引文格式：李福星,郑玉平,高升. 深基坑自动化监测系统优化研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 71-75. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.02.017

深基坑自动化监测系统优化研究

李福星[1]，郑玉平[1]，高　升[2]
（1. 广东省测绘工程有限公司，广东 广州 510700；2. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院，山东 济南 250014）

摘　要：通用版自动化监测系统难以满足基坑监测真实需求的现状，针对此问题，从监测基准网稳定性检校、改善通信链路、云平台数据展示等方面对通用版自动化监测系统进行优化改进，利用后验单位权方差 X^2 检验方法对基准网稳定性进行检验，实时检校并更新监测基准网；采用基于LoRa通信的分布式监测站降低对基坑施工的干扰，并改善基坑内部信号传输环境；采用基坑方向位移、地下水位图示、开挖后累计变形等专业图表设计，提高云平台数据展示的专业性；并通过某建筑深基坑项目对优化内容进行应用验证，均取得了较好的应用效果，在保障监测数据准确性的同时，提高通用版自动化监测系统的行业针对性，为基坑自动化监测系统的建设发展提供了思路。

关键词：深基坑；自动化监测系统；基准网稳定性检验；监测云平台；数据图表
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）02-0071-05

Optimization Research on Automatic Monitoring System for Deep Foundation Pit

LI Fuxing[1], ZHENG Yuping[1], GAO Sheng[2]
(1. Guangdong Surveying and Mapping Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510700, China;
2. Shandong Zhengyuan Geological Exploration Institute, China General Administration of Metallurgical Geology, Jinan 250014, China)

Abstract: In view of the current situation that the general version automation monitoring system was difficult to meet the real needs of foundation pit monitoring, we improved the general version automation monitoring system from the aspects of monitoring benchmark network stability checking, improving communication links, cloud platform data display and so on. We tested the stability of reference network by posterior unit weight variance, and checked and updated the monitoring reference network in real time. Then, we used the distributed monitoring station based on LoRa communication to reduce the interference to the foundation pit construction, and improved the signal transmission environment inside the foundation pit. We adopted the professional chart design, such as excavation direction displacement, groundwater level diagram and accumulated deformation after excavation, to improve the professionalism of cloud platform data display. Finally, we verify the optimized content of application through a deep foundation pit project of a building, and achieved good application results, ensuring the accuracy of monitoring data, improving the industry pertinence of general version of automatic monitoring system, and providing ideas for the foundation pit automation monitoring system construction and development.

Key words: deep foundation pit, automatic monitoring system, reference network stability test, monitoring cloud platform, data graph

基坑作为地面建筑及地下空间建设的基础工程，涵盖了地质、岩土、环境、结构等多个学科，具有较强的综合性和风险性[1]，需要采取一定的技术方法进行安全监测。传统监测方法多为人工手持全站仪、水准仪、测斜仪等监测设备逐点监测，效率较低，工作量较大。自动化监测技术的出现大大提升了基坑监测效率，以物联网传感、边缘解算、计算机软件等技术为基础[2]，采用智能采集器对监测点传感器数据进行采集解算，并发送至云端，由云平台进行数据成果展示。但现阶段自动化监测系统普遍多为通用版，并未针对基坑工程进行专业设计[3]，如深基坑数据传输困难、设备较大影响施工、基准网不稳定等问题，均是通用版自动化监测系统现存的弊端。

本次研究基于通用版自动化监测系统难以满足基坑监测真实需求的现状，对其在基坑工程自动化监测中的不足点进行详细分析，设计可行性技术方案进行优化改进，使自动化监测系统更加满足基坑工程监测需求，并通过某项目进行应用测试，验证优化后深基坑自动化监测系统的可行性及可靠性。

1　通用版自动化监测系统不足点分析

现代化测量仪器设备以及计算机技术的发展进步，

收稿日期：2022-11-02。
项目来源：浙江省住房与城乡建设厅项目（2021K212）。
第一作者简介：李福星（1991—），工程师，主要从事测绘工程测量工作，E-mail：1370439894@qq.com。

