

# 例谈以超导体为真实物理情景的创新型试题

赵顺法

浙江省玉环市玉环中学, 浙江 玉环 317600

**摘要:** 超导体具有重要的物理特性和广阔的应用前景, 本文试图通过高中物理中以超导体为真实物理情景的创新型试题来阐述超导体的特性及应用, 通过对情景的建模分析和问题解决, 提高学生挑战新颖、陌生、前沿物理问题的意识、信心和能力。

**关键词:** 超导体; 物理情景; 创新型试题

## 0 引言

《中国高考评价体系说明》中提出: 高考以生活实践问题情境与学习探索问题情境为载体, 回归人类知识生产过程的本源, 还原知识应用的实际过程, 考查学生运用所学知识解释生活中的现象、解决生产实践中的问题的能力, 同时要求学生运用创新的思维方式探索解决未知的物理现象。以现代科技前沿事件为素材进行命题, 既可以体现试题内容的时代性, 又可以引导学生关心社会、关注科技发展, 体会物理知识的应用价值, 充分发挥命题的育人功能和对教学的积极导向作用, 同时对中学物理教学资源的开发也具有良好的引领作用。本文以超导体情景的创新型试题为例谈对学生关键能力的考查。

## 1 超导体及其基本性质

1911年荷兰物理学家昂尼斯发现, 当水银的温度降低到4.2K左右时, 其电阻突然降到零(其实是极小)。随后他又发现, 除铜、金、银、铁等良导体外, 还有许多其他金属也有这种现象。1913年他把这种新的物态命名为超导态, 将进入超导态时的温度称为超导转变温度或临界温度。对于许多物质, 当温度高于临界温度时, 处于正常态, 符合一般金属电阻变化规律; 而当温度降低到临界温度以下时, 其电阻率降为零, 处于超导态, 该物质变为超导体。超导体具有如下特性:

### 1.1 完全导电性(零电阻效应)

在超导条件下, 电阻等于零是超导体的最显著的特性。如果将一金属环放在磁场中, 突然撤去磁场, 在环内就会出现感生电流。金属环具有电阻 $R$ 和电感 $L$ , 由于焦耳热损耗, 感生电流会逐渐衰减到零, 衰减速度与 $L$ 和 $R$ 的比值有关,  $L/R$ 的值越大, 衰减越慢。如果圆环是超导体, 则电阻为零而电感不为零, 因此电流会毫不衰减地维持下去。这种“持续电流”已在多次实验中观察到。测量超导环中持续电流变化的实验给出, 样品铅的电阻率小于 $3.6 \times 10^{-22} \Omega \cdot \text{cm}$ , 它比铜在室温下的电阻率

$1.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  还要小  $4.4 \times 10^{16}$  倍。这个实验结果表明超导体的电阻率确实是零。

### 1.2 完全抗磁性(迈斯纳效应)

物理学上通常将材料的磁性分为顺磁性、抗磁性和铁磁性等。铁磁性材料是把材料放到磁场中或降到某一温度以下, 材料被磁化, 产生较强的磁场且材料具有明确的磁极, 比如含铁钴镍等元素的一些材料, 磁化后的材料可以保留铁磁性。顺磁性材料是把材料放到磁场中, 材料被磁化产生一个较小的磁场, 方向与原磁场相同, 大小与原磁场成正比, 但撤销外磁场后就会消失。而抗磁性材料是把材料放到磁场中, 材料内部产生的磁场与原磁场方向相反, 反而会减弱总磁场。一般来说, 铁磁性材料放到磁场中会被原磁场吸引, 而抗磁性材料会被原磁场排斥。

普通抗磁性材料只是轻微地排斥外磁场, 磁感线可以穿过普通抗磁性材料, 但超导体的抗磁性很强, 会非常强烈地排斥外磁场, 且能牢牢束缚住磁感线, 但不能穿过处于完全抗磁状态下的超导体, 因此超导体内部的磁通量为零, 如图1所示。

