

超导弱磁场测量技术在磁法找油中的应用¹⁾

贾春生

(西南石油学院基础部,南充 637001)

简述了磁法找油的思路,指出了在航磁测量中使用高 T_c 超导磁强计的必要性。采用费曼提出的简化方法,计算了通过双结超导环的最大零电压电流 I_0 。计算结果表明 I_0 随通过环平面的磁通量作周期性变化,周期为一个磁通量子 Φ_0 。根据计算结果,简要说明了超导磁强计的工作原理。最后,简要介绍了高 T_c dc SQUID 的研究进展。

一、磁法找油概述

美国的皮尔逊指出,油气藏上方由于碳氢化合物的上移形成了还原柱,柱内外氧化还原电场的变化使沉积岩极化,从而产生自然电流(如图 1 所示)。这种电流产生的磁场叠加在大地磁场之上,使油气藏上方的磁场发生异常。虽然皮尔逊提出的关于油气藏上方磁异常现象的地电流模型还不完善^[1],但是磁法找油的试验表明,与油气藏相关的磁异常确实存在,而且采用恰当的磁电滤波器对航磁测量获得的数据进行处理,提取与油气藏相关的磁异常信息,并且在航磁图上划分成油有利区和不利区是可行的^[2-4]。

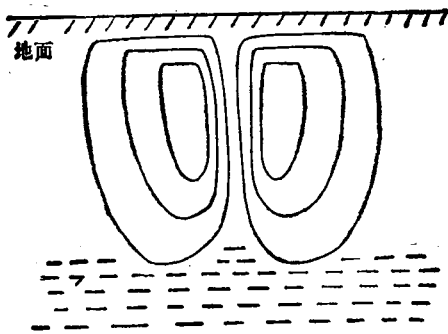


图 1 油气藏上方的地电流

由于与油气藏相关的磁异常强度很弱,其数量级为 10^{-9} nT,因此在航磁测量中需要采用

灵敏度高的磁强计进行测量。目前航磁测量中,使用的 HC-85 型光泵磁强计,显示精度为 0.1 nT。考虑到幅度仅是 1—2 nT 或数 nT 的磁异常随高度的增加衰减很快,因此在航空磁测中使用具有更高精度的超导磁强计是必要的。目前,低 T_c 商品超导磁强计的灵敏度已优于 10^{-4} nT,但是由于低 T_c 超导磁强计需要使用液氮作冷源,这就使得它不适合用于机载勘探。1987 年液氮温区超导体的发现,为人们研究在液氮温区工作的超导磁强计带来了新的希望。目前高 T_c 超导磁强计的研究进展令人鼓舞。一旦在航磁测量中使用高 T_c 超导磁强计,磁法找油的研究将会有新的突破。

二、超导磁强计的工作原理

图 2 是锁定式超导磁强计的方框图。它由直流量子干涉器 (dc SQUID) 和微小电压测量系统两大部分组成。

图 3 是带有双结的 dc SQUID 的示意图。它是由超导体把两个超导隧道结连接成一个闭合回路而组成的。超导隧道结是由中间夹有一个绝缘薄层的两块超导体所组成的,如图 4 所示。超导隧道结具有如下的物理特性。

