

现代有轨电车 运行控制模型与算法

姜 梅 郭孜政 张 骏 鄢红英 / 著

Models and Algorithms of
Modern Tram Operation Control



科学出版社

现代有轨电车运行控制 模型与算法

姜 梅 郭孜政 张 骏 郝红英 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书建立了一整套适应现代有轨电车管理运营特点的控制模型及算法,主要包括客流自适应排班模型、基于历史客流数据的站点乘降量预测模型、交叉口协调控制模型及运行自适应调整模式。其中,乘降量预测模型及自适应排班模型可根据历史数据不断更新和预测站点客流量,从而确定到发站时间,并制定较为精确的时刻表;交叉口协调控制模型可兼顾交叉口整体通行效率和减少有轨电车延误两个方面;运行自适应调整模式主要通过消除速度偏差来实现实际运行状态与运行图编制计划的切合,减少延误的累积。本书在大量实地调研的基础上,结合当前最新研究成果,对现代有轨电车的运行控制模式做出了一些创造性的思考,并提出相应的解决方案,以期为城市轨道交通的发展提供些许参考。

本书适于交通类高校师生、政府交通管理部门和轨道交通相关从业人员等阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代有轨电车运行控制模型与算法 / 姜梅等著. — 北京: 科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-053952-6

I. ①现… II. ①姜… III. ①有轨电车-运行-控制系统 IV. ①U482.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 168326 号

责任编辑: 张 展 华宗琪 / 责任校对: 葛茂香 熊倩莹

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017年8月第一次印刷 印张: 7 1/2

字数: 156千字

定价: 49.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书其他主要合作者

牛琳博	吴志敏	张杰亮	沈 健
孟振华	巴宇航	余颜丽	

前 言

现代有轨电车是介于常规公交和轻轨之间的中低运量的轨道交通系统，是城市地面公共交通系统的重要组成部分，承担大中城市的轨道交通补充线和辅助线、小城市轨道交通骨干线、城区与城市组团的交通连接线等功能，近年来逐渐在我国各城市推广应用且发展迅猛。

现代有轨电车在运营方式、路权形式、交叉路口信号、车站形式、平纵曲线、供电、车辆等方面具有其独特的技术特征。目前国内已建和规划的有轨电车系统主要采用人工驾驶、目视行车、调度员监视行车状态的运营方式。作为一种地面交通方式，有轨电车系统多数情况下并不具有完全独立的路权，在城市道路交叉口存在着乘客交通组织和道路交通组织的问题。同时，其信号系统也有别于其他轨道交通的信号系统，具有更多的灵活性和自主性。对于半独立路权的有轨电车系统，如何在道路交叉口实现有轨电车道路信号系统与城市交通信号系统的有机融合是系统设计的关键所在。因此，有轨电车调度系统并不是对现有的成熟轨道交通调度系统的简单简化。

目前国内针对有轨电车上特点开展的实时调度理论研究尚不成熟，对交叉口信号优先控制的研究尚不完善，已投入运营的有轨电车项目在运营调度上还存在着一定的缺陷：①建设成本和运营成本较高，经济效益较差，但社会效益好；②交叉口信号优先系统原理过于简单，对地面交通组织影响较大，且设备成本较高；③控制中心较简易，采用规划调度模式，智能化不足。

现代有轨电车的优势不仅来自于有轨电车本身，而且来自于围绕其专用空间的运营系统高度集成。因此，技术先进、高度集成的智能调度系统可以充分将有轨电车路权优先、合理调度、快速上下、安全舒适等特点完全发挥出来，本书提出的运行控制模型与算法是智能调度模式的重要组成部分。

