

文章编号: 1671-8585(2009)02-0147-05

超导重力梯度勘探系统

张永明¹, 张贵宾²

(1. 国家海洋局北海海洋工程勘察研究院, 山东青岛 266033; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 超导重力梯度仪具有高灵敏度、高分辨率、性能稳定和宽动力范围等优点, 它涉及的学科很多, 研发难度相当大。以 Maryland 大学研制的低温超导重力梯度仪为例, 讨论了超导加速度计、超导电路、线性加速度计、角加速度计、低温恒温器等超导重力梯度仪主要构成部件的组成和测量原理, 并介绍了其预期的性能和主要的误差源。

关键词: 超导重力梯度仪; 超导加速度计; 超导电路; 低温恒温器; 性能

中图分类号: P631.13

文献标识码: A

自 1880 年匈牙利物理学家罗兰德·冯·厄缶设计出第一台重力梯度仪(厄缶扭称)以来, 重力梯度仪大致经历了从单轴旋转到三轴定向, 从低温(低于 4.2K)到室温, 从扭力、静电悬浮、超导到原子干涉重力梯度仪的发展过程, 仪器精度日益提高。特别是随着现代电子技术、计算机技术、超导量子干涉技术、低温微波空腔谐振技术、“超导负弹簧”、原子干涉技术的发展及应用, 重力梯度仪在灵敏度、分辨率、动力范围和稳定性方面取得了突破性进展^[1~8]。

在超导和低温状态下, 重力梯度仪具有噪声低、无标度因子漂移、机械稳定性好等良好的性能, 除此之外, 通过对超导环路中的永久电流的设置, 可使超导重力梯度仪(SGG)对重力梯度的响应几乎不受作用在仪器上所有的线性加速度和角加速度的影响。鉴于低温状态下超导重力梯度仪的以上优点, 目前国外许多机构正积极开展超导重力梯度仪的研制工作, 并取得了一定的成效。超导重力梯度仪研制的权威机构为美国的 Maryland 大学物理系, 该大学长期以来一直从事重力梯度仪的研究与开发, 取得了许多有价值的研究成果。20 世纪 80 年代初, Maryland 大学研制出了精度为 0.01E(1E=10⁻⁹s⁻²)的单轴超导重力梯度仪实验室样机。与此同时, 美国 Stanford 大学、澳大利亚西澳大学和英国 ARKeX 公司、加拿大 GEDEX 公司等研究机构都在开展超导重力梯度仪的研制工作。2002 年, Maryland 大学对新研制出的单轴超导重力梯度仪实验室样机进行了试验, 其灵敏度提高到了 10⁻³E/√Hz, 而全张量超导重力梯度仪在室温的条件下灵敏度已经达到了 0.02E/√Hz^[3~8]。本文以 Maryland 大学研制的 SQUID(超导量子干涉

装置)低温超导重力梯度仪为例, 说明超导重力梯度仪的测量原理、系统组成、电路分布和性能指标等关键技术^[5~10]。

1 重力梯度测量原理

重力位 U 的一次导数为重力加速度矢量 $\mathbf{g} = (\partial U/\partial x, \partial U/\partial y, \partial U/\partial z)$, 常规重力测量的是重力的垂直分量 $g_z = \partial U/\partial z$, 重力梯度为重力位的二阶导数, 重力梯度张量 $\mathbf{\Gamma}$ 为:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{vmatrix} \Gamma_{xx} & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{yx} & \Gamma_{yy} & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{zx} & \Gamma_{zy} & \Gamma_{zz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \partial^2 U/\partial x^2 & \partial^2 U/\partial x\partial y & \partial^2 U/\partial x\partial z \\ \partial^2 U/\partial y\partial x & \partial^2 U/\partial y^2 & \partial^2 U/\partial y\partial z \\ \partial^2 U/\partial z\partial x & \partial^2 U/\partial z\partial y & \partial^2 U/\partial z^2 \end{vmatrix}$$

梯度张量为对称张量, 即 $\Gamma_{xy} = \Gamma_{yx}$, $\Gamma_{yz} = \Gamma_{zy}$, $\Gamma_{zx} = \Gamma_{xz}$; 由无源区的泊松方程知 $\Gamma_{xx} + \Gamma_{yy} + \Gamma_{zz} = 0$ 。因此重力梯度张量中只有 5 个独立分量: 2 个对角(“轴向”)分量和 3 个非对角(“交叉”)分量。

