

直线感应电动机

浙江大学《新技术译丛》编译组

直线感应电动机

(译文集)

浙江大学五·七电机厂编译
《新技术译丛》编译组

1972

前 言

直线感应电动机是国外近年来用于交通、运输及传送装置等方面的一种新型电力驱动设备，能将电能直接变为直线机械运动能，具有速度快、结构简单、效率高、成本低等优点。

根据伟大领袖毛主席要“洋为中用”的伟大教导，我们选译了近年来国外有关直线感应电动机的文章11篇，汇编成册，供有关部门的广大工人、技术员、教师和其他同志参考。

毛主席教导说：“学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。”在编译过程中我们对原文作了一些必要的删改，但还可能存在一些缺点和错误，希读者批评指正。

直线运动的电机

提要——本文介绍直线运动电机的概况。重点是直线感应电动机，对它作了相当详细的论述，其余各种直流和交流直线电机仅仅简略地提及。本文根据拓扑学的考虑把这些电机分类并阐述了近70年来的发展情况，还扼要地叙述一种新型混合电机的性能。文章对直线电机独特的设计问题及解决办法进行了讨论，并包括这些电机的几种可能的实际应用。

引言

绝大部分电机所产生的都是旋转运动，自从发明轮子以来人们一直采用旋转运动并利用其优点。当然，我们也可以利用电磁力来产生直线运动，如在一种直线感应电机中，作为初级的一系列线圈是按照相序流通电流的。简单地说，直线电机的初级就好像是把普通旋转电机的定子按径向面剖开并将它拉直，如图1所示。依照这一原理可以发展若干种不同类型的直线电机，但我们将会看到，直线电机族并不仅仅限于用这种拉直法所产生的扁平电机。

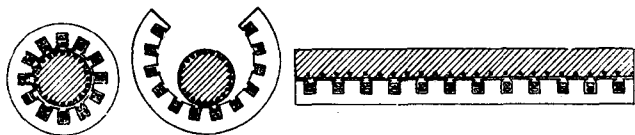


图1 将普通电动机剖开拉直而得到
直线感应电动机的设想过程

通常，当工程技术人员以不同的尺寸、形状或新材料来设计某种器件时，他往往将整个工作状态加以改变，使新产品具有的特性适用于完全不同的应用范围。如直线电机的线性化效应就是为了引起一些新的现象，使电机的工作性能低于相应的普通旋转电机。直线电机的历史告诉我们，起初人们致力于克服使性能降低的诸种因素，但后来为了某些专门用途人们愈来愈乐意接受较低的性能，因为直线电机已在其它方面显示出优越性。

本文将首先讨论由形状改变而引起的工作状态变化，用感应电机来说明变化过程。

拓 扑 学 考 虑

交流电机特别是感应电动机的许多特性都是按照这一概念解释的，即初级在气隙中建立了旋转磁场。把定子剖开拉直显然可以改变工作特性，因为这时任何直线运动的磁场必定有起点和终点。而且，在设计初级时也不需要考虑极的偶数数目，甚至不是整数亦可。

或许从根本上说，将普通鼠笼式电动机剖开拉直而得到的直线电机（如图2所示）只能适用于有限的几种场合，因为允许次级运动就意味着当“笼形”在一端出现而使初级线

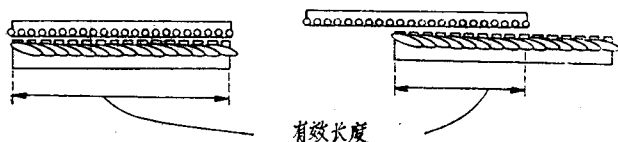


图2 原始形式的直线电动机在运动时有效长度缩短了

圈在另一端裸露时电动机失去了越来越大的部分。由此可见，如果需要以一定功率运动较长一段距离，初级或者次级就必须延长。

根据这种延长即可得到两类不同的直线电机，称为“短初级”和“短次级”，如图3所示。一般地说，短初级电机的制造成本和运行成本要低得多。次级在结构上可以简化，通常制成为一片导体，整个系统仅在其长度的一小部分上有电流流通。但在某些情况下，可以采取一种长的分段初级，电流仅仅通过处于工作状态的部分区段。

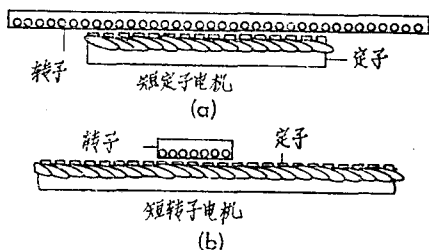


图3 直线电动机的两种基本类型

“片状转子电动机”

