

超导磁体与磁通泵

白质明

(东北大学 110819)

超导现象发现至今已经一百多年。通常一项突破性的发现在经历一百年左右的时间就可以衍生出许多生活中普及的技术。超导作为一项高技术 in 应用领域的表现却不十分令人满意。其原因之一是所面临的障碍不仅仅在于技术本身，还面临低温技术难以普及和超导材料的高成本难以降低。人们期望在不久的将来可以降低低温对超导技术的限制，研究出室温超导材料，期望发现更多便于应用的超导材料。虽然目前已经发现了上万种材料具有超导特性，但其中绝大部分不是因为所必需的超导环境温度过低，就是因为能传输的超导电流太小而失去实际应用中的使用价值。目前有实用价值的超导材料不足百种。受材料技术的限制，真正能做成导线的却只有 10 种左右。

目前，超导技术的最广泛应用是制造磁体。是在其他技术方案难以应对的场合才不得已来发挥超导磁体的独特优势。超导磁体与常规磁体相比最突出的特点是磁场很强，通常一到二十几特斯拉的磁场都是由超导磁体产生的。超导的零电阻特性在这里得到突出反映。这样强的磁体，工作电流经常高达数百到数千安培，磁体发热量却微乎其微。同样磁场强度的普通电磁体其电功率在千瓦到兆瓦水平。这样大的电功率几乎都转变成热量释放出来，磁体电源设备也十分庞大。超导磁体简化电源等设备的同时也节省了大量能源。比如大型医疗设备磁共振成像系统中的磁体磁场 1T 以上，磁体内部存储的磁能超过几兆焦耳，所产生的总热量远小于 1W。

众所周知的经典实验中，可以让一个电流在超导导线中连续不断地流动，经过几年都不衰减。很多超导磁体都是这样工作的。用一个不很大的电源，就可以给大型超导磁体供电。电流达到要求以后，通过超导开关让超导线圈闭合为一个超导环路。体积很大、匝数很多的超导磁体内部数兆 J 的电磁能量可以长期存

储，这是超导磁体的另一个十分突出的功能——超导储能。磁体所存储的能量 $E=LI^2/2$ 。电感 L 越大，磁体存储的能量就越多。超导线圈中的电流 I 增加，超导磁体所存储的能量按平方关系提高。超导储能特点有助于在现代战争科技中的激光、电磁等需要提前存储大量能量且在瞬间释放的武器上发挥独特的作用。

超导磁体能够存储能量是超导基本物理特性——抗磁性的反映。闭合的超导线圈内部磁场磁力线无法跨越超导磁体线圈逃离磁体。既是优点同时也带来了麻烦，磁体外部的磁力线同样无法进入超导磁体内部。给超导磁体加电的过程同时也是给超导线圈内补充磁力线的过程。用普通电源给超导磁体加电流，需要提前把零电阻的超导闭合环路断开，接到超导电源两端，电流加到满足要求后再将断开的超导回路重新闭合。另一种更简单的方案是使用磁通泵。

磁通泵的结构比电子电源简单很多。为克服超导抗磁性，闭合超导环路中同样也需要超导开关。磁通泵的种类有很多种变化，超导开关的类型也更加丰富。磁通泵的工作原理可以通过图 1 所示的电路进行简单说明。可以使用永磁或电磁铁产生一个旋转的磁通量。断开的超导回路没有抗磁性。超导开关 K_1 断开后，超导回路①没有抗磁性，磁力线可以随着磁铁的转动进入超导回路①中。然后关闭超导开关 K_1 ，超导回路①恢复抗磁特性，环路内的磁力线受约束不能跨越超导环路。磁铁继续转动离开超导回路①，磁体以其他形式重新获得磁力线。但被超导回路①内约束的磁力线被留了下来。之后如果打开超导回路②的超导开关 K_2 ，超导回路①内约束的磁力线会进入超导回路②。磁通量是磁力线数量，通常用 Φ 来表示。单位面积内的磁力线数量相当于磁通密度。当超导回路①中的磁通密度大于超导回路②的磁通密度时，磁力线就会不断流动。超导回路①中的磁通密度下降，超导回路②

