

引江补汉工程优化设计的若干重点问题

钮新强



2023.9.12

1

引江补汉工程概况

2

重点不良地质洞段灾变防治

3

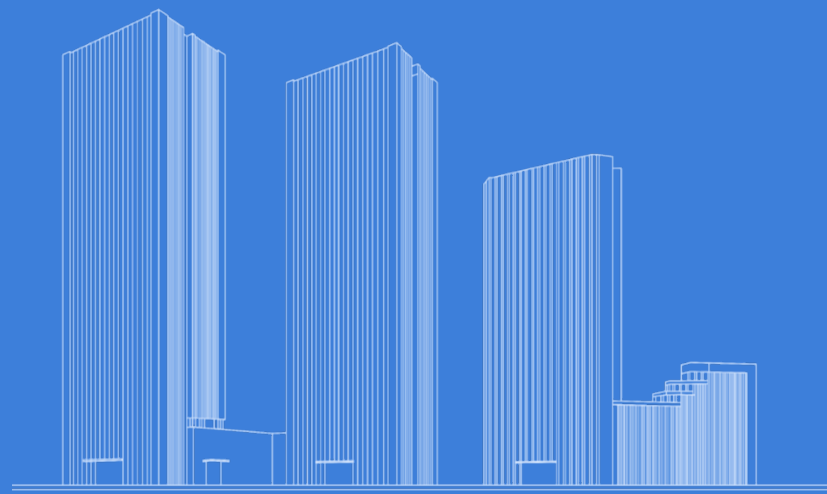
大流量超长有压输水隧洞水力控制

4

智能感知



引江补汉工程概况



1 工程概况

□ 工程定位与战略意义

引江补汉工程作为南水北调中线工程的后续水源，从长江三峡水库引水入汉江丹江口水库坝下，是加快构建国家水网主骨架和大动脉的重要标志性工程。

(1) 创造长江-汉江-华北平原水资源协同调配的工程条件

- 连通三峡水库“大水缸”和丹江口水库“大水盆”两大战略水源
- 连通长江、汉江流域与京津华北地区三地，为汉江流域和京津华北地区提供更稳定可靠的水源保障

(2) 提升三峡水库在国家骨干水网中的战略水源作用

- 上：与上游梯级和西南水源共同构成国家巨大战略淡水资源库
- 中：通过引江补汉连通南水北调中线
- 下：调控两湖、引江济淮和南水北调东线



连通三峡和丹江口两大战略水源地，完善国家水网布局

1 工程概况

□ 工程总体布局

➤ 输水工程

- 从三峡大坝上游约7.5km左岸龙潭溪取水，输水至丹江口坝下约5km右岸安乐河口，全程有压单洞自流输水，线路全长194.7km，等效洞径10.2m。设计流量170m³/s，最大流量212m³/s。

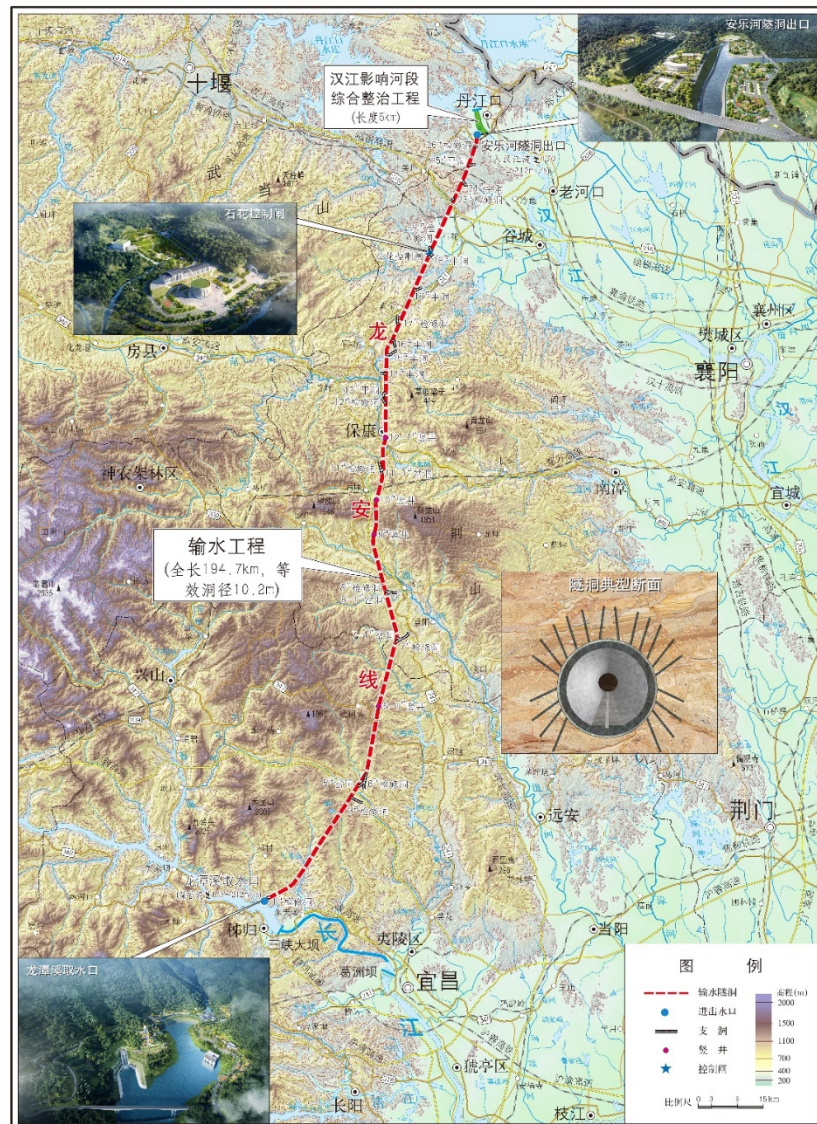
➤ 汉江影响河段整治工程

- 丹江口水库坝下长约5km的汉江影响河段进行综合整治

可研批复工程静态总投资：582.35亿

施工总工期：108月

南水北调中线引江补汉工程总体布置示意图



1 工程概况

□ 工程地质特点

引江补汉输水隧洞跨2个一级构造单元，埋深大，岩性复杂，软岩和可溶岩分布广，断层规模大数量多，具有

“三高、两多、一软” 特点：

三高

- ◆ **高地应力**：实测水平主应力最大量值35.2MPa
- ◆ **高外水压力**：已开展的钻孔实测最大水压约5.7MPa
- ◆ **高岩石强度**：超硬岩分布范围广，实测最大强度达354MPa

两多

- ◆ **断层多**：主洞穿越区域性深大断裂7条，大型断层66条
- ◆ **地下水多**：线路区地下水丰富，预测涌水洞段长约10.69km

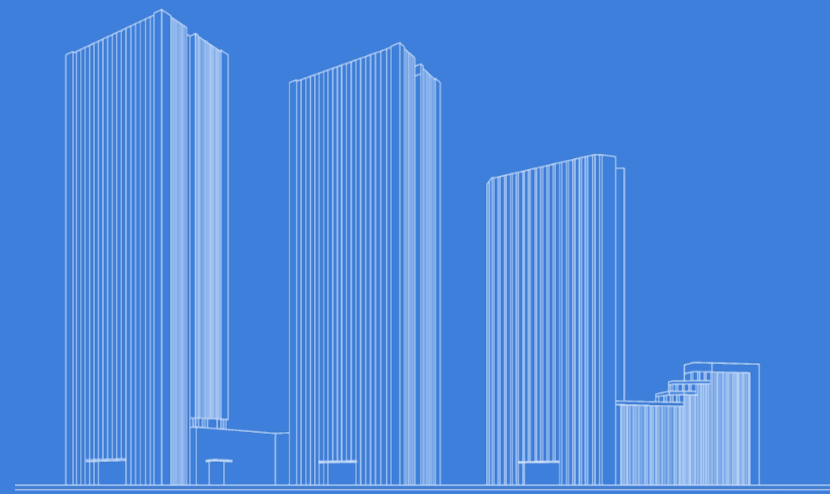
一软

- ◆ 隧洞穿越**软质岩**总长度达45.3km，占比约23%，预测中等及以上软岩变形风险的洞段长度25.9km





重点不良地质洞段灾变防治



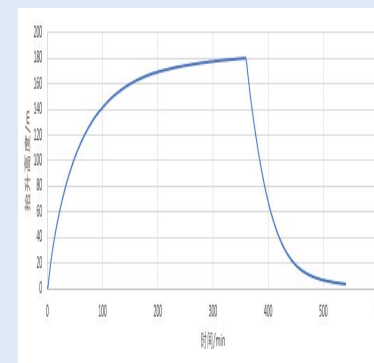
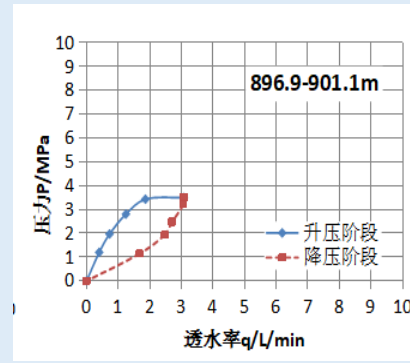
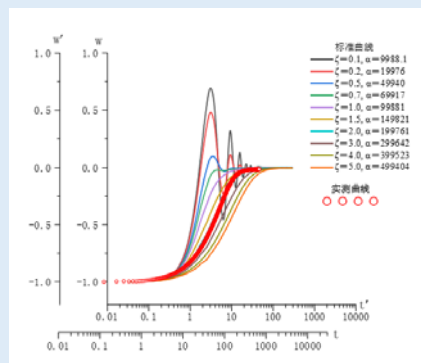
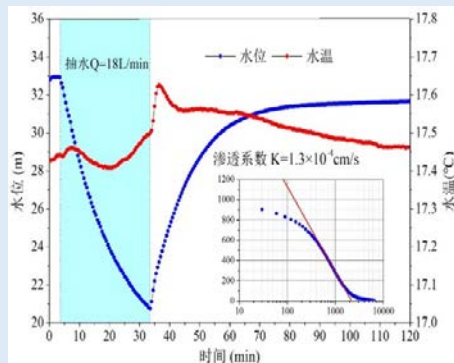
2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 突泥涌水

□ 涌水问题预测

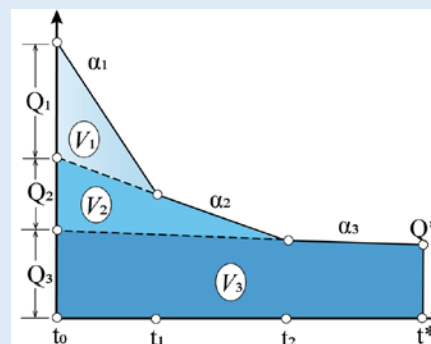
- ◆ 岩溶与水文地质结构
- ◆ 水文地质试验

- 确定岩体渗透系数与给水度



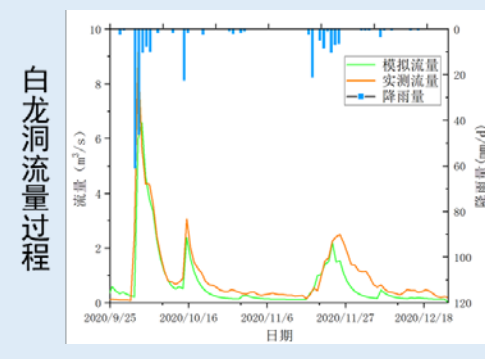
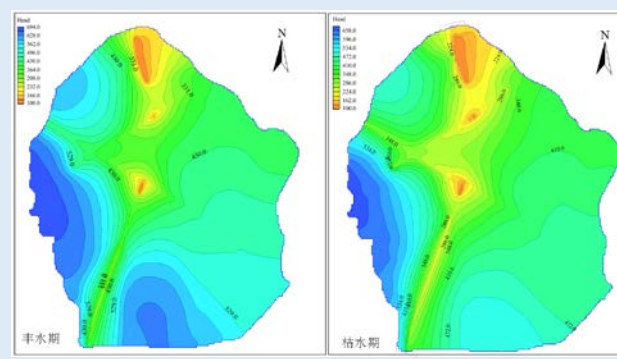
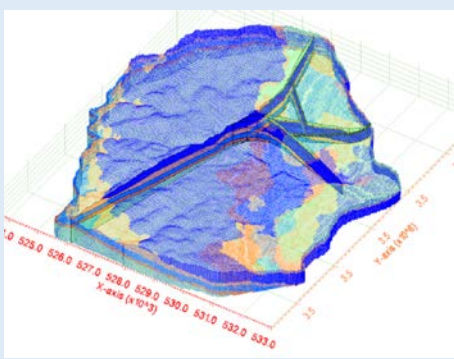
◆ 地下水动态监测

- 掌握地下水动态变化规律
- 识别含水介质富水性等



◆ 涌水量预测

- 区分不同洞段水文地质特征
- 复杂洞段采用数值法进行涌水量及其变化过程预测



□ 突泥问题预测

断层型

- 富水断层型
- 导水断层型
- 阻水断层型

岩溶型

- 溶蚀裂隙型
- 溶洞、溶腔型
- 管道及地下暗河型

其他

- 侵入接触型
- 不整合接触型
- 差异风化型

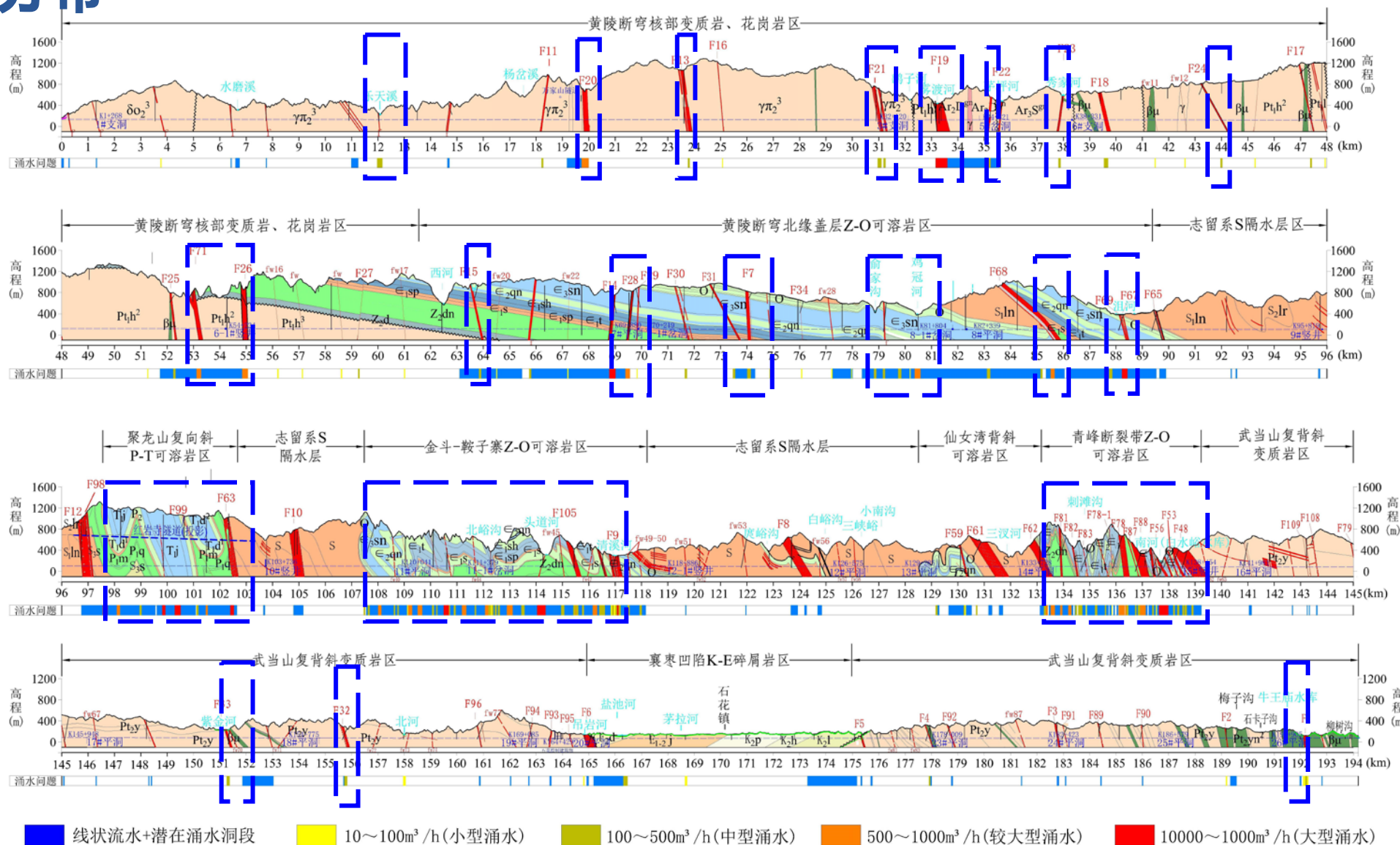
- **岩溶型突泥风险低**：输水隧洞埋深大，隧洞多处于深部缓流带，遇溶洞溶腔、岩溶管道可能性小
 - **其他型风险低**：侵入岩与围岩多为熔融接触，不整合接触带未见风化壳，未见明显差异风化现象
 - **断层型风险高**：沿线断裂构造发育，构造岩中存在断层碎屑物、泥化碎屑物和糜棱岩等
- **主要分布洞段位置**：具一定规模，且断层构造岩中断层碎屑物、泥化碎屑物或软化糜棱岩有一定宽度的断裂（层）洞段

