

校企合作双元开发新形态信息化教材  
高等职业教育城市轨道交通类“十四五”技能型人才培养实用教材

# 城市轨道交通 列车自动控制系统维护

(智媒体版)

主 编 刘继光 李 伟

副主编 慕 威 杨 艳



《城市轨道交通列车自动控制系统维护》课件

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

---

图书在版编目 (C I P) 数据

城市轨道交通列车自动控制系统维护: 智媒体版 /  
刘继光, 李伟主编. —成都: 西南交通大学出版社,  
2023.2

校企合作双元开发新形态信息化教材 高等职业教育  
城市轨道交通类“十四五”技能型人才培养实用教材  
ISBN 978-7-5643-9175-1

I. ①城… II. ①刘… ②李… III. ①城市铁路—自  
动控制系统—维修—高等教育—教材 IV. ①U239.5

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 017458 号

---

校企合作双元开发新形态信息化教材  
高等职业教育城市轨道交通类“十四五”技能型人才培养实用教材

Chengshi Guidao Jiaotong Lieche Zidong Kongzhi Xitong Weihu

城市轨道交通列车自动控制系统维护

(智媒体版)

主编 刘继光 李 伟

---

责任编辑 罗在伟

封面设计 何东琳设计工作室

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川煤田地质制图印务有限责任公司

---

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 13

字数 325 千

版次 2023 年 2 月第 1 版

印次 2023 年 2 月第 1 次

定价 45.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-9175-1

课件咨询电话: 028-81435775

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

本教材为适应城市轨道交通专业群的城市轨道交通列车自动控制系统教学需要而编写。

党的二十大报告指出，坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。实施产业基础再造工程和重大技术装备攻关工程，支持专精特新企业发展，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。城市轨道交通是全面开启建设社会主义现代化强国的重要支撑，是建设现代化经济体系的先行领域，也是建设交通强国和智慧城市的重要组成部分。城轨交通行业要把握当前发展的重大机遇，以推进城轨信息化，发展智能系统，建设智慧城轨为载体，开创交通强国建设新局面。

“城市轨道交通列车自动控制系统维护”课程是城市轨道交通专业群的核心课程，目标是让学生掌握城市轨道交通列车自动控制系统的维护能力。它是以轨道交通信号基础设施、通信原理等课程为基础，也是进一步学习 ATC 实训、信号设计与施工课程的基础。

为了适应城市轨道交通行业的发展需求，我们组织多年在城市轨道交通运营企业生产和教学第一线、具有扎实专业基础理论知识和丰富实践经验的专业教师为城市轨道交通专业群编写了本教材。

本书主要采用任务驱动模式，配备动画、视频和微课等智媒体新形态数字化教学资源，充分调动学生学习兴趣，促进学生积极思考与实践，使学生掌握城市轨道交通列车自动控制系统，进而促进学生职业能力的提高。

本书共分四个项目，按照企业岗位来进行课程教学设计，根据岗位能力需求来编排内容。本书内容主要包括城市轨道交通列车自动控制系统的原理、设备组成、设备维护方法及设备的故障处理方法，涵盖了城市轨道交通列车自动控制系统认知、ATS 系统维护、车载设备维护和轨旁设备维护四个方面。本书可供城市轨道交通相关专业人员、管理工作者和轨道交通类职业院校师生及有关科技人员参考。

本书项目一由辽宁省交通高等专科学校慕威编写，项目二由辽宁省交通高等专科学校杨艳编写，项目三由辽宁省交通高等专科学校刘继光编写，项目四由石家庄铁路职业技术学院李伟编写，全书由辽宁省交通高等专科学校刘继光统稿。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请读者批评、指正。

编者  
2022年11月

# 目 录

## CONTENTS

<b>项目一 城市轨道交通列车自动控制系统认知</b> .....	<b>001</b>
任务一 城市轨道交通列车自动控制系统发展历程 .....	002
任务二 城市轨道交通列车自动控制系统关键技术 .....	015
任务三 城市轨道交通列车自动控制系统基本原理 .....	036
项目实训 .....	049
思考与练习 .....	050
<b>项目二 ATS 系统维护</b> .....	<b>051</b>
任务一 ATS 系统结构 .....	052
任务二 ATS 典型界面和功能 .....	059
任务三 ATS 系统典型接口 .....	079
任务四 典型 ATS 设备维护 .....	083
项目实训 .....	092
思考与练习 .....	093
<b>项目三 车载设备维护</b> .....	<b>094</b>
任务一 TOD 设备 .....	095
任务二 车载外设维护 .....	117
任务三 车载控制器 .....	128
项目实训 .....	142
思考与练习 .....	143
<b>项目四 轨旁设备维护</b> .....	<b>144</b>
任务一 区域控制器 .....	145
任务二 数据存储单元 .....	165
任务三 数据通信系统 .....	183
项目实训 .....	200
思考与练习 .....	201
<b>参考文献</b> .....	<b>202</b>







## 项目一 城市轨道交通列车自动控制系统认知

### 知识目标

1. 了解城市轨道交通列车自动控制系统的发展历程。
2. 掌握城市轨道交通列车控制系统的关键技术。
3. 熟悉城市轨道交通列车控制系统的基本工作原理。

### 技能目标

1. 掌握主流列车定位技术的原理。
2. 掌握主流车地通信技术的原理。
3. 掌握主流 CBTC 系统的结构、原理和功能。

### 素养目标

1. 培养学生良好的职业道德、科学严谨的工作态度。
2. 培养学生牢固的安全观念和责任感。
3. 培养学生遵章守纪意识、安全生产意识、系统观念和全局意识。

### 任务导航

- 任务一 城市轨道交通列车自动控制系统发展历程。
- 任务二 城市轨道交通列车自动控制系统关键技术。
- 任务三 城市轨道交通列车自动控制系统基本原理。

## 任务一 城市轨道交通列车自动控制系统发展历程

### 一、城市轨道交通的产生

城市是人类文明发展的产物，同时也是人类文明重要的组成部分，随着人类文明的不断发展而壮大。城市的快速发展，促使人与物资的流动加快。城市人口数量的不断增加给城市交通运输、物资供应等方面带来了越来越大的压力。城市轨道交通是城市交通的一种，作为运输载体随着城市的不断扩张而逐渐发展起来。



微课：城轨列车  
运行控制系统  
发展历程

#### （一）城市轨道交通产生的原因

现代城市发展的主要特征表现为城市发展朝纵向和横向两个方向呈双向发展。纵向发展的主要标志是，市中心区的高层建筑林立及地下结构的多层化；横向发展的特征是，城市人口向周边地区扩散。上班时，城市人口向市中心区集聚，下班时，城市人口向郊区扩散。集聚和扩散并存构成了当代城市的矛盾运动。人流的集散是这一矛盾运动的表现形式，而城市轨道交通的出现逐步成为缓解这一矛盾运动的主要载体。

1843年英国人C·皮尔逊提出在英国修建地下铁道的建议，1860年英国伦敦开始修建世界上第一条地铁，采用明挖法施工，为单拱砖砌结构，1863年1月10日建成通车，线路长6.4 km，用蒸汽机车牵引，如图1.1.1所示。



图 1.1.1 世界第一条地铁——由蒸汽机牵引的伦敦地铁

世界第一条地下铁道的诞生，为人口密集的大都市如何发展公共交通提供了宝贵的经验，

特别是到 1879 年电力驱动机车的研究成功，使地下客运环境和服务条件得到了空前的改善，地铁建设显示出了强大的生命力。从此以后，世界上一些著名的大都市相继建造地下铁道。自 1863 年至 1899 年，有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、奥地利的维也纳以及法国的巴黎共 5 个国家的 7 座城市率先建成了地下铁道。

伦敦自 1863 年创建世界上第一条地下铁道以来，历经 160 余年的发展，通过不断提高技术水平，伦敦地铁系统已成为当今世界上的先进技术范例之一，尤其是地铁实现了电气化后，伦敦的地铁几乎每年都有新进展，如图 1.1.2 所示。



图 1.1.2 伦敦地铁

受伦敦成功建设地下铁道的影响，美国纽约也于 1867 年建成了第一条地铁。随着纽约城市规模的扩大，城市人口不断增加，到 1900 年纽约市区人口已有 185 万人，同时地铁建设也在不间断地发展，如图 1.1.3 所示。目前，纽约已发展成为世界上地铁线路最多、里程最长的一座城市。



图 1.1.3 纽约地铁

## (二) 城市轨道交通的类型

按照不同的标准和方式，城市轨道交通可以有多种不同的分类，可归纳为以下几类。

### 1. 按技术特征分类

根据轨道交通系统基本技术特征的不同，轨道交通系统主要有市郊铁路、地下铁道、轻轨交通、独轨铁路、城市有轨电车、自动导向交通系统和磁悬浮交通等类型。

#### 1) 市郊铁路

市郊铁路（见图 1.1.4）是连接城市市区与郊区，以及连接城市周围几十千米甚至更大范围的卫星城镇或城市圈的铁路，但它往往又是连接大中城市干线铁路的一部分，因此它具有干线铁路的技术特征。



图 1.1.4 市郊铁路

与城市轨道交通系统中的地下铁道不同，在市郊铁路上通常是市郊旅客列车与干线旅客列车和货物列车混跑。市郊铁路虽然是国家铁路的一种运输方式，但它是现代化城市轨道交通不可分割的一部分。

市郊铁路主要为通勤者提供运输服务，有时也称为通勤铁路（Commuter Rail）或地区铁路（Regional Rail）。它起源于第二次世界大战前城市间的铁路运输。对一些大城市比较重要。在经过相当长一段时间的萧条后，市郊铁路在美国的 10 来个城市又活跃过来。伦敦、巴黎也都有较大规模的市郊铁路运输网络。在加拿大、澳大利亚和其他一些亚欧国家也都有一些市郊铁路。市郊铁路的特点是装备重型化，最高速度较大，加、减速度较低，通常由机车牵引一列列车。线路长度一般为 40~80 km。列车最高速度可达 100 km/h。由于市郊铁路具有运量大（单向最大运能可达 8 万人次/h）、投资省、见效快、速度比较高、效率高、技术易实现、服务范围广等特点，可用于连接市中心和郊区间运输。因此，在日本、法国、俄罗斯以及东欧国家得到了广泛的应用，并与地铁、轻轨共同构成城市轨道交通网络。

#### 2) 地下铁道

地下铁道是修建在地下隧道中的铁路。现在定义一个系统为地下铁道，并不要求该系统的线路必须全部修建在地下隧道内。

地下铁道可分为重型地铁、轻型地铁与微型地铁 3 种类型。

重型地铁（见图 1.1.5）就是传统的普通地铁，轨道基本采用干线铁路技术标准，线路以地下隧道和高架线路为主，仅在郊区地段采用地面线路，路权专用，运量最大。



图 1.1.5 重型地铁

轻型地铁（见图 1.1.6）是一种在轻轨线路，车辆等技术设备工艺基础上发展起来的地铁类型，路权专用，运量较大，通常采用高站台。

高站台：车厢地板面与站台高度相同，站台高度为 900 mm。

一般站台高度比车厢地板面低 1~2 个台阶，即 650 mm 或 450 mm。



图 1.1.6 轻型地铁

微型地铁（见图 1.1.7），又称小断面地铁，隧道断面，车辆轮径和电动机尺寸均小于普通地铁，路权专用，运量中等，行车自动化程度较高。



图 1.1.7 微型地铁

地铁常建于城市中心地区，其特点是运量大，能迅速疏散旅客，不易堵塞，运量可达 4~6 万人次/h，速度可达 30~60 km/h，运行采用全封闭信号控制，运行间隔为 2~2.5 min。所以，凡城市运量在 4 万人次/h 以上的，可以选用地铁。地铁的安全、快速、准时是其他轨道交通无法比拟的，但由于造价昂贵（每千米造价达 4~8 亿元），制约了其发展。

### 3) 轻轨交通

轻轨交通（见图 1.1.8）是在有轨电车的基础上发展起来的中等运量的城市轨道交通系统。它车辆轴重较轻，施加在轨道上的荷载相对于市郊铁路和地铁的荷载来说比较轻，故称为轻轨。早期的轻轨系统一般是直接对旧式有轨电车系统改建而成（地铁造价高导致），20 世纪 70 年代后期一些国家开始修建全新的现代轻轨系统。现代轻轨系统具有行车速度快、乘坐舒适、噪声较低等优点。轻轨也存在多种技术标准并存发展的情况。高技术标准的轻轨接近于轻型地铁，而低技术标准的轻轨则接近于有轨电车。



图 1.1.8 轻轨交通

轻轨交通适用于中等运量，多采用全封闭或半封闭方式，实行信号控制。其线路在市区部分可置于地下或高架，在郊区部分一般多在地面运行。轻轨平均速度为 20~25 km/h，单向高峰流量为 1~3 万人次/h，适用于道路坡道较大或弯曲的大中城市，也可在特大城市配合地铁在郊区的延伸。在运输能力上有较大的灵活性，其造价仅为地铁造价的 1/5~1/3。站台标准有高低之分，路权形式也有多种。

例如，伦敦把轻轨路权分为以下 3 种：

(1) LRT1，指与其他交通及行人共享路面。

(2) LRT2，线路固定于道路上，在紧急情况下，其他车辆可驶入其路面，类似公共汽车专用道。

(3) LRT3，路权专用，线路与其他交通及行人全部隔离，或是立交化的地面铁路，或是地下或高架铁路。它具有容量较大、速度快，乘坐舒适、安全、运行经济、建设成本比地铁低等特点，适用于距离较长、单向高峰小时最大客运需求量在 2~4 万人次的城市区域。

快速轻轨交通是指具有专用路权的轻轨系统。快速轻轨交通又可分旧车改进型、新线建设型及新交通系统型三种：

(1) 旧车改进型：是将有轨电车分阶段加以改进，使其车辆逐步实现高性能，轨道线路路权专门化、地下化或高架化，并实现运转单人操纵。德国、比利时、瑞士、意大利等国修建的轻轨交通就属于这种类型。

(2) 新线建设型：是英、法及北美等国自 20 世纪 70 年代开始利用城市废弃的既有铁路修建比较经济的城市轨道交通系统，如法国巴黎的 RER 系统即属于这种类型。

(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快速轻轨运输系统。加拿大开发的线性电机驱动的轻轨车辆和英国伦敦船坞地 (Docklands) 的轻轨车辆相当于这种类型，加拿大研制的线性电机车已在多伦多，温哥华、底特律等城市付诸使用。

地下铁道与快速轻轨交通又统称为快速轨道交通，是具有专用路权的大容量客运列车系统，有地下、高架或采用立交的地面铁路，具有高标准的站台，并有不同程度的自动化设施。

#### 4) 独轨交通

独轨交通可分为跨座式 (见图 1.1.9) 和悬挂式 (见图 1.1.10) 两种，前者跨在一根走行轨道上行走，其重心位于走行轨道上方；后者车辆悬挂于可在轨道梁上行走的走行装置下面，其重心处于轨道梁的下方。轨道梁比较窄，仅为 85 cm，对城市的景观及日照影响较小。独轨交通具有噪声低、振动小、对城市的景观及日照等影响小、通过小半径曲线能力和爬坡能力强等优点。但独轨车也存在运能小、速度低、能耗大、粉尘污染等缺点。



