

旋转加速度计式重力梯度仪关键技术进展及分析

张伦东, 孙付平

中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州
Email: zhangldxd@163.com, sun.fp@163.com

收稿日期: 2020年11月2日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月27日

摘要

旋转加速度计式重力梯度仪基本原理比较简单,但是由于重力梯度信号十分微弱,任何微小的误差都会造成重力梯度测量失败。本文在介绍旋转加速度计重力梯度仪测量原理的基础上,重点分析了高性能加速度计研制与测试技术、旋转调制技术、多加速度计比例因子一致性匹配与参数动态调节技术、重力梯度数据处理等相关关键技术及其研究进展,以及研制过程中应该关注的技术难点。以期能够为我国旋转加速度计重力梯度仪的研制提供一些参考。

关键词

加速度计, 重力梯度仪, 比例因子匹配

The Key Technologies Development and Analysis of Rotating Accelerometer Gravity Gradiometer

Lundong Zhang, Fuping Sun

PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou Henan
Email: zhangldxd@163.com, sun.fp@163.com

Received: Nov. 2nd, 2020; accepted: Jan. 20th, 2021; published: Jan. 27th, 2021

Abstract

The principle of rotating accelerometer gravity gradiometer is easily understand, whereas the

gravity gradient signal is weak, so any other errors will result in failure to measure the of gravity gradient signal. Based on the introduction of the measuring principle of rotating accelerometer gravity gradiometer, the key technologies and development of gravity gradiometer Instrument are analyzed, and the easily ignored technologies are discussed, which provides some reference during developing the gravity gradiometer Instrument in our country.

Keywords

Accelerometer, Gravity Gradiometer, Matching of Scale Factors

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于万有引力和地球自转产生的向心力作用, 地球内部物质和表面物体都具有重力[1]。通过测量重力或重力异常, 可以探测地球内部物质分布, 研究地球动力学和物理学, 辅助导航等等, 具有非常重要的作用[2] [3] [4]。但是, 在某些场合, 重力的分辨率和灵敏度还不够, 不能刻画出场源体的更多细节; 另外, 对于航空/航海等移动重力测量, 首先必须采用其他手段, 如 DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System, DGNSS)等, 测量载体的运动加速度, 然后再计算重力或重力异常, 所以采用重力实时辅助导航也比较困难[5] [6] [7] [8]。而重力梯度是重力分量沿某一方向的空间变化率, 对重力场的短波分量更加敏感, 具有更高的分辨率和灵敏度[9]。通过对重力梯度张量进行测量, 不但可以恢复出地球重力场, 而且还可以更好地估计出场源体的边界位置[10]以及探测水下物体[11]; 另外, 重力梯度通常采用差分测量, 载体运动加速度为共模干扰, 能够有效地得到抑制[12], 更有利于提高潜艇在水下三维空间的定位精度[6] [13] [14] [15]。

可见, 相对于重力加速度, 重力梯度具有更加重要的地位, 得到了发达国家的大力研究。如美国, 在 20 世纪 70 年代就投入数十亿美元对重力梯度测量技术进行了研究[16]。

针对飞机、舰船等移动平台使用的重力梯度测量系统, 尽管国外提出了各种各样的设计思路, 但迄今为止, 能够投入实际应用的只有旋转加速度计重力梯度仪[17]。该梯度仪的巧妙之处在于采用了旋转调制技术, 通过旋转调制可以将微弱的重力梯度信号与加速度计的主要误差在频率上分离, 同时使加速度计选择在最佳工作点上, 从而达到采用绝对精度相对较低的加速度计获得高精度测量结果的目的[18]。经过多年的持续优化, 发展的目前, 美、英、澳大利亚等国已研制出 Air-FTG、Falcon、FTGeX 等多个型号的重力梯度仪, 在军事、大地测量、地球物理勘探中得到了广泛的应用[19]。

但是, 由于重力梯度仪在惯性导航与制导、大地测量、空间科学等国家战略领域有着广泛的应用, 纵然国外旋转加速度计重力梯度仪相关技术比较成熟, 但是, 他们对核心技术极端保密, 相关设备也严格出口管制, 就连租用澳大利亚 BHP Billiton 公司的 Falcon 系统在我国某些区域测量也被美国制止。因此, 自主完成旋转加速度计重力梯度仪的研制具有十分重要的军事和民用价值。本文首先简要介绍静态情况下旋转加速度计重力梯度仪的基本测量原理, 然后介绍旋转加速度计式重力梯度仪国内外整体研究进展。在此基础上, 对其涉及的关键技术进行分析, 总结相关研究进展, 指出目前文献相对忽略的相关技术, 以期对我国旋转加速度计重力梯度仪的研制提供参考。

2. 旋转加速度计重力梯度仪基本测量原理及研制进展

2.1. 旋转加速度计重力梯度仪基本测量原理

旋转加速度计重力梯度仪由三个相互垂直的 GGI (Gravity Gradiometer Instrument, GGI)组成[20], 如图 1 所示。在每个 GGI 转盘上, 至少对称安装 4 个加速度计, 其示意图如图 2 所示[21]。假设 GGI 静止, 转盘绕垂直轴转动的加速度为 ω , 四个加速度计的敏感轴沿转盘的切线方向, 转盘中心到加速度计的距离为 R 。假设加速度计为理想元件, 则 4 个加速度计的输出组合为[22]:

$$(a_1 + a_3) - (a_2 + a_4) = 2R(\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx})\sin 2\omega t + 4R\Gamma_{xy} \cos 2\omega t \quad (1)$$