在此背景下，中国中铁二院工程集团有限责任公司联合西南交通大学交通运输与物流学院，对现代有轨电车智能调度模式进行了深入的研究。本研究是四川省2014年科技计划项目“城市有轨电车制式系统关键技术研究及产业化(2014GZ0081)”的组成部分之一，旨在为现代有轨电车项目前期规划和各阶段调度系统设计提供理论指导和支撑，为与之相适应的基础设施和机电设施的配备提供准确的功能需求定位。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 有轨电车发展历程	1
1.2 现代有轨电车系统特征	3
1.2.1 系统能力与功能定位	4
1.2.2 线路设计	5
1.2.3 运营组织	13
1.3 现代有轨电车系统现状分析	16
1.4 智能调度模式系统界定与算法架构	17
1.4.1 系统界定	17
1.4.2 算法架构	18
第 2 章 现代有轨电车智能调度机制分析及整体设计	19
2.1 系统功能	19
2.1.1 客流预测及自适应排班功能	19
2.1.2 交叉口信号协调控制功能	21
2.1.3 线路运行自适应调整功能	21
2.2 系统构成及运作	21
2.2.1 系统构成	21
2.2.2 系统运作	22
2.3 系统设备及信息需求	24
2.3.1 信息采集设备	24
2.3.2 统计分析设备	25
2.3.3 调度指挥设备	25
2.3.4 信息发布设备	29
第 3 章 现代有轨电车客流自适应排班模型	31
3.1 客流影响因素分析	31
3.2 客流预测模型构建	32
3.2.1 客流预测理论研究与发展	32
3.2.2 客流预测问题分析	35
3.2.3 基于客流历史数据的客流预测模型构建	36

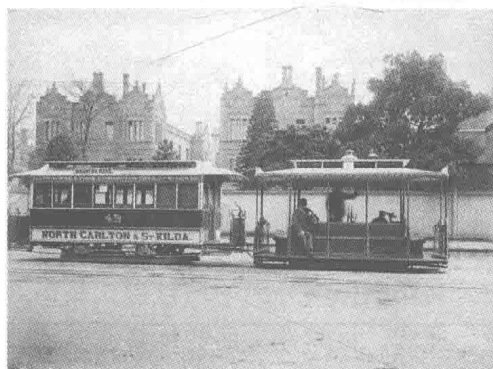
3.2.4 基于统计方法的客流预测模型	38
3.3 制定发车时刻表	43
3.3.1 时刻表问题分析	43
3.3.2 发车时刻表模型	43
3.4 车底运用方案智能调度模型与算法	47
3.4.1 车底问题分析	47
3.4.2 车底运用方案建模	47
3.4.3 合理车底数	49
第4章 现代有轨电车交叉口信号协调控制模式	51
4.1 轨道交通优先理论研究与发展	51
4.2 公共交通交叉口协调控制策略	53
4.2.1 协调控制策略目的及原则	53
4.2.2 协调策略分析	54
4.3 有轨电车和社会车辆信号优先权度量	55
4.3.1 优先策略整体目标	55
4.3.2 有轨电车交叉口优先权度量因子	55
4.4 交叉口信号协调控制模式下配时方案	58
4.4.1 交叉口信号协调控制策略	58
4.4.2 基于协调控制策略的情景分析	65
第5章 现代有轨电车运行自适应调整模式研究	73
5.1 有轨电车运行调整理论研究与发展	73
5.2 有轨电车运行图	75
5.2.1 有轨电车线路模型	75
5.2.2 有轨电车运行图指标	78
5.2.3 有轨电车运行图约束条件	83
5.3 有轨电车自适应调整模型	84
5.3.1 有轨电车运行调整模型	84
5.3.2 有轨电车运行调整方案	86
5.3.3 行车间隔调整模型	90
5.3.4 交叉口配对调整模型	93
第6章 现代有轨电车智能调度模式方案效益评价	96
6.1 评价指标体系构建	96
6.1.1 有轨电车运行效益指标	97
6.1.2 有轨电车优先效益指标	98
6.1.3 社会交通效益指标	98

6.2 评价模型的建立	100
6.2.1 评价理论简介	100
6.2.2 指标的无量纲化处理	100
6.2.3 权重的确定	102
6.2.4 决策阵的计算	103
6.2.5 方案排序	103
参考文献	105

