



同济大学本科教材出版基金资助



中低速磁浮交通技术

杨新斌 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学本科教材出版基金资助

中低速磁浮交通技术

杨新斌 编著

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书共分为8章,主要包括中低速磁浮交通概要、总体设计、轨道线路、车辆设计、悬浮和导向系统、牵引控制系统、制动系统、运行控制与通讯系统等。为了丰富该书的内容,本书不仅仅阐述了作者的科研成果,还介绍了国内外中低速磁浮交通的研发成果,并介绍了日本 HSST 中低速磁浮系统、韩国磁浮交通、德国磁浮交通等技术。

本书可作为高等学校轨道交通车辆专业教材,也可以供相关专业的工程技术人员和科研人员参考及学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

中低速磁浮交通技术/杨新斌编著. —上海:同济大学出版社,2017.4

ISBN 978-7-5608-6790-8

I. ①中… II. ①杨… III. ①磁浮铁路—研究
IV. ①U237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 046972 号

同济大学本科教材出版基金资助

中低速磁浮交通技术

杨新斌 编著

责任编辑 胡晗欣 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 同济大学印刷厂
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 11.5
字 数 287 000
版 次 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6790-8

定 价 35.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

随着我国轨道交通行业进入快速的发展时期,中低速磁浮作为我国具有自主知识产权的一种新型轨道交通技术,具有环保、安全性高、爬坡能力强、转弯半径小、建设成本低等优点,在各大中城市具有极大的发展空间。通常,一种完全新型的交通运输高技术战略发展大致要经历4个阶段,即:技术方案的基础性研究阶段;选定方案的工程技术研究发展阶段;建造运营线,实现有关装备、工程与运营的产业化阶段;大规模推广的应用阶段。

我国中低速磁浮技术在理论研究上已经达到或者接近国际先进水平,差距主要在工程化上。中国科学院院士严陆光多次上书国务院指出,在技术比较成熟的情况下,应抓紧推动磁浮技术的工程化和应用,以占领行业和产业的制高点。反之,我们将可能丧失在该技术领域的优势地位。在中低速磁浮列车的问题上,中国没有遭遇“科技殖民”,而是自己通过自主技术探索和研发了具备完全自主知识产权的中低速磁浮交通系统。

作者本人多年从事中低速磁浮工程项目,《中低速磁浮交通技术》一书结合了作者本人的科研成果,同时介绍了日本HSST磁浮、韩国磁浮、德国磁浮等技术。

全书共8章,其中:第1章为中低速磁浮交通概述,对磁浮技术的由来和发展,以及磁浮交通、技术在国内外的发展情况进行介绍,并对我国发展中低速磁浮交通技术的必要性进行阐述。

第2章为中低速磁浮交通总体,介绍中低速磁浮交通线路轨道、车辆、牵引供电、信号系统、基础通信、车站设计原则、维修基地设计原则、环境影响,并对中低速磁浮交通的社会经济效益进行分析。

第3章为轨道线路,介绍中低速磁浮轨道线路的结构特点、设计基础、运行经验、性能特点、道岔设计、地基和支撑墩柱等内容。并对相关的强制性规范和系统要求,以及评价和问题进行阐述。

第4章为车辆,对中低速磁浮车辆总体技术参数、适应线路、走行机构、零部件重量要求、工况要求、接口要求、选材要求、车体结构和车辆型式试验进行介绍。

第5章为悬浮和导向,介绍中低速磁浮悬浮和导向系统特点、设计基础和技术参数、悬浮特性、悬浮控制系统、系统设计参数和接口要求,并对悬浮系统故障分析与处理原理进行介绍。

第6章为牵引控制系统,介绍牵引控制系统构成原理,以及牵引逆变器的基本要求、主要设备、基本功能等,并说明牵引控制系统对主电路的要求。

第7章为制动系统,介绍微机控制模拟式电液制动系统及电空制动系统两种制动方案,并对两种制动方案进行比较分析。

第8章为运行控制与通信系统,介绍中低速磁浮运行控制系统与通信系统的主要技术原则和依据、系统概况、基本功能和系统方案。

本书的相关章节由杨凤娟(第6章)、曾宪华(第7章)、徐俊起(第5章)等工程技术人员参与编写。本书在编写过程中,参考了相关中低速磁浮试验线的设计文件、协作单位的技术资料等,在此表示感谢。

本书在编写过程中得到了前上海磁浮交通工程技术研究中心主任吴祥明、国防科技大学常文森教授、中国工程院院士刘友梅等资深专家的指导和帮助,以及上海电气集团领导的大力支持,在此表示衷心的感谢。

