

# 直线电机技术手册

叶云岳 卢琴芬 编著  
范承志 方攸同



机械工业出版社



# 前 言

直线电机是一种新颖电机，近年来国外发展较快。国内对该电机的研究发展有过多次起伏。究其原因，恐怕在应用上的推广不够是其主要因素。作为本书的主编者，曾与我国其他的直线电机专家以及中国电工技术学会直线电机专委会的同仁们，几十年来为此做了不懈的努力。包括将直线电机成果不断地推广应用；定期召开学术年会；出版了《直线电机原理与应用》，《新型直线驱动装置与系统》，《中国直线电机应用成果汇编》，《中国直线电机论文选编》；刊编了《直线电机与自动化》内部刊物。但对许多热心于直线电机研究、设计、制造和应用的人员来说，仍觉得不够。鉴于此，编者准备在完成《直线电机的设计与控制》一书之前，先出版一本《直线电机技术手册》，奉献给有关人员，以促进直线电机在我国的更快发展。

本书收集了美、英、日、德、中等世界各国直线电机产品，部分应用成果的基本技术参数、外形安装尺寸等，这些内容中也包括了编著者近年来完成的一些产品和成果的基本数据。

本书各章编写人员

章	编写人员名单	章	编写人员名单
第 1 章	叶云岳	第 2 章	方攸同
第 3 章		第 4 章	叶云岳
第 5 章		第 6 章	
第 7 章	附录 粤		
第 8 章	卢琴芬	附录 月	

本手册的出版得到了国内外各方面的大力支持。浙江大学陈永校教授、上海电器科学研究所傅丰礼教授级高工、直线电机专

委会蔡廷锡主任、机械工业出版社李振标编审等，对本手册进行了评审，提出了许多宝贵意见，并得到了浙江大学泰富电气新技术有限公司、杭州浙大直线电机与自动化研究所有限公司的大力支持，研究生陈宇、刘海文、陈□、沈育栋、黄明星、母果姿等为本书的出版做了许多工作，在此一并表示感谢。

由于编著者与出版社以及一些直线电机的应用者都希望尽快出版本手册，故时间仓促，尚有许多产品、成果未编入，编著者争取在增订时予以完善，不足之处望读者见谅。

叶云岳

二〇〇四年初于浙大求是园

# 目 录

前言	
第 1 章 直线电机及其分类与标准	1
1.1 概述	1
1.2 直线电机的基本结构与工作原理	3
1.3 直线电机的分类及标准	5
第 2 章 直线电机的应用与选择	8
2.1 直线电机的应用	8
2.2 直线电机的应用基础与选用原则	10
第 3 章 直线感应电动机	12
3.1 直线感应电动机的结构与特征	12
3.2 直线感应电动机的技术数据与外形尺寸	15
3.3 直线感应电动机的应用实例	17
第 4 章 直线同步电动机	19
4.1 直线同步电动机的基本原理、结构与特征	19
4.2 直线同步电动机的主要技术数据与外形尺寸	22
4.3 直线同步电动机的应用实例	24
第 5 章 直线直流电动机	26
5.1 直线直流电动机的基本结构、原理与特性	26
5.2 直线直流电动机的主要技术数据与外形尺寸	29
5.3 直线直流电动机的应用实例	31
第 6 章 直线步进电动机	33
6.1 直线步进电动机的基本结构、原理与特性	33
6.2 直线步进电动机的技术数据与外形尺寸	36
6.3 直线步进电动机的应用实例	38
第 7 章 其他各种直线电动机	40

第 1 章	直线振荡电动机 .....	1
第 2 章	直线超声波电动机 .....	2
第 3 章	直线开关磁阻电动机 .....	3
第 4 章	直线原旋转混合型电动机 .....	4
第 5 章	直线发电机 .....	5
第 6 章	直线感应电动机试验 .....	6
附录	.....	7
附录 A	国内外主要直线电机科研机构与制造厂家 .....	7
附录 B	直线电机应用示例表 .....	8
参考文献	.....	9

