

# 盾构姿态自动导向及多源数据融合处理方法

潘国荣, 李怀锋, 王穗辉

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对隧道空间狭小, 全站仪难以对盾构机上 2 个以上点进行测量, 提出利用智能全站仪、双轴电子倾斜仪组合导向控制技术, 在三维直角坐标转换模型的基础上将双轴电子倾斜仪测定的盾构机的俯仰角和扭转角作为观测值参与平差, 解决了多源数据采集、导向数据联合处理的问题。上海地铁 12 线、杭州地铁 1 号线等区间隧道的施工导向实践证明, 该方法可靠、实用。

**关键词:** 三维直角坐标转换; 7 参数; 盾构姿态; 倾斜仪; 俯仰角; 扭转角

**中图分类号:** U455.3

**文献标志码:** A

## A New Method of Shield Attitude Automatic Measurement and Multi-source Data Processing

PAN Guorong, LI Huai Feng, WANG Suihui

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A new method was put forward for shield-attituded automatic measurement. Due to the narrow space of underground tunnel and the difficulty in measuring more than 2 points by robotic total station, an integrated guidance method by robotic total station and clinometer was employed, then with the pitch and scroll of shield obtained from clinometer as observed data, the error adjustment was made based on 3D datum transformation, which solved multi-source data collection and process. The proposed method was successfully applied to the tunnel construction guidance of Metro Line 12 in Shanghai and Metro Line 1 in Hangzhou, which proved to be reliable and practical.

**Key words:** 3D datum transformation; seven parameters; shield attitude; clinometer; pitch; scroll

仪获取盾构上的特征点的坐标来计算盾构的姿态, 及时获取盾构机的姿态对于指导施工非常重要。文献[1]中介绍了目前我国应用广泛的前后标尺人工测量法。前后标尺法根据相似三角形原理, 通过前尺、后尺坐标推求盾首、盾尾的平面坐标; 但在曲线段, 由于设计轴线与相似三角形辅助线不重合从而会产生一定的计算误差。文献[2-3]通过解方程组求解盾首、盾尾的三维坐标, 其实质为点与点、点与平面间的距离公式。该解法数学模型简单, 但只能从多个固定参考点中选取 3 个, 没有多余观测, 不能作有效的检核。文献[4-5]采用的是通过测量盾构机上至少 3 个固定坐标点, 然后进行三维直角坐标转换, 求出盾构机轴线局部坐标系与实际三维空间坐标系的转换参数, 再利用转换参数求出盾首中心和盾尾中心点的实际坐标, 来计算盾构机的姿态偏差。该方法需要在盾构机上设定 3 个固定参考点, 并且每次测量过程中必须全部测出 3 个固定参考点。由于地下施工条件比较恶劣, 空间狭小, 通常情况全站仪只能测到 3 个固定参考点中的 2 个, 难以同时测到分布在盾构机上的 3 个固定参考点的坐标, 这样就使得以上方法难以适应地下隧道的各种工况, 因而就需要寻求采用其他手段获得数据来补充或弥补由于坐标点不够而难以确定盾构姿态的方法。

本文研究利用自动全站仪测定 2 个或以上控制点坐标数据与从固定在盾构机上的双轴电子倾斜仪读取的俯仰角和扭转角数据进行联合数据处理的方法, 来解决自动确定盾构姿态的问题。采用未简化的 7 参数模型并将双轴电子倾斜仪的数据作为限制条件, 按照最小二乘准则求解坐标转换参数, 确保了解算参数的准确。该模型已完成上海地铁 12 号线申江路至金海路、申江路至金京路区间隧道及杭州地铁 1 号线乔司北至临平高铁区间隧道的施工自动引导。

在地铁隧道盾构引导测量中, 通常是根据全站

收稿日期: 2012-02-21

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20120072110049); 上海市科委项目(10231200302)

第一作者: 潘国荣(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为精密工程测量, 工业测量与测量自动化。

