

直线异步电动机

上海工业大学 编
上海电机厂



机械工业出版社

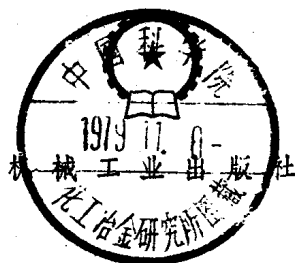
73.2537
115

直线异步电动机

上海工业大学 编
上海电机厂

JK611/35

JK611/34



直线异步电动机是近年来国内外积极发展的新型电机之一。本书首先对直线异步电动机所特有的边缘效应作了定性的描述。之后,介绍非磁性次级直线异步电动机在考虑边缘效应时的分析和设计方法,并从电磁场理论导出纵、横向边缘效应的实用计算公式。最后介绍各种不同类型直线异步电动机的结构,并对制造工艺作了较详细的阐述。为了简化计算,书后还附有电子计算机计算边缘效应的系数表。

本书可供有关专业的广大技术人员和工人阅读,也可供大专院校师生参考。

直线异步电动机

上海工业大学 编
上海电机厂

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $7 \frac{7}{8}$ · 字数 173 千字
1979 年 4 月北京第一版·1979 年 4 月北京第一次印刷

印数 00,001—74,000 · 定价 0.74 元

*

统一书号: 15033 · 4371

前 言

直线异步电动机是近年来国内外积极发展的新型电机之一。由于它能直接产生直线机械运动,而不需中间传动转换装置,因此在工业、交通运输业等各部门的使用前景相当广阔。

一九七四年以来,我们厂校合作,开展了对直线异步电动机的研究,并把初步研究成果应用于生产实践中,收到了良好的效果。

在英明领袖华主席的领导下,在敬爱的周总理提出的本世纪末我国全面实现四个现代化的号召鼓舞下,为进一步推广直线异步电动机的应用,并对它进行更深入地研究,积极赶超世界先进水平,我们根据积累的一些经验编写成《直线异步电动机》一书。

本书首先对直线异步电动机所特有的边缘效应作了定性的描述。之后,介绍非磁性次级直线异步电动机在考虑边缘效应时的分析和设计方法,并从电磁场理论导出纵、横向边缘效应的实用计算公式。最后介绍了各种不同类型直线异步电动机的结构,并对制造工艺作了较详细的阐述。为了简化计算,书后还附有电子计算机计算边缘效应的系数表。

在编写过程中得到了全国各地许多单位的大力支持,提供了宝贵的资料,特别是第一机械工业部机械研究院、中国科学院电工研究所、浙江大学、甘肃工业大学、广西机械工业研究所等有关同志参加了本书的审稿会议,提出了不少宝贵意见,在此表示衷心地感谢。

由于我们水平有限,书中难免有错误和不当之处,希读者批评指正。

《直线异步电动机》编写组

34732

目 录

前 言

第一章 概论	1
§ 1-1 扁平型直线异步电机的结构	1
§ 1-2 直线电机的简单工作原理	6
§ 1-3 直线电机的主要优缺点	11
§ 1-4 直线电机的主要用途	13
第二章 直线电机气隙磁场	18
§ 2-1 概述	18
§ 2-2 不考虑边缘效应时的空载气隙磁场	19
§ 2-3 第一类横向边缘效应	28
§ 2-4 第一类纵向边缘效应	30
§ 2-5 第二类横向边缘效应的物理描述	35
§ 2-6 第二类纵向边缘效应的物理描述	37
第三章 直线电机中几种常用的绕组型式	39
§ 3-1 概述	39
§ 3-2 单层同心式绕组	40
§ 3-3 单层链式绕组	42
§ 3-4 双层无补偿叠绕组	43
§ 3-5 双层有补偿叠绕组	45
第四章 等值电路及特性计算公式	50
§ 4-1 不考虑边缘效应时的等值电路	50
§ 4-2 考虑第二类边缘效应时的串联等值电路	53
§ 4-3 特性计算公式	56
第五章 非磁性次级直线电机设计	59
§ 5-1 主要尺寸的确定与电磁负荷的选择	59

