

## RF SQUID 工作点自动搜索算法研究

任胜男,申茂冬,赵 静

吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要:** 为了解决传统RF SQUID工作点手动调节,人眼观察输出波形,调节工作繁琐,不适合野外工作的问题,提出一种基于最速下降法的非线性二元函数极值搜索最佳工作点算法。采用最速下降法求函数极值的方法,利用最速下降法在最小值搜寻的迭代原理,使RF SQUID自动搜索到最佳工作点,开发了相应的工作点搜索软件,并将该应用于高温超导磁力仪RF SQUID的工作点调节中。通过实验证明利用此算法可以使RF SQUID自动搜索到最佳工作点,降低了操作的复杂性,提高了工作效率,满足超导磁力仪在野外勘探工作的要求。

**关键词:** RF SQUID; 最速下降法; 二元函数极值; 超导磁力仪

**中图分类号:** TP212.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2015)05-0775-04

## The Study on Automatic Search Algorithm for RF SQUID Working Point

REN Sheng-nan, SHEN Mao-dong, ZHAO Jing

College of Instrumentation and Electrical Engineering/Jilin University, Changchun 130022, China

**Abstract:** In order to solve the problem of traditional RF SQUID such as manually adjusted working point, observing the output waveform by human eye, tedious adjustment work, not suitable for field work, and so on, an algorithm of non-linear binary function's extremum for search for the best working point was presented based on the steepest descent method. By using the method of steepest descent method to find the function extreme value, and using the steepest descent method in the minimum search iterative principle, the RF SQUID could automatically search the best working point. Developing the corresponding working point search software, and it will be applied to the high-temperature superconductivity magnetometer RF SQUID work point adjustment. Experiments showed that using this algorithm can make the RF SQUID automatically search the best working point, reduces the complexity of the operation, improve work efficiency, to meet the requirements of superconducting magnetometer in the field work

**Keywords:** RF SQUID; steepest descent method; binary function's extremum; superconducting magnetometer

SQUID(超导量子干涉器)是目前已知测磁灵敏度最高的磁测传感器,利用 SQUID 制成的超导磁力仪在心磁图测量、大地电磁测量、无损检测等方面有着广泛的应用前景<sup>[1-5]</sup>。

高温超导磁力仪在进入测量工作之前,需要对 RF SQUID 的工作点进行调节。传统的高温超导磁力仪工作点调节多采用模拟电路,调节时采用机械式电位器进行手动调节,经过反复调节才能到达 RF SQUID 的工作点,工作效率低,不适合野外工作。本文中 RF SQUID 工作点的调节是通过超导磁力仪测控装置配合基于最速下降法的非线性二元函数极值搜索算法应用软件完成的,实现了 RF SQUID 工作点的自动搜索,省去了人工调节,提高了超导磁力仪野外工作效率。

### 1 RF SQUID 测控装置

RF SQUID 测控装置如图 1 所示。需要调节的三个参数分别为:射频激励振荡频率  $V_T$ 、射频馈入功率  $V_A$ 、初始电流  $V_B$ 。

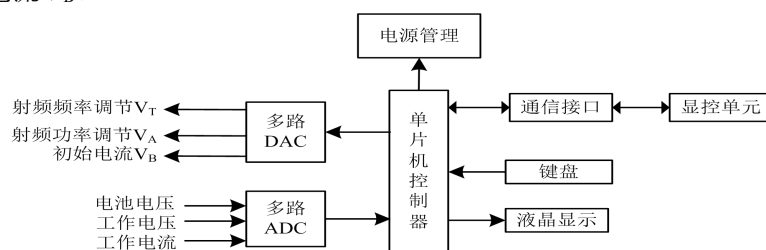


图 1 RF SQUID 测控装置框图

Fig.1 Measurement-control device of RF SQUID

收稿日期: 2014-05-12

修回日期: 2014-05-26

基金项目: 国家 863 计划主题项目:航空地球物理勘查技术与装备子课题航空超导全张量磁梯度测量系统样机研制(2013AA063901-02)

