

隧道及地下工程建设丛书

王明年 田尚志 郭春 李玉文 编著



公路隧道通风节能技术 及地下风机房设计

Road Tunnel Ventilation Energy-saving Technology and
Underground Ventilation Equipment Room Design



人民交通出版社

China Communications Press

隧道及地下工程建设丛

Road Tunnel Ventilation Energy-saving Technology and
Underground Ventilation Equipment Room Design

公路隧道通风节能技术 及地下风机房设计

王明年 田尚志 郭 春 李玉文 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以编著者多年在隧道工程领域的研究成果为主要内容,以隧道通风节能技术及地下风机房设计方法为主线,阐述了全寿命经济性隧道通风井优选方法,明确地提出了隧道内自然风形成机理及计算方法,通过对隧道现场实测、物理模型试验及大型数值仿真计算的具体细节和成果的介绍,系统地给出了隧道利用自然风节能通风设计、隧道风机优化配置以及地下风机房正常营运和火灾情况下的设计技术。全书依托具体工程实例,对隧道通风节能技术和地下风机房设计的诸多理论与技术问题进行了剖析,对实际工程具有参考价值。

本书可供从事隧道设计、施工、建设管理的工程技术人员使用,也可供高等院校隧道工程专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道通风节能技术及地下风机房设计 / 王明年等编著. --北京:人民交通出版社,2012.2

ISBN 978-7-114-09598-6

I. ①公… II. ①王… III. ①公路隧道-隧道通风-研究 IV. ①U459.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第004452号

隧道及地下工程建设丛书

书 名:公路隧道通风节能技术及地下风机房设计

著 者:王明年 田尚志 郭 春 李玉文

责任编辑:王文华 (wwh@ccpress.com.cn)

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010) 59757969, 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:17.5

字 数:398千

版 次:2012年2月 第1版

印 次:2012年2月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09598-6

定 价:38.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

我国正在规划建设的长度超过 10km 以上的特长公路隧道已达到 7 座。由于特长公路隧道需风量大,运营通风费用高,因此,往往出现特长公路隧道建得起但用不起的尴尬局面,特别是西部欠发达地区,这种情况更为严重。所以,在我国倡导节约型社会的背景下,认真搞好特长深埋隧道的通风设计对公路建设的可持续发展具有重要意义。

为了解决公路隧道通风节能问题,本书从以下几个方面进行了研究:

(1) 针对目前隧道通风井设计中,根据现行规范采用 13 ~ 18m/s 的风速来控制通风井的断面积,很多时候是不经济的,也是不符合实际的这一现状,对隧道通风井经济断面积及经济风速进行了优化研究;

(2) 对于隧道自然风利用这一热点问题,目前设计均将其作为阻力考虑,极大地浪费自然资源,并且由于自然风没有计算方法,无法确定其风速大小及风向,进而无从利用,本书对隧道内自然风形成机理、计算方法及隧道利用自然风节能通风设计进行了系统研究;

(3) 现行规范对于隧道用射流、轴流风机规定较少,且针对隧道轴流风机并联安全性、功率匹配关系并无相关研究,本书对隧道风机优化配置进行了研究。

深埋特长公路隧道往往采用分段纵向式通风,采用地下风机房,目前,关于地下风机房的研究主要在于风机房的功能、组成及结构等,对于其内环境、防灾设计的研究还处于空白。由于地下风机房与外界环境封闭,隧道内的污染空气和烟尘往往会扩散到风机房中产生积聚,从而对人员和设备产生影响。同时,风机房内发生灾害也会对隧道环境产生影响,且由于地下结构的封闭性,发生火灾后具有烟气浓度大、温度高、救援困难、危害大的特点。

本书针对地下风机房的以上问题,对其内环境控制和防灾设计进行了系统的研究,并最终形成了地下风机房设计技术指南。

本书共分八章及一个指南:第 1 章绪论,第 2 章隧道通风井经济断面积和经济风速计算方法,第 3 章隧道内自然风形成机理及计算方法,第 4 章隧道利用自然风节能通风设计方法,第 5 章隧道风机优化配置技术,第 6 章隧道地下风机房平面布置及环境标准,第 7 章正常运营地下风机房污染物计算方法及控制措施,第 8 章火灾下地下风机房温度和烟流计算方法及防灾措施,地下风机房设计技术指南。

