引文格式：苏秀永,徐卫红,陈昌耀. 顾及地理时空特征的变形监测基准网稳定性综合分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):33-36. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.12.007

顾及地理时空特征的变形监测基准网稳定性综合分析

苏秀永[1,2]，徐卫红[1,2]，陈昌耀[1,2]
（1. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司，浙江 杭州 310014；2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江 杭州 311122）

摘　要：为了有效区分、判别变形监测基准网复测计算时各网点点位差异成因，通常采用2种及以上的检验方法，相互佐证，以削弱模型误差。在确认观测值可靠、平差基准统一的前提下，针对无法采用t检验法和（或）平均间隙法检验点位稳定性的情形，提出使用限差检验法结合地理时空特征进行变形监测基准网点平面位移综合分析的方法。以工程实例进行剖析，从初步判断4个网点不稳定。经逐步分析，最终判定其中2个点发生了真实位移。结果表明，所提方法简单实用、易于理解掌握，得出的各网点稳定性综合分析结论符合客观规律、逼近真实，对今后同类工作具有借鉴意义。

关键词：变形监测基准网；平均间隙法；t检验法；限差检验法；地理时空特征；平面位移
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0033-04

Comprehensive Analysis of Deformation Monitoring Benchmark Network Stability Considering Geographical Spatio-temporal Characteristics

SU Xiuyong[1,2], XU Weihong[1,2], CHEN Changyao[1,2]
(1. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to effectively distinguish the causes of differences in the location of each network point during the remeasurement calculation of the deformation monitoring benchmark network, two or more testing methods are usually used to mutually support each other and weaken model errors. On the premise of confirming the reliability of observation data and the uniformity of adjustment benchmarks, we proposed a method of using the limit test method combined with geographical spatio-temporal characteristics to comprehensively analyze the plane displacement of deformation monitoring benchmark network points for situations where t-test and/or average gap method couldn't be used to test the stability of point locations. Using engineering examples for analysis, it was initially determined that four network points were unstable. After gradual analysis, it was ultimately determined that two of the points had experienced real displacement. The results show that the proposed method is simple, practical, and easy to understand and master. The comprehensive analysis conclusions of network point stability are in line with objective rules and approximate reality, which has reference significance for similar work in the future.

Key words: deformation monitoring benchmark network, average gap method, t-test method, limit test method, geographical spatio-temporal characteristic, plane displacement

变形监测是保障高层建筑、大型桥隧、水库大坝等重大工程安全运营的关键技术手段。通过建立变形监测基准网并定期复测，可以精确分析结构物的稳定性，及时发现安全隐患[1-3]。基准网点的稳定性分析是后续变形监测工作的前提，其核心在于准确甄别网点位移是由测量误差、平差模型误差引起，还是源于真实的地质构造与物理环境变化[4-8]。鉴于此，本文针对变形监测基准网在复测中常见的两期精度不一致问题，导致传统统计检验法适用性受限的现状，提出将限差法与地理时空特征相融合的稳定性分析思路[9-13]。并以某抽水蓄能电站上水库基准网的多次复测数据为例，验证该方法在非等精度条件下的有效性与可行性，为类似工程的变形分析提供参考。

1　平差基准、平差方法

有学者将平差基准分为固定基准、重心基准和拟稳基准，对应的平差方法是经典网平差、秩亏自由网平差和拟稳平差[14]。而起算数据是选择平差基准的条件，有多余起算数据（稳定点）的平差网称为经典附合网平差，仅含必要的起算数据的平差网称为经典自由网平差[15]，这2种平差方法采用固定基准；没有或缺少必要起算数据，假设网中各点具有相同或相似的

项目来源：中国电建集团华东勘测设计研究院重大科技计划资助项目（KY2021-ZD-03）。
第一作者简介：苏秀永（1976—），本科，高级工程师，注册测绘师，一级建造师，主要从事工程测量与管理工作，E-mail: 809863884@qq.com。

