

国外直线电动机应用



科学技术文献出版社重庆分社

国外直线电动机应用

中国科学院电工研究所
中国科学技术情报研究所重庆分所 编辑
重庆市市中区胜利路91号
四川省新华书店重庆发行所 发行
科学技术文献出版社重庆分社印刷厂 印刷

开本787×1092毫米1/16 印张：7.375字数18万
1980年6月第1次印刷 1980年6月第1次印刷
科技新书目：155-103 印数：5100

书号：15176·412

定价：0.80元

出 版 说 明

直线电动机是一种很有发展前途的新型电机。目前世界各国正在积极开展各项科研活动并已生产出各种用途的直线电机。为配合国内的需要，中国科学院电工研究所和中国科技情报研究所重庆分所共同编辑了本专集，报导内容侧重于应用，但也涉及了一些理论计算。

在编译过程中，西安交通大学电机教研室老师们积极参加了本专集的译校工作，在此表示衷心感谢。

鉴于我们水平不高，在选题和编译中难免存在错误和缺点，谨请读者批评指正。

编 者

国外直线电动机应用

目 录

1 国外直线电机应用综述.....	(1)
2 城市交通运输中采用的稀土磁铁直线同步电动机.....	(16)
3 高速地面运输用直线感应电动机和直线同步电动机的比较.....	(20)
4 用于磁浮车辆的一种双边直线同步电动机.....	(24)
5 高速车辆用直线感应电机.....	(29)
6 直线异步电动机在传送运输中的运行特性.....	(33)
7 直流直线电动机的发展——基本结构和实用性.....	(38)
8 直线电机用于物料搬运.....	(50)
9 直线电机用于吊车驱动.....	(54)
10 直流直线电机在工业上的应用.....	(57)
11 直线电机推进到许多领域.....	(61)
12 已应用的直线电机.....	(66)
13 液态金属的导电与感应泵.....	(71)
14 测量仪表用的磁电式直线电动机.....	(90)
15 小型直线电动机记录器.....	(93)
16 用直线电机的指示器和控制器.....	(94)
17 数控自动绘图机.....	(95)
18 直流直线电动机的定位控制.....	(97)
19 直线增量电机.....	(100)
20 直线电动机生产和应用简况.....	(101)
21 直线电动机带动的挤拉机.....	(104)
22 直线——旋转混合型电动机.....	(105)
23 高拉力低速直线电动机.....	(107)
24 用直流直线电机作短冲程与静态传动装置.....	(108)
25 直线电动机直接驱动的电唱机.....	(115)

0141164/05

国外直线电机应用综述

中国科学院电工研究所

朱维衡

中国科技情报研究所重庆分所 俞晓春

绪 言

直线电机，顾名思义，是一种作直线运动的电动机。最近十几年来，这类电机发展很快，世界各国正在大量试制和推广，其应用范围已遍及到国民经济的各个领域；在许多需用直线运动的场合均由直线电机来完成。它是一种很有发展前途的新型电机。

直线电机的发展也经历了漫长的历史，早在19世纪中叶，就有人提出直线电机问题。图1为Wheatstone 1845年提出的原始直线电动机，见参考文献[1]。当时存在的传统概念是：大气隙的电机不可能有很高的效率，没有高效率的电机就不予重视，把效率看作至高无上的准则。在以后的一百多年中尽管人们提出了直线电动机各种各样的用

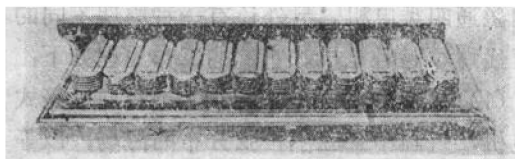


图1 Wheatstone 1845年提出的原始直线电动机

途但没有得到应有的发展，当然这也与当时材料和技术上的一些问题有关。到本世纪六十年代，直线电机在试制和应用方面有了起色，特别是七十年代直线电机在世界范围内得到迅速发展，其用途越来越广，品种越来越多。国外有一家公司已出售一千多种用途、价值数百万英镑的直线电动机，该公司负责人称在直线电动机应用方面现在只是开始[1]。从近年来国外文献报导的情况来看，直线电机在高速运输和自动化领域内更有它

发展的前途。最近几年来，直线电机在我国也有了很大的发展，许多单位已制造出不少品种，现正在开展各项科研和试制工作以适应四个现代化的需要。

直线电机之所以能迅速发展和受到国内外的重视，这是因为它具有一系列的优点。与旋转电机相比，它的优点如下：**1, 速度快**——普通旋转电机或其它旋转运动的机械，由于离心力的作用，功率输出和速度均受到限制，而直线电机不存在离心力问题，这就解决了大部分高速运输在动力上的许多困难。牵引力不受车轮与轨道之间的所谓“粘滞系数”的影响，因而有较高的加速和减速的可能。**2, 结构简单**——直线电机的结构简单，不需要从旋转运动转换成直线运动，因而排除了一系列的机械联动部件和机构，体积大大缩小，运行时无噪音，成本低廉，总工程投资低，日常运行和维护费用也低。**3, 直接拖动**——直流电机运动部分是通过电磁波系统推动，与固定部分无机械联系，不是靠车轮与轨道之间的摩擦来推动，因而磨损小（用直线电机拖动的车辆，只是为了导向而用轨道和车轮），上坡角度较大。**4, 适应性强**——直线电机因结构简单故容易密封，不怕潮气、油污、粉末或其它恶劣环境如放射性、有毒气体等的影响。**5, 额定值高**——直线电机在高速应用时的冷却条件好，次级近于常冷状态，电流密度可以很高，因此设计时可采用高温升和高额定值。**6, 灵活性大**——直线电机改变次级材料的物理性质或改变气隙尺寸可获得各种不同的电机特性。直线电动机对于控制系统的响应度较高，速度

与推力的控制比旋转电机容易。由于以上的优点,直线电机具有广宽的应用范围。事物总是一分为二的,直线电机有其优点,但也有它的缺点。其缺点归纳为:1,电源问题比较麻烦。因为速度高,采用电刷集电比普通电车困难,如果自带发电设备则重量增加,体积加大。2,工频电源时速度不能太低;如变频,则增加一套设备。3,低速小容量直线电机的效率和功率因数一般较低。停止状态下运行的散热较困难。4,每单位重量的推力,一般情况下比气动或液动系统差。总之直线电机的一些缺点可采用各种措施加以克服。

工 作 原 理

直线电机有直流和交流两种,现分别叙述如下:

(一)直流直线电机主要可分三类:(1)直行动电机——工作原理是按电动机左手定则:左手食指为磁通方向,中指为电流方向,则拇指为运动方向,其最简单的工作原理示意图见本刊第10篇图2。增加磁极,改变结构形状,可以增大推力。这种电机可以是电枢移动的也可以是电枢固定的,磁极可以是绕线型的也可以是永久磁铁的。(2)导电泵——将耐热陶瓷管置于强磁场中,又通入强电流,液态金属就在管中流动(见本刊第13篇图1)。(3)直线微型步进电机——是利用压电陶瓷通电后长度能随所跨电压而变的原理,制成一种能产生极小直线位移的步进电机,每步0.1到5微米,可以单独或连续运动,精度可达0.01微米,推力在130克至600克之间。图2是最简单的直线微型步进电机的示意图。一块普通铸铁V形块A作为底座兼作高精度滑轨。压电陶瓷管B装在一对磁铁之间,一端在C,一端在D,用适当的胶合剂粘固在电磁铁上。电磁铁用作夹具,先固定管的一端在V块上,然后另一端。不通电时,电磁铁在V块上滑动。两电磁铁都通电,电机固定在V块上。C不通电而D通电,B上