同时感谢本书参考文献所列的各位同行,以及我的学生孙晨、王泽汉两位同学。

由于编著者水平有限,涉及专业面较宽,书中疏漏、不足之处在所难免,恳请业内专家和广大读者批评指正。

杨新斌

2017年2月于同济大学

目 录

前言

第 1 章 中低速磁浮交通概述	1
1.1 磁浮技术的由来及发展	1
1.2 磁浮交通在各国的发展	2
1.3 日本中低速磁浮交通发展	5
1.4 韩国中低速磁浮交通发展	11
1.5 我国中低速磁浮技术发展	18
1.6 发展中低速磁浮交通技术的必要性	21
第 2 章 中低速磁浮交通总体	24
2.1 线路轨道	24
2.2 车辆	27
2.3 牵引供电	31
2.4 信号系统	36
2.5 基础通信	40
2.6 车站设计原则	45
2.7 维修基地设计原则	46
2.8 环境影响	46
2.9 社会经济效益分析	48
第 3 章 轨道线路	49
3.1 结构特点	49
3.2 设计基础	51
3.3 运行经验	52
3.4 性能特点	53
3.5 道岔	57
3.6 地基和支撑墩柱	59

3.7 轨道曲线	59
3.8 轨道线路技术要求及规范	59
第4章 车辆	72
4.1 总体技术参数	72
4.2 适应线路	75
4.3 走行机构	79
4.4 零部件重量要求	98
4.5 走行机构的工况要求	98
4.6 走行机构的接口	101
4.7 选材要求	105
4.8 车体结构	108
4.9 车体与各部分的接口	118
4.10 车辆形式试验	123
第5章 悬浮和导向	125
5.1 悬浮和导向系统特点	125
5.2 设计基础和技术参数	128
5.3 悬浮特性	129
5.4 悬浮与相关问题	130
5.5 悬浮控制系统	131
5.6 系统设计参数	134
5.7 与其他子系统接口	135
5.8 故障分析与处理	136
第6章 牵引控制系统	137
6.1 概述	137
6.2 牵引控制系统构成	141
6.3 牵引逆变器	143
6.4 主电路的要求	146
第7章 制动系统	151
7.1 微机控制模拟式电液制动系统	151
7.2 微机控制模拟式电空制动系统	159
7.3 两种方案的比较	162

第 8 章 运行控制与通信系统	164
8.1 运行控制系统	164
8.2 基础通信系统	171
参考文献	176

第 1 章 中低速磁浮交通概述

1.1 磁浮技术的由来及发展

磁浮列车是一种采用无接触的悬浮、导向和驱动系统的交通模式。磁浮列车作为一种新型的地面交通工具已从实验阶段走向了商业运营,并且有速度快、爬坡能力强、能耗低、运行时噪音小、安全舒适、无排放、污染少等优点。它从根本上克服了传统列车轮轨黏着限制、机械噪音和磨损等问题,成为人们梦寐以求的陆上交通工具。

磁浮列车从悬浮机理上可分为电磁悬浮(Electromagnetic Suspension, EMS)和电动悬浮(Electrodynamic Suspension, EDS)两种。前者以德国的 Transrapid(简称 TR)08 型和日本的 HSST100L 型磁浮列车为代表,后者以日本的 MLX 型超导磁浮列车为代表。

电磁浮也称磁吸式(Attractive Levitation)悬浮,一般采用“T”形导轨,车辆环抱导轨运行。对车载的、置于导轨下方的悬浮电磁铁通电励磁而产生磁场,磁铁与轨道上的铁磁构件相互吸引,将列车向上吸起悬浮于轨道上,磁铁和铁磁轨道之间的悬浮间隙一般为 8~12 mm。列车通过控制悬浮磁铁的励磁电流来保证稳定的悬浮间隙,通过直线电机来牵引列车运行。这种悬浮方式由于采用磁铁异性相吸的原理,磁场在直线电机的初级、次级线圈之间基本可以形成闭合回路,磁场向外扩散较少,电磁污染程度较低,磁场对人的影响可以忽略不计。

电动悬浮也称磁斥式(Repulsive Levitation)悬浮,当列车运行时,车载磁体(一般为低温超导线圈或永久磁铁)的运动磁场在安装于线路上的悬浮线圈中产生感应电流,两者相互作用,产生一个向上的磁力将列车悬浮于路面一定高度,悬浮间隙一般为 100~150 mm,列车运行也是由直线电机提供牵引力。与电磁浮相比,电动悬浮系统在静止时不能悬浮,必须在列车达到一定速度(约 150 km/h)后才能起浮。电动悬浮系统在实际速度下,悬浮间隙较大,不需要进行主动控制。电动悬浮由于采用磁铁同性相斥的原理,初、次级线圈所产生的磁场在直线电机内部不能闭合,故其电磁污染比电磁浮型要大许多。

