

北京物资学院学术文库

混合悬浮直线 电机运输系统的 原理与特性

**Principles and
Characteristics of
Hybrid Maglev Linear
Motor Transportation
System**

刘同娟◎著



对外经济贸易大学出版社

University of International Business and Economics Press

北京物资学院学术文库

北京物资学院学术专著出版基金资助

混合悬浮直线电机运输 系统的原理与特性

Principles and Characteristics of Hybrid
Maglev Linear Motor Transportation System

刘同娟 著

对外经济贸易大学出版社

中国·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

混合悬浮直线电机运输系统的原理与特性 / 刘同娟

著. —北京: 对外经济贸易大学出版社, 2010

(北京物资学院学术文库)

ISBN 978-7-81134-675-6

I. ①混… II. ①刘… III. ①磁浮铁路—研究 IV.

①U237

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 068173 号

© 2010 年 对外经济贸易大学出版社出版发行

版权所有 翻印必究

混合悬浮直线电机运输系统的原理与特性
Principles and Characteristics of Hybrid
Maglev Linear Motor Transportation System

刘同娟 著

责任编辑: 陈跃琴 赵 昕

对外经济贸易大学出版社

北京市朝阳区惠新东街 10 号 邮政编码: 100029

邮购电话: 010-64492338 发行部电话: 010-64492342

网址: <http://www.uibep.com> E-mail: uibep@126.com

唐山市润丰印务有限公司印装 新华书店北京发行所发行

成品尺寸: 170mm × 230mm 14 印张 237 千字

2010 年 6 月北京第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81134-675-6

定价: 21.00 元

前言

随着上海浦东国际机场——上海地铁2号线龙阳站的第一条商业化运营的磁悬浮示范线在上海的成功运行，人们对磁悬浮列车日趋关注。上海磁悬浮示范线采用的是德国的 Transrapid 磁悬浮系统，它是典型的电磁式系统(EMS)。在这种磁悬浮系统中，由于磁极的励磁电流随悬浮气隙的增加而迅速增大，因此悬浮气隙不可能太大，一般为10mm左右，这就对轨道梁的制造和安装精度提出了很高的要求。而且这种系统在稳定悬浮时，流过悬浮磁极的电流较大，使得悬浮磁极的功耗也很大。而电磁永磁混合悬浮直线电机运输系统可借助永磁体来产生大部分的悬浮力，从而减少悬浮系统的功耗，显著降低悬浮电源的容量，并且悬浮气隙可以适当增加，使得整个系统更加安全，轨道梁的造价也将下降。随着永磁体磁性能的提高和制造工艺的进一步完善，采用混合悬浮直线电机运输系统成为解决传统EMS磁悬浮系统悬浮功耗问题的非常具有竞争力的方案。本书主要对混合悬浮系统不同永磁体厚度的动态特性进行了研究，并对不同永磁体厚度的悬浮系统动态特性进行了实验验证，为优化混合悬浮系统的设计和控制提供了理论依据。

书中采用的电磁永磁混合悬浮系统是直线电机的一种。直线电机，是一种将电能直接转换成直线运动机械能而不需要通过中间任何转换装置的新型电机，它具有系统结构简单、磨损少、噪音低、组合性强、维护方便等优点。直线电机驱动系统与传统的“旋转电动机+滚珠丝杠”驱动方式相比，消除了机械传动链所带来的一些不良影响，极大地提高了系统的快速反应能力和运动精度。目前在国外已经被广泛应用于物流传输系统，如邮政分拣系统、机场行李传送线、物流推挂系统、立体库驱动系统等。本书对直线电机应用到物流传输系统有一定的研究价值，如果能将直线电机在物流传输系统中推广使用，必将带来良好的经济效益和社会效益。

全书共分为9章，其中第一章为导论，简单介绍了磁悬浮列车的发展概况和电磁永磁混合悬浮的优点；第二章为MATLAB仿真基础，介绍了

MATLAB 的数值运算、程序设计和 Simulink 仿真基础；第三章为 DSP 原理，简单介绍了 DSP 相关知识；第四章为混合悬浮模型的结构及参数，简单介绍了系统的结构和系统参数；第五章为混合悬浮系统的工作原理，介绍了混合悬浮系统的悬浮原理、特性曲线和仿真模型等；第六章为混合悬浮系统的状态反馈控制，介绍了状态反馈控制策略及线性系统动态特性的性能指标；第七章为混合悬浮系统的模糊控制，介绍了模糊控制的定义、模糊控制器的基本原理以及模糊 PID 控制器等；第八章为悬浮系统的硬件和软件实现；第九章为混合悬浮系统的动态特性实验。

