

高等学校交通运输专业规划教材  
高等教育应用型人才培  
养系列教材

# 城市轨道交通新技术

(第2版)

薛 锋 朱志国 陈钉均 © 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·





# 前言 (第2版)

PREFACE

随着我国城镇化进程的加快，城市现有的公共交通体系面临着巨大压力。在城市道路建设趋于饱和的情况下，大力发展公共交通，构筑多元化、立体化、现代化的城市公共交通体系是解决我国目前交通拥堵问题的主要出路。城市轨道交通因其具有运量大、快速、准点、节能环保、安全舒适等优点，已成为我国大中城市公共交通网络最重要的组成部分。

城市轨道交通是现代大城市公共交通的发展方向，也是建设绿色城市、智能城市的有效途径。《交通强国建设纲要》提出“建设城市群一体化交通网，推进干线铁路、城际铁路、市域（郊）铁路、城市轨道交通融合发展”。由此可见，轨道交通在促进都市圈和城市群一体化发展方面的重要作用日益凸显，我国城市正走向轨道交通的新时代。近年来，伴随着科学技术的进步，在城市轨道交通的发展过程中涌现出许多创新技术及先进的施工、管理方法，有效地解决了城市轨道交通规划建设、运营和管理过程中的实际问题。为了适应城市轨道交通快速发展的需要，编者紧跟城市轨道交通科技发展前沿，在广泛听取专家和读者意见的基础上，对《城市轨道交通新技术》第一版进行了修正、补充和完善。

第二版《城市轨道交通新技术》继承了第一版主要的篇章布局，涵盖了城市轨道交通工程建设及运营管理中的新技术和新方法，主要内容包括：城市轨道交通发展概述、线路及轨道结构新技术、车站新技术、载运工具新技术、供电新技术、通信信号新技术、列车控制新技术、运营维护新技术、规划设计新技术九大板块。本书继承了第一版的基本内容和特色，根据城市轨道交通的最新发展情况，对原来的相关技术进行了更新和完善，大幅增加了城市轨道交通的供电新技术和运营维护新技术，系统介绍了“互联网+”“大数据”背景下的城市轨道交通新技术。在编写理念上坚持知识传授与能力培养并重，拓展学生的思维和知识面，并力求内容适度、层次结构清楚，便于学生自学。本书可供高等院校交通运输类、城市轨道交通类专业学生作教材使用，同时也可供城市轨道交通行业的工作人员学习参考。

全书由西南交通大学薛锋、朱志国、陈钉均担任主编，研究生王朝阳、任子兰和李焱茹在书稿编写过程中，进行了大量的资料收集、整理和编辑工作，在此表示感谢。

本书在编写过程中参考引用了国内外专家学者的大量文献著作、论文研究成果，在此向有关作者表示感谢。

由于本书涵盖内容较多，加之编写时间较紧且作者水平有限，书中难免有不妥之处，诚挚希望各位专家和读者批评指正。

编 者

2021年4月于成都

# 前言 (第1版)

PREFACE

城市轨道交通是城市基础设施中公共交通系统的重要组成部分。从各国城市化进程的实践来看，轨道交通凭借运量大、速度快、安全可靠、准点舒适的技术优势在发达国家和地区成为主要的城市交通工具，备受市民欢迎。我国北京、上海、广州、重庆、深圳等城市也拥有相当规模的轨道交通线路，轨道交通现已逐步成为居民出行的首选交通工具，也成为政府推行“公交优先”政策的主要手段，大力发展城市轨道交通已成为政府和民众的普遍共识。

城市轨道交通的建设及运营能促进工业、运输、房地产等相关产业的发展，刺激就业，促进沿途土地升值，拓展城市发展空间，具有明显的外部经济性，而且随着社会发展、人口增加、路网扩大以及服务水平的提高，城市轨道交通将吸引更多的客流，其附属的经营性资产具有巨大的升值潜力。同时，城市轨道交通网络具有规模经济圈的属性，辐射影响范围覆盖网内大部分区域和周边区域。当城市轨道交通形成网络化运营后，作为综合性的网络平台可将其他各种网络（如交通运输网、服务网、商贸网等）都载于其间。轨道交通网络强大的聚集和释放效应使网内的客流、物流、资金流、信息流等资源和服务在城市各区域乃至城市间快速流通，改变了社会的消费、生活和生产方式，对城市经济运行产生深远影响。

城市轨道交通由于自身所具备的社会属性和经济属性，使之成为城市交通发展战略的重点，同时也被视为城市交通体系的骨干力量。因此，我国政府提出“科学制定城市轨道交通技术路线，规范建设标准，有序推进轻轨、地铁、有轨电车等城市轨道交通网络建设”的政策，并将城市轨道交通装备列为战略性新兴产业创新发展工程。在城市轨道交通的发展过程中，涌现了很多创新技术及先进施工、管理方法，有效地解决了城市轨道交通规划建设、运营和管理中的实际问题，也促进了我国城市轨道交通政策、法规和标准体系的建立。

本书从城市轨道交通工程建设及运营管理实践中概括、归纳、提炼城市轨道交通的新技术，在阐述新技术原理的同时，突出其应用。按照城市轨道交通发展概述、线路及轨道结构新技术、车站新技术、载运工具新技术、供电新技术、通信信号及列车控制新技术、系统设备新技术、智能化系统、规划设计新技术、运营组织管理新技术十大板块，介绍了城市轨道交通新技术各个方面的发展。在编写理念上坚持知识传授与能力培养并重，拓展学生的思维和知识面，并力求内容适度、层次结构清楚，便于学生自学。本书可供高等院校交通运输类、城市轨道交通类专业学生作教材使用，同时也可供交通运输行业的工作人员学习参考。

全书由西南交通大学薛锋、朱志国、陈钉均主编，研究生李文燕、唐丹凤、王秋晨、赵蕾和刘珊珊在书稿编写过程中进行了大量的资料收集、整理和编辑工作，在此表示感谢。

本书在编写过程中参考引用了国内外专家学者的大量文献著作、论文研究成果，在此向有关作者表示感谢。

由于城市轨道交通新技术涉及内容较多，而教材篇幅内容有限，加之编写时间比较紧，且编写人员水平有限，在全书内容结构的组织及文献材料的取舍方面，难免有不妥之处，敬请国内外同行、专家及各位读者批评指正。

