

获得“天津市应用基础及前沿技术研究计划”资助

无刷直流直线电动机

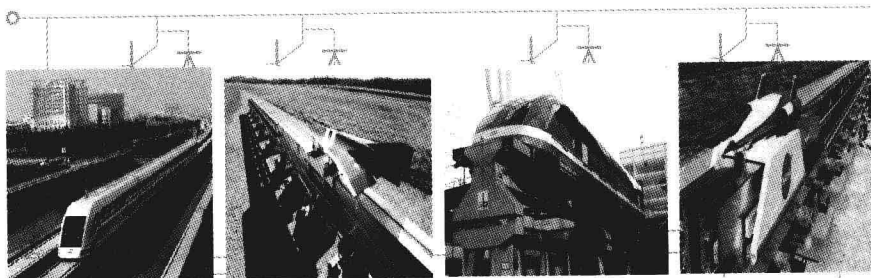
◎ 李小鹏 李立毅 田库 方沂 李利 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

获得“天津市应用基础及前沿技术研究计划”资助



无刷直流直线 电动机

李小鹏 李立毅 田库 方沂 李利 著

常州大学图书馆
藏书章



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书以无刷直流直线电动机为研究对象,系统全面地分析了无刷直流直线电动机相关关键技术。全书共分5章,主要内容包括无刷直流直线电动机的研究历史、发展现状、应用领域以及需要解决的关键技术;无刷直流直线电动机的受力分析、极数分析、相数分析、通电状态分析以及控制方式分析;建立了无刷直流直线电动机系统仿真模型并采用 Matlab 进行了仿真研究;三相无刷直流直线电动机定位力的抑制、系统动态特性分析、推力波动以及控制系统设计;多相电动机研究概述、九相无刷直流直线电动机基本原理、绕组连接方式及通电方式分析、动态特性分析、控制系统以及多相电动机故障运行等。

本书可供从事无刷直流直线电动机设计和应用的工程技术人员、研究人员参考使用,亦可供高等院校相关专业教师和学生作为教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无刷直流直线电动机 / 李小鹏等著. —北京:国防工业出版社,2012.7
ISBN 978 - 7 - 118 - 07633 - 2
I. ①无... II. ①李... III. ①无刷电机:直流电动机:直线电动机 IV. ①TM33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 032969 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 10 1/4 字数 183 千字
2012 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前言

FORWARD

直线电动机是一种将电能直接转换成直线运动的执行装置,不需要中间传动机构,结构相对简单,系统效率高,可以实现精密控制。直线电动机技术经过了近 170 年的发展,从开始的不受重视,到理论上逐渐完善,再到驱动控制技术日趋成熟,现在已经广泛应用于军事、工业生产和日常生活等诸多领域。无刷直流直线电动机与其他种类直线电动机相比在功率密度方面占有明显优势,比较适合长行程和大推力直线运动领域,如轨道交通、提升机以及抽油机等。

本书作者在教育部博士点基金“长行程大推力直线电动机定位力的研究”、天津市应用基础及前沿技术研究计划“基于多耦合场的新型采油直线电动机系统关键技术研究”以及河北省自然科学基金“基于多耦合场的大推力长行程直线电动机及其在采油中的应用研究”资助下,长期从事直线电动机相关技术研究,深入分析了无刷直流直线电动机的共性问题和特性问题,在理论分析和仿真分析的基础上,通过试验验证了正确性和实用性。

参与本书编写工作的还有天津职业技术师范大学的刘玉敏、王少华、付燕荣、李凤泉、吴兴利、朱晓强、荣凯、张思桥、齐沛等,在此谨向他们表示诚挚的谢意!