轴向分量重力梯度仪可通过两个线性加速度的信号差分来实现, 两线性加速度计的敏感轴沿着分离方向成同一直线, 见图 1a。交叉分量重力梯度仪可通过 4 个试验质量块信号组合实现, 其敏感

收稿日期: 2008-11-14; 改回日期: 2008-12-15。

第一作者简介: 张永明(1980—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事海洋地球物理勘探。

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号: 40574045, 40234048)资助。

轴如图 1b 所示,或者通过两个同轴的旋转臂互相正交的角加速度计的信号差分而实现。一个张量

梯度仪可通过 3 个轴向分量重力梯度仪和 3 个交叉分量重力梯度仪的组合来实现。

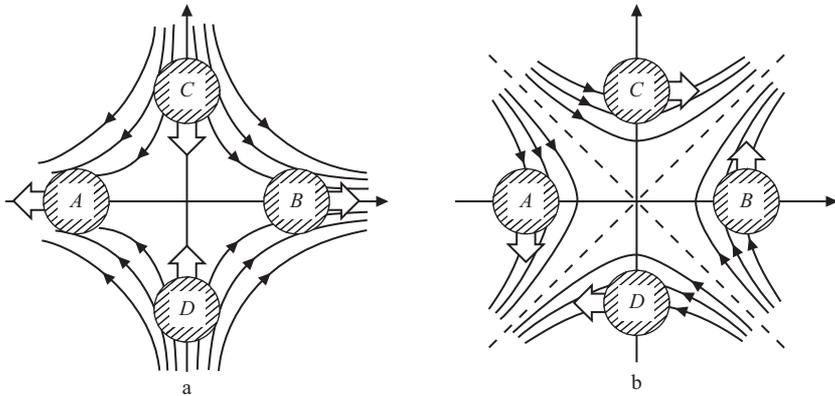


图 1 重力梯度仪轴向分量和交叉分量的实现

a 轴向分量重力梯度仪可通过 2 个质量块 A 和 B 或 C 和 D 差分实现; b 交叉分量重力梯度仪可通过 4 个质量块 A, B, C 和 D 的线性加速度组合实现,或通过两旋转臂 AB 和 CD 的角加速度差分实现

2 超导加速度计的组成及测量原理

超导加速度计的简化结构及测量原理见图 2。该超导加速度计是由弱弹簧、超导检测质量、超导感应线圈和带有输入/输出线圈的超导量子干涉仪 (SQUID) 放大器组成,在由感应线圈和带有输入/

输出线圈的 SQUID 放大器组成的回路中保存有持续的电流。当平台经加速或施加等效的重力信号时,检测质量相对于感应线圈将产生位移,并通过迈斯纳效应(完全抗磁性)调整其感应系数,这将引起线圈中的量子磁通量发生变化从而产生一个随时间变化的电流。SQUID 放大器则将感应电流转换为电信号输出。

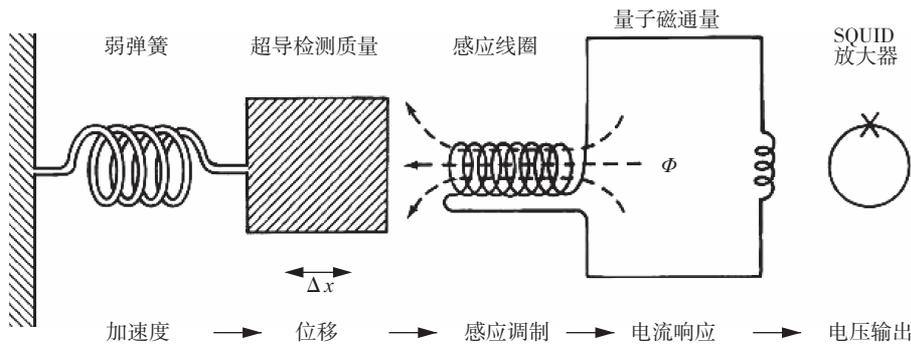


图 2 超导加速度计测量原理

3 轴向分量 SGG

图 3 为 II 型 SGG 加速度计结构示意图。检测质量重为 1.2 kg,被一对带有折叠悬臂梁的弯曲隔板悬挂着,其整个结构由铌(Nb)加工而成。6 个完全相同的加速度计安装在一个精密的钛(Ti)合金立方体的 6 个面上,其灵敏轴正交于立方体的表面,从而构成了三轴 SGG(图 4)。

