



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 轨道

Track for
Lear Motor Rail Transit

高亮 许有全 刘浪静◎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

直线电机轮轨交通轨道

高 亮 许有全 刘浪静 著

中国科学技术出版社
· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

直线电机轮轨交通轨道/高亮,许有全,刘浪静著.

—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 - 5523 - 3

I. 直… II. ①高…②许…③刘… III. 直流电机 - 电力机车 - 铁路运输 - 研究 IV. U264

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167544 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:9.25 字数:200 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

定价:16.00 元

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5523 - 3/U · 72

(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

本书结合广州地铁4号线及北京首都机场线直线电机轮轨交通的建设情况,对直线电机轮轨交通轨道结构的相关技术进行了研究与总结。全书共7章,第1章重点介绍直线电机系统的特点、发展概况及对轨道结构的影响;第2章重点分析轨道结构的选型原则;第3章建立了无砟轨道设计分析模型,研究确定了无砟轨道的力学特性及主要影响因素;第4章介绍了桥上无缝线路设计方法及相关影响因素;第5章阐述了直线电机道岔的平纵断面设计原则、设计参数及其与电务设备的配合;第6章重点研究了直线电机车辆-板式轨道耦合动力学模型,分析了线路减振降噪的原理和方法;第7章总结了直线电机轮轨交通系统的养护维修特点和新型管理模式。

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

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

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。

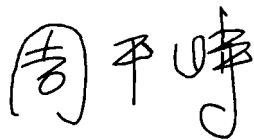
我多次参加该套丛书编委会会议,对丛书选题、各分册编写大纲,甚至对其中几本书的初稿进行了审查并提出了改进建议。我认为这是一套选题正确、内容先进、编排合理、图文并茂的图书,其出版必将对我国直线电机轨道交通建设起到积极的推动和普及作用。

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

Handwritten signature of Zhou Ping in black ink, consisting of three characters: '周', '平', and '啸'.

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。

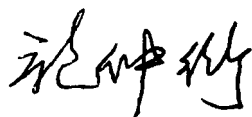
为了在国内普及、推动直线电机轨道交通的建设和发展,在北京交通大学和广州市地下铁道总公司的支持下,以广州市科技攻关重大项目“城市轨道交通直线电机运载系统”等为依托,我们组织国内知名专家编写完成了《直线电机轨道交通系列丛书》。该丛书已被新闻出版总署列为国家“十一五”重点出版规划。

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

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Li Shizhong' (李士忠), written in a cursive style.

2009年4月

前 言

随着城市规模的不断扩大,楼宇建筑和地铁路网建设的不断发展,城市多层立体轨道交通网络使城市地下隧道的埋深逐渐增加,线路坡度越来越大,曲线半径越来越小,传统的轮轨黏着驱动技术已不能完全满足国内城市轨道交通建设的需要。直线电机轮轨交通系统具有结构简单、坚固耐用、车身重心低、维护工作量小、小半径曲线和大坡道适应能力强等优点,线路规划设计时具有较大的自由度,在城市轨道交通领域有着广阔的应用前景。

直线电机轮轨交通系统的研究始于20世纪70年代后期,目前已经形成了以加拿大的温哥华空中列车线和以日本东京大江户线为代表的直线电机轮轨交通系统。两大系统各具特色,分别发展了适应于各自系统特点的直线电机转向架、道床、扣件、道岔技术体系。需要指出的是,由于我国的地铁建设和运输条件与国外存在差异,国外现有技术不能直接引用。为此,需要在充分总结国外直线电机牵引系统特点,认真分析国内地铁设计和运营特点的基础上,通过系统的理论研究和工程试验,建立一套具有中国特色的直线电机轮轨交通系统设计和建设体系。

本书结合广州地铁4号线及北京首都机场线直线电机轮轨交通的建设,对直线电机轮轨交通结构的相关技术进行了研究与总结。全书共分7章,第1,2章介绍了直线电机轨道技术的概况及轨道结构的选型,第3,4,5章介绍直线电机轨道结构关键技术,第6,7章介绍直线电机轮轨交通系统振动控制、检测及养护维修管理技术。

