 中间段亮度

1 中间段亮度可按表 4.2.1 取值。

表 4.2.1 中间段亮度 L_{in}

计算行车 速度 (km/h)	L_{in} (cd/m^2)	
	双车道单向交通 $N > 2400$ 辆/h 双车道双向交通 $N > 1300$ 辆/h	双车道单向交通 $N \leq 700$ 辆/h 双车道双向交通 $N \leq 360$ 辆/h
100	9.0	4
80	4.5	2
60	2.5	1.5
40	1.5	1.5

2 当双车道单向交通 $700 \text{ 辆/h} < N \leq 2400 \text{ 辆/h}$, 双向交通 $360 \text{ 辆/h} < N \leq 1300 \text{ 辆/h}$ 且通过隧道的行车时间超过 135s 时,

可按表 4.2.1 的 80%取值。

3 人车混合通行的隧道中，中间段亮度不得低于 $2.5\text{cd}/\text{m}^2$ 。

4 隧道两侧墙面2m 高范围内，宜铺设反射率不小于 0.7 的墙面材料。

4.2.2 灯具布置应符合下列要求：

1 灯具布置应满足闪烁频率低于2.5Hz 或高于 15Hz。

2 中间段灯具的平面布置形式可采用中线布置、两侧交错布置或两侧对称布置。

3 路面亮度总均匀度应不低于表4.2.2-1所示值。

表 4.2.2-1 路面亮度总均匀度 U_0

设计交通量 N (辆/h)		U_0
双车道单向交通	双车道双向交通	
≥ 2400	≥ 1300	0.4
≤ 700	≤ 360	0.3

注：当交通量在中间值时，按内插考虑。

4 路面中线亮度纵向均匀度应不低于表4.2.2-2所示值。

表 4.2.2-2 亮度纵向均匀度 U_1

设计交通量 N (辆/h)		U_1
双车道单向交通	双车道双向交通	
≥ 2400	≥ 1300	0.6~0.7
≤ 700	≤ 360	0.5

注：当交通量在中间值时，按内插考虑。

4.2.3 应急停车带和连接通道照明

1 应急停车带宜采用荧光灯光源，其照明亮度应大于 $7\text{cd}/\text{m}^2$ 。

2 连接通道亮度应大于 $2\text{cd}/\text{m}^2$ 。

4.3 入口段照明

4.3.1 入口段亮度可按下式计算：

$$L_{th} = k \cdot L_{20}(S) \quad (4.3.1)$$

式中 L_{th} ——入口段亮度 (cd/m^2);

k ——入口段亮度折减系数, 可按表 4.3.1 取值;

$L_{20}(S)$ ——洞外亮度 (cd/m^2)。

表 4.3.1 入口段亮度折减系数

设计交通量 N (辆/h)		k			
		计算行车速度 v_t (km/h)			
双车道单向交通	双车道双向交通	100	80	60	40
≥ 2400	≥ 1300	0.045	0.035	0.022	0.012
≤ 700	≤ 360	0.035	0.025	0.015	0.01

注: 当交通量在中间值时, 按内插考虑。

4.3.2 洞外亮度

1 洞外亮度在设计阶段, 如无实测资料可按表 4.3.2-1 取值。

表 4.3.2-1 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	v_t (km/h) 40	v_t (km/h) 60	v_t (km/h) 80	v_t (km/h) 100
35% ~ 50%	南洞口	—	—	4000	4500
	北洞口	—	—	5500	6000
25%	南洞口	3000	3500	4000	4500
	北洞口	3500	4000	5000	5500
10%	暗环境	2000	2500	3000	3500
	亮环境	3000	3500	4000	4500
0%	暗环境	1000	1500	2000	2500
	亮环境	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。

2 在洞口土建完成时,应采用黑度法进行洞外亮度实测。实测值与设计值的误差,如超出 $\pm 25\%$,应调整照明系统的设计。

3 洞外亮度实测时实测位置为接近段起点,接近段长度应取洞外一个照明停车视距。

4 照明停车视距可按表4.3.2-2取值。

表 4.3.2-2 照明停车视距 D_s 表 (m)

纵坡 (%) v_r (km/h)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
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

4.3.3 入口段长度可按式计算:

$$D_{th} = 1.154D_s - \frac{h - 1.5}{\tan 10^\circ} \quad (4.3.3)$$

式中 D_{th} ——入口段长度 (m);

D_s ——照明停车视距 (m),可按表 4.3.2-2 取值;

h ——洞口内净空高度 (m)。

4.3.4 入口段灯具布置

1 入口段的照明由基本照明和加强照明两部分组成,前者的灯具布置应按中间段照明考虑,后者可用功率较大的灯具加强照明。

2 入口段的加强照明所用灯具,可以从洞口以内 10m 处开始布设。

4.3.5 连续隧道的入口段照明

当两座隧道间的行驶时间按计算行车速度考虑小于 30s,且通过的前一座隧道内的行驶时间大于 30s 时,后续隧道入口段亮度折减率可按表 4.3.5 取值。

表 4.3.5 后续隧道入口段亮度折减率

两隧道之间行驶时间 (s)	<2	<5	<10	<15	<30
后续隧道入口段亮度折减率 (%)	50	30	25	20	15

4.4 过渡段照明

4.4.1 过渡段亮度

过渡段由 TR_1 、 TR_2 、 TR_3 三个照明段组成，与之对应的亮度可按表 4.4.1 取值。

表 4.4.1 过渡段亮度

照明段	TR_1	TR_2	TR_3
亮度	$L_{tr1} = 0.3L_{th}$	$L_{tr2} = 0.1L_{th}$	$L_{tr3} = 0.035L_{th}$

4.4.2 过渡段长度

过渡段各照明段的长度可按表 4.4.2 取值。

表 4.4.2 过渡段长度 D_{tr}

计算行车速度 v_t (km/h)	D_{tr1} (m)	D_{tr2} (m)	D_{tr3} (m)	计算行车速度 v_t (km/h)	D_{tr1} (m)	D_{tr2} (m)	D_{tr3} (m)
100	106	111	167	60	44	67	100
80	72	89	133	40	26	44	67

4.5 出口段照明

4.5.1 在单向交通隧道中，应设置出口段照明；出口段长度宜取 60m，亮度宜取中间段亮度的 5 倍。

4.5.2 在双向交通隧道中，可不设出口段照明。

4.6 调 光

4.6.1 应根据洞外亮度和交通量变化分级调整入口段、过渡段、出口段的照明亮度。

4.6.2 入口段、过渡段、出口段照明亮度调整可按表4.6.2-1和表4.6.2-2取值。

表 4.6.2-1 白 天 调 光

分 级	亮 度	分 级	亮 度
I 晴天	$L_{20}(S)$	III 阴天	$0.25L_{20}(S)$
II 云天	$0.5L_{20}(S)$	IV 重阴	$0.13L_{20}(S)$

表 4.6.2-2 夜 间 调 光

分 级	亮 度
I 交通量较大	与 L_{at} 相等
II 交通量较小	$0.5L_{at}$ 但不小于 $1cd/m^2$

4.7 光源与灯具

4.7.1 隧道照明光源按如下要求选择：

- 1 一般情况下宜选择效率高、透雾性能较好的光源。
- 2 短隧道、柴油车较少的城镇附近隧道、应急停车带、人行横通道、车行横通道可选用显色指数较高的光源。
- 3 光源的使用寿命应不小于10 000h。

4.7.2 隧道照明灯具应满足下列要求：

- 1 防护等级应不低于 IP65。
- 2 应具有适合公路隧道特点的防眩装置。
- 3 灯具结构应便于更换灯泡和附件。
- 4 灯具零部件应具有良好的防腐性能。
- 5 灯具配件安装应易于操作，并能调整安装角度。
- 6 灯具不得侵入隧道建筑限界。

4.8 接近段的减光

4.8.1 接近段可采取以下洞外减光措施：

- 1 从接近段起点起，在路基两侧种植常青树；
- 2 采用削竹式洞门形式；
- 3 大幅坡面绿化；
- 4 洞口采用端墙形式时，墙面宜采用冷色调，其反射率应小于0.17。

4.8.2 在接近段起点处的20°视场中，天空面积小于50%时，

不宜设置遮光棚。

4.9 应急照明

4.9.1 高速公路隧道应设置不间断照明供电系统。长度大于1000m的其他隧道应设置应急照明系统，并保证照明中断时间不超过0.3s，维持时间不短于3min。

4.9.2 配合启用应急照明，应在洞外一定距离处设置信号灯或可变信息板显示警告信息。

4.9.3 在启用应急照明时，洞内路面亮度应不小于中间段亮度的10%和 $0.2\text{cd}/\text{m}^2$ 。

4.9.4 在高速公路长隧道和长度大于2000m的其他隧道中，应设置避灾引导灯。

4.10 洞外引道照明

4.10.1 洞外引道宜布设路灯。

4.10.2 洞外引道布灯长度与路面亮度不宜小于表4.10.2的值。

表 4.10.2 洞外引道布灯长度与路面亮度

计算行车速度 (km/h)	路面亮度 (cd/m^2)	长度 (m)
100	2.0	180
80	1.0	130
60	0.5	95
40	0.5	60

4.11 照明计算

4.11.1 进行照明计算时应收集下列资料：

- 1) 隧道净空断面形式；
- 2) 路面材料及其亮度系数或简化亮度系数；
- 3) 灯具布置方式及安装高度、间距、仰角；

- 4) 光源及灯具的类型、规格;
- 5) 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;
- 6) 灯具的养护系数。

4.11.2 照度计算

1 利用光强表的数值计算方法

1) 某一灯具在洞内路面计算点产生的水平照度可按下式计算:

$$E_{pi} = \frac{I_{cy}}{H^2} \cos^3 \gamma \cdot \frac{\Phi}{1000} \cdot M \quad (4.11.2-1)$$

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), 按灯具光强表 (I 表) 取值;

M ——灯具的养护系数, 无资料时可取 0.6~0.7;

Φ ——灯具额定光通量 (lm);

H ——灯具光源中心至路面的高度 (m)。

2) 数个灯具在计算点所产生的照度可按下式计算:

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{pi} \quad (4.11.2-2)$$

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灯, 约 2~4 个。

3) 路面平均水平照度可按下式计算:

$$E_{av} = \frac{\sum_{p=1}^m E_p}{m} \quad (4.11.2-3)$$

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 利用系数曲线图计算方法

路面平均水平照度可按下式计算:

$$E_{av} = \frac{\eta \cdot \Phi \cdot M \cdot N}{W \cdot S} \quad (4.11.2-4)$$

式中 N ——灯具布置系数, 对称布置时取 2, 交错及中线布置时取 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)。

4.11.3 亮度计算

1 亮度计算应满足下列条件:

1) 计算区域不小于灯具间距;

2) 观察点距计算区域取 60m~160m, 距路面边缘为 1/4 路面宽, 距路面高度为 1.5m;

3) 计算区域内纵向计算点间距不宜大于 1.0m, 横向计算点应不少于 5 点;

4) 计算灯具应包括计算区域前后各一组, 约 2~4 个。

2 某灯具在路面计算点产生的亮度可按下式计算:

$$L_{pi} = \frac{I_{\alpha}}{H^2} r(\beta, \gamma) \quad (4.11.3-1)$$

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 C 表取值;

β ——观察面与光入射面之间的角度。

3 数个灯具在计算点产生的亮度可按下式计算:

$$L_p = \sum_{i=1}^n L_{pi} \quad (4.11.3-2)$$

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下式计算:

$$L_{av} = \frac{\sum_{p=1}^m L_p}{m} \quad (4.11.3-3)$$

式中 L_{av} ——计算区域内路面的平均亮度 (cd/m^2)。

4.11.4 均匀度计算

1 路面亮度总均匀度可按下式计算：

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{L_{av}} \quad (4.11.4-1)$$

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下式计算：

$$U_1 = \frac{L'_{\min}}{L'_{\max}} \quad (4.11.4-2)$$

式中 U_1 ——路面亮度总均匀度；

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)。

附录 A 隧道与风道的压力损失系数

A.0.1 直管段壁面摩阻损失系数

直管段内壁面摩阻损失系数可按式 (A.0.1-1) 计算:

$$\lambda = \frac{1}{(1.1138 - 2\log \frac{\Delta}{D})^2} \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中 Δ ——平均壁面粗糙度 (mm), 可按表 A.0.1 取值;

D ——管段断面当量直径 (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 弯曲段

1 弯曲与折曲损失系数

1) 圆形弯曲风道的损失系数可按式 (A.0.2-2) 计算:

$$\zeta_b = \left[0.131 + 0.1632 \times \left(\frac{D}{r} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \cdot \left(\frac{\theta}{90^\circ} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中 ζ_b ——弯曲风道损失系数;

r ——弯曲管段内壁半径 (m)。

2) 圆形折曲风道的损失系数可按式 (A.0.2-3) 计算或按表 A.0.2-1 查取。

$$\zeta_b = 0.946 \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) + 2.05 \sin^4 \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{A.0.2-3})$$

表 A.0.2-1 圆形折曲风道的损失系数

θ	ζ_b	图 示
15°	0.022	
30°	0.073	
45°	0.183	
60°	0.365	
90°	0.99	
120°	1.86	

3) 变断面折曲风道损失系数可按图 A.0.2-1 取值。

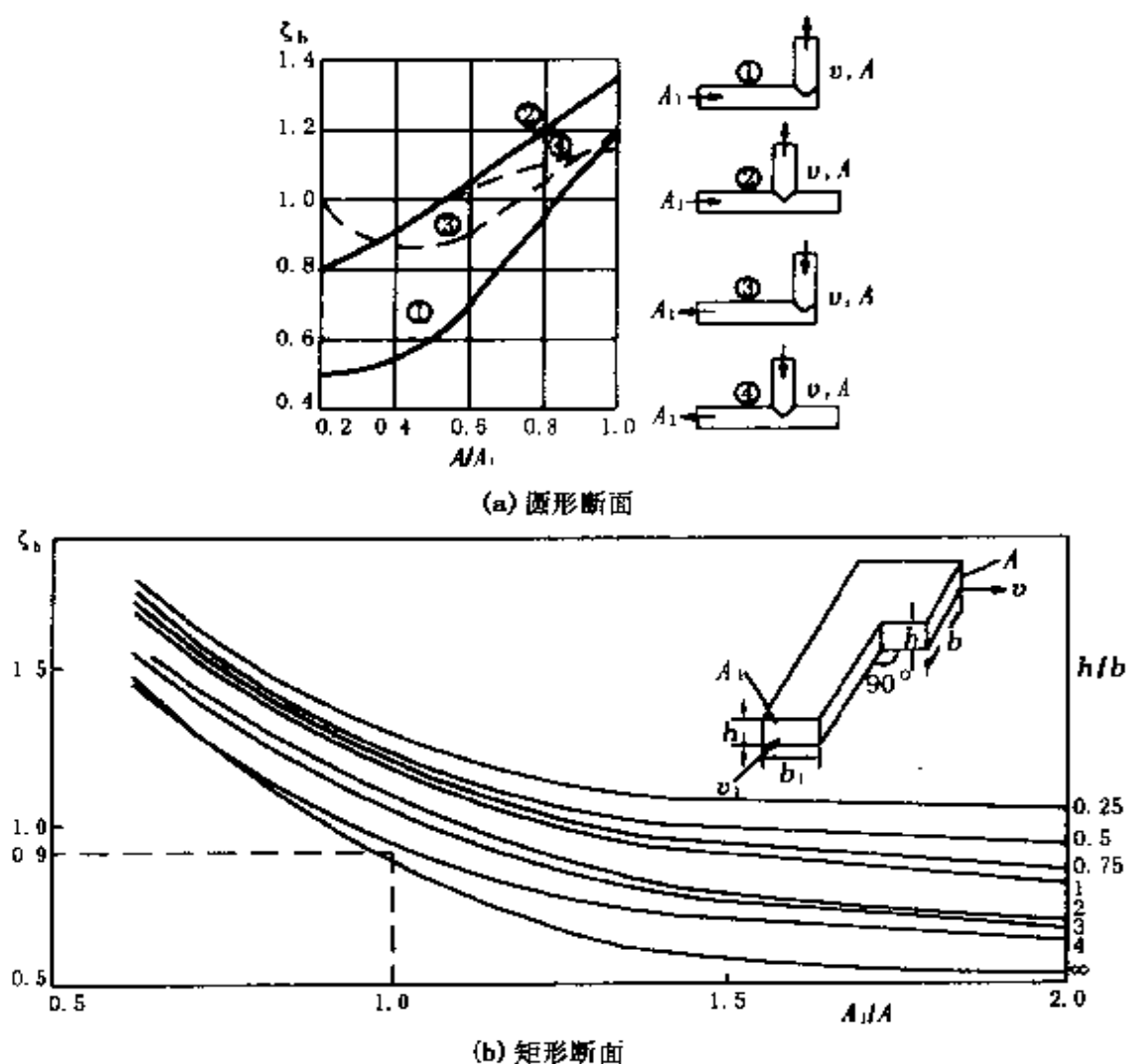


图 A.0.2-1 变断面折曲管段损失系数 ζ_b

2 带导流叶片弯曲管段损失系数

1) 当弯角 θ 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内时, 带导流叶片弯曲管段损失

系数与弯角成正比变化；当弯角 θ 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时，损失系数变化不大，如图 A.0.2-2 所示。

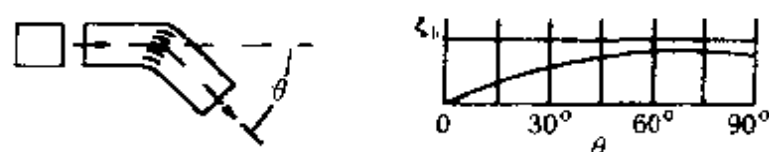


图 A.0.2-2 带导流叶片的弯曲管段弯角 θ 与 ζ_b 的关系

2) 导流叶片一般可做成两种形状，一种为简化弯曲圆柱面形状的翼型；另一种为同心圆形状的薄圆型，如图 A.0.2-3 所示。翼型导流叶片的剖面尺寸可按表 A.0.2-2 制作。

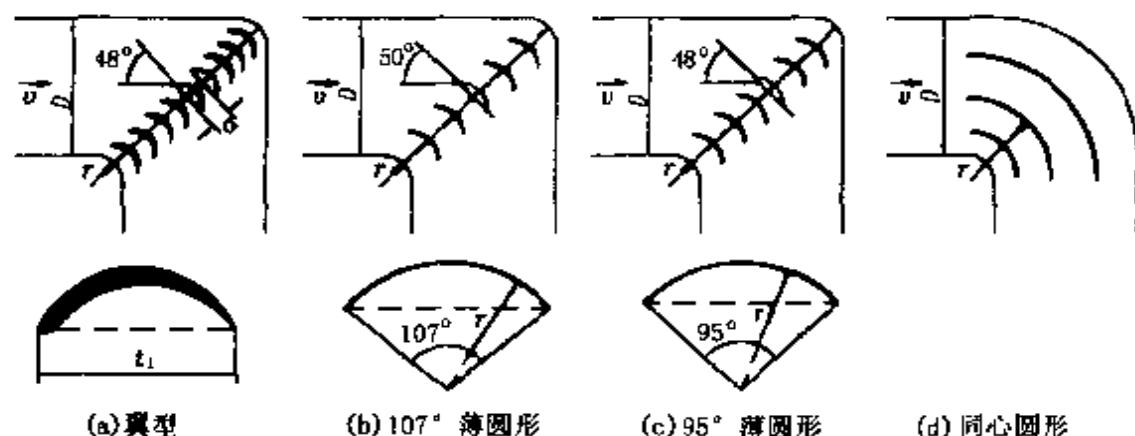


图 A.0.2-3 弯曲管段中的导流叶片

表 A.0.2-2 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_1	$0.519t_1$	y_2	$0.215t_1$		
r_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	$0.463t_1$	l	$0.033t_1$		

注：其弦长 t_1 可取 90° 圆弧的弦长，即 $t_1 = \sqrt{2}r_1$ 。

导流叶片正常数目 a 可按式 (A.0.2-4) 计算：

$$a = 2.13 \times \left(\frac{r}{D} \right)^{1/2} - 1 \quad (\text{A.0.2-4})$$

导流叶片最少数目 a_{\min} 可按式 (A.0.2-5) 计算:

$$a_{\min} = 0.9 \times \left(\frac{r}{D} \right)^{-1} \quad (\text{A.0.2-5})$$

导流叶片减少数目 a' 可按式 (A.0.2-6) 计算:

$$a' = 1.4 \times \left(\frac{r}{D} \right)^{-1} \quad (\text{A.0.2-6})$$

若减少叶片数目, 可从靠近弯曲管外壁的叶片开始, 依次去掉。

3) 带导流叶片的弯曲管段的损失系数, 可按表 A.0.2-3 ~ A.0.2-6 取值, 必要时可进行模型试验确定损失系数值。

表 A.0.2-3 带翼型导流叶片矩形弯曲管段损失系数 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

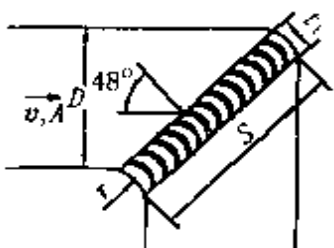
注: 若 $Re < 10^5$ 时, 表中数据应乘以修正系数 k_{Re} , k_{Re} 可按表 A.0.2-6 取值。

表 A.0.2-4 带薄圆形导流叶片矩形弯曲管段损失系数 ζ_b ($\theta = 90^\circ$)

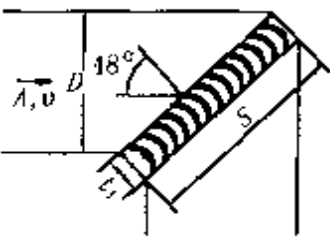
叶片数目	r/D						
	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
正常叶片数目	0.44	0.37	0.32	0.28	0.25	0.25	0.23
减少叶片数目	0.44	0.37	0.32	0.26	0.22	0.21	0.17
最少叶片数目	0.59	0.50	0.45	0.41	0.37	0.34	0.31

注: 若 $Re < 10^5$ 时, 表中数据应乘以修正系数 k_{Re} , k_{Re} 可按表 A.0.2-6 取值。

表 A.0.2-5 带翼型导流叶片圆形弯曲管段损失系数 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 $a = 2D/t_1$	$\zeta_b = 0.15k_{Re} + 1.28\lambda$	

续上表

弯曲管特点	损失系数 ζ_b	图 示
转弯边缘削边, 正常叶片数目 $\alpha = 3D/t_1 - 1$	$\zeta_b = 0.30k_{Re} + 1.28\lambda$	
转弯边缘削边, 减少叶片数目 $\alpha = 2D/t_1$	$\zeta_b = 0.23k_{Re} + 1.28\lambda$	
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} 是与气流雷诺数 Re 有关的参数, 可按表 A.0.2-6 取值。

表 A.0.2-6 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

A.0.3 缩径管段与扩径管段损失系数

扩径与缩径分为断面突然扩大、断面突然缩小和断面渐变三种情况, 其损失系数可按图 A.0.3-1、A.0.3-2 和表 A.0.3 取值。

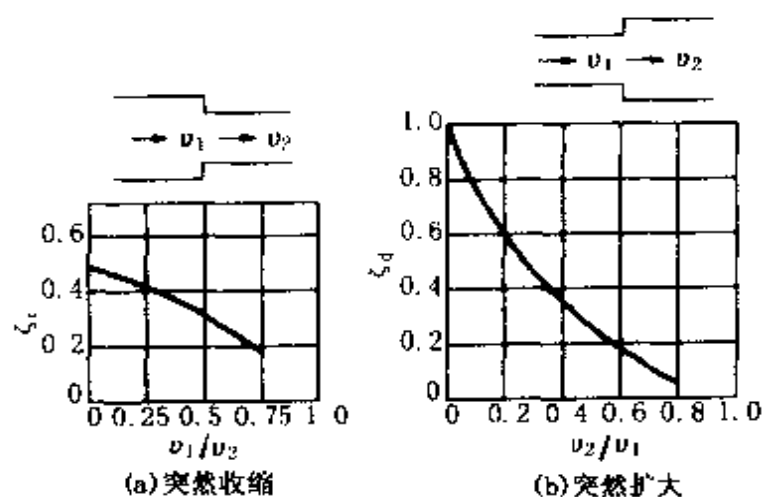


图 A.0.3-1 突缩径与突扩径损失系数

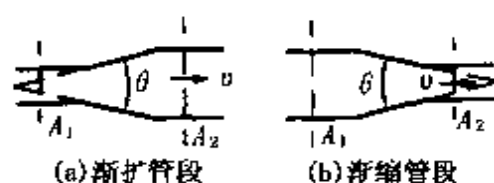


图 A.0.3-2 圆形渐变管段示意图

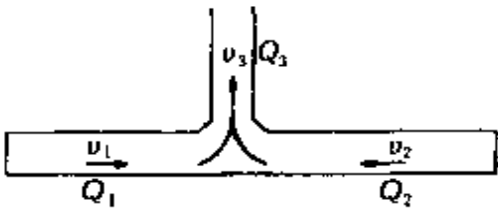
表 A.0.3 圆形渐变管段损失系数

类型	ξ													
渐扩	$\xi = k \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$	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		

A.0.4 分叉段与合流段

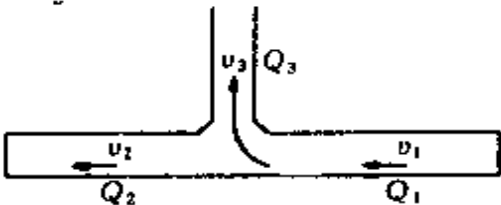
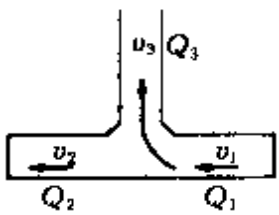
1 当为合流型时, 其损失系数 ξ_{1-3} 、 ξ_{2-3} , 可按表 A.0.4-1 取值。

表 A.0.4-1 合流型风道的损失系数

Q_1/Q_3	Q_2/Q_3	ξ_{1-3}	ξ_{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, 其损失系数 ξ_{1-2} 、 ξ_{1-3} , 可按表 A.0.4-2 取值。

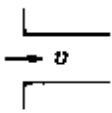
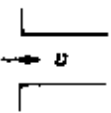
表 A.0.4-2 分流型风道的损失系数

主流的分叉损失系数 $\zeta_{1,2}$										
A_3/A_1	Q_3/Q_1									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.5	0.72	0.48	0.28	0.13	0.05	0.04	0.09	0.18	0.31	0.5
1.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.13	0.22	0.30	0.38	0.48
图 示										
支流的分叉损失系数 $\zeta_{1,3}$										
A_3/A_1	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	0.6	0.85	1.20	1.80	3.10	4.35	6.0	9.0
1.0	0.67	0.55	0.46	0.37	0.32	0.29	0.29	0.30	0.37	0.48
图 示										

A.0.5 入口、出口及其他

入口、出口及其他各损失系数可按表 A.0.5-1~A.0.5-3 及图 A.0.5 取值。

表 A.0.5-1 入口损失系数

形 状	ζ_i	图 示	形 状	ζ_i	图 示
直角锐缘	0.50~0.60		圆缘、倒角	0.03~0.05	

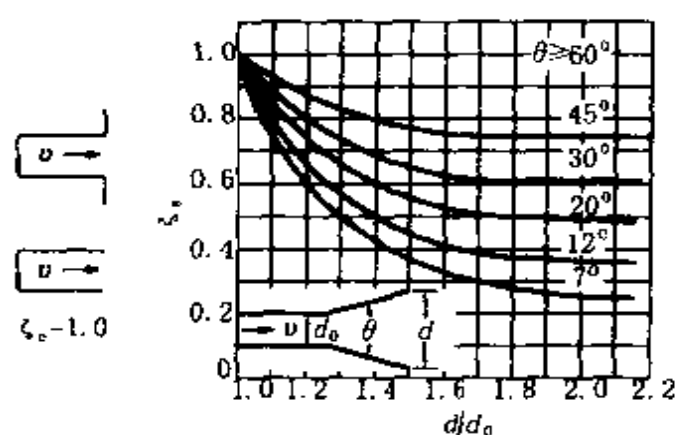


图 A.0.5 出口损失系数

表 A.0.5-2 出入口格栅损失系数

有效面积比	出口 ζ_d	入口 ζ_d	图 示
50%	9.0	5.8	
60%	6.2	3.5	
70%	3.0	2.0	

表 A.0.5-3 金属网筛损失系数

有效面积比 (%)	30	40	50	60	70	80	90
ζ_d	6.2	3.0	1.44	0.97	0.58	0.32	0.14
图 示							

注：有效面积比 = 实际过风面积 / 风道断面积。

附录 B 汽车正面投影面积与空气阻力系数

B.0.1 汽车正面投影面积可按式 (B.0.1) 计算或按表 B.0.1-1、B.0.1-2 酌情取值。

$$A_c = B \cdot h \quad (\text{B.0.1})$$

式中 A_c ——汽车正面投影面积 (m^2);

B ——汽车轮距 (m);

h ——汽车高 (m)。

表 B.0.1-1 我国客车正面投影面积

车 型		A_c (m^2)	车 型		A_c (m^2)
12m 系列大客车	座位客车	6.4	8m 系列中客车	座位客车	5.5
	卧铺客车	7.1		卧铺客车	5.9
10m 系列大客车	座位客车	6.2	7m 系列中客车	座位客车	4.3
	卧铺客车	7.2	6m 系列轻客车	座位客车	4.2

表 B.0.1-2 国外汽车正面投影面积

国别	厂 家	车 型	车 长 (mm)	前轮距 (mm)	车 高 (mm)	正面投影面积 (mm^2)
德 国	大众	帕萨特轿车	4540	1414	1395	1 972 530
		高尔夫轿车	3985	1413	1415	1 999 395
		大赛马轿车	3975	1306	1355	1 769 630
		奥迪轿车	4383	1400	1365	1 911 000
	本茨	190E	4430	1444	1361	1 965 284
		200	4725	1488	1438	2 139 744
		230TE	4724	1486	1425	2 117 550
		380SEC	4910	1545	1406	2 172 270
		500SL	4389	1455	1341	1 951 155
	宝马	315	4355	1366	1380	1 885 080
		745	5014	1501	1430	2 146 430

续上表

国别	厂 家	车 型	车 长 (mm)	前轮距 (mm)	车 高 (mm)	正面投影面积 (mm ²)
美 国	通用	GMC 大客车	10 668	2205	3010	6 637 050
		GMC 卡车	4040	1350	1805	2 436 750
		马利布轿车	4895	1486	1415	2 102 690
		骑士轿车	4428	1406	1366	1 920 596
		旁蒂克轿车	4780	1491	1372	2 045 652
		马刀轿车	5550	1570	1440	2 260 800
	福特	城市轿车	5560	1580	1420	2 243 600
		速度轿车	4475	1390	1339	1 861 210
	克莱斯勒	格兰轿车	5225	1524	1405	2 141 220
		新港轿车	5250	1520	1400	2 128 000
		董事轿车	5340	1460	1350	1 971 000
		纽约人轿车	4715	1464	1346	1 970 544
		道奇轿车	4755	1463	1344	1 966 272
日 本	丰田	皇冠轿车	4860	1440	1400	2 016 000
		追击者轿车	4670	1390	1395	1 980 750
		光冠轿车	4670	1390	1425	1 980 750
		卡姆利轿车	4400	1465	1395	2 043 675
		远景轿车	4410	1460	1390	2 029 400
		L-KM 卡车	4060	1350	1785	2 409 750
		海艾斯卡车	4690	1440	1925	2 772 000
		戴娜卡车	5780	1410	2030	2 862 300
	日产	总统轿车	5280	1520	1490	2 264 800
		公子轿车	4860	1430	1425	2 037 750
		桂冠轿车	4675	1410	1380	1 945 800
		阿特拉斯	5990	1640	2100	3 444 000
		神鹰	5965	1640	2915	4 780 600

