

现代铁路新技术丛书
—— 电力牵引

轨道交通电气传动控制系统

GUIDAOJIAOTONG DIANQI CHUANDONG KONGZHI XITONG

张 斌 缪仲翠 张海明 编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

013030753

U239.5
52

现代铁路新技术丛书——电力牵引

轨道交通电气传动控制系统

张 斌 缪仲翠 张海明 编



U239.5
52

西南交通大学出版社
· 成 都 ·



北航

C1636295

887080810

图书在版编目 (C I P) 数据

轨道交通电气传动控制系统 / 张斌, 缪仲翠, 张海明
编. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.3

(现代铁路新技术丛书. 电力牵引)

ISBN 978-7-5643-2153-6

I. ①轨… II. ①张… ②缪… ③张… III. ①轻轨车
辆—电气设备—电力传动—控制系统 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 009201 号

现代铁路新技术丛书——电力牵引

轨道交通电气传动控制系统

张 斌 缪仲翠 张海明 编

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	将冬清
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	19.5
字 数	485 千字
版 次	2013 年 3 月第 1 版
印 次	2013 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2153-6
定 价	39.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

轨道交通电气传动又称电力牵引,是以电能为动力的一种轨道运输牵引动力形式。它以电力系统或发电厂为电源,通过牵引变电所从电力系统受电,经降压、变频或交流,由接触网向电力机车、动车组供电。电力机车或动车的牵引电动机将电能转换为机械能,驱动铁路列车、电动车组和城市轨道交通电动车辆组运行。近年来我国轨道交通发展迅速,已经出现高速铁路、城际客运专线、城市地铁和轻轨以及磁悬浮列车等多种形式。轨道交通成为国民经济交通领域的主力军。

为了适应轨道交通电气传动与控制系统的发展状况,在编辑本书的过程中做了以下几方面的努力:

- (1) 注意基础知识和专业知识相联系,使读者能由浅入深地掌握电力传动控制系统。
- (2) 尽量反映电力牵引系统的发展过程和现状,力求有一定理论深度。
- (3) 在分析电力牵引系统的同时,兼顾一般性质的电力传动控制系统的分析和设计方法。

全书共分8章,第1章介绍了轨道交通发展概况以及电力机车传动技术概况;第2章涉及基础理论,讲述了电传动力学基础,同时从轮轨关系的作用出发论述了电力牵引的基本理论,以及黏着、牵引特性和列车运动方程等基本概念;第3章介绍了交-直型电力机车的电气线路,包括主电路和辅助电路;第4章介绍了电力牵引直流传动控制系统,着重讨论了直流电动机闭环自动控制系统的组成和分析设计方法;第5章对交-直型电力机车控制系统进行了讨论,以典型交-直型电力机车为例分析了系统的组成和工作原理;第6章介绍了交流调速系统基础,分析了交流电力传动系统的工作原理和控制模式;第7章介绍了交流拖动电力机车的特性,以及交流电力机车的组成和工作方式;第8章介绍了高速磁悬浮列车控制系统的发展概况和一般工作原理。

本书由兰州交通大学张斌副教授、缪仲翠副教授、张海明高级工程师共同编写。张斌编写第1~5章,缪仲翠编写第6、7章,张海明编写第8章。

本书出版得到了兰州交通大学自动化学院的领导和自动化系教师的关心和支持,特别是费克玲和张鑫老师的大力支持。盛怡、焦元钊和刘继凯为本书作了一些文字和插图方面的工作,全书由董海鹰教授主审。在此,向他们表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者和行业专家批评指正。

作 者

2013年2月

目 录

1	轨道交通概论	1
1.1	轨道交通的发展及分类	1
1.2	世界各国的轨道交通发展概况	8
1.3	电力机车传动技术概况	16
2	电传动力学基础和牵引理论基础	22
2.1	电传动力学基础	22
2.2	轮轨相互作用原理	29
2.3	列车运行阻力	39
2.4	列车运动方程	44
2.5	牵引特性	46
3	交-直型电力机车的电气线路	49
3.1	概 述	49
3.2	交-直型电力机车主电路	52
3.3	机车牵引负载电路	66
3.4	机车电气制动电路	72
3.5	机车主电路保护	82
4	电力牵引直流传动控制系统	87
4.1	概 述	87
4.2	闭环控制的直流调速系统	88
4.3	转速、电流双闭环直流调速系统和调节器的工程设计方法	117
5	交-直型电力机车控制系统	128
5.1	6G 型机车控制系统	128
5.2	SS ₄ 型机车控制系统	130
5.3	8K 型机车控制系统	138
5.4	SS ₃ 型机车控制系统	151

6	交流调速系统基础	155
6.1	异步电机的调速原理	155
6.2	异步电动机的变频调速控制方式	165
6.3	交流传动系统的主电路和 PWM 控制方式	173
6.4	基于异步电动机稳态模型的变压变频调速	189
6.5	矢量控制变频调速系统	196
6.6	直接转矩控制的基本原理	220
7	交流拖动电力机车	225
7.1	概 述	225
7.2	交流电力机车传动主电路	228
7.3	牵引变压器	235
7.4	牵引变流器	242
7.5	辅助电路	266
7.6	牵引电机及悬挂方式	269
7.7	机车控制监视系统 (TCMS)	271
8	高速磁悬浮列车控制系统	287
8.1	磁悬浮铁路发展概况	287
8.2	磁悬浮系统分类	290
8.3	磁悬浮列车工作原理	292
	参考文献	305



