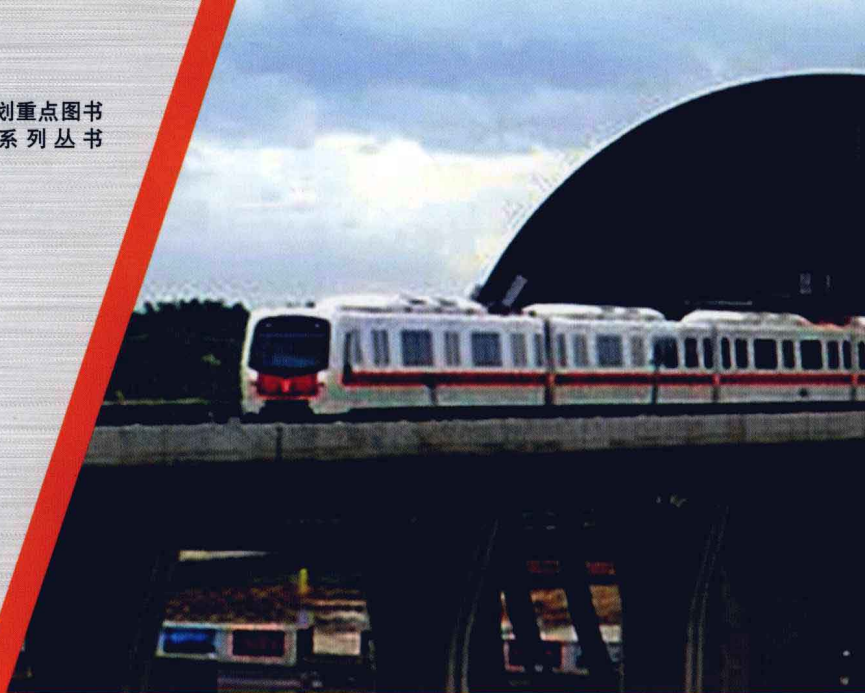




国家“十一五”出版规划重点图书
直线电机轨道交通系列丛书



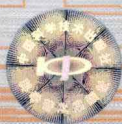
直线电机轮轨交通 高架结构

Elevated Structures for
Linear Motor Rail Transit

夏 禾 郭薇薇 陶毕莲◎著



中国科学技术出版社



- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 直线电机轨道交通系列丛书

直线电机轮轨交通 高架结构

夏 禾 郭薇薇 陶毕莲 著

中国科学技术出版社
· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

直线电机轮轨交通高架结构/夏禾,郭薇薇,陶毕莲著.
—北京:中国科学技术出版社,2009.9
(直线电机轨道交通系列丛书)
ISBN 978-7-5046-5521-9

I. 直… II. ①夏…②郭…③陶… III. ①直流电机-
电力机车-铁路运输-研究②高架桥-桥梁工程-研究
IV. U264 U488.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167546 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:010-62103208 传真:010-62183872
<http://www.kjpbooks.com.cn>
科学普及出版社发行部发行
北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:13.5 字数:280 千字
2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷
定价:21.00 元
ISBN 978-7-5046-5521-9/U·70

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书为《直线电机轨道交通系列丛书》之一,介绍了国内外直线电机轮轨交通高架结构发展和研究现状,总结了直线电机轮轨交通高架桥梁与车站的设计、施工方法、施工管理、养护维修、桥梁动态性能检测与评价方法,针对轨道交通高架桥梁和车站结构的振动与噪声问题,系统地研究了直线电机车辆与高架桥梁动力相互作用分析模型和计算方法、车辆与高架桥梁的共振响应、车桥系统振动性能的评价标准、高架桥梁在直线电机列车作用下的振动响应。

