




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



# 国外直线电机 轮轨交通

Linear Motor Rail Transits  
in Foreign Countries

范瑜 李文球 杨中平 梁青槐 编著

 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

# 国外直线电机轮轨交通

范 瑜 李文球 编著  
杨中平 梁青槐

中国科学技术出版社  
· 北 京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

国外直线电机轮轨交通/范瑜等编著. —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 - 5520 - 2

I. 国… II. 范… 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 167543 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.kjbooks.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:6.75 字数:200 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

定价:12.00 元

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5520 - 2/U · 69

---

(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

本书是《直线电机轨道交通系列丛书》之一,介绍了直线电机轮轨交通系统在国外研发和应用的历史、现状以及未来的发展趋势。本书不仅介绍了既有线路,还介绍了在建线路和规划线路。除普通短定子直线感应电机轮轨交通外,还介绍了分段长定子直线感应电机、双馈直线感应电机等其他类型直线电机在轮轨交通中的应用,同时还介绍了直线电机在小型地铁、独轨交通等系统中的应用现状与发展前景。本书对各国直线电机轮轨交通试验线和直线电机模拟试验装置的特点、主要参数做了阐述,总结了国外直线感应电机轮轨交通的建设经验,展示了其应用前景。

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本科学生的参考书。

# 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 刘红岩

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。

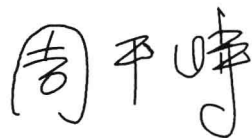
我多次参加该套丛书编委会会议,对丛书选题、各分册编写大纲,甚至对其中几本书的初稿进行了审查并提出了改进建议。我认为这是一套选题正确、内容先进、编排合理、图文并茂的图书,其出版必将对我国直线电机轨道交通建设起到积极的推动和普及作用。

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

Handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '周平' (Zhou Ping).

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。

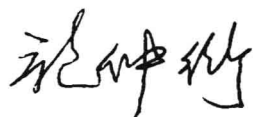
丛书第一批拟出版七本,分别为《直线电机轮轨交通概论》、《国外直线电机轮轨交通》、《直线电机轮轨交通线路与限界》、《直线电机轮轨交通轨道》、《直线电机轮轨交通高架结构》、《直线电机轮轨交通牵引传动系统》、《磁浮铁路系统与技术》,将来还准备组织编写直线电机轮轨交通车辆、地下工程、养护维修等方面的专著,并对广州地铁4号线、首都机场线的技术及运营实践进行总结。

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,通过研究取得了一系列重要成果。

这些科研项目和广州地铁4号线、5号线及首都机场线工程的实施,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,因而具有非常重要的意义。

本书是国家“十一五”重点图书出版规划《直线电机轨道交通系列丛书》之一,全面介绍了直线电机轮轨交通系统在世界各国研发和应用的历史、现状以及今后的发展趋势。不仅介绍了既有线,也介绍了在建线,展示了直线感应电机的应用前景。本书以普通短定子直线感应电机轮轨交通为主,但并不局限于此,还介绍了分段长定子直线感应电机、双馈直线感应电机等其他类型直线电机在轮轨交通中的应用,直线电机在小型地铁、独轨交通、people mover等轮轨交通系统中的应用现状与发展前景。本书还对各国直线

电机轮轨交通试验线和直线电机模拟试验装置的结构、特点和参数等做了较为详细的阐述。相信这些内容对我国开展直线电机轮轨交通的规划设计、工程建设和科学研究具有一定的参考价值。

本书由范瑜确定各章节内容、制订全书大纲,并撰写第1、2、4、5、6、12、13、14、15章;梁青槐撰写第3章;杨忠平撰写第7、8、9、10、11章。广州地铁总公司李文球、李宏辉同志也参加了编写工作并提供了有关资料。全书由范瑜进行统稿和修改。

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;北京交通大学魏庆朝、杨超,广州地铁总公司陈韶章、蔡昌俊等专家对书稿给予了很多指导并提出了宝贵的意见。作者在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免缺点和错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2009年6月

