

# 测量机器人变形监测系统软件研究

梅文胜<sup>1</sup> 张正禄<sup>1</sup> 郭际明<sup>1</sup> 黄全义<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路129号, 430079)

**摘要:**介绍了测量机器人的外部组成、测量原理及发展应用，并设计了基于测量机器人的变形监测系统和数据库的结构，讨论了计算机与测量机器人之间的串行控制，在数据处理中加入了距离和高差差分处理技术。试验表明，基于测量机器人的变形监测系统具有自动化程度高、实用性强、高效、准确、实时等特点。

**关键词:** 测量机器人；变形监测；差分

中图法分类号: P241; TH761

## 1 测量机器人的组成、测量原理及发展应用

测量机器人<sup>[1]</sup>的技术组成包括坐标系统、操纵器、换能器、计算机和控制器、闭路控制传感器、决定制作、目标捕获和集成传感器等8部分。坐标系统采用球面坐标系统，能在水平面360°和竖面180°范围内寻找目标；操纵器主要控制转动；换能器将电能转化为机械能驱动步进马达；计算机和控制器用来按设计开始和终止操纵系统、存储观测数据并与其他系统接口；闭路控制传感器将反馈信号传送给操纵器和控制器，以进行跟踪测量和精密定位；决定制作主要用于发现目标，如采用模拟人的识别图像的方法（试探分析）或对目标局部特征分析的方法（句法分析）进行影像匹配；目标获取在于精确地照准目标，常采用开窗法、阈值法、区域分割法、回光信号最强法以及方形螺旋式扫描法等；集成传感器包括采用距离、角度、温度、气压等传感器获取各种观测值。

由影像传感器构成的视频成像系统通过影像生成、影像获取和影像处理，在计算机和控制器的操纵下实现自动跟踪和精确照准目标。一般来讲，测量人员在接受了某一项测量任务之后，首先是基于已掌握的测量基本知识，根据任务与使用的仪器，作出操作计划；然后用感觉器官对环境、目标进行识别与理解，操作仪器，按计划实施以完

成测量任务。而测量机器人则通过CCD影像传感器和其他传感器对现实测量世界中的“目标”进行识别，迅速作出分析、判断与推理，实现自我控制，并自动完成照准、读数等操作，以完全代替人的手工操作。测量机器人还能与制订测量计划、控制测量过程、进行测量数据处理与分析的软件系统相结合，完全可以替代人完成许多测量任务，具有全自动、遥测、实时、动态、精确、快速等优点。

测量机器人的发展可分3个阶段：①需在被测物体上设置标志，主要是以反射棱镜为合作目标，称为被动式三角测量或极坐标法测量；②以结构光作为照准标志，即用结构光形成的点、线、栅格扫描被测物体，通过空间前方角度交会法来确定被测点的坐标，称为主动式三角测量，由两台带步进马达和CCD传感器的视频电子经纬仪和计算机组成；③目前正在研制的测量机器人亦不需合作目标，根据物体的特征点、轮廓线和纹理，用影像处理的方法自动识别、匹配和照准目标，仍采用空间前方交会的原理获取物体的三维坐标及形状。

## 2 测量机器人变形监测系统组成与软件设计实现

### 2.1 测量机器人变形监测系统的结构与组成

笔者研制的测量机器人变形监测系统是基于一台测量机器人有合作目标（照准棱镜）的变形监

测系统, 其实质为自动极坐标测量系统, 其结构与组成方式如图1所示。

1) 基站。基站即为极坐标系的原点, 用来架设测量机器人, 要求具有良好的通视条件, 一般应选择在稳定处, 特殊情况下也应选在相对稳定处。

2) 参考点。参考点(三维坐标已知)应位于变形区域之外的稳固不动处, 点上放置正对基站的单棱镜(采用强制对中装置), 参考点一般应有3~4个, 且要求覆盖整个变形区域。参考系除了为极坐标系统提供方位外, 更重要的是为系统数据处理时的距离及高差差分计算提供基准。

