

国家自然科学基金 (No. 40804015) 资助

# 高精度海洋重力测量 理论与方法

THEORY AND METHOD  
ON  
HIGH ACCURACY MARINE GRAVIMETERIC SURVEY

赵池航◎著

东南大学出版社



国家自然科学基金(No. 40804015)资助

高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20070286067、200802861060)资助

东南大学科技出版基金资助

东南大学优秀青年教师资助计划项目(2008)资助

# 高精度海洋重力测量理论与方法

THEORY AND METHOD ON HIGH  
ACCURACY MARINE GRAVIMETERIC SURVEY

赵池航 著

东南大学出版社

· 南京 ·

## 内 容 介 绍

本书围绕高精度海洋重力测量理论与方法展开研究,首先详细论述了国内外海洋重力仪的发展及研究现状,其次建立了方位捷联陀螺稳定平台系统误差模型、石英振梁式重力传感器原理误差模型和基于时间序列分析理论的石英振梁式重力传感器输出信号模型,最后研究了基于估计理论的高精度海洋重力仪实时数据处理方法。

本书可以供从事水下运载工具(水下测量船、水下游览船和自主作业机器人)导航专业的研究生参考,也可以作为从事海洋油气田勘探和海洋地热资源勘察的工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高精度海洋重力测量理论与方法/赵池航著. —南京:东南大学出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-5641-3001-5

I. ①高… II. ①赵… III. ①海洋测量:重力测量—研究 IV. ①P223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 185934 号

### 高精度海洋重力测量理论与方法

---

出版发行: 东南大学出版社  
出 版 人: 江建中  
网 址: <http://www.seupress.com>  
电子邮箱: [press@seupress.com](mailto:press@seupress.com)  
社 址: 南京市四牌楼 2 号  
邮 编: 210096  
电 话: 025-83793191(发行) 025-57711295(传真)  
经 销: 全国各地新华书店  
印 刷: 南京玉河印刷厂  
开 本: 700mm×1000mm 1/16  
印 张: 8.75  
字 数: 170 千字  
版 次: 2011 年 9 月第 1 版  
印 次: 2011 年 9 月第 1 次印刷  
书 号: ISBN 978-7-5641-3001-5  
定 价: 22.00 元

---

本社图书若有印装质量问题,请直接与读者服务部联系。电话(传真):025-83792328

# 前 言

水下载运工具,如水下测量船、水下游览船、水下自主作业机器人和潜艇等,广泛地应用于海洋油气资源勘探、海洋地热资源勘察、水下电缆铺设和国防等领域,要实现水下载运工具长时间的水下作业,必须依赖于自主水下导航定位系统。通常采用惯导系统作为水下载运工具的主要导航定位设备,但是,惯性仪表的随机误差以及不规则变化重力场的不确定性都会导致惯导系统的误差不断增加。水下载运工具长时间水下航行时需要利用外部信息对惯导系统进行重调和校正以保证其定位精度,为此,水下载运工具需要定时上浮以接收 GPS、无线电、天文等其他外部导航定位信息,因而降低了水下载运工具导航系统的可靠性。鉴于此,研究利用某种信息与惯导系统组合来解决水下载运工具长时间航行的定位问题具有极为重要的现实意义。

近年来,借助大地测量技术的研究成果,国内外研究机构和学者相继开展了地形匹配导航技术、重力辅助导航技术、地磁场辅助导航技术等研究。由于重力测量不需要接收外部信息,最大程度地保证了水下载运工具的自主性,因此,利用重力与惯导系统组合的导航系统是严格意义上的无源导航系统,受到了格外关注。重力辅助水下导航技术主要有四种方式:重力异常图匹配、重力梯度匹配、垂线偏差修正以及重力异常与重力梯度联合匹配,其中,前两种方式主要用于导航位置误差估算,而后两种方式主要用于速度误差估算。重力异常图匹配只需要重力仪就可以实现,而其他三种方式必须采用重力梯度仪才能实现。因此,重力异常图匹配是一种简便易行的水下载运工具辅助导航方式。

无源重力导航系统的核心技术之一是“高精度海洋重力测量理论与方法重力仪技术”,影响高精度海洋重力仪测量精度的因素有方位捷联陀螺稳定平台水平精度、重力传感器自身测量误差和海浪等干扰因素。高精度海洋重力仪设计方案确立后,提高重力仪测量精度的途径有:对高精度海洋重力仪进行误差分析并采用有效的方法进行误差补偿,包括方位捷联陀螺稳定平台误差分析及补偿和重力传感器的误差分析及补偿,即分析各种误差源对重力异常测量值的影响,以便找出主要误差源并设法补偿或消除;采用有效的数据处理方法对高精度海洋重力仪的输出

