

空中照相法校正飞机无线电罗差

郭志勇¹, 杜兴民², 宋博², 魏俊淦¹

(1. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:空中照相法校正飞机无线电罗差不存在场地影响,但在实施过程中,又引入了一些其它影响测量精度的因素。分析了各种可能引起测量误差的原因及其计算方法,通过数据处理,使误差得到了控制,改善了精度,为“空中照相法”的实用奠定了基础。

关键词:空中照相;罗差;误差分析

中图分类号:TN965 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)03-0076-04

飞机无线电罗差由飞机机体对电波的二次辐射造成,其规律符合二次曲线,大小由飞机机体的几何形状和无线电罗盘的电气参数等因素决定^[1~2]。罗差可以采取补偿措施,补偿后剩余的飞机无线电罗差叫剩余罗差(φ_r),定义为

$$\varphi_r = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1)$$

当飞机机体形状改变或无线电罗盘的电气参数变化时,剩余罗差将变化,因此,剩余罗差需定期校正。

校正剩余罗差的基本方法是,将飞机置于满足校正罗差的场地上,转动飞机到各个检查方位,获取 φ_1 和 φ_2 ,然后,计算出 φ_r 。当剩余罗差超差时,通过调整有关电路或机件给予修正^[2]。然而,某些特种飞机,所在机场不能满足校正罗差的要求,因此,对这种飞机来说,运用空中照相法校正无线电罗差,是一种可行的方法。

1 原理与方法

空中照相法校正飞机无线电罗差也是分别求 φ_1 和 φ_2 后,利用式(1)算出 φ_r 。具体做法是,选择好合适的机场和定向导航台,并在所选择的机场跑道中心点(照相点)布好十字地标线,供飞机空中照相识别。为削弱飞机姿态变化引入的误差,定向导航台距照相点应足够远,兼顾无线电罗盘定向灵敏度等因素时,定向导航台距照相点为 100km 左右为宜。同时选取本机场导航台为辅助导航台,构成如图 1 所示的 $\triangle ABC$ 。由 φ_1 (空中照相获得)、 φ_2 (测量计算获得)求出真实电台相对方位角。此外,在飞机通过跑道中心上空拍照 φ_1 的同时,利用飞机上的其它记录设备,记录该时刻航向指示器的指示角度,根据同时刻的 φ_1 、 φ_2 ,即可求得 φ_r 。

2 误差分析

2.1 求电台真实相对方位角(φ_r)的误差

2.1.1 飞机纵轴与跑道夹角误差 $\Delta\varphi_1$

产生 $\Delta\varphi_1$ 的因素有两个,一是相机安装时其纵轴与飞机纵轴不平行。二是对地面校准点照片的判读有误差。

(1) 相机安装误差 $\Delta\varphi_{a1}$

飞机纵轴地标线与照片纵向平分线的夹角,就是相机的安装误差 $\Delta\varphi_{a1}$,如图 2 所示。这是一固定误差,

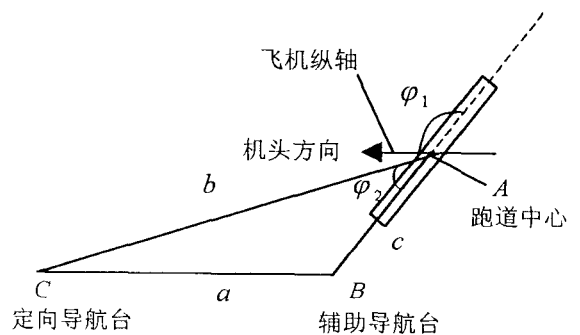


图1 测量三角形示意图

收稿日期:1999-12-17

基金项目:海航科研基金资助项目(1995HJJ66)

作者简介:郭志勇(1958-),男,河南叶县人,讲师,硕士,主要从事航空通信与导航研究。

精确测出后可进行修正。但仪器的测量精度(±4′)是随机误差,因此得 Δφ_{1a} = ±4′。

(2)对地面校准点照片的判读误差 Δφ_{1b}

Δφ_{1b}取决于对照片处理仪器的精度。运用现代仪器得 Δφ_{1b} = ±4′,于是有

$$\Delta\varphi_1 = \sqrt{\Delta\varphi_{1a}^2 + \Delta\varphi_{1b}^2} = \sqrt{4^2 + 4^2} = 5.66'$$

