

中国科学院测量与地球物理研究所编辑

测量与地球物理集刊

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA

12

科学出版社

0234
K4

本刊专职编辑 张 牙

测量与地球物理集刊

第 12 号

中国科学院测量与地球物理研究所 编辑

*

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1991 年 4 月第一次印刷 印张: 7 1/4
印数: 0001—400 字数: 162 000

ISBN 7-03-002236-X/P · 450

定价: 7.40 元

科技新书目: 238-062

前 言

本专集是国家自然科学基金委员会资助项目“航空重力测量理论、仪器和方法的研究”的课题总结,是该课题组三年来对航空重力测量所作的研究成果,由十五篇论文组成。

航空重力测量系统是一种很有发展前途的地球物理勘探新技术,该课题对此问题作了较详尽的理论和试验研究,主要结果反映在文集的首篇《航空重力测量》中,详细的研究内容有:

(1) 航空重力测量理论及可行性研究。包括航空重力测量的定位、测高和各种扰动加速度的影响、航空重力测量的数字滤波和反滤波方法等,根据这些理论进行室内模拟试验表明,结果良好。这方面的学术论文有:《航空重力测量可行性探讨》,《垂直加速度影响的探讨》,《水平加速度改正》,《GPS-INS 最优组合定位系统的理论与设计》,《卡尔曼反滤波消除动态重力测量畸变》等。

(2) 航空重力测量方法和试验方案的研究。探讨和设计了航空重力测量的试验方案,这一方案是在没有定位及高度变化手段的条件下设计的。1988年4月进行了首次航空重力测量试验,获得成功,验证了仪器在直升飞机上工作的可行性并获得较高精度。这方面的论文有:《航空重力仪的试验》,已发表在《地球物理学报》33(1),1990。

(3) 航空重力仪的仪器系统研究。设计出 CKZ 航空重力仪系统,并对其他类型仪器原理进行了探讨,认为双弦重力仪作为航空重力系统将很有发展前途。这方面的论文有:《CKZ 航空重力仪的研究》,《航空重力测量系统的研制》,《应用双弦航空重力仪进行航空重力测量》。

本课题的完成将为我国发展实用的航空重力测量系统奠定了基础。

参加本课题的人员有:张善言、周东明、宗杰、王建弟、周百力、方明、申建华、缪红等。

中国科学院测量与地球物理研究所

测量与地球物理集刊 第 12 号

(1991 年)

目 录

航空重力测量·····	张善言 周东明 宗 杰 (1)
航空重力测量可行性探讨·····	张善言 (15)
直升飞机重力测量系统在地球物理勘探中的应用·····	张善言 (21)
垂直加速度影响的探讨·····	张善言 (27)
水平加速度改正·····	张善言 (33)
航空重力测量研究进展·····	宗 杰 (39)
航空重力测量若干问题·····	宗 杰 (49)
卡尔曼反滤波消除动态重力测量畸变·····	王建弟 (57)
CKZ 航空重力仪的研究 ·····	周东明 宗 杰 (71)
航空重力测量系统的研制·····	周东明 (75)
GPS-INS 最优组合定位系统的理论与设计 ·····	朱才连 周东明 (79)
应用双弦航空重力仪进行航空重力测量·····	张善言 (87)
CHZ 海洋重力仪的若干特点 ·····	张善言 (93)
CHZ 海洋重力仪数据采集和处理系统的改进 ·····	张贤林 (103)
CHZ 海洋重力仪敏感元件的特殊工艺 ·····	江 峰 (107)

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA, No. 12

(1991)

CONTENTS

Aerial Gravity Measurement	
..... Zhang Shanyan Zhou Dongming Zong Jie (14)	
An Inquiry of the Feasibility of Airborne Gravity Measurement	
..... Zhang Shanyan (20)	
The Application of On-helicopter Gravity Measuring System to Geophysical Exploration	Zhang Shanyan (25)
An Inquiry of the Inference of Vertical Acceleration	Zhang Shanyan (32)
The Correction of Horizontal Acceleration	Zhang Shanyan (37)
Progress of the Research on Aerial Gravity Measurement	Zong Jie (48)
Several Problems in Aerial Gravity Measurement	Zong Jie (55)
Elimination of the Distortion in Dynamic Gravimetry Using Kalman In- verse Filter	Wang Jiandi (69)
A R	Zongming Zong Jie (74)
The	 Zhou Dongming (78)
The	 Combination Positioning
..... Zhou Dongming (85)	
Using	 Gravity Measurement
..... Zhang Shanyan (92)	
Sever	 meter
..... Zhang Shanyan (102)	
The	 System of CHZ
..... Zhang Xianlin (106)	
The	 CHZ Seagravime-
t	 Jiang Feng (112)

航空重力测量*

张善言 周东明 宗 杰

摘 要

本文着重研究航空重力测量的理论与方法。要进行航空重力测量需建立航空重力测量系统。研究得出航空重力测量是可行的,并且能勘探有用矿床。我们对 CHZ 海洋重力仪作了改进,并在直升飞机上作了垂直飞行和悬停时的测量试验,获得良好结果;还对双弦航空重力仪及建立小型、完备、自主的航空重力测量系统进行了研究。

