

Yongci Zhixian Tongbu Dianji Jianmo Texing Fenxi Ji Tuili Kongzhi

永磁直线同步电机 建模、特性分析及推力控制

司纪凯 王海星 许孝卓 封海潮 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

永磁直线同步电机建模、 特性分析及推力控制

司纪凯 王海星 许孝卓 封海潮 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书总结了国内外永磁直线同步电机的分类、应用情况、理论研究方法及控制方法,阐述了磁场建模、磁阻力分析及优化、运行特性、制动特性及直接推力控制等内容,提出了解析—有限元混合法求解 PMLSM 磁场,采用有限元法结合间接法分析 SPPMLSM 磁阻力的端部分量特性,得到磁阻力受电机结构参数的影响和变化规律;分析了 SPWM 逆变器供电下 SPPMLSM 的稳态和动态特性,以及稳态速度特性振荡的原因;建立了以非线性磁链为状态变量的 DPPMLSM 状态方程,对各种制动运行工况进行模拟,找出了外接电阻与 DPPMLDM 失电保护制动性能的关系;推导了 PMLSM 直接推力控制系统的数学模型,建立了基于空间矢量调制技术的 PMLSM 直接推力控制仿真系统,提出一种新的磁链动态补偿器,降低推力波动;最后,搭建了实验及测试系统,对 PMLSM 电磁特性及控制策略进行实验验证。

本书适于电气工程领域的教师、研究生、本科高年级学生和研究人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

永磁直线同步电机建模、特性分析及推力控制 / 司纪凯等著. — 徐州:中国矿业大学出版社,2014.3

ISBN 978 - 7 - 5646 -2284 - 8

I. ①永… II. ①司… III. ①永磁同步电机—研究
IV. ①TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第041593号

书 名 永磁直线同步电机建模、特性分析及推力控制

著 者 司纪凯 王海星 许孝卓 封海潮

责任编辑 何 戈

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 16 字数 305 千字

版次印次 2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

旋转运动和直线运动是两种最基本的运动形式。1831年世界上出现了第一台旋转电机,旋转电机传动方式是通过中间转换装置将旋转运动变换为直线运动。1845年英国人 Wheatstone 研制出了世界上第一台直线电机,成为实现电能和直线运动形式的机械能直接转换的机电设备。与旋转电机相比,直线电机及其驱动系统结构简单,反应速度快,加之在某些场合旋转电机不能替代的作用,其研发一直受到重视。永磁直线同步电机(PMLSM)不仅具有永磁电机高效节能的特点,还具有直线电机结构简单、可靠性强、传递效率高、制造成本低、机械损耗小、速度不受限制、时间常数小、响应快、控制比较容易等一系列优点。在相同的有效体积下,钕铁硼永磁体的最大磁能积比电励磁的大 5.8 倍,仅次于超导励磁。钕铁硼永磁体的剩磁和矫顽力均很高,具有线性去磁特性,其去磁曲线与回复曲线基本重合,内禀矫顽力高,内禀特性硬,抗去磁能力强,热稳定性能好。钕铁硼永磁材料具有优异的性能及较高的性价比,使其在永磁直线同步电机中得到广泛应用和较大发展。随着电力电子技术、微电子技术的迅猛发展,开关阵列构成的正弦脉宽调制的电压源逆变器(SPWM—VI)与高效节能、结构简单、可靠性强、推力密度大的永磁直线同步电机为一体的系统受到广大学者的青睐。对电压源逆变器供电 PMLSM 运行特性和控制开展研究具有重要意义。

本书总结了国内外永磁直线同步电机的分类、应用情况、理论研究方法及控制方法等。以电压源逆变器(SPWM—VI)供电的单初级 PMLSM(SPPMLSM)驱动的水平运输系统与不连续初级 PMLSM(DPPMLSM)驱动的垂直无绳运输系统为对象,阐述了磁场建模、磁阻力分析及优化、运行特性、制动特性及直接推力控制等内容。研究结果为永磁直线电机的应用提供了理论基础。本书共 9 章:第 1 章主要阐述了永磁直线电机的发展历史和应用现状,以及主要研究方法;第 2 章论述了解析—有限元混合法求解 PMLSM 磁场;第 3 章采用有限元法结合间接法分析 SPPMLSM 磁阻力的端部分量特性,得到磁阻力受电机结构参数的影响和变化规律;第 4 章采用谐波分析法建立 SPWM—VI 数学模型;第 5 章分析了 SPWM 逆变器供电下 SPPMLSM 的稳态和动态特性,以及稳态速度特性振荡的原因;第 6 章建立了以非线性磁链为状态变量的 DPPMLSM 状态方程,对上行电动、下行反接发电回馈制动等各种制动运行工况进行模拟,仿真数据与试验结果吻合,深入分析了 DPPMLSM 垂直提升系统的失电保护过程,找