本书可供相关科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等学校研究生教材和参考书。

直线电机轨道交通系列丛书

顾问委员会

主 任 周干峙

委 员 王梦恕 刘友梅 焦桐善 钱清泉

编写委员会

主 任 施仲衡

副主任 卢光霖 陈韶章 宁 滨 于 增

主 编 魏庆朝 陈韶章

副主编 蔡昌俊 梁青槐 孙成良 余 乐

编 委 (按姓氏笔画顺序)

丁建隆	陈 峰	张 弥	罗 玲	杨家齐	沈子均
全永燊	宋敏华	冯爱军	杨 超	金 锋	倪 昌
徐明杰	莫庭斌	陈穗九	陆缙华	余祖俊	魏庆朝
蔡昌俊	夏 禾	郑琼林	范 瑜	梁青槐	高 亮
柳拥军	杨中平				

责任编辑 崔 玲 张敬一

封面设计 中文天地

正文设计 孙 俐

责任校对 林 华

责任印制 安利平

总 序

我国轨道交通发展日新月异。首先,在建设规模上,北京、上海、广州、南京、深圳等城市已建成多条地铁线路,并且正在规划、建设更多条线路,我国地铁建设规模已跃居世界第一;其次,由于居民出行方式的多样化及各城市需求的特殊性,所开发的轨道交通类型也越来越多样化,以适应国民经济发展的需要。

在众多的新型轨道交通类型中,采用直线电机驱动的轨道交通具有爬坡能力强、曲线半径小等突出优点。目前已开发成功并投入运营的直线电机轨道交通包括直线电机轮轨交通、磁浮轨道交通、直线电机独轨交通等方式。在上述新型直线电机轨道交通方式中,直线电机轮轨交通以其投入运营时间最长、运营线路最多、技术最成熟而得到专家、政府和民众的认可。

我国是世界上第四个拥有直线电机轮轨交通的国家,广州地铁4号线、首都机场线已相继投入运营,广州地铁5号线等线路正在建设及规划之中。这种新型的城市轨道交通方式已在我国显示出了强大的生命力和应用前景。

广州市地下铁道总公司在国家发改委、建设部和广东省的支持下,率先将直线电机轮轨交通方式在我国实现,并取得了一批创新性成果。北京交通大学发挥学科优势,结合广州地铁4号线、首都机场线等工程实际完成了一批科研项目,提升了我国在该领域的科研水平和学术成果。尤其值得赞赏的是,上述两家单位紧密联合,及时总结直线电机轮轨交通的科研成果和工程实际,编撰了《直线电机轨道交通系列丛书》,并被列入国家“十一五”重点出版规划。这是国内产学研结合所取得的丰硕成果,是我国轨道交通

领域值得庆贺的一件大事。

我多次参加该套丛书编委会会议,对丛书选题、各分册编写大纲,甚至对其中几本书的初稿进行了审查并提出了改进建议。我认为这是一套选题正确、内容先进、编排合理、图文并茂的图书,其出版必将对我国直线电机轨道交通建设起到积极的推动和普及作用。

当然,由于直线电机轨道交通在我国刚刚发展,本套丛书的部分内容将来还有待于修改、补充和完善。

衷心祝贺这套丛书的出版!

衷心祝愿我国直线电机轨道交通尽快发展壮大!

中国科学院、中国工程院院士

2009 年 4 月

总 前 言

我国地域广阔,人口众多,一方面对轨道交通提出了巨大的需求,另一方面也需要多种轨道交通方式。直线电机轨道交通包括直线电机轮轨交通、直线电机单轨交通、磁浮铁路(或称磁浮轨道交通)、直线电机气浮交通等类型,其中直线电机轮轨交通在最近二十余年国内外已建成14条运营线,磁浮铁路在21世纪初已建成两条运营线,均显示出其在技术、经济、环境等方面的突出优势。

为了在国内普及、推动直线电机轨道交通的建设和发展,在北京交通大学和广州市地下铁道总公司的支持下,以广州市科技攻关重大项目“城市轨道交通直线电机运载系统”等为依托,我们组织国内知名专家编写完成了《直线电机轨道交通系列丛书》。该丛书已被新闻出版总署列为国家“十一五”重点出版规划。