一、引 言

1. 历史背景

航空重力测量是地球物理学家们几十年来梦寐以求的。这是因为它能快速测定大面积重力场,更重要的是它能既经济又快速地勘探有用矿床,特别是油气资源。中国科学院测量与地球物理研究所 60 年代研制成功第一代 HSZ-2 海洋石英重力仪,填补了我国的空白。70 年代参与第二代 ZYZY 自动化远洋重力仪的研制,并获得国家地震局科技一等奖。80 年代又完成了第三代 CHZ 新型海洋重力仪,并获得中国科学院科学技术进步一等奖。该仪器性能优良,略加改进有可能用作航空重力仪。为了不失时机地把新技术新方法推向前进,提出了本研究课题。

2. 研究的主要内容

(1) 航空重力测量的理论问题。航空重力测量和海上重力测量均属动态重力测量,这是共性。海上重力测量的理论已研究得比较完善,然而它们也有差别,那就是飞机的速度比船速大得多,飞机不能完全平行于大地水准面飞行,从而带来一系列问题需要进行研究。

(2) 航空重力仪。航空重力仪应能在飞机上工作,能经受飞机运动所产生的各种加速度。新设计仪器当然是理想的,但需要大量经费而且周期很长。作者只借助于新研制成的 CHZ 新型海洋重力仪加以适当改进,使之成为可在飞机上测量的航空重力仪。

(3) 航空重力测量方法的研究。航空重力测量是很复杂的问题,除了理论指导,如何实现以达到测量目的,测量方法大有讲究,有必要深入研究。

(4) 航空重力仪试验。试验的目的主要在于验证,CHZ 新型海洋重力仪经过适当改正之后是否能在飞机上工作,进行航空重力测量之用。

* 1989 年 12 月收稿。

3. 预期研究成果

- (1) 航空重力测量的理论和方法的研究论文。
- (2) 航空重力仪的研究论文。
- (3) 航空重力仪的试验报告。
- (4) 提供经适当改进的 CHZ 航空重力仪一套。
- (5) 本课题的研究报告。

二、测量理论与方法

1. 重力值的归算

(1) 在动态重力测量中的测点预期的归算重力值由下式计算

$$g = g_b - \Delta g - E - g_c - \ddot{h} - f \quad (1)$$

式中 g 为归算到参考面上的重力值, g_b 为基点重力值, Δg 为重力仪敏感的重力变量, E 为厄特弗斯改正, g_c 为横向水平加速度改正, $\ddot{h}$ 为垂直加速度改正, f 为归算到参考面上的自由空间改正。

(2) 厄特弗斯改正

$$E = \left(1 + \frac{h}{R_\varphi}\right) \left(2\omega V_\varphi \sin \alpha \cos \varphi + \frac{V_\varphi^2}{R_\varphi}\right) \quad (2)$$

式中 E 为厄特弗斯改正, R_φ 为纬度 φ 上飞行航向的曲率半径, V_φ 为纬度 φ 上地球表面上的切线速度, h 为飞机离大地水准面的距离, ω 为地球自转角速度, α 为航向(自北向东计算)。

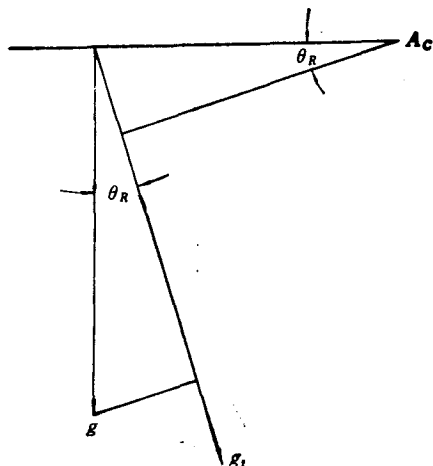


图 1 支承重力仪的平台倾斜时对重力测量的影响

(3) 横向水平加速度改正。飞行时支承 CHZ 重力仪的平台与水平面不严格一致时,则仪器不仅敏感重力加速度,而且也敏感水平加速度分量,在等速高速飞行时,有横向水平加速度作用在飞机上,并引起平台倾斜,见图 1。

$$g_i = g \cos \theta_R + A_c \sin \theta_R \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度, g_i 为重力仪敏感的重力, A_c 为横向水平加速度, θ_R 为平台横向倾角。

重力加速度可由下式计算

$$g = g_c + g_i \quad (4)$$

及

$$g_c = g - g_i \quad (5)$$

将 (3) 式代入上式得

$$g_c = g(1 - \cos \theta_R) - A_c \sin \theta_R \quad (6)$$

g_c 为横向水平加速度改正, A_c 为横向水平加速度,它的大小随航速、航向和纬度而改变, θ_R 为平台绕飞机纵轴的倾角,它是横向水平加速度的函数。

(4) 垂直加速度的改正。飞行时机振会产生垂直加速度, 这可由重力仪具有阻尼及滤波消除。飞机上下波动也产生垂直加速度, 其周期较长, 重力仪只能部分地压缩或者完全不能压缩, 因此需要测出加以改正。可以准确测出飞机高度或高度的变化, 高度的二次时间导数就是垂直加速度。