图 1.1.9 跨座式独轨



图 1.1.10 悬挂式独轨

### 5) 现代有轨电车

现代有轨电车（见图 1.1.11）是介于公共汽车与地铁间的一种低运量的轨道交通系统。有轨电车通常采用地面线，有时有隔离的专用路基和轨道，隧道或高架区间仅在交通拥挤的地带才被采用。现代有轨电车不同于原来的电车，它保留全地面、不封闭、无信号系统等原电车的特点。对轨道结构按国际通用标准进行改造，并采用运量大、性能好、技术先进的新型车辆，具有投资少、运营费用低、对环境污染小等优点。现代有轨电车与性能较差的轻轨交通已很接近，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/h。在中小城市很有发展前景，具有很好的经济性。





图 1.1.11 有轨电车

#### 6) 自动导向交通系统

自动导向交通系统（见图 1.1.12）在一些文献资料中被称作新交通系统，当然是指狭义的新交通系统。这种交通系统的主要技术特征是轨道采用混凝土道床，车辆采用橡胶轮胎，由一组导向轮引导车辆运行，列车运行自动控制，可实现无人驾驶等。

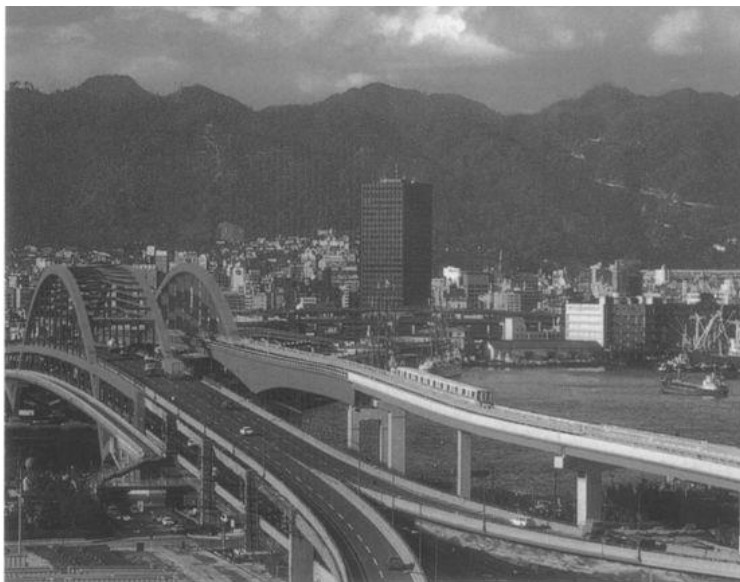


图 1.1.12 自动导向交通系统

#### 7) 磁悬浮交通

磁悬浮交通（见图 1.1.13）是一种靠磁悬浮力（即磁的吸引力和排斥力）来推动列车运行的交通系统。磁悬浮线路分为高速磁悬浮与中低速磁悬浮，上海 2003 年开通的磁悬浮线路

属于高速磁悬浮。



图 1.1.13 磁悬浮交通

高速磁悬浮由于价格高昂，在全球的推广之路异常坎坷，中低速磁悬浮则另辟蹊径。中低速磁悬浮是我国具有自主知识产权的新技术，也是目前城市轨道交通中最先进的技术。

与其他轨道交通制式相比，中低速磁悬浮在速度与造价方面优于地铁和轻轨，系统运能与轻轨相当，在噪声影响与爬坡能力方面优于单轨系统。很多人认为中低速磁悬浮辐射高，其实这是一种误解，磁浮列车内的磁场仅相当于吹风机、剃须刀等家用电器产生的磁场，甚至更低。此外，由于磁浮列车“抱”在轨道上运行，和路基一体化，磁浮交通是唯一可以做到运行中不发生颠覆事故的轨道交通方式。

## 2. 按路权及列车运行控制方式分类

路权是指轨道交通系统运行线路与其他交通隔离程度。以此为依据，轨道交通系统可分为全封闭系统、半封闭系统和开放式系统三种基本类型。

### (1) 全封闭系统。

全封闭系统是与其他交通完全隔离，不受平交道和人车的干扰，亦称“完全隔离”，一般用于高、大容量及 1.6 万人/h 以上的中等容量轨道交通系统。

### (2) 半封闭系统。

半封闭系统是沿行车方向采用缘石、隔离栅、高差等措施与其他交通实体隔离，但在交叉路口仍与横向的人车平交混行，受信号系统控制，一般用于 1.6 万人/h 以下的中等容量轨道交通系统。

### (3) 开放式系统。

开放式系统是代表地面混合交通，不具有实体分隔，轨道交通或与其他交通混合出行，在路口按照信号规定驶停。也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。

根据城市轨道交通系统是否专用、列车运行控制方式的不同，轨道交通系统又可分为以

下三种类型。

(1) 路权专用、按信号指挥运行类型。

该类型系统的特点是线路专用，与其他城市交通线路没有平面交叉，由于路权专用及按信号指挥运行，行车速度快且行车安全性好，属于该种类型的轨道交通系统包括市郊铁路，地下铁道，高技术标准的轻轨和自动导向交通系统等。

(2) 路权专用、按视线可见距离运行类型。

该类型系统的特点是线路专用，与其他城市交通线路没有平面交叉，行车安全性较好。但由于无信号、按可视距离间隔运行，行车速度稍低，属于该种类型的轨道交通系统主要是中等技术标准的轻轨。

(3) 路权混用、按可视距离运行类型。

该类型系统的特点是线路与其他运输车辆和行人共用，与其他城市交通线路有平面交叉，除在交叉口设置信号控制外，其余线路按可视距离间隔运行，行车速度与行车安全稍差。属于该种类型的轨道交通系统主要是低技术标准的轻轨和有轨电车。

根据城市轨道交通系统的基本技术特征，路权是否专用、列车运行控制方式的不同以及高峰小时单向运输能力的大小进行的分类并不是绝对的。事实上，在一些不同类型城市轨道交通系统之间并没有明确的、清晰的界限。

此外，一种轨道交通系统归入何种运量类型也是有条件的，因为计算轨道交通系统高峰小时单向运输能力的基本参数是列车间隔时间、车辆定员人数和列车编组辆数等，即使是同一轨道交通系统，这些参数也可能是多值的，这里进行分类的基本依据是根据某一轨道交通系统有关参数的常用取值。

### 3. 按高峰小时单向运输量分类

根据城市轨道交通系统高峰小时单向运输能力的大小，轨道交通系统可分为高运量，中运量和低运量等类型。

#### 1) 高运量轨道交通系统

该类型系统的高峰小时单向运输能力达到3万人以上，属于该种类型的轨道交通系统主要有重型地铁和轻型地铁等。

#### 2) 中运量轨道交通系统

该类型系统的高峰小时单向运输能力为(1.5~3)万人，属于该种类型的轨道交通系统主要有微型地铁、高技术标准的轻轨和独轨铁路。

#### 3) 低运量轨道交通系统

该类型系统的高峰小时单向运输能力为(0.5~1.5)万人，属于该种类型的轨道交通系统主要有低技术标准的轻轨，自动导向交通系统和有轨电车。

### (三) 城市轨道交通的特点

城市轨道交通系统是一个庞大而复杂的系统，将土木工程、建筑、机械、电机电器、自动控制、计算机、通信、信号等领域协调有序地联结在一起，与其他城市公共交通相比，具有明显的优势。主要特点如下：

### 1. 运量大

地铁和轻轨交通每小时运送能力都在几万人次，而公共汽车等公路交通仅为 8 000 人次。

### 2. 速度快

城市轨道交通采用专用线路，不受其他交通工具的干扰，最高速度可达 80 km/h，平均速度也在 30~40 km/h，能够保证乘客准时、迅速到达目的地。

### 3. 污染小

城市轨道交通相对公路交通，噪声小、污染轻，对城市环境不构成威胁。

### 4. 能耗低

采用大运量集团化客运系统和多项高新技术，按每运送一位乘客的能源消耗评价，是其任何一种城市交通运输方式无法比拟的，并且对能源的适应性也相当强。

### 5. 可靠性强

由于采用先进的列车控制系统，及可靠性理念植根于城市轨道交通系统的设计、施工、运营、维护等阶段，是其他交通运输方式无法达到的。

### 6. 舒适性佳

与常规公共交通相比，目前城市轨道交通多采用自动运行一次性曲线控制，平稳减速和加速，具有良好的运行特性。同时车辆、车站采用空调、电梯、引导装置、自动售票等直接为乘客服务，形成良好的乘车条件。

### 7. 占地面积小

城市轨道交通主要采用地下隧道或高架桥，有效利用地下和地上空间，特别有利于缓解大城市中心区过于拥挤的情况，提高土地利用价值，并能改善城市景观。

城市轨道交通还具有固定性、长期性和先导性等特点和功能，随着我国进入高质量发展阶段，人们对修建城市轨道交通的意义有了新的认识：一是城市轨道交通规划对城市规划、建设的导向作用；二是修建城市轨道交通有利于环境建设和节能降耗。

## 二、城市轨道交通列车自动控制系统发展历程

### （一）国外发展历程

在过去的近 200 年历史进程中，列车运行控制系统首先应用在城际铁路上，后来引入到城市轨道交通系统。列车运行控制系统在诞生之初主要是以信号系统为主要发展体系，随着科学技术的发展，特别是近年来微电子、计算机、通信、智能控制等技术的突飞猛进，信号系统与通信系统等不断融会贯通，其发展历程大体上可以划分为以下几个阶段。

#### 1. 人工控制

1825 年，世界上第一列地铁列车在英国运行，采用人持信号旗骑马前行，引导列车前行。

1832年，美国铁路线开始使用球形固定信号装置，传达列车运行信息。铁路员工通过望远镜瞭望，观察球形的颜色，沿线互传消息。

1839年，英国铁路开始使用电报传输列车消息。

## 2. 机械装置控制

1841年，英国铁路出现了臂板信号机。

1851年，英国铁路使用电报机实现闭塞行车。

1856年，J.萨克斯贝发明了机械联锁机。

1866年，美国利用轨道接触器检查闭塞区间占用。

1867年，出现点式自动停车装置，强制列车在显示停车信号的信号机前停车。

## 3. 电气控制

20世纪30~60年代，出现了继电器联锁系统、色灯信号机和车载辅助信号等，司机依靠路旁信号机来传递不同信息驾驶列车。

## 4. 电子控制

20世纪60年代开始，随着电子器件和计算机开始大量应用，列车自动控制（Automatic Train Control, ATC）系统出现在日本新干线上，实现机控为主，设备优先。

20世纪70年代，随着地面信息传输技术（应答器、轨道电路和轨间环线电缆等）和列车信息接收技术不断完善，出现了点式ATC系统、点连式ATC系统，如法国的TVM系统、德国的LZB系统和日本的ATS-P系统等，具有实时速度监控功能。世界上一些著名信号公司：法国阿尔斯通（ALSTOM）、德国的西门子（SIEMENS）、英国的西屋（Westing-house）、瑞典的安达（Adtranz）、美国的US&S等，相继推出基于数字轨道电路的准移动闭塞ATC系统。

20世纪80年代，车载设备功能不断扩大，距离-速度模式曲线、自动实施常用制动和紧急制动、自动驾驶、节能运行等。

20世纪90年代后，无线通信技术得到广泛应用，以信号控制为核心的传统轨道交通信号系统演变成基于通信的轨道交通运行控制系统（Communication Based Train Control, CBTC），以无线车地通信和移动闭塞为特点。

## （二）国内发展历程

中国轨道交通列车控制系统发展起步较晚，自1965年第一条地铁北京一号线工程动工兴建以来，信号系统经历了自动闭塞、调度集中、列车自动驾驶和继电联锁等初始阶段。

1971年北京地铁二号线开工建设，采用国产信号系统，随后北京八通线和上海一号线分别引进西屋和阿尔斯通公司的ATC系统，信号系统逐步向无绝缘轨道电路、微机联锁、列车超速防护、列车自动监控等现代信号系统发展。

1994年至今，城市轨道交通快速发展，信号设备大规模从国外引进，造成了造价昂贵、设备维修困难、制式混杂、兼容性差等问题，提供国产化ATC系统成为亟待解决的问题。

2010年12月30日，国内首条具有完全自主知识产权CBTC列车控制系统示范工程——北京地铁亦庄线（见图1.1.14）正式开通试运营。北京交通大学研发的具备完全自主知识产权的CBTC核心技术和系统装备，经历了实验室研制、试车线试验、运营线中试后的正式工程应用，实现了“自动驾驶”“无人折返”“安全运营”三项目标，使中国成为继德国（西门子）、法国（阿尔斯通）、加拿大（阿尔卡特）后第四个成功掌握该项核心技术并成功应用于实际运营线路的国家，对推动北京市和中国城市轨道交通运行控制系统国产化和产业化具有重要意义。



图 1.1.14 北京地铁亦庄线

当代城市轨道交通列车控制系统，集车站、区间、车辆控制及行车调度指挥系统一体化，通信系统的相互融合，冲破功能单一、控制分散、通信信号相对独立的传统技术理念，推动列车运行控制系统朝数字化、智能化、网络化和一体化方向发展。

截至2021年底，中国大陆地区共有50个大城市开通城市轨道交通运营线路283条，运营线路总长度9206.8千米。其中，地铁运营线路7209.7千米，占比78.3%；其他制式城轨交通运营线路1997.1千米，占比21.7%。当年新增运营线路长度1237.1千米。

拥有4条及以上运营线路，且换乘站3座及以上的城市24个，占已开通城轨交通运营城市总数的48%。2021年全年累计完成客运量236.9亿人次，同比增长34.7%，总进站量为146.3亿人次，同比增长33.7%，总客运周转量为1981.8亿人次千米，同比增长33.3%，与上年同期相比全年客运水平整体增长。

2021年城轨交通客运量占公共交通客运总量的分担比率为43.4%，比上年提升4.7个百分点，其中上海、广州、深圳、成都、南京、北京、杭州、南宁8个城市城轨交通客运量占公共交通的分担比率均超过50%。

2021年全年共完成建设投资5859.8亿元，在建项目的可研批复投资累计45553.5亿元，在建线路总长6096.4千米，在建线路规模与年度完成投资额同比均略有回落。

截至2021年底，共有67个城市的城轨交通线网规划获批，其中，城轨交通线网建设规

划在实施的城市共计 56 个，在实施的建设规划线路总长 6 988.3 千米；56 个城市在实施建设规划项目的可研批复总投资额合计为 42 222.55 亿元。2021 年全年，共有 3 个城市新一轮城市轨道交通建设规划获国家发改委批复并公布，获批项目中涉及新增线路长度 314.6 千米，新增计划投资 2 233.54 亿元。

“十四五”城轨交通已由重建设转变为建设、运营并重阶段。城轨交通新开通运营线路里程“十三五”期间呈持续上涨势头，“十四五”各年预计呈现波动变化趋势，各年不均衡，新开通运营线路规模在近年达到峰值后有所回落。这种波动将会传导至产业链上下游，带来设计规划、工程建设、装备制造企业等设计、施工、制造、供应的变化，应提前预警，合理配置资源，促进城轨交通行业高质量健康发展。

“十四五”期间，城市群、都市圈轨道交通将快速发展，城市群、都市圈规划中所批复的一批市域快轨逐步建成开通。2021 年国家发改委批复了《长江三角洲地区多层次轨道交通规划》《成渝地区双城经济圈多层次轨道交通规划》，未来随着城市群、都市圈轨道交通规划的推进，市域快轨将有一个较大的潜在发展空间。

党的二十大报告指出，坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。实施产业基础再造工程和重大技术装备攻关工程，支持专精特新企业发展，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。