由于作者学术水平和时间有限,对某些问题的分析还不够全面,不能满足所有读者的需求,书中疏漏之处望广大读者批评指正。



作者

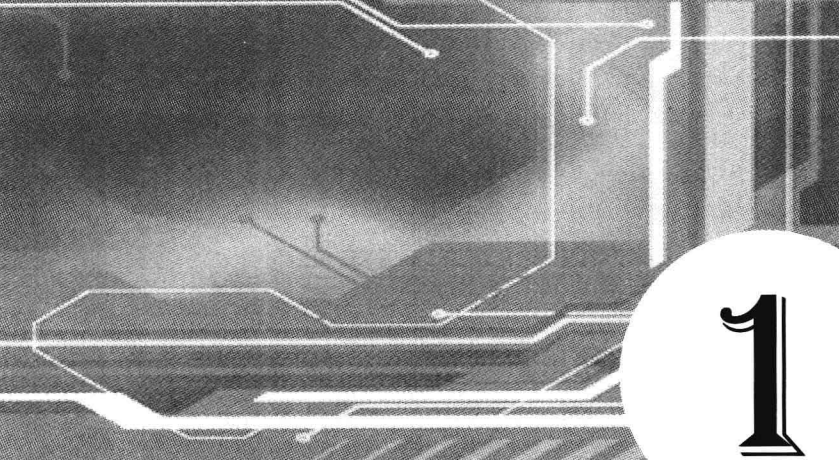
2011 年 11 月 30 日

目录 CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 直线电动机基本原理和分类	1
1.2 直线电动机的发展历史	2
1.3 直线电动机的特点及应用领域	4
1.3.1 直线电动机的优点	4
1.3.2 直线电动机的应用领域	4
1.4 无刷直流直线电动机的工作原理	9
1.4.1 有刷直流电动机的工作原理	10
1.4.2 无刷直流直线电动机的工作原理	11
1.4.3 无刷直流直线电动机的研究历史	12
参考文献	14
第2章 无刷直流直线电动机的基本原理	17
2.1 无刷直流直线电动机的受力分析	17
2.1.1 无刷直流直线电动机的受力种类	17
2.1.2 无刷直流直线电动机的动子受力分析方法	18
2.1.3 无刷直流直线电动机的电磁推力	21
2.1.4 无刷直流直线电动机的齿槽定位力	26
2.1.5 无刷直流直线电动机的纵向端部引起的受力	29
2.1.6 无刷直流直线电动机的横向端部引起的受力	32
2.1.7 无刷直流直线电动机的法向受力	33
2.2 无刷直流直线电动机的极数、相数以及通电状态分析	36
2.2.1 无刷直流直线电动机的极数分析	36
2.2.2 无刷直流直线电动机的相数分析	39
2.2.3 无刷直流直线电动机的通电状态分析	42
2.3 无刷直流直线电动机的控制方式分析	47
2.3.1 无刷直流直线电动机的开环调速控制方式	48

2.3.2 无刷直流直线电动机的闭环控制方式	49
参考文献	54
第3章 无刷直流直线电动机系统建模和仿真研究	55
3.1 无刷直流直线电动机的基本公式	55
3.1.1 短线圈式三相无刷直流直线电动机的基本公式	56
3.1.2 短磁钢式三相无刷直流直线电动机基本公式	58
3.2 无刷直流直线电动机建模研究	59
3.2.1 Matlab/Simulink/SimPowerSystems 简介	59
3.2.2 无刷直流直线电动机控制系统仿真模型的建立	60
3.3 无刷直流直线电动机仿真分析	68
3.3.1 无刷直流直线电动机开环系统仿真研究	68
3.3.2 无刷直流直线电动机电流和速度双闭环系统仿真研究	69
参考文献	72
第4章 三相无刷直流直线电动机	73
4.1 三相无刷直流直线电动机定位力的抑制	73
4.1.1 端部定位力的抑制	74
4.1.2 齿槽定位力的抑制	79
4.2 三相无刷直流直线电动机的动态特性分析	82
4.2.1 三相无刷直流直线电动机换相过程动态特性分析	82
4.2.2 PWM 调制方式下系统动态特性分析	88
4.3 三相无刷直流直线电动机的推力波动	99
4.3.1 非理想反电动势引起的推力波动	100
4.3.2 非理想换相绕组电流引起的推力波动	104
4.3.3 换相引起的推力波动	105
4.3.4 非理想换相方式引起的推力波动	107
4.4 三相无刷直流直线电动机的控制系统设计	110
4.4.1 三相无刷直流直线电动机控制器硬件设计	110
4.4.2 三相无刷直流直线电动机控制器软件设计	120
参考文献	123
第5章 九相无刷直流直线电动机	125
5.1 多相电动机研究概述	125

5.1.1	多相电动机研究历史	125
5.1.2	无刷直流直线电动机的多相化特点	127
5.2	九相无刷直流直线电动机基本原理	128
5.2.1	九相无刷直流直线电动机的基本物理量关系	129
5.2.2	九相无刷直流直线电动机的纵向端部定位力抑制	131
5.3	九相无刷直流直线电动机的绕组连接方式及通电方式分析	132
5.3.1	九相无刷直流直线电动机的绕组连接方式	133
5.3.2	九相无刷直流直线电动机的通电方式分析	134
5.4	九相无刷直流直线电动机的动态特性分析	137
5.4.1	九相无刷直流直线电动机的稳态特性	137
5.4.2	九相无刷直流直线电动机的换相过程分析	138
5.4.3	PWM 调制方式下系统动态特性分析	140
5.5	九相无刷直流直线电动机的控制系统	142
5.5.1	九相无刷直流直线电动机的控制器硬件电路设计	143
5.5.2	九相无刷直流直线电动机控制器的软件设计	146
5.6	九相无刷直流直线电动机的故障运行	148
5.6.1	电力电子器件 IGBT 故障运行	149
5.6.2	绕组与 IGBT 之间连接线故障分析	154
5.6.3	绕组故障分析	154
5.6.4	故障检测	157
	参考文献	158



