
管廊结构安全监测系统方案

工讯科技（深圳）有限公司

二〇一八年九月

0 引言

城市地下管道综合走廊，简称为“综合管廊”或“共同沟”，是指将设置在地面、地下或架空的各类公用类管线集中容纳于一体，并留有供检修人员行走通道的隧道结构。即在城市地下建造一个隧道空间，将市政、电力、通讯、燃气、给排水等各种管线集于一体，设有专门的检修口、吊装口和监测系统，实施统一规划、设计、建设和管理，彻底改变以往各个管道各自建设、各自管理的零乱局面。各管线需要开通时，只需通知有关负责部门，接通接口即可，既便于修理，又节省了国家的资源。

由于共同沟将各类管线均集中设置在一条隧道内，消除了通讯、电力等系统在城市上空布下的道道蛛网及地面上竖立的电线杆、高压塔等，避免了路面的反复开挖、降低了路面的维护保养费用、确保了道路交通功能的充分发挥。同时道路的附属设施集中设置于共同沟内，使得道路的地下空间得到综合利用，腾出了大量宝贵的城市地面空间，增强道路空间的有效利用，并且可以美化城市环境，创造良好的市民生活环境。

由于综合管廊通常长度较长，在具体建设过程中往往需要设置伸缩缝、沉降缝，甚至采用预制拼接方法进行施工。管廊拼接处通常为薄弱位置，在环境荷载作用下可能会出现混凝土开裂、不均匀沉降、水平错动等诸多问题。这些问题不仅会严重削弱混凝土管廊的适用性和耐久性，还会对管廊内附属的各类管道造成不良影响。因此需要对混凝土管廊及附属管道进行结构健康监测，确保其安全稳定运行。

本项目为综合管廊，针对管廊及附属管道的裂缝、沉降、水平位移等问题提出一整套监测方案。

1 工程概况

本工程综合管廊纳入了通信、电力、给水、热力、垃圾输送管等管道，。本工程采用预制拼接工艺，图 1.1 和图 1.2 分别为管廊内部实景图及标准断面。



图 1.1 综合管廊内部实景

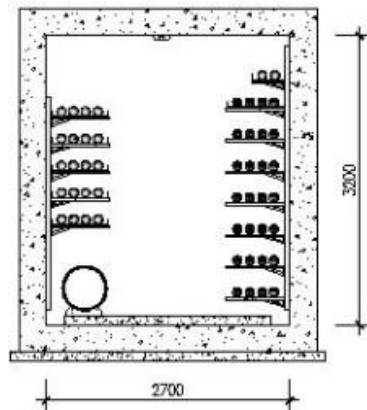


图 1.2 标准断面

2 本方案依据及原则

1. 《城市综合管廊工程技术规范》GB50838-2015
2. 《结构健康监测系统设计标准》CECS333-2012

3 监测内容及技术方案

3.1 监测内容

本工程的地下综合管廊，混凝土管廊的拼接缝处为薄弱位置。在周边环境的各类荷载作用下，该位置可能出现竖向裂缝、不均匀沉降和水平向的错动。此外，混凝土管廊的沉降和水平位移可能引起附属管道的变形。例如，图 1.1 中蓝色的自来水管道通常固定在混凝土管廊上。当混凝土管廊变形时，自来水管道相应产生较大变形，在法兰连接处会出现应变较大，可能出现裂缝。

为收集、反馈和分析综合管廊及内部管道的结构信息，确保其功能完好、安全可靠，计划针对如下四个方面进行结构健康监测工作：

- (1) 混凝土管廊拼接缝部位裂缝监测；
- (2) 混凝土管廊沉降监测；
- (3) 自来水管道法兰裂缝监测。

3.2 混凝土管壁拼接缝处裂缝监测

拼接缝处为预制拼接管廊的薄弱部位。在温度变化、不均匀沉降等环境作用下，拼接缝部位可能出现裂缝，影响综合管廊的安全性、适用性和耐久性。针对管廊拼接缝处的裂缝监测，本项目将MAS-LF裂缝计传感器和MAS-BM/NM 型振弦式应变计，并跨接布置在拼接缝处的混凝土管廊上。

