



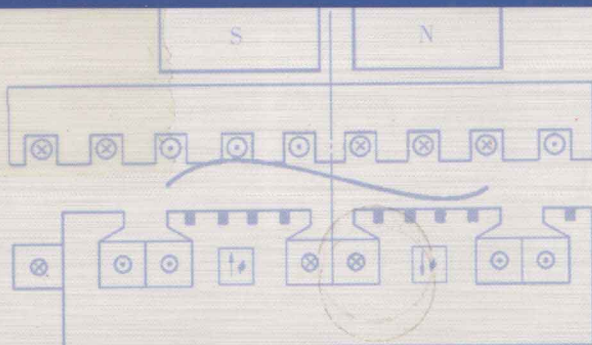
国家“十一五”出版规划重点图书
直线电机轨道交通系列丛书



磁浮铁路 系统与技术 (第二版)

System and Technology for
Maglev Transit

魏庆朝 孔永健 时 瑾◎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

磁浮铁路系统与技术

(第二版)

魏庆朝 孔永健 时瑾 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

磁浮铁路系统与技术(第二版)/魏庆朝,孔永健,时瑾编著. —北京:中国科学技术出版社,2009.6

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5517 - 2

I. 磁... II. ①魏... ②孔... ③时... III. 磁浮铁路 - 交通运输 - 研究 IV. U237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167483 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 - 62173865 传真:010 - 62179148

<http://www.kjpbbooks.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:25.75 字数:520 千字

2010 年 3 月第 2 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5517 - 2/U · 66

(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

本书是国内第一部全面介绍多种制式磁浮铁路系统与技术的著作,也是第一部全面、深入介绍日本磁浮铁路试验、研究及相关技术方面的著作。主要介绍了日本超导超高速磁浮铁路技术、磁浮中央新干线、德国常导超高速磁浮铁路技术、上海磁浮示范线、日本常导中低速磁浮铁路技术、东部丘陵线及国内外多种磁浮铁路技术研究开发等方面的内容。

本书内容涉及线路设计、轨道结构、桥梁、隧道、车站、车辆、电机、控制、供电、经济、社会等众多领域,内容丰富,可供土木工程、交通运输、机车车辆等有关部门的领导、科技人员参考使用,也可以作为大专院校本科生、研究生的教材或参考书。

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 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 凌红霞 赵丽英

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。

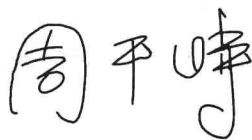
我多次参加该套丛书编委会会议,对丛书选题、各分册编写大纲,甚至对其中几本书的初稿进行了审查并提出了改进建议。我认为这是一套选题正确、内容先进、编排合理、图文并茂的图书,其出版必将对我国直线电机轨道交通建设起到积极的推动和普及作用。

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!

中国科学院院士、中国工程院院士

A handwritten signature in black ink, consisting of three stylized Chinese characters: '周' (Zhou), '平' (Ping), and '啸' (Xiao).

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已在国内外建成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。

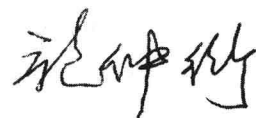
为了在国内普及、推动直线电机轨道交通的建设和发展,在北京交通大学和广州市地下铁道总公司的支持下,以广州市科技攻关重大项目“城市轨道交通直线电机运载系统”等为依托,我们组织国内知名专家编写完成了《直线电机轨道交通系列丛书》。该丛书已被新闻出版总署列为国家“十一五”重点出版规划。

丛书第一批拟出版7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

A handwritten signature in black ink, appearing to read '陈圣' (Chen Sheng), written in a cursive style.

2009年4月

前 言

近些年来,磁浮铁路在世界范围内取得了很大发展,十几个国家开展了磁浮铁路的研究工作。目前比较成熟、具有代表性的磁浮铁路技术有三大类型:日本的超导超高速磁浮铁路技术(ML)、德国的常导超高速磁浮铁路技术(TR)和日本中低速磁浮系统(HSST)。三种磁浮铁路共同之处在于依靠磁浮技术将列车悬浮起来并且利用直线电机(或称线性电机)驱动列车行驶,但其技术又各有特点。

日本中低速磁浮系统 HSST(High Speed Surface Transport)采用常导、短定子直线感应电机及列车驱动的磁浮铁路技术,目前最高设计时速为 130km,适合于城市轨道交通、机场旅客运输等中短距离的旅客运输,其技术已经达到实用化程度。