## 任务二 城市轨道交通列车自动控制系统关键技术

### 一、应答器

应答器在城市轨道交通列车运行自动控制系统中应用很普遍。上海地铁1号线的ATC系统最早采用无源和有源应答器，实现了列车在车站的程序定位停车控制，其后在“距离定位”的ATC系统中，轨间采用了大量的定位应答器，也称“信标”（见图1.2.1）。近年来，我国城市轨道交通陆续采用基于无线通信的CBTC系统，从而废除了轨道电路，而为了检测列车在线路的精确位置，普遍大量地采用了应答器。应答器可以发送线路速度、线路坡度、轨道区段、信号点类型、临时限速、进路参数、轨道区段等信息。



微课：应答器与测速



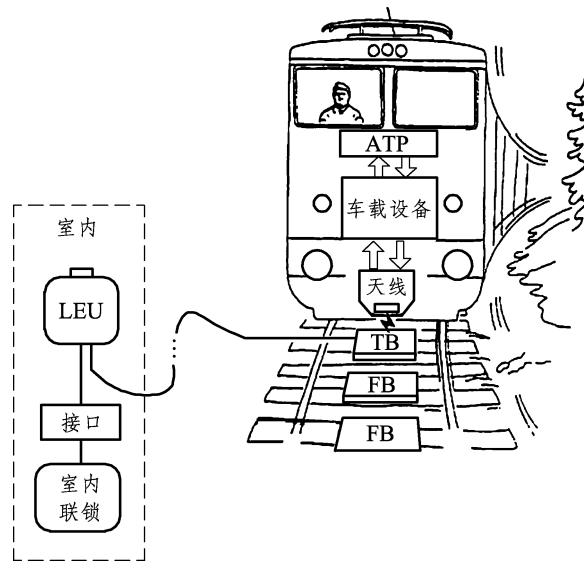
图 1.2.1 应答器

#### （一）应答器系统的组成

应答器系统（见图1.2.2）主要由地面设备和车载设备两部分组成。

地面设备包含地面应答器和地面电子单元，实现地对车的数据传输。地面无源应答器具有列车运行固定信息。有源应答器与地面电子单元相连接时，能提供实时可变的信息。地面电子单元是一种数据采集与处理单元，当有数据变化时，将变化后的数据形成报文，并推送给地面应答器，传送给列车。





FB—固定应答器；TB—可变应答器。

图 1.2.2 应答器系统组成

地面应答器可以单个设置，也可以按编组形式设置，组内每个应答器均发送一组报文，所有报文综合定义了该应答器组所代表的信息含义。例如，在 CBTC 系统中，在线路入口处设有两个距离固定的地面应答器，它们为一组，构成“初始化”应答器，不仅使列车识别运行方向和在线路的绝对位置，而且可以计算“轮径”补偿值，校正距离定位的误差。

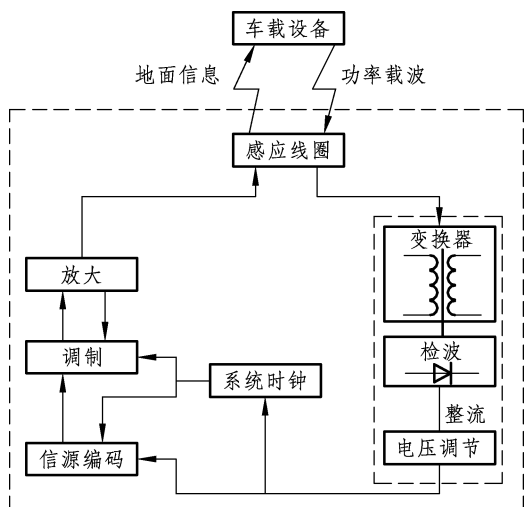
车载部分包括车载查询天线和车载应答器。车载查询天线是一个双工的收发天线，既要向地面发送激活地面应答器的功率载波，还要接收地面应答器发送的数据报文。车载查询器对地面应答器的数据进行处理分析，然后传送给车载 ATC 系统，完成相应的控制，所以车载接收设备包括滤波、解调、微处理器等模块。

## （二）应答器的种类和工作原理

城市轨道交通常见使用的应答器主要包含无源应答器和有源应答器。

### 1. 无源应答器

无源应答器（见图 1.2.3）作为一个电磁设备，没有外接电源供电。平时无源应答器处于静止休眠状态，当列车经过无源应答器上方时，地面应答器接收到车载天线传递的载频能量，获得电能量使地面应答器的信号发生器工作，然后将事先存储在地面应答器中的数据传出去。这些信息可以包含公里标、线路坡度、限速等各种数据信息。列车接收到这些信息，通过车载控制系统得出最佳的运行速度，以保证行车安全。列车也可以根据接收到的信息确定列车在线路的精确位置。



(a) 原理图

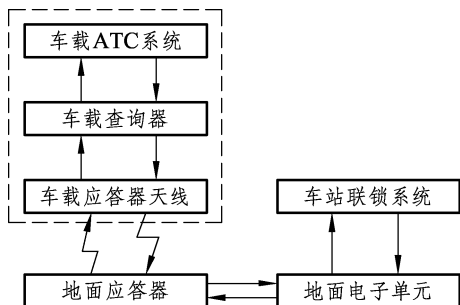


(b) 实物图

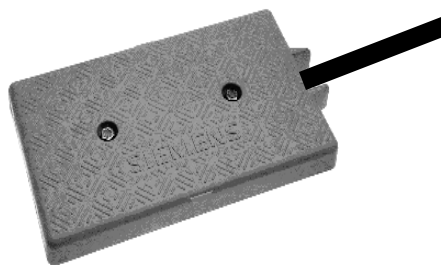
图 1.2.3 无源应答器

## 2. 有源应答器

有源应答器（见图 1.2.4）需要外接电源向其供电。它由可变信息应答器、轨旁电子单元（Lineside Electronic Unit, LEU）（见图 1.2.5）、车站信息编码设备和连接电缆组成。有源应答器接有车站信息编码设备，因此有源应答器内的数据报文可以随外部控制条件产生变化。例如设置于地面信号机旁的应答器，它将信号机的显示状态的数据信息通过应答器传送给列车，对应信号机的不同显示，数据信息是可变的，在城市轨道交通点式 ATP 子系统中得到广泛的应用，另外在 CBTC 的后备系统中也普遍采用。当列车接近到应答器的一定距离时，地面应答器内的数据应该保持不变；当列车远离应答器时，数据可以随时变化。车站内的信息编码设备和车站联锁系统结合，采集联锁系统的有关信息，例如信号机的显示、道岔的位置、临时限速等。这些信息经过编码设备编码后，通过串行接口传送至轨旁电子单元，再通过它控制地面有源应答器的发送，为列车提供实时的信息。



(a) 原理图



(b) 实物图

图 1.2.4 有源应答器



图 1.2.5 轨旁电子单元

应答器作为保证行车安全的信号设备，应符合安全标准。早在 1996 年欧洲铁路联盟就对应答器作出了相应的规定。我国城市轨道交通使用的应答器大部分是基于欧洲标准，再结合我国轨道交通的特点开发的。设计应答器时，应遵循以下设计指标：参照欧洲列车控制系统（European Train Control System, ETCS）的标准设计，并符合我国轨道交通的运行状况；具有抗电化干扰的能力，并且不应对其他设备产生干扰；应采用模块化结构、统一接口、标准协议，能与其他信号系统结合或进行数据交换；系统的信息编码，应符合国际标准；易于安装、调试、采用高可靠性设计，防机械冲击和振动，可满足封装密封、元器件防振、耐高温及防潮等环境要求。

基于以上原则，设计地面应答器时，无源应答器比有源应答器的设计更复杂，且无源应答器只需去除电源电路，改由外部供电外，也可以当作有源应答器使用。

## 二、测 速

速度和位置信息是保证列车控制系统正常工作、列车安全运行的重要参数。只有了解列车的位置、速度等信息，才能控制车辆的牵引、制动和惰行等，获得行车效率和保证行车安全。运行速度和走行距离这两个参数是密不可分的，在不考虑车辆转向架蛇行运动的前提下，其中一个参数可由另一个参数对时间微分或积分求得。

### （一）测速发电机

测速发电机（见图 1.2.6）是一个脉冲转速传感器，通过测量车轮转速来测定列车运行速度和距离。每个测速发电机上均有两个通道，可以发出两组脉冲流，脉冲相位呈  $90^\circ$ 。每套车载 ATC 系统设备均备有两个测速发电机，分别安装在单独的非动力车轴上。

测速发电机安装在车轮外侧，发电机所产生的交流电压的频率与列车速度（主轮的转速）成正比。经过频率-电压的变换，把列车实际运行的速度变换为电压。



图 1.2.6 测速发电机

为了确保发电机线圈断线时按故障-安全原则运行，在频率变换电路中使机车速度为零时也产生一定的频率，这样就可以区分机车速度为零还是故障。当频率为零时（或某频率以下），设备就可以报警或自动停车。

频率-电压变换电路的原理如图 1.2.7 所示。当速度增大，即交流信号增大时，多谐振荡器为射极耦合触发器，其输出与测速发电机同步。当列车速度低于一定值（近似为零）时，电路由射极耦合触发器变为自激多谐振荡器。测速发电机产生的频率与车轮的直径有关。在速度相同时直径大的车轮其输出的速度电压频率低，反之则频率高。因此，需设置一个车轮直径补偿电路，以消除不同直径的车轮所产生的差异。

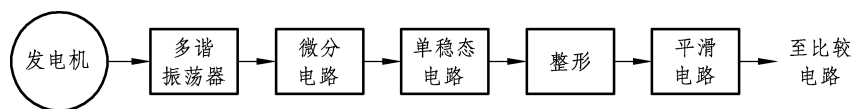


图 1.2.7 频率-电压变换电路的原理

## （二）轮轴脉冲转速传感器

转速传感器的种类很多，有磁电式、光电式、离心式、霍尔式等转速传感器。轮轴脉冲转速传感器（见图 1.2.8）测速的基本工作原理是：利用车轮的周长作为“尺子”测量列车走行距离，根据所测距离测算列车运行速度。



图 1.2.8 轮轴脉冲转速传感器

测量列车速度就是检测列车车轮转速和列车轮径。轮轴脉冲转速传感器安装在轮轴上，轮轴每转动一周，传感器输出一定数目的脉冲，使脉冲频率与轮轴转速成正比。输出的脉冲经隔离和整形后直接输入计算机 CPU 进行频率测量，再经换算从而得出车组速度和走行距离。其工作原理如图 1.2.9 所示。

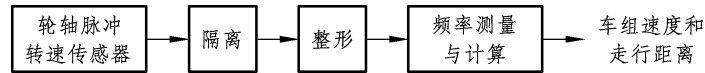


图 1.2.9 轮轴脉冲转速传感器的工作原理

轮轴脉冲转速传感器也存在一定的缺陷，即车轮空转或打滑会使列车速度的测量结果存在误差。为解决此类问题，在列车车轴上加装一个加速度传感器，配合脉冲转速传感器使用。

### （三）惯性加速度传感器

加速度传感器是一种能够测量加速力的电子设备。加速力是物体在加速过程中作用在物体上的力，可以是常量或变量。一般加速度传感器根据压电效应原理工作，加速度传感器利用其内部由于加速度造成的晶体变形产生电压，只要计算出产生的电压和所施加的加速度之间的关系，就可将加速度转化成电压输出。还有很多其他方法制作加速度传感器，如电容效应、热气泡效应、光效应，但其最基本的原理都是由于加速度使某种介质产生变形，通过测量其变形量并用相关电路转化成电压输出。加速度传感器的工作原理如图 1.2.10 所示。

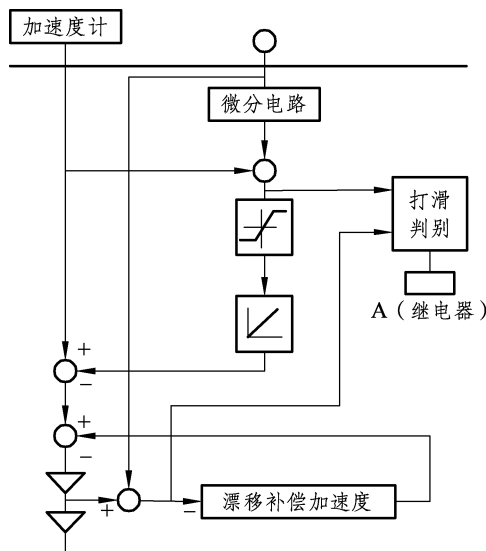


图 1.2.10 加速度传感器的工作原理

在列车打滑期间，把机车的内加速度作为测速的信息源，该信息与车轮旋转的状态等信息不相关，而在其余工作时间仍用轮轴脉冲传感器测速。因此，该方式称为基于惯性加速度传感器的测速。在车轮打滑时，由加速度传感器测得加速度及车轮打滑前加速度的倾斜分量，进而计算出车轮打滑时的列车运行加速度，再将该值积分即得到车轮打滑时列车实时运行的速度。

#### （四）多普勒雷达测速

多普勒雷达测速是利用多普勒效应测量列车的运行速度。在车头位置安装多普勒雷达(见图 1.2.11), 雷达向地面发送一定频率的信号, 并检测反射回来的信号。由于列车的运动会产生多普勒效应, 所以检测的信号频率与发射的信号频率是不完全相同的。如果列车在前进状态, 则反射的信号频率高于发射信号频率; 反之, 则低于发射信号频率。而且, 列车的运行速度越快, 两个信号之间的频率差越大。通过测量两个信号之间的频率差就可以获取列车的运行方向和即时运行速度。

雷达的测算结果完全不受列车空转和滑行的影响并可以实现连续测速。多普勒雷达输出的是一种脉冲流, 其频率与被测量的列车速度成正比。多普勒雷达可用于准确读取 5 km/h 以上的速度。



图 1.2.11 多普勒雷达

### 三、列车定位

列车定位系统设备用来确定列车的位置, 以及与列车行车安全相关的间隔及速度, 为保证安全列车间隔提供依据。

#### （一）定位技术

##### 1. 轨道电路定位

轨道电路(见图 1.2.12)是最简单的列车定位设备, 其优点是无需对既有系统进行大的改造即可实现列车定位功能, 它的定位精度取决于轨道电路的长度。轨道电路定位如图 1.2.13 所示。



图 1.2.12 轨道电路

轨道电路分为机械绝缘和电气绝缘两种类型，利用数字轨道电路对列车进行定位是目前城市轨道交通系统中应用最为普遍的技术手段。



图 1.2.13 轨道电路定位示意图

## 2. 计轴器定位

计轴器（见图 1.2.14）是一种特殊的列车定位装置。计轴技术是以计算机为核心，辅以外部设备，利用统计车辆轴数来检测相应轨道区段占用或空闲状态的技术，适用于某些无法采用轨道电路的场合。我国城市轨道交通也开始引入该技术，并在部分线路上使用。计轴器定位继承了轨道电路定位的很多特点，和前述的轨道电路法一样，这种方法的定位安全性较高，精度较差，通常也需与测速装置结合起来使用。

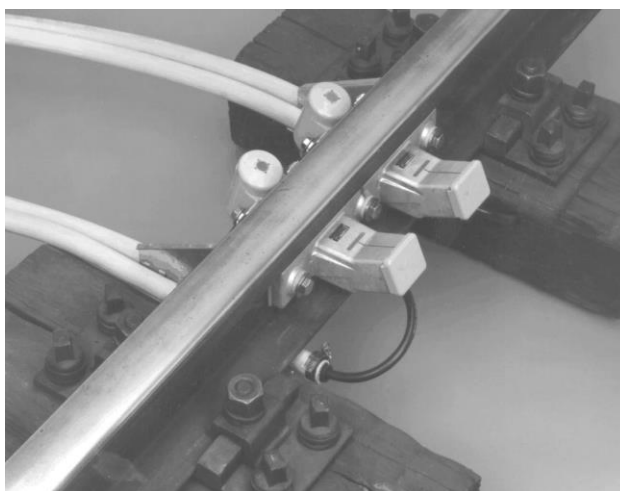


图 1.2.14 计轴器

### 3. 查询应答器定位

查询应答器作为列车定位信标，其定位示意图如图 1.2.15 所示。它可以在设置查询应答器的相应点给出列车定位信息。作为列车定位系统，查询应答器具有很高的定位精度，它在应答器安装点的定位精度为 1~2 m，取决于查询天线的作用范围。它同时还具有很高的可靠度，可以在任何气候、任何地点（包括 GPS 覆盖不到的地区）可靠地工作，并且具有维修简便、运行费用低等一系列优点。

