

doi: 10.7690/bgzdh.2014.03.001

速高比对航空相机的影响分析

范秀英, 赵曼, 郭霏, 王杰

(空军航空大学航空航天情报系, 长春 130022)

摘要: 为满足航空相机成像时影像重叠率和动态分辨率的需要, 运用公式推导法分析了速高比对照相间隔和影像位移的影响。从垂直成像和倾斜成像方式的照相间隔、影像位移与速高比的定量计算公式入手, 推导出了直接和间接获取速高比比值的绝对误差和相对误差的传递公式。结果表明: 根据获取原理分析速高比(速度、高度)误差, 运用误差传递公式计算, 就可以判定速高比对照相间隔和影像位移的影响是否满足航空相机的使用要求。

关键词: 航空相机; 速高比; 照相间隔; 像移; 误差分析

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Influence Analysis of Velocity to Height Ratio on Aerial Camera

Fan Xiuying, Zhao Man, Guo Fei, Wang Jie

(Department of Aerospace Information, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: For the requirement of velocity to height ratio(W/H) influence on image overlap rate and dynamic resolution of aviation camera imaging, the influence of velocity to height ratio on time span of photographing and image displacement were analyzed by the formula derivation. Starting from the vertical and oblique imaging quantitative imaging camera interval, image displacement and speed altitude ratio formula, derivate transfer formula of absolute error and relative error of velocity to height ratio by direct and indirect access. The results show that the error analysis of W/H (velocity, height) according to the principle of access and calculation with the error transfer formula can determine whether W/H influence on the time span of photographing and image displacement meet the demand of use of the aerial camera.

Keywords: aerial camera; velocity to height ratio; time span of photographing; image displacement; error analysis

0 引言

航空相机安装在飞机等运动平台上, 与一般地面相机的主要区别在于: 航空相机在工作过程中始终处于运动状态。飞机的运动状态包括前向飞行、俯仰、偏航和横滚等运动^[1-4]。飞机运动以前向飞行运动为主, 与之相关的参数有地速、真高度, 二者的比值即速高比, 更能准确描述相机相对于地面景物的运动情况, 因而其已成为航空相机的一项技术指标, 对航空相机的照相间隔、影像位移大小起决定作用。为了保证不发生目标遗漏或者满足立体判读的需要, 以及提高航空相机的动态分辨率, 相机系统必须获取准确的、实时的速高比值。速高比的获取方式关系到其误差的大小, 从而影响到照相间隔和影像位移的控制精度, 因此分析速高比(速度、高度)误差对它们的影响具有重要意义; 为此, 笔者推导出了绝对误差和相对误差的传递公式。

1 速高比

速高比是指成像过程中相机相对于被摄景物的移动线速度与成像高度之比, 是所拍摄景物的影像在相机焦平面上移动的角速度^[5-7]。航空相机安装在

飞机上, 相机整体相对于飞机不动, 相机相对于被摄景物的移动线速度, 也就是飞机与地面的相对运动的速度, 称为飞机的地速, 通常用 W 表示, 单位为 km/h, 飞机的地速等于空速 V 和风速 v 的矢量合成, 即 $W = V + v$ 。

成像高度是光学系统的物距, 即物空间的物平面到光学系统主点的距离, 即以飞机正下方地平面为基准至飞机的垂直距离, 就是飞机的真高度, 通常用 H 表示, 单位为 km。

因此, 速高比就是飞机的地速与真高度之比, 单位为 $(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})/\text{km}$, 这种表示方法直观, 在早期的航空相机的指标中都是这样表述的。从速高比的定义可知它在数值上等于像点在焦平面上移动的角速度, 因而通常用 rad/min 或 mrad/s 为单位。

2 速高比获取方法

要保证航空相机可靠地工作, 必须将速高比 W/H 作为一个运算量引入航空相机的运算和控制电路中。根据引入过程是否需要人为参与分为 2 种方法: 手动装订法和自动引入法。自动引入法又可以分为光学测量法和数据总线通信法。其中, 自动引

收稿日期: 2013-10-30; 修回日期: 2013-11-21

作者简介: 范秀英(1972—), 女, 黑龙江人, 硕士, 副教授, 从事航空照相设备的教学和科学研究。

入法是光电技术、通信技术及信息技术在装备发展上具体应用的体现,是现代航空装备发展的必然趋势。速高比获取方法按原理可以分为:手动装订法、光学测量法和数据总线通信法。

