



跨座式单轨交通 轨道梁桥系统

KUAZUOSHI DANGUI JIAOTONG
GUIDAO LIANGQIAO XITONG

主编 ● 胡智勇 贺观 韩阁



西南交通大学出版社

跨座式单轨交通轨道梁桥系统

胡智勇 贺 观 韩 阁 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

跨座式单轨交通轨道梁桥系统 / 胡智勇, 贺观, 韩
阁主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2018.7
ISBN 978-7-5643-6196-9

I. ①跨… II. ①胡… ②贺… ③韩… III. ①城市铁
路—独轨铁路—梁桥—研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 113302 号

跨座式单轨交通轨道梁桥系统

胡智勇 贺观 韩阁 / 主 编

责任编辑 / 王 旻

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 13 字数 315 千

版次 2018 年 7 月第 1 版 印次 2018 年 7 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-6196-9

定价 36.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

《跨座式单轨交通轨道梁桥系统》

编写人员

主 编:	胡智勇	贺 观	韩 阁	
副主编:	姜晓光	赵晓波	王向义	肖静飞
参 编:	郭宏飞	权志杰	陈晓继	蒋顺健
	周胜怡	王 洪	尚魁军	张 朋
	范正述	潘 莉	张 淦	吴焕君
	花春桥	吴 天	石文仙	沈 昕
	陈 波	刘 川	谭德祥	付长胜
	张雁珍			
主 审:	苏明辉	文 彬		
统 筹:	胡维锋			

前言

Preface

在过去几十年中,我国的国民经济水平快速提高,卫星城市建设进程加快,人口快速从广袤的农村融入二、三线城市。但是过去我们一直将轨道交通的重心放在一线城市地铁项目上,面对地铁高昂的初期建设投资和后期运营成本,中小城市望而生畏。近年来,如何根据二、三线城市的财政实力,解决他们日渐拥堵的城市交通出行问题成为热门话题。跨座式单轨交通作为一种成熟的交通模式,具有造价低、噪声小、后期运维成本低、线路走向灵活、建设周期短、运力适中等优点,已成为解决二、三线城市公共交通的一个良好选择。

我国自引入跨座式单轨交通系统以来,在单轨列车、牵引电力、通信信号、轮轨道岔等方面逐步摸索和实践,从技术引进、消化吸收,到完全实现单轨交通系统整体国产化。在此基础上,我们单轨建设者还不断自主创新,在设备产品研发、工程设计施工、系统集成、后期维护保养等方面创造了丰硕的成果,建立了较为完善的质量控制体系,形成了国家、地方和企业质量验收及评估标准,为跨座式单轨交通工程在我国发展奠定了坚实的理论基础,积累了丰富的实践经验。目前我国的跨座式单轨交通技术已处于世界领先水平,成为世界单轨交通的标杆。

本书是跨座式单轨交通系列丛书之一,着重阐述了跨座式单轨交通系统中土建部分的关键技术,较为完善地总结了跨座式单轨交通土建工程设计方法、施工技术、理论创新与研究方面的知识。本书分为8章,第1章是绪论,以单轨发展历程为基准,阐述了单轨的历史、单轨的特征,以及跨座式单轨梁桥体系的合理选择;第2章介绍了跨座式单轨交通关键结构的设计方法和一般原则,阐述了与传统土木工程结构设计的差异;第3章阐述了跨座式单轨交通核心土建结构部件的制造、加工和质量检测方法;第4章、第5章阐述了跨座式单轨梁桥成桥架设安装,以及成桥线形调节部分的内容,并介绍了跨座式单轨交通轨道梁特有的架设安装设备和工艺及轨道梁桥维护检修规程;第6章~第8章是跨座式单轨交通梁桥结构的理论研究,该部分重点阐述了预制混凝土轨道梁的多形态演变机理及其形体控制参数研究,这也是迄今为止,对预制混凝土轨道梁较为系统、全面和准确的认识。