3) 目标点。根据需要, 目标点一般较均匀地布设于变形体上能体现区域变形的部位, 目标点与参考点上均应放置正对基站的棱镜。

4) 计算机。计算机监测软件通过通讯电缆控制测量机器人作全自动变形监测。计算机可直接放置在基站上, 但若要进行长期的无人值守监测, 则应在方便处建专用机房。

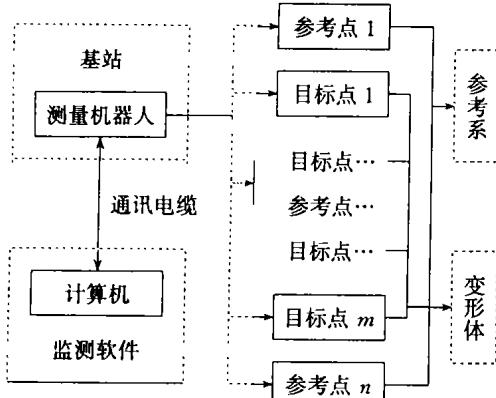


图1 测量机器人变形监测系统组成

Fig. 1 Composition of Georobot Deformation Monitoring System

## 2.2 测量机器人变形监测软件设计目标

变形监测中点位及点数相对固定, 可利用测量机器人在一定的视场范围内(如设置成 $2^{\circ}$ )能自动搜索、照准、读数的特点, 软件在获得观测点位置关系后, 应能自动地完成定时观测、计算、分析、报警、成果输出等工作, 以实现无人值守监测。因此, 软件应以高度自动化、智能化为总目标。

1) 自动化。变形监测软件在进行一些初始化设置及给定监测计划(如观测间隔、期数等)后, 能够严格按计划执行全自动观测, 并自动对原始观测成果进行处理和分析。

2) 智能化。要实现无人值守变形监测, 那么, 软件必须具有一定的适应环境变化和自动采取相应的措施来处理的能力。如某期观测时恰逢大雾、大雨等恶劣天气, 仪器不能读数, 软件会自

动控制测量机器人间隔一小段时间后再试, 若仍不行, 则自行再隔一段时间重试, 直到观测条件正常。

3) 特殊的数据处理方法。用一定精度等级的测量机器人, 为得到更高级别精度的最终成果, 充分利用变形监测中的不动基点, 对原始观测值使用特殊的差分技术进行处理, 改正后的距离和高差将有更高的精度。

4) 海量数据的存储。持续的无人值守观测, 势必产生海量的原始观测和计算成果数据, 采用数据库技术可以高效地存储和管理这些数据, 不但海量数据的存储问题迎刃而解, 而且它还具有方便的数据查询和分析功能。

5) 多样的成果输出。要在长期的海量监测成果中及时查到有用信息, 必须提供快速多样的查询、显示与输出方式。

6) 自动报警。无人值守监测要求软件应有根据变形点的变形大小或变形速度自动提示、自动报警的功能。

7) 操作方便、界面友好。实用而有生命力的软件应该是“傻瓜”式的软件, 形象直观的中文界面和尽量简化的操作过程。

### 2.3 测量机器人变形监测软件主要功能模块

测量机器人变形监测软件主要包括工程管理、系统初始化、学习测量、自动测量、数据处理、数据查询、成果输出、工具、帮助等功能模块。

① 工程管理。每个变形监测项目都作为一项工程来管理, 每个工程对应着一个数据库文件, 数据库文件中保存着该变形监测项目的所有数据, 包括各种初始设置信息、原始观测值、各种计算分析成果等。

② 系统初始化。首先将计算机的串口通讯参数设置成与测量机器人一致, 保证计算机与测量机器人能够顺利地交换信息; 然后再对测量机器人进行一些初始化, 主要有自动目标识别、目标锁定、补偿器的开关状态等, 搜索范围、测距模式的设置, 距离、角度、温度、气压的单位等设置; 最后在每次监测前还必须进行一些测量机器人的校准, 主要有 $2c$ 互差、指标差和自动目标识别照准差的校正等。

