深基坑工程监测系统的设计与实现

# 第一章 绪论

## 1.1 课题的背景和意义

随着社会经济的高速发展，城市的建设规模不断增大，人们对于生活质量的需求也在不断提高，为缓解地面空间资源的不足，地下停车场，地下商场，地铁车站等地下工程的开发日益增多。所谓深基坑工程便是指开挖深度超过5米或地下室为三层及以上的的地下工程。深基坑工程是一个涵盖了岩土和结构的复杂系统工程，涉及土体强度及稳定，工程水文地质，支护结构，结构力学，开挖对周边环境的影响等众多问题。

实际上，人们在很早以前就对深基坑工程进行了尝试，比如为房屋建造桥梁等工程而进行的放坡开挖或者简易木桩支护。但是随着人们需求的不断提高，开挖深度的不断扩大，施工环境的不断恶化，随之而来引发的深基坑工程坍塌事故也在增多。2008年11月15日，杭州地铁1号线的湘湖车站北2基坑发生基坑坍塌事故，造成21人死亡, 4人重伤，20人轻伤；2012年12月30号，武汉地铁4号线施工现场发生坍塌，地铁基坑支撑结构断裂导致基坑坍塌，导致交通单边限行；2017年5月11日，位于深圳市福田区绒花路的深圳市轨道交通工程3号线三期南延工程基坑发生一起土方坍塌事故，造成3人死亡，1人受伤；2019年5月27日，青岛地铁4号线沙子口静沙区间施工段坍塌事故，5名工人全部死亡。

由此可见，深基坑工程的安全问题亟待解决，这些问题必须通过技术和管理的手段来解决。但是正因为深基坑工程的复杂性，使其难以通过定量的分析设计，现阶段深基坑的理论计算与设计还不够完善，必须通过管理手段加以控制修正，这就使得深基坑工程监测在深基坑工程中的地位显得尤为重要。

深基坑工程的监测一般贯穿于基坑建设的全过程，同时对于监测的项目，在《建筑基坑工程监测技术规范》 中给了明确的指导，大致分为四类监测对象：①挡土围护结构体系的监测，其中包括了围护墙或围护桩顶部水平位移，竖向位移，深层水平位移，以及围护墙应力监测；②水平和竖向位移支撑结构的监测，其中包括支撑轴力监测，立柱沉降和应力的监测；③水工监测，其中包括地下水位监测，土压力监测；④周围环境监测，包括周围建筑物的水平位移和沉降监测，周围地下管线的变形监测等。同时不同的工程，监测的项目不尽相同，根据基坑的类型和实际的设计进行监测。

但是深基坑工程的监测不是最终目的，最终目的是能够及时通过监测发现问题，及时通知相关人员，通过监测的数据反馈指导基坑的后续施工方案，避免事故的发生。

迄今为止，深基坑工程现场大多数监测项目仍然通过人工测量，监测的数据通过人工进行整理文档，交由相关负责人查阅，具有严重的滞后性，同时由于监测的项目多样，有时候无法立即分析得到结果，造成了发现问题不及时情况频繁发生。

基于以上背景，应江苏东合南岩土有限公司的要求，本课题研究并设计了一套深基坑工程监测系统，研究重点偏向于系统的整体搭建，同时能够保持系统的兼容性，兼容后续不同的数据传入接口以及预测接口，以便今后随着科技和预测理论的不断发展，有更多监测项目实现自动测量，更多预测算法投入实际项目之中。一方面，相关工作人员可以登录系统，查看各个参数的实时数据以及历史数据，辅助其对基坑现状的安全评估；另一方面，本系统能够自动接收现有的监测数据，对于无法自动测量的数据，可以接收监测人员的上传文件，实现数据的自动分析，预测，展示等功能，如果超过了预定的报警值，自动通知相关工作人员。

本课题研究的深基坑工程监测系统能够在以下几个方面提供深远意义。①节约人力成本，部分监测数据自动上传，减少了人工录入，备份的工作；②隐患的及时消除，本系统提供了监测数据的自动分析，避免了人工分析出现的遗漏，以及人工处理的滞后性问题，同时对于可能出现的问题，自动及时通知相关人员；③监测数据的保存，一方面，根据这些监测结果，及时对比勘探和设计所预期的结果，以两者的差别进行评价设计成果，及时修正施工方案，另一方面，本系统能够对所有的监测项目的数据进行持久化保存，这些数据为今后深基坑的设计以及研究提供了数据支持；④超前预警，结合现有深度学习理论，本系统提供了预警模块，利用历史的监测数据对下一时刻的数据进行预测，一定程度上更早发现问题，为工程的安全施工预留更多的时间进行调整。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 深基坑工程监测的研究现状

