

# 地铁与轻轨.6

中国地铁工程咨询公司 编

中国铁道出版社  
2003年·北京

(京)新登字063号

图书在版编目(CIP)数据

地铁与轻轨.6/中国地铁工程咨询公司编.—北京:  
中国铁道出版社, 2003.12

ISBN 7-113-05165-0

I.地… II.中… III.①地下铁道—铁路工程  
②轻轨铁路—铁路工程 IV.①U231-55 ②U239.3-55

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第018754号

京工商广临字宣0010号

书 名: 地铁与轻轨.6

著作责任者: 中国地铁工程咨询公司

(100037, 北京市阜成门北大街5号)

出版·发行: 中国铁道出版社

(100054, 北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑: 陈若伟

特邀编辑: 郑晓薇 李太惠 曹雪明

编辑部电话: (010) 68318887—6198

传真: (010) 68318887-6199

E-mail: malr@buedri.com

封面设计: 李艳阳

印刷: 中国铁道出版社印刷厂

开 本: 880×1230 1/16 印张: 4.5

插页: 4 字数: 127千

版 本: 2003年12月第1版 2003年12月第1次印刷

书 号: ISBN 7-113-05165-0/U·1478

定 价: 60.00元(共6册)

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者,

请与本社发行部调换。

发行部电话(021) 73169(路) (010) 63545969(市)

编辑委员会

顾 问:

周千峙 中国科学院院士 中国工程院院士  
建设部高级顾问

傅志寰 中国工程院院士

刘国冬 中国工程咨询协会副会长

焦桐善 中国交通运输协会副会长

刘建航 中国工程院院士

陈肇元 中国工程院院士 清华大学教授

王梦恕 中国工程院院士

杨鲁豫 建设部标准定额司司长

周翊民 原铁道部顾问

谢正光 北京市地铁运营公司总经理

五一 上海市地铁建设公司总经理

陈韶章 广州市地铁总公司副总经理

沈晓阳 重庆轨道交通总公司总经理

陈 光 南京市地铁总公司副总经理

高怀志 天津市地下铁道总公司总经理

柏贤华 中国地铁工程咨询公司董事长

宋敏华 北京城建设计研究总院院长

沈秀芳 上海市隧道工程轨道交通设计研究院院长

王新杰 中国地铁工程咨询公司顾问

主 任: 施仲衡

副主任: 杨家齐 沈子钧

委 员: (按姓氏笔划为序)

王振信 申大川 叶大德 包国兴 史其信

兰 荣 朱 军 仲建华 闫景迪 余才高

沈景炎 汪 禾 张 弥 杨 超 卓 弘

周庆瑞 赵 力 彦启森 俞加康 侯树民

曾学贵 褚敬止 潘曾同

编 辑: 郑晓薇 李太惠 王策民 曹雪明

# Contents 目录

---

1.直线电机运载系统技术在广州市轨道交通中的应用 .....	陈韶章 吴俊泉 刘智成 (1)
2.广州地铁2号线首期工程设计创新综述 .....	史海欧 孙钟权 (10)
3.广州地铁2号线江南西站南站厅基坑支护结构设计 .....	陈 东 (15)
4.城市轨道连续—现浇—金属弹簧隔振器式浮置板道床施工工艺探讨 .....	唐 俊 程桂芝 (22)
5.60 kg/m钢轨伸缩量420 mm钢轨伸缩调节器的研究设计 .....	高晓新 (26)
6.对地铁混凝土整体道床横向裂纹的思考 .....	薛育山 (29)

---

7.项目管理服务 (PM) 在我国城市轨道交通领域的实践及意义 .....	于松伟 (31)
8.亚洲城市轨道交通系统的未来 .....	Patrice Pelletier (35)
9.论城市轨道交通安全体系的前向引导与后向完善问题 .....	许 玲 (39)

---

10.现代有轨电车交通系统及其车辆的技术定位 .....	于禹夫 方 力 (43)
11.径向转向架及其在地铁、轻轨车辆中的应用 .....	曹万红 柳拥军 (48)
12.日本东京帝都高速度交通营团的车辆管理 .....	赵曙旗 (51)
13.地铁主要通信名词术语解释 .....	徐华林 (55)
14.美国轻轨系统新型牵引变电所 .....	樊元武 (61)

---

北京加强轨道交通网建设,10 年要建 22 条轨道交通(14)北京排定新建地铁通车时间(25)北京地铁 5 号线 6 座地面车站设计方案亮相(21)北京地铁 4 号线、10 号线 11 月底开标(28)11 种车站 11 种风格——北京八通线车站真漂亮(30)北京八通线设备招标投标节约上亿元(50)中国土木工程学会隧道及地下工程学会地下铁道专业委员会第 15 届学术交流会简报(47)《重庆市快速轨道交通线网规划》通过专家评审(42)《天津城市快速轨道交通线网规划修编》通过专家评审(42)新加坡将建设亚洲首条“无人驾驶地铁”(34)伦敦地铁没有遗憾(60)

# 目录 Contents

---

1.Application of Linear motor system technology in Guangzhou urban rail transit .....	CHEN Shaozhang WU Junquan LIU Zhicheng(1)
2.Overview on the innovation in design of Guangzhou Metro Line 2 stage 1 .....	SHI Haiou SUN Zhongquan(10)
3.The design of retaining supporting structure of the south station hall in Jiangnanxi station of GuangZhou Metro Line 2 .....	CHEN Dong(15)
4.On the construction technics of floating plate bed with ‘continuous–instant cast–metal spring absorber’ in urban rail transit construction .....	TANG Jun CHENG Guizhi(22)
5.The research and design of rail joint for 60 kg/m track with 420 mm expansion .....	GAO Xiaoxin(26)
6.The reflection about lateral flow of monolithic track–bed in metro .....	XUE Yushan(29)

---

7.The value of practice for Project Management(PM) in urban rail transit field of China .....	YU Songwei(31)
8.The future of urban rail transit systems in Asian cities .....	Patrice Pelletier(35)
9.On the Forward Guiding and Afterward Updating in construction of urban rail transit security system .....	XU Ling(39)

---

10.The technological positioning of modern trolley car system and its vehicle .....	YU Yufu FANG Li(43)
11.Radial bogie and its applications in metro and light rail vehicles .....	CAO Wanhong LIU Yongjun(48)
12.The management of vehicles in Japan Teito rapid transit authority .....	ZHAO Shuqi(51)
13.The explanation for the main words and terms in the communication of metro .....	XU Hualin(55)
14.The new–type of transformer substation for traction in light rail system of USA .....	FAN Yuanwu(61)

# 《地铁与轻轨》重要启事

为适应我国加入 WTO 后城市轨道交通事业发展的新形势,《地铁与轻轨》自 2004 年起将以新的面貌——《都市快轨交通》与广大读者见面。

《都市快轨交通》将由北京交通大学与北京城建设计研究总院合办,中国地铁工程咨询公司协办,并通过邮局向国内外公开发行。双月刊,大 16 开本,64 页全彩印刷,每期定价 10 元(国内)。