出了外接电阻与 DPPMLSM 失电保护制动性能的关系;第 7 章给出了 PMLSM 直接推力控制系统的数学模型,建立了基于空间矢量调制技术(SVPWM)的 PMLSM 直接推力控制仿真系统;第 8 章论述了一种新的磁链动态补偿器的设计;第 9 章搭建了实验及测试系统,对 PMLSM 电磁特性及控制策略进行实验验证。

本书由河南理工大学电气工程与自动化学院的司纪凯著第 6、第 7 章,王海星著第 5、第 8、第 9 章,许孝卓著第 2、第 3 章,封海潮著第 1、第 4 章。本书在写作过程中得到电气工程与自动化学院领导的大力支持,得到了上官璇峰教授、汪旭东教授等诸位同事的指导,在此表示感谢。

本书及相关研究工作得到如下基金资助:(1) 国家自然科学基金项目:两自由度直驱实心转子感应电机研究(51277054);(2) 国家自然科学基金项目:永磁直线电机多轿厢无绳提升系统动态性能分析及其控制(61074095);(3) 教育部博士点专项基金项目:多自由度直线弧形电机基础理论研究(20104116120001);(4) 焦作市科技攻关重点项目:一种新型转子永磁电机关键技术研究。感谢上述研究基金的资助,谨以本书献给资助本书相关研究的上述基金资助单位。

本书由河南理工大学袁世鹰教授主审,他通读了全部书稿,提出了许多宝贵意见。

本书在写作过程中参考了大量的文献资料,对所引用的文献尽力在书后的参考文献中列出,但是难免有所遗漏,特别是一些被反复引用很难查实原始出处的参考文献,在此向被遗漏参考文献的作者表示歉意,并向本书所引用的参考文献的作者表示诚挚的谢意。

由于时间仓促,加上作者水平有限,不足及疏漏之处在所难免,有待进一步充实与更新,恳请读者不吝赐教。

作 者

2013 年 12 月于河南理工大学

目 录

1 绪论	1
1.1 直线电机理论与应用历史	1
1.2 PMLSM 的分类	4
1.3 PMLSM 应用现状	5
1.4 PMLSM 磁场的研究方法	10
1.5 电压源逆变器—电机特性研究现状	16
1.6 直线电机控制研究现状	19
2 永磁直线同步电动机的磁场分析	24
2.1 引言	24
2.2 气隙磁导法分析 PMLSM 的开路磁场	24
2.3 解析数值混合法分析 DPPMLSM 磁场	29
2.4 样机磁场计算	39
2.5 本章小结	43
3 永磁直线同步电动机的磁阻力分析	44
3.1 引言	44
3.2 SPPMLSM 磁阻力分析	46
3.3 PMLSM 出入端磁阻力齿槽分量分析	59
3.4 DPPMLSM 磁阻力的端部分量分析	64
3.5 本章小结	71
4 SPWM—VI—SPPMLSM 的非线性建模	73
4.1 引言	73
4.2 逆变器的数学模型	75
4.3 SPWM—VI—SPPMLSM 的场路耦合方程	78
4.4 PMLSM 空载电势计算	90
4.5 基于非线性磁链的 SPWM—VI—PMLSM 状态相量次初级完全 耦合模型	91

4.6	基于非线性磁链的 SPWM—VI—SPPMLSM 状态相量次初级非完全耦合模型	95
4.7	本章小结	99
5	SPWM—VI—SPPMLSM 特性研究	100
5.1	引言	100
5.2	PMLSM 稳态特性分析	100
5.3	PMLSM 动态特性分析	117
5.4	本章小结	126
6	SPWM—VI—DPPMLSM 模型及特性研究	127
6.1	引言	127
6.2	DPPMLSM 非线性状态模型建立	129
6.3	DPPMLSM 的稳态特性仿真	132
6.4	DPPMLSM 的稳态特性试验结果	137
6.5	DPPMLSM 提升系统失电保护分析	140
6.6	结果分析	142
6.7	外串电阻对 DPPMLSM 发电制动性能的影响仿真	145
6.8	本章小结	155
7	PMLSM 驱动系统的直接推力控制建模	157
7.1	引言	157
7.2	电机转矩统一公式	158
7.3	PMSLM 的坐标系及其坐标变换	159
7.4	PMLSM 在各坐标系下的数学模型	161
7.5	PMLSM DFC 的基本思想	167
7.6	PMLSM DFC 的实现方法	167
7.7	PMLSM DFC 仿真系统	175
7.8	仿真结果	182
7.9	实验结果	190
7.10	本章小结	192
8	SPWM 直接推力控制策略	193
8.1	引言	193

