

高等学校交通信息工程系列教材

同济大学教材、学术著作出版基金委员会资助

# 轨道交通运行 控制与管理

本书内容围绕轨道交通现代信号系统展开，共分七章：城市轨道交通的运行组织、轨道交通运行控制的理论基础、基础设备、计算机联锁、自动列车运行控制系统、列车运行自动监控系统、自动化驼峰。

本书可作为高等工科院校交通工程本科专业的教材，亦可作为交通信息工程与控制专业方向硕士研究生的参考教材，并可供有关工程技术人员、运营管理人员参考。

吴汶麒 等 编著

同济大学出版社



华北水利水电学院图书馆



208664346

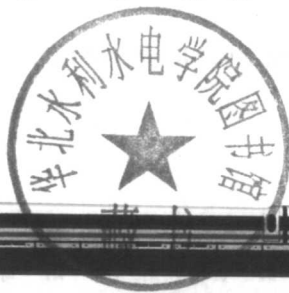
U284

W880

高等学校交通信息工程系教材

同济大学教材、学术著作出版基金委员会资助

# 轨道交通运行 控制与管理



吴汶麒 等 编著

866434

同济大学出版社

## 内容提要

本书内容围绕轨道交通现代信号系统展开,共分七章:城市轨道交通的运行组织、轨道交通运行控制的理论基础、基础设备、计算机联锁、自动列车运行控制系统、列车运行自动监控系统、自动化驼峰。

本书可作为高等工科院校交通工程本科专业的教材,亦可作为交通信息工程与控制专业方向硕士研究生的参考教材,并可供有关工程技术人员、运营管理人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

轨道交通运行控制与管理/吴汶麒等编著. —上海:同济大学出版社,2004.2  
ISBN 7-5608-2707-1

I. 轨… II. 吴… III. 城市运输:铁道运输—铁路信号 IV. U284

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 069127 号

## 轨道交通运行控制与管理

吴汶麒 等 编著

责任编辑 陈全明 杨宁霞 责任校对 徐 栩 封面设计 陈益平

出版  
发行 同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经销 全国各地新华书店

印刷 江苏句容排印厂印刷

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 18

字数 460000

印数 1 3000

版次 2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

书号 ISBN 7-5608-2707-1/U·39

定价 26.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

## 高等学校交通信息工程系列教材编委会

主 任 杨东援

副主任 董德存

编委会委员

同济大学 杨东援 董德存 张 浩 严作人 张树京 吴汶麒

上海交通大学 刘允才 朱 杰 何 晨 敬忠良 李建勋

上海大学 费敏锐 陈惠民

华东理工大学 顾幸生

北方交通大学 徐洪泽

上海海运学院 金永兴 汤天浩 施朝健 宗蓓华 周溪召 蔡存强 陈伟炯

丁以中 施 欣

西南交通大学 王长林

南京航空航天大学 王成华

上海电信技术研究院 祁庆中

东华大学 丁永生

上海第二工业大学 蒋川群

常州工学院 肖闽进

大连海事大学 任 光

集美大学 邵哲平

华东船舶工业学院 王建华

镇江高等专科学校 杨国祥

武汉理工大学 刘明俊

地铁建设有限公司 袁哲雷 黄 钟

深大通信网络有限公司 关志超

上海城市交通信息中心 朱 昊

普陀区科学技术委员会 张小松

中兴通讯股份有限公司 钟 宏

上海船舶运输科学研究所 徐永发

上海海滔通信技术有限公司 张臣雄

东南大学无线电工程系 吴镇扬

常州电信局 郭建冬

上海铁路局城市轨道交通设计研究院 曹俊文 刘 藩

## 总 序

随着信息技术突飞猛进地发展,大力推动了全球信息化前进步伐。信息化带动工业化已经明显地促进了国民经济的持续发展。同时,信息技术也为综合交通(铁路、公路、水运、航运以及城市交通)的现代化和智能化带来了无限生机和活力,由此诞生了一个崭新的专业,这就是交通信息工程专业。

为了培养 21 世纪我国乃至全球紧缺的交通信息工程领域内的高级专门人才,同时为了深化高等院校课程体系改革和教材建设的急需,同济大学出版社邀请了上海乃至全国有关交通、信息、通信、控制等领域的专家和教授,组成了阵容强大的交通信息工程专业系列教材编委会,他们在长期从事教学科研和工程领域的基础上,规划并编写出一套面向高校本科的交通信息工程专业系列教材,并将陆续出版发行。

这套教材具有明显的交通信息工程专业特色,是国内首创,国外也不多见。编写这套教材的宗旨在于培养学生综合运用多门学科知识的能力,提高交叉复合型人才的素质。它是以综合交通系统的信息化、智能化、集成化和网络化为核心,全面运用信息、通信、控制及计算机等高新技术,结合交通系统工程的特点,大力改进和实现交通系统的现代化,以便迎接 21 世纪全球经济一体化的挑战。

这套教材具有“厚基础、强背景、宽专业、重综合”,以及交叉多门学科领域的实用型信息工程专业本科教材的特点,主要为交通信息工程应用类,但对于其他实用型信息工程类专业(如经济信息、社会信息、军事信息、人文信息、医学信息、工程信息等)也具有一定的参考价值,同时也可以作为成人教育、网络教育、高职教育、人员培训等授课教材,同样也适合自学者使用。