续上表

国别	厂 家	车 型	车 长 (mm)	前轮距 (mm)	车 高 (mm)	正面投影面积 (mm ²)
日本	三 菱	未尼卡布	3190	1220	1670	2 037 400
		奔马	5950	1630	2060	3 357 800
		N-FB120	4915	1395	2815	3 926 925
		KFK115H	7460	1715	2405	4 124 575
		KFK216H	7460	1715	2405	4 124 574
		PFP418	9970	2050	3185	6 449 625
		PFT418V	11 360	2050	3195	6 549 750
	五十铃	N-WFR51	4690	1430	2200	3 146 000
		N-TLD34	5940	1385	2060	2 853 100
		P-TLD76V	6690	1385	3032	4 199 320
		K-86BR	7505	1700	2380	4 046 000
		K-TMQ78	9030	1960	2670	5 233 200
		P-CXK19V	11 990	2050	2915	5 975 750
		P-CXG17M	8740	2050	2870	5 883 500
	日产	蓝鸟轿车	4500	1460	1380	2 014 800
		前进轿车	3645	1345	1395	1 876 275
	三菱	科迪亚轿车	4390	1410	1320	1 861 200
		华丽轿车	4560	1445	1385	2 001 325
		特雷轿车	4280	1410	1370	1 931 700
		枪骑兵轿车	4125	1390	1360	1 890 400
	马自达	家族轿车	3955	1390	1375	1 911 250
		卡佩拉轿车	4430	1430	1395	1 994 850
	本田	阿科德轿车	4455	1445	1375	1 986 875

B.0.2 汽车空气阻力系数

部分车型的汽车空气阻力系数可按表 B.0.2 取值, 其他车型可参照使用。

表 B.0.2 汽车正面投影面积与空气阻力系数

车 型	面积 A_c (m^2)	阻力系数 ξ_c	$\xi_c \cdot A_c$ (m^2)	备 注
典型轿车	1.4~2.6	0.4~0.6		
货车	3~7	0.8~1.0		
大型客车	4~7	0.6~0.7		
ЗИЛ130, 空车	4	0.941	3.764	模型
载货用篷布盖好	4.65	0.816	3.794	试验
后装向式厢式车厢	5.8	0.564	3.271	
油罐车	4	0.716	2.864	
VW1200		0.458		
VW1500	1.681	0.422	0.710	
DB220S	1.903	0.430	0.820	
DB330SE	2.100	0.406	0.852	
ГАЗ-24 Волга	2.3	0.48	1.104	
ГАЗ-15 Чайка		0.502		
Citroen DS-19		0.311		
Oldsmobile Toronado		0.38		
Ford Falcon		0.419		
Caçillao	2.27	0.46	1.04	

注：本表数据取自《汽车理论》，机械工业出版社，1981年。

附录 C 路面简化亮度系数

水泥混凝土路面简化亮度系数见表 C，亮度计算示意图见图 C。

表 C 水泥混凝土路面简化亮度系数 $r(\beta, \gamma)$ 表

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

续上表

β $\tan \gamma$	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
0	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655
0.25	610	610	610	610	601	601	601	601	601	601
0.5	521	503	503	503	503	503	503	503	503	503
0.75	395	386	371	371	371	371	371	386	395	395
1	278	269	269	269	269	269	269	278	278	278
1.25	189	189	180	180	180	180	180	189	198	207
1.5	144	144	139	139	139	144	148	153	162	180
1.75	108	103	99	99	103	108	112	121	130	139
2	85	83	84	84	86	90	94	99	103	111
2.5	51	50	51	52	54	58	61	65	69	75
3	32	31	31	33	35	38	40	43	47	51
3.5	21	21	22	22	24	27	29	31	34	38
4	14	14	15	17	19	20	22	23	25	27
4.5	11	11	12	13	14	14	16	17	19	21
5	8.7	8.7	9.0	10	11	13	14	15	16	16
5.5	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：对应于各角度的所有 r 值均都乘了 1000；水泥混凝土路面 $Q_0 = 0.10$ 。

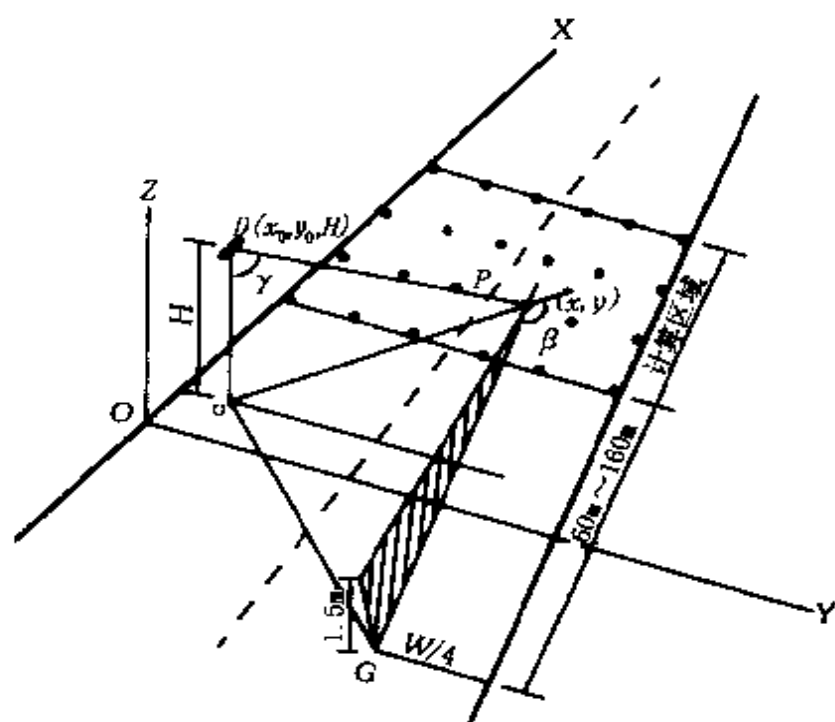


图 C 亮度计算示意图

附录 D 流体力学中常用单位及单位换算

D.0.1 常用单位

	国际单位制				工程单位制			
	量	名 称	代 号		量	名 称	代 号	
			中文	字母			中 文	字 母
基本单位	长度	米	米	m	长度	米	米	m
	时间	秒	秒	s	时间	秒	秒	s
	质量	千克	千克	kg	力	公斤	公斤	kgf
导出单位	力	牛顿	牛	N	质量		公斤·秒 ² /米	kgf·s ² /m
	密度	千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³	密度		公斤·秒 ² /米 ⁴	kgf·s ² /m ⁴
	容重	牛顿每立方米	牛/米 ³	N/m ³	容重	公斤每立方米	公斤/米 ³	kgf/m ³

D.0.2 单位换算

	国际单位制		工程单位制	
力	牛顿 (N)	千牛 (kN)	公斤 (kgf)	吨 (t)
	1	0.001	0.102	0.000 102
	1000	1	102	0.102
	9.807	0.009 807	1	0.001
	9807	9.807	1000	1
容重	牛/米 ³ (N/m ³)	千牛/米 ³ (N/m ³)	公斤/米 ³ (kgf/m ³)	吨/米 ³ (t/m ³)
	1	0.001	0.102	0.000 102
	1000	1	102	0.102
	9.807	0.009 807	1	0.001
	9807	9.807	1000	1
质量	千克 (kg)	1	公斤·秒 ² /米 (kgf·s ² /m)	0.102
		9.807		1

续上表

国际单位制			工程单位制				
密度	千克/米 ³ (kg/m ³)	1	公斤·秒 ² /米 ⁴ (kgf·s ² /m ⁴)				0.102
		9.807					1
功率	瓦 (W)	千瓦 (kW)	公斤·米/秒 (kgf·m/s)				马力 (PS)
	1	0.001	0.102				0.00136
	1000	1	102				1.36
	9.807	0.009 807	1				0.0133
	735.5	0.7355	75				1

压 强	国际单位制	千牛/米 ² (kPa)	1	0.001	101.3	98.07	9.807	0.133
		牛/米 ² (Pa)	1000	1	101 325	98 067	9807	133.32
	工程单位制	公斤/厘米 ² (kgf/cm ²)	0.0102	1.02×10^{-5}	1.033	1	0.1	0.00 136
		吨/米 ² (t/m ²)	0.102	1.02×10^{-4}	10.332	10	1	0.0136
	大气压表示	标准大气压 (atm)	0.009 87	9.87×10^4	1	0.9678	0.096 78	0.001 32
		1 程大气压 (at)	0.0102	1.02×10^{-5}	1.033	1	0.1	0.001 36
	液柱高度表示	米水柱 (m)	0.102	1.02×10^{-4}	10.332	10	1	0.0136
		毫米汞柱 (mmHg)	7.50	0.0075	760	735.6	73.56	1

附录 E 本规范用词说明

E.0.1 执行本规范时，对条文严格程度的用词应按以下写法，以便在执行过程中区别对待。

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，在条件许可时应首先这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”，反面词采用“不宜”。

4 表示只有在一定条件下才可这样做的用词：

正面词采用“允许”，反面词采用“不允许”。

E.0.2 条文中涉及按本规范或其他有关的标准、规范的规定条文执行时，应按以下写法。

1 表示很严格，非这样做不可的用词为：“应按……执行”或“应符合……要求（或规定）”。

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词为：“可参照……”。

附件 公路隧道通风照明设计规范

JTJ 026.1—1999

条 文 说 明

1 总 则

1.0.1 随着高等级公路的发展，公路隧道的建设规模日益扩大，隧道越来越长，机械通风必不可少，其技术也更为复杂，因此需要针对不同的通风方式制定适宜的统一设计规范。同时，从交通安全考虑，公路隧道需要照明，亦应针对隧道等级和洞内区段的不同情况制定设计规范。

在对公路隧道通风与照明设施进行规划、设计、安装和营运时，应充分理解本规范的主要宗旨，综合考虑，并以本规范为依据作出适当的判断。

1.0.2 本规范是以两车道山岭隧道为主要对象来编制的。对于三车道隧道或盾构隧道、沉管隧道等不同断面形式的隧道，其通风照明的技术思路与前者基本一致，因此同样也适用本规范。

当路线特性、隧道规模、交通条件、位置条件等与普通情况有很大差异时，应根据实际情况在遵循本规范要求的原则下进行特别技术探讨。

1.0.3 本条提出的高峰小时交通量是指第30位小时交通量，高峰小时交通量与年平均昼夜交通量的比率分别为山岭重丘区隧道14%、平原微丘区隧道12%、城镇隧道9%。

通风照明所采用的计算行车速度为洞内线形计算行车速度。

1.0.4、1.0.5 为了防止行驶中的汽车排出废气造成隧道内空气污染，公路隧道内必须通风。短隧道或部分中隧道靠自然通风便满足要求，而在长隧道且交通量大的隧道中，必须安装机械通风设施。

通风规划是隧道总体规划的重要组成部分，它与隧道断面、路线选择等基本规划密切相关。它不仅仅是单独讨论通风的经济性和机械设备，而是从更广义的立场讨论它与隧道交通方式（单

洞双向交通或双洞单向交通的形式)、防灾计划(指火灾或交通事故发生时应急用设施)等的相互关系;当隧道很长且交通量大因而需设竖井实现分段通风时,通风规划更要与隧道结构、地质、地形、平纵线形以及隧道总造价等进行综合分析,不可单独讨论。

这里所说的通风方式是指机械通风方式,他们有全横向方式、半横向方式、纵向方式,在纵向方式中又有单纯射流风机、竖(斜)井与射流风机组合方式等。照明方式是指灯具安装位置,一般有中央布置、单侧布置和两侧布置三种方式。另外,近年来国内外开始采用逆光照明方式,在做照明规划时也可以考虑采用逆光照明。

1.0.6 四车道或六车道以上的公路为分隔单向交通,由于工程投资巨大或近期交通量较小等原因,其间隧道段可一次设计分期修建,在满足近期交通量要求的年限内隧道为单洞双向交通,当不能满足交通量需求时应建设开通旁边隧道,形成双洞单向交通,这时,应在一期工程中按设计要求预留好与二期工程通风设施的连接位置和接口等,做好有关衔接工作。何时开通二期工程应充分考虑交通量的增长情况,尽早形成总体设计要求的最终通风状态。

在近期交通量较小的情况下,不宜将按远期交通量设计的通风设施一次性全部安装到位,一般可按两期安装,但必须一次设计完成,预留好相应的位置、接口等。

1.0.7、1.0.8 通常情况按该两条要求的顺序实施通风与照明设计,各工序相互关联,必要时应返回到前面已进行过的工序上。例如特长隧道,如果初拟的通风方案中出现很深的通风竖井,且地质状况又极差,结果导致工程困难或工程造价很大,这时应重新比选其他隧道路线方案,确定综合效益更好的隧道位置。

1.0.10 隧道段是隐蔽交通,其行车环境和安全比普通线路段差,所以必须高度重视环境和安全,尤其是特长隧道或长隧道,应对火灾等工况条件下的通风状态作出评价,并制定有效的应急

措施。

1.0.11 当对隧道洞口或竖井出口附近的空气清洁度有严格要求时，应对隧道内排出的污染空气浓度和扩散范围作出评价和处治措施。

1.0.12 条文中所指的有关标准、规范主要有：

- 1 《公路工程技术标准》(JTJ 001)；
- 2 《公路隧道设计规范》(JTJ 026)；
- 3 《公路隧道施工技术规范》(JTJ 042)；
- 4 《公路工程质量检测评定标准》(JTJ 071)；
- 5 《电气装置安装工程施工及验收规范》(GBJ 232)。

3 通 风

3.1 调 查

3.1.1

1 交通量历时变化包括随小时、星期、季节和年的变化情况,尤其交通量逐年变化情况,是进行通风规划分期实施的主要依据。对难以区分的大型载货车和客车,是指在许多情况下计算交通量时,只区分客车、货车、大型车、小型车,而不能区别其发动机的种类,因而为保证安全,常把大型货车和客车视为柴油车。

2 冻害调查对山岭隧道通风竖井(或斜井)规划设计尤为重要,气温、气压、湿度等是通风计算和设备选型的重要参数。

3 洞口、竖井(或斜井)口附近的地形、重要建筑分布及居民分布,可能成为通风规划的制约因素,必须认真收集调查有关资料。

3.1.2 应通过对其他各条件相似的已建隧道营运情况调查或实测,对通风噪声、废气排放等的不良影响进行分析并作出初步评价,其中,风机噪声问题应与交通噪声综合起来进行预测分析。





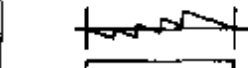
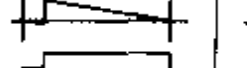
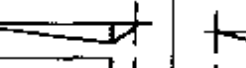

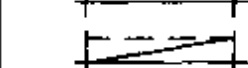
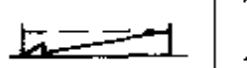
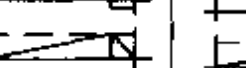
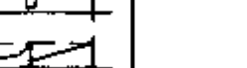
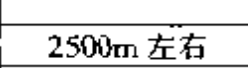
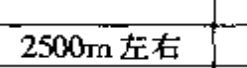
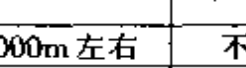
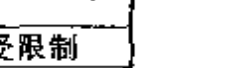




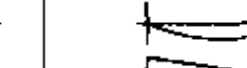

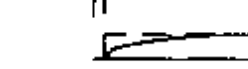
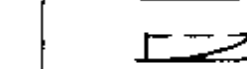
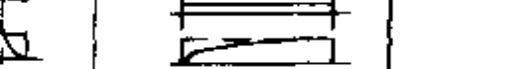
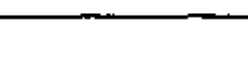
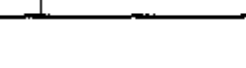
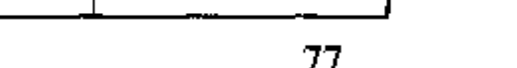
3.2 通 风 方 式

3.2.1 本条提出的两个公式分别为判断双向交通隧道和单向交通隧道是否需要机械通风的经验公式,只能作为初步判定,是否设置风机还应考虑公路等级、隧道断面、长度、纵坡、交通条件及自然条件等因素,进行综合分析,并经计算确定。

3.2.2 根据隧道的条件,将各种方式组合,可作出更合理的组合通风方式。鉴于我国这类通风方式实例和经验不多,暂不列出。目前,采用射流风机作为辅助通风手段的纵向通风方式越来越多。

不同交通状况下主要通风方式的基本特点如表1、表2所示，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，不是限制值，具体设计时应综合分析。




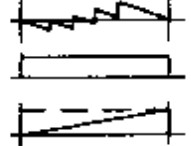

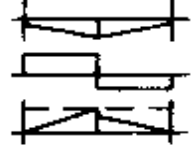
表1 各主要通风方式的特点（单向交通隧道）

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		射流风机式	洞口集中送入式	集中排出式	竖井送排式
形式特征		由射流风机群升压	由喷射流送风升压	洞口两端进风、中部集中抽风	由喷射流送风升压
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	2500m左右	2500m左右	2000m左右	不受限制
	活塞风利用	很好	很好	部分较好	很好
	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	稍难
	营运费	低	一般	一般	一般
	洞口环保	不利	不利	有利	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	排风半横向式		
形式特征		由送风道送风	由排风道排风		
通风系统略图					
隧道内压					
隧道风速					
浓度分布					

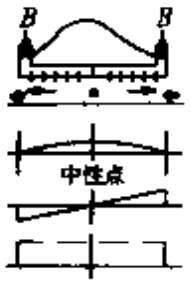
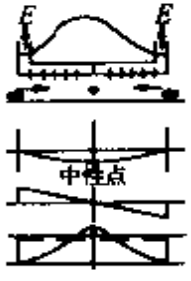
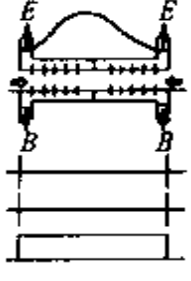
续上表

通风方式		半 横 向 式		全 横 向 式
一般特征	适用长度	3000m左右	3000m左右	不受限制
	活塞风利用	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
	营运费	较高	较高	高
	洞口环保	一般	有利	有利

表 2 各主要通风方式的特点（双向交通隧道）

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		射流风机式	洞口集中送入式	集中排出式
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
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	1500m左右	1500m左右	3000m左右
	活塞风利用	不好	不好	不好
	洞内环境	噪声较大	口部噪声较大	噪声较小
	火灾处理	排烟不便	排烟不便	排烟较方便
	工程造价	低	一般	一般
	管理与维护	不便	方便	方便
	分期实施	易	不易	不易
	技术难度	不难	一般	一般
	营运费	低	一般	一般
	洞口环保	不利	不利	有利

续上表

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	
通风系统略图				
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
	营运费	较高	较高	高
	洞口环保	一般	有利	有利

在选择通风方式时应考虑本条第 3 款所提出的 8 个因素进行全面比较，综合判断。

3.2.3 单向交通隧道设计风速借鉴挪威《公路隧道设计准则》(1990 版)取值，比日本等国的限制风速小，主要是从行车安全出发，特殊情况可放宽至 12m/s，但必须进行技术、经济综合分析和论证。双向交通和人车混合通行的隧道设计风速借鉴日本《公路隧道通风技术基准》(1985 版)和 PIARC (1995)取值。

人车混合通行的隧道是指设有专用人行道的隧道。

3.3 污染空气的稀释标准

3.3.1 隧道的通风，是一项环境保护工程，包括隧道内环境的保护和隧道外环境的保护，但公路隧道一般地处野外，故以隧道内环境的保护为重点。通风的主要对象限于 CO、烟雾和空气中的异味。故在本规范中，氮氧化物不作考虑对象。这点是与 PI-ARC (1983) 报告和日本现行规范《公路隧道通风技术基准》(1985 版) 是一致的。

对 CO 进行稀释的目的是保证卫生条件；对烟雾进行稀释的目的是保证行车安全；对异味进行稀释的目的是提高隧道内行车的舒适性。在公路隧道中，汽车排放出来的废气中有害物质很多，包括 CO、NO_x、Pb、CO₂、SO₂、H·CHO 和烟雾等。其中，CO 对人体健康的影响比较突出，且将其稀释至无害于人体健康的需风量常是最多的，故通风设计时以将其浓度控制在一定的安全限度内，作为主要的设计指标之一，即 CO 的设计浓度。

CO 之所以有害于人体健康，乃因其与血液中的血红蛋白 Hb 结合成 CO-Hb 的结合力特强，达三百倍于氧气与血红蛋白结合成 O₂-Hb 的结合力。一旦 CO 进入人体过多，氧气在血液中的输送量就不足。CO-Hb 饱和度（即 CO-Hb 取代 O₂-Hb 的百分率）超过 10% 后，就会引起程度不同的症状；饱和度为 10% ~ 20% 时，将会引起轻度头痛；饱和度达到 20% ~ 30% 时，将引起剧烈头痛。如图 1 所示。

尽管 CO-Hb 饱和度达到 10% 时，只会引起轻度的头痛，且返回正常空气中后，能全消除且不留后遗症，但有些国家（如荷兰）仍规定不能超越 CO 设计浓度一经历时间曲线，确保在乘车过隧道状态下，CO-Hb 饱和度不超过 5%，以备留 100% 的保险余地。如图 2 所示。

世界上第一条设置机械通风系统的公路隧道，是 1927 年通车的美国纽约霍兰（Holland）隧道。当时采用的 CO 设计浓度是 400ppm。虽然当时没有明确相应的最大允许经历时间，但一般

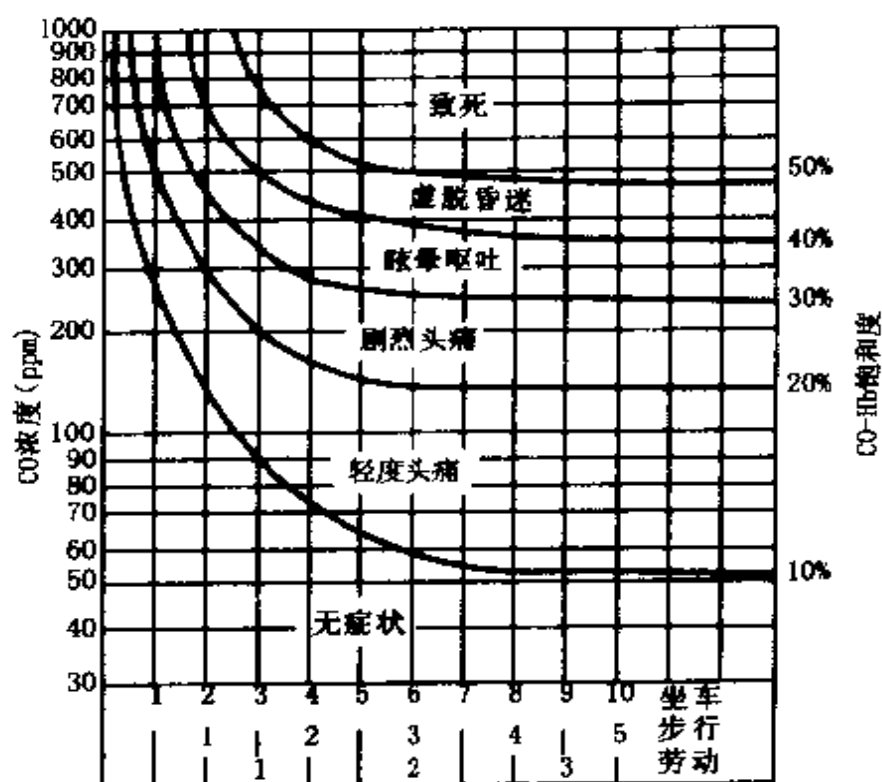


图1 May 氏曲线

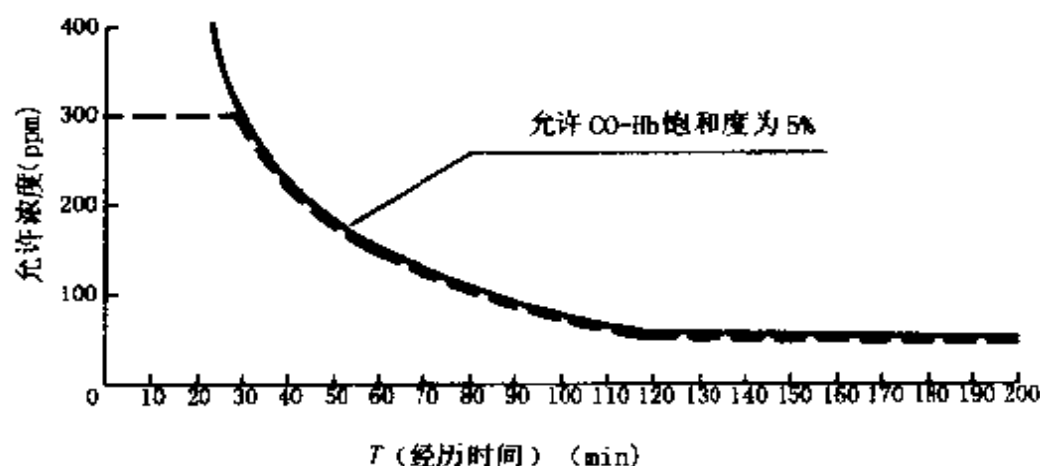


图2 CO 设计浓度—经历时间曲线

隧道的过隧经历时间实际上都只有几分钟，因此 400ppm 所代表的卫生水平是远远超过图 2 所示 5% CO-Hb 饱和度限值要求的。隧道通风的这一设计标准，一直沿用到 20 世纪 40 年代。其后，随着柴油车的日渐发展，而一时又没有稀释烟雾的通风标准，有些国家为了保证充分的能见度，将 CO 设计浓度降低到 250ppm

(事故时仍用 400ppm), 以增加风量, 解决烟雾问题。自此 CO 设计浓度不再是真正的卫生标准, 而变为行车安全标准。

1975 年 PIARC 隧道技术委员会在日本、法国等国家的研究基础上, 提出了一套稀释柴油车烟雾的计算方法后, CO 设计浓度不必再充作行车安全标准。

可是此后 CO 设计浓度并没有复原到本来卫生标准要求的水准。它又被赋以新的目的内涵, 即稀释空气中的异味, 把隧道使用时的舒适性提高到更高的标准——“无异味 (Odour free)” (见 PIARC 十八届大会隧道技术委员会报告)。因此 CO 设计浓度非但没有从 250ppm 回复到 400ppm, 反而进一步降至 150ppm, 甚至 100ppm。自此 CO 设计浓度已完全脱离卫生标准本来涵义, 变成了舒适性标准。

这种以稀释 CO 的名义, 去稀释空气中的异味; 以卫生标准的名义, 去满足舒适性要求的办法不可取。(美国仍明确规定, 作为卫生标准应为 400ppm/15min 或 200ppm/30min。见 PIARC (1983) 报告)。

本规范以保证卫生条件为稀释 CO 的目的, 保证行车安全为稀释烟雾的目的, 提高隧道内行车舒适性为稀释空气中异味的目的。目的不同, 处理途径亦不同。

关于火灾时排烟问题, 本规范只作了原则性要求。由于各国规范 (如日本、PIARC 等规范) 均无明确规定, 而我国尚未进行自己的有关实验, 故本规范未规定很具体的要求。

3.3.2 CO 设计浓度

本条各款均以较简便的方式, 尽量反映 May 氏实验所得结论: CO 浓度—经历时间—活动状态, 三者密切相关。

1 本款以隧道长度反映经历时间, 比较简便、合理。本条表 3.3.2-1 所列各值均与瑞士规范一致, 没有脱离“卫生标准”太远。

1994 年至 1996 年间, 我国有关单位组织了巨大的人力、物力, 在按照我国现行《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90) 设计

的中梁山隧道和缙云山隧道中进行了大量的现场实测。实测时，专门组成了交通量与车型组合完全符合原设计条件的车队，以设计车速通过该两隧道，进行通风实效的检验。结果在中梁山左线上坡隧道，所测风机全部运行时，CO 浓度平均值仅为 42ppm（单向交通）与 68ppm（双向交通），为设计规定值 150ppm 的 28% 与 45%。大量现场实测数据充分说明设计所依据的原规范规定（CO 设计浓度为 150ppm），离开真正的“卫生标准”相当远。由于本规范对 CO 设计浓度只作保证卫生条件的目的要求，故以工程实践和实测数据为依据，参照瑞士规范作了修正。

在纵向通风系统中，CO 浓度呈三角形分布，过隧道人员只在经过隧道出口或其他排风口的很短时间内，才经受最大的 CO “点浓度”。因此设计时不必按全隧道的平均浓度而按“点浓度”或最大 CO 计算浓度来计算需风量。这在 PIARC 十五届大会（1975）报告、PIARC 十六届大会（1979）报告、挪威《公路隧道设计准则》（1990 版）和日本《公路隧道通风技术基准》（1985 版）中均有指出。

2 交通阻滞时的平均车速采用 PIARC 建议的 10km/h。在日本，由于小客车含率较高，当车速降至平均 17km/h～18km/h，即视作交通阻滞。我国各公路的交通组成中，货车含率较高，故采用了 PIARC 的建议。

在公路隧道中，长度在 1km 以上的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（这与城市隧道不同）。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，显然是浪费。PIARC（1995）报告中亦指出了这点。

3 人车混合通行的隧道，在高等级公路中应予禁止。除非人行道（包括检修道）高出车道路面 80cm 以上，否则对人、车都易产生车祸伤害（在欧洲低人行道是严禁的，在日本则采用高出地面 1m 的做法）。我国在低等级公路隧道中，人车混行比较

多，故根据 CO 浓度—经历时间—活动状态三者间关系，提出本款的规定。

3.3.3 烟雾设计浓度

烟雾设计浓度不但与车速（要求视距）有关，而且与亮度（或照度）、光源有关（见表 3）。日本照明专家曾于大量测试后得图 3 所示的烟雾浓度（透过率）、车速、照度和光源四者之间关系。

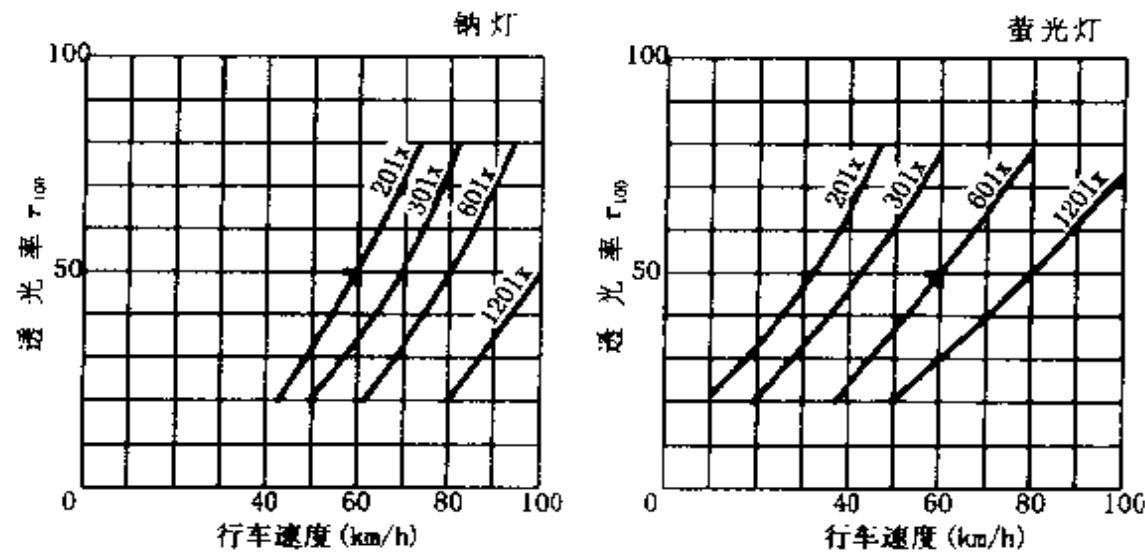


图 3 透过率、车速、照度和光源之间关系

表 3 车速—路面亮度—烟雾浓度之关系

计算行车速度 (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

本条各款均是按钠灯光源考虑。如采用荧光灯光源，则烟雾浓度要求需提高一级。本条各款所用的烟雾浓度 K 与透过率 τ (100m) 之换算关系见表 4，也可按下式计算：

$$K = -\frac{1}{100} \ln \tau \tag{1}$$

表4 K 与 τ 之 关系

K (m^{-1})	τ (%)	K (m^{-1})	τ (%)	K (m^{-1})	τ (%)
0.0050	60	0.0075	47.5	0.0120	30
0.0070	50	0.0090	40		

3.4 需 风 量

3.4.1 一般规定

公路隧道通风设计中,计算有害气体的排放量是一个重要环节,也是整个设计的基本依据。而有害气体排放量计算中又以交通量 N 与有害气体基准排放量 q 为最主要参数。

本规范采用的基准排放量,是以 1995 年为起点,并按每年 1%~2% 的递减率计算获得的排放量作为设计年限的基准排放量。

设计时, N 比较容易确定。一般在设计任务书中都有预计(如 2015 年, 2025 年)设计交通量的指定。但如果要求按某年的交通量进行设计,则该年即为整个设计的设计年限(目标年份)。

