



中国磁浮交通
基础理论与先进技术丛书

永磁电磁悬浮 技术及应用研究

Research on Permanent-electromagnetic Levitation
Technology and Application

龙志强 李晓龙 程虎·等 著



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书以永磁电磁悬浮技术为研究对象,研究领域涉及永磁电磁混合悬浮系统以及永磁电动与电磁混合悬浮系统,应用范围包括中低速、高速和超高速运载系统等。全书在分析磁浮交通系统原理、类型和特点等基础上,总结了国内外磁浮交通领域的研究应用成果,针对常导电磁悬浮技术和永磁电动悬浮技术的发展需求,研究了永磁电磁混合悬浮以及永磁电动与电磁混合悬浮的关键技术,并具体介绍了相关技术的应用成果。

本书是国防科技大学磁浮团队承担“十五”863、“十一五”和“十二五”国家科技支撑计划以及国家自然科学基金等永磁电磁悬浮课题研究的总结。团队经过近20年的技术攻关,完成了永磁电磁悬浮原理研究、集成试验和整车(平台)验证的研制历程。全书以准确的数据、大量的仿真和现场实验为基础,深入浅出地全面介绍了永磁电磁悬浮关键技术,可为永磁电磁悬浮技术在运载工具、旋转机械、有关装备研发中的应用提供指导,对从事磁浮领域相关系统研发、设计、制造和运维的学者和技术人员等具有重要的参考价值 and 工程应用价值。

图书在版编目(CIP)数据

永磁电磁悬浮技术及应用研究 / 龙志强 等著. --
上海: 上海科学技术出版社, 2023. 1
(中国磁浮交通基础理论与先进技术丛书)
ISBN 978-7-5478-5743-4

I. ①永… II. ①龙… III. ①磁悬浮技术—研究
IV. ①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第128768号

永磁电磁悬浮技术及应用研究
龙志强 李晓龙 程 虎 等 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)
邮政编码 201101 www.sstp.cn

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.5

字数 300千字

2023年1月第1版 2023年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-5743-4/U·126

定价: 128.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向印刷厂联系调换

编委会

中国磁浮交通
基础理论与先进技术丛书

主任

陈小鸿

副主任

(以姓氏笔画为序)

丁叁叁 王 平 周晓明 盛雄伟

委员

(以姓氏笔画为序)

万建军 龙志强 刘万明 闫晓言

李耀华 佟来生 张昆仑 徐洪泽

梁 潇 翟 鸣

磁浮运载技术是一种利用电磁力将车体悬浮于轨道上方,利用直线电机进行牵引运行的新型轨道交通工具,具有运行时无摩擦损耗、噪声低、选线灵活、后期维护保养工作量较小等优势。目前许多发达国家开展了磁浮技术的研究,应用领域包括中低速磁浮、高速磁浮和超高速低真空管道磁浮运载系统以及各类磁浮旋转机械等。在以常文森教授为代表的老一辈专家带领下,国防科技大学磁浮团队从1980年开始进行磁浮运载技术的自主研究,在国家“八五”科技攻关、“十五”863计划、“十一五”“十二五”科技支撑计划、“十三五”重点研发计划的支持下,磁浮团队与国内各行业优势单位密切合作,攻克了中低速和高速磁浮列车悬浮导向控制等多项关键技术,推动了中国常导电磁悬浮技术的工程化应用,提出和发展了一种永磁电磁悬浮运载系统技术方案,并付诸实现。

十九大报告首次提出建设“交通强国”。2019年9月中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》,指出要强化前沿关键技术研发,合理统筹安排时速600公里级高速磁悬浮系统、低真空管(隧)道高速列车等技术储备研发。2021年7月20日,中国自主研发的时速600公里高速磁浮交通系统成套装备正式面世。本书在中低速和高速磁浮列车的研究与工程应用基础上,提出了新型永磁电磁混合型中低速和高速磁浮列车悬浮系统工程技术方案,该方案具有悬浮能耗低、承载能力强、电磁铁不易发热等优点;针对低真空管(隧)道超高速运载需求,在研究永磁电动悬浮技术基础上,提出并开展了永磁电动与电磁混合悬浮技术的创新研究,该创新方案具有结构简单、工程可实施性强的优点。

