

中国科学院力学研究所 电磁泵小组 编著
上海电器科学研究所

液态金属电磁泵

科学出版社

内 容 简 介

液态金属电磁泵是一种输送导电流体的装置,它具有密封、可靠、结构简单等优点,在化工、冶金、原子能动力、空间技术等方面都有一定应用。本书总结了国内这方面的研制成果和经验。书中重点介绍了传导式电磁泵和感应式电磁泵的工作原理、测试技术和工艺材料。可供从事液态金属电磁泵的科技人员参考。

液 态 金 属 电 磁 泵

中国科学院力学研究所 电磁泵小组 编著
上海电器科学研究所

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

石家庄地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 9 月 第 一 版	开本: 787×1092 1/32
1979 年 9 月 第 一 次 印 刷	印张: 5 1/4
印数: 0001—7,140	字数: 115,000

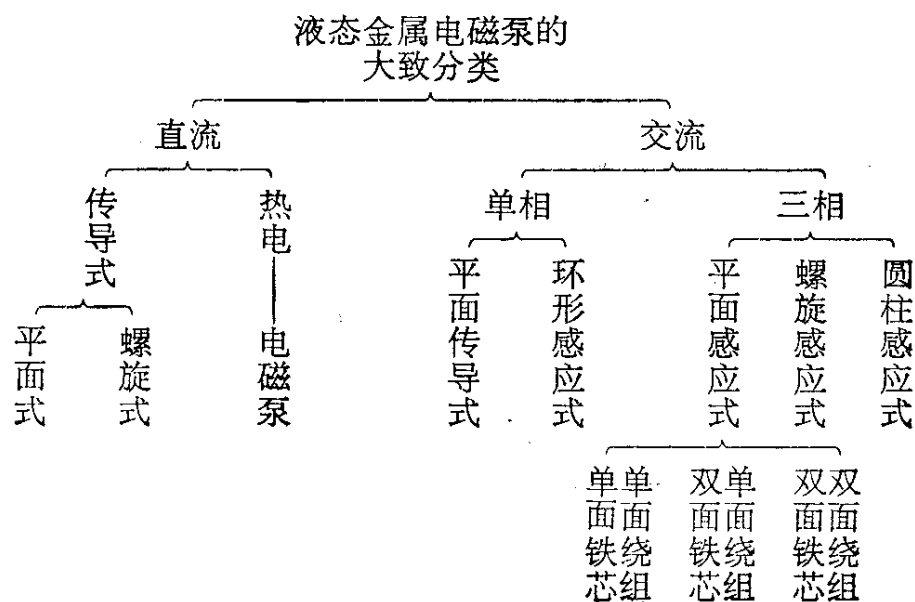
统一书号: 15091·250

本社书号: 1527·15—6

定 价: 0.65 元

序 言

电磁泵是一种输送导电流体的装置，在实际应用中大多用于输送液态金属，所以称做液态金属电磁泵，简称电磁泵。它利用液态金属中的电流（外加或感应的）和磁场的作用，把电磁推动力直接加在液态金属上。由于省去了机械转动部件，因而具有结构简单可靠、完全密封、噪音小等优点，缺点是效率较低。对于输送轻金属的电磁泵，在现有的技术条件和流量范围下不超过 50%（一般讲来，效率和流量有关，流量大的，效率要高一些，如流量 $Q=108$ 米³/小时，效率 $\eta=25\%$ ，而 $Q=750$ 米³/小时 时，则效率达 $\eta=43\%$ ），当流量较小时效率也随之降低。根据被输送介质所要求的压差、流量的不同，工作环境及性质的差异，电磁泵发展成多种型式，各有不同适用的工作范围和工作特点。按电源类型、结构形式等的不同，大致可分成：