## 第 1 章 直线电机及其分类与标准

### 1.1 概述

直线电机主要是直线电动机，它是一种将电能直接转换成直线运动机械能，而不需任何中间转换机构的传动装置。

直线电机的结构可以根据需要制成扁平型、圆筒型或盘型等各种型式，它可以采用交流电源、直流电源或脉冲电源等各种电源进行工作。直线电机可以在几秒钟内把一架几千公斤重的直升飞机拉到每小时几百公里的速度，它在真空中运行时，其时速可达几千至上万公里。在军事上，人们利用它制成各种电磁炮，并试图将它用于导弹、火箭的发射；在交通运输业中，人们利用直线电机制成了时速达 ~~300 公里~~ 以上的磁悬浮列车；在工业领域，直线电机被用于生产输送线，以及各种横向或垂直运动的一些机械设备中。直线电机除具有高速、大推力的特点以外，还具有低速、精细的另一特点，例如，步进直线电动机，它可以做到步距为  $\mu\text{m}$  的精度，因此，直线电机又被应用到许多精密的仪器设备中，例如计算机的磁头驱动装置、照相机的快门、自动绘图仪、医疗仪器、航天航空仪器、各种自动化仪器设备等。除此之外，直线电机还被用于各种各样的民用装置中，如门、窗、桌、椅的移动，门锁、电动窗帘的开、闭等等。

综上所述，直线电机可广泛地应用于工业、民用、军事及其他各种直线运动的场合，采用直线电机驱动的装置和其他非直线电机驱动的装置相比，它具有以下一些优点：

(1) 采用直线电机驱动的传动装置，它不需要任何转换装置而直接产生推力，因此，它可以省去中间转换机构，简化了整个装置或系统，保证了运行的可靠性、传递效率提高、制造成本降

圆

低、易于维护。

(圆) 普通旋转电机由于受到离心力的作用，其圆周速度受到限制，而直线电机运行时，它的零部件和传动装置不像旋转电机那样会受到离心力的作用，因而它的直线速度可以不受限制。

(猿) 直线电机是通过电能直接产生直线电磁推力的，它在驱动装置当中，其运动时可以无机械接触，使传动零部件无磨损，从而大大减少了机械损耗，例如直线电机驱动的磁悬浮列车就是如此。

(源) 旋转电机通过钢绳、齿条、传动带等转换机构转换成直线运动，这些转换机构在运行中，其噪声是不可避免的，而直线电机是靠电磁推力驱动装置运行的，故整个装置或系统噪声很小或无噪声，运行环境好。

(缘) 由于直线电机结构简单，且它的初级铁心在嵌线后可以用环氧树脂等密封成整体，所以可以在一些特殊场合中应用，例如可在潮湿甚至水中使用；可在有腐蚀性气体或有毒、有害气体中应用；亦可在几千度的高温下或零下几百度的低温下使用。

(远) 由于直线电机结构简单，直线电机的散热效果也较好，特别是常用的扁平型短初级直线电机，初级的铁心和绕组端部直接曝露在空气中，同时次级很长，具有很大的散热面，热量很容易散发掉，所以这一类直线电机的热负荷可以取得较高，并且不需要附加冷却装置。

当然，任何事物都是一分为二的，直线电机也不例外，它也有着一些不足之处，主要表现在以下两个方面：

(员) 与同容量旋转电机相比，直线电机（主要是感应式直线电机）的效率和功率因数较低，尤其在低速时比较明显。其原因主要是两个方面引起的，一是直线电机的初次级气隙一般都比旋转电机的气隙大，因此所需的磁化电流就较大，损耗增加；二是由于直线电机初级铁心两端开断，产生了所谓的边端效应，从而引起波形畸变等问题，其结果也导致损耗增加。但从整个装置或系统来看，由于采用直线电机后可省去中间传动装置，因此系统的效率有时还是比采用旋转电机的高。

