

21世纪高校规划教材——机车车辆类

城市轨道交通车辆工程

Chengshi Guidao Jiaotong Cheliang Gongcheng

王伯铭 编著



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

校规划教材——机车车辆类

城市轨道交通车辆工程

王伯铭 编著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

内 容 简 介

本书深入浅出地讲解了城轨车辆的构造和原理,条理清晰地叙述了城轨车辆的动力学基本理论,并创造性地绘制了大量形象生动的工作原理图。本书第一章叙述城市轨道交通系统和车辆总体的发展概况;第二章叙述城轨车辆的牵引计算;第三章重点论述城轨车辆转向架的详细构造和工作原理;第四章叙述城轨车辆车体结构;第五章叙述城轨车辆的车钩缓冲装置;第六章叙述城轨车辆动力学基础;第七章叙述城轨车辆垂向动力学;第八章叙述城轨车辆曲线通过相关理论;第九章简介跨座式独轨车辆;第十章简介直线电机轨道交通车辆。

本书作为车辆工程专业之城市轨道交通车辆专业方向本科教材,一方面能满足本科教学需要,另一方面也可作为相关专业大专和中专等专科学校的教学参考书。同时,还可供从事城轨车辆专业工作的广大科技人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车辆工程 / 王伯铭编著. —成都:西南交通大学出版社, 2007.9

21 世纪高校规划教材. 机车车辆类

ISBN 978-7-81104-718-9

I. 城… II. 王… III. 城市铁路—铁路车辆—高等学校—教材 IV. U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 133491 号

21 世纪高校规划教材——机车车辆类

城市轨道交通车辆工程

王伯铭 编著

*

责任编辑 杨 勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川锦祝印务有限公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 17.5

字数: 436 千字

2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-718-9

定价: 26.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

作为新设本科专业方向——城市轨道交通车辆工程，自1998年在我校正式设立以来，一直没有一本合适的教科书，本书正是为此目的而编写的。希望通过本书，学生能获得城市轨道交通车辆总体构造和其主要参数的分析方法等方面的知识，掌握城市轨道交通车辆走行部结构和工作原理，并能运用有关理论分析城市轨道交通车辆结构关系、运行品质和曲线通过等问题。

本书主要叙述有关城市轨道交通车辆的基本特征、结构原理以及基本设计方法，主要内容包括城市轨道交通车辆的基本知识，车体和转向架的组成以及结构原理，车钩缓冲装置结构原理和车辆动力学基本理论等。

城市轨道交通系统在我国尚处于起步阶段，在今后的20~30年甚至50年内将会得到飞速发展。2007年8月2日，在CCTV“经济半小时”栏目中，建设部有关高层领导指出，目前我国已建成的轨道交通总里程达625 km，预计到2020年将达到1 500 km，投资总额将达5 000亿元人民币。因此，城市轨道交通车辆学科一定会得到社会广泛地重视，社会对该学科人才需求也将越来越大。由于城市轨道交通车辆运用情况的复杂性，使得其结构较传统的机车车辆更具特殊性和多样性，现有传统的机车车辆学科方面的知识已经不能完全满足要求。因此，编写一本能较好反映国内外城市轨道交通车辆学科最新进展的，适合本科生使用的，同时对有关工程技术人员又有参考价值的教科书，十分必要。本书填补了国内在城市轨道交通车辆工程大学本科教材方面的空白。

本书是在充分吸收国内外有关资料的基础上，结合作者多年的教学经验，并认真考虑了本科学生的学习特点后编著而成。全书通俗易懂，条理清晰，深度合理，内容恰当。

本书特别适合作为高等学校车辆工程专业之城市轨道交通车辆专业方向本科教学使用，也可作为相关专业大专和中专等专科学校的教学参考书，同时也是从事城市轨道交通车辆设计、制造、维修和运用的工程技术人员的有益参考书。