(5) 自由空间改正 f 。测量的重力值要归算到某确定的参考面上, 可以由已知飞行高度到参考面上的距离 H 乘以重力垂直梯度得出:

$$f = 0.3086 H \quad (7)$$

2. 厄特弗斯问题

由(2)式可见, 由于飞机飞行的速度很大, 厄特弗斯改正就很大, 航速 750 公里/小时, 改正值可达 3000 毫伽。 V 、 α 、 φ 及 R 的误差会影响到厄特弗斯改正。

(1) 飞行速度 V 的误差。我们对(2)式进行微分得

$$\Delta E_V = 2 \left(\omega \sin \alpha \cos \varphi + \frac{V}{R_\varphi} \right) \Delta V \quad (8)$$

由(8)可知, 在赤道上飞行时速度误差最不利, 1 公里的误差向东飞行引起厄特弗斯误差为 -6 毫伽, 向西飞行则较有利, 误差约 +2 毫伽。

(2) 方位误差。对(2)式进行微分得

$$\Delta E_\alpha = -2\omega V \cos \varphi \cos \alpha \Delta \alpha \quad (9)$$

最坏的情况是在赤道上向南或向北飞行时 6 角分的误差引起误差为 ± 5 毫伽。

(3) 纬度误差。对(2)式微分

$$\Delta E_\varphi = -2\omega V \sin \alpha \sin \varphi \Delta \varphi \quad (10)$$

φ 的误差 1 角分所引起误差小于 1 毫伽。

(4) R 的误差。对(2)式微分

$$\Delta E_R = \frac{V^2}{R^2} \Delta R \quad (11)$$

R 的误差 10 公里引起误差约 1 毫伽。

3. 水平加速度

(1) 水平加速度计算式。飞机沿所选择的航向飞行时, 飞机经受一缓慢改变的水平加速度作用。这是由于飞行在弯曲的和旋转的地球之上所产生的科里奥利加速度的水平分量。由于飞行的速度很快, 科里奥利加速度很大并引起平台倾斜至视垂线。水平加速度的大小可随航向、航速和纬度而改变, 也可随所选择的飞行方式的不同而改变。选择简单的飞行方式, 即等速飞行和沿等方位线或沿大圆航线飞行。所谓沿等方位就是与当地经度的子午线成一固定的方位角。这种飞行除向东或向西飞行之外, 其终端在地球的一极点上。因为飞行有其特殊的曲率半径, 因此增加了横向的水平加速度。所谓沿大圆飞行, 是飞行方向与赤道平面成一固定倾角。等方位航线和大圆航线的横向水平加速度已由 Harlan 计算出来, 计算时假设地速是常数, 其结果为:

对于大圆飞行:

$$A_H = 2V\omega \sin \varphi \quad (12)$$

对于等方位飞行:

$$A_H = 2V\omega \sin \varphi + \frac{V^2}{a} \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha \quad (13)$$

式中 V 为飞行速度, ω 为地球的角速度, φ 为纬度(北正南负), α 为真航向, a 为地球主半径, A_H 为水平加速度。

现在来估计一下, 设大圆航线的航速为 750 公里/小时, 科里奥利加速度的水平分量 $2V\omega \sin \varphi$ 可达 3000 毫伽, 等方位航线上要增加一项正比于纬度的正切和航向的正弦的加速度。当纬度接近于 90° 时, 加速度迅速增大; 当纬度为 45° 时约为 690 毫伽。所以在高纬度地区采用等方位飞行是不恰当的。

(2) 水平加速度引起平台倾斜。水平加速度引起平台倾斜, 其倾角为:

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{A_H}{A_V - G} \quad (14)$$

重力仪读数 A_M :

$$A_M = -A_H \sin \Delta + (A_V - G) \cos \Delta \quad (15)$$

A_H 为水平加速度, A_V 为垂直加速度。如 $A_H = A_V = 0$, 则 $\Delta = 0$, $A_M = -G$ 。因此可以说平台对于视垂线水平。把总加速度矢量置于重力仪轴上, 使重力仪读数偏大, 其数值大约为 $\frac{\Delta^2}{2} G$ 。

(3) 水平加速度改正。水平加速度引起平台倾斜至视垂线方向, 此时重力仪敏感的是总加速度矢量, 比重力仪应敏感的重力值大, 故应作水平加速度改正。计算方法按 (12) 或 (13) 式首先计算水平加速度 A_H 。计算时可按计划飞行时的名义航速和航向计算。其次, 计算倾角近似值:

$$\operatorname{tg} \Delta \approx \frac{A_H}{G}$$

此处 G 可采用当地近似重力值, 再次按 $\frac{\Delta^2}{2} \cdot G$ 计算出改正数。例如计算得水平加速度 $A_H = 3000$ 毫伽, 则平台倾斜 $\Delta = \frac{A_H}{G} \approx 0.003$, 水平加速度改正为 $\frac{\Delta^2}{2} G \approx 4.5$ 毫伽。

