

地铁隧道结构服役性能 感控技术与应用

报告人：朱合华

2022.08.24

一 研究背景

二 结构服役性能感知

三 保护区“空-天-地” 巡查防护技术

四 结构服役性能诊断平台

五 知识产权与工程应用

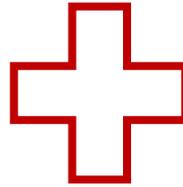
检测

由“表”及“里”

衬砌**表观**病害高精度
智能自动识别

“表”

隧道**断面变形**高精度
移动快速测量



隧道**浅层**潜在剥离
红外热成像检测

“里”

混凝土**裂缝深度**
激光超声快速检测



实现了**全覆盖、高效率**的隧道结构病害精准检测

关键技术1：衬砌表观病害高精度智能自动识别

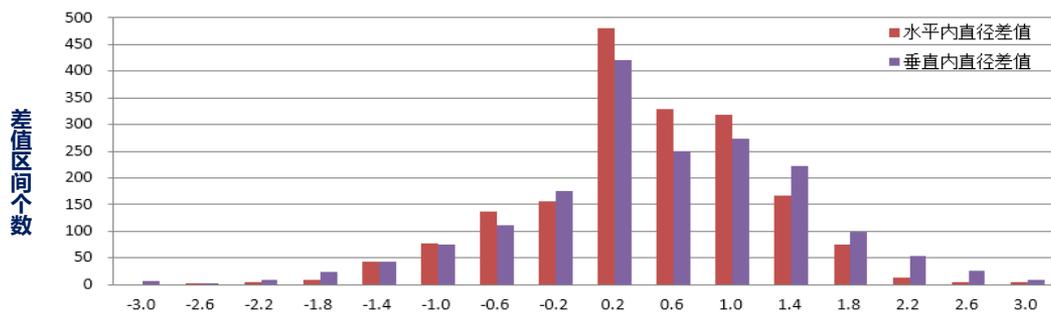
- 隧道结构检测**数据海量**，病害形态复杂，人工及常规算法识别效率低、精度差，通过**机器学习**、**试验修正**等方法，实现病害快速筛查与高精度识别。



表观病害识别总体流程

关键技术2：变形高精度移动快速测量技术

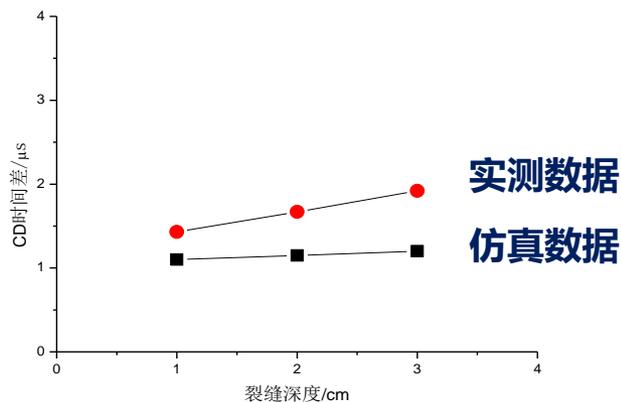
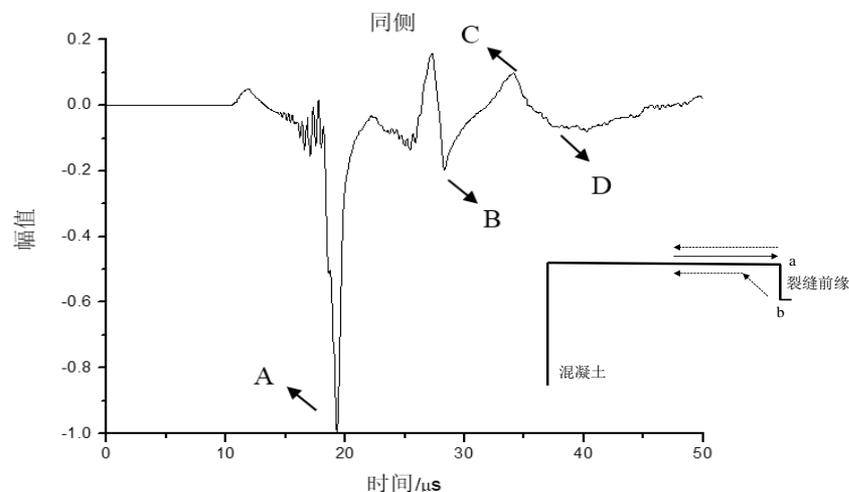
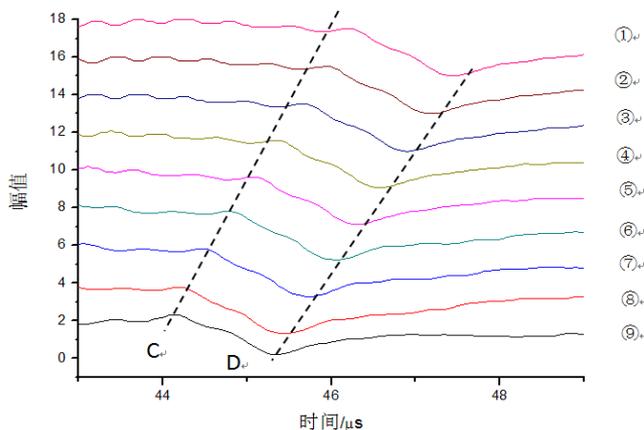
- 基于距离最小二乘法椭圆曲线拟合，建立了激光扫描**噪点迭代自动剔除方法**，构建以点激光数据为基准的**点-线激光**点云数据融合算法，实现管片环变形快速测量，测量精度 $\pm 2\text{mm}$ 。



