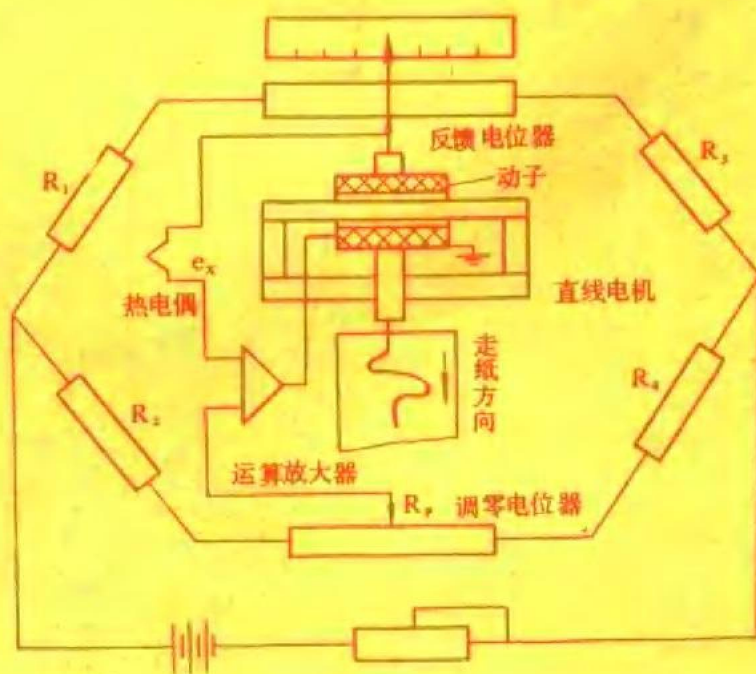


SPECIAL MINIATURE
LINEAR MOTORS
AND CONTROL

微特直綫电机
及其控制

丁志刚 蒋黔麟 陶志鹏 等编著



9.4

浙江大学出版社

内 容 简 介

微特直线电机是机、电和系统控制三门学科巧妙结合的产物，是近十年来新发展起来的直线电动机新品种。

全书共分九章，系统地介绍了各种微特直线电机的工作原理和结构；静态和动态的运行特性；最佳控制参数和设计特点以及它们的典型控制系统。重点讨论直流直线伺服电动机，直线步进电动机，直线感应电动机，压电直线电动机，直线悬浮电动机（电磁轴承），直线振荡电动机以及直线步进电动机的控制。

本书可作为高等院校大学生和研究生的教材，也可作为有关科技人员的参考书。

微特直线电机及其控制

丁志刚 蒋黔麟 陶志鹏等 编著

责任编辑 应伯根

* * *

浙江大学出版社出版

浙江大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

开本787×1092 1/16 印张 17.75 字数 421千字

1987年3月第1版 1987年3月第1次印刷

印数：1-3 000

ISBN 7-308-00006-X

TP·003 定价：2.95元

(统一书号：15337·26)



前 言

近十年来,自动控制技术和微处理机应用的发展,大大地促进了微特直线电机的开发应用。目前微特直线电动机的主要应用机型有:直流直线伺服电动机,直线步进电动机,直线感应电动机,压电直线电动机,直线悬浮电动机(电磁轴承)和直线振荡电动机等。应用领域已经遍及自动化仪表、计算机外围设备、自动化机床,以及其它科学仪器设备的自动控制系统。在国际市场上已经形成批量商品的仪器有:微特直线电动机驱动的自动平衡记录仪、图示电平记录仪、自动绘图机、微型计算机磁盘上的读/写磁头驱动器、X-Y记录仪、激光干涉仪、光刻机以及各种专用仪器和设备。

本书系统地介绍这类具有实用价值的微特直线电机及其控制系统。内容包括:各种直线电机的工作原理和结构,静态和动态的运行特性,最佳控制参数和设计特点,以及它们的典型控制系统(直线步进电机控制)。

在内容选择上,以反映国内外在本领域内所取得的最新成果为主,同时也结合作者在直线电机教学、科研工作中的体会,对一些问题作了较深入的探讨。有的具有独特的见解,并有一定的实用性。

在写法方面,以从事电机和自动控制方面的高校学生、科技人员为主要对象;同时也兼顾到非电类专业技术人员的需要,因此在论述各种电机工作原理时,尽量做到深入浅出,通俗易懂。在讨论有关重要理论问题时,其中部分内容不作公式推导,而仅就其结果进行分析应用。此外,考虑到某些专业人员的需要,本书还详细地介绍了有关参考文献。

本书第一、三、四、五、七、八章由丁志刚执笔;第九章由蒋黔麟执笔;第六章由陶志鹏执笔;第二章和附录部分由陈惠君执笔;第三章的§3-11和§3-12两节由叶挺秀执笔。全书由丁志刚副教授负责定稿。

承蒙许大中教授为本书审稿,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

书中误漏欠妥之处,希望读者批评指正。

编著者

1986年8月

目 录

第一章 绪论

- §1-1 概述..... 1
- §1-2 旋转电机演变为直线电机..... 2
- §1-3 直线电机的特点..... 6
- §1-4 微特直线电机在控制系统中的作用..... 7
- §1-5 微特直线电机的主要类型和典型结构..... 9

第二章 微特直线电机分析和计算的基础

- §2-1 微特直线电机的分析方法、问题的性质和
研究的内容..... 13
- §2-2 微特直线电机的磁场和磁路..... 13
- §2-3 磁场储能和电磁力..... 29
- §2-4 机电系统的动态分析..... 40

第三章 直流直线伺服电动机

- §3-1 直流直线电机的工作原理..... 55
- §3-2 直流直线电机的结构型式..... 56
- §3-3 直流直线电机的主要技术参数指标..... 61
- §3-4 动圈型直流直线伺服电机的几个重要参
数和表达式..... 62
- §3-5 直流直线电机的动态特性..... 64
- §3-6 电机的最佳控制参数..... 68
- §3-7 直流直线伺服电机的误差及其减小的方法..... 72
- §3-8 动圈型直流直线电机主要尺寸的初步设计..... 73
- §3-9 动铁型直流直线电机的结构和工作原理..... 77
- §3-10 动铁型直流直线电机的推力计算..... 79
- §3-11 直流直线伺服电机的驱动线路..... 84
- §3-12 直流直线伺服电机的试验..... 85

第四章 直线步进电动机

- §4-1 概述..... 90
- §4-2 直线步进电机的结构和工作原理..... 90
- §4-3 直线步进电机的结构分析..... 96
- §4-4 直线步进电机的运行特性..... 97
- §4-5 直线步进电机初步设计实例..... 127