这套教材的内容结构是围绕着综合交通系统的信息化和智能化,全方位地展示各种新技术和新方法,并强调理论联系实际,专业基础教材有练习,专业教材有案例。同时,紧密配合本科教学计划和课程体系,着重于基本原理和实用技术方面的内容,体现知识和技能的有机结合,全面培养学生理论分析和独立解决问题的能力,进一步拓展知识面,激发学生学习的积极性和创新意识。

这套教材可以按照教学计划和课程体系分别安排在不同学年的专业基础类和专业类课程系列内,并根据教学大纲和教学时数安排为必修课或选修课。

3/5 晓  
2003年12月5日

## 前 言

从 20 世纪 50 年代起,在全面学习苏联高等教育体制的背景下,我国成立了几所由铁道部领导的铁道学院。近半个世纪以来,培养了数以万计的铁路专业人才,为发展我国的铁路事业作出了重大贡献。

铁路信号专业是原铁道学院的主要专业之一,按铁路所采用的信号设备而设置的主要专业课程有车站联锁、区间闭塞和调度集中。按照传统教育计划培养的大学毕业生,其知识结构不合理,知识面相对狭窄,难以适应社会主义市场经济对人才的要求。随着我国高等教育体制改革的逐步深入,行业办学的模式已被打破,铁路(我们以后将用含义更为广泛的术语“轨道交通”来取代)专业的教学内容已被纳入广义的大交通范畴。在此背景下,我们尝试在“交通工程”专业内开设“轨道交通运行控制与管理”课程。为了使学能脱离某种特定设备的约束,掌握其基本规律、原则及设计方法,以及了解在该领域内国际发展趋势,本教材突破了原铁路信号专业教材的框框,以广阔的视野立足于专业发展的前沿,以崭新的面貌奉献给交通工程专业的大学生、研究生以及相关的专业技术人员。

轨道交通运行控制技术在近十年内发展迅速,其内容已非昔日的“铁路信号”所能涵盖。一方面,工业发达国家为了减轻环境污染的压力,大力发展轨道交通,高速列车在日本,西欧已经成为最主要的交通工具之一,列车时速已普遍达到  $250\sim 300\text{km/h}$ 。在这样的列车时速条件下,已不可能再采用传统的信号技术来保证列车运行安全,列车运行自动控制系统(通常称为 ATC 系统,ATC 是英语单词 Automatic Train Control 的词首)已成为保证列车运行安全,实现集中监控指挥的基本设施。另一方面,随着城市人口的不断增加和城市道路交通的状况日益恶化,城市轨道交通(地铁、城市快速交通、轻轨等)迅速发展,大容量和高密度的城市轨道交通已成为百万人以上的大城市的首选交通工具。城市轨道交通的列车运行速度虽然不高(通常小于  $80\text{km/h}$ ),但其运行间隔很短(可以达到  $2\text{min}$  以下),只有采用自动化程度很高的 ATC 系统,才能保证列车运行安全和提高行车效率。

鉴于上述,本书将围绕现代信号系统展开。本书共分 7 章:

第 1 章介绍轨道交通的运行组织,讨论有关轨道交通的一些基本知识,如列车间隔计算、运行时刻表的生成、主要设备等。

第 2 章讨论轨道交通运行控制的理论基础,包括列车定位原理、音频轨道电路的仿真计算、安全冗余编码的原理和方法等,尤其是对故障导向安全这一基本原则进行了重点讨论。

第 3 章介绍列车运行控制系统的室外基础设备,包括新型电动转辙机、音频无绝缘轨道电路(数字式和非数字式)、电子计轴器、自动道口等。

第 4 章介绍联锁装置。鉴于目前国内外已普遍用计算机联锁取代传统的继电器联锁,所以本章在叙述联锁的基本结构原则之后,详细讨论了计算机联锁的基本结构、逻辑关系以及故障导向安全的措施。

第 5 章介绍列车运行自动控制系统。依次对点式、连续式、无线列车运行自动控制进行

了详细的阐述。由于高速磁浮交通很有可能成为人类 21 世纪的主要交通工具之一,而世界上第一条商业运营的磁浮交通已在上海浦东建成,所以本章的最后对高速磁浮交通的运行控制系统(OCS——Operation Control System)进行了较为细致的讨论。

第 6 章介绍列车运行自动监控系统。在我国铁路行业中,将此系统称为“调度监督与调度集中”;在欧洲,称之为“列车运行指挥系统”;而在我国城市轨道交通行业中,普遍称之为“列车运行自动监控系统”(ATS 系统:Automatic Train Supervision)。我们认为后一种术语较确切地揭示出该系统的功能:对列车运行实施监测与控制,所以本书中采用此术语以取代过去教材中常用的“调度监督与调度集中”。在本章内,除了介绍该系统的一般概念外,用了实际的案例来清楚地揭示该系统的功能及组成。