本书是在总结近年来我国公路隧道通风节能技术研究多项科研成果的基础上,并且得到了由四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院承担、西南交通大学参研的西部交通建设科技项目——大相岭泥巴山深埋特长隧道关键技术研究(2006-318-000-104)的大力支持

下完成的。本书的项目研究成果,不仅直接指导了大相岭泥巴山特长公路隧道的设计,而且对完善我国公路隧道设计规范,提高我国公路隧道运营管理水平,具有十分重要的意义。

书中还引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等成果,在此一并表示感谢。虽然我们尽了很大努力,但由于学识水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2011年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 隧道通风井优化技术研究现状	1
1.2 隧道内自然风计算方法及应用研究现状	3
1.3 隧道内轴流风机优化配置技术研究现状	5
1.4 地下风机房设计方法研究现状	6
第 2 章 隧道通风井经济断面积和经济风速计算方法	9
2.1 隧道正常通风计算方法	9
2.1.1 需风量计算方法	10
2.1.2 基本作用力计算方法	11
2.1.3 竖井送排式与射流风机组合分段纵向式通风计算方法	12
2.2 全寿命经济性隧道通风井优选方法	13
2.2.1 隧道通风井 DTM 模型建立	14
2.2.2 通风井井型区域划分	14
2.2.3 隧道分段确定方法	15
2.2.4 多因素全组合通风井自动搜索方法及流程	16
2.3 隧道通风井优选程序开发	18
2.3.1 需求分析	18
2.3.2 程序设计	18
2.3.3 预设相关费用计算	19
2.3.4 系统实现	24
2.4 工程应用及验证	36
2.4.1 计算情况	36
2.4.2 计算参数	37
2.4.3 计算内容	38
2.4.4 计算结果及比较	39
第 3 章 隧道内自然风形成机理及计算方法	43
3.1 隧道自然风压影响因素分析	43
3.1.1 自然风压基本概念	43
3.1.2 自然风压影响因素	44
3.2 一般隧道自然风压理论计算方法	46
3.2.1 洞外环境因素——“超静压差”计算方法	46
3.2.2 洞口环境因素——“风墙压差”计算方法	48

3.2.3	洞内环境因素——“热位差”计算方法	50
3.2.4	一般隧道自然风压理论计算方法建立	50
3.3	分段隧道自然风压理论计算方法	51
3.3.1	分段隧道通风压力组成模式	51
3.3.2	分段隧道风压循环计算方法	51
3.3.3	分段隧道自然风压理论计算方法建立	54
3.4	隧道内自然风计算方法验证	55
3.4.1	典型公路隧道自然风现场测试	55
3.4.2	隧道自然风现场测试对三维数值计算方法的验证	65
3.4.3	隧道自然风三维数值计算方法对理论方法的验证	74
第4章	隧道利用自然风节能通风设计方法	92
4.1	隧道自然风气象观测物理量获取	92
4.1.1	自动气象站测试方案设计	92
4.1.2	自动气象站相关参数性能	93
4.1.3	自动气象站布置及安装	95
4.1.4	长期气象监测数据分析	95
4.2	隧道自然风风速确定	99
4.2.1	自然风风速计算方法	99
4.2.2	主隧道自然风风速确定	100
4.3	隧道自然风利用模式及节能设计方法	106
4.3.1	隧道利用自然风节能设计流程	106
4.3.2	隧道机械通风方向确定	107
4.3.3	隧道自然风利用模式	113
4.3.4	隧道自然风节能设计	119
4.4	泥巴山隧道自然风利用的节能效益	129
4.4.1	风机配置计算	129
4.4.2	节能效益分析	133
第5章	隧道风机优化配置技术	136
5.1	轴流风机并联安全性分析	136
5.1.1	轴流风机运行工作原理	136
5.1.2	并联风机失速情况分析	137
5.1.3	轴流风机安全性选型及控制要求	139
5.2	轴流风机效率提高方法	140
5.2.1	轴流风机损失与效率计算方法	140
5.2.2	轴流风机数值计算方法	142
5.2.3	轴流风机安装高度对效率的影响	144
5.2.4	并联风机横向间距对效率的影响	145
5.2.5	轴流风机并联台数对效率的影响	146