本书集设计基础、施工控制、理论研究为一体，是我国跨座式单轨交通建设者们智慧的结晶，为我国跨座式单轨交通建设和发展提供了很好的理论基础和实践借鉴，为我国今后培养跨座式单轨交通技术人才提供了较好的教材，也是广大跨座式单轨交通建设者们学习提高的工具。

由于编者水平所限，虽经各位编辑及审查专家多次推敲，但仍恐有疏漏和欠妥之处，敬请业内专家和读者批评指正。

编写组

2018 年 4 月

目录

CONTENTS

第 1 章 绪 论	1
1.1 单轨交通概述	1
1.2 跨座式单轨梁桥体系	9
1.3 轨道梁桥主要构件	16
第 2 章 轨道梁桥系统设计	18
2.1 轨道梁桥结构体系	19
2.2 轨道梁设计	25
2.3 区间结构设计	33
2.4 疏散检修通道设计	43
2.5 车站结构设计原则	51
2.6 其他结构设计原则	53
2.7 基础设计	54
2.8 车场布置原则	54
第 3 章 轨道梁桥施工	57
3.1 概 述	57
3.2 预埋件制造	57
3.3 PC 轨道梁制造工艺	63
3.4 钢轨道梁制造工艺	80
3.5 现浇轨道梁制造工艺	82
3.6 疏散检修通道施工	83
3.7 下部结构施工	85
3.8 其他组合桥体系	91
第 4 章 轨道梁架设	93
4.1 轨道梁架设安装专用设备	93
4.2 轨道梁架设安装	96
4.3 轨道梁线形调整	101

4.4	轨道梁桥成桥质量控制	103
第 5 章	轨道梁桥维护检修	107
5.1	PC 轨道梁维护检修规程	107
5.2	钢轨道梁维护检修规程	117
5.3	轨道梁连接装置检修规程	118
5.4	疏散检修通道检修维护规程	122
5.5	轨道梁下部结构检修规程	123
第 6 章	早龄期 PC 轨道梁多形态瞬时结构变形研究	125
6.1	概 述	125
6.2	PC 轨道梁材料特性增长规律	125
6.3	PC 轨道梁多时态瞬时弯曲变形	127
6.4	PC 轨道梁多时态伸缩变形	134
6.5	PC 轨道梁结构变形试验研究	139
第 7 章	运营期 PC 轨道梁性能自平衡能力研究	146
7.1	概 述	146
7.2	酸性腐蚀场中 PC 轨道梁抗老化能力	146
7.3	PC 轨道梁徐变变形分析	150
7.4	短期移动荷载作用下 PC 轨道梁的时程研究	152
7.5	循环荷载作用下 PC 轨道梁的疲劳研究	161
7.6	动力荷载循环次数对结构特性影响分析	168
7.7	运营期结构性能自平衡能力评价	176
第 8 章	PC 轨道梁多时态形体制作参数推导及应用研究	178
8.1	概 述	178
8.2	坐标转换方法	178
8.3	PC 轨道梁三维制作参数分析	180
8.4	PC 轨道梁空间定位参数设计	182
8.5	PC 轨道梁桥体系精度评估	185
8.6	工程应用	188
参考文献		197

第1章 绪 论

1.1 单轨交通概述

单轨交通又称独轨交通，是采用电力牵引列车在一条轨道梁上运行的轨道交通系统，其组成灵活，线路可设置在地面、地下或空中，可根据需要选用不同运力的车辆系统或采用简易的装置到复杂的现代化的设备系统，以适应不同地形及地理条件。单轨交通系统特别适合中运量客流的城市。按车辆与轨道梁之间的接触关系，单轨交通可分为跨座式单轨交通（车辆骑跨在轨道之上运行，见图 1.1-1）和悬挂式单轨交通（车辆悬挂在轨道之下运行，见图 1.1-2）两种类型。



