五、结 束 语

核磁共振测量谱的各种方法具有等价性，都是识别磁共振原子核系统的频率响应函数。用设计的频率合成信号去激发来识别核系统，能实现其他方法难以实现的功能，并具有灵活性强、使用方便等特点，特别适用于磁共振理论和实验的研究. 这是很有发展前途的磁共振核识别方法，应进一步对它进行研究和推广.

参 考 文 献

[1] F. Bloch, W. W Hansen and M. Packard, *Phys. Rev.*, **70**(1946), 474.

[2] D. Shaw, Fourier Transform N. M. R. Spectroscopy, Amsterdam Elsevier, (1976), 85.

[3] R. K. Gupta, J. A. Farretti and E. D. Becker, *J. Magn. Resonance*, **13**(1975), 275.

[4] R. R. Ernst, *J. Magn. Resonance*, **3**(1970), 10.

[5] R. Kaiser, *J. Magn. Resonance*, **3**(1970), 28.

[6] B. L. Tomlinson and H. D. W. Hill, *J. Chem. Phys.*, 59(1973), 1775.

[7] E. O. Brigham, The Fast Fourier Transform, Englewood Cliffs, New Jersey Prentice-Hall, (1974), 40.

国际单位制（SI）在磁学中的应用

郭 兰 （中国计量科学研究院）

在进行磁测量时，正确选取合适的单位是很重要的. 当前使用SI单位制是大势所趋. 但由于对磁现象的解释历来就有两种观点，磁感应 $\boldsymbol{B}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 在不同观点中被赋予不同的物理意义. 因此，在使用磁学量的单位时经常发生混淆，如磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 和磁极化强度 $\boldsymbol{J}$ 的单位选取常出现混乱，故在使用 SI 单位制时必须首先对磁感应 $\boldsymbol{B}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 的物理概念正确理解.

一、磁感应 $\boldsymbol{B}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$

早期人们对静电学和电磁学之间的关系理解得还不清楚，因此在解释一些磁的现象时，沿袭了静电学的途径，即认为物质是由正、负磁荷组成，磁场来源于磁荷. 后来在奥斯特和安培发现电流的磁效应后，又由于用磁荷观点解释某些实验事实时存在困难（如关于反磁性），人们开始认为物质的磁性起源于电流，而磁场是由电流激发. 这样，在磁学理论中就产生了下面两种观点：

1. 磁荷观点

按磁荷观点来认识物质磁性时，由于观测到的总是正、负磁荷成对存在，因此人们就认为物质是由磁偶极子组成. 每个磁偶极子的特性用磁偶极矩 $\boldsymbol{p}_m$ 来表征：

$$\boldsymbol{p}_m = q_m \boldsymbol{l}, \tag{1}$$

式中 q_m 为磁荷，$\boldsymbol{l}$ 为正、负磁荷之间的距离，$\boldsymbol{l}$ 的方向规定为自负荷指向正荷. 按照这一观点，物质的磁化就是由于在磁场内的物质中每个磁偶极子受到磁场的力矩作用，而使它们的磁矩在一定程度上趋向一致造成的结果.

两磁荷之间存在着作用力，遵照静电库仑定律给出两个点磁荷 q_{m1} 和 q_{m2} 相互作用力的磁的库仑定律：

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_{m1} q_{m2}}{r^2} \boldsymbol{r}, \tag{2}$$

r 为两磁荷间距，$\boldsymbol{r}$ 为一磁荷指向另一磁荷的单位矢量. 由于磁荷间的相互作用力归结为一磁荷受到另一磁荷的磁场作用，于是在磁荷观点中定义 $\boldsymbol{H}$ 为表征磁场强弱的物理量，称作磁场强度矢量.

$$H = F/q_m, \tag{3}$$

F 为磁荷 q_m 在磁场中所受的力，H 为磁荷所在处的磁场强度. 根据 H 的定义和磁的库仑定律，点磁荷的磁场强度公式为

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_0}\frac{q}{r^2}r. \tag{4}$$

由此可以得到 H 的环流公式，在磁荷的磁场中，任一闭合路径上有

$$\oint_l Hdl = \frac{q}{4\pi\mu_0}\oint_l \frac{1}{r_2} rdl, \tag{5}$$

由于 $rdl = dr$，$\oint_l \frac{dr}{r^2} = 0$，故有 H 的环流为零：

$$\oint_l Hdl = 0, \tag{6}$$

即磁荷的磁场为势场.