(4) 水平加速度改正或消除的方法; (a) 按飞行名义上的航速、航向计算出水平加速度, 而后计算改正数; (b) 用惯导仪所记录到的水平加速度值计算改正数; (c) 重力仪回路中插入来自惯导仪上加速度计的水平加速度, 其输出可视为已经作了水平加速度改正; (d) 重力仪平台跟踪惯导的当地垂线。此时平台倾角为零。

4. 垂直加速度

众所周知, 动态重力仪不仅敏感重力加速度, 而且也敏感垂直加速度。为了求得重力加速度, 就要把两者区分开。由于船只在海面上航行, 海浪周期一般为 10 秒左右, 所以尽管船上垂直加速度可达 200 伽, 然而通过仪器内部的阻尼和输出后的低通电磁或数字滤

波,已能完全消除垂直加速度。但在飞机上测量,问题则更为复杂。实际上这是航空重力测量中最困难的问题,如能解答好此问题,则航空重力测量将会获得突破性的进展。

(1) 简谐垂直运动。飞机飞行时其垂直运动理想地又适当地可用简谐垂直运动来表示:

$$h = A \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (16)$$

$$\ddot{h} = A \frac{4\pi^2}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (17)$$

$$\ddot{h}_{\max} = A \frac{4\pi^2}{T^2} \quad (18)$$

式中

h 为垂直位移, $\ddot{h}$ 为垂直加速度, $\ddot{h}_{\max}$ 为最大垂直加速度, A 为垂直位移幅度, T 为垂直加速度周期。

飞机上测量重力时会遇到极大的垂直加速度。由(18)式可见,如幅度为 0.15 厘米,周期 0.1 秒,则每 0.05 秒产生的垂直加速度变量为 1184353 毫伽;幅度 150 厘米,周期 1 分,每 30 秒产生的垂直加速度变量为 3290 毫伽。如果要求精度到毫伽级,则前者大于测量精度百万倍,后者大于 3000 倍。

(2) 垂直加速度产生原因。垂直加速度产生原因可由两个方面来考虑,一是飞机的运动,另一是测高和定位不准确引起。

飞机飞行时机振、高度的改变、速度改变等均产生垂直扰动加速度。机振周期极短,但引起的垂直加速度很大。如直升飞机,飞机偏离飞行高度,其周期一般为几分,所引起的垂直加速度可达几千毫伽。飞行速度的改变,引起厄特弗斯效应的改变,对于重力仪输出的影响和周期性垂直加速度一样。

测高和导航定位误差引起的垂直加速度,可分为高频、中频及低频部分。高频部分主要来自高度变化,中频部分主要来自未检测到的高度变化,低频部分主要由速度和位置误差引起。

(3) 垂直加速度测定。垂直加速度为高度的二次导数,所以垂直加速度的测定主要通过高度测量。办法有二:一是连续测量飞机的绝对高度,另一是连续测量高度的变化。在海洋地区海水面给出了水平参考面,故可利用现代测高仪连续测量飞机到海面上的高度,也可以连续测量飞机偏离飞行面的高度变化。而在陆地上一般只能采用连续测量飞行高度变化,因为陆上测量飞机高度由二部分组成,即由地面的绝对高度与飞机到地面高度的总和,这两者的测量精度都是很低的。

(4) 消除垂直加速度。由于重力仪既敏感重力,又敏感垂直加速度,为了从重力仪的输出中求得重力,须要消除垂直加速度或把它测量计算并加以改正。在航空重力测量中一般两种方法同时采用。极短周期的机振,及海浪周期的垂直加速度可由 CHZ 重力仪的硅油阻尼及其输出到记录之前又通过低通数字滤波器加以消除。而较长周期的垂直加速度则通过对测高数据的计算加以改正。

(5) 提高测量垂直加速度精确度的途径。飞机如严格沿平行于大地水准面飞行,则

飞机的垂直加速度为零(不计机振),但这是办不到的。若偏离上述条件愈大,产生的垂直加速度也愈大,测量的垂直加速度精度也愈低。为使所产生的垂直加速度尽可能小,其途径有:

- 1) 要求把重力仪安放在飞机的转动中心上。此处是飞机垂直加速度最小的地方。
- 2) 要选择性能最优良的飞机,飞机飞行时使方位、速度和高度保持最稳定的状态。
- 3) 尽量优先选用现代化的测高系统,包括测高仪和相对测高仪,以便最精确地测定飞机的绝对高度或高度变化。
- 4) 大气状况也影响飞行的稳定,可能情况下选择最佳气象条件进行作业。

