

概要

该手册是由德国联邦经济合作和发展部“同一个世界的服务机构社区——通过合作项目推动可持续社区发展”(Servicestelle Kommunen in der einen Welt (SKEW) – Nachhaltige Kommunalentwicklung durch Partnerschaftsprojekte (NAPOKA))课题所资助的迁安项目的一部分成果。这个项目重点是可持续城市交通和有轨电车系统。具体来说，该项目主要支持迁安和德累斯顿两座城市之间的经验交流。目前双方共举办两次经验交流研讨会：分别为2014年12月18-19日于德国的德累斯顿和首都柏林，以及2015年6月22-24日于中国河北省迁安市。

2015年9月联合国发布了17条国际宗旨。第11条宗旨为创建可持续城市和社区，包括向所有人提供安全、可负担的、易于利用、可持续的交通运输系统。同时改善道路安全，特别是扩大公共交通，要特别关注保护弱者、妇女、儿童、残疾人和老年人。联合国预计在2030年实现这

些目标。这本手册通过对有轨电车系统的经验总结，旨在帮助找到机遇，从而建设更有效的，可持续的交通系统。

该手册的第一章简要介绍了不同城市的轨道交通系统，简要介绍了基础设施，交通管控以及车辆。第二章以德国的柏林、德累斯顿和汉诺威三座城市为例，重点介绍市内的有轨电车和轻轨系统。第三章给出了两个有轨电车的国际实例，分别是法国的波尔多市和瑞士的苏黎世。第四章介绍了中国的一些具体实例。最后两章则阐述了有轨电车系统的主要优点，并总结它作为新的城市交通文化其中一部分所发挥的作用。

SUMMARY

This information booklet is a result of the Qian'an project funded by the program “Servicestelle Kommunen in der einen Welt (SKEW) – Nachhaltige Kommunalentwicklung durch Partnerschaftsprojekte (NAPOKA)” of the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. The project focussed on sustainable urban transport and tram systems. Specifically, the program supports an exchange of experiences between the Municipality of Qian'an and the City of Dresden. As part of the program an exchange took place during workshops on December 18, 2014 in Dresden, December 19, 2014 in Berlin, and from June 22-24, 2015 in Qian'an.

The United Nations mandated 17 global goals in September 2015. The 11th goal is the creation of sustainable cities and communities that maintain safe, affordable, accessible and sustainable transport systems that serve the needs of everyone. This goal will require the improvement of road safety, notably

through the expansion of public transportation, with special attention to protect the most vulnerable, women, children, the elderly and those with disabilities. The U.N. set a target date of 2030 for meeting these goals. By summarizing the experience of tram systems, this booklet will help identify opportunities for constructing more efficient and sustainable transportation systems.

The first chapter provides an overview of different urban railway systems and briefly describes infrastructure, traffic control and vehicles. The second chapter presents examples of German tram and light rail systems from Berlin, Dresden and Hannover. This is followed by the international examples Bordeaux (France) and Zurich (Switzerland). The fourth chapter presents Chinese examples. The concluding chapters will address the advantages of tramway systems and summarize its role as an integral part of a new urban transport culture.

目录

1	城市轨道系统	6
1.1	交通系统分类	6
1.1.1	城市-城郊快捷铁路系统 (S-Bahn)	7
1.1.2	地铁系统 (U-Bahn)	8
1.1.3	有轨电车系统	8
1.1.4	轻轨系统 (城市铁路)	9
1.2	基础设施	11
1.2.1	轨道	11
1.2.2	车站	13
1.2.3	电力供应	14
1.3	交通管理	15
1.4	车辆	16
2	德国实例	18
2.1	柏林	18
2.1.1	简介	18
2.1.2	公共交通网络	18
2.1.3	柏林有轨电车网络	19
2.1.4	柏林有轨电车系统特点	20
2.1.5	未来有轨电车的发展	21
2.2	德累斯顿	22
2.2.1	简介	22
2.2.2	公共交通网络	23
2.2.3	德累斯顿有轨电车系统	24
2.2.4	德累斯顿有轨电车系统特点	25
2.2.5	未来有轨电车系统的发展	27
2.3	汉诺威	27
2.3.1	简介	27
2.3.2	公共交通网络	28
2.3.3	汉诺威有轨电车系统	29
2.3.4	汉诺威轻轨系统特点	29
2.3.5	未来轻轨系统的发展	29

3 国际实例.....	30
3.1 法国波尔多市	30
3.1.1 简介	30
3.1.2 有轨电车系统.....	31
3.1.3 今后扩建	32
3.2 瑞士苏黎世.....	33
3.2.1 简介	33
3.2.2 有轨电车系统.....	33
3.2.3 今后扩建	35
4 中国实例.....	36
4.1 中国的有轨电车车辆.....	38
4.2 有轨电车系统	39
4.2.1 有轨电车的新生	39
4.2.2 双层有轨电车	41
4.2.3 胶轮有轨电车	42
4.2.4 通勤有轨电车	43
4.2.5 有轨电车作为郊区的主要交通工具	44
4.2.6 有轨电车作为地铁线的延伸	45
4.2.7 从快速公交系统到轻轨	47
5 有轨电车系统在城市发展中的优势	48
5.1 灵活性	48
5.2 效率	49
5.3 交通质量与接受度.....	50
5.4 有轨电车系统成本	51
5.4.1 投资成本	53
5.4.2 运营成本	55
5.5 环境影响	57
5.5.1 噪音排放	57
5.5.2 温室气体排放	57
6 有轨电车成为新交通文化的一部分	58
参考文献	60

图录

图1: 城市轨道系统分类	7
图2: 柏林城市-城郊快捷铁路.....	7
图3: 柏林地铁.....	8
图4: 柏林有轨电车	8
图5: 城市铁路标准的灵活性.....	9
图6: 不同路基类型的灵活性.....	11
图7: 轻轨系统轨道的基本类型.....	12
图8: 不同车辆和不同站台高度的有轨电车车站.....	13
图9: 电力供应系统特性.....	14
图10: 有轨电车的移动广播通讯系统.....	15
图11: 德国有轨电车不同发展阶段: 卡尔斯鲁尔的有轨列车.....	17
图12: 目前普遍使用的Flexity型有轨电车正通过柏林亚历山大广场.....	18
图13: 柏林公共交通现状.....	19
图14: 动态乘客信息系统“DAISY”	20
图15: 现代化的有轨电车车站——有轨电车和公交车共用站台.....	20
图16: 建设“绿色轨道”的新标准.....	20
图17: 柏林有轨电车网络扩张.....	21
图18: 德累斯顿市中心和易北河, 易北河畔的草地以及两侧的建筑.....	22
图19: 德累斯顿公共交通网络.....	23
图20: 车厢内部电子屏幕显示换乘线路实时信息.....	24
图21: 车站内部电子屏幕显示周围站点的实时线路信息.....	24
图22: 在不同道路上的独立式轨道.....	25
图23: 在不同道路上的半独立轨道.....	25
图24: 在不同道路上的开放式轨道.....	25
图25: 路旁有(无)隔离护栏的有轨电车岛型车站.....	26
图26: 路面隆起的有轨电车车站.....	26
图27: 配有隆起自行车道的有轨电车车站.....	26
图28: 路缘扩展的有轨电车车站.....	27
图29: 汉诺威轻轨系统.....	27
图30: 汉诺威地区公共交通覆盖区域	28
图31: 汉诺威市的轻轨系统.....	29
图32: 波尔多市阿尔斯通Citadis型有轨电车行驶在无悬线轨道上.....	30
图33: 波尔多市有轨电车网络图.....	31
图34: Citadis型有轨电车使用第三条导电轨道供电.....	32
图35: 苏黎世有轨电车.....	33
图36: 货运有轨电车.....	34
图37: Cobra型有轨电车.....	35
图38: 中国处于运营, 建设或者规划阶段的有轨电车的城市.....	37
图39: 大连有轨电车网络.....	39
图40: 大连有轨电车DL6WA型和DL3000型.....	39
图41: 长春有轨电车和轻轨网络.....	40

图42: 长春有轨电车800型和900型.....	40
图43: 香港有轨电车网络.....	41
图44: 第七代香港有轨电车和古典旅游电车28号.....	41
图45: 天津泰达有轨电车和车厢内视图.....	42
图46: 张江有轨电车和车厢内视图.....	43
图47: 松江有轨电车设计图.....	44
图48: 松江有轨电车网络.....	44
图49: 苏州第一条有轨电车线.....	45
图50: 2015年苏州地铁和有轨电车网络.....	45
图51: 运营中和规划中的苏州有轨电车线路	47
图52: 不同交通工具运载能力的比较（以慕尼黑为例）.....	49
图53: 在海德堡市的有轨电车运载能力比较.....	49
图54: 斯特拉斯堡的有轨电车自1994年开始运行后的发展情况	50
图55: 生命周期成本“冰山”图	51
图56: 有轨车辆全生命周期的成本组成.....	52
图57: 一辆有轨电车的运营成本	55
图58: 运营成本和车辆运载能力.....	56
图59: 有轨电车, 公交车与地铁的运载量对比.....	56
图60: 不同交通工具的碳排放.....	57
图61: 一辆Combino型有轨电车正驶过弗莱堡.....	59

表录

表1: 不同轻轨系统设计和应用的区别.....	10
表2: 部分有轨电车型号的技术数据.....	16
表3: 柏林有轨电车概况.....	19
表4: 德累斯顿有轨电车概况（2013年）	24
表5: 汉诺威市轻轨网络概况.....	29
表6: 波多尔市有轨电车网络概况.....	31
表7: 苏黎世有轨电车网络概况.....	33
表8: 处于运营中, 建设中和规划阶段的中国有轨电车系统.....	36
表9: 中国有轨电车型号.....	38
表10: 苏州有轨电车概况.....	46
表11: 公交车和有轨电车的成本估算.....	52
表12: 法国贝桑松市和第戎市修建有轨电车的成本比较.....	53
表13: 包含30%规划成本和突发事件成本的每平方公里建造成本	54



1 城市轨道系统

德国的公共交通系统是一个综合性系统，它包括了可相互协调并互补的各个子系统：

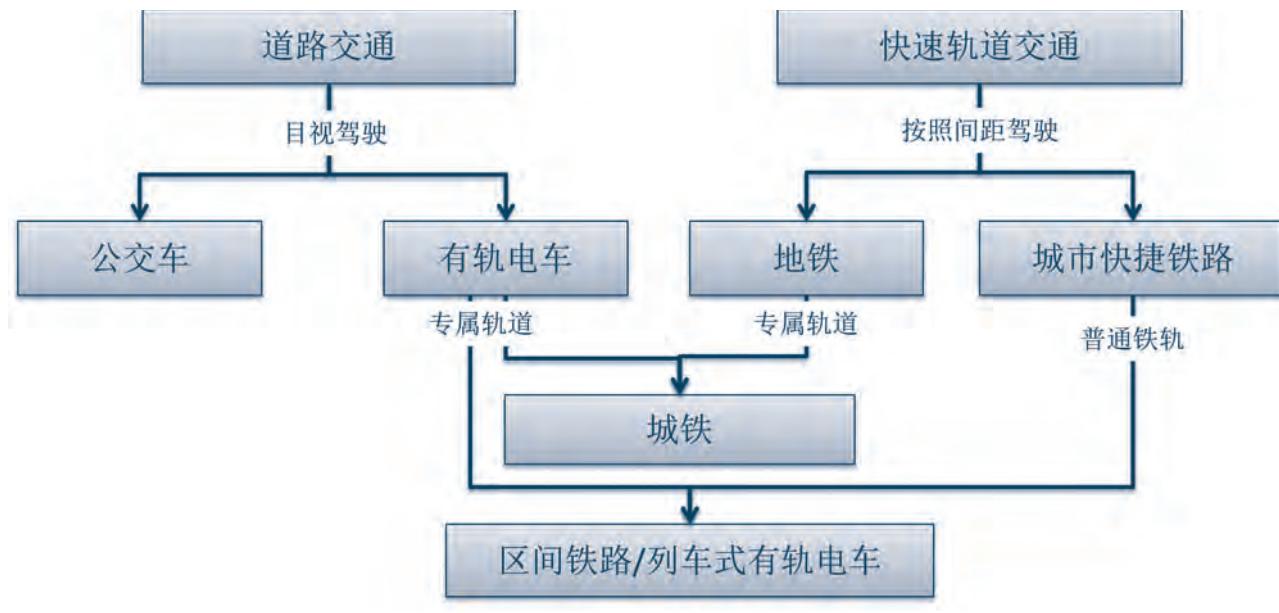
- **区间铁路系统**
- **城市-城郊快捷铁路系统 (S-Bahn)**
- **地铁系统 (U-Bahn)**
- **轻轨系统**
- **有轨电车系统**
- **缆车或山地铁路系统**
- **无轨电车系统**
- **轮渡**
- **出租车**
- **公交车**

德国铁路法 (Allgemeines Eisenbahn Gesetz - AEG) 规定，区间铁路系统和城市-城郊快捷铁路系统 (S-Bahn) 属于重轨。地铁，有轨电车和其他类型的轨道系统属于轻轨。而根据德国客运交通法案 (Personenbeförderungsgesetz - PBefG) 规定，它们又都属于电车系统。尽管这些系统在不同的区域内各司其职，它们却又相互紧密衔接以确保乘客可以方便换乘。不同的系统之间存在很多相似之处，因此很难对它们进行抽象性的概括。但是出于不同职责，立法依据以及财政的考虑，我们有必要划分不同交通方式及其运行区域。

1.1 交通系统分类

直到上世纪中期，德国典型的交通方式只包括公交车，有轨电车，地铁-城市快捷铁路系统（图1所示）。当时，有轨电车系统通常是老旧的电车运行在狭窄拥挤的街道上，所以被认为并不适用于未来的交通系统。有轨电车也逐渐被公交车和城郊铁路所取代。但不久之后，人们便意识到公交车载客量的不足和建造城郊铁路经费的有限。而实践证明最实用的方式是将保存下来的旧的有轨电车线路与大量新修的地铁以及常规铁路线路相结合。于是第一个成功的城市与区域铁路服务出现了，并将其命名为城铁 (City railway)。

城铁是一种应用于城市和区域的交通模式，它结合了有轨电车和轻轨系统的特点。乘客无需中转换乘就可以在有轨电车，地铁和重轨系统之间自由选择不同的组合方式出行。城铁的技术标准介于各个系统标准之间。整个铁路系统包括有轨电车、城铁、地铁、以及城郊铁路。在接下来的章节，我们将简述各系统间的区别。

图1: 城市轨道系统分类¹

1.1.1 城市-城郊快捷铁路系统 (S-Bahn)

城市-城郊快捷铁路系统作为铁路运输的一部分，受到诸如铁路建设和运行法案 (Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung – EBO) 等相关法律法规以及行业标准的限制。城市和城郊快捷铁路系统主要在大城市内繁忙的交通线上承担运输任务以及负责链接大城市的核心地区与其周边区域。城市-城郊快捷铁路系统的主要特点包括 (Girnau et al., 2000) :

- **最高时速：每小时90到120公里**
- **运行时速：每小时40-50公里**
- **居民区站间距离：500到1500米**
- **高峰时段发车间隔：**
 - **市中心：1.5分钟**
 - **市郊：10-20分钟**

城市-城郊快捷铁路系统遍及德国全境。尽管多数情况下都在地面上运行，但也有一部分会运行于城市中心地下的隧道，例如柏林的城市和城郊快捷铁路系统（图2）。这样可以保证中心区域及其周边的各类交通系统（地铁，轻轨，有轨电车电车，公交车）的联接顺畅紧密。

图2: 柏林城市-城郊快捷铁路²¹ 来源: Dutsch, 2014² 来源: Türelia. (2006). https://de.wikipedia.org/wiki/Berliner_Ringbahn#/media/File:EinfahrendeS-Bahn_BahnhofBerlinBeusselstrasse.jpg

1.1.2 地铁系统 (U-Bahn)

在德国，尽管地铁是根据电车系统的修建和运行法案 (Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen – BOStrab) 进行定义的，但是无论是功能还是运行环境，地铁系统和有轨电车以及轻轨系统相比还是有所区别的。地铁在各种公共交通方式中具有最大的载客量，它连接了人口密集区，战略性地区以及经济区。地铁系统可以运送大量乘客，并缩短出行时间。

地铁系统的主要特点包括 (Girnau et al., 2000)：

- **最高时速：每小时70到90公里**
- **运行时速：每小时30-35公里**
- **居民区站间距离：500米到1200米**
- **高峰时段发车间隔：1.5分钟**

地铁一般拥有独立轨道，主要运行在城市中心的地下隧道，但在部分情况下也会使用高架桥。在德国有4个城市具有常规自营的地铁系统，分别是：柏林，汉堡，慕尼黑，和纽伦堡。



图3：柏林地铁⁵

1.1.3 有轨电车系统

19世纪末，许多德国城市开始从轨道马车过渡到有轨电车。如今有超过55个德国城市拥有有轨电车网络，其总长超过1500公里。有轨电车被设计成行驶在街道上并且可以与其他的交通工具以及行人共享路面。大多数情况下有轨电车运行于嵌入在道路里的轨道上 (Girnau et al., 2000)。也有许多线路使用独立的轨道，在中央分离带的轨道上或是在全封闭的轨道上运行。这一方式更为快速可靠，也是高质量运行保障。此外也可以通过使用小段隧道，使有轨电车从地下穿过交通拥挤的地区。

有轨电车系统的主要特点包括 (Ibid.)：

- **最高时速：每小时70-80公里**
- **运行时速：每小时15-40公里³**
- **居民区站间距离：400米（市区）到600米（郊区）**
- **高峰时段发车间隔：无，由于有轨电车属于目视手动操作模式（最高时速可达每小时70公里）⁴**

和地铁以及轻轨一样，有轨电车的修建和运行是依据电车系统修建和运行法案 (Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen – BOStrab)。绝大多数的有轨电车仍然是手动操作（“目视”）——这是和轻轨和地铁最主要的差别。手动操作也使得有轨电车可以在轨道上相继停靠，这意味着在轨道上的有轨电车数量几乎没有上限。 (Ibid.)



