


磁悬浮铁路

系统 技术

魏庆朝 孔永健 编著



 中国科学技术出版社

磁悬浮铁路系统与技术

魏庆朝 孔永健 编著

中国科学技术出版社
·北京·

图书在版编目(CIP)数据

磁悬浮铁路系统与技术/魏庆朝,孔永健编著. —北京:
中国科学技术出版社,2003.9
ISBN 7-5046-3676-2

I. 磁... II. ①魏...②孔... III. 磁浮铁路—研究
IV. U237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 082353 号

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:62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:15.25 字数:400 千字

2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:25.00 元

(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悬浮铁路技术的著作,也是第一部全面、深入介绍日本磁悬浮铁路技术、研究及试验方面的著作。主要介绍日本超导超高速磁悬浮铁路系统、磁悬浮中央新干线、德国常导超高速磁悬浮铁路系统、上海磁悬浮示范铁路、日本常导中低速磁悬浮铁路系统、我国多种磁悬浮铁路技术的开发及研究。

本书内容涉及线路规划、轨道结构、桥隧建筑物、车辆、电机、控制、经济及社会等众多领域,内容丰富,可供土木建筑、交通运输、机车车辆等有关部门的领导、科技人员参考,也可以作为大专院校本科生、研究生的教材及教学参考书。

作者简介

魏庆朝 1957年7月生,北京交通大学教授、博士生导师,土木建筑工程学院副院长,城市轨道交通研究中心副主任,北京交通大学磁悬浮技术研究的核心成员。先后主持过国家级、省部级科研项目多项,参加省部级项目多项。先后获得铁道部科技进步三等奖、北京市高校优秀青年骨干教师、铁道部青年科技拔尖人才、智瑾奖等荣誉。

孔永健 1962年10月生。在日本学习、工作十余年,一直从事道路与铁道工程的科研及生产工作,发表论文多篇。目前为北京交通大学交通与环境工程研究所副教授。

责任编辑 崔 玲
封面设计 新 华
责任校对 赵丽英
责任印制 安利平

前 言

在世界范围内,随着社会经济的发展和人民生活水平的日益提高,一方面人们的出行次数迅速增加,另一方面人们对旅行质量的要求也在逐步提高,要求提供更加快捷、安全、舒适及符合环保要求的交通运输工具。磁悬浮铁路符合这些要求,应该并有可能成为 21 世纪主要的交通运输工具之一。在我国,国土辽阔,人口众多,尤其适合发展磁悬浮铁路。

世界上已有十几个国家开展过磁悬浮铁路的研究工作。目前比较成熟、具有代表性的磁悬浮铁路技术有三大类型:日本的超导超高速磁悬浮铁路技术(ML)、德国的常导超高速磁悬浮铁路技术(TR)及日本的高速地面运输系统(HSST)。它们的共同之处为,依靠磁悬浮技术将列车悬浮起来并且利用直线电机(或称线性电机)驱动列车行使。

日本的高速地面运输系统 HSST(High Speed Surface Transport)采用常导、短定子直线电机及列车驱动的磁悬浮铁路技术,目前最高时速为 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。

德国的磁悬浮铁路技术 TR(Trans Rapid,简称“运捷”),采用常导、长定子直线同步电机及路轨驱动的磁悬浮铁路技术,最高试验速度为 450km/h(1993 年),适用于中长距离的超高速旅客运输,其技术基本成熟,目前已经建成的上海浦东机场磁悬浮铁路就是采用该项技术。

日本的超导磁悬浮铁路技术 ML(Magnetic Levitation,或称 Maglev),采用低温超导、长定子直线同步电机、路轨驱动的磁悬浮铁路技术,最高试验速度已达 552km/h(1999 年),适用于中长距离的超高速旅客运输,其技术也基本成熟。

上述三种磁悬浮铁路技术各有特点,究竟采用哪种形式,各个国家及各位专家有不同的看法。不过,日本的超导磁悬浮铁路技术先进,运行速度高,这是得到大家普遍认可的,因此在将来的中长途旅客运输中具有良好的发展前景。