深基坑工程是一门综合性很强的复杂岩土工程，集地质工程、岩土工程、岩土测试技术、和结构工程于一体，涉及到多门学科。【3,4，5】深基坑工程包括水文地质勘察、设计、施工和监测等内容。正是由于深基坑工程的复杂性，理论设计不足以提供安全保障，施工和监测显得尤为重要。

1. 国外安全监测的研究现状

由于国外的发达国家在轨道交通和高层建筑方面研究比较早，在经过多年的发展后，许多国家已经形成了自己独特的比较完善的信息化监测和管理方法。

在地下工程施工监测领域，Geodata master system的信息化管理平台的研究和应用相对较成熟，是由意大利的GeoDATA公司首次提出并应用，该平台采用了WEB和GIS技术，对周边建筑进行安全管理、安全状态评估、监测数据管理、以及其他一些文档的管理。【6】

新加坡将GIS技术在深基坑施工和数据管理方面进行广泛应用，在深基坑工程的监测过程中，会得到大量的实时监测数据，GIS具有强大的数据分析和图表展示能力，将数据利用GIS进行存储，处理，并显示，能够对于施工过程的安全状态进行更加直观有限的评估。

韩国在首尔地铁的扩建项目中，将基于人工神经网络以及GIS的IT-TURISK系统应用其中，用于模拟地下水补给以及评估地面塌陷和建筑物损害。该系统凭借着一流的可视化设计和友好的人机交互赢得了一致好评，但是该系统仅仅在施工准备阶段用来评估施工过程对周围建筑的影响，在实际的施工过程中，仍需要施工人员密切关注动态，以及施工过程中的各类风险。

可以看出，国外发达国家对于地下工程和施工安全格外重视，对于深基坑工程监测的研究已经很成熟，同时也采用先进的GIS、WEB以及ANN等技术。但是由于国内施工监测方法、管理模式、以及相关政策法规的不同，国内无法推广这些成熟的技术和产品，但是有很大的借鉴作用。

2. 国内安全监测的研究现状

随着科学技术的快速发展，我国的基坑安全监测也进入了自动化和信息化的时代。在数据信息管理系统方面，谢伟【9】等人提出了一套基于Web的深基坑监测管理系统，对于大量监测数据进行快速存储和及时分析，采用计算机网络和数据仓库的方式对于深基坑中采集到的数据进行及时传输，分析以及共享，让用户能够及时、准确地获取深基坑监测信息，还可以为以后的深基坑设计、施工规范提供数据支持。王永明【7】等人提出了建筑基坑信息化监控的基本思路，并利用精密变形监测、互联网通信、计算机信息管理、地理信息系统等先进技术，开发了一套满足基坑监测需求、即时性预警需求、全局性管理需求的基坑安全监控系统，并在南京地区进行了初步应用。张凤瑞【11】等人利用GIS、WEB地图API等技术，开发了一套天津市深基坑监测信息管理系统，集成了基坑工程的信息管理，监测数据管理，监测数据分析与预警提示，监测数据图表化展示，视频实时监控等功能，很好地满足了天津市建筑工程质量安全监管部门的需求，对于信息化的普及有着深远的意义。夏鹏【12】等人基于ArcGIS Engine二次组件库技术和BP神经网络模型，研发出一套集监测数据管理、预警预测分析、可视化表达于一体的深基坑监测系统，应用于长沙地铁湘府路车站实例，能够稳定处理大量的监测数据。

在自动化监测领域，我国的专家学者也在积极研究，取得了一定的成果。

周二众【10】研究了测量机器人的测量原理，并采用自动数据采集技术、数据传输技术、数据存储以及分析等技术设计了一套基于测量机器人的深基坑安全监测预警系统，分为两部分，检测器能够对深基坑现场的监测数据进行实时获取，分析器能够对于采集的数据及时分析并实时预警，在实际的深基坑项目中取得良好的监测效果，在后续稳定性监测中发挥着巨大的作用。

张振兴【8】对基坑自动化监测系统进行了研究和分析，对比了传统方法与自动化监测方法，分析了地下工程和深基坑自动化监测的优缺点，指出目前我国的自动化监测水平的不足，传感器无统一的标准，仍需要大力发展，而自动化监测简单易懂，有利于相关责任人员及时发现问题，采取相应的措施，保证地下工程和基坑工程的施工安全。

殷志建【13】等人探讨了光纤传感技术，分析了基坑自动检测的原理，通过一定的案例指出，利用光纤监测的方法能够解决传统监测中很多不可解决的问题，监测准确性以及时间优势已经逐步显现出来。

