

# 公路隧道通风系统设计工程实录

车轮飞 主编

中国建筑工业出版社

# 公路隧道通风系统 设计工程实录

车轮飞 主编

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

公路隧道通风系统设计工程实录/车轮飞主编. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2015. 10  
ISBN 978-7-112-18399-9

I. ①公… II. ①车… III. ①公路隧道-隧道通风-系统设计 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 203403 号

本书依托编著多年来在国内多条典型公路隧道通风工程的理论与工程实践, 系统归纳总结了不同工法、不同类型隧道通风系统的设计思路、方法以及关键技术。书中内容涵盖了矿山法、盾构法、明挖法等多种施工工法的隧道, 城市、高速公路、低等级公路等不同类型隧道, 江底、湖底、山岭等不同位置隧道, 双管单层、单管双层、公铁合建等多种断面形式的隧道。全书涵盖面广, 内容翔实, 针对性、实用性强, 能对从事公路隧道通风的工程技术人员起到很好的借鉴和指导作用。

本书共分 8 章。第 1 章介绍了我国公路隧道通风系统发展、计算方法和计算参数的选取; 第 2 章~第 7 章以国内典型隧道为例, 详细介绍了隧道通风方案比选、分析计算、仿真模拟以及模型试验; 第 8 章介绍了国内外隧道通风系统的新技术、新工艺。

\* \* \*

责任编辑: 姚荣华 张文胜

责任设计: 李志立

责任校对: 张颖 刘钰

## 公路隧道通风系统设计工程实录

车轮飞 主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 字数: 373 千字

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-18399-9

(27667)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 本书编委会

主 编：车轮飞

副主编：肖明清 林昶隆 付维纲 蔡崇庆 陈玉远

编 委：赵建伟 夏继豪 胡清华 刘 俊 甘 甜 刘 健

唐 凯 陈耀武 徐传汉 朱 毅 李香凡 篮 杰

宋永超 周 强 张立琦 黄武刚 张之启 鲁梅胜

陈清波 曹 亮 王 鑫 邓敏锋 邱少辉 蔡亚桥

李国栋 李森生 胡忠炜 王彦华 王小飞

# 前 言

随着我国基础建设的快速发展和修建技术的不断进步，公路隧道已成为交通道路的重要组成部分，尤其是高速公路隧道、城市交通隧道以及水下隧道，在近几年得到了飞速发展。截至 2013 年底，我国公路隧道已有 11359 处，合计里程达 960.56 万延米；其中特长隧道 562 处，共 250.69 万延米，长隧道 2303 处，共 393.62 万延米。

隧道通风系统作为隧道整体设计的重要组成部分，对工程造价、防灾救援以及后期运营起着至关重要的作用。据统计，通风设备及相关土建投资占长大公路隧道整个工程造价的 30%~50%，通风系统是后期隧道运营的能耗大户，随着单体隧道长度的增加，对通风系统的要求也越来越高。本书依托国内多条典型公路隧道，通过编者在设计中的经验和体会，系统地归纳总结了不同工法、不同类型隧道通风系统的设计思路、方法以及关键技术难点。书中内容涵盖了矿山法、盾构法、明挖法等多种施工工法的隧道，城市、高速公路、低等级公路等不同类型隧道，江底、湖底、山岭等不同位置隧道，双管单层、单管双层、公铁合建等多种断面形式的隧道。全书涵盖面广，内容翔实，针对性、实用性强，能对从事公路隧道通风的工程技术人员起到很好的借鉴和指导作用。

本书共分 8 章。第 1 章介绍了我国公路隧道通风系统发展、计算方法和计算参数的选取；第 2 章~第 7 章以国内典型隧道为例，详细介绍了隧道通风方案比选、分析计算、仿真模拟以及模型试验；第 8 章介绍了国内外隧道通风系统的新技术、新工艺。

中铁第四勘察设计院集团有限公司暖通专业长期从事隧道及地下工程的通风与防灾技术研究，已设计了 20 多条公路隧道通风系统，获得了多项隧道通风关键技术成果，形成了一整套完备的技术体系；在多名专家、教授以及工程技术人员的攻关下，完成了 27 项重大科研课题，获得了省部级科技进步奖 9 项，取得了技术专利 25 项。可以说，本书是编著单位多年来理论与工程实践的总结、提炼和升华。

本书参考了国内外大量技术文献，在编撰过程中得到了武汉大学、华中科技大学、同济大学、中南大学、西南交通大学、武汉科技大学等的大力协助；得到了中铁第四勘察设计院集团有限公司各级领导和暖通所、隧道所、水下隧道技术湖北省工程实验室各位同仁的大力支持和帮助，在此一并表示感谢！