磁浮交通的产生源于人们对轮轨黏着式铁路局限性的认识。传统的轮轨黏着式铁路,是利用车轮与钢轨之间的黏着力使列车前行。它的黏着系数随列车速度的增加而减小,走行阻力随列车速度的增加而增加,当车速增至黏着系数曲线和走行阻力曲线的交点时,就达到了极限。为了解决这一难题,在 20 世纪 60 年代初,一些国家开始着手研究非黏着式超高速铁路。磁浮交通就是非黏着式轨道交通的一种。

磁浮交通除了具有速度快的特点之外,还有噪声低、振动小、无磨损、不受气候条件影

响、不污染环境、安全、舒适、节能等优点,因而引起了人们极大的兴趣,许多国家纷纷制订了研究计划。

德国、日本、美国、中国等国家都在积极地研究磁浮列车技术,并且已经取得了较大的进展。以 EMS 型磁浮列车为代表的德国和以 EDS 型磁浮列车为代表的日本,其磁浮交通系统目前能达到或接近应用水平的分别为德国的 TR 常导吸力型磁浮列车、日本的 MLX 超导斥力型磁浮列车和 HSST 常导吸力型磁浮列车。我国正在研制的磁浮列车属于常导电磁吸力悬浮型。

磁浮技术起源于德国,早在 1922 年,德国工程师赫尔曼·肯佩尔就提出了电磁浮原理,并于 1934 年申请了磁浮列车的专利。20 世纪 70 年代以后,随着世界工业化国家经济实力的不断加强,为提高交通运输能力以适应其经济发展的需要,德国、日本、美国、加拿大、法国、英国等发达国家相继开始筹划进行磁浮运输系统的开发。

20 世纪 60 年代,世界上出现了 3 个载人的气垫车实验系统,它是最早对磁浮列车进行研究的系统。随着技术的发展,特别是半导体/集成电路的空前发展,使原来十分庞大的控制设备变得十分轻巧,这就给磁浮列车技术提供了实现的可能。1969 年,德国牵引机车公司的马法伊研制出小型磁浮列车系统模型,之后命名为 TR01 型,该车在 1 km 轨道上时速达 165 km,这是磁浮列车发展的第一个里程碑。在制造磁浮列车的角逐中,日本和德国是两大竞争对手。1994 年 2 月 24 日,日本的电动悬浮式磁浮列车,在宫崎一段 74 km 长的试验线上,创造了时速 431 km 的当时日本最高记录。1999 年 4 月日本研制的超导磁浮列车在实验线上达到时速 552 km。德国经过 20 年的努力,技术上已趋成熟,具有建造运营线路的水平。原计划在汉堡和柏林之间修建第一条时速为 400 km 的磁浮交通,总长度为 248 km,预计 2003 年正式投入营运,但由于资金计划问题,2002 年宣布停止了这一计划。

利用磁力使物体处于无接触悬浮状态的设想是人类一个古老的梦,但实现起来并不容易。因为磁浮技术是集电磁学、电子技术、控制工程、信号处理、机械学、动力学为一体的典型的机电一体化技术。随着电子技术、控制工程、信号处理元器件、电磁理论及新型电磁材料的发展和转子动力学的进展,磁浮技术得到了长足的发展。

1.2 磁浮交通在各国的发展

迄今为止,对磁浮交通进行过研究的国家主要有日本、德国、英国、加拿大、美国、苏联和中国。当前,以日本和德国处于领先地位,而美国和苏联则分别在 20 世纪七八十年代放弃了研究计划。以下是各主要国家对磁浮交通研究情况的简要介绍。

从 20 世纪 60 年代开始,日本、德国、英国、苏联、韩国和中国等国家都先后投入力量研究中低速磁浮列车。

日本于 1962 年开始研究常导磁浮交通。此后由于超导技术的迅速发展,从 70 年代初开始转而研究超导磁浮交通。1972 年首次成功地进行了 2.2 t 重的超导磁浮列车实验,其速度达到每小时 50 km。1977 年 12 月在宫崎磁浮交通试验线上,最高速度达到了每小时 204 km,到 1979 年 12 月又进一步提高到每小时 517 km。1982 年 11 月,磁浮列车的载人试验获得成功。1995 年,载人磁浮列车试验时的最高时速达到 411 km。为了进行东京至大阪