教育部长江学者特聘教授



2007年8月16日

前 言

自从世界上第一个地铁系统于 1863 年在英国伦敦建成运行以来, 尽管经历了各种曲折的发展过程, 但世界各主要大城市无不以轨道交通系统作为城市骨干公共交通系统。我国的城市轨道交通系统开始于 1965 年, 经过 40 多年的建设, 全国已有 200 多 km 的地铁和轻轨线路建成通车, 但这些城市轨道交通系统分布在北京、天津、上海和广州等七八座城市, 所以, 在任何一个城市都没有形成真正意义上以轨道交通为骨干的公共交通网络。据初步统计, 在今后 20 年内, 我国规划建设城市轨道交通系统总里程将达 600~1 000 km, 因此, 城市轨道交通系统在我国各大城市一定会得到蓬勃发展。而作为该系统主要工具的城市轨道交通车辆, 其设计、制造、运用和维修工作需要大量具有相关专业知识的科学技术人员, 而培养这些科技人员目前迫切需要一些适合他们要求的, 同时又具有一定理论深度的教材或参考书。

本书便是基于以上目的编著而成。它从城市轨道交通系统的发展概况出发, 简要叙述了城轨车辆的基本组成和主要技术参数, 重点论述了城轨车辆转向架的详细构造和工作原理, 并对城轨车辆动力学基础、城轨车辆垂向动力学和曲线通过理论进行了详细阐述, 还对跨座式独轨车辆和直线电机轨道交通车辆做了简明介绍, 而且创造性地绘制了大量形象生动的工作原理图。

本书作为大学本科教材, 一方面既能满足大学本科教学需要, 另一方面也一定会受到从事城轨车辆设计、制造、运用和维修的广大科技人员的热烈欢迎。

编 者

2007 年 8 月

目 录

绪 论	1
第一章 城市轨道交通系统和车辆总体概述	3
第一节 城市轨道交通系统的发展和分类	3
第二节 城轨车辆的基本组成及主要技术参数	16
第三节 城市轨道交通车辆限界简介	21
第二章 城轨车辆牵引计算	24
第一节 概 述	24
第二节 牵引力	25
第三节 列车阻力	27
第四节 列车运行所需功率及牵引电动机功率估算	29
第三章 城轨车辆转向架	32
第一节 概 述	32
第二节 转向架的任务、组成和分类	32
第三节 几种典型的城轨车辆转向架简介	35
第四节 转向架构架	41
第五节 弹簧装置及减振器	43
第六节 轮对轴箱装置	62
第七节 驱动装置	74
第八节 车体与转向架间的连接装置	85
第九节 基础制动装置	98
第四章 城轨车辆车体结构	106
第一节 车体类型及特征	106
第二节 车体结构	106
第五章 城轨车辆车钩缓冲装置	138
第一节 车钩缓冲装置简介	138
第二节 城轨车辆车钩缓冲装置的几种典型结构	144

第六章 城轨车辆动力学基础	153
第一节 引起城轨车辆振动的原因	153
第二节 城轨车辆的振动形式	158
第三节 车辆运行品质及其评估标准	159
第七章 城轨车辆垂向动力学	170
第一节 具有一系簧的无阻尼车轮荷重系统的固有振动	170
第二节 具有一系簧的无阻尼车轮荷重系统的受迫振动	172
第三节 具有一系簧和液压减振器车轮荷重系统受迫振动	176
第四节 液压减振器和摩擦减振器的吸振性能比较	180
第五节 具有两系簧的无阻尼车轮荷重系统的固有振动	183
第六节 具有两系簧的有阻尼车轮荷重系统的受迫振动	186
第七节 具有两系簧的有阻尼车辆系统的受迫振动	191
第八章 城轨车辆曲线通过相关理论	196
第一节 概 述	196
第二节 便于机车车辆几何曲线通过的措施	196
第三节 机车车辆几何曲线通过的图示法	197
第四节 转向架的转心	198
第五节 机车车辆几何曲线通过的解法	199
第六节 曲线超高和缓和曲线长度	202
第七节 动力曲线通过引起的轮轨相互作用力	203
第八节 机车车辆在曲线上的速度限制	207
第九节 改善机车车辆动力曲线通过的措施	209
第九章 跨座式独轨车辆	211
第一节 跨座式独轨交通系统的特点	211
第二节 跨座式独轨车辆	213
第三节 独轨车辆采用的几个特殊装置	221
第十章 直线电机轨道交通车辆	233
第一节 直线电机轨道交通发展概况	233
第二节 直线电机的基本原理	237
第三节 直线电机轨道交通的特点	243
第四节 直线电机轨道交通车辆	251
参考文献	272

