



轨道交通类专业“互联网+”创新型精品教材

城市轨道交通 车辆

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG
CHELIANG



扫描二维码
共享立体资源

主 编 丁阳喜 罗芝华

城市轨道交通
车辆

主
编
丁阳喜
罗芝华

北京出版集团公司
北京出版社

北京出版集团公司
北京出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城市轨道交通车辆 / 丁阳喜, 罗芝华主编. —北京 :
北京出版社, 2017.1 (2023 重印)
ISBN 978-7-200-12601-3

I. ①城… II. ①丁… ②罗… III. ①城市轨道交通—铁路车辆—高等职业教育—教材 IV. ① U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 255505 号

城市轨道交通车辆
CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG CHELIANG

主 编: 丁阳喜 罗芝华
出 版: 北京出版集团公司
北 京 出 版 社
地 址: 北京北三环中路 6 号
邮 编: 100120
网 址: www.bph.com.cn
总发行: 北京出版集团公司
经 销: 新华书店
印 刷: 定州市新华印刷有限公司
版 次: 2017 年 1 月第 1 版 2023 年 8 月修订 2023 年 8 月第 4 次印刷
开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16
印 张: 20.5
字 数: 361 千字
书 号: ISBN 978-7-200-12601-3
定 价: 54.00 元

质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

目 录

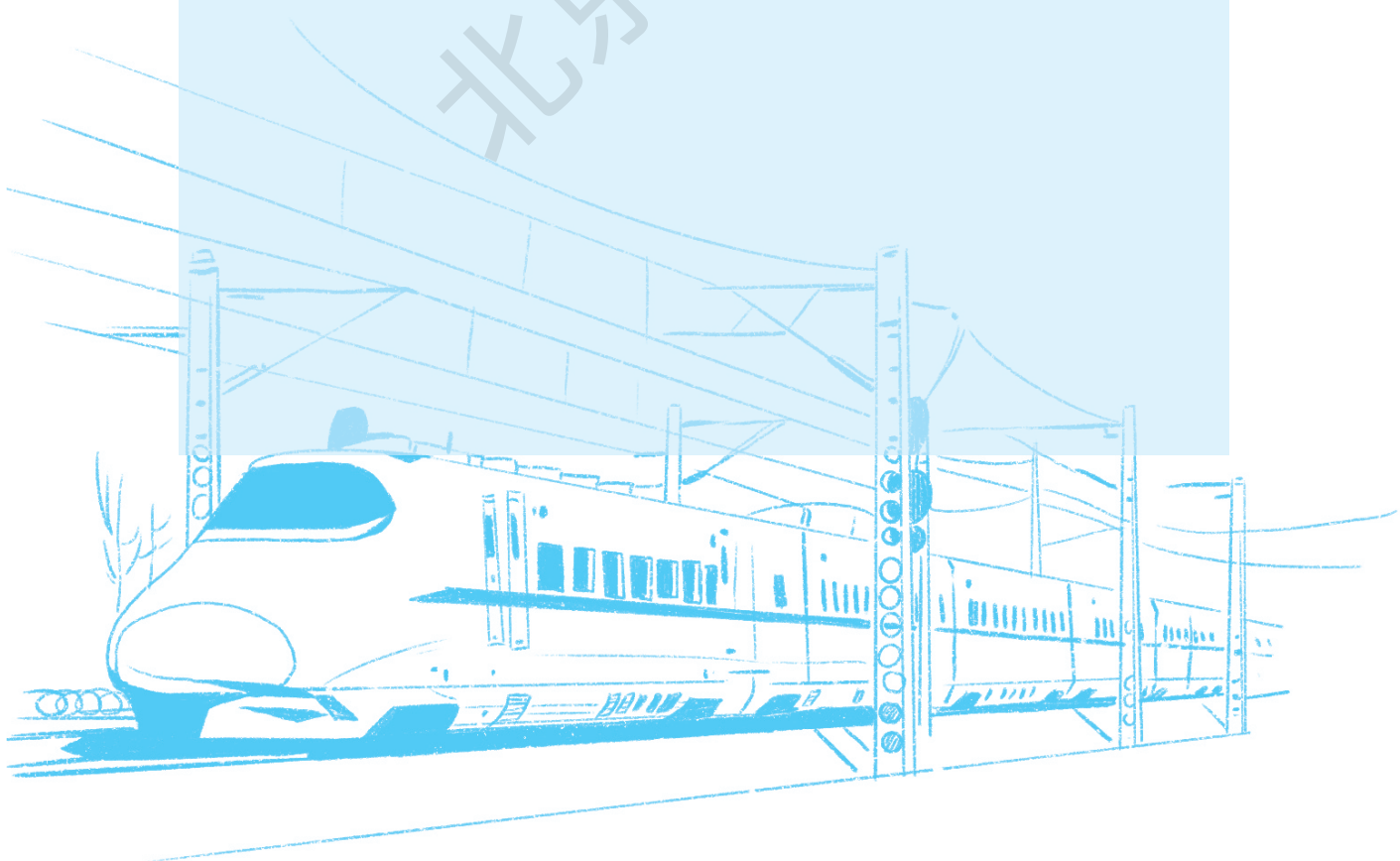
单元一 城市轨道交通车辆的基础知识及发展概况	1
任务 1 城市轨道交通车辆的基础知识	2
任务 2 城市轨道交通车辆的发展概况	18
单元二 城市轨道交通车辆的车体	29
任务 1 车体的类型与结构	30
任务 2 车体的内装与车内设备	49
任务 3 车门	59
单元三 城市轨道交通车辆的转向架	72
任务 1 概述	73
任务 2 构架	85
任务 3 轮对轴箱装置	91
任务 4 弹簧减震装置	106
任务 5 牵引连接装置	121
任务 6 驱动装置	129
任务 7 地铁及轻轨车辆转向架	138
单元四 城市轨道交通车辆的连接装置	167
任务 1 车钩缓冲装置的概述	168
任务 2 车钩装置	170
任务 3 缓冲装置	178
任务 4 车钩缓冲装置的附属装置	185
任务 5 贯通道	189
单元五 城市轨道交通车辆的制动系统	193
任务 1 制动系统的作用	194
任务 2 空气制动系统	201
任务 3 风源系统	210
任务 4 电气指令式制动控制系统	224

任务 5 基础制动装置	231
任务 6 制动系统的检修	236
单元六 城市轨道交通车辆的空调系统	240
任务 1 制冷与空调的基本原理及空调系统的概述	241
任务 2 车内空气参数的确定	250
任务 3 制冷剂与润滑油	253
任务 4 制冷压缩机	260
任务 5 换热器与辅助设备	267
任务 6 制冷自动控制器件	273
任务 7 单元式空调机组	277
单元七 城市轨道交通车辆的维修与管理	294
任务 1 维修与管理的概述	295
任务 2 维修工艺的基础	300
任务 3 维修制度	315
参考文献	322

单元一 城市轨道交通车辆的基础知识及发展概况

【单元概述】

城市轨道交通车辆作为城市轨道交通的乘客运载工具，不仅要保证车辆运行的安全、准点和快速，而且要为乘客提供良好的服务，使乘客感到舒适和方便，同时还应考虑其对城市景观和环境的影响。为了更好地满足这些要求，近年来在设计、制造城市轨道交通车辆上采用了大量的高新技术，如车体结构、材料的轻量化、运行装置的低噪声和高平稳性设计、线性电机驱动，以及直流斩波调速技术、再生制动技术和交流变频调压技术等。



任务 1

城市轨道交通车辆的基础知识

学习目标

1. 掌握城市轨道交通车辆的特点与类型。
2. 掌握城市轨道交通车辆的选用。
3. 掌握城市轨道交通车辆的基本组成。
4. 熟悉城市轨道交通车辆的主要技术参数。
5. 熟悉城市轨道交通车辆的编组。

教学环境

教室和车辆模拟实训室或课后实地参观。

教学设施

城市轨道交通车辆模型（动力转向架和非动力转向架模型各1套、轮对装置模型1套、车钩缓冲装置模型1套、制动装置原理试教板1套）及多媒体等。

理论模块

一、城市轨道交通车辆的概念与类型

（一）城市轨道交通车辆的概念

城市轨道交通车辆是指在城市轨道交通系统中，由电力牵引搭载乘客，在固定导轨上行驶的一种运载工具。

（二）城市轨道交通车辆的特点

城市轨道交通车辆是城市轨道交通运送乘客的重要工具，是城市轨道交通类型的标志。结合城市轨道交通的需求，同其他交通车辆相比，它具有以下特点：



1. 种类多。能满足不同类型的城市轨道交通。
2. 载客能力强。大型城市轨道交通车辆额定载客可达 310 人 / 辆。
3. 动力性能好。速度快、加速能力强、制动效果好。
4. 安全可靠性好。设备先进，故障率低，稳定性和可靠性强，突发情况下适应性强。
5. 外观和乘车环境好。对车辆的外观造型、色彩、照明、空调、座椅及扶手等都有美化。
6. 灵活的牵引特征。根据不同的线路特征，可以选择不同的牵引方式，即动力集中牵引和动力分散牵引。
7. 节能环保。车辆牵引动力采用电力，故也称绿色交通车辆。

