

十字型应变式动态土压力 无线实时监测系统

作品概述

土体组成性质多样，差异性大，不均匀性和变异性显著，因此很多情况下土压力值理论计算结果与实际结果有着较大的偏差，影响建筑设计与施工。相比较而言，土压力传感器测得的土压力值更加直观可靠，因此如何提高土压力传感器的精确度，降低误差率对实际工程的安全性有着至关重要的指导意义。

目前土压力检测装置主要使用钢弦式或应变膜式土压力盒，虽然能够准确检测出柔性荷载下的土压力值，但是由于设计上的缺陷，无法准确检测刚性以及半刚性荷载下的土压力值，更加无法测量快速变化的动荷载下的土压力值。而且，现在很多土压力传感器无法实现实时监测的效果，对土体因瞬时荷载过大而导致的失稳现象缺少指导意义。挡土墙后填土一般都具有很大的刚性，而且道路交通工程中大部分为动态荷载，因此为了满足实际工程需求，十字型应变式动态土压力无线实时监测系统应运而生。

十字型应变式动态土压力无线实时监测系统主要由应变轴式土压力传感器、应变梁式土压力传感器、无线传输系统、实时检测系统四者组成。应变轴式土压力传感器能同时测试竖向以及侧向的压力值，从而计算得出土体侧向系数 K_0 ；应变梁式土压力传感器主要采用传力轴、弹性梁、应变片等主要部件的有机组合，受土体刚性影响较小，能够准确测量柔性、刚性以及半刚性荷载下土压力值，并且能对快速变化的动态荷载作出及时响应；无线传输系统采用多对一模式，将多个土压力盒的模拟电信号转换成数字信号发送到监控中心；监控中心的实时检测系统将接收到的多组数字信号进行处理后以间谐波的形式进行显示，一旦土压力值超过预先设定的临界值后将会发出警报，提醒工作人员做相应的措施，同时对整个测试系统进行控制。

关键词：应变梁，应变轴，土压力，动态荷载，无线，监测，刚性，侧向系数

目 录

作品概述	2
1 作品摘要	6
1.1 作品背景	6
1.2 产品简介	7
1.3 创新点、先进性与科学性	8
1.4 同类产品对比	10
1.5 技术关键与指标	11
1.6 技术特点与优势	13
1.7 市场前景分析	13
1.8 工程使用说明	14
1.9 相关名词解释	15
2 作品原理与技术	17
2.1 应变轴式土压力传感器	18
2.2 应变梁式土压力传感器	24
2.3 无线传输系统	34
2.4 实时监测系统	42
3 实验数据分析	47
3.1 实验型土压力盒静态标定实验	47
3.2 实验型土压力盒动态荷载实验	51
3.3 实验型土压力盒动态标定实验	52
3.4 实用型土压力盒静态标定实验	53
3.5 实验小结	54
4 市场应用前景	56
4.1 产品销量预测（系统仿真）	56
4.2 产品目标市场分析	59
5 工作回顾	64
5.1 团队成员分工	64
5.2 照片展示	65
5.3 致谢	68

附录一、专利

附录二、科技查新报告

附录三、所获荣誉

2013 年诺基亚·绿色设计大赛 金奖

■■■■大学第十三届“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛 特等奖

附录四、论文

附录五、专家推荐意见

龚晓南 中国工程院院士、岩土工程专家

李 欣 天津市勘测院主任工程师、正高级工程师

徐世烺 长江学者、■■■■大学建工学院院长、■■■■特聘教授

附录六、购销意向书

附录七、实地调研访谈

■■■■大学建筑设计研究院

■■■■隧道与道路工程

附录八、产品装配图

应变轴式土压力传感器

应变梁式土压力传感器

附录九、实验报告（典型实验部分）

作品摘要 | 01

PART

本节概述：土体性质受温度、湿度等环境因素影响较大，传统的理论计算方法无法准确计算出土体内部压力值。相比之下土压力传感器能够更加直观准确地测出土压力值。团队不仅在传统土压力传感器的基础上开发出能对快速变化的动荷载作出及时响应的新型应变梁式土压力传感器以及能对竖向和纵向土压力进行同步测试的应变轴式土压力传感器，而且将无线传输以及实时监测技术结合到土压力测试中，创新性地开发出十字型应变式动态土压力无线实时监测系统。

1 作品摘要

1.1 作品背景

土的组成性质多样，其性质差异大，不均匀性和变异性显著。目前岩土工程设计理论中运用均匀弹性理论，将土体视为半无限弹性空间体。显然这一理论是不符合土体实际性质的。而在现行规范中，设计公式都是在理论计算公式中引入经验系数。这种规范的设计方法经验性要求高，在实际工程中，设计值与实际值往往存在很大的差别。在某些工程实际设计中，土压力计算值与实际值之间的误差甚至可以达到 200%。正是土压力的这种不确定性，导致了在基坑工程，隧道工程中众多的事故发生，其危害是显而易见的。

特别是近年来，我国由于挡土墙坍塌、受损而导致发生的交通事故数不胜数。究其原因，大致可分为以下几类：

- 1) 建设场地拦洪排水设施设置不合理；
- 2) 供水管道断裂，大量蓄水流入滑坡土体形成泥石流；
- 3) 挡土墙上部施加的动荷载过大，导致挡土墙产生变形破坏；
- 4) 人工填土密实度低，大量滞水停留在填土地下水。当处在积水层中的填土材料处于饱和状态时形成流塑性软土层，在填土层自身重力及上部荷载下产生剪力破坏；
- 5) 挡土墙施工质量不好；
- 6) 地质灾害。

上述问题的存在，将严重影响挡土墙的结构强度、刚度、稳定性和抗震抗剪性能，使挡土墙存在严重的安全隐患，很有可能导致安全事故的发生，造成重大的人员伤亡和财产损失。我们应重视挡土墙存在的安全隐患，及早对安全隐患作出正确的评估，并通过先进的检测仪器对挡土侧向土压力进行实时监测，保证围护结构的稳定性和安全性。因此对挡土墙土压力进行检测（特别是动态荷载下挡土墙侧向土压力的检测）并作出安全评估就显得尤为重要。

我国建筑垮塌的发生率与西方国家相比高很多。但目前国内对建筑安全监测防治工作的重视程度远低于国外，在我国至今没有做过有关应变梁式土压力测试仪的准确统计。建筑失稳失效的现象不减反增，并有逐年上升的趋势，应引起足

够重视。

现有土压力计测试仪由于原理上的缺陷无法准确测量刚性荷载下土压力值，同时也无法测试快速变化的动态荷载下的土压力值，因此鉴于上述多种因素考虑，十字型应变式动态土压力无线实时监测系统应运而生。

1.2 产品简介

目前的土压力检测装置主要使用的是振弦式或应变膜式土压力盒，他们能够准确地检测出柔性荷载下的压力值，但是由于设计上的缺陷，无法准确检测刚性以及半刚性荷载下的压力值。挡土墙后填土一般都具有一定刚度，因此传统的土压力传感器用于测试土压力往往难以得到令人满意的结果，尤其是在检测挡土墙后填土表面作用的动态荷载方面。工程中常用的振弦式土压力盒无法对快速变化的动态荷载下的土压力作出及时响应，更无法对挡土墙后土体的侧向土压力作出有效的检测。因此，在很多情况下，现有土压力测试仪器检测结果的准确程度远不能满足工程应用的要求。

本项方案旨在克服传统的振弦式和应变膜式土压力盒的缺陷，研制新型应变梁式土压力盒，并开发出一套利用无线传输的实时监控系統，从而能够较准确地测量具有一定刚度土体中的土压力。这也为挡土结构上土压力的设计计算提供一种较为准确的测试和检验手段，进一步为提高挡土墙或其他地下挡土结构的设计水平创造条件，为工程建设服务。

基于上述思想，我们设计了十字型应变式动态土压力无线实时监测系统。它既可以通过新型土压力盒的精准测量来反映该处土体的土压力，又可以将所测数据通过所研发系统实时反馈到设计人员手中，从而提供设计依据并有利于地质灾害的预防与整治。



图 1.1 土压力传感器实物图



图 1.2 系统实物图

1.3 创新点、先进性与科学性

<p>创新性</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 引入传力系统 采用传力轴、应变片以及弹性梁有机结合的方法，能对快速变化的动态荷载作出及时响应。 2. 采用十字形弹性轴（梁） 应变轴式与应变梁式土压力传感器均引入十字型弹性轴或梁，使得应变轴式土压力传感器能同时测试竖向和侧向土体土压力，进一步求得侧向土压力系数 K_0； 应变梁式土压力传感器在原有单梁的基础上进行改进，使用十字形弹性梁增加监测稳定性，提高精确度。 3. 嵌入式无线传输实时监测技术 将传统的土压力测试技术与无线传输技术相结合，并开发相应的监测系统，使得测试过程更加安全可靠。
<p>先进性</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 实现竖向与侧向土压力同步测试技术 采用十字形梁测试技术，能同时对竖向以及横向土压力值进行准确检测，从而计算出侧向土压力系数 K_0，进一步有利于多方向土压力的监测。 2. 实现长时间快速变化动荷载作用下土压力测试技术 采用应变片电阻变化的原理，对动态荷载反应灵敏，可以为研究汽车、波浪等动态荷载对挡墙稳定性的影响提供帮助，弥补了振弦式土压力传感器无法对快速变化的土压力作出及时响应的缺陷； 3. 提高土压力测试准确度 土压力传感器引入传力系统，能够对刚性、半刚性以及柔性荷载进行更准确的测量，尤其弥补了现有土压力传感器对刚性荷载测试精度低的缺陷； 采用惠斯顿电桥连接应变片的方式，实现温度自补偿，受温度影响小，精度更高，弥补了应变膜式土压力传感器因传力机制为液体而受温度影响大的缺陷； 4. 实现无线实时监测 配有无线传输系统以及实时监测系统，实现智能化全天候监测，进一步提高工程安全性，同时，由于弹性梁的优良性能，能提高测试仪的使用寿命； 5. 制作加工过程更加简易 与传统的钢弦式土压力传感器相比，制作工艺更加简单，内部配件更少，而且稳定性更高，降低产品次品率。

科学性

土体组成性质多样，性质差异大，不均匀性和变异性显著，而现有的一些计算方法，类似均匀弹性理论，无法准确计算出真实的土压力值。相比较而言，土压力传感器测得的土压力值更加直观可靠，因此如何提高土压力传感器的精确度，降低误差率对实际工程的安全性有着至关重要的指导意义。

1. 理论方面：应变式土压力传感器以发展十分成熟的应变片为基础进行创新性运用，性能稳定；应变轴式土压力传感器采用十字型弹性轴能够同时测试竖向以及侧向土压力值，进一步计算得出侧向土压力系数；

应变梁式土压力传感器采用传力轴、弹性梁等部件，能够准确检测刚性、半刚性以及柔性荷载下土压力值，与原有土压力传感器相比具有更高的精确度；同时应变轴式土压力传感器能够准确直观地测试出侧向系数，对工程开展有着重要的指导意义。

2. 应用方面：团队通过大量的实验论证，发现十字型应变式动态土压力无线实时监测系统能够对土压力进行准确测量，并且数据传输十分稳定，能对超出临界值的荷载作出及时警报。

从创新点、先进性以及科学性三方面可以看出十字型应变式动态土压力无线实时监测系统可以很好地弥补了现有土压力传感器无法准确检测刚性荷载下土压力值以及对快速变化的动荷载作出及时响应的缺陷。同时监测系统相对与传统的土压力传感器而言，实现了智能化测试效果，使工程测量更加方便、安全和可靠。

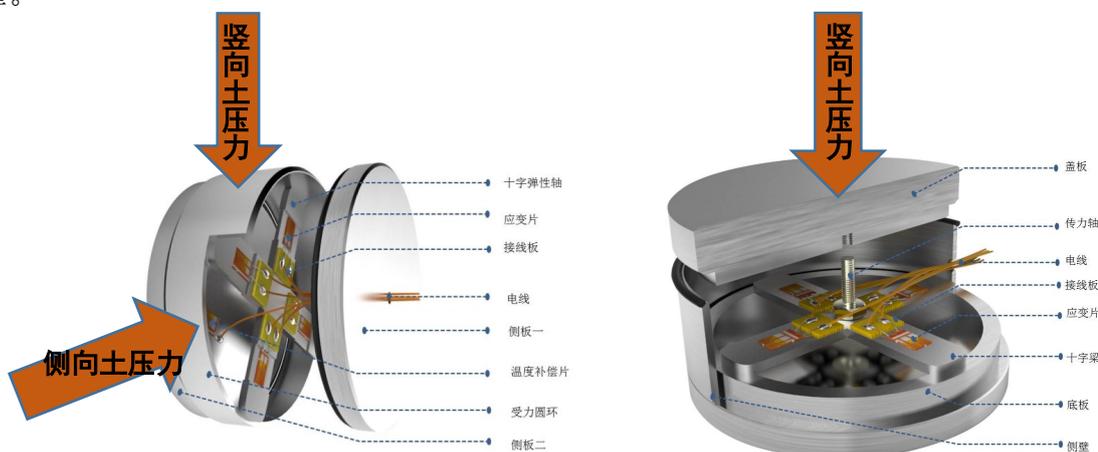


图 1.3 土压力传感器受力原理图

1.4 同类产品对比

现有土压力盒使用较多的是振弦式土压力盒和承压膜式土压力盒，表 1.1 从多维度将本产品与已有的两种土压力盒进行对比分析。市场上暂无土压力盒能测试侧向土压力系数，而是使用其他产品进行测试，也包括实验室的测试方法，因此表 1.2 将应变轴式土压力测试仪同时与原位以及实验室测试方法进行多维度对比。

表 1.1 应变梁式土压力传感器同类产品对比表

比较因素 土压力盒	精准度	测试范围	制作工艺	环境效益	价格
钢弦式	反应较慢	静态荷载，柔性荷载，半刚性荷载（准确率低）	钢弦薄板的制作难度高	环境污染小	300 元到 1000 元不等
承压膜式	受温度影响大	静态荷载，柔性荷载，半刚性荷载（准确率低）	需要很好的密封技术	传压介质为液体，主要有硅油、水银，对环境污染很大	350 元
应变梁式	电桥温度自补偿，抗干扰，精度较高	静态荷载，动态荷载，刚性荷载，半刚性荷载，柔性荷载	内部结构，制作工艺均相对简单	不含或极少含有重金属材料，符合“低碳绿色”的环保理念	400 元

从上表中可以看出，应变梁式土压力传感器的综合性能更高，弥补了其他种类土压力传感器无法准确测量刚性荷载以及对快速变化的动态荷载及时响应的缺陷，有着更高的性价比，市场前景更广。

表 1.2 应变轴式土压力传感器同类产品对比表

比较因素 测试仪器	精准度	测试 方法	可操作性	环境效益	价格
应力铲	内部为液体介质，故受温度影响较大	原位	需辅以纵向土压力值检测仪，过程较繁琐	传压介质为液体，主要有硅油、水银，对环境污染很大	1000 元到 2000 元
静止土压力系数测试仪	由于土为重塑土，故难以获得准确值	室内	钻探取土，运土装土一系列过程较为复杂	室内检测，对环境影响较小	3000 元左右
应变轴式侧压力系数	电桥温度自补偿，避免了温度影响	原位	装置简单，且可直接获取侧压力系数，操作性强	不含或极少含有重金属材料，符合“低碳”，“绿色”的环保理念	400 元左右

从上表中不难发现，应变轴式土压力测试仪有着更高的性价比，同时性能更加优异，稳定性更好，准确度更高。

1.5 技术关键与指标

(1) 技术关键

- 1) 应变轴式土压力传感器筒身刚度选取尽量与所测土体刚度相匹配，且与弹性轴刚度相差得当；
- 2) 应变梁式土压力传感器盖板刚度选取尽量与所测土体刚度相匹配，并且不能过小；
- 3) 应变梁式土压力传感器密封圈材料选取应与量程相匹配，同时防止传感器受瞬时土压力过大而损坏；
- 4) 两种土压力传感器均使用十字型轴（梁），增加传感器稳定性；
- 5) 传感器均基于电阻应变片，能对快速变化的动荷载作出及时响应；
- 6) 无线传输系统对电磁波等外界信号做出有效处理后，实时监测系统用统计学的方法对数据做进一步处理，确保监测准确性。

(2) 技术指标

应变轴式土压力传感器	实用型	外盒规格	直径 100mm; 高度 45mm
		应变轴规格	长度 96mm; 最大直径 10mm; 最小直径 5mm; 材料: 钢
应变梁式土压力传感器	实验型	外盒规格	直径 31mm; 高度 11mm;
		应变梁规格	1 号应变梁规格: 21mm×7mm×1mm 材料: 钢 2 号应变梁规格: 21mm×7mm×1mm 材料: 铝 3 号应变梁规格: 21mm×7mm×2mm 材料: 钢 4 号应变梁规格: 21mm×7mm×2mm 材料: 铝 5 号应变梁规格: 21mm×7mm×3mm 材料: 钢 6 号应变梁规格: 21mm×7mm×3mm 材料: 铝
	实用型	外盒规格	直径 104mm; 高度 45mm
		应变梁规格	100mm×10mm×5mm 材料: 钢
		可达量程	0. 1MPA-10MPA
可达精度	$\leq 0. 08\%F. S$		
静态标定公式	$F = -0. 0779\Delta U + 0. 0539$ (其中所得 F 单位为 N, ΔU 单位为 mV) $\Delta U = U - U_0$ U_0 为未加荷时的电压值 U 为加荷后的电压值		
无线传输系统	无线通信模块 NRF905	工作频率	433MHz
		工作距离	空旷地 200~300 米 (经过两层混凝土可达 100 米左右)
		工作电压	1. 9~3. 6V
		收发转换时间	<650 微秒
		最大发射功率	10mW
		接收灵敏度	-100dBm
		与单片机连接接口	SPI
	控制模块 c8051f320	供电电压	4. 0~5. 25V
		程序下载接口	USB
		NRF 连接接口	SPI
并行 A/D 转换位数	10bit		