式中, a_i ($i=1,2,3,4$)为加速度计的输出, Γ_{xx} 、 Γ_{yy} 、 Γ_{xy} 为重力梯度分量。

由(1)式可知, 在单个 GGI 转盘上, 4 个加速度计成对分为两组, 两组进行差分, 可消除共模和转动角速度误差的影响[22]。并且经过转盘有规律地旋转, 可将重力梯度信号调制到转盘转动速率的两倍频率上, 从而与其它噪声分离开。转盘的转动速率 ω 可以有效控制和测量, 所以可以产生相应的解调信号 $\sin 2\omega t$ 和 $\cos 2\omega t$, 进而将重力梯度信号 $(\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx})$ 和 Γ_{xy} 解调出来。采用三个互相正交的 GGI, 就可以将 5 个独立的重力梯度信号测量出来。

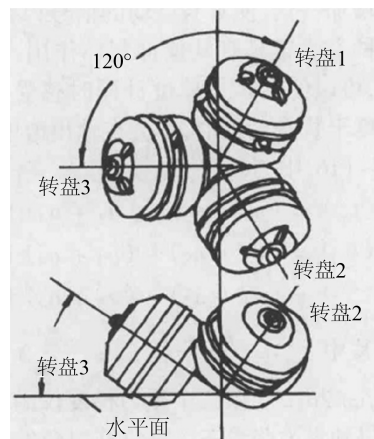


Figure 1. Orientation of GGIs [21]
图 1. GGI 的布置图[21]

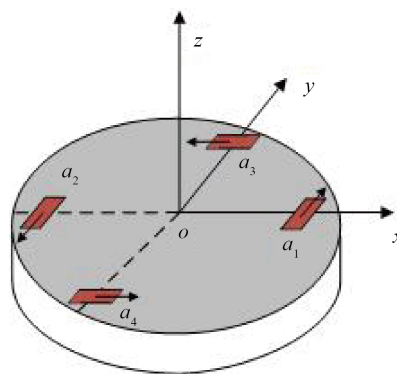


Figure 2. Schematic diagram of gravity gradient instrument [21]
图 2. 重力梯度仪(GGI)示意图[21]

可见, 由旋转加速度计重力梯度仪基本测量原理可知, 旋转加速度计重力梯度仪通过控制转盘的旋转, 使加速度计工作在最佳的频率点上, 避开零位偏置的影响, 可以有效提高加速度计工作时的使用精度。也就是说, 虽然加速度计的绝对精度满足不了重力梯度仪的要求, 但在旋转频率上, 加速度计的精度可以提高一至两个数量级。

2.2. 旋转加速度计重力梯度仪国内外研制相关情况

20 世纪 70 年代, 在导航和导弹发射等因素的驱动下, 美军提出了研制适合于移动平台的重力梯度仪的设想。70 年代中期, 美国 Hughes Aircraft 公司、Draper 实验室和 Bell Aerospace Textron 公司分别研制出 3 种不同类型的实验室样机: 旋转重力梯度仪、液浮重力梯度仪和旋转加速度计重力梯度仪[16]。其中, Bell 公司的重力梯度仪由于采用了旋转加速度计的方案, 该方案结构简单, 基于当时的加速度计工艺水平, 对材料的稳定性、耐受性要求相对不高, 因此最终胜出, 开启了旋转加速度计重力梯度仪的研制。

1974 年, Bell 公司研制出第一台旋转加速度计重力梯度仪原理样机[22]。但是, 直到 1982 年, 第一套旋转加速度计重力梯度仪才提交给美军, 在潜艇上进行了使用[23]。1991 年, 采用旋转加速度计方案, BHP Billiton 和 Lockheed Martin 公司联合开展航空重力梯度仪的研究, 直至 1997 年, 能够测量部分梯度张量的航空重力梯度仪才研制成功, 命名为 Falcon, 如图 3 所示, 并于 1999 年进行商业应用, 主要用于航空地球物理勘探[24]。Lockheed Martin 公司对 Bell Aerospace 公司研制的 GGI 进行了升级改造, 使其适用于航空重力梯度测量, 并且能够测量全部重力梯度张量, 将其命名为 Air-FTG, 如图 4 所示, 并于 2003 年用于商业勘探[25]。2005 年, 英国 ARKeX 公司引进了 Lockheed Martin 公司的全张量重力梯度测量技术, 改进研制了相关的重力梯度测量系统, 命名为 FTGeX, 如图 5 所示[25]。

由上述可知, 国外旋转加速度计重力梯度仪 20 世纪 70 年代初期开始研制, 20 世纪 80 年代在潜艇等军用武器平台开始使用, 20 世纪 90 年代末开始商业勘探。但是, 重力梯度仪是一个非常精密的仪器, 在国防中具有重要的作用, 能够公开查找到的技术资料非常少, 很难知晓相关技术细节。

我国旋转加速度计重力梯度仪在“十一五”之前, 基本上都是对相关技术进行跟踪, 真正研制开始于“十一五”时期, 主要研究单位包括中船重工 707 研究所、中国航空物探遥感中心、东南大学、华中科技大学、航天控制仪器研究所等[22]。经过“十一五”、“十二五”和“十三五”的持续攻关, 一是攻克了重力梯度仪的核心器件—高精度石英挠性加速度计的相关技术, 其偏置已优于 $5 \times 10^{-9} \text{ g}$, 研制的加