图4：柏林有轨电车⁶

³ 超过每小时25-30公里的运行时速仅限于拥有独立路权并且配备信号灯控制系统

⁴ 来源：Steierwald 2008: Stadtverkehrsplanung, S. 596ff; Metrobuch, Transpress, S. 32; <https://de.wikipedia.org/wiki/Straßenbahn>

⁵ 来源：Jivee Blau. (2009). https://de.wikipedia.org/wiki/U-Bahn_Berlin#/media/File:Berlin_U-Bahn-Station_Kochstraße_auf_Bahnsteig_zu_Gleis_1_Richtung_Berlin-Alt-Tegel_U-Bahn_BVG-Baureihe_H_5013-6_8.8.2009.jpg

⁶ 来源：Reinhard Zabel. (2012). <http://www.bahnbilder.de/1024/berlin-27052012-wagen-8014-neue-603145.jpg>

1.1.4 轻轨系统（城市铁路）

城市铁路（Stadt bahn）一词在德国的历史上最早源于柏林。19世纪后半叶，一种被称为“城市和城郊铁路”的交通系统开始出现，并且作为城市的主要运输路线，同时还通向城市周边郊区。这类系统现在被归为“城市-城郊快捷铁路系统（S-Bahn）”。在此之后，许多城市中出现的有轨电车系统也被称之为城市铁路，从而将其与在同一区域行驶的区间火车等其他线路进行区分（Girnau et al., 2000）。

在上世纪60年代末，德国重新定义了城市铁路这一词。为了控制日益增多的交通问题，城市需要扩建有轨电车系统，并使其现代化。由于修建全新的地铁系统成本太高，人们找到了更灵活更有益的解决办法，这就是改进有轨电车系统。有轨电车的轨道在交通拥挤处钻入地下隧道。地下电车（德语是U-Straßenbahn）一词就是用来形容这种模式。（Ibid.）

在此之后，诸如有轨电车的线路设计和运行模式等方面的改进更多是为了提高新建线路和延长线的载客能力，使其更趋向于地铁系统。但同时还要保证不能够偏离有轨电车在某些线路上原有的运行方式。“城市铁路”（轻

轨）一词就是为了描述这一系统而产生的。这个词是用来强调该系统在质量和管理上都比有轨电车有所提高。

因此，德国的轻轨系统是在地方有轨电车系统的基础上发展而成的电气化铁路系统。它的载客量介于有轨电车系统和地铁系统之间。根据每个城市的具体情况和要求，轻轨系统可以调整为更接近于有轨电车系统或者地铁系统（见图5）（Dutsch, 2014）。这种灵活性既包括到基础设施（如铁轨，车站，供电系统），又涉及到交通管理以及车辆（见表1）。这也是轻轨在德国得到如此广泛应用的原因。轻轨的这种灵活性也使得它不但可以从零开始建造，也可以从已有的线路（有轨电车/城铁/地铁）基础上发展而成。

轻轨

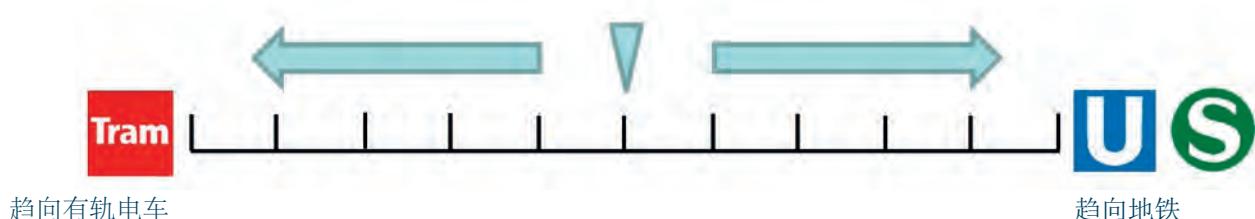


图5：城市铁路标准的灵活性（Dutsch, 2014）⁷

⁷ 来源: Dutsch, 2014

下表列举了四种不同设计的轻轨系统特点。

		更接近有轨电车		更接近地铁	
		第一类	第二类	第三类	第四类
按城市和交通需求划分	城市规模	小型城市	中型城市	大型城市/城市群	特大城市/城市群
不同类别的选择标准	城市地区的人口数量 (万人)	20 – 50	50 – 100	100 – 200	200 – 500
	交通走廊人口密度 (人/平方公里)	2,000	3,000	5,000	8,000
	15公里长交通走廊公共交通需求 (乘客/工作日)	30,000	60,000	100,000	160,000
	支线交通带来的额外需求 (乘客/工作日)	5,000	15,000	25,000	40,000
	每个工作日最小的交通流量状况 (每公里客流量/每公里线路)	2,000	5,000	10,000	> 15,000
导轨	地权设置	地面上	5% 隧道/高架桥	20% 隧道/高架桥	> 50% 隧道/高架桥
		20% 共享	10% 共享		
		80% 独立	85% 独立	80% 独立	< 50% 独立
车站	站间平均距离 (米)	500	600	750	1,000
	站台长度 (米)	40	60	90	100
车辆	驾驶室	一端/两端	两端	两端	两端
	车辆宽度 (米)	< 2.40	2.40/2.65	2.65	2.65
	六轴车厢载客量 (每平方米站6个人)	160	200 – 230	260	300
运行	最大车辆数	2	2	3	4
	最短发车间隔 (秒)	90	90	90	90
	最大客运量 (人/小时/单向)	13,000	18,000	31,000	48,000
	列车保护	无, 手动操作	一部分	绝大部分	全方面
	路旁信号灯控制	大部分情况下	全部	优先系统	集成在列车内
	平均运行时速 (km/h)	20	25	30	40

表1：不同轻轨系统设计和应用的区别⁸

⁸ 来源: Girbau et al., 2000

1.2 基础设施

这一章简略地介绍了有轨电车系统的基础设施，包括轨道，车站和电力供应。

1.2.1 轨道

根据各个地方的不同情况，轻轨系统基础设施的设计和建造过程必须尽可能考虑到其可靠性和经济性，同时要将环境影响降到最低。最重要的考虑因素是轨道铺设的不同等级，分别是地面铺设，在路堤或高架桥上铺设，以及在路堑和地下隧道铺设。这三个等级的修建难度逐渐递增，成本也逐级增加。粗略计算得到三个不同等级系统之间的相对花销比例，即地面轨道：高架桥轨道：地下轨道=1: 3-5: 10-15。 (Girnau et al., 2000)

根据线路需求和具体情况，轻轨系统可以采用不同类型的轨道（嵌入式/分离式/独立式轨道）。图6是部分具体实例的照片，图7则列举了几种最常见的轨道类型。



图6：不同路基类型的灵活性（左：嵌入式，中：分离式，右：独立式）⁹

⁹ 来源: Wittstock, 2014

图7: 轻轨系统轨道的基本类型¹⁰

当轻轨路线修建在地面公共道路上时（嵌入式轨道），必须通过交通分流和交通信号灯管控来确保轻轨系统的通行优先权。这可以避免道路交通堵塞轨道交通，这就违背轻轨系统修建的初衷。更理想的情况是将轻轨拥有独立的轨道，与其他道路交通隔开。

轨道基础设施最重要的部分在于上层结构，这包括铁轨本身（轨道，必要时的枕木和轨道扣件）以及由道闸，混凝土，沥青，或者相似材料组成的路基。如果在隧道或者高架桥的路基下面可修建道砟垫，在地面路基下可修建防霜层。轨道必须具有不同的功能以满足多种不同的要求 (Girnau et al., 2000)。

修建轨道时需要考虑以下几个方面 (Ibid.) :

- 行驶的安全性
- 安全载重准则
- 导电和绝缘性
- 避免杂散电流
- 必要时减少与道路车辆的联接
- 震动和噪音控制
- 与城市环境的融合
- 服务周期和经济效率

¹⁰ 来源: Girnau et al., 2000

1.2.2 车站

车站或者站台的设计与配备设施对于城市轨道系统的接受度，吸引力以及性能都起到至关重要的作用。这些因素同时还影响着乘客在不同路线间上下车以及换乘的方便程度 (Girnau et al., 2000)。这涉及到一系列相关要求，且在轨道系统中这些高标准非常重要。车站必须要满足以下几方面要求：

有轨电车车站应该...

- **拥有高水平的服务和高连接度**
- **所有乘客都可以安全且便捷的使用**
- **建筑设计既有吸引力，也很高的识别度**
- **提供乘客所需要的信息**
- **适用于不同的乘客群体**
- **有效连接其它公共或私人交通方式**
- **能应对各种天气状况并提供足够的保护（乘客应在舒适的环境下候车，同时车站应提供座椅）(Girnau et al., 2000)**

另外，车辆应方便地进出站。车站必须要和城市结构有机的结合起来，并考虑到其他交通方式的利益。其他关于车站的要求还包括安全性，清洁度和各类服务项目。
(Ibid.)

针对车站的设计既包括简单的街道出站方式，也涉及到复杂完整的铁路站点设计。对于联运来说，车站应该可以直接将有轨电车与公交车或其他铁路站点相连，从而确保乘客可以快捷的换乘。一个典型的例子可见图15（第20页），公交车可以和有轨电车停靠在同一个站台。

关于上车高度，图8展示了不同车辆在不同站台的情况下。上车高度对于无障碍通道而言非常重要，可以通过降低有轨电车的上车高度或调整站台高度来实现。



高低板车辆和站台¹¹



低地板车辆和站台¹²

图8：不同车辆和不同站台高度的有轨电车车站

¹¹ 来源: Christian Weske

¹² 来源: Wittstock

1.2.3 电力供应

轻轨车辆安装了受电弓并由架空接触网所提供的牵引电流驱动。这一特点可将其与地铁系统区分开来。由于地铁系统在独立封闭互不交叉的轨道上运行，因此地铁系统的电力供应位于轨道侧面。而轻轨系统是由传统的有轨电车系统发展而来，并且在一些情况下和有轨电车同时运营了许多年，因此许多最初的轻轨线路和有轨电车运行的核定电压（600V直流电）是相同的。而新建的轻轨线路和新型车辆则普遍采用核定电压为750V的直流电，这样可以减少电线上电能的损失（Girnau et al., 2000）。关于电车在不同电力供应系统之间的相互切换可以参见后面有关德国章节的部分内容，例如卡尔斯鲁尔市（见图9）。

地面轨道交通线路最重要的部分是建造在轨道上方的架空电缆和配套的电线杆。在不减少功能的情况下，将这两者与轨道、车站以及现有的道路空间整合起来是很关

键的。与此同时，有必要寻找最大程度减少环境影响的技术方法。比如在法国波尔多市修建的无悬线轨道电车系统（见第3.1章），或是德国奥格斯堡测试的庞巴迪Primove无线充电系统（见图9）。这些实例都指出架空电缆所用的电线杆除了使用钢筋混凝土，也有其他很多不同的可替代建筑材料可供选择。



架空电缆断开以切换至不同电力供应系统¹³



Primove无线充电系统¹⁴

图9：电力供应系统特性

¹³ 来源：© Bombardier Inc., <http://www.zukunft-mobilitaet.net/wp-content/uploads/2011/12/bombardier-primove-induktion-strassenbahn-oberleitungs frei.jpg>

¹⁴ 来源：Reinhard Dietrich, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stromsystemwechsel_Stadtbaum_Karlsruhe.JPG

1.3 交通管理

在轻轨运行过程中，控制中心和车辆间的通信一般通过无线通讯技术来实现。这样以来就可以使用精细复杂的系统技术来引导和追踪车辆。运输公司采用的无线电系统处于非公共频率的范围内，也就是说无线电设备和系统技术都是由相应的公司负责开发和操作。得益于计算机操作控制系统，包括车辆位置，车载系数，偏离路线和计划外的停车时间等在内的相关数据都被不断地被记录和存储下来，并用以调整后续的列车时刻表。现代技术的应用使得乘客能够及时的获取所需要的信息。因此，通讯技术系统为运营方和乘客搭建了一个很好的平台，使得双方在交通拥堵的情况下也可以最快速的得到相关信息 (Girnau et al., 2000)。图10展示了现在有轨电车常用的通讯技术。

负责整个运营交通系统的后勤总部是操作控制中心，也是整个高效通讯系统的中心部分。控制中心必须确保运营方和乘客都能在正确的地方及时得到正确的信息。

控制中心的一个主要任务是安排车辆的运行，也就是说监控车辆并对突发情况快速采取措施。不同公司都有属于自己的控制中心，并可以通过无线电与车辆进行语音和数据交流。如今控制中心还可以通过智能手机和网站为客户提供相关数据和信息。比如在德国的柏林和勃兰登堡州，所有公共交通方式的实时位置信息都可以在在线地图上查到（见：www.vbb.de/livekarte）。现代化信息系统的一个实例请参见第2.2.3章（德累斯顿）。

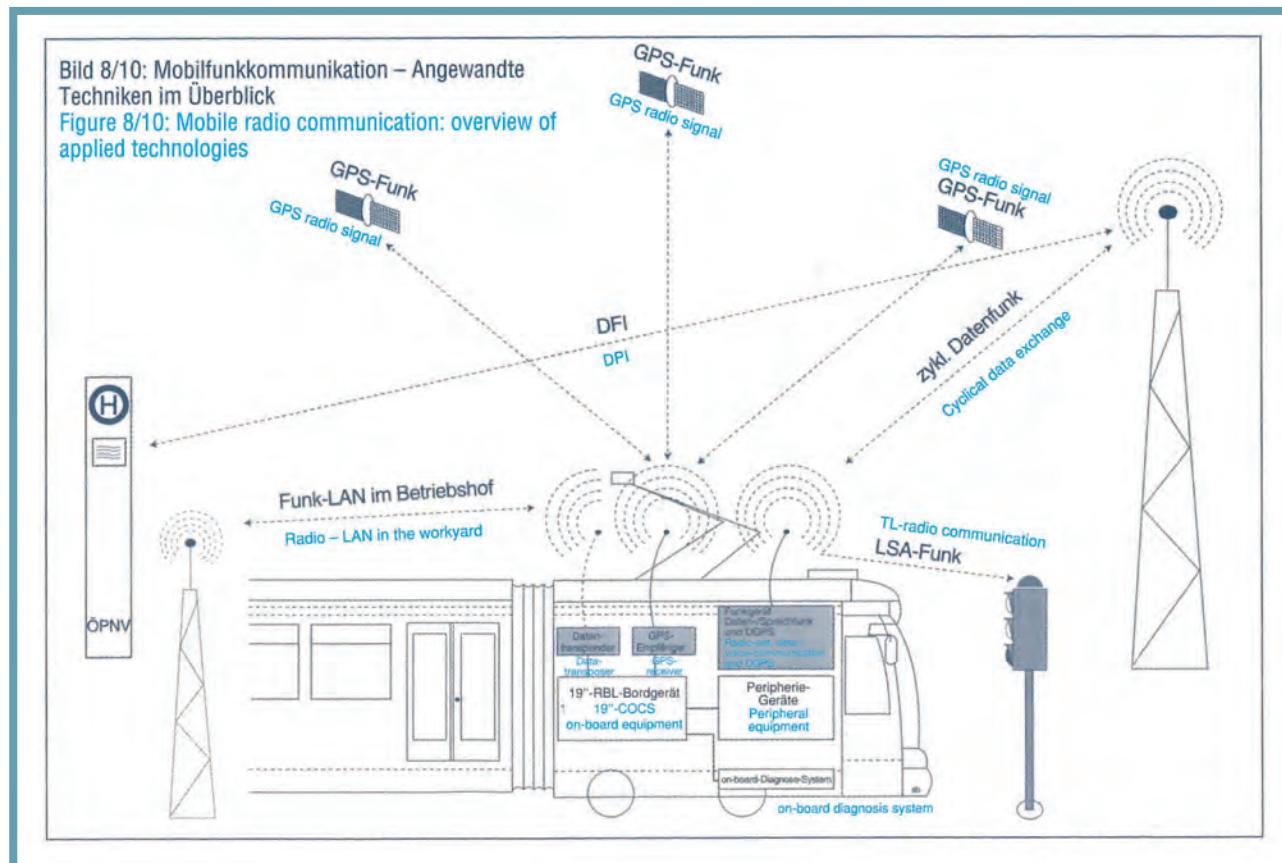


图10：有轨电车的移动广播通讯系统¹⁵

¹⁵ 来源：(c) 2000, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV-Förderkreis e.V.