编 者

2015年10月于成都







# 目 录

## CONTENTS

### 第一章 绪 论

- 第一节 城市轨道交通概述 .....001
- 第二节 城市轨道交通的新技术 .....011
- 第三节 城市轨道交通的发展趋势 .....013

### 第二章 城市轨道交通线路及轨道结构新技术

- 第一节 概 述 .....017
- 第二节 线路勘测新技术 .....019
- 第三节 线路施工新技术 .....030
- 第四节 线路管理新技术 .....033

### 第三章 城市轨道交通车站新技术

- 第一节 概 述 .....041
- 第二节 车站施工新技术 .....043
- 第三节 车站设备新技术 .....063
- 第四节 车站运营管理新技术 .....083

### 第四章 城市轨道交通载运工具新技术

- 第一节 概 述 .....097
- 第二节 城市轨道交通车辆车门新技术 .....098
- 第三节 弹性车轮在城市轨道交通车辆中的发展与运用 .....105
- 第四节 城市轨道交通车辆转向架新技术 .....113
- 第五节 城市轨道交通车辆检测新技术 .....118

### 第五章 城市轨道交通供电新技术

- 第一节 概 述 .....126
- 第二节 SCADA 系统在城市轨道交通供电系统中的应用 .....128

第三节	城市轨道交通供电系统中压环网新技术 .....	133
第四节	滑动供电系统在城市轨道交通中的应用 .....	139
第五节	城市轨道交通双向变流式牵引供电系统 .....	142
第六节	城市轨道交通供电系统合环精准协调控制新技术 .....	149

## 第六章 城市轨道交通通信信号新技术

第一节	概 述 .....	154
第二节	城市轨道交通通信新技术 .....	156
第三节	城市轨道交通信号新技术 .....	167

## 第七章 城市轨道交通列车控制新技术

第一节	概 述 .....	174
第二节	针对单轨交通的车载 ATP 系统 .....	175
第三节	全自动无人驾驶系统的 ATS 联动技术 .....	179
第四节	列车自动运行 ATO 仿真系统设计 .....	182
第五节	UTO 城市轨道交通的列车控制管理系统 .....	186
第六节	多制式冗余列车运行控制系统 .....	191

## 第八章 城市轨道交通运营维护新技术

第一节	客运服务系统新技术 .....	195
第二节	安全保障设备新技术 .....	204
第三节	客流信息检测新技术 .....	224
第四节	城市轨道交通网络化运营技术 .....	229
第五节	基于“互联网+”的城市轨道交通票务管理技术 .....	234
第六节	城市轨道交通全自动运行线路上的 列车灵活编组技术 .....	239
第七节	城市轨道交通列车预警新技术 .....	244
第八节	城市轨道交通列车运行图编制系统 .....	248

## 第九章 城市轨道交通规划设计新技术

第一节	规划与设计的基本理论与理念 .....	254
第二节	规划与设计的新理论与理念 .....	259
第三节	规划设计常用软件工具 .....	265
第四节	城市轨道交通一体化衔接规划设计新技术 .....	268
第五节	城市轨道交通线路规划设计新技术 .....	272

参考文献 .....	283
------------	-----

# 第一章 绪 论

## 第一节 城市轨道交通概述

### 一、城市轨道交通的概念

#### (一) 城市轨道交通的定义

城市轨道交通通常是指具有固定线路，铺设固定轨道，配备运输车辆及服务设施等的公共交通设施。在国家标准《城市公共交通常用名词术语》中，将城市轨道交通定义为“通常以电能为动力，采取轮轨运转方式的快速大运力公共交通的总称”，但城市轨道交通是一个包含范围较大的概念，在国际上没有统一的定义。

一般而言，广义的城市轨道交通是指以轨道运输方式为主要技术特征的城市公共客运交通系统中具有中等以上运量的轨道交通系统（有别于道路交通），主要为城市内（有别于城际铁路，但可涵盖郊区及城市圈范围）公共客运服务，是一种在城市公共客运交通中起骨干作用的现代化立体交通系统。城市轨道交通（Rail Transit）具有运量大、速度快、安全、准点、保护环境、节约能源和用地等特点。目前，世界各国普遍认识到解决城市交通问题的根本出路在于优先发展以轨道交通为骨干的城市公共交通系统。

#### (二) 城市轨道交通在城市公共交通中的地位与作用

(1) 城市轨道交通是城市公共交通的主干线、客流运送的大动脉，是城市的生命线工程。建成运营后，将直接关系到城市居民的出行、工作、购物和生活。

(2) 城市轨道交通是世界公认的低能耗、少污染的绿色交通，是解决“城市病”的一把“金钥匙”，对于实现城市的可持续发展具有非常重要的意义。

(3) 城市轨道交通是城市建设史上最大的公益性基础设施，对城市的全局和发展模式将产生深远的影响。城市轨道交通的建设可以缓解城市中心人口密集、住房紧张、绿化面积小、空气污染严重等城市通病。

(4) 城市轨道交通的建设与发展有利于提高市民出行的效率，节省时间，改善生活质量。

### 二、城市轨道交通的类型

城市轨道交通种类繁多，技术指标差异较大，世界各国评价标准不一，并无严格的分类。城市轨道交通在世界范围内发展较快，由于国家、城市、地区以及服务对象的不同等，城市



轨道交通已发展成为多种类型，尚无统一的分类标准。不同的分类方法可以分出不同的结果：

- (1) 若按容量（运送能力）分类，可分为大容量、大容量、中容量和小容量；
- (2) 若按导向方式分类，可分为轮轨导向和导向轨导向；
- (3) 若按线路架设方式分类，可分为地下、高架和地面；
- (4) 若按线路隔离程度分类，可分为全隔离、半隔离和不隔离；
- (5) 若按轨道材料分类，可分为钢轮钢轨系统和橡胶轮混凝土轨道梁系统；
- (6) 若按牵引方式不同，可分为旋转式直流、交流电机牵引和直线电机牵引；
- (7) 若按运营组织不同，可分为传统城市轨道交通、区域快速轨道交通和城市（市郊）铁路。