丛书第一批拟出版七本,分别为《直线电机轮轨交通概论》、《国外直线电机轮轨交通》、《直线电机轮轨交通线路与限界》、《直线电机轮轨交通轨道》、《直线电机轮轨交通高架结构》、《直线电机轮轨交通牵引传动系统》、《磁浮铁路系统与技术》,将来还准备组织编写直线电机轮轨交通车辆、地下工程、养护维修等方面的专著,并对广州地铁4号线、首都机场线的技术及运营实践进行总结。

该套丛书内容涵盖面广,既有系统介绍,又有各专业技术创新的最新成果,是一套跨学科、前沿性的综合研究系列丛书。丛书的出版不仅填补了国内该领域出版物的空白,而且对直线电机轨道交通技术在我国的发展和应用具有重要意义。

该套丛书编写人员均为我国城市轨道交通研究方面的专家,他们承担了多项相关科研项目,在该方面的研究居于国内领先水平。而且他们都参与了我国首都机场线及广州地铁4号线直线电机轨道交通工程的建设,具有理论和实践双重经验,相信他们所编撰完成的这套丛书必定具有较高的学术水平和应用价值。

中国工程院院士

2009年4月

前 言

直线电机轮轨交通系统具有技术先进、安全可靠、经济合理、绿色环保等特点,非常适合大、中城市中等级运量轨道交通发展的需求,是一种极具发展前途的新型交通模式。

在广州地铁4号线的设计建造过程中,广州地铁总公司组织相关单位完成了“城市轨道交通直线电机运载系统”科研项目,对直线电机轮轨交通的系统集成、关键技术、重大装备等进行了系统的研究,内容包括系统适用性、直线电机的设计、VVVF变频器研制、转向架研制、车辆设计及系统集成、感应板、道岔研制、轨道结构设计、供电及配电系统、信号及列车运行控制等。在基础设施工程方面,重点研究了直线电机轮轨交通限界、线路设计参数、轨道结构相关技术、混凝土板式道床振动控制与轨道动态平顺性控制以及高架结构动力特性及车辆走行性等,通过研究取得了一系列重要的成果。

研究工作还得到了北京市自然科学基金项目(8082021)和比利时政府—中国科技部政府间科技合作项目(BILO7/07)的资助。

这些科研成果对广州地铁4号线、5号线以及首都机场线工程的实施,具有非常重要的意义,有利于我国尽快掌握直线电机轮轨交通的关键技术,填补我国在此领域的空白;有利于在我国推广直线电机轮轨交通方式,为我国轨道交通系统提供新的选择。

本书是国家“十一五”重点图书出版规划项目《直线电机轨道交通系列丛书》中的一本。内容分为五章:第1章绪论,主要对国内外直线电机轮轨交通高架结构发展和研究现状进行介绍;第2章高架结构设计,从设计角度对轨道交通高架桥梁总体布置、上部及下部结构形式、桥面构造以及轨道交通高架车站设计进行了全

面的阐述;第3章高架结构动力分析,针对轨道交通高架桥梁和车站结构的振动与噪声问题,系统地研究了车辆与桥梁动力相互作用分析模型和计算方法、车辆与高架桥梁的共振响应、车桥系统振动性能的评价标准,并以广州地铁4号线为工程背景,对位于车陂南—黄阁段区间中的四种不同梁式、跨度、墩高的高架桥梁在直线电机列车作用下的振动响应进行了分析;第4章高架结构施工与管理,介绍了高架桥梁的施工方法、高架车站主结构施工技术、高架桥梁的施工管理方法;第5章高架桥梁的养护维修与检测,介绍了高架桥梁的养护维修以及桥梁动态性能检测与评价方法。本书可供相关科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等学校研究生教材和大学生的参考书。