间修建磁浮交通的可行性研究,于1990年又着手建设山梨磁浮交通试验线,首期42.8 km长的试验线已于1996年全部建设完成。

德国对磁浮交通的研究始于1968年(当时为联邦德国)。

1969年,德国联邦交通部、联邦铁路公司和德国工业界参与了关于“高速与快速铁路的研究”,所研究的高速交通涉及轮轨高速铁路和磁浮高速铁路。1971年2月,德国第一辆磁浮原理车MBB和一段660 m长的试验线路投入试验运行。原理车采用车辆侧的短定子直线电机驱动。1975年,Thyssen Henschel公司在卡塞尔(Kassel)的工厂中的HMB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。这一试验系统将直线驱动和悬浮支承结合起来,奠定了今天TR磁浮高速铁路发展的基础。1976年研制的“彗星”号试验车,首次证明磁浮车可以以400 km/h以上速度运行。在1979年汉堡国际交通博览会上,一段900 m长的TR磁浮交通示范线顺利展出,促进了磁浮交通的发展。

为了建造第一段试验线路,德国工业界组成了磁浮交通Transrapid联合体。在德国西北部的埃姆斯兰(Emsland)地区建设Transrapid试验线(简称TVE)。第一期工程包括21.5 km长的试验线路、试验中心和试验车Transrapid06(简称TR06)。考虑到将来的实际应用,提高试验速度,联邦研究与工艺部于1984年决定在TVE扩建南环线,即试验线路的第二线路段。南环线1984年开工,1987年竣工。至此,TVE的试验线总长达到31.5 km。同年,TR06磁浮车在试验线上达到406 km/h的速度,1988年,试验速度提高到412.6 km/h。

从1986年开始,由德国Thyssen Henschel公司牵头,研制了面向应用的磁浮列车TR07,1989年该车投入试验线运行。1993年,TR07在载人试验运行中达到了450 km/h的速度。由于线路长度的限制,磁浮列车不允许再往上加速。

在Transrapid磁浮高速铁路开发过程中,联邦铁路公司和7所著名的大学的专家组成的工作组,由位于慕尼黑的联邦铁路中心局牵头,对Transrapid系统进行了独立、全面的评价和鉴定。1991年年底,德国得出TR磁浮高速铁路系统技术成熟的结论。1997年4月,德国决定建造柏林和汉堡之间的磁浮交通,该线全长292 km,原计划1998年下半年动工,2005年投入商业运行,并为此开发了拟用于柏林至汉堡线的TR08型磁浮列车,该车于1999年10月开始在TVE上进行了试验。后因原来预测的客流量偏大,新的预测表明建设新线将面临亏损的危险,遂于2000年2月取消建设计划。

德国磁浮交通研究初期,常导和超导并重,到1977年,先后分别研制出常导电磁铁吸引式和超导电磁铁相斥式试验车辆,试验时的最高速度达到400 km/h。后来经过分析比较认为,超导磁浮交通所需的技术水平太高,短期内难以取得较大进展,遂决定以后只集中力量发展常导磁浮交通。1978年,决定在埃姆斯兰德修建试验线,并于1980年开工兴建,1982年开始进行不载人试验。列车的最高试验速度在1983年底达到300 km/h,1984年又进一步增至400 km/h。

与日本和德国相比,英国对磁浮交通的研究起步较晚,从1973年才开始。但是,英国则是最早将磁浮交通投入商业运营的国家之一。1984年4月,伯明翰机场至英特纳雄纳尔车站之间一条600 m长的磁浮交通正式通车营业。旅客乘坐磁浮列车从伯明翰机场到英特纳雄纳尔火车站仅需90 s。令人遗憾的是,在1995年,这趟一度是世界上唯一从事商业运营的磁浮列车在运行了11年之后被宣布停止营业,其运送旅客的任务由机场班车所取代。

我国在20世纪80年代初开始正式立项,对常导电磁铁吸引式磁浮交通进行研究。到

1994年10月,由西南交通大学建成我国首条磁浮交通试验线,并同时开展磁浮列车的载人实验。该项实验成果于1996年1月通过铁道部组织的专家鉴定,从而使我国对磁浮交通的研究跨入到先进国家的行列之中。

2000年6月,中国上海市与德国磁浮国际公司合作进行中国高速磁浮列车示范运营线可行性研究。同年12月,中国决定修建上海浦东龙阳路地铁站至浦东国际机场高速磁浮交通示范运营线。2001年3月正式开工建设。