1 轨道交通概论

交通运输对社会发展的影响巨大，是社会生产、流通、分配、消费以及人们工作、旅游等的先决条件，常被喻为一个城市、一个国家的血液循环系统。轨道交通很早就作为公共交通在城市中出现，在相当长的一段时间里，铁路曾是人们中长距离出行及运输的主要工具，但随着汽车和航空业的发展，轨道交通一度被冷落，特别是在经济发达、人口密度较小的国家。但是由于新型运输产生了大量污染、事故和资源消耗等问题，轨道交通技术正是在这种背景下由兴到衰，再到近年来的复兴。

城市化正成为当今世界发展的重要趋势，在城市化历程中，不同规模与发展阶段的城市产生不同的交通需求，需要通过相应的运输工具及技术装备来满足。伴随着近年来高速铁路系统、城市地铁、轻轨技术在全世界范围内的较好发展，大运量的轨道交通在现代大城市中起着越来越重要的作用。为了克服由于城市化的发展带来的交通堵塞、环境污染等城市问题，必须加快发展具有快捷、安全、准时、容量大、能耗低、污染轻特点的轨道交通，这已成为人们的共识。

1.1 轨道交通的发展及分类

1.1.1 轨道交通的产生及发展

1. 轨道交通的产生

两千多年之前，出现在希腊、马耳他和罗马帝国的马拉轨道车辆可称为轨道交通的雏形，它使用加工过的石材作为轨道，轨道有凹槽，从而限制车轮只能在轨道上行走。这种交通形式再次出现于欧洲是在 1550 年，工业革命初期通常使用木材作轨道，为了延长木制轨道的使用寿命，人们在轨道面上包了一层铁皮。18 世纪中叶，开始出现铁质车轮，这大大加剧了轨道的损坏，因此发明了铁制的轨道，由于这种轨道强度不够，容易变形，18 世纪末叶，又出现了类似现代钢轨的轨道形式。使用轨道运输的优势是明显的：用较少的材料制成轨道而无需加工整个车辆通过的路面，轨道面提供了一个较为平整的、硬度较高的车轮滚动面，并且可以把运输物的重量通过轨道分散地分布于地面上，历史记载早期的矿区、林区曾使用了这种运输形式。不止于此，在早期的西方城市，随着城市规模的扩大、城市化进程的发展，只有利用交通工具才能保证城市经济生活的正常进行。由于市内交通客流有一定的路线，在客流集中的路线上使用轨道交通不仅有助于缓解交通拥挤，而且这种交通方式拥有较快的速度。正是在这种背景之下，1828 年，在巴黎出现了一种可供 14 人乘坐的单行“公共马车”，并以固定路线运载乘客，这是历史上第一条公共交通线，随后又演变成马拉轨道车，从而拉开城

市轨道交通发展的序幕。自从巴黎的马拉轨道车面世后，世界上其他一些城市也纷纷仿效，如 1829 年的伦敦街头出现了公共马拉轨道车辆，1832 年纽约市建成了第一条马车铁道，1860 年前后，公共马拉轨道车辆更是风靡北美各大城市。

有别于其他陆上的车辆交通，载人、载物的轨道运输车辆行驶在特定的轨道上，轨道起了支承、传递车辆荷载的作用，为了使车辆只在轨道上行驶，轨道还提供了导向作用。这种运输形式就称为轨道交通。轨道交通系统就是利用车辆在固定导轨（1 根或 2 根）上运行来输送旅客或货物的交通系统。而城市轨道交通作为城市公共交通网络的重要组成部分，泛指城市中在不同形式轨道上运行的大、中运量城市公共交通工具，是地铁、轻轨、单轨铁路、自动导轨、磁悬浮等轨道交通的总称。

2. 轨道交通的发展

在轨道交通的发展历程中，有这样一些突出的事件：

（1）蒸汽机车、内燃机车的诞生

随着英国工业革命的功绩之一——以煤作为能源的蒸汽机的问世，人们自然想到将它用于驱动车辆运动。1787 年，英国工程师默托克发明了一辆用蒸汽机驱动的四轮无轨火车。出于对这种新交通工具运载能力的惧怕，也考虑到由蒸汽机牵引的重型车辆对道路的高要求，伦敦运输业向法院提起了诉讼，英国法律裁决这种庞然大物不能在公路上行驶，只能运行在专用轨道上。在这种形势下，火车的发展几乎是顺理成章的了。

1803 年，英国人特里维西克制造了世界上第一台可以真正使用的铁路蒸汽机车。1823 年，斯蒂芬森主持修建英格兰北部煤矿城市斯多克顿至河边城市达林顿之间的第一条商用铁路，正式将火车推向实用。1825 年 9 月 27 日，由机车、煤水车、32 辆货车和 1 辆客车组成的载重量约 90 吨的“旅行”号列车，由设计者斯蒂芬森亲自驾驶，从伊库拉因车站出发共运行了 31.8 km。斯托克顿—达林顿铁路的正式开业运营，标志着近代铁路运输业的开端。而第一条城市间铁路服务是 1830 年在英国的利物浦至曼彻斯特之间开始的，利物浦与曼彻斯特铁路显示了铁路的巨大发展潜力。很快铁路便在英国和世界各地通行起来，使铁路主导着世界交通运输达一个世纪之久。