2.1 手动装订法

手动装订法分为 2 种:一种是直接装订 W/H 法,另一种是分别装订 W 、 H 法。

2.1.1 直接装订 W/H 法

直接装订法是飞行前根据侦察任务规划首先运算速高比值,再通过操纵器面板上的速高比旋钮装订^[8]。通常采用的是电位计模拟法,速高比值变化范围内的每一数值与电位计的电刷位置相对应。这样调节速高比旋钮也就改变了电位计的等效阻值,也就改变了两端输出电压。

2.1.2 分别装订 W 、 H 法

分别装订法是分别引入飞机的地速、真高度数值,即将 2 个参数分别通过操纵器面板上的速度和高度旋钮装订,运用电位计、二极管、分频器等电路元件构造模拟电路或数字电路来实现对地速、真高度数值的引入,并完成比值的计算^[8]。

2.2 光学测量法

光学测量法就是运用基本的光学元器件,通过测定反映像点运动速度 v_i 的相关量引入速高比 W/H ,包括光栅法、扫描相关法、外差法、光程差法等^[1]。

2.2.1 光栅法

光栅法也叫平行狭缝法或空间滤波法^[1,8]。由光栅构成的速高比率计,在物镜焦面处设置了有明暗相间条纹的调制光栅,光栅明条暗条宽度相等,条纹与飞行方向垂直,飞机飞行中,地物影像即横越明暗条纹而移动,其速度为 $v_i = f' \frac{W}{H}$ 。式中 f' 为速高比计物镜的焦距。公式表明: v_i 与速高比 W/H 成正比,即 v_i 反映了飞机的速高比。明暗条纹交替入射到光电探测器上,经光电转换电路后输出具有矩形波形的电压信号。若光栅周期为 b ,其频率 $f_i = \frac{f'}{b} \cdot \frac{W}{H}$,即输出信号的频率 f_i ,反映了飞机的速高比。若需要以电压信号作为控制信号,要经过频率-电压变换电路处理,转换为直流电压信号输出。

2.2.2 扫描相关法

扫描相关法用光电探测器的输出信号 $f(t)$ 作为相关器的输入信号, $f(t)$ 与延时一个扫描周期 T_a 后的信号 $f(t-T_a)$ 进行相关运算后得到自相关函数 $R(\tau)$ 。而通过 $R(\tau)$ 可得到像速的运动关系式。

2.2.3 外差法

外差法是用来测量运动光学图像或者稳定图像像速的方法。采用电子手段使装置产生相对空间滤波器明显的平动速度,而不需要空间滤波器真正地进行物理移动。带有速度信息的图像经由频率发生器,调制器、加法器、相位速度检测装置等运算器件后,输出的信号中包含被检测图像像速和表征图像运动速度方向的参量。

2.2.4 光程差法

光程差法也叫做分光法。这种方法不需要确定测量装置与景物之间的距离。它采用一对速高比传感器,将其放置距离景物不同的位置,使其存在光程差。通过运算像在像平面上运动的角速度,得到两镜头像面上移动的像速度,进一步运算比较可以得到像运动速度。

2.3 数据总线通信法

数据总线通信法,就是首先由侦察任务管理系统通过飞机综合航空电子系统获取飞机系统提供的速度、高度信息,然后再通过数据总线传输给航空相机。侦察任务处理机从火控系统获得无线电高度信息,同时也从大气机获取气压高度信息(相对于海平面);在 1 500 m 以下,采用无线电高度表高度作为飞机当前真高度发送给航空相机;在 1 500 m 以上,则采用绝对气压高度减去当地地面气压高度以获得当前的飞机真高度并发送给航空相机。

在以上讨论的速高比获取方法中,按是否是直接获取速高比的比值又可以分为:直接获取比值法和间接获取比值法。直接获取比值法包括直接装订 W/H 法和各种光学测量法,间接获取比值法包括分别装订 W 、 H 法及数据总线通信法,分别引入 W 、 H 后,再通过比值计算电路或微处理系统输出速高比信号。无论通过哪种方式获取速高比值,最后都是以模拟电压或频率信号的形式输出,再引入到航空相机的照相间隔机构和像移补偿系统的控制电路中。但比值是否直接获取将关系到绝对误差和相对误差的计算方法不同。

3 速高比对照相间隔的影响

3.1 照相间隔与速高比的定量关系

航空成像时，相邻两幅照片上的重叠区域的边长占整幅照片边长的百分率，即为影像的重叠率。重叠率有纵向和横向重叠率之分。通常地，纵向重叠率用 $P\%$ 来表示；横向重叠率用 $Q\%$ 来表示。单航线照相时，只涉及纵向重叠率。重叠率是保证照片镶嵌、立体判读和测图的一个重要条件^[9]。航空相机连续 2 次曝光所需间隔的时间称为照相间隔。照相间隔是保证获得预定照片重叠率的重要参数。