50 km/h 左右的旅行速度，方能满足乘客的要求。

城市轨道交通系统显然能满足这一需要。

城市交通系统分类，见图 0-2。

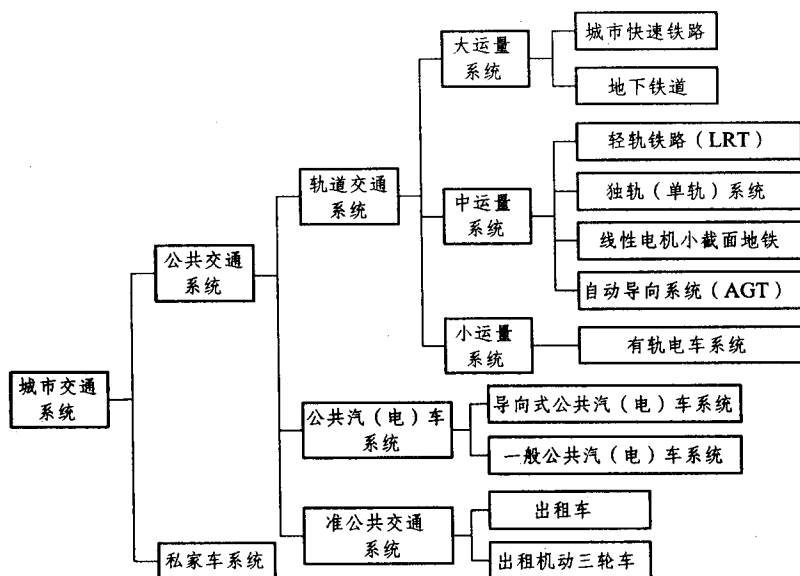


图 0-2 城市交通系统分类

第一章 城市轨道交通系统和 车辆总体概述

第一节 城市轨道交通系统的发展和分类

一、世界各国城市轨道交通系统发展概况

与任何新生事物一样，以地铁为代表的城轨交通系统也是在一片反对声中诞生的。

(1) 18 世纪到 19 世纪上半叶，城市交通处于马车时代——世界第 1 条路面轨道马车于 1832 年在美国纽约诞生。

(2) 1863 年，英国伦敦建成了世界第 1 条由蒸汽牵引的地铁——全长 3.1 km，1890 年改为电力牵引。

(3) 1888 年，美国的弗吉尼亚州的里磁门德市，世界第 1 条有轨电车系统投入正式商业运行。

这标志着城市交通进入了轨道交通的时代。

自从 1863 年伦敦开通了世界上第 1 条地铁至今，城市轨道交通发展经历了一个曲折的过程，大致可分为以下 4 个阶段：

1. 诞生和初始发展阶段（1863—1924 年）

标志：欧美的城市轨道交通得到了较快的发展。其间，共有 13 个城市建设了地铁，平均每年的增长速度为 0.21 个城市，还有许多城市建设了有轨电车系统。

1863—1899 年，有伦敦、纽约和巴黎等 7 座城市建设了地铁。

1900—1924 年，有柏林、汉堡和费城等 9 座城市建设了地铁。

2. 停止萎缩阶段（1924—1949 年）

标志：该阶段只有 5 个城市发展了地铁，有轨电车也停滞不前，有些线路还被拆除。

原因：战争的爆发和汽车工业的飞速发展。

1924—1949 年，有东京、大阪和莫斯科等 5 座城市建设了地铁。

3. 重新（再）发展阶段（1949—1969 年）

标志：轨道交通重新得到重视，并且从欧美扩展到日本、中国、韩国及南美的巴西等国，该阶段共有 17 座城市新建了地铁，平均每年发展 0.85 个城市。

原因：汽车的高速发展使得城市道路交通经常堵塞，严重时可使交通瘫痪，再加上汽车排放的尾气严重污染了城市空气。

1950—1970 年，约有 30 座城市新建了地铁和轻轨系统。

4. 高速发展阶段（1970 年至今）