王鹏【14】等人指出传统监测方法的诸多不足之处，通过多种传感器融合分方法，实现现场的自动监测，实现监测数据的实时发布和报警。

（1）监测技术的研究现状

（2）监测方法的研究现状

（3）监测系统的研究现状

### 1.2.2 深基坑变形预测的研究现状

对于经验预测法而言，首先需要对深基坑现场的监测数据进行搜集和整理，对其进行分析，找出一般规律。例如OU【29】，Wang【30】等人研究了支护系统刚度和开挖深度的相互影响作用，总结了变形的基本表现特征；Long【31】等人发现不同的地质条件，随着施工的进行，基坑的变形规律不尽相同，根据以往的经验，总结出一定的规律，为今后的研究奠定了基础。

目前来看，大多数的深基坑监测系统注重于数据的存储与处理，监测的实时数据除了用于报警外，大多数还用来为今后的基坑设计提供数据支持。但是近年来，随着国内外的专家学者对于深基坑变形预测的研究，这些历史数据的作用越来越重要。国内外对于深基坑变形预测的方法主要分为两种，一种是数值计算的方法，主要有限元分析的方法，另一种则是基于监测历史数据的预测方法，其中包括灰色模型预测，时间序列预测以及神经网络预测等。

为了保证深基坑工程的设计方案的合理性和安全性，一些建筑物需要采用数值计算方法对可能采取的方案进行超前预测分析或者工后预测分析。目前岩土有关领域常用的数值分析法主要有有限元分析法，边界单元法，离散单元法等，使用最为广泛的还是有限元分析法【15】。

李宁【27】选取了合肥明光路车站为研究样本，借助Midas GTS有限元分析软件进行模型构建，并对基坑周围地表沉降进行研究。赵志峰【28】通过有限元模型的构建，对围护结构的变形规律进行了研究。郝敬力【16】通过数值模拟分析地铁基坑施工对邻近建筑物的影响。李杭杭【17】等人则重点分析了墙身水平位移、钢支撑轴力随基坑开挖的变化规律，并建立有限元模型,对基坑施工过程进行数值模拟计算，对计算结果和监测值进行了对比分析，结果较为一致。康亚静【18】等人采用MIDAS/GTS有限元软件通过模拟基坑开挖的静力场状态获得其开挖后的应力场及位移场，通过现场数据的对比发现，有限元计算模型可以起到很好的指导作用。张驰【19】采用MIDAS-GTS建立模型，重点研究了软土地区深基坑围护体变形及对临近管线影响，分析表明数值模拟模型的合理性，具有参考意义。

但是岩土体本身就是一个不确定的系统，在采用数值模拟的方法进行模型的建立时，土体参数的选定、计算的前提假定、边界条件的选择等不确定因素都导致了岩土工程的不确定性【20】【21】。但是深基坑变形仍然可以看做是一个系统，不少学者将系统科学的理论引入到深基坑变形预测领域，并取得了较好的效果。

Chunbao Xiong【32】等人将多种数据进行组合，利用人工神经网络对未来数据进行预测，指出人工神经网络在深基坑变形预测的研究方向和发展前景。Guojin Tan【33】等人结合粒子群算法与神经网络算法，建立了基于粒子群神经网络算法的深基坑变形预测方法，结合了实际工程，验证了方法的有效性和实用性。黄传胜【26】将灰色马尔科夫预测模型、基于时间序列的BP神经网络、基于各影响因素BP神经网络模型进行对比分析，结果表明预测值与实际值吻合较好。贾备【24】等人则将灰色系统理论与BP神经网络模型进行有机联合,建立了灰色BP神经网络组合模型的预测方法。2012 年，徐卫东【25】等结合时间序列模型，用二次平移法提取建筑物沉降序列中的趋势项，并采用动态 GM（1,1）模型对趋势项进行预测。陈家骐【23】针对传统的GM(1,1)和DGM(1,1)模型的不足，提出采用TPGM(1,1)预测模型对基坑周边地表沉降进行预测，实验表明，该模型具有一定的优越性。