航空相机在空中照相时，按主光轴是否垂直大地水平面，分为垂直成像和倾斜成像。

3.1.1 垂直成像

在单条航线连续垂直照相时，照相间隔 T 与 W/H 的关系为

$$T = \frac{l(1-P\%) \cdot H}{f' \cdot W} \quad (1)$$

式中： l 为像幅尺寸； $P\%$ 为重叠率； f' 为相机光学系统的焦距。

由式 (1) 可看出参数 W/H 对照相间隔时间 T 的影响：照相间隔 T 反比于速高比 W/H 。

3.1.2 倾斜成像

在单条航线倾斜照相时，当相机光轴偏离铅垂线的倾角为 θ 时，物距为 $H/\cos\theta$ ，所以照相间隔 T 计算公式修订为

$$T = \frac{l(1-P\%) \cdot H}{f' \cdot W \cos\theta} \quad (2)$$

3.2 照相间隔误差分析

3.2.1 垂直成像

1) 绝对误差。

① 间接获取比值法。

采用间接获取比值法，在式 (1) 中， H 、 W 为自变量， T 为因变量。

T 的全微分为：

$$dT = \frac{l(1-P\%) \cdot WdH - HdW}{f' \cdot W^2} \quad (3)$$

用 ΔT 代替 dT ，用 ΔW 、 ΔH 分别代替 dW 、 dH ，则可得到照相间隔的绝对误差公式。

对于某一相机，其像面尺寸 l 、焦距 f' 为固定值；对于特定侦察任务 $P\%$ 也是定值，则 $\frac{l(1-P\%)}{f'}$ 为

定值，为推导方便令 $c = \frac{l(1-P\%)}{f'}$ ，绝对误差公式可以化简为：

$$\Delta T = c \cdot \frac{W\Delta H - H\Delta W}{W^2} \quad (4)$$

所以， W 的绝对误差传递系数为

$$C_{\Delta W} = -\frac{cH}{W^2} \quad (5)$$

H 的绝对误差传递系数为：

$$C_{\Delta H} = \frac{c}{W} \quad (6)$$

② 直接获取比值法

若采用直接获取 W/H 的方法，可以将 W/H 视为一个自变量，同理推导，绝对误差为

$$\Delta T = -c \cdot \frac{\Delta\left(\frac{W}{H}\right)}{\left(\frac{W}{H}\right)^2} = -c \left(\frac{H}{W}\right)^2 \Delta\left(\frac{W}{H}\right) \quad (7)$$

2) 相对误差。

① 间接获取比值法。

根据误差传递系数理论^[10]可知， W 对 T 的相对误差传递系数为：

$$C_{\gamma_w} = W \cdot \frac{\partial \ln T}{\partial W} = \frac{W}{T} \left(-\frac{cH}{W^2}\right) = -1 \quad (8)$$

W 对 T 的相对误差分量为：

$$\gamma_w = -\frac{\Delta W}{W} \quad (9)$$

H 对 T 的相对误差传递系数为：

$$C_{\gamma_H} = H \cdot \frac{\partial \ln T}{\partial H} = \frac{H}{T} \cdot \frac{c}{W} = 1 \quad (10)$$

H 对 T 的相对误差分量为：

$$\gamma_H = \frac{\Delta H}{H} \quad (11)$$

所以， T 的相对误差为：

$$\gamma_T = \gamma_w + \gamma_H = -\frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta H}{H} \quad (12)$$

② 直接获取比值法。

若采用直接获取 W/H 的方法，可以将其 W/H 视为一个自变量，同理推导，相对误差为：

$$\gamma_T = d \ln T = \frac{1}{T} dT = -\frac{1}{W/H} \Delta\left(\frac{W}{H}\right) = -\frac{H}{W} \Delta\left(\frac{W}{H}\right) \quad (13)$$

3.2.2 倾斜成像

在倾斜成像时，由于物距为 $H/\cos\theta$ ，而对于特定的侦察任务 θ 不变，可视为常量，因此可定义常数 $c_\theta = \frac{l(1-P\%)}{f' \cos\theta}$ ，这样在推导绝对误差和相对误差