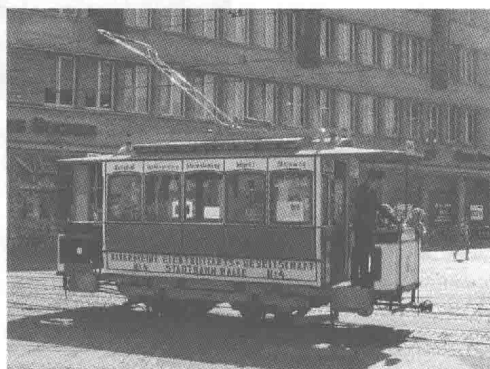
第 1 章 绪 论

1.1 有轨电车发展历程

有轨电车于 19 世纪 80 年代集中出现在西方工业国家中。随着汽车工业的发展,有轨电车开始面临来自小汽车和公共汽车的竞争。从 20 世纪 20 年代开始,私人小汽车的发展对有轨电车的客流量造成了强烈的冲击。越来越多的小汽车导致道路日益拥挤,阻碍了有轨电车的正常运行。传统有轨电车车辆由于加速能力低,很难在拥挤的混合交通流中运行(图 1-1)。另外,轨道养护也需要额外的费用。在这些因素的作用下,美国、英国和法国等国家逐渐拆除有轨电车系统或者取消有轨电车的分离路权,越来越多的公交公司开始放弃有轨电车转而运营公共汽车,有轨电车系统出现衰退^[1]。



(a)1905 年墨尔本有轨电车



(b)德国传统有轨电车

图 1-1 传统有轨电车

在这样的背景下,有轨电车行业内部开始寻求途径来提升自己的竞争力。在德国、荷兰、瑞士、奥地利等欧洲国家,有轨电车的分离路权形式得以保留,甚至在形式上还获得了提升,线路长度被延长。这些国家的很多城市坚持把有轨电车和其他交通方式分离作为目标。在这样的目标下,有轨电车系统获得了全面提升:使用现代化、大容量的铰接车辆,修建分离的有轨电车通路,使用特设信号

控制, 修建与地铁、公共汽车的换乘枢纽等。这种提升后的模式在速度、可靠性、舒适度和安全性等方面更加接近于快速轨道交通, 而不是传统的有轨电车。这种系统被赋予了一个新的名字: 现代有轨电车(图 1-2)。



(a)德国柏林



(b)荷兰阿姆斯特丹



(c)西班牙巴塞罗那

图 1-2 国外现代有轨电车

而美国、英国和法国在交通日益拥挤的情况下, 为此付出的代价是公交客流的持续下降。这些城市终于逐渐意识到, 对公交车辆提供分离的路权形式是提升服务水平的最根本因素。而轨道交通在容量、速度、可靠性方面的优势使其比公共汽车更适合分离的路权形式。这种在路权、容量等方面提升了的系统模式在 20 世纪 70 年代发展成熟并获得了认可, 并在北美二十多个城市, 法国、英国、西班牙、爱尔兰、以色列、澳大利亚等发达国家的城市, 以及许多发展中国家, 如土耳其、埃及、突尼斯、菲律宾和墨西哥等的城市发展起来^[2]。

在国内, 现代有轨电车也逐步得到了重视和快速发展。国家“十二五”规划纲要中明确提出, 实施公共交通优先发展战略, 有序推进轻轨、地铁、有轨电车等城市轨道交通网络建设。2012 年 10 月 10 日举行的国务院常务会议要求, 加快构建以公共交通为主, 由轨道交通网络、公共汽车、有轨电车等组成的城市机动

