

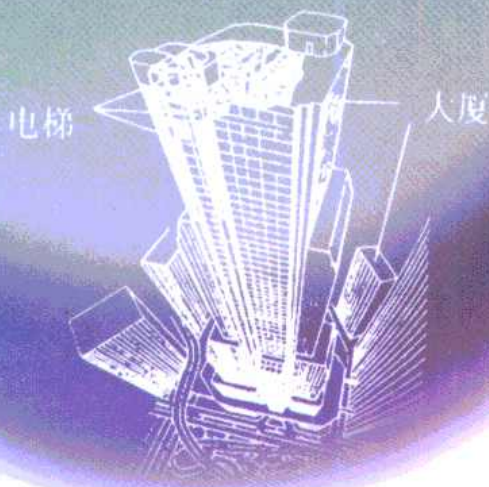
机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

ZHI XIAN
DIAN JI
YUAN LI YU
YING YONG

叶云岳 编著

直线电机原理与应用

ZHI XIAN DIAN JI YUAN LI YU YING YONG



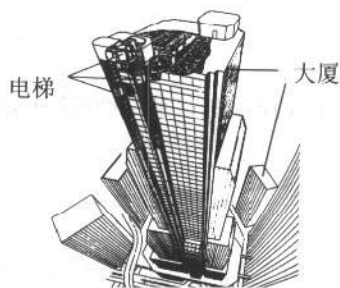
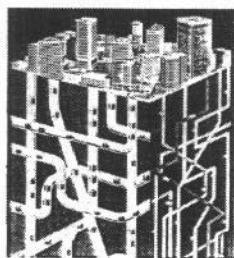
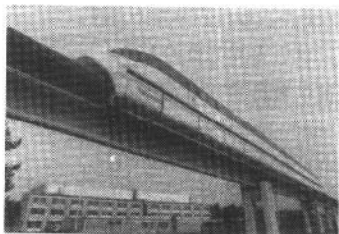
机械工业出版社
China Machine Press

TM359.4 716

Y42

直线电机原理与应用

叶云岳 编著



五



机械工业出版社

直线电机是一种具有广阔应用前景的新颖电机。本书在简要地介绍了直线电机的历史和发展的基础上,全面详细地介绍了各种类型直线电机的基本工作原理、结构型式、基本特性以及在国内外各个领域的具体应用。全书在充分反映直线电机全貌的基础上,力求反映直线电机的最新发展和应用成果。

本书可供电工界,特别是从事电机、电气及自动化领域的工程技术人员、科研人员、科技管理人员参考,也可供其他希望了解直线电机的工程界人士参考,还可以作为大专院校的大学生、研究生的教材,以及作为继续教育方面的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

直线电机原理与应用 / 叶云岳编著. —北京:机械工业出版社, 2000.6

ISBN 7-111-08050-5

I. 直... II. 叶... III. ①直线电机-理论②直线电机-应用 IV. TM359.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 08187 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:周娟 责任校对:王新

封面设计:李雨桥 责任印制:何全君

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000年6月第1版·第1次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·12.25印张·319千字

0 001—4 000册

定价:21.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677—2527

前 言

直线电机是一种将电能直接转换成直线运动，而不需通过任何中间转换机构的新颖电机。它具有广阔的应用和发展前景。然而，国内外有关介绍直线电机方面的书籍甚少，特别是迄今为止，国内尚无一本全面介绍各种类型直线电机的原理、设计、控制和应用的书籍。笔者几十年来长期从事直线电机方面的科研和教学工作，已完成几十项直线电机科研成果和发明、实用新型专利，并自编了《直线电机及其控制》、《直线电机理论与应用》教材，在本科生和研究生中开设了直线电机课程。目前越来越多的人希望了解和利用直线电机，却又找不到合适的介绍直线电机的资料，鉴于这种情况，笔者利用了点滴空余时间，在原有教材的基础上，汇集了国内外的最新发展以及笔者自身的实践成果，撰写了这本拙作，供广大热爱和从事直线电机科技事业的科技工作者、大专院校的教师、学生以及希望了解直线电机的所有人员参考。