第 7 章介绍了用于远程铁路货物运输的专用设备:自动化驼峰调车场。在叙述了自动化驼峰的基本概念之后,以一个闻名于世的自动化驼峰调车场——德国慕尼黑北调车场——作为案例,对 20 世纪末发展起来的“推送机车无线遥控”、“溜放速度自动控制”、“快速道岔转换控制”等最新技术作了较详细的说明。

本书的第 2.3 节以及第 4 章由刘进老师撰写,其余部分均由吴汶麒教授撰写。

吴汶麒

2003 年 7 月

# 目 录

## 前 言

### 第 1 章 城市轨道交通的运行组织..... (1)

#### 1.1 轨道交通发展概况..... (1)

#### 1.2 城市轨道交通的运行组织..... (1)

##### 1.2.1 城市轨道交通的类型 ..... (1)

##### 1.2.2 城市轨道交通的技术经济特征 ..... (3)

##### 1.2.3 城市轨道交通系统的方案评估 ..... (5)

##### 1.2.4 城市轨道交通系统的运输组织 ..... (6)

##### 1.2.5 城市轨道交通系统的列车运行图 ..... (14)

##### 1.2.6 城市轨道交通的运输能力 ..... (14)

#### 1.3 铁路运输组织概论 ..... (19)

##### 1.3.1 铁路车站 ..... (19)

##### 1.3.2 铁路运输设备概述..... (26)

#### 参考文献 ..... (37)

### 第 2 章 轨道交通运行控制的基础理论 ..... (38)

#### 2.1 信号系统的基本安全准则:故障导向安全准则 ..... (38)

##### 2.1.1 定义 ..... (38)

##### 2.1.2 微电子信号系统的故障-安全结构 ..... (39)

#### 2.2 符合信号安全准则的数据信息传输 ..... (43)

##### 2.2.1 概述 ..... (43)

##### 2.2.2 差错控制编码原理..... (45)

##### 2.2.3 简单的差错控制编码 ..... (48)

##### 2.2.4 线性分组码 ..... (50)

#### 2.3 列车定位技术 ..... (57)

##### 2.3.1 定位技术概述 ..... (57)

##### 2.3.2 轨道电路与计轴器..... (59)

##### 2.3.3 查询-应答器原理 ..... (59)

##### 2.3.4 雷达测速和里程计工作原理 ..... (60)

##### 2.3.5 交叉感应环线工作原理 ..... (61)

##### 2.3.6 无线测距原理 ..... (62)

##### 2.3.7 惯性导航原理 ..... (65)



|            |                               |       |
|------------|-------------------------------|-------|
| 2.4        | 轨道电路的计算基础 .....               | (66)  |
| 2.4.1      | 轨道电路的一次参数 .....               | (67)  |
| 2.4.2      | 列车分路电阻 $R_f$ .....            | (69)  |
| 2.4.3      | 用于分析计算轨道电路的计算方法 .....         | (69)  |
| 2.5        | 列车最小间隔时间的计算 .....             | (73)  |
| 2.5.1      | 理想情况下 $t_w$ 的计算方法 .....       | (74)  |
| 2.5.2      | 在采用自动闭塞时 $t_w$ 的计算方法 .....    | (74)  |
| 2.5.3      | 准移动闭塞时 $t_w$ 的计算方法 .....      | (74)  |
| 附:         | 均匀传输线概论 .....                 | (75)  |
|            | 参考文献 .....                    | (78)  |
| <b>第3章</b> | <b>基础设备</b> .....             | (79)  |
| 3.1        | 色灯信号机及灯光显示 .....              | (79)  |
| 3.1.1      | 透镜式色灯信号机的机构 .....             | (79)  |
| 3.1.2      | 灯光颜色的含义 .....                 | (79)  |
| 3.2        | 电动转辙机 .....                   | (82)  |
| 3.2.1      | 带滚珠丝杠的三相交流电动转辙机 S700K—C ..... | (83)  |
| 3.2.2      | 液压式电动转辙机 .....                | (87)  |
| 3.2.3      | 瑞典铁路使用的新型转辙机(EBISWITCH) ..... | (88)  |
| 3.2.4      | 道岔密贴检查器 .....                 | (90)  |
| 3.2.5      | 道岔外锁闭尖轨燕尾锁的解锁与锁闭过程 .....      | (91)  |
| 3.3        | 轨道电路 .....                    | (93)  |
| 3.3.1      | 轨道电路原理 .....                  | (93)  |
| 3.3.2      | 音频无绝缘轨道电路 .....               | (101) |
| 3.3.3      | 电子计轴器 .....                   | (109) |
| 3.4        | 铁路道口的安全技术 .....               | (125) |
| 3.4.1      | 不带速度监控的自动道口设备 .....           | (125) |
| 3.4.2      | 带速度监控的自动道口设备 .....            | (126) |
|            | 参考文献 .....                    | (127) |
| <b>第4章</b> | <b>计算机联锁</b> .....            | (128) |
| 4.1        | 概述 .....                      | (128) |
| 4.2        | 联锁系统的控制对象 .....               | (129) |
| 4.2.1      | 站内信号机 .....                   | (129) |
| 4.2.2      | 道岔及转辙机 .....                  | (134) |
| 4.2.3      | 站内轨道电路 .....                  | (137) |
| 4.3        | 进路的种类及划分 .....                | (144) |
| 4.4        | 联锁与进路控制 .....                 | (147) |