2.1.2 定向导航台与跑道夹角的误差 Δφ₂

φ₂由图 1 所示的测量三角形确定 φ₂ = arccos[(b² + c² - a²)/2bc]。三角形的三条边长存在测量误差 Δa、Δb、Δc 时,便产生误差 Δφ₂,由|Δa|、|Δb|、|Δc|产生的误差就是三元函数 φ₂ 的全增量的绝对值|Δφ₂|。由于|Δa|、|Δb|、|Δc|都很小,由此可以用 dφ₂ 来近似代替 Δφ₂,于是得

$$|\Delta\varphi_2| = |d\varphi_2| = \left| \frac{\partial\varphi_2}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial\varphi_2}{\partial b}\Delta b + \frac{\partial\varphi_2}{\partial c}\Delta c \right| \leq \left| \frac{\partial\varphi_2}{\partial a} \right| \cdot |\Delta a| + \left| \frac{\partial\varphi_2}{\partial b} \right| \cdot |\Delta b| + \left| \frac{\partial\varphi_2}{\partial c} \right| \cdot |\Delta c| = \frac{1}{\sqrt{1 - [(b^2 + c^2 - a^2)/2bc]^2}} \times \left(\frac{a}{bc}|\Delta a| + \frac{b^2 - c^2 + a^2}{2b^2c}|\Delta b| + \frac{b^2 - c^2 - a^2}{2bc^2}|\Delta c| \right)$$

其中,c 由修建机场时准确给出,其它两边可通过 GPS 接收机测量出△ABC 三顶点的经纬度,再转换为距离。

根据误差理论可知,测量次数越多,其统计值越接近真值,在所需概率下的置信区间越小。由贝塞尔公式可知,多次测量平均值的标准偏差估计值^[3]为 $\hat{\delta}(\bar{x}) = \hat{\delta}(x) / \sqrt{n}$ 通过 GPS 接收机测量 1 280 次,得到定位径向误差的标准偏差估计值为 $\hat{\delta}(x) = 20.59\text{m}$ 。

在一定置信概率下的置信区间为 $P = \pm C \cdot \hat{\delta}(\bar{x})$,取置信概率为 99% 时,经查表求得 C = 2.60。因此,当对△ABC 三顶点(A、B、C)的测量次数分别为 320、320 和 200 次的条件下,定位的径向误差^[4~5]分别为

$$\Delta A = \pm [C \cdot \hat{\delta}(\bar{x}_A)] = \pm C \cdot \frac{\hat{\delta}(x)}{\sqrt{n}} = \pm 2.60 \times \frac{20.59}{\sqrt{320}} = \pm 2.99\text{m}, \quad \Delta B = \Delta A = 2.99\text{m},$$

$$\Delta C = \pm [C \cdot \hat{\delta}(\bar{x}_C)] = \pm C \cdot \frac{\hat{\delta}(x)}{\sqrt{n}} = \pm 2.60 \times \frac{20.59}{\sqrt{200}} = \pm 3.79\text{m}$$

根据对△ABC 三顶点坐标测量的均值,运用专业计算软件转换成三边的长度,由于不存在计算方法误差,因此三角形边长误差主要由 GPS 接收机的定位径向误差决定,最严重的情况为

$$|\Delta a| = |\Delta B| + |\Delta C| = 2.99\text{m} + 3.79\text{m} = 6.78\text{m}$$

$$|\Delta b| = |\Delta A| + |\Delta C| = 2.99\text{m} + 3.79\text{m} = 6.78\text{m}$$

将转换出的数据带入 Δφ₂ 公式得

$$|\Delta\varphi_2| \leq \frac{1}{\sqrt{1 - [(b^2 + c^2 - a^2)/2bc]^2}} \times \left(\frac{a}{bc}|\Delta a| + \frac{b^2 - c^2 + a^2}{2b^2c}|\Delta b| + \frac{b^2 - c^2 - a^2}{2bc^2}|\Delta c| \right) = 10.36'$$

