

Yongci Zhixian Tongbu
Dianji Zhiqu Dianti Yunxing Kongzhi

永磁直线同步电机直驱 电梯运行控制

张宏伟 王新环 著

中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press

永磁直线同步电机直驱电梯运行控制

张宏伟 王新环 著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了永磁直线同步电机直驱电梯的发展概况,分析了直线电机直驱电梯的结构及特点,研究了转子位置变化对绕组分段永磁直线同步电机电磁参数的影响规律。提出了永磁直线同步电机直接推力控制及 PLC 绕组切换运行控制的总体方案,确定了转子位置检测及绕组切换控制方法,阐述了永磁直线同步电机直接推力控制原理。针对位置传感器信号丢失引起的失步问题,提出一种容错切换控制方法,说明了容错切换控制的实现思路。最后,以家用永磁直线同步电机直驱电梯为对象,对直线电机直驱电梯运行控制系统进行了分析和设计。

本书可作为高等院校电气工程、控制工程专业研究生的教学参考书,也可供从事相关领域设计、制造的科研人员和工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

永磁直线同步电机直驱电梯运行控制 / 张宏伟,王新环著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2018.10

ISBN 978-7-5646-3890-0

I. ①永… II. ①张… ②王… III. ①永磁同步电机—
电力传动—电梯—高等学校—教材 IV. ①TU857

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 020668 号

书 名 永磁直线同步电机直驱电梯运行控制
著 者 张宏伟 王新环
责任编辑 仓小金 何晓惠
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 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 7.5 字数 143 千字
版次印次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

电梯进入人们的生活已经有 160 多年,它极大地方便了人们的生活。作为现代城市高层建筑的运输工具,电梯运载压力不断加大。随着提升高度逐渐增加,传统钢丝绳牵引电梯的运载能力正在逼近极限。

直线电机直驱电梯是一种新型的电梯驱动模式,这种电梯与传统缆绳电梯完全不同。它采用直线电机直接驱动轿厢,直线电机定子相对于定子的运动,就是轿厢相对于导轨的运动。这种驱动模式不用钢丝绳吊挂轿厢,打破了钢丝绳的种种限制:

(1) 省去了中间机械传动装置和提升钢丝绳,电机定子与轿厢的运动距离不受设备限制,使其更适合于超高层建筑提升。

(2) 没有牵引钢丝绳,容易实现高速运行,提高了工作效率。

(3) 没有钢丝绳、配重的限制,可以实现多轿厢循环运行,大大提高井道的利用率,减少电梯和井道的数量。

(4) 安全可靠,具备多重多级保护功能,可靠性高。

近年来,随着直线电机理论、变频驱动技术、计算机控制技术的发展,直线电机直驱电梯发展迅速,本书正是这一背景下的研究成果。本书主要介绍绕组分段永磁直线同步电机直驱无绳电梯的运行控制。全书共分 6 章,各章主要内容如下:

第一章介绍电梯的发展概况,直线电机的分类,永磁直线同步电机的结构、原理及控制方法,直驱电梯的发展现状。

第二章在介绍直线电机驱动方案及直驱电梯结构的基础上,分析了定子绕组调度策略给出了绕组切换控制整体设计方案。

第三章介绍了单段永磁直线同步电机数学模型的建模方法。

第四章介绍了定子位置变化对电机参数的影响规律,建立了绕组分段 PMLSM 直驱电梯整体数学模型。

第五章介绍了永磁直线同步电机直接推力控制的原理,并利用 MATLAB 软件,给出了直接推力控制仿真实现方法。

第六章首先介绍了绕组切换信号的检测及驱动控制,提出了一种容错切换控制方法,说明了容错切换控制的实现思路。最后,以家用永磁直线同步电机直驱电梯为对象,对直线电机直驱电梯运行控制系统进行了分析和设计,开展了相关实验验证,给出了实验结果。

本书的出版得到了河南省自然科学基金项目(162300410349)、河南省高校控制工程重点学科开放课题(KG2014-05)、河南理工大学基本科研业务费(NSFRF140118)、河南理工大学博士基金(672103/001/122)、电气工程与自动化学院中青年拔尖创新人才项目(660807/016)的资助,在此表示感谢。