③ 学习测量。通过初始的训练学习测量获取目标点概略空间位置信息, 计算机控制测量机器人在每个目标概略位置一定的视场范围内自动搜寻目标, 完成自动测量。

④ 自动测量。软件按预先设置的观测方案及观测限差控制测量机器人作自动重复的周期观测。

观测方案主要包括总观测期数、两期观测间隔时间、每期测回数、是否盘右观测等内容。自动观测过程中, 软件尽量设计得具有一定的智能性, 能自动处理一些异常情况。如当观测成果超限时, 软件会自动判断指挥测量机器人按要求部分或全部重测; 再如若某期观测过程中某些目标被挡, 软件会控制测量机器人作三次重测尝试, 不成功则暂时放弃, 待其余目标观测完毕后再试, 若仍不成功则等待一段时间(一般1/10周期间隔)后补测, 还不成功则会最终放弃并记录相应说明信息。自动报警也是在自动测量过程中实现的, 根据每期观测后的计算结果, 目标点的变动超过某一给定值时, 会进行声音或屏幕提示等方式的报警。

·数据处理。主要包括目标点坐标的计算和后续的变形分析。为提高最终成果精度, 在计算每期目标点坐标之前, 首先要对原始观测值作特殊的距离差分和高差差分处理。

·数据查询与成果输出。主要是查询和输出选定时期目标点的观测、计算和分析成果, 包括各种报表与图。

·工具。提供自由设站观测与计算工具, 用来检查基站的稳定性或基站不稳的情况下得到基站的精确坐标。

·帮助。提供软件操作使用的在线帮助。

## 2.4 测量机器人变形监测的软件实现

### 2.4.1 系统开发环境

基于徕卡(Leica)测量机器人进行开发, 以VB为编程环境, 采用数据库技术来实现各种数据的存储与管理。软件采用多文档界面, 各种类型的子窗口(包括数据表格窗口、图形窗口、表格按钮组合窗口等)都集成在一个大小可调的父窗口中, 尽量做到软件界面简洁、直观、好用。

### 2.4.2 数据库结构设计

基于数据库技术存储与管理初始信息、观测数据、计算结果、中间数据等多种数据的监测软件, 其库结构的设计是整个软件的基础, 结合监测软件涉及的各种数据, 设计了数据库主要表结构, 如表1~表7所示。

### 2.4.3 计算机与测量机器人之间的串行控制

GeoCOM是Leica测量机器人的串行通讯接口, 按点对点的方式进行通讯。相互通讯的两部分, 一个作为客户端(计算机应用程序), 一个作为服务器(测量机器人)。通讯由请求(request)和应答(replay)组成, 当客户端发送一个请求到服务器且服务器返回一个应答到客户端时, 即完成一次通讯<sup>[2]</sup>。

表1 测点初始信息表

Tab. 1 Initial Information of Target Points

字段名	类型	备注
点号	整型	
点名	字串型	
测点类型	布尔型	0表示参考点 1表示目标点
距离	双精度型	
盘左水平角	双精度型	
盘左垂直角	双精度型	距离、盘左水平角、盘左垂直角与X、Y、Z坐标中有一组即可
X坐标	双精度型	
Y坐标	双精度型	
Z坐标	双精度型	

表2 测站信息表

Tab. 2 Information of Base Station

字段名	类型	备注
测站X坐标	双精度型	
测站Y坐标	双精度型	
测站H坐标	双精度型	
仪器高	双精度型	
定向点数	整型	

表3 参考点信息表

Tab. 3 Information of Reference Points

字段名	类型	备注
定向点号	整型	
定向方位值	双精度型	
是否参与计算	布尔型	

表4 观测方案表

Tab. 4 Observation Schema

字段名	类型	备注
总期数	整型	
期间间隔时间	整型	
开始时间	时间	
结束时间	时间	与总期数有一即可
每期测回数	整型	
是否盘右观测	布尔型	
重复读数次数	整型	
观测等级	整型	