1820环两次复测精度达到 $\pm 2\text{mm}$

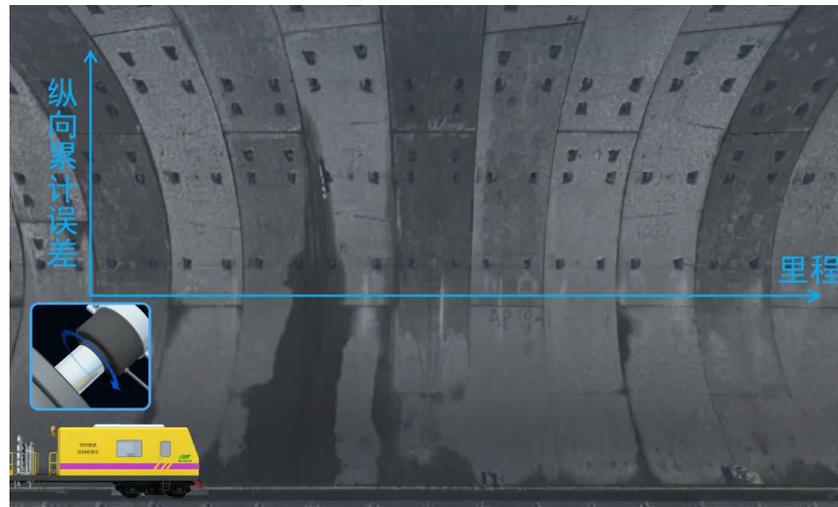
关键技术4：内部病害非接触快速检测技术

(1) **混凝土裂缝深度**：通过数值分析、模型试验，探究了激光超声在混凝土缺陷处的传播、衰减规律，建立了裂缝深度与裂缝前缘次声波回波周期的线性关系，**提出了**管片裂缝深度的非接触式快速检测方法。



关键技术5：隧道受限空间高精度**组合定位技术**

- **构建了**时间序列反向修正精密里程和图像特征辅助校准的**组合定位技术**，可实现隧道纵向**移动厘米级定位**，解决了动态测量中历史病害**数据精确匹配难题**。



L

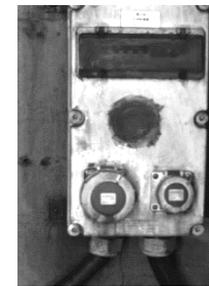
位置特征代表物



百米标



指示牌

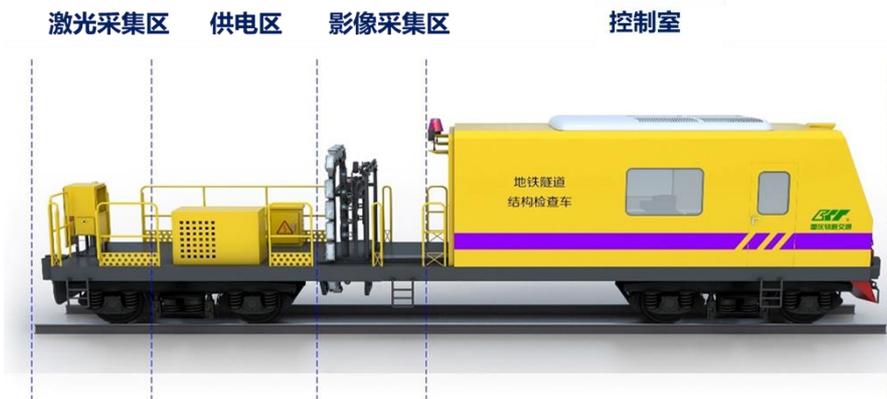


设施设备

集成研发轮轨式地铁隧道结构检测车

集成了上述关键技术，研发轮轨式地铁隧道结构检测车，实现表观病害、轮廓变形等病害非接触、快速、高精度检测，适用于隧道定期、专项、重点检测。

- ✓ 表观病害：裂缝、渗漏水、剥落剥离、错台、接缝、掉块等
- ✓ 轮廓变形：变形、侵限
- ✓ 内部病害：钢筋锈蚀、浅层潜在剥离等
- ✓ 裂缝宽度识别精度：0.1mm
- ✓ 检测速度：0~30km/h（图像检测系统80km/h）