本书由夏禾确定各章节内容、制订全书大纲,并撰写第1章和第3章的部分内容;张楠、申兆繁撰写第2章;郭薇薇撰写第1、2章部分内容和第3章;卢文良、姚锦宝撰写第4章;夏超逸、战家旺撰写第5章;部分章节引用了顾戍华、陈晶文学位论文的成果;北京城建设计院冯爱军提供了有关资料;全书由夏禾、郭薇薇进行统稿和修改,夏超逸参加了修改工作。在科研项目的完成和本书的编写过程中,始终得到施仲衡院士的指导和广州地铁总公司的支持。北京交通大学张弥、刘建坤,广州地铁总公司莫庭斌、陶毕莲,北京城建设计院冯爱军、沈子均、任静,铁二院倪昌,东直门机场快速轨道有限公司孙成良等专家对书稿提出了许多宝贵的意见。作者在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

夏 禾

2008年11月于北京交通大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 直线电机轮轨交通高架结构的特点	1
1.2 国外直线电机轮轨交通高架结构发展概况	4
1.3 国内直线电机轮轨交通高架结构发展和研究现状	8
第 2 章 高架结构设计	12
2.1 概 述	12
2.2 高架桥梁的总体设计	12
2.3 高架桥梁结构形式	18
2.4 直线电机轮轨交通高架桥梁的桥面构造	28
2.5 高架桥梁的设计	30
2.6 轨道交通高架车站设计	47
第 3 章 高架结构动力分析	58
3.1 高架结构的振动与噪声问题	58
3.2 车辆与桥梁动力相互作用研究的发展历史与现状	66
3.3 车辆与桥梁动力相互作用分析模型和计算方法	76
3.4 车辆与高架桥梁的共振响应	104
3.5 车桥系统振动性能的评价标准	111
3.6 直线电机列车与高架桥动力相互作用分析实例	118
第 4 章 高架结构施工与管理	144
4.1 高架桥梁的施工方法	144
4.2 广州地铁 4 号线高架车站主体结构施工技术	158
4.3 高架桥梁的施工管理	160
第 5 章 高架桥梁的养护维修与检测	167
5.1 高架桥梁的养护维修	167
5.2 高架桥梁动态性能检测与评价	181
参考文献	197

第1章 绪 论

随着我国城市化的推进,交通系统大规模发展的趋势是极为迅速的。由于轨道交通具有运量大、速度快、安全可靠、对环境污染小、不占用地面道路等优点,成为缓解城市交通拥挤和减少污染的一种有效手段。目前,以地铁和轻轨为主的轨道交通基础设施建设已成为城市优先发展的基本任务之一。在我国人口过百万的 48 个城市中,有 30 多个大城市和特大城市正在建设或筹建自己的轨道交通系统。

目前,世界各国根据城市特点已开发了多种形式的轨道交通模式。这其中,既有传统的轮轨系统,也有直线感应电机(Linear Induction Motor,以下简称“直线电机”或“LIM”)系统、跨座式单轨系统、无人驾驶新交通、磁悬浮系统等新型轨道交通模式。我国城市轨道交通的发展只有 40 余年的历史,仍以传统的大运量轮轨交通为主。

本书结合直线电机轮轨交通的特点,对高架桥梁与车站的结构形式及选型、桥梁总体设计和结构设计、运行列车引起的结构振动与噪声问题以及施工方法、施工管理、养护维修、桥梁动态性能检测与评价方法等进行介绍。

1.1 直线电机轮轨交通高架结构的特点

城市轨道交通系统进入城区后,可以随着城市地势的变化或城区建筑群的不同,采取空中(高架桥梁)、地下(地铁隧道)或地面等铺设方式。不同方式对工程建设投资的影响很大:同样规模的线路,地面、高架、地下三种不同的铺设方式,其土建工程投资比例一般为 1:3:6。为降低造价,城市轨道交通一般只是在市区建筑物密集地段设在地下;在城乡结合部、郊区等环境条件允许的情况下,利用地面线或高架线;当考虑轨道交通与其他交通立交的需要时,往往采用高架线。