日本于1962年开始磁浮交通的研究工作。1977年在南部九州建成7 km 超导磁浮试验线,即宫崎试验线。宫崎试验线是单线,没有坡道和隧道,不能满足接近应用条件的试验要求,因此日本运输省决定建设超导磁浮山梨试验线,并于1991年在山梨县境内开始建设,1997年4月投入试验运行。山梨试验线主要包括18.4 km 长的试验线路、变电站、试验中心和两列磁浮车(MLX01和MLX02)。1997年12月24日,三辆编组的MLX01型磁浮列车不载人试验运行达到550 km/h 的速度,创下地面交通速度的最高世界记录。1999年12月,日本山梨磁浮列车试验线进行了磁浮列车高速错车试验,创造了错车时相对时速为1 003 km的世界最高记录,当时两列车的时速分别为546 km 和457 km。

日本的HSST系统磁浮列车最初是由日航投资成立的HSST公司研究开发,希望用于机场到市区的快速轨道交通,后又与其他股东联合开发。1974年4月,小型磁浮试验装置的浮起试验成功,1975年试制成电磁支承和导向的第一辆试验车HSST-01,1978年向公众展出了HSST-02号车,最高速度约为100 km/h,总共有9个座位,为了改善舒适性,在车厢和悬浮架之间采用了二系弹簧悬挂系统,从1983—1989年,HSST-03到HSST-05型车相继投入试验。

1991年,日本在名古屋附近的大江,建成一条新的面向应用的试验线。试验线总长1 530 m,最小竖曲线半径1 000 m,最大超高为80 mm,最大坡度7%。从1991—1995年,对HSST100S型磁浮列车进行了100多项面向应用要求的运行试验,最高运行速度达到130 km/h。1993年3月,以日本运输省、建设省和其他单位的专家学者组成的可行性研究委员会对试验结果进行了最后论证,考察了噪声、振动和磁场影响等,结论是:HSST磁浮交通系统是舒适的低污染系统,能够应对紧急情况,长期的运行试验证明它是可靠的,并且由于其悬浮的优点使得它的维修量降低,作为城市交通系统,HSST磁浮交通系统已进入实用阶段。

美国从20世纪60年代开始磁浮交通的研究,1975停止研究工作,1989年起又重新开始评估磁浮列车的实用价值。由铁道总署、陆军工兵总部、能源部牵头,数家公司和大学参加,历时4年,定出4个磁浮车设计速度均为500 km/h 的方案,其中3个方案为电动型。美国还对大城市间的16条线进行技术经济条件评估,认为只有纽约—波士顿线能在短期内回收投资并能实现赢利。

目前,美国正在积极推进应用的是永磁Magplane,它属于永磁浮型。Magplane的悬浮电磁铁和驱动电磁铁皆为永磁体,间隙可达5~15 cm。在悬浮和导向上使用了20 mm 厚的弧形铝板轨道,这种结构具有高速转弯的优点。这种设计方案需要加辅助轮。为了安全起见,Magplane的设计者计划在行驶的全程不收回辅助轮,而是将其固定在列车下面,整个列车技术相对简单。

Magplane高速磁浮列车系统与其他磁浮列车系统相比,有许多的创新之处,最显著的

特点就是永磁浮、电磁道岔、自稳定的控制系统等。

Magplane 方案采用永磁方案,比起超导悬浮列车更经济,不存在一套精密的制冷系统,简化了磁浮列车系统,同时不会出现日本超导高速磁浮列车 MLU 在试验时曾出现的超导体失超而引发的事故,使得磁浮系统可靠性大大提高,同时也使得原理更简单,建造更方便。对磁浮系统来说有一个振荡的过程,从安全角度,系统不需要防止与地面碰撞。而对旅客来说,存在振动则会感觉不舒服,为阻尼这些振荡,磁铁不是粘在列车上,而是有一个可以运动的装置。磁铁在列车底部运动,可吸收掉能量以阻尼振荡,磁铁可以运动的范围大约 2 cm,频率大约是 1 周。磁铁在车体下面只是径向运动,因为磁铁下面有一个稳定机构,不能上下运动,列车动起来后,所有的磁块都在不断地运动。速度更高时,有像飞机一样的稳定翼,振动幅度 1 cm 左右,用空气动力学原理来控制列车系统的晃动。

列车在拐弯时允许倾斜 10° ,这样列车在通过半径为 2 km 的曲线时,仍可保证 360 km/h 的速度,而且乘客感觉和坐飞机一样舒适,该方案目前还在设计与改进过程中。和传统的列车自动控制系统不同,Magplane 的控制系统除检测列车的位置外,还要检测列车的姿态,根据这些信号由控制系统处理后发出控制信号控制磁块。

