

塑造智慧变革



HEXAGON

海克斯康



北京
国家会议中心

2018年

9月10-12日

2018.hexagonchina.com.cn

Leica TM系列全站仪在杭州地铁保护区自动化监测中的应用

胡雷鸣，浙江分公司副总工程师

2018年9月10日



上海勘察设计研究院(集团)有限公司
SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd.



海克斯康
HEXAGON

目录

1. 背景
2. 杭州地铁保护区监测的特点
3. 单测站全站仪自动化监测
4. 多测站全站仪联测
5. 总结



1 背景

- 城市地铁设计使用年限100年，保护要求高
- 地下车站与隧道50m保护区范围寸土寸金，通常有大量的施工项目进行，需要对地铁进行保护监测
- 杭州、宁波、温州、苏州、南京、无锡、广州、深圳、合肥、济南、武汉、郑州等地都在开展全站仪自动化监测
- 杭州地区已运营地铁里程118km，2022年亚运会前将达到446km，地铁向郊区辐射
- 2012年以来杭州超过150个地铁保护区项目施工，亚运会前将成倍增加
- 目前杭州150余台TM系列全站仪进行自动化监测，项目50余个
- 我司60余台TM系列全站仪在上海、杭州、南京、苏州、深圳、长沙等地进行自动化监测，其中杭州投入40台全站仪
- 临近施工越来越“近、大、长、深”，自动化监测越来越重要、难度越来越大



2018年杭州地铁线路

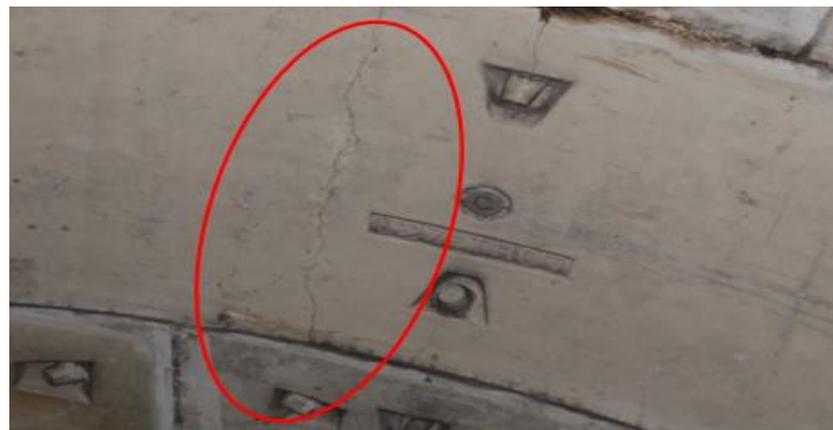


2022年杭州地铁线路



2 杭州地铁保护区监测的特点

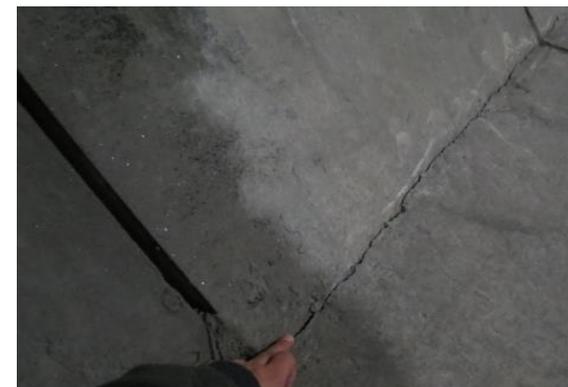
- 2.1 软弱地层运营隧道结构病害较多
 - 杭州地区管片错缝拼装，变形较为均匀，但易产生裂缝
 - 结构裂缝、错台
 - 管片破损
 - 渗漏水
 - 道床与管片脱开



隧道管片结构裂缝



隧道管片破损、掉块



隧道管片与道床脱开



2 杭州地铁保护区监测的特点

- 2.2 软弱地层运营隧道自身变形较大
 - 盾构施工期管片拼装质量差
 - 运营后易发生长期的不均匀沉降、收敛
- 2.3 地铁保护区施工较多
 - 其他地铁线路、公路隧道的临近、穿越施工
 - 临近深基坑施工
 - 临近桩基、加固施工
 - 隧道上方堆土、卸载

2 杭州地铁保护区监测的特点



- 2.4 地铁保护区变形控制要求高
 - 盾构隧道由一系列预制钢筋混凝土管片在纵向和环向通过接头螺栓连接而成的非连续体
 - 隧道易受周边施工影响，发生变形、病害
 - 隧道沉降、位移、收敛变形允许值不大于 $\pm(5\sim 20)$ mm
 - 杭州地区通常以沉降 ± 10 mm、水平位移 ± 5 mm作为变形控制值



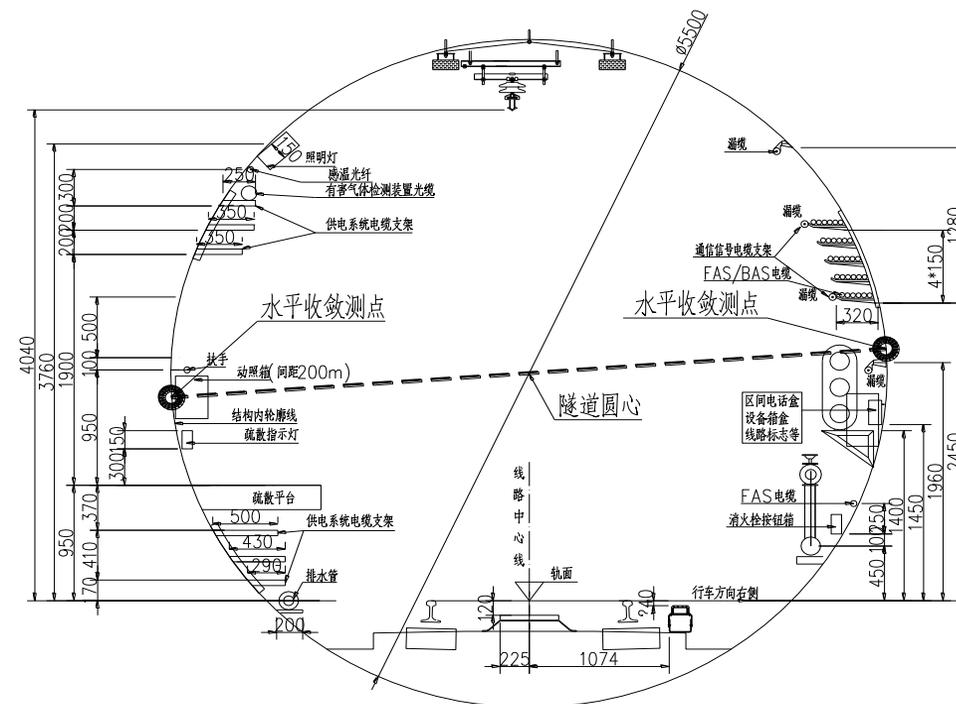


2 杭州地铁保护区监测的特点

- 2.5 轨行区监测作业难度大
 - 隧道呈狭长分布，通常内径仅5.5m/6m，监测网型差
 - 隧道内管线、信号、消防、疏散设备众多，影响通视
 - 隧道内通风不良，湿气较大，影响观测精度
 - 白天地铁列车高频率振动，影响监测设施的稳定
 - 白天列车运行，夜间作业时间较短，人工测量监测频率无法保证



