

北京高等学校青年英才计划项目

Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project

地铁火灾 数值模拟技术

DITIE HUOZAI SHUZHIMONI JISHU

闫宁 著



中国劳动社会保障出版社

“北京高等学校青年英才计划项目”

Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project

地铁火灾数值模拟技术

闫 宁 著

(著作者所在单位: 北京政法职业学院)



中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

地铁火灾数值模拟技术/闫宁著. —北京: 中国劳动社会保障出版社, 2015

ISBN 978-7-5167-1841-4

I. ①地… II. ①闫… III. ①地下铁道-火灾-数值模拟 IV.
①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 102010 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

*

北京市艺辉印刷有限公司印刷装订 新华书店经销

880 毫米×1230 毫米 32 开本 5.5 印张 108 千字

2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

定价: 15.00 元

读者服务部电话: (010) 64929211/64921644/84643933

发行部电话: (010) 64961894

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

如有印装差错, 请与本社联系调换: (010) 80497374

我社将与版权执法机关配合, 大力打击盗印、销售和使用盗版图书活动, 敬请广大读者协助举报, 经查实将给予举报者奖励。

举报电话: (010) 64954652

目 录

第一章 绪论 (1)

- 一、概述 (1)
- 二、各国地铁介绍 (3)
- 三、火灾事故在地铁安全事故中的重要性 ... (6)
- 四、地铁环控系统的研究进展 (8)
- 五、地铁环控系统研究方法及存在的问题 ... (13)
- 六、数值模拟技术在地铁火灾研究中的应用 ... (16)
- 七、数值模拟技术在地铁领域的研究进展 ... (19)

第二章 地铁火灾火源特性描述 (23)

- 一、地铁火灾燃烧特性 (23)
 - 1. 地铁火灾特点 (23)
 - 2. 燃烧过程和蔓延形式 (25)
 - 3. 地铁火灾的发展过程 (27)
 - 4. 地铁站台火灾烟气流动的特点 (28)
- 二、地铁火灾可燃物及燃烧产物分析 (33)

1. 可燃物分析	(33)
2. 燃烧产物分析	(33)
三、燃烧的模拟方法	(35)
1. 湍流燃烧模拟方法	(35)
2. 非预混燃烧模型	(37)
3. 湍流的 PDF 燃烧模型	(38)

第三章 地铁火灾场模拟理论基础

(43)

一、地铁火灾场模拟技术原理	(43)
二、地铁火灾流场的物理数学模型	(45)
1. 基本假设	(45)
2. 基本守恒方程	(46)
3. 标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型	(47)
4. 定解条件	(50)
5. 数值计算方法	(54)

三、CFD 软件介绍

(59)

1. 常用 CFD 软件	(59)
2. FLUENT 软件的基本功能及在本模拟中的作用 ..	(61)
3. FLUENT 的前处理软件 GAMBIT	(64)
4. FLUENT 的后处理软件 TECPLOT	(65)

第四章 基于 CFD 技术的地铁火灾通风方案 优化研究

(67)

一、地铁火灾通风系统运行模式概述	(69)
------------------------	--------

1. 车站的防排烟系统	(69)
2. 通风系统运行模式	(69)
3. 通风系统运行模式实例分析	(70)
二、地铁火灾的火源位置及功率	(76)
1. 火源位置	(76)
2. 火源功率	(78)
三、人员安全疏散判定条件	(79)
1. 温度条件	(79)
2. 浓度条件	(81)
3. 出入口风向及风速条件	(83)
四、基于 CFD 技术的地铁站台火灾通风 系统优化模式	(86)

第五章 地铁火灾 CFD 数值模拟

一、数学模型的实验验证	(88)
1. 实验概述	(88)
2. 实验过程	(88)
3. 实测值与计算机模拟结果的对比分析	(90)
二、数值模拟场景描述	(94)
1. 地铁站台的物理模型	(94)
2. 边界条件与火源参数	(95)
三、站台中心区域火灾数值模拟	(96)
1. 固定火源功率的计算模拟	(96)