2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 突泥涌水

□ 涌水风险洞段分布

- 断层破碎带段
- 可溶岩褶皱核部段
- 可溶岩/非可溶岩接触带
- 过河埋深较浅段
- 累计长10.69km, 占比5.5%



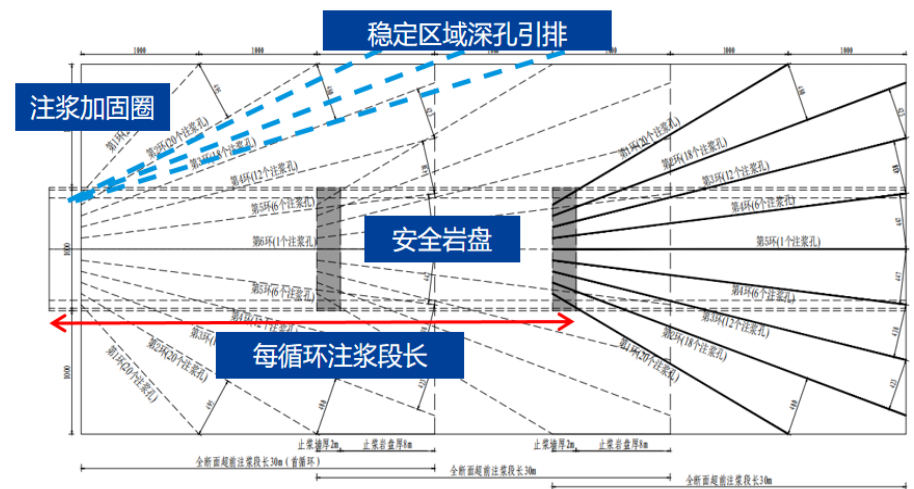
■ 线状流水+潜在涌水洞段
 ■ 10~100m³/h (小型涌水)
 ■ 100~500m³/h (中型涌水)
 ■ 500~1000m³/h (较大型涌水)
 ■ 10000~100000m³/h (大型涌水)

2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 突泥涌水

□ 突泥涌水防治——“四超前”防控技术

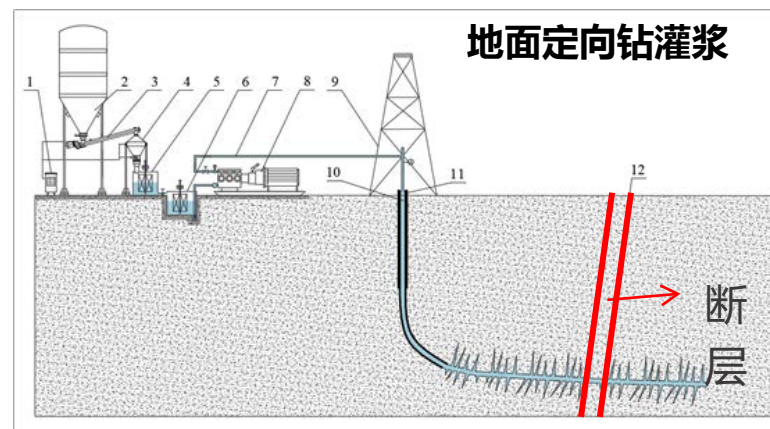
- **超前探测：**洞内超前地质预报+洞外复合定向钻勘察技术
- **超前灌浆：**洞内灌浆+地面复合定向钻灌浆
- **超前减压：**深孔排水减压
- **超前支护：**洞内超前支护措施



超前深排水减压孔示意图



引江补汉复合定向钻勘察技术



2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 突泥涌水

□ 突泥涌水防治——超前灌浆设计

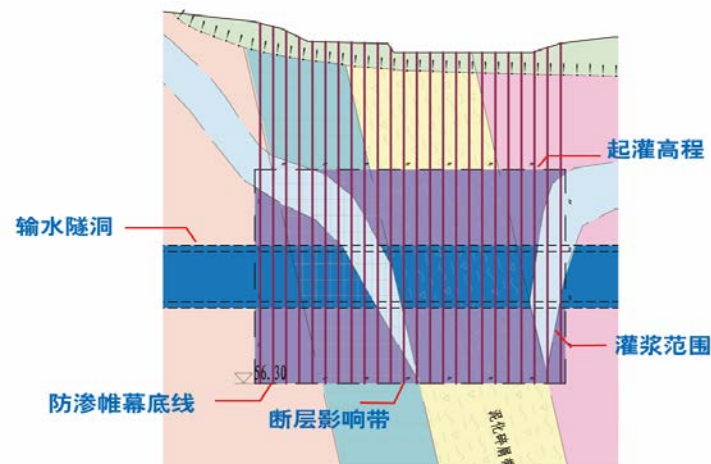
- 对勘察查明的涌水突泥高风险洞段逐一分析，系统进行超前灌浆设计，综合采用地表+洞内处理措施

地表垂直孔超前灌浆

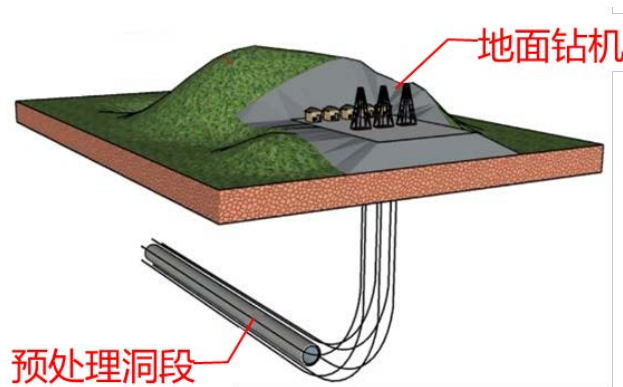
- 使用原则：工艺成熟，需隧洞上方合适施工场地，一般适用埋深不超过100m洞段
- 适用部位：出口段两翼断裂

地表定向钻超前灌浆

- 使用原则：主要适用于TBM段（洞内处理十分困难）断层洞段，保证TBM顺利开挖，不占用直线工期，但费用相对高
- 适用部位：雾渡河、土门等8条断层，长2011m



地表垂直孔超前灌浆



地表定向钻超前灌浆

2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 突泥涌水

□ 突泥涌水防治——超前灌浆设计

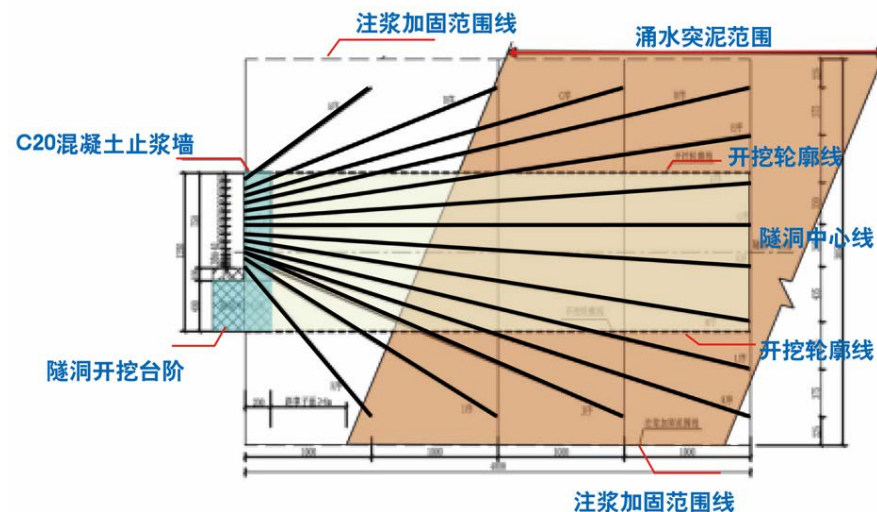
洞内常规超前灌浆

- 使用原则：常规钻灌设备处理，每循环进尺约30m，占用掌子面，处理时间长
- 适用部位：适用于窄短断层洞段

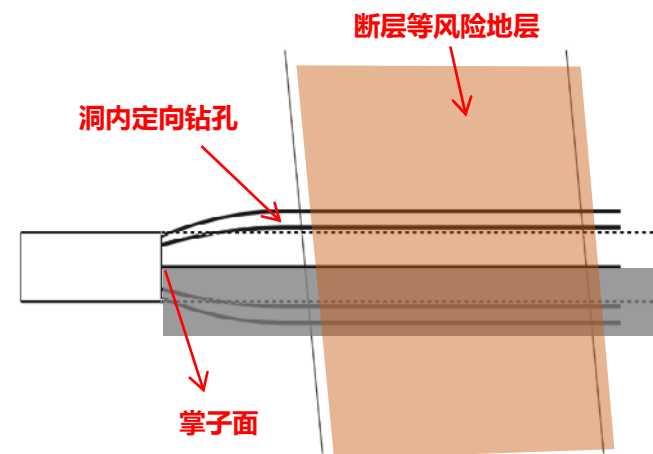
洞内定向钻超前灌浆

- 使用原则：适用于钻爆段宽大（超过100m）的高突泥风险断层及联系地表水体的断层洞段，一次性处理，仅需灌注洞周岩体，灌浆进尺少，处理工效高
- 适用部位：鹞子河、城口-房县等11条断层，长2611m

◆ 具体超前灌浆部位及措施，需结合超前勘探、地质预报及分析确定



洞内常规超前灌浆



洞内定向钻超前灌浆

2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 突泥涌水

□ 突泥涌水防治——定向钻灌浆关键技术研究

定向钻灌浆核心优势

- 超前长距离高压灌浆，一次性处理断层，减少工期影响
- 超高压灌浆提升效果，地表灌浆避免高压动水施工难题

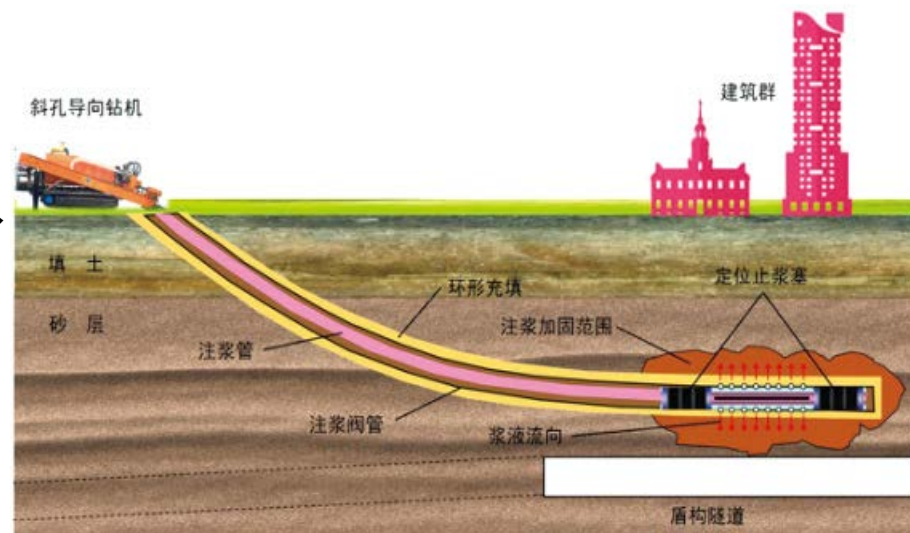
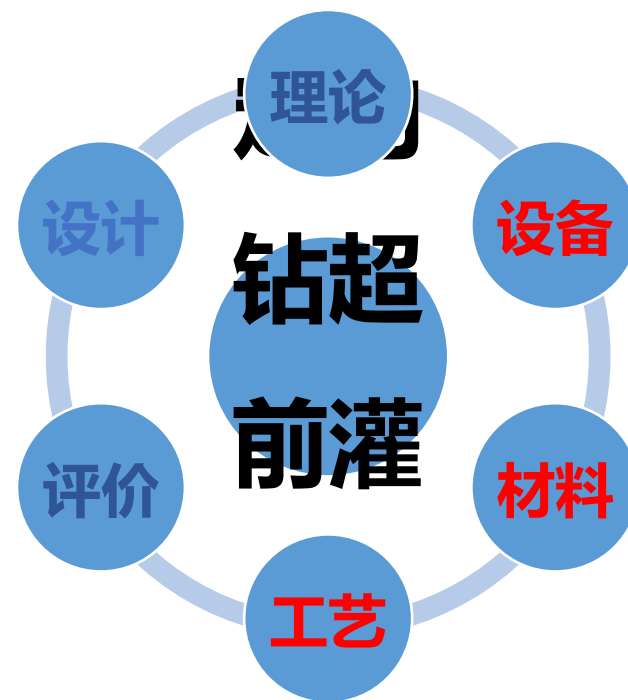
存在问题

- 高压富水断层均匀受灌难，碎粉岩、泥化碎屑带可灌性差
- 超前灌浆理论、材料、工艺及效果评价等技术尚不成熟

研究方向

- **设备**（地表、洞内定向钻设备研发）
- **材料**（新材料研发，形成灌浆材料体系）—解决可灌性和动水灌注问题
- **工艺**（引入覆盖层灌浆工艺、孔内复合灌浆）—提高灌浆效果

◆ 亟需通过技术攻关、室内试验和现场试验开展研究



□ 软岩变形预测

◆ 可能存在软岩大变形岩组划分:

- 页岩、泥岩、千枚岩等常见的软岩
- 断层破碎带、节理密集带等完整性差、破碎的岩体

◆ 岩体物理力学参数:

- 现场试验: 承压板法变形、直剪、单轴压缩、蠕变试验; 钻孔弹模试验
- 室内试验: 常规力学试验、岩石三轴流变试验、结构面剪切流变、三轴卸荷卸荷等

◆ 预测方法:

$$S = R_{cm} / \sigma_m$$

- $$R_{cm} \left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ 基于完整性系数} K_v \text{ 岩体强度} \\ \bullet \text{ 基于Hoek-Brown准则及Mohr-Coulomb准则岩体强度} \\ \bullet \text{ 基于GSI等效岩体强度法岩体强度} \end{array} \right.$$

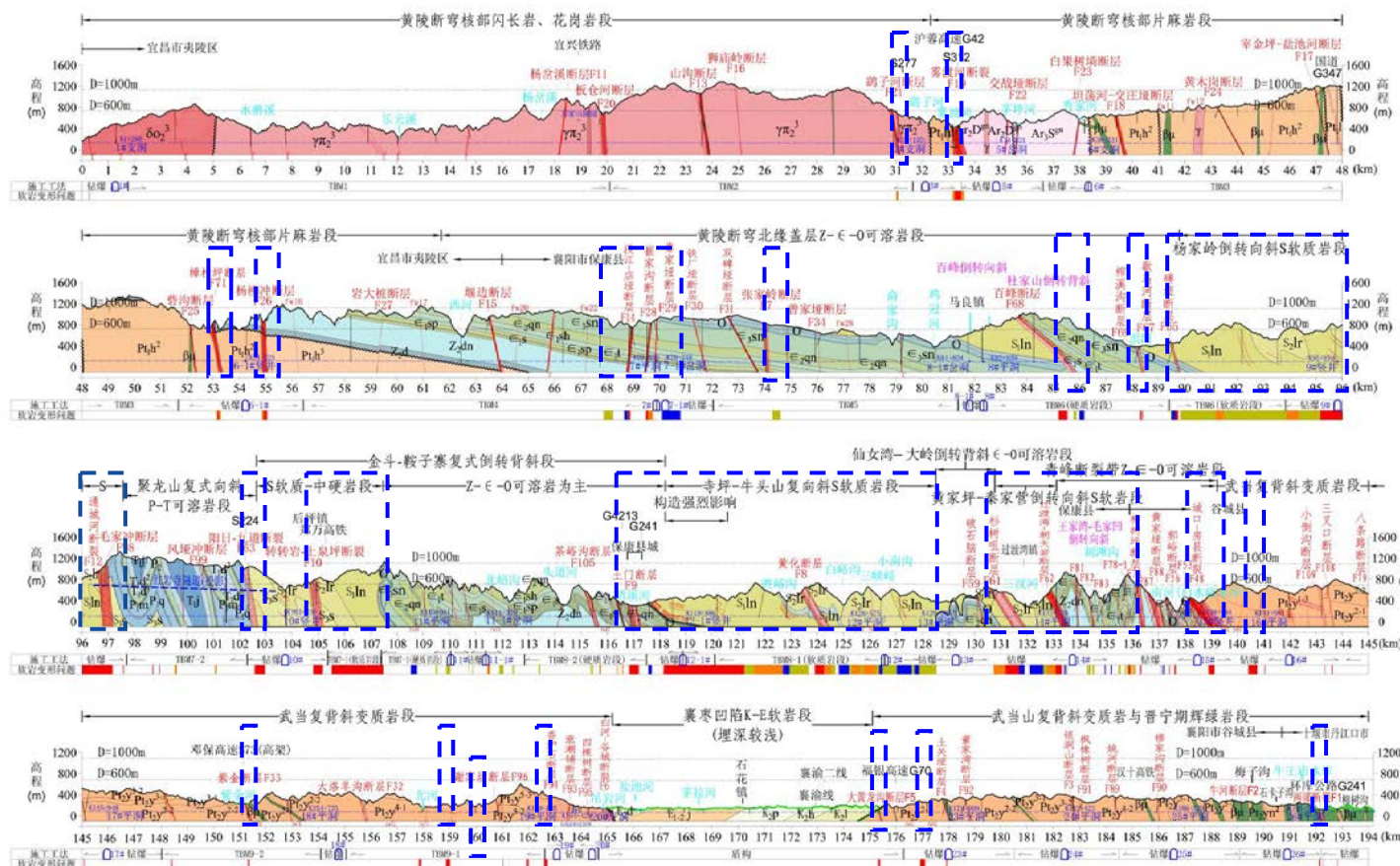
σ_m 取值根据地应力反演成果

2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 软岩大变形

□ 软岩变形洞段分布

R_{cm}/σ_m	变形程度判别	围岩稳定性评价
≥ 0.45	无挤压	围岩基本稳定，局部有轻微挤压变形
$0.30 \sim 0.45$	轻微	稳定性较差。应力集中部位可能发生轻微中等挤出变形，不支护可能产生塌方或变形破坏
$0.20 \sim 0.30$	中等	稳定性差。围岩自稳时间很短，规模较大的各种变形和破坏都可能发生
$0.15 \sim 0.20$	严重	不稳定。围岩稳定时间仅数小时或更短，不及时支护围岩很快变形失稳。破坏形式除整体塌落外，侧墙挤出、底鼓均可发生。明显流变，变形大，持续时间长
< 0.15	极严重	极不稳定。围岩不能自稳，变形破坏严重



