

# 一种基于可靠性的工程控制网优化设计新方法

张正禄<sup>1</sup> 罗年学<sup>1</sup> 黄全义<sup>1</sup> 梅文胜<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘科学与技术学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要:** 在论述工程控制网优化设计方法及网的精度、可靠性、灵敏度以及费用等准则的基础上, 提出了一种基于观测值内部可靠性指标的工程控制网模拟法优化设计的新思想和算法, 指出了该方法的优点和特点; 介绍了该优化设计方法所采用的“科傻”软件, 并用实例说明了用该方法进行工程控制网优化设计的计算步骤、优化效益以及优化设计的必要性。

**关键词:** 工程控制网; 优化设计; 可靠性; 多余观测分量  
**中图法分类号:** P221. 2; P258

按用途划分, 工程控制网可分为测图控制网、施工控制网、安装控制网和变形监测网; 按基准或已知数据划分, 可分为独立网(或称经典自由网)和约束网(或称强制网), 独立网只固定一个点和一个方向, 即已知一点的坐标和一条边的方位角, 网的尺度由测边确定; 约束网有两个或两个以上已知点。一般工程控制网以采用独立网为宜, 已知点和已知方位角可以在假定坐标系中给定, 也可以采用国家或地方坐标系的一个已知点和一个已知方位角。

网的优化设计有解析法和模拟法两种。解析法是以最优化理论为基础的严密方法, 其数学模型一般表示为:

$$\left. \begin{aligned} f(X) &\rightarrow \min \\ \varphi(X) &\geq 0 \\ \psi(X) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, 第一式为目标函数; 第二、三式为约束条件。优化设计的实质是通过给定的约束条件求目标函数的极值而得到最优解。目标函数可以是精度、可靠性、灵敏度或费用等指标, 约束条件也可以是上述指标。有人总以为解析法的结果是最优的, 实际上并非如此。因为目标函数和约束条件都是一种经过简化的数学模型, 不能完全反映客观实际。最有代表性的例子是以费用为目标函数或约束条件时, 都是以观测值的权的总和来代表建网费用, 实际上这是很粗糙的。而且, 绝大多数情况

下, 解析法是对观测值的权进行最佳分配, 优化后还存在取整的问题, 同一测站上还要划为便于操作的等权观测问题, 经过取整和调整后的观测方案不再是最优的了。解析法不但存在上述缺点, 同时还因优化任务不同, 目标函数和约束条件的数学模型也不尽相同, 故研制通用的解析法优化设计软件的难度较大。尽管解析法优化设计方面的研究已很多, 却难以推广, 在实际生产中也鲜有应用。

模拟法实际上是一种试算法。一般作法是: 根据优化的任务和设计者的知识和经验, 制定初始设计方案, 用模拟的观测值对该方案作平差计算, 对平差结果作评价, 对初始方案进行修改, 再计算、再修改, 如此多次重复, 直至认为满意为止。模拟法需要一个好的平差程序, 并且该程序还能作观测值模拟, 显示网图及各种精度指标和可靠性数值指标, 便于人机对话式操作, 算法好(如采用序贯算法), 速度快。但模拟法即使有一个好的优化设计程序, 仍依赖于设计者的知识和经验, 同样的要求, 甚至同样的初始设计方案, 不同人设计出的最终方案也有差别, 甚至差别还很大。

由于解析法和模拟法的缺陷, 造成在实际工作中人们很少对工程控制网作优化设计, 大多根据测量负责人的知识、经验和习惯进行布网和观测。对于高精度施工控制网或变形监测网, 往往精度和费用偏高; 而对于测图控制网, 大多用多级

拟合导线进行加密。这些作法虽然都符合规范要求,但谈不上网的优化设计,有不少弊病。

针对上述情况,本文提出了一种基于观测值内部可靠性指标的工程控制网优化设计方法。该方法本质上属于模拟法,但加进可靠性指标后,具有量化的优化设计准则,不以人的知识和经验为转移,优化结果既具有一致性,也不失严密性。该方法使用笔者研制的现代测量控制网数据处理通用软件包——科傻系统系列软件之二——Cosa2(或称科达普施 Codaps)。