本书由河南理工大学张宏伟、王新环撰写。在本书的撰写过程中,得到了河南理工大学电气工程与自动化学院、直驱电梯产业技术研究院的支持,书中参考和引用了国内外同行专家和学者的相关研究成果,在此一并表示衷心的感谢。

由于著者水平所限,书中错误或不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

著者

2017年12月

| | |
|-------------------------------------|----|
| 目 录 | |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 第一节 电梯发展概况..... | 1 |
| 第二节 直线电机的分类..... | 3 |
| 第三节 永磁直线同步电机结构及工作原理..... | 4 |
| 第四节 永磁直线同步电机控制方法 | 10 |
| 第五节 直线电机直驱电梯的发展现状 | 13 |
| 本章参考文献 | 16 |
| 第二章 PMLSM 直驱电梯运行控制方案设计 | 21 |
| 第一节 直线电机驱动方案 | 21 |
| 第二节 PMLSM 直驱家用电梯结构 | 23 |
| 第三节 PMLSM 直驱电梯定子绕组调度策略 | 25 |
| 第四节 绕组切换控制总体方案设计 | 27 |
| 本章参考文献 | 28 |
| 第三章 永磁直线同步电机数学模型 | 30 |
| 第一节 概述 | 30 |
| 第二节 永磁直线同步电机的坐标变换 | 30 |
| 第三节 永磁直线同步电机 ABC 坐标系数学建模 | 36 |
| 第四节 永磁直线同步电机 dq 坐标系数学建模 | 38 |
| 本章参考文献 | 42 |
| 第四章 PMLSM 直驱电梯整体建模 | 44 |
| 第一节 定子位置变化对定子电感的影响规律 | 44 |
| 第二节 定子位置变化对反电势的影响规律 | 47 |
| 第三节 出入端效应对推力的影响规律 | 53 |
| 第四节 绕组分段永磁直线电机整体建模 | 56 |
| 本章参考文献 | 62 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第五章 PMLSM 直接推力控制建模与仿真 | 64 |
| 第一节 概述 | 64 |
| 第二节 直接推力控制研究现状 | 64 |
| 第三节 永磁直线同步电机直接推力控制原理 | 67 |
| 第四节 电压矢量对电磁推力的作用 | 69 |
| 第五节 永磁直线同步电动机仿真建模 | 70 |
| 第六节 六扇区 PMLSM 直接推力控制实现方法 | 76 |
| 第七节 直接推力控制推力脉动抑制 | 86 |
| 本章参考文献 | 86 |
| | |
| 第六章 PMLSM 直驱电梯运行控制系统设计 | 89 |
| 第一节 绕组切换位置信号的检测及驱动控制 | 89 |
| 第二节 绕组切换运行控制系统设计 | 91 |
| 第三节 绕组切换容错控制 | 94 |
| 第四节 安全保护系统设计 | 96 |
| 第五节 PLC 运行控制程序设计 | 99 |
| 第六节 直接推力控制系统设计 | 100 |
| 第七节 实验研究 | 112 |
| 本章参考文献 | 114 |

第一章 绪 论

第一节 电梯发展概况

1845年,英国人汤姆逊制成了世界上第一台液压升降机^[1,2]。当时由于升降机功能不够完善,难以保障安全,故较少用于载人。1852年,美国机械工程师奥的斯(Elisha Graves Otis)在一次展览会上向公众展示了他的发明,从此宣告了电梯的诞生,也打消了人们长期对升降机安全性的质疑,随后奥的斯组建成立了奥的斯电梯公司。1857年,奥的斯公司在纽约安装了世界第一台客运升降机;1889年,奥的斯公司制成使用了世界上第一台以直流电动机驱动的升降机;1903年,奥的斯公司采用了曳引驱动方式代替了卷筒驱动,提高了电梯传动系统的通用性;同时也成功制造出有齿轮减速曳引式高速电梯,使电梯传动设备重量和体积大幅度缩小,增强了安全性,并成为沿用至今的电梯曳引式传动的基本型式^[1-3]。

