

AS5000 是一种可以用来完成上述检测的四象限 Hall 探测器。

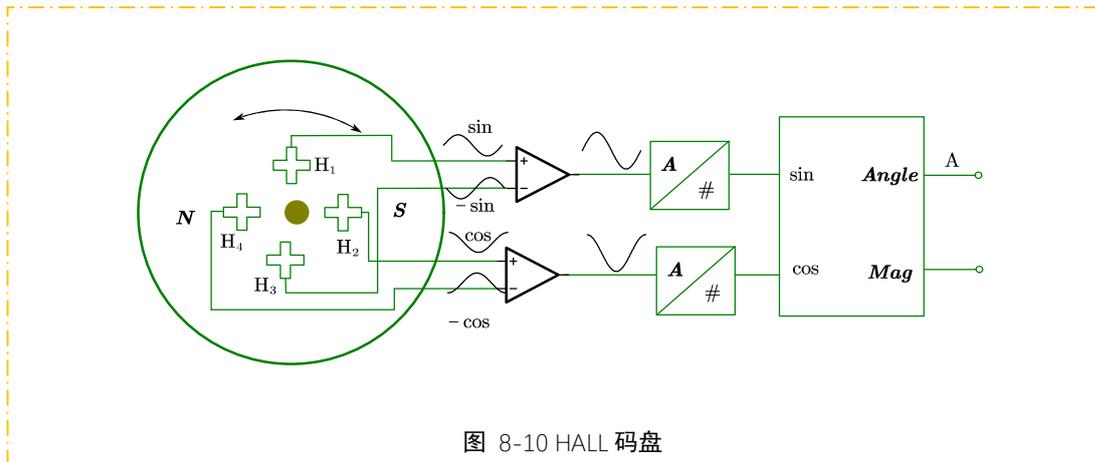


图 8-10 HALL 码盘

8.2.4 霍尔电流传感器

如果测量具有较高频率的电流大小，可以利用互感原理，既有非接触测量的优势，也有较高的精度和很宽的频率范围。50Hz 的工频互感器就是个典型的例子。但是，如果要求能测量到直流，由于变压器不能工作在直流或很低的频率下，这个方案就不能采样。如果使用霍尔元件，则可以测量从直流到频率很高的交流电流。

图 8-11 图 11-4 所示为利用霍尔效应直接测量直流电流的原理图。被测电流 I 在磁芯中产生磁通 Φ_1 ，有

$$\phi_1 = K_1 I$$

该磁通通过霍尔元件的磁感应强度为：

$$B_1 = K_2 \phi_1 = K_1 K_2 \cdot i$$

K_1 、 K_2 为电流到磁通、磁通到磁场强度的变化系数，与磁环的材料、尺寸等有关。

霍尔元件的输出电压为

$$U_H = (K_H I_H K_1 K_2) \cdot i = k \cdot i$$

其中， K_H 为霍尔元件的灵敏度； I_H 为霍尔元件的控制电流。

将霍尔元件的输出电压 U_H 通过运算放大器 A 后，其输出电压为

$$U_O = K_H K_1 K_2 \frac{R_2}{R_1} I_H \cdot i = K \cdot i$$

因此，预先测得 k 的大小，即可通过输出电压 U_H 换算出 i 的大小。

上述方案较为简单，为了提高测量装置的性能，可以使用平衡反馈式结构，如图 8-12 所示。

被测电流 i_1 在磁芯中产生磁通 ϕ_1 ，穿过霍尔元件产生霍尔输出电压 U_H ， U_H 通过放大器 A_1 放大后，产生输出电流 i_2 ，此电流通过线圈 N_2 在铁芯中产生磁通 ϕ_2 。Hall 的放置应使其输出电压通过放大、接入 N_2 后产生的磁通 ϕ_2 应与原边（测量端）产生的磁通 ϕ_1 有相互抵消的趋势，