□ 极严重-严重变形:

- 主要分布断层软弱带、炭质页岩，以及受构造影响强烈的志留系中下统地层洞段
- 极严重变形段长11.923km，占比6.1%；严重变形段长4.674km，占比2.4%

□ 中等变形:

- 埋深较大的软质岩洞段，长9.335km，占比4.8%

□ 软岩大变形防治

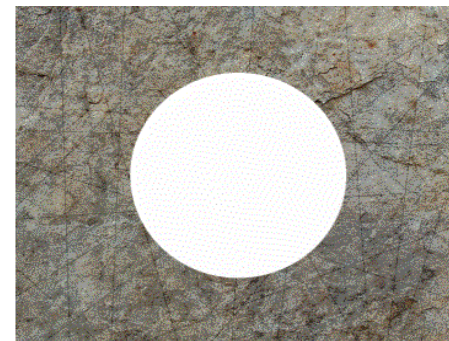
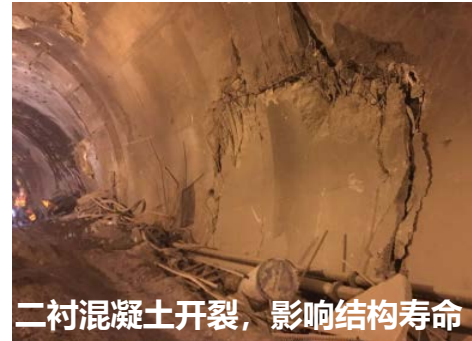
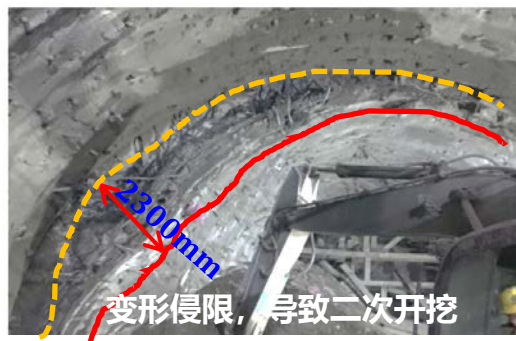
📄 致灾机制

隧洞软岩大变形：隧洞工程中，由软弱岩体构成的围岩，在高地应力（或相对高地应力）、地下水或自身膨胀性能的作用下，其自承能力丧失或部分丧失，产生具有累进性和明显时间效应的塑性变形且变形得不到有效约束的现象。

软岩大变形 力学机制



- 与围岩岩性相关的物化膨胀机制（Ⅰ型）
- 与工程力来源相关的应力扩容机制（Ⅱ型）
- 与岩体结构特征相关的结构变形机制（Ⅲ型） [何满潮院士]



2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 软岩大变形

□ 软岩大变形防治

防治策略：“放-抗结合、主动支护、分层施作”围岩大变形控制理念

原理：通过让压支护措施适应围岩变形，围岩松弛卸荷使所需支护力减小，让压支护措施稳定地提供支护抗力而不失效，避免过早屈服导致围岩失稳，边让边抗，并结合预应力施加以主动控制围岩收敛量。



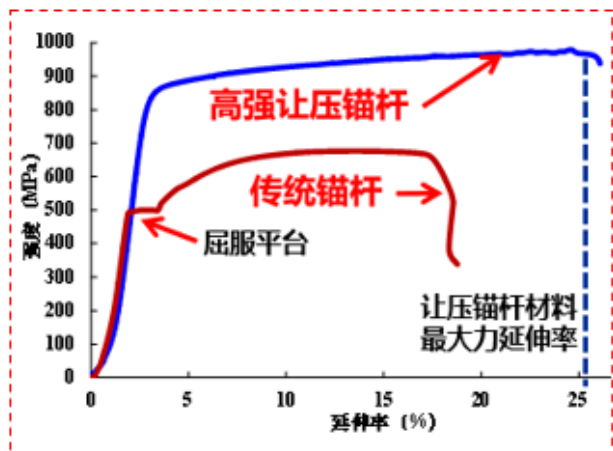
NPR 恒阻锚索结构简图



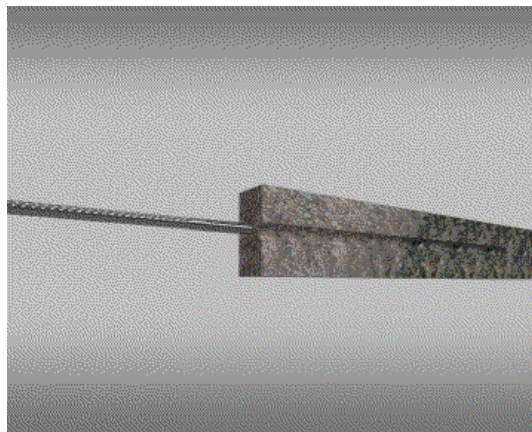
恒阻让压锚杆 (索)



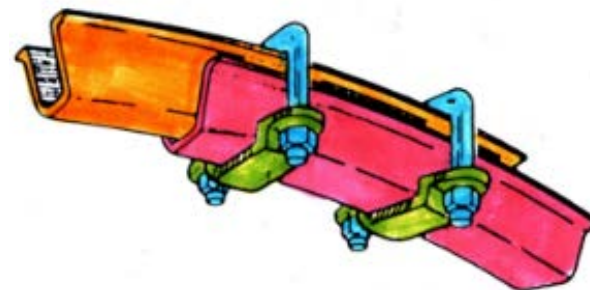
组合让压锚杆



让压锚杆 (索)



吸能让压锚杆锚固效应

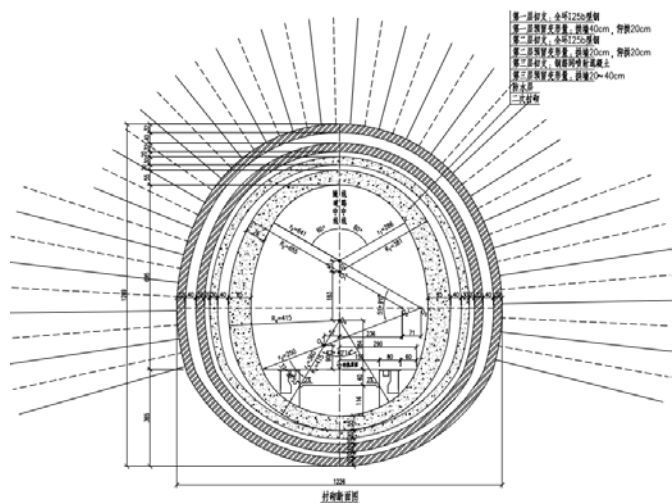


可缩式U型钢拱架

□ 软岩大变形防治

📄 防治策略：“放-抗结合、主动支护、分层施作” 围岩大变形控制理念

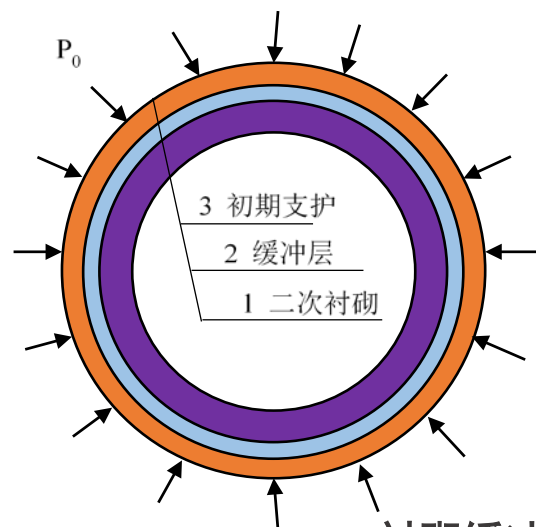
- 在软岩大变形钻爆洞段，采用了“**双层初期支护（HW+U型钢拱架）+二衬外设置缓冲垫层**”的新型复合支护结构，效果良好；
- 第一次支护变形到一定程度以后，及时施做第二层支护，最终将变形量控制在容许范围内，通过**分层施作支护**，允许围岩变形释放部分应力，又能控制围岩过度变形。



分层施作支护示意图



可缩式U型钢拱架



衬砌缓冲层结构



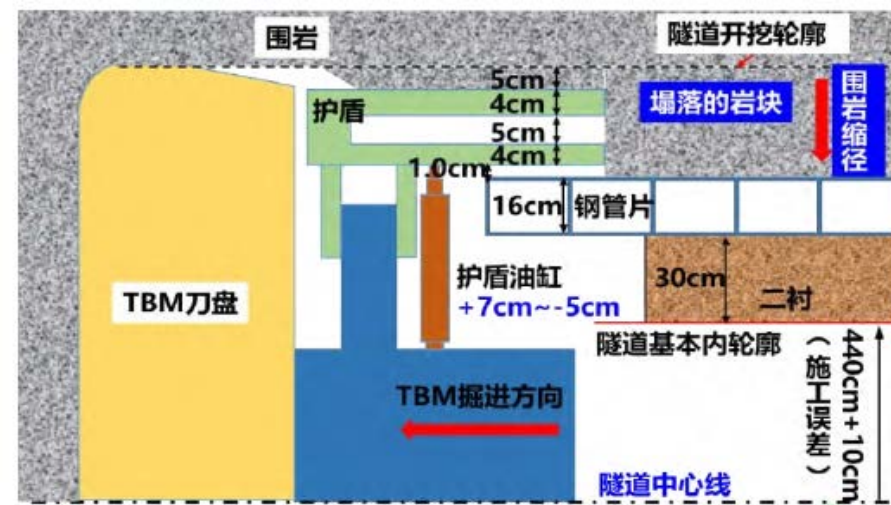
2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 软岩大变形

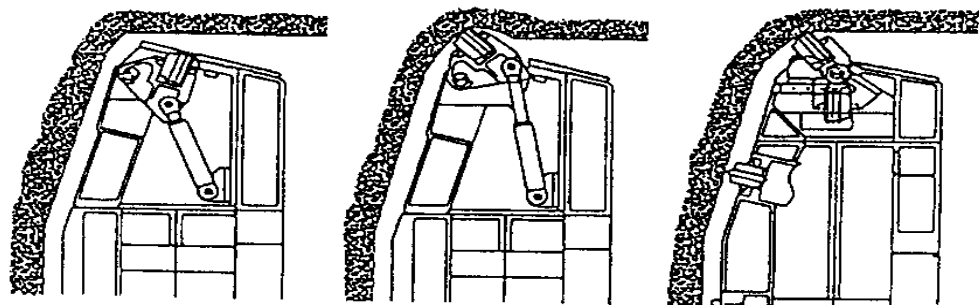
□ 软岩大变形防治

📄 软岩段TBM选型及卡机防控功能针对性设计

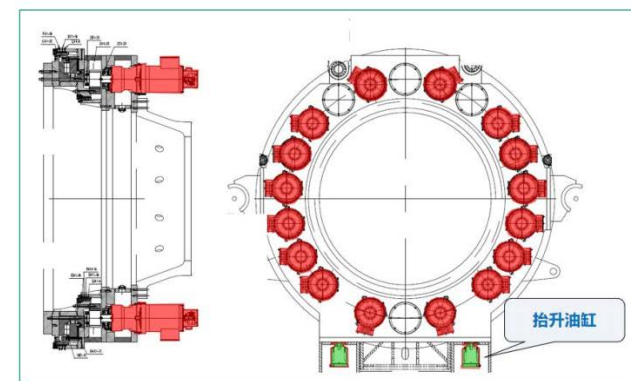
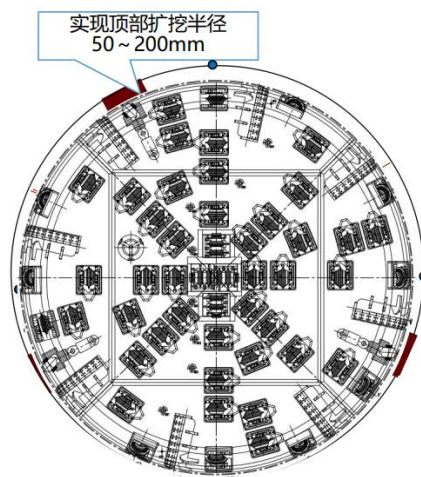
- 单护盾 VS 敞开式 支护及时
- 单护盾 VS 双护盾 盾体长度短、卡机风险小
- **电液混合驱动与控制系统**：采用大扭矩脱困，具有足够大的扭矩储备系数；
- **刀盘扩挖**：预留扩挖刀座、增加边刀垫块；通过液压扩孔机构调节边刀、抬升油缸。实现顶部扩挖半径50~200mm；
- **倒锥形盾体**：采用阶梯型盾体设计。



阶梯型护盾



边刀扩挖

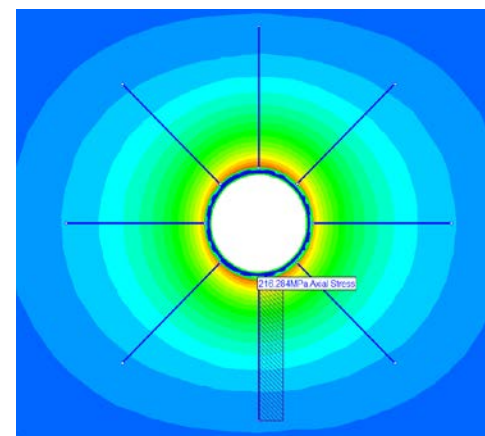


抬升油缸扩挖

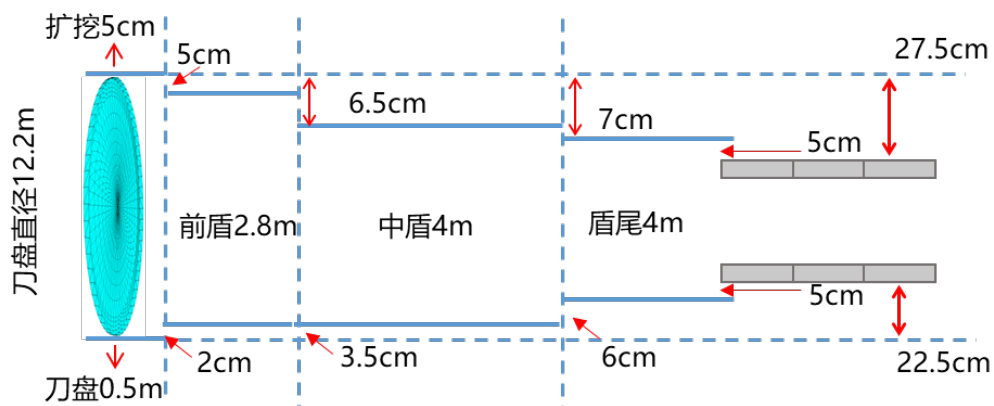
□ 软岩大变形防治

📄 软岩TBM施工洞段的支护设计

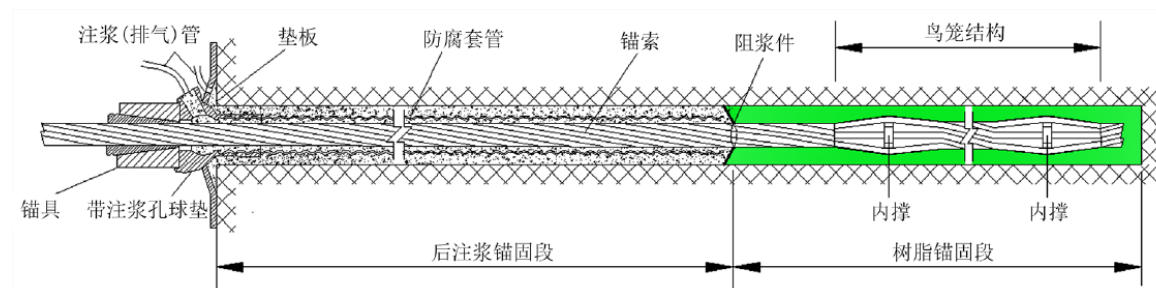
- TBM针对软岩的 **倒锥体设计** 与 **卡机风险** 相容性分析
- 根据护盾式TBM倒锥形设计留足变形空间，合理掌握砾石回填和灌浆时机，实现防抗结合
- 预应力锚索主动支护，加固围岩