表5 计算成果表

Tab. 5 Calculated Results

字段名	类型	备注
点号	整型	
期数	长整型	
观测时间	时间	
X坐标	双精度型	
Y坐标	双精度型	
Z坐标	双精度型	
与首期X差	双精度型	
与首期Y差	双精度型	
与首期H差	双精度型	

表 6 限差表

Tab. 6 Observation Tolerance

字段名	类型	备注
等级	整型	
2c 差	整型	
指标差	整型	
测回差	整型	
归零差	整型	

表 7 观测成果表

Tab. 7 Observation Results

字段名	类型	备注
点号	整型	
测点类型	布尔型	
期数	长整型	
测回数	整型	
观测时间	时间	
温度	双精度型	
距离	双精度型	
盘左水平角	双精度型	
盘左垂直角	双精度型	
盘右水平角	双精度型	
盘右垂直角	双精度型	
补充说明	字串型	

GeoCOM 基于 SUN 微机系统的远程过程调用(RPC)协议, 有两种接口方式: ①低级的 ASCII 接口方式, 由请求和应答构成, 即计算机应用程序通过串行线发送一个请求到测量机器人, 等候应答并对应答解码。远程的测量机器人中有可以调用的过程, 且每个过程都对应着一个惟一的标识码, 每一标识码又与一个特定的请求(包括隐含的参数)相联系。这样可以通过发送 ASCII 请求, 并得到 ASCII 应答的方式来控制测量机器人。ASCII 接口一般用在不支持 MS-Windows 的平台上。②高级的函数接口方式, 就是在 C/C<sup>++</sup> 或 VB 中直接使用普通的函数调用, 这种方式只需简单的调用函数, 所有的请求、应答和解码都封装在 GeoCOM 的函数中。

GeoCOM 包含操作 Leica 系列全站仪的全部函数及命令, 而对测量机器人的函数与命令则集中在 GeoCOM 的一个子集 AUT (automatization) 中。下面对 AUT 中控制测量机器人的 ASCII 命令及函数举例简要说明。

ASCII 请求格式: [<LF>] %R1Q, <RPC> [, <TrId>] : [<p0>] [, <p1>, …] <Term>

ASCII 应答格式: %R1P, <GRC> [, <TrId>] : <RC> [, <p0>] [, <p1>, …] <Term>

格式中 [ ] 表示可选项。<LF> 用来初始化并清空接收缓冲区; %R1Q 表示该请求为 Geo-

COM 第一种类型的请求; <RPC> 为远程过程调用码, 其值在 0 ~ 65 535 之间; <TrId> 为任务标识符, 通常从 1 增加到 7, 且应答中包含相同的 ID 值; 分隔号 (:) 用来分隔头与后续的参数; <p0>, <p1>, … 表示参数 0, 参数 1, …; <Term> 为终止字串, 缺省值为 CR/LF; %R1P 表示为 GeoCOM 第一种类型的应答; <GRC> 为 GeoCOM 返回码, 此码反映通讯是否成功, 返回值为 0 表示成功; <RC> 为远程过程调用返回码, 此码反映远程过程调用是否成功。

GeoCOM 函数是以动态连接库的方式提供的, 在 VB 中使用 GeoCOM 函数, 必须先在模块级别中用 Declare 语句声明对动态链接库(DLL)中外部过程的引用, 然后再以普通函数调用的方式直接调用。

实例 自动目标搜寻函数, 该函数操纵测量机器人在一定的视场范围内自动搜寻目标。

#### VB 函数声明:

```
Declare Function VBAUTSearch2 Lib "GEOCOM 32.DLL" (Hz-Area As Double, V-Area As Double, bDummy As Boolean) As Integer
```

