

直线感应电机理论

M. 皮罗亚多夫 著

张春钢 译

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书对平面气隙行波磁场直线感应电机的一维理论、二维理论和三维理论进行了分析。

全书共分十章。第一章绪论；第二和第四章讲二维理论；第三章专讲求解电磁场微分方程所需用的边界条件；第五章、第七章讲在直线电机副边平面上和与副边垂直的（ $x-z$ ）平面上的二维分析；第八章讲二维分析；第九章分析了影响直线电机性能的一些因素；第十讲直线感应电机的试验，并介绍了世界名厂研制直线感应电机方面所取得的一些最新科研成果。

本书题材新颖，理论的系统性高并联系实际。书中提供了不少计算实例、试验方法和试验结果。书末附有二百余篇参考文献目录。

本书可供高等院校电机类专业的大学生、研究生和教师阅读，也可供从事电机工程的科技人员参考应用。

Michel Polcardoff

THE THEORY OF LINEAR INDUCTION MACHINERY

Clarendon Press, Oxford, 1980

直线感应电机理论

M 波罗亚多夫 著

张春镛 译

责任编辑 范代夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年3月第一版 开本：737×1092 1/32

1985年3月第一次印刷 印张：9 1/3 插页：0

印数：0001—75,800 字数：199,000

统一书号 15031 630

本社书号：389 15—5

定价：2.15元

目 录

译者前言

Louis Néel 教授的前言ix

序言和致谢xi

符号表xiii

第一章 绪论 1

1.1 直线感应电机 1

1.2 直线感应电动机和发电机的一般叙述。基本假定 2

1.3 本书的宗旨 5

1.4 电磁学基本定律的表达式 8

1.4.1 麦克斯韦方程组的表达式 8

1.4.2 功率和力的求解11

1.5 附录12

第二章 一维理论基础13

2.1 副边电流线的形状13

2.2 其他假定·标记法15

2.3 基本方程16

2.4 基本方程组的复数形式17

2.5 磁通密度的一般形式17

2.6 无限长电动机19

2.6.1 电流和磁通密度20

2.6.2 阻抗图22

2.6.3 推力计算24

2.6.4 等值电路24

2.7 “二阶”理论26

2.8 “四阶”理论29

2.9	多重返回路径理论	30
2.10	附录	32
第三章 一维理论中的边界条件		
3.1	第一种情况：直线感应电动机长度 $L = \lambda$ ；端部磁通 密度突然变化，三阶返回路径理论	36
3.2	第二种情况：直线感应电动机长度 $L = \lambda$ ；端部磁通 密度突然变化，二阶理论	38
3.3	第三种情况：直线感应电动机长度较 $p\lambda$ 稍长，端部磁 通密度突然变化	40
3.4	第四种情况：直线感应电动机长度较 $p\lambda$ 长很多， 三阶理论	41
3.5	第五种情况：直线感应电动机长度 $L = \lambda$ ；端部磁通 密度突然变化，四阶理论	41
3.6	第六种情况：直流制动器	43
3.7	边缘的形状、其在一维理论中的近似	45
3.8	原边磁场的分析	46
第四章 直线感应电机的特性（一维理论）		
4.1	由直接求解微分方程来分析恒电流源供电的直线感应 电动机	49
4.1.1	磁通密度的表示法	50
4.1.2	推力的求解	51
4.1.3	气隙中有功功率和无功功率的求解。效率	52
4.2	一些因素对计算电动机特性的影响	56
4.3	方程组的非直接解法：无限长铁心和实际原边磁势	59
4.3.1	傅立叶展开法	59
4.3.2	傅立叶积分法	63
4.4	方程的非直接解：无限长铁心和实际原边磁通密度	68
4.4.1	解法原理	68
4.4.2	傅立叶级数展开法	69
4.4.3	傅立叶积分法	71

