

文章编号:1671-8860(2005)05-0451-05

文献标志码:A

# 三峡库区滑坡体变形监测的似单差方法与结果分析

余学祥<sup>1</sup> 徐绍铨<sup>2</sup> 吕伟才<sup>1</sup>

(1 安徽理工大学资源与环境工程系, 淮南市舜耕路 168 号, 232001)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:**根据高精度 GPS 变形监测的特点,以监测网的首期观测成果为基础,建立了单历元解算监测点变形量的似单差模型,讨论了接收机天线相位中心偏差的改正方法。该模型避免了周跳的探测与修复,可适用于动态、静态两种监测模式及单频接收机。利用三峡库区的实测数据对模型的正确性进行了检验。

**关键词:**GPS 监测; 单历元; 似单差模型

中图法分类号:P228.41

国内外许多学者对单历元解算模糊度方法进行了大量的研究<sup>[1~5]</sup>,并将这种方法用于单历元解算变形量。目前, GPS 变形监测正朝高精度、快速和实时化的方向发展。为适应这一发展趋势,笔者曾根据高精度 GPS 变形监测的特点,以监测网的首期观测成果为基础,利用监测时段的载波相位为基本观测量,建立了一种适合于高精度 GPS 变形监测的单历元、似单差的快速解算模型<sup>[6~9]</sup>。该模型可用于同步观测卫星数较少(如 2 颗)的情况。本文讨论了接收机天线相位中心的改正方法和似单差算法。

## 1 似单差方法简介

### 1.1 基本数学模型

对于高精度 GPS 监测网,通常隐含三个条件:①基准点都建立在地质条件好、稳定、易于长期保存的地方;②为降低仪器本身的观测误差对变形监测精度的影响,基准点与监测点间的距离(本文称为监测距离)一般不超过 3 km,最好在 1 km 左右;③对监测网进行首期观测时,最好与邻近的高等级国家 GPS 点联测;一般还需要采用精密基线解算软件(如 GAMIT 软件)来处理基线向量。也就是说,相对于监测点而言,基准点的变形

可以不考虑,同时通过首期观测以获得了基准点与监测点间精确的基线向量先验值。

设某一监测网中,在进行监测时段的观测时,相对于基准时段(首期观测)而言,基准点( $p_1$ )不动,监测点( $p_2$ )发生了变形。设  $p_2$  点变形后的位置为  $p_3$ ,变形量以  $d$  表示。现拟用监测时段的观测值获取形变量  $d$ 。

在历元  $t$ ,基准点  $p_1$  和变形后的监测点  $p_3$ (即首期观测时的基准点  $p_2$ )对第  $i$  颗卫星的载波相位观测值进行各项改正后可表示为:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{pq}^i = & \lambda \varphi_{pq}^i + \lambda N_{pq}^i - c \delta t_{pq} + c \delta t^i + \\ & h_{pq} \sin \theta_{pq}^i + \rho_{pq}^i \times \dot{\rho}_{pq}^i / c + \dot{\rho}_{pq}^i \delta t_{pq} - \\ & \Delta_{pq, \text{atmo}}^i - \Delta_{pq, \text{mult}}^i - \Delta_{pq, \text{phase}}^i - \Delta_{pq}^i \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $q = 1$  时代表基准点,  $q = 3$  时代表监测点。 $\varphi$  为载波相位观测值;  $\lambda$  为载波波长;  $N$  为初始整周未知数;  $\delta t_{pq}$  为接收机钟钟差;  $\delta t^i$  为卫星钟钟差;  $h$  为天线高;  $\theta$  为测站到卫星的高度角;  $\rho$  为观测伪距;  $\dot{\rho}$  为卫地距变率;  $\Delta$  分别为大气延迟改正、多路径效应改正、接收机天线相位中心改正及其他改正(如地球自转改正、潮汐改正等)。当用一定的方法计算出各种改正数或消除有关影响后,则式(1)中只有初始整周未知数  $N$  为待定量。

从图 1 可以看出,在由  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  和卫星  $i$  组成的空间四边形中,监测点  $p_2$  的变形量  $d$  以向量