本书仅仅是在介绍了直线电机的历史和发展的基础上，比较全面地介绍了各种直线电机的基本工作原理、结构型式以及在国内外各个领域的具体应用情况。至于有关直线电机及其应用的具体设计与控制，将考虑在另一本《直线电机的设计与控制》一书中介绍。

笔者曾访问和考察过日本的东京工业大学、信州大学、武藏大学、磁悬浮列车山梨试验线以及松下公司、富士公司、东洋电机公司等，对于这些大学、试验线和公司的直线电机的成果和产品，在本书中均有一定反映。在此，笔者谨向这些单位和个人表示谢意。尤其要感谢原日本直线驱动技术委员会委员长山田一教授、武藏工业大学海老原大树教授、山梨试验研究

所关秋生所长、京谷好泰先生等所给予的帮助。

本书的出版，得到了中国电工技术学会直线电机专业委员会、浙江大学陈永校教授和机械工业出版社周娟编辑以及其他有关人士的鼓励和支持，对此笔者表示衷心的感谢。此外，书中选用了国内外一些直线电机科技工作者的一些应用成果和文献，在此，亦向这些作者表示笔者的谢意。

本书稿的计算机打印和图稿的绘制，均由卢琴芬同志帮助完成，在此，亦表谢意。

由于作者水平有限，错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

2000年2月于浙江大学

第 1 章 绪 论

1.1 概述

我们经常看到，许多直线驱动装置或系统都是采用旋转电动机通过中间转换装置(例如链条、钢丝绳、传动带、齿条或丝杆等机构)转换为直线运动的。由于这些装置或系统有中间转换传动机构，所以整机存在着体积大、效率低、精度低等问题。

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。它是 20 世纪下半叶电工领域中出现的具有新原理、新理论的新技术，如图 1-1 所示。它所具有的突出优势，已越来越引起人们的重视，不久的将来，它将像微电子技术和计算机技术一样，在人类的各个领域中得到广泛的应用。

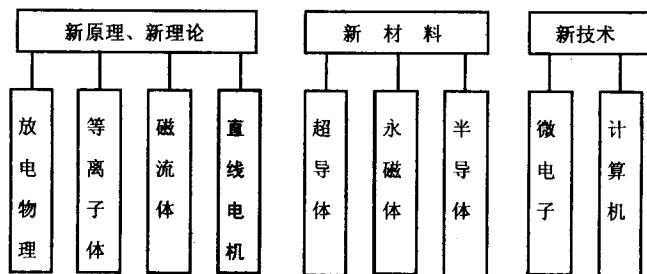


图 1-1 20 世纪下半叶电工新技术的发展概况

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

架几千千克重的直升飞机拉到每小时几百千米的速度，它在真空中运行时，其时速可达上万千米。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500km/h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、精细等另一些特点，例如，步进直线电动机，它可以做到步距为 $1\mu\text{m}$ 的精度。因此，直线电机又被应用到许多精密的仪器设备中，如计算机的磁盘驱动装置、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、军事及其它各种直线运动的场合，采用直线电机驱动的装置和其它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，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，提高了传递效率，降低了制造成本，易于维护。据国外报道，曾经有台直线电机驱动的洗衣机，每天24h连续不停地工作了7年，而没有做任何维修。

(2) 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。

(3) 直线电机是通过电能直接产生直线电磁推力的，它在驱动装置中，其运动可以无机械接触，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。

(4) 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，故整个装置或系统的噪声很小或无噪声，运行环境好。

(5) 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。

(6) 由于直线电机结构简单，其散热效果也较好，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 also 存在着一些不足之处，主要表现在以下两个方面：

(1) 与同容量旋转电机相比，直线电机的效率和功率因数要低，尤其在低速时比较明显。其原因主要是由两个方面引起的；一是直线电机的初次级气隙一般比旋转电机的气隙大，因此所需的磁化电流较大，使损耗增加；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。

(2) 直线电机特别是直线感应电动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，还需要进行综合考虑，在充分权衡了直线电机驱动与旋转电机驱动利弊得失之后，才能做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，是很有发展前途，也是能发挥很大作用的。

