

工业用直线电动机

〔日〕山田一 著

薄荣志 译 沙震亚 校

新 时 代 出 版 社

工业用直线电动机

〔日〕 山田一 著

薄 荣 志 译

沙 震 亚 校

新 时 代 出 版 社

内 容 简 介

直线电动机是国外近年来获得迅速发展的由电能转换成直线运动机械能的具有独特性能的一种新型电动机。与其它类型电动机相比,它具有速度快、直接直线传动、结构简单可靠、效率高和成本低等优点,已在交通、冶金、运输等领域,及传送装置、绘图-记录装置、民用电器、仪器设备、红外系统上获得了广泛的应用。

本书介绍了国际上所研制使用的各种类型的直线电动机。系统地介绍了各种类直线电动机的发展历史、工作原理、结构特点、运行特性、基本特性公式以及国际上的应用情况,并提供了设计公式、数据和图表。内容丰富通俗易懂。

本书可供从事电机、交通运输、冶金、自动控制、仪器仪表、宇航和航空工程、机器人工程、环卫和轻工机械等方面工作的科技人员阅读,也可供高等院校相应专业的师生参考。

産業用リニアモータ

山 田 一

(日) 工业调查会

*

工业用直线电动机

(日) 山田一 著

薄 荣 志 译

沙 震 亚 校

责任编辑 米德友

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 8.625印张 186千字

1986年12月第1版 1986年12月北京第1次印刷

印数: 0,001—3,600册

统一书号: 15241·75 定价: 1.80元

前 言

最近，日本国有铁路等单位正在实验的磁浮列车即直线电动机车（Linear Motor Car）成为社会话题以来，学术界和工业界对直线电动机的工作越来越重视。从世界范围来看也有各种各样的直线电动机被研制出来并已在使用的。

自从笔者编著的《直线电动机及其应用技术》出版以来，已四年多了，在此期间有幸与学术界和工业界的研究人员及技术人员亲密地接触，得以交流直线电动机方面的国内外资料，并得到读者们的支持，使这方面的内容逐渐丰富起来。至此笔者感到有必要将迄今为止的有关资料、数据介绍给读者以便了解电动机的研制动向。

本书叙述的直线电动机是将《自动化技术（工业调查会刊物）》上连载（1979年4月～1980年11月）过的原稿作了些修改并补充一些全面反映国内外工业用直线电动机的最新资料编写成的。其中包括一些本研究室公开发表的或未曾公开发表的资料。

写本书时笔者注意了以下几点：

1）考虑到从事直线电动机的研究和开发工作的技术人员并不都是从事电气专业的人员，更多的却是机械方面的专业人员，因此，书中力求做到使读者均能初步掌握各种直线电动机工作原理的本质，

2）就工作原理而言，有些省去了公式的具体推导，仅

记述其结果。为使读者便于查找有关原著，在相应的脚注上尽可能详细地注明了有关文献。

3) 在本书内容上力求不重复我前著《直线电动机及其应用技术》的内容。在前著中已经叙述的型号本书不再介绍。另外在内容安排上考虑了使读者能够根据自己的兴趣任选有关章节阅读，不一定按章节顺序阅读；

4) 本书采用了 SI 单位（国际单位）制。为使读者便于熟悉 SI 单位制，其中列举了许多例题。

在此，谨向为本书提供许多宝贵数据资料的各界前辈和各位同行以及本研究室的成员，特别是丸山利喜、祖川憲司、山本智夫等三位深表谢意。此外，向为出版本书而尽力的以新谷滋记、古内正行二位为首的工业调查会各位一一表示谢意。

山 田 一

目 录

符号表	1
一、直线电动机及其它	5
1.1 直线电动机失败的历史	5
1.2 直线电动机的分类	6
1.3 直线电动机的发展历史	7
1.3.1 孕育阶段(1886~1929年)	7
1.3.2 实验阶段(1930~1940年)	8
1.3.3 开发阶段(1945~1969年)	9
1.3.4 实用阶段(1970年~至今)	9
1.4 日本直线电动机的进出口动态	10
二、直线直流电动机	13
2.1 直线直流电动机的基础	13
2.1.1 直线直流电动机的工作原理	13
2.1.2 直线直流电动机的传递函数	16
2.2 动圈式直线直流电动机	19
2.2.1 电子缝纫机用直线直流电动机	19
2.2.2 在读取针织机图案方面的应用	28
2.2.3 获得长行程的永磁体排列法	34
2.2.4 无接触式位移计	36
2.2.5 在笔式记录仪、指示器上的应用	44
2.2.6 磁头定位电动机与稀土类永磁体	48
2.2.7 条形码读出器	56
2.2.8 X-Y工作台	56
2.3 动磁式直线直流电动机	58
2.3.1 直线跟踪臂	58

