

# 联机全站仪 3-D 导线测量系统的研究

(14)  
97-104

冯 晓  
(东南大学交通工程学院 江苏南京 210096)

P214

王 榕  
(重庆建筑大学基础科学系 四川重庆 630045)

**摘 要** 三维光电导线是至今为止最为简洁快速的全三维控制测量方法,它适应性好,能实现同步作业,非直接边长精度和高差精度分别已到四等三角和三等水准的指标。本文着重研究基于联机全站仪的三维导线内外业一体化系统的测量方法与功能设计和相应算法。并介绍了相应的实验系统以及试验情况。

**关键词** 联机全站仪, 3-D 控制测量, 三维相对精度, 同步化, 成果可靠度

**中图法分类号** P214 导线测量, 测量学

全站仪与超微型计算机的结合形成的联机系统是第三代经纬仪(智能全站仪)的组合形式。它与普通全站仪加电子手簿形成的系统有较大区别。它能运行各种用户程序并产生出各种适于用户要求的测量方法。计算机既充当信息记录媒体,又充当数据处理和作业控制中心,使测量工作的内外业(主要是中、小型测量工程)出现一体化与同步化的趋势。联机全站仪具有高精度的角度与距离传感器和强大的数据记录与处理功能,在一定程度上能使平面与高程控制结为一体,使控制与控制点使用(测图、放样等)合为一体,甚至使数据的采集与平差(主要是简易平差)合为一体,还可以有某些辅助设计功能。

## 1 硬件系统的选配

全站仪是 80 年代中期出现的一种包括高精度方向距离传感器、A-D 转换与数据处理模块以及记录装置的系统,重量 2 kg~3 kg,水平和垂直方向分辨率“1~2”;距离分辨率 1~2 (mm),测距精度中固定部分 2 mm~5 mm,比例部分 2 ppm×D~5 ppm×D(边长 D 以公里为单位)第一、第二代全站仪为固定程序式,数据记录有内部 RAM 式,磁卡式,外接专用电子手簿式。数据实时处理只能由外接计算机来承担,这种系统称为联机全站仪,成为一个功能非常强大的系统。第三代全站仪为将外接计算机与其合为一体的系统。

觇标由支撑、对中、铅直系统以及反光镜和测角标志板组成。手持式用于低精度测量,支架式用于低等控制,脚架式用于高精度控制测量。

收稿日期:1995-05-15

冯 晓,男,1962 年生,副教授

## 2 观测方法与系统功能的研究

设计适合于公路控制的观测程序具有重要意义。存在着多种多样的测站观测程序。根据观测精度的需要,选择较高可靠度以及较为符合作业习惯的程序。表 1 给出了经过优选的四种观测程序基本上能满足各种公路控制的需求。

系统测计有两种观测方式和三种后视方式。组合的观测程序有 A I、A II、A III 及 B I 四种,B II、B III 观测程序未设计。各种观测程序中的观测顺序及观测值见表 1。

表 1 观测顺序及观测值

镜位	代号	后式方式	代号	观测程序	观测值
单镜位	A	单全观测后视	I	后(LCV <sub>v<sub>1</sub></sub> )→前(LCV <sub>v<sub>2</sub></sub> )	9个
		单方向后视	II	后(C)→前(LCV <sub>v<sub>2</sub></sub> )	6个
		双方向后视	III	后(C <sub>1</sub> )→后(C <sub>2</sub> )→前(LCV <sub>v<sub>2</sub></sub> )	7个
双镜位	B	单全观测后视	I	①后左(全)→后右(CV)→前左(全)→前右(CV)	13个
			I	②后左(全)→前左(全)→后右(CV)→前右(CV)	13个
		单方向后视	II	后左(C)→后右(C)→前左(全)→前右(CV)	11个
		双方向后视	III	后左(C <sub>1</sub> C <sub>2</sub> )→后右(C <sub>1</sub> C <sub>2</sub> )→前左(全)→前右(CV)	11个

表中 L、C、V 分别表示斜距、水平和垂直方向的值,  $t$ 、 $v_1$ 、 $v_2$  分别表示仪器高与后、前觇标高。B I、A I 方式主要用于首级导线, A II 方式主要用于测图、标定控制; A III 方式用于放射布点。