第五章 直线感应电动机	
§5-1	工作原理..... 137
§5-2	直线感应电机的应用分类和性能评价..... 138
§5-3	直线感应电机的运行分析..... 140
§5-4	直线感应电机的设计特点..... 145
§5-5	钢次级直线感应电机次级参数的计算..... 156
第六章 压电直线电动机	
§6-1	概述..... 169
§6-2	压电效应..... 169
§6-3	压电直线电机的基本工作原理..... 171
§6-4	基本结构..... 173
§6-5	主要参数的确定..... 174
§6-6	控制线路..... 180
§6-7	应用举例..... 182
§6-8	计算例题..... 183
第七章 直线悬浮电动机(电磁轴承)	
§7-1	概述..... 188
§7-2	吸引型悬浮电机的运行分析..... 189
第八章 直线振荡电动机	
§8-1	概述..... 201
§8-2	线圈可动型直线振动驱动装置..... 202
§8-3	永久磁铁可动型直线振动驱动装置..... 205
§8-4	铁芯可动型直线同步振荡电机..... 206
第九章 直线步进电动机的控制	
§9-1	概述..... 213
§9-2	单元电路和元器件简介..... 213
§9-3	数字逻辑电路..... 221
§9-4	微型计算机开环控制系统..... 229
§9-5	微型计算机的闭环控制..... 256
附录 I 272
附录 II 277

第一章 绪 论

§1-1 概 述

直线电机是一种利用电能直接产生直线运动的电气装置。

这种电气装置早在1845年就有人提出，但是，最近十几年来才真正被开发、应用在工业生产中，形成了产品和商品。尽管在实际生活中，存在着许多需要直线运动的场合，但是这些直线运动驱动源，几乎全部采用技术上早已成熟的旋转电机。过去很长时期以来，直线电机之所以没有制造出象旋转电机那样经得起实践考验的产品来，除了直线电机本身在理论上和技术上不够完善外，主要是因为没有充分发挥它的长处，避免和克服它的短处。直线电机的发展和应用的实践表明：直线电机只有向着其它驱动装置（包括旋转电机在内）所不能满足的，或者使用旋转电机有困难，经济上不合算的领域发展，才能找到直线电机独特的应用领域和优秀的应用机型。

近十多年来，世界各国开发出许多具有实用价值的直线电机新机型。这些新机型大多数是一些微型的或小型的微特直线电机，它们已广泛应用于自动化仪表系统，计算机辅助设备系统，自动化机床以及其它各种自动化系统（包括家用电器设备系统）。

微特直线电机是机、电和系统控制三门学科巧妙结合的产物。其使用往往是和设备、仪器的更新换代联系在一起。目前，以微特直线电机为主要控制元件的新型设备和仪器正在国际市场上大量涌现。从产品数量上来看，仅仅使用在自动化仪表上的微特直线电机，全世界的年产量就有好几万台。例如英国的Foster Cambridge公司已经在100mm宽刻度的多用P101L型和P102L型记录仪上全面采用了直线电机^[1]。西德的BBC和Flexa Controls在P100L、P130L和P250L小型记录仪、指示器和控制器中采用了直线电机，如图1-1、图1-2所示。丹麦的Brüel & Kjaer公司在高档产品“2305”、“2306”、“2307”图示电平记录仪中全

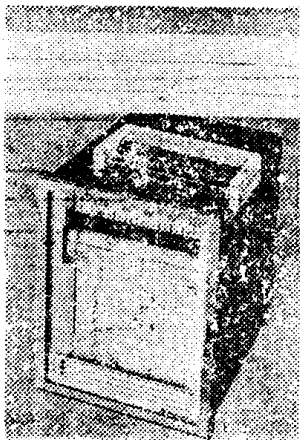


图 1-1

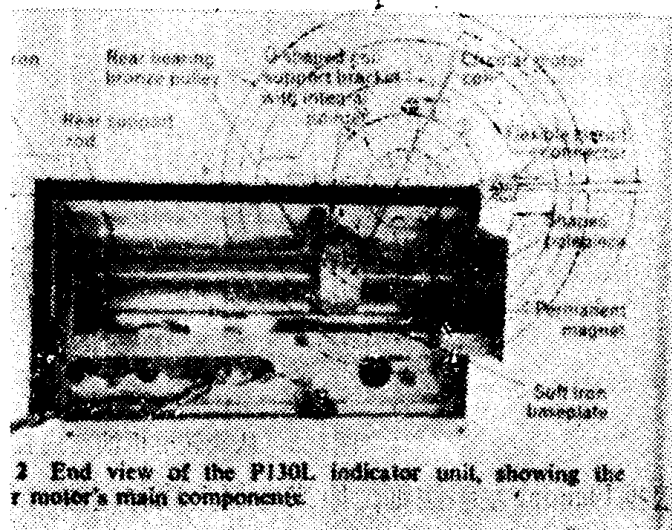


图 1-2

部采用了直线电机^[2]。此外，美国的Esterlaine Angus、法国的 Shlumberger、东德的 RFT以及苏联的ВИБРАТОР和ГСКБ ПЭА工厂都已成批地生产这类测量仪表用的微特直线电机^[3]。

在计算机领域中，几乎所有的微型计算机磁盘系统中的磁头驱动装置都采用了先进的微特直线电机^[4]。

在X-Y记录仪、平面绘图机上也已大量采用微特直线电机作为推动笔头的动力，如图1-3和1-4所示^[5]。

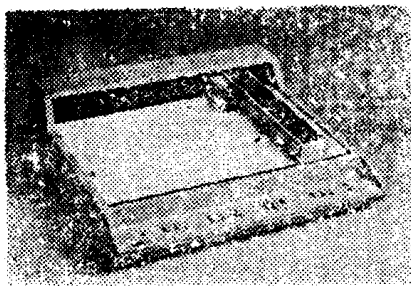
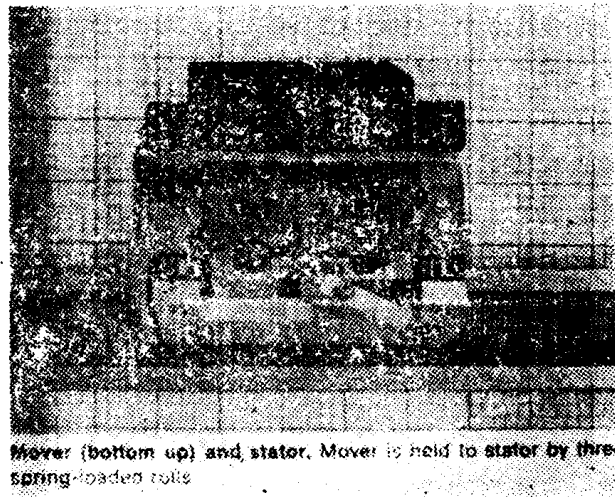


图 1-3



Mover (bottom up) and stator. Mover is held to stator by three spring-loaded rolls