地铁隧道狭长敷设，通视条件差、湿度大



地铁隧道内各类设备众多



2 杭州地铁保护区监测的特点

- 2.6 保护区监测内容
 - 竖向位移：监测地铁结构（道床、管片、底板等）的沉降或隆起变形
 - 水平收敛：监测隧道结构的横向收敛变形
 - 水平位移：监测地铁结构（道床、管片、底板、侧墙等）沿水平方向的变形
 - 监测点间距：隧道通常2~6m，车站10~12m

2 杭州地铁保护区监测的特点

- 2.7 常用自动化监测手段
 - 竖向位移：静力水准、电水平尺
 - 水平收敛：测距仪
 - 三维测量：TM30、TM50系列全站仪



静力水准



GLS-B70测距仪



TM系列全站仪



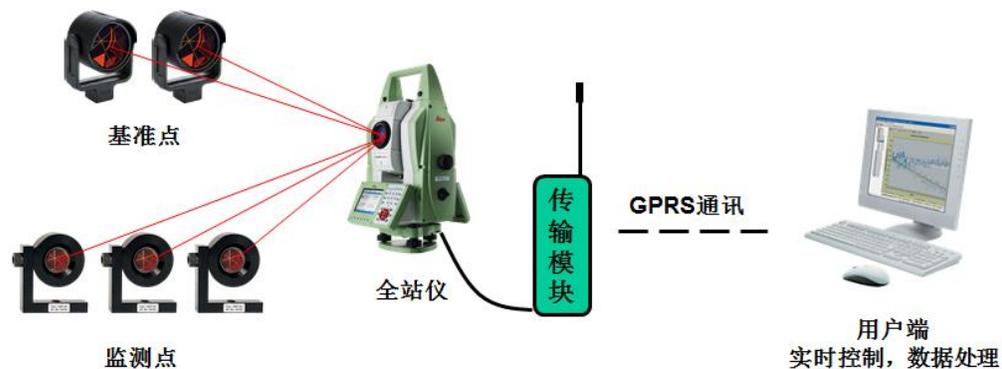
控制点棱镜与监测棱镜





3 单测站全站仪自动化监测

- 3.1 全站仪自动化监测的硬件组成
 - 全站仪：固定在待测区域，进行24h的自动化三维测量
 - 基准点棱镜：固定在稳定区域，作为监测的基准点
 - 监测点棱镜：固定在待测对象上，作为监测点
 - 传输模块：固定在仪器旁，通过手机GPRS进行远程通讯
 - 用户端：采用GeoMoS系统实时控制、数据处理

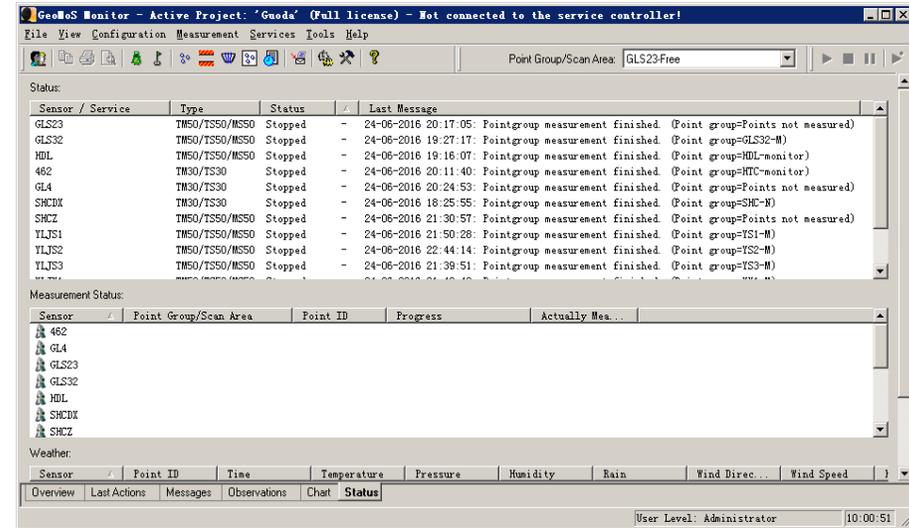


3 单测站全站仪自动化监测

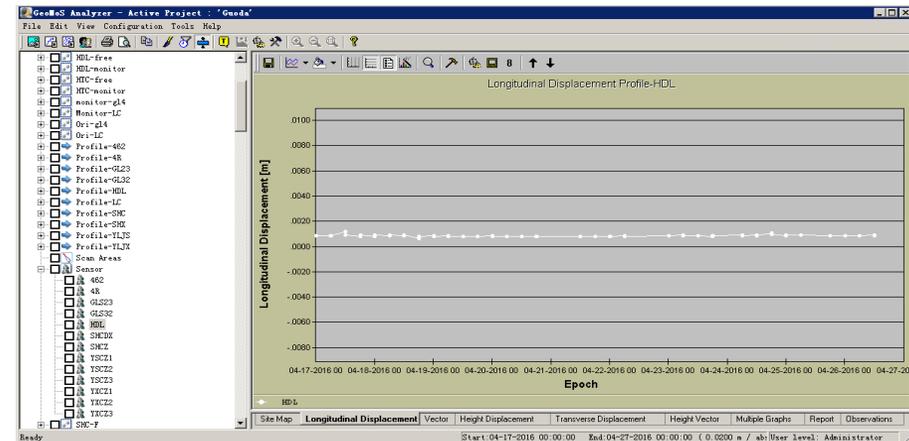


3.2 全站仪自动化监测的软件

- GeoMoS: Monitor监测器 + Analyzer分析器
- Monitor监测器:
 - 全站仪的管理与配置
 - 测量周期、各种改正模型、限差的设定
 - 数据的自动测量采集
 - 变形结果的实时计算
- Analyzer分析器:
 - 测量数据的编辑与后处理
 - 图形、数字形式的数据显示
 - 超限探测与粗差剔除
 - 多种格式（图形、数据）的成果输出



Monitor监测器



Analyzer分析器

3 单测站全站仪自动化监测



3.3 单测站全站仪测量平差

- 观测量：测边、测水平角、测垂直角
- 平差方法：空间多点后方交会
- 两点后方交会观测方程：

$$s_1^2 \cos^2 \beta_1 = (X_1 - x_p)^2 + (Y_1 - y_p)^2$$

$$s_2^2 \cos^2 \beta_2 = (X_2 - x_p)^2 + (Y_2 - y_p)^2$$

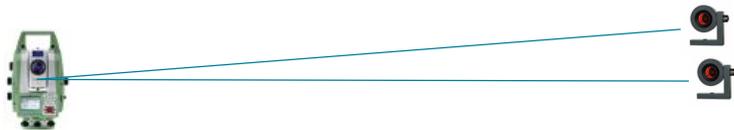
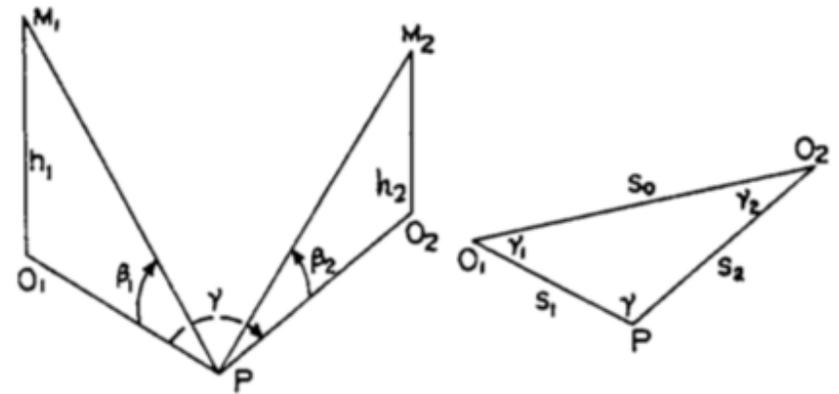
$$s_1^2 + s_2^2 - 2s_1 s_2 \cos \gamma = S_0^2$$