形式可表示为:

$$d = \bar{\rho}_{p_1}^i - \bar{\rho}_{p_3}^i - b \quad (2)$$

式中,  $b$  为  $p_1$ 、 $p_2$  间的已知基线向量, 通过该监测网的首期观测获得;  $\bar{\rho}$  为按式(1)计算的载波相位观测值。因此, 如果对载波相位观测值进行合理的处理, 则由式(2)可直接获取监测点  $p_2$  的变形量  $d$ 。

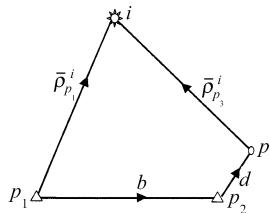


图 1 原理示意图

Fig. 1 Theory Sketch

为获取监测点  $p_2$  的空间变形量, 将式(2)投影到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个坐标轴方向上。为简洁起见, 略去式(1)中  $\Delta$  改正部分。以  $p_2$  点在  $X$  轴方向的变形量  $dX$  为例, 有:

$$dX = \bar{\rho}_{Xp_1}^i - \bar{\rho}_{Xp_3}^i - X_{p_1, p_2} \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)并顾及到方向余弦  $l^i$ , 进一步推导可得监测点  $p_2$  在  $X$  方向的变形量为<sup>[6~9]</sup>:

$$\begin{aligned} dX = & -\lambda l_{p_1}^i N_{p_1, p_3}^i + \{ l_{p_1}^i (\lambda \varphi_{p_1}^i - c \delta t_{p_1} + c \delta t^i) - \\ & l_{p_3}^i (\lambda \varphi_{p_3}^i - c \delta t_{p_3} + c \delta t^i) + \\ & (l_{p_1}^i h_{p_1} \sin \theta_{p_1}^i - l_{p_3}^i h_{p_3} \sin \theta_{p_3}^i) + \\ & (l_{p_1}^i \rho_{p_1}^i \times \dot{\rho}_{p_1}^i - l_{p_3}^i \rho_{p_3}^i \times \dot{\rho}_{p_3}^i) / c + \\ & (l_{p_1}^i \dot{\rho}_{p_1}^i \delta t_{p_1} - l_{p_3}^i \dot{\rho}_{p_3}^i \delta t_{p_3}) - X_{p_1, p_2} - \\ & l_{p_1}^i \lambda N_{p_1, p_3}^{1, i} - l_{p_1, p_3}^i \lambda N_{p_3}^i + (\Delta_{p_1, p_3, \text{atmo}}^i + \\ & \Delta_{p_1, p_3, \text{mult}}^i + \Delta_{p_1, p_3, \text{phase}}^i + \Delta_{p_1, p_3}^i) \} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $N_{p_1, p_3}^i$  为参考卫星的单差整周未知数;  $N_{p_3}^i$  为监测点上载波相位的初始整周未知数;  $N_{p_1, p_3}^{1, i}$  为双差整周未知数;  $X_{p_1, p_2}$  为基准点与监测点间首期观测的高精度基线向量( $X$  分量)。式(4)即为单历元获取 GPS 监测点变形量的数学模型。该式类似于载波相位观测值的单差模式, 只是考虑到了方向余弦。因此, 这种模型称为似单差模型, 与之相应的数据处理方法称为似单差法。

通过监测网的首期观测, 已获得基准点  $p_1$  和监测点  $p_2$  间的精确基线向量, 这就为解算双差整周未知数  $N_{p_1, p_3}^{1, i}$  提供了高精度的先验信息, 使得其解算变得快速、可靠和简单。从式(4)来看, 虽然表面上含有监测点上非参考卫星的整周未知数  $N_{p_3}^i$  (与卫星个数有关的量), 但由于监测距离较短, 其系数  $l_{p_1, p_3}^i$  (基准点与监测点对卫星的方向

余弦之差)很小, 因此, 利用对该卫星的载波相位观测值和伪距观测值即可求得  $N_{p_3}^i$ , 这种算法对解算的变形量不会产生显著的影响<sup>[6]</sup>。所以,  $N_{p_3}^i$  为已知量。

监测点的另两个变形分量  $dY$  和  $dZ$  具有与式(4)相同的形式, 只是方向余弦不同而已。因此, 对某一监测点而言, 从式(4)来看, 只有 4 个待定参数, 即三个变形分量  $dX$ 、 $dY$ 、 $dZ$  和参考卫星的单差整周未知数  $N_{p_1, p_3}^i$  与卫星的个数无关。