铁路。

城市轨道交通按运能范围、车辆类型及主要技术特征可分为有轨电车、地下铁道、轻轨轨道交通、市郊铁路、单轨道交通、新交通系统、磁悬浮交通、智能轨道快运系统八类。

### （一）有轨电车

有轨电车（Tram 或 Streetcar）是采用电力驱动并在轨道上行驶的轻型小编组轨道交通车辆，是使用电车牵引、轻轨导向、1~3 辆编组运行在城市路面线路上的低运量轨道交通系统，图 1-1 所示为沈阳有轨电车。



图 1-1 沈阳有轨电车

有轨电车是最早发展的城市轨道交通形式之一，一般设在城市中心穿街走巷运行，具有上下车方便的特点。

改造后的现代有轨电车与性能较差的轻轨轨道交通已很接近，只是车辆尺寸稍小一些，运营速度接近 20 km/h，单向运能可达 2 万人次/h。

优点：

(1) 对于中型城市来说，路面电车是适宜的选择。1 km 路面电车线所需的投资只是 1 km 地下铁道的 1/3。

(2) 无须在地下挖掘隧道。

(3) 相较其他路面交通工具，路面电车能更有效地减少交通意外的比例。



(4) 路面电车以电力推动，车辆不会排放废气，是一种无污染的环保交通工具。

缺点：

(1) 成本不及公共汽车低，对小型城市来说财政负担颇重。

(2) 效率比地下铁道低。

(3) 路面电车的速度一般较地下铁路慢，除非路面电车行驶的大部分路段是专用的（主要行驶专用路段的路面电车一般称为轻便铁路）。

(4) 路面电车每小时可载客约 7 000 人，地下铁道每小时载客可达 12 000 人。

(5) 路面电车路轨占用路面，路面交通要为路面电车改道，并让出行车线。

(6) 需要设置架空电缆。

## (二) 地下铁道

地下铁道简称地铁（Metro 或 Underground Railway 或 Subway 或 Tube），是由电力牵引、轮轨导向、轴重相对较重、具有一定规模运量、按运行图行车、车辆编组运行在地下隧道内，或根据城市的具体条件，运行在地面或高架线路上的快速轨道交通系统。图 1-2 所示为无人驾驶地铁。



图 1-2 无人驾驶地铁

地铁是城市快速轨道交通的先驱。地铁的运能单向在 3 万人次/h，最高可达 6~8 万人次/h。最高速度可达 160 km/h，旅行速度可达 40 km/h 以上，可 4~10 辆编组，车辆运行最小间隔可低于 1.5 min，驱动方式有直流电机、交流电机、直线电机等。地铁系统与国家干线铁路一样，主要由线网、轨道、车站、车辆、通信信号等设备构成。

优点：

(1) 运量大、速度快。地铁的运输能力要比地面公共汽车大 7~10 倍，行驶的速度可超过 100 km/h。地铁适用于出行距离较长、客运量需求大的城市中心区域。一般认为，人口超过百万的大城市就应该考虑修建地铁。

(2) 可以节省地面空间，令地面地皮用于其他用途。

(3) 可以减少地面的噪音。



(4) 行车受到的交通干扰较少，可节省大量通勤时间。

(5) 节约能源，减少污染。

缺点：

(1) 建造成本高。由于要钻挖地底，地下建造成本比建于地面高，每公里投资在3亿~6亿元人民币。

(2) 前期时间长。建设地铁的前期时间较长，由于需要规划和政府审批，甚至还需要试验，从开始酝酿到付诸行动破土动工需要非常长的时间。

(3) 地下铁道由于大部分线路在地下或高架通行，因此技术水平要求较高，可靠性和安全性要求也高。

### (三) 轻轨交通

轻轨(Light Rail Transit, 简称LRT), 原来的定义是指采用轻型轨道的城市交通系统。在《城市轨道交通工程项目建设标准》中, 把每小时单向客流量为0.6万~3万人次的轨道交通定义为中运量轨道交通, 即轻轨。轻轨是在有轨电车的基础上改造发展起来的城市轨道交通系统, 如图1-3所示。



图 1-3 轻 轨

轻轨一般采用地面和高架相结合的方法建设, 路线可以从市区通往近郊。列车编组采用3~6辆铰接式车体。由于轻轨采用了线路隔离、自动化信号、调度指挥系统和高新技术车辆等措施, 最高速度可达80 km/h, 克服了有轨电车运能低、噪声大等问题。

优点: 轻轨具有投资少(每公里造价在0.6亿~1.8亿元人民币)、建设周期短、运能高、灵活等优点。

缺点: 由于轻轨系统车辆长度较短, 载客量较少, 且运行速度不高, 因此运量较低, 单向高峰小时的运输能力一般在1~3万人/h以内。

轻轨已形成三种主要类型: 钢轮钢轨系统、线性电机牵引系统和橡胶轮轻轨系统。

(1) 钢轮钢轨系统即新型有轨电车, 是应用地铁先进技术对老式有轨电车进行改造的成果。

(2) 线性电机牵引系统(Linear Motor Car)是曲线型电机牵引、轮轨导向、车辆编组运行在小断面隧道及地面和高架专用线路上的中运量轨道交通系统。线性电机列车具有车身矮、





重量轻、噪声低、爬坡能力强和可通过小半径曲线等优点，可以轻便地钻入地下，爬上高架，是地下与高架接轨的理想车型。

(3) 橡胶轮轻轨系统采用全高架运行，不占用地面道路，具有振动小、噪声低、爬坡能力强、转弯半径小、投资较少等优点。

#### (四) 市郊铁路

所谓市郊铁路，指的是建在城市内部或内外结合部，线路设施与干线铁路基本相同，服务对象以城市公共交通客流（即短途、通勤旅客）为主的铁路，如图 1-4 所示。



图 1-4 市郊铁路

市郊铁路一般和干线铁路设有联络线，设备与干线铁路相同，线路大多建在地面，部分建在地下或高架。其运行特点接近于干线铁路，只是服务对象不同。

市郊铁路是伴随着城市规模的扩大、卫星城的建设而发展起来的，通常使用电力牵引和内燃牵引，列车编组多在 4~10 辆，最高速度可达 100~120 km/h。市郊铁路运能与地铁相同，但由于站距较地铁长，运行速度超过地铁，可达 80 km/h 以上。