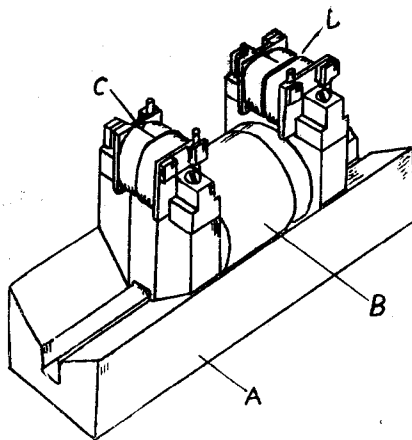


图2 直线微型步进电机

再通电,压电陶瓷管子随所加电压大小而缩短长度,C就移近D。C接着通电,就固定在V块上,D不通电并除去B管所通电流,B管就伸长到原来长度,结果D移离C,如D再通电,整台电机就固定在一个新的位置上〔9〕〔10〕。

(二)交流直线电机是一般旋转感应电动机的特殊设计。工作原理与鼠笼型异步电机相同〔11〕〔12〕。可分平型、管状、滚棍、横向磁通四类电机。另外还有一种原理不同的直线螺纹磁阻电机。它们的工作原理如下:

(1)平型电机——图3(A)是普通鼠笼式电机,气隙中感应出正弦分布的磁场,以等速 ω/p 在气隙中旋转。 ω 为电源角频率($\omega = 2\pi f$, f 为电源频率)、 P 为极对数。当转子转速小于 ω/p 时,在鼠笼中产生感应电压,电流开始流动,电流与磁场相作用而产生力矩,推动转子旋转。如果将鼠笼换成连续的导体,如图3(B)所示,上述作用依然存在。假设将图3(B)中的电机锯开、拉直,成为图3(C)那样的电机,初级绕组的旋转磁场就变成了平移磁场,转子铁芯可以同原来转子中的导体分开,作为固定磁路的一部分,新的次级导体片则依旧与磁场相作用,产生平移运动。次级导体片很长时,能连续移

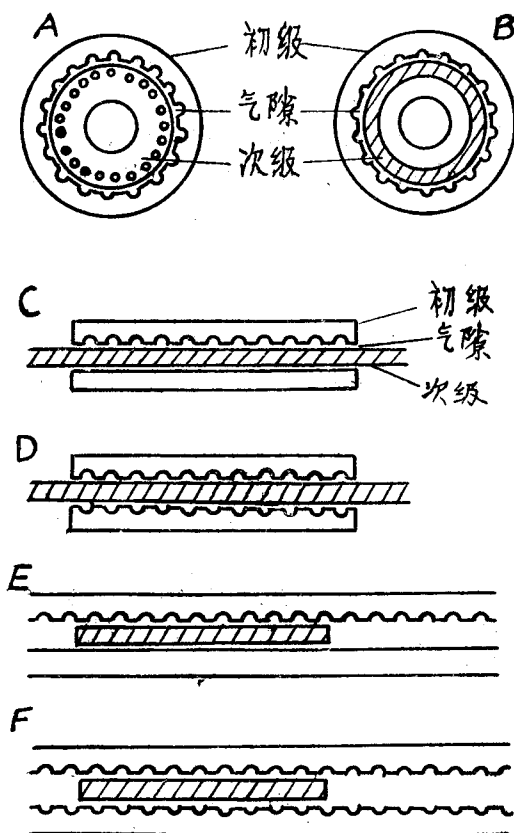


图3 普通鼠笼感应电机变换成直线电机情况

动,叫做“长次级”直线感应电动机。这是“单边型”电机。如果 f 是电网频率, τ 是极距长度,移动磁场的速度是 τf ,叫做同步速度,相当于旋转电机同步角速度 ω/p ,为了更充分利用次级,可以加上第二个固定初级,就是将图3(C)的次级铁轭加上绕组,形成如图3(D)那样的另一初级块。就成了“双边型”长次级直线感应电机。如果次级长度短而初级长度长,就成为图3(E)的单边型短次级直线电机,或如图3(F)的双边型短次级直线电机。从上面几种形式的直线感应电动机,可以推出其它形式,例如图4(A)是一个短初级配合一个固定在铁芯上的长次级直线感应电动机。图4(B)是一个长初级配合一个短次级的情况,它们各自分别固定在一部分铁芯上[12]。

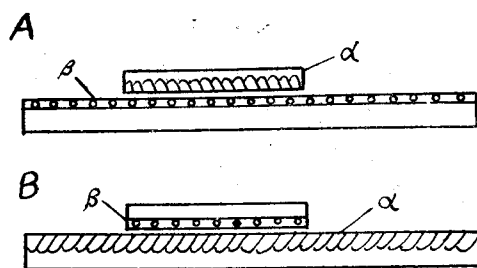


图4 单边直线感应电机
(A)短初级
(B)短次级

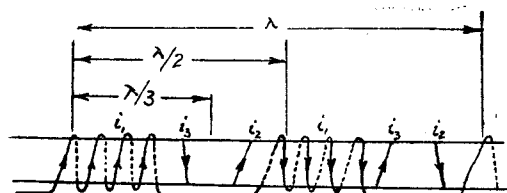


图5 在圆柱上绕六组螺线管产生轴向磁场移动正弦波

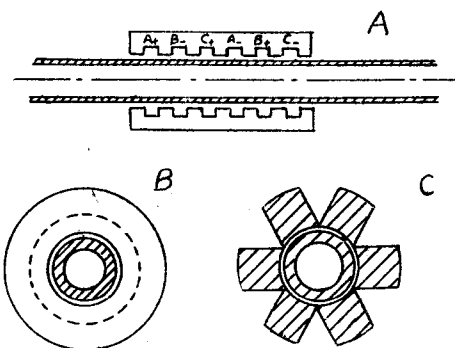


图6 管状直线感应电机内外两铁芯如A、B所示,为了结构简单,外铁芯可制成如C中形式

(2) 管状电机——图5三相绕组依次排列,绕一段后反向绕制。当电流 i_1 在线圈中流动时,产生磁场 b_1 。磁场方向沿圆筒中心线,各组绕组依次相互交替。 i_1 是时间的正弦函数,沿X轴的磁场 b_1 就是正弦形。在第一组之间插入另两组绕组的电流 i_2 和 i_3 ,综合的磁场就呈正弦形分布于X轴上,并以速度 τf 沿x轴移动,在这线圈中放一个圆筒形导体,就有一个按磁场移动方向的推力作用在这导体上。上述电机中装上导磁回路如图6所示,可以改善运动性能。导体是包在