## 3 原始观测值的系统误差改正

每一原始观测值(斜距、水平与竖直方向值)被读入后立即被自动加入各项改正。

1) 斜距观测值 L 将被加入光速、大气折光, 仪器加、乘常数改正。设改正后的斜距为  $\bar{L}$

$$\bar{L} = L + \Delta D_s + \Delta D_f + \Delta D_c + \Delta D_i + \Delta D_k \quad (1)$$

光速改正被认为主要由当地大气压力  $P$  与大气温度  $t$  决定, 一般认为存在关系<sup>[14]</sup>。

$$\Delta D_s = \left( \alpha_1 - \frac{\alpha_2 P}{1 + \alpha_3 t} \right) L$$

$L$  为测线边长,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  因仪器而异, 一般由厂家给出。

大气折光改正  $\Delta D_f$  主要由大气折光影响角  $\bar{\delta}''$  决定。

$$\Delta D_f = -L \sin \delta \cdot \frac{\bar{\delta}''}{\rho''}$$

$\delta$  为测线倾角, 若折光系数  $k = 0.14$ ,  $\bar{\delta}'' = \frac{L}{14R} \cdot \rho''$  作业中  $k$  取值参阅<sup>[4]</sup>。

仪器乘常数改正  $\Delta D_i = C \cdot L$ ,  $C$  为仪器乘常数。

仪器加常数改正  $\Delta D_i = \delta L$  (仪器检验确定)。

仪器周期误差改正  $\Delta D_i$  表达式由仪器检验给出。

2) 竖盘读数值  $V$  将被加入指标差改正  $\Delta V_i$ , 大气折光改正  $\Delta V_f$ , 改正后的值为  $\bar{V}$

$$\bar{V} = V + \Delta V_i + \Delta V_f \quad (2)$$

$\Delta V_i$  为常数由仪器检定时测定

$\Delta V_f = \pm \Delta S''$ ,  $\Delta S'' = \rho'' L / (14R)$ ,  $k = 0.14$ ; 符号按仰角增加, 俯角减小规则取。  $R$  为地球半径。

3) 水平方向值  $C$  需加入视轴差改正  $\Delta C_1$ , 竖轴倾斜改正  $\Delta C_2$ , 以及横轴倾斜改正  $\Delta C_3$ ;  
 $\Delta C_1 = c$ ,  $c$  角由仪器检定时测定

$$\Delta C_2 = v \cos \beta \text{tg} \delta = \frac{1}{4} [(左 + 右)_R - (左 + 右)_L] \tau'' \text{tg} \alpha, \tau'' \text{为水准器分划值}, \delta \text{为垂直角},$$

“左”、“右”为气泡左右端读数格值。

$\Delta C_3 = i \text{tg} \alpha$ ,  $i$  为横轴倾斜角,  $\alpha$  为视线倾角。横轴倾角可由仪器检校时测定。

每一单镜位水平方向值被自动加入以上改正, 即

$$\bar{C} = C + \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 \quad (3)$$

经预处理后的水平方向、竖直方向以及斜距观测值已经在很大程度上消除了因仪器几何关系不完善、仪器整置误差以及环境条件引起的主要系统误差。为了保证点号辨识与输入的正确性, 瞄准与对中的正确性, 仪器高与观标高量取的正确性, 还必须进行测站的多项校验, 以确保观测值的可靠性与精度。

### 4 测站校核与粗差检测

1) 单全观测后视具有点号错误校核和对向高差校核, 可完全排除点号输错情况、仪器高和视标高量取错误或精度超限。

(1) 点号错误校核是根据后视观测水平边长与全部测站点幅射线比较长度, 检索出相同边长的对方点号, 比较输入的后视点号若相符则两点号输入无误。不符报告真实点号。此功能可以用以恢复实地丢失的点号。图 1 中假定 6 为测站点, 9 为后视点, 库中共有已有三维坐标点 6 个, 由平面反称函数  $\alpha d(\Delta x, \Delta y)$  求解各边边长。

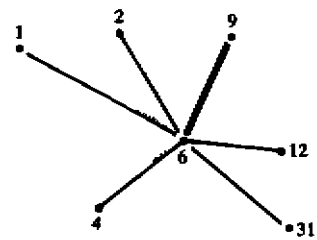


图 1

(2) 对向高差校核: 设  $h$  为上一站前视高差,  $h'$  为本站后视高差, 由(4)式计算。若  $|h + h'| < \epsilon_1 \cdot D$  则精度满足要求, 取平均  $\bar{h} = (h - h') / 2$  为后视边前进方向高差用于推算测站坐标。