优点：与地铁相比具有站距长、旅速高、运能大，以及投资省、造价低等优点，列车编组多、车体大，大部分线路可铺设在地上（高架或地面方式），设站相对减少，车站结构较简单，建设费用较低；与干线铁路技术标准相兼容，可实现两者的功能衔接与设备共享。

缺点：目前的市郊铁路尚未实现与地铁完全兼容，购票与地铁系统分开，且进出站时间较长。

#### (五) 单轨交通

单轨也称作独轨（Monorail），是指通过单一轨道梁支撑车厢并提供导引作用而运行的轨道交通系统，其最大特点是车体比承载轨道要宽。

根据支撑方式的不同，单轨通常分为跨座式和悬挂式两种。跨座式是车辆跨座在轨道梁



上行驶；悬挂式是车辆悬挂在轨道梁下方行驶。

跨座式轨道由预应力混凝土制作，车辆运行时走行轮在轨道上平面滚动，导向轮在轨道侧面滚动导向。图 1-5 所示为跨座式单轨交通。

悬挂式轨道大多由箱形断面钢梁制作，车辆运行时走行轮沿轨道走形面滚动，导向轮沿轨道导向面滚动导向，如图 1-6 所示。



图 1-5 跨座式单轨交通



图 1-6 悬挂式单轨交通

单轨的车辆采用橡胶轮，电气牵引，最高速度可达 80 km/h，旅行速度 30 ~ 35 km/h，列车可 4 ~ 6 辆编组，单向运送能力为 1 万 ~ 2.5 万人次/h。

中国首条跨座式单轨线路是在有“山城”之称的重庆修建的。跨座式单轨交通十分适合重庆市道路坡陡、弯急、路窄的地形特点，同时由于结构轻巧、简洁、易融于山城景色取得了较好的景观效果。

优点：

(1) 所占空间小。不单是所占的地面面积小，垂直空间亦较小。单轨铁路所需的宽度主要由车辆的宽度决定，与轨距无关。且单轨铁路多数以高架兴建，地面上只需很小的空间建造承托路轨的桥墩。

(2) 相比其他高架铁路，单轨所占的空间较小，亦不影响视线，能有效利用道路中央隔离带，适于建筑物密度大的狭窄街区。



(3) 单轨使用橡胶轮胎在混凝土或者在钢轨上行走，噪声污染小。

(4) 单轨铁路的爬坡能力强，拐弯半径小，一般正线最大坡度 60%，最小曲线半径 100 m，适合复杂地形。

缺点：

(1) 跨座式单轨的道岔结构复杂，因而限制了列车的最短运行间隔。

(2) 存在橡胶轮与轨道梁摩擦产生橡胶粉尘的现象，对环境有轻度污染，且能源消耗较大。

(3) 如果出现紧急情况，单轨铁路上的乘客没有逃生的地方。车的两旁没有可站立的路轨，而且离地面很高。头尾两端的路轨亦很窄。有些单轨铁路因此在路轨的两旁建有可供人行的紧急通道。

(4) 单轨的速度及载客量通常比不上其他轨道交通系统。不过，大型跨座式单轨通过加编组、缩短间隔等方式，客流量可以与地铁不相上下。

## (六) 新交通系统 AGT

新交通系统 (Automated Guideway Transit, 简称 AGT) 是一个模糊的概念，广义上的定义为，AGT 是那些所有现代化新型公共交通方式的总称。狭义上的定义为，AGT 是由电气牵引，具有特殊导向、操作和转向方式胶轮车辆，单车或数辆编组运行在专用轨道梁上的中小运量轨道运输系统，如图 1-7 所示。



图 1-7 新交通系统

在新交通系统中，车辆在线路上可无人驾驶自动运行，车站无人管理，完全由中央控制室的计算机集中控制，自动化水平高。新交通系统与独轨道交通有许多相同之处，最大的区别在于该系统除有走行轨外，还设有导向轨，故新交通系统也称为自动导向轨道交通。

新交通系统的导向系统可分为中央导向方式和侧面导向方式，每种方式又可分为单用型和两用型。所谓单用型是指车辆只能在导轨上运行，两用型则指车辆既可在导轨上运行，又可以在一般道路上行驶。

主要特点：具有高速、准点、舒适和污染小、自动化水平高等优势，克服现有交通方式在环境和经营上的缺陷，满足现有运输方式难以适应的运输需求。

天津市在滨海新区开通了全长 7.6 km 的亚洲首条胶轮导轨线路，北京市开通了服务于首



都机场 T3 航站楼的新交通系统，上海市也开通了胶轮导轨电车。

旅客捷运系统 (Automated People Mover, 简称 APM), 是一种无人驾驶、立体交叉的大众运输系统。这个铁路名词通常只形容在范围狭小的地区所运行的低载量铁路运输, 例如机场、城市商业区或主题公园的铁路运输, 但有时此名词亦能应用于自动运行但复杂的铁路运输。

旅客捷运系统并不是一种独立及特殊的铁路运输技术, 它通常会应用到多种铁路运输技术, 例如单轨铁路、轻轨运输或磁悬浮列车等。驱动系统方面可以采用传统的电动机、线型电动机或缆索拉动。有些复杂的旅客捷运系统采用多辆小型列车运行于多个下线站台上, 为乘客提供全时间运作的服务。这种像出租车般的系统一般被称为个人捷运系统。其他复杂的旅客捷运系统则有着大型运输系统的特征, 这类旅客捷运系统在定义上与自动化的大型运输系统并无明确分别。

