

Rb II, Sr III, Y IV, Zr V, Nb VI, Mo VII^[9]; Sc XVI, Ti XVII, V XVIII^[10]; Mg VIII, Al IX, Si X^[11]; Y IX-Y XIII, Zr X-XIV, Nb XI-XV, Mo XII-XVI^[12] 等一系列高次电离谱线。这对于开展高次电离离子光谱的研究和应用它们开展天体物理学方面的探索创造了有利的条件。

2. 高温等离子体诊断

高温等离子体的许多基本参数,如温度、密度都能够依靠高次电离离子光谱得到比较正确的诊断。光谱诊断一直是等离子体诊断的重要方法之一。然而,由于天体物理学的发展,对太阳辐射层的等离子态的研究。从高次电离离子光谱学入手研究等离子体中粒子辐射,碰撞过程以及状态,在光谱学上都是需要解决的课题。

3. 高次电离离子光谱的定量分析

高次电离离子光谱的定量分析工作。一直是一个极其活跃的部份,这方面研究任务,在于获得高速度、高灵敏度、高精度的光谱定量分析方法。在真空紫外光谱区域内,采用高次电离谱线去进行定量分析工作有过评述^[12,13],由于选用高电离谱线作为分析线对,表现出快速、准确、干扰小的特点。在金属中能够同时进行对金属、非金属、气体杂质元素的测定。同时,还能

在金属合金的不同基体中采用唯一工作曲线去测定同一杂质元素。

由于天体物理学、等离子体物理学、定量光谱学等学科和高次电离离子光谱都有十分密切的关系,因此,从实验上和理论上深入探讨高次电离离子光谱学中一些问题。进一步扩大它的应用范围是非常有价值的。

参 考 文 献

- [1] I. S. Bowen, *Astrophys. J.*, **67**(1928), 1.
- [2] 韦钦、许芝华、彭建怀,《分析化学》, **6-3**(1978), 232.
- [3] F. Malamand, *Analusis*, **1-6**(1972), 420—426.
- [4] 韦钦、许芝华、彭建怀,《物理》, **6-5** (1977), 275.
- [5] B. C. Fawcett, *Advances in Atomic and Molecular Physics*, **10** (1974), 224.
- [6] S. Mandelstan, *Spectrochimica Acta*, **3-4**(1959), 225—271.
- [7] R. Tousey, *Applied Optics*, **1-6**(1962), 679.
- [8] S. Goldsmith and U. Feldman, L. Coher, *J.O.S.A.*, **61-5**(1971), 615.
- [9] Joseph. Reader and Gabriel. L. Epstein, Jan Olof Ekberg, *J.O.S.A.*, **62-2**(1972), 273.
- [10] S. Goldsmith and U. Feldman, A. Crooker and L. Cohen, *J.O.S.A.*, **62-2**(1972), 260.
- [11] S. Hoory and S. Goldsmith and U. Feldman, W. Behring and L. Cohen, *J.O.S.A.*, **61-4**(1971), 504.
- [12] E. Alexander, M. E. Ven-Zohar, B. S. Fraenkel and S. Goldsmith, *J.O.S.A.*, **61-4**(1971), 508.

磁 流 体 发 电

——它的物理原理及研究进展

磁流体发电研究室

(南京工学院)

磁流体发电是一种新型的发电方式,它具有高效率、低污染等优点。由于它是将热能直接转换为电能,再加上充分利用热能的措施,因而可以大大提高效率,从而大量地节省煤、石油等初级能源的消耗,并且废热少,热污染少,甚至可以完全消除化学污染。同时,由于它能快速启动,故在国防上有重要意义。

磁流体发电是一项涉及许多近代学科和技术(如等离子体物理、磁流体力学、高温热物理、高温材料和技术、超导技术等)的大型综合性课题。它的基本原理,同普通发电机一样,是法拉第电磁感应定律。对其物理原理的阐述,主要围绕磁流体发电机主体并从电、磁、导体及其运动三方面展开。同时,还必须论及导电

气体的一个重要特性——电导率,以及在强磁场作用下一个重要效应——霍耳效应。最后讲一讲循环系统和应用。

一、磁流体发电机及其理论

试以目前广为研究和采用的开环系统法拉第直线型磁流体发电机为例说明之。磁流体发电机由三个主要部分组成: 1. 燃烧室——它产生高温导电气体; 2. 发电通道——一系框型组合部件, 两对相互平行壁面中, 一对是导电的, 即为电极, 另一对是绝缘的; 3. 磁体——它的二极靴设置在发电通道绝缘壁外侧, 见图 1。

