

13/11/3/2007

# 第六章

## 磁学计量

# 一、磁学计量基础知识

## (一) 例题与解答

**例题 1** 什么是抗磁性物质、顺磁性物质、铁磁性物质？

**解答：**弱磁性物质的磁化强度  $M$  与磁场强度  $H$  间的关系用下式表示

$$M = XH$$

式中  $X$  称为物质的磁化率。

如果  $X < 0$ ，则该物质称为抗磁性物质。惰性气体、许多有机化合物以及若干金属如 Bi、Zn、Ag、Mg 和非金属如 Si、P、S 等都是典型的抗磁体，它们的磁化率  $X \approx -10^{-6}$ 。

如果  $X > 0$ ，则该物质称为顺磁性物质。氧分子  $O_2$ 、一氧化氮 NO 以及许多稀土金属和铁族元素的盐类、碱金属等都是顺磁性物质。它们的磁化率  $X \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ 。

此外，还有许多物质，它们的磁化强度  $M$  不是磁场强度  $H$  的线性函数，两者之间存在着很复杂的关系。 $X$  的数值很大，同时也是磁场的函数。这类物质称为铁磁性物质。铁、钴、镍、钆以及它们的化合物和合金，还有铬和锰的合金等都是铁磁物质。铁磁性物质在居里温度以下，当加上外磁场时，各磁畴磁矩趋向于外磁场方向整齐排列，使材料具有较大的磁化强度。

**例题 2** 铁磁性材料按其性能、用途和工艺方法可分为哪几类？

**解答：**铁磁性材料可分为金属磁性材料和铁氧体磁性材料两大类。其中金属磁性材料可分为：

- (1) 软磁材料，如硅钢片、铁镍合金、磁介质等；
- (2) 硬磁材料，如浇铸及烧结磁钢、单畴微粉永磁、可加工永磁、稀土永磁等；
- (3) 半硬磁材料，如铁钴钒系列合金、铁锰镍、铁钴钨、铁钴钨钼合金、铁钴钼系列合金等；
- (4) 矩磁材料，如矩磁铁镍合金、金属磁性薄膜等；
- (5) 特殊磁性材料，如磁致伸缩材料等。

铁氧体磁性材料可分为：

- (1) 软磁铁氧体，如镍—锌铁氧体、锰—锌铁氧体、锂—锌铁氧体、镍—铜—锌铁氧体等；
- (2) 硬磁铁氧体，如钡铁氧体、锶铁氧体、钴铁氧体等；
- (3) 旋磁铁氧体，如尖晶石结构的旋磁性铁氧体材料、石榴石结构的旋磁性铁氧体材料等；
- (4) 矩磁铁氧体，如镁—锰铁氧体、镁—锰—锌铁氧体、锂系铁氧体等；
- (5) 压磁铁氧体，如镍—锌铁氧体、镍—铜铁氧体、镍—铜—锌铁氧体等。

**例题 3** 永磁合金按照永磁性能形成的机理可分为哪几类？

**解答：**可分为以下六类：

- (1) 淬火硬化型磁钢, 如碳钢、铬钢、钴钢、铝钢、钨钢;
- (2) 沉淀硬化型磁钢, 这类磁钢是以 Fe—Ni—Al 和 Fe—Ni—Al—Co 为“基”的高磁能高矫顽力合金, 浇铸磁钢和烧结磁钢属于这一类;
- (3) 时效硬化型磁钢, 这类磁钢经过淬火后具有可塑性, 适合于机械加工。其中包括:
  - ①  $\alpha$ -铁基合金, 如钴钼、铁钨钴、铁钼钴;
  - ② 铁锰钛和铁钴钒合金; ③ 铜基合金, 如铜镍铁、铜镍钴合金。
- (4) 有序硬化型磁钢, 包括银锰铝、铂钴、铁铂、锰铝合金;
- (5) 单畴微粉永磁, 这类材料有锰铋合金、球型微铁粉和铁钴粉、针状微铁粉和铁钴粉;
- (6) 稀土永磁合金。

**例题 4** 金属软磁材料包括哪些材料?

**解答:** 金属软磁材料包括: 纯铁 (工业纯铁、电解铁、羰基铁)、硅钢片、铁镍合金、铁钴合金、铁铝合金等。

**例题 5** 试述磁学计量中常用名词术语的定义。

**解答:**

(1) 磁场——存在于磁体内外或运动电荷周围空间的一种物质。其特征是对磁体和运动电荷具有作用力。

(2) 磁感应强度(磁通密度)  $\vec{B}$  ——描述磁场强弱和方向的物理量(是一个轴矢量)。磁场作用于电流元  $i d\vec{l}$  的力  $d\vec{F}$  等于此电流元和磁感应强度  $\vec{B}$  的矢量积, 即

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

其中  $B$  的单位: 特斯拉 (韦伯/米<sup>2</sup>);

$i$  的单位: A (安);

$l$  的单位: m (米);

$F$  的单位: 牛顿。

(3) 磁通量  $\phi$  ——通过某一曲面  $A$  的磁通  $\phi$  等于通过该曲面磁感应强度  $\vec{B}$  的面积分, 即

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

其中  $B$  的单位: 韦伯/米<sup>2</sup>;

$A$  的单位: 米<sup>2</sup>;