文献[6~13]定性分析了影响似单差法解算的变形量精度的主要误差来源, 文献[6]给出了有关影响因素的定量计算结果。总的来说, 影响变形信息精度的误差可以分为两大类: 一是由于在建立模型过程中的线性化或近似代替或略去次要因素所引起的模型误差, 这类误差可通过模型的完善或改化来消除或削弱<sup>[10~12]</sup>; 二是所利用的数据中含有误差, 即通常所说的 GPS 测量误差。这里仅介绍接收机天线相位中心偏差的改正方法。

## 1.2 接收机天线相位中心偏差的改正

接收机天线相位中心偏差改正的正确与否对似单差模型解算的监测点在天顶方向上的变形量影响最大, 特别是在采用不同型号的天线时, 两测站在同一卫星高度角下, 这一影响可高达 1.0 cm (见图 2)。因此, 在似单差模型中, 必须解决接收机天线相位中心偏差改正这一问题。

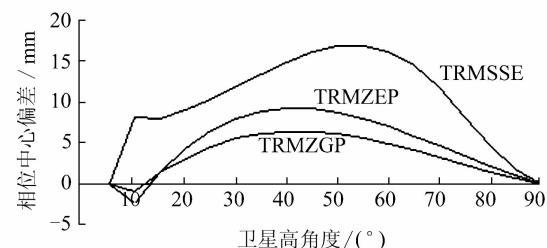


图 2 天线相位中心随卫星高度角的变化

Fig. 2 Antenna Phase Center Changing Upon the Satellite Elevation Angle

目前, 有关天线相位中心偏差的测定方法较多, 但如何在软件中采用一定的模型来进行改正讨论的要少一些。这主要是因为不同型号的天线其相位中心偏差不同; 同一天线, 当卫星高度角、方位角不同时, 相位中心偏差一般也不同。

GAMIT 软件对天线相位中心偏差改正采用两种基本方法, 即与卫星高度角有关的模型和与卫星高度角、方位角有关的模型。对不同类型天线, GAMIT 软件赋予惟一的六个字符标准代码 (见图 2), 并给出与相应模型所对应的相位中心偏差值数据表。其中高度角按 5°间隔划分, 方位

角按  $10^\circ$  间隔划分。对于某一种天线,若要计算其相对于某一历元、某一卫星的相位中心偏差,利用数据表进行一次或二次内插即可得到。图 2 给出了 3 种天线的  $L_1$  相位中心随高度角的变化规律。

从图 2 看出,对于标准代码为 TRMSSE 和 TRMZGP 的两种天线,当卫星高度角为  $45^\circ$  时,相位中心偏差之差约为  $9.8 \text{ mm}$ ;当高度角为  $60^\circ$  时,约为  $12 \text{ mm}$ 。在高精度变形监测中,有时要求尽量采用同一种类型天线,这也是为避免天线相位中心偏差改正不完善而引起的系统误差。

在利用式(4)研制的 GPS 单历元直接解算变形信息软件——GQuickS 软件中,采用了与卫星高度角有关的模型对天线相位中心偏差进行改正,取得了理想的效果。

### 1.3 似单差模型的基本算法

解算监测点变形信息前,每一历元应首先计算出卫星的瞬时坐标,测站到卫星的方向余弦、卫星高度角和方位角、卫星钟差改正、接收机钟差改正、大气延迟改正、双差整周未知数等基本信息<sup>[6]</sup>,然后按下述方法进行解算。

在  $t$  历元,将式(4)化为误差方程形式,有:

$$v_{X,i} = dX + \lambda l_{p_1}^i N_{p_1, p_3}^1 - \{ \cdot \} \quad (5)$$

式中,  $\{ \cdot \}$  为式(4)中  $\{ \}$  部分。取变形信息和参考卫星的单差整周未知数的初值为  $dX^0$  和  $N_{p_1, p_3}^{1,0}$ , 改正数为  $\delta X$  和  $\delta N_{p_1, p_3}^1$ , 则式(5)为:

$$v_{X,i} = \delta X + \lambda l_{p_1}^i \delta N_{p_1, p_3}^1 - \{ \cdot \} - dX^0 - \lambda l_{p_1}^i N_{p_1, p_3}^{1,0} \quad (6)$$