至此述及的配置都假设定子和转子均由叠片铁心槽中的导体所组成，这是旋转电机的通常结构。但在这种结构中，除了电机所产生的切向磁推力之外，在反向磁化的两表面之间还存在着一一种纯磁拉力。在圆筒形电机中只能观察到因结构不对称而引起的失衡磁拉力。这情况足以使技术人员在设计旋转电动机时伤脑筋，现在要设计直线电机，问题就更复杂了。

于是，人们设计了一种双边型电机，它的次级导体不再嵌在槽中而是在气隙中工作，仅仅在通电区域由一钢块使磁路闭合。通常更妥当的办法是把这一钢块装上第二个初级绕组，这样有助于使磁力线通过次级导体。图4表示双边型电动机的发展过程。在最后一步，使次级的结构简化，它不过是一块导体，在构造上的这种更动是为了改变工作状态。

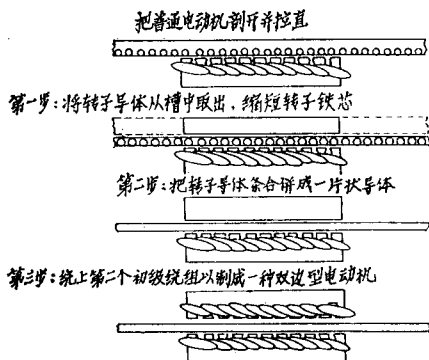


图4 “片状转子”电动机的发展过程

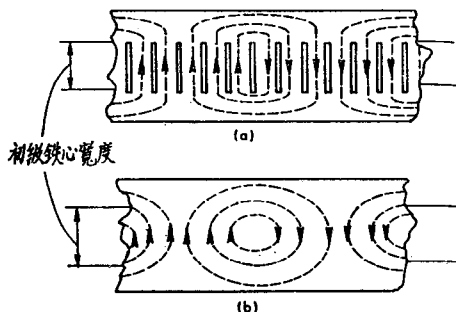


图5 开槽式次级片(a)和片状转子(b)中的电流分布

图 5 (a) 表示在梯型次级导体(鼠笼式转子的线性模拟)中电流分布的情况。棒间电流仅仅通过端导体,但在片状转子中可得到象图 5 (b) 那样的电流分布。在激磁区纵向电流的作用是重新分配气隙磁通量,使电机中心区域的磁通密度高于两边。最近已发表了关于这种效应的分析文章[6]。

边端效应

除了初级侧边的效应之外,由于短初级或短次级的前后边端,还会产生圆筒形电机中并不存在的其它效应。在短初级和短次级两类电机中,这些边端的作用首先是在磁铁心上产生驻波,以附加于通常的行波。其次,当初级和次级之间开始相对运动时,在边端建立了电瞬态。这些“进入”和“引出”的边端效应在已发表的文章[3],[12],[25],[35],[37],[59]-[62],[69]中有较详尽的分析,本文仅将其结果作一概述。

在短次级电机中,当次级长度至少为 2 个极距时瞬变效应是不易察觉的。若次级长度再短些,一般可由次级导体电阻率的明显增高来说明这些效应。图 6 表示在一典型场合下电阻率倍增系数随着次级长度而变化的情况。在短初级电机中效应比较复杂,但主要特征可归纳如下:

- (1) 沿电机长度上的磁通分布是不均匀的,分布随速度而变。一般地说,该效应好象是相对运动把大量磁通扫掠到电机的后部。
- (2) 电机采取串接时次级中会引起额外损耗,采取并接时初级中会引起损耗,对于这种损耗普通电机的理论是无法计算的。

- (3) 力的大小也不能用普通公式来计算，因为它比普通电机中的力一般要低些。力和上述损耗这两种效应都显著地受到初级极数和速度的影响：与同步转速比较，速度愈低，极数愈多，上述效应就愈微。
- (4) 由于上述(3)的缘故，电机作为电动机使用时，并不在指定的同步速度下空载运行。两者的差别不甚明显，除非直线电机少于4个极。