|              |                                          |       |
|--------------|------------------------------------------|-------|
| 4.4.1        | 联锁的定义 .....                              | (147) |
| 4.4.2        | 信号机开放的技术条件 .....                         | (151) |
| 4.4.3        | 进路控制 .....                               | (151) |
| 4.5          | 计算机联锁系统的硬件结构 .....                       | (154) |
| 4.5.1        | 计算机联锁系统的几种体系结构 .....                     | (155) |
| 4.5.2        | 一个案例——德国西门子公司的 SICAS 系统的结构及硬件配置<br>..... | (158) |
| 4.6          | 计算机联锁系统的软件结构 .....                       | (170) |
| 4.6.1        | 软件的功能与总体结构 .....                         | (170) |
| 4.6.2        | 联锁数据与数据结构 .....                          | (172) |
| 4.6.3        | 联锁控制程序及其任务调度方式 .....                     | (174) |
| 4.6.4        | 进路处理程序 .....                             | (177) |
| 4.6.5        | 过程输入输出程序 .....                           | (188) |
| 4.6.6        | 人机界面软件 .....                             | (189) |
|              | <b>参考文献</b> .....                        | (191) |
| <b>第 5 章</b> | <b>自动列车运行控制系统</b> .....                  | (192) |
| 5.1          | 概述 .....                                 | (192) |
| 5.1.1        | 欧洲轨道交通的自动列车运行控制系统 .....                  | (192) |
| 5.1.2        | 城市轨道交通自动列车运行控制系统的主要功能 .....              | (194) |
| 5.2          | 点式自动列车运行控制系统 .....                       | (195) |
| 5.2.1        | 点式自动列车运行控制系统的基本结构 .....                  | (196) |
| 5.2.2        | 点式自动列车运行控制系统的基本工作原理 .....                | (199) |
| 5.2.3        | 欧洲型地面应答器 .....                           | (203) |
| 5.3          | 连续式自动列车运行控制系统 .....                      | (209) |
| 5.3.1        | 采用轨间电缆的自动列车运行控制系统 .....                  | (209) |
| 5.3.2        | 采用数字编码轨道电路的连续式自动列车运行控制系统 .....           | (214) |
| 5.4          | 无线自动列车运行控制系统 .....                       | (221) |
| 5.4.1        | 用于干线铁路的无线自动列车运行控制系统 .....                | (221) |
| 5.4.2        | 高速磁浮交通的自动列车运行控制系统 .....                  | (226) |
|              | <b>参考文献</b> .....                        | (238) |
| <b>第 6 章</b> | <b>列车运行自动监控系统</b> .....                  | (239) |
| 6.1          | 概述 .....                                 | (239) |
| 6.1.1        | 列车运行自动监控的任务与要求 .....                     | (239) |
| 6.1.2        | 基本技术方案 .....                             | (239) |
| 6.1.3        | 列车运行跟踪 .....                             | (241) |
| 6.1.4        | 计算机辅助列车运行调度 .....                        | (241) |

|                                                         |       |
|---------------------------------------------------------|-------|
| 6.1.5 列车进路自动排列 .....                                    | (242) |
| 6.2 用于城市轨道交通的列车运行自动监控(ATS)子系统的基本功能 .....                | (242) |
| 6.2.1 集中控制功能 .....                                      | (242) |
| 6.2.2 集中显示功能 .....                                      | (243) |
| 6.2.3 列车运行时刻表管理功能 .....                                 | (243) |
| 6.2.4 运行数据记录与统计功能 .....                                 | (244) |
| 6.2.5 仿真功能 .....                                        | (244) |
| 6.2.6 监测与报警功能 .....                                     | (244) |
| 6.3 城市轨道交通列车自动监控(ATS)子系统的一个范例——上海地铁一号线的 ATS 子系统简介 ..... | (244) |
| 6.3.1 CATS 系统的构成 .....                                  | (245) |
| 6.3.2 数据传输系统(DTS) .....                                 | (247) |
| 6.3.3 车载 ATC 控制及显示 .....                                | (248) |
| 6.3.4 系统用户等级、运行模式和功能配置 .....                            | (248) |
| 6.3.5 系统在线控制功能 .....                                    | (250) |
| 6.3.6 系统操作运用 .....                                      | (253) |
| <b>参考文献</b> .....                                       | (256) |
| <b>第 7 章 自动化驼峰</b> .....                                | (257) |
| 7.1 概述 .....                                            | (257) |
| 7.1.1 推送速度自动控制 .....                                    | (257) |
| 7.1.2 溜放速度自动控制 .....                                    | (260) |
| 7.1.3 溜放速度调整设备 .....                                    | (261) |
| 7.2 自动化驼峰的一个实例——德国慕尼黑北调车场 .....                         | (266) |
| 7.2.1 采用 32bit 技术的溜放控制 .....                            | (266) |
| 7.2.2 推送小车的无线遥控 .....                                   | (272) |
| 7.2.3 全电子快递道岔控制技术(简称 SEWA) .....                        | (275) |
| <b>参考文献</b> .....                                       | (278) |