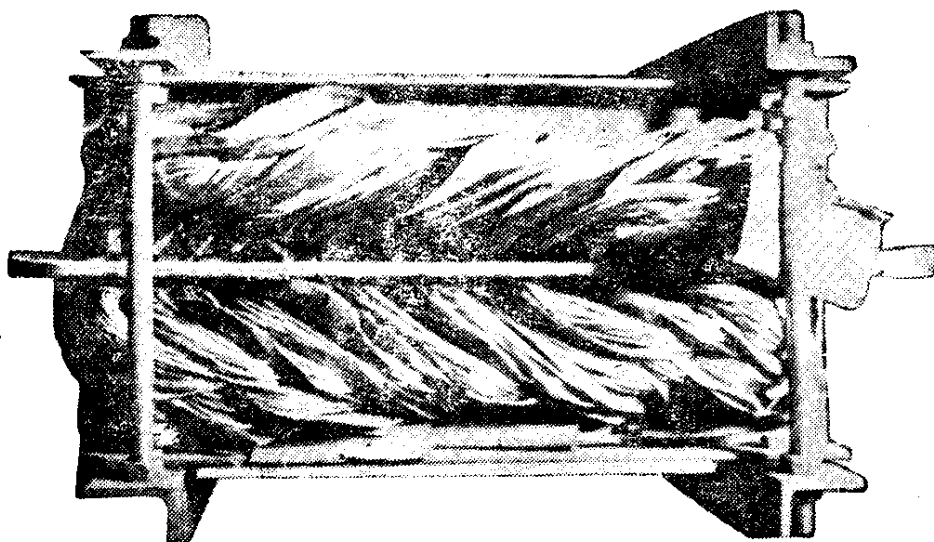


图1 平面感应式电磁泵

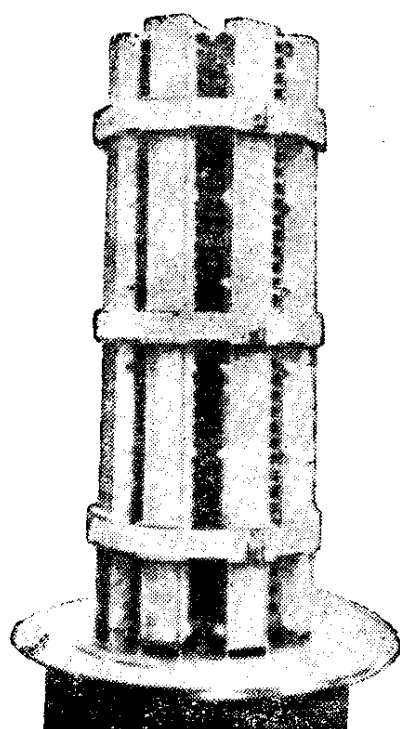


图2 圆柱感应式电磁泵

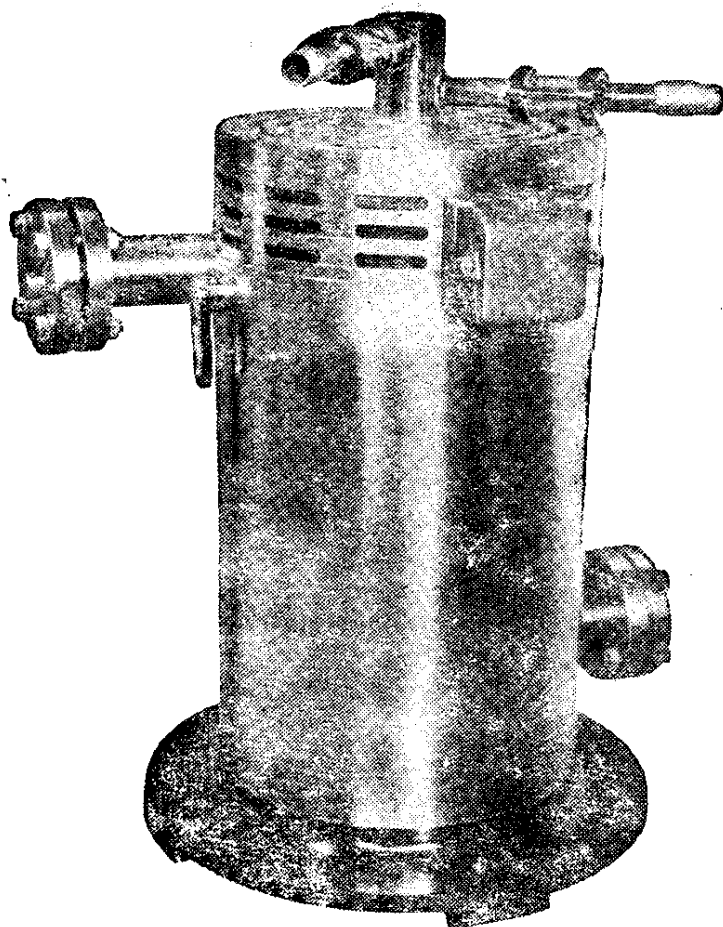


图 3 螺旋感应式电磁泵

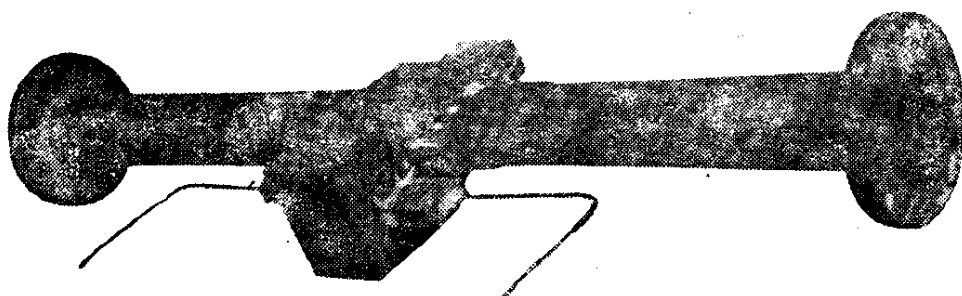


图 4 传导式直流平面泵

一般说来,交流感应式电磁泵使用比较简单,不需专用直流电源,也可避免传导泵的电极材料和结构问题,但效率较低。传导泵一般效率较高,且因所需电压较低(1 伏左右),所以高温下绝缘较易解决,但需有一大电流、低电压的直流电源;电极材料以及泵沟的连结也比较复杂。因此在某些工业

• v •

部门,如冶金、铸造工业中,由于工作条件比较苛刻,工作环境也比较差,故要求电磁泵的结构简单,工作可靠,因而大部分都采用感应式平面泵(单面绕组或双面绕组)。各种类型的电磁泵有不同适用的工作范围,一般讲,圆柱式电磁泵适用于大流量、低压差,螺旋式电磁泵适用于小流量、高压差,而平面式电磁泵则居于中间范围。

原子能动力工业的发展,特别是快中子反应堆的发展促进了电磁泵的研究和应用。目前在国内外,电磁泵广泛用于原子能动力液态金属回路的各种辅助系统及热工和材料试验装置中。对于一些实验性反应堆以及空间动力反应堆,电磁泵也用于液态金属的主要回路中,如英国的唐纳原子能反应堆和法国的热泊沙弟屋(Rapsodio)原子能反应堆。

国外一些三相感应泵指标