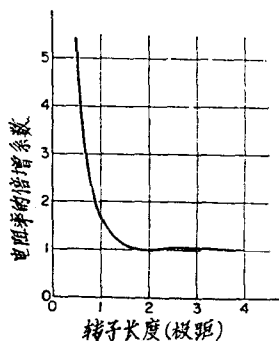


图6 转子电阻率由于“短转子”效应而增高

对于普通的圆筒对称型电机来说，每相初级线圈均串接的电动机和线圈并接的电动机之间的唯一差别在于工作电压-电流比（即电机的工作阻抗）不同。而对于直线电机，串接或并接是一个关键问题，它直接影响到电路和磁路材料的有效利用、效率以及功率因数诸方面。这个问题在参考资料[35]，[37]中也详细论述过。通常，短次级电机采取并接而短初级电机采取串接较为适宜。并接方式有助于使磁通分布均匀固定，但是会产生较高的局部电流密度甚至造成短路等不利的情况。串接方式可避免局部的电阻损耗，但磁通分布不均匀。这两种接法都存在着电路和磁路之间的完全对偶性。

垂直于驱动方向的力

单边型直线电动机近来已得到应用，这种电动机的次级上有无铁磁性材料均可（见图7）。在这种情况下，次级导体上除了切向推力之外还存在着一种脱离极面的推力（性质与磁拉力相反的力）。次级导体确实能以这种方式悬置于稳态〔36〕。垂直于极面的力是很复杂的，其中要解决一个多层问题〔17〕。然而，在仅有一个初级绕组而次级导体固定在无绕组的铁磁块上的一种双边电机中，初级和次级之间的垂直力究竟是吸引的还是排斥的尚无法确定。还有一个值得注意的结果是：处于一对初级绕组（这对初级互相促进磁力线通过转子片）之间的片状转子在垂直力作用下不稳定，因为运行时它会受到较近一个初级的吸引。由此看来，这种转子好象一块铁磁性材料，但因电磁侧拉力较小，这不过表现在性质上而已。

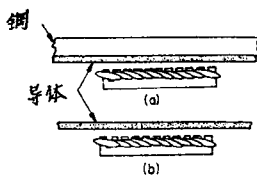


图7 两种单边型直线电动机

上面已经讨论了电磁场运动方向上的力（设计人员致力于产生这种力）以及与极面垂直的力。在与这两个力都成垂直的方向（即所谓“与主轴线直交”的方向）上，还会由于磁路或电路的不对称而产生力。譬如片状转子电机，激磁区的纵向电流使转子片处在横向张力下，从中心位置的任何偏

离会引起横向力而使偏心率增高，即把转子片横击出去。依据一种直线蔽极电动机对横向轴的作用原理，就很容易解释上述效应。

另一方面，次级上的铁磁材料在横向移动时易被拉回到线路中去，一种混合次级（如图 2 所示的结构）在横向上是否稳定仍是一个复杂问题，其净效应取决于速度、导体的相对厚度和气隙等。但根据实验结果似乎出现另一种情况（虽然在理论上从来没有证实过），即受到初级之垂直斥力的次级在横向上是不稳定的，而被初级吸引的次级是稳定的。

单边直线电机〔图 7 (b)〕具有一个有趣的特征：它的磁场在表面上方除了预期的移动分量之外，还有一个纯粹旋转分量，要证实这一点可将一张纸片挖个小洞并把它复盖在图 8 上，使纸洞最初先处在圆圈 A 的位置上。移动纸片，使小洞在两条虚线之间横向移动，结果发现磁场的方向不断改变而产生一种逆转磁场，该磁场可用来驱动小型圆筒转子，所取的方式如同“齿条和齿杆”〔43〕。这种形式也许是直线电机和旋转电机的完全混合型。

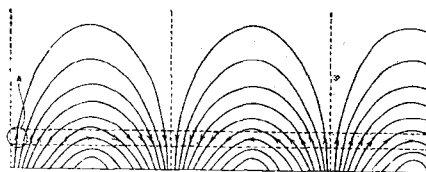


图 8 “齿条和齿杆”型电动机的机理

轴向磁通电机

这里还要再讲一种电机。图 1 表明，直线电动机就是把

普通的圆筒形定子剖开拉直而发展起来的。如果再把这种扁平初级绕着一根与磁场运动方向平行的轴卷拢来（如图9所示），即可得到一种结构完全不同的圆筒型电动机，其磁场是沿着初级的孔腔运动的。此种结构可称为电磁“炮”，图10示出它的一个优点。普通旋转电机和扁平直线电机的初级绕组只是在通过槽的区域〔即在图10(a)中两条虚线之间〕才有效用。它们的绕组端部是用来使电流从一个极通向另一极，并且提供冷却区，此外可以说没有其它用处。而在圆筒型电动机中，绕组是卷拢的，使得PQ和RS重叠，整个绕组看上去只是一列圆形线圈〔如图10(b)所示〕，或者象多层导线（见图11），这样可大大简化制造工序。