数据进行处理,包括实时数据处理和事后数据处理,高精度海洋重力仪测得的重力异常数据通常是淹没在强噪声背景下的微弱信号。本书对高精度海洋重力测量理论与方法进行了研究,以实时获取高精度的重力异常信息中的特征点,并用于重力辅助导航系统中的重力异常图匹配。本书共分7章,主要的研究工作包括如下几个方面:

第一章是全书的总论,主要论述了国内外海洋重力仪的研究现状及趋势。

第二章分析了引起方位捷联陀螺稳定平台不水平的因素,建立方位捷联陀螺稳定平台系统误差模型,并分析各种误差源对重力异常测量值的影响。首先分析了高精度海洋重力仪方位捷联陀螺稳定平台系统的结构,建立了平台横摇环、纵摇环的绝对运动角速度表达式,分析了以液浮陀螺作为敏感元件的方位捷联陀螺稳定平台的陀螺仪、信号传感器、放大校正器、力矩马达和环架系统,根据各组成部分的传递函数得到方位捷联陀螺稳定平台动力学方程;其次,建立无阻尼方位捷联陀螺稳定平台不水平引起重力传感器测量误差方程,并进行了仿真模拟实验,理论分析和仿真模拟可得:由陀螺漂移、陀螺稳定平台安装误差和惯性加速度计误差引起的方位捷联陀螺稳定平台的纵倾角 $\alpha$ 、横倾角 $\beta$ 及平台上的重力传感器的测量误差都具有振荡传播特性,其振荡周期包括舒勒周期、地球周期和傅科周期,为了满足高精度海洋重力仪测量精度1 mGal的要求,必须采用阻尼的方法对上述振荡周期进行阻尼;最后,为克服振荡周期对高精度海洋重力仪测量系统的影响,在方位捷联陀螺稳定平台水平回路中加入阻尼,并建立水平阻尼方位捷联陀螺稳定平台不水平引起重力传感器测量误差方块图,并进行了仿真模拟实验,理论分析和仿真模拟得:在该仿真条件下,水平阻尼方位捷联陀螺稳定平台倾斜引起的重力传感器测量误差约为0.2246 mGal,因此,对于高精度海洋重力仪来说,该项误差应予以补偿,即进行横向水平加速度改正,否则,只有在潜艇无加速度时,此项测量误差才为零。

第三章分析了石英振梁式重力传感器的结构和工作原理,建立了石英振梁式重力传感器原理误差模型,并进行了定量分析。首先分析的石英振梁式重力传感器中的关键器件双音叉石英谐振器的工作原理,得出双音叉石英谐振器的谐振频率公式;其次,从结构上分析了石英振梁式重力传感器的工作原理,石英振梁式重力传感器由挠性支承、敏感质量块、双音叉石英谐振器、谐振电路、测频电路和高精度温控电路等部分组成,将石英振梁式重力传感器等效成转动惯量—扭簧—阻尼系统,得出石英振梁式重力传感器输出差动频率公式;再次,从石英振梁式重力传感器原理计算、测频电路、输出差动频率线性化、加工工艺和工作温度等方面分析了石英振梁式重力传感器产生输出频率误差的因素,得出加工工艺误差是石英振

梁式重力传感器输出差动频率的主要误差源,为有效减小输出差动频率误差应控制加工尺寸精度。

第四章研究了基于时间序列分析理论的石英振梁式重力传感器的输出信号建模方法,并建立了石英振梁式重力传感器的输出信号模型。首先采用时间序列分析方法对静态测量的石英振梁式重力传感器输出信号进行建模处理,由于静态测量石英振梁式重力传感器输出信号具有明显的周期项,因此,先提取明显周期项,其次对提取周期项后的石英振梁式重力传感器输出信号采用逆序检验方法检验证明具有一阶线性趋势项,并提取了线性趋势项,然后对提取明显周期项和线性趋势项的数据采用 Fisher 统计检验方法证明具有一个隐含周期项,并提取了隐含周期项,对经过上述数据预处理的石英振梁式重力传感器输出信号的自相关函数和偏相关函数的分析可得,其自相关函数“截尾”,偏相关函数“拖尾”,因此可以用 AR 模型进行描述,并对预处理后的数据建立了五阶 AR 模型,并计算了 AIC 值,随着阶数越高 AIC 值越小,则阶数越高,AR 模型的逼近性能越好;为分析模型的适用性,对建立的五个 AR 模型计算了拟合后残差的自相关函数曲线,可得当阶数大于 3 时,残差的自相关函数值绝大部分在  $\pm 2\sigma^2/\sqrt{N}$  的范围内,残差可近似为白噪声;采用 AR(3)、AR(4)和 AR(5)模型拟合石英振梁式重力传感器输出系统方程,并采用 Sage-Husa 自适应卡尔曼滤波来进行实时数据处理,三种模型都在一定程度上消除背景噪声的影响,但阶数越高处理效果越好。

