**有轨电车线路运行安全防护永久及临时速度曲线设计软件实现**

# 摘 要

有轨电车是采用电力驱动并在轨道上行驶的轻型轨道交通车辆。有轨电车是一种公共交通工具，亦称[路面电车](http://baike.baidu.com/view/14738309.htm" \t "_blank)或简称电车，属轻铁的一种﹝以电力推动的列车，亦称为电车﹞。但通常全在街道上行走，列车只有单节，最多亦不过三节。另外，某些在市区的轨道上运行的缆车亦可算作路面电车的一种。伴随着经济的快速发展和城市化、机动化的进程，国内大多数城市的空间布局由单中心向多中心转变。在国内大中城市中，新城区、开发区的建设成为未来城市的发展趋势，这有利于现代有轨电车在城市中的使用。

在交通领域，安全问题一直是最为重要的问题，所有的技术研究与革新，都必须基于安全这个大前提，有轨电车也不例外。随着现代有轨电车的发展，安全防护问题也得到很大重视，本文着重在分析有轨电车安全防护问题，在建立有轨电车速度模型的基础上，设计出有轨电车速度计算软件，实现解析线路图纸功能与安全速度计算功能。本设计将根据有轨电车的车辆特性和线路特性，计算有轨电车安全的速度曲线，支持外部线路参数的输入或文件导入、临时限速的设置，用计算机软件实现速度曲线自动生成。设计成果将以软件形式，部署在车载系统上，提供实时最大车速的计算。

**关键词**： 有轨电车，安全防护，速度，软件设计

**Software design for the permanent and temporary speed of safety protection for tram**

**ABSTRACT**

Tram car is a light rail transit vehicle that uses electric power to drive and travel on its tracks. Tram is a kind of public traffic tool, also known as streetcars or referred to the tram, which belongs to the light rail of a (powered by electricity train, also known as the TRAM). But usually all in the streets to walk, the train is only a single section, but also the most three. In addition, some of the cable car running on the urban rail can also be counted as a road tram. With the rapid development of economy and the process of urbanization and mobility, the spatial distribution of most cities in China is changing from single center to multi center. In the large and medium cities in China, the construction of the new city and the development zone has become the future development trend of the city, which is conducive to the use of modern tram in the city.

In the field of transport, security issues have been the most important issue, all of the technical research and innovation, must be based on the premise of security, there is no exception to the tram. With the modern development of streetcar, security has been paid much attention to, this paper in the analysis have tram security problems, in establishing a streetcar velocity model based on design calculation software of the trolley speed to achieve analytical line drawing functions and safe speed calculation function. This design will tram vehicle characteristics and transmission characteristics according to the calculated velocity curves of the trolley safety, support external circuit parameters input or file to import, temporary speed limit settings, using computer software to achieve automatic speed curve generation. The design results will be in the form of software, deployed in the vehicle system, providing the calculation of the maximum speed in real time.

**Keywords:** Tram, Safety protection, Speed, Software Design

目 录

[摘 要 1](#_Toc452414207)

[1绪论 5](#_Toc452414208)

[1.1 研究背景 5](#_Toc452414209)

[1.1.1有轨电车介绍 5](#_Toc452414210)

[1.1.2有轨电车发展历程（背景） 5](#_Toc452414211)

[1.1.3上海浦东张江有轨电车 7](#_Toc452414212)

[1.2 研究目的 7](#_Toc452414213)

[1.3 研究内容 7](#_Toc452414214)

[1.3.1 查阅有轨电车相关论文 7](#_Toc452414215)

[1.3.2 研究有轨电车最大安全速度影响因素，建立速度模型 8](#_Toc452414216)

[1.3.3 学习DXF相关知识，并掌握Python解析DXF技术 8](#_Toc452414217)

[1.3.4 建立模型，开发安全速度曲线计算软件，输出可视化结果 8](#_Toc452414218)

[1.4 论文结构 8](#_Toc452414219)

[2 有轨电车技术条件 9](#_Toc452414220)

[2.1 有轨列车车辆特征 9](#_Toc452414221)

[2.2 有轨列车线路特性 10](#_Toc452414222)

[2.2.1 最小曲线半径 10](#_Toc452414223)

[2.2.2 线路纵断面条件 13](#_Toc452414224)

[2.3 有轨列车路权形式 15](#_Toc452414225)

[2.3.1 完全独立路权 15](#_Toc452414226)

[2.3.2 半独立路权 15](#_Toc452414227)

[2.3.3 混行路权 16](#_Toc452414228)

[2.4 路口优先控制系统 17](#_Toc452414229)

[3 最大安全速度模型 20](#_Toc452414230)

[3.1 停车视距对最大安全车速的影响 20](#_Toc452414231)

[3.1.1 车速对停车视距的影响 20](#_Toc452414232)

[3.1.2 紧急制动 21](#_Toc452414233)

[3.1.3 进入站台 21](#_Toc452414234)

[3.2 转弯半径对最大安全车速的影响 22](#_Toc452414235)

[3.3 竖曲线半径对最大安全车速的影响 23](#_Toc452414236)

[3.4 总结 24](#_Toc452414237)

[4 有轨电车线路图解析 25](#_Toc452414238)

[4.1 Python语言介绍 25](#_Toc452414239)

[4.2 Highcharts介绍 25](#_Toc452414240)

[4.3 dxf文件介绍 25](#_Toc452414241)

[4.3.1获取所有线段数据 26](#_Toc452414242)

[4.3.2转化为点数据 26](#_Toc452414243)

[4.3.3计算参数 26](#_Toc452414244)

[4.3.4计算车速 26](#_Toc452414245)

[4.4 输出结果展示（见附录） 27](#_Toc452414246)

[5结论与展望 28](#_Toc452414247)

[参考文献 29](#_Toc452414248)

# 1绪论

1.1 研究背景

### 1.1.1有轨电车介绍

伴随着经济的快速发展和城市化、机动化的进程， 国内大多数城市的空间布局由单中心向多中心转变。在国内大中城市中，新城区、开发区的建设成为未来城市的发展趋势， 这有利于现代有轨电车在城市中的使用。

(1)在优先发展公共交通的背景下，现代有轨电车的灵活多变特点能很好地适应连接新旧城之间以及新区内部的优质、高效的公共交通系统服务需求。

(2)城市交通堵塞和环境污染日益严重， 考虑到城市交通投资的约束， 现代有轨电车能与其它轨道交通相互协调，共同承担城市的交通需求，以提高公共交通的服务竞争力，提高城市生活质量。

(3)在道路资源充分、施工条件良好的新城区，应尽量实现现代有轨电车路权专用， 以提高运行速度和断面运能，实现快速、大容量的运输目标。

有轨电车是采用电力驱动并在轨道上行驶的轻型轨道交通车辆。有轨电车是一种公共交通工具，亦称[路面电车](http://baike.baidu.com/view/14738309.htm" \t "_blank)或简称电车，属轻铁的一种﹝以电力推动的列车，亦称为电车﹞。但通常全在街道上行走，列车只有单节，最多亦不过三节。另外，某些在市区的轨道上运行的缆车亦可算作路面电车的一种。

现代有轨电车作为一种交通方式，特别适用于环境敏感、具有中低客运强度的城市发展轴。对于上海、北京等特大城市，现代有轨电车可以与城市大容量轨道交通(地铁、轻轨)、快速公共交通(BRT)等共同构成城市快速公共交通系统，既丰富、增强城市综合交通客运体系，又提高公共交通对国内外旅客的吸引力。