作者简介: 任胜男(1985-),女,博士研究生,主要从事 RF SQUID 计数方法研究。E-mail:12763544@qq.com

数字优先出版: 2015-05-14 <http://www.cnki.net>

RF SQUID 测控装置采用多路 DAC 输出三个直流电压, ADC 实时采集输出的信号, 通过算法分析信号特征, 调节参数找到 RF SQUID 的最佳工作点。

## 2 RF SQUID 最佳工作点自动搜索算法

RF SQUID 的最佳工作点即输出信号的信噪比最大。输出信号最佳信噪比  $SNR$  是关于射频激励振荡频率、射频馈入功率、初始电流的三元函数, 即  $SNR=f(V_T, V_A, V_B)$ , 为了使 RF SQUID 能进入且以最快的速度进入最佳工作点, 需要对非线性多元函数复杂的极大值点搜寻方法进行研究。由于  $V_B$  是  $V_T$  的周期函数, 且参数  $V_B$  与  $V_T, V_A$  独立, 因此  $SNR$  极大值  $SNR$  可简化为首先搜寻非线性二元函数  $f(V_T, V_A)$  的极大值。

### 2.1 最速下降法

为了应用最速下降法求取目标函数极小值的方法, 我们构建目标函数,

$$\Phi_{obj}=\Phi(x,y)=-f(V_T, V_A) \tag{1}$$

最速下降法搜索的原理<sup>[6-9]</sup>为:对于空间曲面  $\Phi(x,y)$ , 采用一系列平行于  $x-y$  平面的即  $\Phi$ =常数的平面与其相交后投影到  $x-y$  平面可以得到一系列平面曲线, 这些曲线叫做曲面的等高线族, 处在同一条等高线上的  $\Phi$  值都是相等的。若  $\Phi(x,y)$  的极小值在  $(\alpha, \beta)$  附近, 则等高线将会以  $(\alpha, \beta)$  中。形成封闭的曲线族, 且  $\Phi(x,y)$  的值由外相离不断的下降, 当达到  $(\alpha, \beta)$  时,  $\Phi(x,y)$  取得极小值。

在任一点处等高线的法向即函数  $\Phi(x,y)$  在该点处的梯度方向,

$$g = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^T \tag{2}$$

是使得  $\Phi(x,y)$  上升最快的方向。而使得  $\Phi(x,y)$  下降最快的方向为

$$-g = \left( -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^T \tag{3}$$

最速下降法就是  $-g$  的方向来逐步搜索  $\Phi(x,y)$  的极小值的。具体步骤为:

(1) 设  $A_0(x_0, y_0)$  为解的初值, 计算  $\Phi(x,y)$  在该点的梯度  $\nabla \Phi(x, y)|_{A_0(x_0, y_0)}$

$$\begin{cases} g_0 = (g_{10}, g_{20}) \\ g_{10} = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_0 \\ g_{20} = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_0 \end{cases} \tag{4}$$

(2) 以  $\lambda$  步长因子沿梯度下降方向得到下一个计算点  $A_1(x_0 - \lambda g_{10}, y_0 - \lambda g_{20})$ ;

(3) 计算  $\Phi(x,y)$  在  $A_1$  点的梯度  $\nabla \Phi(x, y)|_{A_1(x_0 - \lambda g_{10}, y_0 - \lambda g_{20})}$ ;

(4) 判断  $\|\nabla \Phi(x, y)\| = |g_1|$  是否小于求解精度  $\varepsilon$ ? 若满足则求解结束, 若不满足则继续沿梯度下降方向继续下一个点的计算  $A_2$ , 其中,

$$\begin{aligned} |g_1| &= |(g_{11}, g_{21})| \\ &= \|\nabla \Phi(x, y)\| \\ &= \sqrt{\left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{A_1}^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_{A_1}^2} \end{aligned} \tag{5}$$

(5) 根据  $A_i$  点的计算结果获得下一个计算点  $A_{i+1}(x_i - \lambda g_{1i}, y_i - \lambda g_{2i})$ , 重新按步骤 (3) 计算, 直到  $\|\nabla \Phi(x, y)\| < \varepsilon$ 。