## 1 观测值的内部可靠性及其性质

网的可靠性可分为网的总体可靠性、观测值的内部可靠性(也称局部可靠性)和外部可靠性。在此,主要讨论观测值的内部可靠性。

对于一个工程控制网来说,由其间接观测平差模型 $(l, Ax, \sigma_0^2 P^{-1})$ 可得观测值  $l_i$  的内部可靠性  $r_i$  为<sup>[1]</sup>:

$$r_i = (Q_{VV}P)_{ii} \tag{2}$$

且满足

$$\sum_1^n r_i = r = n - t \tag{3}$$

$$\nabla_0 l_i = \sigma_i \cdot \omega_0 / \sqrt{r_i} \tag{4}$$

式中,  $\omega_0$  为非中心参数,对于单个观测值粗差而言,其取值与显著水平  $\alpha$  和检验功效  $\gamma$  有关,常取  $2.79(\alpha=0.05, \gamma=0.80)$  或  $4.13(\alpha=0.001, \gamma=0.80)^{[2]}$ ;  $r$  为网的多余观测数,  $r_i$  为观测值  $l_i$  的多余观测分量,  $r_i$  可以反映控制网发现观测值  $l_i$  (中误差为  $\sigma_i$ ) 中粗差的能力。通过统计检验,  $r_i$  愈大,  $l_i$  中能被发现粗差的下界值  $\nabla l_i$  愈小;或对同一个粗差,检验功率愈大。因此,  $r_i$  被定义为观测值的内部可靠性。

观测值相互独立(本文只讨论这种情况)时,有:

$$r_i = 1 - \sigma_i^2 / \sigma_i^2 \tag{5}$$

式中,  $\hat{\sigma}_i$  为  $l_i$  的平差值的中误差。若观测值  $l_i$  的精度很高,则平差后的精度提高很小,有  $\hat{\sigma}_i \approx \sigma_i$ , 这时  $r_i \rightarrow 0$ 。若无多余观测,有  $\hat{\sigma}_i = \sigma_i$ ,  $r_i = 0$ ;反之,若  $l_i$  的精度很低,则平差后精度将显著提高,即  $\hat{\sigma}_i \ll \sigma_i$ , 这时  $r_i \rightarrow 1$ 。对已知边作边长观测,由于已知边的误差等于零,即  $\hat{\sigma}_s = 0$ , 则  $r_s = 1$ 。观测值的内部可靠性具有以下性质。

1)  $0 \leq r_i \leq 1$ 。  $r_i$  愈小,该观测值在网中的地位愈高,若  $r_i$  等于零,则该观测值不可缺少,否则将产生形亏。  $r_i$  愈大,该观测值在网中的地位愈

低,当  $r_i$  等于 1 时,则该观测值完全成为多余,即使删除之网平差结果也不变。

2)  $r_i$  愈小,该观测值的粗差愈难被发现,  $r_i = 0$  时,即使有大的粗差或错误也无法发现。根据内部可靠性与外部可靠性具有一致性的性质<sup>[3]</sup>,平差结果受粗差的影响随  $r_i$  的减小而增大。  $r_i$  愈大,则较小的粗差也能发现,  $r_i = 1$  时,观测值的粗差能完全确定,粗差对平差结果的影响随  $r_i$  的增大而减小。

3) 对于一个确定的网和设计方案,即在网形和网的观测值总数  $n$  (或多余观测数  $r$ ) 确定的情况下,观测值之间的精度相差愈大,则内部可靠性  $r_i$  的值相差也愈大。观测值的精度愈高,则相应的  $r_i$  愈小;观测值的精度愈低,其  $r_i$  愈大,即观测值的内部可靠性与观测值的精度成反比。

4) 对于确定的网和观测精度(方向与边长观测精度主要由仪器和测回数决定的情况下),多余观测数  $r$  愈大,则观测值的  $r_i$  也愈大反之,若  $r_i$  大,则  $r$  也必定大(建网费用将随  $r$  的增大而增加)。