图 5 是 II 型 SGG 每个轴的电路图。安装在立方体相对面上的两个检测质量通过超导电路连接起来即形成一个重力梯度仪。检测质量通过其环

路保存的由 L_{L1} 和 L_{L2} 形成的永久电流 L_L 排斥重力场的作用而悬浮。镀锡卷板 L_{S1} 和 L_{S2} 平行于 SQUID 连接起来形成感应回路。重力梯度仪的每个轴都有两个回路,在其中的一个回路上,以同样的电流方向存储电流 I_{S1} 和 I_{S2} ,则 SQUID 可感测出微分加速度或重力梯度。在另一个回路中使其中的一个电流反向,这样 SQUID 就可感测出整个模型的运动。在检测出器件没有达到完全稳定之前通过对恒稳电流进行信号差分,这样可增进共同体的排斥能力。而且 SQUID 仅能测出一小部分的差分信号,因此,减小动力范围要依赖于放大器和信号处理电子器件。

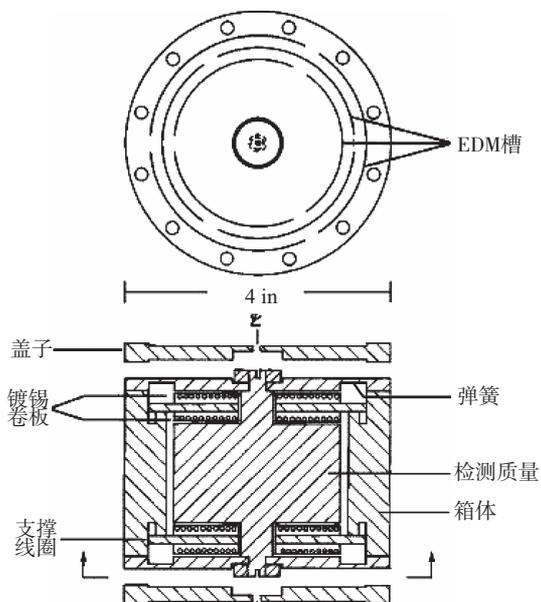


图 3 II 型 SGG 加速度计组成示意
(1 in ≈ 2.54 cm)

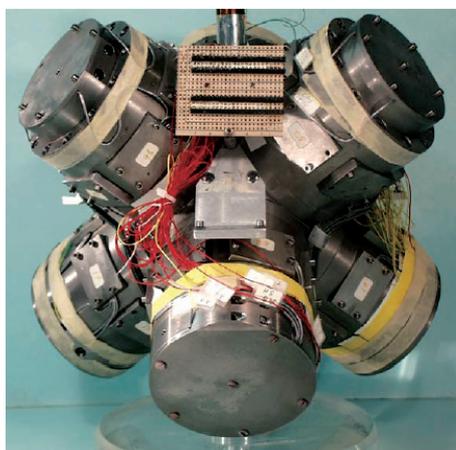


图 4 三轴 II 型 SGG

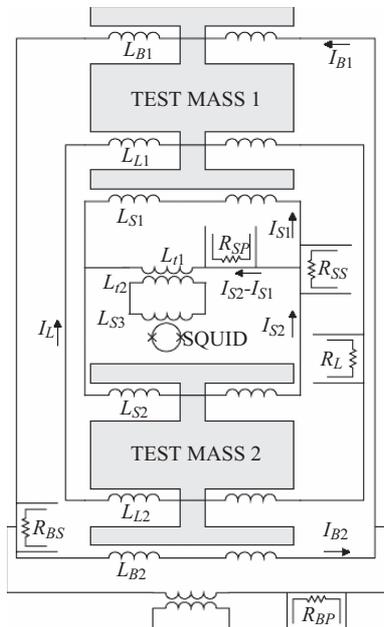


图 5 II 型 SGG 单轴电路

通过调整电流 I_{S2} 与 I_{S1} 的比可使共同体排斥最大化。尽管通过调整电流可将平行于敏感轴的线性加速度分量精确地排斥掉,然而垂直于敏感轴的加速度分量由于敏感轴的未对准将同梯度一起输出。在 II 型 SGG 中,所有的未对准角是通过重力梯度仪对各个方向上加速度的响应而测量的。其结果乘以测量的线性加速度分量然后被重力梯度仪的输出值相减即得到“残余的共同体差额”。未对准角大约为 10^{-4} rad ($1 \text{ rad} = 180^\circ/\pi$),而残余量可以将共同体的互斥精度提高到 10^7 。