1.6 技术特点与优势

产品由不同专业本科生一起自主研发设计，属于交叉学科创新性技术：

土压力传感器方面将电阻应变片与十字型轴（梁）进行有机结合，并创新性地开发传力系统，尽最大可能排除土体刚度对测试精度的影响，也实现了对竖向以及纵向土压力同步测量的技术，能在原位不断实时监测侧向土压力系数的变化情况。因此，与传统土压力传感器相比准确度更高，能对快速变化的动态荷载进行及时响应。

除此之外，又将土压力测试技术与无线传输监测技术相结合，构成土压力实时监测系统，去除工地上绕线复杂的现象，使监测更加方便、安全、准确。

1.7 市场前景分析

全国建筑监测企业中所使用的土压力盒均存在存活率低、反应滞后、灵敏度低的现象，有 15%左右是 20 世纪 90 年代前后的产品，有 60%是 21 世纪初左右的产品，它们更新换代的过程又是一个需求释放的过程，将会保证未来 10 年甚至更长一段时间中国建筑测试设备市场的快速增长。

同时现在市场上的土压力传感器均无法对快速变化的动态荷载作出及时响应，也很少有成套的土压力实时监测系统，因此十字型应变式动态土压力无线实时监测系统有着巨大的市场容量，具有客观的市场前景与市场效益。

应变梁式土压力传感器结构简单，所需零件易得，生产过程方便，大大减少了制造成本，从而最终降低建筑成本，为企业带来更大的利润。此外，应变梁式土压力传感器的高精度、高灵敏度的特性在提高挡土墙和其他地下工程的建设设计的同时，将极大减少工程建设事故的发生几率，减少豆腐渣工程的发生，从而提高工程建设的效率，降低建筑公司的事故赔偿费用。

另外，整套监测系统能对冲击荷载作出准确测量，可与相关国防项目结合用于监测爆炸荷载，可有效用于防灾工程，有助于减少地质灾害所造成的经济损失。

主要适用工程：

尾矿库实时监测、边坡实时监测、桥梁实时监测、基坑实时监测、隧道实时监测、水利大坝实时监测、管道实时监测、路基实时监测；

1.8 工程使用说明

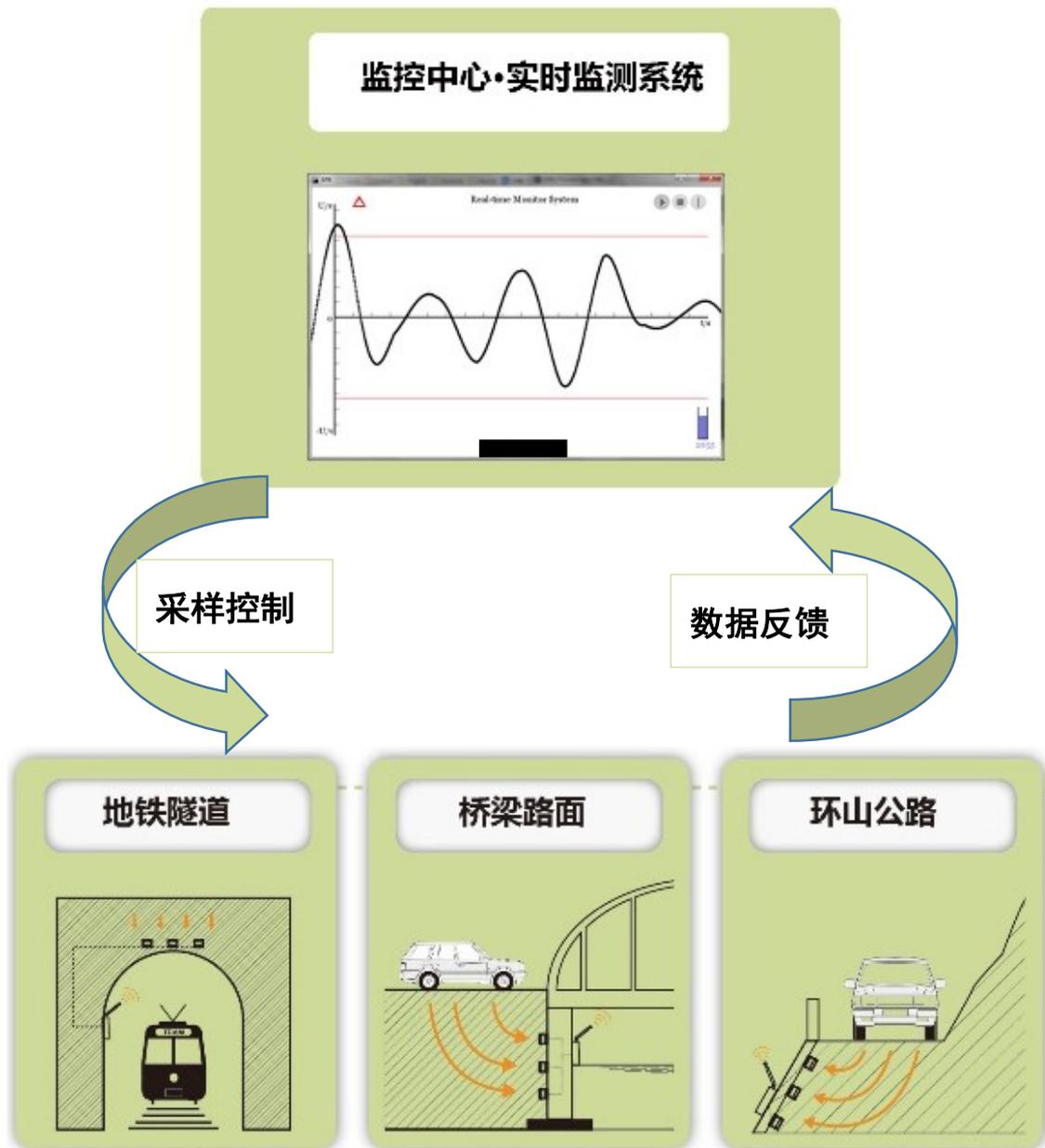


图 1.4 作品工程应用原理图

将土压力传感器按要求（测量方向方位等）埋置在土体中，用四芯接头将其与数据采集发送模块连接；将多个土压力传感器连接到同一个数据发送中心后，按下工作开关即开始受监测中心控制；监测中心按要求开始或者停止采样，并观察不同荷载情况下土压力值和侧向土压力系数的变化曲线；土压力值或侧向土压力系数超过预先设定的临界值后会发出警报，提醒工作人员作出相应措施。

1.9 相关名词解释

刚性	两个物体相碰撞不会发生变形，刚性物质坚硬比较脆，文中主要指固体类物质。
半刚性	工作特性介于刚性、柔性之间，如石灰或水泥加固土、石灰多合土等，文中提到土体具有半刚性，因为土体刚性受温度、湿度等因素影响大，所以经常具有半刚性。
柔性	与刚性相对，文中主要以水为例子当成柔性介质
土压力盒	文中又名土压力计、土压力传感器、土压力测试仪，主要用于直接或间接测量土体内部压力值。
钢弦式	文中又名振弦式，在不同的压力下，钢线振动频率不同，可根据具体公式由所测频率计算出响应压力值。
承压膜式	文中又名应变膜式，在不同压力下，应变膜产生变形，从变形计算出压力值。
弹性轴	文中又名应变轴，在轴向压力作用下会产生相应的拉压变形。
弹性梁	文中又名应变梁，在横向压力作用下会产生相应的弯曲变形。
电阻应变片	文中又名应变片，由敏感栅等构成用于测量应变的元件，能将机械构件上应变的变化转换为电阻变化。
惠斯顿电桥	文中又名惠斯通电桥，英文名称：Wheatstone bridge，测量电阻值的一种四臂电桥，被测电阻为一个臂，其余三个臂是已知标准电阻，其中至少有一个臂是可调的。
零漂	当输入端无信号时，输出端的电压偏离初始值而上下漂动的现象。零漂是由于温度的变化、电源电压的不稳定等原因造成的。

作品原理与技术 | 02

PART

本节概述：十字型应变式动态土压力无线实时监测系统主要包括四个部分，分别是应变轴式土压力传感器、应变梁式土压力传感器、无线传输系统以及实时监测系统。整套监测系统能对过高的土压力值以及相应的侧向土压力系数作出及时的警示作用，减少被监测工程的事故发生率。

2 作品原理与技术

十字型应变式动态土压力无线实时监测系统主要包括四个部分，分别是应变轴式土压力传感器、应变梁式土压力传感器、无线传输系统以及实时监测系统。

应变轴式土压力传感器能同时测试竖向以及横向的压力值，从而计算得出土体侧向系数 K_0 ；为工程技术人员区分主动以及被动土压力区提供指导。

应变梁式土压力传感器主要采用传力轴、弹性梁、应变片等主要部件的有机组合，受土体刚性影响较小，能够准确测量柔性、刚性以及半刚性荷载下土压力值，并且能对快速变化的动态荷载作出及时响应。

无线传输系统采用多对一模式，将多个土压力盒的模拟电信号转换成数字信号发送到监控中心的实时监测系统。

实时监测系统将接收到的多组数字信号进行处理后以间谐波的形式进行显示，一旦土压力值超过预先设定的临界值后将会发出警报，提醒工作人员做相应的措施，同时对整个测试系统进行控制。

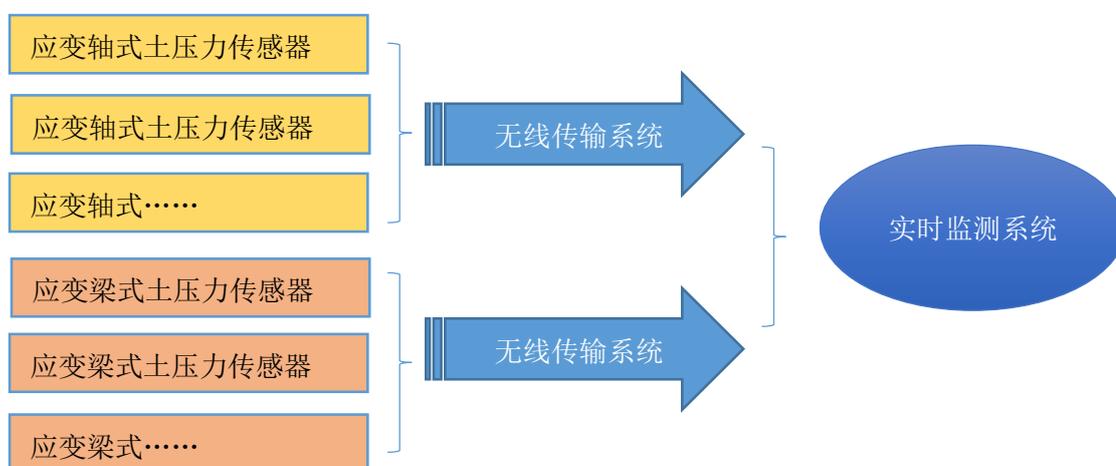


图 2.1 十字型应变式动态土压力无线实时监测系统工作原理图

2.1 应变轴式土压力传感器

2.1.1 现有产品

目前市场上测量土侧压力系数的产品主要分为原位测试仪以及室内测试仪。原位测试仪主要利用油压系统测量侧压力系数，而室内测试仪则主要通过纵向以及横向的力传感器获得纵向以及横向的土压力值，进而获得侧压力系数。下面分别举例来介绍原为测试仪遗迹室内测试仪的工作原理和缺陷。

(1) 应力铲

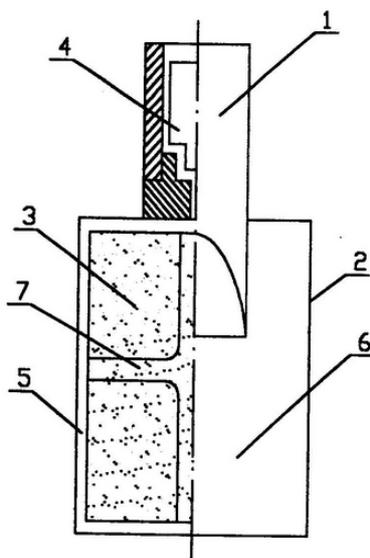


图 2.2 应力铲的工作原理图

(1) 钻杆 (2) 压力盒 (3) 液体介质 (4) 压力传感器 (5) 框架 (6) 钢板

1) 应力铲的工作原理

应力铲由钻杆(1)和压力盒(2)组成，压力盒(2)内装有液体介质(3)，压力盒(2)与钻杆(1)连通，钻杆(1)内设有压力传感器(4)；压力盒(2)的四周为框架(5)，框架(5)的两侧焊有钢板(6)，框架(5)和钢板(6)形成压力盒(2)。该装置将侧向土压力通过压力盒内的液体转换为液压，进而通过钻杆内的压力传感器测的液压值，换算成侧向土压力值，进而得到横向纵向土压力的比值，即侧压力系数。

2) 应力铲的主要缺陷

应力铲内部传压介质为液体(如硅油)，因此受温度的影响较大，而且一般情况下，受温度的影响程度会随着产品精度的提高而提高，这样又限制了产品的量程。所以精度和量程的取舍就成了一个较大的问题。

(2) 静止土压力系数测试仪

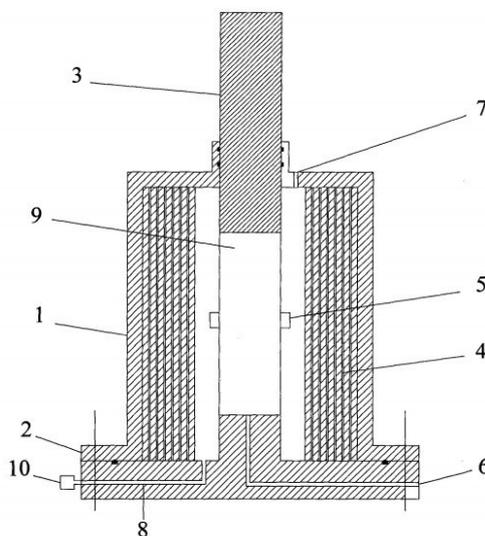


图 2.3 静止土压力系数测试装置结构图

1) 静止土压力系数测试仪工作原理

该静止土压力系数测试仪，装置如上图所示，包括安装式样的底座，罩扣在式样底座上的压力室，压力室顶部中心设有与其滑动配合的活塞以及固定在试样中间截面上的电阻应变式径向变形传感器和连接于底座上的液压传感器，活塞断面面积和形状与压力室中具体试验的式样的断面面积和形状相同，压力室通过嵌套若干个高度、厚度均相等的套筒实现内部体积的调节。该仪器运用压力室内的液压传感器获得土体的纵向压力，通过固定在试样中间截面上的电阻应变式径向变形传感器获得横向土压力，从而获得侧压力系数。

2) 静止土压力系数测试仪主要缺陷

该实验装置构造较为复杂，且只能用于室内试验。由于获取土样时难免会造成土样扰动，因而使得室内实验所获得的数据往往会偏离实际值较多。因此，为了获得准确值，往往要进行一系列的标定实验，故而增加了工作量。

2.1.2 设计思路

土体侧向压力系数反应了土体单元竖向与水平侧向协同变形的能力。对于水,其侧向压力系数为 1, 对于刚性体, 其侧向压力系数为 0。土体单元最为一种半刚性弹性体, 其在欠固结或正常固结状态下静止状态下的侧向压力系数通常位于 $0 \sim 1$ 之间。对于超固结土, 土的侧向压力系数有时会大于 1。这是土体在静态平衡状态下, 侧向土压力系数的取值。当土体受到扰动, 即将产生破坏时, 其侧向土压力系数会产生一定幅度的改变。当侧向土压力值增大, 则土体可能在背离其重力滑动方向受力, 此时的土体中的横向力可能达到被动土压力, 从而发生土体破坏。当侧向土压力系数减小, 则土体可能在向着其重力滑动方向受力, 此时的土体中的横向力可能达到被动土压力, 从而同样导致土体破坏。所以, 用土体侧向土压力作为指标监测土体的稳定性状态是一种良好的方式。

温度补偿片: 为了消除温度改变对土压力测试的影响。在不受力的盖板上粘贴应变片作为温度补偿片。由于因为温度改变而引起的变形对于弹性轴与盖板是相同的, 所以若将上盖板应变片与弹性轴应变片连接在惠斯通电桥相邻桥路上, 便能消除温度应力的影响。

弹性轴: 互相垂直的两根弹性轴均采用变截面, 在距端部四分之一处设置 20mm 长, 直径 5mm 的较小截面段, 弹性轴的其余部分均为直径 10mm 的较大截面段。两根弹性轴在中点处相交相贯。将较小截面段作为变形测量段, 粘贴电阻应变片测量其应变以推算土压。较大截面段作为传力轴和固定装置, 保证将压力稳定传至测量段, 并通过构造保证弹性轴与受力环连接的稳定性。简化计算验算弹性轴的强度与稳定性:

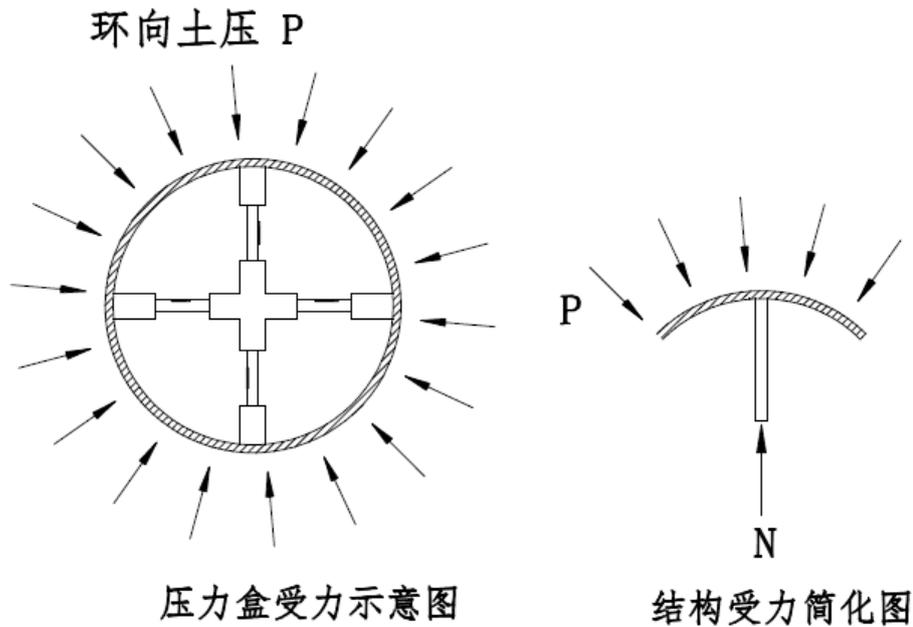


图 2.4 弹性轴设计计算示意图

1) 假设土压力 1MPa

压力 N: $N = p\pi Dh / 4 = 1(\text{MPa}) \times \pi \times 100(\text{mm}) \times 45(\text{mm}) / 4 = 3.5\text{kN}$

轴压强度验算: $\frac{N}{A} = \frac{N}{\pi r^2} = \frac{3.5\text{kN}}{\pi \times (5\text{mm})^2 / 4} = 178\text{MPa} < f = 235\text{MPa}$ 强度满足

稳定验算: $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 \times 206(\text{GPa}) \times [\pi \times (5\text{mm})^4 / 64]}{(100\text{mm})^2} = 6.2\text{kN} > N$

2) 反算土压力限值

轴极限承载力 $N_{lim} = \min \begin{cases} N_u = Af = \pi \times (5\text{mm})^2 \times 235(\text{MPa}) / 4 = 4.6\text{kN} \\ N_{cr} = 6.2\text{kN} \end{cases} = 4.6\text{kN}$

3) 土压力限值

$P_{lim} = N_{lim} / (\pi Dh / 4) = p\pi Dh / 4 = 4.6\text{kN} \div [\pi \times 100(\text{mm}) \times 45(\text{mm}) / 4] = 1.3\text{MPa}$

所以，经粗略估算，弹性轴满足在 1MPa 情况下的强度要求与稳定要求，且，土压力限值估计为 1.3MPa。

根据工程经验，1MPa 的土压力量程满足绝大多数工程应用的要求。

2.1.3 原理介绍

在原有土压力测试系统的基础上，我们又创新地引入了通过对土体侧向土压力系数的监测从而达到监测土体状态的功能。

为了能够找到测试土体竖向与横向土压力之间关系的方法，我们引入如下测力装置。

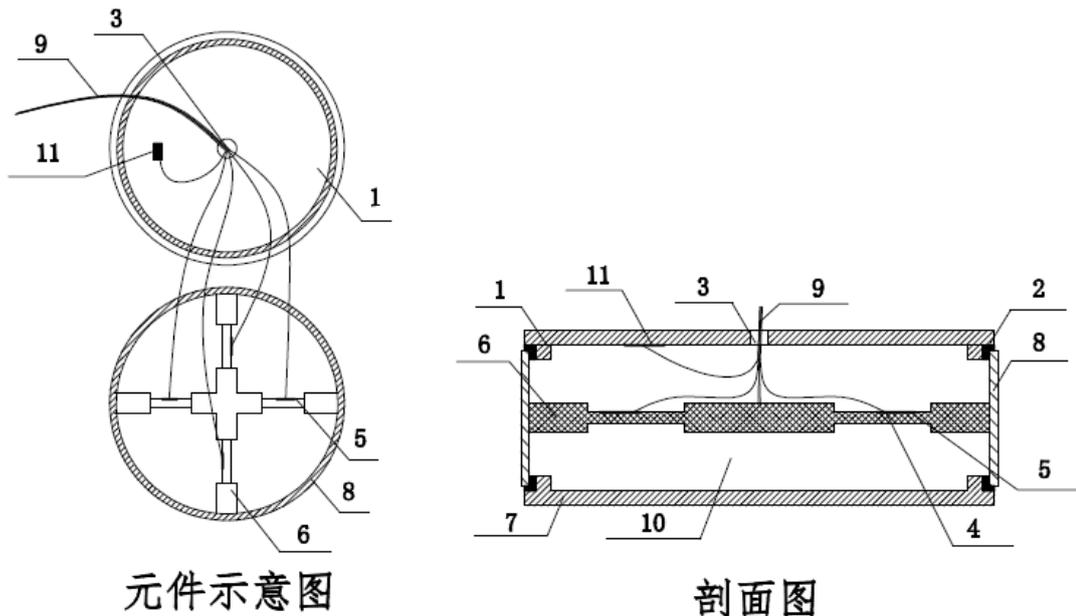


图 2.5 装置示意图

1 盖板，2 密封圈，3 穿出的通孔，4 配套的接线板，5 电阻应变片，6 弹性轴，7 底板，8 受力环，9 连接线，10 防水封闭胶，11 温度补偿应变片。

该测力装置通过周围土压力对其环的竖向与横向压力的差别，在竖轴向与横轴向产生不相等的变形。利用变形差通过理论计算，便可以测得土体的侧向压力系数。

弹性轴采用变截面的结构形式，用较粗截面保持轴压稳定，用较细截面放大变形。将细截面轴段用作应变测量轴段，提高测量精度。

使用：将土压力盒埋置于土体中，土压力盒测力环受上覆土轴向力与水平的土体侧向力。两个方向的力的大小差异导致测力环两个轴向产生不相等变形。通过两个轴向变形的大小可以得知测力环变形的大小。通过测力环变形的大小可以得知两个轴向土压力值的大小，进而可以得知土体的侧向土压力的大小。

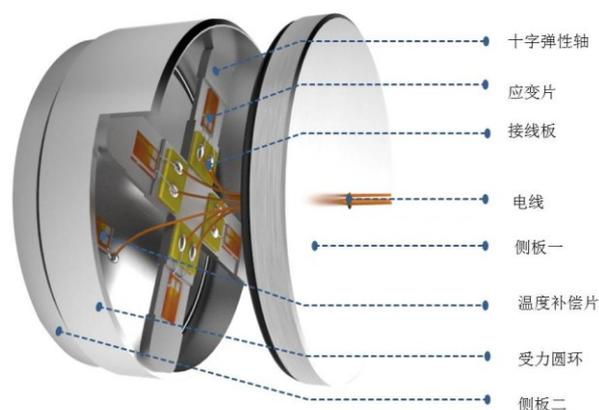


图 2.6 应变轴式土压力传感器 3D 效果图

2.1.4 小结

通常的仪器在对土体进行状态监测时都采用土压力作为监测指标。这种指标具有直观和物理意义明确的特点。但在实际工程中，对单方向的土压力监测往往无法正确及时的反应土体是否处于即将破坏的状态。此时，若引入对土体侧向压力系数的监测便可大大改善这种不确定性。

对于土体侧向土压力的监测可以广泛应用于各种实际工程。例如挡墙土体稳定监测，基坑土体稳定监测，隧道土体稳定监测等。加入无线系统的应变轴式土压力测试系统可以适应各种复杂工况，有利于工程应用。

2.2 应变梁式土压力传感器

2.2.1 现有产品

土压力计按采用的传感器不同主要有钢弦式、差动式、电阻应变式、电感式之分。目前市场上运用最多的是振弦式土压力计与应变膜式土压力计。下面通过分别介绍两种土压力计的代表型型号说明其工作原理及缺陷。

(1) 钢弦式土压力盒

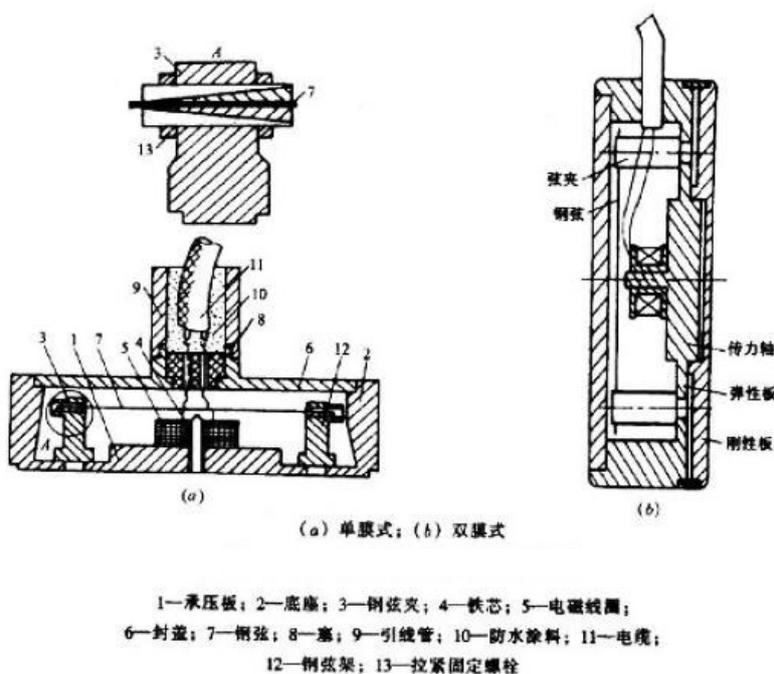


图 2.7 钢弦式压力计的工作原理图

1) 钢弦式压力盒的工作原理：

当表面刚性板受到土压力作用后，通过传力轴将作用力传至弹性薄板，使之产生挠曲变形，同时也使嵌固在弹性薄板上的两根钢弦柱偏转，使钢弦应力发生变化，钢弦的自振频率也相应变化，利用钢弦频率仪中的激励装置使钢弦起振并接收其振荡频率，使用预先标定的压力—频率曲线，即可换算出土压力值。

2) 钢弦式压力盒的主要缺陷：

钢弦式土压力盒每次读数时都需要激发受力钢弦，通过测量某段时间内的振动次数来得到该段时间内的平均振动频率，并以此为依据计算出土压力。由于这种传感原理，在测平均频率的过程中无法对荷载变化做出相应。所以，钢弦式土压力盒不能测试快速变化的动态荷载。

(2) 承压模式土压力盒

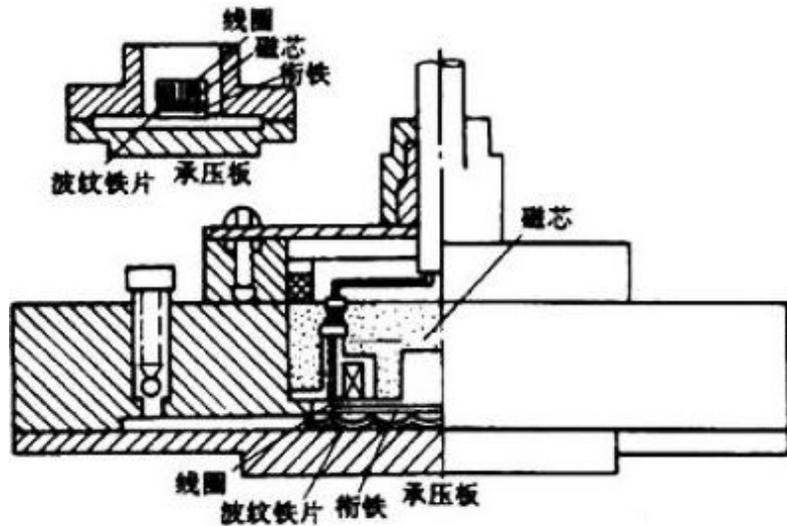


图 2.8 承压膜式土压力盒的工作原理图

1) 承压膜式土压力盒的工作原理：

当土压力作用于压力盒承压膜（一次膜）上，承压膜产生微小挠性变形，使油腔内液体受压，因液体不可压缩而产生液体压力，通过接管传到压力传感器的受压膜即二次膜上，使差动电阻式传感器的电阻比和电阻值发生变化，或使电阻应变式土压力盒的四个桥壁电阻值发生变化，或使电感式土压力盒的电感（自感或互感）发生变化。通过测度仪表，测出相应的变化值，经换算即可求得所测土压力值。

2) 承压膜式土压力盒的主要缺陷：

土压力盒因传压介质为液体（如硅油、水银等），其受温度影响因使用的液体不同而不同，实践中发现越是精度高其受温度影响越大，对于现场的实际工程而言，由于温度变化产生的数据漂移而带来的误差，用厂方提供的温度校正系数或公式是可以满足工程需要的，但对于用室内小型模型试验研究的某方面机理来说，由温度引起的应力偏差将会影响到试验结果分析的可靠性，有时甚至得到相反的结论。

2.2.2 设计思路

通过对现有的土压力盒的深入研究,我们发现了现有土压力盒的主要问题有以下两点:

- (1) 无合适的传力机构正确传导半刚性的土压力;
- (2) 传感器类型不合适导致无法对快速变化的动态荷载做出及时响应;

针对以上两个问题,我们做了相关思考:

1) 如何解决传力轴问题

- ① 具有一个合适的传力面,将面积内的土压力均匀的传至传感器;
- ② 传力系统应当尽可能满足直接有效的要求,这样可以减少在传力过程中的力损失;
- ③ 传力系统能与测试仪整体协调装配;

基于以上几点考虑,加之处于受力均匀性问题的考虑优先选择圆形盒身,参照现有测试仪的外形我们团队设计了由外壳上盖板和传力轴组成的传力系统。传力系统中,外壳上盖板直接与土体接触将半刚性荷载转换至刚性荷载,并通过传力轴施加于传感器上。

实际实现过程中,为保证外壳上盖板弹性传力,在上盖板和与外套筒之间设置空隙,预计填入弹性材料保证上盖板弹性下陷。

2) 如何解决快速变化动荷载问题

在思考了多种受力结构后,我们最终选择了梁式结构受力。梁式结构受力具有变形相应大的优势。在受力保证弹性形变的条件下,梁的挠度与受集中力大小具有以下关系:

$$\omega = \frac{Pl^3}{48EI}$$

其中: ω 为受力点处挠度;

P 为传力轴传来的集中力;

l 为弹性梁长;

EI 为梁抗弯刚度;

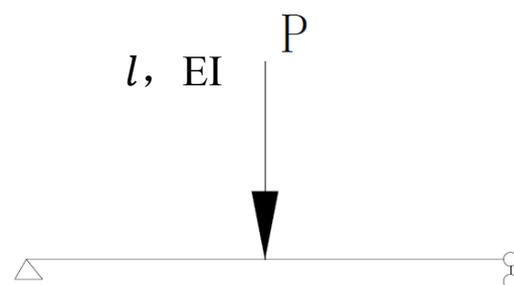


图 2.9 弹性梁受力模型

在梁长和梁厚设计时主要考虑了两点，首先在梁受荷载全阶段，梁的变形属于弹性变形。为此，控制梁的竖向挠度不超过梁长的 1%。其次，在保证梁弹性变形的前提下，上盖板与外套筒之间的空隙空间因满足两个要求：

- ① 空隙空间应大于梁的设计挠度；
- ② 空隙体积满足在梁挠度大小的位移下，上盖板与外套筒之间的弹性填充物应当同样属于弹性变形；

在变形的基础上，运用应变片将弹性梁的弹性应变转化为电阻阻值变化，再通过惠斯更电桥的引入，将阻值变化转化为电压变化。这样就通过监测惠斯顿电桥的电压变化来监测梁实时变形并通过标定，将电压信号与土压力建立关系。这样就完成了传感器部分的设计。

2.2.3 原理介绍

1) 原理图说明：

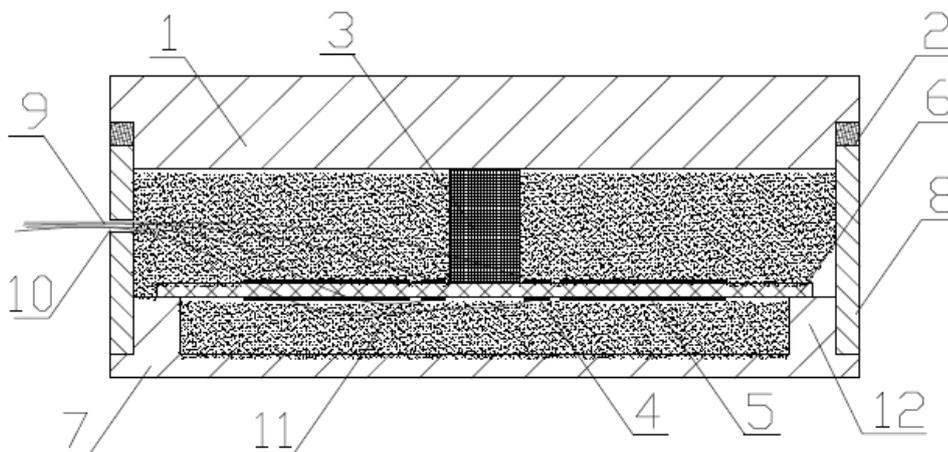


图 2.10 应变梁式土压力盒原理图

- (1) 盖板
- (2) 密封圈：起到缓冲以及密封作用
- (3) 传力轴：将上部荷载传下作用在弹性梁上
- (4) 配套的接线板
- (5) 电阻应变片：4 个应变片与回路组成惠斯通电桥，放大应变