对于磁介质可以认为磁荷是磁介质被磁化后在介质的界面上出现的，介质的磁化程度由磁极化强度 J 表征，J 定义为在介质中单位体积内各分子的磁偶极矩 p_m 之和

$$J = \lim_{\Delta V\to 0}\left(\frac{\sum p_m}{\Delta V}\right). \tag{7}$$

在介质内取一闭合曲面，在此闭合曲面上 J 的通量 $\oint_S JdS$ 和它所包围的磁荷的代数和 q_m 有以下关系：

$$\oint_S JdS = -q_m. \tag{8}$$

根据(4)式可导出高斯公式，在磁场中作任意高斯面（一闭合曲面），则高斯面上的磁通量为

$$\oint_S HdS = \frac{q}{4\pi\mu_0}\oint_S \frac{rdS}{r^2}. \tag{9}$$

而 $\frac{rdS}{r^2} = d\Omega$ 为面积元 dS 对点磁荷 q_m 所张立体角，闭合面对面内任一点所张立体角为 4π，因此

$$\oint_S HdS = \frac{q_m}{\mu_0}. \tag{10}$$

在同一曲面上 H 通量和 J 通量之间的关系可用(8)和(10)式建立起来，

$$\mu_0\oint_S HdS = -\oint_S JdS, \tag{11}$$

从而有

$$\oint_S (\mu_0 H + J)dS = 0. \tag{12}$$

定义磁感应强度 B 为

$$B = \mu_0 H + J, \tag{13}$$

于是在磁荷的磁场中有

$$\oint_S BdS = 0. \tag{14}$$

它表示在磁荷的磁场中磁感应线是闭合的.

从 B 的定义来看，它是由表征磁荷磁场的磁场强度矢量 H 与表征介质磁化程度的磁极化强度矢量 J 组合而成，而磁极化强度 J 和磁场强度 H 却是两个有不同物理意义的量，因此磁感应强度 B 的含义既不同于磁场强度 H，也不同于磁极化强度 J. 也就是说，磁感应强度 B 不是表征磁荷磁场的量，在磁荷观点中磁感应强度 B 只是一种辅助矢量.

2. 电流观点

在奥斯特和安培发现电流的磁效应后，人们开始认为物质的磁性起源是电流激发磁场，而磁场用磁感应 B 来表示，B 由电流在磁场中受力来定义.

毕奥-萨伐尔定律给出电流元 Idl 在与其相距为 r 的 P 点的磁场为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\times r}{r^2}, \tag{15}$$

式中 r 为沿 r 方向的单位矢量，

考虑一个闭合电路 l_1 的磁场中 B 的环流，在此电流的磁场中任选一闭合路径 l_2，由于闭合电流在 P 点的磁场为

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\oint_{l_1}\frac{Idl_1\times r}{r^2}, \tag{16}$$

从而在 l_2 上 B 的环流为

$$\oint_{l_2} Bdl_2 = \frac{\mu_0}{4\pi}\oint_{l_2}\left(\oint_{l_1}\frac{Idl_1\times r}{r^2}\right)dl_2. \tag{17}$$

按照矢量代数公式有 $dl_1\times r\cdot dl_2 = dl_2\times dl_1\cdot r$，而 l_1 所扫过的闭合曲面对 P 点所张立体角为

$$\oint_{l_2}\oint_{l_1}\frac{dl_2\times dl_1}{r^2}\cdot r = 4\pi, \tag{18}$$

故可将(17)式表示为

$$\oint_{l_2} \boldsymbol{B} d\boldsymbol{l}_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint_{l_2}\oint_{l_1} \frac{d\boldsymbol{l}_2 \times d\boldsymbol{l}_1}{r^2} \cdot \boldsymbol{r}$$

$$= \mu_0 I. \qquad (19)$$

考虑到电流的磁场遵守迭加原理，上式可写成一般的表示式：

$$\oint_l \boldsymbol{B} d\boldsymbol{l} = \mu_0 I, \qquad (20)$$

式中的 $\boldsymbol{B}$ 应理解为一切电流在 l 的 dl 处的合磁场，I 则为 l 所包围电流的代数和.

