

# 道路曲线数字化数据的联合平差模型<sup>\*</sup>

童小华<sup>1</sup> 刘大杰<sup>2</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 同济大学测量与国土信息工程系, 上海市四平路 1239 号, 200092)

**摘要:**在讨论道路曲线基本单元数字化数据处理模型的基础上, 进一步建立了道路曲线的联合平差模型, 探讨了以线形为特征的交通运输空间数据的平差处理方法, 提出了评价道路曲线数字化的精度指标。这些工作为研究交通空间数据的质量和建立动态分段模型以及道路 GIS 空间基础数据库是有益的。

**关键词:**GIS; 道路曲线; 地图数字化; 联合平差; 质量控制

中图法分类号: P207; P208

GIS 空间数据的精度与质量问题是 GIS 和 GIS-T(交通运输地理信息系统)研究中重要的基础问题<sup>[1~3]</sup>。研究交通运输空间数据的精度与质量, 有利于道路交通规划与管理决策的有效性和可靠性<sup>[4]</sup>。鉴于地图数字化仍然是当前 GIS-T 数据采集的主要方法之一, 道路曲线是道路空间数据的基本形式, 文献[5]以道路曲线数字化建立道路 GIS 基础地图为研究对象, 建立了道路线状要素(如道路直线段、圆曲线和缓和曲线)的数字化平差的基本模型。本文在此基础上, 比较系统地探讨道路曲线要素的基本数据处理模型和以基本单元组合的道路曲线的联合平差模型, 以及分段的道路曲线的整体平差模型, 并进一步讨论数字化道路曲线的精度评价方法。其目的在于: ①用于评价数字化道路曲线的精度, 为建立道路 GIS 数据库提供质量参考; ②为建立道路线性参照系统和动态分段的数据模型奠定基础。这一方面的应用将另文讨论。

## 1 道路曲线数据处理的基本模型

道路曲线由直线和规则曲线组成, 有严格的数学模型, 宜采用间接平差方法建立平差模型。设数字化观测值为  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 相应的平差值为  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ , 改正数为  $(v_{x_i}, v_{y_i})$ 。

### 1.1 直线段误差方程<sup>[3]</sup>

设直线方程为:

$$y = k_1 x + k_2 \quad (1)$$

由于  $(x_i, y_i)$  都有误差, 故取坐标  $\hat{x}_i$  和系数  $k_1, k_2$  为未知参数。可建立如下直线段数字化的误差方程:

$$\begin{aligned} v_{x_i} &= \delta \hat{x}_i - (x_i - x_i^0) \\ v_{y_i} &= k_1^0 \delta \hat{x}_i + x_i^0 \delta k_1 + \delta k_2 - (y_i - y_i^0) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $k_1^0 = \tan \alpha$ ,  $\alpha$  为直线的方位角;  $y_i^0 = k_1^0 x_i^0 + k_2^0$ 。

### 1.2 圆曲线段误差方程<sup>[5]</sup>

圆曲线的参数方程为:

$$\begin{aligned} x &= x_c + R \cos \varphi \\ y &= y_c + R \sin \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

取圆心坐标  $(\hat{x}_c, \hat{y}_c)$  和参数  $R, \varphi$  作为平差未知参数。微分后, 可建立圆曲线数字化点的误差方程:

$$\begin{aligned} v_{x_i} &= \delta \hat{x}_c + \cos \varphi_i^0 \delta R - R^0 \sin \varphi_i^0 \frac{\delta \varphi_i}{\rho} - (x_i - x_i^0) \\ v_{y_i} &= \delta \hat{y}_c + \sin \varphi_i^0 \delta R + R^0 \cos \varphi_i^0 \frac{\delta \varphi_i}{\rho} - (y_i - y_i^0) \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.3 缓和曲线段误差方程