变形特征，采用全网重心基准，进行秩亏自由网平差[16]；没有或缺少必要起算数据，假设网中有部分点具有相对稳定性[17]，采用该类拟稳点组成拟稳基准，进行拟稳平差。

为了避免已知点之间位置误差导致平差网型被扭曲，变形监测基准网首次建网，通常采用一点一方向的固定基准，进行经典自由网平差，评估观测精度，获取建网成果。尽管变形监测基准网远离变形影响区，但受区域地质构造和地球物理环境影响，个别网点仍会发生不同程度的位移。规范[3]规定，变形监测基准网应每年至少复测一次。基于网中有部分点具有相对稳定性的假设，采用该类拟稳点组成拟稳基准对复测网进行拟稳平差。若存在个别网点不稳定，采用全网重心基准对复测网进行秩亏自由网平差，必然会导致变形量的配赋失真，扭曲稳定性分析结论。因此，拟稳平差理论提出至今，备受测绘界关注，已被广泛运用于复测网平差计算中。

2 检验方法

2.1 两期观测同精度检验

通常各期复测与首次建网是等精度观测，但由于存在观测误差，两期单位权方差估值不尽相同；前后两期非等精度观测，两期单位权方差估值一般不相同。使用 F 检验法对两期观测是否同精度进行检验：

1）作原假设 H_0：两期观测同精度，即 $\sigma_1^2=\sigma_2^2$；备选假设：两期观测不同精度，即 $\sigma_1^2\neq\sigma_2^2$；

2）构造一个服从 F 分布的统计量：$P=\dfrac{m_1^2}{m_2^2}$；

3）检验量：$F=F(\alpha,f_1,f_2)$。

式中，σ_1^2、σ_2^2 为两期单位权方差；m_1^2、m_2^2 为两期单位权方差估值，即两期观测平差验后中误差平方，且 $m_1^2>m_2^2$；α 为显著水平，通常取0.05；f_1、f_2 分别为两期观测多余观测总数。根据 m_1^2、m_2^2 计算 P，根据 α,f_1,f_2 查 F 分布分位数表，当 $P\leqslant F$ 时，接受原假设，否则认为两期观测不同精度。

经上述检验分析，判断两期精度一致，方可继续采用平均间隙法和（或）t检验法，逐点检验各网点稳定与否。一般变形监测网点数量不多时，统计检验误差较大[18]。因此，平均间隙法适用较大变形监测网网点稳定性检验，而t检验法不需要大子样[12]，适用各类大小变形监测网网点稳定性检验。文献[1]详细介绍了利用平均间隙法、文献[19]详细介绍了利用t检验法、文献[20]详细介绍了利用平均间隙法和t检验法对变形监测基准点稳定性进行验证的原理和步骤。使用数理统计检验基准点稳定性的方法不是本文讨论重点，且限于篇幅，故不作展开。

2.2 限差检验法

限差检验法的基本思想是假定各网点是等概率变形。利用观测方向值、观测边长较差，或采用相同平差基准的平差坐标分量较差与最大测量误差进行比较，判定各网点稳定与否。

2.2.1 观测量比较检验法

比较分析两点间的方向、边长2次测量改化值的较差，当较差小于其最大测量误差（一般取2倍中误差）时，即较差满足式（1）和式（2）时，认为2点相对稳定或位移不显著。

$$\Delta\beta<2m_\beta \tag{1}$$

$$\Delta D<2(a+bD) \tag{2}$$

式中，$\Delta\beta$ 为2点间的方向2次测量值的较差；m_β 为方向中误差，$m_\beta=\dfrac{1}{\sqrt{2}}m_\alpha$；$m_\alpha$ 为规范规定的各等级测角中误差；ΔD 为2点间的距离2次测量值的较差；a 为仪器测距标称的固定误差；b 为仪器测距标称的比列误差；D 为2点间距离。