另外,也要注意 q_{CO} (CO 基准排放量)亦有其设计年限(目标年份)。特别是 20 世纪 50 年代以来,各国汽车制造业技术水平都在激烈的竞争中迅速提高,带来了 q_{CO} 的急剧锐减。从表 5 可见瑞士小客车的 q_{CO} 值在 30 年内下降了约 60%。

表5 瑞士小客车历年来 q_{CO} 的变化

年 份	q_{CO}		%
1950	$1.2m^3/h \cdot pc$	$(0.017m^3/辆 \cdot km)$	100
1975	$0.85m^3/h \cdot pc$	$(0.012m^3/辆 \cdot km)$	70.83
1979	$0.7m^3/h \cdot pc$	$(0.0097m^3/辆 \cdot km)$	58.33
1987	$0.46m^3/h \cdot pc$	$(0.0065m^3/辆 \cdot km)$	38.33

图 4 所示为 PIARC 隧道技术委员会于 1975 年至 1987 年所提出的 q_{CO} 推荐值。在前后 12 年内, q_{CO} 值下降了 44%。日本的小客车 q_{CO} 值从 20 世纪 60 年代的 0.092 (CO 计算浓度为 100ppm), 下降到 80 年代的 0.02, 20 年内降幅达 78%, 如图 5 所示。

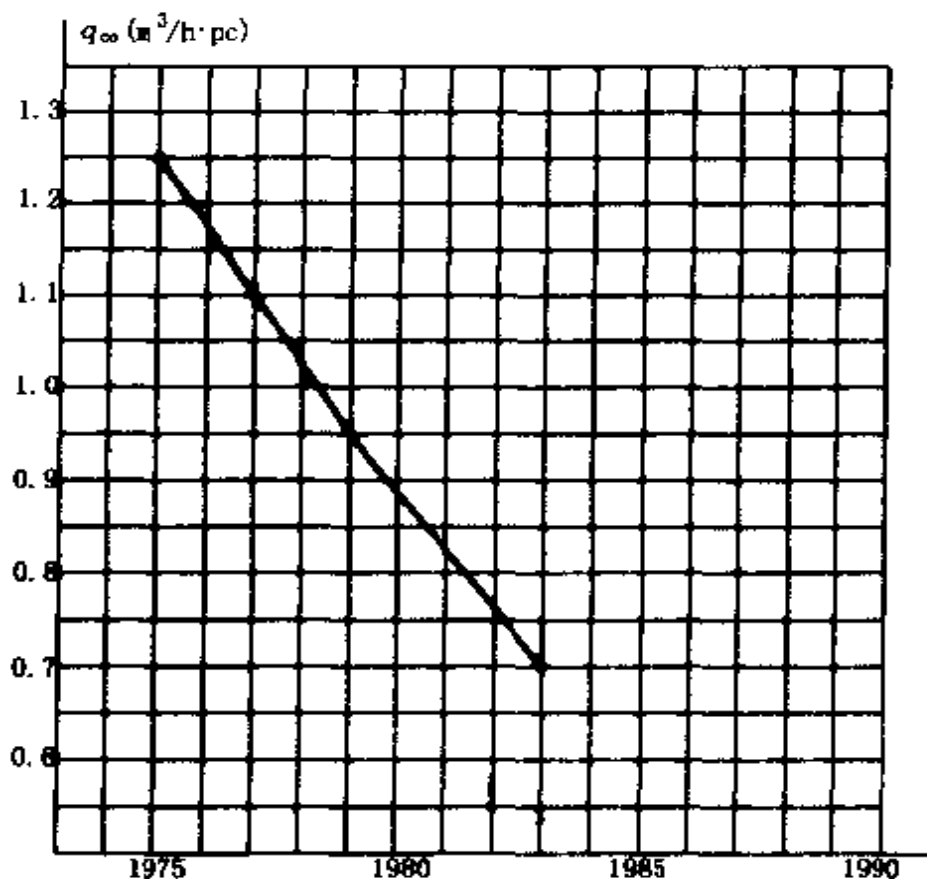


图 4 1975 年至 1985 年间 PIARC 所提出的 q_{CO}

1987 年至 2000 年的 13 年中, PIARC 十八届大会亦作了 q_{CO} 值再下降 50% ~ 70% 的预测估计。

我国实行改革开放以来, 德、法、日、美、意、韩等国已在我国合资建厂制造新型车辆, 且已大量投入生产, 每年将有大量的新车走上公路投放市场。在此形势下, 通风设计不单是要考虑 N 的设计年限, 也应明确 q 的设计年限, 两者必须匹配, 否则所设计的通风系统必定规模过大, 浪费建设资金。

根据我国最新的《汽车报废标准》规定, 轻、微型载货汽车

(含越野型)、带拖挂载货汽车、矿山作业专用车及各类出租车使用8年,其他车辆使用10年均作报废处理。新标准和老标准比较,汽车使用年限从原来的10年至14年缩短到8年至10年。行驶里程由原来的40万至70万公里缩短为30万至50万公里。因此,本条文规定交通量的设计年限应与有害气体排放量的设计年限相匹配。

不同工况车速对应的适应交通量可参照表6进行验算。

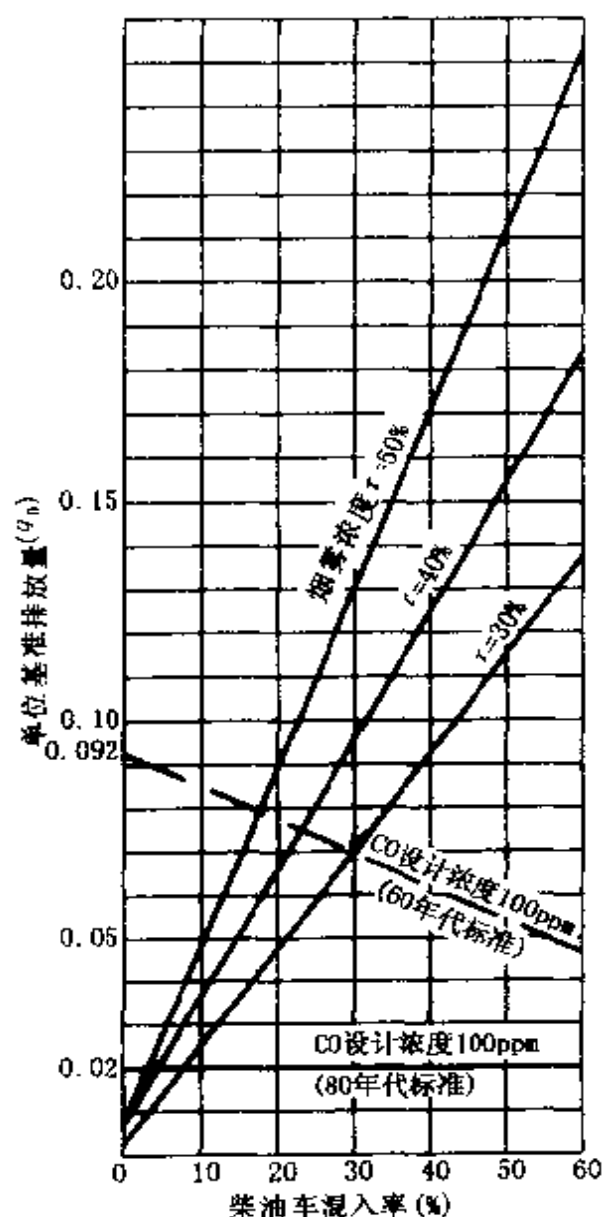


图5 日本CO需风量系数

表6 各工况车速的适应交通量

v (km/h)	N' (小客车· 辆/h·车道)	N'' (小客车· 辆/h·车道)
100	1400	795
80	1600	919
70	1750	990
60	1800	1020
50	1780	1000
40	1700	965
30	1550	880
20	1330	755
10	950	540

注: v ——工况车速;

N' ——单向交通时各工况车速的最大适应交通量;

N'' ——双向交通时各工况车速的最大适应交通量。

此表是参照 PIARC 隧道技术委员会报告的建议和英国通风设计规定。

3.4.2 CO 排放量

公式 (3.4.2) 中的 N 是经 OD 调查得到的各种车辆混合交通量, 采用适应交通量验算时, 应折算成小客车。

CO 基准排放量采用 $q_{CO} = 0.01\text{m}^3/\text{辆} \cdot \text{km}$ 的主要参照车型是:

——上海桑塔纳 JV 1.8L 型车, 5 座, 满载 1.46t, 60km/h 时, 油耗 4.9L/100km; 90km/h 时, 油耗 6.3L/100km; 120km/h 时, 油耗 8.3L/100km。

——一汽奥迪 Audi 100 型, 5 座, 满载 1.71t, 90km/h 时, 油耗 5.9L/100km; 120km/h 时, 油耗 7.6L/100km。

——北京切诺基 BJ/XJ213 型吉普车, 5 座, 满载 2t, 满载时油耗 8.5L/100km。

本条文取值 $q_{CO} = 0.01\text{m}^3/\text{辆} \cdot \text{km}$, 略大于日本现行规范《公路隧道通风技术基准》(1985 版) 所定 $q_{CO} = 0.007\text{m}^3/\text{辆} \cdot \text{km}$ 。但较我国《公路隧道设计规范 JTJ 026—90》所列举的北京 BJ212 型轿车的 $q_{CO} = 1.955 \times 0.0176 = 0.0344\text{m}^3/\text{辆} \cdot \text{km}$, 降低了 71%。

车型系数 f_m , 除柴油车定为 1.0 (与 PIARC 及日本现行规范一致) 外, 余均参照《中国汽车大全》和《汽车使用、维修大全》中典型车型:

旅行车 三峰牌 TJ620B 型车, 10 座, 满载 2.38t, 油耗 14L/100km。

金杯牌 SY622B 型车, 10 座, 满载 2.47t, 最大油耗 12L/100km。

轻型货车 北京牌 BJ104I, Q2DG 型车, 满载 4.11t, 油耗 13.8L/100km。

金杯牌 SY132C 型车, 满载 3.89t, 油耗 14L/100km。

中型货车 东风牌 EQ1090E 型车, 满载 9.29t, 油耗 26.5L/100km。

解放牌 CA1091 型车, 满载 9.31t, 油耗 26L/100km。

大型客车 东风牌 GZ660 型车, 51 座, 满载 9.4t, 油耗 28L/100km。

太湖牌 XQ641 型车, 37 座, 满载 10t, 油耗 29L/100km。

纵坡一车速系数 f_{iv} 有两种提法, 一种是 f_i 与 f_v 分为不同的两组; 另一种是合二为一, 称为 f_{iv} 。本规范采用后者。本条文内容主要参照日本现行规范与 PIARC 报告。日本规范比较简单, 取 $f_{iv}=1.0$ 。PIARC 历届报告均略有调整, 但幅度不大。本规范以 PIARC (1987) 报告及 (1991) 报告推荐值为基础, 作了综合、调整和简化处理 (见表 7 和表 8), 以便于使用。

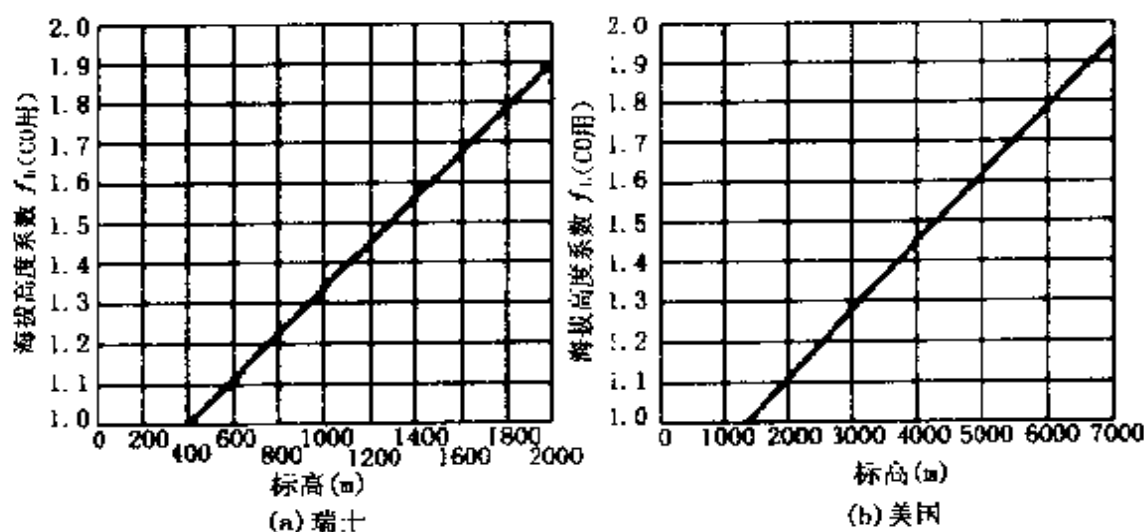
表 7 PIARC (1987) 的 f_{iv}

i (%)		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
v (km/h)	f_i	0.87	0.9	0.93	0.97	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2
	f_v									
100	1.2	1.04	1.08	1.11	1.16	1.2	1.26	1.32	1.38	1.44
80	1.1	0.957	0.99	1.023	1.067	1.1	1.155	1.21	1.265	1.32
70	1.05	0.914	0.945	0.977	1.019	1.05	1.103	1.155	1.208	1.26
60	1.0	0.87	0.9	0.93	0.97	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2
50	0.95	0.825	0.855	0.884	0.922	0.95	0.998	1.045	1.093	1.14
40	0.9	0.783	0.81	0.837	0.873	0.9	0.945	0.99	1.035	1.08
30	0.85	0.74	0.765	0.79	0.825	0.85	0.893	0.935	0.978	1.02
20	0.8	0.696	0.72	0.744	0.776	0.8	0.84	0.88	0.92	0.96
10	0.7	0.609	0.63	0.651	0.679	0.7	0.735	0.77	0.805	0.84

表 8 PIARC (1991) 的 f_{iv}

	i (%)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
v (km/h)	f_1 f_v	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.08	1.15	1.23	1.3
100	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.51	1.61	1.72	1.82
80	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.21	1.29	1.38	1.46
70	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.14	1.22	1.3	1.38
60	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.08	1.15	1.23	1.3
50	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	1.04	1.1	1.18	1.25
40	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.98	1.05	1.12	1.18
30	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.94	1.0	1.07	1.13
20	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.9	0.95	1.02	1.08
10	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.86	0.92	0.98	1.04

国际上现有两种海拔高度系数 f_h 。第一种既考虑在高海拔地区, 汽车发动机效率降低, 有害气体排放量增加的影响, 又考虑海拔高处空气稀薄, 风机工作风量有所增加的影响。实质上是排放量修正系数和需风量修正系数两者的乘积, 故 f_h 数值较大。PIARC 历届报告推荐用的 f_h 属这一种。第二种是只考虑排放量的增大, 需风量的增大另做计算 (见本规范第 3.4.3 条), 故数值较小。如图 6 所示, 瑞士、美国等国家所用的属第二种, 且数值完全一致。美国 Colorado 州公路局曾于 1964 年和 1965 年会同

图 6 国外的 f_h 系数

州卫生署做过高原现场实测，所得结果与沿用多年的 f_h 值非常接近。本条文的海拔高度系数 f_h 只对排放量作修正，故采用与瑞、美国等国一致的数值。

3.4.4 烟雾的排放量

烟雾基准排放量采用 $q_{VT}=2.5\text{m}^3/\text{辆}\cdot\text{km}$ ，含义是每辆中型柴油货车行走 1km 排放浓度为 1m^{-1} 的烟雾 2.5m^3 。此值与 PIARC 最近数届大会隧道委员会推荐的 $q_T^0=16\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{t}$ 一致。

车型系数 $f_{m(VI)}$ 随相对车重而定。本条取满载质量 9.5t 的中型柴油货车的 $f_{m(VI)}$ 为 1.0 。由于缺乏资料依据，本规范暂未规定汽油载货车的 $f_{m(VI)}$ 。

所采用的 $f_{iv(VI)}$ 均参照 PIARC (1991) 的推荐值。表 3.4.4-3 中未列有 100km/h 的纵坡系数，这是因为国内外均无这方面的技术成果和资料，当设计车速取 100km/h 时可参考 80km/h 的情况酌情取值。

本条文的海拔高度系数 $f_{h(VI)}$ ，采用根据 1968 年日本建设省土木研究所实测数据所制定的日本现行规范推荐值。

3.4.5 稀释烟雾的需风量

计算稀释 CO 的需风量时，如活动状态（坐车、步行或劳动）相同，既要考虑 CO 浓度，也要考虑经历时间，二者不可偏废。但计算稀释烟雾的需风量时，烟雾浓度与经历时间没有关系，即使是经历时间很短，也要满足确保视距（能见度）的要求。所以在采用纵向通风方式时，应按隧道出口或竖（斜）井排风口的“点浓度”进行需风量的计算。

3.4.6 稀释空气中异味的需风量

本条所用换气频度与 PIARC 二十届大会（1995）报告所介绍的一致。

3.5 通风计算

3.5.1 一般规定

1 这里所说的风机包括射流风机、轴流风机。

2 在通风计划阶段，应结合路线走向和选择隧道位置等工作比选经济合理的通风方式。隧道内设计风速、一氧化碳（CO）和烟雾浓度（VI）分布应满足行车交通的安全性和舒适性要求，对全通风系统的经济性和合理性作概略讨论。

在初步设计阶段，应对可选的通风方式进行通风系统初步设计，并确定通风系统规模，即选定隧道通风各要素（如隧道条件、车辆与交通条件、隧道卫生标准与营运服务水平等），然后计算所需风压和风量、风机的大致规格、设置台数等，同时根据交通量等提出通风分期实施的设计方案。

当采用竖井（或斜井）结合射流风机进行分段组合通风时，这种通风系统技术复杂，我国经验很少，应针对其中的关键技术做专题技术设计，如组合风压、风量、分段风速、送风和排风风压、风口与风道构造形式等应做详细计算分析，必要时还应通过模拟实验进行分析。

在施工图设计阶段，通风计算和设计应深化初步设计或技术设计的工作成果，确定通风系统的细部构造，精确计算所需风压和风量，预测计算隧道投入营运后的各种通风状态（如短期单洞双向交通、远期双洞单向交通、通风设施分期安装、交通量变化等）。

3 隧道内通风风速一般均在 30m/s 以下，因此可以不考虑空气压缩性影响。

通风中涉及到的流动，在微观上是复杂的，但在宏观上可视为恒定流，这在实际应用中是可行的。

隧道内空气虽受汽车尾排废气污染，但它与洞外新鲜空气常混为一体，难以分开，因此可以忽视空气性质的变化，而作为纯空气考虑。

4 这里的摩阻损失系数考虑的是混凝土壁面，如果采用光洁材料装饰壁面，应视实际情况取合理值（小于本规范表 3.5.1-2 所示值），必要时可通过模拟实验确定摩阻损失系数。

5 风道的断面尺寸常从构造考虑而沿程改变，这时在外来

风压力的作用下使得风道的风速和风压发生改变。在复杂的风道系统通风计算时，可以绘制压力线图（包括全压力线和静压力线），由此可容易看出风速和风压的变化。

如图 7 所示，在存在入口和扩大部的风道模式中，有连续性方程 $A_1 v_1 = A_2 v_2$ 。

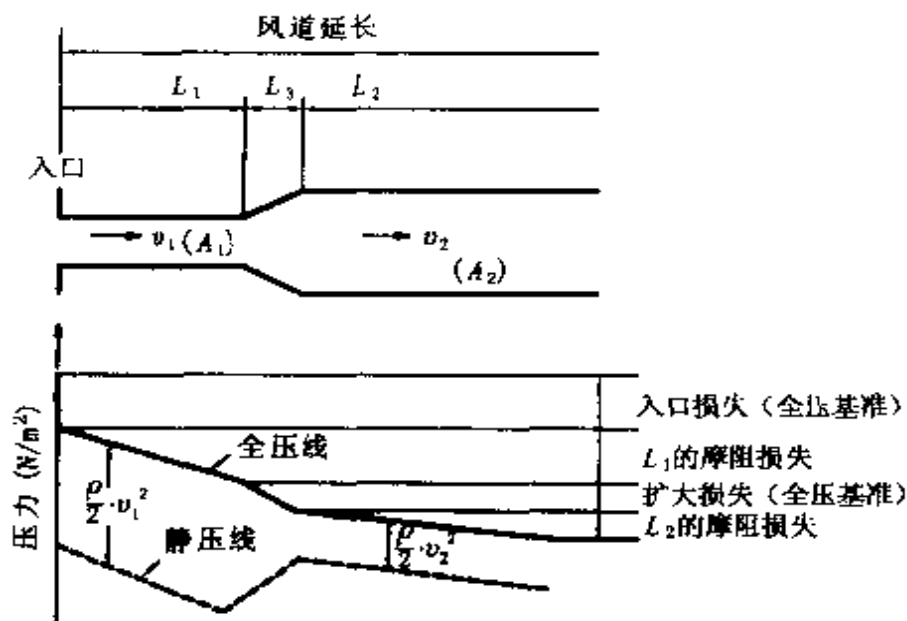


图 7 压力线图

该图中扩大部的压力损失称为局部阻抗。风道内如果没有阻抗力，其全压力沿程不变。由于阻抗力或压力损失的存在使得全压力发生变化，因此应尽可能减少弯道和断面变化。

在低风速通风系统中，送风机所需全压较小，因此不得低估风道断面尺寸改变和弯道造成的压力损失，以防止造成送风机风量不足。

在高风速通风系统中，风速越大所需全压力越急剧增加，从而导致电力费大幅增加，因此应合理确定风道结构尺寸，尽可能减少风道断面改变和弯道数。

对于一些特殊的变断面或弯道，其局部压力损失应通过模型实验来确定，使其取值更加合理。在隧道建成投入营运后，宜对局部压力损失的实际情况进行回访性实测（如果按风机两期实施

的方案，即可通过实测适当调整未实施通风设施和通风参数)。

6 在双向交通情况下，无法利用汽车交通流产生的通风活塞作用，一般作为阻力考虑，在此情况下的通风计算是以与洞内风向相逆的交通流中的较大者为考虑对象的。因此只要满足此条件并由此确定风机容量就不会发生风量不足的问题。

在单向交通情况下，可将交通通风力作为通风的一种动力（即活塞作用力）有效利用。需要注意的是，其通风计算往往考虑远期设计交通量，而在营运近期交通量较小，或者说交通量是一个变化量，其交通通风力也随之变化，有时会出现风量不足；交通堵塞或慢速行驶时，同样会产生风量不足的问题。为此，应对通风系统的各营运工况进行计算分析。

以上是针对纵向式通风系统而言的，对于全横向式或半横向式通风系统也应对交通通风力进行讨论，但比纵向式问题简单。

3.5.2 自然风阻力

1 在隧道内自然风向与交通方向一致时产生推力（顺压），相反时则产生阻力（逆压）。从实际情况看自然风向难以与交通方向完全一致，且经常变化，从安全考虑，通风计算中通常视自然风向与交通方向逆向，即作为阻力考虑。

2 压力差大致由两部分构成，即①隧道洞口间的气象气压坡度差及隧道内外温度差引起的压力差；②洞外自然风吹入洞口时那一瞬间产生的“风墙式”压力差。这两者相互关连，相互作用，几乎不能独立分解。

实际隧道中，这种自然通风力并不是经常存在，即使存在，也因为时间和自然风风向的变化而经常变动。因此，在计算中常把他作为逆向阻力，有时也可按 $\Delta p_{ni}=0$ 考虑。

关于自然风速引起的车道风速 v_n ，不是指洞外大气自然风速，而是指在自然风作用下产生的洞内（洞口内侧）风速，他的大小可在隧道贯通后但未通车前的期间内进行实测，但在设计计算阶段很难掌握，目前基本上是凭经验确定。对于一般地形条件的隧道，若没有可借鉴资料，通常可取 $2\text{m/s} \sim 3\text{m/s}$ 。

将式 (3.5.2-1) 中的 v_n 与 Δp_m 之关系绘于图 8 以作参考。

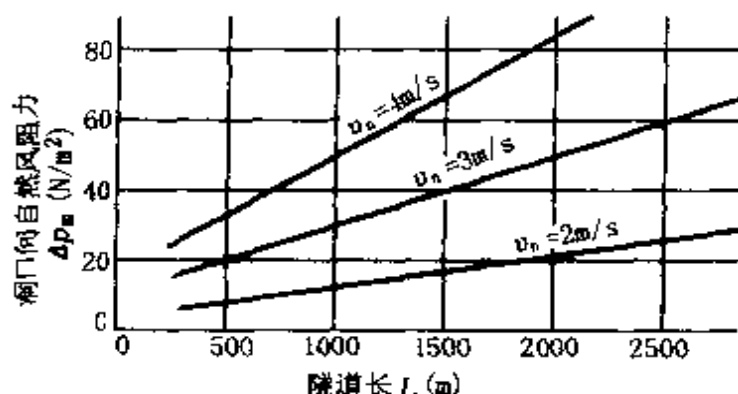


图 8 自然风阻力 Δp_m 与自然风引起的洞内风速 v_n 的关系

3.5.3 交通通风力

通常情况下交通通风力比自然风阻力大得多, 因此, 在单向交通条件下, 即使隧道较长但只要汽车交通流顺畅, 仅交通通风力就能够满足通风要求。但是, 在双向交通条件下, 交通通风力互相抵消或者成为阻力, 因此即使隧道较短也可能需要设置机械通风设施。

隧道设计风速 v_r 亦称交通通风风速, 其方向为设计通风方向, 本规范式 (3.5.3-1) 中, 以隧道设计风速 v_r 的方向为基准, 定为正向, 必须注意确定 n_+ 、 n_- 及 $v_{t(+)}$ 、 $v_{t(-)}$ 的方向。

当单向交通时, 交通通风力 Δp_t 按下式计算:

$$\Delta p_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (v_t - v_r)^2 \quad (2)$$

当双向交通且上、下行交通状态完全一样 (即 $n_+ = n_-$; $A_{m(+)} = A_{m(-)}$) 时, 交通通风力 Δp_t 按下式计算:

$$\Delta p_t = -4 \times \frac{A_{m(+)} \cdot A_{m(-)}}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_+ \cdot v_{t(+)} \cdot v_{t(-)} \quad (3)$$

由于隧道内行驶汽车的种类较多, 因此应求出汽车群正面投影面积 A_c 和空气阻力系数 ξ_c 的平均值, 该条文提出的值是几种主要汽车的统计值, 如果有条件, 可通过试验来获得空气阻力系

数。用本条文提供的 A_c 、 ξ_c 值，可得到 A_m r_l 关系图（如图 9 所示）。

3.5.5 射流风机通风方式

设置射流风机的目的是补充汽车交通通风力的不足，由喷流效果保持空气推力，使隧道内压力上升，以满足所需通风量的要求。

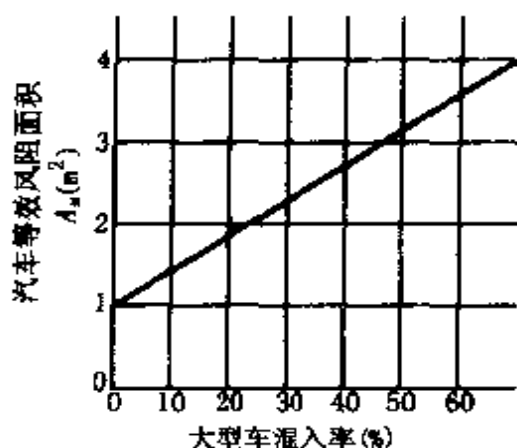


图 9 汽车等效阻抗面积

本条文中式 (3.5.5-2) 所示的射流风机台数计算式是基于图 3.5.5 所示的通风压力模式而定的（即自然风向与交通方向 v_t 、隧道内风向 v_i 相逆）。

当单向交通时，如果自然风向、交通方向与隧道内风向相同，则有：

$$i = \frac{\Delta p_r - \Delta p_m - \Delta p_t}{\Delta p_j} \quad (4)$$

如果交通方向与自然风向、隧道内风向相逆，且自然风所产生的洞内风速非常大时，则有：

$$i = \frac{\Delta p_r - \Delta p_m + \Delta p_t}{\Delta p_j} \quad (5)$$

式 (4) 所示的情况所需风机台数较少，若自然风向经常变化，则隧道内风压可能不足，因此一般不作为计算风机台数的依据。式 (5) 所示的情况则表明自然风压比汽车交通“活塞”作用显著，结果射流风机升压力的方向与设计希望的方向相逆，因此这种情况是极少发生的，一般不予考虑。

采用射流风机通风方式设计时，应注意以下事项：

1) 不宜频繁逆转射流风机的喷流方向，避免引起通风压力模式的不断改变。

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，而且考虑到空

气流动的惯性,经常使其转向会造成较大的能量损失和气体紊乱。

2) 自然风引起的洞内风速 v_n 可取 $2\text{m/s} \sim 3\text{m/s}$ 为标准值。当将需风量 Q_{req} 作为设计风量 Q_r 考虑时,隧道设计风速可按 $v_r = Q_{\text{req}}/A_r$ 取值。

3) 射流风机宜按拱顶悬吊式设置,并应考虑与壁面的摩阻损失,适当折减风机产生的升压力。

我国大多数隧道是将风机悬吊于拱顶处,但也有将风机设置在靠拱脚侧壁处的情况,这时,必须充分讨论风机升压力的摩阻损失问题以及喷流速度对行车安全的影响问题。

4) 射流风机的喷流能量亦可按推力考虑,其推力 F 按下式计算:

$$F = \rho \cdot A_j \cdot v_j \cdot (v_j - v_r) \quad (6)$$

3.5.6 集中送入通风方式

集中送入通风方式是将较大功率轴流风机布置在隧道洞口附近,其喷流方向与交通方向一致,所产生的风压与交通通风力合成,由此克服隧道通风阻力和自然风阻力。由动量法则可得图 3.5.6 中两断面的动量方程如下:

$$A_r \cdot \Delta p_b = \rho \cdot Q_r \cdot v_{r2} - [\rho \cdot (Q_r - Q_b) \cdot v_{r1} + K_b \cdot \rho \cdot Q_b \cdot v_b \cdot \alpha \cos \beta] \quad (7)$$

$$v_{r1} = \frac{Q_r - Q_b}{A_r}; \quad v_{r2} = \frac{Q_r}{A_r}$$

集中送入通风方式的工作原理与射流风机通风基本一样,属于同一类型。由于该方式在隧道内存在大风量高速喷流风速,因此一般适用于单向交通隧道。它的优点是便于集中控制和管理,升压效果显著。我国目前还没有一座采用该通风方式的隧道,本规范所采用的通风参数参考了国外的经验和标准。关于送风口升压动量系数 K_b , 应综合考虑送风道和送风口的结构形式及工程造价,尽可能保证 $K_b = 1.0$ 。图 10 所示为送风口升压增量与送风口升压动量系数 K_b 之关系,该图为日本建设省土木研究所的实验结果,可作参考。