根据缓和曲线局部坐标系(以缓和曲线起点为局部坐标原点, 以该点的切线方向为横轴, 以其法线方向为纵轴, 建立右手坐标系), 则有如下参数方程<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} \hat{x}_i &= l_i - \frac{l_i^5}{40R^2L_0^2} + \frac{l_i^9}{3456R^4L_0^4} - \dots \\ \hat{y}_i &= \frac{l_i^3}{6RL_0} - \frac{l_i^7}{336R^3L_0^3} + \frac{l_i^{11}}{42240R^5L_0^5} - \dots \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $l_i$  是从缓和曲线起点到第  $i$  点的缓和曲线长度;  $L_0$  为缓和曲线总长;  $R$  为缓圆点处的曲线半径。

缓和曲线局部坐标系  $x'By'$  与大地坐标系  $xOy$  之间的转换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos(\alpha + C \cdot \frac{\pi}{2}) \\ \sin\alpha & \sin(\alpha + C \cdot \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $\alpha$  是直缓点  $B$  处切线的方位角, 也就是直线段的方位角;  $(x_B, y_B)$  是缓和曲线起点即直缓点在大地坐标系中的坐标;  $C$  为缓和曲线偏转参数 ( $C=1$  表示右偏;  $C=-1$  表示左偏)。对式(5)、式(6)微分并考虑到:

$$k_1 = \tan\alpha, y_B = k_1 x_B + k_2 \quad (7)$$

得缓和曲线坐标点的误差方程式为(以曲线右偏为例):

$$\begin{aligned} v_{x_i} &= \delta x_B + \cos(\alpha^0 - \beta_i^0) dl_i + a_{x_i k_1} \delta k_1 + \\ & a_{x_i R} dR + a_{x_i L_0} \delta L_0 - (x_i - x_i^0) \\ v_{y_i} &= \delta y_B + \sin(\alpha^0 - \beta_i^0) dl_i + a_{y_i k_1} \delta k_1 + \\ & a_{y_i R} dR + a_{y_i L_0} \delta L_0 - (y_i - y_i^0) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\beta_i$  为缓和曲线上第  $i$  点的转折角;

$$\begin{bmatrix} a_{x_i R} & a_{x_i L_0} \\ a_{y_i R} & a_{y_i L_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha^0 & -\sin\alpha^0 \\ \sin\alpha^0 & \cos\alpha^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_{x_i R} & \tilde{a}_{x_i L_0} \\ \tilde{a}_{y_i R} & \tilde{a}_{y_i L_0} \end{bmatrix}$$

其中,

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{x_i R} &= \frac{l_i^5}{20R^3 L_0^2} - \frac{l_i^9}{864R^5 L_0^4} \\ \tilde{a}_{y_i R} &= -\frac{l_i^3}{6R^2 L_0} + \frac{l_i^7}{112R^4 L_0^3} - \frac{l_i^{11}}{8\ 448R^6 L_0^5} \\ \tilde{a}_{x_i L_0} &= \frac{R}{L_0} \tilde{a}_{x_i R}, \tilde{a}_{y_i L_0} = \frac{R}{L_0} \tilde{a}_{y_i R} \\ a_{x_i k_1} &= (-\tilde{x}_i^0 \sin\alpha^0 - \tilde{y}_i^0 \cos\alpha^0) \cos^2\alpha^0 \\ a_{y_i k_1} &= (\tilde{x}_i^0 \cos\alpha^0 - \tilde{y}_i^0 \sin\alpha^0) \cos^2\alpha^0 \end{aligned}$$

#### 1.4 道路线形的初步识别和参数近似值的计算

数字化采点结束后, 需要对采集的坐标离散点所组成的道路曲线进行初步的识别, 以对所采集的点进行分段处理, 即判断出分别属于直线段、缓和段或者圆曲线段的点群, 并根据分段的点群计算出参与平差参数的近似值, 以便构造出初步的道路曲线的基本构成元素和形状。对于道路线形的初步识别方法, 可以采用曲率-弧长判别法<sup>[7]</sup>和斜率判别法<sup>[8]</sup>。