由于电流形成的来源有两种，即由物质中自由电荷运动所形成的传导电流 I_0 和由局限在分子范围内的束缚电荷运动所形成的分子电流 I'，因此（20）式中的 I 应为

$$I = I_0 + I'. \qquad (21)$$

按照电流观点，介质的磁化程度由分子电流磁矩 $\boldsymbol{m} = iS$ 取向整齐的程度决定，并定义介质中单位体积内分子电流磁矩的总和为磁化强度矢量 $\boldsymbol{M}$，用以表示介质的磁化程度：

$$\boldsymbol{M} = \lim_{\Delta V \to 0} \left(\frac{\sum \boldsymbol{m}}{\Delta V} \right). \qquad (22)$$

在有介质的空间的任何地方，取任意闭合积分路径 l，可以证明磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 沿 l 的积分等于穿过此积分路径围成的面积上束缚电流强度 I' 的代数和，其表达式为

$$\oint_l \boldsymbol{M} d\boldsymbol{l} = I'. \qquad (23)$$

因此，在有介质的磁场空间的任意闭合路径上将有

$$\oint_l \boldsymbol{B} d\boldsymbol{l} = \mu_0 I = \mu_0 (I_0 + I')$$

$$= \mu_0 \left(I_0 + \oint_l \boldsymbol{M} d\boldsymbol{l} \right),$$

$$\frac{1}{\mu_0} \oint_l \boldsymbol{B} d\boldsymbol{l} = I_0 + \oint_l \boldsymbol{M} d\boldsymbol{l},$$

$$\oint_l \left(\frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0} - \boldsymbol{M} \right) d\boldsymbol{l} = I_0. \qquad (24)$$

定义磁场强度矢量 $\boldsymbol{H}$ 为

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0} - \boldsymbol{M}, \qquad (25)$$

则有

$$\oint_l \boldsymbol{H} d\boldsymbol{l} = I_0. \qquad (26)$$

这就是积分形式的安培环路定律，但必须注意它和（6）式并不相同.

再由闭合电流的磁场公式即毕奥-萨伐尔定律

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_l \frac{I d\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{r}}{r^2},$$

可以导出磁场的高斯定理

$$\oint_S \boldsymbol{B} d\boldsymbol{S} = 0, \qquad (27)$$

与（14）式相同.

根据在电流观点中定义磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 的公式 $\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0} - \boldsymbol{M}$ 来看，$\boldsymbol{H}$ 是由表征电流磁场的 $\boldsymbol{B}$ 和表征介质磁化程度的 $\boldsymbol{M}$ 组合而成. $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{M}$ 是两个具有不同物理意义的量，因此 $\boldsymbol{H}$ 的含义既不能同于 $\boldsymbol{B}$，也不能同于 $\boldsymbol{M}$，它在电流观点中不是表征磁场的量，而是一种辅助矢量.

磁感应 $\boldsymbol{B}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 在两种观点中都只有一个是表征磁场的物理量，在磁荷观点中本来就没有电流的磁场这一概念.同样，在电流观点中也不再有磁荷和磁荷的磁场的概念. 在讨论有关磁场问题时，只能选用两种观点中的一种，并且只能按一种观点把问题讨论到底.而不能同时兼容两种观点，否则就会导致概念上的混乱. 但是应该指出的是，在两种观点中，$\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 都分别称作磁感应矢量和磁场强度矢量而没有区别，在分析问题时，分别按两种观点计算同一问题所得到的 $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 将是相同的. 但必须再次指出，尽管计算结果相同，$\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 在两种观点中也只能有一个是表征磁场的物理量.

二、SI 单位制的应用

电磁量的 SI 单位制是以 MKSA 四个基本量为基础的，由于选取了电流强度 A 作第四个基本量，因此介电常数和磁导率都成为有量纲的量，而且也不能再任选 $\varepsilon_0 = 1$ 和 $\mu_0 = 1$. 有了电流的基本单位安培（A）就可以和功率的单位瓦特（W）一起构成电压的单位伏特（V —

W/A)，由此就可以导出具有专门名称的其它电磁学单位，如电阻的单位欧姆 (Ω)、电导的单位西门子 $\left(S=\frac{1}{\Omega}\right)$、电荷的单位库仑 ($C=s\cdot A$)、电容单位法拉 ($F=C/V$)、磁场强度单位安培每米 (A/m)、磁通单位韦伯 ($Wb=V\cdot s$)、磁感应单位特斯拉 ($T=Wb/m^2$) 和电感单位亨利 ($H=Wb/A$).