1974 年,英国在德比进行了磁浮列车运行试验。为了将新建的伯明翰机场终端和国际博览会展区及火车站连接起来,英国建造了一条 620 m 长的磁浮交通线,该线于 1984 年投入载客运行。这条线路是复线,轨道架在 6 m 高的钢结构上,来往运行 3 辆有电磁支承、导向系统和直线电机驱动的小型磁浮车,速度可达 50 km/h。磁浮车辆重约 5 t,具有铝焊接底架和玻璃纤维强化塑料制成的车厢结构,一辆车有 6 个座位和 26 个站位。伯明翰磁浮交通是第一个用在公共旅客运输上的磁浮交通系统,1992 年,由于故障率高,维护困难,该线路关闭。

1.3 日本中低速磁浮交通发展

1.3.1 概述

日本中低速磁浮的开发是从 1974 年初开始的。当时计划修建的成田新东京国际空港离市中心大约 65 km,是世界上离市中心较远的空港之一。因此,在日本航空对空港进行计划的时候就包括了附属设施建设的问题。为了缩短到空港的交通时间,日本对一些设备进行了调查,当时联邦德国开发的线性机车(TR-04 系统)令人瞩目。最初开始进行开发和研究的动机是希望使用航空机械的技术得到更好的系统,并且可以减少公害。

因为成田空港开港的时间已经迫近,所以进行长时间的技术开发是不允许的,就是说使用尖端技术的系统是不适当的,在考虑了日本的实际情况后,必须选择耐环境性的交通工具。此外是作为空港的附属设施,也没有必要超高速的机车,只需达到当时的新干线的速度(210 km/h)的程度就足够了。这一点,TR-04 方式的关键技术并不是最新的,集电装置是必要的组成,而对于速度和集电装置方面,似乎也没有大的开发要素。剩下的课题就是在高速行驶中 LIM 特性和悬浮控制对实际应用是否会有重大影响。此外是如何才能设计出最

佳的,且需要搞清楚是否能比较容易地用于实际应用。

1.3.2 在东扇岛进行的实验

在进行中低速磁浮开发的时候,日本首先以时速 300 km 为目标速度,对在这个速度下能保持悬浮间隙的悬浮控制及 LIM 设计的实用性进行了基础实验以验证。为此安排了实用尺寸的 LIM 和磁铁,制作了能够高速行驶的实验机——中低速磁浮-01 号机,这是开发的第一步。

在这样的构想下,中低速磁浮的技术开发正式开始了。1975 年 12 月,在横滨市新杉田建设的 200 m 的直线轨道上初次悬浮行驶了中低速磁浮-01 号机(重 1 t,长 4 m),9 个月后,再次在川崎市东扇岛建设了全长 1 300 m 的直线轨道,开始了提速实验。1979 年 2 月开始在国家资助下增加了纵曲线和半径为 2 000 m 及 280 m 的曲线,并且将轨道线延长到了 1 600 m。图 1-1 为实验轨道的图示。

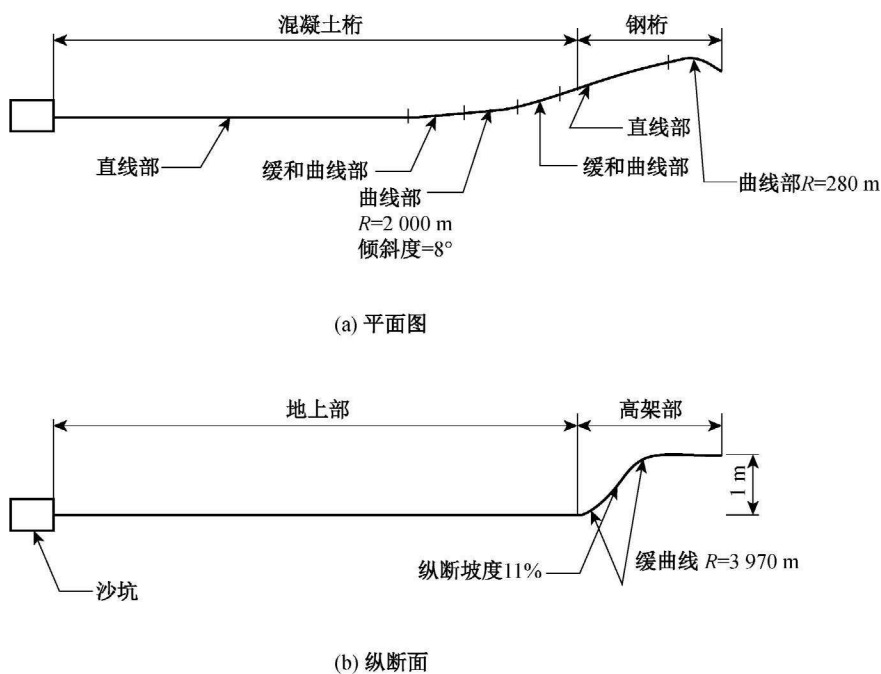


图 1-1 东扇岛实验轨道

因为轨道较短,所以用火箭推进器进行辅助加速,经过一年半时间才顺利地达到目标速度,1978 年 2 月初超过了目标时速 300 km,达到 307.8 km/h。同时也得到了悬浮、推进的相关数据(图 1-2)。从零开始出发极为顺利地进行了实验。