2) 双方向后视存在可靠的点号较核, 但无高差及  $i$ 、 $v$  量取校核。点号校核是通过计算全部(距离小于某一设定值)射线的非重迭夹角与观测角比较, 若某一个  $\beta$  满足  $|\beta - \beta'| < \epsilon_2$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , 取得对应点号与输入点号比较。如图,  $R$  为搜索园半径。

3) 单方向后视不存在自动检查, 必须在点名可靠条件下才能使用。但它速度快, 可用于作某些次要控制点。

4) 双镜位观测方式下存在测站盘左盘右瞄准目标正确性较核及瞄准精度较核。设  $C'_{左}$ 、 $C_{左}$ 、 $C'_{右}$ 、 $C_{右}$  分别为后、前目标盘左、盘右观测值,  $V'_{左}$ 、 $V_{左}$ 、 $V'_{右}$ 、 $V_{右}$  分别为竖盘对应读数, 若满足

$$|C'_{左} - C_{左} - 180 - \Delta C| < \epsilon_3, \quad |C'_{右} - C_{右} - 180 - \Delta C| < \epsilon_3$$

$$|(V'_{左} + V_{右} - 360)/2 - i| < \epsilon_4,$$

$$|(V_{左} + V_{右} - 360)/2 - i| < \epsilon_4$$

可以认为不存在显著的瞄准误差, 然后可计算消除了视轴差和横轴倾斜误差的后、前水平方向值以及消除了指标差的后、前天顶距。以上各项校核均由计算机自动完成。

设定不同的  $\epsilon_i (i = 1, \dots, 4)$  可以控制观测值的精度, 在各种公路工程控制中  $\epsilon$  的选取由工程的精度要求确定。

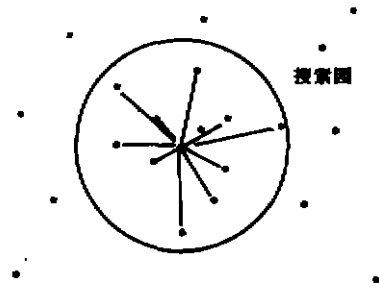


图 2

## 5 投影改正与坐标推算

### 5.1 边长计算可选择三种投影方式:

投影到测线平均高程面上的水平长度

$$D = L + \Delta D_o, \Delta D_o = L(1 - \cos\delta) \text{ 倾斜改正}$$

投影到高斯面上的直线长度为

$D_g = D + \Delta D_H + \Delta D_B$ , 其中  $\Delta D_H$  为投影至参考椭球面上的改正,  $\Delta D_B$  为由参考椭球面至高斯面。

还可选择计算至测区平均高程面长度以及高程抵偿面投影长度。

### 5.2 高差计算

$$h = D \operatorname{tg} \delta + i - v + f \tag{4}$$

$f$  为球气差改正, 当  $K$  (折光系数) 为 0.14 时,  $f = (1 - K)D^2 / (2R)$ ,  $R$  为地球半径,  $D = 1 \text{ km}$  时约改正 7 cm。

### 5.3 坐标推算

单向作业方式(A II、A III)下每站观测结束产生目标点坐标

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + D \cos \alpha \\ y &= y_0 + D \sin \alpha \\ H &= H_0 + h \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

前视边方位  $\alpha$  由后视方位与水平角推算, 即  $\alpha = \alpha_0 + \beta_{左} \pm 180^\circ$ ,  $\beta_{左} = C - C_0$ ,  $C_0$  为后视方向值(两方向时取定向方向)

## 6 实时精度计算

任意点(或方向)间的相对误差估计对实时评价方案与控制作业质量有重要作用。

### 6.1 P 段等精度观测情况

设有 3-D 导线上任意点  $k$  至任意点  $n$  边长为  $D_{kn}$ , 在  $xky$  坐标系下,  $n$  点的 3-D 坐标为:

$$\left. \begin{aligned} x_n &= \sum_{i=k}^{n-1} D_i \cos \alpha_i + x_k \\ y_n &= \sum_{i=k}^{n-1} D_i \sin \alpha_i + y_k \\ H_n &= H_k + \sum_{i=k}^{n-1} h_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