5) 对于独立网来说,与边长和角度是不变量一样,观测值的内部可靠性  $r_i$  是与基准的位置无关的不变量。

## 2 几个有关问题

### 2.1 多余观测数和平均多余观测分量

设控制网的网点数为  $m$ , 已知点数为  $m_k$ , 未知点数为  $m_u$ , 已知边和已知方位角数分别为  $k_s$  和  $k_a$ , 进行有方向观测的设站数为  $m_l$ , 只进行有边长观测的设站数为  $m_s$ , 其中有方向或边长观测的已知点设站数为  $m_1$ , 总的观测值数为  $n$  (其中,方向观测值数为  $n_l$ , 边长观测值数为  $n_s$ ), 必要观测值个数为  $t$ , 多余观测数为  $r$ , 平均多余观测分量为  $\bar{r}_i$ , 其中,方向和边长的平均多余观测分量分别为  $\bar{r}_{li}$ 、 $\bar{r}_{si}$ , 方向、边长的最大最小多余观测分量分别为  $r_{lmax}$ 、 $r_{lmin}$ 、 $r_{smax}$ 、 $r_{smin}$ 。某观测值的多余观测分量用  $r_i$ 、 $r_{li}$ 、 $r_{si}$  表示。

对于按方向的间接观测平差模型,网的多余观测数  $r$  和平均多余观测分量可按下式计算:

$$r = n - t = n - (3m_l + 2m_s - 2m_1 - k_s - k_a) \tag{6}$$

$$\bar{r} = \frac{r}{n} \tag{7}$$

例如,对于附和导线,有  $m_1 = 2$ ,  $m_l = m_u + 2$ , 方向观测值数  $n_l = 2(m_u + 2)$ , 边长观测值数  $n_s = m_u + 1$ , 未知数个数  $t = 3(m_u + 2) - 2 \times 2$ , 故  $r = n_l + n_s$

—  $t = 2m_u + 4 + m_u + 1 - (3m_u + 6 - 4) = 3$ 。

表 1 列出了附和导线含不同未知点数时观测值个数和平均多余观测分量。当未知点多于 4 个

时,  $\bar{r}_i$  小于 0.2。从可靠性指标来看, 附和导线不能作为施工控制网和变形监测网。

在优化设计时, 为了使网有足够的可靠性, 在

表 1 附和导线的观测值个数和平均多余观测分量

未知点数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n$	8	11	14	17	20	23	26	29	32
$\bar{r}_i$	0.375	0.27	0.21	0.18	0.15	0.13	0.115	0.10	0.09

此提出平均多余观测分量设计值的概念, 用  $\bar{r}_i^0$  表示。对于不同用途、不同要求的网, 可以取  $\bar{r}_i$  的设计值  $\bar{r}_i^0$  为 0.3~0.6。由  $\bar{r}_i^0$  值, 可按下式计算观测值数的设计值  $n^0$ , 有:

$$n^0 = \frac{t}{1 - \bar{r}_i^0} \tag{8}$$

令  $\bar{n}_i^0 = 1 - \bar{r}_i^0$  为观测值的平均必要观测分量, 故有:

$$t = n^0 \cdot \bar{n}_i^0$$

2.2 边角精度匹配问题及可靠性判别法

随着全站仪的普遍应用, 纯测角网已逐渐消亡, 纯测边网也很少采用, 广泛应用的边角网或导线网存在边角精度的匹配问题。众所周知, 测边引起(或控制)纵向误差, 方向引起(或控制)横向误差, 它们都与边长密切相关。设方向中误差为  $m''_r$ , 测边的固定误差和比例误差分别为  $a$  和  $b$ , 边长为  $s$ , 则由方向中误差引起的横向误差为:

$$m_q = \frac{m''_r}{\rho''} \cdot S \tag{9}$$

由边长中误差引起的纵向误差为:

$$m_L = \sqrt{a^2 + (bs)^2} \quad \text{或} \quad m_L = a + bs \tag{10}$$

所谓边角精度完全匹配, 是指应满足  $m_q = m_L$ 。由于网的边长变化和仪器的限制, 边角精度匹配是相对的, 不匹配是绝对的。一般认为, 当  $m_q$  和  $m_L$  满足下述关系

$$\frac{1}{k} m_L \leq m_q \leq k m_L, (k = 1 \sim 2.5) \tag{11}$$

时, 边角精度是基本匹配的。因为观测值的精度与其可靠性成反比, 边角精度是否匹配也可通过可靠性来判别。对于初始方案即边角全测的情况(这时  $n_l \approx 2n_s$ ), 通过计算方向和边长的多余观测数和平均多余观测分量  $r_l, r_s, \bar{r}_{li}, \bar{r}_{si}$ , 可根据  $\bar{r}_{li}, \bar{r}_{si}$  的大小来判断边角精度是否匹配, 一般应满足  $\frac{1}{k} \bar{r}_{li} \leq \bar{r}_{si} \leq k \bar{r}_{li}$ ,  $k$  一般在 1~2.5 之间。这里的  $k$  和式(11)中的  $k$  值无直接联系, 且都是经