工业革命加剧了欧洲的城市化，交通拥塞导致的一系列问题使人们尝试用新的思维来解决问题，当时唯一可以依托的机械动力交通手段就是火车，而那时的火车主要用于城市间的交通、大城市和周边小城镇之间的联系，火车站都建于当时城市的边缘，将蒸汽列车引入市中心的构想导致了地铁的产生。1863 年 1 月 10 日，世界上第一条用蒸汽机车牵引的地下铁道线路在英国伦敦建成通车，这条地铁从帕丁顿（Paddington）到法灵顿（Farringdon），总长 6 km。由于列车在地下隧道内运行，隧道里烟雾熏人，通风成问题，但还是受到了人们的欢迎。更进一步的想法是将蒸汽列车放到高架的街道上行驶。1868 年，查尔斯·T·哈维（Charles T Harvey）在纽约的格林尼治街建造了一条由电缆牵引的高架线，但这项投资经济上并不成功。1871 年，新管理者将它改造为由一台小的蒸汽机车牵引的线路。

由于传统的蒸汽机完全通过外燃的方式将热能转化为机械能，热量主要在汽缸外流通，大部分热量几乎都通过锅炉和烟囱散发出去了，因此蒸汽机的热效率非常低。此外，蒸汽机启动之前还需要一段时间的预热，使用起来很不方便，而且以煤作燃料的蒸汽机空气污染很严重。1860 年，法国发明家卡诺发明了一台实用的、用煤气作燃料、用电火花作点火装置的



内燃机。1862年,法国工程师德罗夏总结卡诺的热机理论和内燃机的研制实践,提出了内燃机的四冲程循环理论,使内燃机的发展具有了坚实可靠的理论基础。1876年,德国工程师奥托造出了第一台以四冲程理论为依据的煤气内燃机。与此同时,19世纪中叶以来,燃料工业发生了一次巨大的变革。1854年,美国工程师西里曼成功发明了石油的分馏方法,使汽油、煤油和柴油等优质燃油投入应用。1883年,德国发明家戴姆勒成功研制了第一台以汽油为燃料的内燃机。1892年,德国工程师狄塞尔制造出一台用柴油作燃料的高压缩型自动点火内燃机。从此,柴油机这种马力大、体积小、重量轻和效率高的新式动力机逐渐取代了蒸汽机,成为工业上的主要动力机,也促进了汽车工业和航空业的起步与发展。当然大功率内燃机在轨道交通中也得到了应用,即内燃机车。

(2) 电力机车的诞生

世界上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提供了宝贵的经验。1879年,德国工程师沃纳·冯·西门子(Werner Von Siemens)在柏林博览会展示实用电力机车,1881年,世界上第一条实用的电气化铁路在柏林市郊投入运营。其后,北美城市也建造了几条试验线,于1888年成功地试验出技术先进的电力机车。此后,电力机车迅速推广应用。电力驱动机车的研制成功,使地下客运环境和服务条件得到了空前的改善,地铁建设显示出强大的生命力。世界上第一条电力驱动的地铁是1890年12月18日在伦敦开通的。此后建设的地铁都不再使用蒸汽机车而采用电力机车牵引。

而电进入城市交通的另一个方面是有轨电车的诞生。1881年德国柏林工业博览会期间,西门子展示了其发明的一列三辆编组的有轨电车(Tram),能乘坐6人,在400m的跑道上演示。虽然这种有轨电车使用两根钢轨作为输电电极,很不安全,但这次演示给世人以重要启示。1888年在美国弗吉尼亚州的里士满市,出现了世界上第一个投入商业运行的有轨电车系统,它采用了架空电缆和受电弓供电。有轨电车作为一种行驶在道路路面上的有轨交通工具,投资省、见效快、乘坐方便,又可以观赏街景,因而迅速在欧美各城市中蔓延。

(3) 动车组的出现

1897年,芝加哥南部当局决定将高架铁路电气化,并与当时的工程技术专家法兰克林·斯卜拉格(Franklin J. Sprague)签订了合同。斯卜拉格的一个重要贡献是发明了能同时控制多个发动机的操控系统,动车组应运而生(Multiple Units,或称多单元动车系统)。在这种系统中,每辆车均自带发动机,但全部由第一辆车的驾驶员操纵(在没有斯卜拉格的发明之前,使用多个串联一起的电动车厢会导致各样的问题,例如,各车发动机的速度不一、车厢之间的挂钩出现黏合等,而且列车的行走不顺畅,使乘客感到不适,严重时甚至可能导致出轨)。

动车组采用的牵引运行方式称为动力分散式,相对于传统的列车牵引运行方式——动力集中式(列车通常由一台动力机车牵引无动力车辆在轨道上行驶,机车大多是在列车的最前端牵引车辆,亦有自车尾逆推甚至机车置中牵引的情况,还有由两台机车前后推拉的动力集中列车模式),动力分散式列车有如下优点:由于列车的牵引动力可以分散设置,因而可以按需要增减动轴,使列车总功率不受机车功率所限制;动力分散式列车的启动容易,加速度较动力集中式列车高,有利于提高行车密度,更适合高密度停车、站距短的路线,同时可有更快的运行速度;动力效率较高,特别是在斜坡上;动力分散式列车的轴重和簧下重量都比动力集中式中的机车小,列车运行时轮对对路轨的损害较低,有利于降低线路维修费用;动力分散式因为有较多的牵引电动机,所以再生制动的效果较好(对于停站较多的近郊通勤铁路、

