

---

江苏省工程建设标准

---

城市隧道竖井型自然通风设计与验收规范  
Code of Design and Acceptance on Natural Ventilation  
for City Tunnel with Shafts

（征求意见稿）

\*\*\*\*-\*\*-\*\*发布

\*\*\*\*-\*\*-\*\*实施

---

江苏省住房和城乡建设厅

## 目 录

1 总则.....	1
2 术语和符号 .....	1
2.1 术语.....	1
2.2 符号.....	2
3 隧道.....	6
4 竖井.....	7
5 污染空气的稀释标准 .....	8
6 隧道需风量计算 .....	9
7 通风量计算 .....	13
7.1 一般规定 .....	13
7.2 正常交通状况下的通风量计算 .....	14
7.3 交通阻滞状况下的通风量计算 .....	14
8 辅助风机的设置 .....	15
9 火灾时的防排烟 .....	15
10 验收.....	15
附录 A 隧道与竖井的压力损失系数.....	17
附录 B 汽车正面投影面积与空气阻力系数.....	22
附录 C 正常交通状况下的通风量计算方法.....	27
附录 D 交通阻滞状况下的通风量计算方法 .....	32
附录 E 加设辅助风机情况下的通风量计算方法.....	35
附录 F 汽车单位时间发热量计算方法 .....	37
附录 G 本规范用词说明.....	39
附件 条文说明 .....	40

## 1 总则

**1.0.1** 为使城市隧道竖井型自然通风设计与验收做到科学合理，使隧道通风和防排烟满足卫生和安全要求，特制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于采用自然通风方式的城市浅埋式双洞单向中、长隧道。

**1.0.3** 自然通风设计应纳入城市隧道总体设计，以保证隧道通风和火灾时能满足卫生和安全要求。

**1.0.4** 隧道和竖井口的废气扩散应符合环保的有关规定。

**1.0.5** 城市隧道竖井型自然通风设计除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准、规范的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 城市隧道 city tunnel

城市中为缓解地面交通压力而设置的地下隧道。

#### 2.1.2 自然通风 natural ventilation

利用自然风压、隧道内外热压和车辆行驶时的交通通风力实现隧道通风换气的一种通风方式。自然通风是相对于机械通风而言的。

#### 2.1.3 竖井 vertical shaft

为隧道通风而竖向设置的通道。

#### 2.1.4 开孔率 hatch ratio

自然通风竖井的有效开口面积占隧道垂直投影面积的比例。

#### 2.1.5 风帽 blast cap

竖井口上能够利用风压的装置。

### 2.1.6 辅助风机 donkey ventilator

为增加部分隧道段的通风量而设置的风机。

## 2.2 符号

$A_{cl}$ ——大型车正面投影面积；

$A_{cs}$ ——小型车正面投影面积；

$A_j$ ——射流风机的出口面积；

$A_m$ ——汽车等效阻抗面积；

$A_{ri}$ ——第  $i$  段隧道净空断面积；

$A_{si}$ ——第  $i$  个竖井断面面积；

$B$ ——汽车轮距；

$c_p$ ——空气定压比热；

$d$ ——汽车耗油量；

$D_{ri}$ ——第  $i$  段隧道断面当量直径；

$D_{si}$ ——第  $i$  个竖井断面当量直径；

$f$ ——射流风机台数；

$f_a$ ——考虑 CO 的车况系数；

$f_d$ ——车辆密度系数；

$f_h$ ——考虑 CO 的海拔高度系数；

$f_{iv}$ ——考虑 CO 的纵坡—车速系数；

$f_m$ ——考虑 CO 的车型系数;

$f_{a(VI)}$ ——考虑烟雾的车况系数;

$f_{h(VI)}$ ——考虑烟雾的海拔高度系数;

$f_{iv(VI)}$ ——考虑烟雾的坡度—车速系数;

$f_{m(VI)}$ ——考虑烟雾的车型系数;

$h$ ——汽车高;

$K$ ——烟雾设计浓度;

$L_{ri}$ ——第  $i$  段隧道的长度;

$L_{si}$ ——第  $i$  个竖井的长度;

$L_s$ ——竖井高度;

$L_{rp}$ ——进入隧道气流平均流经距离;

$L_r$ ——隧道长度;

$m$ ——有效热量系数;

$n$ ——车型类别数;

$n_D$ ——柴油车车型类别数;

$N_m$ ——相应车型的设计交通量;

$N_r$ ——隧道内存在的汽车数量;

$N_{ri}$ ——第  $i$  段隧道内运动车辆数量;

$N$ ——隧道设计交通量;

$p$ ——气体绝对压力;

$p_0$ ——标准大气压;

$p_t$ ——隧址设计气压；

$\Delta p_j$ ——每台射流风机升压力；

$\Delta p_{rmi}$ ——第  $i$  段隧道的自然风阻力；

$\Delta p_{rai}$ ——第  $i$  段隧道内通风阻力；

$\Delta p_{sai}$ ——第  $i$  个竖井内通风阻力；

$\Delta p_{ti}$ ——第  $i$  段隧道交通通风力；

$q$ ——隧道内汽车总的单位时间发热量；

$q_{CO}$ ——CO 基准排放量；

$q_g$ ——单位质量汽油燃烧发热量；

$q_{VI}$ ——烟雾基准排放量；

$q_0$ ——单个汽车单位时间发热量；

$Q_{CO}$ ——隧道全长 CO 排放量；

$Q_{req(CO)}$ ——隧道全长稀释 CO 的需风量；

$Q_{VI}$ ——隧道全长烟雾排放量；

$Q_{req(VI)}$ ——隧道全长稀释烟雾的需风量；

$r$ ——下角码，表示隧道空间；

$R$ ——气体常数；

$r_1$ ——大型车比例；

$s$ ——下角码，表示竖井空间；

$T$ ——气体热力学温度；

$T_0$ ——标准气温；

$T_s$ ——隧道夏季的设计气温；

$t_r$ ——隧道内空气温度；

$t_w$ ——隧道外空气温度；

$U_{ri}$ ——第  $i$  段隧道断面周长；

$v_{rmi}$ ——自然风作用引起第  $i$  段隧道内风速；

$v_t$ ——汽车运动速度；

$v_{ri}$ ——第  $i$  段隧道内空气流速；

$v_{si}$ ——第  $i$  个竖井内风速；

$v_j$ ——射流风机的出口速度；

$v_s$ ——竖井排风风速；

$\zeta_i$ ——第  $i$  段隧道内局部阻力系数；

$\zeta_{si}$ ——第  $i$  个竖井内局部阻力系数；

$\zeta_s$ ——竖井排风局部阻力系数；

$\xi_{cl}$ ——大型车空气阻力系数；

$\zeta_{i-(i+1)}$ ——分流型风道主流分叉损失系数；

$\zeta_{k-k_s}$ ——分流型风道支流分叉损失系数；

$\zeta_e$ ——隧道入口进风局部阻力系数；

$\xi_{cs}$ ——小型车空气阻力系数；

$\lambda_r$ ——隧道壁面摩阻损失系数；

$\lambda_s$ ——竖井壁面摩阻损失系数；

$\rho$ ——空气密度；

$\rho_s$ ——竖井内的空气密度；

$\delta$ ——一氧化碳设计浓度；

$\Delta$ ——平均壁面粗糙度；

$\eta$ ——射流风机位置摩阻损失折减系数；

$\gamma$ ——空气容重；

$\nu$ ——运动粘滞系数。

### 3 一般规定

**3.0.1** 隧道竖井设置应综合考虑近、远期交通量的变化要求。

**3.0.2** 城市隧道竖井型自然通风设计可按下列顺序实施：

1. 收集交通、气象、环境、地质、地形、地物等通风设计基础资料；
2. 根据交通量、车辆情况、设计参数等调查及设计资料，计算需风量；
3. 根据竖井设置要求合理设计竖井；
4. 计算各种工况下隧道的通风量；
5. 隧道通风量如不能满足需风量要求时，应设置辅助风机，在设置辅助风机后应重新计算通风量。

**3.0.3** 通风规划和设计时应应对交通量、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、洞口及竖井口附近的建筑物分布，居民分布，重要设施等。

**3.0.4** 通风调查的同时应对隧道顶部能否按照竖井要求设置通风竖井且不影响城市美观和周围环境进行调查，并对废气扩散和竖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估。

**3.0.5** 隧道壁面宜平滑，减少摩擦阻力。

**3.0.6** 隧道转弯处应平顺过渡，减小气流流动的局部阻力。

## 4 竖井设计

**4.0.1** 竖井上端与大气连通，下端与隧道内部连通。

**4.0.2** 竖井宜沿隧道长度方向设置在隧道顶部中央处，也可设置在隧道顶部两侧。

**4.0.3** 竖井可沿隧道全长连续设置，也可间断设置。

**4.0.4** 不加辅助风机时，竖井间距不得大于 240m。

**4.0.5** 在竖井间断设置时，竖井宜等距布置。

**4.0.6** 相邻隧道竖井宜交错设置。

**4.0.7** 竖井宽高比（ $D_s/L_s$ ）宜取在 0.174~0.6 之间。

**4.0.8** 单个竖井开孔面积较大，无法满足条文 4.0.7 对竖井宽高比（ $D_s/L_s$ ）限值时，竖井应进行分隔，且宜分割为 3~5 份。

**4.0.9** 不加辅助风机时，隧道内连续 500m 隧道段的开孔率应满足表 4.0.9 要求。

表 4.0.9 开孔率

隧道长度 (m)	500~1500	1500~3000
开孔率 (%)	$\geq 3.25$	$\geq 4$

**4.0.10** 竖井顶部如不设置风帽，则应设置网状井盖，并设置警示标志，且网状井盖的单个网孔面积不得大于  $900\text{mm}^2$ ；当井口距离地面小于  $1000\text{mm}$  时，井盖应能承受  $1000\text{N}$  的负重。

**4.0.11** 竖井内壁面应平滑，减少摩擦阻力。

**4.0.12** 竖井上端宜设置风帽，且风帽孔口应设置安全措施和警示标志。

## 5 污染空气的稀释标准

**5.0.1** 隧道通风主要应对一氧化碳 (CO)、烟雾和异味进行稀释。

### 5.0.2 隧道 CO 设计浓度

1 正常交通状况下，隧道内 CO 设计浓度可按表 5.0.2-1 取值。

表 5.0.2-1 CO 设计浓度  $\delta$

隧道长度 (m)	$\leq 1000$	$\leq 3000$
$\delta$ (ppm)	300	250

2 交通阻滞（隧道内各车道均以怠速行驶，平均车速为  $10\text{km/h}$ ）时，阻滞段的平均 CO 设计浓度可取  $300\text{ppm}$ ，隧道内滞留时间不超过  $20\text{min}$ 。