5.2.6	并联风机中间隔墙对效率的影响	148
5.2.7	自然风对并联风机效率的影响	162
5.3	斜竖井送排风对射流风机的影响	165
5.3.1	送风口送风对主隧道的影晌范围	166
5.3.2	排风口排风对主隧道的影晌范围	167
5.4	泥巴山隧道风机优化配置应用	168
5.4.1	泥巴山隧道轴流风机布置优化	168
5.4.2	泥巴山隧道轴流风机配置优化	168
5.4.3	泥巴山隧道射流风机布置优化	176
第6章	隧道地下风机房平面布置及环境标准	179
6.1	地下风机房平面布置	179
6.2	地下风机房环境标准	180
6.2.1	地下环境主要污染物	180
6.2.2	地下环境指标选取	180
6.2.3	地下风机房环境标准	181
6.3	泥巴山隧道地下风机房平面布置设计	184
第7章	正常运营地下风机房污染物计算方法及控制措施	185
7.1	地下风机房污染物计算方法	185
7.1.1	地下风机房污染物扩散理论计算方法	185
7.1.2	地下风机房污染物扩散规律模型试验	187
7.1.3	地下风机房污染物扩散规律数值模拟	201
7.2	地下风机房污染物控制措施	204
7.2.1	常用污染物控制措施	204
7.2.2	隔离门屏蔽	206
7.2.3	送风加压	210
7.2.4	组合方式	212
7.3	泥巴山隧道地下风机房正常运营通风设计	214
7.3.1	正常运营通风设计步骤	214
7.3.2	正常运营通风系统设计	218
第8章	火灾下地下风机房温度和烟流计算方法及防灾措施	221
8.1	地下风机房温度和烟流计算方法	221
8.1.1	地下风机房温度和烟流理论计算方法	221
8.1.2	地下风机房温度和烟流浓度模型试验	225
8.1.3	地下风机房温度和烟流浓度数值模拟	237
8.2	地下风机房火灾疏散	245
8.2.1	火灾疏散理论	245
8.2.2	数值模拟计算	251
8.3	泥巴山隧道地下风机房防灾疏散设计	256

地下风机房设计技术指南	258
1 总则	258
2 术语、定义与符号	258
3 规划	259
4 功能分区	260
5 环境控制标准	261
6 通风	262
7 防灾和疏散	263
8 供配电、照明和附属设施	265
参考文献	268

第1章 绪 论

随着我国公路建设的快速发展,长度超过 5km 的特长深埋隧道大量出现。由于稀释特长深埋公路隧道内的有害气体比较困难,所以特长深埋公路隧道建设中面临的首要问题便是隧道的通风问题^[1-3]。特长深埋隧道的复杂通风系统不仅使隧道工程造价急剧增加,而且还使隧道运营费用大幅上升。相对于一般的隧道工程而言,国内在特长深埋隧道通风系统设计和施工方面的经验还比较欠缺,有时会因为缺少施工经验而使设计的工程无法施工,有时会因为过多地考虑了施工而使通风系统能耗较大。所以,在我国倡导节约型社会的背景下,认真搞好特长深埋隧道的通风设计对公路建设的可持续发展具有重要意义^[4]。

1.1 隧道通风并优化技术研究现状

公路隧道的机械通风方式主要有纵向式通风、半横向通风及全横向通风。纵向式通风主要适用于双洞单向交通隧道及较短的单洞双向交通隧道;半横向通风及全横向通风主要适用于单洞双向交通隧道^[4-7]。

通过调查国内外 10km 以上的隧道通风方式(表 1.1)^[8-21],20 世纪 70 年代以前,包括欧洲和日本修建的特长隧道(如瑞士的圣哥达隧道、奥地利的阿尔贝格隧道、法国至意大利的勃朗峰隧道等)基本上采用半横向通风或全横向通风;20 世纪 70 年代以后修建的特长隧道(如日本的关越隧道、挪威的 Folgefonn 隧道等)基本上采用纵向式通风,这是隧道通风方式的发展规律。