验值。若要求提高, 还可取小一些, 如  $k = 1 \sim 2.0$ 。

2.3 网的质量准则问题

网的质量准则主要是精度、可靠性、建网费用, 对于变形监测网还包括灵敏度和可区分性。

精度准则常采用的有点位精度、相对点位精度(包括误差椭圆)、特征值以及主元(或主分量)等指标。实际应用中, 计算点位精度和相对点位精度就足够了。值得注意的是, 点位精度与基准的位置有关, 对于独立网来说, 最好是将最靠近网的重心的点作为已知点, 以通过该点的最接近中心线的方向作为起始方向。这样可保证点位精度在数值上达到最小。实际上, 应将相对点位精度或最弱边精度作为精度准则, 因为它们是与基准的位置无关的不变量。在模拟法优化设计中, 应取先验单位权中误差计算各精度指标。

网的可靠性指标建议采用平均多余观测分量  $\bar{r}_i$  衡量, 而且  $\bar{r}_{si}$  和  $\bar{r}_{li}$  相差不应太大。对于相同的观测方案,  $\bar{r}_{si}$  和  $\bar{r}_{li}$  随边角精度的改变而改变, 例如若提高方向观测的精度, 则  $\bar{r}_{li}$  将减小。同时,  $(r_{lmax} - r_{lmin})$  与  $(r_{smax} - r_{smin})$  也不能太大。

由 §1 中观测值内部可靠性的性质 4) 可知, 由于  $r_i$  的总和反映了多余观测数, 因此, 也在很大程度反映了建网费用, 即  $r$  愈大, 建网费用愈高。

网的灵敏度表现为网点在特定方向上的精度。只有在特殊情况下才需要作灵敏度计算。一般可以采用误差椭圆近似地进行评价, 即网点在要求的方向上误差应较小, 如尽量靠近误差椭圆的短轴方向。

3 优化设计思想、计算步骤和特点

观测值的内部可靠性与观测值的精度有密切关系, 而观测值的精度又与建网费用有关。变形监测网的灵敏度实际是网点在特定方向上的精度, 它也取决于网的观测方案设计和观测值的精

度,此外,变形与粗差的可区分性也必然涉及到观测值的精度。因此,观测值的内部可靠性与观测值的精度、建网费用、监测网的灵敏度和可区分性存在密切的关系,有的关系可以简化为如式(3)、(4)、(5)或文献[4]所描述的数学公式,有的关系却难以进行数学表达。由观测值内部可靠性的性质和前述的讨论,基于可靠性的优化设计思想和计算步骤如下。

1) 一个网必须要有一定的多余观测,多余观测数  $r$  愈大,则网的可靠性愈好,但建网费用也愈高。

2) 在多余观测数一定的情况下,观测值之间的精度相差不要太大,边角观测值之间的精度应基本匹配。对于边角全测的初始方案,也可根据边角观测值的平均多余观测分量来判断边角精度匹配的情况。

3) 根据网的设计要求、所使用的仪器、图上设计和实地踏勘,确定观测精度和初始观测方案。观测精度应选取仪器所能达到的最高精度,使优化时有降低的余地;初始观测方案应对所有可能观测的边和方向进行全测,故有最大的多余观测数,是一个“肥网”或“密网”。

4) 模拟初始观测方案,进行平差计算,对精度、可靠性乃至灵敏度计算结果并进行分析。首先,检验确定的观测精度是否合理,若不合理,则需作适当调整。在观测值精度基本合理的基础上,基于观测值内部可靠性指标按从“肥”到“瘦”、从“密”到“疏”的策略<sup>[5]</sup>进行网的优化设计。具体地说,先确定一个恰当的  $\bar{r}_i^0$  值,再按式(8)计算  $n^0$ ,根据差值  $(n - n^0)$  确定应删去的观测值个数  $n_q$ 。对计算的观测值多余观测分量按从大到小的顺序排列,删去  $n_d$  个多余观测分量较大的那些观测值,然后重新作观测值模拟计算。如果观测值精度选择恰当,仅作一二次迭代计算即可得到网的优化设计方案。