为建筑物自动化监测系统的发展提供了基础条件。但现有自动化监测系统多为通用版，面向对象有建筑工程、水利大坝、国土地灾等，综合性较强[4]，但专业性较差，尤其是基坑工程自身复杂性较强，通用版自动化监测系统难以满足施工监测及数据展示要求。本文结合基坑工程实际特点，对通用版自动化监测系统的不足进行分析。

1.1 未考虑基准网变形影响

三维形变作为变形监测中的核心内容，普遍采用全站仪、GNSS等技术手段进行自动化监测，由于基坑监测精度要求较高，多采用测量机器人“自由设站+极坐标”测量原理构建自动化监测系统，利用多个后视点对设站点坐标进行交会检校，确保设站点的准确性。但由于基坑施工场地普遍较小，设站点和后视基准点均存在变形可能，

通用版自动化监测系统普遍未考虑后视点的稳定性[5]，若后视点发生变形，会影响监测成果的可靠性。

1.2 未考虑数据传输信号较差影响

现有自动化监测系统多采用3G、4G无线通信技术进行数据传输，但由于基坑开挖较深且钢支撑和砼支撑数量较多，大大影响了基坑内部通信信号强度，导致监测数据传输困难甚至无法传输，普遍利用加长水工线缆将传感器接入地面多通道采集器中，该方案线缆布设较为复杂，容易被破坏，同时会影响工程施工。

1.3 监测站集中部署

自动化监测系统需要外部持续供电，多采用市电或太阳能供电方式进行集中供电，数据集中处理并远端发送，实施过程较为复杂，布线繁琐易被破坏。并且基坑施工现场电压稳定性相对较差，频繁断电会对自动化监测系统造成较大损坏。同时集中部署方式对于故障排查极为不便，当单一链路故障时，容易造成整个监测系统瘫痪。

1.4 数据展示缺乏专业性

基坑监测的核心在于输出真实可靠的监测数据，通用版自动化监测系统虽然能够获得满足监测要求的成果数据，但数据展示缺乏专业性，没有针对基坑工程实际需求进行可视化图表设计[6]。部分数据仅为原始观测数据，未进行专业性处理，如基坑围护结构顶部水平位移监测重点关注向基坑开挖侧的位移变形，而通用版自动化监测系统普遍展示X、Y方向位移数据，直观性和专业性较差。

2 针对性优化设计

本次研究从基坑监测的实际应用出发，对通用版自动化监测系统进行优化设计，改变通用版自动化监测系统算法逻辑、硬件系统等，打造基坑工程专业自动化监测系统，实现基坑监测成果的可视化、信息化及规范化管理。

2.1 基准网稳定性检验

基坑工程施工场地往往相对较小，测量机器人自动化监测系统多位于基坑施工影响范围内，监测基准网稳定性相对较差。本次研究在现有基坑三维形变自动化监测系统的基础上，增加基准网稳定性检验流程，提高监测成果的可靠性。

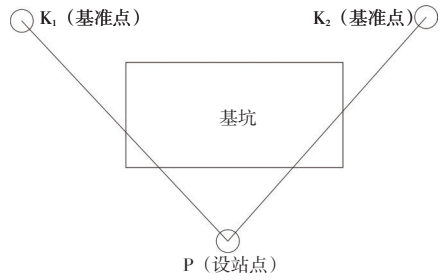


图1 基坑变形监测基准网示意图

如图1所示，P为测量机器人设站点，K_1、K_2为后视基准点，自动化监测系统采用“自由设站+极坐标”测量原理，测站点平差是基于间接平差原理，测站点P对基准点K_1、K_2的观测角度和边长的误差方程的矩阵形式如式(1)所示。

$$V = B\hat{X} - l \tag{1}$$

式中，

$$B = \begin{bmatrix} \rho''\left(\frac{\sin\alpha^0_{PK_1}}{S^0_{PK_1}} - \frac{\sin\alpha^0_{PK_2}}{S^0_{PK_2}}\right) & -\rho''\left(\frac{\cos\alpha^0_{PK_1}}{S^0_{PK_1}} - \frac{\cos\alpha^0_{PK_2}}{S^0_{PK_2}}\right) \\ -\cos\alpha^0_{PK_1} & -\sin\alpha^0_{PK_1} \\ -\cos\alpha^0_{PK_2} & -\sin\alpha^0_{PK_2} \end{bmatrix};$$

