

# 高阶高温超导量子干涉器件平面式梯度计的设计\*

郎佩琳<sup>1)</sup> 陈珂<sup>1)</sup> 郑东宁<sup>1)†</sup> 张鸣剑<sup>1)</sup> 漆汉宏<sup>1)‡</sup> 赵忠贤<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院物理研究所超导实验室,北京 100080)

<sup>2)</sup>燕山大学材料科学与工程学院,秦皇岛 066004)

(2003 年 11 月 21 日收到;2004 年 2 月 2 日收到修改稿)

设计了一种高温超导平面式梯度计的探测线圈.利用这种探测线圈与超导量子干涉器件(SQUID)耦合,可以制成二阶或更高阶的高温超导 SQUID 平面式磁场梯度计.设计的探测线圈由两个闭合环路组成,每个闭合环路是由若干个环路通过细小的连接通道连接而成.两个闭合环路由一条超导窄带分割,将 SQUID 与这条超导窄带耦合可以测出超导窄带上的电流大小.通过调整各个环路的形状、面积和位置,可以使超导窄带上的电流与磁场的高阶梯度成正比,从而测得磁场的高阶梯度.通过计算,得到了各个环路的面积、电感以及位置的关系,在理论上说明这种设计是可行的.对于高阶梯度计,需要较长的基线长度,而这种设计也可以很容易地做成倒装结构来提高基线长度.另外,用该方法也可以很容易地设计出二维平面梯度计来提高基线长度.

关键词:高阶平面式磁场梯度计,高温超导薄膜

PACC:7475,7430G

## 1. 引言

众所周知,超导量子干涉器件(SQUID)是对磁通响应最灵敏的器件.利用 SQUID 作为磁强计可以探测到十分微弱的磁场,如人的心磁和脑磁信号.但是,正是由于超导 SQUID 磁强计对磁场极其敏感,导致环境的噪声对其影响很大,从而限制了磁强计的使用范围.为了在无屏蔽的环境中测量磁场信号,往往采用梯度计的形式<sup>[1]</sup>.梯度计测量的是磁场的梯度,对磁场的强度并不敏感,因此,一些远距离的噪声源产生的空间分布相对均匀的磁场就被消除了,只留下近处的被测信号源的信号.

梯度计可以按测量磁场梯度的方向与磁场方向的关系分为轴向梯度计和平面梯度计.轴向梯度计是指测量磁场梯度的方向与磁场方向重合,设磁场方向为  $z$  方向,即测量的是  $\partial B_z/\partial z$ ,而平面式梯度计测量的磁场梯度方向与磁场方向垂直,即测量的是  $\partial B_z/\partial x$ .对低温超导梯度计而言,两种取向的梯

度计都有<sup>[2,3]</sup>,但轴向梯度计应用更为广泛.而高温超导梯度计则以平面式梯度计居多.

低温超导梯度计一般是由探测线圈和 SQUID 两部分构成.探测线圈由两个方向相反的拾取线圈和一个耦合线圈组成,两个拾取线圈对磁场产生方向相反的感应电流,在耦合线圈中与 SQUID 耦合,由 SQUID 测出耦合线圈中电流的大小就得到了两个拾取线圈处的磁场强度之差,即测出了磁场的一阶梯度.如果需要测量磁场的二阶梯度,则只需将探测线圈改为三个拾取线圈,其中三个线圈的匝数比为 1:2:1,且中间的线圈的方向与两边的相反.这样就组成了二阶磁场梯度计.

对于高温超导体而言,由于没有线材可以绕制探测线圈,主要发展出两种类型的梯度计:一种是电子学梯度计,另一种是采用梯度转换线圈的平面式梯度计.电子学梯度计是指将两个或多个高温超导磁强计所探测到的信号经过电子学的方法相减得到磁场的梯度.电子学梯度计的好处主要有两个:一是基线长度可以任意长.基线长度是指被测磁场的两

\* 国家重大基础研究规划项目(G1999064604)、国家高技术发展计划(863)项目和国家自然科学基金资助的课题.

