【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

深基坑智能联网监测与预警系统的研究及开发

齐红升¹, 肖成志¹, 王子寒¹, 孙重阳²

1) 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2) 河北工业大学国际教育学院, 天津 300401

摘 要: 基坑开挖会对支护结构及周围环境产生应力与应变, 因此在工程建设中对基坑进行监测十分必要. 为解决基坑监测信息化程度低、人工方式采集数据效率低的问题, 采用 C/S 模式、C# 编程语言、关系型数据库 MySQL、全球导航卫星系统、导轮式固定测斜仪和自主研发的太阳能自供电传感器, 以无线传输的方式, 开发一套深基坑智能联网监测与预警系统. 该系统实现了信息集中管理, 监测数据实时读取、自动存储查询、计算和分析, 图表自动绘制、自动预警报警, 具有数据预测、事故处理分析和快速生成报表的功能. 该系统通过监测仪器自动采集基坑信息, 并进行数据分析及预警, 提升了监测效率和安全保障.

关键词: 基坑工程; 基坑监测; 基坑支护; 数据库; 信息化施工; 无线传输; 自动采集数据

中图分类号: TU441

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.01097

Research and development of intelligent network monitoring and warning system for deep foundation pit

QI Hongsheng¹, XIAO Chengzhi¹, WANG Zihan¹, and SUN Chongyang²

1) School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China

2) School of International Education, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China

Abstract: The excavation of foundation pit inevitably affects the stresses and deformations of supporting structures and surrounding environment, so it is necessary to keep on monitoring foundation pit in engineering construction. In order to solve the problems of low information level of excavation monitoring and low efficiency of manual data collection, a set of intelligent network monitoring and warning system for deep foundation pits is developed by means of wireless transmission which adopts the C/S mode, C# object-oriented language, relational database MySQL, GNSS, fixed inclinometer and self-powered sensor by solar energy. The monitoring system realizes the centralized management of information including data real-time reading, automatic saving and query, automatic calculation and analyses, automatic charts drawing, and automatic warning and alarm. The system also had the functions of data prediction, accident processing and analyses and rapid report generation. Through the monitoring instrument, the system can automatically analyze foundation pit information and give early warnings, and can further improve the monitoring efficiency and safety guarantee in foundation pit engineering.

Key words: excavation engineering; excavation monitoring; foundation pit supporting; database; information construction; wireless transmission; automatic data collection

Received: 2019-05-16; **Accepted:** 2019-10-25

Foundation: National Natural Science Foundation of China (41877255); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2018202108)

Corresponding author: Associate professor WANG Zihan. E-mail: wangzihan@hebut.edu.cn

Citation: QI Hongsheng, XIAO Chengzhi, WANG Zihan, et al. Research and development of intelligent network monitoring and warning system for deep foundation pit [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(1): 97-102. (in Chinese)

随着中国城镇化的发展, 基坑越来越密集, 基坑开挖面积和开挖深度增加, 加大了基坑施工的难度程度. 基坑监测是对基坑围护结构、坑底隆起、周围环境和地下管线的监测, 实现对监测数据的准确快速采集, 并进行信息化施工, 尽量做到避免事故发生.

近年来, 随着数据技术 (data technology, DT) 的发展, 人工智能也应用于各行各业. 已有的基坑监测系统^[1-13]和基坑信息分类编码^[14]存在以下问题: ① 传统监测采用经纬仪和全站仪等人工监测设备以及手动输入数据的方式, 不能实时监测, 甚至存在滞后性, 影响施工质量. 一些有线网络监测系统虽降低人工成本, 但长距离的传输线路容易受到破坏; ② 数据保存在 Excel 中, 不仅存在片面化、处理速度慢的问题, 数据的处理分析也比较滞后, 得不到及时分析, 影响施工决策判断; ③ 可视化程度低, 数据与图形关联程度低, 部分系统基于做图软件, 但也会受到对应软件的限制; ④ 很多系统没有考虑到事故的处理分析和相应的专家库, 对紧急情况没有参考建议; ⑤ 对预警的分类编码不明确; ⑥ 各个厂家生产的仪器互不兼容, 采用厂家附带的处理系统, 不仅生成的图表报表不统一, 而且存在频繁更换软件的问题.

