



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 概论

Introduction to  
Linear Motor Rail Transit

魏庆朝 蔡昌俊 龙许友◎著

 中国科学技术出版社



## 图书在版编目(CIP)数据

直线电机轮轨交通概论/魏庆朝,蔡昌俊,龙许友著.  
—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 978-7-5046-5522-6

I. 直… II. ①魏…②蔡…③龙… III. ①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167542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:15.5 字数:350千字  
2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷  
定价:26.00元  
ISBN 978-7-5046-5522-6/U·71

---

(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,是国内第一部全面介绍直线电机轮轨交通的著作。主要内容包括直线电机轮轨交通系统车辆、线路、土建工程、牵引供电、运行控制、养护维修、环境保护等,并对各国已建成的线路进行简要介绍。本书可供城市轨道交通、铁路行业有关科研、设计、工程技术人员和领导参考,并可作为高等学校道路与铁道工程、桥梁与隧道工程、车辆工程、载运工具运用工程、交通运输规划与管理等专业本科生、研究生教材或教学参考书。

# 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。

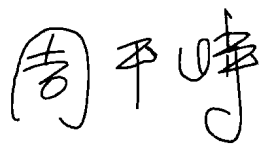
我多次参加该套丛书编委会会议,对丛书选题、各分册编写大纲,甚至对其中几本书的初稿进行了审查并提出了改进建议。我认为这是一套选题正确、内容先进、编排合理、图文并茂的图书,其出版必将对我国直线电机轨道交通建设起到积极的推动和普及作用。

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

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。

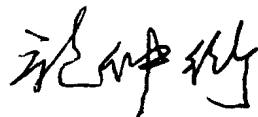
为了在国内普及、推动直线电机轨道交通的建设和发展,在北京交通大学和广州市地下铁道总公司的支持下,以广州市科技攻关重大项目“城市轨道交通直线电机运载系统”等为依托,我们组织国内知名专家编写完成了《直线电机轨道交通系列丛书》。该丛书已被新闻出版总署列为国家“十一五”重点出版规划。

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

Handwritten signature in black ink, appearing to read '李时中' (Li Shizhong).

2009年4月



# 前 言

随着国民经济的快速发展,城市化进程加快,城市人口急剧膨胀,越来越多的城市交通堵塞和乘车行车难的现象日益严重。大力发展城市轨道交通,使其成为城市公共交通系统的骨干已成为共识。

直线电机轮轨交通为城市轨道交通提供了一个新的选择。20世纪70年代末,加拿大与日本分别开始了该系统的研制及实用化进程。目前已在加拿大、日本、马来西亚、美国等国以及我国广州和北京建成了十几条线路。直线电机轮轨交通采用直线感应电机牵引,轮轨系统提供支承与导向,它具有爬坡能力强、曲线通过性能好、横断面小等优点,具有良好的地形适应能力,非常适合大中城市中等运量轨道交通发展的要求,尤其适合在地形起伏较大、建筑物密集和地下空间资源紧张的城市中应用。

本书依托广州地下铁道总公司资助的直线电机轨道交通执行系统系列科研成果并参考《直线电机轨道交通系列丛书》相应分册编撰而成,介绍了直线电机轮轨交通的各主要组成部分,特别侧重于有别于传统城市轨道交通的车辆、线路、供电、控制四大系统内容,还介绍了养护维修、环境保护、各国已建成的线路等内容。

本书由魏庆朝负责制订全书大纲、确定各章节内容,并负责编写第1章、第3章、第9章,龙许友负责编写第2章、第4章,蔡昌俊负责编写第6章,施竑负责编写第7章,王英杰负责编写第8章,郑琼林负责编写第5章,柳拥军编写了第2章部分内容。陈韶章对全

书进行了审查。全书由魏庆朝、龙许友统稿和修改。

在本书的编写过程中,始终得到施仲衡院士的指导和北京交通大学、广州地下铁道总公司的支持,得到了各分册主编夏禾、郑琼林、范瑜、梁青槐、高亮和柳拥军等教授的大力帮助,周干峙院士、钱清泉院士、宁滨、全永燊、陈韶章、金峰等专家对书稿提出了许多宝贵的意见,本书还参考了大量国内外有关城市轨道交通和直线电机轮轨交通的论文及相关资料。北京交通大学刘建坤教授和李小红老师,广州地下铁道总公司的李文球、李宏辉工程师等人承担了大量的组织工作,在此一并表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免缺点和错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2009年2月于北京交通大学