则有:

$$v_{X,i} = \delta X + \lambda l_{p_1}^i \delta N_{p_1, p_3}^1 - L_{X,i} \quad (7)$$

同理,对于变形信息的  $Y$  分量和  $Z$  分量有类似形式(仅方向余弦不同),则有:

$$\left. \begin{aligned} v_{Y,i} &= \delta Y + \lambda m_{p_1}^i \delta N_{p_1, p_3}^1 - L_{Y,i} \\ v_{Z,i} &= \delta Z + \lambda n_{p_1}^i \delta N_{p_1, p_3}^1 - L_{Z,i} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(7)、式(8)中,  $l, m, n$  为测站到卫星的方向余弦;  $L$  为相应的常数项。

在观测历元  $t$ ,若对  $s$  颗卫星进行了同步观测,则可组成形如式(7)、式(8)的  $s$  个误差方程,由此构成该历元的整体误差方程,然后根据最小二乘估计原理,即可求得监测点的变形信息和单差整周未知数。为保证计算精度,一般以第一次的结果为初值,再计算一次。若观测了  $k$  个历元,取各历元计算值的平均值,即可求得  $p_2$  点的平均变形量,并对其精度进行评价。

## 2 在三峡库区滑坡体变形监测中的应用

### 2.1 监测方案

三峡库区一滑坡体位于长江湖北段境内,为监测其变化情况,在远离滑坡体处布设了一个基准点(PG09),在滑坡体上布设了 8 个监测点(PG55~PG62),构成监测网。8 个监测点呈 3 列沿与长江基本垂直的方向布设(见图 3)。基准点和监测点都具有强制对中装置。观测时采用了 Trimble 公司的三种类型双频接收机,其天线的标准代码分别为 TRMSSE、TRMZEP 和 TRMZGP(见图 2)。首期观测时,采用 5 台接收机,基准点上观测 6 h,监测点上观测 2 h;以后各期观测时,采用 6 台接收机,基准点上观测 4 h,监测点上观测 1.5~2 h。天线高用三角板直接丈量到天线相位中心的参考点(ARP),数据采样率均为 15 s。

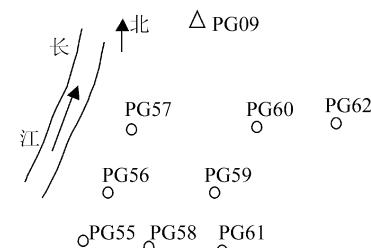


图 3 监测点布设示意图

Fig. 3 Sketch of Monitor Points Layout

### 2.2 数据处理方案

在首期观测时,先将基准点(PG09)与武汉跟踪站联测,采用 GMAIT 软件和精密星历解算,获得基准点的精确 WGS-84 坐标。再采用随机软件(TGO)解算基线向量,通过平差获得监测点的精确 WGS-84 坐标,即变形监测的基准。

对于以后各期的数据处理,先采用随机软件,再采用 GQuickS 软件解算。解算时,在准备好首期观测获得的基准点、监测点坐标和本期观测的 RINEX 格式观测值文件和星历文件,并定义好天线类型及天线高后,软件即可直接解算出监测点的变形量。通过两种软件解算结果的差异,可以检验本文建立的似单差模型的正确性。