特 性	泵 型								
	螺 旋 型								
被输送的液态金属	钠	钾	钾	钾	汞	钠	铅	钠	钠
温 度 t ($^{\circ}\text{C}$)	260	1200	1000	650	50	400	550	650	450
流 量 Q (米 ³ /小时)	91.08	0.72	45.36	3.6	2.9	252	1.08	30	0.108
压 差 (公斤/厘米 ²)	2.8	5.3	1.4	7.0	20	5	2.5	5	6
效 率 η (%)	15	1	6	14	9	38	1	23	2.2
泵 重 (公斤)	450	260	680	48	300	500	300	300	100
重量功率比(公斤/千瓦)	650	2650	390	75	184	15	1200	74	120

特 性	泵 型							
	平 面 型						圆 柱 型	
被输送的液态金属	钠-钾	汞	铟-镓	钠-钾	钠-钾	钠	钾	钠
温 度 t ($^{\circ}\text{C}$)	260	100	80	310	330	315	400	400
流 量 Q (米 ³ /小时)	25.2	20.2	0.0144	34	500	748.8	10	45
压 差 (公斤/厘米 ²)	7	3	0.5	5.2	5	6.0	6.5	6.0
效 率 η (%)	21	12	0.1	22	30	43	19	29
泵 重 (公斤)	400	300	15	670	4120	5200	330	650
重量功率比(公斤/千瓦)	88	184	750	140	130	42	188	90