圆柱铁芯外的圆筒，线圈外面铁圆筒是导磁回路，管状电机的原理也可用普通三相旋转电机的初级锯开、拉直、再卷起的方法来理解，如图7(A)(B)所示，成为图8(C)的管状直线感应电机初级[12][51]。

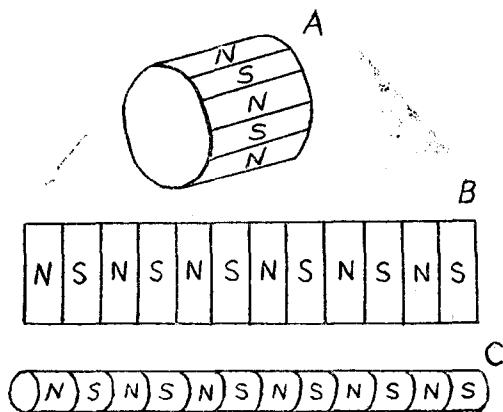


图7 管状电机可看作重新卷起平型直线电机的结果。

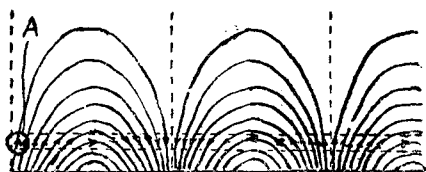


图8 滚棍电机机理

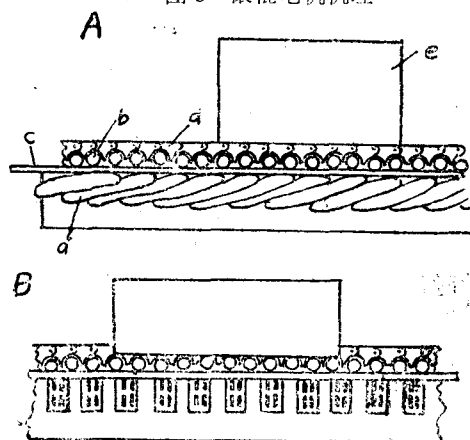


图9 滚棍式传送带

- A. 物件在链板上
a. 初级绕组, b. 滚棍, c. 无磁性片, d. 链条联接, e. 负载
B. 物件在滚棍上

(3) **滚棍电机**——钢棍放在平型直线电机初级绕组面上时，能按磁场前进相反方向滚动。这一现象可用一张纸片挖个小洞复盖在图8上，使纸洞最先处在圆圈A的位置上。移动纸片使小洞在两条虚线之间横向移动，就能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棍[13]，这一现象可用来制成如图9所示的低速传送带。将这种传送带的初级卷起来，把滚棍次级做成鼠笼形转子，就成为滚棍旋转电机，如图10所示。

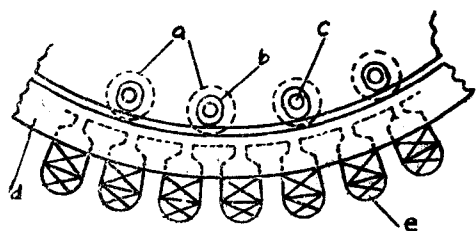


图10 滚棍旋转电机

- a. 滚棍
b. 端板上的长圆孔
c. 棍端车细使在孔内松配合
d. 轴承面
e. 初级绕组

(4) **横向磁通电机**——普通纵向磁通直线电机每个线圈的平面垂直于运动方向，如图11所示。AB线代表运动磁场及运动体的运动方向，磁路在y平面，电路基本上在x平面上，磁通与电流如图中虚线所示。电磁作用存在于平行于CD的磁通分量与平行于EF的电流分量之间。阻碍极距也就是速度增加的是当极距增加时，磁通和电流的无用分量都平行于运动的方向AB，因此与极距同时增加，后者使重量、漏磁和 I^2R 损耗增加，改变电路平面从X到Z，电路无用分量就平行于CD和EF，而不随极距的增加而增加。然而电机磁路增长比电路增长更为不利，因此，宁可使电路增长而使磁路短而宽，并且只有单回路。也就是使磁路从Y平面改变到Z平面，如图11(B)所示。这种电机叫做“横向磁通电机”。

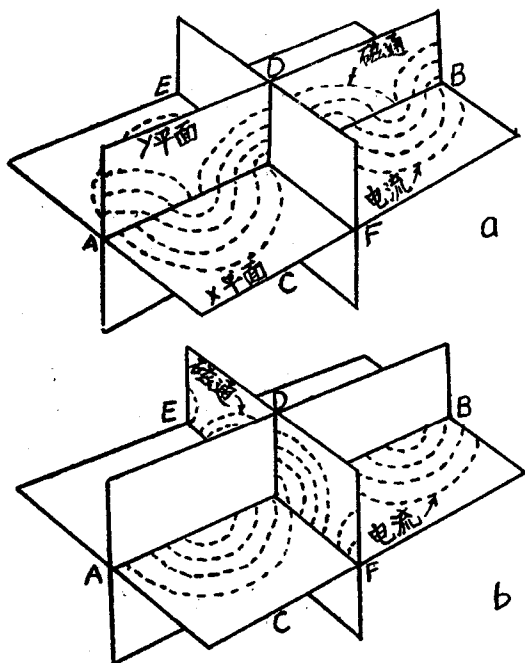


图11 直线电机磁通与电流关系
a 普通直线电机 b 横磁通直线电机

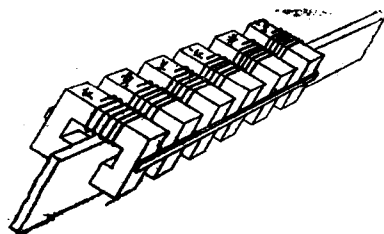


图12 横磁通电机

最简单的横向磁通电机示意如图12。横向磁通电机的主要优点是可以在小的铁芯重量的情况下得到较大的极距。普通纵向磁通电机所有初级齿中的磁通在铁芯中互相补足，横向磁通电机每个齿中的磁通是本身齐全的，是与极距无关的。铁芯磁通只等于每一点上的齿部磁通。见图13。〔12〕〔51〕

(5) 直线螺纹磁阻电机——图14中定子类似普通旋转电机，在定子铁芯内孔车出双起方螺纹；动子是中碳钢圆柱体，车出垂直于运动方向的方槽，槽距与定子螺距相同。由于两者相同，定子与动子齿总对在两个直径对过点上，电机通电后，动子平衡位置是它的齿对在定子螺纹对磁极重合处。