管片+预应力锚索组合



单护盾TBM倒锥体结构示意图



预应力锚索

□ 软岩大变形防治

📄 软岩TBM施工洞段的支护设计

- 管片强度选择根据料场骨料特性和工程类比确定
- 围岩压力考虑施工期和运营期两种工况（**短期荷载**和**长期荷载**）
- 设计方法采用 ITA 建议的 “**收敛-约束**” 法
- II级（严重变形及以下）变形洞段采用C60高强混凝土管片，考虑长期强度劣化，增加预应力锚索/锚杆
- TBM7软岩严重变形洞段采用钢-砼管片支护
- 考虑软岩长期强度劣化，增设二次衬砌，保障管片结构长期安全稳定

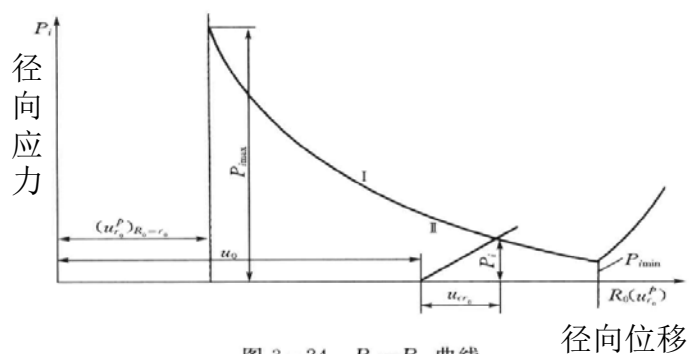
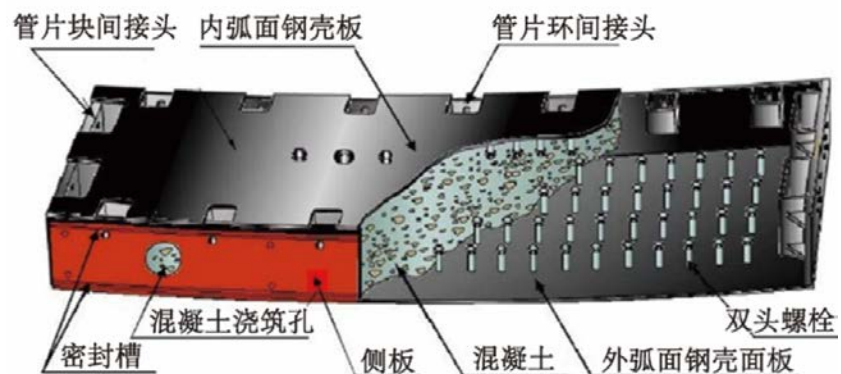
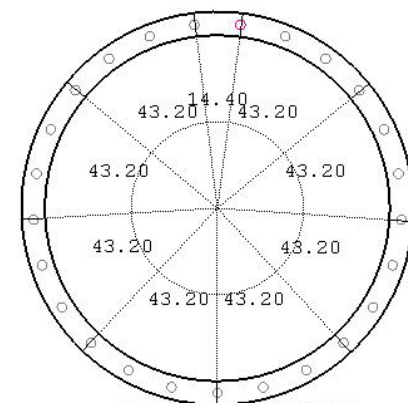


图 3-24 P_r-R_0 曲线

围岩应力与收敛位移关系曲线



管片结构设计

2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 硬岩岩爆

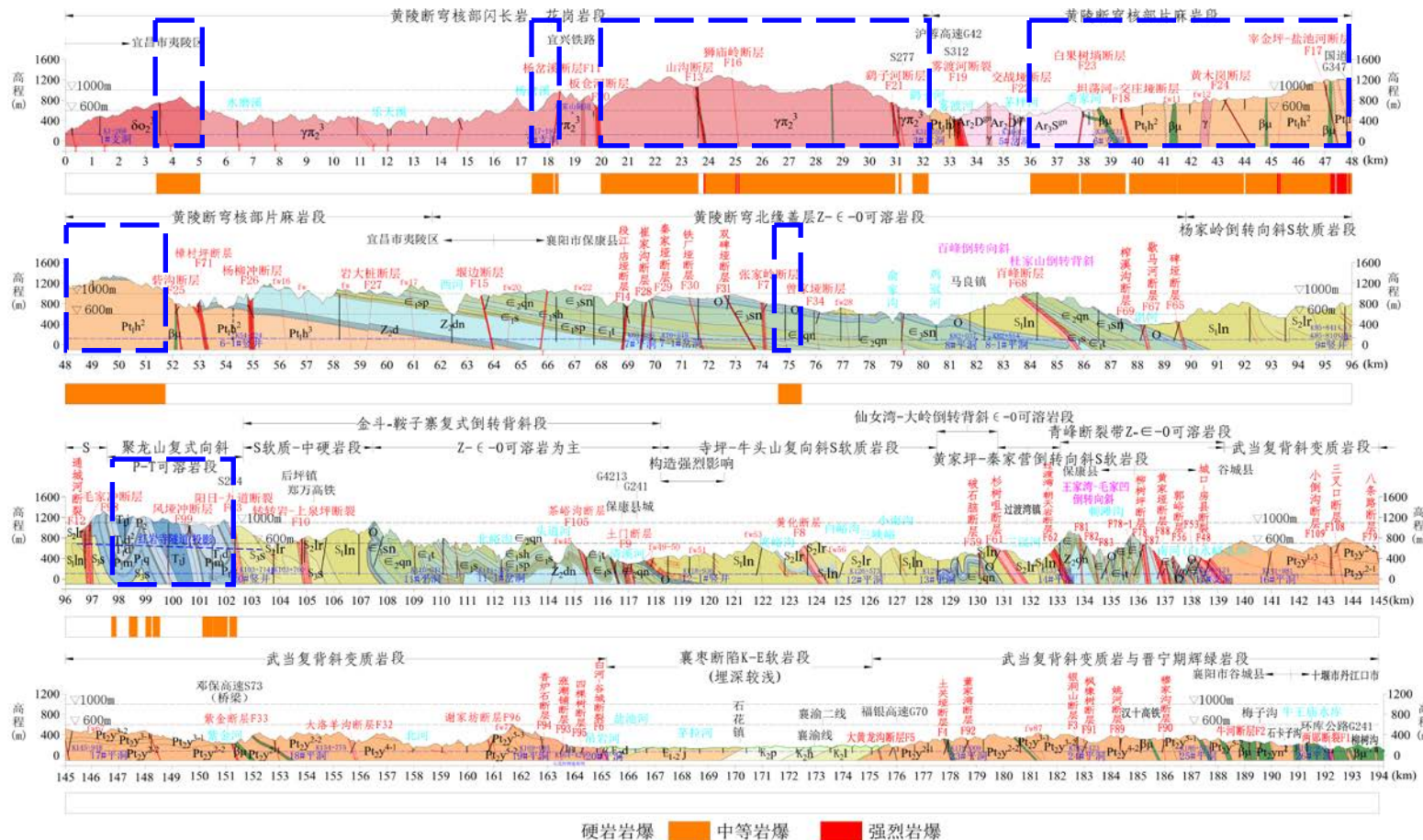
□ 岩爆问题预测及分布

◆ 岩爆预测方法

- 岩爆倾向性判别
- 强度应力比法
- 徐林生二郎山隧道应力强度比法
- 冯夏庭院士团队地质综合查表法

◆ 岩爆预测成果

- 筛除富水和完整性差~较破碎洞段
- 多种方法岩爆预测成果进行综合考虑



- 强烈岩爆风险洞段长0.859km，占比约0.4%，主要分布于黄陵断穹核部
- 中等岩爆风险洞段长20.202km，占比约10.4%，主要分布于黄陵断穹核部以及聚龙山复式向斜

2 重点不良地质洞段灾变防治

■ 硬岩岩爆

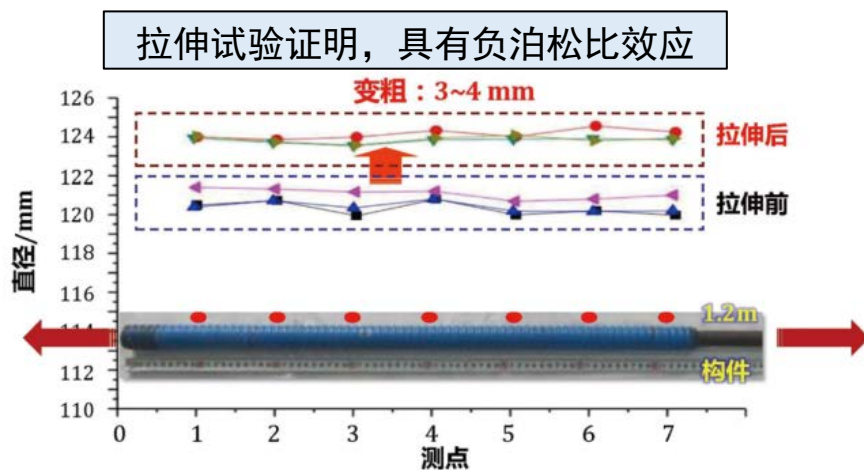
□ 岩爆防治

高地应力隧洞硬岩岩爆主动防控技术

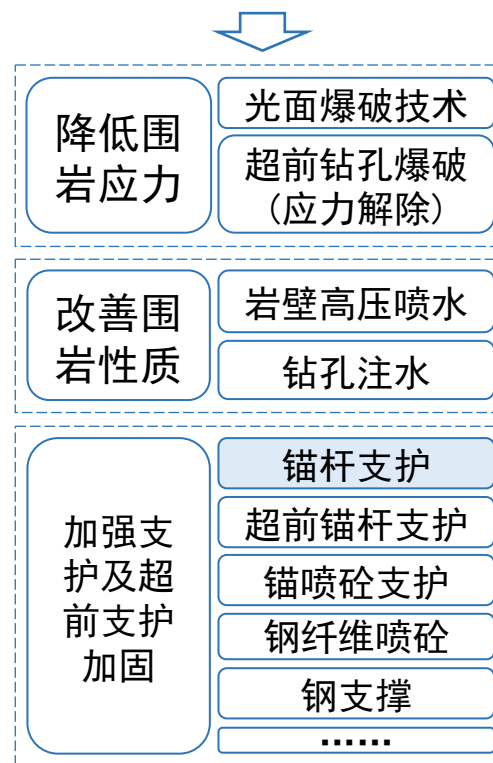
- “以防为主，防治结合，软化围岩、释放应力”原则
 - 对于中等岩爆和强烈岩爆，宜采用预应力锚杆，如涨壳式预应力中空锚杆
 - 对于强烈岩爆和极强岩爆，可结合现场条件，采用**吸能锚杆**等新型高性能结构

■ 吸能锚杆支护结构

- 高恒阻、高预应力、大变形
- 吸收能量
- 多次冲击而不断
- 防爆抗冲



岩爆区防控治理措施

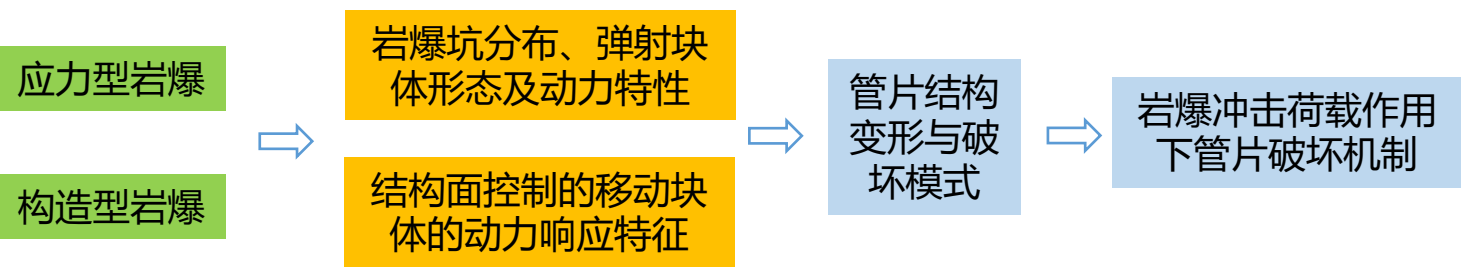


□ 岩爆防治

管片结构-岩爆冲击相互作用机制

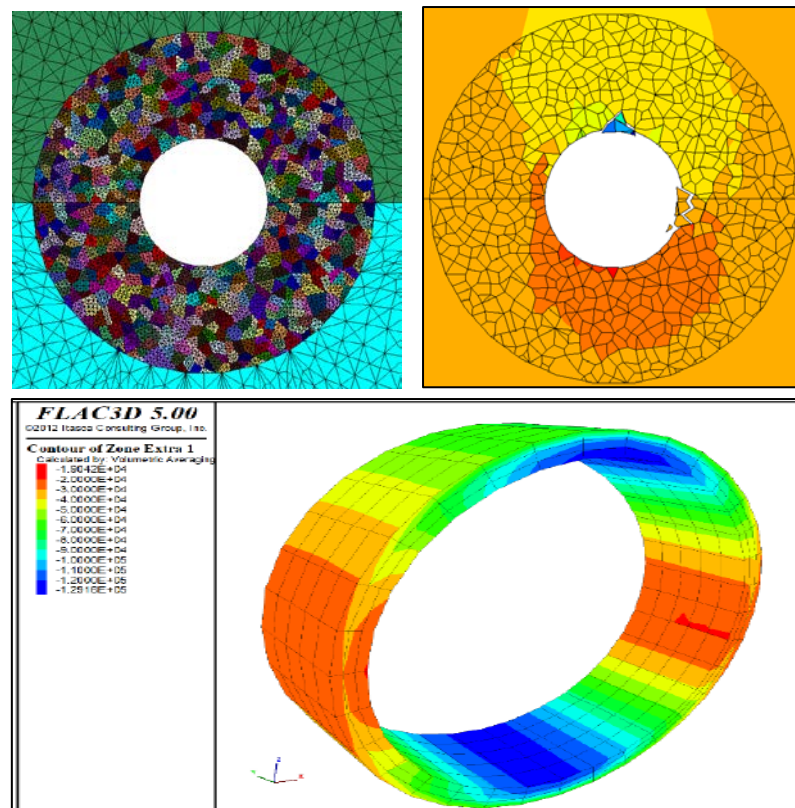
■ 引江补汉强烈岩爆洞段主要采用双护盾TBM规避强岩爆风险，施工时需及时豆砾石回填灌浆