(三) 城市轨道交通车辆的类型

城市轨道交通车辆的类型主要有地铁车辆、轻轨车辆、直线电机车辆、单轨车辆和自导向轮胎式车辆。

1. 地铁车辆

地铁车辆是一种由电力牵引，用轮轨支持与导向，运行在地下隧道、地面或高架线路上的大运量轨道交通工具。地铁车辆由车体与内装、车门与照明、转向架与车钩缓冲等装置和牵引电动传动、辅助供电、制动、列车控制、空调与采暖及乘客信息等系统组成。车辆类型有 A 型车、B 型车和 C 型车，如图 1-1、图 1-2、图 1-3 所示。各类型车辆主要技术参数见表 1-1。



图 1-1 北京地铁 14 号线 A 型车



图 1-2 重庆地铁 1 号线 B 型车



图 1-3 香港南港岛线 C 型车

表 1-1 各类型车辆主要技术参数

序号	项目名称		A 型车	B 型车	C 型车		
			四轴车	四轴车	四轴车	六轴车	八轴车
1	车体基本长度 (mm)		22 000	19 000	18 900	22 300	29 500
2	车体基本宽度 (mm)		3 000	2 800	2 600		
3	车体基本高度 (mm)	受流器车 (加空调 / 无空调)	3 800/3 600		3 700/3 250		
		受电弓车 (落弓高度)	3 810~3 890				
		受电弓工作高度	3 980~5 410				
4	车内净高度 (mm)		$\geq 2 100$				
5	地板高度 (mm)		1 130	1 100	950		
6	车辆定距 (mm)		15 700	12 600	11 000		7 200
7	轴重 (t)		≤ 16	≤ 14	≤ 11	≤ 10	≤ 9
8	固定轴距 (mm)		2 200~2 500	2 200~2 300	1 800~1 900		
9	车轮直径 (mm)		$\Phi 840$		$\Phi 760$		
10	每侧车门数 (个)		5	4	4	4	5
11	车门宽度 (mm)		$\geq 1 300$				
12	车门高度 (mm)		$\geq 1 800$				
13	定员人数 (人)	单司机室车	295	230	200	240	315
		无司机室车	310	245	210	250	325
14	站立人员标准	定员 (人 / m ²)	6				
		超员 (人 / m ²)	9				
15	最高运行速度 (km/h)		≥ 80		≥ 70		
16	启动平均加速度 (m/s ²)		≥ 0.9		≥ 0.85		
17	常用制动减速度 (m/s ²)		1.0		1.1		
18	紧急制动减速度 (m/s ²)		1.2		1.3		
19	噪声 [dB (A)]	司机室内	≤ 80		≤ 70		
		客室内	≤ 83		≤ 75		
		车外	80~85 (站台)		≤ 82		

注: 摘自《地铁车辆通用技术条件》(GB/T 7928—2003)。



2. 轻轨车辆

轻轨车辆是在传统有轨电车基础上改造发展起来的现代低地板有轨电车，使用电力牵引，用于城市客运的中运量轨道交通工具。现代低地板有轨电车由车体与内装、车门与照明、独立轮转向架或传统转向架与链接等装置和牵引电传动、辅助供电、空气与液压制动、列车控制、空调与采暖及乘客信息等系统组成。根据《城市轻轨交通链接车辆通用技术条件》(GB/T 23434—2009)的规定，现代低地板有轨电车分为四轴车辆、六轴铰接车辆和八轴铰接车辆三种类型，如图 1-4、图 1-5 所示。现代低地板有轨电车主要技术参数见表 1-2。



图 1-4 苏州六轴铰接低地板有轨电车



图 1-5 沈阳有轨电车 2 号线低地板有轨电车

表 1-2 现代低地板有轨电车主要技术参数

序号	名称	四轴低地板 C-I 型 (D)	六轴低地板 C-II 型 (D)	八轴低地板 C-III 型 (D)
1	车辆基本长度 (mm)	20 000	35 000	45 000
2	车辆基本宽度 (mm)	2 600	—	—
3	车辆顶部至轨面高度 (mm)	≤3 250	—	—
4	车辆顶部设备至轨面高度 (mm)	≤3 700	—	—
5	车内最小净高 (mm)	1 950	—	—
6	地板面至轨面高度 (mm)	≤350	—	—
7	转向架至固定轴距 (mm)	动车 ≤1 900 拖车 ≤1 800		
8	车轮直径 (mm)	≤660	—	—
9	车钩中心线距轨面高度 (mm)	660	—	—
10	受电弓落弓高度 (mm)	≤3 700	—	—
11	受电弓工作高度 (mm)	3 900~5 600	—	—
12	受电弓滑板工作高度 (mm)	≥1 200	—	—
13	轴重 (t)	≤11	—	—
14	定员 (人)	≤160	≤240	≤320

3. 直线电机车辆

直线电机车辆采用直线感应电机来获得牵引力和电制动力，其定子线圈安装在车辆转向架上，而转子部分则安装在线路导轨上，如图 1-6 所示。直线电机车辆依然是一种通过转向架实现轮轨支持与导向，运行在地面、高架线路或地下隧道的中运量轨

道交通工具。直线电机车辆的构造与地铁车辆基本相同，唯一不同的是采用悬挂直线电机定子的径向转向架。由于直线电机车辆采用直线电机驱动，实现了非粘着牵引，爬坡能力强；由于没有齿轮箱等传动机构，轮径可以减小，车辆可以轻量化，能有效减少车辆的断面限界，降低工程投资；但直线电机空隙大、效率低、能耗比一般地铁车辆高 30% 左右。因此，直线电机车辆适用于坡道大、曲线半径小及断面限界小的特殊线路。直线电机车辆主要技术参数见表 1-3。



图 1-6 首都国际机场快速轨道线直线电机车辆

表 1-3 直线电机车辆主要技术参数

线路	广州地铁 4 号线	广州地铁 5 号线	北京地铁机场线	东京地铁大江户线
供电方式	正线接触轨 / 车辆段架空接触网	正线接触轨 / 车辆段架空接触网	接触轨	架空接触网
供电电压 (V)	DC1 500	DC1 500	DC750	DC1 500
信号系统制式	无线电台式移动闭塞	无线电台式移动闭塞	波导管式移动闭塞	数字轨道电路式准移动闭塞
车辆质量 (t)	30	30	24	26.5
载客量 (人)	217 (头车) / 242	217 (头车) / 242	193	100 (40)
车辆长度 (mm)	17.2 (头车) / 16.8	17.2 (头车) / 16.8	16.13 (头车) / 15.28	16.5
车辆宽度 (mm)	2 900	2 900	3 200	2 500
车辆高度 (mm)	3 560	3 560	3 777	3 150
地板高度 (mm)	930	930	1 082	800
轮径 (mm)	730	730	840	610
最高运行速度 (km/h)	90	90	110	70

4. 单轨车辆

单轨车辆是采用橡胶轮胎转向架，通过在轨道梁运行的橡胶轮胎转向架走行轮支持车厢，并借助转向架的导向轮和稳定轮的引导和稳定作用，在高架线路上行驶的中运量轨道交通工具。单轨车辆由车体与内装、车门与照明、橡胶轮胎转向架、钩缓连接等装置和牵引电传动、辅助供电、空气与液压制动、列车控制、空调与采暖及乘客信息等系统组成。车辆类型有跨座式单轨车辆和悬挂式单轨车辆，如图 1-7、图 1-8、图 1-9 所示。由于必须采用高架形式，因此限制了跨座式单轨车辆的发展。跨座式单轨车辆主要技术参数见表 1-4。



图 1-7 重庆轨道交通 2 号线跨座式单轨列车



图 1-8 日本多摩都市跨座式单轨列车



图 1-9 日本江之岛线悬挂式单轨列车

表 1-4 跨座式单轨车辆主要技术参数

序号	名称	车辆类型		备注
		Mc 车或 Tc 车	M 车或 T 车	
1	轨道梁截面尺寸 (mm)	850 × 1 500 (宽 × 高)	—	—
2	车钩连接面间长度 (mm)	15 500	14 600	—
3	车体长度 (mm)	14 800	13 900	—
4	车最高点距地面高度 (mm)	3 840		—
5	车辆总高度 (mm)	≤5 300	车辆最低点至最高点	—
6	车体宽度 (mm)	2 900	—	—
7	车辆最大高度 (mm)	2 980	—	—
8	客室地板面高度 (mm)	1 130	—	—
9	转向架中心距 (mm)	9 600	—	—
10	空气弹簧中心距 (mm)	2 050	—	—
11	每辆车客室门数 (对)	2	—	—
12	定员人数 (人)	151	165	6 人 / m ²
13	超员人数 (人)	211	230	9 人 / m ²
14	车辆自重 (t)	≤28	≤29	—
15	轴重 (t)	≤11		—

续表

序号	名称		车辆类型		备注
			Mc 车或 Tc 车	M 车或 T 车	
16	转向架主要尺寸 (mm)	走行轮固定轴距	1 500		—
		导向轮轴距	2 500		—
		走行轮自由直径	1 006		—
		导向轮自由直径	730		—
		稳定轮自由直径	730		—

注：摘自《跨座式单轨交通车辆通用技术条件》(CJ/T 287—2008)。

5. 自导向轮胎式车辆

自导向轮胎式车辆是运行在专用混凝土轨道上，具有特殊导向和转向机构并由单轴橡胶轮转向架支撑的小运量电动客车。自导向轮胎式车辆由车体与内装、车门与照明、橡胶轮胎单轴转向架与钩缓连接等装置和牵引电传动、辅助供电、电制动与液压制动、列车控制、空调与采暖及乘客信息等系统组成。其中，单轴转向架的走行轮采用带内置式辅助轮的充氮气橡胶轮胎，并设有轮胎压力监测装置；而导向轮采用填充聚氨酯的橡胶轮或实心橡胶轮。单轴转向架还设有车辆自导向与转向装置。自导向轮胎式车辆如图 1-10 所示。自导向轮胎式车辆主要技术参数见表 1-5。