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_p \\ \hat{y}_p \end{bmatrix},\quad l = \begin{bmatrix} \gamma - (\alpha^0_{PK_2} - \alpha^0_{PK_1}) \\ S_{PK_1} - S^0_{PK_1} \\ S_{PK_2} - S^0_{PK_2} \end{bmatrix};\quad S^0_{PK_1}、S^0_{PK_2}、\alpha^0_{PK_1}、\alpha^0_{PK_2}$$

分别为P点测量机器人对基准点K_1、K_2观测的边长、方位角的近似值。

在进行定权时，将单位权中误差σ_0作为测量机器人方向观测值中误差，即测量机器人所标称的测角精度；测量机器人边长观测值的权$P_{S_i} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{S_i}^2}$，$\sigma_{S_i} = \sqrt{a^2 + (b \times S_i)^2}$，a、b分别为测量机器人所标称的测距精度中的加常数和乘常数。

列出法方程，如式（2）所示。

$$\hat{X}=(B^{\mathrm{T}}\mathrm{P}B)^{-1}B\mathrm{P}l \tag{2}$$

由误差方程和法方程可知，单位权中误差估值表达式如式（3）所示。

$$\hat{\sigma}_0=\sqrt{\frac{V^{\mathrm{T}}\mathrm{P}V}{l}} \tag{3}$$

式中，f 为自由度，即多余观测数。

本次研究采用后验单位权方差 χ^2 检验方法对监测基准网稳定性进行检验，首先对自由设站法所解算的测站坐标进行间接平差处理，获取监测基准网后验单位权中误差 $\hat{\sigma}_0$，然后将其与先验单位权方差 σ_0 进行对比，进行统计量 $T=f(\hat{\sigma}_0^2/\sigma_0^2)\sim\chi^2_{f,\alpha}$ 的构建，从而进行 χ^2 假设检验；原假设为 $H_0{:}E(\hat{\sigma}_0^2)=\sigma_0^2$，备择假设为 $H_1{:}E(\hat{\sigma}_0^2)>\sigma_0^2$，当 $T>\chi^2_{f,\alpha}$ 时，表明拒绝原假设，备择假设成立，即监测基准网中有不稳定的基准点存在。

在基于后验单位权方差 χ^2 检验过程中，一般情况下多采用测量机器人所标称的测角精度来对先验单位权方差 σ_0 进行赋值，f 表示自由度，显著水平 α 的取值为0.05。当监测基准网中存在动点时，则逐个减少基准点数量，以剩余基准点为新的基准网[7]，再次对测量机器人测站坐标进行间接平差计算，然后构建所对应的统计量，再次进行 χ^2 假设检验流程，直至监测基准网中的所有基准点均为稳定点为止。基于后验单位权方差 χ^2 检验的技术路线如图2所示。

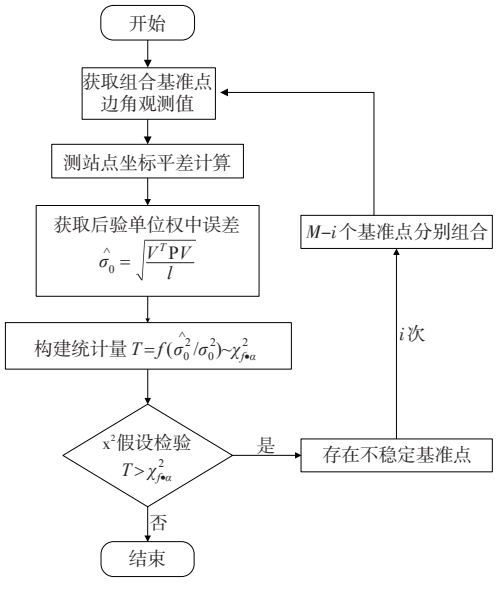


图2　基准网稳定性检验流程

基准网中包含仪器设站点和后视基准点，当所发现的动点为仪器设站点时，利用稳定的后视基准点采用间接平差方法对设站点进行更新求解；当动点为后视基准点时，将发生显著位移的后视基准点从基准网中剔除，作为待观测的点进行多次重复观测，并进行平差处理，直至该基准点稳定后更新其三维坐标。