1

第 1 章 绪论 <<<<

直线电动机是一种将电能直接转换成直线运动机械能的执行装置,绕组通入交流电或直流电后,电流与磁场相互作用产生电磁推力。直线电动机技术经过了近 170 年的发展,从开始的不受重视,到理论上逐渐完善,再到驱动控制技术日趋成熟,现在已经广泛应用于军事、工业生产和日常生活等诸多领域。

1.1 直线电动机基本原理和分类

直线电动机与旋转电动机的发展几乎同步,其历史最早可追溯到 1845 年,查尔斯·慧斯通开始提出并制作了略具雏形的直线电动机。之后,伴随着旋转电动机的发展,直线电动机也逐渐发展起来^[1]。

直线电动机由旋转电动机沿径向剖开并展成平面而成,每种旋转电动机都有其相对应的直线电动机,如图 1-1 所示。直线电动机固定部分称为定子,平动部分称为动子。旋转电动机的定子既可能变为直线电动机定子,也可能变为动子;相应地,旋转电动机的转子既可能变为直线电动机动子,也可能变为定子。相对于旋转电动机,直线电动机只不过由旋转运动变为直线运动,其基本原理与旋转电动机基本一致^[1]。

按照不同的原则,直线电动机可以有不同的分类方法。

按照电动机的机种分类,可分为直线感应电动机、直线同步电动机以及直线直流电动机三种。

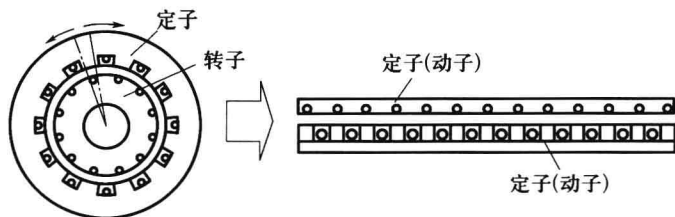


图 1-1 直线电动机演变过程

按其结构形式分类,可分为平板型直线电动机、圆筒型直线电动机、圆盘型直线电动机以及圆弧型直线电动机等。

按其有无电刷分类,可分为无刷直线电动机和有刷直线电动机。

此外,还存在一些非电磁感应原理的直线电动机,如压电直线电动机、超声波直线电动机以及磁致伸缩直线电动机等。

某一种直线电动机可能属于几个种类,如无刷直流直线电动机按照机种分类既可说是直线同步电动机,也可说是直线直流电动机;按其结构形式又可能是平板形直线电动机、圆筒形直线电动机、圆盘形直线电动机以及圆弧形直线电动机四种中的一种;按其有无电刷又是无刷直线电动机。

本文论述的无刷直流直线电动机是一种长行程大推力直线电动机。

1.2 直线电动机的发展历史

直线电动机的发展经历了漫长的历史。早在 1845 年查尔斯·慧斯通就提出了直线电动机的概念。近 170 年的历史中,直线电动机大致经历了探索试验、开发应用和实用商品化三个阶段^[2,3]。

大推力、长行程直线电动机是直线电动机的特例,主要针对军事领域和工业领域,较少应用在民用领域。下面简要介绍其发展历程和现状。

1905 年提出了直线电动机作为火车推进机构的方案,虽然当时受限于经济性、可靠性等方面因素并没有付诸实施,但目前在地铁和高铁上的应用已有了突破性进展。1917 年出现了第一台圆筒形直线电动机,发明者试图把它作为导弹发射装置,但其发展并没有超出模型阶段。从 1845 年到 1930 年前后这个阶段,科学家们提出了很多有创意的设想,从理论上也做了各种探讨,但由于没有从试验上去验证这些想法和理论,以致于有不少直线电动机的机理还没有真正与实际相结合,许多设想没能付诸实现^[1]。

从 1930 年到 1955 年之间,大推力、长行程直线电动机进入了试验验证阶

段。在这个阶段中,科研人员获取了大量的试验数据,从而对已有理论有了更深一层的认识,奠定了直线电动机今后的应用基础。1945年,美国西屋公司首先研制成功的电力牵引飞机弹射器,以7400kW的直线电动机为动力,经4.1s时间将一架4535kg的飞机在165m行程内由静止加速到188km/h的速度,它的试验成功,使直线电动机受到了应有的重视。1954年,英国皇家飞机制造公司利用双边扁平型直流直线电动机制成了一种发射导弹装置,试验速度据称可达1600km/h。在这个阶段中,尤其值得一提的是,直线电动机作为高速列车的驱动装置这一方案得到了各国的高度重视并计划予以实施^[1]。