珠江新城旅客自动输送系统是世界首条地下无人驾驶旅客自动输送系统, 将解决珠江新城核心区的交通疏导问题, 它将是珠江新城中央商务区 (Central Business District, 简称 CBD) 地区和天河商贸区内部的公交骨干线, 同时也可加强与海珠区联系, 满足其内部、珠江新城与天河商贸区、观光塔之间客流的交通需求, 以及旅游观光购物的出行需要。该系统与轨道交通线路形成快捷方便的连接, 促进了城市公共交通系统功能的充分发挥。珠江新城旅客自动输送系统如图 1-8 所示。



图 1-8 珠江新城旅客自动输送系统 (APM)

## (七) 磁悬浮交通

磁悬浮交通 (Magnetic Levitation for Transportation, 简称 MLT), 是一种非轮轨黏着传动而悬浮于地面的交通运输系统。磁悬浮列车利用常导磁铁或超导磁铁产生的吸力或斥力使车辆浮起, 用以上的复合技术产生导向力, 用直线电机产生牵引动力。上海磁悬浮列车如图 1-9 所示。





图 1-9 上海磁悬浮列车

优点：具有高速、低噪音、环保、经济和舒适等特点，是目前最快速的地面交通工具。

缺点：由于磁悬浮系统是凭借电磁力来进行悬浮、导向和驱动的，一旦断电，磁悬浮列车将发生严重的安全事故，然而断电后磁悬浮的安全保障措施仍然没有得到完全解决。

#### （八）智能轨道快运系统

智能轨道快运系统（Autonomous Rail Rapid Transit，简称 ART）具有城市轨道交通和地面公共交通双重属性，同时吸收了轨道交通准时、运量大、节能环保和地面公交运营灵活、综合成本低等优势。该系统主要由供电、通信信号、智轨电车（见图 1-10）、虚拟轨道、车站、检修中心 6 大基础部分构成。比照轨道交通系统，其最大的不同点在于用智轨电车代替轨道列车，用虚拟轨道代替了钢轨。这一替代在确保智轨电车具有有轨电车的安全与高效特性的同时，大大简化了系统结构，节省了系统的成本。



图 1-10 智轨电车工程化样车

智轨电车为采用 100%低地板构架、全电驱动、具备多种受电方式的双向行驶多编组胶轮车辆。它采用自动循迹、轨迹跟随、自主导向等技术，实现在虚拟轨道下的类轨道行驶；同时采用主动防护技术对电车的行驶进行电子约束与安全保障。智轨电车的头车头轴自动地按照地面的虚拟轨道或高精度电子地图运行，其他各轴自动跟随头车头轴的行驶轨迹，实现与轨道列车行驶在钢轨上相似的类轨道行驶。

虚拟轨道则为行车线路或辅助线路上设置的特定标识，其为车载自动循迹系统中的光学



感知、图像识别、激光检测等感知传感器提供导向特征输入，构建运行路径。

主要特点：

(1) 系统简洁、成本低。因无须铺设钢轨，对道路破坏性小；整车质量轻，单轴承载低，借用既有路面，无须对桥梁进行结构加强；同时可借助现有的道路交通管理系统，使运输道路上的信号系统无须大规模改造。

(2) 基础建设周期短。以绘制地面标志线代替钢轨铺设，施工期短；可借用城市现有道路运营，缩短了道路规划、拆迁和建设周期，预计从项目立项到全部运力上线仅需 12 个月。

(3) 运营灵活、适应性强。其无须铺设钢轨与供电线网，可采用共享路权方式，运营线路布置灵活；发生交通事故或严重拥堵时，可以临时授权绕道行驶，调度灵活；转弯半径小，双向行驶，可以在老城区相对狭窄的道路运行。

2019 年 12 月全球首条 ART 运营线——宜宾智轨 T1 线在四川省宜宾市投入商业运营，主线全长约 16.1 km，线路起自成贵宜宾西站，止于企业服务中心站，共设站 14 座，均为地面站，平均站间距约 1.1 km，其中地面线约 15.7 km，高架线路长约 0.4 km；支线全长约 1.6 km，设站 2 座，均为地面站，站间距约 1.2 km，线路起自主线长翠路站，止于峥嵘路南侧的白酒学院附近，串联起临港大学城与 T1 线主线。宜宾市智轨交通 T1 线经过长江大桥，穿越老城区，覆盖了城市发展主要客流走廊，从 2019 年 3 月 29 日至 12 月 31 日，累计试运行 278 天，共运行智轨列车 13 910 对，累计运行 3128 万列公里。全线开通后，T1 线路设置车辆最高运行速度 55 km/h，正线全程耗时约 40 min，平均旅行速度为 24.8 km/h 左右，相较宜宾传统公交线路 13 km/h 的旅行速度，全程耗时节约 25 min；列车运行图兑现率 98.8%、发车正点率 98.3%。ART 的大运量、舒适、准时、快速等特点已得到广大市民广泛认可，该线路开通试运营以来，平均日客流量达到 1.3 万人。

### 三、城市轨道交通的技术特性

#### 1. 城市轨道交通有较大的运输能力

城市轨道交通由于高密度运转，列车行车时间间隔短，行车速度高，列车编组辆数多而具有较大的运输能力。单向高峰每小时的运输能力最大可达到 6 万~8 万人次（市郊铁道）；地铁达到 3 万~6 万人次，甚至达到 8 万人次；轻轨 1 万~3 万人次，有轨电车能达到 1 万人次，城市轨道交通的运输能力远远超过公共汽车。

#### 2. 城市轨道交通具有较高的准时性

城市轨道交通由于在专用行车道上运行，不受其他交通工具干扰，不产生线路堵塞现象并且不受气候影响，是全天候的交通工具，列车能按运行图运行，具有可信赖的准时性。

#### 3. 城市轨道交通具有较高的速达性

与常规公共交通相比，城市轨道交通由于运行在专用行车道上，不受其他交通工具干扰，车辆有较高的运行速度，有较高的启、制动加速度，多数采用高站台，列车停站时间短，上下车迅速方便，而且换乘方便，从而可以使乘客较快地到达目的地，缩短出行时间。

#### 4. 城市轨道交通具有较高的舒适性



与常规公共交通相比，城市轨道交通由于运行在不受其他交通工具干扰的线路上，城市轨道车辆具有较好的运行特性，车辆、车站等装有空调、引导装置、自动售票等直接为乘客服务的设备，城市轨道交通具有较好的乘车条件，其舒适性优于公共电车、公共汽车。