直线电机轨道交通在世界诸多国家中得到应用,属于中运量系统(单向高峰小时 2 万人左右)。因其具有爬坡能力强、转弯半径小、噪声低、方便灵活、安全可靠等诸多方面的独特优点,具有很好的推广应用前景。加拿大温哥华空中列车线建在城区,地面和高架部分在全线占较大比例,所采用的高架桥结构如图 1-1 所示。肯尼迪机场线高架结构如图 1-2。

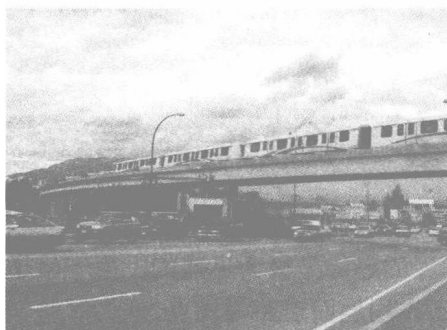


图 1-1 温哥华空中列车高架桥

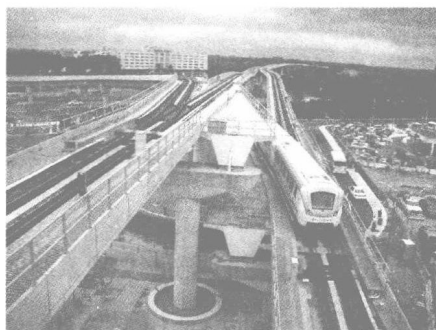


图 1-2 肯尼迪机场线高架桥

作为一种新型的交通模式,直线电机轮轨交通系统具有安全可靠、经济合理、绿色环保等特点,非常适合大、中城市中等运量轨道交通发展的需求,是一种极具发展前途的交通模式。直线电机轨道交通与传统轨道交通相比,在高架结构(高架桥梁和高架车站)方面还具有以下优势:

(1) 轴重轻,断面小,高架桥体量小

对于传统的车辆,牵引力与制动力受轮轨间黏着力的限制。在黏着系数一定的情况下,增加黏着力就需要增加动车的重量,这与希望减小列车重量以减少损耗的设计宗旨是相矛盾的。所以在列车重量一定的情况下,列车的牵引力与制动力完全受制于轮轨间的黏着系数,从而大大地限制了列车牵引力的提高。

直线电机牵引的车辆,没有机械传动机构,使得转向架设计紧凑,实现了车上各种设备的小型化。同时采用轻质材料,使车辆重量减轻。例如,庞巴迪公司生产的 MK II 型车辆轴重只有 9t。这种轴重较轻的中、小型车辆,可以使桥梁结构实现轻量化,实现高架线的小限界断面,减少 30% 的高架桥工程量。加拿大空中列车系统的高架线行车导梁和高架车站的体量都较小,下部结构尽量简化,梁型、墩型设计采用的断面都比较小。因此空中列车系统的高架线路桥面比常规轮轨交通系统窄,梁短,支柱小,桥墩间距大,充分体现了车辆轴重减轻带来的优势。

(2) 高架桥景观效果好

直线电机轮轨交通系统车体小,轴重轻,高架桥体量小,高架车站规模小,噪声低,振动小,相对减少了城市轨道交通系统对城市生态和景观的影响,有时还可将其与城市景观相融合,形成城市新景观。图 1-3 为温哥华空中列车系统中列车通过跨海大桥时的景观效果。反过来,系统的环境景观影响优势又使城市环境对城市轨道交通系统建设的限制减小,容许建设环境可接受的市区高架线路,有利于工程项目的实施和节约工程造价。

