

# 路面胶轮导向系统发展历程综述及未来展望

梁帅文

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京)

**摘要** **[目的]**路面胶轮导向系统已在世界上部分城市开通运营。为了更详细、更全面地认识该系统,有必要对其发展历程及不同发展阶段的技术特点进行系统总结。**[方法]**从路面胶轮导向系统的导向方式和编组模式两方面,将该系统的发展历程分为4个阶段——1.0阶段、2.0阶段、3.0阶段及4.0阶段。逐个分析了每个阶段路面胶轮导向系统的主要技术特征、应用场景及应用案例,对各个阶段呈现出的不同技术特点进行了总结。对路面胶轮导向系统未来的5.0阶段进行了展望。**[结果及结论]**该系统4个阶段的发展历程是逐步实现无导向到刚性导向、刚性导向到柔性导向、单编组到多编组的过程,呈现出运行方式轨道化、基础设施简易化、导向模式智能化、车道使用复合化、编组模式增量化的发展特点。5.0阶段的系统应具备虚拟编组、柔性导向的技术特征,干线路段通过车辆之间的虚拟连挂增加运量、提高运输效率,以满足具有“一干多支”特点的城市公共交通出行需求。

**关键词** 胶轮导向系统; 柔性导向; 刚性导向; 列车虚拟编组

**中图分类号** F530.3; U482.1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.04.014

## Development Course Overview and Future Prospect of Road Rubber-tyred Guidance System

LIANG Shuaiwen

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China)

**Abstract** **[Objective]** Road rubber-tyred guidance system is officially launched for operation in some cities worldwide. To gain a more detailed and comprehensive understanding of this system, it is necessary to systematically summarize its development history and technical characteristics at different stages. **[Method]** According to the guidance methods and formation modes of the road rubber-tyred guidance system, the development of which can be divided into four stages: Stage 1.0, Stage 2.0, Stage 3.0 and Stage 4.0. The main technical characteristics, application scenarios and application cases in each stage are analyzed individually. The distinct technical characteristics exhibited in each stage are summarized. A prospective

analysis of Stage 5.0 for future road rubber-tyred guidance system is provided **[Result & Conclusion]** The development course of this system through the four stages represents a gradual progression from non-guided to rigid guidance, from rigid guidance to flexible guidance, and from single formation to multi-formation, demonstrating characteristics of orbitalized train operation mode, simplified infrastructure tendency, intelligent guidance mode, composite vehicle lane use, and incrementing formation mode. The Stage 5.0 system should possess technical characteristics of virtual formation and flexible guidance. Trunk line sections, through virtual coupling between vehicles, will increase transport capacity and enhance transportation efficiency, meeting the needs of urban public transportation with the characteristics of 'one-trunk multi-branch'.

**Key words** rubber-tyred guidance system; flexible guidance; rigid guidance; train virtual formation

路面胶轮导向系统已在世界上多个国家的城市内开通运营,为解决城市交通拥堵问题提供了一种新的思路和方法。该系统的车辆采用胶轮作为其走行轮,通常行驶于市政道路上,具备自主导向能力,沿固定轨迹运行。本文回顾了该系统40多年的发展历程,对该系统在不同阶段下的技术特点进行梳理,并探讨其未来发展趋势。

## 1 路面胶轮导向系统1.0阶段(单编组、刚性导向)

1979年,在德国汉堡市举办的国际交通展览会上,戴姆勒-奔驰公司推出其研发的新型导向巴士——Guided Bus(见图1)。该巴士由传统的公共汽车改造而来,在离地约20 cm的车轮处安装了侧向水平导向轮,并将导轨布置于车辆的两侧。车辆进入导轨段后,导向轮与导轨紧密贴合,从而限制车辆的横向移动,减小车辆运行过程中的晃动,使车辆可以沿导轨高速行驶。车辆离开导轨段后,由司机控制其转向。Guided Bus具有车道占地面积少、车辆运行平稳性高、选线灵活、较传统轨道交通成本