地下铁路,此优点特别明显)。著名的动力分散式列车有:日本新干线各型列车、德国 ICE、中国高速铁路 CRH 各型动车组、法国 TGV 等。

1.1.2 轨道交通的分类

世界各国在各自轨道交通的发展历程中,根据相对位置、运营范围、系统容量、路权、车辆类型等,提出了不同的分类形式,并赋予了各种名称。轨道交通的基本类型通常包括干线铁路、地铁系统、轻轨系统、市郊铁路、单轨系统、新交通系统共六类。为了能够在不同的目标下合理地选择轨道交通系统形式,可以依据不同的标准对轨道交通基本类型进行分类。

1. 按线路敷设方式分类

按轨道相对地面位置或构筑物的形态划分,轨道交通可分为以下三类。

- ① 地下线:位于地下(或水下)隧道内的那部分轨道交通线。线路构筑物形态为单线或双线隧道。
- ② 地面线:位于地面的轨道交通线。线路构筑物形态为路堤或路堑。
- ③ 高架线:位于高架桥上的轨道交通线。线路构筑物形态为高架桥。

2. 按路权分类

路权是指轨道交通系统运行线路与其他交通的隔离程度。以此为依据,轨道交通系统可分为 A, B, C 三种类型。

- ① A 类为全封闭系统,与其他交通完全隔离,不受平交道和人车的干扰,一般用于高、大容量及 1.6 万人/小时以上交通容量的轨道交通系统。
- ② B 类为半封闭系统,沿行车方向采用路缘石、隔离栅、高差等措施与其他交通实体隔离,但在部分交叉路口仍与横向的人车平交混行,受交叉路口信号系统控制,一般用于 1.6 万人/小时以下交通容量的轨道交通系统。
- ③ C 类为开放式系统,即不实行实体分隔,轨道交通与其他交通混合出行,在路口按照信号规定驶停,或可享有一定的优先权,诸如用道路标线或特殊信号等保留车道,有轨电车通常使用此形式。

3. 按导向方式分类

根据不同的导向方式,轨道交通系统可分为轮轨导向及导向轮导向。一般钢轨钢轮系统(地铁、轻轨、有轨电车)属前一类型,启动较快;单轨及新交通系统等胶轮车辆属后一类型。

4. 按轮轨支撑形式分类

轮轨支撑形式,即车辆与转移车重的行驶表面之间的垂直接触与运行方式,从这一标准出发,轨道交通系统可分为钢轮钢轨系统、胶轮混凝土轨系统以及特殊系统。钢轮钢轨系统包括市郊铁路、地铁、轻轨、有轨电车;胶轮混凝土轨系统主要指单轨及新交通系统;特殊系统则包括支撑面置于车辆之上的悬挂式单轨系统、磁悬浮式轨道系统等。



5. 按系统运能分类

系统运能即运送能力,通常用单方向每小时的输送能力(断面乘客通过量)表示。根据我国现行的《城市快速轨道交通工程项目建设标准》,轨道交通按系统容量可分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ级,分别对应大于或等于5万人次/小时、3万人次/小时~5万人次/小时、1万人次/小时~3万人次/小时的单方向小时断面客流输送能力,也分别称为高运能、大运能、中运能的轨道交通。对应于不同运能级别的轨道交通系统,线路、车辆及编组、路权、信号等设备都要与之匹配。按照不同的交通容量范围,轨道交通可分为特大、大、中、小容量四种系统。其中,特大容量系统一般指市郊铁路,其单向小时断面流量可达到百万人,大容量轨道交通通常指常规地铁,中容量轨道交通包括轻轨、单轨、小型地铁和新交通系统,小容量轨道交通系统则多指有轨电车。

6. 按车辆特征分类

根据车辆不同的驱动方式,轨道交通车辆可分为电动车、线性电机车、独轨车、自动导轨车、磁悬浮车等。

7. 按运营范围分类

① 干线铁路:铁路网中具有重要地位的铁路线。凡能保证全国运输联系,并具有重要政治、经济和国防意义,或达到规定客货运量的铁路,都属于铁路干线。

② 城际铁路:城际线由于承担沿线区域内的直达客流和主要城镇之间的客流,要求线路进入城市中心区,以便发挥城际快线高密度、小编组、公交化出行的特点,最大范围地吸引客流。服务范围覆盖城市市域(即城市与其他城市)的轨道交通系统,这类交通系统在各国的名称不同。例如,法国的区域快速铁路 RER (Regional Express Railway)、德国的 S-Bahn (Stadt Bahn)、美国的区域快速轨道交通 (Regional Rapid Rail Transit)、日本的私铁(市域范围内)等。

③ 城市轨道交通:服务范围以中心城区为主的轨道交通系统,包括市郊铁路、城市地铁、轻轨交通、单轨交通等。

1.1.3 城市轨道交通的系统制式

虽然从专业的角度可以对轨道交通系统以运能、线路敷设方式、路权、车辆驱动方式、运营范围等多个方面进行比较严密、细致的划分,但这对于不熟悉城市轨道交通专业的非专业人员是不易理解和交流的。此外,各国在应用过程中形成了很多名称,有些名称在不同的国家形成了不同的含义。例如,欧洲有些城市所指的“轻轨”与我国的“轻轨”含义不同,他们所指的是现代有轨电车。为了便于专业人员及非专业人员相互交流,有必要归纳几种典型的城市轨道交通系统类型作为系统制式,而系统制式的名称需要兼顾本国习惯,简明、综合地反映城市轨道交通系统的本质及主要的特征。