(圆) 直线电机特别是直线感应电机的起动推力受电源电压的影响较大, 故需采取有关措施保证电源的稳定或改变电机的有关特性来减少或消除这种影响。

通过以上关于直线电机驱动直线运动装置所具有的优缺点的论述, 我们可以说, 在所有直线运动的装置或系统中, 是否采用直线电机驱动, 这需要进行综合考虑, 在充分权衡了直线电机驱动与旋转电机驱动的利弊得失之后, 才能作出是否采用直线电机的决定。换句话说, 直线电机在一些合适的直线运动装置或系统中, 是很有前途, 也是能发挥很大作用的。

## 猿圆 直线电机的基本结构与工作原理

### 猿圆猿 基本结构

图 猿圆猿和 猿圆肆分别表示了一台旋转电动机和一台扁平型直线电动机。

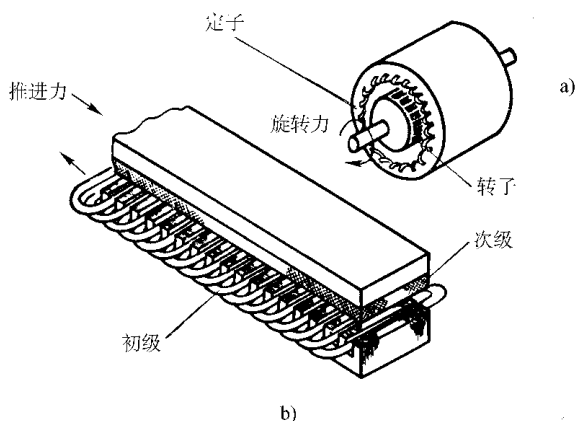


图 猿圆猿 旋转电动机和直线电动机示意图

猿 旋转电动机 肆 直线电动机

直线电机可以认为是旋转电机在结构方面的一种演变, 它可看作是将一台旋转电机沿径向剖开, 然后将电机的圆周展成直线, 如图 猿圆猿和图 猿圆肆所示。图 猿圆猿为感应式直线电机的演