本书在编写过程中还得到了北京物资学院科研处及信息学院领导、同事的热情支持，在此表示感谢。

本书还得到了对外经济贸易大学出版社的大力支持，在此也要特别感谢本书的责任编辑为本书的编辑工作提供了多方面的帮助，并为本书的早日出版竭尽了全力。

本书在编写的过程中，参考了大量的资料和文献，由于篇幅所限，没有全部列入参考文献，在此对这些资料的作者深表谢意。

由于编写时间仓促，加之作者水平有限，书中难免有错漏之处，恳请读者批评指正。

编者

2010 年 3 月

Preface

The levitation air-air gap of the electromagnetic suspension (EMS) system is only about 10mm because exciting current of magnetic poles increases along with the increasing of levitation air-air gap, which requires very high making and fixing precision of the track and causes the high cost to the long distance Maglev line. Another disadvantage of this kind of EMS system is that the magnets consume too much energy. So the auxiliary power rail must be constructed along the track. Also batteries of large capacity are needed onboard. But, the controlled-PM maglev system can generate a majority of levitation force by using permanent magnets. Thus, the power consumption of system and the capacity of the batteries are decreased greatly. At the same time, the levitation air-air gap can increase properly and the cost of the track can decrease evidently. With the permanent magnet magnetic energy to enhance and further improve the manufacturing process, using mixed suspension linear motor transportation system has become a traditional EMS maglev system to solve the problem of suspended power consumption very competitive program. Base on this, in this book, according to characteristic of the hybrid maglev system, its mathematic model is built. At the same time, the dynamic characteristic of the whole control systems with different length permanent magnets are simulated and studied In order to provide a theoretical basis for the design of hybrid and control of suspension system.

The hybrid maglev system used in this book is a kind of linear motor. Linear motor is a kind of novel motor which can directly convert electrical energy into mechanical energy of linear motion without the need for any middle conversion device. It has simple structure, low wear, low noise, combined with strong, convenient maintenance and so on. Linear motor drive system by eliminating a number of adverse effects caused by mechanical transmission chain and Greatly

increase the system's rapid response capability and motion accuracy. Now in foreign countries it has been widely used in logistics transmission system such as postal sorting systems, airport baggage conveyor line, the logistics push the hanging system, three-dimensional database-driven system, etc. This book has a certain research value of the linear induction motor applied to the logistics transmission system. It must bring good economic and social benefits if linear motors are widely used in the logistics transmission system.

The book is divided into nine chapters. Chapter 1 is introduction which describes the development of maglev train and the advantages of hybrid maglev system simply. Chapter 2 is the foundation of MATLAB which describes the numerical computation and programming and graphics processing of MATLAB. Chapter 3 is principles of DSP which describes the knowledge of DSP. Chapter 4 describes the structure and parameters of the hybrid maglev model. Chapter 5 describes the principle and the character curves and simulation model of the hybrid maglev system. Chapter 6 describes state feedback control strategy and dynamic characteristics of linear systems. Chapter 7 describes the fuzzy control of this system. Chapter 8 describes the hardware and software realization of this system. Chapter 9 describes the dynamic experiment of this system.

I thank Beijing Wuzi University Research Office's leadership and Information Institute's leadership and my colleagues because of their support during the cause of writing this book.

I also thank the press for support and thank the editor of this book because of his help.

Large amount of information and documentation are referenced during the course of writing this book. Because of the lack of space, they do not have all been included in the Reference. I give deeply grateful to these authors.

The book is hard to avoid mistakes because preparation time is so short and the author have the limited capacity. I hope the readers to give criticism correction.