这里  $\alpha_i = \alpha_{k-1} + \sum_{j=1}^i \beta_j - i 180^\circ$

$$h_i = D_i \operatorname{tg} \delta + i - v + f$$

由此可见  $(x_n, y_n, H_n)_k$  是该段全

部观测值  $S = \{\beta_i, D_i, h_i \mid i = k, k+1, \dots, n-1\}$

$\dots, n-1\}$  的函数, 设它们对应的偶然误差为  $\{m_{\beta_i}, m_{D_i}, m_{h_i} \mid i = k, k+1, \dots, n-1\}$ , 系统误差为  $\{0, \lambda D_i, 0 \mid i = k \sim n-1\}$ 。根据偶然误差传播定理,  $n$  点相对于  $k$  点在  $x$ 、 $y$  和  $H$  方向上的中误差为(假定  $\beta_i, D_i, h_i$  为独立观测值):

$$\left. \begin{aligned} m_{x_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} \left\{ \left( \frac{\partial x_n}{\partial \beta_i} \right)^2 m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial x_n}{\partial D_i} \right)^2 m_{D_i}^2 \right\} \\ m_{y_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} \left\{ \left( \frac{\partial y_n}{\partial \beta_i} \right)^2 m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial y_n}{\partial D_i} \right)^2 m_{D_i}^2 \right\} \\ m_{H_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} \left\{ \left( \frac{\partial H_n}{\partial h_i} \right)^2 m_{h_i}^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$m_{h_i}$  为第  $i$  边间接高测高差中误差,  $m_{h_i} = \mu D_i$ ;

$m_{\beta_i}$  为第  $i$  角测角中误差,  $m_{D_i}^2 = m_{\beta_i}^2 + \lambda^2 D_i^2$  为第  $i$  边边长中误差, 其中  $m_{\beta_i}$  为偶然误差,

$m_{\beta_i} = a + b D_i$ ;  $\lambda$  为系统误差系数, 按与起点幅射线方向加入。

$$\left. \begin{aligned} m_{x_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} \cos^2 \alpha_i m_{\beta_i}^2 + \lambda^2 L^2 \cos^2 \theta + \sum_{i=k}^{n-1} \left( \frac{m_{\beta_i}^2}{\rho''} \right)^2 (y_n - y_i)^2 \\ m_{y_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} m_{\beta_i}^2 \sin^2 \alpha_i + \lambda^2 L^2 \cos^2 \theta + \sum_{i=k}^{n-1} \left( \frac{m_{\beta_i}^2}{\rho''} \right)^2 (x_n - x_i)^2 \\ m_{H_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} \mu^2 D_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

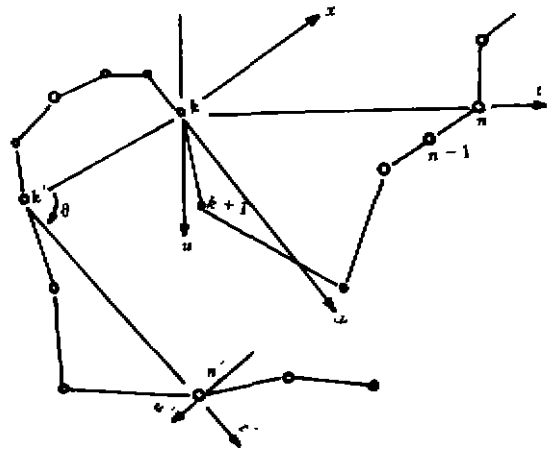


图 3

### 6.2 $p$ 段不等精度观测情况

设  $k \sim k_1 - 1$  点为  $(m_{\rho 1}, a_1, b_1, \lambda_1, \mu_1)$  精度,  $k_1 \sim k_2 - 1$  点为  $(m_{\rho 2}, a_2, b_2, \lambda_2, \mu_2)$  精度,  $k_p \sim (n-1)$  为  $(m_{\rho p}, a_p, b_p, \lambda_p, \mu_p)$  精度;  $L_j$  和  $\theta_j$  分别为第  $j$  段 ( $j=0 \sim p$ ) 的闭合线长及其与  $x$  轴的夹角。