- (6) 弹性梁
- (7) 底板
- (8) 固接的筒身：密封土压力盒
- (9) 连接线
- (10) 穿出的通孔：导线的通路
- (11) 防水封闭胶：在土压力盒柔性荷载作用下（水下）标定过程中，不致进水失效。
- (12) 台阶支撑弹性梁：保证弹性梁为简支梁。

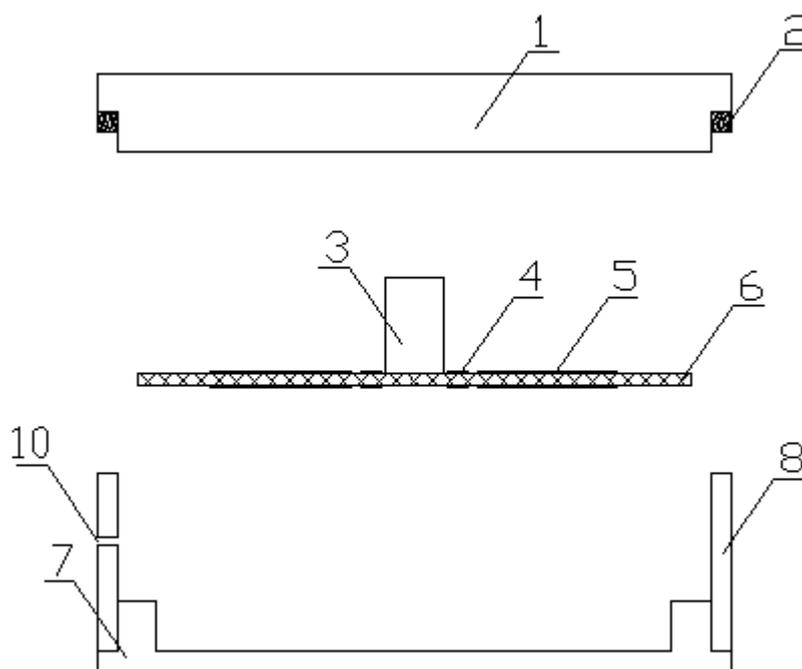


图 2.11 装置分解示意图

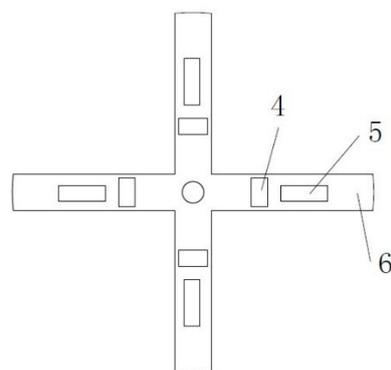


图 2.12 弹性梁示意图

1) 具体实施方式

应变梁式土压力传感器，包括中空的壳体和封闭壳体的盖板 1，所述的壳体的内腔中设有弹性梁 6 和传力轴 3，所述的壳体的底部设有一圈向上延伸的台阶 12，所述的弹性梁 6 架设于所述的台阶 12 上；

所述的弹性梁 6 的上、下表面均设有电阻值相同的电阻应变片 5 和与电阻应变片 5 配套的接线板 4，所述的电阻应变片 5 之间通过导线连接形成惠斯通电桥，所述的惠斯通电桥通过连接线 9 与应变仪连接，所述的壳体上设有允许所述的连接线 9 穿出的通孔 10；

所述的弹性梁 6 和盖板 1 之间设置所述的传力轴 3，所述的传力轴 3 一端与盖板 1 接触、另一端与弹性梁 6 接触。

所述的盖板 1 与壳体之间设有密封圈 2；所述的壳体内腔填充有防水封闭胶 11。

所述的壳体呈圆筒形，所述的壳体由底板 7 和与底板 7 固接的筒身 8 组成；所述的台阶 12 设置于底板 7 上，所述的台阶 12 为一圈圆环，所述的台阶 12 与筒身 8 通过螺纹连接。

所述的传力轴 3 的与所述的弹性梁 6 固接。

2) 工作原理

在壳体内腔中设置弹性梁，并在弹性梁的两侧粘贴电阻应变片和接线板，将电阻应变片连接成惠斯通电桥。测试中施加在圆形盖板上的土压力通过传力轴传递到弹性梁上，引起弹性梁发生微小应变，进而使得粘贴在梁上的应变片电阻发生变化。弹性梁变形的特点为上表面受压缩短、下表面受拉伸长，这将导致粘贴在梁上下表面的应变片电阻发生不同的变化，梁的变形虽然十分微小，但经过惠斯通电桥的放大作用后可由应变仪精确的检测出来。经过标定后便可以得到土压力与应变仪读数变化的对应关系。

3) 量程设计:

为了使弹性梁的刚度能与土压力盒的量程相匹配。我们进行了如下考虑:

首先,压力盒需具有足够的刚度来适应我们需要的工程实际需求。通过计算工程实用荷载下的挠度 ω ,控制其与梁长 l 的比值为 $1/100$ 。以此来保证梁的变形处于弹性阶段。利用公式:

$$\omega = \frac{Pl^3}{48EI}$$

变形后得在已知集中力 p ,梁长 l ,挠度 $\omega = 0.01l$ 的前提下可计算得梁所需截面抗弯刚度 EI :

$$EI = \frac{Pl^3}{48\omega} = \frac{100Pl^2}{48} \cong 2.08Pl^2$$

其中: ω 为受力点处挠度;

P 为传力轴传来的集中力;

l 为弹性梁长;

EI 为梁抗弯刚度;

根据计算所得抗弯刚度 EI 在选定材料下,弹性模量 E 为常数

。则可通过截面惯性矩 I 计算截面尺寸:

$$I = \frac{BH^3}{12}$$

其中: I 截面惯性矩;

B 为弹性梁截面宽;

H 为弹性梁截面高;

通过选定弹性梁宽 B 即可计算求得

$$H = \sqrt[3]{\frac{12I}{B}}$$

其中: I 截面惯性矩;

b 为弹性梁截面宽;

H 为弹性梁截面高;

由此求得的梁截面高为弹性梁的最小刚度对应梁高,即 H_{min} 。

其次,为了保证压力盒的灵敏度 μ_b 。

$$\mu_b = \Delta F_{min}$$

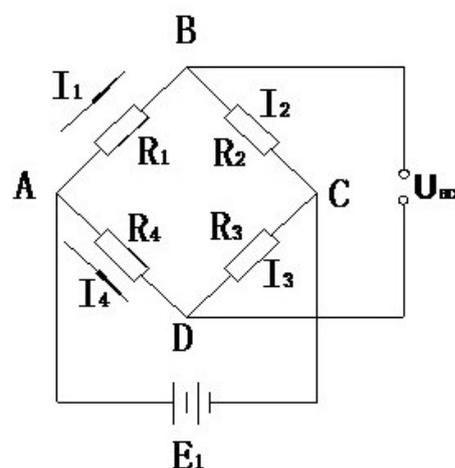


图 2.13 惠斯顿电桥电路

假设测试仪器能读到的最小电压变化为 ΔU_{min} ，则可以计算得到土压力盒的最大刚度对应的梁最大厚度 H_{max} 。

如图 2.13 所示为一全桥电路，输出电压为

$$U_{BD} = \frac{E_1 K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

四枚应变片在桥上下两侧对称布置，故有

$$\therefore \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon_0 \quad U_{BD} = E_1 K \varepsilon_0$$

图 2.14 即为土压力盒内梁的力学模型

$$\text{在 } x=l/2 \text{ 处, 有弯矩 } M = \frac{Fl}{4}$$

$$\therefore M(x) = \frac{Fl}{4} \times \frac{x}{l/2} = \frac{Fx}{2} (x \leq l/2)$$

由材料力学

$$\sigma = \frac{My}{I}, \quad \varepsilon = \frac{My}{EI}$$

由公式得

$$\int du = E_1 K \int d\varepsilon$$

$$\therefore U = E_1 K \int_a^b \frac{y}{EI} \times \frac{Fx}{2} dx = E_1 K \int_a^b \frac{H}{2EI} \times \frac{Fx}{2} dx$$

$$U = \frac{E_1 K F H}{8EI} (b^2 - a^2)$$

$$\therefore F = \frac{8EIU}{E_1 K H} \times \frac{1}{b^2 - a^2} \quad \text{令 } C = \frac{8EI}{E_1 K H} \times \frac{1}{b^2 - a^2}$$

得 $F = C \times U$

$$\text{令 } F_1 = CU_1$$

$$F_2 = CU_2$$

$$\text{同时 } U_2 - U_1 = \Delta U_{min}$$

$$\text{此时 } F_2 - F_1 = \Delta F_{min};$$

$$\text{故 } \Delta F_{min} = F_2 - F_1 = C(U_2 - U_1) = C \Delta U_{min};$$

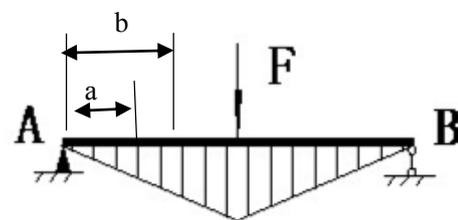


图 2.14 弹性梁受力简图

所以由计算可得土压力盒精度为

$$\mu_b = \frac{8EI}{E_1KH} \times \frac{1}{b^2 - a^2} \Delta U_{min}$$

其中： μ_b 为土压力盒灵敏度；

ΔU_{min} 为测试仪器最小电压变化值；

K为应变片灵敏系数；

E_1 为电桥输入电压；

EI为弹性梁抗弯刚度；

H为弹性梁梁厚；

a, b分别为应变片端、尾距离弹性梁支点的距离；

为保证一定的灵敏度可求得在一定梁宽条件下梁的最大高度 h_{max} 。

$$H = \sqrt{\frac{3E_1K(b^2 - a^2)\mu_b}{2EB \Delta U_{min}}}$$

其中： μ_b 为土压力盒灵敏度；

ΔU_{min} 为测试仪器最小电压变化值；

K为应变片灵敏系数；

E_1 为电桥输入电压；

E为弹性梁材料弹性模量；

H为弹性梁梁厚；

a, b分别为应变片端、尾部距离弹性梁支点的距离；

B为弹性梁梁宽；

4) 具体实用型盒身主要技术指标与加工设计图纸:

① 主要技术指标

表 2.1 实用型盒身主要技术指标

盒型	盒身外包尺寸 ($\Phi \times H_{\text{盒}}$)	梁尺寸 ($l \times b \times H_{\text{梁}}$)	量程 (Mpa)	理论分辨力 (最小可测力 变化值与量程 的比值)	温度适用范围
实用型	104mm × 45mm	100mm × 10mm × 5mm	0.1	$5.55 \times 10^{-5}\%$	-20℃—60℃

② 加工设计图纸 (具体详见附录)

选用 BX120-6AA 型应变片灵敏系数 2.09, 敏感栅尺寸 $6\text{mm} \times 4\text{mm}$

选用不锈钢制作钢梁弹性模量 $2 \times 10^5 \text{Mpa}$;

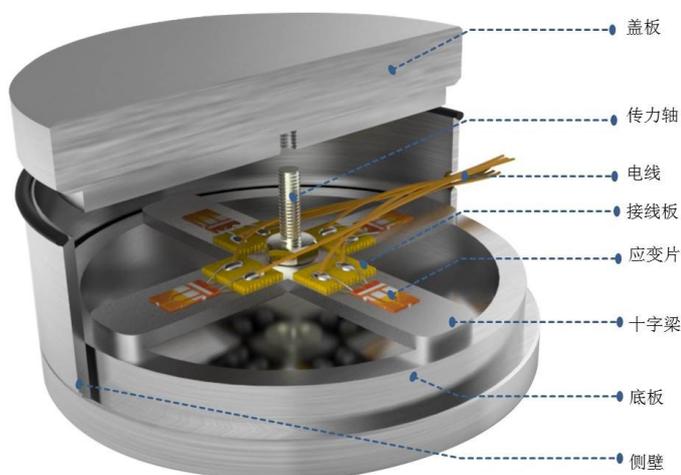


图 2.15 应变梁式土压力盒 3D 效果图

2.2.4 小结

应变梁式土压力传感器通过将弹性梁、应变片以及传力轴有机结合在一起,能对快速变化的动态荷载作出及时响应,而且受土体刚性、温度等因素影响小,测试结果更加准确。

2.3 无线传输系统

无线通信模块用于将土压力测试仪采集到的数据通过无线的方式实时传送到处理中心。当前实际工程中，大多采用有线的方式传送土压力测试仪测得的数据，相比于有线传送数据的方式，无线方式可以避免布线的麻烦，也可以避免传输线缆容易断的缺陷。

2.3.1 整体介绍

无线模块分为无线发送模块与无线接收模块，接收模块可以接收多个发送模块传送来的数据。发送模块负责收集土压力测试仪采集到的数据，并对其进行放大、A/D 转换等处理，然后将数据通过天线发出。（如图 2.16 所示）

无线接收模块通过天线接收数据，将接收到的数据通过 USB 口传送到电脑，由电脑对数据进行进一步处理。（如图 2.17 所示）

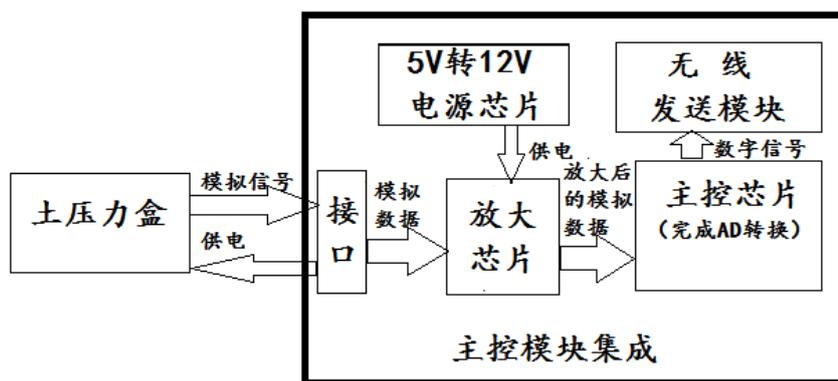


图 2.16 数据采集发送模块

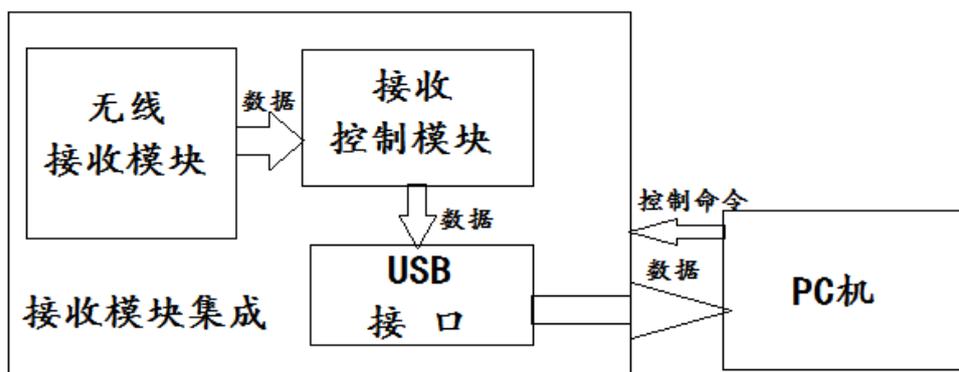


图 2.17 数据接收模块

2.3.2 模块硬件实现

1) 无线发送模块

无线发送模块主要采用了微处理器芯片 c8051f320、放大芯片 ad620、精密电源芯片 MC1403、5V 电压转 12V 电压的 DCDC 芯片 NR5D12/50a 以及无线模块 NRF905 等。其 PCB 板图如图 2.18 所示。

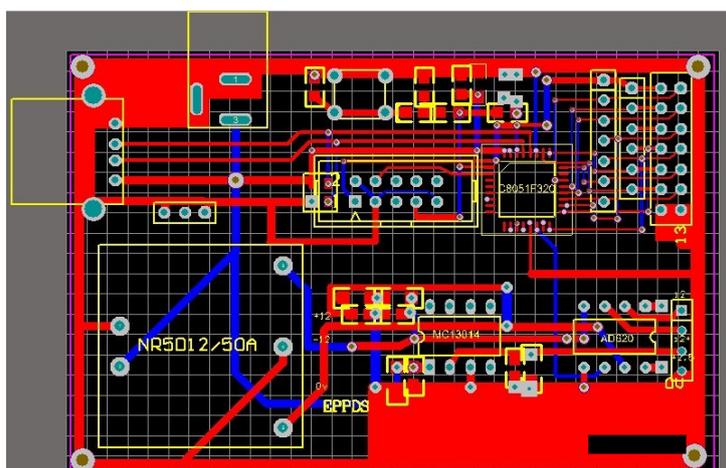


图 2.18 数据采集 PCB 板

a) 主控芯片：c8051f320

c8051f320 内部引脚说明如图 2.19 所示。

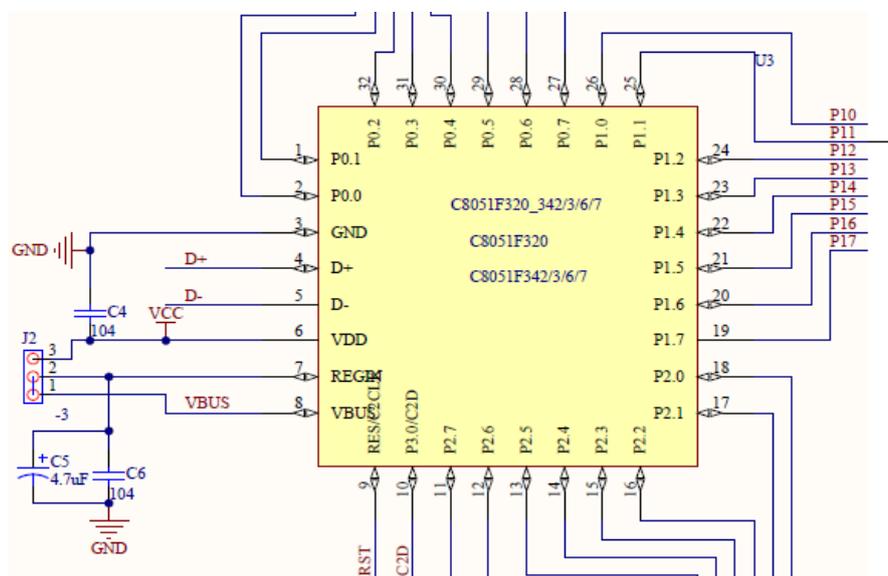


图 2.19 主控芯片

c8051f320 自带差分输入 10 位 A/D 转换功能；具有增强型外设接口(SPI0)，可以用于与无线模块 NRF905 直接进行通信。因此是无线发送模块主控芯片的合适选择。

