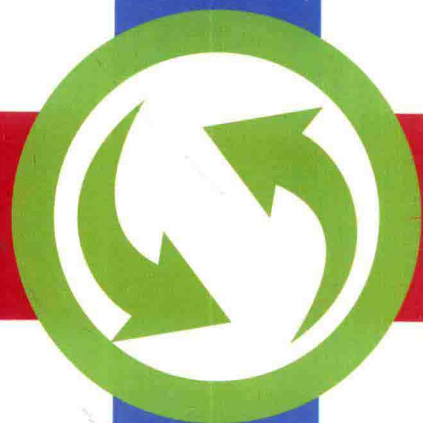
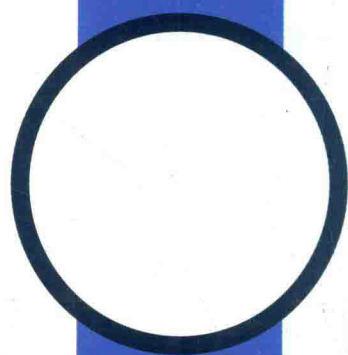




# 大型地铁换乘站 火灾安全技术

李炎锋 著



 科学出版社

# 大型地铁换乘站 火灾安全技术

李炎锋 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书结合新版《地铁设计规范》(GB 50517—2013)对地铁换乘站火灾安全的若干问题进行研究。本书重点对在单个地铁车站火灾安全研究的基础上对换乘站的火灾场景设计,不同形式换乘站的气流组织、烟气扩散、通风排烟技术,人员安全疏散以及火灾风险评估进行研究。

本书可供从事地铁系统及其他城市地下空间相关的火灾研究、火灾安全咨询与评估、防火安全检查与管理、消防系统设计的技术人员参考,也可作为高等院校安全工程与技术、建筑环境与设备工程(暖通)、建筑学、城市地下空间工程等专业的师生的教学、科研用参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

大型地铁换乘站火灾安全技术/李炎锋著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-044554-4

I. ①大… II. ①李… III. ①地下铁道车站—换乘站—消防—安全工程  
IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 126450 号

责任编辑: 王 钰 / 责任校对: 刘玉靖

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 东方人华

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717  
<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 13

字数: 250 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62130750

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

地铁以其运量大、快速、准时、便捷、安全和环保等突出特点和优势,已成为各大城市解决交通拥堵问题的首选交通方式。当前,我国城市轨道交通处于快速发展时期,很多城市的轨道交通已经由单线运营进入网络化运营时代。为了保证城市轨道交通运营安全、健康、平稳、有序发展,最终实现“平安型地铁”的目标,必须加强网络化运营所面临风险的安全管理,作为地铁交通网络节点的地铁换乘站的安全成为网络化运行的关键。为了适应大型、复杂形式地铁车站的发展需求,结合我国地铁工程建设和运营方面的新经验并借鉴国(境)内外地铁的成功经验和技术,2013年国家颁布了《地铁设计规范》(GB 50517—2013),并于2014年3月正式实施。此外,《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)于2015年5月正式实施,地铁车站防火设计进入了一个新的阶段。

地铁系统涉及的灾害包括火灾、震灾、水灾以及新生灾害(如恐怖袭击)等。地铁一旦发生火灾,危害性大、人员伤亡多、疏散与救援难度高,因此火灾受到的重视程度最高,《地铁设计规范》明确规定以预防火灾为主。多起地铁事故调查结果表明,人员伤亡的主要原因是吸入不完全燃烧所产生的大量高温、有毒气体而导致的窒息。地铁消防重要措施之一是通过有效的通风、防排烟来控制烟气扩散,从而增加人员疏散的安全时间,加强消防救援和减少人员伤亡。

随着地铁换乘站数量的日益增多,换乘站复杂的空间结构特点、人流特征使得火灾时烟气的蔓延和疏散规律变得极为复杂,消防安全技术要求比单个地铁车站难度更大。开展地铁换乘站的火灾安全技术研究对于提高我国地铁系统安全建设与运营水平具有重要的指导意义。

本书结合新版《地铁设计规范》对地铁换乘站的火灾安全技术的若干问题进行研究,即以换乘站的结构、人流、消防系统设置为依托,在单个地铁车站研究的基础上主要对换乘站的火灾场景设计、不同形式换乘站的火灾烟气扩散、通风排烟技术、人员安全疏散动力学以及火灾风险评估进行研究。同时,作者对地铁车站消防工程设计的新理论、新方法和实验研究及数值模拟技术进行了介绍。

全书共分为五章:第一章为总论,主要介绍我国地铁发展现状、火灾危害、地铁消防系统以及换乘站火灾安全面临的挑战。第二章系统介绍地铁系统火灾烟气运动理论基础,包括火灾场景设计、火灾烟气扩散与控制技术的相关理论。第三章介绍地铁车站火灾数值模拟研究的相关理论和方法,并对不同类型(“十”字形、“T”形、“L”形)地铁换乘站的火灾烟气扩散开展研究,对气流组织形式、烟气运动规律和通风排烟模式效果进行分析。第四章介绍地铁车站现场全尺寸试