全书共7章,全面总结了作者团队在永磁电磁悬浮技术领域近20年的技术成果,具体内容如下:

第1章综述了国内外磁浮交通领域的磁浮技术研究应用成果,并针对常导电磁悬浮技术和永磁电动悬浮技术的不足,分别阐述了永磁电磁混合悬浮技术、永磁电动与电磁混合悬浮技术的现状与挑战。

第 2 章详细介绍了国防科技大学提出的基于永磁电磁混合型高速磁浮技术的悬浮电磁铁设计方法,针对永磁电磁混合悬浮高速磁浮列车的需求,详细分析了不同类型的永磁电磁混合悬浮电磁铁设计技术。

第 3 章主要介绍了永磁电磁混合型高速磁浮列车的悬浮控制策略,通过对永磁电磁混合悬浮系统模型的分析,开展了基于状态反馈的零功率控制器设计和基于参数自适应的控制器设计研究,通过永磁电磁混合悬浮双磁浮架和整车的实验验证了所设计的控制方案。

第 4 章以永磁电磁混合型中低速磁浮列车为研究对象,重点结合实际工程问题,围绕永磁电磁混合悬浮电磁铁的设计和永磁电磁混合悬浮系统的抗干扰控制问题,开展了相关关键技术的探讨研究,并结合永磁电磁混合型单转向架和整车开展了验证实验。

第 5 章针对永磁电磁混合悬浮系统的安全防护问题,分别介绍了中低速、高速混合悬浮系统的防护要求和主动安全控制策略。

第 6 章以基于 Halbach 结构永磁电动悬浮的超高速电动悬浮系统为背景,对 Halbach 永磁电动悬浮的机理进行了分析,并对 Halbach 结构永磁体阵列进行了稳定性分析和优化设计。

第 7 章针对永磁电动悬浮系统存在的阻尼不足,以及受到干扰时垂直方向上容易产生振荡的问题,详细介绍了国防科技大学提出的在永磁电动悬浮系统中加入电磁主动控制的永磁电动与电磁混合悬浮系统方案,并进行了实验验证。

本书由国防科技大学龙志强主编并统稿。具体编写分工如下:龙志强撰写第 1、6、7 章;程虎、龙志强、陈慧星撰写第 2 章、第 3 章和第 5 章的 5.4 节;李晓龙、龙鑫林撰写第 4 章和第 5 章其余小节。胡永攀、贺光、成玉卫参与了永磁电动悬浮技术研究和资料整理,温韬、夏文韬、黄翠翠和杨洋等博士做了细致的图文校对工作。

感谢合作单位北京控股磁悬浮技术发展有限公司、国家磁浮交通工程技术研究中心、中国中车集团有限公司等一直以来对本研究的支持。李云钢、余龙华等 10 多位老师曾直接参与与本书相关的研究工作,李杰、吴峻以及窦峰山等多位老师也一直参与或支持相关研究工作,在此一并表示衷心感谢。在项目研究和书稿撰写的过程中,参考和借鉴了大量的国内外高水平参考文献资料,在此也由衷地表示感谢。

由于作者的能力有限,本书中的不足及错误之处在所难免,欢迎各位同行专家、学者及广大读者批评指正。

龙志强

2022 年 10 月

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	3
1.2 国内外磁浮交通的主要应用成果	5
1.2.1 国外研究现状和主要成果	5
1.2.2 国内研究现状和主要成果	6
1.3 永磁电磁混合型悬浮技术研究现状与挑战	14
1.3.1 电磁铁设计	16
1.3.2 悬浮控制技术	16
1.3.3 吸死防护技术	17
1.4 永磁电动与电磁混合悬浮技术研究现状与挑战	18
1.4.1 永磁电动悬浮技术	18
1.4.2 永磁电动与电磁混合悬浮技术	19
1.5 本章小结	21
第 2 章 永磁电磁混合型高速磁浮列车悬浮电磁铁设计技术	23
2.1 概述	25
2.2 永磁电磁混合型磁铁的基本设计要求	26
2.2.1 节能要求	26
2.2.2 提升永磁体利用率的要求	28
2.2.3 提高 PEM 可控性能的要求	29
2.3 永磁电磁混合型磁铁的结构设计与对比分析	32
2.3.1 现有 EM 的基本结构	32
2.3.2 三种安装永磁体的方案分析	32

