

34-39

航空吊挂式定点高精度重力系统的研制与试验

罗壮伟 刘文锦

(地矿部物化探研究所·廊坊市·102849)

程振炎

(地矿部地质所)

A

我们在引进国外生产的高精度重力仪的基础上,开发研制出航空吊挂式定点高精度重力系统,并于1993年1月10日至3月24日在哈尔滨利用直升机进行野外试验,与地面高精度重力对比,取得重力精度为 $\pm 0.091 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$,高程精度为 $\pm 0.51 \text{m}$ 的试验成果。用这种方法可供进一步在沙漠、沼泽、及其它交通困难地区进行生产性试验工作。

关键词 航空 挂吊式 重力系统 试验

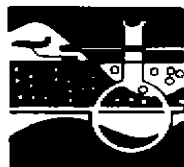


图1 重力仪与吊钩

1 航空吊挂式定点高精度重力测量系统研制

1.1 CG-3全自动重力仪的改装

CG-3型全自动重力仪是加拿大先达利公司近年来研制的重力仪。它的主要特点是采用野外和循环自动两种读数方式,可在 ± 200 弧秒的倾斜范围内读数,由IGS-2固化软件进行自动倾斜改正,使仪器可以在缓慢倾斜状态下自动读数。此外,重力仪的观测值、水平倾斜状态、温度补偿、固体潮等所有输出结果,均为数字式,而且重力仪的探头和IGS-2可以完全分开。因此,CG-3重力仪改装后完全适用于航空重力仪的核心部分。

将CG-3重力仪用于航空重力仪并进行遥控操作,就必须将其面板部分(包括显示器和键盘)与探头分离,并用长电缆连接起来。这样便可把探头悬吊在直升机下,而操作与读数在飞机上进行。

为了使从重力仪探头送出的信号不损耗地通过长电缆传输到控制器,需要在探头内

安装驱动电路,经过驱动的信号通过长电缆传输到飞机上的控制器,按键盘产生的操作命令信号同样需要安装驱动电路,将信号加强后经长电缆传输到重力仪探头。

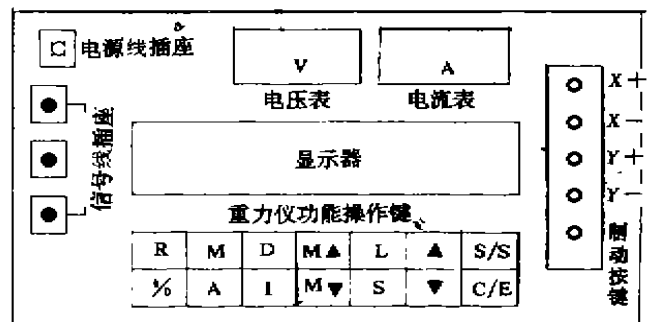


图1 控制箱面板示意图

控制箱包括CG-3重力仪的IGS-2控制器,控制箱面板上安装有电压、电流指示表,当重力仪工作时,表头分别指示出当前的电压、电流值。控制箱面板如图1所示。控制箱上还包括有X、Y伺服电机细调及制动器开关。

1.2 调平装置

重力仪必须在水平状态下才能正确地读数。重力仪调平装置包括常平架粗调和伺服

本文1995年2月收到,林镇泰编辑。

电机细调两部分(图 2)。

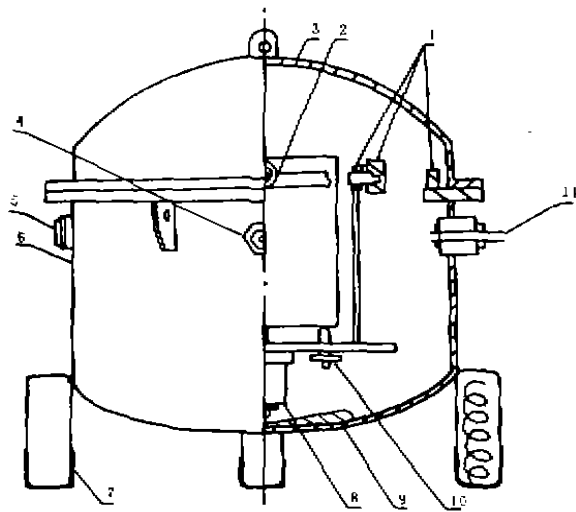


图 2 航空重力仪的吊仓外形及其结构图

1—常平架;2—重力仪探头;3—吊仓仓盖;4—干燥剂盒;5—数据输出口;6—吊仓仓体;7—支撑腿;8—电磁制动器;9—球面摩擦盘;10—细调装置;11—长电缆接口