式中, Hz-Area 与 V-Area 分别指定水平与垂直视场搜索范围, 测量机器人将在此范围内搜寻棱镜目标并自动瞄准; bDummy 为保留参数, 通常赋值 FALSE。函数返回一个整型值, 表示搜索结果信息。

ASCII 请求格式: %R1Q, 9029, Hz-Area, V-Area, 0

ASCII 应答格式: %R1P, 0, 0, RC

RC 为返回结果代码, 如 RC-OK 表示搜索成功; ATU-RC-NO-TARGET 表示没有发现棱镜目标; ATU-RC-BAD-ENVIRONMENT 表示外界条件不适合观测等。

### 2.5 测量机器人变形监测软件的特殊数据处理方法

#### 2.5.1 距离差分改正

红外相位式测距仪测距基本公式为<sup>[3]</sup>:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{c_0 \varphi}{f n} + K \quad (1)$$

式中,  $c_0$  为真空中光速;  $f$  为测距频率;  $\varphi$  为相位值;  $n$  为大气折射率;  $K$  为仪器常数。

由文献知, 标称精度为  $\pm(1\text{mm} + 1 \times 10^{-6})$  的测距仪, 与测相有关的误差约为 0.2mm, 由调制频率误差引起的误差与边长成正比, 比例系数约为  $\pm(0.2 \sim 0.9) \times 10^{-6}$ , 而与大气折射率有关误差的比例系数可达  $\pm(0.6 \sim 0.4) \times 10^{-6}$ <sup>[4]</sup>。

因此, 当边长固定不变时, 可以认为不同时间同一距离测量结果的差值  $\Delta D$  主要是由于大气折射率的变化引起的。大气折射率可以通过测量温度、气压、湿度等气象元素求得, 但由于气象元素测定误差、折射率计算公式不严密、气象代表性差等原因, 大气折射率往往难以准确求得。假设在小的形变监测范围内气象条件相同, 那么变形监测系统中因有稳定的参考点, 存在多条固定边长, 利用每期所测距离与标准距离或高精度距离(如用ME5000测得的距离)之差即可求得每期大气折射率的差分改正系数, 而无需测定气象元素。

设某一固定边对应的标准大气折射率为  $n_0$ , 标准斜距  $d_0$  为:

$$d_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{c_0 \varphi_0}{f n_0} + K \quad (2)$$

第  $i$  次观测固定边斜距为  $d_i$ , 大气折射率为  $n_i$ , 因没有测定气象元素, 若仪器中使用的是大气折射率为  $n_0$  的缺省参考气象元素, 则

$$d_i = \frac{1}{4\pi} \frac{c_0 \varphi_i}{f n_0} + K \quad (3)$$

而其实际值应为:

$$d_i' = \frac{1}{4\pi} \frac{c_0 \varphi_i}{f n_i} + K \quad (4)$$

令:  $\Delta d_i = d_i - d_0 = d_i \left(1 - \frac{\varphi_0}{\varphi_i}\right)$   $(5)$

理论上同一边同一仪器两次测距之差为:

$$\Delta d = d_i' - d_0 = \frac{c_0}{4\pi f} \left(\frac{\varphi_i}{n_i} - \frac{\varphi_0}{n_0}\right) = 0 \quad (6)$$

因此有:  $\frac{\varphi_i}{n_i} = \frac{\varphi_0}{n_0}$   $(7)$

由式(5)、式(7)可得:

$$n_i = \left(\frac{d_i}{d_i - \Delta d_i}\right) n_0 \quad (8)$$

设第  $i$  次观测目标点斜距为:

$$S_i' = \frac{1}{4\pi} \frac{c_0 \varphi_{Si}}{f n_0} + K \quad (9)$$

则其实际值应为:

$$S_i' = \frac{1}{4\pi} \frac{c_0 \varphi_{Si}}{f n_i} + K = S_i \left(1 - \frac{\Delta d_i}{d_i}\right) \quad (10)$$