E-mail: pgr2@163.com

通讯作者: 王穗辉(1962—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为测量数据处理。E-mail: wsh@tongji.edu.cn

实践证明,本文提出的基于全站仪和倾斜仪的盾构姿态自动测量及多源数据联合处理方法是可靠的。

## 1 关于三维直角坐标转换的数学模型

地铁施工中为了及时获取盾构机的姿态信息,需在盾构机上布设3个控制点,并事先测定这3个控制点与盾首、盾尾之间的相对关系,这种相对关系采用坐标表示,即称为标定坐标。工程实际施工定位的坐标系简称工程坐标系。通过控制点在标定坐标系和工程坐标系下的坐标以及双轴电子倾斜仪读取的俯仰角和扭转角建立三维直角坐标转换的关系。这里所定义的俯仰角是指盾首、盾尾连线相对于水平视线的上仰角或下俯角,扭转角是指盾构机绕盾首、盾尾连线的滚动角,这两个角度都是相对量,与坐标系无关。由于三维直角坐标转换的布尔沙模型只适用于小角度的转换,而本文需要任意角度的转换,因此采用如下的未简化的7参数模型。

设点  $P$  在工程坐标系  $O-XYZ$  中的坐标为  $(X, Y, Z)$ , 在标定坐标系  $o-xyz$  中的坐标为  $(x, y, z)$ , 两个坐标系的关系如图1所示。两个坐标系间的坐标转换公式<sup>[6-8]</sup>为

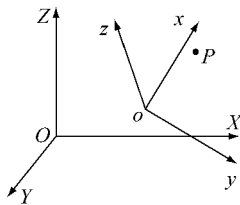


图1 两个坐标系的关系图

Fig.1 Sketch of two coordinate systems

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + k \mathbf{R}_Z(\gamma) \mathbf{R}_Y(\beta) \mathbf{R}_X(\alpha) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)^T$  为  $o-xyz$  的原点相对于  $O-XYZ$  原点的平移量;  $k$  为尺度参数;  $\mathbf{R}_X, \mathbf{R}_Y, \mathbf{R}_Z$  为旋

转矩阵,  $\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{R}_Y =$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \alpha,$$

$\beta, \gamma$  分别为绕  $X, Y, Z$  轴的旋转角度,

由于隧道地下观测条件稳定,一般情况下不考虑尺度的变形,故可认为  $k$  为1不变,此时坐标转换模型就为6参数坐标转换。为6个坐标转换参数进

行初始赋值,利用泰勒公式线性化后,该点的误差方程为

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha} & \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \beta} & \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \gamma} \end{bmatrix}.$$

$$(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ d\alpha \ d\beta \ d\gamma)^T - \begin{bmatrix} l_X \\ l_Y \\ l_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha} = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \frac{d\mathbf{R}_X}{d\alpha} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \beta} = \mathbf{R}_Z \frac{d\mathbf{R}_Y}{d\beta} \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \gamma} =$$

$$\frac{d\mathbf{R}_Z}{d\gamma} \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} l_X \\ l_Y \\ l_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} - \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

列出  $N$  个控制点的误差方程后,组成误差方程式如下,其权为  $W_1$ 。

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{B}_1 d\mathbf{X} - \mathbf{L}_1 \quad (3)$$

## 2 关于俯仰角和扭转角的数学模型

将盾尾中心  $P_T$  至盾首中心  $P_H$  的坐标偏差表示为向量  $\overrightarrow{P_T P_H}$ , 在  $O-XYZ$  坐标系、 $o-xyz$  坐标系

中分别表示为  $\begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Z_1 \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix}$ , 满足两个坐标系的转换关系,即

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

若此时盾构机俯仰角为  $\theta_1$ , 盾首中心与盾尾中心的恒定距离  $s_1$  不随坐标转换而变化,推出误差函数式为

$$\Delta Z_1 - s_1 \sin \theta_1 = 0 \quad (5)$$

$$\text{式中: } \Delta Z_1 = (0 \ 0 \ 1) \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix}.$$