目 录

第一章 导论	(1)
第一节 直线电机	(3)
第二节 磁悬浮列车的发展概况	(5)
第三节 混合悬浮方式的优点和研究状况	(18)
第四节 本书研究内容和主要创新点	(20)
第五节 展望	(21)
第六节 本章小结	(21)
第二章 MATLAB 仿真基础	(23)
第一节 MATLAB 概述	(25)
第二节 MATLAB 数值运算	(27)
第三节 MATLAB 程序设计	(32)
第四节 Simulink 基础	(38)
第五节 本章小结	(45)
第三章 DSP 原理	(47)
第一节 DSP 简单介绍	(49)
第二节 DSP 控制内核	(56)
第三节 DSP 软件开发工具平台	(64)
第四节 本章小结	(78)
第四章 混合悬浮模型的结构及参数	(79)
第一节 系统的结构	(81)
第二节 系统的参数	(86)
第三节 本章小结	(86)

第五章 混合悬浮系统的工作原理	(87)
第一节 悬浮系统的电气时间常数	(89)
第二节 混合悬浮系统的悬浮原理	(95)
第三节 混合悬浮磁极的特性曲线	(98)
第四节 混合悬浮磁极的仿真模型	(103)
第五节 混合悬浮磁极的线性化方程	(106)
第六节 磁悬浮模型车四点悬浮耦合问题的解决方案	(110)
第七节 本章小结	(114)
第六章 混合悬浮系统的状态反馈控制	(115)
第一节 悬浮系统控制策略的特点及研究状况	(117)
第二节 状态反馈控制	(118)
第三节 线性系统动态特性的性能指标	(121)
第四节 混合悬浮系统的动态响应	(125)
第五节 最优控制	(135)
第六节 本章小结	(137)
第七章 混合悬浮系统的模糊控制	(139)
第一节 模糊理论的起源	(141)
第二节 模糊集合	(142)
第三节 模糊控制器的基本原理	(158)
第四节 模糊 PID 控制器	(163)
第五节 模糊 PID 控制器在 EMS 磁悬浮系统中的应用	(165)
第六节 状态反馈内嵌模糊 PD 的混合模糊控制方案	(167)
第七节 混合模糊控制器的计算机仿真与实验结果	(170)
第八节 本章小结	(174)
第八章 悬浮系统的硬件和软件实现	(175)
第一节 悬浮控制及悬浮斩波器	(177)
第二节 TMS320LF2407A 开发系统	(181)
第三节 悬浮控制器	(184)
第四节 系统软件设计	(190)

第五节 本章小结	(193)
第九章 混合悬浮系统的动态特性实验	(195)
第一节 可控永磁悬浮系统的磁场测量	(197)
第二节 实验结果分析	(199)
第三节 本章小结	(204)
第十章 研究结论及展望	(205)
参考文献	(209)

第一章 ●

导 论

第一节 直线电机

一、概述

现实生活中许多直线驱动装置或系统都是采用旋转电动机通过中间转换装置（例如链条、钢丝绳、传动带、齿条或丝杆等机构）转换为直线运动的。由于这些装置或系统有中间传动机构，所以整机存在着体积大、效率低、精度低等问题。

直线电机是国外近年来发展起来的一种新型电机。与旋转电机相比，它不需要中间转换装置，能把电能直接转变为作直线运动的机械能。它是 20 世纪下半叶电工领域中出现的具有新原理、新理论的新技术。它所具有的突出优势，已越来越引起人们的重视，不久的将来，它将像微电子技术和计算机技术一样，在人类生产、生活的各个领域中得到广泛的应用。

直线电机的结构可以根据需要制成扁平型、圆筒型或盘型等各种形式。它可以采用交流电源、直流电源或脉冲电源等各种电源进行工作。直线电机可以在几秒钟内把一架几千千克重的直升飞机拉到每小时几百千米的速度，在真空中运行时，其速度可达上万千米。在军事上，人们利用它制成各种电磁炮，并试图将它用于导弹、火箭的发射；在交通运输业中，人们利用直线电机制成了时速达 500km/h 以上的磁悬浮列车；在工业领域，直线电机被用于直线输送线，以及各种横向或垂直运动的一些机械设备中。直线电机除具有高速、大推力的特点以外，还具有低速、精细等另一些特点，例如，步进直线电动机，它可以做到步距为 $1\mu\text{m}$ 的精度。因此，直线电机又被应用到许多精密的仪器设备中，如计算机的磁盘驱动装置、照相机的快门、自动绘图仪、医疗仪器、航天航空仪器、各种自动化仪器设备等。除此之外，直线电机还被用于各种各样的民用装置中，如门、窗、桌、椅的移动，门锁、电动窗帘的开闭等。