本书由北方交通大学魏庆朝教授、孔永健副教授编著完成,魏庆朝博士负

责完成第一章、第二章一至六节、第四章、第五章、第七章,孔庆健博士负责完成第二章七至十节、第三章、第六章,最后由魏庆朝负责统稿。全书绘图由赵吉涛、侯明辉、姚国伟完成。

目前综合介绍日本磁悬浮铁路技术的书籍即使在日本国内也非常少。由白泽照雄、阿部和义编著,由日本商务出版社出版的《直线电机新时代》,详细地介绍了日本磁悬浮铁路技术的研究开发历史、磁悬浮铁路的原理以及以商业运营为目的的磁悬浮中央新干线的构想等诸多方面的内容,对于了解日本磁悬浮铁路技术是一本难得的参考书。本书第三章的主要内容及第二章前六节的部分内容主要以《直线电机新时代》为基础撰写,日本的白泽照雄先生对此部分的编译给予了无私的支持,在此表示最深切的敬意。第五章主要根据吴祥明主编的《磁浮列车》编写;其他内容则根据作者近年的研究成果及日本铁道综合研究所、德国蒂森磁悬浮高速列车有限公司 THYSSEN、日本航空、东京都交通局等有关单位和媒体的大量资料编撰而成,在此,一并对这些单位及专家表示深切的谢意!

作 者

2003年4月于北方交通大学

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 铁路分类.....	(1)
第二节 磁悬浮铁路分类.....	(4)
第三节 磁悬浮铁路的优势范围.....	(8)
第四节 环保型的超高速铁路.....	(13)
第五节 磁悬浮铁路的由来和发展.....	(17)
第六节 日本磁悬浮铁路技术的发展.....	(18)
第七节 德国磁悬浮铁路技术的发展.....	(22)
第八节 国外其他国家磁悬浮铁路研究情况.....	(24)
第九节 提高列车运行速度是中国铁路的当务之急.....	(27)
第二章 日本超导超高速磁悬浮铁路技术	(30)
第一节 日本磁悬浮铁路技术的发展过程.....	(30)
第二节 山梨试验线概况.....	(37)
第三节 基本原理.....	(42)
第四节 线、桥、隧、站设备及建筑物.....	(47)
第五节 车辆及列车编组.....	(54)
第六节 供电及控制.....	(63)
第七节 实用化试验内容与安排.....	(65)
第八节 实用化技术的具体试验.....	(69)
第九节 实用化技术评价.....	(77)
第十节 下一阶段试验及技术开发.....	(81)
第三章 日本磁悬浮中央新干线	(83)
第一节 线路和主要停车站方案.....	(83)
第二节 客运需求及铁路能力.....	(87)
第三节 项目总投资及经济评价.....	(91)
第四节 日本回廊型的交通网和通信网.....	(94)
第五节 中央新干线对社会、经济的影响.....	(97)
第六节 社会经济效益.....	(100)
第七节 磁悬浮铁路对相关企业的促进.....	(103)
第八节 超导技术的应用领域.....	(105)
第九节 日本 JR 型磁悬浮铁路发展规划.....	(109)
第四章 德国常导超高速磁悬浮铁路技术	(113)
第一节 概述.....	(113)
第二节 基本原理.....	(119)
第三节 列车与车辆.....	(122)