1.2 直线电机的基本结构与工作原理

1.2.1 基本结构

图 1-2 所示的 a 和 b 分别表示了一台旋转电机和一台直线电机。

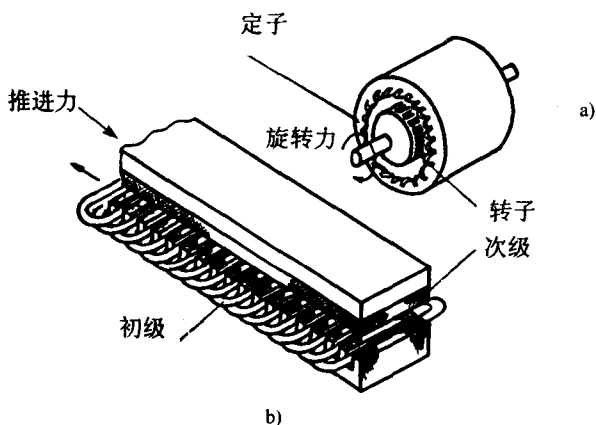


图 1-2 旋转电机和直线电机示意图

a) 旋转电机 b) 直线电机

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 1-3 所示。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。

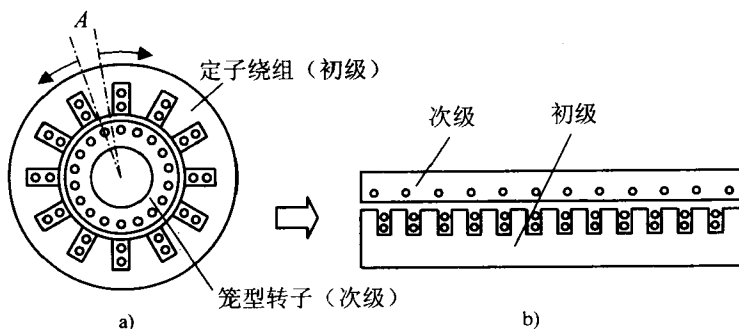


图 1-3 由旋转电机演变为直线电机的过程

a) 沿径向剖开 b) 把圆周展成直线

图 1-3 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做相对运动，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。在制造直线电机时，既可以是初级短、次级长，也可以是初级长、次级短。前者称为短初级长次级，后者称为长初级短次级。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，一般均采用短初级长次级，如图 1-4 所示。

在图 1-4 中所示的直线电机中仅在一边安放初级，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 1-5 所示。

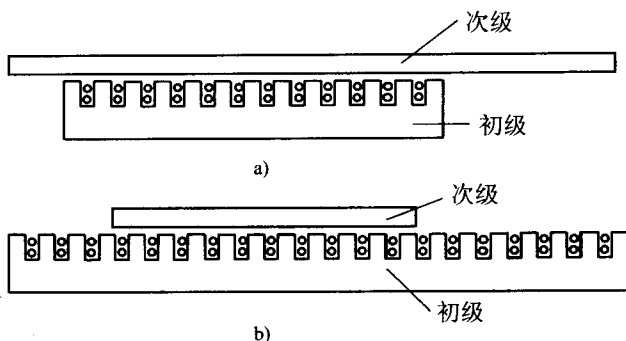


图 1-4 单边型直线电机

a) 短初级 b) 短次级

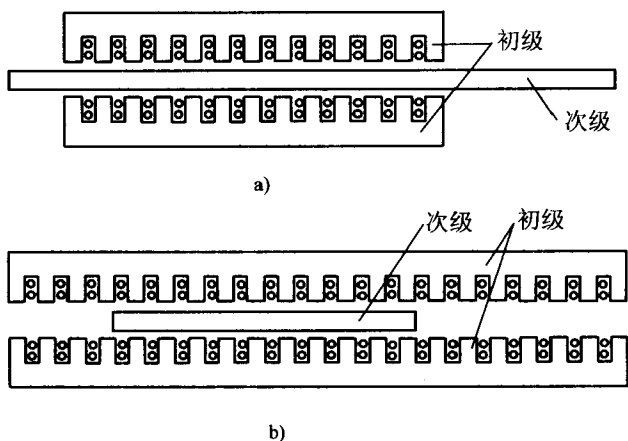


图 1-5 双边型直线电机

a) 短初级 b) 短次级

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型式外，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 1-6 所示。

