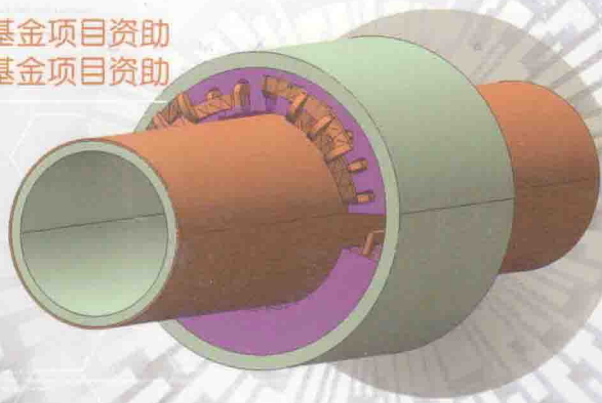


国家自然科学基金项目资助
教育部博士点基金项目资助



两自由度直驱实心感应电机 理论及控制

司纪凯 封海潮 著

 煤炭工业出版社

两自由度直驱实心感应电机 理论及控制

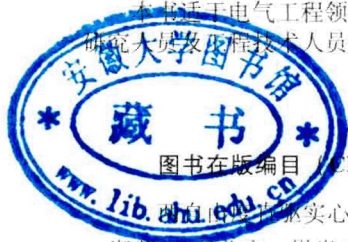
司纪凯 封海潮 著

煤炭工业出版社
· 北 京 ·

内 容 提 要

本书在分析国内外两自由度电机的设计理论、控制方法的基础上,分析了两自由度直驱实心感应电机(2DOF-DDSRIM)运行机理,采用解析算法设计了其基本电磁参数;采用透入深度法与有限元法分析了电机特性,解析计算和仿真实验结果验证了所提出2DOF-DDSRIM方案的可行性,优化了电机的结构及关键电磁参数;研究了2DOF-DDSRIM的控制方案,建立其矢量控制模型;设计了基于光电传感器和磁电传感器的2DOF-DDSRIM速度检测方案。研究结果为两自由度直驱感应电机提供了理论基础。

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阅读参考。



图书在版编目(CIP)数据

两自由度直驱实心感应电机理论及控制 / 司纪凯, 封海潮著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978-7-5020-4362-9

I. ①两… II. ①司…②封… III. ①实心转子—感应电机—控制 IV. ①TM346

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第268750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 850mm × 1168mm^{1/32} 印张 4^{3/4}

字数 121 千字

2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷

社内编号 7194 定价 15.00 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

前 言

单自由度电机驱动系统作为一种实现能量转化或信号传递的电磁机械装置，其应用几乎涵盖了社会的各行各业。近年来随着工业朝着自动化和智能化方向发展，人们对担当着主要驱动的电机提出了更高要求。单自由度电机已经不能满足要求，需要多个电机配合协调。由于传统单自由度电机的运动单一性，所以工业应用上一般采取使用多个单自由度电机通过中间传动机构来构成多自由度驱动。两自由度的驱动技术多采用两个甚至更多旋转电机的机械组合或者复杂的运动转换装置来驱动轴做直线、旋转或者螺旋运动，这些运动可以独立产生，也可同时存在。但此类解决方案存在以下不足：①控制方式复杂；②体积大、零部件多、维护量大、价格昂贵，不便于集成，占用安装空间大；③传动组件及轴承均吸收较大的轴向力，导致组件机械磨损大。因此，许多学者和电工专家一直致力于寻求结构紧凑、体积小、实用性强、控制容易的两自由度运动驱动电机及其驱动控制解决方案。

随着直线电机理论的日益完善与工业应用的不断扩展，直线电机与旋转电机结合的驱动方案引起了广泛的关注。直线-旋转运动的两自由度电机具有机械集成度高、电机结构材料利用率高等优点。在两个运动自由度的机械系统中，采用一台两自由度电机替代两台单自由度电机或其他运动转换传动装置，可以简化机械系统的结构，减小体积与重量，提高系统的精度和动静态性能。