化出行系统。近几年，我国现代有轨电车的建设规划发展迅速，据不完全统计，国内现代有轨电车已建成项目 7 个，在建项目 10 个，规划项目 10 个(图 1-3)。

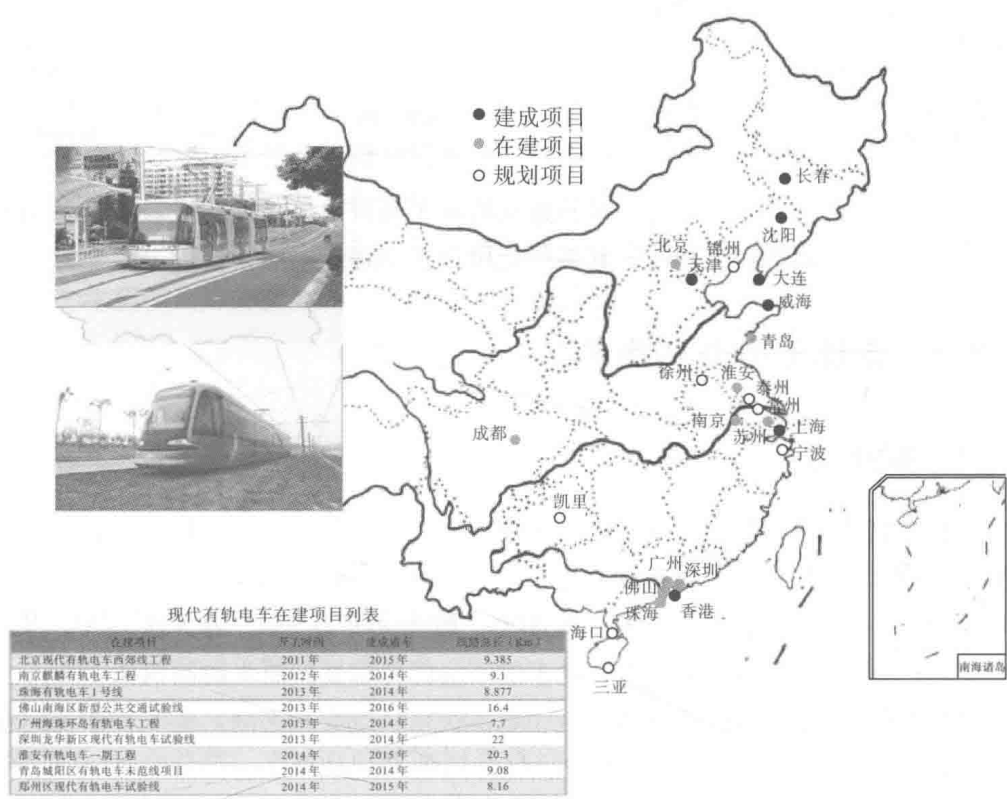


图 1-3 国内现代有轨电车项目分布图

1.2 现代有轨电车系统特征

现代有轨电车的优势不仅来自有轨电车本身，还来自系统集成，围绕其专用空间，形成高度集成化的运营系统。因此，技术先进、高度集成的智能系统可以充分将有轨电车路权优先、合理调度、快速上下、安全舒适等特点完全发挥出来。本书所研究的智能调度模式是其中的重要组成部分。为更好地开展研究，笔者在对国内若干典型现代有轨电车系统实地调查研究的基础上，对现代有轨电车系统能力与功能定位、线路设计、运营组织等应用及发展现状进行了深入的调研(表 1-1)。

表 1-1 部分国内新投入运营有轨电车项目比较

项目	路权	车辆编组	驾驶模式	调度指挥	行车间距
沈阳浑南新区有轨电车	半独立	初、近期 1 辆独行， 远期 2 辆编组	人工驾驶	控制中心 人工调度	最小 14min

续表1-1

项目	路权	车辆编组	驾驶模式	调度指挥	行车间距
苏州有轨电车高新区1号线	半独立	初、近期 5 辆独行， 远期 5 辆编组和 7 辆 编组混行	人工驾驶	控制中心 人工调度	高峰时段间隔为 8min
广州市海珠环岛新型有轨电车试验段	半独立	初、近期 4 辆独行， 远期 6 辆编组	人工驾驶	控制中心 人工调度	全天行车间隔为 9min

研究表明，国内已投入运行及新建有轨电车项目采用的线路设计、运营组织等技术、管理方式均较为类似，其系统定位目标及理念也极为接近。

1.2.1 系统能力与功能定位

1. 系统能力

现代有轨电车系统以大容量为主要的特征之一，但不能一味地高估其客运能力。国外以混合路权为主的有轨电车系统客运能力一般为 0.6 万~0.8 万人次/h；以专用路权为主的有轨电车系统客运能力一般为 0.9 万~1.2 万人次/h^[3]。考虑国内城市道路交通环境影响，有轨电车的客运能力将受到更大的制约。