3 人车混合通行的隧道，其 CO 设计浓度按表 5.0.2-2 取值。

表 5.0.2-2 CO 设计浓度  $\delta$

隧道长度 (m)	$\leq 1000$	$\leq 3000$
$\delta$ (ppm)	150	100

### 5.0.3 隧道烟雾设计浓度

1 采用钠灯光源时，烟雾设计浓度应按表 5.0.3 取值；采用荧光灯光源时，烟雾设计浓度应提高一级。

表 5.0.3 烟雾设计浓度  $K$

计算行车速度 (m/s)	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。

## 6 隧道需风量计算

### 6.0.1 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。

6.0.2 CO 排放量按式 (6.0.2) 计算。

$$Q_{CO} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{CO} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_{iv} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (6.0.2)$$

式中  $Q_{CO}$ ——隧道全长 CO 排放量 ( $m^3/s$ );

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

$f_a$ ——考虑 CO 的车况系数, 按表 6.0.2-1 取值;

$f_d$ ——车辆密度系数, 按表 6.0.2-2 取值;

$f_h$ ——考虑 CO 的海拔高度系数, 按图 6.0.2 取值;

$f_{iv}$ ——考虑 CO 的纵坡—车速系数, 按表 6.0.2-3 取值;

$f_m$ ——考虑 CO 的车型系数, 按表 6.0.2-4 取值;

$n$ ——车型类别数;

$N_m$ ——相应车型的设计交通量（辆/h）。

表 6.0.2-1 CO 的车况系数  $f_a$

适用道路等级	$f_a$
高速公路、一级公路	1.0
二、三、四级公路	1.1~1.2

表 6.0.2-2 车辆密度系数  $f_d$

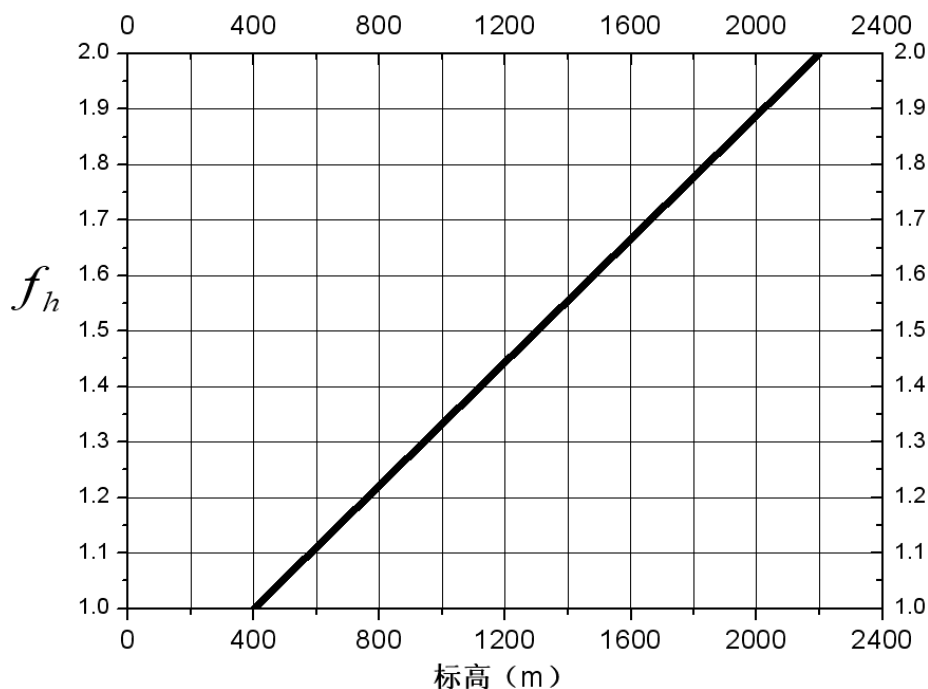
工况车速 (km/h)	100	80	70	60	50	40	30	20	10
$f_d$	0.6	0.75	0.85	1	1.2	1.5	2	3	6

表 6.0.2-3 考虑 CO 的纵向—车速系数  $f_{iv}$

$v_i$ (km/h) \ $i$ (%)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
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

表 6.0.2-4 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

图 6.02 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

**6.0.3** 稀释 CO 的需风量应按式（6.0.3）计算：

$$Q_{req(CO)} = \frac{Q_{CO}}{\delta} \cdot \frac{p_0}{p_t} \cdot \frac{T_s}{T_0} \times 10^6 \quad (6.0.3)$$

式中  $Q_{req(CO)}$ ——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  $101.325 kN/m^2$ ；

$p_t$ ——隧址设计气压 ( $kN/m^2$ )；

$T_0$ ——标准气温 (K)，取  $273K$ ；

$T_s$ ——隧道夏季的设计气温 (K)。

**6.0.4** 烟雾排放量应按式（6.0.4）计算：

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_D} (N_m \cdot f_{m(VI)}) \quad (6.0.4)$$

式中  $Q_{VI}$ ——隧道全长烟雾排放量 ( $m^3/s$ )；

$q_{VI}$ ——烟雾基准排放量 ( $m^3/辆 \cdot km$ )，可取  $2.5 m^3/辆 \cdot km$ ；

$f_{a(VT)}$ ——考虑烟雾的车况系数，按表 6.0.4-1 取值；

$f_{h(VT)}$ ——考虑烟雾的海拔高度系数，按图 6.0.4 取值；

$f_{iv(VT)}$ ——考虑烟雾的坡度—车速系数，按表 6.0.4-2 取值；

$f_{m(VT)}$ ——考虑烟雾的车型系数，按表 6.0.4-3 取值；

$n_D$ ——柴油车车型类别数。

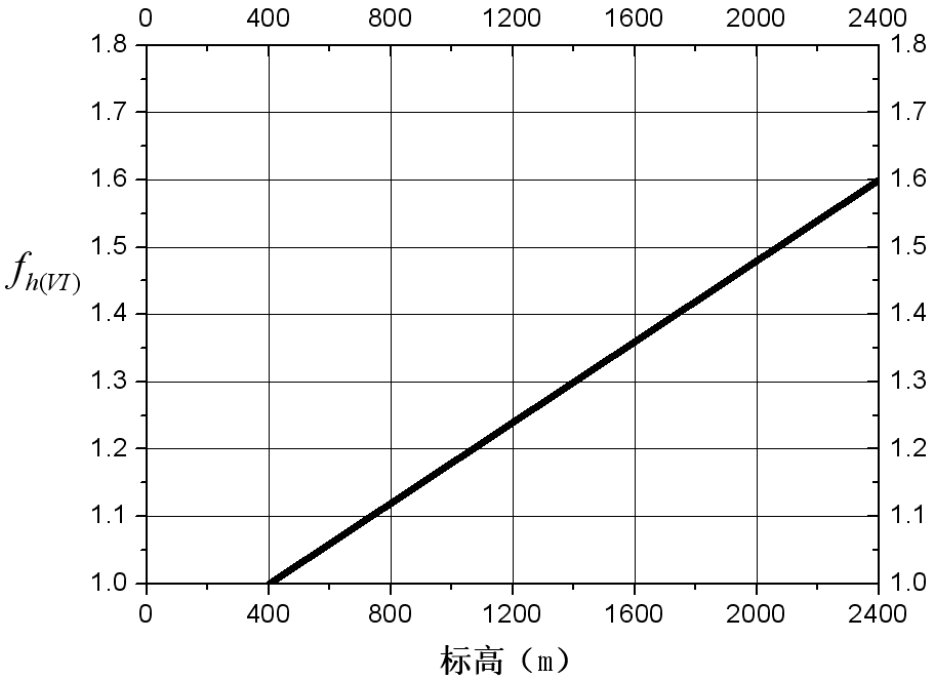


图 6.0.4 考虑烟雾的海拔高度系数  $f_{h(VT)}$

注：当取值超出图示范围时，可作直线延伸

表 6.0.4-1 考虑烟雾的车况系数  $f_{a(VT)}$

适用道路等级	$f_{a(VT)}$
高速公路、一级公路	1.0
二、三、四级公路	1.2~1.5

表 6.0.4-2 考虑烟雾的纵向—车速系数  $f_{iv(VT)}$

$v_t$ (km/h) \ $i$ (%)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4

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	3.2	—	—
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 6.0.4-3 考虑烟雾的车型系数  $f_{m(VI)}$ 

柴 油 车			
轻型货车	中型货车	重型货车、大型客车、拖挂车	集装箱车
0.4	1.0	1.5	3~4

**6.0.5** 稀释烟雾的需风量应按式 (6.0.5) 计算：

$$Q_{req(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} \quad (6.0.5)$$

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

$K$ ——烟雾设计浓度 ( $m^{-1}$ )，按表 6.0.3 取值。

**6.0.6** 稀释空气中异味的需风量

隧道空间不间断换气频率不应低于每小时 5 次。

## 7 通风量计算

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 隧道正常交通状况和阻滞交通状况下，隧道内通过交通通风力、热压差提供的通风换气量必须满足需风量的要求。

**7.1.2** 当通风量无法满足隧道需风量要求时，应在部分隧道段设置辅助风机。

**7.1.3** 隧道壁面摩阻损失系数及入口损失系数应根据隧道和竖井断面当

量直径、壁面糙率等取值，当为混凝土壁面时常用损失系数可按表 7.1.3 取值。其他材料和隧道弯道摩阻损失系数可按附录 A 计算或取值。

表 7.1.3 损失系数

隧道壁面摩阻损失系数 $\lambda_r$	0.02
竖井壁面摩阻损失系数 $\lambda_s$	0.022
隧道入口损失系数 $\zeta_e$	0.6

**7.1.4** 应对隧道计算行车速度以下各种工况车速的通风量进行计算。

## 7.2 正常交通状况下的通风量计算

**7.2.1** 在正常交通状况下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，且视汽车行驶为恒定持续的。在标准大气压状态下的空气物理量可按表 7.2.1 取值。

表 7.2.1 空气物理量

容重 $\gamma$ ( $kN / m^3$ )	11.77
密度 $\rho$ ( $kg / m^3$ )	1.20
运动粘滞系数 $\nu$ ( $m^2/s$ )	$1.52 \times 10^{-5}$

**7.2.2** 隧道入口算作起点，至各个通风竖井的中心位置，直至隧道出口，将隧道看成由若干段组成。

**7.2.3** 正常交通状况下的通风量可按附录 C 确定。

## 7.3 交通阻滞状况下的通风量计算

**7.3.1** 在交通阻滞状况下隧道主要利用内外温差引起热压差进行通风。

**7.3.2** 交通阻滞通风量可按附录 D 确定。



## 8 辅助风机的设置

**8.0.1** 部分隧道段无法按照竖井要求设置竖井时，应在隧道内设置辅助风机。

**8.0.2** 辅助风机位置选择：

1 隧道部分段无法开设竖井，如最大暗埋段大于 240m，应在该段内设置辅助风机。

2 隧道局部无法按照隧道开孔率要求设置竖井时，应在该段内设置辅助风机。

**8.0.3** 设置辅助风机后，应对隧道通风量进行重新计算。

**8.0.4** 若加设射流风机，隧道的通风量可按附录 E 确定。

## 9 火灾时的防排烟

**9.0.1** 隧道按照竖井要求设置通风竖井后，隧道内可不设置机械排烟系统。

## 10 验收

**10.0.1** 竖井间距应符合本规范第 4.0.5 条的规定。

检查方法：尺量检查。

**10.0.2** 隧道开孔率应符合本规范第 4.0.9 条的规定。

检查方法：对照图纸，尺量检查。

**10.0.3** 无风帽竖井顶部应按本规范第 4.0.10 条的规定设置网状井盖和警示标志。

检查数量：全数检查。

检查方法：观察检查，尺量检查，检查检测报告。

**10.0.4** 设置风帽的隧道，风帽孔口应有安全措施和警示标志。

检查数量：全数检查。

检查方法：观察检查，检查检测报告。

**10.0.5** 隧道如设置辅助风机，其辅助风机的设置应符合下列规定：

- 1 型号、规格应符合设计规定，其出口方向应正确；
- 2 叶轮旋转应平稳，停转后不应每次停留在同一位置上；
- 3 风机应有加固措施。

检查数量：全数检查。

检查方法：依据设计图核对、观察检查。

## 附录 A 隧道与竖井的压力损失系数

### 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:

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

式中  $\Delta$  ——平均壁面粗糙度 (mm), 可按表 A.0.1 取值;