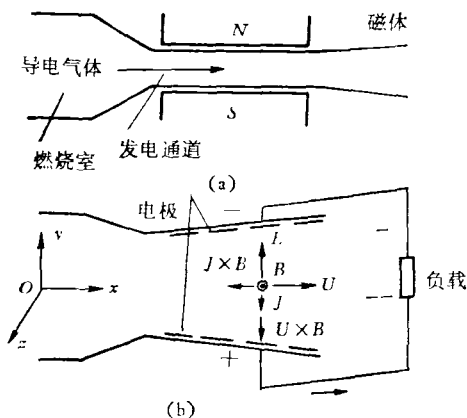


图1 磁流体发电机示意图
(a)——俯视; (b)——侧视

由燃烧室出来的导电气体,经收缩段运动加速,一部分热能变成了气体本身的动能,气体通过喉部进入发电通道后,以相当高的速度 u 流动,垂直穿过磁场 B ,切割磁力线,在与 u 及 B 垂直的方向上产生感应电势,因而就有电流通过气体;将正负电极通过外负荷联接起来,就可取得电功率。发电机单位体积的比功率为

$$P = jE, \quad (1)$$

式中: j ——感生电流密度,根据欧姆定律有

$$j = \sigma(uB - E), \quad (2)$$

σ 为气体标量电导率, E 为决定于负荷的外电场,即由此电路中通过的电流而定。负荷系数

$$K = E/uB, \quad (3)$$

因而

$$P = \sigma u^2 B^2 K(1 - K). \quad (4)$$

所得的电是直流电,若须并入交流电网,则先要通过逆变换流装置,将直流电变成交流电。

磁流体发电省去了热能向机械能的转换,实现了热电的直接转换。从宏观来看,普通发电机中金属绕组的动能来自透平的机械能,而在磁流体发电机中,导体本身被加热,因而具有足够的热能,再经膨胀加速,导体从自身汲取了原动力。于是,当导体在磁场内运动时,它同时起了普通发电机中的透平和发电机的双重作用。从微观分析,则在于热能直接造成气体的电离,产生了自由电子,这种主要的电荷粒子在电场的作用下获得了一定速度,因而形成电流。

发电通道内的导电气体,亦即低温等离子体,是一种混合物,其成份为气体中的中性粒子,添加剂中被电离的自由电子、正离子及尚未电离的中性粒子。它具有等离子体的普遍特性——电中性,即认为一般情况下,单位体积内正电荷数 n_+ 与负电荷数即电子数 n_e 相同。等离子体的运动的基本描述须借助分子动力学^[1]。

电子的运动是很复杂的,可以看作四种运动的

叠加: 主要决定于温度的热运动;伴随气流的宏观运动;在均匀磁场作用下在碰撞自由程内作具有拉莫尔圆频率的旋转运动;由感生电场引起的电子漂移。

当这种导电气体垂直地穿过磁场时,在磁场的作用下,使荷正电和荷负电的两类粒子向相反两个方向偏转,带正电荷的正离子移向正极,带负电荷的电子移向负极,产生电势。一旦正负电极经有限外电阻接通时,则正、负电荷在电场的作用下,源源不断地补充到正、负电极上去,因而形成电流。在外电阻等于零时,电流达最大值。

电流,就是所有带电粒子与其速度乘积之总和,对单位体积言,电流密度 j 可写为:

$$j = n_+ e v_+ - n_e e v_e, \quad (5)$$

式中,脚码 $+$ 和 e 相应表示正离子和电子, v 系粒子真实速度, e 为电子电荷。对于(5)式,我们引进正离子和电子对于中性粒子的相对速度 W_+ 和 W_e , 由于 $n_+ = n_e$, 考虑到电子质量 m_e 远比正离子质量 m_+ 为小,因而 $W_+ \ll W_e$, 经过简单运算,可得

$$j = -n_e e W_e. \quad (6)$$

由此可以认为电流全然由电子运动而成,式中的 W_e 、 n_e 可分别在一定的假设下简单求得。

感应电势引起了一个与通道轴向(Ox)垂直的横向电子漂移,这个漂移速度又常常是同磁场垂直,因而感生一个轴向的电场,这个电场称为霍耳场,相应的电流称为霍耳电流。取用轴向电流而获得输出电功率的电机称为霍耳型磁流体发电机。而前面所述的横向电流称为法拉第电流,取用横向电流而获得输出电功率的电机称为法拉第型磁流体发电机。