■ 岩爆冲击荷载作用下管片结构变形与破坏模式理论



■ 不同岩爆等级下豆砾石灌浆加固时机及管片安全评价理论

- 围岩开挖卸载-管片支护-豆砾石灌浆加固作用机制
- 不同豆砾石灌浆加固时机下管片受力情况与安全评价理论



超硬岩问题预测及分布

超硬岩分类阈值

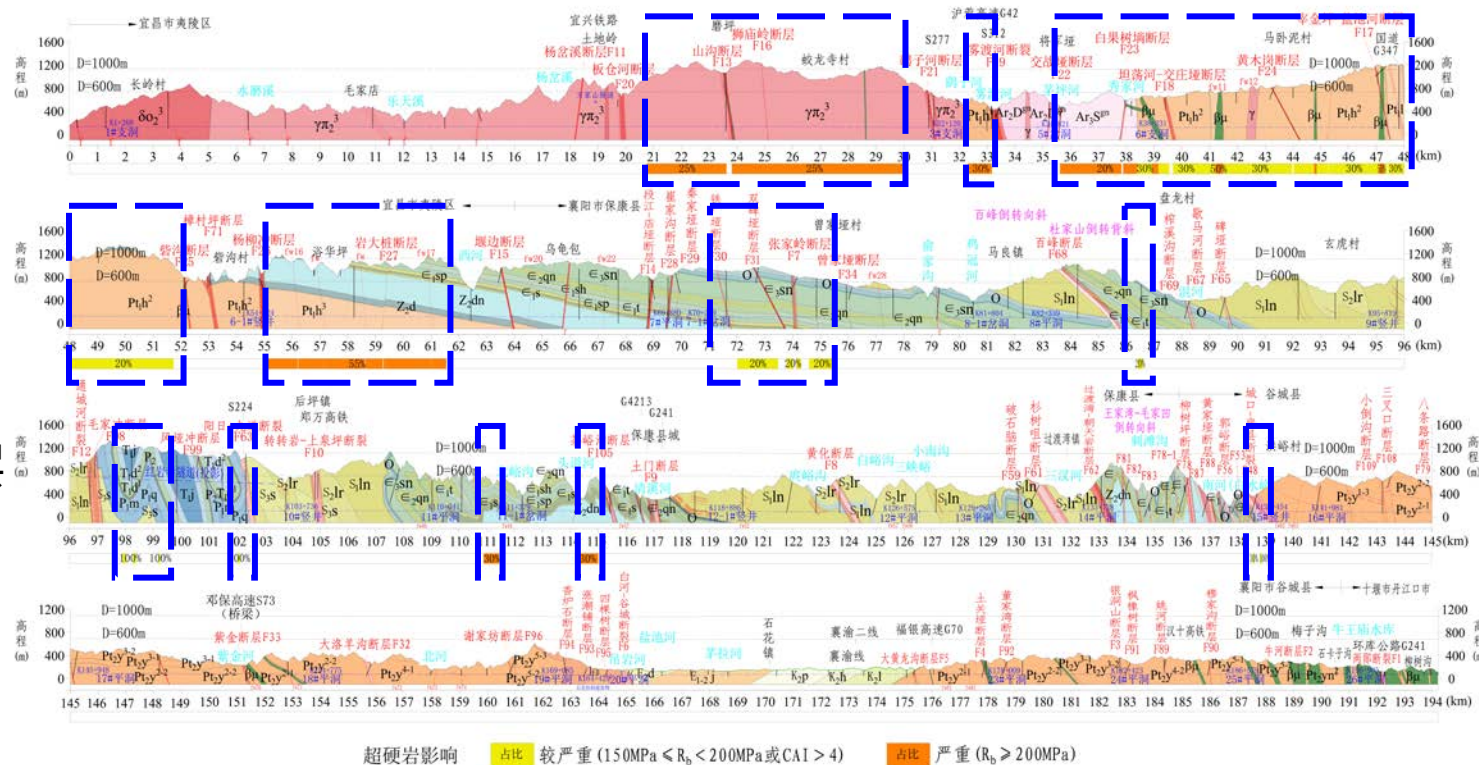
- 150MPa和200MPa为强度阈值
- CAI=4.0作磨耗性阈值

定性分析

- 地质测绘和钻探成果，初判存在超硬岩地层

定量分析

- 存在超硬岩地层针对性勘察
- 岩石抗压强度、磨耗性、等效石英含量等
- 定量分析各岩组中超硬岩的占比



➤ 黄陵断穹核部岩浆岩和片麻岩区较为集中，洞段总长12.037m，占比约6.2%

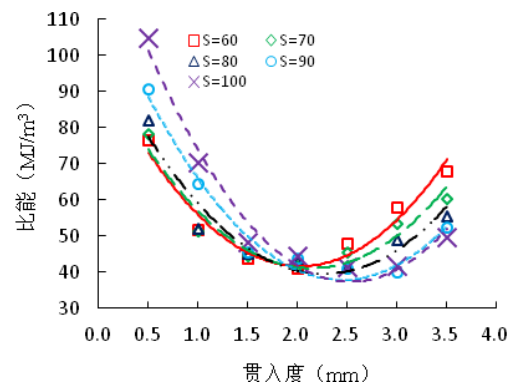
□ 超硬岩对应措施

□ 超硬岩问题—需开展的研究

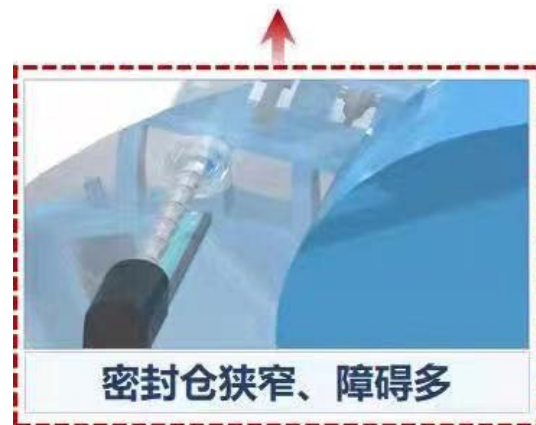
- **TBM针对性配置**：选择合适的刀具尺寸和刀间距
- **材料技术与TBM掘进控制技术创新**
 - 研发高韧、高强、耐磨刀具材料，及长寿命滚刀结构与布置形式
 - 研究TBM最优推力、贯入度及TBM掘进参数自主馈控技术
- **超硬岩TBM掘进刀盘换刀机器人的系统适应性研究**



掘进面同心圆



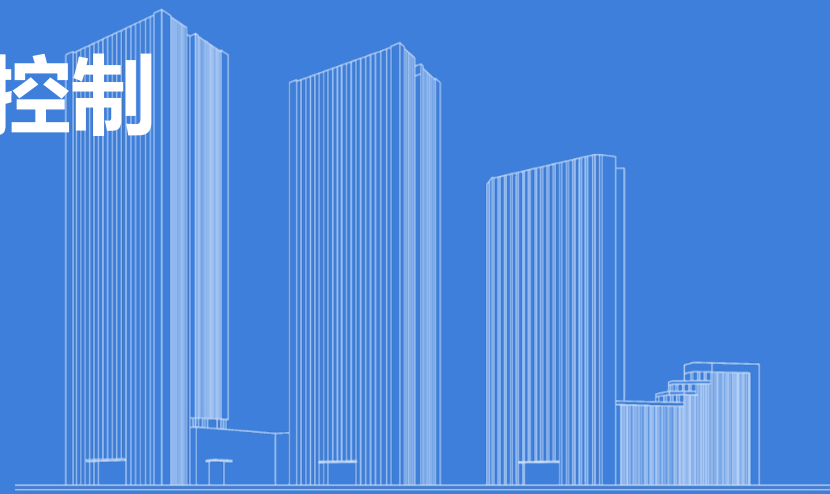
TBM滚刀切削贯入度-比能关系曲线



换刀机器人概念图



大流量超长有压输水隧洞水力控制



3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 引江补汉运行特点

超长、有压、流量大、流速小

194km 170~212m³/s 2~3m/s

首部控制研究前提 **不控流、启闭频次低**

引江补汉工程向汉江补水时一般不控制输水流量；丹江口水库结合发电调度和生态要求控制下泄流量，与引江补水共同满足汉江中下游河道内外用水。

分析1956~2018年长系列模拟调度过程，石花闸平均每年开启约1.6次，平均每次开启后持续引水约130天。

	进口水位 (m)	备注
最高运行水位	173.3	三峡正常蓄水位
最低运行水位	143.3	三峡防洪限制水位

	出口水位 (m)	备注
设计水位	88.3	黄家港490m ³ /s, 王甫洲维持正常蓄水位
最高运行水位	89.5	黄家港1680m ³ /s, 王甫洲维持正常蓄水位
最低运行水位	87.0	由羊皮滩右汊出口溢流堰控制

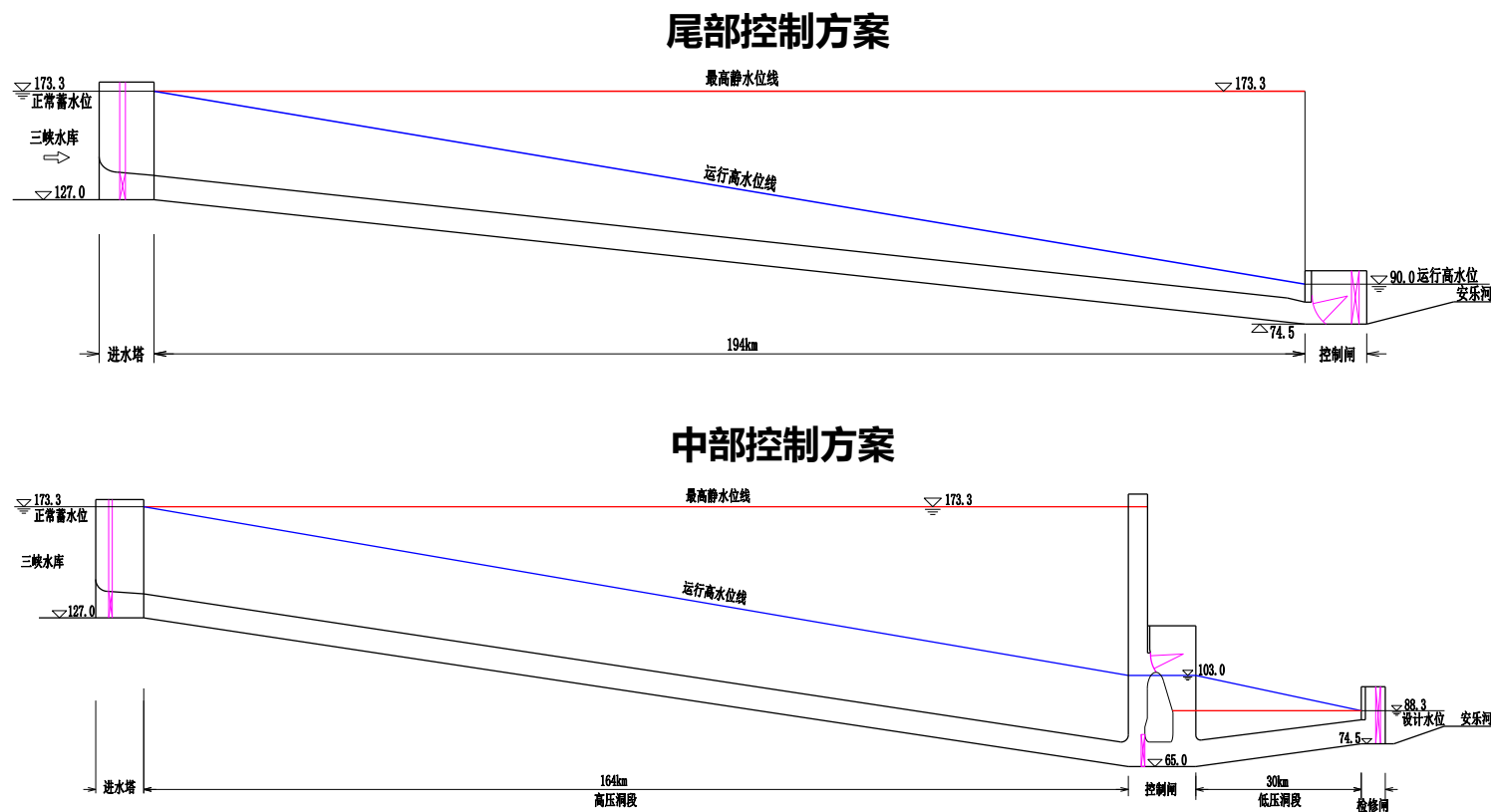
3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 传统水力控制方案

- 有压隧洞输水通常采用**尾部控制**，其优势是整个输水隧洞在任何运行方式下均为有压流，输水响应快，启闭水力过渡过程历时相对较短，有利于输水流量的控制与调度。

- 引江补汉工程为降低不引水期间后30km浅埋洞段的内水压力，将控制闸前移，采用**中部控制**，将隧洞分为前后两段。不引水期间，闸前为高压洞段，闸后为低压洞段。

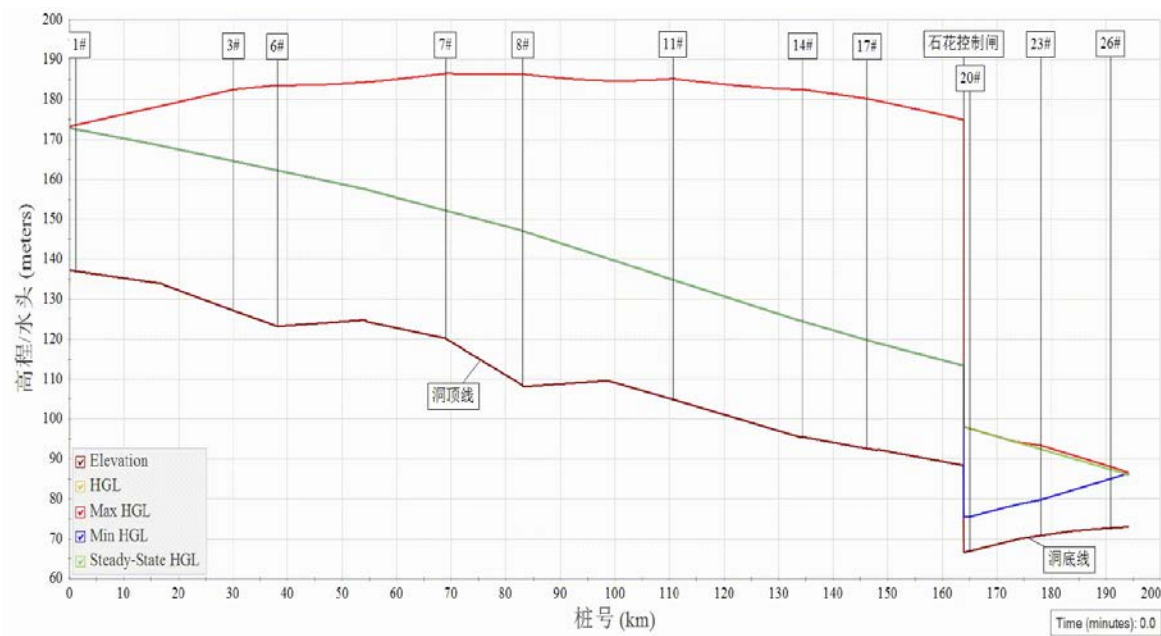
- 中部控制方案的水力特性与尾部方案本质上相同，均为**低点控制**。



3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 传统水力控制方案

- **低点控制的优势**：整个输水隧洞在任何运行方式下均为有压流，输水响应快，控制闸启闭引起的水力过渡过程历时相对较短，有利于输水流量的控制与调度。
- **低点控制存在问题**：不引水期间闸前洞段静水压力大（108m）、水力过渡过程压力变幅大（90m）、要求控制闸在小开度区间启闭时间长（30min）等。
- 为解决上述问题，结合引江补汉工程输水运行特点，提出将**控制闸前移至隧洞进口**，采用**首部水力控制方案**。



中部控制方案闭门过渡过程

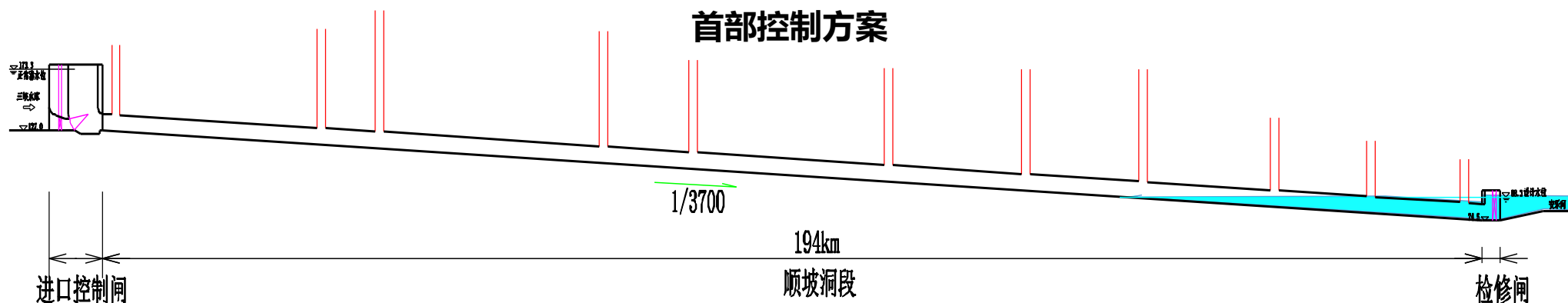
3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 首部水力控制方案

● 首部控制的优势：

- 布置简单：可取消中部控制闸，改为结合取水口集中布置；可抬高洞线高程，优化施工支洞纵坡。
- 运行简单：避免隧洞不引水期间承受高静水压力，以及启闭过程中较大的压力变幅
- 检修简单：检修抽排水量大幅减少

● 首部控制存在问题：系统启闭充/退水过程较长，且存在复杂气液两相流问题。

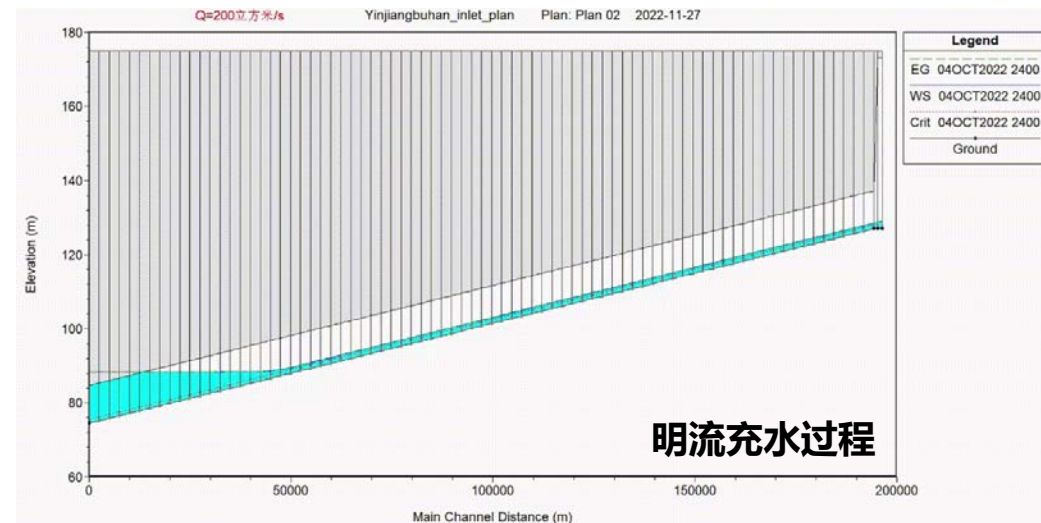
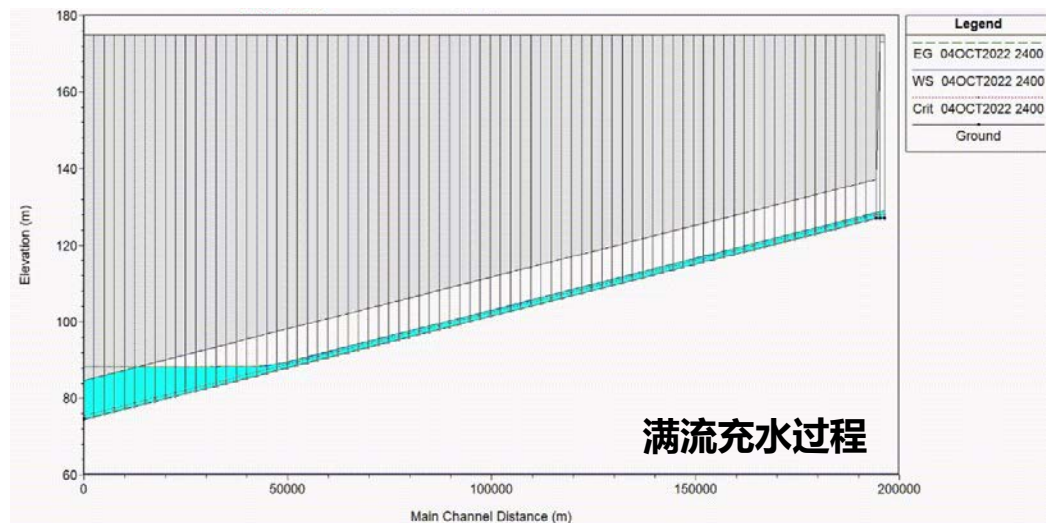