验以及比例模型实验要求,并分析对比国内部分学者的车站火灾实验研究成果。第五章介绍地铁火灾工况下紧急疏散的理论、疏散模型及疏散策略;以某典型的“十”字形换乘站为原型,结合数值研究结果,系统研究了地铁换乘站火灾时人员疏散特性和疏散时间,并对换乘站进行火灾安全风险评估,结合评估结果对换乘站的消防应急预案制定提出建议。

李炎锋教授拟定了全书大纲并负责全书的统稿工作。李俊梅副教授参与第三章、第五章部分内容的撰写工作。第三章数值模拟研究部分引用了作者指导的研究生王超、侯丛兰、王鲁鹏、张亦昕、侯昱晟许多研究资料。第四章地铁车站火灾现场试验部分是与国家自然科学基金合作单位中国建筑科学研究防火所教授级高工李磊合作完成,地铁比例模型试验部分是与樊洪明教授合作完成。第五章内容来自作者与北京市劳动保护科学研究所吕良海高工、张晋工程师合作申请的北京市科学技术研究院创新团队计划项目的部分研究成果。北京工业大学建筑环境与设备工程系研究生张亦昕、侯昱晟、赵刚、边江、徐聪聪、尹晨晨、张仁、褚利为、石勃伟、梁强等参加了部分章节的撰写和修改工作,以及一些具体文字、图、表等内容的完善工作,在此一并向他们表示感谢。

撰写本书过程中参阅并引用了国内外同行专家的相关研究成果,在参考文献中已尽力予以列出,但难免会有遗漏。在此对这些专家表示衷心的感谢。

本书主要基于作者及合作团队多年来的研究成果撰写而成,并适当吸纳了国(境)内外同行在地铁车站火灾领域的相关研究内容。本书相关内容的研究工作得到国家自然科学基金面上项目(51378040)、“2011 计划”项目-北京城市交通协同创新中心、北京市自然科学基金委员会-北京市科学技术研究院联合资助项目(14L00001)、北京市科学技术研究院创新团队课题“大型城市地下空间风险评估与防灾减灾技术研究”(IG20126N)、城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放重点课题“城市地下综合交通枢纽多点火灾烟气扩散及控制技术研究”、北京市科技计划课题“地下综合交通工程枢纽工程的安全风险分析与评价”和“北京地铁火灾烟气控制计算机模拟与排烟应急预案研究”的资助。北京工业大学杜修力教授对本书相关内容的“城市地下空间火灾安全技术”研究领域的工作给予了大力支持,在此一并表示衷心感谢。

虽然作者在撰写过程中尽了自己最大的努力,但由于水平有限加上时间仓促,疏漏之处在所难免,敬请读者及同行不吝指教,以臻完善。

作 者

2015年5月

# 目 录

## 前言

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 总论 .....                    | 1  |
| 1.1 城市地铁系统发展 .....              | 1  |
| 1.1.1 地铁系统现状 .....              | 1  |
| 1.1.2 地铁系统的功能特征和发展趋势 .....      | 2  |
| 1.2 地铁系统发生火灾的危害性 .....          | 5  |
| 1.2.1 地铁系统的组成及地铁站形式的划分 .....    | 5  |
| 1.2.2 地铁火灾特点及危害 .....           | 6  |
| 1.2.3 国内外地铁火灾事故案例 .....         | 7  |
| 1.3 地铁消防系统设计现状 .....            | 10 |
| 1.3.1 地铁消防系统设计相关标准 .....        | 10 |
| 1.3.2 地铁火灾的归类 .....             | 10 |
| 1.3.3 地铁消防系统组成 .....            | 11 |
| 1.3.4 地铁车站通风排烟系统 .....          | 12 |
| 1.3.5 地铁车站公共区防火分区和防烟分区的划分 ..... | 14 |
| 1.3.6 地铁消防系统的管理 .....           | 15 |
| 1.4 地铁换乘站火灾安全面临的挑战 .....        | 16 |
| 1.4.1 地铁换乘站的主要形式 .....          | 16 |
| 1.4.2 地铁换乘站防排烟系统的特点 .....       | 17 |
| 1.4.3 地铁换乘站火灾安全的技术难点 .....      | 18 |
| 1.5 地铁换乘站火灾安全国内外研究现状 .....      | 21 |
| 1.6 本书主要内容 .....                | 23 |
| 参考文献 .....                      | 24 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第二章 地铁车站火灾烟气运动理论及控制技术 .....    | 29 |
| 2.1 地铁系统火灾场景设计 .....           | 29 |
| 2.1.1 火灾场景定义 .....             | 29 |
| 2.1.2 地铁车站火灾场景设计 .....         | 29 |
| 2.1.3 地铁站火灾热释放率曲线 .....        | 33 |
| 2.1.4 地铁换乘站场景设计需要考虑的特殊因素 ..... | 35 |

