

GIPS-1AM 高精度惯性稳定平台式海空重力仪的设计与试验

胡平华, 黄鹤, 赵明, 陈晓华, 刘东斌

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 针对国内对于高精度海空重力仪的迫切需求, 自主研制了 GIPS-1AM 高精度惯性稳定平台式海空重力仪样机。突破了高精度重力传感器设计、高精密度温度控制、总体设计和自标定等关键技术问题, 完成了样机的设计、调试和试验测试。试验测试结果表明, 样机温控精度优于 0.01°C , 静态长时间工作稳定性、不同楼层重力测试精度均优于 1mGal (1σ)。可满足大地测量学、地球物理学、地球动力学、海洋科学、资源勘探、空间科学以及现代军事等基础前沿领域的重力测量需求。

关键词: 海空重力仪; 惯性稳定平台; 石英挠性加速度计; 温度控制

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2015)03-0016-07

Design and Testing of GIPS-1AM Airborne/marine Gravimeter based on High Precision Inertial Stabilized Platform

HU Ping-hua, HUANG He, ZHAO Ming, CHEN Xiao-hua, LIU Dong-bin

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: To meet the urgent needs of high-precision airborne/marine gravimeter in our country, the GIPS-1AM airborne/marine gravimeter based on the high precision inertial stabilized platform is developed independently. Many key technologies are breakthrough, such as the high accuracy gravity sensor designing, high precision temperature controlling, overall designing and self-aligning and so on. The prototype is designed, produced and tested. The experiment results show that the precision of the temperature is 0.01°C . Furthermore, the long duration static stability, the different floors' gravity measurement accuracy are both better than 1mGal (1σ). The product can meet the demand of the forefront academic such as geodesy, geophysics, geodynamics, ocean science, resource exploration, space science and modern military.

Key words: Airborne/marine gravimeter; Inertial stabilized platform; Quartz flexure accelerometer; Temperature control

0 引言

地球重力场是地球固有的物理特性之一, 它反映地球内部物质分布、运动及其变化状态, 并制约地球自身及其邻近空间中的一切物理事件^[1]。地球重力场数据是研究固体地球演化、全球海平面、冰川融化、洋流、气候、陆地水资源、地质灾害和地震等科学问题的重要前提, 对于现代国防、

资源勘探、空间科学、海洋科学、大地测量学、地球物理学、地球动力学等基础和前沿科学研究具有重要意义, 在国家经济、社会发展以及国家安全中发挥着极为重要的作用。

海空重力仪是海洋重力仪和航空重力仪的总称, 是一种相对式重力仪, 可安装于飞机舰船等移动平台上对地球重力进行动态测量, 具有可实现对人员难于达到的沙漠、沼泽、山川、原始森

收稿日期: 2015 - 03 - 15; 修订日期: 2015 - 04 - 02。

作者简介: 胡平华 (1964 -), 男, 研究员, 主要从事惯性技术方面的研究。

林、河湖、海洋等地区进行重力测量的优势，此外还具有测量速度快、测量效率高等特点。

目前，国内 1mGal 精度的海空重力仪仅能够少量整机引进，而且价格昂贵，使用维护困难，与我国的需求相比，缺口很大。国内自主研发的海空重力仪仍处于样机研制阶段，在工程或商业应用方面仍属空白状态。此种现状，严重限制了国家实力的增强和深远海战略的进一步实施。

北京自动化控制设备研究所充分利用和发掘已有小型高精度惯性器件和惯性平台、惯性导航及组合导航等方面的技术基础，自主研发了 GIPS-1AM 高精度惯性稳定平台式海空重力仪样机，以期加快我国小型高精度海空重力仪的工程化应用，尽快满足我国相关应用领域的迫切需求。本文对该重力仪的技术指标和系统方案、关键技术及解决效果、试验测试等情况进行介绍。

