



永磁直线同步 电动机特性及控制

*Operating Characteristics and Control of
Permanent Magnet Linear Synchronous Motor*

焦留成 程志平 著



科学出版社

TM351
20

014032690

永磁直线同步电动机 特性及控制

焦留成 程志平 著



科学出版社

北京

TXI 351
20



北航

C1720983

内 容 简 介

本书分上下两篇。上篇提出了用于研究永磁直线同步电动机的“四层线性分析模型”，系统地推导了应用于垂直运输系统的永磁直线同步电动机电磁参数及运行特性的解析表达式，并进行了深入分析。下篇对永磁直线同步电动机控制策略进行了初步研究。

本书适合电气工程专业高年级本科生、研究生的选修课程，也可作为相关研究及工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

永磁直线同步电动机特性及控制/焦留成,程志平著. —北京:科学出版社,2014.2

ISBN 978-7-03-039705-8

I. ①永… II. ①焦… ②程… III. ①永磁式电机-同步电动机-基本知识
IV. ①TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 020427 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:张怡君
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年2月第 一 版 开本:720×1000 B5

2014年2月第一次印刷 印张:12

字数:235 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

直线驱动在工业、民用以及其他各种直线运动的场合具有广泛的应用,将永磁直线同步电机(PMLSM)应用于直线驱动场合是传统直线驱动方式的重大发展。由于永磁直线同步电机的优越性能和广泛的应用前景,受到国内外研究者和工业运动控制厂家的青睐。

20世纪90年代初,国外首次提出“直线同步电机驱动的垂直运输系统”的构想。这一构思完全不同于传统的垂直提升方式,而是一种全新的提升系统模式。新模式提升系统,面临许多重大理论和技术问题的挑战,这种“挑战”使得该课题成为直线电机研究领域的前沿课题。如果理论上和技术上许多问题得到解决,则传统的提升系统将发生巨大的变革,其理论价值和带来的经济与社会效益是不可估量的。

永磁直线同步电动机是新模式提升系统的核心。永磁电机是新型节能电机,永磁式旋转电机已经有了一定的发展,但永磁式直线电机的研究还处于初级阶段。特别是关于永磁式直线同步电动机的电磁场分析研究、电磁参数设计计算研究以及永磁直线同步电动机应用在垂直运输系统的各种运行特性研究,在世界范围内都还是较新的研究课题。尤其是永磁式直线同步电动机磁场和电磁参数分析,结构参数对电磁参数影响的研究,基本上还是空白。多数文献在分析永磁直线同步电动机时基本上照搬旋转电机的分析方法和采用几乎相同的计算公式计算电磁参数,并没有严格的理论分析和可靠的试验结果支持这种方式得出的结论。

本书分上下两篇,上篇在合理假定的基础上,建立了永磁直线同步电动机的物理模型,并首次提出了用于研究永磁直线同步电动机的“四层线性分析模型”。在此基础上,运用麦克斯韦方程等基本电磁场理论,深入分析永磁直线同步电动机的电磁现象。经过严格的推导,得出了各种电磁参数的解析表达式,建立了数学模型及电路模型(等值电路)。继而导出了各种运行特性的解析表达式并进行深入的分析研究,提出了若干新见解和研究结论。

本书还仔细分析了电机结构参数对电磁参数、电气性能及运行特性的影响。书中对试验样机进行了计算分析。理论计算与试验结果比较吻合,证明本书提出的理论分析和计算方法是正确有效的。

书中对直线同步电动机驱动垂直运输系统出入端效应进行了分析,得出通过合理设计在达到一定机械设计精度后,定子切换理论上不产生扰动力时,机械上应遵循的基本原则。

本书的研究成果初步建立了比较完整的新模式提升系统用永磁直线同步电动机的基础理论体系。

下篇在数学建模的基础上,给出了永磁直线同步电动机恒负载条件下基于能量的哈密尔顿无源控制;永磁直线同步电动机线性化控制方法;永磁直线同步电动机逆系统控制方法。

本书的初稿完成于十几年前,其内容也在作者的研究生教学和相关科研工作及工程中应用。实践证明,本书提出的线性分析及计算方法,具有物理概念明确、计算方法简明实用的优点。

为了本书的出版,作者的研究生做了许多工作,包括部分图表的重制、部分内容的修订、公式校核、参考文献查证以及附录编写等。

实际上,当年形成初稿的时候,作者的研究团队及研究生就付出了很多努力。现代科学研究任何一项成果都是集体智慧的结晶!