$\phi$  的单位: 韦伯。

(4) 磁 (面积) 矩  $\vec{m}$  ——表征磁偶极子磁性强弱与方向的一个物理量。

磁偶极子是可以与一个无限小平面电流回路等效的。它所具有的磁 (面积) 矩值

$$\vec{m} = i \cdot \vec{A}$$

其方向符合右手螺旋定则。

式中:  $i$  ——电流 (安);

$\vec{A}$  ——面积 (米<sup>2</sup>);

$\vec{m}$  ——磁 (面积) 矩 (安·米<sup>2</sup>)。

(5) 磁化强度  $\vec{M}$  ——表示物体磁化程度和方向的一个物理量。其值等于单位体积内磁

矩的矢量和。即

$$\vec{M} = \frac{\Sigma \vec{m}}{V}$$

式中：  $V$ ——磁体的体积（米<sup>3</sup>）；  
 $\vec{m}$ ——磁（面积）矩（安·米<sup>2</sup>）；  
 $\vec{M}$ ——磁化强度（安/米）。

(6) 磁场强度  $\vec{H}$ ——与磁场中任意点的磁感应强度相联系的一个物理量。磁场强度  $\vec{H}$  决定于磁化电流和磁化强度的不连续性。

在磁化强度为  $\vec{M}$  的磁体中，磁场强度为

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

式中：  $\mu_0$ ——真空磁导率。

在真空中， $\vec{M} = 0$ ，上式成为

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

(7) 磁化率  $X$ ——磁化强度  $M$  与磁场强度  $H$  之比。

(8) 磁通势（磁动势） $F_M$ ——若磁通量是由稳态或准稳态电流所产生，磁通势等于磁场强度  $\vec{H}$  沿着包围电流闭合回路的线积分。即

$$F_M = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i$$

式中：  $i$ ——表示被线积分回路所包围的电流总和。

(9) 抗磁性——在外加磁场作用下，原子系统获得与磁场方向相反的微弱磁矩的现象。

(10) 顺磁性——原子系统固有磁矩受热骚动影响，在无外磁场时，这些磁矩的取向是无规则的，当加上外磁场时，这些磁矩就按磁场方向排列得稍为整齐，从而沿外磁场方向具有微弱磁矩的现象。

(11) 铁磁性——在居里温度以下，原子（或离子）磁矩在一定区域内自发地按同一方向平行排列的现象。

(12) 亚铁磁性——在奈尔温度以下，由于自发磁化有序排列的原子（或离子）磁矩，在一定区域内部分抵消，因而有合成磁矩的现象。

(13) 铁氧体——一般是指氧化铁和铁族或稀土族氧化物为主要成份的复合氧化物，这类材料大多数具有亚铁磁性。

(14) 居里温度（居里点） $\theta_f$ ——在此温度以上，自发磁化强度为零，即铁磁性材料（或亚铁磁性材料），由铁磁状态（或亚铁磁状态）转变为顺磁状态的临界温度。

(15) 磁各向异性——沿磁性单晶体不同方向进行磁化，为了达到同样磁化强度（一般指饱和磁化强度），需要不同能量的现象，称为磁各向异性。能量最低的方向，称为易磁化方向（轴）；能量最高的方向，称为难磁化方向（轴）。