图 1.1-1 跨座式单轨交通系统



图 1.1-2 悬挂式单轨交通系统

在 19 世纪初，由于受到城市地形地貌限制，人们发明了单轨（Monorail Transit，又称独轨、空轨）交通系统，此系统的列车轨道为一根带状梁体，即轨道梁^[1,2]。1821 年，英国工程师亨利·帕默尔（Henry Palmer）提出了马拉车辆骑行于木制单轨的构思^[3-5]。1825 年，由美国在伦敦码头上建造了第一条货运跨座式单轨线路。1888 年，法国人查尔·拉里格（Charle Larlique）为爱尔兰利斯特维尔设计并建造了一条长 15 km 的客货两用的单轨线路，连续运营长达 36 年。1898 年，德国鲁尔地区的伍伯塔尔市由法国人奥根·兰根设计了一条长 13.3 km 的悬挂式单轨系统，1903 年建成通车。此时，单轨交通正式成为城市客运的一种制式。

1893 年，德国人 Eugen Langen 在科隆设计出首个机动化悬挂单轨铁路模型^[6,7]。1960 年，法国的雷诺、米兰、里昂水电公司等联合设计出悬挂式单轨列车，命名为 SAFEGE（萨非基）悬挂式单轨列车^[8]。1952 年，由瑞典人格林（Axel Wenner Gren）对原已有的跨座式单轨形式进行了较大的技术改进，并修了一条长 1.9 km 的第一条试验线路，进行了模拟试验。1957 年在同一地点又建造了一条长 1.8 km 的实用性试验线路，进行了实用运行试验，并取得了成功，从此奠定了现代跨座式单轨交通的技术基础。1960—1965 年，日本在阿尔威克式、商洛克希德式和萨非基式单轨列车技术的基础之上，研制出不同型号

的单轨列车，并在日本广泛应用^[9]。

20 世纪 90 年代初，重庆开始引进日本日立公司跨座式单轨技术，并运用于国内第一条城市轨道交通跨座式单轨线路——重庆轨道交通 2 号线，此后又新建了重庆轨道交通 3 号线，在重庆逐步形成了中国的单轨技术。

目前，在日本的东京、大阪、冲绳、神户、北九州等地区运行的线路有 6 条；在中国重庆建造了世界上最长的线路；在澳大利亚悉尼市，美国拉斯维加斯、查克逊威尔市，马来西亚吉隆坡，俄罗斯莫斯科，阿联酋迪拜，韩国大邱等城市也相继建成了多条单轨线路^[10]。受中国重庆单轨交通发展的成功热潮的影响，世界上还有印尼的雅加达、日惹，泰国曼谷，印度的孟买以及我国的北京、郑州、兰州、宝鸡、六盘水等地也在准备建设跨座式单轨。

图 1.1-3 所示是世界上著名的单轨交通系统^[11-18]。图 1.1-3 (a) 所示是 1901 年建成的德国鲁尔区伍珀塔尔悬挂式单轨铁路（全长 13.3 km），这是世界上最早、也是历史最悠久的悬挂式单轨线；图 1.1-3 (b) 所示是东京上野动物园的悬挂式单轨铁路；图 1.1-3 (c) 所示是澳洲悉尼跨座式单轨铁路，该线主要用于运输达令港和市中心之间的旅客；图 1.1-3 (d) 所示是美国加州迪斯尼乐园度假区及佛罗里达州华特迪斯尼世界度假区的跨座式单轨铁路；图 1.1-3 (e) 所示是日本千叶市悬挂式单轨；图 1.1-3 (f) 所示是连接法国多蒙德大学南、北两个校区的无人驾驶高空悬挂式单轨；图 1.1-3 (g) 所示是重庆轨道交通 2 号线，采用跨座式单轨，它是我国建成的第一条单轨线路，也是我国西部地区第一条城市轨道交通线路。图 1.1-3 (h) 所示是重庆轨道交通 3 号线，采用跨座式单轨，它是世界上客运量（82 万人次/日）最大、运行长度最长的跨座式单轨线路，该线路贯穿重庆南北，连接 1 个机场、2 个火车站、3 个经济圈、5 个公交枢纽。