$$h_p = H_1 - s_1 \operatorname{tg} \beta_1$$

$$h_p = H_2 - s_2 \operatorname{tg} \beta_2$$

- 已知 (X_1, Y_1, H_1) 、 (X_2, Y_2, H_2) 、 S_0 ，求解 (x_p, y_p, h_p)
- 同一断面A、B两棱镜的水平收敛计算：

$$d^2 = (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (h_A - h_B)^2$$





3 单测站全站仪自动化监测

- 3.4 单测站平面观测精度：模拟计算
 - 采用StarNet平差软件进行模拟计算
 - TM50全站仪1测回夹角标称精度0.71”，测距精度0.6mm+1ppm
 - 1台仪器，两侧各120m（100环）分别设置1个大棱镜，三点位于一条直线：



测站坐标标准偏差 (mm)		测站坐标误差椭圆 (mm)	
垂直方向	平面位移方向	半长轴 (垂直方向)	半短轴 (平面位移方向)
0.51	0.21	1.25	0.50

- 1台仪器，两侧各120m（100环）分别设置1个大棱镜，三点夹角160度：



测站坐标标准偏差 (mm)		测站坐标误差椭圆 (mm)	
垂直方向	平面位移方向	半长轴 (垂直方向)	半短轴 (平面位移方向)
0.52	0.21	1.27	0.51



3 单测站全站仪自动化监测

- 3.5 单测站自动化监测案例情况
 - 某房地产项目，距离既有地铁隧道结构边线最近距离约14米
 - 紧邻基坑的下行线隧道：设置1台全站仪自动化监测，监测范围约260m
 - 设置36个监测断面，每断面4个监测棱镜

CFX1006
CFX1012

TM50全站仪



CFXCZ1

CFX1006
CFX1012

控制网示意图



3 单测站全站仪自动化监测

- 3.6 TM全站仪水平角观测实测精度统计

- 未施工阶段重复测量精度计算

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}$$

- 统计未施工阶段263次观测数据的中误差如下所示:

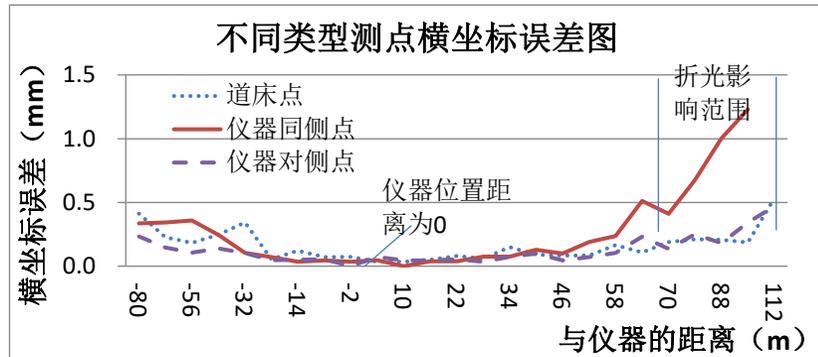
测项	中误差
水平夹角1	±0.18"
水平夹角2	±0.26"
水平夹角3	±0.36"
全站仪沿位移方向坐标变化	±0.36mm

测项	中误差
垂直夹角1	±0.42"
垂直夹角2	±0.63"
垂直夹角3	±0.42"
全站仪高程变化	±0.86mm

3 单测站全站仪自动化监测



- 3.7 影响监测精度的因素
 - 控制网网型
 - 管壁折光



3 单测站全站仪自动化监测



上海勘察设计研究院(集团)有限公司
SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd.

- 3.8 影响监测精度的因素
 - 多棱镜效应
 - 列车运行、振动
 - 温度
 - 湿度
 - 粉尘
 - ATR
 - 人为因素



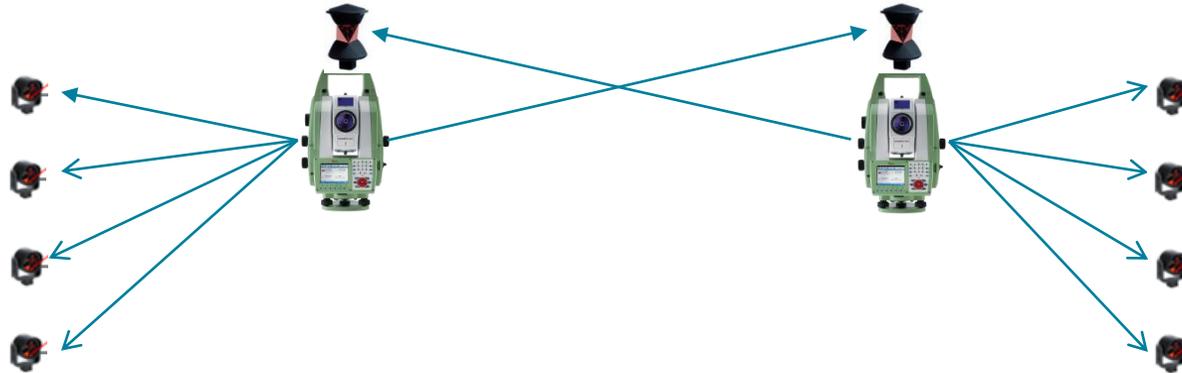
4 多测站全站仪联测

- 4.1 多测站全站仪联测的现实需要
 - 保护区施工范围越来越长
 - 某房地产项目基坑长度达895m，位于既有地铁车辆段与隧道中间，与地铁隧道最近约15m
 - 新建某车站基坑长达588m，与既有地铁隧道最近约11m
 - 隧道平面半径较小，单台全站仪无法全部通视
 - 某隧道正上方房地产项目施工，隧道最小平面半径仅304m