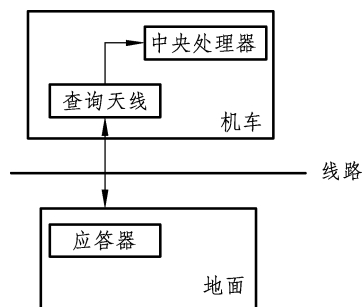


图 1.2.15 查询应答器定位示意图

### 4. 测速定位

测速定位就是通过不断测量列车的即时运行速度，对列车的即时速度进行积分（或求和）的方法得到列车的运行距离。由于测速定位获取列车位置的方法是对列车运行速度进行积分或求和，故其误差是累积的，而且测得的速度值误差对最终距离值的误差影响也是非常直接的。因此，利用该种定位方法的关键在于速度测量的准确性和求位移算法的合理性。另外，测速定位法总体来说属于相对定位，它无法获取列车的初始位置，要获得列车的绝对位置仅仅依靠这种方法本身几乎是不可能的。测速定位主要有轮速（里程表）法和多普勒雷达法等测量方法。

### 5. 交叉感应环线定位

感应环线电缆由扭绞铜制线芯和绝缘及防护外层组成。电缆敷设于轨道之间。一个环线区段的最小长度是 40 m，最大长度是 350 m，环线之间是相互分离的，仅在区域边界处相互邻接。为了解决与钢轨及相邻环线的退耦，电缆每隔 25~100 m 进行交叉，车载设备在经过每个交叉时检测到信号相位的变化，以此进行列车的定位计算。

列车定位是从感应环、感应环交叉和测速发电机来获得的，它们之间的相互关系如图 1.2.16 所示。

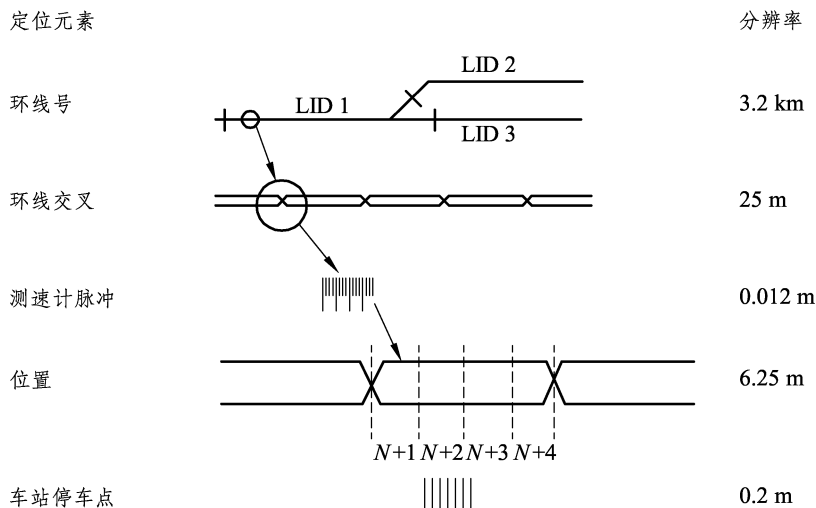


图 1.2.16 交叉环线定位原理



## 6. GPS 定位技术

GPS 定位系统由导航卫星、地面检测站和用户接收机组成。只要在列车两端安装 GPS 接收机和差分误差信息接收器，接收多颗导航定位卫星发送来的定位信息，就可以计算出自己确切的位置，从而通过导航卫星实现列车的精确定位。GPS 定位方法的显著优点是定位精度高，可实现连续定位，没有地面设备，节约了大量的安装和维护工作。

## 7. 无线扩频列车定位

无线扩频列车定位是利用无线扩展频谱通信技术确定列车在线路中的位置。这种方法借鉴了军用定位技术，具备在恶劣电磁环境下可靠传输的能力。每隔 0.5 s 可对每辆列车的位置进行检测，对列车定位的精度可达  $\pm 5$  m。

在车站、轨旁和列车上设置有扩频电台，所有的电台都由同步时钟精确同步。一方面通过这些电台在列车与轨旁控制室之间传递安全信息，另一方面也利用它们对列车进行定位。轨旁电台的位置是固定不变的，并经过精确测量。轨旁计算机或车载计算机利用不同电台传输信息的时间延时可以精确计算出列车的位置。

## 8. IPS 列车定位

IPS 是惯性定位系统（Inertial Positioning System）的英文简写，它根据牛顿力学定律，通过测量列车的加速度，将加速度进行一次积分后得到列车的运行速度，再进行一次积分即可得到列车的位置（包括经度、纬度和高度），从而实现对列车的定位。

此外，还有航位推算（Dead Reckoning，DR）系统定位及地图匹配定位等方法。

## 9. 编码里程计定位

编码里程计是 ATP/ATO 用来测量列车位移、推算速度和加速度的车载定位设备，通常设置在列车车轴的尾部。

编码里程计通过编码盘与轮轴耦合，驱动一个或多个装在编码盘四周的光电传感器。这些传感器产生一个和速度成比例的脉冲序列，车载设备通过采样电路得到列车运行的速度和距离。

列车车轮运动一周，编码里程计输出 64 个或 128 个脉冲。列车车轮运动一周，编码里程计输出的脉冲数越多，测速和/或测距精度越高。

编码里程计测距的原理如图 1.2.17 所示。

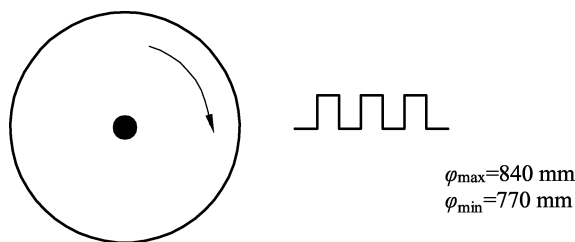


图 1.2.17 编码里程计测距的原理

$$\begin{aligned} \text{列车运动速度} &= \text{单位时间内编码里程计输出的脉冲数} \times \\ &\quad (\pi\varphi / \text{编码里程计每周输出的脉冲数}) \\ \text{列车运动距离} &= \text{编码里程计输出的脉冲数} \times \\ &\quad (\pi\varphi / \text{编码里程计每周输出的脉冲数}) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中， $\varphi$ ——列车车轮的直径，mm。

由于列车周而复始地运动，车轮轮径不断磨损，目前城市轨道交通系统中允许列车车轮的轮径范围为 770~840 mm，因此  $\varphi$  是个变量，要定期或不定期地进行修正。

利用车载编码里程计确定列车运行的距离还需要考虑列车运动过程中车轮的空转和打滑。通常车载里程计只给出列车对应地面某个标识的相对距离，保证列车在线路中运行时，车载定位设备的距离测量不会有大的累积误差。

### 10. 多种设备融合定位

实际工程应用中，可以综合运用多种设备进行定位，例如某 ATC 系统的列车定位信息的处理过程如图 1.2.18 所示。

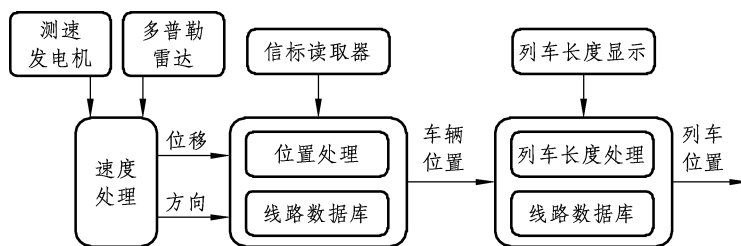


图 1.2.18 某 ATC 系统列车定位信息处理过程

(1) 系统通过处理测速发电机和多普勒雷达的输出信息，生成行驶距离（位移）、速度和方向的精确数据。线路曲线半径过小可能会导致测速发电机产生一个较小的位移误差。为解决这一问题，ATP 在列车运行的整个距离上确定累积误差范围。

(2) 为了防止定位误差累积过大，沿线路设置的每个信标都有一个唯一的编号并带有特定的位置信息。系统通过信标读取器识别信标，从而校正自身的位置。当遇到信标时，在更新车载位置和重新设置位置误差之前，ATP 会检查信标的位置坐标是否在当前计算的车载位置误差范围之内。此外，当列车经过信标标记时，ATP 还将自动校准轮径值，消除人为输入车轮直径所产生的误差。

(3) 车载列车控制系统从上一个信标位置计算列车位移和位置误差。通过加上每一侧的列车长度和列车每一段的位置误差，确定列车的精确位置。

## (二) 列车定位技术的分类

列车定位可以分为固定定位技术和移动定位技术两大类。

### 1. 固定定位技术

固定定位技术是一种被动的定位方式，其定位原理是将线路划分为若干不同的闭塞分区，

列车定位是以固定闭塞分区的长度作为最小定位单元的，一个闭塞分区同时只能被一辆列车占用，但列车在闭塞分区内更加详细的位置信息无法获得，定位精度较差。列车的定位功能常利用轨道电路方式或计轴点的方式来实现。

## 2. 移动定位技术

移动定位技术是一种主动的定位方式，其定位原理是列车根据线路上预先设置的轨旁信息点，来推算出自身的实际地理位置，最小定位单元可以根据设置的轨旁信息点的精度来实现。

列车的定位功能常利用测速定位加校正方式或外部参照定位方式等来实现。

测速定位加校正方式是利用查询应答器、电缆环线等技术手段，对车载里程计由于车轮滑行或空转、轮缘磨损等原因产生的测距误差进行修正，来实现列车的定位的。而外部参照定位方式就是列车根据预设的外部参照物来确定自身位置的方式，主要包括利用电缆环线、裂缝波导、无线扩频通信及 GPS 等技术手段。外部参照定位方式从定位原理来看分为以下两类：一是利用沿线路敷设外部介质特性在线路上形成标尺的功能，列车通过数刻度的方式实现自身的定位，如裂缝波导管定位和电缆环线定位就采用这种原理；二是列车通过综合多个预设定位校正设备的距离的数据来获取列车所处的具体位置，如无线扩频通信定位和 GPS 定位就采用这种原理。需要说明的是，具体系统中采用何种定位技术，取决于对线路运输能力的要求。



微课：车地通信技术

## 四、车地通信技术

在城市轨道交通领域，ATC 系统的车地通信信道主要采用点式和连续式两种通信方式来实现列车与轨旁设备间的信息传输。地到车的信息主要是列车自动防护（ATP）信息，车到地的信息主要是列车动态信息（包括列车位置、速度、驾驶模式、停车保证等）和车载信号设备及列车车辆相关状态信息等。为了实现精确、安全、可靠的控车目标，要求车地通信通道具有高可靠性、安全性和兼容性。

### （一）点式通信方式

点式通信是在线路上特定的点进行车地信息传输，其通道主要用应答器建立。应答器是基于感应耦合和移频键控技术的数字式转发器。根据使用性质不同，应答器可分为固定数据应答器和可变数据应答器，二者均由来自列车的能量信号触发。应答器通常安装在道床上或其他有效位置。当列车经过应答器时，被激活的应答器向车载天线发送一个用于识别应答器的报文（识别号）。车载 ATP 设备可以依据该报文中的线路坐标的绝对位置信息，进行列车定位修正，同时也从应答器获取其他控车信息。

对于点式通信级的应答器，它主要为列车防护提供点式列控信息。其中，固定数据应答器是无源的，用于存储一个可重复编程的报文；可变数据应答器是有源的，它通过轨旁电子单元（LEU）和相应信号机相连。正常情况下，可变数据应答器接收 LEU 连续发送的报文，

该报文内容取决于与 LEU 连接的信号机的显示信息,变化的显示信息再通过应答器向列车传送;一旦与 LEU 的连接中断,将向通过列车传送存储的默认报文。应答器车地通信子系统的构成如图 1.2.19 所示。

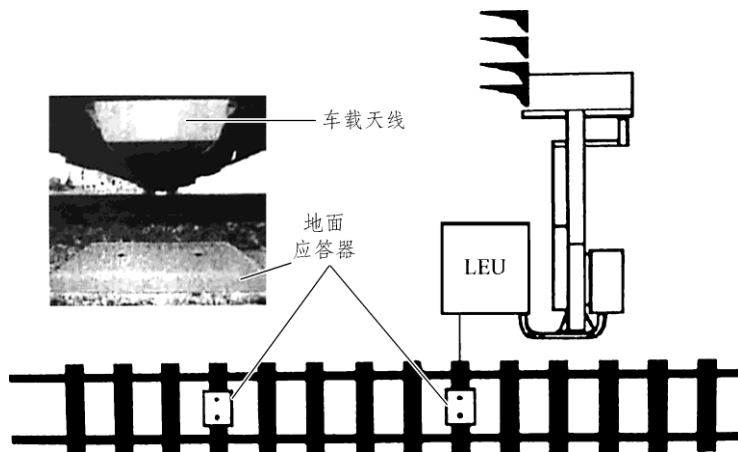


图 1.2.19 应答器车地通信子系统的构成

## (二) 连续式通信方式

连续式通信是在线路全线进行车地信息传输。目前,城市轨道交通领域主要采用轨道电路、感应环线、无线电台、漏泄波导作为连续式通信的媒介。其中,感应环线属于电磁感应式;漏泄波导和无线电台属于无线通信式,其信息传输量较电磁感应式大。

### 1. 轨道电路

轨道电路反映该段线路是否空闲,为开放信号、建立进路或构成闭塞提供依据,还通过轨道电路的被占用来关闭信号,使信号显示与轨道电路是否被占用结合起来。对于列车运行控制来讲,带有编码信息的轨道电路是其车地之间传输信息的通道之一。城市轨道交通一般采用直流牵引,所以车辆段内可采用 50 Hz 相敏轨道电路,正线则多采用高可靠性、多信息量的数字编码式音频轨道电路,简称数字轨道电路。

目前,在我国的广州、上海等城市轨道交通中运用较多的音频无绝缘数字轨道电路有德国西门子公司的 FTGS 轨道电路、法国阿尔斯通公司的 DTC921 轨道电路,以及美国 US&S 公司的 AF-904 轨道电路。

随着电子数字技术的发展,日本铁路公司新开发了多种数字式 ATC 系统。数字 ATC 系统分地面设备和车载设备两部分。地面设备检查列车出清或占用,并将线路状况信息传输给列车;车载设备根据该数据确定能保证列车安全运行的速度,控制机车运行。

