

WUCAO YONGCI ZHIXIAN TONGBU DIANDONGJI YANJIU

无槽永磁直线同步 电动机研究

刘 豪 著



 煤炭工业出版社

无槽永磁直线同步电动机研究

刘 豪 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

无槽永磁直线同步电动机研究 / 刘豪著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4674 - 3

I. ①无… II. ①刘… III. ①无槽电机—永磁电动机—直线电动机—同步电动机—研究 IV. ①TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 221193 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京市郑庄宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 8¹/₂

字数 192 千字

2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

社内编号 7529 定价 25.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

内 容 提 要

本书阐述了无槽永磁直线同步电动机的基本工作原理、特点、分类，建立了无槽永磁直线同步电动机的物理模型和数学模型；提出了无槽永磁直线同步电动机的总体设计原则；结合无槽永磁直线同步电动机的磁场解析，进行了动静态分析。

本书可供从事电动机的研发人员、设计人员使用，也可作为电气工程专业教师、研究生的参考书。

前 言

交流励磁直线同步电动机 (Linear Motor, LM) 是一种由电能转换成机械能的直线运动装置。该电动机具有旋转电动机无可媲美的优点, 如结构简单、散热效果好、传递效率高、运行可靠、制造成本低、运行速度不受限制、机械损耗小以及振动噪声较小等。近年来, 交流励磁直线同步电动机在物流系统、工业设备、信息与自动化系统、交通与民用、军事以及其他领域得到应用。但是该电动机存在推力波动较大以及控制精度低等缺点, 不能满足某些领域的应用, 迫切需要人们寻找新的电动机。

随着稀土永磁材料的出现, 特别是钕铁硼新材料的应用, 有槽永磁直线同步电动机得到了快速发展。该电动机具有交流励磁直线同步电动机无法比拟的优点, 如体积小、效率高、电磁推力大等, 因此在市场上被广泛应用。但是永磁直线同步电动机的振动噪声、磁阻阻力依然较大, 稳定性较差, 不能使用在要求推力波动小、控制精度高的场合。无槽永磁直线同步电动机 (Slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, Slotless PMLSM) 具有初级不开槽、绕组嵌放 (用环氧树脂浇注) 简单、端部绕线少、比有槽槽满率高、磁饱和较低、不存在齿槽相互作用的磁阻阻力、温度系数低、振动小、噪声小以及损耗低等优点, 具有有槽永磁直线同步电动机、无槽旋转电动机无法比拟的优点, 因此受到世界各国极大重视, 成为电动机领域的前沿课题。目前, 该课题的研究还处于起步阶段, 且大部分研究都集中在静态特性以及部分参数分析等方面, 存在数学解析模型、设计思路不完善, 无动态特性的研究, 结构参数对电磁参数、性能参数的影响分析不全面等问题。

本书针对无槽永磁直线同步电动机存在的上述问题进行了深入的研究, 建立了无槽永磁直线同步电动机的数学解析模型, 在此基础上, 进行磁场分析; 提出设计方案, 进行电磁设计和参数计算; 采用解析法分析电动机内磁场以及其他参数, 利用有限元法验证解析的有效性, 并作定性的分析与讨论。

全书介绍了五方面内容: 第一部分介绍了直线电动机及无槽永磁直线同

步电动机的国内外研究现状。第二部分介绍了无槽永磁直线同步电动机的工作原理、特点和分类等内容，建立了该电动机的物理模型和数学模型，提出了“六层线性解析模型”。第三部分介绍了无槽永磁直线同步电动机的总体设计原则。根据电动机的要求，确定电动机的结构和选材。在此基础上，进行电磁设计、电磁参数及性能参数的计算，并编制电磁设计以及性能校核程序。第四部分对无槽永磁直线同步电动机的动、静态特性进行了分析，并与有槽永磁直线同步电动机的特性进行了比较。第五部分讨论了无槽永磁直线同步电动机结构参数对电磁参数及性能的影响，利用有限元法分析验证结构参数的影响，得出电动机设计最佳尺寸的选择规律和依据。