第四节	线路	(126)
第五节	供电与运行控制	(136)
第六节	安全性能	(139)
第七节	技术性能	(141)
第八节	环保性能	(144)
第九节	经济性能	(152)
第十节	埃姆斯兰试验线	(153)
第十一节	柏林至汉堡磁悬浮铁路	(155)
第十二节	采用 TR 技术的应用线规划	(159)
第十三节	德国、日本超高速磁悬浮铁路技术经济比较	(163)
第五章	上海磁浮示范线路	(170)
第一节	概述	(170)
第二节	线路设计	(175)
第三节	轨道结构	(182)
第四节	车站与维修基地	(189)
第六章	日本中低速磁悬浮 HSST 系统	(191)
第一节	概述	(191)
第二节	工作原理	(197)
第三节	HSST 试验线	(199)
第四节	车辆	(201)
第五节	轨道	(204)
第六节	供电系统	(205)
第七节	安全与救援措施	(206)
第八节	营业线建设规划	(207)
第九节	HSST 与 TR 系统的比较	(209)
第七章	我国磁悬浮铁路研究及发展	(213)
第一节	研究概况	(213)
第二节	中低速磁悬浮铁路研究与探索	(214)
第三节	我国拟建磁悬浮铁路线	(221)
第四节	新型磁浮交通方式的探索	(228)
第五节	走具有中国特色的磁悬浮铁路发展之路	(230)
参考文献		(235)

第一章 绪 论

在许多发达工业化国家里,陆上交通的无接触行车技术的特殊优点早就为人们所知。一些国家如英国、法国、意大利和美国,首先从事了气垫技术的研究,而德国、加拿大和日本一开始就重视磁浮技术。后来,这些国家中没有一个国家再继续研究气垫技术,而磁浮技术的研究却继续发展起来。

目前在磁悬浮铁路技术方面,主要有三种类型:日本的超导磁悬浮 ML、德国的常导磁悬浮运捷 TR 和日本航空的常导磁悬浮 HSST。本章主要介绍磁悬浮铁路的分类、地位、作用以及上述磁悬浮铁路的发展。为此先定义铁路的类型和磁悬浮铁路的类型。

第一节 铁路分类

日本 ML 和德国运捷 TR 属于超高速铁路。超高速铁路是相对于高速铁路而言的,是根据列车的最高运行速度决定的。根据列车的最高速度的不同,铁路可以划分为低速、快速、高速和超高速铁路等类型。

一、低速铁路

列车最高运行速度小于等于 120km/h 的铁路称为低速铁路,即指通常意义上的铁路,也称普速铁路、普通铁路、常速铁路或简称为铁路。这种铁路大部分为客货混线运输的铁路。目前世界上的绝大部分铁路都属于这种铁路。我国 I 级铁路原先的最高设计速度为 120km/h,即在铁路提速以前(20 世纪 90 年代之前),我国的铁路均属于低速铁路的范畴。

根据《铁路主要技术政策》的划分,低速铁路一般包括特别繁忙干线、繁忙干线、干线、支线及城际铁路。

1. 特别繁忙干线

在国家重要的交通运输大通道担当客货运输主力,在路网中起极重要的骨干作用,且客货行车量达到或超过 100 对的线路称为特别繁忙干线。

2. 繁忙干线

连接经济发达地区或经济大区,在路网中起重要的骨干作用,且客货行车量单线达到或超过 30 对和双线达到或超过 60 对的线路称为繁忙干线。

3. 干线

连接大中城市,在路网中起骨干作用,且客货行车量超过 15 对的线路称为干线。

4. 支线

连接中小城市,在路网中起辅助、联络作用,或为地区经济交通运输服务,或客货行车量不超过 15 对的线路称为支线。

5. 城际铁路

长度在 500km 以下、客货运输繁忙、相邻两大城市间的铁路称为城际铁路。

二、快速铁路

列车最高运行速度在 120~200km/h 之间的铁路称为快速铁路,其中以客运为主的铁路列车的最高运行速度不低于 160km/h。快速铁路有时也称中速铁路。我国铁路大提速的速度目标值大部分都是由低速铁路的速度范围提高到快速铁路的速度范围。目前我国的主要干线铁路已由低速铁路升级为快速铁路。未来的铁路大提速将在更大范围内将低速铁路改造为快速铁路。