图 1-4

§1-2 旋转电机演变为直线电机

直线电机可认为是旋转电机在结构方面的一种变形。它可看作是将一台旋转电机沿其径向剖开，然后拉平演变而成，如图1-5所示。

图1-5(a)是一台旋转式环形电枢绕组的直流电机。现沿电机径向切开，然后向两边拉开，展平成图1-5(b)所示。

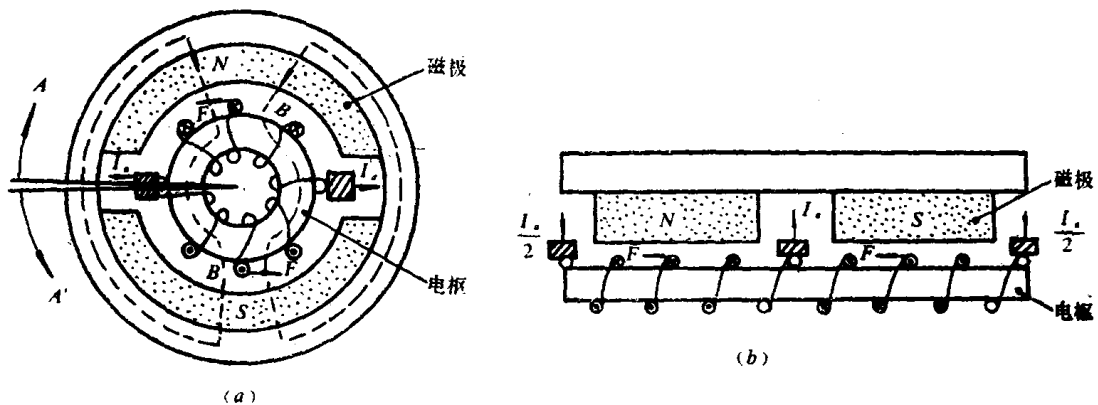


图1-5 从旋转电机演变成直线电机的过程

根据Flaming左手法则，原来电枢上载有电流的导体在磁场 B 中，会受到一个沿圆周切向的电磁力 F 。现在电机演变为图1-5(b)所示的结构后，这些力就变成水平推力，从而

使电枢产生直线运动。

如果磁极和电枢设计得一样长，当磁极和电枢作相对直线运动后，则它们相对着的部分逐渐减少，相对作用力也越来越小，以致最后消失。

为了使磁极和电枢之间能够在一定范围内保持恒定的相对作用和直线运动，就必须使电枢和磁极的长度不同。因此，就产生了所谓长电枢型或长磁极型直流直线电动机。图 1-6 所示的是长电枢型多极直流直线电动机。

图 1-6(a) 中磁场分布偏在电枢一边，称为单边型直流直线电动机（简称单边型）。图 1-6(b) 为双边型。

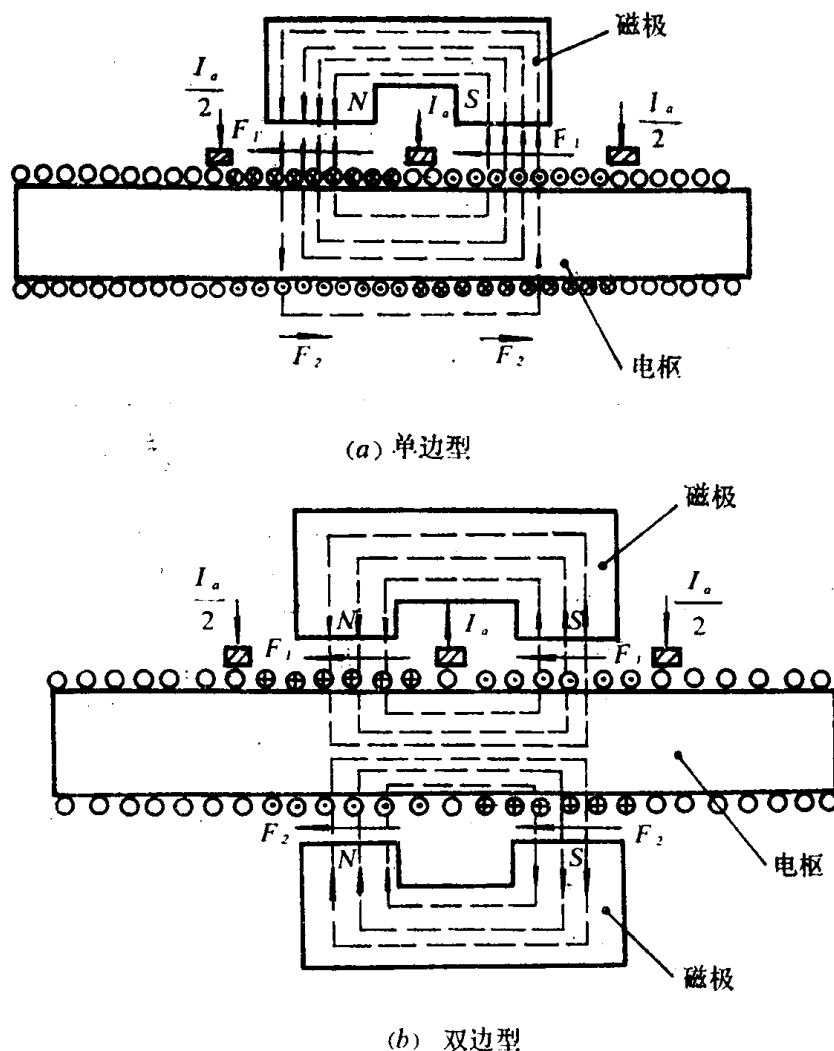


图 1-6 长电枢型多极直流直线电动机

单边型直线电机有两个缺点：

一、电枢在磁场中所受到的总推力为： $F = F_1 - F_2$ ，因为穿过电枢的那部分磁场和下面的那部分载流导体相互作用所产生的电磁力 F_2 的方向和力 F_1 相反。而双边型可做到电枢受到的总推力为： $F = F_1 + F_2 = 2F_1$ [参看图 1-6(b)]。

二、单边型由于磁场不对称，在磁极和电枢之间存在着很大的吸引力，称为单边磁拉力。其数值大约是推力的十倍左右，容易使轴弯曲变形。为了保证定、动子不相擦，要求

放大电机气隙，从而增加了激磁安匝和损耗，使电机性能恶化，并给电机的结构设计带来一定的麻烦。而双边型可做到使电枢和磁极之间不存在上述单边磁拉力。因此，实用的直流直线电机总是优先考虑采用类似双边型的磁对称结构系统。

如果把图1-6中的长电枢固定不动，磁极做成可以移动的型式，这台电机就称为长电枢动极型多极直流直线电机。图1-7所示的是长电枢动极型单极式直流直线电机。当然，也可做成动圈型单极式直流直线电机，如图1-8所示。

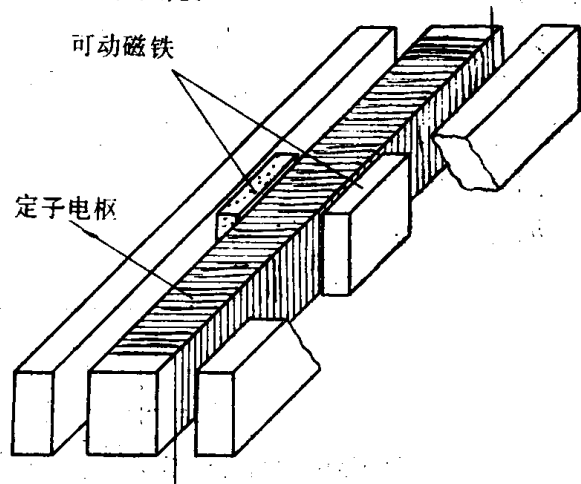


图1-7 动极型单极式直流直线电机

同样可设想把旋转式交流伺服电动机[见图1-9(a)]沿径向剖开，并将电机的圆周展开拉平，成为扁平型交流直线伺服电动机[见图1-9(b)]。这样，由原来定子演变而来的一侧，叫直线伺服电动机的初