现代有轨电车系统介于常规公交和城市快速轨道交通之间，是一种中低运量的城市公共交通系统(图 1-4)。

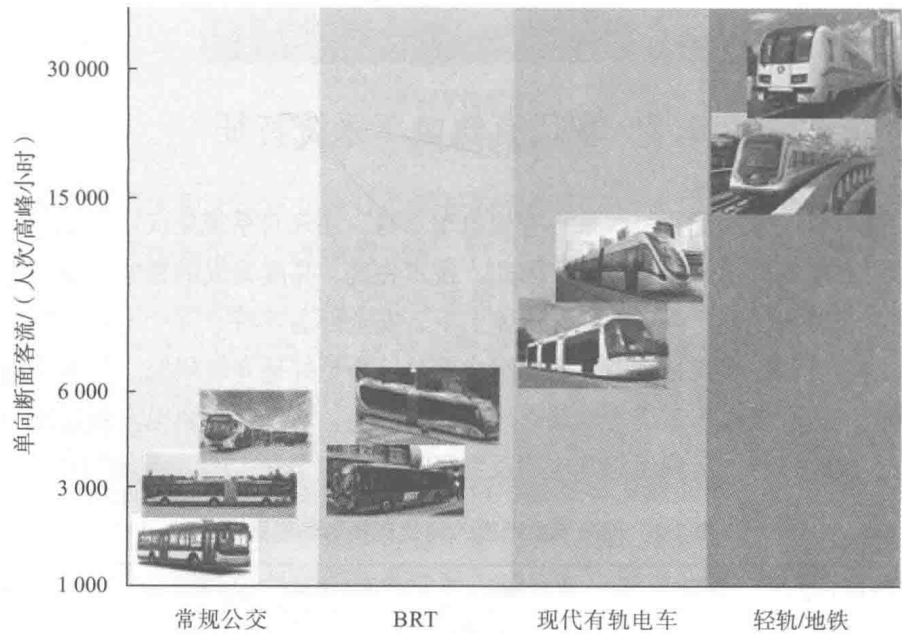


图 1-4 各种轨道交通制式的运量等级分布

2. 功能定位

有轨电车系统在不同的城市、不同的区域和不同的交通走廊发挥不同的交通功能，根据国内外的适用经验，主要可以分为以下几类：

- ①承担大运量轨道交通系统的补充、加密和接驳功能；
- ②承担远期城市快速轨道交通规划线路的客流培育；
- ③承担中小城市、规划新区内部公共交通系统的主体或骨干线；
- ④承担主城区与周边新区、城市组团间的联络线；
- ⑤承担城市特殊交通功能，如观光、摆渡等。

1.2.2 线路设计

1. 路权

现代有轨电车的路权形式根据不同的需要和条件可以多样化。对于同一条线路的不同地点，路权形式也可以发生变化。

参照美国交通运输研究委员会(Transportation Research Board, TRB)对北美轻轨(Light Rail Transit, LRT)路权的分类，可以将有轨电车路权分为三个级别：完全独立路权、半独立路权和混合路权(表 1-2)。但实际的情况是，一条有轨电车线路可被划分为多个路权形式不同的区间。

表 1-2 北美轻轨路权形式分类

类型	分类编号	路权及隔离方式
完全独立路权	Type A	全隔离路权
	Type B-1	隔离的路权
半独立路权	Type B-2	混合路权(有 6 英寸高的路缘石或栅栏保护)
	Type B-3	混合路权(有 6 英寸高的路缘石保护)
	Type B-4	混合路权(可越过的路缘石、标线)
	Type B-5	轻轨与道路平行，与人行道相邻
混合路权	Type C-1	混合交通
	Type C-2	公交专用道，与公共汽车混合路权
	Type C-3	行人专用道，与行人混合路权