3.2.1 MAS-LF裂缝计测量原理

MAS-LF-xx 裂缝计（如图 1-1）为差动变压器式位移传感器（LVDT），可用于位移量的自动化检测。它具有精度高、稳定性好、抗干扰能力强等特点，使用的是 304 不锈钢金属外壳，可以在潮湿和灰尘等恶劣环境中工作，适用于长期布设在混凝土结构物或其它材料结构物的表面，测量结构物裂缝的开合度(变形)，也适用于多种场所的位移测量。



图 1-1 裂缝计实物图

差动变压器式位移传感器的工作原理如图 2-1 所示。它的核心部分是虚框内的传感器头部分。传感器头由拉杆、铁芯、一组初级线圈、两组次级线圈、内管、外管等组成。当铁芯在线圈内移动时，两次级线圈产生差动电压。此两组电压经检波、相减、滤波、调零、放大等处理，输出一个与铁芯移动量相对应的信号（电压或电流）。

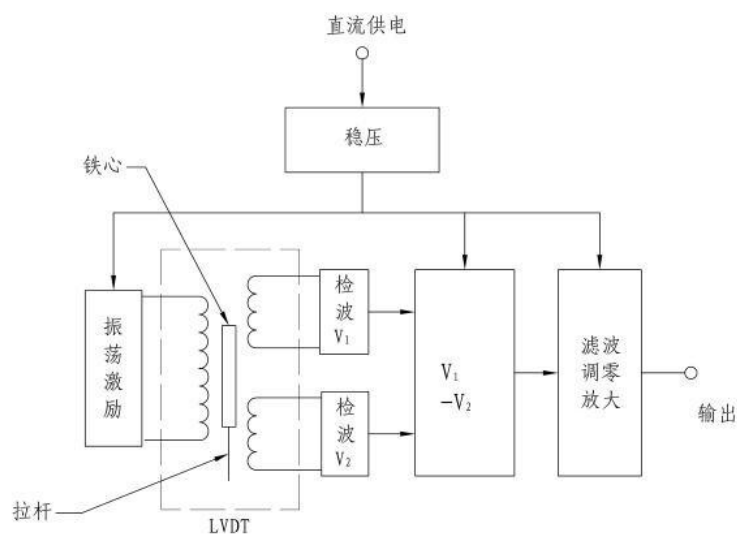


图 2-1 差动变压器式位移传感器工作原理

铁芯在线圈内的移动与输出的关系如图 2-2 所示。在图 2-2 中当铁芯处于中间位置时，输出的电压为零，随着拉杆向外拉动，输出电压逐渐增大并与位移量成线性变化，当铁芯过虚线处时，输出的电压继续增大但与位移量不再成线性变化，这时传感器进入非线性区。因此，铁芯靠中间部分移动是线性区，靠近线圈两头移动是非线性区。在线性区内铁芯的位移量与输出电量（电压或电流）成线性关系。铁芯在线性区外移动仍有输出，但不保证精度。

图 2-2 铁芯的位移与输出的关系

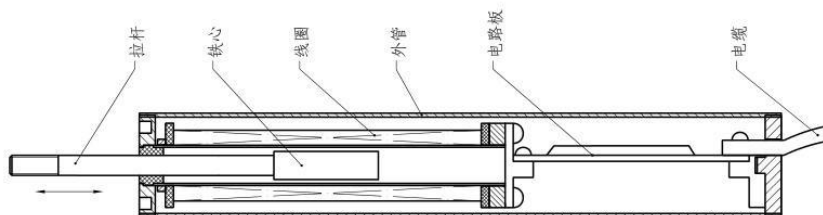


图 2-3 裂缝计结构示意图

图 2-4 主要参数

产品型号系列	MAS-LF-xx(xx 位移量程)
供电电源	12V-3.34A DC (9V~12V DC)
位移量程	10mm、25mm、50mm、100mm、200mm、500mm
输出信号	数字 RS485 信号
精度	50mm 以下量程：±0.25%FS，50~100mm 量程：0.5%FS； 100~500mm 量程：±1%FS
重复误差	≤0.01% of FS
工作温度	-20℃~+60℃
温度系数	零点 ≤0.01%/℃
	灵敏度 ≤0.025%/℃