2.3.3	PEM 的有限元计算与分析	33
2.4	节能型永磁电磁混合型磁铁设计	36
2.4.1	节能型 PEM 的设计要求	36
2.4.2	节能型 PEM 的参数计算	37
2.4.3	节能型 PEM 的设计结果	39
2.4.4	节能型 PEM 的研制与实验	40
2.5	安全型永磁电磁混合型磁铁设计	41
2.5.1	安全型 PEM 的设计要求	42
2.5.2	安全型 PEM 的参数计算	42
2.5.3	安全型 PEM 的设计结果	45
2.6	综合型永磁电磁混合型磁铁设计	45
2.6.1	综合型 PEM 的设计要求	45
2.6.2	综合型 PEM 的参数计算	45
2.6.3	综合型 PEM 的设计结果	51
2.7	本章小结	51
第 3 章	永磁电磁混合型高速磁浮列车悬浮控制技术	53
3.1	概述	55
3.2	永磁电磁混合悬浮系统建模与分析	56
3.2.1	系统模型	56
3.2.2	开环特性分析	58
3.2.3	永磁参数和漏磁因素对系统开环特性的影响	59
3.3	基于状态反馈的零功率控制器设计	61
3.3.1	状态反馈控制器设计	61
3.3.2	状态反馈控制器仿真分析	63
3.4	基于参数自适应的零功率控制器设计	64
3.4.1	参数自适应控制器设计	65
3.4.2	参数自适应控制器稳定性分析	66
3.4.3	参数自适应控制器仿真分析	67
3.5	永磁电磁混合悬浮系统实验研究	68
3.5.1	永磁电磁混合悬浮双磁浮架实验研究	68
3.5.2	整车运行实验测试	73
3.6	本章小结	74
第 4 章	永磁电磁混合型中低速磁浮列车悬浮技术	75
4.1	概述	77
4.2	永磁电磁混合悬浮电磁铁设计	78

4.2.1	磁铁结构选择	78
4.2.2	磁铁结构参数设计	79
4.2.3	有限元仿真分析	80
4.3	永磁电磁混合悬浮系统抗扰控制	83
4.3.1	错台干扰	83
4.3.2	冲击干扰	86
4.3.3	负载变化对悬浮系统的影响	90
4.4	实验测试验证	93
4.4.1	电磁悬浮与永磁电磁混合悬浮实验测试对比	93
4.4.2	整车运行实验测试	97
4.5	本章小结	100
第 5 章	永磁电磁混合悬浮系统的安全防护技术	101
5.1	概述	103
5.2	中低速磁浮系统机械防护策略	103
5.2.1	吸死力学特性与危害性分析	103
5.2.2	防撞铜块厚度优化设计	105
5.3	中低速磁浮系统主动控制防护策略	108
5.3.1	防吸死控制算法	108
5.3.2	防吸死实验研究	111
5.4	高速磁浮系统主动控制防护策略	114
5.4.1	永磁电磁混合型悬浮吸死故障分析	114
5.4.2	基于线性矩阵不等式的防吸死控制算法	120
5.4.3	防吸死实验研究	127
5.5	本章小结	129
第 6 章	超高速永磁电动悬浮技术	131
6.1	概述	133
6.2	永磁电动悬浮的机理分析	134
6.2.1	Halbach 永磁体阵列与空间磁场分析	134
6.2.2	离散轨道形式电磁力计算	140
6.2.3	连续轨道形式电磁力计算	144
6.3	Halbach 结构永磁体阵列的优化设计	149
6.3.1	理想 Halbach 结构永磁体阵列优化分析	149
6.3.2	准 Halbach 结构永磁体阵列优化分析	152
6.4	永磁电动悬浮系统的稳定性分析	159
6.5	永磁电动悬浮实验测试	161