4.5	附录	74
第五章	在副边平面上的二维分析(无限长的电动机)	78
5.1	数据、假定和标记	78
5.2	在 x - y 平面上的基本方程	80
5.2.1	在气隙范围内	80
5.2.2	在气隙外边	81
5.3	无限长电动机方程的解	82
5.3.1	边界条件	82
5.3.2	电流的求解	83
5.3.3	电流线的形状	85
5.4	轴向力和侧向力	88
5.5	原边电压和功率	91
5.5.1	复气隙功率	91
5.5.2	等值电路	92
5.6	在对称情况下与一维理论比较	96
5.7	横向边缘磁场的影响	101
5.7.1	问题的提出	101
5.7.2	横向调制函数	102
5.8	附录	105
5.8.1	确定 \bar{A} 、 \bar{B} 、 \bar{C} 、 \bar{D} 四个常数	105
5.8.2	磁通的求解	107
第六章	在 x-y 平面上的二维分析(有限长度的情况)	108
6.1	分离法的第一个例子	108
6.1.1	在区域 I 中的分析	109
6.1.2	在区域 II 和区域 III 内的分析	112
6.1.3	区域 I 与区域 II、III 之间的边界条件	113
6.1.4	应用	115
6.2	分离法的第二个例子	117
6.2.1	气隙下场方程的分析	117
6.2.2	在返回路径中场方程的分析	119

6.2.3	在区域 I 中的电流值	120
6.2.4	实际例子	121
6.2.5	全解	123
6.3	五区域模型	124
6.4	气隙在 x 方向延伸	126
6.4.1	应用原边电流	126
6.4.2	应用原边磁通密度	128
6.4.3	与第二种分离法的比较	129
6.5	气隙在 x 和 y 两个方向上延伸	130
6.6	对直流制动的四种分析	132
6.6.1	一条窄铜带进入直流磁场	132
6.6.2	对制动器的分析	135
6.6.3	其他因素的影响	139
6.6.4	对悬浮装置的分析	140
6.7	附录	142
第七章	在 $x-z$ 平面内的二维分析	145
7.1	一维理论的推广	146
7.1.1	磁力线	146
7.1.2	悬浮问题	149
7.1.3	注解	151
7.1.4	边端效应对法向力的影响	151
7.1.5	双边电动机中副边的平衡	152
7.2	无限长电动机的全面分析	154
7.2.1	基本方程	154
7.2.2	简单对称的情况: 第一种方法	156
7.2.3	与电力传输线的相似	160
7.2.4	力	165
7.2.5	无限大导电介质的情况	167
7.2.6	无限薄副边的情况	172
7.2.7	等值电路和输入功率	173
7.3	有限长电动机的分析	178

7.3.1	气隙在 x 方向上无限延伸, 傅立叶积分法	178
7.3.2	对短定子直线感应电动机的其他课题	181
7.4	对应用傅立叶变换的一个重要注解	182
7.5	附录	182
7.5.1	考虑入端效应时法向 (z 方向) 力的求解	182
7.5.2	电气相似	185
7.5.3	简单对称情况的分析	185
第八章	三维分析	188
8.1	无限长电动机	188
8.1.1	模型的描述	188
8.1.2	基本方程和边界条件	190
8.1.3	磁场和功率的表达式	191
8.1.4	与其他各章所得结果的比较	198
8.2	有限长的电动机	199
第九章	几点补充	201
9.1	关于推力-速度曲线的一些解释	201
9.2	无因次参数	203
9.2.1	磁雷诺数	204
9.2.2	副边品质因数	206
9.3	n_m , J_m 和 X_m 的确定	207
9.3.1	无限薄的电流密度层	208
9.3.2	正弦移动磁势的产生	210
9.3.3	求 X_m 的值. 小空气隙	211
9.3.4	求 X_m 的值. 大空气隙	213
9.4	某些参数的影响	215
9.4.1	谐波和电流不平衡	215
9.4.2	确定电流源供电和电压源供电电机的特性	216
9.4.3	“外伸缘”的影响	217
9.4.4	铁心开槽	219
9.5	补偿绕组	220