SGG 固有的梯度噪声的功率谱密度可以用下式来表示:

$$S_r(f) = \frac{8}{ml^2} \left[k_B T \frac{\omega_0}{Q} + \frac{\omega_0^2}{2\beta\eta} E_A(f) \right] \quad (1)$$

式中: m, Q, T 分别代表检测质量的重量、品质因子和温度; l 为重力梯度仪的基线长; k_B 是万有引力常数; β 为传感器的机电能量耦合常数; η 为 SQUID 超导电路的能量耦合效率; $E_A(f)$ 为 SQUID 能量输入的分辨率,单位为 JHz^{-1} ; $f = \omega/2\pi$ 为信号频率。重力梯度仪相关参数的量级和数值分别为: $m = 1.2 \text{ kg}$, $l = 0.19 \text{ m}$, $\omega_0/2\pi = 10 \text{ Hz}$, $Q = 10^6$, $T = 4.2 \text{ K}$, $\beta = \eta = 0.25$, $E_A(f) = [1 + (0.1 \text{ Hz})/f] \cdot 5 \times 10^{-31}$, $f \leq 0.1 \text{ Hz}$ (商业直流电)。由式(1)可预测其白噪声为 $2 \times 10^{-3} \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$,当 f 低于 0.1 Hz 时将出现 $1/f$ 能级的噪声。

实验室测定的噪声谱特性表明: $0.02 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ 白噪声在未补偿的加速度噪声中占优势。在低于 0.1 Hz 时就会出现一个 $1/f$ 能级的噪声,但是一个振幅的量级大大高于预测的 SQUID 所产生的噪声。这个额外的低频噪声被认为是由于仪器的温度漂移所引起,通过对超导体有效肤深的调制,它与重力梯度仪和下转换离心加速度噪声耦合在一起。SGG 灵敏度比传统的重力梯度仪灵敏度提高 3 个量级,可在室温下工作。

4 交叉分量 SGG

轴向分量 SGG 的研制主要是为了空间应用,对空间环境来说,SGG 共同体的互斥达到 10^7 已足够。而对航空应用来说,其线性加速度的互斥必须达到 10^9 或者更高,因为当飞机进行大的平移运动时 SGG 的平台难以稳定,飞机的运动甚至会超出 SGG 舱室所能处理的维数。

交叉分量 SGG 被设计成固有的对线性加速度不敏感,可通过一个转动的旋转臂,预先使其质量

矩精确平衡。通过设计使旋转轴只对期望的旋转加速度敏感,而对别的自由度不敏感,这样,线性加速度可进一步地被区分出来。图 6 为 Maryland 大学正在研制中的三轴交叉分量 SGG。其检测质量的旋转轴结构通过金属丝放电加工(EDM)的方式从一块铌上切下来。安装在立方体基座相对面上的两个角加速度计通过超导电路连接起来即为一个单轴 SGG,其导向旋臂互相垂直。

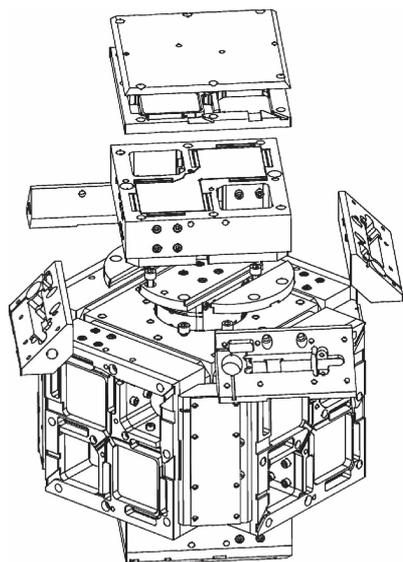


图 6 交叉分量 SGG 模型

4.1 角加速度计

图 7 为交叉分量 SGG 角加速度计组成示意。检测质量绕位于质心的中心轴旋转,旋转轴被设计成只对旋转加速度高度敏感,而对别的自由度上的运动不敏感。加速度计包含有一个挠性的旋转轴,其他的几何构造都具有较大的刚劲系数。

