第一章　城市轨道交通运营系统概述

第一节　城市轨道交通分类

城市轨道交通，一般指在城市地域内利用客运列车（车辆）在钢轨上或沿导向轨运行的城市公共交通系统。城市轨道交通类型的划分迄今仍未有统一标准，世界各国按照线路特征、运营范围、系统容量、路权等不同条件进行分类。根据城市轨道交通的技术经济特征和我国城市轨道交通的发展的实际情况，可将城市轨道交通划分为市域快轨、地铁、轻轨、单轨、自动导向交通和磁浮交通六种类型。

一、市域快轨

市域快轨是运营速度为 120～160 km/h，服务于市域范围内中长距离客运（具有通勤服务功能）的一种城市轨道交通系统制式。在国外，市域快轨还有其他名称，如在美国被称为通勤铁路（Commuter Rail），德国及奥地利称为 S-bahn，在法国、比利时一般称作区域快线 RER（Réseau Express Régional），法国法兰西岛大区（Région d'Île-de-France）（即巴黎大区）由法国国家铁路公司（SNCF）运营的线路还被称作 Banlieue（旧称）或 Transilien。从国内外发展状况来看，市域快轨往往是干线铁路的一部分，或是由既有干线铁路改造而来，因此往往具有干线铁路的技术特征，其站间距一般较长，采用重轨。市域快轨主要提

供通勤服务，客流具有方向性和高峰性。但随着都市圈的扩大，欧美国家的市域快轨在市区段的车站设置与运营服务也逐渐与地铁接近。

图 1.1　法兰西岛大区市域快轨 Transilien U 线圣克卢站（Gare de Saint-Cloud）

图 1.2　德国柏林 S-Bahn 弗雷德里希大街站（Bahnhof Friedrichstraße）

二、地铁与轻轨

地铁最初指修建在城市地下隧道中的铁路，但目前地铁早已突破原有的只在地下运行的限制，从早期单一地下隧道线路发展成地下隧道、地面与高架线路相结合的线路系统，在市区段采取地下线路，在郊区则出于对建设成本控制的考虑更多采用地面或高架线路。因此，有必要对原有的定义进行修正。国际隧道协会将地铁定义为轴重相对较重，单方向输送能力在每小时 3 万人次以上的城市轨道交通系统。

所谓轻轨，最初指“轻型轨道交通系统”，国外将有轨电车也纳入“轻型轨道交通系统”的范畴。在我国，所谓“轻型轨道交通系统”的道床、轨道结构、运行车辆和运行管理系统与地铁相似，享有独立路权。与地铁相比，轻轨运量较小，因而编组车辆少、运营线路短、行驶速度慢、行车间隔略长，其运行管理模式有所不同。因此，其与地铁的最主要区别就是运量上的差别。根据我国规范，将轴重较轻、每小时客运量在 1 万 ~ 3 万人次的轨道交通系

统称为轻轨。

三、有轨电车

与地铁和轻轨不同，有轨电车的线路敷设往往因地制宜，既可修在市区街道上，又可修建在地下隧道或高架轨道上。有轨电车主要由以下三种情形：无平面交叉的路权专用线路、有平面交叉的路权专用线路、有平面交叉的路权公用线路。有平面交叉的路权专用线路通常是采用缘石、栅栏或通过设置高差的形式将线路与其他交通分离。

图 1.3　法兰西岛大区有轨电车 1 号线在巴黎北郊的塞纳圣德尼省（Seine-Saint-Denis）运行

四、单　轨

单轨是指车辆在一根轨道上运行的轨道交通系统，其线路通常为高架结构，路轨可以是钢梁、钢筋混凝土梁等形式。橡胶轮胎车辆在单根轨道梁上部或下部运行，在轨道梁上部运行的称跨座式单轨，在轨道梁下部运行的称悬挂式单轨。

单轨系统占地少，对城市景观及采光影响较小，噪声及振动较低，转弯及爬坡能力强，小时运能、运行速度与轻轨相仿。对于目前普遍采用的跨座式单轨，一般采用橡胶轮胎及混凝土轨道梁，但由于橡胶轮会与轨道梁产生摩擦，因此将产生一定的粉尘污染。转向架

与道岔的结构比较复杂，且转辙时间比普通道岔长，因此将加大行车间隔。此外，一旦列车在运行区间发生事故，面积狭小的轨道梁难以安放救援设施，疏散与救援都比较困难。

五、自动导向交通（AGT）

自动导向交通是指新交通系统中利用导轨导向且自动控制运行的新型轨道交通系统。此类系统早期在美国被称为水平电梯、空中巴士等。法国与日本将其进一步发展，并用于城市内的运输系统。在法国，此类交通系统被称为 VAL（Véhicule Automatique Léger），意为自动轻型交通。VAL 除了用于机场的内部交通外，还被用于里尔、图卢兹等多个城市的地铁系统，我国台北市的捷运（地铁）文湖线同样也使用了法国的 VAL 系统。自动导向交通线路路权专用，采用计算机进行全自动控制，可以实现无人驾驶的高密度运营。车辆既可单车运营，又可编成列车运行，导向运行方式有中央导向和侧面导向两种。自动导向交通有 PRT（Personal Rapid Transit，个人快速交通）与 PM（People Mover，旅客运输系统）两种。