3.2.2 MAS-BM 系列振弦式应变计测量原理

MAS-BM 系列振弦式应变计（如下图 1-1 所示）主要安装于管线、桩基和桥梁等各种结构表面，测量结构物表面的应变变量，内置数字式温度传感器可同步测量布设点的温度，用于表面式应变计的温度修正。

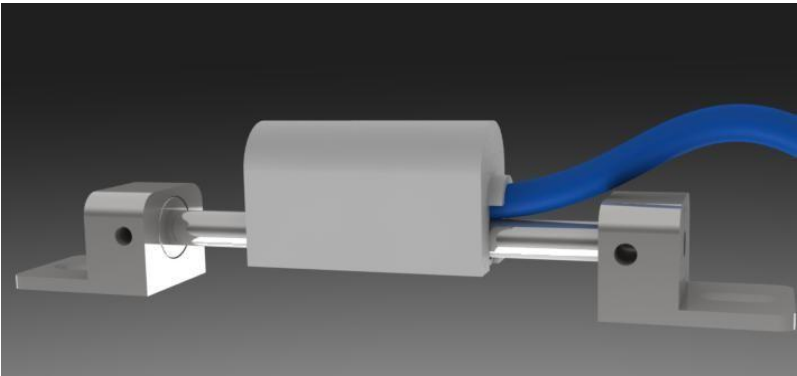


图 1-1 表面式应变计实物图

振弦式应变计主要由左右端安装支座、钢弦和线圈组成，基本原理及内部结构示意图如图 2-1。当被测结构物发生应变时，振弦式应变计左右端安装支座产生相对位移并传递给钢弦，使钢弦受力发生变化，从而改变钢弦的固有频率，测量仪表输出脉冲信号，通过线圈激振钢弦并检测出线圈所感应信号的频率，振动频率的平方正比于应变计的应变，经换算得到被测结构物的应变变量。

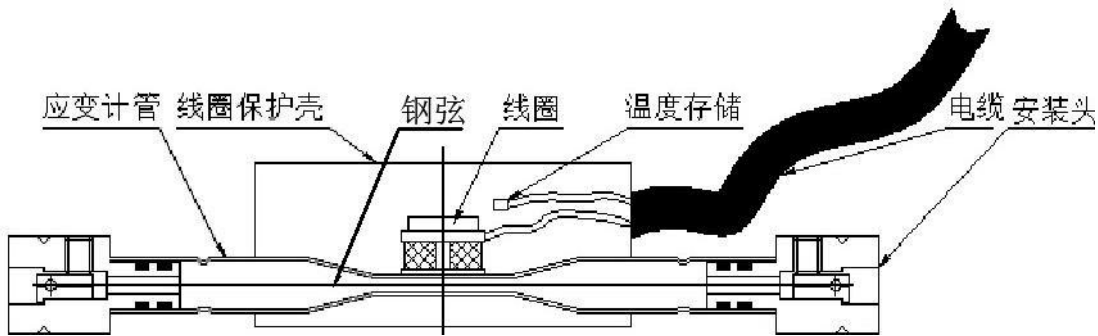


图 2-1 应变计内部结构图

表 3-1 主要技术指标

规格代号			MAS-BM15A	MAS-NM15A	MAS-BM30A	MAS-NM30A
尺寸参数	标距 L: mm		100			
	外形尺寸（长*宽*高): mm		174*26*38			
	应变测量范围	拉伸: $\mu\epsilon$	1500		3000	
		压缩: $\mu\epsilon$	1500		3000	
	分辨率: F·S		≤0.2%			
	温度测量范围: °C		-20~+70			

性能参数	温度测量精度: °C	(-20℃~-10℃测温精度在 2℃内, -10℃~70℃测温精度在 0.5℃内)
	耐水压: MPa	≥0.2
	绝缘电阻: MΩ	≥50