本书的撰写工作得到了河南城建学院电气与信息工程学院领导的大力支持，得到了河南理工大学袁世鹰教授和上官璇峰教授的悉心指导和帮助；此外，煤炭工业出版社徐武、常建丽编辑做了许多细致入微的出版工作。在此向他们表示衷心感谢。

本书在写作过程中参考了大量的文献资料，对所引用的文献在书后的参考文献中列出，但是难免有所遗漏，在此向被遗漏参考文献的作者表示歉意，向本书所引用的参考文献的作者表示诚挚的谢意。

由于时间仓促及作者水平有限，书中不妥之处，敬请批评指正。

著 者

2014年9月于河南城建学院

1 绪论	1
1.1 直线电动机的研究现状	1
1.1.1 直线电动机的发展	1
1.1.2 直线电动机的理论研究方法	1
1.1.3 直线电动机的设计方法研究	2
1.2 国内外无槽永磁直线同步电动机的研究现状	4
2 无槽永磁直线同步电动机磁场分析	5
2.1 无槽永磁直线同步电动机	5
2.1.1 无槽永磁直线同步电动机的基本工作原理	5
2.1.2 无槽永磁直线同步电动机的特点	5
2.2 无槽永磁直线同步电动机的物理模型	5
2.2.1 假定条件	5
2.2.2 等效电枢电流密度	6
2.2.3 次级永磁体等效电流密度	7
2.2.4 磁场分析模型	8
2.3 无槽永磁直线同步电动机的磁场分析	8
2.3.1 磁场方程及其解析	8
2.3.2 各区矢量磁位及磁通密度表达式	9
2.3.3 合成磁通密度表达式	19
3 无槽永磁直线同步电动机的设计	23
3.1 无槽永磁直线同步电动机的结构设计	23
3.1.1 结构形式的确定	23
3.1.2 磁级轭材料的选择	24
3.1.3 永磁材料的性能与应用	24
3.1.4 电枢绕组材料及形状的选择	26
3.2 无槽永磁直线同步电动机的电磁设计	27
3.2.1 主要参数的确定	27
3.2.2 永磁材料的选择	27
3.2.3 次级尺寸的设计	28

3.2.4	初级尺寸的设计	30
3.2.5	气隙的选择	32
3.2.6	初级绕组设计	32
3.2.7	磁路计算	34
3.2.8	永磁体工作点的校核计算	37
3.2.9	电磁参数及性能计算	38
3.2.10	电磁推力的校核程序	44
4	无槽永磁直线同步电动机的仿真	46
4.1	概述	46
4.1.1	引言	46
4.1.2	软件介绍	47
4.1.3	无槽永磁直线同步电动机的结构参数	48
4.2	无槽永磁直线同步电动机的静态特性	48
4.2.1	磁场分析	49
4.2.2	电磁推力	58
4.2.3	磁阻阻力	59
4.2.4	磁通	62
4.2.5	自感与互感	62
4.3	无槽永磁直线同步电动机的动态特性	64
4.3.1	瞬态分析	64
4.3.2	速度驱动特性	64
4.3.3	负载驱动特性	65
4.4	有槽永磁直线同步电动机	69
4.4.1	磁场分析	69
4.4.2	电磁推力	76
4.4.3	磁阻阻力	77
4.4.4	磁通	79
4.4.5	自感与互感	79
5	无槽永磁直线同步电动机结构参数对电磁参数及性能的影响	81
5.1	结构参数对电磁参数的影响	81
5.1.1	永磁体高度对电枢反应磁场的影响	81
5.1.2	永磁体高度对空载磁场的影响	82
5.1.3	气隙长度对气隙磁密的影响	83
5.1.4	永磁体纵向长度对气隙磁密的影响	85
5.1.5	次级轭高对气隙磁密的影响	85
5.1.6	永磁体高度和气隙长度对电枢电抗及槽漏抗的影响	86

5.2 结构参数对性能参数的影响.....	89
5.2.1 永磁体高度对励磁电势的影响.....	89
5.2.2 永磁体纵向长度对电磁推力的影响.....	89
5.2.3 永磁体高度对电磁推力的影响.....	90
5.2.4 气隙长度对电磁推力的影响.....	91
5.2.5 永磁体横向宽度对电磁推力的影响.....	91
5.2.6 电流变化对电磁推力的影响.....	91
6 结论.....	93
附录 A Slotless PMLSM 整体磁场计算源程序 (MATLAB 语言)	95
附录 B Slotless PMLSM 整体磁场计算源程序 (ANSYS 语言)	100
附录 C PMLSM 整体磁场计算源程序 (ANSYS 语言)	110
参考文献.....	121