2.1.3 飞机空中照相时偏离照相校准点产生的误差 Δφ₃

飞机空中照相时,如果偏离照相点正上空,则照片中心点与校准点将不能重合,设照片中心点为 A',则 Δφ₃ 可由照片中心点(A')、校准点(A)和定向导航台(C)构成的△A'AC 求得,如图 3 所示,其中 S 表示校准点偏离照片中心的距离,已知跑道宽度为 80m,据此,由照片可直接确定 S 的数值,从照片的处理结果来看,和飞行员的经验基本吻合,最大为 200m。当 S 一定,β = 90° 时,Δφ₃ 最大,于是可求得 φ_{3max} = arcsin(s/b) = arcsin(200/10 8652) = 6.33'

2.1.4 飞机姿态不稳定产生的误差 Δφ₄

飞行姿态发生变化,例如空中照相时左右倾斜或前后俯仰,将导

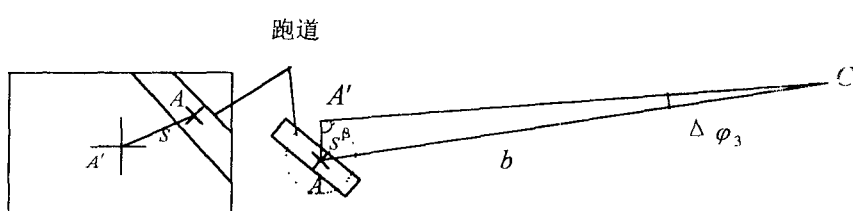


图 3 飞机未在照相点上空照相时示意图

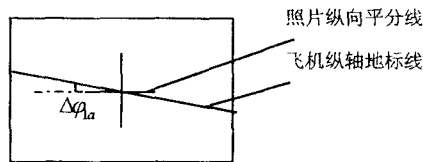


图 2 相机安装误差示意图

致飞机在地面的投影偏离照片中心,产生误差 $\Delta\varphi_4$,根据飞行员的飞行经验,飞行时,左右倾斜和前后俯仰能保持在 5° 以内,所以分析时取最大值为 5° 。当飞机通过照相校准点上空进行拍照时,如果飞机左右倾斜 5° ,则飞机在地面的实际照相点为 A' ,将偏离照相校准点 l 米,如图4所示。从图中不难求得 $l = \pm H_0 \tan 5^\circ$ 飞行高度

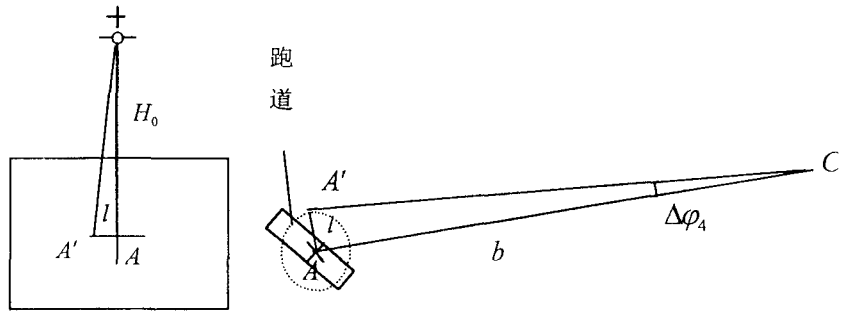


图4 飞机姿态变化时照相示意图

$H_0 = 1\ 000\text{m}$ 时, $l = \pm 1\ 000 \times \tan 5^\circ = \pm 87.49\text{m}$ 。故由 l 引起的 $\Delta\varphi_{4a}$ 最大值为, $\Delta\varphi_{4am} = \pm \arctan(l/b)$, b 为定向导航台到照相校准点之间的距离(108 652m),将其代入得 $\Delta\varphi_{4am} = \pm \arctan(87.49/108\ 652) = \pm 2.77'$,同理可求,前后俯仰 5° 时产生的最大角度误差为 $\Delta\varphi_{4bm} = \pm \arctan(87.49/108\ 652) = \pm 2.77'$,当飞机左右倾斜和前后俯仰同时为 5° 时产生的最大角度误差为 $\Delta\varphi_{4cm} = \pm \arctan(\sqrt{2} \times 87.49/108\ 652) = \pm 3.91'$ 。考虑最严重的情况,应取 $\Delta\varphi_{4cm} = \pm \arctan(\sqrt{2} \times 87.49/108\ 652) = \pm 3.91'$ 。