§ 5-2	初级绕组与冲片的初步设计	64
§ 5-3	磁路计算	67
§ 5-4	参数计算	70
§ 5-5	用电子计算机进行电磁设计	76
§ 5-6	电磁设计公式及计算实例	79
第六章	缓慢直线运动导电媒质中的电磁场方程	91
§ 6-1	电磁场方程组	91
§ 6-2	场量的微分方程	93
§ 6-3	复数形式的电磁场方程	98
§ 6-4	具有直线运动的导电媒质中的电磁场方程	101
第七章	第二类横向边缘效应的定量分析	107
§ 7-1	第二类横向边缘效应的计算	107
§ 7-2	第二类横向边缘效应对于复电磁功率的影响	119
第八章	第二类纵向边缘效应的定量分析	122
§ 8-1	第二类纵向边缘效应的计算	122
§ 8-2	工作气隙中的磁通密度	129
§ 8-3	电磁推力的计算	131
§ 8-4	电磁功率与复电磁功率	132
§ 8-5	机械功率与次级导体板中的电损耗	135
第九章	钢次级直线电机	138
§ 9-1	概述	138
§ 9-2	等值电路及其参数计算	138
§ 9-3	特性计算	142
§ 9-4	单边磁拉力的计算	145
§ 9-5	电磁计算实例	146
第十章	直线异步电机的其它型式	158
§ 10-1	管型及方型直线电机	158
§ 10-2	圆盘型及弧型初级直线电机	161
第十一章	直线电机的若干应用	165

V

§ 11-1	直线电机在工业机械手上的应用	165
§ 11-2	直线电机传送车在生产流水线上的应用	169
§ 11-3	直线电机在吊车上的应用	171
§ 11-4	直线电机在冷库电动门上的应用	174
§ 11-5	直线电机驱动的电磁锤	176
§ 11-6	直线电机在皮带运输机上的应用	179
第十二章	直线电机初级的制造工艺	180
§ 12-1	初级铁心的材料	180
§ 12-2	初级冲片的剪切	184
§ 12-3	初级冲片冲裁力的计算	191
§ 12-4	初级冲片单槽冲的尺寸调试	196
§ 12-5	初级冲片的绝缘处理	200
§ 12-6	铁心压装工艺	203
§ 12-7	线圈绕制、嵌线和接线工艺	204
§ 12-8	浸漆工艺	206
附录		208
主要符号表		240
参考文献		246

第一章 概 论

直线电机是一种将电能直接转换成直线运动机械能的电力传动装置。

直线电机可以看作是由旋转电机演变而来的。与旋转电机相对应，直线电机可分为直线异步电机、直线同步电机、直线直流电机及特种直线电机(例如直线步进电机等)四类。本书将讨论直线异步电机。

直线异步电机按其结构型式不同，又可分为扁平型、管型和圆盘型等。因扁平型最有代表性，且应用最广泛，故本书将着重介绍扁平型直线异步电机。至于管型、圆盘型等在结构上与扁平型的区别以及它们的设计计算特点将在第十章中介绍。

§ 1-1 扁平型直线异步电机的结构

为简单起见，自本节起至第九章，把扁平型直线异步电机简称为直线电机，把对应的旋转异步电机简称为旋转电机。

为了说明由旋转电机变为直线电机的演变过程，先扼要地介绍一下旋转电机的结构。图 1-1 是一台旋转电机的剖面图。由图可见，它由固定不动的定子、可以自由转动的转子以及介于两者之间的气隙三部分组成。定子的主体是铁心和三相交流绕组。铁心用硅钢片叠成，在内圆上开有均匀分布的槽，而三相交流绕组嵌置于槽中。转子有鼠笼型、线绕型和实心型三种型式，最常见的是鼠笼型，它由铁心和鼠笼绕

组构成。铁心一般也用硅钢片叠成，在外圆上开有均匀分布的槽，槽中安放铜条或注入铝条，在铁心两端用铜环或铸铝环把所有导条短接起来，形成鼠笼绕组。定、转子之间的气隙是为了不使定、转子相擦而必须存在的，在保证机械上运转可靠的条件下，气隙应尽可能小，以便减小所需的磁化电流而提高电机的效率和功率因数。