介质的磁化状态是通过关系式 $\boldsymbol{B}=\mu_0\boldsymbol{H}+\boldsymbol{J}$ 来描述的，为此就需要测量介质的磁感应 $\boldsymbol{B}$ 或磁极化强度 $\boldsymbol{J}$ 和外加磁化场 $\boldsymbol{H}$ 的大小，从而描绘出 $\boldsymbol{B}=f(\boldsymbol{H})$ 或 $\boldsymbol{J}=f(\boldsymbol{H})$ 的关系曲线. 在闭合磁路的情况下，若磁化场是由电流线圈产生的，那末磁场的大小就用磁场强度矢量 $\boldsymbol{H}$ 来表示，其值直接由电流和线圈匝数决定，介质磁感应（或磁极化强度）由绕在试样上的感应线圈测量. 若磁化场是由电磁铁产生，磁场的大小用自由空间的磁感应 $\boldsymbol{B}_0(\boldsymbol{B}_0=\mu_0\boldsymbol{H})$ 表示比较方便，用通常测量磁通或测磁感应的仪器进行测量.

在进行开路测量时，必须考虑介质端面的影响，我们用磁荷观点分析问题比较直观. 当一个有限长度的介质棒在磁化场 $\boldsymbol{H}_0$ 中被磁化后，两端出现正负磁荷，它们将在介质内外产生一个附加场 $\boldsymbol{H}'$. 有了附加场 $\boldsymbol{H}'$ 后，介质内部的总磁场强度 $\boldsymbol{H}=\boldsymbol{H}_0+\boldsymbol{H}'$，此时介质的磁极化强度 $\boldsymbol{J}$ 不再取决于磁化场 $\boldsymbol{H}_0$，而取决于介质内的总磁场 $\boldsymbol{H}$. 附加场 $\boldsymbol{H}'$ 的方向与 $\boldsymbol{H}_0$ 和 $\boldsymbol{J}$ 相反，这样介质内部的总磁场强度的数值实际上是

$$H=H_0-H'. \tag{28}$$

而且 $H<H_0$，即磁化场被减弱了，所以通常把介质内部的与外磁场方向相反的附加场 $\boldsymbol{H}'$ 叫做"退磁场"，显然退磁场的存在不利于介质磁化. 退磁场的大小，一方面与介质端面上的磁荷密度成正比（即与磁极化强度 $\boldsymbol{J}$ 成正比），另一方面在 $\boldsymbol{J}$ 给定后与介质的几何形状有关，它的表示式可写成

$$\boldsymbol{H}'=N_D\boldsymbol{J}/\mu_0, \tag{29}$$

式中 N_D 称作"退磁因子"，它是一个纯数，其大小由介质的几何形状决定. 例如对于有限尺寸的棒，N_D 由它的细长比 l/d 所决定（l 是棒的长度，d 是棒的直径）. 式中除以 μ_0 是为了使 $\boldsymbol{J}/\mu_0$ 的单位和 $\boldsymbol{H}'$ 的单位一致.

下面举例说明 SI 单位制的实际应用以及和 CGS 单位制的关系：

1. 软磁环形试样的参数测量

环形试样的磁化场是由均匀绕在环样上的电流线圈产生，因此磁场强度由公式

$$\boldsymbol{H}=\frac{N_1 I}{\pi\bar{D}}\ (\mathrm{A/cm}) \tag{30}$$

计算，式中 N_1 是线圈匝数，I 为磁化电流，单位是安培 (A)，$\bar{D}$ 是环形试样的平均直径，单位是厘米 (cm).

试样的磁感应由公式

$$\boldsymbol{B}=\frac{C_b\alpha}{N_2 S}\ (\mathrm{Wb/m^2}) \tag{31}$$

计算，式中 C_b 是仪器灵敏度，单位是韦伯每分格 (Wb/分格)，α 是仪器指示格数，N_2 是感应线圈匝数，S 是试样横截面积，单位是平方米 (m^2).