国内外 10km 以上隧道通风方式

表 1.1

隧道名称	国家或地区	长度(m)	修建年代	通风方式
圣哥达(St. Gothard)	瑞士	16 918	1970 ~ 1980 年	横向式
阿尔贝格(Arlberg)	奥地利	13 927	1978 ~ 1982 年	横向式
弗雷儒斯(Frejus)	法国-意大利	12 901	1974 ~ 1979 年	横向式
勃朗峰(Mt. Blance)	法国-意大利	11 600	1959 ~ 1965 年	横向式
普拉布斯(Plabutsch)	奥地利	10 086	~ 1988 年	横向式
拉尔达尔(Aurland Laerdal)	挪威	24 500	1995 ~ 2001 年	纵向式
秦岭终南山	中国	18 020	2001 ~ 2005 年	纵向式
西山	中国	13 680/13 580	2006 年 ~	纵向式
坪林(Pinglin)	中国台湾	12 900	~ 2003 年	纵向式
大坪里	中国	12 290	2005 年 ~	纵向式

续上表

隧道名称	国家或地区	长度(m)	修建年代	通风方式
Folgefonn	挪威	11 100	~2001 年	纵向式
关越(Kan-Etsu)	日本	11 020	1977~1989 年	纵向式
Hida	日本	10 750	~2010 年	纵向式
格兰萨索(Gran Sasso)	意大利	10 175	1968~1984 年	纵向式
巴黎 A86 公路西线	法国	10 162	在建	纵向式

从国内外特长公路隧道的通风方式来看,有向分段纵向式通风发展的趋势,也有向斜、竖井分段纵向式通风发展的趋势。在我国,目前新建或即将建设的特长隧道,如陕西秦岭终南山隧道(长约 18km)、宝鸡至天水高速公路大坪里隧道(长约 12.3km)、湖南雪峰山隧道(长约 7km)、陕西包家山隧道(长约 11km)、山西太原至古交高速公路上的西山隧道(左洞长 13.68km,右洞长 13.58km)、台湾的坪林隧道(长约 12.9km)等,都采用分段纵向通风。

通风方式从单纯依靠自然风或交通风的最简单的纵向通风方式,到横向式、半横向式通风,现已逐步演变为利用射流风机通风、利用斜(竖)井送排风、斜(竖)井送排风和射流风机通风相结合、射流风机通风和电气集尘相结合等多种通风方式。纵向通风方式已成为长大隧道通风方式的主流。

我国长大公路隧道建设起步于 20 世纪 80 年代。针对我国具体国情,通风井作为通风系统中最为关键的部分,需要对隧道通风井的设计和施工进行研究,以积累经验为隧道建设服务。对于隧道通风井的研究,目前进行较多的是与通风井设计和施工相关的一些研究。国内外 10km 以上隧道通风井情况见表 1.2。

国内外 10km 以上隧道通风井情况

表 1.2

隧道名称	国家或地区	长度(m)	通风方式	竖井数量(个)	井深(m)/直径(m)	斜井数量(个)	斜井长(m)/直径(m)
拉尔达尔	挪威	24 500	纵向式			1	2 100
秦岭终南山	中国	18 020	纵向式	3	195/10.6,710/11.3,395/11.5		
圣哥达	瑞士	16 918	横向式	2	522/6.6,303/5.6	2	513/5.95,896/5.75
阿尔贝格	奥地利	13 927	横向式	2	736/7.7,218/8.3		
弗雷儒斯	法国—意大利	12 901	横向式	1	735/7.4	1	705/5.8
坪林	中国台湾	12 900	纵向式	3	250/6,235/6.5,500/6		
关越	日本	11 020	纵向式	2	193/9.7,181/9.7		

2000 年以来西南交通大学王明年等人以秦岭终南山隧道为研究对象,利用大比例模型试验,对火灾模式下竖井温度场的分布规律进行了研究^[22-25];湖北省交通规划设计院结合乌池坝特长公路隧道的情况^[26],对通风井的布置、轴线以及通风井净空断面的选择进行了研究;长安大学公路学院、陕西西汉高速公路有限公司针对斜井和竖井的选择以及斜井倾角的

选择进行了研究;广东省公路勘察规划设计院、西安科技大学结合秦岭终南山公路隧道通风竖井的设计,对现阶段国内外竖井施工的全断面法、导坑扩挖法、中心扩挖法这三种主要施工方法进行比较,对通风井设计及施工中所面临的问题进行了研究^[27-29];国内很多科研、设计、施工单位都针对特长深埋隧道通风井的施工技术进行了研究。而对于通风井的经济风速和经济断面面积仅在相应的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)^[30]中做了范围性的规定,此方面的研究很少。