模块化、集成化设计

研发地铁隧道结构智能巡检机器人

集成**高精度定位**、**机器视觉**、**前端计算**等关键技术，研发了无人自主驾驶的地铁隧道结构智能巡检机器人，通过隧道结构智能巡检机器人云控制平台，实现了结构巡检**自主规划**、**智能跟踪**、**前端识别**、**实时传输**。



巡检机器人组成部分



线阵相机采集系统



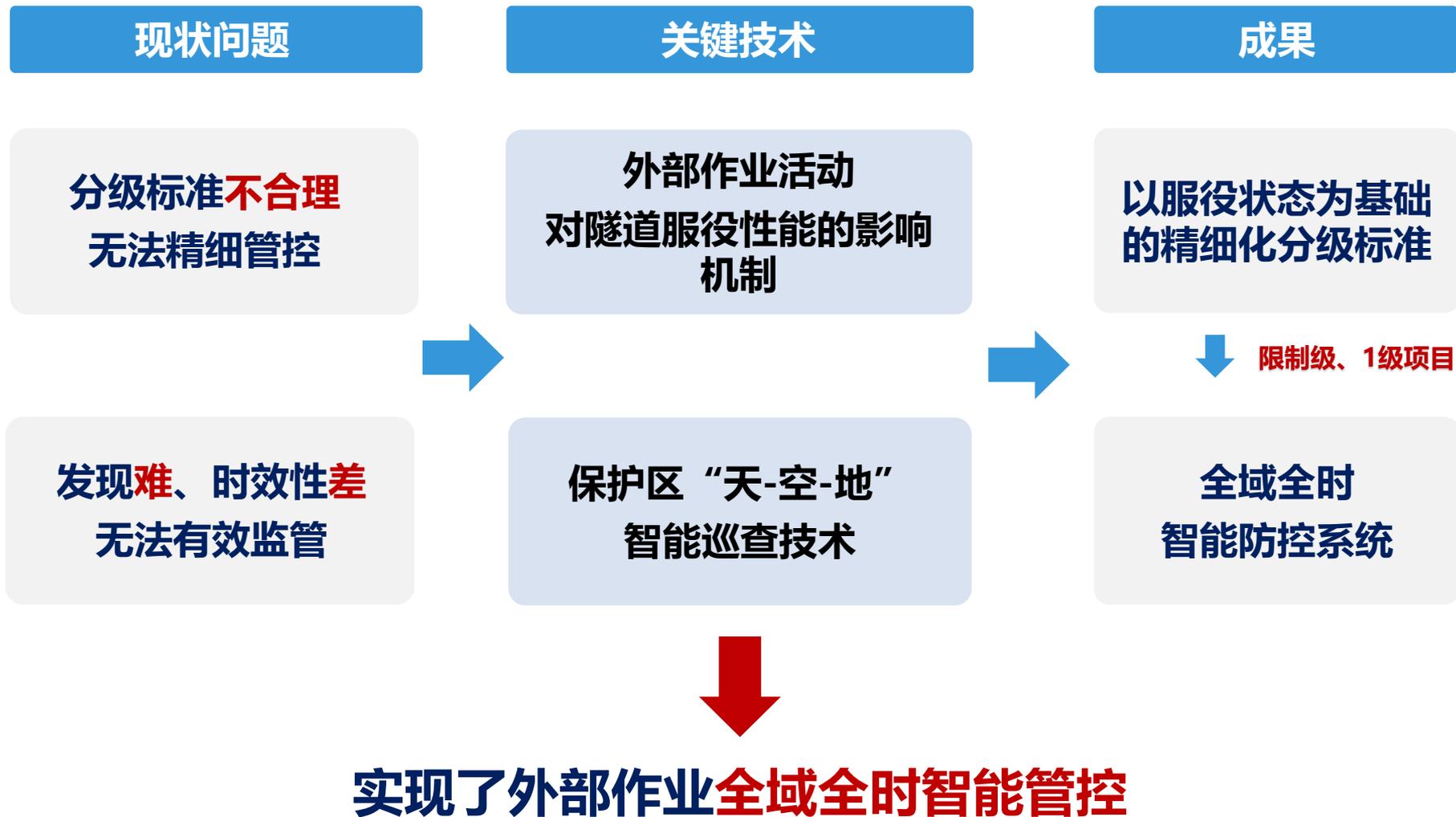
云平台



机器人实物

- 一 研究背景**
- 二 结构服役性能感知**
- 三 保护区“空-天-地” 巡查防护技术**
- 四 结构服役性能诊断平台**
- 五 知识产权与工程应用**