2. 不同火源功率数值模拟的对比分析	(114)
3. 分析总结	(124)
4. 通风方案的优化及模拟结果分析	(129)
四、站台列车火灾数值模拟	(158)

参考文献	(169)
------------	-------

第一章

绪论

一、概述

伴随着世界范围内城市化发展的进程，地下轨道交通在各主要大中城市的客流运输中扮演着越来越重要的角色。地铁交通具有客流输运能力大、准时、快捷的特点，可以有效缓解大城市交通的巨大压力，据统计，我国目前已建有地铁的城市有北京、天津、香港、上海、广州等，在建和规划建设地铁的城市有东莞、无锡、青岛等。至2016年我国将建成总里程共计2 500 km的89条城市轨道交通线路，而在未来30年我国城市轨道交通将进入建设发展的黄金时代。随着城市轨道交通规模的不断扩大，同时由于地铁运行所具有的特点，地铁火灾的防范和应急处理问题也凸显出来。

随着地下交通建设的快速发展，地铁火灾预防作为公

公共安全的重要内容越来越受到人们的重视，不断发生的重大地铁火灾安全事故给社会造成了巨大的损失。地铁系统与外界连通的出入口少，发生火灾后，烟流和热量不能及时排出，聚集的热量使温度迅速上升。由于地下空间相对封闭和火灾状态下通风能力的限制导致燃烧不充分，一氧化碳、二氧化碳等有毒有害气体的浓度迅速增加。高温烟流的扩散流动不仅加速燃烧的蔓延，降低能见度，而且使疏散和灭火工作变得困难，是地铁火灾导致人员伤亡的主要原因。1987年11月18日，伦敦地铁金·克罗斯站发生大火，由于站内设备陈旧，对火灾初期的反应及报警不及时，酿成31人死亡、100多人受伤的惨剧；1995年10月28日，阿塞拜疆巴库地铁发生火灾事故，导致558名乘客丧生、269人严重受伤；2003年2月18日，韩国大邱市中央路地铁车站因纵火造成火灾，造成198人死亡、147人受伤。据不完全统计，日本在1961年至1975年共发生地铁火灾45起，平均每年3起；北京地铁自1969年至今就曾发生过156起火灾，2004年2月4日，正在建设的北京地铁5号线张自忠路车站突然发生火灾，所幸没有造成人员伤亡。

与地面建筑相比，地铁系统是在地下通过开挖、修筑而成的建筑空间，它的周围是土壤和岩石，只有内部空间，没有外部空间，不能开设窗户。由于施工困难及造价等原因，与建筑外部相连的通道少，而且宽度、高度较小，由此决定了其火灾特征与地上建筑有着很大的差别，

采取的火灾防治对策也应当有所不同。目前,我国对地铁系统建筑设计防火问题没有相应的规范,也缺乏有关的研究资料,特别是那些建成较早的地铁系统,由于历史原因和技术条件,对地铁系统火灾特点和防治技术的研究比较薄弱,随着城市地铁运行规模的不断扩大,应该对地铁火灾的研究给予足够的重视。

由于地铁环境的特殊性,如何确定地下空间区域的流场分布,制定合理的通风、排烟方案,从而为人员的安全疏散创造良好的环境,成为具有重要研究意义的课题。

由于地铁空间的复杂性和系统运行的独特性,人们对地铁站台区域火灾烟气流动规律缺少足够的认识,也缺少相应的实验数据积累。随着计算机技术的飞速发展以及各种模型和算法的不断完善,CFD数值模拟技术由于具有快速、定量的特点及研究成本的优势而在近些年得到越来越多的应用。

二、各国地铁介绍

1863年1月10日,英国伦敦开通了第一条地铁线路,它标志着城市地下快速轨道交通的诞生。

世界第一条地下铁道的诞生,为人口密集的大都市发展公共交通积累了宝贵的经验,从此以后,世界上一些著名的大都市相继建造地下铁道。波士顿地铁开通于1897年,它是北美最早的地铁。纽约地铁于1901年动工修建,