### 1.2.3 存在的问题

从国内外的研究现状看，目前国内市场上的深基坑监测系统还不够成熟，主要停留在研究阶段。不仅如此，现阶段深基坑监测系统还存在如下几个问题：

1. 大多数基坑现场监测系统是基于C/S架构的，需要现场监测管理人员安装相应的软件才能使用，同时如果某一功能更新或者修改后，需要重新安装或者更新软件才能使用。

2. 国内自动化监测技术限制，许多监测项目无法实现自动化监测，同时能够自动监测的数据的传输没有统一的传输协议的规范。

3. 兼容性不够，目前的深基坑监测系统，有的没有实现自动化监测，是对监测的数据信息进行存储和管理；有的则是仅仅对能够自动采集的数据进行自动采集，存储，分析处理，对于无法实现自动化采集的数据弃而不管；然而实际的项目中，我们不仅需要能够在现有的技术条件下，实现实时监控，还能够兼容目前无法实现自动化监测的监测项目数据，保证项目监测数据管理的完整性。

4. 目前，深基坑工程监测预警都按照实际监测值是否到达预警值进行报警，存在一定的滞后性，系统的预测模块就显得尤为必要；虽然基于历史数据，很多学者对于各项监测项目进行预测研究，但是停留在研究阶段，如何将其集成到监测系统中，是亟待解决的问题。

## 1.3 本文的主要研究内容

## 1.4 本文各章节安排

# 第二章 需求分析与总体方案设计

## 2.1 需求分析

需求分析是软件计划阶段的重要活动，是软件生命周期的一个重要的环节，在这个阶段，我们的目标是把用户对该软件提出的需要或者要求进行分析和整理，明确软件需要实现哪些功能，完成哪些工作。另外一些约束条件和非功能性需求，例如软件的可靠性，可扩展性，兼容性等也是软件需求分析的重要组成部分。因此，一般情况下，软件的需求分析包括系统的功能性需求，非功能性需求以及软件设计的约束条件【34】

针对当前深基坑施工过程中事故频发，基坑安全监测依赖人工，问题发现不及时，效率低下的问题，应江苏东合南岩土科技股份有限公司的要求，本课题需要研究设计出一套用于深基坑工程进行现场安全进行监测的深基坑工程监测系统。一方面，深基坑工程的工作人员能够基于本系统远程了解现场的监测情况，同时能够在必要的时候查看各个监测项目的历史数据，辅助其对目前深基坑安全进行鉴定；另一方面，当深基坑工程现场出现监测数据异常或者监测数据呈现异常方向发展的趋势等情况，系统能够自动检测并且以短信和邮件的形式及时通知安全负责人，提醒其采取相应的措施，确保深基坑施工现场的安全。系统前期的安全监测主要围绕《建筑基坑工程监测技术规范》【35】中的有关规定进行展开，下面将从功能性需求、非功能性需求以及软件设计的约束条件三个方面对系统需求进行深入分析。

### 2.1.1 系统功能性需求分析

基于系统的实际应用需求以及江苏东合南岩土科技股份有限公司的要求，深基坑工程监测系统所需要具备的功能如图2-1所示

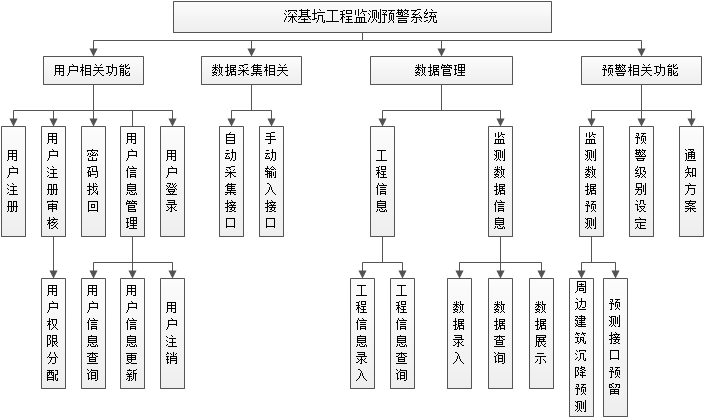


图2-1 深基坑工程监测系统功能需求图

### 2.1.2 系统非功能性需求分析

1. 可扩展性

2. 易用性

3. 可靠性（服务降级Hystrix）

4. 实时性

### 2.1.3 软件设计的约束条件

1. B/S架构

2. 运行环境

2.2 系统总体设计方案

2.2.1 系统总体架构设计

2.2.2

第三章 深基坑工程监测方案及数据采集模块设计与实现

监测内容

监测方法

数据采集模块的设计实现

第四章 监测系统Web应用模块设计与实现

负载均衡模块

数据库模块

预警模块

人机交互模块

第五章 基于深基坑监测历史数据的变形预测算法研究

时间序列Arima

改进的灰色模型

BP神经网络

支持向量机

实验分析

第六章 总结

[2] 姚世宏. 排桩及拱圈支护体系在软土深基坑中的应用研究[D].天津大学,2012.