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 直线电机 .....	1
1.2 直线电机轨道交通 .....	7
1.3 直线电机轮轨交通主要技术经济特点 .....	24
<b>第2章 车辆</b> .....	33
2.1 概述 .....	33
2.2 牵引系统 .....	47
2.3 制动系统 .....	58
2.4 转向架 .....	64
2.5 车体结构 .....	78
<b>第3章 线路</b> .....	83
3.1 直线电机轮轨交通线路特点 .....	83
3.2 线路规划 .....	86
3.3 线路横断面 .....	91
3.4 线路平面 .....	98
3.5 线路纵断面 .....	104
<b>第4章 土建工程</b> .....	108
4.1 轨道 .....	108
4.2 桥梁 .....	130
4.3 高架车站 .....	144
4.4 地下结构 .....	149
<b>第5章 牵引与供电</b> .....	156
5.1 概述 .....	156
5.2 高压电源系统 .....	159
5.3 主变电站 .....	160
5.4 牵引变电所 .....	160
5.5 牵引供电网 .....	161

5.6	牵引逆变器 .....	166
5.7	直线感应电机 .....	166
5.8	降压变电所 .....	168
5.9	电力监控系统 .....	168
5.10	国外直线电机轮轨交通牵引与供电系统 .....	168
<b>第6章</b>	<b>列车运行控制系统</b> .....	<b>170</b>
6.1	通信系统 .....	170
6.2	信号系统 .....	171
6.3	闭塞方式 .....	173
6.4	运行控制 .....	175
6.5	国内外直线电机列车运行控制系统 .....	179
<b>第7章</b>	<b>养护维修</b> .....	<b>182</b>
7.1	车辆基地的组成与功能 .....	182
7.2	直线电机车辆基地 .....	183
7.3	轨道养护维修 .....	190
7.4	机械及电气设备养护维修 .....	194
7.5	变电及供电设备养护维修 .....	194
7.6	直线电机养护维修特点 .....	194
<b>第8章</b>	<b>技术经济比较与环境</b> .....	<b>196</b>
8.1	技术评价 .....	196
8.2	经济效益评价 .....	198
8.3	环境保护 .....	200
<b>第9章</b>	<b>工程应用</b> .....	<b>206</b>
9.1	加拿大技术应用 .....	206
9.2	日本技术应用 .....	214
9.3	在中国的应用 .....	224
9.4	莫斯科直线电机单轨交通 .....	228
9.5	直线电机轮轨交通发展展望 .....	229
	<b>本书名词</b> .....	<b>231</b>
	<b>本书缩写符号</b> .....	<b>233</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>234</b>

# 第1章 绪论

直线电机轨道交通包括直线电机轮轨交通、磁浮轨道交通、直线电机气浮交通等类型,其共同的核心技术是直线电机驱动。本章先介绍直线电机原理、分类、技术特点及在轨道交通中的应用,之后介绍直线电机轮轨交通的主要特点及发展趋势。

## 1.1 直线电机

直线电机是在传统旋转电机的基础上发展起来的,具有完全不同的驱动特色,一般情况下具有传统旋转电机不可比拟的优势,在轨道交通领域已得到了成功的应用。

### 1.1.1 直线电机驱动原理

通常,电动机是旋转型的。定子包围着圆筒形的转子,定子通电后形成旋转磁场,使转子产生旋转力矩。直线电机由旋转电机转变而来,可以认为是半径无限大的旋转电机,也可以认为是把旋转电机展开成平板状,它的基本构成和工作原理也与旋转电机类似。把定子和转子这两个圆筒展开成板状,并相对合在一起,通电后定子旋转磁场变成了直线移动磁场,转子随之沿定子的长度方向移动。于是,相应的传动方式也由旋转运动变为直线运动,如图1-1所示。