6.5.1	永磁电动悬浮实验平台设计.....	161
6.5.2	实验结果与分析.....	162
6.6	本章小结	164
第7章	超高速永磁电动与电磁混合悬浮技术.....	165
7.1	概述	167
7.2	永磁电动与电磁混合悬浮系统的结构方案	168
7.2.1	车体与轨道结构.....	168
7.2.2	悬浮与导向系统结构.....	169
7.3	永磁电动与电磁混合悬浮系统建模	172
7.3.1	永磁电动与电磁混合悬浮系统.....	172
7.3.2	永磁电动悬浮系统阻尼特性分析.....	173
7.3.3	永磁电动与电磁混合悬浮系统模型.....	178
7.4	永磁电动与电磁混合悬浮系统控制器设计	182
7.4.1	永磁电动与电磁混合悬浮系统能控能观性.....	182
7.4.2	永磁电动与电磁混合悬浮系统速度反馈控制器设计.....	183
7.4.3	永磁电动与电磁混合悬浮系统间隙反馈控制器设计.....	192
7.4.4	永磁电动与电磁混合悬浮系统控制方案.....	205
7.5	永磁电动与电磁混合悬浮实验测试	208
7.5.1	永磁电动与电磁混合悬浮实验平台设计.....	208
7.5.2	永磁电动与电磁混合悬浮控制实验结果分析.....	209
7.6	本章小结	211
	参考文献.....	212

第 1 章

绪 论

本章综述了国内外磁浮交通领域的磁浮技术研究应用成果,并针对常导电磁悬浮技术和永磁电动悬浮技术的不足,分别研究了永磁电磁混合悬浮技术、永磁电动与电磁混合悬浮技术的现状与挑战。

1.1 背景与意义

磁浮技术的研究已经持续近 100 年,目前世界上许多国家开展了磁浮技术研究,其研究和应用领域包括城市内中低速磁浮列车,城际间高速磁浮列车,卫星和空间站中的磁浮动量飞轮、反作用飞轮、储能飞轮、磁浮陀螺力矩器等,机械工业领域中各种磁轴承支承的高速旋转机械如各类泵、离心机械、磨床等;在某些高精度、高灵敏度的仪器仪表如磁浮陀螺、磁浮重力仪中,也应用了磁浮技术。另外,近年来,国内外学者和多家研究机构对低真空管(隧)道超高速磁浮技术也开展了探索研究。

按照磁浮力产生的原理不同,可将磁浮系统分为电磁悬浮(electromagnetic suspension, EMS)系统和电动悬浮(electrodynamic suspension, EDS)系统。在磁浮交通领域,按照牵引原理不同,又可将磁浮系统分为长定子同步直线电机牵引和短定子异步直线电机牵引。按照速度范围划分,磁浮交通系统又可以分为中低速磁浮(最高速度为 100~160 km/h)、中速磁浮(最高速度为 160~200 km/h)、高速磁浮(最高速度为 400~600 km/h)和超高速磁浮(最高速度 800 km/h 以上,采用低真空管道技术,目前处于探索阶段)。高速和中速磁浮系统主要采用长定子同步直线电机牵引方式,中低速和部分中速磁浮系统采用短定子异步直线电机牵引方式。

EMS 型磁浮列车利用通电后电磁铁与轨道之间主动控制的电磁吸力实现车辆的悬浮。目前,以德国、日本、中国和韩国为代表,主要研究方向都集中在 EMS 型中低速和高速磁浮列车的研发上。其中,中低速磁浮系统主要解决城市内部的交通运输问题,造价与轻轨相当,最大优点为绿色环保;高速磁浮系统适合作为城市间的交通工具。虽然中低速和高速 EMS 型磁浮列车在牵引、供电以及运行控制方面存在较大差异,但是两者的悬浮原理相同,均采用主动式的电磁悬浮原理,悬浮间隙均在 10 mm 左右,因此高速和中低速 EMS 型磁浮列车在悬浮控制系统的设计方面有许多相似之处。中国从 20 世纪 80 年代开始了对磁浮交通技术的自主研究,虽然起步较晚,但发展迅速,到目前为止已经掌握了 EMS 型中低速磁浮列车和高速磁浮列车的关键技术,并实现了商业化或工程化。在中低速领域,中国先后开工建设了北京中低速磁浮示范线、湖南长沙磁浮快线、湖南凤凰磁浮旅游线、广东清远磁浮旅游线等。在高速领域,2002 年 12 月中德合作建成了上海高速磁