三、航空重力测量系统

要实现航空重力测量,需要有一系列的仪器设备才能实现,这一整套仪器称之为重力测量系统。此系统由四个子系统组成,即重力传感系统、导航定位系统、测高系统及数据采集与处理系统。所有子系统均放在飞机上,要获得良好的测量结果,对飞机也有严格的要求,稳定的飞行是获得可靠数据的前提。

(1) 重力传感系统,包括重力仪及平台。重力仪除了能抵抗各种扰动加速度的能力之外要求线性度好而且有瞬时读数能力。最好采用三轴稳定平台,即使机动飞行时也能保持水平。CHZ 海洋重力仪在海上测量精度高,可用作航空重力仪。

(2) 导航定位系统。飞机水平位置可用 GPS、惯导系统或其他无线电导航系统等得出。GPS 有三维定位能力,能连续快速提供三维位置、三维速度和精确时间信息,更适合航空重力测量使用。厄特弗斯改正所需的速度可由 GPS 的数据推导出来,并有可能实时地由 GPS 直接输出的速度来计算厄特弗斯改正;惯导系统也可提供三维定位能力。GPS 及惯导系统的高度不宜采用,因为它与测高系统相比其精度是很低的。

(3) 测高系统。高度测量误差有两种方式影响到重力测定。一是影响厄特弗斯改正和高度改正;另一是影响到垂直加速度改正。因此测高系统要用精密的测高仪,如激光测高仪、雷达测高仪以及精密的气压测高仪组成。

(4) 数据采集及处理系统。重力传感系统、导航定位系统及测高系统均由快速的数据采集系统采集并进行数据处理,所有这些均可由计算机来完成。

四、航空重力测量可行性探讨

空间科学和大地测量学所要求的主要是平均重力场,这对于航空重力测量来说是十分理想的。因为地球上空一点的重力值是代表地球表面一块很大地区重力场的平均值,区域半径是观测高度 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时可得到最大的补偿。区域半径是观测高度三倍以外时,才影响很小,可以舍去。所以 10 公里高空上一点的重力值是代表地面大约 60 公里直径地区的平均重力值,故在 10 公里上空飞行时所测量的是 60 公里宽的一条重力带。如航速 750 公里/小时,则一小时可测量约为 60×750 平方公里区域的重力场,大约 15 分钟就可

以给出 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的平均重力值。

有了重力测量系统则 (1) 式右边除 g_b 是已知外, Δg 可由重力传感系统得出, E 、 g_c 可由导航定位系统得出, h 及 f 可由测高系统得出, 经计算机处理即可得出归算重力值 g 。

CHZ 海洋重力仪经多年海上测量及 1988 年的直升飞机悬停试验均得出良好结果, 已证明可用作航空重力仪, 导航定位系统、测高系统以及计算机均有商品供应。由此可见, 航空重力测量的现实可行性是无可怀疑的。

五、直升飞机重力测量系统勘探有用矿床

直升飞机重力测量系统与航空重力测量系统在其组成上没有原则上的区别。由于前者目的在于勘探有用矿床, 因此测量重点集中于提高测量精度; 而后者是快速测定大面积重力场, 所以在测量系统的考虑有些不同。由于勘探测量一次任务的测区面积有限, 测量方法也有所不同, 现分述于下。

(1) 测区采用正交布网方法, 以提高精度。

(2) 为了提高异常的分辨率, 航高航速给予限制。

(3) 采用最精确的测高系统, 特别是测量高度变化的测高仪要十分精确, 以保证垂直加速度的改正精确度。

(4) 导航定位系统采用 GPS 等系统精度达不到要求。幸好测区面积有限, 可采用电子定位系统, 测得飞机上主机至地面固定站的精确距离, 根据三角形, 可以求得飞机水平位置及飞行速度。此法求得的速度, 计算厄特弗斯改正精度要高得多。

(5) 选用飞行最稳定的直升飞机。

(6) 测量时可考虑气流最稳定的夜间进行。

1981 年美国在 ~ 1000 平方公里的测区按上述方法, 纵横各布置 32 条测线, 间距 1 公里, 共有测线交点 1089 个, 测量精度为 0.39 毫伽。此精度比广泛使用的海洋重力测量精度高一倍。由此可见, 用直升飞机重力测量系统来勘探有用矿床应当说是无可怀疑的。由于它快速、经济, 且对任何遥远不可到达的地区均能进行勘探, 因此它很有可能开辟勘探油气的新纪年。

六、CHZ 海洋重力仪的改进

对 CHZ 海洋重力仪进行改进, 以尽量适合航空重力仪的要求。改进包括以下几个方面:

(1) 重力仪机柜的小型化。原海洋重力仪由三个部分组成。重力仪机柜、平台机柜和稳定平台带重力仪本体, 总重量达 500 公斤以上, 体积亦很大。因此把整个重力仪机柜压缩成两个小机箱, 一个包括重力仪本体恒温控制及电容测微器线路, 另一个机箱包括反馈控制及数据采集。

