

科技情报

内部刊物

第 3 期

注意保存

国外工程流体力学概况

姜

文

文

中国科学院力学研究所

1971年9月

二 前 言

磁流体力学研究的是导电流体与电磁场的相互作用问题，在有些问题里还必讨论电磁场的变化，这样，也可以说是导电流体在电磁场中的运动问题。

这里说的导电流体大致可分为两类，即导电液体与导电气体。导电气体主要是指电离气体。有些电离气体称为等离子体。

磁流体力学是从宏观方面来研究导电流体在电磁场中的运动。如果从微观方面来研究，则属于等离子体动力学（或等离子体物理学）。由此可见，磁流体力学是流体力学与电动力学的结合，而等离子体物理学则是分子运动论与电动力学的结合。

磁流体力学的发展是从研究天体开始的。这件事现在看起来也许并不奇怪，因为宇宙空间90%以上的物质是等离子体。早在廿世纪初，天文学家已经知道外层空间存在电离物质，并且发现太阳的磁场。到40年代初阿尔芬提出磁流体力学波，磁流体力学已经有了相当的基础了。

尽管宇宙空间几乎到处都弥漫着等离子体，但是，在我们人类生活的地球表面上，自然状态的等离子体却是罕见的。物质通常的状态是固态、液态和气态。现在，产生等离子体的办法有几种，可分为：

放电等离子体：用电磁场和热（如电弧）使气体电离。

燃气等离子体：在燃料燃烧时将化学能转化为热使气体电离；为了提高电导率，有时还加上添加剂，即少量容易电离的物质，如 C_2 、 K

K_2CO_3 等。

激光等离子体：用光辐射和热产生电离气体。

铀等离子体和氢等离子体：用核能、电磁场和热使铀、氢（氘，氚）电离。等等。

其中放电的研究已有一百多年的历史，而激光等离子体的研究却是最近几年的事。

工程技术部门开始注意磁流体力学及研究低温等离子体的性质，大约在五十年代的后期。虽然在此以前，不少国家也研制过液态金属电磁泵，电磁流量计等，但是对工程磁流体力学的推动都不大。五十年代，由于受控热核反应的发展，特别是空间技术的发展，逐渐提出了不少工程磁流体力学的问题。就空间技术来说，大致有：

1. 再入大气层：飞行器的马赫数很高，头部脱体激波很强，因此空气电离。有人提出，利用磁场和电离空气的相互作用，达到增大阻力、减小热流的目的。另外，在地面进行再入大气层的模拟实验，也需要一些磁流体力学设备，如用电磁加速器模拟磁场，用电弧风洞模拟驻点传热等。

2. 推进：对于空间飞行，需要大比冲的推进装置，电推进就是其中的一种。曾经设想，用磁场加速等离子体，以得到大比冲，这里面就有不少工程磁流体力学问题。核推进中的气态火箭推进，需要将铀等离子体（燃料）与推进剂分开，也曾设想用交叉电磁场使等离子体旋转

而达到这一目的。

3. 飞行器或仪器（均为导体）通过电离层和行星际空间等离子体时所产生的电磁效应与力学效应。

4. 通讯和探测问题，再入大气层时，飞行器表面为电离空气，使无线电信号减弱，甚至通讯中断。从再入大气层的飞行器的等离子体尾迹所反射的信号，可以探测飞行器的运动等。

5. 磁流体直接发电，根据电磁感应原理，可使导电流体的焓直接转换为电能。这样的大功率直流电源是某些空间实验室所需要的，当然也可作为民用动力装置。另外，未来的聚变反应堆发电，最理想的也是磁流体直接发电等。

十多年来的研究情况表明，工程磁流体力学的发展主要取决于需要的迫切程度，但是也和本身技术水平的发展有关，和磁流体力学方法是否比其他方法优越（在经济上，可靠性上，重量等等）有关。下面将十多年来国外某些项目的进展情况作一介绍。

三 磁流体直接发电

1959年国外第一次提出磁流体发电——蒸汽动力联合循环，当时的设想是能把现有民用蒸汽动力循环的效率从40%提高到60%。当时存在的主要技术困难是：

(1) 电极和绝缘壁材料的耐高温和耐腐蚀性；

(2) 超导磁场问题；

(3) 添加剂回收问题;

(4) 高温热交换器问题。

十多年来各国的研究结果表明:

(1) 联合循环的效率估计过高, 实际上在大功率时(60万千瓦以上)估计只能达到50%左右;

(2) 超导磁场的研制已基本过关;

(3) 通过结构的改革绝缘壁的材料问题已解决;

(4) 煤粉直接燃烧有严重的结渣问题;

(5) 发电器的磁流体力学问题已清楚。

目前, 苏联、日本仍较积极地开展工作, 主要原因是苏联有较丰富的天然气作为燃料, 而日本则是使用进口液体燃料, 这就大大减轻了燃煤所引起的技术问题。美国在民用磁流体直接发电方面没有投入多少力量, 而英国已明确停止这一工作。

在作为短时间快速起动的直流电源方面, 磁流体直接发电具有装置成本低的突出优点, 同时, 相应的技术问题也比较简单, 国外已认为基本解决。我们可以以美国的23000千瓦的装置MarkV作为例子, 它已作为电弧风洞的电源投入使用。

磁流体直接发电不仅限于用化学燃料的开式循环, 利用反应堆作为热源的还有两种循环方式:

闭式非平衡电离磁流体直接发电机

~ 4 ~

闭式液态金属磁流体直接发电机

非平衡电离磁流体直接发电的目的是希望能在较低温度下(1800℃左右)有足够的电导率。十多年来的工作表明,在有磁场的情况下,非平衡电离的实验结果和理论预计相差甚远,同时由于低气压的要求和反应堆合理设计是有矛盾的,所以还处于基础研究阶段,没有重大突破。

1962年提出液态金属磁流体直接发电作为空间动力的一个备用方案,它适用的范围大于100千瓦,要求反应堆出口温度在1000℃左右。优点是:没有转动部件,能发出交流电。十年来的工作主要限于交流发电机性能试验。目前对交流发电机的电磁现象已基本弄清。存在的主要技术问题是发电机的管道材料。它必须是绝缘,同时具有较好的机械性能。而在热能转换为机械能方面,还只进行了模拟试验,主要问题是效率较低。1969年进行技术设计的结果表明,重量指标约为30公斤/千瓦。总的说来,这项工作开展的规模还比较小。

三 电磁泵

在五十年代,进行了民用动力反应堆用液态金属电磁泵的研制工作。它的优点是密封性好,可靠性高;缺点是效率较低,一般不超过45%。到六十年代,这一方面已逐步为机械泵所代替。但在空间核动力方面,由于电磁泵的可靠性好,在小功率的情况下结构也紧凑,所以比机械泵优越。从六十年代开始,为空间核动力研制了各种类型的电磁泵,并相应的发展了耐高温的电工材料,致使空间电磁泵的重量指标比民用的下

降了一个数量级。美国原子能委员会在确定空间核动力装置各种参数后，委託有关公司进行了电磁泵研制工作。工作做得比较多的是热电——电磁泵和螺旋式交流电磁泵，对直流泵及其他型式的泵也进行了探讨，目的是为空间核动力找出最合适的泵的类型和正确的设计方法。总的说起来，目前这一方面的磁流体力学问题已很清楚，主要问题是材料和工艺方面的。

在冶金和化学工业中，输送和搅拌高温融化的金属，如铝、镁、铜、铁、铅、铋、钠、钾等，以及水银，电磁泵也有一定的用途。

这里顺便指出，曾有人设想利用电磁泵作为潜艇的推进器。优点是无声，不易被声纳所侦察。主要技术障碍是大尺寸超导磁场的技术困难和经济、可靠问题。现在看起来，在某些小型、低速、深潜装置上也许有应用的可能。

四、电磁离心分离器

在自然状态， U_{235} 约佔千分之七。浓缩之后可作反应堆及原子弹原料。过去都是用气体扩散法浓缩铀，近年来，西欧各国制成功了一种新的分离装置——离心机正受到越来越多的重视。

1962年一个英国专利提出用磁流体力学离心方法浓缩铀。原理是：用交叉电磁场使放电等离子体快速旋转，象离心机那样，离心力使 U_{235} ， U_{238} 分离。这个专利发表后，没有看到进一步的工作。

1970年，一个瑞典科学家，在受控热核反应的装置中，用磁场驱

动等离子体旋转，结果使氘和氚产生了分离。1970年夏他和英国科学家讨论了这种方法是否能用于浓缩铀，尚未作出结论。

电磁离心分离器和离心机相比，有一个明显优点，即无高速机械转动部分，因此不存在有关材料、轴承、振动等一系列问题。但由于工作做得不多，矛盾暴露得还不充分。

五 受控热核反应

受控热核反应的工作，各国大体上都是在50年左右开始的。几年后，碰到了一个共同的难题：磁流体力学不稳定性，在还没有产生聚变反应前，或仅有少量原子核发生反应，氘等离子体（氘核、氚核、电子）就成堆地飞散了。50年代到60年代中期，大力开展了关于磁场约束高温等离子体的磁流体力学不稳定性的研究，想出了很多巧妙的办法，得到丰硕的理论成果。这样，在不少装置上，磁流体力学不稳定性就逐渐被克服了。例如，在准稳态环状装置托卡马克上，有一个很强的纵向稳定磁场，此外，等离子体电流还激发一个周向磁场，二者结合后，能够满足“极小B场原理”及磁场“剪切”条件，这就保证了磁流体力学稳定性，而使约束的时间增长到差不多 $1/100$ 秒。其他类型的装置，情况大体也相同。

在实现热核点火以后，在聚变反应堆的设计和利用高温等离子体的能量直接发电等等方面，都还存在不少的工程磁流体力学问题。

六 空间技术

现将空间技术方面磁流体力学的发展情况，简要说明如下。

重入大气层：利用磁场与电离空气的相互作用以增大阻力、减小热流，实际上并无应用，因为可以用简单得多的烧蚀方法来解决。但是作模拟实验用的磁流体力学设备，发展较快。

推进：电推进研究了三种类型：电弧加热推进器，离子推进器与等离子体推进器。作为行星际航行用的主推进器，现在倾向于采用离子推进器。但是同步卫星上姿态控制用的辅助推进器，有采用脉冲式等离子体推进器的。

电离层空气动力学，探测问题等，发展也较快。

工程磁流体力学的内容不只上面这些，因为有些新的设想还不断提出来。最近，美国有人提出电磁流体激励大功率激光器，其原理基于低气压下的非平衡电离效应。它需要一个大尺寸强磁场，原则上可用超导磁场。看起来比气动激光器复杂得多，是否有实用价值还有待于进一步的探索。