实际中, 基坑的监测项目需要多种监测仪器和监测手段来实现, 通常需要各个厂家的仪器配合使用, 需要有将相同厂家的不同仪器或者不同厂家的仪器综合起来使用的软件和系统. 本研究开发的基

坑智能联网监测与预警系统 1.0 (foundation pit intelligent network monitoring and prewarning system 1.0, FIMP1.0), 以 .NET 为开发平台, 采用 C# 编程语言、关系型数据库 MySQL、下位机的无线传输技术、上位机的通信技术和客户端/服务器 (client/server, C/S) 模式, 各个部门共同参与, 集数据采集、传输、处理、分析、查询、管理、预警和事故分析等功能于一体, 可有效提升监测效率和安全保障.

1 系统设计

1.1 体系结构

本研究深基坑智能联网监测与预警系统包括云端服务器的搭建、传感器的布置、数据传输和监测预警系统的开发. 构建方式如图 1, 包括重要要素有:

1) 监测点. 根据工程和施工中的实际状况, 结合国家和地方相应的规范, 沿着基坑的周边埋设监测点.

2) 传感器. 全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 具有高精度、高效益及全天候特点, 可用于监测地表位移; 导轮式固定测斜仪可用于监测深层土体内部位移; 自主研发的轴力传感器, 可对围护墙内力、支柱内力和支撑内力等进行监测; 水平位移传感器可对围护墙顶部水平位移等进行监测; 水位传感器可对地下水位进行监测. 它们通过无线终端设备将数据通过无线的方式

图 1 系统构建图

Fig. 1 The system construction

传送后台中心, 并存储到云平台上. 对传感器或者监测表的命名, 有分类和编码规则, 如土钉内力信息表可用 ND01 和 ND02, 立柱竖向位移信息表可用 WD01 和 WD01 等. 数据表的编码如表 1.

表 1 数据表编码
Table 1 Encoding table

类型	编码	监测类型	编码	表名	编码
内力监测	N	围护墙内力	A	围护墙内力表	NA01
		支撑内力	B	支撑内力表	NB01
		立柱内力	C	立柱内力表	NC01
		土钉内力	D	土钉内力表	ND01
位移监测	W	坑底隆起	A	坑底隆起表	WA01
		围护墙顶部水平位移	B	围护墙顶部水平位移表	WB01
		围护墙顶部竖向位移	C	围护墙顶部竖向位移表	WC01
		立柱竖向位移	D	立柱竖向位移表	WD01
水监测	S	地下水位	A	地下水位表	SA01
		孔隙水压力	B	孔隙水压力表	SB01
土压力监测	T	围护墙侧向土压力	A	围护墙侧向土压力表	TA01

3) 智能联网监测与预警系统. 本系统可以实时读取传感器传来的数据, 自动进行计算与分析, 生成变量曲线图, 并根据预先设定好的规范值自动预警报警. 当出现事故时, 可以调用专家库, 联系多个专家共同商讨解决的办法.

1.2 功能需求

本系统实现了自动归档资料的方式, 包括项目新建、数据入库、基坑信息的查询、数据的处理、图表的生成、预警报警、事故分析处理、回归模型预测和成果输出等.

新建项目: 可保存项目的基本信息、仪器信息、监测点和监测项目信息.

数据入库: 将监测数据传输到云平台, 在服务器中自动解析保存到数据库. 基坑的基本信息、地理勘察资料和施工进度信息则保存在非结构化数据库中. 电容式传感器、电阻式传感器、振弦式传感器和激光式传感器等都可实现实时读取数据.

数据处理: 传感器将变形信号、光信号等转化为数据后上传云端, 并对数据进行预处理.

数据查询: 可以实现对基坑的地理信息、勘察资料、基坑信息、施工进度、监测点布置和科学仪器的查询, 还可以对监测数据进行简单查询和复合查询. 所有查询不需要用户输入任何指令, 本系统对结构化查询语言语句 (structured query language, SQL) 进行高度封装, 用户按习惯选择查询条件即可, 并自动生成相应的交叉表.

图表可视化和实时联动功能: 监测数据可由监测曲线图实时显示出来. 本系统可以导入基坑图形或者监测点布置图, 通过点击设备上的监测点就可以获得此监测点的监测状态图, 还可以通过菜单栏直接得到监测状态图.

监测等级设置功能: 将基坑监测规范导入系统, 选择基坑等级就可以自动分配基坑监测项目, 并且可以根据基坑实际工程情况, 增加或者减少基坑监测项目.