斜井、竖井断面面积的确定应综合考虑工程造价和运营费用,当通风量一定时,通风井风速低,阻力小,通风井风机消耗功率小,运营费用低,但通风井面积增大,工程造价增加;通风井风速高,通风井面积减少,造价降低,但通风井风机功率消耗增大,运营费用增加。因此,应该权衡工程造价和运营费用之后,确定通风井风速和通风井面积。在选择断面形式和尺寸时主要考虑运营阶段各通风工况下风速和风量的要求和工程可行性,技术上要求安全、经济、合理,同时结合施工的基本要求而拟定,需满足提升容器尺寸、人行道宽度、梯子间尺寸、管路布置,以及设备之间的安全间距等因素,同时满足凿井设备的布置要求,有利于施工通风及布设电线、通信线,并且满足施工能力、运输的要求。

《公路隧道通风照明设计规范》中关于通风井经济断面面积的确定没有规定,这给设计带来很大困难。对风道的设计有如下规定,即“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”、“风道内设计风速宜在 13 ~ 18m/s 范围内取值”。为了进行通风井设计,一般设计单位采用 13 ~ 18m/s 的风速来控制通风井的断面面积,实际上很多时候是不经济的,也是很不符合实际的。

可以看出,对于隧道通风井的研究已经取得了很多成果,我国在这方面也投入了很多,但仍有许多亟待解决的问题,就目前来看国内隧道通风井的研究主要集中在对通风井设计与施工的研究上,对长大公路隧道实际工程的通风井风速和通风断面面积的研究很少,应继续加强这方面的研究。

1.2 隧道内自然风计算方法及应用研究现状

目前在隧道运营通风设计阶段,隧道内自然风风速 v_n 基本上是靠经验确定,对于一般隧道,这种方法可能是合适的,但对于处于气候分隔带的深埋特长隧道,如果对自然风考虑不正确,可能会造成很大误差,甚至会产生错误的结果。

如二郎山隧道,东坡潮湿多雨,西坡干燥多风。地面风向:东坡进口端地面多为北向和西北偏北向,西坡出口端地面多为东北向。地面最大风速:东坡进口端地面多为 2 ~ 7m/s,西坡出口端地面多为 7 ~ 14m/s。因为二郎山隧道的进口和出口,均正对山凹隘口,地面流动的气流受到地形的挟持正对洞口,形成二郎山隧道内特别大的自然风流。静风时间很少,隧道内自然风方向的转换,经常在 15 ~ 30min 内迅速完成,一般在 9:00 左右和 21:00 左右有一次相对固定的自然风转变风向的过程。实测自然风风速多在 2.69 ~ 7.76m/s 之间。

西南交通大学曾于 2002 年 8 月 15 日对二郎山隧道进行了一次自然风实测,实测结果见表 1.3。

二郎山隧道内自然风实测结果

表 1.3

时 间	自然风风向	风 速 (m/s)			
		东洞口内 200m	7 号横洞左 10m	7 号横洞右 10m	西洞口内 200m
8:00	西向东	2.69	3.1	3.12	3.49
9:00	西向东	1.35	1.59	1.59	1.87
10:00	东向西	2.87	2.46	2.46	2.05
11:00	东向西	6.09	5.61	5.61	5.15
12:00	东向西	6.5	6.03	5.99	5.53
13:00	东向西	7.17	6.67	6.6	6.1
14:00	东向西	7.26	6.74	6.68	6.19
15:00	东向西	6.15	5.69	5.63	5.19
16:00	东向西	6.33	5.85	5.81	5.35
17:00	东向西	5.41	4.97	4.96	4.53
18:00	东向西	5.05	4.62	4.6	4.21
19:00	东向西	4.85	4.42	4.42	4.03
20:00	东向西	2.58	2.17	2.17	1.8
21:00	东向西	0.93	0.78	0.78	0.64
22:00	西向东	1	1.14	1.16	1.35
23:00	西向东	2.82	3.1	3.14	3.44