1976年,日本富士达公司开发了速度为10 m/s的直流无齿轮曳引电梯;1977年,日本三菱电机公司开发了可控硅控制的无齿轮曳引电梯;1979年,奥的斯公司开发了第一台基于微机的电梯控制系统,使电梯控制进入了一个崭新的发展时期;1983年,日本三菱电机公司开发了世界上第一台变频变压调速电机,并于1990年将此变频调速系统用于液压电梯驱动;1996年,芬兰通力电梯公司发布了最新设计的无机房电梯 MonoSpace,由 Ecodisk 扁平的永磁同步电动机变压变频调速驱动,电机固定在井道顶部侧面,由曳引钢丝绳传动牵引轿厢;1996年,日本三菱电机公司开发了采用永磁同步无齿轮曳引机和双盘式制动系统的双层轿厢高速电梯,安装在上海 Mori 大厦;1997年,迅达电梯公司展示了 Mobile 无机房电梯,该电梯不需曳引绳和承载井道,自驱动轿厢在自支撑的铝制导轨上垂直运行^[1-3]。

随着现代建筑物楼层的不断升高,电梯的运行速度、载重量也在不断提高。世界上电梯速度最高已经达到16 m/s,但从人体对加速度的适应能力、气压变化的承受能力和实际使用电梯停层的考虑,一般将电梯的速度限制在10 m/s以下^[1-3]。

目前,为了降低建筑物造价,提高建筑面积的有效利用率,无机房电梯被大量使用。它无须建造普通意义上的机房,对井道顶层楼板及井道没有特殊要求,这样既节约了机房建造费用,又提高了井道的利用率。此种电梯曳引机是将电动机、曳引轮、制动器等合为一体,安装在井道上方的导轨上,或采用行星齿轮减速器,是一种长寿命的曳引机^[1-4]。

随着高层建筑不断向空中延伸,提升高度逐渐增加,若仍采用传统的钢丝绳牵引提升模式将遇到以下难以克服的问题^[6-10]:

(1) 受钢丝绳的强度、单位长度的绳重、安全系数、根数和轿厢重量等因素的影响,一次提升高度受到限制,有时需要多级提升。同时,钢丝绳过长弹性变形大,导致轿厢振动和提升系统控制困难。

(2) 受钢丝绳缠绕速度的限制,提升速度不能太高。

(3) 占去大量宝贵的建筑空间,系统惯量大,运行效率低。

鉴于此,研究探索新的提升模式,替代传统的钢丝绳牵引模式具有十分重要的意义。直线电机驱动的无绳提升系统因其自身优点成为解决超高层建筑提升的热点研究课题^[6-10]。永磁直线同步电机(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM)及其伺服系统以响应速度快、定位精度高、行程不受限制、节能高效等优点,成为无绳提升系统的理想驱动源^[7,11-13]。

PMLSM 直驱无绳提升系统采用电枢绕组(初级)作为定子铺设在直线型轨道上,将永磁体动子(次级)与轿厢相连。直线电机动子相对于定子的运动,就是轿厢相对于导轨的运动。这种系统不用钢丝绳吊挂轿厢,打破了钢丝绳的种种限制^[7-9,11-13,28-29]:

(1) PMLSM 的动子与轿厢为一个整体,直接驱动轿厢做上下运动,省去了中间机械传动装置和提升钢丝绳,电机动子与轿厢的运动距离不受设备限制,使其更适合于超高层建筑提升。

(2) 可实现高速提升,提高了工作效率。由于采用直线电机动子直接驱动轿厢,没有牵引钢丝绳,容易实现高速运行;该提升系统的提升速度为 $v=2f\tau$ (τ 为电机的极距, f 为供电频率)。提升高度的增加只需要适当增加电机定子铺设的高度,适应性强。

(4) 传统的电梯受限于复杂的钢丝绳传动装置使其不可能在垂直运行的情况下再水平运行,而直线电机电梯没有钢丝绳、配重的限制,只需要加装水平的电磁导轨,既可以使其垂直运行又可以使其水平运行。这样的好处在于在一个电梯井道内可以存在多个轿厢同时运行,这将大大提高井道的利用率,减少电梯和井道的数量,整体造价低。