3.2.3 MAS-LF裂缝计传感器和MAS-BM 系列振弦式应变计布置方案

此传感器将布置在管廊拼接缝处，如图 2 所示。当拼接缝处应变较大时可能出现纵向裂缝时（图中红色所示）。MAS-LF裂缝计传感器通过采集此处裂缝变化量可以得到裂缝信息。

由于混凝土管廊尺寸较大，裂缝可能出现在断面上的任意位置，而且管廊四角处容易出现应力集中，因此在每一断面布置 8 个MAS-BM 系列振弦式应变计传感器，如图所示

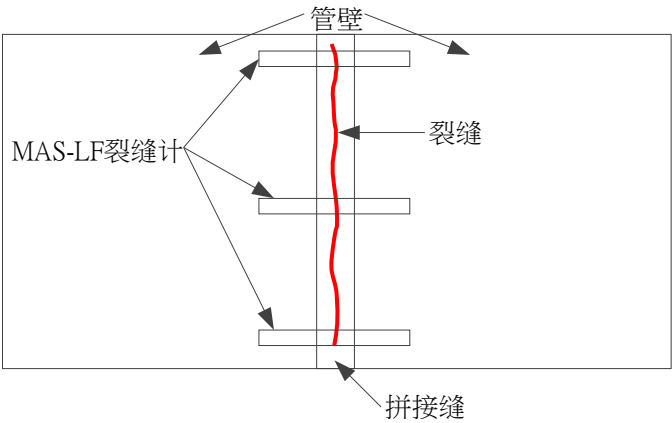


图 2.6 MAS-LF裂缝计传感器布设示意图(平面图)

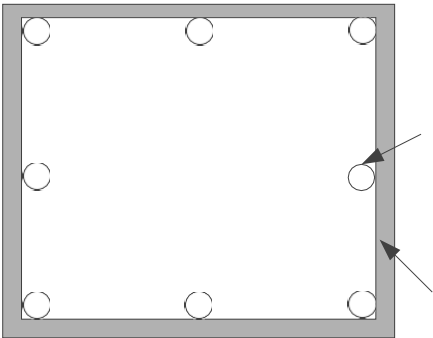


图 3.7 MAS-BM 系列振弦式应变计传感器布设示意图(断面图)

3.3 混凝土管廊沉降监测

测试元件以及监测仪表的好坏从根本上决定了整个安全监测及安全监控预警系统中数据采集和数据传输是否准确、有效。由于国内外生产、销售可用于土木工程结构监测、检测设备的厂家众多，各厂家生产的传感器性能及价格千差万别，即便是同一类型的传感器，不同型号技术性能和价格亦不尽相同，因此在进行系统监测仪器的选择上应参考如下要求：

（1）先进性：为提高建成后系统的信息化、数字化管理水平，要求系统的传感测试仪器等监测设备必须具有一定国际先进水平；

（2）精确性：可靠的监测仪表还必须具备必要的精度，能准确的反映出效应量（或原因量）的变化。选择传感器时，必须对结构部位的受力进行分析，选择精度满足监测要求的传感测试仪器；

（3）可靠性：选择的监测仪器设备必须能在自然环境下长期稳定可靠运行，尽可能选择已在同类项目中广泛使用，并证明使用效果好的监测仪表及传感设备；

（4）简便性：仪器结构简单，牢固可靠，率定、埋设、测读、操作、维修方便，便于更换，使操作人员易于掌握，有利于提高量测速度和精度。

（5）经济实用性：传感测试仪器及配套仪表须有合理的性能/价格比，满足结构监测特性及养护管理实用性的要求；

（6）自动化性：传感测试及采集设备选型时，应从技术先进、可靠实用、经济合理以及自动化测控技术发展水平相适应等方面进行综合分析确定，以便系统集成和调试及自动控制；

（7）冗余度：考虑到传感测试元件存活率可能出现的问题，系统设计中个别监测项目的监测点时适当考虑冗余度；

（8）耐久性：结构安全监测系统通常要运行数年，这就要求传感器必须经久耐用，尽可能少的更换，以保证测试数据的长期连续有效


（1）测点布置

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》（GB 50911-2013）6.2节，建筑物竖向位移监测点应布设在外墙或承重柱上，且位于主要影响区时，监测点沿外墙间距为10~15m。