1. 当结两端电压为零时,仍然有一股很小的电流流过绝缘薄层,这种电流称为超导电流。

1) 西南石油学院青年教师基金资助。

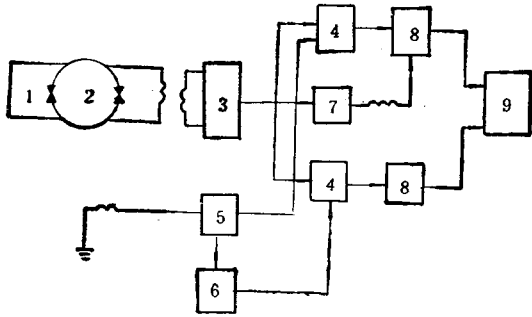


图2 锁定式超导磁强计的方框图

- 1—电流源; 2—超导量子干涉器; 3—放大器;
4—同步检波器; 5—振荡器; 6—倍频器
7—补偿磁场线圈; 8—积分器; 9—输出指示计

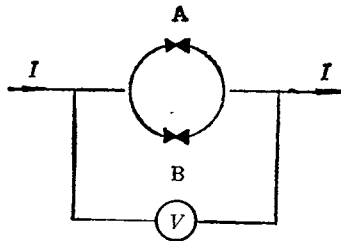


图3

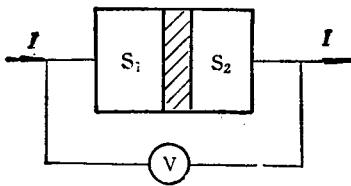


图4

当通过结的电流达到临界电流 I_c 时, 电压沿图5中的虚线从零跳到 V_G , 当电流继续增大时, 电压沿着一条二次曲线上升。临界电流 I_c 的大小与外磁场有关。如果降低电压, 电流将按单电子隧道效应曲线下降。

2. 如果在结两端加上直流电压, 这时有交流电流过绝缘层, 其频率 ν 为

$$\nu = \frac{e}{h},$$

式中 e 为电子的电量, h 是普朗克常数。结区内的交流电能向外发射电磁辐射, 同时也能吸收电磁辐射。

下面我们采用费曼 (R.P. Feynman) 提出的一种方法^[5], 导出直流超导电流与外加磁场

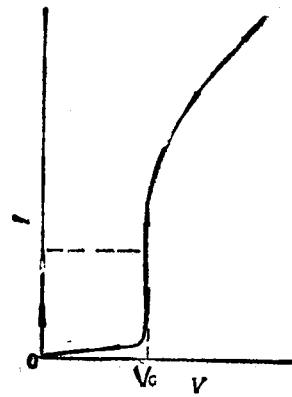


图5

的关系。设描述超导隧道结 A (见图3) 两侧超导态的有效波函数分别为

$$\Psi_1(r, t) = [n_{s1}(r, t)]^{1/2} \exp[i\phi_1(r, t)]$$

和

$$\Psi_2(r, t) = [n_{s2}(r, t)]^{1/2} \exp[i\phi_2(r, t)],$$

式中 $n_{s1}(r, t)$ 和 $n_{s2}(r, t)$ 分别表示两侧超导电子对数。为了简单起见, 假设两侧超导体是全同的, 且两侧电压为零, 于是 Ψ_1 和 Ψ_2 满足下列方程

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_1}{\partial t} = k\Psi_2, \quad (1)$$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_2}{\partial t} = k\Psi_1, \quad (2)$$

式中 k 为耦合系数, 表征两侧超导体弱耦合的程度。把 $\Psi_1 = \sqrt{n_{s1}} e^{i\phi_1}$ 和 $\Psi_2 = \sqrt{n_{s2}} e^{i\phi_2}$ 代入(1)式和(2)式, 并利用近似关系式 $n_{s1} \approx n_{s2}$, 解得

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi_1 = \frac{\partial}{\partial t} \phi_2, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{s1} = -\frac{\partial}{\partial t} n_{s2}. \quad (4)$$

上式表明, 一侧超导体失去超导电子对的速率刚好等于另一侧超导体增加超导电子对的速率。考虑到超导电子对的电量为 $2e$, 因此流过结 A 的超导电流密度为

$$J_A = 2e \frac{\partial}{\partial t} n_{s1} = J_{Ac} \sin \phi_A, \quad (5)$$

式中

$$J_{Ac} = \frac{8\pi e k}{h} \sqrt{n_1 n_2}$$

为临界电流密度, $\phi_A = \phi_2 - \phi_1$, 表示 A 结两侧超导态有效波函数的周相差。(5) 式两边乘上结 A 的面积, 得到流过结 A 的电流为

$$I_A = I_{Ac} \sin \phi_A$$

式中 I_{Ac} 为流过结 A 的临界电流。同理, 可得通过结 B 的电流为 $I_B = I_{Bc} \sin \phi_B$, ϕ_B 表示结 B 两侧超导态有效波函数的周相差。设结 A 和结 B 是两个完全相同的弱连接超导体, 则有 $I_{Ac} = I_{Bc} = I_c$ 。当没有外磁场时, 流过双结超导环的总超导电流为

$$I = I_A + I_B = I_c (\sin \phi_A + \sin \phi_B). \quad (6)$$

当加上垂直于环平面的磁场时, 外加磁场引起沿环的周相差

$$\phi_H = \frac{4\pi e}{h} \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi e}{h} \Phi = 2\pi \Phi / \Phi_0$$