# 第 1 章 城市轨道交通的运行组织

## 1.1 轨道交通发展概况

自从 1825 年英国修建了世界上第一条蒸汽机车牵引的铁路(斯托克顿—达林顿)以来,铁路已有了将近 180 年的历史,它对世界工业化的进程起着举足轻重的作用。目前世界铁路的总长度已达 130 万 km。

随着世界工业的发展,城市化的进程导致了城市人口的高度集中,于是,城市轨道交通应运而生。从 1863 年英国伦敦市第一条地铁正式运营至今,世界上已有 80 多个城市建成了城市轨道交通,其中地铁的运营总里程已达 5264km(截至 1993 年)。

在人类文明发展的历史上,远程铁路与城市铁路是一对“孪生子”,在管理上、技术装备上十分相似,但又有其各自的独特“个性”。本书中采用的“轨道交通”作为泛指术语,将城市与城市之间(甚至国家与国家之间)的轨道交通称之为远程铁路,而将城市内的轨道交通称之为城市轨道交通。

随着科学的不断发展,轨道交通的安全程度与列车运行速度有了很大的提高,从 20 世纪初期的每小时几十公里发展到今天的 250km/h 以上的高速列车,其中最具代表性的有日本新干线、法国的 TGV、德国的 ICE。几乎与远程铁路不断提速相并行,城市轨道交通的运行间隔时间越来越缩短,从 20 世纪初期的 10min 间隔发展到今天的 90s 间隔。诚然,不论是列车运行速度的提高,还是列车运行间隔的缩短,都是以各类相关技术共同发展为基础的,与轨道交通相关的技术领域有“车”(指运输组织)、“机”(指机车车辆)、“工”(指路基、路轨、桥梁等)、“电”(指通信信号与供电)。这四大技术领域必须共同发展,密切协调,从而才能形成轨道交通大系统发展的基础。

如上所述,轨道交通包括远程铁路(以下简称铁路)及城市轨道交通两大类型,城市轨道交通又包含了地铁、市郊快速、轻轨、独轨……多种类型,而铁路到目前为止还仅有轮轨系统一种类型。值得一提的是德、日两国率先花费巨大投资研制、开发的高速磁浮交通,尽管对此国内外有不同的看法,但随着上海浦东高速磁浮铁路的修建和成功投入运营,轨道交通家族又将增添一位新的成员,可以预期一种新的充满活力、代表着 21 世纪交通发展方向的新系统将出现在世界面前。

## 1.2 城市轨道交通的运行组织

### 1.2.1 城市轨道交通的类型

城市轨道交通系统是指服务于城市客运交通,通常以电力为动力、轮轨运行方式为特征的车辆或列车与轨道等各种相关设施的总和。它具有运能大、速度快、安全准时、成本低、节约能源以及能缓解地面交通拥挤和有利于环境保护等优点。

自 19 世纪中叶,世界上先后出现城市地下铁道与有轨电车以来,经过 100 多年的研究、开发、建设与运营,城市快速轨道交通系统已经形成多种类型并存与发展的状态。

#### 1.2.1.1 按基本技术特征分类

根据城市轨道交通系统基本技术特征的不同,城市轨道交通系统主要有市郊铁路、地下铁道、轻轨交通、独轨铁路和自动导向交通系统等类型。

(1) 市郊铁路 市郊铁路是连接城市市区与郊区,以及连接城市周围几十公里甚至更大范围的卫星城镇或城市圈的铁路,但它往往又是连接大中城市干线铁路的一部分,因此它具有干线铁路的技术特征,如轨道通常是重型的。与城市轨道交通系统中的地下铁道等其他类型不同,在市郊铁路上通常是市郊旅客列车与干线旅客列车和货物列车混跑。

(2) 地下铁道 顾名思义,地下铁道是修建在地下隧道中的铁路。这样理解,也许在地下铁道修建的初期没有什么不妥,但现在定义一个系统为地下铁道,并不要求该系统的线路必须全部修建在地下隧道内。对世界各国地下铁道系统进行分类研究可知,地下铁道可分为重型地铁、轻型地铁与微型地铁 3 种类型。重型地铁就是传统的普通地铁,轨道基本采用干线铁路技术标准,线路以地下隧道和高架线路为主,仅在郊区地段采用地面线路,路权专用,运量最大。轻型地铁是一种在轻轨线路、车辆等技术设备工艺基础上发展起来的地铁类型,路权专用,运量较大,通常采用高站台。微型地铁,又称小断面地铁,隧道断面、车辆轮径和电动机尺寸均小于普通地铁,路权专用,运量中等,行车自动化程度较高。

(3) 轻轨铁路 轻轨的涵义是指就车辆对轨道施加的荷载而言,轻轨车辆与市郊列车或地下铁道车辆比较相对较轻。轻轨是从旧式有轨电车系统发展演变而来的,早期的轻轨系统一般是直接对旧式有轨电车系统改建而成,20 世纪 70 年代后期一些国家开始修建全新的现代轻轨系统。现代轻轨系统与旧式有轨电车系统相比,具有行车速度快、乘坐舒适、噪音较低等优点。同样,对世界各国轻轨系统进行分类研究,轻轨也存在多种技术标准并存发展的情况。高技术标准的轻轨接近于轻型地铁,而低技术标准的轻轨则接近于有轨电车。