本书所提出的两自由度直驱实心转子感应电机（2DOF-DDSRIM）是一种无中间传动机构，直接驱动机械负载做直线、旋转或螺旋运动的新型电机。它适用于芯片生产线、汽车生产线、柔性加工制造系统、数控机床、机器人、混合驱动机构、雕

刻机、挤出机、注塑机等设备上。

本书分析了 2DOF - DDSRIM 运行机理, 采用解析算法设计了其基本电磁参数; 采用透入深度法与有限元法分析了电机特性; 优化了电机的结构以及关键电磁参数; 研究了 2DOF - DDSRIM 的控制方案, 确定了基于转子磁场定向的矢量控制策略及速度检测方案。研究结果为两自由度直驱感应电机提供了理论基础。本书共 6 章, 第 1 章主要介绍本书的研究背景及研究意义, 详细阐述了两自由度电机的国内外发展现状。根据两自由度电机的结构特点进行分类, 对不同种类两自由度电机的控制策略进行了分析。第 2 章主要完成了两自由度直驱感应电机运行原理分析、总体机械结构设计、两自由度直驱感应电机电磁设计、确定电机的初步电磁参数。第 3 章先采用透入深度法对所设计的两自由度直驱感应电机的旋转运动部分进行解析计算, 根据透入深度法将转子展开成导磁导电平板, 理论上计算结果经过等效换算后对直线运动部分也适用。之后采用有限元分析法对两自由度直驱感应电机的旋转运动部分和直线运动部分进行仿真分析, 验证了解析结果的正确性。第 4 章总结了几种改善实心转子感应电机运行性能的措施, 优化了电机的关键参数。对优化后的实心电机进行了改进, 将原电机的实心转子改为空心转子, 同时改变了电机转子次级材料。第 5 章建立了 2DOF - DDSRIM 空间直角坐标系下的运动模型。提出将 2DOF - DDSRIM 等效成旋转运动直线感应电机 (RLIM) 和直线运动直线感应电机 (LLIM), 并分别进行控制的思路。确定了双变频器供电方案的 2DOF - DDSRIM 矢量控制系统。第 6 章分析了 2DOF - DDSRIM 的运动特点, 设计了一种基于光电式传感器和磁电式传感器联合测量 2DOF - DDSRIM 速度的方法。

本书共 6 章, 1~4 章由司纪凯著; 5~6 章由封海潮著。本书及相关研究工作得到了“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)”“国家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)”“河南省教育厅自然科学研究计划项目：直线-旋转双直线弧形电机基础理论研究(2011A470003)”“河南理工大学硕士学位论文创新基金：两自由度直驱感应电机电磁设计及特性研究(508037)”的资助。

本书的撰写工作得到了河南理工大学电气工程与自动化学院领导大力支持，得到了上官璇峰教授、汪旭东教授、许孝卓讲师等诸位同事细心指导和帮助，得到了司萌、胡高伟、艾立旺、苏鹏、何松、韩俊波、刘志凤等研究生鼎力协助。在一定意义上，他们也是本书的作者。袁世鹰教授认真细致地审读全部书稿，提出了许多宝贵意见；煤炭工业出版社徐武编辑做了大量细致入微的出版工作。在此向他们表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处，敬请批评指正。

著 者

2013年11月于河南理工大学

目 次

1	绪论	1
1.1	两自由度电机的研究背景	1
1.2	国内外现状	3
1.3	控制方法	17
1.4	两自由度电机的研究方向	22
1.5	本书研究内容及任务	23
2	两自由度直驱实心感应电机机理分析与电磁设计	24
2.1	两自由度直驱电机类型选择	24
2.2	两自由度直驱电机转子结构确定	24
2.3	工作机理分析及总体结构设计	26
2.4	设计原则及额定数据	30
2.5	电机主要尺寸设计	31
2.6	电机气隙选择	33
2.7	电机绕组与线规设计	34
2.8	定子槽形设计	37
2.9	转子结构与材料设计	39
2.10	本章小结	39
3	采用透入深度法与有限元法研究 2DOF - DDSRIM 特性	41
3.1	透入深度法的计算过程	41
3.2	解析计算结果分析	47
3.3	2DOF - DDSRIM 旋转运动部分的有限元法分析	52
3.4	2DOF - DDSRIM 直线运动部分的有限元法分析	62
3.5	解析法与有限元法的分析结果对比	70
3.6	本章小结	72