8.2	基于 SVPWM 的直接推力控制策略	194
8.3	磁链动态补偿器设计	199
8.4	基于磁链动态补偿的 SVPWM—DFC 系统总体仿真模型	204
8.5	仿真结果	207
8.6	实验结果	213
8.7	影响 PMLSM DFC 推力波动的其他因素	219
8.8	本章小结	221
9	PMLSM 试验系统	222
9.1	引言	222
9.2	SPPMLSM 驱动的水平运输系统装置	223
9.3	DPPMLSM 驱动的垂直运输系统装置	228
9.4	PMLSM 空载电势测量	231
9.5	直接推力实验	231
	参考文献	234

1 绪论

1.1 直线电机理论与应用历史

旋转运动和直线运动是两种最基本的运动形式。1831年世界上出现了第一台旋转电机,旋转电机传动方式是通过中间转换装置将旋转运动变换为直线运动。1845年英国人 Wheatstone 研制出了世界上第一台直线电机(linear machine, 简称 LM),成为实现电能和直线运动形式的机械能直接转换的机电设备。与旋转电机相比,直线电机及其驱动系统结构简单,反应速度快,加之在某些场合旋转电机不能替代的作用,其研发一直受到重视。

国际上日本、俄罗斯、美国、法国、德国、英国等国家先于我国开展直线电机的研究工作。1890年美国匹兹堡市首次发表了关于直线感应电机(linear induction machine, 简称 LIM)的专利。1895年 Weaver Jacquard 电梭子公司申请了将直线电机用作织布机梭子驱动装置的专利。1952年,美国研制成功钾钠电磁泵。1954年英国皇家飞机制造公司研制了双边型直线电机驱动的导弹发射装置。1973年当时的西德开始研发 M—Bahn 运输系统试验装置,采用定子为长初级的直线同步电机驱动,车身质量 17 800 kg,长 12 m,宽 2.3 m,气隙范围 15~25 mm,额定载客量 80 人。1979年,日本建成长 7.5 km,时速高达 530 km/h 的宫崎磁悬浮铁道试验线。1984年英国建成直线感应电机驱动的磁悬浮运输线,并实现了公共营运。加拿大城市运输发展公司(UTDC)研发出直线感应电机驱动的列车,具有较高的加速度。在北美这样的系统还有: Scarborough(Toronto Greater Metro, 1985)、Vancouver(Bennett, 1985)和 Detroit(Emmott, 1987)等。20世纪90年代初,日本建成 48.2 km 的超导磁悬浮铁道试验线。1995年,德国建成预算高达近百亿马克的柏林—汉堡磁悬浮列车商用线,全长 286 km,时速达 420 km/h。我国引进德国技术,在上海建成自龙阳路到浦东国际机场行程 30 km、运行时间仅为 8 min 的磁悬浮客运线,并于 2002年10月正式投入营运。

20世纪80年代以来,随着永磁材料(尤其是钕铁硼材料)的性价比提高,以及电力电子器件制造技术和数字信号处理技术的提高,永磁交流电动机的研发经验逐步成熟,应用也逐步扩大到航空航天、国防、工农业生产和日常生活等各

个领域。

永磁直线同步电动机(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor,简称PMLSM)既具有永磁电机高效节能的优点,也具有直线电机的诸多优点。近年来,国外很多研究机构和公司研发出了众多将PMLSM作为动力源的高新技术产品。

在数控机床和运输设备方面,日本的日立、三井精机、三菱、东芝,德国的西门子、Ex-cell-o,美国的Kollmorgen等公司都开发了一系列用PMLSM驱动的产品。Kollmorgen公司生产的无铁芯型PMLSM,不产生齿槽力,实现低速平滑运行(速度低于 $1\mu\text{m/s}$);铁芯型PMLSM的推力高达 $8\,000\text{ N}$ 。Ingersoll公司生产的高速精密机床用PMLSM,最大速度 200 m/min ,最大推力 $6\,600\text{ N}$,最大位移 504 mm 。日本FANUC公司生产的PMLSM最高移动速度达 $120\sim 240\text{ m/min}$,最大推力达 $1\,500\sim 9\,000\text{ N}$ ^[1,2]。