(4) 独轨铁路 独轨是车辆或列车在单一轨道梁上运行的城市客运交通系统。独轨的线路采用高架结构,车辆则大多采用橡胶轮胎。从构造型式上可分为跨骑式独轨与悬挂式独轨两种。跨骑式独轨是列车跨坐在轨道梁上运行的型式,而悬挂式独轨则是列车悬挂在轨道梁下运行的型式。

(5) 自动导向交通系统 自动导向交通系统在一些文献资料中称为新交通系统,当然是指狭义的新交通系统。这种交通系统的主要技术特征是轨道采用混凝土道床、车辆采用橡胶轮胎,有一组导向轮引导车辆运行,列车运行自动控制,可实现无人驾驶等。

#### 1.2.1.2 按路权及列车运行控制方式分类

根据城市轨道交通系统是否专用、列车运行控制方式的不同,城市轨道交通系统可分为路权专用、按信号指挥运行,路权专用、按视线可见距离运行和路权混用、按视线可见距离运行等类型。

(1) 路权专用、按信号指挥运行类型 该类型系统的特点是线路专用,与其他城市交通线路没有平面交叉。由于路权专用及按信号指挥运行,行车速度快且行车安全性好。属于该种类型的轨道交通系统包括市郊铁路、地下铁道、高技术标准的轻轨和自动导向交通系统等。

(2) 路权专用、按视线可见距离运行类型 该类型系统的特点是线路专用,与其他城市

交通线路没有平面交叉,行车安全性较好。但由于无信号、按可视距离间隔运行,行车速度稍低。属于该种类型的轨道交通系统主要是中等技术标准的轻轨。

(3) 路权混用、按可视距离运行类型 该类型系统的特点是线路与其他运输车辆和行人共用,与其他城市交通线路有平面交叉。除在交叉口设置信号控制外,其余线路段按可视距离间隔运行,行车速度与行车安全稍差。属于该种类型的轨道交通系统主要是低技术标准的轻轨和有轨电车。

### 1.2.1.3 按高峰小时单向运输能力分类

根据城市轨道交通系统高峰小时单向运输能力的大小,城市轨道交通系统可分为高运量、中运量和低运量等类型。

(1) 高运量城市轨道交通系统 该类型系统的高峰小时单向运输能力达到 30 000 人以上,属于该种类型的城市轨道交通系统主要有重型地铁和轻型地铁等。

(2) 中运量城市轨道交通系统 该类型系统的高峰小时单向运输能力为 15 000~30 000 人,属于该种类型的城市轨道交通系统主要有微型地铁、高技术标准的轻轨和独轨铁路。

(3) 低运量城市轨道交通系统 该类型系统的高峰小时单向运输能力为 5 000~15 000 人,属于该种类型的城市轨道交通系统主要有低技术标准的轻轨、自动导向交通系统和有轨电车。

应当指出,以上根据城市轨道交通系统的基本技术特征,路权是否专用、列车运行控制方式的不同以及高峰小时单向运输能力的大小进行的分类并不是绝对的。事实上,在一些不同类型城市轨道交通系统之间并没有明确的、清晰的界限。专业文献资料表明,国外对同一种城市轨道交通系统有轻型地铁和轻轨等不同称呼的情况。此外,一种城市轨道交通系统归入何种运量类型也是有条件的,因为计算城市轨道交通系统高峰小时单向运输能力的基本参数是列车间隔时间、车辆定员人数和列车编组辆数等,即使是同一城市轨道交通系统,这些参数也可能是多值的,这里进行分类的基本依据是根据某种城市轨道交通系统有关参数的常用取值。

## 1.2.2 城市轨道交通的技术经济特征

### 1.2.2.1 地下铁道技术经济特征

地下铁道通常都是专用线路,没有平面交叉。地铁线路除修建在地下隧道外,也有部分是修建在地面或高架桥上。地铁线路一般是双线,个别城市也有四线地铁情况。正线最大坡度一般为 3%,最小曲线半径一般为 300~400m。轨道较多采用焊接长钢轨,混凝土整体道床。

地铁车站按其运营功能划分有终点站、中间站和换乘站。车站由出入口、站厅、通道、楼梯、自动扶梯、站台、售票房、行车作业用房和机电设备用房等组成。车站设备的通过能力根据远期高峰客流数以及考虑留有余地进行确定。车站的站台设计为高站台,有侧式、岛式和混合式等型式。早期地铁多为侧式站台,现在较多选择的是岛式站台,但高架中间站的站台宜采用侧式站台。站台长度应满足远期列车编组长度的需要。