4	影响电机性能的关键因素研究及其优化设计	73
4.1	气隙长度对电机性能的影响	73
4.2	转子结构对电机性能的影响	78
4.3	导电层厚度对电机性能的影响	82
4.4	中空转子电机参数优化及性能分析	86
4.5	本章小结	99
5	2DOF - DDSRIM 控制方案分析及矢量控制数学建模	100
5.1	2DOF - DDSRIM 运动模型	100
5.2	2DOF - DDSRIM 控制方案论证	101
5.3	2DOF - DDSRIM 矢量控制数学建模	107
5.4	双变频器供电的 2DOF - DDSRIM 矢量控制 系统的建模	116
5.5	矢量控制系统主要模块建模	120
5.6	RLIM 矢量控制系统模型	120
5.7	LLIM 矢量控制系统模型	126
5.8	2DOF - DDSRIM 矢量控制系统	126
5.9	本章小结	126
6	2DOF - DDSRIM 速度检测方案设计	128
6.1	普通速度传感器在 2DOF - DDSRIM 速度 检测中的应用局限性	128
6.2	基于光学接近传感器的 2DOF - DDSRIM 速度检测方案	130
6.3	基于磁电感应原理的 2DOF - DDSRIM 速度检测方案	134
6.4	基于光电传感器与磁电传感器联合的 2DOF - DDSRIM 速度检测方案设计	136
6.5	本章小结	138
	参考文献	139

1 绪 论

1.1 两自由度电机的研究背景

在人类的生产及生活当中,单自由度电机驱动系统作为一种实现能量转化或信号传递的电磁机械装置,其应用几乎涵盖了社会的各行各业,不仅推动了生产技术由一般的机械化到电气化、自动化的转变,更改变了人类的生产、生活方式。长期以来,人们对单自由度电机(包括旋转电机和直线电机)及其传动系统进行了广泛深入地研究,使得电气传动系统性能得到不断的提高。近年来,随着工业朝着自动化和智能化方向发展,旋转电机或直线电机已不能完全满足人类生产与生活的需要。如柔性加工制造系统、机器人、镗床、汽车生产线、机床、微电子装配机械、挤出机、绕线机、混合动力车及精密数控机床等装置的驱动电机,通常需要驱动轴实现直线、旋转或者螺旋的运动形式。这些运动可以独立产生,也可以同时存在。为了实现这些复杂的运动形式,传统的两自由度驱动装置多采用两个或两个以上的电机,通过中间传动机构连接,驱动负载做两自由度运动^[1-6]。但这样带来一些问题:首先,机械结构比较复杂,每台电机都需要相对独立的机械传动装置,从而使系统的结构变得复杂;其次,各台电机分别控制需要中间传动结构,占用了大量空间,而且大大增加了系统的体积和重量;再次,精度和稳定性不好,当多台单自由度电机协同动作时需要电机高度一致,如果一台电机出现问题将使系统的精度和稳定性大打折扣。目前常用的两自由度驱动装置方案见表1-1。

总的来说,3种方案普遍存在控制方式复杂、体积庞大、零部件繁多、维护量大、价格昂贵的缺点。最初,由于整个制造行

表 1-1 目前常用两自由度驱动装置方案

所用方案	各 方 面 对 比		
	具体方案	优 点	缺 点
方案 1	应用两个旋转电机，其中一个用一种机械装置将旋转运动变为直线运动，另外一个做旋转运动，两个电机配合使用	操作灵活，实现功能过程简单	两个电机成本过高，而且有复杂传动机构，维护困难
方案 2	应用一个旋转电机，通过极其复杂的机械装置，在需要的时候让输出轴做出旋转或直线的运动	电机数量少	机械装置更为复杂，维护成本太高
方案 3	应用一个旋转电机和一个直线电机	机械结构稍简单	机械装置较为复杂，直线电机成本高