2.2　多方式组网

基坑开挖深度的加深，以及钢支撑和砼支撑数量的增加，大大影响了基坑内部无线信号强度。本次研究针对通用版支撑轴力自动化监测系统线缆布设困难、容易影响施工等问题，从低功耗广域网技术思路出发，构建基于LoRa通信的“网关+终端”分布式监测系统，解决现有自动化监测系统集中部署及通信困难的弊端。

基于LoRa通信的“网关+终端”监测系统充分发挥了LoRa信号的强穿透能力，实现基坑内部多节点通信。终端作为数据采集装置，能够在短时间对监测点传感器进行多次数据采集，剔除异常噪点后取均值作为最终数据进行本地存储并发送至网关；终端采用锂电池供电，体积较小可直接部署在支撑上；同时采用低功耗设计，单块锂电池可满足终端设备连续工作2 a，足以覆盖基坑施工监测需求。为解决深基坑内部信号较差问题，采用终端亦为双向中继的组网方式，每个终端均可作为同链路下的中继设备，进行双向通信，解决深基坑内部通信困难问题[8]。网关作为终端数据汇聚中心，最大可支持128个终端接入，接收终端数据并进行过滤解析，实时上发至云端；网关与终端通信距离可达1~2 km，便于灵活选取安装位置，降低对基坑施工的影响。

2.3　专业图表设计

自动化监测数据普遍通过云平台进行展示，通用版云平台没有结合基坑工程实际数据展示需求，往往需要监测人员对监测数据进行线下处理。本文依据基坑工程数据需求，设计专业数据图表进行可视化展示[9-10]。

2.3.1　基坑围护结构顶部水平位移

基坑围护结构顶部水平位移能够直观呈现围护结构顶部向基坑开挖面发生的位移变形，因此应在云平台展示监测点向基坑开挖方向的位移变形，而非X、Y方向的变形数据。针对此问题，本文基于点到线最短距离原理，预先设置一条与基坑围护边平行的基准线，计算监测点到基准线距离变化，反演监测点向基坑开挖面的水平位移变形数据。

如图3所示，A、B、C、D为基坑的4个角点，QD_1~QD_3为基坑围护结构顶水平位移监测点，M、N

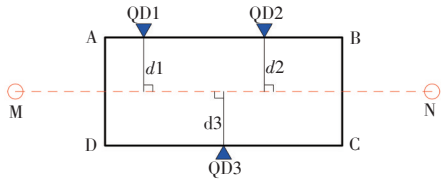


图3　围护结构顶部基坑方向水平位移示意图

为基准线的起点和终点，d_1~d_3为监测点到基准线的初始距离。在基准线设置时，应尽可能使得MN与监测点所在的基坑边线平行，由于未考虑监测点与基准线的空间方位，因此还应确保监测点与基准线不相交，即监测点始终位于基准线的同一侧。以QD_1监测点为例，假设M、N已知平面坐标分别为（x_M，y_M）、（x_N，y_N），QD_1初始坐标为（x_0，y_0），则初始状态下，监测点QD_1至参考基准线MN的初始距离为d_1：

$$\begin{aligned} y_M &= kx_M + b \\ y_N &= kx_N + b \\ d_1 &= \frac{|kx_0 - y_0 + b|}{\sqrt{k^2+1}} \end{aligned} \tag{4}$$

式中，k为基准线MN的斜率；b为常数。

因此，基坑施工监测过程中，监测点QD_1向基坑开挖方向的累计变化量Δd为：

$$\begin{aligned} \Delta d &= d_i - d_1 \\ &= \frac{|kx_i - y_i + b| - |kx_0 - y_0 + b|}{\sqrt{k^2+1}} \end{aligned} \tag{5}$$

式中，（x_i，y_i）为第i次监测过程中监测点QD_1的平面坐标；d_i为第i次监测过程中监测点QD_1至参考基准线MN的距离。

2.3.2　基坑外地下水水位

基坑外地下水水位的变化有助于对基坑降水及基坑围护结构是否发生渗漏进行分析判断，常采用投入式渗压计进行自动化监测，利用不同水深的水压力不同，反演地下水位变化。通用版云平台普遍只展示地下水位变化量，但基坑监测相关规范要求展示地下水位变化量和水位绝对高程。为满足规范及用户需求，本文设计基坑外地下水水位专业数据展示图，并以不同颜色区分水位上升和水位下降，如图4所示。