1904年1月正式开通运行。随着纽约城市规模的扩大,城市人口不断增加,地铁建设也在不断地发展。目前,纽约地铁线路总长度约373 km,其中地下隧道208 km,共设置车站468座,地铁车辆保有总数6 000辆以上,年客运总量已突破17亿人次。美国的地铁以纽约地铁的规模最大,华盛顿地铁的装修最华丽,芝加哥地铁的自动化程度最高。

首尔地铁于1974年开通第一条线路,现共有19条线路,长度为983 km,轨距为1 435 mm,最小曲线半径为400 m,最大坡度为3.5%,车站数量为622座。

莫斯科地铁举世闻名,至今仍是世界三大地铁之一,始终是俄罗斯人民的骄傲。每一个来到莫斯科的外国游客都必定要去地铁参观,就如同到北京不能不去长城一样。莫斯科第一条地铁线路于1935年5月15日开通,长11.2 km。它是第一条由国家规划、投资建设的地铁线路,因此从一开始就同城市发展紧密相连,且处处以广大人民的利益为出发点。经过多年的不断建设,目前莫斯科地铁的规模已十分宏伟。打开莫斯科地铁图,可以看到纵横交错的12条线路,且以一条环线将其相连,形成了四通八达的地下交通网。其隧道长度达521.1 km,道路长度达703.7 km,每天运送乘客900万人次,承担着全市56%的客运量。可以毫不夸张地说,要是没有地铁,莫斯科的交通状况将难以想象。

巴黎是一座建立在地铁上的城市。巴黎地铁诞生于

1900年7月19日,经过一个多世纪的发展,如今已拥有纵横交错的16条线路,总长220 km,设有303个车站。虽是地铁,但列车也不时从地下钻出地面,在高架桥上行驶。巴黎地铁是工薪阶层和游客最理想的交通工具,它为缓解市内的交通发挥了重要作用。据统计,巴黎地铁日客运量近421万人次。巴黎的地铁布局合理。在市区,每平方千米至少有3个地铁站,人们无论住在市区的哪个位置,出门只需步行10~15 min,都可以找到标有M字样的地铁站。

日本地铁着重开发主要车站及其邻近的公众聚集场所,这些场所能促进地下商业中心的建设,而且与地下车站连成一片,使地铁这一公益性基础设施获得了新的活力,取得了较好的经济效益和社会效益。

新加坡地铁的特点是舒适、网络化。新加坡地铁又称“大众捷运系统”,始建于1988年。目前地铁线路总长约128.6 km,有109个车站,东西及南北纵横两条主干线将机场、码头、商业中心和居民聚居的新城镇连接起来。

我国地铁发展起步较晚,1969年10月北京地铁建成通车,标志着我国第一条地铁的诞生,到2014年,我国共有25个城市开通了地铁,分别是北京、上海、天津、重庆、香港、台北、高雄、广州、深圳、佛山、南京、苏州、无锡、杭州、宁波、沈阳、大连、武汉、成都、长沙、郑州、哈尔滨、昆明、西安、长春。而如果算上正在