（2）监测设备选型

建筑物沉降采用MAS-LTG-Y500-Z型压差式变形测量传感器，其技术指标见表

表6.1 MAS-LTG-Y500-Z型压差式变形测量传感器技术指标

监测项	设备名称	设备型号	技术指标	设备图片
沉降监测	压差变形测量传感器	MAS-LTG-Y500-Z	量程：500mm 精度：±0.1% F·S 供电：DC12V 环境温度：-20～80℃	

(3) 基点布置

建筑物沉降基点布置在远离基坑一侧的柱或墙上。

(4) 基点复核

在基点附近布设人工校核测点，采用人工方式定期（每周一次）复核基点传感器的高程。

(5) 安装方法

1) 储液罐支架为“L”型不锈钢板，短边4个孔用于固定于结构表面；另一个长边上的4个孔用于与储液罐连接固定。

2) 传感器支架也是“L”型喷塑钢板，短边4个孔用于固定于结构表面；另外一个长边的2个孔用于固定传感器安装外壳。

3) 使用桥架保护，线槽或桥架尺寸根据现场情况及走线根数确定；线槽或桥架必须与结构物可靠固定，线槽使用胶粒和自攻螺丝固定于结构物，桥架使用膨胀螺丝和托架固定于结构物。

4) 通液管铺设、连接：储液罐安装固定完成后，可进行通液管铺设、连接工作，同时进行传感器安装，主要是通过从储液罐流通到安装位置的液体，尽可能将通液管内的气泡排出。根据需要连接的两个测点之间的距离，截取相应的通液管，应留有一定的余量，两个测点间通液管安装好之后，管线中间应比两段低，这样有利于排出空气。管线铺设时，应避免打折、扭曲和划伤。管线必须紧固、可靠的连接到三通、直通上，以免漏液。

5) 注意：为防止储液罐内液体蒸发，建议将储液罐内添加不具有挥发性的硅油，使硅油覆盖在溶液表面形成油膜以隔绝空气，从而限制水分的挥发。油膜厚度以0.2~0.5mm为宜。添加硅油应使用粘度单位为5~10厘丝的品种，粘度太大的硅油不利于液面的平衡。

6) 通气管铺设、连接：调试工作完成，传感器正常工作后，可进行通气管

连接、铺设工作。通气的作用是使储液罐液面以上气压及传感器内部压力保持一致，整个通气系统应相互连通并仅在一点和大气连通。根据需要连接的两个测点间的距离，截取连通管应留有一定的富余量。松开干燥管一段的螺丝，使其和大气导通，然后再在干燥管上套一呈自然干瘪状态且较大的气球，对其进行保护，有利于延长干燥剂的使用寿命。通气管安装完毕后，可与通液管聚拢、绑扎在一起，管线铺设时，应避免打折、扭曲和划伤。。

3.4 自来水管法兰裂缝监测

对于自来水管法兰处裂缝的监测同样采用MAS-BM 系列振弦式应变计传感器。传感器将固定在螺栓上，如图所示。

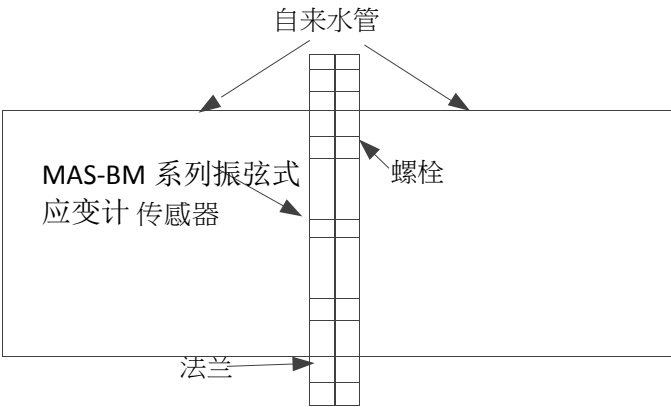



图 3.10 自来水管法兰处裂缝监测 MAS-BM 系列振弦式应变计传感器布设示意图

3.4 采集设备

MAS-LF裂缝计传感器和MAS-LTG-Y500-Z型压差式变形测量传感器输出信号均为数字信号，可通过数据采集系统V1.0进行采集，数据采集系统V1.0的具体参数如下表所示。