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\hat{z}_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{k_1-1} (a_i + b_i D_i)^2 \cos^2 a_i + \cdots + \sum_{i=p}^{n-1} (a_i + b_i D_i)^2 \cos^2 a_i \\
 &\quad + \lambda_1^2 L_1^2 \cos^2 \theta_1 + \cdots + \lambda_p^2 L_p^2 \cos^2 \theta_p \\
 &\quad + (\bar{\rho}^n)^2 \left\{ m_{\hat{y}_i}^2 \sum_{i=k}^{k_1-1} (y_n - y_i)^2 + \cdots + m_{\hat{y}_p}^2 \sum_{i=p}^{n-1} (y_n - y_i)^2 \right\} \\
 m_{\hat{x}_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{k_1-1} (a_i + b_i D_i)^2 \sin^2 a_i + \cdots + \sum_{i=p}^{n-1} (a_i + b_i D_i)^2 \sin^2 a_i \\
 &\quad + \lambda_1^2 L_1^2 \sin^2 \theta_1 + \cdots + \lambda_p^2 L_p^2 \sin^2 \theta_p \\
 &\quad + \left( \frac{1}{\bar{\rho}^n} \right)^2 \left\{ m_{\hat{x}_i}^2 \sum_{i=k}^{k_1-1} (x_n - x_i)^2 + \cdots + m_{\hat{x}_p}^2 \sum_{i=p}^{n-1} (x_n - x_i)^2 \right\} \\
 m_{\hat{D}_{kn}}^2 &= \mu_1^2 \sum_{i=k}^{k_1-1} D_i^2 + \cdots + \mu_p^2 \sum_{i=p}^{n-1} D_i^2
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

### 6.3 完全等精度观测情况

如果两点间路径完全为相同精度  $(m_\rho, a, b, \lambda, \mu)$  观测, 则相对精度计算变为

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\hat{z}_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} (a + b D_i)^2 \cos^2 a + \left( \frac{m_\rho}{\bar{\rho}^n} \right)^2 \sum_{i=k}^{n-1} (y_n - y_i)^2 + \lambda^2 L^2 \cos^2 \theta \\
 m_{\hat{x}_{kn}}^2 &= \sum_{i=k}^{n-1} (a + b D_i)^2 \sin^2 a + \left( \frac{m_\rho}{\bar{\rho}^n} \right)^2 \sum_{i=k}^{n-1} (x_n - x_i)^2 + \lambda^2 L^2 \sin^2 \theta \\
 m_{\hat{D}_{kn}}^2 &= \mu^2 \sum_{i=k}^{n-1} D_i^2
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

### 6.4 $n$ 点关于 $k$ 点在任意方向上的误差

式(7)、(8)~(10)与坐标系的取法无关。若需估计  $n$  点相对于  $k$  点在任意方向的中误差只需将  $x$  轴或  $y$  轴取为该方向即可。若取  $x$  轴为  $k_n$  方向则可计算  $n$  相对于  $k$  的纵向误差 (即  $D_{kn}$  边长精度) 与横向误差  $m_{n_u}$ 。

### 6.5 任意两边的相对角度误差

多数服务于具体工程的控制网更加注重点间及边间的相对精度。在自由 3-D 控制系统中, 任意两边的相对方向精度存在严密的计算公式。图 3 中  $k'-n'$  边的相对于  $k-n$  边的方向误差为  $m_\alpha$ , 则可由式(9)分别计算  $n$  点相对于  $k$  的横向误差  $m_{n_u}$ , 和  $n'$  点相对于  $k'$  的横向误差  $m_{n'_u}$ , 则

$$m_\alpha^2(k'n' - kn) = \left\{ \left( \frac{m_{n_u}}{D_{kn}} \right)^2 + \left( \frac{m_{n'_u}}{D_{k'n'}} \right)^2 \right\} \bar{\rho}^n + \left( \frac{m_{\langle kk' \rangle_n}}{D_{kk'}} \right)^2 \quad (11)$$

$m_{\langle kk' \rangle_n}$  为  $k'$  点相对于  $kk'$  边的横向误差,  $D_{kk'}$  为  $k, k'$  点间边长。