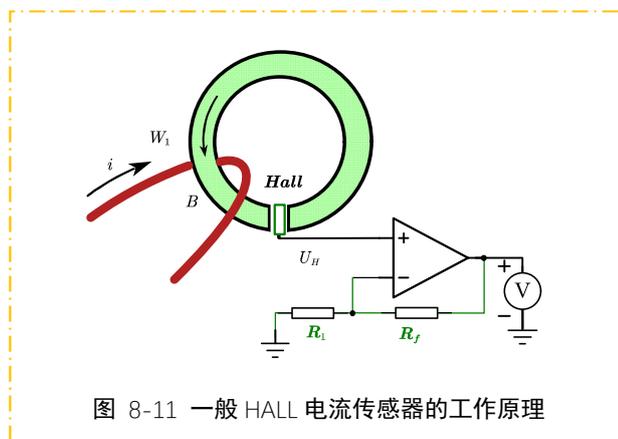


图 8-11 一般 HALL 电流传感器的工作原理

在幅值上应有：

$$\phi_1 = \phi_2$$

$$i_1 N_1 = i_2 N_2 \quad \text{或} \quad i_1 = \frac{N_2}{N_1} i_2$$

如果 $N_1=1$ ，则有 $i_1 = N_2 \cdot i_2$ 。而 i_2 的大小可以通过采样电阻 R_s 获得：其上的电压与阻值的比就是流过其上的电流。

关于反馈式(平衡式)测量系统优点的理解，可以这样推理：Hall 反馈式测量结构，Hall 元件用来做反馈式测量时，正常工作下，磁环里的磁通一定为零或接近于零。这样，对原边来讲，等效电感为零，也就是原边电流在测量时不做功；同理，副边也不做功。这可大大提高测量速度。

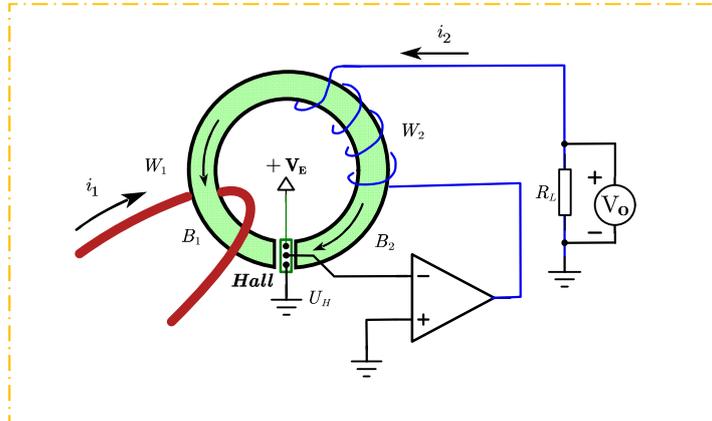


图 8-12 反馈式 HALL 电流传感器的工作原理

不加反馈时测量的缺陷体现在三个方面：1. Hall 元件的工作区间内非线性很大，其自身的非线性会影响到测量结果；而磁芯本身磁感应强度与电流也不是完全线性的，甚至在电流较大时还有可能饱和。这些都决定了其较大的非线性。2. 对测量对象有较大的影响。由于原边绕组有电感，对变化的电流有感抗作用，也就是在测量回路上有压降，这对小电压电路的测量不利。3. 其测量速度也受限。这是由于原边有个较大的等效电感，要让电感中的电流上升到一个值，必须有足够长的时间并加上足够高的电压。可以从两个角度说明这个问题：

1. 从能量的角度。若原边形成的电感值为 L ，则其中流过 I 的电流时，电感吸收并储存的能量大小为 $0.5LI^2$ 。这个过程如果在很短的时间内完成，比如一段较短的时间 δ ，外部电源需要提供的平均功率为： $0.5LI^2/\delta$ 。很显然， δ 越小，功率越大。对于一个功率有限的电源来讲，很显然，时间不能太小，也就是测量不能非常快。
2. 从 L 会抵抗电流变化的角度。可以用个简单的电路模型说明，即由 RL 组成的一阶系统来说明，如图所示。这个电路的时间常数 τ 为 L/R ，因此无论是电流增大或者电流减小，都需要一个时间过程。