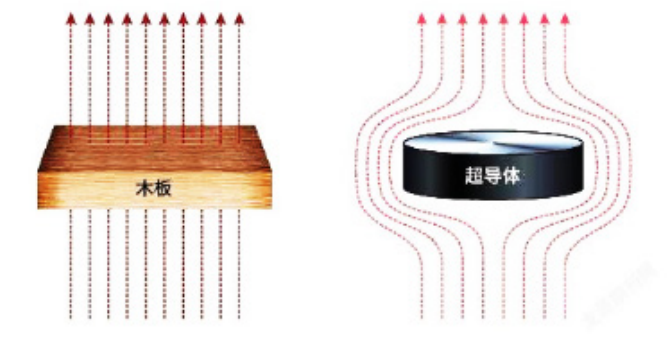


图1

## 2 超导体情景试题例析

例1: (2023北京海淀高三统考期末) 1911年, 科学家们发现一些金属在温度低于某一临界温度 $T_c$ 时, 其直流电阻率会降到 $10^{-28} \Omega$ 以下, 远低于正常金属的 $10^{-7} \Omega$ , 称为超导现象。

1934年，科学家提出超导体的二流体模型初步解释了低温超导现象。该模型认为，当金属在温度低于 $T_c$ 成为超导体后，金属中的自由电子会有一部分凝聚成超导电子（“凝聚”是指电子动量分布趋于相同、有序）。随着温度进一步降低，越来越多的自由电子凝聚为超导电子。这些超导电子与金属离子不发生“碰撞”，因而超导电子的定向运动不受阻碍，具有理想的导电性。一圆柱形金属导体，沿其轴线方向通有均匀分布的恒定电流，将中间一段金属降温转变为超导体后，超导体内的电流只分布在表面厚为 $10^{-8}\text{m}$ 量级的薄层内，其截面示意图如图2所示。在正常金属和超导体之间还存在尺度为 $10^{-8}\text{m}$ 量级的交界区。根据上述信息可知（）

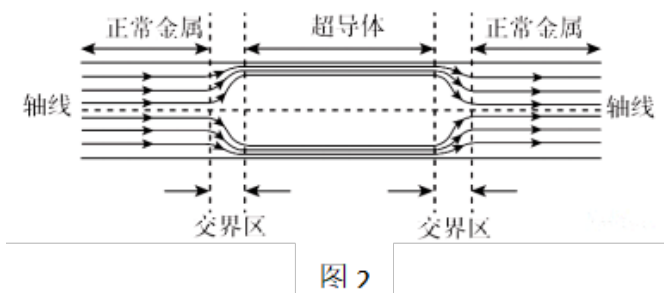


图2

- A. 交界区两侧单位时间内通过电荷量相等
- B. 超导体中需要恒定电场以维持其中的超导电流
- C. 如图中超导体内部可能存在定向移动的自由电子
- D. 如图中超导体内部轴线处的磁场一定为零

解析：超导体有两大特性，即零电阻性和完全抗磁性，这两个特性在本题中都有涉及：A. 交界区两侧的电流相等，则单位时间内通过的电荷量相等，选项A正确；B. 因超导电子能产生定向运动，不受阻碍，则超导体中不需要恒定电场以维持其中的超导电流，选项B错误；C. 由题意可知，当金属在温度低于 $T_c$ 成为超导体后，金属中的自由电子会有一部分凝聚成超导电子，则在如图中超导体内部可能存在定向移动的自由电子，选项C正确；D. 因为超导体内的电流只分布在表面厚为 $10^{-8}\text{m}$ 量级的薄层内，由对称性可知，如图中超导体内部轴线处的磁场一定为零，选项D正确。故选ACD。

拓展一：电流为什么集中分布在超导体的表层？

如图3所示，当圆柱形超导体内突然向右通过电流时，电流向右从小到大逐渐变大，电流磁场逐渐增强，根据楞次定律，在圆柱体中心轴线的四周会产生感应电流，感应电流在靠近中轴线的一侧向左，在靠近圆柱外表面一侧的方向向右；导致超导体中心区域的电流被感应电流抵消，流经超导体的电流只能从超导体