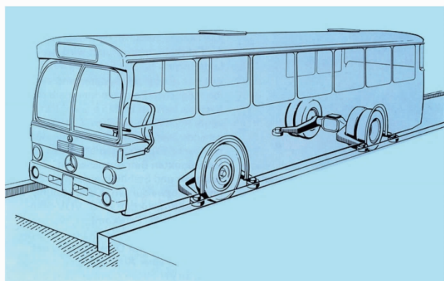


图 1 戴姆勒-奔驰公司研发的新型导向巴士的车辆结构  
Fig. 1 Vehicle structure of new-model guided bus developed by Daimler-Benz AG

低等优点。

导向巴士系统的技术特点为单编组、刚性导向，目前已在德国、英国、澳大利亚等国部分城市投入运营，主要应用于以下 2 类场景：

1) 对于廊道资源比较紧张、道路宽度不满足非导向公共汽车两车道宽度要求但又具有公共交通建设需求的路段，可建设导向巴士，以满足沿线居民公共交通出行需求，实现土地资源的集约化利用。该应用场景的典型案例为德国埃森市沿高速公路路中绿化带敷设的导向巴士系统，其线路全长约为 3.5 km(见图 2)。



图 2 德国埃森市的导向巴士系统  
Fig. 2 Guided bus system in Essen, Germany

2) 导向巴士线还可应用于连接 2 个距离较远的核心区域，以实现区域间的快速联系。该应用场景的典型案例包括英国剑桥郡的导向巴士系统和澳大利亚阿德莱德的导向巴士系统。这 2 条导向巴士线均位于市郊区域，其导轨段线路长度分别为 25 km 和 12 km，导向巴士的最高行驶速度分别为 90 km/h 和 85 km/h，旅行速度分别为 60 km/h 和 36 km/h。导轨段为多条导向巴士线路共线运行。离开导轨段后，根据客流分布情况，各条线路的车辆将驶往不同的区域。图 3 为澳大利亚阿德莱德的



图 3 澳大利亚阿德莱德的导向巴士系统  
Fig. 3 Guided bus system in Adelaide, Australia  
导向巴士系统。

## 2 路面胶轮导向系统 2.0 阶段(单编组、柔性导向)

柔性导向指车辆无需借助外界实体轨道或不受导轨限制，在非物理接触状态下由车载控制系统自动控制车辆的走行方向，以实现车辆的主动导向。根据导向原理的不同，柔性导向技术可分为光学导向和磁导航 2 种方式。

### 2.1 光学导向

德国西门子公司于 1990 年研发出基于光学导向的 Optiguide 系统(见图 4)。该系统由涂在路面上的标识线形成车辆行驶的路径，安装在车头的光学摄像头识别这些地面标志线，车载控制系统引导车辆沿标识线行驶。该系统不控制车辆的起动和制动，仅对车辆进行导向，驾驶员也可随时对车辆进行控制。

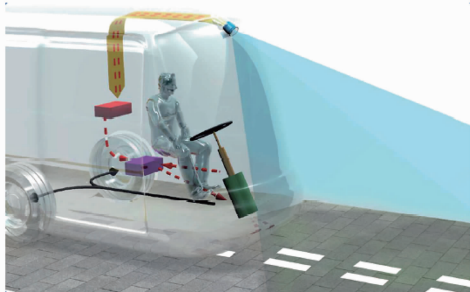


图 4 德国西门子公司研发的 Optiguide 系统工作示意图  
Fig. 4 Operation diagram of Optiguide system developed by Siemens AG, Germany

该系统的研发初衷是为了引导车辆按照预定的进站路径行驶，使车辆停靠时与站台边缘的距离尽量不超过 5 cm，以方便乘客(尤其是残障人士)上下车。车辆进站时，司机仅需实施前进或刹车操作，这既可减轻司机的操作负担，还可提高车辆的停站精度。

2001 年,应用 Optiguide 系统的法国鲁昂市快速公共交通线(见图 5)开通运营。如图 5 所示,该线路的地面标识线以车站为中心向两侧的线路方向各延伸 50 m。运营期间,该线光学导向系统的错误率为 1.97 次/万次停站,准确率达 99.98%。