下面根据双轴电子倾斜仪读出的盾构机扭转角推导误差函数式。如图2所示,以目标棱镜  $P_1$  为例,  $P'$  为点  $P_1$  在盾构机轴线上的投影点,可以根据解析几何解出  $P'$  在  $o-xyz$  坐标系的坐标,此时设向量

$$\overrightarrow{P' P_1} \text{ 在两个坐标系上分别表示为 } \begin{bmatrix} \Delta X_2 \\ \Delta Y_2 \\ \Delta Z_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix}, \text{ 同}$$

理也满足式(4). 而向量 $\overrightarrow{P'P_1}$ 与 $Z$ 轴夹角的变化量即为扭转角 $\theta_2$ . 若 $\theta_2$ 为正,表示盾构机姿态向右扭转;反之,向左扭转.

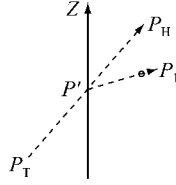


图2 扭转角示意图

Fig.2 Sketch of scroll hint

设 $\theta'_2$ 为 $o-xyz$ 坐标系下向量 $\overrightarrow{P'P_1}$ 与 $Z$ 轴的夹角,可以解算出其数值. 那么在 $O-XYZ$ 坐标系下向量 $\overrightarrow{P'P_1}$ 与 $Z$ 轴的夹角即为 $\theta_2 + \theta'_2$ ,可以得出下式:

$$\Delta Z_2 - s_2 \cos(\theta_2 + \theta'_2) = 0 \quad (6)$$

式中:  $\Delta Z_2 = (0 \ 0 \ 1) \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix}$ ;  $s_2$ 为向量 $\overrightarrow{P'P_1}$ 的模,不随坐标转换而变化.

结合式(5)和式(6),将其线性化,得出下面的误差函数式,其权为 $W_2$ .

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{B}_2 \mathbf{dX} - \mathbf{L}_2 \quad (7)$$

$$\text{式中: } \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{d\Delta Z_1}{d\alpha} & \frac{d\Delta Z_1}{d\beta} & \frac{d\Delta Z_1}{d\gamma} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d\Delta Z_2}{d\alpha} & \frac{d\Delta Z_2}{d\beta} & \frac{d\Delta Z_2}{d\gamma} \end{bmatrix},$$

$$\frac{d\Delta Z_1}{d\alpha} = (0 \ 0 \ 1) \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \frac{d\mathbf{R}_X}{d\alpha} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix},$$

$$\frac{d\Delta Z_1}{d\beta} = (0 \ 0 \ 1) \mathbf{R}_Z \frac{d\mathbf{R}_Y}{d\beta} \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix},$$

$$\frac{d\Delta Z_1}{d\gamma} = (0 \ 0 \ 1) \frac{d\mathbf{R}_Z}{d\gamma} \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix},$$

$$\frac{d\Delta Z_2}{d\alpha} = (0 \ 0 \ 1) \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \frac{d\mathbf{R}_X}{d\alpha} \begin{bmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix},$$

$$\frac{d\Delta Z_2}{d\beta} = (0 \ 0 \ 1) \mathbf{R}_Z \frac{d\mathbf{R}_Y}{d\beta} \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix},$$

$$\frac{d\Delta Z_2}{d\gamma} = (0 \ 0 \ 1) \frac{d\mathbf{R}_Z}{d\gamma} \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{L}_2 = \begin{pmatrix} s_1 \sin \theta_1 - \Delta Z_1 \\ s_2 \cos(\theta_2 + \theta'_2) - \Delta Z_2 \end{pmatrix}.$$

