

# 航空重力测量内符合精度计算方法

姜作喜<sup>1</sup>, 张虹<sup>2</sup>, 郭志宏<sup>1</sup>

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 北京信息科技大学 经济管理学院, 北京 100192)

**摘要:**为了评估航空重力系统的性能指标,通常采用对一条测试线多次往返飞行计算各条重复测试线内符合精度的方法。笔者研究了一种较准确的计算各重复线对应点的方法,并在对应点处采用插值方法计算其重力值,利用重复线上对应点的重力值进行均方差计算可以得到精度较高的内符合精度值。

**关键词:**航空重力测量;内符合精度;重复线;对应点;插值

**中图分类号:** P631.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2010)05-0672-05

在进行航空重力测量时,通常采用多次重复线测量来评估重力测量的性能指标和工作状态,即通过在同一条重力异常明显的测线多次往返测量,计算所测重复线的内符合精度来测试和评估测量系统动态测量的实际精度或噪声指标及仪器的稳定性。在实际工作中,除了对重复测试线进行内符合精度计算,还对重复测线进行内符合精度统计。

## 1 计算方法

参考有关文献<sup>[1-4]</sup>,计算重复测试线数据的内符合精度均方误差公式为:

$$\varepsilon_j = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_{ij}^2 / n}, \quad j = 1, \dots, m. \quad (1)$$

式中,  $\delta_{ij}$  为第  $j$  条重复测试线公共段各点观测值  $F_{ij}$

与该点各重复测试线观测的平均值  $F_i$  之差:

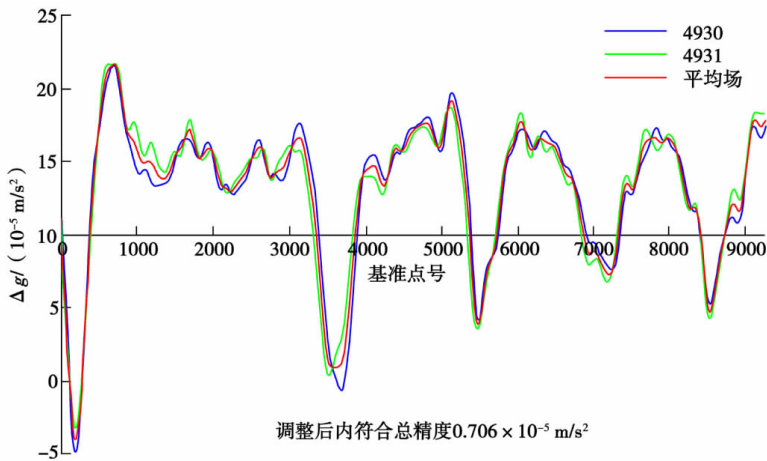
$$\delta_{ij} = F_{ij} - F_i, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m; \quad (2)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^m F_{ij} / m, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

其中,  $m$  为重复测试线的数目;  $n$  为重复测试线公共段数据点数。所有重复测试线的内符合总精度计算公式为:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n \delta_{ij}^2) / n \times m}. \quad (4)$$

目前,内符合精度计算方法是根据坐标位置找到各重复线的起始点,按基准号截取各线原始数据,按照基准号计算原始数据的均方差。如果飞行条件较理想,点距均匀,各条重复测试线原始数据点的点位对应较好,这种计算方法可以取得较理想的结果。



4930 为测线号,测线方向为由南向北,其所测结果为蓝色异常曲线;4931 为对 4930 重复飞行的测线编号,测线方向由南向北,其所测结果为绿色异常曲线;红色曲线为 4930 和 4931 两条异常曲线的平均值曲线。图 9 同。

图 1 基准点对应内符合精度算法得到的重复测线计算结果

当飞行条件不理想时,特别是飞行方向上风速较大时,飞机可能达不到正常状态下设定的飞行速度,而重力仪以固定频率采样,将造成顺风飞行与逆风飞行取样点距出现差异。当重复测试线间的平均取样点距不同时,基准号实际对应的是测线上不同位置的点,并不是真正位置上的对应点位,这将使内符合精度计算引入误差。航空重力飞行利用 GPS 控制在同一高度平飞,高度变化控制在  $\pm 5\text{ m}$  之内,重复线内符合精度分析时可以不考虑高度的影响。图 1 所示为某测区内一条重复测线基准点对应内符合精度计算所得到的结果,由于前后两次飞行方向上风速的不同,两条曲线存在偏移。