在冶金、铸造工业中,国外虽早在1947年就曾尝试应用电磁泵来实现熔融铝的自动定量浇注,但由于工艺技术和材料问题没有解决,所以迟迟没有进展.近年来随着新型、高效铸造机械,如压铸机,和高速自动造型线在冶金、铸造生产中的广泛应用,使熔融金属的输送、计量、浇注的自动化、高速化成为急需解决的问题,浇注作业又是冶金、铸造工业中一道操作繁重的工序,不仅劳动强度大而且作业环境(如高温、废气、安全事故等)对工人健康影响较大,这些都为电磁泵的应用开辟了新的前景.如只产生推力的电磁泵式自动浇注装置即双面或单面电磁流槽在国外已有应用.对电磁泵的使用也越来越感兴趣,最近国内外正在着力研制,但由于技术条件的限制,目前大都处于试验装置或工业试验装置阶段.

随着冶金、铸造工业自动化程度的提高,电磁原理的应用也越来越广泛,如电炉炼钢中的电磁搅拌、空心浇注、钢带淬火等都有不同程度的应用.

化工工业中的某些部门也是电磁泵应用的合适场所,如采用电磁泵来输送汞可消除汞的泄漏和对环境的污染,如我国某化工厂已将汞泵使用于一化工流程,从而改善了工人同志的劳动条件和健康状况.一些易氧化的液态金属如钾、钠由于采用电磁泵进行输送可以大大提高安全性.

虽然,电磁泵和电机的工作原理是一样的,但实际上由于液态金属是一种导电的连续介质,它在电磁场的作用下有自己的不同于电机的独特现象,分析这些现象,构成了液态金属电磁泵的设计理论和方法,它在设计步骤、参数选择、设计方法上和电机很不相同.

近几年来,我们两个研究所的电磁泵小组在有关单位的支持和配合下,在液态金属电磁泵方面做了一些工作.因此本书的重点主要是对液态金属电磁泵内部过程作质的描述,

同时也对常用的几种型式的电磁泵给出了设计方法和一些参考数据。

本书由薛明伦、唐福林、陈乐山、顾琅同志执笔编写。由于我们水平有限,书中一定会有许多缺点或错误,希望读者指正。

中国科学院力学研究所 电磁泵小组
上海电器科学研究所

1977.12.

目 录

序言	iii
第一章 工程电磁流体力学在电磁泵中的应用	1
1.1 电磁泵中的电磁流体力学方程	1
1.2 当有垂直均匀磁场时两平板间导电流体的层流流动	3
1.3 简单流动模型在液态金属电磁泵中的应用	7
1.4 液态金属对金属固壁的接触电阻	8
第二章 传导式电磁泵	11
2.1 直流泵	11
2.2 热电-电磁泵的工作原理	45
2.3 单相交流传导泵	49
第三章 感应式电磁泵	55
3.1 平面型感应式电磁泵的工作原理及其一些问题	55
3.2 平面型感应式电磁泵的理想模型	58
3.3 考虑热绝缘层与金属泵沟壁的感应式电磁泵理论	66
3.4 感应式电磁泵的横向端部效应	73
3.5 感应式电磁泵的纵向端部效应	85
3.6 单面铁芯单面绕组的平面型感应式电磁泵	124
3.7 螺旋型感应式电磁泵(简称螺旋泵)的工作原理	130
3.8 双面铁芯平面型感应式电磁泵的计算步骤	133
第四章 液态金属电磁泵的测试技术和工艺材料	141
4.1 液态金属电磁泵的试验回路装置	141
4.2 电磁泵试验热工参数的测量	145
4.3 电磁泵的性能试验	151
4.4 电磁泵的工艺材料	155
参考文献	156
主要符号表	157