第五章研究了基于估计理论的高精度海洋重力仪实时数据处理方法,以消除各种随机干扰噪声对高精度海洋重力测量观测值的影响,并通过实验验证了所研究方法的可行性。首先,由于采用基于估计理论的实时滤波方法都必须知道高精度海洋重力仪测量系统的系统方程,但是由于高精度海洋重力仪测量系统的物理意义上的系统方程难以建立,本章提出根据高精度海洋重力仪输出随机误差模型来逼近高精度海洋重力仪测量系统的系统方程;其次,针对特定的 AR 模型,研究了基于估计理论的自适应卡尔曼滤波方法,并针对高精度海洋重力仪系统噪声和量测噪声为白噪声时做了仿真实验,理论分析和仿真实验证明:采用自适应卡尔曼滤波可以有效地消除背景白噪声的影响;再次,针对高精度海洋重力仪系统噪声和观测噪声分别对白噪声和相关噪声的情况下,研究了基于估计理论的  $H_\infty$  滤波技术,并与自适应卡尔曼滤波进行了对比分析,理论分析和仿真实验证明:当高精度海洋重力仪测量系统的系统噪声和量测噪声都为白噪声时,自适应卡尔曼滤波在消除背景干扰噪声中性能优于  $H_\infty$  滤波,当高精度海洋重力仪测量系统的系统噪声和量测噪声都为相关噪声时,  $H_\infty$  滤波在消除背景干扰噪声中性能优于自适应卡尔曼滤波;最后,分析了厄特弗斯效应、布格异常、横向加速度、垂直加速度和潮

汐对高精度海洋重力仪测量值的影响,并给出各项修正方法。

第六章研究了基于小波理论的高精度海洋重力仪事后数据处理技术,并通过实验验证了所研究方法的可行性。首先论述了多重小波基本理论,包括连续小波变换、离散多重变换和多元多分辨率分析;其次,分析了多重小波的正交性、正则性、对称性、消失矩特性和短支集特性等特性,分析了数据信号的奇异性分析理论,分别论述了数据信号和噪声信号在多重小波域的表现形式;再次,以改进的 Bumps 曲线来模拟高精度海洋重力仪受海浪等背景噪声干扰的输出数据信号,对加白噪声的 Bumps 曲线分别采用通用阈值规则(sqtwolog 规则)、最小最大准则阈值规则(minimax 规则)和无偏风险阈值规则(rigrsure 规则)进行处理,理论分析和仿真实验表明三种阈值规则都不能有效地消除这种阶越噪声的影响,为了消除高频脉冲噪声的影响,提出高频与低频联合软阈值处理方法并做了仿真实验,理论分析和仿真实验表明高频与低频联合软阈值处理法可有效地消除这种模拟阶越噪声的影响;最后,对加相关噪声的 Bumps 曲线采用特征值法阈值规则和高频与低频联合软阈值处理方法进行了仿真模拟实验,仿真实验表明在背景噪声为相关噪声时,高频与低频联合软阈值处理法也可有效地消除这种模拟阶越干扰的影响。

第七章对本书进行总结,并提出了今后的研究方向。

本课题的研究成果对于海洋油气田勘探、海洋地热资源勘察、水下电缆铺设和国防等方面都具有重要的理论和实际应用价值。本书的研究工作和出版得到了国家自然科学基金项目(No. 40804015)、高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20070286067、200802861060)和东南大学优秀青年教师资助计划项目(2008)的资助,在撰写过程中,参考了国内外大量相关文献及编著,同时,本学科的何杰教授对本书的撰写提出了宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。由于作者的理论水平和实践经验有限,加之编写时间仓促,书中肯定有不足之处,敬请各位专家和学者批评指正。