限于时间紧迫、水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，恳请业内专家和同行不吝批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 隧道分类及施工方法 .....	1
1.2 公路隧道通风系统介绍 .....	3
1.3 隧道通风需风量计算 .....	6
1.4 隧道通风模拟软件介绍 .....	9
1.5 火灾相关计算及人员安全准则.....	12
1.6 国内部分已建成公路隧道通风系统简介.....	17
<b>第 2 章 绵茂公路篮家岩隧道设计工程实录</b> .....	25
2.1 工程概况.....	25
2.2 项目特点和技术创新点.....	26
2.3 主要设计标准.....	27
2.4 需风量计算.....	28
2.5 通风方案.....	29
2.6 通风系统设计.....	30
2.7 火灾通风系统模拟.....	36
<b>第 3 章 杭州钱江隧道设计工程实录</b> .....	40
3.1 工程概况.....	40
3.2 项目特点和技术创新点.....	41
3.3 主要设计标准.....	42
3.4 需风量计算.....	43
3.5 通风方案.....	45
3.6 通风系统设计.....	47
3.7 隧道火灾通风模拟计算.....	50
<b>第 4 章 扬州瘦西湖隧道设计工程实录</b> .....	57
4.1 工程概况.....	57
4.2 项目特点和技术创新点.....	58
4.3 主要设计标准.....	59
4.4 需风量计算.....	60
4.5 通风方案.....	62
4.6 通风系统设计.....	65
4.7 火灾通风系统模拟.....	72
<b>第 5 章 南京梅子洲地下交通系统设计工程实录</b> .....	78
5.1 工程概况.....	78

5.2	项目特点和技术创新点	80
5.3	主要设计标准	81
5.4	需风量计算	82
5.5	通风方案	86
5.6	通风系统设计	88
5.7	火灾通风系统模拟	101
<b>第6章</b>	<b>武汉东湖隧道设计工程实录</b>	<b>120</b>
6.1	工程概况	120
6.2	项目特点和技术创新点	121
6.3	主要设计标准	122
6.4	需风量计算	123
6.5	通风方案	125
6.6	通风系统设计	137
6.7	机械通风区段火灾排烟模拟分析	144
<b>第7章</b>	<b>武汉三阳路公铁合建越江隧道设计工程实录</b>	<b>154</b>
7.1	工程概况	154
7.2	项目特点和技术创新点	155
7.3	公路隧道主要设计标准	156
7.4	公路隧道需风量计算	157
7.5	公路隧道通风方案	160
7.6	公路隧道通风系统设计	163
7.7	公路隧道重点排烟数值模拟验证	172
7.8	公路隧道重点排烟模型试验验证	186
7.9	公路隧道火灾可用安全疏散时间分析	192
7.10	地铁隧道通风设计简介	196
<b>第8章</b>	<b>公路隧道通风新技术</b>	<b>208</b>
8.1	隧道空气净化系统	208
8.2	基于环境预测的隧道通风前馈智能控制系统	224
8.3	射流风机安全监测系统	227
8.4	隧道通风风塔的设置	228
	参考文献	231

# 第 1 章 绪 论

随着我国公路交通的快速发展,公路隧道建设技术已取得了长足的进步,公路隧道的数量与长度不断增加。据统计,截至 2011 年底,我国已建成公路隧道 8522 座,总长度 625.34 万 m,其中建成的特长隧道 326 座,总长度 143.32 万 m,长隧道 1504 座,总长度 251.84 万 m<sup>[1]</sup>。截至 2013 年底,已建成通车的公路隧道为 11359 座,总长 960.56 万 m<sup>[2]</sup>。

隧道作为一个相对封闭的空间,具有出入口少、疏散路线长、通风照明条件差等特点,车辆行驶时排出的废气、烟尘很难随自然风扩散到大气中,因此在运营过程中,为了保证车辆行驶的安全性和舒适性,隧道内的运营环境必须达到一定的卫生标准,而这些主要依靠隧道运营通风解决。同时,在隧道火灾救援方面,隧道通风也起着巨大的作用<sup>[3,4]</sup>。

隧道的长度是影响隧道通风方式最重要的因素。隧道越长,对隧道通风的安全性和可靠性的要求就越高<sup>[5]</sup>。据统计,通风设备及相应土建投资占长大公路隧道整体工程造价的 30%~50%,且隧道通风所需费用与隧道长度的立方成正比;此外,隧道建成通车后的运营费用也是一笔巨大的开支。这也是近几十年来,世界各国隧道专业人员十分关注公路隧道通风研究的主要原因<sup>[6~8]</sup>。