### 2. 电磁感应式

感应环线通信是基于数据的电磁传输,它通常敷设于两条钢轨之间,作为发送和接收天线使用,与相应的车载天线一起,实现车载设备和轨旁设备间的双向通信和数据交换。感应

环线车地通信子系统主要由室内环线控制单元、车载通信单元和天线、室外轨旁远程终端盒与感应环线电缆组成，其轨旁布置如图 1.2.20 所示。

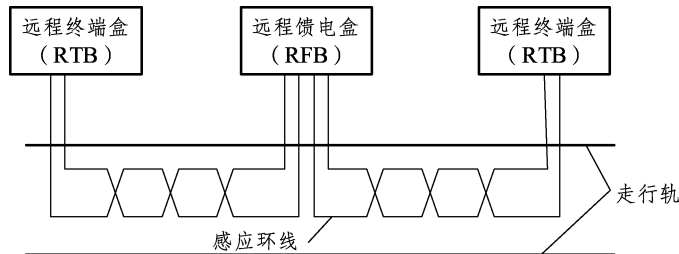


图 1.2.20 感应环线车地通信子系统的轨旁布置

### 3. 车地无线通信方式

无线通信式具有传输速率高、产品通用性强、对运营维护和乘客疏散的影响小、技术先进等优点，现已得到广泛应用。无线通信式是利用自由空间波实现车载和轨旁设备之间的数据传输的。车地无线通信应用如图 1.2.21 和图 1.2.22 所示。



动画：车地无线通信技术原理

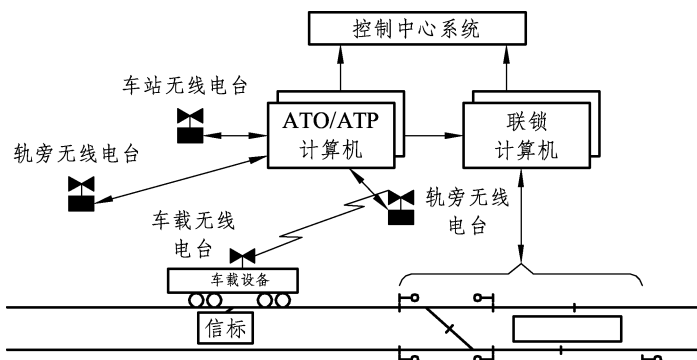


图 1.2.21 车地无线通信应用示意图

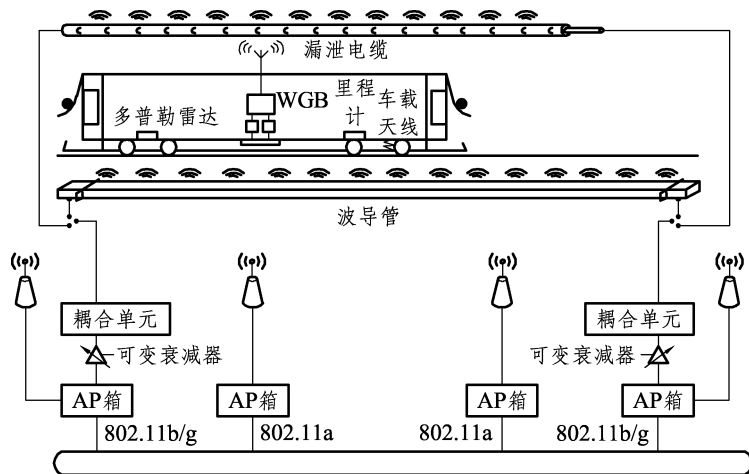


图 1.2.22 CBTC 系统车地无线通信示意图

在无线通信中通常采用扩频技术,即扩展频谱通信。扩频通信技术是一种信息传输方式,其信号所占有的频带宽度远大于所传信息必需的最小带宽。频带的扩展是通过一个独立的码序列来完成的,与所传信息数据无关;在接收端,则用同样的码进行相关同步接收、解扩及恢复所传信息数据。扩频通信技术具有抗干扰性强、保密性好的特点。

在发射链路的某处引入相应的扩频码[扩频码通常称为伪随机码(PRN)或伪随机序列,它是类似于噪声的随机数字序列],将传输的信号扩展到一个更宽的频带内,从而对其他系统表现为噪声;在接收链路中数据恢复之前移去扩频码,在信号的原始带宽上重新构建信息,从而提高无线传输的抗干扰性和安全性。根据伪随机码插入通信信道的位置不同,可以得到直序扩频(DSSS)、跳频扩频(FHSS)、跳时扩频(THSS)几种扩频调制方式,其中DSSS和FHSS是现在最常用的两种技术。

### 1) 无线自由波

无线车地通信子系统由轨旁无线传输网络和车载无线设备两部分组成。轨旁无线传输网络由光纤骨干网和无线局域网[轨旁读取点(AP)、无线天线]构成,轨旁无线方向性天线通过AP与光纤骨干网连接,并与车载无线天线一起把车载设备和轨旁设备联系起来。

轨旁无线传输网络的典型布置如图1.2.23所示。

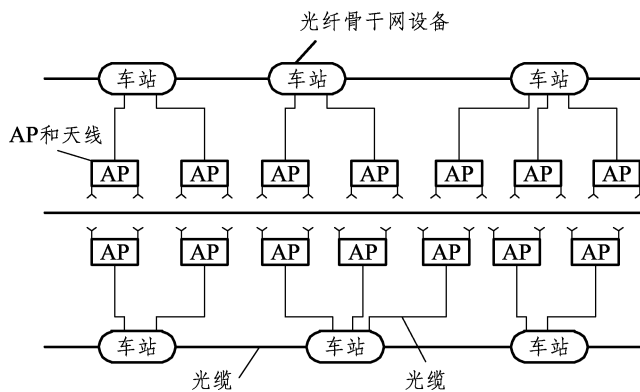


图 1.2.23 轨旁无线传输网络的典型布置

### 2) 微波裂缝漏泄波导

微波裂缝漏泄波导系统是波导信息网络的关键部分,它是具有较宽的带宽的可以同时传输数据、语音及视频信号的传输系统,用于车地双向连续数据传输及列车定位。

裂缝漏泄波导单元是一个中空的铝质矩形管,在其顶部等间隔开有窄缝,使得在载频范围内的微波沿裂缝波导均匀辐射,在波导上方的适当位置接收器可以接收波导裂缝辐射的信号,接收器通过信号处理得到有用的数据。微波裂缝漏泄波导的传输方式如图1.2.24所示。

波导信息网络轨旁子系统产生一个高频的连续波,除传递列控信息外,当这一连续波沿着波导传输时,波导上方辐射的尖峰数等于波导的缝隙数,在检测尖峰的过程中,列车经过的距离等于两个波导缝隙的距离,从而实现列车位置的精确测量。由于这一测量过程独立于轨道与车轮的接触,当车轮打滑或空转时可以用它来对里程仪加以校正。

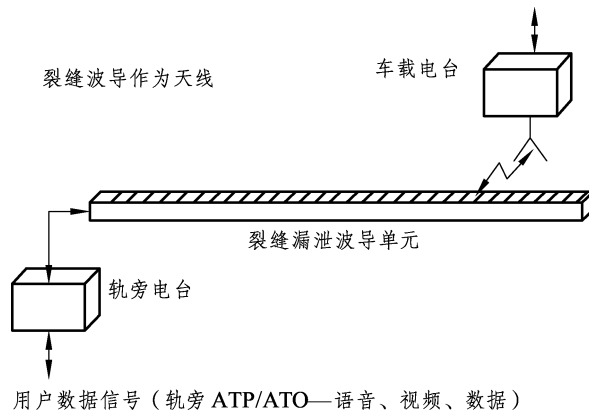


图 1.2.24 微波裂缝漏泄波导的传输方式

波导信息网络子系统包括固定在轨旁的漏泄波导、基站及车载天线。一个 ATC 区段内的车地双向连续传输由几个波导信息网络 (WIN) 基站提供, 每个 WIN 基站通过对频率管理一个通信单元。在通信单元的边界之间设有重叠的无线覆盖区, 以保证列车在两个相邻的通信单元之间平稳地交接。轨旁波导信息网络的典型布置如图 1.2.25 所示。

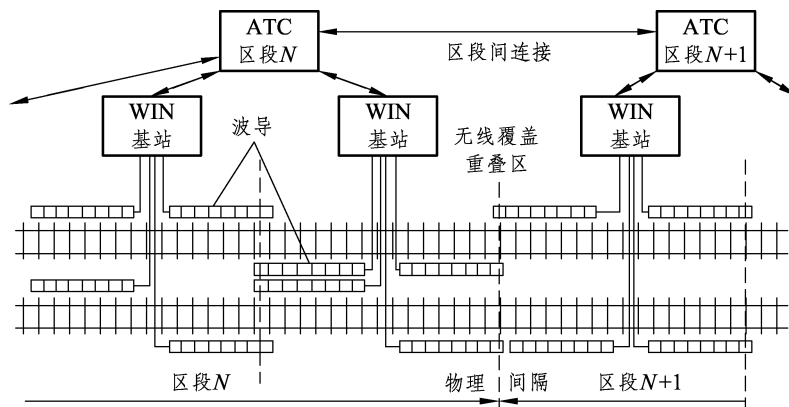


图 1.2.25 漏泄波导信息网络的典型布置

### 3) 漏泄同轴电缆

除采用无线电台和漏泄波导外, 无线通信方式还可采用漏泄同轴电缆 (漏缆) 作为车地信息传输的媒介。漏缆大量用于隧道内的信息传输。通过同轴电缆外导体上所开的槽孔, 电缆内传输的一部分电磁能量发送至外界环境中; 同样, 外界能量也能传入电缆内部。外导体上的槽孔使电缆内部电磁场和外界电波之间产生耦合, 进行信息传输, 具体的耦合机制取决于槽孔的排列形式。

## 五、闭塞方式

ATC 系统是根据列车在线路上运行的客观条件和实际情况, 对列车运行的速度和控制方

式等状态进行监督、控制和调整的技术装备。在车站区间内，使连续发出的列车保持一定的间隔，避免造成列车正面冲突或追尾事故，高效组织列车安全运行的方法叫作行车闭塞法，也称闭塞。

1840年之前，列车运行采用时间间隔的区间行车组织方法。时间间隔法是列车按照事先规定好的时间由车站发车，先行列车发出后，间隔一定的时间再发出同方向的后续列车，使先行列车和后续列车追踪时保持一定的时间间隔的行车方法。这种方法的缺点是不能有效确保行车安全。当先行列车在途中遇到突发情况停车或晚点等非正常情况时，后续列车无法预知，依然按照既定时间间隔发车，可能会发生追尾事故，安全无法保证，更无法实现高效运营，为解决这个问题，提出了空间间隔法。

空间间隔法，即把线路划分为若干区间（或分区），在每个区间（或分区）内同时只准许一辆列车运行，使先行列车和后续列车追踪时保持一定的空间距离的行车方法。我国轨道交通线路以车站为分界点，划分为若干区间，采用区间作为列车运行空间间隔。这种方法能严格把列车分隔在两个空间，可以有效地防止列车追尾和正面冲突事故发生，确保列车运行安全。目前常说闭塞可以默认为空间间隔闭塞法，定义为用信号或凭证，保证列车按照空间间隔法运行的技术方法。

ATC系统按照闭塞制式有三种：固定闭塞式、准移动闭塞式、移动闭塞式。

### （一）固定闭塞式

固定闭塞（见图 1.2.26）将线路划分为固定的闭塞分区，前后车的位置都是用固定的地面设备来检测；闭塞分区用轨道电路或计轴装置来划分。由于列车定位是以固定区段为单位的（系统只知道列车在哪一个区段中，而不知道在区段中的具体位置），所以固定闭塞的速度控制模式是分级的，需要向被控列车传送的信息只有速度码。

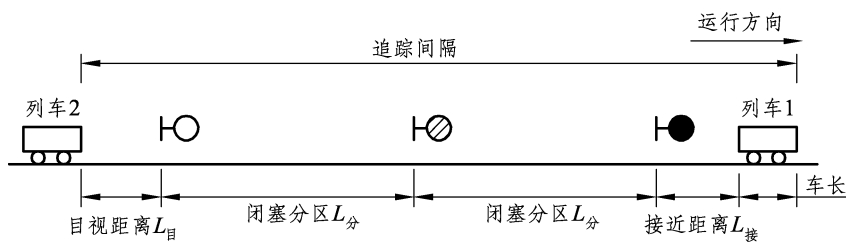


图 1.2.26 固定闭塞示意图

固定闭塞式 ATC 系统的分界线是进、出站信号机、防护信号机、分界点信号机或分界标。行车凭证是车载信号绿色灯相对应的速度值和出站信号机稳定绿色灯光。追踪目标是本次列车所占用闭塞分区的终端。先行列车所在区间的始端和本次列车所在分区的终端之间空间间隔是若干个固定的闭塞分区。主体信号为车载信号的绿色灯光相对应的速度值。

固定闭塞的闭塞长度较大，并且一个分区只能被一辆列车占用，所以不利于缩短列车运行间隔。因为无法知道列车的具体位置，需要在两辆列车之间增加一个防护区段，这使得列车间的安全间隔较大，从而影响了线路的使用效率。



### (二) 准移动闭塞式

准移动闭塞（见图 1.2.27）对前后列车定位是不同的，前行列车的定位依然沿用固定闭塞方式，而后续列车的定位则采用移动的或称为连续的方式，即后续列车可以定位更加精确。为了提高后续列车的定位精度，目前各系统均在地面间隔一段距离设置 1 个定位标志（轨道电路的分界点、信标和计轴器等），列车通过时提供绝对位置信息。在相邻定位标志之间，列车的相对位置由安装在列车上的轮轴测速装置连续测得。



图 1.2.27 准移动闭塞示意图

准移动闭塞 ATC 系统分界线是出站信号机、防护信号机、分界点信号机或分界标。行车凭证是车载信号相对应的目标速度曲线值。追踪目标是先行列车的所在闭塞分区的始端。主体信号是车载信号的绿色灯光相对应的速度值，地面信号机不点灯。

由于准移动闭塞采用了固定和移动两种方式，所以其速度控制模式既有连续的特点，又有阶梯的性质。由于被控列车的位置是由列车自行实时（移动）测得的，所以其最大允许速度的计算最终是在车载设备上实现的。

准移动闭塞在控制列车安全间隔方面比固定闭塞更进一步，可以告知后续列车继续前行的距离，后续列车也可以通过这一距离合理地采取减速或制动，从而可以改善列车控制，缩短时间间隔，提高线路使用效率。

但是准移动闭塞中后续列车的最大目标制动点仍必须在先行列车占用分区的终端，因此没有完全突破固定闭塞的限制。

### (三) 移动闭塞式

移动闭塞（见图 1.2.28）是基于车地无线通信系统，将地面控制中心计算的移动授权信息发送给车载设备，由车载计算机进行实时计算出列车最大允许速度曲线，并按此曲线对列车实际速度进行监控，达到超速自动防护，确保列车安全运行。

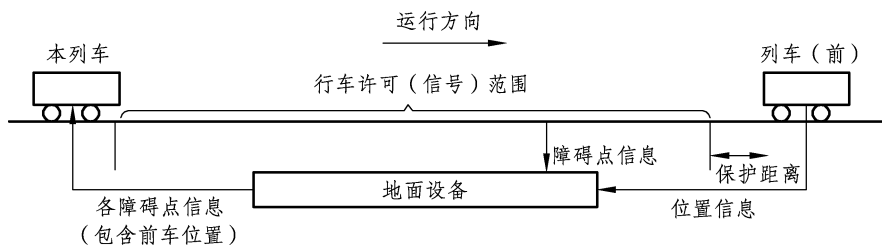


图 1.2.28 移动闭塞示意图

移动闭塞分界线是由无线系统传输的列车移动授权终点划分的。行车凭证是车载信号相对应的目标速度值。追踪目标是先行列车的尾部，加上一定的安全距离。主体信号是车载信号的绿色灯光相对应的速度值，地面信号机不点灯。