同时,电子的横向漂移与磁场相互作用,产生一个电磁力,即洛伦兹力 $F = j \times B$, 它主要沿着通道轴向作用,并与气流方向相反,对气流起减速制动作用。这个力主要作用在电子上,因为它们携带了电流的大部或全部,因而电子被制动,出现轴向电场。由此之故,这力传给离子,电子与离子一起运动,通过碰撞又传给中性粒子,于是这个力就从电荷粒子传到了气流整体。

二、导电气体及其电导率

常温下气体并不导电,若要使气体导电,必须使之电离。电离的机理有二:一是热电离,或称平衡电离,这可以简单地用加热气体的方法而实现;另一种是非平衡电离,它同低压下气体放电相似,是由外加电场或任何形式的辐射等方法所产生的电离,其机理较为复杂。

热电离是目前磁流体发电研究中广为采用的方法。如同分子的分解,热电离服从质量作用定律。多数气体,如空气、二氧化碳、氩等,都具有相当高的电离电位。纯氩在接近 4000K 时,实际上仍然不导电。空

气也须在很高的温度下方能电离。要达到这样高的温度,在技术上和材料上都不容易。但是注意到有些碱金属,其电离电位比较低,例如铯的电离电位为 3.89 电子伏,铷为 4.16 电子伏,钾为 4.34 电子伏,它们可以在相对较低的温度下,其中包括对磁流体发电有意义的温度范围 2000—3000K,发生电离。

一般说来,0.1% 的电离度就足以使气体的电导率达到其最大值的一半^[4],而在 1% 电离度时,气体的电导率几乎可达到其最大值。因此,当燃料(石油、煤或天然气)和氧化剂(预热空气、富氧热空气或纯氧)在燃烧室内燃烧时,将上述碱金属或其化合物作为称作“种子”的添加剂,在燃气中添加小量,约为 1% 总重,就可以在较低的温度下达到足够的电离度,从而使气体具有一定的电导率。若使添加剂完全电离,则气体的电导率能达其最大值。

气体的电导率 σ 可以表示为电子密度 n_e 和电子迁移率 μ 的函数,即

$$\sigma = n_e e \mu, \quad (7)$$

式中,电子密度 n_e 在热平衡时由质量作用定律确定之。电子迁移率 μ 决定于单位电场作用下的电子平均漂移速度 W_e ,即

$$\mu = W_e / E.$$

电导率与温度的关系,其明显特征是,温度上升,电导率也上升,而且升得快,当温度低于 2000K 时, σ 已变得很小,当温度在 1900K 以下时,则已不能用于磁流体发电了。

三、磁 场

磁流体发电机所要求的磁场特点是:磁体体积大,磁感应强度高。主要因为磁流体发电机中工作气体的电导率较之普通电机中所用的铜的电导率要低得多(二者典型比值为 10^5 — 10^6),由此引起发电通道体积的增大,磁体亦须相应增大,磁场强度亦要尽可能高。

在普通发电机中,乘积 σu^2 约为 10^{13} 姆欧米/秒²,而在磁流体发电机中, σu^2 仅约 10^8 姆欧米/秒²。为了达到相同的输出功率,发电通道的体积就要大得多,则相应的磁体也要做得大。同时又须使磁感应强度 B 足够高,以便使输出功率 $P \propto \sigma u^2 B^2$ 达到额定设计值。在磁流体发电机中, B 通常至少应在 1 至 2 忒以上方有意义。此外,磁场须是均匀分布,这是不言而喻的。磁场和电流相互作用产生的力 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ 直接影响流动,但对于沿磁场方向的运动则无影响。

通常,磁体的芯是铁做的,但是大型磁流体发电机的磁体用铁芯就不合理了,因为用铁,磁体将会很大,而且磁场也有个饱和问题。因之宜采用超导磁体,即利用导体在超低温下电阻消失的特性,以求得到相当