表6.4 数据采集系统技术指标

监测项	设备名称	设备型号	技术指标	设备图片
混凝土管壁拼接缝处裂缝监测	数据采集系统V1.0	MAS-D08	通道数：8通道	

MAS-BM 系列振弦式应变计传感器输出信号均为振弦信号，可通过多通道振弦采集仪进行采集，多通道振弦采集仪的具体参数如下表所示。

监测项	设备名称	设备型号	技术指标	设备图片
自来水管道法兰裂缝和混凝土管壁拼接缝处裂缝监测	多通道振弦采集仪	MAS-Fxx	通道数：8通道	

3.4.1 采集频率

进行实时变形监控；可根据人工设置时间段进行采集。常规条件下每30分钟采集一次。可以根据实际情况加密采集频率，可以设定为每5分钟采集一次。

4 结构健康监测系统设计

4.1 设计原则

地下综合管廊健康监测系统集成传感器技术，结构分析计算、计算机技术、通信技术、网络技术等高新技术于一体，为使其成为一个功能强大的系统，能真正长期用于结构损伤和状态评估，满足地下综合管廊养护管理和运营的需要，同时兼顾经济和社会效益，现遵循如下设计原则：

遵循简洁、实用、性能可靠、经济合理的原则；

2) 系统设置首先需满足隧道养护管理和运营的需要，立足实用性原则第一，兼顾考虑科学试验和设计验证等方面因素。

根据结构易损性分析的结果及养护管理的需求进行监测点的布设。

4) 监测与结构安全性密切相关内容，主要监测一些有代表性的结构、必须进行监测的重要结构以及日常养护无法检查或检查非常困难的结构响应。

5) 从动力、静力、耐久性对结构进行监测，力求用最少的传感器和最少的数据量完成工作。

地下综合管廊监测内容包括混凝土管廊拼接缝部位裂缝监测、混凝土管廊沉降监测、混凝土管廊水平位移监测、自来水管道法兰裂缝监测等监测系统的设计。

5. 系统数据的采集、传输、处理


5.1 在线健康监测系统无线数据传输方式

现场传感器所有数据通过无线方式进行传输，该方式通过成熟的GPRS/3G/4G网络，通过灵活地控制设备的采集制度，进行远程控制。直接通过无线传输模块实现对现场设备数据的采集和控制，简单方便。

5.1.1 无线数传模块

系统采用无线数传模块进行无线传输，该传输模块是由无线数传终端和无线数传主机组成，依靠成熟的GPRS/3G/4G网络，在网络覆盖内区域内可以快速组建数据通讯，实现实时远程数据传输。MAS-DTU系列通讯模块支持AT指令集，采用通用标准串口对模块进行设置和调试，提供标准的RS232/485接口，其工作参数如下：

表5.1 无线参数模块技术指标

设备名称	设备型号	技术指标	设备图片
GPRS无线模块	MAS-DTU	环境温度：-25℃~70℃； 湿度：0~90%，非冷凝； 波特率：300~115200bps； 接口： RS232/RS485/TTL232； 标准电源：DC9V	

5.1.2 无线远程数传采集系统具备的特点

- ①支持GPRS/3G/4G网络；
- ②易于安装、维护；使用方便、灵活、可靠，即插即用；
- ③能强大的嵌入式互联网控制器，具备完整的TCP/IP协议栈及功能强大的透明传输保障机制；
- ④可实现点对点、点对多点多种方式的实时数据传输；
- ⑤不依赖于运营商交换中心的数据接口设备，直接通过Internet网络随时随地的构建覆盖全国范围内的移动数据通信网络。