笔者所研究的寻找测线间对应点并插值计算对应点重力值的方法可以很好地解决测线间点位位置不对应的问题。该方法根据点坐标寻找该点在其他测线上的对应点,并用插值的方法求出对应点的重力值,利用内插得到的对应点处的重力值计算内符合精度。经过实践检验,该方法能够很好地解决测量点距不均匀时内符合精度计算存在的问题,提高内符合精度计算的准确度,更真实地反映仪器状态和性能指标。

2 垂线法寻找对应点

航空重力测量采用差分 GPS 进行定位,数据处理后每个点的数据包位置数据和原始重力数据。测点的平面投影位置数据包含东向距  $X$ ,北向距  $Y$ 。假设有 2 条重复线  $A$  和  $B$ ,按测点的东向距和北向距坐标将点绘制在平面内,如图 2 所示,2 条虚线  $a$  和

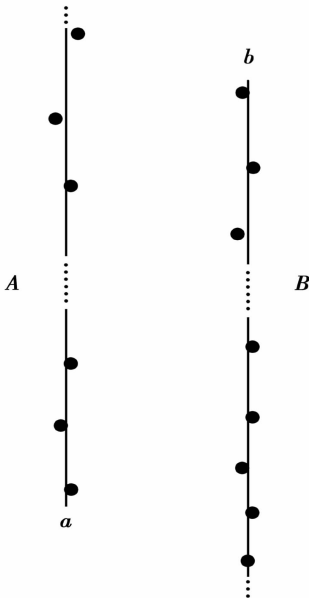


图 2 测线 A 与 B

$b$  分别是根据  $A$  线和  $B$  线的坐标数据计算得到的测线航迹直线。

根据测点的坐标值,截取 2 条测线的公共测线段,即截取 2 条测线都有测点的最长公共坐标段。截取后的测线如图 3 所示, $A$  线在公共段内有  $N$  个测点,记为  $A_n(n=1,\cdots,N)$ ,各点的重力值记为  $G_{A_n}(n=1,\cdots,N)$ ;  $B$  线在公共段内有  $M$  个测点,记为  $B_m(m=1,\cdots,M)$ ,各点的重力值记为  $G_{B_m}(m=1,\cdots,M)$ 。

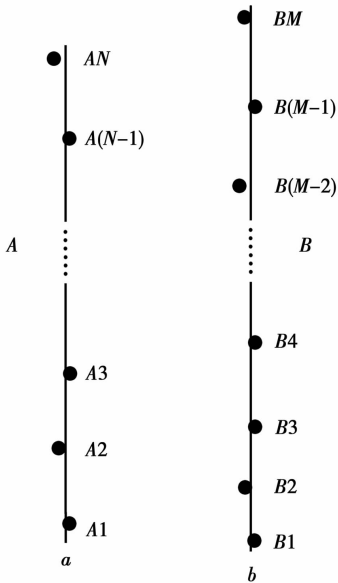


图 3 截取公共段后的 A 线与 B 线

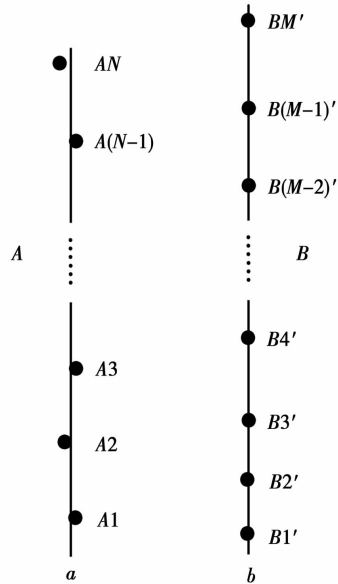


图 4 A 线与调整后的 B 线

在公共测线段内,选择一条测线作为标准线,将其余测线的测点根据其坐标值向其测线方向直线上作投影,例如,以  $A$  线作为标准线,将  $B$  线上的点根据坐标向测线方向直线  $b$  作投影,得到新的点位

$Bm'(m=1,\cdots,M)$ ,如图 4 所示。

过标准线  $A$  线上的点作垂直于其测线方向直线  $a$  的垂线,交  $b$  线于  $BAn(n=1,\cdots,N)$ 。点  $BAn(n=1,\cdots,N)$  分别是  $A$  线上的点  $An(n=1,\cdots,N)$