常平架是用刚性材料制作,由 3 个环形框架组成,相互之间用旋转轴连接,重力仪固定在内环上,利用重力仪自身的重量使仪器处于自动水平状态。在制作常平架时,要求两组旋转轴线相互垂直并在同一平面上,两组轴线交点的投影要通过仪器的重心。如果常平架粗调可使重力仪倾斜在 ± 200 弧秒以内,则可直接进行重力读数。但是常平架常常不能满足精确调平的要求(小于 ± 200 弧秒),其原因是机械加工的误差以及密封仓内信号传输线扭力的干扰等所致,这就需利用伺服电机来进行细调。

1.3 制动装置

在重力仪工作时,为了克服密封仓内常平架大幅度长时间的摆动,缩短调平时间,因此,在常平架托盘底部安装一电磁制动器(图 2)。一般情况下电磁制动器为常接触式,即摩擦头和密封仓内底部的球面摩擦盘之间为常接触,只有在电磁线圈供电时摩擦头向上抬起,常平架可以自由摆动,使重力仪自动调平。

1.4 吊仓外形设计

吊仓大致有 3 部分(图 2),即仓盖、仓体、支撑腿。仓盖为球冠形,以减小对气流的阻力。仓盖与仓体之间为法兰式结构,其间垫有两道半径不同的密封橡胶圈。仓体为圆柱形,直径 500mm,底部也为球冠形。吊仓底部至顶部的距离为 600mm。在吊仓仓体中部,有数据输出孔可输出重力仪内存储的数据;有干燥剂盒孔可使仓内保持空气干燥。支撑腿为 3 条具有弹性、脚部有橡胶包裹的不锈钢圆柱做成,作用是使密封仓落到地面时,具有软着陆功能。

1.5 定位装置的选型

导航定位装置采用美国天宝(Trimble)公司生产的 Navtrac 型全球导航定位系统,它采用独特的图象显示功能,使得操作更加清晰、直观、准确和方便。可存储 500 个转向点,50 条航线,显示内容有偏航距、对地速度和航向、航程、时间以及瞬时地理坐标等。坐标和高程测量直接引进美国天宝公司的高精度差分法大地测量型 4000SE 卫星接收机,4000SE 天线安装在吊仓的顶部,进行航空重力定点三维坐标测量(x, y, z)。

1.6 直升机的选型

引用适合低空作业的直升飞机,并安装重力测量系统和定位系统。本次试验使用法国生产的小松鼠直升机(AS350B2)。

1.7 航空吊挂式定点高精度重力仪的主要技术参数

测量精度优于	$\pm 100 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$
工作电源	DC 14V, 50W
自动调平限度	$\leq 15^\circ$
自动调平误差(陆上)	$\pm 15''$
吊仓体积	高 0.6m, 直径 0.5m
总重量	$\leq 150 \text{kg}$
导航精度	10m
测量高程精度	$\pm 0.5 \text{m}$

1.8 航空高精度重力测量系统的工作流程

航空吊挂式定点高精度重力测量系统是当前

高技术产物。用一个测点的测量过程来说明系统的工作流程。陆上重力测点的位置一般不必事先设立标志。工作流程如下:

(1)用 Navtrac 型 GPS 接收机引导测量飞机到达测点点位。

(2)将重力仪吊仓放到地面。

(3)用控制箱打开制动器,进行水平粗调,再用伺服电机进行水平细调。直到重力仪探头达到水平状态。

(4)按动重力仪测量键测量重力值,测量完成后记录点线号、重力值等并存贮记录。

(5)与第(3)、(4)步同时,打开 4000SE 型 GPS 测地系统,完成测点坐标和高程的测量。

(6)重力仪关机后将航空重力仪吊仓升起。

(7)按上述流程完成其他测点测量。

2 野外试验

我们于 1993 年 1 月 10 日至 3 月 24 日利用哈尔滨飞机制造厂机场在 102 国道上进行了试验。试验内容包括仪器安装;飞机悬停和吊仓起落;悬停高度和重力仪读数精度之间的关系;剖面测量试验。