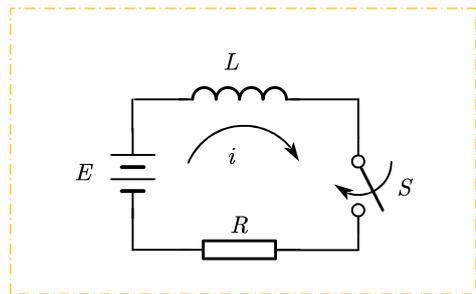


图 8-13 RL 一阶系统的电流不能突变

反馈式在工作的时候，Hall 元件工作在零点附近，原则上 Hall 元件本身的非线性不会带入反馈系统；磁环中的磁通密度也接近于零，因此涡流损耗也很小，同时，磁性材料的磁化性质也不再影响测量过程。因此这种结构的测量系统具有较好的线性。

由于其非线性得到了抑制，因此，这个结构的传感器也能工作在更大的区间，也就是具有较大的量程。

由于原边理论上的阻抗可为零，因此串接到测量回路时，对系统的理论影响也为零。实际上会有些许的漏电感及导线电阻，而这些可通过一定的措施压低到很小的值。

这种平衡式的结构还有一个非常重要的特性：它的分辨率往往也很高。根据前面的霍尔元件的特性， $V_H = A_H IB/t$ 。很显然，当处于平衡状态时，Hall 元件的激励电流 I 的稳定性对输出的影响最小，此时理论上 B 的影响为零。举个例子，对于这个结构，激励电流 I 变化 5% 引起的 V_H 变化理论上为 0，实际上也确实远远小于 5%。因此无论是 I 的时间稳定性还是温度稳定性，抑或是其上的电流噪声，比起前面的直接测量法，对测量带来的影响都会大大减小。

当然，由于一些非理想因素比如运放的频带不是无限宽，磁环会有一些漏磁、工作频带也有限制，因此，这种反馈式的多应用于频率相对较低的情形下，并不是能用在频率很高的情形比如 1MHz 以上。

这是一个很好的理解反馈式结构（平衡法测量）的传感器具有哪些优点的案例。这类传感器的主要优点我们总结如下：

1. 动态特性好
2. 线性好
3. 量程大
4. 分辨率高
5. 对测量对象的影响小

由于以上非常重要的优点，平衡反馈式结构被大量用于高精度的传感器或仪器中。

8.3 饱和磁心（磁通门）传感器

8.3.1 磁通门的基本结构及工作原理

1928 年，阿申布雷那 (H.Aschenbrenner) 和古鲍 (G.Goubau) 使用了一种环形磁芯磁通门磁强计，但第一个专利应用却是由托马斯 (H.P.Thomas) 于 1931 年完成，并在 1935 年获得了专利。

磁通门的基本结构如图 8-14 所示。两根磁棒的材料、磁化曲线、几何尺寸等参数完全相同。在磁棒上绕有三组线圈，第一组是激励线圈，它的绕法是，使它励磁时在两根磁棒里产生的磁场方向始终相反。探测线圈用来探测经磁棒通过它的交变磁场，是磁通变化量，探测线圈两端产生的电压与线圈内的磁通变化率成正比。注意探测线圈中的交变磁场来自于两个磁棒。

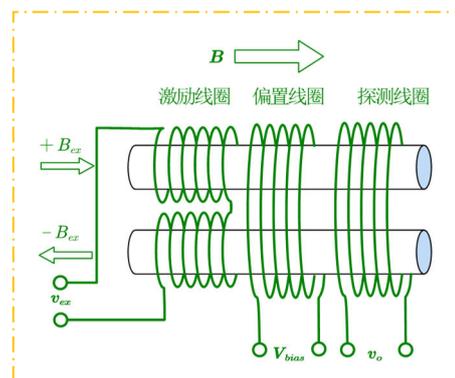


图 8-14 基本磁通门结构

磁棒中的励磁磁场由两部分组成，一是线圈中电流产生，记为 B_c ；一是外部的待测磁场，记为 B_s 。
 $B=B_c+B_s$ 。

励磁线圈产生的磁场强度记为 H ，磁感应强度记为 M 。当外部磁场强度 B_s 为 0 的时候，两个磁芯的磁化曲线如图 8-15 所示。假设以对称的三角波进行电流激励。 M_1 是磁棒 1 的磁化曲线； M_2 是磁棒 2 的磁化曲线。磁通门在工作的时候，磁性材料的磁化曲线一定要有较为明显的非线性区间。我们前面已经假设，两根磁棒完全一致，这样，它们的磁化曲线也就完全对称了。虽然有非线性，但总的磁感应强度 B 却是时时为 0。很容易得到这时候感应线圈中的磁通也时时为 0，结果就是感应线圈没有电压输出。