的表层流过，表现出“趋肤效应”的特征。

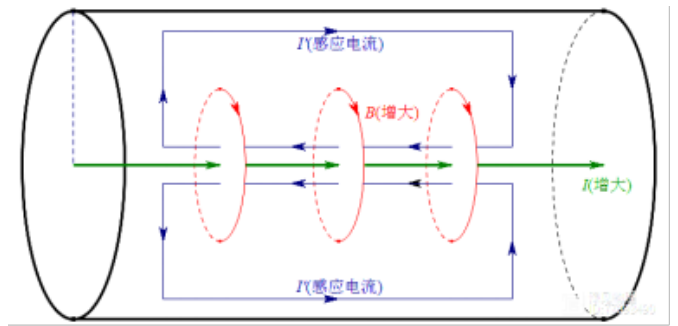


图3

拓展二：超导体内部的磁场为什么处处为零？

由于电流对称分布在圆柱形超导体的外表面，由对称性可知，超导体中轴线上的磁感应强度恰好为零，证明其他位置的磁场为零，高中阶段可以利用微元法构建两个平行的线电流，利用相似性和矢量合成证明超导体的完全抗磁性。

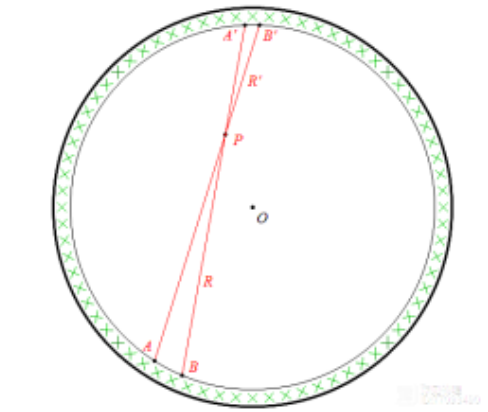


图4

如图4所示，圆环为圆柱形超导体的横截面，外环为圆柱形超导体的外表面，由对称性可知，电流在内环与外环之间的区域呈轴对称均匀分布。（1）在截面内取任一点P，过P点作两条相交弦AB'和BA'，由于两条相交弦夹角非常小，可得 $\triangle PAB$ 与 $\triangle PA'B'$ 相似，由相似比可知，圆环与两相交弦对应的微元长度和微元到P点的距离成正比，即；（2）微元中的电流与对应的微元长度成正比，即；（3）由（1）（2）可得；（4）因为直线电流的磁感应强度与电流成正比、与距离成反比（ $B=k$ ），可得AB和A'B'两个电流微元在P点的磁感应强度等值反向，相消为零；（5）由于圆环内的P点位置是任意的，所以除去超导体厚度约为 $10^{-8}\text{m}$ 厚的表层以外，超导体内部的磁感应强度处处为零，表现出“完全抗磁性”的特征。

例2：（2024年1月浙江物理选考13题）若通以电流I的圆形线圈在线圈内产生的磁场近似为方向垂直线圈平面的匀强磁场，其大小 $B=kI$ （k的数量级为 $10^{-4}\text{T/A}$ ）。现有横截面半

径为 1mm 的导线构成半径为 1cm 的圆形线圈处于超导状态, 其电阻率上限为  $10^{-26} \Omega \cdot m$ 。开始时线圈通有 100A 的电流, 则线圈的感应电动势大小的数量级和一年后电流减小量的数量级分别为

- A.  $10^{-23}V, 10^{-7}A$       B.  $10^{-20}V, 10^{-7}A$   
C.  $10^{-23}V, 10^{-5}A$       D.  $10^{-20}V, 10^{-5}A$

解析: 本题描述了一个处于近似超导状态的圆形线圈由于电阻率上限的存在, 让考生估算线圈感应电动势和一年后电流减小量的数量级, 该题情境新颖、模型独特, 要求学生建模时具有创新意识, 采用逆向思维思考感应电动势如何产生的机理, 通过创新思维建构物理模型, 简化已知数据, 估算出相关数量级大小。求解如下:

$$r_1 = 0.001 \text{ m}, r_2 = 0.01 \text{ m}, \rho = 10^{-26} \Omega \cdot m,$$

$$\text{线圈电阻 } R = \rho \frac{2\pi r_2}{\pi r_1^2} = 2 \times 10^{-22} \Omega.$$

感应电动势即为线圈的自感电动势, 大小等于电阻上的电压降, 有  $E=IR=2 \times 10^{-20}V$ 。

由法拉第电磁感应定律, 感应电动势大小

$$E = \frac{\Phi}{\Delta t} = \frac{S \Delta B}{\Delta t} = \pi r_2^2 \frac{k \Delta I}{\Delta t} = IR$$