邮发代号:80-163,中国连续出版物号:CN11-5144/U(国内);ISSN 1672-6073(国际)。

由中国地铁工程咨询公司和北京城建设计研究总院创办于 1988 年 1 月 1 日的《地铁与轻轨》,是我国最早的一本地铁与轻轨行业综合技术刊物,深得各级领导和广大工程技术人员的支持与厚爱。多年来,它传达国家关于轨道交通的相关政策,介绍国内外地铁与轻轨建设及运营过程的经验、最新的科技成果、重要的技术信息,促进了同行间的学术交流和技术研讨,推动了我国城市轨道交通事业的发展。

《都市快轨交通》将继续《地铁与轻轨》的办刊宗旨,充分发挥两个主办单位各自的优势,合作办刊,并欢迎更多单位加盟进来,共同打造精品刊物,为此特成立《都市快轨交通》杂志理事会,由北京交通大学校长谈振辉教授任理事长,北京城建设计研究总院院长宋敏华任副理事长。诚意邀请各相关企业事业单位加入本刊理事会,以建立密切的合作与交流,并为推动我国城市轨道交通事业的发展献智出力。

北京交通大学(原北方交通大学)是一所拥有百年办学历史的全国重点大学,综合实力强大,拥有通信与信息系统、信号与信息处理、交通信息工程与控制、交通运输规划与管理、产业经济学等 5 个国家级重点学科,11 个部级重点学科;50 个硕士点,21 个博士点,6 个博士后科研流动站,有 5 个学科获准设立“长江学者特聘教授”岗位;学校有 22 个研究

所和研究中心及 38 个实验室,其中包括交通运输系统仿真实验室和运输自动化实验室等一批轨道交通研究领域的全国一流实验室;拥有教学、科研仪器设备固定资产 10 多亿元。

北京城建设计研究总院是我国第一家城市轨道交通专业设计单位,拥有城建院、建筑院、勘察院及工程研究院 4 个分院和建筑、市政、人防工程、建筑工程总承包、工程监理、工程咨询、智能建筑、勘察、测绘等甲级证书,并有工程监测、桩基静动测、管线物探、公路、市政与土建工程监测实验等多项对外技术服务资质。是国内该领域实力最强的甲级企业之一。曾设计了我国第一批地下铁道——北京地铁 1、2 号线,是国内第一家承担国外地铁的总体设计单位,主编了我国《地铁设计规范》《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》《地下铁道、轻轨交通工程测量规范》及《城市快速轨道交通工程项目建设标准》等。在我国地铁事业方兴未艾的 1988 年创办并独资资助了《地铁与轻轨》直到今天。

2001 年 1 月,北京交通大学与北京城建设计研究总院走到一起共建城市轨道交通研究中心,在技术攻关、规程标准制定、工程材料鉴定、培养人才等诸多方面进行全方位合作,合办《都市快轨交通》杂志将是这一合作的延伸。

今天,当编辑部即将把这本已有 16 年历史的刊物以崭新的面貌奉献给读者时,我们感到责任重大,希望广大读者继续给予支持和爱护,不吝惜你们的指教,使其不断提高质量,为推动城市轨道交通事业的发展作贡献。

《地铁与轻轨》编辑部

2003 年 12 月

(欲加入理事单位请与马跃老师联系,电话:010-51688043

编辑部电话:010-68318887-6198)

# 《都市轨道交通》稿约

本刊(原《地铁与轻轨》)主要报道内容是:宣传国家关于轨道交通的相关政策,介绍国内外地铁与轻轨建设及运营管理的经验、最新的科技成果、重要的技术信息、业内动态等。刊登内容以综合性技术文章为主,适当刊登学术性文章。主要栏目:法规与标准 综合评述、规划设计、工程研究、运营管理、设备国产化等。

欢迎各界踊跃投稿。

1. 来稿用 A4 纸打印,最好同时发电子文档或随稿邮寄软盘(光盘)。请作者自行留底,本部不予退稿,作者可在投稿 3 个月后查询处理意见。来稿请勿一稿多投。

2. 来稿除事先申明外,编辑部有权作适当删改,或要求作者自行修改。

3. 作者须保证来稿未侵犯他人权利,并不得泄密,文责自负。

4. 文稿一般不超过 5 000 字,特约来稿另行酌定,译稿请附原文或原文出处。

5. 文稿应包括:文题、作者姓名、工作单位、邮编、摘要、关键词(以上项目尽可能附英文译文)及参考文献和第一作者简介。

**题名**应能准确地概括文章主题,尽量不用缩略语,一般不超过 20 字。

**作者署名**不宜超过 3 人,超过时列出前 3 人,其后加“等”。

**作者单位**应包括全部作者单位的全称、所在省市(县)、邮政编码。

**摘要**为全文的浓缩,是简明、确切的记述文献内容的短文,一般包括目的、方法、结果和结论等,不加评论和解释。①应突出文章创新点,排除在本学科领域已成常识的内容②不得重复题名中已有的信息;不得出现图表、数学式和引文③要用第三人称写法,不用“本文”、“作者”等作主语④中文摘要以 50~300

字为宜;英文摘要不宜超过 250 个实词。

**关键词**是摘要的浓缩,可选 3~8 个。

正文的层次一律用阿拉伯数字连续编号:“1”;“1.1”;“1.1.1”等。一般不超过 3 级,后续分层用“1)”,“2)”;“①”,“②”;“a”“b”的形式。

文中科技术语和名词请用通用、规范词语,计量单位应按现行国家规定采用国际单位制。

**参考文献著录原则:**①只著录必要的、最新的公开发表的文献,一般仅限于作者在论著中直接引用的文献。未公开发表的资料不列入参考文献,必要时可紧跟在引文之后注释或标注在当页的页脚。②参考文献应按引用的先后次序编号,并在引文处右上角用方括弧标明文献序号。③当文章引用了其他文献时,不得用“参考文献略”字样。

**参考文献著录格式:**①专著:著者.书名.出版地:出版者,出版年.页码(选择项)②期刊:作者.文题.刊名,年份,卷号(期号):起止页码③论文集:作者.文题.见:编者.书名.出版地:出版者,出版年.起止页码④学位论文:作者.题目:[学位论文].保存地:保存者.年份⑤技术标准:起草责任者.标准代号 标准顺序号-发布年 标准名称.出版地:出版者,出版年(可选择项;起草责任者、出版地、出版者和出版年)⑥专利文献:专利申请者.专利题目.专利国别,专利文献种类,专利号.出版日期。

**外文作者名**采用姓前名后著录法,名可用首字母代替,不加缩写点。

**第一作者简介**各项内容顺序为:姓名,性别,出生年月,毕业时间、学校、专业,最高学历,职称,职务,专业技术领域或研究方向,基金项目名称(若有时),地址,电话。

6. 来稿请寄:100037 北京市阜成门北大街 5 号《都市轨道交通》编辑部 电话:68318887-6198, E-mail 地址:malr@buedri.com。

# 直线电机运载系统技术在广州市轨道交通中的应用

陈韶章 吴俊泉 刘智成 (广州市地下铁道总公司)

**摘要:**本文在系统介绍了城市轨道交通非黏着驱动方式的技术发展的基础上,分析了直线电机运载系统的技术特性,以及该系统在广州市轨道交通中应用的必要性,与适合于我国大中型城市轻、中运量等级线路应用的系统技术选择。

**关键词:**城轨交通 非黏着驱动 直线电机 系统选择

## 1 城市轨道交通运载系统的技术发展

1.1 从英国伦敦1863年第一条地下铁道投入运营,到现在已有100多年的历史了。开始时以地下线形式出现,所采用的运载系统,一直以来都是采用传统铁路车辆运载方式,也就是传统的钢轮与钢轨的黏着驱动方式。到今天为止,对于大运量、较大轴重的城市轨道交通系统主要还是这种运载方式。