1 绪 论

1.1 直线电动机的研究现状

1.1.1 直线电动机的发展

直线电动机可以认为是由旋转电动机演变而来。1832年,法国工程师皮克希研制成功世界上第一台旋转电动机,之后不久,就出现了直线电动机的雏形。1840年,惠斯登(Wheatstone)研制成功世界上第一台直线电动机。1890年,匹兹堡市长首次申请了关于直线感应电动机的专利。1895年,Weaver. Jacquard电梭子公司发表了一篇将直线电动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动机引起了人们的极大兴趣。1945年,美国的西屋电气公司首先研制成功的电力牵引飞机弹射器,它以7400 kW的直线电动机为动力,成功地用4.1 s的时间将一架重4535 kg的喷气式飞机在165 m的行程内由静止加速到188 km/h的速度。它的试验成功,使直线电动机可靠性等优点受到应有的重视,随后,美国利用直线电动机制成的用作抽汲钾、钠等液态金属的电磁泵,满足核动力中的需要。1954年,英国皇家飞机制造公司利用双边扁平性直线电动机制成了发射导弹的装置,其速度可达1600 km/h。1955年以来,随着控制技术和新材料的应用,直线电动机进入快速发展阶段。1965年以后,随着控制技术和材料性能的显著提高,应用直线电动机的实用设备被逐步开发出来,如:采用直线电动机的MHD泵、自动绘图仪、磁头定位驱动装置、电唱机、缝纫机、空气压缩机及输送装置等。

20世纪70年代,日本首次进行了由直线同步电动机推进的超导磁悬浮试验车试验,1979年,建成了7.5 km长的宫崎磁悬浮铁道试验线,运行时速可达530 km/h。1999年,日本在山梨县境内成功进行的5节车辆时速500 km的运行试验,标志着直线同步电动机在超导磁悬浮列车上的应用技术已进入实用化阶段。

我国在20世纪70年代初才开始对直线电动机的理论研究和应用试验,虽然起步较晚,但发展较快。从20世纪70年代到90年代二十多年里,涌现了一批高质量的论文,如焦留成的“垂直运动永磁直线同步电动机电磁参数及特性研究”、上官璇峰的“分段初级永磁直线同步电动机理论与试验研究”、汪旭东的“永磁直线同步电动机统一解析理论及应用研究”、司纪凯的“SPWM电压源供电的永磁直线同步电动机特性研究”、贾宏新的“电梯用直线感应电动机的优化设计及其控制系统研究”、尚喆的“永磁同步电动机磁场定向控制的研究”。这些高质量的论文对永磁直线同步电动机的理论研究以及应用起到了重要的推动作用。上海磁悬浮列车的成功试验,标志着我国直线电动机的应用技术迎来了新的快速发展阶段。

1.1.2 直线电动机的理论研究方法

由于直线电动机结构的特殊性，因此直线电动机的理论分析方法与旋转电动机不同，常用的直线电动机理论分析方法有：等效磁路法、等效磁网络法、分层线性解析法、电磁场数值计算法、场路结合分析法等。

1. 等效磁路法

等效磁路法是将永磁体处理成磁势源或磁通源，其余按照传统电动机的磁路计算进行分析。等效磁路的优点是形象、直观以及计算方便等。但是永磁直线电动机磁场分布比较复杂，仅依靠少量集中参数构成的等效磁路模型难以描述磁场的真实情况，通用性较差。因此，在永磁直线电动机的分析中，磁路计算只适用于方案的估算、初始方案设计和类似方案的比较。

2. 等效磁网络法

等效磁网络法根据电动机的结构和预测的磁通走向，把磁场区域划分为若干串联或并联支路，支路是由磁导、磁势源等单元组成，单元之间通过节点相连，构成磁网络。等效磁网络法是一种介于等效磁路法和有限元法之间的分析方法，原理简单、实现方便、计算精度高。但是在建立磁网络时，电动机结构是建立在假定基础上进行简化的，而且磁网络模型是建立在磁路基础上的，难免带来一定的误差，尤其是对结构复杂的永磁电动机，造成误差更大。