作者

2011年3月

# 目 录

<b>第一章 国内外重力仪的发展及研究现状</b> .....	1
1.1 国外重力仪的发展及研究现状 .....	1
1.2 国内重力仪的发展及研究现状 .....	6
<b>第二章 方位捷联陀螺稳定平台系统误差模型</b> .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 方位捷联陀螺稳定平台动力学分析 .....	9
2.3 无阻尼方位捷联陀螺稳定平台系统误差模型 .....	15
2.3.1 无阻尼方位捷联陀螺稳定平台基本方程 .....	15
2.3.2 无阻尼方位捷联陀螺稳定平台系统误差模型 .....	19
2.3.3 无阻尼方位捷联陀螺稳定平台不水平引起重力传感器测量误差仿真实验 .....	23
2.4 水平阻尼方位捷联陀螺稳定平台系统误差模型 .....	24
2.4.1 水平阻尼方位捷联陀螺稳定平台基本方程 .....	25
2.4.2 水平阻尼方位捷联陀螺稳定平台系统误差模型 .....	27
2.4.3 水平阻尼方位捷联陀螺稳定平台不水平引起重力传感器测量误差仿真实验 .....	28
2.5 小结 .....	29
<b>第三章 石英振梁式重力传感器原理误差分析</b> .....	31
3.1 引言 .....	31
3.2 双音叉石英谐振器工作原理 .....	32
3.3 石英振梁式重力传感器工作原理 .....	33
3.4 石英振梁式重力传感器原理计算误差分析 .....	37
3.5 石英振梁式重力传感器测频电路误差分析 .....	38
3.6 石英振梁式重力传感器线性化误差分析 .....	39
3.7 加工工艺引起的误差分析 .....	40



3.7.1	挠性梁的加工误差引起的差动输出误差	41
3.7.2	双音叉石英谐振器加工误差引起的输出误差	43
3.7.3	质量块的质心偏移引起的输出误差	45
3.8	温度因素引起的测量误差分析	46
3.9	小结	47
<b>第四章</b>	<b>基于时间序列分析的石英振梁式重力传感器输出信号模型</b>	<b>49</b>
4.1	引言	49
4.2	石英振梁式重力传感器输出信号模型	49
4.2.1	石英振梁式重力传感器输出信号采集	49
4.2.2	石英振梁式重力传感器输出信号明显周期项提取	50
4.2.3	去除明显周期项后石英振梁式重力传感器输出信号趋向性检验	52
4.2.4	去除明显周期项后石英振梁式重力传感器输出信号趋势项提取	53
4.2.5	石英振梁式重力传感器输出信号模型参数辨识	56
4.2.6	石英振梁式重力传感器输出信号模型的确立	60
4.3	基于自适应 kalman 滤波的石英振梁式重力传感器输出信号处理	62
4.4	小结	64
<b>第五章</b>	<b>基于估计理论的高精度海洋重力仪实时数据处理技术</b>	<b>65</b>
5.1	引言	65
5.2	基于卡尔曼滤波的实时滤波技术	66
5.2.1	高精度海洋重力仪测量系统方程	66
5.2.2	自适应卡尔曼滤波原理	68
5.2.3	仿真实验	70
5.3	基于 $H_\infty$ 滤波的实时滤波技术	71
5.3.1	$H_\infty$ 滤波原理	72
5.3.2	仿真实验	76
5.4	高精度海洋重力仪测量值修正	80
5.4.1	厄特弗斯修正	80
5.4.2	横向水平加速度修正	81
5.4.3	布格修正	82
5.4.4	潮汐修正	83
5.5	小结	84

<b>第六章 高精度海洋重力仪事后数据处理技术</b> .....	85
6.1 引言 .....	85
6.2 多重小波基本理论 .....	86
6.3 多重小波特性 .....	88
6.3.1 多重小波的正交性 .....	88
6.3.2 多重小波的正则性 .....	90
6.3.3 多重小波的对称性 .....	91
6.3.4 多重小波的高消失矩特性 .....	94
6.3.5 多重小波的短支集特性 .....	98
6.4 数据信号的奇异性分析 .....	99
6.5 多重小波变换的数据预处理 .....	102
6.5.1 重复采样 .....	103
6.5.2 信号对称的延拓 .....	104
6.5.3 构造预滤波器 .....	105
6.6 阈值讨论及仿真实验 .....	107
6.6.1 高精度海洋重力仪系统噪声为白噪声 .....	109
6.6.2 高精度海洋重力仪系统噪声为相关噪声 .....	113
6.7 小结 .....	115
<b>第七章 总结</b> .....	116
<b>参考文献</b> .....	119

# 第一章

## 国内外重力仪的发展及研究现状

### 1.1 国外重力仪的发展及研究现状

自从 20 世纪 30 年代以来,世界各国研制了多种用于测量重力变化或进行重力相对测量的仪器——“重力仪”,重力仪系统中用于重力测量的传感器通常采用金属“零长”弹簧、石英“零长”弹簧和惯性加速度计等<sup>[5~12]</sup>。

1965 年,美国 LaCoste & Romberg 公司基于“零长”弹簧思想研制成功了 LaCoste & Romberg S 型海洋重力仪,LaCoste & Romberg S 型海洋重力仪由硬件系统和软件系统两部分组成,硬件系统如图 1.1 所示,软件系统如图 1.2 所示。