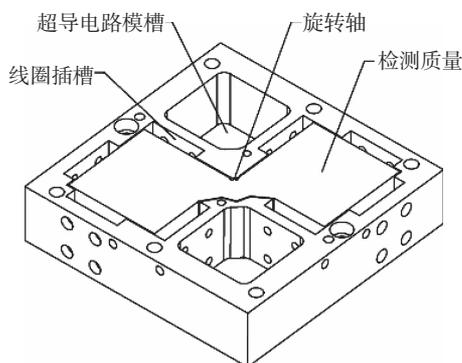


图 7 角加速度计(10.2 cm×10.2 cm×2.5 cm)

4.2 感应电路

图 8 为 SGG 感应电路图。除了连接两个加速度计的镀锡卷板并联于一个 SQUID 输入线圈外,它与基本的加速度计感应电路相似。激发电流 I_1 和 I_2 之差,流过 SQUID 输入线圈。如果检测质

量、弹簧和线圈之间能完美匹配,那么初始化时两个激发电流可设置为同样大小。随着两个检测质量的运动, I_1 与 I_2 之差的瞬时值就是它们相对位移的度量,即如果两检测质量沿同一方向运动, I_1 和 I_2 的变化量相同,就没有信号产生,这样,在放大之前两个加速度计信号使用永久电流相减。现实中,加速度计的组成部件之间不可能匹配完美。不过可以通过调整 I_1 与 I_2 之比来抵消这种不均衡。在初始化时,每个重力梯度仪绕各自的旋转轴做正弦振动,通过调整 I_1 与 I_2 之比使响应最小化。SGG 的每个轴上都有两个这样的电路。另外一种情况,如果激发电流 I_2 反向的话,它只能感应到共同体的加速度。

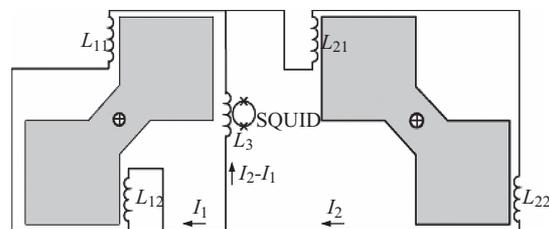


图 8 SGG 电路

4.3 线性加速度计

SGG 同时含有 3 个线性加速度计,可用于校正线性加速度的剩余耦合。图 9 为线性加速度计透视图。同角加速度计一样,检测质量和弹簧是通过金属丝放电加工(EMD)的方式从一块铌上切下来的。这样能确保轴校准达到 10^{-4} rad 的精度。

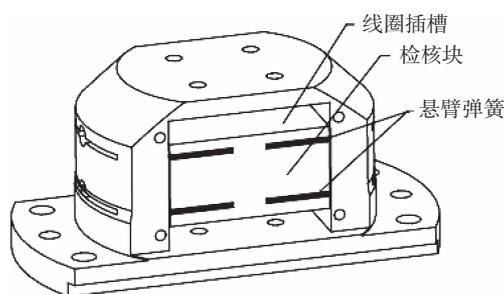


图 9 线性加速度计

4.4 低温保持器

为了摆脱对液体氦的需求,新型 SGG 是通过建立在二级脉冲管冷却头上的一个闭合循环的冷却器来制冷的。冷却头的脉冲管中不带有往复活塞,研究表明,这样能极大地减小压力脉冲的谐振。图 10 为带有支撑框架和振荡器的低温恒温器示意图。低温恒温器和冷却头总的高度为 95 cm,低温恒温器的外半径为 40 cm。SGG 被封装在一个真空罐中,并且用一个 5 Hz 隔振架支撑着,用

来消除冷却头和压缩机振动的影响。这种严格的设计是用来消除 SGG 检测质量附近模块的谐振。整个设备都封装在一个直径为 16 in、高为 37 in 的密闭结构中。双重的真空装置可容许使用氦与气体交换的方式均一地冷却 SGG。