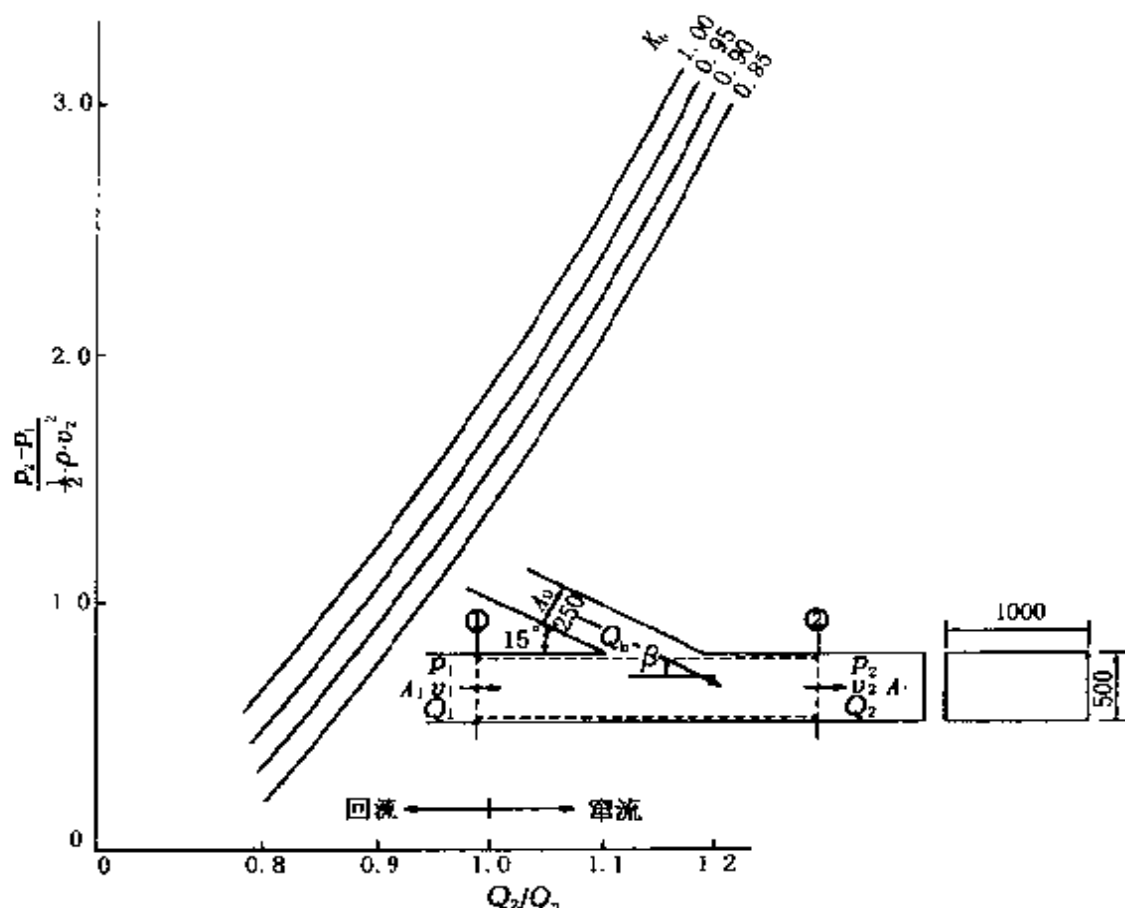


图 10 送风口升压增量与送风口升压动量系数 K_h

3.5.7 竖井排出通风方式

竖井排出式是利用竖井底部产生的负压来实现换风的通风方式。

该通风方式一般适用于双向交通隧道；当单向交通并在出口附近有较严格的环境要求即不允许洞内污染风吹出（出口）洞外的情况时，也可以采用该通风方式，但在隧道短区段（出口侧）气流与行车方向及隧道总体设计风向呈相反流动，压力损失较大，流态可能出现紊乱，设计计算中应充分注意这一问题。从环保考虑，洞内污染空气吹出（洞外）量为零原则上是能够做到的，但这需要较大的竖井排风动力，消耗较大电力；另一方面汽车交通流本身会带出一部分风量，因此将洞口处的污染风量定为零一般很难，设计中应注意这一点。

应当指出，单向交通隧道采用这种通风方式不太理想，但基于一些特殊考虑（如环保要求等），只要精心设计和严格营运管

理,采用这种方式也是可行的。

1 压力模式

图(3.5.7-1)中 Δp_g 为洞口与竖井出口之间存在的气象压力差。以竖井出口为基准, Δp_g 长期产生加压作用,为通风推力(区别于自然风阻力 Δp_m)。当 $A_1 = A_2$ 且隧道及竖井内风向如该图中所示方向流动时,竖井底部合流后的全压力可用式(3.5.7-1)表示。

该通风方式一般采用竖井结构,但也可采用斜井或水平坑道,这时通风设计中应建立相应的压力模式,并考虑不同的结构特点和压力损失等进行计算。

2 排风机设计风压

按照本条第1款所示的压力模式和平衡方法以及有关损失系数就可确定出各区段的风量、风速及风压,然后考虑自隧道内排风口到竖井出口止的总压力损失(含连接风道和竖井的壁面摩阻损失、弯道损失、钢网风门损失等),并考虑一定的风压富余,就可以求得风机所需的全风压力。

作为一个参考,图11所示为无车辆通行时的合流型压力线图

3 设计要求与注意事项

1) 单向交通时,在合流型压力模式条件下,隧道短区段(出口侧)内气流与隧道总体设计风向相逆流动,并与行车方向相逆,对此,设计计算中必须充分注意。

2) 在合流型压力模式中,考虑到竖井底部左右两侧的风量受交通条件或自然风影响而出现不均衡,必须充分估计排风量,I、II区段均不得出现通风量不足现象;另一方面,从建设费和营运电力费的经济性考虑,排风量不应过大。一般可采取在隧道拱顶局部设置挡风板的办法或与射流风机组合的通风方式。

3) 应尽可能缩短连接风道和竖井的长度,减少转弯次数,必要时宜设导流叶片,以减小风压损失。

如图12所示,挡风板有多种类型,通常采用其中的A类型。若挡风板的设置个数为3个以上时,每一个挡风板的损失系

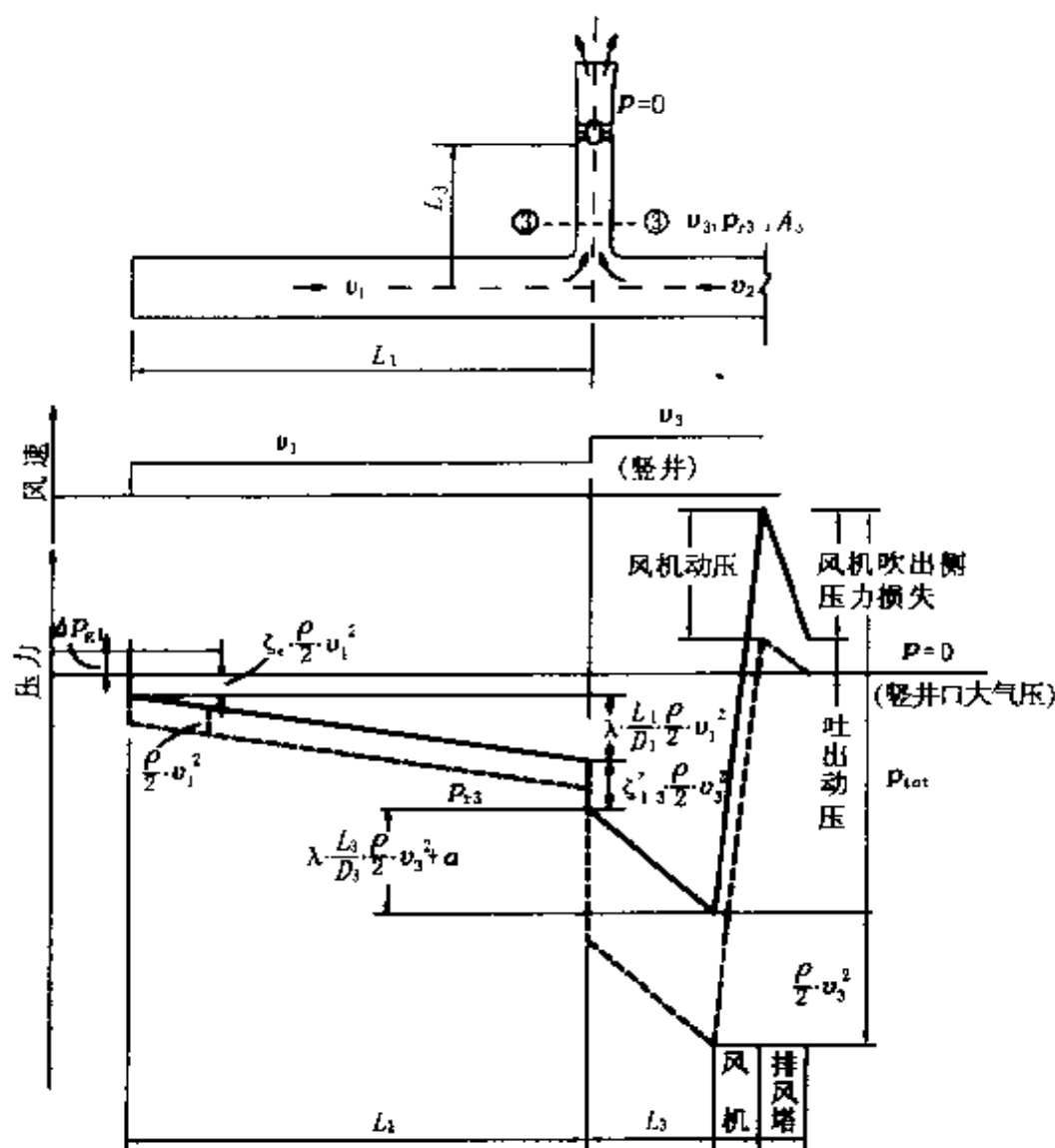


图 11 合流型竖井排出式压力线图

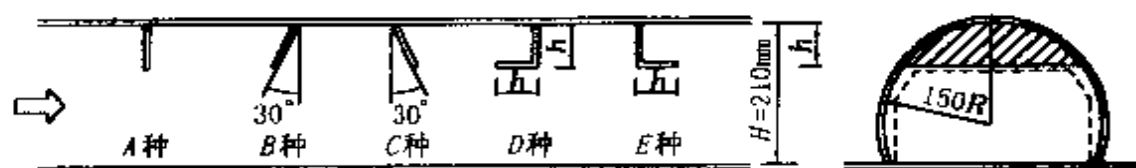


图 12 挡风板类型

数 ζ_j 值是稳定的。当为 A 类型挡风板时, ζ_j 与设置间距和尺寸的关系如图 13 所示。

假设在半圆形断面的公路隧道的拱部, 建筑界限以上空间全部设置挡风板, 即 $h/H=0.23\sim0.31$ 左右, 此时, 挡风板引起

的隧道内损失系数 ζ_j 的值约为 0.35~0.45 左右 (A 类型), 其压力损失可按下式计算:

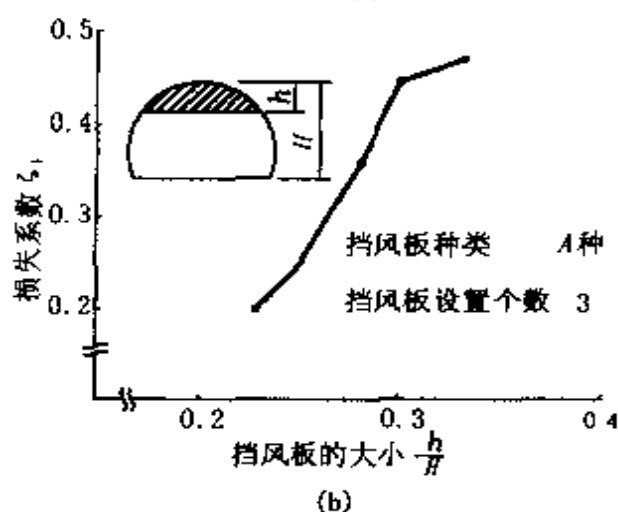
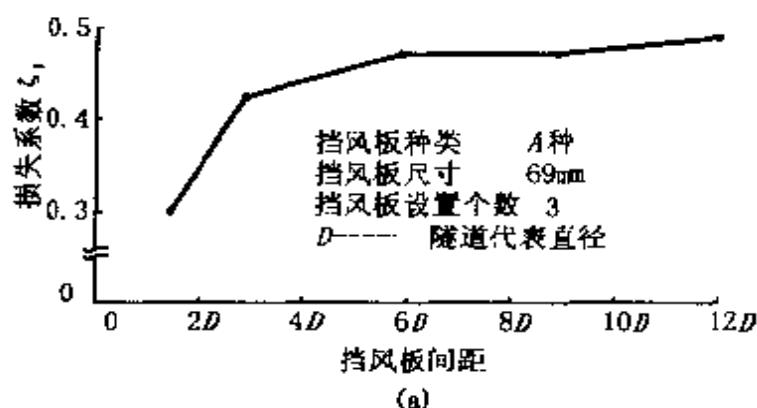


图 13 挡风板间距与大小对损失系数的影响

$$\Delta p = \zeta_j \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \cdot n' \quad (8)$$

式中 n' ——挡风板设置个数。

3.5.8 竖井送排式纵向通风方式

1 压力模式

竖井送排式通风是通过竖井交换隧道空间的空气, 达到排出污染气体同时送入新鲜气体之目的, 由此加大纵向通风方式的适用长度。

考虑图 14 所示的模式, 分别取排风口和送风口两段的隔离体, 应用流体力学动量法则, 即有如下关系:

$$A_r (p_{r2} - p_{r1}) = \rho \cdot Q_{r1} \cdot v_{r1} - (\rho \cdot Q_{r2} \cdot v_{r2} + \rho \cdot K_e \cdot Q_e \cdot v_e) \quad (9)$$

$$\Delta_r(p_{r4} - p_{r3}) = \rho \cdot Q_{r4} \cdot v_{r4} - (\rho \cdot Q_{r3} \cdot v_{r3} + \rho \cdot K_b \cdot Q_b \cdot v_b \cdot \cos\beta) \quad (10)$$

通过数学推导整理可分别得到排风口升压力 Δp_e 和送风口升压力 Δp_{bc}

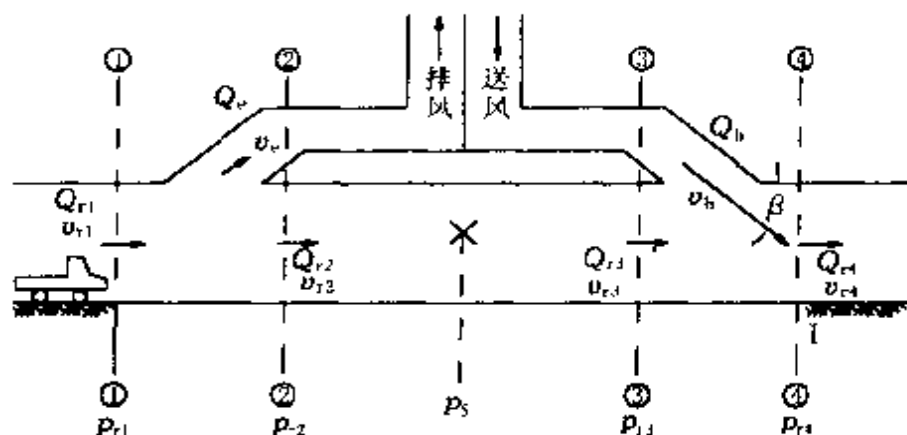


图 14 竖井送排口模式图

大量的计算结果和一些模型实验结果表明，若取隧道内设计风速 v_r 为 $4\text{m/s} \sim 7\text{m/s}$ ，排风口产生的升压力较送风口升压力小得多，因此起升压作用的就主要依靠送风口，于是升压力计算可简化为（取竖井两端设计风速一样，均为 v_r ）：

$$\Delta p_b = 2 \times \frac{Q_b}{Q_r} \left[\left(\frac{K_b \cdot v_b \cdot \cos\beta}{v_r} - 2 \right) - \frac{Q_b}{Q_r} \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \quad (11)$$

关于升压动量系数，参考日本有关技术资料 and 实验报告，送风口升压动量系数 K_b 一般可取 $0.95 \sim 0.90$ 。排风口升压动量系数 K_e 受排风口断面积与隧道断面积之比、排风量与隧道设计风量之比影响，其关系如图 15 所示。

2 设计判定

当采用竖井送排通风方式时，沿隧道全长排出废气的浓度分布为：从隧道入口开始基本是直线状上升，在竖井底部达最大值，过了送风口位置，浓度急剧降低，之后又几乎呈直线状上升。如果有数个竖井，则反复上述状态，因此从理论上讲，采用这种通风方式，则隧道长度没有限制。

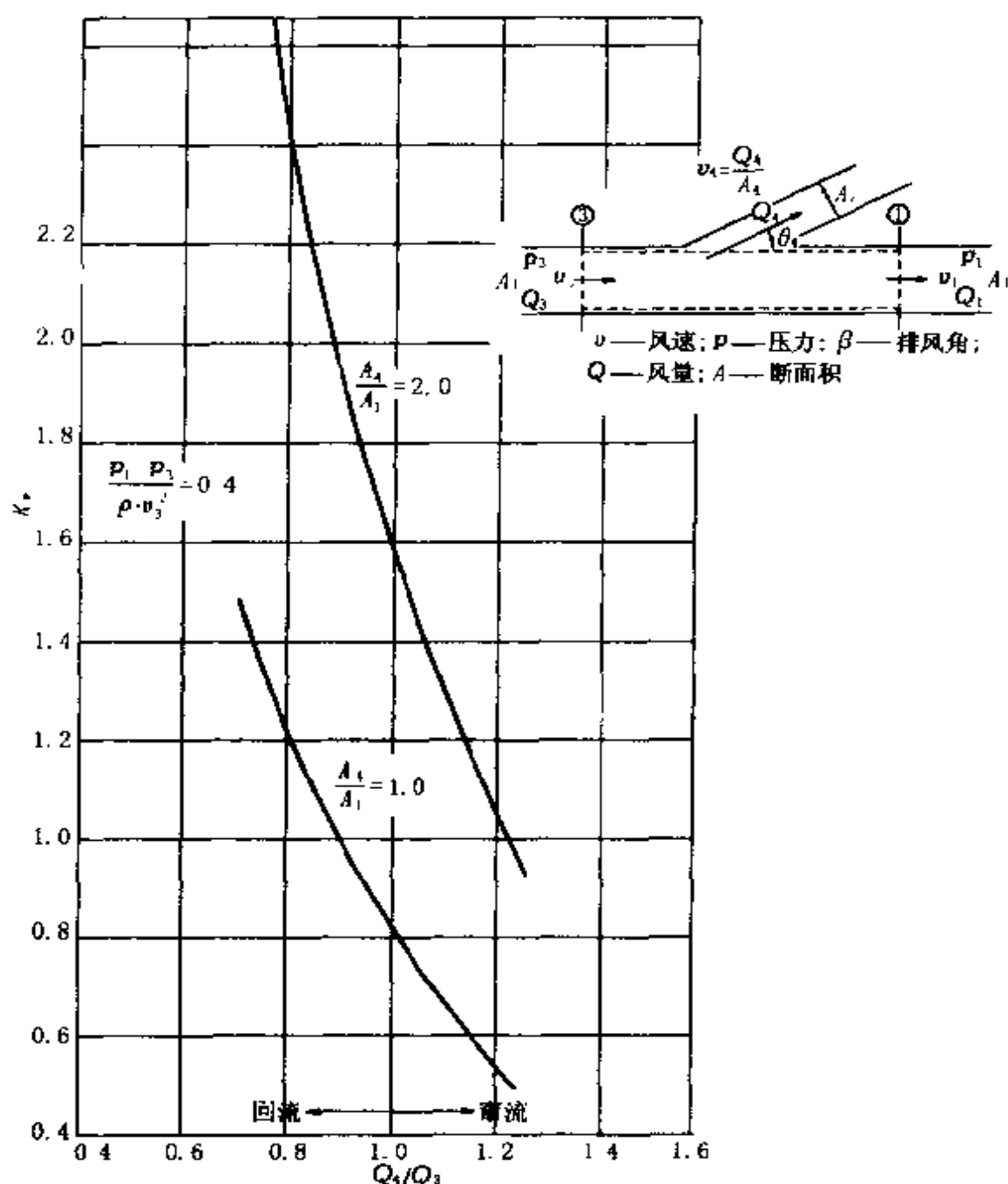


图 15 K_e 与 Q_e/Q_r 之关系

实际情况中，隧道内其他位置有时会随机出现废气浓度接近设计允许浓度的高浓度情况，在视觉和感官方面可能不适，但由于汽车交通通风力的扩散作用，即使暂时出现高浓度情况也会很快消失。

在排风口与送风口之间的竖井底部短道内客观地存在着窜流

和回流两种状态,有时受车流量、自然风、风机运转等的影响还会出现两者交替的状态,总之,短道内气流有一定流速。即使按短道气流流速等于零进行设计,由于交通通风力的扩散作用,短道浓度也会在允许浓度之内。

污染风量(需风量)与新鲜风量(设计风量)之比 Q_{req}/Q_r 如果大于 1.0,隧道内空气污浊,这是不允许的;如果等于或小于并趋近于 1.0,隧道内空气清洁,符合设计要求;如果远小于 1.0,虽然隧道内空气清洁,但存在浪费,设计方案不经济。本条文中提出的 0.9 是经大量设计计算后的经验值。

送风量 Q_b 与排风量 Q_e 互为相关,一般不能独立确定,需要通过试算确定合理值。

3 排风机、送风机设计风压

全压力中的总压力损失 p_{de} 或 p_{db} 是由各弯道、扩径管、缩径管、沿程摩阻、进出口等引起的压力损失之和,各损失系数 ζ_i 可参照我国有关流体力学和空气动力学专业书籍中的资料(或有关试验报告)。在计算简例中采用的有关损失系数,仅供参考。

4 设计要求与注意事项

1) 当竖井送排通风方式用于分期修建的隧道时,需对远期交通量相应的双洞单向交通情况和近期交通量相应的单洞双向交通情况分别计算,并尽可能兼顾该两种情况,应在满足两种通风系统要求的前提下获得工程的经济性。

2) 采用竖井送排通风方式时,从交通通风力方面考虑取隧道设计风速 $6\text{m/s} \sim 8\text{m/s}$ 往往较为经济合理。

3) 竖井位置应选在由交通通风力从洞口带入的气流(活塞风)几乎达到设计浓度的地点附近,同时竖井位置的选择还应充分考虑地形地质条件,将这些自然条件与营运动力费等进行工程与经济综合比较分析后确定出合理的竖井位置。

4) 送风量应在充分估计从竖井底部窜过排风口和短道流入送风口后段的风量及其污染浓度状态的基础上加以计算确定。

5) 为获得大的升压力,送风口喷流风速一般取 $25\text{m/s} \sim$

30m/s,并要求喷流方向与隧道轴向一致。但风速过大,对行车安全不利,为此宜将风口构造设置于隧道拱部。

送风口喷流风速越快,其通风升压效果越大,但该风速过大可能会给行驶车辆造成不良影响,因此一般要求不超过 30m/s。当双向交通时,无法利用交通升压力,因此可取上限 30m/s;当单向交通时,交通升压力显著,这时可适当降低该喷流风速。关于风速调节,日本关越隧道的具体做法是,当初期单洞双向交通时在送风口部设置风速调节板,以缩小送风断面积;当成为双洞单向交通时撤除该调节板,以扩大送风口断面积,同时适当降低送风机提供的风压。

6) 排风口断面平均风速不得大于隧道内设计风速,并从行车安全考虑,提出宜取 5m/s~6m/s。

考虑到便于土建结构的实施和节省工程造价,本项提出排风口其底面与隧道检修道标高基本齐平,排风方向与隧道轴向垂直。实际工程中也有排风口与隧道轴向呈夹角相交的情况,当制订方案时,应对风压损失与工程造价等因素进行综合比较分析,确定经济合理的结构形式。

7) 为减小气流阻抗,在竖井底部及连接风道各弯道处应设置隅角导流叶片,在风道变断面部、合流部及送排风口等处宜设置整流板。

排风口及竖井塔口部(尤其是吸风口)需设置钢网门,以防止异物吸入损坏风机叶片,同时也保护检修人员过往时的安全。

8) 应防止送、排风口间的短道内气流出现回流、短路以及污染问题,由此确定合理的短道长度。

短道区间的污染风量(需风量)可按下式计算:

$$Q_{\text{req/s}} = q_0 \cdot N \cdot ds \cdot f_{iv} \quad (12)$$

式中 ds ——短道长度;

q_0 ——单位需风量;

f_{iv} ——坡度—车速修正系数。

短道浓度可按下式计算:

$$C_s = Q_{\text{req}/s} / Q_s \quad (13)$$

式中 Q_s ——短道设计流量, $Q_s = Q_{\text{rl}} - Q_e$ 。

等效新鲜空气量 Q_{sf} 可按下式计算:

$$Q_{\text{sf}} = Q_s \cdot (1 - C_s) \quad (14)$$

从上述三个计算式可知, 短道长度越长, 其间污染浓度越大, 其等效新鲜空气量就越少, 从这个意义考虑, 送排风口间的短道不宜过长; 但从防止回流方面考虑, 该短道又不得过短。因此, 应综合分析确定合理值。根据日本数座特长公路隧道经验和我国工程实践, 本款提出短道长度不得小于 50m。

9) 排风口断面积不得大于隧道正洞断面积; 送风口断面积应考虑隧道拱部结构及允许面积, 不得侵占隧道建筑限界, 同时从送风口风速考虑, 本款提出该取值范围。

10) 为防止地面换气时排出的废气不被重新吸入, 地面换气塔的排风口标高宜高出吸风口 5m 以上。

3.5.9 竖井与射流风机组合通风方式

竖井送排式通风中的排风系统或竖井单排式通风系统, 其升压效果非常小, 往往难以与隧道所需压力 ($\Delta p_r - \Delta p_t + \Delta p_m$) 平衡, 为了解决升压力不足的问题, 一般可采用升压效果较显著的射流风机与之组合。

有时还可利用射流风机产生的升压力来替代部分排风量。譬如, 排风量 Q_e 增大 $60\text{m}^3/\text{s}$, 其升压力增长量约为 $10\text{N}/\text{m}^2$, 并且其增长率随隧道设计风速减小而降低。从能量观点看, 这是不经济的。因此, 应设置适当数量的射流风机来弥补上述之不足。假设一台 30kW 功率的射流风机所产生的升压力 Δp_j 约为 $10.6\text{N}/\text{m}^2$, 显然用它来替换 $60\text{m}^3/\text{s}$ 的排风机风量是经济合理的。

然而, 射流风机采用过多会导致洞内风速增大, 不利于行车, 更为重要的是, 既然作了竖井送排式通风的计划, 就应充分发挥升压效果非常显著的送风升压作用, 如果用射流风机替代部分送风升压力也是不经济的。因此, 射流风机在组合通风中 (指

竖井送排式) 总体来说辅助性的, 如果其数量及安装位置合理, 将会起到良好的通风升压效果。

3.5.10 静电吸尘通风方式

隧道内行驶车辆尾排的有害气体主要有一氧化碳 (CO)、氧化氮化合物 (NO_x) 和烟尘等, 随着柴油车的增多, 含烟尘气体越来越成为隧道内的主要污染源, 对于特长隧道, 如果在隧道内合适位置一处或数处设置静电吸尘装置滤除汽车尾排气体中的烟尘, 就可以取消或减少竖井, 并使隧道的适用长度增大。日本在 80 年代首先开发出静电吸尘机装置, 并成功地使用于惠那山、关越等数座特长隧道中, 吸尘效果显著, 达到净化空气的目的。挪威也在公路隧道中成功采用。我国有关研究机构也在开发之中, 但还远远未达到使用阶段。由于这种通风方式非常合理, 将会在我国公路隧道中得到应用, 因此本条文借鉴日本的方法列出其计算方法和注意事项, 供今后实际应用时参考。

2 吸尘装置的升压力

由于行驶车流的活塞作用或其他通风设施的机械力作用产生隧道内通风风速, 因此在此状态下可以不依赖由吸尘装置吹出风量 Q_c 产生的升压力。

吸尘装置的安装方式一般有两种, 一种是在隧道拱部轴向分散布置小容量吸尘装置的分散安装方式, 另一种是在隧道主洞断面的旁侧隧道安装大容量吸尘装置的方式。目前日本新建隧道多数采用大容量吸尘装置的方式。

当采用大容量吸尘装置时, 其送风口尺寸受到结构上的制约, 一般与竖井送排通风方式的送风口基本一样, 风流以较高风速吹出, 因此其升压力完全可按竖井送排式通风的压力模式进行计算, 并可考虑 $Q_c = Q_b = Q_e$ 的关系。

3 设计要求与注意事项

1) 一般要求在 C_n' 达到设计允许浓度的位置安装吸尘装置, 则吸尘装置的处理风量 Q_c 一般可任意设定, 但是, 由于 $Q_c \times \eta_{VI}$ 的量就是下一区段 (指两台吸尘装置之间的隧道长度)

的需风量,因此 Q_c 的取值大小对吸尘装置的设置间距和设置台数有影响。因而, Q_c 值应根据隧道各方面的条件进行综合性经济技术比较分析后合理确定。

2) 当以烟雾浓度 (VI 值) 为主要控制指标时,经吸尘装置过滤后的空气可流入下一区段再利用,这种空气再利用一般没有限度;当以一氧化碳 (CO) 为主要通风控制指标时,必须考虑空气再利用的限度。隧道内吸尘机总的处理风量一般不大于隧道入口流进风量的 2 倍,当超过该值时,应考虑将吸尘装置与其他通风方式进行组合,适时地换入新鲜空气。

3) 吸尘装置电力设计时,应充分考虑吸尘机房内的各种压力损失和吹风动压等。静电吸尘机本身的压力损失约为 150N/m^2 。

4) 靠近吸尘机前部的风道断面风速应尽可能呈均匀分布,以使吸尘机每个吸尘单元的 VI 改善率一样。吸尘机的通过风速一般不宜大于 7m/s 。

5) 当隧道发生火灾时,吸尘机机室一般不具有吸收烟雾功能,必须从其他方面采取排烟措施。

6) 吸尘机运转时容易产生臭氧 (O_3) 等物质,实际装置时应将臭氧控制在允许值之内。

7) 应处理好吸尘机滤除的粉尘,一般可将该粉尘做固化处理,以便储藏或弃放,并可作为与其他物质的混合剂加以积极利用。

3.5.11 全横式和半横向通风方式

相对于纵向通风方式,横向通风方式其气流是在隧道横断面上产生循环,进行换风,其车道内风速较低,排烟效果良好,特别适用于双向交通特长隧道。我国采用横向通风方式的隧道较少,通风计算实例不多,有待于今后积累经验,逐步提高该通风方式的设计水平。

1 通风系统压力模式

横向通风系统的压力模式一般可用图 3.5.11 表示。当隧道两洞口间不存在由自然风、气象温度差引起的压力差 (Δp_m) 时,在该图中用 (压力) 实线表示,并作为通风标准状态;当两

洞口间存在压力差时，隧道内风压应发生变化，同时风道始端和末端的压力也随之上升或下降，图中用（压力）虚线表示。风机全风压一般以虚线所示的所需风压为基准来确定。

2 送、排风道的风压

为决定送风道末端风道静压原点值，应确定送风道所需末端压力 $(p_{b0} - p_{r0})$ 。即使隧道内压力分布由于气象状态或交通状态的改变而发生变化也必须保证风量分布的均匀性。送风道所需末端压力一般可取 $(p_{b0} - p_{r0}) = 150\text{N/m}^2$ 。

为决定排风道静压原点值，应确定排风道的所需始端压力 $(p_{ri} - p_{ei})$ 。设计中必须考虑有充足的始端压力，以克服行车通过后产生的负压或气象变化等引起的不良影响，保证排风的均匀性。排风道所需始端压力一般可取 $(p_{ri} - p_{ei}) = 100\text{N/m}^2$ 。

上述两值是参照日本东（京）名（古屋）高速公路隧道的实测结果确定的，在我国暂无该数据的情况下可按上述取值。

根据国外一些工程实践，隧道风压与送风道风压之关系可由图 16 表示，当然这与送风道的形状和尺寸有关。但在实际隧道中几乎没有 $(p_{b0} - p_{r0})_{\min}$ 比吹出所需压力小的情况。

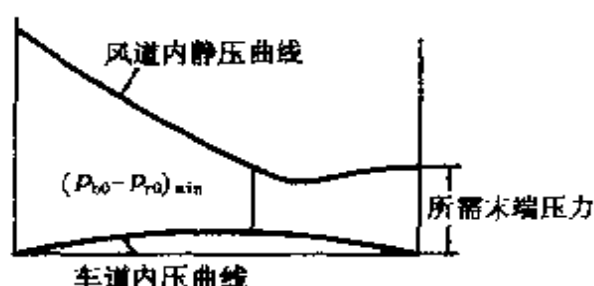


图 16 送风道所需末端压力与最低吹出风压之关系

上述的送风道末端压力和排风道始端压力均是工程实测结果，自然因素已在其中，因此可以说两洞口间气象压力差 Δp_m 已包含在实测压力值之中。

3 隧道内风压

式 (3.5.11-5) ~ 式 (3.5.11-8) 所示的送风型半横向式的隧道风压分布计算，是在单位长度送风量 q_b 呈均匀分布的前提下进行的（一般为洞口两端输风的情况）。当考虑洞口单端输风时，送风道末端处的隧道风压通常为零，在送风机全风压计算中一般将该处隧道风压取为零。