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| 2.2   | 地铁火灾烟气产生量                       | 35 |
| 2.2.1 | 烟气的生成量设定                        | 36 |
| 2.2.2 | 地铁车站火灾强羽流模型                     | 38 |
| 2.2.3 | 两类烟气生成量计算方法的比较                  | 40 |
| 2.3   | 地铁车站火灾烟气扩散相关理论                  | 40 |
| 2.3.1 | 地铁站内火灾烟气流动特征                    | 40 |
| 2.3.2 | 地铁车站火灾烟气扩散相关理论                  | 42 |
| 2.3.3 | 地铁车站火灾烟气层沉降规律                   | 43 |
| 2.3.4 | 机械排烟状态下的烟气流动规律                  | 46 |
| 2.3.5 | 地铁车站竖直开口烟气溢流规律                  | 48 |
| 2.3.6 | 站台楼梯、扶梯通道烟气扩散控制规律               | 49 |
| 2.4   | 地铁车站火灾烟气控制模式                    | 52 |
| 2.4.1 | 地铁站台门系统                         | 52 |
| 2.4.2 | 单个地铁车站火灾烟气控制模式                  | 53 |
|       | 参考文献                            | 56 |
| 第三章   | 地铁换乘站火灾烟气扩散的数值分析                | 59 |
| 3.1   | 火灾过程湍流燃烧模型                      | 59 |
| 3.2   | 火灾烟气扩散 Reynolds 时均方程法以及大涡模拟研究理论 | 60 |
| 3.2.1 | Reynolds 时均方程法                  | 60 |
| 3.2.2 | 大涡模拟法                           | 62 |
| 3.3   | 地铁换乘站烟气控制数值模拟技术要点及研究现状          | 65 |
| 3.3.1 | 换乘站火灾烟气控制数值模拟技术要点               | 65 |
| 3.3.2 | 地铁防排烟系统的数值模拟研究现状                | 68 |
| 3.4   | 地铁“十”字形换乘站火灾烟气扩散研究              | 69 |
| 3.4.1 | “十”字形换乘站的消防技术特点                 | 69 |
| 3.4.2 | “十”字形岛-岛换乘火灾工况分析                | 69 |
| 3.4.3 | 模拟结果及分析                         | 72 |
| 3.4.4 | “十”字形岛-侧换乘火灾工况分析                | 82 |
| 3.4.5 | 火灾场景及数值模拟边界条件设定                 | 83 |
| 3.4.6 | 火灾工况模拟结果数据                      | 84 |
| 3.4.7 | 研究结论                            | 90 |
| 3.5   | 地铁“T”形换乘站火灾烟气扩散研究               | 91 |
| 3.5.1 | “T”形换乘站的结构特点和消防技术难点             | 91 |
| 3.5.2 | 站厅换乘的“T”形换乘站的火灾工况设置             | 92 |
| 3.5.3 | 换乘站火灾模拟结果                       | 94 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 3.5.4 | 采用联络通道换乘的“T”形地铁换乘站火灾研究 | 99  |
| 3.5.5 | 站台火灾模拟结果及分析            | 101 |
| 3.5.6 | 结论                     | 105 |
| 3.6   | 地铁“L”形换乘站火灾烟气扩散研究      | 106 |
| 3.6.1 | “L”形换乘站的特点             | 106 |
| 3.6.2 | “L”形岛-岛换乘火灾工况设置        | 107 |
| 3.6.3 | “L”形换乘站火灾数值模拟结果及分析     | 109 |
| 3.6.4 | 结论                     | 118 |
| 3.7   | 本章小结                   | 118 |
| 3.7.1 | “十”字形换乘站               | 119 |
| 3.7.2 | “T”形换乘站                | 119 |
| 3.7.3 | “L”形换乘站                | 120 |
|       | 参考文献                   | 121 |
| 第四章   | 地铁车站火灾工况实验研究           | 125 |
| 4.1   | 地铁车站的现场火灾试验研究          | 125 |
| 4.1.1 | 地铁车站火灾现场试验的意义          | 125 |
| 4.1.2 | 现场热烟试验的标准              | 126 |
| 4.1.3 | 地铁车站现场热烟试验的研究进展        | 128 |
| 4.2   | 地铁车站火灾比例模型实验研究         | 133 |
| 4.2.1 | 地铁车站火灾比例模型实验设计思想       | 133 |
| 4.2.2 | 地铁车站火灾比例模型实验的相似准则      | 134 |
| 4.2.3 | 国内外关于地铁车站比例模型实验的研究现状   | 137 |
| 4.3   | 地铁换乘站车站火灾实验研究思路        | 140 |
|       | 参考文献                   | 141 |
| 第五章   | 地铁车站火灾安全疏散及风险评估        | 143 |
| 5.1   | 地铁车站火灾人员安全疏散策略         | 143 |
| 5.1.1 | 地铁系统火灾情况人员安全疏散的研究意义    | 143 |
| 5.1.2 | 地铁车站疏散的设施以及疏散策略        | 143 |
| 5.2   | 地铁车站火灾人员安全疏散准则         | 151 |
| 5.2.1 | 火灾安全疏散准则               | 151 |
| 5.2.2 | 火灾环境下的人员行为特性           | 156 |
| 5.2.3 | 人员疏散模型                 | 157 |
| 5.3   | 地铁车站火灾人员安全疏散研究         | 163 |
| 5.3.1 | FDS+Evac 疏散模型的理论基础     | 164 |



|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 5.3.2 | 换乘站疏散火灾案例 .....          | 166 |
| 5.3.3 | 采用 STEPS 软件模拟换乘站疏散 ..... | 173 |
| 5.3.4 | 两种模拟方法的结果比较分析 .....      | 177 |
| 5.4   | 地铁车站火灾风险评估 .....         | 178 |
| 5.4.1 | 风险评估的主要内容与评价体系 .....     | 179 |
| 5.4.2 | 地铁车站火灾风险评估 .....         | 179 |
| 5.4.3 | 风险评估方法 .....             | 183 |
| 5.4.4 | 地铁车站火灾风险案例研究 .....       | 185 |
| 5.5   | 地铁车站火灾应急预案 .....         | 189 |
| 5.5.1 | 地铁事故等级分类 .....           | 189 |
| 5.5.2 | 应急预案 .....               | 190 |
| 5.5.3 | 地铁车站火灾应急预案框架 .....       | 192 |
| 5.5.4 | 地铁车站站台火灾的应急响应程序案例 .....  | 193 |
| 5.6   | 地铁换乘站消防系统资源共享与管理 .....   | 194 |
|       | 参考文献 .....               | 196 |