在军事应用方面,2003年美国研制成功推力超过 2 MN 的PMLSM航空母舰飞机推进器,飞机起飞时,在 95 m 的距离和 1.84 s 的时间内起飞速度可加速至 103 m/s ,加速度高达 56 m/s^2 ;飞机降落时, 0.112 s 内飞机速度从 103 m/s 降到 0 ,减速度为 920 m/s^2 ,减速距离为 5.79 m 。该研究小组得出结论,采用PMLSM比采用直线感应电动机更有效。起飞时间的缩短,意味着可增加单位时间内飞机起飞的架数,这在军事上非常有意义^[1,2]。日本进行了PMLSM驱动的火箭发射装置可行性研究,火箭模型发射速度峰值达 4.6 m/s 。

我国于20世纪70年代开始直线电机的研究工作,研究单位主要有中科院电工所、浙江大学、上海大学、沈阳工业大学、河南理工大学等高校和科研机构,取得了一些成果,但在推广应用方面与国外相比还存在较大的差距。

能源问题关系着人类生存环境的改善及人类社会的可持续发展。能源短缺是当今世界面临的一个紧迫问题,节能技术研究及相关产品的开发已成为21世纪工业发展的主题。在“十一五”期间,我国将重点推进十项节能工程,其中一项就是电机系统节能工程。具体包括:电机系统节能改造,提高运行效率;合理匹配,加快淘汰落后低效电机,推广高效节能电机;推广变频调速节能技术,风机、水泵、压缩机等通用机械系统采用变频调速节能措施,工业机械采用交流电动机变频工艺调速技术;制定相关经济激励政策和技术政策、完善电机能效标准体系等配套措施。“十一五”期间,实现电机系统运行效率提高2个百分点,形成年节电能力 $200\text{ 亿 kW}\cdot\text{h}$ 。可见,搞好电机系统节能工程,一是要推广高效节能电机,二是要推广变频调速技术。

稀土永磁同步电机以其高效节能的优势得到了大力研究和应用。随着永磁材料性能的不断提高和完善,特别是钕铁硼永磁材料的热稳定性和耐腐蚀性的

改善和价格的逐步降低,以及电力电子器件的进一步发展,加上永磁电机研究开发经验的逐步成熟,使永磁电机在航空航天、国防、工农业生产和日常生活等各个领域获得越来越广泛的应用。同时,稀土永磁电机的研究开发也进入一个新阶段。一方面,向大功率化(高转速、高转矩)、功能化和微型化方向发展。另一方面,永磁电机的设计理论、计算方法、结构工艺和控制技术等方面的研究工作出现了崭新的局面,形成了以电磁场数值计算和等效磁路解析求解相结合的一整套分析研究方法和计算机辅助设计软件^[3,4]。

永磁直线同步电机(PMLSM)不仅具有永磁电机高效节能的特点,还具有直线电机结构简单、可靠性强、传递效率高、制造成本低、机械损耗小、速度不受限制、时间常数小、响应快、控制比较容易等一系列优点。在相同的有效体积下,钕铁硼永磁体的最大磁能积比电励磁的大 5.8 倍,仅次于超导励磁。钕铁硼永磁体的剩磁和矫顽力均很高,具有线性去磁特性,其去磁曲线与回复曲线基本重合,内禀矫顽力高,内禀特性硬,抗去磁能力强,热稳定性能好。钕铁硼永磁材料具有优异的性能及较高的性价比,使其在永磁直线同步电机中得到广泛应用和较大发展。20 世纪 90 年代,国外某些研究单位已成功地将永磁直线同步电机应用到数控机床和运输线中^[5]。

20 世纪 90 年代以前,人们对变频调速系统的研究主要集中在变频器的拓扑结构以及控制算法上,使电动机传动的动态性能和调速精度大大提高。但采用变频器供电时,电动机的效率、功率因数和功率密度等稳态性能却未得到相应的重视与研究。尤其是高压大容量的电动机传动系统中出现了低效率和低功率因数的问题,使得人们重新认识到电动机在变频调速系统中的稳态性能与动态性能一样重要。提高电动机在变频调速系统中的稳态性能,不仅可以极大地节约能源,而且还能提高电动机运行的可靠性。目前,主要以电压型逆变器的研究和应用开发为主,一方面是因为通常的电力能源如发电机、电网、电池等均属电压源,另一方面电压源逆变器中的储能元件电容器与电流源逆变器中的储能元件电感器相比,储能效率和储能器件的体积、价格都具有明显的优势^[6,7]。