高的(例如 5 忒以上)磁感应强度。焦耳热 i^2/σ 是由磁能转换而来,所以对具有强磁场的超导磁体的稳定性问题十分重要。

磁系统的材料结构具有重要意义,磁流体发电机的重量、尺寸以及成本在很大程度上同磁系统有关,尤其是在宇宙航行的应用上。

四、霍耳效应

上面讲了发电通道及其内部过程,讲了导电气体和磁场,现在可以来讲一个很重要的效应。

在等离子体中,如同在固体导体中,当有电流通过导体,若是处在强磁场内,则会出现霍耳效应。这种效应使得本来的等电位面发生偏转,表明是产生了附加的电场。这种效应在通常条件下,并不显现,只有当磁场很强时,例如在 1 忒以上时才有。而磁流体发电机中用的正是强磁场,所以有这种现象,而且一定要考虑。霍耳效应是同磁场强度成正比,在强度超过一定值的磁场内的导电气体中,这一效应较之在固体中更为强烈。当磁场强度与气体密度的比值足够大时,则会出现离子滑移,一旦这一现象发生后,则再增大磁场,而感应电势不会增加多少。

由于霍耳效应,欧姆定律须要修正。根据广义的欧姆定律,我们留下标量电导率项和有霍耳效应项,而忽略了虽然在天体物理中起主要作用,然而在磁流体发电中影响极小的扩散项和惯性项。则欧姆定律表示为:

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{u} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}) - \frac{\omega \tau}{B} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}), \quad (8)$$

式中 ω ——电子的回旋频率, τ ——粒子在相继二次碰撞之间自由程内运动的平均时间, $\omega \tau$ 即称为霍耳参数,其物理意义即粒子在自由程内旋转圈数。

霍耳效应的存在使得 $\mathbf{j}$ 在通道纵轴向投影 $j_x \neq 0$, 因此必然降低有效电导率,降低输出功率。

为了防止霍耳电流短路,可将电极分段很细,彼此绝缘,每一对正负电极单独同一外负载联接,这就是具有分段电极的法拉第直线型磁流体发电机。这种型式负载太多,为了减少负载,可采用对角联结,就是把分段电极法拉第直线型电机中在正常运行时处于等电位面上的那些电极短接起来,因此霍耳电流 $j_x = 0$,但是电机效率仍然不变,同时又具有外负载个数少、输出电压高的优点。这种电机或称为串接发电机。至于借引出 j_x 而取得电功率的霍耳型电机,理论上可以证明效率较分段电极法拉第型电机的效率差,但其输出电压高。

以上所提及的各种型式的发电机,其联结法(图 2)以及输出功率的计算公式如下:

连续电极法拉第型电机

$$P = \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \sigma u^2 B^2 K (1 - K).$$

分段电极法拉第型电机

$$P = \sigma u^2 B^2 K (1 - K).$$

霍耳型电机

$$P = \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \sigma u^2 B^2 K (1 - K).$$

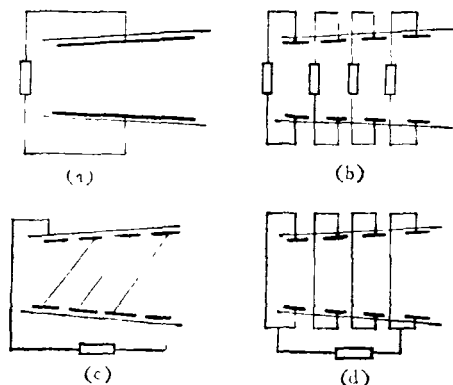


图2 直线型磁流体发电机的类别

- (a) 连续电极法拉第型发电机
- (b) 分段电极法拉第型发电机
- (c) 串接发电机
- (d) 霍耳型发电机

五、发电通道内的流动

发电通道内流动的研究和计算分析是重要的理论基础和设计依据。诸流动参数及其组合有一个最佳的选择,以便使通道具有最佳的发电性能。由前面所述,并从(4)式看出,电导率 σ 及气流速度 u 的增大,无疑都对输出功率有贡献,但是 u 的增大是以消耗气体的一部分热能为代价,而随着焓降,气体的电导率将愈来愈快的下降,所以 σ 和 u 是一对相互制约的参数。在典型的温度水平下,最佳流速是有的。通道内的流动可设计成等马赫数的,也可设计成等速的,此时方程由非线性变成线性的,因而可以直接积分。