业生产水平低下，精度要求不高，这些方案也许能够满足生产的需要。然而随着科技的进步，行业的整体水平有了大幅度提高，尤其是近年来中国的制造业已开始向高精尖技术方向转型，而现有的设备故障率高、维护成本大、效率低、加工精度低，已经不能满足生产的实际需要。柔性加工制造系统、机器人、镗床、汽车生产线、机床、微电子装配机械、挤出机、绕线机、混合动力车及精密数控机床等装置的驱动电机，往往需要驱动轴做螺旋运动，上述方案则无法解决这类问题。

因此，能够直接驱动负载做旋转、直线或螺旋运动的两自由度直驱实心感应电机（简称两自由度电机）成为研发的热点。两自由度电机是一种不需要中间传动装置的新型电机，可以做纯直线运动、纯旋转运动，也可以做这两者合成的螺旋运动。这种电机具有机械集成度高、电机结构材料和驱动控制系统元件利用率高优点，是典型的机电一体化装置，在数控机床、工业机器人、雕刻机、陀螺仪、搅拌机、二维绘图仪等需要复杂运动的设备中，具有非常广泛的用途。与传统电机相比，两自由度电机还

有许多方面的优点，表 1-2 为两自由度电机与传统电机的性能对比。

表 1-2 两自由度电机与传统电机的性能对比

电机类别	性 能 对 比			
	自由度	机械结构	生产成本	性 能
两自由度电机	两自由度，可做直线、旋转、螺旋运动	简单、紧凑、故障率低、易维护	所需材料少，成本低	结构紧凑，反应灵敏，加工精度高
传统电机	单自由度，只能单纯做旋转和直线运动	需要多个电机还要加上许多传动机构，机械结构复杂，故障率高	需要多个电机，传动机构多，成本高	结构复杂，转动惯量大，轴承受力大、磨损大，精度不高

由于两自由度电机有两个自由度，如果使两自由度电机做类似单自由度电机的运动，就必须对它的速度进行检测。两自由度电机运动形式为螺旋运动，其速度检测不能套用普通旋转电机的速度检测方法，因此需要对它的速度测量方案进行设计。

两自由度电机作为一种典型的机电一体化产品，其驱动控制系统不仅要对各自由度的角位移、速度、加速度及输出转矩进行检测，还要进行各自由度之间的解耦计算、轨迹规划，因此有必要研制适合于两自由度电机控制系统的专用控制器件。为了使两自由度电机获得良好的控制性能，对其控制方法和控制策略进行研究意义重大。

1.2 国内外现状

20 世纪的 50 年代初，为了改善感应电机的调速性能，英国的威廉姆斯等人研制出了一种变速球形感应电机，这种电机的定、转子都可以动，是有记载的最早的多自由度电机。由于早期

电机理论的不完善,再加上机械制造水平的限制,多自由度电机遇到很多难题,可靠性差。直到 20 世纪的七八十年代载人航天、机器人等技术的发展直接激发了多自由度电机的发展,特别是以新材料微电子技术为代表的第三次科技革命的开展,为多自由度电机的结构设计、制造和电机驱动控制系统的实现提供了有利的条件。作为一种汇聚电机本体结构、电源驱动的典型机电一体化产品,各国研究人员对多自由度电机的开发和研制方兴未艾。目前,两自由度电机按原理可分为感应电机、永磁电机与磁阻电机 3 种。