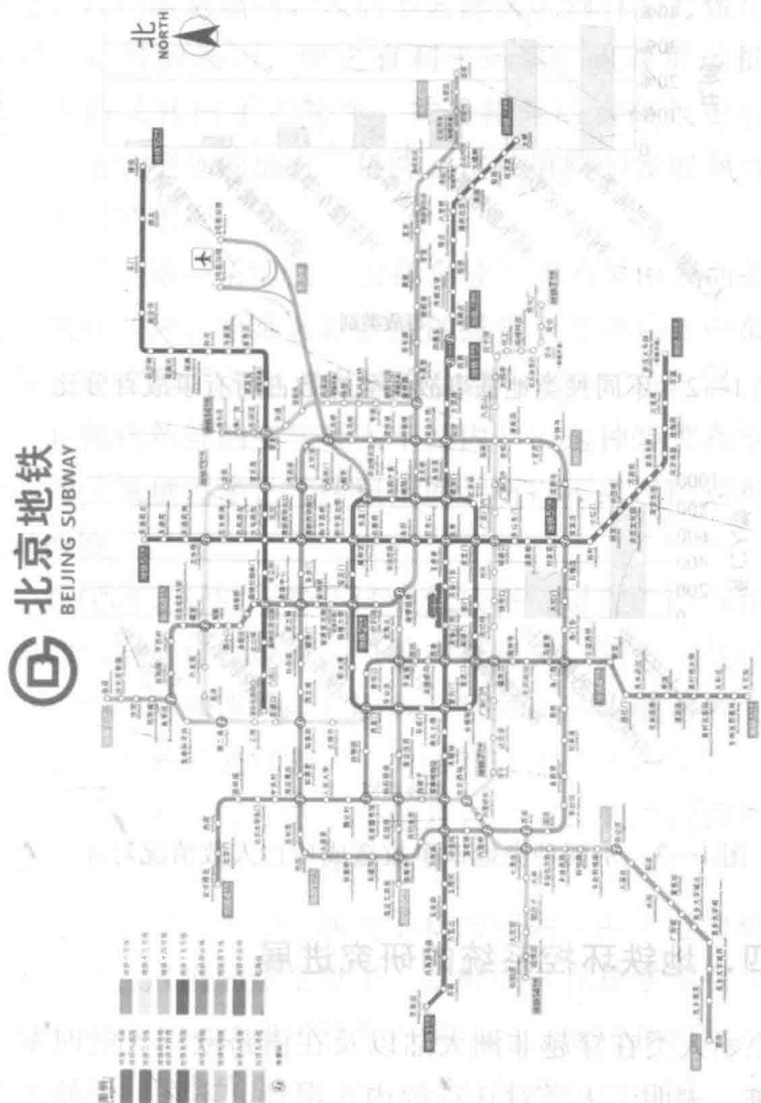
建设地铁的城市，这将是一个更为庞大的数字。

随着北京地铁 10 号线、9 号线、8 号线、6 号线的开通，北京地铁正式进入网络化运营阶段，同时，上海、广州、南京等城市的轨道交通也相继进入网络化运营管理时代，总长 561 km 的北京地铁网络将实现“三环、四横、五纵、七放射”的城市轨道交通网络，如图 1—1 所示为 2015 年北京地铁网络。

三、火灾事故在地铁安全事故中的重要性

地铁系统由许多环节组成，因此地铁事故也由若干因素组成，如电路起火、列车脱轨、拥挤踩踏等。任何环节发生故障，都有可能造成地铁事故的发生。据统计，在这些事故中，人为纵火或恐怖袭击发生的次数最多，列车火灾事故其次，不同种类地铁事故发生次数占所有事故百分比如图 1—2 所示。另外，地铁是一个相对封闭的场所，并且作为城市交通的重要工具，每天的人流量很大，一旦发生事故，极易造成群死群伤，不同种类地铁事故造成死亡人数情况对比如图 1—3 所示。

通过图 1—2 可以看出，人为纵火或恐怖袭击和列车火灾事故发生的频率最高，共占事故发生频率的 68%，是其他几类事故发生频率总和的两倍还多。可见，火灾事故应该引起人们足够的重视。