根据磁流体动力学理论,发电通道内的流动实际上是哈德曼(Hartmann)流动在有限外电阻情况下的特例。

磁流体动力学的一个重要的无量纲参数——磁雷诺数 R_{em} 可表示为

$$R_{em} = \mu_0 \sigma u L,$$

式中 μ_0 ——真空磁导率, L ——特征长度。若使

$$\nu_H = \frac{1}{\mu_0 \sigma},$$

则上式可改写为

$$R_{em} = uL/\nu_H,$$

ν_H 可看作磁粘性。于是 R_{em} 就具有一般流体力学中雷诺数的形式,它是区分磁流体发电同天体物理过程之间的基本差别的重要判据^[2]。

在天体物理中,由于 L 的庞大尺度, $Lu \gg \nu_H$,因而 $R_{em} \gg 1$,例如在太阳中, $\nu_H = 10^4 - 10^2$ 米²/秒, $L \sim 10^6$ 米, $u \sim 10^3$ 米/秒,显然有 $R_{em} \gg 1$;而在磁流体发电条件下,因为 $L \sim 1$ 米, $u \sim 10^3$ 米/秒,而 $\nu_H = 1/\mu_0 \sigma \sim 10^4 - 10^3$ 米²/秒,则有 $R_{em} \leq 1$ 。在磁流体发电机中,如同在通常实验室环境的导体中,磁力线很快穿过物体而散开,导体中的电流主要取决于电导率 σ ;然而在宇宙体中,则弥散极慢,磁力线几乎冻结在物体中, σ 对电流流动的大小直接影响很小,因此对实验室情况而言,对磁流体发电也一样,因果次序是:电动势和电导率决定了电流的流动,电流流动决定磁场;而在宇宙体中,次序倒过来,磁流体发电正是依照这种因果关系开展研究,并从此点上加深对其物理意义的理解^[4]。

六、磁流体发电机的应用

为扩展以上讲的物理原理,再结合应用,简述几种系统,以窥全貌。磁流体发电因热源、工质不同,可组成若干循环系统,可在民用、国防、航天及原子能反应堆上得到应用。

开环磁流体发电系统,即是前面当作例子说明的,是以矿物燃料为初级热源,用预热空气作氧化剂,以热电离所产生的导电气体为工质,经热电转换后,自发电通道排出的气体尚有近2000K的高温,其热量足以用来预热空气和加热锅炉产生透平所需的蒸汽,推动透平再带动普通发电机。这样就构成了开环磁流体——蒸汽联合循环发电系统。据计算,这种系统的效率可达50—60%。此外,这种电站的热污染较常规火力发电厂约减小一半,有害气体(如SO₂)的化学污染可基本消除,而且随着系统的大型化,高效率低污染的优点就愈加突出。所以一百万千瓦量级的大型开环磁流体—蒸汽联合循环发电站就使磁流体发电成为工业实用的最佳方案和主攻方向,这是各国所公认的。

把火箭发动机的燃烧室和磁流体发电器联接起来的短时间发电,可用作军用电源。

闭环磁流体发电系统,主要指闭环等离子体系统,是将磁流体发电机和原子能反应堆联结起来,利用运行温度为2000K的气冷原子能反应堆或是高温热交换器作热源,工质系氦、氖等惰性气体,添加剂亦为碱金属如铯,其电离系非平衡电离。工质自发电通道排出后,再经冷却、压缩,再返回核反应堆重新被加热循环使用,形成闭合循环,故称闭环。这种闭环系统的优点是提高核燃料的利用率,为使目前核电站的效率由25—30%提高至50—55%。目前主要问题之一是反应堆的运行温度不够高,此外还有个非平衡等离子体

的稳定性问题。闭环等离子体系统有这样特点,即气体电导率可用感应方法去提高,并且在相当低的温度(如,1370℃)下还有较高的效率(50%以上)。再者,工质的腐蚀性也低。所以,从长远来看,闭环磁流体发电将来不仅对原子能电站,甚至对受控热核电站都有可能作出重要的贡献。

此外,磁流体发电还有在航天中应用的前景。因为温度水平对航天有特殊意义。磁流体发电器所能掌握的温度水平甚高,温度的提高对提高热机的性能是有利的,对航天器更是如此。故从这一点来看,在航天中宜采用磁流体发电,并可考虑同腔式反应堆联接,这种方案,可能反映了未来技术发展的前景。