当采用两个送风道以上将隧道划为两个以上通风区段时，可由图 17 所示的图解法，即通过隧道风压分布与风道区间的相对位置关系求解隧道风压。

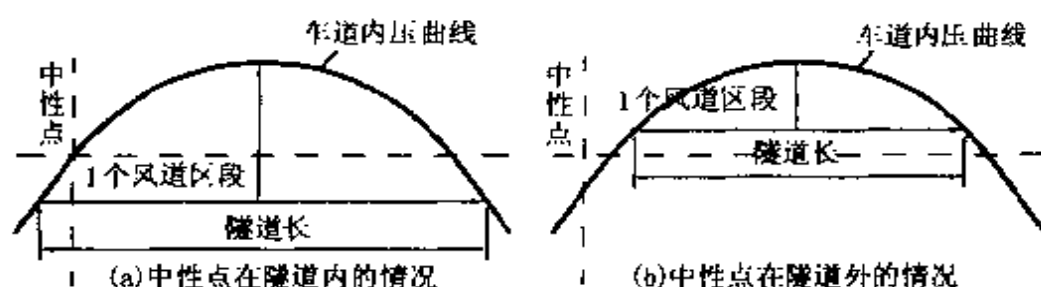


图 17 隧道风压图解法示意图（两端输风情况）

5 风机所需全风压

送风机所需全风压应包括空气从换气塔口被吸入后流经连接风道、送风道、送风口吹入隧道，然后从排风口排出为止的各种压力损失之和，并加上隧道风压。

排风机所需全风压应包括空气自隧道被吸入排风口后流经排风道、连接风道，然后从换气塔口排出为止的各种压力损失之和。考虑到全横向式通风时在标准大气压状态下的隧道静压通常为零，因此式 (3.5.11-11) 中未考虑该项压力。

通风计算简例

简例 1 射流风机纵向通风方式

1 单向交通隧道

1) 计算条件

隧道长度	$L_r = 1537\text{m}$
隧道断面积	$A_r = 63.85\text{m}^2$
断面当量直径	$D_r = 8.166\text{m}$
设计交通量	$N = 1984 \text{ 辆/h}$
大型车混入率	$r_1 = 59\%$
计算行车速度	$v_1 = 60\text{km/h} = 16.67\text{m/s}$

自然风引起的洞内风速 $v_n = 2.5\text{m/s}$

需风量 $Q_{\text{req}} = 450\text{m}^3/\text{s}$

隧道设计风速 $v_r = 450/63.85 = 7.05\text{m/s}$

2) 隧道内所需升压力

$$\Delta p = \Delta p_r + \Delta p_m - \Delta p_t$$

由式 (3.5.4)

$$\begin{aligned}\Delta p_r &= \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \\ &= \left(1 + 0.6 + 0.025 \times \frac{1537}{8.17}\right) \times 0.6 \times 7.05^2 \\ &= 187.97\text{N/m}^2\end{aligned}$$

由式 (3.5.2-1), 并设 $v_n = 2.5\text{m/s}$

$$\begin{aligned}\Delta p_m &= \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \\ &= \left(1 + 0.6 + 0.025 \times \frac{1537}{8.17}\right) \times 0.6 \times 2.5^2 \\ &= 23.64\text{N/m}^2\end{aligned}$$

由式 (3.5.3-1)

$$\begin{aligned}\Delta p_t &= \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (v_t - v_r)^2 \\ n &= \frac{1984 \times 1537}{3600 \times 16.67} = 50.82 \text{ 辆} \\ \Delta p_t &= \frac{3.6}{63.85} \times 0.6 \times 50.82 \times (16.67 - 7.05)^2 \\ &= 159.04\text{N/m}^2 \\ \Delta p &= 187.97 + 23.64 - 159.04 \\ &= 52.57\text{N/m}^2\end{aligned}$$

3) 900 型射流风机所需台数

900 型射流风机每台的升压力 Δp_j 为

$$\begin{aligned}\Delta p_j &= \rho \cdot v_j^2 \cdot \Phi \cdot (1 - \Psi) \\ &= 1.2 \times 25^2 \times 0.010 \times (1 - 0.282) \\ &= 5.385\text{N/m}^2\end{aligned}$$

$$A_j = 0.636 \text{m}^2; \quad \Phi = \frac{A_j}{A_r} = \frac{0.636}{63.85} = 0.010;$$

$$v_j^2 = 25 \text{m/s}; \quad \Psi = \frac{v_r}{v_j} = \frac{7.05}{25} = 0.282$$

则
$$i = \frac{\Delta p}{\Delta p_j} = \frac{52.57}{5.385} = 9.76 \approx 10 \text{ 台}$$

合计需要 10 台射流风机，按 5 组布置。

4) 1120 型射流风机所需台数

1120 型射流风机每台的升压力为 Δp_j ，由

$$A_j = 0.98 \text{m}^2; \quad \Phi = \frac{A_j}{A_r} = \frac{0.98}{63.85} = 0.0154;$$

$$v_j^2 = 30 \text{m/s}; \quad \Psi = \frac{v_r}{v_j} = \frac{7.05}{30} = 0.235$$

可得

$$\begin{aligned} \Delta p_j &= \rho \cdot v_j^2 \cdot \Phi \cdot (1 - \Psi) \\ &= 1.2 \times 30^2 \times 0.0154 \times (1 - 0.235) \\ &= 12.72 \text{N/m}^2 \end{aligned}$$

则
$$i = \frac{\Delta p}{\Delta p_j} = \frac{52.57}{12.72} = 4.1 \approx 4 \text{ 台}$$

合计需要 4 台 1120 型射流风机，按 2 组布置。

2 双向交通隧道

1) 计算条件

除按 1 中所示的有关计算条件外，另附加以下条件：

设计交通量	$N = 759 \text{ 辆/h}$
上行方向交通量率	$k = 60\%$
计算行车速度	$v_t = 40 \text{km/h} = 11.11 \text{m/s}$
自然风引起的洞内风速	$v_n = 1.5 \text{m/s}$
需风量（按烟尘考虑）	$Q_{\text{req}} = 172 \text{m}^3/\text{s}$
隧道设计风速	$v_r = 172/63.85 = 2.69 \text{m/s}$

2) 隧道内所需升压力

按射流风机喷流方向与主交通率方向一致考虑。

$$\begin{aligned}\Delta p_r &= \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \\ &= \left(1 + 0.6 + 0.025 \times \frac{1537}{8.17}\right) \times 0.6 \times 2.69^2 \\ &= 27.37 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta p_m &= \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \\ &= \left(1 + 0.6 + 0.025 \times \frac{1537}{8.17}\right) \times 0.6 \times 1.5^2 \\ &= 8.51 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

$$\Delta p_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_+ \cdot (v_t + v_r)^2 - \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_- \cdot (v_t - v_r)^2$$

对上行方向交通正常行驶时隧道内车辆数 n_+ 为

$$n_+ = \frac{759 \times 0.6 \times 1537}{3600 \times 11.11} = 17.5 \text{ 辆}$$

对下行方向交通的车辆数 n_- 为

$$n_- = \frac{759 \times 0.4 \times 1537}{3600 \times 11.11} = 11.67 \text{ 辆}$$

设 $A_{m+} = A_{m-}$ ，则

$$\begin{aligned}\Delta p_t &= \frac{-3.6}{63.85} \times \frac{1.2}{2} [11.67 \times (11.11 - 2.69)^2 - 17.5 \times (11.11 + 2.69)^2] \\ &= -84.75 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

由以上计算结果，则有

$$\begin{aligned}\Delta p &= \Delta p_r + \Delta p_m - \Delta p_t \\ &= 27.37 + 8.51 - (-84.75) = 120.63 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

3) 射流风机所需台数的计算

按单向交通隧道方法计算，则对于 900 型风机，

$$\Delta p_j = 5.385 \text{ N/m}^2$$

$$i = \frac{\Delta p}{\Delta p_j} = \frac{120.63}{5.385} = 22.4 \approx 23 \text{ 台}$$

按 12 组 24 台布置

对于 1120 型风机，则

$$\Delta p_i = 12.72 \text{ N/m}^2$$

$$i = \frac{\Delta p}{\Delta p_i} = \frac{120.63}{12.72} = 9.48 \approx 10 \text{ 台}$$

按 5 组 10 台布置。

简例 2 集中送入纵向通风方式

1 隧道条件

交通方向	单向交通
隧道长度	$L_r = 2150 \text{ m}$
隧道断面积	$A_r = 63.85 \text{ m}^2$
断面当量直径	$D_r = 8.17 \text{ m}$
设计交通量	$N = 2480 \text{ 辆/h}$
大型车混入率	$r_f = 0.3$ ($A_m = 2.3 \text{ m}^2$)
计算行车速度	$v_r = 60 \text{ km/h} = 16.67 \text{ m/s}$
需风量	$Q_{\text{req}} = 490 \text{ m}^3/\text{s}$
集中送风设施如图 18 所示。	

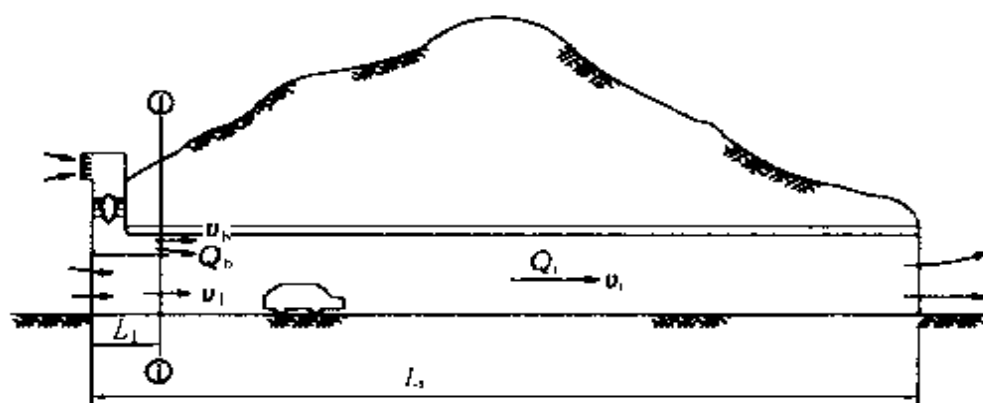


图 18 集中送入通风方式的隧道概况图

2 隧道内所需升压力 Δp

$$\Delta p = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_1}{D_i} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 + \lambda_r \cdot \frac{L_r - L_1}{D_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 - \Delta p_t + \Delta p_m$$

$$v_1 = \frac{Q_r - Q_b}{A_r - A_b}$$

这里, 为了简化, 设 $L_1=0$, 并假定 $v_1=0.5v_r$, 则得下式:

$$\Delta p = \left[\frac{1}{4} (1 + \zeta_e) + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r} \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 - \Delta p_t + \Delta p_m$$

$$v_r = \frac{490}{63.85} = 7.67 \text{ m/s}$$

$$\frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 = 0.6 \times 7.67^2 = 35.3 \text{ N/m}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta p_r &= \left[\frac{1}{4} (1 + \zeta_e) + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r} \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \\ &= \left[\frac{1}{4} (1 + 0.6) + 0.025 \times \frac{2150}{8.17} \right] \times 35.3 \\ &= 246.36 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta p_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot n \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_t - v_r)^2$$

式中 $A_m = 2.3 \text{ m}^2$; $n = \frac{2480 \times 2150}{3600 \times 16.67} = 88.85$

$$\begin{aligned} \Delta p_t &= \frac{2.3}{63.85} \times 88.85 \times 0.6 \times (16.67 - 7.67)^2 \\ &= 155.55 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta p_m = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2$$

设 $v_r = 2.8 \text{ m/s}$

$$\Delta p_m = \left(1 + 0.6 + 0.025 \times \frac{2150}{7.67} \right) \times 0.6 \times 2.8^2 = 40.49 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta p = 246.36 - 155.55 + 40.49 = 131.3 \text{ N/m}^2$$

3 送风机风量 Q_b 、送风口喷出风速 v_b 和送风口面积 A_b

本例取送风口面积 $A_b = 12 \text{ m}^2$, 并认为送风口面积大小对送风口土建结构造价影响不大。设送风口喷流方向与隧道轴方向夹角 β 为 5° , 取 $\cos\beta \approx 1.0$, $K_j = 0.9$ 。

1) 计算风速 v_b (取送风口面积为 12 m^2)

重写式 (3.5.6-1), 即

$$\Delta p_b = 2 \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) \left[\frac{k_h \cdot v_b \cdot \cos\beta}{v_r} - 2 + \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

本例中有 $\Delta p_b = \Delta p$ ，并设 $f = \frac{A_r}{A_b} \cdot k_b \cdot \cos \beta$ ；则有

$$\Delta p_b = 2 \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) \cdot \left[f \cdot \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) - 2 + \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

$$\text{移项得} \quad 2 \times (1+f) \times \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right)^2 - 4 \times \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) - \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} \cdot v_r^2} = 0$$

上式为 (Q_b/Q_r) 的 2 次方程。

$$\text{由} \quad \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} \cdot v_r^2} = \frac{131.3}{0.6 \times 7.67^2} = 3.72$$

$$\text{及} \quad f = \frac{A_r}{A_b} \cdot K_b \cdot \cos \beta = \frac{63.85}{12} \times 0.9 \times 1.0 = 4.79$$

解出 $Q_b/Q_r = 0.765$ ，所以

$$Q_b = Q_r \times 0.765 = 490 \times 0.765 = 375 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$[\text{检验} \quad v_1 = \frac{490 - 375}{63.85 - 12} = 2.22 \text{ m/s} < \frac{1}{2} \times 7.67 \text{ m/s}]$$

$$(1 + \xi_e) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 = (1 + 0.6) \times 0.6 \times 2.22^2 = 4.73 \text{ N/m}^2$$

因此， $v_1 = 0.5v_r$ 的假定是偏安全的，可以不再做试算。]

2) 计算送风口面积 (取送风口风速为 30m/s)

在 $\Delta p_b = \Delta p$

$$= 2 \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) \left[\frac{K_b \cdot v_b \cdot \cos \beta}{v_r} - 2 + \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) \right] \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

中， $v_b = 30 \text{ m/s}$ 时，由

$$\frac{K_b \cdot v_b \cdot \cos \beta}{v_r} = \frac{0.9 \times 30 \times 1.0}{7.67} = 3.52;$$

$$\frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} \cdot v_r^2} = \frac{131.3}{0.6 \times 7.67^2} = 3.72$$

$$\text{可得} \quad \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right)^2 + 1.52 \left(\frac{Q_b}{Q_r} \right) - \frac{3.72}{2} = 0$$

$$\text{解出} \quad Q_b/Q_r = 0.801, \quad Q_b = 490 \times 0.801 = 393 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_b = Q_b / v_j = 393 / 30 = 13.09 \text{ m}^2$$

$$[\text{检验 } v_1 = \frac{490 - 393}{63.85 - 13.09} = 1.91 \text{ m/s} < \frac{1}{2} \times 7.67 \text{ m/s}]$$

因此, $v_1 = 0.5 v_r$ 的假定是偏安全的, 可以不再做验算。]

4 送风机动力设计

在第3条所示的计算分析基础上, 对其动力费和工程建设费(如风机设备、风塔、风道等)作比较分析, 确定出最好的送风设备。

重写式(3.5.6-4), 并设 Δp_d 为 300 N/m^2 , 则

对于第3条1)的情况 ($Q_b = 375 \text{ m}^3/\text{s}$, $v_b = 31.2 \text{ m/s}$),

$$\begin{aligned} p_{\text{tot}} &= 1.1 \times \left(\frac{\rho}{2} v_b^2 + \Delta p_d \right) \\ &= 1.1 \times (0.6 \times 31.2^2 + 300) = 972 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

理论功率为

$$A_{\text{kw}} = \frac{Q_b \times p_{\text{tot}}}{1000} = \frac{375 \times 972}{1000} = 364.5 \text{ kW}$$

若设送风机效率 $\eta = 0.8$, 则送风机电机轴功率 S_{kw}

$$S_{\text{kw}} = \frac{A_{\text{tot}}}{\eta} = \frac{364.5}{0.8} = 455.6 \text{ kW}$$

对于第3条2)的情况 ($Q_b = 393 \text{ m}^3/\text{s}$, $v_b = 30 \text{ m/s}$),

$$\begin{aligned} p_{\text{tot}} &= 1.1 \times \left(\frac{\rho}{2} v_b^2 + \Delta p_d \right) \\ &= 1.1 \times (0.6 \times 30^2 + 300) = 924 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$S_{\text{kw}} = \frac{393 \times 924}{1000 \times 0.8} = 453.9 \text{ kW}$$

以上计算可以看出, 在本例中所需动力费没有多少差异, 因此工程建设费就成为经济比选的主要因素。

简例3 竖井送排式通风方式

(考虑一座竖井的情况)

1 隧道条件

交通方向

单向交通

隧道长度

$L = 4100 \text{ m}$ ($L_1 = 2000 \text{ m}$, $L_2 = 2100 \text{ m}$)

隧道断面面积	$A_r = 66.04\text{m}^2$
断面当量直径	$D_r = 8.25\text{m}$
设计交通量	$N = 1850 \text{ 辆/h}$
大型车混入率	$r_l = 55\%$ ($A_{rl} = 3.43\text{m}^2$)
柴油车混入率	$r_d = 28\%$
计算行车速度	$v_l = 80\text{km/h} = 22.22\text{m/s}$
需风量	$Q_{\text{req}} = 812\text{m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{req}l} = 396$, $Q_{\text{req}2} = 416$)

自然风引起的洞内风速 $v_n = 1.5\text{m/s}$

2 送、排风量，浓度、升压力及设计风速

$$\text{由 } Q_b = Q_{\text{req}} - Q_{rl} + Q_e \cdot \left(\frac{Q_{rl} - Q_{\text{req}l}}{Q_{rl}} \right)$$

$$\Delta p_c = 2 \cdot \frac{Q_e}{Q_{rl}} \cdot \left(2 - \frac{k_e \cdot v_e}{v_{rl}} - \frac{Q_e}{Q_{rl}} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{rl}^2$$

$$\Delta p_b = 2 \cdot \frac{Q_b}{Q_{r2}} \cdot \left(\frac{k_b \cdot v_b \cdot \cos \beta}{v_{r2}} - 2 + \frac{Q_b}{Q_{r2}} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2$$

并取 $v_b = 28\text{m/s}$, $v_e = 6\text{m/s}$, $\beta = 0^\circ$ ($\cos \beta = 1.0$), $K_b = 1.0$, $K_e = 0.9$, 按表 9 所列计算 (需分别列表进行试算)。

通过分析可确定如下诸量:

$$Q_e = 340\text{m}^3/\text{s}; \quad Q_{rl} = 396\text{m}^3/\text{s}; \quad v_{rl} = 6.0\text{m/s};$$

$$Q_b = 360\text{m}^3/\text{s}; \quad Q_{r2} = 416\text{m}^3/\text{s}; \quad v_{r2} = 6.3\text{m/s}$$

表 9 升压力 Δp_e 、 Δp_b 的计算 (取 $Q_e = 340\text{m}^3/\text{s}$)

v_d	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	$Q_{r2} = Q_b + Q_e + Q_{rl}$ $v_{r2} = Q_{r2}/A_r$
Q_d	396	429	462	495	528	
$\rho/2 \cdot v_d^2$	22.03	25.86	29.99	34.43	39.17	
v_e/v_{rl}	1.0	0.923	0.857	0.80	0.75	
Q_e/Q_{rl}	0.859	0.793	0.736	0.687	0.644	
Δp_e	9.12	15.43	21.75	28.05	34.36	
Q_j	360	358	351	340	327	
Q_{r2}	416	447	473	495	515	
v_{r2}	6.302	6.769	7.162	7.495	7.800	
$\rho/2 \cdot v_{r2}^2$	24.31	28.04	31.39	34.38	37.24	
v_b/v_{r2}	4.443	4.136	3.909	3.736	3.59	
Q_b/Q_{r2}	0.865	0.801	0.742	0.687	0.635	
Δp_b	139.1	131.9	123.5	114.4	105.2	

$\Delta p_b + \Delta p_e = 139.1 + 9.12 = 148.22 \text{ N/m}^2$ (送排风口提供的升压力)

并验算:

$$C_2 = \frac{Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} = \frac{396}{396} = 1.0$$

$$C_3 = \frac{Q_{\text{req2}}}{Q_{r1} - Q_e - Q_{\text{req1}} + \frac{Q_e \cdot Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} + Q_b} = 1.0$$

$$\frac{Q_c}{Q_{r1}} = 0.859 < 1.0; \quad \frac{Q_c}{Q_{r2}} = 0.865 < 1.0$$

∴ 满足条件。

$$Q_s = Q_{r1} - Q_e = 396 - 340 = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_s = \frac{Q_s}{A_r} = \frac{56}{66.04} = 0.85 \text{ m/s}$$

即短道内气流存在低速流动。

3 隧道内所需压力 Δp

隧道内所需压力 Δp 应为 I 段和 II 段所需压力之和, 即

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_r + \Delta p_t + \Delta p_m \\ &= (\Delta p_{r1} + \Delta p_{r2}) + (\Delta p_{t1} + \Delta p_{t2}) + \Delta p_m \end{aligned}$$

计算通风阻力 Δp_r 时, 对于 I 段, 出口流量损失为零; 对于 II 段, 入口流量损失为零, 并考虑竖井分叉损失, 取分叉损失系数 $\zeta_{\text{分叉}} = 0.28$ 。计算汽车交通力 Δp_t 时, 考虑不利情况, 偏于安全, 取 $v_t = 50 \text{ km/h} = 13.89 \text{ m/s}$ 。计算自然风阻力 Δp_m 时, 送风口损失系数取 $\zeta_{\text{合流}} = 0.7$, 自然风引起的洞内风速取 $v_n = 1.5 \text{ m/s}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta p_{r1} &= \left(\zeta_{\text{入口}} + \lambda \cdot \frac{L_1}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r1}^2 + \zeta_{\text{分叉}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r1}^2 \\ &= \left(0.28 + 0.6 + 0.0255 \times \frac{2000}{8.25} \right) \times 0.6 \times 6.0^2 \\ &= 155.6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta p_{r2} = \left(1 + \lambda \cdot \frac{L_2}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2 + \zeta_{\text{合流}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2$$

$$= \left(1 + 0.7 + 0.0255 \times \frac{2100}{8.25} \right) \times 0.6 \times 6.3^2$$

$$= 199.0 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta p_{11} = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_1 \cdot (v_r - v_{r1})^2$$

$$= \frac{3.43}{66.04} \times 0.6 \times \frac{1850 \times 2000}{3600 \times 13.89} \times (13.89 - 6.0)^2$$

$$= 122.0 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta p_{12} = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_2 \cdot (v_r - v_{r2})^2$$

$$= \frac{3.43}{66.04} \times 0.6 \times \frac{1850 \times 2100}{3600 \times 13.89} \times (13.89 - 6.3)^2$$

$$= 118.5 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta p_m = \left(1 + \zeta_{\text{入口}} + \zeta_{\text{合流}} + \zeta_{\text{分叉}} + \lambda \cdot \frac{L}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2$$

$$= \left(1 + 0.6 + 0.7 + 0.28 + 0.0255 \times \frac{4100}{8.25} \right) \times 0.6 \times 1.5^2$$

$$= 21.0 \text{ N/m}^2$$

隧道内所需压力 Δp 即为

$$\Delta p = 155.6 + 199.0 - 122.0 - 118.5 + 21.0 = 135.1 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta p_b + \Delta p_e = 148.22 \text{ N/m}^2 > \Delta p_r - \Delta p_t + \Delta p_m = 135.1 \text{ N/m}^2$$

故满足压力条件。

4 送风口与排风口断面积、短道长度

根据国外工程经验，送风口断面积宜取 $A_b = 12 \text{ m}^2$ 左右，排风口断面积不得大于隧道正洞断面积。

由前面的计算结果可得

$$A_b = \frac{Q_b}{v_b} = \frac{360}{28} = 12.8 \text{ m}^2; \quad A_e = \frac{Q_e}{v_e} = \frac{340}{6} = 56.7 \text{ m}^2$$

满足要求。

短道长度从防止回流方面考虑，不得过短；从防止短道污染方面考虑，不宜过长，再综合考虑其他因素（如土建结构、风压沿程损失等问题），本例取短道长度 $d_s = 56 \text{ m}$ ，并取 $q_{v1} =$

$2.5\text{m}^2/\text{辆}\cdot\text{km}$, $k=0.007$, $f_{iv}=1.3$, 则

$$q_0 = \frac{q_{VI}}{3600k} = 0.0992 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{req/s}} = q_0 \cdot N \cdot ds \cdot f_{iv} = 0.0992 \times 1850 \times 0.056 \times 1.3 \\ = 13.36\text{m}^3/\text{s}$$

$$C_2 = \frac{Q_{\text{req/s}}}{Q_s} = \frac{13.36}{56} = 0.24$$

本例浓度分布如图 19 所示 (本例计算忽略了短道内的浓度变化)。

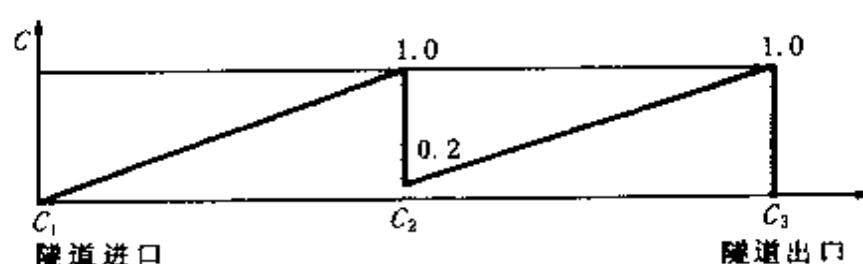


图 19 浓度分布

简例 4 竖井送排式与射流风机组合通风方式

1 隧道条件

交通方向

单向交通

隧道长度

$L = 3922\text{m}$ ($L_1 = 1972\text{m}$, $L_2 = 1950\text{m}$)

隧道断面积

$A_r = 59.5\text{m}^2$

断面当量直径

$D_r = 7.79\text{m}$

设计交通量

$N = 1656 \text{ 辆/h}$

大型车混入率

$r_1 = 70\%$ ($A_m = 4.08\text{m}^2$)

柴油车混入率

$r_d = 42\%$

计算行车速度

$v_1 = 60\text{km/h} = 16.67\text{m/s}$

需风量

$Q_{\text{req}} = 700.08\text{m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{reqI}} = 339.91$,
 $Q_{\text{reqII}} = 360.17$)

自然风引起的洞内风速 $v_n = 1.0\text{m/s}$

2 送、排风量、浓度、升压力及设计风速

$$\text{由 } Q_b = Q_{\text{req}} - Q_{r1} + Q_e \cdot \left(\frac{Q_{r1} - Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} \right)$$

$$\Delta p_e = 2 \cdot \frac{Q_e}{Q_{r1}} \cdot \left(2 - \frac{k_e \cdot v_e}{v_{r1}} - \frac{Q_e}{Q_{r1}} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r1}^2$$

$$\Delta p_b = 2 \cdot \frac{Q_e}{Q_{r2}} \cdot \left(\frac{k_b \cdot v_b \cdot \cos \beta}{v_{r2}} - 2 + \frac{Q_b}{Q_{r2}} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2$$

并取 $v_b = 28\text{m/s}$, $v_e = 6\text{m/s}$, $\beta = 0^\circ$ ($\cos \beta = 1.0$), $K_b = 1.0$, $K_e = 0.9$, 按表 10 所列计算 (需分别列表进行试算)。

表 10 升压力 Δp_e 、 Δp_b 的计算 (取 $Q_e = 280\text{m}^3/\text{s}$)

v_{r1}	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Q_{r1}	297.5	327.2	357.0	386.8	416.5	446.3
$\rho/2 \cdot v_{r1}^2$	15.00	18.15	21.60	25.35	29.4	33.75
v_e/v_{r1}	1.20	1.09	1.0	0.92	0.86	0.80
Q_e/Q_{r1}	0.941	0.856	0.784	0.724	0.672	0.627
Δp_e	-0.593	5.039	10.703	16.343	21.992	29.130
Q_b	362.7	362	356.5	347.2	335.1	320.5
Q_{r2}	380.2	409.2	433.5	454	471.6	486.8
v_{r2}	6.39	6.88	7.29	7.63	7.93	8.18
$\rho/2 \cdot v_{r2}^2$	24.50	28.40	31.89	34.93	37.73	40.15
v_b/v_{r2}	4.38	4.07	3.84	3.67	3.53	3.42
Q_b/Q_{r2}	0.954	0.885	0.822	0.765	0.711	0.658
Δp_b	155.85	148.54	139.56	130.13	120.23	109.80
$\Delta p_b + \Delta p_e$	155.26	153.58	150.26	146.47	142.22	138.93

通过分析可确定如下诸量:

$$Q_e = 280.0\text{m}^3/\text{s}; Q_{r1} = 357.0\text{m}^3/\text{s}; v_{r1} = 6.0\text{m/s};$$

$$Q_b = 356.48\text{m}^3/\text{s}; Q_{r2} = 433.48\text{m}^3/\text{s}; v_{r2} = 7.29\text{m/s}。$$

$\Delta p_b + \Delta p_e = 139.56 + 10.70 = 150.26\text{N/m}^2$ (送排风口提供的升压力),

$$\text{并验算: } C_2 = \frac{Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} = \frac{3390.91}{357.0} = 0.952 < 1.0.$$

$$C_3 = \frac{Q_{\text{req2}}}{Q_{r1} - Q_e - Q_{\text{req1}} + \frac{Q_e \cdot Q_{\text{req1}}}{Q_{r1}} + Q_b}$$

$$= \frac{360.17}{360.17} = 1.0$$

$$\frac{Q_e}{Q_{r1}} = \frac{280}{375.0} = 0.784 < 1.0; \quad \frac{Q_e}{Q_{r2}} = \frac{356.48}{433.48} = 0.822 < 1.0$$

∴ 满足条件。

$$Q_s = Q_{r1} - Q_e = 357.0 - 280.0 = 77.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_{rs} = \frac{Q_s}{A_r} = \frac{77.0}{59.5} = 1.29 \text{ m/s}$$

3 隧道内所需压力 Δp

隧道内所需压力 Δp 应为 I 段和 II 段所需压力之和, 即

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_r - \Delta p_i + \Delta p_m \\ &= (\Delta p_{r1} + \Delta p_{r2}) - (\Delta p_{i1} + \Delta p_{i2}) + \Delta p_m \end{aligned}$$

计算通风阻抗力 Δp_r 时, 对于 I 段, 出口流量损失为零; 对于 II 段, 入口流量损失为零, 并考虑竖井分叉损失, 取分叉损失系数 $\zeta_{\text{分叉}} = 0.28$ 。计算汽车交通力 Δp_i 时, 考虑不利情况, 偏于安全, 取 $v_i = 50 \text{ km/h} = 13.89 \text{ m/s}$ 。计算自然风阻力 Δp_m 时, 送风口损失系数取 $\zeta_{\text{合流}} = 0.7$, 自然风引起的洞内风速取 $v_n = 1.5 \text{ m/s}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta p_{r1} &= \left(\zeta_{\text{入口}} + \lambda \cdot \frac{L_1}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r1}^2 + \zeta_{\text{分叉}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r1}^2 \\ &= \left(0.28 + 0.65 + 0.0255 \times \frac{1972}{7.79} \right) \times 0.6 \times 6.0^2 \\ &= 155.71 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{r2} &= \left(1 + \lambda \cdot \frac{L_2}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2 + \zeta_{\text{合流}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{r2}^2 \\ &= \left(1 + 0.7 + 0.0255 \times \frac{1950}{7.79} \right) \times 0.6 \times 7.29^2 \\ &= 253.75 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{i1} &= \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_1 \cdot (v_i - v_{i1})^2 \\ &= \frac{4.08}{59.5} \times 0.6 \times \frac{1656 \times 1972}{3600 \times 13.89} \times (13.89 - 6.0)^2 \\ &= 166.42 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{c}} &= \frac{A_{\text{m}}}{A_{\text{r}}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_2 \cdot (v_1 - v_{12})^2 \\ &= \frac{4.08}{59.5} \times 0.6 \times \frac{1656 \times 1950}{3600 \times 13.89} \times (13.89 - 7.29)^2 \\ &= 115.16 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{m}} &= \left(1 + \zeta_{\text{入口}} + \zeta_{\text{合流}} + \zeta_{\text{分叉}} + \lambda \cdot \frac{L}{D_{\text{r}}} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{\text{n}}^2 \\ &= \left(1 + 0.6 + 0.7 + 0.28 + 0.0255 \times \frac{3922}{7.79} \right) \times 0.6 \times 1.0^2 \\ &= 9.10 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