## 6.6 路径检索算法(图 4)

### 6.6.1 自动编号与自动识别:

基点: <基点标志>

一级点: <一级路线号><点号>

二级点: <一级路线号><二级路线号><点号>

三级点: <一级路线号> <二级路线号> <三级路线号><点号>

### 6.6.2 自动路径检索:

任给两点号分别由两端按点号递减检索出路径点坐标, 点号减至 0 进入上一级路线继续递减点号直至基点。

在连接点处一般应进行判断另一端是否在同一支线上, 每遇一结点判断一次。后退按低级优先原则。

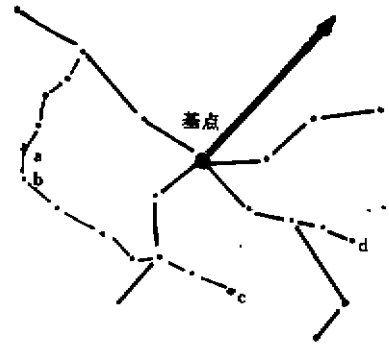


图 4

## 7 程序实现

实验系统选择日本 sharp 公司生产的 PC-E500 计算机与日本测机舍 SET2C 全站仪通过 RS232 标准串行口相连接组成的硬件系统。PC-E500 机是该公司生产的第三代八位袖珍机, 具有一个较大的 LCD(48×160 点阵), CPU 为 80C31, 时钟为 14M, 128kROM(内驻 BASIC 解释程序、工程常用程序 50 k), RAM 最大到 256 k。

程序用该机提供 BASIC 语言编制, 程度由数据采集, 观测值预处理, 安全及精度检验, 坐标推算、精度计算以及数据通信等子程序组成。程序空间 2 kB, 工作变量 4~6 kB, 数据文件可达 200 kB 空间, 可以记录 600 点数据。

作业时首先进行系统初始化, 输入观测方法规范(最短边长, 最大边长, 往返高差及水平边长允许误差, 以及测站校核允许误差等), 仪器检校参数, 测区概略位置及大气条件参数等。为了防止输入错误, 设计有十分科学的界面, 输入的数据与指令(主要是重要指令)在被接收前具有多种语法检验, 提供反复的修改机会, 并具有丰富的语法和内容提示信息。由于空间有限, 帮助信息由使用手册提供。系统的功能设计充分考虑到了工程中可能出现的多种需求。成果数据可以以(XYH)形式提供, 也可以转换成  $Dh\alpha$ (水平边长, 高差和方位角)形式提供以便作各种平差计算(当形成条件时)。成果数据文件可直接送入计算机作各种路线 CAD 设计, 也可以输入联机全站仪标定系统作各种工程放样和工程质量检测。

从 1990 年以来使用这一技术进行过多次试验, 并多次成功地用于生产, 它们包括普通公路的一次定测中的导线测量, 高等级公路 3-D 导线敷设, 独立小区域大比例地形控制以及城市道路的施工放样控制等。1993 年使用联机全站仪系统(PC-E500+SET2C)初步形成了一种具有较高自动化程度和较高可靠性的 3-D 导线测量系统。它既能在不平差条件下进行同步作业, 又能将数据用于后续平差处理。

## 参 考 文 献

- 1 武汉测绘科技大学, 同济大学. 控制测量学(上、下). 北京: 测绘出版社, 1986
- 2 徐时涛, 夏英宣. 实用测量学. 重庆: 重庆大学出版社, 1990

- 3 中国矿业大学, 矿山测量学 I、II, 北京: 煤炭工业出版社, 1989
- 4 顾孝烈主编, 城市导线测量, 北京: 测绘出版社, 1988
- 5 除德敏, 章登义, PC-E500 机原理使用, 武汉 武汉测绘科技大学出版社, 1992
- 6 北京振中信息公司, Palm Basic V1.0 技术手册, 1994
- 7 王安东等, 三维导线电子记录 PC-1500 程序说明, 重庆交通学院自选课题资料.
- 8 编写组, 工厂建设测量手册, 北京: 测绘出版社, 1990

## Researches on 3-D traverse surveying system of on-line all-station electronic theodolite

*Feng Xiao*

(Faculty of Traffic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096)

*Wang Rong*

(Department of Natural Sciences, Chongqing Jianzhu University, Chongqing, Sichuan 630045)

**Abstract** On-line all-station electronic theodolite with software, it provides a more convenient and rapid new solution for highway control survey. This paper introduces a basic concept of free synchronous 3-D traverse survey based on the system, and submits main theoretic principles as well as algorithms of some important functions, such as automatic inquiring about present point numbers, automatic proofread about all input information, automatic detection of gross errors in instrument and target heights, sightings and point number's input as well as real-time relative accuracy reporting etc. Finally some practical engineering tests are outlined.

**Key Words** on-line all-station electronic theodolite, 3-D highway control network, traverse survey, gross error detection

(编辑: 陈蓉)