故一年后的电流减小量

$$\Delta I = \frac{IR}{k\pi r_2^2} \Delta t \approx 2.1 \times 10^{-5} A. \text{ 选 D.}$$

本题还有更为巧妙的解法: 由自感电动势

$$\text{公式 } E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ 得 } \frac{E}{\Delta I} = \frac{L}{\Delta t}; \text{ 由 } E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ 得}$$

$$L = \frac{\Phi}{\Delta I} = \frac{BS}{I}. \text{ 代入得 } \frac{E}{\Delta I} = \frac{BS}{I \Delta t} = \frac{B\pi r_2^2}{I \Delta t} = 1 \times 10^{-15} V/A,$$

上面四个选项中只有 D 选项符合。

拓展: 超导环在磁场中如何载流?

普通导体环放入磁场中, 产生的感应电流依赖外磁场的变化, 只在均匀变化的磁场中, 环中的电流才是恒稳的。超导环的电阻为零, 将普通环放入稳定的外磁场中, 环的初始电流为零, 此时超导环的磁通量记作  $\Phi$ 。随后使环超导, 撤去外磁场, 超导环产生感应电流  $I$ , 为维持超导环中的磁通量不变, 该电流产生的磁通量就是  $\Phi$ , 超导环中的电流可以稳定存在。

例 3: (2023 年 5 月上虞区高三模拟试题)

近日, 我国某大学研究团队的“实验证实超导态‘分段费米面’”科研成果入选 2022 年度“中国科学十大进展”。某超导体制成的圆环在常温下电阻为  $R$ , 圆环的半径为  $r$ , 环横截面半径远小于圆环半径。

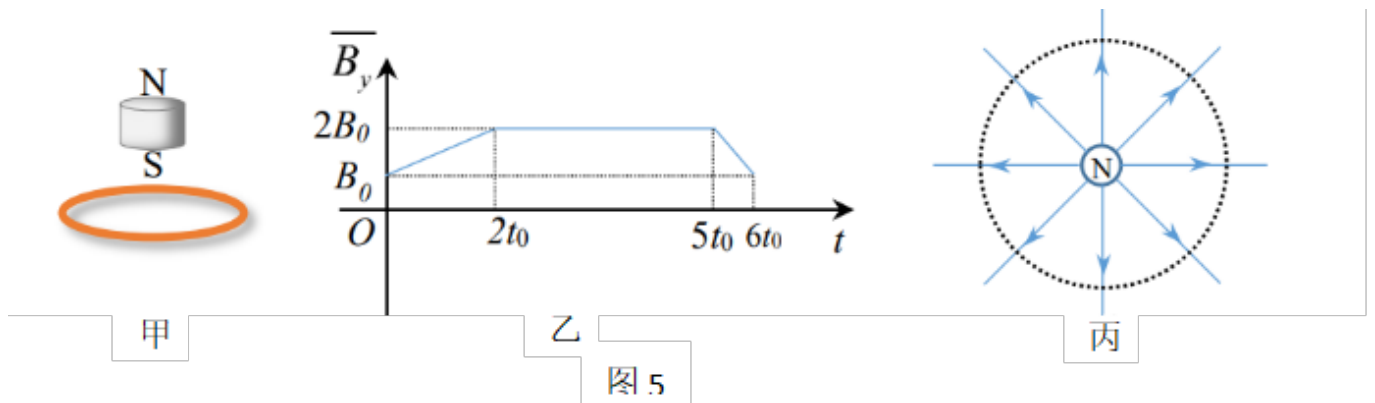


图 5

(一) 如图 5 甲, 一个钕磁铁沿轴线从上到下穿过圆环, 圆环面上的沿轴线方向的磁感应强度分量  $B_y$  的平均值随时间  $t$  变化的情况如图 5 乙所示 (已作简化处理)。求  $0 \sim 2t_0$  时间内圆环中电流的大小与方向 (从上往下看)。

(二) 求 (1) 过程中  $0 \sim 6t_0$  时间内圆环产生的焦耳热;

(三) 磁单极子是理论物理中指一些仅带有 N 极或 S 极单一磁极的磁性物质, 它们的磁感线分布类似于点电荷的电场线分布。如图 5 丙所示, 图中包围一个 N 极的磁单极子的球面的磁通量为  $\Phi_0$ , 此磁单极子从上向下以恒定速度  $v$  沿轴线穿过低温超导状态的圆环, 求在这个磁单极子到达圆环中心时圆环中的感应电动势。(不考虑线圈的自感)