从表 1.3 中数据可知,洞外自然和气象条件对隧道内自然风影响很大。为了设计出高效可靠的通风系统,必须对现场气象进行充分监测,从而正确评价自然风的影响。

自然风压的基本动力是“风压”和“热压”。在各种建筑结构中,合理利用自然风压改善室内空气品质具有显著的节能效应。对于住宅结构中的自然风压,国外学者在理论研究和应用方面都进行了许多探索和研究,使其在各类建筑中得到了较广泛应用。在国内,周漠仁^[31]提出了计算复杂建筑自然风压的“一元流动环路分析法”。该方法的主要思路是,任选一个通风口作为基础孔口,其他每一孔口和基础孔口及它们之间的室内外空间组成一元流动环路,建立环路能量平衡方程,求解环路中的自然风压量。

自然风压在地下洞室也有较为广泛的应用,而国内在这方面的研究较少。国内肖益民^[32]对水电站地下洞室的自然风压进行了研究,并编写了地下洞室自然风压计算程序。在矿井工程中,工程师更关心的是自然风压的不利影响。自然风压的不稳定,导致矿井工程不能应用自然风压方式,一般必须采用机械通风。该领域的研究人员一直着力于研究不同时期自然风压作用对机械通风系统的影响。

国内对隧道自然风压的研究不多。根据经验,对于短隧道采用自然通风的方式既经济又实用;而对于长大隧道而言,一般要采用机械通风方式,但在特定条件下,自然风的影响也会相当明显,若能认识其规律并加以利用,会收到意想不到的效果。

目前的公路隧道通风设计中,对于无竖井的隧道,规定按对通风不利的隧道内的自然反

风 $2\sim 3\text{m/s}$ 计算。对于有斜(竖)井的隧道,较一致的习惯是以斜(竖)井所在位置进行分段,类似无斜(竖)井情况分段计算隧道中各段的自然风压。实际上在有斜(竖)井的隧道中,由于通风线路改变,斜(竖)井对隧道内自然风的影响很敏感,隧道与斜(竖)井中的自然风的风向、风速,将随斜(竖)井、隧道的阻力状况而异。

曾艳华^[33]对有竖井隧道自然风压进行了研究。运用回路自然风压理论对有竖井隧道自然风压进行了研究,提出在有竖井隧道中自然风压的大小和方向均会发生变化,并将影响竖井主风机工作,在通风设计及运营通风管理中应给予重视。王光辉^[34]对圆梁山隧道贯通后自然通风进行了研究,比较详细地分析了隧道内自然风产生的原因,依据有关通风理论并结合圆梁山隧道施工通风的实际,研究了圆梁山隧道贯通后自然通风的方法。于燕玲^[35]对狭长排污隧洞冬季自然通风进行了研究,通过建立有竖井和无竖井隧洞自然风通风的数学模型,利用空气动力学基本原理,分析对比冬季排污隧洞内空气的流动状况。结果表明:无竖井狭长隧洞内的气流状况受外界风压影响显著;有竖井隧洞内热压作用效果较风压作用显著,隧洞内具有较好的气流组织。韩国的 Chan-Hoon Yoon 等研究了具有竖井的公路隧道的自然风压。

长安大学吕康成^[36]教授推导了公路隧道的自然风压计算公式,并指出:在尚未做进一步的研究分析之前,为可将隧道自然风阻力按常压差考虑,参考有关算法与工程实例,此值宜在 $10\sim 30\text{Pa}$ 之间。

由此可见,目前对于隧道内自然风压的组成均认为其可分为两部分:

- (1) 隧道洞口间的气象气压差与隧道内外温度差引起的压力差;
- (2) 洞外自然风吹入洞口的瞬间“风墙式”压力差。

并且认为这两者相互关联,几乎不能独立分解。对于其计算方法也考虑因素不足,未能明确地给出。

因此,国内外规范均将隧道内自然风作为一定值考虑。对于存在斜(竖)井的隧道,未曾考虑过其特殊的自然风形式,每段仍按定值计算,且没有对实际隧道进行测试验证。

在自然风的利用上,隧道设计中均主观将其作为阻力考虑,极大地浪费了自然资源。客观上来看,由于自然风没有计算方法,因此无法确定其风速大小及风向,进而无从利用。另外,由于有斜(竖)井的隧道装有风机,在其未开启的情况下,风道均处于关闭状态,并且因为没有可供参考使用的风道设计方法,使得斜(竖)井内自然风也无从利用。