图 1-10 日本埼玉县新交通轮胎式车辆

表 1-5 自导向轮胎式车辆主要技术参数

序号	名称	技术规格
1	车体长度 (mm)	8 500
2	车顶距轨面高度 (mm)	≤3 450
3	车体宽度 (mm)	2 450
4	车内净高 (mm)	≥2 100
5	地板面距轨面高度 (mm)	1 050
6	车辆定距 (mm)	5 000
7	左右走行轮中心距离	1 700



续表

序号	名称	技术规格
8	走行轮轮胎直径 (mm)	940
9	轴重 (t)	9
10	每辆车每侧客室门数 (对)	12
11	车辆最大载客量 (人)	90
12	车钩中心线距轨面高度 (mm)	880

注：摘自《自导向轮胎式车辆通用技术条件》(CJ/T 366—2011)。

城市轨道交通车辆按照其他不同的划分标准，还可以划分出以下类型。

1. 按车辆牵引动力配置分为动车和拖车两种类型。动车 (Motor, 用“M”表示), 是指车辆自身具有动力装置 (动轴上装有牵引电动机), 具有牵引与载客双重功能。动车又可分为带受电弓的动车和不带受电弓的动车。拖车 (Train, 用“T”表示), 是指车辆不装备动力装置, 需动车牵引拖带的车辆, 仅有载客功能。拖车可以设置司机室 (首位车辆, 用“Tc”表示), 也可以带受电弓 (用“Tp”表示)。

2. 按车辆规格分为重型车辆和轻型车辆两种类型。重型车辆是指轴重较重、载客量大、车体较大的车辆。轻型车辆是指轴重较轻、载客量少、车体较小的车辆。

3. 按车辆的牵引方式分为直流旋转电机牵引车、交流旋转电机牵引车和直流电机牵引车三种类型。直流旋转电机牵引车和交流旋转电机牵引车是粘着牵引系统车型, 直流电机牵引车则是非粘着牵引系统车型。

4. 按车辆的制造材料分为耐候钢车、不锈钢车和铝合金车三种类型。

5. 按受电方式分为受电弓车辆 (直流 1 500 V 电压, 架空接触网供电) 和受电靴车辆 (直流 750 V 电压, 第三轨供电)。

6. 按车辆连接结构分为贯通式车辆和非贯通式车辆两种类型。贯通式车辆是指全列车载客部分通道贯通。非贯通式车辆是指车辆与车辆间通道封闭。

7. 轻轨和有轨电车可分为单节车辆 (四轴全动车)、铰接车辆 (单铰六轴车和双铰八轴车) 和低地板车辆。

(四) 城市轨道交通车辆类型的选用

车辆是城市轨道交通运送乘客的载体, 是城市轨道交通系统中的关键核心移动部件。车辆选型需考虑运量大小、运营质量、服务水平和城市环境景观等诸多方面。合理选择车辆类型有利于提高系统功能和服务水平, 资源共享, 减少能耗, 保护环境, 降低工程建设投资和维修费用, 提高社会效益。车辆类型和列车编组长度一旦选定是不可更改的, 因为地铁线路与地面线路不同, 地铁线路不能轻易改造, 所以必须十分重视车辆的选型。车辆类型选择应遵循如下原则:

1. 应与城市轨道交通类型相适应

目前, 世界各国城市轨道交通类型有地铁、轻轨、单轨、直线电机交通及自导向

新交通等，其中以地铁为主，其他形式为辅。

不同类型的城市轨道交通，采用的车辆类型也不同。地铁系统采用传统钢轮钢轨支撑的转向架车辆，由旋转电机或直线电机驱动；轻轨采用现代化低地板铰接式车辆；单轨采用轮胎支撑和导向的跨座式或悬挂式单轨车辆；自导向新交通采用橡胶轮胎支撑式导向的两轴车辆。因此，车辆类型的选择应与所采用的城市轨道交通类型相适应。

我国城市轨道交通以地铁为主，其他轨道交通方式为辅。表 1-6 列出了目前我国城市轨道交通各车型的主要技术规格。

表 1-6 城市轨道交通各车型主要技术规格

项目名称			地铁 A 型车	地铁 B 型车	现代低地板 有轨电车	直线电机 Lb 型车	跨座式 单轨车	
车辆驱动特征			钢轮 / 钢轨—旋转电机			钢轮/钢轨— 直线电机	胶轮—跨座 单轨	
车轴数			四轴	四轴	六轴	四轴	四轴	
1	车厢基本长度 (m)	单司机室车厢	23.6 (24.4)	19 (19.55)	28.76	17.2	14.8	
		无司机室车厢	22.0 (22.8)	19 (19.55)	—	16.84	13.9	
2	车辆基本宽度 (m)		3.0	2.8	2.65	2.8	2.98	
3	车辆高度 (m)	受流器车	有空调	3.8	3.8	—	≤3.625	车辆总高 5.53; 轨面以 上 3.84
			无空调	3.6	3.6	—	—	
		受电弓车(落弓高度)		3.81	3.81	3.70	3.56	
		受电弓工作高度		3.9~5.6	3.9~5.6	4.2~5.6	—	
4	车内净高 (m)		2.10~2.15		2.10	≥2.1	2.2	
5	地板面高 (m)		1.13	1.10	0.290 (0.365)	0.93	1.13	
6	车辆轴重 (t)		≤16	≤14	≤11	≤13	≤11	
7	车辆定距 (m)		15.7	12.6	10.7	11.14	9.6	
8	固定轴距 (m)		2.2~2.5	2.2~2.3	1.90	1.9~2.0	走行轮 1.5 导向轮 2.5	
9	车轮直径 (mm)		840		760	660~730	1 006 730	
10	车门数 (每侧) (个)		5	4	4	3	2	
11	车门宽度 (m)		≥1.3~1.4		1.3	1.4	1.3	
12	车门高度 (m)		≥1.8		1.8	1.86	1.82	



续表

项目名称		地铁 A 型车	地铁 B 型车	现代低地板有轨电车	直线电机 Lb 型车	跨座式单轨车	
13	定员(人)	单司机室车厢(超员)	310(432)	230(327)	双司机室 238	217	151
		其中:座席	56(48)	36	66	28	32
14		无司机室车厢(超员)	310(432)	250(352)	—	242	165
		其中:座席	56(52)	46	—	32	36
15	最高运行速度(km/h)	80~100	80~100	70	90	75	

2. 应以客流量为基础

客流量是决定车辆形式、编组数量、间隔时分、列车速度和列车对数等的主要因素。表 1-7 列出了不同类型车辆载客量、编组与客流量之间的关系。从表中可以看出:地铁 A 型车主要适用于高峰小时单向客流量 4.5 万~7 万人的高运量城市轨道交通,地铁 B 型车和直线电机 Lb 型车主要适用于高峰小时单向客流量 3 万~5 万人的大运量城市轨道交通,轻轨和单轨则主要适用于高峰小时单向客流量 1 万~3 万人的中运量城市轨道交通。

表 1-7 列车编组、定员与运能参考表

车型		列车编组(辆/列)							运量级 (万人/h)
		2 辆	3 辆	4 辆	5 辆	6 辆	7 辆	8 辆	—
A	长度(m)	—	—	92.0	114.8	137.60	160.4	183.2	高运量 4.5~7
	定员(人)	—	—	1 240	1 550	1 860	2 170	2 480	
	运能(人/h)	—	—	37 200	46 500	55 800	65 100	74 400	
B	长度(m)	—	58.04	77.52	97.08	116.60	136.12	155.64	
	定员(人)	—	710	940	1 210	1 460	1 710	1 960	
	运能(人/h)	—	21 300	28 200	36 300	43 800	51 300	58 800	
Lb	长度(m)	34.04	50.88	67.72	84.56	101.40	118.24	—	大运量 3~5
	定员(人)	459	701	943	1 185	1 427	1 669	—	
	运能(人/h)	13 770	21 030	28 290	35 550	42 810	50 070	—	
单轨	长度(m)	28.7	42.6	56.5	70.4	84.3	98.2	—	中运量 1~3
	定员(人)	316	467	632	797	962	1 127	—	
	运能(人/h)	7 584	11 208	15 168	19 128	23 088	27 048	—	
轻轨	长度(m)	28.76	—	57.52	—	—	—	—	
	定员(人)	238	—	476	—	—	—	—	
	运能(人/h)	7 140	—	14 280	—	—	—	—	

注:(1)列车编组均按两端车为驾驶室,中间车为无驾驶室,定员按表 1-1 计算;

(2)运能均按 30 对/h 计算,单轨车按 24 对/h 计算。

3. 应统筹兼顾既有线的车辆类型

从资源共享出发，新线车辆类型选择应统筹兼顾既有线的车辆类型，如果能做到相互兼容，就能合理调配现有车辆，提高车辆的利用率，以确保新线试运营车辆的需要；也有利于缩短车辆招投标和合同谈判的时间，缩短车辆供货期限，降低车辆采购费；可以降低车辆检修设备数量和投入，提高设备的利用率；可以减少运营人员的培训时间，提高运营效率。

