

# 机场净空智能监测仪测距和高程精度分析

丁德亮<sup>1</sup>, 蔡良才<sup>1</sup>, 李光元<sup>1</sup>, 陈定胜<sup>2</sup>, 陈黎明<sup>2</sup>, 王建国<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西西安, 710038; 2. 空军工程设计研究局, 北京, 100068; 3. 北京军区空军后勤部, 北京, 100005)

**摘要** 为满足目前机场净空区障碍物测试需求, 将电子经纬仪、激光测距仪和 GPS 的功能进行整合, 研制智能化机场净空监测仪器。根据电磁波脉冲法测距原理以及实际采用的计数频率得出监测仪测距精度; 通过对机场净空区内障碍物三角高程测量误差传播规律以及边长误差、垂直角观测误差、折光误差、仪器高及照准点标高的测定误差等各种误差的具体分析, 并结合国内外民航组织机场净空区障碍物测量精度的要求, 综合分析得出了监测仪高程精度要求。通过分析论证得出测距精度  $\pm 0.5 \text{ m}$  和高程精度  $\pm 1 \text{ m}$  的技术要求, 为确定机场净空智能监测仪主要技术参数和选用相应仪器模块提供了理论依据。

**关键词** 机场净空; 智能监测仪; 测距精度; 高程精度; 电磁波脉冲法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.02.005

**中图分类号** U212.246 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)02-0020-04

机场净空区是指为保证飞机起飞、着陆和复飞的安全, 在机场周围划定的限制物体高度的空间区域。机场建设选址时和投入使用后, 需要定期对机场净空进行检查和评定<sup>[1]</sup>。目前国外对于机场净空区障碍物的监测趋向于采用航空摄影测量, 但是航空摄影测量成本较高<sup>[2]</sup>。我国净空区障碍物测量还在使用传统的手段和方法, 存在操作复杂、工作量较大、用户不能快速判别所测目标是否在净空区内和是否超高等缺点; 机场净空激光监测仪存在使用繁琐、测出数据现场不能直接处理、稳定性差、无法自主对测站定位等缺点<sup>[3]</sup>。为了研制技术先进、操作方便的智能化机场净空监测仪器来进行机场净空测试和管理<sup>[4]</sup>, 必须根据使用需求、净空规格<sup>[1]</sup>和仪器发展等方面, 从原理上对测距和高程精度进行论证后, 提出仪器主要的技术指标。

## 1 监测仪测距精度论证

机场净空智能监测仪整合电子经纬仪、激光测距仪和 GPS 的功能, 将机场净空评定软件固化进仪器中, 实现激光测距仪和经纬仪中心在同一铅垂线上, 激光测距仪光线和经纬仪视线重合, 在无需原有控制点、无合作目标条件下实现长距离 5 km 快速测量, 没有作业半径限制, 单人单机即可完成全部测绘作业流程。测量时只需架设监测仪, 并使用 GPS 确定位置, 自动评定障碍物是否超高, 并对超高障碍物进行提示, 使用方便快捷, 极大地提高工作效率, 解决了目前机场净空监测专业性强、效率低, 机场管理者不能及时发现机场净空障碍物超高等疑难问题<sup>[5]</sup>。

脉冲法测距通过直接测定电磁波脉冲信号在待测距离上往返传播的时间  $t_{2D}$  来确定距离。脉冲激光测距是利用激光脉冲持续时间极短、能量在时间上相对集中、瞬时功率很大(一般可达 MW)的特点, 用于光能量很大的激光测距仪, 可以达到极远测程; 进行公里测距时, 如果精度要求不高, 利用被测目标对脉冲激光漫反射索取的反射信号就可以测距。这是相位式测距方法不能达到的, 因而在中远距离测距中脉冲法测距被广泛应用<sup>[6]</sup>。

\* 收稿日期: 2011-08-20

基金项目: 军队科研基金资助项目(KHY10016)

作者简介: 丁德亮(1980-), 男, 山东泰安人, 博士生, 主要从事机场规划设计与勘测研究. E-mail: kgyddl@163.com

脉冲法测距精度直接受到时间测定精度的限制,测距距离计算见式(1), $c$  为光速:

$$D = \frac{1}{2}ct_{2D} \quad (1)$$

对  $t$  进行微分得:

$$dD = \frac{1}{2}cdt \quad (2)$$

如果要求测距精度  $\Delta D \leq 1$  cm,则测时的精度需要满足:

$$\Delta t \leq \frac{2\Delta D}{c} \approx \frac{2}{3} \times 10^{-10} \text{ (s)} \quad (3)$$