1.2.1 国外现状

1. 感应电机

螺旋运动感应电机是具有两个自由度的最常见的电机,它能够做纯直线运动、纯旋转运动以及螺旋运动。

文献 [7]、[8]、[9]、[10] 提出了一种螺旋电机,定子采用螺旋形三相绕组嵌入由 6 个轴向叠片组构成的定子铁心的斜槽中,转子采用各向同性的圆柱体结构,也就是在铁磁轴上套上一定厚度的铜套筒。当三相螺旋定子绕组通电后将产生螺旋形磁场,根据感应原理,动子将同时在轴向和周向上受到力的作用。采用场论的方法对电机模型进行分析,首先建立气隙和次级边界的场坐标,然后对磁矢位进行求解。由于采用螺旋形绕组的结构,电磁是耦合的,所以很难对电机进行转矩控制以及对轴向和周向上的两个力解耦。电机定子的平面布局图如图 1-1 所示。

采用场论的方法进行分析,求解磁矢位时基于以下假设:

(1) 初级电流都是 v 导向的且不随 v 变化。只有 v 方向的磁矢位可以存在于绝对导磁的初级与气隙交界面。

(2) 初级电流可以被模拟为存在于气隙与初级交界面的电流层,可表示为

$$\vec{J}_s = J_m e^{j(\omega t - \beta v)} \vec{a}_v \quad (1-1)$$

其中

$$\beta = \pi/\tau = \pi/N_p \lambda \quad (1-2)$$

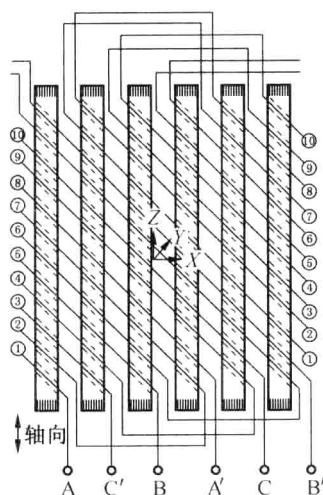


图 1-1 螺旋感应电机定子的平面布局图

(3) 螺旋角度 θ 被认为是常量, 由 $Y = d_{cs}$ 及 $\theta = \tan^{-1} (N_p \lambda / \pi R_c)$ 决定。其中 Y 是定义的与螺旋角度 θ 有关的量, 即螺距; τ 为极距; N_p 为每极所跨过的齿距数; λ 为齿距。

(4) 磁导率被认为是常量且各向同性。

式 (1-1) 中, v 、 w 为研究初级电流所建立的坐标系变量。磁矢位求解结果可以从移动 $x' - z'$ 坐标系得出。式 (1-1) 坐标系中的电流层具有 x' 和 z' 分量。经过坐标变换, 对应到 $x' - z'$ 坐标系的电流层可以表示为

$$\vec{J}'_s = [J_{mx'} \vec{a}_{x'} + J_{mz'} \vec{a}_{z'}] e^{j[\omega - \beta_z u) t - \beta_z z' - \beta_x x']} \quad (1-3)$$

通过求解磁矢位方程, 最后得到应力密度表达式及计算推力和转矩

$$\langle \vec{f} \rangle = \frac{1}{2} \sigma \text{Re} \left\{ -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \times \nabla \times \vec{A}^* \right\} \quad (1-4)$$

$$F_T = \langle F_{z1} \rangle + \langle F_{z2} \rangle \quad (1-5)$$

$$T_T = \langle F_{x2} \rangle \frac{R_s}{2} + \langle F_{x2} \rangle \frac{R_c + R_s}{2} \quad (1-6)$$

式中, F_{x2} 、 F_{x1} 、 F_{z2} 为对应力密度积分所得到的 x 向及 z 向的作用力; R_c 、 R_s 分别为导电铜套和转轴的半径; $\bar{A}^*$ 为矢量磁位的逆; $\langle \rangle$ 表示各量的幅值。