(16) 磁畴——在居里温度以下，磁性体中存在着许多自发磁化的小区域，这样的小区域称为磁畴。

(17) 磁致伸缩——磁性体由于磁化引起的弹性形变现象。

(18) 磁化——在外磁场作用下，使磁性体感应出磁化强度的过程。

(19) 磁饱和——磁性体受到足够强的外磁场作用，磁化强度基本上不再随外磁场增加的状态。

(20) 磁中性状态——磁性体的磁感应强度和磁场强度均为零的状态。

(21) 初始磁化曲线——磁性体从磁中性状态开始，受到一个从零起单调增加的磁场作用时，所得到的磁感应强度（磁化强度或磁极化强度）随磁场变化的曲线。

(22) 磁滞——磁性体的磁化状态，不仅决定于磁场的大小，而且决定于先前的磁化状态，这种现象称为磁滞。

(23) 磁滞回线——当磁化磁场循环改变时，表示磁性体中的磁感应强度（磁化强度或磁极化强度）随磁场强度变化的闭合曲线。

(24) 正常磁滞回线——磁性体处于循环磁化状态时，得到相对于坐标原点对称的磁滞回线。

(25) 正常磁化曲线——加一个交变磁场，改变振幅，可以获得一系列正常磁滞回线，顺序联结这些回线的顶点，所得到的曲线称为正常磁化曲线。

(26) 剩余磁感应强度（剩余磁通密度）——从磁性体的某一磁化状态，沿正常磁滞回线，把磁场（包括自退磁场）单调地减小到零时的磁感应强度（磁通密度）。

(27) 剩磁  $B_r$ ——从磁性体的饱和磁化状态，把磁场（包括自退磁场沿饱和磁滞回线单调地减小到零时的磁感应强度（磁通密度）。

(28) 矫顽场强度——从磁性体的某一磁化状态，沿正常磁滞回线单调改变磁场，使磁感应强度（磁化强度或磁极化强度）减到零时的磁场强度。

(29) 矫顽力  $H_c$ ——从磁性体的饱和磁化状态，沿饱和磁滞回线单调改变磁场，使磁感应强度减到零时的磁场强度。

(30) 内禀矫顽力  $H_c$ ——从磁性体的饱和磁化状态，沿饱和磁滞回线单调改变磁场，使磁化强度减到零时的磁场强度。

(31) 绝对磁导率——物质中单位磁场强度所感生的磁感应强度。

(32) 相对磁导率  $\mu$ ——物质的绝对磁导率与真空绝对磁导率之比。

(33) 软磁材料——主要利用其磁导率特性的磁性材料，称为软磁材料。

(34) 起始磁导率  $\mu_i$ ——磁性体在磁中性状态下磁导率的极限值。

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

式中： $\mu_0$ ——真空绝对磁导率（亨/米）；

$H$ ——磁场强度（安/米）；

$B$ ——相应的磁感应强度（韦伯/米<sup>2</sup>）。

(35) 最大磁导率  $\mu_m$ ——初始磁化曲线上所得到的磁导率最大值。

(36) 增量磁导率  $\mu_\Delta$ ——在一定恒稳磁场作用下，再加交变磁场时测得的磁导率。

$$\mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

式中： $\mu_0$ ——真空绝对磁导率（亨/米）；

$\Delta H$ ——增量磁场强度的双峰值之差（安/米）；

$\Delta B$ ——相应的磁感应强度之差 (韦伯/米<sup>2</sup>)。

(37) 振幅磁导率 $\mu_a$ ——磁性体在交变磁场 (无恒稳磁场存在) 中被磁化时, 某一指定磁场 (或磁感应) 下的磁导率。

常采用峰值振幅磁导率 $\mu_{ap}$ :

$$\mu_{ap} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\widehat{B}}{\widehat{H}}$$

式中:  $\mu_0$ ——真空绝对磁导率 (亨/米);

$\widehat{H}$ ——交变磁场峰值 (安/米);

$\widehat{B}$ ——相应的磁感应强度峰值 (韦伯/米<sup>2</sup>)。

(38) 复数磁导率——磁感应强度矢量与磁场强度矢量之复数比。

(39) 总损耗——磁性材料处在随时间变化的磁场中, 材料所吸收并以热形式耗散的能量。

(40) 涡流损耗——磁性材料中, 由于涡流引起的损耗。

(41) 磁滞损耗——当磁场随时间变化, 在磁性材料中由磁滞引起的损耗。

(42) 剩余损耗——总损耗中减去涡流损耗和磁滞损耗之后, 所剩余的损耗。

(43) 永磁体——去掉磁化场后, 仍能对外保持磁场的磁性体。

(44) 自退磁场——在磁性体中, 由于磁化强度不连续性所产生的与原磁化强度方向相反的内磁场, 称为自退磁场。

(45) 退磁因子 $N$ ——当磁体被均匀磁化时, 自退磁场与磁化强度成正比, 其比例常数称为退磁因子。

(46) 退磁曲线——磁滞回线 (一般是指饱和磁滞回线) 在第二或第四象限中的那一部分。

(47) 磁路——主要由磁性材料组成 (包括气隙), 便于通过磁力线的回路。

(48) 磁能积——在永磁体的退磁曲线上, 任意点的磁感应强度与磁场强度的乘积。

(49) 最大磁能积 $(B \cdot H)_{max}$ ——在永磁体的退磁曲线上, 获得磁能积的最大值。

(50) 回复线 (回线、曲线)——永磁体在回复状态时, 往复的局部磁滞回线或其一部分。

(51) 回复磁导率 $\mu_{rc}$ ——等于回复线的斜率。

(52) 漏磁通——是指没有经过主磁路的那一部分磁通。

(53) 磁阻 $R_M$ ——磁通势与对应的磁通量之比。

**例题 6** 给出主要磁学量在国际单位制和CGS单位制中的换算关系。

**解答:** 主要磁学量在国际单位制和CGS单位制中的换算关系如表 (6.1.1) 所示。

表 6.1.1

磁 学 量	国 际 单 位 制 (SI)	C G S 制	换 算 比
磁 通 量 $\Phi$	韦伯 Wb	麦克斯韦 Mx	$10^8$
磁(面积)矩 $m$	韦伯·米 Wb·m		$7.96 \times 10^3$
磁化强度 $M$	安/米 A/m	高斯 Gs	$10^{-3}$
磁感应强度 $B$	韦伯/米 <sup>2</sup> Wb/m <sup>2</sup>	高斯 Gs	$10^4$
磁场强度 $H$	安/米 A/m	奥斯特 Oe	$4\pi \times 10^{-3}$
磁通势 $F_M$	安 A	吉伯 Gb	$4\pi \times 10^{-1}$
真空磁导率 $\mu_0$	亨/米 H/m		$10^7/4\pi$
磁晶各向异性能	焦耳/米 <sup>3</sup> J/m <sup>3</sup>	尔格/厘米 <sup>3</sup>	10
磁 能 积	焦耳/米 <sup>3</sup> J/m <sup>3</sup>	高斯·奥斯特	$4\pi \times 10$

注：国际单位制的数值乘以换算比，得CGS制数值

## (二) 学习与参考资料

1. 《铁磁学》 郭贻诚 人民教育出版社 1965年
2. 磁性材料与器件术语及定义 SJ—1258—77
3. 永磁合金工艺 金山器材厂 1975年
4. 金属磁性材料 戴礼智 上海人民出版社 1973年
5. 《铁氧体物理学》 李荫远 李国栋 科学出版社 1978年