1.2 传统的钢轮与钢轨的黏着驱动方式存在如下问题:

(1)20世纪初地下铁道线路铺设形式由单一地下形式,逐步发展成地下、地面和高架联运形式。例如美国纽约这样一个大都市,地下铁道列车通过高架钢梁发出的轰鸣声,成为这个大都市的一大特色。这种黏着驱动方式用于地面或高架线路,给线路周围环境带来较为严重的噪声、振动影响。

(2)传统的钢轮与钢轨的黏着驱动方式,其牵引力产生机理是:旋转的动力源传给轮对的转矩可以用两个力 $F$ 来表示,一个力 $F$ 作用车轴中心,另一个力 $F$ 作用在车轮与钢轨的接触点 $a$ ,详见图1。作用在 $a$ 点的力 $F$ 为轮对压力作用下所产生的黏着力 $F_c$ 相平衡。而另一力 $F$ 则使车轮移动,即整个轮对绕 $a$ 点( $a$ 点为瞬时中心)转动。当 $F > F_c$ 时,车辆将在钢轨面空转打滑不能前进,无益地消耗了能量,使轮缘和轨头磨损。所以车辆能够运行的必要条件是由于外力(黏着力) $F_c$ 的存在。这种机理带来了地下铁道线路纵断面设计最大纵坡度值(30‰)以及连续坡长的限制。线

路从地下接至地面、高架坡长较大,占用城市道路平、竖向空间较大,影响了城市景观。

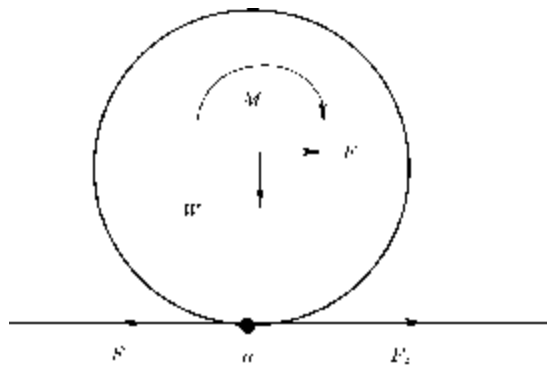


图1 传统钢轮与钢轨的黏着驱动方式原理图

(3)难以实现安全可靠的无人驾驶,英国伦敦的Dockland轻轨系统只能实现有乘务员的无人驾驶,新加坡的东北地下铁道线花费大量投资,采用先进技术,才能实现无人驾驶。

1.3 为了克服传统的钢轨与钢轮的黏着驱动方式存在的缺点,法国巴黎地下铁道第一条线于1900年建成通车,直到1954年前都是采用传统的黏着驱动方式为主,之后开始采用非传统的胶轮、混凝土(水平导向、垂直支撑)的黏着驱动方式,在巴黎地下铁道20多条线路中有多条线采用。以后推广应用到法国多个城市(马赛、里尔等)、加拿大蒙特利尔市、墨西哥墨西哥城、中国台北(栅木线)等城市轨道交通系统中。法国马赛市胶轮运载系统车辆,详见图2。在日本东京、美国奥兰多、澳大利亚悉尼、马来西亚吉隆坡、中国重庆所采用的单轨系统(monorail system)也



图2 法国马赛市胶轮运载系统车辆



图3 跨座式胶轮单轨运载系统

都属于这种驱动方式,详见图3。

(1)胶轮运载系统的优点

①提高黏着系数(可达0.25,而传统的钢轨与钢轮黏着驱动方式一般为0.18),因此,最大坡度可达70%,有利于线路由地下至地面和高架的过渡。

②有较大的加、减速度(加速度可达 $1.2\text{ m/s}^2$ ,减速度可达 $1.4\text{ m/s}^2$ ),下坡度时可采用较高的速度。

③噪声、振动大幅度降低。

④实现无人驾驶较为安全可靠。法国里尔市Val系统、巴黎14号线都成功在胶轮运载系统上实现了安全可靠的无人驾驶,详见图4。



图4 法国里尔市Val系统无人驾驶运载系统

(2)胶轮运载系统的缺点

①工程造价较高。

②系统复杂(胶轮气压控制、驱动-差动桥方式等)。

③能耗高,胶轮磨损大、需要经常更换,造成运营成本高。

④胶轮大量磨损产生胶粒粉尘,污染系统的轨行区。

1.4 国外为了提高城市轨道交通运载系统的爬坡能力,亦相继开发了悬挂轨道交通系统。

(1)刚性悬挂运载系统,详见图5。

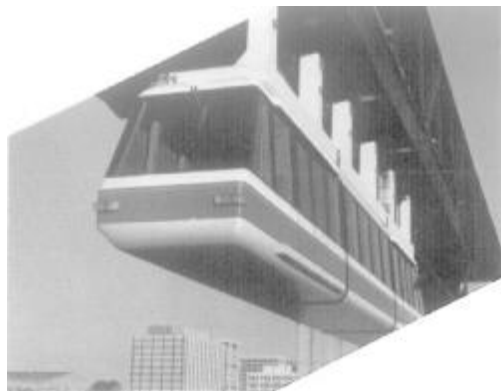


图5 刚性悬挂运载系统

(2) 瑞士利用悬吊缆车运载系统技术发展了一种架空地铁系统(A system),其最大特点是最大纵坡达70%,短距离纵坡(200 m)可达90%。支承跨度:一般经济跨度为300 m,稍增加投资可达450 m,最大跨度可达800 m。在德国曼海姆市建成了一条试验线,详见图6。



图6 德国曼海姆市 Aerometro 柔性悬挂运载系统

(3)以上两种运载系统由于受多种条件限制,都未能得到广泛应用。

1.5 到了20世纪70年代,一些城市探索能否在城市

轨道交通运载系统中,采用其他形式的非黏着驱动方式代替黏着驱动方式的运载系统,出现以下几种非黏着驱动方式的运载系统。

(1)巴西Coestes公司专利的Aeromovel系统(即所谓风动运载系统),该系统是一种被动式系统,也就是列车上无任何牵引动力,其机理是通过风机把电能转变为风流的能量,在密封的风道内,使连接着列车的风帆板前后产生压差,从而推动列车前进。由于能量的二次转换,能耗高、系统复杂,仅在巴西瓦