源

变过程，图 1-10 为永磁式直线电机。这样就得到了由旋转电机演变而来的最原始的直线电机。由定子演变而来的一侧称为初级，由转子演变而来的一侧称为次级。

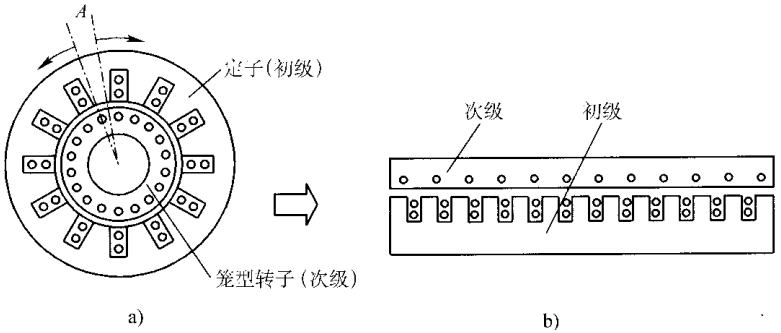


图 1-10 由感应式旋转电机演变为直线电机的过程

沿径向剖开 把圆周展成直线

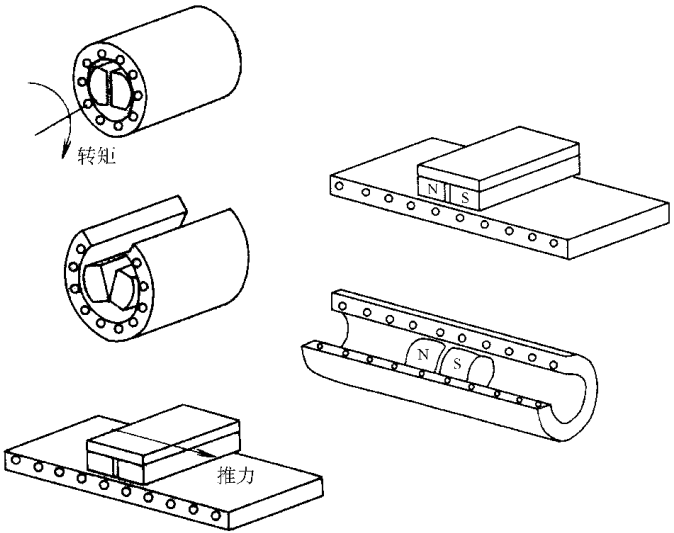


图 1-11 由永磁旋转电机演变为直线电机的过程

图 1-10 中演变而来的直线电机，其初级和次级长度是相等的，由于在运行时初级与次级之间要作相对运动，如果在运动开

始时，初级与次级正巧对齐，那么在运动中，初级与次级之间互相耦合的部分越来越少，而不能正常运动。为了保证在所需的行程范围内，初级与次级之间的耦合能保持不变，因此实际应用时，是将初级与次级制造成不同的长度。在直线电机制造时，既可以是初级短、次级长，也可以是初级长、次级短，前者称作短初级长次级，后者称为长初级短次级，如图 1 所示。但是由于短初级在制造成本上、运行的费用上均比短次级低得多，因此，目前除特殊场合外，一般均采用短初级。

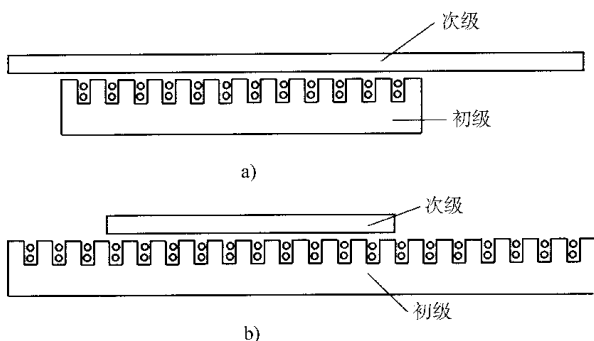


图 1 单边型直线电机

☐ 短初级    ☐ 短次级

在图 1 所示的直线电机仅在一边安放初级，对于这样的结构型式称为单边型直线电机。这种结构的电机，一个最大特点是在初级与次级之间存在着一个很大的法向吸力，一般这个法向吸力，在钢次级时约为推力的 10 倍左右，在大多数的场合下，这种法向吸力是不希望存在的，如果在次级的两边都装上初级，那么这个法向吸力可以相互抵消，这种结构型式称为双边型，如图 2 所示。

上述介绍的直线电机称为扁平型直线电机，是目前应用最广泛的，除了上述扁平型直线电机的结构形式外，直线电机还可以做成圆筒型（也称管型）结构，它也可以看作是由旋转电机演变过来的，其演变的过程如图 3 所示。