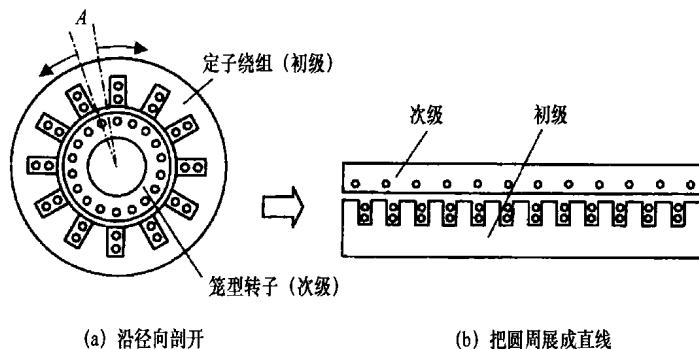


图1-1 由旋转电机演变为直线电机的过程

## 1.1.2 直线电机的分类

直线电机的分类方法很多,下面介绍几种与轨道交通有关的主要分类方法。

### 1.1.2.1 按直线电机的定子长度分类

根据直线电机定子(初级线圈)长度的不同,直线电机可以划分为长定子直线电机、短定子直线电机、分段长定子直线电机和双侧式直线电机。

#### (1)长定子直线电机

长定子直线电机的定子(或称初级线圈、初级、一次线圈、一次侧)设置在地面导轨上,其定子绕组可以在导轨上无限长铺设,故称为“长定子”,也称为地上一次式直线电机。

这种电机的转子(或称次级、二次线圈、二次侧)采用鼠笼或线圈,和旋转电机具有相同的构造。初级和次级线圈都需要供给能源,见图1-2(a)。其结构与直线感应电机相比较要复杂一些。

长定子直线电机驱动技术一般用于高速、超高速磁浮交通,通常采用导轨驱动技术,变频器设在导轨侧,列车的运行速度和运行工况由地面控制中心直接控制。

#### (2)短定子直线电机

短定子直线电机的定子设置在车辆上。由于其定子长度受列车长度的限制不能无限延长,故称为“短定子”,也称为车上一次式直线电机。定子线圈和普通的旋转电机相同;为了简化构造将转子制成铝板和铁心的层状结构的感应板。感应板不必供给动力电源,列车运动过程中会在感应板中产生感应磁场,该磁场与车上的定子磁场共同作用产生列车驱动力,故这种电机常被称为直线感应电机。

短定子直线感应电机驱动的轨道交通一般采用列车驱动技术,变频器设在列车上,列车的运行速度和运行工况由司机或控制中心直接控制,列车需要供应牵引动力电源,见图1-2(b)。短定子直线感应电机通常用于中低速磁浮交通、直线电机轮轨交通及直线电机单轨交通等范畴,主要用于城市轨道交通领域。除特别说明之外,本书所论述的直线电机均指短定子直线感应电机。

#### (3)分段长定子直线电机

分段长定子直线电机的定子设置在导轨上,其定子绕组在导轨上分段铺设,故称为“分段长定子”。该种磁浮交通一般采用导轨驱动技术,变频器设在导轨侧,列车的运行速度和运行工况由地面控制中心直接控制,见图1-2(c)。列车不需要供应牵引动力电源可省去接触网或接触轨。主要用于小型轨道交通,目前还未用于干线、城际铁路。

#### (4)双侧式直线电机

前述的直线电机的初级线圈为单侧排放,所以称为单侧式直线电机。这种电机构造

因为是非对称的,且在和运行方向垂直的方向产生垂向吸引力,其大小因电机的工作状态而变化,这成为该种轨道交通的缺点。

如图1-2(d)所示,将两个初级线圈安装在次级导体两侧,则构成双侧式直线电机。要解决上述对称问题,必须正确保持两侧的气隙。电机的气隙即两个铁芯之间的距离越大,直线电机的功率因数就越低。由于该种电机次级铜板加热及产生的热膨胀难以吸收等原因,近期直线电机轨道交通所使用的直线电机基本上不采用双侧式,大都采用单侧式。