曲率-弧长判别法是根据曲线的曲率和弧长之间的关系来进行判别, 是比较精确的方法。设  $k$  为曲线的曲率,  $s$  为弧长, 则有:

$$k = as + b \quad (9)$$

式中,  $a, b$  为常量。若  $a=b=0$ , 对应的是直线; 若  $a=0$  而  $b \neq 0$ , 对应圆曲线; 若  $a \neq 0$  且  $b \neq 0$ , 对应缓和曲线。

斜率判别法是一种粗略的方法, 主要是通过计算相邻点斜率的变化代替曲线的曲率来进行判别。其主要思路为: 计算数字化点群中每两相邻点所组成线段的斜率  $k_i$ , 每 3 邻点计算斜率差  $\Delta k_{i, i+1}, \Delta k_{i+1, i+2}$  以及每 4 邻点计算的斜率差变化  $\Delta k_{i+1, i+2} - \Delta k_{i, i+1}, \Delta k_{i+2, i+3} - \Delta k_{i+1, i+2}$ 。若  $k_i = k_{i+1}$ , 说明对应的点在直线段; 若  $\Delta k_{i+1, i+2} - \Delta k_{i, i+1} = \Delta k_{i+2, i+3} - \Delta k_{i+1, i+2}$ , 说明对应的点位于缓和曲线上; 若  $\Delta k_{i, i+1} = \Delta k_{i+1, i+2}$ , 则说明对应的点在圆曲线段。

取直线段上任意两点  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ , 可求得参数  $k_1$  的近似值为:

$$k_1^0 = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1) \quad (10)$$

则  $k_2^0 = y_1 - k_1^0 x_1, y_i^0 = k_1^0 x_i^0 + k_2^0$ 。当取  $x = x_i^0$  时,  $v_{x_i} = \delta \tilde{x}_i$ 。

对圆曲线段误差方程中的参数近似值按照如下方法计算。任取圆曲线上 3 点数字化点坐标  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  和  $(x_3, y_3)$ , 来计算圆心坐标  $(x_c, y_c)$  和半径  $R$  的近似值  $(x_c^0, y_c^0), R^0$  为:

$$\begin{aligned} x_c^0 &= \begin{vmatrix} c_1 & c_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \\ y_c^0 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ c_1 & c_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$R^0 = \sqrt{(x_1 - x_c^0)^2 + (y_1 - y_c^0)^2}$$

式中,

$$\begin{aligned} a_1 &= x_2 - x_1, b_1 = y_2 - y_1 \\ a_2 &= x_3 - x_1, b_2 = y_3 - y_1 \\ c_1 &= \frac{1}{2}(x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2) \\ c_2 &= \frac{1}{2}(x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2) \end{aligned}$$

同样, 可求得  $\varphi_i$  的近似值  $\varphi_i^0$  为:

$$\varphi_i^0 = \arctan \frac{y_i - y_c^0}{x_i - x_c^0} \quad (12)$$

对缓和曲线误差方程的参数近似值采用如下方法计算<sup>[8]</sup>。通过上面的方法得到圆曲线半径  $R$  的近似值, 直线段与圆曲线的切线交角即为缓和曲线的转折角近似值  $\beta_0^0$ 。由此可计算缓和曲线的近似长度  $L_0$ 。

由数字化坐标观测值  $(x_i, y_i)$  通过式(6)进行坐标转换计算各点在坐标系  $x'B'y'$  中的坐标近似值  $(\tilde{x}_i^0, \tilde{y}_i^0)$ , 再利用式(5)按迭代法求  $l_i^0$ 。

当曲线数字化点的误差较大, 参数的近似值计算比较粗略时, 在平差计算中, 也应进行迭代计算。

## 2 道路曲线数字化的联合误差方程

从以上误差方程可以看到, 在道路曲线中, 直线段有参数  $k_1, k_2$ , 圆曲线段有参数  $R$  和  $x_c, y_c$ , 缓和曲线段除有参数  $k_1, k_2$  和  $R$  外, 还含有  $x_B$  和  $L_0$ 。而道路曲线上的每一个数字化点都有一个必要观测, 故对于由直线—缓和曲线—圆曲线构成的道路曲线段(如图1), 若共有数字化点  $n$  个, 则有观测值  $2n$  个, 而必要观测值和平差中的未知参数为  $n+7$  个。