1959年美国阿夫柯(AVCO)公司建造的磁流体发电装置首次原理性试验成功,发出的电点亮了228只50瓦的灯泡。这次试验被认为是磁流体发电研究的开端,引起了各国的重视。自此以后,苏、日、西德、英、法、波、罗等国相继开展研究。

国外研究进展一般可分为四个阶段:

1. 基础理论研究,从基础性的物理学、磁流体力学开始,了解低温等离子体的一般特性和规律,同时进行技术经济评价和估算。

2. 建立小型磁流体发电装置并进行综合试验和局部试验。对装置的各部件,特别是对发电机主体,对发电通道内的热电转换过程诸物理现象进行综合的或专题的研究;对发电机各种结构型式进行试验研究,选择合适的参数和材料;进行对整个发电装置系统的研究,摸索各部件的工作特性等。这些研究工作无非围绕两个主要目标:发出尽可能多的电功率;发电的时间尽可能长。各国采取的途径大致相同。日本的两轴接近法是典型的代表,即在小的输出功率下实现长时间发电试验运行,以研究各部件和材料的寿命以及系统运行最佳参数;在短时间运行中力求获得高的输出功率,以研究发电机最佳热电特性。最后同时实现高功率输出和长时间运行。

这里主要问题可归为三大类:(1)高温材料问题,其中包括电极材料和绝缘材料等;(2)发电通道内热电过程、诸参数分布、近电极现象和电极过程;(3)通道的结构形式,长寿命和高电性能的通道结构形式。

目前大多数国家尚处在第一、二阶段中,各国都有它自己的试验装置,总计约40台。美国最多,接近20台,各种类型的都有,但亦尚处在第二阶段研究的末尾。目前唯有苏联已经完成了前二阶段的研究计划,这项工作以苏联科学院高温物理研究所及其γ-02磁流体发电装置为代表。在γ-02上完成了第二阶段基本研究,并为其中型试验装置γ-25提供了大量数据和经验。

3. 由小型装置的实验研究向大型示范电站发展的中间过渡试验阶段,这是因为磁流体发电课题中许多

因素相互制约及其间非线性关系,不可以按比例放大一步进入大型电厂。建立几万千瓦量级的中型试验装置便是第三阶段试验研究的标志。1971年苏联高温研究所建成第一台中型试验装置γ-25,这是一台磁流体-蒸气联合发电机组,总功率为七万五千千瓦,磁流体发电部分占二万五千千瓦。据最近报道,磁流体发电输出功率已经达到调整后的额定设计值。

4. 第四阶段建成示范性工业应用磁流体电站,它是第一代开环磁流体电站的原型。麻省理工学院所提的发展磁流体发电规划中包括了这一项。据报道,苏联拟在八十年代中建立一个八十一百万千瓦的磁流体发电站,估计效率可达50—60%,但须以使用超导磁体为前提。

此后便可推广建设工业应用规模的磁流体电站。

目前各国研究工作集中较大力量,围绕发电通道、空气预热器和超导磁体三大件,突破其中关键问题:

1. 发电通道。归结为两方面问题,即效率和寿命。目前开环系统中磁流体发电部分的效率实际达到的才约为10%。为了提高效率,正在研究提高气体的电导率,研究如何使添加剂完全电离以达到最大的电导率,在很强磁场作用下,磁流体动力特性,附面层特性及其与热流、电流相互作用,近电极效应、端部效应等问题都关系到效率。再就是寿命问题,这对电极材料是个决定性因素。因其工作条件十分严酷,须耐高温、耐碱、耐电化学烧蚀、耐气体冲刷等,且要长时间工作,问题自然突出,困难也大,有的国家致力研究能工作几千小时的电极材料。此外,随着发电装置的大型化,通道的电强度问题也愈加重要。

2. 空气预热器。预热温度很重要:低了,影响电导率;高了,投资大。有的国家提出指标是要把空气预热温度提高至2300K;预热器寿命提高到一万小时。

3. 超导磁体。越大型困难也越大,因为在高磁通密度下破坏的可能性也越大。主要还是个稳定性问题。超导磁体的研究,美国、日本领先,美国为苏联γ-25装置设计制造的超导磁体(磁场强度达5忒),已经投入运行试验。