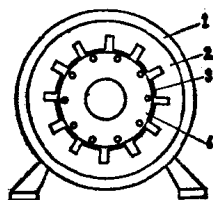


图1-1 旋转电机剖面图

现在设想把图 1-1 所示的旋转电机沿径向剖开，并将电机的圆周展成直线，如图 1-2 所示，这就得到了由

1—机座 2—定子铁心
3—气隙 4—转子铁心

旋转电机演变而来的最原始的扁平型直线电机。由定子演变而来的一侧叫做初级或原边，由转子演变而来的一侧叫做次级或副边。

直线电机的运动方式不限于初级是固定的，有时也可以固定次级而运动初级。当初级固定而次级运动时，称为动次级，反之则称为动初级。

在图 1-2 中，直线电机的初级和次级长度相等，这在实际应用中是行不通的。因为初、次级要作相对运动，假定在开始运动时，初、次级正好对齐，那末在运动过程中，初、次级之间互相耦合的部分将越来越少，影响了正常运行。因此在实用上必须把初、次级做成长短不等，而使长的那一级有足够的长度，以保证在所需行程范围内初、次级间保持不变的耦合。在直线电机制造上，既可以做成长初级，又可以做成长次级，见图 1-3。由于短初级的制造成本和运行费用均比短次级的低得多，因此一般常用短初级，而只有在特殊情况下才采用短次级。

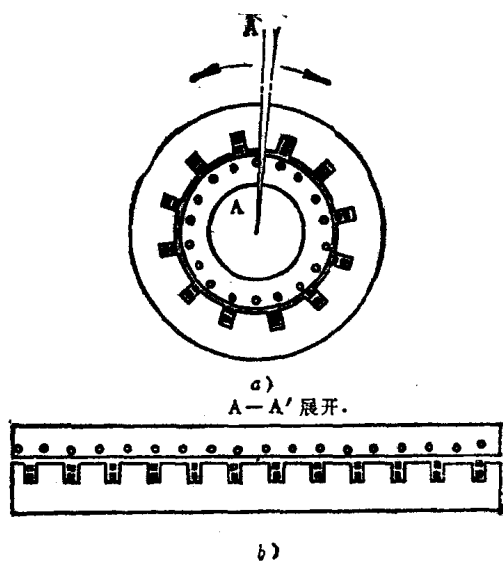


图1-2 由旋转电机变为直线电机的演变过程

a) 沿径向剖开 b) 把圆周展成直线

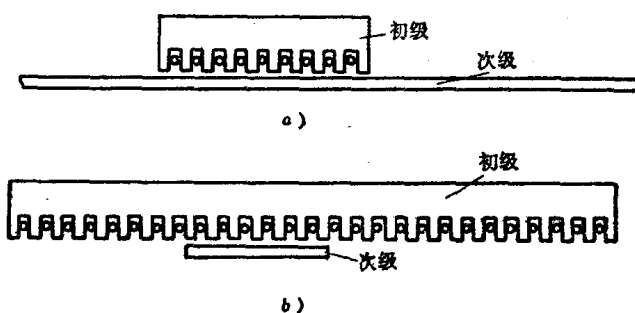


图1-3 单边型直线电机

a) 短初级 b) 短次级

图 1-3 所示的直线电机仅在次级的一边具有初级，这种结构型式称为单边型。它的一个显著特点，就是在初、次级之间作用着很大的法向磁拉力，在大多数使用场合下，这种磁拉力是不希望存在的。如果在次级两边都装上初级，那就使两边的法向磁拉力相互抵消，也就是使次级上受到的法向合力为零，这种结构型式称为双边型，见图 1-4。