1.4 车辆

为了对有轨电车的物理参数和配置有个初步的了解，表2列举了七种常见的有轨电车型号的技术细节。



型号	Leoliner NGWT6-L	Flexity 2	TMK 2200	ULF Typ B	Citadis de Bordeaux	120N	VarioBahn Potsdam
生产厂商	Heiterblick	庞巴迪	CroTram	西门子	阿尔斯通	PESA	Stadler
长度	约23 m	32.5 m	32 m	35.47 m	约44 m	31.8 m	约30 m
宽度	2.3 m	2.65 m	2.3 m	2.4 m	2.4 m	2.35 m	2.3 m
高度	3.69 m	3.42 m	3.4 m	-----	3.27 m	3.4 m	约 3.3 m
空车净重	27.3 t	40.9 t	-----	-----	54.9 t	-----	38.8 t
引擎功率	4 x 65 kW	4 x 120 kW	390 kW	8 x 60 kW	880 kW	420 kW	8 x 45 kW
上车高度	290 mm	320 mm	300 mm	180 mm	320 mm	n. a.	300 mm
低地板高度	350–475 mm	320 mm	350 mm	197 mm	350 mm	350 mm	350 mm
低地板率	60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
站立人数*	118	148	156	154	140	148	112
座位数	39	74	46	66	90	63	68
最高时速	70 km/h	70 km/h	70 km/h	70 km/h	60 km/h	70 km/h	70 km/h
最大爬坡比	6%	6%	-----	-----	-----	-----	-----
最小转弯半径	17 m	20 m	16.5 m	-----	-----	-----	-----

* (每平方米站4个人)

表2：部分有轨电车型号的技术数据¹⁶

¹⁶来源：生产厂商数据表

通过观察这组数据不难发现，车辆的设计方面有很多相似点：一辆有轨电车的空车净重大约为1.2吨，标准车厢的宽度在2.3-2.65米之间；所有表中列出来的电车都靠电能驱动，并且来自法国波尔多市的Citadis型有轨电车最高时速可达每小时70公里。而在上车高度以及座位设置却方面有所区别：例如ULF（超低地板）B车型的上车高度最小，只有180毫米；车厢内部的装饰也差别很大，这主要和价格有关。列车越长越贵，因为更长的列车需要功率更高的发动机。

有轨电车的编组也非常灵活。单独一辆有轨电车就可以作为最小版本的动力车（见图11）。并且也可以把动力车和几个车厢连接起来，形成一个长列有轨电车从而满足更高的需求。最后，有轨电车也可以根据交通流量的多少进行编组，以增加或者减少的运载量。因此有轨电车系统可以在很大范围内满足不同需求。



图11：德国有轨电车不同发展阶段：卡尔斯鲁尔的有轨列车——将拖车连接起来所形成的高运载力列车¹⁷

¹⁷ 来源：https://de.wikipedia.org/wiki/Stadtbahn_Karlsruhe#/media/File:Murgtalbahn_Tennettschluchtbruecke_Stadtbahn.jpg



2 德国实例

德国目前拥有超过55个轻轨系统。在人口总数超过100万的四个德国城市中，其中有的三个城市运行着轻轨系统。在柏林和慕尼黑，轻轨系统主要以有轨电车的形式用来补充地铁和城市-城郊快捷铁路的交通运输力量。在科隆则以地铁的形式存在。在15个常住人口超过30万的大城市中，有14个城市拥有轻轨系统。这其中十个城市的部分轻轨系统位于地下，用作地铁。而其他城市的轻轨系统则更倾向于有轨电车。另外有三座城市的轻轨系统

有小部分隧道存在，使得这部分轻轨网络也具备了地铁的标准。在599个常住人口超过5万的中型城市中，有14个轻轨系统具有有轨电车的特征。而在一些小城镇这些电车主要作为旅游观光车和班车（Dutsch, 2014）。本章节将介绍柏林，德累斯顿以及汉诺威市的轻轨/有轨电车系统。通过不同的系统来展示轻轨应用领域的灵活性。这三个实例各有不同，但都取得了成功。

2.1 柏林



图12：目前普遍使用的Flexity型有轨电车正通过柏林亚历山大广场¹⁸

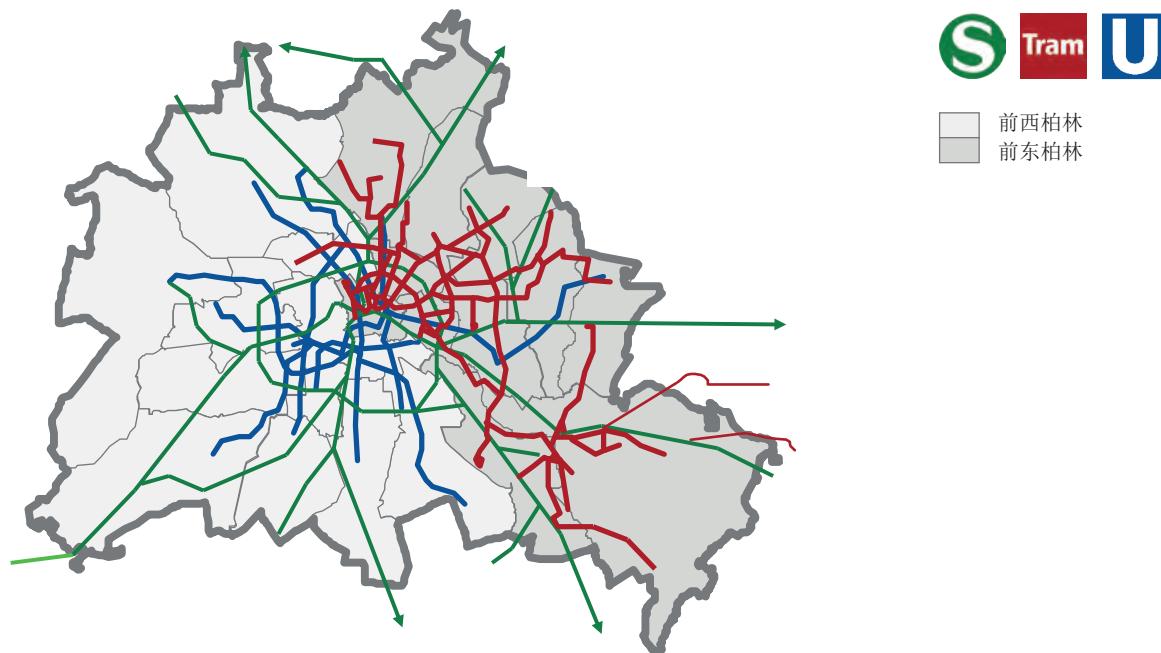
2.1.1 简介

柏林是德国的首都，位于德国东北部。目前柏林有344.1万居民，面积约占892平方公里，是阿姆斯特丹，布魯塞尔和巴黎面积总和的两倍以上。在全球范围内，这座城市以其在冷战时期被分割为东、西柏林的历史而著名。如今这座城市吸引了大量的游客、年轻人和世界各地前来寻找相对低廉且宜居住所的人们。因此，柏林的人口不断增长，同时与日俱增的是对城市公共交通的需求。柏林的公共交通系统是一个在特大城市中应用有轨电车的典型案例，它不仅可以作为主要的交通方式还可以作为其他交通方式的补充。

2.1.2 公共交通网络

柏林的公共交通网络几乎覆盖城市所有区域。它包括城市快捷铁路（332公里，173个站点），地铁（146公里，173个站点），有轨电车（300公里，801个站点），公交车（151条线路）和五条轮渡路线。另外，还有五个长途列车站点和两个机场。公路网总长度约为5400公里。

¹⁸ 来源：Döge, 2014

图13: 柏林公共交通现状¹⁹

2.1.3 柏林有轨电车网络

柏林拥有世界上第四大的有轨电车网络，仅次于墨尔本，圣彼得堡和索菲亚。有轨电车系统主要位于前东柏林地区。二战后西柏林停驶了所有的有轨电车。为了给地铁，私家车和公交车让路，西柏林移除了许多有轨电车轨道。而东柏林由于财政原因仍然保留了有轨电车系统。作为柏林第三大轨道交通（仅次于城市-城郊快捷铁路和地铁系统），有轨电车在交通系统中发挥着不同的功能：在连接市中心和城市东北部主要居民区放射型道路上如Greifswalder Str./Berliner Allee和Landsberger Allee，有轨电车是主要公共交通工具；在城市快捷转运系

统中，它起到补充作用；在城市北部和南部，它主要确保了郊区的通达度。

在柏林，有轨电车是一种现代化的、富有竞争力的以及成功的交通模式，它在柏林的东部的公共交通系统中起到了中流砥柱的作用。它不光构成并美化了城市景观并且为人们提供了一种简捷又有效的出行方式。

人口数量	3,421,829 (2013)
总面积	891.68 平方公里
人口密度	3,838 人/平方公里
有轨电车车站数量	794 (白天) / 409 (夜晚)
有轨电车线路数量	22 (白天) / 9 (夜晚)
网络总长	299.9 km(白天) / 107.9 km(夜晚) 60% 有独立轨道
站间平均距离	500 m
平均时速	19.2 km/h
列车数量	361
年客流量	174,400,000 人次

表3: 柏林有轨电车概况²⁰¹⁹ 来源: Döge, 2014²⁰ 来源: 总结归纳参考片Döge, 2014

2.1.4 柏林有轨电车系统特点

柏林的有轨电车系统所覆盖的范围几乎和公交车一样大。但是和重轨系统相比，它的成本更低。有轨电车系统面临的最主要问题是交通拥堵。为了解决这一问题，柏林采用和推广了不会引起拥堵的分离式轨道，并结合交通信号系统给予优先通行权。许多车站都配置了乘客信息系统以方便乘客快速换乘其他交通系统（图14）。有轨电车系统与其他尽可能多的交通方式（例如从公交车到有轨电车，或者从自行车到有轨电车）相连，以确保换乘的便捷性（图15）。

柏林铺设了许多绿色轨道（图16）以美化城市，同时正在不断更新新型有轨电车。新车型是庞巴迪生产的Flexity型有轨电车，它们具有用户定制、无障碍（低地板）、现代化等特点。另外，为了保障市民夜晚出行的需求，柏林的有轨电车网络提供24小时不间断的服务。所有这些在有轨电车系统上所作出的努力都是为了保证其吸引力，从而使乘客数量不断增加。



图14：动态乘客信息系统“DAISY”²¹



图15：现代化的有轨电车车站——有轨电车和公交车共用站台²¹



图16：建设“绿色轨道”的新标准²³

²¹ 来源: Döge, 2014

²² 来源: Döge, 2014

²³ 来源: Döge, 2014

2.1.5 未来有轨电车的发展

不断增长的乘客需求和减少交通网络中空隙的要求（也包括前东、西柏林之间的空隙）促使了现有交通网络的扩张。未来有轨电车系统的发展依赖于柏林的城市发展规划（2025年城市交通发展规划）。该规划包括图17所示的新扩展计划以及针对有轨电车系统的不同措施，例如有轨

电车在车站间享有优先通行权，现有的站点将移至更便捷的地方，或者将升级车站增加自行车停车位。

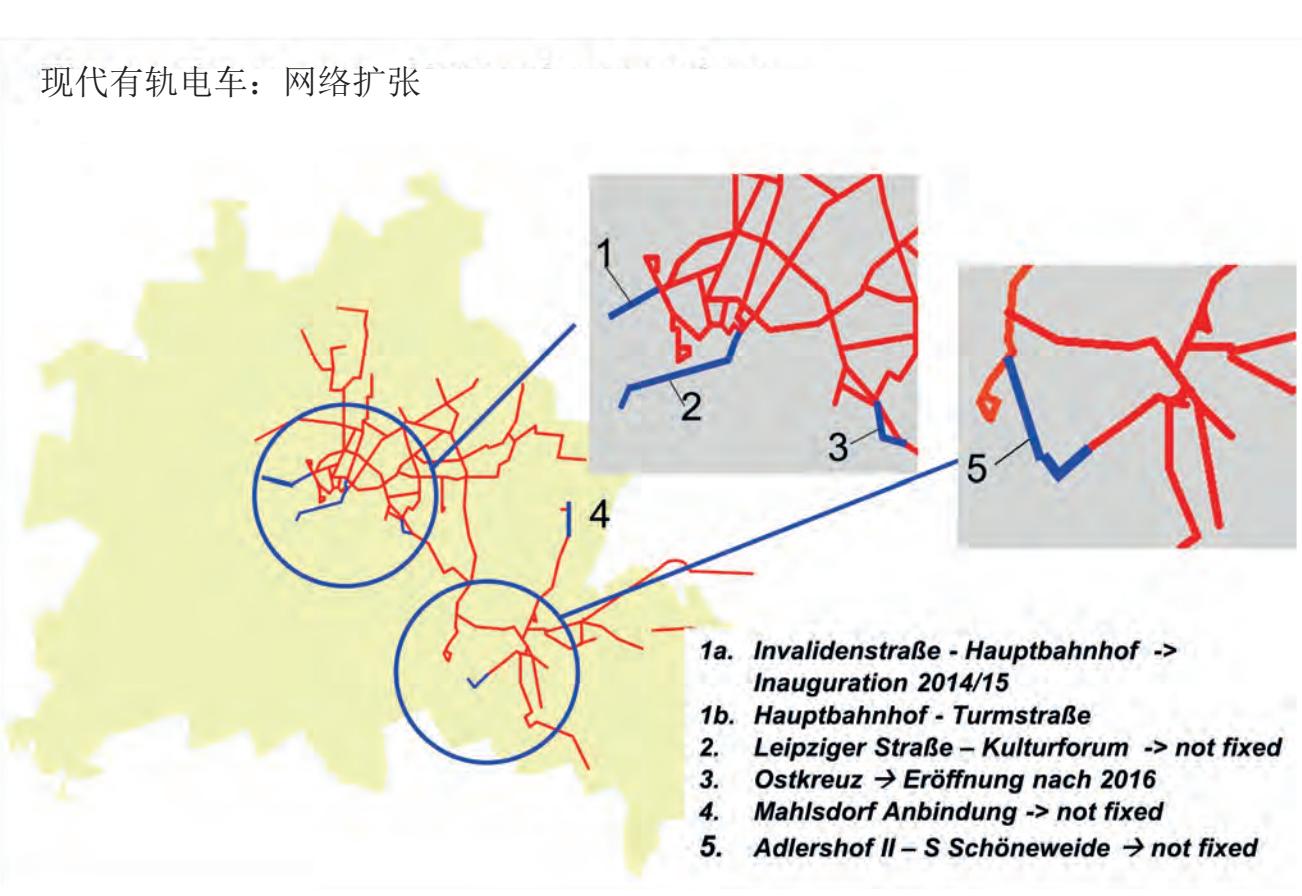


图17：柏林有轨电车网络扩张²⁴

²⁴ 来源：Döge, 2014

2.2 德累斯顿



图18：德累斯顿市中心和易北河，易北河畔的草地以及两侧的建筑²⁵

2.2.1 简介

德累斯顿位于德国东南部，是萨克森自由州的首府。目前德累斯顿面积约为328平方公里，居民人数达到54.1万人。易北河从城市中心穿流而过，河道两旁的草地给城市提供了开阔的休闲场所。

许多著名的建筑如茨温格宫，森伯歌剧院，绿顶皇宫，以及圣母教堂所坐落的新市场广场都位于这座城市的文化历史中心。如图18所示，电车正行驶穿过城市中心，通过三座大桥。

日益增长的人口，逐步重建的房屋，新开发的区

域，新建的基础设施以及以微电子领域为代表的商业发展带动了整个德累斯顿市的蓬勃发展。但这种发展不应该对德累斯顿市内的环境和生活质量造成负担。为了解决这一矛盾，一个可持续的交通系统势在必行。而建设基础则是一个成功的并富有竞争力的公共交通系统。对于其他的大城市来说，德累斯顿的有轨电车系统，尤其是作为一个全面综合性的地上有轨电车网络，是一个很好的实例。

²⁵ 来源：G.Otto Niederwilligen, 2013

2.2.2 公共交通网络

经过历史上不断的发展以及合并，德累斯顿公共交通网络几乎覆盖了全市范围。整个网络包含了重轨（60km，25个站点），有轨电车（约134km），公交车（48条路线），三条轮渡和两个缆车线路。此外，还建有