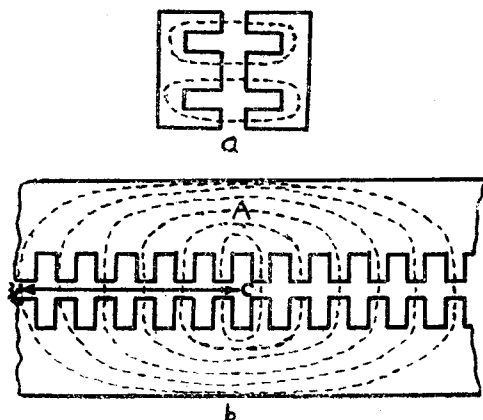
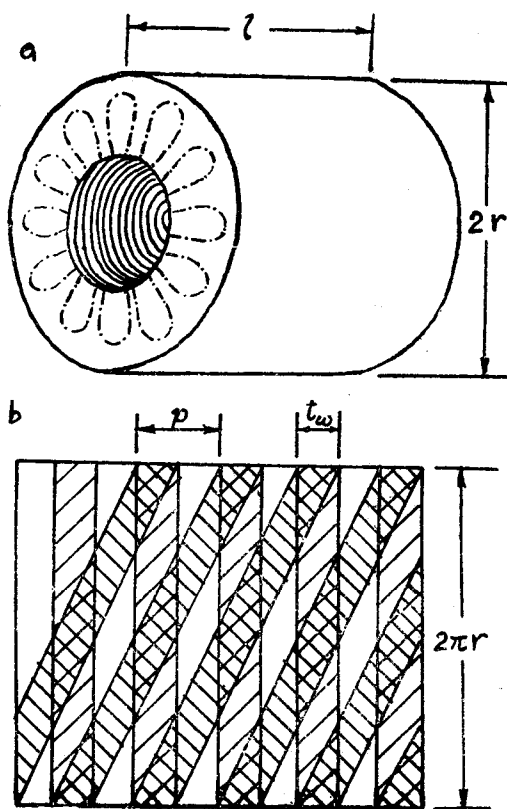


图13 磁通图
a. 横向磁通电机 b. 纵向磁通电机
显示用横向磁通减少铁芯磁路的情况



▨ 定子螺纹 ▨ 转子螺纹

图14 直线螺纹磁阻电机

a. 定子螺纹图 b. 定子与动子螺纹展开图

如果激磁电流的相略微领先或滞后，磁场的轴旋转起来。螺纹的作用就是略微使磁极沿

电机纵轴方向进行位移，动子就会同步移动，因此就在每周激磁移动两螺距，这种电机能在较低速度下以较高位置精度移动约1米。将柱形定转子展为平板形也同样可行。

直线电机的应用

直线电机有交流和直流两种。两种电机的优缺点和应用范围不尽相同，现分别叙述如下：

(一) 交流直线电机

这种电机的优点是结构简单，坚固耐用，因而广泛得到应用，主要缺点是速度控制不及直流电机方便，其应用实例介绍如下：

(1) 高速列车——这是直线电机重要用途之一，直线电动机在高速方面的应用主要是地面运输中作推进和悬浮系统。由于粘着力和其它机械上的原因，一般旋转电机不能胜任速度大于250公里/时下的高速运行。

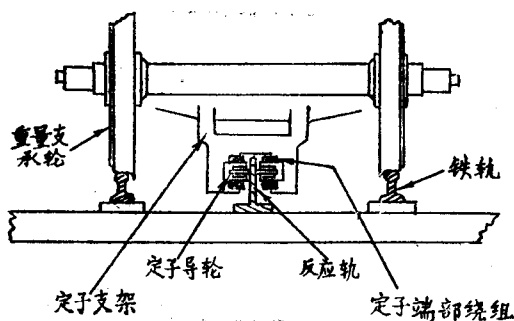


图15 固定板在轨中间的直线电机

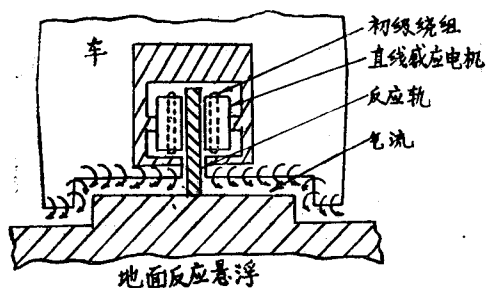


图16 用直线感应电机的有轨气垫车

而直线电动在速度超过250公里/时下运行最为理想。这样高的速度希望避免机械接触，为此，可采用磁悬浮系统的悬浮机。目前最高速度已达550公里/时。图15是无气垫或磁垫的高速列车示意图；图16是用气垫的；图17是用磁垫的〔20〕。供电方式有用滑块集电式，分为三相和单相在车上转换成三相两种；有在车上自己发电的，也有在车上带移动变压器次级绕组供电的（见第4篇，图7）〔21〕。日本用超导电磁铁同直线同步电动机结合起来推进铁路车辆，如图18所示〔22〕〔23〕。现在美国、英国、西德、日本、加拿大、法国等国在高速地面运输方面已设计了采用直线电机的试验车，并作了实际试验〔18-21〕。这类用途的直线电动机可用直线感应电动机，也可用直线同步电动机，还可以用直流直线电动机。美国七十年代科技研究五大问题中考虑用磁垫或气垫车的高速铁路。加拿大设计了一种双边直线同步电动机

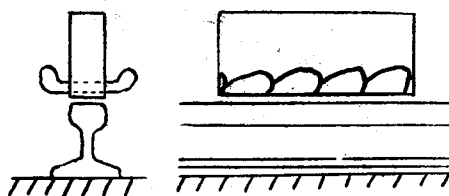


图17 直线电机装在普通铁路上，用轨道作次级。

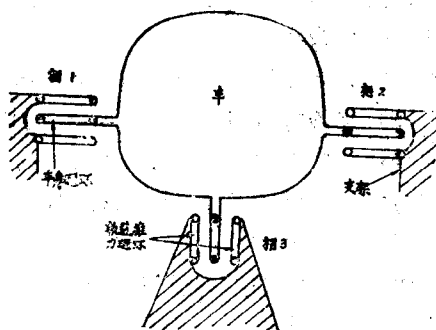


图18 三相直线同步电机推进磁垫列车示意图

系统，时速为480公里，效率和功率因数分别为0.74和0.70，供城市间高速列车之用。英国 RTV-31 型初级块装在车底部，次级铝合金板以钢为背板，平铺在水泥轨中间，优点是可以调节气隙以改变车速。气垫用8台120 马力直流电风扇产生，万一气垫失灵或意外断电，有电气液动伺服系统自动控制，保证不致碰在次级上〔23〕。此外也有用80号钢轨作次级的〔20〕。与其它国家相比，日本在直线电机可控硅供电方面作了更深入的探讨。

(2) 传送机——根据不同用途有多种形式：①传送车——初级装在车上，次级铝

条装在侧面钢架上。控制系统如图19所示。速度传感器压力和推力的关系如图20所示〔28〕〔49〕。②传送道——水平传送钢块、钢板或钢制件的情况下，根据钢材的长度，在滚子之间装入直线电机初级，即可提供一种简便的驱动推力。在钢板运送道上，用一台倒装的直线电机初级装在钢板堆上方，初级吸力的垂直分量先将钢板提上来，水平分量再将钢板运送出去，切断电流放下钢板到另一台用直线电机驱动的传送道上〔29〕。图21是大量煤炭运送的一例，将小车改成大型皮带，皮带背面装次级板，可成一条大型运煤沟〔20〕〔47〕。③传送带——用普通旋转