## 二、磁场、磁通、磁矩

### (一) 基本要求

1. 掌握计量学基础知识。
2. 掌握磁学计量基础知识 (参见本章第一节内容)。
3. 了解电工学、电动力学、量子力学、铁磁学、无线电技术的基础知识。
4. 熟练运用磁量具比较方法进行磁通量具常数、磁场量具常数、线圈常数的检定。
5. 掌握霍尔效应法测量磁场强度。
6. 熟练掌握磁通计的检定方法。
7. 了解使用核磁共振法, 测量磁场的原理和误差。
8. 了解磁通门磁强计、约瑟夫森效应的原理。
9. 了解数字磁通计的原理。
10. 了解磁矩标准量具。
11. 了解磁学计量的发展趋势。

### (二) 例题与解答

**例题 1** 磁学计量中常用磁场强度量具有哪些?

**解答:** 磁学计量中常用磁场强度量具分为两类:

- (1) 通电流的线圈型量具, 如亥姆霍兹线圈、螺线管等;
- (2) 永久磁铁型量具。

**例题 2** 磁学计量中常用磁通量具有哪些?

**解答:** 磁学计量中常用磁通量具包括: 具有单层初级绕组和次级绕组的圆柱形螺线管、标准互感线圈、康培尔式线圈。另外, 椭球形永久磁铁也可作为磁通量具。

**例题 3** 给出我国磁学单位量值传递系统图。

**解答:** 目前我国的磁学单位量值按图 (6.2.1) 的系统进行传递。

**例题 4** 磁矩标准量具有哪几种?

**解答:** 磁矩标准量具有两种, 一是尺寸比例不同的椭球形或圆柱形永久磁铁组; 二是通以恒定电流的线圈。

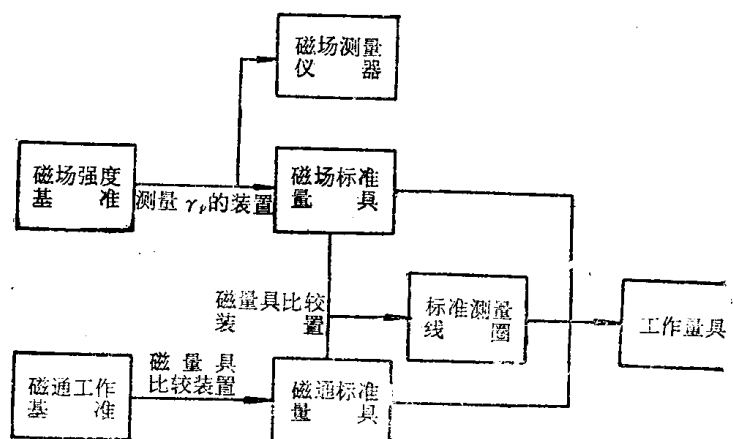


图 6.2.1



例题 5 画出用磁量具比较方法进行磁场量具和磁通量具传递的原理线路。

解答：比较磁量具的差值冲击法线路如图 (6.2.2) 所示。

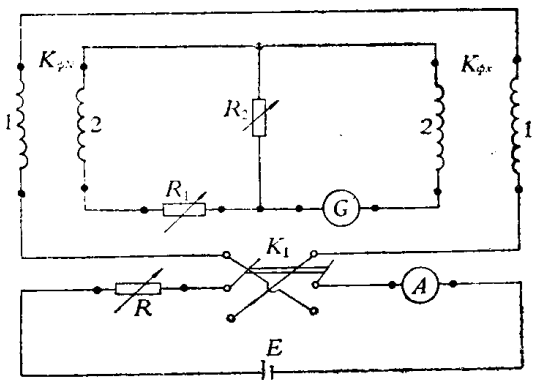


图 6.2.2

$E$ ——直流电源； $R$ ——调节电流的电阻；  
 $A$ ——直流电流表； $K_1$ ——电流换向开关；  
 $R_1$ ——电阻； $G$ ——冲击检流计； $K_{\phi N}$ ——标准量具常数； $K_{\phi x}$ ——被测量具常数

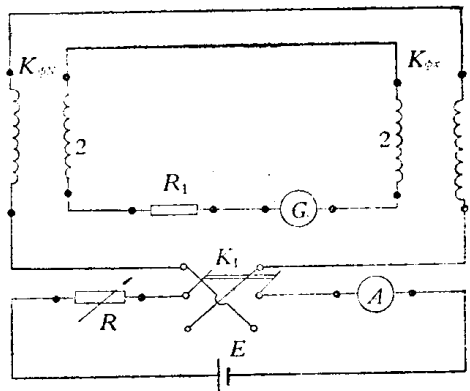


图 6.2.3

$K_{\phi x}$ ——被测量具常数； $G$ ——冲击检流计；  
 $K_1$ ——电流换向开关； $A$ ——直流电流表；  
 $E$ ——直流电源； $R$ ——调节电流的电阻；  
 $R_1$ 、 $R_2$ ——次级回路电阻； $K_{\phi N}$ ——标准量具常数

差值冲击法用来比较同名义值的量具。它是将比较的两种量具初级绕组串接，而次级绕组则经过冲击检流计对接。

比较磁量具的零值冲击法线路如图 (6.2.3) 所示。

零值法用来比较不同名义值的量具。它是将测量回路接成桥路的形式，测量时通过调节电阻  $R_1$  和  $R_2$ ，使线路达到平衡，即当改变初级绕组电流的大小或者方向时，检流计不再偏转。