图 5 应用 Optiguide 系统的法国鲁昂市快速公共交通线  
Fig. 5 Rapid public transport line equipped with Optiguide system in Rouen, France

2008 年,应用光学导向技术的西班牙卡斯特略市无轨电车 1 号线开通。与鲁昂市快速公共交通线不同的是,卡斯特略市无轨电车 1 号线全线均设有地面标识线。由此,光学导向技术的应用经历了由局部路段循迹到全线循迹运行的过程,实现了公共汽车的“轨道化”运行。

## 2.2 磁导航

采用磁导航技术的线路,其磁钉或磁条埋设于路面下。车辆经过磁钉或磁条上方时,通过识别电磁信号,对自身的行驶路径进行校核,以确保车辆沿预定路径行驶。最早研究磁导航技术的是美国加州大学伯克利分校的 PATH(先进运输技术合作伙伴)项目团队,其研发的 IERT(智能电子轨道)系统最初计划应用于车辆的自动驾驶。

由荷兰埃因市 SRE(城市交通管理局)与其他企业合作开发的 Phileas 系统是世界上首个磁导航公共交通系统。Phileas 系统已在荷兰、美国、土耳其、韩国、以色列、法国等国相继开展试验并应用,其中最成功的应用案例为美国尤金市的快速公共交通系统。尤金市的快速公共交通系统(见图 6)首期工程于 2007 年开通,目前已建成运营线路总长度为 20.4 km 的线网。该系统车辆采用基于磁导航的复合型导航技术,可实现车辆的准确定位和自主转向,走行轮踏面以外的行车道区域还可进行绿化布置。

## 2.3 光学导向系统和磁导航系统的对比

光学导向技术研发的初衷是为了提高公共交通



图 6 应用 Phileas 磁导航技术的美国尤金市快速公共交通系统

Fig. 6 Rapid public transport system equipped with Phileas magnetic guidance technology in Eugene, USA

车辆停站的精确度,以方便乘客上下车,同时缓解司机的驾驶负担,但该系统的识别精度易受光照、标识线清晰度、天气状况等因素影响。磁导航技术受天气的影响程度较小,其研发初衷是实现车辆沿固定路径行驶的自动驾驶功能。

无论是光学导向技术还是磁导航技术,都可视为车辆的辅助驾驶技术,司机可随时接手车辆的操控。在车辆运行前方存在障碍物或车辆因其他原因无法按预定路径行驶时,可由司机操作车辆绕行,因此,这 2 种技术均具备一定的运营灵活性。

## 3 路面胶轮导向系统 3.0 阶段(多编组、刚性导向)

这一阶段的车辆在我国又被称为“胶轮有轨电车”,其导向轨以嵌入方式设置于车行道中央,车辆下方安装导向轮,导向轮与导向轨紧密贴合,用以引导车辆沿导向轨方向行驶。

该阶段投入实际运营的胶轮有轨电车系统有原法国劳尔公司的 Translohr 电车及加拿大庞巴迪公司的 TVR(沿预定路径运行)电车。这 2 种电车导向原理基本相同,只是在导向轮布置形式和导向轨断面形状上有所区别,如图 7 和图 8 所示。Translohr 电车每套导向装置由 2 个导向轮组成,导向轮与地面呈 45°布置,2 个导向轮间的夹角为 90°,导向轮轮缘和踏面将导向轨包裹在 2 个导向轮之间。TVR 电车仅设置 1 个导向轮,导向轮与地面呈 90°,导向轮两侧轮缘与导向轨接触,实现对车辆的导向。

目前世界上应用较多的是 Translohr 电车系统,我国曾在 2007 年和 2009 年分别在天津市和上海市各建成一段示范线路,但这 2 条线路均已退出运营,图 9 为拆除前的上海张江有轨电车线。