从目前国内外城市轨道交通发展状况看,城市轨道交通的系统制式主要有地铁、轻轨、单轨、自动导轨、城市铁路、磁浮交通。各种制式的主要特征如下。

1. 地铁

“地铁”是“地下铁道交通”的简称,由于最初修建在地下,因而在英美称为 Underground Railway 或 Subway,在法国称为 Metro (Metropolitan Railway),在德国称为 U-Bahn。它是一种在城市中修建的全封闭、线路全部或大部分位于市区的、快速、大运量的轨道交通,通常以电力牵引,其单向高峰小时客运能力可达 60 000 人次左右,其线路通常设在地下隧道内,也有的在城市中心以外地区从地下转到地面或高架桥上。大而快是地铁的本质特征,车体较宽 (2.8 ~ 3.0 m),速度较高 (80 km/h 及以上),站间距在 0.5 ~ 1.0 km (市中心),在郊区可达 2 km 左右,运量单方向为 3 万人/小时左右,无平交道口,列车信号与控制系统先进。

2. 轻轨交通

轻轨交通是对传统的有轨电车利用现代科技进行改造后的各类有轨电车系统的总称,由国际公共交通联合会 (UITP) 于 1978 年 3 月在比利时首都布鲁塞尔召开的会议上正式统一命名的,英文为 Light Rail Transit,简称“轻轨”,英文缩写为 LRT。与地铁相比,轻轨系统在“大”与“快”方面,至少有一方面有所降低,使得其运量比地铁小,一般为 1 万人/小时 ~ 3 万人/小时。例如,因车辆宽度较小 (一般在 2.6 m 及以下) 而降低了系统容量;因车辆最高运行速度较低 (如 70 km/h),站间距缩短 (如 500 ~ 800 m),线路存在部分平交道口等。

需要说明的是,在我国根据《城市快速轨道交通工程项目建设标准 (试行本)》,用轻轨来命名中运量的地铁 (包括地面和高架铁路),而欧洲所说的“轻轨”,一般是特指现代有轨电车交通。为了与欧洲的定义兼容,因此将轻轨分为两类:一类是准地铁,其车型和轨道结构类似地铁,与地铁的不同之处在于运量和轴重较小,曲线半径较小,以及“最大坡度”较大,此外并无多大区别;另一类为运量比公共汽车略大,在地面行驶,路权可以共用的新型有轨电车,它是在传统的有轨电车基础上发展起来的,由于其造价低、无污染、乘坐舒适、建设周期较短而被许多国家的大、中城市所接受,近年来不断得到发展和推广。因此,国外开发的轻轨交通系统主要有三种类型:

① 旧车改进型。

将老式有轨电车分阶段地加以改造,使其车辆逐步实现高性能化,轨道线路专用化或地下化,并实现计算机调度控制。德国、比利时、瑞士、意大利等国家修建的轻轨铁路属于这种类型。

② 新线建设型。

英、法和北美等国家从 1970 年开始对比较经济的城市轻轨系统进行了探讨,部分利用废弃的旧线修建新线,如法国巴黎的 RER (Regional Express Railway) 系统。

③ 新交通系统型。

它比新线建设型更进一步,是作为一个独立系统开发的轻轨交通系统。加拿大温哥华建成的全自动的线性电机驱动的轻轨交通系统和英国伦敦船坞地 (Docklands) 的轻轨系统相当于这种类型。

3. 单轨交通

单轨交通 (Monorail) 是指以单一轨道来支承或悬挂车辆并提供导向作用使车辆运行



的轨道交通系统。按结构形式,单轨交通可分为跨座式和悬挂式两种类型。前者车辆的走行装置(转向架)跨骑在走行轨道上,其车体重心处于走行轨道的上方。后者车体悬挂于可在轨道梁上行走的走行装置的下面,其重心处于走行轨道梁的下方。单轨交通大多采用高架轨道结构,其轨道可以是钢梁或钢筋混凝土梁等形式。单轨交通仍属于轮轨运行模式,但传统的钢轮钢轨、双轨线路相比,其特点是占用的空间较小、转弯及爬坡能力强,即能够实现大坡度和小曲线半径运行,噪声和振动较低,在城市中运行具有交通和旅游观光的双重作用。

4. 自动轨道交通

自动导轨运输系统 AGT (Automated Guide Way Transit) 一般泛指无人驾驶的车辆在专用路权等条件下沿导轨行驶在固定轨道上的新型运输系统。典型的 AGT 系统由计算机进行全自动控制,无论是轮轨运行还是“水平电梯”运行,其共同的特点是始终沿着一条固定的轨道自动运行。AGT 系统的车辆外形类似公共汽车,采用电力驱动、橡胶轮走行,在全隔离的专用走行道上行驶,并设有专用的导向轨导向。其导向方式有两种:一种为中央导向,在线路的中央设有导向轨条,对应于车辆底架下部伸出的导向轮,在车辆走行时,导向轮紧贴导向轨滚动而实现车辆的导向,这种方式的导向轨凸出在线路的中央沿着线路向前延伸。另一种为侧面导向,在车辆走行装置的外侧装设水平的导向轮,在走行道两侧矮墙上装设导向轨滚道。当车辆走行时,车辆前后两侧的导向轮沿着导向轨滚动,从而实现车辆的自动导向。轨道可用特制的混凝土做成,也可用钢板焊接而成,轨道结构较复杂。AGT 系统既可用于博览游乐场、机场的内部运输,也可用于一般公共交通。