自1955年以来,直线电动机进入了全面的开发阶段。先进控制技术和新材料的发展,更加助长了这种发展趋势。在这段时期中,关于直线电动机相关的专利申请数量也开始急剧增加。这一时期的理论探讨和试验研究对未来直线电动机技术发展起到了重要的推动作用。1966年,E. Laithwaite比较系统地分析了直线电动机理论并出版了专著《Induction Machines for Special Purposes》,对直线电动机的发展起到了极大的推动作用,做出了开创性的贡献。

从20世纪70年代开始,随着磁悬浮列车、轨道交通系统、电磁辅助推进以及舰载机弹射等领域需求加大,大推力、长行程直线电动机的理论研究和试验研究得到进一步完善。

随着直线电动机技术迅速发展,许多国家越来越重视相关技术人才的培养,在德国、法国、英国、瑞士以及瑞典等的大学里,都设有直线电动机专业课程和直线电动机研究室。目前,世界上很多著名电气企业都在研究和开发直线电动机产品,例如美国的西屋公司、德国的西门子公司。特别是日本的一些公司和研究机构,其人员之多和研究范围之广,全世界堪称首屈一指。

20世纪70年代初我国开始进行直线电动机的研究。1972年,浙江大学在国内首先翻译了《直线感应电动机》译文集。随后国内很多研究单位参与直线电动机相关技术研究,如中国科学院电工所、西安交通大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、上海大学、太原工业大学、焦作矿业学院等^[2,3]。主要成果有直线电动机驱动遥控(电动)窗帘机、直线电动机驱动门、炒茶机、工厂桥式起重機、电磁锤、冲压机、摩擦压力机、磁分选机、玻璃搅拌机、拉伸机、送料机、粒子加速器、邮政分拣机以及矿山运输系统等。电磁发射器和弹射器也属于特殊直线电动机,国内学者在该领域也做了大量工作,如哈尔滨工业大学进行了重接式电磁发射装置的研究^[4-7]。虽然我国直线电动机研究也取得了一些成绩,但与国外相比,其推广应用方面尚存在很大差距。目前,国内不少研究单位已越来越注意到这一点,并开展了大量的工作,取得了一些成果和可观的经济效益以及社会效益。

1.3 直线电机的特点及应用领域

采用直线电动机驱动的装置具有很多优点,广泛地应用于传统工业、航空航天、军事及其他各种直线运动的场合,直线电动机在很多领域得到了广泛应用。

1.3.1 直线电机的优点

- (1) 能够直接驱动负载实现直线运动,不需要中间传动机构,结构相对简单,系统效率高,成本较低,易于维护。
- (2) 克服了旋转电动机的转子由于受到离心力的作用而其运动速度受限的缺点,能够实现超高速。
- (3) 省去了中间传动机构,系统响应时间较短,能够实现精密控制。
- (4) 采用悬浮技术可实现无接触运动。
- (5) 直线电动机属于开放式系统,散热面积较大,易于实现冷却,比较适合应用于大功率系统中。

1.3.2 直线电机的应用领域

1 直接驱动领域

采用直线电动机驱动的传动装置,不需要任何转换装置而直接产生推力,因此可以省去中间转换机构,简化了整个装置,保证了运行的可靠性,提高了传动效率,降低了制造成本并易于维护。直线电动机直接驱动实例包括钢管输送机、运煤机、各种电动门、电动窗、工厂行车、电磁锤、冲压机等^[2,3]。图1-2(a)为直线电动机直接驱动剃须刀;图1-2(b)为抽油领域用直线电磁抽油机,可将系统效率提高很多,节约大量电能;图1-2(c)为直线电动机直接驱动分检传输系统。直线电动机在轨道交通领域应用潜力巨大,直线电动机轨道交通系统利用轮轨支撑和导向,采用直线电动机牵引,是一种节能环保、动力强劲、转弯灵活的新型轨道交通技术,它是轮轨交通技术的一项重大突破,具有十分广阔的应用前景^[8]。自1985年加拿大多伦多市 Scarborough 投入使用以来,全球已有15条地铁线路在使用或在建直线电动机运载系统。我国广州地铁4号线和北京首都机场线均采用该方案,现已投入使用,如图1-2(d)所示。

2 超高速发射领域

普通旋转电动机的转子由于受到离心力的作用,其圆周速度受到限制;而直线电动机运行时,它的零部件和传动装置不受到离心力的作用,因而在如电磁炮一类特殊直线电动机装置中,动子直线速度可以不受限制。从化学能发展到电