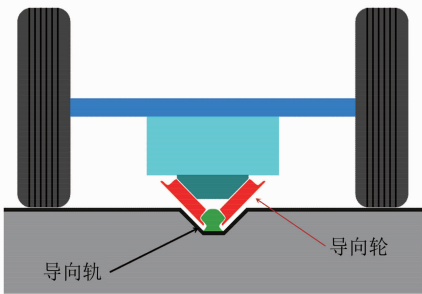


图 7 Translohr 电车导向结构示意图

Fig. 7 Diagram of guidance structure of Translohr vehicle

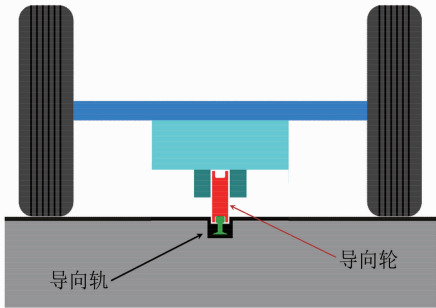


图 8 TVR 电车导向结构示意图

Fig. 8 Diagram of guidance structure of TVR vehicle

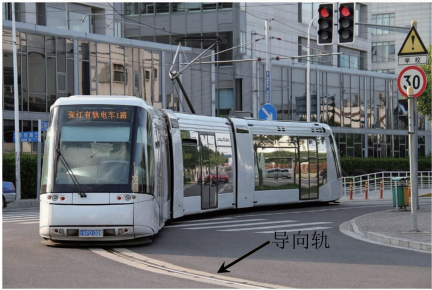


图 9 拆除前的上海张江有轨电车线

Fig. 9 Tram line in Zhangjiang, Shanghai before demolition

Translohr 电车的技术特征主要为:①宽度为 2.2 m;②可实现 3 节编组至 6 节编组,列车长度为 25~46 m,最大定员为 255 人/列;③车行道为预制拼装结构,在现场通过机械方式拼装;④车行道中央的轨槽宽度为 190 mm、深度为 80 mm,通过浇筑环氧树脂将导向轨固定于轨槽内<sup>[1]</sup>;⑤导轨轨面与路面平齐,因此其他机动车可行驶在 Translohr 电车的车道上,可实现车道的综合利用。

Translohr 电车主要由走行轮承受车体重量,导向轮与导向轨之间受力相对较小。在路况较差导致车辆颠簸或导向轨槽内存在异物时,导向轮和导向轨之间会受到一定冲击,容易导致车辆脱轨。我国天津市和意大利帕多瓦市的 Translohr 电车系统均发生过类似事故,因此,该系统存在一定的运营安全风险。此外,Translohr 电车系统对车行道路面的平整度要求较高,运营时还需要加强轨槽的清洁工作。

4 路面胶轮导向系统 4.0 阶段(多编组、柔性导向)

2017 年,中车株洲电力机车研究所有限公司发布了基于光学导向的地面公共交通系统——智能轨道快运系统(以下简称“智轨”)。随后,多个车辆厂商分别发布了基于光学导向的超级虚拟轨道交通系统(以下简称“超轨”)和基于磁导航技术的数字化导向胶轮低地板列车系统(以下简称“数轨”)。这些新系统的面世,标志着路面胶轮导向系统进入了 4.0 阶段。路面胶轮导向 4.0 阶段各类型车辆的主要技术参数<sup>[2-3]</sup>如表 1 所示。

表 1 路面胶轮导向 4.0 阶段各类型车辆的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of each vehicle type in Stage 4.0 of road rubber-tyred guidance

系统简称	发布时间	导向模式	车辆长度/m	车辆轴重/t	编组形式	最大载客量/(人/列)	设计速度/(km/h)
智轨	2017 年	光学导向	32.0	≤8.5	3 模块	309	70
超轨	2019 年	光学导向	36.0	≤8.5	4 模块	320	70
数轨	2020 年	磁导航	30.5	≤7.0	3 模块	302	70

胶轮导向 4.0 阶段各类型列车均采用多编组模式,相比于单编组模式,其运量显著提升。光学导向技术和磁导航技术用于实现车辆的循迹运行,每节车厢的轮对均安装了自主转向装置,用于协同控制各个车轮的转向。列车行驶时,首对车轮沿导向系