3. 分层线性解析法

分层线性解析法是将直线电动机内的电磁场根据假定条件简化，依据材料磁性能的不同建立二维的分层模型，从而进行求解。由于该解析法不能处理复杂的电动机结构（如端部开断、三相绕组分布不平衡等），对磁场饱和不能够进行有效的处理，因而该方法计算存在一定的误差。

4. 电磁场数值计算法

电磁场数值计算法包括有限差分法、有限元法、积分方程法和边界元法等四种基本类型，以及近年来发展产生的有限元法和边界元法相结合的混合法。其中有限元法适应了工程电磁问题分析的需要，获得了广泛的应用。有限元法最主要的特点是根据该方法编制的软件系统对于各种各样的电磁计算问题具有较强的适应性，通过前处理过程能有效地形成方程并求解。它能方便地处理非线性介质特性，如铁磁饱和特性等。它所形成的代数方程具有系数矩阵对称、正定、稀疏等特点，所以求解容易，收敛性好，占用计算机内存量也较少。工程设计和科学研究对电磁设计计算精确度要求的不断提高，以及计算机技术的不断发展，促进了有限元法的发展及其在电气工程方面的广泛应用。

5. 场路结合分析法

场路结合是指电路和磁路相结合。利用电磁场数值计算求出极弧系数、漏磁系数、电枢有效长度以及机壳有效长度等磁路法计算中不易准确计算的一些参数，然后将这些参数结合到磁路法的计算中，这样可以提高磁路法计算的准确性。目前，已逐步形成适用于计算机求解的以等效磁路解析求解为主，用电磁场计算和实验验证的一整套分析计算方法和计算机辅助软件。

1.1.3 直线电动机的设计方法研究

20世纪50年代，人们开始在电动机设计中借助电子计算机辅助分析。计算机在电动

机设计应用中经历了从简单到复杂的三个阶段,即从“校核设计”到“综合设计”,最后进入“优化设计”。

所谓“校核设计”,就是该设计程序是按设计人员预先估计好的若干设计参量,依一定程序步骤来确定产品运行性能的计算,人工将一些输入参量加以变化再进行校核,使之达到设计要求。“校核设计”相当于以计算机演算来代替手算。

综合设计是根据已知的性能要求,决定电动机各设计参数的程序。它与校核设计的区别在于:综合设计的目的是在规定产品性能和技术条件下,使计算机主动选择适当的技术参数和结构尺寸,从而得出一个或一批可行方案。它不依赖于人工而自动修改方案并重复校核计算,直至最终得到符合要求的方案为止。习惯上称之为“循环计算”的电动机设计程序是综合设计程序中最常见的形式,它能对一些自变量,如电动机的内外径、电枢轴向长度、齿、最大气隙磁通密度等,按步长进行多重循环计算,从而算出一大批方案,经比较后,由人工选出较优方案。校核设计是设计者在计算机中预先设置好若干设计参量,依一定程序步骤来确定产品运行性能,当不符合要求时,人工将一些输入参量加以调整再校核。这样往往工作时间比较长,不适合现代的高速度、高效率的要求。

优化设计始于20世纪60年代初期,它是让计算机直接找出最优设计方案,而中间计算的比较方案个数尽可能少的一种程序。概括地说,优化设计的程序主要内容有:第一,是将实际设计问题抽象成为最优化的数学模型;第二,是选择最优化的计算方法,使用计算机求解数学模型,得出最优的(不是唯一)设计方案。与综合设计、校核设计比较:它运行速度比较快、周期短、工作效率高以及经济比较合理;它唯一的缺点就是必须提前初步设计出该电动机的大体情况,方可选择合适的优化设计方法,进行优化设计。然而综合设计、校核设计则没有优化设计的优点,但它适于初步设计。