## 1.1 隧道分类及施工方法

### 1.1.1 隧道分类

从不同角度区分,可得出不同的隧道分类方法<sup>[9]</sup>:

- (1) 按地层分,可分为岩石隧道(软岩、硬岩)、土质隧道;
- (2) 按所处位置分,可分为山岭隧道、城市隧道、水底隧道;
- (3) 按施工方法分,可分为矿山法、掘进机法、盾构法、沉管法、顶进法、明挖法、浅埋暗挖法等;
- (4) 按埋置深度分,可分为浅埋隧道和深埋隧道;
- (5) 按断面形式分,可分为圆形隧道、马蹄形隧道、矩形隧道等;
- (6) 按国际隧道协会(ITA)定义的断面数值划分标准分,可分为特大断面(100m<sup>2</sup>以上)、大断面(50~100m<sup>2</sup>)、中等断面(10~50m<sup>2</sup>)、小断面(3~10m<sup>2</sup>)、极小断面(3m<sup>2</sup>以下);
- (7) 按车道数分可分为单车道、双车道、多车道。
- (8) 按照用途分类可分为:交通隧道、水工隧道、市政隧道、矿山隧道,其中交通隧道是应用最广泛的一种隧道,其作用是提供交通运输和人行的通道,以满足交通线路畅通



的要求，一般包括公路隧道、铁路隧道、地铁隧道、航运隧道、人行隧道。

(9) 按照隧道的长度分类：《公路隧道设计规范》JTGD 70—2004 将隧道分为短隧道、中长隧道、长隧道和特长隧道，如表 1-1 所示。

公路隧道长度分类

表 1-1

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

### 1.1.2 隧道施工方法

隧道施工方法分为：矿山法、掘进机法、盾构法、沉管法、顶进法、明挖法、浅埋暗挖法等<sup>[10]</sup>。

矿山法因最早应用于矿石开采而得名，它包括传统法和新奥法，多数情况下需要采用钻眼爆破进行开挖，故又称为钻爆法。

隧道掘进机（简称 TBM）是一种利用回转刀具开挖（同时破碎和掘进）隧道的机械装置，用此机械修筑隧道的方法，称为掘进机法。掘进机法包括隧道掘进机法和盾构掘进机法，前者应用于岩石地层，后者则主要应用于土质围岩，尤其适用于软土、流沙、淤泥等特殊地层。

盾构法是现阶段在软弱地层中修建地铁和交通隧道以及各种用途管道的最先进的施工方法之一，应用广泛。盾构法是使用所谓的“盾构”机械，在围岩中推进，一边防止土砂的崩坍，一边在其内部进行开挖、衬砌作业修建隧道的方法，用盾构法修建的隧道称为盾构隧道。

沉管隧道，简单地说，就是在水底预先挖好沟槽，把在陆上其他地点预制的适当长度的管体，浮运到沉放现场，顺序地沉放到沟槽中，并回填覆盖而成的隧道。此施工方法称为沉管法，用此法修建的隧道称为沉管隧道，这是修建水底隧道通常采用的方法。

顶进法又称顶管法，即在保证道路或铁路交通安全运行的同时，在线路下采用预制的钢筋混凝土箱体框架（箱涵），用机械力顶入铁路路基内，成为一个隧道结构，该方法称为顶进法。顶管技术是从隧道盾构法施工技术发展而来。顶管法所用的顶管机（掘进机或盾构机）和管片隧道施工法所采用的隧道掘进机没有本质的不同。两种施工技术的区别仅在于隧道内衬构筑方法的不同，一个是把整段管片顶进连接安装，另一个是组合管片不断拼接安装。

明挖法是从地表面向下开挖，在预定位置修筑结构物方法的总称，在城市地下工程中，获得广泛的应用，特别是在浅埋的地下铁道工程中。一般来说，明挖法多用在平坦地形，而且可以适应不同类型的结构形式，使结构空间得到充分而有效的利用。

浅埋暗挖法是在新奥法的基础上针对城市地下工程的特点而发展起来的，与其他施工方法比较，具有以下特点：1) 适用于各种地质条件和地下水条件；2) 具有适合各种断面形式（单线、双线及多线、车站等）和变化断面（过渡段、多层断面等）的高度灵活性；3) 通过分部开挖和辅助施工方法，可以有效地控制地表下沉和坍塌；4) 与盾构法比较，在较短的开挖地段使用，较经济；5) 与明挖法比较，可以极大地减轻对地面交通和商业活动的影响，避免大量的拆迁；6) 从综合效益观点出发，是比较经济的一种方法。