### 3 定权与联合平差

因为双轴电子倾斜仪读出来的俯仰角与扭转角数据也有一定的精度,并不能将其简单地作为限制条件,需根据全站仪测点精度与双轴电子倾斜仪标定精度来定权阵. 设单位权中误差为 $\delta_0$ ,各坐标分量误差分别为 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ ,则各坐标分量作为观测值的权分别为:  $W_x = \delta_0^2 / \delta_x^2, W_y = \delta_0^2 / \delta_y^2, W_z = \delta_0^2 / \delta_z^2$ . 俯仰角与扭转角观测值的权为:  $\mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} \delta_0^2 / \delta_1^2 & 0 \\ 0 & \delta_0^2 / \delta_2^2 \end{bmatrix}$ .

$$\mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} \delta_0^2 / \delta_1^2 & 0 \\ 0 & \delta_0^2 / \delta_2^2 \end{bmatrix}.$$

将误差方程联立,利用间接平差模型,采用联合平差,得改正数的最小二乘解为

$$\mathbf{dX} = (\mathbf{B}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2^T \mathbf{W}_2 \mathbf{B}_2)^{-1} (\mathbf{B}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{L}_1 + \mathbf{B}_2^T \mathbf{W}_2 \mathbf{L}_2) \quad (8)$$

求出6个坐标转换参数的改正数,根据改正数大小判断其是否收敛,若不收敛则进行迭代计算直至收敛,最后确定该6个坐标转换参数.

坐标转换模型的精度对数据转换结果的精度起决定性影响,本文采用的计算公式为

$$\sigma_m = \sqrt{(\Delta x_i + \Delta y_i + \Delta z_i) / (3N + 2 - 6)} \quad (9)$$

式中:  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ 为实际三维坐标系的公共点实测坐标与求得坐标转换参数后转换的公共点在实际三维坐标系的坐标之间的差值;  $N$ 为公共点的点数.  $\sigma_m$ 的值越大,转换模型的精度越低;反之,转换模型的精度越高.

### 4 工程算例

以上海地铁12号线申江路至金海路上行线工程区间的实测数据为例,始发井盾构拼装完毕后,在盾构机上适当位置焊接 $P_1, P_2, P_3$ 3个棱镜,并测量3个棱镜及盾首、盾尾中心共5个点在标定坐标系下的三维坐标(表1). 盾构机推进后,使用全站仪实时测出3个棱镜在工程坐标系的坐标,同时从双轴电

表1 3个棱镜与盾构首、尾中心初始标定数据

Tab.1 Initial calibration coordinates of three prisms and shield head and tail

点位	标定坐标系		
	X / m	Y / m	Z / m
P <sub>1</sub>	35 182.099	30 364.861	-7.279
P <sub>2</sub>	35 183.092	30 360.964	-7.196
P <sub>3</sub>	35 183.743	30 364.863	-7.288
盾首中心	35 182.907	30 368.405	-9.764
盾尾中心	35 182.934	30 361.525	-9.771

子倾斜仪读取角度数据,实时测定盾构首、尾中心三维坐标并计算盾构姿态偏差.下面采用 3 个棱镜在

不同里程位置下的两组坐标(表 2)分析盾构姿态定位情况.

表 2 3 个棱镜在工程坐标系下的两组坐标

Tab.2 Two groups of 3D coordinates of prism in engineering coordinate systems

点号	第一组			第二组		
	X /m	Y /m	Z /m	X /m	Y /m	Z /m
P <sub>1</sub>	34 922.063	30 912.435	-9.232	34 754.854	30 955.739	-9.421
P <sub>2</sub>	34 925.979	30 911.523	-9.139	34 758.787	30 956.574	-9.369
P <sub>3</sub>	34 922.818	30 913.897	-9.242	34 754.916	30 957.384	-9.429
倾斜仪	俯仰角: -0.08°		扭转角: -0.05°;	俯仰角: 0.53°		扭转角: 0.43°

采用 VC++ 编写程序,将表 2 中的数据采用 5 种不同组合,即:3 个棱镜情形、3 个棱镜结合角度情形、两棱镜 P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub> 结合角度情形、2 个棱镜 P<sub>2</sub>,P<sub>3</sub> 结合角度情形、2 个棱镜 P<sub>1</sub>,P<sub>3</sub> 结合角度情形来分别确定盾构首尾的坐标;将 5 种情形分别代入程序进行

计算,并将结果列入表中作比较.后 3 种组合为 2 个棱镜结合双轴电子倾斜仪数据模式,进行坐标转换后,得出工程坐标系下的盾构首尾中心坐标,具体数据见表 3 与表 4.