### 2.3 数值结果与分析

为节省篇幅,表 1 中仅给出了北面两列点解算的变形量及其与随机软件解算结果的差异。在解算监测点变形量时,仅使用了 C/A 码伪距和

$L_1$  载波相位观测值。

表 1 GQuickS 软件解算的变形量

Tab. 1 Deformations Solved by GQuickS

期点 号	变形量/mm			差异/mm			
	N	E	U	dN	dE	dU	
57	+12.7	-20.2	-20.4	+1.9	+3.8	+4.0	
60	+12.6	-7.5	-9.3	-0.8	+2.8	-1.4	
2	62	+8.0	+13.3	-35.1	+1.1	+5.1	-0.5
56	+11.1	-39.0	-7.2	-2.9	-0.6	+5.8	
59	+13.2	-20.6	-11.3	+3.6	-2.7	-1.2	
57	+12.9	-36.9	-33.2	-1.8	+0.4	+0.7	
60	+23.6	-21.1	-12.9	-2.7	+1.6	-2.4	
3	62	+12.1	+11.7	-35.4	+1.3	+1.1	+1.7
56	+25.2	-52.4	-15.8	+2.8	+4.8	-1.0	
59	+10.9	-28.7	-14.6	-3.4	+0.7	-2.8	
57	+20.6	-59.7	-35.3	-1.6	-1.1	+4.5	
60	+40.2	-36.9	-12.8	-1.7	+1.1	+5.3	
4	62	+10.5	+0.2	-12.9	-2.3	+2.1	+5.0
56	+31.2	-102.9	-2.0	+0.8	-1.7	+4.8	
59	+21.8	-45.7	-25.9	+0.7	+2.7	-2.3	
57	+20.5	-64.5	-40.7	+0.9	+1.9	+2.9	
60	+48.5	-41.8	-21.6	+0.4	+1.9	-2.4	
5	62	+11.8	+0.4	-12.7	+2.6	+3.4	+4.9
56	+35.2	-119.4	-7.3	-0.9	-1.2	+3.9	
59	+26.3	-54.0	-36.6	+0.6	+1.6	-5.0	
平均差值			+0.3	+1.4	+1.3		
中误差			2.0	2.1	3.3		

若以随机软件(TGO)解算的变形量为参照,则表 1 中的差异值即为 GQuickS 软件与 TGO 软件解算变形量的互差。从平均意义上来说,似单差模型解算的变形量与 TGO 软件解算的变形量没有明显的差异,各分量的互差不超过 2 mm;但在个别点上,平面位置互差最大约为 5 mm,高程分量互差最大可达 6 mm。

表 1 中的中误差实际上是似单差模型解算的变形量的外部检核精度,它表示了该模型解算的变形量的准确程度。该模型的内部符合精度已利用试验数据在文献[6~12]中进行了介绍。从对该滑坡体的解算成果来看,平面位置精度为  $\pm 2.9$  mm,高程方向精度为  $\pm 3.3$  mm。对于变形监测来说,一般要求两个基准点,此时上述精度指标可得到进一步提高。

### 3 结语

根据高精度 GPS 变形监测的特点建立的单历元解算监测点变形信息的似单差模型,由于采用了单历元算法,因此避免了周跳的探测与修复。同时,从理论上来说,该模型可适用于静态监测和动态监测两种监测模式。由于以监测网的首期观测成果为基础,从而使得双差模糊度的解算变得

更为容易。由于直接利用监测时段的观测值解算变形量,从而避免了网平差这一环节,有利于提高数据处理的响应速度。

式(4)表示的似单差模型,曾利用试验数据进行了大量的检验<sup>[6~13]</sup>,通过本次在三峡库区滑坡监测中的实际应用,进一步说明了似单差模型在理论上是正确的。采用似单差模型研制的 GQuickS 软件,通过进一步完善后,可望在 GPS 变形监测领域得到广泛的应用。

### 参 考 文 献

- 1 Corbett S J, Cross P A. GPS Single Epoch Ambiguity Resolution. Survey Review, 1995, 33(257): 149~160
- 2 Han S S, Rizos C. Single-Epoch Ambiguity Resolution for Real-Time GPS Attitude Determination with the Aid of One-Dimensional Optical Fiber Gyro. GPS Solution, 1999, 3(1): 5~12
- 3 Moke E. Reliable Single Epoch GPS Processing Algorithm for Static Deformation Monitoring. Geomatics Research Australasia, 1997(70): 95~117
- 4 Deloach S. Continuous Deformation Monitoring with GPS. Journal of Surveying Engineering, 1989, 115(1): 93~110
- 5 陈永奇, Lutes J. 单历元 GPS 变形监测数据处理方法的研究. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 324~328
- 6 余学祥. GPS 变形监测信息获取方法的研究与软件研制:[学位论文]. 武汉:武汉大学, 2002
- 7 余学祥, 徐绍铨, 吕伟才. GPS 变形监测信息的单历元解算方法研究. 测绘学报, 2002, 31(2): 123~127
- 8 Yu X X, Xu S Q, Lu W C. New Method for Solving GPS Deformation Monitoring Information at Single Epoch. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 13(2): 159~165
- 9 Yu X X, Xu S Q, Gao W, et al. Similar Single-Difference Model and its Algorithm for Solving GPS Monitoring Information Directly at Single Epoch. Geo-spatial Information Science, 2003, 6(4): 51~56
- 10 余学祥, 徐绍铨, 吕伟才. 似单差模型的误差分析与算法改进. 铁路航测, 2002, 28(3): 1~4
- 11 余学祥, 徐绍铨, 吕伟才. 似单差法对起算数据的精度要求. 工程勘察, 2003(5): 43~45
- 12 余学祥, 徐绍铨, 吕伟才. 似单差模型中接收机钟差的单历元算法. 矿山测量, 2004(1): 9~12
- 13 徐绍铨, 余学祥. 用两颗 GPS 卫星进行变形监测的研究. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(1): 77~80