## 1.2 公路隧道通风系统介绍

### 1.2.1 公路隧道通风目的

机动车辆在隧道内行驶时所排放的废气中含有多种对人体有害的物质,而柴油车排出的黑烟和车辆卷起的尘埃还会降低隧道内的能见度,影响行车安全。因此,隧道运营通风的目的就是要保证隧道内空气符合卫生标准和有足够的能见度。另外,当隧道内发生火灾时,在外界风力较弱的情况下,火灾产生的烟雾四处蔓延,严重影响人员逃生,并威胁生命安全。隧道防灾通风的目的就是通过有效组织气流,将隧道内烟气快速排除,创造一个有利于司乘人员逃生的环境<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 公路隧道通风方式介绍

合理的隧道通风方式是安全性高、可靠性高、建设安装方便、投资成本少、隧道内环境好、对火灾的适应能力强、运营费用低的通风方式。隧道通风系统的设计应充分考虑各通风方式的优缺点,并根据隧道的特点,综合比较来确定公路隧道通风方式。公路隧道的通风方式按照送风形态、空气流动状态、送风原理,可分为自然通风和机械通风两大类。

#### 1.2.2.1 自然通风

自然通风方式无需设置专门的通风设备,利用隧道内外温差、两洞口气压差、地表自然风以及车辆活塞风可实现隧道通风换气。由于隧道内自然风受隧道周围环境影响,其大小、方向极不稳定,因此汽车排出的CO等有害物质浓度难以控制,发生火灾时排烟能力差是自然通风的主要缺点。

#### 1.2.2.2 机械通风

机械通风方式又可分为纵向通风、半横向通风、全横向通风以及组合通风几种<sup>[12]</sup>。机械通风方式具体可按表 1-2 分类。

机械通风方式的分类

表 1-2

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
全射流			
集中送入式	送风式	顶送顶排式	纵向组合式
通风井送排式	排风式	底送顶排式	纵向+半横向组合式
通风井排出式	平导压入式	顶送底排式	纵向+集中排烟组合式
吸尘式		侧送侧排式	

在《公路隧道通风设计细则》JTG/T D 70/2—02—2014 中,规定如下:

1. 双向交通隧道,当符合式(1-1)的条件时,可设置机械通风:

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

式中  $L$ ——隧道长度, m;

$N$ ——设计小时交通量, veh/h。

2. 单向交通隧道,当符合式(1-2)的条件时,可设置机械通风:

$$L \cdot N \geq 2 \times 10^6 \quad (1-2)$$

以上式 (1-1) 式 (1-2) 为判断是否需要设置机械通风的经验公式, 只能作为初步判定的方法。以下对全射流半横向、全横向、三种机械通风方式进行简单介绍:

### (1) 全射流纵向通风

全射流纵向通风是利用射流风机所产生的高速气流推动前方空气在隧道内形成纵向流动, 使新鲜空气从一侧洞口直接引进, 并从另一侧洞口排出污染空气的一种通风方式, 特别适用于单向行车的隧道, 如图 1-1 所示。

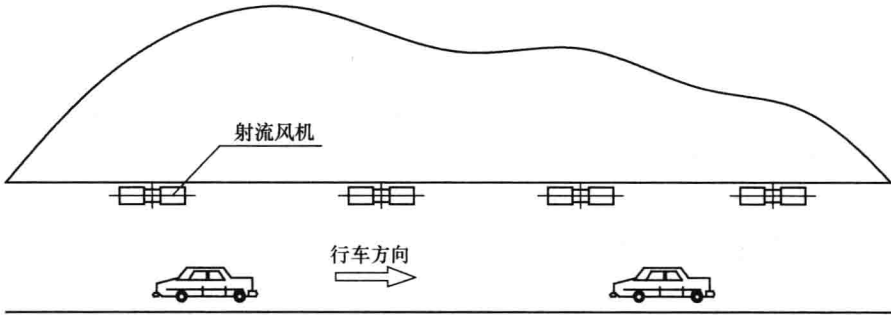


图 1-1 全射流纵向通风

根据能量守恒定理, 可得到式 (1-3):

$$-\Delta P_m + \Delta P_t - \Delta P_r + n\Delta P_j = 0 \quad (1-3)$$

式中  $\Delta P_m$  ——自然风阻力,  $N/m^2$ ;  
 $\Delta P_t$  ——交通通风力,  $N/m^2$ ;  
 $\Delta P_r$  ——通风阻抗力,  $N/m^2$ ;  
 $\Delta P_j$  ——射流风机升压力,  $N/m^2$ ;  
 $n$  ——射流风机台数, 台。