移动闭塞已经没有了将线路分成若干个闭塞分区概念，列车监督运行间隔是动态的，并随先行列车的移动而移动，该间隔是按后续列车在当前速度的所需制动距离加上安全余量实时计算和控制的，确保追踪运行不能追尾，列车制动时机、制动起始点和终点均是动态的，其目的是最大限度地利用机车车辆特性全速运行，尽可能地缩短列车运行间隔，最有效、最合理地利用区间有限空间，提高区间通行能力。

## 六、速度控制模式

ATC 系统中，对列车控制不仅仅需要行车闭塞法从空间上根本将列车运行的线路间隔开来，还需要不同闭塞制式采用不同的速度控制模式，科学合理地控制列车速度，确保在安全的前提下实现最小列车运行间隔。

### （一）分级速度控制

分级速度控制是指以一个闭塞分区为单位，根据列车运行的速度分级，对列车运行进行速度控制。分级速度控制又可分为阶梯式分级速度控制和曲线式分级速度控制。

#### 1. 阶梯式分级速度控制

随着列车速度及列车密度的不断提高，仍将轨道划分为若干固定区段，在前行列车及信号机后方的不同区段确定不同的最高限速。通过地面设备编辑不同电码，以轨道电路为传输媒介，将本区段速度信息送至列车，列车在人工驾驶（也可自动驾驶）下，以低于最高限速的速度正常行驶。当列车速度高于最高限速时，将产生常用制动或紧急制动，以保证列车不超速（包括速度为零）运行，确保行车安全，这种列车控制系统称为阶梯式分级速度控制模式，如图 1.2.29 所示。

目前城市轨道交通列车控制系统大量使用这种控制方式，列车只需获得由轨道电路提供的最高限速信息即可自动完成列车超速防护。

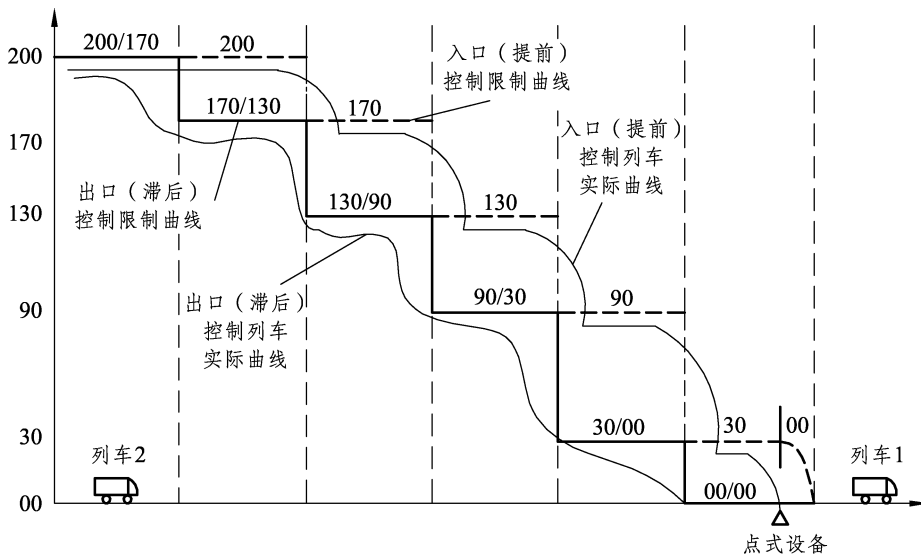


图 1.2.29 阶梯式速度控制曲线

### 1) 出口检查方式

在闭塞分区入口给出列车限速值，采取人控优先方法，控制列车在闭塞分区出口的速度不超过下一闭塞分区的限制速度，如超速即强迫制动。

### 2) 入口检查方式

在闭塞分区入口处给出该闭塞分区列车速度的限制值，控制列车到该闭塞分区出口时不超过本分区限制速度即可。

阶梯式速度控制模式的安全性及通过能力由合理设置轨道区段的长度来保证，系统结构简单，不需要知道列车的准确位置，只需要知道列车占用哪个区段即可，性价比高。由于地面传至列车的信息量较少，用于列车位置检测的轨道电路可兼作传输信息的媒介。

北京地铁 1 号线采用的 FS-2500 型 14 信息音频无绝缘轨道电路及 ATP/ATO 设备即为出口速度检查方式，上海地铁 1 号线采用的 GRS 公司的 ATP/ATO 系统即为入口速度检查方式。

## 2. 曲线式分级速度控制

曲线式分级速度控制要求每个闭塞分区的入口速度和出口速度用曲线连接起来，形成一段连续的控制曲线。把闭塞分区允许速度的变化连续起来，从最高速至零速的列车控制减速线为分段曲线组成的一条不连贯的曲线组合，一旦撞墙，设备自动引发制动。由于速度控制是连续的，紧急制动停车点不会冒进，可以不需要增加闭塞分区作为安全防护区段，设计时考虑适当的安全距离，如图 1.2.30 所示。

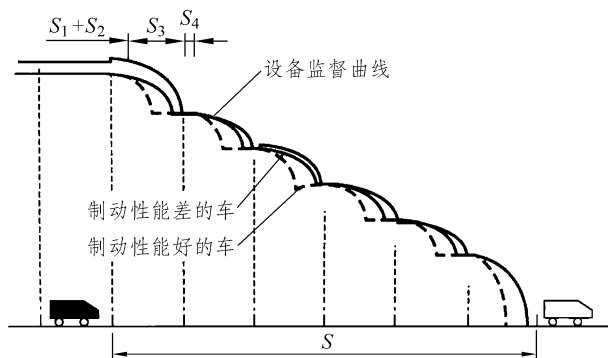


图 1.2.30 曲线式分级速度控制曲线

曲线式分级控制模式下，列车的最大安全制动距离  $S$  为

$$S = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) \times n \quad (1-2)$$

式中  $S$  ——列车的最大安全制动距离；

$S_1$  ——ATC 车载设备接收地面列控信号反应时间距离；

$S_2$  ——列车制动响应时间距离；

$S_3$  ——列车制动距离；

- $s_4$ ——过走防护距离；  
 $n$ ——列车从最高速度停车制动所需的分区数。

## (二) 速度-目标距离模式曲线控制

速度-目标距离模式曲线是根据目标速度、线路参数、列车参数、制动性能等确定的反映列车允许速度与目标距离间关系的曲线。速度-目标距离模式曲线反映了列车在各点允许运行的速度值。ATC 系统根据速度-距离模式曲线实时给出列车当前的允许速度，当列车超过当前允许速度时，设备自动实施常用制动或紧急制动，保证列车能在停车地点前停车。

速度-目标距离模式曲线控制方式不设定每个闭塞分区的速度等级，采用一次制动，故又称为一次速度-目标距离模式。以前方列车占用闭塞分区入口为目标点，通过地车信息传输系统向列车传送目标速度、目标距离等信息。连续速度-目标距离模式曲线方式更适用于高中速混跑的线路。速度-目标距离模式曲线控制模式如图 1.2.31 所示。

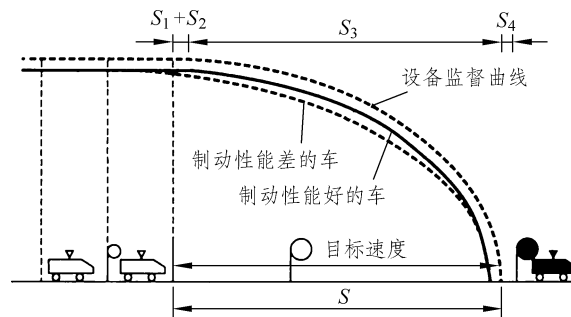


图 1.2.31 速度-目标距离控制模式示意图

速度-目标距离控制模式下列车的最大安全制动距离  $S$  为

$$S = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 \quad (1-3)$$

式中， $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_4$ 与式(1-2)中的基本相同，在计算一次连续速度模式最大安全制动中由于为一次制动，因此在制动过程中它们只考虑一次。而在分段模式中由于在整个制动过程中要多次制动、缓解，这3个参数要考虑  $n$  次。

另外，速度-目标距离控制模式列车的最大安全制动距离  $s_3$  采用的是每一列车的实际最大安全制动距离，制动性能好的列车  $s_3$  的数值小，制动性能差的列车则  $s_3$  的数值就大。因此，在连续速度控制模式中，列车的运行间隔距离各尽其能，有助于提高运行效率。

## 任务三 城市轨道交通列车自动控制系统基本原理

### 一、ATC 系统组成

ATC 系统由 ATS、ATP、ATO 三个子系统组成，其中 ATP/ATO 按地理位置的分布又分为轨旁 ATP/ATO 和车载 ATP/ATO。联锁从理论上讲应属于 ATP 的一部分，但由于新近发展起来的计算机联锁在功能、设备方面具备较强的独立性，因此联锁部分往往被单独列为一类系统设备。

这三个子系统被概括定义为四层，以分级实现 ATC 系统的功能。



动画：ATC  
组成结构

#### （一）中央层

列车自动监督（ATS）层包括操作控制中心和本地操作员工作站（LOW），主要负责完成集中的线路控制，车站级的线路控制也可由操作员工作站完成。

#### （二）轨旁层

ATP 的轨旁设备提供控制运算功能，而信号基础设备如通信、信号机、数字编码轨道电路、计轴器和应答器等一起参与运行线的联锁和轨旁 ATP 功能。

#### （三）通信层

通信层提供轨旁与车载之间的点式或连续式通信。通信层可以采用传统的数字编码轨道电路，也可以采用无线系统或环线系统提供用于移动闭塞的连续通信。可变数据应答器和填充数据应答器提供点式通信用于固定闭塞 ATP 防护，作为后备模式。

#### （四）车载层

车载信号设备包括车载 ATP、ATO 以及驾驶员人机界面（HMI）。ATP、ATO 和 HMI 提供了自动列车运行模式（AM）功能，ATP 和 HMI 提供了列车运行监督模式（SM）功能。

ATC 系统总体结构如图 1.3.1 所示。

### 二、ATS 子系统

城市轨道交通列车运行自动监控 ATS 系统是监督和控制列车按运行图运行，是使列车运行最佳化和稳定化的控制系统。当出现非正常情况或设备故障时，通过该系统可使之对运行图所带来的不利影响最小化。

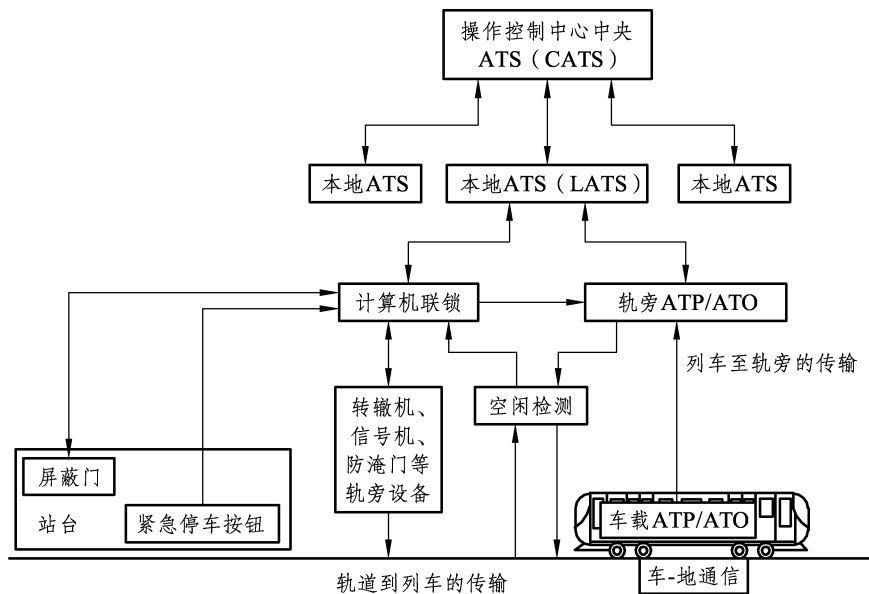


图 1.3.1 ATC 系统总体结构

ATS 系统主要是实现对列车运行及所控制的道岔、信号等设备运行状态的监督和控制，为行车调度人员显示出全线列车的运行状态，监督和记录运行图的执行情况，在列车因故障偏离运行图时及时做出调整，辅助行车调度人员完成对全线列车运行的管理。

ATS 在 ATP 和 ATO 系统支持下，根据运行时刻表完成对全线列车运行的自动监控，可自动监控和控制正线列车进路，并向行车调度员和外部系统提供信息。ATS 系统为非安全系统，其全部或任何一部分发生故障或不正确操作，不会影响列车运行安全。ATS 系统通过 ATP 系统有效防止了由于 ATS 系统故障或不正确操作可能导致的对列车运行的危害。

ATS 系统主要功能如下：

### （一）管理信号设备

ATS 可以接收联锁系统的远程监控信息，比如道岔位置、信号机状态、进路、车次号等，并在调度员工作站和综合显示屏上显示。

### （二）列车描述

ATS 系统为每辆列车提供唯一识别号，识别号一般由 3 位车次号和 2 位目的地号共 5 位数字组成。在列车每次到达折返站后，ATS 系统根据运行图自动在控制中心更改该列车的识别号，并显示于司机驾驶室的显示器上。

### （三）自动进路设置

自动进路只适用于列车正向的运行，主要包含以下几种自动进路。

### 1. 通过进路

控制中心或车站 ATS 调度员须先开放进路，再将该进路的入口信号机设置成通过信号模式。在列车通过后，不需要 ATS 系统干预，而由联锁系统自动再次建立的进路。

### 2. 目的地触发进路

以列车识别号中的目的地为基础，由车站 ATS 自动设置的进路。

### 3. 接近触发进路

当特定的触发轨被占用后由车站 ATS 自动建立的自动进路，用于从入口信号机只有一条进路可办理的进路。

## （四）运行图调整

ATS 系统主要通过停站时间和站间运行时间等方式对特定列车，按照列车的运行图进行调整，和其他列车可能的延迟无关。

## （五）运行图管理

运行图管理主要包括离线运行图管理和在线运行图管理。

### 1. 离线运行图管理

运行图确定了运行日内正常的列车运行计划，这里的运行日是指一年中任何工作日、双休日或假日。离线运行图管理功能通过图形用户界面供计划员建立和修改运行图。

### 2. 在线运行图管理

每天在正线运营前，调度员在已创建的运行图内选定一个并创建为当天运行计划，ATS 按照当天运行计划进行列车自动调整。在运行过程中，调度员使用运行图菜单可对运行图进行某些调整，比如调度员可在运行图上添加一列列车计划、删除一列列车计划或更改一列列车计划，ATS 系统将按照调度员修改后的计划自动调整线路上运行的列车。

## 三、ATP 子系统

列车自动防护系统（Automatic Train Protection, ATP）是列车运行超速防护核心安全系统，负责列车的安全运行，完成保证安全的各种任务，必须符合“故障-安全”原则。

ATP 连续检测列车的位置和速度，监督列车必须遵循速度限制、车门控制，追踪所有装备信号设备的列车，考虑联锁条件，并为列车提供移动授权，实现与 ATS、ATO 及车辆系统接口及进行信息交换，可分为车载 ATP 和地面 ATP 两部分。

ATP 系统的主要功能如下：

### （一）列车定位

定位任务及时确定列车在路网中的地理位置。通常，ATP 系统是利用查询应答器及速度传感器和雷达完成列车定位。安装在线路上某些位置的应答器用于列车物理位置的检测，每个应答器发送一个包括识别编号（ID）的应答器报文，由应答器天线接收，在车载 ATP 单元的线路数据库里存有应答器位置，这样确定列车在线路上的确切基准位置，由速度传感器和雷达执行列车位移的测量。