4. 应具备多系统接口条件

车辆类型的选择应充分考虑与供电、信号、通信、屏蔽门和线路等系统的接口条件的匹配，这是实现车辆资源共享的前提条件。只有接口条件相同，才能实现多线共用一种车辆。



二、城市轨道交通车辆的基本组成及主要技术参数

(一) 城市轨道交通车辆的基本组成

城市轨道交通车辆因类型不同，技术参数也不一样，但其结构却基本相同。地铁车辆一般采用动拖结合、固定编组来运营，形成电动车组。考虑到它本身带有动力牵引装置，这使其兼有牵引和载客两大功能，不需要再连挂单独的机车。它一般由车体、转向架与车辆牵引缓冲连接装置及制动、电气牵引、列车内部设备和辅助供电、乘客信息、列车信息网络控制、空调与采暖等系统构成。

城市轨道交通车辆
的基本组成

1. 车体

车体是城市轨道交通车辆最重要的组成部件之一，它坐落在转向架上，分有司机室车体和无司机室车体两种。它除了载客之外，几乎所有的机械、电气和电子等设备都安装在车体的上部、下部及内部，驾驶室也设置在车体中。车体一般由底架、侧墙、车顶、前端与后端等组成。车体最初由普通碳素钢制造，为了减少腐蚀，提高使用寿命，耐候钢制造的车体后来得到广泛应用。为实现车体的轻量化，现代城市轨道交通车辆多由不锈钢和铝合金制造，并且采用模块化生产工艺。车体的个别部位（如前端等）也可采用有机合成材料制造。另外，车体要有隔音、减震、隔热、防火的功能，以及尽可能保证乘客安全的措施。

2. 转向架

转向架位于车体与轨道之间，是保证车辆运行质量、保证动力性能和运行安全的关键部件，也是支撑车体并担负车辆沿轨道运行的支撑装置。转向架有动力转向架和非动力转向架之分，它一般由构架、轮对、悬挂系统、减震装置、基础制动装置和传动装置等组成。对于动力转向架还装设有牵引电动机及齿轮传动装置。动车的牵引电动机、变速机构等都装在转向架上。

转向架引导车辆沿着轨道行驶，承受与传递来自车体及线路的各种载荷，并缓和



其动力冲击。地铁、轻轨车辆转向架一般利用转向架轮对踏面与钢轨的粘着力产生牵引力和制动力，利用车轮的轮缘与钢轨使车辆沿着轨道行驶；跨座式单轨车辆转向架由走行轮、导向轮与稳行轮代替地铁和轻轨车辆的钢制车轮；走行轮为充氮气的钢丝橡胶轮胎，导向轮、稳行轮是充压缩空气的尼龙丝橡胶轮胎。

3. 车辆牵引缓冲连接装置

城市轨道交通车辆都是多节车辆运行，车辆编组成列运行必须借助连接装置，即所谓的车钩。为了改善列车纵向平稳性，一般在车钩的后部设有缓冲装置，以缓和列车冲击，另外，还必须连接车辆之间的电气和空气的管路。连接装置由车钩、缓冲器、电气连接及风挡与渡板等组成。

4. 制动系统

制动是使车辆减速、停车，并保证列车安全运行所必不可少的装置。该装置不仅在动车上需设置，而且在拖车上也要设置，这样才能使运行中的车辆按需要减速或在规定的距离内停车。城市轨道交通车辆制动装置除常规的机械制动（也称摩擦制动）装置外，还要求具有电制动（再生制动、电阻制动）功能，并且应充分发挥电制动能力。制动装置包括机械、空气管路和电气控制三部分。电制动和机械制动要能够协调配合。

城市轨道交通车辆的制动形式有摩擦制动和电制动两种。摩擦制动有压缩空气为动力的闸瓦和盘形制动，还有利用电磁铁与钢轨的作用力进行制动的轨道电磁制动。电制动有再生制动和电阻制动，它是在车辆制动时将牵引电动机变成发电机、将列车动能变为电能，再生制动是将这种电能反馈到电网，供给其他列车使用；电阻制动将电网不能吸收的电能通过电阻器将其转变为热能散发到大气中。

摩擦制动的压缩空气动力由车辆的供气系统供给。供气系统主要由空气压缩机、干燥过滤器、压力控制装置和管路组成，还向空气弹簧等需要压缩空气的设施供气。

目前，我国城市轨道交通车辆采用模拟式直通电空制动系统，可与牵引、TCMS（列车控制管理系统）和 ATC 等系统协调配合。


5. 电气牵引系统

车辆电气牵引系统包括车辆上的受流器和各种电气牵引设备及其控制电路。

受流器就是接受供电的装置。一般城市轨道交通车辆采用直流供电和交流供电两种。直流供电采用第三轨供电，在车辆的转向架上装有受流器。直流供电采用架空线接触网式供电，车辆采用受电弓滑块受流。

受流器按其受流方式可分为以下五种形式：

(1) 杆形受流器：外形为 2 根平行杆，上部有两个受电轨（导线），一“正”一“负”，广泛应用于城市无轨电车。

(2) 弓形受流器：形状如“”，属于上部受流，弓可升可降，上部与一根导线接触，与下面的导轨（钢轨）构成电流回路。一般用于城市有轨电车。

(3) 侧面受流器：在车顶的侧面受流，又称为“旁弓”，多用于矿山装货物的电力



机车上。

(4) 轨道式受流器：从底部导电轨受流，又称第三轨受流。这时列车周围空间可得到充分利用。通常用于速度较高且在隧道内运行的列车。北京地铁和欧美大部分城市地铁均采用这种受流方式。

(5) 受电弓受流器：属于上部受流，形状如“▽”，弓可升可降，适用于运行速度较高的干线电力机车。上海地铁和广州地铁均采用这种方式。

车辆牵引系统有直流电机牵引系统和交流电机牵引系统两种。

车辆电气牵引系统采用直流电机牵引，它虽然有重量大、体积大及维修量大的缺点，但由于具有调速容易的优点，曾得到广泛的应用。随着电力电子技术和微电子技术的高速发展，交流调频调压（VVVF）技术效率高、性能好，目前几乎所有车辆都采用交流电机牵引和交流调频调压（VVVF）技术控制的交流电气牵引系统。车辆交流电气牵引系统的控制方式是采用微机控制的交流调频调压（VVVF）技术，牵引逆变器主要由输入滤波器、三项逆变线路、制动斩波线路和控制线路组成。

6. 列车内部设备和辅助供电系统

车辆内部设备包括服务于乘客的车体内的固定附属装置和服务于车辆运行的设备装置。服务于乘客的车体内的固定附属装置有车电、通风、取暖、空调、座椅、吊环和扶手等。服务于车辆运行的设备装置大多悬挂于车底架，如蓄电池箱、继电器箱、主控制箱、电动空气压缩机组、总风缸、电源变压器、各种电气开关和接触器箱等。

城市轨道交通车辆上的辅助设施，如车厢通风、空调及牵引等系统设备和空气压缩机、照明（采用交流电源）等交流负载，以及乘客信息系统、列车控制系统、车辆及其子系统控制系统、电动车门驱动装置、蓄电池充电器、照明（采用直流电源）等交流负载，都是由车辆辅助供电系统供给电源的。辅助供电系统主要由辅助静态逆变器、充电器与蓄电池三大部分组成。

7. 乘客信息系统

城市轨道交通车辆乘客信息系统向乘客提供列车运行信息、安全信息和其他公共信息，如列车的终点站、停车车站、换乘等信息；在列车发生故障或事故时，向乘客提供回避危险的指挥、指导等信息。乘客信息系统包括广播、列车运行线路电子显示图、LED显示器、VCD显示器，以及各种文字、图示等固定信息。向乘客播报和显示的各种形式的信息应简洁、明了，还有正确并同步，以避免对乘客产生误导。

8. 列车信息网络控制系统

列车信息网络控制系统主要由列车信息中央、列车信息终端、列车信息显示器（含IC卡架等）以及车内各种设备的监控、诊断和显示等装置组成。其作用是对整个列车的牵引、制动和车内所有设备进行控制、监测和诊断。

（二）城市轨道交通车辆的主要技术参数

车辆技术参数是概括说明车辆技术规格的某些指标，是从总体上表征车辆性能及



结构的一些参数，一般分为性能参数与主要尺寸两大类。

1. 车辆性能参数

(1) 自重、载重及容积。

自重为车辆车身的全部质量。载重即车辆允许的正常最大装载质量，均以 t (吨) 为单位。容积即表示装载空间，以 m^3 (立方米) 为单位。

(2) 构造速度。

构造速度是指车辆设计时，按安全及结构强度等条件所允许的车辆最高行驶速度。车辆实际运行速度一般不允许超过构造速度。一般地铁车辆构造速度为 $v_g=80\sim 100\text{ km/h}$ ，轻轨车辆的构造速度为 $v_g=70\sim 80\text{ km/h}$ 。

(3) 轴重。

轴重是指按车轴型号式样及在某个运行速度范围内，该轴允许承担的并包括轮对自身在内的最大总质量。轴重的选择与线路、桥梁及车辆走行部的设计标准有关。地铁车辆的轴重一般为 $12\sim 16\text{ t}$ ，轻轨车辆的轴重一般为 $10\sim 12\text{ t}$ 。

(4) 每延米轨道载重。

这是车辆设计中与桥梁、线路强度密切相关的一个指标，同时又是能否充分利用站线长度、提高运输能力的一个指标，其数值是车辆总质量与车辆全长之比。城市轨道交通车辆的这一参数按设计任务书规定。