1978 年 5 月制作了中低速磁浮-02 号机。因为 01 号机车是无人车辆而无二系减震(suspension),而 02 号机因装备了二次减震,乘坐非常舒适,是可以载人表演的实验机。长约 7 m,重约 2 t,在 8 人乘坐时以 100 km 的时速行驶,并对悬浮控制方法进行了改善。1981 年 3 月,对东扇岛的实验场予以封锁,当初预定的中低速磁浮的基础实验至此全部结束。

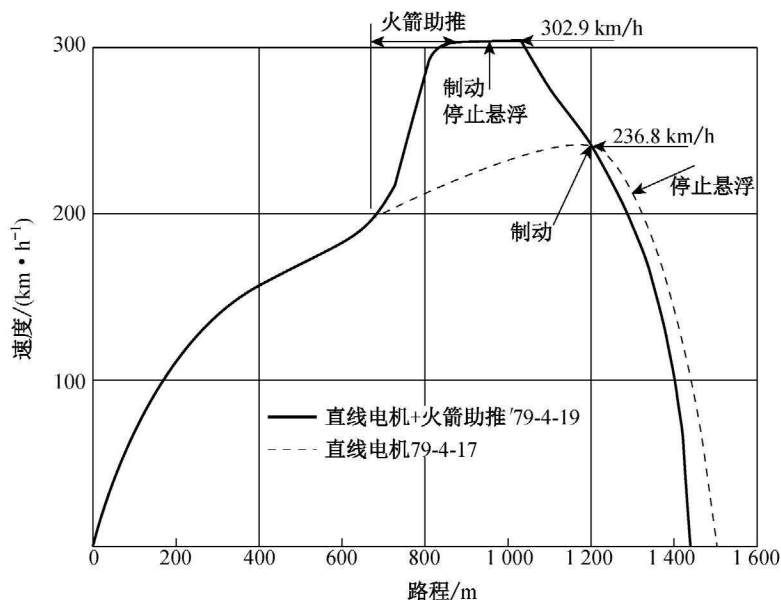


图 1-2 中低速磁浮-01 加速线图的一例

1.3.3 中低速磁浮-03 号机

1985 年在筑波的科学技术博览会上,展出了能够载客的新的大型中低速磁浮-03 号机(图 1-3)。01 号机和 02 号机是与悬浮控制及推进相关构成关键技术的实验用车辆,而 03 号机则是中低速磁浮系统实用型的原型机。除了车体的大小与实际的车辆相近以外,还采用了中低速磁浮独特的车体悬浮模块(module)方式。关于车体悬浮模块方式在后续章节会有详细叙述,它在中低速磁浮系统中与通常的铁道车辆的底架的作用是相当的,是中低速磁浮特有的车体支持机械装置,在 03 号机上初次实现了车体悬浮模块方式的技术价值。03 号机将 VVVF 置于地面, VVVF 电源可通过触轮线集电。



图 1-3 HSST-03 号机

该 03 号机在筑波科学技术博览会及第二年在加拿大温哥华举办的交通博览会上均进行了多名乘客搭乘的表演。而且在以 1987 年 3 月举办的爱知县冈崎市的“葵博”为契机至 1990 年 9 月初止进行了载人行驶表演。

1.3.4 实用型中低速磁浮

1988 年在埼玉县熊谷市的“埼玉博览会”上展出了中低速磁浮-04 号机。这是时速达到 200 km 的中低速磁浮-200 型的原型机。而且在后来 1990 年的横滨博览会上展示了两辆同型车连接在一起的中低速磁浮-05 号机(图 1-4),表 1-1 是中低速磁浮-05 号机的主要参数。