(a) 德国鲁尔区伍珀塔尔悬挂式单轨



(b) 东京上野动物园跨座式单轨



(c) 澳大利亚悉尼跨座式单轨



(d) 美国加州跨座式单轨



(e) 日本千叶市悬挂式单轨



(f) 法国多蒙德大学悬挂式单轨



(g) 重庆轨道交通 2 号线



(h) 重庆轨道交通 3 号线

图 1.1-3 世界著名的单轨线路

1.1.1 单轨交通系统关键技术

单轨交通系统由单轨车辆、过轨道岔和梁桥系统三大核心技术组成。目前，掌握单轨交通系统技术的有日本、中国、加拿大、马来西亚等少数几个国家，其技术特点见表 1.1-1^[19]。

表 1.1-1 世界主要单轨技术格局和特点

技术体系	技术优点	主要缺点	主要项目案例	造价指标	车辆供应商
日本	具备整个单轨系统的集成技术，自主掌握单轨车辆、道岔、PC 轨道全套技术，全套技术成熟；载客量大，适用于中运量的城市轨道交通	—	20 世纪 80 年代至今，在日本大阪、冲绳、九州等 6 个城市应用；20 世纪 90 年代至今，如重庆、新加坡、迪拜等出口单轨车辆和道岔	高	日立
中国	具备对整个单轨系统的集成能力，自主掌握单轨车辆、道岔、PC 轨道梁等全套核心技术；单轨技术较成熟；车辆载客能力大，适用于较大运量城市轨道交通	部分国产化子系统性能需进一步提高	2005 年重庆单轨 2 号线全套技术；2011 年至今重庆单轨 2 号线、3 号线及其延长线全套技术；2010 年至今，PC 轨道梁技术出口韩国大邱等地	较低	日本及中车集团

续表

技术体系	技术优点	主要缺点	主要项目案例	造价指标	车辆供应商
加拿大	掌握全套单轨系统技术；车辆技术较为领先、成熟；车辆采用非传统转向架；掌握全自动无人驾驶车辆生产技术	车辆体积较小、载客能力小，大运量城市轨道交通不适用	1997 年向美国出口佛罗里达州坦帕机场线单轨车辆；2004 年向美国出口拉斯维加斯线单轨车辆	较高	庞巴迪
马来西亚	主要掌握单轨车辆技术；车辆成本有一定竞争力	技术可靠性有待进一步完善；车辆载客能力小，大运量城市轨道交通不适用	2003 年供应吉隆坡单轨车辆；2012 年供应印度孟买单轨车辆	较低	斯高密

1. 单轨车辆系统

单轨车辆是单轨交通制式最基本和最核心的技术。一方面，轨道交通车辆技术本身是整个单轨交通系统的技术核心；另一方面，只有确定了车辆技术体系，才能进一步选择与之匹配的道岔、轨道梁及其他配套的机电设备系统，不同单轨车辆的主要区别是转向架的构造不同（见图 1.1-4）。