完全独立路权，不允许有平面交叉口，在法规上不允许任何其他车辆或行人进入；在形式上，可以是隧道、高架桥或者在地面上隔离出的通道。

半独立路权，沿其通道拥有与其他交通方式的物理隔离措施，如路缘石、栅栏等，但与其他交通方式有平面交叉，包括常规的道路交叉口。

混合路权，指各种交通方式混行的街面，公共交通工具可以拥有保留的车道（不进行物理隔离），或是在普通车道上运营。

有轨电车三种路权具有各自的特点，适用范围也不尽相同，如表 1-3 所示。三种路权形式最显著的不同在于对车辆平均运营速度和乘客出行时间的影响。完全独立路权的使用对系统成本会产生较大影响，除特殊情况外，有轨电车一般不采用高架和地下方式。有轨电车线路一般以半独立路权为主，为保证行车安全，在道路平面交叉口处应采取必要的信号优先和限速措施。混合路权极有可能会导导致混合车道上的严重拥堵或干扰有轨电车的运行，仅适用于市中心或社会经济活动密集的区域。

表 1-3 有轨电车路权的使用范围

路权分类	应用条件	适用范围
完全独立路权	与道路立体交叉；一般不应有其他交通方式与线路并行	仅在特殊情况下于特殊路段使用，所占路段比例很低
半独立路权	路段有较为严格的隔离措施；道路交叉口信号优先措施	大多数城市干路
混合路权	线路上的其他交通方式流量较小；沿线有公共汽车运营，且车站能力富裕	城市次干道及支路；商业步行街、休闲区及公交专用车道

2. 沿线道路横断面

现代有轨电车线路的横断面布置形式通常有三种：中央布置、两侧布置和单侧布置(图 1-5)。

中央式布置形式：有轨电车线路敷设于道路中央，其他交通模式的通道布置在有轨电车通道的两侧。这种方式需考虑行人过街的问题。其中，中央岛式站台要求有轨电车车辆从左侧开启车门，这就有可能导致混合路权下右侧开门的常规公交车辆无法利用有轨电车车道和站台，降低道路通行能力。

两侧式布置形式：有轨电车的双线分别设置在道路两侧外侧车道，站台设置在人行道上。非机动车道设置在有轨电车通道的外侧。这种布置方式的好处在于常规公交车辆可以与有轨电车共用车道。

单侧式布置形式：有轨电车双线布置在道路一侧的外侧车道上，站台设置在人行道和非机动车道的分隔带上，非机动车道在双线外侧。

通过分析国外轻轨经验和我国交通环境可知，有轨电车车道布设于道路中央最安全，其次为单侧式布置，两侧式布置最劣。因此，在道路条件允许的情况下，有轨电车道路断面布设形式应优先采用中央式布置，尤其是针对承担大运量