† E-mail: dzheng@ssc.iphy.ac.cn; 电话 010-82649187

个测量点之间的距离. 显然, 基线长度越长, 磁场强度之差越大, 梯度计也就越灵敏. 另外一个优点是平衡可以由外部来调节. 所谓平衡是指在均匀磁场中, 梯度计的响应应该为零, 即两个测量点对相同强度的磁场响应也是相同的. 度量平衡的参数是共模抑制比. 共模抑制比的定义为梯度计对磁场梯度的响应与磁场强度的响应之比. 从外部调节平衡可以得到很高的共模抑制比. 电子学梯度计既可以组成轴向梯度计, 也可以构成平面梯度计. 只要增加磁强计的数目, 还可以构成二阶以及三阶的磁场梯度计. 但对于电子学梯度计而言, 一个重要的先决条件是构成梯度计的每一个 SQUID 都能在使用的环境中工作, 而这要求 SQUID 器件有很大的动态范围和很高的摆率.

带梯度探测线圈的高温超导平面式梯度计一般是由两部分组成, 一部分是梯度探测线圈, 另一部分是 SQUID. 由于高温超导没有线材, 梯度探测线圈是在超导薄膜上刻蚀出的, 因此只能组成平面式梯度计. 平面式梯度计(以下均指采用梯度探测线圈的梯度计)由于探测线圈受到基片尺寸的限制, 基线长度比较小, 灵敏度不高, 而且平衡不容易调整. 但是平面式梯度计的结构比电子学简单, 抗干扰能力强, 因此发展很快, 目前已有一阶和二阶的平面梯度计, 并且在有些设计中平衡度可以调整<sup>[4]</sup>, 单层超导膜的二阶平面梯度计也被证明是可行的<sup>[5]</sup>.

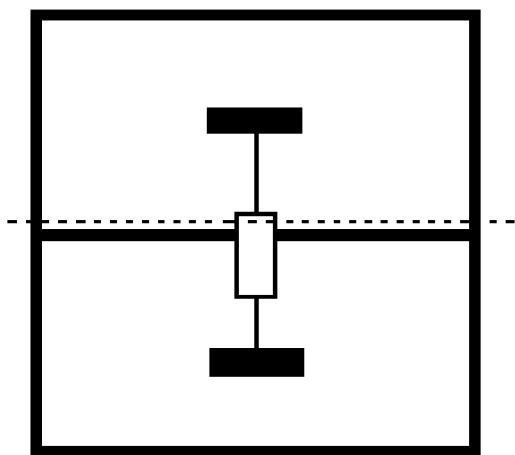


图1 一阶梯度计的原理图(图中虚线是晶界)

最简单的一阶高温超导 SQUID 梯度计的设计原理图如图 1 所示. 探测线圈由两个形状、面积都相同的超导环路组成, 两个超导环路在磁场中的感应电流在环路之间的公共超导线条上的方向相反. 因

此, 可以用与公共超导线条耦合的 SQUID 测量出两个超导环路内磁通的差值, 即对应于磁场的一阶梯度.

二阶的平面梯度计有两种形式, 一种是采用倒装片的<sup>[6]</sup>, 另一种是单层膜平面梯度计<sup>[5]</sup>. 倒装片式的梯度计有平衡度可调的优点, 而单层膜平面梯度计的结构简单, 易于制作. Lee 等人制作的单层膜平面梯度计采用了三个超导环路与 SQUID 耦合的方法<sup>[5]</sup>, 思想新颖, 但是无法用于更高阶的梯度计设计. 我们提出的双超导闭合环路的设计方法有结构简单, 不可控参数少, SQUID 的位置要求不严格, 且可以推广到二维和高阶的优点.