下面具体介绍扁平型直线电机的初级、次级和气隙，并着重说明它们与旋转电机相应部分之间的差异。

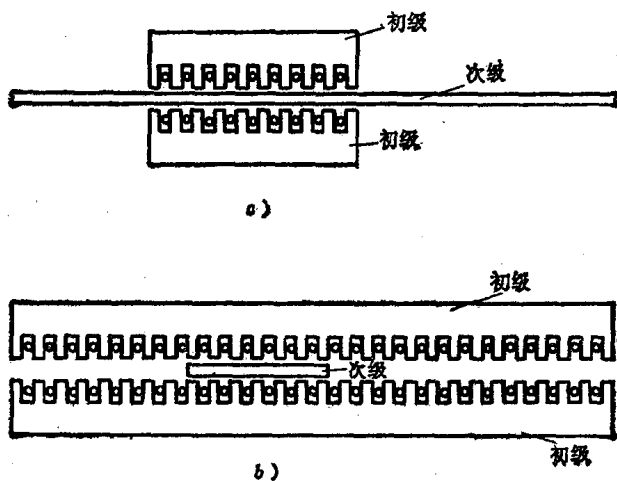


图1-4 双边型直线电机

a) 短初级 b) 短次级

1. 初级

直线电机的初级如图 1-5 所示，它相当于旋转电机的定子沿圆周方向展开。初级铁心也由硅钢片叠成，表面开有槽，三相交流绕组嵌置于槽内。

但是，直线电机的初级与旋转电机的定子有一个很大的差别。旋转电机的定子铁心和绕组沿圆周方向是到处连续

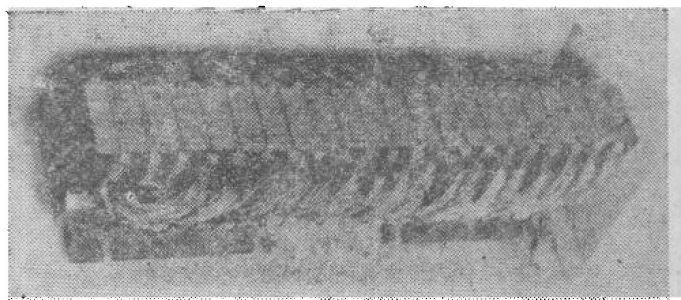


图1-5 直线电机的初级

的，而直线电机的初级则是开断的，形成了两个端部边缘，铁心和绕组无法从一端直接联接到另一端。铁心和绕组的开断将对电机的磁场有一定的影响，即所谓纵向边缘效应，详见第二章。

2. 次级

直线电机的次级相当于旋转电机的转子沿圆周方向展开。与鼠笼转子相对应的是栅形次级，如图 1-6 所示。它是在钢板上开槽，槽中放入铜条或铝条，然后用铜带或铝带在两侧端部短接而成。栅形次级的直线电机性能较好，但由于结构和工艺较复杂，故在短初级直线电机中很少采用。

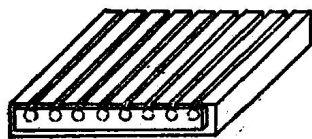


图1-6 栅形次级

在短初级直线电机中常用的次级有三种。第一种是整块钢板，称为钢次级或磁性次级。这时钢既起导磁作用，又起导电作用，但由于钢的电阻率较大，故钢次级的电磁性能较差。第二种为钢板上复合一层铜板（或铝板），称为钢铜（钢

铝)复合次级。在复合次级中,钢主要用于导磁,而导电主要靠铜或铝。第三种是单纯的铜板(或铝板),称为铜(铝)次级或非磁性次级。这种次级一般用于双边型电机中,使用时,必须使一边的 N 极对准另一边的 S 极,从而使非磁性次级中磁通路径最短,如图1-7所示。尚需指出,当复合次级的铜板(或铝板)有相当厚度时,这种次级也可看作非磁性次级。

3. 气隙

直线电机的气隙通常比旋转电机的大得多,主要是为了保证在长距离运动中,初、次级不致于相擦。对于复合次级或铜(铝)次级来说,还要引入电磁气隙的概念。由于铜或铝等非导磁材料的导磁性能和空气相同,故在磁场和磁路计算时,铜板或铝板的厚度要归并到气隙之中,这个总的气隙称为电磁气隙,用 δ_e 表示。为了区别起见,单纯的空气隙称为机械气隙,用 δ 表示,见图1-8。