十几年过去了,永磁直线同步电动机的理论、应用及控制研究有更多人的参与并取得许多成果。为了方便读者,作者在绪论部分作了简要综述并增加了下篇控制部分内容。

本书研究课题多次得到国家自然科学基金的资助,在此表示感谢。

限于作者水平,书中舛错在所难免,权作抛砖引玉吧。

作者

2013年10月

目 录

前言

上篇 线性理论

第 1 章 绪论	3
1.1 直线电机的发展	3
1.2 直线同步电动机的研究现状	8
1.3 低速直线电机的研究现状	12
1.4 低速永磁直线电机的发展	14
1.5 本书研究重点及目标	17
第 2 章 永磁直线同步电动机概念	18
2.1 永磁直线同步电动机垂直运输系统的基本原理构想	18
2.2 稀土永磁材料及稀土永磁直线电动机的特点	19
2.2.1 稀土永磁材料的发展	19
2.2.2 钕铁硼永磁材料的性能	19
2.2.3 稀土永磁直线电机的特点	20
2.3 永磁直线同步电动机结构特点	21
第 3 章 永磁直线同步电动机磁场特性分析	23
3.1 永磁直线同步电动机物理模型及磁场分析模型	23
3.1.1 假设条件	23
3.1.2 初级电流层	23
3.1.3 定子永磁体的等效代换	24
3.1.4 齿槽区等效磁导率	27
3.1.5 磁场分析模型	27
3.2 永磁直线同步电动机磁场分析	28
3.2.1 统一磁场方程及其解	28
3.2.2 各区磁场强度及电场强度表达式	30
3.2.3 磁密及磁位表达式	35
3.2.4 电枢、励磁磁场及其合成	37
3.3 线性分析法与有限元分析法比较	39
3.3.1 永磁直线同步电动机磁场有限元法简介	39

3.3.2	两种方法的比较	40
第4章	永磁直线同步电动机电磁参数及性能计算	41
4.1	等效电路及电磁参数的计算式	41
4.1.1	励磁电势	41
4.1.2	电枢反应电抗 X_s 的物理意义及其计算	42
4.1.3	槽漏电抗 X_{σ} 计算式	43
4.1.4	端部漏抗分析及计算	44
4.1.5	电枢绕组每相电阻	48
4.2	向量图及性能计算	48
第5章	永磁直线同步电动机结构参数对电磁参数及性能的影响	52
5.1	结构参数对电磁参数的影响	52
5.1.1	槽高对无载平均磁密的影响	52
5.1.2	永磁体高对无载磁密的影响	53
5.1.3	永磁体高及槽高对电枢反应磁场(平均磁密)的影响	54
5.1.4	电枢槽高、永磁体高度及气隙对电机电枢电抗及槽漏电抗的影响	55
5.1.5	电枢槽高、永磁体高对端漏电抗 Z 分量的影响	57
5.1.6	电枢槽高、永磁体宽对端漏电抗 X 分量的影响	58
5.2	结构参数对性能的影响	59
5.2.1	永磁体高对励磁电势的影响	59
5.2.2	槽高及槽宽、槽距比对励磁电势的影响	60
5.2.3	永磁体高、槽高、槽宽槽距比及气隙对电负荷及电磁推力的影响	61
第6章	永磁直线凸极同步电动机分析	63
6.1	磁极区等效磁导率	63
6.2	电枢、励磁磁势作用下各区磁密表达式	64
6.2.1	电枢磁势单独作用时各区磁密表达式	64
6.2.2	励磁磁势单独作用时各区磁密表达式	64
6.3	永磁直线凸极同步电动机等效电路参数	65
6.3.1	励磁电势 E_{0p}	65
6.3.2	电枢反应电抗 X_{sp}	66
6.3.3	槽漏电抗 x_{L1p}	66
6.3.4	端部电抗	67
6.4	磁路饱和的影响	68
第7章	垂直运动永磁直线同步电动机运行特性分析	70
7.1	力角特性	70
7.2	电源电压和频率变化对最大电磁功率和推力的影响	70