## 2. 设计方法

我们注意到, 对平面一阶磁场梯度计, 探测线圈是由两个超导闭合环路构成的. 设两个环路电感分别为  $L_1$  和  $L_2$ , 两个环路内的磁通分别为  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$ , 则在两个环路上的感应电流为  $I_1 = \Phi_1/L_1$ ,  $I_2 = \Phi_2/L_2$ . 由于两个环路的电流方向在中间的超导线条上是相反的, 因此中间超导线条上的电流为  $I = \Phi_2/L_2 - \Phi_1/L_1$ . 如果两个超导环路的面积形状都相等, 则可以认为  $L_1 = L_2$ . 对于均匀磁场而言, 由于  $\Phi_1 = \Phi_2$ , 电流  $I = 0$ . 因此屏蔽了均匀磁场的影响.

现在我们假设环路 1 和环路 2 的形状和面积都可以不相同, 则屏蔽均匀磁场需要有  $I = 0$ . 即

$$\Phi_1/L_1 = \Phi_2/L_2. \quad (1)$$

由于  $\Phi = BA$ , 其中  $B$  是磁感应强度,  $A$  是超导环路的面积, 有

$$A_1/L_1 = A_2/L_2. \quad (2)$$

因此可以得出结论, 对于两个超导闭合环路的探测线圈而言, 只要闭合环路的面积和电感满足(2)式, 则探测线圈对均匀磁场没有响应.

如图 2 所示, 我们将其中一个闭合环路设计为由两个非闭合环路 1 和 3 以及连接环路 1, 3 的通路 4 组成. 则只要此探测线圈满足  $(A_1 + A_3 + A_4)/L_{134} = A_2/L_2$ , 便可以做到探测线圈对均匀磁场没有响应.

对一阶磁场而言, 设磁感应强度为  $B = B_0 x$ , 则环路 2 中的磁通为

$$\Phi_2 = h \int_{-a}^a B_0 x dx = \frac{1}{2} h B_0 [a^2 - (-a)^2] = 0.$$

环路 1, 3, 4 中的磁通为

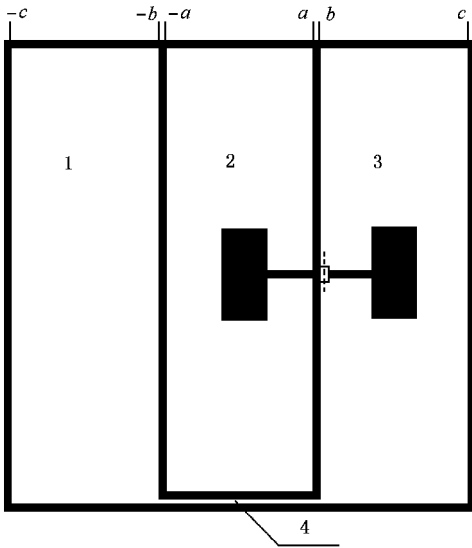


图2 二阶梯度计设计原理(1 2 3 4 代表各个环路和连接环路的通道,  $a, b, c$  是各个环路边缘的坐标)

$$\begin{aligned} \Phi_{134} &= h \int_{-c}^{-b} B_0 x dx + h_4 \int_{-b}^b B_0 x dx + h \int_b^c B_0 x dx \\ &= \frac{1}{2} h B_0 [(-b)^2 - (c)^2] \\ &\quad + \frac{1}{2} h_4 B_0 [b^2 - (-b)^2] \\ &\quad + \frac{1}{2} h B_0 [c^2 - b^2] = 0. \end{aligned}$$

因此这种设计的探测线圈对一阶梯度磁场的响应为零.也就是说,这种探测线圈只对二阶以及更高阶的磁场梯度有响应.将 SQUIP 于两个闭合环路的中间超导线条耦合,测量出超导线条上的电流大小即可以测出磁场的二阶梯度.从而构成了平面磁场二阶梯度计.

从以上的设计方案可以很容易地看出,采用双闭合回路的探测线圈可以构成更高阶数的平面磁场梯度计,甚至二维的平面磁场梯度计.