9.6	其他方法	223
9.6.1	Weh 法	223
9.6.2	边 ^{g'} 效应的数值分析	225
9.6.3	网格矩阵分析	226
9.7	Guimbal 电动机	227
9.8	傅立叶变换的反变换	227
第十章 直线感应电机的试验		232
10.1	金属带试验	232
10.2	轮子试验	234
10.2.1	圆柱副边	235
10.2.2	扁平副边的试验	239
10.2.3	出端和入端边端效应间的干涉	242
10.2.4	复合伦试验	242
10.3	液体副边的直线感应电机	244
10.4	轨道试验	245
10.4.1	大中型轨道试验	246
10.4.2	小型轨道试验	251
参考文献		255
中英名词索引		271

第一章 绪 论

1.1 直线感应电机

直线移动磁场的感应电机，是近三十年来深入研究的对象；对其他一些直线感应装置也进行过研究，但进展较少。

学习和制造直线感应电动机十分容易。可以认为本书的读者对它的发展史、基本原理和主要应用都已是熟知的了。在这些方面的许多文献，可在著者的一篇发表过的论文中找到（波罗亚多夫 1971）。而现在要叙述一些在很普通的文献中没有援引过的概念，或至少在第 1.5 节中给出一些与此有关的参考文献。直线感应电动机可有各种各样的结构：气隙可以是平面的或圆柱形的，磁通可以是轴向的或横向的。这些可能做出的结构，大多数已由 Eastham 和 Laithwaite (1973) 以及 Laithwaite (1975) 详细地叙述过了。

磁流体动力发电机，是一种具有气体或液体运动部件的直线感应发电机。在国际原子能机构编制的会议期刊中，和几个关于磁流体动力学（简称 MHD）工程方面的专题论集中，都可以找到大量的有关文献。

本书的范围，首先是关于平面气隙行波磁场的感应电动机或感应发电机的理论分析，这类电机将在第 1.2 节中加以描述。如果在磁流体动力发电机的流体管道中每一点上流体的速度都相同，且霍尔效应可以忽略，则这种行波磁场的感应电机就包括了液态-汽态 MHD 发电机。同时它还包 括某些液态金属泵。

由于下面的两个原因，在本书的第 3.6 节和第 6.6 节

中，也考虑了一些制动效应的情况；首先，这些分析明白地显示了端部效应的本质，而端部效应在行波磁场直线感应电机中起着很重要的作用；其次，关于制动的理论，可很容易做为本书基本理论的一个简化情况而得到。

1.2 直线感应电动机和发电机的一般叙述。基本假定

普通双边电动机可粗略地表示于图 1.1 (a) 中。普通液态金属行波 MHD 发电机，可粗略地表示于图 2.8 中（见第 2.7 节）。应当注意，更详细的画法，应当在绕组和高温管道间画出隔热绝缘体（一般由玻璃纤维做成）来。

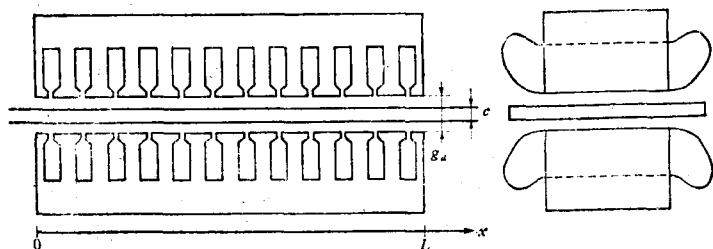


图 1.1 双边直线感应电动机的正视图和左视图。在正视图中绕组没有表示出来

两段开槽的铁心支持着绕组，这些绕组与普通旋转感应电动机的绕组很相似，将在下面说明（图 1.3 和图 1.4）。当电机由多相的平衡电流系统供电时，这些绕组在气隙内建立一个原边滑动磁场。因现在只考虑副边很长的情况，所以副边的长度可假定为无穷大。

基本假定：为了分析双边直线感应电动机 (LIM)，现做基本假定如下：

(i) 长度为 g_a 的有齿槽的实际气隙，可用一个假想的、长度为 g 的无齿槽气隙来代替；比值 g/g_a 为卡特系数，在任何有关感应电机的书中都能找到这个系数的定义（例如可见 Alger1965 年的著作）。