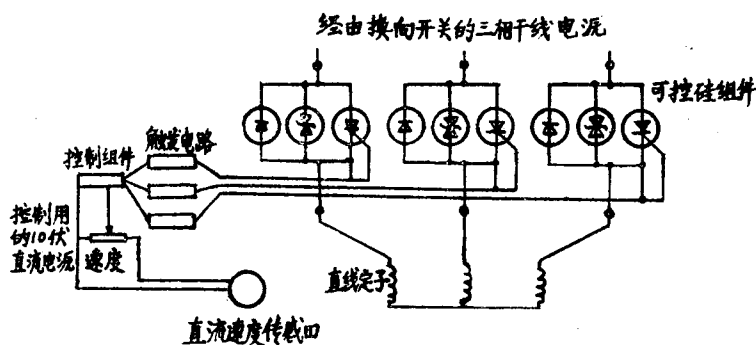


图19 速度控制系统的电路简图

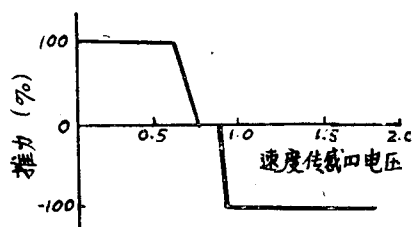


图20 输出推力与速度传感器电压的关系

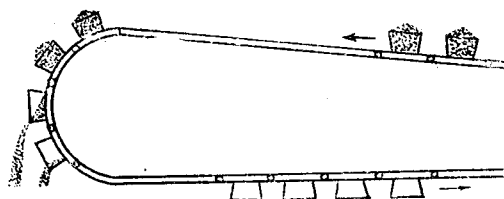


图21 直线电机运煤车示意图

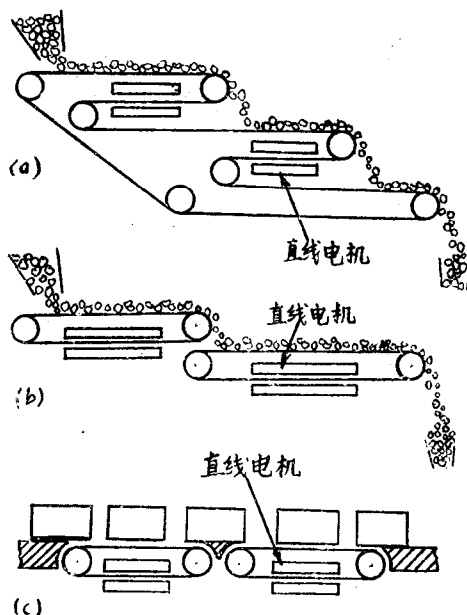


图22 用直线电机的传送带示意图

电机拖动传送皮带，完全依靠滚轮与皮带轮之间的摩擦，遇到非常潮湿的环境或有粘糊糊的物质附在皮带上时，就容易打滑，皮带用旧而伸长时也容易打滑。采用直线电机后，在传送带大面积上拖动力分布均匀，无机械接触，因此与摩擦系数无关。皮带背面装次级板的单边型直线电机的缺点是磁路不好，可用图22中双边型电机来改善。图22

(a) 是在回程中两次加力，图22 (b) 是缩短传送带的办法，图22 (c) 是平面连续传送的情况。图23是用金属丝编织的传送带，粗铜棍作纬线，细铜绞线作经线，其中通过初级块之间的中间部分不需要导电，可用无磁性高电阻不锈钢绞线以加强编织带机械强度，编织带两边用纯铜线，以形成低电阻的端环〔30〕。编织带的电阻约为同厚度铜片的7倍，气隙0.184吋，电源频率6.25赫，效率58%；另一台较大试验电机初级宽30吋，极距10吋，槽深3吋，气隙0.45吋，频率5赫，速度7.5呎/秒，总效率是61%。若将编织带改成1/4吋厚、36吋宽和10吋长的铝板，一块接一块固定在两边的链子上，其它不变，总效率是75%。〔21〕。④传送板——在成批生产或大量生产的加工机床之间的运输线或装配线上，要求装载部件的运输平板沿一定路线和一定速度，在一定位置上准确停住。可用直线电机初级块装在生产线上，运输平板背面装铝片作次级。在生产线直线部分，每台直线电机装一敏感元件，用脉冲技术控制速度，当速度过慢时，推动平板；速度过高

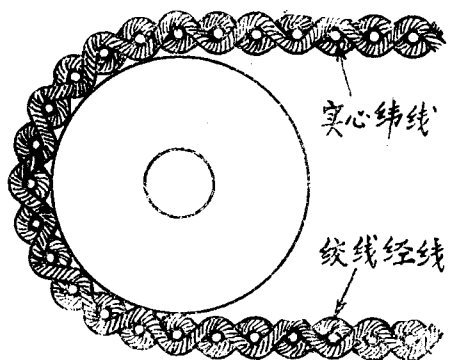


图23 编织传送带示意图

时，切断电源。需要转过90°时，将直流电通入，使平板迅速停止，然后在垂直方向的绕组内通入交流电，使之转过90°前进。到达加工机床位或装配位上，要求平板停在准确位置上，就在绕组中注入不连续脉冲的交流电源。这种形式的平板要求比较准确，为了减少装置费用，在平板返回部分必须使平板数量愈少愈好。在返回部分装上直线电机初级块，使平板高速返回〔29〕。一条汽车引擎装配线用75厘米/分速度前进，在装配线尽头，空平板降到下层返回线，以9.5米/秒快速返回起点，使平板能迅速周转。装配线长135米，用44台直线电机。装配平板每块半吨重，1米长，下面用螺栓固定一块4.8毫米厚的铝板作为次级。初级块长46厘米。起动处三块初级块间隔很近，用以加速平板，每块产生34公斤推力，其余初级块约间隔3米。每块初级块之前装上静磁力开关，并用可调时间开关调到约1秒钟时打开，如果走得太快，在电机通电之前就过去了，走一段时间就慢慢减速；如果走得太慢，电机开关通电，就给平板以推力，使平板基本上等速行走。由于快速返回，节省大量平板因而节省相当多的投资〔32〕。⑤自动化车库——在100辆汽车的面积内存放99辆汽车，并能迅速存

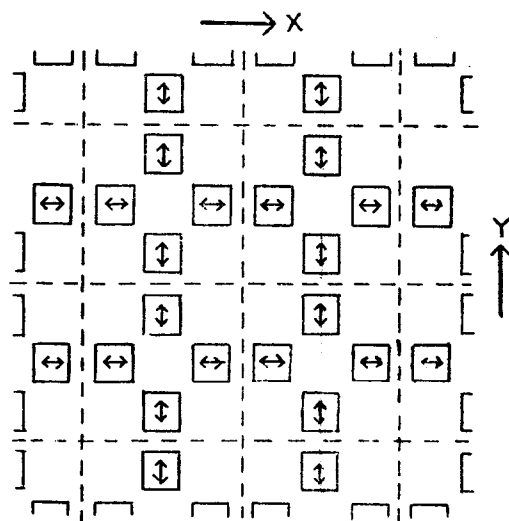


图24 用直线电机的自动化车库示意图

取的高度面积利用的汽车库,靠地上安装一系列纵向和横向直线电机初级块来解决,如图24所示。载车平板底部是铝板,作为次级块,在每个车位上装四个初级块,两纵向两横向,纵向两块激磁方向相同而横向两块激磁方向相反时,次级板就带着汽车向前或向后移动一个位置。第二位置的初级块如情况相同,次级板继续前进。如两纵向块激磁方向相反而两横向块激磁方向相同,次级板就按需要向左或向右移动,直至到达指定位置上。通过电子计算机编排程序,可在极短时间内将所需要的车从库内排满了汽车的位置取出来。同一方法可存取其它类似货物。