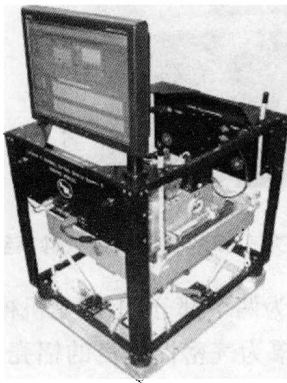


图 1.1 LaCoste & Romberg S 型重力仪硬件系统

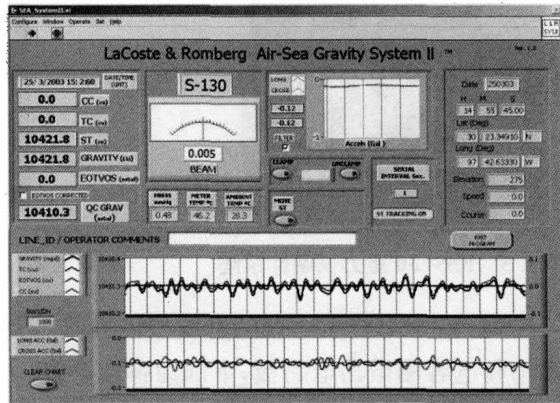


图 1.2 LaCoste & Romberg S 型重力仪软件系统

LaCoste & Romberg S 型海洋重力仪硬件系统由一台电控陀螺稳定平台和一台装在其上的具有强阻尼的倾斜金属“零长”弹簧传感器组成。金属“零长”弹簧传感器包括一个由“零长”弹簧支撑的铰链摆和一个用于抑制由于船体运动带来的强垂直干扰加速度的空气阻尼器,采用强阻尼可有效地消除海浪波动对重力测量值

的影响,提高测量的灵敏度;陀螺稳定平台采用第三代高品位固态光纤陀螺(FOGs),比当前的电-机械陀螺有重大的改进,寿命超过 50 000 h,且 FOGs 不需特殊加温和恒温就可进入最佳状态。LaCoste 和 Romberg S 型海洋重力仪软件系统是基于微软 Windows™ 操作系统的,采用数字 FIR 低通滤波器,在线实现厄特弗斯修正、误差补偿和动态数据滤波等,并集成了数据处理子程序。LaCoste & Romberg S 型海洋重力仪的性能:静态测量精度 0.01 Gal,海上测量精度优于 1 mGal,测量范围 12 Gal,零点漂移每月小于 3 mGal。

1986 年,联邦德国波登斯威克公司在 KSS-5 型海洋重力仪的基础上研制了 KSS-30 型海洋重力仪,KSS-30 型海洋重力仪的传感器也是基于“零长”弹簧思想。KSS-30 型海洋重力仪由硬件系统和软件系统两部分构成,硬件系统由直线型传感器 GSS-30 和平台子系统 KT30 构成,硬件系统如图 1.3 所示,软件系统采用的是 Fugro-LCT 公司的数据处理软件系统,如图 1.4 所示。

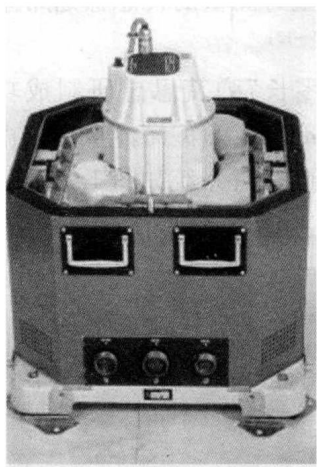


图 1.3 KSS-30 重力仪硬件系统

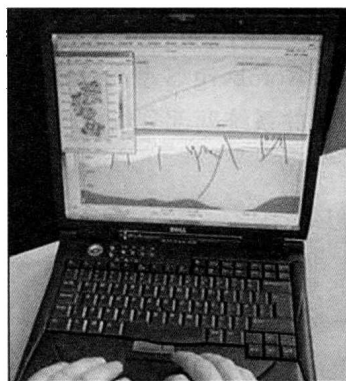


图 1.4 Fugro-LCT 公司的数据处理软件系统

KSS-30 型海洋重力仪的直线型传感器 GSS-30 分为两个部分,上部是机械制锁机构和电容测微器电路板,下部为弹性系统。系统外罩为气密性优良的铝壳,壳内气压稳定,设有气浮补偿装置。因为该系统主要部件为金属件,温度系数大。所以,该系统采取三种恒温绝热措施:一是弹性系统放在保温瓶中;二是电热恒温器(工作温度 50℃);三是系统内加专门的温度补偿。在管状质量下端骨架上有一组康铜丝绕成的温度补偿线圈,它同标准电阻组成惠斯顿电桥,调节线圈回路电流,这样,系统内温度控制精度可达到 0.02℃,该系统伺服回路时间常数为 36 秒,响应速度快,系统阻尼小。永久磁铁作用限于形成稳定的强磁场,铝制的外壳起到磁屏蔽的作用。KSS-30 型重力仪的重力传感器采用直立螺旋弹簧悬挂的质量系