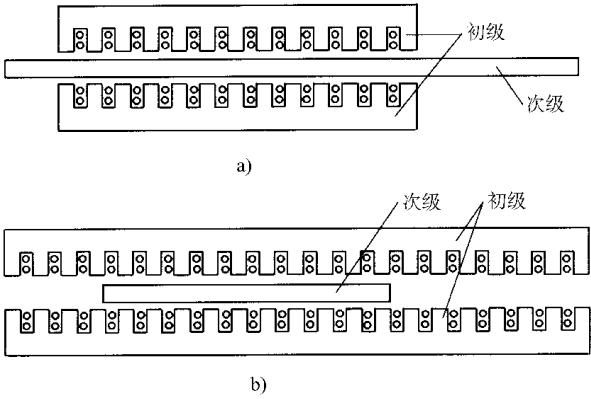


图 15-9 双边型直线电机  
 1) 短初级 2) 短次级

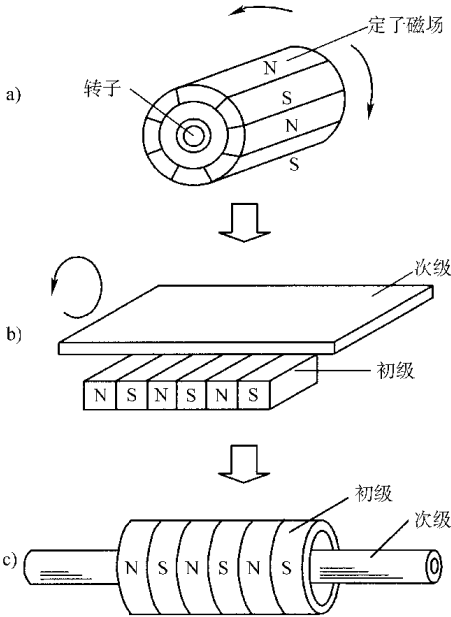


图 15-10 旋转电机演变为圆筒型直线电机的过程  
 1) 旋转电机 2) 扁平型单边直线电机 3) 圆筒型(管型)直线电机

图 1-1-27 中表示一台旋转式电机以及定子绕组所构成的磁场极性分布情况，图 1-1-28 表示转变为扁平型直线电机后，初级绕组所构成的磁场极性分布情况，然后将扁平型直线电机沿着和直线运动相垂直的方向卷接成筒形，这样就构成图 1-1-29 所示的圆筒型直线电机。此外，直线电机还有弧型和盘型结构。所谓弧型结构，就是将平板型直线电机的初级沿运动方向改成弧型，并安放于圆柱形次级的柱面外侧，如图 1-1-30 所示。

图 1-1-31 是圆盘型直线电机，该电机把次级做成一片圆盘（铜或铝，或铜、铝与铁复合），将初级放在次级圆盘靠近外缘的平面上，盘型直线电机的初级可以是双面的，也可以是单面的。弧型和盘型直线电机的运动实际上是一个圆周运动，如图中的箭头所示，然而由于它们的运行原理和设计方法与扁平型直线电机结构相似，故仍归入直线电机的范畴。

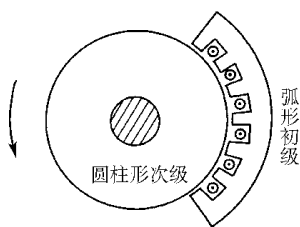


图 1-1-30 弧型直线电动机

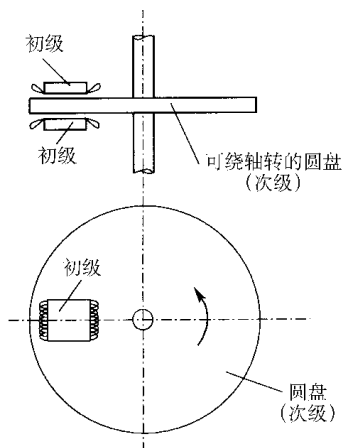


图 1-1-31 圆盘型直线电机

### 1-1-32 工作原理

直线电机不仅在结构上相当于是从旋转电机演变而来的，而且其工作原理也与旋转电机相似。遵循电机学的一些基本原理，本节将以直线异步电动机为例，从旋转电机的基本工作原理出发，引伸出直线电机的基本工作原理。