5. 城市铁路

在城市区域内主要承担城市交通功能、线路主要位于地上的铁路系统。与地铁比较,城市铁路的主要特征是站距短、绝大部分位于地面以上。其站距一般为 1 km (市区)、3~5 km (郊区),比传统铁路的 10 km 以上的站距小得多,从而适应了城市客流需求的特点;其线路位于地面以上,使之建设成本及运营成本比地铁小得多。与轻轨相比,城市铁路列车车体较宽(一般与城市间铁路列车同宽),轴重及最高速度也较大。区域快速铁路(服务于城市市区及郊区)、市郊铁路(仅服务于城市郊区)、通勤铁路(主要服务于中心城与卫星城之间上下班的通勤交通)都是其特殊的时空表现形式。

6. 磁悬浮交通

磁浮车辆的推进原理与线性电机相同,都是采用线性电机驱动车辆前进,只是线性电机车没有离开轨道,而磁浮车辆离开轨道有一定的间隙,实现了无接触运行。用于城市交通的磁浮系统为中低速,速度一般在 100 km/h 左右,中低速磁悬浮列车的主要特点:一是“短定子、长转子”,即定子安装在车辆上,转子铺设在轨道上;二是需要对车辆供电;三是磁悬浮系统的寻向稳定依靠自稳来实现。磁浮系统的最大优点是低噪声、行驶阻力小、转弯及爬坡能力强。其缺点是列车发生故障之后救援相对困难。

1.2 世界各国的轨道交通发展概况

1.2.1 国外轨道交通发展概况

1. 大容量轨道交通的起源与发展

(1) 干线铁路和城际铁路

自 1825 年英国开通第一条铁路,铁路立刻获得了世界先进工业国家的青睐。1840—1913 年是世界铁路发展的“黄金时代”,由于铁路机车制造已相当完善,轨道结构也不断改进定型,各国修建铁路的热情日益高涨,铁路发展速度明显加快。1840 年,世界铁路营业里程为 8 000 km,到 1913 年已达 110 万 km。在这一修路的高潮中,以美国为例,1881—1890 年,平均每年修建 1 万 km 铁路;德国 1866—1870 年,投资的 70%用于修建铁路;俄国 1861—1873 年,投资的 63%用于修建铁路。作为交通大动脉的铁路的大量修建和超前发展,奠定了这些国家工业化的坚实基础。到 1913 年,世界铁路的运营里程已达 110 万 km,并垄断了陆上交通运输。铁路霸主的地位一直延续到 1940 年,达到了铁路发展的鼎盛时期,此时的运营里程高达 135.6 万 km。

随着城市规模的不断扩大,居住区与商业经济区的逐渐分离,以及大城市—卫星城建设格局的形成,单一的城市轨道交通(地铁、轻轨)已不能满足快速增长的城市交通客流的需求,在美国、法国、英国和日本等交通发达国家,就逐步形成了城际铁路与城市轨道交通接驳的格局。

自 20 世纪 40 年代开始,铁路受到了公路和航空的竞争冲击。随着高速公路的发展,铁路的优势逐渐减小,长距离上更不能同航空竞争,铁路一度被冷落,特别是在经济发达、人口密度较小的国家。1964 年日本东海道新干线的运营,是铁路发展史上的一个新的里程碑。它不仅成功吹响了铁道技术革命的号角,也改变了人们对轨道交通的看法。东海道新干线联系了东京和大阪,全长 515.4 km,运营最高时速为 210 km,平均时速也达 160 km,成为高速列车研制的典范。日本新干线的成功,不单显示其运量大、投资省、污染小的优点,更充分地发挥了高速又不失安全的特点。由于新干线的开通,维系两地的民航被迫关闭。法国 TGV 于 1989 年 12 月创造了 515.3 km/h 的行车速度纪录,2007 年更创造了 547 km/h 的世界纪录,继日本、法国之后,世界各国相继开始了高速铁路的积极建设和规划。

(2) 地 铁

轨道交通是作为大运量、快速公共交通工具进入城市的。1863 年 1 月 10 日,世界上第一条用蒸汽机车牵引的地铁线路在英国伦敦建成通车。伦敦地铁的产生有其内在的发展条件与需求,首先是铁路运输技术日趋成熟,铁路客运需求增长迅速。铁路发展和工业革命使伦敦等大城市建立了许多工厂,大量的人口涌入城市,刺激了城市交通需求的增长;其次是伦敦市区交通拥挤状况日益严重。1890 年 12 月 8 日伦敦首次用盾构法施工,建成用电气机车牵引的 5.2 km 的另一条线路。而地铁在其他城市的推广使用归功于电力机车的发明与应用。1892 年 6 月 6 日,芝加哥建成世界上第二条蒸汽驱动地铁,1895 年 5 月,建成世界第二条电气化地铁;1896 年 5 月 8 日,布达佩斯也建成一条电气化地铁。电气化地铁的应用解决了地铁通道的空气污染问题。据有关资料统计,1863—1924 年,世界上共有 17 个城市修建了地



铁,包括英国的伦敦和格拉斯哥、美国的纽约和波士顿、匈牙利的布达佩斯、奥地利的维也纳、法国的巴黎、德国的柏林、汉堡、西班牙的马德里和巴塞罗那等,因而 1863—1924 年为世界地铁建设的初步发展阶段。

1925—1949 年为世界地铁建设的停滞萎缩阶段,随着第二次世界大战的爆发和汽车工业的发展,地铁建设处于低潮,只有日本的东京、大阪,苏联的莫斯科等少数城市在此期间修建了地铁。