Figure 3. Falcon partial tensor gravity gradiometry [24]

图 3. Falcon 部分张量梯度仪[24]



Figure 4. Air-FTG full tensor gravity gradiometry [25]

图 4. Air-FTG 全张量梯度仪[25]



Figure 5. FTGeX full tensor gravity gradiometry [25]

图 5. FTGeX 全张量重力梯度仪[25]

速度计如图 6 所示；二是已研制出我国首台旋转加速度计重力梯度仪原理样机[26]，精度约为 70 E，内部结构示意图和原理样机实物图分别如图 7、图 8 所示；三是研制了重力梯度仪稳定平台，其结构如图 9 所示；四是对重力梯度仪进行了车载实验和飞行实验，取得了第一手的资料[27]。



Figure 6. High resolution quartz flexible accelerometer [27]

图 6. 高分辨率石英挠性加速度计[27]

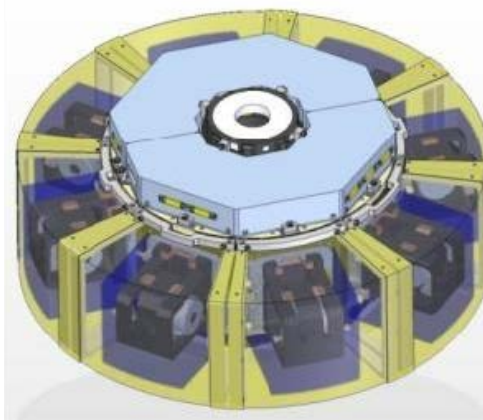


Figure 7. The internal structure diagram of gravity gradiometer [22]

图 7. 重力梯度仪内部结构图[22]



Figure 8. The physical picture of gravity gradiometer [22]

图 8. 重力梯度仪实物图[22]



Figure 9. The stabilization platform of gravity gradiometer [22]

图 9. 重力梯度仪稳定平台[22]

由以上可见, 国内已基本攻克了旋转加速度计重力梯度仪的关键技术, 提高了重力梯度仪用加速度计的精度, 研制了实验室样机, 取得了从无到有的突破式进步。但是, 与国外相比还有不小的差距, 主要体现在: 一是单个加速度计的精度虽然很高, 但是重力梯度值是多个加速度计进行组合, 通过相应的数据处理得到的, 要求多个加速度计的误差特性高度一致, 在这方面国内与国外的差距还不小; 二是旋转调制技术的技术实现细节仍需深入研究, 旋转速率选取多少合适, 转速和转轴的稳定性对重力梯度值的影响等细节问题还仍待进一步解决; 三是动态误差补偿和重力梯度高精度数据处理还需加强研究, 国内虽然研制出实验室样机, 但是车载和机载等动态试验结果还不理想, 另外高精度数据处理和解释涉及的还比较少, 需要进一步加强研究。

3. 相关关键技术分析

涂良成教授等[12]从旋转加速度计重力梯度仪的工作原理出发, 对各类误差影响因素进行了深入分析, 指出关键技术和技术难点主要包括: 高精度大动态范围加速度计、多个加速度计一致性匹配技术、惯性稳定平台技术。加速度计是重力梯度仪的关键器件, 持续提升加速度计的性能使之满足重力梯度仪的需求是核心技术; 在重力梯度仪中, 加速度计是成对工作的, 在工作中, 加速度计比例因子要保持一致性, 任何微小的变化, 则可能导致重力梯度信号提取的失败, 多个加速度计比例因子一致性匹配技术是旋转加速度计重力梯度仪实现的关键; 在重力梯度仪测量中, 需要保持测量坐标系与地固坐标系方位的稳定, 在移动测量中, 重力梯度测量系统安装在惯性稳定平台上。虽然惯性稳定平台是重力梯度仪动态应用的关键, 但相关论证表明, 对于分辨率为 $1E$ 旋转加速度计重力梯度仪, 惯性稳定平台指向误差优于 0.5° , 角速率随机漂移优于 $0.01^\circ/h$ 基本上就能满足需要[28]。根据我国目前陀螺仪和惯性导航技术的水平, 惯性稳定平台的技术指标已优于这个指标, 不再是制约移动重力梯度仪的主要因素。

旋转加速度计重力梯度仪的巧妙之处在于转盘带动加速度计进行旋转, 因此, 旋转调制技术是重力梯度仪的纽带, 它将高精度加速度计技术、多个加速度计参数一致性匹配技术、重力梯度仪数据处理技术有机的联系在一起。综合分析起来, 以下技术仍需深入关注。

3.1. 高性能加速度计的研制与测试技术

基于差分加速度计原理的重力梯度仪, 加速度计是其核心元器件, 其精度决定了重力梯度仪的精度。由于地球重力梯度信号非常微弱, 对其进行精确测量对加速度计提出了很高的要求。理论上讲, 常温下重力梯度如果需要达到 $1E$ ($1E = 1 \times 10^{-9}/S^2$) 的测量精度, 在相距 10 厘米的两点上, 加速度计的精度需要达到 $1 \times 10^{-11} g$ 。这么高精度的加速度计很难实现, 为了提高加速度计的精度, 达到测量重力梯度微弱信号的目的, 美国等发达国家采用了各种各样的手段。第一是采用超导技术提高加速度计的分辨率和稳定性, 进而达到测量重力梯度的目的[29] [30]; 第二是采用压电材料、蓝宝石材料、静电支持技术等研究灵敏度相对较高的加速度计, 从而提高重力梯度仪的精度[31] [32] [33]; 第三是对现有加速度计进行工艺改进, 减小热噪声, 同时采用旋转调制技术、误差在线补偿等系统级技术突破单个加速度计的性能极限, 提高加速度计的使用精度, 达到测量重力梯度微弱信号的要求[34]-[39]。