### 1.1.2有轨电车发展历程（背景）

自年第一辆城市有轨电车在德国诞生后，世界各地开始发展城市有轨电车。在世纪初，这种以轨道作为车辆导向的大运量客运交通工具得到了快速发展。在世纪年代，仅美国的有轨电车总长度就达公里。然而，随着西方国家私人汽车的急剧增长，大量汽车涌上街头，旧式有轨电车行驶与其他车辆混行等问题日益突出。世纪年代开始，世界各国的大城市纷纷拆除了有轨电车线路。到世纪年代，以汽车为主导的交通模式所带来的问题日渐凸显，能源危机、环境污染、土地紧缺、交通拥堵等问题，迫使欧美发达国家重新将大容量的轨道交通作为发展城市公共交通的重点。由于中小城市无法负担地铁的巨额投资，各国环境和交通部门便着手进行了有轨电车的运营、建设、研究和发展。

由于有轨电车的独特优势，从上世纪九十年代开始，世界的大城市又开始了有轨电车的建设。1992年，法国相继建成了多条有轨电车而且大大缓解了相应区域的交通拥挤。由此各国又开始了对有轨电车的建设。

作为成熟的轨道交通方式，有轨电车凭借其相对经济、节能和环保特点成为了很多城市公共交通的主力运载工具。一些城市在废弃有轨电车几十年后，又开始重新研究建设这个系统。在保留和发展有轨电车的过程中，工程技术人员坚持不懈地攻克了制约有轨电车发展的相关技术，并对早期的有轨电车系统加以改造，使得有轨电车可以持续发展，于是具有低噪音、低振动、省能源、能高速等高性能的现代有轨电车在欧洲中小城市应运而生。

国内第一条有轨电车于年在上海建成通车，它标志着我国城市公共交通的一个里程碑。年以后在大连、北京、天津、沈阳、哈尔滨、长春等城市都相继建成了有轨电车。到了年代，我国有轨电车有了很大发展，成为当时城市公共交通的主要交通工具。随着我国汽车工业的迅速发展，机动性更好的公交汽车越来越普遍，旧式有轨电车逐渐被无轨公共车辆所替代。年代末，我国各大城市的有轨电车线路基本拆完，仅剩下大连、长春个别线路保留至今。大连、鞍山、长春所使用的有轨电车均为大连电车工厂生产制造的。值得一提的是，型有轨电车是我国自行研制的第一种有轨电车。1983年定型生产的DL621型六轴有轨电车是国内首次采用铰接车体技术的城市轨道车辆。

最近，上海市城市规划设计研究院编制的《恢复使用、发展有轨电车的可行性研究》提出，在上海市内可以布置总长254 km、14 条有轨电车线路，这些线路的布置设想如下。

T1：从北外滩出发，走新建路隧道沿浦东南路，再穿越耀华路隧道回到浦西，最终到达上海南站。

T2：从北外滩出发，沿新建路、海伦路、东宝兴路等到达外环线。

T3：从上海西站出发，沿交通路、延长西路、经花园路、四川北路、四川中路、四川南路，再绕行中华路、人民路。

T4：从老城厢出发，沿半淞园路、龙华路向西延伸至宛平南路，再向南穿过龙华机场，经龙水路，沿上中路至虹梅路折南到达外环路。

T5：从外滩出发，沿延安东路、延安中路、延安西路、转入番愚路、吴中路至外环线。

T6：从外高桥保税区出发，沿杨高北路南下，经金桥开发区、张江高科园区，最终到达黄浦江边。

T7：从外高桥保税区出发，沿五洲大道向西，过嫩江路隧道，沿翔殷路、水电路、汶水路到达真大路。

T8：从高桥镇出发，沿东塘路、浦东大道，经张杨路、罗山路直到黄浦江边。

T9：浦东南部地区，从外环线出发，沿锦锈路到沿浦路。

T10 ：从军工路出发，到杨树浦路，折向西经提蓝桥，到达高阳路、东大名路。

T11：从长寿路出发，直到外环线。

T12 ：从古浪路出发，直到外环线。

T13 ：从外环线长清路出发，到达铜仁路，与轨道交通M6 线交汇。

T14 ：从外环线刘场路出发，到达上海火车站北广场。

### 1.1.3上海浦东张江有轨电车

上海浦东张江有轨电车项目一期工程已于年正式投运，运营控制系统同步开通使用。经过运营，系统各向指标正常，运行平稳，达到设计要求，满足了运营需要。与地铁、轻轨等传统的轨道交通不同，张江有轨电车工程采用橡胶轮胎、导向轨结构，车辆行进时主要依据地面交通信号红绿灯，车辆运行速度由司机自主掌控。道岔信号主要用于控制导向轨道贫，引导车辆前进方向。

正线有3组道岔，共付，分别在起点站折返渡线、终点站折返渡线和进出车辆段的岔线上。方案釆用了车载无线道岔控制技术，在对道岔控制时通过微波识别获取道岔控制权，确保只有唯一机车能够控制当前道贫，从而提高了行车安全。

以为主要定位方式，在进入盲区时，能自动切换辅助定位模块；以GPRS为通信平台，将实时采集到的数据车辆定位、车辆营运、车辆违规、安全等传送到控制中心服务器，同时接收控制中心服务器传送过来各种消息和指令，实现双通信功能；支持语音和文字或方式智能报站，兼备服务用语、违规提示、语音提示、电子站牌等功能；接收和显示来自系统平台的单项调度和集群调度指令信息；如出现超速、滞站、非正常开关门、异常情况、路堵、事故、故障、纠纷等实现信息即时报警。项目釆用数字集群技术为其专用无线调度系统平台服务，使用兆数字集群政务共网的数字集群网络摩托罗拉系统服务，数字集群终端设备为电车调度和相关业务提供无线通信或数据传输等服务。由数字集群网、控制中心无线调度台含通话录音设备、车载台和手持台组成，具有调度呼叫、数据业务等功能。共配置安装在有轨电车车辆上的车载台套、放在调度控制中心的基地台和语音录音器各套，供工作人员使用的手持台套。

1.2 研究目的

在交通领域，安全问题一直是最为重要的问题，所有的技术研究与革新，都必须基于安全这个大前提，有轨电车也不例外。本设计将根据有轨电车的车辆特性和线路特性，计算有轨电车安全的速度曲线，支持外部线路参数的输入或文件导入、临时限速的设置，用计算机软件实现速度曲线自动生成。设计成果将以软件形式，部署在车载系统上，提供实时最大车速的计算。设计基本思路拟用Python完成全部开发，核心使用Python的dxfwrite库，前期将学习并测试其CAD解析能力，需要实现CAD图的坐标解析，数值标注等功能。后期主要建立数学模型，计算速度曲线，并根据线路实际参数，设计出模拟数据，并代入进行测试。

1.3 研究内容

### 1.3.1 查阅有轨电车相关论文

通过查阅论文资料，了解有轨电车车辆特性与线路特性，重点研究与安全速度相关的特性，为之后模型的建立做准备

### 1.3.2 研究有轨电车最大安全速度影响因素，建立速度模型

速度曲线的模型，目的在于保障有轨列车的安全舒适和提高运输效率、行车密度。关键在于了解模型的输入参数和速度计算原理，以便之后能够更好用软件实现模型计算。

### 1.3.3 学习DXF相关知识，并掌握Python解析DXF技术

有轨列车的线路图主要还是用CAD绘制，CAD的主要格式有DWG和DXF，而DWG格式加密级别较高，不适合用其他程序解析，这里选择统一使用DXF格式，Python中的dxfgrabber库较为完善，然而为了实现具体操作，有可能将会对dxfgrabber的源码进行删改。