三种设计结合在一起,才能使整个直线电动机设计过程完整化、系统化。完整的电动机设计程序,都要经过初步设计、综合设计及优化设计过程。不同的电动机采用不同的设计准则,直线电动机的设计准则是由 Laithwaite 于 1965 年提出来的品质因数 G 。它是表示直线电动机电路与磁路耦合程度的质量因数,具有多种定义形式。然而,对于高速直线感应电动机来说,品质因数大并不能保证电动机产生最大推力和最高效率。于是 Boldia 等提出了最佳品质因数的概念。

直线电动机在设计过程中要采取各种措施尽可能降低端部效应影响,如直线电动机初级绕组的端部槽中,采用全填满绕组的形式提高电动机性能或采用半槽绕组进行补偿。也有文献中提出在初级前面增加一段辅助短初级,用来减少入端电磁行波的效应,但是增加补偿绕组会使电动机重量和成本增加,而且有时在结构上实现起来也会有困难。Elsayad 等人的研究表明在次级铁芯上开槽会显著降低端部效应,从而使鼠笼次级比叠次级直线电动机的性能要好。目前在直线电动机的设计研究中,一个非常活跃的研究方向就是引入各种数值算法和优化算法对直线电动机进行优化设计。焦留成等采用 Hook - Jeeves 法对直线感应电动机进行优化设计,优化的目标是直线电动机的力能指标最大,对直线电动机的其他性能指标引入约束条件,约束处理采用外点罚函数法。Im Dal - Ho 等采用神经网络法对单边直线感应电动机进行优化设计,电动机部分的计算采用有限元法。Laporte 等用边界元法对直线感应电动机进行优化设计。刘景林等从场路结合的观点采用混合罚函数法对

稀土永磁直线同步电动机进行优化设计,目标函数为单位体积产生的推力。王新环、许孝卓等采用遗传算法的小生境优化算法对永磁直线同步电动机优化设计,选用电磁推力为优化目标函数,对其他性能指标引入约束条件进行优化设计。Chun - Gil Jung 等用神经网络对无槽永磁直线同步电动机进行优化设计,选用电磁推力为目标函数。其他如模拟退火法、禁忌搜索、混沌搜索及列表寻优法等也被引入到直线电动机的优化设计中。

1.2 国内外无槽永磁直线同步电动机的研究现状

随着国民经济的发展、科学技术的进步和人民生活水平的提高,对电动机的性能也提出了许多新的更高的要求。而新材料,特别是20世纪80年代中期第三代稀土永磁钕铁硼(NdFeB)材料研制成功,使电动机的发展扩宽很多领域。稀土永磁钕铁硼具有很高的剩磁和矫顽力以及很大的磁能积,其磁性能高于其他永磁材料,同时钕铁硼还具有线性去磁曲线,其去磁曲线与回复曲线基本吻合、内禀矫顽力高、内禀特性硬、抗去磁能力强、热稳定性及耐腐蚀性好等特点,再加上其在矿产资源中含量比较丰富,因此永磁电动机的发展受到越来越多国家的重视,并以它的高效节能而逐渐得到推广应用。如西门子公司生产的用于高速精密机床上的PMLSM最大移动速度200 m/min,最大推力6600 N,最大位移504 mm;日本的FANUC公司生产的PMLSM最高移动速度为240 m/min,最大推力为9000 N,有自冷、气冷、水冷三种型号。

随着直线电动机的应用领域不断地扩大,工作性能的要求越来越高,越来越需求控制精度高、结构简单、振动小、噪声小及磁阻阻力小等特点的电动机。由于无槽永磁直线同步电动机(Slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, Slotless PMLSM)兼有无槽永磁电动机与永磁直线同步电动机的特点,其初级无开槽、绕组嵌放简单、槽满率高、温度系数低、无磁阻阻力(初级齿槽与永磁体相互作用力)、推力脉动小、控制精度高以及工艺简单等特点,因此受到世界各国极大重视,成为直线电动机研究领域的前沿课题。

国外关于无槽永磁直线同步电动机理论研究主要有:采用三维空间谐函数分析磁场及参数计算,采用神经网络进行优化设计;采用二维空间谐函数分析无槽永磁直线同步电动机励磁性能,以及采用初级电流的部分励磁获取最大效率以及参数计算等。进入实验性阶段的研究成果有:韩国汉城大学研制的X-Y结构桶架、韩国电工研究所及韩国Chungnam大学研究的应用于生产伺服系统的无槽永磁直线同步电动机、美国加利福尼亚州SantaClarita, Baldor电子公司的Baldor无槽永磁直线同步电动机等。