标志：当今世界各国的大城市和特大城市中，轨道交通已在公共交通系统中处于骨干（又称主动脉）地位。

原因有：

（1）世界上许多国家都确立了发展城市轨道交通的方针，并立法解决了建设城市轨道交通的资金来源。

（2）城市的高速发展要求轨道交通必须相应地高速发展。

（3）科技的发展促进了城市轨道交通的发展。

这一阶段中，地铁以每年 1.4 个城市的速度增长，共有 40 多个城市新建了地铁；轻轨和其他形式的轨道交通也得到了高速发展。

据统计，目前世界上已有 50 多个国家和地区的 127 座城市建造了地下铁道，累计地铁线路总长约为 5 000 多 km，年客运总量约为 230 亿人次。而世界上已建成轻轨交通系统的城市大约有 280 座，总长度达 2 万 5 千多 km，车辆总数 5 万多辆，年客运总量超过 200 亿人次。

表 1-1 列出了世界一些主要大城市公共交通方式分担率，该分担率可用对应的图 1-1 来表示。从表 1-1 或图 1-1 可以看出，在 20 世纪 80 年代，世界上公共交通问题解决比较好的城市，譬如东京、伦敦、纽约和巴黎等城市，其轨道交通在整个公共交通中的分担率均超过 50%，最高的东京达到了 94%。而且东京、伦敦和莫斯科 3 座城市在 1998 年时，其轨道交通完成客运量占总客运量的百分比均超过了 50%。

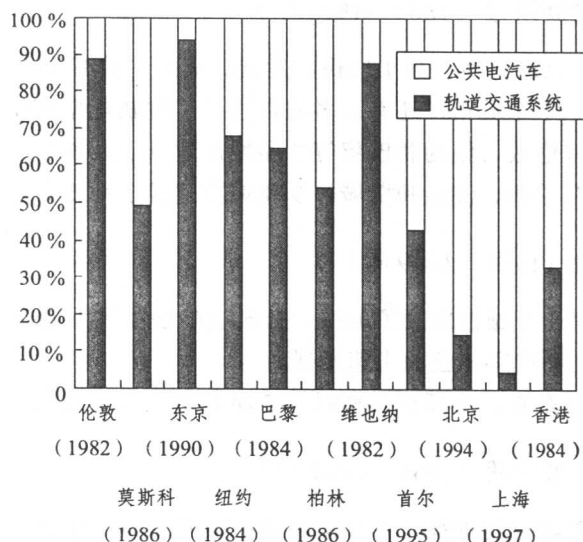


图 1-1 世界一些主要大城市公共交通方式分担率

表 1-1 世界一些主要大城市公共交通方式分担率

%

城市/年份	轨道交通分担率	公共汽(电)车分担率	轨道交通完成客运量占总客运量的百分比
伦敦/1982	89.0	11.0	61 (1998 年)
莫斯科/1986	49.0	51.0	54 (1998 年)
东京/1990	94.0	6.0	87 (1998 年)
纽约/1984	68.0	32.0	
巴黎/1984	65.0	35.0	
柏林/1986	54.0	46.0	
维也纳/1982	88.0	12.0	
首尔/1995	43.0	57.0	
北京/1994	15.0 (23/2000 年)	85.0	
上海/1997	4.5 (15/2000 年)	95.5	
香港/1984	33.0	67.0	