(5) 安全可靠。在系统失电和紧急情况下,除工作制动器、安全钳、缓冲器

三重常规的保护之外,还有第四重 PMLSM 自身固有的断电发电制动保护,理论上可完全避免坠罐的严重事故,安全性显著提高。

从 20 世纪 90 年代开始日本、德国等国家就开展直线电机电梯的研究工作,在电机设计、控制、信号检测等方面取得了一系列重要研究成果。三菱电机株式会社^[14,15]于 1991 年发明了利用直线电动机驱动的电梯,并将成果申请了专利,专利中的电梯采用永磁直线同步电机驱动,对直线电动机电梯的结构及安装布置方式进行了说明。

近年来,随着直线电机理论、变频驱动技术、计算机控制技术的发展,直线电机电梯发展迅速,但仍有许多关键问题亟待解决。本书主要介绍绕组分段永磁直线同步电动机直驱无绳电梯的运行控制。

第二节 直线电机的分类

直线电机是把旋转电机的定子、转子和气隙分别展开成直线形状,将电能直接转变为直线运动动能的电机^[16-18]。直线电机的基本结构如图 1-1 所示。

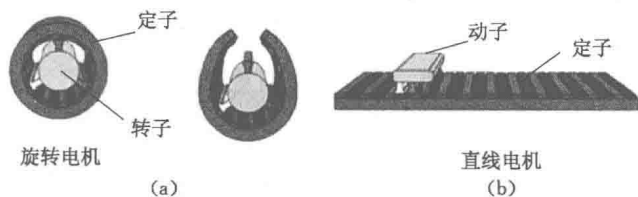


图 1-1 直线电机的基本结构

(a) 沿径向剖开;(b) 拉伸呈直线型

直线电机的历史最早可以追溯到 19 世纪 40 年代,伦敦大学国王学院的 Charles Wheatstone 提出和制作了直线电机的雏形,但并不成功,之后直线电机的发展经历了漫长而艰难的历史。进入 20 世纪 80 年代,随着材料技术、电子技术、电机控制理论以及电力电子器件的不断发展,直线电机的理论和应用得到了迅速发展。特别是近年来,由于高速、高精度机床进给系统的需要,直线电机的优越性逐步体现出来,直线电机的研究重新成为热点,实践上引人注目的增长和工业应用的显著受益使其逐渐成熟^[16-18]。

直线电机的种类较多,基本上每种旋转电机都有与之对应的直线电机。直线电机按不同的标准有不同的分类方法^[16]。

(1) 按结构形式分类:可分为平板型、圆筒型、圆盘型和圆弧型。

其中平板型直线电机又可分为单边型和双边型,每种型式下又可分为短初

级长次级、长初级短次级。

(2) 按工作原理分类:可以分为直线感应电机(Linear Induction Motor, LIM)、直线同步电机(Linear Synchronous Motor, LSM)、直线开关磁阻电机(Linear Switched Reluctance Motor, LSRM)等。

表 1-1 为常用直线电机的分类。

表 1-1 常用直线电机的分类

| 原理 | | 直流式 | 感应式 | 同步式 | 磁阻式 |
|----|------|--------|-------|--------|-----|
| 构造 | 结构形式 | 单边平板型 | 双边平板型 | 圆筒型 | 圆盘型 |
| | 动子长短 | 短初级长次级 | | 长初级短次级 | |
| | 磁通方向 | 横向磁通式 | | 径向磁通式 | |
| 电源 | | 直流 | | 交流 | |

直线感应电机具有结构简单、成本低等优点,但其效率、功率因数较低。而直线同步电机效率和功率因数较高,但是其动子装配困难、电机成本较高。相比较而言,由于直线同步电机效率和功率因数高,在实际应用中前景广阔。在高性能的永磁材料,特别是 NdFeB 出现后,永磁直线同步电机因其推力电流比高、损耗小、效率高、响应速度快等优点,越来越受到重视^[16,17]。