全射流纵向通风通常是将一定数量的射流风机按一定的间距安装于车道的顶部或侧面, 从一侧洞口吸入新鲜空气, 以  $30m/s$  左右的速度喷射吹出, 诱导隧道内空气纵向流动, 达到通风换气的目的, 并以接力的形式将废气排出隧道外。因此, 隧道内空气污染浓度是不一样的, 由入口向出口方向呈线性递增: 入口处污染浓度最小, 出口处浓度最大。全射流纵向通风具有造价低廉、运营能耗低、调节灵活等优点, 是目前公路隧道中主流的通风方式<sup>[13]</sup>。

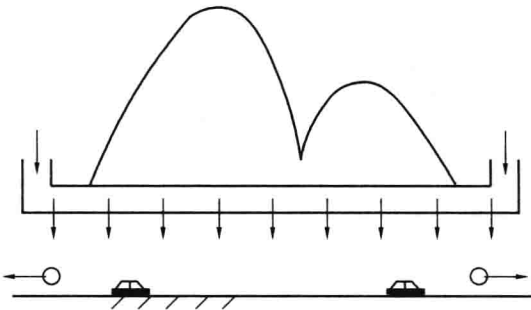


图 1-2 半横向通风 (送风式)

### (2) 半横向通风

半横向通风的特点是利用隧道洞体作为进风或排风道, 只需设排风道或进风道, 隧道断面介于全横向通风和纵向通风之间, 可以利用部分活塞风作用。与纵向通风不同, 半横向通风可使隧道内的污染物浓度大体上接近一致, 如图 1-2 所示。

对于双向交通的隧道, 半横向通风不论是送入式还是排出式, 如果双向交通的

流量和两洞口的气象条件相等，隧道内的风压分布为中央最大；当两洞口排出或送入等量的空气，在隧道中点，空气是静止的，风速为零，称为中性点，除这点以外风速向两洞口呈线性递增。

单向交通时，送风式通风的中性点多半移至入口以外，排风点的中性点则靠近出口，中性点附近的污染物浓度高。

(3) 全横向通风

全横向通风方式是同时设置送风道和排风道，其特点是气流在隧道横断面方向上流动，因此只有横向的风流，污染物浓度沿隧道方向基本上均匀，如图 1-3 所示。

该通风方式使烟尘等有害物排出，其排出路程短，可使新鲜空气得到充分利用，且隧道内无明显纵向气流，因而发生火灾时火势也不会沿纵向迅速蔓延，有利于防火排烟。这种通风方式适用于中、长隧道，是各种通风方式中最可靠和舒适的。但由于隧道内需设置送风道和排风道，从而增加了工程的建设及运营费用。

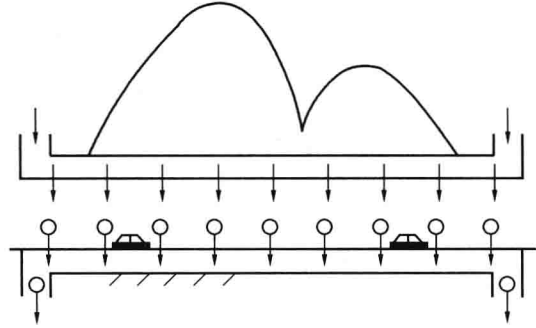


图 1-3 全横向通风

1.2.2.3 各机械通风方式的特点

以单向交通为例，比较各通风方式的优缺点如表 1-3 所示。

各主要通风方式的特点（单向交通隧道）

表 1-3

通风方式		纵向式				半横向式		全横向式
基本特征		通风风流沿隧道纵向流动				由隧道风道送风或排风，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		全射流式	洞口集中送入式	通风井排出式	通风井送排式	送风半横向式	排风半横向式	
形式特征		由射流风机群升压	由喷流送风升压	洞口两端进风、中部集中排风	由喷流送风升压	由送风道送风	由排风道排风	
一般特征	非火灾工况的适用长度	5000m 以内	3000m 左右	5000m 左右	不受限制	3000~5000m	3000m 左右	不受限制
	通风利用	很好	很好	部分较好	很好	较好	不好	不好
	噪声	较大	洞口噪声较大	噪声较小	噪声较小	噪声小	噪声小	噪声小
	火灾处理	排烟不便	排烟不便	排烟较方便	排烟较方便	排烟方便	排烟方便	能有效排烟
	工程造价	低	一般	一般	一般	较高	较高	高
	管理与维护	不便	方便	方便	方便	一般	一般	一般
	分期实施	易	不易	不易	不易	难	难	难
	技术难度	不难	一般	一般	稍难	稍难	稍难	难
	运营费	低	一般	一般	一般	较高	较高	高
洞口环保	不利	不利	有利	一般	一般	有利	有利	