轨道交通系统的补充线路和承担城市客运系统的主体或骨干的线路。

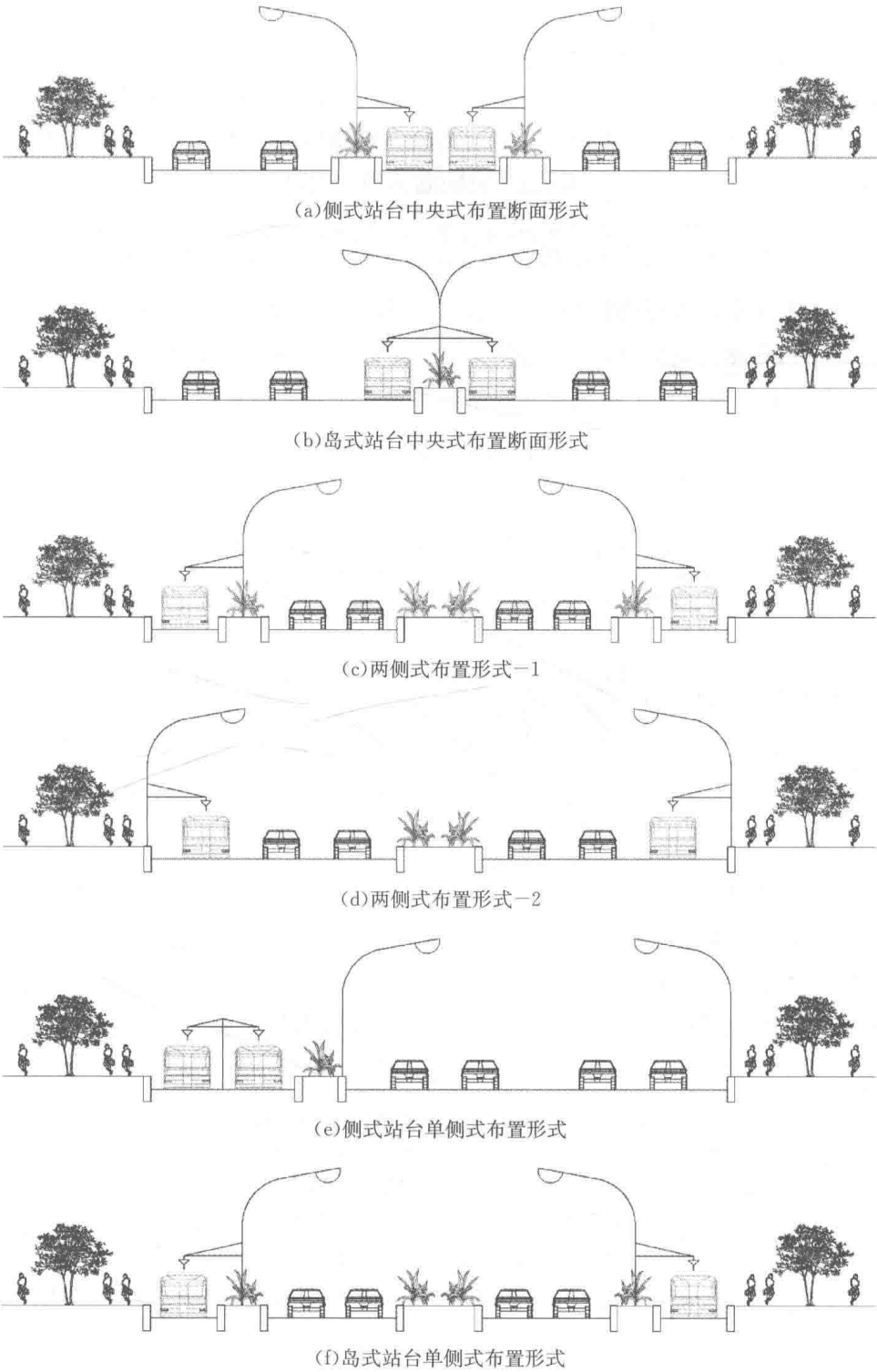


图 1-5 有轨电车道路横断面布置图

3. 车站站间距

有轨电车系统的站间距会影响系统的速度和运力，应根据乘客步行可达性、搭乘意愿、系统特性、运营绩效综合确定。一般而言，有轨电车系统站间距为 300~800m，具体站间距根据车站功能、城市规模、城市区位、土地开发密度有所不同。特殊功能的有轨电车系统的站间距可突破此范围，但以不超过 2000m 为佳。

4. 车站形式

有轨电车车站沿道路横向布设可分为三种：岛式站台车站、侧式站台车站和混合式站台车站。岛式站台设置在上下行线路之间，侧式站台设置在上下行线路两侧(表 1-4)，混合式车站包含岛式站台和侧式站台，通常用于换乘站。

表 1-4 岛式站台和侧式站台的比较

车站形式	站台宽度
岛式站台	在道路用地受限时，岛式站台可同时供上下行乘客使用，因此可减少设置站台对道路空间的占用，岛式站台最小宽度不宜小于 4m；在道路宽度足够的前提下，岛式站台宽度可以设置为 5m 以上，为有轨电车乘客提供宽敞的候车空间，还可以布置如报亭、座椅等乘客服务设施
侧式站台	在道路用地受限时，侧式站台的宽度将受到限制，乘客在站台的行走容易受到阻碍，导致有轨电车的服务水平下降