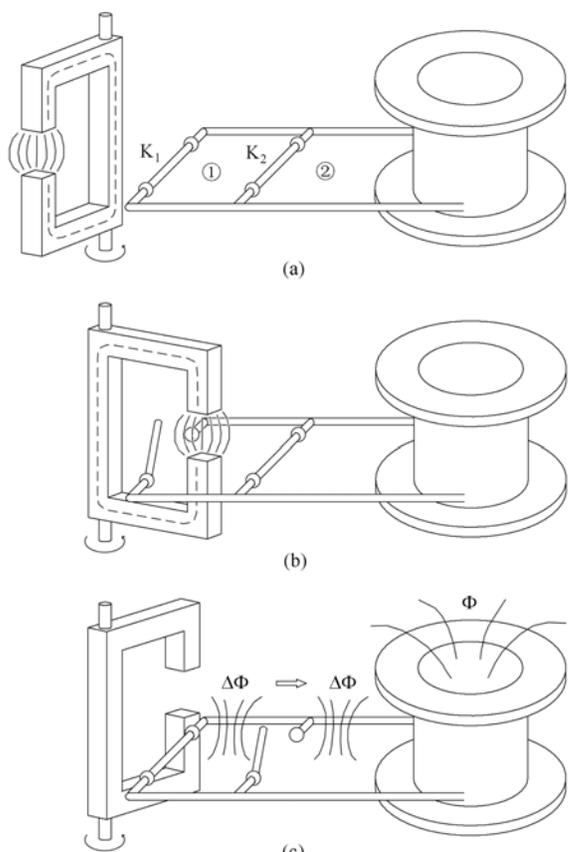


图 1

的磁通密度升高，直到两个回路内磁通密度相等。关闭超导开关 K_2 ，超导回路②内的磁力线就被约束起来。随着磁体的多次旋转，和开关 K_1 、 K_2 的反复开关，直到超导回路②中的磁通密度与新进入超导回路①中

的磁通密度相等，磁通泵就达到饱和，无法使磁通继续增加了。

闭合超导回路内约束的磁通不是孤立存在的，需要同时在超导回路内感应出超导电流。超导电流流经线圈，线圈内匝数越多就会产生越强的磁场。在一个较小的闭合超导环内，很小的磁场就可以很轻易感应出几百甚至上千 A 的超导电流。在几百到几千匝的磁体上加上数百到数千 A 的电流，就会产生特斯拉量级的强磁场。磁通泵是一种用小磁场可以产生大磁场的巧妙装置，但目前磁通泵的使用并不普遍。

除了超导线之外，另一种具有应用潜力的是块材超导体。一些超导材料制作超导导线不容易，但却比较容易制作性能极好的大块超导单晶。理论上，这种高温超导块材的磁场可以达到 20 T，是目前最强的钕铁硼永磁体块磁场强度的几十倍。这样强的磁场只能在更强的磁场内通过磁化产生。如果能设计一种合理的磁通泵结构，用小磁场对大块超导体进行磁化，一定能使块材超导在磁悬浮、强磁场等应用中发挥巨大潜力。

作者简介

白质明，男，1966 年 11 月生，教授，博士，硕士生导师。近年来主要从事电工理论新技术、超导电性及其应用、高温超导磁体、磁共振成像技术、电子电路等方面的研究。曾经从事过光学、电子、计算机等方面应用研究。

科苑快讯

从岩石中吸收水的植物

一些生活于干燥环境的植物，能够从没有任何液体水的石膏晶体中吸收水分。西班牙比利牛斯生态研究所 (Instituto Pirenaico de Ecología) 的帕拉西奥 (Sara Palacio) 和同事展示了一种以石膏栽培的特殊植物 (*Helianthemum squamatum*)，这是一种在西班牙东北部和其他地区都能找到的小型常绿灌木，能够从石膏中吸收水分。

石膏是一种硫酸钙水合物 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，也能以烧石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) 或者完全没有水分子结合的硬石膏形式存在。石膏中的结晶水不同于游离水，常常作用于浅根植物 (其吸收的水分中 70% ~ 90%



来自石膏)。关于这些植物是如何吸收结晶水的，很多细节还在研究中。有趣的是，石膏不只在地球上分布广泛，在火星上也很常见。

(高凌云编译自 2014 年 9 月 23 日《欧洲核子中心快报》)