为了提高加速度计性能, 国内也进行了相应改进。东南大学的蔡体菁教授团队[40] [41]对石英挠性加速度计的摆片重新进行了设计, 对表头进行抽空, 改进了控制回路, 通过改进, 理论上加速度计的分辨率可达到 $1 \times 10^{-10} g$ 。刘润等[42] [43]对加速度计力矩器磁路进行了优化设计, 使磁通密度更稳定。任勇芳[44]针对重力梯度用的加速度计, 在原有结构的基础上, 增加一组摆组件和力矩器, 形成具有两片摆片和三个力矩器的结构, 利用两片摆片感应加速度的大小, 形成双差分测量电路, 可以消除部分噪声的影响, 提高加速度的性能。于湘涛等[45]研究了石英挠性加速度计偏值和标度因数长期重复性机理, 提出从

结构优化、新型材料、稳定化处理等方面提高加速度计参数长期重复性。王珂[46]研究了石英挠性加速度计偏值和标度因数误差产生的机理, 提出了通过改变摆片挠性、结构优化和永磁体感应强度等提高其性能。陈福彬[47]研究了石英挠性加速度计温度补偿方法, 通过温度补偿加速度计测量精度可提高一个数量级。北京航天控制仪器研究所等[48]单位研制的高分辨率加速度计的分辨率也优于 $8 \times 10^{-10} \text{ g}$ 的水平。华中科技大学的涂良成教授团队[49]采用大深宽比的深硅刻蚀、串联弹簧设计、弹簧间隙不等宽度设计等手段对硅基挠性加速度计的表头结构进行了优化。实验测试表明: 开环加速度计的静态本底噪声为 $86 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$, $25 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$ 。

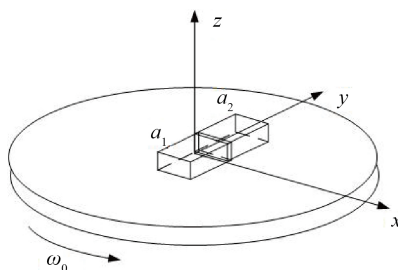


Figure 10. The program of accelerometer thermal noise experiment

图 10. 加速度计热噪声实验方案

加速度计是重力梯度仪的核心器件, Bell Aerospace 公司使用的加速度计其一天内的零偏为 $20 \mu\text{g}$ 左右, 相应的波动优于 $1 \mu\text{g}$, 可以说精度并不太高。但其在旋转频率附近的噪声非常小, 可以接近热噪声的水平。加速度计的研究应注重考虑以下几个方面: 1) 对加速度计进行改进, 重点应该放在怎样降低热噪声和增强稳定性上, 只有热噪声较低、稳定性较好的加速度计, 通过旋转的方式, 才能提高其使用精度; 2) 4 个加速度计的噪声在一定的频段内要尽可能一致, 并且其噪声要达到比较小的值; 3) 要重视加速度计高性能测试技术, 特别是多个加速度计一致性测试和旋转频率与加速度热噪声功率谱之间的关系, 进而确定最好的调制频率。对于加速度计热噪声功率谱的分析和测试, 可采用图 10 所示的方案, 将两个加速度计叠加安装, 使它们的输入轴指向相反的方向。这样, 使安装有两个叠加加速度计的转台运动在不同频率段, 通过测量两个加速度计的输出之和, 则有可能分析噪声随频率的变化情况。

3.2. 旋转调制技术

旋转加速度计重力梯度仪的巧妙之处在于旋转, 因此旋转或者说旋转调制技术是其核心技术。旋转调制技术的本质是通过旋转使加速度计工作在最佳工作点, 使其不受低频噪声的影响。旋转调制技术中旋转频率的选择是其关键技术。加速度计的旋转频率如果选择的过低, 则不能抑制其低频变化的噪声; 旋转频率如果选择的过高, 则加速度计的精度受高频噪声的影响, 同时对旋转圆盘的制造和控制等提出了更高的要求。旋转频率的选择可以通过对加速度计噪声的频谱分析进行选择, 通过加速度计噪声的频谱分析, 将旋转频率选择在低频噪声和低频噪声对加速度计精度影响最小的频带。

基于实验室现有的石英挠性加速度计进行功率谱分析, 该加速度计零偏的出厂值为 $3 \times 10^{-5} \text{ g}$ (1σ , 百秒方差)。对其进行 200 Hz 采样, 减去均值并累加成 1 s , 其噪声输出如图 11 所示。将其累加到 100 s 后, 加速度计输出如图 12 所示。对该加速度计的噪声进行功率谱分析, 其功率谱密度如图 13 所示。

由该加速度计噪声的功率谱密度可以看出, 在 $0 \sim 0.02$ 赫兹的范围内加速度计噪声的功率谱密度是很高的, 但是在 $0.02 \sim 0.8$ 赫兹的范围内, 其功率谱密度减小了很多, 在相对更高的频段, 加速度计的精度又受高频噪声的影响。