两个长途铁路车站和一个机场。德累斯顿市的道路网络总长约为1470公里。

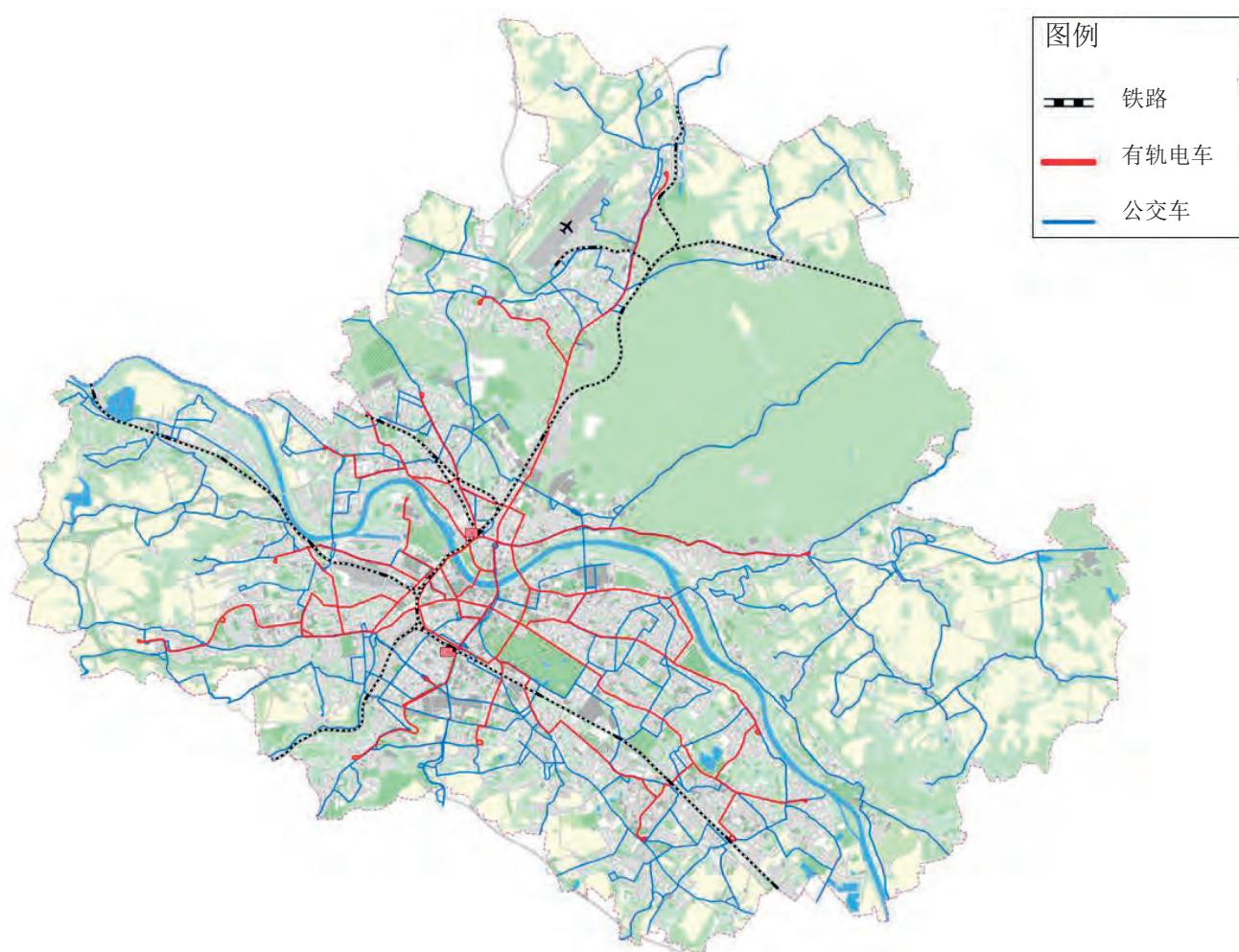


图19：德累斯顿公共交通网络²⁶

²⁶ 来源：Wittstock, 2014

2.2.3 德累斯顿有轨电车系统

德累斯顿有轨电车系统与城市的历史同步发展，虽然历经各种变化，但至今仍在城市内许多区域运营。

人口数量	541,304 / 服务人群 600,764
总面积	328.31 平方公里 / 服务面积 428 平方公里
人口密度	1,617 人/平方公里
有轨电车车站数量	260 (无障碍站台高度: 23厘米)
有轨电车线路数量	12
网络总长	134 km 45%有独立轨道
站间平均距离	470 m
平均时速	20 km/h
列车数量	166
年客流量	100,000,000 人次

表4：德累斯顿有轨电车概况（2013年）²⁷

德累斯顿市的有轨电车系统十分成功，它是一个现代化、多功能且富有竞争力的交通系统。它是整个公共交通的主要支柱。在地面运行的有轨电车系统已经成为了城市街区的一部分。有轨电车车辆实现了无障碍化，并拥有现代化的信息系统，可以在车厢内部为乘客提供实时信息。在换乘站，其他线路的出发时间将显示在车厢内的电子屏幕上（图20）。电子屏幕还会显示附近站点车辆的出发时间（图21）。



图20：车厢内部电子屏幕显示换乘线路实时信息²⁸



图21：车站内部电子屏幕显示周围站点的实时线路信息²⁹

²⁷ 来源: Wittstock, 2014 参考DVB AG

²⁸ 来源: Oelmann, 2014

²⁹ 来源: Wittstock, 2014

2.2.4 德累斯顿有轨电车系统特点

广泛扩张的地面电车网络在一方面代表着其高区域的覆盖性，即人们可以在旅途中体验整个城市，以及在城市道路上公共交通的常见性。另一方面，有轨电车必须和其它交通方式（包括私家车，自行车和行人）一起整合到现有的道路空间中来。这就需要修建相应的辅助交通设施，以保证有轨电车在街道的正常通行和街道环境的吸引力。针对于此要制定一套面向所有道路使用者的协作解决

方案，特别是在街道空间狭窄的高密度城市建成区更为重要。此外，这也意味着要对此进行相应的交通管理。下面举例说明了不同的解决方案，分为轨道和车站两种类别。图22为独立轨道系统；图23为半独立轨道系统；图24为开放式轨道系统。



图22：在不同道路上的独立式轨道³⁰

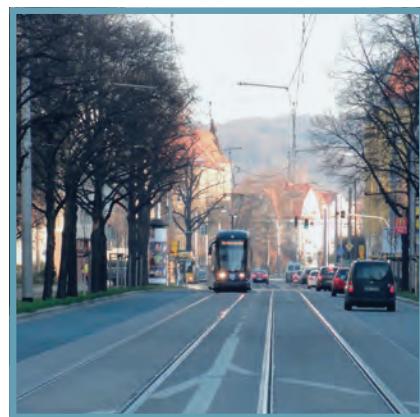


图23：在不同道路上的半独立轨道（左转向车道位于轨道之间）³¹



图24：在不同道路上的开放式轨道³²

³⁰ 来源：Wittstock, 2014

³¹ 来源：Wittstock, 2014

³² 来源：Wittstock, 2014

乘客友好型有轨电车车站的设计有多种。其中所有类型的车站都应实现无障碍通行。岛型车站可设计有隔离或无隔离护栏（图25）。

路面隆起（图26）保留了道路的直线特点。乘客在隆起的路面候车和上车。图27展示了该种创新的进一步发展，即自行车道的隆起处理。路缘扩展也为从人行道直接

上车的有轨电车车站设计提供了另一种可能性（图28）。

另外，一种货运有轨电车为城市郊区的公司服务。货运有轨电车将公司和城市的物流中心联系在了一起。



图25：路旁有（无）隔离护栏的有轨电车岛型车站³³



图26：路面隆起的有轨电车车站³⁴



图27：配有隆起自行车道的有轨电车车站³⁵

³³ 来源：Wittstock, 2014

³⁴ 来源：Wittstock, 2014

³⁵ 来源：Wittstock, 2014



图28：路缘扩展的有轨电车车站³⁶

2.2.5 未来有轨电车系统的发展

除了逐步重新评估已有线路和无障碍站点，德勒斯顿还将规划新的有轨电车路线。新的路线应代替公交车路线，并有达到满载的潜力。未来有轨电车的发展依据是德

累斯顿可持续城市交通规划（SUMP）中的“2025+交通发展规划”。

2.3 汉诺威



图29：汉诺威轻轨系统³⁷

2.3.1 简介

汉诺威地区包括下萨克森州首府汉诺威市及其20个地区。该区域有居民115万，其中52万人居住在汉诺威市。汉诺威地区的轻轨系统可以作为大型城市发展高覆盖度、半地下城市轻轨系统的最佳实例。

³⁶ 来源：Wittstock, 2014

³⁷ 来源：Weske, 2014

2.3.2 公共交通网络

每年有超过2亿人次使用包含了重轨、轻轨和公交车的城市公共交通系统。如今轨道交通系统覆盖了城市中心和郊区73%的区域，计划到2030年将覆盖率提高到77%（如图30所示）。

考虑诸多因素，汉诺威市政府采取一种折中的方案，决定采用3种不同功能的公共交通：一个重轨网络用以连接周边的城市中心和汉诺威市，一个轻轨网络连接城市和郊区，一个公交车系统完善社区内部服务。汉诺威市和汉诺威地区的居民区基本上是沿着主要轨道交通线路建立起来的。

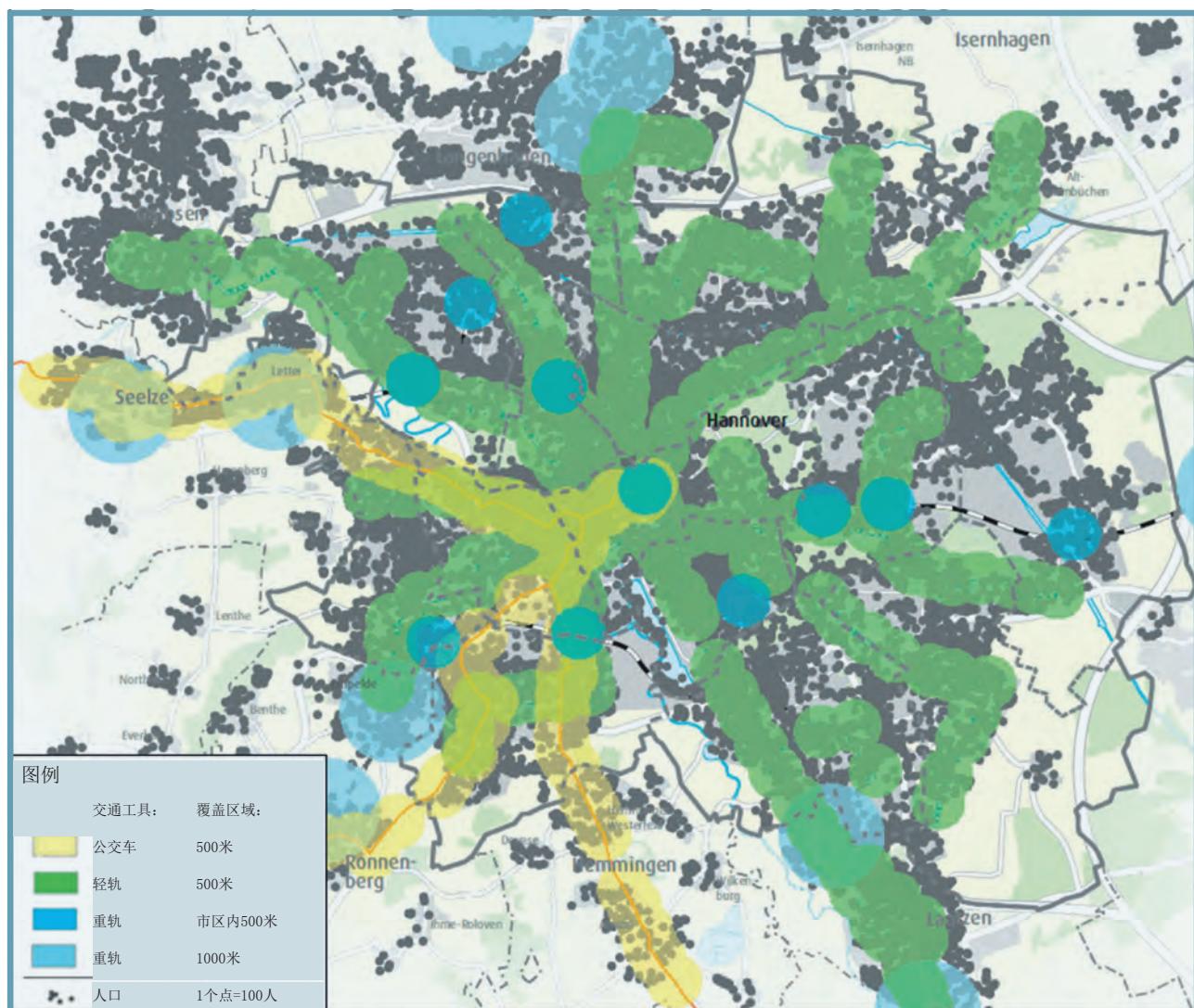


图30：汉诺威地区公共交通覆盖区域³⁸

³⁸ 来源：Weske, 2014

2.3.3 汉诺威有轨电车系统

作为交通系统的支柱，总长127公里的12条轻轨路线连接了汉诺威市及其周边地区（图31）。为了满足地区的发展，轻轨应该独立于其他交通方式，并且应比有轨电车更快、更高效以及在运行过程中受到更少的干扰。因此汉诺威的轻轨系统包含了地面和地下两部分，其中地下隧道横跨市区中心。在郊区，轻轨使用了独立于道路的轨道，因此速度更快。在市区内，由于不受交通堵塞的影响，有轨电车更加准时高效。

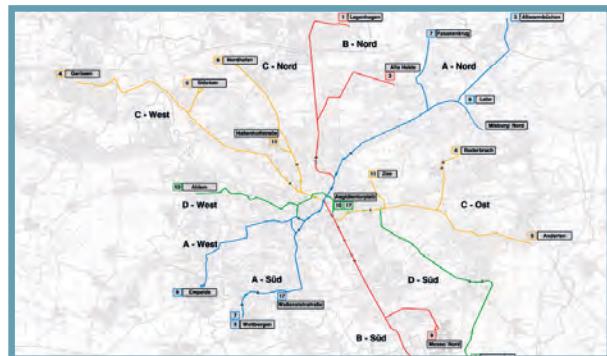


图31：汉诺威市的轻轨系统³⁹

人口数量	518,386 (2013年)
总面积	204.15 平方公里
人口密度	2,539 人/平方公里
有轨电车车站数量	202 (站台高度: 86厘米)
有轨电车线路数量	12
网络总长	127 km 84%有独立轨道
站间平均距离	650 m
平均时速	26 km/h
列车数量	300
年客流量	130,000,000 人次 (仅轻轨)

表5：汉诺威市轻轨网络概况⁴⁰

2.3.4 汉诺威轻轨系统特点

汉诺威位于德国北部平原和下萨克森高地之间，周围是莱纳河河谷，这也是城市中许多重要的交通路线都是东西和南北走向的原因。

2.3.5 未来轻轨系统的发展

总而言之，“2015区域发展规划”控制着该区域新居住区的增长情况。该规划的主要目的是防止区域内的过度发展。新居住区主要规划在中心城镇的地铁站附近。

关于电车系统的详细发展目标包括以下几个方面：连接站点，完成第四条城市轨道，延长交通线路，车站的无障碍化改造，测试新轨道的经济价值以及为将来的轨道发展预留区域。

³⁹ 来源：Weske, 2014

⁴⁰ 来源：Weske, 2014



3 国际实例

本章主要介绍除德国之外其他国家的有轨电车系统。

3.1 法国波尔多市



图32：波尔多市阿尔斯通Citadis型有轨电车行驶在无悬线轨道上⁴¹

3.1.1 简介

波尔多市的有轨电车系统是世界上首批无悬线的有轨电车系统。在20世纪50年代，波尔多市的有轨电车系统曾经被彻底废弃。在20世纪70年代，当城市开始面临交通问题时曾一度想要建设一个地铁系统。然而这一切在1995年市长的办公室里发生了改变：他们决定要重新启用有轨电车。波尔多市有轨电车的APS（地面供电系统）一开始易受暴雨，积水和积雪等原因而导致短路。由于该技术在

当年实施时是全新的技术，因此造价昂贵而且出现问题时会极大地提高总体成本。同时其运营成本也会略高于一般的有轨电车。但这一系统依然被采用并且作为一个成功典型推广到其他法国城市。

⁴¹ 来源：Pline. (2008). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:XDSC_7576-tramway-Bordeaux-ligne-B-place-des-Quinconces.jpg

3.1.2 有轨电车系统

一个完整的有轨电车网络包括有轨电车所使用的独立轨道——这其中也包括很多绿色轨道。整个系统的设计时速是每小时70公里。实际上最大速度被限制为每小时55公里。有轨电车可以控制信号灯并拥有优先通行权，从而不用停车直接行驶到下一站。这一方式使得有轨电车的平

均行驶速度可以达到每小时21公里，也是全法国最快的。候车间隔时间在高峰时段为4分钟，其他时段为8分钟。在市区内37%的居民在500米的范围内就能找到有轨电车车站。

人口数量	241,000 (2012年)
总面积	49 平方公里
人口密度	约4,900 人/平方公里
有轨电车车站数量	86
有轨电车线路数量	3
网络总长	44 km
站间平均距离	约 450-500 m
平均时速	21 km/h
列车数量	74
年客流量	40,000,000 人次

表6：波多尔市有轨电车网络概况⁴²



图33：波多尔市有轨电车网络图⁴³

⁴² 来源: Bordeaux-metropole.fr, 2015

⁴³ 来源: [Otourly. \(2008\). \[https://en.wikipedia.org/wiki/Bordeaux_tramway#/media/File:Tramway_Bordeaux.svg\]\(https://en.wikipedia.org/wiki/Bordeaux_tramway#/media/File:Tramway_Bordeaux.svg\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bordeaux_tramway#/media/File:Tramway_Bordeaux.svg)

无悬线有轨电车主要运行在城市中心和一些郊区。列车从现有的架空电缆和导电轨道系统获取电力，从而避免破坏城市风光。

如图34所示，在两条铁轨之间有一条地下的电气化轨道，这个轨道包括8米长的导电部分以及两侧3米长的绝缘部分。只有电车经过时，导电部分才会通过无线电讯号启动。因此该系统对于穿越轨道的行人是完全无害的。

在波尔多市外的有轨电车仍要使用架空电缆。转换架空电缆的操作需要列车员在站台进行，大概需要20秒钟的时间。



图34：Citadis型有轨电车使用第三条导电轨道供电⁴⁴

3.1.3 今后扩建

目前有轨电车系统正处于第三扩建阶段。这一阶段包括33公里的新轨道以及7公里的列车式有轨电车（tram-train）。投资资金为5.82亿欧元。A、B、C线都将会延伸，并且将会建设一条新的D线（预计2017/18年完工）。新型更长的Citadis车型已经被预定。

一条列车式有轨电车线将会沿着法国铁路公司（SNCF）的线路建造，起始站从Médoc线开始。C线的有轨电车将会从平时的线路分离出来并使用铁轨，实现无换乘连接波尔多市和布朗克福市（Blanquefort）。第一步是在法国铁路公司的轨道旁边建设一条单独的线路。在之后的阶段预期运营一个真正的列车式有轨电车。

⁴⁴ 来源：Eyquem Christophe. (2004). http://www.freemages.fr/album/vehicules/tramway_0.jpg