# 第一章 总 论

## 1.1 城市地铁系统发展

### 1.1.1 地铁系统现状

随着我国城市化进程加快，城市人口规模和空间规模不断扩大，交通拥堵已成为大城市最突出的问题，严重地制约和阻碍了城市的健康和可持续发展。

地铁具有载客量大，运行快捷、安全、准时、舒适，运营费用低，环境污染小，综合经济效率高等特点，它是解决城市道路交通阻塞和居民乘车难等问题的有效途径。地铁是城市最重要的公共交通工具之一，也是城市现代化的重要标志。目前，地铁成为城市公共交通的主要发展方向，全世界已有越来越多的城市建成或正在建设自己的地铁交通系统。

自 1863 年 1 月第一条地铁线在英国伦敦建成通车以来，地铁交通在 140 多年间得到了迅猛发展，目前世界上很多大城市都拥有发达的地铁交通系统。伦敦地铁是世界上建成最早的地铁，通车里程达 402km，其他城市如俄罗斯莫斯科、美国纽约、西班牙马德里、日本东京都拥有长度超过 300km 以上的地铁网络。表 1.1 给出 2012~2014 年（截至年度 12 月 31 日）世界上地铁线路长度排名前 10 名的城市及其地铁长度<sup>[1]</sup>。

表 1.1 地铁线路长度排名前 10 名的城市及其地铁长度

| 2012 年<br>排名 | 国家   | 城市  | 地铁长<br>度/km      | 2013<br>年排名 | 国家   | 城市  | 地铁长<br>度/km      | 2014 年<br>排名 | 国家   | 城市  | 地铁长<br>度/km        |
|--------------|------|-----|------------------|-------------|------|-----|------------------|--------------|------|-----|--------------------|
| 1            | 中国   | 北京  | 442              | 1           | 中国   | 上海  | 469 <sup>①</sup> | 1            | 中国   | 上海  | 548.0 <sup>①</sup> |
| 2            | 中国   | 上海  | 439 <sup>①</sup> | 2           | 中国   | 北京  | 465 <sup>②</sup> | 2            | 中国   | 北京  | 527 <sup>②</sup>   |
| 3            | 英国   | 伦敦  | 402 <sup>③</sup> | 3           | 英国   | 伦敦  | 402 <sup>③</sup> | 3            | 英国   | 伦敦  | 402 <sup>③</sup>   |
| 4            | 澳大利亚 | 墨尔本 | 372              | 4           | 澳大利亚 | 墨尔本 | 372              | 4            | 澳大利亚 | 墨尔本 | 372                |
| 5            | 美国   | 纽约  | 369              | 5           | 美国   | 纽约  | 369              | 5            | 美国   | 纽约  | 369                |
| 6            | 日本   | 东京  | 326 <sup>④</sup> | 6           | 日本   | 东京  | 326 <sup>④</sup> | 6            | 日本   | 东京  | 326 <sup>④</sup>   |
| 7            | 韩国   | 首尔  | 314 <sup>⑤</sup> | 7           | 韩国   | 首尔  | 314 <sup>⑤</sup> | 7            | 韩国   | 首尔  | 314 <sup>⑤</sup>   |
| 8            | 俄罗斯  | 莫斯科 | 306              | 8           | 俄罗斯  | 莫斯科 | 312.9            | 8            | 俄罗斯  | 莫斯科 | 312.9              |
| 9            | 西班牙  | 马德里 | 284              | 9           | 西班牙  | 马德里 | 284              | 9            | 西班牙  | 马德里 | 284                |
| 10           | 中国   | 广州  | 236              | 10          | 中国   | 广州  | 260.5            | 10           | 中国   | 广州  | 260.5              |

① 没有包括磁浮线 33km。  
② 北京市郊铁路（北京城铁）（77.07km）未计入。  
③ 伦敦地上铁（86km）未计入。  
④ 不包括私铁线路（1147km）、JR 铁路（1117km）以及 2 条单轨线路（33km）。  
⑤ 广域电铁和私铁线路未计入。

我国最早建成的地铁是北京地铁 1 号线, 1969 年建成通车。1981 年地铁 2 号线建成开通; 紧接着, 复八线于 1999 年开通。21 世纪以来, 尤其是在北京成功申办奥运会之后, 北京地铁迎来了建设的空前高潮。在 2002 年, 北京地铁 13 号线和八通线相继开通; 5 年之后的 2007 年, 5 号线开通; 2008 年, 10 号线一期、8 号线奥林匹克中心区段、机场快轨三条线路开通, 使北京地铁的运营里程增加至 200km。截至 2014 年年底, 北京市轨道交通总里程达到 527km, 线路 18 条, 车站 276 座, 其中换乘站 47 座。预计到 2015 年运营总里程达到 561km, 2050 年将突破 1000km, 有望成为世界上拥有地铁线路最长的城市<sup>[2]</sup>。