### 1.3.4 建立模型，开发安全速度曲线计算软件，输出可视化结果

用Python实现数学模型，并设计大量模拟数据进行测试，保证在各种条件下均能正常计算。同时将有轨电车的最大行驶速度导出成可以直观观察的html文件。

1.4 论文结构

论文的第1章为绪论部分：主要介绍了论文研究的现实需求背景、理论研究背景及实际应用背景，展示了项目研究的技术路线以及论文结构。

第2章为文献综述部分：主要分析了现代有轨电车的一些技术条件，主要分析了列车特性与线路特性，还有一些有轨电车运行时的技术，如路权管理，交叉口信号优先等，根据文献资料，深入分析影响最大安全速度的各类因素。

第3章根据第2章获得的各类技术条件，针对最大安全速度不同影响因素，建立起最大安全速度模型。

第4章主要讲解了针对线路图纸解析的工具与思路，线路上的数据最终会被解析成间距较小的点坐标数据，为模型计算提供数据。

# 2 有轨电车技术条件

要计算现代有轨电车的安全速度曲线，必须先对有轨电车的车辆特性，线路特性以及相关的技术条件进行分析，有轨电车的特殊车辆特性，如车身长度较长，制动能力相对较小，乘客乘坐舒适性等，导致了其特殊的行驶方式，同时线路的不同也会对有轨电车的各类参数有很大影响，再者有轨电车与传统道路交通共同行驶在路面上，空间时间分配都会有所不同，如何能在对原有交通影响尽可能小的情况下，给有轨电车提供更优先的空间时间分配，提高有轨电车的通行效率，需要更多复杂的技术来实现。

2.1 有轨列车车辆特征

新型有轨电车系统车辆采用模块化设计理念，尤其是运用在100%低地板车辆上，受到普遍欢迎。模块化设计理念是将车辆划分为若干各自独立而又相互联系的模块。模块可以是车辆的一个组成部分、也可以是车辆的一个或几个部件或设备的组合，例如带驾驶室和不带驾驶室端部模块、中间模块、铰接模块、转向架模块等。每个模块可以独立生产和组装，因此，模块化设计使得车辆不再采用贯通式纵梁，结构简化，生产制造也简单方便；更容易保证质量、缩短工时；互换性增强、有利于维修保养；一旦出现故障，只处理或更换该模块即可，不需进行整车作业，可大大节约工时、人力和费用。车辆被划分为若干模块后，利用增减中间模块和铰接模块，可以组成不同编组的列车；增加列车在道路上运营的灵活性，减少车辆在曲线上的内外偏移量，也不易与相邻列车发生碰触；可以满足不同城市、不同地区、不同线路、不同建设阶段的客流需求，可单向或双向运行。

根据运行系统的不同，现代有轨电车主要分为钢轮钢轨和胶轮+导轨两种制式，例如阿尔斯通公司的Citadis 系列属于前者，而劳尔公司的Translohr系列为后者。钢轮钢轨式现代有轨电车在地面的两条U型[6]钢轨既承担钢轮的重量，又对钢轮起导向限制作用。一般情况下钢轨顶面与城市道路路面平齐。胶轮+导轨式现代有轨电车轨道由类似道路的行车道和一条引导车辆运行的特殊导轨组成[3]，车辆走行系统与汽车一样为橡胶轮胎，导向轮在导轨的限制下引导车辆运行。

1钢轮钢轨式有轨电车车内空间、载客量比胶轮+导轨式有轨电车大；

2钢轮钢轨式有轨电车受转向架、钢轮－钢轨摩擦性能限制，在爬坡、转弯、加速、减速方面的性能不如胶轮+导轨式有轨电车；

3两种制式的有轨电车车内、外噪声比较接近，差距在检测误差内(±2 dB)。另外，目前钢轮钢轨式有轨电车技术比较成熟，单列列车成本比胶轮+导轨式有轨电车低。

两种制式有轨电车主要指标对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 主要指标 | | 钢轮钢轨式有轨电车  (以Citadis系列为例) | 胶轮+导轨式有轨电车  (以Translohr系列为例) |
| 尺寸 | 车辆长度 | 22~50 | 25~46 |
| 车辆宽度 | 2.3~2.65 | 2.2 |
| 运能 | 32 m列车，4人/m2 | 200~220 | 160~170 |
| 技术性能 | 最大速度/(km·h-1) | 70 | 70 |
| 最大坡度/% | 8 | 13 |
| 最小转弯半径/m | 20 | 11 |
| 供电电压/V | 750 | 750 |
| 最大加速度/(m·s-2) | 1.1 | 1.3 |
| 紧急减速度/(m·s-2) | 3 | 5 |
| 供电方式选择/种 | 3 | 2 |

从两种制式的现代有轨电车在市场上的表现来看，钢轮钢轨式现代有轨电车因其推出更早、性能更稳定等原因，目前占据了主要市场，但两种制式的现代有轨电车均发展较快。

2.2 有轨列车线路特性

### 2.2.1 最小曲线半径

现代有轨电车最小曲线半径的选取主要受车辆构造允许的最小转弯半径、行车速度以及道路条件影响。

1 车辆构造允许的最小曲线半径

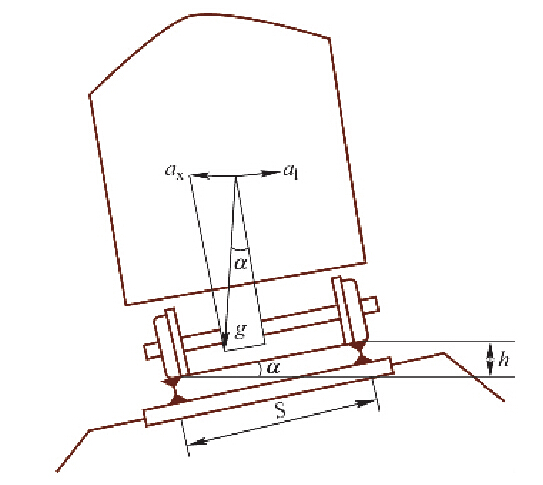
现代有轨电车主流产品都采取了模块化设计，集成度较高。目前世界上广泛使用的现代有轨电车主要有加拿大庞巴迪(Bombardier)公司的FLEXITY系列、法国阿尔斯通(Alstom)公司的Citadis系列以及德国西门子(Siemens)公司的Avenio系列，其性能参数如表:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 有轨电车型号 | 车辆长度/m | 车辆宽度/m | 最高车速/(km/h) | 最小转弯半径/m | 最大纵坡/‰ |
| FLEXITY | 21~45 | 2.2~2.65 | 70 | 15~30 | 50~80 |
| Citadis | 22~50 | 2.3~2.65 | 70 | 20 | 80 |
| Avenio | 18~72 | 2.3~2.65 | 80 | 18 | 90 |

从表中可以看到，目前主流的现代有轨电车车辆构造允许的最小曲线半径在15~30m。

2 行车速度允许的最小曲线半径

2.1计算公式。车辆在通过曲线时将产生一定的离心加速度，为了维持车辆的平衡，需要给车辆提供相应的向心加速度。在轨道交通里一般设置外轨超高，使得车辆的重力加速度产生一个水平分量来平衡车辆的离心加速度，如图所示。