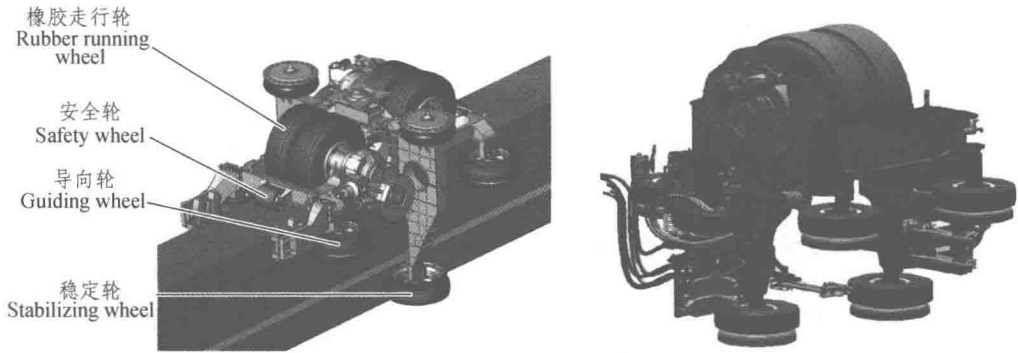


图 1.1-4 单轨车辆转向架

2. 单轨道岔系统

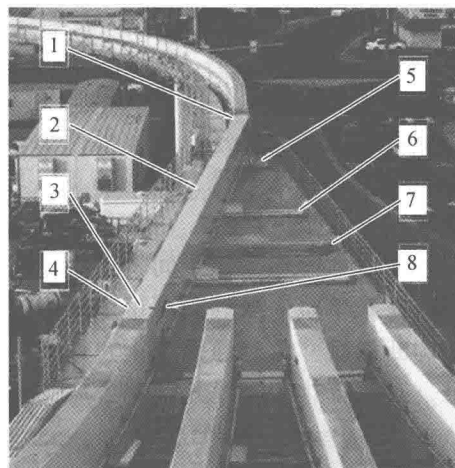
单轨道岔（见图 1.1-5）是一种钢质特殊结构的专用道岔，其截面形状与轨道梁保持一致。道岔梁转辙通过电力驱动与轨道梁或另一道岔梁实现对位而形成岔道，以实现车辆行驶线路的转换。根据道岔梁体过渡线形状（折线、圆弧线），单轨道岔可分为关节式道岔、关节可挠式道岔。关节式道岔分为单开、对开、三开、五开、单渡线、双渡线及交叉渡线等形式；关节可挠式道岔分单开、对开、单渡线、双渡线及交叉渡线等形式。其他类型的还有平移式道岔、枢轴式道岔、替换梁式道岔等。

3. 单轨梁桥系统

单轨交通梁桥系统（见图 1.1-6）通常由下部支撑体系、检修平台和轨道梁 3 部分^[20]组成。轨道梁不仅是承重结构，也是车辆运行的轨道。此外，接触轨、通信信号电缆等设施也敷设在轨道梁上。轨道梁承担多种重要功能于一身，因而它也是单轨系统的关键系统之一^[21]。



(a) 关节式道岔



(b) 枢轴式道岔



(c) 平移式道岔

图 1.1-5 单轨道岔系统

1—回转装置；2—道岔梁；3—活动接缝装置；4—固定接缝装置；
5—台车；6—走行轨；7—驱动机构；8—锁定装置

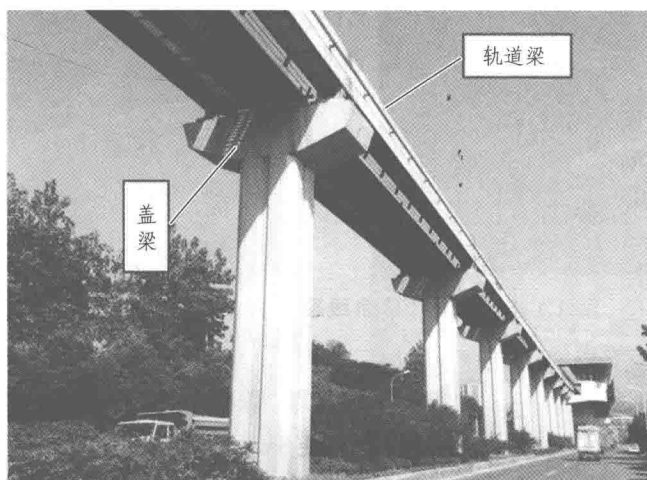


图 1.1-6 跨座式单轨梁桥体系

1.1.2 跨座式单轨交通的特点

跨座式单轨交通采用橡胶轮胎和预制混凝土轨道梁,是一种极具特色的城市轨道交通制式,具有爬坡能力强、转弯半径小、占地少、噪声低、运量适中、造价低等显著优点,其独特的三大技术特性是:噪声低、转弯半径小、爬坡能力强^[22]。这种制式的特点主要体现在以下几个方面:

(1) 占地面积少,空间轨道结构宽度小,能有效利用城市空间。

跨座式单轨一般利用城市道路中央隔离带设置结构墩柱,由于载荷较小,其墩柱及高架结构断面尺寸较普通复轮钢轨系统小。跨座式单轨大部分是高架结构,与其他交通各行其道,互不干扰。跨座式单轨系统高架区间如图 1.1-7 所示。

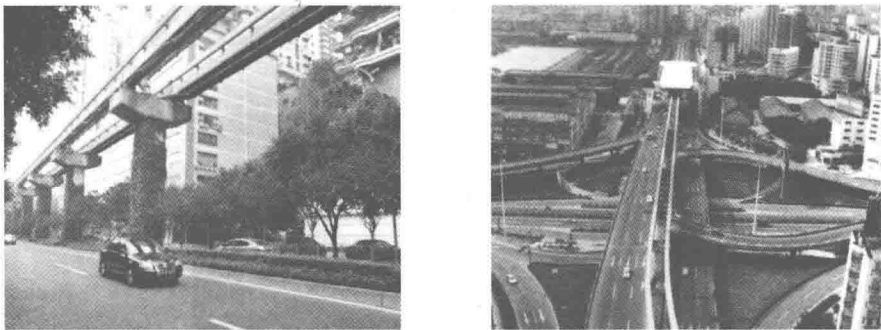


图 1.1-7 跨座式单轨系统高架区间

(2) 能适应陡坡急弯,便于在城市内选定线路。

跨座式单轨列车爬坡能力强,理论最大坡度可达 100%,最小曲率半径可达 30 m,对城市多变的地形地貌和复杂的地理环境适应性强,征地拆迁量较小,有利于控制工程投资规模。在实际工程中,正线一般选用不小于 100 m 的曲线半径和不大于 60%的坡度。跨座式单轨线路小曲线、大纵坡设置如图 1.1-8 所示。

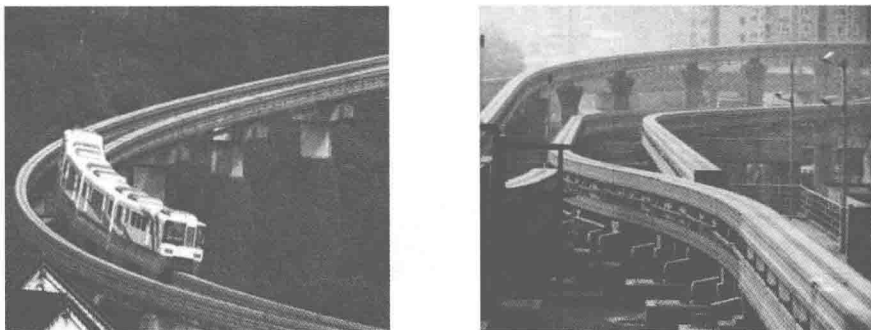


图 1.1-8 跨座式单轨线路小曲线、大纵坡设置

(3) 施工简便,工程造价低。

跨座式单轨交通轨道梁桥体系结构比较简单,标准轨道梁采用工厂预制和现场拼装的 PC 轨道梁,既保证了轨道几何线位的精度又便于工程施工,从而可缩短工期,其工程建设期一般为 2~3 年。跨座式单轨交通工程造价较地铁工程有明显优势(为地铁造价的 1/2~1/3)。跨座式单轨轨道梁制作及架设如图 1.1-9 所示。