表 3 5 种组合计算得出的盾首中心与盾尾中心坐标(第一组)

Tab.3 Coordinates of head and tail by five combinations(first group)

模式	盾首中心			盾尾中心			中误差
	X /m	Y /m	Z /m	X /m	Y /m	Z /m	$\sigma_m$ /mm
P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> +P <sub>3</sub>	34 919.294	30 914.779	-11.728	34 925.414	30 911.635	-11.716	1.26
P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> +P <sub>3</sub> +倾斜仪	34 919.294	30 914.780	-11.727	34 925.413	30 911.636	-11.717	0.72
P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> +倾斜仪	34 919.293	30 914.778	-11.727	34 925.414	30 911.636	-11.716	1.54
P <sub>2</sub> +P <sub>3</sub> +倾斜仪	34 919.293	30 914.779	-11.726	34 925.412	30 911.633	-11.716	1.58
P <sub>1</sub> +P <sub>3</sub> +倾斜仪	34 919.293	30 914.778	-11.727	34 925.414	30 911.638	-11.717	1.61

表 4 5 种组合计算得出的盾首中心与盾尾中心坐标(第二组)

Tab.4 Coordinates of head and tail by five combinations (second group)

模式	盾首中心			盾尾中心			中误差
	X /m	Y /m	Z /m	X /m	Y /m	Z /m	$\sigma_m$ /mm
P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> +P <sub>3</sub>	34 751.324	30 956.693	-11.877	34 758.199	30 956.447	-11.941	2.04
P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> +P <sub>3</sub> +倾斜仪	34 751.325	30 956.704	-11.877	34 758.200	30 956.454	-11.941	1.75
P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> +倾斜仪	34 751.325	30 956.705	-11.873	34 758.200	30 956.457	-11.939	2.64
P <sub>2</sub> +P <sub>3</sub> +倾斜仪	34 751.324	30 956.701	-11.878	34 758.199	30 956.447	-11.941	2.53
P <sub>1</sub> +P <sub>3</sub> +倾斜仪	34 751.325	30 956.699	-11.877	34 758.200	30 956.458	-11.940	2.36

## 5 结论

根据文章所述的方法,笔者采用 VC++ 语言实现了算法程序与系统研制.经过在上海地铁 12 号线及杭州 1 号线地铁工程的实际应用,得出如下结论:

(1) 根据表 2 两组观测数据的计算表明,由 5 种组合计算出来的盾构首、尾中心坐标数据相差不大,偏差都在毫米级,5 种结果数据中相差最大的一个点位偏差为 10 mm,该精度足以满足盾构姿态的测量精度要求.

(2) 使用 3 个棱镜坐标数据结合俯仰角和扭转角计算的盾构首、尾中心的点位中误差最小;2 个棱

镜坐标数据结合俯仰角和扭转角计算过程的点位中误差最大,但是由于相对误差相差不超过 1 cm,故认为精度相当.

(3) 本文方法可以在全站仪最不利(即只测到 2 个坐标点)的情况下,通过利用双轴电子倾斜仪数据联合处理确定盾构的姿态;在全站仪测到 3 个坐标点的情况下,通过双轴倾斜仪的数据联合处理,可以提高盾构姿态的解算精度.

## 参考文献:

- [1] 高俊强,王维.基于前后标尺法的盾构姿态测量及精度研究[J].工程勘察,2010(1):70.

