

·测试、试验与仿真·

## 高速摄像在起落架载荷测试中的应用

左益宏,何红丽,冯巧宁,田伟峰

(中国飞行试验研究院,陕西 西安 710089)

**摘要:**根据起落架载荷分析对轨迹测量的需求,综合利用光电经纬仪(EOMS)、GPS(global position system)、全站仪(TPS110)等,设计了一套安全、可靠的测试及监控方案。从摄影测量和投影几何的角度出发,提出了一种基于序列影像的飞行器高精度轨迹求取方法、相机的标定方法和精度检测的方法,经过分析证明了该方法测量精度优于6 cm,所设计系统已经应用于飞行试验过程中,获得了很好的应用效果。

**关键词:**起落架;载荷;高速摄像系统;飞行试验

**中图分类号:**TN911.73;V217+.32;V219

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-1255(2011)03-0082-03

## Application of High Speed Video in Load Test for Aircraft Landing Gear

ZUO Yi-hong, HE Hong-li, FENG Qiao-ning, TIAN Wei-feng

(Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** According to the requirements of the trajectory measurement in the load test for aircraft landing gear, a safe and reliable trajectory test and the monitor scheme are designed by using electro-optic theodolite (EOMS), GPS (global position system) and total station positioning system (TPS110) etc. The methods of the aircraft trajectory, camera calibration and precision detection based on the image sequence are proposed, from the view of the photogrammetry and projective geometry. The analysis proves that the method of the measurement precision is better than 6 cm. The designed system has been used in flight test and has got a good application.

**Key words:** landing gear; load; high speed video system; flight test

起落架是飞机最重要的承力部件之一,用于飞机起飞、着陆、滑跑及地面停放,其强度是否满足设计要求将直接关系到飞机的顺利起降和飞行安全<sup>[1]</sup>。搞清楚飞机在不同运动状态下作用在起落架上的外载荷时间历程可以发现其结构设计缺陷<sup>[2,3]</sup>,尤其是飞机在着陆过程中,由于冲击地面,会产生较大的撞击载荷。因此在飞机设计定型试飞中,需要通过多种手段测量飞机在飞行过程的运动参数,如时间、飞机离地高度、飞机着陆姿态角、着陆下沉速度、地面滑行速度、地面转弯半径、地面转弯速度、飞机主轮触地瞬间时刻及触地时的运动速度等参数,通过对运动参数的分析和计算得出起落架在

某种状态下所承受的力,从而为起落架的设计定型和寿命评估提供依据。

### 1 测量方法

根据载荷测试需要,测量包含正常质量着陆、最大速度着陆、直线滑行、最大转弯半径滑行等多个状态。为了达到测试需求,依照起落架载荷试验的特点及测试要求,设计了一套保精度的测试、监控方案及处理方法。方案主要涉及机载与地面时间的统一、设备的布设、各测量设备覆盖的区域,着陆点的准确时刻,多种测量设备的协调一致工作

收稿日期:2011-04-22

基金项目:航空科学基金项目(03113003);航空科学基金项目(2008ZD30008)

作者简介:左益宏(1973-),男,陕西长安人,硕士,高级工程师,主要从事飞机性能、强度技术研究。

等,确保系统工作正常,测量数据可靠有效。

为了获得整个着陆区间的测量数据,采用机载 GPS、光电经纬仪进行空中及中近程飞行段轨迹测量。由于着陆段飞机状态变化比较大,且测量精度要求高,为了确保获得地面准确的着地时刻与测量精度,选用 V5 高速摄像机(分辨率为  $1\ 024 \times 1\ 024$ ) 进行测量及解算;机载和地面的全部测量设备配置了 GPS 时统,确保整个系统的时间一致。在地面构建了一个局域航迹测量网,光电经纬仪与机载 GPS 同时获得飞机的位置信息,通过光电经纬仪与 GPS 信息融合获得可靠的飞机目标定位数据,一旦飞机进入高速摄像机的测量区域,自动触发高速摄像机进行影像的高速获取及数据转存。该测量方案充分利用了机载 GPS 跟踪范围大,高速摄像机无接触的测量优势,以及高速摄影机高帧频特点,获取飞机着陆时刻段的飞行参数。多种测量模式互为补充,得到精确完整的测量数据。该测量系统主要组成如图 1 所示。