隧道内所需压力 Δp 即为

$$\begin{aligned}\Delta p &= 155.71 + 253.75 - 166.42 - 115.16 + 9.10 \\ &= 191.58 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta p - (\Delta p_{\text{b}} + \Delta p_{\text{e}}) &= 191.58 - (10.70 + 139.56) \\ &= 41.32 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

4 竖井送排式与射流风机组合通风

选用 TAS 9.0-3-1 型射流风机，每台升压力为 $\Delta p_{\text{j}} = 3.99 \text{ N/m}^2$ ，则所需射流风机为

$$N = \frac{41.32}{3.99} = 10.36 \text{ 台}$$

本例的压力、风速、浓度分布如图 20 所示（本例计算忽略

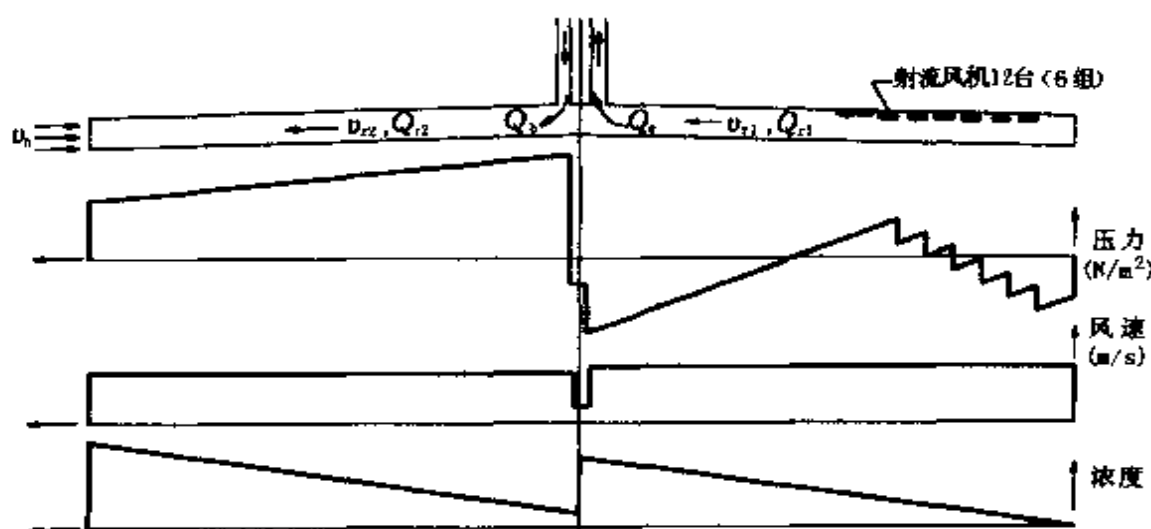


图 20 压力、风速、浓度分布

了短道内的浓度变化)。

简例 5 电吸尘机纵向通风方式

1 隧道条件

交通方向	单向交通
隧道长度	$L = 3000\text{m}$
隧道断面积	$A_r = 58.0\text{m}^2$
断面当量直径	$D_r = 7.7\text{m}$
设计交通量	$N = 1700 \text{ 辆/h}$
大型车混入率	$r_l = 43\%$ ($A_m = 2.9\text{m}^2$)
柴油车混入率	$r_d = 42\%$
计算行车速度	$v_t = 60\text{km/h} = 16.67\text{m/s}$
需风量	$Q_{\text{req}} = 590\text{m}^3/\text{s}$ (考虑烟尘的情况) $Q_{\text{req}} = 210\text{m}^3/\text{s}$ (考虑一氧化碳的情况)

2 吸尘机房位置的大致确定

因烟尘需风量 $590\text{m}^3/\text{s}$ 超过一氧化碳需风量 $210\text{m}^3/\text{s}$ 时, 宜采用吸尘机。若第一次计算时忽略吸尘机的升压能力, 并假设 $\Delta p_m = 52\text{N/m}^2$, 则自洞口在风速作用下带入洞内的风量 Q_{in} 及区段长度 L_1 可计算如下:

将计算条件中的有关数值代入下式中:

$$(1 + \zeta_e + \lambda \cdot \frac{L}{D})_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 - \frac{A_m}{A_r} \cdot n \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_t - v_r)^2 + \Delta p_m = 0$$

整理得 $6.804v_r^2 - 2.549 \times (16.67 - v_r)^2 + 52 = 0$

计算得 $v_r = 5.95\text{m/s}$

$$Q_{\text{in}} = v_r \cdot A_r = 5.95 \times 58 = 345\text{m}^3/\text{s}$$

自洞口 L_1 处需设置吸尘装置, 即

$$L_1 = \frac{345}{590} \times 3000 = 1754\text{m}$$

本例浓度分布如图 21 所示。

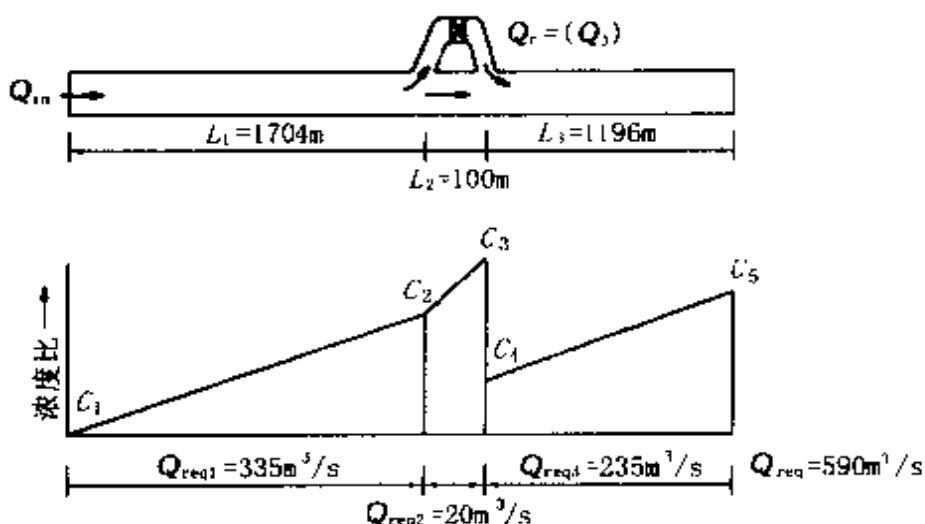


图 21 吸尘机通风方式通风系统图例

注：上图为严格计算了吸入口中心与送风口中心距离之间的浓度变化的实例。实际上，即使有上图所示的距离，由于汽车行驶可使紊流扩散，因此不考虑短道影响的简化计算也是可以的。

3 浓度比计算

由下式可以求出第一次处理风量的概略值 Q_c 。

$$Q_c = \frac{\text{需风量 (590)} - \text{吹入风量 (345)}}{\text{VI 改善率 (0.8)}} = 306 \text{ m}^3/\text{s}$$

这里考虑大容量吸尘装置，将吸尘机房设置于弯形隧道内，短道距离 L_2 按 100 m 考虑，则各控制点的浓度比可按计算如下：

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = \frac{Q_{\text{req1}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{335}{345} = 0.97$$

$$\begin{aligned} C_3 &= C_2 + \frac{Q_{\text{req2}}}{Q_{\text{in}} - Q_c} \\ &= 0.97 + \frac{20}{345 - 306} = 0.97 + 0.51 = 1.48 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_4 &= \frac{C_2 \times Q_c (1 - \eta_{\text{VI}}) + C_3 \times (Q_{\text{in}} - Q_c)}{Q_{\text{in}}} \\ &= \frac{0.97 \times 306 \times (1 - 0.8) + 1.48 \times (345 - 306)}{345} = 0.34 \end{aligned}$$

$$C_5 = C_4 + \frac{Q_{\text{req3}}}{Q_{\text{in}}} = 0.34 + \frac{235}{345} = 0.34 + 0.68 = 1.02$$

4 由吹出风量喷流效果产生的升压力估算

由吸尘装置吹出风量产生的升压力计算可按照竖井送排通风方式的情况进行, 即由 $\Delta p_b = \Delta p_r - \Delta p_l + \Delta p_m$ 关系, 可计算出 $Q_c (= Q_t)$ 与 Q_m 值 (互为相关)。

5 Q_m 与浓度分布的关系

由第 3 条所示的各浓度计算式, 并变化 Q_c 值, 则可求得隧道出口浓度与 Q_m 值的相应关系, 取出口 $C_5 = 1.0$, 可得相应的 Q_c 值。由此可求得各点的浓度 C 和烟雾透过率。

简例 6 横向通风方式

1 送风型半横向通风方式

1) 隧道条件

交通方向	双向交通
隧道长度	$L_r = 2160\text{m}$
拱部风道长度	$L_b = 1080\text{m}$ (洞口两端送风)
隧道断面积	$A_r = 42.0\text{m}^2$
隧道当量直径	$D_r = 6.0\text{m}$
设计交通量	$N = 1428$ 辆/h
计算行车速度	$v_1 = 60\text{km/h} = 16.67\text{m/s}$
需风量	$Q_{\text{req}} = 290\text{m}^3/\text{s}, q_b = 290/2160$ $= 0.134\text{m}^3/\text{s/m}$
风道断面积	$A_b = 9.0\text{m}^2$
风道当量直径	$D_b = 2.3\text{m}$
汽车等效迎风阻抗面积	$A_m = 2.8\text{m}^2$

2) 风道与隧道的风压

风道始端风速 v_b

$$v_{bi} = \frac{Q}{2A_b} = \frac{290}{2 \times 9.0} = 16.11\text{m/s}$$

风道始端动压 p_b

$$p_b = \frac{\rho}{2} \cdot v_{bi}^2 = 0.6 \times 16.11^2 = 155.72 \text{ N/m}^2$$

风道静压差 ($p_{bi} - p_{b0}$)

$$k_b = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{L}{D} - 1 \right)_b = \frac{0.025}{3} \times \frac{1080}{2.3} - 1 = 2.91$$

$$p_{bi} - p_{b0} = k_b \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{bi}^2 = 2.91 \times 155.72 = 453.62 \text{ N/m}^2$$

送风道所需末端压力

$$(p_{b0} - p_{r0}) = 150 \text{ N/m}^2$$

隧道风压

$$v_r(x) = \frac{q_b}{A_r} \cdot x = \frac{0.134}{42.0} \cdot x = (3.19 \times 10^{-3}) \cdot x$$

$$\alpha = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{N \cdot L}{v_t} = \frac{2.8}{42} \times \frac{1428 \times 2160}{16.67 \times 3600} = 3.43$$

上下行交通量相等 (均为 50%), 且 $\Delta p_m = 0$ 时, 用 $x = 1080 \text{ m}$ 代入, 则得

$$\begin{aligned} p_{re} - p_r(x) &= \frac{\rho}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{\lambda}{3} \times \frac{x}{D} + 2 \right)_r \cdot v_r^2(x) + \alpha \cdot \frac{x}{L} \cdot v_t \cdot v_r(x) \right\} \\ &= 0.6 \left\{ \left(\frac{0.025}{3} \times \frac{1080}{6.0} + 2 \right) \cdot (3.19 \times 10^{-3} \times 1080)^2 \right. \\ &\quad \left. + 3.43 \times \frac{1080}{2160} (16.67 \times 3.19 \times 10^{-3} \times 1080) \right\} \\ &= 84.03 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3) 送风机所需全压力

设连接风道的压力损失为 p_d , 送风机所需全风压 p_{tot} 可计算如下:

$$\begin{aligned} p_{tot} &= 1.1 \times \{ \text{隧道风压} + \text{所需末端压力} + \text{风道静压差} \\ &\quad + \text{风道始端动压} + \text{连接风道损失} \} \\ &= 1.1 \times \{ 84.03 + 150 + 453.62 + 155.72 + p_d \} \\ &= 1.1 \times (843.4 + p_d) \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

2 全横向式

1) 计算条件

隧道长度	$L_t = 3200\text{m}$
送、排风道长度	$L_b = L_e = 1600\text{m}$ (洞口两端送排风)
设计交通量	$N = 2950 \text{ 辆/h}$
计算行车速度	$v_1 = 60\text{km/h} = 16.67\text{m/s}$
需风量	$Q_{\text{req}} = 317\text{m}^3/\text{s}$ (每条风道的量)
送、排风道断面积	$A_b = A_e = 16\text{m}^2$
送、排风道断面当量直径	$D_b = D_e = 3.2\text{m}$

2) 送风机的全风压

送风道始端风速

$$v_{bi} = \frac{Q_b}{A_b} = \frac{317}{16} = 19.8\text{m/s}$$

送风道始端动压 p_b

$$p_b = \frac{\rho}{2} \cdot v_{bi}^2 = 0.6 \times 19.81^2 = 235.5\text{N/m}^2$$

送风道静压差 ($p_{bi} - p_{b0}$)

$$k_b = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{L}{D} - 1 \right)_b = \frac{0.025}{3} \times \frac{1600}{3.2} - 1 = 3.17$$

$$p_{bi} - p_{b0} = k_b \cdot \frac{\rho}{2} v_{bi}^2 = 3.17 \times 235.5 = 746.5\text{N/m}^2$$

送风道所需末端压力

$$(p_{b0} - p_{r0}) = 150\text{N/m}^2$$

送风连接风道的压力损失 Δp_{bd} , 必须根据各段风道形状及摩阻情况, 由式 (3.5.11-9) 进行计算。

送风机所需全压力

$$\begin{aligned} p_{\text{qpt}} &= 1.1 \times \{ \text{隧道风压} + \text{送风道所需末端压力} + \text{送风道静压差} \\ &\quad + \text{送风道始端动压} + \text{连接风道压力损失} \} \\ &= 1.1 \times \{ 0 + 150 + 746.5 + 235.5 + \Delta p_{bd} \} \\ &= 1.1 \times (1132 + p_{bd}) \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3) 排风机的全风压

排风道末端风速

$$v_{e0} = \frac{Q_e}{A_e} = \frac{317}{16} = 19.81 \text{ m/s}$$

排风道末端动压 p_e

$$p_e = \frac{\rho}{2} \cdot v_{e0}^2 = 0.6 \times 19.81^2 = 235.5 \text{ N/m}^2$$

排风道静压差 ($p_{ei} - p_{e0}$)

$$k_e = \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{L}{D} + 2 \right)_e = \frac{0.025}{3} \times \frac{1600}{3.2} + 2 = 6.17$$

$$p_{ei} - p_{e0} = k_e \cdot \frac{\rho}{2} v_{e0}^2 = 6.17 \times 235.5 = 1453 \text{ N/m}^2$$

排风道所需始端压力

$$(p_n - p_{ei}) = 100 \text{ N/m}^2$$

连接风道的压力损失 p_{ed} ，同样必须根据各段风道形状及摩擦情况，由式 (3.5.11-9) 进行计算。

排风机所需全压力

$$\begin{aligned} p_{\text{ex}} &= 1.1 \times \{ \text{排风道所需始端压力} + \text{排风道静压差} - \text{排风道} \\ &\quad \text{末端动压} + \text{连接风道压力损失} \} \\ &= 1.1 \times \{ 100 + 1453 - 235.5 + \Delta p_{ed} \} \\ &= 1.1 \times (1318 + p_{ed}) \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3.6 风机的选型与布置

3.6.1 特长隧道通风一般采用满足大风量低风压的轴流风机，但当送、排风机全风压达到 5000 N/m^2 时，必须进行轴流风机和离心风机的比选。从总体看，轴流风机具有体积小，与土建易配合，风机效率高，火灾排烟逆转方便的优点，但存在价格高、噪声大的缺点。

静电吸尘装置主要目的是采用静电原理除去隧道内空气中烟尘粒子，达到改善隧道内环境，保障行车安全。该设备对节约能源，保护环境非常有利。

3.6.2 常用国产射流风机的部分型号及其技术参数见表11，安装可参见图 22。

表 11 部分国产风机型号及其技术参数

机号(Nb)	63	90	100	112	125	140
叶轮直径(mm)	630	900	1000	1120	1250	1400
轴向推力(N)	245~515	390~840	530~1095	695~1340	845~1655	645~1330
流量(m ³ /s)	8.6~12.3	15.4~22.3	20~28.5	25.8~35.5	31.8~44	31~44
出口风速(m/s)	27.6~39.5	24.2~35.1	25.5~36.3	26.2~36	25.9~35.9	20.1~28.6
转速(r/min)	2900~2930	1440~1470	1460~1470	1460~1480	1470~1480	970~980
电机功率(kW)	5.5~15	7.5~22	11~30	15~37	18.5~45	11~30
噪声(dB(A))	68~75	66~75	68~75	69~75	69~75	68~75
A (mm)	2980	3130	3380	3880	4480	3880
B (mm)	1215	1215	1315	1515	1815	1515
C (mm)	940	1180	1260	1360	1470	1740
D (mm)	800	1100	1200	1320	1450	1700
E (mm)	750	940	1000	1100	1160	1160
H (mm)	1100	1400	1500	1620	1750	2100
总重力(kN)	450	770	985	1165	1410	1820
最小间距(m)	80	100	120	150	180	180

根据实验测试，口径小于 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，由此风机能产生较好的升压效果。

据实测与经验，在距进洞口约 200m 范围以内，汽车带进隧道的新鲜空气量是足够的，因此在该段落内不宜布置射流风机。

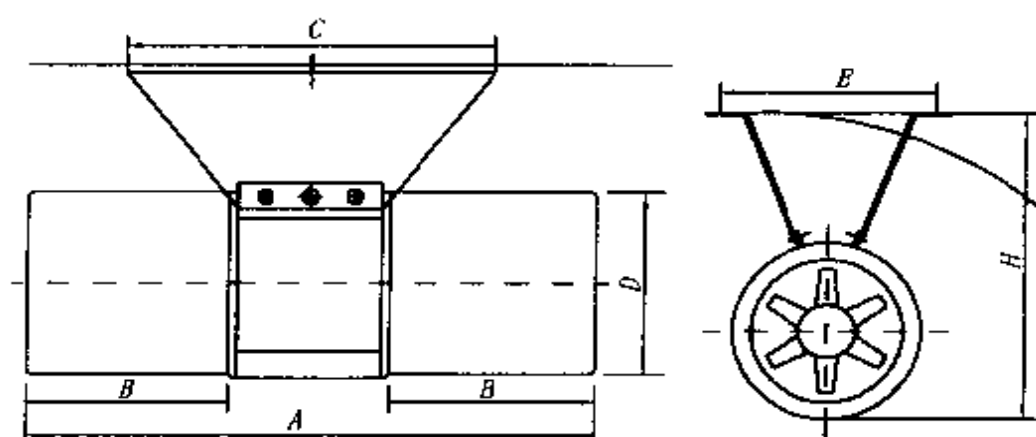


图 22 射流风机尺寸型号及安装示意图

对长度大于 1500m 的隧道须考虑火灾时的排烟问题，如果

风机布置过于集中，一旦火灾发生在风机较集中地段，后果较为严重，因此风机不宜过于集中。

在考虑上述因素的同时，应注意经济性。风机距配电所越远，电压降越大，所需电缆直径越大，材料费用越高，因此风机布置还应考虑经济性这一重要指标。

如果对每段风机控制太多，则同时启动的启动电流太大，如果每段风机控制太少，营运时又没必要。故根据工程经验，宜按2~4台一组进行控制。

3.6.3 轴流风机的构造形式有卧式和立式，均可采用，国外两种形式都有，目前我国多采用卧式风机。

风量控制方法一般有减振器控制法、转速调节控制法、叶片安装角控制法、可变齿距控制法、台数控制法5种。

轴流风机风量控制应根据交通量、交通监控、CO浓度和能见度监测指标综合考虑。

3.6.4 静电吸尘装置已在日本、挪威成功应用于公路隧道，其原理、规格及布置方式简介如下：

1 静电吸尘装置的原理

空气中的微粒子流经电晕放电区域带电，带电粒子在电场力的作用下而被吸附于吸尘板上，从而使空气得以净化。

2 静电吸尘装置的规格

静电吸尘装置以处理烟尘为主，吸尘率可达80%以上。表12列出静电吸尘装置主要技术参数。

表 12 电吸尘机主要技术参数

项 目	规 格
形式	钢板自立平板形水平气流两段式
吸尘处理风量	240m ³ /s (120m ³ /s×2组)
吸尘机组	15m ³ /s处理机×2台×2组
吸尘输送管的洗清方式	空气清洗
吸尘过风风速	7m/s
吸尘率	重力法 $\tau = 80\%$ 以上
压力损失	120N/m ² 以下

续上表

项 目	规 格
外加电压	带电部 DC 11kV, 吸尘部 DC 5.5 kV
电源	3Φ 3W 210V 60Hz
吸尘机消耗电力	约 12kW
清洗用辅助机械	高压风机

3 静电吸尘装置的布置方式

较多采取置于隧道旁侧风道的大型设备布置方式；随着小型化设备的发展，也可采取吊顶式的静电吸尘装置布置方式。

3.7 风 道

3.7.1 一般规定

通风风道主要由主风道和连接风道及风机房内部风道构成。主风道沿隧道轴向布置，一般设在隧道的上部或下部。主风道的设置型式如图 23 所示。

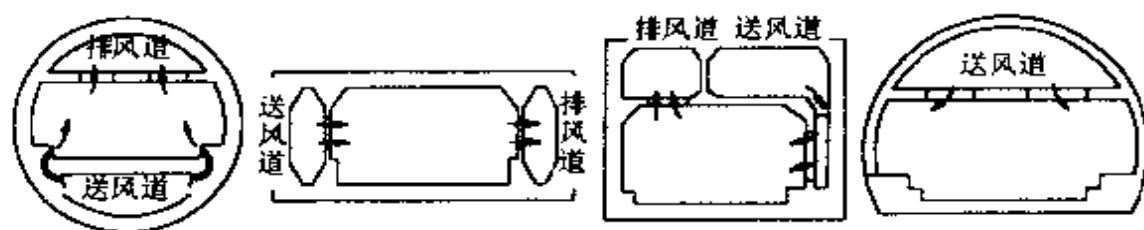


图 23 隧道主风道设置型式示例

风道用于送风，为了减小沿程摩阻损失和风道变形引起的局部损失，必须按空气动力学原理设计，要求风道内壁面平滑，在弯曲、折曲、扩径、缩径、分叉、合流等变形处平顺过渡。当确定风道形状的变形时，可参照表 13 考虑。

3.7.2 隧道主风道


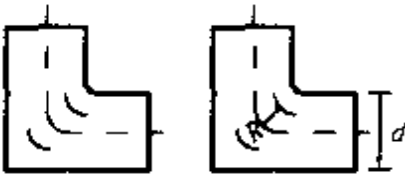
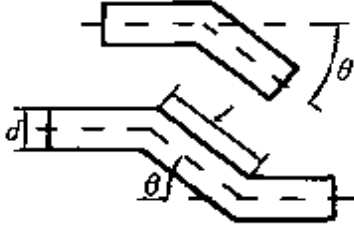
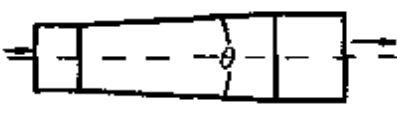


隧道主风道一般用于全横向或半横向通风方式。

1 主风道一般设置于隧道上部，也有设置于隧道下部或侧部的情况，应根据具体情况确定。

所谓一个通风区段，对于横向通风方式而言，是指可独立控

制风量且与其他通风区段完全隔断的区段，一般宜将长隧道的风道划割成2段或2段以上，形成隧道分段控制通风；对于纵向通风方式，一般可将隧道空间作为一个通风区段考虑。

表 13 风道的各变形部及注意事项

变形	图 示	注 意 事 项
弯曲		<ul style="list-style-type: none"> • $R > 1.6d$ 时，可不设导流叶片，但弯头后出现偏流
		<ul style="list-style-type: none"> • $R < 1.6d$ 时，安装隅角叶片以减少损失，也可减小偏流； • 弯曲内侧必须做成圆滑状； • 弯曲外侧不做成圆滑状也可
折曲		<ul style="list-style-type: none"> • 尽量避免 $\theta > 30^\circ$ 的折曲； • 连续折曲时，选择合适的 l/d 和 θ 角，可以减少损失，例如，$\theta = 30^\circ$ 时 $l = 3d$ 为最好
扩径		<ul style="list-style-type: none"> • $\theta = 6 \sim 10^\circ$ 时，损失最小； • $\theta = 60 \sim 70^\circ$ 时，损失最大，此时最好做成 $\theta = 180^\circ$ 的突变扩大
缩径		<ul style="list-style-type: none"> • 应避免突然缩小； • $\theta < 60^\circ$ 较好，当 $\theta > 60^\circ$ 时，宜做成喇叭口状，以减少损失； • 喇叭口半径宜大于 $0.1d$，理想状态为 $0.3d$ 左右
分叉、合流		<ul style="list-style-type: none"> • 分叉、合流的损失受风量比 Q_1/Q_2 和面积比的影响，不能一概而论，但 θ 角应尽可能小

2 对于横向通风方式，当火灾时顶隔板直接承受高温，结构易于变形、剥脱，从而导致漏风甚至更严重后果，如果风道及顶隔板一旦破损，其修补或更换将非常困难，因此，应特别重视

其结构的耐久性。

顶隔板的材料和结构形式一般有轻质气泡混凝土板 (ALG 板)、PC 板、现浇 RC 结构和组合钢结构。顶隔板的比较选择除了通风方面的考虑外,还应从材料与结构的施工难易、功能、耐久性、维修养护、美观、工程费用等诸方面进行全面综合分析,然后确定合理方案 (参见表 14)。

关于顶隔板人群荷载,日本数座公路隧道均按 1.0kN/m^2 取值,属成熟经验,故本条文借鉴了这一取值。

顶隔板允许挠度按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023) 第 4.2.3 条规定取 $1/600$ 。日本新神户隧道工程设计取 $1/500$ 。

根据国外工程实践经验,本条文提出顶隔板的标准厚度一般不宜大于 15cm ,但应根据实际荷载和材料特性以及具体使用功能,经计算后确定。当隧道照明灯具嵌入顶隔板内布置或其他特殊情况时,顶隔板厚度可适当加大。

3 当确定了通风方式和需风量后,就可以计算隧道主风道所负担的送风量或排风量。此时,如果增大一个通风区段的长度,其主风道断面积就会增大,从而造成建设费用增加,因此,应针对主风道分段数与主风道断面积之关系,结合隧道布局条件、地形条件等要素进行风道经济性设计。经济性设计可按以下顺序进行:






1) 从风道分段数、风道断面积、风道内风速以及连接风道等几者关系考虑,制订若干通风系统比较方案。

2) 在各比较方案的相应设计条件下,概略地计算所需风压,并初步确定风机规格和所需动力,分析各方案所采用的风机房型式和有关电气设备的各自特点,将此计算分析的结果作为确定通风系统建设费的主要参考资料。

3) 对各方案在营运期间发生的电力、维修等费用进行估计,并预测电力等费用的年递增率。

4) 对各方案相应的建设费 (包括隧道主体结构、竖井、

表 14 主风道顶隔板方案比较简表

比较方案		ALC 板	PC 板	组合钢结构板	吊跨板	现浇板
设计条件	图 示					
	荷载条件					
施工性	材料尺寸(板厚)					
	防锈措施					
	现场加工工程					
	部件拼装					
	施工进度及施工处数					
功能性	施工省力度					
	结构质量可靠性					
	与其他工程的相互干扰					
	风道内壁的摩擦阻					
	风道的封闭性					
耐久性	漏水处治理措施					
	材质耐久年数					
	由高温引起的剥脱、溶解					
维修保养	板体(部件)拆换					
	养护					
	接缝数量					
美观	板体形状					
	工程费(万元)					
综合评价						

主风道顶隔板、风机房、风机设备及有关电气设备等)和营运费(包括电力费、养护维修费等)进行经济比较。

经济性方案比较可按式(15)进行计算:

$$c = c_B \cdot (1 + r)^Y + \sum_{n=1}^Y c_E \cdot (1 + r)^{(Y-n)} \quad (15)$$

式中 c ——总费用;

c_B ——工程建设费;

r ——年利率;

Y ——还贷年数;

c_E ——营运维持费(全年电力费)。

3.7.3 送风孔与排风孔

1、2 当为山岭隧道(马蹄形断面)且全横向通风方式时,送风孔和排风孔可参照图 24 所示的位置布置。

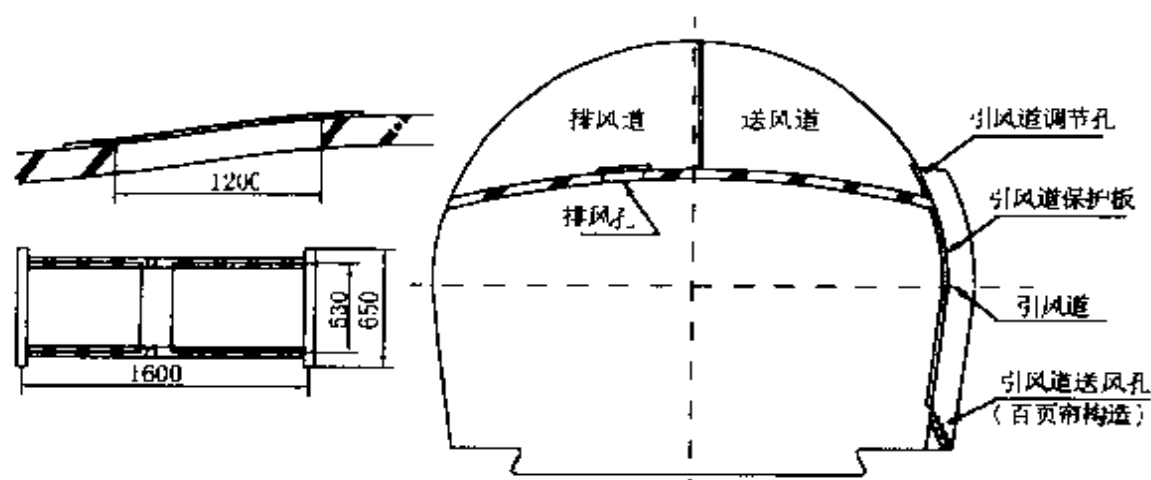


图 24 送风孔与排风孔的位置示例

条文提出送风孔的位置标高宜与汽车尾排气管距路面高度大致相同,是为了尽快稀释汽车尾排气体,与排风孔形成空气交换。如果新鲜风从送风道直接吹入隧道,将会在隧道上部形成空气交换,存于隧道下部的污染风得不到交换,通风效果差;另一方面,吹入风速会因送风孔与轴流风机的距离近而大,距离远而小,形成风速不均匀。为了解决这一问题,如上图所示在送风道与送风孔之间设置引风道及调节孔,则吹入隧道的风速可以基本

达到均匀程度。

3 送排风孔的开度调节

为了使新鲜空气均匀输送到隧道内，有必要对风孔的开度进行调节，为此本款提出开度调节的工作顺序。

测试通风状态的方法有以下 3 种：

·由风孔流速和开度断面积计算其流量的方法

测试点容易受偏流的影响，而且需要实测风孔的流量系数，其精度较低。一般不太采用这种方法。

·由风道内静压分布推算的方法

风道内静压测试非常稳定，可以提高其测试精度。如果静压分布与计算值一致，吹入流量或吸出流量就可视为是均匀的。采用这种方法时需要测试风道内壁面摩阻损失系数 λ_b 。

·由风道内风速分布推算的方法

风道内风速分布不一样，而且由于送风孔与主风流形成分叉流，排风孔与主风流形成合流，因此风速测试精度很难保证。另外，随着趋近风道末端，其风速变低，测试误差增大。然而，风速分布自风道始端朝末端呈直线减小，由此可大致了解吹入流量的均匀状态。