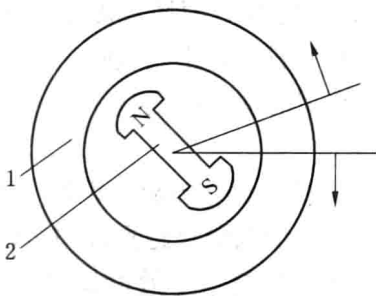
由于目前国外关于无槽永磁直线同步电动机的研究仅限于理论和实验阶段,还没有进入到应用领域,国内在此方面的研究仅处于起步阶段,因此开展无槽永磁直线同步电动机的研究意义重大。

2 无槽永磁直线同步电动机磁场分析

2.1 无槽永磁直线同步电动机

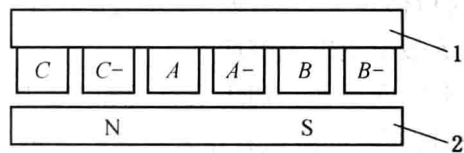
2.1.1 无槽永磁直线同步电动机的工作原理

无槽永磁直线同步电动机的工作原理与旋转永磁同步电动机、永磁直线同步电动机的工作原理类似,将如图 2-1 所示的旋转型无槽永磁同步电动机沿图中所示的方向展开,就得到如图 2-2 所示的直线永磁同步电动机模型。当定子内通入三相对称的正弦电流后,就会产生气隙磁场。当定子绕组中通入的三相电流相序为 $A-B-C$ 时,将在气隙中产生沿直线前进的行波磁场,行波磁场与永磁体的励磁磁场相互作用便会产生电磁推力,在这个电磁推力的作用下,由于定子(初级)固定不动,动子(次级)便会沿行波磁场运动相反的方向做直线运动;使其速度等于同步速度,即 $v_s = 2\tau f$,改变三相电流的相序就可以改变行波磁场的方向,从而改变动子的运动方向。这就是该电动机的工作原理。



1—定子; 2—动子

图 2-1 旋转型无槽永磁同步电动机



1—定子(初级); 2—动子(次级)

图 2-2 无槽永磁直线同步电动机

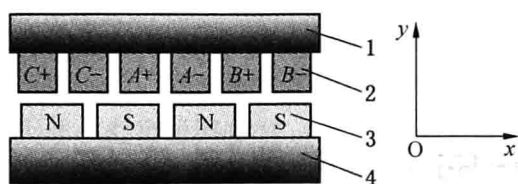
2.1.2 无槽永磁直线同步电动机的特点

无槽永磁直线同步电动机兼有无槽永磁电动机与永磁直线同步电动机的特点。无槽永磁直线同步电动机具有初级无开槽、绕组嵌放简单、槽满率高、温度系数低、端部绕组减少,无磁阻阻力(初级齿槽与永磁体相互作用力)、推力脉动小、噪声低、磁饱和较低、控制精度高及制造工艺简单等特点;但是,它还具有功率密度低的缺点。

2.2 无槽永磁直线同步电动机的物理模型

2.2.1 假定条件

无槽永磁直线同步电动机有单、双边之分,其又有长初级短次级及短初级长次级之分。本文研究的主要是单边隐极式无槽永磁直线同步电动机短初级长次级的物理模型,如图 2-3 所示。它的初级采用集中绕组,互不搭接,由许多模型组成,其中一个模型由 4