如果待测的外部磁场强度 B_s 不为零，这时，磁棒的磁化曲线将不再对称。假设外部磁场方向向右，一个线圈的励磁磁场也是右向时，则此磁芯会更快地进入饱和区和，磁化曲线出现更大的平顶，如图 8-16 图 f.2(b) 所示。但是，对于另外一个磁芯来讲，电流产生的磁场方向与前一个是反向的，因此，其磁化曲线的头部会出现变尖的现象。由于两根磁棒的磁化曲线不再对称，因此通过感应线圈的磁通总和不再时时为 0，也就出现了图 8-16 图 f.2(b) 中虚线所表示的剩余磁场。这个磁场是脉动的，脉动频率的基频与激励信号的基频有 2 倍的关系。探测线圈的感生电压与磁场强度的变化率成正比，因此，可以得到线圈中的磁场变化率、也就是线圈中的电压波形如图 8-16 图 f.2(b) 右下角的波形所示，也是基频与激励电流频率成双倍的关系。

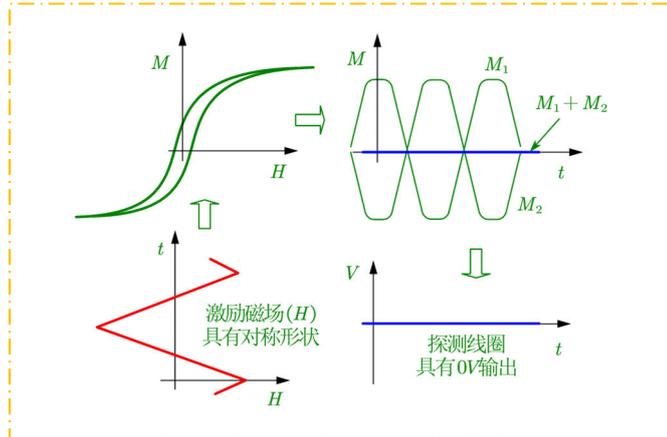


图 8-15 磁通门的工作原理；磁平衡时的情况

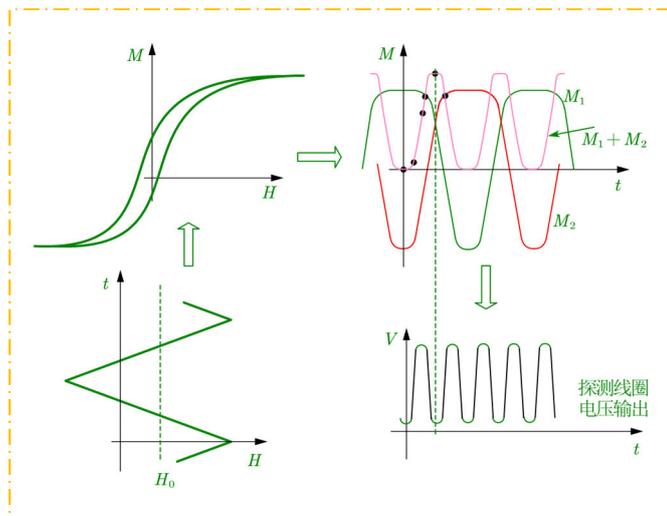


图 8-16 磁通门工作原理：有偏置磁场时在探测线圈产生感生电压

我们可以想象，外部磁场越强，磁化越不对称，探测线圈中的感生电压越大。因此，可以使用探测线圈的输出电压反映外部磁场的大小。

在使用的时候，往往由于制作工艺的原因，当外部磁场强度为零时，探测线圈的输出也不为零。这个时候，可以使用偏置线圈通以一个较小的电流，来平衡掉非零输出。当然，有时我们也会把一个不变的外部磁场看成是一个基准，测量在其上的波动量，这时也可使用偏置线圈强制使探测线圈的输出为 0。

现在很多时候采取环形磁芯，在它上面绕上两个相互垂直的探测线圈，公用一个激励线圈。它的好处是可以同时测量正交磁场，因此理论上使用两个环型探头就可以测量空间三维磁场，且有一路冗余。