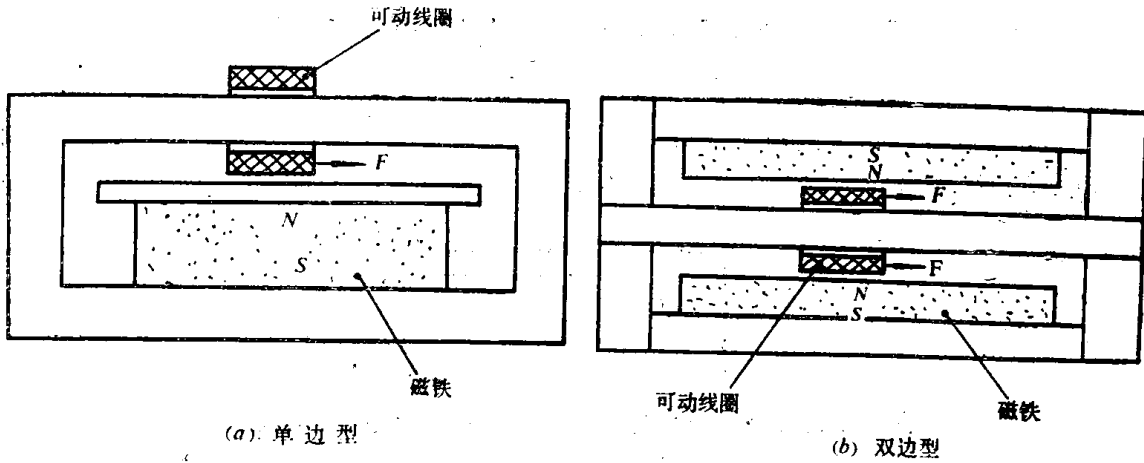


图1-8 动圈型单极式直流直线电机

级；由鼠笼式转子演变的一侧，叫做直线伺服电动机的次级。原来沿电机圆周空气隙旋转的旋转磁场，现在随着电机圆周的拉平而成直线后，变成了平移磁场。由此，电机也由旋转运动变成了直线运动。

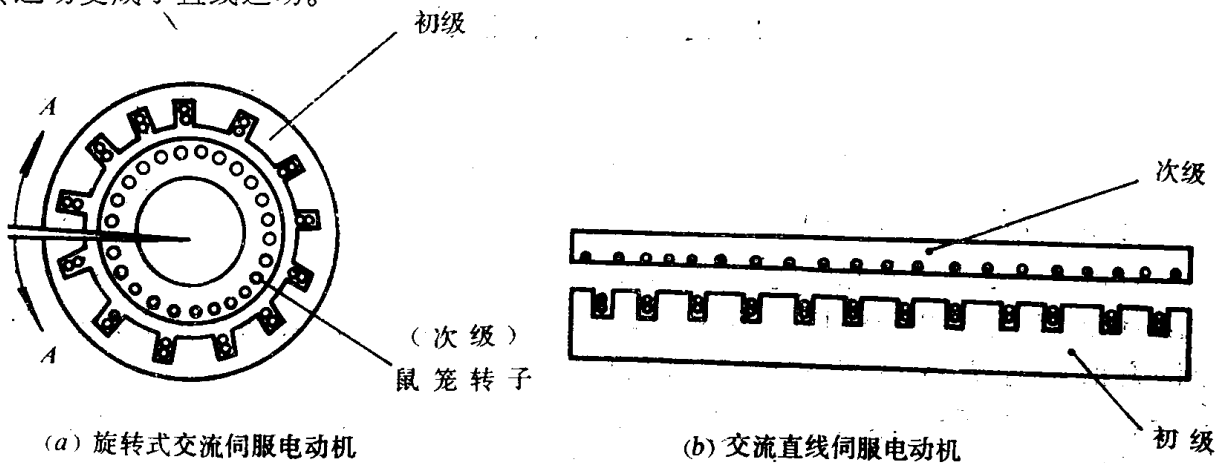


图1-9 旋转交流伺服电动机演变成直线电机的过程

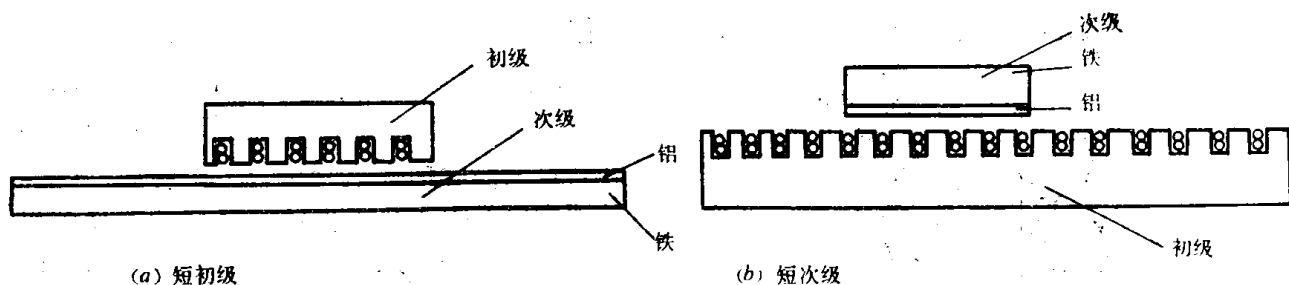


图1-10 单边型交流直线伺服电动机

同样，为了实现在一定范围内的直线运动，初级和次级也不能一样长。因此，出现了短初级型和短次级型的直线伺服电机，如图1-10所示。为了制造方便起见，采用了类似交流伺服电机杯形转子的结构形式，以铝片代替了鼠笼，把铝片贴在铁轭上作为次级。