(4) 安全、舒适，具有旅游观光效果。

跨座式单轨交通车辆（见图 1.1-10）采用特殊转向架骑跨在轨道结构上，保证其安全运行，没有脱轨的危险。同时，由于车辆采用橡胶轮胎并带有空气弹簧减振构造，故较其他制式的轨道交通乘坐舒适性更好。单轨大部分是高架结构，视野宽广、眺望条件好，特别是在城市中运行时，乘客可观光景色和市容。所以，它既是安全舒适的交通工具，又能起到游览观光的作用。

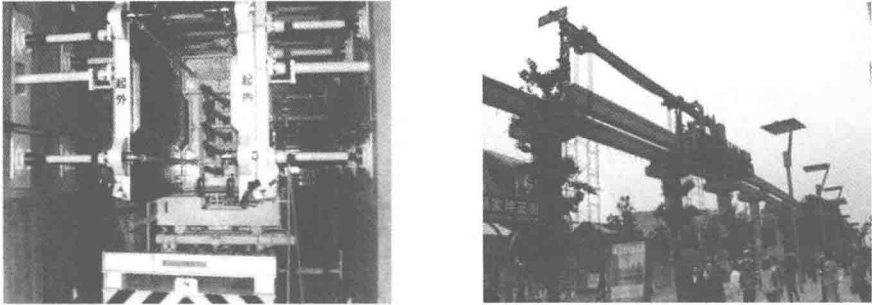


图 1.1-9 跨座式单轨轨道梁制作及架设

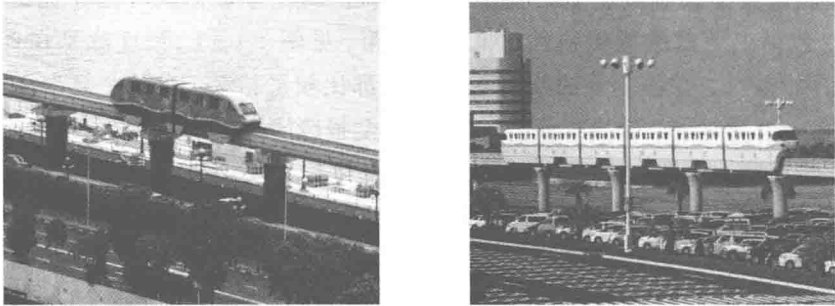


图 1.1-10 跨座式单轨旅游观光

(5) 环境影响小。

跨座式单轨车辆一般采用橡胶轮车轮，其噪声与振动能很好地满足环境要求。当行车速度为 60 km/h 时，距轨道中心 10 m，离地面高 1.2 m 处，测得噪声值为 74 dB (A)。由于噪声、振动小，所以跨座式单轨线路走向灵活，可从人口密集地区的高空中穿过，甚至从建筑物内部穿过，且对人们的日常生活几乎不产生影响，跨座式单轨线路运用实例如图 1.1-11 所示。



图 1.1-11 跨座式单轨线路运用实例

(6) 景观影响小。

一方面,跨座式单轨的轨道结构是带状梁体构件,与其他高架轨道交通和高架道路相比,是目前地上高架交通设施中遮挡日光照射及景观影响最小的建筑物。另一面,跨座式单轨系统采用 PC 梁刚性接触网,无须再单独设置接触支柱及架空接触网等(见图 1.1-12)。



图 1.1-12 跨座式单轨线路无架空接触网

(7) PC 轨道梁是预制混凝土结构,制作和养护均在专业化梁厂内完成,而梁桥体系的下部结构,包括上下部的连接构件(即支座锚箱,见图 1.1-13)预埋都是在现场完成^[23]。为确保成桥后的精度,对各部分的施工误差控制都比较严格,一旦某个环节的误差超限或累计误差超限,将导致 PC 轨道梁无法架设,甚至报废^[24]。

(8) PC 轨道梁几何形体的精度、整体线形变化的平顺度、工后线形与设计线形的吻合度等方面均有严格要求,给施工控制带来很多难以估计的风险^[25]。

(9) 相邻 PC 轨道梁之间的缝隙是 (30 ± 10) mm,并通过球墨铸铁制作的指形板作为单轨列车通过该缝隙的连接装置,如图 1.1-14 所示。为确保列车平稳通过指形板,并减少橡胶轮胎的磨损和列车运行的能耗,须长期维护和调节指形板的平整度^[26]。