二、城市轨道交通系统的总特点

1. 运输能力大

大运量是城市轨道交通系统的最大特点之一。地铁或高架铁路每小时单向可运送 5 万~8 万人次,明显优于公路交通。

2. 高速性和准时性

由于轨道交通系统有专用行驶轨道,在交通堵塞严重的大城市中,其平均运行速度明显高于一般公路的汽车,并具有良好的准时性和可靠性。

3. 节省空间,能有效利用土地

由于公路交通不是导向式的,故与轨道交通相比,其占用面积大得多。

日本东京首都圈的铁路与公路的实际土地占用情况比较见表 1-2。

表 1-2 日本东京首都圈的铁路与公路的实际土地占用情况

项 目	运输实绩(单向)/(人/h)	占用宽度/m
铁 路	83 020	10.9
公 路	7 820	17.0

由此可见,在完成相同运量(人数)的情况下,铁路实际土地占用宽度仅为公路的 6%,亦即公路实际土地占用宽度是铁路的 16 倍。

4. 节约能源

比较铁路、公共汽车和私家车等 3 种主要交通系统每一单位运输量的能源消耗可见(见图 1-2):铁路约为公共汽车的 3/5,私人用车的 1/6。

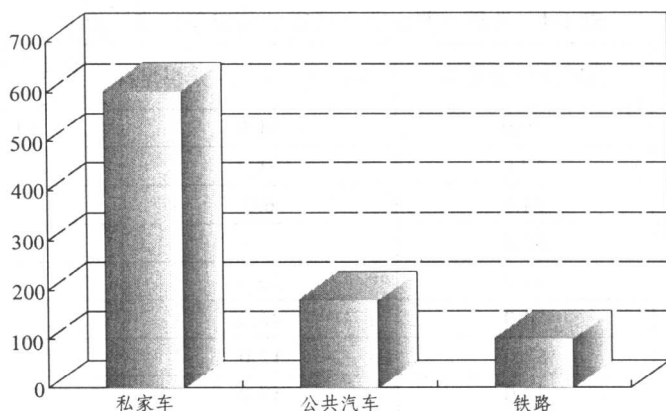


图 1-2 3 种主要交通系统每一单位运输量的能源消耗比较

5. 安全性高

从世界各种交通发展历史来看，毫无疑问轨道交通系统比公路交通系统的安全性高得多。

表 1-3 为日本各交通工具死伤率的统计数据（1982—1987 年）。由表 1-3 可知：铁路交通的死亡率不到私人用车死亡率的千分之五（4.53%），而铁路交通的受伤率仅为私人用车受伤率的万分之一（0.124%）。

表 1-3 日本各交通工具死伤率统计（1982—1987 年）

项 目	10 亿人 · km (A)	死者(B)	伤者(C)	死亡率(B/A)	受伤率(C/A)
铁 路	1 656	88	176	0.053	0.106
私人用车	2 334	27 300	1 999 325	11.698	856.682
铁路交通的死伤率/ 私人用车的死伤率				4.53%	0.124%

6. 减少大气污染

大城市中汽车造成的大气污染，日益危害着人类的健康，已成为严重的城市问题。与汽车相比，铁路的有害物质排出量少得多，对人类生活而言，是很出色（绿色）的交通工具（见图 1-3）。

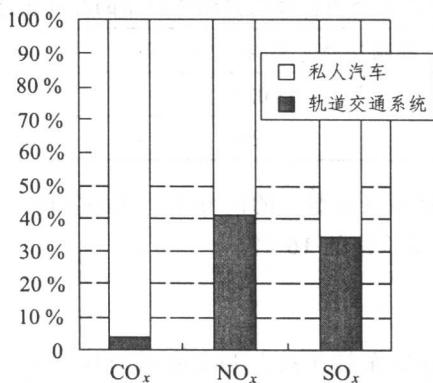


图 1-3 日本各交通工具的大气污染物质排放量统计

表 1-4 为日本各交通工具的大气污染物质排放量统计数据。

表 1-4 日本各交通工具大气污染物排放量统计

t/(10 亿人 · km)

交通工具	CO _x	NO _x	SO _x
轨道交通系统	4 600	179	11
私人用车	123 000	257	21
轨道交通系统/私人用车	3.74 %	69.6 %	52.4 %

三、我国城市轨道交通系统发展现状及存在的问题

1. 发展现状

1) 北京：1965 年开始修建地铁

1969 年，我国第 1 条地铁线建成通车，全长 23.6 km（环线）。

1984 年，2 号线通车，全长 19.9 km。

1 号、2 号线总长 43.5 km，共设 29 座车站，日均客运量 146 万人次，占全市日客运量的 15%。

2000 年，3 号线（即复兴门—八王坟）通车，全长 13.5 km。该线通车后，使客运量又增加了 8%。但尚未形成以轨道交通为骨干的公共交通网络。

线路全长 40.8 km 的快速轨道，已于 2003 年初全线建成通车。

工程总投资约 120 亿元的地铁 5 号线全长 27.6 km，也已于 2007 年 7 月投入试运行。

北京规划的轨道交通线路数达到 13 条，并有 2 条支线，共计里程 408.2 km。其中：2008 年前，北京将新建城市轨道交通线路 156.7 km，总投资 630 亿元。