2.3.3　特殊场景下数据展示

基坑施工过程中同样需要对周边环境进行变形监测，如周边重要建筑物、地下管线等。周边环境变形监测普遍在基坑开挖前，基坑打桩、钻孔等初期施工同样会对周边环境产生影响，因此变形过程分为基坑开挖前和开挖后2个阶段，但基坑监测重点关注开挖后周边环境的变形情况。本次研究在监测云

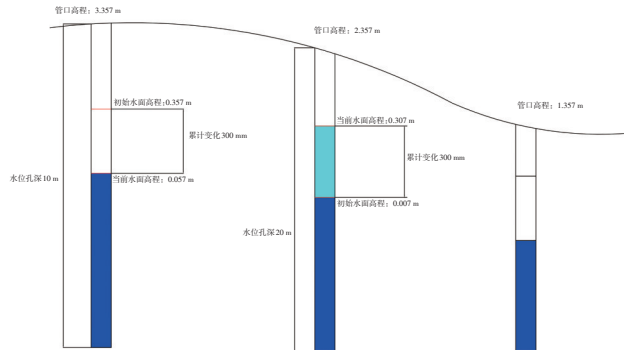


图4　基坑外地下水水位数据展示

平台中增加“开挖后累计位移”字段，设定开挖日期，对周边环境受基坑开挖影响产生的位移变形进行直观展示。

自动化监测频率较快，1 d可监测8~12组。通用版云平台普遍1 d所有监测数据的平均值作为当日数据，但由于基坑白天处于施工状态，机械设备运转会对自动化监测设备产生影响，监测数据存有误差，可靠性相对较差。本次研究在监测云平台中增加“时间筛选”功能，通过设置时间区间，选择固定时间点的数据进行展示。该功能支持筛选某一段监测日期内同一时间点的数据进行对比分析，基坑凌晨时间段普遍不进行施工，对比不同监测日期凌晨时间的数据，更能直观准确地呈现监测点的真实变形特征。

3　项目应用效果分析

3.1　项目概况

本文以某深基坑自动化监测项目为研究对象，该项目为商业建筑基坑工程，围护结构采用宽度为1 000 mm的地下连续墙，基坑开挖深度在15 m左右，设置三层混凝土砼支撑。项目采用本文优化设计后的深基坑自动化监测系统进行全天候监测作业，监测对象包括围护墙顶部水平和竖向位移、立柱竖向位移、围护墙深层水平位移、支撑轴力、基坑外地下水水位。

3.2　自动化监测系统应用研究

本项目于2022年3月完成自动化监测设备安装，于2022年9月完成监测，设备拆除。自动化监测期间，除施工现场供电系统维护导致自动化监测设备断电外，其他时间自动化监测设备均正常运转，每个监测点平均每天监测数据在8~12组，系统稳定性和适应性相对较好。

本次研究对通用版自动化监测系统的优化包含测量机器人基准点稳定性检校、支撑轴力监测站LoRa通信、监测平台数据展示方式调整三大方面，其中本

项目基坑共设置三层支撑，第三层支撑监测站信号较差，数据基本无法直传地表网关，普遍采用第二层支撑的监测站作为中继，将数据转发至网关，应用效果较好，避免了第三层传感器线缆延长布设。监测平台数据展示方面新增围护结构顶部向基坑开挖方向位移、基坑外地下水水位绝对高程、基坑开挖后累计位移等数据展示图表，使得既有自动化监测系统更加满足基坑监测业务需求。

本项目在基坑开挖影响范围外布设了6个后视基准点，为验证基于后验单位权方差 χ^2 的基准网稳定性检验应用效果，研究选择某轮次原始观测数据进行分析计算，结果为：后验单位权中误差 $\hat{\sigma}_0=0.701''$，前验单位权中误差即测量机器人标称测角精度 $\sigma_0=0.5''$，故统计量 $T=f\hat{\sigma}_0^2/\sigma_0^2=19.656$；假定显著水平和自由度的取值分别为 $\alpha=0.05$，自由度 $f=10$，查表可知 $\chi^2_{0.05}(10)=18.307$，因此 $T=f(\hat{\sigma}_0^2/\sigma_0^2)>\chi^2_{f\bullet\alpha}$，检验未通过，即基准网存在动点。依次剔除一个基准点，重新构建基准网，再次进行后验单位权方差 χ^2 检验，结果如表1所示。