浮运营示范线。在“十五”863计划和“十一五”“十二五”科技支撑计划的支持下,中国先后研制了单磁浮架、双磁浮架和一系列两辆编组的高速磁浮试验列车,高速磁浮列车的技术攻关进程得到了快速推进。由于EMS型磁浮列车主要依靠车载电磁铁与地面轨道相互作用产生的电磁力实现列车的无接触支撑和导向,并且车体的稳定悬浮需要多个专门的悬浮控制器进行控制,因此会存在电磁铁发热和悬浮能耗问题。中国学者提出了一种永磁电磁混合悬浮控制方案即在电磁悬浮的电磁铁中加入永磁体,实现永磁加电磁的混合悬浮控制,该方案能够大幅降低电磁悬浮系统的悬浮功耗,从根本上解决电磁铁线圈绕组发热的问题。

EDS型系统的特点是利用超导磁体或者永磁电磁混合型磁铁(permanent and electric magnet, PEM)与轨道之间的相对运动在轨道内产生感应电流,感应电流与源磁场相互作用产生斥力而实现悬浮。按照提供磁场源的不同,EDS型系统可分为超导电动型和永磁电动型。日本采用低温超导磁体的高速磁浮列车技术以及美国的永磁电动型磁悬浮列车技术是EDS型磁悬浮技术的代表。最初,由于永磁材料无法提供足够的磁场,EDS型悬浮系统研究主要集中在超导磁体上。随着高剩磁强度永磁材料的问世以及Halbach结构永磁体阵列在磁悬浮技术中的不断应用,永磁体能够提供足够的悬浮力,并被引入到基于永磁的电动悬浮技术中。由于永磁电动悬浮技术不需要复杂的冷却装置,同时一定速度下可达到较高的浮力与磁阻力比值,因而其成为具有良好发展前景的磁悬浮技术之一。在国外,永磁电动悬浮技术的应用以美国的Magplane磁浮列车、GA Urban磁悬浮列车、MIT Hyperloop为典型代表。美国麻省理工学院(MIT)的Montgomery教授基于永磁电动提出了Magplane的设计方案;美国兰利空气热力学实验室以电磁辅助发射为背景,开展了永磁电动悬浮技术的研究,为美国国家航空航天局的火箭助推计划研制了试验车;2016年5月,MIT Hyperloop团队研制了第一个真空管道胶囊列车舱体,其长度为2.4 m、重258 kg、设计速度为400 km/h,在2017年1月的比赛中该舱体的悬浮、导向功能全部依靠Halbach结构的永磁电动悬浮方案实现。在中国,中国科学院电工研究所(简称“中科院电工所”)、国防科技大学、西南交通大学和海军工程大学也相继开展了永磁电动悬浮的基础性研究工作。但是,由于永磁电动悬浮具有临界稳定的特性,在受到干扰时容易产生振荡,因此必须引入主动控制,从而确保电动悬浮系统的稳定运行。本书综合国防科技大学多年来的电磁悬浮技术积累,研究了永磁电动和电磁混合的悬浮技术,该技术很好地弥补了单纯永磁电动磁浮列车悬浮系统阻尼不够的缺点。

本书在常导电磁悬浮和永磁电动悬浮技术基础上,提出了永磁电磁混合悬浮以及永磁电动与电磁混合悬浮的技术方案,旨在拓展常导电磁悬浮和永磁电动技术的应用,解决其存在的不足。

1.2 国内外磁浮交通的主要应用成果

本节回顾和概述了国内外磁浮交通领域的主要研发历史、研究现状与主要成果,这些成果为磁浮技术的进一步拓展应用奠定了基础。

1.2.1 国外研究现状和主要成果

国外从事磁浮技术研究的主要有德国、日本、英国、韩国及美国等。其研究和应用主要涉及中低速、高速和超高速磁浮交通领域。

1) 中低速磁浮交通领域

中低速磁浮列车系统采用非接触运行方式,与普通城市内运行的轮轨列车相比,它具有噪声低、振动小、转弯半径小、线路铺设条件宽松、建造成本较低、易于实施、易于维护等优点,而且由于其牵引力不受轮轨间的黏着系数影响,还具有爬坡能力强等特点。