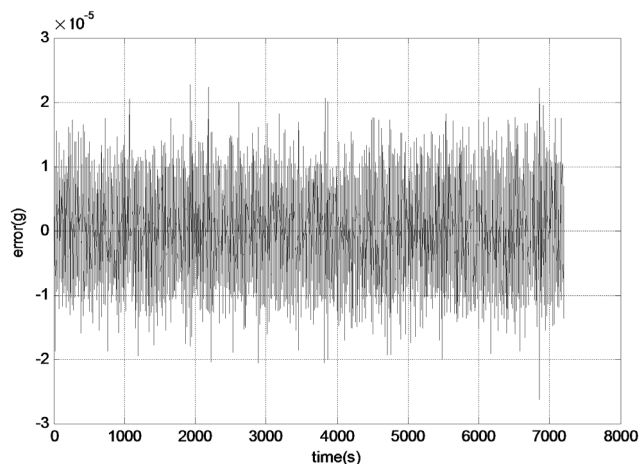


Figure 11. Accelerometer 1 s output value
图 11. 加速度计 1 s 输出值

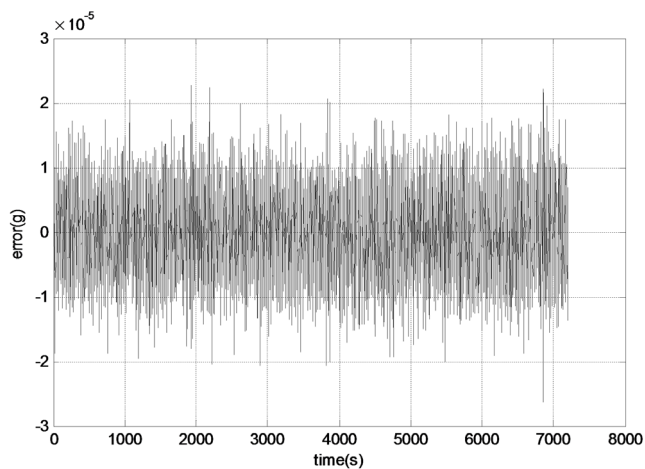


Figure 12. Accelerometer 100 s output value
图 12. 加速度计 100 s 输出

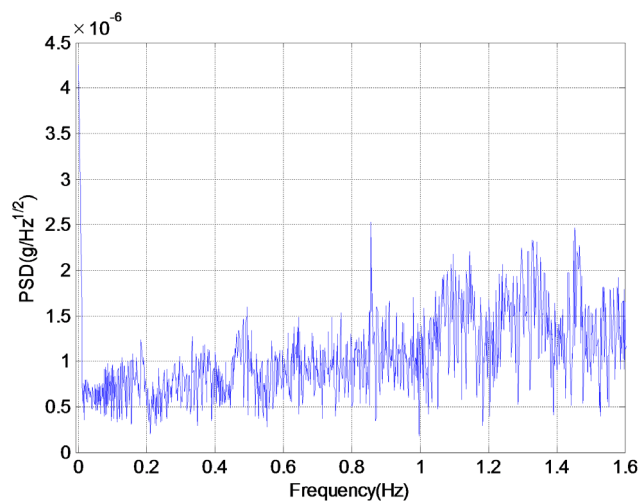


Figure 13. Power spectral density of accelerometer noise
图 13. 加速度计噪声的功率谱密度

对于该加速度计, 在 0.02~0.8 赫兹的频带内, 噪声对加速度计的影响较低, 在 $3 \times 10^{-7} \text{ g/Hz}^{1/2} \sim 1.2 \times 10^{-6} \text{ g/Hz}^{1/2}$ 的水平, 所以如果将转动频率选择在这个范围, 则加速度计的使用精度将得到很大提高, 相对于不旋转时其精度提高 1~2 个数量级。

因为每个重力梯度敏感器(GGI)上有 4 个加速度计, 所以圆盘的转速应根据这 4 个加速度计的功率谱选择一恰当值, 使得在这一圆盘转速下, 4 个加速度计的使用精度都得到大力提高。对该问题, 高巍等[50]提出了一种采用功率谱密度分析和 Allan 方差分析相结合的方式, 得到一个转速的频率区间, 在该区间转动, 则兼顾了多个加速度计精度提高情况。

但是, 转盘转速的稳定性对重力梯度也有较大影响。罗嗣成[21]分析了旋转角速度不稳定时对重力梯度的影响, 指出重力梯度仪的测量精度为 10 E 时, 旋转角加速度的稳定性应优于 $2.4 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^2$ 。韦宏玮[51]推导了角速度误差的传播规律, 指出要实现 1 E 的测量精度, 转盘的角速度测量误差需要优于 $2 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$ 。郑玲玲等[52]也分析了转盘转速对重力梯度测量的影响, 并提出了转盘的稳速控制算法。总之, 对于旋转调制技术, 国内的研究主要集中在转速稳定性对重力梯度仪的精度影响上, 而对于在旋转调制技术下, 加速度计的误差特性、误差变化规律的研究较少, 特别是在一个圆盘上有多个加速度计时, 为最大程度的消除随机测量噪声需要进行怎样的加速度计配置的研究少有涉及。

对于旋转调制技术, 以下几点需要在研究过程中注意: 1) 在旋转情况下, 加速度计的误差特性和变化规律如何变化需深入研究; 2) 需要深入研究确定转动圆盘最优转动速率的理论和方法; 3) 如要深入研究在旋转的情况下, 加速度计多种误差的在线估计和补偿方法。