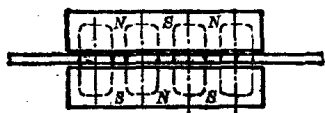


图1-7 双边型直线电机的
磁通路径



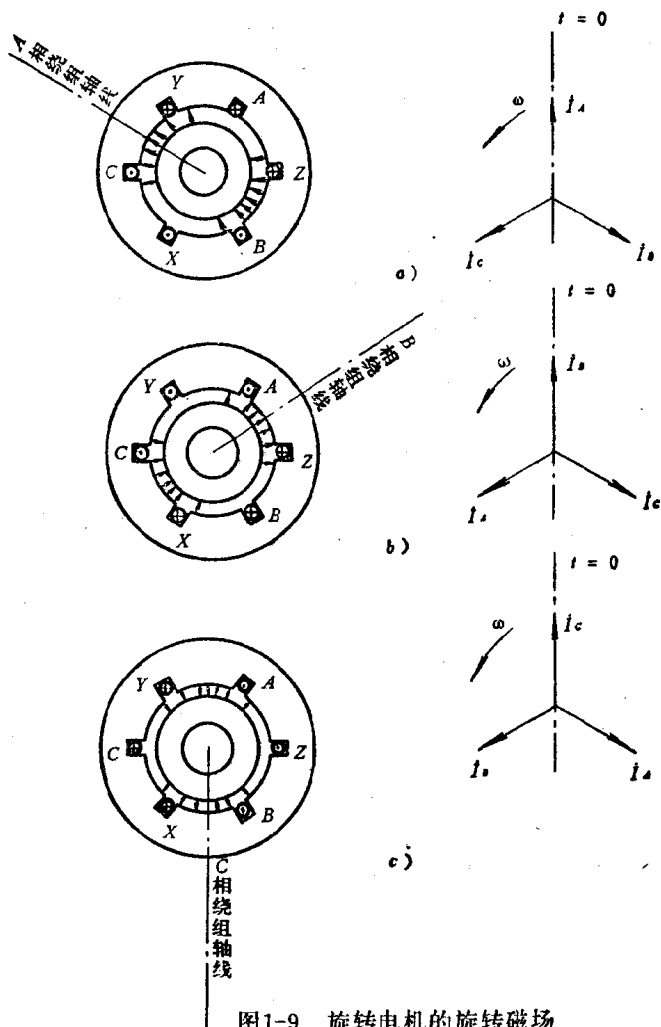
图1-8 复合次级的气隙
1—初级 2—铜板或铝板 3—钢板

§ 1-2 直线电机的简单工作原理

直线电机不仅在结构上与旋转电机相类似,而且工作原理也是相似的。本节将从旋转电机的基本工作原理出发,引出直线电机的基本工作原理。

1. 旋转电机的基本工作原理

图 1-9 表示一台简单的二极旋转电机。图中线圈 AX 、



BY、CZ 为定子 A、B、C 三相绕组。当在其中通入三相对称正弦电流后，便在气隙中产生了一个磁场，这个磁场可看成沿气隙圆周呈正弦形分布。当 A 相电流达到最大值时，B 和 C 相电流都为负的最大值的二分之一，这时磁场波幅处于 A 相绕组轴线上，如图 1-9a 所示。经过 $t = \frac{2\pi}{3\omega}$ 时间（其中 ω 为电流的角频率）后，B 相电流达到最大值，这时 C 和 A 相都为负的最大值的二分之一，而磁场波幅转到 B 相绕组轴线上，如图 1-9b 所示。经过 $t = \frac{4\pi}{3\omega}$ 时间后，C 相电流达到最大值时，A 和 B 相电流都为负的最大值的二分之一，磁场波幅又转到 C 相绕组轴线上，如图 1-9c 所示。由此可见，电流随时间变化，磁场波幅就按 A、B、C 相序沿圆周旋转。电流变化一个周期，磁场转过一对极。这种磁场称为旋转磁场，它的旋转速度称为同步转速，用 n_s 表示，它与电流的频率 f （赫）成正比，而与电机的极对数 p 成反比，如下式所示：