这要求时标脉冲的频率  $f_p$  达到 1.5 GHz,目前计数频率一般达到 150 MHz 或 300 MHz,计数精度可以达到  $10^{-8}$  s 量级。

由于:

$$\Delta D = \frac{c}{2f_p} \quad (4)$$

当  $f_p = 3 \times 10^8$  时,  $\Delta D = \frac{c}{2f_p} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3 \times 10^8} = 0.5$  m,因此当设计仪器采用 300 MHz 电磁波脉冲信号时,测距精度可达到  $\pm 0.5$  m。

## 2 三角高程精度论证

对难以到达的障碍物目标进行观测时只能采用单项观测,通过三角测量法测得障碍物高程,因此应对三角测量的精度进行分析。

### 2.1 单向观测高差中误差公式

#### 2.1.1 以实地水平边长求单向观测高差公式

图 1 中, $D_0$  为  $A、B$  2 点间的实地边长,由于地球曲率半径  $R$  很长, $D_0$  相对于  $R$  来说不大,故可视图中水平线  $PC$  近似垂直于  $OM$ ,这样  $\triangle PCM$  可以视为直角平面三角形,所以  $MC = D_0 \tan \alpha_{12}$ 。 $MN$  ( $= \frac{K}{2R} D_0^2$ ) 为大气垂直折光差, $CE$  ( $= \frac{D_0^2}{2R}$ ) 为地球弯曲差,其中: $K$  为折光系数, $i$  为仪器高, $a_2$  为照准点标高。

由图 1 则可将  $A、B$  之间的高差写成:

$$h_{12} = D_0 \tan \alpha_{12} + \frac{D_0^2}{2R} + i_1 - \frac{K}{2R} D_0^2 - a_2 = D_0 \tan \alpha_{12} + \frac{1-K}{2R} D_0^2 + i_1 - a_2 \quad (5)$$

设  $C = \frac{1-K}{2R}$ , $C$  为垂直折光与地球弯曲差的综合影响系数,简称球气差系数。

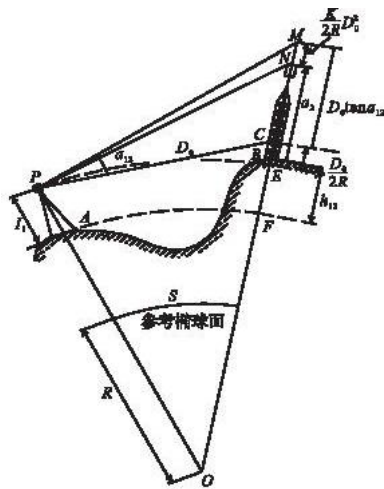


图 1 三角高程测量

Fig. 1 Trigonometric leveling

#### 2.1.2 单向高差中误差公式

对高差  $h_{12}$  多元函数式依据误差传播定律<sup>[7]</sup>得:

$$m_h^2 = h^2 \left( \frac{m_D}{D} \right)^2 + D^2 \left( \frac{m_\alpha}{\rho''} \right)^2 + \left( \frac{D^2}{2R} \right)^2 m_k^2 + m_i^2 + m_a^2 \quad (6)$$

式中: $m_h$  为高差中误差; $m_D$  为边长中误差; $m_\alpha$  为垂直角中误差; $m_k$  为折光系数中误差; $m_i$  为仪器高中误差; $m_a$  为照准点标高中误差。

### 2.2 各项误差分析

#### 2.2.1 边长误差的影响 $m_1$

边长中误差为 0.5 m,考虑到激光测距的作用距离的极小值为 30 m,取距离 30 m,其边长相对误差 1/60,取高差  $h = 30$  m,则边长误差影响:

$$m_1 = h \left( \frac{m_D}{D} \right) = 30 \times \frac{1}{60} = 0.5 \text{ (m)} \quad (7)$$

### 2.2.2 垂直角观测误差的影响 $m_2$

1) 照准中误差  $m_{\text{照}}$ :  $m_{\text{照}} = \frac{60''}{V}$ ,  $60''$  是人眼鉴别角,  $V$  为望远镜放大倍率。根据需要将  $V$  设计为 10 倍, 则有  $m_{\text{照}} = \frac{60''}{10} = 6''$ 。