用于连接增强型外设接口（SPI）的部分管脚定义如下表：

表 2.2 SPI 管脚定义

SPI 接口名	8051 管脚	功能	说明
CSN	P0 ⁷	SPI 使能	SPI 使能
PWR_UP	P0 ⁶	数字输入	是芯片上电
TX_EN	P0 ⁴	数字输入	TX_EN= 1 TX 模式 TX_EN= 0 RX 模式
TRX_CE	P0 ⁵	数字输入	使能芯片发射或接收
CD	P1 ⁰	数字输出	载波检测
AM	P1 ¹	数字输出	地址匹配
DR	P1 ²	数字输出	接收或发送数据完成
MISO	P0 ¹	SPI 接口	SPI 输出
MOSI	P0 ²	SPI 接口	SPI 输入

注：SPI 接口名以及对应的功能、说明是以无线模块 NRF905 为标准。

b) 放大芯片 ad620

土压力测试仪输出的电信号为毫伏级别，而 c8051f320 芯片能够正常处理的电压在伏数量级，因此需要采用放大芯片，ad620 芯片的放大公式如式 (1)，

$$Gain = \frac{49.4k\Omega}{R_g} + 1 \quad (1)$$

当 R_g 取 50 Ω 时，可以实现 1000 倍的放大，可以使毫伏级的电压放大为伏数量级的电压。ad620 的管脚定义及其功能如图 2.20 所示。

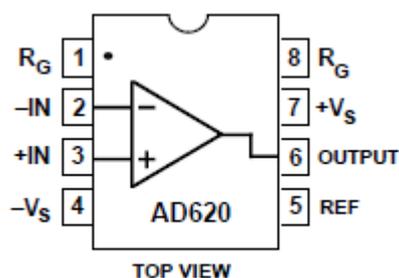


图 2.20 ad620 管脚定义

c) 精密电压源 MC1403

MC1403 芯片用于提供稳定的 2.5V 电压，为土压力测试仪提供电源，其第 1 脚为 5V 电压输入，第 2 脚为 2.5V 电压输出，输出电压误差为正负 1%，第 3 脚接地。

d) DCDC 芯片 NR5D12/50a

NR5D12/50a 芯片用于将 5V 电压转换为正负 12V 电压，用于给 ad620 芯片提供电源。

e) 无线模块 NRF905

NRF905 模块的电路管脚说明如图 2.21，各个管脚的功能如表 2.2。

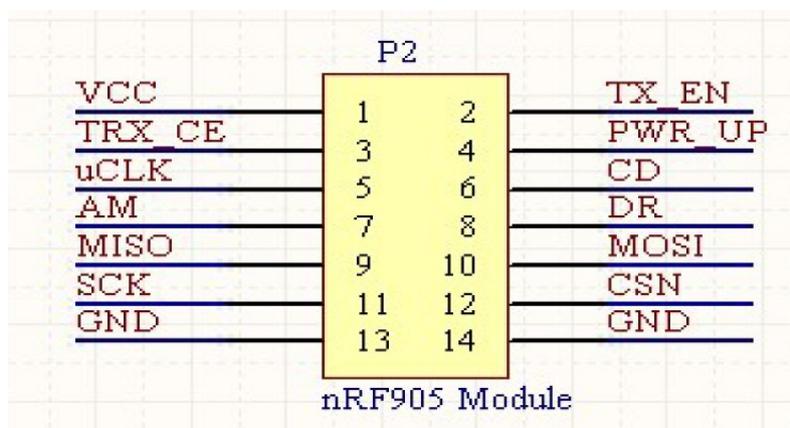


图 2.21 NRF905 管脚说明

2) 无线接收模块

由于接收模块的功能主要是用于数据传递，因此其电路比较简单。主控芯片仍采用 c8051f320（除发送模块所说功能之外，另外该芯片可以通过 USB 口与计算机连接传送数据），无线模块与发送模块匹配，采用 NRF905。其 PCB 板图如图 2.22。

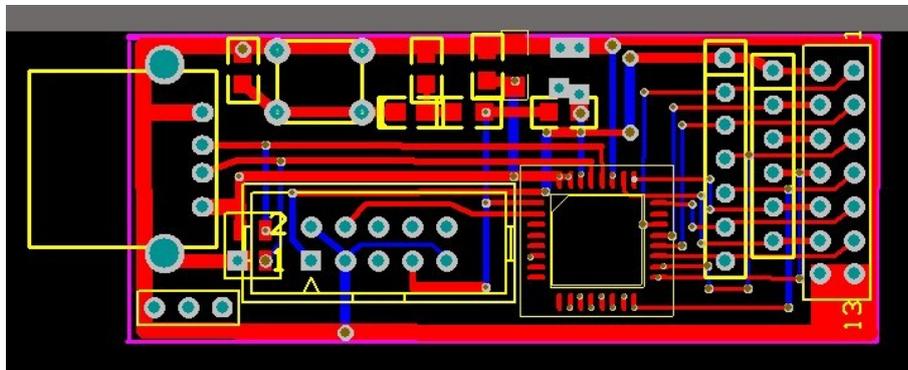


图 2.22 接收模块 PCB 板

各个芯片以及模块的功能见发送模块。

2.3.3 模块软件实现

无线传输部分可以实现多个发送模块向接收模块传输数据，主要通过软件的方法来实现——通过软件的方法给各个发送模块配置一个地址，由主机先向接收模块发出命令，要求接收模块接收某一发送模块的数据，然后再由接收模块根据发送带有地址的开启发送命令信号，该命令信号所有模块都可以接收到，但是只有地址匹配的发送模块向接收模块发送数据，其他模块被禁止发送。在接收到一定数据之后，主机再向接收模块发送命令停止发送模块的发送，由接收模块通过无线模块转发到发送模块。其工作过程如图 2.23 所示。

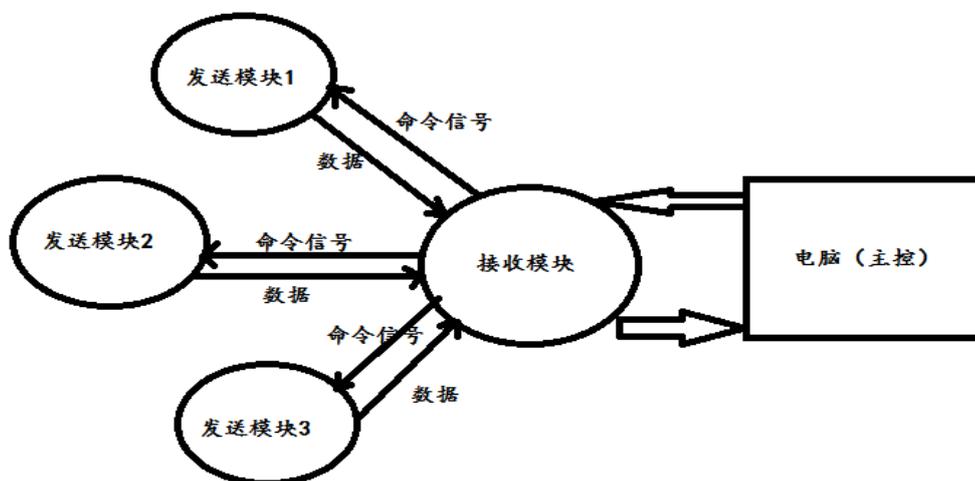


图 2.23 无线传输系统整体工作原理图

1) 发送模块软件设计

当某个模块接收到接收模块发送过来的数据，并且判断本模块的地址与接收模块的控制命令中的地址匹配之后，开始进行发送。发送流程图如图 2.24 所示。

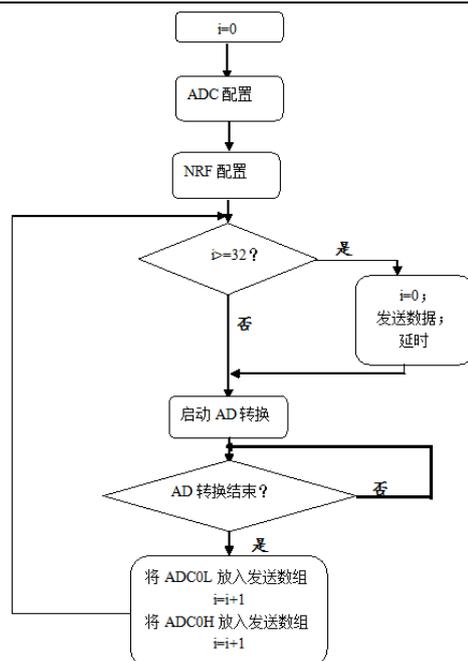


图 2.24 发送模块软件设计流程图

2) 接收模块软件设计

无线接收模块的程序的设计流程如下：

- ① PC 机上的主控软件向单片机(无线接收模块)通过 USB 口发送控制数据，用于控制接收模块向 PC 机上主控程序发送数据包的大小以及需要传递的发送节点地址；
- ② 接收模块接收到无线模块命令后，将命令通过 NRF905 发送到各个发送模块，随后接收处于接收模式；
- ③ 无线接收模块将接收到的数据按照控制数据的要求通过 USB 口发给 PC 机

3) 软件模块说明

软件模块与硬件模块是紧密结合的，本项目的软件只适合本项目中的硬件电路。比如在硬件设计中，放大芯片 AD620 的输出作为单片机 P1.4、P1.5 口的输入信号，因此，c8051f320 单片机芯片的 ADC 输入就必须设置为差分输入，并且输入端口为 P1.4、P1.5。

另外软件还具有电源检测模块，当发送模块电源供电不足时（供电电压小于阈值），该模块会向接收模块发送一组特定的数据，实现电源不足的报警。

2.3.4 主要参数及其他说明

1) 主要参数

表 2.3 参数表

ad602 放大倍数	约为 1000 倍
A/D 转换精度	10 位
NRF 发送频率	433MHz
无线模块供电电源电压	3.3V
收发模式切换时间	<680 微秒
发送模式（功率为 10dBm 时）	30mA
接收模式（功率为 10dBm 时）	12mA
c8051f320 工作电压	5V
MC1403 电压误差	1%
最大发射功率	10dBm
接收灵敏度	-100dBm
NRF 与 8051 连接接口	SPI
程序下载接口	USB
无线传输距离	200~300 米

2) 模块特点

本模块主要由一下一些优点：

<1>无线传输的系统相比于有线传输的系统的主要优点在于可以避免有线传输时布线带来的一系列问题；

<2>本模块的无线传输距离可以达到 200~300 米（最远传送距离与具体的环境有关）；

<3>A/D 转换的精度为 10bit，具有较高的精度；

<4>可以通过软件设置各个发送模块的地址，依据地址可以实现多点传输的功能，可以实现接收 125 个节点的数据；

<5>无线模块内置硬件 CRC 检错和点对多点通信地址控制；

<6>无线模块待机工作模式下电流为 2.5 微安，功耗较低；

<7>电源采用太阳能电池供电，也可以采用普通 5V 电源供电（通过适配器、锂电池供电或者通过 USB 口由电脑供电）当电源不足时，可以进行电源不足的示警。

3) 供电电源说明

接收模块电源由电脑通过 USB 口提供稳定的 5V 电压（USB 口具有稳压功能）。

发送模块采用太阳能电池板供电，同时可以采用锂电池、USB 口或者适配器（通过插座）作为备用电源。由于产品将用于野外环境，因此主要采用太阳能电池板供电，另外在要求相对较低的情况下也可采用锂电池供电。

太阳能电池板可以采用 5V120MA 提供 5V 电源，由于发送模块对电压的稳定性要求比较高，因此需要该太阳能电池板需要通过一个稳压模块之后才能完成供电的功能。

无线模块在发送功率在 10dBm 的情况下，电流为 30mA，供电电压为 3.3V，因此发送时消耗的功率如式（2）：

$$P = U_{nrf} \times I_{tran} = 3.3V \times 30mA = 99mW \quad (2)$$

由于给 c8051f320 模块供电的电压为 5V，所以需要对该式（2）进行修正，修正结果如式（3），

$$P_m = U_{c8051} \times I_{tran} = 5V \times 30mA = 150mW \quad (3)$$

5V 锂电池组以 1700mAh 电量为例，理想状态下可以连续处于发送状态的时间如式（4），

$$T_{eff} = \frac{Q_{总}}{I_{tran}} = \frac{1700mAh}{33mA} = 1700h \quad (4)$$

4) 无线传输系统实物图



图 2.25 数据采集发送模块实物图



图 2.26 数据接收模块实物图

2.3.5 小结

无线传输系统主要包括无线发送模块和无线接收模块，接收模块可以接收多个发送模块传送过来的数据，并且将数据通过 USB 传送到电脑上，由电脑中的实时监测系统对数据进行处理以及显示。无线传输距离在空旷地能达到 300m 左右，经过两层混凝土后仍能达到 100m 左右，因此基本能满足实际工程需求。

2.4 实时监测系统

2.4.1 整体介绍

软件一共分为三个部分：控制部分、监控部分和显示部分。

控制部分为软件右上角三个按键，从左至右分别代表开始、暂停和峰值线。开始按钮用来启动数据的读取，并由显示部分实时显示读取到的数据，鼠标左键点击开始。暂停按钮用来暂停数据的读取，且显示部分停止在对应的图形绘制界面，鼠标左键点击暂停。峰值线用来显示波形的峰值处，鼠标左键点击显示峰值线，右键点击不显示。

监控部分为软件左上角的三角形，一般情况下显示会灰色，当所显示的数据超过一定阈值时，显示红色，以给出提醒。

显示部分为软件的主体部分，包括坐标显示部分以及右下角的数据部分。坐标部分包括纵横坐标，分别表示电压值 U 以及时间 t 。上下两条红色线为阈值警戒线，用以检测数据异常情况。实时显示的图像为三角函数的调幅图像，根据不同的数据对三角函数进行调幅并显示。显示部分可以时候键盘中的上下按键进行缩放显示。右下角类似电池充电的部分，用以表示数据的实时读取并显示，下方的数据为当前第一个波形的调幅值。

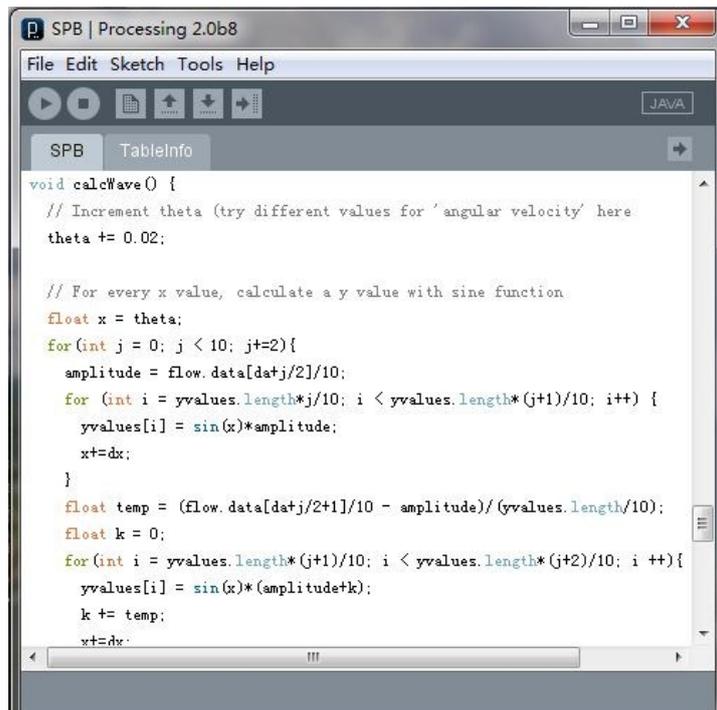


图 2.27 实时监测系统编码界面

2.4.2 软件实现

软件使用 Processing 编写，均通过所给的函数、变量进行数据处理和图形显示。

数据处理包括数据的读取、数据的显示与控制数据的写入。

数据的读取通过对文件的读操作，从文件中读取所需数据，并对数据进行一定的处理，得到所需的数据。

```
rows = loadStrings(dataSource);
if (rows.length != 0) {
    data = parseInt(split(rows[0], ','));
    len = data.length/10+1;
}
```

图 2.28 数据读取代码

数据的显示是通过对三角函数的调幅进行的。而对三角函数的绘制是通过绘制图形上的各个点连接而成的。

```
void renderWave() {
    noStroke();
    fill(0);
    for (int x = 0; x < yvalues.length; x++) {
        ellipse(x*xspacing, bottom/2+40+yvalues[x], 5, 5);
    }
}
```