3.2 瑞士苏黎世



图35：苏黎世有轨电车⁴⁵

3.2.1 简介

与其他的欧洲和美国城市相比，无论是小汽车还是火车，苏黎世从来没有只把重点放在单一的交通工具上面。苏黎世实际上决定保留有轨电车系统，而不是用地铁替代它。不像德国以及奥地利，有轨电车在瑞士被称为“das tram”而不是“die tram”。

3.2.2 有轨电车系统

如今苏黎世拥有世界上最密集的有轨电车网络之一。由于相应的交通政策，80%的居民都在使用有轨电车。有轨电车和其他交通工具相比既可靠又干净，但是缺点是速度很慢（平均每小时18公里）。这是因为相比其他城市，苏黎世的有轨电车车站之间距离很近（300米而不是通常的500–600米），因此行驶到车站的时间也很短。

人口数量	404,000 (2014年)
总面积	92 平方公里
人口密度	约 4,400 人/平方公里
有轨电车车站数量	约 350
有轨电车线路数量	14
网络总长	118 km
站间平均距离	300 m
平均时速	18 km/h
列车数量	约 260
年客流量	201,000,000 人次

表7：苏黎世有轨电车网络概况⁴⁶

⁴⁵ 来源：Andreas Praefcke. (2007). https://en.m.wikipedia.org/wiki/Z%C3%BCrich_tram_route_2#/media/File:Z%C3%BCrich_Paradeplatz.jpg

⁴⁶ 来源：Stadt Zürich, 2015

无论在哪里建立新的城市小区，有轨电车都是规划过程中的一部分。有轨电车能够使房地产增值。目前就有针对于此的相关讨论，主要针对于因居住在有轨电车附近而获得相应收益的居民是否应该提供一定的财政捐助。

Cobra型有轨电车（图37）是庞巴迪为苏黎世定制的车型：乘客被放在了“首位”。市政府为每一辆列车花费了将近250万欧元。该车型使用了很多创新性技术：铁轨发出的吱吱声被控制在列车内部而不是外部；新型的轨道

润滑剂使得有轨电车的噪音污染很少。苏黎世的失业人群可以获得清理有轨电车的工作（“清洁队”），这一点更加增加了当地有轨电车建设的吸引力。

自2003年起，苏黎世的市民可以使用货物有轨电车（图36）来处理大宗废弃物。在固定的时间段，人们可以把体积较大的废弃物带到某些特定的车站。有轨电车将会把这些废弃物免费运走。



图36：货运有轨电车⁴⁷

⁴⁷ 来源：Sunil Prasannan. (2009). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cargo_Tram_outside_Zurich_Hauptbahnhof.JPG



图37: Cobra型有轨电车⁴⁸

3.2.3 今后扩建

一些线路正根据乘客的需求进行了改进和延伸。苏黎世遵循着有轨电车网络进一步发展的5大目标:

- **有轨电车网络和公交车网络的发展应该和城市发展目标、临近的社区、投资者以及区域规划相协调。**
- **客运需求应该通过管理需求导向来满足。**
- **中长期的观点应该不断改进，应优先考虑线路延伸，并整合到现有的网络中来。**

- **不同的公共交通运营商应该相互协调并且联系在一起。**
- **应该建立一个不断更新的公共交通总体规划原则**

在《2025苏黎世公共交通线路理念》(VBZ Linienkonzept 2025)中可以找到有关于这些目标以及特殊战略和扩张计划的详细内容。

⁴⁸ 来源: Stefan Baguette. (2005). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zurich_Be_5-6_Cobra_3002_Letzistrasse.jpg



4 中国实例

中国的城市化率一直在不断增长并且预计在2030年达到70%。这意味着有超过10亿人将会居住在城市里，而城市的基础设施必须进一步快速发展和扩建。除了建设地铁系统，中国还会经历有轨电车的重新兴起。2003年，国务院发布了一个关于加强城市轨道交通规划建设管理的通告。该通告对于申报地铁和轻轨项目的城市设立了几项基本条件。申报发展地铁的城市应达到下述基本条件：地方财政一般预算收入在100亿元以上；国内生产总值达到1000亿元以上；城区人口在300万人以上；规划线路的客流规模达到单向高峰每小时3万人以上。申报建设轻轨的城市应达到下述基本条件：地方财政一般预算收

入在60亿元以上；国内生产总值达到600亿元以上；城区人口在150万人以上；规划线路客流规模达到单向高峰每小时1万人以上。根据这一通告，中国的很多城市并不能满足建设地铁和轻轨的基本申报条件。因此，很多城市将注意力转向了有轨电车：预计有轨电车线路总长将会达到2000公里，从长远来看甚至达到4000公里。仅上海市就在计划建设一个600公里长的有轨电车网。郑州也在规划建设37条有轨电车线路，总长达到550公里。武汉也在规划200公里长的有轨电车网。下表总结了中国的有轨电车系统。

城市	开始时间	运营中 (线路)	运营中 (公里)	建设中 (线路)	建设中 (公里)	规划阶段 (线路)	规划阶段 (公里)	总长 (公里)
香港	1904	6	13.0	-	-	-	-	13.0
大连	1909	2	23.4	-	-	-	-	23.4
长春	1941	4	63.2	-	-	-	-	63.2
天津	2007	1*	7.8	-	-	-	-	7.8
上海	2010	1*	9.8	2	28.0	6	79.4	117.2
沈阳	2013	3	54.8	1	11.3	4	65.0	131.1
南京	2014	1	7.7	1	9.1	-	-	16.8
苏州	2014	1	18.1	1	16.0	4	81.9	116.0
广州	2014	1	7.8	-	-	6	66.5	74.3
北京	2015	-	-	1	9.4	4	76.0	85.4
珠海	2015	-	-	1	8.7	8	147.3	156.0
淮安	2015	-	-	1	20.3	-	-	20.3
深圳	2015	-	-	1	11.5	-	-	11.5
成都	2015	-	-	1	22.3	5	57.7	80.0
合肥	2015	-	-	2	29.3	-	80.4	109.7
青岛	2015	-	-	1	8.8	-	-	8.8
徐州	2015	-	-	1	14.4	3	-	14.4
六盘水	2016	-	-	1	49.2	1	18.1	67.3
佛山	2016	-	-	1	13.1	-	-	13.1
武汉**	2016	-	-	1	10.0	13	204.0	214.0
昆山	2017	-	-	-	-	8	243.0	243.0
宁波	2017	-	-	1	8.2	-	-	8.2
海口	2017	-	-	1	24.7	-	27.6	52.3
重庆	2017	-	-	2	24.7	2	-	24.7
郑州***	2018	-	-	-	-	31	466.0	466.0
三亚	-	-	-	-	-	4	60.0	60.0
厦门	-	-	-	-	-	3	-	0.0
拉萨	-	-	-	-	-	3	63.9	63.9
株洲	-	-	-	-	-	4	98.7	98.7
合计	-	14	192.6	21	319.0	109	1835.5	2347.1

*Translohr系统； **估算； ***规划指导2030年，后续有更多线路

表8：处于运营中，建设中和规划阶段的中国有轨电车系统⁴⁹

⁴⁹来源：Schulz, 补充了2015年的数据

和地铁相比，有轨电车在中国如此具有吸引力的主要原因是低成本。目前的一些地方的有轨电车系统运行站点之间距离较长并且车型较小，客容量有限。这种情况经常出现在还未完全建成的城市发展区。如果城市化过程持

续下去，有轨电车的使用率会大幅上升。毫无疑问中国对于交通运输会有强烈的需求，而这就需要长期且可持续的解决方案。

图38显示了目前在中国处于运营，建设或者规划阶段的有轨电车的城市。其中一些城市将会在本章进行介绍。



图38：中国处于运营，建设或者规划阶段的有轨电车的城市

4.1 中国的有轨电车车辆

中国有轨电车市场近些年来不断升温，开始日益受到国际知名有轨电车生产厂商的关注。但在中国国产化背景下，像庞巴迪（Bombardier），西门子（Siemens）和阿尔斯通（Alstom）很难从中国的市场直接得到订单。中国采用“以市场换技术”的投资战略已经很多年，并且在汽车和高铁上都取得了成功。基于这些成功经验，中国的有轨电车生产厂商也通过自主研发、买断知识产权、合作

研发等方式设计和生产中国本土的有轨电车。因为低廉的维护成本和较短的维护时间，这些本土车型比欧洲的车型在中国的市场更有竞争力。

为了与欧洲市场的典型有轨电车车型进行对比，下表给出了一些在中国使用的有轨电车车型。

地点	大连	长春	天津	沈阳	广州
			上海		
型号	DL6WA	900 series	Translohr STE 3	-----	CNDDB
生产厂商	大连市公共电车公司电车工厂	沈阳新阳光机电科技有限公司	法国Translohr公司	中车长春轨道客车股份有限公司	南车株洲电力机车有限公司
运行时间	2002年11月	2012年底	2007年5月	Sep. 2013	End of 2014
长度	22.5 m	15.85 m	25.00 m	28.8 m, 34.4 m	36.5 m
宽度	2.6 m	2.5 m	2.2 m	2.65 m	2.65 m
净重	35.44 t	22 t	23-44 t	-----	-----
引擎功率	455 kW	150 kW	-----	700 kW	-----
低地板率	70 %	70 %	-----	70 % (28.8 m) 100 % (34.4 m)	100 %
载客量	242	150	127	300 (28.8 m) 360 (34.4 m)	386
最高时速	60 km/h	60 km/h	70 km/h	70 km /h	70 km/h
最大爬坡比	-----	-----	13 %	5 %	6 %
供电系统	750 V DC	750 V DC	750 V DC	-----	-----
特点	关节式铰接装置，电动塞拉门，交流驱动系统	再生制动并电阻制动补足	单轨胶轮导向车辆，最大爬坡比为13 %	无悬线驾驶700米	无悬线行驶 (超级电容)

表9：中国有轨电车型号⁵⁰

⁵⁰ 来源：生产厂商数据表

4.2 有轨电车系统

4.2.1 有轨电车的新生

在中国，只有三座城市的有轨电车几十年来一直运营，从未间断。他们分别是长春，大连和香港。1909年，大连在被日本占领期间建成了第一条有轨电车线。在1945年有轨电车网共包括11条线路，总长达到最大。在20世纪70年代，因为城市发展的原因，8条线路被拆除。只保留了201路，202路和203路。201路和203路在2006年合并为新的201路。新的线路长10.8公里，由华乐广场站始发至终点站兴工街（图39）。202路则扩建并延伸穿过世界上最大的城市广场——星海广场。201路主要行驶在道路上而202路则有独立轨道。201路以前主要使用DL3000型日本产有轨电车，现在主要是DL6WA型现代铰接式有轨电车，202路主要使用的DL6WA型（图40）。



图39：大连有轨电车网络



图40：大连有轨电车DL6WA型（左）⁵¹ 和DL3000型（右）⁵²



⁵¹ 来源：陳炬燧. (2008). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dalian_Tram%E5%A4%A7%E8%BF%9E%E6%9C%89%E8%BB%8C%E9%9B%BB%E8%BB%8A1007.jpg

⁵² Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Trams_in_Dalian#/media/File:DL6WA.jpg

长春是中国第一个将新的有轨电车和现存的无轨电车系统相结合的城市。此外，长春还有两个建在高架桥上的轻轨系统（3号线和4号线）。轻轨3号线自2002年开始运行，也是中国第一条轻轨线。轻轨线总长48.2公里，共设有49个车站。有轨电车54路线路总长7.6公里，始发站位于西安大路，终点站是工农大路（图41）。在2014年，增加了一条长为5公里的支线（55路）可以通到长春西站。55路每公里建造成本约为人民币2000万元，和其他有轨电车轨道线路相比造价低廉。新型的长春有轨电车900系电车（图42）自2012年起投入运营。该款车型的设计专门考虑了长春的气候条件，在零下40度时也可以正常运行。为了今后交通网络的扩建和延伸，长春市制定了以有轨电车为主导的交通总体规划。该规划设计了“一横三纵”的四条有轨电车线路，总长为38.16公里。



图41：长春有轨电车和轻轨网络



图42：长春有轨电车800型（右）⁵³ 和900型（左）⁵⁴



⁵³ 来源：<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/YK4-600.jpg>
⁵⁴ 来源：Belinsky. (2014). https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/Trams_in_Changchun_900_series_%283%29.JPG

4.2.2 双层有轨电车

在中国提起有轨电车，最有名的城市当属香港。香港电车在1905年投入运营。由于乘客的不断增长，于1912年引入了第一辆双层电车。现如今香港电车是全球唯一全数采用双层电车的电车系统。而双层电车不仅仅作为香港重要的交通工具，更成为了香港的标志之一。换而言之，双层电车见证了香港的历史。香港电车被香港人俗称为“叮叮”，源于电车开动或警示的铃声。

香港的有轨电车系统总长33公里，包括7条线路，123个车站，轨道总长30公里。电车在香港岛北部坚尼地城至筲箕湾段为双线行车，此外还有围绕跑马地段约3公里的顺时针环形单线（图43）。在2015年，香港共有178辆双层电车，其中包括48辆最新型的第七代有轨电车，2辆（#28和#128）敞篷古典旅游电车用于旅游推广和私人派对（图44）。第七代有轨电车于2011年11月28日正式投入服务。该款电车结合了现代内部设计和传统车身外貌，并且首次使用了变频驱动。每一节车厢可以运载115个人。在有轨电车车厢内和车站处均设有乘车信息，并且车次可以重新安排以满足乘客求。采用交流电动机替代直



图43：香港有轨电车网络⁵⁵

流电动机以提高可靠性和效率并配备了新的电磁制动系统。针对轨道维护，通过引入自动埋弧焊接机器人和磨床增加铁轨的使用年限并且减少运行噪音。站点之间的距离很短（通常为250米）并且发车间隔约为90秒。在2015年每天约有18万人次乘坐有轨电车。



图44：第七代香港有轨电车（左）⁵⁶ 和古典旅游电车28号（右）⁵⁷



⁵⁵ 来源：http://vignette1.wikia.nocookie.net/hk-rail/images/7/78/Tram_58.JPG/revision/latest?cb=20121213031625&path-prefix=zh

⁵⁶ 来源：Mike Peel. (2013). https://en.wikipedia.org/wiki/Hong_Kong_Tramways#/media/File:Hong_Kong_tram_28.jpg

⁵⁷ 来源：香港电车 https://www.hktramways.com/images/schedulesFares/map_6_en.png

4.2.3 胶轮有轨电车

天津开发区现代导轨电车是中国第一条现代胶轮有轨电车系统。这个有轨电车系统自2007年5月起一直运行在天津泰达经济技术开发区。该系统总长7.86公里，共设14站，从津滨轻轨泰达站一直到北部学院区。有轨电车车辆由法国劳尔公司制造，为100%低地板电车（图45）。胶轮可以与铁轨产生更大的摩擦，增强列车的牵引力，使列车的爬坡角度上升为13%，但代价是更多的摩擦损耗。整个Translohr系统是一个专利的系统，比其他传统的有轨电车系统更贵，无论是建造成本还是运营成本都更高。整个项目共投资5亿元，其中1.9亿元⁵⁸用于试验线（不含车

辆）。第二阶段将会建设1号线，长30公里，始于滨海公园到滨海航母主题公园。2号线和3号线正在处于规划阶段，其中2号线长度约为15公里。



图45：天津泰达有轨电车（左）⁵⁹和车厢内视图（右）⁶⁰



⁵⁸ 来源：http://www.teda.gov.cn/html/teda_index2011/SHZN11094/List/htm/Index_26.html?type=sh

⁵⁹ 来源：https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/New_Tram_in_Tianjin.jpg

⁶⁰ 来源：https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Interior_Translohr_Tianjin.jpg

4.2.4 通勤有轨电车

自从1975年上海市有轨电车停止运营后，新的有轨电车线自2010年起重新运行在上海市张江高新区。这也是目前为止上海市唯一的有轨电车。这条有轨电车采用与天津经济技术开发区现代导轨电车相同的Translohr胶轮有轨电车系统（图46），主要用来连接张江高科技园区和居住区。线路总长为10公里，共设15个车站并配备了8辆列车。运行时间从早上5:45开始直到晚上11点，每天的客流量约为6000人次。根据上海晨报的报道，张江有轨电车线每年约亏损2千万元⁶¹。造成亏损主要有两个原因：一是单轨系统的维护成本较高，二是没有足够的乘客。

有轨电车的乘客绝大多数为上班族，这意味着每天有轨电车运送的为上下班客流，并且仅在早高峰和晚高峰时段，而生活客流很少。一天之中的交通流量严重不平衡。此外，超过10分钟的发车间隔和较慢的运行速度也是大部分乘客舍弃有轨电车转而选择地铁的两个原因。同时因为进口零部件价格昂贵，运行费用约为1500万人民币⁶²，并且也造成了维修花费时间较长。要解决这些问题，其中一个解决方案是将有轨电车和公交车结合起来。在经过第二和第三阶段后，张江有轨电车系统的总长可以达到30公里。



图46：张江有轨电车（左）⁶³ 和车厢内视图（右）⁶⁴



⁶¹ 来源：[ShanghaiDaily.com: http://www.shanghaidaily.com/metro/society/Tramway-cites-losses-for-shelving-expansion-plans/shdaily.shtml](http://www.shanghaidaily.com/metro/society/Tramway-cites-losses-for-shelving-expansion-plans/shdaily.shtml)

⁶² 来源：<http://news.163.com/11/0421/10/725H3MH200014AED.html>

⁶³ 来源：https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zhangjiang_Tram.jpg

⁶⁴ 来源：http://i1.dpf.com/groups/grouppic/2010-01-14/zhoubianyou_1968332_2900904_l.jpg