2.1 仪器的安装

控制箱装在直升飞机内,通过 45m 电缆与吊挂在机外的装有重力仪探头的吊仓相连接,重力仪吊仓作为重力仪探头的支撑物和防震保护罩,用 $\varnothing 6$ 的钢丝绳吊挂在机身下部的吊架上。重力仪和调平装置所用的电源为 14V 电瓶,电瓶放在直升飞机内,输出的电流和电压通过控制箱面板上的表头来监视。为了克服吊仓在落地前由于飞机速度改变而产生的大幅度摆动,在吊仓下部拴一根长约 2.5m,重约 10kg 的铁链作为阻尼链。整体航空吊挂式定点高精度重力测量系统如图 3 所示。

2.2 飞机悬停和吊仓起落

在机场附近的空地上,在一个点上做飞

机悬停和吊仓起落试验。为慎重起见,首先在吊仓内不装入重力仪探头,而使直升飞机悬着吊仓进行悬停飞行和起落仪器。经试验得出,飞机在 30~40m 高度上悬停,在一段时间内一直能使飞机较平稳地处在测点正上方。

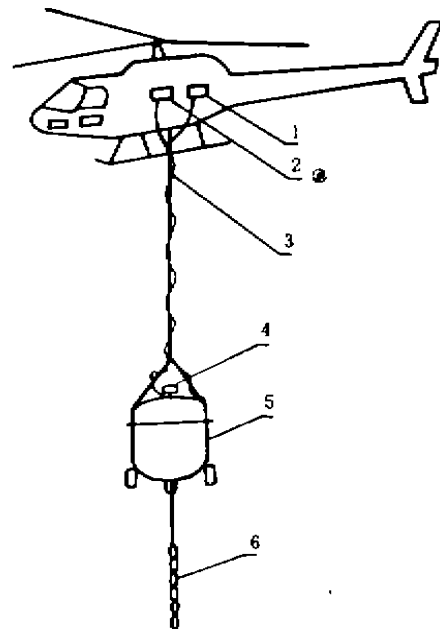


图 3 航空定点高精度重力测量系统示意图

1—重力仪控制箱;2—GPS 接收机;3—电缆及吊索;
4—GPS 天线;5—吊仓;6—阻尼链

2.3 飞机悬停高度与重力读数精度的关系

在飞行员掌握了试验的要求和熟练操作飞机悬停及吊仓起落的操作步骤后,我们将重力仪探头装入吊仓内继续试验。为了试验飞机螺旋桨风力对重力读数的影响,让飞机分别在 40m、30m 和 20m 高度上悬停,读取一系列与这些高度相应的重力值。在各高度上飞机悬停所对应的重力读数见表 1。经分析认为,直升飞机在 30~40m 高度上悬停对重力读数影响较小,而在 20m 高度上悬停时地面感到风力较大,有可能吹起地面上的沙尘。悬停 40m,固定吊挂要 45m 长,增加了飞行难度。因此,小松鼠直升机悬停以 30m 为好。

表1 不同高度飞机悬停读数对比

悬停高度 40m 读数	读数精度	悬停高度 30m 读数	读数精度	悬停高度 20m 读数	读数精度
57.90	0.030	57.85	0.020	57.87	0.045
57.89	0.020	57.88	0.030	58.88	0.013
57.90	0.036	57.88	0.026	57.90	0.040
57.84	0.010	57.87	0.037	57.89	0.068
57.85	0.008	57.88	0.028	57.86	0.040
57.85	0.014	57.92	0.033	57.88	0.022
57.84	0.021	57.98	0.027	57.87	0.020
57.86	0.014	57.91	0.037	57.87	0.019
57.84	0.014	57.89	0.025	57.84	0.026
57.83	0.021	57.88	0.023	57.84	0.048
57.85	0.019	57.86	0.015	57.95	0.035
		57.84	0.008	57.88	0.036
		57.85	0.019	57.98	0.058
		57.86	0.021	57.84	0.013
		57.87	0.018	57.93	0.053
		57.86	0.045	57.93	0.050
		57.87	0.048	57.96	0.079
		57.84	0.042	57.96	0.062
		57.85	0.048	57.85	0.016
		57.84	0.044	57.88	0.026
n=11		n=20		n=20	
$S_x=0.025$		$S_x=0.033$		$S_x=0.045$	