第三节 永磁直线同步电机结构及工作原理

一、永磁直线同步电机基本结构

永磁直线同步电机是旋转同步电机在结构上的一种演变,相当于把旋转同步电机的定子和转子沿轴向剖开,然后展开成直线。由定子演变而来的一侧称为初级,转子演变而来的一侧称为次级^[16-18]。由此得到了直线电机的定子和动子,图 1-2 为其转变过程。

与普通旋转同步电机一样,直线同步电机也由电枢和激磁(励磁)系统两部分组成。产生移动磁场的称为电枢系统,产生恒定磁场的称为激磁(励磁)系统^[16,20]。永磁直线同步电机的励磁磁场由永磁体产生。永磁直线同步电机结构图如图 1-3 所示。

永磁旋转同步电机中,永磁体安装在转子上,电枢绕组安装在定子中。在直线电机中,通常将移动部分称为动子,固定部分称为定子。对于 PMLSM 来讲,电枢和永磁体均可以作为动子或者定子。若永磁体安装在动子上,则在定子上

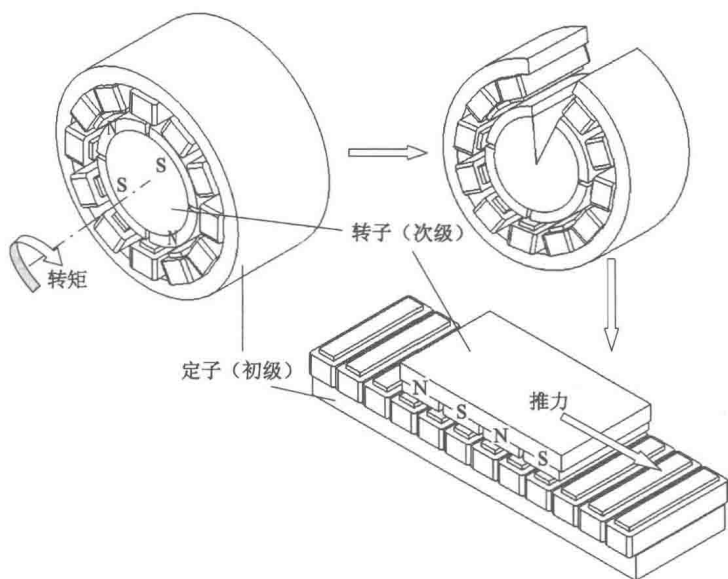


图 1-2 永磁直线同步电机的演变过程

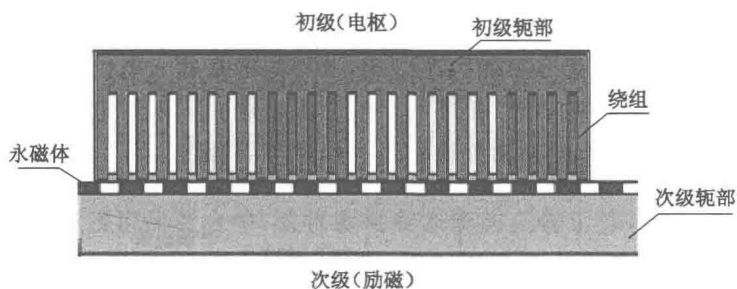


图 1-3 永磁直线同步电机结构示意图

安装通电绕组；若将永磁体安装在定子上，则在动子上安装通电绕组。习惯上，仍将电枢称为初级，永磁体称为次级（虽然初级、次级通常应用于感应电机和变压器）。

二、永磁直线同步电机的工作原理

直线电机不仅在结构上是旋转电机的演变，在工作原理上也与旋转电机类似。当电机的三相绕组中通入三相正弦交流电后，在电机气隙中产生旋转气隙磁场，旋转磁场的转速（又称同步转速）为^[16,17]：

$$n = \frac{60f}{p_n} \quad (\text{r/min}) \quad (1-1)$$

式中 f ——交流电源频率；

p_n ——电机的极对数。

如果用 v 表示气隙磁场的线速度，则有：

$$v = n \frac{2p\tau}{60} = 2f\tau \quad (\text{mm/s}) \quad (1-2)$$

式中 τ ——极距。

当旋转电机展开成直线电机形式以后，如果不考虑铁芯两端开断引起的纵向边端效应，此气隙磁场沿直线运动方向呈正弦分布，当三相交流电随时间变化时，气隙磁场由原来的圆周方向运动变为沿直线方向运动，次级产生的磁场和初级的磁场相互作用从而产生电磁推力。