1.3 隧道内轴流风机优化配置技术研究现状

在 10km 以上隧道通风设计中,通风井内需要设置功率很大的轴流风机,在《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)中,关于轴流风机设置方式规定较少,条文说明中也没有对轴流风机并联模式进行更多的论述,这给轴流风机的选型、布置和控制设计带来困难。

目前国内外对轴流风机的研究主要集中在其本身的设计上,并且主要是发电、航空、煤矿、化工等行业,对于隧道用的轴流风机并无专门的研究。

马良玉^[37]对轴流风机通用性能数学模型进行了研究。鉴于现有的动叶调节或静叶调

节轴流风机性能数学模型静态精度不高,动态调节过程特性与实际风机相差较大等问题,根据动(静)叶调节轴流风机静态性能曲线特点,依据风机的有关定律和原理,建立了动(静)叶调节轴流风机的性能通用数学模型。刘飞^[38]研究了大型轴流风机来流条件对内流影响的数值分析,对带有前后导叶以及复杂进气箱的大型轴流引风机的内流特性进行了全三维的数值计算,并且将其性能与试验数据进行了比较。研究捕捉了许多复杂的流动现象,说明部件之间的相互关联非常紧密。进气箱的复杂形状和不合理的轴套结构会增大流动的不稳定性和损失,并引起了下游流动的周向不均匀性。张永建^[39]进行了基于定常计算的轴流式通风机内部全流场数值模拟和性能预测。针对 2K70 型轴流式通风机从集流器进口到扩散器出口的内部三维全流场做了定常的数值模拟。马琴^[40]对轴流风机防喘振控制优化设计进行了研究。探讨了轴流风机喘振发生的原因,并详细阐述了优化防喘振控制的设计方案。王明奎^[41]对矿用对旋轴流风机失速与喘振下的数值模拟进行了研究。李燕^[42]对矿用对旋轴流风机的气动噪声进行了数值模拟研究。通过对矿用对旋轴流风机的内部流场进行气动噪声数值模拟,对风机在一般工况和失速工况下的气动噪声进行了比较分析,并得出了相对的噪声值。

由此可见,目前针对隧道轴流风机并联安全性、功率匹配关系并无相关研究,而针对日益增多的多台风机并联情况,也没有轴流风机效率的计算方法。因此,需要对以上内容及提高并联轴流风机效率的设计方法、措施等内容进行研究。

1.4 地下风机房设计方法研究现状

对于长大隧道,当采用地下风机房时,《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)中只有一条规定,即“洞内风机房应考虑防潮、防尘、降噪和温度调节”,实际上该条说明对设计没有任何指导作用。正如规范条文说明中所说的“……我国为数不多的几座设竖井通风的隧道均采用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。”由此可见,洞内风机房的研究在我国还是起步阶段。

根据 PIARC 统计,目前世界上关于火灾的试验共有三大类:等比例模型试验、在运营前或运营时的隧道中进行试验、小比例模型试验。日本、法国、意大利等国进行了一系列模型试验,研究地铁区间隧道内活塞风运动、地铁环控、地铁火灾以及压力损失等课题。在隧道防火排烟设施这一问题上,德国等欧洲八国在 20 世纪 90 年代初进行了研究,德国不伦瑞克大学试验以及欧洲各国的补充试验获取了大量的信息,如火灾现象以及灭火的可能性等。具体如表 1.4 所示。

世界各国进行的火灾试验

表 1.4

时 间	试 验 机 构	试 验 隧 道	试 验 内 容 / 结 论
1965 年	瑞士公路隧道安全委员会	Ofenegg 隧道,把隧道距入口 190m 处进行了封闭	测试的内容包括温度、空气流速、气体(CO、O ₂)浓度和能见度
1970 年	英国火警研究站与格拉斯哥隧道消防队	格拉斯哥隧道火灾试验	烟雾扩散