### 1.3 隧道通风需风量计算

隧道通风需风量计算依据为《公路隧道通风设计细则》JTG/T D 70/2—02—2014，所采用相关公式如下。

#### 1.3.1 稀释 CO 的需风量

##### 1.3.1.1 CO 排放量计算

$$Q_{co} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{co} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_{iv} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (1-4)$$

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

$q_{co}$  ——设计目标年份的 CO 基准排放量， $m^3 / (veh \cdot km)$ ；

$f_a$  ——考虑 CO 的车况系数，见表 1-4；

$f_d$  ——车密度系数，见表 1-5；

$f_h$  ——考虑 CO 的海拔高度系数，见图 1-4；

$f_m$  ——考虑 CO 的车型系数，见表 1-6；

$f_{iv}$  ——考虑 CO 的纵坡—车速系数，见表 1-7；

$n$  ——车型类别数；

$N_m$  ——相应车型的交通量，veh/h。

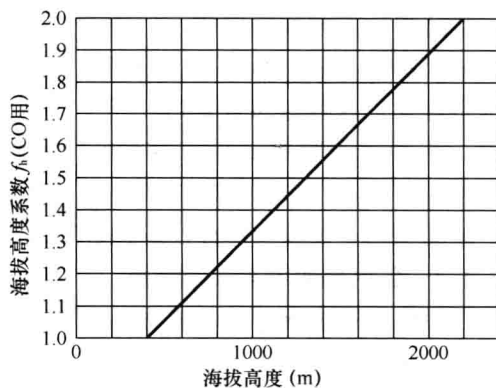


图 1-4 考虑 CO 的海拔高度系数  $f_h$

考虑 CO 的车况系数  $f_a$

表 1-4

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

车密度系数  $f_d$

表 1-5

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

考虑 CO 的车型系数  $f_m$

表 1-6

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

考虑 CO 的纵坡—车速系数  $f_{iv}$

表 1-7

设计速度 $v_i$ (km/h)	隧道行车方向纵坡 $i$ (%)								
	-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

1.3.1.2 稀释 CO 的需风量计算

$$Q_{req(co)} = \frac{Q_{co}}{\delta} \cdot \frac{p_o}{p} \cdot \frac{T}{T_o} \times 10^6 \quad (1-5)$$

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

$Q_{co}$ ——隧道 CO 排放量,  $m^3/s$ ;

$\delta$ ——CO 浓度;

$p_o$ ——标准大气压,  $kN/m^2$ , 取  $101.325kN/m^2$ ;

$p$ ——隧址大气压 ( $kN/m^2$ );

$T_o$ ——标准气温, K, 取 273 K;

$T$ ——隧址夏季气温, K。

1.3.2 稀释烟尘的需风量

1.3.2.1 烟尘排放量计算

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

式中  $Q_{VI}$ ——隧道烟尘排放量,  $m^2/s$ ;

$q_{VI}$ ——设计目标年份的烟尘基准排放量,  $m^2/(veh \cdot km)$ , 机动车有害气体基准排放量宜均以 2000 年为起点, 按每年 2.0% 的递减率计算至设计目标年份获得的排放量, 作为隧道通风设计目标年份的基准排放量, 最大折减年限不宜超过 30 年; 2000 年的机动车尾排有害气体中烟尘的基准排放量应取  $2.0 m^2/(veh \cdot km)$ 。

$f_{a(VI)}$ ——考虑烟尘的车况系数, 按表 1-8 取值;

$f_d$ ——车密度系数, 按表 1-5 取值;

$f_{h(VI)}$ ——考虑烟尘的海拔高度系数, 按图 1-5 取值;

$f_{iv(VI)}$ ——考虑烟尘的纵坡—车速系数, 按表 1-9 取值;

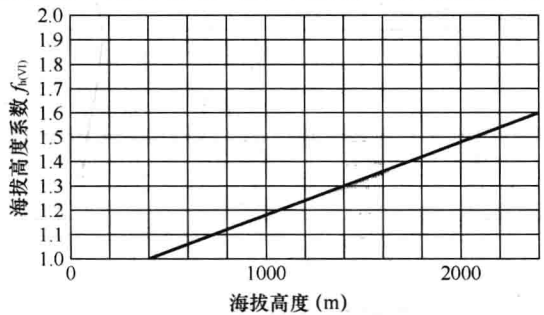


图 1-5 考虑烟尘的海拔高度系数  $f_{h(VI)}$

注: 当取值超出图示范围时, 可作直线延伸。

- $L$ ——隧道长度, m;  
 $f_{m(VD)}$ ——考虑烟尘的柴油车车型系数, 按表 1-10 取值;  
 $n_D$ ——柴油车车型类别数;  
 $N_m$ ——相应车行的交通量, veh/h。