格雷拉港建了一条650 m长的试验线。可以讲这是一项不成熟的技术,未能在工程上实际运用,详见图7。

(2)把钢轮与钢轨缆车运载系统技术应用在城市轨道交通。

①西班牙巴塞罗那市奥林匹克运动中心的地下缆车运载系统,成功建成,并为巴塞罗那奥运会提供交通服务,详见图8。

②法国里昂市登山地下缆车运载系统,详见图9。

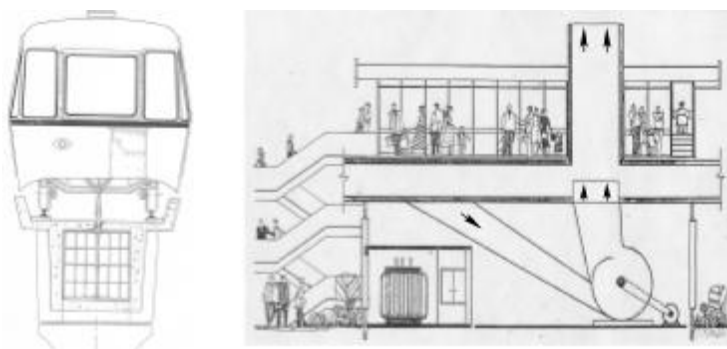


图7 巴西瓦格雷拉港风动运载系统



图8 西班牙巴塞罗那市地下缆车运载系统



图9 法国里昂市登山地下缆车运载系统

③上述这种运载系统技术由于受运量等级及车站设置条件限制,亦未能广泛应用。

(3)把直线电机运载系统技术运用在城市轨道交通。

①直线电机与传统的旋转电机不同,由直线运动实现运行与制动,代替旋转,所以称其为直线电机。直线电机在机理上,如同将旋转电机的转子与定子展开成直线形状,在理论上,可以把它看成为具有无限大半径的传统的旋转电机。其机理亦与旋转电机相同,详见图10。

②直线电机运载系统是应用于城市轨道交通的

典型非黏着驱动方式的系统。其机理是固定在转向架的一次线圈通过交流电流,产生移动磁场(行波磁场),通过相互作用,使固定在整体道床上的二次感应板(展开的转子)产生磁场,通过磁力(吸引、排

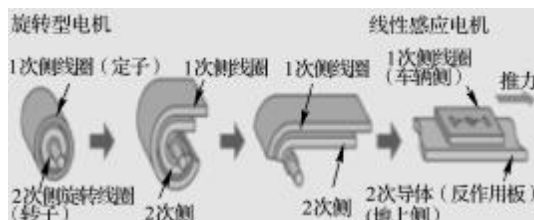


图10 从旋转电机向直线电机的展开示意图

斥),实现车辆的运行和制动,详见图11。

③直线电机运载系统在国外多个城市已有近20年的安全可靠运用成功经验,技术日趋成熟。可以说,在国外是技术最成熟、最安全可靠的非黏着驱动方式的轨道交通运载系统,详见表1。

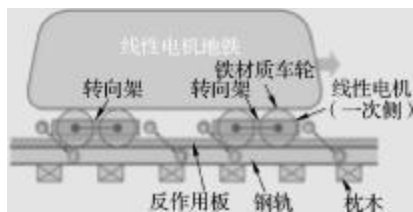


图11 直线电机运载系统的非黏着驱动方式

表1 直线电机运载系统在世界城市轨道交通应用情况统计

线路名称	开通年份(年)	线路长度(km)	车站数(个)	车辆数(辆)	日乘客流(人)	最小发车间隔(s)
加拿大温哥华 SkyTrain	1986	51	31	210	200 000	90
加拿大多伦多 Scarborough线	1985	6.4	6	28	40 000	180
马来西亚吉隆坡 PUTRA系统	1998	29.4	24	70	110 000	60
美国底特律DPM系统	1987	4.8	13	12	8 400	240
美国纽约肯尼迪机场线	2003	13	10		34 000(预测)	
日本大阪市营地铁7号线	1990	15	17	100		
日本东京都营地铁12号线	1991	38.7	38	388		
日本神户市营地铁海岸线	2002	7.9	10	40		
日本横滨市营地铁4号线	2000	首期13(全线42)	首期10(全线32)			
日本福冈市营地铁3号线	预计2006	12.7	16	126		

LIGHT RAIL

## 2 直线电机运载系统技术特性

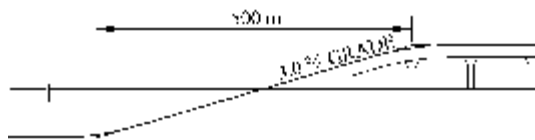
2.1 由于该运载系统采用了非黏着驱动方式,因而不受黏着系数限制,有较强爬坡能力,最大坡度可达80‰,这个特点带来如下优点:

(1)有利于线路纵断面设计,以利于选线及避开地下构筑物。

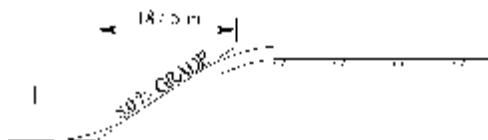
(2)有利于线路由地下至地面、高架过渡,从而减少过渡段的用地面积,便于道路交通疏解,降低用地费用,减少对城市景观的影响,详见图12。

2.2 由于车辆转向架没有旋转动力源,即无机械传动系统,因此,有利于采用径向转向架,详见图13。

采用径向转向架带来如下优点:

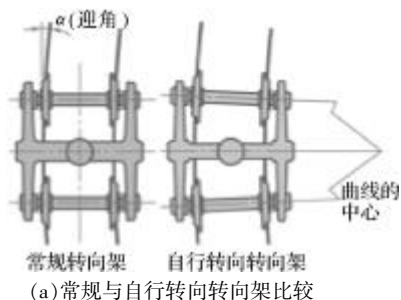


传统钢轮与钢轨黏着驱动方式

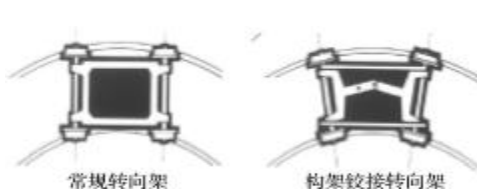


直线电机非黏着驱动方式

图12 与传统的钢轮与钢轨黏着驱动方式的运载系统爬坡能力比较



(a) 常规与自行转向转向架比较



(b) 常规与构架铰接径向转向架比较

图13 常规与径向转向架的比较

(1)平面转弯半径小,详见图14。

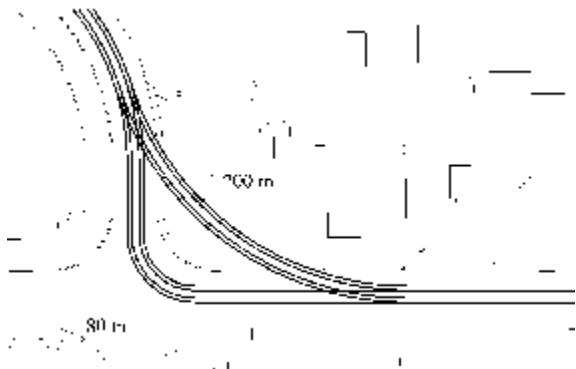


图14 与传统的黏着驱动式运载系统转弯半径比较

(2)有利于线路平面选线,可避开已建或规划待建的建筑,以及建筑基础、地下管线和其他地下构筑物,降低工程造价。

(3)减少噪声、振动对线路周围环境的影响。

(4)由于车辆平面转弯半径小,大大缩减车辆段及综合维修基地的用地面积,降低工程投资。

### 2.3 直线电机运载系统的非黏着驱动方式有利于实现小编组高密度

(1)由于可以采用较小轮径,有利于使整个系统小型化、轻量化,降低工程投资。

(2)与移动闭塞信号系统相结合,较易实现安全可靠小编组、高密度、无人驾驶运行模式,从而使系统高效、节能、低成本运营。

### 2.4 直线电机运载系统应用在城市轨道交通中应注意的几个问题

(1) 直线电机的效率比传统的旋转电机的效率低,一般只有70%左右,而传统的旋转电机的效率高于90%,因此,只有在系统集成上采用多项综合技术,充分发挥直线电机运载系统的技术特点,才能达到节能的目的,弥补直线电机效率低的缺点。