为了消除初、次级之间的单边磁拉力，也为了减轻次级的重量，直线伺服电动机常做成双边型，如图1-11所示。

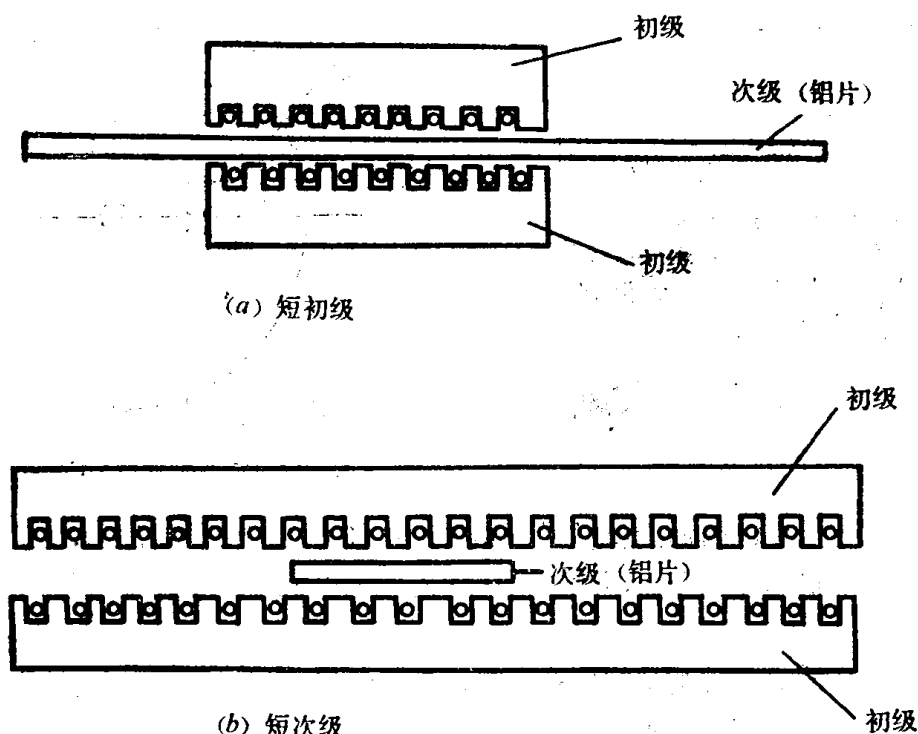


图1-11 双边型交流直线伺服电动机

除了上述扁平直线伺服电动机的结构型式外，直线伺服电动机也可做成圆筒型（或称为管形）结构。它是从旋转式感应电动机演变过来的，其演变过程如图1-12所示。图1-12(a)表示一台旋转式感应电动机定子绕组所构成的磁场极性分布情况。图1-12(b)表示转变为扁平型直线感应电动机后，初级绕组所产生的磁极极性分布情况。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圆筒形，这就变成图1-12(c)所示的圆筒型的直线感应电机。这种由旋转式交流感应电动机演变而来的交流直线伺服电动机有时也称为交流直线感应电动机。

此外，还可把次级做成一片铝圆盘或铜圆盘，并将初级放在次级圆盘靠近外缘的平面上，如图1-13所示。次级圆盘在初级移动磁场的作用下，形成感应电流，并与磁场相互作用，产生电磁力，使次级圆盘能绕其轴线作旋转运动。这就是圆盘型直线感应电动机的工作原理。

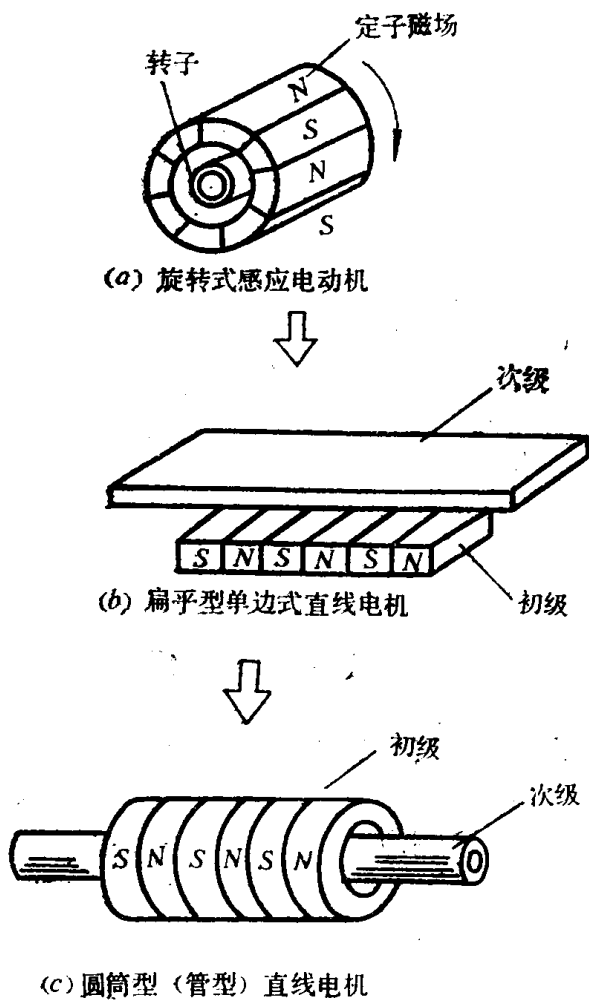


图1-12

圆盘型直线电动机和传统的旋转电机相比有如下几个优点：（1）设计和应用比较灵活，推力、速度可通过多个不同的初级块组合方式或通过调整初级块在圆盘上的径向位置来调节；（2）无需通过齿轮减

速，做到无接触传递力，因而无机噪声和振动；（3）可持续稳速运行；（4）维修方便。总之，直线电机的结构型式，比它对应的旋转式电机结构型式要多得多，从而便于灵活选用。

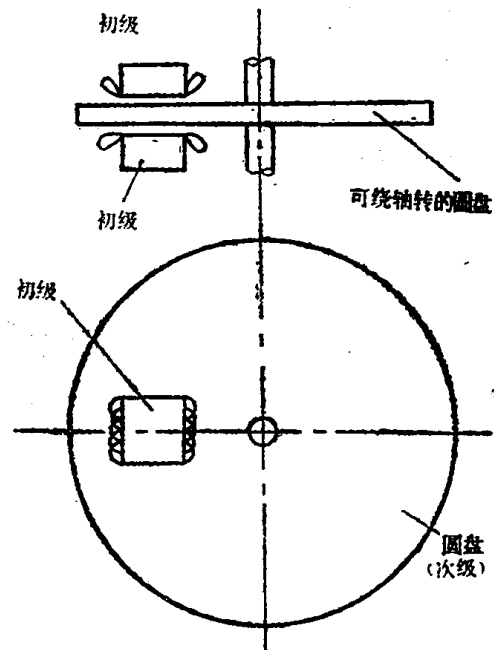


图1-13 圆盘型直线电机

速，做到无接触传递力，因而无机噪声和振动；（3）可持续稳速运行；（4）维修方便。

总之，直线电机的结构型式，比它对应的旋转式电机结构型式要多得多，从而便于灵活选用。

从原理上说，任何一种类型的旋转电机，都可通过上述演变过程转变成对应的直线电动机。这将在以后的章节里逐步介绍。

§1-3 直线电机的特点

电机结构上的改变必然会给电机性能带来一定的影响。现在以直线感应电动机为例概括地说明其特点。直线电机和旋转电机在结构上的主要区别是：直线电机初级铁芯沿磁场移动的方向是开断的，长度是有限的，不连续的。因而对移动磁场来说出现了一个“进入端”和一个“出口端”。这就形成了直线电机所特有的“边端效应”，使得电机的损耗增加，出力减小。此外，直线电机初、次级之间的气隙，由于机械结构刚度的限制和工艺水

平的影响，一般要比旋转电机的气隙大2~3倍。因而使直线电机的功率因数和效率大大降低，这是直线感应电动机的致命弱点。然而直线电机的优点是很多的，现叙述如下：

一、结构简单

在需要直线运动的地方，采用直线电机可实现直接传动，不需要一套把旋转运动转换成直线运动的中间转换机构。因而使机器设备总体结构大大简化，体积大大缩小。

二、反应速度快，灵敏度高，随动性好

微特直线电机容易做到无刷无接触运行。特别是采用悬浮技术以后，可以使电机可动部分（动子）悬浮起来。这样，动子在运动中毫无机械阻力，因而反应速度快，灵敏度高，随动性好。这是其它传统驱动装置无法竞争的优点。