3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 首部控制关键问题

首部控制关键问题：超大长径比隧洞充水过程水气两相瞬变流及流态转换

- 无论明流充水或满流充水，均存在水气两相瞬变流及流态转换问题
- 虚设狭缝法无法考虑水流裹挟气团的影响（模拟结果与实际情况可能存在较大偏差，动图仅展示流动规律）



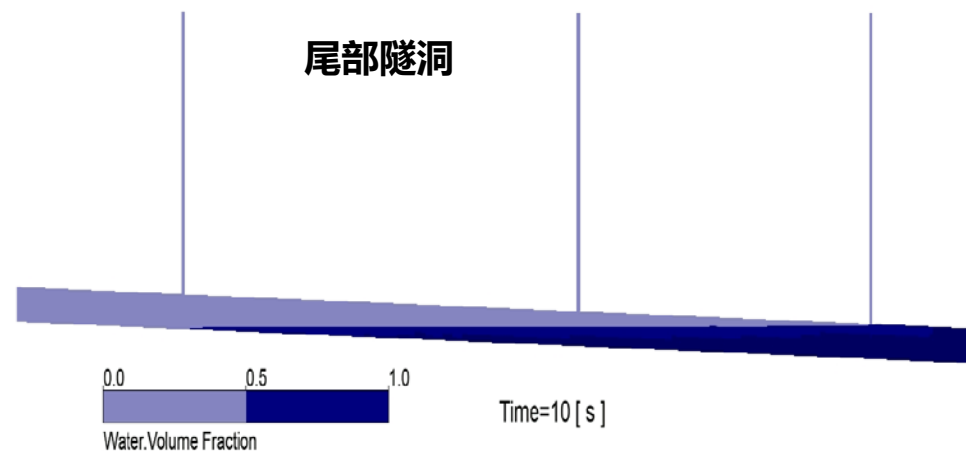
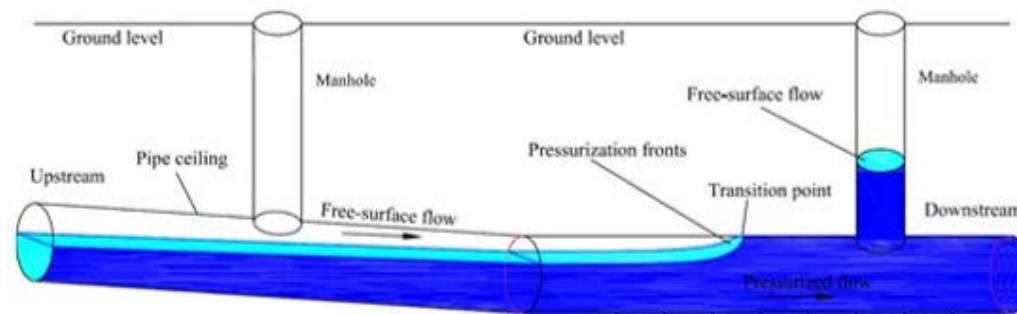
3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 首部控制关键问题

- 研究内容:**
- 首部控制方案充/退水过程水气两相非恒定流数模研究
 - 局部模型实验及验证
 - 隧洞布置优化及结构安全适应性研究
 - 首部控制闸布置与体型及闸门控制研究

- 技术难点:**
- 定量分析难，数值、物模手段有限
 - 突破规范，无设计标准与工程案例

水气耦合的动力特性演变过程复杂



3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 首部水力控制研究思路

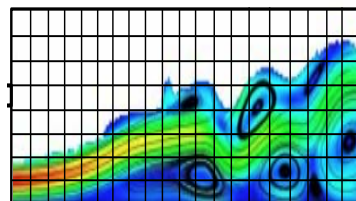
机理分析、模型实验、数值模拟相结合，数值模拟发挥关键参数量化作用

研究方法

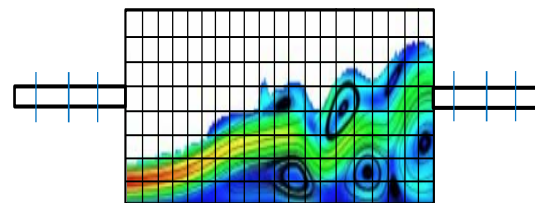
1D气液两相流法



局部3D-CFD法



1D+3D耦合CFD法

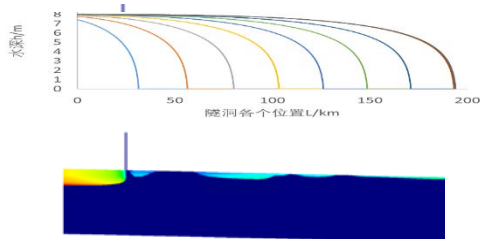


物理模型实验

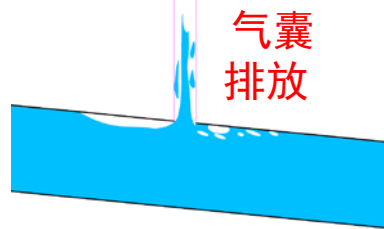


关注问题

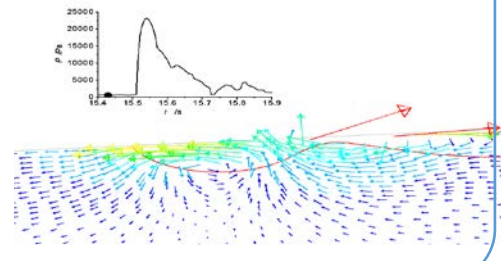
宏观流动规律
流态转换气囊形成



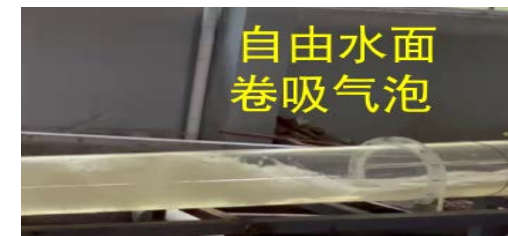
局部三维流态
气囊动力特性



整体与局部耦合流
态和波动特性



整体流态测点压强
通气流速流态特写



发挥功能

验证率定

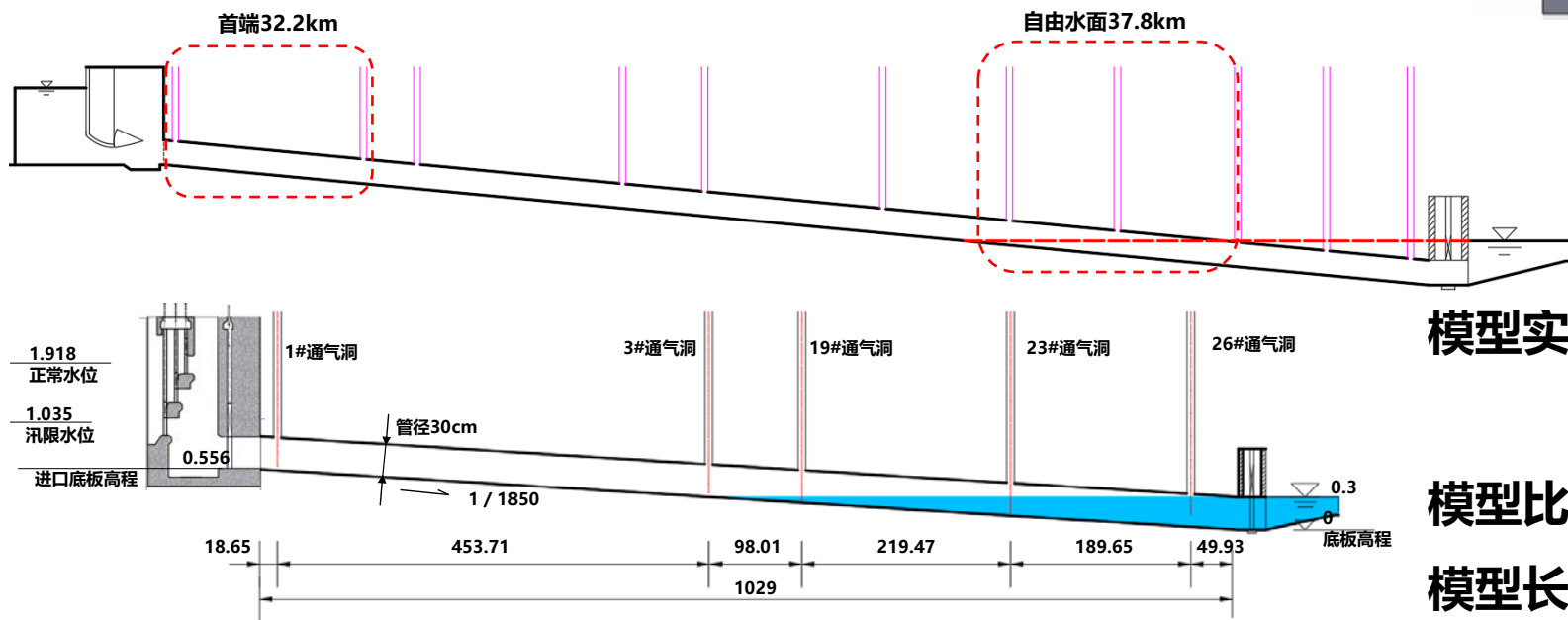
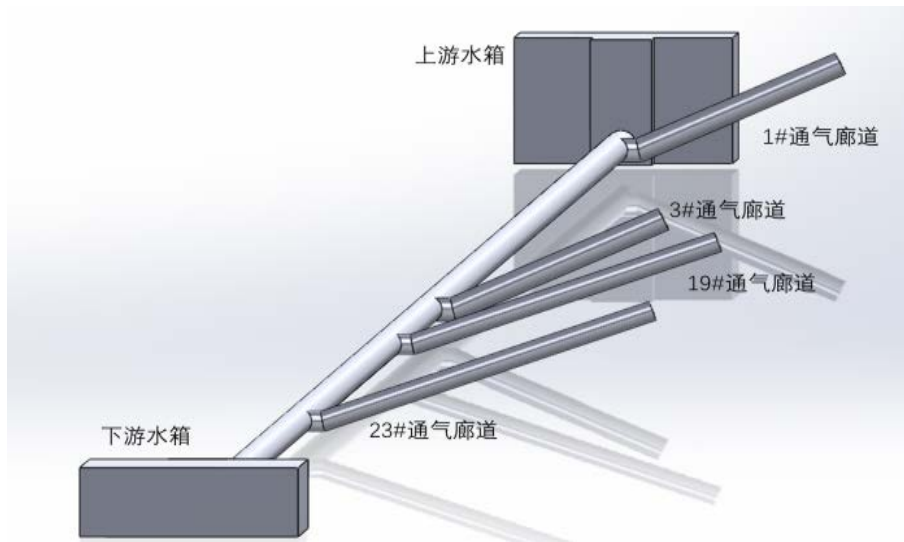
开展原型系统充水过程仿真模拟，获得流态规律、水力参数、控制策略

3 大流量超长有压输水隧洞水力控制

□ 首部水力控制研究思路

■ 模型试验方案

- 完整的揭示隧洞流态演变、水动力学参数时空演化特征研究;
- 充水过程洞内水气两相流流型、气泡聚合分裂及运动规律研究;
- 充水过程洞顶气囊收缩、扩张及排放引起的压力波动研究;
- 隧洞沿程通气洞布置优化研究。



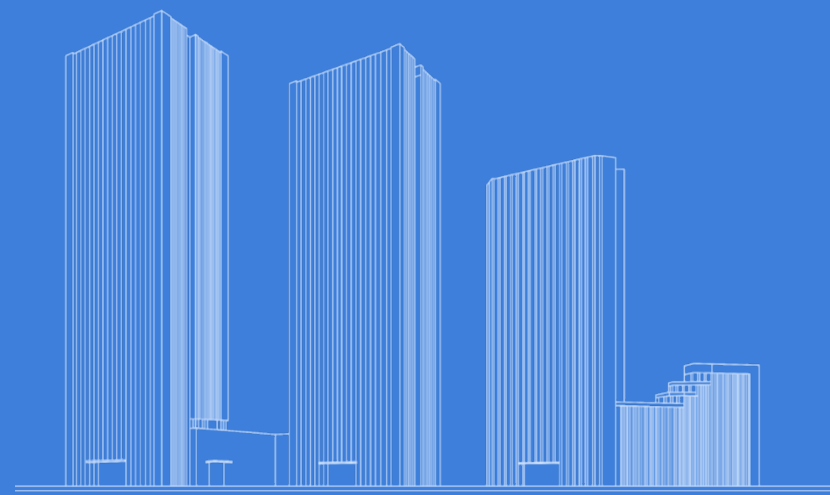
模型实验范围: 选取首部闸及32.2km隧洞+尾部37.8km隧洞

模型比尺: $\lambda_l = 68, \lambda_d = 34$ **变态模型**

模型长度: 1029m

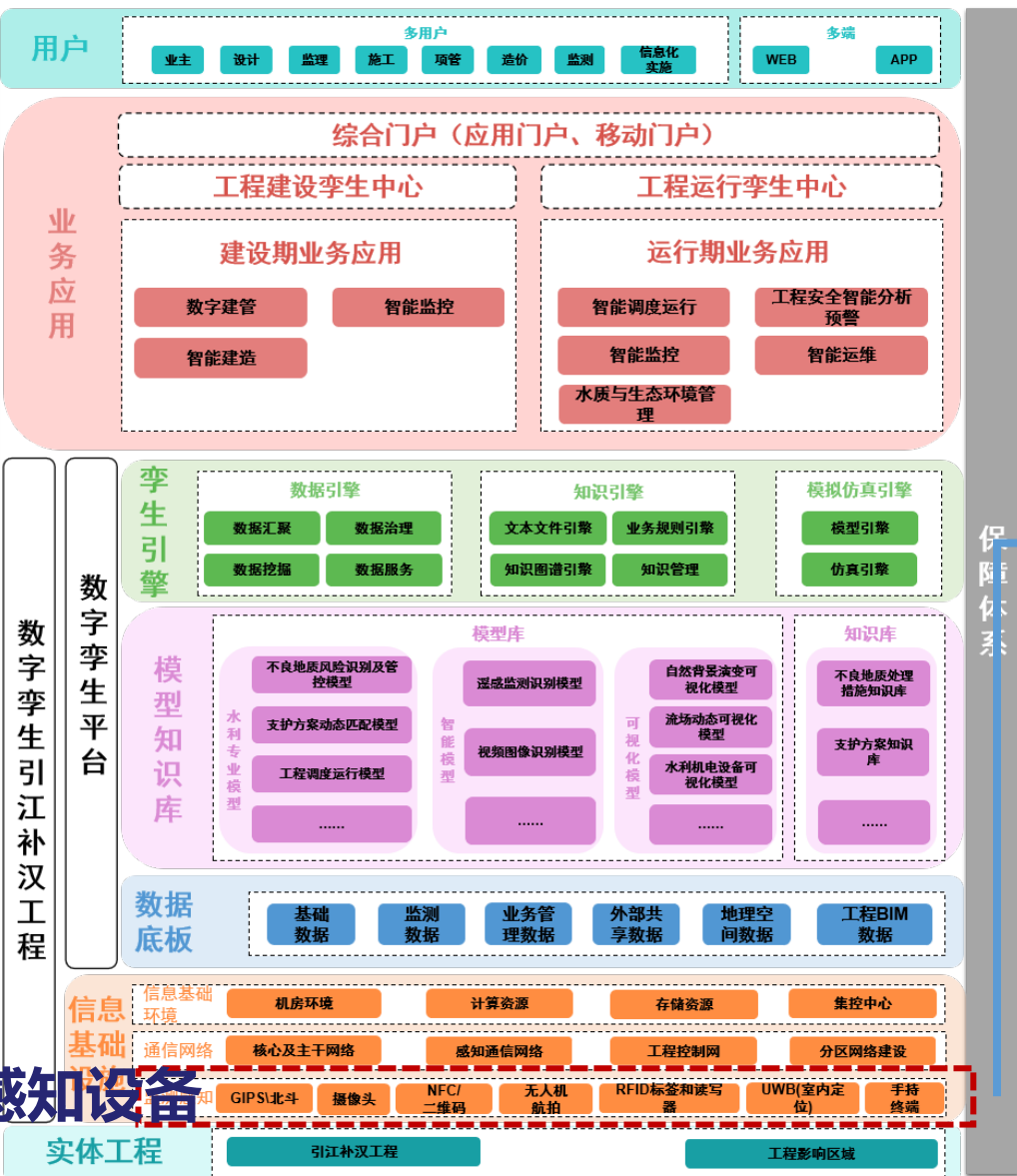


智能感知



4 智能感知

引江补汉数字孪生 - 以智能感知为基础



泛在物联感知设施

- 地表基础地理数据及三维实景采集
- 视频智能监控系统采集与集成
- 工区人员车辆位置信息集成
- 地下人员设备位置信息采集与集成
- 隧洞施工地质信息集成
- TBM施工监控信息集成
- 施工期隧洞实景影像数据集成
- 施工环境信息集成
- 建设期工程安全监测信息集成
- 施工期危险源智能监控信息集成