4 多测站全站仪联测

- 4.2 多测站全站仪联测的方法
 - GRZ4 360° 棱镜
 - 采用GRZ4 360° 棱镜，固定在仪器上方，随仪器转动，同轴、同步观测

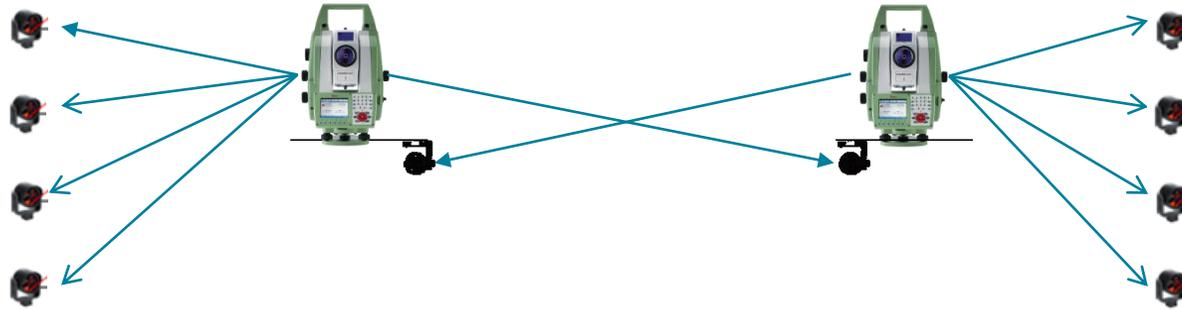


4 多测站全站仪联测

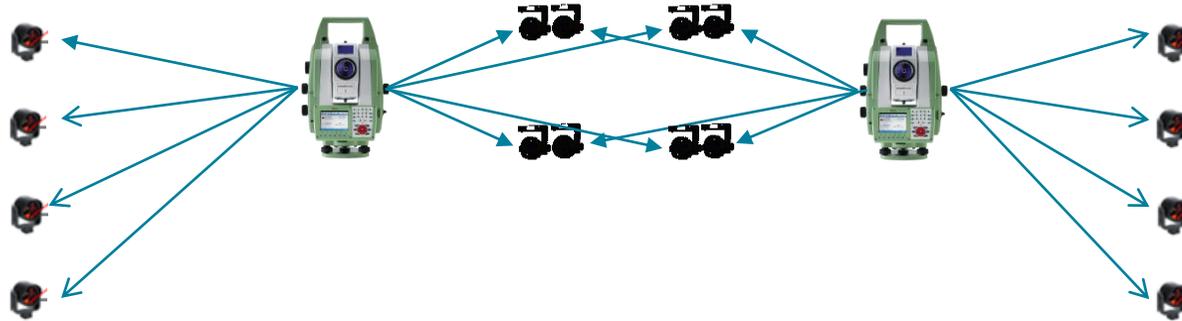
4.3 多测站全站仪联测的方法

- 偏心观测

- 采用小棱镜固定在仪器台上, 进行偏心观测



- 采用“背靠背”小棱镜, 固定在两台全站仪中间, 进行偏心观测



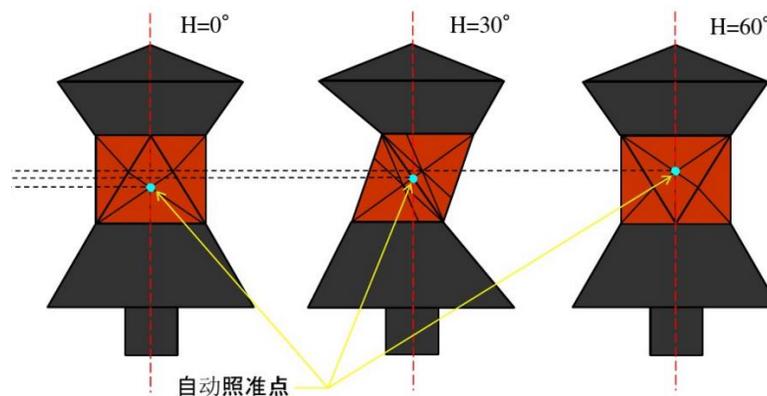


4 多测站全站仪联测

- 4.4 同轴GRZ4 360° 棱镜的问题
 - 光束角偏差、对中误差影响同轴观测精度
 - 固定在仪器上方时，随仪器的转动，观测精度不一致
 - 参考武汉大学徐亚明老师《360° 棱镜定位精度分析》（测绘通报，2013年），GRZ4 360° 棱镜距离测量精度如下表：

距离 /m	平面位置 最大偏差 /mm	平面位置 中误差 /mm	垂直方向 最大偏差 /mm	垂直方向 中误差 /mm
5	0.001 9	0.000 4	0.002 9	0.001 3
15	0.001 8	0.000 3	0.003 0	0.001 5
30	0.002 1	0.000 4	0.001 9	0.000 9
60	0.002 2	0.000 5	0.001 9	0.000 9
120	0.008 6	0.002 4	0.002 0	0.000 9
250	0.014 8	0.004 0	0.003 6	0.001 5

不同距离测量的定位精度



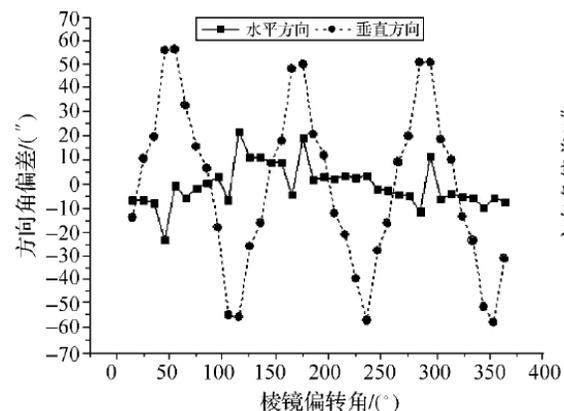
不同入射角度存在照准偏差

4 多测站全站仪联测

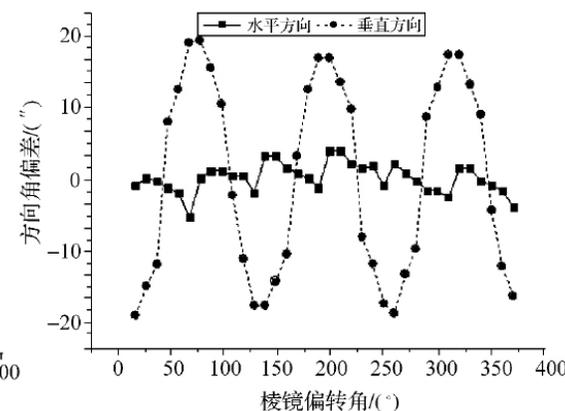


4.5 同轴GRZ4 360° 棱镜的问题

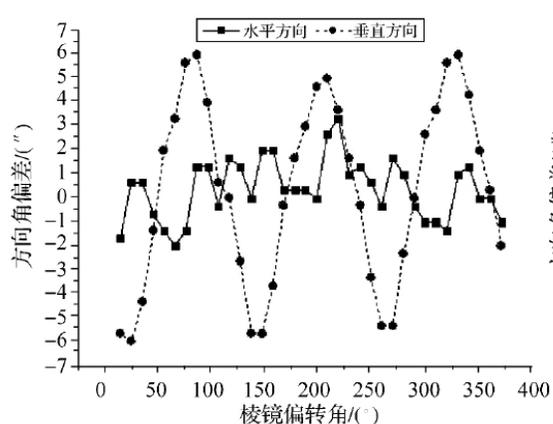
- 棱镜偏转对角度观测的影响如图(a)~(f)所示
- 360° 棱镜的特殊结构，在入射光线垂直方向不变的情况下，改变水平方向的入射角，观测得到的水平角、垂直角并不是相等的，水平角基本呈60° 为一周期的变化趋势，垂直角基本呈120° 为一周期的变化趋势