在图2的设计中,环路1和3并不完全对称,而且在  $y$  方向也是不对称的,考虑对称性的设计如图3所示,加入了环路1中的平衡电极和环路2上的小通道可以提高梯度探测线圈在  $x$  方向和  $y$  方向的平衡度.

图4是一个三阶磁场梯度计的探测线圈.其对均匀磁场、磁场的一阶梯度和二阶梯度都应该没有响应,即在两个闭合回路的公共超导线条上的感应电流应为0.因此,在磁场分布有  $B = B_0, B = B_0 x, B = B_0 x^2$  的形式时都需要满足(1)式

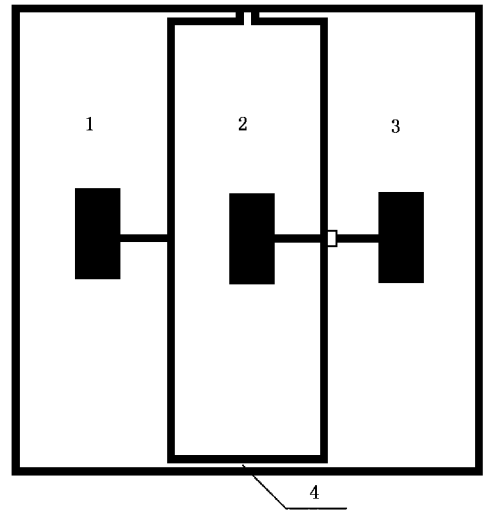


图3 考虑对称性后的设计示意图(1 2 3 4 代表各个环路和连接环路的通道)

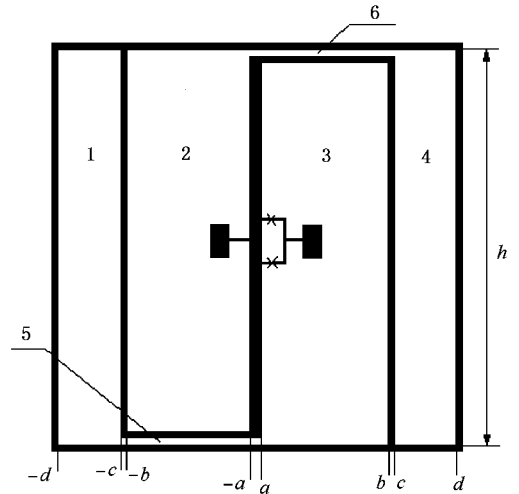


图4 三阶梯度计设计原理(1 2 3 4 5 6 代表各个环路和连接环路的通道,  $a, b, c, d$  是各个环路边缘的坐标)

$$\Phi_{135} / L_{135} = \Phi_{246} / L_{246}.$$

由  $B = B_0$  可得

$$(A_1 + A_3 + A_5) / L_{135} = (A_2 + A_4 + A_6) / L_{246}. \tag{3}$$

由  $B = B_0 x$  可得

$$\begin{aligned} \Phi_{135} &= h \int_{-d}^{-c} B_0 x dx + h \int_a^b B_0 x dx + h_5 \int_{-c}^a B_0 x dx \\ &= \frac{1}{2} h B_0 [(-c)^2 - (-d)^2] \\ &\quad + \frac{1}{2} h B_0 [b^2 - a^2] \\ &\quad + \frac{1}{2} h_5 B_0 [a^2 - (-c)^2], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{246} &= h \int_{-b}^{-a} B_0 x dx + h \int_c^d B_0 x dx + h_6 \int_{-a}^c B_0 x dx \\ &= \frac{1}{2} h B_0 [(-a)^2 - (-b)^2] \\ &\quad + \frac{1}{2} h B_0 [d^2 - c^2] \\ &\quad + \frac{1}{2} h_6 B_0 [c^2 - (-a)^2].\end{aligned}$$