第一章 工程电磁流体力学

在电磁泵中的应用

1.1 电磁泵中的电磁流体力学方程

电磁流体力学是随研究宇宙间等离子体运动规律而发展起来的,是把流体力学和电动力学结合起来的一门边缘学科.近二十多年来,由于工程实践发展的需要,提出了研究小尺寸范围内导电介质和电磁场相互作用的要求,如液态金属电磁泵、电磁流体发电、电磁流体推进等的内部工作过程.把电磁流体力学的基本原理和工程实践结合起来形成了有一系列特色的工程电磁流体力学.对于液态金属电磁泵而言,工程电磁流体力学则具有更狭义的意义,因为它所处理的对象,完全可以看作是**不可压缩的,具有标量电导率(各向同性)的,且流体速度不大,工作频率不高.电磁泵虽然乍一看来和电机很相似,但由于它所输送的介质是连续的、液态的,因此可以很明确地说,必须以电磁流体力学的方法去分析,才能正确地掌握它的一系列工作特点,并由此建立起一套电磁泵的工作原理和设计理论.在设计思想、参数选择、设计方法等方面,电磁泵几乎与电机完全不同.

针对液态金属电磁泵的具体情况,即工质是不可压缩流体,具有常量电导率,流体速度远小于光速,电磁频率在 1000 赫芝以下(即完全可忽略位移电流),这时电动力学的基本方程是:(采用实用单位制)

法拉第电磁感应定律:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

高斯定律:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1.2)$$

安培定律:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (1.3)$$

欧姆定律:

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v}_f \times \mathbf{B}) \quad (1.4)$$

及

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.5)$$

其中 $\mathbf{E}$ ——电场强度;

$\mathbf{B}$ ——磁感应强度;

$\mathbf{H}$ ——磁场强度;

$\mathbf{j}$ ——电流密度;

σ ——介质(或导电流体)的电导率;

μ ——介质(或导电流体)的导磁率;

$\mathbf{v}_f$ ——导电流体的速度.

而流体力学方程则有

连续方程:

$$\operatorname{div} \mathbf{v}_f = 0 \quad (1.6)$$

运动方程:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_f}{\partial t} + (\mathbf{v}_f \cdot \nabla) \mathbf{v}_f = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \frac{1}{\rho} \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \nu \nabla^2 \mathbf{v}_f \quad (1.7)$$

其中 $\mathbf{g}$ ——重力加速度;

ρ ——导电流体的密度;

ν ——导电流体的运动粘滞系数;

p ——导电流体的压强.

1.2 当有垂直均匀磁场时两平板间 导电流体的层流流动

上节列出了不可压导电流体的电磁流体力学方程,但对于在一般情况下求电动力学和流体力学联合方程的分析解几乎是不可能的,因而我们从简化得多的流动模型出发,得到一些针对电磁泵具体情况最有用的一些质的看法,然后再加以各种理论上和实验上的修正,使简单的理论和一定的实验数据结合起来,形成一个设计适用的理论.

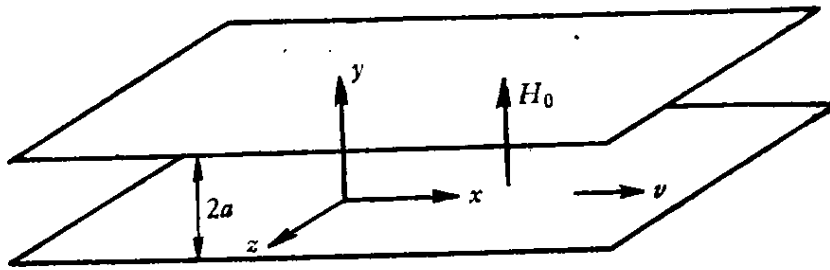


图 1.1

下面我们来分析一个简单的流动模型,假定:

- (1) 不可压缩,完全发展的层流流动 (即定常流 $\frac{\partial}{\partial t}=0$, 且除压力外,其余参数沿流动方向不变, $\frac{\partial}{\partial x}=0$);
- (2) 外加磁场 H_0 (即铁芯气隙间尚未有流体时的磁场强度)在整个气隙空间中是均匀的;
- (3) 电极位置处于 $Z = \pm \infty$ 处,因而不考虑流动参数在 Z 方向的变化,即 $\frac{\partial}{\partial Z}=0$;
- (4) 导电流体充满两平板间的全部气隙;
- (5) 通过导电流体的电流从置于 $y = \pm a$ 的两块无限薄的电流面流回.