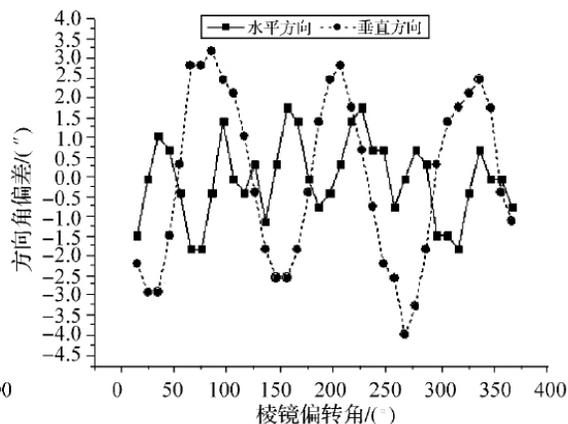
(a) 与仪器距离5m



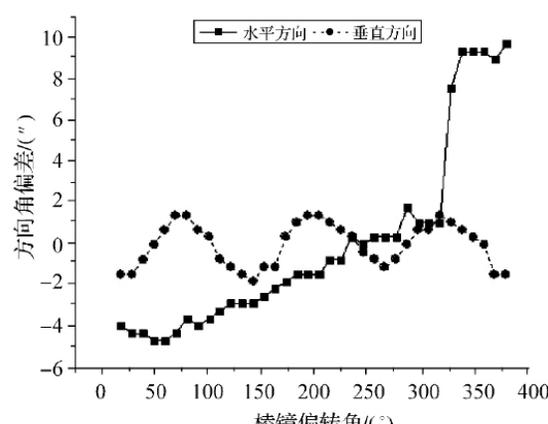
(b) 与仪器距离15m



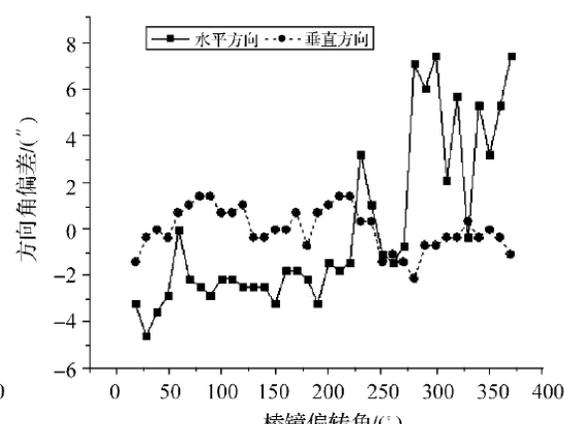
(c) 与仪器距离30m



(d) 与仪器距离60m



(e) 与仪器距离120m



(f) 与仪器距离250m

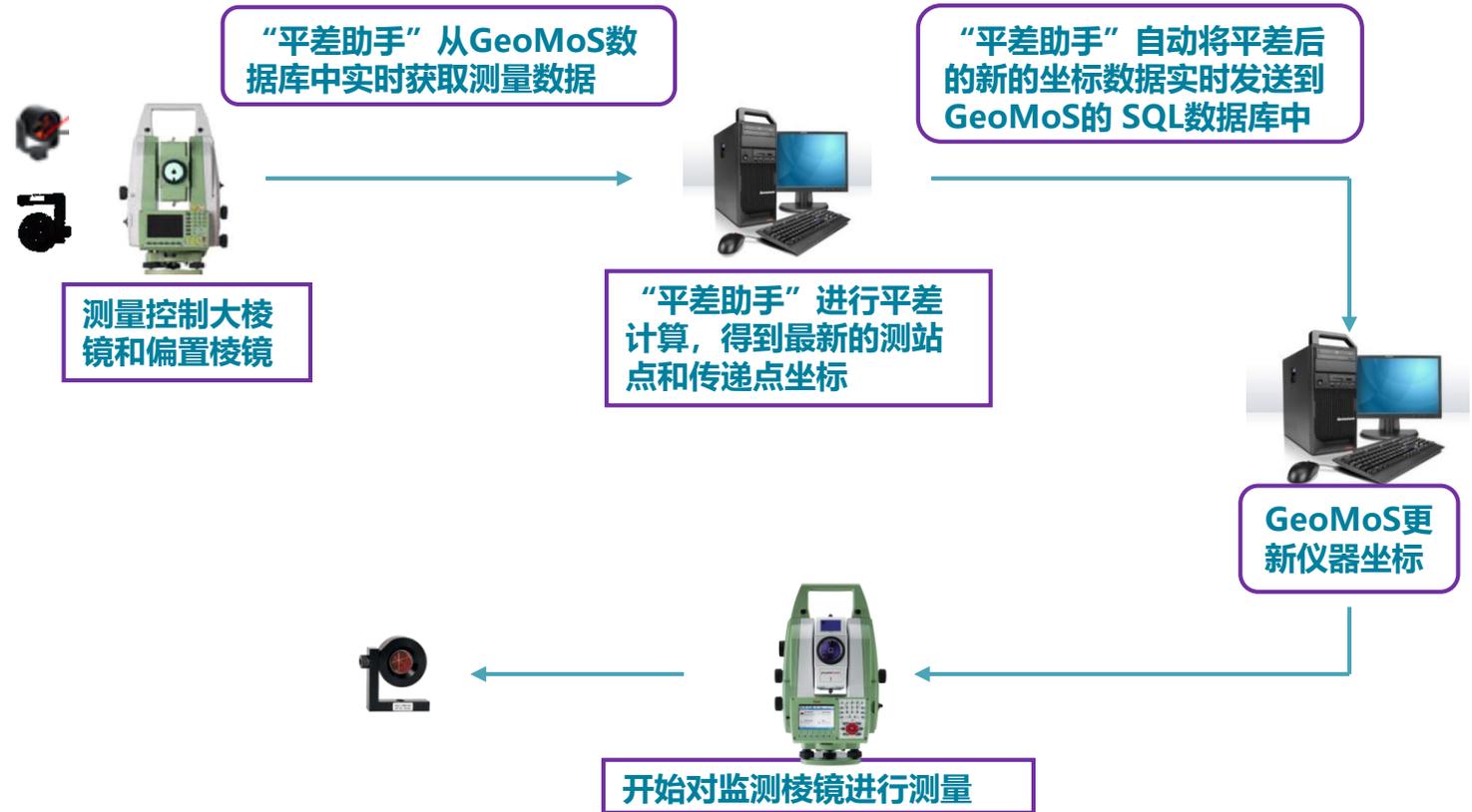
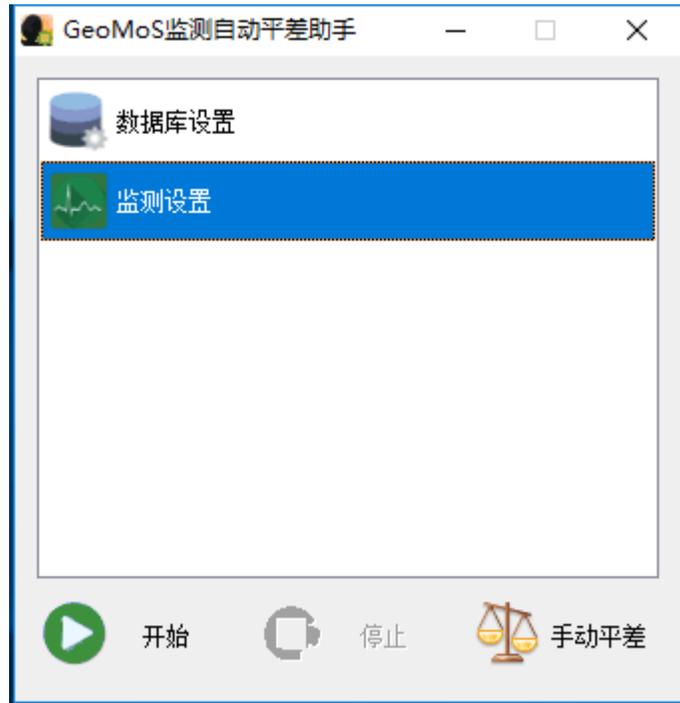