地铁车辆宽度在 2.8~3m 左右。车辆设计除具有大容量的特点外,在牵引控制、调速制动以及故障诊断等方面广泛采用了各种先进技术,具有自动化程度较高的特点。车辆座席有纵向和横向两种布置。车辆定员为 200~320 人。车辆的最高速度可达 80~100

km/h,运营速度约为 35~40km/h。

地铁列车在信号系统控制下运行。控制方式主要有采用色灯信号、自动闭塞设备、调度集中控制和采用列车自动控制系统、计算机集中控制两种类型。列车自动控制系统(ATC)由列车运行自动防护(ATP)、列车运行自动驾驶(ATO)和列车运行自动监控(ATS)三个子系统组成。地铁列车的编组辆数通常为 4~8 辆,但也有 10 辆编组的情况。列车运行的最小间隔时间可达到 75s。

单向小时最大运输能力在 30 000~60 000 人之间。地下铁道其他的技术经济特点还包括安全准点、节约土地、节省能源、环境污染小、影响城市景观小以及综合造价高、修建周期长等。

### 1.2.2.2 轻轨铁路技术经济特征

轻轨线路的设计方案较多,没有固定的模式。线路修建往往是因地制宜,既可修建在市区街道上,也可修建在地下隧道或高架桥上。地面轻轨线路可分为:无平面交叉的专用行车线路、有平面交叉的专用行车线路和与其他机动车辆共用行车线路 3 种类型。轻轨线路大多是双线,但支线、短程区间或道路用地较为紧张的地段也有设计为单线的情况。线路最大坡度可达 8%,最小曲线半径可达 30m。

轻轨铁路车站按其运营功能划分有终点站、中间站和换乘站。终点站和位于中心商业区的中间站应具备集散较大客流的能力。换乘站是指位于同一或不同交通系统线路交汇点的车站,它应具备满足各种客流性质和不同客流方向的旅客进行换乘的能力和便利性。车站的站台大多设计为低站台,有侧式、岛式和混合式等布置。侧式站台又有横列式、纵列式和单列式几种形式。

轻轨车辆是由老式有轨电车发展而来,旧式轻轨车辆宽度在 2.2~2.4m 左右,新式轻轨车辆为适应客运量增加的需求,有向长和宽发展的趋势,宽度在 2.5~2.6m 左右。车辆设计除采用大容量外,还有轻型化、铰接式、低地板和宽敞舒适等特点。车辆座席有纵向和横向两种布置。横向又分两边双人座、两边单人座和一边双人座一边单人座等布置形式。近年来各国制造的新型轻轨车辆有 4 轴车、6 轴单铰接车和 8 轴双铰接车 3 种车型,车辆定员在 130~270 人之间,而旧型轻轨车辆定员一般在 100 人左右。轻轨车辆的最高速度可达 60~80km/h,运营速度约为 20~35km/h。

轻轨列车的运行控制有人工视觉控制、在 ATP 监控下的人工驾驶和列车运行自动控制三种类型。

轻轨列车的编组辆数为 1~6 辆,但通常小于 4 辆。列车运行的最小间隔时间通常为 2min,最短为 90s。

单向小时最大运输能力在 8 000~40 000 人之间。

轻轨铁路其他的技术经济特点还包括修建周期短,工程投资少,运营成本低,运行噪声小,能适应陡坡急弯,旅客乘坐舒适等。

### 1.2.2.3 独轨铁路技术经济特征

国外已建成城市独轨铁路的长度通常为 10km 左右,单、双线都有,以单线为主。最大坡度可达 6%,最小曲率半径为 60 米。

轨道由轨道梁,支柱与道岔三部分组成。轨道梁为予应力钢筋混凝土结构,起承载、运行、导向及稳定车辆的作用。独轨铁路有跨骑式和悬挂式两种,跨骑式独轨的轨道梁顶面是列车的运行轨道。支柱的主要形式为 T 型。

跨骑式与悬挂式两类独轨的车辆形式是不同的,跨骑式独轨车辆为采用橡胶轮行驶的电动车,其车体较宽,约为 3m;悬挂式独轨车辆有用橡胶轮的,也有用钢轮的,车体宽度约为 2.6m。就车辆定员而言,跨骑式为 140~190 人,悬挂式为 100~160 人。车辆的最高速度可达 80km/h,运营速度约为 30km/h。

独轨列车通常为 4 节编组,单向每小时的最大运能为 5000~20000 人。

独轨铁路的线路工程造价低,占地面积少,但能耗大,速度低。

#### 1.2.2.4 自动导向交通系统技术经济特征

线路长度通常在 5~15km 间,以双线为主,但也有环形单线和网状线路。最大坡度可达 7%~10%,最小曲线半径可达 10~30m。

轨道多为混凝土高架结构,车辆在导轨上行驶,导向方式有中央凸型导向、中央内侧导向和两侧侧面导向三种。

车站分终点站、中间站和管理站,站间距较短。有的中间站性铺设侧线。管理站有停留备用车、空车以及紧急待避等设施。

车辆为轻小型,车体宽度在 2m 左右,长度多为 4~8m。电力驱动,动力从侧面供给,交、直流均可以。车轮采用橡胶轮胎。车辆定员在 20~80 人左右。最高速度在 60km/h 左右,运营速度在 30~40km/h 左右。