****

车辆离心和向心加速度

有轨列车转弯时，加速度与超高关系

根据受力平衡分析可以推导出：

式中为最小曲线半径，m；为最大超高，mm；为允许欠超高，mm；v为行车速度，km/h。

可以看出，行车速度v一定时，最小曲线半径由最大超高和允许欠超高的取值决定。

2.2 参数取值。

当超高值过大时，列车在曲线上低速行驶或者临时停车就会有向内倾覆的危险。因此，为了保证行车安全，需要设定最大超高。根据我国铁道科学院的试验研究，当列车停在实设超高=200m的曲线上时，部分旅客感到站立不稳，行走困难，并有头晕感觉。因此，建议最大超高不宜超180mm。在实际运营中，我国铁路和地铁根据长期运营实践，分别采用了150 mm和120 mm的最大超高。现代有轨电车由于运行速度较低，且无实际运营经验，建议最大超高与地铁保持一致，即hmax=120mm。

当列车在以高于设计速度设置超高的曲线上行驶时，将会产生未被平衡的离心加速度，即欠超高。欠超高过大时，对列车通过曲线的安全性、舒适性和轨道横向稳定性都会造成影响，故应对欠超高加以限制。根据国内铁路相关试验结果，未被平衡的离心加速度、欠超高与乘客舒适度的关系。

乘客对不同或的反应

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | 乘客反应 |
| 0.26 | 40 | 无感觉 |
| 0.39 | 60 | 基本无感觉 |
| 0.52 | 80 | 稍有感觉 |
| 0.59 | 90 | 有些感觉，能适应 |
| 0.72 | 110 | 较大感觉，尚能克服 |
| 0.85 | 130 | 甚大感觉，需用力平衡 |
| 1 | 153 | 更甚感觉，站不稳，无法行走 |

在实际运营中，根据长期运营实践，我国铁路采用的欠超高值一般为70mm，困难时为90mm，既有线改造110mm，地铁采用的欠超高值为60mm。

由公式可以看出，在速度:一定的情况下，允许的未被平衡的离心加速度越大，可使用的曲线半径就越小，线路条件越灵活，但是乘客舒适度就越低。现代有轨电车由于大部分为地而线路，且采用了低地板的新型车辆，舒适程度比较高，相比地铁可以承受更高的未被平衡的离心加速度。因此，建议适当提高现代有轨电车允许的未被平衡的离心加速度值，一般取，困难条件下取。

将以上参数代入公式中计算可得：一般情况下，困难条件下:

有轨列车设计时速时，一般情况下 = 300m，困难情况下=250m；

有轨列车设计时速时，一般情况下 = 150m，困难情况下=130m。

3 道路条件允许的最小曲线半径

城市道路的曲线半径本身也对现代有轨电车有限制。

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计速度（km/h） | 100 | 80 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| 不设超高最小半径/m | 1600 | 1000 | 600 | 400 | 300 | 150 | 70 |
| 设超高一般最小半径/m | 650 | 400 | 300 | 200 | 150 | 85 | 40 |
| 设超高极限最小半径/m | 400 | 250 | 150 | 100 | 70 | 40 | 20 |

可以看出，城市道路的最小曲线半径是可以满足同等速度条件下的现代有轨电车曲线半径要求的。

此外，在通过十字路口时，过大的曲线半径会严重影响路口的道路交通，并造成大量的拆迁。我国一般的十字形交叉口路缘石的最小半径为：主干道20~25m;次干道10~15 m;支路6~9m。目前主流的现代有轨电车车辆构造允许的最小曲线半径为15~30m。根据不同的道路等级和路而宽度，可采取合适的横断而布置形式和路口信号控制模式，这种最小转弯半径可适用于大部分主干道和次干道。因此，在通过十字路口时，最小曲线半径宜采用车辆构造允许的最小曲线半径，以减少对路口交通的影响、路口改造工程量及拆迁量。

### 2.2.2 线路纵断面条件

1 最大坡度

现代有轨电车线路的最大纵坡主要受车辆爬坡性能和城市道路条件影响。

1)车辆爬坡性能。从表3可以看出目前现代有轨电车主流产品的最大爬坡基本上在50‰~80‰之间。

2)城市道路条件。我国的城市道路条件根据CJJ37-2012撇市道路工程设计规范》的要求，城市道路机动车车行道最大纵坡度推荐值与限制值如表所示。

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 行车速度/(km/h) | 100 | 80 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| 最大纵坡一般值/% | 3 | 4 | 5 | 5.5 | 6 | 7 | 8 |
| 最大纵坡极限值/% | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 |

此外，积雪或冰冻地区的快速路最大纵坡不应大于3.5%，其他等级道路最大纵坡不应大于6.0%。

3)结论。有轨电车一般以地而线形式敷设于城市道路上，线路最大纵坡由其所采用的车辆爬坡性能和敷设的城市道路纵坡决定。从以上分析可以看出，大部分现代有轨电车的车辆最大纵坡在50‰~80‰之间，而我国城市道路的最大纵坡推荐值均在80‰以下：

因此，在己建成的城市道路上修建现代有轨电车线路时，可根据城市道路的实际情况选择车辆。按照城市道路的既有坡度敷设线路即可满足要求，最大坡度不超过80‰；在积雪或冰冻地区的最大纵坡不超过60‰；在准备新建或者规划的城市道路上修建现代有轨电车时，考虑到大部分现代有轨电车的车辆最大纵坡在50‰~ 80‰，为了能适应大多数车辆的性能，建议最大坡度不超过50‰。

综上所述，建议现代有轨电车线路最大坡度为50‰，困难条件下不超过60‰，特殊困难条件下，例如既有道路改造代价巨大且车辆性能允许的情况下，可采用不超过80‰的坡度，但需考虑与本城市其他线路车辆类型相配套问题。

2 竖曲线半径

参照GB 50157-2003《地铁设计规范》，车辆通过变坡点时产生的竖向加速度、竖曲线半径与行车速度的关系同为:

从式(5)可以看出，在速度一定的情况下，竖向加速度越大，可采用的竖曲线半径就越小，线路条件越灵活，但是乘客的舒适度就越低。

对于竖向加速度的取值，GB 50157-2003《地铁设计规范》中规定：在正线取值范围为0. 1 ~ 0. 154，困难条件下为0. 17 ~ 0. 26。而对于现代有轨电车目前国内尚无更多的经验值可借鉴，参照北京西郊线的建设经验，竖向加速度一般情况下取0.154，困难情况下取0. 24，经计算可得:当v=50时，R≥1 200 m}困难条件下R≥800 m;当v=70时，R≥2500 m}困难条件下R≥1 600m。

现代有轨电车的竖曲线设置还受城市道路条件限制，CJJ37-2012《城市道路工程设计规范》对城市道路最小竖曲线半径的规定如表所示

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计速度/() | | 100 | 80 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| 凸形竖曲线/m | 一般值 | 10000 | 4500 | 1800 | 1350 | 600 | 400 | 150 |
| 极限值 | 6500 | 3000 | 1200 | 900 | 400 | 250 | 100 |
| 凹形竖曲线/m | 一般值 | 4500 | 2700 | 1500 | 1050 | 700 | 400 | 150 |
| 极限值 | 3000 | 1800 | 1000 | 700 | 450 | 250 | 100 |
| 竖曲线长度/m | 一般值 | 210 | 180 | 120 | 100 | 90 | 60 | 50 |
| 极限值 | 85 | 20 | 50 | 40 | 35 | 25 | 20 |

由表可以看出，城市道路的最小竖曲线半径是可以满足同等速度条件下的现代有轨电车竖曲线半径要求的。

现代有轨电车在坡度发生变化处采用圆弧形竖曲线连接相邻坡段，最小竖曲线半可计算得出。一般情况下取0. 154 ，困难情况下取0.24。

3 最短坡段长度

列车通过变坡点时要产生附加力和附加加速度，从行车平稳考虑，宜设计较长的坡段，但是为了适应线路高程的变化，坡段长度也不能太长，否则容易发生较大的工程量，给施工带来困难。因此，应综合考虑两者的影响来确定最短坡段长度。