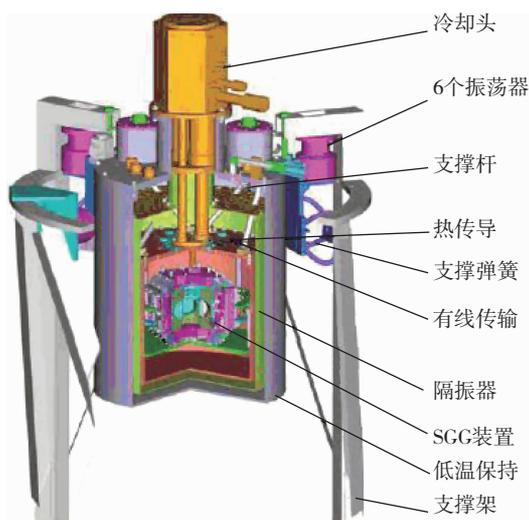


图 10 置于支撑结构上的 SGG 恒温低温器内部结构

4.5 预期性能

为保证飞机运动环境下重力梯度仪所需满足的要求,需在 Carson 双獭勘探飞机连续水平飞行条件下对 SGG 进行测试,表 1 为 SGG 预期达到的性能。从表 1 可估计重力勘探系统需满足的要求。数据表明,必须使用一个陀螺稳定平台使角运动减小到一定的程度。带宽 1 Hz 时重力梯度仪的灵敏度值小于 $1 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$,对探测大多数地球物理目标体已足够。为了达到该灵敏度,带宽小于 5 Hz 时,平台应为 3 个轴提供大约 40 dB 衰减。可供选择的平台包括六脚支架和用万向架固定的系统。安装在平台上的 SGG 的主要误差源包括热噪声、线性加速度、角加速度、角加速度非线性响应、线性

表 1 SGG 预期性能

指标	幅值
仪器固有噪声	$0.03(1+0.1 \text{ Hz}/f)^{-1/2} \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$
温度波动	$0.1 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$
角加速度排斥	
一阶	3×10^7
二阶	$10^6 \text{ E}(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})^{-2}$
线性加速度排斥	
一阶	$30 \text{ E}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-1}$
二阶	$12 \text{ E}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-2}$
轴校准	10^{-4} rad
偏置稳定性	0.1 Eh^{-1}
动力范围	$10^6 (1 \text{ Hz 带宽})$
幅频响应	$10^{-7} \sim 3 \text{ Hz}$

加速度非线性响应和温度波动等,其总的幅值均方根误差最大可达 1 Hz。

5 结论

通过分析,我们对超导加速度计、超导电路、线性加速度计、角加速度计、低温恒温器和稳定平台等超导重力梯度仪的主要部件的组成结构和测量原理有了一定的认识 and 了解。同时可看出,超导重力梯度勘探系统涉及到物理学、力学、材料科学、电子科学、计算机科学、地质学等多学科的交叉理论和知识,科技含量高,考虑到实际应用中的各种振动、噪声、线性加速度、角加速度、温度变化以及大气辐射压力的影响,其研发难度是相当大的。但由于超导重力梯度仪具有高灵敏度、高分辨率、性能稳定和宽动力范围等优点,因此具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 张永明,盛君,张贵宾. 航空重力测量技术的现状及应用[J]. 勘探地球物理进展,2006,29(2):94~97
- 张永明,张贵宾,盛君. 旋转加速度计航空重力梯度仪的测量原理及应用[J]. 工程地球物理学报,2006,3(5):375~380
- EAGE. ARKeX on the way to hatching an EGG[J]. First Break,2004,22(3):65~69
- Paik H J, Richard J P. Development of a Sensitive Superconducting Gravity Gradiometer for Geological and Navigational Applications [M]. USA: University of Maryland Press,1986. 207
- VeGuirk J M. High precision absolute gravity gradiometry with atom interferometry [D]. California: Stanford University,2001
- Lumley J M, White J P, Barnes G, et al. A superconducting gravity gradiometer tool for exploration[A]. Airborne gravity 2004 Geoscience Australia Record [C]. Australia: ASEG-PESA,2004. 21~40
- Paik H J, Richard J P. Development of superconducting gravity gradiometers[EB/OL]. (2006-11-12)[2007-02-01]. <http://www.physics.umd.edu/GRE/>
- Paik H J, Richard J P. Principle of gravity gradiometry [EB/OL]. (2006-11-12)[2007-02-01]. http://www.physics.umd.edu/GRE/Gravity_Gradiometry.pdf
- Paik H J, Richard J P. Superconducting gravity gradiometers(SGGs)[EB/OL]. (2006-11-12)[2007-02-01]. http://www.physics.umd.edu/GRE/NASA_SGG.pdf
- Paik H J, Richard J P. Superconducting gravity gradiometer for moving-base applications [EB/OL]. (2006-11-12)[2007-02-01]. http://www.physics.umd.edu/GRE/Moving_base_SGG.pdf

(编辑:顾石庆)