### （二）测速与测距

通常采用速度传感器和雷达用于列车速度和距离的精确检测。列车实际速度是施行速度控制的依据，速度测量的准确性直接影响到速度控制效果。列车的位置直接关系到列车运行的安全，通过确定列车实际位置，才能保证列车之间的运行间隔，以及能够在接近障碍物或限制区之前停下或减速。

为补偿轮径磨损和由于轮径磨损而造成的维护服务间隔期内轮径的改变，使用雷达和查询应答器重新同步的方法，当列车经过应答器时，正确的位置将被识别。在这些应答器之间，雷达和测速传感器一起确定准确的列车速度和距离。

为了避免空转和打滑带来的不利影响，雷达可以有效补偿这种误差，保证 ATP 系统得到准确列车位置。

### （三）速度监督与超速防护

城市轨道交通中速度限制分为固定速度限制和临时性速度限制两种。

固定速度限制是在设计阶段设置的，ATP 车载设备中都存储着整条线路上的固定限速区信息，包括列车最大允许运行速度、列车最大允许速度和区间最大允许速度。

临时限速用于在一些特殊区段来降低允许速度，该功能满足在特殊地段要求较低速度的运行要求，例如正在进行的一些轨道作业。控制中心 ATS 操作员按照安全程序人工设置，设定的数据会从 ATS 系统传送给 ATP 轨旁单元，ATP 轨旁单元通过通信通道把所有的临时限速发送到车上，车载 ATP 接收来自轨旁 ATP 的移动授权和临时限速信息。

### （四）停车点防护

通常停车点就是危险点，危险点在任何情况下都不能越过，否则易导致危险情况发生。例如站内有车时，车站的起点即是必须停车点，在停车点的前方通常还设置一段防护段，ATP 系统通过计算得出的紧急制动曲线即以该防护区段入口点为基础，保证列车不超越入口点。



此外也可以在入口点设置一个列车滑行速度值（如 5 km/h），一旦需要，列车可在此基础上加速或停在危险点前方。

### （五）列车间隔控制

列车间隔控制是一种既能保证行车安全，防止两列车发生追尾事故，又能提高运行效率，使两列车的间隔最短的防护功能。固定闭塞下，列车的间隔是靠自动闭塞系统来保证的，列车间隔以闭塞分区为单位，当采用准移动闭塞和移动闭塞时，闭塞分区长度与位置是不固定的，是随着前方目标点的位置和后续列车的实际速度及线路参数而不断改变的。

### （六）车门控制

车门自动开闭是否由司机手动操纵，关键是要对安全条件进行严格的监督。防止列车在站外打开车门、在站内时打开非站台侧的车门、在车门打开时列车启动等情况发生。只有 ATP 系统检查所有安全条件均已满足时，给出一个控制命令，才能打开车门。

列车停站时间结束时，轨旁 ATP 设备停发开门信息，关闭车门。轨旁 ATP 确定车门关闭并锁闭后，向车载 ATP 发送移动授权信息，车载 ATP 收到后，再次确定车门关闭且锁闭后，允许列车发车。

### （七）站台屏蔽门控制

当列车进站且停在允许误差范围内时，司机操作或 ATO 发送开门指令，经过 DCS 系统传至 CI，PSD 系统接收 CI 的开门指令，执行相应自动解锁、开门等操作，同时 PSD 状态指示装置做出相应的响应动作。

当列车离站时，司机操作或 ATO 发送关门指令，经过 DCS 系统至 CI，PSD 系统接收 CI 的关门指令，执行相应的关门、锁闭等操作，当所有屏蔽门关闭并锁闭后，PSD 系统向 CI 发送“屏蔽门关闭且锁闭”信息，并通过 DCS 系统至车载 ATP，列车被允许离站，同时 PSD 状态指示装置做出响应动作。

### （八）紧急停车功能

特殊情况下，按压设在车站上的紧急停车按钮，就可以通过信号系统车载 ATP，启动紧急制动，使列车停止运行。

### （九）给出发车命令

车载 ATP 检查有关安全启动条件（如车门是否关闭且锁闭、司机操作手柄是否都置于零位、ATP 系统是否处于正常工作状态）并确认符合安全后，才允许列车发车。

### （十）列车倒退控制

为了防止列车倒退或溜逸时，当后退距离超过一定距离，车载 ATP 立即启动紧急制动。

### （十一）停稳监督

监控列车停稳是在站内打开车门和站台屏蔽门的安全前提,为了确定列车停稳,车载 ATP 实时监督雷达和测速传感器的信息。

## 四、ATO 子系统

列车自动运行系统 (Automatic Train Operation, ATO) 主要用于实现“地对车控制”,根据地面控制中心的指令自动完成对列车的启动、牵引、惰性、制动,送出车门和站台安全门的开关信号,使列车以最佳工况安全、正点、平稳运行。ATO 为非“故障-安全”系统,其控制列车自动运行,主要目的是模拟最佳司机驾驶,实现正常情况下高质量的自动驾驶。

ATO 系统必须受 ATP 系统监督,执行超速防护功能,否则实施制动。按用途和制动效率来讲主要有:常用制动和紧急制动。

常用制动的特点是作用比较缓和,制动过程比较长,只使用全制动能力的 20% ~ 80%。

紧急制动的特点是实施全制动能力,制动比较迅猛,乘客可能惯性摔伤。

因此,一般情况下首先使用常用制动,只在紧急情况或突发事件下使用紧急制动。

如图 1.3.2 所示,紧急制动曲线是由车载 ATP 计算和监督的,列车速度一旦触发该曲线,列车获得最大减速度,立即启动紧急制动,以保证列车停在停车点,这是一种非正常的运行状态,应尽量避免发生,且列车必须经过一段时间制动缓解后并得到确认后才能重新启动。

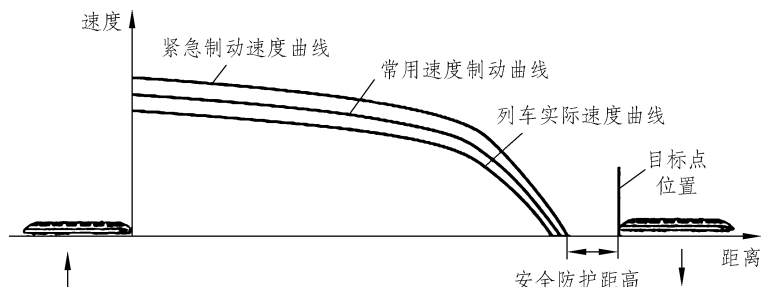


图 1.3.2 制动曲线示意图

常用制动曲线是由车载 ATP 计算的,当列车速度达到该曲线值时,应给出警告,但不启动紧急制动,提示司机实施常用制动减速。

列车实际速度曲线由车载 ATO 系统计算,正常运行情况下 ATO 自动驾驶停车制动曲线,通常减速度制动设置为  $0.75 \text{ m/s}^2$  左右,已达到平稳减速和停车。

ATO 系统主要功能如下:

(1) 自动调整列车运行速度。列车启动、停止和速度调节必须按司机指令或 ATS 的输入,通过 ATO 系统控制执行,使列车巡航速度、加速、减速、惰行和冲击率控制在规定的乘客舒适度范围内,同时列车速度必须保持在 ATP 防护速度曲线下。

(2) 车站精确停车。采用查询应答器、无线通信、测速传感器和雷达等定位及测速方法

实现列车车站定点精确停车。

(3) 列车区间运行时间的控制。ATO 自动驾驶模式下，可根据 ATS 的调整指令改变列车在区间的走行时间。

(4) 车门和屏蔽门控制。ATP 监督下对车门和屏蔽门进行控制，可人工或自动开启关闭车门和屏蔽门。列车停在站台维持开门时间由 ATS 建立，并受 ATO 自动控制。

(5) 与 ATS、ATP 子系统交换信息，共同实现列车无人自动折返及驾驶室自动换向。

(6) 允许速度。ATO 速度控制器提供列车在轨迹任意点的对应速度值。

(7) 向车载 PIS 提供信息，显示下一站、目的地站和时间，并触发语音播报。

(8) 巡航/惰行。按照时刻表自动实现列车区间运行的惰行控制，同时节省资源，保证最大能量效率。

### 五、ATC 系统类型

根据车-地之间信息传递方式的不同，ATC 系统可分为点式 ATC 系统和连续式 ATC 系统。

#### (一) 点式 ATC 系统

点式 ATC 系统通过设置在轨边的点式设备，在列车经过时向车上传递信息，点式设备有查询应答器、感应环线等。

##### 1. 点式 ATC 系统结构

点式 ATC 系统因其主要功能是实现列车超速防护，所以又称为点式 ATP 系统。点式 ATP 系统由车载设备和地面设备组成，主要是地面应答器轨旁电子单元（LEU，又称作地面电子单元或信号接口）以及车载设备。点式 ATC 系统结构如图 1.3.3 所示。

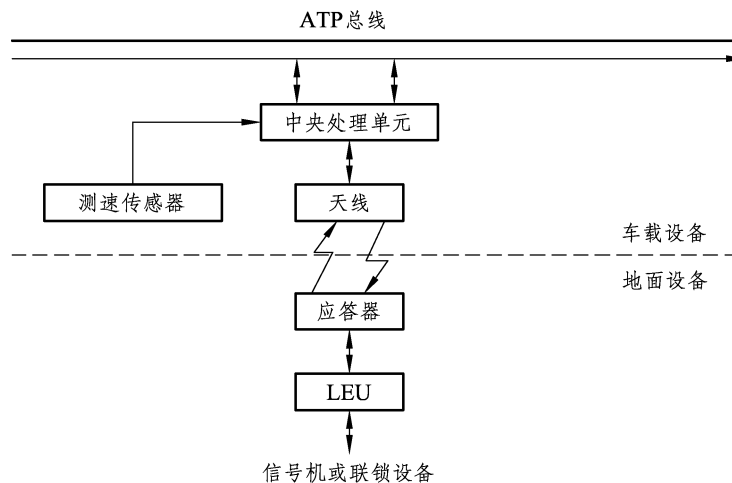


图 1.3.3 点式 ATC 系统结构

##### 2. 点式 ATC 系统的基本原理

地面应答器向列车传送每一信号点的允许速度、目标速度、目标距离、线路坡度、信号机号码等信息。点式 ATC 系统的车载设备接收信号点或标志点的应答器信息，还接收列车速度和制动压力信息，输出控制命令和向司机显示，车载中央控制单元根据地面应答器传至车上的信息以及列车自身的制动率（负加速度），计算得出的两个信号机之间的速度监控曲线，如图 1.3.4 所示。

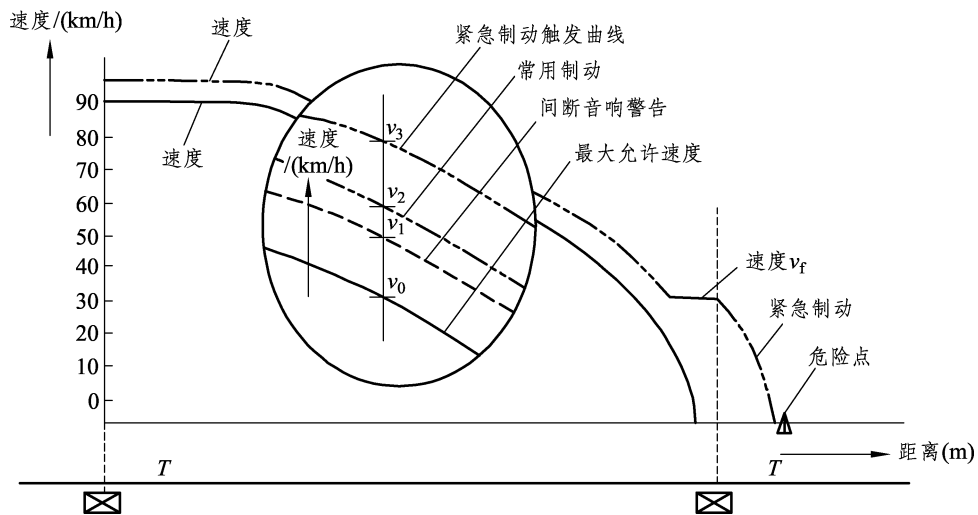


图 1.3.4 点式列车超速防护系统速度监控曲线图

图中， $v_0$ 指所允许的最高列车速度。 $v_1$ 是当列车车速达到此值时，车载中央控制单元给出音响报警，如果此时司机警惕降速，使车速低于 $v_0$ ，则一切又趋于正常。

$v_2$ 是指当列车车速达到此值时，车载中央控制单元给出启动常用制动（通常为启动最大常用制动）的信息，列车自动降速至 $v_0$ 以下。若列车制动装置具有自动缓解功能，则在列车速度降至 $v_0$ 以下时，制动装置即可自动缓解，列车行驶趋于正常；若列车制动装置不具备自动缓解功能，则常用制动使列车行驶一段路程后停下，列车由司机经过一定的手续后重新人工启动。

$v_3$ 是指当列车车速达到此值时，车载中央控制单元给出启动紧急制动的信息，确保列车在危险点的前方停住。

## （二）连续式 ATC 系统

连续式 ATC 系统通过轨道电路、轨道电缆回线、漏泄同轴电缆和无线通信方式等传输媒介连续不断地向车上传递信息，车载计算机也不间断地计算出速度曲线，从而使行车间隔可缩短至最短。连续式 ATC 系统按照地面-车上信息传输所用的媒体可分为有线、无线两大类。

### 1. 采用轨间电缆的连续式 ATC 系统

采用轨间电缆的连续式 ATC 系统由地面控制中心、轨间传输电缆和车载设备三部分构成，如图 1.3.5 所示。

采用轨间电缆的连续式 ATC 系统，需要在整条线路上设置一个控制中心。在此控制中心

内，按地理坐标存储了该线路的一些固定数据，如区间的线路布置图、线路坡度、曲线半径、缓行段位置及长度等。此外，经过联锁装置，将沿线的信号显示、道岔位置及其他控制对象的信息不断地传送到控制中心。同时，列车也将它自身的数据，如车长、制动率、所在位置、实时速度等，经过轨间电缆传给控制中心。在控制中心内的计算机根据已有的数据，计算出此时此刻的列车最大允许速度，此速度值经由轨间电缆传递给运行在线路区间上的相应列车。列车从控制中心获得最大允许速度之后，则根据此值对列车速度进行监控。若列车实际速度高于此最大允许速度，则报警后实施常用制动。如果制动条件许可，则可在列车实际速度低于规定速度后缓解制动，从而避免了列车停车及重新启动，如图 1.3.6 所示。