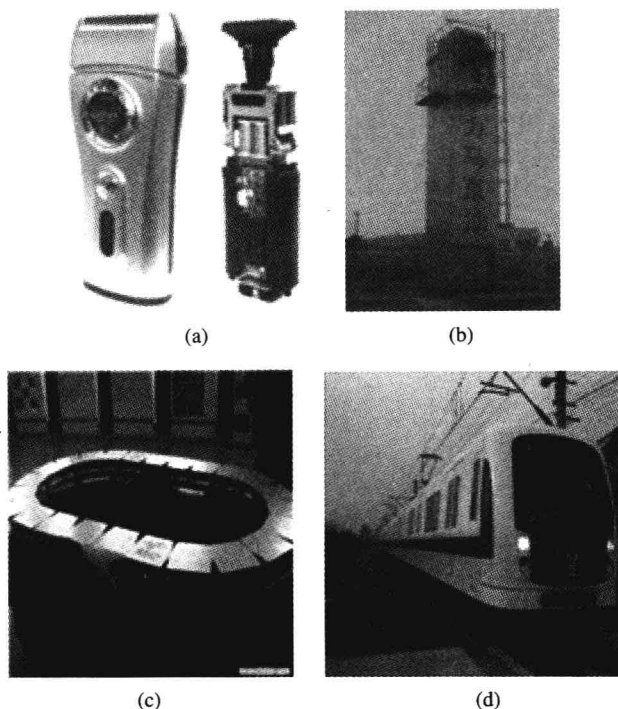


图 1-2 直线电动机直接驱动应用领域

能是军事领域内一个新的里程碑。从理论上讲,使用电能发射的发射体速度将不受外界因素影响,只受发射体和线圈材料的限制,因此电磁发射是一种理想的发射方式。电磁发射是把电磁能转化为动能,借助电磁力做功。电磁发射装置是一种特殊的电气传动装置,可以把发射体加速到十几甚至几十千米/秒。按照结构的不同,电磁发射装置可以分为导轨式、同轴线圈式和磁力线重接式三种^[9-12]。如美国正在研制的轨道电磁炮,初速度能够达到 7 倍声速,炮弹用 1min 时间穿出大气层,在太空滑飞 4min 后重返大气层,然后以马赫数为 5 的速度下落。图 1-3(a)和(b)为线圈炮和导轨炮,图 1-3(c)为导轨炮靶场实射效果图。

3 精密控制领域

旋转电动机通过钢丝绳、齿条、传动带等转换机构将旋转运动转换成直线运动,这些机构在运行中其噪声和损耗是不可避免的。直线电动机直接产生直线运动,系统的噪声很小或无噪声,运行环境好^[13-15]。此外,由于减少了中间传动环节,可以提高控制精度,如数控车床中的直线电动机进给系统,自 1993 年德国 Ex-Cell-O 公司研发出世界上第一台直线电动机驱动工作台的加工中心以