特点：只要能够接入互联网，即可取得测试得到的数据；安全可靠。DTU在应用之前首先要进行设置，通过软件设置好数据中心的IP和端口及其它参数的设置，设置好之后串口和采集器串口对接，DTU上电之后根据事先设置好的中心IP和端口进行连接，成功连接到中心软件后即可双向透明传输数据。用户可以通过任何能联网的电脑，登录服务器输入自己的用户名密码及时查看自己监测的信息。系统提供的图标显示更直观的显示了被监测的数据。

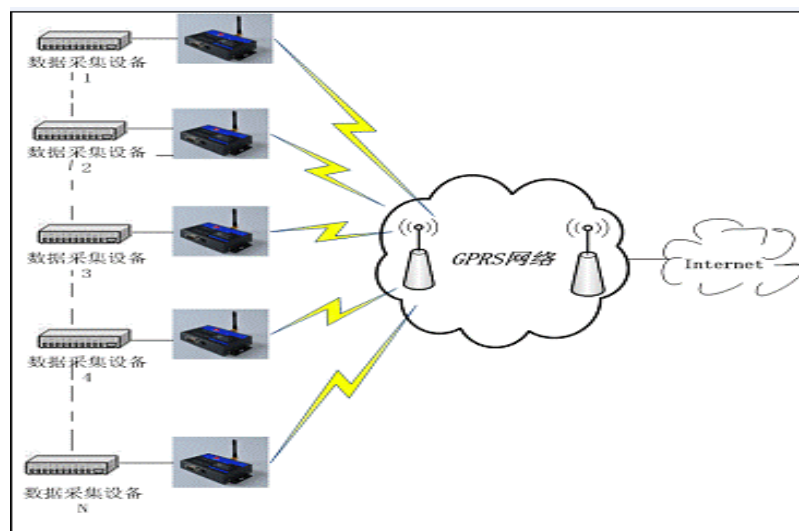


图5-1 系统结构图

无线远程数传采集系统具备如下优点：

- （1）能实现远程无线监控；
- （2）可实现短信报警；
- （3）可节省大量线材等费用；
- （4）可在任何有网路的地方查看实时监测数据。

5.2 数据处理

信号在采集前与采集后均可进行数据处理，数据处理有滤波、分析等功能：

- （1）信号实时显示；
- （2）数据采集：随机采样、触发采样，多次触发采样，采样时间和采样数据长度自由设定，采样时实时观察波形变化，定时采样；
- （3）数字滤波：低通，高通，带通，带阻滤波；
- （4）幅域统计：描述信号的幅域特征参数有最大值、最小值、平均值、有效值、均方值、方差、标准差等值；
- （5）时域、频域分析：可对动态信号进行时域、频域范围的不同类型分析，可进行不同点数的FFT分析；
- （6）相关分析：可对各系统间信号的相关性进行分析。

5.3 数据优化

目前绝大多数结构安全与安全监控预警系统所遵循的采集制度是实时采集，这样得到的数据量最大化，信息量也最多，可是随之而来的问题是数据量太多了，以至于没有足够的人力资源进行处理分析，而且得到的信息中有很多是重复的冗余信息。这种情况使得重要的信息不突出，导致其湮没于众多巨大的信息中，造成了主次不分明的问题，很容易使重要的信息被遗漏，给结构的安全监控预警带来极大的麻烦。因此数据采集中必须有采集优化方法，以便能采集到有意义的数据，尽可能减少重复性的、冗余的、日常性的数据。