该方法的特点是:初始方案是一个观测精度和观测值个数都有富裕的全边角网,整个优化设计过程中的关键是如何删除多余观测和调整观测精度。按此法删除的多余观测具有确定性且不致于引起形亏(这是该法的最大优点和特点)。初始方案中每测站上方向观测的零方向选择要恰当,最好选距离偏短的边。对于同一测站上的边和方向,还可根据通视条件和外界环境的影响给不同的精度,使结果更符合实际。

4 优化设计软件

本文所提出的优化设计方法可使用任何一种网平差软件进行,但要求软件还具有计算观测值的多余观测分量和模拟观测方案的功能。

科傻二<sup>[6]</sup>能按严密的间接观测模型对一、二维网进行从一个到数千个未知点,包括上万个观测值的等权或不等权平差。除平差功能外,还可自动推算网点近似坐标,自动生成最小独立闭合环<sup>[7]</sup>,进行贯通误差影响值估算、坐标换算、粗差探测与定值定位、方差分量估算等<sup>[8]</sup>。该软件包与网的优化设计有关的功能是:能作网的模拟计算,计算观测值的多余观测分量,根据需要输出各种精度评定结果,网图显绘和生成多种报表等。

软件要求先生成一个原始观测方案文件:网名°OB2。该文件的结构如下:

- I { 方向中误差  $l$ , 边长固定误差  $l(\text{mm})$ ,  
比例误差  $l(\text{ppm})$ , 精度号  $l$   
.....
- II { 点名, 点类型,  $X$  坐标(m),  $Y$  坐标(m)  
.....  
测站点, 照准点,  $A$ , 方位角值  
测站点点号
- III { 照准点点号, 观测值类型, 精度号  
.....

其中, I 为观测精度部分; II 为控制点坐标和已知方位角部分; III 为观测方案部分。

某模拟桥梁边角网的 OB2 文件为:

1.8, 3, 2( $m_1$ )  
(若只有一组观测精度,则仅有第一行,且  $m_1$  可省去。第 2 行如: 2.5, 5, 3,  $m_2$ )  
1, 0(表示已知点), 5 000, 5 000  
2, 1(表示未知点), 6 000, 5 000  
.....  
1, 2,  $A$ , 0.0(表示 1 至 2 点的已知方位角为  $0^{\circ}00'00.0''$ )  
1(下面按顺时针方向输照准点)  
 $SW, L$ (表示方向观测), 1(与  $m_1$  对应, 若只有一组观测精度,可省去)  
 $SW, S$ (表示边长观测), 1  
 $NW, L, 1$   
 $NW, S, 1$   
2,  $L, 1$   
2,  $S, 1$   
 $NE, L, 1$

NE, S, 1  
ME, L, 1  
ME, L, 1  
SE, L, 1  
SE, S, 1

2 (此测站下面的输入与第 1 站完全相同)

...

程序可根据网点坐标和观测方案自动生成平差所需要的输入文件(网名 IN2), 文件中的观测值系根据坐标反算后加上模拟的观测值精度。为此, 在程序中, 提供了生成正态标准随机数的功能, 对这些正态标准随机数还进行有各种检验(如正态性、周期误差、偏度、峰度、方差、均值检验等)。

模拟计算得到的观测值文件(网名 IN2)与实测得到的完全一致, 因不含粗差和系统误差, 故更符合最小二乘平差要求。通过平差计算网的各种精度和可靠性指标, 即可按前述的步骤进行网的优化设计。

5 算 例

5.1 算例 1 模拟桥梁边角网

该网共 8 个点, 其中点 1、2 位于桥轴线上, 北岸 4 个点, 南岸 3 个点, 江中岛上 1 个点。以 1 为已知点, 1 至 2 的方位角为已知方位角, 按独立网进行设计。优化设计要求为:  $\bar{r}_i^0 \geq 0.4$ , 最弱点精