2) 天津：1970 年 6 月开始兴建地铁

1980 年建成，1985 年正式投入运营的天津地铁 1 号线，全长 7.4 km，设 6 座车站，日均客运量约为 3 万人次，远未形成公交骨干能力。

天津规划地铁 4 条，共 106 km；规划市郊轻轨线 50 km；预留环线地铁 1 条约 71 km。全部共计 227 km。

3) 上海：1990 年 9 月开始兴建地铁

1995 年 5 月，1 号线建成通车，1996 年 7 月 1 日向南延伸至莘庄，全长 20.5 km，设 17 座车站，平均日客运量为 100 万人次，占全上海公交总运量的 8%。

2000 年 5 月，2 号线建成通车，全长 19 km，设 13 座车站及 1 处停车场。

2000 年底，3 号线（即明珠线一期——全部高架）建成通车，全长 24.7 km，设 19 座车站。

截至 2000 年底，上海轨道交通线路全长 65 km，完成的客运量占全市公交客运量的 15%。

1 号线的北延伸段，即上海火车站—泰和路站，全长 12.5 km，已于 2004 年建成通车；4 号线（即明珠二期），全长 22.3 km，也已于 2005 年全线建成通车。

到 2005 年底，上海的轨道交通已形成由“十字加环”及若干条放射线组成的轨道交通

网基本框架,运行线路达 120 多 km,分担中心城区 20% 左右的城市公交客运总量。

上海规划轨道交通线路 21 条,共计 780 多 km (不计磁悬浮线)。

预计到 2010 年,上海将建成约 400 km 的城轨交通。

4) 广州:1993 年 12 月破土动工建设地铁

1998 年 12 月 28 日 1 号线(广州钢铁厂—广州火车东站)全线建成。1999 年 6 月 28 日,广州地铁 1 号线正式投入商业运营。全长 18.5 km,共设 16 个车站。

全长为 23.4 km 的 2 号线,设 20 座车站,已于 2004 年 6 月 28 日全线开通,其中首段(从三元里至晓港) 8.9 km 早在 2002 年 12 月 29 日就已贯通。

全长为 35.86 km 的 3 号线,从广州东站—番禺广场,已于 2006 年底全线开通。

广州规划轨道交通线路共计 554 km,并将按照“1 年至少 1 条新的地铁线路动工”的目标,加速推进广州城市轨道交通网的建设。

5) 其他城市

其他城市包括深圳、南京、重庆和武汉等,已经建成的城市轨道交通项目有:

深圳地铁 1 号线一期工程,全长 14.8 km,于 2005 年建成通车。

南京地铁 1 号线一期工程,全长 16.84 km,于 2005 年 10 月建成通车(南京规划轨道交通线 7 条共计 263.1 km)。

重庆轻轨 1 号线(独轨),全长 16.6 km,于 2005 年建成通车(重庆规划轨道交通线共计 325 km)。

武汉轻轨 1 号线一期工程,全长 11 km,于 2004 年 7 月建成通车。

正在建设的城市轨道交通项目有:

成都地铁 1 号线,全长 14.8 km,预计 2010 年建成。

天津地铁 1 号线延伸线,全长 11 km。

沈阳轻轨一期工程,规划全长 22.35 km,预计 2007 年建成。

.....

规划和筹备建设的其他城市轨道交通项目有:

哈尔滨轻轨交通工程,规划全长 14.5 km。

青岛地铁 1 号线,规划全长(一期) 16.43 km。

杭州地铁 1 号线,规划全长 52 km。

西安地铁 1 号线,规划全长 19.42 km。

.....