[3] 谭正清.《地基与基础工程施工》.[M].武汉.武汉大学出版社

[4] 洪倪.《软质岩石基坑的变形研究》[D].贵州大学、2010

[5] 刘起霞.《基坑工程》.[M].郑州.中国电力出版社

【6】马智亮,陈娟.建筑施工信息化发展趋势与对策[D],浙江工业大学机械工程学院，2011

【7】王永明,李明峰,檀丁,梁新华,徐燕.南京地区建筑基坑变形预警与安全监控系统[J].土木工程学报,2015,48(S2):143-147.

【8】张振兴.地下工程及深基坑自动化监测系统综述[J].住宅与房地产,2018(33):206.

【9】谢伟 基于web方式的深基坑监测管理信息系统的设计 2005

【10】周二众 基于测量机器人的深基坑安全监测预警系统研究 2012

【11】张凤瑞,张磊.GIS技术下天津市深基坑监测信息管理系统的设计与实现[J].测绘通报,2016(07):118-121.

【12】夏鹏,崔宇鹏,张明伟,陈诚,徐帮树.基于ArcGIS的三维可视化深基坑监测系统的研发及应用[J].山西建筑,2017,43(01):83-86.

【13】殷志建.深基坑工程自动化监测关键技术探讨[J].建材与装饰,2019(28):16-17.

【14】王鹏,王宇,胡文奎,林祥宏.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(06):122-125.

【15】蒋孝煌.有限元法基础.北京二清华大学出版社,1984

【16】郝敬力.地铁车站深基坑开挖对邻近建筑物的影响分析[J].智能城市,2019,5(20):57-58.

【17】李杭杭,王勇.地铁深基坑变形特性有限元模拟及监测分析[J].工程质量,2019,37(09):61-65.

【18】康亚静,谭帅,张莉辉,韩丽.有限元数值分析在深基坑开挖中的应用[J].西南公路,2019(02):28-33.

【19】张驰. 软土地区深基坑围护体变形及对临近管线影响研究[D].西安科技大学,2019.

【20】BjerrumL.Stabilityofstruttedexcavationsinclay.Geotechnique1956,6(7):32-

47.

【21】Eide.Associatedandnon-associatedvisco-plasticityandplasticityin

soDmechanics.Geotechnique1975,25(4):67-189.81:659-662.

【23】陈家骐,司大雄,丁蕾,丁碧莹.TPGM(1,1)预测模型在基坑变形中的应用研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2019,37(03):355-358+387.

【24】贾备 邬亮.基于灰色BP神经网络组合模型的基坑变形预测研究.隧道建设,

2009,29(3):280一283

【25】徐卫东,伍锡锈,欧海平.基于时间序列分析和灰色理论的建筑物沉降预测模型研究[J].测绘地理信息,2012,37(06):23-25.

【26】黄传胜. 地铁深基坑开挖变形预测方法及工程应用研究[D].中南大学,2011.

【27】李宁.邯郸地区深基坑支护结构的优化设计研究 [D].河北工业大学硕士学位论

文,2013.

【28】赵志峰,高吉.单支撑深基坑围护结构及坑外土体变形分析[J].防灾减灾工程学报，2017,v.37(01):122-126.

【29】Chang-Yu Ou;Pio-Go Hsieh and Dar-Chang Chiou.Characteristics of ground surface settlementduring excavation[J].Canadian Geotechnical Journa1.1993,30(5): 758-767.

【30】LH. Wong;T.YPoh and H.L. Chuah.Analysis of case histories from construction of the CentralExpressway in Singapore[J].Canadian Geotechnical Journa1.1996,Vo1.33(NO.S): 732-746.

【31】 Michael Long. Database for Retaining Wall and Ground Movements due to Deep Excavations[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironm -ental Engineering.2001,127(03): 203-224.

【32】Chunbao Xiong, Tiande Li. Application of artificial neural networks to prediction of deformation in deep foundation pit[P]. Multimedia Technology (ICMT), 2011 International Conference on,2011.

【33】Guojin Tan, Hanbing Liu, Yongchun Cheng, Bin Liu, Yin Zhang. Prediction method for the deformation of deep foundation pit based on neural network algorithm optimized by particle swarm[P]. Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), 2011 International Conference on,2011.

【34】余久久编著．软件工程简明教程：清华大学出版社，2015.05

【35】[8] 中华人民共和国住房与城乡建设部 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 50497-2009 建筑基坑工程监测技术规范[S].北京:中国计划出版社,2009

Terzaghi k , perk R,B ,Soil Mechanics in Engineering practice ,2ded, John wiley & sons.INC New York

1967