例题 6 简述用差值冲击法进行磁场量具和磁通量具传递的原理。

解答：当采用差值冲击法线路时，用图 (6.2.2) 的换向开关  $K_1$ ，改变初级绕组电流方向或者断掉电流。这时检流计的偏转与两个量具的磁通量之差  $\Delta\phi$  成比例

$$\Delta\phi = \phi_x - \phi_N = \pm C_{\phi} \alpha$$

或者

$$K_{\phi x} = K_{\phi N} \pm \frac{C_{\phi} \cdot \alpha}{\Delta I} \quad (6.2.1)$$

式中：  
 $\phi_N$ ——标准磁通量具产生的磁通；  
 $\phi_x$ ——被测磁通量具产生的磁通；  
 $K_{\phi N}$ ——标准磁通量具的常数；  
 $K_{\phi x}$ ——被测磁通量具的常数；  
 $C_{\phi}$ ——检流计的冲击常数；  
 $\alpha$ ——检流计的偏转；  
 $\Delta I$ ——电流变化量。

已知磁通线圈常数  $K_{\phi}$ 、磁场强度线圈常数  $K_H$  和测量线圈常数  $K_{SW}$  三者之间存在如下关

系

$$K_{\phi} = K_H \cdot K_{SW}$$

所以,当测量磁场强度量具常数时,将一个已知常数的标准线圈放进被测磁场强度量具内,组成一个磁通量具,接入图(6.2.2)线路右端,磁场强度量具常数 $K_{Hx}$ 按下式计算

$$K_{Hx} = \frac{K_{\phi N}}{K_{SWN}} \pm \frac{C_{\phi} \alpha}{K_{SWN} \cdot \Delta I}$$

式中:  $K_{SWN}$ ——标准测量线圈常数。其余符号同(6.2.1)式。

同理,当测量线圈常数时,将被测线圈放进已知磁场线圈常数的标准磁场量具中,组成一个磁通量具,接入图(6.2.2)线路右端,线圈常数 $K_{SWx}$ 按下式计算

$$K_{SWx} = \frac{K_{\phi N}}{K_{HN}} \pm \frac{C_{\phi} \cdot \alpha}{K_{HN} \cdot \Delta I}$$

式中:  $K_{HN}$ ——标准磁场强度量具常数。其余符号同(6.2.1)式。

**例题7** 简述用零值冲击法进行磁场量具和磁通量具传递的原理。

**解答:**用零值冲击法进行测量时,通过调节电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 使线路达到平衡,这时被测磁通量具的常数 $K_{\phi x}$ 按下式计算

$$K_{\phi x} = K_{\phi N} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_N}$$

式中:  $R_N$ ——标准量具的次级绕组电阻(包括接线电阻)。

同理,被测磁场强度线圈常数 $K_{Hx}$ 和被测线圈常数 $K_{SWx}$ 分别按下面的公式计算

$$K_{Hx} = \frac{K_{\phi N}}{K_{SWN}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_N}$$

$$K_{SWx} = \frac{K_{\phi N}}{K_{HN}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_N}$$

**例题8** 试分析用差值冲击法检定磁量具的误差。

**解答:**以检定互感线圈为例,分析差值冲击法的误差。

由(6.2.1)式得到,用差值冲击法检定互感线圈的计算公式为

$$M_x = M_N \pm \frac{C_{\phi} \cdot \alpha}{\Delta I} = M_N \left( 1 \pm \frac{\Delta I'}{\Delta I} \cdot \frac{\alpha}{\alpha'} \right) \quad (6.2.2)$$

式中:  $M_x$ ——被检互感线圈的互感系数;

$M_N$ ——标准互感线圈的互感系数;

$\Delta I'$ 、 $\alpha'$ ——对测量回路进行刻度时,标准互感线圈初级电流变化量和相应的检流计偏转;

$\Delta I$ 、 $\alpha$ ——测量时,初级回路电流变化量和相应的检流计偏转。

由(6.2.2)式可以求出,用差值冲击法检定互感线圈的基本误差表达式为

$$\frac{dM_x}{M_x} = \frac{dM_N}{M_N} + \left( \frac{\Delta I'}{\Delta I} \right) \left( \frac{\alpha}{\alpha'} \right) \left[ \frac{dI'}{I'} + \frac{dI}{I} + \frac{d\alpha'}{\alpha'} + \frac{d\alpha}{\alpha} \right]$$

式中:  $\frac{dM_N}{M_N}$ ——标准互感线圈的相对误差,由上一级计量机构给出;

$\frac{dI'}{I'}$ 、 $\frac{dI}{I}$ ——测量电流  $I'$  和  $I$  的误差;

$\frac{d\alpha'}{\alpha'}$ 、 $\frac{d\alpha}{\alpha}$ ——检流计两次偏转的读数误差。

除以上基本误差外,还存在着标尺的非球面修正误差、周围杂散电磁场给测量带来的误差等。

**例题 9** 简述  $CB_2$  型磁量具比较装置的安装注意事项。

**解答:** 安装  $CB_2$  型磁量具比较装置时应注意以下几点:

- (1) 装置放置的地点,应保证周围 1 米以内没有铁磁物质和外杂散磁场(地磁场除外);
- (2) 冲击检流计应安装在符合要求的固定台上,固定台与地面相距约为 1—1.2 米。冲击检流计小镜与标尺相距应大于 0.75 米;
- (3) 接线时应保证测量回路中所有导线不要形成面积太大的闭合回路;
- (4) 螺线管放置的方向应与地磁场的方向垂直;
- (5) 为防止漏电现象,装置和检流计应很好接地。