应用间接平差模型, 由式(2)、式(4)和式(8)建立道路曲线平差的联合误差方程为:

$$V = A \delta X - L \tag{13}$$

式中,  $A$  为误差方程式系数阵;  $L$  为相应的常数向量;

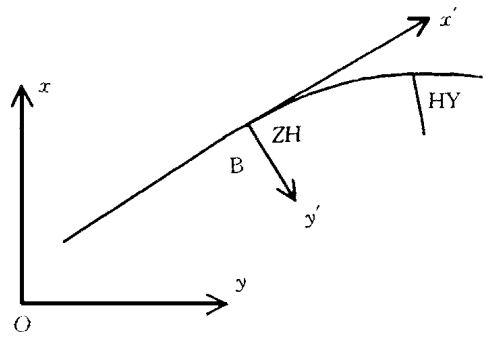


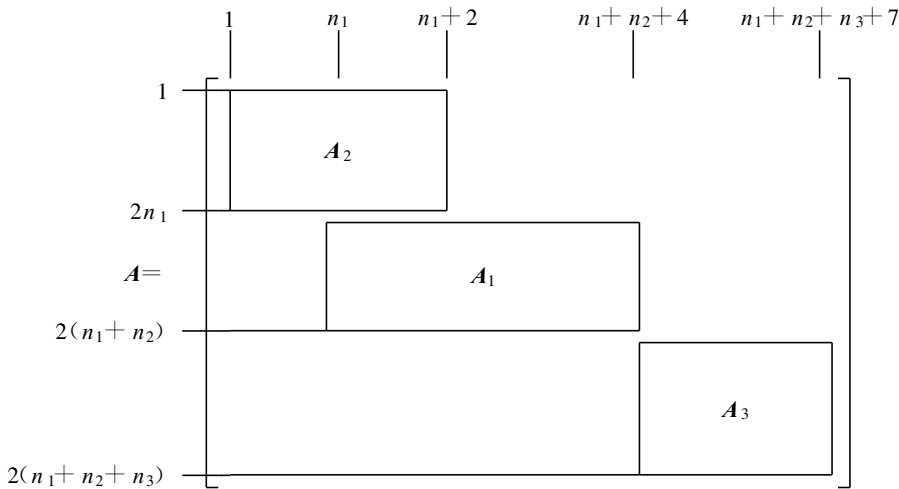
图1 直线、圆曲线和缓和曲线的组合

Fig. 1 The Combination of Straight Lines Circular Curves and Transition Curves

$$V = [v_{x_1} \ v_{y_1} \ \dots \ v_{x_{n_1}} \ v_{y_{n_1}} \ v_{x_{n_1+1}} \ v_{y_{n_1+1}} \ \dots \ v_{x_{n_1+n_2}} \ v_{y_{n_1+n_2}} \ \dots \ v_{x_{n_1+n_2+n_3}} \ v_{y_{n_1+n_2+n_3}}]^T$$

$$\delta X = [\delta x_1 \ \dots \ \delta x_{n_1} \ \delta k_1 \ \delta k_2 \ \delta x_B \ \delta L_0 \ \delta l_1 \ \dots \ \delta l_{n_2} \ \delta R \ \delta x_c \ \delta y_c \ \delta \varphi_1 \ \dots \ \delta \varphi_{n_3}]^T$$

且  $A$  的具体形式为:



其中,  $A_1, A_2$  和  $A_3$  的具体形式如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{x_1 k_1} & 0 & 1 & a_{x_1 L_0} & \cos(\alpha^0 - \beta_1^0) & 0 & \dots & 0 & a_{x_1 R} \\ a_{x_2 k_1} & 0 & 1 & a_{x_2 L_0} & 0 & \cos(\alpha^0 - \beta_2^0) & \dots & 0 & a_{x_2 R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{x_{n_2} k_1} & 0 & 1 & a_{x_{n_2} L_0} & 0 & 0 & \dots & \cos(\alpha^0 - \beta_{n_2}^0) & a_{x_{n_2} R} \\ (x_B^0 + a_{y_1 k_1}) & 1 & k_1^0 & a_{y_1 L_0} & \sin(\alpha^0 - \beta_1^0) & 0 & \dots & 0 & a_{y_1 R} \\ (x_B^0 + a_{y_2 k_1}) & 1 & k_1^0 & a_{y_2 L_0} & 0 & \sin(\alpha^0 - \beta_2^0) & \dots & 0 & a_{y_2 R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (x_B^0 + a_{y_{n_2} k_1}) & 1 & k_1^0 & a_{y_{n_2} L_0} & 0 & 0 & \dots & \sin(\alpha^0 - \beta_{n_2}^0) & a_{y_{n_2} R} \end{bmatrix}_{2n_2 \times (n_2+4)}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ & & \cdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ k_1^0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x_1^0 & 1 \\ & & \cdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & k_1^0 & x_{n_1}^0 & 1 \end{bmatrix}_{2n_1 \times (n_1+2)}, A_3 =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi_1^0 & 1 & 0 & -R^0 \frac{\sin \varphi_1^0}{\rho} & 0 \\ & & \cdots & & \\ \cos \varphi_{n_3}^0 & 1 & 0 & 0 & -R^0 \frac{\sin \varphi_{n_3}^0}{\rho} \\ \sin \varphi_1^0 & 0 & 1 & -R^0 \frac{\cos \varphi_1^0}{\rho} & 0 \\ & & \cdots & & \\ \sin \varphi_{n_3}^0 & 0 & 1 & 0 & -R^0 \frac{\cos \varphi_{n_3}^0}{\rho} \end{bmatrix}_{2n_3 \times (n_3+3)}$$

由下式计算多段(条)道路曲线的单位权中误差, 作为从总体上评定数字化曲线成果的质量和精度的指标:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M V_i^T V_i}{\sum_{i=1}^M (2n_i - t_i)}} \quad (14)$$

式中,  $M$  为平差的道路曲线个数;  $n_i, t_i$  为第  $i$  条曲线的数字化总点数和必要观测数。

按照下式可以评定未知参数以及道路曲线坐标数字化的精度:

$$Q_X = (A^T A)^{-1}, Q_L = A Q_X A^T, D_L = \sigma_0^2 Q_L \quad (15)$$

可将这些精度指标作为数字化道路曲线的精度元信息输入到 GIS 数据库中, 供用户进一步作不确定性分析时使用。

### 3 整体平差计算与精度

在道路曲线数字化实际情况中, 可对某一条道路曲线完整地数字化, 这可采用上述模型和方法进行平差处理。但是在大多数情况下, 往往是对道路曲线分段进行数字化, 因此, 有必要对分段的道路曲线进行整体平差处理。以两段(I 和 II)圆—缓—直—缓—圆组成的道路曲线为例, 推导道路曲线的整体计算公式(如图 2)。

对第 I 段、第 II 段建立曲线误差方程为:

$$V_1 = A_{11} \xi_1 + A_{1\eta} \eta - L_1 \quad (16)$$

$$V_2 = A_{22} \xi_2 + A_{2\eta} \eta - L_2 \quad (17)$$

式中,

$$V_1 = [v_{x_1}^{(1)} \ v_{y_1}^{(1)} \ \cdots \ v_{x_{n_1}}^{(1)} \ v_{y_{n_1}}^{(1)} \ v_{x_{n_1+1}}^{(1)} \ v_{y_{n_1+1}}^{(1)} \ \cdots \ v_{x_{n_1+n_2}}^{(1)} \ v_{y_{n_1+n_2}}^{(1)} \ \cdots \ v_{x_{n_1+n_2+n_3}}^{(1)} \ v_{y_{n_1+n_2+n_3}}^{(1)}]^T$$