原先曾经将列车最高运行速度在 160~200km/h 之间的铁路称为准高速铁路。我国的广深铁路曾经被称为广深准高速铁路。我国铁道部 2000 年颁布的《铁路主要技术政策》已将准高速铁路归为快速铁路。

三、高速铁路

一般将列车最高运行速度在 200~350km/h 之间的铁路称为高速铁路。关于高速铁路的最低速度值,目前国际上没有统一的标准。日本 1970 年在《全国新干线铁路整备法》中规定:在主要区间能以 200km/h 以上速度运行的干线铁道为新干线(即高速铁路)。在西欧,新建铁路的列车最高运行速度达到 250~300km/h,既有线达到 200km/h 的铁路称为高速铁路。联合国欧洲经济委员会 1985 年规定:新建客运专线列车最高运行速度达到 300km/h、客货混运铁路达到 250km/h 的铁路称为高速铁路。1986 年国际铁路联盟秘书长勃莱认为,列车最高运行速度至少达到 200km/h 的铁路才能称为高速铁路。目前国际上一般认为列车最高运行速度达到 200km/h 及以上的铁路才能称为高速铁路。我国《铁路主要技术政策》中规定,列车最高运行速度大于 200km/h 的铁路称为高速铁路。

世界上的第一条高速铁路是日本的东海道新干线,于 1964 年 10 月建成通车。1997 年世界上的高速铁路总里程为 4369km。

我国第一条客运专线——秦沈客运专线已于 2002 年底铺通并准备开始试运营,其最高运行速度为 200~250km/h,它实际上是一条高速铁路。

低速、快速、高速铁路有一个共同的特点:列车依靠轮轨接触方式驱动,即列车车轮紧贴着钢轨运行,钢轨为车辆提供支承、牵引及导向三大功能。

四、超高速铁路——磁悬浮铁路

为了与轮轨接触的高速铁路相区别,我们建议将列车最高运行速度超过 350km/h 的铁路称为超高速铁路。

目前一般认为轮轨接触型铁路的实用最高速度为 350km/h 左右,故欲使列车达到更高的运行速度,难以依靠传统的轮轨接触方式,而要依靠其他的牵引方式来降低列车运行阻力,尤其是轮轨摩擦阻力。为此国际上曾研制过气垫列车、磁悬浮列车等新型的铁路运输工具,但目前比较成熟的超高速铁路技术仍然为磁悬浮铁路技术。

磁悬浮铁路目前分为低速、中速磁悬浮和高速、超高速磁悬浮几种类型,列车最高运行速度超过 350km/h 的磁悬浮铁路称为超高速磁悬浮铁路。目前中美两国正在准备研制磁悬浮飞机,其最高运行速度为 500km/h。这种磁悬浮飞机也应该归入超高速磁悬浮铁路。

五、高速、超高速铁路的发展阶段

高速铁路和超高速铁路一般统称为高速铁路,可以将其按最高运行速度及其发展阶段进一步分类。考虑到将来的发展,高速及超高速铁路可以划分为五代。

1. 第一代

第一代属于高速铁路的范畴,列车的最高运行速度在 200~250km/h 之间。早期的高速铁路均属于第一代高速铁路。它采用传统的轮轨接触形式。这一代高速铁路的典型代表是世界上第一条高速铁路——日本的东海道新干线,1964 年 10 月 1 日建成通车,当时列车最高运行速度为 210km/h。我国即将投入运营的秦沈客运专线的最高运行速度为 200km/h,基础设施预留 250km/h 的条件,故该条铁路应属于第一代高速铁路。

2. 第二代

第二代也属于高速铁路的范畴,列车的最高运行速度在 250~350km/h 之间。它也采用传统的轮轨接触方式。目前新建的高速铁路大多属于该种类型。日本后来建设的北陆新干线(最高运行速度 260km/h)、法国的东南线(最高运行速度 270km/h)及大西洋线(最高运行速度 300km/h)、中国即将建设的京沪高速铁路(最高运行速度 300km/h)均属于第二代高速铁路。