2.3.2 在打印机上的应用	64
----------------------	----

三、直线感应电动机

3.1 涡流的作用	66
3.1.1 何谓涡流	66
3.1.2 磁通的渗透深度	67
3.2 直线感应电动机的基础	68
3.2.1 直线感应电动机的工作原理	68
3.2.2 直线感应电动机的基本特性	71
3.2.3 边缘效应	75
3.2.4 直线感应电动机的特征	76
3.3 平板形单边式直线感应电动机	77
3.3.1 自动搬运装置	77
3.3.2 汽车冲击试验装置	80
3.3.3 使用磁流体的波动发生装置	84
3.3.4 减少水中运动体流体阻力的装置	86
3.3.5 用于生产线上的变频型低速, 大推力直线电动机	87
3.3.6 回收有色金属方面的应用	91
3.3.7 具有磁通通路的单边式直线电动机	101
3.3.8 电洗衣机	102
3.3.9 电干燥机	105
3.3.10 螺旋压力机的设计	105
3.3.11 栅形直线电动机	108
3.3.12 平面直线电动机	112
3.3.13 其它单边式直线感应电动机	112
3.4 平板形双边式直线感应电动机	113
3.4.1 电梯上的应用	113
3.4.2 带锯	115
3.4.3 次级导体为链式的传送带装置	118
3.4.4 电动缝纫机上的应用	119
3.4.5 双边式两相电动机的价格/推力比特性	122
3.4.6 具有变速运行特性的混合式下线法	124
3.4.7 平板形多层次级导体	124
3.4.8 机械鱼上的应用	126
3.4.9 转盘的超同步驱动法	128

3.4.10 其它双边式直线电动机	131
3.5 圆筒形直线感应电动机	132
3.5.1 圆筒形直线感应电动机的特性举例	132
3.5.2 直线打桩机	134
3.5.3 方形直线感应电动机	136
3.5.4 直线感应电动机的特性解析	137
3.5.5 其它圆筒形直线感应电动机	140
四、直线脉冲电动机	141
4.1 直线脉冲电动机的基础	141
4.1.1 直线脉冲电动机	141
4.1.2 磁动力	142
4.1.3 在磁场控制下磁性体的运动状态	144
4.1.4 直线脉冲电动机的工作原理	147
4.2 直线脉冲电动机的推力解析	151
4.2.1 用导磁率(permeance)表示的推力公式	151
4.2.2 用磁通分布表示的推力公式	154
4.2.3 试制的直线脉冲电动机的结构与规格	156
4.2.4 实测结果	160
4.3 计算机终端设备用平板形直线脉冲电动机	162
4.3.1 FLPM的结构与特性	162
4.3.2 FLPM的特性值	164
4.3.3 绘图机	167
4.3.4 永磁体悬浮式直线脉冲电动机	175
4.3.5 直线脉冲电动机的驱动电路	178
4.4 圆筒形直线脉冲电动机	181
4.4.1 圆筒形直线脉冲电动机的基本特性	181
4.4.2 软塑料磁盘用CLPM	186
五、直线振动驱动器	189
5.1 直线振动驱动器	189
5.2 动圈式直线振动驱动器	190
5.3 动铁芯式直线振动驱动器	190
5.3.1 空气压缩机	190
5.3.2 直线振动驱动器的工作解析	195

5.3.3 有限元法推力计算举例	205
5.3.4 电磁快门	207
5.4 动磁式直线振动驱动器	208
5.4.1 触觉模拟器	208
5.4.2 直线泵	210
六、直流螺线管	213
6.1 直流螺线管的基础	213
6.1.1 直流螺线管	213
6.1.2 直流螺线管的工作原理	214
6.1.3 推力的一般表达式	215
6.1.4 柱塞式螺线管的推力/输入比特性	219
6.1.5 直流螺线管的应用举例	221
6.2 无响声螺线管	223
6.2.1 无响声螺线管的结构	223
6.2.2 无响声螺线管的推力/输入比特性	224
6.3 位置保持式螺线管	225
6.3.1 永磁保持式螺线管	225
6.3.2 辅助线圈位置保持式螺线管	226
6.4 双向螺线管	228
6.4.1 辅助动铁芯式螺线管	228
6.4.2 永磁式双向螺线管	229
6.5 直线多级螺线管	230
6.5.1 数字式位移螺线管	230
6.5.2 直线数字式多级螺线管 LDA 的工作原理	231
6.6 直线电磁锤	234
七、MHD泵	236
7.1 何谓 MHD泵?	236
7.1.1 MHD泵	236
7.1.2 感应式MHD泵的分类	236
7.2 利用感应式 MHD 的自动铸造系统	238
7.2.1 感应式MHD泵	238
7.2.2 自动铸造系统	240