1995 年 4 月 10 日, 上海第一条地铁线路正式开通, 是在北京市、天津市地铁建成通车后, 我国投入运营的第三个城市轨道交通系统。截至 2014 年 12 月 31 日, 上海地铁全路网已开通运营 14 条线路, 运营里程达 548km (不含磁悬浮线), 共有 337 座车站, 44 座换乘站<sup>[3]</sup>。广州开通 9 条线路, 总长 260.5km, 有 149 个车站, 15 个换乘站。

根据《城市轨道交通 2014 年度统计分析报告》, 截至 2014 年 12 月, 我国内地开通地铁的城市有 22 个, 包括北京、天津、上海、广州、深圳、南京、沈阳、成都、武汉、西安、郑州、苏州、无锡、杭州、南京、重庆、佛山、昆明、大连、哈尔滨、宁波、长春, 还有多个城市在进行地铁建设规划。整体来说, 我国城市地铁线路已初具规模, 在国民日常生活中发挥着不可替代的作用。

### 1.1.2 地铁系统的功能特征和发展趋势

#### 1. 功能特征<sup>[4-8]</sup>

##### 1) 改善交通, 繁荣区域经济

1971 年 1 月 15 日, 北京地铁 1 号线一期开始载客试运营, 当年共运送乘客 828 万人次。2007 年 12 月 14 日, 北京地铁 5 条线路开通运行, 该日所有地铁共运送乘客 284.05 万人次。2012 年 4 月 28 日, 北京市轨道交通日客运量首次突破 800 万人次, 达 839.1 万人次。2013 年 7 月 12 日, 北京轨道交通全路网 17 条线路日客运量达 1104.69 万人次。2014 年 4 月 30 日北京轨道交通全路网客运量达 1155.95 万人次。2013 年, 北京地铁年客运量突破 32 亿人次, 居全球第一, 日均客流量过千万已成常态。上海地铁 2013 年全路网客运量达 25 亿人次。2014 年 12 月 31 日, 上海地铁全路网单日客流达到 1028.6 万人次为历史最高。据统计, 北京的轨道交通出行量占到市民公共出行总量的 39.89%。随着城市交通枢纽建立, 公交与地铁系统之间的快捷换乘大大提高了城市的交通运输能力。

城市规划中以地铁为动力发展轴线, 通过沿线规划建设多种形式地下工程, 促进了地铁站周围的地下空间、商业中心区的开发, 对地区的经济繁荣起到了重要的推动作用。

## 2) 平战结合功能

1969年10月1日第一条北京地铁线路建成通车,根据北京地铁的最初设计方案,其主要用途是战备疏散,同时兼顾城市交通。1995年以后,考虑到国内外的局势和以经济建设为中心的方针,我国城市地下空间开发利用的主体由人防工程向民防工程进行了转变。由以前的以防止战争灾害为主转为以防止人为灾害和自然灾害为主,加强了防灾工程的深度和广度。地铁系统的平战结合功能符合国际流行趋势,它对提高我国城市平时和战时的整体防灾能力产生了巨大作用。

## 3) 旧城保护和发展商业

以地铁为代表的地下空间的开发利用对老旧城区的更新改建和循环利用起着非常重要的作用。我国众多历史文化名城是经济发达的大城市,同时有大量需要保护的旧城区,如北京、上海、广州、西安、南京等。随着人们对旧城保护意识不断提高,发展地下轨道交通和有效利用地下空间有利于保护文物古迹、改造老旧城区、改善生活环境、促进旅游经济和缓解交通压力。

随着市场经济的发展,地铁车站也从单纯的运输工具变成了社会生活的场所。如何充分利用地铁人流发展商业已经引起地铁车站周围商业中心的高度关注。如上海市地铁1号线徐家汇地铁车站周围有百胜、太平洋百货徐汇店、东方商厦等多家大型商场,并设有4层地下商场与地下车站直接相连,带动了该区域商业的繁荣。

## 2. 地铁系统管理运营的发展方向

### 1) 由单条独立线路运营向网络化系统运营过渡<sup>[9,10]</sup>

城市地铁系统网络化建设及运营是一个重要的发展趋势。大量实践表明,一条地铁线路对城市公共交通能力的改善效果并不显著,但是多条线路组成的地铁网络能明显减轻城市公共交通压力。世界上一些大城市如巴黎、东京、纽约、伦敦等,地下都已构筑起一个上下数层、四通八达的地铁网。国内由地铁单线运营进入网络化运营时代的城市有北京、上海、广州、南京、深圳等。其中北京、上海、广州已经进入网络化运营的快速发展阶段。

城市地铁网络化发展带来的一个关键问题是换乘节点逐渐增多。以北京为例,1999年地铁只有2条线路、2座换乘站;到2008年,共有8条线路、13座换乘站。截至2014年12月31日,北京地铁有47座换乘站;上海有14条线路,换乘站44个;广州开通9条线路,有15个换乘站。