对于软磁材料很重要的一个参数是磁导率 μ，在 SI 制里是用相对磁导率 μ_r 表示，这样计算方便也可以直接和 CGS 制相比较.（在书写时经常将 μ_r 的下标 r 省略）. 它的表达式是

$$\mu_r=\frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0\boldsymbol{H}}. \tag{32}$$

它是一个无量纲的量，其值与 CGS 制中的磁导率相同. 若需要求绝对磁导率，可以用公式

$$\mu=\frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{H}}=\mu_0\mu_r \tag{33}$$

计算，它是一个与 μ_0 有同一量纲的量，单位是亨利每米 (H/m). 下面将 1J50 软磁合金的测量数据列于表 1.

表 1　1J50 软磁合金的磁特性参数

量	符号	SI 制	CGS 制	换算系数 k(SI $=k$CGS)
起始磁导率	μ_i	7200	7200	1
最大磁导率	μ_m	76000	76000	1
最大磁感应	B_m	$1.54\mathrm{Wb/m^2}$	15400 Gs	10^{-4}
剩余磁感应	B_r	$1.25\mathrm{Wb/m^2}$	12500 Gs	10^{-4}
矫顽力	H_c	0.08A/cm	0.1 Oe	$\frac{10}{4\pi}$

表 2　LNG32 永磁的磁特性参数

量	符　号	SI 制	CGS 制	换算系数 k (SI $=k$CGS)
剩磁	B_r	1.2T(Wb/m²)	12000 Gs	10^{-4}
矫顽力	H_c		600 Oe	
磁化场	$\mu_0 H_c$	600T(Wb/m²)		
磁能积	$(B\cdot H)_m$	32kJ/m³	4×10^6 GsOe	$\frac{10^{-1}}{4\pi}$
回复磁导率	μ_{rec}	3.5	3.5	1

表 1 中 μ_i，μ_m 都是指相对磁导率.

2. 永磁材料磁特性参数测量

永磁材料要求测量饱和磁滞回线在第二象限的一段即退磁曲线,它的特征参数是剩磁 B_r，矫顽力 H_c，最大磁能积 $(B\cdot H)_m$，还要求测量回复曲线及其特征量回复磁导率 μ_{rec}.

永磁材料的磁化场是由电磁铁产生，磁场的大小用自由空间的磁感应 B_0表示($B_0=\mu_0 H$).

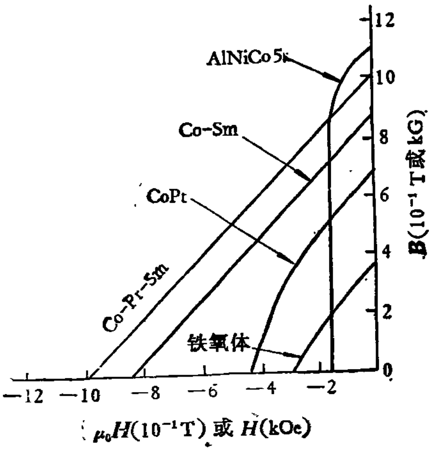

图　1

这样计算方便，特别在作图时便于和原来习惯使用的 CGS 制相比较. 下面举一铝镍钴永磁的实测数据,如表 2.

永磁材料的退磁曲线用 $B=f(\mu_0 H)$ 描绘比较方便,也便于和 CGS 制的曲线比较. 退磁曲线的典型示例如图 1 所示.

三、结　语

国际单位制是国际上公认的先进单位制，它的结构比较科学，使用比较方便，避免了由于多种单位制并用而引起的混乱和不必要的换算.

电磁量的国际制单位，由于增加了电流的基本单位安培,这样就可以通过单位换算公式，使力学、电学、热力学单位彼此发生了联系. 由于给自由空间的介电常数 ε_0 和磁导率 μ_0 赋予了量纲,这就消除了对电场强度和电位移,磁场强度和磁感应强度的概念混淆，同时也消除了 CGS 制给予电荷的又奇怪又不合理的量纲. 毫无疑义,SI 单位制必将得到广泛的应用.

误差与实验数据处理教学中的几个问题(上)

李　化　平　(北京钢铁学院物理教研组)

一、名词和概念

1. 误差：是指测量值与真实值之差[1)],即

误差＝测量值－真实值.

1) 更广义的理解是，某量值的得到值（如测量值、标称值、近似计算值）与其客观真值（如校准值、理论值、公认值等)之差.