世界上最早的磁浮列车结构是德国工程师 Kamper 在 1922 年提出的。20 世纪 70 年代德国开始了 Transrapid(TR)高速磁浮交通技术研究,最初的 TR01、TR02、TR04 列车也是这种结构,采用短定子异步电机技术进行牵引,但是这种结构方案只适合于中低速运行。德国后来放弃了 Kamper 的短定子和倒 U 型轨道方案,转向长定子同步电机牵引的高速磁浮技术,发展至今形成了上海运营的高速磁浮系统(TR08)。

日本在德国 Kamper 技术专利基础上开始中低速磁浮技术的研发,至今已经有 50 多年历史,先后研制了 HSST(high speed surface transport)-01~05 号磁浮列车。1991 年 4 月在名古屋市建成面向应用的长 1 530 m 的中低速磁浮试验线,研制 HSST-100S 型实用化磁浮列车。1993 年 4 月,通过日本政府组织的专家评审,得出了“HSST-100S 系统面向城市交通的商业运营技术已经成熟”的结论。1995 年 5 月,加长型的 HSST-100L 原型车被制造出来并运送到试验线,开始进行持续改进运行试验。为迎接 2005 年名古屋世界博览会,日本在 1999 年决定建造长 8.9 km 的中低速磁浮商业运营线——东部丘陵线。此线路于 2005 年 3 月 5 日正式开通运行,其成功运行有力地证实了中低速磁浮列车的优势。目前日本正在加强该项技术的应用推广工作。

为解决大城市交通问题,韩国从 20 世纪 80 年代就开始发展中低速磁浮列车,并在仁川国际机场到仁川之间建设了一条磁浮示范线,第一期建设线路长 6.1 km,2016 年 3 月开始试运行。

鉴于近年来城市交通出现的拥堵现象,美国交通部开始研究中低速磁浮交通,并已经

把磁浮列车技术的开发列入交通部发展计划。美国交通部支持具有不同技术内涵磁浮项目的研发,目前正处于原理样机的开发阶段。

2) 高速磁浮交通领域

高速磁浮交通系统主要解决大城市之间的交通运输问题,从事研究的主要有德国和日本。

德国高速磁浮交通系统采用常导电磁悬浮(EMS)技术。1971年,德国第一辆磁浮原理车在660 m长的试验线路上进行试验运行。1975年,Thyssen Henschel公司在卡塞尔(Kassel)工厂的HMB1号试验线上率先实现了线路侧长定子直线同步电机驱动的磁浮列车运行。1976年,Thyssen Henschel公司在HMB2号试验线上进行了载人长定子试验车的运行。1979年,汉堡国际交通博览会展出了TR05磁浮铁路示范线并进行载客运行。1980年,埃姆斯兰德的高速磁浮试验线(TVE试验线)正式开工,1983年6月投入试验运行,同年年底运行时速达到300公里。1986—1989年,由Thyssen Henschel公司牵头研制了面向应用的TR07磁浮列车,1993年TR07磁浮列车在TVE试验线上运行最高速度达到450 km/h。2000年12月中国决定引进德国TR08磁浮技术,建设上海市浦东新区龙阳路地铁站至浦东国际机场的高速磁浮示范运营线。

日本高速磁浮交通系统采用超导电动斥力悬浮,利用车载超导磁体与轨道侧墙闭合“8”字线圈相对运动产生感生电流,两者相互作用产生悬浮力和导向力。日本从1962年起开始超导磁浮技术研发。1972年,采用直线感应电动机驱动的ML-100超导磁浮试验车在试验线上实现悬浮,时速60公里。1975年,采用直线同步电动机驱动的ML-100A试验车投入运行,并在九州岛宫崎市开始建造长7 km的试验线;1979年12月试验速度达到517 km/h。1980年,日本将宫崎试验线倒T型轨道改造为U型轨道,研制了三辆编组的MLU-001磁浮试验列车;1991年将部分悬浮线圈移至侧壁并开始试验;1995年载人试验速度达到411 km/h。1989年,日本决定建设山梨试验线,同时研制MLX01试验列车;1997年2月,MLX01磁浮列车投入试验运行,同年12月载人试验速度达到531 km/h。2005年3月,日本超导磁浮铁路实用技术评价委员会认定“MLX超导磁浮系统已经确立了实用化的技术基础”。2009年,日本JR东海铁路公司发布了由MLX01试验列车衍生而来的L0系实用化磁浮列车。2015年4月16日,L0系磁浮列车试验速度达到590 km/h;4月21日,七辆编组试验列车载人速度达到603 km/h。2014年12月,采用L0系磁浮技术的中央新干线开始开工建设,计划于2027年开通东京至名古屋段,到2045年建成东京到大阪段。