然而，圆筒型电动机和扁平电机之间的拓扑差别并不限

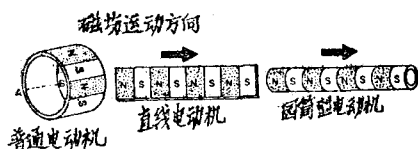


图9 圆筒型电动机的由来

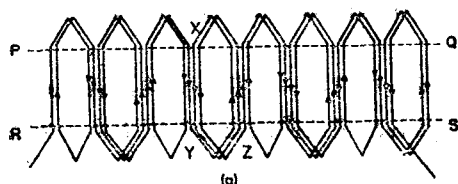
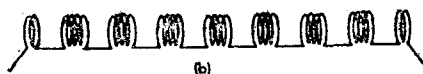


图10 圆筒型电动机绕组端部的优点



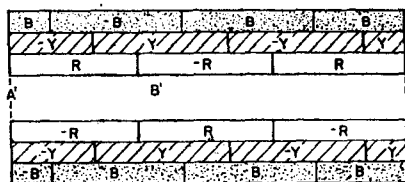


图11 圆筒型电动机的三层连绕结构

于电路上。图9表明，从某一N极发出的全部磁力线都必须轴向通过次级才能重新进入S极。因此，次级上必须有足够的铁磁材料以容纳来自一个极距的磁通量(包含100%驻波)，这样一来，次级芯就好象把一个“障碍”加在磁路上。

圆筒型电动机是一整类直线电动机中特殊的一种，此一整类包括图4所示的双边型扁平电机，其中二个初级绕组连接成能够产生以相反方向进入次级的磁通，此磁通进入次级后即以轴向在其中移动。这种电机已有人称之为轴向磁通电动机[37]。轴向磁通电动机的端部效应不同于扁平电机。扁平电机的极面绕组要求以某方向通过电机的电流最后须从另一方向返回，使 $\int J dx = 0$ ；而轴向磁通电机可从励磁系统给予任何非整数的极数。对于轴向磁通的边端效应也已经详细计算过[37]，[48]。

图12表示各种直线感应电机的一种拓扑分类，沿着由上而下的路线我们就能把某种电机的类别完全确定下来。头三级简要地表明，就哪个部件运动、哪个较短、次级上是否有铁磁材料这三方面而论，任何电机都不外乎两类中的一类。图13对所用的几种术语名称作了图解。如所谓“磁双边”就是在次级两边的初级结构上都应有铁磁材料。因此图2所示的简单电动机属于“磁单边”，其运动的次级钢片使它成为

一种混合次级电动机。若要这种结构变成磁双边，就需在次级的另一边加一钢块〔如图13(d)所示〕。次级上的钢片是为了缩短有效气隙，而不是传送轴向磁通。此类电机的次级往往是铆着钢钉的铝片。