**例题 10** 用磁量具比较装置进行测量时,应注意哪些问题?

**解答:**

(1) 测量前,应首先检查被测量具的接线是否正确。为此可在小电流下观察,仅接一个量具时检流计的偏转方向。若只接入标准量具的偏转方向,与只接入被测量具的偏转方向相反,说明接线是正确的。反之,说明接线是错误的,应将被测量具次级接线倒换过来。

(2) 测量冲击常数时,互感线圈初级电流从最小值逐渐增加,其最大电流不应超过互感线圈的额定电流;

(3) 用零值法进行测量时,若线路不能达到平衡,说明图 (6.2.3) 中的  $K_{\mu N} < K_{\mu}$ 。为此,可将标准量具与被测量具的位置对调。

(4) 用差值法进行测量时,检流计偏转应读准到 0.2 分格,并进行多次测量,取其平均值作为测量结果。

**例题 11** 简述磁通计的结构特点和工作原理。

**解答:** 磁通计是一种阻尼很大的磁电式仪器。其结构特点是无反作用力矩,即由悬丝的扭转、或引入线圈中电流引线的扭转,产生的反作用力矩很小,与电磁制动力矩相比,可以略去不计。这时磁通计处在过阻尼状态,其运动方程从 (6.3.1) 式变为

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} = Gi \quad (6.2.3)$$

式中  $G = B_0 NS$ 。

由于磁通计是在过阻尼状态下工作,其线圈偏转可认为发生在感应电压存在的过程。根据此初始条件,解 (6.2.3) 式得

$$\Delta\phi = \frac{C_{\mu} \cdot \alpha}{N_2}$$

式中： $\Delta\phi$ ——被测磁通的变化量；  
 $C_s$ ——磁通计的磁通常数；  
 $\alpha$ ——磁通计的指针偏转；  
 $N_2$ ——测量线圈匝数。

上式说明，磁通计的指针偏转与被测磁通变化量成正比。

**例题12** 磁通计主要应检定哪些内容？

**解答：**磁通计主要应检定的内容是：

- (1) 外观检查；
- (2) 剩余反作用力矩值检查；
- (3) 活动部分平衡的检查；
- (4) 读数检定。

**例题13** 试画出检定磁通计读数的原理线路。

**解答：**检定磁通计读数的原理线路如图(6.2.4)所示。

**例题14** 检定磁通计时，对电流表和互感线圈的精度有何要求？

**解答：**检定2.5级以上的磁通计时，要求电流表的精度为0.2级或0.5级；互感线圈的精度为0.2级以上。

**例题15** 简述磁通计的检定方法和检定结果的处理。

**解答：**通常采用磁通计读数与标准互感线圈产生的磁通量进行比较的方法，来检定磁通计。标准互感线圈产生的磁通 $\phi = 2IM$ （式中 $M$ ——互感系数； $2I$ ——互感线圈初级电流的变化量）。为使磁通计的指针指示在要求检定的位置，可根据下式求出标准互感线圈初级的电流 $I$ 。

$$I = \frac{\phi}{2M} \quad (6.2.5)$$

当对电流 $I$ 进行换向时，磁通计的读数为

$$\phi_x = C_s \cdot \alpha \quad (6.2.6)$$

式中： $C_s$ ——磁通计常数；  
 $\alpha$ ——磁通计偏转。

磁通计的引用误差按下式计算

$$\gamma = \frac{\phi_x - \phi}{\phi_{\max}}$$

式中： $\phi$ ， $\phi_x$ ——分别按(6.2.5)式和(6.2.6)式计算的磁通量；

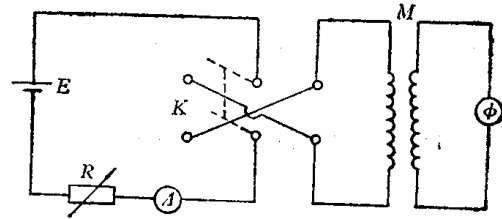


图 6.2.4

$\phi$ ——被检磁通计； $M$ ——标准互感线圈；  
 $A$ ——直流电流表； $K$ ——电流换向开关；  
 $R$ ——调节电流的电阻； $E$ ——直流电源

$\phi_{\max}$ ——仪器测量上限的磁通数值。

**例题16** 产生磁场的方法有哪些？

**解答：**产生磁场的方法主要有以下几种：

- (1) 用永久磁铁产生磁场；
- (2) 用磁场线圈产生磁场，其中包括单层和多层亥姆霍兹线圈、单层和多层螺线管；
- (3) 用电磁铁产生磁场，其中包括中场和强场磁导计，外斯型和比特型结构的电磁铁；
- (4) 用超导螺线管产生磁场；
- (5) 用脉冲螺线管产生磁场。

**例题17** 亥姆霍兹线圈的结构有什么特点？

**解答：**亥姆霍兹线圈是一个标准弱磁场源，在理想情况下，它是两个相同半径的圆形线圈绕组，相互平行地分布在一个公共轴上，它们之间的距离  $2a$  等于其半径  $r$ 。亥姆霍兹线圈具有很高的均匀度和大的均匀区，单层绕组线圈的常数计算误差，可以达到0.001%。