(5) 通过最小曲线半径。

通过最小曲线半径是指配用某种型号式样转向架的车辆在站场或厂、段内调车时所能安全通过的最小曲线半径。当车辆在此曲线区段上行驶时不得出现脱轨、倾覆等危及行车安全的事故，也不允许转向架与车体底架或车下其他悬挂物相碰撞。

(6) 轴配置或轴列式。

轴配置是表示动轴与非动轴等排列情况的参数，而所谓轴列式是指用英文字母或数字来表示车辆走行部结构特点的一种简单方法。通常英文字母表示动轴数（如“B”表示两根动轴，“C”表示三根动轴等），数字表示从轴数（“2”表示两根从轴，“3”表示三根从轴等）。例如，四轴动车，设两台动力转向架，则轴配置标记为 B-B。六轴单铰轻轨车，两端为动力转向架，中间为非动力铰接转向架，其轴配置记为 B-2-B。八轴单铰轻轨车，两端为动力转向架，中间为非动力铰接转向架，其轴配置记为 B-2-2-B。

(7) 最大启动加速度、平均启动加速度与平均制动减速度。

最大启动加速度是指列车在启动过程中所能达到的最大加速度。

平均启动加速度是指列车速度从 0 增至某一速度（一般为 $30\sim 36\text{ km/h}$ ）的平均加速度。一般情况下，地铁车辆为 $0.9\sim 1.0\text{ m/s}^2$ ，轻轨车辆为 $0.8\sim 1.3\text{ m/s}^2$ 。

平均制动减速度是指列车在额定载荷下，自最大运行速度制动减速直至停车过程中的平均减速度，一般地铁车辆常用制动时的平均减速度 $\geq 1.0\text{ m/s}^2$ ，紧急制动时的平均减速度 $\geq 1.2\text{ m/s}^2$ 。轻轨车辆常用制动时的平均减速度 $\approx 1.2\text{ m/s}^2$ ，紧急制动时的平均





减速度，带磁轨制动时 $\approx 2.0 \text{ m/s}^2$ ，不带磁轨制动时 $\approx 1.4 \text{ m/s}^2$ 。

(8) 单位自重功率指标。

单位自重功率指标是指整车总功率与整车自重之比。它一般为 $10\sim 15 \text{ kW/t}$ 。

(9) 供电电压、最大网电流及牵引电动机功率。

目前世界上地铁发展较早的城市，其供电电压大多采用直流 750 V ，个别也有采用直流 600 V 的。北京地铁采用直流 750 V ，而上海和广州地铁均采用直流 1500 V 。

最大网电流是指供电电网的最大允许电流。

牵引电动机功率由列车运行工况决定，地铁车辆单电机功率通常为 $200\sim 250 \text{ kW}$ ，轻轨车辆单电机功率通常为 $150\sim 200 \text{ kW}$ 。

(10) 制动形式有摩擦制动、再生制动、电阻制动以及磁轨制动等多种形式。

(11) 座位席数及每平方米地板面积站立人数。

座席人数根据车内布置情况确定。通常为了增加车身容量，城市轨道交通车辆基本采用沿车长方向两侧纵向排列的方式。

一般情况下，单位地板面积站立人数：额定时为 6 人/m^2 ，超员时为 9 人/m^2 。

2. 车辆的主要尺寸

车辆的主要尺寸除车辆全长之外，还有以下几项：

(1) 车辆定距。

车辆定距是指车辆两相邻转向架中心之间的距离，车辆定距多在 20000 mm 之内。

(2) 转向架固定轴距。

不论是两轴转向架还是多轴转向架，同一转向架最前位轮轴中心与最后位轮轴中心线之间的距离称为转向架固定轴距。

一般地铁车辆的轴距 $\leq 2500 \text{ mm}$ ，而轻轨车辆的轴距为 $1800\sim 2100 \text{ mm}$ 。

(3) 车辆最大宽度、最大高度。

车辆最大宽度指车体最宽部分的尺寸，车辆最大高度指车辆顶部最高点离钢轨支撑平面之间的距离。这两个尺寸均需符合车辆限界的要求。

(4) 车体长、宽、高。

这个有车体外部与内部之别，但车体内部的长、宽、高必须满足乘客乘坐等要求。

(5) 车钩中心线距轨面高度。

车钩中心线距轨面高度简称车钩高，它是指车钩钩舌外侧面的中心线至轨面的高度。我国铁路规定，新造或修竣后的空车标准车钩高为 880 mm 。城市轨道交通车辆的车钩高无统一的标准，上海地铁车辆为 720 mm ，北京地铁车辆为 670 mm 。

(6) 地板面高度。

地板面距轨面的高度与车钩高一样，均指新造或修竣后空车的数值。它将受到两方面的制约，一方面是车辆本身某些结构高度的限制，如车钩高及转向架下心盘面的高度；另一方面又与站台高度的标准有关，如上海地铁车辆地板面高为 1.13 m ，北京



地铁车辆地板面高为 1.053 m。

三、城市轨道交通车辆的编组

在城市轨道交通列车中，车辆运行时一般采用动拖结合，以固定编组形成电动列车组。动车和拖车通过车钩连接形成一个固定编组，也称一个（动力）单元编组，一辆列车可以由一个或几个单元编组组成。城市轨道交通的规模取决于高峰时刻小时客流量，而小时客流量取决于编组列车的载客量及行车间隔。城市轨道交通系统上下班、节假日客流量同正常营运时间客流量相比，高峰小时客流量大约为非高峰小时客流量的 3~4 倍，其对策是调整行车间隔及列车编组车辆数目。在考虑列车编组时，可以将大编组分解为小编组，如 10 辆可以分解为 2 列 5 辆编组，8 辆可以分解为 2 列 4 辆编组。依然采用全动车编组，理论上的优点是摘挂方便、编组灵活，但现在大多数城市轨道交通车辆采用动拖结合的混编方式。目前我国地铁列车多采用“三动三拖”“四动两拖”的 6 辆编组和“两动两拖”的 4 辆编组形式。

南昌地铁 1 号线列车为 B2 型车，列车编组方式为 6 辆 / 列，采用“四动两拖”的形式： $+Tc-Mp_1-M_1=M_2-Mp_2-Tc+$

式中：Tc ——带司机室的拖车；

Mp ——带受电弓的动车；

M ——不带受电弓的动车；

+ ——单元之间的连挂；

- ——自动车钩；

= ——半自动车钩。

上海地铁车辆编组由三种车组成：拖车 A 设有驾驶室、列车自动控制装置、逆变器、空调装置和蓄电装置；动车 B 设有牵引电动机、牵引斩波器、逆变器及空调装置和受电弓；动车 C 设有牵引电动机、牵引斩波器、逆变器及空调装置和空气压缩机。上海地铁近期运行按 6 辆车编组，两端为 A 车，中间两组为 B 车和 C 车，即列车由 4 辆动车和 2 辆拖车组成；而远期运行按 8 辆车编组，两端为 A 车，中间三组为 B 车和 C 车，即列车由 6 辆动车和 2 辆拖车组成。

近期运行按 6 辆车编组： $-A=B*C=C*B=A-$

远期运行按 8 辆车编组： $-A=B*C=B*C=B*C=A-$

式中：A ——带司机室的拖车；

B ——带受电弓的动车；

C ——不带受电弓的动车；

- ——自动车钩；

= ——半自动车钩；

* ——半永久性车钩。

任务 2

城市轨道交通车辆的发展概况

学习目标

1. 了解世界城市轨道交通车辆的发展概况。
2. 了解我国城市轨道交通车辆的发展概况。
3. 了解城市轨道交通车辆技术的发展趋势。

教学环境

能用多媒体技术展示城市轨道交通车辆发展概况的教室。

教学设施

城市轨道交通车辆发展纪录片、多媒体教室等。

理论模块

一、世界城市轨道交通车辆的发展

1825年，英国率先修建了第一条铁路，1840—1913年，铁路的发展进入了“黄金时代”，与此同时，铁路机车车辆制造也逐步得到完善和发展。

世界上第一条城市地下铁道诞生于1863年的伦敦，当时车辆使用蒸气机车作为动力装置，但很快被内燃机车所取代。1890年世界上出现了电动机车后，地铁才正式步入了它的“黄金时代”。为了降低火灾发生所造成的危害，地铁由最初的木制车厢改为钢制车厢，1953年车厢被改为铝制，更加有效地降低了车体重量和维修成本。

在国外，城市轨道交通车辆产业已有100多年的发展历史。在整个发展历程中，根据所采用电力牵引系统的不同，将城市轨道交通车辆的发展划分为三个阶段：20世纪50年代以前，采用直流调速牵引系统的凸轮调阻车辆；20世纪50~70年代，采用直流调速牵引系统的斩波调压车辆；20世纪70年代至今，采用交流调速牵引系统的调频调压车辆。城市轨道交通车辆在世界工业技术发展的基础上得到了不断的完善和发展。



（一）车体

车体结构最初采用的是木制车体，到 20 世纪初采用钢制车体，1952 年伦敦地铁开始采用铝合金车体，1958 年开始采用不锈钢车体。目前，车体已发展为铝合金大型挤压型材质或不锈钢整体承载车体轻型结构。

（二）车辆牵引

牵引方式从 1863 年采用蒸气机车牵引，到 1890 年采用电力机车牵引，1896 年开始采用电动车辆，由安装在转向架的直流电机实现牵引，在 20 世纪 60 年代出现斩波调压车辆，直至 1977 年柏林地铁开始采用交流电机传动并发展了交流调频调压（VVVF）技术。