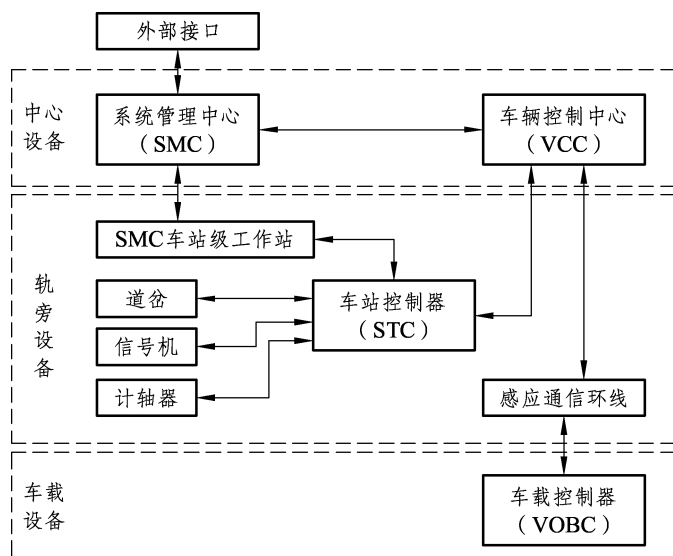


图 1.3.5 采用轨间电缆的连续式 ATC 系统示意图

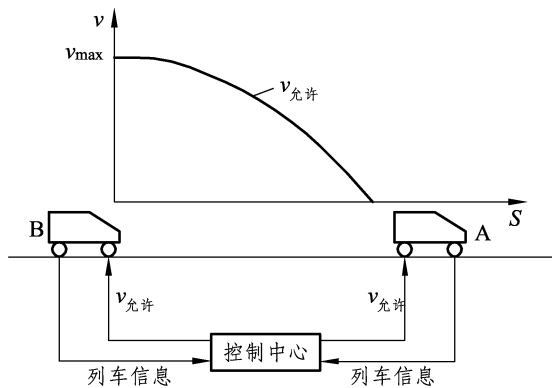


图 1.3.6 采用轨间电缆的连续式 ATC 控车原理图

## 2. 基于轨道电路的连续式 ATC 系统

基于轨道电路的连续式 ATC 系统主要由车载设备、轨道电路及室内（控制中心内）设备三大部分组成，如图 1.3.7 所示。

地面 ATP 接收器接收到由钢轨传送来的列车检测信息，以证实列车是否占用。接收器检出列车进入该轨道区段，前方轨道区段空闲，进路位置正确，通过驱动电路向 ATP 发送器发送速度命令的指令。

车载 ATP 部分的主要任务是根据来自地面控制中心的数据（由 ATP 天线接收）与预先储存的列车数据计算列车实时最大允许速度，将此最大允许速度与来自轮脉冲发生器（OPG）的列车此时此刻的实际速度数据作比较。如实际速度小于限速，则 ATP 模块产生输出，使常用制动继电器吸起；如实际速度大于限速，则表明超速，ATP 模块使常用制动继电器落下并告警或进一步启动制动器（常用制动或紧急制动）。在司机驾驶台上给出一系列必要的显示，如最大允许速度、此时此刻的实际速度、目标点距离、目标点速度等。

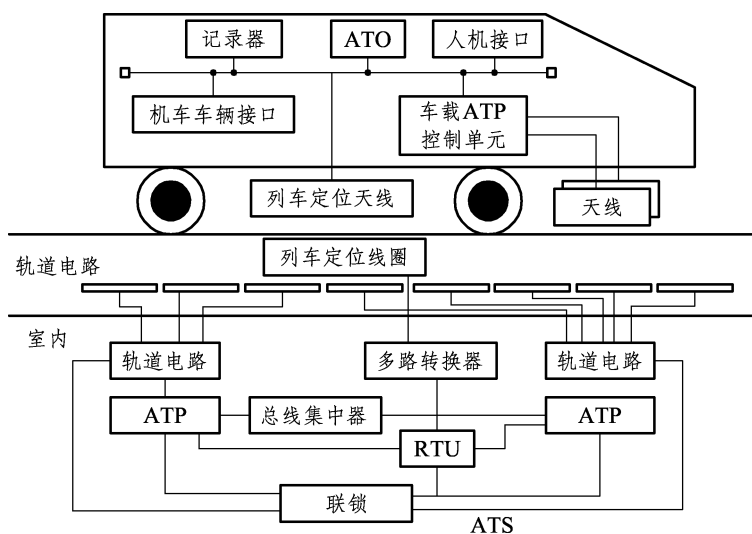


图 1.3.7 基于轨道电路的连续式 ATC 系统结构图

### 3. 无线 ATC 系统

无线 ATC 系统利用无线通信的方式传输信息。地面编码器生成编码信息，通过天线向车上发送。信号显示控制接口负责检测要发送的信号显示，并从已编程的数据中选出有用数据送编码器，同时选出与限制速度、坡度、距离等有关的轨道数据。编码器用高安全度的代码将这些数据编码，经过载波调制，馈送至无线通道向列车发送。车上接收设备接收限制速度、坡度、距离后，由车载计算机计算出目标速度，对列车进行监控。

## 六、CBTC 系统基本原理

CBTC 系统一般由列车自动防护 ATP、列车自动运行 ATO、列车自动监控 ATS、正线计算机联锁 CI 四个子系统构成。ATC 核心的系统主要采用安萨尔多公司的技术。

### （一）系统组成

如图 1.3.8 所示, CBTC 信号系统主要由控制中心 ATS、车站 ATS/LCW 现地控制工作站、区域控制器、车载控制器、联锁控制器、数据存储单元、数据通信系统等子系统和设备组成。



动画：安萨尔多 CBTC 系统结构及控车原理



微课：安萨尔多 CBTC 系统

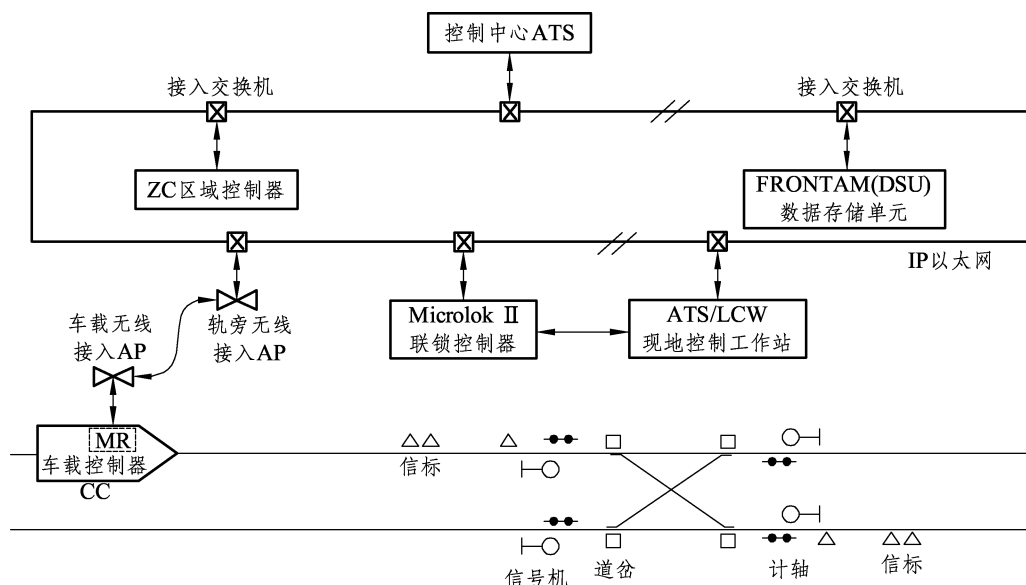


图 1.3.8 CBTC 系统架构示意图

### 1. 中央列车自动监控系统 (ATS)

ATS 是城市轨道交通 ATC 系统的一个子系统,它是基于现代数据通信网络的分布式实时计算机控制系统,通过与 ATC 系统中的 ATP、ATO 和 MLKII (微机联锁)子系统的协调配合,完成对高密度城市轨道交通信号系统的自动化管理和全自动行车调度指挥控制,包括中心 ATS 和车站 ATS。ATS 系统监督功能是将列车运营及轨旁设备的状态和信息,通过控制中心或车站的调度终端实时显示出来,调度员可以通过这些终端屏幕,实时了解和掌握列车的实际运行情况以及轨旁信号设备的显示情况,以便及时对行车作业进行分析和调整,保证全线运营安全高效有序进行。

ATS 系统控制功能是向轨旁联锁系统发出指令办理进路,指挥列车按照列车运行图来运行。ATS 可以绘制列车实际运行图,并动态地对偏离运行图的列车进行调整。

ATS 系统主要特点如下:

- (1) 系统关键单元的 1+1 防护,故障情况下无需人工干预的热备切换。
- (2) 集中后备架构,在中央故障时仍可完成自动控制功能。
- (3) 模块化的软件设计,灵活适应用户的需求,并可满足系统扩容的需要。
- (4) 对于涉及安全的操作,提供二次确认的操作。

(5) 符合人机工程原理的标准化图形用户界面。

(6) 全系统的时钟同步。

## 2. 区域控制器 (ZC)

区域控制器安装在轨旁，是基于处理器的安全控制器。每个区域控制器通过数据通信子系统和车载控制器连接。区域控制器通过运用 CBTC 的移动闭塞概念，确保列车的安全运行。区域控制器基于已知的障碍地点和预计的交通荷载，确定预定义的地区（区域）内所有列车的移动权限。区域控制器接收临时限速（TSR）指令以及该区域内列车发出的位置信息。区域控制器与 MicroLok II 接口，以控制和表示轨旁设备。每个区域控制器都是以三选二表决配置为基础。

## 3. 数据存储单元

数据存储单元用于保存轨道数据库数据，临时速度限制储存在区域控制器中。

## 4. 联锁控制器 MicroLok II

MicroLok II 负责安全执行传统联锁功能。MicroLok II 从辅助列车检查计轴系统中获得列车位置信息。MicroLok II 与轨旁设备接口，诸如转辙机、LED 信号机等。为保证正确的 CBTC 运行，MicroLok II 还与区域控制器（ZC）接口。

如果区域控制器出故障，列车的安全运行通过联锁控制器和轨旁 LED 信号机来实现。如果数据通信子系统或车载控制器出现故障，列车以地面信号显示作为主体信号运行。另外，如果数据通信子系统（无线部分）出现故障，系统提供超速防护功能并防止列车冒进红灯信号。

## 5. 工作站

集成了 ATS 工作站/本地控制工作站功能的工作站位于设备集中站的本地调度室。该工作站通常用于监督列车运行，也可用于联锁的人工控制。

当中央和本地 ATS 功能均不可用时，MicroLok 自动设置正线追踪的直通进路，并在终端站自动提供折返进路，通过本地操作终端实现联锁进路的设置和取消。

## 6. 车载控制器 (CC)

车载控制器包括基于微处理器的控制器、相关速度测量及位置定位传感器（在地面应答器的辅助下）、车载设备与列车的各子系统接口，并通过数据通信子系统与区域控制器接口。车载控制器负责列车定位、执行允许速度、执行移动授权以及其他有关的 ATP 和 ATO 功能。车载控制器采用“三取二”表决方式。每端的 ATO 有一套冗余的设备。如果一个 ATO 单元故障，同一端的另一个 ATO 单元将接替工作。切换是自动的，不需要人工干预。

五种列车驾驶模式：ATO 自动驾驶模式（AM），连续式 ATP 监控下的人工驾驶模式（ATPM），点式 ATP 监控下的人工驾驶模式（iATP），限制人工驾驶模式（RM）和非限制人工驾驶模式（NRM）。另外，还有一种用于自动折返的模式（ATB），可以实现无人自动折返。

## 7. 数据通信子系统 (DCS)



数据通信子系统使用 UDP/IP 协议，在信号系统各设备之间提供双向的、安全的数据交换，它提供开放的通信接口和体系架构。应用国际通行的协议：有线网使用 IEEE802.3，无线通信使用 IEEE802.11g，它是一个非安全（Non-vital）的系统，但是通过其传送的消息受安全算法的保护。系统设计能够消除单个独立故障或多个相关故障对系统的影响，通信系统对列车控制操作是透明的，DCS 能够满足系统对于数据传输延时和数据率的要求。

以太网为所有子系统提供了相互通信的途径。系统提供双环网冗余骨干网络。ATS 接入骨干网络是通过有线交换机实现的。

### (二) 系统接口

CBTC 系统各子系统接口如图 1.3.9 所示，各系统间接口传输的信息如下。

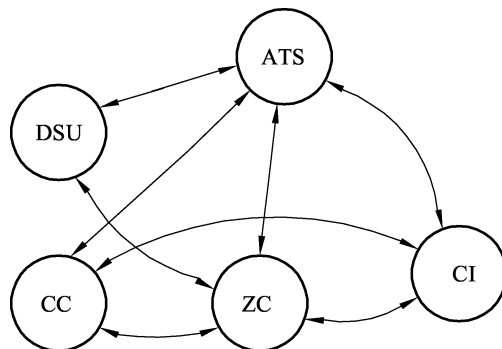


图 1.3.9 CBTC 系统各子系统接口示意图

#### 1. ATS 与 ZC 间接口

ATS 与 ZC 接口信息主要包括：列车占用信息、移动授权终点信息、临时限速信息确认信息及告警信息等。

#### 2. ATS 与 CI 间接口

ATS 与 CI 接口信息主要包括：轨旁设备（信号机、计轴区段、屏蔽门、紧急停车按钮等）状态信息，进路状态信息、命令交互信息。

#### 3. ATS 与 DSU 间接口

ATS 与 DSU 间接口信息主要包括：临时限速信息及告警信息等。

#### 4. ATS 与 CC 间接口

ATS 与 CC 间接口信息主要包括：列车识别号、计划时刻表号、扣车请求、统一时钟信息、运行方向、停稳信息、停车时间、下一站运行等级及告警信息等。

#### 5. ZC 与 CC 间接口

ZC 与 CC 接口信息主要包括：移送授权信息、临时限速信息、无人折返信息、数据库版本号信息、列车运行状态、速度、位置、级别、驾驶模式、完整性等。

#### 6. ZC 与 DSU 间接口

ZC 与 DSU 接口信息包括：临时限速信息、数据库版本号信息等。

#### 7. CC 与 CI 间接口

CC 与 CI 间接口信息包括：打开/关闭屏蔽门信息。

总之 CBTC 系统各子系统在独立执行各自功能的同时密切配合，协同控制，共同实现了 CBTC 系统各项功能。

## 项目实训

### 实训目的

掌握城市轨道交通列车自动控制系统相关的基础知识。

### 实训内容

1. 教师介绍实训目的、方式和要求，调动学生参与的积极性；
2. 对学生进行分组，确定组长和人员分工，以小组为单位，制订实训计划；
3. 教师简介城轨列控系统发展历程、关键技术和基本工作原理，组织学习调查、讨论；
4. 各小组通过不同方式获取资料进行分析、讨论；
5. 各小组根据调查、分析和讨论的情况撰写总结；
6. 各小组互相评价，教师给出点评和总结。

### 实训考核

完成任务后，对每名同学的总体表现进行自评、小组评价和教师评价，其中自评占总成绩的 20%，小组评价占总成绩的 30%，教师评价占总成绩的 50%，如下表所列。

姓名	学号	所在小组				
学习任务						
评价内容	分值	自评	小组评价	教师评价	得分	
1. 能严格遵守各项规章制度，具备安全意识	5					
2. 能很好地完成任务；能与本组同学合作交流、协同工作	5					
3. 学习态度端正、认真、主动	5					
4. 能熟练运用掌握的知识完成相应的任务	15					
5. 城轨列控系统发展历程	5					
6. 应答器的组成	5					
7. 列车测速原理	15					
8. 常用定位技术	10					
9. 车地无线通信方式	15					
10. 速度控制模式分类	5					
11. CBTC 系统工作原理	15					
合计	100	任务综合得分：				

## 思考与练习

---

1. 常用的测速方法有哪几种?
2. 查询应答器定位的特点有哪些?
3. 城市轨道交通中车地无线通信技术主要有哪几种?
4. 从列车速度控制方式的角度, 列车运行自动控制系统可以分为哪几类?
5. 目前用于城市轨道交通系统的闭塞制式有哪几种?
6. 按技术特征进行划分, 城市轨道交通可以分为哪些类?
7. 城市轨道交通的特点主要有哪些?
8. 列车定位技术主要有哪些?
9. 速度控制模式可以分为哪几类?
10. ATC 系统主要有哪些类型?
11. 绘制典型 CBTC 系统架构图。