图 1.4　日本东京单轨羽田空港线
（東京モノレール羽田空港線）

图 1.5　东京临海新交通临海线
（新交通ゆりかもめ）

图 1.6　法国里尔地铁（Métro de Lille）的 VAL 系统

六、磁浮交通

传统铁路列车推进的主要原因是钢轨与列车之间具有黏着力或摩擦力，借由机车或动车组内动车加速产生的牵引力克服阻力而前进。随着列车速度的提高，黏着力减小，列车所能产生的牵引力越小。同时，列车所受空气阻力增大。当列车速度达到一定值时，继续加速，车轮将空转，速度无法再提高。因此，欲使列车速度继续提高，不外乎减小列车阻力，或不采用黏着力推进列车前进，即列车不与轨道或地面接触而放弃使用车轮。根据速度划分，磁浮技术可分为高速磁浮和中低速磁浮，其中高速磁浮的时速可达到 500 km/h 及以上，中低速磁浮时速约为 100 km/h。按是否采用超导电磁铁，磁浮技术又可分为超导和常导两类。由于超导磁浮列车只有当时速超过 150 km/h 时列车才可浮起，因此超导磁浮均为高速磁浮。磁浮列车的基本原理是磁铁的同性相斥、异性相吸特性，列车磁浮方式主要分为排斥力悬浮与吸引力悬浮两种。

第二节　城市轨道交通系统构成

轨道交通是由移动设施子系统（车辆）与各种固定设施系统（车站、线路、车辆基地等）组成的一个复杂的系统，本节主要介绍各子系统中的技术设备。

一、土　建

1. 线　路

城市轨道交通线路按线路敷设方式可分为地下线、地面线、高架线和敞开式线路。按其在运营中的功能可分为正线、辅助线与车场线三类。正线指列车正常运行的连接两个车站并从区间深入或贯穿车站、行驶载客列车的线路，一般为双线。辅助线包括车辆段出入线、停车场出入线、车站配线（存车线、渡线、折返线）及两线路间的联络线。车场线简称场线，包括牵出线、车底（空车列）停留线、检修线及综合基地内各种作业线。

城市轨道交通线路平面由直线、圆曲线和缓和曲线组成，其主要技术要素包括最小圆曲线半径、缓和曲线半径、缓和曲线线型和长度、最小夹直线长度、最小圆曲线长度等。小半径线路对行车安全、路轨磨损与乘客舒适度均产生不利影响。由于直线与圆曲线之间存在曲率半径的突变，因此在圆曲线半径小于或等于 2 000 m 时，需在圆曲线与直线间加设缓和曲线。圆曲线及夹直线长度均不得小于车辆全轴距，以提高行车安全性、列车稳定性与乘客舒适度。

轨道交通线路的纵断面由坡段和连接相邻坡段的竖曲线组成，其中正线最大坡度是线路的主要技术标准之一。线路坡度在满足排水及高程控制要求的前提下应尽可能平缓，坡段长度不得小于远期列车计算长度，而在变坡点附近，若两条坡段的坡度值代数差过大时，一般采用一段坡度不大于 5‰的坡段连接，同时在坡度代数差大于 2‰时在变坡点设置竖曲

线。竖曲线通常采用圆曲线，以便施工与养护，但在车站站台及道岔处不得设置竖曲线，且竖曲线离开道岔应不小于 5 m。两竖曲线间的夹直线不宜小于 50 m。通常地下线路会采用“高站位、低区间”的纵断面设计，以减少能耗。

线路横断面必须满足线路各断面列车通过的限界要求，包括车辆限界、设备限界和建筑限界。地下隧道横断面常用形式有圆形、矩形和马蹄形。而当线路位于地面或高架桥上时，其轨上部分的横断面需满足一定的限界要求，轨下部分横断面形状视轨下结构而定。

2. 轨　道

在城市轨道交通中，轨道具有支承、导向及导电的功能，在此主要介绍较为常见的钢轮钢轨系统、单轨系统及自动导向交通系统的轨道。

（1）钢轮钢轨系统

钢轮钢轨系统的轨道由钢轨、轨枕、连接零件、道床、道岔及其他附属设备组成。钢轨用于引导轨道交通列车车轮，直接承受来自车轮和其他方面的力并传递至轨枕，同时为车轮滚动提供小阻力表面。在电气化铁路或自动闭塞区段，钢轨还兼作供电电路或轨道电路。轨枕则用于支承钢轨，保持轨距与方向，并将钢轨对它的各种压力传递至道床。

钢轨连接分为中间连接与接头连接两种。中间连接为钢轨与轨枕之间的连接，通常称为扣件，用于将钢轨固定在轨枕上，保持轨距和阻止钢轨的横纵向移动及其倾翻。接头连接用于两根钢轨之间的连接，通常采用接头夹板连接。而在城市轨道交通中由于无缝线路的广泛使用，钢轨接头大为减少，但在缓冲区、轨道电路绝缘区及道岔区等地段仍有接头。