(ii) 气隙上面和下面的绕组，可理想化为两个无限薄的导体板，放置于假想气隙的表面上（见第 9.3 节）。

(iii) 假定铁心是叠片压装的，所以它的电导率可以忽略。其磁阻一般也可以忽略，只是在第 2.8 节中例外，那里考虑了磁阻。

单边直线感应电动机表示于图 1.2 的示意图中。图 1.2 (a) 中的电动机刚好与图 1.1 中电动机的一半等效，这个观点将在许多情况下应用（例如第 7.3.1 节图 7.17）。

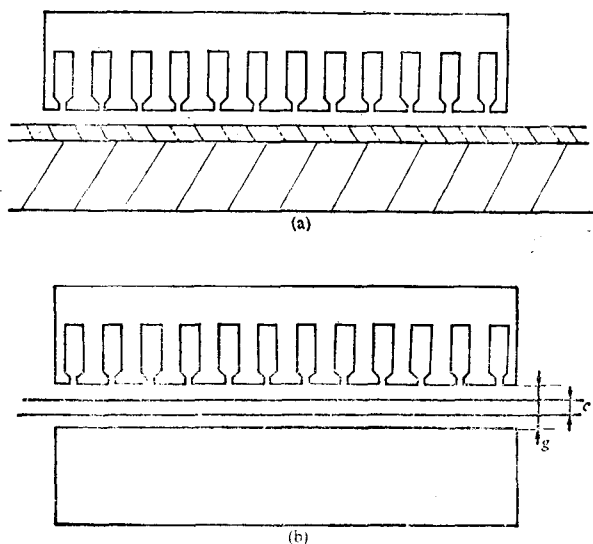


图1.2 单边电动机

所以，尽管双边电动机和单边电动机的应用很不相同，但一般并不需要区分它们的理论。

多相绕组：应用于直线感应电机中的多相绕组有两种：单层整距绕组或双层短距绕组。

单层整距绕组可按克兰姆（Gramme）绕法得到，但这会引起原边漏磁通较大的缺点；它也可以由图 1.3 (a) 中所说明的方法来做出。这种绕组，特别是在通常应用的开槽很深的情况下，需要很庞大的端匝。这个缺点可以应用两个单层绕组，一个放在另一个之上来减缓，如图 1.3 (b) 所示 (Payen, 1971)。

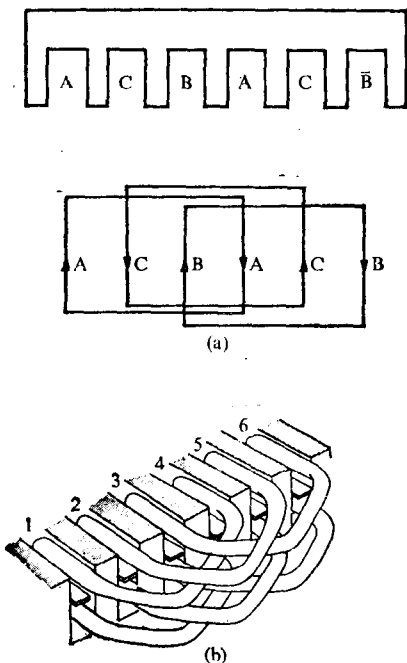


图 1.3 (a)——一般两极三相单层绕组，(b)——两个单层绕组的迭加
(取自Payen, 1971年)

在图 1.4 中画出一个双层短距绕组的例子。可以看出如果极距为 $2/3$ ，且每极每相槽数为 S ，则在电动机每端必须有 $2S$ 个槽填满一半，或者用另一方案，即压缩掉两端的部分槽（在图 1.4 的例子中为 1 到 6 槽和 19 到 24 槽），并使相应的线圈边放在敞开的空气中。存在半填充（或未嵌入导体）槽是这种绕组的缺点。例如对一个 60° 相带，短距 $2/3$ 槽，每极每相五个槽的五对极的盖莱特（Garret）电动机（Chirgwin, 1973 年），这时有 140 个满槽，在电动机的每端有 10 个半填充槽。其它有关这种装置的消息，可在 Kalman (1974) 的著作中找到。