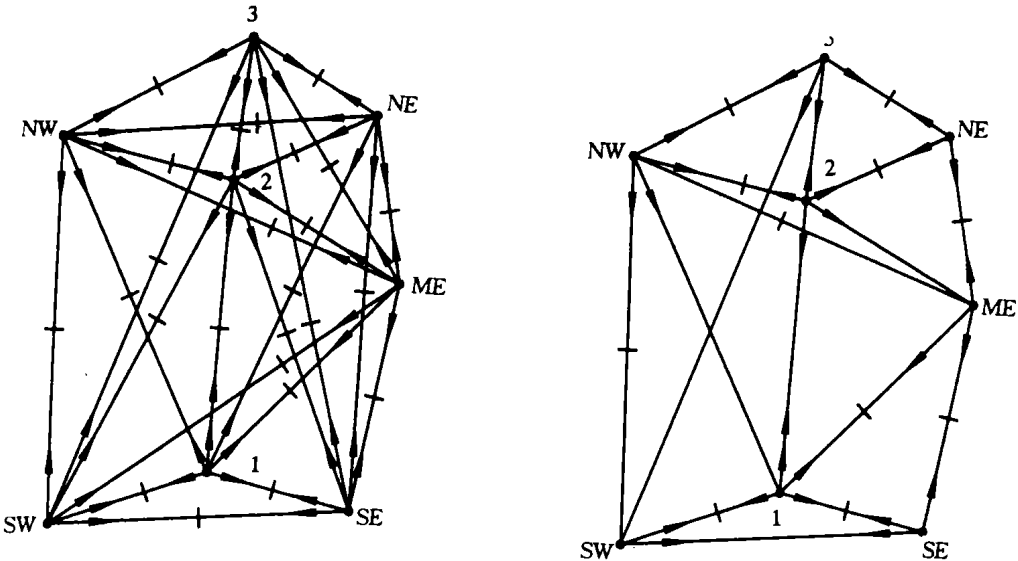
度  $m_{pmax} \leq 4.5\text{mm}$ , 最弱边精度  $m_s/s$  优于  $1/(12\text{万})$ 。初始方案为观测 50 个方向值, 25 条对向边的全边角网(如图 1(a)所示)。观测值精度为:  $m_r = 1.8''$ ,  $a = 3\text{mm}$ ,  $b = 2 \times 10^{-6}$ 。初始方案的计算结果为:  $n = 75$ ,  $t = 21$ ,  $r = 54$ ,  $\bar{r}_i = 0.72$ ,  $\bar{r}_{li} = 0.76$ ,  $\bar{r}_{si} = 0.64$  (边长观测值较方向观测值的多余观测分量要小, 说明边长的精度要高于方向的精度)。点位精度均值  $\bar{m}_p = 2.0\text{mm}$ , 最大点位精度  $m_{pmax} = 2.3\text{mm}$ ,  $m_s/s = 1/(17.5\text{万})$ , 显然质量太高。

按前述步骤进行如下优化设计与计算。

1) 取  $\bar{r}_i^0 = 0.5$ , 由式(11)计算得  $n^0 = 42$ , 应删去  $n_d = 75 - 42 = 33$  个观测值。按观测值的多余观测分量从大到小排序, 确定删除  $r_{li} \geq 0.80$  的观测值 22 个,  $r_{si} \geq 0.66$  的观测值 11 个, 重新作平差计算, 得:  $\bar{r}_{li} = 0.53$ ,  $\bar{r}_{si} = 0.40$ ,  $\bar{m}_p = 3.1\text{mm}$ ,  $m_{pmax} = 3.6\text{mm}$ ,  $m_s/s = 1/(14.2\text{万})$ , 网的质量仍然偏高。

2) 取  $\bar{r}_i^0 = 0.42$  进行计算, 得  $n^0 = 36$ ,  $n_d = 39$ 。在前述的基础上, 再删去 3 个  $r_{li} > 0.70$  和 3 个  $r_{si} > 0.59$  共 6 个方向和边长观测值, 计算得  $\bar{r}_{li} = 0.47$ ,  $\bar{r}_{si} = 0.29$ ,  $\bar{m}_p = 3.2\text{mm}$ ,  $m_{pmax} = 3.7\text{mm}$ ,  $m_s/s = 1/(13.9\text{万})$ 。网的质量仍偏高。