目前,采用正弦脉宽调制的电压型逆变器(SPWM—VI)已在工业中普遍应用。由于变流装置中作为换流元件的电力半导体工作在开关状态,变流器产生的电压和电流多为非正弦波,包含了大量的谐波,这些谐波不可避免地在 PMLSM 中产生谐波电流、脉动推力、谐波损耗和浪涌电压等^[8]。PMLSM 本身是一个非线性、时变、强电磁耦合的多变量系统,当它与处于开关状态的变频器连接后,传统的相量图和等效电路的分析已难以满足要求,因此有必要建立适用于非正弦供电下 PMLSM 新的数学模型,精确地计算分析电源谐波对电机性能的影响,这对逆变器元件的选择以及变频调速控制方式和控制系统的设计都有着重要的意义。交流

调速系统中电机是由变频器供电的,这与传统工频正弦波供电的电机存在着很大区别。前者一方面是在从低频到高频的宽频范围内运行,另一方面供电电源的波形是非正弦的。由于 PMLSM 存在自启动缺陷、满足系统的调速性能及节约能源的逆变器在工业中应用普遍,采用 SPWM—VI 供电模式,为非正弦供电的 PMLSM 的设计、性能分析与特性测试提出了一系列的新问题,因此对逆变器—PMLSM 系统特性进行专门和系统的分析研究很有意义。

1.2 PMLSM 的分类

PMLSM 按结构的分类见图 1.1。

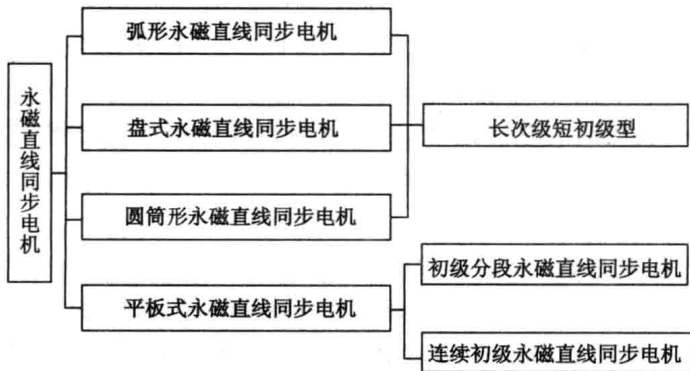


图 1.1 PMLSM 的结构类型

1.2.1 单初级 PMLSM 的物理结构及基本工作原理

单初级 PMLSM(SPPMLSM)的初级是由三相绕组及矩形槽的初级铁轭组成;次级是由永磁体(钕铁硼)与隔磁块粘附在钢板上形成。本书所研究的 SPPMLSM 是单边平板式长次级短初级隐极型电机,如图 1.2 所示。隐极结构中永磁体的磁化方向与气隙磁通轴线一致,极间漏磁较少,工艺上也较简单。

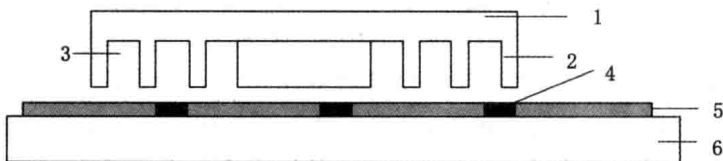


图 1.2 物理模型(隐极结构)

1——初级轭部;2——齿;3——槽;4——隔磁块;5——永磁体;6——次级轭部

SPPMLSM 都分为通电绕组和永磁体两部分,在 SPPMLSM 的绕组中通入电流产生气隙磁场。当电流随时间变化时,气隙磁场将沿直线移动,称为行波磁场,永磁体产生的磁场与电枢电流产生的行波磁场相互作用会产生电磁推力。由于定子固定不动,那么动子就会沿行波磁场运动的相反方向做直线运动。改变电流的相序就可以改变行波磁场的方向,从而可以改变动子的运动方向。

1.2.2 分段初级 PMLSM 的结构及工作特点

分段初级 PMLSM(DPPMLSM)驱动的垂直运输系统结构示意图如图 1.3 所示。

整个系统由定子(初级)电枢绕组、动子(次级)和提升容器组成。动子由永久磁铁等构成,结构为隐极式,电机初级均匀地布置在固定框架(提升罐道)上。在动子纵向运动过程中,始终有 2 台(根据后面系统的设计确定为两段定子电机共同驱动)初级与动子接触,即动子的纵向长度等于两台初级和两段间隔纵向长度之和,保证动子在纵向运动过程中,与之平行的初级长度始终保持不变,且气隙均匀。供电方式采用递推方式,根据动子运行的位置来切换定子电枢绕组供电,即上升时初级供电组号依次为 1#、2#、3#, 2#、3#、4#, 3#、4#、5#, 4#、5#、6#, 5#、6#、7#, 6#、7#、8#, 7#、8#、9#, 8#、9#、10# 八组顺序供电,下降时按逆顺序分组供电。对于整个分段式系统而言,原理上近似于长初级、短次级永磁直线同步电动机。