1 技术指标及系统方案

1.1 技术指标

GIPS-1AM 高精度惯性稳定平台式海空重力仪主要性能指标为：

- 1) 测量范围：±2000Gal；
- 2) 测量精度优于 1mGal；
- 3) 俯仰、滚动工作范围：-60°~+60°，方位工作范围：-360°~+360°；
- 4) 工作温度范围：-10℃~+45℃；
- 5) 重力仪主机重量小于 20kg；
- 6) 重力仪主机外形尺寸：385mm×264mm×195mm；
- 7) 稳态功耗小于 100W。

1.2 工作原理及组成

该重力仪采用与加拿大 SGL 公司的 AIRGrav 重力仪相同的“三轴惯性平台+石英挠性加速度计式重力传感器”技术方案，并且是在已装备的航空惯性导航系统的基础上改进研制而成。加拿大 SGL 公司的 AIRGrav 重力仪是目前国际上实际应用中精度最高的动态重力仪，其实测精度大都在 0.3mGal 附近。

“三轴惯性平台+石英挠性加速度计式重力传感器”技术方案主要是采用惯性平台将垂向加速度计始终稳定在垂直方向，使高精度垂向加速度

计测量载体的垂向比力（载体垂向运动加速度和垂向重力加速度的合成），在此基础上，采用差分 GPS 系统测量载体的运动加速度，从垂向比力中减去载体垂向运动加速度，并扣除各种误差改正，便可得到载体运动路径的垂向重力加速度或重力异常。具体公式为^[2]

$$\delta g = g_b + (f_z - f_z^b) - \dot{v}_U + \delta a_E + \delta a_F + \delta a_K + \delta a_I - \gamma_0 \quad (1)$$

式中， g_b 为测试基准点参考重力值，由静态重力仪从国家重力基准点联测得到； f_z 、 f_z^b 为垂向加速度计测得的比力及在测试基准点测得的初值； \dot{v}_U 为由差分 GPS 系统测得的载体垂向运动加速度； δa_E 为厄特弗斯改正（也即惯性导航领域的有害加速度垂向分量）； δa_F 为自由空间（高度）改正，大致为 0.3086h（mGal）； δa_K 为零漂（垂向加速度计零偏随时间的漂移）改正； δa_I 为重力仪、差分 GPS 随机噪声之和； γ_0 为正常椭球面上的重力。

为了实现对地球重力场的精确测量，该重力仪主要包括以下主要组成部分为：

1) 重力仪主机：用于测量载体的垂向比力，是重力仪的核心部分，主要包括惯性稳定平台、二次电源、控制电路、计算机等。其中惯性稳定平台主要由 2 个动力调谐陀螺、1 个高精度石英挠性加速度计式重力仪敏感器、2 个导航级石英挠性加速度计和 3 个框架等组成。本重力仪惯性稳定平台的水平稳定精度优于 10"。

2) DGPS 系统：用于测量载体的运动加速度，并为各种误差校正和参数标定提供基准信息，包括安装在载体上的移动站和安装在地面的固定站两部分。

3) 不间断电源：用于外部电源突然中断后，为重力仪及显控存储装置提供至少 30min 以上的电源供应，以保证产品及数据安全。

4) 显控存储装置：用于控制重力仪完成各工作流程，并将重力仪测量的重要数据和状态进行存储和显示。

5) 减振器：用于衰减载体的高频振动，为重力仪主机提供一个相对较好的力学环境条件。本重力仪的减振器谐振频率低于 10Hz。

6) 软件：包括系统软件、标定测试软件以及

后处理软件等。其中后处理软件是对测试过程中得到的重力仪主机数据、DGPS数据等进行对齐、滤波、改正、质量检验、成图等处理,以得到测量路径或区域的重力异常图。

1.3 工作流程

该海空重力仪的工作流程包含准备阶段、测量阶段和热待机阶段,具体流程如图1所示。

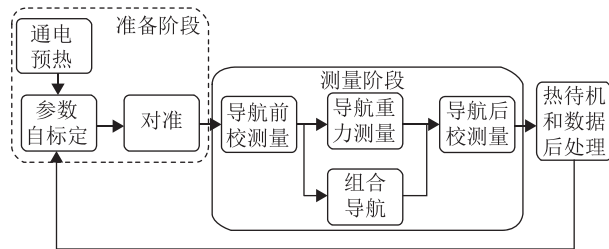


图1 高精度惯性稳定平台式海空重力仪工作流程图

Fig.1 Flow chart of GIPS-IAM airborne/marine gravimeter

(1) 准备阶段

在准备阶段主要是使惯性器件精度达到要求,完成重力仪的初始对准。具体完成的任务有:

1) 通电预热。重力仪内部所有分部件均启动工作,并对稳定平台进行温度控制。此步骤目的是使惯性器件和电路性能稳定,达到工作状态。

2) 参数自标定。利用稳定平台框架实现惯性器件的不同空间标定位置,标定出陀螺、加速度计的关键参数。自标定完成后可有效减小重力仪参数的逐次启动重复性误差,为后续的高精度重力测量奠定基础。

3) 抗扰动对准。调整稳定平台坐标系精确进入测量工作状态。对准完成后,稳定平台将重力传感器测量方向精确稳定在垂向,为重力测量提供良好的条件。

(2) 测量阶段

此阶段重力仪均工作在导航状态,为了数据后处理方便将此阶段分为三个步骤。

1) 前校测量。完成准备后,在载体不移动的情况下进行一段静态测试,自动记录重力仪和卫星数据。

2) 重力测量。系统工作于动态导航状态,自动记录重力仪和卫星的数据,是重力测量的主体工作。

3) 后校测量。在完成测量后,载体回到出发点,重新进行一段静态测试,自动记录重力仪和卫星数据,结合前校测量确定重力测量阶段重力仪零偏漂移量,以进一步提高测量精度。

(3) 热待机和数据后处理

此阶段,重力仪工作在导航状态,等待下航次测量或关机指令。为了减少重力仪准备阶段的时间,在每航次测量结束后,重力仪转入热待机状态,如果需要继续测量,则可省去通电预热的时间。

利用测量阶段得到的数据,对卫星数据和重力仪主机数据进行处理后得到所需的重力异常数据。

2 关键技术及解决效果

由于重力仪测量精度非常高,因此对器件、系统及算法等都提出了非常高的要求,从而形成了重力仪研制中的一系列关键技术问题。

2.1 高精度石英挠性加速度计重力敏感器技术

重力仪测量精度指标为1mGal,因此对垂向石英挠性加速度计的精度要求至少为优于 $1\mu\text{g}$,远高于目前导航系统中使用的加速度计指标要求。针对小量程高精度高稳定性的应用需求,通过对石英挠性加速度计进行设计和工艺改进研制,并采用加强稳定化处理和测试挑选等措施,使重力敏感器的精度得到显著提高。三块高精度石英挠性加速度计样机在温控精度约为 0.05°C 的测试工装中测得的 1g 8小时稳定性测试结果(1σ)分别为1#: $0.46\mu\text{g}$, 2#: $0.82\mu\text{g}$, 3#: $0.90\mu\text{g}$,基本可满足重力仪样机的精度指标要求。

2.2 高精度加速度计转换电路技术

相应地,垂向加速度计的转换电路精度也应优于 10^{-6} ,这比目前的高精度I/F、V/F和A/D转换电路的精度要高1到2个数量级。本样机通过采用24位高精度过采样A/D转换电路技术,并对其进行高精度温度控制的方法,显著提高了转换电路的精度。转换电路8小时温控精度稳定性测试结果如图2所示,8小时零位输入稳定性测试结果如图3所示,结果表明,8小时温控精度稳定性达到 0.004°C (1σ),8小时零位稳定性达到 $1.1 \times 10^{-7}\text{g}$ (1σ),基本达到重力仪的精度指标要求。