2.2.2 最小二乘测量平差检验法

两期观测的平差值的较差 d_x、d_y，在满足规范[3]时，认为点位稳定。

$$\begin{cases}d_x<2\sigma\sqrt{2Q}\\ d_y<2\sigma\sqrt{2Q}\end{cases} \tag{3}$$

式中，d_x、d_y 为两期平差值较差；σ 为两期观测单位权中误差的平均值；Q 为各网点变形量的权系数。

因 $Q=\dfrac{1}{P}$，$P=\dfrac{\sigma^2}{m^2}$，式（3）可整理为下式：

$$\begin{cases}d_x<2\sqrt{2}\ \ m_x\\ d_y<2\sqrt{2}\ \ m_y\end{cases} \tag{4}$$

式中，P 为各网点的权；m_x、m_y 为各网点的坐标分量中误差。

又因点位差 $d_p=\sqrt{(d_x^2+d_y^2)}$，为简化计算，取坐标分量的中误差 $m_x=m_y$，根据误差传播规律，有 $m_P=\sqrt{2}\,m_x$ 或 $m_P=\sqrt{2}\,m_y$，由式（4）可变换为：

$$d_p<4\,m_P \tag{5}$$

式中，m_P 为两期观测各网点点位中误差的平均值，为方便应用，实际工作中常取复测时各测点的点位中

误差。

3　工程实例分析

3.1　首期建网情况

某抽水蓄能电站原监测基准网于2020年5月进行升级改造，其中涵盖上水库大坝、进出水口平面变形监测基准网由9个点组成，如图1所示。经过一个冻融周期，2021年4月开始监测基准网首期2次观测，平面变形监测基准网采用专二级边角网观测，高程监测基准网采用一等几何水准法观测，5月底观测外业全部结束。在外业观测数据检验合格的基础上，以TN1–4为起算点、TN1–4—TN1–6为起算方位角，进行一点一方向经典自由网平差，获取了新网的平面初始值。

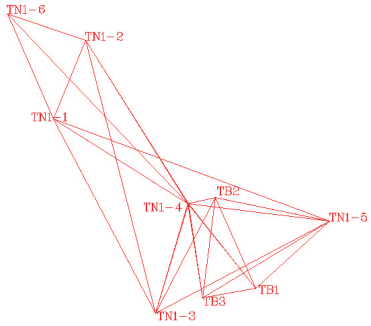


图1　上水库平面变形监测基准网图

3.2　第一次复测各网点稳定性分析

2021年11月进行第一期复测，采用与首期建网时相同的仪器设备、观测图形（观测路线）、观测等级和观测方法。在外业观测数据全部检验合格的基础上，初步采用经典自由网平差，评估复测网观测精度达到了专二级，获得复测单位权方差估值，再使用2.1节方法分析得知两期观测精度相同后，使用平均间隙法，分析结果表明9个基准网点均稳定。采用与首期建网相同的平差方法：仍以TN1–4为起算点、TN1–4—TN1–6为起算方位角，进行一点一方向经典自由网平差。两期平面坐标变化量均小于1 mm，考虑到测量误差影响，可以判定变形监测基准网全网点稳定，同时验证了首期建网初始值的正确性，建议继续使用首期建网成果。

该次复测与首期建网仅隔5个月，测区内未做区域影响性工程。这一地理时空特征，可以作为补充说明，解释各网点均稳定的合理性。

3.3　第二次复测各网点稳定性分析

2022年11月进行第二期复测，采用与首期建网、第一次复测时相同的仪器设备、观测图形（观测路线）、观测等级和观测方法。在外业观测数据全部检验合格的基础上，初步采用经典自由网平差，评估复测网观测精度达到了专二级，获得复测单位权方差估值，再使用2.1节方法分析得知相邻两期观测精度相同后，使用平均间隙法，分析出TN1–4、TB2两个基准网点不稳定。采用与首期建网相同的平差方法：使用首期建网成果，以稳定的TN1–3为起算点、长边TN1–3—TN1–2为起算方位角，进行一点一方向经典自由网平差。相邻两期复测平面坐标变化量：TN1–4的 d_x =–4 mm、d_y =2 mm；TB2的 d_x =–3 mm、d_y =–1 mm；其余各点均小于1 mm。基于测量误差影响考虑，除了TN1–4、TB2两个基准网点略有变动，其余各网点平面位置无明显变化，建议使用本期复测平差成果。