道床是轨枕的基础，主要用于均匀传递轨枕荷载，阻止轨枕横纵移动，为轨道提供必

要的弹性与缓冲性能等。一般用作道床的材料有碎石、熔炉矿渣等，在城市轨道交通线路中，无砟轨道得到越来越广泛的使用，用混凝土板基础取代了轨枕与道床。

道岔用于引导车辆由一条线路转向或越过另一线路，主要形式有线路连接、线路交叉及线路连接与交叉三种基本形式。常见的线路连接设备有普通单开道岔、单式对称道岔及三开道岔。道岔号数为辙叉角余切的取整值，常用道岔号数有 9#、12#、18#等。号数越大的道岔，允许侧向通过的列车速度越大，我国大城市的轨道交通中广泛采用 9#道岔。

有轨电车的轨道与普通的钢轮钢轨系统有所不同。有轨电车正线上普遍采用槽型轨，最大限度地实现了绿化铺面，取得良好景观效果。用于公用路权时，轨道与行车路面容易衔接，改善了机动车的行车条件。同时轨道结构得到简化，加快施工速度。在小半径曲线地段，槽型轨能起到护轨的作用，防止车辆独立轮脱轨，同时可减小钢轨磨耗。

（2）单轨系统

跨座式单轨轨道梁有预制混凝土轨道梁和钢制轨道梁两种，大多数跨座式单轨铁路都采用标准预制混凝土轨道梁，断面一般采用工字型中空截面，轨道梁采用预应力混凝土，全部由专用模板制成。当跨度较大或轨道梁建筑高度很高时，原则上采用钢制轨道梁。钢制轨道梁断面一般采用箱型截面。跨座式单轨的轨道梁作为承重的桥梁结构，在支承和约束车辆行驶的同时，还承载牵引电网。跨座式单轨道岔采用梁式结构，由一组互相联结、关节间可转动的钢箱梁组成，主要分为道岔结构、转辙驱动系统及信号控制系统三个部分。跨座式单轨道岔一端可以移动，每片道岔梁均固定在一个支承台车上，由台车上的电动机驱动。跨座式单轨道岔可以分为两种类型：一类是柔性铰接型，可使道岔连续弯成曲线；

另一类为简易铰接型，转辙时道岔梁在转辙点前方保持一定距离的直线，用于车库内部或低速区段。

悬挂式单轨主要分为非对称悬挂钢轮—钢轨型、工字轨道梁悬挂型、非对称悬挂胶轮型和 SAFEGE 型。非对称悬挂钢轮—钢轨型主要特点是钢轨铺设在钢制桁架梁上，钢制车轮的转向架运行于钢轨上，车厢悬挂于桁架梁下，悬挂构件布置在轨道梁一侧。工字轨道梁悬挂型线路的轨道梁为“工”字形截面梁，车轮嵌在梁上运行。这种轨道结构简单，但其车辆振动大，运量低，不适合城市轨道交通运输。非对称悬挂胶轮式单轨车采用非对称悬挂，将悬挂构件安装于轨道梁一侧。位于轨道梁上在竖直平面内转动的是走行轮，负责承重、牵引以及制动。位于轨道梁两侧在水平面内转动的是导向轮，负责导向以及缓和横向振动。SAFEGE 型采用对称式悬挂，其特点是轨道梁为底部开口的钢制箱型梁，橡胶轮胎的两轴转向架运行于轨道梁内部，转向架上设走行轮和导向轮，沿着箱型梁内部的轨道运行。悬挂构件通过箱型梁底部开口将车体和转向架连接起来。道岔为箱型梁内部的可动轨，列车行驶方向的改变通过可动轨的水平移动来实现。

（3）自动导向交通系统

自动导向交通系统与其他城市轨道交通车辆最基本的区别就是其走行装置是运行在专用轨道上、使用橡胶车轮的自动运行公共交通工具。电动车由走行车轮和导向车轮承担载荷，沿导轨运行，导向系统可设置在轨道侧面，也可设置在轨道中央。

图 1.7　新加坡武吉班让（Bukit Panjang）自动导向交通系统，属中央导向式

3. 车　站

城市轨道交通车站是供乘客出入的场所，也是轨道交通中最复杂的一种建筑物，具有多种类型。根据车站客运作业的不同，车站可分为中间站、换乘站、折返站、越行站、接轨站、终点站等类型。按站台形式不同，可分为岛式站台车站、侧式站台车站和混合式站台车站。按是否具有站控功能，可分为集中控制站和非集中控制站。按线路敷设方式，可分为地下站、地面站和高架站。

（1）车站选址

车站选址因其影响因素众多，影响深远，故应顾及多方面因素综合考虑。总体而言，影响车站选址与分布的主要因素包括客流吸引力、乘客出行时间、工程与运营成本、沿线土地开发、城市规模、线路长度，以及轨道交通路网与城市道路网状况等。

为最大限度地吸引客流，城市轨道交通车站应考虑城市用地状况与用地规划，设在广场、干线街道交叉点、铁路车站等大型客流集散点附近，并尽可能与邻近交通枢纽、商业