考虑烟尘的车况系数  $f_{a(VI)}$  表 1-8

适用道路等级	$f_{a(VI)}$
高速、一级公路	1.0
二级及二级以下公路	1.2~1.5

考虑烟尘的纵坡——车速系数  $f_{iv(VI)}$  表 1-9

工况车速 (km/h)	隧道行车方向纵坡 (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
80	0.3	0.4	0.55	0.8	1.3	2.6	3.7	4.4	—
70	0.3	0.4	0.55	0.8	1.1	1.8	3.1	3.9	—
60	0.3	0.4	0.55	0.75	1.0	1.45	2.2	2.95	3.7
50	0.3	0.4	0.55	0.75	1.0	1.45	2.2	2.95	3.7
40	0.3	0.4	0.55	0.7	0.85	1.1	1.45	2.2	2.95
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

考虑烟尘的柴油车车型系数  $f_{m(VI)}$  表 1-10

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

### 1.3.2.2 稀释烟尘的需风量计算

$$Q_{req(VD)} = \frac{Q_{VI}}{K} \quad (1-7)$$

- 式中  $Q_{req(VD)}$ ——隧道稀释烟尘的需风量,  $m^3/s$ ;  
 $K$ ——烟尘设计浓度,  $m^{-1}$ , 按表 1-11、表 1-12 取值;  
 $Q_{VI}$ ——隧道烟尘排放量,  $m^3/s$ 。

烟尘设计浓度  $K$  (钠光源) 表 1-11

设计速度 $v_t$ (km/h)	$\geq 90$	$60 \leq v_t < 90$	$50 \leq v_t < 60$	$30 < v_t < 50$	$v_t \leq 30$
烟尘设计浓度 $K$ ( $m^{-1}$ )	0.0065	0.0070	0.0075	0.0090	0.0120*

\* 此工况下应采取交通管制或关闭隧道等措施。

烟尘设计浓度  $K$  (荧光灯、LED 灯等光源) 表 1-12

设计速度 $v_t$ (km/h)	$\geq 90$	$60 \leq v_t < 90$	$50 \leq v_t < 60$	$30 < v_t < 50$	$v_t \leq 30$
烟尘设计浓度 $K$ ( $m^{-1}$ )	0.0050	0.0065	0.0070	0.0075	0.0120*

\* 此工况下应采取交通管制或关闭隧道等措施。

### 1.3.3 隧道换气需风量

隧道换气需风量应按式 (1-8) 计算:

$$Q_{\text{req(ac)}} = \frac{A_r \cdot L \cdot n_s}{3600} \quad (1-8)$$

式中  $Q_{\text{req(ac)}}$  ——隧道换气需风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $A_r$  ——隧道净空断面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $n_s$  ——隧道最小换气频率, 按表 1-13 取值。

隧道最小换气频率

表 1-13

隧道最小 换气频率	《公路隧道通风照明设计规范》 JTJ 026.1—1999		《公路隧道通风设计细则》 JTG/T D 70/2—02—2014
	$n_s$	一般隧道 不宜小于 5 次/h	交通量较小或特长隧道 3~4 次/h

采用纵向式通风的隧道, 换气需风量应按式 (1-8) 和式 (1-9) 计算, 并取最大者作为隧道空间不间断换气的需风量:

$$Q_{\text{req(ac)}} = v_{\text{ac}} \cdot A_r \quad (1-9)$$

式中  $v_{\text{ac}}$  ——隧道换气风速, 按表 1-14 取值;  
 $A_r$  ——隧道净空断面积,  $\text{m}^2$ 。

隧道换气风速

表 1-14

隧道换气风速	《公路隧道通风照明设计规范》 JTJ 026.1—1999	《公路隧道通风设计细则》 JTG/T D 70/2—02—2014
$v_{\text{ac}}$	不应低于 2.5m/s	不应低于 1.5m/s