式(10)即为距离差分改正公式。距离的差分改正项从理论上来讲相当于气象改正项。从上面的分析可看出, 测相与频率误差越小, 则按上式所求出的气象改正项越精确。而对于 1km 的边长由测相和频率引起的误差仅约  $\pm 0.3\text{mm}$ , 因此, 差分后的距离应比测定气象元素求得气象改正后的距离精度要高。

为分析方便, 将式(10)简化。设  $S_i = d_i$ , 当

目标点至测站的距离与参考站至测站的距离相等时, 将参考站至测站的标准距离与第  $i$  次测得的距离求差, 再加到第  $i$  次目标点至测站的距离上, 即得第  $i$  次目标点至测站的差分距离, 即

$$S_i' = S_i - \Delta d_i = S_i - (d_i' - d_0) \quad (11)$$

式中,  $d_0$  为标准值无误差, 因此  $(d_i' - d_0)$  中包含了与  $d_i'$  相等的系统误差和偶然误差。对同一台仪器, 如果参考站至测站与目标点至测站的大气折射率相同, 那么  $S_i$  中也包含了同样的系统误差和偶然误差。显然, 差分结果  $S_i'$  中消除了系统误差, 其最终误差为  $\sqrt{2}$  倍的偶然误差。

由文献[4]可知, 标称精度为  $\pm (1\text{mm} + 1 \times 10^{-6})$  的测距仪, 在采用强制对中装置的情况下, 若不考虑系统误差, 其精度可达  $\pm (1\text{mm} + (0.2 \sim 0.9) \times 10^{-6})$ , 因此相应的差分结果精度可达  $\pm (0.35\text{mm} + (0.3 \sim 1.3) \times 10^{-6})$ , 在测距仪调制频率较为稳定的情况下, 差分结果应能达到最优精度  $\pm (0.35\text{mm} + 0.3 \times 10^{-6})$ 。当然, 以上的结果只是在理论分析的基础上得出的, 实际精度还需要长期的实测结果来检验证明。

由上可知, 参考点至测站的距离应尽量选得与多数目标点至测站的距离相近; 在有多个稳定参考点的情况下, 当  $\Delta d_i / d_i$  相差不大时, 可取其平均值来进行差分改正; 而  $\Delta d_i / d_i$  相差较大时, 应将目标点分区, 取其不同参考点的对应值来进行改正。

### 2.5.2 高差差分改正

自动极坐标测量系统中各变形点的高程都是通过三角高程的方法得到的, 而大气折光影响是单向三角高程测量的主要误差来源。为削弱大气折光的影响, 利用变形监测系统中的稳定参考点, 存在多个固定高差, 求得每期大气折光的差分改正系数, 对变形点高差实施改正, 从而提高高差差值的精度。

三角高程单向观测高差计算公式为:

$$h = S \cdot \sin \alpha + \frac{1-K}{2R} (S \cdot \cos \alpha)^2 + i - v \quad (12)$$

式中,  $S$  为斜距;  $\alpha$  为垂直角;  $K$  为大气折光系数;  $i$  为仪器高;  $v$  为棱镜高。

若忽略测角误差引起的差值, 对参考点的多次观测高差应相等, 而实际观测计算值往往不等, 其变化可以认为主要是大气折光系数  $K$  的变化引起的。如同距离差分改正一样的道理, 对参考点, 若已知固定高差为  $h_0$ , 第  $i$  次高差为  $h_i$ , 边长为  $d_i$ , 从式(11)可推求出差分改正系数:

$$\lambda_i = \frac{h_0 - h_i}{d_i^2 \cdot \cos^2 \alpha_i} \quad (13)$$

因每周期观测时间较短,可以认为大气折光对参考点,及邻近区域的目标点具有相同的影响,故对某一变形点,若第*i*次观测边长为*S<sub>i</sub>*,垂直角为 $\beta_i$ ,那么,加上如下式的改正数,即可削弱大气折光的影响:

$$\Delta h_i = \lambda_i \cdot (S_i \cdot \cos \beta_i)^2 \quad (14)$$

同理,对高差差分结果也可以作与距离差分类似的简化分析,在大气折光对参考点及邻近区域的目标点影响相同的前提下,高差差分结果精度相当于高度角测角误差引起误差的 $\sqrt{2}$ 倍。