$D$  ——管段壁面当量直径 (m)。

表 A.0.1 平均壁面粗糙度  $\Delta$

壁面材料及特征		$\Delta$ (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 弯曲段局部阻力系数

1 圆形弯曲风道的损失系数可按式 (A.0.2-1) 计算:

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

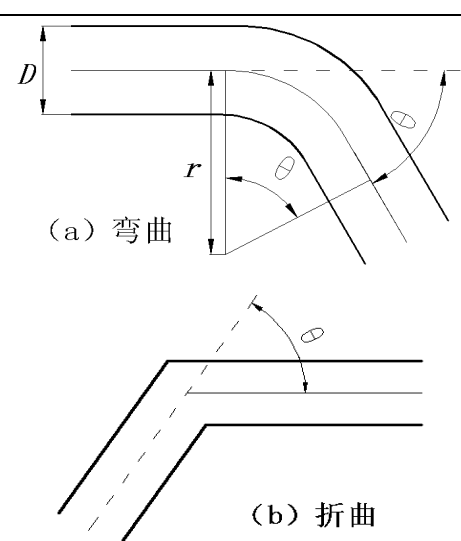
式中  $\zeta_b$  ——弯曲风道损失系数;

$r$  ——弯曲管段内壁半径 (m)。

2 圆形折曲风道的局部阻力系数可按式(A.0.2-2)计算或按表 A.0.2 查取。

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

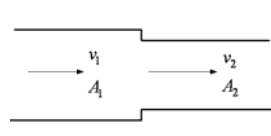
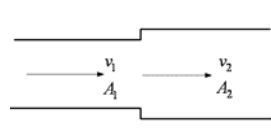
表 A.0.2 圆形折曲风道的局部阻力系数

$\theta$	$\zeta_b$	图 示
15°	0.022	 (a) 弯曲 (b) 折曲
30°	0.073	
45°	0.183	
60°	0.365	
90°	0.99	
120°	1.86	

A.0.3 缩径管段与扩径管段局部阻力系数

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，其局部局部阻力系数可按表 A.0.3-1 和表 A.0.3-2 取值。

表 A.0.3-1 突扩与突缩管局部阻力系数

突扩		$\frac{A_1}{A_2}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0
		$\zeta$	1.0	0.81	0.64	0.49	0.36	0.25	0.16	0.09	0.01	0
突缩		$\frac{A_2}{A_1}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0
		$\zeta$	0.5	0.47	0.42	0.38	0.34	0.30	0.25	0.20	0.09	0

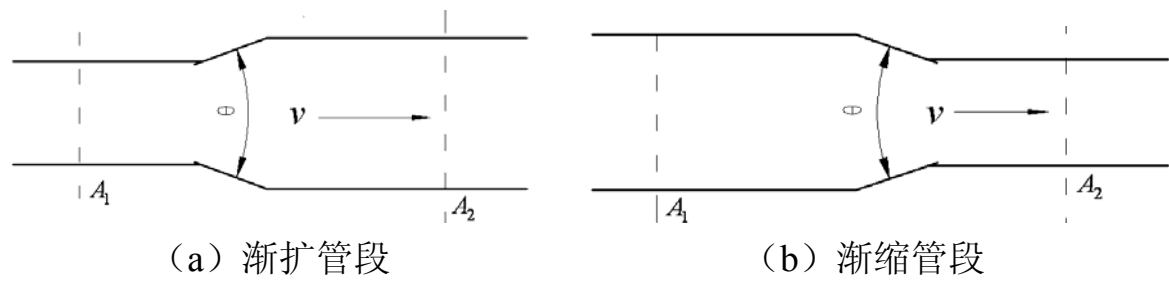


图 A.0.3 圆形渐变管段示意图

表 A.0.3-2 圆形渐变管段局部阻力系数

类 型	$\zeta$													
渐 扩	$\zeta = k \cdot (\frac{A_2}{A_1} - 1)^2$	$\theta$	8°		10°		12°		15°		20°		25°	
		$k$	0.14		0.16		0.22		0.30		0.42		0.62	
渐 缩	$\zeta = k_1 \cdot k_2$	$\theta$	10°		20°		40°		60°		80°		100°	
		$k_1$	0.40		0.25		0.20		0.20		0.30		0.40	
		$A_1/A_2$	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

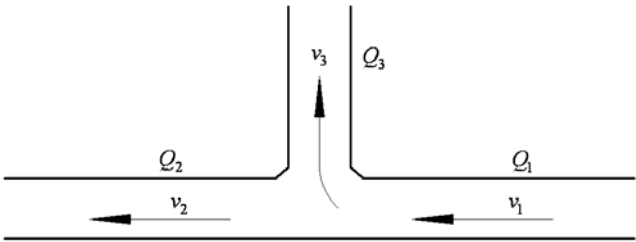
1 当为合流型时，其局部阻力系数 $\zeta_{1-3}$ 、 $\zeta_{2-3}$ ，可按表 A.0.4-1 取值。

表 A.0.4-1 合流型风道的局部阻力系数

$Q_1/Q_3$	$Q_2/Q_3$	$\zeta_{1-3}$	$\zeta_{2-3}$	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,其局部阻力系数 $\zeta_{1-2}$ 、 $\zeta_{1-3}$ ,可按表 A.0.4-2 取值。

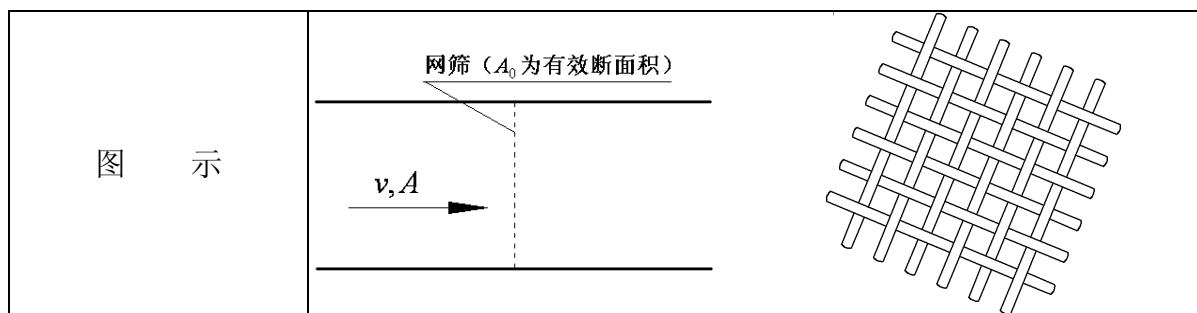
主流的分叉局部阻力系数 $\zeta_{1-2}$										
$A_3/A_1$	$Q_3/Q_1$									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.5	0.72	0.48	0.28	0.13	0.05	0.04	0.09	0.18	0.31	0.5
1.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.13	0.22	0.30	0.38	0.48
支流的分叉局部阻力系数 $\zeta_{1-3}$										
$A_3/A_1$	$Q_3/Q_1$									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.25	0.55	0.50	0.60	0.85	1.20	1.80	3.10	4.35	6.00	9.00
1.0	0.67	0.55	0.46	0.37	0.32	0.29	0.29	0.30	0.37	0.48
图 示										

### A.0.5 金属网筛局部阻力系数

金属网筛的局部阻力系数可按表 A.0.5 取值。

表 A.0.5 金属网筛局部阻力系数

有效面积比 (%)	30	40	50	60	70	80	90
$\zeta$	6.2	3.0	1.44	0.97	0.58	0.32	0.14



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 ( $\text{m}^2$ );

$B$ ——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		$A_c (\text{m}^2)$	车 型		$A_c (\text{m}^2)$
12m 系列大客车	座位客车	6.4	8m 系列大客车	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 系列大客车	座位客车	4.3
	卧铺客车	7.2	6m 系列大客车	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 ( $\text{mm}^2$ )
德 国	大众	帕萨特轿车	4540	1414	1390	1972530
		高尔夫轿车	3985	1413	1415	1999395
		大赛马轿车	3975	1306	1355	1769630
		奥迪轿车	4383	1400	1365	1911000
	宝马	315	4355	1366	1380	1885080
		745	5014	1501	1430	2146430



国别	厂家	车型	车长 (mm)	前轮距 (mm)	车高 (mm)	正面投影面积 (mm <sup>2</sup> )
德国	本茨	190E	4430	1444	1361	1965284
		200	4725	1488	1438	2139744
		230TE	4724	1486	1425	2117550
		380SEC	4910	1545	1406	2172270
		500SL	4389	1455	1341	1951155
美国	通用	CMC 大客车	10668	2205	3010	6637050
		CMC 卡车	4040	1350	1805	2436750
		马利布轿车	4895	1486	1415	2102690
		骑士轿车	4428	1406	1366	1920596
		劳蒂克轿车	4780	1491	1372	2045652
		马刀轿车	5550	1570	1440	2260800
	福特	城市轿车	5560	1580	1420	2243600
		速度轿车	4475	1390	1339	1861210
	克莱斯勒	格兰轿车	5225	1524	1405	2141220
		新港轿车	5250	1520	1400	2128000
		董事轿车	5340	1460	1350	1971000
		纽约人轿车	4715	1464	1346	1970544
		道奇轿车	4755	1463	1344	1966272
日本	丰田	皇冠轿车	4860	1440	1400	2016000
		追击者轿车	4670	1390	1395	1980750
		光冠轿车	4670	1390	1425	1980750
		卡姆利轿车	4400	1465	1395	2043675