3. 第三代

第三代属于超高速铁路的范畴,列车的最高运行速度在 350~550km/h 之间,主要依靠磁悬浮方式实现线路与列车之间的无接触运行。其主要特点是线路修建在地面上并且列车在普通的大气环境中运行。目前能实现这一运行速度的磁悬浮方式只有日本的 ML 方式(最高运行速度 500km/h)和德国的运捷(最高运行速度 440km/h)。我国于 2002 年 12 月开始试运行的上海磁浮示范线(最高运行速度 430km/h)也属于第三代高速铁路范畴。

4. 第四代

第四代属于超高速铁路范畴,主要特点是线路采用高架低真空管道形式。管道内保留 10%~20% 的空气,即将常温时的空气密度($1.2\text{kg}/\text{m}^3$)降为低真空密度($0.12\sim 0.24\text{kg}/\text{m}^3$)。列车最高运行速度可达 2000~3000km/h,大约为两倍音速的速度。目前这种交通方式只是处于前期构想阶段。在充分利用当代科技成果的基础上大力开展试验研究,估计 10 年以后,这种超高速铁路很可能成为现实。

5. 第五代

第五代也属于超高速铁路范畴,主要特点是线路采用地下真空管道磁悬浮形式。20 世纪 70 年代末,美国一家咨询公司设计了一种称为“行星号”的未来地下铁道,理论速度可达 22500km/h,纽约至洛杉矶只需半小时即可到达。这种超高速列车不但可以获得极高的运行速度,而且其运营费比普通铁路便宜 90%,比飞机便宜 95%。这是一种理想型、科幻型的超高速铁路。限于现代科技水平及经济方面的原因,这种超高速铁路目前还难以实现。

从上面的分代可以看出,将来高速、超高速铁路的发展方向是磁悬浮铁路。

第二节 磁悬浮铁路分类

上节所述的铁路分代,只是在高速、超高速铁路的速度范围内根据列车最高运行速度所划分的。其实,根据着眼点的不同,磁悬浮铁路可以划分为多种类型。

一、按应用范围划分

应用范围主要体现在线路长度、在路网中的作用、最高运行速度及所属管理部门等方面。据此磁悬浮铁路可以划分为干线磁悬浮、城际磁悬浮和城市磁悬浮。

1. 干线磁悬浮

这里的干线包括上一节中所述的特别繁忙干线、繁忙干线和干线,线路长度一般超过500km,在国家重要的交通运输大通道担当客运主力,连接经济发达地区、经济大区或大中城市,在路网中起重要的骨干作用。该铁路的最高运行速度一般要达到高速或超高速铁路的速度范围,一般归铁路部门或交通部门经营管理。

2. 城际磁悬浮

其线路长度在500km以下,连接客运繁忙的相邻两大城市。运行速度一般达到中高速铁路的速度范围,一般归铁路部门或交通部门经营管理。

3. 城市磁悬浮

其线路长度一般不超过100km,承担市内交通、机场内交通或机场与市区间交通的任务。由于运行距离较短,列车的运行速度一般是在中低速的速度范围内。一般归市政部门或民航部门管理。

二、按运行速度划分

根据第一节的铁路划分标准,按照列车的最高运行速度,磁悬浮铁路可以分为低速(常速)磁悬浮、中速磁悬浮、高速磁悬浮和超高速磁悬浮。目前一般不严格按照此标准来进行区分。一般将低速和中速磁悬浮统称为中低速磁悬浮,而将高速和超高速磁悬浮统称为高速磁悬浮。中低速磁悬浮主要适用于城市轨道交通(包括机场内交通),高速磁悬浮主要适用于干线和城际交通。

三、按导体材料划分

根据直线电机线圈绕组是否使用超导材料,磁悬浮铁路可以划分为超导磁悬浮和常导磁悬浮。

1. 超导磁悬浮

超导磁悬浮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。超导电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较大的悬浮高度和更快的运行速度。其缺点主要为,超导磁铁结构复杂,体积庞大,并且为了使超导绕组始终处于超导状态,在列车上还要配置制冷装置。日本的ML技术属于超导磁悬浮的范畴。