### 2.2 最速下降法在最佳工作点搜索中的应用

可以利用最速下降法在  $f(x,y)$  最小值搜寻迭加原理来完成 RF SQUID 最佳工作点的智能化搜寻。但最佳工作点 SNR 是一个非线性二元函数  $f(V_T, V_A)$ ，无法写出具体的表达式，也不能求出其梯度的表达式。为了表示方便，我们将  $SNR = f(V_T, V_A)$  记为  $f(x, y)$ 。由于无法得出解析表达式，我们可以通过微分计算方法获得。

为了求得在某工作点  $A_i(x, y)$  处梯度，我们让 RF SQUID 工作在  $A_i(x, y)$  点附近的两点，并依次记下共计三点出的信噪比  $f(A_i(x, y))$ 、 $f(A_{i1}(x + \Delta x, y))$ 、 $f(A_{i2}(x, y + \Delta y))$ ，按照微分计算方法获得的梯度为：

$$\begin{cases} \nabla f(x, y)|_{A_i(x, y)} = \left( \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f(A_{i1}(x + \Delta x, y)) - f(A_i(x, y))}{\Delta x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \approx \frac{f(A_{i2}(x, y + \Delta y)) - f(A_i(x, y))}{\Delta y} \end{cases} \quad (6)$$

基于最速下降法和微分计算求得的梯度，我们设计的最佳工作点搜寻算法流程如图 2 所示。

- (1) 首先读取记录工作点或人工给定初始工作点  $A_i(x, y)$ ，记录下  $f(A_i(x, y))$ ；
- (2) 通过调节装置让 RF SQUID 在临界两个工作点工作  $A_i(x, y)$ 、 $A_{i1}(x + \Delta x, y)$ ，采集其输出的信号并计算信噪比 SNR  $f(A_{i1}(x + \Delta x, y))$  和  $f(A_{i2}(x, y + \Delta y))$ ；
- (3) 根据  $f(A_i(x, y))$ 、 $f(A_{i1}(x + \Delta x, y))$ 、 $f(A_{i2}(x, y + \Delta y))$  采用数值法计算梯度  $\nabla f(x, y)$ ；
- (4) 离散化偏置电流，范围为一个磁通量子，离散点数至少为 10；
- (5) 判断是否存在较好的 SNR 且  $\|\nabla f(x, y)\| < 1\%$ ，若满足条件，则表明自动搜寻成功，软件自动记录下工作点；
- (6) 若不满足条件的次数不大于 50 次，取  $\lambda=0.5$  计算步长和下一个工作点，开始下一个工作点搜索；
- (7) 当尝试条件次数大于 50 次，则给出报警，人工完成工作点调节并检查仪器是否工作正常。

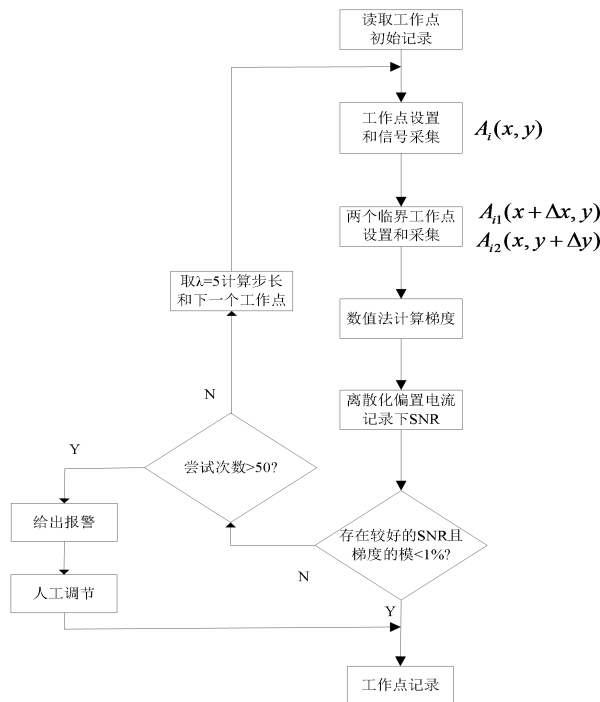


图 2 最佳工作点搜寻算法

Fig.2 Search algorithm for the best working point

### 3 实际测试

将基于最速下降法的非线性二元函数极值最佳工作点搜索算法软件在高温超导磁力仪中进行了应用,测试结果如图 3 所示。通过图三可以看出,工作点搜索软件可以搜索到 RF SQUID 的最佳工作点,并且在测试过程中,每搜寻一次工作点耗时小于 2 s。当初始工作点人工随意设置时,搜寻次数通常在 20~40 次,耗时<100 s;当有历史工作点记录时,搜寻次数通常在 10 次以内,耗时小于 30 s。相比之前的人工调节工作点的做法,最佳工作点搜寻算法应用软件带来了极大的方便,提高了高温超导磁力仪野外工作效率。