大值的二分之一，这时磁场波幅处于粤相绕组轴线上，如图员原怨葬所示。经过越圆越时间（其中 $\omega$ 为电流的角频率）后，月相电流达到最大值，这时悦和粤相都为负的最大值的二分之一，而磁场波幅转到月相绕组轴线上，如图员原怨曹所示。经过越源越时间后，悦相电流达到最大值时，粤和月相电流都为负的最大值的二分之一，磁场波幅又转到悦相绕组轴线上，如图员原怨曹所示。由此可见，电流随时间变化，磁场波幅就按粤月悦相序沿圆周旋转。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（越圆越），用越表示，它与电流的频率成正比，而与电机的极对数成反比，如下式所示：

$$\text{越} = \frac{\text{越圆越}}{\text{越}} \quad (\text{员原员})$$

如用越表示在定子内圆表面上磁场运动的线速度（越圆越），则有：

$$\text{越} = \frac{\text{越圆越}}{\text{越}} \quad (\text{员原圆})$$

式中  $\tau$  ——极距（越）。

通过图员原怨可说明旋转磁场对转子的作用，为了简单起见，图中笼型转子只画出了两根导条。

当气隙中旋转磁场以同步速越旋转时，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云。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转向是一致的。转子的转速用越表示。在电动机运行状态下，转子转速越总要比同步转速越小一些，因为一旦越越越，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  $n_s$  的差值经常用转差率  $s$  来表示，即

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{n_s - n}{n_s} \\ n &= n_s (1 - s) \\ n_s &= \frac{n}{1 - s} \end{aligned} \right\} \quad (10-10)$$

以上就是一般旋转电机的基本工作原理。

### 10-2 直线电机的基本工作原理

将图 10-10 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 10-11 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端效应时，这个气隙磁场的分布情况与旋转电机相似，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  $U$  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  $v$ ，称为同步速度（ $v_s$ ），且

$$v = v_s \quad (10-11)$$

再来看行波磁场对次级的作用。假定次级为栅形次级，图 10-11 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，那么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，移动的差率（简称移差率）用  $s$  表示，则有

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{v_s - v}{v_s} \\ v &= v_s (1 - s) \\ v_s &= \frac{v}{1 - s} \end{aligned} \right\} \quad (10-12)$$

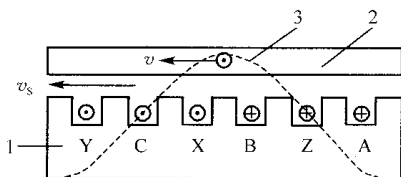
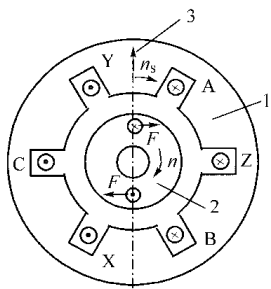


图 员原园 旋转电机的基本工作原理

图 员原员 直线电机的基本工作原理

员—定子 圆—转子 猿—磁场方向

员—初级 圆—次级 猿—行波磁场

在电动机运行状态下，泽在 园与 员之间。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金属板，因此并不存在明显的导条。但在分析时，不妨把整块看成是无限多的导条并列安置，这样仍可以应用上述原理进行讨论。在图 员原圆中，分别画出了假想导条中的感应电流及金属板内电流的分布，图中 造为初级铁心的叠片厚度，槽为次级在 造长度方向伸出初级铁心的宽度，它用来作为次级感应电流的端部通路，糟的大小将影响次级的电阻，详见第 猿章。

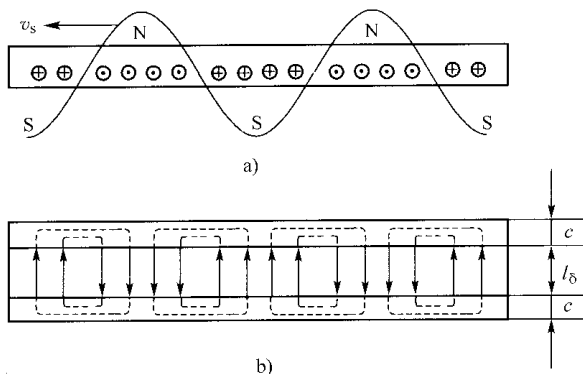


图 员原圆 次级导体板中的电流

猿—假想导条中的感应电流 圆—金属板内电流分布