2. 常导磁悬浮

常导磁悬浮使用普通材料制成线圈绕组,采用普通导体通电励磁,产生电磁悬浮力和导向力。该种直线电机具有结构简单、养护维修方便等优点。其主要缺点是线圈绕组中电阻较大。因此该种直线电机的功率损失较大,并且线圈绕组容易发热,列车的运行速度也会受到一定的限制。德国的运捷 TR、日本的 HSST 及我国的大部分磁悬浮研究都属于常导磁悬浮的范畴。

四、按制冷剂及工作温度划分

超导磁悬浮铁路依靠制冷剂使超导绕组维持在超导状态。目前超导磁悬浮常用的制冷剂为液氮和液氦。根据两者工作温度的不同,磁悬浮铁路又可划分为高温超导磁悬浮和低温超导磁悬浮两类。

1. 高温超导磁悬浮

液氮的工作温度为 $77\text{K}(-196^{\circ}\text{C})$ 。采用适合于该工作温度的超导材料制作线圈绕组的磁悬浮称为高温超导磁悬浮,目前一般采用液氮作为高温超导线圈绕组制冷剂。我国西南交通大学研制出了高温超导磁悬浮系统,超导材料使用以钇(Y)为主的钇钡铜氧(YBaCuO)高温超导体块材。

值得注意的是,高温超导磁悬浮的工作温度未必是固定的。随着超导技术的发展,磁悬浮铁路所使用的高温超导工作温度可能会升高。将来也有可能使用常温超导磁悬浮材料。到那时还可能会出现常温超导磁悬浮铁路。

2. 低温超导磁悬浮

液氦的工作温度为 $4.2\text{K}(-269^{\circ}\text{C})$ 。采用适合于该工作温度的超导材料制作绕组并且采用液氦作为超导绕组制冷剂的磁悬浮称为低温超导磁悬浮,简称超导磁悬浮。日本的 ML 磁悬浮系统是低温超导磁悬浮系统,超导绕组使用铌钛(NbTi)合金制造。

五、按直线电机的定子长度划分

根据直线电机的定子长度的不同,直线电机可以划分为长定子直线电机和短定子直线电机。据此,磁悬浮也分为长定子直线电机磁悬浮和短定子直线电机磁悬浮。

1. 长定子直线电机

长定子直线电机的定子设置在轨道上,其定子绕组可以在轨道上无限长地铺设,故称为“长定子”。长定子磁悬浮一般采用导轨驱动技术,列车的运行速度和运行工况由地面控制中心直接控制。长定子直线电机通常用在高速及超高速磁悬浮铁路中,应用在干线及城际铁路领域。

2. 短定子直线电机

短定子直线电机的定子设置在车辆上。由于其长度受列车长度的限制,故称为“短定子”。短定子磁悬浮一般采用列车驱动技术,列车的运行速度和运行工况由司机直接控制。短定子直线电机通常用在中低速磁悬浮铁路中,用在城市轨道交通领域。

六、按直线电机的磁场是否同步划分

导轨磁场与车辆磁场可以同步运行,也可以是不同步运行。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(LSM)

LSM(Liner Synchronous Motor)直线电机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、超高速磁悬浮铁路一般使用该种长定子直线同步电机。该种电机技术复杂,一般用于长大干线交通或城际交通系统之中。德国的运捷 TR 和日本的 ML 系统均使用这种直线同步电机。

2. 直线感应电机(LIM)

LIM(Liner Induction Motor)直线电机的转子磁场与定子磁场不同步运行,故也称为直线异步电机。次级线圈(导轨侧)的磁场移动速度低于初级线圈磁场的移动速度。