$$\xi_1 = [\delta x_1^{(1)} \ \cdots \ \delta x_{n_1}^{(1)} \ \delta x_B^{(1)} \ \delta L_0^{(1)} \ \delta \varphi_1^{(1)} \ \cdots \ \delta l_{n_2}^{(1)} \ \delta R^{(1)} \ \delta x_c^{(1)} \ \delta y_c^{(1)} \ \delta \varphi_1^{(1)} \ \cdots \ \delta \varphi_{n_3}^{(1)}]^T$$

$$V_2 = [v_{x_{n_1+1}}^{(2)} \ v_{y_{n_1+1}}^{(2)} \ \cdots \ v_{x_{n_1+n'_2}}^{(2)} \ v_{y_{n_1+n'_2}}^{(2)} \ \cdots \ v_{x_{n_1+n'_2+n'_3}}^{(2)} \ v_{y_{n_1+n'_2+n'_3}}^{(2)}]^T$$

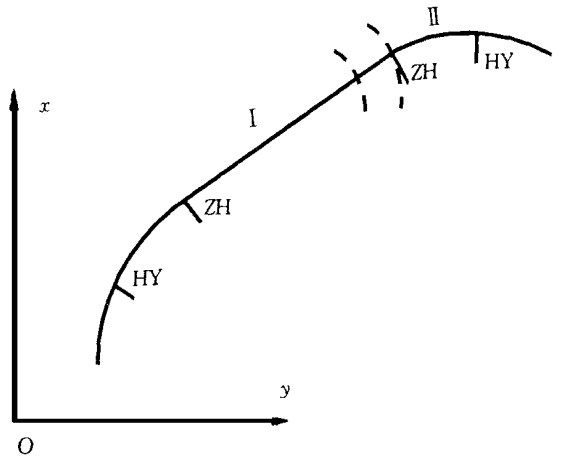


图 2 分段的道路曲线的整体平差

Fig. 2 The Combined Adjustment of the Segmented Road Curves

按照最小二乘原理  $V^T V = \min$ , 由误差方程式(16)、(17)组成法方程为:

$$\begin{bmatrix} A_{11}^T A_{11} & 0 & A_{11}^T A_{1\eta} \\ 0 & A_{22}^T A_{22} & A_{22}^T A_{2\eta} \\ A_{1\eta}^T A_{11} & A_{2\eta}^T A_{22} & A_{1\eta}^T A_{1\eta} + A_{2\eta}^T A_{2\eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \eta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{11}^T L_1 \\ A_{22}^T L_2 \\ A_{1\eta}^T L_1 + A_{2\eta}^T L_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

由式(18)求得联系参数  $\eta$  为:

$$\eta = N^{-1} W \quad (19)$$

待求参数  $\xi_1, \xi_2$  为:

$$\xi_1 = (A_{11}^T A_{11})^{-1} (A_{11}^T L_1 - A_{11}^T A_{1\eta} \eta)$$

$$\xi_2 = (A_{22}^T A_{22})^{-1} (A_{22}^T L_2 - A_{22}^T A_{2\eta} \eta) \quad (20)$$

式中,

$$N = (A_{1\eta}^T A_{1\eta} + A_{2\eta}^T A_{2\eta}) - (A_{1\eta}^T A_{11}) \cdot (A_{11}^T A_{11})^{-1} (A_{11}^T A_{1\eta}) - (A_{2\eta}^T A_{22}) \cdot$$

$$W = (A_{22}^T A_{22})^{-1} (A_{22}^T A_{21}) (A_{11}^T L_1 + A_{21}^T) - (A_{11}^T A_{11}) \circ (A_{11}^T A_{11})^{-1} \cdot A_{11}^T L_1 - (A_{21}^T A_{22}) (A_{22}^T A_{22})^{-1} A_{22}^T L_2$$