统识别的轨迹运行(如地面标识线或磁钉),其余各车轮则自动跟随首对车轮的行驶轨迹,以保持所有车轮运行轨迹一致,由此解决了多编组列车在转向过程中容易出现的甩尾、偏离车道等问题,使得列车在通过曲线时更加顺畅和安全。4.0 阶段胶轮导向

系统发布后,已在我国部分城市投入了实际应用。图 10 为中国(上海)自由贸易试验区临港新片区的数轨系统(2021 年 6 月 30 日开通),图 11 为湖南株洲市的智轨系统(2018 年 5 月 8 日开通)。这些系统的投入运营,引起了业内广泛关注。



图 10 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区的数轨系统  
Fig. 10 Digital guidance system in Lingang Special Area of China (Shanghai) Pilot Free Trade Zone



图 11 湖南株洲市的智轨系统  
Fig. 11 Autonomous rapid rail transit (ART) in Zhuzhou, Hunan

## 5 路面胶轮导向系统 1.0 阶段至 4.0 阶段的发展历程总结

本文对路面胶轮导向系统在各个阶段呈现出的不同技术特点进行了总结,如表 2 所示。

表 2 路面胶轮导向系统各阶段的主要技术特点及应用案例

Tab. 2 Main technical characteristics and application cases of road rubber-tyred guidance system in each stage					
阶段	导向模式	编组形式	车辆长度/m	首次应用时间	应用案例所在城市
1.0	两侧导向轨	单编组	≤18	1980 年	德国埃森、英国剑桥郡、澳大利亚阿德莱德等
2.0	光学导向或磁导航	单编组	≤25	1996 年	法国鲁昂、西班牙卡斯特略、美国尤金等
3.0	路面中央导向轨	多编组	25~46	2006 年	我国的天津、上海,以及意大利克莱蒙费勒、法国巴黎等
4.0	光学导向或磁导航	多编组	30~72	2019 年	我国的株洲、宜宾、上海、盐城等

随着技术的不断进步,路面胶轮导向系统逐步向运行模式轨道化、基础设施简易化、导向模式智能化、车道使用复合化及编组模式增量化的方向发展。其发展历程总结如下:

1) 由非导向到刚性导向的发展。在刚性导向模式下,车辆可保持运行轨迹的持续稳定。车辆行驶速度得以显著提高,进而缩短了乘客的旅行时间。车道宽度有所减小,可实现道路资源的集约化利用。

2) 由刚性导向到柔性导向的发展。柔性系统摆脱了对实体导向结构的依赖,简化了基础设施结构,降低了工程造价,缩短了工程周期,减少了后期基础设施的维护工作量。柔性系统还可实现与其他道路交通系统的兼容,必要时可与其他机动车共用车道,进而增强了系统的适用性,提高了车道的使用效率。

3) 由单编组车辆到多编组列车的发展。编组的增加直接带来了运量的提升,使路面胶轮导向系统迈入中运量公共交通范畴。多编组的路面胶轮系统可作为中小城市公共交通骨干系统,或承担大城

市地铁、轻轨的补充及加密功能,可作为大运量公共交通和公共汽(电)车之间承上启下的衔接制式。

## 6 对路面胶轮导向系统 5.0 阶段(虚拟编组、柔性导向)的展望

经过多年的发展和运营实践,基于光学导向或磁导航的 4.0 阶段的路面胶轮柔性导向系统在技术上已趋于成熟、可靠。路面胶轮导向系统 5.0 阶段(虚拟编组、柔性导向)是路面胶轮导向系统未来的发展趋势。

### 6.1 满足“一干多支”的客流需求

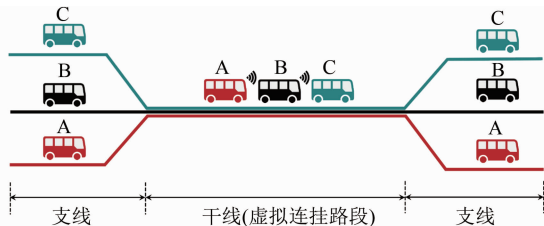
城市公共交通客流廊道可分为干线客流廊道和支线客流廊道两部分,客流廊道线网通常呈现“一干多支”的特点。其中:“一干”是线网中的一条骨架线路,其主要服务于城市的主客流廊道,用以连接城市的主要节点,具有运力大、速度快的特点;“多支”指支线车辆应深入城市街道吸引客流,尽量靠近乘客出行起讫点,为其提供“门到门”的出行服务,进而增强公共交通系统的吸引力。