(2) 重力仪控制回路的改进。原 CHZ 海洋重力仪采用模拟回路, 控制系统输出用

FLUK 六位数字电压表进行 A/D 转换;采用 TP801 单板机进行数据采集及滤波,用录音机作数据外存部件,因此采样率及可靠性都较低。现在改成数字回路,用 A/D 集成块进行模数转换,转换率比原用 FLUK 数字电压表高,用单片机进行数字控制,缩小了体积,并且数据记录在软盘上,这些不仅增加了可靠性,且也方便数据的后处理。

(3) 平台专用电源的研制。原平台设计没有考虑飞机使用条件,因此体积很大,电源也与飞机不配,这给飞机试验带来很大困难。由于整机无法再改小,故重点将电源作了改动。

平台系统由三相 110 V, 400 Hz 电源供电。在船上是由一台三相 380 V, 50 Hz 电机驱动的变流机输出三相 110 V, 400Hz 供电。仅变流机本身就约有 200 千克,而且还不适合机上电源,为此,研制了一台专用电源,可用 110 V 或 220 V 单相 50Hz 电源(或直流)产生需要的三相电源,供给平台及机柜,这为以后的试验提供了很大方便。

(4) 航空重力测量系统。航空重力测量系统构成如图 2 所示。

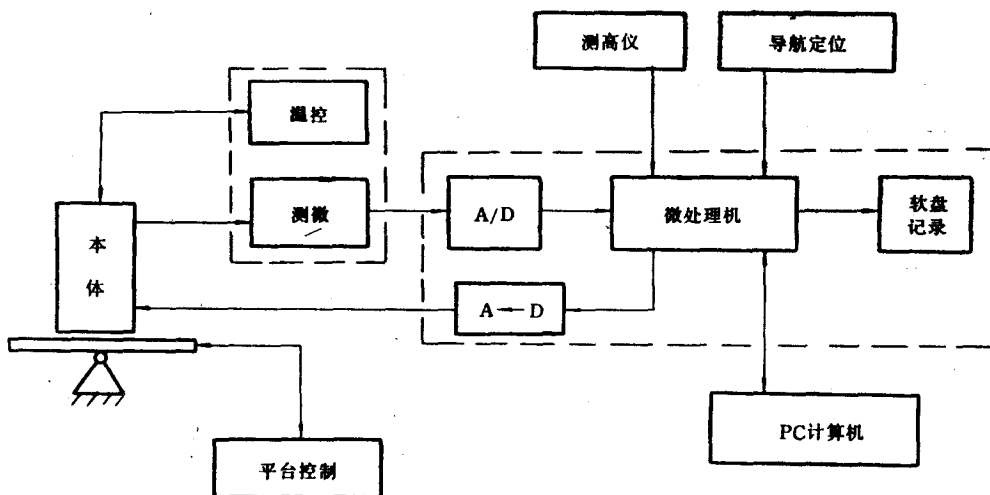


图 2 航空重力测量系统

微处理机采集本体输出的摆位数据,测高仪的高度数据和导航定位数据,对摆位数据进行滤波按设计的控制算法处理数据。通过 AD 公司的 16 位 D/A 转换模板反馈给本体的摆,使其维持零位。它还将测高仪、导航定位的数据连同经过处理的重力仪数据一起存入软盘,这些数据也可送给 PC 计算机进行实时处理。

为了使数据存盘时不中断数据采集和处理,我们为软盘驱动器单独配了一个单片机。

一个完整的航空重力测量系统必须包括以下几个部分: 重力传感部分(包括重力仪和稳定平台)、测高系统、精密导航定位系统以及数据采集和处理系统。

目前对测高系统和精密定位系统也已投入了研究。

1) 测高系统。研究了各种测高方法,初步确定航空重力测量系统中用振动压力筒型或振弦型相对气压测高仪与雷达或激光测高仪组合,具体硬件方案也已有所考虑。

2) 精密导航定位系统。为了提高测量精度,必须有一精密实时定位系统,我们进行了全球定位系统(GPS)与惯导系统(INS)的组合导航定位系统的研究。作了一些计

算模拟,效果还比较满意。

(5) 卡尔曼滤波消除航空重力测量畸变。飞机上进行重力测量时,需要用强阻尼措施压缩巨大的垂直扰动加速度,并用低通滤波和积分平均等措施除去高频噪声。由于这些原因造成低频重力异常信号的畸变,此畸变包括异常幅度的缩减和相位的滞后两个方面,因此必须进行校准。我们研究了卡尔曼滤波消除畸变,并进行了计算机仿真,效果相当理想。

(6) 高精度宽量程长图记录仪的研制。这是为航空重力测量数据采集而研制的,是一种高精度宽量程的电压测量智能仪器。

七、航空重力仪的试验

1. 重力仪

试验是采用 CHZ 海洋重力仪,它是一种新型轴对称的仪器,对交叉偶合不敏感,可在巨大扰动加速度下进行高精度重力测量。它曾多次与西德 KSS-30 海洋重力仪、日本 NIPR-ORI-2 海洋重力仪、TSSG 海洋重力仪同船工作,均获得良好资料,证明仪器性能优良。仪器由三部分组成,即重力传感器、信号拾取和电子控制部分、数据采集和处理部分。重力传感部分采用直线运动的轴对称结构,有一根垂直安放的主弹簧悬挂一管状质量作为测量系统。由于重力变化引起弹簧长度变化,通过精密测微系统检测这种微小的位移,并通过力平衡反馈系统进行补偿和信号的读出,在仪器终端进一步对所采集的数据进行滤波处理。并可以打印数据,模拟记录和磁带存贮等。