国别	厂家	车型	车长 (mm)	前轮距 (mm)	车高 (mm)	正面投影面积 (mm <sup>2</sup> )
日本	丰田	远景轿车	4410	1460	1390	2029400
		L-KM 卡车	4060	1350	1785	2409750
		海艾斯卡车	4690	1440	1925	2772000
		戴娜卡车	5780	1410	2030	2862300
	日产	总统轿车	5280	1520	1490	2264800
		公子轿车	4860	1430	1425	2037750
		桂冠轿车	4675	1410	1380	1945800
		阿特拉斯	5990	1640	2100	3444000
		蓝鸟轿车	4500	1460	1380	2014800
		前进轿车	3645	1345	1395	1876275
		神鹰	5965	1640	2915	4780600
	三菱	未尼卡布	3190	1220	1670	2037400
		奔马	5950	1630	2060	3357800
		N-FB120	4915	1395	2815	3926925
		KFK115H	7460	1715	2405	4124575
		KFK216H	7460	1715	2405	4124575
		PFP418	9970	2050	3185	6449625
		PFT418V	11360	2050	3195	6549750
		科迪亚轿车	4390	1410	1320	1861200
		华丽轿车	4560	1445	1385	2001325
		特雷轿车	4280	1410	1370	1931700
		枪骑兵轿车	4125	1390	1360	1890400

国别	厂家	车型	车长 (mm)	前轮距 (mm)	车高 (mm)	正面投影面积 (mm <sup>2</sup> )
日本	五十铃	N-WFR51	4690	1430	2200	3146000
		N-TLD34	5940	1385	2060	2853100
		P-TLD76V	6690	1385	3032	4199320
		K-86BR	7505	1700	2380	4046000
		K-TMQ78	9030	1960	2670	5233200
		P-CXK19V	11990	2050	2915	5975750
		P-CXG17M	8740	2050	2870	5883500
	马自达	家族轿车	3955	1390	1375	1911250
		卡佩拉轿车	4430	1430	1395	1994850
	本田	阿科德轿车	4455	1445	1375	1986875

### 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 <sup>2</sup> )	阻力系数 $\xi_c$	$\xi_c \cdot A_c$ (m <sup>2</sup> )	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 试验
载货用篷布盖好	4.65	0.816	3.794	
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		

车 型	面积 $A_c$ ( $m^2$ )	阻力系数 $\xi_c$	$\xi_c \cdot A_c (m^2)$	备 注
VW1500	1.681	0.422	0.710	
DB220S	1.903	0.430	0.820	
DB330SE	2.100	0.406	0.852	
ГАЗ-24 Волга	2.300	0.480	1.104	
ГАЗ-15 Найка		0.502		
Citroen DS-19		0.311		
Oldsmobile Toronado		0.380		
Ford Falcon		0.419		
Cadillao	2.27	0.460	1.040	

注：本表数据取自《汽车理论》，机械工业出版社。

## 附录 C 正常交通状况下的通风量计算方法

### C.0.1 自然风阻力

1 在正常交通状况下的通风计算中,一般可将自然通风作为阻力考虑。

2 隧道自然风阻力应按式 (C.0.1-1) 计算:

$$\Delta p_{rmi} = (1 + \zeta_i + \lambda_r \frac{L_i}{D_{ri}}) \frac{\rho}{2} \cdot v_{rmi}^2 \quad (\text{C.0.1-1})$$

式中  $\Delta p_{rmi}$ ——第 i 段隧道的自然风阻力 ( $\text{N/m}^2$ );

$v_{rmi}$ ——自然风作用引起第 i 段隧道内风速 ( $\text{m/s}$ ), 可取  $0.5 \sim 1.5 \text{m/s}$ ;

$\zeta_i$ ——第 i 段隧道内局部阻力系数, 可按附录 A 计算或取值;

$\lambda_r$ ——隧道壁面摩阻损失系数, 可按附录 A 计算或取值;

$L_i$ ——第 i 段隧道的长度 ( $\text{m}$ );

$\rho$ ——空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ), 按表 7.1.3 取值;

$D_{ri}$ ——第 i 段隧道断面当量直径 ( $\text{m}$ )。

隧道断面当量直径按式 (C.0.1-2) 计算:

$$D_{ri} = \frac{4 \times A_{ri}}{U_{ri}} \quad (\text{C.0.1-2})$$

式中  $A_{ri}$ ——第 i 段隧道净空断面积 ( $\text{m}^2$ );

$U_{ri}$ ——第 i 段隧道断面周长 ( $\text{m}$ )。

C.0.2 交通通风力可按式 (C.0.2-1) 计算:

$$\Delta p_{rti} = N_{ri} \cdot \frac{A_m}{A_{ri}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_t - v_{ri})^2 \quad (\text{C.0.2-1})$$

式中  $\Delta p_{rti}$ ——第 i 段隧道交通通风力 ( $\text{N/m}^2$ );

$N_{ri}$ ——第 i 段隧道内运动车辆数量 (辆);

$v_t$ ——汽车运动速度 ( $\text{m/s}$ );

$v_{ri}$ ——第 i 段隧道内空气流速 ( $\text{m/s}$ );

$A_m$ ——汽车等效阻抗面积 ( $\text{m}^2$ )。

汽车等效阻抗面积可按式 (C.0.2-2) 计算:

$$A_m = (1 - r_1) \cdot A_{cs} \cdot \xi_{cs} + r_1 \cdot A_{cl} \cdot \xi_{cl} \quad (\text{C.0.2-2})$$

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

$\xi_{cs}$ ——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 ( $\text{m}^2$ ), 可取  $5.37 \text{ m}^2$ , 或参照附录 B 取值;

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

$r_1$ ——大型车比例。

### C.0.3 通风阻力

1 隧道内通风阻力可按式 (C.0.3-1) 计算:

$$\Delta p_{rai} = (1 + \xi_i + \lambda_r \cdot \frac{L_i}{D_{ri}}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{ri}^2 \quad (\text{C.0.3-1})$$

式中  $\Delta p_{rai}$ ——第  $i$  段隧道内通风阻力 (N/m<sup>2</sup>);

$\xi_i$ ——第  $i$  段隧道内的局部阻力系数。

2 竖井内通风阻力可按式 (C.0.3-2) 计算:

$$\Delta p_{sai} = (1 + \xi_{si} + \lambda_s \frac{L_{si}}{D_{si}}) \frac{\rho}{2} v_{si}^2 \quad (\text{C.0.3-2})$$

式中  $\Delta p_{sri}$ ——第  $i$  个竖井内通风阻力 (N/m<sup>2</sup>);

$v_{si}$ ——第  $i$  个竖井内风速 (m/s)。

第  $i$  个竖井内的风速可按式 (C.0.3-3) 计算:

$$v_{si} = \frac{v_{ri} A_{ri} - v_{r(i+1)} A_{r(i+1)}}{A_{si}} \quad (\text{C.0.3-3})$$

式中  $A_{ri}$ ——第  $i$  段隧道断面面积 (m<sup>2</sup>);

$A_{si}$ ——第  $i$  个竖井断面面积 (m<sup>2</sup>)。

#### C.0.4 各段通风量计算。

##### 1 正常交通状况下隧道通风模式

正常交通状况下隧道通风模式如图 C.0.4 所示。入口段隧道中, 其分段内车辆运动产生的作用, 并不会局限在本分段内, 车辆运动产生的通风压, 不仅对其临近的竖井口产生作用, 且将波及前方隧道, 并因此影响整个隧道的每个分段。相应地, 入口段中气流的运动, 也将受到来自隧道其它各个分段车辆运动影响, 以致不能孤立地确定入口段中的气流状态。同理, 任一分段的气流的运动, 都将受到其它分段车辆运动的影响。因此, 竖井型隧道任一分段的气流运动变化, 都将导致整个隧道各个分段的气流运动状况发生改变。隧道各个分段的状态和任一竖井内的

气流运动状态皆是与整个隧道系统相关联的，需要将隧道系统视为一个统一的整体来研究其气流运动规律。

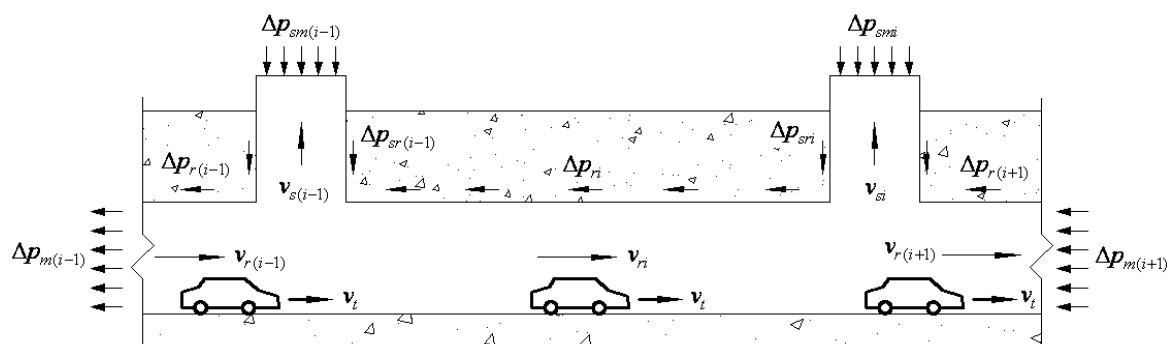


图 C.0.4 正常交通状况下隧道通风模式

## 2 隧道内压力

当处于无外界干扰的条件下，隧道内气流达到稳定状态后，其内部车辆运动产生的交通通风压应与整个隧道所有阻力之和相等。

设隧道存在  $n-1$  个竖井，则整个隧道分为  $n$  段。正常交通状况下隧道内压力可按式（C.0.4-1）计算：

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_{ti} = \sum_{i=1}^n \left( \zeta_i + \lambda_r \frac{L_{ri}}{D_{ri}} \right) \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 + \sum_{i=1}^n \Delta p_{rmi} + \sum_{i=1}^{n-1} \zeta_{i-(i+1)} \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 + \frac{1}{2} \rho v_{rm}^2 \quad (\text{C.0.4-1})$$

式中  $\zeta_{i-(i+1)}$ ——分流型风道主流分叉损失系数，可按附录 A 计算或取值。

**3 隧道竖井内的气体是流出或流入隧道取决于竖井底部与外界大气之间的压差。**显然，竖井底部压力大于外界时，隧道内气体通过竖井向外流出。反之，则隧道外新鲜空气流入隧道内。

沿行车方向，对于任意一个竖井通风口而言，位于其后方的车辆产生的运动风压皆为正压，其作用使得这个通风口出流排风。而位于其前方的车辆产生的运动风压则为负压，其作用效果为吸入隧道外气流。当我们能够确定这个竖井底部的压力方向和大小，这个风口气流运动的情况就可以确定了。

第  $k$  个竖井底部的压力  $p_{sk}$  为竖井后方所有隧道车辆运动产生的风压



与所经过路径的所有阻力总和之差。竖井底部的压力与隧道外的压力差将推动竖井内气体流动，根据能量守恒，此压力差将等于竖井内气体流动阻力。则：

$$p_{sk} = \Delta p_{sak} \quad (\text{C.0.4-2})$$

及

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^k \Delta p_{ti} - \sum_{i=1}^k \Delta p_{rmi} - \sum_{i=1}^k \left( \zeta_i + \lambda_r \frac{L_{ri}}{D_{ri}} \right) \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 - \\ & \sum_{i=1}^{k-1} \zeta_{i-(i+1)} \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 - \zeta_{k-k_s} \frac{\rho}{2} v_{rk}^2 = \Delta p_{sak} \end{aligned} \quad (\text{C.0.4-3})$$