1950—1969 年为世界地铁建设的再发展阶段,第二次世界大战以后的 20 余年中,由于汽车的过度增加,使城市道路异常堵塞,轨道交通因此重新得到了重视,而且从欧美扩展到亚洲的日本、韩国、巴西、伊朗、埃及等国家,这期间约有 28 个城市相继建成了地铁,包括意大利的罗马和米兰、加拿大的蒙特利尔、日本的名古屋等。

1970—至今为世界地铁建设的高速发展阶段。20 世纪 70 年代能源危机之后,迎来了世界地铁建设的高潮。一方面包括日本、韩国等一些新兴的发达国家的大城市开始快速发展地铁网络;另一方面,欧美等发达国家重新提倡发展公共交通,大力扩展地铁网络。地铁建设在原有的基础上,取得了长足的进展。地铁区别于普通铁路及常规公交系统而具备很大的城市交通客运能力,其关键在于采用了全封闭线路、保障高密度行车的通信信号、容量大且集散快速的车辆及高站台等措施。而要达到这些要求并不一定要把线路修建在地下,实际上,各国根据自己的特点还通过其他途径来实现轨道交通系统的快速和大容量的目标。这些途径实质与上述是相同的,但在各国的称呼、经营管理方式有所不同。巴黎的 RER 采取了将城市铁路与地铁结合起来的模式,RER 线在经过市中心区时接近于地铁,在郊区则接近于城市铁路。

据统计,截至 2005 年底,国外有 108 个城市拥有近 70 km 的地铁网里程。

2. 中容量轨道交通的起源与发展

中容量轨道交通包括地面有轨电车、现代有轨电车、单轨交通、线性电机车等轨道交通系统。中容量轨道交通的发展起源于地面有轨电车。

(1) 有轨电车

有轨电车已有 100 多年的历史,自 1888 年世界上第一个有轨电车系统在美国弗吉尼亚州的里磁门德市(Richmond)投入商业运行,作为公共交通工具,有轨电车在世界各国很快得到广泛应用,至 1890 年末,有轨电车迅速替代了有轨马车及缆索铁道。此后,有轨电车发展很快,以美国为例,到 20 世纪 20 年代,有轨电车的数量最多时达到 8 万多辆,线路总长达 25 000 km;到 20 世纪 30 年代,欧洲、日本、印度和我国的有轨电车有了很大发展。旧式有轨电车行驶在道路中间,与其他车辆混合运行,又受交叉口红绿灯的控制,运行速度慢、噪声大、加减速性能差。到 20 世纪 30 年代和 40 年代,随着汽车工业的迅速发展,西方国家私人小汽车数量急剧增长,大量的汽车涌上街头,城市道路面积严重不足,于是导致世界上各大城市纷纷拆除有轨电车线路。美国的有轨电车系统在 50 年代和 60 年代基本上被拆除了。然而,有轨电车也有其优点:诸如它可以在路面直接换乘、可以小单位频繁发车、节约能源,而且无污染,造价低廉,所以东欧及亚洲一些城市没有拆光,并一直保留至今。但汽车数量的过度增长使城市交通又出现了新的问题:诸如交通堵塞、行车速度下降、空气污染和噪声严重,在闹市区甚至连停车也很难找到适当地方。在 20 世纪 60、70 年代的地铁

建设高潮发展时期,出于地铁造价昂贵,建设进度受财政和其他因素制约,西方一些人口密集的大城市,除考虑修建地下铁道外,又重新把注意力转移到地面轨道交通方式上来。利用现代高科技改造和发展有轨电车系统,开发了新一代噪声低、速度高,走行部转弯灵活,乘客上、下方便,甚至照顾到老人和残疾人上、下的低地板新型有轨电车。在线路结构上,采用了降噪技术措施,在速度要求较高的线路上,采用专用车道;而在繁忙道路交叉处进入半地下或高架,相互影响小;对速度要求不高的线路可与道路平行,与汽车混合运行,在欧美已取得了显著成效。20世纪80年代开始,环保问题、能源结构问题突出,全世界又掀起了新一轮的轻轨交通系统的建设高潮。据不完全统计,截至2005年年底,国外有50个城市拥有轻轨交通线路,总长约2010 km,说明轻轨交通正在发挥着重要作用。

(2) 单轨交通

最早的单轨系统可以追溯到1821年英国人亨利·帕尔默(P. H. Palmer)因开发单轨系统所获得的发明专利。1824年,帕尔默在伦敦码头区布设世界上第一条木制单轨运输线路用以运载货物,比蒸汽铁路还早,不过它是用马来牵引的。1888年,法国人夏尔·拉蒂格(Charles Lartigue)在爱尔兰建造了一条15 km客货两用的跨座式独轨系统,由蒸汽机车牵引,运营了将近36年,是动力式单轨系统走向实用的标志。1893年,德国人欧根·朗根(Eugen Langen)发明了悬挂式单轨车辆,1901年,一条13.3 km的悬挂式单轨铁路在德国伍珀塔市投入运营,它沿着贯穿市区的河谷搭建钢架吊悬车厢并采用电力驱动方式,称为Langen式或Wuppertal式独轨系统,该系统运营至今无任何伤亡记录,被列为世界高效率运输系统之一,这也是利用街道上空建设单轨铁路的开始。