〔20〕⑥送片装置——生产铝薄片的过程中,在卷线之前需要精确地进行最后拉张,用一排双边型直线电机初级块已能做到这一点。铝片与初级块没有任何接触,保证了铝片的完全均匀和表面光洁,避免褶皱。另有一对初级块与上述拉张用的初级块相垂直,用来驱导铝片以保证铝片与卷绕机相对位置正确。极薄的铝片,例如薄至0.005英寸的铝箔,可用直线电机推入冲压机制成各种实用品,每次送进及切割成型的一个循环时间为240毫秒〔28〕。图25为一排9台直线电动机在铝片生产过程中对其施加张力,而无接触,以免损坏其表面。⑦滚棍传送带——利用铁棍在平型直线电机初级块表面滚动现象,制成滚棍式传送带。图9(A)是物件放在链板上,速度较慢,图9(B)是物件直接放在滚棍上,速度较快,因为滚棍与物件接触处又有一次推动〔13〕。⑧粉末传送带——在初级块表面加一层磁性材料作成槽形,可作铁粉、铜粉、铝粉及其他导磁或导电粉末金属

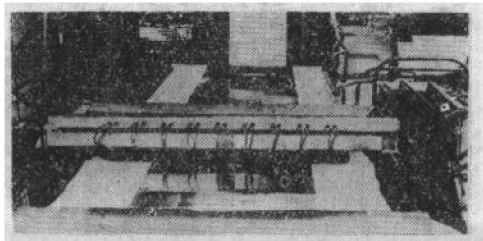


图25 直线电动机用于拉张铝片

材料传送带,优点是没有粉尘飞扬,无噪音〔47〕。

(3) 吊车用直线电机——用它来直接驱动,可免去齿轮减速机构,缩小体积,减轻重量。①桥式吊车用钢轨底面作次级,初级块挂在下面,可利用两者的吸力,将吊车提起一部分,减轻水平移动的总重量。无论下挂型或上驰型桥式吊车,都用这一方法。所需总功率不超过旋转电机齿轮减速的总功率〔28〕〔48〕。②地控吊车也用上述同样方法,最高速度不超过50米/分,英国已有商品,在要求声音轻和特别清洁的地方最为适用〔29〕〔33〕〔34〕。

(4) 加速器或减速器用直线电机——它能充分发挥直线电机高速的优越性,举例如下:①起飞车——世界上第一台实用的直线电机,是第二次世界大战末期美国空军为缩短跑道所用的起飞车。初级绕组块作成小车,在1400呎长的鼠笼型次级上面飞驰。拖动10000磅重的喷气式飞机,最大速度225英里/小时,加速时约7000安,刹车时约10000安,用铜石墨集电靴,总功率约10000瓩〔35〕。②撞击试验台——英国汽车工业研究协会试验汽车与部件安装全特性的试验台,用3.3千伏、1½吨重的双边型直线感应电机初级块作小车,固定直立式1吋厚、35吋宽的铝板作次级,初级每相每极两槽,串联接成星形,形成六级电机。小车上有一突出地板之上的钩子,挂住系在汽车腹部的钢丝绳,能将重量自0.45吨至2.3吨的试验车以每小时30哩的速度撞向水泥墙。在加速过程中,直线感应电机产生450马力。当试验车到达水泥墙之前10尺的位置时,电力被切断,跑车与试验汽车脱开,当试验车撞毁在水泥墙上时,直线感应电机初级块在下面通过,被张开的尼龙绳捉住。整个试验只需要35秒钟完成〔32〕。③绳缆试验装置——英国国家技术部工程实验室采用直线电机作绳缆破坏性力学试验,主要为尼龙绳和其他合成纤维绳。模拟降落伞坠落重物时或在风浪中拖船时发生的冲击

张力情况。小车两边装上12呎长的铝板，两对固定初级块，每块4呎长，加速2060磅重的小车直至铝板通过这些初级块定子最大加速度超过5g。起始推力9700磅，同步速度42.5哩/时，负载速度34哩/时，小车发动时间只要1/8秒，峰值功率约10000马力。供电变压器高压边有几个抽头，满足推力变化的要求〔32〕。

④调车场加减速器——用直线电机次级装在调车场编组线上，初级作成小车，牵引火车车厢向前或制动，来代替普通驼峰调车场进行车辆编组，可取消驼峰，又可免除蹭车过多或不足，免除人工垫铁靴对铁轨的磨损和人身事故，已被公认为调车场先进设备〔36〕。

⑤发射器——利用直线电机高速的特点，可设计作导弹、电炮等发射器。1954年英国制成双边扁平型直流直线电机，能发射几磅重的导弹，速度可达1000哩/小时以上。空间研究部门在1961年为模拟陨石对宇宙飞船座舱的冲击，制成超高速感应发射器，速度可达30000至160000哩/时。发射器动圈通过滑动接点从供电轨获得电流，然后使电流通过固定线圈流向另一滑动接点而返回到供电轨，以产生一个超前移动的通电区。这个实验失败了，但人们对其失败的原因特别感兴趣，因为实验在还没有达到最终速度时，金属都被熔化了。在研究这装置所产生的力时，发现次级导体的温度变化率与导体在无阻抗运动中由于感应力而产生的加速度之比，是和线性尺寸的乘方成反比。发射器结构如图26，用AWG-23号漆包线绕在直径

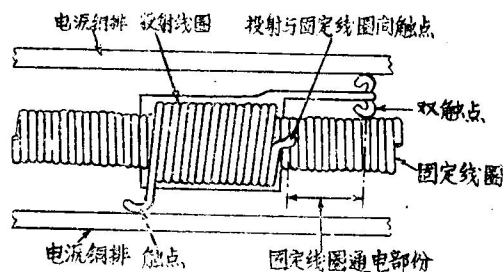


图26 超高速感应发射器

3/4吋，长10吋的胶木棒上作定圈，外套动圈用同线径5、10、15圈作试验。动圈重3克左右，电容0.004法，充电电压35000伏，电流17600安〔16〕〔37〕。

(5) 开门器和升降机——平面型和管状直线电机都可用作开门装置。仓库滑动门，上启式或左右拉式，电梯滑动门以及能转120°的翼门都有应用，电梯门要求人不致被关在门内无法出来，当门正在关上时如果电梯内有人尚未出来，应便于乘客用手打开〔28〕。快速升降机主机也可采用直线电机，初级作为平衡重量的一部分，次级作为支架结构的一部分。用图19的固定系统来控制〔28〕。图27为Courtesy直线电动机公司的产品在滑动门上的应用。