(四) 当磁单极子穿过环后 (看作相距无穷远), 研究人员测得环中初始电流为  $I$ , 设环中单位体积的自由电子数为  $n$ , 电子质量为  $m_e$ ,

电荷量为  $e$ , 环的电阻率为  $\rho$ 。经一年以上的的时间  $t$  检测出电流变化量  $\Delta I$ , 其中  $\Delta I \ll I$ , 求  $\Delta I / I$  的值。

解析: 本题以超导体和磁单极产生的辐射形磁场为背景, 考查电磁感应和电路中的能量问题, 并涉及数学中的小量近似处理。

(一)  $0 \sim 2t_0$  时间内, 圆环产生的平均电动势为  $E_1 = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{B_0 \pi r^2}{2t_0}$ , 故  $I_1 = \frac{E_1}{R} = \frac{B_0 \pi r^2}{2t_0 R}$ , 由楞次定律判得电流沿逆时针方向。

(二)  $0 \sim 2t_0$  时间内, 圆环产生的焦耳热  $Q_1 = I_1^2 R \cdot 2t_0 = \frac{B_0^2 \pi^2 r^4}{2t_0 R}$ 。

$2t_0 \sim 5t_0$  时间内,  $I_2 = 0$ ;  $2t_0 \sim 5t_0$  时间内, 圆环产生的焦耳热  $Q_3 = I_3^2 R \cdot t_0 = \frac{B_0^2 \pi^2 r^4}{t_0 R}$ 。

故  $0 \sim 6t_0$  时间内圆环产生的焦耳热

$$Q = Q_1 + Q_3 = \frac{3B_0^2 \pi^2 r^4}{2t_0 R}$$

(三) 由于以磁单极子为球心, 半径为  $r$  的球面的磁通量为  $\Phi_0$ , 设距磁单极子距离为  $r$  处的磁感应强度为  $B$ , 则有  $\Phi_0 = B \cdot 4\pi r^2$ 。磁单极子到达圆环中心时, 相当于圆环切割磁感线,

产生感应电动势为  $E = B \cdot 2\pi r v$ 。故有  $E = \frac{\Phi_0 v}{2r}$ 。

(四) 根据能量守恒, 环中的电子动能减小, 转化为环的焦耳热。即  $\Delta E_k = Q$ 。

环中定向移动电子减少的动能总和为  $\Delta E_k = n l S (\frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v'^2)$ 。式中  $n$ 、 $l$ 、 $S$  分别代表环中单位体积内定向移动电子数、圆环周长、圆环截面积。

由于  $\Delta I \ll I$ , 时间  $t$  内环中焦耳热近似为  $Q = I^2 R t$ 。

### 参考文献:

- [1] 教育部考试中心. 中国高考评价体系 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2020.  
[2] 朱军, 王忠明. 例谈超导体的特性及其应用——纪念超导现象发现 100 周年 [J]. 物理教学探讨, 2010, 28(11): 36-38.

**作者简介:** 赵顺法 (1970—), 男, 汉族, 浙江台州人, 本科, 正高级教师, 中学特级教师, 主要从事中学物理教学与研究。

再由  $R = \rho \frac{l}{S}$ ;  $I = neSv$ ;  $I - \Delta I = neSv'$ 。

联立上述各式, 得  $\frac{\Delta I}{I} = \frac{n \rho e^2}{m} t$ 。

### 3 结语

以超导体为真实物理情景命制试题, 是衔接前沿科技与基础物理教学的一次有益实践。通过对零电阻效应、迈斯纳效应等核心特性的设问, 试题不仅考查了电磁学、热力学等核心概念, 更引导学生在复杂情境中完成信息提取与模型构建。这类创新型试题凸显了物理知识从理论走向应用的价值。它将实验室中的微观机理与磁悬浮、量子计算等宏观应用相关联, 有助于培养学生解决实际问题的科学思维, 提升科学探究的兴趣与素养。未来, 随着更多室温超导材料的探索, 此类情境化命题将更具生命力, 持续为物理教育与评价改革注入新活力。