车站形式	站台设施
岛式站台	站台设施如连接车站的人行天桥、地道楼梯、电梯以及票务管理、智能交通信息和管理系统只需设置一套
侧式站台	需设置两套相应的站台设施

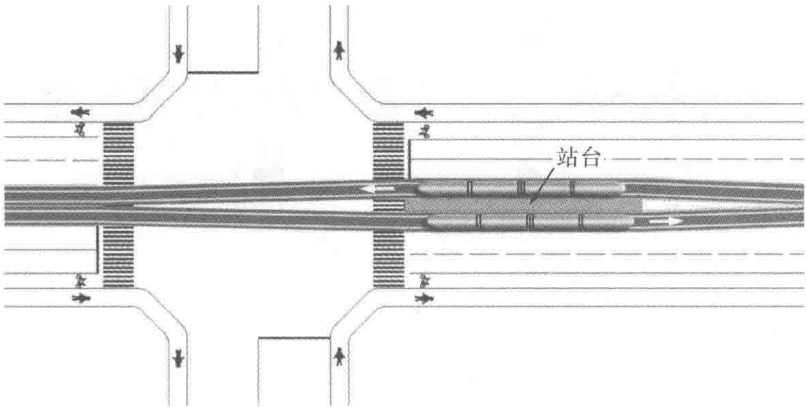
从沿道路纵向位置关系看，有轨电车车站可分为路端式车站和路段式车站(表 1-5)。根据车站 in 交叉路口的设置方式，路端式车站分为进口设站和出口设站两种形式。考虑乘客出行习惯、换乘需求、公交吸引等因素，有轨电车一般采用路端式车站布置。

表 1-5 路端设站和路段设站的比较

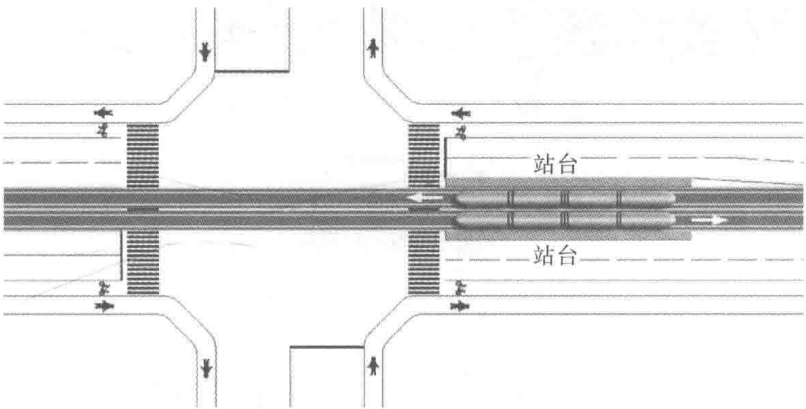
车站位置	信号优先控制措施
路端设站	交叉口进口：由于有轨电车停站时间无法控制，难以实施优先控制 交叉口出口：在交叉口进口处设置感应装置，以实现优先控制
路段设站	避免信号灯对有轨电车上下客的影响；需要单独设置一组行人过街信号或人行天桥(地道)

中央布置形式的有轨电车路端式车站布置主要如图 1-6 所示。车站形式的选

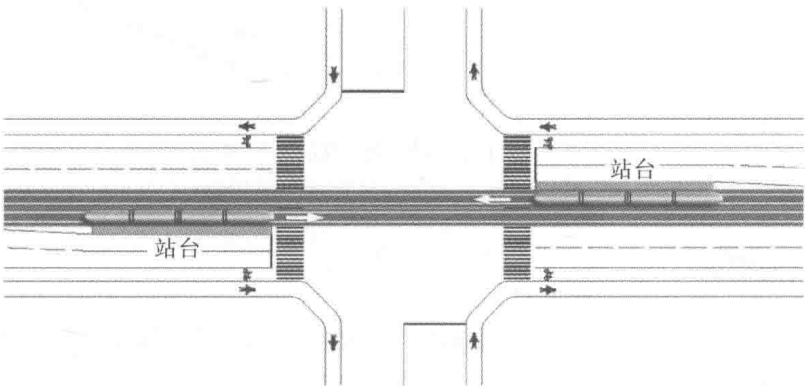
择主要考虑车辆的通过效率，不同的路面宽度、车站至交叉口距离以及发车间隔对车辆通过效率均会产生影响。



(a)中央岛式车站



(b)中央侧式车站



(c)交叉口进口设站