(2)为了达到直线电机的高效率,必须保持短定子(固定在车辆转向架上)与长转子(铺设在轨道中间),亦称为感应板之间的磁间隙高度值的恒定,这是直线电机运载系统与土建工程之间的重要接口,因此,对线路上部建筑及轨道技术要求更严格,增加了土建工程难度。

(3)直线电机运载系统是一个专用系统,不能与传统的钢轮与钢轨黏着驱动方式的系统过轨通用,因此,是否在城市轨道交通中应用,必须以每个城市的线网规划为依据,取决于线网规划中有多少条线需要发挥直线电机运载系统的特点来实现其功能定

位。一条线的先进性不能代表线网的先进性,采用直线电机运载系统后必须形成线网几个主要层次,从而实现低耗、高效的先进线网。

## 3 广州市城市轨道交通应用直线电机运载系统技术的必要性

### 3.1 广州市城市轨道交通线网规划简介

(1) 广州市规划了15条线轨道交通线网规划以及2010年前实施线网规划,详见图15、16。

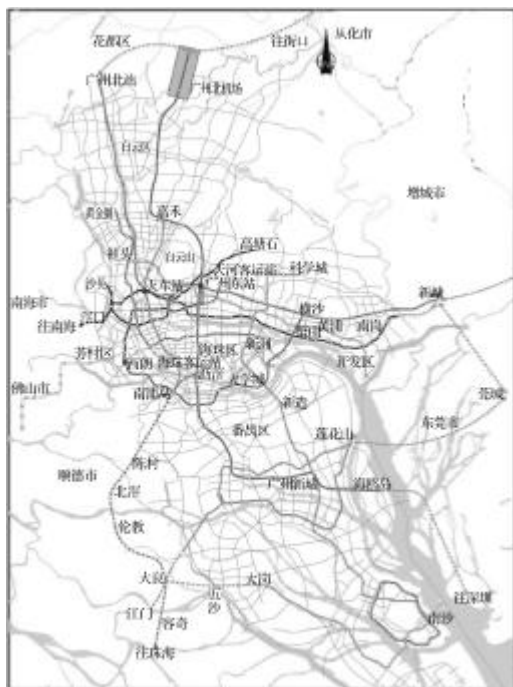


图15 15条轨道交通线网规划图

### (2)广州市轨道交通线网规划特点

①有利于实现城市总体规划,即拉开城市布局,抽疏旧城区建筑密度并有效降低旧城区人口密度,实现南拓、北优、西联、东调发展战略,促进城市向滨海区域发展。

②在旧城区及规划建成区的线路以客流导向功能为主(即为SOD模式——Service Oriented Development),兼顾规划导向功能(即为TOD模式——Transit Oriented Development)。向新发展区延伸线的线路以TOD模式功能为主,兼顾SOD模式功能。

③已建成的1989年广州市人民政府批准的轨道交通十字形线网(亦即1、2号线),主要体现SOD模式功能,亦即是解决旧城市城区交通拥挤问题,其规划指导思想是线路布置在城市主要交通走廊上。从客流预测结果规划年单向小时高峰断面客流量达5.3

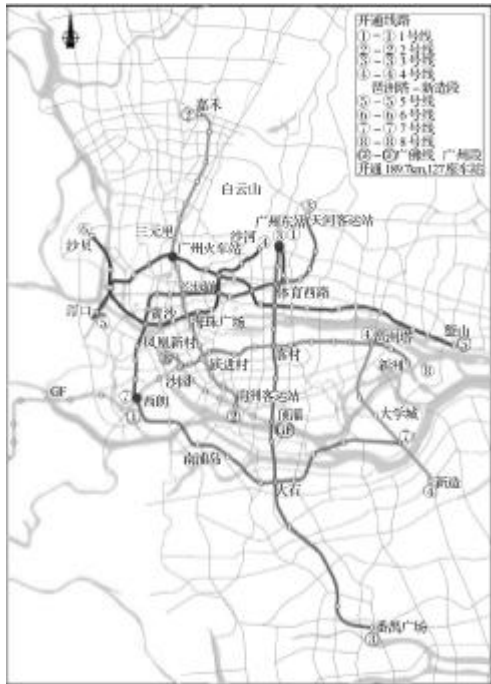


图16 2010年前实施的轨道交通线网规划图

万人次,因此,系统选择为6节固定编组的A型(大容量)车辆。运能达单向高峰小时5.5万人次。

④随着广州城市总体规划及发展战略实现,原城市中心区人口及建筑密度会相应降低,加上轨道交通线网密度加大,因此,除了1、2号线以及2号线拆分开成2、8号线外,其他线路运输要求不再达到5万人次(单向小时)。已建设的3、4号线以及2004年动工的5号线,规划年客流预测分别为4.5万、3万、3.9万人次(单向小时),预计其他线路运能等级亦在2.5万~4万人次(单向小时)之间。

⑤从运量等级来分析,广州市轨道交通线网规划形成了以1、2、8号线为代表的大运量等级线路;以3号线为代表的中大运量等级线路(B型车,初近期为3节编组,远期为6节编组);其他线路均为轻、中运量等级的3个层次,轻、中运量等级的牵引系统选择也就迫在眉睫。

### 3.2 实现广州市轨道交通线网规划的工程特点

(1)广州市位于珠江三角洲的中心位置,珠江把广州分割成多块,其中有多条水系为主航道,从15条线轨道交通线网规划可以看出约50次穿越珠江水系,其中近期建设的10条线路需32次穿越珠江水系,目前实施的5条线路共18次穿越珠江水系。另东南部地区丘陵起伏、地形高差大,传统的钢轮与钢轨黏着驱动方式的运载系统难以满足线路纵断面设计需

要,将会付出较大工程代价、运营成本高(水系两岸车站埋设深度大)。

(2)广州西部以及东山、天河等已按城市规划建成区,高楼、高架快速路林立;人口、车流密度高,使得通过该地区的轨道交通线路平面选线遇到很大困难。建筑物、高架桥的基础以及道路隧道的地下埋设标高和平面位置限制传统地下铁道系统线路通过。广州地铁1号线托换桩基约143根;2号线托换桩基约18根;3号线托换桩基约237根。在城市中心建设的后续新线如再选用传统的运载系统将需托换大量的桩基。

(3)广州区域水文地质与工程地质情况复杂,岩面起伏变化大,多条断裂带交错分布。大部分线路要穿越四大地质难点(石灰岩溶洞、断层、软土和砂层、花岗岩残积层),过江段还需通过河床下的透水软弱地层。广州地铁1、2、3号线建设中都不同程度地因选线需要穿越这些不良地层,给工程实施造成很大困难。如果在后续新线建设中再选用传统的运载系统难以避开不良地质。

(4)轨道交通线网形成后,需要配置多个车辆段及综合维修基地,应用传统的运载系统,车辆段及综合维修基地用地面积较大,城市土地供给有困难,并影响了城市总体规划,因此,从城市土地供给要求选择一个新系统。