分级分项预警和报警功能: 报警值是基坑工程监测中规定的硬性指标, 可保证基坑围护结构的稳定和周围环境的安全. 本系统采用 3 级预警, 当监测数据超过 1 级预警值时, 会出现蓝色预警; 当监测数据超过 2 级预警值时, 会出现黄色预警; 当监测数据超过 3 级预警值时, 会出现橙色预警; 当监测数据超过报警值时, 会出现红色预警, 并伴有警鸣声, 同时将监测点号、报警的断面位置和超过的值等报警信息呈现出来.

事故分析处理功能: 建立专家库, 当报警时, 甲方、施工方连同监测单位、设计院共同分析事故原因, 并且对报警部位适当增加监测频率. 启动专家库平台, 以供多方会谈. 专家库会预先存储大量事故后的处理视频和处理方案, 报警后根据关键词就可以查询到, 以供施工方参考. 事故处理后, 还可以将本次事故处理的方案等资料存储到系统中, 方便下次查询使用.

成果输出功能: 监测数据按规范生成报表, 根据日期、监测项目、断点或者监测点, 以 Excel 的格式生成监测报表, 命名规则为“项目编号 + 监测点号 + 监测时间段”. 可按照需要生成日报表、周报表和月报表.

1.3 回归模型预测

1) 数据预测回归方程. 根据时间 t 、参数 k 和变形量 D 建立模型^[15]为

$$D = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t k + a_4 t^2 k + a_5 t k^2 \quad (1)$$

选择监测数据, 代入模型中, 根据间接平差原理^[16], 可解出模型参数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 和 a_5 . 根据工程地质条件、施工开挖进度和现场实际情况, 可对变形点进行预测分析.

2) 回归方程检验. 采用 F 检验对回归方程进行显著性分析^[17]. 回归方程用式(2)计算. 相关系数 Cov 反应模拟的相关程度, 用式(3)计算.

$$F = \frac{S_1}{S^2 p} \sim F(p, n - p - 1) \quad (2)$$

$$Cov = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \times (S_1 + S_2)}} \quad (3)$$

其中, S_1 为回归平方和; S_2 为剩余平方和; p 为因子个数; n 为监测数据个数; S^2 为样本方差; S_{xy} 为 x 和 y 的离差积; S_{xx} 为 x 的离差平方和.

2 数据库设计

数据库设计是系统的核心部分. 深基坑监测数据量大, 数据库设计需要遵循一定原则: ① 安全性: 建立严格的限制条件, 防止数据被更改; ② 可靠性: 数据的传输及存储在数据库中要可靠; ③ 唯一性: 保证数据时间不重复.

根据基坑的监测项目和监测数据, 可将基坑监测内容分内力监测、位移监测、水位与土压力监测及周围环境监测. 每个监测内容又分为若干个监测项目, 并考虑仪器、档案和现场施工等资料, 设置基坑工程项目信息表、监测类型表、监测点号表、报警信息表、监测数据表和仪器管理表等, 这些表相互关联, 通过设置主键和外键, 方便查询和管理. 表 2 为部分数据库表的结构说明.

3 工程应用实例

天津市儿童医院改扩建一期工程, 项目位于天

表 2 数据表结构说明

Table 2 Structural description of data

字段名	数据类型(长度)	说明	允许空
ID	Int	索引	否
PIPEHOLE	Varchar(50)	孔号	否
POINT	Varchar(50)	监测点号	否
VALUE	Double(255)	监测数据	否
CHANGE	Double(255)	单位变化量	是
TOTALCHANGE	Double(255)	累计变化量	是
RATE	Double(255)	变化频率	是
TIME	Datetime	监测时间	是
INSTRUNUMBER	Varchar(50)	仪器编号	是
TYPE	Varchar(50)	类型	是
JCTYPE	Varchar(100)	监测类型	是
SERIAL	Varchar(70)	编号	是
PROJECTNUMBER	Varchar(50)	项目编号	是

津市河西区马场道与围堤道交口. 该工程分为 5 个小基坑, 分别是地下车库、汽车坡道三、新建综合楼、污水站和停车塔库. 该期工程规划建筑面积 76 225 m² (含地下 9 330 m²), 拆除现状建筑面积 11 886 m², 保留建筑面积 9 870 m², 改造建筑面积 34 194 m² (含地下 2 670 m²), 新建建筑面积 32 161 m², 最大基坑深度约 11 m. 围护结构顶部水平位移竖向位移监测点 37 个, 混凝土支撑轴力监测点 30 个, 立柱沉降监测点 15 个, 周边地表沉降监测点 100 个, 地下水位监测点 28 个. 以本研究开发的系统对基坑数据进行信息可视化显示和查询. 限于篇幅仅列出部分监测项和基本功能, 如图 2 和图 3. 对监测点 JC14 (图 2) 的垂直位移监测数据进行分析, 结果见表 3.