式中  $\zeta_{k-k_s}$  ——分流型风道支流分叉损失系数，可按附录 A 计算或取值。

因有  $n-1$  个竖井，则可列出  $n-1$  个竖井底部压力平衡方程式，

**4** 由于将空气视为不可压缩的气体，按照质量守恒定律，则任意第  $k$  个竖井内流动的风量（流出隧道为正，流入隧道为负）必然满足：

$$Q_{sk} = Q_{rk} - Q_{r(k+1)} \quad (\text{C.0.4-4})$$

即：

$$v_{sk} A_{sk} = v_{rk} A_{sk} - v_{r(k+1)} A_{r(k+1)} \quad (\text{C.0.4-5})$$

将式 (C.0.4-5) 代入式 (C.0.4-3)，则式 (C.0.4-1) 和式 (C.0.4-3) 联立可得  $n$  个方程，方程中未知数（隧道各段流速），求解这个  $n$  元 2 次方程组，就可得到整个隧道各个分段的隧道风速，由式 (C.0.4-5) 可得各个竖井内的气体流量，将通过竖井流入隧道的空气量之和与第 1 段隧道空气流量相加即为隧道正常交通状况下的通风量。

## 附录 D 交通阻滞状况下的通风量计算方法

### D.0.1 交通阻滞状况下的通风量计算原理

在交通阻滞状况下，将隧道分为各段分别进行计算较为复杂，为简化计算，将隧道看成一个整体考虑。

车辆运动需要消耗必要的燃油，其化学能通过燃烧转化为热能及车辆运动所需的动能，且动能最终转化为地位能——热能。隧道内的车辆消耗的燃油最终转化为热能，并传递给隧道内空气，使得隧道内空气的温度上升，密度减小。这使得隧道内外空气存在密度差，在隧道竖井内将产生热压差，使隧道内的空气向隧道外流动，形成自然通风。

### D.0.2 交通阻滞状况下的通风量计算

1 汽车发热量可按式 (D.0.2-1) 计算：

$$q = q_0 \cdot N_r \quad (\text{D.0.2-1})$$

式中  $q$ ——隧道内汽车总的单位时间发热量 (W)；

$q_0$ ——单个汽车单位时间发热量 (W)，可取 9170W，或按附录 F 计算取值；

$N_r$ ——隧道内存在的汽车数量，可按式 (D.0.2-2) 计算：

$$N_r = \frac{L}{v_t} \cdot N \quad (\text{D.0.2-2})$$

式中  $L$ ——隧道长度 (m)；

$N$ ——隧道设计交通量 (辆/s)。

2 热压平衡可由式 (D.0.2-3) 表示：

$$g \cdot L_s \cdot (\rho_w - \rho_s) = \frac{\rho_w}{2} \cdot v_r^2 \cdot (\zeta_e + \lambda_r \cdot \frac{L_r}{D_r}) + \frac{\rho_s}{2} \cdot v_s^2 \cdot (\zeta_s + \lambda_s \cdot \frac{L_s}{D_s}) \quad (\text{D.0.2-3})$$

式中  $L_{rp}$ ——进入隧道气流平均流经距离，为隧道长度的 1/4 (m)；

$\rho_s$ ——竖井内的空气密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\zeta_s$ ——竖井排风局部阻力系数；

$L_s$ ——竖井高度 (m)；

$v_s$ ——竖井排风风速 (m/s)；可以表示为总风量  $Q$  与隧道所有竖井总面积  $A_s$  的关系，即  $v_s = Q/A_s$ ；

$v_r$ ——进入隧道的空气流速 (m/s)；隧道外气体流通过隧道两端流入隧道，因此，流速可以表示为  $v_r = 0.5 \cdot Q/A_r$ ，式中  $A_r$  为隧道横断面面积 (m<sup>2</sup>)。

**3** 热平衡关系可由式 (D.0.2-4) 表示：

$$c_p \cdot (t_r - t_w) \cdot Q \cdot \rho_w = m \cdot q \quad (\text{D.0.2-4})$$

式中  $c_p$ ——空气定压比热 (kJ/(kg·℃))；

$t_r$ ——隧道内空气温度 (℃)；

$t_w$ ——隧道外空气温度 (℃)；

$m$ ——有效热量系数，可按式 (D.0.2-5) 计算：

$$m = \frac{t_r - t_w}{t_s - t_w} \quad (\text{D.0.2-5})$$

针对隧道发热体分布形式，可取 0.6。

#### 4 隧道内气体可看作理想气体，服从理想气体方程：

$$p = \rho RT \quad (\text{D.0.2-6})$$

式中  $p$ ——气体绝对压力 ( $\text{N/m}^2$ )；

$T$ ——气体热力学温度 ( $\text{K}$ )；

$\rho$ ——气体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；

$R$ ——气体常数 ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )，这里取  $287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

隧道内绝对压力变化不大，则密度关系式可由式 (D.0.2-6) 表示：

$$\rho_r = \rho_w \cdot \frac{273 + t_w}{273 + t_r} \quad ; \quad \rho_s = \rho_w \cdot \frac{273 + t_w}{273 + t_s} \quad (\text{D.0.2-7})$$

联立式 (D.0.2-1)、式 (D.0.2-2)、式 (D.0.2-3)、式 (D.0.2-4)、式 (D.0.2-5)、式 (D.0.2-6)、式 (D.0.2-7)，可解出隧道交通阻滞状况下的通风量。

## 附录 E 加设辅助风机情况下的通风量计算方法

### 1 通风压力模式

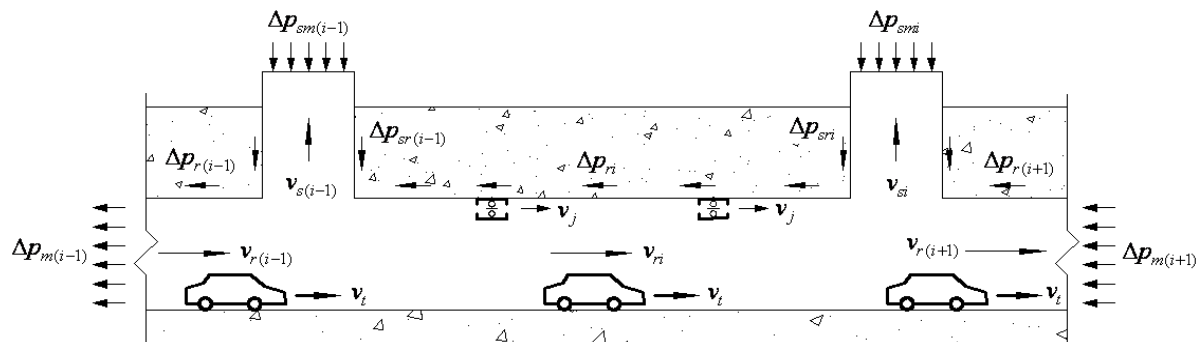


图 E.0.1 射流风机通风方式模式图

### 2 隧道内压力

正常交通状况下隧道内压力可按式 (E.0.1-1) 计算：

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_{ti} + \sum_{j=1}^f \Delta p_j = \sum_{i=1}^n (\zeta_i + \lambda_r \frac{L_{ri}}{D_{ri}}) \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 + \sum_{i=1}^n \Delta p_{rmi} + \sum_{i=1}^{n-1} \zeta_{i-(i+1)} \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 + \frac{1}{2} \rho v_{rn}^2 \quad (\text{E.0.1-1})$$

式中  $f$ ——射流风机台数；

$\Delta p_j$ ——每台射流风机升压力 ( $\text{N/m}^2$ )，可按式 (E.0.1-2) 计算：

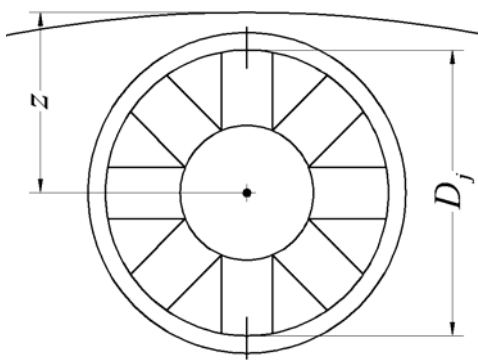
$$\Delta p_j = \rho \cdot v_j^2 \cdot \frac{A_j}{A_r} \cdot (1 - \frac{v_r}{v_j}) \cdot \eta \quad (\text{E.0.1-2})$$

式中  $v_j$ ——射流风机的出口速度 ( $\text{m/s}$ )；

$A_j$ ——射流风机的出口面积 ( $\text{m}^2$ )；

$\eta$ ——射流风机位置摩阻损失折减系数，可按表 E.0.1 取值。

表 E.0.1 射流风机位置摩阻损失折减系数  $\eta$

$Z/D_j$	1.5	1.0	0.7	图示 
$\eta$	0.91	0.87	0.85	

### 3 隧道内第 k 个竖井内压力

(1) 当第 k 个竖井在隧道入口和射流风机之间时, 竖井内压力平衡满足式 (E.0.1-3):

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^k \Delta p_{ti} - \sum_{i=1}^k \Delta p_{rmi} - \sum_{i=1}^k (\zeta_i + \lambda_r \frac{L_{ri}}{D_{ri}}) \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 - \\
 & \sum_{i=1}^{k-1} \zeta_{i-(i+1)} \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 - \zeta_{k-k_s} \frac{\rho}{2} v_{rk}^2 = \Delta p_{sak}
 \end{aligned} \quad (E.0.1-3)$$

(2) 当第 k 个竖井在射流风机与隧道出口之间时, 竖井内压力平衡满足式 (E.0.1-4):

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^k \Delta p_{ti} + \sum_{j=1}^f \Delta p_j - \sum_{i=1}^k \Delta p_{rmi} - \sum_{i=1}^k (\zeta_i + \lambda_r \frac{L_{ri}}{D_{ri}}) \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 - \\
 & \sum_{i=1}^{k-1} \zeta_{i-(i+1)} \frac{\rho}{2} v_{ri}^2 - \zeta_{k-k_s} \frac{\rho}{2} v_{rk}^2 = \Delta p_{srk}
 \end{aligned} \quad (E.0.1-4)$$

因有 n-1 个竖井, 则可列出 n-1 个竖井底部压力平衡方程式,

### 4 隧道内第 i 个竖井内空气流量可按式 (E.0.1-5) 计算:

$$Q_{si} = A_{si} v_{si} \quad (E.0.1-5)$$

通过联立式 (E.0.1-1)、式 (E.0.1-2)、式 (E.0.1-3)、式 (E.0.1-4) 和式 (E.0.1-5), 可算出隧道内各段通风换气量。

## 附录 F 汽车单位时间发热量计算方法

汽车单位时间发热量  $q_0$  可按式 F.0.1 计算：

$$q_0 = q_g \cdot d \cdot v_t \quad (\text{F.0.1})$$

式中  $q_g$  ——单位质量汽油燃烧发热量 (kJ/kg)，取 44000kJ/kg；

$d$  ——汽车耗油量 (kg/m)，可取 10L/100km，及  $7.5 \times 10^{-5} \text{kg/m}$ ，或按表 F.0.1 酌情取值；