文献 [11]、[12] 提出一种双绕组结构的旋转-直线感应电机, 电机的结构如图 1-2 所示。该结构的电机沿定子的轴向和径向分别开槽, 在两种槽中分别放置独立的三相绕组。其中一个槽的绕组和普通旋转电机的绕组相似, 负责产生旋转磁场, 另一个槽的绕组则类似于管状直线电机绕组, 负责产生行波磁场。转子在这两种磁场的共同作用下, 产生旋转力和直线力, 通过改变电机绕组的供电电压、频率来改变转子的运动方向和速度。由于采用叠片结构, 叠片之间的非铁磁性绝缘层减小了定子铁心在轴向上的有效长度, 同时产生的涡流也不能被叠片很好的限制。

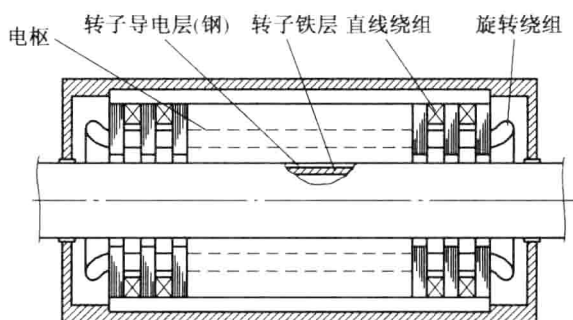


图 1-2 双绕组旋转-直线感应电机

通过建立电机的多层数学模型对该结构电机的性能进行分析, 由于电机为圆柱体结构, 所以选择在柱面坐标系中进行分析。数学模型的分析基于以下假设:

(1) 电机被分为 4 层进行分析, 每一层都是均匀的, 各向同性并且线性。

(2) 定子绕组被平滑的定子表面极薄的电流层所替代, 层内的线性电流密度可由下式表示。

“旋转”绕组：

$$\vec{J}_r^s = J_m^s \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau_x} x \right) \right] \quad (1-7)$$

式中， J_m^s 为定子绕组等效的总电流密度； x 为旋转运动方向上的位移变量。

“直线”绕组：

$$\vec{J}_l^s = J_m^s \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau_z} z \right) \right] \quad (1-8)$$

式中， z 为直线运动方向上的位移变量。

(3) 初级槽的有效气隙被定义为

$$\delta = \delta_a k_c \quad (1-9)$$

式中， δ_a 为气隙的有效长度； k_c 为卡氏系数。

(4) 初级电流对称且无漏磁。

(5) 定子铁心无限长而定子电流层有限长，则定子线性电流密度的傅里叶级数形式为

“旋转”绕组：

$$\vec{J}_r^s = \sum_l J_m^s \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau_x} x \right) \right] \cos \left(l \frac{\pi}{\tau_s} z \right) \cdots \quad (1-10)$$

“直线”绕组：

$$\vec{J}_l^s = \sum_k J_m^s \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau_z} z \right) \right] \cos \left(k \frac{\pi}{\tau_s} x \right) \cdots \quad (1-11)$$

然后求解电通密度及磁通密度方程，通过计算应力密度最终得到推力及转矩。

$$f_x = -\frac{1}{2} \sigma \operatorname{Re} [E_{-zm} \mathbf{B}_{-ym}^*] \quad (1-12)$$

$$f_z = -\frac{1}{2} \sigma \operatorname{Re} [E_{-xm} \mathbf{B}_{-ym}^*] \quad (1-13)$$

式中， E_{-zm} 为电通密度 z 轴分量； E_{-xm} 为电通密度 x 轴分量； $\mathbf{B}_{-ym}^*$ 为磁通密度 y 轴分量的逆。

文献 [13] 提出一种由 4 个直线感应电机的单边定子沿电机转子对称排列的旋转-直线电机，电机的结构如图 1-3 所示。

4 个定子线圈分别由具有独立移相器的三相电源供电，通过调整相邻定子间供电电压的相序，相邻定子间产生相互作用，电机不但产生轴向力而且还会产生转矩。这种电机和用直线电机、旋转电机合成的旋转-直线驱动装置相比具有价格便宜、维护费用较低的优点。