7.3	动力制动特性	72
7.4	发电制动特性	73
7.5	发电反馈制动特性	75
7.6	加速度特性	76
7.7	恒流供电对电动机运行特性的影响	77
第8章	试验研究	80
8.1	试验装置介绍	80
8.2	试验测试系统	81
8.3	试验测试的原理	83
8.4	试验用永磁直线同步电动机	85
8.4.1	电机等值电路参数计算值	85
8.4.2	电机的性能数据	88
8.4.3	试验电机参数评价	88
8.4.4	试验电机工作在 50Hz 电压源时性能分析	89
8.4.5	试验电机的恒流源运行特性	90
8.4.6	试验电机发电制动特性	91
8.5	试验分析	92
8.5.1	空载与荷载行走试验	92
8.5.2	等效电路参数试验验证	92
8.5.3	最大推力试验	94
第9章	直线同步电动机驱动垂直运输系统出入端效应分析	95
9.1	引言	95
9.2	垂直提升系统机械设计的要求	95
9.3	出入端效应分析	96
第10章	上篇结语	101
10.1	垂直运动永磁直线同步电动机基础理论体系要点	101
10.2	进一步的研究工作	104
	上篇参考文献	105

下篇 控制策略

第11章	基于能量的永磁直线同步电机控制	115
11.1	概述	115
11.2	端口受控哈密顿系统数学基础	116
11.3	端口受控耗散哈密顿系统	117
11.4	端口受控哈密顿(PCH)系统基本形式	118

11.5 永磁直线同步电动机的数学建模型	119
11.5.1 电机的基本方程	119
11.5.2 模型参数的确定	120
11.6 永磁直线同步电机矢量坐标变换及变换矩阵	121
11.6.1 永磁直线同步电机坐标系与空间矢量	121
11.6.2 空间矢量	121
11.6.3 变换矩阵确定原则	121
11.6.4 永磁直线同步电机矢量变换	122
11.7 永磁直线同步电动机的数学(d - q 轴控制)模型	125
11.8 系统控制器设计与稳定性分析	129
11.9 系统仿真	131
第12章 其他控制方式	134
12.1 永磁直线同步电动机伺服系统的非线性控制	134
12.1.1 引言	134
12.1.2 直接反馈线性化原理	134
12.1.3 永磁直线同步电动机的数学建模型	135
12.1.4 坐标变化	137
12.1.5 系统仿真	138
12.2 永磁直线同步电动机逆系统控制——模型参考逆方法控制	139
12.2.1 引言	139
12.2.2 永磁直线同步电动机的数学模型	139
12.2.3 模型参考逆方法基本原理	140
12.2.4 永磁直线同步电动机参考模型逆方法	141
12.2.5 仿真结果	141
12.2.6 小结	142
下篇参考文献	143
附录 永磁直线同步电机电磁场求解的有限元方法	147
A.1 麦克斯韦方程组	147
A.2 位函数的微分方程	148
A.3 位函数的边界条件	149
A.4 边值问题	150
A.5 有限元方程	150
A.5.1 变分原理	150
A.5.2 单元剖分	153

A. 5.3 有限元方程组的形成·····	172
A. 6 用波阵法求解有限元方程组·····	177
A. 7 磁场计算结果及应用·····	179
A. 7.1 画磁力线·····	179
A. 7.2 求电机产生的拉力和压力·····	180
A. 7.3 求气隙磁密·····	182