# 目 录

|   |    |
|---|----|
| <b>第1章 绪论</b> .....                         | 1  |
| 1.1 直线电机及其在轨道交通中应用的历史 .....                 | 1  |
| 1.2 直线电机的分类及其在轨道交通中的应用 .....                | 3  |
| 1.3 直线电机轮轨交通的发展现状与展望 .....                  | 9  |
| <b>第2章 加拿大多伦多斯卡伯勒线</b> .....                | 12 |
| 2.1 多伦多城市轨道交通概况 .....                       | 12 |
| 2.2 斯卡伯勒线概述 .....                           | 14 |
| 2.3 斯卡伯勒线车辆 .....                           | 16 |
| 2.4 未来发展计划 .....                            | 18 |
| <b>第3章 加拿大温哥华直线电机轮轨交通</b> .....             | 19 |
| 3.1 大温哥华地区轨道交通概述 .....                      | 19 |
| 3.2 空中列车线路 .....                            | 19 |
| 3.3 空中列车运行控制 .....                          | 22 |
| 3.4 空中列车直线电机车辆 .....                        | 23 |
| 3.5 空中列车车辆段 .....                           | 25 |
| <b>第4章 马来西亚吉隆坡格兰那再也线</b> .....              | 26 |
| 4.1 吉隆坡城市轨道交通概况 .....                       | 26 |
| 4.2 格兰那再也线概述 .....                          | 26 |
| 4.3 格兰那再也线车辆 .....                          | 28 |
| <b>第5章 美国底特律直线电机载运系统 People Mover</b> ..... | 30 |
| 5.1 底特律城市轨道交通概况 .....                       | 30 |
| 5.2 People Mover 概述 .....                   | 30 |
| 5.3 People Mover 车辆 .....                   | 31 |
| <b>第6章 美国纽约肯尼迪机场线</b> .....                 | 32 |
| 6.1 纽约城市轨道交通概况 .....                        | 32 |
| 6.2 肯尼迪机场线系统简介 .....                        | 33 |

---

---

|             |                           |           |
|-------------|---------------------------|-----------|
| 6.3         | 肯尼迪机场线车辆 .....            | 33        |
| <b>第7章</b>  | <b>日本大阪直线电机轮轨交通</b> ..... | <b>36</b> |
| 7.1         | 大阪市地铁概况 .....             | 36        |
| 7.2         | 大阪长堀鹤见绿地线概况 .....         | 37        |
| 7.3         | 大阪今里筋线概况 .....            | 41        |
| <b>第8章</b>  | <b>日本东京大江户线</b> .....     | <b>43</b> |
| 8.1         | 东京市地铁概况 .....             | 43        |
| 8.2         | 大江户线概况 .....              | 44        |
| 8.3         | 大江户线车辆 .....              | 46        |
| <b>第9章</b>  | <b>日本神户海岸线</b> .....      | <b>49</b> |
| 9.1         | 神户市地铁概况 .....             | 49        |
| 9.2         | 神户市海岸线概况 .....            | 49        |
| 9.3         | 神户海岸线车辆 .....             | 50        |
| 9.4         | 神户海岸线列车控制系统 .....         | 51        |
| <b>第10章</b> | <b>日本福冈七隈线</b> .....      | <b>52</b> |
| 10.1        | 福冈地铁概况 .....              | 52        |
| 10.2        | 七隈线概况 .....               | 53        |
| 10.3        | 七隈线车辆 .....               | 54        |
| 10.4        | 七隈线列车控制系统 .....           | 55        |
| <b>第11章</b> | <b>日本横滨市营地铁4号线</b> .....  | <b>56</b> |
| 11.1        | 横滨市地铁概况 .....             | 56        |
| 11.2        | 横滨市4号线概况 .....            | 57        |
| 11.3        | 横滨直线电机车辆 .....            | 58        |
| <b>第12章</b> | <b>莫斯科直线电机独轨列车</b> .....  | <b>60</b> |
| 12.1        | 莫斯科轨道交通概况 .....           | 60        |
| 12.2        | 莫斯科独轨交通系统概况 .....         | 61        |
| 12.3        | 莫斯科独轨交通线路及车站 .....        | 63        |
| 12.4        | 莫斯科独轨交通车辆 .....           | 64        |
| 12.5        | 莫斯科独轨交通供电与列车控制 .....      | 65        |

---

---

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| <b>第 13 章 美国分段长定子直线电机轮轨交通</b> ..... | 66 |
| 13.1 美国国会大厦直线电机小型地铁 .....           | 66 |
| 13.2 休斯敦机场直线电机轮轨交通 .....            | 67 |
| 13.3 迪斯尼乐园直线电机轮轨交通 .....            | 68 |
| <b>第 14 章 国外其他规划线路</b> .....        | 70 |
| 14.1 韩国龙仁市直线电机轨道交通系统 .....          | 70 |
| 14.2 温哥华加拿大线 .....                  | 72 |
| 14.3 日本仙台市直线电机系统 .....              | 73 |
| <b>第 15 章 国外直线电机轮轨交通试验线</b> .....   | 74 |
| 15.1 英国直线电机轮轨车辆试验线 .....            | 74 |
| 15.2 加拿大金士顿直线电机轮轨交通试验线 .....        | 75 |
| 15.3 日本南港直线电机轮轨车辆试验线 .....          | 76 |
| 15.4 德国双馈直线电机轮轨交通试验线 .....          | 79 |
| 15.5 美国直线电机 PRT .....               | 83 |
| 15.6 韩国直线电机 PRT .....               | 85 |
| 15.7 各国直线电机模拟试验装置 .....             | 85 |
| <b>参考文献</b> .....                   | 90 |