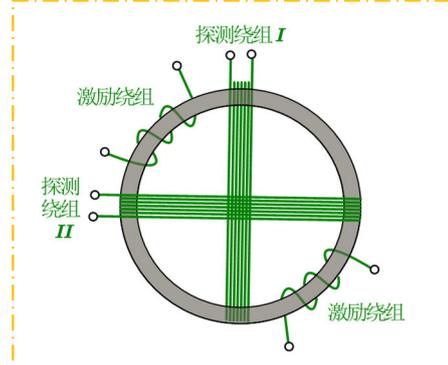


图 8-17 磁环式二维磁通门探头

若外部磁场 H_e 在平均面积为 A 的磁芯中产生的磁通密度为 $B_e = \mu_0 H_e$ ，磁通为 BA 。对于低强度场， B 和 B_e 成正比， $B = \mu_a B_e$ ，其中， μ_a 是视在磁导率或有效磁导率。 B 的变化将在 N 匝耦合线圈中感应出下列电压：

$$v_0 = NA \frac{dB}{dt} \quad [8.6]$$

根据电磁学的基本关系，有：

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 \mu_r H = \mu_a B_e \quad [8.7]$$

$$M = H(\mu_r - 1) \quad [8.8]$$

$$H = H_e - D \times M \quad [8.9]$$

式中， D 是退磁因数。对上式中的 μ_a 求解得：

$$\mu_a = \frac{\mu_r}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad [8.10]$$

若 μ_r 随时间而变，通过对式 [8.6] 取导数，最后得

$$v_0 = NAB_e \frac{1 - D}{[1 + D(\mu_r - 1)^2]} \frac{d\mu_r}{dt} \quad [8.11]$$

这里就是利用交流激励使磁芯周期性饱和达到通过改变 μ_r 得到交变的输出电压。由于高 μ_r 材料能使磁力线集中，而低 μ_r 材料则没有这一功能，所以交流激励可以使磁通集中器或磁通门接通和切断。

按照式 [8.11]，谐波的幅度与沿检测轴的（低频）磁通密度 B_e 成正比。随后的电子线路采集二次谐波并对其幅度解调，因而取名为二次谐波传感器。

8.3.2 反馈平衡式磁通门传感器

一个完整的、性能优异的磁通门传感器如图 8-18 图 f.4 所示。它采用了反馈平衡式测量技术、高低频复用技术。

信号发生器产生 f 、 $2f$ 两个频率的信号，具有频率 f 的激励信号用来激励磁通门线圈的激励线圈，具有频率 $2f$ 的信号用来做时钟参考，对输出信号进行相敏检波：上面分析我们已经得到结论，探测线圈有用的信号具有激励信号基频的 2 倍的频率。探测线圈的输出通过 C_2 耦合给放大器 II，然后提供给相敏检波器。相敏检波器后的信号经低通滤波器提供给积分器。积分器的作用是消除稳态误差，它是组成无稳态误差系统的核心，由它组成的反馈环