#### 5. 城市轨道交通具有较高的安全性

城市轨道交通由于运行在专用轨道上，没有平交道口，不受其他交通工具干扰，并且有先进的通信信号设备，极少发生交通事故。

#### 6. 城市轨道交通能充分利用地下和地上空间

城市轨道交通由于充分利用了地下和地上空间的开发，不占用地面街道，能有效缓解由于汽车大量发展而造成的道路拥挤、堵塞，有利于城市空间合理利用，特别有利于缓解大城市中心区过于拥挤的状态，提高了土地利用价值，并能改善城市景观。

#### 7. 城市轨道交通的系统运营费用较低

城市轨道交通主要采用电力牵引，而且轮轨摩擦阻力较小，与公共电车、公共汽车相比节省能源，运营费用较低。

#### 8. 城市轨道交通对环境污染低

城市轨道交通由于采用电力牵引，与公共汽车相比不产生废气污染。城市轨道交通的发展，能减少公共汽车的数量，并进一步减少汽车的废气污染。同时，由于在线路和车辆上采用了各种降噪措施，一般不会对城市环境产生严重的噪声污染。

## 第二节 城市轨道交通的新技术

目前，我国城市轨道交通工程建设中研发出多项关键技术成果，这些成果来自生产一线，经过了实践的验证。新技术涵盖城市轨道交通系统各个组成部分的基础知识，并涉及多个与城市轨道交通相关的技术领域，内容包括线路及轨道结构、车站、载运工具、供电、通信信号、列车控制、运营维护及规划设计等各个方面。

自动可视系统使用高速摄像机来捕捉轨道图像，再利用软件分析采集信息；锁定轨温检测装置是由一个传感器元件和输出元件组成的，前者安装在轨腰上利用磁性检测锁定轨温，每隔一定时间采集钢轨应变和温度数据，并将其储存起来，输出元件由小型的接收器/全球卫星定位系统传感器组成，并同笔记本电脑相连，可从最大 200 英尺（ft，1ft=0.305 m）的距离外接收来自传感器的数据信息；GPS RTK 定位技术是以载波相位观测值为根据的实时动态定位技术，它将 GPS 与数据传输技术相结合，实时坐标进行数据传输，能够实时提供流动站在指定坐标系中的三维定位结果，并达到厘米级精度；轨道精密三维测控技术是建立自由测站三维边角测量网、应用轨道几何状态测量仪进行轨道精密测量，从而指导轨道精调施工、轨道精密验收检测等；真空管井复合降水技术是在井管和填料及地层中形成一定的真空度，使含水层和井管及填料之间形成更大的压力差，一方面提高重力水流速，另一方面削弱毛细管作用力使更多毛细水被抽出，达到增加出水量和增大降深的目的。这些新技术的应用让城市轨道交通线路建设更能适应多种实际的地形条件。



盖挖法是由地面向下开挖至一定深度后，将顶部封闭，其余的下部工程在封闭的顶盖下进行施工，其主体结构可以顺作，也可以逆作；集中供冷技术是相对于每个车站设置制冷机房而言，通过集中设置制冷机房，供应几个车站的冷冻水来实现空调的效果；集成闭式通风空调系统是利用传统系统中常规的通风空调设备，并采用成熟的风机变频技术以及在传统设备基础上改进而成的可自动开启表冷器，对传统闭式通风空调系统的各个子系统进行系统合并、集成，并重新组织系统布局；背散射技术是基于 X 射线技术的另一个应用发展，采用能量整形与“飞点”等技术。这些新技术的应用让城市轨道交通车站的运营管理更科学。

城市轨道交通车辆车门系统控制软件是与硬件部分关系密切的嵌入式系统软件；城市轨道交通车辆车门智能诊断技术主要通过将列车车门故障诊断及专业网络技术结合，对车门系统故障进行信息管理、危害度分析、故障定障诊断和故障预测；弹性车轮是在轮箍和轮芯之间镶嵌一个弹性元件，轮箍与车轮弹性装配在一起，大幅降低了簧下质量，从而降低磨损和噪声；转向架主要用于承受车辆自重及载重，将轴重均匀分配，同时传递车体与轮对之间、轮轨与车体之间的各种载荷及作用力；车辆综合检测体系以预防性维修一体化检测平台为主，在大数据中心的支持下，实时监控车辆关键部件的运行状态，执行故障预测与故障趋势判断，实现故障早期预警和分级报警。这些新技术的应用提高了城市轨道交通列车运行的安全性。

电力监控系统 SCADA，被称作远动监控行业数据采集系统，其作用主要是对远方运行的电力设备进行监测与控制，从而保证电力运行的安全；中压网络是通过中压电缆，纵向把上级主变电所和下级牵引变电所、降压变电所连接起来，横向把全线的各个牵引变电所、降压变电所等联系起来，起分配和传输电能作用的网络；滑动供电系统集成安全、经济、方便、美观于一身，利用电缆将车辆与系统中的集电小车相连接，为停泊在车辆段检修库内轨道上的车辆提供牵引和静调电力；双向变流器具备整流机组的牵引供电能力和能馈装置的制动回馈能力，形成新一代城市轨道交通牵引供电双向变流系统，可显著改善节能指标，优化供电环境；基于配电物联网的轨道交通供电电源精准协调控制技术是利用配电网的微型同步相量测量装置作为感知层，对合环点两侧进行高精度相角和电压测量，同时作为边缘物联代理用于进行实时潮流计算，通过精准控制选择合环点两侧相角和电压最小的时刻进行合环操作，确保合环操作的可靠性。这些新技术的应用让城市轨道交通供电技术更通用合理。

城市轨道交通通信系统是指挥列车运行，公务联络和传递各种信息的重要手段，是直接为轨道交通运营管理服务的，是保证列车及乘客安全、快速、高效运行的一种不可缺少的信息化、自动化、智能化的综合通信系统；基于移动闭塞方式的 ATC 系统主要是依靠漏缆、交叉感应电缆、扩频电台、裂缝波导管等方式传输数据；5G 移动通信技术在车地无线通信系统上的应用，会给轨道交通领域的无线通信技术带来一场重大的技术革命，将显著提高城市轨道交通的运营效率和乘客的用户体验；城市轨道交通列车全自动驾驶系统具有列车运行性能更佳、安全可靠更高、运能增大、运输成本降低等优势，是轨道交通技术发展的方向。这些新技术的应用让城市轨道交通通信信号传输更及时稳定。