德国的磁浮铁路技术 TR(TransRapid,简称“运捷”),采用常导、长定子直线同步电机及导轨驱动的磁浮铁路技术,最高试验速度为 501km/h(2003 年),适用于中长距离的超高速旅客运输,其技术已经基本成熟,目前已经建成的上海浦东机场磁浮铁路采用该项技术。

日本的超导磁浮铁路技术 ML(Magnetic Levitation,或称 Maglev),采用低温超导、长定子直线同步电机、导轨驱动的磁浮铁路技术,最高试验速度已达 581km/h(2003 年),适用于中长距离的超高速旅客运输,其技术已基本成熟。

我国上海磁浮线自 2003 年年底通车以来,取得了良好的运营业绩。采用中低速磁浮技术的日本东部丘陵线于 2005 年 3 月建成通车,在日本城市轨道交通中发挥了重要作用。在采用超导超高速

速磁浮 ML 技术的日本山梨试验线上已完成了第二阶段试验计划,证明“实用化的基础技术已经确立”,并于 2003 年 12 月创造了 581km/h 的陆路交通工具最高试验速度。

本书在第一版的基础上修订而成,是作者在广泛分析国内外有关研究资料的基础上,结合承担的国家自然科学基金课题(50578010,50978024)和国家高技术发展计划(863)课题编写而成。书中介绍了多种制式磁浮铁路技术,包括日本超导超高速磁浮铁路技术、磁浮中央新干线,德国常导超高速磁浮铁路技术,日本常导中低速磁浮铁路技术、东部丘陵线,上海磁浮示范线路等国内外多种磁浮铁路技术研究开发、应用的内容。

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 7 章、第 8 章和第 9 章,孔永健负责编写第 3 章和第 6 章,时瑾负责编写第 2 章、第 4 章和第 5 章。赵吉涛、侯明辉、姚国伟等同学绘制了本书部分图表,刘景军同学翻译了部分日文资料。

限于作者水平,书中难免不足和错误之处,恳请读者批评指正。

魏庆朝

2009 年 3 月于北京交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 悬浮铁路发展概述	1
1.2 磁浮铁路发展概述	5
1.3 磁浮铁路分类	13
1.4 磁浮铁路的优势	29
1.5 我国磁浮铁路需求与发展	37
第 2 章 日本超导超高速磁浮铁路技术	43
2.1 概述	43
2.2 基本原理	66
2.3 线桥隧站	77
2.4 车辆	95
2.5 供电	109
2.6 列车运行控制	116
2.7 实用化试验	120
第 3 章 日本磁浮中央新干线	145
3.1 线路和主要停车站方案	145
3.2 客运量	150
3.3 项目投资及企业效益	153
3.4 社会效益	157
3.5 磁浮中央新干线建设规划	166
3.6 日本 JR 型磁浮铁路发展规划	168
第 4 章 德国常导超高速磁浮铁路技术	173
4.1 德国磁浮铁路技术发展	173
4.2 工作原理	183
4.3 车辆	186
4.4 线路	198

4.5	轨道	207
4.6	桥隧及车站	218
4.7	牵引供电与列车运行控制	225
4.8	主要性能及特点	234
4.9	埃姆斯兰试验线	243
4.10	采用 TR 技术的应用线规划	246
第 5 章	上海磁浮线	262
5.1	概述	262
5.2	线路	265
5.3	轨道	267
5.4	桥梁与下部结构	272
5.5	车站与维修基地	273
5.6	牵引供电与列车运行控制系统	275
第 6 章	日本中低速磁浮铁路技术	277
6.1	概述	277
6.2	工作原理	289
6.3	车辆	291
6.4	轨道	305
6.5	供电与列车运行控制	310
6.6	安全与救援措施	311
第 7 章	日本东部丘陵线	313
7.1	概述	313
7.2	线路工程	318
7.3	车站及车辆段	325
7.4	车辆	333
7.5	列车运行与控制	336
7.6	其他营业线建设规划	338
第 8 章	系统与技术比较	341
8.1	德国、日本超高速磁浮铁路比较	341