GB 50157-2003《地铁设计规范》指出，为了保证行车平稳，线路最小坡段长度应不小于远期列车长度，这样可以使一列车范围内只有一个变坡点，避免变坡点附加力的叠加和附加力的频繁变化对行车平稳造成的不利影响。

现代有轨电车车辆为模块化铰接车辆，单列车辆全长较短，一般不超过40 m，两列连挂长度一般也不超过70 m：因此，建议现代有轨电车一般情况下，线路最短坡段长度不小于远期列车长度，可以使整列车范围内只有一个变坡点，避免变坡点附加力的叠加和附加力的频繁变化，以保证行车的平稳。另外，坡段长度还应满足竖曲线既不相互重叠又能相隔一定间距的要求，这样有利于列车运行和线路维修养护。

4 车站间距

现代有轨电车的车站应根据所在位置周围的环境条件及城市规划部门对车站布局的要求，在主要客流集散点如商业网点、公交站点、风景园林区出入口等场所，因地制宜进行合理布置。

考虑到交叉口处的道路一般都有增加进口道、加宽交叉口等既有措施，因而无需拓宽或者少拓宽交叉口即可满足车站的道路用地，同时乘客利用交叉口行人过街设施即可到达、离开车站。因此，车站应尽可能布置于交叉路口附近，以减少道路拓宽，并充分利用交叉口行人过街设施，方便各方向乘客乘坐。

车站之间的距离选定应根据具体情况确定，站间距太短虽然能方便乘客，但是会降低运营速度，增加乘客旅行时耗，并增大能耗，同时，由于多设车站也增加了工程投资和运营成本。站间距若太长，会使乘客感到不便，降低对客流的吸引程度。现代有轨电车的运营速度介于地铁和公共汽车之间。根据GB 50157-2003《地铁设计规范》规定：地铁车站间距一般在城市中心区和居民稠密地区宜为1 km左右，而根据CJJ 15-87《城市公共交通站、场、厂设计规范》规定:城市公共电、汽车中途站平均站距宜在500-600 m。在采用混行路权时，现代有轨电车的运营更趋向于公交化，因此可在CJJ 15-87《城市公共交通站、场、厂设计规范》要求的基础上适当提高，车站间距宜在500 ~ 700 m；而采用专用路权时，现代有轨电车的运营速度相对较快，应适当增大站间距，宜在700~1000m。

2.3 有轨列车路权形式

现代有轨电车路权形式的范畴为除完全独立路权外的其他形式。但现实情况中，一条线路往往划分为多个路权形式不同的区间，其中有的区间路权等级较低，与多种其他交通方式混行，而有的区间路权等级较高，甚至达到独立路权的标准，因此完全独立路权虽不是现代有轨电车的。

有轨列车的主要的路权形式有三种：

### 2.3.1 完全独立路权

现代有轨电车完全独立的路权形式主要体现在路段的车道独享和交叉口的立交化。

这种路权形式有以下特点：

(1)在大多数情况下，为现代有轨电车专用路的形式，即没有与线路并列运行的其他交通方式。

(2)线路多为旧铁路线改造而成，而非在既有道路上建设。完全独立路权能够保证现代有轨电车在路段上的高速、安全地运行，但现代有轨电车线路中完全独立路权的路段很少，否则其系统制式已经接近轻轨的水平。

### 2.3.2 半独立路权

半独立路权的现代有轨电车线路最为普遍，在路段中有专用的路权供现代有轨电车运行，而在交叉口处与道路平交，与其他交通方式混行。

半独立路权有以下特点：

(1)线路多为城市道路改造而成，机动车与线路平行运行。

(2)路段中通常有物理隔离措施将有轨电车车道与其他交通方式隔离。隔离措施包括绿化带、栅栏、路缘石等。其中以路缘石为隔离措施应用的十分普遍，不仅因为其造价低廉，而且其他机动车(主要指消防、急救车辆)在紧急情况下可以越过隔离措施，运行于有轨电车车道，较为畅通的行驶。

(3)交叉口处一般采取一定的信号优先措施(见3．3节)以提高有轨电车的服务水平。

### 2.3.3 混行路权

混行路权是指在线路上除有有轨电车运行外，还有其他交通方式运行于有轨电车的车道之上，按照混行交通方式的不同分为以下几种情况：

1 与社会机动车混行：

现代有轨电车与机动车混行会大大降低现代有轨电车的旅行速度，而且存在一定的运行安全隐患。但在线路运营的初期，发车间隔较大，若为独立路权则线路利用率很低，此时可以首先采取混行路权的方式，并为今后改造为独立路权预留出条件。由于各种列车自动控制方式都无法解决混行车道中的机动车造成的突发事件，车辆在与机动车混行的路段中只能采取司机控制列车的方式。同时，这种混行路权需要有完善的针对现代有轨电车的交通法规为基础，限制其他机动车争抢路权、阻塞车道等不利于有轨电车运行的交通现象。

2 与行人混行：

在商业区的步行街内只允许现代有轨电车进入，电车与行人共享路权的形式。这种路权形式在慕尼黑、苏黎世、曼海姆、阿姆斯特丹等城市都有成功的经验。在商业区的步行街上运行现代有轨电车并没有与行人和其他机动车辆产生冲突，反而受到了乘客和行人的欢迎。现代有轨电车运行于步行街上得到了乘客的欢迎，因为它能够运行于商业区的中心地带，将乘客尽可能运送到目的地，而不需要在步行街的入口处就下车步行过去。车站通常离大型商场的出入口、广场和餐厅较近，一方面这里是人流集散的，另一方面乘客可以在周边的休闲场所候车。对于行人而言，现代有轨电车运行于商业步行街比其他公交方式更加合适，因为：

(a)与机动车相比，由于车辆精确的运行在既定轨道上，因此安全程度更高。

(b)噪音量相较低，并且由于使用了电力牵引，行驶过程中完全没有尾气排放(无轨电车也有这些优点)。

(c)美观的车辆成为步行街上的一条风景线。通常采用白色实线划出现代有轨电车运行时的车道，以警示行人，也可以利用不同的地面铺设材料将现代有轨电车行车道和其他商业区域区及行人空间区分开来。为了确保安全，现代有轨电车在欧洲商业区内行驶的速度通常被限定在25km／h(15mph)。普通商业区范围不超过1"--'2km，在平均行驶速度12km／h下，穿过商业区的时间为也不超过10min。

3 与公交车混行：

在部分区段，现代有轨电车可与公交车共用一条独立的路权，共享车站设施。这种路权形式的特点有：

(a)车站设施共享，方便有轨电车与公交线路间的换乘。

(b)专用路权的利用率大大提升。一种公交与现代有轨电车混行的方式是公交车运行于有轨电车车道，公交车有较大的行驶自由度。另一种方式为公交车同样运行于轨道之中，其轨道与现代有轨电车轨道重合，线路可以位于绿化带中。但在这种混行方式中，有轨电车与公交车很难实现超车，各线需严格执行时刻表才不致互相干扰；同时有轨电车的轨道与轨道槽间的联结强度需经特殊加强处理以应对公交车轮胎对该处长时间的反复荷载。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 路权方式 | 完全独立路权 | 半独立路权 | 混行路权 |
| 应用条件 | 1与道路立体交叉  2一般不应有其他交通与线路并行 | 1路段严格的隔离设施  2交通口信号优先 | 1线路上其他交通流较小 |
| 适用范围 | 1城市快速路  2郊区线路 | 大多数的城市道路 | 1城市次干路，支路  2商业密集的步行街 |