# 第1章 绪论

## 1.1 直线电机及其在轨道交通中应用的历史

直线电机的历史,最早可追溯到1840年惠斯登(Charles Wheatstone)提出和制作的直线电机,至今已有160多年。图1-1是1854年惠斯登制作的直线电机。

1891年,法国的M. Lebranc首次为直线电机定名,美国的Bradly提出利用行进磁场的直线电机。1895年,美国的J. Weaver等人申请了直线磁阻电机织机梭子的专利。1902年,德国的A. Zehden提出了把直线电机定子安装在车辆上进行驱动的方案(图1-2)并于1905年获得专利。同一年,英国的H. Wilson建议将直线电机定子分段安装在地面驱动轨道车辆,并申请了专利。1908年,美国的Johnson也提出用直线电机驱动单轨列车的设想。但是,在当时的条件下,直线电机的调速性能以及经济性、可靠性等与旋转电机相比还没有竞争力,因此很长时间内未得到广泛应用。

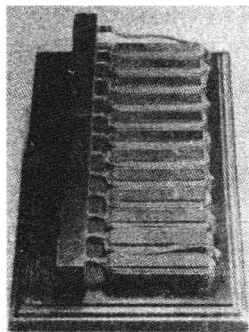


图1-1 1854年惠斯登制作的直线电机

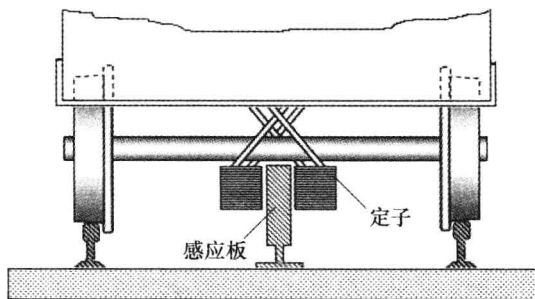


图1-2 直线感应电机轮轨车辆设想

20世纪50年代,英国的莱思韦特(Eric Laithwaite, 1921~1997)教授在直线电机基础理论研究方面取得了许多突破性进展,对直线电机的复兴起到了重要推动作用。莱思韦特曾长期致力于直线电机轨道车辆的研究。1960年,莱思韦特在当时任教的曼彻斯特大学设计制造了载人直线电机轨道车辆模型,并在24 m长的轨道上做了试验。该模型车重750 kg,采用双边定子三相直线感应电机。1962年,他又在曼彻斯特戈顿机车厂建造了914 m长的试验线,对这台轨道车辆模型(垂直感应板)进行了试验(图1-3)。接着莱思韦特建立了“轨

道气垫有限公司”(Tracked Hovercraft Ltd.)，在英国政府的支持下进行直线电机气垫悬浮轨道车辆研究，但后来由于铁路经营不景气，政府撤回投资而使研究项目半途而废。

日本开展交通领域直线电机的应用研究也很早，20世纪60年代就开始了直线电机驱动磁浮列车的科学研究。1974年，日本曾在货车调车场采用过直线电机牵引的“L4移动车”，即把数节装有直线电机的扁平小车铰接在一起牵引货车车厢，轨道上安装铝感应板，见图1-4。1975年，英国设计了一条直线电机牵引轮轨列车试验线：铁轨中间安装238m长的铝制感应板，在英国101DMU型列车转向架上安装了直线牵引电机。虽然当时并没有进行直线电机牵引试验，而仅仅是检验直线电机牵引系统的可行性，包括感应板安装的难易程度，但这是直线感应电机在实际轮轨车辆上的最早试验，见图1-5。

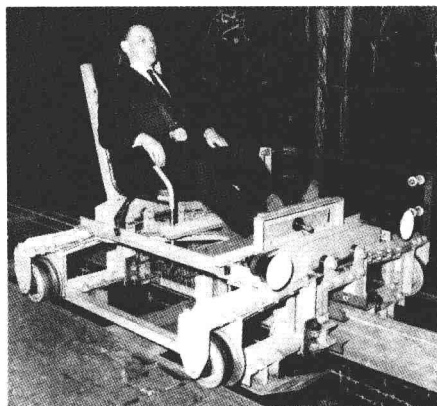


图1-3 莱思韦特在进行直线感应电机轮轨车辆试验

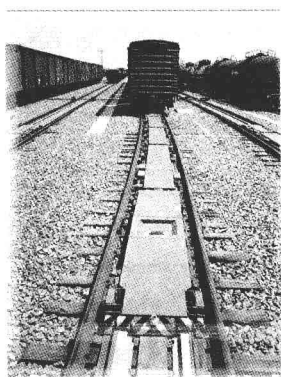


图1-4 日本早期直线电机调车线(1974)