根据监测数据、基坑的深度和时间, 可得到模型参数: $a_1 = 4.402\ 16$, $a_2 = -0.920\ 22$, $a_3 = 0.110\ 57$, $a_4 = -0.331\ 14$, $a_5 = -0.015\ 41$, $a_6 = 0.061\ 00$, $Cov = 0.753\ 1$. 将模型参数代入式(1), 结合基坑深度 k 和时间 t , 可估算测点处变形量 D . 如表 3 中已监测垂直位移共计 7 次, 即 $n = 7$; 式(1)中与深度和时间相关的因子数共计 5 个 (a_1 — a_5), 即 $p = 5$. 通过方差计算, 由式(2)可得 $F(5, 1) = 51.242$. 经查阅 F 分布表可知, 差异不显著, 可接收该回归模型. 因此可按式(1)预测出各监

图 2 基坑测点布置图

Fig. 2 (Color online) Survey point layout

水位监测报表			
工程名称	天津儿童医院扩建项目	工程编号	* * * * *
观测者	* * *	天气	晴朗
索引号	观测值	时间	
30004	756	2018-04-27 16:27	
30005	756	2018-04-28 16:27	
30006	756	2018-04-28 16:27	
30007	756	2018-04-29 16:27	
30008	756	2018-04-30 16:27	
30009	756	2018-05-01 16:27	
30010	756	2018-05-02 16:27	
30011	756	2018-05-03 16:27	
30012	756	2018-05-04 16:27	
30013	756	2018-05-06 16:27	

图 3 水位监测报表图

Fig. 3 Monitoring report figure of water level

表 3 垂直位移监测数据分析					
Table 3 Analysis of vertical displacement monitoring data					
次 数	监测 深度/m	监测 时间/d	垂直 位移/mm	估计 值/mm	相对 误差/%
1	1.2	6	0.4	0.410 7	2.67
2	2.2	11	-1.0	-0.966 5	3.35
3	3.0	18	1.5	1.227 0	18.20
4	4.2	22	0.3	0.350 9	16.96
5	5.2	24	-0.5	-0.637 9	2.75
6	7.8	40	0.5	0.456 2	8.76
7	9.8	46	1.2	1.222 0	1.83

测点在某时间、某基坑深度的垂直位移值. 如当 $t = 29 \text{ d}$, $k = 6.6 \text{ m}$ 时, 预测 JC14 点垂直位移是 0.769 mm . 根据基坑工程的地质条件, 可以由已有的工程监测数据预测基坑的变形量, 为深基坑工程分析和评价提供参考.

结 语

实践证明, 深基坑监测与预警系统的研究具有重要意义. 本研究利用 C#编程语言并结合监测传感器, 开发了一套智能联网监测与预警系统, 实现了信息的集成管理及监测数据的实时采集. 通过将监测数据无线传输至云服务器, 本系统能够自动进行数据分析及处理, 实现对数据的实时更新、图形生成、自动预警报警、模型预测和报表输出等功能. 该系统可节约大量人力物力, 且监测更加准确高效.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41877255); 河北省自然科学基金资助项目 (E2018202108)
作者简介: 齐红升 (1994—), 河北工业大学硕士研究生. 研究方向: 基坑智能监测. E-mail: 2927766412@qq.com
引 文: 齐红升, 肖成志, 王子寒, 等. 深基坑智能联网监测与预警系统的研究及开发 [J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(1): 97-102.