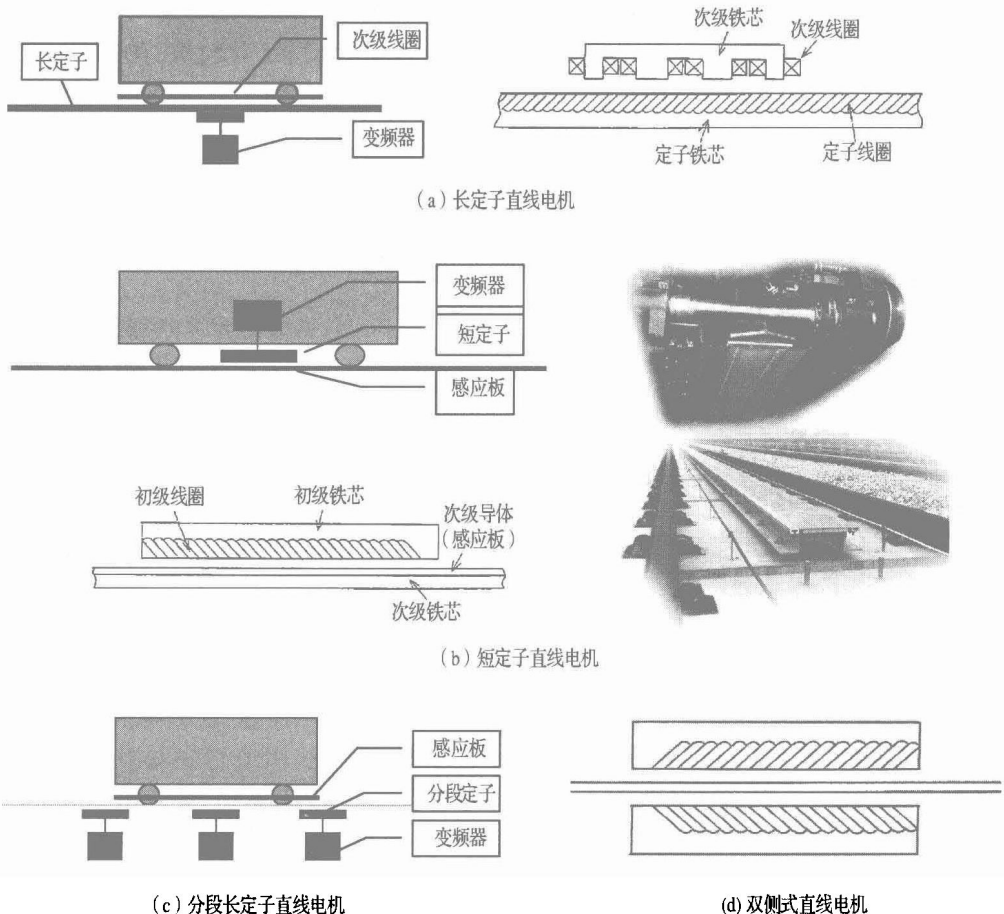


图1-2 直线电机分类示意图

### 1.1.2.2 按直线电机的磁场是否同步分类

直线电机和旋转电机的种类大体相同。导轨磁场与车辆可以同步运行,也可以异步运行。据此可以划分为直线同步电机和直线感应电机两种类型。

### (1) 直线同步电机

直线同步电机(LSM, Linear Synchronous Motor)一般采用长定子技术,转子磁场与定子磁场同步运行,控制定子(初级线圈,导轨侧)磁场的移动速度就可以准确控制列车的运行速度。高速、超高速磁浮交通一般使用该种长定子直线同步电机。该种电机技术复杂、造价较高,一般用于长大干线交通或城际交通之中。德国的常导超高速磁浮交通 TR (Transrapid) 和日本的超导超高速磁浮交通 ML (Maglev) 均使用这种直线同步电机。

### (2) 直线感应电机

直线感应电机 LIM (Linear Induction Motor) 次级或称感应板(导轨侧)的磁场,相对移动速度低于初级线圈(列车上)的移动速度。

短定子直线感应电机结构比较简单,制造成本较低。缺点是效率和功率因数相对较低,运行中需要地面供电装置对列车接触供电,不能实现车辆、线路之间完全无接触运行,所以更适合中低速磁浮交通或直线电机轮轨交通使用,一般用于城市轨道交通。除特别说明之外,本书所谈的直线电机均指直线感应电机。