图 2.29 数据显示代码

控制数据的写入通过对文件的写操作，将所需的控制信号写入文件，使得监控程序能够从文件中读取到数据，并根据数据的形式进行相应的操作。

```
if (mousePressed == true) {
    fill(255, 0, 0, 150);
    stop = false;
    output = createWriter("ctrl.txt");
    output.print("1");
    output.flush();
    output.close();
}
```

图 2.30 数据写入代码

2.4.3 操作界面

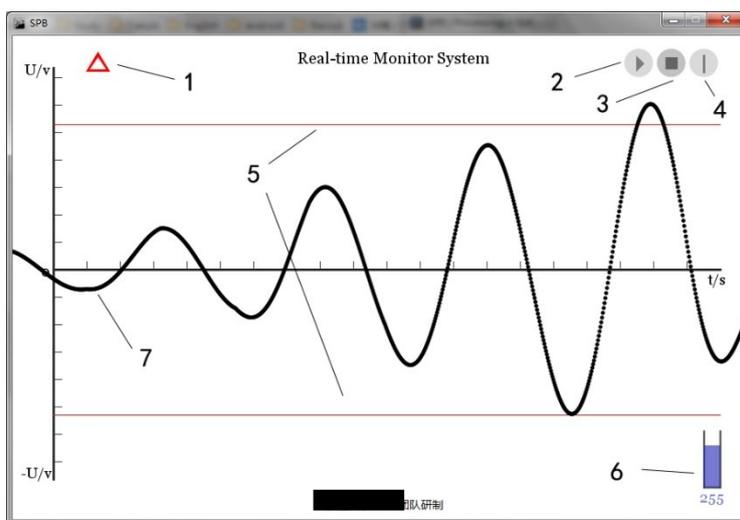


图 2.31 界面功能介绍

- 1 报警显示灯;
- 2 波形继续按钮;
- 3 波形暂停按钮;
- 4 波峰跟随直线显示按钮;
- 5 警戒电压值线;
- 6 即时电压值显示;
- 7 实时土压力监测曲线;

2.4.4 实测实例

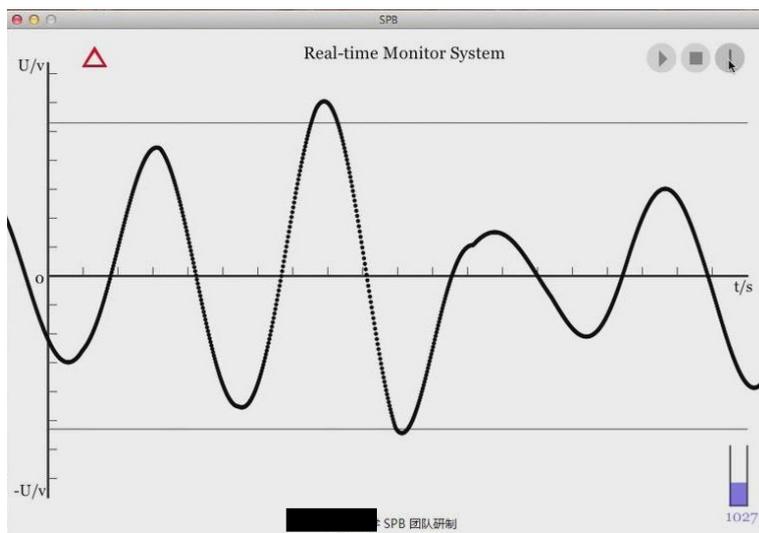


图 2.32 实测实例 1——IOS 系统

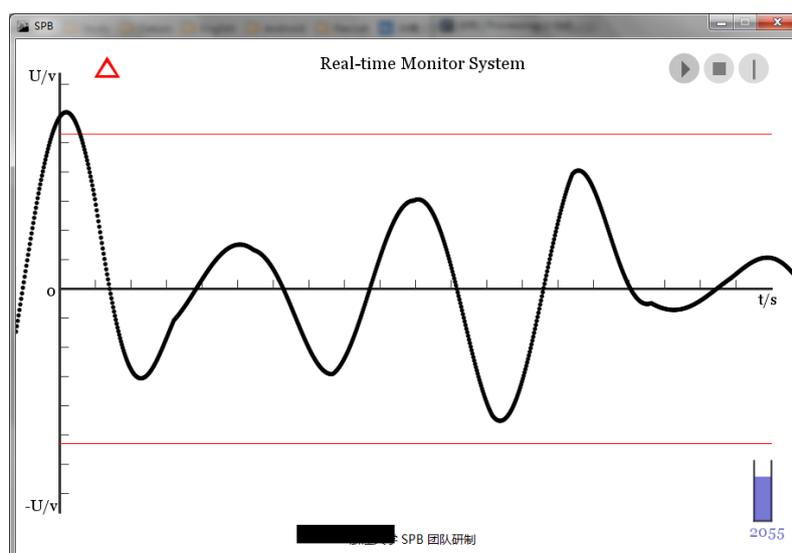


图 2.33 实测实例 2——Windows 系统

2.4.5 小结

实时监测系统主要将接受到的数据进行处理以及显示，并可以对整个监测系统进行控制。在动态荷载作用下，土压力值会产生不同的变化，实时监测系统可以将此以间谐波的形式进行显示，同时当土压力峰值超过预先设定的临界值后会发出警报，提醒工作人员作出相应的措施。另外，当整个监测系统出现问题时，比如无线发射模块电量不足等情况，实时监测系统将会发出提醒，工作人员就能及时对整个系统进行检修，尽量避免由监测系统故障而引起的事故。

实验数据分析 | PART 03

本节概述：团队就自主开发的土压力传感器模型、实物、传统的土压力传感器以及整套监测系统进行了大量的实验论证，得到大量实验数据。在对实验数据进行对比分析后，团队又不断完善产品，使监测系统误差不断减小，精度不断提高。

3 实验数据分析

实验过程中所涉及的土压力盒主要分为实验型（模型）和实用型，前者主要用于实验室研究，后者在标定以及相关部门鉴定后即可应用于实际工程。团队对两种分别做了多次实验，并以实验报告的形式对其进行了总结。（具体实验报告请见附录）

3.1 实验型土压力盒静态标定实验

3.1.1 刚性荷载实验

试验时，通过在土压力盒上部加载定额砝码（10克-1000克），测试刚性荷载下应变梁式土压力传感器的应变值，测试结果列于表3.1。1#和2#土压力传感器的梁厚度为1毫米，3#和4#土压力传感器的梁厚度为2毫米。

表 3.1 刚性荷载下土压力传感器应变值测试数据

荷载 (g)	1#				2#				3#				4#			
	1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	3	3	3	11	11	10	10.7	8	8	8	8	14	14	13	13.7
20	6	5	6	5.7	23	22	22	22.3	16	17	16	16.3	27	28	28	27.7
40	11	11	12	11.3	44	44	43	43.7	33	33	32	32.7	56	56	57	56.3
50	15	14	14	14.3	56	54	55	55	39	40	41	40	72	70	71	71
100	29	28	29	28.7	111	112	111	111.3	80	82	80	80.7	139	140	140	139.7
200	57	55	55	55.7	201	196	208	204.7	159	162	160	160.3	281	282	279	280.7
500	133	129	131	130.3	444	441	454	446.3	401	402	402	401.7	698	702	698	699.3
700	—	—	—	—	—	—	—	—	556	562	559	559	981	985	980	982
1000	—	—	—	—	—	—	—	—	794	802	800	798.7	1404	1403	1399	1402

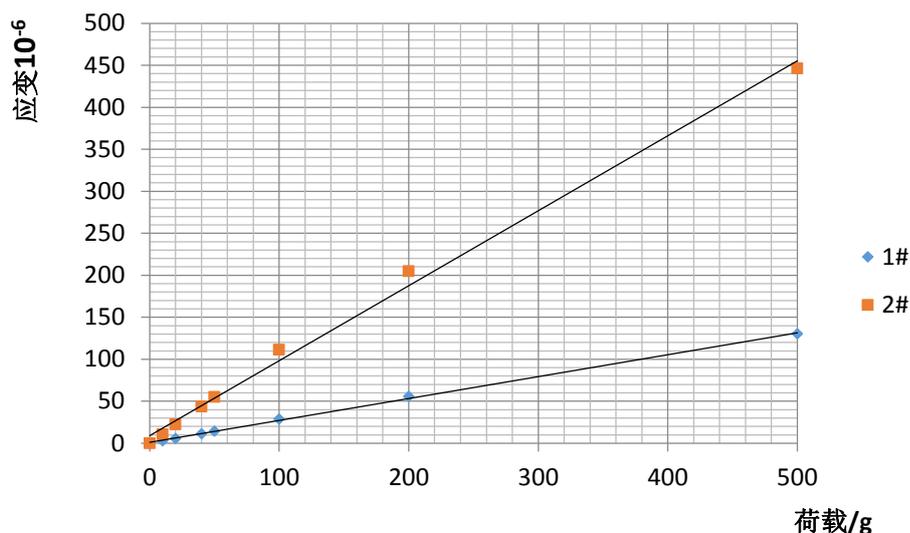


图 3.1 1#、2#土压力盒

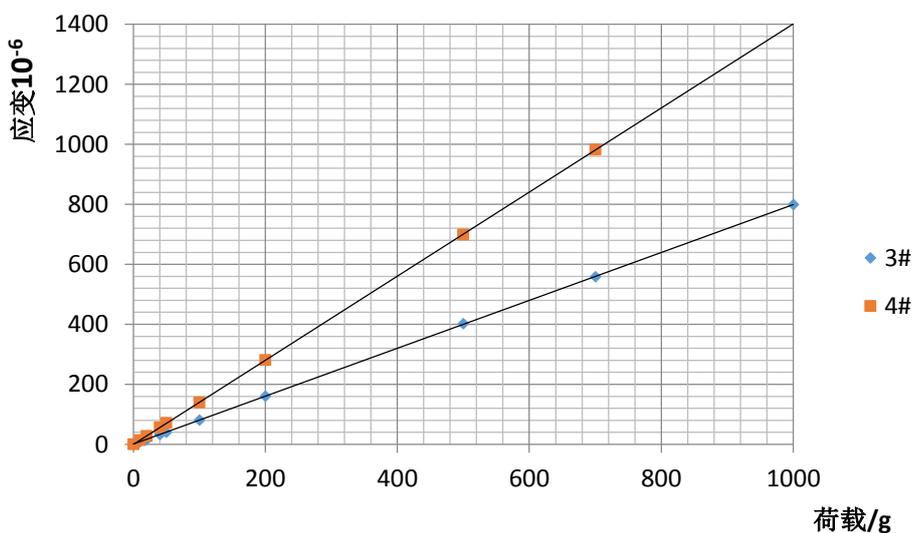


图 3.2 3#、4#土压力盒

由以上数据分析可得当梁厚从 1mm 增加到 2mm 时，土压力盒的量程增加了 8 倍左右，和理论分析比较接近。

3.1.2 柔性荷载实验

试验时，将土压力传感器安装于模型槽侧壁，模型槽内装满水。3# 和 4# 土压力传感器安装位置深度分别距水面 10cm、20cm、30cm、40cm、50cm，传感器通过隔水导线接到应变测试仪上，应变仪的测试值见以下数据。

表 3.2 柔性荷载下土压力传感器应变测试数据

深度 (m)	3#				4#			
	1	2	3	平均	1	2	3	平均
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	56	57	57	56.7	99	100	99	99.3
0.2	113	114	114	113.7	198	199	200	199
0.3	170	172	171	171	300	300	302	300.7
0.4	225	229	229	227.7	399	399	400	399.7
0.5	281	288	287	285.3	497	501	502	500

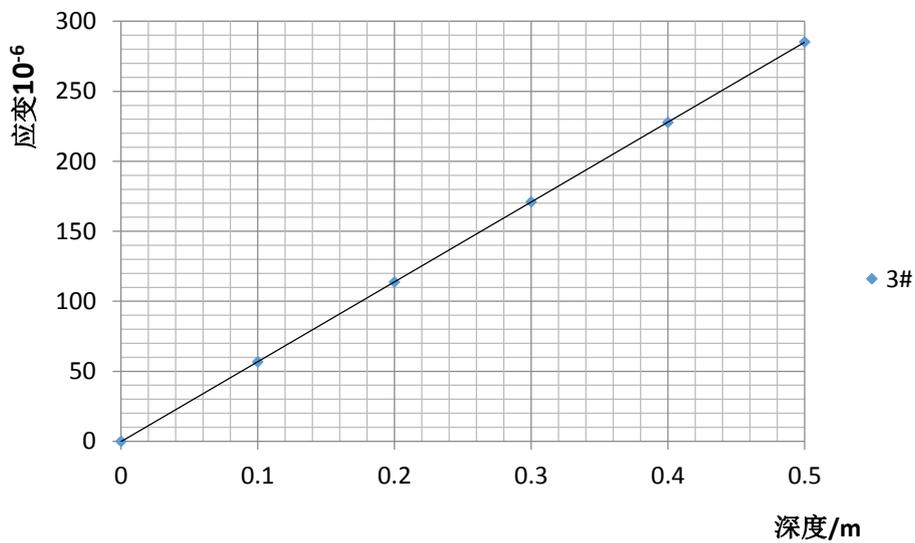


图 3.3 3# 土压力盒 应变水深响应曲线

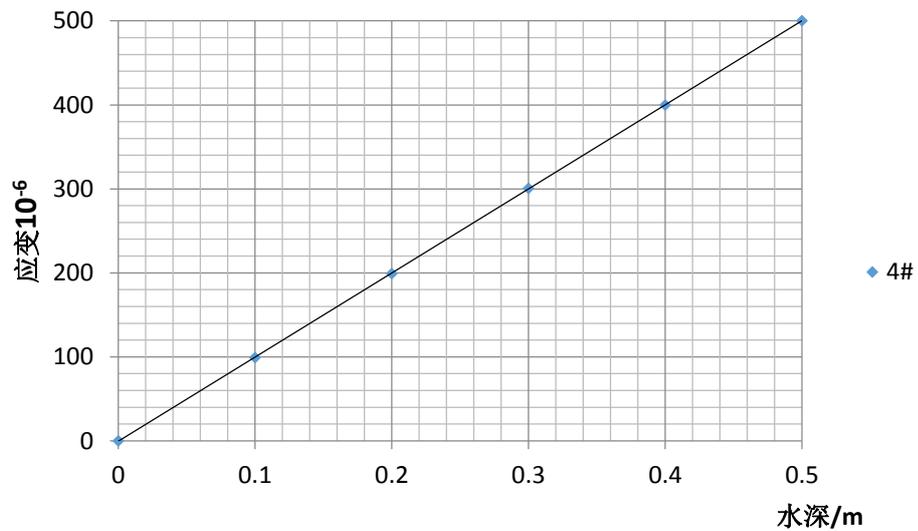


图 3.4 4# 土压力盒 应变水深响应曲线

从以上图表中，我们可以看出新型应变式土压力盒应变和水深的线性度十分良好，这说明了新型应变梁式土压力盒实验原理是可行的，而且在和市场同类现存产品比起来，它在测试柔性荷载的情况下，表现得更为优异。

3.1.3 半刚性荷载实验

在做半刚性荷载试验时，模型槽内按密实度要求装满砂性填土，3#土压力传感器分别置于距填土表面 10cm-40cm 位置，传感器通过导线接到应变测试仪上，应变仪的测试值列于表 3.3。

表 3.3 半刚性荷载下土压力传感器应变测试数据

深度 (m)	1	2	3	平均
0.00	0	0	0	0
0.05	35	40	41	38.7
0.10	77	89	90	85.3
0.15	116	126	130	124
0.20	152	172	168	164
0.25	180	213	208	200.3
0.30	217	256	246	239.7
0.35	296	326	301	307.7