4.2.5 有轨电车作为郊区的主要交通工具

松江是上海市的市辖区，面积为605.64平方公里，常住人口158万。松江区计划建设一个长90公里，拥有6条线路的有轨电车网，其中还包括若干个和地铁九号线以及金山铁路的换乘站（图48）。在第一阶段，首批的两条线路（T1和T2）从2014年开始建造，2016年开始试运行，并于2017年正式运营。T1线总长15.6公里，T2线15.34公里。这两条有轨电车线将主要连接松江新城，老城，大学城，生活区，解决当地居民出行“最后一公里”的问题。预计每天的客流量可以达到17.3万人次。阿尔斯通和上海轨道交通发展公司合资的上海阿尔斯通交通设备有限公司将会为这两条线路生产30辆总价值7200万欧元的Citadis型有轨电车（图47）。



图47：松江有轨电车设计图⁶⁵

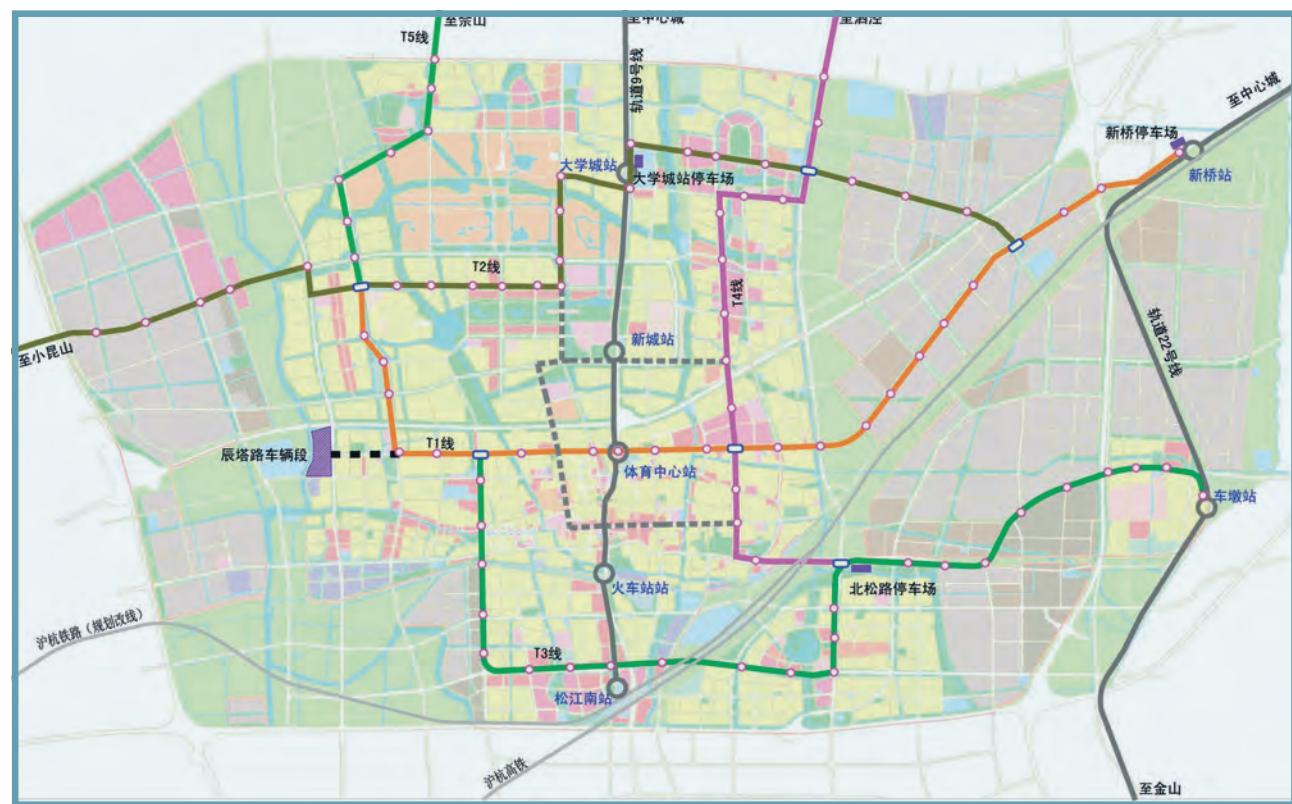


图48：松江有轨电车网络⁶⁶

⁶⁵ 来源：SATCO. (2015). <http://www.alstom.com/Global/OneAlstomPlus/Group/Images/Press%20Releases/Press%20photo-Shanghai%20Songjiang%20tram%20initial%20design.jpg>

⁶⁶ 来源：<http://www.shgtj.gov.cn/hdpt/gzcy/sj/201309/W02013090556969259726.jpg>

4.2.6 有轨电车作为地铁线的延伸

苏州是江苏省的地级市，位于中国的东海岸，西距上海80公里。苏州市多年来发展迅速，目前常住人口约为1000万人，是中国大陆第九大城市。有轨电车网主要建在苏州高新区（SNB）。这里主要集中了众多的高新技术产业和外资企业，同时也被称为“生态城”。苏州高新区已经采取了一系列措施来推广可持续交通，其中包括一个公共自行车共享系统，独立自行车道，机动车限排，鼓励电动车以及扩建绿地。现如今的公共交通以公交车、快速公交系统以及地铁线为主，并且地铁线的数量也会在今后由2条增加到7条。



图49：苏州第一条有轨电车线⁶⁷

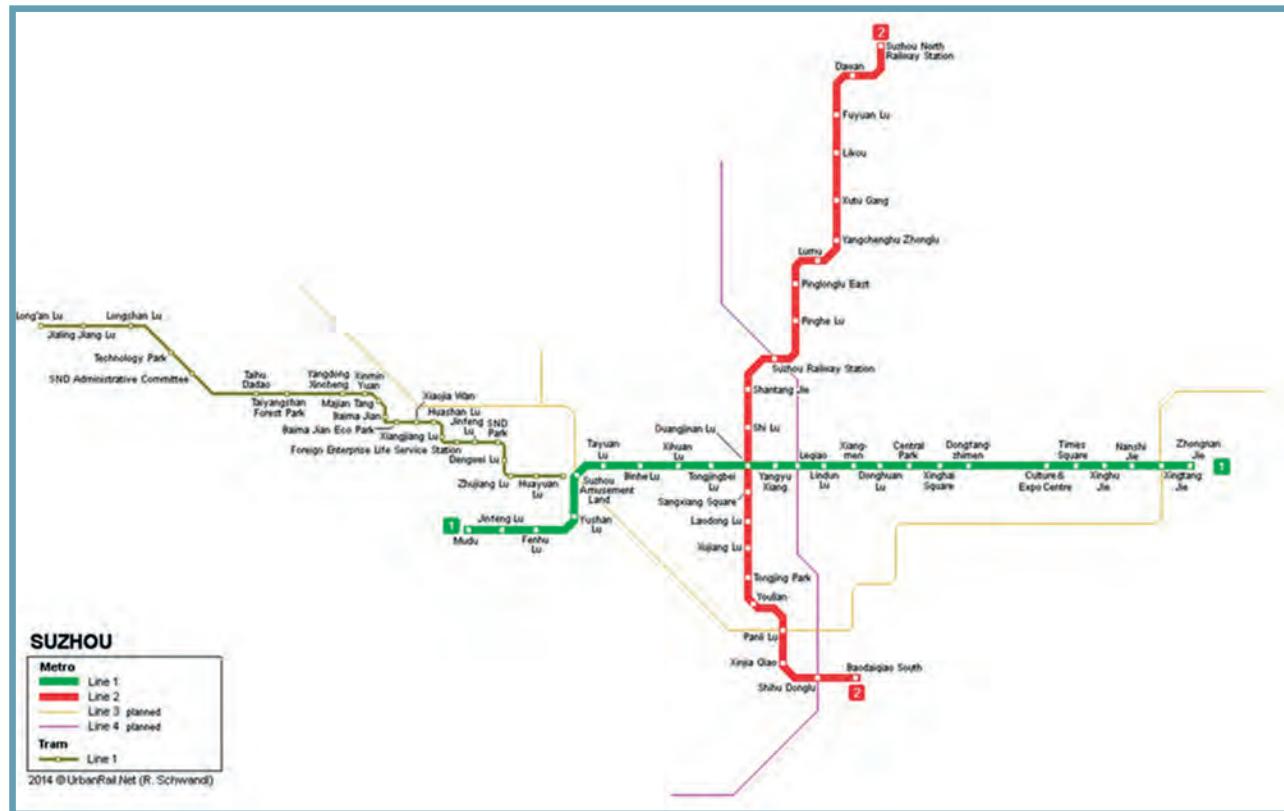


图50：2015年苏州地铁和有轨电车网络⁶⁸

⁶⁷ 来源: Andrew Benton. (2014). http://www.railwaygazette.com/uploads/pics/tr_cn-suzhou_tram-Andrew_Benton.jpg

⁶⁸ 来源: Robert Schwandl. <http://www.urbanrail.net/as/cn/suzh/suzhou-map.png>

在2014年10月26日，苏州开始运行第一条有轨电车线，并采用独立轨道系统。该线路主要用于连接苏州高新区和市中心的西部地区，起点站为地铁1号线的换乘站“苏州乐园”（图50）。线路共设11站，乘客可以通过地下通道或者过街天桥出入站。车站设有屏蔽护栏，乘客只能够从屏蔽门处上下车，这就需要精准的停车操作。

发车间隔为10到20分钟。车型为100%低地板的双向Flexity-2型有轨电车（图49），由庞巴迪和南车南京浦镇车辆有限公司共同设计建造，共包含5节车厢，总长32米，可乘坐299名游客。车站和轨道旁绿化优美，种植了各种树木，灌木。在线路中段阳山南站设有一个仓库，可同时停靠36辆有轨电车。

通过增加列车数量可以逐步缩短1号线的候车时间。在拥有15辆车的情况下，设置车站的停靠时间为30秒钟，红绿灯的等候时间为30-45秒钟，一辆车行驶一圈的时间为90分钟。最大时速为每小时60公里，平均时速可以达到每小时24公里。除了现有的有轨电车1号线，整个苏州高新区今后会建设更多的有轨电车线。2号线已于2014年7月开始建设并且预计在2016年底完工。在目前的规划中，1号线长18公里，2号线长18.7公里，3号线长8.8公里。这3条有轨电车线将构成一个长度为45.5公里的有轨电车网络。后续的扩建可以使总长达到88公里（图51）。

人口数量	10,060,000
总面积	8,488 平方公里
人口密度	1,249 人/平方公里
有轨电车车站数量	11
有轨电车线路数量	1 （共规划了5条线路）
网络总长	25 km （规划长度160km）
站间平均距离	约230m
平均时速	24 km/h
列车数量	3 （共预定15辆）
客流量	12,000 人次（第一天）

表10：苏州有轨电车概况⁶⁹

⁶⁹ 来源：Beckendorff, 2014



图51：运营中和规划中的苏州有轨电车线路⁷⁰

4.2.7 从快速公交系统到轻轨

厦门位于中国的东南沿海，是一座风景优美的现代化国际性港口旅游城市。总面积1699平方千米，常住人口350万人。仅在2010年，厦门就吸引了3000万来自国内外游客。为了提升旅游品质，厦门市计划建立一条43公里长的环岛观光有轨电车线（4号线），并预计在2015年底开始建造。在规划中，这条环岛线一开始是一条轻轨线，考虑到每天的客流量在4000到7000人次之间，后来在规划中改成了有轨电车线。厦门市早在2006年就申请建造地铁。但因为人口不足和成本过高等原因，该计划一直被搁置。在2008年采用了快速公交系统（BRT）以解决当时的交通问题。第一批的三条快速公交线在2008年开始运行。在建造初期就考虑到今后在所有条件都满足时要将快速公交系

统升级为轻轨。快速公交系统在建造时结合了许多不同的形式和方法，包括高架桥和地面车道，隧道和桥梁，快速公交系统和普通的公交车。快速公交系统的日客流量在2014年达到了30万人次。现如今快速公交系统已经成为厦门的主要交通工具。如果现在将快速公交系统升级为轻轨将会导致目前交通情况的恶化，因此改造计划推迟到了2020年，等到第一批三条地铁线建成通车之后。

⁷⁰ 来源：<http://www.sndtram.com/UploadFile/201501/06//15083269629.jpg>



5 有轨电车系统在城市发展中的优势

与其他公共交通系统（如公共汽车和地铁系统）相比，有轨电车系统具有很多优势。本章总结了其中最重要的几点。有轨电车的这些优点在与城市和交通发展联系在

一起时会产生更明显的作用。这其中涉及到了采用辅助措施以影响私车交通，停车空间，与公共汽车和自行车的衔接以及街道的设计。

5.1 灵活性

有轨电车系统能够与周边环境很好的融合在一起。当提到有轨电车网络时，第一个优势就是和其他车辆共享路面空间。将不同的轨道系统和路面交通工具整合起来可以节省空间，为其他建筑提供更多的可能性。有轨电车拥有较小的转弯半径，使得其也能适用于弯曲狭窄的道路。在第2.2章（德累斯顿）就列举了许多不同类型的街道设计。

另外，有轨电车系统的灵活性也来源于它所具有的不同功能。有轨电车既可以作为单一的交通模式，也可以作为联运运输系统，亦或是对于其他交通模式的补充（见柏林案例）。作为主要的交通模式，它在小范围内提供了类似于重轨的服务。作为联运运输系统，它运载着乘客以便他们在公交车和地铁等其他交通方式之间换乘。作为对重轨系统的补充，它在使用频率较低的路线上运输乘客，与此同时并不需要全套的重轨配套设施。

有轨电车的车型设计也丰富多样：大多数有轨电车的车身设计是基于模块化生产。同一系列的电车有许多相同的部位，例如发动机和车门。车头和车尾通常是根据不同城市的需求专门定制。车内设计和乘客上下车配套设施则有无限种选择。

就整个系统而言，也存在不同的变体。在前文中就介绍了三个不同的例子，分别是地下有轨电车，双系统有轨电车以及货运有轨电车。

地下有轨电车类似于地铁系统在隧道中运行。因此，它和其他交通分隔开来。大多数地下有轨电车是使用之前停用的地下地铁线路。这些地铁线路要么由于财政原因无法完成，要么曾被规划为重轨系统或者（地下）地铁系统。因此它们常被称为“准地铁”。第2.3章（汉诺威）就给出了一个的例子。

双系统有轨电车也就是所谓的列车式有轨电车（在德语中称之为“Regional-Stadtbahn”）。这种独特的系

统是基于卡尔斯鲁厄模式。它在80年代末期出现并发展起来，在1992年第一次运营。双系统有轨电车的特点是电车既可以在城市电车轨道上运行也可以在通往城市外部交通区域的重轨轨道上运行。有轨电车通常使用500-750伏特的直流电，但一般铁路系统是使用15千伏的交流电。双系统有轨电车能够通过技术调整适用于这两种不同的电力供应模式。目前德国的城市如卡尔斯鲁厄，卡塞尔，卡姆尼茨和意大利以及法国的部分城市拥有这种系统。卡塞尔和北豪森则拥有以混合柴油为动力的另一种系统。双系统的设计是为了连接有特殊基础设施的农村地区或者包含几个中型中心的区域。

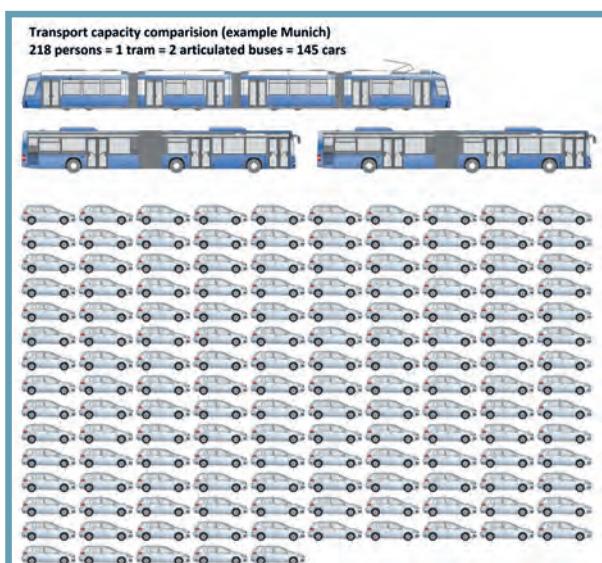
一些城市在常规电车的运营基础上还使用了货运有轨电车。2007年，在维也纳进行了一个试点项目之后，鲜有对于“Güterbim”（一个货运电车项目的名称）的需求。只有瑞士的苏黎世和德国的德累斯顿沿用了这套货运电车系统。在苏黎世，该系统被没有私家车或其他交通工具的市民用来处理大型生活垃圾。在德累斯顿，货运电车辅助大众汽车公司的一个生产基地连接附近的物流中心。这大幅降低了大货车穿梭于城市的现象。所有的货运电车都是用户定制，因此售价昂贵。

5.2 效率

一般而言，无论一辆车是否满载，电动机的使用效率都非常高。它比柴油机加速更有力，乘坐也更加舒适。此外，电动机所占的空间也非常小，因此它们可以安装在轮胎旁边。电动机的使用寿命也更长，并且由于大多数的部件没有磨损，所需的保养也非常有限。

有轨电车系统的运载效率通常是公共汽车的两至三倍。现代有轨电车的运载能力可以达到地铁系统的80%左右。如果乘客数量在短期内大幅增加或者减少，有轨电车可以通过在车内设置多功能区域（如可以放下收起的座椅）和增加车厢数进行及时应变。如果电车在开放路面运营，它和公共汽车一样会受到交通堵塞的影响。所以通常在这些区域，电车被设计为在独立的区域内运行，或使用设置通行优先权的交通信号系统以避免堵车的影响。有轨电车的平均速度因此得到了极大的提高，可以在站点间不停顿的高效运行。