单编组车辆的载客量难以满足干线客流廊道对运能的要求。多编组车辆进入街道吸引客流属于“大材小用”，容易造成资源浪费，运营成本增加。未来的胶轮导向 5.0 系统应针对公共交通“一干多支”的出行需求，为居民提供便捷、快速的出行服务，为此需实现车辆的灵活编组。

### 6.2 虚拟编组模式

虚拟连挂基于车车通信技术，在不设置机械连挂装置的情况下，通过各车辆之间的信息共享和协同控制，保持各车辆在行驶方向、速度、加速度及间距等运行参数上的一致性，进而使得多辆车组成统一的编队运行，此方式又称为“虚拟编组”。采用虚拟编组方式可提高路段的运输能力，各车协同运行可满足高速状态下的安全行驶要求。该项技术将主要应用于干线客流走廊。

图 12 为路面胶轮导向系统 5.0 阶段的应用模式。如图 12 所示，离开干线客流走廊后，编组车辆将自动解编，分别驶往不同的区域，形成由干线延伸出多条支线的公共交通网络。这样可以提高公共交



注：A、B、C 为车辆编号。

图 12 路面胶轮导向系统 5.0 阶段的应用模式

Fig. 12 Application mode in Stage 5.0 of road rubber-tyred guidance system

通系统的覆盖率，减小乘客的换乘次数，为乘客提供“门到门”的服务。

### 6.3 技术难点

为实现路面胶轮导向系统 5.0 阶段的运行模式，应在车车通信、高速运行状态下车辆对虚拟路径的准确识别、对横向摆动距离的控制、车辆的快速连挂与解编、车辆实时精准定位等关键技术上开展深入研究，并在车车通信的稳定性、安全性、可靠性及时效性上进行验证。

### 参考文献

[1] 李京增, 李力, 李金华. 现代有轨电车轨道结构探析[J]. 现代城市轨道交通, 2014(5): 55.  
LI Jingzeng, LI Li, LI Jinhua. Analysis on track structure of modern tram[J]. Modern Urban Transit, 2014(5): 55.

[2] 冯江华, 肖磊, 胡云卿. 智能轨道快运系统[J]. 控制与信息技术, 2020(1): 1.  
FENG Jianghua, XIAO Lei, HU Yuning. Autonomous-rail rapid transit[J]. Control and Information Technology, 2020(1): 1.

[3] 徐伟. 超级虚拟轨道快运系统(SRT)特点和适应性分析: 以盐城市为例[J]. 工程技术研究, 2021, 6(5): 40.  
XU Wei. Characteristics and adaptability analysis of super virtual rail express system (SRT)—a case study of Yancheng city[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(5): 40.

· 收稿日期:2023-01-19 修回日期:2023-03-17 出版日期:2024-04-10  
Received:2023-01-19 Revised:2023-03-17 Published:2024-04-10  
· 作者:梁帅文, 工程师, liebeshan@sina.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 73 页)

[9] ZHAO Y B. Analysis of Shanghai Metro passenger satisfaction based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(12): 213.

[10] 赵栋煜, 翁凡易, 马骊. 基于综合主成分分析的铁路客运服务质量评价[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(3): 18.  
ZHAO Dongyu, WENG Fanyu, MA Si. A railway passenger service quantity evaluation based on comprehensive principle components analysis[J]. Railway Transport and Economy,

2020, 42(3): 18.

· 收稿日期:2023-11-16 修回日期:2023-12-25 出版日期:2024-04-10  
Received:2023-11-16 Revised:2023-12-25 Published:2024-04-10  
· 第一作者:何静, 正高级工程师, hejing@kust.edu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728