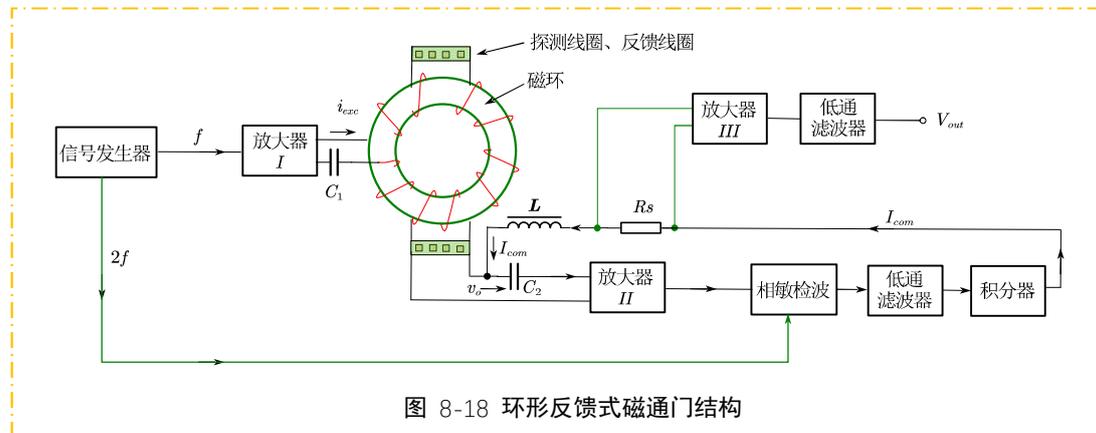


图 8-18 环形反馈式磁通门结构

路正常工作后，积分器的输入时时为零(而输出可以为任意值)。

积分器的输出经 R_s 采样电阻后再经 L 提供给探测/偏置线圈。电感 L 的作用是无阻碍通过这个低频的反馈电流，又能阻碍探测线圈获取的具有 $2f$ 频率的高频信号反向进入放大器 III、积分器组成的低频回路。这个反馈电流的作用是使其产生的低频磁场抵消外部的磁场，最终使得探测线圈探测出的频率为 $2f$ 的信号幅值减小到 0。

可以想象，只要积分器的输出电流产生的磁场强度不能平衡掉外部磁场的强度，则剩余信号强度不可能为零，即积分器的输入不会为 0，结果就是积分器进一步提高输出电压，直至积分器的输入为零。也就是一定要保证外部磁场被探测线圈加反馈线圈元件产生的低频磁场完全抵消。

由于磁通门一直工作于零磁场强度，因此它具有平衡反馈式测量结构的一切优点：线性好、测量范围宽、动态特性好、分辨率高、对测量对象的影响小等。对优点的详细分析可以参照前面对 Hall 反馈平衡式电流测量电路的解释。

8.3.3 精密直流电流比例测量电路

直流电流比较仪(Direct Current Transformer, DCT), 利用磁通门的原理, 制作的可以精密测量直流电流的传感器。它的探头结构如图 8-19 所示, 使用一磁环, 上面绕有激励线圈、探测线圈和两个比较电流线圈。 W_1 、 W_2 中分别接入标准电流和待测电流。假设 W_2 中通入的是

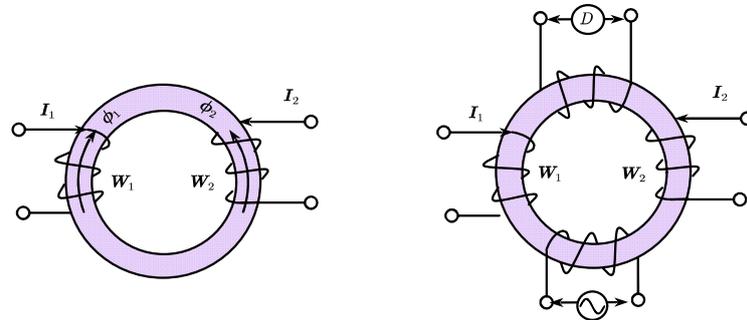


图 8-19 直流电流磁通门探头

标准电流 $I_2(I_{ref})$, I_1 中通入的是待测电流 (I_s)。则当满足 $I_s W_1 = I_2 W_2$ 时, 由它们共同产生的磁场强度为 0, 也就是不破坏磁环的对称性, 也就是如果激励线圈 W_4 中通入的是对称的交流正弦波电路, 则 W_3 的输出也必须为对称的波形。这个波形通过傅里叶分析可知, 不包含 2 次谐波; 但是, 一旦对称性被破坏, 也就是 $I_s W_1 \neq I_2 W_2$, 则 W_3 输出的波形中将有二次分量。

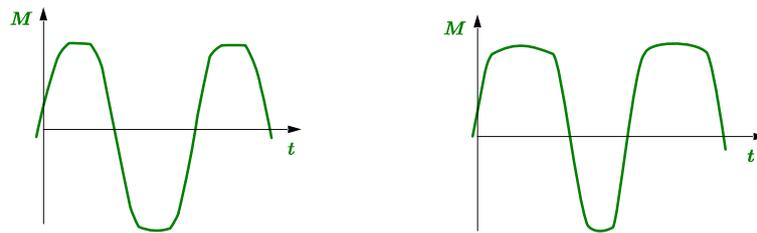


图 8-20 直流比较仪磁环中的磁化情况

因此, 我们只要对探测线圈的输出电压进行 $2f$ 解调, 通过输出电压的情况就可以知道 $I_s W_1 = I_2 W_2$ 的符合程度。极限情况, 当测量不出来有 $2f$ 信号存在时, 我们可以认为达到完全平衡。由于 I_r 已知, 而 W_1 和 W_2 也是整数, 因此, 如果 I_r 很准确, 也可以得到结论, 我们得到的 I_2 也有很高的准确度。基于这个原理的仪器其准确度可达 10^{-7} 。