表1　重构基准网检验结果

基准点组合	后验单位权中误差 $\hat{\sigma}_0$/(″)	统计量 T	分位值 $\chi^2_{0.05}(8)$	是否包含动点
JZ1、JZ2、JZ3、JZ4、JZ5	0.675	13.813	15.507	否
JZ1、JZ2、JZ3、JZ4、JZ6	0.701	15.724	15.507	是
JZ1、JZ2、JZ3、JZ5、JZ6	0.743	17.665	15.507	是
JZ1、JZ2、JZ4、JZ5、JZ6	0.741	17.570	15.507	是
JZ1、JZ3、JZ4、JZ5、JZ6	0.722	16.681	15.507	是
JZ2、JZ3、JZ4、JZ5、JZ6	0.697	15.545	15.507	是

由表1可知，剔除1个基准点后的6种基准网组合中，含有JZ6基准点的基准网均未通过稳定性检验，而唯一一组不含有JZ6基准点的基准网通过了稳定性检验，因此可表明JZ6基准点发生了显著位移，为基准网中的动点，其他基准点均为稳定点。为进一步验证本项目中基于后验单位权方差 χ^2 检验方法的基准网稳定性分析成果的准确性，本次研究继续剔除1个基准点，采用剩余的4个基准点构建基准网再次进行后验单位权方差 χ^2 检验，结果包含JZ6基准点的组合均未通过检验，故表明JZ6基准点为本次监测中的动点，需将其视为监测点进行多次测量，直至稳定后更新JZ6基准点坐标数据。从测量机器人自动化监测系统中调取该监测轮次下解算数据发现，JZ6基准点在本轮次下已被视为监测点，连续观测24轮次后取稳定数据更新JZ6基准点坐标。故表明：基于后验单位权方差 χ^2 的基准网稳定性检验在本项目中应用效果较好，能够准确识别基准网中的动点，并对其进行更新，降低了人工复核基准网频次，在保证监测数据准确性的同时提高了监测效率。

4　结　语

基坑开挖深度的增加和基坑规模的扩大对基坑安全监测提出了新的要求，以物联网为基础的自动化监测技术方法逐渐成为基坑监测的主流，但通用版自动化监测系统无法满足基坑监测业务场景真实需求。本次研究从基坑监测行业需求出发，对通用版自动化监测系统进行优化设计，并通过某建筑深基坑项目对优化效果进行分析研究，验证了自动化监测系统优化设计的可靠性。

参考文献

[1] 王鹏,王宇,胡文奎,等. 自动化监测系统在城市深基坑监测工程中的应用[J]. 城市勘测,2017(6):122-125

[2] 高开强. 自动化监测系统在深基坑工程中的应用及可靠性分析[J]. 经纬天地,2021,36(1):75-78

[3] 郑晖,付凯. 基于Android的基坑变形自动化监测软件设计与实现[J]. 地理空间信息,2022,20(7):120-123

[4] 张彬彬. 监测基准网稳定性分析及应用研究[J]. 福建建设科技,2022,37(4):53-55

[5] 李益斌,陈健. 地铁隧道自由设站变形监测基准网稳定性检验[J]. 现代测绘,2021,44(1):44-46

[6] 雷霆,谭斌,刘佐. 基于物联网技术的工程安全监测云平台[J]. 大坝与安全,2020,34(5):20-24

[7] 林良岱. 深基坑施工影响下地铁自动监测研究[J]. 地理空间信息,2017,15(4):105-108

[8] 王臣龙. 基坑自动化监测项目平台的构建[J]. 品牌与标准化,2022,42(2):66-68

[9] 洪威. 基于LoRa无线传输的基坑工程监测系统及数据预测分析[D]. 上海:上海应用技术大学,2020

[10] 傅理文,彭渊,翁湛,等. 深基坑安全监测与预警平台的开发与应用[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(增刊):423-429