最后一个假设之所以必要, 因为只有通过气隙的总电流为零才能保证磁场沿 x 方向没有变化, 也才能得到完全发展的流动.

根据上述假定, 则

$$\mathbf{v}_f = \{v_x; v_y; v_z\} = \{v; 0; 0\}$$

$$\mathbf{H} = \{H_x; H_y; H_z\} = \{H_x; H_0; 0\}$$

$$\mathbf{j} = \{j_x; j_y; j_z\} = \{0; 0; j\}$$

$$\mathbf{E} = \{E_x; E_y; E_z\} = \{0; 0; E\}$$

由方程(1.7)可得

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} - \mu j H_0 + \nu \rho \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (1.8)$$

由方程(1.3), (1.4) 可得

$$j = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (1.9)$$

$$j = \sigma(E + \mu v H_0) \quad (1.10)$$

在这些方程中 v , j 和 H_x 只是 y 的函数, 而压强梯度 $-\frac{\partial p}{\partial x} \equiv P$ 在流体的所有各点都是一样的, 因此方程(1.8)可改写成

$$0 = P - \mu \sigma H_0 (E + \mu v H_0) + \nu \rho \frac{d^2 v}{dy^2} \quad (1.11)$$

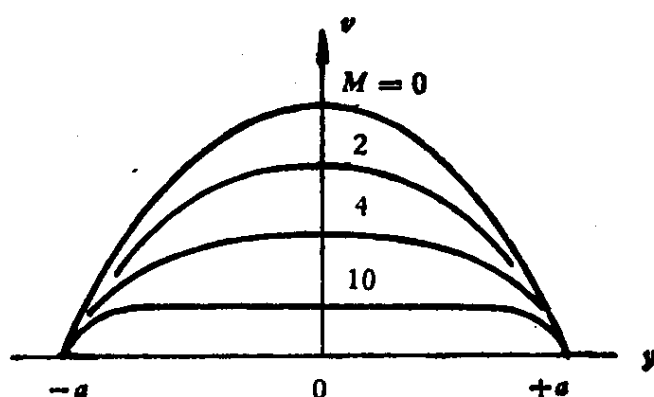


图 1.2

在边界 $y = \pm a$ 处 $v = 0$, 得上述方程之解为

$$v = \left(\frac{P}{\mu^2 \sigma H_0^2} - \frac{E}{\mu H_0} \right) \left[1 - \frac{\text{ch}(H_0 y/a)}{\text{ch} H_0} \right] \quad (1.12)$$

其中 $H_0 = \mu H_0 a \left(\frac{\sigma}{\nu \rho} \right)^{1/2}$ 称为哈特曼(Hartmann)数 M .

在对这种流动模型进行实验研究时, 一般流动槽是绝缘的, 但为了尽量反映假设的条件, 因而均匀电场 E 必须这样取, 使得在 $y = \pm a$ 之间流过流体的总电流 $\int_{-a}^{+a} j dy$ 为零, 这相当于外电路开路的情况, 这种流动模型称为哈特曼流动. 但在很多实际问题中, 导电流体和外界总有能量交换, 也就是说流过流体的总电流实际上不是零; 而另一方面只有通过气隙的总电流为零才能保证磁场强度沿 x 方向没有变化. 电磁泵或液态金属发电中应用反向导流板的情况正和上述情况相当, 也就是这时相当于在 $y = \pm a$ 处有二个往回流的电流面, 在经过这一无限薄的电流面时磁场强度 H_0 有一突变.