在有多个稳定参考点的情况下,当 $\lambda_i$ 值相差不大时,可取其平均值来进行差分改正;而当 $\lambda_i$ 值相差较大时,应将目标点分区,取其不同参考点的对应的 $\lambda_i$ 值来进行改正。

### 3 应用试验

基于测量机器人的变形监测系统,笔者已在不同类型的变形监测中进行了试验或实际应用。对滑坡监测,选定三峡工程库区巴东滑坡进行了监测试验,滑坡体面积约1km<sup>2</sup>。经实地勘察,在滑坡体对岸稳定且位置较高的山体上设置基站,在滑坡体同岸的滑坡区域外设3个参考站,在滑坡体上均匀设置5个目标点,监测视线穿过长江,其长度在800m至1300m之间。使用TCA1800仪器,试验时恰逢下中雨,因此只进行了5个周期的观测,每期盘左、盘右观测一个测回。从试验结果来看,在雨中TCA1800自动目标识别情况良好,且基本上达到仪器标称精度。

对桥梁变形监测,在武汉长江二桥的高塔柱变形监测中使用了基于测量机器人(TCA1800)的

变形监测系统。斜拉桥是高度超静定结构体系,它的每个节点坐标位置的变化都会影响结构内力的分配,因此为保证桥梁的安全运营,定期对桥梁进行变形监测有非常重要的意义。因为斜拉桥塔、索、梁为连接一体的结构体系,除常规的监测项外,其变形监测还应加上高塔柱的摆动监测。

武汉长江二桥主跨400m,为预应力混凝土双塔双索面斜拉桥,塔高自基底至塔顶约190m,桥面以上约95m。考虑到塔、索、梁体系受温度、日照等因素影响,而使高塔产生周期性的摆动,此外因桥面动载、风振等影响,高塔会产生轻微震颤。高塔柱变形监测选择以下观测方案。

用TCA1800对高塔柱进行24h的自动周期观测,观测间隔约35min;只采用盘左位观测,同时为保证精度及可靠性,每期每点照准、读数4次。

目标点布置情况如图3所示,每塔柱布设4个,两塔共8个目标点;基站设在南岸江边桥轴线上游约180m处,观测距离一塔约860m,另一塔约470m;参考点两个,南岸基站上、下游各一个。

坐标系以桥轴线为X轴,南方向为正向,垂直桥轴线为Y轴,上游为正。观测成果中,南岸塔柱3、4号点变形过程线如图3所示。

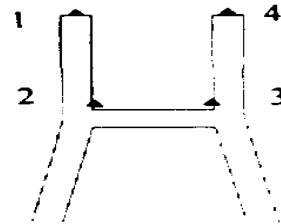


图2 塔柱目标点布置示意图

Fig. 2 Sketch Map of Pylon Targets Position

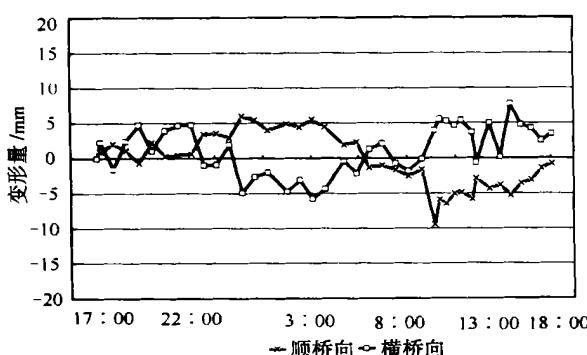
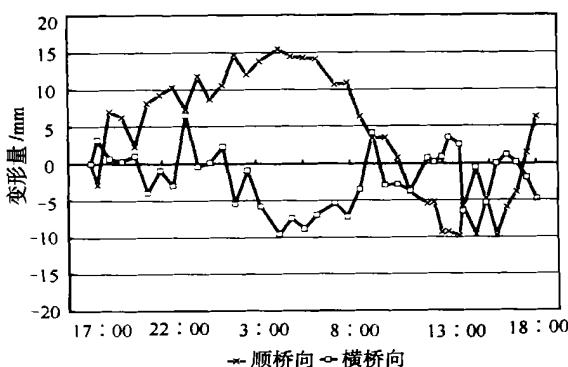