上述整体平差的单位权中误差为:

$$\sigma_0 = \sqrt{(V_I^T V_I + V_{II}^T V_{II}) / (n_I + n_{II} - 12)} \quad (21)$$

式中,  $n_I$ 、 $V_I$  和  $n_{II}$ 、 $V_{II}$  分别为第 I 段和第 II 段曲线数字化点数和相应的坐标改正数, 且有  $n_I = n_1 + n_2 + n_3$ ,  $n_{II} = n_1' + n_2' + n_3'$ 。

### 4 算例

以图 1 所示的组合道路曲线为例, 利用道路线形识别程序, 初步判别属于直线段、缓和曲线段和圆曲线段上的数字化点分别为 6、10、10 个, 存储于相应的数组单元, 同时计算出各段特征参数的近似值, 组成误差方程并进行迭代解算。表 1 是该段道路曲线平差参数的近似值、平差值以及设计值数据。

表 1 平差参数的近似值、平差值和设计值

Tab. 1 The Approximation, Adjustment and Design Values of the Parameters

参数	近似值	改正数	平差后参数值	设计参数
$k_V/m$	1.295	-0.002	1.296	
$k_V'/m$	-7.167	-0.116	-7.283	
$\alpha/rad$	0.913	0.001	0.914	0.915
$x_B/m$	507.295	-0.062	507.233	507.267
$y_B'/m$	649.772	0.036	649.808	649.917
$R/m$	106.624	-6.458	100.166	100.0
$\beta_0/rad$	0.317	-0.015	0.302	0.300
$L_0/m$	67.653	-7.522	60.131	60.0

分析以上计算结果可知:

1) 由表 1 中的计算数据可以看到, 道路曲线的特征参数平差后的数值与设计值十分接近, 这说明采用道路平差处理和迭代计算较好地提高了道路曲线数字化的精度, 从而恢复道路几何线形和获得曲线的特征参数, 这可为建立 GIS-T 空间数据参照系统以及建立动态分段的线状数据模型奠定基础。

2) 对若干条道路曲线进行重复数字化采样(采样点达 160 个), 通过以上方法计算各次数字化点的坐标改正数, 获得各段上数字化点的平差坐标值, 其总体精度指标为 0.102m; 而根据数字化采样的坐标值与已知解析坐标比较所计算精度值为:  $\sigma_{x^0} = \pm 0.065m$ ,  $\sigma_{y^0} = \pm 0.081m$ <sup>[5,9]</sup>。可见, 平差计算的精度与之是相近的, 这说明在通常无

法得到真误差来估计数字化数据精度的情况下, 通过平差处理来获得的观测值和参数的精度值可用来作为评定道路曲线数字化成果的一个指标, 以达到实施 GIS 空间数据质量控制的目的。同时, 这些精度指标也是进一步研究 GIS 空间数据不确定性以及误差传播的基础。

3) 上面以典型道路线形组合直线—缓和曲线—圆曲线为例, 建立了道路曲线数字化联合平差模型。事实上, 由这 3 种基本线形可以组合成多样的线形, 如直—缓—圆—缓—圆、圆—缓—缓—圆以及缓—圆—缓—缓—圆—缓等, 均可类似地按照前述方法建立相应的平差模型。笔者按照上述方法, 针对各种组合线形编制了较完整的道路曲线数字化的处理程序, 用以进行道路线形的联合平差和精度估计。

4) 应用本文提出的道路曲线的平差方法获得道路线形的几何参数, 从而建立了一种面向道路曲线要素的线性参照系统, 已经应用于公路交通事故的分析系统和事故的空间定位以及道路数据库中多重属性的动态分段管理。