国外许多工程实例表明，主要用静压推算的方法对通风状态进行判定，同时用风速推算的方法进行验核。

以下按风孔开度调节的顺序，对测试方法作一介绍。

1) 主风道内壁面摩阻损失系数

如图 25 所示，以距风道始端约 $10D_b$ 处和再往末端方向 100m 处为测试点，对风道内的静压及风速进行测试。测试时关闭 $10D_b + 100m + 10D_b$ 区段中的所有风孔。此外，一般还应测试风道内空气温度和大气压。由此，摩阻损失系数 λ_b 可按下式计算：

$$\lambda_b = (p_{s1} - p_{s2}) \cdot \frac{D_b}{L_b} \cdot \frac{6g}{\gamma} \cdot \frac{1}{(v_1^2 + v_2^2 + v_1 \cdot v_2)} \quad (16)$$

式中 p_{s1} 、 p_{s2} ——两测点的平均静压 (N/m^2)；

L_b ——两测点间的距离 (m);
 g ——重力加速度 (m/s^2);
 v_1 、 v_2 ——两测点的平均风速 (m/s);
 D_b ——风道断面当量直径 (m)。

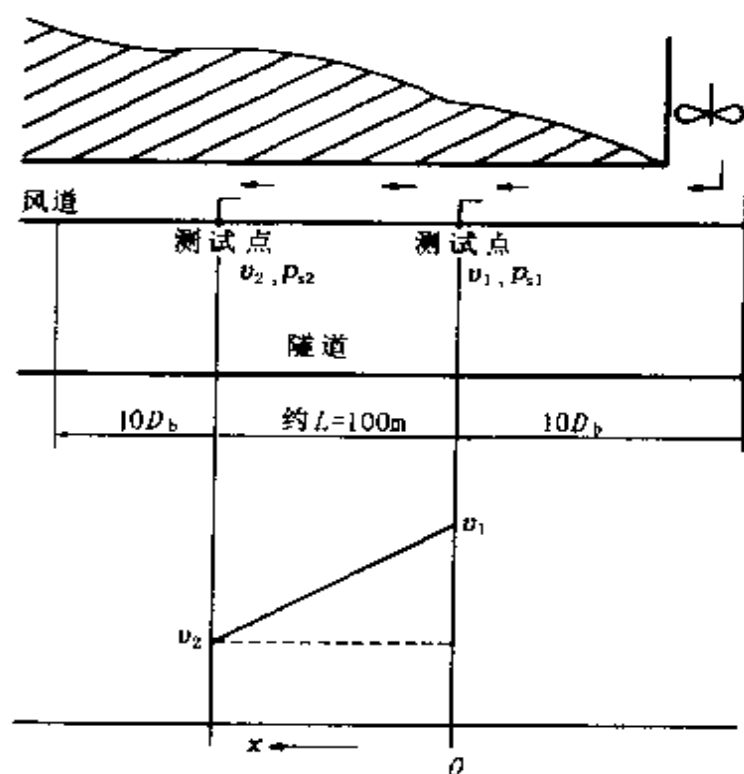


图 25 测试点与风速的关系

测试仪器采用标准毕托管测速仪、倾斜压力计及棒式温度计。

2) 初次调节风孔开度

由摩阻损失系数 λ_b 和送（排）风机设计风量可求出风道内静压分布，并通过计算初次（临时）设定风孔开度。当隧道风压分布计算结果在 20N/m^2 以下时可以忽略隧道风压。

风孔开度设定时，当风道长 1000m 以下则取 10 个风孔为同一开度，当风道长 $1000\text{m} \sim 2000\text{m}$ 则取 20 个风孔为同一开度，以便于实际控制。

初次调节风孔开度是在隧道无汽车行驶状态下进行的。

3) 风道内静压分布及风速分布

在临时设定风孔开度的状态下，再次对风道内静压及风速进行测试。

测试仪器在横向设置于风道横断面中心，在纵向设置于同一开度风孔的中央风机位置，并距顶隔板上面 50cm。

毕托管测速仪一般用于测试风速 4m/s （动压约为 10N/m^2 ）以上的情况，当在风道末端附近风速非常小时，需要采用热线式风速仪测试。

4) 测试结果及其判定

将测试结果用图表示，即得到风道长—静压分布关系曲线和风道长—风速分布关系曲线。要求实测值与其计算值的容许误差在 $\pm 10\%$ 以内。如果不满足此条件，应反复调节风孔开度，并讨论其通风状态，直到满足此条件为止。

5) 设定风孔开度

经过上述对测试结果的判定及反复调节后所设定的风孔开度，就能保证隧道内在设计状态下的等风量分布（即吹入风量均匀）。需要说明的是，上述调试工作是在非设计状态（即隧道无行车或少行车的情况）下进行的，因此，所设定的风孔开度在设计状态下是偏于安全的。

3.7.4 连接风道

1 连接风道包括主风道与风机房之间的连接风道、隧道主洞与风机房之间的连接风道、竖井与风机房之间的连接风道等。

2 连接风道断面积、长度和断面形状等的设计，应进行经济分析比较。

3 连接风道内的风压损失由摩阻损失与风道形状变形（如弯曲、断面扩大与缩小、分叉、合流等）产生的局部损失两部分构成，不得缺漏。

3.7.5 各类风道的压力损失

风道壁面摩阻损失系数和风道变形损失系数的取值对压力损失的大小有着密切关系，应合理取值。

当风道在短距离内连续出现变形（弯曲、折曲、突扩、突缩

等),其压力损失非常大,应尽可能通过试验来确定具体的损失系数值。

各类风道的压力损失系数可参照本规范附录 A 取值。

3.8 风机房与通风井

3.8.1 风机房与通风井、连接风道、主风道和隧道构成完整的通风系统,它的规划与设计是否合理,至关重要,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,便于养护维修及营运管理。

3.8.2 洞外风机房

当采用集中送入式或横向式通风方式时,风机房可设置在隧道洞口处,其中可分为在两洞口间设置的形式和路堑单侧设置的形式;当采用竖井通风方式时,风机房可设在竖井地表口处。

应根据洞口或竖井周围地形条件、两洞口轴向间距等因素,合理确定风机房位置。城镇附近的隧道还应考虑对洞口附近城市设施的影响。

当在两洞口间设置风机房时,应注意与洞口环境的协调,避免对行车造成压抑感。

3.8.3 洞内风机房

当采用竖井通风且洞外设置风机房有困难时,可将风机房设置于竖井底部。洞内风机房内应考虑防湿、防尘、降噪和温度调节,同时应具有自身通风设施。

据国外一些技术资料,20 世纪 90 年代以前,隧道风机房较多设置在隧道洞口附近和竖井地表换风塔口附近,但进入 20 世纪 90 年代后,一些国家尤其是日本在采用竖井通风方式时,较多地将风机房设在地下即竖井底部与正洞连接处的山体内。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,并且由于风机房位于隧道内路侧边,便于设备的维护管理和工作人员的进出。我国为数不多的几座设竖井通风的隧道均采取洞外设置风机房的方式,还未有洞内设置风机房

的工程实践，有待今后积累经验。这里示出几座国外隧道工程实例（图 26～图 28），仅为参考。

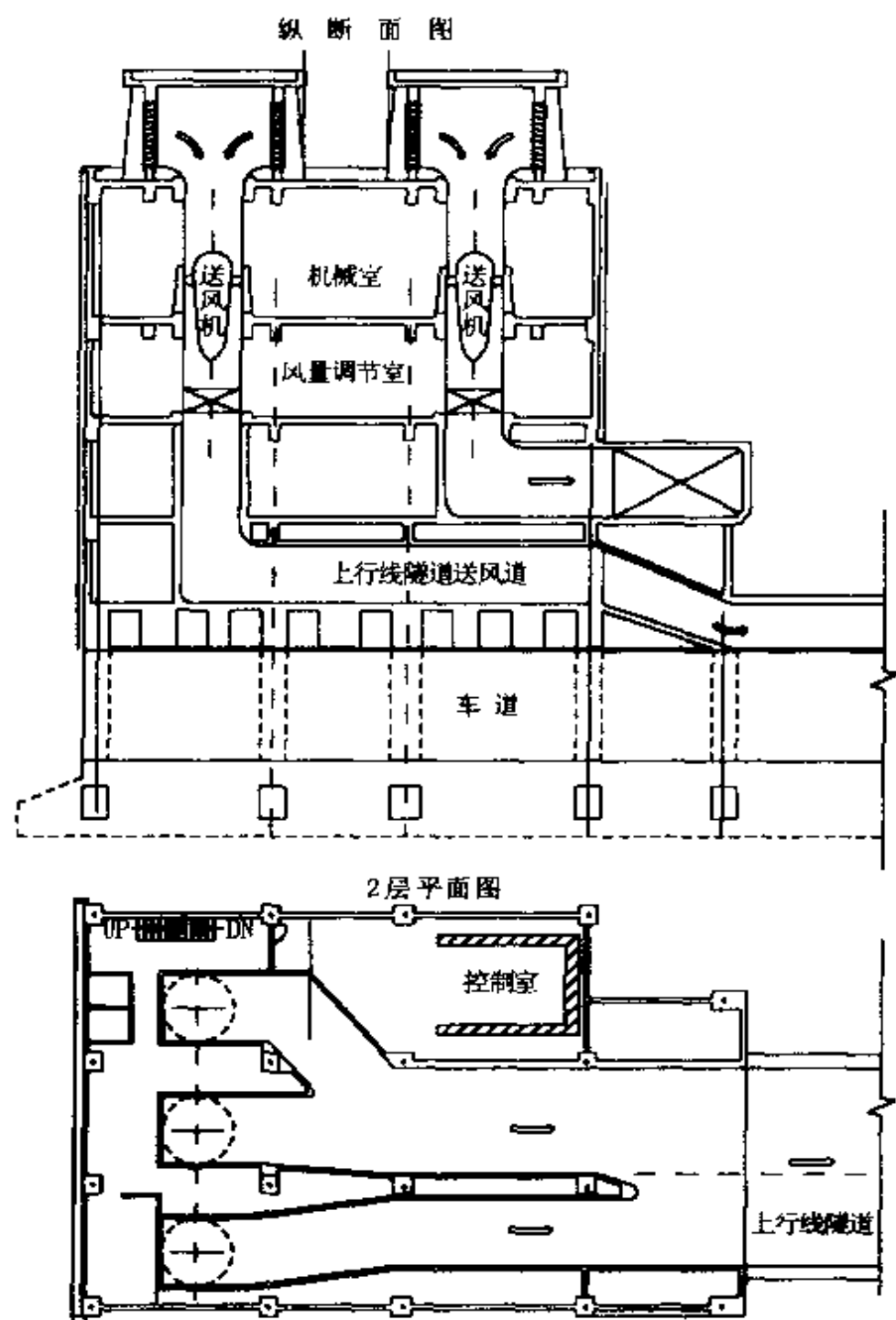


图 26 两洞口间设置风机房实例

3.8.4 通风井（竖井换风塔）的排风扩散要求

对于地处城镇的隧道，竖井换风塔的设计应根据所处位置注意防止排风扩散对周围大气环境的不良影响，必要时应对此影响

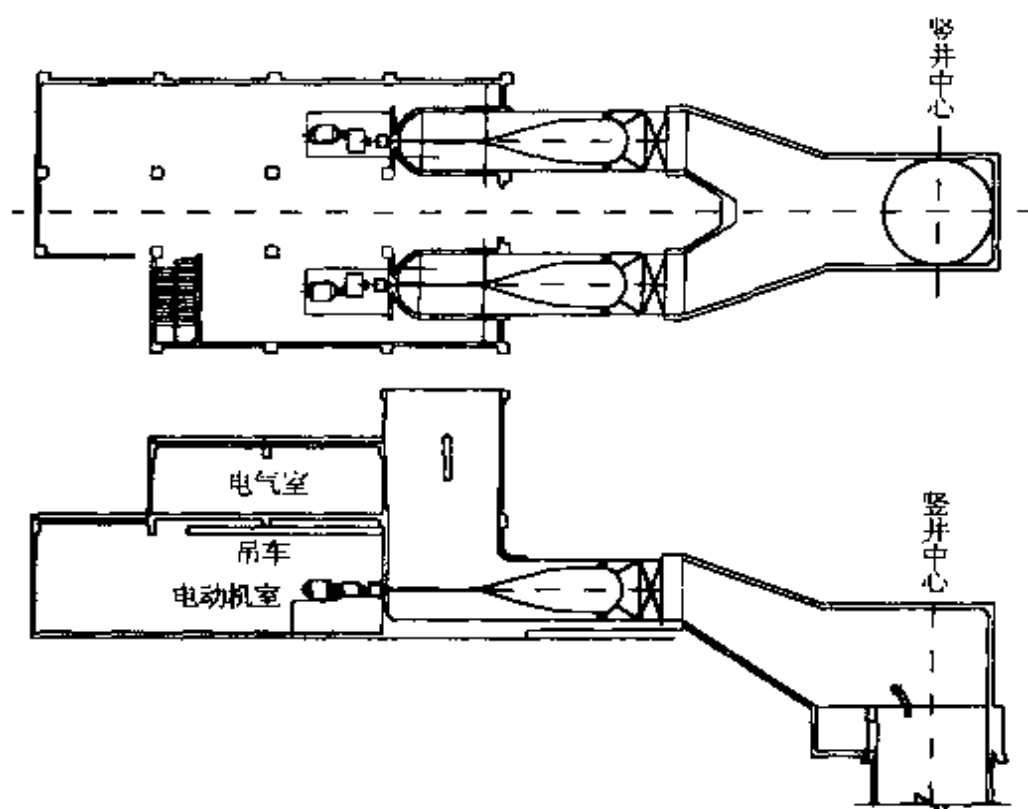


图 27 竖井口（地表）设置风机房实例

作出评价并采取防范措施。其调查和评价内容应包括排风的上升高度、排出角度、扩散宽度、扩散浓度以及井位附近的大气主导风向等。

竖井换风塔应设置在地形较为开阔其扩散效果良好的地带。换风塔设于山坳中时，在地势上应有一方朝开阔方向，以提高换风质量。风塔排风口高度宜高出送风口 5m。

1 排风上升高度

地面换风塔的排风（吹出）口附近，有管理所和人员以及各通风设备，吹出的废风有一定污染，应有环保要求，因此排风口应有足够的高度。排风口的构造应考虑风口周围的地形、植被等自然条件来确定，一般而言，朝上开口吹出的形式较为有利。表 15 所示为排风口构造形式与排风上升效果。

有效排风口高度 H_e 应为排风口结构高度 H_0 加上排风上升高度 ΔH （图 29 所示），即

$$H_e = H_0 + \Delta H \quad (17)$$

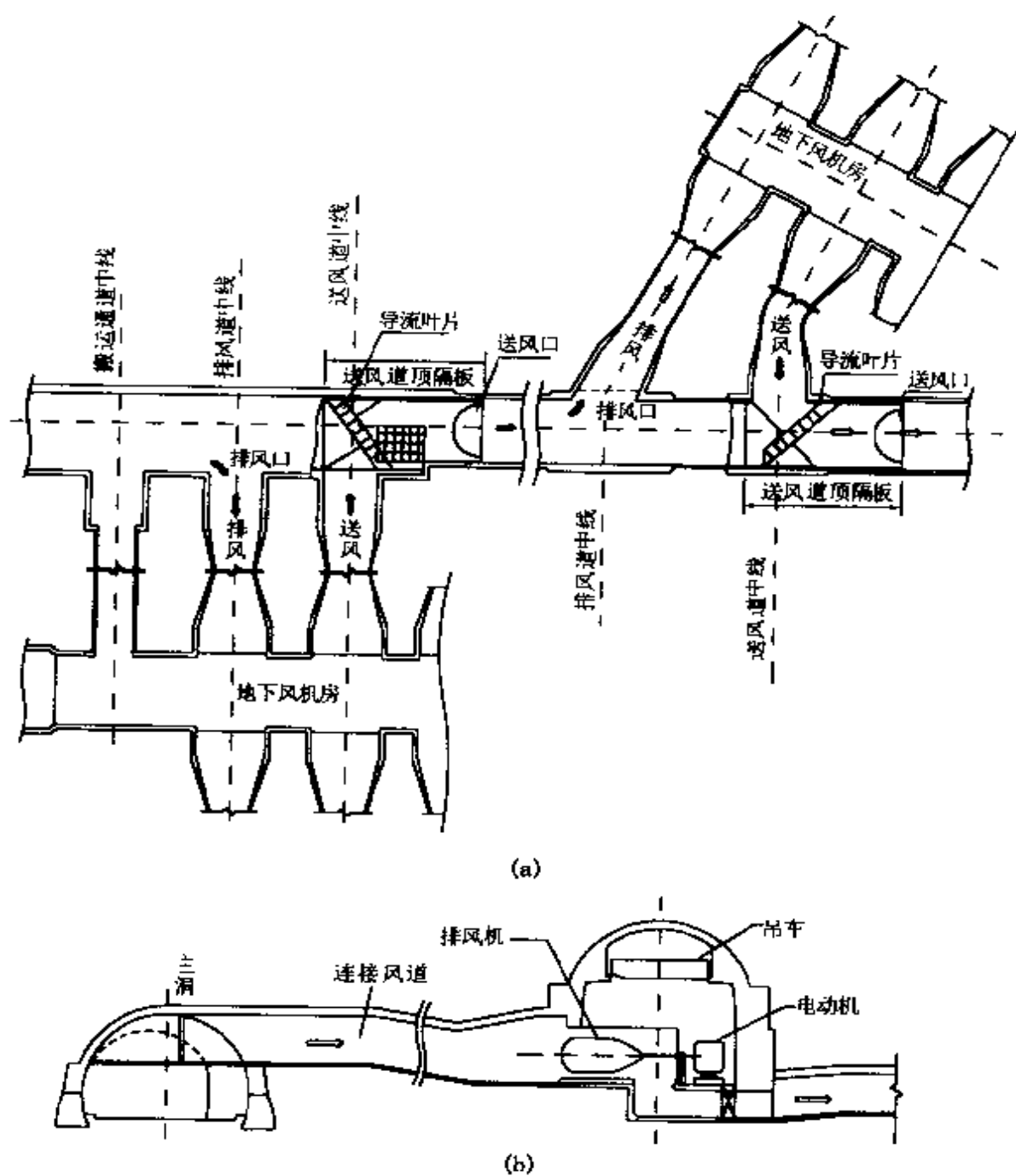
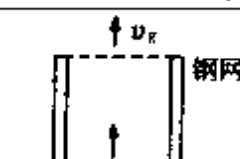


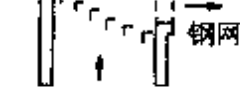



图 28 洞内设置风机房实例

表 15 换风塔排风口构造与排风上升效果

排 风 口 型 式			排 气 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，是一种不利的型式

由于汽车尾排气体有一定热量，排出的气体与大气存在温差，具有少量上浮力，但这里忽略这一小量，只考虑排风机械产生的排出速度，采用国际较普遍的 Bosanguet 计算公式来计算排风上升高度 ΔH ，即

$$\Delta H = \frac{0.65 \times 4.77}{1 + 0.43 \times \frac{v}{v_g}} \cdot \frac{\sqrt{Q_e \cdot v_g}}{v} \quad (18)$$

式中 Q_e ——排风量 (m^3/s)；

v_g ——换风塔排风口风速 (m/s)；

v ——大气平均风速 (m/s)。

2 排风的扩散

排风口的扩散计算方法可按工厂烟囱的排烟问题一样考虑。

一般假设扩散气体的污染浓度分布为正态分布，其扩散计算公式称为正态型扩散式。计算式以排出源（排风口中心）为原点，沿风向为 x 轴，水平向为

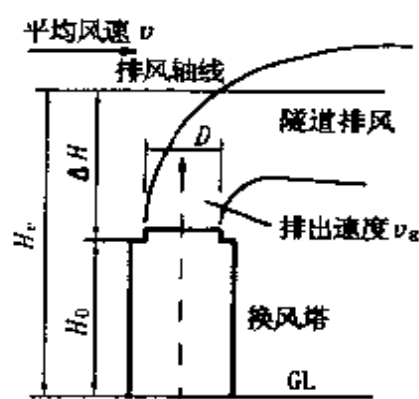


图 29 排风口有效高度

y 轴, 垂直向为 z 轴。

地表面浓度 (取 $z=0$) 可按式 (19) 计算:

$$C(x, y, 0) = \frac{q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp\left[-\left(\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \quad (19)$$

式中 C——浓度 (ppm);

q——发生源强度 (ml/s);

σ_y 、 σ_z ——水平方向、垂直方向的扩散宽度 (m);

H_e ——有效排风口高度 (m)。

扩散宽度是上式中的重要参数, 它与大气稳定度、地面糙度等诸多因素密切相关, 应通过大量调查和专题研究取其合理值。

3.9 火灾时的通风

3.9.1 火灾排烟设计应结合避难设施和通风控制统一考虑。本文借鉴日本通风设计指南, 提出 1500m 的长度。

3.9.2 隧道排烟风速 2m/s~3m/s, 是按一般隧道火灾, 产生 20MW 的热量控制的排烟风速取值; 对汽油车相撞产生 500MW 以上的热量, 排烟风速要求 5m/s 以上, 如以此设计很不经济, 建议特殊车辆通过隧道可定时并由引导车开道。

3.9.3 排烟分区长度建议取 1000m, 是基于与避难横通道所处位置基本对应而提出来的。

3.9.4 半横向和全横向通风可通过风道实现排烟要求; 纵向通风主要通过控制风速、风向及竖井排烟等手段达到控制烟雾行程的目的, 必要时可通过射流风机的风向逆转来实现排烟。

3.10 通风监控

3.10.1 当隧道内发生如火灾等异常情况时, 应通过对异常情况的监控和通风控制, 使异常情况的规模得到控制, 并尽快恢复正常的营运环境。

3.10.2 控制方式

控制方式大致可分为自动控制和手动控制两类。每座隧道应

根据其隧道长度、公路等级、交通量等要素选择合适的控制方式。

自动控制方式由设置于隧道内的烟雾透过率传感器、一氧化碳浓度传感器、车辆检测器、风向与风速测试仪所得到的传感信号，通过控制网络进行风量控制。

手动控制方式是靠人工操纵仪器控制风量，它分为联动控制与单独控制。

联动控制——预先确定风量档次，通过单手操纵风量各档按钮，使其相关仪器和机械产生联动，由此控制风量。当自动控制系统出现故障或检修时可使用联动控制；对于高速公路的特长隧道，亦可与自动控制结合使用。

单独控制——可由人工对各仪器和机械单独控制，亦可对几个相关联的附属机械实施局部联动控制。当自动控制或联动控制出现故障或检修时可使用单独控制；对于低等级公路中的中、短隧道，可使用单独控制。

3.10.3 控制方法

1 直接控制法

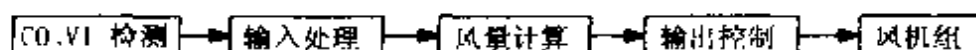
可通过分布在隧道内各点的烟雾透过率传感器和一氧化碳浓度传感器，直接检测行驶车辆排放出的烟雾浓度和 CO 浓度值，经计算处理后，给出控制信号，控制运转风机，供给必要的新鲜风量，稀释烟雾浓度和 CO 浓度，以达到设计要求的洞内卫生与安全标准。

直接控制法的主要设备由控制中心计算机系统、区域控制器、VI 传感器、CO 传感器、风机控制柜及风机构成。

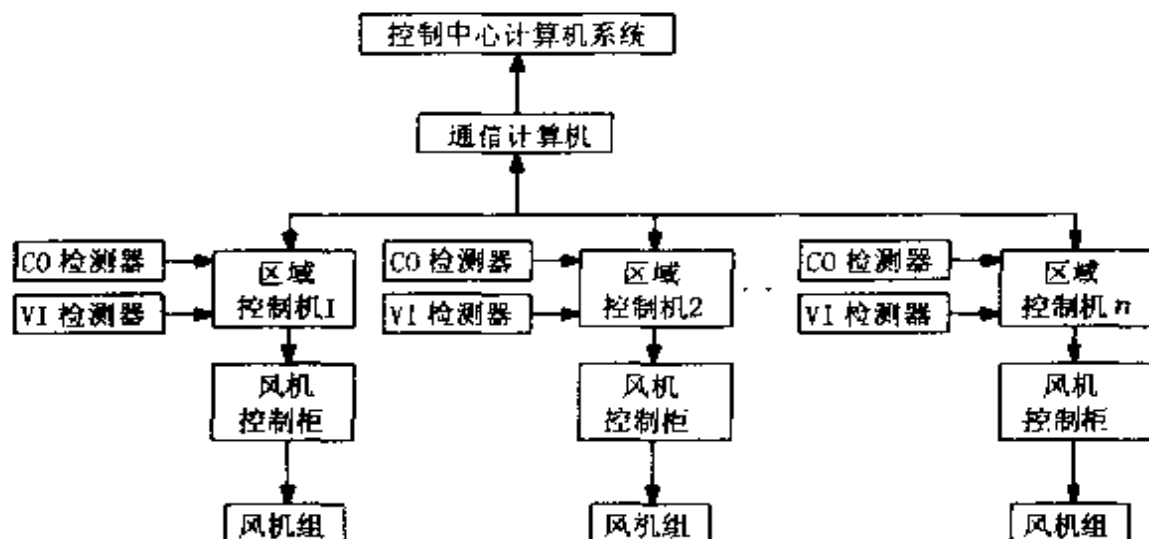
基于 VI、CO 浓度信息的直接控制法较为简单、直接，我国许多隧道目前较普遍采用这种方式。直接控制法的控制图如图 30 所示。

2 间接控制法

可根据进入隧道前区段的交通量信息及埋在洞内路面下的车辆检测器，实时了解隧道内交通量、行车速度、车辆构成等，通



(a) 控制流程



(b) 控制方式

图 30 直接控制法的流程图

过检测交通流状况，分析并计算出车辆烟雾和一氧化碳的排放量，实施风量控制。

间接控制法的主要设备由控制中心计算机系统、区域控制器、交通量信号板、车辆检测器、风机控制柜及风机构成。

间接控制法的核心是通过车辆分类检测装置，在检测交通量和车速的基础上，同时把各种车辆按类型检测出来。目的在于减少 VI 和 CO 的计算误差，提高通风控制精度。该方法的控制流程比直接法复杂，其检测技术与设备要求较高，在我国的实际应用受到限制，但国外一些发达国家如日本等常采用这种方法，效果良好。间接法的控制图如图 31 所示。

3 程序控制法

该方法不考虑 VI、CO 浓度及交通量的变化情况，而是按时间区间（如白昼与夜晚，节假日与平时）预先编成程序来控制风机运转。

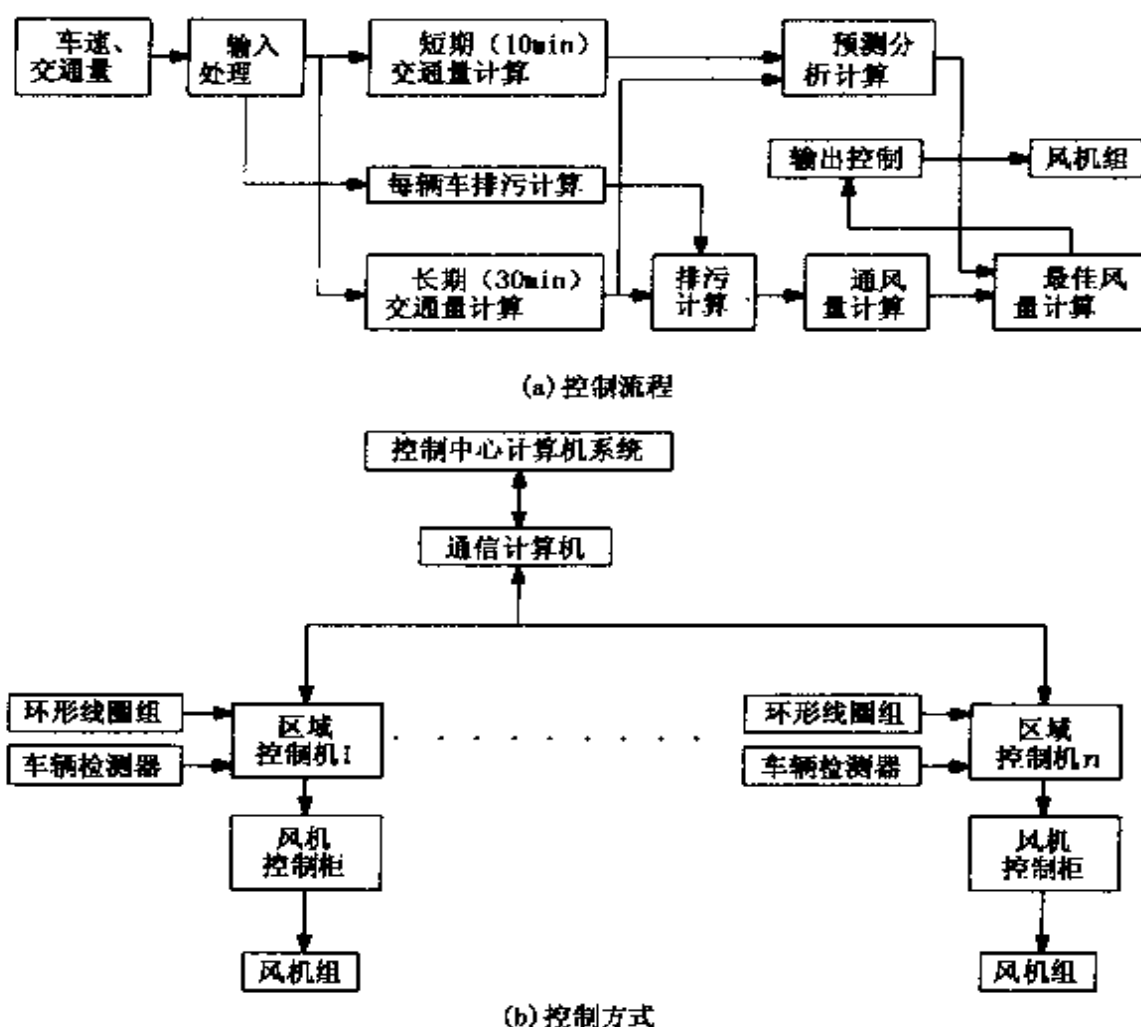


图 31 间接控制法的流程图

以上示出的控制图仅作参考，每座隧道应根据自身具体情况制订适宜的控制方式并编制相应的控制程序。

3.10.4 风量级档的设定

风量级档的设定应考虑交通量或 VI、CO 浓度，行车速度及自然风速的历时变化，还应考虑分期修建情况下由单洞变双洞的交通状态的变化。

一般来说，风机（含排风机、送风机、射流风机）的叶片转速可以无级改变其吐出风量，但如果按无级控制或级档分得过细，对隧道而言，其风量感应迟缓，控制效率低下，另一方面会导致控制系统复杂化，设备消耗大，费用增加。因此本条文提出风量级档的划分不宜过细。表 16 所示为风量级档设定实例，仅

作参考。

表 16 风机组合风量级档设定实例

分档	送风量 (%)	分档	排风量 (%)	分档	射流风机运转台数	自然风速 (m/s)	交通量·年期 (辆/h)	车速 (km/h)	车向	平均设计风速 (m/s)
	0		0		0					
①	20	③	100	②	4	顺 1.0	1850	60~80	单	6.8
②	30	③	100	②	4	0	1850	60~80	单	6.8
③	46	③	100	②	4	逆 1.5	1850	60~80	单	6.8
①	(54) 51	①	51	②	4	0	874·2002 年	60~80	双	3.4
④	54	①	50	①	0	逆 3.5	1330	40	单	4.0
⑤	(68) 60	③	100	②	4	逆 2.0	1850	60~80	单	6.8
⑤	68	②	75	①	0	0	740	10	单	4.2
⑥	74	③	100	②	4	逆 2.5	1850	60~80	单	6.8
⑦	81	①	51	③	8	0	1284·2005 年	60~80	双	4.2
⑧	91	③	100	②	4	逆 3.0	1850	60~80	单	6.8
⑨	100	③	100	②	4	逆 3.5	1850	60~80	单	6.8

注：本表是按送风量 (%) 从小到大排列，由于是组合风量，因此排风量 (%) 及射流风机运转台数难以按大小顺序排列。当然，也可将其按大小排列，然后将三者的代号进行编排组合。

3.10.5 监控设施主要由传感仪器、监视装置、控制装置及信息传输装置构成。CO 仪由试料采集部、红外线气体分析部、校正用气体、指示记录计及其他附属装置构成。

VI 仪宜距隧道进出口 200m 以上布置。传感器的投光部和感光部宜相距 100m 设置。

用于车辆检测的环行线圈感应器是通过车辆驶过埋设于路面下的环行线圈而感应线圈的电感变化，检测车辆情况，具有高精度的车辆感应能力。超声波感应器是将超声波投射车辆，根据其反射波的变化来检测车辆情况。感应器宜设置在洞口内侧较明亮处。