2) 气泡整平误差  $m_{\text{气}}$ : 在进行垂直角读数时, 必须使垂直度盘水准气泡居中。水准器格值  $J_2$  取  $\tau = 30''$ , 气泡居中的误差  $J_2$  约为  $\frac{1}{2} \times 0.3$  格(符合水准器读数精度提高一倍所以乘  $1/2$ ), 故:

$$m_{\text{气}}(J_2) = \pm \left( \frac{1}{2} \times 0.3 \times 30'' \right) = \pm 4.5'' \quad (9)$$

3) 读数中误差  $m_{\text{读}}$ :  $J_2$  型仪器可认为  $m_{\text{读}}(J_2) = \pm 1''$ 。

4) 垂直度盘偏心差  $m_{\text{偏}}$ :  $J_2$  型仪器观测垂直角时的仪器误差, 主要来自垂直度盘偏心差、测微器行差及指标差变化的影响等。一般误差总和可能达到:  $m_{\text{偏}} = \pm 3''$ 。

综上所述, 垂直角内部符合精度如下:

$J_2$  型仪器垂直角半测回内部符合中误差为:

$$m'_{\alpha\text{半}(J_2)} = \sqrt{m_{\text{照}}^2 + m_{\text{气}}^2 + m_{\text{读}}^2 + m_{\text{偏}}^2} = \sqrt{6^2 + 4.5^2 + 1^2 + 3^2} = \pm 8.1'' \quad (10)$$

按  $D = 5$  km,  $J_2$  观测半测回垂直角, 对高差影响:

$$m_2 = D \left( \frac{m'_{\alpha}}{\rho''} \right) = 5000 \times \frac{8.1''}{\rho''} = \pm 0.196 \text{ (m)} \quad (11)$$

### 2.2.3 确定折光系数的中误差 $m_k$ 对高差的影响 $m_3$

一般折光系数  $K$  的中误差为  $\pm 0.03 - \pm 0.04 \text{ m}^{[7]}$ 。设  $D = 5$  km 时,  $m_k$  取大值对高差的影响为:

$$m_3 = \frac{D^2}{2R} m_k = \frac{5^2}{2 \times 6370} \times 0.04 = \pm 0.078 \text{ (m)} \quad (12)$$

### 2.2.4 仪器高及照准点标高的测定误差 $m_4$

低照准点标高和仪器高测定要达到误差在  $\pm 0.02$  m 内是不难的<sup>[7]</sup>, 则此 2 项中误差可写成:

$$m_4^2 = m_i^2 + m_a^2 = (0.02)^2 + (0.02)^2, m_4 = \pm 0.028 \text{ (m)} \quad (13)$$

根据以上分析, 若边长为 30 m - 5 km, 测距精度:  $\pm 0.5$  m, 则估算其单向观测时高差中误差  $m_h$  为:

$$m_h = \pm \sqrt{h^2 \left( \frac{m_D}{D} \right)^2 + D^2 \left( \frac{m_{\alpha}}{\rho''} \right)^2 + \left( \frac{D^2}{2R} \right)^2 m_k^2 + m_i^2 + m_a^2} = \pm \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2} = \pm 0.543 \text{ (m)} \quad (14)$$

通过推导计算可知: 高程中误差  $m_h = \pm 0.543$  m。在实际工作中, 测量规范要求观测值中不能存在较大的误差, 常以 2 倍或 3 倍中误差作为容许误差, 取 2 倍高程中误差并取整得  $m_{h\text{容许}} = \pm 1$  m; 对仪器要求采用  $J_2$ 、测距范围: 30 m - 5 km; 测距精度:  $\pm 0.5$  m, 评定结果的误差可以满足  $\pm 1$  m。

## 3 监测仪高程精度要求

根据文献[8-9], 表 A8-2 障碍物数据数值表示要求, 2 区垂直精确度为  $3 \text{ m}^{[8-9]}$ 。根据文献[10]附录 B 机场航空数据及精确度要求表 B2 标高/高程/高, 地区 2 内的障碍物精确度为  $3 \text{ m}^{[10]}$ 。利用本文三角测量的方法对障碍物高程精度分析论证, 得出机场净空区障碍物测量的高程误差可以满足  $\pm 1$  m。