这时电流密度的分布是

$$j = \sigma(E + \mu v H_0) = \sigma E \left[\frac{\text{ch}(H_0 y/a)}{\text{ch} H_0} \right] + \frac{P}{\mu H_0} \left[1 - \frac{\text{ch}(H_0 y/a)}{\text{ch} H_0} \right] \quad (1.13)$$

总电流

$$I = \int_{-a}^{+a} j dy = \sigma E \frac{a}{H_0} \frac{2 \text{sh} H_0}{\text{ch} H_0} + \frac{P}{\mu H_0} \cdot 2a \left[1 - \frac{\text{sh} H_0}{H_0 \text{ch} H_0} \right] \quad (1.14)$$

而在 $y = \pm a$ 之间的速度平均值为:

$$v_{cp} = \frac{\int_{-a}^{+a} v dy}{2a} = \left(\frac{P}{\mu^2 \sigma H_0^2} - \frac{E}{\mu H_0} \right) \left[1 - \frac{\text{sh} H_0}{H_0 \text{ch} H_0} \right] \quad (1.15)$$

磁场强度 x 方向分量沿 y 方向的变化是:

$$\begin{aligned}
 H_x &= -\int_{-a}^y j dy + \frac{1}{2} I \\
 &= -\frac{P}{\mu H_0} (y+a) - \left(\sigma E - \frac{P}{\mu H_0} \right) \frac{a}{H_a} \\
 &\quad \times \frac{\text{sh}(H_a y/a) + \text{sh} H_a}{\text{ch} H_a} + \frac{1}{2} I \quad (1.16)
 \end{aligned}$$

对于电磁泵而言, 沿流动方向总是提高压力的, 因而 P 为负值, 而 E 在所取的坐标中应取负值, 且 $|E|$ 总是大于 $\left| \frac{P}{\mu \sigma H_0} \right|$, 因为只有这样, 才能得到正向的速度和流量.

(1) 从式 (1.13) 可以看到 j 在所取的坐标中取负 Z 方

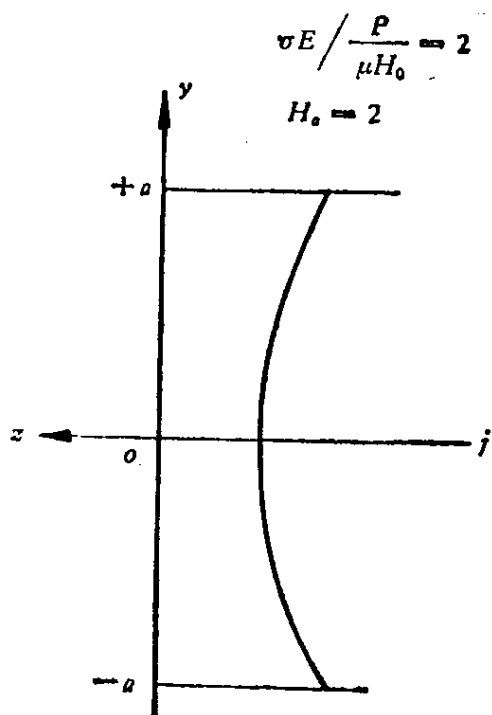


图 1.3

向, 且 $|j|$ 在通道边缘总是比中心要高, 这是由于在同一电场作用下, 边缘速度较低, 因而反电势较低的缘故.

(2) 由于电磁力的作用, 使得层流流动的速度剖面变得更平坦了, 而不是如完全发展的纯流体力学的层流流动那样速度分布是抛物线型的. 随着 H_a 的增大, 速度剖面也变得越来越平坦 (如图 1.2 所示), 这说明在大 H_a 情况下磁粘滞性就大

过普通的粘滞力, 这时除了墙壁附近的很薄的边界层里以外, 粘滞性都不重要, 在离墙壁较远处, v 近似为一个常数. 由于速度剖面变得平坦了, 在同一流量的下, 壁面的速度梯度就要大得多, 因而为通过同样流量, 所需克服的摩擦阻力也大.

1.3 简单流动模型在液态金属 电磁泵中的应用

事实上在电磁泵设计理论中所应用的流动模型较上述还要简单得多, 即往往假定沿流通截面的流速为常数, 从而把速度场和电磁场的相互作用简化. 这种流速为常数的假定所带来的误差很小. 这从式(1.12)也可以看出, 由于电磁力的作用使速度剖面即使当层流流动时也不象流体力学的层流流动那样是抛物线型的, 而是随着哈特曼数的增大而越来越平坦(如图 1.2 所示). 在液态金属电磁泵的实践中哈特曼数都较大, 一般在 10 以上, 因此速度剖面非常平坦, 只有在壁面附近才有一个很大的速度梯度.