针对单轨交通的车载 ATP 系统具有列车速度检测、列车定位、移动授权管理、发车监督等功能，负责列车运行间隔保护及超速防护，满足故障-安全原则，是保证列车运行安全的重要系统；全自动无人驾驶系统的 ATS 联动技术针对信号系统内部各专业进行联动，根据运营计划，对车、联锁、区域控制器等专业进行联动操作，来满足 FAO 系统各场景的自动运行，并能够在故障或紧急情况下自动进行操作处理；多制式冗余列车运行控制系统是指车载/轨旁





具备多种制式的列车运行控制能力，可自动或手动进行切换的列车运行控制系统的统称，包括车载多制式冗余列车运行控制系统、轨旁多制式冗余列车运行控制系统及完整的多制式冗余列车运行控制系统等。这些新技术的应用让城市轨道交通列车控制系统更安全有效。

清分中心系统是一套建立在轨道交通各线路 AFC 中央计算机系统基础之上的适用于本城市轨道交通线网特点的、高效可靠灵活的、体现公平性原则的收益清分模型；乘客信息系统是电力载波通信技术在地铁中的应用，主要由传输网络、媒体播放的软硬件系统及信息显示终端几部分组成；地铁站的环境监控系统利用分布式微机监控系统，对地铁车站及区间隧道内的空调通风、给排水、照明、电梯、自动扶梯、导向标志等机电设备进行全面的运行管理与控制；客流信息检测技术应用 AI、模式识别、多源数据融合等技术，采用复合式客流信息检测方法实现多种检测技术的深度融合和有效集成，形成全方位客流信息精准检测的整体解决方案；基于“互联网+”的城市轨道交通票务管理系统采用 B/S 架构，所有权限内工作人员都能通过浏览器方式访问和使用票务管理系统，可满足对既有线路的票卡、收益、现金、发票、报表等的管理。这些新技术的应用提高了城市轨道交通运营维护的效率。

轨道交通引导城市结构发展是通过大幅度提高交通供给，引导周边土地高强度利用；概念规划是把以时间期限为主导的规划模式转为以规模为主导，淡化规划期限；CARD/1 软件功能强大，包括线路平纵横设计、互通立交设计、土石方调配、安全性评价等功能，新版本还增加了排水、挡墙、防护、边沟/排水沟工程量统计、加宽/超高段统计、路面加宽工程量统计、分离式路基处理和全面的断链解决方案；基于 InfraWorks 对线路进行规划设计能够为工程设计、方案比选提供技术支持和新的平台，极大改善了传统二维环境下的不直观、设计效率低，沟通不顺畅等弊端，对提高设计效率，实现工程项目全生命周期内的信息共享、传递、协同、决策等具有良好作用。这些新技术的应用让城市轨道交通线路的总体规划设计更加科学合理。

## 第三节 城市轨道交通的发展趋势

### 一、我国城市轨道交通的发展现状

#### （一）工程造价得到合理控制

工程造价，是对整个轨道交通建设工程，通过成本分析、成本预算及成本决算而得出建设工程整体的成本投入情况，并为相关企业的投资提供参考。在传统工程造价的管理中，其施工预算超支的情况，主要是因为工程造价体系的不合理，导致了施工单位在施工中，无法有效控制成本，使其工程在建设过程中出现成本超支现象，为整个轨道交通建设的有序建设造成了极为不利的影 响。伴随我国相关行业发展和完善，城市轨道交通建设日趋规范化。

#### （二）融资渠道逐渐增多

建设城市轨道交通是一个非常大的项目，需要巨额的资金支持。想要保障轨道交通工程



顺利建设，资金的支持是必不可少的。另外，社会上的资金投入也是非常重要的，所以在工程实施的过程之中，为了保证工程建造中的融资，要持续地吸收社会资金，从而来保证轨道建设工程的顺利进行。目前，我国经济水平的提升，其社会的经济主体也在不断地攀升。此种情况，为轨道交通建设的相关部门提供了优质的条件，再加上现代融资的途径与方式的多样化，可以很大程度上节省工程成本。

### （三）轨道安全问题逐渐改善

安全问题是轨道交通建设的核心问题，能否安全运行成为轨道交通质量的标准和目标。安全的轨道交通运行，是城市居民日常出行的必要保障，同时也保障了人民的生命财产安全。现在，我国相关部门也对轨道交通建设安全性给予了高度重视，使轨道交通在运行及安全方面得到了完善和强化，相对应的安全问题也得到了进一步改善。

### （四）多种制式和系统并存

从已建和规划建设项目的情况看，根据轨道交通技术发展趋势和不同的运能需求，我国将形成类型众多的轨道交通系统来满足城市交通需求，并引入现代控制、现代通信和现代网络等技术，使轨道交通在城市交通中发挥更大的作用，安全更有保证，服务水平不断提高。我国轨道交通已拥有大运量的地铁系统、城市高架轨道交通系统、高架跨座式单轨系统和低运量的地面轻轨系统，另外还有高速磁浮系统、快速市郊铁路系统等。

## 二、我国城市轨道交通存在的主要问题

### （一）现阶段道路建设力度过大

近年来，随着社会的发展需求以及国家相应出台的系列政策的支持，越来越多的城市加大了对城市轨道交通的建设力度，据不完全统计，在北京、上海、广州、深圳等一线城市内进行的年均轨道建设量可达莫斯科等城市建设量的十多倍。这虽然反映了我国经济与交通的迅速发展，但是大量交通道路建设工程的开展也带来了一系列严重的后续问题。过于密集的道路建设，不仅占用了一些不该占用的土地资源，而且也会使得现阶段的建筑人员、资金等周转困难，继而延误了工期，不利于经济的发展，此外还会对周边的居民带来一定的困扰。