4 多测站全站仪联测

- 4.6 全站仪偏心观测的联测方法
 - 360° 棱镜由于其特殊结构形式，不宜用于固定在仪器上方、与仪器同轴转动的同步观测
 - 采用“背靠背”小棱镜、360° 棱镜均可以进行偏心观测，实现多台仪器联测测量

4 多测站全站仪联测

- 4.7 多测站自动化联测流程
 - 引入“GeoMoS监测自动平差助手”，与GeoMoS系统相连接，进行控制网的三维平差



4 多测站全站仪联测



- 4.8 两台全站仪联测案例
 - 上行线隧道：设置2台全站仪
 - 监测范围465环~250环
 - 设置36个监测断面，每断面4个监测棱镜



控制网示意图



4 多测站全站仪联测

- 4.9 两台仪器联测案例平差计算

- 待定点坐标中误差 (mm)

点号	东坐标	北坐标 (水平位移方向)	高程
1号仪器	0.28	0.59	0.62
2号仪器	0.34	0.65	0.83
1号偏置棱镜	0.57	0.83	0.99
2号偏置棱镜	0.57	0.85	1.04

- 待定点误差椭圆 (mm)

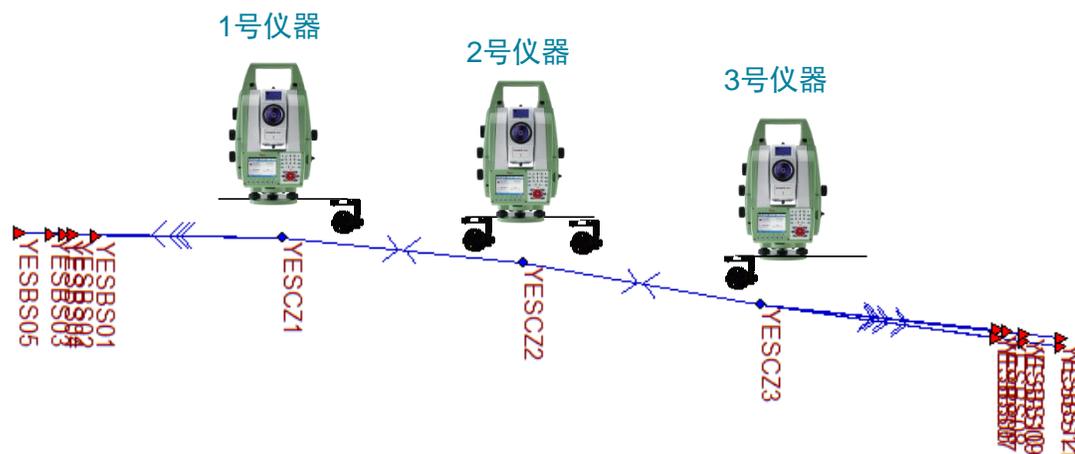
点号	长半轴	短半轴
1号仪器	1.45	0.68
2号仪器	1.60	0.82
1号偏置棱镜	2.29	0.94
2号偏置棱镜	2.30	1.01

- 卡方检验95%置信度通过

4 多测站全站仪联测



- 4.10 三台全站仪联测案例
 - 上行线隧道：设置3台全站仪
 - 设置82个监测断面，每断面4个监测棱镜



控制网示意图



4 多测站全站仪联测

- 4.11 三台仪器联测案例平差计算
 - 待定点坐标中误差 (mm)

点号	东坐标 (水平位移方向)	北坐标	高程
1号仪器	1.38	0.60	1.3
2号仪器	2.06	0.91	1.7
3号仪器	1.47	0.55	1.3
1号偏置棱镜	2.02	1.02	1.6
2号左偏置棱镜	2.53	1.02	1.8
2号右偏置棱镜	2.52	1.03	1.8
3号偏置棱镜	2.10	1.01	1.6

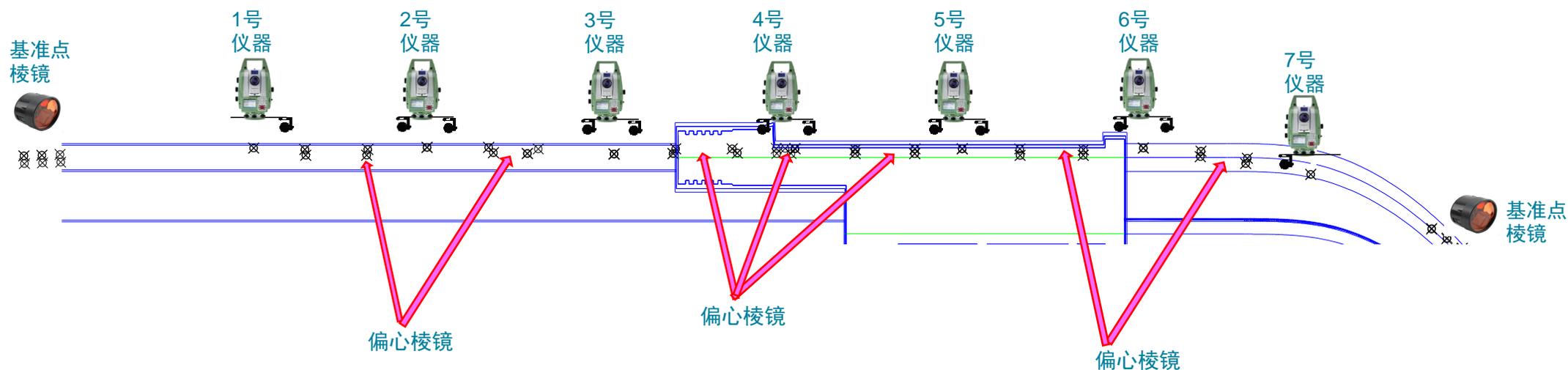
- 待定点误差椭圆 (mm)

点号	长半轴	短半轴
1号仪器	1.38	0.60
2号仪器	2.07	0.90
3号仪器	1.48	0.53
1号偏置棱镜	2.03	1.01
2号左偏置棱镜	2.53	0.99
2号右偏置棱镜	2.53	1.01
3号偏置棱镜	2.11	0.99



4 多测站全站仪联测

- 4.12 七台全站仪联测案例
 - 某项目基坑与邻近既有车站最近约5m
 - 在既有线路左、右线各设置7台全站仪
 - 仪器台采用固定偏置棱镜进行偏心观测
 - 仪器台之间安装多组360°小棱镜、“背靠背”小棱镜进行偏心观测





4 多测站全站仪联测

- 4.13 七台仪器联测案例平差计算
 - 仪器坐标中误差、误差椭圆 (mm)

点号	北坐标 (水平位移方向)	东坐标	高程	长半轴	短半轴
1号仪器	0.82	0.47	0.6	0.82	0.47
2号仪器	1.33	0.54	0.6	1.33	0.54
3号仪器	1.61	0.63	0.6	1.61	0.63
4号仪器	1.63	0.64	0.6	1.64	0.63
5号仪器	1.46	0.64	0.5	1.47	0.62
6号仪器	1.11	0.60	0.5	1.13	0.56
7号仪器	0.60	0.45	0.4	0.62	0.42