6) 统计

至 2000 年上半年止,我国已建成通车的地铁线路总长近 150 km,其中:北京 57 km,上海 65 km,广州 18.5 km,天津 7.4 km(合计 147.9 km)。

截至 2003 年底,全国除港澳台地区以外,已建成的地铁、城铁、轻轨、高架磁悬浮线、高架轨道交通线、现代有轨电车等城市轨道交通共 16 条线路,全长达 385 km。

在全国所有城市轨道交通网规划中,北京规划总里程约为 1 000 km,为全国之首,预计到 2008 年,将建成约 300 km 的城轨交通;上海规划总里程约为 780 km,预计到 2010 年,将建成约 400 km 的城轨交通;广州规划总里程约为 554 km;天津规划总里程约为

234.7 km；南京规划总里程约为 263 km；重庆规划总里程约为 325 km。其他已做了城市轨道交通网规划的城市，其规划总里程一般都在 100~200 km 左右。

2. 存在的问题

(1) 地铁建设资金巨大：上海和广州地铁的建设费用每 km 高达 8~10 亿元人民币。

(2) 地铁建设周期较长，现在北京、上海和广州地铁平均建设速度为 3 km/年左右。照此计算，要想建成 200~300 km 的轨道交通网，赶上世界主要发达国家大都市的水平，恐怕需要一个世纪。

(3) 城市轨道交通系统只有建到一定规模（即形成一定规模的路网）时，才能充分发挥其巨大的社会效能和经济效益。

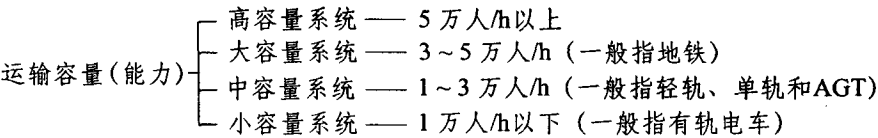
四、城市轨道交通系统的分类

城市轨道交通系统一般采用以下几种分类方法进行分类：

1. 以运输容量（能力）来分

可分为高容量、大容量、中容量和小容量。

所谓容量，是指运送能力，也就是指每小时单方向断面的乘客通过量（或输送量）。



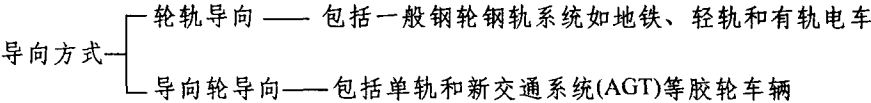
2. 以线路架设方式来分

可分为隧道（地下或水下）、高架和地面。

高容量和大容量系统均采用高架和隧道；小容量系统一般采用地面直接铺设；中容量系统通常兼有地面、隧道和高架。

3. 以导向方式来分

可分为轮轨导向和导向轮导向。



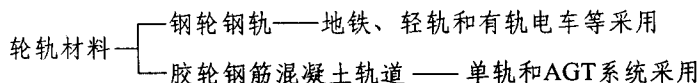
4. 以线路隔离（封闭）程度来分

可分为全隔离、半隔离和不隔离等 3 种系统。

高、大容量及 1.6 万人/h 以上的中容量系统都必须全隔离；有轨电车则属于不隔离；中容量一般采用半隔离系统。

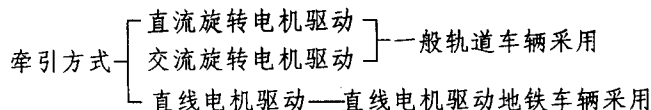
5. 以轮轨材料来分

可分为钢轮钢轨系统和胶轮钢筋混凝土轨道系统。



6. 以车辆的牵引方式来分

可分为直流旋转电机牵引、交流旋转电机牵引和直线电机牵引3种。



五、几种广泛采用的城市轨道交通系统简介

1. 地铁——Metro 或 Subway

20 世纪上半叶，世界广泛采用的轨道交通基本上只有地铁和有轨电车。

地铁开始时确实都建在地下，但随着技术的进步和线路的延长，后来出现了地面和高架线路。

现在，全世界被称为“地铁”的系统有 51% 是地面线，13.6% 属高架线，只有 35.4% 才是地下线。

但不管是地面线还是高架线，几乎全部采用全隔离（封闭）系统。单向每小时运量可达 3 万~5 万人次。

例如：日本东京的山手线，全长 34.5 km，90% 以上为封闭的地面线，但道口全部立交，整车由 10 辆组成，载客量可达 2 000 人，高峰时每隔 1.5 min 发一次车，日运量可达 300 万~400 万人次。