### （二）轨道交通投资不足，仅靠政府支持

就现阶段的发展而言，我国城市轨道交通的主要特点为建设周期较长且规模范围较大。在进行道路工程开展的过程中，进行道路修建作业可能涉及几百公里，在此过程中不仅需要大量的施工人员，还需要多种机器设备，只有这样才能够加快工程的开展速度。而为了满足上述条件，不仅需要对人才与先进的技术进行引进，而且还需要有强大的资金链支持，只有这样，才能够确保工程的顺利进行。但现在，道路修建过程中的资金均来自政府的资金投入，这无疑加剧了政府的财政压力，且在前期的投入过程中，只有投入并没有任何回收，进而导致了前期的运营收支难以平衡，而这也直接增加了贷款的压力。



### （三）实际客流量与预测客流量有出入

在进行城市轨道交通规划和建设前，需要对所改建的道路进行合理的客流量预测，并以此为依据作为道路建设的参考。就我国发展的现阶段而言，预测的数据往往与实际客流量不符，且二者相差很大。比如，如果在城市内部进行道路维修，在工程完成后发现在此路段经过的客流量非常少，这就是一种对资源的浪费，不仅没有达到疏通缓解其他道路上客流量的作用，还占用了宝贵的土地资源。除此之外，现阶段的道路高峰期主要是在上班时间点与下班时间点客流量较多，而这也是造成实际客流量与预测客流量存在差异的重要原因。

### （四）工作规范化差，相关制度不全面

规范、科学、合理地开展城市轨道交通工作不仅能够保证建设工作的顺利开展，也加快了工程的开展进度。现阶段，我国的城市轨道交通工作规范性相对较差，在进行交通建设工作的整体规划、土地的有效资源利用规划和交通服务规划上略显不足。有的地区在进行道路建设的过程中，并没有考虑到现阶段该地区的实际情况，盲目跟风，一味地开展道路建设工程，而这不仅浪费了大量的土地资源，也浪费了资金，而且对该地区的实际发展没有发挥到该有的作用，严重还影响到了区域的发展。

## 三、城市轨道交通的发展趋势

### （一）国家政策明朗化

城市轨道交通建设能够顺利地各个城市中进行推广和发展，离不开国家相关政策的引导和宏观把控。政府也越来越重视有关城市轨道交通的建设对现阶段人类社会带来的巨大影响。根据现阶段政府颁布的一系列规划建议书中所提到，要大力加强公共交通服务轨道的建设，尤其是针对一些大型发达的经济型城市，做好运输系统的管理对城市的发展也能够起到积极的推动作用。

### （二）交通建设体系多样化

针对如何挑选符合国家政策的交通运输体系，如今也有着多种多样的选择。由于国家开始重视公共场地的交通线路建设，不仅一些经济能力较好的大城市开始建设地铁，还有一些中小城市也逐渐开始建设成本相对较低的轻轨项目。对此，许多业内人士也赞同这种扩展多种城市轨道交通方式的行为，并相信多样化格局将促进我国整体的交通水平提升到一个崭新的层次。

### （三）技术精良化

随着当今时代经济的迅速发展，对于各个领域来说科技水平也达到了一个前所未有的新高度。同样在轨道交通领域来说，高科技也得到了广泛的运用。这不仅可以提高大型项目在运行过程中的运输效率，为各个城市的交通领域提供更加便利的服务，同时还能有效降低开支，使轨道交通建设进入到一个全新的发展阶段。



#### （四）投资主体多元化

轨道交通的建设需要巨额资金，如果只依靠政府，会给财政带来巨大的压力，尤其是在目前轨道交通规模越来越大的环境下，为了解决轨道交通建设资金问题，许多城市都在走投资主体多元化的道路。政府在轨道交通投资多元化中起着很重要的作用，显而易见，轨道交通沿线的商业开发会带来可观的经济效益，所以社会资本也愿意参与到轨道交通投资多元化的潮流中。在实际操作中，许多城市的政府正在建立政府投入少量资金起导向作用，让社会资本参与到轨道交通建设中的模式，通过这种模式来解决财政资金紧张与城市轨道交通建设规模不断扩大的矛盾，进一步提高社会资本在轨道交通建设中的占比。

#### （五）运营市场化

在以往的轨道交通运行模式中，有采用国有垄断经营模式，也有采取市场化经营模式。根据实践证明，市场化经营模式更有利于提高轨道交通的竞争力，提高服务质量。国有垄断经营模式，会增加运营成本，降低运营效率，使轨道交通失去活力，错失机遇，降低服务质量。市场化的经营模式，可以根据市场风向，及时做出有利于轨道交通运营的决策，提高运营效率，降低运营成本，将利益最大化，有利于轨道交通的健康、持续发展。总体上说，我国轨道交通市场化程度还不够高，有关部门应该鼓励轨道交通市场化运作，依靠市场规律，更好地发展城市轨道交通。

#### （六）管理法制化

管理法制化即利用法律来管理轨道交通。目前我国轨道交通规模越来越大，城市轨道交通涉及的利益群体也日渐庞大，投资者、经营者、管理者、消费者之间的法律关系权利和义务都需要明确。所以，法制化管理轨道交通是必然的选择。首先，管理法制化可以降低轨道交通运行风险，轨道交通在建设、运行、管理的过程中，难免会出现不可预见的问题，通过法律来规定权利和义务，才能够及时明确责任人，确定处理方案，保障轨道交通运行；其次，通过法制化管理可以规范投资方、建设方、管理方的行为和维护彼此的合法利益，通过法制来规范政府、企业和市民的行为，使政府、企业和市民均在法律的约束下投资轨道交通或使用轨道交通，同时，当政府、企业和市民的权利受到侵犯时，通过法律来维护各方的利益；最后，法制化管理可以让轨道交通建设、运行更加透明、公平、公正。轨道交通建设是关乎城市发展的重要决定，法制化管理可以让轨道交通建设在投资、建设、运行、管理等各个阶段更加公平、公正，一方面可以保障轨道交通建设的正常进行，另一方面也保障了人民群众的知情权，让人民群众可以监督轨道交通的建设与运营。