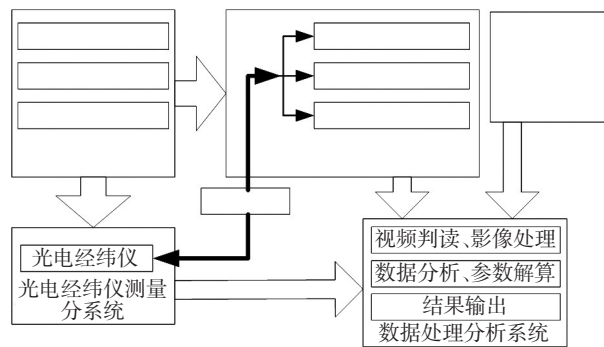


图1 测量系统组成框图

高速摄影测量分系统。该系统由多套数字高速摄影机组成,可获得高清晰、高帧频的图像,主要用来测量飞机着陆时刻及地面滑跑段运动参数。地面校准分系统。包括全站仪、大地型 GPS、校准架、校准标等,主要用于对数字高速摄影机和光电经纬仪的测量校准,并通过这些系统的测量实现各测量坐标系的统一。光电经纬仪测量分系统。光电经纬仪是集光、机、电、计算机等多种技术为一体的、先进的高精度自动跟踪测量系统。它具有自动测角和测距的功能,既可以单站极坐标定位测量,也可以采用两站空间交会定位测量。主要用来完成飞机起飞、着陆和地面滑行段的测量;可获取载机一系列运动参数及视频图像。载机参数采集和记录分系统。用于完成飞机状态参数、试验参数的

采集、记录等。数据处理分析系统,分为实时处理系统与事后数据处理分析系统。实时处理系统实时接收光电经纬仪及 GPS 数据,进行解算获得实时飞行状态下目标的位置,对其数据进行外推处理可以引导光电经纬仪,同时根据飞行方案,利用提前设定的触发判据,逐次触发高速摄像机进行实时拍摄。事后数据处理分析系统包括计算机、视频判读、数据处理、数据分析等,主要为了获取高精度的结果数据。

## 2 摄影测量原理及解算方法

近景摄影测量是通过是非接触性量测手段,对近距离目标确定其外形、形态和几何位置的技术,不触及被测物体,信息容量高,信息易存储和更新,并且精度高。测量过程主要分为相机检校、外部图像数据获取和影像数据判读及轨迹姿态处理 3 个阶段。相机检校采用控制场检校法;外部图像数据获取包括控制点联测和影像获取,控制点联测可采用常规控制测量手段;数据处理包括数字影像预处理和判读、摄影测量数学解析。

利用数字高速摄影机测量飞机的轨迹、速度、姿态等参数,主要利用共线方程进行解算。由于飞机着陆时刻段主要在跑道理想着陆点附近,采用多台摄影机平行布站接力测量方式,测量区域达到 500 m。同时为了保证测量精度和计算方便,合理架设摄影机,采用正直摄影进行测量。并与光电经纬仪测量的定位数据进行联合求解,可以进一步提高测量精度。

### 2.1 高速摄影机的标定

摄像机标定是摄影测量系统中的一项最基本、最重要的工作<sup>[4-6]</sup>。摄像机标定主要内容:摄像机内部参数:焦距 $f$ ,光心坐标 $(x_0, y_0)$ ;摄像机外部参数:旋转矩阵  $\mathbf{R} = \{a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3, 4, 5\}$ , 平移矩阵  $\mathbf{T} (X_S, Y_S, Z_S)$ ;一般物距是焦距的几倍甚至几十倍,这将导致摄像系统内外参数或图像上目标像点位置的任一点微小误差在测量结果中都可能被放大几十倍。因此,要达到高精度的测量,必须要对摄像系统进行高精度的标定。在标定过程中借助于一定数量的物方控制点,采用基于三维直接线性变换同时求解外方位元素和内方位元素。先布设设置控制场,严禁所有控制点布设在同一平面内,否则会引起解的不稳定,

应布设足够数量(要求布设有6个以上的控制点)的三维控制点标志,控制点应均匀分布,避免各控制点靠近某一平面,并且在3个坐标方向的分布上均有足够的延伸,使它们环绕被测目标。依靠全站速测仪进行物方标示点的测量。然后利用直接线形变(DLT)方法进行内外参数求解。