(5)随着我国城市化高潮的到来,城市土地供给越来越紧张,土地价值不断上升,造成城市轨道交通必然要采用地下线路形式,工程投资大、运营成本高。作为以TOD模式功能为主的线路,站距较大,并要穿越城市组团之间农田、绿化隔离带,这样的线路能否采用地下、地面、高架建设方式来达到因地制宜降低建造及运营成本的目的,就要选择一种平面转弯半径小、上下坡能力强、噪声低、较为小型化的系统来实现这一目标。

### 3.3 实现广州城市轨道交通线网规划要选择直线电机运载系统

(1)建成先进的线网是广州城市轨道交通建设目标,根据每条线路在线网中的功能定位,4、5、6、7号线需要选择直线电机运载系统。

(2)根据广州城市轨道交通近期线网的客流预测,采用大客流量的A型车辆6节固定编组的1、2、8号线3条线是大运量系统;以3号线成为代表采用B型车辆(车辆最高速为120 km/h)、初期3节、近远期6

节编组来实现初期为轻运量、近远期大运量(单向每小时4.5万人次)的系统,以上都是传统的运载系统,地下线为主或全部都是地下线。拟采用直线电机运载系统的4、5、6、7号线构成了近期线网中的第三层次的运量等级,即2.5万~4万次(单向小时)的轻、中高运量等级系统。这些线路以TOD模式功能为主的线路应采用地下、地面、高架线路铺设的方式。

(3)根据广州地区工程实施条件,需要选择直线电机运载系统。

#### 4 广州城市轨道交通直线电机运载系统技术的选择

4.1 目前在国外只有加拿大、日本开发了直线电机运载系统技术,形成了两个不同体系的直线电机运载系统技术。

(1)加拿大开发的直线电机运载系统的技术特点

① 1986年建成通车的加拿大温哥华市的天空系统(Sky train system),代表了加拿大开发的直线运载系统特点。1985年加拿大首先在多伦多市建成一条6.4 km试验线。随后温哥华市为了解决1986年在该市主办世界博览会的交通问题,从1981年开始设计,1982年开始施工建设,1986年初建成21.4 km(地下线2 km、地面线6 km、高架线13 km)的第一条城市轨道交通直线电机运载系统并投入运营。该系统一开始就实现了无人驾驶,安全、可靠运营至今(至2002年已安全、可靠运营约10亿km),线路由原来的21.4 km扩展至现在的51 km,详见图17。

- 由加拿大Bombardier公司开发制造,即MK I型车辆,均为小型化车辆,列车可2、4、6节编组;
- 车辆尺寸:长度:12.7 m、宽度:2.5 m、高度:3.125 m;
- 重量:13.9 t/节;
- 载客量:定员106人,其中35个座位,71个站位;
- 结构:焊接铝合金框架和外壳,玻璃纤维断面。蜂窝结构的铝合金的车顶和钢框架地板结构;
- 供电:两条不锈钢铝合金复合材料的馈电及回流轨,DC 600 V;

- 转向架:自动导向径向转向架;
- 制动:以电气再生制动为主,配以液力盘型制动及电磁轨道机械制动;
- 运行模式:应用移动闭塞信号系统实现了无司机全自动驾驶的功能;
- 直线电机:采用强迫风冷。

综上所述,该系统以低噪声、低振动、大爬坡能力、小平面对转弯半径、重量轻、小编组(一般4节)、高密度(发车间隔可达90 s)、无司机全自动驾驶的特点,有利于实现以高架、地面为主,地下线为辅的运营模式。配以多项先进技术,实现低能耗、提高系统可靠性,从而达到降低运营成本的目的,受电方式为DC 600 V三轨受电、四轨回流,成为城市轨道交通中的先进的、轻轨运量等级的运载系统。

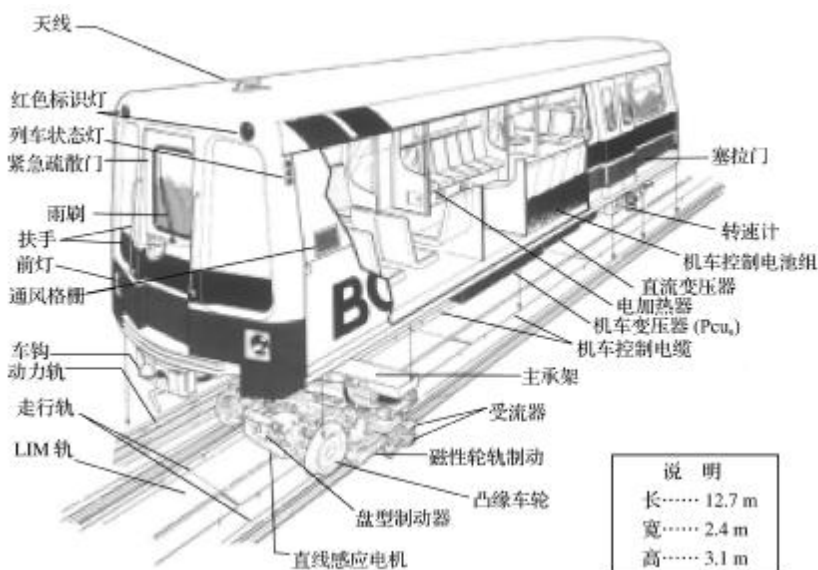


图17 加拿大温哥华市直线电机运载系统

② 20世纪90年代,该公司在MK I型车辆的基础上开发了KN II型车辆,供温哥华市Sky train系统新线及旧线后续车辆,并供给作为马来西亚吉隆坡PUTRA轻轨系统的车辆。该车辆具有如下特点:

- 载客量均比MK I型车辆大,列车可2~5节编组;
- 车辆尺寸:长度:17.35(16.85)m、宽度:2.65 m、高度:3.275(3.44)m(括号内为吉隆坡PUTRA轻轨系统车辆数据,下同);
- 重量:22.3(22)t;
- 载客量:定员171人,其中42个座位,129个站位(定员185人,其中32个座位,153个站位);
- 车辆装备技术水平比MK I型车辆大大提高;

牵引逆变器:2台IGBT/辆;  
 转向架:焊接钢结构,自动导向径向转向架,  
 轮径585 mm,轴距1.9 m,定距12 m;  
 两辆车之间连廊宽度:1.4 m;  
 空调系统:2台空调机组(2×28 kW)/辆;  
 常用制动:以电气再生制动为主,弹簧盘型  
 制动为辅;  
 紧急制动:以磁轨制动为主,弹簧盘型制动  
 为辅;

停车制动:弹簧盘型制动;

• 性能比MK I型车辆优越:

正常加速度:1.0 m/s<sup>2</sup>;

正常减速度:1.0 m/s<sup>2</sup>;

紧急制动减速度:2.4 m/s<sup>2</sup>;

车辆构造速度:90 km/h;

车辆最高运行速度:80 km/h;

• 实现无司机全自动驾驶功能。

• 受电方式:DC 600 V(DC 750 V),三轨受流,  
 四轨回流。

③ 20世纪末,该公司又为美国纽约肯尼迪机场  
 开发机场线的直线电机运载系统,其车辆特点为:

• 可1~4节编组;

• 车辆尺寸:长度:17.602 m、宽度:3.2 m、高  
 度:3.81 m;