## 1.1.2.3 按磁铁种类分类

根据电机磁铁种类不同,直线电机可以划分为电磁电机与永磁电机。电磁电机根据线圈材质又分为常导磁铁与超导磁铁。

### (1) 超导磁铁

超导磁铁的线圈绕组使用超导材料。超导材料在周围环境温度低于其临界温度后就处于超导状态,即超导绕组内的电阻几乎为零。超导磁铁根据工作温度的不同还分为高温超导磁铁和低温超导磁铁两种类型。超导磁铁能产生强大的磁场,具有极高的工作效率,因此可以使列车获得更大的驱动力、悬浮高度和更快的运行速度。超导磁铁的缺点主要为结构复杂,体积庞大,并且为了使超导绕组始终处于超导状态,在列车上还要配置功能强大的制冷装置。目前,超导磁铁只用于同步直线电机。日本的超高速磁浮交通 ML 属于超导磁铁的应用范畴。

### (2) 常导磁铁

常导磁铁使用普通材料制成线圈绕组,采用普通导体通电励磁,产生电磁力。该种直线电机及线圈绕组具有结构简单、养护维修方便等优点。其主要缺点是线圈绕组中电阻较大,线圈绕组容易发热,功耗较大,列车的运行速度也会受到一定的限制。德国的超高速磁浮交通 TR、日本的中低速磁浮交通 HSST (High Speed surface Transport) 及直线电机轮轨交通都使用该种电磁铁。

### (3) 永磁磁铁

永磁直线电机(permanent magnet linear motors)实际上也是同步直线电机的一种,只是其转子不再用电激磁,而是采用永久磁铁,见图 1-3。永磁直线电机的最大优点是单



边激磁,所以结构简单、效率高。但是,由于永磁磁极不能像电磁铁那样调节磁通,所以永磁直线电机弱磁控制性能较差。另外,开启式永磁磁极吸附铁磁杂物后很难清理,所以更适合于轨道较短或封闭环境的场合,如导弹或飞机发射架,在普通轻轨车辆上的应用比较少。与同步电机相似,永磁转子可以间作悬浮磁铁,所以永磁直线电机可以应用于小型磁浮列车或有限位轮的“半磁悬浮”列车。

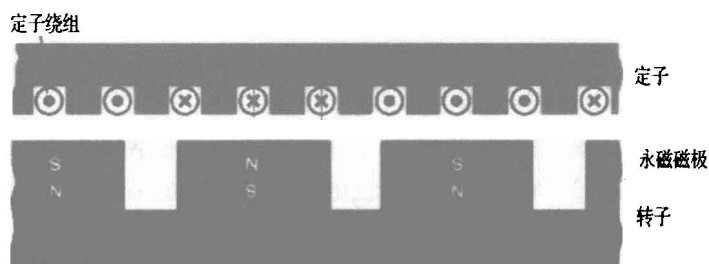


图 1-3 直线永磁电机

#### 1.1.2.4 按驱动方式分类

列车的运行工况(起动、牵引、惰行、制动)及运行速度完全由定子绕组中的移动磁场控制。按照直线电机的初级线圈(定子线圈)的安设位置不同,直线电机轨道交通可以划分为导轨驱动和列车驱动两种类型。

##### (1) 导轨驱动

导轨驱动也称为路轨驱动、地上一次式驱动。直线电机的初级线圈(定子线圈)设置在导轨上,车上安装次级或励磁部分。导轨驱动方式一般采用长定子直线同步电机 LSM 驱动技术。其列车的运行工况及运行速度完全由地面控制中心控制,列车上的司机不能直接控制,见图 1-4(a)。

驱动装置的主要部分安装在地面导轨上;把励磁磁铁安装在车上,对于磁浮交通可以和悬浮用的磁铁兼用,所需要的电力不是很大,所以用车载的蓄电池即可供电,一般不需要集电装置,完全可以实现无接触运行。这项优点也很适合大容量的磁浮高速交通。

导轨驱动方式也存在缺点。需要在全线安装地面线圈及相关设备,制作和施工技术要求高,初期投资大,系统自由度小,若运量增大后难以使系统迅速扩能。

由于车辆的运行完全由地面控制,如果地面驱动线圈不工作,车辆就无驱动力。因此,列车运行控制的原理和方法与以往的铁路完全不同。这一方面有助于实现高速化和无人驾驶,另一方面也面临很多挑战。

这种驱动方式一般用于干线或城际交通。德国的 TR 和日本的 ML 超高速磁浮交通均使用这种导轨驱动技术。