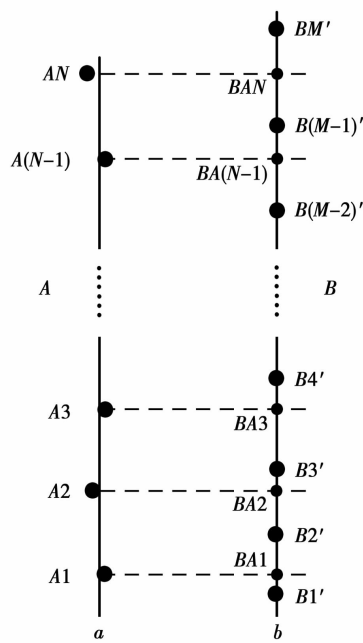


图 5  $A$  线在  $B$  线上的对应点

在  $B$  线上的对应点,如图 5 所示。利用  $Bm'(m=1,\cdots,M)$  的坐标值及  $Bm(m=1,\cdots,M)$  各点对应的重力值  $G_{Bm}(m=1,\cdots,M)$ ,根据  $BAn(n=1,\cdots,N)$  的坐标值利用插值方法计算出各对应点的重力值  $G_{BAn}(n=1,\cdots,N)$ 。

利用  $A$  线上重力数据  $G_{An}(n=1,2,\cdots,N)$  和重新内插得到的  $B$  线上的重力数据  $G_{BAn}(n=1,2,\cdots,N)$  可计算两条测线的内符合精度值。多条测线的计算方法与两条测线的情况类同。

3 插值方法

航空重力原始数据经过处理,得到的是经过低通滤波的离散的重力异常值。得到的重力场曲线是平缓变化的,所以可以利用内插的方法求得对应点的重力异常值。为了研究插值效果,建立了如图 6 所示的地质模型,研究了线性插值、抛物线插值、三次厄米特(爱尔米特, Hermite)插值和三次样条插值 4 种典型的插值方法。在 50 km 长度的水平面下,分布着中心在地面上的投影为一条直线的 9 个密度异常体,其中 7 个球体,2 个正方柱体,过各异常体中心在地面上的投影点布设一条测线,根据理论公

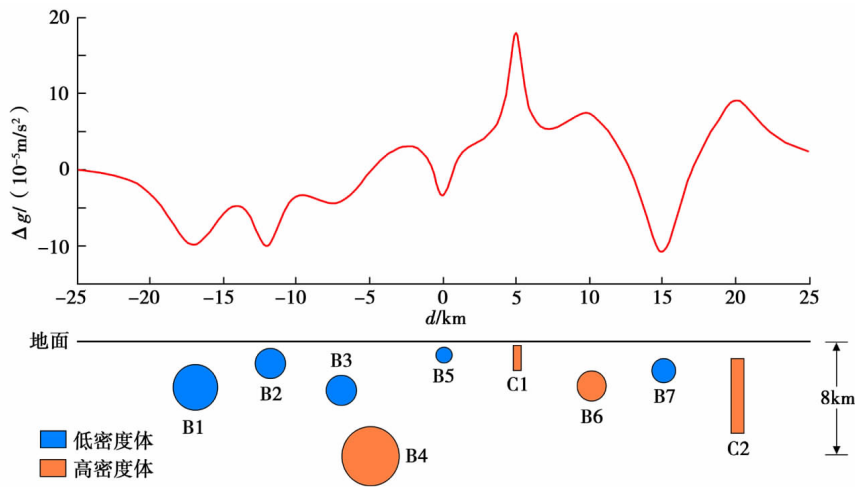


图 6 地质模型与其异常剖面曲线

式计算此测线上的重力异常如图中红色曲线所示。

首先对数据进行离散化处理。目前某航空重力测量的采样点距约为 30 m,我们模拟目前的航重测量以 30 m 间隔在异常曲线上取样,得到离散点的位置坐标为  $x(i)(i=1,\cdots,N)$ ,由位置坐标根据理论公式计算得到各点对应的重力值为  $g(i)(i=1,\cdots,N)$ 。利用随机函数生成不等距的离散点,各点的位置坐标表示为  $x'(i)=x(i)+d$ ,取  $-10\sim10$  之间的随机值。

利用数学软件 Matlab7.0 编写线性插值、抛物

线插值、Hermite 插值和三次样条插值 4 种插值方法的插值程序,根据均匀离散点  $x_i$  上的重力值  $g(i)$  利用程序计算不均匀离散点  $x'(i)$  上的重力值,4 种插值程序分别计算得到的插值序列为  $g'_L(i),g'_P(i),g'_H(i),g'_S(i)(i=1,\cdots,N)$ 。将理论重力、线性内插重力值  $g'_1(i)$ 、抛物线内插重力值  $g'_p(i)$ 、Hermite 内插重力值  $g'_h(i)$ 、三次样条内插重力值  $g'_s(i)$  绘制成剖面图,如图 7 所示。