上篇 线性理论

第 1 章 绪 论

1.1 直线电机的发展

世界上出现旋转电机后不久,就出现了直线电动机的雏形。1840年惠斯登(Wheatstone)提出了直线电机设想,虽然由于当时材料和一些基本理论不能解决直线电机效率问题,未能获得成功,但开辟了直线电机研究的先河。

1845年英国人查尔斯·惠斯登(Charle Wheatstone)提出并制作了略具雏形的直线电动机,为以后的研究开发奠定了基础。

1890年美国匹兹堡市长在他所著的一篇文章中,发表了关于直线感应电机的专利,首次明确提出直线电机的概念。

1895年,Weaver Jacquard电梭子公司发表了一篇将直线电机用作织布梭子推动装置的专利,这种不需要中间装置就能把电能转化成直线运动的电机引起了人们的极大兴趣,主要原因之一是对于把直线电机用于织布机的梭子推进器抱很大的希望。

但是,由于当时的制造技术、工程材料以及控制技术的水平,在经过断断续续20多年的顽强努力后,直线电机一直未获得成功。

1905年Zehdem提出的用直线感应电动机作为火车推进机构的建议,无疑是给当时直线电机研究领域科研人员的一剂兴奋剂,也可以看做是当时某些国家正在进行试验的先驱,以致许多国家的科研人员都投入到了这些研究工作之中。

1917年出现了第一台试图把直线电机作为导弹发射装置的圆筒形直线电动机的试验模型,它实际上可以看做是一种初级线圈可换接的直流磁阻电动机。

直到1930年及随后的十几年,直线电机才进入实验研究阶段,结构上也出现了当时较为新颖的拓扑形式,如双边型直线电动机、片状动子直线电动机以及圆筒形直线电动机等。在这个阶段,科研人员获取了大量的实验数据,从而对已有理论有了更深一层的认识,奠定了直线电机在今后的应用基础。

1945年美国的西屋电器公司采用直线感应电机作为动力为美国海军进行两次大规模的飞机弹射起飞试验,仅用4.2s时间,将重达4.546t的喷气式飞机由静止加速到135km/h。虽然由于此项试验成本太高而未获得实际采用,但它震动了世界科技界,使直线电机结构简单、起动快、可靠性高等优点受到了应有的重视。

50年代,随着原子能工业的发展,直线电机在液态金属泵领域得到了普遍的应用。

1952年,美国最先研制成功钾钠电磁感应泵以满足核动力中的需要。

1954年,苏联发表了熔融电磁感应泵理论。英国皇家飞机制造公司利用双边扁平型直流直线电机制成了发射导弹装置,其速度可达1600km/h。

尤需值得一提的是,在1940~1955年这个阶段中,由于交通运输的飞速发展,一些发达国家大力研究用直线电机作为驱动火车的动力,并与悬浮技术相结合,发展磁悬浮高速列车。直线电机作为高速列车的驱动装置得到了各国的高度重视并计划予以实施。如日本新干线技术的成功,给日益萧条的日本铁路事业带来了新的生机,并导致重新评价铁路事业,重视直线感应电动机具有的无接触特性,使直线感应电动机在低噪声高速铁路上得到广泛利用。

1955年以后,由于科技的发展,特别是以英国 Laithwaite E 教授为首的一些科研工作者致力于直线电动机的基础理论研究,并取得了许多重要的研究成果,从而使直线感应电动机进一步受到各国的重视。每年几乎都有数以百计的研究论文发表,一些大学和研究机构也把直线电机的许多研究内容作为硕士、博士论文的重要研究课题。

1969年,Usami Y, Ishihara M, Kojima N, Mitomi T 在国际铁路协会举办的例会上,系统地论述了将直线电机应用到运输机车的可行性。

Kalman G P, Irani D, Simpson A U 在他们的论文中也系统地讨论了直线电机用于运输系统较为完善的方案。而 Wang T C 则采用场-路理论给出了直线感应电机用于高速运输系统情况下的能量关系,系统研究了直线感应电机用于地面高速运输系统的材料选择、结构设计等内容。