图52展示了有轨电车相较于铰接式公交车和私家车的效率。



*218个乘客 = 1辆有轨电车 = 2辆铰接式公交车 = 145辆小汽车

图52：不同交通工具运载能力的比较（以慕尼黑为例）⁷¹

图53则展示了由德国海德堡市一个社区自发组织的活动，用来比较在实际生活中有轨电车和小汽车所占空间的大小。Variobahn型有轨电车在高峰时段其运载能力在90%的情况下可以搭载200多位乘客。假设平均每辆车上又有1.21个乘客则相当于170辆小汽车。而这些小汽车加起来需要大量的停车和道路空间（3.3公里长）。



图53：在海德堡市的有轨电车运载能力比较⁷²

⁷¹ 来源：MVG GmbH. <https://www.mvg.de/imaging/stk/mvg/halbbild/dam/mvg/ueber/projekte/tram/westtangente/galerie-01/diagramm-kapazitaet.png/jcr:content/diagramm-kapazitaet.png.2015-07-14-15-13-26.png>

⁷² 来源：UPI-Institut, Heidelberg. <http://www.tiefburg.de/images/StauPKW4.jpg>

5.3 交通质量与接受度

有轨电车系统在交通质量和接受度方面也比其他交通方式有更多的优势：首先，对乘客而言它比公共汽车的通达度更高。并且新修建有轨电车系统的实际客运量大多超过了预计的需求量。

图54就是一个例子。它显示了法国斯特拉斯堡从1994年到2013年在引入一条电车路线后乘客需求的不断增长。

导致这一结果的因素很多，主要包括：人们在车内的安全感和候车环境（有轨电车主要在地面上，而地铁则

但是有轨电车系统仍然只是间接地使周围地区的获利。比起公共汽车，轨道会被视作“某个从这里经过的事物”。它在这个区域意味着一项长期投资和未来的出行选择。一般来说，有轨电车系统的接受度取决于人们是否将其当做方向标，作为一次体验区域（附近的商铺、地标等）的机会以及作为一种有吸引力的、有活力的交通方式。

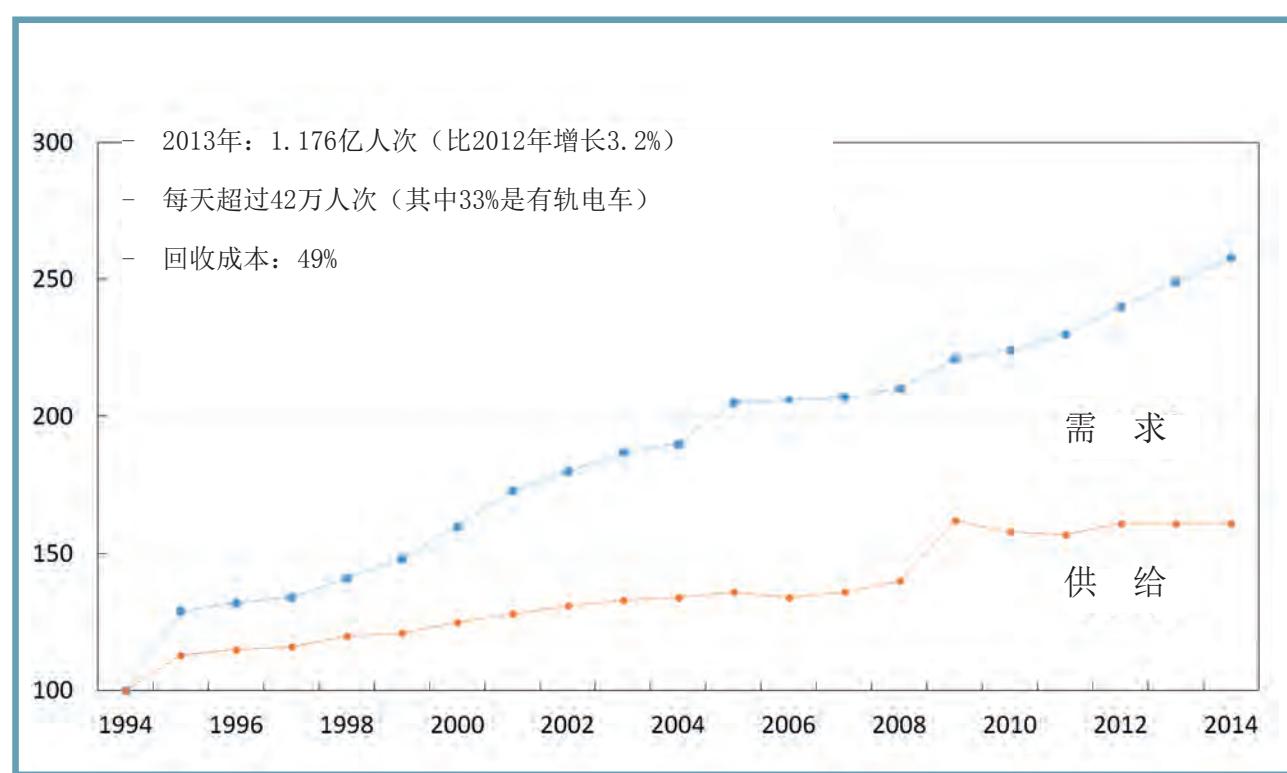


图54：斯特拉斯堡的有轨电车自1994年开始运行后的发展情况⁷³

有较深的地下入口），上下车以及在车旁移动的方便程度（越来越多的电车采用低地板方便上下），座位数量，噪音，舒适度，信息获取的难易度等等。长远来看有轨电车比其他交通方式更深入人心，因为人们会认为它比公共汽车等交通方式更可靠。

⁷³ 来源：CTS; Naumann, 2014

5.4 有轨电车系统成本

要想得到有轨电车系统的“纯”成本非常困难，唯一的方法是计算其生命周期成本 (Grinau et al., 2000)。交通公司经常被他们的决策所产生的财政后果感到惊愕。这是因为他们没有准确计算出决策所产生能够影响成本的各个因素。

图55用一个冰山的形式来说明有轨电车系统的全部成本。

有轨电车系统的全部成本包括车辆采购（高地板车辆的成本最高可以达到55%），基础设施，能源，维护，运营成本（人力，车辆与车站的清洁等）。由于资金来源的不同，有必要将投资成本和运营成本区别开来。表11列出了对于成本的估算，包括2008年车辆采购成本（误差在10%以内）和基于2007年针对十个运营商的运营成本调查。

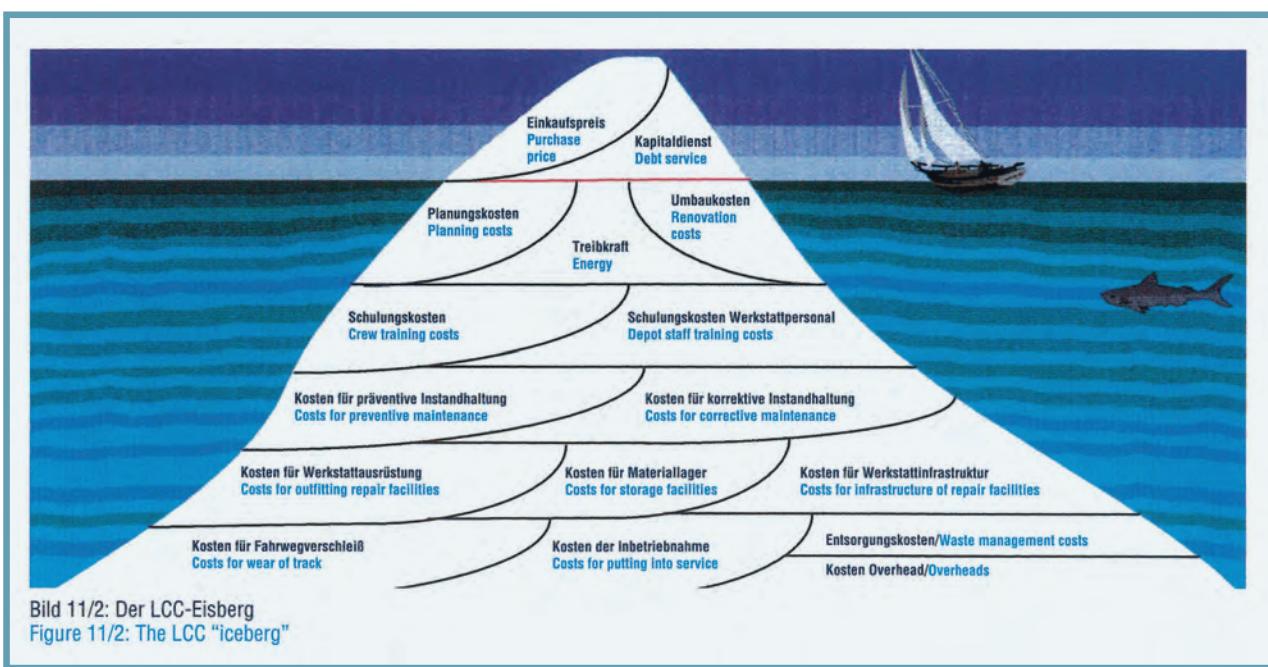


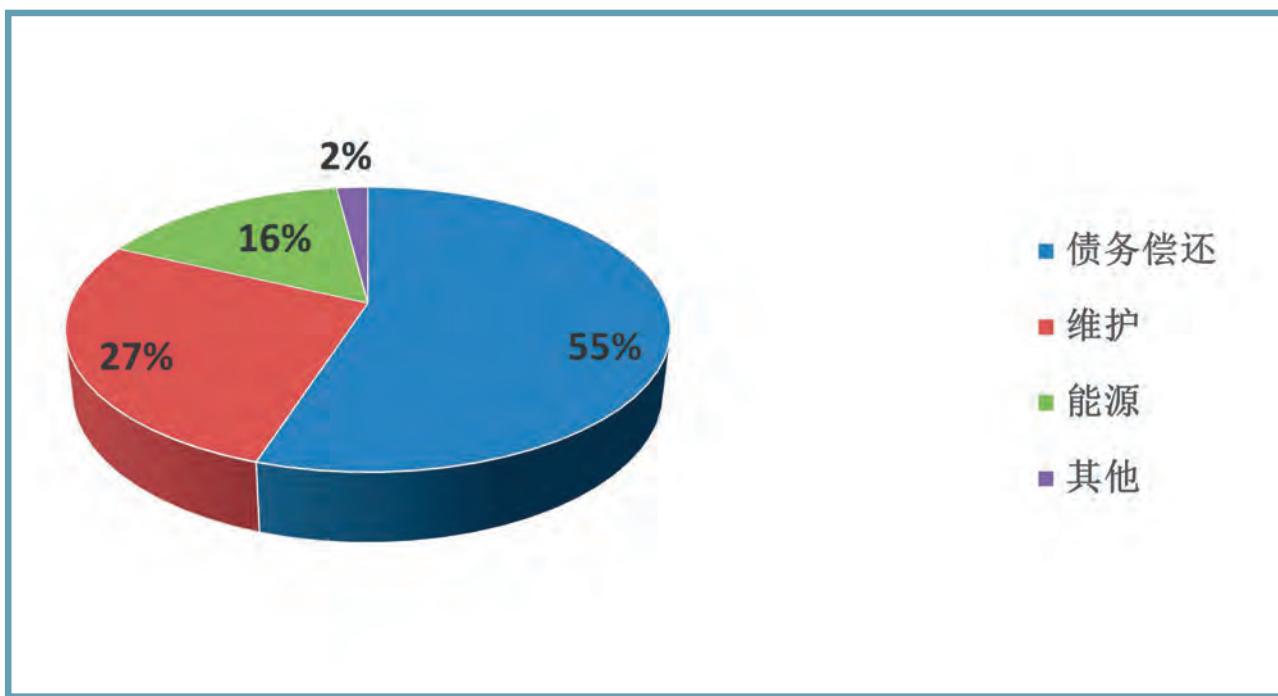
图55：生命周期成本“冰山”图⁷⁴

⁷⁴ 来源：(c) 2000, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDV-Förderkreis e.V.

	公交车 12米	铰接式公交车 18米	有轨电车 30米	有轨电车 40米
载客量	82	127	218	290
座位数/站立	32/50	47/80	64/154	88/202
使用寿命	12 年	12 年	40 年	40 年
购置成本 (欧元)	260,000	330,000	260万	290 万
每个座位的购置成本 (欧元)	3,293	2,598	11,972	10,000
每年的购置成本 (欧元)	274	216.5	298	250
一辆车每公里运营成本 (欧元)	3	3.5	6	6.5
一名乘客每公里的运营成本 (欧元)	0.037	0.028	0.038	0.022

表11：公交车和有轨电车的成本估算⁷⁵

图56将一辆有轨电车在使用生命期内产生的成本按照关键要素进行了划分；此处的债务偿还包括了投资成本。

图56：有轨电车车辆全生命周期的成本组成⁷⁶⁷⁵ 来源：Arndt/Busse, 2009⁷⁶ 来源：Girnau et al., 2000

5.4.1 投资成本

线路的投资成本包括购买车辆和修建必要的基础设施，这对许多城市是一项巨大的工程。和有轨电车系统相比，公共汽车的成本较低也能够快速投入运营。同时因为所需要的配套设施很少，在路线规划上也更加灵活。但是只要设计得当，有轨电车较长的使用周期会使得长期的回报高于前期投入。由于每座城市有不同的情况，因此比较不同的交通模式非常困难。投资成本还包括购置交通配套设施所需的资产。在一些其他情况下，补贴措施也

必须跟进。选择路线本身就是一部分很大的成本 (Girnau et al., 2000)。表12比较了在法国贝桑松市 (Besançon) 修建的一条14.5公里长有轨电车路线和在法国第戎市 (Dijon) 修建的一条18.9公里有轨电车路线所需要的成本。

		贝桑松市 (14.5 km)	第戎市 (18.9 km)		
	资产	总和	每平方公里	总和	每平方公里
1	规划/调查	1,190,717	82,118		
2	项目管理 1	11,159,649	769,631	7,000,000	370,370
3	项目管理 2	13,649,718	941,360	19,200,000	1,015,873
	小计 1-3	26,000,084	1,739,109	26,200,000	1,386,243
4	设备购买	5,000,100	344,835	14,000,000	740,741
5	设备安置	2,150,000	148,276	23,000,000	1,216,931
6	准备阶段	8,823,850	608,541	12,100,000	640,212
7	土木工程	18,776,200	1,294,910	10,100,000	534,392
8	线路建设	8,495,725	585,912	18,400,000	973,545
9	轨道铺设	39,074,100	2,694,765	41,500,000	2,195,767
10	导轨设计	10,437,175	719,805	7,400,000	391,534
11	道路区域	13,785,800	950,745	41,000,000	2,169,312
	小计 8-11	71,792,800	4,951,228	108,300,000	5,730,159
12	公共区间设施	8,185,200	564,497	14,900,000	788,360
13	信号灯	3,241,125	223,526	4,300,000	227,513
14	车站	2,201,600	151,835	6,000,000	317,460
15	电气化 (高)	20,521,750	1,415,293	24,700,000	1,306,878
16	电气化 (低)	10,504,900	724,467	17,400,000	920,635
	小计 12-16	44,654,575	3,079,626	67,300,000	3,560,847
17	场站和维护	13,112,702	904,324	24,500,000	1,296,296
18	车辆	35,296,094	2,434,213	73,600,000	3,894,180
18	推广措施	2,393,595	165,076	3,500,000	185,185
	总计	228,000,000	15,724,138	362,600,000	19,185,185

表12：法国贝桑松市和第戎市修建有轨电车的成本比较 (欧元)⁷⁷

⁷⁷来源: Naumann, 2014

由于每个城市的空间分布（旧城、新城、宽/窄街道等）各不相同，这给量化电车和轨道的建造成本带来了很大的困难。

表13基于法国的平均水平估算了路线和站点的建造成本。

许多中国专家认为有轨电车的建造成本大概是一个新地铁系统成本的20%到30%。在南京修建的河西有轨电车每公里成本为1.04亿人民币左右。深圳计算出来的成本为每公里1亿人民币。相比起来在武汉计算得出的成本要高一些，为每公里1.3亿人民币（Schulz, 2015）。

	百万欧元/公里	备注
电车线路（包括车站）	10	电气化
电车线路（不包括车站）	8	电气化
车站	1	双向
街道改造（表面）	5-10	取决于宽度和难易程度
桥梁（单线）	25	
桥梁（双线）	50	
隧道（双线）	100	

表13：包含30%规划成本和突发事件成本的每平方公里建造成本⁷⁸

最近在德国法兰克福新修建了一条3.5公里的双线有轨电车线。一共新修建了8个低地板车站，车站之间的平均距离为325米到630米，该线路的成本为4450万欧元。如果修建相同的地铁路线，成本将会是有轨电车20倍。目前可以预计在将来有轨电车的成本会下滑。这是因为庞巴迪，西门子和阿尔斯通等公司正在积极研究有轨电车的改造升级，取消部分高成本的架空电缆以及低成本电车型号。这些项目的成败与否尚无法给出定论。目前阿尔斯通公司在法国波尔多市进行的有轨电车项目发现许多新技术都出现了早期问题，而这些问题只能通过大量的资金投入才能解决。

目前，制造商一直没有公布有轨电车的制造成本。根据线管的预算金额和订购量进行估算，一辆有轨电车的造价介于150万到400万欧元之间。造价的区别主要在于技术设备的选择和车厢内部的质量。