**例题18** 简述核磁共振法测量磁场的原理，采用这种方法测磁场时的误差源主要有哪些？

**解答：**核磁共振法测量磁场的原理：任何具有本征磁矩的原子核，在外磁场的作用下，要产生能级分裂，即出现塞曼效应。如果在垂直于外磁场  $H$  的方向，加一小的射频场，当射频场的频率  $\omega$  等于原子核的进动频率时，则系统中处于低能级的粒子就从射频场中吸收能量，跃迁到相邻的高能级上去，这个现象称为核磁共振。这时存在下面的关系式：

$$\omega = \gamma_p \cdot H$$

式中： $\gamma_p$ ——物质的固有常数，称为质子回旋磁比。若  $\omega$  能准确测量出，则可以高精度地获得  $H$ 。

采用核磁共振法测量磁场时的误差源主要包括：

- (1) 质子回旋磁比  $\gamma_p$  的测量误差；
- (2) 频率  $f$  的测量误差；
- (3) 在被测磁场  $H$  中放入核磁共振探头后，使工作样品位置的磁场与被测磁场略有不同，所引起的磁场测量误差；
- (4) 测量时，由于高频磁场存在与原子核进动异相分量，而引起的共振频率偏差；
- (5) 共振频率的位置确定不正确引起的误差；
- (6) 弱振荡器频率不稳定而引起的共振频率测定误差；
- (7) 被测磁场不稳定引起的误差。

**例题19** 什么是霍尔效应？利用霍尔效应测量磁场的原理是什么？

**解答：**霍尔效应就是在与纵向电流和横向磁场相互垂直的方向上，出现一个电场的现象。如图(6.2.5)所示，将一块金属或半导体放入磁场  $H$  中，在垂直于磁场方向通电流  $i$ ，则电子在洛仑兹力作用下，沿垂直于  $H$  和  $i$  平面的方向移动，最后产生一个稳定的电动势

$U_H$ 。这一效应称为霍尔效应， $U_H$  称为霍尔电动势。

根据 Sondheimer 建立的理论，霍尔效应的数学表达式为

$$U_H = R_H \frac{iB}{d}$$

式中： $R_H$ ——霍尔系数；  
 $B$ ——样品磁感应强度；  
 $d$ ——样品厚度。

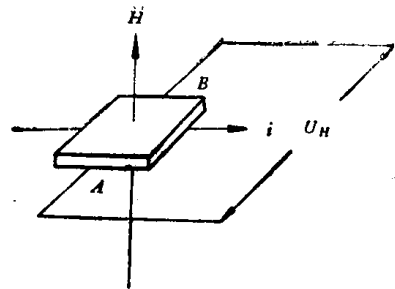


图 6.2.5

由于金属或半导体的磁化率比 1 小很多，可用磁场强度  $H$  代替  $B$  ( $B = \mu_0 H$ )，上式变成

$$H = \frac{d}{\mu_0 R_H i} \cdot U_H$$

若已知某一材料的霍尔系数，对于给定的电流  $i$ ，磁场  $H$  与霍尔电动势  $U_H$  成正比，这样就可通过  $U_H$  的测量得到被测磁场数值。

**例题20** 利用霍尔效应测量磁场时包括哪些误差？

**解答：**利用霍尔效应测量磁场的误差，除测量霍尔电动势的仪表误差外，还有霍尔元件本身产生的误差，它主要包括：

- (1) 霍尔系数随温度变化；
- (2) 磁电阻效应；
- (3) 霍尔系数在不同的磁场范围，数值不同；
- (4) 不等位电势引入的误差。

**例题21** 简述磁通门磁强计测量弱磁场的原理。

**解答：**磁通门磁强计的探头是利用高磁导率材料制成的铁芯。图 (6.2.6) 是纵向激励磁场的探头。交流饱和激励磁场  $H_{\infty}$  的方向与被测直流磁场  $H_0$  的方向平行。由于铁芯磁化曲线的非线性， $H_{\infty}$  和  $H_0$  同时作用于铁芯的结果，使其磁感应在线性、负半周的波形不对称了。

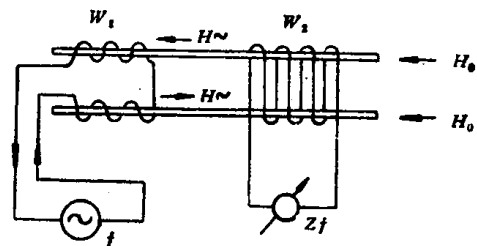


图 6.2.6

将这种非对称的波形进行傅里叶级数展开，其中包含有偶次谐波，且偶次谐波中的主要成份（二次谐波的振幅）与被测弱磁场  $H_0$  成正比。这就是用磁通门磁强计测量弱磁场的原理。

**例题22** 什么是约瑟夫森效应？用超导量子干涉器件测量磁场的原理是什么？

**解答：**约瑟夫森效应，是指两块超导体间存在着弱耦合时，超导电子通过这种安排（称为超导约瑟夫森结）而表现出一系列电、磁和辐射特性。现代超导理论指出，电子在超导体内是按特殊方式成对结合着，所谓超导电流，就是这种电子对的整体运动。当两块超导体靠得很近，中间仅几十 Å 的势垒层时，若通以直流恒流源（图6.2.7），则会出现：