法国的 Spitz A 在他的文章中也披露了在 Societe De Dietrich 建立的重8400kg,可载3600kg,容纳44名乘客,时速可达180km/h直线电机机车模型。

从70年代开始,直线感应电机基础理论研究有了很大发展。1970年,White D C 从电磁场理论出发,研究了单边和双边型长定子直线感应电机,应用麦克斯韦磁应力张量法,首次给出力与气隙比速度曲线,White D C 的研究在非接触无摩擦大推力系统、磁悬浮等系统具有工程意义。

德国 Kockisch K H 从直线电机制造的角度在 Elektrische 期刊上发表了论文,讨论了直线电机系统高效解决方法,并提出了直线电机系列化的标准概念。

1971年,德国 Huehns T, Kratz G 考虑了直线感应电机用于变载驱动系统并对速度控制进行了研究,同时与旋转电机驱动系统进行了比较。

法国的 Machefert-Tassin, Ancel J, Faure A 也研究了用于陆地运输的直线感应电机。

俄罗斯 Sokolov M M, Sorokin L K 研究了直线电机驱动的高速梭子机,对直线电机在高速梭子机械中的驱动系统的起动特性和发电制动情况进行了仿真和实验研究。

Matsumiya T, Takagi K 首次对直线感应电机的边端效应进行了研究。Yamamura S, Ito H, Ishikawa Y 对如何降低边端效应的影响给出了具体措施。Herbert W, Andreas L 通过在主磁矩旁增加小线圈的方法设计了一种降低漏磁的直线电机线圈绕线方式。Paul R J A, Reid G G 开发了直线螺旋磁阻步进电机,对电机变载条件和频率进行了试验研究,并对不同的实验样机进行了静态性能对比分析。

Nonaka S, Yoshida Y 对短初级直线感应电机的磁通密度空间谐波分布进行了研究。作者假定原边无限宽,纵向绕组间距很大,彼此线圈相互影响可不计。采用傅里叶变换对原边电流产生的磁通分布进行了研究,并给出等效面电流。分析了短初级原边绕组运行特性,并给出了纵向边端效应补偿绕组的影响。

1974年, Brough J J 给出直线直流电机的概念,较为全面地讨论了直线直流电机的特点并对速度进行了冗余控制研究。

Laforie P, Calmesnil W, Maloigne P 设计了一款可用于打印机的小功率变磁阻直线步进电机,每秒可行 20 步, 2.54mm, 精度可达 0.1mm。

德国 Hoffer O 研究了直线感应电机驱动的牵引系统中温度场的分布。

Boldea I, Nasar S A 研究了分段次级直线磁阻电机,给出了电抗方程,应用凸极机理论,分析了分段次级直线磁阻电机性能,初步设计、分析了该种电机的相关特性。在考虑边端效应及集肤效应等条件下,给出了直线感应电机的优化设计,并进行了样机试验。

Bhattacharyya M, Mehendra S N 开发了单相直线震荡电机,在该电机类型的电机中,作者采用将电枢分成三个相互独立的电抗,但内部相互也有联系的区域。第一和第三区包括分布电枢绕组和由于空间上依次错位而造成的辅助绕组,电枢绕组本身倾斜对称处理以便产生指向电枢中心的行波磁场,中间区域包括了单相分布绕组。

Eastham J F 和 Balchin M J 设计了一种变极结构的直线电机并对控制进行了研究。

Raposa F L 对用于驱动系统直线感应电机的能量管理进行了研究。

Elliott D G 首次将矩阵方法应用于单边/双边直线电机的分析中。

从能查到的资料来看,这一时期,德国、法国理论研究较为深入,直线感应电机基础理论研究得到了强有力促进,研究内容从基本的磁场分析、特性研究到温度场分布,从机械结构到优化设计,几乎涉及所有研究内容,几经失败和成功的实践,直线电机终于进入了独立应用的时代。直线电机的理论体系已逐步建立,应用也更有效,更广泛。