8.2 中低速磁浮与超高速磁浮铁路比较	349
8.3 TR、MLX、HSST 三种磁浮铁路比较	353
8.4 磁浮铁路与轮轨铁路比较	357
第 9 章 磁浮铁路研究及发展	365
9.1 国外其他高速磁浮铁路	365
9.2 国外其他中低速磁浮铁路	377
9.3 中国磁浮铁路	384
参考文献	396

第1章 绪 论

从1825年世界第一条铁路出现算起,轨道交通已有180多年的历史。特别是20世纪中叶以来,随着科技的进步,轨道交通在速度、密度、重量等性能方面有了很大提高,使轨道交通呈现出高速化、重载化、便捷化的特点。

在许多国家里,陆路交通无接触行车技术的特殊优点早就为人们所知。一些发达国家如英国、法国、意大利和美国曾经开展过气垫列车技术研究,德国、日本等国一开始就重视磁浮铁路(或称磁浮轨道交通)技术研究。

本章主要介绍磁浮铁路的发展、分类及应用。

1.1 悬浮铁路发展概述

将车辆悬浮于轨道之上运行一直是人类追求的梦想,只有如此,才能尽可能减小列车运行阻力、轮轨磨耗,提高列车运行速度。自有铁路以来,人们曾经试验过水浮、气浮、磁浮等多种悬浮方式。

1.1.1 为什么要让列车悬浮

很早以前,人们就注意到了轮轨方式铁路在高速化方面的局限性。

首先是轮轨之间的黏着方式制约着列车的高速运行。列车在轨道上滚动前进,靠的是轮轨之间的黏着牵引力,但是轮轨之间的黏着力随速度的增加而减小,与此同时列车的空气阻力却随速度的平方而增加。如图1-1所示,当列车速度到达一定值时,黏着牵引力和运行阻力相等,列车便不可能再加速了。这个速度就是列车运行的最高速度。一般来说,轮轨高速铁路较难实现超过400km/h的运营速度。

其次,受电弓的受流问题是列车高速运行的又一个障碍。1955年,法国创造了331km/h的列车试验速度纪录,但试验后电力机车的受电弓完

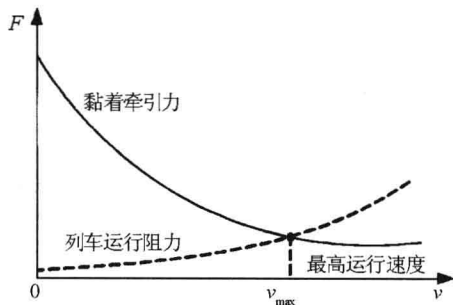


图1-1 受黏着牵引力限制的列车最高运行速度

全被受电弓离线时的电弧烧坏了。正是这个原因,法国人最初设计的高速列车放弃电力牵引,而选取了燃气轮机牵引——和飞机一样的动力方式。在 1973 年中东战争引起全球第一次石油危机之后,法国才将 TGV 列车研发重点放在电力牵引方面。经研究发现在受电弓接触导线的波动传播速度小于或接近于列车运行速度的情况下,受电弓的离线率将会迅速增加。提高接触导线波动传播速度的方法是增大接触导线的张力和使用质量更轻的接触导线。但接触导线的张力不能无限增大,过大就会有断线的危险。保证受电弓的受流质量还和受电电流的大小、列车前后受电弓的间距等因素有关。从目前的技术和使用材料来看,受流极限速度大约为 $400 \sim 500\text{km/h}$ 。

制约轮轨式铁路超高速化的因素还远不止这些,如保证列车超高速稳定运行的转向架、平顺的线路、强大的列车牵引功率、良好的制动系统、列车运行时的噪声、振动等环境指标等都直接制约着列车的最高运行速度。

那么,轮轨方式铁路的极限速度到底是多少呢?一开始法国人创造了轮轨式铁路的最高试验速度,他们在 20 世纪中叶认为实用化的商业极限运行速度大约是 200km/h ; 20 世纪 60 年代建设世界上第一条高速铁路的日本人认为轮轨式铁路的最高运营速度应该是 300km/h ; 我国京津城际铁路最高运行速度创下了 350km/h 的世界纪录,但这个纪录又将被目前欧洲、日本和我国正在积极开发 $360 \sim 380\text{km/h}$ 及以上高速列车这一事实改写。目前看来, 380km/h 还不一定是速度极限。随着人类对轮轨黏着问题认识的更加深入及相关技术的发展,轮轨式铁路的商业运行极限速度可能还会提高。虽然 2007 年 4 月 3 日法国高速铁路的最高试验速度达到了 574.8km/h ,刷新了轮轨高速列车的最高试验速度记录,但最高运营速度不会被无止境地提高。通常认为 400km/h 的速度应该是目前轮轨式铁路的商业运行速度极限了。