综上所述，直线电机可广泛地应用于工业、民用、军事及其他各种直线运动的场合。与其他非直线电机驱动的装置相比，采用直线电机驱动的装置

具有以下一些优点：

(1) 采用直线电机驱动的传动装置，不需要任何转换装置而直接产生推力，因此，它可以省去中间转换机构，简化了整个装置或系统，保证了运行的可靠性，提高了传递效率，降低了制造成本，易于维护。

(2) 普通旋转电机由于受到离心力的作用，其圆周速度受到限制；而直线电机运行时，它的零部件和传动装置不像旋转电机那样受到离心力的作用，因而它的直线速度可以不受限制。

(3) 直线电机是通过电能直接产生直线电磁推力的，在驱动装置中，其运动可以无机械接触，使传动零部件无磨损，从而大大减少了机械损耗，例如直线电机驱动的磁悬浮列车就是如此。

(4) 旋转电机通过钢绳、齿条、传动带等转换机构转换成直线运动，这些转换机构在运行中，其噪声是不可避免的；而直线电机是靠电磁推力驱动装置运行的，故整个装置或系统的噪声很小或无噪声，运行环境好。

(5) 由于直线电机结构简单，且它的初次级铁心在嵌线后可以用环氧树脂等密封成整体，所以可以在一些特殊场合中应用，例如可在潮湿环境甚至水中使用，可在腐蚀性气体或有毒、有害气体中应用，亦可在几千度的高温下或零下几百度的低温下使用。

(6) 由于直线电机结构简单，其散热效果也较好，特别是常用的扁平型短初级直线电机，初级的铁心和绕组端部，直接曝露在空气中，同时次级很长，具有很大的散热面，热量很容易散发掉，所以这一类直线电机的热负荷可以取得较高，并且不需要附加冷却装置。

二、工作原理

通常，电动机是旋转型的。定子包围着圆筒形的转子，定子形成磁场，在转子中流过电流，使转子产生旋转力矩。而直线电机则是将两个圆筒形部件展开成平板状，面对面，定子在相应于转子移动的长度方向上延长，转子通过一定的方式被支承起来，并保持稳定，形成转子和定子之间的空隙。图 1.1 所示的 (a) 和 (b) 分别表示了一台旋转电机和一台直线电机。

直流电机、感应电机、同步电机等都可做成直线电机，但是，直流电机在结构上无法做成无整流子型，所以，直线电机一般为感应电动机和同步电动机。这些交流电动机的 1 次侧有作为定子侧的，也有作为转子侧即移动体

侧的。例如，超导磁悬浮中，同步电动机的定子（地上）是 1 次侧，旋转磁场在地上移动；而地铁的直线电机，感应电动机的旋转磁场装在车上，2 次侧固定在地上。前者的空隙靠左右导向线圈保持，而后者靠车轮保持。

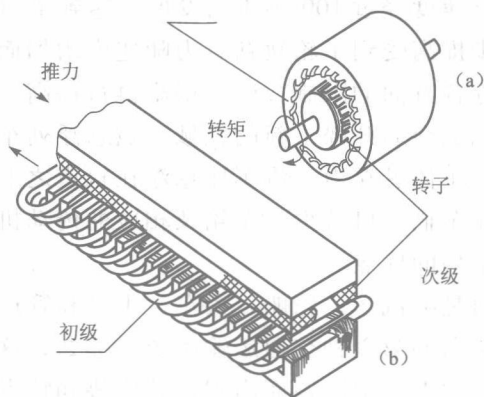


图 1.1 旋转电机和直线电机示意图

(a) 旋转电机；(b) 直线电机

产生推进力的原理与电动机产生力矩的原理一样，在直线电机地铁中，安装在转向架上的直线电动机沿前进方向产生移动磁场。让面对该磁场、安装在地上的反作用板（相当于 2 次线圈）中通过 2 次电流（涡电流），由这个 2 次电流切割磁场产生的力作为反作用力，安装在转向架上的直线电动机得到推进力。

直线电机的基本缺点是很难将定子与转子空隙做成像旋转式电机那么小，旋转式是无限循环的，而直线电动机是有端头的。为此，泄漏磁通多，电气-机械能量转换的效率低，如果要得到相同的输出，逆变器的容量需要比旋转式大。