续上表

时 间	试 验 机 构	试 验 隧 道	试 验 内 容 或 结 论
1974 年	日本	宫古线某隧道内	运行列车的着火试验,认为列车着火后再运行 15min 是安全的
1975 年	奥地利	Zwenberg 隧道	测试的内容包括温度、气体(CO、CO ₂ 、NO _x 和 O ₂)浓度、不透明度和燃烧率
1980 年	日本公共事业研究协会(PWRI)	700m 长的导洞和 3 300m 长的公路隧道	测试了纵向空气流速的影响
1982 年	日本建设省土木研究所	某实际隧道内	隧道内使用水喷淋系统的效果以及对火灾的影响
1985 年	德国	盖尔森基兴—俾斯麦市的地铁隧道	得出在不同通风方式和火灾荷载下温度与火灾持续时间关系
1989 年	中国广州铁路局科研所、铁科院西南所	四川华蓥山矿务局救护大队的训练巷道 1:3 断面模拟试验	探索长隧道的消防方法
1990 ~ 1992 年	西欧 9 国联合试验	Repparfjord 隧道,在长达 2.3km 的采矿导洞中进行	测试的内容包括空气和墙壁的温度、流速、不透明度、气体浓度、烟雾运动
1993 年	中国铁科院西南分院	四川芙蓉矿务局救护消防大队训练巷道	易燃液体在密闭空间内燃烧时间的测定
1993 ~ 1995 年	美国	长 850m 的 Memorial 隧道	全横向和纵向通风方式防灾

总的来说,在运营前或运营时的隧道中进行试验和全比例试验不需要进行相似换算,更加接近实际。因此,在长大隧道中,PIARC 推荐采用这种试验方法。然而该试验成本高昂,有的试验计划耗资达到数千万美元,这些因素都大大制约了试验进行时间、限制了试验数量。

与全尺度火灾试验相比,以相似理论、量纲分析为基础的小比例模型试验方法,在经济性和可操作性上表现出更大的优越性。它是按一定比例缩小的模拟试验,是对真实地铁或隧道的简化。但是对于一个待建或改建的地铁系统,可用的环控方案有很多种,但是哪种方案最优,并没有明确的结论。如采用试验研究的方法,工作量非常巨大,另外地铁运行过程非常复杂,模型模拟很难准确反映实际情况,因此地铁环控的研究主要采用数值模拟的研究方法^[43-63]。

目前应用广泛的方法是有限元法和有限差分法,在计算流体力学(CFD)中不失为有效的方法。有限元法被广泛地应用于地铁和隧道的计算中,有限差分法主要是应用在地铁与隧道内气流流动、温度分布以及火灾时烟气控制。另外特征线法在空气流动非稳定过程的解算中也得到了一定的应用,它的定义就是将偏微分方程用等价的特征线来代替,推导出特征线方程和相容性方程,将复杂的偏微分方程转化为较为简单的常微分方程求解,主要优点是计算量相对较小,差分的稳定性也较好。

刘柏林^[64]对夹活岩隧道通风竖井及风机房设计进行了研究。介绍了该隧道竖井通风

系统竖井井位、竖井断面、竖井井身结构以及地下风机房的总体设计及施工情况。认为首先从功能上满足运营通风设计的要求,再根据风机型号及功率等确定风机房和运输通道的大小。魏军政^[65]对秦岭终南山特长公路隧道通风站设计进行了研究。主要介绍了秦岭终南山特长公路隧道通风系统的各部分组成、设计思路,以及通风系统设计中所考虑的主要问题,并就通风系统结构复杂的地下风机站作了重点介绍,主要论述风机房尺寸的拟定、机房的内部组成、设计的基本思路。辛国平^[66]以石忠高速公路方斗山隧道专用通风斜井井底地下风机房为例,介绍了该类型地下风机房的施工技术方案的和大跨度平坦状隧道施工技术、交叉口施工技术、现场监控量测等关键施工技术。

由此可以看到,针对地下空间,特别是地铁等公共设施的环境设计、防灾设计,目前已经开展了许多研究,而针对公路隧道地下风机房的研究主要在于对风机房的功能、组成及结构等的讨论,地下风机房内环境、防灾设计的研究目前还处于空白状态,国外可供借鉴的实例也不多^[67-71]。

地下风机房与外界环境封闭,隧道内的污染空气和烟尘往往会扩散到风机房中产生积聚,从而对地下风机房的人员和设备产生影响。同时,风机房内发生灾害也会对隧道环境产生影响。由于地下结构的封闭性,发生火灾后有烟气浓度大、温度高、救援困难、危害大等特点,因此地下风机房内环境控制和防灾设计是重要的,也是必要的。