轮轨式铁路的商业运行速度有极限,但人类对列车运行速度的追求似乎永远没有止境。继 350km/h 的速度之后,人们还希望实现 400 、 450 、 500 乃至 550km/h 及以上的超高速商业运行。从上面的分析看来,要想实现 400km/h 以上的超高速运行,只好突破传统的轮轨方式,另辟蹊径,寻找新的轨道交通方式了。

既然轮轨之间的黏着极大地限制了高速化,可以考虑去掉车轮和钢轨,用其他力量让车体悬浮在空中;由于轮轨式铁路的车轮和钢轨还有对列车导向的功能,所以,光让车体悬浮在空中还不行,还要防止它的左右运动,对车体施加电磁导向力或其他力让它沿着线路中心线运行;同样原因,不用受电弓供电甚至不用传统的旋转电机驱动,需在牵引方式上找出新的替代办法。由此人们研发了多种悬浮铁路。

1.1.2 载运工具悬浮的探索

载运工具悬浮运行一直以来是人类的梦想。在 1870 年的巴黎博览会上,展示了一种靠水流浮起列车沿轨道运行的运输方式,也可称为水浮列车,见图 1-2。虽然水浮

列车在技术实施上有较多困难,但这一构想为轨道交通发展提供了新的思路。伴随着技术的进步,人们一直在追求提高列车速度,在一个世纪左右的时间内,已将列车试验速度提高到高速铁路范围之内,超过了200km/h,见表1-1。

第二次世界大战前后航空技术飞速发展。1952年英国开发的商用喷气式飞机在民航航线上开始通航,普通人逐渐能体验空中旅行,缩短了旅行所需要的时间,亚音速喷气式飞机成了新时代输送组织的象征。

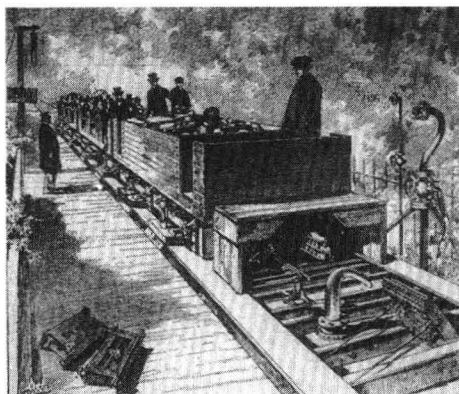


图1-2 水浮列车

船舶、铁路和汽车领域都在进行高速化的试验。Cockerell在1959年发明气垫船,显示出船浮在水上能高速行驶。把同样的气垫原理应用到铁路上使列车悬浮走行,实现更高速行驶,气垫悬浮铁路技术引起了广泛关注。

表1-1 早期提高列车试验速度的记录

年份	国家	最高速度 (km/h)	牵引种类
1854	英国	131.6	蒸汽机车
1893	美国	180	蒸汽机车
1903	德国	210.2	电力机车
1933	德国	160	柴油机车
1938	英国	202.7	蒸汽机车

气垫悬浮也称气悬浮,采用气垫船的原理,也可以使车辆悬浮起来。用压缩机把空气吹向地面,通过提高出口处空气流速得到浮力,见图1-3(a)。悬浮力为流速的平方和气流断面面积之积。但是,采用这种悬浮方式车辆的运动不能像磁浮车辆那样容易控制,即使和直线电机驱动组合在一起,电机的气隙变得相当大,使得能源利用效率降低。

日本OTIS公司开发了一种直径为60cm的空气垫圈。把许多这样的垫圈装到车辆上,悬浮1mm的高度,用1kW电力可得到近3t的悬浮力。车辆像电梯一样用缆绳纵向驱动,这样就可以减轻结构荷载、降低工程造价、减少维修工作量,同时也减少了运行时电量的消耗。因为气垫自身具有支撑功能,所以没有必要再装备支撑车轮。导轨断面为槽形,导轨侧壁可以作为导向轨。导向轮安装在驱动缆索附近,并且安装在单侧,即使不使用道岔,也能实现上下行车辆在单一导轨内走行,见图1-3(b)。在