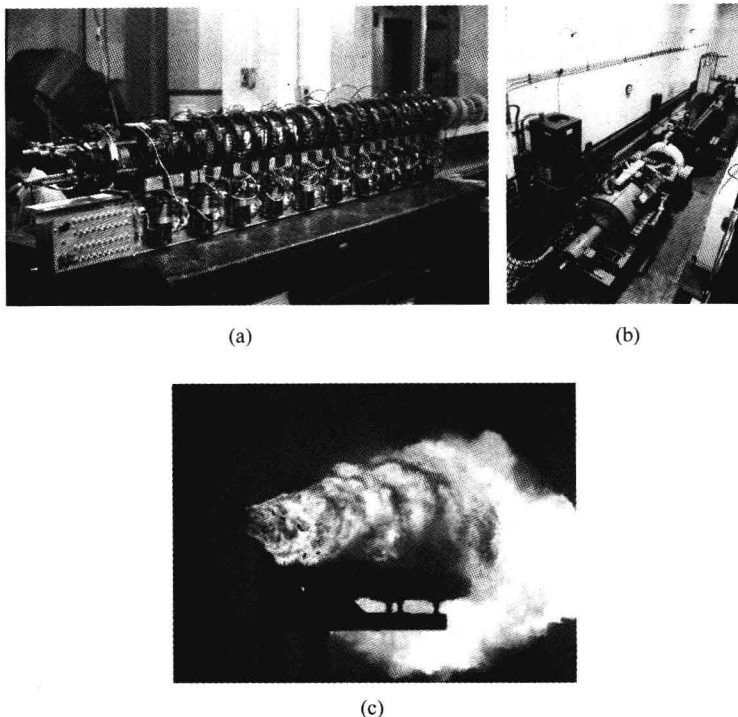


图 1-3 电磁炮

来,直线电动机已在不同种类的机床上得到应用。2001 年、2003 年欧洲机床展,2002 年、2004 年日本机床展及美国机床展上每次都有几十家公司的展品采用直线电动机驱动系统。目前直线电动机驱动进给速度可达 $100\text{m}/\text{min}$, 加速度 $1g \sim 2g$ 的机床已很普遍。日本 Mazak 公司宣称,该公司将在近期推出快移速度 $500\text{m}/\text{min}$, 加速度 $6g$ 的超声速加工中心,在微细加工及精密磨削中,可实现 $10\mu\text{m}$ 进给分辨率及 $20\text{m}/\text{min}$ 的快移速度,加工表面粗糙度 $< 1\text{nm}$ 。机床电动机要求线性度好,可以采用无铁芯结构,重复定位精度达到 1nm ,行程最大推力 10000N ,最大行程 2m ,如图 1-4(a)和(b)所示。德国研制的超声振动设备 X、Y、Z 轴都采用直线电动机驱动,所有轴都配置了绝对测量系统,动态性能好,精度高,如图 1-4(c)所示。

4 无接触直线运动领域

直线电动机通过电能直接产生直线电磁推力,其运动可实现无机械接触,传动零部件无磨损,大大减少了机械损耗,例如直线电动机驱动的磁悬浮列车和电磁辅助推进装置。1922 年德国工程师赫尔曼·肯佩尔提出磁悬浮概念,20 世纪

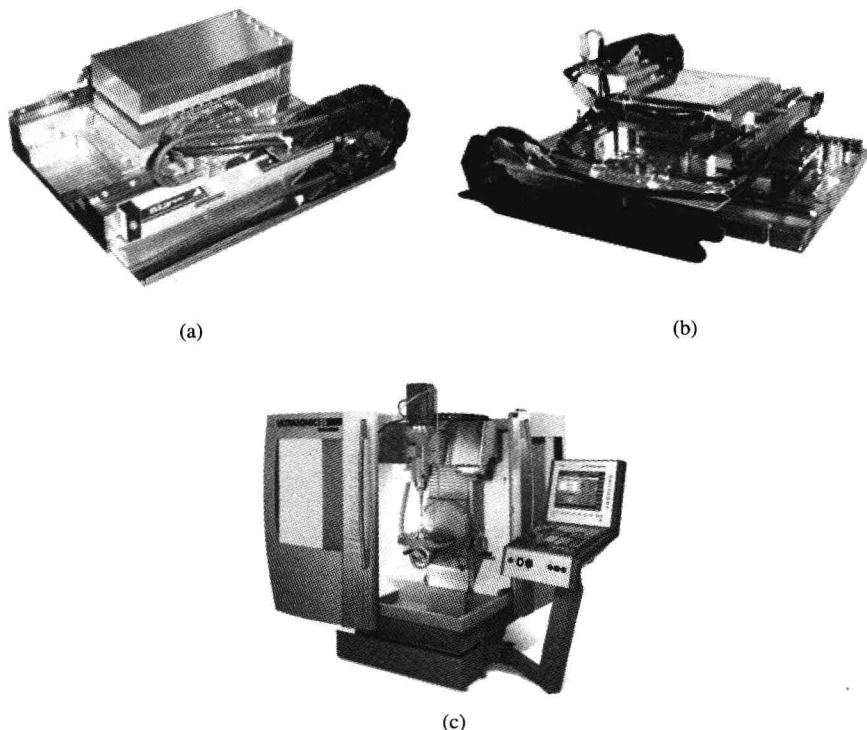


图 1-4 直线伺服电动机驱动的机床

六七十年代很多国家投入了大量的人力、物力来研究磁悬浮。1969 年在德国出现世界上第一列磁悬浮列车小型模型,1972 年日本成功进行了相关试验,1979 年磁悬浮技术列车就创造了 517km/h 的速度纪录,如图 1-5(a)所示^[16]。在上海,磁悬浮列车已进入商业运营,正线全长近 30km,设计速度和运行速度分别为 505km/h 和 430km/h,如图 1-5(b)所示。

电磁辅助推进设想由 Sandia 实验室提出并进行试验研究,使用电磁推进(直线电动机或电磁炮)取代第一级火箭,发射体的初速为 4.2km/s,再需一级火箭即可入轨,发射重量可减少 70%,发射费用仅为传统发射方式的 1%。20 世纪 80 年代 NASA 实验室开始启动一项用电磁发射器从地面向太空发射有效载荷的庞大计划,若把重 1t 的放射性核废料以第三宇宙速度脱离太阳系,所需的成本仅为化学推进剂火箭的 1% 左右,如图 1-5(c)和(d)所示。一旦电磁发射技术应用于航天领域,将为卫星发射等方面带来难以想象的价值^[17-20]。国内哈尔滨工业大学的李立毅和李小鹏也对电磁炮辅助推进方案作了相关研究^[21-24]。