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磁悬浮列车接触供电,不能实现车辆、线路之间完全无接触地运行,所以更适合中低速磁悬浮铁路使用,一般用于城市轨道交通。日本的 HSST 系统及目前我国自行研制的磁悬浮系统大部分使用这种直线感应电机。

七、按驱动方式划分

列车的运行工况(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,磁悬浮铁路可以划分为导轨驱动和列车驱动两种类型。

1. 导轨驱动磁悬浮

导轨驱动也称为路轨驱动。直线电机的初级线圈(定子线圈)设置在导轨上,采用长定子同步驱动技术。其列车的运行工况及运行速度由地面控制中心控制,列车司机不能直接控制。一般用于干线或城际交通。德国的运捷 TR 和日本的 ML 系统均使用这种导轨驱动技术。

2. 列车驱动磁悬浮

中低速磁悬浮直线电机的初级线圈(定子线圈)设置在车辆上,故这种磁悬浮铁路也称为列车驱动的磁悬浮铁路。其列车的运行工况及运行速度由列车司机控制。一般用于城市轨道交通。目前我国自行研制的磁悬浮系统大都使用这种列车驱动的技术。

八、按导轨结构形式划分

磁悬浮铁路所使用的导轨结构有多种形式。常用的有“T”形、“上”形、“U”形和“一”形导轨。

1. “T”形导轨

该种导轨梁的横断面为“T”形,见图 4-9、图 6-5。直线电机的驱动绕组及悬浮绕组均安装在导轨梁两侧翼的下方,导向绕组安装在两侧翼的外端。导轨梁直接安装在桥墩上。德国高速磁悬浮运捷和日本中低速 HSST 系统采用这种导轨结构形式,详见第四章、第六章的有关内容。

由于这种磁悬浮列车“抱”着导轨运行,故遇突发事件时的安全性更好一些,并且线路设计中的最小曲线半径也可以更小一些。但它对轨道梁的加工精度和列车的悬浮及导向

的控制要求很高。

2. “┘”形导轨

这种导轨结构类似于城市轨道交通中的跨座式独轨交通。日本在早期磁悬浮试验线曾经采用过这种结构形式,见第二章图 2-1、图 2-3、图 2-4。由于这种导轨的凸出部分侵占车辆的底部空间,影响车厢的载客率,所以目前一般不再采用这种导轨结构形式。

3. “U”形导轨

这种导轨梁的横断面为“U”形,列车在“U”形槽中运行,见图 2-23、图 2-24。地面的驱动、悬浮及导向绕组均安装在“U”形槽的内侧壁。这种导轨梁可以采用高架结构架设在桥墩上,也可以采用无碴轨道形式铺设在路基上。与“T”形导轨的要求相比,“U”形轨道梁的加工精度及对列车的悬浮控制、导向控制的要求较低,但对最小曲线半径的要求更高一些(即要求最小曲线半径更大一些)。日本的 ML 目前采用这种导轨结构形式,详见第二章。

4. “—”形导轨

这种导轨梁的横断面为“—”形,地面绕组均安装在导轨梁的正上方,车辆绕组均安装在车辆的正下方,列车在导轨梁上方运行,见图 7-9。这种导轨梁一般架设在桥墩上,采用高架结构,特点是结构简单,但导向功能稍差一些,因此主要适用于中低速磁悬浮。我国西南交通大学研制的“世纪号”高温超导磁悬浮采用这种导轨结构形式,详见第七章。

九、按悬浮方式分

按照将车辆悬浮起来的原理及方式不同,磁悬浮铁路可以划分为电磁悬浮、电动悬浮两种类型。

1. 电磁悬浮

电磁悬浮(EMS)也称磁吸式悬浮,一般采用“T”形导轨,车辆环抱导轨运行。导轨上的驱动、悬浮绕组安装在导轨侧翼底部,车辆上的驱动、悬浮绕组安装在车辆下翼的上缘,通过电磁作用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气隙一般为 8~12mm。列车通过控制悬浮磁铁的励磁电流来保证稳定的悬浮气隙。