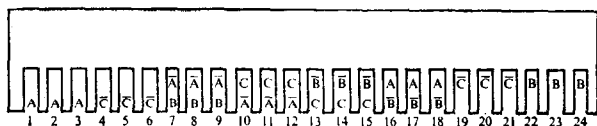


图 1.4 双层短距三相绕组

在单层绕组和双层绕组间其他方面的比较，可在感应电机的经典著作中找到，例如，可看 Alger (1965) 的书第三章。

在本书中，以后假定绕组为单层绕组。

1.3 本书的宗旨

本书的主要目的是介绍一些最重要的方法，这些方法可用来分析双边或单边直线感应电动机或发电机，当由正弦交流电源供电时其稳态运行特性。

因为我们只局限于研究稳态情况，这时任何电场或磁场的分量，都可由它们的相位和幅值来确定，也就是说由一个

复数来确定，我们把这个复数称为场的值。

气隙中某点的位置，是由它相对于固定在原边的参考坐标来确定的，如图 1.5 所示。直线电动机的主要理论可分类

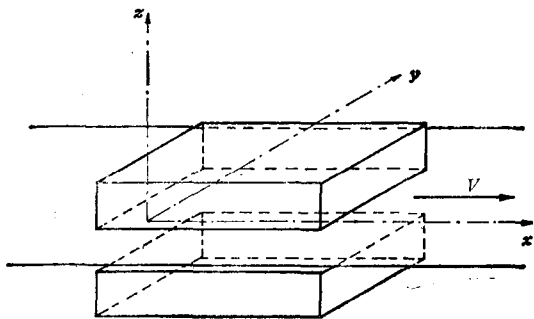


图 1.5 坐标轴

如下：

(i) 一维理论，假定各电场或磁场的值只为 x 坐标的函数。

(ii) 二维理论，假定各种场量的值只为一对坐标的函数： x 和 y 坐标对（如果在导体平面内进行分析），或 z 和 x 坐标对。而 y 和 z 坐标对则没有多大价值。

(iii) 三维理论，认为各种场量的值是 x ， y 和 z 三个坐标的函数。

理论分析的另一种分类法，基于在上一节基本假定的基础上，有时还要再加上一些假设，这些假设或补充假定，确定了通常所谓电机的“数学模型”。数学模型可分为以下几类：

(a) 不用附加的假定。

(b) 原边的实际宽度 l 可任意增加，并且用副边的宽度 l' 来代替（在一切实际情况下 $l' \geq l$ ）。例如 Preston 和

Reece (1969), Oberretl (1973) 都这样做过。这种假设也是本书第 5.7.2 节和第八章的主题。

(c) 铁心实际长度可以用无限长的铁心来代替，同时认为绕组的范围和原边电流的值都仍是实际值。这些假定曾为下列各人所采用：Fanucci, Kijewski, Ness, 和 McCune (1963); Engeln 和 Peschka (1966); Sudan (1963); Yamamura (1972); 以及 Nasar (1969)。同时这些假定也是本书第 4.3 节和第 6.4.1 节的主题。

(d) 铁心实际长度可以用无限长的铁心来代替，但在实际电动机中，由原边建立的磁通密度做为分析的已知条件。这些假设曾为 Jufer (1971), Oberretl (1973), Lin 和 Pierson (1975) 所采用，并且是本书第 4.4 节和第 6.4.1 节的主题。

自然，在这两类中的大多数项还可以再细分，所以数学模型的种类是很多的。

数学模型一旦选定之后，就可以写出决定电磁场的方程组并求解，一般地讲这也有很多方法来进行。所以，不可能在本书的范围之内，罗列出所有分析直线感应电动机的方法。但是对于与这些分析有关的物理问题和数学问题，提供一个全面的认识，则属于本书的范围。