三、容易密封，不怕污染，适应性强

由于直线电机本身结构简单，又可做到无接触运行，因此容易密封。各部件用尼龙浸渍后，再用环氧树脂加以涂封。这样，它就不怕风吹雨打，不怕有毒气体和化学药品的侵蚀，在核辐射和液态物质中也能使用。

四、工作稳定可靠，寿命长

直线电机是一种直接传动的特种电机，可实现无接触传递力，没有什么机械磨耗，故障少，几乎不需要维修，又不怕振动和冲击，因此稳定可靠，寿命长。

五、额定值高

直线电机冷却条件好，特别是长次级接近常温状态，因此线负荷和电流密度都可以取得很高。

六、有精密定位和自锁的能力

和控制线路相配合，可保证做到0.001mm的一级位移精度和自锁能力。可以和微处理机相结合，在不需要闭环控制系统的条件下，提供较精确和稳定的位置，并能控制速度和加速度。

各种微特直线电机的特性、优点和缺点，下面将在有关章节详细讨论。

§1-4 微特直线电机在控制系统中的作用

目前，国际市场上能买到的微特直线电机，绝大多数是和高档仪器设备配套引进的。这说明微特直线电机的设计和制造既要考虑到仪器设备的要求，又要考虑到控制系统的要求。现在就以自动化仪表中所用的直线电机为例来说明它们在系统中所起的作用。

在自动化仪表系统中，直线电机往往和运算放大器、测量桥路相结合组成自动平衡式的仪表系统，例如自动平衡记录仪、台式记录仪，它们都是用来测量并记录被测量随时间变化的过程。以热电偶作为测量元件的线路系统基本环节如图1-14所示。

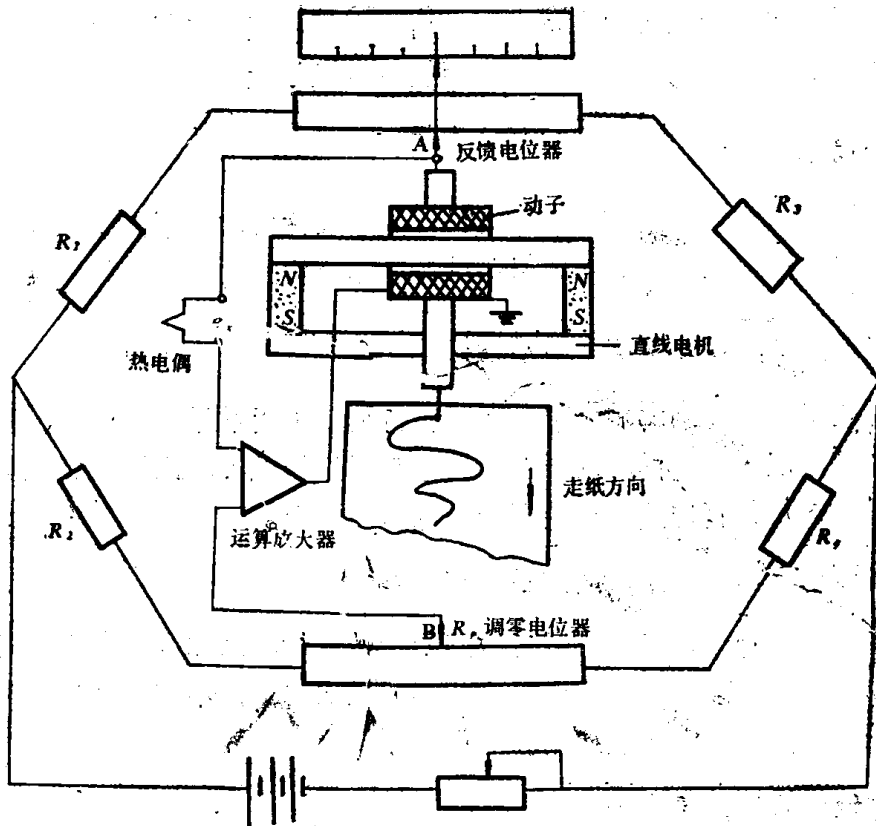


图1-14 自动平衡仪表系统基本环节

系统最初处在平衡状态下，电桥 A 、 B 之间没有电压输出。这时直线电机所带的指针或记录笔所处的位置为仪表的零位。此零位点的位置可通过改变调零电位器触点的位置来调整。当温度升高时，热电偶就会产生一个热电动势 e_x ，使得运算放大器获得一定的输入信号。经放大后，推动直线电机带动指针、笔和反馈电位器的触点作直线运动。笔可以在纸上记录温度变化的过程，同时触点在反馈电位器上滑动，运动到新的位置。当测量桥路输出电压和热电动势大小相等而方向相反时，运算放大器输入信号为零，系统处于新的平衡状态。显而易见，直线电机是一个重要的执行元件，在这些控制系统中充当着位置伺服机构的角色。

当然，在要求比较高的快速记录仪（例如电平记录仪）中，实际线路要比上述系统复杂一些。它大致可用图1-15所示的方框图来描述。当然其中基本的环节还是桥式平衡电路（作为比较电路）和运算放大器等。但为了减少直流放大器零点飘移，在直流伺服系统

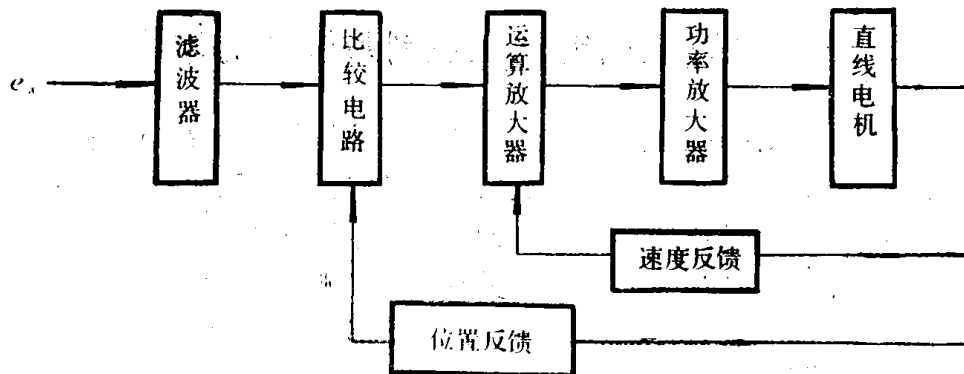


图1-15 快速记录仪直流伺服系统方框图

中，通常采用斩波型运算放大器。另外在反馈方面，除了保留动子位置反馈外，还增加了动子速度反馈来调节系统的阻尼比，以保证整个系统的快速、稳定、精密和准确。速度反馈环节常常用直线测速发电机来担任，例如象微型计算机磁盘磁头驱动装置用的直线测速发电机。可见，在这里微特直线电机又相当于一个测量元件或传感器。