德国的运捷 TR 系统(详见图 4-9)及日本的 HSST 系统(见图 6-5)均采用这种悬浮方式。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、次级线圈之间基本上可以形成闭合回路,磁场向外界扩散较少,电磁污染程度很低,磁场对人的影响可以忽略不计。

2. 电动悬浮

电动悬浮(EDS)也称为磁斥式磁悬浮。当列车运动时,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,地面绕组产生的磁场与车辆绕组产生的磁场同性相斥将车辆悬浮起来。电动悬浮的悬浮高度一般为 100~150mm。

与电磁悬浮相比,电动悬浮系统在静止时不能悬浮,必须达到一定的运行速度(120~150km/h)后才能起浮。电动悬浮系统在设计速度下,悬浮间隙较大,不需要进行主动控制。

电动悬浮可以采用“┘”形导轨,车辆跨在导轨上运行。日本早期的 ML 系统采用这种悬浮方式,见第二章图 2-1、图 2-3、图 2-4。磁斥式磁悬浮还可以采用另一种导轨

结构形式,即“一”形导轨。速度比较低的磁悬浮铁路可以采用这种悬浮方式。我国西南交通大学研制的高温超导磁悬浮采用这种悬浮方式,见第七章。

日本的 ML 系统采用磁吸、磁斥混合并且以磁斥式为主的悬浮系统。在“U”形导轨侧壁内侧的地面悬浮绕组产生上下极性不同的一组磁场,若车辆侧的磁场与地面侧的磁场相适应,则导轨侧壁的磁场会对车辆磁场产生上吸下斥的混合作用,使车辆悬浮起来。这种悬浮方式也可以称为混合式悬浮方式。

磁斥式磁悬浮由于采用磁铁同性相斥的原理,初、次极线圈所产生的磁场在直线电机内部不能闭合,故其电磁污染比磁吸式磁悬浮要大许多。

十、几种典型磁悬浮系统的分类特征

上面总结了磁悬浮铁路常见的几种分类方法。不可否认,从不同的角度考虑,还有其他多种分类方法。上面只是选择了几种与本书内容有关的分类方法进行介绍。

与上述的众多分类方法类似,由于磁悬浮铁路技术目前正处在蓬勃发展、百花齐放的阶段,目前在世界范围内也有众多形式的磁悬浮系统,将在本书后面几章陆续进行介绍。其中几种具有代表性的磁悬浮系统包括:

(1) ML:日本低温超导超高速磁悬浮系统,原理及技术详见第二章,中央新干线见第三章。

(2) TR:德国常导超高速磁悬浮系统,原理及技术详见第四章,上海磁浮示范线见第五章。

(3) HSST:日本中低速磁悬浮系统,详见第六章。

(4) 世纪号:中国高温超导中低速磁悬浮系统,详见第七章。

上述磁悬浮系统的分类特征见表 1-1。

表 1-1 几种典型磁悬浮系统的分类特征表

项 目	日本 ML	德国 TR	日本 HSST	中国世纪号
应用范围	干线、城际	干线、城际	城际、市内	市内
速度范围	超高速	超高速	中低速、高速	中低速
线圈导体	低温超导	常导	常导	高温超导
直线电机	长定子、同步	长定子、同步	短定子	短定子
驱动方式	导轨驱动	导轨驱动	列车驱动	列车驱动
悬浮方式	电动悬浮 EDS	电磁悬浮 EMS	磁吸式	磁斥式
导轨结构	“U”形	“T”形	“T”形	“一”形

第三节 磁悬浮铁路的优势范围

在当代客运交通系统中,高速公路、航空运输与铁路运输之间既互相配合又互相竞争,且都在迅猛发展。从综合交通运输系统角度考虑,每一种交通运输工具都有其优势范围。本节先介绍旅客总出行时间的概念,然后再讨论小汽车、铁路、飞机等交通运输方式尤其是磁悬浮铁路的速度优势范围和距离优势范围。