2.4 路口优先控制系统

除完全独立路权外，其余两种路权方式，有轨列车均与道路交通交叉，在交叉口对有轨列车实行优先通行明显有助于提高现代有轨电车的通行效率。

优先方式分完全优先与部分优先，大多数场景下，对有轨列车实行完全优先权会极大降低原本道路交通的通行效率，所以部分优先控制更适合多数有轨列车设计。

完全信号优先措施通过调整一个信号周期内不同相位出现的时间来达到使现代有轨电车通行的目的。常用的手段包括：

(a)早断：当检测器检测到现代有轨电车接近交叉口时，当前有轨电车信号若为红灯，则通过调整信号机时相，为有轨电车提前提供绿灯。

(b)迟启：对当前信号为绿灯且已经接近交叉口的现代有轨电车延长其绿灯时间，使之能够顺利通过交叉口。完全信号优先措施的目的是尽可能地为到达交叉口的现代有轨电车提供优先通行权，当有轨电车发车间隔较高时会造成信号相位的频繁调整，对同向车流和横向车流造成干扰，交叉口的秩序较为混乱。部分信号优先措施不是以现代有轨电车的优先通行为指导原则，而是需要具体的判定是否有优先通行的必要，之后显示给有轨电车驾驶员。判断是否应给予优先权的依据主要有以下几种：

(a)现代有轨电车严格按照时刻表运行，只有当到达交叉口的时刻晚于时刻表的要求时才给予信号优先。

(b)高峰时期给予信号优先，其他时段不给予信号优先，鼓励市民乘坐公交出行。

(c)权衡现代有轨电车延误于其他机动车的延误，确定是否给予信号优先。前两种判断依据较容易实现，因此使用范围十分广泛；后一种判断依据以交通系统的效率最大化为目标，需要基于良好的交叉口仿真、分析、处理手段，实现起来较为困难。与完全信号优先相比，以上判断依据和过程需要信号控制。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 适用性 | 无信号优先 | 部分信号优先 | 完全信号优先 |
| 对道路交通影响 | 无影响 | 有一定延误 | 较大延误 |
| 实现难度 | 无 | 复杂 | 较复杂 |
| 适用范围 | 主干道交叉口 | 大多数次干路交叉口 | 流量较小，车速较慢交叉口 |

**2.5 现代有轨电车运行速度**

速度体现了公共交通运输乘客的快捷性，现代有轨电车站间距比较密集，同时又经常遇到道路交叉口，以多快的速度到达目的地往往是乘客最为关心的问题，因此平均旅行速度直接影响到公交方式的适用性及受欢迎程度。

平均旅行速度的计算公式为：

其中：

S一线路长度

t一由起点至终点的总行程时间，其主要由如下几部分组成：

ts一车辆匀速行驶时间

ta一车辆加速行驶时闯

td一车辆减速行驶时间

tc一车辆在交叉口的延误时间(仅指停车时间)

tp一车辆在车站的停车时间

车辆的最高速度仅决定了匀速行驶时间，因此他不是制约系统旅行速度的最主要因素。对于有轨电车而言，车站的停车时问与交叉口的延误时间对速度的制约是决定性的，影响二者的主要因素包括平均站间距、客流量、车门数量、交叉口的优先方式等，同时这些因素还间接影响ts、ta和td。由于以上各影响因素的差异，世界范围内的现代有轨电车平均旅行速度范围在15km/h-30km/h之间。

为了更加深入地探讨各个影响因素对现代有轨电车旅行速度的影响，下文假设一条线路(线路具体条件见附录A)，通过不同影响因素的分类及分级，从而更详细地分析以上因素对有轨电车平均旅行速度的影响程度。对此线路的计算还需要作如下假设：

(a)完全信号优先措施可保证列车无延误地通过交叉口；部分信号优先的措施可以保证列车在一半数量的交叉口无延误地通过，另一半数量的交叉口同无优先措施的情况。

(b)若无优先措施，在任何交叉151都必须按照相同行驶方向的机动车信号通过交叉口。各交叉口的信号周期120s，有轨电车行驶方向的红灯信号80s，按照平均到达的概率，将在2/3数量的交叉口产生停车延误，且当有另有1/2数量的交叉口位于车站处，不产生对车辆加减速时间的影响。设平均延误时间为40s。

(c)现代有轨电车的正常加速度1.2m/s2，正常减速度为1.2m/s2，线路中最高运行速度为50km/h。

(d)由于车站位于交叉口处，线路转弯(小半径曲线)处的限速区J下好与进出站减、加速区重叠，不考虑曲线段的限速问题。

(e)车辆停车时间根据客流和车门数量有关，车门宽度1.2m可同时供2人上下车。乘客的平均登车时间为2s/人。车辆开门、关门、车辆起步确认和预留的安全时间总计20s。

根据假设计算出平均旅行速度：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 交叉口信号控制方式 | 单方向客流量（人次/h） | 总行程时间（s） | 平均旅行速度（km/h） |
| 完全优先 | 15000 | 1479 | 21.9 |
| 10000 | 1354 | 23.9 |
| 7500 | 1291.5 | 25.1 |
| 5000 | 1229 | 26.4 |
| 部分优先 | 15000 | 1845 | 17.6 |
| 10000 | 1720 | 18.8 |
| 7500 | 1657.5 | 19.5 |
| 5000 | 1595 | 20.3 |
| 无优先 | 15000 | 2119 | 15.3 |
| 10000 | 1994 | 16.2 |
| 7500 | 1931.5 | 16.8 |
| 5000 | 1869 | 17.3 |

平均旅行速度还与平均站间距等因素有关，本文设定了线路的具体条件，未对此类影响因素作假设计算，但综合了实例分析和理论计算的结果，笔者认为与道路平交的现代有轨电车系统在平均旅行速度方面可达到的功能水平为15~28km/h。现代有轨电车的平均旅行速度还有以下特点：

(1)若全天都按照较高的频率发车(本算例为20对/h)，则客流量较小时(非高峰期)的系统平均旅行速度较高峰期提高5km/h，系统的快捷性能更好的体现。但在实际中，往往非高峰期内的发车间隔也较大，车辆停站时间与高峰期接近，非高峰期的速度与高峰期相比无明显提升。

(2)通常采用的部分信号优先的措施可以使现代有轨电车的平均旅行速度达到17~22 km／h，采用完全优先的信号控制方式将提高速度5km/h左右；相反若不采取任何信号优先措施，现代有轨电车的速度为15~17 km/h，无法突出体现出快速公交速度方面的优越性。

# 3 最大安全速度模型

上一章节主要讨论了现代有轨电车的各类技术条件，车辆参数，线路特性，还有路权分配管理和信号优先技术。本章节将根据之前获得的各类参数，分析现代有轨列车行驶的理论最大安全速度。重点分析停车视距，转弯半径，竖曲线半径对最大安全速度的影响。

3.1 停车视距对最大安全车速的影响

停车视距，即同一车道上，车辆从发现障碍物，采取制动到完全停止的距离。当行驶在弯道上、[视距](http://www.baike.com/wiki/%E8%A7%86%E8%B7%9D" \t "_blank)小于停车视距时，汽车要减速行驶，以保行车安全。对于有轨列车来说，其行驶场景与道路交通类似，这里也采用与道路交通相似的计算方法，计算停车视距。