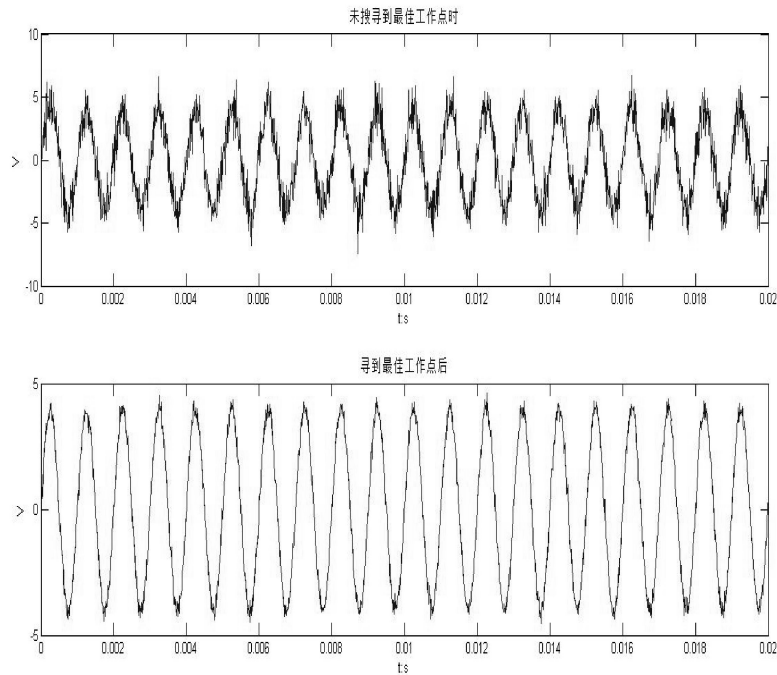


图 3 实际测试中 RF SQUID 的输出调制波形

Fig.3 Output modulation waveform of RF SQUID in actual test

### 4 结论

本文将基于最速下降法搜寻二元非线性函数的极值原理应用于超导磁力仪 RF SQUID 的最佳工作点搜索中,并开发了相应的搜索软件。与之前靠人工经验调节最佳工作点相比,具有操作简单,智能化程度高,搜索最佳工作点速度快等优点,提高了工作效率,满足超导磁力仪在野外勘探工作的要求。

### 参考文献

- [1] 王永生.我国矿产资源综合利用现状、潜力和对策措施[J].矿产保护与利用,2007(6):5-7
- [2] 赵洁心,冯波,谭俊,等.我国矿产资源开发利用现状与可持续发展探讨[J].黄金,2006,27(2):1-4
- [3] 张言海,张文艺.21世纪我国矿产资源实现可持续开发利用战略问题探讨[J].吉林地质,2000,19(2):27-30
- [4] 滕吉文,刘建明,刘财,等.第二深度空间金属矿产探查与东北战略后备基地的建立和可持续发展[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(4):633-651
- [5] 张成现,李建文.多元非线性函数极值的通用数值解法[J].西安工程科技学院学报,2005,19(4):507-509,512
- [6] 王洪斌,贺峻华,贺辉.具有优化步长的最速下降法 MPPT 控制[J].电机与控制学报,2012,16(10):21-25
- [7] 宁伟,卿熙宏,陶华学.基于共轭梯度法和最速下降法的非线性测量数据处理[J].山东科技大学学报:自然科学版,2004,23(4):5-7
- [8] 马常仁,徐得潜,周慧,等.基于最小二乘法与最速下降法的综合衰减系数的率定[J].水利科技与经济,2012,18(1):20-24
- [9] 欧志英,严克明,王柏岩.共轭梯度法和最速下降法的混合算法[J].甘肃工业大学学报,1999,25(1):89-91