3) 由于  $\bar{r}_i$  已达到设计的极限值, 为此, 可根据测量仪器和作业习惯, 改变观测值的精度, 例如让测边的精度保持不变, 而  $m_r$  降为  $2.5''$ , 仍按前面优化计算所得到的观测方案进行计算



(a) 初始方案 (b) 优化方案

图 1 模拟桥梁边角网初始方案和优化方案

Fig. 1 The Simulated Triangur-trilateration Network for Bridge Project Primary Design and Optmrization Design

得  $\bar{r}_{li}=0.5$ ,  $\bar{r}_{si}=0.23$ ,  $\bar{m}_p=3.6\text{mm}$ ,  $m_{p\max}=4.3\text{mm}$ ,  $m_s/s=1/(12.1\text{ 万})$ 。该结果满足设计的要求, 所对应的为网的优化设计方案(参见图 1(b))。优化设计方案相对于初始方案, 共减少了 39 个观测值, 方向观测精度也从  $1.8''$  降低到  $2.5''$ , 达到综合最优。

需要说明的是, 改变起始点和起始方位角, 例如以  $SW$  为已知点,  $SW-1$  为已知方位角, 仍按网的优化设计方案计算, 所有的可靠性指标不变, 边长相对精度也不变, 但点位精度改变了,  $\bar{m}_p$  从  $3.6\text{mm}$  增大到  $8.7\text{mm}$ ,  $m_{p\max}$  从  $4.3\text{mm}$  变大到  $12.8\text{mm}$ 。

5.2 算例 2 某大型实测施工控制网

该网总点数 27 个, 其中已知点 10 个。在每个点上都设站观测, 其中在 21 个点上进行了方向

观测, 6 个点上只有边长观测, 共有 98 个方向观测值, 88 个边长观测值。观测精度为:  $m_r=1.0''$ ,  $a=1\text{mm}$ ,  $b=1\times 10^{-6}$ 。按公式(6)、(7)计算得:  $t=55$ ,  $r=131$ ,  $\bar{r}_i=0.70$ ,  $\bar{r}_{li}=0.69$ ,  $\bar{r}_{si}=0.72$  (有多条边的多余观测分量为 1)。由于该网是约束网, 可在相同基准下用点位精度和最弱边相对精度来衡量网的质量。优化方案取  $\bar{r}_i^0=0.54$ , 由式(11)计算得  $n^0=119$ , 应去掉 67 个观测值。将计算出的  $r_{li}$  和  $r_{si}$  按大小顺序排列, 结合经验和作业习惯, 去掉 31 个方向观测值, 36 个边长观测值, 作为优化方案, 该方案的观测精度不变,  $\bar{r}_{li}=0.54$ ,  $\bar{r}_{si}=0.53$ 。我们将实测方案和优化方案进行比较结果列于表 2, 表中的精度系根据验后单位数中误差计算。

从算例 1 的优化过程和优化结果可见, 本文

表 2 某大型施工控制网实测方案和优化设计方案比较表  
Tab. 2 The Real Observation and Optimization Project of a Large Construction Network

方 案	基 本 情 况					可靠性		精 度/mm				
	$m$	$m_k$	$n$	$n_L$	$n_s$	$r$	$\bar{r}_i$	$\bar{m}_p$	$m_{p\max}$	$m_s$	$s/m$	$s/m_s$
实测方案	21	10	186	98	88	131	0.70	1.3	1.7	0.8	11.32	14 000
优化方案	21	10	119	67	52	64	0.54	1.5	1.9	0.8	11.32	14 000

所提出的方法简单易行, 优化结果很少依赖人们的主观认识, 一致性较好。从初始方案到优化设计方案只需作一二次迭代计算即可。根据本文所提出的算法和公式, 容易编写网优化设计的自动计算程序。从算例 2 可见, 该方法可用于对现有网的评价, 优化方案与实测方案比较, 在精度降低非常小的情况下, 其工作量和建网费用的减小却是十分显著的。

6 结 语

工程控制网特别是施工控制网、变形监测网的优化设计仍然是一个值得研究和应用的问题。本文在深入研究观测值内部可靠性指标的基础上, 归纳了观测值多余观测分量与精度、建网费用乃至灵敏度等质量指标的关系, 提出了基于观测值可靠性的模拟法优化设计的思想和算法, 指出了该方法的特点和优点, 并在通用平差软件基础上研制了相应的优化设计程序。通过算例说明了网的优化设计过程, 用该思想和方法, 还可在对现有网平差的同时, 评价网在设计上的好坏。