但直到 20 世纪 90 年代初期的 20 多年里,发表的若干专著和上千篇论文的研究,主要是针对直线感应电动机,其重点是直线感应电动机在运输系统方面的应用,取得的成果也大都是这些方面的。例如日本的东海新干线(250km/h)和大阪

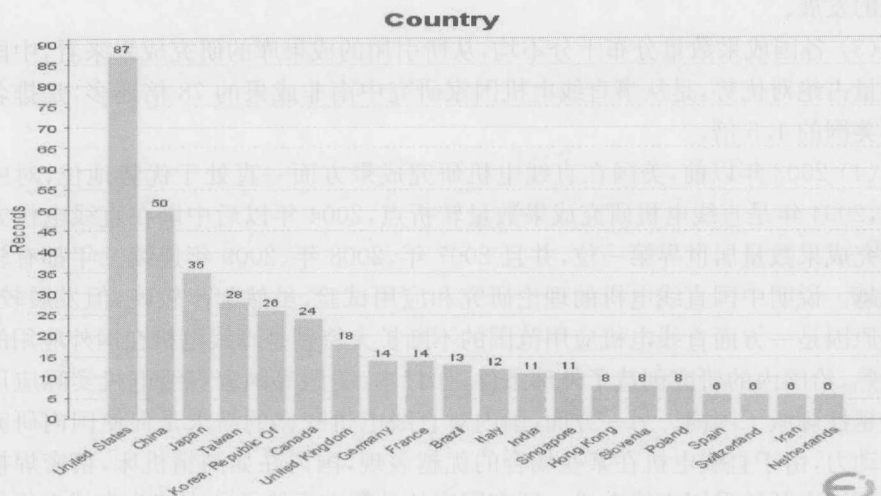


图 1.3 2003 年各国成果数量

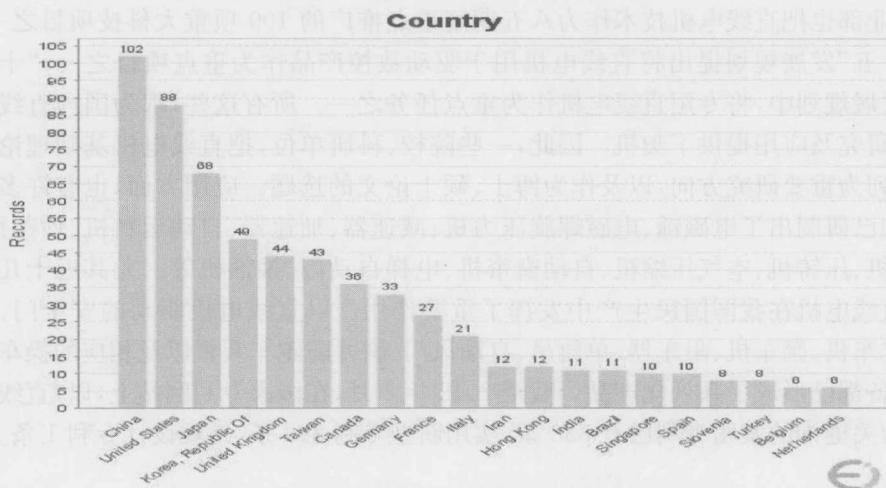


图 1.4 2004 年各国成果数量

综上可看出,直线电机发展有如下特点:

(1) 从直线电机诞生之日起,经过相当长的一段时期,由于受技术和材料的影响,发展速度十分缓慢。

(2) 从每年的研究成果来看,2004年以前,世界范围内,成果数量都在500篇(个)以内,从2004年出现了量的飞跃,达到了765篇(个),以后每年增加,2008年出现了由2007年989篇(个)骤然上升到1364篇(个),直到2010年的1508篇(个)达到最高。分析原因,主要是中国这个时期研究成果的繁荣促进了世界直线