用 c_θ 代替 c 即可，具体推导过程不再赘述，结果表明：绝对误差公式形式与垂直成像时完全相同，相对误差公式不变。

4 速高比对影像位移的影响

4.1 影像位移的含义

所谓影像位移，就是指由于飞机和地面相对运动，使航空相机在成像过程中(即曝光的瞬间)，地物的像点在感光胶片或者光电探测器上相应地移动，反映为影像变得模糊，降低了成像质量。人眼的分辨率^[11]在正常的照明的条件下大约为 1'(即 60")。以明视距离 250 mm 计算，人眼能够分辨的最近距离约为 0.072 7 mm。如果 2 个像点之间的距离小于这个数值，那么人的肉眼直接观察这 2 个像点，就认为是同一个点。对于同一景物的像点，如果像移的大小超过人眼的分辨距离，就导致影像模糊的感觉。

飞机的各种运动都会产生影像位移，只有前向飞行运动引起的影像位移与 W/H 有关，所以笔者只讨论前向影像位移。

4.2 影像位移速度与速高比的定量关系

4.2.1 垂直成像

垂直成像时，前向影像位移速度大小^[1]为：

$$v_i = f' \frac{W}{H} \tag{14}$$

在曝光时间 t 内，像移量为 $\Delta l = ft \frac{W}{H}$ 。

4.2.2 倾斜成像

倾斜成像时，由于航空相机光学系统的主光轴不再与大地水平面垂直，所以像移速度的公式需要进一步校正。由飞机前向飞行运动引起的影像位移速度^[12]为：

$$v_i = f' \cos\theta \frac{W}{H} \tag{15}$$

像移量为 $\Delta l = ft \cos\theta \frac{W}{H}$ 。

4.3 影像位移误差分析

4.3.1 垂直成像

1) 绝对误差。

① 间接获取比值法。

采用间接获取比值法，式 (14) 中 W 、 H 作为自变量， v_i 作为因变量。由 v_i 对 W 、 H 的全微分可以

求出 W 、 H 误差引起的影像位移速度误差为：

$$\Delta v_i = \frac{\partial v_i}{\partial W} \Delta W + \frac{\partial v_i}{\partial H} \Delta H = \frac{f'}{H} \Delta W - \frac{f'W}{H^2} \Delta H \tag{16}$$

W 对 v_i 的绝对误差传递系数为

$$C_{\Delta W} = \frac{f'}{H} \tag{17}$$

H 对 v_i 的绝对误差传递系数为

$$C_{\Delta H} = -\frac{f'W}{H^2} \tag{18}$$

② 直接获取比值法。

采用间接获取比值法，式 (14) 中 W/H 作为自变量， v_i 作为因变量。由 v_i 对 W/H 的微分可以求出 W/H 误差引起的影像位移速度绝对误差为：

$$\Delta v_i = f' \Delta \left(\frac{W}{H} \right) \tag{19}$$

2) 相对误差。

① 间接获取比值法。

W 对 v_i 的相对误差传递系数为

$$C_{\gamma_w} = W \frac{\partial \ln v_i}{\partial W} = \frac{W}{v_i} \cdot \frac{f'}{H} = 1 \tag{20}$$

H 对 v_i 的相对误差传递系数为

$$C_{\gamma_H} = H \frac{\partial \ln v_i}{\partial H} = \frac{H}{v_i} \cdot \left(-\frac{f'W}{H^2} \right) = -1 \tag{21}$$

所以 v_i 的相对误差为：

$$\gamma_{v_i} = \gamma_w + \gamma_H = \frac{\Delta W}{W} - \frac{\Delta H}{H} \tag{22}$$

② 直接获取比值法。

由 v_i 对 W/H 的微分可以求出 W/H 误差引起的影像位移速度相对误差为：

$$\gamma_{v_i} = d \ln v_i = \frac{f'}{v_i} \Delta \left(\frac{W}{H} \right) = \frac{H}{W} \Delta \left(\frac{W}{H} \right) \tag{23}$$

4.3.2 倾斜成像

同理可求出倾斜成像时的误差传递公式。结果表明：绝对误差公式多了个修正因子 $\cos\theta$ ，相对误差公式不变。

5 结论

速高比作为照相间隔机构和像移补偿系统的输入量，是保证不发生目标遗漏或立体判读，以及提高航空相机动态分辨率的需要。笔者推导的误差传递公式可以定量计算照相间隔 T 、像移速度 v_i 的绝对误差和相对误差大小，再结合重叠率和动态分辨率判定方法就可知是否满足航空相机使用需求。