$$n_s = \frac{60 f}{p} \text{ (转/分)} \quad (1-1)$$

如用 v_s 表示在定子内圆表面上磁场运动的线速度，则有：

$$v_s = \frac{n_s}{60} 2p\tau = 2\tau f \text{ (米/秒)} \quad (1-2)$$

式中 τ ——极距(米)。

通过图 1-10 可说明旋转磁场对转子的作用，为了简单起见，图中鼠笼转子只画出了两根导条。

当气隙中旋转磁场以同步转速 n_s 旋转时，该磁场就会切割转子导条，而在其中感应出电动势。电动势的方向可按右

手定则确定，示于图中转子导条上。由于转子导条是通过端环短接的，因此在感应电动势的作用下，便在转子导条中产生电流。当不考虑电动势和电流的相位差时，电流的方向即为电动势的方向。这个转子电流与气隙磁场相互作用便产生切向电磁力。电磁力的方向可按左手定则确定。由于转子是个圆柱体，故转子上每根导条的切向电磁力乘上转子半径，全部加起来即为促使转子旋转的电磁转矩。由此可以看出，转子旋转的方向与旋转磁场的

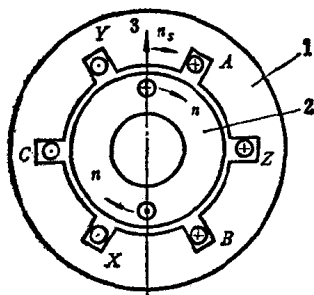


图1-10 旋转电机的基本工作原理

1—定子 2—转子 3—磁场方向

转向是一致的。转子的转速用 n 表示。在电动机运行状态下，转子转速 n 总要比同步转速 n_s 小一些，因为一旦 $n = n_s$ ，转子就和旋转磁场相对静止，转子导条不切割磁场，于是感应电动势为零，不能产生电流和电磁转矩。转子转速 n 与同步转速 n_s 的差值经常用滑差率 s 来表示，即

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{n_s - n}{n_s} \\ n_s - n &= sn_s \\ n &= (1 - s)n_s \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

以上就是一般旋转电机的基本工作原理。

2. 直线电机的基本工作原理

将图 1-10 所示的旋转电机在顶上沿径向剖开，并将圆周拉直，便成了图 1-11 所示的直线电机。在这台直线电机的三相绕组中通入三相对称正弦电流后，也会产生气隙磁场。

当不考虑由于铁心两端开断而引起的纵向边缘效应时，这个气隙磁场的分布情况与旋转电机的相似，即可看成沿展开的直线方向呈正弦形分布。当三相电流随时间变化时，气隙磁场将按 A 、 B 、 C 相序沿直线移动。这个原理与旋转电机的相似，二者的差异是：这个磁场是平移的，而不是旋转的，因此称为行波磁场。显然，行波磁场的移动速度与旋转磁场在定子内圆表面上的线速度是一样的，即为 v_s ，称为同步速度，且

$$v_s = 2f\tau (\text{米/秒}) \quad (1-4)$$

再来看行波磁场对次级的作用。假定次级为栅形次级，图 1-11 中仅画出其中的一根导条。次级导条在行波磁场切割下，将感应电动势并产生电流。而所有导条的电流和气隙磁场相互作用便产生电磁推力。在这个电磁推力的作用下，如果初级是固定不动的，那末次级就顺着行波磁场运动的方向作直线运动。若次级移动的速度用 v 表示，滑差率用 s 表示，则有：

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{v_s - v}{v_s} \\ v_s - v &= sv_s \\ v &= (1 - s)v_s \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

在电动机运行状态下， s 在 0 与 1 之间。上述就是直线电机的基本工作原理。

应该指出，直线电机的次级大多采用整块金属板或复合

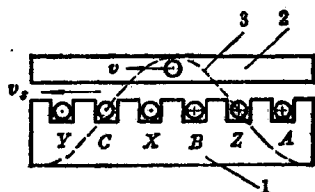


图1-11 直线电机的基本工作原理

1—初级 2—次级 3—行波磁场