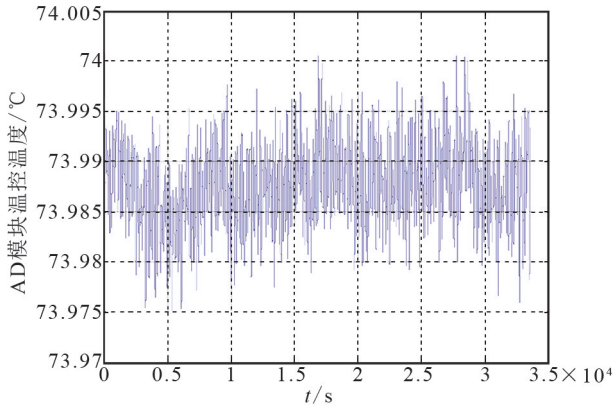


图 2 A/D 转换电路温控稳定性测试结果

Fig.2 Testing curve of A/D converter temperature control stability

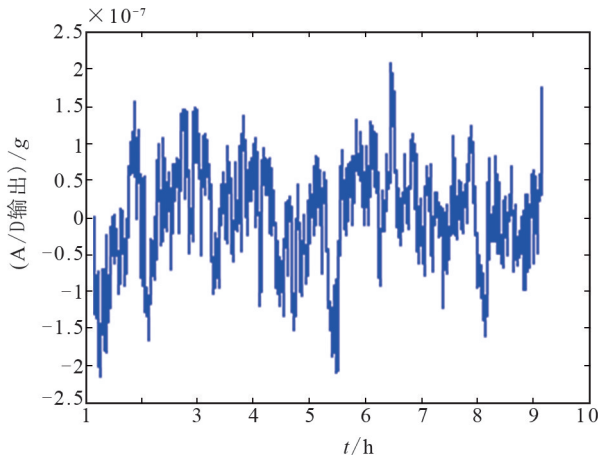


图 3 A/D 转换电路零位稳定性测试结果

Fig.3 Testing curve of A/D converter zero stability

2.3 高精密度温度控制技术

为了保证垂向加速度计的精度要求，惯性稳定平台必须为其提供高度稳定均匀的温度控制环境。为此，惯性稳定平台采用了 4 级 6 路非线性 PID 数字温度控制方案，确保了垂向加速度计和陀螺的温度控制精度要求。

垂向加速度计和垂直陀螺在室温条件下 8 小时温控稳定性测试结果分别如图 4、图 5 所示，在不同环境温度下的温控温度均值如表 1 所示。测试结果为，室温条件下垂向加速度计 8 小时温控稳定性达到 0.0006°C (1σ)，垂直陀螺 8 小时温控稳定性达到 0.0008°C (1σ)；在 -10~+45°C 的不同环境温度下垂向加速度计的温控温度变化小于

0.006°C，垂直陀螺的温控温度变化小于 0.004°C。

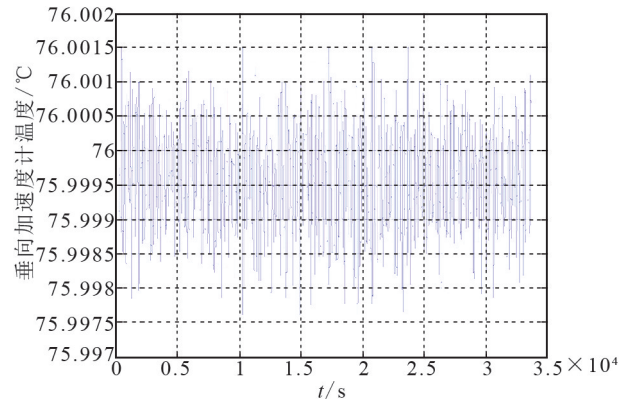


图 4 垂向加速度计温控稳定性测试结果

Fig.4 Testing curve of vertical accelerometer temperature control stability

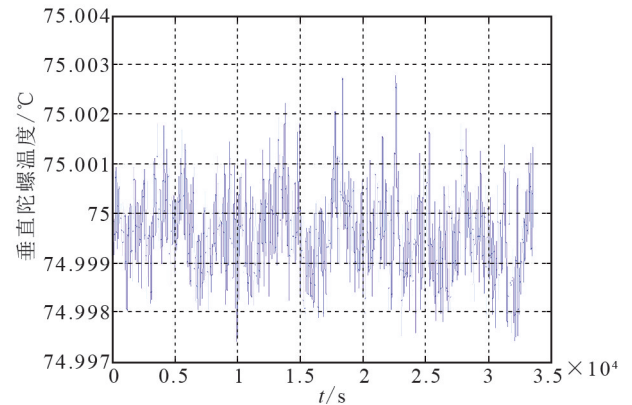


图 5 垂直陀螺温控稳定性测试结果

Fig.5 Testing curve of vertical gyroscope temperature control stability

表 1 不同环境温度下垂向加速度计和垂直陀螺温控温度测试结果

Tab.1 Temperature testing result of vertical accelerometer and gyroscope at different circumstance temperature