2. 试验目的

CHZ 海洋重力仪是性能优良的仪器,试验的目的在于确定 CHZ 海洋重力仪可否在飞机上测量重力,通过试验作出定性的结论。

3. 试验方案

选择试验方案要考虑二个前提,一是除重力仪之外没有测高系统也没有导航定位系统,二是飞行时间应最短以节约经费。重力的计算式为

$$g = g_b - \Delta g - E - g_c - \ddot{h} - f$$

式中 g_b 是已知的, Δg 由重力仪给出, E 、 g_c 由导航定位系统的数据计算, $\ddot{h}$ 、 f 由测高系统给出。由于没有导航定位系统及测高系统,看来实验无法进行。

经过思考,充分利用直升飞机的特性,因此选择的方案为:“直升飞机垂直飞行并在不同的高度上悬停”。这是一个绝妙的方案,它不仅能计算出归算重力值,对重力仪能否在飞机上测量重力作出定性的结论,而且还可以得出定量的数据,并计算出重力仪的测量精度。

4. 空中试验

1988 年 4 月在江西省景德镇 CHZ 海洋重力仪在国产 Z-8 直升飞机上进行了空中

重力测量试验。试验的飞行方案见图3。直升飞机在地面上,然后垂直飞行,先后在5米、10米、15米、20米,5米及15米高度上各停5分钟,飞机只改变高度,经纬度不变,记录如图4,地面记录读数为1878.0毫伽。

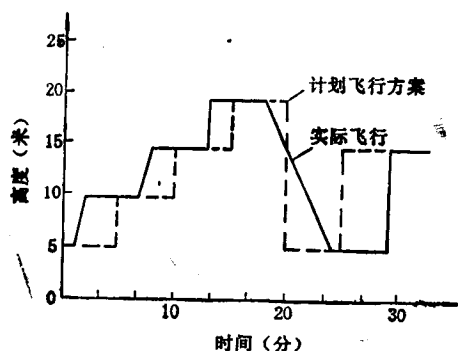


图3 直升飞机飞行方案

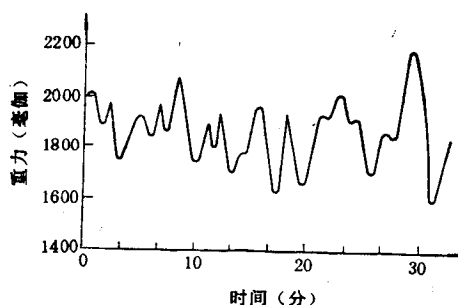


图4 重力测量值曲线

5. 测量数据的处理

此次试验,直升飞机的水平速度为零,故 E 及 g_e 为零,则(1)式成为

$$g = g_b - \Delta g - \ddot{h} - f \quad (19)$$

把地面点作为基点,所有记录均归算到地面点上,此时(19)式成为

$$g_i = g_b - (\Delta g_i + f_i) - \ddot{h} \quad (20)$$

不同悬停高度的归算重力值 g_i ,实际上就是基点的重力值。如测量没有误差,则所有 g_i 均等于 g_b 。但测量不可避免地存在误差,它的不符值可用于估算精度。

这时可以看到,飞机上下起伏所产生的垂直加速度,相对于地面点的不变重力值来说,是高频信号,故可利用低通滤波的方法来消除垂直加速度影响。图5是通过低通滤波之后所得到的结果,此时(20)式可写为

$$g_i = g_b - (\Delta g_i + f_i) \quad (21)$$

$$d_i = g_i - g_b = -(\Delta g_i + f_i) \quad (22)$$

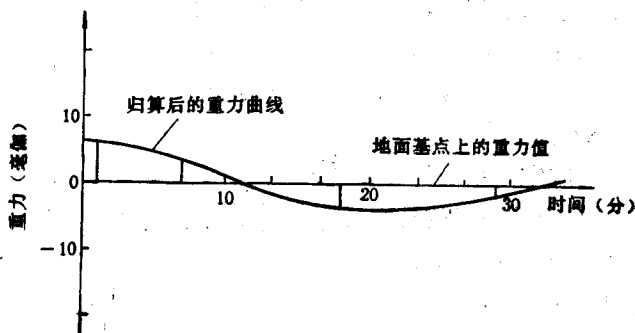


图5 计算结果

由此可计算出均方误差

$$m = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{n}} \quad (23)$$

平均值的均方误差

$$M = \pm \frac{m}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

平均归算重力值与基点重力值的偏差为

$$\frac{[d]}{n} \quad (25)$$

6. 计算结果

根据图 5 归算后的重力曲线与基点重力值可得出偏差。采用悬停时最后一分钟的偏差 d 其结果见表 1。

表 1

测 点	1	2	3	4	5	6
悬停时间 (分)	1	6	6	5	11	4
悬停高度 (米)	5	10	15	20	5	15
d (毫伽)	+6.4	+3.2	-1.0	-3.4	-1.3	+0.6