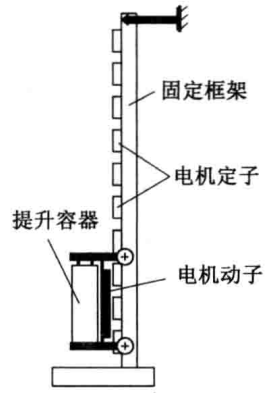


图 1.3 DPPMLSM 垂直运输系统结构示意图

1.3 PMLSM 应用现状

以 PMLSM 为核心的动力系统具有结构简单、推力体积比大、效率高、定位精确等优点,受到许多国家的高度重视^[9,10]。韩国、日本、美国、德国、法国、俄罗斯、南非与中国等都在积极开展该方面的理论研究和技术开发工作,进展快,前景好。美国的研究重点在于军事方面的应用^[11~13],韩国的研究多放在精密机床上^[14~17],德国的研究重点为长行程水平运输系统^[18],日本的研究重点是高层建筑的电梯方面及军事装备的发射系统^[19~27],俄罗斯的研究重点是直线电机驱动的矿井提升系统。

20 世纪 90 年代以来,国外很多研究机构和公司纷纷把 PMLSM 作为更新

换代的高新技术产品来研发。PMLSM 的使用范围遍及许多领域,从工业运输系统到办公自动化及军事领域等。

1.3.1 数控机床方面

日本三菱、东芝、日立、三井精机公司,德国西门子公司、Ex-cell-o 公司,美国的 Kollmorgen 公司都开发了相关的产品。Ingersoll 公司生产的用于高速精密机床的 PMLSM,最大移动速度达 200 m/min,最大推力 6.6 kN,最大位移 0.504 m。世界著名的 Kollmorgen 工业移动控制公司开发了无铁芯和有铁芯两种类型的 PMLSM。无铁芯型 PMLSM 的动态性能非常高,没有 detent force (cogging force) 的存在,定位非常精准,铁芯型 PMLSM 的电磁推力可达 8 kN。日本 FANUC 公司采用美国 ANORAD 的转让技术生产的 PMLSM 最高移动速度达 120~240 m/min,最大推力为 1.5~9.0 kN。

1.3.2 军事领域

2003 年,美国研制用于航空母舰上推动飞机起飞的 PMLSM 推力超过了 2 MN,可使飞机在 1.84 s 内加速到起飞速度,加速距离仅为 95 m。电机动子在 0.112 s 内速度从 103 m/s 降到 0,减速距离为 5.79 m。当电机采用 HPP(1/2 phase per pole)结构时,相电流有效值达 7.597 kA,运行速度 103 m/s 时,电机效率为 66.7%,功率因数为 0.671。电机采用 OPP(one phase per pole)结构时,相电流有效值达 5 141 A,运行速度 103 m/s 时,电机效率为 62.5%,功率因数为 0.641。该研究小组比较了直线异步电机和 PMLSM 方案,结果认为采用 PMLSM 更有效。加速距离的缩短可节省宝贵的空间;起飞时间的缩短,可增加单位时间飞机起飞的数量,这在军事上是非常有意义的。2005 年美国哥伦比亚州南卡罗莱纳州立大学的 Dean Patterson 和 Antonello Monti 等人在研究航空母舰上运载的由 PMLSM 驱动的航空器发射平台。从所发表的论文看,只是对电机进行了初步设计,并采用虚拟试验平台对电机设计方案进行了验证。图 1.4 所示为发射平台的实物示意图。



图 1.4 永磁直线电机航母发射器

日本九州大学正在进行四级加速驱动火箭发射装置的研究,火箭的发射器

由 16 块永磁体组成 PMLSM 的定子,最后火箭速度达 4.6 m/s,采用 PID 控制,他们主要对火箭的动力性能进行控制仿真的研究。图 1.5 所示为火箭发射装置的示意图。