第二节 磁悬浮列车的发展概况

一、背景介绍

整个人类客运交通发展的历史是一个速度不断提高的历史。每一种新型交通工具的出现和重大技术的突破都伴随着速度的显著提高，20 世纪在这

方面尤为突出。飞机、汽车与火车均在不断刷新其速度的记录,高速磁悬浮列车的发展尤为令人瞩目。由于磁悬浮列车的高速、安全、噪音小等特点,世界上很多国家都在进行磁悬浮列车的研究。

传统铁路的运行速度经过 100 多年的发展,达到了 $300\text{km/h} \sim 350\text{km/h}$, 然而其速度的进一步提高受到了轮轨粘着力随速度增加而降低、高速时的阻力增加及机械磨损等各方面的限制,已经很难再行提高。磁悬浮高速铁路的发展,为地面高速轨道交通开辟了新的领域。磁悬浮列车是利用电磁吸引力或者电磁排斥力产生车体悬浮力,将车体悬浮在轨道之上,这样它彻底甩掉了几千年来地面运输车辆不可缺少的车轮及相应的传动机构,与轨道没有机械接触,带来了一系列的优点。

高速磁悬浮交通是继汽车、轮船、火车、飞机和管道运输之后,填补火车和飞机之间速度空白的第六种交通运输系统。那么,这第六种交通方式何以在前五种交通工具的夹缝中脱颖而出呢,其优势和特点何在呢?

首先是安全,这是交通的首要问题。磁悬浮系统构造特征使其不会脱轨;列车运行的控制和安全防护技术可避免追尾和对撞。

第二是高速。高速磁悬浮列车采用无接触的悬浮技术,它克服了车辆与轨道之间的接触和磨损,使列车的速度提升有了质的飞跃。磁悬浮系统最高速度在 500km/h 以上,是商业运行的速度最高的地面交通工具。

第三是舒适。由于车辆为无接触运行、具有良好的悬挂减震系统,且导向控制技术非常合理,能保证乘客的舒适性和平稳性。同时列车的高速运行,缩短了时空距离,使得中长距离旅行的乘客感觉不到疲劳,根据实测,上海磁悬浮列车示范线的测量结果达到了 ISO (International Organization for Standardization) 舒适度的最高等级。

第四是选线灵活。磁悬浮列车允许的曲线半径比较小,列车可与高速公路平行运行;爬坡能力也很强,最大可达 10%,使得选线更为灵活,可以较好地适应地形的变化,沿已有交通走廊选线。

此外,磁悬浮系统固有节能和环保的特点。在同一速度下,它比飞机和火车均节省能耗;噪音比其他陆上交通工具低。

为了说明磁悬浮列车的优越性,现对各种高速运输系统做一个综合比较,不同客运方式的技术经济指标列于表 1.1 中。

表 1.1 高速运输系统综合比较

项目 \ 内容 \ 类型	高速公路	民用航空	高速铁路	磁悬浮
最高时速 (km/h)	160	1 200	380	558
平均占用土地 (市亩/公里)	122		30	15
运量	中	小	大	大
安全性	易出事故	好	较好	好
一次能源能耗 (瓦小时/人·公里)	320 (160km/h)	770 (1 000km/h)	300 (184km/h)	157 (400m/h)
噪音 (分贝)	100km/h	76	72	67
	250km/h		88	78
建造成本 (万美元/公里)	375		215 ~ 232	416 ~ 464
风景观光	较方便	差	较好	较好

二、磁悬浮列车的分类

磁悬浮列车是利用电磁力来支承车体，使车辆本身与轨道之间无机械接触，并采用直线电机直接驱动的轨道交通工具。

在磁悬浮列车中，可以利用磁吸引力也可以利用磁排斥力使车体悬浮。可能采用的磁悬浮方案类型有多种，表 1.2 中列出了磁悬浮的原理分类，并用图表示了与表 1.2 相对应的磁悬浮力的部分产生方式，如图 1.2 ~ 图 1.9 所示。

(1) 第一种磁悬浮方式：即表 1.2 中序号①和图 1.2 所代表的方式，这是利用高温超导体和永磁体之间的排斥力来产生磁悬浮。这样的实例包括高温超导磁悬浮轴承和超导排斥式磁悬浮轴承。

(2) 第二种磁悬浮方式：即表中序号②和图 1.3 所代表的方式，利用了永磁体对强导磁体（如铁磁材料）产生的吸引力来实现磁悬浮。实例如