### 5 结论

本文在探讨道路曲线数字化中单个基本单元直线、缓和曲线和圆曲线的平差模型的基础上, 建立了道路曲线数字化线形的联合平差模型以及相应的处理方法。实例计算表明, 本文提出的模型和方法能够较好地减弱道路曲线数字化误差的影响, 恢复道路几何线形和获得曲线的特征参数, 同时评价数字化道路曲线的精度, 为建立道路 GIS 数据库提供质量参考。这对于研究 GIS 曲线数据的精度和不确定性以及建立 GIS-T 中道路线性参照系统和动态分段的数据模型是有益的。

#### 参 考 文 献

- 1 张廷楷. 道路路线设计. 上海: 同济大学出版社, 1990
- 2 孟晓林, 刘大杰, 朱照宏. 道路曲线数字化数据处理的平差模型. 同济大学学报, 1998, 26(6): 669 ~ 673
- 3 杨东援, 朱照宏. 利用几何样条曲线建立道路平面线形模型. 华东公路, 1993, 1: 27 ~ 32
- 4 孟晓林. 适用于公路网规划和公路管理的地理信息系统(HGIS): [学位论文]. 上海: 同济大学, 1997
- 5 童小华, 刘大杰, 杨东援. GIS 数字化数据的平差模型及软件实现. 同济大学学报, 1998, 26(6): 682 ~ 685
- 6 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Quality and Accuracy of Positional Data in Transportation. Project 20-47, FY' 98. Washington D

- C, 1998
- 7 Quiroga C A. Accuracy of Linearly Referenced Data Using GIS. 78th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D C, 1999
- 8 Thapa K, Bossler J. Accuracy of Spatial Data Used in Geographic Information Systems. PE &RS, 1992, 58(6): 835 ~ 841
- 9 TRB Task Force on GIS-T. Criteria for Linear Spatial

Data Quality, Analyses and Integration with GPS for Location Reference. Transportation Research Board, Washington D C, 1997

作者简介: 童小华, 博士, 讲师, 现从事误差分析与处理、GIS 数据质量控制等研究。代表成果: GIS 中数字化数据误差的分布检验与处理等。

E-mail: xhtong@celiang.tongji.edu.cn

## Combined Adjustment Models of Road Curve Digitization in GIS

TONG Xiaohua<sup>1</sup> LIU Dajie<sup>2</sup>

(1 National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

(2 Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai, China, 200092)

**Abstract:** The accuracy and quality of spatial data are one of the fundamental issues in geographic information system (GIS) and geographic information system for transportation (GIS-T). Since the manual digitization is still one of the major methods for capturing the spatial data, error-processing models for the road curves from manual digitization are discussed in this paper. The road curves as the fundamental forms of the road spatial data are composed of regular geometric curves with vigorous mathematics expressions, therefore, it is pertinent to use parametric adjustment approaches to establish error processing models for the digitized road curves. By using least square theory, the parametric adjustment models including error equations and the calculations of parameter approximate values are first derived for the basic geometric features—straight lines, circular curves and transition curves that constitute the road curve alignments. The combined adjustment models based on those of basic geometric features are then presented for the road curve obtaining from manual map digitization. Therefore, the system parameters determining the whole road alignments are resolved simultaneously, and the indicators estimating the accuracy of digitized curve features are obtained as well. In the practical situation, the road curves are usually digitized from piece to piece, therefore, the practical adjustment models are further derived to process integrally the segmentally digitized road curves. Case studies are presented to illustrate the application of the models in the adjustment of a stretch of digitized road curve composed of the basic geometric features. By using developed models and methods for digitized road curve adjustment, the error influences on the road curve digitization are minimized and the accuracy of the digitized road curves is improved. The accuracy of the digitized road curve features is estimated with road curve adjustment method, as provides the quality indicators for the spatial databases of GIS-T. On the other hand, the system parameters of the digitized road curves obtained by using the developed models are very close to those of the designed road curves, as is the blocks for further development of the datum-based linear referencing system and geometric curve feature-oriented dynamic segmentation model for GIS-T.

**Key words:** GIS; road curve features; map digitization; combined adjustment; quality control