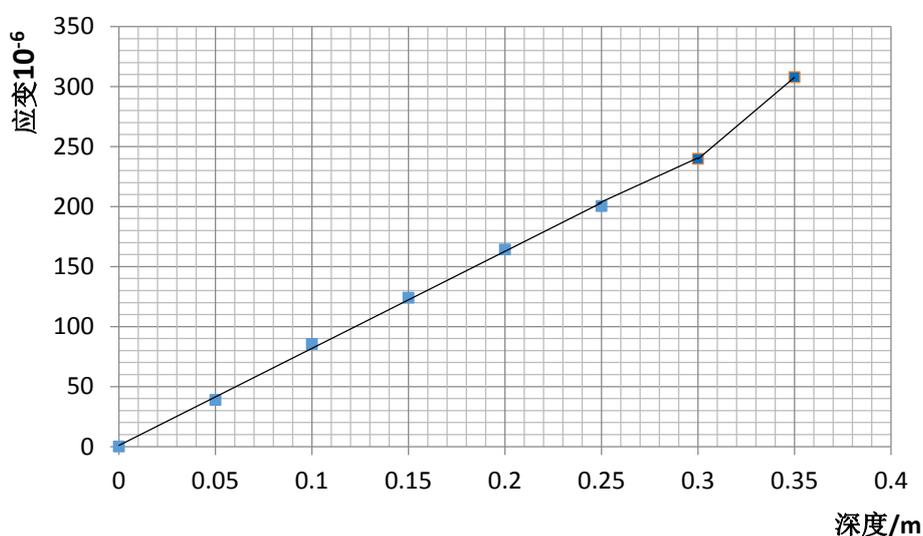


图 3.5 半刚性荷载下土压力传感器应变与深度关系曲线

将修正后的数据与柔性荷载下数据对比，结果表明同样荷载值下半刚性荷载所测的应变比柔性荷载下所测的应变约小 10%。

3.2 实验型土压力盒动态荷载实验

试验时分为（1）直接动态荷载试验（2）环境（埋土状态）动荷载试验（3）冲击荷载试验。实验结果如下图所示。

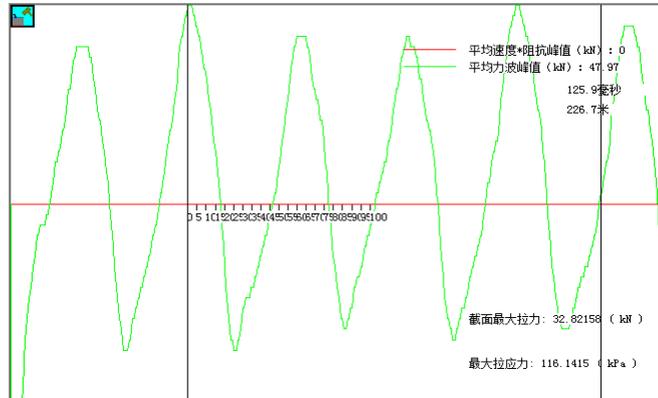


图 3.6 直接作用 100Hz 动态荷载力波曲线

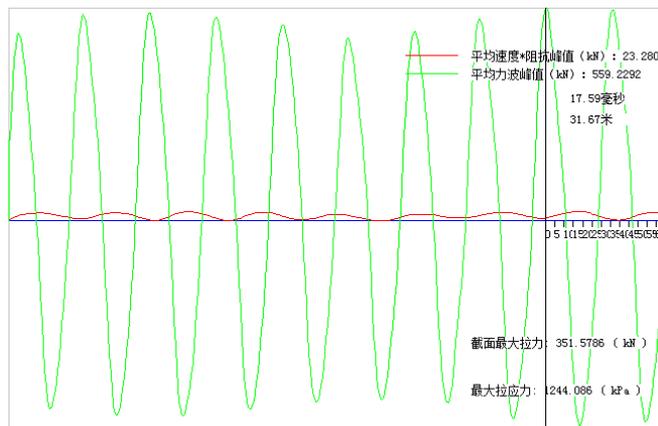


图 3.7 动态荷载速力波与度响应曲线对比图

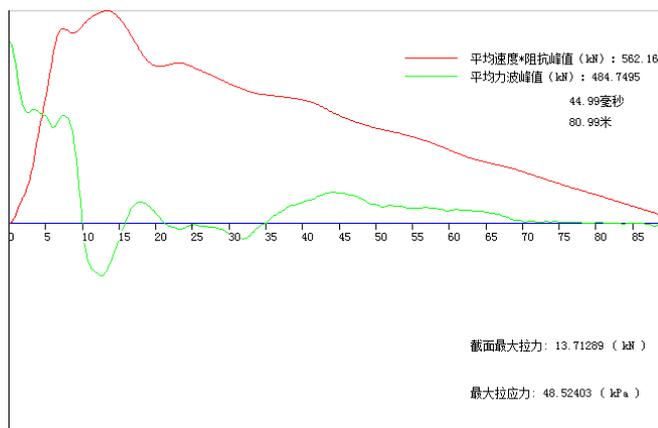


图 3.8 冲击荷载力波与速度曲线

由以上数据分析可得，新型土压力盒受迫振动下，能够输出与输入频率相同的周期效应，且波形均非常稳定，工作状态良好。

3.3 实验型土压力盒动态标定实验

试验时，土压力盒埋置在土下 10cm 处，接收激震器一定频率动荷载作用，利用 EPPDS 检测土压力盒应变响应并获得压力盒力波曲线与力传感器荷载测试曲线。最后提取荷载响应曲线与荷载测试曲线的对应峰值，标定其线性关系。实验结果见如下图所示。

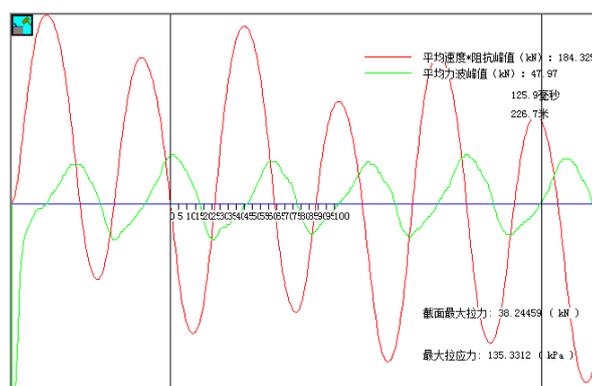


图 3.9 30Hz 动态荷载力波响应曲线与荷载曲线对比图

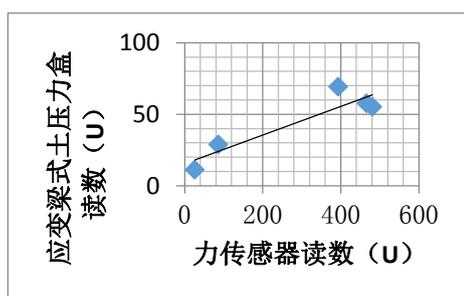


图 3.10 20Hz 动态响应

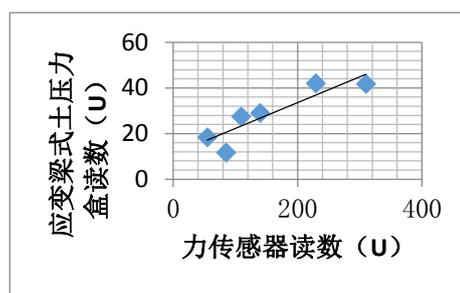


图 3.11 25Hz 动态响应

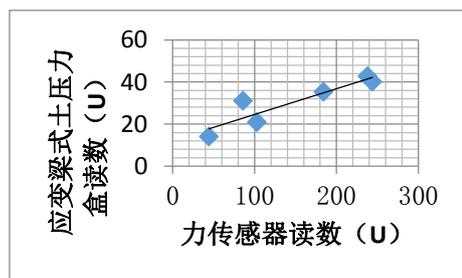


图 3.12 30Hz 动态响应

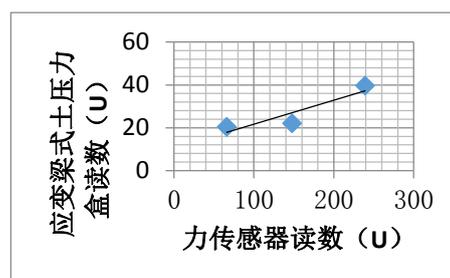


图 3.13 40Hz 动态响应

由以上数据，我们可以分析得到一下两点结论：

- 1、由压力盒荷载响应与压力传感器荷载测试曲线图形，观察其两者周期性，可以发现两者周期性符合程度相当高，再次验证压力盒荷载响应的及时性准确性。
- 2、由数据比对证明压力盒荷载响应的应变数值与力传感器荷载测试数值间呈线性关系，证明压力盒能够通过准确测试动态荷载。

3.4 实用型土压力盒静态标定实验

实验时，利用 EPPDS 动态荷载测试仪，通过砝码分级加载，对土压力盒进行静力标定。利用 EPPDS 动态荷载测试仪中的动态测试部分测试实用型土压力盒冲击荷载响应能力。实验结果如下图所示。

3.4.1 静态标定实验

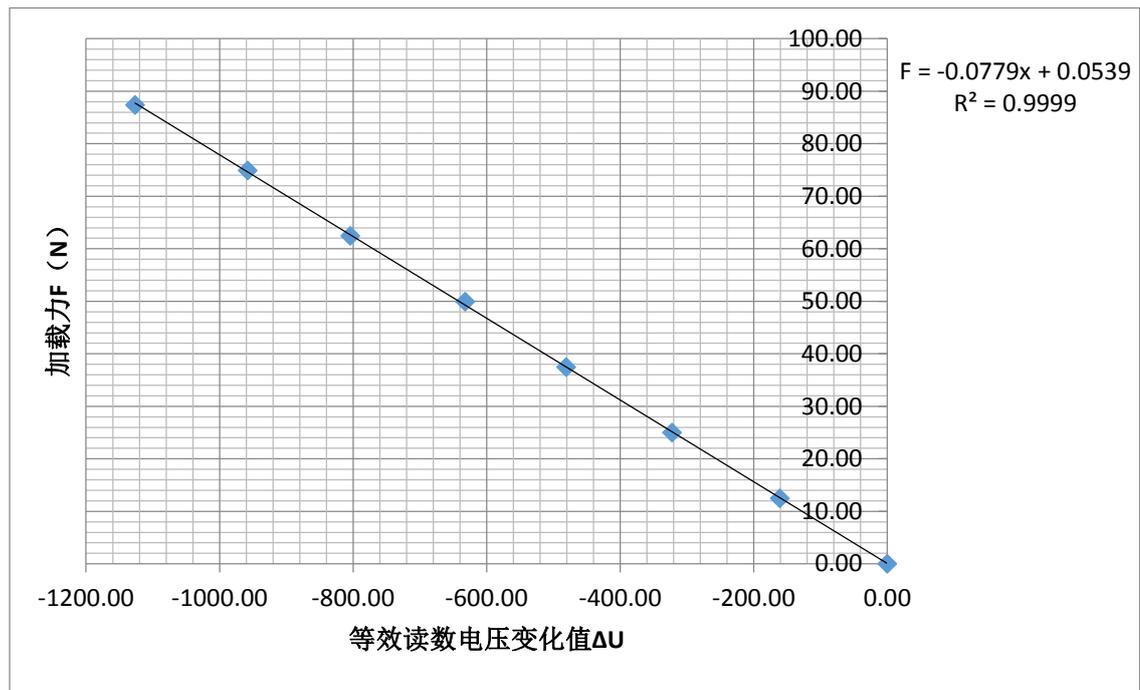


图 3.14 电压差值-力值标定曲线

由上图曲线，我们可以看出来标定结果表明实用型土压力盒标定数据线性相关性好，证明土压力盒在测试静态荷载时具有良好的测试性能。

3.4.2 冲击荷载试验

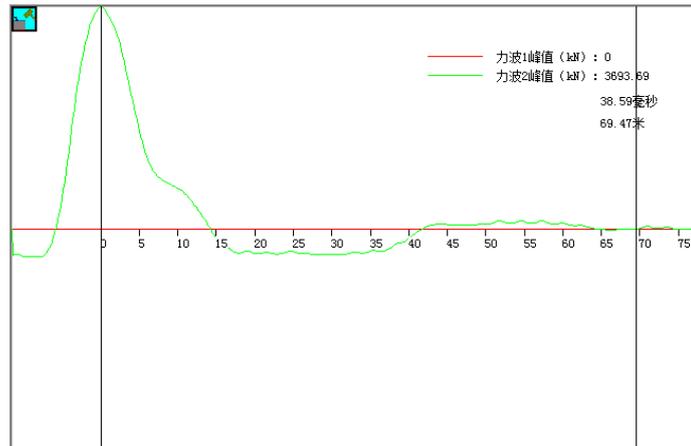


图 3.15 冲击荷载响应代表曲线

这样的实验结果验证了实用型土压力盒也同样具有良好的动力响应能力。

3.5 实验小结

团队对两种土压力盒进行了多次实验，实验结果表明：在刚性、半刚性以及柔性荷载下，土压力盒均能对其做出准确测量，而且实用型土压力盒由于尺寸等方面的改善稳定性更好，精确度更大，完全符合工程实际要求。

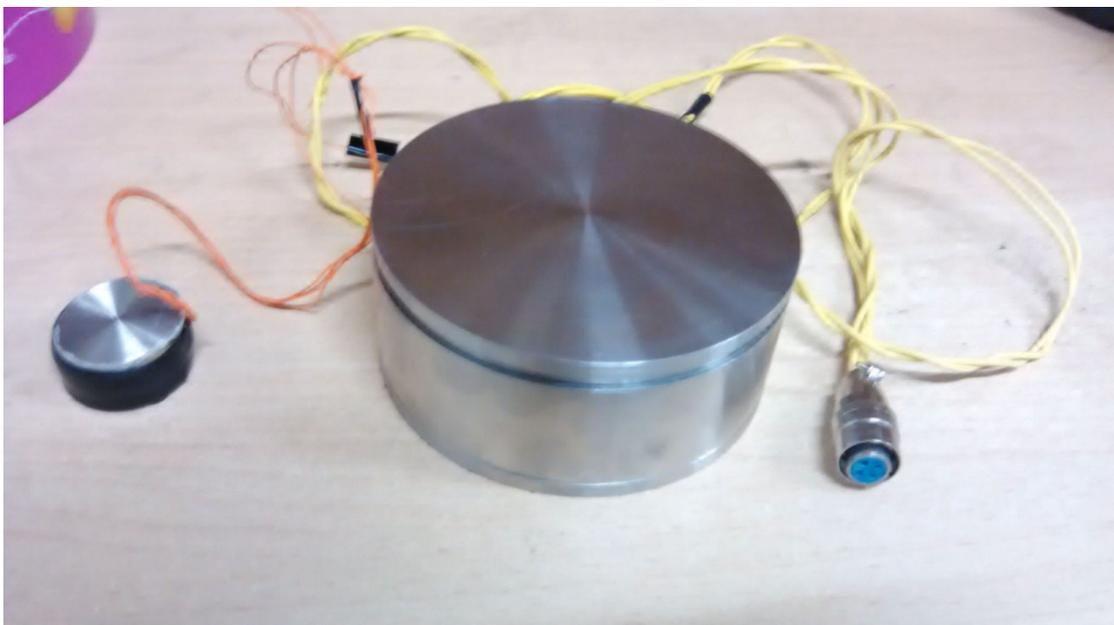


图 3.16 土压力传感器模型与产品对比图

市场应用前景 | 04

PART

本节概述：本产品由于受土体刚性、环境温度、湿度等因素影响小，并能对竖向以及纵向土压力进行同步测量，在结合了无线传输技术后，能适应多种复杂工况，如隧道实时监测、边坡实时监测以及桥梁实时监测等工程，具有广阔的市场前景。

4 市场应用前景

该产品可以提高国内外土压力测试的整体水平，提高挡土墙和其他地下工程的建设设计的水平，对防止工程建设事故和地质灾害发生将起到积极推动作用。同时还能获得一套具有核心技术的土压力实时监控系統。这套系統可以应用于几乎所有的土压力检测，并能进行长期监控，有效地对灾害作出预防。这不仅对于我国的工程建筑业，乃至对整个社会民生都会有深远的影响。因此，该项研究不仅具有很好的创新性，更具有很强的实用价值和商业前景。

4.1 产品销量预测（系统仿真）

团队从经济、社会以及环境等多个方面对产品和响应的市场进行了分析，并进行系统建模与仿真分析。

1) 经济效益分析

应变梁式土压力传感器结构简单，所需零件易得，生产过程方便，大大减少了制造成本，从而最终降低建筑成本，为企业带来更大的利润。此外，应变梁式土压力传感器的高精度、高灵敏度的特性在提高挡土墙和其他地下工程的建设设计的同时，将极大减少工程建设事故的发生几率，减少豆腐渣工程的发生，从而提高工程建设的效率，降低建筑公司的事故赔偿费用。另外，应变梁式土压力传感器可有效地用于预防灾害，有助于减少地质灾害所造成的经济损失。

2) 社会效益分析

一方面，应变梁式土压力传感器将极大地提高工程建筑的安全性，降低事故的发生率，进而提高企业的声誉和信誉。另一方面，应变梁式土压力传感器能够防止地质灾害造成的大量人员伤亡，从而提高人们的生活水平，使人们能够幸福安康地生活，有益于促进社会的稳定发展，从而构建一个和谐的社会。

3) 环境效益分析

由建设与国家质检总局联合发布的工程建设国家标准《绿色建筑评价标准》2006年6月1日起正式实施，这是我国第一部从住宅和公共建筑全寿命周期出发，多目标、多层次，对绿色建筑进行综合性评价的推荐性国家标准。绿色建筑是指在建筑的全寿命周期内，最大限度地节约资源（节能、节地、节水、节材）、保护环境和减少污染，为人们提供健康、适用和高效的使用空间，与自然和谐共生的建筑。

材料选取方面，本应变梁式土压力盒主要采用铝、钢、铁等轻金属材料，不含或极少包含重金属，因此对环境不会产生很大的污染，更不会有放射性污染。土压力盒直径为100mm，高度为45mm，在施工过程中由于其较小的尺寸，基本不会占用土地资源，做到了节地，节材的绿色环保要求。

加工制作方面，整个生产工艺的效率较高，不会产生较多的残次品，导致原材料的浪费。生产产生的三废污染物较少，能够通过设备进行很好的监测和处理，使最终的排放符合国家的标准，不会造成大气、水污染。