在直线电机中我们把运动的部分称为动子，对应于旋转电机的转子。这个原理和旋转电机相似，二者的差异是：直线电机的磁场是平移的，而不是旋转的，因此称为行波磁场。这时直线电机的同步速度为 $v = 2f\tau$ ，旋转电机改变电源相序后，电机的旋转方向发生改变，同样的方法可以使得直线电机的动子运动方向发生改变。

在图 1-4 给出的原理图中，三相电流通入绕组后产生的磁场与旋转电机产生的磁场相似，即呈正弦分布的行波磁场，所不同的是通入电机的三相电流随时间变化时，行波磁场将按 ABC 相序沿直线方向运动。由两种电机机构的相通性可知行波磁场的位移速度是和旋转磁场的线速度一致的。

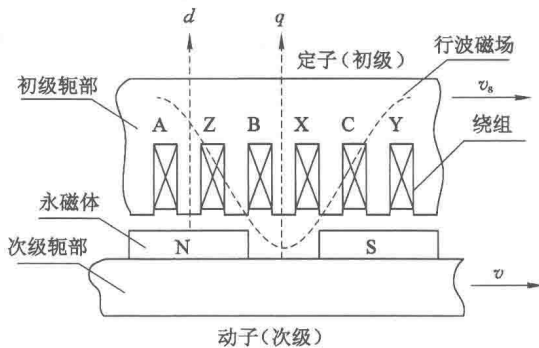


图 1-4 永磁直线同步电机结构原理

电磁推力是由在永磁直线同步电机中永磁体产生的励磁磁场与行波磁场相互作用产生的。在这个电磁推力的作用下，由于定子固定不动，动子就会沿行波

磁场运动的相同方向做直线运动,永磁同步直线电机的运行速度等于电机的同步速度^[16,17]:

$$v = v_s = 2f\tau \quad (1-3)$$

三、永磁直线同步电机的分类

永磁直线同步电机的初级一般由硅钢片叠压而成,次级也是由硅钢片叠压而成,并且在次级上安装有永磁体。对于运动部分可以是电机的初级,也可以是电机的次级,要根据实际的情况来确定。

初级移动式(动电枢型或动初级型)是指初级电枢绕组安装在移动部分,永磁体固定在轨道上,由于该方案电枢绕组长度远远小于永磁体长度,故称为短初级长次级型 PMLSM。

次级移动式(动磁钢型或动次级型)是指次级安装在移动部分,电枢绕组固定在轨道上,由于该方案永磁体长度远远小于电枢绕组长度,故称为长初级短次级型 PMLSM。

按不同的分类标准,可将 PMLSM 分为以下几种类型^[8,16]:

- (1) 单边型(Single-sided),双边型(Double-sided)。
- (2) 开槽(Slotted),无槽(Slotless)。
- (3) 铁芯(Iron-cored),无铁芯(Air-cored)。
- (4) 横向磁通式(Transverse flux),径向磁通式(Longitudinal flux)。
- (5) 动电枢型(Moving armature),动磁钢型(Moving magnet)。

对于动电枢型 PMLSM,由于其动子在运行过程中需要与供电电缆相连,尤其在长行程、高速度应用场合中,这将影响到系统的正常工作,降低整个系统的可靠性及安全性。因此在长行程、高速度的直线电机应用系统中,不宜采用动电枢型 PMLSM。而动磁钢型 PMLSM 则没有这些缺点,但由于其定子电枢绕组较长,绕组电阻、电感较大,对直流母线电压要求较高,损耗比较大、系统效率比较低。如果将其定子绕组进行分段,并采取分段供电的方案,就可以避免对整个定子电枢绕组供电,能降低对直流母线电压的要求,同时减小电机损耗、提高效率、方便电机的安装维护,提高系统安全性^[8,20],这就是分段式 PMLSM。