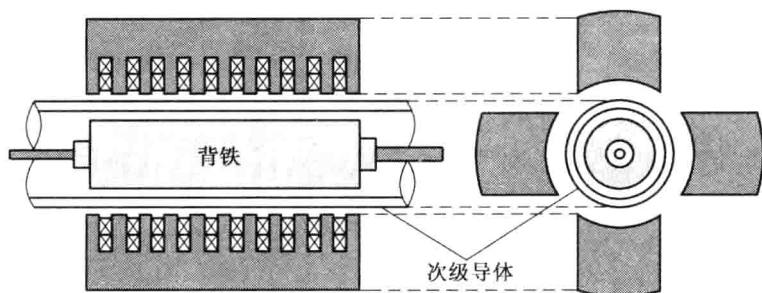


图 1-3 多定子旋转-直线感应电机

文献 [14] 提出的电机和文献 [13] 的电机结构类似，它把 4 个直线感应电机的定子换成 4 个普通旋转感应电机的定子。4 个定子绕组仍然采用具有独立移相器的三相电源供电，通过控制每个绕组电流的相位角，可以控制转子做直线坐标的四象限运动。

文献 [14] 采用有限元分析法，并对节点元应用加勒金法

$$-\int_{\Omega} \text{grad} N \times \frac{1}{\mu} \text{rot} A d\Omega - \int_{\Omega} N J_0 d\Omega + \int_{\Omega} N \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) d\Omega = 0 \quad (1-14)$$

$$-\int_{\Omega} \text{grad} N \cdot \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) d\Omega = 0 \quad (1-15)$$

式中， N 为节点数； J_0 为电流密度； A 为矢量磁位； Ω 为移动角速度； μ 为磁导率； ϕ 为磁通。

文献 [13] 采用建立电机的数学模型并分区域求解电磁场方程的方法进行理论分析。首先得到电机各个分析域的电磁场方

程, 然后由涡流和磁通密度表达式求解出次级力。

2. 永磁电机

文献 [15]~[17] 提出一种永磁同步旋转直线电机, 这种电机由一对相同的圆筒形定子沿相同的轴心端对端对齐, 同样也是筒形的转子沿同一轴心置于定子的内部, 定子部分同转子一起置于旋转直线轴承支撑的机械结构中。定子部分包括铁心和线圈, 铁心是各向同性的并且具有半封闭的槽。转子包括铁心和 $2p$ 个永磁体 (永磁体的个数等于定子绕组的极数), 永磁体是凹形圆柱状扇形体, 并在轴向方向具有统一的磁场强度。永磁体对称地贴到铁心上面。永磁体的有效长度等于定子铁心的有效长度加上定子间距。永磁同步旋转直线电机轴向剖面图如图 1-4 所示。

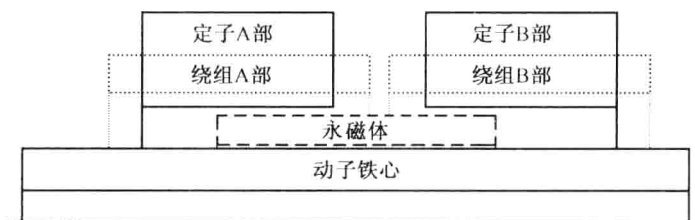


图 1-4 永磁同步旋转直线电机轴向剖面图

文献 [18] 中介绍的是一种具有圆柱状 Halbach 阵列结构的永磁旋转直线电机, 它的设计思路是为了获得轴向的推力和切向的旋转转矩, 需要在不同方向上建立两种气隙磁场。因此它采用了空心的动子结构, 在空心动子的内壁和外壁均设置定子, 外部的各向同性三相定子产生转矩, 内部装载有两个环形线圈的定子, 用来产生轴向力。动子由圆筒形铁心和粘贴在铁心内外的 Halbach 永磁阵列组成, 在铁心外侧的永磁体和一般的无刷电机类似, 而铁心内部的永磁体则和音圈电机类似。基于无刷旋转式和直线音圈式电机组成的复合电机结构如图 1-5 所示。

通过分析最终得到定子电流密度表达式为