从轨道交通系统的发展规律及城市总体规划等方面分析,轨道交通系统应以两线换乘为主。据调查,城市地铁中两条地铁线换乘比例为67.1%~88.3%,三条

地铁线换乘比例为 11.7%~26.4%。以北京为例,目前三线换乘只有西直门、东直门、宋家庄 3 个地铁站。上海地铁现有换乘站 44 个,其中四线换乘 1 座,三线换乘 11 座,两线换乘 32 座。

实际运营情况表明:在大部分区域,两线换乘已经可以满足四面八方的到发交通。多条线路的交汇会增加客流换乘的方向,使得设计难度增大,建设难度及风险也相应提高,枢纽布置和建筑结构变得相当复杂,造价更高;从管理上看,过于密集的客流集中换乘对安全有很大影响。

2) 地铁与铁路枢纽线路、城市公共交通将实行一体化管理,真正实现零换乘<sup>[11]</sup>

现代城市交通的发展趋势是各种交通方式的合理分工和有效衔接,由于地铁、轻轨现在可以与铁路枢纽实现过轨运输,城市轨道交通的出行范围和影响范围都相应扩大。在这些大型公交枢纽站上,通常汇聚了多条城市轨道交通线路,其中有地铁、轻轨、机场快速路、公交车、出租车等,它们一起组成了立体化的公交网络,从而创造了零距离换乘的条件。以地铁换乘站为核心的综合换乘枢纽已经成为建设高效率城市综合交通体系的关键。

北京的东直门交通枢纽是北京市东北的重要门户,东直门同时也是北京地铁 2 号线、13 号线以及机场快轨的三线换乘站,它承担着大量轨道交通与路面交通的换乘任务,还是市区与空港之间快速客运通道的起点。北京南站是集普通铁路、高速铁路、市郊铁路、城市轨道交通地铁(4 号线、14 号线)与公交、出租等市政交通设施于一体的大型综合交通枢纽站,也是中国第一座高标准现代化的客运专线大型客站,客流量名列世界第三,被誉为“亚洲第一站”。

上海虹桥交通枢纽是高速铁路、城际和城市轨道交通、公共汽车、出租车及航空港紧密衔接的国际一流的现代化大型综合交通枢纽,具有良好的换乘系统,充分发挥了地铁系统大运量、快速的优势。

3) 地铁站务管理向设备综合自动化方向发展<sup>[12]</sup>

设备综合自动化是地铁站务管理的一个重要发展方向。现行地铁站务管理主要表现在客流组织相关设备管理,包括自动售检票系统(automatic fare collection, AFC)的运用和管理,防灾报警系统(fire alarming system, FAS)、环控系统(building automation system, BAS)、供电监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)等设备的独立监控和管理。这些监控设备一般分为车站级、中心级两级化管理,就地级、车站级、中心级三级控制。当地铁线路运营模式扩展到网络化以后,列车密度增加、客流增多、行车指挥越来越复杂,站务管理会把包括防灾报警系统,由电梯、空调、通风、供水、排水等设备组成的环控系统,供电监控系统等所有设备联合构成车站设备综合监控系统(engineer manufacture and customer

service, EMCS), 从而实现设备的集中控制, 实现综合自动化, 促使设备运行安全、可靠、稳定。

#### 4) 地铁节能运行和消防安全是地铁系统重点关注的因素<sup>[13~17]</sup>

据调查, 国内多个城市建成和运营的地铁工程的能耗都相当惊人, 因此在保证地铁运营系统安全有序的前提下进行节能运行引起人们的关注。国内外实践表明, 合理规划和科学管理将有效降低总系统的能耗。在设计阶段, 优化地铁环控系统可以减少能源消耗和降低环控系统运行费用。在地铁系统能耗中, 地铁的通风和空调系统消耗了相当多的能源。从经验上来说, 在高温高湿地区, 如果采用屏蔽门系统, 通风空调用电量能够达到整体系统的三分之一; 如果采用闭式系统, 其用电量的比例甚至能够达到 50%。通过引进节能技术如采用智能模糊控制系统进行风机变频、水泵变频以及主机群控等可以实现节能运行。运营部门还可以通过结合初期、近期、远期的实际情况来调整运行工况, 实现最大程度地节约能源。

地铁系统的最大服务载体是运营服务, 而运营服务最受媒体和民众关注的是安全管理。据统计, 超过 98% 的地铁事故是人为因素引起的, 通过主动控制风险源头和事故链, 消灭安全隐患, 可以有效防止事故的发生。影响地铁系统运营的异常原因包括火灾、列车冲突、列车脱轨、自然灾害、大面积停电、爆炸、客流冲击、恐怖袭击等。相关部门根据突发事件的特点和国内外地铁运营救援抢险经验制定合理的应急预案体系。部分应急预案还需经政府牵头组织相关部门、专家进行评审, 评审通过后报上级政府。政府部分牵头建立相应的事故处理机制并落实责任追究制度。

地铁运营单位必须不断加强运营安全管理, 建立安全检查制度, 预防运营事故发生; 要及时更新观念, 对发生的事故进行系统地分析论证, 透过现象看本质, 从管理层上剖析深层次原因, 不断提高事故处理分析能力; 处理安全工作中的问题要有针对性的解决办法, 变被动管理模式为主动管理模式, 变事后惩处为事前预防; 建立安全培训制度, 营造安全文化氛围, 使员工真正意识到“人人有责、人人负责”, 从而尽可能地杜绝安全风险, 将人员及财产损失降到最低。