参 考 文 献

1 佩尔策. 现代工程测量控制网的理论 and 应用. 张正禄

译. 北京: 测绘出版社, 1989  
2 李德仁. 误差处理和可靠性理论. 北京: 测绘出版社, 1988  
3 陈永奇, 张正禄, 吴子安, 等. 高等应用测量. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996  
4 张正禄, 李晓东. 观测值的灵敏度影响系数及其在监测网优化设计中的应用. 测绘学报, 1989, 18(4): 249 ~ 257  
5 张正禄. 工程平面控制网模拟法优化设计策略. 武汉科技, 1993(1): 1 ~ 4  
6 张正禄, 黄全义, 罗年学, 等. 全站式地面测量工程一体化自动化系统研究. 武汉测绘科技大学学报, 1999 24(1): 79 ~ 83  
7 冯 琰, 张正禄, 罗年学. 最小独立闭合环与附和导线的自动生成算法. 武汉测绘科技大学学报, 1998 23 (3): 255 ~ 259  
8 罗年学, 张正禄, 黄全义, 等. WIN95 版现代测量控制网数据处理通用软件的若干技术和算法. 见: 姚楚光, 张正禄. 水利水电测绘科技论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998. 169 ~ 174

作者简介: 张正禄, 教授, 博士生导师。现主要从事精密工程测量、变形监测分析与预报、测量数据处理和工程信息系统方面的科研和教学工作。主要代表成果有: 地面测量工程内外业一体化和数据处理自动化系统; 超站式 GPS 和全站仪集成测绘系统; 测量机器人、GPS 和多传感器专用仪器应用研究。已发表论文 120 余篇。  
E-mail: zlzhang@wtusn.edu.cn

## A New Method Based on Reliability of Engineering Control Network for Netsoptimization

ZHANG Zhenglu<sup>1</sup> LUO Nianxue<sup>1</sup> HUANG Quanyi<sup>1</sup> MEI Wensheng<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The optimization of engineering control network, especially that of the deformation monitoring network and precise control network for large construction is a very important work in network design. But in practice it is still difficult for the users to realize the network optimization with analytical or analogical method. In this paper, after interpretation on the optimization design methods of engineering control network and the quality standards such as precision, reliability, sensitivity and costs, a new algorithm of optimization design with simulative method for engineering control network based on the inner reliability of observations is presented. The relationship between inner reliability and other quality standards is discussed in detail. The great advantages and characteristics of this new method are that the result of optimization is determined uniquely and not on the knowledge and experience of the designer. Otherwise some new concepts, such as average observation redundant, the design number of observation and matching criterion for the precision of distance and direction observation, are proposed and defined. A general software packet for data processing and adjustment of surveying network (cosa) used for the network optimization design with this method is introduced. With this software, a primary network observation plan is simulated by \*.OB2 file. Then the correspondent observation file \*.IN2 will be created automatically according to the above \*.OB2 file. After adjustment, the redundant of every observation will be calculated. Based on the average redundant and observation design number, surveyors may make a decision that which observations could be deleted. Finally, two examples are given. One is a simulated triangu-trilateration network for bridge project. The work load of the final optimal measuring plan is reduced to 36 from the initial 75 observations and the precision and reliability are still satisfied for the design. The other is a real large construction network. For this network, there are 186 observations at the beginning. After the optimal processing the observations are reduced to 119 and the precision of the point with the lowest precision is not degraded significantly. The optimization benefits and necessity can be seen clearly through the above examples. Furthermore, this method can not only make the optimization of network, but also be used to interpret the rationality of an existing network.

**Key words:** engineering control network; optimization design; reliability; observations redundant

---

**About the author:** ZHANG Zhenglu, professor, Ph.D supervisor. He is concentrated on the research and education in precise engineering geodesy, deformation monitoring analysis and forecast, measurement data processing and engineering geo-information system. He has made contribution in the areas of automatic system of terrestrial control surveying data gathering and processing, integrated super GPS and total station measurement system, the application of measurement robot, GPS and special instrument with multi-sensors. His published papers are more than 120.

E-mail: zlzhang@wtusm.edu.cn