从图 3 可见,测点 1 悬停时间只有一分钟,此点不参予计算,则根据 5 个悬停点计算得

$$m = \pm 2.3 \text{ 毫伽}$$

$$M = \pm 1.1 \text{ 毫伽}$$

$$[d]/n = -0.4 \text{ 毫伽。}$$

八、新型航空重力仪及航空重力测量系统的研制

1. 问题的提出

1988 年 4 月,用 CHZ 海洋重力仪,在国产 Z-8 直升飞机上作了定点悬停试验,尽管这是一次可行性试验,意料之外地获得了很理想的结果,又经过海上多年测量的经验,证明 CHZ 海洋重力仪可以在飞机上测量。但由于用于海上的 CHZ 仪器太大、太重,因此只有在大型运输机上工作才适宜。

目前我们正研制一种微重力仪,用于测量空间微重力场,此种仪器的探头已经设计出来,外形尺寸约为 $65 \times 65 \times 80$ 毫米³,重约 250 克,非常适于航空重力测量之用。为此,在研制微重力仪的过程中也可同时利用同一类型的探头开展新型航空重力仪及航空重力测量系统的研究,以建立一种小型、完备、自主的航空重力测量系统。

2. 新型双弦航空重力仪

新型航空重力仪的探头采用双振弦加速度计,重力仪由重力仪探头、精密温控、测频器和微处理器组成,振弦位于磁钢的气隙中,弦两端固定并施加一初始张力(见图 6)。

双弦的测量原理

由微重力仪的研究中已经推导出,两弦的谐振频率之差为:

$$f = K_0 + K_1 A + K_2 A^2 + K_3 A^3 \quad (26)$$

式中 f 为两弦差频, A 为沿弦方向的加速度, K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 为仪器常数。在地球上测量时 (26) 式右边第三第四项可以舍去,弦对于重力矢量定位用下标 (+ g) 表示,翻转定位用下标 (- g) 表示,则

$$f_{+g} = K_0 + K_1 A \quad (27)$$

$$f_{-g} = -K_0 + K_1 A \quad (28)$$

在地球表面一点上测量时, $A = g$, 故

$$g = \frac{f}{K_1} - \frac{K_0}{K_1} \quad (29)$$

在空中测量时

$$A = g + H$$

H 为垂直加速度,包括厄特弗斯效应在内。

$$A = \frac{f}{K_1} - \frac{K_0}{K_1} \quad (30)$$

$$g = A - H \quad (31)$$

H 的厄特弗斯效应部分由导航定位数据计算,垂直加速度的高频部分采用低通滤波消除,较长周期部分由测高系统测出高度,再由高度的二次时间导数计算而得。

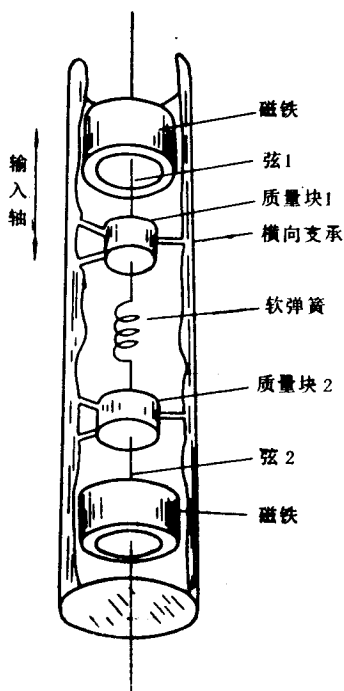


图6 双弦重力仪

得。

双弦重力仪的优点:

- (1) 双弦重力仪的非线性小,因为它是两单弦的非线性之差。
- (2) 只须在当地的一重力点上即能标定重力常数,测出 f_{+g} 及 f_{-g} , 由 (27)、(28) 式求得 K_0 及 K_1 。
- (3) 不产生 C-C 效应,因为弦在张紧状态下只能允许敏感质量作垂直运动。
- (4) 体积小重量轻,结构简单,生产成本只有 CHZ 仪器的几分之一。

3. 航空重力测量系统

航空重力测量系统由重力仪系统、惯性平台、最优组合定位系统及精密测高系统四个部分组成。

重力仪系统 重力仪系统由重力仪探头、精密温控、测微器和微处理器组成。

惯导平台 由于飞机飞行中会后左右摇晃,为了克服此影响,将重力仪放在惯导平台上,使重力仪始终保持在正常位置。

其次平台实时、连续地提供速度、航向、经度、纬度、姿态等数据,以提供计算厄特弗斯改正,同时也为重力测量提供定位数据。

GPS-INS 最优组合定位系统 惯导 (INS) 的短期精度高,但它的误差是随时间