环境温度 /°C	垂向加速度计温控温度 /°C	垂直陀螺温控温度 /°C
-10	76.0052	75.0021
5	76.0019	75.0020
室温	75.9995	74.9996
45	76.0028	75.0036
温控温度最大变化	0.0057	0.004

2.4 总体设计技术

鉴于航空重力仪，特别是小型无人机载重力仪对于体积、重量和功耗等有较为严苛的要求，为此，在已装备部队的小型高精度航空惯导系统的基础上，采用小型高精度石英挠性加速度计和转换电路，对惯性稳定平台的台体和环架等结构进行改进设计，对电源、温控电路、伺服电路、导航计算机等进行优化设计，以改进系统的电磁兼容性、温度均匀性和稳定性，使重力仪主机的重量仅为 20kg，外形尺寸仅为 385mm×264mm×195mm，稳态功耗仅为 100W，垂向加速度测量精度提高两个数量级。重力仪主机的外形照片如图 6 所示。

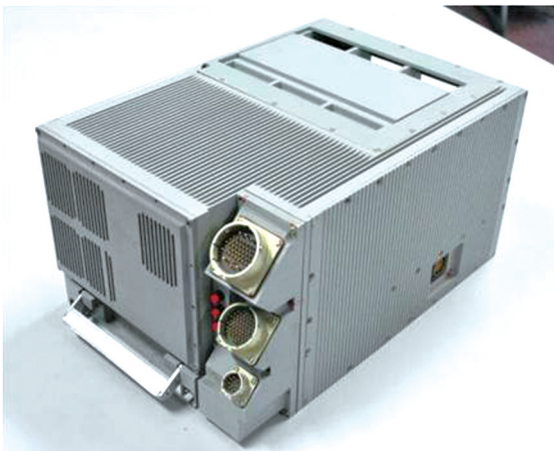


图 6 GIPS-1AM 海空重力仪主机

Fig. 6 Photo of GIPS-1AM airborne/marine gravimeter mainframe

2.5 自标定技术

利用惯性稳定平台的特点，采用开环自标定技术，可在外场静止工作台或飞机上对陀螺和两水平加速度计的误差参数及安装误差等进行高精度自标定，可解决重力仪在外场长期工作后误差参数随时间发生变化的问题。

重力仪主机固定于静止基座上，利用惯性稳定平台的框架完成九位置的开环自标定，可标定出陀螺常值漂移、与 g 有关项漂移，加速度计的零偏、标度因数、安装误差等参数。标定结果如表 2 所示。

自标定结果与转台标定结果对比表明，陀螺常值漂移相差均小于 $0.015(^{\circ})/h$ ，与 g 有关项漂移系数相差均小于 $0.015(^{\circ})/(h \cdot g)$ ，加速度计零偏相差均小于 $0.03mg$ ，标度因数相差均小于 25ppm，安装误差相差均小于 $10''$ 。可满足重力仪导航和保持重力敏感器垂直的相关要求，重力敏感器采用前校测量和后校测量的方法来降低其参数变化对重力测量精度的影响，可不依赖于自标定的精度。

表 2 重力仪自标定结果及与转台标定结果对比

Tab. 2 Compare of self-calibration and table-calibration results about a gravimeter