3.3. 多加速度计一致性匹配和参数动态调整技术

重力梯度信号非常微弱, 在工作过程中, 一个转盘上的加速度计需要成对匹配, 四个加速度计也需要一起匹配, 同时, 还需要转盘转速稳定性优于 10^{-5} [12], 这是旋转加速度计重力梯度仪非常困难的技术, 关系到仪器的成败, 得到了国内众多学者的研究。

王树甫等[53]通过解调加速度计组合输出信号中的标度因子不平衡信息, 采用反馈实现标度因子的调整, 但并没有给出调整的结果。马莉等[54]采用 PID 控制算法对加速度计标度因子进行了调整, 仿真结果表明其调整的精度可达 10^{-5} 的量级。钱学武、蔡体菁等[55] [56]首先对一对加速度计输出信号及重力梯度仪总输出进行滤波, 然后对含有标度因子不平衡信息进行幅值解调, 并利用模糊 PID 控制算法实时反馈调整加速度计内部的电磁线圈力矩, 对加速度计的标度因子进行调整, 实验测试表明一对加速度计标度因子的调整精度可达 10^{-7} , 两对之间的调整精度可达 10^{-5} 。涂良成教授团队等[57] [58]分析了加速度计动态调节需求, 指出要使重力梯度测量分辨率达到 1 E, 加速度计标度因子一致性匹配需达到 10^{-11} 的量级, 二阶非线性因子需达到 10^{-11} g/g^2 的量级, 匹配方法是在加速度计输入中加上一个特征频率的信号, 然后对输出组合进行解调, 根据特征信号大小进行反馈调节, 直到特征频率信号幅值小于目标要求。

加速度计一致性匹配和参数动态调整非常困难, 一是一致性匹配需要的精度比较高, 需要优于 10^{-8} , 二是计算量大, 并且需要快速调节, 三是调节的参数多, 除了需要调节标度因子外, 还需要调节比较多的二阶系数和非线性系数。所以需要结合加速度计的结构、转盘的旋转等深入研究加速度计一致性匹配和参数动态调节方法, 这是旋转加速度计重力梯度仪能否应用的关键。

3.4. 重力梯度仪高精度数据处理技术

重力梯度信号十分微弱, 如何高精度的提取重力梯度信号并进行解释非常关键, 需要从解调方法、放大电路、数据处理方法、误差抑制等整体考虑。

丁昊、蔡体菁等[59]设计了重力梯度仪低噪声前放电路, 测试结果表明, 折算到重力梯度仪输入端的

噪声约为 $26.5 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。李海兵等[60] [61]研究了重力梯度高精度微弱信号检测电路,对重力梯度仪实验设备进行了数据处理,在实验室条件下的引力梯度试验表明,系统可检测优于 200 E 的引力梯度。钱学武等[62]采用 dmey 小波基函数强制阈值方法对重力梯度信息进行去噪处理,仿真表明该方法不会造成数据丢失和信号偏移。杨晔等[63] [64]研究了相关的输出解调与滤波方法,主要有方波解调和正弦波解调两种方式,滤波后的信号采用正弦波解调可以消除谐波频点处的噪声导致的测量偏差。陈曦、袁园等[65] [66]采用数字滤波器和卡尔曼滤波结合,利用卡尔曼滤波并采用扩展状态将重力梯度数据中的有色噪声进行估计,可将有用信号与有色噪声分离,进而得到更高质量的梯度信号。此外,在运动情况下,线运动、角运动、自身的重力梯度等[67] [68] [69] [70]都需要仔细考虑,这也是影响重力梯度的非常重要的因素。

尽管旋转加速度计重力梯度仪采取多项措施减小误差的影响,但是梯度信号十分微弱,梯度仪输出信号含有大量噪声,信噪比相对极低,因此,需要深入研究重力梯度信号高精度动态提取方法和误差补偿方法。另外,解算出来的重力梯度信息包含哪些含义,仍需深入解释,这也是重力梯度仪走向实用的关键因素。

4. 结论

旋转加速度计重力梯度仪虽然原理简单,但重力梯度信号十分微弱,任何微小的误差都会造成重力梯度检测失败。所以,需要以旋转技术为纽带,系统地考虑加速度计的改进、多个加速度计一致性匹配和参数动态调节、重力梯度高精度数据处理和误差动态补偿等,充分考虑各种微小误差的影响。本文从旋转加速度计重力梯度仪研制的意义和基本原理出发,对相关的关键技术和研究进展进行了分析和总结,并总结了研究中应该重点关注的技术难点。重力梯度仪对国防安全具有十分重要的意义,目前得到了国内很多单位的研究。期待不久后,相关技术能够得到突破,我国的重力梯度仪能够走出实验室,得到实用。