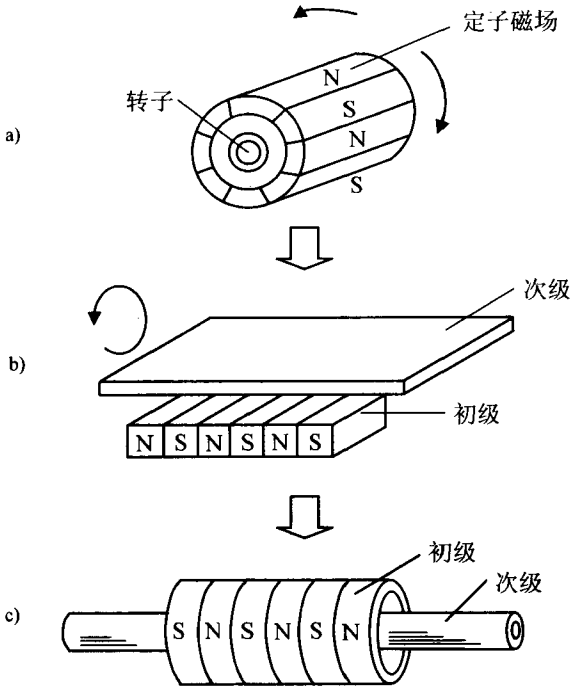


图 1-6 旋转电机演变为圆筒型直线电机的过程

a) 旋转电机 b) 扁平型单边直线电机

c) 圆筒型（管型）直线电机

图 1-6a 表示一台旋转电机以及由定子绕组所构成的磁场极性分布情况；图 1-6b 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 1-6c 所示的圆筒型直线电机。

此外，直线电机还有圆弧型和圆盘型结构。所谓圆弧型结构，就是将平板型直线电机的初级沿运动方向改成圆弧型，并安放于圆柱形次级的柱面外侧，如图 1-7 所示。

图 1-8 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，圆盘型直线电机的初级可以是双面的，也可以是单面的。圆弧型和圆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。

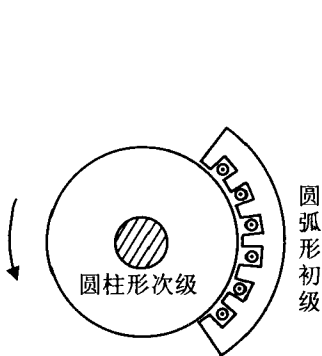


图 1-7 圆弧型直线电动机

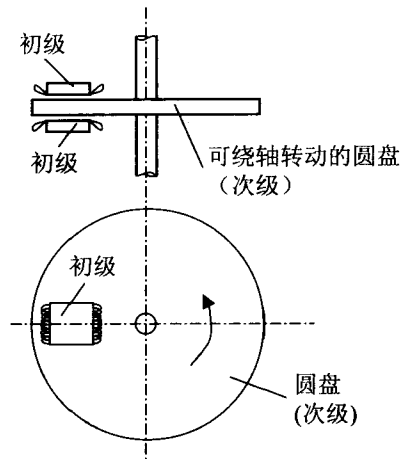


图 1-8 圆盘型直线电机

1.2.2 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，本节将以直线感应电动机为例，从旋转电机的基本工作原理出发，引申出直线电机的基本工作原理。

1.2.2.1 旋转电机的基本工作原理

图 1-9 表示一台简单的两极旋转电机。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1/2，这时磁场波幅处于A相绕组轴线上，如图1-9a所示。经过 $t=2\pi/(3\omega)$ 时间（其中 ω 为电流的角频率）后，