参加本书编写的有北京交通大学高亮(第1~4章、第6章、第

5章第5.7节及第7章第7.4节)、中铁工程设计咨询集团有限公司许有全(第5章第5.1~5.6节)、广州地铁公司刘浪静(第7章第7.1~7.3节)。北京交通大学博士研究生马鸣楠、辛涛协助完成了部分章节的计算、分析和统稿工作。

在本书的编写过程中,承蒙广州地铁公司陈晓英高级工程师,中铁工程设计咨询集团有限公司张立国高级工程师、王菁教授级高级工程师、张庆教授级高级工程师、丁静波工程师、何雪峰工程师,广州地铁设计院刘智成高级工程师,周斌工程师,北京城建设计院任静高级工程师、冯爱军副总工程师、曾向荣高级工程师、张格妍工程师,北京交通大学的魏庆朝教授、张弥教授、彭华副教授、谷爱军副教授、王冬梅老师、赵影老师、廖利博士、陈鹏博士、曲建军博士,北京市规划委员会冯雅薇博士的帮助和支持,在此一并表示感谢。

直线电机轨道交通技术涉及专业多,技术复杂。由于时间紧迫,作者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2009年1月于北京

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 直线电机轮轨交通特点及发展现状	1
1.2 轨道设计的特点	2
第 2 章 轨道结构选型及感应板的安装	5
2.1 轨道结构设计原则	5
2.2 钢轨类型的选择	5
2.3 扣件的选择	7
2.4 道床类型的选择	9
2.5 感应板的安装	16
第 3 章 无砟轨道结构力学特性	20
3.1 概述	20
3.2 解析法及其改进	20
3.3 有限元法	28
3.4 无缝线路-无砟轨道-桥梁一体化模型	31
3.5 无砟轨道结构力学特性分析	34
3.6 其他相关影响因素分析	39
3.7 主要结论	42
第 4 章 桥上无缝线路力学特性	43
4.1 概述	43
4.2 桥上无缝线路传统设计方法	44
4.3 一体化模型在无缝线路计算中的应用特性	47
4.4 桥上无缝线路设计参数的影响规律研究	48
4.5 与直线电机相关的其他因素的影响分析	57
4.6 主要结论	63

第 5 章 道 岔	66
5.1 概 述	66
5.2 直线电机轮轨交通道岔的设计原则及设计参数	69
5.3 道岔的平面设计要求	71
5.4 护轨及道岔区非金属部件的设置方法	73
5.5 道岔与电务转换设备的配合	75
5.6 施工方法及机具可能对道岔结构性能的影响	77
5.7 车辆 - 道岔动力响应研究	78
第 6 章 轨道结构的振动与控制	99
6.1 轨道结构振动特点	99
6.2 直线电机车辆-无砟轨道动力学研究现状	100
6.3 直线电机车辆 - 无砟轨道耦合系统动力模型的建立	101
6.4 直线电机轮轨交通振动特性分析	105
6.5 直线电机轮轨交通减振降噪措施	113
6.6 轨道状态测试及减振性能评估	116
第 7 章 养护维修与管理	119
7.1 直线电机养护维修特点	119
7.2 维修周期及维修内容	119
7.3 维修工艺及标准	120
7.4 轨道结构信息化管理	125
附 表	126
参考文献	131

第1章 概述

1.1 直线电机轮轨交通特点及发展现状

1.1.1 系统基本工作原理

直线电机(Linear Induction Motor, LIM)是从传统的旋转电机(Rotational Induction Motor, RIM)演变而来的,它的基本构成和作用原理与普通旋转电机类似。旋转电机圆筒形的转子被定子围绕着,定子构成磁场,利用转子中通过的电流,在转子上产生旋转力。直线电机则是把定子和转子这两个圆筒展开成板状,转子沿定子的长度方向直线移动,以某种方式支撑转子,使转子与定子间的气隙维持一定,如图1-1所示。