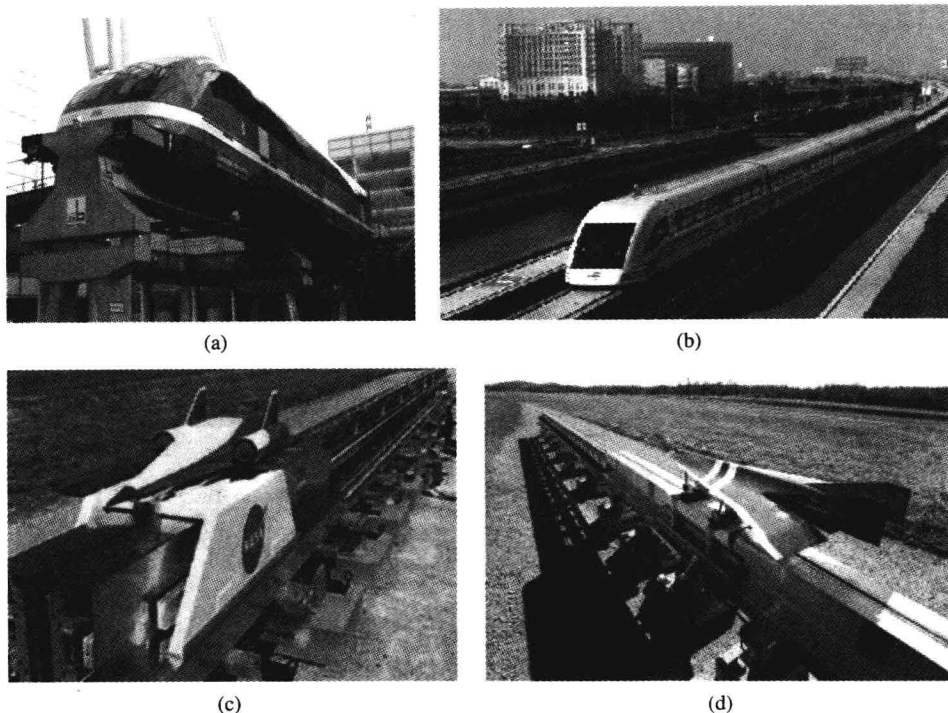


图 1-5 磁悬浮列车和电磁辅助推进装置

5 高功率密度系统应用领域

由于直线电动机的结构简单,其散热效果也好,特别是常用的扁平型短初级直线电动机,其铁芯和端部绕组直接暴露在空气中,同时次级很长,具有很大的散热面,热量很容易散发掉,所以这一类直线电动机的热负荷可以取得较高,而且不需要附加冷却装置,特别适合应用在需要高功率密度的场合,如航空母舰舰载飞机弹射等领域。电磁弹射器被认为是蒸汽弹射器的可行替代方案,它利用直线电动机的直线运动带动舰载机加速到起飞速度^[1,25]。电磁弹射器(EMALS)的研究历史最早可追溯到20世纪40年代,科研工作者们进行了一系列试验研究,如图1-6(a)所示。1988年,美国开发出电磁弹射器的小比例模型,该模型长3.66m,宽为实际尺寸的1/2,试验表明,其静态推力可达到500kN以上,电磁辐射也能够被控制在槽型结构内,如图1-6(b)所示。此后,美国又对此项技术进行了许多设计研究。2008年,美国航空母舰电磁弹射器完成第一阶段试验,通过海量重复试验,验证了电磁弹射器的电气、热力设备的性能以及储能系统的充放电周期率。2009年,该研究机构进行了第二阶段试验,包括满功率试验以及环境适应性测试,如图1-6(c)所示。