• 重量:24 t;

• 载客量AW3:205人,其中179个站位5.4人/  
 m<sup>2</sup>,26个座位);

转向架:轮径660 mm,轴距1.93 m,定距12 m;

• 技术性能:

正常加速度:1.34 m/s<sup>2</sup>;

正常减速度:1.0 m/s<sup>2</sup>;

紧急制动减速度:1.43 m/s<sup>2</sup>;

车辆构造速度:110 km/h;

车辆最高运行速度:100 km/h;

常用制动:以电气再生制动为主,电液盘型制  
 动为辅;

紧急制动:以磁轨制动为主,弹簧盘型制动为辅;

停车制动:弹簧盘型制动;

• 空调系统:2台空调机组(2×26冷吨)/辆;

• 受电方式:DC 750 V,三轨受流,四轨回流。

(2) 日本开发的直线电机运载系统的技术特点

① 日本多个城市应用直线电机运载系统的目的

• 日本人口众多,国土面积小,大量人口集中在  
 几个大都市。工程界把21世纪称为地下空间综合开  
 发利用的时代,但是在20世纪60年代开始,日本已大  
 规模进行地下空间综合开发利用,建成了发达的城  
 市轨道交通网络和综合功能齐全的地下建筑,地下  
 空间资源已感到十分紧张,如要继续修建新的地下  
 铁道线,建设已十分困难,造价更昂贵。因此,开发直  
 线电机运载系统以适应日趋紧张的地下空间资源已  
 十分迫切,详见图18。



图18 21世纪的日本城市交通需要直线电机运载系统

• 地下轨道交通线网越密,埋深越大,地下车  
 站及区间隧道土假工程造价越来越昂贵,因此,开发  
 小型化的直线电机运载系统以降低土建工程造价。

② 日本开发的直线电机运载系统的技术特点

• 以地下线为主,甚至车辆段及综合维修基地  
 亦设置在地下。

• 受电方式:全部为DC 1 500 V上部受电方式

• 小型化,详见图19。

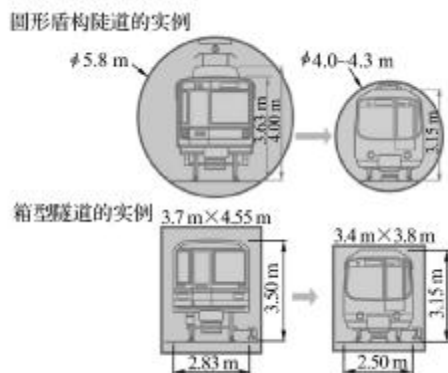


图19 区间隧道断面比较

• 车辆尺寸:长度:16.5 m、宽度:2.49 m、高度:  
 3.15 m;

• 重量:带司机室头、尾车辆:24 t,中间车辆:  
 25 t;

• 载客量:带司机室头、尾车辆90人(32个座

位);中间车辆100人(40个座位);运量一般可达到单向高峰小时1.9万人次;

- 发车密度不高:最高为24对/h,大编组(一般为8节编组);

- 转向架:强迫导向径向转向架,轴距:1.9 m,定距:11 m,轮径:610或660 mm;

- 直线电机:自然冷却;

- 车辆最高运行速度:70 km/h;

综上所述,日本开发的直线电机运载系统的特点是:大编组,中等密度、小型化的系统。适合于地下线路运营使用,不追求高技术,性能指标一般,经济实用。

## 4.2 广州城市轨道交通直线电机运载系统的选择

### (1) 系统必须满足的条件

#### ① 运量等级应为小、中、大运量

- 4、5号线客流预测,规划年为单向每小时最高断面客流量分别为3.2万、3.9万人次;

- 6、7号线客流预测,规划年为单向每小时最高断面客流量为2.5万~3.5万人次之间;

- 系统运量等级应能满足2.5万~4万人次/h的密度,目前,加拿大、日本现有的系统都不能满足这个条件。

#### ② 线路长、站间距大

- 以4号线为例,线路全长63 km,平均站间距达3 km。

- 牵引供电电压等级采用DC 1 500 V是经济合理的;

③4号线以TOD模式为主导功能的线路,可以以高架线路形式通过城市组团之间的隔离带,因此,必须满足如下条件:

- 高架或地面站的建筑体量要尽量小,车站站台长度不大于75 m;

- 系统应为小编组、高密度,实现有司机全自动驾驶功能;

- 对周围环境噪声、振动的影响减至最低;

- 高架或地面线要与城市景观相协调。

#### ④ 线路条件

- 正线最小曲线半径:150 m;

- 车辆段最小曲线半径:60 m;

- 最大坡度:50‰。

(2) 系统选择要反映出直线电机运载系统的技术特点

#### ① 系统初步选择

- 列车可4节或6节编组

- 车辆尺寸:长度:约17 m、宽度:2.8 m、高度3.71 m;

- 轴重:13 t;

- 载容量:定员228人,其中:约28个座位,200个站位;

- 转向架:径向转向架,轮径660 mm,轴距1.9~2.0 m,定距11~12.5 m;

- 两辆车之间连廊宽度:大于1.3 m;

- 常用制动:以电气再生制动为主,弹簧盘型制动为辅;

- 紧急制动:弹簧盘型制动;

- 技术性能

正常加速度:1.0 m/s<sup>2</sup>;

正常减速度:1.0 m/s<sup>2</sup>;

紧急制动减速度:1.3 m/s<sup>2</sup>;

车辆构造速度:100 km/h;

车辆最高运行速度:90 km/h;

- 有司机全自动驾驶;

- 受电方式:DC1 500 V,三轨和接触网受流。

#### ② 适合于我国大中型城市的推广应用

- 我国幅员广阔,地质条件复杂,许多城市建造在山区或水系复杂的区域、建造城市轨道交通都将会遇到需要设置大坡度、小半径线路的问题,采用传统的系统将会造成较大的困难及建造和运营成本的提高推广应用非黏着驱动的直线电机运载系统是技术发展的必然需要。

- 我国城市人口密度较大,中大型的载客能力适应了大中型城市的交通需求,广州市城市轨道交通所选择的直线电机系统,为城市轨道交通系统提供了可选择的新的模式。

- 随着各城市轨道交通网络的扩展,减少城市郊区的延伸线路走出地面后对周边环境的影响,是降低城轨造价的必然选择之路。

- 广州市轨道交通直线电机运载系统的选择适应了我国大多数城市中、小运量等级线路的发展需求,具有广阔的推广应用前景。 ■

# 广州地铁2号线首期工程 设计创新综述

史海欧 孙钟权 (广州市地下铁道设计研究院)

**摘要:**广州地铁2号线工程设计本着“安全、实用、经济、高效”的原则,遵循以人为本、技术创新的设计理念,设计中采用了屏蔽门系统、集中供冷系统、刚性接触网、AFC一卡通、结构风管、暗挖车站、无柱车站、1.5 m宽盾构管片、冷冻法、水泥土地锚技术、设备国产化等一系列的新技术、新工艺、新设备。新技术节省了建设成本,加快了建设速度,提高了质量,而且将为以后的地铁运营降低成本。