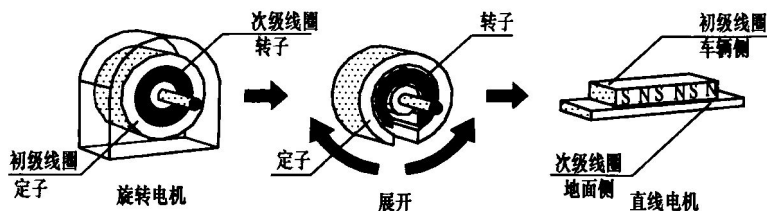


图 1-1 旋转电机与直线电机原理对比图

直线电机牵引的地铁车辆是将直线感应电机的定子部分(含电磁铁和线圈)安装在车辆的转向架上,将转子(感应板)沿线路铺设在轨道的中间。根据感应电机原理,当电流通过直线电机的定子电磁铁线圈时,会产生向前方向的磁场,通过与轨道感应板的相互作用产生牵引力。列车靠车轮支撑在轨道上,由于感应板是固定在轨枕(或轨道板)上的,反作用力就推动直线感应电机定子,从而带动转向架和列车在轨道上运行,如图1-2。



图 1-2 直线电机车辆

1.1.2 直线电机轮轨交通的优缺点

采用直线电机牵引有两大突出优点:一是直线电机车辆车轮尺寸小,新建地铁时能减小隧道的断面,节省土方量,降低工程造价;二是它基于非黏着驱动,爬坡能力强,便于采用径向转向架,车辆易于通过小半径曲线,具有良好的安全性和可靠性。

以日本大阪南港试验线为例,其直线感应电机列车地板高度只有70cm,比一般地铁车辆的地板高度低50cm左右,车辆的整体高度则比普通地铁车辆要低约1m,但客室高度仍然有2m以上,不会让乘客有压抑感。

LIM牵引系统的车轮仅起支撑和导向作用,列车前进靠直线电机的电磁力推动。列车的牵引力不受车轮与钢轨之间黏着条件的影响,是一种典型的非黏着驱动系统。所以LIM牵引系统能获得优良的动力性能和爬坡能力,其线路的最大坡度为80‰左右,远大于传统RIM系统轮轨黏着牵引的30‰~40‰。

另外,LIM牵引系统,没有传统RIM系统的机械齿轮变速传动系统,车轮无须传递牵引力,有利于采用结构简单的径向转向架,可以使线路曲线半径减少到50~80m,而传统地铁的曲线半径是300m,这样小的曲线半径,使得LIM线路可以方便地绕过城市地上和地下的建筑物,方便选线和降低投资成本。

但与旋转电机相比,直线电机由于其转子和定子间气隙大,导致漏磁量大,机电能量变换的效率低;小直径车轮踏面研磨频繁,运营过程中必须及时调整其角度和空隙,增加了该方面的养护维修难度。

1.1.3 国内外发展现状

由于直线电机轮轨交通系统具有加减速性能好、牵引力大、维修量小等突出优势,已在加拿大温哥华空中列车线、马来西亚吉隆坡格兰那再也线、日本大阪长堀鹤见绿地线、东京大江户线、纽约肯尼迪机场线等轨道交通中得到应用,目前建成的线路总里程超过180km。我国广州地铁4号线和北京首都机场线已开通运营;广州地铁5号线经过充分的筹备工作,已经开工建设。广州地铁6号线,武汉、台北等城市地铁也计划采用直线电机系统。

1.2 轨道设计的特点

直线电机轮轨交通采用直线感应电机驱动技术,是介于磁悬浮与轮轨系统之间的轨道交通系统,区别于传统轨道交通牵引模式。其轨道结构与一般的地铁线路不同点在于感应板在轨道轨枕或整体道床上安置,与钢轨、道床以及供电轨的尺寸链关系至关重要,其关系见图1-3。这种尺寸链关系对轨道的设计会产生一定的影响。

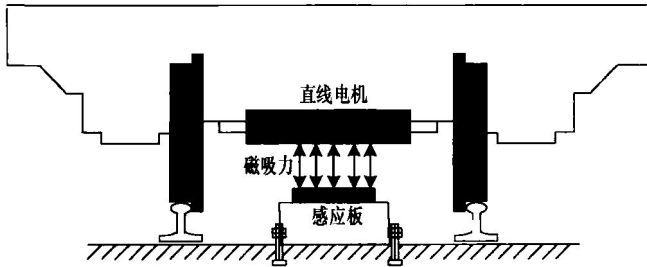


图 1-3 直线电机、感应板和钢轨之间的关系图

1.2.1 感应板安装的影响

直线电机系统的感应板及安装有多种形式。加拿大技术的感应板安装如图 1-4 所示。其在整体道床或轨枕上预埋螺栓,感应板固定在螺栓上,具有易调整、板端头可悬空、感应板铺装方便等特点。