第一作者简介:余学祥,副教授,博士。主要从事 GPS 变形监测自动化研究。

E-mail: xxyu9166@yahoo.com.cn

# Similar Single-Difference Methodology and Results Analysis for Slope Objects Deformation Monitoring in Three Gorge Area

YU Xuexiang<sup>1</sup> XU Shaoquan<sup>2</sup> LÜ Weicai<sup>1</sup>

(1 Department of Resource and Environment Engineering, Anhui University of Science and Technology, 168 Shungeng Road, Huainan 232001, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the high precise GPS deformation monitoring, basing on the first period observation results of the monitoring network, the similar single-difference model of solving GPS monitor point deformation information at single epoch is built, and the receivers' antenna phase center offsets are discussed. This model avoids the troublesome problem of cycle slip detecting and repairing, and is not only applicable to the static and dynamic monitoring modes, but also suitable for the single receivers. The correctness of the similar single-difference model is verified with the practical data in Three Gorge Area.

**Key words:** GPS monitoring; single epoch; similar single-difference methodology

**About the first author:** YU Xuexiang, associate professor, Ph. D. He is engaged in the research on GPS deformation monitoring automation.

E-mail: xxyu9166@yahoo.com.cn

## 《武汉大学学报·信息科学版》征稿简则

本刊是由武汉大学主办、国内外公开发行的测绘及相关专业学术期刊, EI、PCK、CSA 等国际著名检索系统均收录本刊发表的论文。为进一步提高刊登论文的代表性, 发挥本刊在国内外的学术辐射优势, 特面向国内外公开征稿。

1. 稿件内容: 本刊主要刊登有关摄影测量、遥感、大地测量、工程测量、地图学、物理大地测量、地球动力学、图形图像学、地理信息系统、测绘仪器、计算机理论及应用、光电工程、通讯技术及电子信息工程、资源与环境等相关学科的学术论文, 稿件要求具有较高的学术水平或重大应用价值。所有来稿文责自负。

2. 稿件要求: 来稿应符合科技论文著作要求, 论点明确, 论证严谨, 内容创新, 数据可靠, 方法科学, 文字通达、简洁, 字数一般在 8 000 字以内。来稿应采用法定计量单位, 采用国家有关出版标准, 附 300 字以内的中文摘要和 1 000 单词以上的英文摘要, 并附有中英文关键词。摘要要有自含性, 要能反映论文的核心内容。作者署名应符合著作权法规定, 并附第一作者简介(中英文)、E-mail、通讯方式及所有作者的详细地址(中英文)。基金资助论文应注明基金名称、项目编号。

3. 投稿要求: 所有来稿应打印清楚, 交磁盘者须同时附打印稿; 图表、公式应清楚, 易混淆的字符应注明; 所附照片应符合制版要求; 参考文献著录内容齐全, 格式符合有关标准, 并按引用的先后顺序于文中标出; 不准一稿两投。一经投稿, 视为作者授权编辑部可作不影响作者论点的必要文字加工。

4. 鉴于本刊已整体加入《中国学术期刊(光盘版)》、“中文科技期刊数据库”、“万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群”及“台湾华艺电子期刊全文资料库”等, 若无特别声明, 所有投稿视为作者同意在本刊出版印刷版的同时授权出版光盘版及进入因特网。本刊所付稿酬包含此项收益。

5. 来稿经本刊组织的同行专家评议、审查同意刊登后, 将酌收版面费。一经利用, 即付稿酬。来稿一般不退。对于投稿两个月后无答复的稿件, 作者可以查询。

6. 本刊编辑部地址: 武汉市珞喻路 129 号, 武汉大学(测绘校区), 武汉大学期刊社信息科学学报编辑部, 邮编 430079, 电话(027)68778465。