## 2.2 基于共线方程的联合求解定位方法

摄影机内方位元素 $(x_0, y_0, f)$ 可以通过摄影机检校得到,而外方位元素 $(X_S, Y_S, Z_S, \phi, \omega, \kappa)$ 在摄影机现场架设好后标定和解算获得。然后根据空间后方交会原理进行测量点位置解算。

飞机上布设的测量点是用来解算飞机位置的特征点,其相对空间坐标 $(X_s, Y_s, Z_s)$ 由量测得出,它们与控制场的控制点坐标不属于同一个坐标系。 $(X_s, Y_s, Z_s)$ 能经过一定的旋转和平移转换到控制场坐标系中,具体几何关系如下

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = R_{\phi\omega\gamma} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

得到 $(X_k, Y_k, Z_k)$ 中的各个坐标值都是以 $X_0, Y_0, Z_0, \phi, \omega, \gamma$ 为参数的表达式; $X_0, Y_0, Z_0$ 为坐标平移量, $\phi, \omega, \gamma$ 为2个坐标系之间的对应旋转角度关系。 $(X_k, Y_k, Z_k)$ 即为飞机上标志点在指定坐标系下的坐标, $(x, y)$ 为判读出的标志点像平面坐标。将高速摄像机的内外方位元素值 $X_k = f_1 \cdot (x_0, y_0, z_0, \phi, \omega, \gamma), Y_k = f_2(x_0, y_0, z_0, \phi, \omega, \gamma), Z_k = f_z \cdot (x_0, y_0, z_0, \phi, \omega, \gamma)$ 以及像平面坐标 $x, y$ ,坐标表达式代入共线方程

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \end{cases} \quad (2)$$

通过最小二乘可以估计出 $X, Y, Z, \phi, \omega, \gamma$ 的最优解。至此,每一帧图像上标志点对应的空间位置就可以解算出来。

## 3 测量结果及其精度检查

根据上述测试方案,利用高速摄像机接力测量的模式对某次地面段进行了测量处理,通过数据融合获得飞机沿跑道飞行的位移及高度变化曲线图,如图2所示。

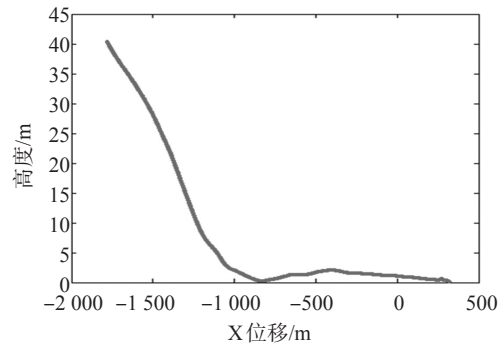


图2 轨迹测量曲线

根据试验环境条件,使用可见光波段的数字高速摄影机进行测量,精度检查时主要是通过现场的摄影区域中设置静态标志点来进行,其标志点坐标利用全站仪(定位精度2 mm)进行标定。利用摄影机获得可见光图像信息,并对实际获得图像中标志点进行判读和解算,图像中的每个像素对应的实际测量空间位置约3 cm。通过对图像中标志点进行亚像素判读可以获得0.2个像素的判读精度,再加上镜头畸变、计算等误差,通过对静态标志点的解算结果与全站仪器测出的结果进行比对检查,该测量方法得到的测量结果在跑道坐标系测量定位精度优于6 cm,完全满足测量任务要求。

## 4 结论

根据飞机飞行试验技术条件、状态要求,设计出这一测试方案和数据处理方法,完成了多架次飞行试验状态测量,获得的轨迹数据与机载数据进行综合分析,获得了很好的效果,测量结果完全满足飞机飞行试验测量要求。

## 参考文献

- [1] 赵志明,庄苗,王成波.飞机起落架落震试验数值模拟[J].飞机设计,2007,27(4):21-26.
- [2] 吴伟.起落架载荷测量与标定试验研究[J].机械强度,2003,25(1):48-51.
- [3] 汤阿妮.基于加载平台的起落架载荷[J].强度与环境,2006(4):23-26.
- [4] 张剑清,潘励,王树根.摄影测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2003:12-95.
- [5] 孟祥丽,周波,程俊廷,等.基于数字近景摄影测量的若干关键技术研究[J].计算机测量与控制,2008,16(9):1237-1239.
- [6] 苗红杰,赵文吉,刘先林,等.数码相机检校和摄像测量的部分问题探讨[J].首都师范大学学报,2005(3):117-119.