2. 有轨电车系统——Tram/Streetcar Rail Transit

有轨电车是在地面上与其他交通工具混行的轨道交通方式，它比地铁晚几年诞生，几乎经历了与地铁一样的几个阶段。

20 世纪 20 年代是有轨电车最辉煌的年代，在城市交通中起到了重要的作用。例如：1920 年美国有 370 个城市建有有轨电车，线路总长达 2.5 万 km，车辆近万辆，年客运量达 137 亿人次，占城市总客运量的 88%。

3. 轻轨交通系统——LRT

轻轨交通是一种比较年轻的电气牵引交通系统，是在 20 世纪 60~70 年代在有轨电车的基础上经改造而发展起来的。

主要采用了以下一些新技术：

(1) 可控硅斩波调速技术。

- (2) 橡胶弹性车轮 —— 减振技术。
- (3) 铰接式车体技术。
- (4) 轻量化车体技术（铝合金焊接结构）。
- (5) 车辆组合制动技术（再生制动、磁轨制动和涡流制动等）。
- (6) 新型转向架技术（径向转向架、独立车轮转向架和单轮组转向架等）。
- (7) 高架线路降噪技术。

新生后的有轨电车 —— 即轻轨交通系统在速度、能耗、噪声、振动、爬坡能力、制动能力、运载能力、转弯能力和车身重量等方面均明显优于原来的有轨电车，并产生了质的变化，而且在造价、工期和灵活性方面也优于地铁。它以一种崭新的姿态活跃在城市交通舞台上，在轨道交通大家庭中形成了一个新的系统。在 1978 年公共交通国际联会上被命名为轻轨交通 —— LRT (Light Rail Transit)，其所采用的车辆被称为轻轨车辆 —— LRV (Light Rail Vehicle)。

轻轨交通诞生后，刚好填补了轨道交通单向小时客运能力 1 万~4 万人次的空缺，整体上完善了轨道交通系统。因此，LRT 得到了迅速发展。

4. 单轨（独轨）交通系统 —— Monorail Transit

单轨交通是一种跨骑或悬挂在高架的钢或混凝土轨道上行驶的交通系统（见图 1-4）。最早的运营线出现在 1888 年。但由于其车辆摇晃、轮轨磨损严重和舒适性差等不足，一直没有得到发展。直到 20 世纪 50 年代，从技术上解决了行驶稳定性等问题后才得以发展。

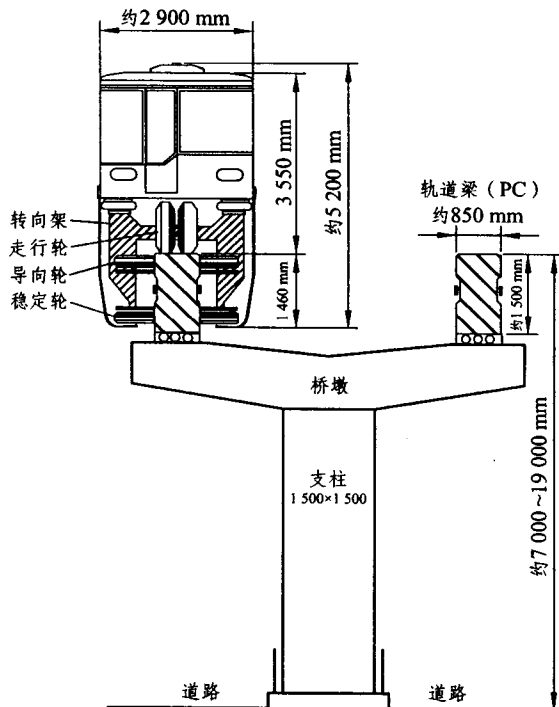


图 1-4 单轨（独轨）交通系统组成示意图