1952年,瑞典人阿尔塞尔·莱昂纳特·文纳·格伦(Axel Leonart Wenner Gren)研究出新型的跨座单轨系统,以其名字命名为ALWEG型独轨系统。ALWEG型单轨系统很快地成为世界独轨的风尚:1959年,美国洛杉矶迪斯尼乐园首先建造了2.3 km的游客输送系统;1961年,意大利的都灵(Torino)建成了1.16 km的客运路线;1962年,美国西雅图市配合世界博览会的游客运输,建造了1.5 km的从市中心区到展览会场大门的游客输送系统;1971年美国东岸奥兰多的迪斯尼世界(Disney World)完成了4.4 km的游客输送系统。ALWEG型单轨系统在发展成型后至20世纪70年代的10多年间,虽然进展较快,但仅限于游乐园或展览会场区内的游客运输,尚未进入城市交通领域。到了80年代后期,欧洲的独轨交通开始进入城市轨道交通体系。日本(5个城市)、美国(4个城市)、澳大利亚的悉尼和英国的奥尔顿·托尔都采用这种类型。

在法国企业管理股份有限公司(SAFEGE)与法国国铁及巴黎快速运输局(RATP)共同协作研制下,1960年,在巴黎南方奥尔良市完成了1.4 km长的一种新式悬挂式单轨系统的试验,并用参与厂商所属集团名称的缩写字母命名为SAFEGE型单轨系统。它的特点是走行轨道梁为钢制箱形断面,底部开口,充气轮胎组成的转向架在轨道梁内走行,车体悬挂在转向架下面,车辆走行平稳,噪声低。日本是世界上第一个应用SAFEGE型单轨系统的国家,于1964年在名古屋的东山动物园建造了470 m长的游园路线,另外,日本的湘南江岛线和千叶线均采用该形式。

目前,ALWEG型及SAFEGE型逐渐成为现代单轨系统的两大主流技术。与普通双轨道交通相比,跨座式和悬挂式独轨交通具有钢轮钢轨系统无法替代的特点,特别适合于地形复杂、高低起伏较大、对防振降噪要求较高的场合。



(3) AGT 系统

为了解决城市交通所出现的拥挤、堵塞、噪声与废气污染等日趋严重的问题,自 20 世纪 60 年代末以来,日本、美国、法国和加拿大等国家开发了多种不同的驱动方式、控制方式以满足运输需要的所谓新交通系统,旨在改善城市公共客运,与小汽车竞争。这种系统在美国早期被称为水平电梯、空中巴士或快速运输通道,近年来则统称为运人系统。法国与日本将 AGT 技术进一步发展,并应用于城市地区的中等运量的大众运输,在法国简称 VAL (法文为 Vehicule Automatique Leger,英文为 Light Automated Vehicle);在日本,则以“新交通系统”统称属于 AGT 技术类型的中运量快速运输系统。

AGT 系统运行的速度视运距的远近有快有慢,整个系统无人值守,由计算机自动控制运行。AGT 系统可依其服务容量与路径形式分成下列三种。

① 穿梭/环路式快速运输系统。

穿梭/环路式快速运输 (Shuttle/Loop Transit, SLT) 系统是 AGT 系统最简单的一种,分穿梭式与环路式两种。穿梭式使用较大型车厢 (容量约 100 人),通常具有站位,沿着固定路线行驶。从甲地驶到乙地,再从乙地驶回甲地,如此来回输送,其作用如同高楼中的自动电梯,因此又称为水平电梯。除可作两点间直接输运外,中途亦可设站。环路式则沿环状路绕圈行驶,中途设站停留。

② 群体快速运输系统。

群体快速运输 (Group Rapid Transit, GRT) 系统的主要服务对象为具有相同出发地点与目的地的群体乘客,通常使用载运量为 12~70 人的中型车厢。GRT 与 SLT 的不同之处在于,因容量较小,除可有较密的班次外,还可设置分岔路线,以便选择性地绕行主线、支线收集乘客。运行班次间隔为 3~60 s,服务方式可分定时排班或中途不停留的区间快速运输。1974 年 1 月启用的德克萨斯州达拉斯机场的 Airtrans 以及 1975 年通车的西弗吉尼亚大学摩根敦 (Morgantown) 运人系统均属 GRT 的应用例子。

③ 个人快速运输系统。

从技术层次及载运形态而言,个人快速运输系统 (Personal Rapid Transit, PRT) 才是真正的运“人”快速运输系统 (True Personal Rapid Transit)。其主要特色为使用具有 2~6 人容量的小型车厢,在计算机控制系统的控制下,在复杂的路网中运行,并经由岔道转出/进入主干线运载乘客。

SLT 系统虽然在技术应用层面上较简单,但它既可提供机场或城市特定区内的环流交通功能,也可以在各种活动中心 (如购物中心、运输中心、娱乐园区等) 间作串联式的联络服务,因此,其运载容量不但高于群体快速运输系统与个人快速运输系统,而且可以“单节”或“连挂”成列车的方式,适应中运量系统范围内的客运需求,故在美国被称为“运人系统”。自动导轨运输系统在日本被称为新交通系统,1968 年,首先由东京大学着手进行一项类似于美国 PRT 式的 C CVS (Computer Controlled Vehicle System) 计划。1973 年 3 月,日本车辆制造株式会社开发的两辆 VONA (Vehicles of New Age) 在千叶县的谷津游园开通启用,成为日本最早的 AGT 运输工具。1975 年,冲绳海洋博览会分别使用神户制铁研发的 KRT (Kobe Rapid Transit) 及三菱重工研发的海洋博 CVS (Computer Controlled Vehicle) 作为展览会的交通工具。20 世纪 70 年代,日本在 AGT 技术方面的研究成果非常丰硕,约有 8 个机种在此期间产生。法国在中运量自动导轨系统的发展中,也有着相当高的技术经验与运营成就。1983