根据段边界处电机电枢(包括铁芯和绕组)的分段情况,可以将 S-PMLSM 分为三种类型:无铁芯分段永磁直线同步电机(Coreless sectioned PMLSM, CLS-PMLSM)、绕组分段永磁直线同步电机(Segment winding PMLSM, SW-PMLSM)和初级分段永磁直线同步电机(Primary sectioned PMLSM, PS-PMLSM)^[20,21]。CLS-PMLSM 为无铁芯电机,只将绕组分段,具有无齿槽效应、动态响应快、推力波动小等优点,但其推力体积密度较小,主要用于高速度、高精

度场合。PS-PMLSM 对整个初级分段,该结构存在较大的推力波动,主要用于推力波动要求不高的场合^[11,22]。SW-PMLSM 只将初级绕组分段而初级铁芯未分段,端部效应较小。

上官璇峰^[11]、王淑红^[22]、Kenji Suzuki, Yong-Jae Kim^[23,24]等研究的直线电机均属于初级分段永磁直线同步电机(PS-PMLSM),有的学者将这种电机称为定子电枢不连续永磁直线同步电动机(Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor With the Stationary Discontinuous Armature)、分段式永磁直线同步电动机(Segmental-primary Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)等,尽管名称不统一,但结构上均属于初级分段永磁直线电机。

四、分数槽绕电机结构

PMLSM 虽然具有力能指标高、损耗低、响应速度快、定位精度高等优点,但 PMLSM 有以下局限性^[19,25]:

(1) PMLSM 极距一般相对较小,每极每相槽数 q 通常很小,否则在一极距上的总槽数较多,造成制造困难。若 q 取较小的整数,虽然总槽数可以很少,但却不能充分利用分布绕组的方法来削弱磁场的谐波分量,产生较大齿槽力。

(2) 由于 PMLSM 定子电枢铁芯开断,存在开路磁场引起的边端效应(端部效应)。如果设计不当,会产生较大边端力。

齿槽力和边端力(统称为定位力或磁阻力)是 PMLSM 推力波动的主要来源,也是制约 PMLSM 性能的关键因素之一。应对齿槽力和端部效应引起的推力波动,并考虑抑制磁场谐波,尽量正弦化反电势的目标下,分数槽是优选方案之一。

永磁同步电动机采用分数槽结构设计可以达到分布绕组的效果,这种设计在每个齿上绕一个绕组元件,绕组端部无交叉重叠,除最大限度地降低绕组端部长度外,还可以改善气隙磁密,使得反电势波形更加接近正弦波形,抑制推力波动。同时对电枢长度、槽深、齿宽等参数进行优化设计,以降低推力波动。

PMLSM 三相绕组每极每相槽数 q 可以用式(1-4)来表示^[19,25-26]:

$$q = \frac{Z}{2 \times 3 \times p} = b + \frac{c}{d} = \frac{bd + c}{d} \quad (1-4)$$

式中 Z ——槽数;

p ——永磁体极对数;

b ——整数;

c/d ——不可约的真分数,当 q 取整数时即为通常设计的整数槽绕组;

q ——分数时为分数槽绕组;

d ——每 d 对转子永磁体极与定子电枢的一对极相对应。

因为 $bd+c$ 个槽务必在 60° 相带内, 所以将 $bd+c$ 个槽称为每极每相槽数, 用 q' 表示, 也代表每个等效相带的向量数。

相邻槽中导体的感应电动势之间存在相位差, 其大小取决于槽距的电角度。两个相邻槽之间槽距的机械角度乘以极对数即为槽距的电角度。相邻两槽的空间电角度即槽距电角度 α 可表示为^[19, 25-26]:

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} \quad (1-5)$$

分数槽绕组结构电机定子电枢的槽数与永磁体极数可以相差 1, 也可以相差 2, 槽极数配合相差 1 的结构在旋转式结构中会产生转子偏心力, 产生振动与噪声, 不利于轴承的寿命, 但这对直线式结构没有影响^[19, 26]。