§1-5 微特直线电机的主要类型和典型结构

目前已广泛使用的微特直线电机主要有如下几种类型：

一、直流直线伺服电动机

按激磁来源可分为永磁式和电磁式两类；按动子结构可分为动圈式和动极式两种。

典型结构：除了§1-2节中介绍过的型式外，还有如图1-16所示的典型磁路结构。

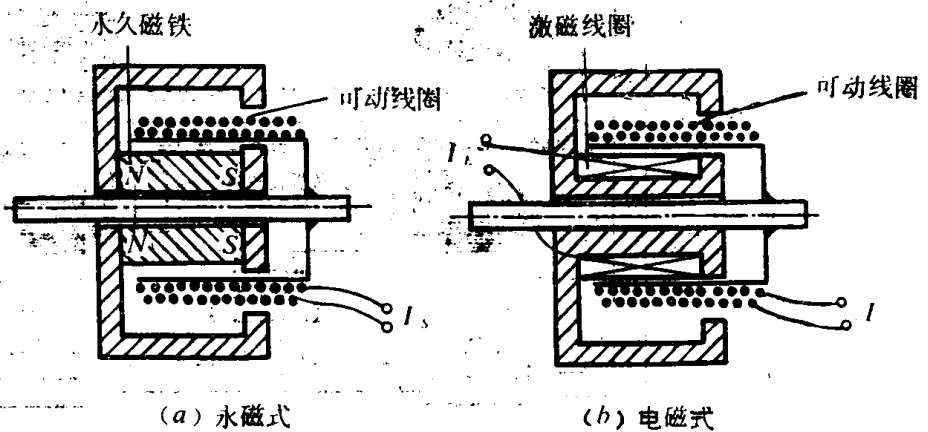


图1-16. 直流直线伺服电动机的典型磁路结构

二、直线步进电动机

按作用原理可分为变磁阻式和混合式两种，典型的磁路结构型式如图1-17所示。

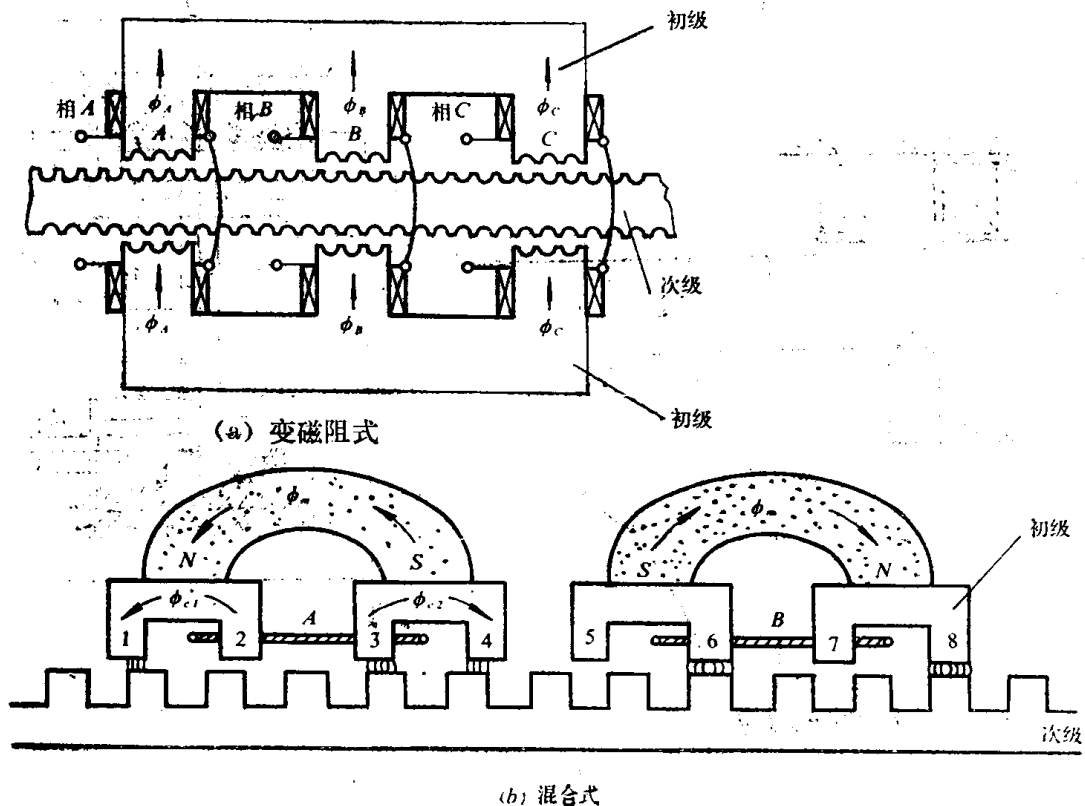


图1-17 直线步进电动机的典型磁路结构

三、交流直线感应伺服电动机（力电机）

典型结构如§1-2节所示。

四、直线电磁悬浮电动机（电磁轴承）

按浮力性质可分为吸引型和排斥型两类。

由于单位输入功率产生的悬浮力，吸引型比排斥型大得多，因此吸引型悬浮电机在应用中比排斥型多得多。本书着重介绍吸引型直线悬浮电机。吸引型悬浮电机又可分为直流可控型和交流感应悬浮型两种，其典型结构如图1-18所示。