1—初级轭；2—电枢绕组（运动部分）；
3—永磁体（静止部分）；4—次级轭

图 2-3 无槽永磁直线同步电动机的物理模型

极 3 绕组组成。

为了建立起合适的磁场分析模型，可作如下假定：

(1) 忽略 z 轴方向磁场的变化，各电流仅在 z 轴方向流动，即 A 中只有 z 方向分量 A_z ，因此，磁场可按二维处理。

(2) 作为激励场源的电枢电流和次级永磁体分别按实际情况等效电流密度。

- (3) 各部分纵向 (x 方向) 无限长，永磁体 y 方向磁化。
- (4) 永磁体在各方向上磁导率相同且等于空气隙磁导率 μ_0 。
- (5) 初级绕组的磁导率各向均匀同性且等于空气磁导率 μ_0 。
- (6) 初、次级轭的磁导率各向均匀同性，分别为 μ_1 、 μ_2 。
- (7) 永磁体沿着 x 轴周期性分布。
- (8) 所有部分的电导率为零。
- (9) 铁磁材料没有饱和。

假定 1 是将三维磁场简化为二维磁场处理；假定 2 代表“真实”的初、次级的激励场源，以便于解更接近实际；假定 3 是为了忽略端部、铁芯开断等影响，作简化处理；因稀土永磁材料回复相对磁导率近似为 1，假定 4 是合理；假定 6 合理地考虑电动机不同材料的物理特性；因为无槽永磁直线同步电动机正常状态下一般工作于大气隙，磁路是不饱和的，所以假定 7 是合理。其他假定都是二维磁场分析常用的基本假定。

2.2.2 等效电枢电流密度

如图 2-3 所示，初级没有齿和槽，所有的绕组都是用环氧树脂浇铸固定。电枢电流密度分布按实际的绕组分布来考虑，采用逐槽电流法可以减少无槽永磁直线同步电动机的铁芯开断、端部作用以及绕组分布不平衡等因素影响。其电枢绕组等效电流密度如图 2-4 所示。

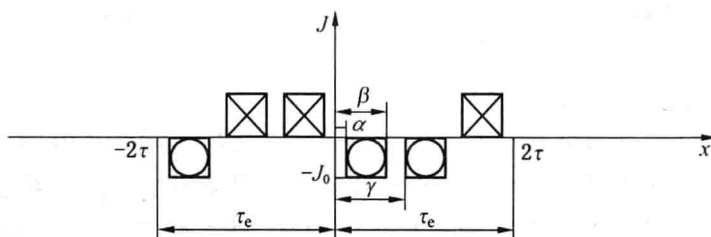


图 2-4 电枢绕组等效电流密度

$$J_s = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_e} x\right) \quad (2-1)$$

其中 $b_n = \frac{2}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} J_0 \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_e} x\right) dx$

$$= \frac{2}{\tau_e} \left[- \int_{\alpha}^{\beta} J_0 \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_e} x\right) dx - \frac{1}{2} \int_{\gamma}^{\gamma+w_c} J_0 \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_e} x\right) dx + \frac{1}{2} \int_{\gamma+w_c+d_c}^{\gamma+d_c+2w_c} J_0 \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_e} x\right) dx \right]$$

$$= -\frac{4J_0}{n\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{2}{3}n\pi\right) \right] \sin\left[\frac{n\pi}{\tau_c}\left(\frac{d_c + w_c}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_c} \cdot \frac{w_c}{2}\right)$$

$$\alpha = \frac{d_c}{2}$$

$$\beta = \alpha + w_c = w_c + \frac{d_c}{2}$$

$$\gamma = \frac{4}{3}\tau - w_c - \frac{d_c}{2}$$

$$\tau_c = 2\tau$$

式中 d_c ——绕组两有效边的距离, mm;

w_c ——绕组宽度, mm;