不良地质风险识别及管控

隧道动态支护

多源信息融合的围岩动态分级

支护方案动态智能优选

建设期

运行期

工程安全智能分析预警

智能调度运行

网络安全体系

数字孪生平台

感知设备

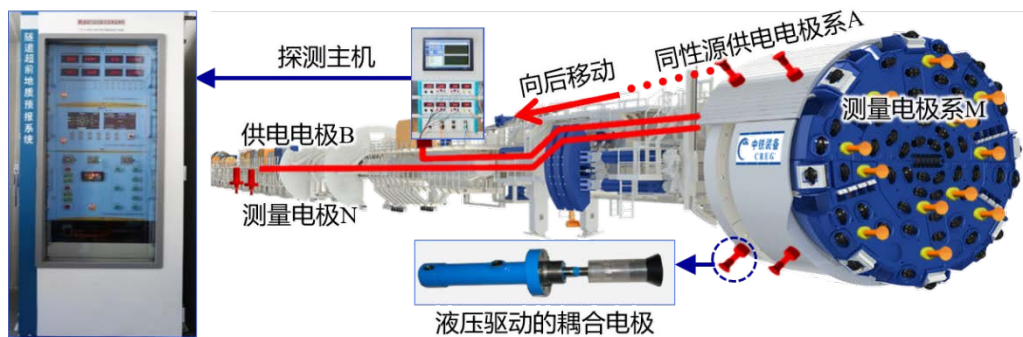
4 智能感知

超前地质预报

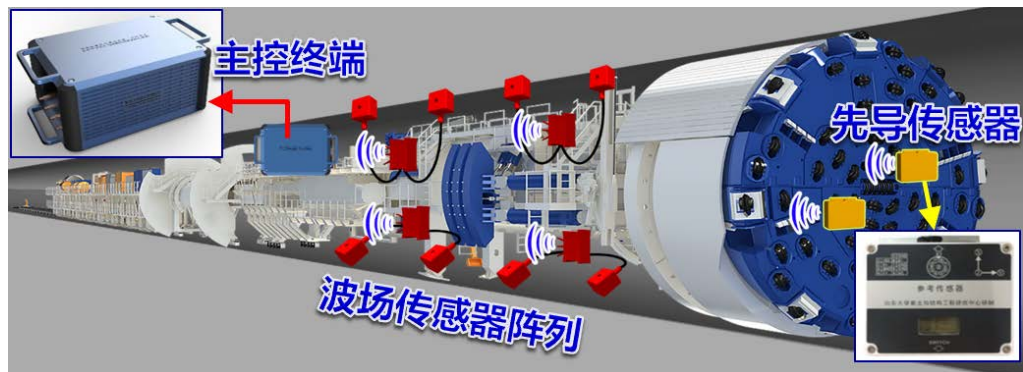
智能化超前预报装备

TBM洞段

- 超前预报设备的TBM智能搭载
- 超前预报数据的自动化采集与智能判断



激发极化超前预报系统



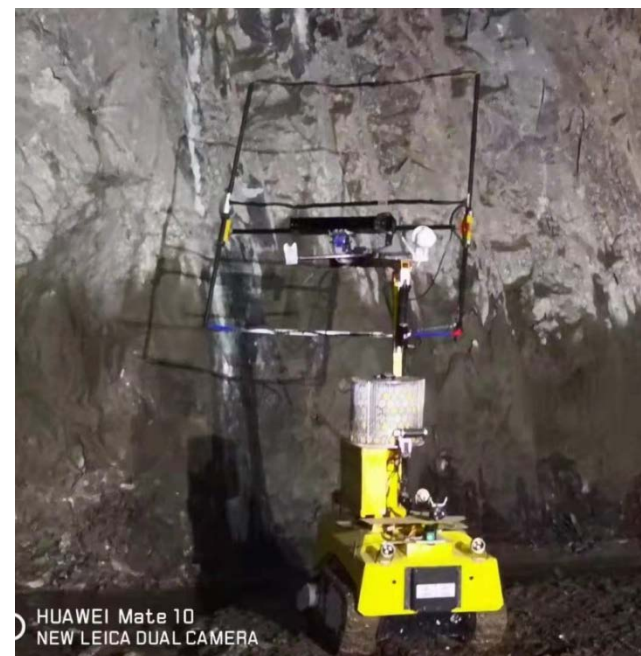
破岩震源地震波预报系统 (数据实时自动化采集并智能判断)

钻爆洞段

- 地质雷达自动化采集智能装备
- 瞬变电磁自动化采集智能装备
- 其它智能装备



地质雷达自动化采集智能装备



瞬变电磁自动化采集智能装备

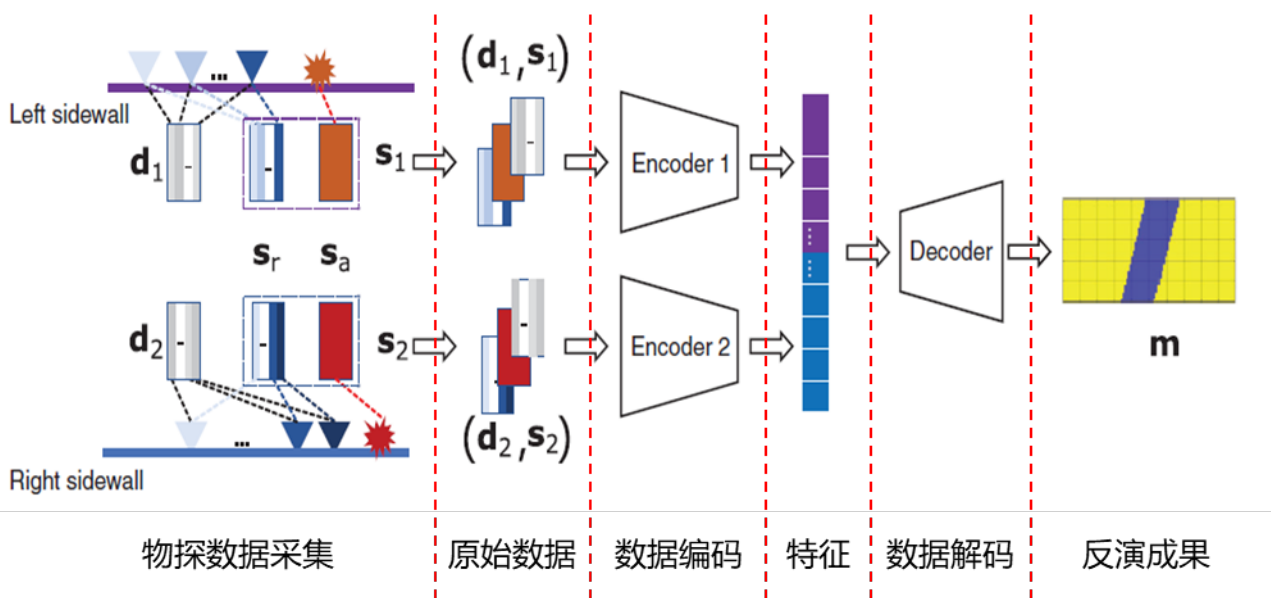
4 智能感知

超前地质预报

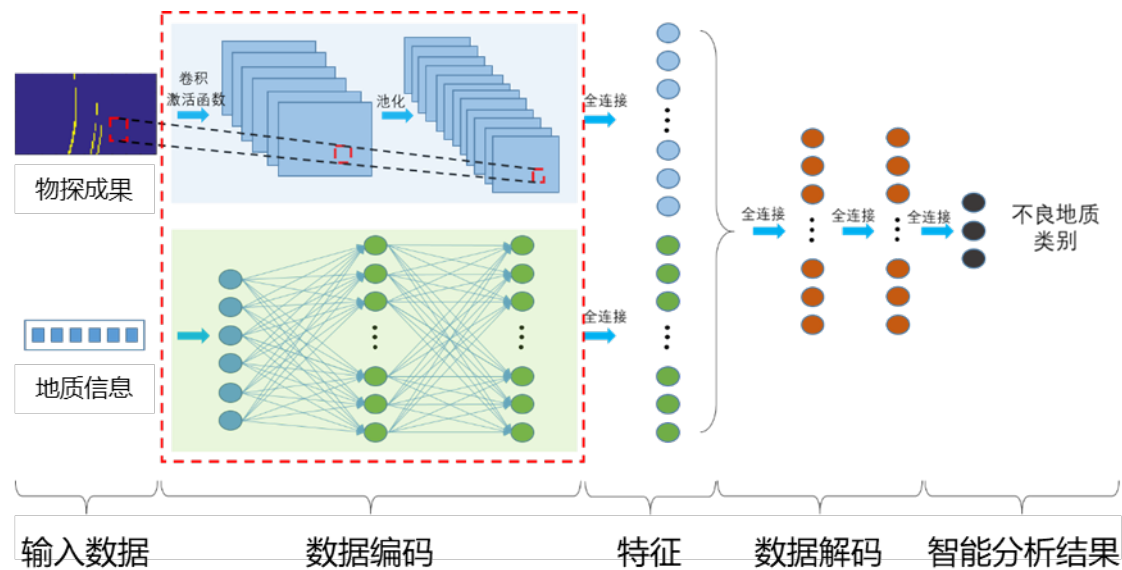
◆ 数据智能反演与分析

● 基于深度学习，建立数据集并进行神经网络模型参数训练

- 实现物探原始数据的滤波、去噪等智能处理
- 实现波速、电阻率等物性参数的智能反演
- 实现物探反演结果与地质信息的不良地质智能分析



地震波法超前预报数据智能反演流程



基于物探反演结果与地质信息的不良地质智能分析流程

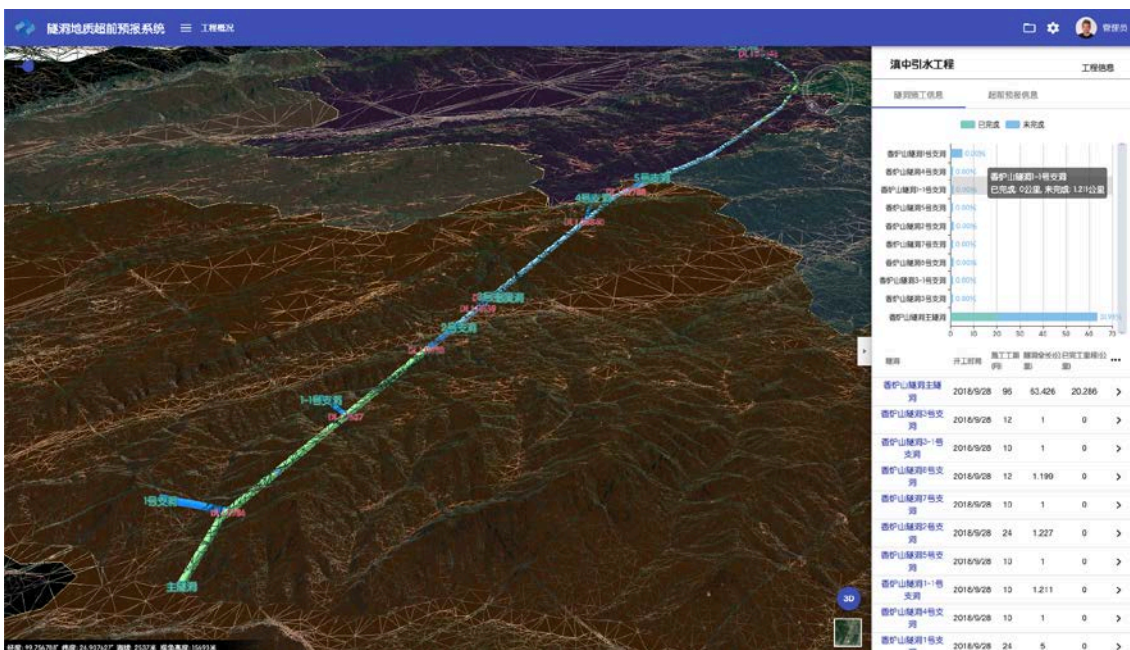
4 智能感知

□ 超前地质预报

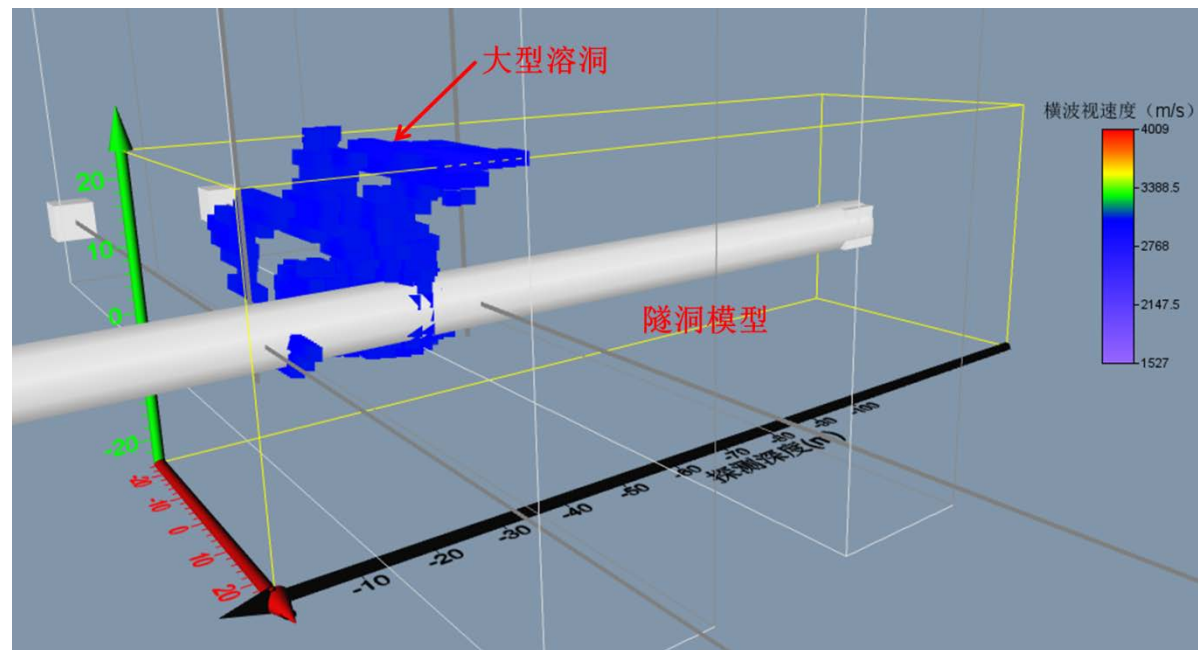
◆ 智能化成果展示与应用

● 研发超前预报信息化管理平台，用于超前预报成果的智能展示与应用

- 基于BIM模型的超前预报成果智能管理
- 物探预报成果的三维展示
- 有利于智能化预报成果的应用，指导隧洞安全施工



基于BIM模型的超前预报成果智能管理与应用

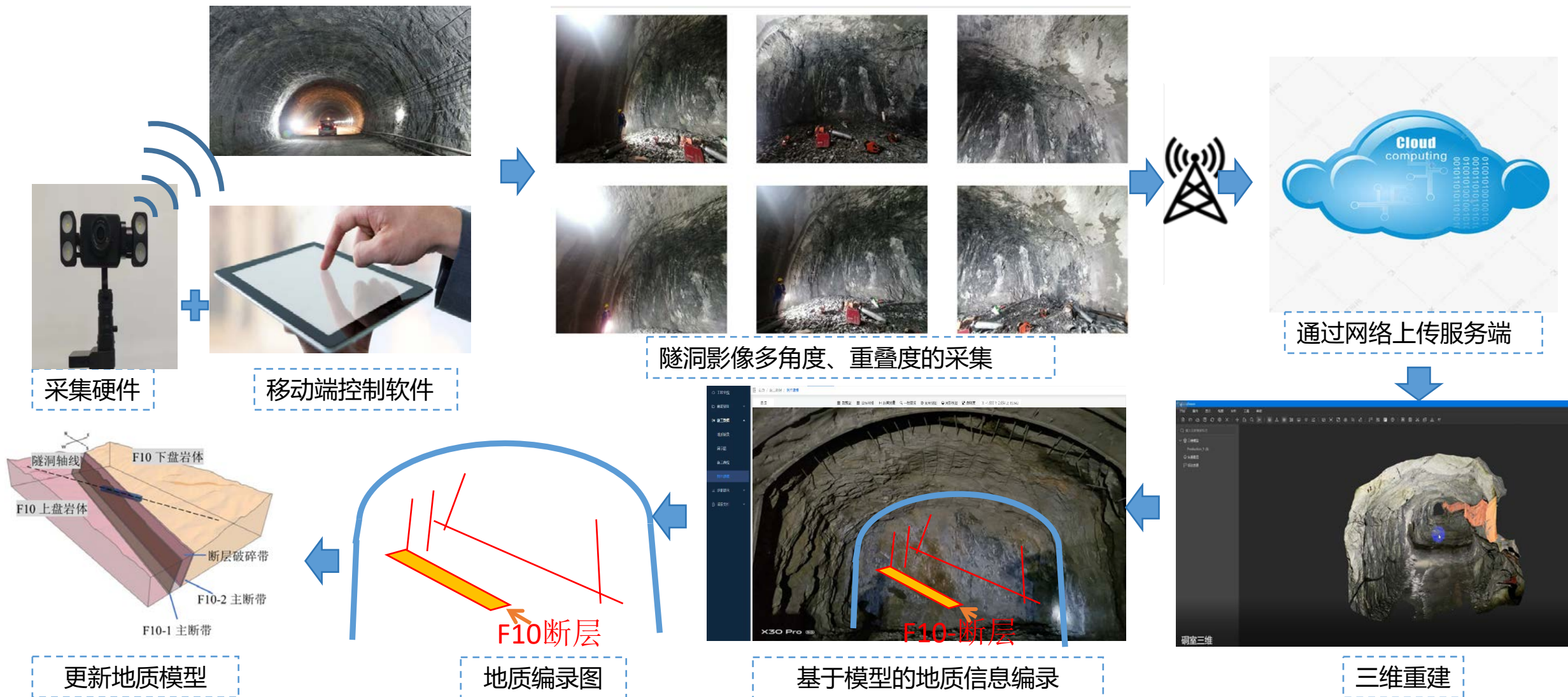


超前预报成果的三维智能展示

4 智能感知

地质信息感知

◆ 钻爆段智能编录



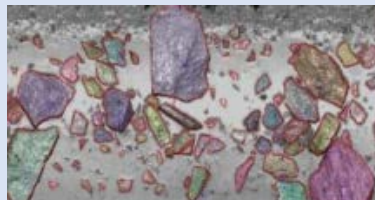
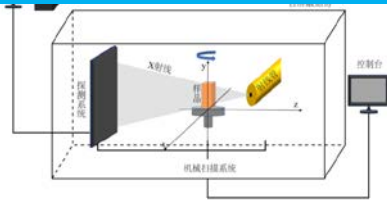
4 智能感知