第二次复测与上次复测时隔13个月，期间坝体、坝址监测点之间修建了安全通道。TN1–4位于大坝中间外侧，TB2位于坝址一侧山坡山。鉴于上述地理时空特征变化，可以作为TN1–4、TB2两个基准网点不稳定的补充分析。

3.4　第三次复测各网点稳定性分析

2023年10月进行第三期复测，采用与首期建网、前期复测时同类的仪器设备、观测图形（观测路线）、观测方法，观测等级提高为为专一级。在外业观测数据全部检验合格的基础上，初步采用经典自由网平差，评估复测网观测精度达到了专一级，获得复测单位权方差估值，再使用2.1节方法，分析结果表明相邻两期观测精度不相同，因此不能使用均间隙法和（或）t检验法逐点检验各网点稳定性。将2023年10月第三期复测与2022年11月第二期复测的各方向值、经改化后的边长比较，发现与TN1–4、TB1、TB2、TB3相关的方向值、边长较差大于 $2m_\beta$、$2(a+bD)$，使用限差法初步判断TN1–4、TB1、TB2和TB3共4个点不稳定。

取2022年11月第二期复测成果坐标作为近似坐标，以TN1–1、TN1–2、TN1–3、TN1–5、TN1–6为拟稳点，结合2023年10月第三期复测观测数据进行拟稳平差，平差后各网点的坐标差、点位差、点位中误差如表1所示。

依据式（5）计算，使用限差法，由表1可以进一步判断TN1–4、TB1和TB3共3个点不稳定，其中TB3位移不显著。其余各点点位差 d_p 最大值为1.3 mm，可以认为处于相对稳定状态。

变形监测基准网点分布如图2所示，TN1–4位于大坝中间外侧，受上水库运行期日调节水位变化影响，一直呈现平面位移现象；TB2位于坝址一侧山坡

表1　初次拟稳平差后各网点差异量结果比较表/m

点名	d_x	d_y	d_p	m_P	$4\,m_P$
TN1-1	0.000 6	0.000 8	0.001 0	±0.000 8	±0.003 2
TN1-2	0.000 4	-0.000 7	0.000 8	±0.000 7	±0.002 8
TN1-3	-0.000 9	-0.000 7	0.001 1	±0.000 9	±0.003 6
TN1-4	-0.000 8	0.006 5	0.006 5	±0.000 6	±0.002 4
TN1-5	-0.001 0	0.000 7	0.001 2	±0.000 9	±0.003 6
TN1-6	0.001 0	-0.000 8	0.001 3	±0.000 9	±0.003 6
TB1	-0.007 0	0.000 1	0.007 0	±0.000 8	±0.003 2
TB2	0.000 8	0.000 6	0.001 0	±0.000 7	±0.002 8
TB3	-0.003 2	0.001 2	0.003 4	±0.000 8	±0.003 2

山，前期复测时略有平面位移，现已稳定；TB1所处的小山梁一侧有林场道路施工，本次一等水准复测该点，相对上期成果沉降了5 mm，充分说明了该点朝小山梁低处公路方向发生了三维位移。

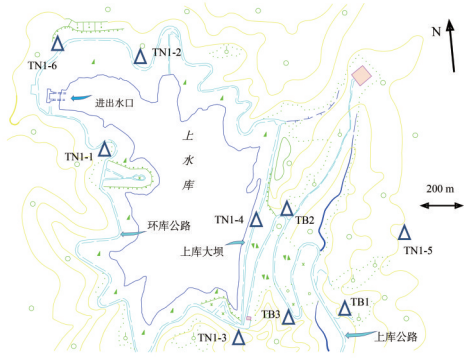


图2　上水库平面变形监测基准网点分布图

由两期坐标差计算出点位差方向，与实际地形（图2）可能发生位移的方向范围对比如表2所示。

表2　点位差方向与实际地形可能发生位移的方向范围比较表

点名	d_x/m	d_y/m	d_p/m	点位差方向/(°)	实际地形可能发生位移的方向范围/(°)	与实地符合情况
TN1-4	-0.000 8	0.006 5	0.006 5	97	85~190	相符
TB1	-0.007 0	0.000 1	0.007 0	179	135~250，300~360	相符
TB3	-0.003 2	0.001 2	0.003 4	159	90~130	不相符