统,结构简单。重力变化改变着弹簧的张力,弹簧的伸缩量同重力变化成正比。图 1.5 为弹性系统示意图和实物图,图中的 3 为管状质量,它分为三部分:中间是直立管,顶部为金属薄片,作为带内部测微器的动片,下端为状似瓶盖的非金属骨架,架上绕了三组线圈,整个质量重约 30 克。主弹簧上端固定在基座上,下端固定在管状质量的底部。为严格保持管状质量只能在垂直方向平动,管壁上的上、中、下三处沿切线方向拉了 5 条细钨丝和 2 条细弹簧。适当地调节拉丝张力,使管状质量只有垂直方向一个自由度,而不受水平加速度的影响,同时几条细丝还兼作电引线。质量顶部的薄片制作很精细,光洁度很高,它与固定在基座上的两固定片构成可变电容器,称为电容位移传感器(电容测微器),用来指示重力的变化。电容测微器具有灵敏度高、精确度高、漂移小、稳定性好等特点。电容器极板间隙为 1 mm,灵敏度为  $0.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。外界重力变化导致主弹簧发生线运动,电容测微器将线位移转化为电量变化。电容测微器与另一对云母电容器组成差动电容电桥,电容桥路作为振荡器的振荡回路。振荡信号用于质量位移相对应的电压调幅。此调制的频率经前置放大器和选频放大器放大,振荡器另一路将正弦波送到移向器整形后作为相敏检波器参考信号。在相敏检波器中参考信号与选频放大器输出的被测信号进行相位锁定,从而可进行信号的幅度检波,获得缓变的直流信号(包括海浪扰动和待测重力的变化)。直流信号(电压)加到质量下端的比例线圈。质量下端骨架上绕了三组电磁线圈,一组是比例线圈,二组是积分线圈,三组是温度补偿线圈。前两个线圈作用原理是利用永久磁铁磁场和导电线圈电磁场的相互作用达到对重力变化的补偿和对垂直干扰加速度的压制。

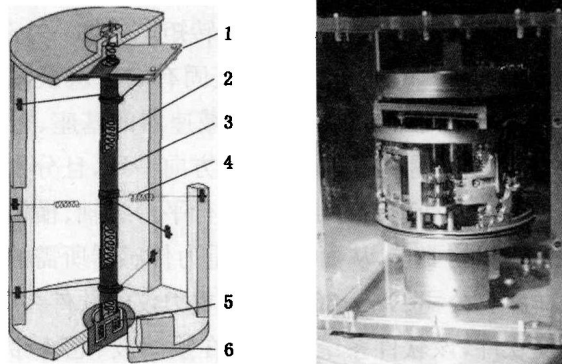


图 1.5 KSS-30 重力仪的直线型传感器 G33-30

1—电容器动片 2—直立弹簧 3—管状质量 4—拉丝 5—补偿线圈 6—磁铁

KSS-30 型海洋重力仪的平台子系统 KT30 由垂直陀螺仪、双轴平台和电子修正装置等部分组成,如图 1.6 所示。陀螺仪是提供水平基准的装置,其敏感器件是

转子,转子在充满氢气的球体中由互相垂直的纵轴和横轴支浮着绕惯性轴高速旋转,在纵轴和横轴上分别装有一组粗、精角度发送器,用来测量转子相对于外壳的位置,作为同步信号输出。为保持主轴竖直,分别沿着纵、横轴向安装两个加速度计,用以测量陀螺转子轴相对垂直方向的偏差,两个转矩马达则分别控制纵轴、横轴的进动。通过连接电缆把加速度计、垂直修正回路和转矩电机连通成闭合环路。理论上讲,高速旋转的陀螺仪在空间上会保持其主轴的方向与真垂线方向一致,但实际由于地球转动、潜艇运动和陀螺本体质量中心不对称及轴系间不可避免的摩擦等因素都会造成陀螺主轴偏离垂线方向。这些偏差信号由加速度计测量出并送到垂直修正回路中处理。误差信号分为四