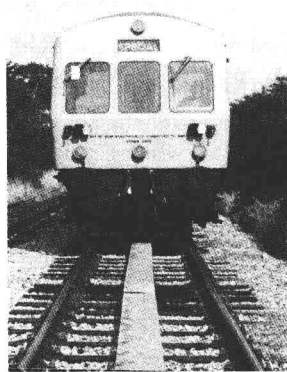


图1-5 英国直线电机牵引轮轨列车试验(1975)

然而，直线电机成功地用于轨道交通却是在磁浮列车上首先实现的。由于磁浮列车不能再依靠车轮驱动，所以很自然地采用了直接通过电磁力驱动列车的直线电机。20世纪60年代以来，得益于电力电子技术的进步，采用交流调速技术的直线电机驱动高速磁浮列车在德国、日本、英国、美国、瑞士、韩国、中国等国相继建立起了试验和试运行线路。进入21世纪以后，上海浦东高速磁浮列车和日本名古屋低速磁浮列车Linimo的商业运行，标志着磁浮铁路已进入了实际应用的阶段。

如果说磁浮列车采用直线电机驱动是旋转电机无法发挥作用时的唯一选择，那么现代轮轨交通采用直线电机牵引则可以看做是在磁浮列车获得成功的推动下诞生的。人



们意识到,既然直线电机驱动的磁浮列车因为不再通过黏着力牵引而具有更大的爬坡能力,那么直线电机用于轮轨列车当然具有同样的优点。因此20世纪80年代以后,加拿大、日本等国在研究磁浮列车的同时成功地开发出直线电机驱动的城市轮轨车辆交通系统并付诸实用。特别是加拿大,放弃了早期的磁浮列车研究计划,转而研制直线电机轮轨车辆,获得极大成功。这种新型交通系统伴生的优点还有:车辆断面小、噪声低,可以采用径向转向架等。图1-6是日本东京大江户线直线电机地铁与普通地铁隧道断面的比较。

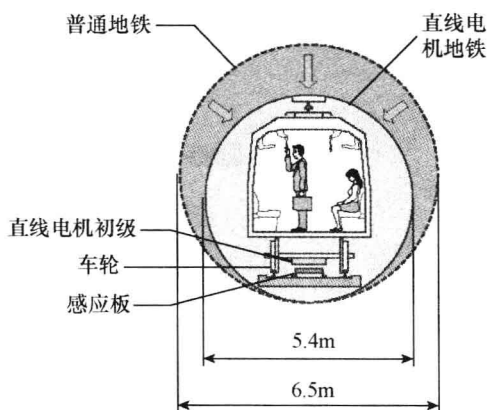


图1-6 直线电机地铁与普通地铁隧道断面的比较

## 1.2 直线电机的分类及其在轨道交通中的应用

直线电机轮轨车辆的核心是直线电机。本节简要介绍一下轨道交通(包括磁浮列车)中常用的几种直线电机。

尽管每一种旋转电机都可以对应至少一种直线电机,但由于技术和经济指标的限制,在轨道交通中应用的直线牵引电机,最常用的是直线同步电机和直线感应电机。近年来,由于电力电子技术和材料技术的进步,其他特种直线电机也相继问世,如永磁直线电机、双馈直线异步电机、直线开关磁阻电机等。各种直线电机都可分为短定子和长定子直线电机,定子部分在车上的称为短定子,在轨道上的称为长定子。

### 1.2.1 直线感应电机

直线感应电机 LIM(Linear Induction Motor)由于结构简单、单边激磁,因此在中低速轨道交通系统中应用最早也最广。最常见的直线感应电机是单侧定子结构的,为了改善磁路,提高效率,也可以采用双侧定子直线感应电机,两种电机结构如图1-7所示。双侧定子直线感应电机的缺点是,感应板一般只能垂直安放,占用空间较大。

(1)短定子直线感应电机的特点是:①定子在上,单边激磁,因此需要接触网/轨或直线变压器供电;②转子在地面,采用感应板(实心、无绕组),结构简单、经济;③采用接触网/轨供电时运行速度受到限制。图1-8是采用单侧短定子的日本直线感应电机转向架断面图。

(2)长定子直线感应电机的特点是:①定子在地面励磁,因此不需要接触网/轨或直线变压器供电,但长定子有三相绕组,系统成本较高;②转子在上,采用感应板(实心、无绕组),结构简单,车体轻;③由于定子可隐蔽供电,不仅限界小,而且非常安全。