（三）制动

制动从最早采用车长手制动方式，到 1875 年采用真空制动机，1890 年开始使用威斯汀豪斯自动制动机，之后逐步发展为电气和空气的联合制动，电气制动继而实现了再生制动，近年来空气制动进一步发展成为计算机控制模拟制动机。

（四）车辆走行部

车辆走行部从最早采用两轴或四轴轮对，到 1904 年开始采用转向架，1950 年开始采用螺旋弹簧和液压减震器的联合减震装置，20 世纪 50 年代末出现了由压型钢板焊接成的轻型转向架构架，目前主要发展的构架为焊接结构，二系悬挂采用空气弹簧、无摇枕转向架。

（五）车辆控制及驾驶

随着计算机技术的发展和应用，实现了对列车及车辆各个系统的计算机网络自动化控制和故障自我诊断，特别是自动驾驶技术的应用，使列车实现了自动驾驶。中国、法国、新加坡、加拿大等国家中，有的城市轨道交通线路已经实现了无人驾驶运行。



车辆控制及驾驶

二、我国城市轨道交通车辆的发展

城市轨道交通车辆产业是伴随着城市轨道交通的建设而逐渐发展起来的。目前，我国的城市轨道交通车辆大部分以地铁车辆和轻轨车辆为主，从 1962 年开始研制，到 1967 年试制成功第一列城市轨道交通地铁车辆，1969 年批量生产的 DK2 型地铁车辆于当年 10 月 1 日开始运行在北京地铁线上，标志着我国现代城市轨道交通的开始。之后我国又对城市轨道交通车辆进行了大量的自主科技研究、技术开发和改进工作，从 20 世纪 80 年代开始，陆续开展了多种形式的国际技术研究，进行了技术引进、合作生产和大量的国产化工作。随着我国科技人员对城市轨道交通车辆这一领域的不断探索，我们对轨道交通车辆的了解逐步加深。为了克服知识产权等一系列车辆产业发展的障碍，我国已自主开发并研制出国产车辆。我国城市轨道交通



城市交通自动驾驶系统



车辆的制造与采购主要以中外合资和自主开发为主。目前，国家定点城市轨道交通车辆总装制造厂家有中车长春轨道客车股份有限公司（与 ADtranz 公司合资）、中车青岛四方机车车辆股份有限公司（与 BOMBARDIER 公司合资）、中车南京浦镇车辆有限公司（与 ALSTOM 公司合资）和中车株洲电力机车有限公司（与 SIEMENS 公司合资），其 Logo 如图 1-11 所示。



图 1-11 我国城市轨道交通车辆总装定点厂家 Logo

（一）车辆牵引技术

我国城市轨道交通车辆的牵引技术走过了从直流牵引控制技术到交流牵引技术的历程，直流牵引控制技术又经过了凸轮变阻控制、斩波调阻控制和斩波调压控制阶段，目前交流调频调压（VVVF）技术控制的交流牵引技术已在我国城市轨道交通车辆使用中得到普遍应用。

20 世纪 60 年代，我国地铁车辆采用直流牵引技术，牵引控制系统主要采用凸轮变阻方式，从开始批量生产的 DK2 型车辆到 1994 年开发的北京 DK20 型车辆，虽然经过大量技术改进，但采用的基本都是直流牵引、凸轮变阻控制方式。1987 年我国在引进日本斩波调压地铁车辆的同时，引进了车辆斩波调压系统设备的制造技术，在当年就设计生产出 DKZ1 型地铁车辆并在北京地铁投入运营。20 世纪 90 年代广州地铁 1 号线、上海地铁 2 号线引进的车辆采用的是交流调频调压（VVVF）牵引控制技术，目前我国已经完全具备该技术的自主知识产权且该技术已被广泛应用。

（二）车体制造技术

我国地铁车辆开始生产时主要采用碳素钢作为车体材料，造价低，但车体自重大、易腐蚀，维修成本高。20 世纪 80 年代耐腐蚀性能较好的耐候钢在国内地铁车辆中得到广泛应用，同时车体制造工艺也不断得到提高和完善，与采用碳素钢的车体相比，车体的自重明显降低，寿命得到延长。随着大型铝合金材料及其焊接技术和不锈钢以点焊为主要生产工艺的成熟，铝合金及不锈钢轻型结构车体逐步获得应用，20 世纪 90 年代上海、广州等城市引进的地铁车辆就是采用了铝合金车体。我国目前生产的城市轨道交通车辆，如武汉城市轨道交通车辆、重庆单轨车辆、天津单轨车辆都已采用了铝合金车体。在引进不锈钢车体生产技术的基础上，由长春客车厂和北京地铁建设公司联合研制，自行设计、生产的 DKZ6 无涂装不锈钢地铁车辆，采用高强度不锈钢材料和轻量化结构设计，并在北京城市轨道投入运营，这些实践成果为我国发展城市轨道



交通车辆创造了有利条件。

（三）车辆制动技术

车辆制动系统是车辆运行安全的重要保证。我国地铁车辆最初采用 DK 型电空制动机，空气制动和电气控制同时产生作用，在电气空走失效时，空气制动还能产生作用。之后研制、开发了 SD 数字式直通电空制动机，该制动系统缩短了空走时间和制动距离，改善了车辆制动的一致性。1989 年，北京地铁在引进、消化以及吸收国外模拟制动技术和装备基础上，成功研制出电气控制模拟直通电空制动系统，实现了与 ATC 装置的配合，但其没有采用微机控制技术。20 世纪 90 年代上海地铁 1 号线、2 号线和广州地铁 1 号线引进的车辆以及目前国内生产的城市轨道交通车辆都是采用 KNORR 和 NOBCO 公司的微机控制的模拟直通电空制动系统。国内对这个系统也进行了研究开发，铁道部科学研究院的研究成果已进入实用化阶段，在天津地铁进入了试运行。

经过多年的技术引进和消化吸收，依托国内城市轨道交通工程项目，我国的城市轨道交通车辆制造技术得到了快速发展，车辆平均国产率已超过 70%。

三、城市轨道交通车辆技术的发展趋势

根据国内外城市轨道交通的发展情况和运用经验，今后城市轨道交通车辆技术的发展趋势如下所述。

（一）提高最高运行速度

提高城市轨道交通车辆最高运行速度不但能提高城市轨道交通运营效率与效益，还可以提高乘客旅行速度、节约出行时间、提升工作效率和增加社会效益。

1. 提高车辆最高运行速度状况

巴黎地铁车辆初期最高运行速度为 80 km/h，旅行速度为 23.7 km/h，近年来已将地铁车辆的最高速度提高到 100 km/h，旅行速度达到 50 km/h。莫斯科地铁车辆运行速度由 90 km/h 提高到 100 km/h，平均旅行速度达到 41 km/h。纽约地铁车辆最高运行速度由 70 km/h 逐步提高到 130 km/h，1974 年，R-44 型地铁车辆的最高速度达到 133 km/h。日本地铁车辆在地下最高速度为 70~80 km/h，地面行驶的最高速度已达到 120 km/h。例如，日本地铁车辆 3000 系、5000 系车辆最高速度都是 120 km/h。

我国北京、上海、广州、南京和深圳等大城市已运营的地铁车辆最高运行速度大多数在 80 km/h 以下。近年来，地铁车辆最高运行速度也在逐步提高，广州地铁 4 号线和 5 号线直线车辆最高运行速度达到 90 km/h，大连 3 号线快轨车辆和天津滨海快轨车辆最高运行速度达到 100 km/h，北京地铁机场直线电机车辆最高设计速度达到 110 km/h，广州地铁 3 号线车辆最高运行速度为 120 km/h。

2. 城市轨道交通车辆最高速度目标值的选择

城市轨道交通车辆最高运行速度目标值的选择与旅行时间密切相关。城市轨道交通主要为城市中心城区、中心城与新城以及卫星城之间提供快速、舒适、大容量的公



共交通服务，为了缩短旅行时间，车辆就要有较高的运行速度。国外城市轨道交通建设遵循市民出行一次到达目的地以不超过 1 h 为原则，伦敦、巴黎、莫斯科、东京和纽约等大都市基本在主城区 50~80 km 半径范围内，市中心至郊区一般出行时间控制在 1 h 以内。我国大城市市域范围基本在中心城 70 km 半径范围内，大多数新城至中心城中心的直线距离小于 50 km，总出行时间可控制在 1 h 以内，旅行时间不宜超过 35~40 min，以此选择列车形式，确定旅行速度和最高运行速度。

城市轨道交通车辆最高速度目标值的选择与站间距相关。站间距短，速度目标值低；站间距长，速度目标值就高。在不组织越行的运输组织模式下，列车最高运行速度主要取决于平均站间距离。根据国内地铁车辆有关主要参数分析，列车最高运行速度与站间距合理的匹配关系见表 1-8。

表 1-8 列车最高运行速度与站间距的匹配表

最高速度目标值	站间距离					
	1.0 km	2.0 km	3.0 km	4.0 km	5.0 km	6.0 km
80 km/h	√					
100 km/h		√				
120 km/h			√	√		
140~160 km/h					√	√