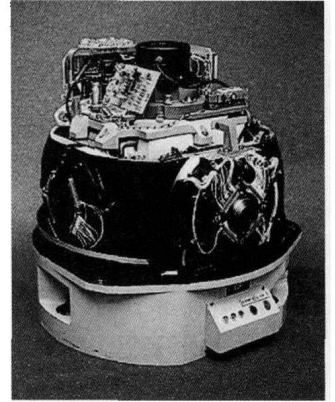


图 1.6 DQES 结构移动式海洋重力仪

类:一类是周期性误差,如海浪干扰加速度引起的,由于其频率较高,可通过设置低通滤波器的角频率低于海浪的角频率,予以有效的抑制;第二类是非周期性的,如舰艇的拐弯、航向修正、船摆头等曲线运动产生的向心加速度而引起的陀螺主轴垂向偏移,这些误差则由曲线补偿器补偿,根据来自导航接口的船速、船首向和航向三组实时数据进行补偿计算后输出一个等值反向的补偿信号到比较器中比较,若大于陀螺仪水平信号就驱动转矩电机进动,抵消这种偏移;第三类为缓慢的线性漂移,如地球自转引起的陀螺主轴缓慢地向西偏移,平台稳定回路中的地球补偿器就会依据导航计算机送来的当时地理纬度和船首向数据进行计算,可准确算出该纬度上地球自转的水平分量值,从比较器输入,给转矩电机加一个进动力矩平衡这种漂移;第四类是摩擦力引起的误差,可以认为是固有的定量误差,在回路参数设计时就给予补偿。平台是由万向常平架(环)、带减速器的基座、电子伺服装置构成,常平架的纵轴、横轴分别与陀螺仪的纵轴、横轴方向一致,且分别安装有转矩电机,基座的正面板上有两个电位计旋钮可由人工进行平台纵轴、横轴的水平调整,以满足陀螺水平同步信号输出的要求,从而构成了重力传感器所需的稳定平台。

联邦德国波登斯威克公司 KSS-30 型海洋重力仪的软件系统采用 Fugro-LCT 公司的专用数据处理软件,该软件系统集成在线滤波、厄特弗斯修正、自由空间修正和布格修正等子程序。KSS-30 型海洋重力仪的性能:静态测量精度为 0.02 mGal,海上动态测量精度 0.5 mGal,测量范围 10 Gal,零点漂移每月小于 3 mGal。

1994 年,俄罗斯国家研究中心(CSRI Elektropribor)研制成功了一种 DQES 结构移动式海洋重力仪,该类型重力仪的重力传感器的设计原理是基于一对线阵

CCD 相耦合的光电探测转换石英弹性系统 (DQES), 并将光电探测转换石英弹性系统安装在陀螺稳定平台上进行重力的相对测量。光电探测转换石英弹性系统采用一对石英弹簧, 光电接收和转换器件采用一对线阵 CCD, 由于目前 CCD 的制造在尺寸和性能上已达到相当水平, 采用 CCD 作为信号接收器有利于减小模数转换误差, 提高测量精度。DQES 结构移动式重力仪的工作原理为: 由发光二极管 (发光波长  $\lambda = 626 \mu\text{m}$ ,  $50 \text{ Hz}$ ) 发射光波经成像物镜成像在相匹配的两个线阵 CCD 上, 重力的变化量通过 DQES 摆杆的转动角度  $\Delta\varphi$  来反映, 满足关系式

$$\Delta\varphi = K \cdot \Delta g \quad (1.5)$$

其中,  $K$  是 DQES 的灵敏度, 范围根据其扭矩的大小, 约为  $0.3''/\text{mGal}$  到  $1.5''/\text{mGal}$ , 扭丝预先做了预扭处理, 使两检测质量块的位置处于水平并相向为  $180^\circ$ ,  $\Delta\varphi$  是通过成像光点在两线阵 CCD 上的位置变化得出。DQES 结构必须在具有精密温控的密封体内, 因为温度的变化严重影响其测量精度, 所以温度控制箱的温度变化必须控制在  $0.01^\circ\text{C}$  以下。俄罗斯国家研究中心研制的移动式海洋重力仪与陀螺稳定平台以及和卫星导航系统 GPS/GLONASS 相结合进行重力测量, 并通过数据处理软件系统对测量的数据进行滤波处理和修正处理。