如果设定  $h_5 = h_6$ , 则可以看出  $\Phi_{135} = -\Phi_{246}$ . 如果要满足 (1) 式, 必须有  $\Phi_{135} = -\Phi_{246} = 0$ . 于是可得

$$\frac{(c+d)}{2} A_1 + \frac{(a+c)}{2} A_5 = \frac{(a+b)}{2} A_3, \quad (4a)$$

$$\frac{(c+d)}{2} A_4 + \frac{(a+c)}{2} A_6 = \frac{(a+b)}{2} A_2, \quad (4b)$$

即只要环路中点位置与环路面积的乘积为一定值则可以使探测线圈对一阶磁场响应几乎为零.

对于  $B = B_0 x^2$  有

$$\begin{aligned}\Phi_{135} &= h \int_{-d}^{-c} B_0 x^2 dx + h \int_a^b B_0 x^2 dx + h_5 \int_{-c}^a B_0 x^2 dx \\ &= \frac{1}{3} h B_0 [(-c)^3 - (-d)^3] + \frac{1}{3} h B_0 [b^3 - a^3] \\ &\quad + \frac{1}{3} h_5 B_0 [a^3 - (-c)^3],\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{246} &= h \int_{-b}^{-a} B_0 x^2 dx + h \int_c^d B_0 x^2 dx + h_6 \int_{-a}^c B_0 x^2 dx \\ &= \frac{1}{3} h B_0 [(-a)^3 - (-b)^3] + \frac{1}{3} h B_0 [d^3 - c^3] \\ &\quad + \frac{1}{3} h_6 B_0 [c^3 - (-a)^3],\end{aligned}$$

即  $\Phi_{135} = \Phi_{246}$ . 可以很容易看出如果有  $L_{135} = L_{246}$  则可以满足 (1) 式. 由于闭合环路 135 和闭合环路 246 是对称的, 因此对均匀磁场和磁场的二阶梯度都没有响应, 而适当安排环路 1, 3, 5 的面积和位置则可满足 (4) 式的要求. 因此, 用此探测线圈和 SQUID 耦合可以构成三阶平面梯度计.

### 3. 双闭合回路的特点

目前已发表的高温超导二阶平面梯度计的设计方案有两种: 其一是 Clarke 等人采用的倒装片式的二阶梯度计<sup>[4]</sup>, 其二是 Lee 等人采用的单层超导膜的设计<sup>[5]</sup>. Clarke 等人的设计由于将探测线圈与 SQUID 分离, 所以可以调节平衡, 从而获得较高的共模抑制比. 但是由于采用两片超导薄膜制成, 结构相

对复杂. Lee 等人的设计方案与我们提出的方案都采用单层超导膜, 更具有可比性. Lee 等人设计的梯度计的平衡条件是

$$\frac{A_c}{A} \frac{L}{L_c} = \frac{2\alpha}{\alpha_c},$$

其中  $\alpha$  是环路与 SQUID 的耦合系数. 由于耦合系数无法精确计算, 因此只有靠大量试验才能满足平衡公式<sup>[7]</sup>. 而我们提出的二阶梯度计的平衡条件为

$$(A_1 + A_3 + A_4) L_{134} = A_2 / L_2.$$

由于没有耦合系数的影响, 只需要计算有效面积和电感即可以设计出相当符合平衡条件的器件. 目前计算有效面积和电感的方法有很多, 足以满足设计的需要<sup>[8,9]</sup>.

对于三阶平面式梯度计而言, 由于两个闭合环路是完全对称的, 因此只需要考虑各环路的面积和位置即可, 不必考虑电感, 降低了设计的难度.

使用双闭合回路的设计方法, 不但可以实现二阶、三阶平面式梯度计, 而且可以实现二维二阶平面式梯度计以及更高阶数的一维和二维的平面式梯度计. 而且与电子学的方法相比, 只需一个 SQUID 与线圈耦合, 也降低了制作难度.