下面为系统仿真部分：

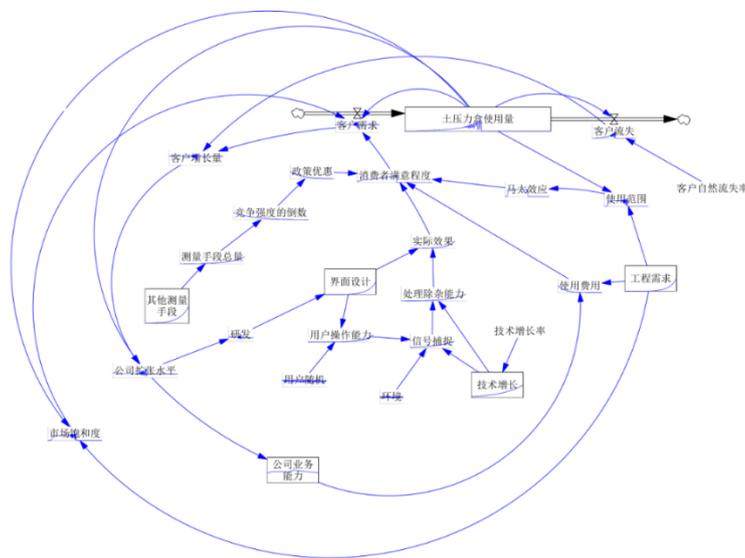


图 4.1 土压力盒销量影响因素相互间关系图

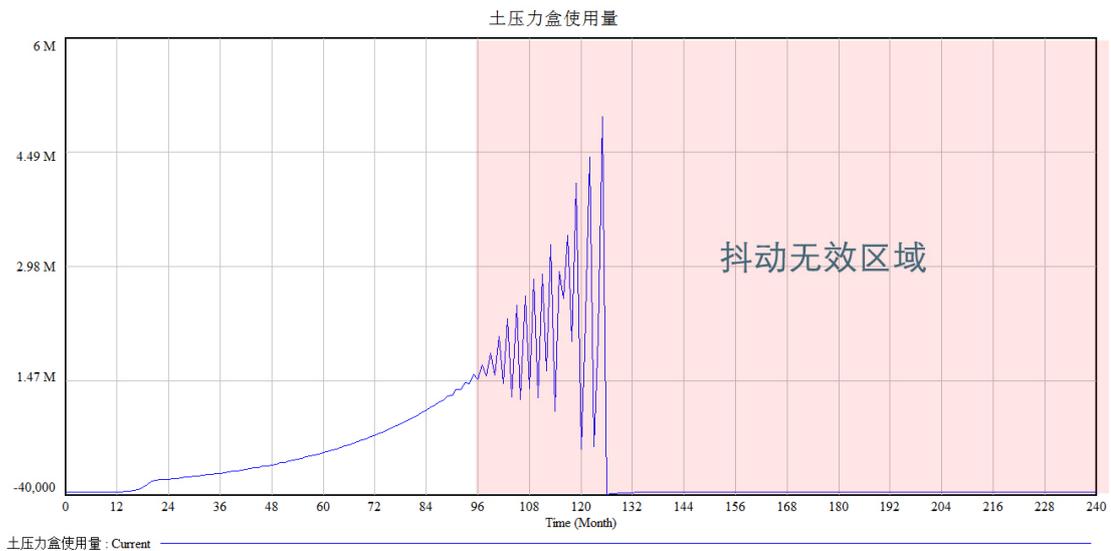


图 4.2 土压力盒未来十年销量预测图

要素间关系

- 土压力盒使用量=INTEG (客户需求量-客户流失, 初始值 (10))
- 客户流失=土压力盒使用量*客户流失率
- 客户自然流失率=0.2
- 客户需求=土压力盒使用量*消费者满意程度*(1-市场饱和度)
- 市场饱和度=土压力盒使用量/工程需求
- 消费者满意程度=(政策优惠^{0.2}*实际效果^{0.6}*(马太效应*100)^{0.1}*使用费用^{0.1})/100
- 客户增长量=客户需求-客户流失
- 公司扩张水平=0.01*客户增长量/土压力盒使用量
- 公司业务能力=INTEG (公司业务能力*公司扩张水平, 初始值 (100))
- 研发=公司扩张水平/工程需求+0.01
- 界面设计=INTEG (界面设计*研发, 初始值 (100))
- 用户操作能力=用户随机*界面设计
- 用户随机=RANDOM UNIFORM(0.6 , 1 , 10)*100
- 信号捕捉=技术增长^{0.5}*用户操作能力^{0.2}*环境^{0.3}
- 环境=RANDOM UNIFORM(0.8 , 1 , 90)
- 技术增长=INTEG (技术增长*技术增长率, 初始值 (100))
- 技术增长率=0.01
- 处理除杂能力=信号捕捉*技术增长
- 实际效果=界面设计^{0.5}*处理除杂能力^{0.5}
- 使用费用=公司业务能力/工程需求
- 工程需求=INTEG (工程需求*0.01, 初始值 (100000000))

- 使用范围=土压力盒使用量/工程需求
- 马太效应=WITHLOOKUP
(([(0, 0) - (0.5, 1)], (0, 0), (0.0351682, 0.298246), (0.126911, 0.530702), (0.252294, 0.649123), (0.35, 0.95)))
- 其他测量手段=INTEG(其他测量手段*0.02, 初始值 (3))
- 测量手段总量=其他测量手段+1
- 竞争强度=1/测量手段总量
- 政策优惠=100*竞争强度的倒数

4.2 产品目标市场分析

十字型应变式动态土压力无线实时监测系统的目标意愿市场为全国中高级及以上的全国级房地产开发商、省级房地产开发商、城市级房地产开发商及外国房地产开发公司（主要有万科、中海、保利、恒大、绿城、龙湖等）。

随着团队生产能力和产品市场需求的扩大，该设备的销量呈增长趋势。根据11年中国医疗器械行业研究报告，我国建筑市场年增长率在10%；考虑市场增长、各地开发政策改革等情况，产品市场潜力巨大。

竞争要素着眼于分析细分市场的整体行业竞争结构。

十字型应变式动态土压力无线实时监测系统是一套运用于岩土工程的进行土压力精确测量和实时反馈的新型建筑科技产品。

本产品主要应用于以下方面：

1) 尾矿库实时监测

尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的，用以堆存金属或非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿或其他工业废渣的场所。尾矿库是一个具有高势能的人造泥石流危险源，存在溃坝危险，一旦失事，容易造成重特大事故。

为了加强对尾矿库的管理，我国以立法的形式特别强调了对尾矿设施的安全监督。在《中华人民共和国矿山安全法》中规定：矿山企业对尾矿库可能引起的危害应当采取预防措施。并明确：国务院劳动行政主管部门对全国矿山安全工作实施统一监督。县级以上各级人民政府劳动行政主管部门对本行政区域内的矿山安全工作实施统一监督。

根据国家相关文件的要求，需要对尾矿库的坝体水平位移及沉降、坝体侧向土压力等主要指标进行在线长期的安全监测，在这些监测工作中需要大量埋设土压力盒。

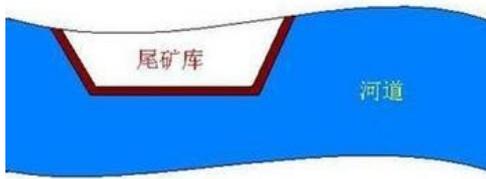


图 4.3 尾矿库说明图



图 4.4 山西尾矿库溃坝事故损失统计

2) 隧道实时监测

为了能够在施工过程中掌握围岩动态和支护结构稳定状态,得到可靠有利的信息,必须对隧道进行监控量测。特别是连拱隧道,隧道中的中隔墙作为永久结构设计时,多步的施工工序使其顶部围岩受到多次扰动,反复拉张,并承受拱部上的荷载及隧道完成后从两侧传递来的部分荷载。因此,对中隔墙结构加强监测是十分必要的。对中隔墙结构进行应力监测一般采用在墙顶部预埋压力盒的方式。压力盒的埋设是在中隔墙施作后进行的,在中隔墙顶部回填混凝土时应及时埋设压力盒。

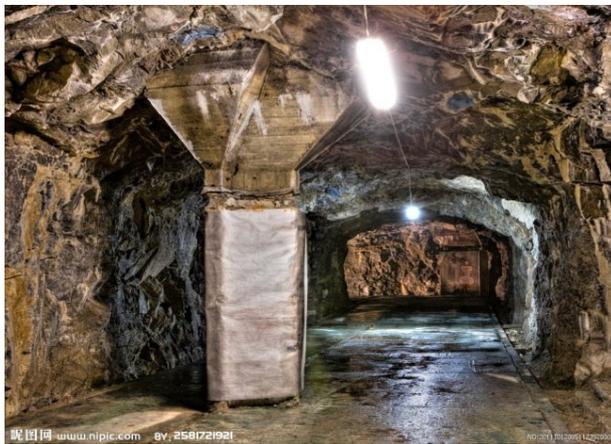


图 4.5 隧道实景图



图 4.6 隧道施工图

3) 边坡实时监测

由于边坡地区工程地质和水文条件复杂多变，在强降雨、地震等容易诱发滑坡的因素影响下，滑坡、泥石流等边坡类地质灾害的事故风险难以得到完全控制和管理。对于高速公路、住宅区、水利市政等设施邻近的高位边坡实施有重点、有选择的长期监测是不可或缺的。一个有效的边坡监测系统，不仅可以对易滑边坡及其区域进行实施检查和预警、预报，对边坡加固措施进行健康状态监测，同时可解释边坡潜在的失稳机理，为评估边坡稳定性和指导加固设计提供依据，而在边坡监测中，目前主要使用埋设土压力盒进行实时监测和反馈。



图 4.7 挡土墙工程

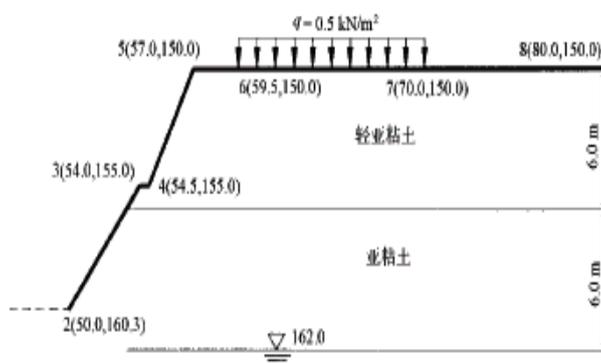


图 4.8 挡土墙侧向土压力计算图

4) 桥梁实时监测

我国公路桥梁大部分为建国后造，桥龄一般在30年以内，病害问题尚未到大量暴露无遗之时，但值得引为注意的是目前已有不少桥梁发生老化、破损、裂缝等现象，危桥逐年增多，承载能力明显下降。随着公路交通的发展，汽车保有量与国民经济的同步上升，公路客货运输量不断增长，对公路安全、快速、重载行驶的要求也越来越高。桥梁是确保公路畅通的咽喉，其承载能力和通行能力又是贯通全线的关键。为避免重蹈工业发达国家的覆辙，有计划、有步骤地突出重点，及时加强对现有桥梁进行调查研究，区别情况，分析损坏原因，采取相应的维修措施，检验评定旧桥承载能力和提出提高桥梁荷载等级的有效方法，从实践中取得成效，以充分发挥经济效益和社会效益，确保公路交通正常运行，应是我国公路建设发展中具有战略意义和深远影响的重要任务。

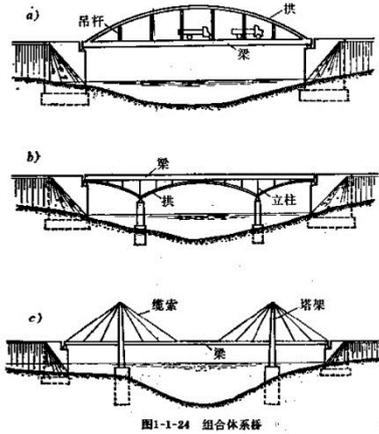


图 4.9 桥梁内力计算简图



图 4.10 桥梁实景图

5) 基坑实时监测

在现代城市建设中高层建筑、地铁工程等工程中大量存在深基坑工程。深基坑工程是国家规定的具有较大危险性的工程之一。深基坑工程开挖施工过程中往往会引起支护结构内力和位移以及基坑内外土体变形等情况发生，因此风险性较大，稍有不慎，不仅将危及基坑本身安全，而且会殃及临近的建筑物、构筑物、道路桥梁和各种地下设施，造成的经济损失和社会影响往往十分严重。基坑监测不到位，往往会造成重大的地铁安全事故发生：2008年杭州地铁湘湖站北2基坑现场发生大面积坍塌事故，造成了重大的人员伤亡和经济损失，给社会造成的重大的不良影响。造成此次重大事故的最主要原因即是基坑监测的不到



图 4.11 杭州地铁事故现场



图 4.12 基坑围护

工作回顾 | 05

PART

本节概述：团队成员由来自土木工程系、信电系、计算机科学系以及工业设计系等 8 位同学组成，于本科阶段尝试交叉学科技术产品的研发。团队分工明确，各司其职，不断克服产品研发过程中的各项困难，同时也在此实践过程中学习到很多课本之外的知识。

5 工作回顾

5.1 团队成员分工

姓名	专业	年级	分工
徐松杰	土木工程	本科三年级	实验计划制定 研究报告撰写 实地调研 产品研发
应建坤	土木工程	本科四年级	文献查阅 实地调研
梁洪超	土木工程	本科三年级	实验设计 实验数据处理分析 产品研发
许振东	土木工程	本科三年级	实验器材购买 实验准备
朱成伟	土木工程	本科三年级	专利申请 论文撰写
文鼎柱	通信工程	本科三年级	无线传输系统研发
方子硕	工业设计	本科三年级	文本美工 产品效果图制作
陶冠宏	计算机科学	本科三年级	实时监测系统研发

5.2 照片展示

在整个产品研发阶段，来自不同专业的同学有着明确的分工，下面是团队成员工作中的剪影：



图 1 磨制模型弹性梁（许振东）

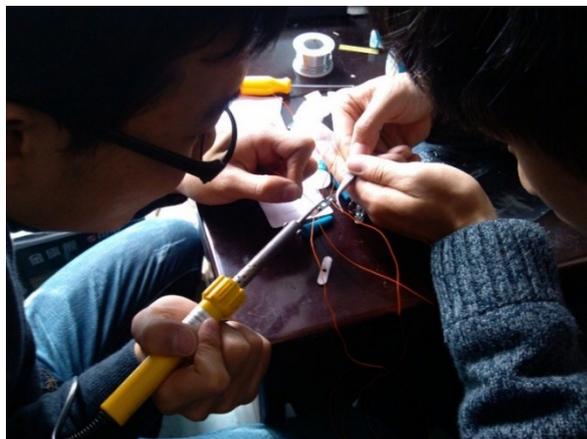


图 2 焊接应变片（梁洪超）



图 3 埋置土压力传感器（梁洪超）



图 4 测试土压力值（朱成伟）



图 5 调试无线传输系统（文鼎柱）

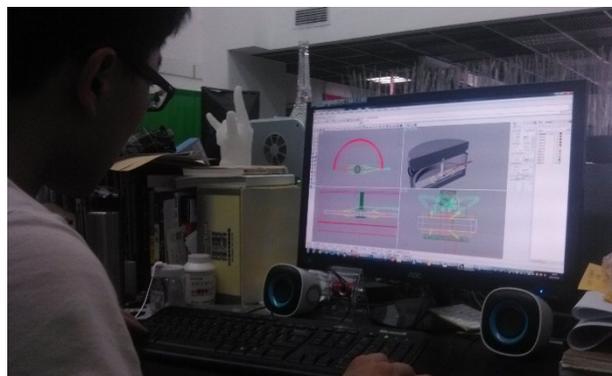


图 6 制作传感器效果图（方子硕）



图 7 室外汽车碾压实验 (梁洪超)



图 8 动态荷载实验 (朱成伟)



图 9 静态标定实验 (徐松杰)



图 10 编写监测系统代码 (陶冠宏)

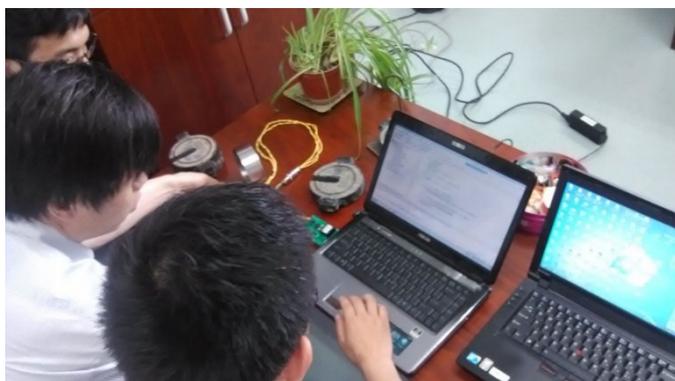


图 11 老师指导实验过程 (王奎华教授)



图 12 院士指导项目 (龚晓南教授)



图 13 成员与院士合影留念



图 14 SPB 团队部分成员合照

SPB 团队成员秉承“微笑(Smile)第一、热情(Passion)常驻、头脑(Brain)风暴”的理念，用“██████”的科研作风，竭尽全力为减少工程事故，增加施工安全性做出贡献。

5.3 致谢

本作品得到了“第六期国家大学生创新创业训练计划”、“第六期[]大学生科技创新活动计划（[]人才计划）”、“第八期国家大学生创业训练计划”等项目的资助。在项目进行期间，王奎华教授对整个作品的构思、实验过程以及后期推广等方面进行了精心指导。团队在走访中，作品得到了龚晓南院士、徐世烺教授、王立忠教授、金心宇教授和李欣高工等多位专家的肯定与赞许，同时专家们也对作品提出了各自宝贵的改进意见。此外，吕述辉博士、张鹏博士、黄博涛博士等师兄对于实验过程中的一些细节问题给予了多次的指导，同时胡雨辰、赖艳芳、毛影竹、林靖凯等同学在文本撰写方面给予了大量的帮助。方劼文同学在宣传视频方面付出了巨大的贡献。

团队成员在多个工程现场外出调研时，得到了[]建筑设计研究院张工、[]隧道与道路工程 1 号段魏工等一线工程师的指导，也得到了关于开发无线传输技术等多项宝贵的意见与建议。

感谢所有在这两年里对本项目给予各方面帮助的老师、同学、亲人以及朋友，项目也在八位来自土木工程系、信电系、计算机系、工业设计系等专业的成员共同努力下基本成熟，得到了业内外多名专业人士的认同与许可。

徐松杰 应建坤 梁洪超 许振东
朱成伟 文鼎柱 方子硕 陶冠宏
2013 年 6 月于 []