## 1.4 隧道通风模拟软件介绍

### 1.4.1 SES 4.1 模拟软件

SES 4.1 (Subway Environment Simulation) 由美国城市公共运输部和运输发展公司开发, 是一款目前被国际上广泛认可并相对成熟地用于地铁环控模拟计算的软件。SES 4.1 程序主要由四个既独立又互相关联的子程序组成: 列车运动子程序, 空气动力学子程序, 温度/湿度子程序, 热库/环境控制子程序。列车运动子程序根据列车的速度、加速度、位置, 可计算列车的发热量; 空气动力学子程序依靠列车参数以及系统的几何组成与通风状况数据, 计算所有车站、区间、通风井中的气流速度; 接着, 温度/湿度子程序使用这些空气参数与列车运动子程序计算出的列车发热数据来计算系统中的显热与潜热, 这样一来, 就可以得到各处连续的温、湿度。最后, 列车运动子程序按气流速度推算列车附近活塞风作用。这些子程序计算出的地铁通风与热负荷数据同室外每日与年度气象条件参数一起, 被热库/环境控制子程序用来计算地铁内空气与隧道结构、周围土壤之间长期的热传导作用, 同时也可以得到为使某些区间温度达到设计条件所需的冷量。除此之外, SES 程序中设有一个火灾模式, 可以模拟火灾时空气动力学和热力学的影响。1976 年, SES 4.1 修改后被应用到公路隧道通风分析中, 1985 年又增加了火灾的动态模拟。SES



4.1 软件对于地铁的地下车站、区间隧道及铁路、公路隧道具有较强的适用性，国外公路隧道通风设计中，SES 4.1 程序亦得到了广泛的运用。

将 SES 4.1 程序应用于公路隧道的原理<sup>[14]</sup>是：由于在隧道中一般不允许超车，车辆以固定的间距前后匀速通过，故可以将一定数量的车辆组合为一部列车，列车的班次与车道数及车流量有关，列车车头的阻力系数与车种比有关，可以想象，如果车流中车头投影面积大的货车、大客车等多，阻力系数亦大，这对正常工况引起的活塞风量有利，但不利于阻塞或事故时的通风。而隧道结构模型的设立与地铁隧道区别不大。正常及阻塞情况下，先分段计算出 CO 及烟尘的排放量，结合 SES 程序计算的风量结果得出各段污染物的浓度，通过增减射流风机的台数来达到通风量的需求。火灾工况时，亦可在 SES 4.1 程序设定射流风机及轴流风机的组合开启方式，来验算在不同的火灾地点的风速是否能够满足临界风速的要求。

### 1.4.2 FDS 火灾模拟软件

FDS (Fire Dynamics Simulator) 是美国国家标准研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 建筑火灾研究实验室 (Building and Fire Research Laboratory) 开发的模拟火灾中流体运动的计算流体动力学软件。该软件采用数值方法求解受火灾浮力驱动的低马赫数流动的 N-S 方程 (黏性流体 Navier-Stokes)，重点计算火灾中的烟气和热传递过程。由于 FDS 是开放的源码，在推广使用的同时，根据使用者反馈的信息持续不断地完善程序。因此，在火灾科学领域得到了广泛应用。另外，Smokeview 是用于展示 FDS 模拟结果的可视化程序。

FDS 自 2000 年公开发布以来受到普遍关注。据统计，该模型大约一半应用于烟气控制系统和喷头、探测器的激活启动的研究设计，另一半应用于居民和工业建筑火灾后的重建和修复设计。通过一系列的发展，FDS 致力于解决火灾保护工程中的实际消防问题，与此同时，也为火灾动力学和燃烧的理论研究提供工具。以下为 FDS 软件的特点：

1. 流体动力学模型：FDS 数值求解热驱动下低速流动的 N-S 方程。其核心算法为显式预估校正方案，时间和空间采用二阶精度，湍流采用 Smagorinsky 形式的大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES)，在足够细的网格下能实现直接模拟 (Direct Numerical Simulation, DNS)，缺省状况下使用 LES。

2. 燃烧模型：对于大多数情况，FDS 采用混合物燃烧模型。该模型假设燃烧混合控制，燃料和氧气反应速度无限快。主要反应物和生成物的质量分数通过“状态关系”从混合物分数中得到，通过简单分析和测量的结合得到经验表达式。

3. 辐射输运：辐射热传递通过求解非扩散气体的辐射输运方程得到，在有些特殊情况下采用宽带模型。与对流输运方程一样，此方程求解也采用有限体积法。

4. 几何：FDS 基于直线性网格求解控制方程。所以在直接建模时，要注意所建实体区域为矩形以适应背景网格。

5. 多重网格：多重网格用来描述计算中需使用多个矩形网格的。当计算区域的划分不可能只用一种矩形网格完成时可以设置多个矩形网格。

6. 边界条件：所有固体表面都指定热量边界条件和燃料燃烧信息。通常，燃料属性储存在数据库中用名称调用。表面之间的热和质量用经验公式计算，但 DNS 模拟时热和