## 1.2 地铁系统发生火灾的危害性

### 1.2.1 地铁系统的组成及地铁站形式的划分<sup>[18]</sup>

由于地铁系统中各部分的功能、位置和使用要求均不相同, 可分为车站、区间和车辆段三个部分。其中最重要的组成部分是地铁车站。地铁站不仅是乘客集散转换必经之处, 又集中设置了地铁运营中很大一部分技术设备和运行管理系统。



区间是两个车站之间的隧道部分。车辆段是地铁车辆停放、检查、整备、运用和修理的管理中心所在地。

地铁站可以分为三大部分,分别是车站主体、出入口及通道、通风道及地面通风亭。而车站主体又包括站厅、站台、生产生活用房。车站主体是列车在线路上的停车点,其承担着乘客集散、乘客候车、乘客换乘及上下车的功能。站厅主要包括售检票口,与地面、站台相连的人行楼梯和电动扶梯,车站控制室等,功能为乘客购票和检票;站台是旅客上下车的场所,主要包括站台、与站厅相连的楼梯和电动扶梯等。地铁站内的隧道又称轨行区,它供车辆进站停靠用,与区间相连。生产生活用房包括运营管理用房、技术设备用房以及辅助用房。出入口通道、通风道及地面通风亭等属于地面建筑。出入口用于旅客进出车站,同时还担负着火灾时外界补风空气进入的功能。风亭用于新风进入、活塞风和烟气的排放等。

地铁车站按照车站的平面布置形式,主要分为岛式站台,侧式站台和岛、侧混合式站台3种。①岛式站台:站台位于上、下行线路中间,上下行站台合二为一成为一个区域。岛式站台的面积利用率高,可以做到灵活调剂客流,乘客使用也比较方便;因此常用于客流量较大的车站。②侧式站台:轨道在中央,站台位于上、下行路线的两侧。侧式站台也是一种常用的车站形式,但其站台面积利用率较低、站台之间联系也不紧密,在这些方面不如岛式站台;因此多用于客流量不大的车站以及高架车站。③岛、侧混合式站台将岛式站台及侧式站台同设在一个车站内,可同时在两侧的站台上、下车,也可适应列车中途折返的要求,但投资较大。

地铁车站按照垂直分层数目分类,可以分为单层、双层和多层三种。单层式是将站台、站厅的功能集于一层,适用于客流量较小和用地紧张受限的车站。双层式车站是最为常见的一种车站,其将站厅、站台分层设置。多层式车站一般由单层站厅和多层站台构成,多用于中心车站、深埋车站和换乘车站。

### 1.2.2 地铁火灾特点及危害

由于地铁车站及地铁列车是人流密集的公众聚集场所,再加上其结构特征,一旦有突发事故,会引发严峻的安全疏散问题,容易造成重大的社会影响。此外,地铁是人员高度密集的公众聚集场所,恐怖集团、邪教组织、对社会不满极端分子均有可能把地铁作为袭击的目标,人为纵火或者爆炸伤害无辜公众,造成重大损失和恶劣社会影响。

地铁系统涉及的灾害涉及火灾、震灾、水灾以及新生灾害如恐怖袭击等。地铁一旦发生火灾,危害性大,人员伤亡多,疏散与救援难度高,因此火灾受到的重视程度最高。地铁系统的火灾安全问题已成为国内外学术界重点关注和研究领域。我国《地铁设计规范》(GB 50517—2013)第28.1.1条规定:地铁应具有针对火灾、水淹、风灾、地震、冰雪和雷击等灾害的预防措施,并以预防火灾为主<sup>[19]</sup>。

由于地铁系统深埋在地下(一般距地面 20~30m),与外界的联系主要为出入口,发生火灾时烟气的流动特性不同于地面建筑火灾。由于地铁站相对封闭,在发生火灾后很难迅速排出热量,相比地面建筑火灾具有更高的危险系数,往往会造成非常严重的人员伤亡。地铁火灾的特点主要表现在以下方面<sup>[20,21]</sup>。

(1) 地铁内人员密度大,客流集中,地铁隧道出入口少,通道狭窄,疏散距离长,一旦发生火灾,极易造成群死群伤。

(2) 火灾排烟困难。地铁内部环境相对封闭,火灾时氧气不足造成物质难以充分燃烧,产生大量烟气,而地铁的进排风只能依靠少量的通风口,一旦机械通风系统发生故障,大量烟雾只能从通风口排出,与地面空气对流速度慢,地下洞口的“吸风”效应使向外扩散的部分烟雾又被洞口卷吸回来,容易令人窒息。自然通风排烟无法满足地铁站内的排烟要求,烟雾控制和排出难度极大,对人员逃生和火灾控制造成了巨大困难。

(3) 升温迅速、温度极高。相对封闭的地铁空间在发生火灾以后,会积聚大量热量,短时间内空间温度提高很快,在火势猛烈的情况下,温度能够超过 1000℃。超高温度会造成气流紊乱,影响人员逃生,而且会对车站结构造成很大破坏。

(4) 隧道内设备或列车起火后,隧道内的电气线路可能会因烧损而被切断,隧道机械排烟系统失效,失去通风排烟作用。有毒烟雾和黑暗的环境给疏散及救援工作造成困难。

(5) 列车在隧道内发生火灾时,乘客在隧道中的逃生方向和烟气的扩散方向相同,隧道口既是乘客的逃生出入口,也是烟气排出的排烟口,含有大量毒害物质的黑热浓烟会造成重大的人员伤亡。