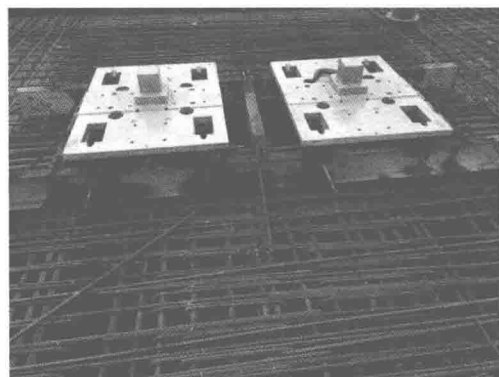


图 1.1-13 支座锚箱

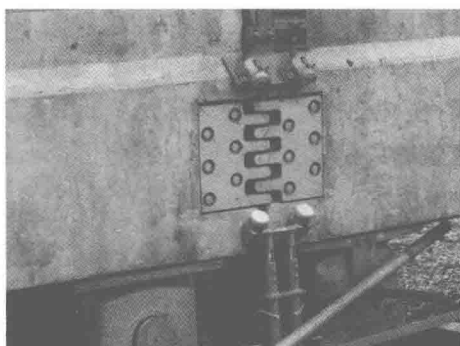


图 1.1-14 接缝板示意图

(10) 简支体系中的铸钢拉力支座、指形板、锚杆、支座锚箱为铁质材料,其防腐要求较高^[27],后期维护成本较大。

(11) 目前尚无有效方法精确推导出 PC 轨道梁的线形参数,当线形条件复杂时,PC 轨道梁的形体制作参数存在误差,无法保障 PC 轨道梁的制作精度^[28],从而会影响工程质量。

(12) PC 轨道梁形体控制参数和定位参数多, 理论计算和设计任务较繁重。

(13) 目前尚无可靠方法根据各部分实测误差提前评估梁桥体系的精度, 质量风险大。梁桥体系的精度只能成桥后才能测定, 一旦出现质量问题, 将会导致 PC 轨道梁拆卸打磨, 甚至有报废的风险^[29]。

1.2 跨座式单轨梁桥体系

轨道梁作为跨座式单轨交通中三大核心技术之一, 按轨道梁与下部结构的连接方式可分为简支体系、连续体系, 按下部结构的形式, 可分为轨道梁桥体系和组合梁桥体系。

1.2.1 简支轨道梁桥

简支轨道梁桥在两榀轨道梁之间设置一道伸缩缝, 轨道梁两端分别设置了一个铸钢拉力固定支座和一个铸钢拉力活动支座。利用铸钢拉力支座将梁体和下部结构连接形成简支结构体系 (见图 1.2-1 ~ 1.2-8)。



图 1.2-1 重庆 3 号线简支轨道梁桥实景图



图 1.2-2 重庆 3 号线出入段线简支轨道梁桥实景图

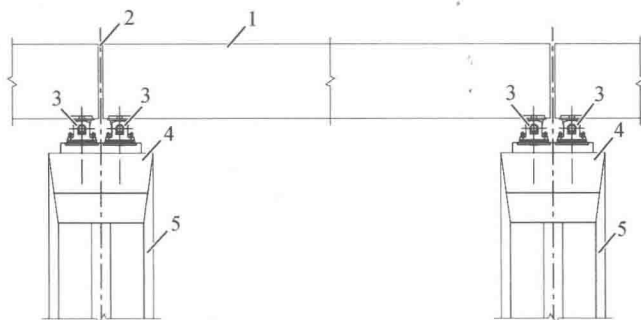


图 1.2-3 简支轨道梁桥示意图

1—轨道梁; 2—伸缩缝; 3—铸钢拉力支座; 4—盖梁; 5—墩柱