式中 \mathbf{A} 为磁场的矢势, Φ_0 为磁通量子, $\Phi_0 = h/2e = 2.6078 \times 10^{-15} \text{Wb}$ 。由磁场引起的周相差 ϕ_H 和周相差 ϕ_A, ϕ_B 之间满足

$$\phi_B - \phi_A = 2\pi n + \phi_H = 2\pi(\Phi/\Phi_0 + n) \quad (n \text{ 为整数}).$$

令

$$\begin{aligned} \phi_B &= \phi_0 + \pi(\Phi/\Phi_0 + n), \\ \phi_A &= \phi_0 - \pi(\Phi/\Phi_0 + n), \end{aligned}$$

将上面两式代入(6)式, 可得存在外磁场时, 通过双结超导环的总电流

$$I = 2I_c \sin \phi_0 \cos(\pi\Phi/\Phi_0).$$

电流 I 的极大值为

$$I_m = 2I_c |\cos(\pi\Phi/\Phi_0)|.$$

上式表明, 流过双结 dc SQUID 的最大零电压电流 I_m 随通过环平面的磁通量作周期性变化, 周期为一个磁通量子 Φ_0 。当 Φ 等于 Φ_0 的整数倍时, I_m 有极大值。当流过 dc SQUID 的电流大于 I_m 时, dc SQUID 便有输出电压。

上面我们对理想 dc SQUID 进行了讨论, 对实际双结 dc SQUID 的描述可参见文献[6]。如果使通过双结 dc SQUID 的电流, 稍大于它的最大零电压电流 I_m , 那么它有一个直流输出电压, 且输出电压是外磁通 Φ 的周期函数, 周期

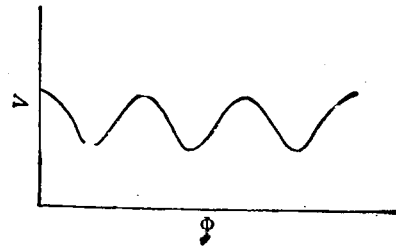


图 6

为一个磁通量子 Φ_0 , 如图 6 所示^[7]。由于磁通量子 Φ_0 很小, 因此通过测量 dc SQUID 的输出电压, 就可以测量外磁场的微小变化。

三、高 T_c dc SQUID 的研究进展

1987 年初, 发现液氮温区超导体后的几个星期之内, 研究高 T_c 超导薄膜和高 T_c SQUID 的工作便在世界各国展开了。六年多来, 高 T_c dc SQUID 的研制取得了令人鼓舞的成果。在国内, 郝凤珠等人^[8]研制的 Tl 膜 dc SQUID, 在 77K 温度下, 其磁通噪声为 $9.4 \times 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ (在 10Hz), 能量分辨率为 $1.1 \times 10^{-28} \text{J/Hz}$ (在 10Hz)。徐鸿达等人^[9]研制的工作于 78K 的 Bi 膜 dc SQUID, 在无屏蔽条件下, 0—1Hz 频率范围内, 其能量分辨率为 $3.6 \times 10^{-26} \text{J/Hz}$, 磁通噪声为 $1.7 \times 10^{-3} \Phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ 。按目前的发展趋势, 估计在今后 1—2 年内将研制出商品化的高 T_c dc SQUID, 投入实际应用。

- [1] 王家林等, 石油地球物理勘探, No. 6 (1982), 60.
- [2] 王家林等, 石油地球物理勘探, No. 6 (1985), 397.
- [3] 胡先金, 石油地球物理勘探, No. 5 (1989), 598.
- [4] 朱英, 石油物探, No. 3(1989), 16.
- [5] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, The Feynman Lectures on Physics, Addison-Wesley Publishing Company, Vol. III, (1965), 21—14.
- [6] 蒋建飞, 超导器件物理, 国防工业出版社, (1988), 493.
- [7] 杨沛然, 物理, 18(1989), 43.
- [8] 郝凤珠等, 低温与超导, No. 3 (1990), 27.
- [9] 徐鸿达等, 低温物理学报, 14(1992), 236.