从表 1-8 可以看出，当平均站间距为 2 km 左右时，城市轨道交通列车最高运行速度可提高到 100 km/h；平均站间距为 3~4 km 时，城市轨道交通列车最高运行速度可提高到 120 km/h；平均站间距为 5~6 km 时，城市轨道交通列车最高运行速度可提高到 140~160 km/h。由于近郊、城市车辆在地面和高架桥设若干越行轨道，能实现快慢速运行。

(二) 发展交流传动车辆

早期地铁车辆采用蒸气牵引。1890 年改为电力牵引后，一直采用凸轮变阻调速控制。直流电动机牵引系统后来发展为斩波器调速控制系统。20 世纪 90 年代由于电力电子技术微机控制技术的迅猛发展，大功率自关断元器件 (GTO、IGBT、IPM) 走向产品化和实用化，交流调频调压 (VVVF) 技术迅速发展、交流传动车辆广泛应用于城市轨道交通。日本、英国、法国、俄罗斯、美国、韩国、墨西哥和西班牙等国家新造地铁车辆全部采用 VVVF 交流传动装置。

我国从 20 世纪 90 年代开始，所有地铁新造车辆牵引系统都采用交流传动技术，交流传动成为各类车辆传动的唯一和最优模式，但只能依靠西门子、庞巴迪、阿尔斯通、东芝与东洋等公司提供牵引逆变器系统。近年来在国家发改委的领导和支持下，地铁车辆牵引国产化进程中，株洲电力机车研究所开发的牵引系统已在上海 1 号线、沈阳 2 号线、北京房山线等地铁车辆中得到应用。目前，车辆牵引系统基本实现国产



化,已取得 60% 的市场份额,应用在各城市很多线路上。

(三) 发展不锈钢和铝合金车体

自 1863 年英国伦敦建成世界上第一条地铁线,1888 年美国弗吉尼亚州里士满市建成世界上第一条有轨电车线以来,地铁车辆、有轨电车和市郊车辆长期采用普通钢车体。但是,普通钢车体强度低、重量大、能耗高、腐蚀重、维修量大、使用寿命短,于是人们开始用铝合金与不锈钢取代普通钢制造车体。

铝合金是一种轻金属材料。法国最早于 1896 年将铝合金用于铁道客车车窗上,1905 年英国铁路自动车的外墙板采用了铝合金,美国在 1923—1932 年,有 700 辆电动车的车墙和车顶采用铝合金车体。日本 1962 年引进铝合金技术,首先在山阳电动车上采用了铝合金车体,2000 年生产了近万辆铝合金车。之后法国、德国、日本和俄罗斯等国在高速铁路车辆上均采用了铝合金车体。

不锈钢是一种含镍铬的高强度合金钢。美国最早于 20 世纪 50 年代由巴德公司生产不锈钢车体。日本于 20 世纪 60 年代初从美国引进不锈钢车体技术,在 1962 年 11 月生产出了最早的南海地铁 6000 系不锈钢车,到 2000 年累计生产不锈钢车约 10 000 辆,占城市轨道交通车辆的 50% 以上。加拿大庞巴迪拉柏卡尔夫工厂在 1982—1992 年累计生产了 1 546 辆客车,其中不锈钢车占 89%。韩国韩进重工业公司于 1995 年生产了 250 辆客车,其中不锈钢车占 80%。

我国城市新线地铁车辆都是选用铝合金和轻量化不锈钢车体两种材料。截至 2015 年年底,选用铝合金材料的有广州 3 号线、广佛线、天津 1 号线、武汉 1 号线、武汉 1 号线延长线、重庆跨座 2 号线、杭州 1 号线、南昌 1 号线等,总计 1 832 辆;选用轻量化不锈钢的有北京 4 号线、5 号线、8 号线、10 号线,天津滨海线、天津 2 号线、天津 3 号线,沈阳 1 号线和 2 号线,深圳 3 号线,成都 1 号线,西安 2 号线等,总计 2 894 辆。

不锈钢车体和铝合金车体的比较如下所述。

1. 轻量化效果

铝合金的密度为 2.71 g/cm^3 , 仅是不锈钢密度 (7.85 g/cm^3) 的 $1/3$ 。铝合金的抗拉强度不如不锈钢,铝合金的抗拉强度为 $274 \sim 352 \text{ N/mm}^2$, 而一般不锈钢的抗拉强度为 $520 \sim 685 \text{ N/mm}^2$, 采用超低碳 [$w(\text{C}) < 0.03\%$] 的轻量化不锈钢的抗拉强度达到 $960 \sim 1\,200 \text{ N/mm}^2$, 是铝合金的 $2 \sim 5$ 倍。铝合金刚度低,其弹性模量为 $0.71 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 是不锈钢弹性模量 ($2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$) 的 $1/3$ 。因此,为保证城市轨道交通车辆有足够的承载强度和刚度,铝合金车辆必须采用大型、中型材及其组合件。对于 B 型车来说,日本铝合金车体质量已达到 $4 \sim 5 \text{ t}$, 比普通钢车体质量减轻 50%, 我国目前铝合金车体质量达到 $6 \sim 7 \text{ t}$, 比普通钢车体质量减轻 30%~50%, 比不锈钢车体质量减轻 12%~30%。

轻量化不锈钢的密度与全钢相当,不锈钢的强度是钢的 $2 \sim 3$ 倍。由于不锈钢的强度和刚度高于铝合金,不锈钢车体可采用板梁组合整体承载全焊结构,车体的梁柱板



厚为 0.8~3 mm，车体外板厚为 0.4~1.2 mm。在相同的强度下，不锈钢车体的断面可以做得更小，使用板材更薄，能有效地减轻车体自重，达到实现车体轻量化的目的。但是不锈钢弹性模量只有钢的 85%，刚度较小，需采用大量薄材板轧成加强型板与外板电焊形成空腔，以提高其刚度和强度。日本轻量化不锈钢车体质量为 6~7 t，我国轻量化不锈钢车体质量为 8~9 t，比普通钢车体质量减轻 10%~20%。

2. 耐腐蚀性

铝合金车体耐腐蚀性较好。铝合金车体的耐腐蚀性是由于铝合金表面在空气中形成致密的三氧化二铝保护膜，从而具有很好的防腐蚀能力。但由于在长期使用中，特别是在潮湿的环境下，遇到介质中的阴离子（如 Cl^- 等），铝合金车体就会产生局部原电池，发生腐蚀和变色，影响了车体的强度和美观，因此，大部分铝合金车体都要涂装，以保证 30 年的使用寿命。

轻量化不锈钢车体具有优越的耐腐蚀性。不锈钢含铬量大于 12%，使钢的电极电位从 -0.56 V 升至 $+0.2\text{ V}$ ，原电池腐蚀不易发生，显著地提高了钢的抗蚀性，因此不锈钢的外表面不需要涂装，并能长期保持新造时外板的光泽，无须检修与再涂装。

3. 安全性

铝合金车体的防火性能较差，铝合金熔点为 $660\text{ }^\circ\text{C}$ ，在发生火灾的情况下，铝合金会在较短时间内熔化掉，不利于乘客逃生。不锈钢车体的防火性能较好，不锈钢熔点为 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ，是铝合金的两倍多，在发生火灾的情况下，车体不会很快熔化，有利于乘客逃生。

4. 气密性

铝合金车体采用整体全焊接结构，具有优越的气密性，不怕风沙、雨水和雪水，有利于提高车辆的最高运行速度。不锈钢车体气密性较差，它的热膨胀系数是钢的 1.5 倍，传导率仅为钢的 $1/3$ ，电阻率大，这决定了不锈钢必须采用点焊，而不能采用连续焊，从而造成板材和型材间的连接会有一定空隙，密封性较差。

5. 工艺性

铝合金车体具有良好的工艺性，目前普遍采用的是大型中空型组焊结构，零件数量少，焊接工作量小，简化了车体制造工艺，且易实现自动化，既降低了车体制造成本，又提高了产品质量。不锈钢车体的制造工艺较复杂，零部件采用搭接方式，不能采用连续焊，只能点焊，工艺要求高；特别是不锈钢成型困难，有些部位如枕梁、牵引梁和前端梁造型等，不得不采用钢材或者玻璃钢制造；车体外表面不能用火调节，冷弯件和冷压件的制造精度要求较高。

6. 外观性

铝合金车体具有较好的外观形象，车体外表平整，可根据外部环境和城市特点进行涂装和美化，以达到与人文环境相互协调的效果。不锈钢车体由于不涂装，外表面总有电焊痕迹，门框与整体侧墙外表面结构不协调，不易进行美化，难以达到与外部



环境相和谐的效果。

7. 经济性

采用铝合金车体和轻量化不锈钢材料分别会使车体制造费用增加多少，我国还没有这方面的统计资料。日本是发展铝合金车体和轻量化不锈钢车体最多的国家，据2000年统计资料显示，日本生产了铝合金车体10 000辆，不锈钢车体11 000辆，使用经验丰富。

通过对上述两种车体材料的综合比较和分析，铝合金车体和不锈钢车体各有优缺点。在潮湿多雨的南方城市，为满足密封性和使用寿命要求，建议采用整体焊接的铝合金车体，而在干燥少雨的北方城市，宜采用不锈钢车体。

(四) 车辆模块化设计和生产

车辆的模块化设计与生产是将车体分为车顶、车底、侧墙及端墙等6大模块进行设计和生产。对于铝合金车体，各大部件间的连接采用整体焊接或铆焊组合方式；对于不锈钢车体，不论大部件还是各大部件间的连接全部采用电焊连接。车辆的模块化设计与生产的优点：可以促进车辆设计的标准化、通用化；方便检修部件更换，优化检修更换，优化检修工艺；便于大部件运输，节省生产成本。