列车运行采用自动控制,ATC 系统按列车运行图集中调度,自动控制列车上的限速装置和驾驶装置,同时兼管车站作业。

列车通常采用短编组,大多为 2 辆编组,但也可以单车运行或 6 辆编组运行,以适应运输需求。此外,列车在按列车运行图运行的同时,还可按乘客要求方式运行。列车最小运行间隔时间多在 20~120s 左右。

单向小时最大运输能力在 10000~30000 人之间。

自动导向交通系统其他的技术经济特点为工程造价低,运行噪音小,占地面积少,旅客乘坐舒适,能适应陡坡急弯等。

#### 1.2.3 城市轨道交通系统的方案评估

在选择城市轨道交通系统方案时,首先应评估现有的城市交通系统,现有交通系统的服务供给不足,可以通过交通拥挤程度和乘车时间过长等指标来反映。在证明现有系统已确实无潜力可挖时,才需考虑选择需要巨额投资的新系统。

城市轨道交通系统方案评估的主要方面包括需求预测、系统成本、系统的现实性、外部效益和环境影响。

(1) 需求预测 未来交通需求预测可在现有交通客流调查的基础上,通过考虑人口增长、收入水平、私人小汽车拥有量以及邻近地区发展等因素,采用一定的数学模型和算法来进行估算。需求预测应防止高估的情况,因为各种交通工具的竞争、票价过高和平行交通线路的修建都可能对预测的交通需求产生比想象要大得多的抑制。

(2) 系统成本 一旦交通需求确定后,就可以考虑能满足这种需求的轨道交通系统。在几种不同的轨道交通系统能力都能满足交通需求时,系统的成本对系统的选择确定无疑有重要的影响。系统的总成本包括线路设施、车辆等设备的投资成本和运营成本。投资成本按年计算,由年折旧费和利息构成。运营成本可以分为与距离有关的成本、与时间有关的



成本和与线路有关的成本,前两项又称为可变成本。系统的总成本通常以每人公里成本的形式来表示,使不同轨道交通系统的成本可以进行比较。

(3) 系统的现实性 主要考虑工程项目的工期要求,施工的困难程度,资金来源,国外筹措资金的政治、经济环境等因素。此外,如果不能收回全部投资,则能否获得补贴及补贴来源、补贴数额等问题也应加以考虑。

(4) 外部效益 外部效益是指轨道交通系统给整个社会带来的经济效益,如缩短乘客旅行时间、减轻交通疲劳、减少事故费用、缓和道路阻塞程度、提高沿线土地使用价值、增加投资和就业机会、降低能源消耗等带来的经济效益。外部效益中有相当部分是无形效益,即间接使社会增加财富或难以用市场价值尺度进行较为准确计量的经济效益。由于影响外部效益的变量和不确定因素较多,加上外部效益的产生往往是在系统建成后的若干年,外部效益的定量评价因此变得比较困难,一套完整可行的外部效益定量评价方法还有待于完善。

(5) 环境影响 环境污染对人类生活质量、动植物生存的影响,环境污染引起的巨大社会代价,使得各个国家对环境保护越来越重视。由于城市轨道交通系统采用电力牵引,它对空气的污染比非轨道交通系统要低得多。不过城市轨道交通系统仍然有噪声、振动、电磁干扰等对环境的影响因素,因此在选择轨道交通系统时必须考虑各种系统对环境的不同影响。当然在选择城市轨道交通系统方案时,不能只根据环境影响一个因素就排除一个系统,但每一系统在有利环境保护方面的价值是不容忽视的。

#### 1.2.4 城市轨道交通系统的运输组织

从社会效益出发,城市轨道交通系统应充分发挥运量大、规律性强的特点,保证安全、迅速、准点和舒适地运送旅客。从企业经济效益出发,城市轨道交通系统应能实现高效率 and 低成本。为了达到上述目标,城市轨道交通系统的运输组织必须以运输计划为基础,即根据客流的特点,合理编制运行计划,合理调度指挥列车运行。

运输计划将涉及到客流计划,全日行车计划,车辆配备计划,列车交路计划。下面就分别予以说明。

##### 1.2.4.1 客流计划

客流计划是对运输计划期间轨道交通线路客流的规划。它是全日行车计划、车辆配备计划和列车交路计划编制的基础。在新线投入运营的情况下,客流计划根据客流预测资料进行编制;在既有运营线路的情况下,客流计划根据客流统计资料和客流调查资料进行编制。客流计划的主要内容包括站间到发客流量,各站两个方向的上下车人数,全日、高峰小时和低谷小时的断面客流量,全日分时最大断面客流量等。

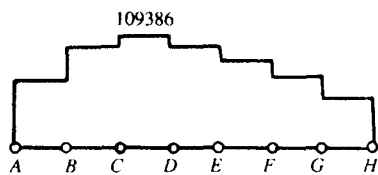


图 1-1 断面客流图(下行)

客流计划以站间到发客流量资料作为编制基础,分步计算出各站上下车人数和断面客流量数据。表 1-1 是一条有 8 座车站轻轨线路的站间到发客流量斜表,根据站间到发客流量资料可以计算出各站上下车人数,见表 1-2。本断面的客流量等于上一断面的客流量加车站的上车人数减车站的下车人数,见表 1-3。根据表 1-3 资料可绘制断面客流图,见图 1-1。