序号	参数	标定结果			
		自标定	转台标定	自标定误差	
1	陀螺常值 漂移/ [$(^{\circ})/h$]	ω_{0x}	-0.1126	-0.1041	-0.0085
2		ω_{0y}	-1.0727	-1.0863	0.0136
3		ω_{0z}	-1.1975	-1.2079	0.0104
4	陀螺与 g 有关项漂 移系数/ [$(^{\circ})/$ $(h \cdot g)$]	ω_{xx}	-0.3268	-0.3187	-0.0081
5		ω_{xy}	-0.0036	—	-0.0036
6		ω_{xz}	-0.0439	-0.0457	0.0018
7		ω_{yx}	0.0595	0.0481	0.0114
8		ω_{yy}	0.4249	0.4195	0.0054
9		ω_{yz}	-0.0037	—	-0.0037
10		ω_{zx}	0.0494	0.0529	-0.0035
11		ω_{zy}	-0.0052	—	-0.0052
12		ω_{zz}	-0.3312	-0.3330	0.0018
13	加速度 计零偏 /mg	n_{0x}	-1.2309	-1.2117	-0.0192
14		n_{0y}	2.1479	2.1206	0.0273
15		n_{0z}	-0.0075	-0.0276	0.0201
16	加速度计 标度因数 /(\sim/g)	M_x	15388.177	15387.856	20.9 ppm
17		M_y	15218.649	15218.587	4.1 ppm
18		M_z	14232.410	14232.705	20.7 ppm
19	加速度计 安装误差 /($''$)	K_{xy}	-34.52	-35.04	0.52
20		K_{xz}	-82.70	-74.15	-8.55
21		K_{yz}	19.61	29.3	-9.69

3 试验测试结果

3.1 静基座长时间工作精度测试

将重力仪样机置于工作台上进行长时间工作精度测试。1#和2#样机的测试结果分别如图7和图8所示。1#样机8小时工作精度为0.37mGal (1σ)；2#样机8小时工作精度为0.24mGal (1σ)。

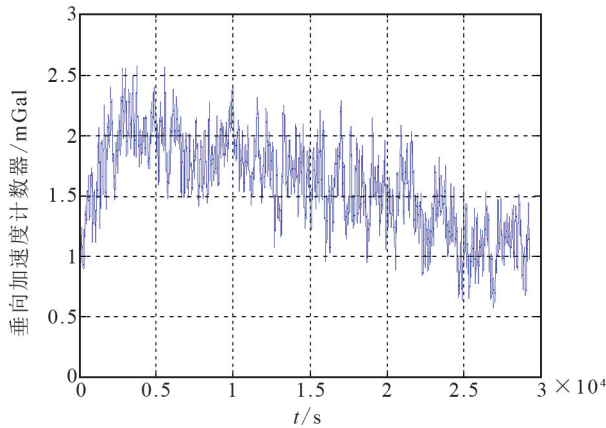


图7 1#重力仪样机静基座稳定性测试结果

Fig.7 Testing curve of 1#gravimeter static stability

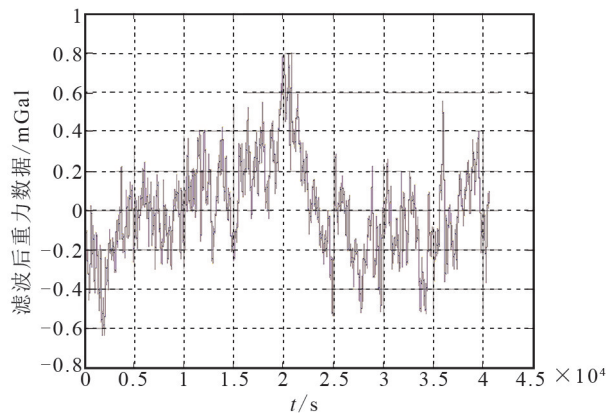


图8 2#重力仪样机静基座稳定性测试结果

Fig.8 Testing curve of 2# gravimeter static stability

3.2 不同楼层重复性及精度测试

对重力仪样机在五层办公楼进行了不同楼层7次重复性测试。1#和2#样机的测试结果分别如表3和表4所示。表中理论重力差为由相邻楼层高度差计算所得的高度改正值，其中1~2层、2~3层高度均为5.4m，3~4层、4~5层高度均为3.9m；测量误差为相邻楼层重力测量均值差减理论重力差。