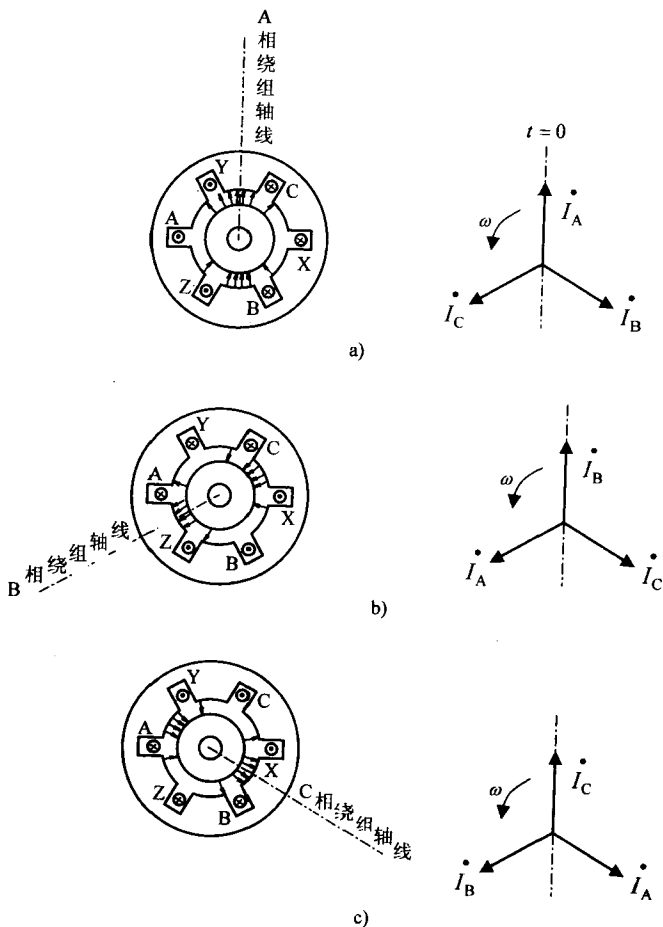


图 1-9 旋转电机的旋转磁场

a) $\omega t = 0$ b) $\omega t = \frac{2\pi}{3}$ c) $\omega t = \frac{4\pi}{3}$

B相电流达到最大值，这时C和A相都为负的最大值的1/2，而磁场波幅转到B相绕组轴线上，如图1-9b所示。经过 $t=4\pi/(3\omega)$ 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1/2，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 (r/min)表示，它与电流的频率 f (Hz)成正比，而与电机的极对数 p 成反比，如下式所示：

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

如果用 v_s (m/s)表示在定子内圆表面上磁场运动的线速度，则有

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

式中 τ ——极距 (m)。

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

当气隙中旋转磁场以同步速度 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

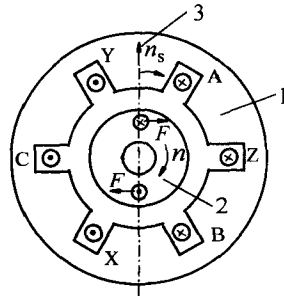


图 1-10 旋转电机的基本工作原理
1—定子 2—转子 3—磁场方向

用便产生切向电磁力 F 。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 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 低一些，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 的差值经常用转差率 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。

1.2.2.2 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端效应时，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，两者的差异是：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 $v_s(\text{m/s})$ ，称为同步速度，且

$$v_s = 2f\tau \quad (1-4)$$

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，转差率用 s 表示，则有

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

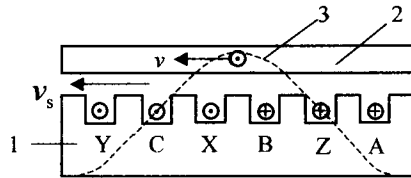


图 1-11 直线电机的基本工作原理

1—初级 2—次级 3—行波磁场

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 1-12 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 l_s 为初级铁心的叠片厚度， c 为次级在 l_s 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， c 的大小将影响次级的电阻，详见第 2 章。

我们知道，旋转电机通过对换任意两相的电源线，可以实现反向旋转。这是因为三相绕组的相序相反了，旋转磁场的转向也随之反了，使转子转向跟着反过来。同样，直线电机对换任意两相的电源线后，运动方向也会反过来，根据这一原理，可使直线电机做往复直线运动。