西门子公司、阿尔斯通公司、庞巴迪公司以及日本东芝公司等是地铁和轻轨车辆的主要制造商，它们从20世纪90年代开始进行车辆模块化设计和生产。庞巴迪公司为我国香港地铁生产了模块化车辆，阿尔斯通公司和西门子公司生产了模块化的低地板轻轨车辆。我国定点生产地铁车辆的厂家通过引进、消化国外模块化技术，实现了地铁车辆模块化的设计和生产。中车南京浦镇车辆有限公司与阿尔斯通公司合作，赢得了上海地铁1号线延伸线续购的16列128辆地铁车辆订单以及上海地铁2号线西延线续购的21列168辆地铁车辆订单，车辆为模块化铆焊铝合金车体。

(五) 发展直通模拟式空电联合制动系统

城市轨道交通列车旅行速度低、时间短、平均站距短、停站点多，致使列车启动频繁、制动冲击要求高、紧急制动距离短、要求安全平稳，列车停车精度高、自动化控制程序要求高，因此国内外城市轨道交通列车普遍采用直通模拟式空电联合制动系统。该系统具有响应快，冲动小、平稳舒适，可实现无级制动，司机操纵方便，环保等优点。

(六) 广泛采用列车控制网络技术

自20世纪90年代以来，在世界各国城市轨道交通车辆牵引和制动控制中广泛采用了列车控制网络技术。列车控制网络技术是城市轨道交通车辆的关键技术，它的应用保证了列车行车安全，提高了运营效率和水平，方便了维修，增加了运行可靠性，提升了乘客服务质量。

目前，国内城市轨道交通列车控制网络技术大部分依赖于国外的西门子、庞巴迪、



阿尔斯通、三菱电机、三洋电机和日立等车辆牵引供货商。近年来，南车时代电气公司开发了具有自主知识产权的列车控制网络技术，已在上海 1 号线改造、沈阳 2 号线、北京房山线等车上批量装车运用。

（七）广泛应用列车乘客信息技术

列车乘客信息技术的广泛应用，不仅为乘客出行方便提供了服务效率与质量，而且提升了城市轨道交通运营现代化水平，增加了经济和社会效益。因此，20 世纪以来，英国、法国、德国、俄罗斯、美国、加拿大、日本、韩国、新加坡与马来西亚等国家的地铁列车广泛应用乘客信息技术。其中音频技术实现了从司机和运营控制中心（OCC）经由无线电进行广播、数字播放、乘客紧急内部通信、司机对讲及播放关门信息等功能。可视技术（LED 系统）为乘客提供电视新闻、广告、动画、图片、文字等多媒体信息服务。车载视频监视技术为司机和运营控制中心（OCC）提供了在司机室及 OCC 监控乘客状况和两端司机室状况的技术能力。

20 世纪 90 年代以来，我国各城市所有地铁新造车也都广泛采用乘客信息技术，如北京地铁 1 号线和 2 号线车辆的改造、上海地铁车辆 6 改 8，都安装了现代化乘客信息系统。

我国车载通信和乘客信息系统主要提供语音通信和广播，为乘客提供高质量的视频、音频和文本信息，以及为运营控制中心（OCC）提供视频、音频信息的监控和记录功能。系统采用分布式控制，网络化管理，数字化处理，模块化结构；同时具有高效性，接口操作简便，实现数据交换和全自动工作。整套系统的控制信号、音频信号（广播 / 对讲）、视频多媒体信号等都采用总线式进行信号传输。

（八）发展空调车辆，提高乘坐舒适性

种种规划表明，发展空调车辆，有效改善乘坐环境，不断提升轨道交通服务水平，是今后城市轨道交通车辆的发展方向。

纽约地铁自 1976 年第一列装有空调的 R-38 型地铁车辆投入使用以来，到 1992 年 95% 的纽约地铁列车都安装了空调。1997 年日本东京地铁车辆空调车占全部车辆总数的 50% 左右。韩国、新加坡、中国香港和中国台北的地铁车辆也都装有空调。

20 世纪 90 年代以来，我国所有地铁新造车辆都安装了空调，特别是气候变暖后，北方如北京、天津、沈阳、长春和大连等城市为改善乘客乘车环境，解决在炎热夏季里车厢内温度过高、通风差的问题，城市轨道交通车辆也都装上了空调。北京地铁 B 型车的空调系统有两种规格：一种是地铁 1 号线、2 号线车辆因受地铁限界尺寸的限制，采用超薄型空调机组，单节空调机组制冷能力为 23.26 kW，通风量为 3 650 m³/h；另一种是已建成和在建的线路车辆，按 GB 50157—2003 标准进行车辆设计，车体总高为 3 800 mm，安装空调机组的空间增大，空调机车的制冷能力提高到 29 kW，通风量为 4 000 m³/h。上海、广州、深圳和南京地铁采用 A 型车，车体空间大，采用较大的空



调机组，车顶每个单元空调机组制冷能力达到 42 kW 以上，通风量为 5 000 m³/h 以上。

（九）降低车辆运行的轮轨噪声

除提速、节能之外，降噪、减震也是轨道交通车辆技术进步的主攻方向。轮轨噪声是城市轨道交通车辆运行中噪声的主要来源。轮轨噪声主要有三种类型：摩擦、滚动和撞击噪声。

摩擦噪声是车辆经过小半径曲线运行时，轮缘与钢轨接触发出的一种高音调噪声。影响这种噪声的主要因素有曲线半径、转向架轴距、车轮震动阻尼特性以及轮轨表面粘着系数等，所以加大曲线半径、减少转向架轴距是降低摩擦噪声的有效方法。滚动噪声是因车轮与钢轨接触表面局部小面积粗糙造成的，研究证明，轮轨接触面积越大，滚动噪声越大，因此，降低轮轨接触面粗糙度，打磨钢轨，磨削车轮踏面是降低滚动噪声最有效的方法。撞击噪声是由于车轮表面或钢轨接触表面局部不连续性产生的，如钢轨间的缝隙、不平滑的钢轨接头、车轮踏面擦伤或局部磨损等。研究证明，两钢轨末端接头处于同一高度时，撞击噪声很小，如果第一条钢轨末端低于第二条钢轨连接端头所处的位置，则撞击噪声随车速的提高而迅速升高，成为严重的噪声源。因此，减少钢轨接头，采用无缝钢轨，减少车轮踏面损失是减少撞击的重要措施。

为降低轮轨噪声，除在消除产生噪声源上采取措施外，还应在减少噪声对外的辐射上采取降噪措施。目前，国内外在车轮上采取的降噪措施主要有两种：一是车轮上安装谐振消声器；二是采用橡胶弹性车轮。

（十）发展独立轮对转向架技术

低地板有轨电车大多采用了 70% 低地板和 100% 低地板结构。实现有轨电车低地板化，不采用传统轮对转向架，而采用小直径独立轮对转向架，可以最大程度地降低车辆地板面的高度，满足残疾人专用车辆及乘客快速上下车要求。动力独立轮对转向架是低地板有轨电车的关键技术。目前西门子公司、庞巴迪公司和阿尔斯通公司等都掌握了低地板有轨电车的关键技术，并进行了批量生产，在欧洲地区及俄罗斯、美国、澳大利亚和日本等国家被广泛应用。

我国长春市轻轨 3 号线和 4 号线运营的 70% 低地板有轨电车，以及大连市运营的 DL6W 型 70% 低地板现代有轨电车，其动车转向架都采用了非动力独立轮对转向架。非动力独立轮对转向架取消了车轴，采用“轴桥”将左右两侧独立轮连接起来，使独立轮相对轴桥仅有一定的转动自由度，保证了转向架在线路上的安全运行。为约束转向架绕车体的转动，用纵向拉杆连接构架与车体，并传递纵向力。我国 100% 低地板有轨电车正在开发中，还没有投入运营。中车长春轨道客车股份有限公司在取得沈阳浑南开发区低地板有轨电车订单后，已开发了新一代五模块长 34.8 m 的 100% 低地板有轨电车。该 100% 低地板有轨电车的最大特点是动车与拖车都采用小轮径传统轮对转向架，以实现全列车 100% 低地板。



(十一) 加强永磁电机在城市轨道交通车辆牵引领域的应用

目前,由牵引变流器控制三相感应异步电机的交流传动驱动系统已成为轨道车辆牵引的主流,但要实现高效率 and 轻量化仍比较困难。近年来,随着稀土永磁材料特别是钕铁硼($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)等性能的不不断提高与完善,以及材料价格逐步降低,永磁电机研发逐渐成熟,发展较快。德国西门子公司、法国阿尔斯通公司、日本东芝公司已完成永磁电机的研制,并投入使用。同样,我国将永磁同步电机的研发列入铁路牵引创新技术计划,中车株洲电力机车有限公司研发的永磁同步电机已完成沈阳地铁线上的实验测试,预计不久后将运用于我国的城市轨道交通车辆。

思考与练习

1. 简述城市轨道交通车辆的概念与分类。
2. 简述城市轨道交通车辆的基本特点。
3. 试述城市轨道交通车辆的选用原则。
4. 试述城市轨道交通车辆的基本构成及各部件的作用。
5. 试述列车编组形式 $+Tc-Mp_1-M_1=M_2-Mp_2-Tc+$ 的含义。
6. 试述城市轨道交通车辆技术的发展趋势。