此外,对于闭环磁流体发电,国外进展也很快,认为它很有前途,美国计划在八十年代初建立小型闭环电站。

总之,在国外,美、苏、日均是以建成百万千瓦量级的磁流体-蒸气联合电站为主攻方向。

我国从六十年代初期开始磁流体发电的研究工作以来,先后开展了磁流体发电机、高温材料、特种测试技术、与磁流体发电站配套的辅助系统以及有关基础理论等各项专题的研究,目前工作还处于小试验阶段,

曾经在几种类型的小型试验装置上进行过几分钟短时间和 200 小时长时间连续发电试验,发电功率由数千瓦至数百千瓦。某些主要技术指标已接近和赶上世界同类机组的水平。但就总体水平说,还存在相当的差距。现在这一课题已列入国家重点科研项目。1978 年 9 月,国家科委召开了全国磁流体发电会议,对这项研究工作,制定了规划。在完成预定计划后,将开始进行中、大型规模的试验研究。

参 考 文 献

- [1] S. Chapman, T. G. Cowling, The mathematical theory of non-uniform gases, (1953), 319.
- [2] R. Rosa, 磁流体发电, 科学出版社, (1975), 11.
- [3] T. J. M. Boyd, J. J. Sanderson, 等离子体动力学, 科学出版社, (1977), 2, 111, 129.
- [4] T. G. Cowling, Magnetohydrodynamics, (1957), 6.

顺 磁 弛 豫

林 乔 源

(中国科学院武汉物理研究所)

顺磁弛豫研究与顺磁共振研究紧密相关,它们在物理、化学、生物等方面得到了广泛的应用。它们可用于发现过渡族离子、半导体中的杂质与缺陷、离子精细结构、物质结构等;以及了解金属与半导体中电子交换的性质、金属导电的性质等;还可用于器件的研究,如微波低噪声放大器(脉塞)以及光激光器(莱塞)。

本文将对顺磁弛豫的基本概念和主要机制作简单介绍。

一、弛豫概念与线形线宽

在物理学中,一个物理系统由不平衡状态达到平衡状态的过程,或者在某条件下是平衡状态,后随条件改变而又重新达到新的平衡状态的过程,叫做弛豫过程。通常认为弛豫过程是按指数律($e^{-t/T}$)进行的,指数函数中的特征时间 T 为弛豫时间。 T 是用来表征弛豫过程快慢的物理量。

任何共振吸收谱线的形状,简称线形。以横坐标为磁场 H (或频率 ν , 二者是一样的,因二者之间只差一个常数因子旋磁比 γ) 而以吸收强度为纵坐标,这样得到吸收曲线 $f(H)$ 或 $f(\nu)$, 它的形状称之为线形,如图 1 所示。吸收线两个斜率 $\frac{df(H)}{dH}$ 最大点之间的距离 δH , 有时称之为吸收线的宽度,简称线宽。这是线宽的一种计算方法。另外一种方法,是取吸收强度为最大吸收的一半的两点之间的距离 ΔH , 叫做线宽。这两种计算方法的结果,是有差别的。对于 Lorentz 型线形, $\Delta H = 1.73\delta H$; 而对于 Gauss 型线形,

$$\Delta H = 1.26\delta H.$$

谱线的线宽 ΔH 或 $\Delta \nu$ 与弛豫时间 T 成倒数关

系:

$$\gamma \Delta H = \Delta \nu = \frac{1}{T},$$

线形与弛豫机制有关。

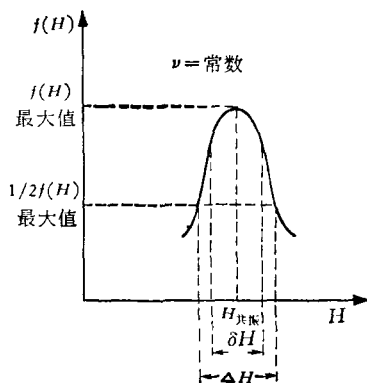


图 1 线形与线宽示意图

二、宏观理论(布洛赫方程)

1946 年,布洛赫^[3]针对核磁弛豫,给出了没有零场分裂的顺磁与核磁共振的经典的唯象方程。

在没有弛豫时,磁矩运动方程为

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_0), \quad (1)$$

其中, $\mathbf{M}$ 为宏观磁矩; $\mathbf{H}_0$ 为直流磁场; γ 称旋磁比,即磁矩 μ 和角动量 $S\hbar$ 的比值。

考虑到周围物质的相互作用,布洛赫引进了相应的阻尼项,上式化为