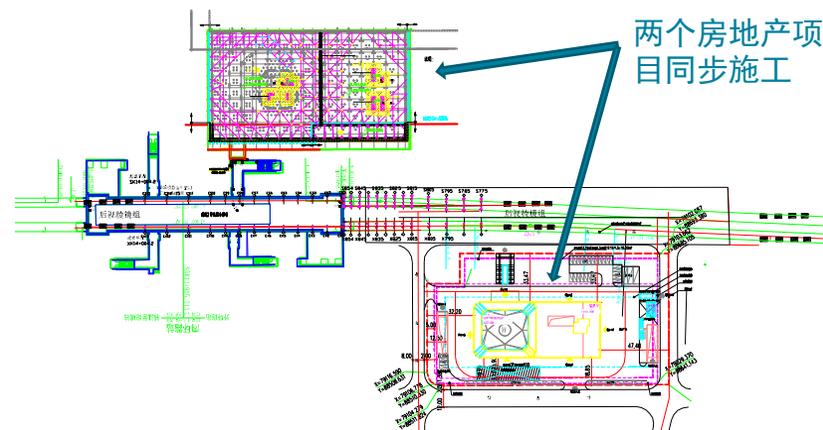
4 多测站全站仪联测

- 4.14 影响联测精度的主要因素
 - 控制网网型
 - 网型越长，精度越差
 - 联测仪器越多，精度越差
 - 观测精度
 - 多棱镜效应
 - 隧道管片折光
 - 平差附加条件的可靠度
 - 初始值观测精度
 - 隧道环境的变化

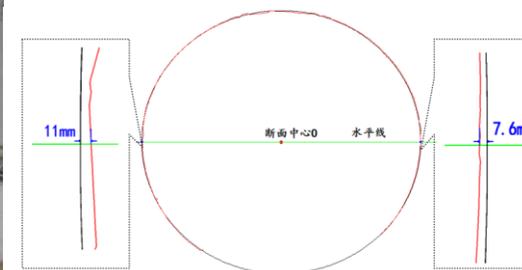
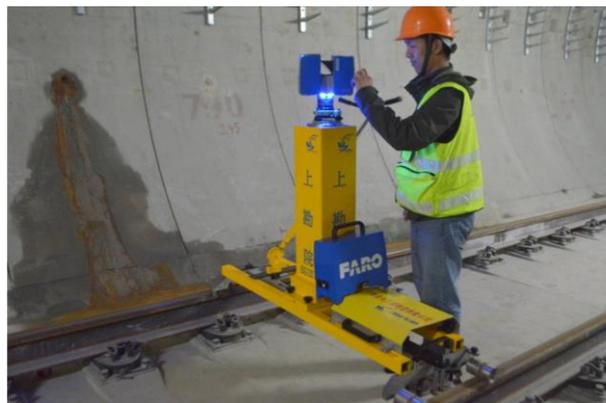
5 总结



- 5.1 杭州地区自动化监测发展趋势
 - 自动化监测区域越来越长
 - 如对既有左、右线隧道各采用7台全站仪组网监测
 - 范围越来越宽
 - 如地铁换乘站，临近既有线路最大开挖深度达30m左右，影响范围广
 - 多个项目同步进行
 - 新建地铁沿线房地产开发力度大
 - 杭州城西、大江东地区大量待开发地块
 - 多种监测数据的综合分析
 - 三维激光扫描
 - 全站仪全断面测量
 - 裂缝测量成果
 - 临近基坑变形数据



保护区项目交叉施工



三维激光扫描测量隧道现状

5 总结



- 5.2 基于TM系列全站仪进行自动化监测的优势
 - 实现高效率、实时、高精度的三维测量
 - 引入绝对坐标, 可实现全线路的坐标统一, 方便相邻监测项目的联测、校核
 - 配合GeoMoS系统, 可方便的进行多项目控制、数据采集、编辑、输出等一体化作业
 - 监测点布设方式灵活, 便于更加全面的隧道状态分析
 - 以杭州地区为例, 6年间的自动化监测项目总体实施效果较好, 满足地铁保护要求

5 总结



- 5.3 关于自动化监测的重难点
 - 提高实测的观测精度、观测可靠性是首要问题
 - 监测控制网的建立，需要综合考虑多方面的因素：
 - 经济性
 - 施工影响
 - 通视条件
 - 管片折光
 - 多棱镜效应
 - 隧道结构形式
 - 自动化监测实施过程中，还应考虑以下方面的影响：
 - 列车运行产生的遮挡、高频率振动
 - 隧道环境复杂

5 总结



- 5.4 关于多测站全站仪联测
 - 越来越多的项目需要多台全站仪进行联测
 - 对于单测站控制网，多余观测数较多，网型更加稳定，出现个别观测粗差时GeoMoS可简单的进行处理
 - 对于多台全站仪联测，目前都是通过偏心观测的方式进行，仍存在以下问题：
 - 网型容错率较低
 - 人工干预较多
 - GeoMoS不能独立完成平差



1958-2018

六十一甲子
百年上勘梦

以岩土工程
为特色的工
程咨询公司

- 精良的仪器设备
- 丰富的工程经验
- 一流的专家团队
- 优化的专家系统



上海勘察设计研究院(集团)有限公司
SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd.

网址: www.sgidi.com

QQ: 2328376684



海克斯康
HEXAGON

公司介绍

公司总部现有技术人员400余人，拥有国家勘察大师5位、教授级高级工程师20位、各类注册工程师百余位。集团现有员工近2000人。

公司以城市建设和管理为核心，长期从事岩土工程一体化勘察、设计、监测、咨询、科研及软件开发服务，出色地完成上海市60%以上重大工程的岩土工程技术服务。

袁雅康



莫群欢



陆学智



顾国荣



许丽萍

公司介绍



上海勘察设计研究院(集团)有限公司
SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd.