- (1) 当  $I < I_c$  时，势垒层中允许通过无损电流，即允许出现零电压下的电流；
- (2) 当  $I > I_c$  时，超导体 I—II 结二端会出现一定的电位差  $V$ ，且对应此电压  $V$  下有

一定频率  $f$  的电磁波辐射，并有关系  $f = \frac{2e}{h} V$  (式中  $\frac{h}{2e}$  称为磁通量子)。这就是约瑟夫森效应， $I_c$  称为约瑟夫森临界电流，对应于 (1) 的情况称为直流约瑟夫森效应，对应于 (2) 的情况称为交流约瑟夫森效应。

当超导结置于外磁场下，则会出现  $I_c$  随磁场敏感地变化，且呈周期性的起伏(图6.2.8)。其周期为  $\phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15}$  韦伯。这种现象称为超导量子干涉效应。所以只要测出

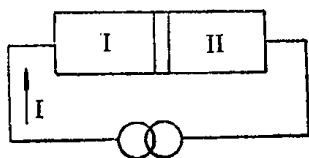


图 6.2.7

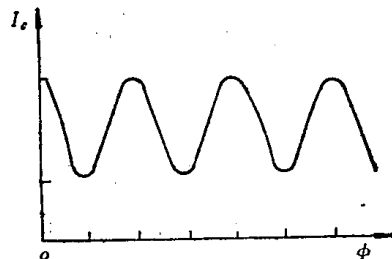


图 6.2.8

$I_c-\phi$  曲线起伏的周期数  $n$ ，就可按照下式计算出欲求的磁场  $H$ 。

$$H = \frac{1}{\mu_0 S} (n\phi_0 + \Delta\phi)$$

式中： $\mu_0$ ——真空磁导率；  
 $S$ ——结的截面积；  
 $\Delta\phi$ ——被测磁通中不足  $\phi_0$  整数倍的部分。

例题23 磁通单位韦伯 (Wb) 的定义是什么？

解答：磁通单位韦伯的定义是，一匝环路交链的磁通量，如果使它在 1 秒内均匀地减小到零，则在环路中产生 1 伏特的电动势。

例题24 水中质子回旋磁比的最新平差数据是多少？

解答：是  $4.257602 \times 10^7$  赫兹·特斯拉<sup>-1</sup>，不确定度为  $2.8 \times 10^{-6}$ 。

例题25 磁通量子  $\left(\frac{h}{2e}\right)$  的最新平差数据是多少？

解答：是  $2.0678506 \times 10^{-15}$  韦伯，不确定度为  $2.6 \times 10^{-6}$ 。

例题26 简述数字磁通计的工作原理。

解答：数字磁通计是近十几年发展起来的新型磁测量仪器，它使磁通的测量直接数字化显示，精度较高。图 (6.2.9) 给出了数字磁通计的原理性方框图。

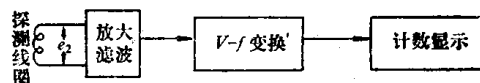


图 6.2.9

已知探测线圈中感应的电压  $e_2$  与磁通的变化率成正比： $e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$ 。一般  $e_2$  的数值在

微伏量级,为了使下一级  $V-f$  变换器得到适当的电压,并除去杂波干扰,所以要对  $e_2$  进行放大滤波。 $V-f$  变换是将放大器的输出电压,转换成其频率与该电压成正比的脉冲,其关系式为

$$f = Kl_2 = -KN_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$V-f$  变换器的输出,由下一级计数器进行累积计数。计数器上记下的数值为

$$N = \int f dt = K \int -N_2 \frac{d\phi}{dt} dt = KN_2 \Delta\phi$$

上式说明计数器所显示的数值,与磁通的变化量成正比。这就是数字磁通计的工作原理。

### (三) 思考题

1. 霍尔效应测场仪常见的故障有哪些,如何排除?
2. 用核磁共振法建立我国磁场强度基准,其传递系统如何建立?
3. 我国磁通量具的传递系统将如何建立?
4. 磁矩量具如何进行传递?
5. 如何用永久磁铁式量具建立磁场强度标准?
6. 在 200 奥斯特以下的低场和弱场范围的磁场标准及其传递系统如何建立?
7. 如何测量脉冲强磁场?
8. 如何测量超导强磁场?
9. 磁传感器在磁学单位量的建立中有何应用?

### (四) 学习与参考资料

- |                     |  |
|---------------------|--|
| 1. 《直流与交流磁测量》       | Е.Т.Чернышев... 刘湘元等译<br>上海科学技术出版社 1964年 |
| 2. 磁量具比较方法          | 陈竹年 电测与仪表 1978年 №5                       |
| 3. 《核磁共振法测量磁场的误差分析》 | 黄曙炯, 1966年                               |
| 4. 《磁性测量原理》         | 北京大学 1977年                               |
| 5. 用核磁共振法绝对测量安培     | 中国计量科学研究院 1978年                          |
| 6. 《电磁学单位和标准》       | P. 维古鲁 科学出版社 1979年                       |

### (五) 检定规程索引

1. 硅钢片标准测试方法\*
2. 永磁材料标准样品直流磁特性测试方法\*
3. 软磁材料标准样品直流磁特性测试方法\*
4. 软磁材料音频损耗测试方法\*
5. 弱磁材料标准样品测试方法\*

\* 尚未颁布的检定规程