基金项目

国家自然科学基金资助(41674027)。

参考文献

- [1] 宁津生, 刘经南, 等. 现代大地测量理论与技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006: 1-32.
- [2] Jekeli, C. (2004) Airborne Gravimetry Using INS/GPS and Gravity Gradiometers. *Proceedings of the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation*, Dayton, 7-9 June 2004, 476-482.
- [3] 丛丹妮, 吴美平, 胡小平. 重力梯度传感器结构误差建模[J]. 导航与控制, 2018, 17(1): 74-82.
- [4] 黄杨明. 高精度捷联式航空重力仪误差估计方法研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [5] 李兰玉. 基于全张量重力梯度的水下导航技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [6] Rice, H., Kelmenson, S. and Mendelsohn, L. (2004) Geophysical Navigation Technologies and Applications. *IEEE 2004 Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, 26-29 April 2004, 618-624. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2004.1309051>
- [7] Difrancesco, D. (2007) Advances and Challenges in the Development and Deployment of Gravity Gradiometer Systems. *EGM 2007 International Workshop*, 1-20.
- [8] Ma, J., Yang, F. and Yan, Z. (2012) Density Compensation to Reference Map of Gravity Navigation. *Proceeding of 2012 International Conference on Modeling Identification and Control*, Wuhan, 24-26 June 2012, 1129-1134.
- [9] Yu, M.B. and Cai, T.J. (2018) A Method of Rotating Accelerometer Gravity Gradiometer for Centrifugal Gradient Detection. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*, **1016**, Article ID: 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1016/1/012016>
- [10] 汤井田, 史庆斌, 胡双贵, 等. 基于重力梯度张量曲率的边界识别[J]. 地球物理学报, 2019, 62(5): 1872-1884.

- [11] 万晓云, 曾相航. 一种基于重力梯度极值点的潜艇位置探测方法[P]. 中国专利, CN 111142170 A. 2020-05-12.
- [12] 涂良成, 李祝, 王志伟, 等. 旋转加速度计重力梯度测量关键技术分析[C]//2014 年大地测量研究进展学术研讨会. 武汉, 2014: 358-366.
- [13] Moryl, J., Rice, H. and Shinnars, S. (1998) The Universal Gravity Module for Enhanced Submarine Navigation. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, Palm Springs, CA, 20-23 April 1996, 324-331. <https://doi.org/10.1109/PLANS.1998.670124>
- [14] Moryl, J. (1996) Advanced Submarine Navigation Systems. *Sea Technology*, **37**, 33-39.
- [15] Jircitano, A. and Dosch, D. (1991) Gravity Aided Inertial Navigation System (GAINS). *ION 47th Annual Meeting Proceedings*, Williamsburg, VA, 10-12 June 1991, 21-29.
- [16] 蔡体菁, 周百令. 重力梯度仪的现状和前景[J]. 中国惯性技术学报, 1999, 7(1): 39-42.
- [17] Difrancesco, D., Meyer, T., Christensen, A., et al. (2009) Gravity Gradiometry—Today and Tomorrow. 11th *SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition*, Swaziland, 16-18 September 2009, 80-83.
- [18] Hammond, S. and Murphy, C. (2003) Air-FTGTM: Bell Geospace's Airborne Gravity Gradiometer—A Description and Case Study. Preview, August 2003, 24-26.
- [19] 吴琼, 腾云田, 张兵, 等. 世界重力梯度仪的研究现状[J]. 物探与化探, 2013, 37(5): 761-768.
- [20] 任永毅, 李汉舟, 陈锦杜. 旋转加速度计重力梯度仪技术研究[J]. 导航与控制, 2003, 2(3): 38-42.
- [21] 罗嗣成. 旋转加速度计重力梯度仪[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [22] 舒晴. 航空重力梯度测量技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [23] Dransfield, M. (2007) Airborne Gravity Gradiometer in the Search for Mineral Deposits. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, Toronto, 341-354.
- [24] (2020) Lockheed Martin Gravity Systems—Cutting-Edge Resource and Exploration Technologies. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/gravity-gradiometry.html>
- [25] Veryaskin, A. and Gravity, V. (2018) *Magnetic and Electromagnetic Gradiometry*. Morgan & Claypool Publishers, San Rafael, California, 1-56.
- [26] 杨晔, 李达, 李城锁, 等. 旋转加速度计式重力梯度仪动态测量适应性能试验与效果分析[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(2): 19-25.
- [27] Meng, Z.H., Yang, Y. and Li, Z. (2019) Development of Airborne Gravity Gradiometer Based on a Quartz Flexible Accelerometer. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, **93**, 352-364. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14133>
- [28] 涂良成, 李祝, 伍文杰, 等. 航空重力与重力梯度测量对惯性稳定平台的需求分析[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 18-23.
- [29] Chan, H.A. and Paik, H.J. (1987) Superconductor Gravity Gradiometer for Sensitive Gravity Measurements I: Theory. *Physical Review D*, **35**, 3551-3571. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.35.3551>
- [30] Jordan, S.K. (1985) Status of Moving-Base Gravity Gradiometry. *3rd Inter Symposium on Inertial Technology for Survey and Geodesy*, Banff, Canada, September 1985, 16-20.
- [31] Bernard, A. and Touboul, P. (1989) A Spaceborne Gravity Gradiometer for the Nineties Gravity, Gradiometer and Gravimetry. In: Rummel, R. and Hipkin, R.G., Eds., *Gravity, Gradiometry and Gravimetry. International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 103, Springer, New York, 57-66. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3404-3_8
- [32] Martin, L.P. (1994) Sapphire Resonator Transducer Accelerometer for Space Gravity Gradiometry. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **27**, 875-880. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/4/031>
- [33] Blair, D.G. (1992) Sapphire Dielectric Resonator Transducers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **25**, 1110-1115. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/25/7/013>
- [34] Clive, A. and Alvert, J. (1990) Passive Gravity Gradiometer Navigation System. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, Las Vegas, NV, 20 March 1990, 60-66.
- [35] Zorn, A.H. (2002) A Merging of System Technologies: All-Accelerometer Inertial Navigation and Gravity Gradiometry. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, Palms Springs, CA, 15-18 April 2002, 60-73. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2002.998890>
- [36] Jiang, F., Wu, Y.M., Zhang, Z.S., et al. (2009) Combinational Seabed Terrain Matching Algorithm Basing on Probability Data Associate Filtering and Iterative Closest Contour Point. 2009 *Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Changsha, 10-11 October 2009, 245-249.
- [37] Difrancesco, D., Grierson, A., Kaputa, D., et al. (2009) Gravity Gradiometer Systems—Advances and Challenges. *Geophysical Prospecting*, **57**, 615-623. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2008.00764.x>