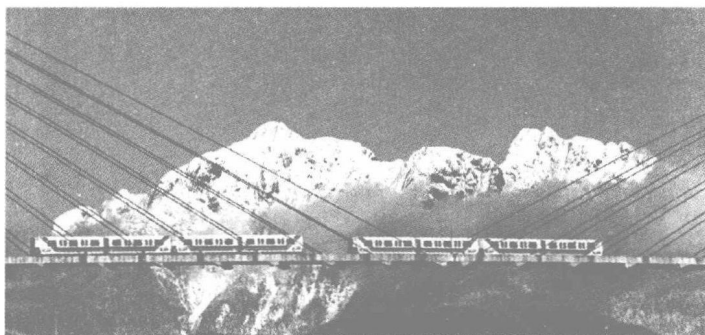


图 1-3 温哥华空中列车系统跨海大桥景观效果

(3) 性能优越,爬坡能力强

直线电机轮轨交通系统利用直线电机磁极气隙间产生的电磁推力作为列车的牵引力,车轮仅起竖向支撑和行车导向的作用。由于列车牵引力不受轮轨间的黏着力影响,仅受限于直线电机的容量和列车的结构,因此具有优良的动力性能。车辆加减速可靠,磨损少,爬坡能力强,可爬上 80‰的坡度(传统列车爬坡能力一般不大于 35‰),故可改善选线条件,并减少对环境的破坏。

(4) 曲线半径小,适应性强

与普通的旋转电机相比,特别是采用径向转向架时,直线电机技术能够使车辆运行在曲线半径更小(最小平面曲线半径可达 80m,而传统地铁是 300m)的地段,规划选线时可以通过高架或地下线路来避开建筑物或建筑基础,便于灵活选择线路,可以减少用地,适用于不同的建设条件。

(5) 转向架重量轻,运行性能好

直线电机车辆的车轮仅起支撑和导向作用,大大减少了轮缘和轨道的磨损,转向架和直线电机结构都比旋转电机车辆简单,大大提高了运行性能,降低了车辆维修工作量。

(6) 振动小,噪声低,高架车站易与已有建筑结合,方便乘客乘坐

直线电机轮轨交通系统振动较小。列车在轨面上正常运行时,车体的横向、纵向和垂向 RMS 振动加速度不超过 0.5m/s^2 ,且振动频率在 1~50Hz 之间。由于轮、轨间不传递牵引力和制动力,车辆轮轨的撞击噪声也得到降低。资料表明,直线电机轮轨交通以 60km/h 速度运行时,距线路中心 10m 处测得的声强比传统地铁要低 10dB 左右,而且直线电机系统的电磁污染也很小。这些特性使之能近距离通过建筑物,甚至直接穿过建筑物,如图 1-4 所示。

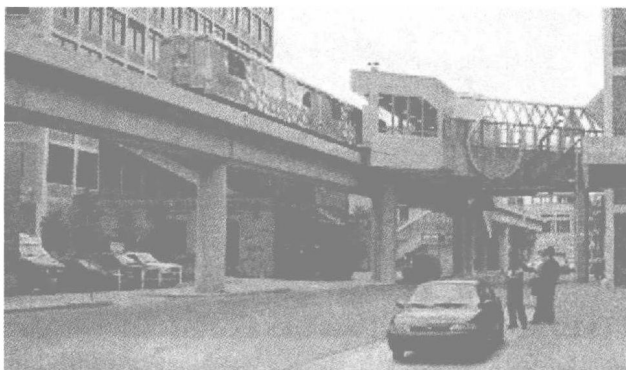


图 1-4 美国底特律线车站设在建筑物内

(7) 工程造价和管理费用低

由于采用了直线电机,车辆的重量和轮廓尺寸都有所减小,可使高架桥设计成轻型结构。直线电机具有较强的爬坡能力,可减小坡道距离和平面转弯半径,从而节省了车辆段及综合维修基地的用地面积,大幅降低了工程造价。