- GAO Junqiang, WANG Wei. Research on shield attitude determination and accuracy based on pre and post scale method [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010(1): 70.
- [2] 唐争气,赵俊三,彭国新. 盾构机实时姿态测量和计算方法的研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(11): 92.
- TANG Zhengqi, ZHAO Junsan, PENG Guoxi. Measurement and calculation method for real-time attitude of tunnel boring machine[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(11): 92.
- [3] 冯冬健,潘庆林,张凤梅. 地铁盾构施工中盾构机姿态定位测量的研究[J]. *工程勘察*, 2003(5): 57.
- FENG Dongjian, PAN Qinglin, ZHANG Fengmei. Research on shield attitude determination in subway construction [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2003(5): 57.
- [4] 潘国荣,周莹,张德海. 坐标转换模型在盾构姿态计算中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, 2006, 26(3): 84.
- PAN Guorong, ZHOU Ying, ZHANG Dehai. 3D datum transformation model for determining orientation of shield in subway construction [J]. *Journal Geodesy and Geodynamics*, 2006, 26 (3): 84.
- [5] 潘国荣,王穗辉,陈传林,等. 盾构姿态自动测量系统的开发与应用[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2010, 38(3): 459.
- PAN Guorong, WANG Suihui, CHEN Chuanlin, et al. Development and application of automatic surveying system in shield tunneling [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2010, 38(3): 459.
- [6] 潘国荣,李怀锋. 基于空间向量的空间圆形拟合检测新方法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(4): 106.
- PAN Guorong, LI Huaifeng. A new test method based on space vector in 3D circle fitting [J]. *Journal Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(4): 106.
- [7] 陈义,沈云中,刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准转换的一种简便模型[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2004, 12(29): 1101.
- CHEN Yi, SHEN Yunzhong, LIU Dajie. A simplified model of three dimensional-datum transformation adapted to big rotation angle [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 12(29): 1101.
- [8] 王敬庚. 空间解析几何[M]. 北京:北京师范大学出版社, 2004.
- WANG Jinggeng. *Analytic geometry* [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2004.

(上接第 618 页)

## 参考文献:

- [1] Amhar F, Jansa J, Ries C. The generation of true orthophoto using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM [J]. *International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 32(4): 16.
- [2] Skarlatos D. Orthophoto production in urban areas [J]. *Photogrammetric Record*, 1999, 16(94): 643.
- [3] Rau J Y, Chen N, Chen L. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view photos[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(6): 581.
- [4] Bang K, Habib A F, Kim K, et al. Comprehensive analysis of alternative methodologies for true ortho-photo generation from high resolution satellite and aerial imagery[C] //The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology MMT'07. Padua: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007: 1-5.
- [5] 钟成,黄先锋,李德仁,等. 真正射影像生成的多边形反演成像遮蔽检测算法[J]. *测绘学报*, 2010, 39(1): 59.
- ZHONG Cheng, HUANG Xianfeng, LI Deren, et al. Polygon based inversion imaging for occlusion detection in true orthophoto generation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 59.
- [6] Braun J. Aspects on true orthophoto production [C] // Proceedings of 49th Photogrammetric Week. Heidelberg: [s. n.], 2003: 205-214.
- [7] Sheng Y W. Minimising algorithm-induced artefacts in orthophoto generation: a direct method implemented in the vector domain[J]. *The Photogrammetric Record*, 2007, 22(118): 151.
- [8] Rau J Y, Chen N Y, Chen L C. Hidden compensation and shadow enhancement for true orthophoto generation[C/CD]// Proceedings the of 21st Asian Conference on Remote Sensing. Taipei: [s. n.], 2000.
- [9] Sheng Y W, Gong P, Biging G. True orthoimage production for forested areas from large scale arial photograph [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69 (3): 259.
- [10] Zhong C, Li H, Li Z, et al. A vector-based backward projection method for robust detection of occlusions when generating true ortho photos [J]. *GIScience and Remote Sensing*, 2010, 47(3): 412.
- [11] Habib A F, Kim E, Kim C. New methodologies for true orthophoto generation[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(1): 699.