- [38] Lane, R.J.L. (2010) Airborne Gravity 2010-Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity Workshop. *Geoscience Australia Record 2010 and GSNSW File GS2010*, Sydney, 22 August 2010, 256-272.
- [39] Barnes, G. and Lumley, J. (2011) Processing Gravity Gradient Data. *Geophysics*, **76**, I33-I47. <https://doi.org/10.1190/1.3548548>
- [40] 王春爱, 蔡体菁. 挠性加速度计石英摆片的力学分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(3): 57-60.
- [41] 王春爱. 高精度加速度计的结构设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2009.
- [42] 刘润, 蔡体菁, 丁皓. 高精度石英挠性加速度计闭环系统的设计与分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 311-315.
- [43] 刘润, 李海兵. 高精度加速度计力矩器磁路的设计与仿真分析[J]. 导航与控制, 2014, 13(1): 40-43.
- [44] 任勇芳. 重力梯度检测用石英加速度计[P]. 中国专利, CN204086572 U. 2014-09-18.
- [45] 于湘涛, 张菁华, 杜祖良. 石英挠性加速度计参数长期重复性技术研究[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(1): 58-62.
- [46] 王珂. 石英挠性加速度计偏值和标度因数稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [47] 陈福彬, 张科备. 石英挠性加速度计温度补偿算法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 98-102.
- [48] 田兴, 李天赐, 李海兵, 等. 超高分辨率石英挠性加速度计设计研究[J]. 新技术新工艺, 2020(4): 21-25.
- [49] 伍文杰. 高精度大动态范围硅基挠性加速度计研制[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [50] 高巍, 李达, 冯鸿奎, 等. 一种基于惯性技术的重力梯度传感器转速选择方法[P]. 中国专利, CN 108287372 A. 2019-11-26.
- [51] Wei, H.W. and Wu, M.P. (2017) A New Configuration Method for Accelerometers in Rotating Accelerometer-Based Gravity Gradiometer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **220**, Article ID 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/220/1/012037>
- [52] 郑玲玲. 基于 DSP 的转台稳速控制系统的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学硕, 2008.
- [53] 王树甫, 孙枫, 郝燕玲, 等. 旋转加速度计重力梯度仪标度因子调整方法及误差补偿研究[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(4): 31-35.
- [54] 马莉. 旋转加速度计重力梯度仪标度因数调整算法与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [55] 钱学武, 蔡体菁. 旋转加速度计重力梯度仪加速度计标度因数实时反馈调整方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(2): 148-153.
- [56] 蔡体菁, 钱学武. 旋转加速度计重力梯度仪加速度计标度因子反馈调整方法[P]. 中国专利, CN105044798 A. 2015-11-11.
- [57] 涂良成, 刘金全, 王志伟, 等. 旋转重力梯度仪的加速度计动态调节方法与需求分析[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(2): 131-135.
- [58] 胡双英. 旋转重力梯度仪中加速度计一致性匹配分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [59] 丁昊, 蔡体菁. 旋转加速度计重力梯度仪前放电路的分析与设计[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(3): 400-403.
- [60] 李海兵, 杨慧, 马存尊, 等. 用于重力梯度仪系统中的高精度微弱信号检测电路[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(5): 581-584.
- [61] 李海兵, 郭刚, 周坚鑫, 等. 旋转式重力梯度测量系统试验及数据处理[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(6): 736-740.
- [62] 钱学武, 蔡体菁. 旋转加速度计重力梯度仪数据处理方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 708-712.
- [63] 杨晔, 李达, 高巍. 旋转加速度计式重力梯度仪输出解调与滤波[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(6): 701-705.
- [64] 杨晔, 李达. 基于旋转加速度计原理的重力梯度测量技术与试验[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 20-28.
- [65] 陈曦, 吴燕冈, 袁园, 等. 移动平台全张量重力梯度数据的噪声抑制[J]. 世界地质, 2015, 34(2): 491-496.
- [66] Yuan, Y., Huang, D.-N., Yu, Q.-L., et al. (2013) Noise Filtering of Full-Gravity Gradient Tensor Data. *Applied Geophysics*, **10**, 241-250. <https://doi.org/10.1007/s11770-013-0391-3>
- [67] 喻名彪. 旋转加速度计重力梯度仪误差补偿及信号处理[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [68] Yu, M.B. and Cai, T.J. (2019) Online Error Compensation Method of A Rotating Accelerometer Gravity Gradiometer. *Review of Scientific Instruments*, **90**, 1-16.
- [69] 钱学武, 赵立业. 旋转加速度计重力梯度仪重力梯度解调相位角确定方法及装置[P]. 中国专利, CN 111624671

A. 2020-01-07.

- [70] Qian, X.W. and Zhu, Y.H. (2019) Self-Gradient Compensation of Full-Tensor Airborne Gravity Gradiometer. *Sensors*, **19**, 1950-1963. <https://doi.org/10.3390/s19081950>