2.4 剖面测量试验

在国道102线1279.750km至1287.500km的公路段东侧,沿公路布设了31个测点,测线方位大致为NE35°,地形起伏高差约30m,测点间距为250m左右,要求GPS定位和测高时间为5min。首先在地面上用红外测距仪和经纬仪测出各测点的相对高程,并进行地面重力观测,地面重力观测重复率(检查率)为100%,统计观测精度为 $0.040 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。因为各测点的高程和重力值为已知,所以航空定点重力测量必须在这些点上进行,以便与地面重力值进行对比。为此,先在这些测点上铺上红旗,作为引航定位标志,当飞机到达红旗上方时,悬停后降低高度,从而把重力仪吊仓放置在地面测点上。需要说明的是,由于飞行员在测点正上方看不到下面的红旗,实际在部分测点上,重力仪吊仓并没有精确放置到测点上,而是偏离1~2m。

在仪器落至地面后,机上操作员便开始操作重力仪和GPS进行读数。在一个点上,如果地面较平坦,在5min内即可完成重力仪调平并读取二个读数。从一个测点到另一个测点的飞行时间大约在10s左右,而重力仪吊仓下落时则稍费时间,约需1min。

航空定点重力值与地面重力值均以临时确定的一个重力基点的重力值为参考值。各测点上的航空定点重力观测值与地面重力观测值的对比见表2。重力剖面图见图4。以地面重力测量为准确值,计算得航空吊挂定点重力测量均方误差为 $0.091 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

为解决航空定点重力测量的点位及高程测量,我们使用4000SE型GPS卫星定位接收机。此次GPS试验目的,主要研究直升飞机对GPS接收机的遮挡作用以及研究4000SE型GPS解算高程精度。为了试验直升飞机悬停对GPS接收机的影响,将GPS天线放在吊仓盖上,而操作员在机上进行观测。试验说明,飞机悬停对GPS读数没有影响,我们有红外测距仪布设了一条约15km的高程导线。为满足等外水准要求,规定最大视距控制在1km左右,采用 t_2 经纬仪,垂直角读一个测回。高程导线中共有36个测点,高程闭合差为66mm,允许误差为156mm,高程为相对高程。在GPS测量和地面红外测量高程精度对比中,以红外高程为理论高程。

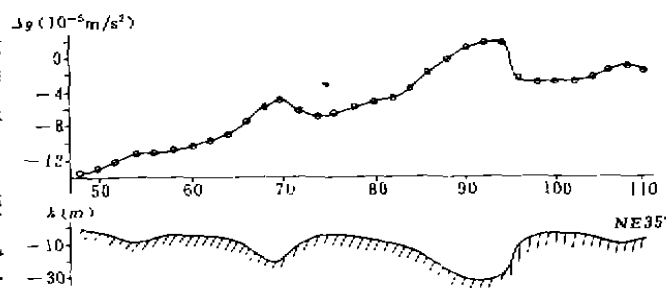


图4 航空与地面观测重力剖面

• 地面重力观测曲线, × 航空重力观测曲线

用4000SE型GPS接收机共取数二组,一组为地面人工安置GPS天线,每点观测

10min 的数据;另一组为飞机投下重力仪, GPS 天线附在吊仓盖上,接收机在飞机上观测 5min 所求。GPS 固定差分站设在地面测线的南端,固定差分站的高程亦为红外测算的相对高程,和其他测点为同精度同系统。

二组 GPS 观测结果经电算处理求解测点高程,最后求解的高程精度如下:第一组 GPS 地面观测求解点数为 36 个,观测时间取 10min,计算采用 5min 数据,高程均方误差为 $\pm 0.59\text{m}$;第二组 GPS 在飞机上观测求解测点高程点数为 31 个,观测时间为 5min,

高程均方误差为 $\pm 0.40\text{m}$ 。其中最大误差为 2.254m ,总点数中误差超过 1m 的仅有 2 个点,系由当时卫星分布不好所致。小于 0.5m 的共有 55 个点,总点数为 67 个点。用 4000SE 求解高程总均方误差为 $\pm 0.51\text{m}$ 。

用第一组地面 5min 观测的平面位置与飞机上 5min 观测的平面位置差进行比较,计算得平面位置均方误差为 $\pm 0.403\text{m}$ 。最大偏差为 0.97m ,一般偏差为 0.3m 左右。