8.3.4 磁通门磁场计的主要特性及用途

与另外一些灵敏磁场计, 如质子进动磁场计和光抽运磁场计不同, 磁通门磁场计能直接测量磁场的各个分量。它们也比霍尔磁场计更灵敏、更稳定, 且具有宽的测量范围(100pT - 1mT)和低噪声电平(10pT 的分辨率)。他们能测量叠加在低到 $60\mu\text{T}$ 左右的背景磁场上的达 $\pm 500\text{nT}$ 的磁场。由于磁通门场强计没有可动元件, 所以十分牢固和可靠。

磁通门磁场计不能测量频率接近激励电流频率的交流磁场, 激励电流频率受磁芯磁特性

的限制。外部磁场的上限频率约为 10kHz。磁芯和激励线圈的几何尺寸决定了功耗，这个功耗大于探测线圈式磁场计的功耗。

具有正方形磁滞回线的材料能给出具有最高灵敏度。然而，低功耗要求低的矫顽力和饱和磁场。普通磁通门采用铁氧体或钕钨合金。

在 20 世纪 30 年代和 40 年代，磁通门传感器最初是为探测潜艇而研制的，因为它能检测地球磁场的微弱变化。它们广泛用于宇宙飞行器（如低轨道卫星和外层空间探测器）的磁强计中，以及用于飞机和飞船的电子罗盘中。它们还用于地质勘探，虚拟现实系统的方向传感，以及在安保系统中用来探测含铁的物体。磁栅探头也需要使用磁通门计的原理制作。

8.4 其它磁场测量元件

除上面介绍的磁场测量原理以外，还有很多基于其它效应的磁传感器。基本的有基于电磁感应原理的探测线圈式，到超导量子干涉器件，它们的参数有着很大的差别，使用场景也很多。

8.4.1 探测线圈式磁强计

对变化磁场的测量可以使用磁电式原理。它可以工作在很高的频率，但原则上不能测量直流磁场，虽然频率可以低至几十毫赫兹。它虽然原理简单，有时分辨率及精度都很高，使用范围也很广泛。

探测线圈或感应线圈式磁强计是基于法拉第定律的简单磁场传感器。探测线圈式磁强计没有直流响应，但可以通过旋转或者振动探测线圈来检测直流磁场。某些探测线圈式磁强计采用空心结构（环形天线），这类磁强计能提供比具有圆棒磁芯的传感器更好的线性，且能工作在更高的频率，但灵敏度较低，也很笨重（特别是对于低频），从而限制了它们的空间分辨率。圆棒磁芯由高磁导率的软磁材料，如铁氧体、钕钨合金或**非晶合金**制成。为防止电场影响输出电压，将线圈用**非**磁性导体进行屏蔽。

图 8-21 示出探测线圈式磁强计的等效电路。电感、电阻和绕组间电容随线圈圈数的增加而增大，它们对频率响应造成了限制。静电屏蔽会增大 C。对短路电流进行测量能消除电容的影响，对于超过 R/L 的频率，输出与磁场的频率无关。在远低于谐振的频率上，开路电压等于感应电压，因而与磁场的频率有关。因此，电压检测适于低频和调谐频率磁场测量，而电流检测适于从大约 10Hz 到 1MHz 的宽带测量。

MEDA 公司生产的某款线圈磁场计，具有 25mV/mT 的灵敏度，以及 $10fT/\sqrt{Hz}$ 的分辨率（10kHz 附近），在 0.2Hz 具有 $2.5pT/\sqrt{Hz}$ 的分辨率。

探测线圈式磁强计广泛用于地球物理学中观察地球磁场的微脉动、油田勘探中的大地电磁测量以及电磁兼容性测试中对磁场的测量。