(6) 扑救困难。由于地下空间限制,又由于高温、浓烟、缺氧、能见度低、通信中断等原因,求援人员很难了解现场情况,大型灭火设备无法进入现场,且救火人员在进入火场时需要特殊防护,灭火救援难度大。

### 1.2.3 国内外地铁火灾事故案例<sup>[22~31]</sup>

在地铁发展较早的一些国家都曾经发生过严重的地铁火灾事故。从 20 世纪 60 年代至 2014 年,国内外发生的大型地铁事故包括地铁火灾、水灾、停电、列车出轨或相撞、爆炸、毒物泄露等共 50 余起,地铁事故分布见图 1.1,其中火灾事故 30 多起,占到 57%。表 1.2 为近 30 年来国外发生的一次性死伤 10 人以上的重大地铁交通火灾事故统计表。除了人员伤亡外,地铁火灾还会造成其他设施受到破坏,如车辆、设备的焚毁,衬砌受损,结构承载力减低或丧失;一旦辅助设备包括动力、照明、通信、通风、给排水等设备无法运转,将导致事故救援难度加大。



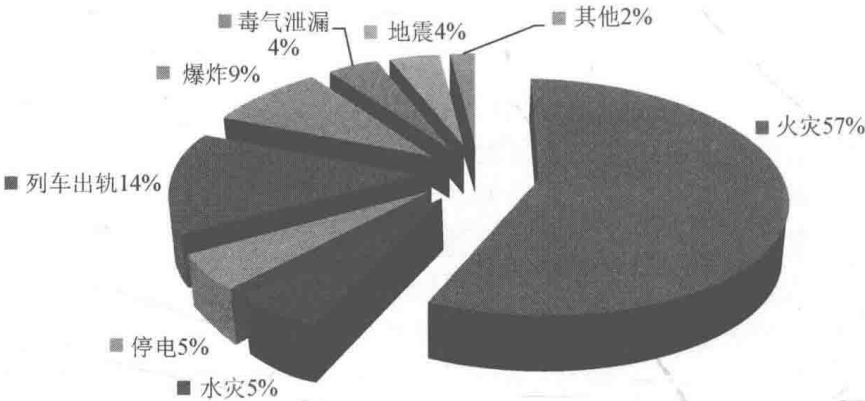


图 1.1 地铁交通事故分布

表 1.2 近 30 年来国外发生的一次性死伤 10 人以上重大地铁交通火灾事故统计

| 时 间         | 火灾场所     | 起火原因                   | 伤亡损失                   |
|-------------|----------|------------------------|------------------------|
| 1987 年 11 月 | 英国伦敦     | 未熄灭烟头引燃木质扶梯            | 死 31 人，伤 100 余人        |
| 1991 年 4 月  | 瑞士苏黎世    | 列车机车电路短路               | 伤 58 人                 |
| 1995 年 10 月 | 阿塞拜疆巴库   | 电动机车电路故障               | 死 558 人，伤 269 人        |
| 1995 年 3 月  | 日本东京     | 人为投放毒气                 | 死 12 人，伤 512 人         |
| 2000 年 11 月 | 奥地利萨尔茨堡州 | 保护装置过热失灵               | 死 155 人，伤 18 人         |
| 2003 年 2 月  | 韩国大邱     | 人为纵火                   | 死 198 人，伤 146 人        |
| 2003 年 1 月  | 英国伦敦     | 列车撞月台                  | 伤 32 人                 |
| 2004 年 2 月  | 俄罗斯莫斯科   | 列车爆炸案                  | 死 50 人，伤 100 余人        |
| 2005 年 7 月  | 英国伦敦     | 爆炸案                    | 死 56 人，伤 700 余人        |
| 2004 年 3 月  | 西班牙马德里   | 人为造成 3 起爆炸             | 死 191 人以上，伤 1800 余人    |
| 2010 年 3 月  | 俄罗斯莫斯科   | 恐怖分子制造两起爆炸             | 死 42 人，伤亡 80 人         |
| 2012 年 2 月  | 日本大阪     | 御堂筋线梅田站地下二层的一个仓库冒烟起火   | 地铁停运 1.5h，3000 人疏散     |
| 2013 年 6 月  | 俄罗斯莫斯科   | 地铁 1 号线两个车站之间的供电电缆突然起火 | 约 4500 名乘客被紧急疏散，15 人受伤 |
| 2015 年 1 月  | 美国华盛顿    | 兰芳广场站地铁车厢突然冒出浓烟，电路起火导致 | 死 1 人，伤 81 人           |

通过对国内外地铁火灾案例分析，地铁发生火灾主要是由于人为纵火、列车电器着火或地铁内的电器设备着火，而火灾发生的原因主要有以下几点：

- （1）地铁站内的通风排烟系统设计不合理，致使火灾时通风排烟不畅通或者无法发挥作用。
- （2）地铁站内的火灾报警及消防设备不完备。
- （3）地铁站内及列车采用易燃装饰材料，一旦着火不易控制。
- （4）地铁车站管理方面的疏漏。
- （5）人为纵火或者恐怖袭击。