$v_t$  ——汽车运动速度 (m/s)。

**表 F.0.1 汽车燃油消耗量**

汽车生产企业	通用名称	车辆型号	市区工况耗油量 (L/100km)
日本本田技研工业株式会社	ACURA RL	KB265	15.80
日本本田技研工业株式会社	CIVIC HYBRID	FA3	5.30
PSA 标致雪铁龙集团	标致 308 CC	4B5F4	10.40
PSA 标致雪铁龙集团	标致 308 CC	4B5FT	12.60
PSA 标致雪铁龙集团	标致 308SW	4H5FT	12.60
SUZUKI MOTOR CORPORATION	超级维特拉	TA04V-4M	11.60
SUZUKI MOTOR CORPORATION	吉姆尼	JB43V-4A	9.30
一汽-大众汽车有限公司	奥迪 A6L 2.4 CVT	FV7241FCVTG	12.10
一汽-大众汽车有限公司	捷达 1.6 自动	FV7160ATFE	10.40
一汽-大众汽车有限公司	捷达 1.6 手动	FV7160CiF L	10.00
一汽-大众汽车有限公司	速腾 2.0 自动	FV7206ATG	10.90
一汽海马汽车有限公司	海马 2	HMC7135A4H0	7.90

汽车生产企业	通用名称	车辆型号	市区工况耗油量 (L/100km)
一汽海马汽车有限公司	海福星	HMC7163A3S1	10.20
上汽通用五菱汽车股份有限公司	五菱之光	LZW6390B3	8.40
上汽通用五菱汽车股份有限公司	五菱之光	LZW6376NVF	8.80

注：摘自 2010 年 1 月 1 日 中国工业和信息化部公布的轻型汽车燃料消耗量通告



## 附录 G 本规范用词说明

1、为便于在执行本规范条文时区别对待对要求严格程度，不同的用词说明如下。

1) 表示很严格，非这样做不可的

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

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择在条件许可时首先应这样做的

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2、条文中指定按其他有关标准执行的写法为“应按……执行”或“应符合……的规定”。

---

附件

# 城市隧道竖井型自然通风设计与验收规范

条文说明

## 1 总则

**1.0.1** 随着我国经济社会的发展和城市化进程的加快，交通问题逐渐成为了影响城市发展的重要环节，将城市交通系统适度地下化，是改善城市整体交通并使之进一步现代化的有效途径，同时也是地下空间利用的一个重要内容，因此城市隧道建设得到了飞速发展。

竖井型自然通风隧道是在隧道顶部合理的设置通风竖井，利用隧道外风压、隧道内外热压差以及车辆在隧道行驶时的交通通风力进行隧道通风换气的一种隧道型式。由于这种隧道型式不依靠机械通风设备，除照明外不耗费额外能源，其节能效果突出，同时，分散的竖井口有利于隧道内污染空气的多点排放，避免了机械通风高浓度污染空气的集中排放对隧道周围环境造成危害，因此这种隧道型式具有明显的经济及社会效应，应在隧道设计中广泛应用，然而，相关设计和验收规范对此类隧道没有进行规定和相应的设计、验收指导，故制定本《规范》，为此类隧道的设计、验收提供指导，从而使得此类隧道通风设计、验收更加科学合理，也有利于其广泛应用。

**1.0.2** 本《规范》采用《公路隧道设计规范》JTG D70 对隧道分类，将城市公路隧道按其长度分为四类，如表 1 所示。

**表 1 隧道按长度分类**

分类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
长度 (m)	$L > 3000$	$3000 \geq L > 1000$	$1000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

注：隧道长度系指两端洞门墙墙面与路面的交线同路线中线交点间的距离。

在《公路隧道设计规范》JTG D70 和《公路隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1 中规定，“隧道长度大于 1500m 且交通量较大的隧道应考虑排

烟措施”；在《公路隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1 中规定，单向交通隧道，当  $L \cdot N \geq 2 \times 10^6$  时，隧道宜设置机械通风；在《建筑设计防火规范》GB 50016 中规定，“通行机动车的一、二、三类隧道应设置机械排烟系统，通行机动车的四类隧道可采用自然排烟方式”，以上规定是在隧道没有或无法合理开设竖井的情况下提出的，通过大量研究发现，只要通风竖井设置合理，自然通风方式将能够满足隧道通风和防排烟要求。考虑通风竖井建造成本和通风阻力等因素，竖井型自然通风隧道适用于潜埋隧道，从火灾救援时间的角度考虑，隧道长度不宜大于 3000m，故本规范适用于采用自然通风方式的城市潜埋式中、长隧道。

在隧道中运行的车辆，由于其具有一定的运动速度和相应的车体断面积，将能量传递给隧道内的空气，造成了隧道内部的空气流动。这种由车辆运动所引起的隧道气流运动俗称为“活塞风”。当沿隧道前进方向的上方（或侧壁）间断设有通风孔与外界大气连通时，隧道内部的气流运动必将在通风孔产生相应的压力，使得通风孔排出或吸入气流。

对于双向交通公路隧道而言，由于其相向运动的车辆产生的运动风压相互抵消，对隧道气流运动的实际作用效果甚微。从而，隧道气流运动在通风孔处的作用亦不明显。故设置以自然通风为目的竖井通风孔并无实际意义。

在单向交通公路隧道中，隧道气流的运动方向与车行方向一致，其车辆运动产生的风压是持续的，在隧道内可形成连续的交通风。在竖井通风孔处的作用风压，将使得通风孔保持持续的气流运动，隧道内部的空气因此得以置换，其环境空气质量得到相应的改善。

按照我国现行的《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004) 规定：“上、下行分离式独立双洞的公路隧道之间应设置横向通道”，“人行横通道的

设置间距可取 250m，并不大于 500m”，“车行横通道的设置间距可取 750m，并不得大于 1000m；长 1000~1500m 的隧道宜设 1 处，中、短隧道可不设”。所以双洞单向隧道之间每隔一段距离可设置一个横通道，在火灾时，利用横通道，可以及时疏散人员和车辆，方案如图 1 所示。该方案的过程为：（1）火灾发生后，立即关闭两个公路隧道；（2）火灾下游的车辆快速驶离隧道，火灾上游的车辆通过横通道驶向另一个隧道，当前方无车行横通道时，人员可弃车通过后方的人行横通道快速撤离隧道；（3）火灾扑灭后，在对火灾隧道进行整修过程中，另一个隧道可暂时变为双向交通，这样不会因为隧道火灾而对城市交通造成较大影响。

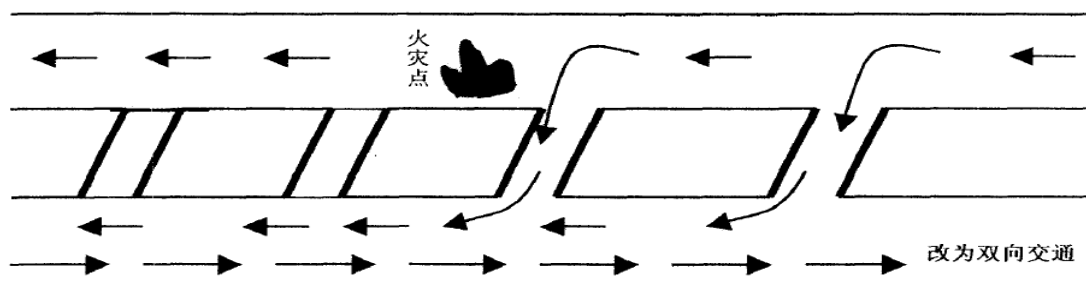


图 1 人员和车辆疏散方案

**1.0.3** 隧道竖井型自然通风形式应合理设置通风竖井，竖井的开设对隧道的结构、周围环境等有一定要求，不能等到隧道设计好后再考虑设置通风竖井，这可能使得隧道通风不能满足卫生和安全要求，故应将竖井通风规划纳入隧道总体设计规划中。

**1.0.4** 城市隧道四周多为居民区、商业区和文化区，人员较多，且滞留时间较长，对空气质量提出了较高要求。在我国《环境空气质量标准》GB 3095 中，对各种污染物在各功能区的浓度限值做了明确规定。隧道内空气中污染物浓度较高，通过隧道口和竖井口排出的空气易污染周围环境，故应对隧道排出的空气污染物浓度和扩散范围做出评价，如不能满足污染物浓度限值要求，应提出相应的处置措施。

### 1.0.5 条文中所指的有关标准、规范主要有：

- 1 《公路隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1；
- 2 《公路隧道设计规范》JTG D70；
- 3 《建筑设计防火规范》GB 50016；
- 4 《环境空气质量标准》GB 3095；
- 5 《公路隧道施工设计规范》JTG F60。

## 3 一般规定

**3.0.1** 隧道通车后，竖井的开设不但会影响隧道的整体结构，而且在施工期间隧道将不能使用，这将对城市交通正常运作造成影响，所以隧道竖井设置应接近、远期最大交通量设计。

**3.0.3** 本条文内容摘录于《隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1，没有作大的调整。

**3.0.4** 隧道竖井的合理设置是此类隧道设计的关键，决定隧道建造成本和通风能力，所以在设计前必须对隧道在不影响城市美观和周围环境的情况下能否按照竖井要求合理开设竖井进行调查。

通过对前期已建竖井型自然通风隧道营运情况调查和实测，得到隧道内排出废气的扩散规律，运用此规律对设计隧道尾气排放可能对周围化境和居民生活造成的危害进行初步评估。竖井施工问题可参考已建相似工程施工所遇问题进行初步评估。

## 4 竖井

**4.0.1~4.0.3** 在隧道的顶部或侧上部间断的设置竖井，使竖井上端与大气连通，下端与隧道内部连通，在正常运行时，隧道利用竖井底部产生

的负压和汽车通行过程中产生的风压实现通风，将隧道内的污染空气排出隧道，同时将隧道外的新鲜空气吸入隧道；在发生交通阻滞时，隧道内的污染空气利用自然压差在竖井和隧道口部与外界空气形成对流，从而使隧道内污染空气排出隧道，隧道外的新鲜空气流入隧道；在火灾发生时，火灾产生的烟气和热量能够通过竖井及时地排出隧道，防止了火灾烟气的持续扩散，有利于人员逃生和消防人员开展救援。通过大量的理论分析、全尺寸实验、模型实验和模拟实验研究，得出如下结论：在潜埋式中、长城市隧道上，通过合理设置自然通风竖井，隧道将能够满足平时通风和火灾时自然排烟的卫生与安全要求。