分别计算插值序列  $g'_1(i),g'_p(i),g'_h(i),g'_s(i)$  与对应坐标点的理论重力值序列的均方误差,结

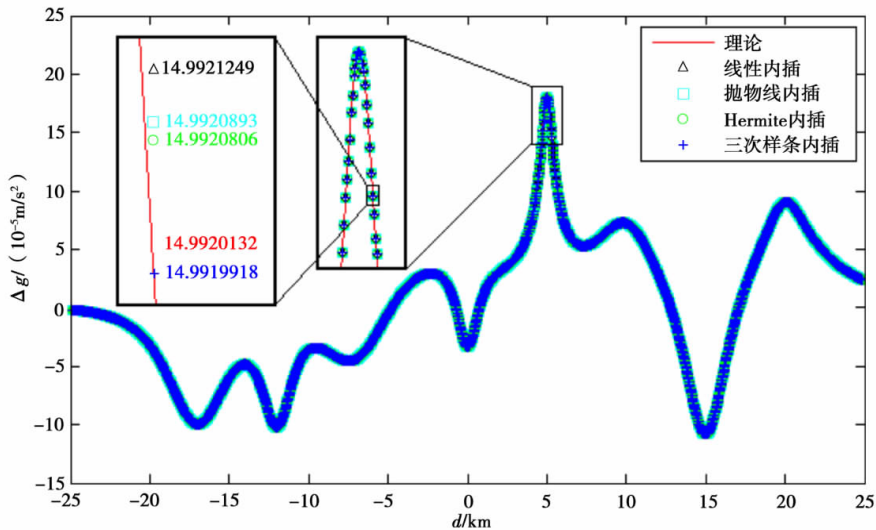


图 7 4 种插值结果与理论值的比较

表 1 四种插值方法误差对比

| 插值方法  | 均方误差                    | 插值方法       | 均方误差                    |
|-------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 线性插值  | $6.4135 \times 10^{-4}$ | Hermite 插值 | $1.2136 \times 10^{-5}$ |
| 抛物线插值 | $2.6491 \times 10^{-5}$ | 三次样条插值     | $3.3864 \times 10^{-6}$ |

果如表 1 所示。

对比表 1 中 4 种插值方法的精度,可发现线性插值精度最低,抛物线插值与 Hermite 插值比线性插值高一个数量级, Hermite 插值精度略高于抛物线插值,三次样条插值精度最高。对图 7 内一个典型区域进行放大,对一个代表性点进行放大显示,在该点上线性内插值、抛物线内插值、Hermite 内插值和三次样条内插值与理论值的差分别为 0.000 111 7、0.000 076 1、0.000 067 4、-0.000 021 4,差值的绝对值依次变小,反映了 4 种插值方法的精度依次提高。

目前航空重力生产得到的重力值精度在小数点后一位,内符合精度计算结果保留小数点后 3 位,在建立的模型中 4 种插值方法的重力值计算误差均小于  $10^{-4}$  数量级,所以 4 种插值方法均适用于对应点的重力值计算。权衡精度与计算效率,笔者选择将 Hermite 插值方法使用在对应点的重力值计算中。

4 软件实现

基于 Windows 系统利用 Visual C + + 6.0 编程语言开发了使用对应点插值方法的内符合精度计算软件,该软件要包括两大模块:计算模块,绘图模块。

计算模块打开重力异常数据文件,读取重复测试线数据,提取坐标和重力值,截取公共测线段,利用垂线法寻找对应点,并用 Hermite 插值法内插得到对应点的重力值计算内符合精度。该模块流程如图 8 所示。

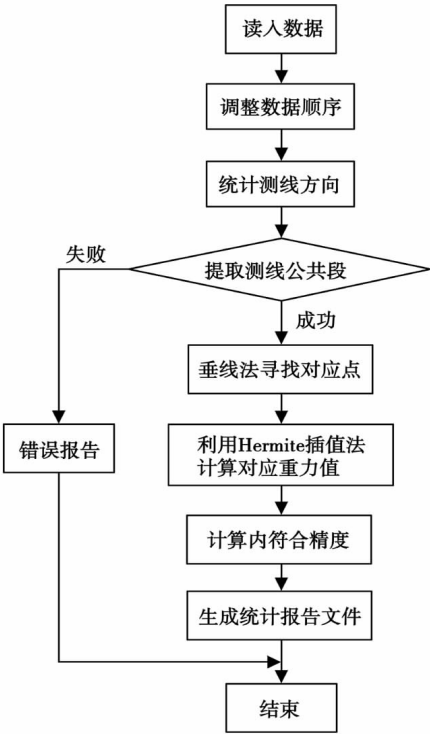


图 8 内符合精度计算流程

绘图模块利用计算模块计算得到的数据,将重复测试线绘制成调整前和调整后曲线图,更直观地了解重复测试线的曲线形态和符合程度。

5 应用

在航空重力测量中,对基准点内符合精度算法和点插值内符合精度算法做了许多对比试验,验证新算法的可行性。对图 1 中的两条测线利用对应点插值算法重新计算,得到如图 9 所示的结果。