2.2 求航向指示器的指示误差 $\Delta\varphi_5$

影响航向指示器的指示误差主要有观测指示值与空中照相时的同步误差、指示值的判读误差以及在有指示摆动情况下,读取指示值的方法误差等因素构成。

2.2.1 校准点照片与指示值录像在时间上不同引入的误差 $\Delta\varphi_5$

在采用时钟同步的情况下,同步时间的不确定性小于1s,当飞行速度为300km/h,飞机在1s内的飞行距离为83.33m,由此形成的最大误差为 $\Delta\varphi_5 = \pm \arctan(83.33/108\ 652) = \pm 2.64'$ 。

2.2.2 指示值的判读误差 $\Delta\varphi_6$

航向指示器指示的记录通过摄像机完成,为提高判读精度,应在大屏幕投影电视上观测。我们选用的大屏幕投影机,投影画面为 $4.20\text{m} \times 2.80\text{m}$,经分析,指示值判读误差为 $\Delta\varphi_6 = 2 \times 600/180 = 6.67'$ 。

2.2.3 平均线读数误差 $\Delta\varphi_7$

前已述及,空中照相时飞机距定向导航台较远,因此,无线电罗盘指针可能出现摆动,为了消除因摆动现象产生的指示误差,读取数据时,应采取“扣除航向变化后的平均线法”,通过分析,采用该方法引起的误差小于 $\pm 0.1^\circ$,即 $\Delta\varphi_7 < \pm 6.00'$ 。

2.3 综合误差

综上所述,在获取 φ_1 和 φ_2 的过程中,共有7种因素产生 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$,根据均方根合成法^[3]

$$\Delta\varphi = \pm \sqrt{\Delta\varphi_1^2 + \Delta\varphi_2^2 + \Delta\varphi_3^2 + \Delta\varphi_4^2 + \Delta\varphi_5^2 + \Delta\varphi_6^2 + \Delta\varphi_7^2} = \pm \sqrt{5.66^2 + 10.36^2 + 6.33^2 + 3.91^2 + 2.64^2 + 6.67^2 + 6.00^2} = \pm 16.80'$$

考虑到不能确知各分项误差的分布规律,上式应再乘以1.2的系数,最终得到空中照相法测定无线电罗差的总不确定度为 $\Delta\varphi_{\Sigma} = 1.2 \times \Delta\varphi = \pm 1.2 \times 16.80' = \pm 20.16'$ 。

3 结束语

(1)空中照相法校罗差是在1 000m上空进行,不存在场地误差。

(2)影响空中照相法罗差测量精度的因素很多,由于在实施过程中采用了比较先进的仪器、技术和方法,测量精度高。

(3)空中照相法校罗差较地面校罗差复杂,在部队实施时,应做好充分的技术准备和协调工作。

参 考 文 献

- [1] 张忠兴,李晓明,张景伟,等. 无线电导航理论与系统. 西安:陕西科学技术出版社,1998.
- [2] 魏光顺,郑玉簋,张欲敏. 无线电导航原理. 南京:东南大学出版社,1989.
- [3] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,1994.
- [4] 钱天爵,瞿学林. GPS全球定位系统及其应用[M]. 北京:海潮出版社,1993.
- [5] 言中,丁子明. 卫星无线电导航. 北京:国防工业出版社,1989.

Study and Error Analysis of Calibrating Airplane Radio Compass Error with Aerophotograph

GUO Zhi-yong¹, DU Xing-min², SONG Bo², WEI Jun-gan¹

(1. Qingdao Branch Institute of Navy Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China; 2. The Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710038, China)

Abstract: There is no influence of aerodrome on the calibration of airplane radio compass error with aerophotograph, but it causes some effects on measurement accuracy. In this paper, not only the causation of the error but also the calculation methods are analysed in detail. Besides, the precision is improved via appropriate data processing and that is the solid foundation of the application of aerophotograph.

Key words: aerophotograph; compass error; error analysis