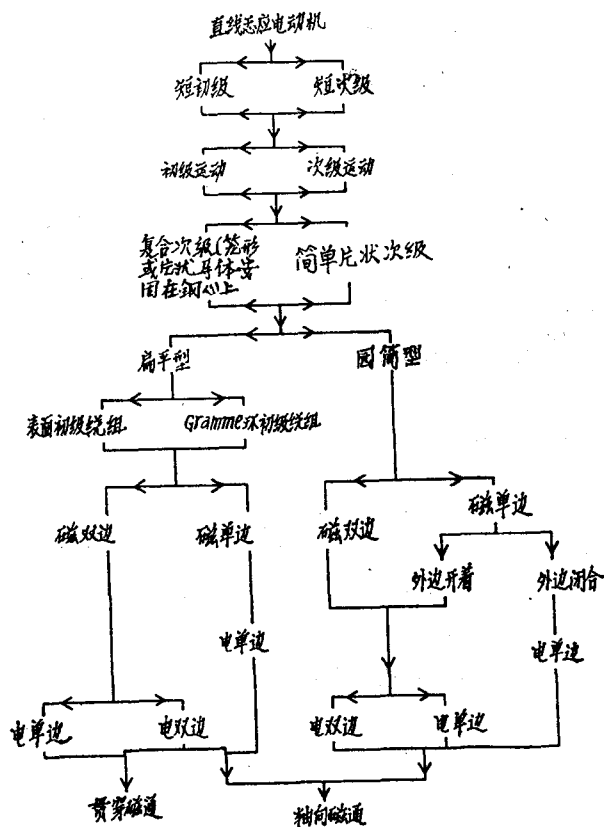


图12 直线感应电动机的拓扑分类

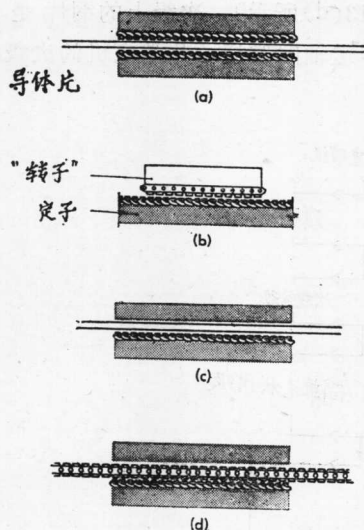


图13 拓扑分类的举例说明：
 (a) 电磁双边的片状转子电机；
 (b) 电磁单边的混合型转子电机；
 (c) 磁双边而电单边的片状转子电机；
 (d) 磁双边而电单边的混合型转子电机。

图12所示种类繁多的直线电机是结合了各种特点而产生的。图中齐平的每一层都包括根本不同的因数，这有助于对某一系统进行理论上和（或）经济上的评价。图12还可以颠倒过来用，这时它表明贯穿磁通-轴向磁通这两类分法与短初级-短次级分类法一样是最基本的。

另有几种可供制造的组合形式由于经济成本太高，本文特地不予列入。如一种磁单边扁平型电机，要从缠有第一个初级绕组的钢片出发在次级的另一边装上第二个初级绕组，那是极不经济的。然而，这种系统对于圆筒型电机是适用的，因为即使以空气作为磁路，在外层初级绕组外边的磁阻也能够比较低，参考资料〔41〕已说明这一点。

发 展 历 史

最早明确地提到直线电机的文章是1890年匹兹堡市长所写关于感应电机的一篇专利〔85〕。接着在1895年Weaver, Jacquard电梭子公司发表了一篇专利,他们顾名思义,对于把直线电机用作织布机的梭子推进器抱有很大希望。其后的许多专利文献表明,在1900年至1940年期间直线感应电动机的迅速发展都和织梭推进有关,但始终无人在此种器件的商品生产上获得成功,这无疑是由于电气系统比织布机本身的成本还要高。然而,纺织工程技术人员在这方面表现了极大的创造才能,他们巧妙地设计出双边电动机、片状转子电动机和圆筒型电动机。

在1905年有两人分别建议用直线感应电动机作为火车推进机构。其一〔82〕建议把许多初级短段嵌入轨道,在需要时就能接上电源。其二〔84〕建议将初级装在车辆上,把片状转子轨条装在轨道上。第二种想法实在是目前某些国家正在进行大规模试验的几种直线电动机的前驱。Zehden的想法之所以直到半个世纪以后才得到普遍采用,主要是由于其它形式的推进装置在速度、加速度和可靠性方面已能够满足当时的有限要求。

在1917年出现了第一台圆筒型电动机,事实上那是一种具有换接初级线圈的直流磁阻电机〔15〕。人们试图把它作为导弹发射装置,但其发展并没有超出模型阶段。在1923年有人提出用扁平型感应电动机来驱动一种连续运行的站台系统,打算把它敷设在时代广场和中央车站之间的第42街道上。当时建造了试验轨道,但是没有获得成果。

随着核动力的发展，需要抽吸液态金属，特别是高电导率的钠钾混合物。于是产生了交流电动机和直流电动机：双边扁平型电动机和圆筒型电动机〔5〕。交流电机不但包括感应型而且包括传导型（类似直流电机），这种电机可说是最早的（也许是唯一的）交流换向器型直线电动机。通常都采用扁平型而不用圆筒型，因为圆筒型电机的初级绕组一旦被烧坏时会引起管道的断裂。此类电机中有一种新颖的混合型，它那有点象普通圆筒型的定子产生旋转磁场，在磁场内液态金属沿着螺旋状管道从定子的一端流到另一端。这里所应用的角磁场原理后来就成为实验变速电动机的基础〔80〕，〔81〕。

在1946年随着西屋公司飞机投掷起飞装置“Electro-pult”的创制〔86〕，直线电动机开始在交通运输方面得到较大规模的应用。该装置的初级线圈系统装在一个托架上，次

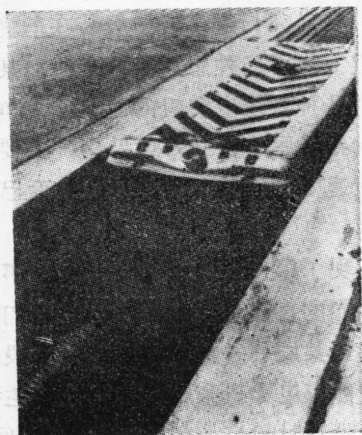


图14 飞机投掷起飞装置