(6) 低速直推器——用管状直线电机作低速和无位移直线传动装置，可相当简化制造。英国已有现存商品。定子绕组是许多园形线圈，绕成空心扁园饼状，每个线圈之间，用钢板圈隔开，作为定子齿兼作冷却片，另用钢圈包住线圈外园。将独立的钢板圈、线圈、钢圈依次装配在薄壁不锈钢管上，进行接线，就成为低速直推器定子。动子是一根钢棒，外面热套铜管，在薄壁不锈钢管内滑动。钢棒材料与冷却片材料的磁阻相同。这种结构形成，可以任意拼装以组成不长度和输出功率的传动装置。不用管状电机而用横轴磁场形式的结构，也可制成低速直推器〔38〕〔30〕。

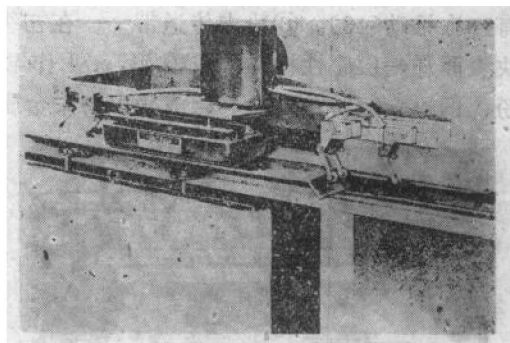


图27 直线电动机正在带动一扇滑动门

(7) **往复直推器**——用直线电机作往复运动的推力器，已在各国应用，以下五种仅是代表性的例子：①电梭——1895年英国的电梭是直线电机的前驱。梭子到头时，用弹簧来储存一些动能，用开关倒换磁场而反向投梭，参见示意图28。1961年英国在两端部装了走向中间的磁场，梭子移过中间位置，就产生弛缓运动，移到终端就被杀住，于是停下来再向反方向加速，那边又产生同样现象[39] [44]。②空气压缩机——法国制成用直线电机推动的空气压缩机，正半周时推动活塞向上，负半周时用弹簧顶回，如图29所示。用50赫经二极管整流供电。规格从50瓦到1千瓦/缸，最多为12缸。50赫电源时，只需1/100秒以下的时间就可达到满输出。效率为20%至30%，比普通旋转式空气压缩机为高，功率与重量之比也较良好。一种单相230瓦的这种空气压缩机，压力2.5大气压，自由空间输出8米³/时，相当于一台

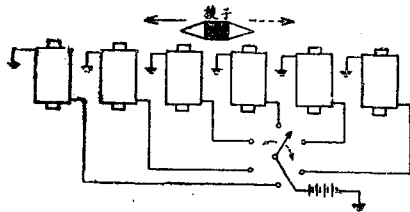


图28 1895年的直线电机(用机械转换器供电的同步电机推动织机梭子往复运动)

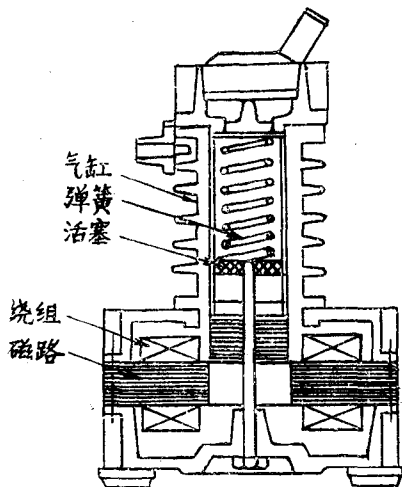


图29 直线电机推动的空气压缩机

1/2马力的普通旋转空气压缩机[40]。③凿岩机——捷克用直线电机作矿山凿岩冲击回转机，用水冷却，对解决采矿全盘电气化，提高机械化程度，降低成本和节省电力都有帮助[42]。④冲压机——英国用直线电机作钣金冲压机床，对缩小冲压机体积，减轻重量，节省电力都起到良好效果，再配上用直线电机的传送带，可组成冲床准确送料定位装置。另有一台高速冲击挤压机的动力重21.5磅，能产生730呌磅的冲击能力，时间只需0.096秒[42]。⑤挤压机——一种铝和有色金属工业用的新型挤拉机已推销到欧美各国。这种挤拉机能自动地抓住从压力机出来的金属挤压件并以预定的速度拉成精确的长度并以很高的精确度与挤压机速度相配合，并能随时适应速度的变化，挤压机的传动设备是一台特殊设计的直线电动机，它在挤压操作工序结束时能立即制动并高速返回到选定位置，为下一道挤压长度作准备[42]。⑥油开关——美国用直线电机操纵磁力开关作240伏和480伏、800至4000安的断路器遥控或自控，在18英吋的行程上，从起动到停止只需250毫秒。另外，10千伏和35千伏的油断路器，用直线电机作动力机应用，经过四年现场试验，证明其快速反应及高速能力，很适用于操作油断路器[37] [14]。

(8) **电磁泵**——由于原子能工业的发展，需要将液态金属钠、钠-钾和铯进行泵运。用普通机械方法是有困难的，因此发展了电磁泵。利用在磁场下带电时液态金属内部产生的压力进行泵送。虽然效率较低，但体积较小，密封于管道之内，比较可靠和较少日常维护。电磁泵分为两大类①导电泵——电流从外部电源流入液态金属，使金属流动。②感应泵——电流由移动磁场感应，使金属流动。最简单的导电泵见本刊第13篇图1，磁场穿过装液态金属的耐温瓷管，电流经过接在管壁的电极送入液体，液体就流动起来，可以用直流也可用交流电源。感应泵有三种主要形式：a. 平板形感应泵是一台双

边型直线感应电机，见本刊第13篇图2，次级空心，液态金属在里面流动；b.螺旋形感应泵在外形和运转上与感应电动机最相似，见本刊第13篇图2，液体被螺旋翼片岔开，形成螺旋形运动，磁场的作用产生圆周运动；c.环状感应泵见本刊第13篇图4，液态金属在中间铁心与外部绕组之间的环状空间内流通。外部绕组是沿管外一个独立圈形成〔8〕。苏联列宁格勒车辆工厂用电磁泵泵送钢水上3°斜坡，效率虽只有0.08%，但投资只有其它方法的一半，日常维护费只有40%，劳动生产率