以设计 24 槽 22 极电机为例。

$$q = 24 / (2 \times 3 \times 11) = \frac{4}{11} = b + \frac{c}{d} = \frac{bd+c}{d} \quad (1-6)$$

$$b=0, c=4, d=11$$

有 $q' = bd+c=4$, 分数槽绕组连接图如图 1-5 所示。

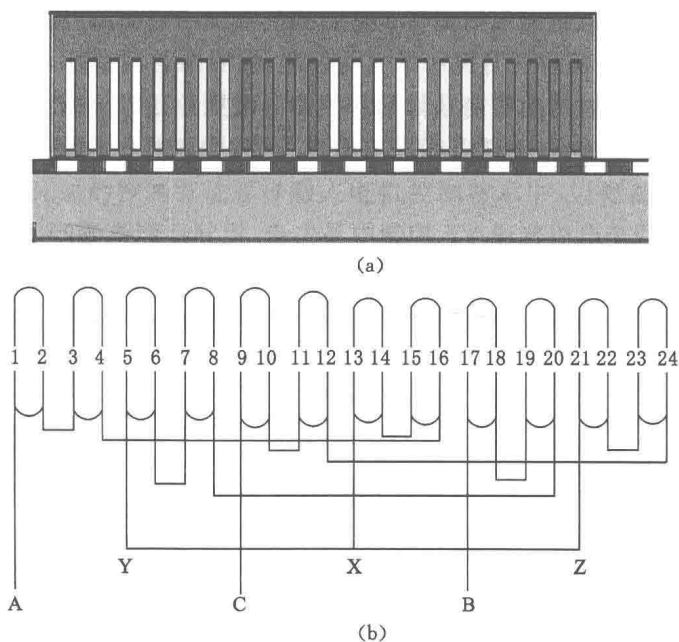


图 1-5 分数槽 PMLSM

(a) 24 槽 22 极分数槽绕组电机结构; (b) 24 槽 22 极分数槽绕组接线图

第四节 永磁直线同步电机控制方法

一、永磁直线同步电机控制技术

永磁直线同步电机的控制技术与永磁同步电机类似,主要有变压变频控制(Variable Voltage Variable Frequency,检测 VVVF 或 VF)、矢量控制(Field Oriented Control,FOC)和直接推力控制(Direct Thrust Force Control,DTFC,或 DTC)^[7,30]三种方式。传统旋转运动的永磁同步电机控制的是转速和转矩,永磁直线同步电机控制的是直线线速度和推力^[30,31]。

(1) VF 控制

VF 控制方式控制的是电机的外部变量,即电机的定子电压和频率,在系统中,预先设定好一条电压跟随频率变化的曲线,对于任意频率值,根据 VF 曲线都能找到相应的电压值,然后将此电压值通过一定的调制算法并由逆变器产生出正弦电压并施加到电机的定子绕组上,即可实现 VF 控制。VF 控制属于开环控制,在 VF 控制方式下,不需要安装位置和速度传感器,只需要改变供电电源的频率便可实现电动机速度的调节。这种控制系统结构简单、系统成本较低、易于实现^[33-35]。

该方法无法通过精确控制来得到最佳的电磁推力,故系统性能不高,动态性能较差,若使用 VF 控制永磁直线同步电机,重载或者突加负载时,容易出现失步现象^[33-35]。

针对永磁同步电机普通 VF 控制中易失步、控制性能差的问题,有关学者提出了基于功率观测的永磁同步电机高效 VF 控制方法,通过对运行过程中有功功率和无功功率的观测,对同步电机的功率角以及电压向量幅值进行补偿,保障电机的稳定高效运行^[35]。

(2) 矢量控制

20 世纪 70 年代初,德国学者提出了交流电机的矢量控制理论,其主要思想是参考直流电机控制中励磁电流和转矩电流完全解耦分别控制的形式,基于磁场等效原则,通过矢量变换将交流电机数学模型重构为一台他励直流电动机,在同步旋转的参考坐标系内将交流电机定子交流电流变换为两个直流分量,即励磁分量和转矩分量,且两者在空间上相互垂直,从而实现解耦控制以获得与直流电机一样的调速性能^[7,30]。交流电动机矢量控制理论的出现对电机控制技术领域的研究具有划时代的意义,使电机控制技术的发展步入了一个全新的阶段。