下图为数据采集优化的流程图。

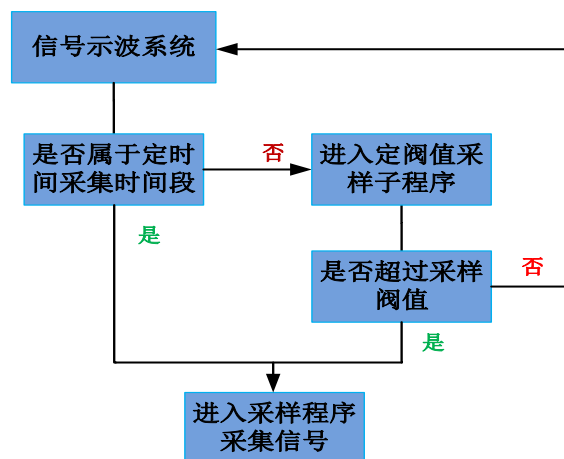


图5-2 数据采集优化流程图

针对结构实时监测功能，必须考虑系统的优化采集情况，即具有定时间段采集以及定阈值采集。

采样时间和采样长度可以根据实际情况灵活设置。

序号	开始时间	终止时间	采样时长(秒)
1	16:00:15	16:26:15	600
2	16:56:15	17:26:15	600
3	17:56:15	18:26:15	600
4	18:56:15	19:26:15	600

图5-3 采样时间设置图

(1) 阈值设置

多条件触发采样参数有触发逻辑和各通道的触发值设置，用户可根据需要在这里进行设置。触发逻辑是设定各触发通道之间的触发关系，“或”表示设定的触发通道只要有一个达到触发阈值就进行触发采样，采到设定的时间长度为止；“与”表示设定的触发通道必须都达到触发阈值才进行触发采样。

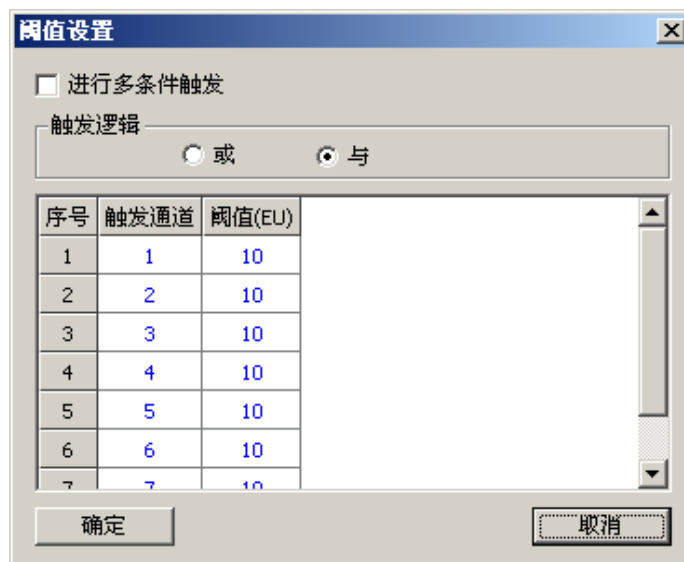


图5-4 阈值设置图

6. 监测预警、报警机制

6.1 监测数据预警

根据设计单位提出的监控量测控制值和相关监测规范的规定，当监测数据“双控指标”（累计变化量、变化速率）均超过监控量测控制的75%，或者“双控指标”之一累计变化量超过控制值80%或变化速率连续3天超过控制值80%，即刻发起预警，发出预警快报，通知建设分（项目）公司业主代表、安全监控中心、监理单位、施工单位。预警报告的主要内容包括：①施工进度和工程概况；②对数据超过预警值的测点，进行分析，提出预警和启动预案的建议性意见，并提出处理意见。第三方监测单位和施工监测单位同时加密监测频率，加强对地面和周围建筑物沉降的动态观察，尤其加强对预警点附近的压力管线的检查和处理，时刻关注工程结构本身和周围环境的变化情况。

现场业主代表应立即主持召开现场警情分析会，与会单位：现场业主代表、监理单位、施工单位、第三方监测单位、施工方监测单位。与会各方应对警情原因进行分析，并提出具体措施防止情况进一步扩大。

监理单位撰写会议纪要，并报地铁集团安全质量部、建设分（项目）公司备案。

6.2 监测数据报警

监测数据“双控指标”均超过监控量测控制值或者监测数据变化速率出现急剧增长即刻发起报警，发警情快报，安全监控中心应根据监测值将报警进行分级，级别分为黄色报警、橙色报警和红色报警，且通知（项目）公司现场业主代表。

现场业主代表立即主持召开现场警情分析会，与会各方应对警情原因进行分析，并提出具体措施，确保工程本体及周边环境安全。

业主单位撰写现场警情分析会会议纪要。