综合考虑以上结果, 结合净空管理无合作目标测量的需求和当前仪器的发展, 确定机场净空智能监测仪观测障碍物的高程精确度为  $\pm 1$  m。

## 4 结束语

本文根据电磁波脉冲法测距原理、三角高程测量误差传播规律以及各种误差的具体分析对机场净空智能监测仪测距和高程精度进行推导论证, 结合国内外机场净空测量的实际精度要求<sup>[11]</sup>, 提出了仪器的测距精度  $\pm 0.5$  m 和高程精度  $\pm 1$  m 的技术参数要求, 为指导选用市场上相应的仪器模块提供了理论依据。通过将电子经纬仪、激光测距仪和 GPS 的功能进行整合, 研制出智能化机场净空监测仪器, 为机场净空区障碍物测试和净空管理提供了有效的手段与方法。

## 参考文献(References):

- [1] 蔡良才. 机场规划设计[M]. 北京:解放军出版社,2002.  
CAI Liangcai. Airport layout design[M]. Beijing: PLA press,2002. (in Chinese)
- [2] Harris Jr Ray L, Johnson Andrea R. Detecting airfield vertical obstructions using digital photogrammetry and GIS[C]//Proceedings of the ASPRS annual convention. St Louis:ASPRS press,2001:23-27.
- [3] 蔡良才,郑汝海,种小雷. 飞机起落航迹激光定位系统[J]. 交通运输工程学报,2004,4(1):58-61.  
CAI Liangcai, ZHENG Ruhai, CHONG Xiaolei. Laser locating system of airplane's taking-off and landing track[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2004,4(1):58-61. (in Chinese)
- [4] 蔡良才,邵斌,郑汝海. 机场净空区范围确定方法[J]. 交通运输工程学报,2004,4(4):40-43.  
CAI Liangcai, SHAO Bin, ZHENG Ruhai. Determining method of airfield clearance zone[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2004,4(4):40-43. (in Chinese)
- [5] 蔡良才,邵斌,郑汝海. 机场净空规定过渡面范围的计算确定[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(1):11-13.  
CAI Liangcai, SHAO Bin, ZHENG Ruhai. Calculation of confirmation to transitional surface range in the airfield clearance rules [J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2007,8(1):11-13. (in Chinese)
- [6] U. S. Department of transportation, federal aviation administration. Standards for aeronautical surveys and related products [R]. FAA 405,1996.
- [7] 合肥工业大学. 测量学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.  
Hefei industry university. Survey[M]. Beijing: China build & industry press,1996. (in Chinese)
- [8] 国际民航组织. 机场勤务手册:Doc9137-AN/898[S].  
International civil aviation organization. Airport duty manual. Doc9137-AN/898[S].
- [9] 国际民航组织. 国际民用航空公约[S].  
International civil aviation organization. Convention on international civil aviation[S].
- [10] 民用机场飞行区技术标准. MH5001-2006[S].  
Technical standards for airfield area of civil airport. MH5001-2006[S].
- [11] Wells Alexander T. Airport planning & management[M]. Florida:University of Florida,2000.

(编辑:徐敏)

## Research on Distance and Height Precision Analysis of Airport Clearance Intelligent Monitoring Instrument

DING De-liang<sup>1</sup>, CAI Liang-cai<sup>1</sup>, LI Guang-yuan<sup>1</sup>, CHEN Ding-sheng<sup>2</sup>, CHEN Li-ming<sup>2</sup>, WANG Jian-guo<sup>3</sup>

(1. Engineering Institute, Air force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Air Force Engineering Design & Research Institute, Beijing 100068, China; 3. Air Force Logistic Department of Beijing Military Command, Beijing 100005, China)

**Abstract:** To meet the current demand for obstruction testing of airport clearance zone, the electronic theodolite, laser range finders and GPS capabilities are integrated, and an airport clearance intelligent monitoring instrument is developed. According to the electromagnetic wave's principle of measuring distance and the actual count rate, the precision of monitor's measuring distance is obtained. By specific analysis through error propagation of trigonometric leveling for obstacle in clearance zone and various errors, which includes side length error, observation error of the elevation angle, refractive error, such as error of the instrument height and sighting point height. etc., and in combination with the precision requirements of obstacle measurement by domestic and international civil aeronautics organization, the height precision requirements of monitor instrument is obtained through comprehensive analysis. Finally technical requirements for measuring distance accuracy  $\pm 0.5$  m and elevation accuracy  $\pm 1$  m are got by analysis and appraisal, which provide a theoretical basis for determining the main technical parameters of the airport clearance intelligent monitor and the selection of the appropriate instrument module from the market.

**Key words:** airport clearance; intelligent monitoring instrument; distance precision; height precision; electromagnetic wave's principle