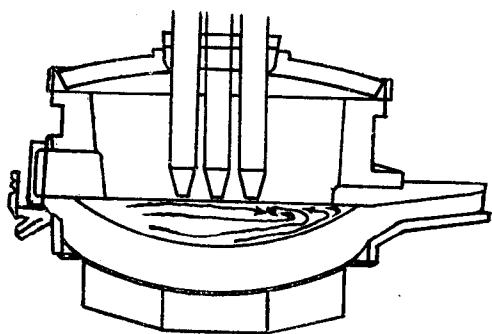


图30 电弧炉内直搅式感应搅拌时钢水流动情况

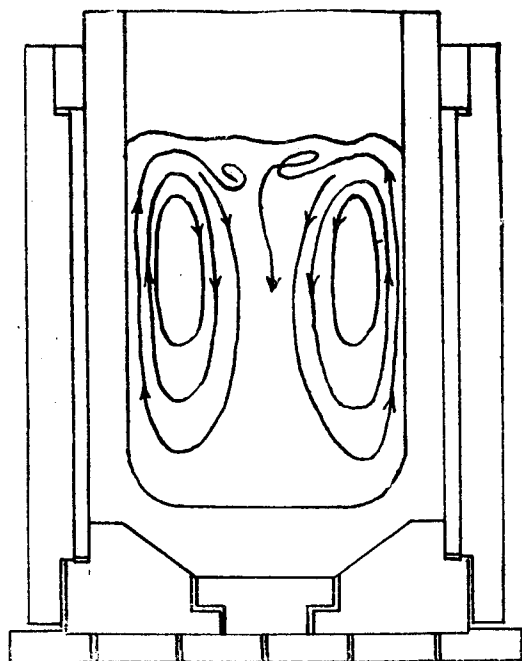


图31 圆筒形搅拌式感应搅拌时钢水流动情况

提高三倍，而且钢水自动清渣，不导电的渣落到底部极易清除〔32〕〔30〕。

(9) **感应搅拌器**——钢铁熔炼时用直线电机原理对钢水进行感应搅拌，能提高熔炼质量。因为感应搅拌使流动均匀，上下各处温度一致，因此能使各部分化学反应完全，从而加速熔炼时间，提高熔炼效率。搅拌器有直搅式和圆筒形搅拌式两种。直搅式用两相绕组在0.5—5赫的低频下进行，绕组用铜管制成，通入冷却水。图30是电弧炉内直搅式感应搅拌时流动情况；图31是圆筒形搅拌式感应搅拌时流动情况〔45〕。

(10) **测量仪器**——用直线感应电机作测量仪器有电磁流速计、钢片测厚仪等。① **电磁流速计**——直线电机除可用作磁流体发电机外，还可制成电磁流速计。导电流体在一个与流动方向成直角的磁场中运动时，会产生感应电动势。这种流速计可称为横向磁场流速计，见图32。另外还有轴向电流流速计和径向流速计。电磁流速计的主要优点是其输出电压与容量流速成线性比例〔16〕。② **钢片测厚仪**——钢片碾压后，可用双边型直线电机作厚度测量装置。钢片两边各有一只测量头，装在由两个连续运行的直线定子所操作的托架上，直线定子能保证测量头在其横对滚筒宽度的部位上与钢片相对位置的精确性〔28〕。

(11) **圆盘型直线电机**——比普通旋转电机优越的是：结构简单，不用齿轮，调速方便。① **圆盘电动机**——直线电机初级块径向地装在圆盘的侧边，使圆盘的轴作旋转运动，如图33所示，改变定子的推力，用二个

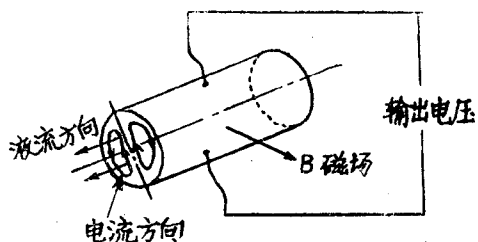


图32 电磁流速计

定子,改变电源频率,调节定子的径向位置,或改变园盘材料,可使电机特性发生一系列变化。从维护的观点看,若绕组被击穿,几分钟内就可换好定子,在重绕线圈时,整个机组无须停止工作[28]。日本三洋电气公司研制了直线电动机直接驱动的双速电唱机,其规格为:3.5瓦、33 $\frac{1}{2}$ 和45转/分、100伏交流、50/60赫,该机特点是结构简单、装配容易,不需对生产设备特别投资就可大量生产[4]。②转车台和转盘——传送系统中需要转过一个角度的转车装置,可用园盘直线电机直接产生旋转运动。停止点的精确度不超过3毫米。转车台板背面装上铝板作次级,下面装一个或几个固定的直线电机定子,另有备用定子作替换用。奶粉制作机、陶工旋盘、自动挤奶器、制瓶机以及灯塔旋转透镜驱动装置等已采用园盘型直线电机[28]。③桥式起重机——用园盘型直线电机驱动桥桁、小车和吊钩,配上4:1减速齿轮,可淘汰以往那种双速鼠笼式电动机[28]。④离合器——内燃机或燃气轮机驱动的车辆上的自动变速齿轮和离合器,可用园盘型直线电机来代替。发电机的电能直接送给园盘直线电机的定子。园盘直线电动机的输出动力以通常方式直接传送给差动齿轮和车轮。车轮上得到的转矩和速度范围与普通直接驱动的内燃机所提供的范围相同。在爬坡的情况下,因为内燃机——交流发电机组的速度不受车轮速度变化的影响,因而能有高转差特

性。这种系统的成本和重量都低于使用鼠笼式旋转电机驱动系统,运行中又能使燃气轮机保持最经济的速度,即油耗和空气污染最小[28]。⑤船用直线电机——轮船推进器的转轴不用穿过船尾,而用园盘直线电机驱动,现在已受人重视。螺旋桨与园盘的组合铸件由防水直线定子驱动,其额定值因为有天然的水冷却而得到提高,另一种较次要的应用,是以三相交流电源驱动瞭望台挡风玻璃的弧刷,它装在次级上,位于玻璃外边,定子固定在玻璃里边。通过直接换向可控硅和近程限制开关来产生往复运动。在玻璃外边不需要电气或机械的驱动装置[28]。

(12) **直线步进电机**——这类电机在自动化控制系统中用途甚广,种类甚多,有刚性机械联接的,也有柔性电磁联接的,按其位移坐标来说,有单坐标式和多坐标式。单坐标式直线步进电动机主要用于必需高速和高精度直线位移的系统中,例如控制器和机器人中。双坐标式直线步进电动机用于各类控制装置和坐标仪以及代替传统双坐标精确定位系统(精密丝杠、导轨和滑板)等[3]。直线步进电动机采用稀土磁铁以替代铝镍钴磁铁可使能量大为提高[2]。

(二) 直流直线电机

这种电机也同样有广泛的用途,可用于高速列车,物料运送和精度很高的动力机,主要优点是调速性能好,缺点是有电刷,长距离造价较高,分别叙述如下:

(1) **高速列车**——在高速地面运输系统中可采用直流直线电动机。据最近(1979年)报导[52]日本铁路研究所设计了一台高速性能极好的直流直线电动机,作为日本新干线的下一步技术改进,采用300公里/小时和500公里/小时两种系统,已制造出第一台实验设备,一辆几百公斤重的车辆能悬浮地行驶在上面,此设备的性能已得到证实。与普通直线同步电动机相比较,直流直线电动机具有更多的优越性,有关情况详见本刊第7篇。

(2) **物料运送**——英法等国已制成定型传

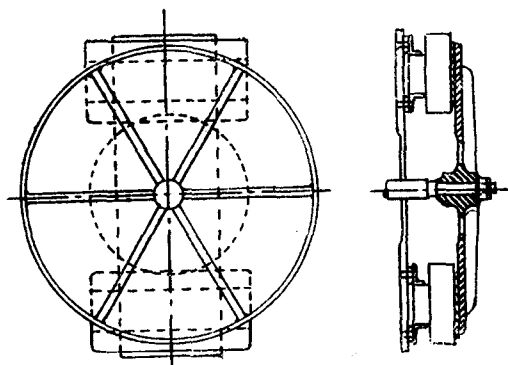


图33 园盘型直线电动机