综上所述,使用 4000SE 型 GPS 接收机用于航空定点重力测量是可行的。

表 2 航空重力观测值与地面重力观测值对比

点 号	地面重力 ①	航空重力 ②	Δ ②-①	点 号	地面重力 ①	航空重力 ②	Δ ②-①
48	-13.889	-13.680	0.209	80	-5.087	-5.049	0.038
50	-13.194	-13.065	0.129	82	-4.627	-4.456	0.171
52	-12.383	-12.271	0.112	84	-3.368	-3.381	-0.013
54	-11.108	-11.159	-0.051	86	-1.278	-1.273	0.005
56	-10.768	-10.935	-0.167	88	0.145	0.096	-0.049
58	-10.805	-10.611	0.194	90	1.811	1.682	-0.129
60	-10.205	-10.220	-0.015	92	2.261	2.183	-0.078
62	-9.615	-9.629	-0.014	94	2.302	2.294	-0.008
64	-8.927	-8.979	-0.052	96	-2.096	-2.147	-0.051
66	-7.482	-7.485	-0.003	98	-2.545	-2.493	0.052
68	-5.509	-5.457	-0.052	102	-2.347	-2.387	-0.040
70	-4.474	-4.503	-0.029	104	-2.069	-2.018	0.051
72	-6.178	-6.302	-0.124	106	-0.887	-0.904	-0.017
74	-6.812	-6.689	0.123	108	-0.596	-0.623	-0.027
76	-6.347	-6.323	0.024	110	-0.997	-1.019	-0.022
78	-5.749	-5.777	-0.028	$\sigma = \pm 0.091 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$			

3 结论与建议

试验结果表明,将航空定点重力观测值与地面重力观测值对比,均方误差为 $\pm 0.091 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$;GPS 高程观测精度 $\pm 0.51\text{m}$,平面位置精度 $\pm 0.40\text{m}$,计算航空定点重力测

量布格异常精度达到 $\pm 0.15 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。只需在以下几方面做些改进即可投入野外工作。

(1)为了适应于沙漠、沼泽、森林等困难地区的生产,需进一步提高观测速度和增加直升飞机的续航时间。

(2)为便于飞行员完成飞机悬停、仪器吊落等操作,在飞机上安装仪器的同时,要考虑增加一套能让飞行员看到正下方情况的光学设施。

(3) 试验中所用的电缆太笨重, 而且容易损坏电路, 今后应使用较轻便的电缆。为适应航行中紧急事件的要求, 必须有自动与飞机脱开的性能。

(4) 尽可能用双频 GPS 测量型接收机, 5min 可达到 $\pm 0.30\text{m}$ 的高程测量精度。

本研究项目的主要参加者还有于德武、宁建统、王福根、李元厚、侯遵泽、李晓昌、吴新刚、刘旭华、卢景奇等。在该项目的实施过程中,得到了北京地质工程技术勘察公司、北京地质仪器厂等单位的大力支持和帮助,在此表示感谢。

Manufacture and Testing on Airborne Hanging-type Fixed Point Pinpoint Accuracy Gravitational System

Luo Zhuangwei, Liu Wenjin, Chen Zhenyan

Based on the pinpoint accuracy gravimeter imported from foreign countries, airborne hanging fixed point pinpoint accuracy gravitational system has been manufactured, and put into outdoor testing operation by helicopter from January 10 to March of 1993 in Haerbin. Compared with ground pinpoint accuracy gravity, experimental results are as follows: gravitational accuracy is $\pm 0.091 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$, and elevation accuracy is $\pm 0.51 \text{m}$. The productional testing work in desert, bog and other areas without transport facilities can be carried out by this method.

Key words: aviation, hanging-type, gravitational system, testing

(上接第46页)

(As)、Ag、Au 异常(或近矿晕 Au、Ag、Pb、Mo、Sr、Ba、Cu、Zn 异常)→指标判断未被剥蚀(或剥蚀不多)。

此综合找矿模型应用是有效的,它将在找寻与偏碱性二长杂岩体有关的金矿,尤其是该类隐伏金矿床提供了一套有效的物化探综合找矿方法。

参考文献

- 1 李治华. 燕辽金矿带地质——地球物理特征. 地质与勘探, 1991, 27(9).
- 2 谭义东. γ 能谱测量和甚低频波阻抗法在评价金家庄金矿区异常上的应用. 地质与勘探, 1991, 27(3).
- 3 朱官祥. 一个与碱性杂岩体有关的金矿床——冀北东坪金矿. 地质与勘探, 1991, 27(8).

Comprehensive Geophysical and Geochemical Exploration Model of Dongping—Hougou Gold Deposit

Chang Zhimin, Li Yongcai

This paper summed up the characteristics of geophysical and geochemical anomalies of Dongping-Hougou gold deposit in relation to bias-alkali monzonite complex body, and according to the features of anomalies a comprehensive geophysical and geochemical anomaly model and its exploration model were established.

Key words: characteristics of geophysical and geochemical anomalies comprehensive geophysical and geochemical exploration model