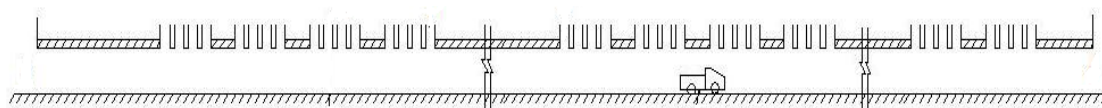


图 2 竖井型自然通风城市隧道剖面结构图

**4.0.4** 通过模型实验，对隧道内的 CO 浓度的分布情况进行了研究。图 3 为正常交通状况下隧道末端 CO 浓度随隧道长度增加的变化情况，可以看出随着隧道长度增加，隧道末端 CO 浓度增大。CO 浓度曲线迟早会有一个和限制值（参照《公路隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1 取 250ppm）直线相交的点，称为正常交通状况下的临界点，临界点对应的长度值称为正常交通状况下的临界长度。当无竖井隧道长度小于临界长度时，隧道能够满足卫生要求；反之则不能满足卫生要求。图 3 是通过模型实验得到的正常交通状况下原型隧道末端 CO 浓度随隧道长度的变化情况，从图 3 中可以看出，隧道长度为 600 米时，隧道末端 CO 浓度最大为 16.4ppm，远小于 250ppm，所以正常交通状况下隧道临界长度远大于 600m。

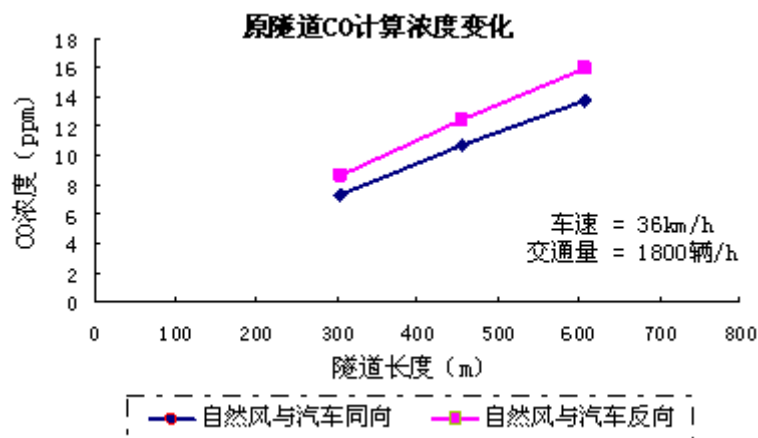


图3 原型隧道末端 CO 浓度随长度变化

图4为阻滞交通状况下隧道末端CO浓度随隧道最不利通风段长度增加的变化情况。最不利通风段是指第一组竖井和最后一组竖井之间的各暗埋段，热压使得这些段内的空气呈现三维运动，其通风效果明显比隧道两端的暗埋段要差。所以若最不利段能满足通风要求，其它隧道段肯定能满足通风要求。从图4中可以看出，原隧道CO浓度的变化图形是一条上升曲线，所以，曲线与限制浓度所表示的直线会相交于一点，该点称为最不利通风段的临界点，对应的段长为最不利通风段的临界段长。实际段长小于临界段长时，最不利通风段能够满足通风要求；反之，实际段长大于临界段长时，最不利通风段不能满足通风要求。由图4可知，临界段长在240m。

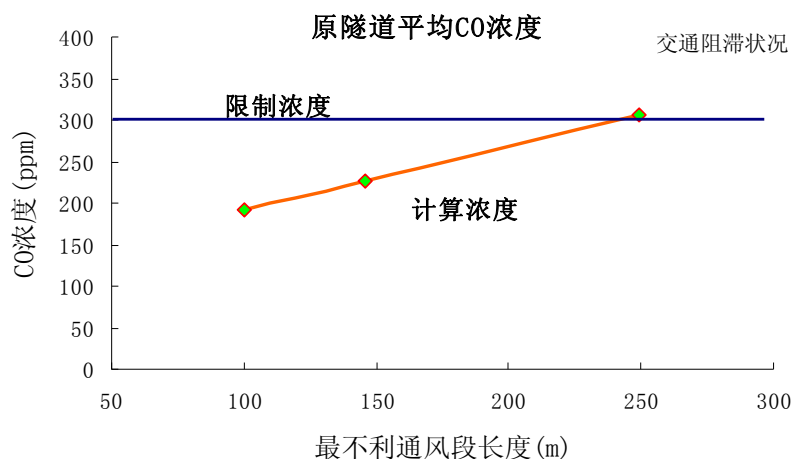


图4 原型隧道 CO 浓度计算结果



**4.0.5** 在地面条件允许的情况下，自然通风竖井应等距布置，这使得隧道在相同开孔率的情况下隧道最不利通风段的长度变为最小，从图 3 可以看出，隧道末端 CO 的浓度随着最不利通风段长度的增加而升高，所以通过等距布置自然通风竖井可有效控制隧道内 CO 浓度，使得隧道通风效果达到最好的状态。

通过火灾对比模型实验发现，当自然通风竖井以组为单位沿隧道等距分布时，火灾烟流沉降时间明显推迟，更有利于人员火灾前期安全疏散；等距开孔时，无论隧道内部何处发生火灾，竖井离火源中心的距离都较短；同时烟流扩散时的热损失较少，排烟速度快，暗埋段内烟气难以积聚，烟流影响范围很小，所以竖井均匀分布利于烟流控制。

通过对隧道均匀设置竖井组和集中设置竖井组的竖井的排烟能力进行模拟研究，可以发现：均匀设置竖井组的隧道烟气扩散距离明显小于集中设置竖井组的隧道；均匀设置的竖井的排烟能力也明显的优于集中设置的竖井。

综上所述，自然通风竖井等距设置将有利于隧道的通风和防排烟。

**4.0.6** 正常交通状况下，隧道内的空气同时受到交通风压、通风阻力、热压差三种力的作用而产生气流运动，气流运动速度将由零逐渐增大，直到稳定为止。所谓稳定，是指空气受到的交通风压、通风阻力、自然压差形成力学平衡，合力为零。至此之后，流速将不再变化。实际上，绝对稳定的状态是永远达不到的，因为隧道内车辆数目、类型均是一个随机变化的过程，而隧道外的自然风也存在波动。所以，气流的稳定是相对的稳定，瞬时的稳定。

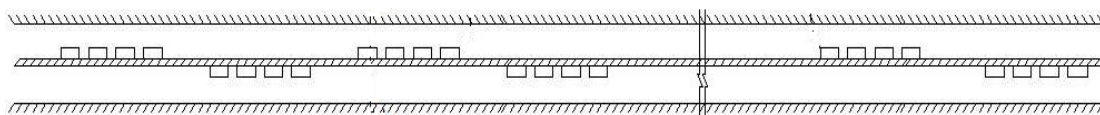


图 5 自然通风竖井交错布置隧道平面结构图

通过研究发现，竖井型自然通风隧道有部分通风竖井起到排出污染空气的作用，而另一部分通风竖井起到引进新鲜空气的作用。可将起到排出污染空气的作用的竖井称之为“排风竖井”；而将起到补充新鲜空气的作用的竖井称之为“补风竖井”。由于受到各种因素（车辆速度、车辆间距、外界风等）的干扰，隧道内任何竖井都可能作为“排风竖井”或是“补风竖井”。

如果相邻隧道的通风竖井相邻设置，很有可能出现一侧竖井为“排气竖井”，而另一侧竖井为“补气竖井”，在外界风等因素的干扰下，“排气竖井”排出的污染空气与外界新鲜空气掺混后又被“补气竖井”重新吸入了隧道，使得排出的污染空气再次污染隧道（如图 6 所示）。所以从通风的角度考虑，两条相邻隧道的自然通风竖井应交错设置。

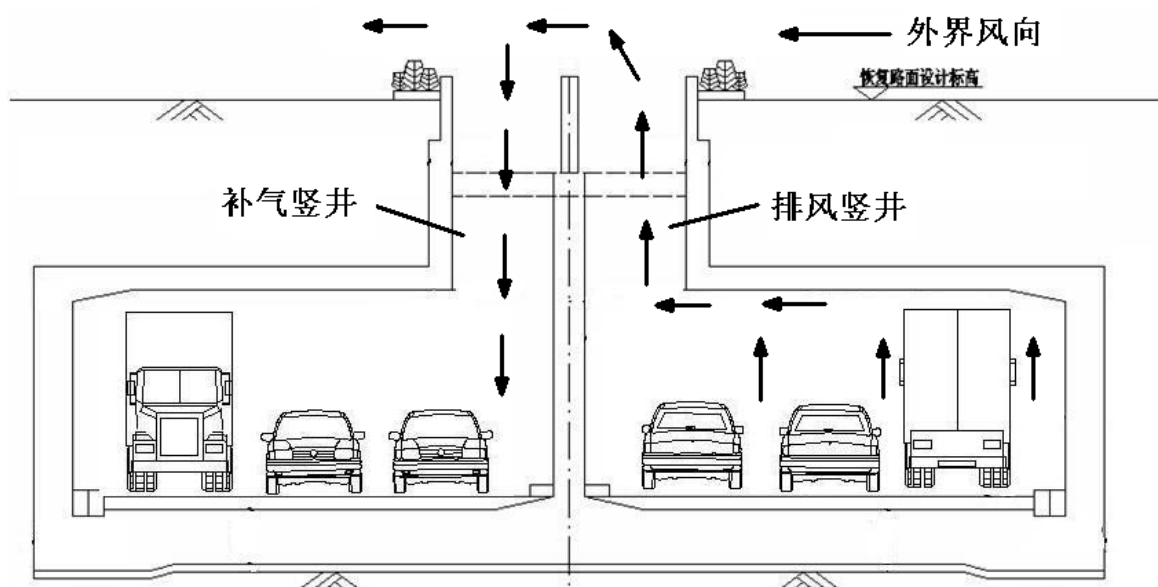


图 6 相邻竖井内气流示意图

当一条隧道发生火灾时，火灾烟气通过烟囱效应从竖井排出隧道，

如果两条隧道的通风竖井相邻设置，火灾烟气很可能因为外界风等因素的干扰通过相邻竖井进入另一条隧道，从而影响人员和车辆通过未发生火灾侧隧道疏散，严重的情况下会降低未发生火灾侧隧道内的能见度，增加了驾驶人员的心理负担，影响驾驶人员的正常驾驶，很可能发生交通事故，加大了人员疏散和消防人员展开救援的难度。所以从火灾时排烟角度考虑，两条相邻隧道的自然通风竖井应交错设置。

综上所述，相邻隧道竖井宜交错设置。

**4.0.7** 对不同宽高比的通风竖井的通风和防排烟能力进行了模型和模拟研究，研究发现：随着竖井宽高比的减小，竖井在交通阻滞状态下的通风能力和火灾时的排烟能力增强，但当其小于 0.174 时，其值减小将使竖井在交通阻滞状态下的通风能力和火灾时的排烟能力减弱；在隧道正常交通状况下，竖井宽高比越大，竖井通风能力越强，隧道内通风换气越好。所以综合考虑隧道的通风和防排烟要求，竖井宽高比（ $D_s/L_s$ ）宜取在 0.174~0.6 之间。对于一些特殊情况，竖井宽高比（ $D_s/L_s$ ）可酌情取值，如竖井高度为 1m 时，竖井当量直径可取 0.6m，竖井高度较高时，竖井宽高比（ $D_s/L_s$ ）可靠近 0.174 取值。