测试结果表明，1#样机同一楼层重复性的最大值为0.33mGal (1σ)，最小值为0.17mGal，测量误差均方根为0.24mGal；2#样机同一楼层重复性的最大值为0.19mGal (1σ)，最小值为0.07mGal，测量误差均方根为0.33mGal。

表3 1#重力仪样机不同楼层重复性及精度测试结果

Tab.3 Testing results of 1# gravimeter repeatability and accuracy at different floor

测量序次	一层/ mGal	二层/ mGal	三层/ mGal	四层/ mGal	五层/ mGal
第1次	5.90	4.28	2.77	2.37	0.69
第2次	6.47	4.66	3.07	2.27	1.17
第3次	6.35	4.49	3.10	2.02	1.28
第4次	6.23	4.50	2.97	2.30	1.16
第5次	5.54	4.36	3.04	2.16	1.08
第6次	5.99	4.14	2.63	1.99	0.75
第7次	5.77	4.28	2.76	1.92	0.69
均值	6.04	4.39	2.91	2.15	0.97
标准偏差	0.33	0.17	0.18	0.17	0.25
与下一楼层实测重力差	—	1.65	1.48	0.76	1.18
与下一楼层理论重力差	—	1.67	1.67	1.20	1.20
测量误差	—	-0.02	-0.19	-0.44	-0.02

表4 2#重力仪样机不同楼层重复性及精度测试结果

Tab.4 Testing results of 2# gravimeter repeatability and accuracy at different floor

测量序次	一层/ mGal	二层/ mGal	三层/ mGal	四层/ mGal	五层/ mGal
第1次	14.00	12.01	10.06	9.56	8.48
第2次	13.96	12.13	10.29	9.48	8.83
第3次	14.01	12.16	10.16	9.49	8.70

续表

测量序次	一层/ mGal	二层/ mGal	三层/ mGal	四层/ mGal	五层/ mGal
第4次	13.80	11.93	10.15	9.40	8.71
第5次	13.76	11.94	10.20	9.36	8.53
第6次	13.79	12.07	10.16	9.42	8.59
第7次	13.84	12.50	10.16	9.40	8.48
均值	13.88	12.11	10.17	9.44	8.61
标准偏差	0.11	0.19	0.07	0.07	0.13
与下一楼层实测重力差	—	1.77	1.94	0.73	0.83
与下一楼层理论重力差	—	1.67	1.67	1.20	1.20
测量误差	—	0.1	0.27	-0.47	-0.37

4 结论

重力仪样机和关键分部件的试验测试结果表明,自主研制的 GIPS-1AM 重力仪的温控精度优于 0.01°C ,静态稳定性、不同楼层测量精度均优于 1mGal (1σ)。可装载于固定翼飞机、直升飞机、

无人飞机、大地测量车、测量船等移动平台,具备满足大地测量学、地球物理学、地球动力学、海洋科学、资源勘探、空间科学以及现代军事等基础前沿领域的重力测量需求的能力。并且该重力仪具有体积小、重量轻、精度高等特点,非常适合于小型低成本无人机载重力测量以及重力、地磁、电磁、放射线等地球信息同步测量。

参考文献

- [1] 黄谟涛, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 海洋磁场重力场信息军事应用研究现状与展望 [J]. 海洋测绘, 2011, 31 (1): 71-76.
- [2] 熊盛青, 周锡华, 郭志宏, 周坚鑫, 等. 航空重力勘探理论方法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [3] 孙中苗, 翟振和, 李迎春. 航空重力仪发展现状和趋势 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28 (1): 1-8.
- [4] Luise Sander and Stephen Ferguson. Advances in SGL AIRGrav acquisition and processing [C]// Richard Lane. Airborne Gravity 2010, Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2010 Workshop. Australia: Onshore Energy Minerals Division, Geoscience Australia, 2010: 172-177.
- [5] A A Krasnov, A V Sokolov, L S Elinson. A new air-sea shelf gravimeter of the Chekan series [J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5 (3): 131-137.
- [6] A A Krasnov, A V Sokolov, L S Elinson. Operational experience with the Chekan - AM gravimeters [J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5 (3): 181-185.