自动控制装置主要由向风机发出指令的控制中继柜和监视风

机运转状况并发出手动运转指令的监视控制柜构成。

自动控制应采用工业用控制计算机。

3.10.6 火灾时的通风监控要求

1 通风控制系统应考虑火灾发生时的排烟功能。

2 火灾发生后风机的运转模式，应能防止烟雾扩散，确保火点附近的司乘人员在疏散避难过程中具有一定的视觉条件，并尽力确保消防工作起码的作业环境。

3 应根据隧道长度和通风方式等将隧道划分成若干个排烟区段（一般与通风区段一致）。当为竖井送排式纵向通风方式时，以竖井为界，可划为2个排烟区段。当火点发生在第1段时，应由排风机风口排烟；当火点发生在第2段时，应由隧道出口排烟。有时送排风口间的短道亦可作为一个区段。当横向通风方式时，可酌情划分多区段排烟。

应考虑自然风等因素对洞内的影响，将排烟运行分为排烟A类型和排烟B类型，并确定相应的风机风量或风机运转台数。表17所示为排烟区段划分实例，仅作参考。

表 17 竖井纵向通风方式的排烟区段划分实例

火点位置	排烟类型	送风机风量	排风机风量	JF 运转台数
I 区段	A	20%	100%	0
	B	100%	100%	4 台
II 区段	A	100%	0	0
	B	100%	100%	4 台
短道	A	20%	100%	0
	B	100%	100%	4 台

注：A 类型表示隧道内不受自然风影响（ $v_n=0$ ）的情况；

B 类型表示自然风速（ $v_n=3.5\text{m/s}$ ）逆吹的情况。

4 排烟时隧道内风速应满足本规范3.9.2条的要求。

3.10.7 隧道通风监控设施可根据计算行车速度、隧道长度、设计交通量和实际平均行车速度的情况进行配置。实际平均行车速度应通过对实际行车速度进行实地观测统计获得；当有困难时，亦可假定与计算行车速度相同，作近似处理。

4 照 明

4.1 一 般 规 定

4.1.2 洞外亮度是隧道照明的重要基准之一，洞口方位对洞外亮度影响较大，在设计阶段之初，应做调查。

交通量与照明水平关系密切，交通量越大，事故发生的机率越高，对照明水平的要求也越高。早在 60 年代，意、法两国之间的 Mont Blanc 隧道（长 11.6km）就按交通量的变化进行照明调光。80 年代之后，各国新编隧道照明规范均在设计指标中综合了交通量及交通状况的影响因素。本规范亦作如此考虑，故要求进行交通状况的调查。

隧道内废气的排放方式与情况对照明有很大影响。如果在入口端洞口排出大量废气，其微细颗粒受日光照射后，经散射和反射就会产生白色光幕，将降低亮度对比度和照明效果，设计时应予充分考虑。初设时要对通风方式、布置方案及通风标准做详细调查。

为了确定养护系数 M ，设计之初应了解营运管理组织方式和管理方式。

4.1.4 照明用计算行车速度

计算行车速度在公路隧道照明中是个极为敏感的参数，对整个照明系统的投资与营运电费影响很大。日本东京湾海底隧道曾做过详细比较，如其他参数相同，仅是车速由 80km/h 提高到 100km/h，其结果照明设备费提高 60%～61%，营运电耗提高 63%～66%。

俄罗斯有关研究机构曾做过现场实测，在车辆通过隧道洞口前后，会很自然地降速，进洞后再行回升。日本许多隧道实测结

果也证明,通过隧道时,车速普遍下降 30% 左右。这一现象对隧道照明影响较大,故 PIARC1995 报告建议,凡通行货车的公路隧道,计算行车速度不超过 80km/h。因此,在选用计算行车速度时应慎重。

4.1.5 亮度

光源、透过率(烟雾浓度)都对照明水平的要求有较大影响,日本照明专家曾做过大量的实测,予以证实。详见本规范第 3.3.3 条的条文说明图 3。

维持亮度是指灯具在养护、清洗前的亮度,较初装亮度低。设计时,应在照明计算结果中除以养护系数 M 。 M 值一般可取 0.6~0.7。日本隧道照明设计规范对此取值较低,如表 18 所示。这并不说明日本的养护工作周期长,清洗不及时,而与日本隧道照明设计规范所规定的入口加强段照明亮度远较其他国家为低有关。

表 18 日本的养护系数 M

交通量 (辆/d)	隧道长度 (m)	>1500		500~1500		<500	
	纵坡 (%)	>2	<2	>2	<2	>2	<2
>20 000		0.4	0.5	0.5	0.55	0.55	0.6
10 000~20 000		0.45	0.55	0.55	0.6	0.6	0.65
5000~10 000		0.5	0.6	0.6	0.65	0.65	0.7
<5000		0.55	0.65	0.65	0.7	0.7	0.75

注:该表为双向交通的情况。当单向交通时,养护系数可在表中数字基础上增加 0.05。

路面平均亮度与平均照度间的换算率,不仅与路面材料有关,还与路面的使用龄期有关。新的沥青路面较黑,新的混凝土路面较白,随着使用年数的增长,前者黑度降低,后者黑度增大。因此换算率宜在一个范围内选取,如图 32 所示。

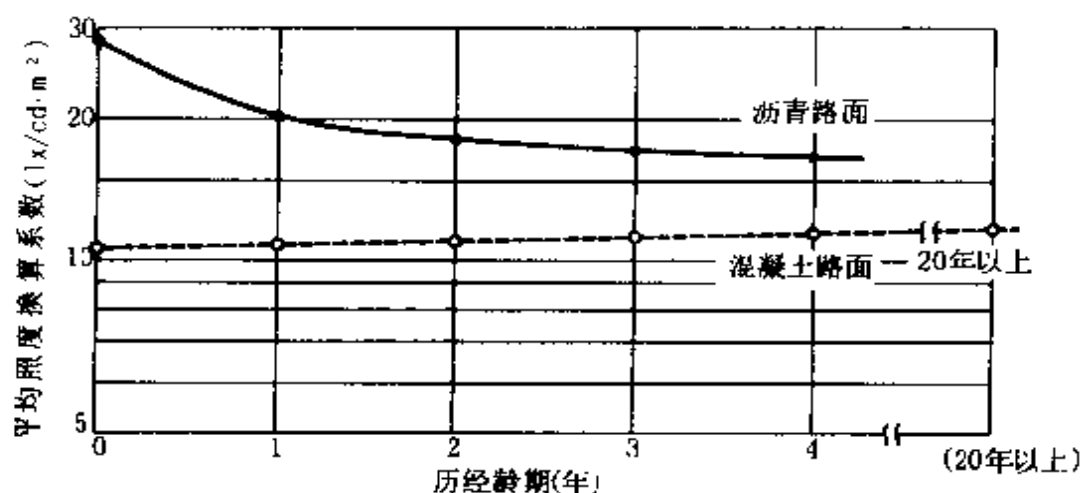


图 32 平均照度换算系数的历年变化

4.2 中间段照明

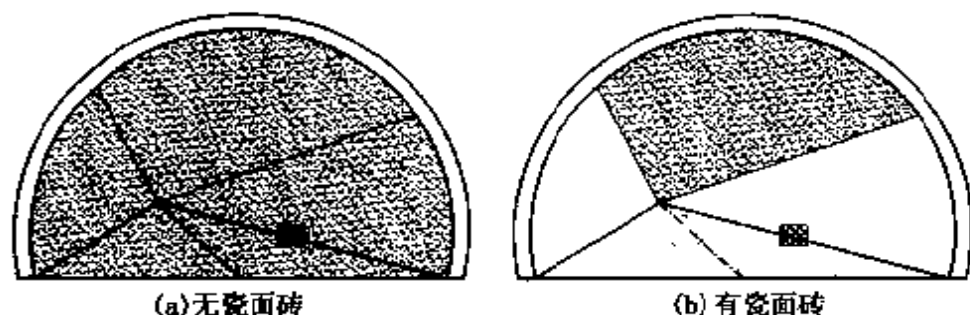
4.2.1 中间段亮度 L_{in}

1 该款内容主要借鉴 EURO STD (欧盟隧道照明标准, 1997 版) 和日本《隧道照明指针》(1990 版) 中的有关规定, 较 CIE TC4—08《隧道与地道照明准则》(1990 版) 标准低。

2 长隧道有充分的适应(过渡)时间, 故 L_{in} 可适当降低。

4 所提出的照明亮度是以墙面 2m 高范围内铺反射率 $\rho \geq 0.7$ 的装修材料为前提的。

如图 33 所示, 墙面的反射与衬托作用在隧道照明中非常重要, 不容忽视。当墙面反射率达到 0.7 时路面亮度可提高 10%。1992 年, 我国上海黄浦江水下隧道曾对隧道墙面上采用喷塑铝合金板、苯丙乳液涂料、平光瓷砖、白色有光瓷砖、搪瓷钢板等



(a) 无瓷面砖

(b) 有瓷面砖

图 33 墙面亮度衬托效果示意图

各种护面材料进行现场实测，结果仅白色有光瓷砖达标。

4.2.2 灯具布置形式如图34 所示。




	布置形式	图 示
A	中线布置	
B	交错布置	
C	对称布置	

图 34 灯具布置

路面亮度总均匀度 U_0 、纵向均匀度 U_l 与隧道的设计交通量有密切关系，该两款参照了 EURO STD（欧盟隧道照明标准，1997 版）取值，较 CIE TC4—08 规定有所调低。

4.2.3 应急停车带上经常进行车辆检修，故宜采用显色指数高的荧光灯光源。

4.3 入口段照明

4.3.1 入口段照明亮度 L_{th}

自 60 年代开始，隧道照明工学上的两大学派，即欧洲的 D.A.Schreuder 学派和日本的成定康平学派，长期以来围绕 k 值的合理取值，进行了针锋相对的争论，两大学派理论上的分歧集中反映在 k 值两者差达 5 倍之多。两派的立说依据都是相同的模拟测试方法，但在基本参数的选用上差别较大。

从表 19 可见，Schreuder 在障碍物标准尺寸和亮度对比度上所采用的是照明工学上国际通用常规值，而成定康平所采用的是以“注视点”学说为依托的修正值，比较有利于障碍物的视认。可是成定康平已于 1984 年宣布放弃自己的“注视点”学说，并认为他所主张的 k 值应提高 1 倍左右。

表 19 两大学派的基本参数差异

	障碍物标准尺寸	亮度对比度	模型显示时间
Schreuder	20cm×20cm	0.2	0.1s
成定康平	25cm×25cm	0.25	0.5s

表 20 所示为各国际学术团体及不同国家最近采用的 k 值。本条文采用的 k 值是两大学派荐用值的中间值。

表 20 国际学术团体及不同国家采用的 k 值

	交 通 量			车 速 v (km/h)	D_s (m)	k
	AADT (辆/d)	N (辆/h)				
		单向交通	双向交通			
PIARC (1987)					100	0.06
					60	0.05
CIE TC4-08 (1990)					100	0.06
					60	0.05
NDG Road Tunnels (挪威公路隧道 设计准则) (1990)	> 20 000			80		0.05
	8000 ~ 20 000					50
	4000 ~ 8000			80		0.03
				50		0.015
	BS 5489/7 (1992)				80	
50 ~ 70						0.05
CNBE (1997)					100	0.06
					60	0.05
EURO STD (1997)		≥ 2400	≥ 1300		100	0.05
					60	0.035
		≤ 700	≤ 360		100	0.025
					60	0.015
日本隧道照明指针 (1990)				80		0.02
				60		0.015

4.3.2 洞外亮度 $L_{20}(S)$

1 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。洞外亮度 $L_{20}(S)$ 是照明系统的设计基准之一。洞外亮度 $L_{20}(S)$ 的正确设定,对工程投资和营运电费都有极大的影响,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 $4000\text{cd}/\text{m}^2$ 与 $6000\text{cd}/\text{m}^2$,则设备费相差 34%,年电耗量 ($\text{kW}\cdot\text{h}$),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,尽量降低洞外亮度。

本规范表 4.3.2-1 中,当 20° 视场中天空面积比大于或等于 25% 时,北洞口的 $L_{20}(S)$ 较南洞口大,此与 CIE TC4—08《隧道与地道照明准则》(1990 版)、BS 5489/7 (英国国家标准,1992)、CNBE (比利时隧道照明国家标准,1997) 及 EURO STD (欧盟隧道照明标准,1997 版) 所提一致,但与日本《隧道照明指针》(1990 版) 提法相反。本规范采纳了前者的观点,表 21 可说明理由。

表 21 行车方向与景物亮度关系

行车方向	天 空	路 面	岩 石	树木、草地	建筑物
N	8000	3000	3000	2000	8000
E、W	12 000	4000	2000	2000	6000
S	16 000	5000	1000	2000	4000

由于 $L_{20}(S)$ 随纬度、季度、气象变化,本规范表 4.3.2-1 所提供的仅是粗略的设计参考值。雪地环境中 $L_{20}(S)$ 会较高,但行车速度亦相应下降,故该表中不提雪地环境中的 $L_{20}(S)$ 。

2 黑度法是一种简易的实测法。实测时,在接近段起点 S 距地面 1.5m 高处,正对洞口拍摄黑白照片,拍摄时在洞口旁立一已知亮度的灰板,作为参照物,然后将冲洗出来的胶片置于黑

度仪上测读 20° 视场内各景物的黑度，经权重计算得出平均黑度，从而确定现场的洞外亮度 $L_{20}(S)$ 值。实测应在夏季（6、7、8月）晴天无云时连续进行3日，每日测读5次（11:00至15:00时，时距1h）或11次（8:00至18:00时，时距1h）。

4.3.3 入口段长度 D_{th}

为保证驾驶员对路面上（标准高20cm）障碍物的视认能力，在障碍物背后应有一段最小长度为 b 的明亮路面，如图35所示。

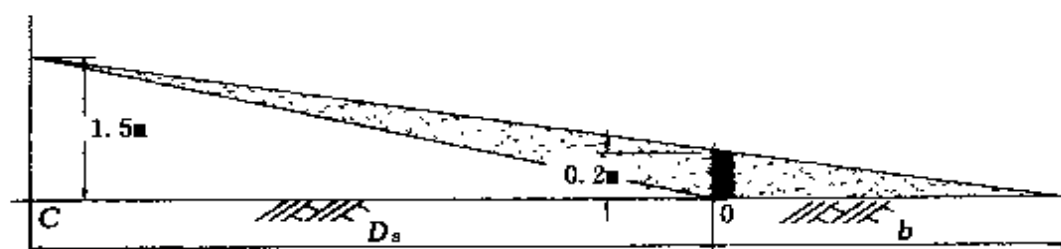


图35 照明停车视距与最小衬托长度

车辆驶至洞外适应点 A 时，驾驶员的 20° 视场中，洞外景物基本消失。适应点 A 与洞口 P 间的距离 d 称为适应距离（ $d = (h - 1.5) / \tan 10^\circ$ ），如图36所示。

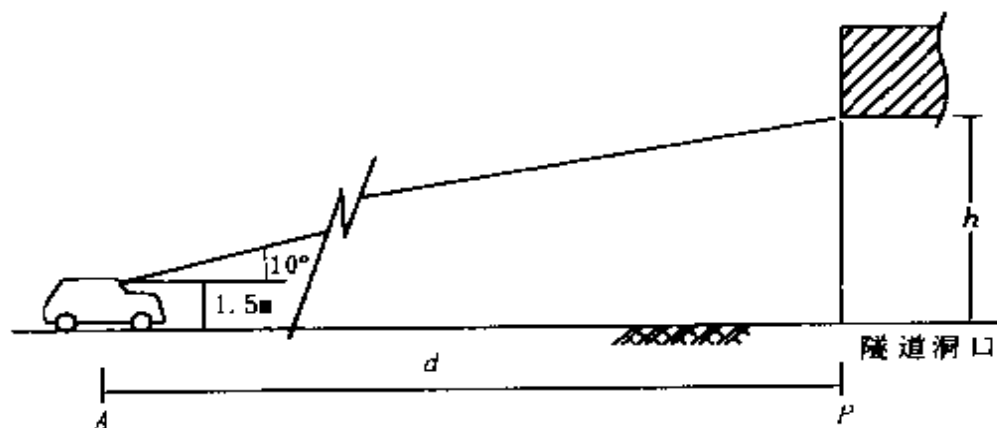


图36 适应距离

入口段长度 D_{th} 可根据车速、视距、最小衬托长度、洞口净空高度、适应距离进行计算，表22所示为计算示例。

表 22 D_{th} 计 算 示 例

计算行车 速 度 (km/h)	停车视距 D_s (m)	最小衬托 长 度 b (m)	洞口净空高度 h (m)		
			6	7	8
			适应距离 d (m)		
			25.5	31.2	38.9
100	158	24.3	157	151	143
80	100	15.4	89.9	84.2	76.5
60	55	8.5	38	32	25
40	27	4.2	10	10	10

4.3.4 由于洞外日光的投射进入, 洞口以内一定范围内有较高亮度。这种自然光可利用作为入口段加强照明的组成部分, 因此参照了英、日两国规范, 将洞口以内 10m 范围内的加强照明灯具予以省略。

4.3.5 连续隧道入口照明

连续隧道指两隧道间正常行驶时间小于 30s 的隧道。在连续隧道中, 后续隧道入口照明的标准, 国内外的研究资料与成果较少, 仅日本有关研究人员对此进行了研究, 这里借鉴了其研究成果。同时考虑到我国山区高速公路建设必然出现连续隧道, 因此将连续隧道的照明纳入本规范, 可参照执行。

4.4 过渡段照明

4.4.1 过渡段亮度 L_{tr}

本规范采用 CIE 适应曲线 $L_{\text{tr}} = L_{\text{th}} (1.9 + t)^{-1.4}$ 作为过渡段亮度与长度划分的依据。TR₁、TR₂、TR₃ 三个过渡照明段的亮度比例按 3:1 划分, 见图 37。

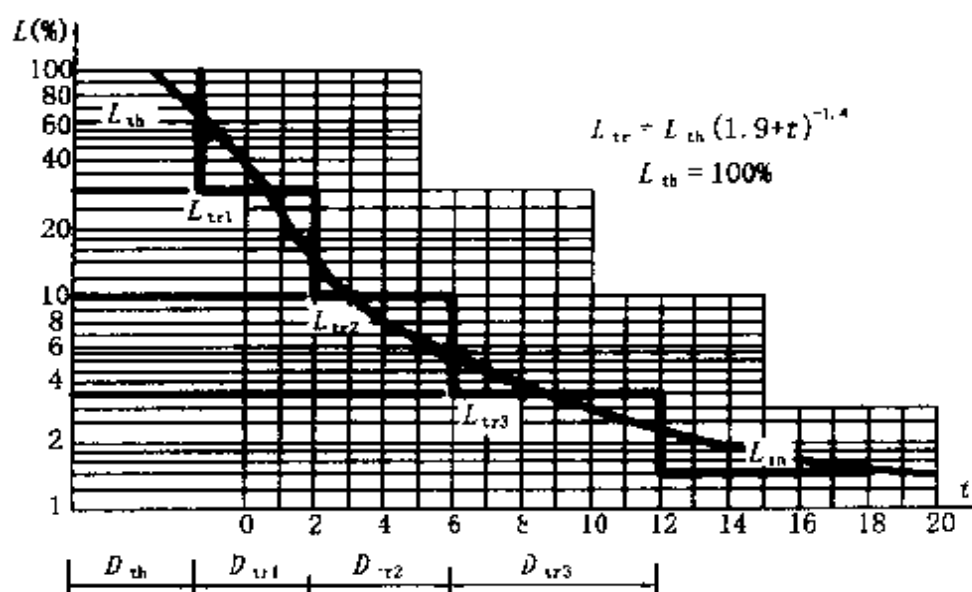


图 37 过渡照明段长度与相应亮度

4.4.2 过渡段长度 D_{th}

各过渡段的长度，基本上沿着 CIE 适应曲线分割。过渡段 TR_1 的长度为：

$$D_{tr1} = \frac{D_{th}}{3} + \frac{v}{1.8} \quad (20)$$

式中 $v/1.8$ ——2s 内的行驶距离。

过渡段 TR_2 的长度为 $D_{tr2} = \frac{2v}{1.8}$ ，相当于 4s 内的行驶距离。

过渡段 TR_3 的长度为 $D_{tr3} = \frac{3v}{1.8}$ ，相当于 6s 内的行驶距离。

过渡段长度 D_{tr} 计算见表 23。

表 23 过渡段长度 D_{tr} 计算表 (m)

计算行车 速度 v_i (km/h)	D_{tr1}			D_{tr2}	D_{tr3}	计算行车 速度 v_i (km/h)	D_{tr1}			D_{tr2}	D_{tr3}
	h						h				
	6	7	8				6	7	8		
100	108	106	103	111	167	60	46	44	42	67	100
80	74	72	70	89	133	40	26	26	26	44	67

4.5 出口段照明

4.5.1 在隧道出口附近，前车背后的小型车辆常难以发现、视认，容易发生车祸。设置出口加强照明后，可消除这类视觉困难（如图 38 所示）。

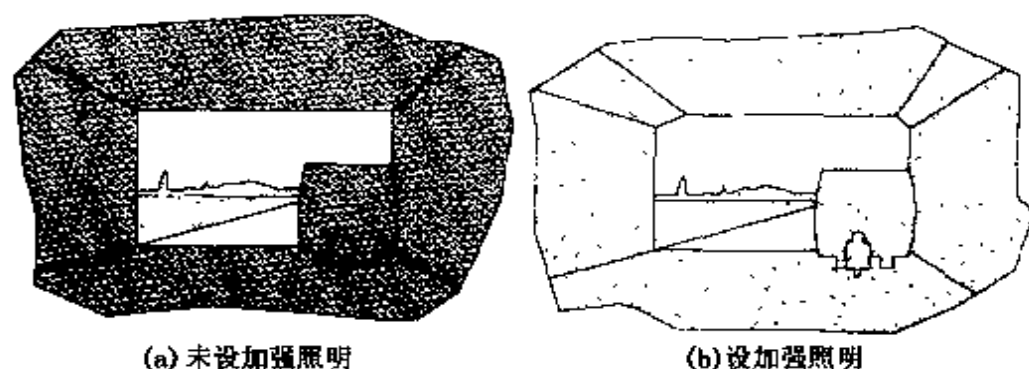


图 38 出口加强照明效果

4.7 光源与灯具

4.7.1 隧道照明目前多采用效率及透雾性能较好的高压钠灯，对显色性要求较高的隧道和特殊地段较多采用荧光灯。

4.7.2 隧道照明灯具的防护等级参照 CIE《隧道和地下通道照明指南》（1990 版）的要求取值，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。

4.8 接近段的减光

4.8.1 采用削竹式洞口并辅以大幅坡面植被时，即使 20° 视场中天空所占比例较多， $L_{20}(S)$ 值仍远低于端墙式洞门，如图 39 (a) 所示。

洞外亮度 $L_{20}(S)$ 对整个照明系统的影响极大，若对洞门做明亮装饰会倍增洞外亮度，加剧“黑洞效应”，导致照明能耗的浪费。图 39 (b) 所示为洞门做明亮装饰后，使 $L_{20}(S)$ 提高的情况。

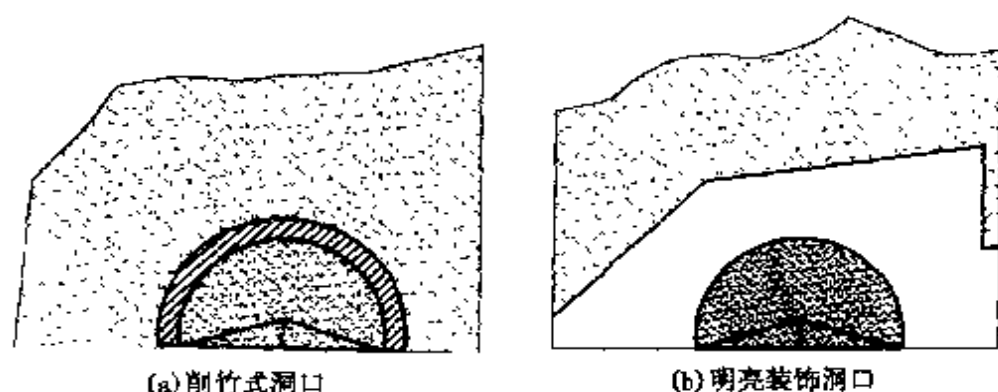


图 39 洞口（门）形式对洞外亮度的影响

4.11 照明计算

4.11.1 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。

4.11.2 照度计算

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，已经可以实现繁琐的重复计算工作，得出路面上乃至隧道墙面上任意一点的照度与亮度。本规范推荐数值计算方法（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 40。

本条文式（4.11.2-1）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

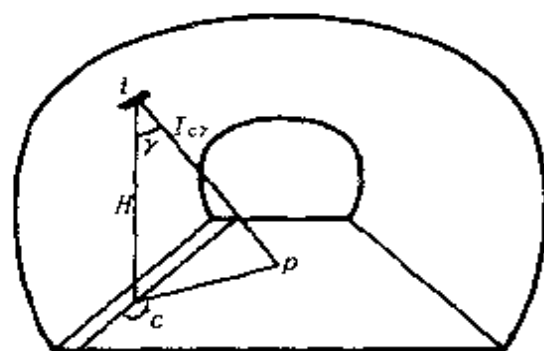


图 40 灯具光强

0° ，光通量为 1000lm 条件下，所得的光强表，实际计算时应按

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，应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_{cy} 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 ）一倍以上的灯具影响较小，可以不考虑。故一般情况下，取计算区域前后各一组，计算区域之外，另计 2~4 个灯（如图 41 所示）。

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，计算区域内必须有足够的计算点数量，并且车道中心线上应布点。

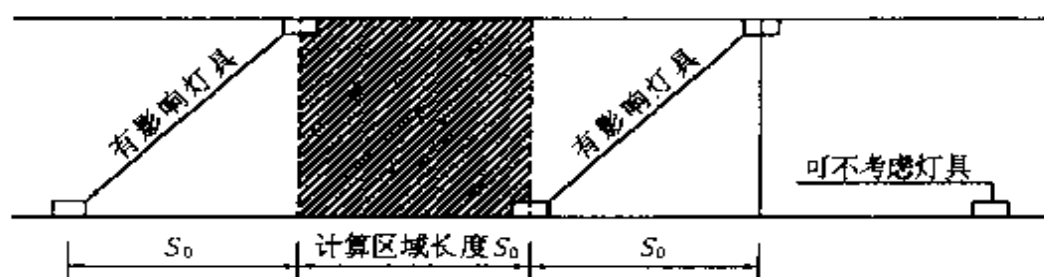


图 41 计算区域

4.11.3 亮度计算

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，驾驶员注意力集中的区域大致是前方 60m~160m，因此视点纵向距离取距计算区域 60m~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 $r(c, \gamma)$ 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。本规范附录 C 只列出了一种路面的 $r(c, \gamma)$ 值。 $r(c, \gamma)$ 表中所有的 r 值是按 $Q_0 = 1$ 测量计算得出的。实际计算时，应乘以表中的 Q_0 值，并且表中各 r 值均乘了 1000。经推断 L_p 可按下式计算：

$$L_{ip} = \frac{I_{cy}}{H^2} \cdot \frac{\Phi}{1000} \cdot M \cdot r(\beta, \gamma) \cdot \frac{Q_0}{1000} \quad (21)$$

照明计算简例

1 基本数据见表24。

表 24 基本数据

光源	高压钠灯	路面类型	水泥混凝土路面
功率	100W	路面宽度	8.5m
灯具	×××	灯具安装方式	双侧交错, 间距 6m; 高度 5m, 仰角 10°
养护系数	0.7	观测点位置	计算区域前方 60m, 距路面边缘 1/4 路面宽处
光通量	8180lm	计算区域	纵向长度 $S=6m$, 横向宽度 $W=8.5m$
灯具数量	4 个	计算点数	纵向 7 点 (间距 1m), 横向 5 点 (间距 2.125m)

2 照度、亮度计算

1) 数值计算方法

计算区域、布灯方式、计算点布设如图 42 所示。

①计算步骤:

- 计算某灯对某点的照度与亮度;
- 依次计算其余灯具对某点的照度与亮度;
- 计算全部灯具在此点产生的总照度和亮度;
- 逐点计算区域内各计算点的照度和亮度;
- 根据各计算点的照度和亮度, 计算平均照度和亮度;
- 根据各计算点的照度和亮度, 计算总均匀度及纵向均匀度。

以上计算照度和亮度，需反复迭代计算，可由计算机完成。

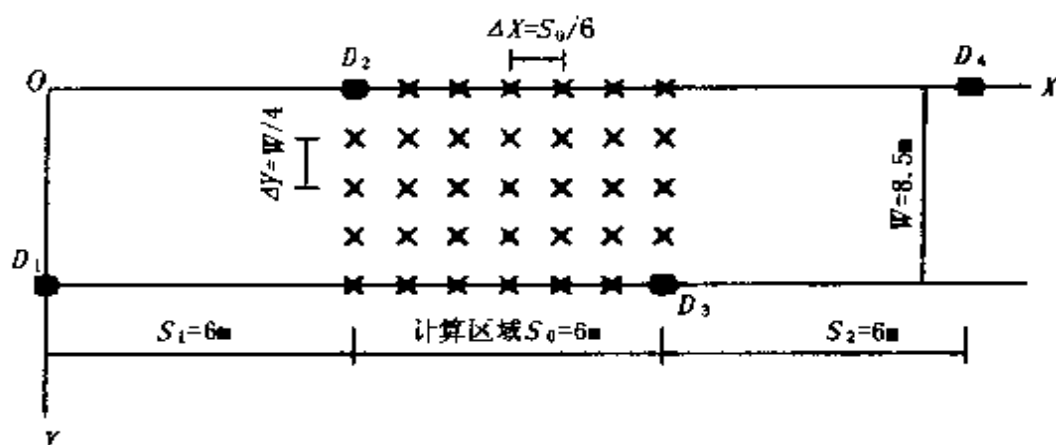


图 42 计算区域、布灯方式、计算点布设

②计算结果

·计算区域内的路面照度 (lx)

	1 *	2 *	3 *	4 *	5 *	6 *	7 *
1 -	59.9	56.3	47.4	37.3	29.1	24.1	22.2
2 -	63.2	60.5	54.3	47.9	42.6	39.6	38.5 (车道中心线)
3 -	58.9	58.0	56.4	55.7	56.4	58.0	58.9
4 -	38.5	39.6	42.6	47.9	54.3	60.5	63.2 (车道中心线)
5 -	22.2	24.1	29.1	37.3	47.4	56.3	59.9

区域内最小照度 $E_{\min} = 22.16\text{lx}$

区域内最大照度 $E_{\max} = 63.25\text{lx}$

区域内平均照度 $E_{\text{av}} = 47.09\text{lx}$

·计算区域内的路面亮度 (cd/m^2)

	1 *	2 *	3 *	4 *	5 *	6 *	7 *
1 -	4.4	4.2	3.7	3.2	2.7	2.3	2.0
2 -	5.0	4.9	4.5	4.1	3.7	3.5	3.3
3 -	5.2	5.1	4.9	4.6	4.5	4.6	4.7
4 -	3.8	4.0	4.0	4.1	4.4	4.6	4.7
5 -	2.4	2.6	2.8	3.2	3.7	4.1	4.3

区域内最小亮度 $L_{\min} = 2.034\text{cd}/\text{m}^2$

区域内最大亮度 $L_{\max} = 5.184\text{cd}/\text{m}^2$

区域内平均亮度 $L_{av} = 3.934 \text{cd/m}^2$

区域内总均匀度 $U_0 = 0.517$

区域内纵向均匀度 $U_1 = 0.81$

2) 利用系数方法

将 $W = 8.5$ 、 $S = 6$ 、 $\Phi = 8180 \text{lm}$ 、 $M = 0.7$ 、 $N = 1$ 、 $\eta = 0.4$ 代入式 (4.11.2-4)，则路面平均照度为：

$$E_{av} = 0.40 \times 8180 \times 0.7 \times 1 / 8.5 / 6 = 44.9 \text{lx}$$