地质信息感知

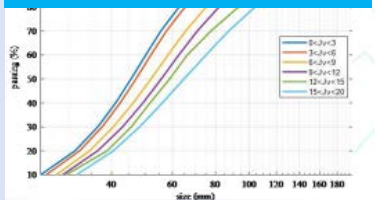
基于TBM施工段岩渣和掘进参数的围岩识别分析



渣片图像采集

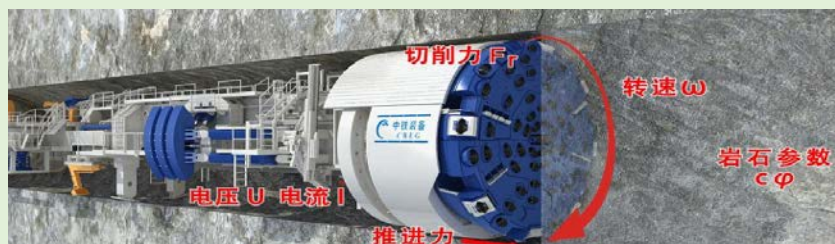


渣样特征识别



围岩类别	岩渣含量%		
	片状	块状	粉末状
I、II	75-85	5-10	10-15
III	50-75	10-25	15-25
IV	20-50	≥50	-
V	<20	≥70	-

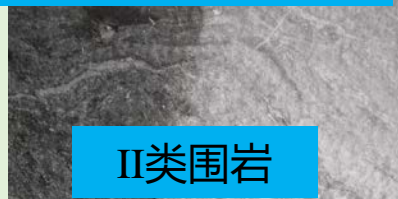
建立基于TBM岩渣及掘进参数的岩体条件识别技术



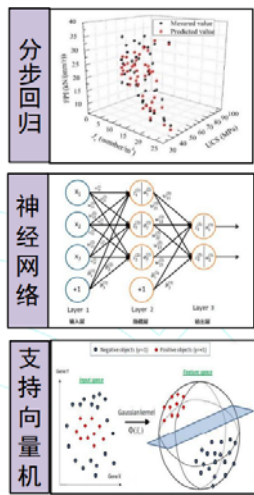
不同围岩完备丰富的岩-机基础数据库



IV类围岩



II类围岩

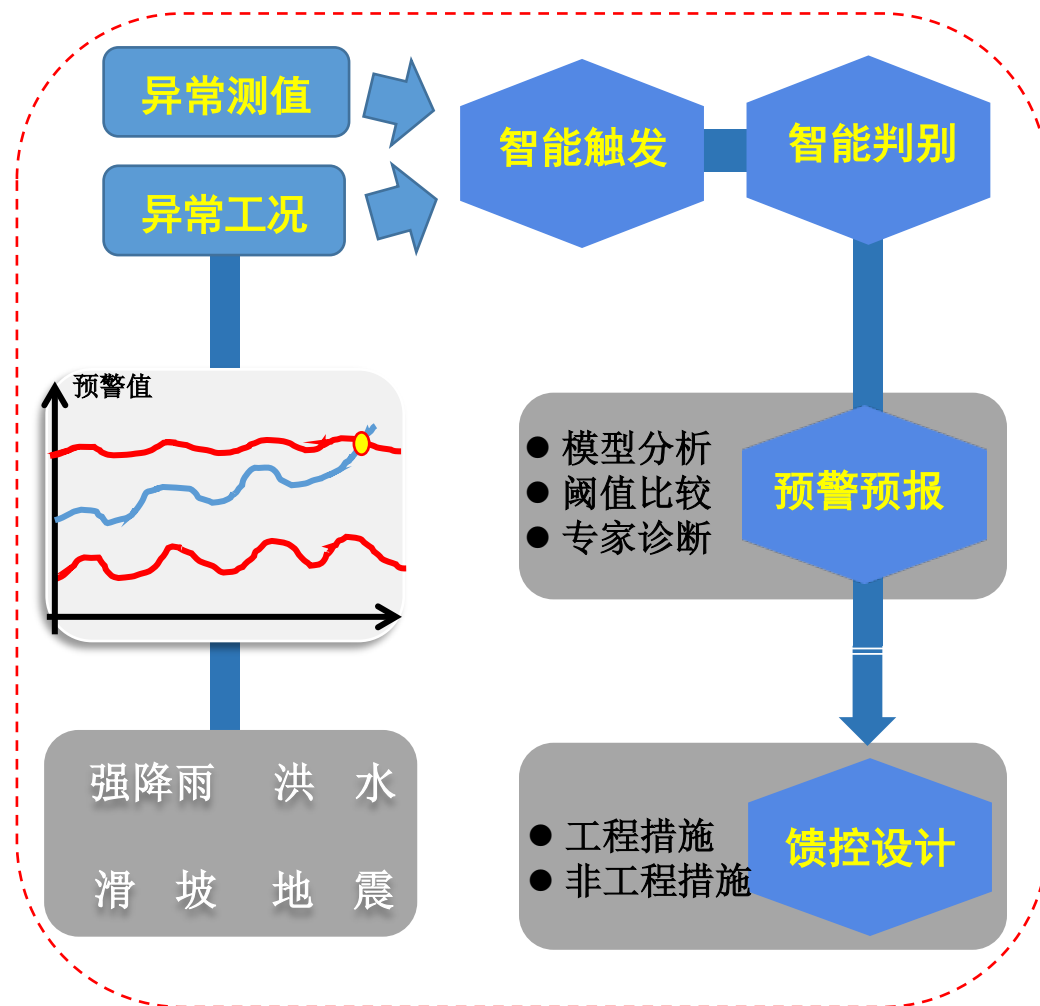


4 智能感知

□ 建设期应用

➤ 馈控设计、指导施工

- 针对取水口、输水隧洞、石花控制闸、出水口、检修排水泵站等建筑物，开展**围岩变形、渗流渗压**并兼顾主要建筑物的**应力应变、温度**等监测
- 通过监测数据与设计建议警戒值对比分析，并结合专家诊断结论，**馈控工程原型结构、检验设计成果和检查施工质量**



4 智能感知

□ 建设期应用

➤ 风险管控、动态支护

- 结合模型/知识，开展不良地质风险识别管控、隧道动态支护
- 提升地灾风险主动防控能力、隧道动态设计效率

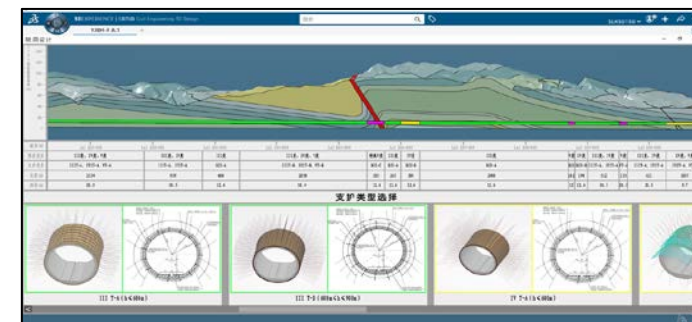


1、不良地质风险识别及管控



多源信息融合的围岩动态分级

支护方案动态智能优选



2、隧道动态支护

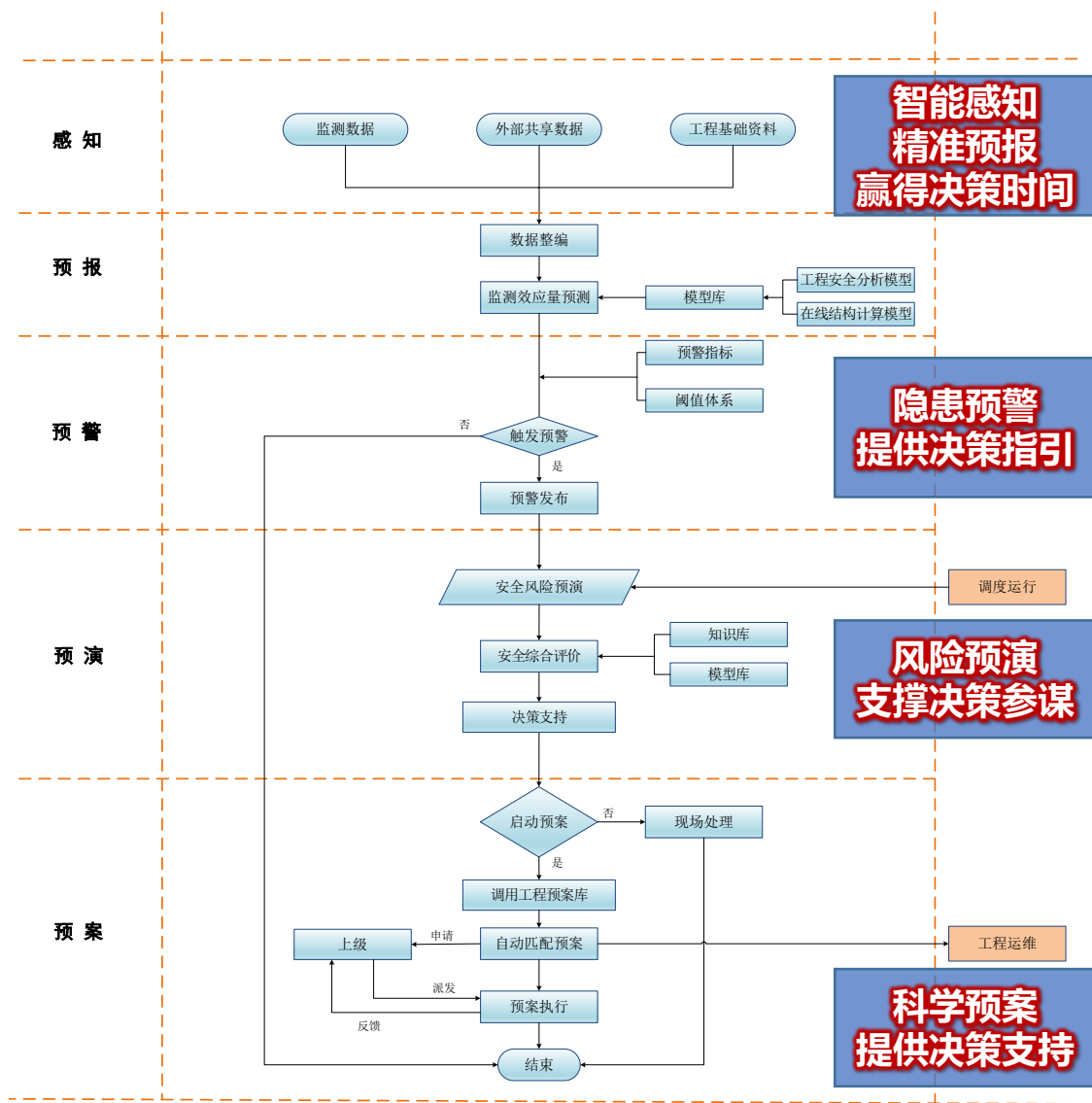
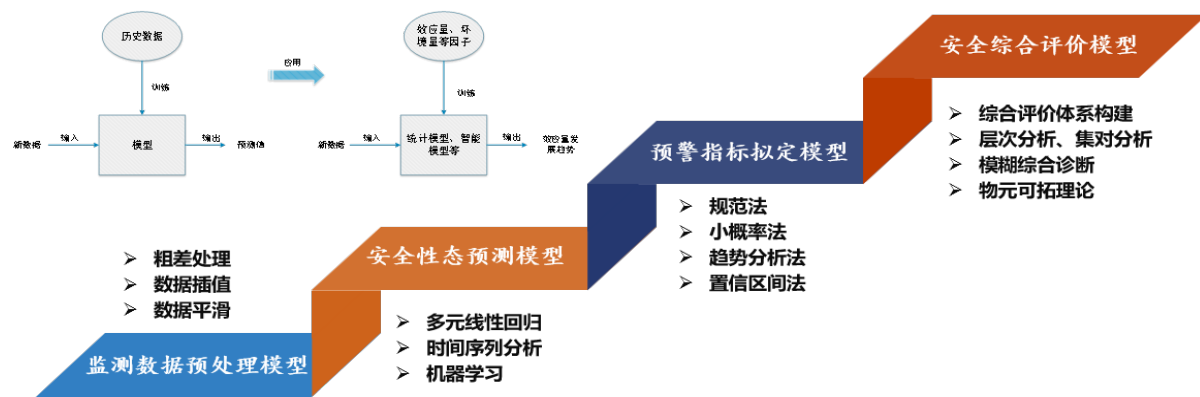
4 智能感知

运行期智能监测

工程安全“四预”应用

结合引江补汉总干线输水隧洞工程全生命周期安全监测实际需求、设计建议的监测数据警戒值分级表、石花闸弧门流激振动风险评估结果，实现：

- ✓ 预测：利用历史和实时监测数据开展工程安全性态预测
- ✓ 预警：建立工程预警指标分级管理体系实现自动预警
- ✓ 预演：对工程预案进行动态预演、综合评价和互馈修正
- ✓ 预案：分析应急响应等级，推荐处置措施



4 智能感知

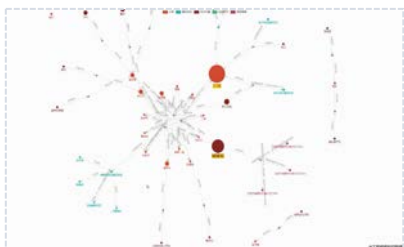
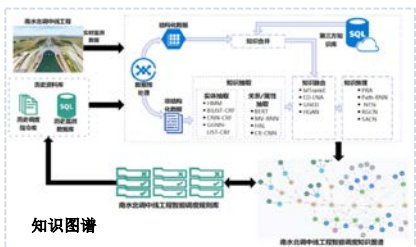
运行期智能监测

智能调度运行“四预”应用

基于调度专业模型库和知识库，实现水量调度计划制定、水量/水位预警、调度过程预演、调度预案生成“四预”应用：



核心 - 专业模型库
机理数学模型
人工智能算法



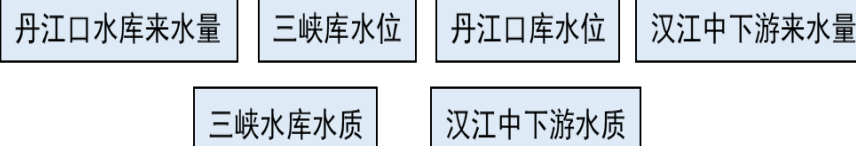
水量调度计划生成模型

工程水动力仿真模型

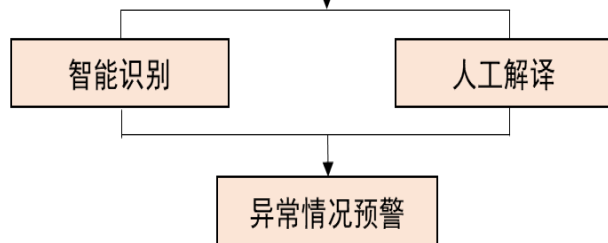
运行控制指令生成模型

工程调度运行评价模型

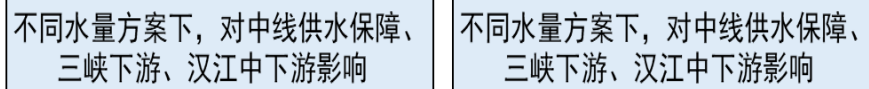
预报



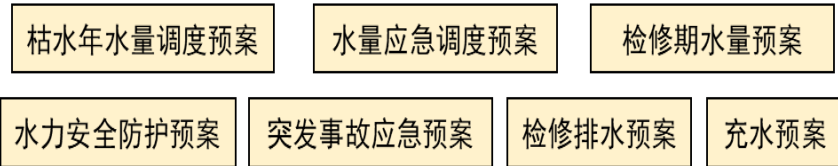
预警



预演



预案



An aerial photograph of a large concrete dam with multiple spillways, situated in a valley. The water behind the dam is a vibrant turquoise color. In the background, there are blue mountains under a sky filled with white, fluffy clouds. The foreground shows some greenery and infrastructure like roads and power lines.

谢谢!
THANKS