V——行驶速度的85%~100%，考虑到车速较慢，这里直接取100%；

t——驾驶员反应时间，取2.5s；

a——最大减速度，极限情况下为3，一般情况下取1~1.2；

——安全距离，5~10m，这里取5m。

对有轨列车来说，停车视距最主要考虑的是两种情况，第一种是紧急情况，需要紧急制动，例如前方突然出现障碍物，第二种是则是有轨列车在入站时的制动。两种情况之后会分别讨论，首先需要分析车速对停车视距的影响。

### 3.1.1 车速对停车视距的影响

汽车驾驶员在行车中，有80%~90%以上的信息是依靠视觉获得的，驾驶员的视野信息是安全行车的重要保证，其视野特性与交通安全有着密切关系。

视野人的眼睛注视前方，头部的视线固定时，所能看到的范围称为视野(静视野)。如果将头部固定，眼球自动转动时能够看到的全部范围称为动视野。人眼的视野可利用视野计进行检查。如果驾驶员的双眼视野太小，不利于行车安全，当驾驶员驾驶汽车高速行驶时，会感到车外的树木、房屋等固定物体的映像在人眼视网膜上停留的时间太短，人眼来不及仔细分辨物体的细节，因此，随着车速的提高，驾驶员眼睛的有效视野会越来越窄。

驾驶视力也叫视敏度，是指分辨细小的或遥远的物体或物体的细微部分的能力。在一定的条件下，眼睛能分辨的物体越小，视觉的敏锐度越大，视敏度的基本特征在于辨别两点之间距离的大小，因此，也可以把它看作视觉的空间闭限。

研究结果表明，驾驶员的动视力随着车速的变化而变化，一般来说动视力比静视力低10%~20%，特殊情况下比静视力低30%~40%。例如，以60km/h的速度行驶的车辆，驾驶员可看清前方240m处的交通标志;可是当车速提高到80km/h时，则连160m处的交通标志都看不清楚。

值得注意的是，虽然静视力好是动视力好的前提，但是静视力好的人不一定会有很好的动视力。据相关调查，静视力为1.0的277人，其中动视力等于和高于0.5的只有170人，占总数的61%。许多研究都表明，驾驶员的动视力与交通事故有更密切的关系。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 速度(km/h) | 80 | 60 | 40 | 30 | 20 |
| 动态行驶视距(m) | 110 | 75 | 40 | 30 | 20 |

对有轨电车来说，其正常行驶速度通常在20~30km/h，所以安全停车视距取30m。

### 3.1.2 紧急制动

紧急制动的停车视距由三部分组成，反应距离，制动距离和安全距离：

因为是紧急制动情况，最大制动减速度取3，反应时间取2.5s，安全距离取5m：

对于紧急制动来说，需要考虑的场景比较特殊，公式中取了极限减速度，是在严重危及全车乘客安全时才有可能使用的减速度，虽然对于道路交通来说，有轨电车的减速度已经偏小，但对于有轨电车来说减速度在这么大的情况下对乘客本身就会有伤害风险。对于本设计，紧急制动的场景不在考虑范围内，因为紧急制动的情况无法预测，这里只能根据线路已有的固定参数进行计算最大安全速度。

### 3.1.3 进入站台

有轨列车进入站台并不算突发事件，所以不需要反应时间，同时也没有安全距离，这里只要考虑制动距离即可：

这里主要考虑到乘客的舒适性，所以减速度不宜太高，所以取1。

计算进入站台安全速度最主要是为了有轨列车在进入站台之前能够减速到较低的速度，这样在有轨列车到站后可以平滑地停下，不会出现较大的减速度，提高乘客乘坐的舒适性。

3.2 转弯半径对最大安全车速的影响

转弯半径对最大安全速度的影响显而易见，在本文的第二章节也已经提过，车辆在通过曲线时将产生一定的离心加速度，为了维持车辆的平衡，需要给车辆提供相应的向心加速度。在轨道交通里一般设置外轨超高，使得车辆的重力加速度产生一个水平分量来平衡车辆的离心加速度。公式如下：

所以速度公式可以反推：

—最小曲线半径，单位m；

—最大超高，单位mm；

—允许欠超高，单位mm；

v—车速，单位km/h。

可以看出，行车速度v一定时，最小曲线半径由最大超高和允许欠超高的取值决定。根据前文分析，现代有轨电车由于运行速度较低，且无实际运营经验，建议最大超高与地铁保持一致，即hmax=120mm，允许欠超高也取一般情况，。所以最终公式如下：

在路况较为复杂的城市有轨列车线路中，转弯产生的加速度往往会对车速有很多限制，并且在实际情况中，在道路交通上设置线路超高成本较高，很多线路并不会设置超高，所以转弯情况下的最高安全车速很值得注意。

3.3 竖曲线半径对最大安全车速的影响

在第二章节中已经分析过有轨电车竖曲线半径的线路特性，并且已经给出结论，在城市道路中，现有的道路条件已经完全满足有轨电车的需求，这里仍然推导出公式，实际测试结果也确实相符，竖向加速度对安全车速的影响确实较小。

参照GB 50157-2003《地铁设计规范》，车辆通过变坡点时产生的竖向加速度、竖曲线半径与行车速度的关系同为:

—竖曲线半径，单位；

—竖向加速度，单位；

—车速，单位km/h。

从式中可以看出，在速度一定的情况下，竖向加速度越大，可采用的竖曲线半径就越小，线路条件越灵活，但是乘客的舒适度就越低。

对于竖向加速度的取值，GB 50157-2003《地铁设计规范》中规定：在正线取值范围为0. 1 ~ 0. 154，困难条件下为0. 17 ~ 0. 26。而对于现代有轨电车目前国内尚无更多的经验值可借鉴，参照北京西郊线的建设经验，竖向加速度一般情况下取0.154，困难情况下取0. 24，经计算可得:当v=50时，R≥1 200 m，困难条件下R≥800 m;当v=70时，R≥2500 m，困难条件下R≥1 600 m。这里方便计算，取。

对于实际运行车速并不高的有轨列车来说，根据实际线路竖曲线半径结合该公式算出的车速大部分情况都符合标准。

3.4 总结

本章节给出了多种安全速度模型，在实际计算中，需要对每一个点进行以上所有模型的速度计算，取最小值作为最大安全速度。需要注意的是，这里给出的模型全为理论最大安全速度，在实际场景中，为了确保安全和舒适性，并不会让有轨列车达到这些理论速度，实际上在研究中也发现，有轨列车因其特殊性，如需要承载多名乘客，车身较长，减速度较小等情况，要想提高到较大车速存在很多困难，尤其在遇到紧急情况，不考虑独立路权的情况，前方突然有行人或车辆出现，有轨列车在正常运行速度下通常是无法及时制动停下的，不仅是车辆本身特性，质量大，摩擦力小，更多是要考虑车内乘客的安全，不同于地铁的绝对独立路权，有轨电车的路权性质极大地限制了有轨电车的通行效率。

# 4 有轨电车线路图解析

本设计程序使用Python语言编程，结合html输出可视化结果，用dxf格式的线路图提供线路数据。在开发过程中遇到不少困难，这里将给出开发思路。

4.1 Python语言介绍

Python是一个高层次的结合了解释性、编译性、互动性和面向对象的脚本语言。Python的设计具有很强的可读性，相比其他语言经常使用英文关键字，其他语言的一些标点符号，它具有比其他语言更有特色语法结构。