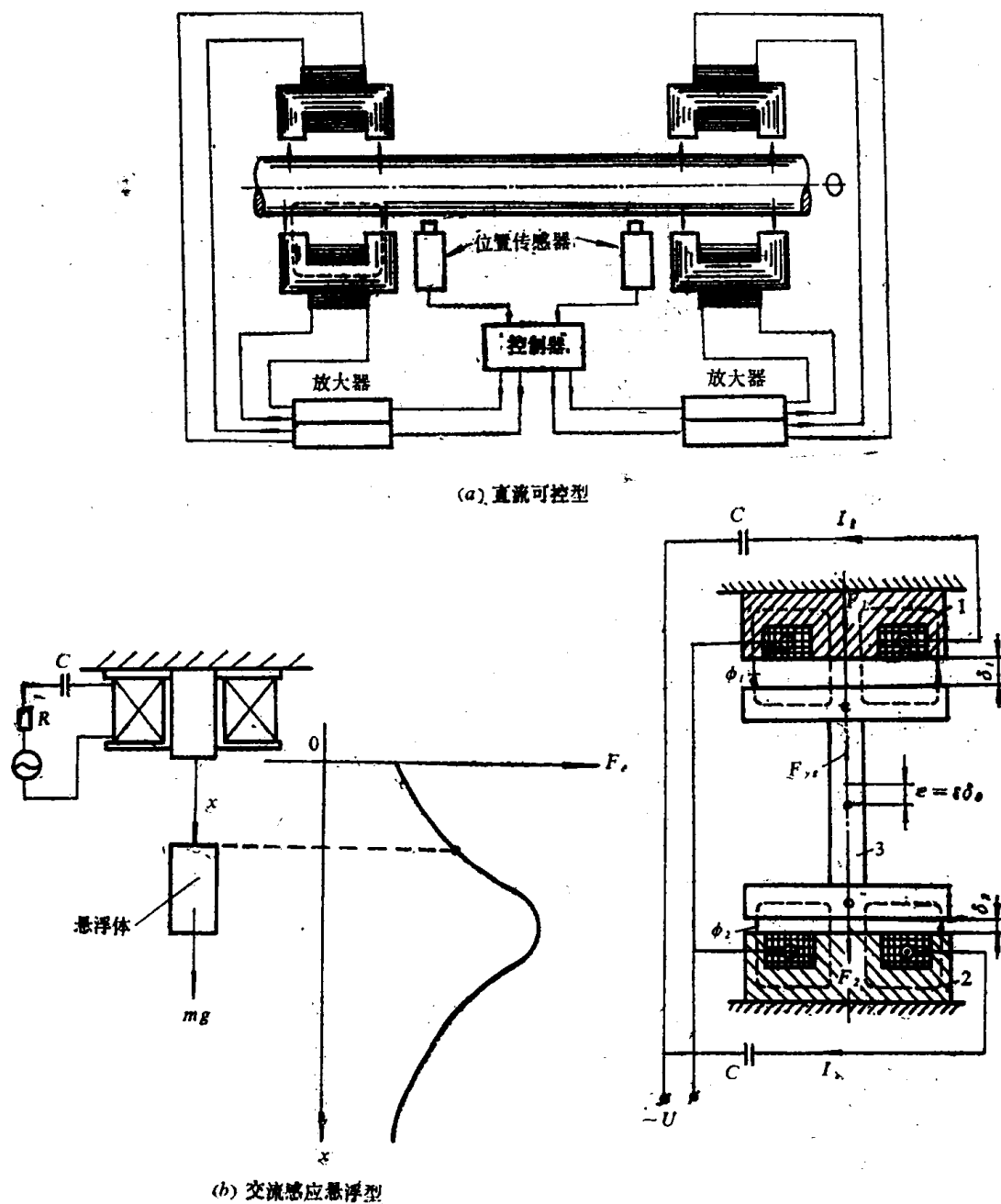


图1-18 直线悬浮电机(电磁轴承)

五、直线振荡电动机

目前已经形成产品的直线振荡电动机大多数为同步直线振荡电动机。其激磁方式有单激磁式（磁阻式）、永磁式和双激磁式（电磁式）三种。其典型结构如图1-19所示。

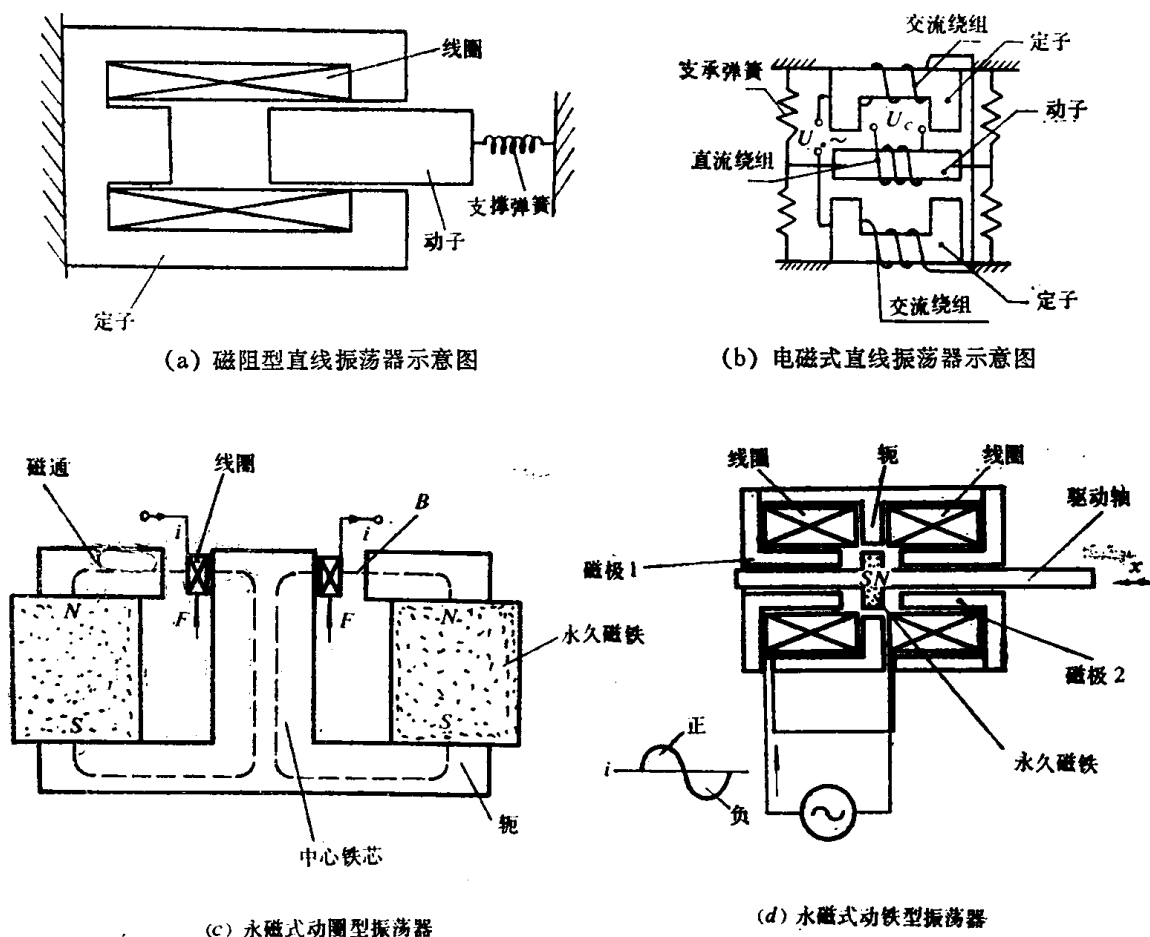


图1-19 直线振荡电动机的典型结构

从上述各种微特直线电机的典型磁路结构中可看到：微特直线电机大多数都采用永久磁铁作为直流激磁源。

永磁式电机的特点是：

1. 没有直流激磁绕组和对应的铜损耗，从而节省了激磁绕组所用的铜；减少了电机的体积和重量；效率和成本等技术经济指标都将得到提高。此外，电机动子采用了永久磁铁，可使电机易于实现无刷、无接触运行，从而增加了电机运行的可靠性。因此，在微特直线电机中广泛地采用了永磁式结构。

2. 永磁式电机和电磁式电机在磁路设计和计算方面有很大的区别。永磁式电机的性能在很大程度上决定于所选用的永磁材料和它对应磁路结构的设计。分析计算也较特殊，详见下章分析。

参 考 文 献

- [1] Lock J. 1977. Miniaturized Linear Motor Recorders. Processing, No 10
- [2] Brüel & Kjaer. 1981. Instruction Manual. Portable Graphic Level Recorder Type 2306
- [3] ТЕР-МАРТНРОСЯН М Г, ХОДЖАЯНЦ Ю М, ИНЖ САФАРЯН А А. 1977. ЛИНЕЙНЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ, №11 Р38
- [4] Minoru Fujino, Junshiro Sugihara, Seiya Ogawa. 1985. Magnetic Disk Storage. FUJITSU Scientific & Technical Journal, Vol. 21, No4 P395
- [5] Fenoglio J A, Chin B W, Cobb T R. 1979. A High-Quality Digital X-Y Plotter Designed for Reliability, Flexibility and Low Cost. Hewlett-Packard Journal, February