东京大学的 Kazue Seki and Masaya Watada et al. 在研究多段初级 PMLSM 驱动的运输系统。此 PMLSM 由四段组成,前三段为加速电机,最后一台电机为减速电机,电机总是工作在非同步状态,他们同时研究了此装配形式速度与磁阻力的变化情况,图 1.6 为电机实物模型。

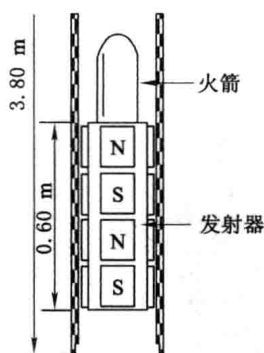


图 1.5 垂直型 PMLSM 火箭发射装置系统

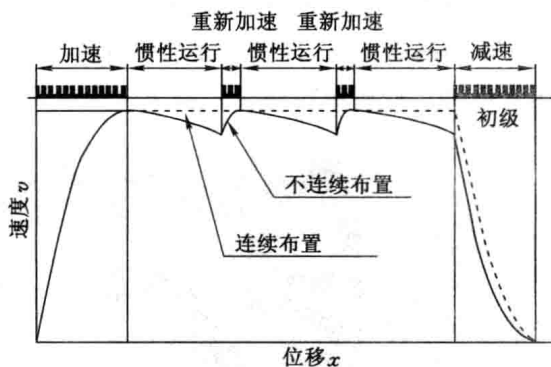


图 1.6 不连续初级和连续初级驱动模式

1982 年,前苏联利用研制的电磁炮把 1.3 g 的弹丸加速到 5 km/s。20 世纪 90 年代以后,日本采用 50~100 级、总长度达 700 m 的多级轨道炮,将 1 g 重的发射物加速到近 150 km/s 的超高速,研究高速撞击引发核聚变。1980 年,美国的研究人员用电磁炮成功地发射了质量为 317 g 的弹丸,其飞行速度为 4.2 km/s。1994 年研制出反战术导弹电磁炮,并于 1994~1998 年进行坦克电磁炮的全尺寸工程试验。

1.3.3 运输系统

1973 年德国开始研发 M-Bahn 运输系统试验装置,采用长初级 PMLSM 为驱动源。车体长 12 m,宽 2.3 m,乘坐 80 人(最多可达 132 人),总质量 17 800 kg。气隙范围 15~25 mm,随载重变化。日本于 1979 年建成行程 7.5 km 的宫崎磁悬浮铁道试验线,时速达 530 km/h。20 世纪 90 年代初,日本开始在山梨县建造 48.2 km 长的实用超导磁悬浮铁道线。1995 年德国动工修建了柏林—汉堡磁悬浮列车商用线。

南非威特沃特斯兰德大学(Witwatersrand)的 R J Cruise 和 C F Landy —

直在从事多段 PMLSM 驱动的深井提升系统的研究。他们从电机效率、安全性、重量与推力比等方面论证了南非金矿深至 2 500 m 以后采用 PMLSM 作为驱动源较传统模式具有的优越性,并研究了电源供电时电机速度下降至 0.25 m/s 情况下的安全速度、磁阻力、电机控制及结构上的优化。但是对工作在低速分段 PMLSM 的特性缺乏根本性的分析和解决^[28~31]。

德国的达姆施塔特[德意志联邦共和国中部城市]科技大学的 Roberto Leidhold and Peter Mutschler 研究了长定子直线永磁盘式同步电机,其中长定子是由八段初级装配而成,但是八段初级之间没有间隔,这样的配置可用来研究 PMLSM 的高速工况,他们主要的研究方向为 PMLSM 的控制,主要对长定子的无速度传感器控制进行研究。图 1.7 为电机实物图。