图3 3.4号点变形曲线

Fig. 3 Deformation Curve of Point No. 3 and Point No. 4



从图3中可知, 塔柱顺桥向在24h内呈现周期性变化规律, 且塔顶(4号点)与塔中部(3号点)具有相同的变化规律, 塔顶变化幅度约为中部的两倍; 横桥向在24h内也呈现一定的规律性, 但因变化幅度较小, 其规律不如顺桥向明显。结果证明基于测量机器人的变形监测系统完全能够满足塔柱变形监测的要求, 得到了好的监测结果。

## 4 结语

试验和实际应用表明, 基于测量机器人的变形监测系统具有高效、全自动、准确、实时性强、结构简单、操作简便等特点, 特别适用于小区域(约 $1\text{km}^2$ )内的变形监测, 可实现全自动的无人值守的形变监测。

## 参考文献

- 1 张正禄. 测量机器人介绍. 测绘通报, 2001(5): 17
- 2 Leica A G. GeoCOM Reference Manual. Heerbrugg, 1997
- 3 陈永奇. 高等应用测量. 武汉: 武汉测绘科技大学出版

社, 1996

- 4 张学庄, 王爱公, 张弛. 单波高精度测距系统的研究. 测绘学报, 1996, 25(3): 186~189
- 5 郭际明, 梅文胜, 张正禄, 等. 测量机器人系统构成与精度研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(5): 421~425
- 6 Gruen A, Kahmen H. Optical 3-D Measurement Techniques III. Heidelberg: Wichmann Verlag, 1995
- 7 张学庄, 王爱公, 张弛, 等. 测量机器人系统在五强溪大坝的应用. 大坝观测与土工测试, 1999, 23(3): 24~27
- 8 Kahmen H. Advances in Metrology with a New Generation of Measurement Robots. FIG XXI International Congress, Brighton, United Kingdom, 1998
- 9 李广云, 倪涵, 徐忠阳. 工业测量系统. 北京: 解放军出版社, 1994
- 10 谢建纲, 吴栋材. 大型斜拉桥施工测量. 北京: 测绘出版社, 1996

作者简介: 梅文胜, 讲师, 博士生。现从事测量机器人应用软件及数据处理方面的研究。

E-mail: mei.wensheng@263.net

## Software of Georobot Deformation Monitoring System

*MEI Wensheng<sup>1</sup> ZHANG Zhenglu<sup>1</sup> GUO Jiming<sup>1</sup> HUANG Quanyi<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

**Abstract:** In this paper, the working principle and characteristic of Georobot are briefly introduced, and then its application to deformation monitoring system is mainly studied. A main frame of the deformation monitoring system based on Georobot is presented and the corresponding software is designed. A special method which can effectively improve the monitoring precision of the system is applied in the data processing.

The whole Georobot deformation monitoring system consists of base station (Georobot station), reference points, target points, computer and software. The software in VB environment mainly comprises the following functional modules: project managing, system initializing, learning measure, data querying, data processing and results outputting.

Lastly, two experiments have been conducted by the Georobot deformation monitoring system which is developed by the authors. The result of the experiments proves that the Georobot deformation monitoring system has several advantages, such as high efficiency, high automation, real-time, high precision etc.

**Key words:** Georobot; deformation monitoring; difference

**About the author:** MEI Wensheng, lecture, Ph. D candidate. His major research orientations are Georobot application software and its data processing.

E-mail: mei-wensheng@263.net