图 1-4 HSST-05 号机

表 1-1 HSST-05 号机主要参数

车辆数		3
重量	自重	20 t
	最大重量	27 t
尺寸	长度	18.25 m
	宽度	3.0 m
	高度	3.6 m
座位数		80
车体支撑		电磁吸引式磁浮 由 8 台组体组成的弹性台车方式 空气弹簧
电气方式		DC750V
牵引	牵引	VVVF 驱动,单侧式 LIM8 台
	控制	定滑动频率控制
	推力	2 160 kgf(1 kgf=9.8 N)
	电压	200~550 V
	电流	最大 800 A
	频率	2~65 Hz
悬浮	电磁铁	36 个
	悬浮间隙	9 mm
	电压	280 V
制动		LIM 再生,逆相,换压式油压制动
空调		13 000 cal(1 cal=4.1868 J)×2 台
车体性能	最高速度	50 km/h
	最大加速度	3.2 km/(h·s ⁻¹)
	减速度	3.5 km/(h·s ⁻¹)(常用最大),5.3 km/(h·s ⁻¹)(非常用)
	爬坡能力	70‰
最小曲线半径		100 m

04 号和 05 号机与 03 号机不同,VVVF 搭载在车辆内,且轨道构造为高架轨道,这已是完全实用车辆的形态。特别是在横滨博览会上,运输省对其安全性进行了确认试验,随后磁浮铁道首次取得了营业许可,这对于整个磁浮铁道事业来说,具有重要意义。01 号机至 05

号机的各项成绩如表 1-2 所示。在各种博览会上无故障高速运行, 合计有 300 万人次以上的搭乘成绩, 由此表明中低速磁浮向实用性方向迈了一大步。

表 1-2 HSST 系列机主要特点

系列		HSST-01	HSST-02	HSST-03	HSST-04	HSST-05
1	尺寸	4.2 m×2.6 m×1.1 m	6.84 m×2.0 m×1.75 m	13.8 m×2.95 m×3.0 m	19.4 m×3.0 m×3.6 m	36.5 m×3.0 m×3.6 m
	自重	1.0 t	1.8 t	12.4 t	19.8 t	39.5 t
	满载车重量		2.4 t	18.0 t	27.0 t	54.0 t
	座位数	0	8~6	50	70	160
	组成	1 辆组成	1 辆组成	1 辆组成	1 辆组成	1 辆组成
2	最高速度	307.7 km/h	110 km/h	60 km/h	43 km/h	55 km/h
	曲线半径	280 m, 2 000 m	280 m, 2 000 m	250 m	150 m	—
	倾斜角度	8.5°	8.5°	1.15°	2.3°	—
	坡度	1.1%	1.1%	0.3%	—	—
	竖曲线半径	3 970 m	3 970 m	—	—	—
3	运行速度		110 km/h	40 km/h	30 km/h	42 km/h
	运行次数		1 456 次	57 676 次	3 781 次	28 173 次
	走行距离		3 802 km	24 126 km	2 144 km	14 515 km
	乘客数		约 3 000 人	1 518 785 人	241 203 人	1 262 046 人
4	车体支持	车体相当于组件	弹性台车方式	6module 模式	8module 模式	8module 模式
	二系弹簧	无	线圈弹簧	空气弹簧	空气弹簧	空气弹簧
5	供电	三相 VVVF 0~600 V 铜平角线	三相 VVVF 0~600 V 铜平角线	推进用三相 VVVF 40~550 V 悬浮用 210VDC 铜平角线	750VDC	750VDC
	集电器	弹簧换压式	弹簧换压式	弹簧换压式	触轮推压式 硬质碳滑板	触轮推压式 硬质碳滑板
6	悬浮间隙	13 mm	8~10 mm	11 mm	9 mm	9 mm
	电源	电池 164 V	电池 120V 直流转换器	地上直流电源装置	电流变换器(PSO) 280VDC	电流变换器 (PSO)280VDC
	频率	2 kHz	2 kHz	2 kHz	2 kHz	2 kHz
7	LIM	3 400 N×1250 k/h 以上时用助 推火箭	3 000 N×1	1 860 N×6	2 646 N×8	2 646 N×2
	电源	地上置 VVVF 208 kV·A, 三相,0~600 V, 0~350 Hz	地上置 VVVF 208 kV·A,三相, 0~600 V, 0~120 Hz	地上置 VVVF 308 kV·A,三相, 0~550 V, 5~100 Hz	车载 VVVF 760kV·A,三相, 550 V,0~60 Hz	车载 VVVF 760kV·A,三相, 550 V,0~60 Hz
8	电气制动	发电制动	发电制动	逆相制动	逆相制动	再生制动, 逆相制动
	机械制动	空气压制动	油压制动	油压制动	油压制动	油压制动
9	轨道	单轨地面置式	单轨地面置式	地面双轨	高架单轨	高架单轨
	长度	1 600 m	1 600 m	386 m,450 m,180 m	327 m	568 m