**4.0.8** 自然通风竖井进行适当分隔后将有利于隧道通风和火灾时排烟。

图 7 为隧道最不利通风段热压气流的示意图，从图中可以看出，在隧道处于阻滞状况时，最不利段内的污染空气吸收汽车散发的热量，温度升高，密度减小，在浮力作用下向上运动，上升到一定高度将撞击顶棚，然后转为向四周的径向蔓延，径向蔓延到一定阶段后，污染空气将受到隧道侧壁的限制而最终转变为沿隧道方向的纵向流动，当流到离最不利通风段最近的竖井底部时，污染空气将在浮力作用下排出隧道，而随着

污染空气的排出，最不利段的静压将减小，新鲜空气将通过距离最不利段稍远的竖井从外界高压区沿隧道底部流向低压区——最不利通风段，从而达到通风换气的目的。如果竖井不进行分隔，污染空气向上的热压务必将与新鲜空气向下的静压发生抵消，不利于隧道内的通风换气，而且向下流动的新鲜空气还会与向上流动的污染空气在竖井内掺混，使得部分污染物又流回了隧道，这将进一步加大最不利段的污染状况。所以，从通风角度考虑，自然通风竖井应该进行适当分隔。

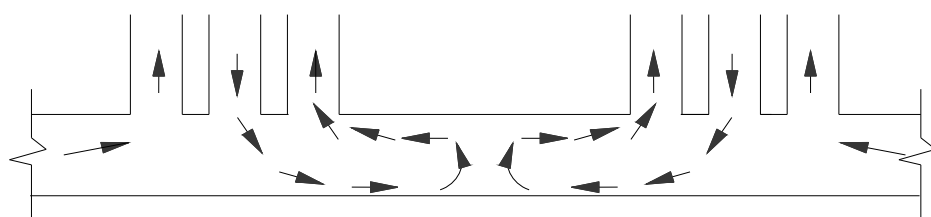


图 7 最不利通风段热压气流示意图

通过火灾模型实验和模拟实验发现，自然通风竖井进行适当分隔后竖井排烟能力将大幅提升。所以竖井进行适当分割有利于隧道防排烟。

故当竖井开孔面积较大，无法满足条文 4.0.7 的有关规定时，建议将竖井进行分割。当然竖井的分隔应该适当，不是分的越多越好，这一方面增加了建设的成本，另一方面会增大气体流动时的阻力，不利于隧道的通风排烟。所以综合考虑，建议将单个竖井分割为 3~5 份。

**4.0.9** 通过模型和模拟实验研究得到，当隧道长度为 500m~1500m 时，隧道内任何长度为 500m 隧道段的开孔率只要不小于 2.6%，竖井自然通风将能够满足隧道的营运通风和火灾时的防排烟要求；当隧道长度为 1500 m~3000 m 时，隧道内任何长度为 500m 隧道段的开孔率只要不小于 3.2%，竖井自然通风将能够满足隧道的通风和火灾时的防排烟要求。在此类隧道设计时，开孔率的安全系数取 1.25，则隧道长度为 500m~

1500m的隧道,隧道内任何长度为500m隧道段的开孔率应不小于3.25%;隧道长度为1500 m~3000 m的隧道,隧道内任何长度为500m隧道段的开孔率应不小于4%。

**4.0.10** 为防止物体通过竖井落入隧道,引发交通事故,竖井顶部必须加设防护措施,并设置警示标志,当竖井口距离地面小于1000mm时,其井盖必须具有一定的承载能力,防止人员不慎跌入隧道。

**4.0.12** 通过在竖井顶部合理的安装风帽将能进一步改善隧道内的通风效果,并且风帽的使用还能阻挡阳光对驾驶人员的视觉干扰,将有利于减少隧道内事故的发生,提高隧道运行的安全性,同时可以减少雨雪、大风等不良天气对隧道的影响,确保隧道在恶劣天气条件下依然能够正常运行。

通过隧道火灾模型对比实验发现,竖井顶部安装排风型风帽将能加强竖井的排烟功能,推迟烟气沉降时间;在火源热动力不足的情况下,依然能将残留烟气迅速排尽。这对人员安全逃生和消防人员开展救援有利。

为防止物体或人员从风帽孔口落入隧道,引发事故,风帽孔口应设置安全措施和警示标志。

## 5 污染空气的稀释标准

**5.0.1** 汽车在行驶的过程中,会产生大量的尾气。它包括不完全燃烧产生的气体和燃料中含有的杂质,即CO、NO<sub>x</sub>、HC、SO<sub>2</sub>、Pb、HCHO和烟雾(游离炭)等有害成分,通风的目的便是稀释这些有害成分。研究表明,CO和烟雾是隧道通风控制的主要目标,只要能把CO和烟雾的浓度稀释到允许值,其它有害成分也会随之达到允许值。异味将影响隧

道内的舒适性，可通过控制污染源和增大通风换气次数来达到消除异味的目的。

**5.0.2~5.0.3** 本节稀释标准与《公路隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1 中采用纵向通风方式的隧道稀释标准相同。

## 6 隧道需风量计算

本节需风量计算与《公路隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1 中的隧道需风量计算方法相同。

## 7 通风量计算

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 隧道通风换气量只有在不小于隧道需风量条件下，隧道通风才能满足车辆行驶的安全性和舒适性要求，而竖井型自然通风隧道主要通过自然风压、隧道内外热压差和车辆行驶时的交通通风力进行通风换气的，由于自然风压的方向和大小存在不稳定性，故在正常交通状况下的通风量计算中将自然风压视为阻力，而在交通阻滞交通状况下的通风量计算中不考虑自然风压的作用。

**7.1.2** 在隧道设计、施工等阶段应对隧道通风进行详细的计算，确保隧道营运时隧道通风能够满足卫生、安全和舒适性要求。当隧道不能按照竖井要求设置竖井，或隧道局部阻力较大，经计算发现隧道通风量无法满足隧道需风量要求时，应在部分隧道段设置辅助风机，从而增大隧道通风量，以满足隧道需风量要求。

**7.1.4** 交通通风力是竖井型自然通风隧道通风换气的主要驱动力，而车速是决定交通通风力大小的重要因素，故为确保各种工况下隧道通风量

能够满足隧道需风量要求，应对隧道计算行车速度以下各种工况车速的通风量进行计算。

## 7.2 正常交通状况下的通风量计算

**7.2.1** 通过模型模拟实验发现，在正常交通状况下，交通通风力是自然通风隧道通风换气的主要因素，隧道内外热压差引起的通风换气量相对于交通通风力引起的通风量要小得多，故在正常交通状况下，可忽略压差引起的通风换气量，不考虑隧道内空气的密度变化，将隧道内气体看作不可压缩流体。

为简化计算，将隧道内的空气流看成不随时间变化的恒定流，汽车行驶看作是恒定持续的来处理，这在实际应用中是可行的。

汽车排出的气体污染物相对于空气的量较少，却排出后在空气中快速扩散，于空气混为一体，故可忽视空气性质的变化，认为隧道内气体与纯空气的物性相同。

**7.2.2** 在正常交通状况下，由于竖井的通风作用，使得各隧道的空气流量不相等，为计算通风量，故将隧道看成由若干段组成。

## 7.3 交通阻滞情况下的通风量计算

**7.3.1** 本规范中交通阻滞状况下的平均车速与《公路隧道通风照明设计规范》JTJ 026.1 中所选相同，都为 10km/h。由于交通阻滞状况下车辆行驶速度较低，引起的交通通风力较小，隧道通风换气主要依靠隧道内外温差引起的热压差。

## 8 辅助风机的设置

**8.0.1** 当隧道由于地面限制等因素无法按照竖井要求开设竖井时，为使隧道通风满足卫生、安全和舒适性要求，应在隧道部分段设置辅助风机，

从而加大隧道通风量。

**8.0.3** 隧道设置辅助风机后，隧道各段都将受到风机送风压力的影响，故应对隧道通风量进行重新计算。

## 9 火灾时的防排烟

**9.0.1** 火灾事故的发生离不开时间因素，时间是决定火灾危害程度的重要参数。实际上，人员能否安全疏散取决于两个特征时间：一是火灾发展到对人员构成威胁所需的时间  $T_{ASET}$ (Available Safe Egress Time)；二是人员疏散到安全区所需的时间  $T_{RSET}$ (Required Safe Egress Time)。为了保证人员的安全疏散，必须使所有人员在火灾发展到威胁生命安全之前，顺利疏散到安全区域，即要求  $T_{ASET} < T_{RSET}$ 。只要火灾发展到超越任一安全指标规定的限度时，人员就处在危险状态。

与建筑火灾人员不同，隧道的纵向尺寸比横向大得多。因此，烟流沿纵向蔓延需要一定的时间，这使得隧道内各个位置的可用人员疏散时间  $T_{ASET}$  仅是关于距离火源位置的函数，即  $T_{ASET}(X)$ 。而隧道人员所需的安全疏散时间  $T_{RSET}$  由多种原因决定，与火灾报警时间，人员年龄、性别，头脑反应力快慢，疏散运动速度等因素有关，即  $T_{RSET}(X, T, N, \dots)$ 。

人员疏散行为并非伴着火灾的发生而进行的，从火灾发生到人员安全疏散一般要经历 3 个时间段：从着火到发现火灾经历的时间  $T_d$ 、发现火灾到开始疏散耽搁的时间  $T_r$ 、和人员疏散到安全区的运动时间  $T_m$ 。人员疏散所需时间  $T_{AREST} = T_d + T_r + T_m$ 。从着火到发现火灾经历的时间  $T_d$  取决于火灾探测和报警系统灵敏程度，如果火灾探测和报警系统准确灵敏，则车上乘客在最短的时间内获知火灾信息；发现火灾到开始疏散耽搁的时间  $T_r$  与个体有关，对火灾警报灵敏的人员  $T_r$  较小，反之则



$T_r$  较大。隧道内发生火灾时,若下车逃生的均为健康成年人,则人员疏散运动时间  $T_m$  较短;反之如果车辆载客量较大,逃生路段拥挤且多为老人、孩子, $T_m$  将会大大增加。由此看出, TREST 与许多因素有关,所以无法给出确切的值。根据国际公路协会 PIARC 的规定,  $T_d+T_r$  约在 30~300s 之间。人员疏散到安全区的运动时间  $T_m$  主要取决于人员的疏散运动速度,以及着火点到安全区域的距离。由于着火点到安全区域间的距离在火灾发生时即确定,因此,  $T_m$  主要取决于人员疏散运动速度  $v$ 。 $v$  也与许多因素有关;例如:隧道内的可见度、烟流的刺激性、人员的健康状况以及隧道内的指示标记等。根据 PIARC 的建议,人员的疏散运动速度在 0.5~1.5m/s 之间。

综上分析,当  $T_{ASET}(X) < T_{RSET}(X, T, N \dots)$  时,判定人员安全。

通过大量火灾模型模拟实验发现,在 20MW 的火灾强度下,只要隧道按照竖井要求合理设置竖井,隧道无需设置机械排烟系统,人员能够安全的从火源处疏散到安全区内。