1.2.2 国内研究现状和主要成果

中国从20世纪80年代开始磁浮技术研究,研究领域主要涉及中低速和高速磁浮交通系统,近年来也相继开展了低真空管道超高速运载技术研究。

1) 中低速磁浮交通领域

从20世纪80年代开始,国防科技大学、西南交通大学、中科院电工所和中国铁道科

学院等单位相继开展了磁浮列车技术的基础性研究。

国防科技大学从1980年开始了磁浮控制技术的研发,1981年研制成功单点悬浮系统,1986年研制了一台四点悬浮的内嵌式结构磁浮小车(CMS-01型),如图1-1所示。1989年年初,国防科技大学成功研制了一辆小型磁浮模型样车(CMS-01A型),该车集悬浮、导向与推进于一体,车重约80 kg,可承载1人,如图1-2所示。1992年5月,国家科委正式将“磁悬浮列车关键技术研究”列入国家“八五”重点科技攻关计划。1995年5月,国防科技大学研制成功全尺寸中低速单磁浮转向架系统(CMS-02型),如图1-3所示,该车最多可承载40人、悬浮重量6 t,1995年被评为全国十大科技进展。2001年9月,北京控股磁悬浮科技发展有限公司(简称“北控磁浮”)与国防科技大学合作建成长度204 m的中低速磁浮试验线,研制了CMS-03型中低速磁浮试验样车并在该线路进行了试验运行,如图1-4所示。2001年11月25日,CMS-03型中低速磁浮试验样车在湖南长沙通过了由北京市科委组织的中试评审。2005年7月29日,北控磁浮、

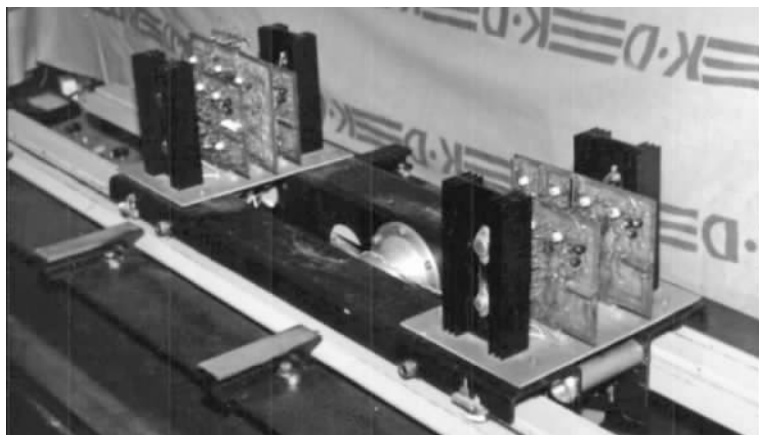


图1-1 国防科技大学1986年研制的内嵌式结构磁浮小车(CMS-01型)

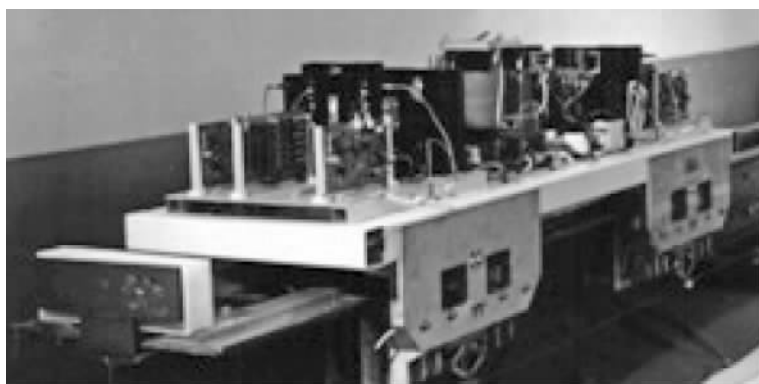


图1-2 国防科技大学1989年研制成功小型磁浮模型样车(CMS-01A型)