1 Python是一种解释型语言：这意味着开发过程中没有了编译这个环节。类似于PHP和Perl语言。

2 Python是交互式语言： 这意味着，您可以在一个Python提示符，直接互动执行写你的程序。

3 Python是面向对象语言: 这意味着Python支持面向对象的风格或代码封装在对象的编程技术。

4 Python是初学者的语言：Python对初级程序员而言，是一种伟大的语言，它支持广泛的应用程序开发，从简单的文字处理到WWW浏览器再到游戏。

本文作者在日常的实习工作过程中，有着非常丰富的Python开发经验，所以这里选择了该语言进行开发，在ubuntu系统下进行测试。

4.2 Highcharts介绍

Highcharts 是一个用纯[JavaScript](http://baike.baidu.com/view/16168.htm" \t "_blank)编写的一个图表库， 能够很简单便捷的在web网站或是web应用程序添加有交互性的图表，并且免费提供给个人学习、个人网站和非商业用途使用。HighCharts支持的图表类型有曲线图、区域图、柱状图、饼状图、散状点图和综合图表。

Highcharts是一个web开发常用的图表库，这里用作输出结果，可以直观观察各点的车速。

4.3 dxf文件介绍

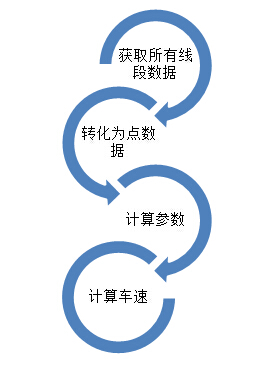
DXF是一种开放的[矢量数据](http://baike.baidu.com/view/285316.htm" \t "_blank)格式，可以分为两类：ASCII格式和二进制格式；ASCII具有可读性好的特点，但占有空间较大；二进制格式则占有空间小、读取速度快。由于Autocad现在是最流行的cad系统，DXF也被广泛使用，成为事实上的标准。绝大多数CAD系统都能读入或输出DXF文件。

DXF文件是由很多的“代码”和“值”组成的“数据对”构造而成，这里的代码称为“[组码](http://baike.baidu.com/view/228975.htm)”（group code），指定其后的值的类型和用途。每个组码和值必须为单独的一行的。

DXF文件被组织成为多个“段”（section），每个段以组码“0”和字符串“SECTION”开头，紧接着是组码“2”和表示段名的字符串（如HEADER）段的中间，可以使用组码和值定义段中的元素。段的结尾使用组码“0”和字符串“ENDSEC”来定义。

DXF-Drawing Exchange File(图形交换文件)，这是一种ASCII文本文件，它包含对应的DWG文件的全部信息，不是ASCII码形式，可读性差，但用它形成图形速度快.不同类型的计算机(如PC及其兼容机与SUN工作站具体不同的CPU用总线)哪怕是用同一版本的文件，其DWG文件也是不可交换的。为了克服这一缺点，AutoCAD提供了DXF类型文件，其内部为ASCII码，这样不同类型的计算机可通过交换DXF文件来达到交换图形的目的，由于DXF文件可读性好，用户可方便地对它进行修改，编程，达到从外部图形进行编辑，修改的目的。

本设计通过使用Python下的dxfgrabber库对dxf图纸进行解析。具体流程如下：



### 4.3.1获取所有线段数据

测试的图纸在绘制电车线路时，只使用了线段和多段线两种形式，分别用来表示直线线路和曲线线路，所以这一步只需要获取图纸中的所有线段数据即可。

### 4.3.2转化为点数据

在实际计算中，需要具体到线路上每一个点上进行计算，所以这一步将把所有线段按一定距离切分成多个点，记录下每一个点坐标，同时为了后续的计算，记录下每一个点到起点的累计路程。

### 4.3.3计算参数

根据第三章的速度模型可知，这里需要根据点坐标获取的参数主要有：到下一个车站的距离，该点转弯半径，该点竖直曲线半径。其中竖直曲线半径无法根据平面坐标获得，所以另外输入，前面两个参数可以根据坐标直接计算获取。

### 4.3.4计算车速

根据上一步获得的参数，计算各点在不同模型下的最大安全速度，然后取得最小值就是理论最大安全速度。然后输出到html文件中，调用Highcharts显示。

4.4 输出结果展示（见附录）

最终结果输出成为HTML文件，并用Highcharts解析成为可视化图表。由于竖曲线半径模型对最大安全速度计算限制较小，这里不进行计算，主要分析了进站的停车视距和转弯半径对最大安全车速的影响。其中，进站的停车视距的影响较为明显，前文分析也已经说明，主要出于乘客舒适度考虑，而根据转弯半径模型计算出的结果，在大多数情况下也远超过设计速度，这主要是因为在原本道路交通上，道路的转弯半径条件并不苛刻，符合预期。

# 5结论与展望

本文主要研究了有轨电车车辆与线路特点，建立了有轨电车安全速度计算模型，学习了dxf图纸解析方式，并用程序实现速度计算模型。根据有轨电车的车辆特性和线路特性，计算有轨电车安全的速度曲线，支持外部线路参数的输入或文件导入、临时限速的设置，用计算机软件实现速度曲线自动生成。

在完成理论分析的过程中，在老师和学长学姐的帮助下，学习了很多有轨电车的知识，同时也意识到有轨电车发展过程中的一些瓶颈，如受限于原本道路交通情况，建设成本高，制动能力弱等等，本文为最大安全速度的研究提供了一些理论依据和计算思想，之后随着有轨电车的技术发展，实际运行速度会有不断提升，通行效率和载客能力也会增加，希望本文能够起到一些推动作用。

同时由于数据只有二维图纸，本文并未深入讨论突发情况的临时最大速度，也简化了竖直曲线半径的模型计算，如果之后需要进一步开发，可以从外部导入更多数据内容，以便分析更多情况下的有轨电车速度。

# 参考文献

[1] 曾小清等编著，《轨道交通运行控制与管理》，人民交通出版社，2015

[2] 叶霞飞，顾保南. 城市轨道交通工程[M]. 华中科技大学出版社，2007.

[3] [陆云](http://book.jd.com/writer/%E9%99%86%E4%BA%91_1.html),[刘达德](http://book.jd.com/writer/%E5%88%98%E8%BE%BE%E5%BE%B7_1.html)等.现代有轨电车工程[M].西南交通大学出版社,2015.

[4] 薛美根，杨立峰，程杰现代有轨电车主要特征与国内外发展研究［J］.城市交通，2008，6(6):88-91

[5] 王舒祺.现代有轨电车交叉路口优先控制管理方法研究综述[J]．城市轨道交通研究，2014（6）:17－22．

[6] 林琳.基于模糊控制的BRT交叉口信号优先控制方法研究[J].郑州铁路职业技术学院学报,2010, 04.

[7] 王明文，王国良，张育宏.现代有轨电车与城市发展适应模式探讨[J].城市交通，2007,5(6):12-15.

[8] 唐森，马韵.现代有轨电车在城市区域内的适应性[J]上海交通大学学报，2011 , 08(45):71-75.

[9] 马作泽.现代有轨电车地面控制系统原理样机研制[D], 2011, 12.

[10] Tim Parkin, dxfwrite 1.2.0 : Python Package Index [DB/OL ] , 2015

[11] Wang Yanqing, Zeng Xiaoqing, Li Yang. Similar Normal Distribution of Pedestrian Speeds at Signalized Intersection Crosswalks. ISDEA 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications,

[12] Autodesk , AUTOCAD. DXF格式详解 [DB/OL] , 1992

[13] 丁强，现代有轨电车交通概述［J］.都市快轨交通，2013，12.

[14] 王明文，王国良，张育宏.现代有轨电车与城市发展适应模式探讨[J]. 城市交通，2007，（6）：71-72.