另外，前面已经说过，讨论某些直线运动装置的制动作用，可以使分析深入，并可提供一些有用的对比。

在这里没有讲横向磁通电动机，但是可以认为，在第 6.5 节中所用的方法，可直接用于大多数的横向磁通电动机中。管状电动机和实心铁副边电动机也没有包括在本书之内。

在大多数实际情况中，电动机是由恒压电源供电的。这时由于三相的不对称，特别是极对数少时，引起了电流的不

平衡。这个概念就是为什么直线电机并联运行和串联运行在理论上很不相同的原因；而在旋转电机中，理论上它们是一样的 (Laithwaite, 1965)。然而，这种不平衡受到漏电抗的很大限制，因为这时气隙很大，且漏磁通与气隙磁通相比并不小，所以经常可以把它忽略不计 (见第 9.1.3 节)。

应当注意，所有的力-速度曲线和功率-速度曲线，都是在恒电流源情况下给出的。这是由于对恒压源的相应曲线，与原边漏抗值有密切的关系。如果这漏抗已知，则电流-速度曲线的变化已知，如在第 5.6 节和图 5.9 中所示，因而恒压源时的特性也就可知 (也可见第 9.4.2 节)。

通常需要用试验来确定理论公式的正确性。但是，详细分析所得的试验结果并不是最终的目的，所以没有把这些包括在本书之内。这里做了如下的折衷方案：书中给出了很多数例的应用，这些数据大部分参考了 Pacuat 在一个电动机上所做的试验。而这个电动机的主要尺寸和特性已在第 9.7 节中给出，所以理论和试验间的初步比较，就可容易地进行了。

1.4 电磁学基本定律的表达式

电磁学的基本定律是众所周知的，但这些定律可以用不同的方式来表达，我们必须在其中进行一些选择。以下各节就是考虑这个问题的。

1.4.1 麦克斯韦方程组的表达式

电磁场是 E 、 B 、 D 、和 H 四个向量的组合。对任意正常的点，这四个向量及其导数都是时间和空间的连续函数，这些向量间的关系为：

法拉第定律:

$$\operatorname{curl} \mathbf{E} + \partial \mathbf{B} / \partial t = 0 \quad (1.1 a)$$

安培定律:

$$\operatorname{curl} \mathbf{H} - \partial \mathbf{D} / \partial t = \mathbf{J} \quad (1.2 a)$$

其中 \mathbf{J} 为电流密度。由 (1.1 a) 我们有

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1.3 a)$$

这些关系式可重写为:

$$\oint_{(c)} \mathbf{E} d\mathbf{l} + (\partial / \partial t) \int_s \mathbf{B} d\mathbf{s} = 0 \quad (1.1 b)$$

$$\oint_{(c)} \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_s (\mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t) d\mathbf{s} \quad (1.2 b)$$

$$\oint_s \mathbf{B} d\mathbf{s} = 0 \quad (1.3 b)$$

于是我们得到两种不同的表达形式, 微分形式和积分形式。从理论上看来, 它们是完全等价的。

然而, 在简化的理论中, 一些磁通线的实际形状可以用简化的形状来代替, 所以微分的方程式并不是在场中的每一点都能满足的。例如在第二章到第六章中, 假定气隙中的磁场只有一个 z 方向的分量, 此磁场或者为 x 的函数 (一维理论), 或者为 x 和 y 的函数 (在副边平面上的二维理论), 所以在副边和原边之间的空隙里, 微分规律

$$\operatorname{curl} \mathbf{B} = 0$$

并不满足。在这种情况下, 如同建立方程 (2.1) 到方程 (2.4) 那样, 应用通过整个气隙的积分形式, 则误差就自然地消掉了。

所以, 麦克斯韦方程组在本书中写出过几次, 在不同的情况下, 可以采取两种可用形式中较为方便的一种。

还应当注意, 在法拉第定律中, \mathbf{B} 对时间的导数, 应由固定在副边导体上的观察者来求取。为强调这一点, 我们