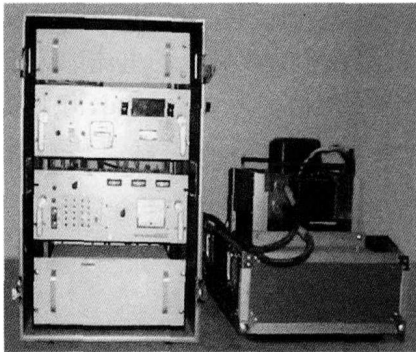


图 1.7 Bell BGM-3 型海洋重力仪

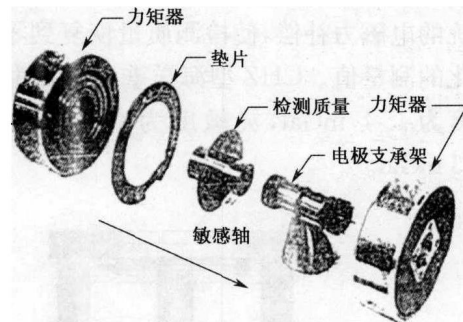


图 1.8 MESA 静电加速度计  
检测质量结构图

美国 Bell 公司基于 Bell XI 型静电加速度计研制了 Bell BGM-3 型重力仪, 如图 1.7 所示。软件系统采用 Fugro-LCT 公司的专用数据处理软件。Bell BGM-3 型重力仪性能: 灵敏度  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ , 海上动态测量精度为  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。美国 Bell 公司研制的 MESA 静电加速度计的检测质量为空心圆柱体结构, 如图 1.8 所示。其敏感精度在  $1 \text{ g}$  重力场下分辨率优于  $1 \times 10^{-7} \text{ g}$ , 零位长期稳定性  $< \pm 5 \times 10^{-7} \text{ g}$ 。采用 MESA 静电加速度计作为重力传感器, 其检测质量为空心圆柱体, 空心圆柱体的中心位置有一个法兰环。空心圆柱体沿非敏感轴方向由其内表面对应

的八个电极采用数字有源静电悬浮支撑,八个支撑电极以法兰环中心截面、圆柱体轴线为基准对称放置。空心圆柱体沿敏感轴方向的运动可通过圆柱体上的法兰环与同轴激励电极之间的电容变化来检测,并经控制回路使圆柱体恢复到“零位”。MESA 静电加速度计设计方案优点:检测质量可以做到完全悬浮,不与壳体有任何接触,结构简单,误差源小,检测精度高,零位长期稳定性好。MESA 静电加速度计设计方案的难点:结构件加工要求极高,位置检测、位置控制精度、温度场均匀性及磁屏蔽的要求亦很高,对强垂直干扰加速度影响需从数字滤波中消除。

## 1.2 | 国内重力仪的发展及研究现状

20 世纪 80 年代,中国科学院测量与地球物理研究所研制成功了 CHZ 型海洋重力仪。CHZ 型海洋重力仪是一种轴对称式海洋重力仪,其传感器结构类似于 KSS-30 型海洋重力传感器 G33-30,如图 1.9 所示。它是由质量弹簧系统、电容测微器、电磁反馈系统、硅油阻尼、双层恒温 and 恒温补偿、数字滤波及可编程数据采集系统等部分构成。质量弹簧系统是一根垂直安装的“零长”主弹簧、六根拉丝和两根绷簧以及一个管状检测质量组成。在重力传感器中重力值的微小变化体现为检测质量的微小位移。电容测微器将检测出的检测质量的位移变化,并由电磁反馈系统的电磁力补偿,使检测质量恢复到零点。此时在积分线圈上的电流即为重力变化的测量值。CHZ 型海洋重力仪的性能:静态测量精度为 0.1 mGal,海上测量精度为 1.4 mGal,灵敏度为 0.01 mGal,测量范围 10 Gal,零点漂移每月小于 3 mGal。

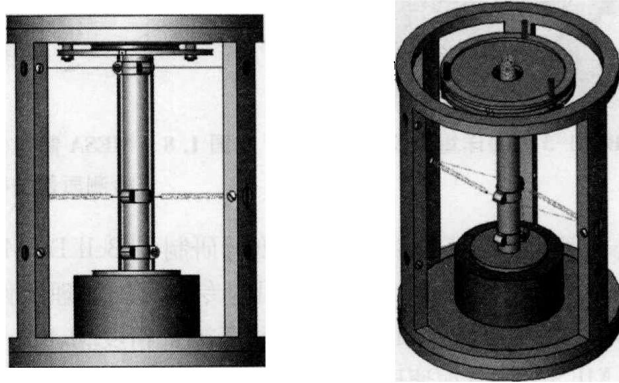


图 1.9 CHZ 型海洋重力仪质量弹簧系

综上所述,俄罗斯国家研究中心(CSRI Elektropribor)研制的 DQES 结构移动



式海洋重力仪的重力传感器是采用一对线性 CCD 和一对石英弹簧的弹性系统。LaCoste & Romberg S 型海洋重力仪、KSS-30 型海洋重力仪和 CHZ 型海洋重力仪的重力传感器均采用“零长”弹簧质量弹性系统。由于石英弹性系统和“零长”弹簧质量弹性系统的加工、安装和调整技术要求很高,高精度重力仪的性能难以做到长期稳定,而且要想在此基础上进一步提高重力仪的测量精度以满足技术指标要求很难。美国 Bell 公司研制的 Bell BGM-3 型重力仪的重力传感器采用的是 MESA 静电加速度计,重力仪测量精度及稳定性主要由 MESA 静电加速度计的精度和稳定性决定。