采用双闭合回路的设计, 由于只要求两个闭合回路的公共超导线条与 SQUID 耦合, 因此对 SQUID 的位置要求并不严格, 可以放在公共线条附近的任何地方. 也可以用多个 SQUID 与公共线条耦合, 从而提高梯度计的成品率.

## 4. 结 论

我们提出了一种利用单层超导膜制备二阶以及更高阶数的平面梯度计的方法, 并对二阶和三阶的磁场梯度探测线圈对磁场梯度的响应做了初步计算. 计算表明这种方法可以制备二阶和三阶的梯度计, 并指出了这种方法也可以用来制备更高阶梯度计以及二维梯度计.

与其他制备梯度计的方法相比, 我们提出的方法有易于设计、制备的优点. 因为在同样大小的基片上, 二维梯度计的基线长度比一维的要长, 因此二维梯度计可以获得更高的分辨率. 而我们的方法可以用于制备二维的梯度计, 因此可以预期能够得到性能较好的器件.

- [ 1 ] Koelle D , Kleiner R , Ludwig F , Dantsker E and Clarke J 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** 631
- [ 2 ] Van Nieuwenhuyzen G J and De Waal V J 1985 *Appl. Phys. Lett.* **45** 439
- [ 3 ] Zimmerman J E and Frederick N V 1971 *Appl. Phys. Lett.* **19** 16
- [ 4 ] Dantsker E , Froehlich O M , Tanaka S , Kouznetsov K , Clarke J , Lu Z , Matijasevic V and Char K 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 1712
- [ 5 ] Lee S G , Yunseok Hwang ,Byung-Chang Nam ,Jin-Tae Kim and In-Seon Kim 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2345
- [ 6 ] Kittel A , Kouznetsov K A , McDermott R , Oh B and Clarke J 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2197
- [ 7 ] Lee S G , Yunseok Hwang , Hyuk Chan Kwon ,Jin-Tae Kim and Yang H J 2002 *Physica C* **372** – **376** 221
- [ 8 ] Chang W H 1981 *IEEE Trans. Magn. MAG-* **17** 764
- [ 9 ] Hildebrandt G and Uhlmann F H 1995 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** 2766

## A method for designing high-order planar superconducting quantum interference device gradiometer<sup>\*</sup>

Lang Pei-Lin<sup>1)</sup> Chen Ke<sup>1)</sup> Zheng Dong-Ning<sup>1)†</sup> Zhang Ming-Jian<sup>1)</sup> Qi Han-Hong<sup>1)✉</sup> Zhao Zhong-Xian<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>( National Laboratory for Superconductors , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

<sup>2)</sup>( Materials Science and Engineering College of Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China )

( Received 21 November 2003 ; revised manuscript received 2 February 2004 )

### Abstract

We have proposed a novel method for designing the second-order planar gradiometers and even high-order gradiometers. The gradiometer consists of two parts ,one is the superconducting quantum interference device( SQUID ) ,the other is the pickup loop which is directly coupled with the SQUID. The pickup loop consists of two parallel-connected loops ,each loop consists of several opening loops which are connected with minimal channels between them. By adjusting the site ,size and shape of these opening loops ,we can realize that the current in the common line between the two loops is proportioned by the high-order gradient of the magnetic field. Because the line is coupled with SQUID ,so we can measure the high-order gradient of the magnetic field.

We have got the relations between the site and the size of loops by calculation ,and prove it can work. For high-order gradiometers ,the baseline is important. Our design can use flip-chip configuration to lengthen the baseline. Another method to get longer baseline is to design two-dimensional gradiometers which are easy to design using our method.

**Keywords :** HTS films , high order planar gradiometers

**PACC :** 7475 , 7430G

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Program of Basic Research of China( G1999064604 ) , the National High Technology Development Program of China , and the National Nature Science Foundation of China .

<sup>†</sup>E-mail : dzheng@ssc. iphy. ac. cn