可以发现垂线法寻找对应点的新计算方法基本消除了图 1 中 2 条曲线的偏移,内符合计算结果也

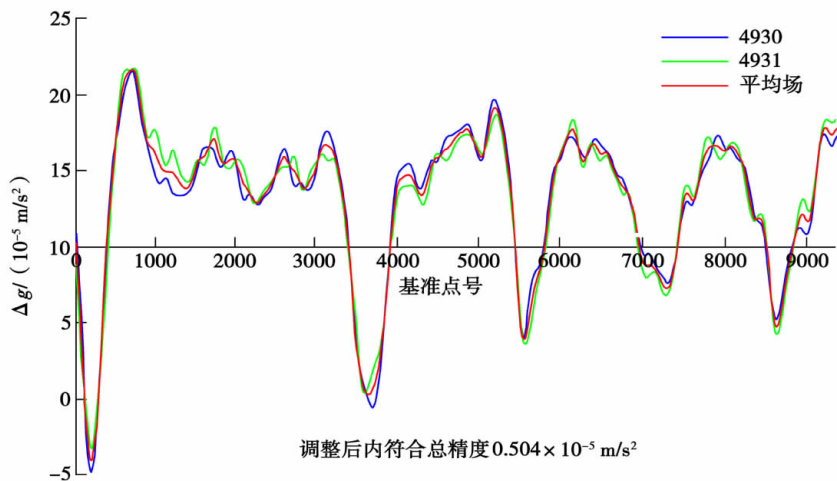


图9 对应点内符合精度算法得到的重复测线计算结果

小于图1得到的结果。

对风速影响较小的重复线,基准点对应内符合精度算法和对应点插值内符合精度算法的处理结果基本一致。

## 6 结论

(1)航空重力重复线对应点插值内符合精度计算方法,相比基准点对应内符合精度算法可以消除点位位置不对应引起的误差,更准确地评估航空重力仪的动态测量精度。

(2)寻找测线间对应点的方法还可应用于其他的测线绘图或测线比较方法中。

目前,对应点插值内符合精度计算方法已应用于我国航空重力测量的作业生产中,取得了很好的效果。

## 参考文献:

- [1] 郭志宏,熊盛青,周坚鑫,等.航空重力重复线测试数据质量评价方法研究[J].地球物理学报,2008(5).
- [2] Gabell A, Tuckett H, Olson D. The GT-1A mobile gravimeter[R]. ASEG 2004 Airborne Gravity Workshop, 2004.
- [3] Green A, Lane R. Estimating noise levels in AEM data[C]//ASEG 16th Geophysical Conference and Exhibition, 2003.
- [4] Bruton A M. Improving the accuracy and resolution of SINS/DGPS airborne gravimetry[D]. Department of Geomatics Engineering at University of Calgary, 2001.
- [5] 吕同富,康兆敏,方秀男.数值计算方法[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [6] 曾华霖.重力场与重力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [7] Hanselman D, Littlefield B. 精通 matlab 7[M].朱仁峰,译.北京:清华大学出版社,2006.
- [8] 姚领田,高守传. MFC 窗口程序设计[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

## THE METHOD FOR CALCULATION OF INTERNAL ACCORD ACCURACY IN AIRBORNE GRAVITY SURVEY

JIANG Zuo-xi<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, GUO Zhi-hong<sup>1</sup>

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 2. Economy and Management College, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to evaluate the performance index of the airborne gravity system, researchers usually use the method for calculating the internal accord accuracy of repeated flight lines. The authors have designed a method for precise calculation of the corresponding point of repeat lines, in which the gravity value is calculated by using interpolation. High precision internal accord accuracy could be achieved by using RMS calculation for gravity value of corresponding points on repeat lines.

**Key words:** airborne gravity survey; internal accord accuracy; repeat line; corresponding point; interpolation

**作者简介:**姜作喜(1981-),男,山东烟台人,工程师。2007年毕业于中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,获得地球探测与信息技术专业硕士学位,现主要从事地球物理探测技术、探测仪器以及计算机应用技术等领域的研究开发与应用。