τ ——极距, mm。

2.2.3 次级永磁体等效电流密度

采用等效磁化电流法等效永磁体电流密度, 其永磁体等效磁势分布如图 2-5 所示。

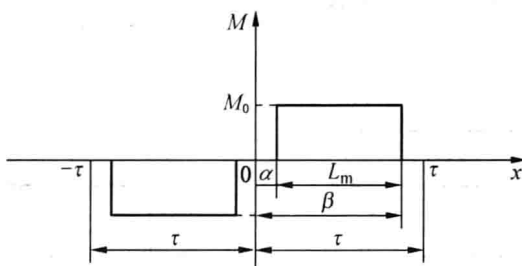


图 2-5 永磁体的磁势分布

$$\begin{aligned} M &= \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_0}{jn\pi} (1 - e^{-jk_n\tau}) (e^{jk_n\beta} - e^{-jk_n\alpha}) e^{-jk_nx} \right] \\ &= \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_0}{jn\pi} (1 - \cos k_n\tau + jsink_n\tau) (\cos k_n\beta + jsink_n\beta - \cos k_n\alpha + jsink_n\alpha) \cdot \right. \\ &\quad \left. (\cos k_nx - jsink_nx) \right] \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi) [\sin k_n(\beta - x) + \sin k_n(\alpha + x)] \\ &= \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2M_0}{n\pi} [\sin k_n(\beta - x) + \sin k_n(\alpha + x)] & (n = 1, 3, 5, \dots) \\ 0 & (n = 2, 4, 6, \dots) \end{cases} \\ &= \sum_{n=1,3}^{\infty} (-1)^{\frac{n+3}{2}} \frac{4M_0}{n\pi} \cos \left[\frac{n\pi}{\tau} \left(\frac{L_m}{2} - x \right) \right] \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$J_m = \frac{dM}{dx} = \sum_{n=1,3}^{\infty} (-1)^{\frac{n+3}{2}} \frac{4M_0}{\tau} \sin \left[\frac{n\pi}{\tau} \left(\frac{L_m}{2} - x \right) \right] = \sum_{n=1,3}^{\infty} a_n \sin \left[\frac{n\pi}{\tau} \left(\frac{L_m}{2} - x \right) \right] \quad (2-3)$$

其中

$$\alpha = \frac{\tau - L_m}{2}$$

$$\beta = \frac{\tau + L_m}{2}$$

$$a_n = (-1)^{\frac{n+3}{2}} \frac{4M_0}{\tau}$$

$$M_0 = \frac{B_r}{\mu_0}$$

式中 B_r ——永磁体剩余磁密, T;

M_0 ——永磁体磁化强度, H;

L_m ——永磁体纵向长度, mm;

μ_0 ——空气磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m), H/m。

2.2.4 磁场分析模型

基于无槽永磁直线同步电动机物理模型的假定, 建立磁场的理想模型, 这种模型是各层均匀线性的六层结构, 如图 2-6 所示。

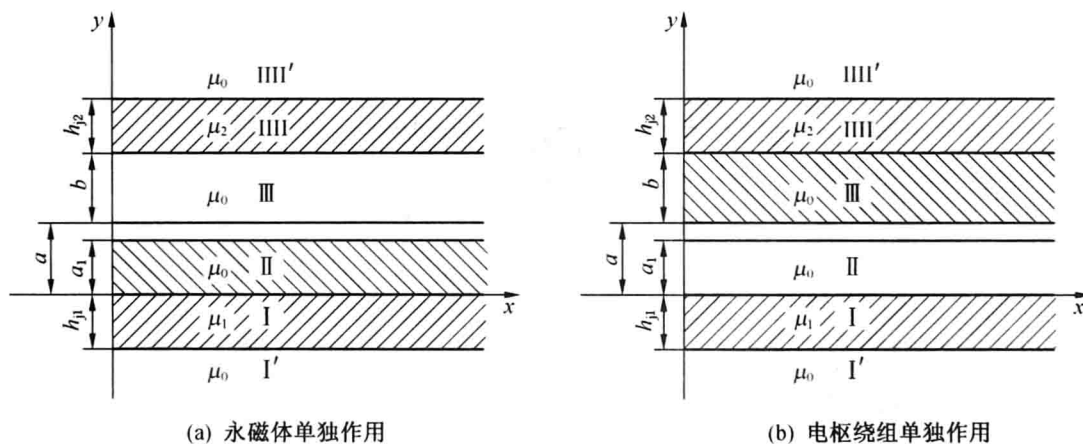


图 2-6 无槽永磁直线同步电动机六层线性模型

2.3 无槽永磁直线同步电动机的磁场分析

2.3.1 磁场方程及其解析

根据无槽永磁直线同步电动机物理模型假定条件可知, 磁场的矢量磁位方程如下:

$$\nabla \times \vec{H} = \nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu} \right) = \nabla \times \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] = \vec{J} \quad (2-4)$$

根据假设, 得:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{无电流密度区域})$$

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu_0 J(x) \quad (\text{有电流密度区域})$$