另外, 电磁泵通道内的水力阻力通常可以按纯流体湍流流动时水力阻力的经验公式来估计, 这方面有实验曲线可供参考(图 1.4), 它给出了纯流体流动的阻力系数对雷诺数 Re

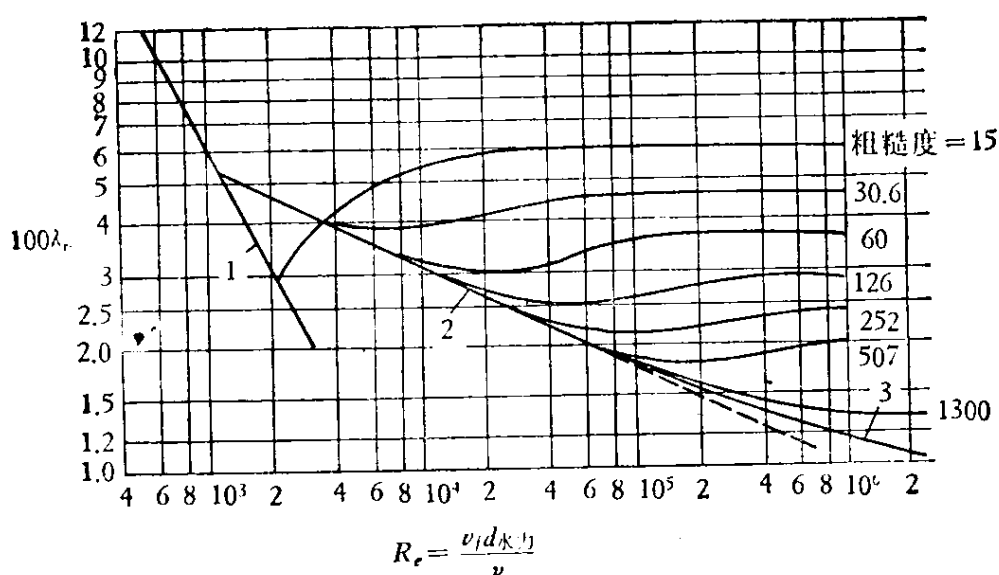


图 1.4 管壁粗糙的管道流动摩擦系数

1——层流; 2——湍流光滑; 3——湍流粗糙

和管壁粗糙度的关系。在有磁场作用的情况下，当流体质点无规则地横向切割磁场而运动时，因受电磁力的阻尼将把部分湍流运动的动能转化为热，故磁场对于从层流到湍流的过渡有阻抑作用，这一点已被实验所证实；但实验数据表明，对于已经高度发展了的湍流流动来说，有磁场时泵沟内的压强损失近似地与纯流体湍流流动时的损失相同，这意味着，这时高度发展的湍流是如此强烈，以致于磁场对它的阻抑作用已难以察觉。而实际的电磁泵（特别是交流感应式电磁泵）通道内的流体运动大多是处于高度湍流状态，因而在一般情况下可以简单地按纯流体湍流流动的水力阻力来估算（见图1.4）。

由于在液态金属电磁泵中应用了这两个假定，使问题大为简化，而且在大部分情况下可以得到分析解。

1.4 液态金属对金属固壁的接触电阻

对于电磁泵来说，还有一个重要的影响因素，那就是液态金属对固体金属壁之间的接触电阻，例如传导式电磁泵中电极和液态金属的接触电阻，螺旋型电磁泵中螺纹带和液态金属之间的接触电阻，平面型感应电磁泵中短路条和液态金属之间的接触电阻。

接触电阻的存在可以是物理上的，也可以是化学上的原因，它们是：

(1) 液态金属对固体金属表面的湿润情况。从图(1.5)可以看出，如果有一类液体的内聚力大于该液体对固体表面的附着力，则对单个液滴来说形状如图1.5(a)所示。把表面放大来看，液滴实际上只在固体表面几个尖顶附近接触，这样接触电阻显然是很大的。反之，如图1.5(b)所示，液体可以近乎充满固体表面的所有面积。