7.3 管形MHD泵	241
7.3.1 管形MHD泵的结构	241
7.3.2 实验结果	243
7.4 旋转感应电动机、直线感应电动机和液 态金属MHD泵的比较	244
7.5 MHD在推进船上的应用	246
八、直线混合式电动机	248
8.1 何谓直线混合式电动机?	248
8.2 电唱机上的应用	248
8.2.1 DD(直接驱动)方式电唱机	248
8.2.2 用直载混合式电动机驱动唱盘	250
8.2.3 唱盘的转速控制	252
8.3 定位用直线混合式电动机	254
九、其它直线电动机	256
9.1 磁浮列车的研制现状	256
9.2 直线感应式传感器	257
9.3 直线同步机 (Linear Synchro)	258
附录 I 工业用直线电动机的特性值	259
附录 II 国际单位 (SI单位)	260

符 号 表

a :	齿宽[m]
	加速度[m/s ²]
A :	面积[m ²]
A_0 :	矢位[Wb/m]
B :	磁通密度[T]
B_m :	最大磁通密度[T]
B_r :	剩余磁通密度[T]
c :	价格[¥](cost)
C :	弹簧系数[N/m]
	系数
	电容量[F]
d :	槽深[m]
	直径[m]
D :	密度[kg/m ³]
E :	电压[V]
E_c :	控制电压[V]
f :	频率[Hz]
f_n :	固有频率[Hz]
f_s :	自起动频率[pps]
F :	推力[N]
F_d :	动推力[N]
F_f :	摩擦力[N]

- F_s : 保持力[N]
 F_m : 最大推力[N]
 F_s : 起动推力[N]
 g : 气隙长度[m]
 $g_e = K_e g$: 有效气隙长度[m]
 $G = 2\mu_0 \tau^2 f / \pi \rho_r g_e$: 品质因数
 h : 高度[m]
 H : 磁场强度[A/m]
 H_e : 矫顽力[A/m]
 I : 电流[A]
 J : 惯性矩[kg·m²]
 电流密度[A/m²]
 J_s : 定子表面电流[A/m²]
 k : 系数
 K : 增益
 K_e : 卡氏系数
 l : 长度[m]
 L : 自感[H]
 长度[m]
 L_s : 行程[m]
 m : 动体质量[kg]
 M : 质量[kg]
 互感[H]
 n : 往复速度[s⁻¹]
 N : 匝数[匝]
 转速[rpm]
 p : 磁导系数

磁极对数

P : 磁导〔H〕

压力〔Pa〕

视在功率〔VA〕

P_e : 有效功率〔W〕

q : 槽宽〔m〕

Q : 流量〔m³/s〕

r : 半径〔m〕

R : 电阻〔Ω〕

R_m : 磁阻〔H⁻¹〕

s : 拉普拉斯算子

t : 时间〔s〕

厚度〔m〕

T : 时间常数〔s〕

周期〔s〕

转矩〔N·m〕

T_m : 机械时间常数〔s〕

v : 速度〔m/s〕

v_{∞} : 最终速度〔m/s〕

$v_s = 2\pi f$: 同步速度〔m/s〕

V : 体积〔L〕(立升)〔m³〕

V_m : 电压峰值〔V〕

V_o : 输出电压〔V〕

w : 宽度〔m〕

W : 能量〔J〕

W_m : 磁能〔J〕

x : 位移〔m〕

y : y 轴距离[m]

z : z 轴距离[m]

Z : 阻抗[Ω]

β : 系数

$\delta = \sqrt{2 / \mu \sigma \omega}$: 磁通渗透深度[m]

Δ : 偏移[m]

ε : 误差

ζ : 衰减系数

η : 效率

θ : 角度[$^\circ$]

μ : 导磁率[H/m]

摩擦系数[N·s/m]

μ_r : 比导磁率

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$: 真空中导磁率[H/m]

ρ : 电阻率[$\Omega \cdot m$]

$\rho_r = \rho / t$: 表面电阻[Ω]

σ : 导电率[S/m]

τ : 极距[m]

步距[m]

ϕ : 磁通[Wb]

φ : 相位差[rad]

$\psi = N\phi$: 磁链[Wb]

$\omega = 2\pi f$: 角频率[rad/s]