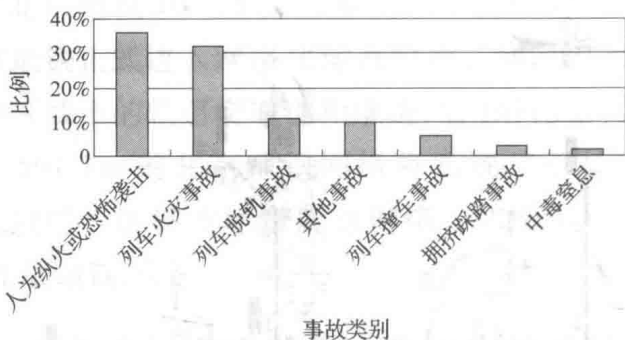


图 1—2 不同种类地铁事故发生次数占所有事故百分比

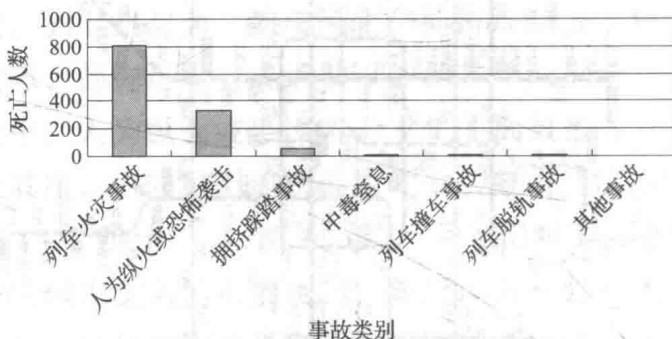


图 1—3 不同种类地铁事故造成死亡人数情况对比

四、地铁环控系统的研究进展

原始人类在穿越非洲大陆以及在横跨欧洲大陆时留下的痕迹，表明了人类对迁徙的内在渴望。不久，原始人学会了在雪橇上运送重物。公元前 4000 年，美索不达米亚

地区的居民发明了车轮，随后出现两轮马车。早期的车轮很宽，以便运送重物，人们不久便认识到有必要做出一种坚固、光滑的表面，使之有利于运输。随着货运量的增加，人们又转向了四轮车，并且修建的道路也更直、更好，能通到更远的地方。最终，这种道路的发展导致了铁路在英国的出现。

世界上第一条地铁“大都会号”的通风由表面是格栅的通风孔送风，给乘客以舒适的感觉。几年后，中部伦敦地铁公司安装了名为“臭氧发生器”（空气净化器）的装置。它能将新鲜的空气吸入车站，但这种装置在空气中加入的臭氧量过多，气味很难闻，所以不久以后这种装置也被废弃了。

在伦敦进行的一些尝试还包括将隧道中的空气用功率强大的风扇从特别设计的风管中排出去，新鲜空气经车站入口、楼梯间和通风竖井引入。另外，还将隧道内的列车作为一种主要的通风方式，为增加这种“活塞效应”的通风作用，新鲜空气在进入车站月台之前，先经过设在阶梯形竖井和特殊井口中的通风通道。

电力机车引入时又遇到了新的问题。由于电力机车的功率很大，放出的热量更多，新鲜空气在被强制引入车站月台的同时，也要被强制送入隧道内，以防止由于这种大功率发动机而造成温度升高。散热量增加的同时，由于客运量的增大，伦敦地铁内形成了一种难以忍受的窒息状态。

Hugh B. Wilson, 一位来自美国密歇根州的人, 深深地被地铁的优点所吸引, 他参加了 1863 年“大都会号”的揭幕仪式, 并决心为纽约市也修建类似的地下交通系统。遗憾的是他的提议没有被纽约市议会接受, 提案被搁置在一边。但是, Wilson 提出了第一份在早期地铁设计中有关环境考虑的设想, 该方案包括一个由美国工程师 A. P. Robinson 提出的地铁换气的问题。Robinson 设想由设在街道两旁的煤气灯灯柱中间的管子通风, 这些灯柱之间间隔约为 30.5 m (100 ft), 耸立在地铁通过的街道两旁。这样, 又过了很多年, Wilson 的计划才真正得以付诸实施。当纽约地铁于 1901 年动工修建时, 对于隧道和车站的强制通风并未给予特别的考虑。设计人员认为人行道上的格栅通风口和列车在隧道中运行所产生的活塞风就能提供足够的通风空气。

1904 年 10 月, 纽约的第一条地铁开通运行。但是开通不到一年, 由于地面通风口不足而引起的地铁内温度过高的问题变得严重起来。为增加通气量, 车站的顶部设置了更多的通风口, 车站之间还修建了风机室和通风管。

在通常情况下, 地铁的通风问题几乎完全是依靠列车的“活塞效应”来解决的, 排气扇只在紧急情况下才打开。建成于 1943 年的芝加哥地铁及 1954 年开通的加拿大多伦多地铁早期都是采用“活塞效应”来通风的。采用这种方法, 早期芝加哥车站的温度保持在 $4 \sim 22^{\circ}\text{C}$ 之间, 相