**关键词:**创新 工程设计 新概念 国产化 新技术 屏蔽门 集中供冷

广州市地下铁道2号线首期工程(琶洲至江夏)线路全长23.32 km,共20座车站(其中从江夏至三元里段的4站5.04 km,因通过白云机场,将待白云机场搬迁后再行建设)。2003年6月28日顺利开通试运营的地铁2号线琶洲至三元里段线路长18.28 km,设16座地下车站,1个车辆段,2个主变电站,控制中心与1号线共同。该线路沿广州城市旧中轴线布设,连接火车站、广交会、越秀公园、中山纪念堂、市政府、中山大学、会展中心等重要地点,与地铁1号线形成广州市十字形的路网架构。地铁2号线首期工程从1999年11月8日正式开工至2002年12月29日2号线首段(晓港—三元里)8.9 km开通,前后仅用了3年时间,琶洲—三元里18.28 km开通试运营也只用了3.5年时间,工程进度、质量、投资控制和技术先进性都达到了国内领先水平,有很多超越了1号线。

2号线设计总体部本着“安全、实用、经济、高效”的原则,遵循以人为本、技术创新的设计理念,在总结广州地铁1号线设计及施工经验、回访运营的基础上,经多方研究和论证,广州地铁2号线设计中采用了一系列的新技术和创新,成为国内地铁工程建设的样板,而且许多新的概念和技术编入新的《地下铁道设计规范》。

## 1 结构与防水设计概念的创新

广州地铁2号线工程结构设计是国内首次提出“地铁工程考虑使用寿命超过百年,结构设计应保

证具有足够的耐久性,混凝土结构按100年设计”的新概念。永久结构混凝土的标号由C25提高到C30,并提出采用低标号高性能混凝土来保证结构的耐久性。地铁矿山法隧道二衬须采用钢筋混凝土内衬,并且能承受实际的水压力的设计概念在全国地铁工程中被普遍接受。

以结构自防水为主,关键处理好各种缝的防水原则;当设计中有附加外防水措施时,地下车站钢筋混凝土结构迎水面的最大裂缝宽度允许值可放宽至0.3 mm;围护结构与主体结构中间增加防水隔离层的全包型式得到了工程界的广泛认同,并成为广州地铁新线建设的标准;盾构隧道国内首次采用三元乙丙橡胶密封垫,也被全国盾构隧道设计普遍采用。

## 2 优化车站的布置,减少车站的土建规模

广州地铁2号线车站设计吸取了地铁1号线的经验,从车站的使用功能入手,科学地采用新技术、新工艺,进行车站的建筑布置,进一步核减车站的土建规模,设备用房和管理用房进一步核减其面积及高度,改进平面布置。

1号线普通双层明挖车站的长度为240~260 m,尽管2号线还增加了民用通信设备室(约30 m<sup>2</sup>),电信局机房(约15 m<sup>2</sup>),广告设备用房(约10 m<sup>2</sup>)等管理用房的面积,2号线普通双层明挖车站的长度仅为180~200 m长,缩短50 m左右。

### 3 因地制宜的确定车站方案

2号线车站方案设计因地制宜,根据水文地质条件、地面环境条件对各车站方案的确定从使用功能、工程投资、施工、环境、运行成本等方面进行综合比选,尽量采用一种对市民正常生活干扰最少的方案。

海珠广场站为4层车站,纪念堂、公园前站为3层车站;江南西和越秀公园站均为两端明挖、中间暗挖的车站;市二宫、鹭江、中大、赤岗、纪念堂站为无柱大跨度结构的双层车站;琶洲、新港东、磨碟砂站为单层侧式站台车站。

### 4 国内首次采用车站结构风管

地铁车站行车隧道的顶部风管以往是采用金属结构风管,现场安装。这种结构的最大缺点是运行期间的维护费用较大,且初始投入大,而在2号线中,首次采用了低成本的钢筋混凝土结构,减免了运营维护问题。结构风管与屏蔽门上承梁、刚性接触网预埋件巧妙结合设计,成功解决了它们之间的接口关系,节省了投资,对今后的地铁建设具有普遍的借鉴意义。

### 5 国内首次设计 1.5 m 宽盾构隧道管片

广州地区第一次自己独立设计和施工盾构隧道初砌结构。

在国内的地铁工程中,盾构隧道衬砌较多采用1.2 m宽的管片,1.5 m宽盾构隧道管片此前还未应用过。在2号线的盾构隧道设计中,通过盾构承包商和设计人员的努力,经过细致分析和方案比较,采用了1.5 m宽盾构隧道管片,一方面减少了20%的环向接缝数量,降低了接缝漏水的几率,提高隧道防水质量;另一方面,减少了接缝止水材料和连接螺栓的使用量;此外还可减少20%的拼装时间,提高了施工进度。

在1号线的盾构施工中,月平均掘进速度是180 m左右,而在2号线工程,盾构月平均速度达到250~300 m,最高推进速度达到450 m,因而这种施工进度将有助于改变今后新线地铁工程建设的管理理念和建设模式。

### 6 目前国内外最长距离水平冻结法的应用

广州地铁2号线中山纪念堂—越秀公园区间隧

道的南端穿越清泉街断裂破碎带,该破碎带由南北侧的破碎带和中间挤压带组成,长度达145 m。隧道施工通过该破碎带时采用了全断面水平冻结法作为辅助施工方法,冻结施工总长度115 m,冻结管单管长度最长达62 m,而目前国内外水平冻结的长度仅45 m。水平冻结施工满足了隧道的开挖要求。

长距离水平冻结施工方法在清泉街断裂破碎带的成功应用,是一个创举。长距离水平冻结法工艺及相关的许多关键技术在广州地铁的运用,解决了在城市环境中地面建筑物的保护这样一个难题,提高了目前国内外的水平冻结技术水平,而且对今后类似的复杂地下工程提供了指引。

### 7 水泥土地锚技术在软弱地层中的成功应用

在东部区间和车站中,根据周围环境和地质状况,第一次采用了较经济的搅拌桩加水平水泥土地锚的围护结构方案。新港东站的围护结构采用深层搅拌桩加水平水泥土地锚的方案,同比相同规模而采用灌注桩方案的琶洲站节省投资1 500万元左右。

从实施效果情况来看,这种围护结构虽存在水平位移较大的现象,但在软弱富水地层中能成功运用,不失为是一种创举。因此,对于地处空旷的基坑,即使在软弱地层,采用该类型的围护结构型式,不仅技术可行,而且非常经济,该技术既解决了围护结构的基坑支护需要,也具有较好的地层止水效果,值得推广应用。

### 8 暗挖隧道超前支护采用水平旋喷搅拌桩

在隧道横跨华南快速公路时,华南路桥公司坚持不允许明挖施工,隧道经过的地层上部均为淤泥和粉细砂层,下部为中粗砂层,而且地下水与珠江相联通,隧道埋深仅有5 m,要采用暗挖矿山法过华南路几乎是不可能的,因而设计中大胆采用了密排水水平旋喷超前支护的方法,较明挖法节省投资约500万元左右。

暗挖隧道施工的超前支护措施采用了水平旋喷搅拌桩。与以往的设计概念相比,水平旋喷搅拌桩工艺的采用,丰富了对矿山法隧道超前支护的认识,拓宽了人们的设计思想。

### 9 海珠广场站 27 m 超深基坑的设计

海珠广场站临近珠江边,地质水文条件复杂,基