参考文献 / References:

[1] 傅理文, 彭 渊, 翁 湛. 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1): 423-429.
FU Liwen, PENG Yuan, WENG Zhan. Development and application of safety monitoring and early warning platform for deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Suppl. 1): 423-429. (in Chinese)
[2] 李芒原, 张传浩, 杨二东, 等. 基于 BIM+3D 激光扫描技术的复杂深基坑监测技术研究及应用 [J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊1): 751-755.
LI Mangyuan, ZHANG Chuanhao, YANG Erdong, et al. Application of complex deep foundation pit safety supervision integrated platform based on BIM+3D laser scanning technology [J]. Building Structure, 2019, 49 (Suppl. 1): 751-755. (in Chinese)
[3] 何宏盛, 梁 超, 童立元, 等. 深大基坑无线自动化监测系统的开发应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2016 (2): 87-91.
HE Hongsheng, LIANG Chao, TONG Liyuan, et al. Development and application of wireless automatic monitoring system for deep and large foundation pit [J]. Urban

- Mass Transit, 2016 (2): 87-91. (in Chinese)
- [4] 赵 峰. 基于 BIM 的基坑工程自动化监测平台研发[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 151-158.
ZHAO Feng. Development of BIM-based automatic monitoring platform for foundation pit engineering [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2): 151-158. (in Chinese)
- [5] 李 璐, 刘新根. 基于 Web Service 与 BIM 集成技术的基坑安全监测系统[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 12: 62-65.
LI Lu, LIU Xingen. Safety monitoring system for metro foundation pit based on web service and BIM [J]. Urban-Mass Transit, 2017, 12: 62-65. (in Chinese)
- [6] 张君华, 马 波, 张鸣宇. 拟稳平差在基坑自动监测系统中的应用[J]. 测绘通报, 2014(增刊1): 75-76.
ZHANG Junhua, MA Bo, ZHANG Mingyu. Realization of quasi-stable adjustment in automatic monitoring system of foundation pit [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(S1): 75-76. (in Chinese)
- [7] 徐杨青, 程 琳. 基坑监测数据分析处理及预测预警系统研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊1): 219-224.
XU Yangqing, CHENG Lin. Analysis processing of monitoring data and forecast and early warning system of foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 219-224. (in Chinese)
- [8] 陈金培. 基于现场监测数据的深基坑施工期风险评估[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
CHEN Jinpei. Risk assessment of deep foundation during construction based on monitoring [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 高 磊, 孙阳阳, 濮慧蕾, 等. 基坑沉降监测信息的自动化处理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊2): 2002-2005, 2018.
GAO Lei, SUN Yangyang, PU Huilei, et al. Research on automatic processing of settlement observation data of foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2): 2002-2005, 2018. (in Chinese)
- [10] 冯利坡, 郑永来, 赵 民, 等. 信息化监测在深基坑工程事故中的预警作用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊2): 1643-1646.
FENG Lipo, ZHENG Yonglai, ZHAO Min, et al. The precaution function of information monitoring in the accident of deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(Suppl. 2): 1643-1646. (in Chinese)
- [11] 周二众, 刘 星, 青 舟. 深基坑监测预警系统的研究与实现[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 204-210.
ZHOU Erzong, LIU Xing, QING Zhou. Research and implementation of monitoring and early warning system of deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 204-210. (in Chinese)
- [12] 杨 佳, 张志强, 张强勇, 等. 深基坑安全监测信息分析系统的开发与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1246-1250.
YANG Jia, ZHANG Zhiqiang, ZHANG Qiangyong, et al. Development and application of analyzing system for safety monitoring information on deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1246-1250. (in Chinese)
- [13] 张友良, 陈从新. 面向对象的深基坑监测模型及系统开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊1): 1061-1064.
ZHANG Youliang, CHEN Congxin. Object-oriented model and development of deep foundation pit monitoring system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Suppl. 1): 1061-1064. (in Chinese)
- [14] 陈 诚, 徐帮树. 深基坑监测信息分类及编码研究[J]. 土工基础, 2016, 30(6): 677-681.
CHEN Cheng, XU Bangshu. Classification and coding of deep excavation monitoring information [J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(6): 677-681. (in Chinese)
- [15] 陈志华. 复杂地质区域深基坑自动变形监测系统开发及应用[J]. 测绘科学, 2014, 39(2): 69-72.
CHEN Zhihua. Development and application of automatic deformation monitoring system of deep foundation pit in complex geological area [J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(2): 69-72. (in Chinese)
- [16] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社.
Measurement Adjustment Discipline Group, Institute of Surveying and Mapping, Wuhan University. Errors theory and foundation of surveying adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (in Chinese)
- [17] 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, 2003.
HUANG Shengxiang, YIN Hui, JIANG Zheng. Deformation monitoring data processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】