结合表2内容分析，最终判定TN1-4、TB1为不稳定点，以其余各点为拟稳定点进行拟稳平差，提交复测平面成果。

4　结　语

限差法数学模型易于构造浅显的地理时、空特征理论为众所周知，二者结合进行变形监测基准网点稳定性综合分析，互相佐证，简单实用。通过工程实践，充分证明了这一观点。本研究所提方法，解决了因两期观测精度不同导致常用的平均间隙法、t检验法检无法使用的问题。

地理时、空特征与变形监测网点稳定性密切相关，也可与其他诸多传统检验方法结合，进行网点稳定性综合分析，得到的结论无疑会更切合实际，值得在今后工作实践中探索。

参考文献

[1] 苏秀永,胡航,马向阳. 变形监测网稳定性分析与数据维护的关键技术[J]. 地理空间信息,2023,21(9):22-26

[2] 黄声享,尹晖,蒋征. 变形监测数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2010:89-99

[3] 中华人民共和国水利部.水利水电工程测量规范:SL-197-2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013

[4] 郭迎钢,李宗春,何华,等. 变形监测网稳定点选取的平方型Msplit相似变换法[J]. 测绘学报,2020,49(11):1 419-1 429

[5] 董春来,丁允静. 基于Matlab的变形监测网稳定性分析[J]. 淮海工学院学报(自然科学版),2010,19(1):54-57

[6] 李韧,杨久东,龚栎澎,等. 监测网基准点稳定性检验方法与应用[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2020,42(4):56-60

[7] Nowel K. Squared Msplit(q) Stransformation of Control Network Deformations[J]. Journal of Geodesy,2019,93(7):1 025-1 044

[8] 焕乐,聂虎啸,刘成龙. 平均间隙法的一种改进算法[J]. 铁道勘察,2018,43(2):8-12

[9] 刘定威. 变形监测网点稳定性分析方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2016

[10] 葛文,何文峰,王英林,等. 大坝平面变形控制网观测及稳定性分析[J]. 城市勘测,2018(2):123-127

[11] 吴杰,余腾,潘庆林. 工程控制网的稳定性研究[J]. 测绘科学,2011,36(5):31-33

[12] 隋立芬,宋力杰,柴洪洲,等. 误差理论与测量平差基础[M]. 北京:测绘出版社,2016

[13] 陈超,尚金光. 抽水蓄能电站运行期平面控制网复测及稳定性分析[J]. 大坝与安全,2020,33(1):17-21

[14] 陶本藻. 自由网平差与变形分析[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000

[15] 马下平,张勇.自由网基准转换的概括模型研究[J]. 测绘科学,2013,38(6):13-15

[16] 李伟东. 秩亏自由网平差中观测值改正数与参考系选取无关性的推导[J]. 吉林建筑工程学院学报,2011,28(6):15-17

[17] 刘晃,江林,王志良,等. 大坝变形监测数据处理方法研究[J]. 测绘技术装备,2021,23(1):26-27

[18] 中国电力企业联合会,国家能源局.混凝土坝安全监测技术规范:DL/T5178-2016 [S]. 北京:中国电力出版社,2016

[19] 陈超,张胜利,汪晨. 应用DefDPS高效实现变形监测控制网稳定平差基准的筛选[J]. 大坝与安全,2023,36(3):31-36

[20] 王海城,徐进军,王海. 沉降监测网的稳定性检验方法及工程应用[J]. 测绘通报,2016(增刊):137-140