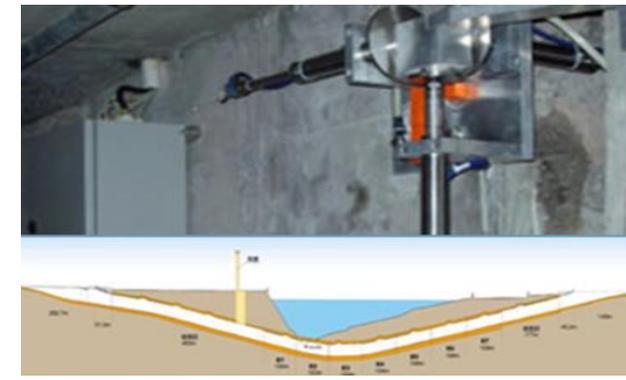
静力水准用于
隧道沉降测量



隧道收敛测量



三维激光扫描



变形测量
外环隧道结构

服务于24个城市的轨道交通建设



南京地铁



贵阳市轨道交通



宁波轨道交通
Ningbo Rail Transit



福州地铁
FUZHOU METRO



兰州轨道交通



南昌地铁
NANCHANG METRO



南通地铁
NANTONG METRO



青岛地铁
QINGDAO METRO



合肥地铁
hefeiditie.com



哈尔滨地铁
HARBIN METRO



上海轨道交通



NVRT
宁波轨道交通



苏州轨道交通



厦门轨道交通集团
XIAMEN RAIL TRANSIT GROUP



佛山地铁
FMETRO



徐州地铁
XUZHOU METRO



天津地铁
Tianjin Metro



杭州轨道交通



常州地铁
CHANGZHOU METRO



长沙轨道交通



济南地铁
Jinan Metro



东莞轨道交通
DongGuan Rail Transit



绍兴轨道交通
Shaoxing Rail Transit

金华轨道交通

JINHUA RAIL TRANSIT

公司介绍



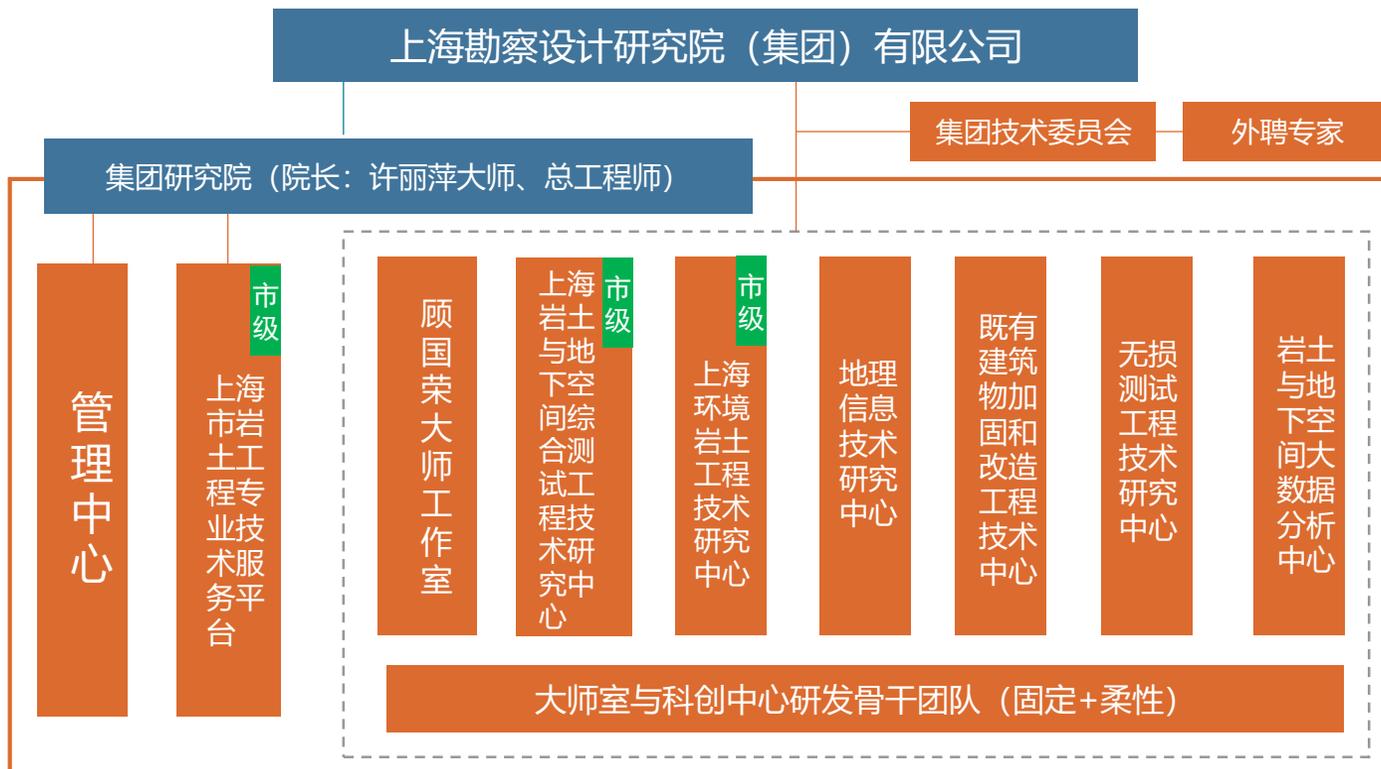
上海勘察设计研究院(集团)有限公司
SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd.

一室六中心一平台

- ☆ 一个服务平台、两个市级中心
- ☆ 一个大师工作室、四个院级中心
- ☆ 辐射公司全部专业公司
- ☆ 专注新技术研发和产业化

定位

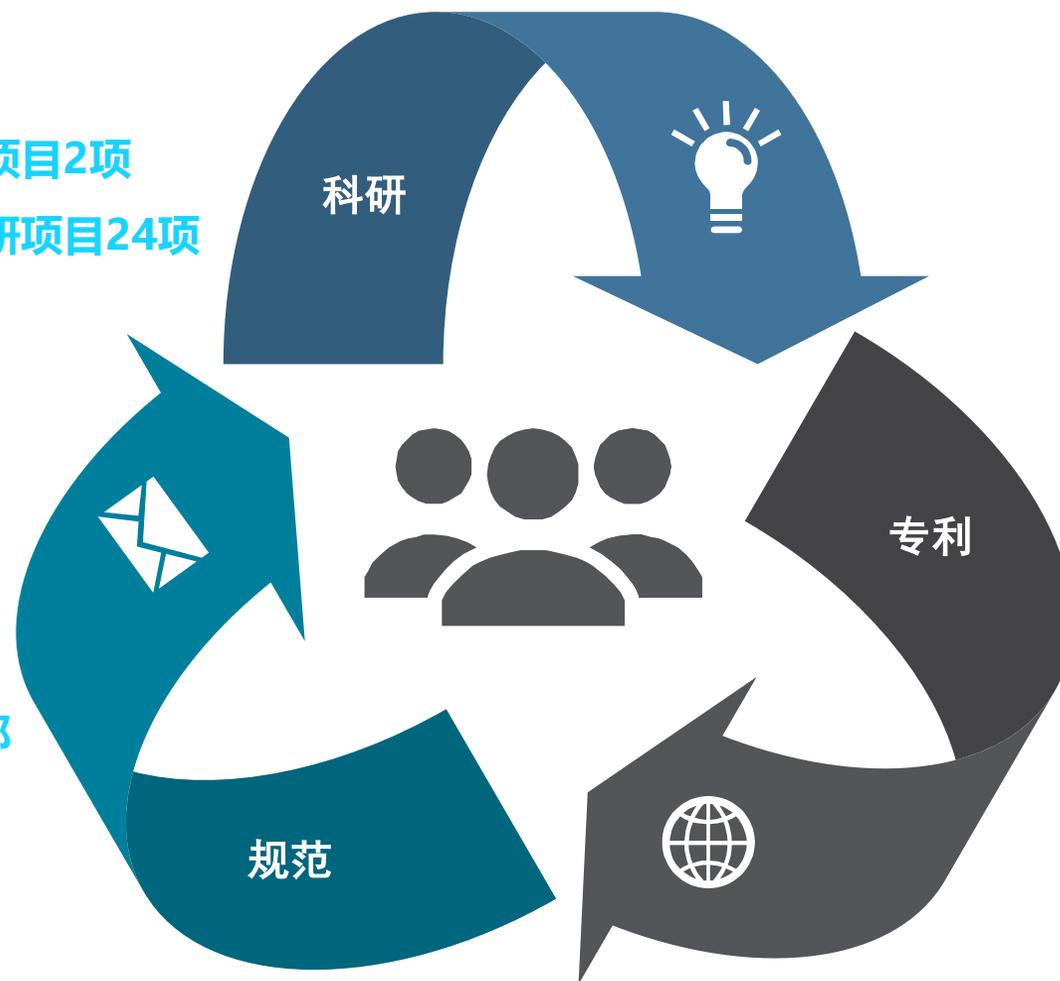
- ☆ 技术研发中心
- ☆ 产业化技术孵化中心
- ☆ 科技政策研究中心
- ☆ 人才培育中心



海克斯康
HEXAGON

公司介绍

- 国家级科研项目2项
- 上海市级科研项目24项



- 实用新型129项
- 发明31项

- 编制国家及行业规范21部
- 编制上海市规范32部
- 主编规范12部



—— 谢 谢 ——