ω_n : 固有角频率[rad/s]

一、直线电动机及其它

1.1 直线电动机失败的历史

在日本，不少人一提直线电动机就会立刻想到直线电动机车（磁浮列车）。如果有人说他是在研究直线电动机，往往被认为研究磁浮列车上用的那种直线电动机。这并不奇怪，直线电动机的全面研究和开发工作，就是由于磁浮列车的研究而受到人们重视，为众人所知的。但是直线电动机并非只有用于磁浮列车的一种，目前已发展到许多种。

世界上出现旋转电动机后不久，就出现了直线电动机的雏型。据报道[●]，惠特斯頓（Wheat-stone）于1845年最早提出了直线电动机的方案。这种直线电动机由于气隙过大而“效率很低”，结果未能获得成功。这已是135年前的事了。

旋转电动机和直线电动机作为驱动装置，前者发展迅速并得到广泛的应用，后者却没有得到应有的发展。

旋转电动机理应多用于旋转运动领域，直线电动机则应多用于直线运动领域，可是大部分直线运动领域至今仍采用旋转电动机，却很少采用直线电动机。

可是，旋转电动机有它的缺点，将来直线电动机一定会有很大的发展，特别是在直线运动领域里将发挥直线电动机特有的作用并取代旋转电动机。

● E. R. Laitwaite, Electrical Review, Vol.202, No.2 pp.42~43 (1978).

1.2 直线电动机的分类

众所周知,所谓直线电动机(linear motor)就是将旋转电动机的定子和转子以及气隙展开成直线状,使电能直接转换成直线机械运动的一种推力装置的总称。

上述把旋转电动机切开展直的说法是不严格的,如果将已有的旋转电动机展开成直线形状可得到上百个直线电动机。约在十年前,直线电动机一般只限于直线感应电动机和直线同步电动机,现在已研究出各种各样的直线电动机。

直线电动机的分类法也许有几种,但这里笔者按直线电动机的名称、电磁力、定子(初级)和动体(次级)的结构来分类(见表1.1)即有直线直流电动机、直线感应电动机、直线脉冲电动机、直线振动驱动器、直线直流螺线管、MHD●泵和直线混合式电动机。

表1.1 直线电动机的分类

名 称	电磁力	结 构	
		定子(初级)	动体(次级)
直线直流电动机	电磁力	平板形(单边式、双边式) 圆筒形	方形 圆筒形
直线感应电动机	电动机	平板形(单边式、双边式) 圆筒形	均匀形、分割形、栅形、均匀形
直线脉冲电动机	磁动力	平板形(单边式、双边式) 圆筒形	格子形、竹帘子形螺旋形、环形
直线振动驱动器	磁动力	圆筒形、方形	均匀形、复合形
直线直流螺线管	磁动力	圆筒形	均匀形
MHD 泵	MHD力	管形	管形
直线混合式电动机	电磁力	弧形、圆筒形	圆盘形、管形

● MHD泵(磁流泵)也就是指通常的液体金属电磁泵。——校者

表 1.1 的详细说明放在各章内，这里从略。本书将按表 1.1 所列顺序叙述。

1.3 直线电动机的发展历史

迄今为止，人们为了从电能直接获得直线运动做出了各种努力。这里我们将根据日本特许厅出版[●]的，有关美国专利情报 (U.S Patent) 探讨直线电动机的变迁与发展。

旋转型直流电动机在十九世纪中期已进入实用阶段，到了二十世纪初已得到广泛应用。

当时，从电能直接获得直线运动是非常困难的，因此，只好将电能变成旋转运动后利用辅助机构再把它转换成直线运动。加上当时还不能用电的方法来产生运动磁场[●]，因此利用交流电来驱动电动机也是极其困难的事情。可以说当时是直流电动机的全盛时期。即使在这种情况下也作过利用直流电磁铁的吸引力和排斥力由电能直接获得直线运动的尝试。

从广义的观点看直线电动机，最基本的发明就是直流电磁铁型装置即直流螺线管。

根据图 1.1 所示有关美国直线电动机专利的年度公布件数的变化，可分如下三阶段来探讨直线电动机的发展历史。

1.3.1 孕育阶段 (1886~1929年)

在这个阶段，尼克拉忒斯拉 (N. Tesla) 发明了一系列运动磁场方面的技术，以此为契机开始了对直线电动机的研究工作。值得注意的是，在这称为孕育阶段的时期内，不仅

● 特许厅编：特許かう見た技術動向 (1) ニアモータ技術編)，日本特許情報センター (昭50年4月)。

● 通常电机学中所说的旋转磁场。——校者