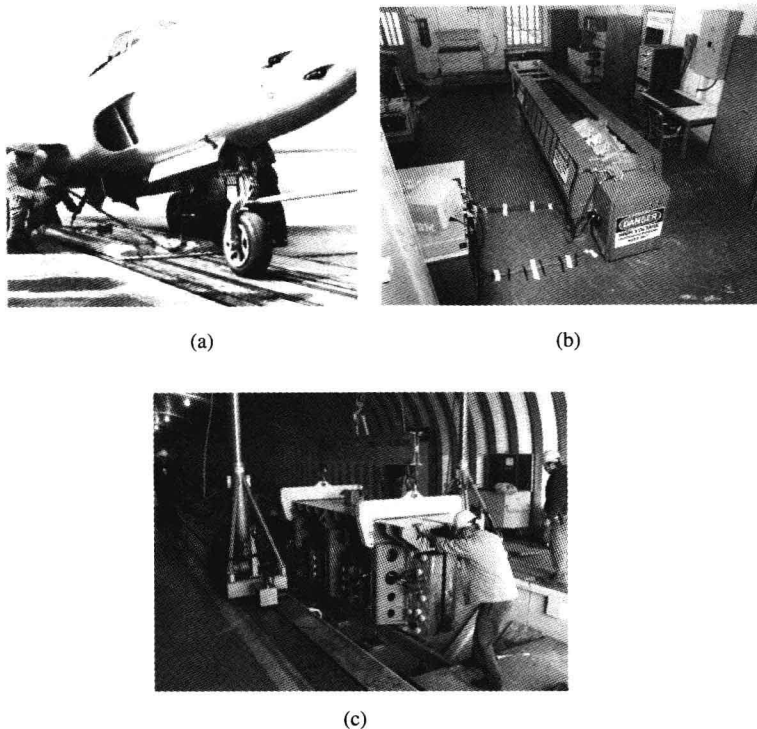


图 1-6 电磁弹射器

当然,直线电动机也存在一些不足之处。与相同容量的旋转电动机相比,直线电动机的效率和功率因数低些,尤其在低速时比较明显。主要由两个方面原因引起:一是直线电动机的初、次级气隙一般比旋转电动机的大,因此需要的磁化电流较大,使损耗增加;二是由于初级铁芯的两端断开,产生了所谓的边端效应,其结果也是导致损耗增加。但从系统总体来看,由于采用直线电动机后可省去中间传动装置,因此系统效率会比采用旋转电动机时高。

综上所述,直线电动机在一些适合采用直线运动的系统中发挥着巨大作用。

1.4 无刷直流直线电动机的工作原理

无刷直流电动机具有很多优点,如具有较大的启动转矩、机械特性比较硬、系统响应较快、调速器控制相对简单、效率最高以及功率密度最高等。无刷直流

直线电动机也具有类似的优点。

1.4.1 有刷直流电动机的工作原理

无刷直流直线电动机是在旋转式无刷直流电动机基础上发展起来的,而无刷直流电动机的基础是有刷直流电动机,所以有必要分析有刷直流电动机的工作原理。有刷直流电动机的结构示意图如图 1-7 所示。

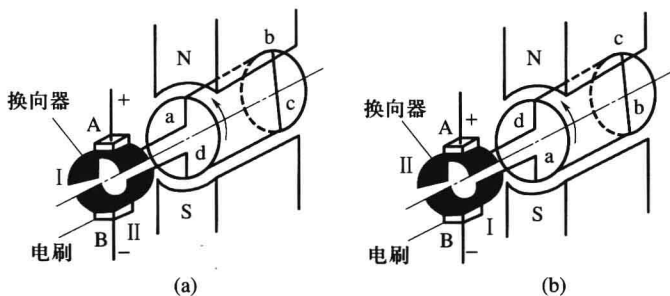


图 1-7 有刷直流电动机的结构示意图

有刷直流电动机结构主要包括定子和转子两部分,当然还包括机壳和端盖等。定子上有主磁极,此外还有电刷;转子主要包括电枢和换向器。如图 1-7(a)所示,线圈 $abcd$ 形成电枢,电刷 A、B 和换向片 I 和 II 组成机械换向机构。当接上电源后,电流 i 从电刷 A 流入,经过换向片 I、线圈 $abcd$ 至换向片 II,然后由电刷 B 流出。根据毕奥·萨伐尔定律:垂直于磁场方向的载流导体在磁场中受到电磁力 f ,形成作用在线圈上的电磁转矩。在该电磁转矩作用下,线圈将逆时针转动。当载流导体转过 180° 电角度后,如图 1-7(b)所示,电流 i 还是从电刷 A 流入,经由换向片 II、线圈 $dcba$,至换向片 I,最后仍从电刷 B 流出,转矩方向不变。可见,在有刷直流电动机中,就是借助电刷和换向器使电枢电磁转矩方向始终不变,电动机转子连续旋转,这就是有刷直流电动机的机械换相过程。

从直流电动机运动过程可知,电枢磁场与定子磁场(主磁场)始终维持 90° 相位差,不考虑磁饱和的情况下,直流电动机电磁转矩与电枢电流成正比。但是电刷和换向器在电动机转动时会产生火花,使用场合受到限制。

随着传感器技术、半导体技术以及控制技术的发展,出现了电子换向。借助反映转子位置的位置传感器输出信号,通过电子换相线路驱动与电枢绕组连接的相应功率开关器件,使电枢绕组依次通电,产生跳跃式的旋转磁场,驱动永磁转子旋转。随着转子的转动,位置传感器不断地送出信号,以改变电枢绕组的通