⁷⁸ 来源：Busse, 2009

5.4.2 运营成本

除去能源成本和维护费，运营成本中最主要的部分是人工成本（图57）：

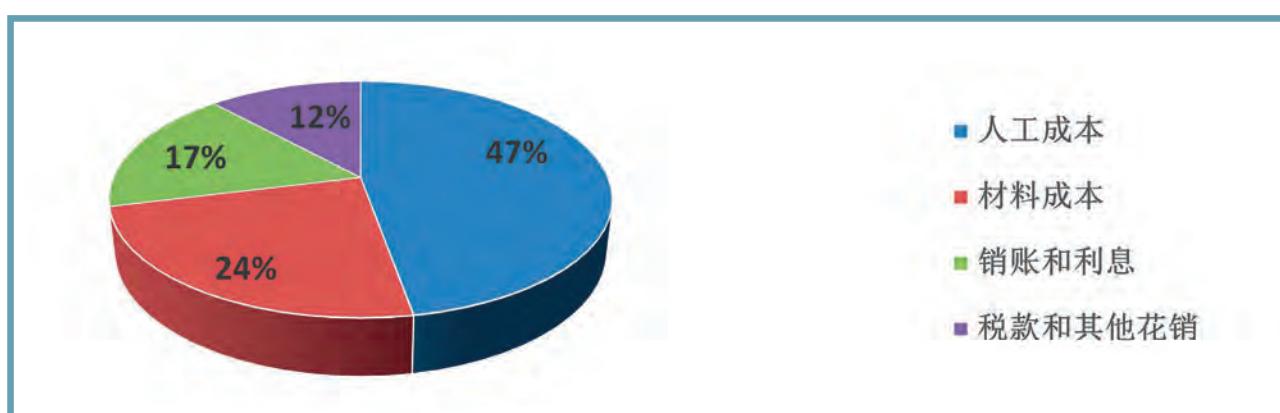


图57：一辆有轨电车的运营成本⁷⁹

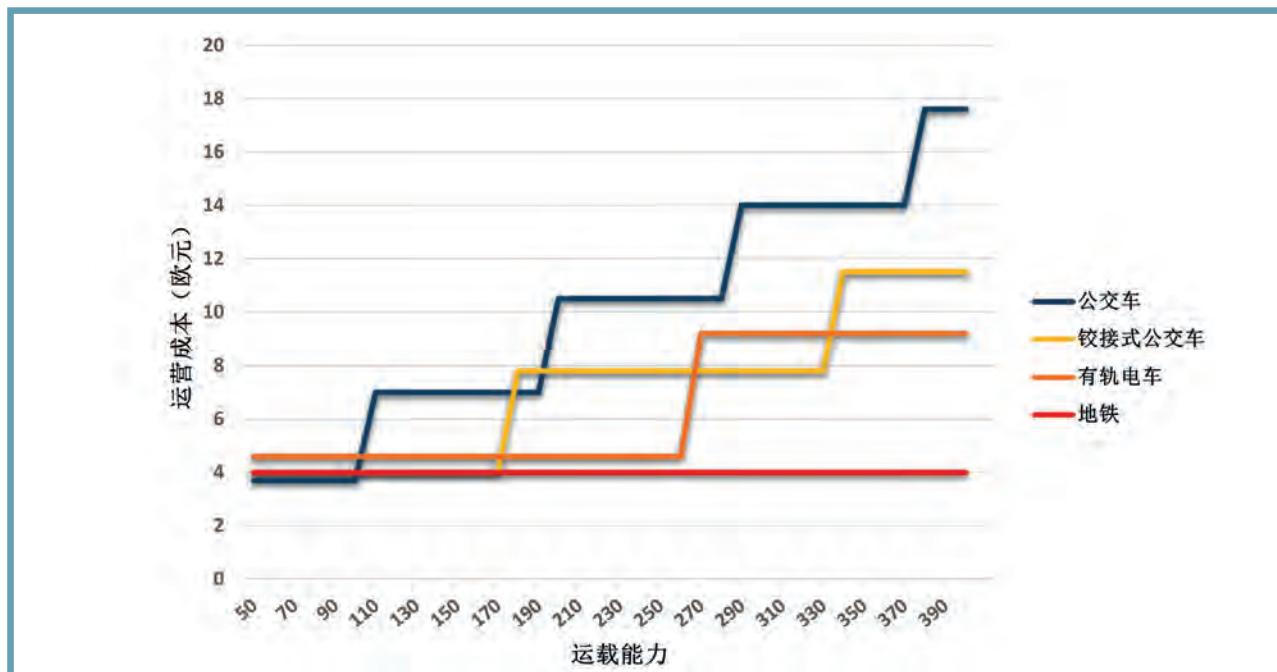
从运营商的角度来讲，考虑到有轨电车车辆的实用性和可靠度，有如下几个因素会影响到成本：

- **车辆重量有关的能耗**
- **替换零件的配送速度**
- **制造和保修的时间延迟**
- **备件的供应**
- **员工培训 (Girnau et al., 2000)**

磨损会导致进一步的成本上升。而磨损主要取决于客流量，天气以及其他一些因素。有轨电车系统中会受到磨损影响的部分包括铁轨，路基，排水系统，人工加固系统，交叉路口，信号灯，下穿隧道或地下隧道。此外，沿途的通讯系统以及车站内的售票机，照明设施，自动扶梯和电梯等部分也会磨损，需要定期维护。每年的维护费可以占到最初投资成本的20%。（Ibid.）

在许多城市，轨道系统通常也作为广告媒介以确保额外的财政收入。广告主要投放在电车车身空白处。在德国，规定只有一小部分的车窗禁止被遮盖，而大部分的车窗都可以用来投放广告。有轨电车通常行驶在地面并穿行于居住区。它非常引人注目，这不光达到了广告的目的，也成为针对游客的一个亮点。最后，一辆设计独特新颖的电车可以代表一座城市，对旅游业也起到间接的宣传作用。在全球范围内，电车高度广告化一个最著名的例子就是香港。

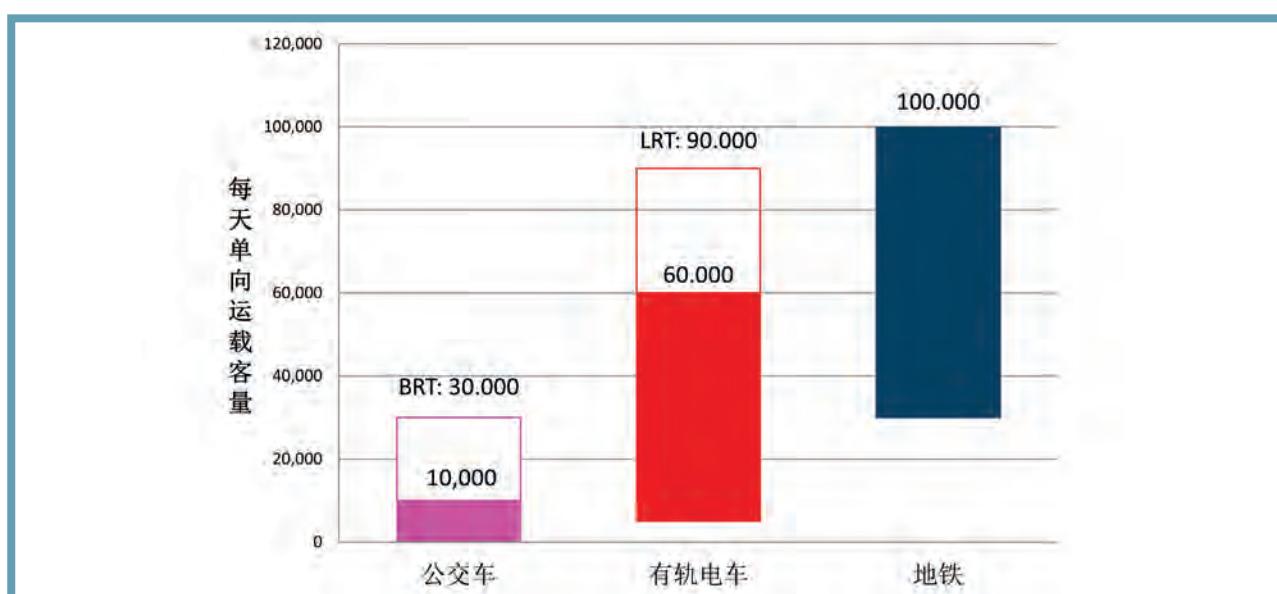
⁷⁹ 来源：Girnau et al., 2000

图58：运营成本和车辆运载能力⁸⁰

如图58所示，在载客量不断增加的情况下，有轨电车（Flexity型）的运营成本在很长时间内仍然保持稳定，而公交车的成本则不断上升。

有轨电车系统的载客量可以灵活调整。有轨电车可以根据运载乘客数量的需求进行加长或者减短。一列有轨电车每天单向可以搭载5,000到60,000名乘客。这一数字最高也可以达到90,000（图59）。

在德国投资修建一条有轨电车线路需要考虑很多因素，其中预期乘客数量需要达到每天单向15,000至50,000人次。如果少于这个数量，则更倾向于使用公共汽车；而多于这个数量将考虑修建地铁。

图59：有轨电车、公交车与地铁的运载量对比⁸¹

⁸⁰ 来源: Foljanty, 2009

⁸¹ 来源: Döge, 2010; 由Arndt补充

5.5 环境影响

由于使用电力驱动，有轨电车系统对环境的影响非常小。在市区范围不造成空气污染。轨道和车辆技术的改进使得其噪音也不断降低。总而言之，有轨电车是一种对

环境影响非常小的交通方式。

5.5.1 噪音排放

绿色轨道和其他一些技术可以降低有轨电车系统的噪音排放。电气化还确保了电动发动机十分安静。特别是路基在很大程度上决定了声音的排放。未保养好的铁轨和车辆会发出更多刺耳的吱吱声，尤其是在拐弯处。针对于此，庞巴迪公司为苏黎世定制的新型Cobra有轨电车采用创新技术，将轨道摩擦的声音导向轨道内侧而非两边的。新型润滑油的出现则进一步减小了电车的噪音污染。尽管电车产生的噪音在某种程度上不会小于公交车和小汽车，但这种噪音更加稳定而且可以预测。而汽车在疾驰的情况下会比有轨电车产生更大的噪音。

综上所述，一般而言有轨电车所产生的噪音较低。特别是考虑到它的运载能力要高于公交车和小汽车。因此当一辆有轨电车和几辆公交车相比时，这种噪音影响就会相对减小。

5.5.2 温室气体排放

目前几乎所有的有轨电车系统都是由电力驱动的。电能从能源角度来说十分环保，但前提是确保电力的来源是可再生能源。即便电车所使用的电能来自于常规的化石燃料，它和其他燃油驱动的交通工具相比仍然具有优势。诚然整个系统在建造和运营时仍然会产生碳排放，但电车在城区内运行时不会排放温室气体，因而不会对周围居民产生负担。

如图60所示有轨电车的二氧化碳排放量只比地铁略高一些，但远低于公交车和小汽车。有轨电车相比小汽车可减少75%的二氧化碳排放。

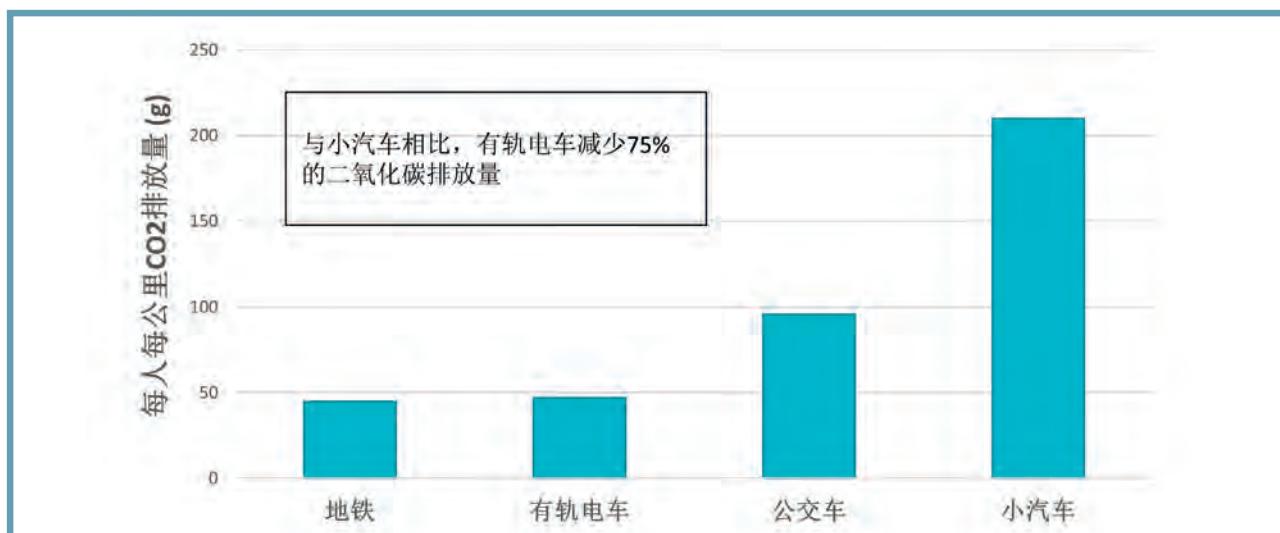


图60：不同交通工具的碳排放⁸²

⁸² 来源：<http://urban-gallery.net/txl/wp-content/uploads/2012/10/diagramm-co21.gif>



6 有轨电车成为新交通文化的一部分

20世纪后半叶全球有许多城市逐步减少了有轨电车的使用量，甚至将有轨电车完全废弃。有轨电车被公交车和地铁系统取而代之，更多的空间则留给小汽车等私人交通方式。不断增长的个人交通导致了更多私家车的使用，给地面公共交通带来了极大地负面影响。

为了弥补过去的错误与不足，越来越多的人开始重视环境友好型的交通设计。这其中最主要的挑战是如何有效解决交通，经济，环境，自由等目标之间的冲突。这意味着在改进的同时不能造成其他负面影响。

由于相关领域的发展，20世纪末全球掀起了一股思潮，主要反思相关的交通理念。除此之外还包括有轨电车的复兴。因为有轨电车是一种低成本交通方式，并且也是城市形态的一部分。这股复兴在法国尤胜，而之前许多有轨电车系统在法国都已经停运。

有轨电车在连接城市不同地区、甚至不同街区这方面的效果最好：它们通常运行在路面上，而不是在路面高架桥上或地下隧道里。有轨电车的轨道，站点以及悬线不光有交通辅助作用，也起到了指引方向的作用。因为车站高度较低，而且便于使用，因而通道结构和车站常常能为所有人使用。新的有轨电车系统也将改变街区外貌和周围环境。人们可以看到并深刻感受到这种变化。

总之有轨电车作为一种交通方式有其独特的一面：它有很好的城市适应性并且可以连接其他所有交通方式。由于电气化的高效率，有轨电车作为一种持续运行的公共交通工具的同时也十分环保。它的灵活性使得它具有多种多样的不同功能。有轨电车正在慢慢复兴并飞速发展。欧洲、北美、中东和北非区域以及亚洲都逐渐意识到了交通和经济增长所带来的影响，并积极寻找相应的对策。因此城市轨道系统尤其是有轨电车的前途将一片光明。



图61：一辆Combino型有轨电车正驶过弗莱堡⁸³

⁸³ 来源：Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 2014: VDV Das Magazin. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. Köln, 03 2014, P: 4&5

参考文献

Arndt, Wulf-Holger: The Tram - Efficient Public Tram Vehicle. Technische Universität Berlin (not published).

Beckendorff, Gerhardt 2014: Die neue Stadtbahn in Suzhou in Stadtverkehr 9/14 (59. Jahrgang).

Busse, Michael 2009: Diploma Thesis: Systemvergleich Straßenbahn/Stadtbus, Technische Universität Berlin.

Bordeaux-metropole.fr 2015: <http://www.Bordeaux-metropole.fr/tramway/chiffres> (Retrieved 02.04.2015).

CTS; Naumann, Thomas 2014: 20 Jahre neue Tram und Stadtentwicklung in Straßburg in Stadtverkehr 11/14 (59. Jahrgang).

Döge, Reiner 2010: The Berlin Tram System. A modern public transport system for the future. Presentation in Urban Management, Technische Universität Berlin 2010.

Döge, Reiner 2014: The Berlin Tram System. A modern public transport system for the future. Presentation at The Joint Chinese-German Workshop on Urban Public Transportation, Technische Universität Berlin 2014.

Dutsch, Steffen 2014: Urban Railways in German Cities. Presentation at The Joint Chinese-German Workshop on Urban Public Transportation, Dresden 2014.

Girnau et al., 2000: Stadtbahnen in Deutschland innovativ – flexibel – attraktiv. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (Ed.). Düsseldorf.

Naumann, Thomas 2014: Besancon nimmt „kostenseitig optimierte“ Straßenbahn in Betrieb in Stadtverkehr 10/14 (59. Jahrgang).

Oelmann, Winfried 2014: Dresden Verkehrsbetriebe AG, Präsentation at The Joint Chinese-German Workshop on Urban Public Transportation, Dresden 2014.

Schulz, Dennis 2015: Die Straßenbahn in China auf dem Vormarsch in Stadtverkehr 4/15 (60. Jahrgang).

Stadt Zürich 2015: https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/portraet.html (Retrieved 02.04.2015).

Weske, Christian 2014: Hanover light-rail-system as city-suburban-relation. Presentation at The Joint Chinese-German Workshop on Urban Public Transportation, Technische Universität Berlin 2014.

Wittstock, Axel 2014: The Dresden Tram System – Multifaceted, efficient and successful. Presentation at The Joint Chinese-German Workshop on Urban Public Transportation, Technische Universität Berlin 2014.