1.2 国外直线电机轮轨交通高架结构发展概况

从第一条直线电机轮轨交通问世至今,不过经过了短短的二十几年,但这种新型的交通方式以其独有的先进性和实用性等特点迅速地发展起来。

目前世界上直线电机轮轨交通系统设备主要由加拿大和日本的有关公司制造。两国在技术上各有侧重:加拿大主要使用地上直线电机车辆,在高架桥、跨海大桥建设上有成功经验;日本则主要是地下直线电机轮轨交通,在小断面隧道建设上成效显著;加拿大为无人驾驶,日本为单人驾驶。另外,两国在直线电机设计中对参数的选择也有不同。

1.2.1 日本直线电机轮轨交通

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,但是从 20 世纪 60 年代起,日本就已开始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。地下空间资源已十分紧张,要继续修建新的地铁线路已十分困难,且造价非常昂贵。因此,开发小型化的直线电机地铁以适应日趋紧张的地下空间资源就显得十分必要。

1981~1983 年,日本铁道技术协会进行了“小断面地铁直线电机驱动车辆”的研究,并试制了样车。通过研究和试验,初步确立了小断面地铁采用直线电机驱动的模式。1985~1987 年,在运输省及地下铁道协会的指导下,组成专门委员会,开展直线电机驱动

小型地下铁道实用化研究。同时,在大阪南港建造了试验线,进行了一系列样车实验,取得了成功。1986年8月大阪7号线小断面地铁开始施工,1990年3月通车运行。1988年东京大江户线小断面地铁开始施工,2000年12月全线通车。

日本的直线电机轮轨交通系统以地下线为主,甚至车辆段及综合维修基地也设置在地下,只有少量高架线,见图1-5。其特点是:以经济实用、不盲目追求技术先进为特征,性能指标一般。直线电机采用自然冷却方式,受电为1500V直流受电弓方式。车辆采用强迫导向径向转向架,轴距1.9m,定距11.0m,轮径610mm或660mm。列车为八节编组,带司机室的头、尾车辆重24t,载客量90人(32个座位);中间车辆重25t,载客量100人(40个座位)。列车最高运行速度70km/h,发车密度最高为24对/小时,运送能力可达到单向高峰小时1.9万人次。

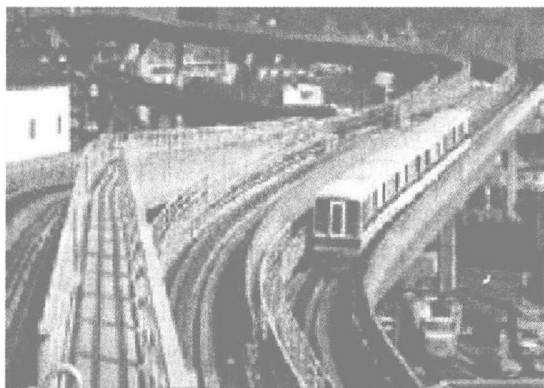


图1-5 日本的直线电机高架系统

1.2.2 加拿大直线电机轮轨交通

加拿大的直线电机轮轨交通系统是由加拿大城市交通发展公司研发的。该公司在金斯頓市设立了研究中心,包括一个带有环形试验线的轨道试验基地,主要通过车辆试验和轨道线路试验开展直线电机轮轨交通系统的研究。

经过长期的酝酿,温哥华市采用了直线电机轮轨交通模式。1981年温哥华线开始规划设计,1982年施工,首先建造了1 km多的试验线,1985年底全线建成,1986年1月正式投入运营。

加拿大的直线电机轮轨交通包括地下线和高架线。由于温哥华线建在城区,地面和高架部分在全线占较大比例,因此选择了噪声低、振动小的直线电机轮轨交通。造型美观的高架桥穿过市区,成为城市中一道靓丽的风景线,因此被名副其实地称为空中列车线(Skytrain Line),如图1-6所示。