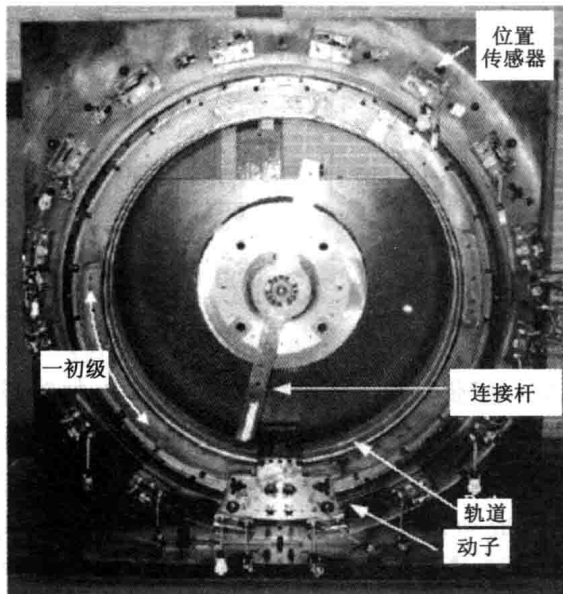


图 1.7 八段初级盘式直线电机样机

在国内,2002 年 10 月,我国引用德国技术和部分设备在上海建成了一条自龙阳路到浦东国际机场的商用线,行程 30 000 m,运行时间 8 min。浙江大学研制了 PMLSM 水平驱动装置^[32],目前正在进行混合励磁的驱动系统研究。沈阳工业大学主要开展 PMLSM 驱动系统的控制策略研究^[33]。由江汉石油机械厂与中国石油大学(华东)机电工程学院合作,研制成功了大功率低速永磁同步直线电机抽油机。2004 年 5 月生产出第一台直线电机抽油机样机,并在厂内进行运行试验。2004 年 10 月移至华北油田采油一厂作现场试验,到目前为止,一直运行良好^[34]。西安交通大学研制了一种永磁直线电动机驱动的新型直线压缩机^[35]。河南理工

大学的袁世鹰、焦留成、汪旭东及上官璇峰等人从 1995 年开始进行 PMLSM 驱动运输系统的研究。焦留成博士建立了 PMLSM 隐极与凸极型一维四层线性解析模型,并进一步研究了电机的结构参数与性能参数之间的关系及正弦电流源供电的稳态性能^[36~38]。汪旭东博士建立了 PMLSM 统一解析磁场模型,其考虑了正弦电流激励源的真实情况,对永磁体励磁场进行了合理等效,并制作了样机对建立的模型进行试验验证^[39~41]。上官璇峰博士基于有限元得到 PMLSM 的参数,建立了 DPPMLSM 的整体模型,此模型基于正弦电流源,研究了 SPPMLSM 的磁阻力及稳态性能^[42]。SPPMLSM 驱动的水平运输系统试验装置如图 1.8 所示。DPPMLSM 驱动的垂直运输系统本体结构如图 1.9 所示。

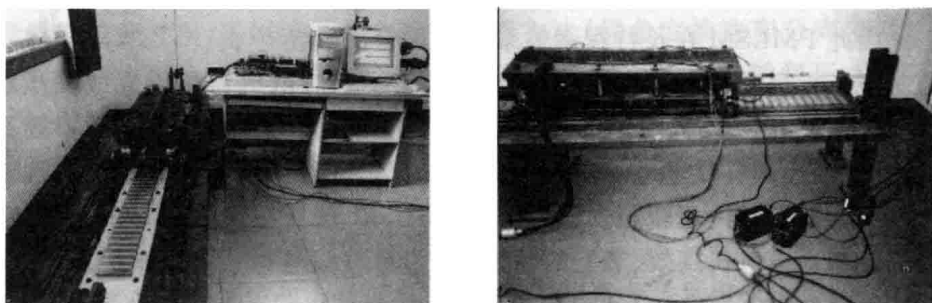


图 1.8 永磁直线电机水平运输系统

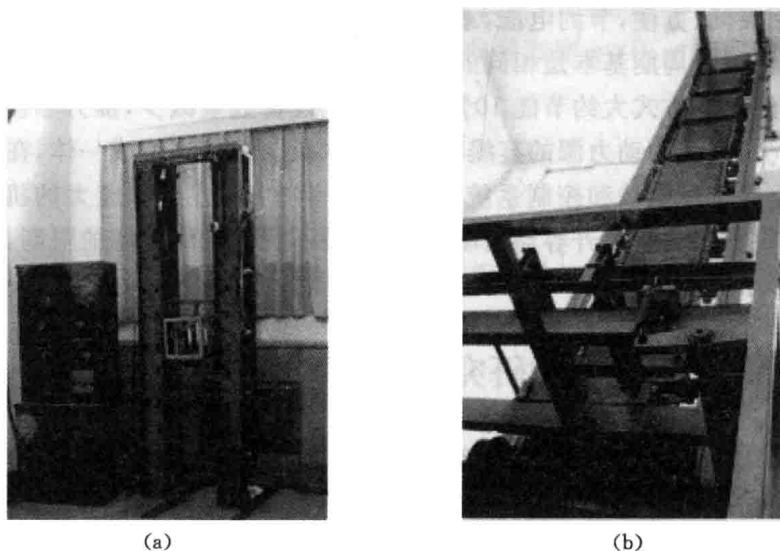


图 1.9 DPPMLSM 驱动的垂直运输系统

(a) 双边结构;(b) 单边结构