日本技术的感应板及安装如图 1-5 所示。在轨枕上预埋螺栓,采用扣压件扣压感应板,感应板稳定性较好,缺点是感应板的调整量很小,对轨道铺设精度要求很高。感应板规格少且端头不能悬空,给轨道设计和铺设带来一定困难。

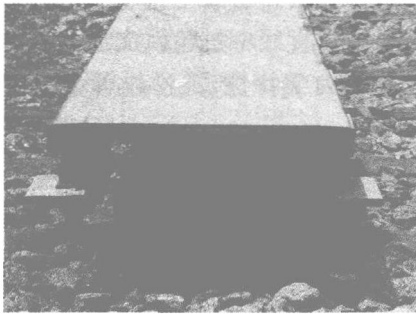


图 1-4 加拿大的感应板及安装



图 1-5 日本的感应板及安装

车载直线电机本体与安置在道床结构上感应板的气隙大小和变化是影响直线电机轨道系统设计的关键所在。广州地铁 4 号线采用日本技术,感应板由扣压件扣压固定,感应板高度调整通过扣压件中的调整板实现,调整板标准厚度为 5mm,垂向调整量为 $\pm 6\text{mm}$,横向调整量为 $\pm 11\text{mm}$ 。直线电机与感应板对轨道结构的气隙标准静态时为 10mm,公差为 0、-1mm,动态时仅允许 1.5mm 的钢轨及接头的下沉量,维修周期之前的钢轨允许磨耗 1.0mm,对轨道设计要求较为苛刻。由此可知,从施工及调整角度看,采用加拿大的方式来安装感应板较为合理。

1.2.2 对轨道受力的影响

直线电机轮轨交通的轨道荷载较普通轨道复杂,除了走行轨承受轮轨垂直动荷载、横向水平荷载、纵向轮轨滚动摩擦力、高架桥上的梁轨纵向附加力等外,装有感应板的轨道还承受列车牵引力或制动力,牵引力的作用点在轨道中心,而不是在走行轨上。此外供电轨多安装在轨道一侧,使轨道还受到一个附加外弯矩,因此设计时需要针对轨道结构进行针对性的分析和研究。

车辆运行时应满足气隙的要求,由于感应板的安装精度要求较高,因此需要提高轨道的施工精度;为保证轨道平顺性,还需满足良好的调整能力。直线电机轮轨交通的线路存在小曲线半径和较大的坡道,因此必须满足轨道的稳定性要求。

总之,直线电机轮轨交通的轨道结构是轨道交通系统行车的基础,其结构非常复杂。从受力角度看,一方面轨道结构承受来自车辆的随机动荷载作用,在载荷反复作用下,轨道强度会受到影响,钢轨在轮轨接触处,巨大的接触应力可能会导致钢轨的损伤,在制动力和曲线侧向切削力的作用下又会使这种损伤加剧;由于温差、大坡道及小半径的影响,无缝线路又会出现爬行、失稳、断轨等问题。另一方面,作为直线电机轮轨交通这种新型城市轨道交通形式,轨道结构与感应板还存在着一定的相互作用,除了感应板会对轨道结构的形式、设计参数等有一定的影响外,轨道结构的性能也会对直线电机正常、安全的使用有重要的影响。轨道结构的形式、设计参数、设计方法及安装工艺、养护维修水平等将成为决定该系统能否正常使用的关键。本书主要结合直线电机轮轨交通的特点,着重对直线电机轨道结构的选型、无砟轨道及无缝线路的力学特性、道岔设计、轨道振动分析、养护维修等问题进行探讨。

作为我国第一条直线电机轮轨交通系统的广州地铁4号线,为我国发展新型城市轨道交通系统开辟了一条新路。但不容忽视的是,由于直线电机轮轨交通在我国才刚刚出现,没有现成的标准和规范套用,轨道结构相关的研究在国内尚存在一定的欠缺。因此,充分吸收国外先进经验,借助广州地铁4号线及北京首都机场线的建设,对轨道结构进行深入细致的研究是非常必要的。对直线电机轮轨系统的深入研究和总结对我国进一步推广直线电机轮轨交通系统具有非常重要的意义。