保护区“空-天-地” 巡查防护技术



关键技术1：外部作业活动对隧道服役性能的影响机制

- 综合数值分析、工程实测验证等手段，研究了基坑、隧道上下穿、堆卸载、桩基等外部作业**对既有隧道结构的影响规律**，揭示外部作业的影响机制。



基坑开挖

开挖类型、开挖深度、与隧道水平净距



近接穿越

穿越类型、穿越位置、与隧道净距



堆土卸载

加卸载类型、荷载水平、与隧道净距



桩基施工

桩基类型、打桩深度、桩径、与隧道净距

关键技术2：保护区外部作业精细化分级标准

- 结合外部作业影响机制，提出以隧道服役状态为基础的**保护区精细化分级标准**，依据作业类型、方式、范围、与隧道间相对位置关系和结构状态，外部作业划分为**4级**。

主要
分级
指标

既有
隧道
服役
状态



基坑开挖

开挖深度、与隧道水平净距

近接穿越

穿越类型、穿越位置、与隧道净距

堆土卸载

荷载类型、荷载水平

桩基施工

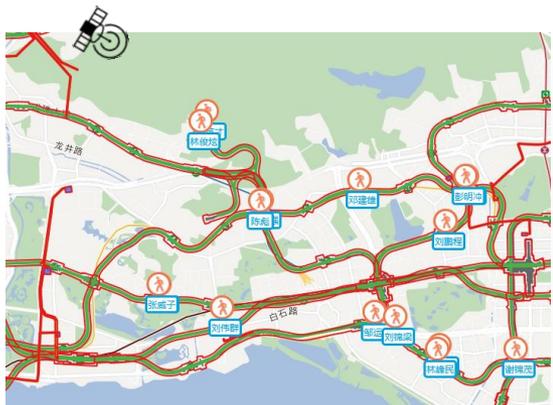
与隧道水平净距

关键技术3：保护区“天-空-地”智能巡查技术

■ 融合北斗卫星、5G通信、高位视频监控、移动终端等技术，构建了保护区立体式防控技术体系，实现了外部作业“天-空-地”全域全时智能管控。

1 天

采用北斗卫星定位技术、5G通信传输技术建立了保护区巡查覆盖统计方法、人员考核机制和监管项目面积测算方法



2 空

采用高位视频监控、无人机图像采集技术建立了保护区无人化智能巡查方法



3 地

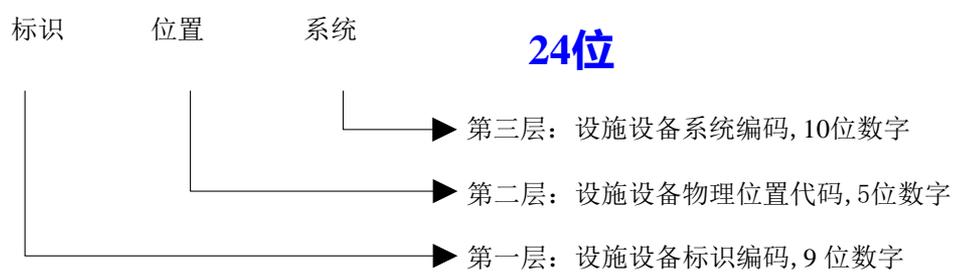
采用洞内外数据互联互通技术建立了隧道内外联合巡查方法



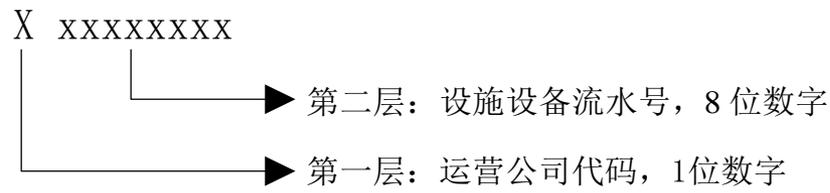
- 一 研究背景**
- 二 结构服役性能感知**
- 三 保护区“空-天-地” 巡查防护技术**
- 四 结构服役性能诊断平台**
- 五 知识产权与工程应用**

关键技术1：多源数据配准融合方法

■ 针对洞内外数据标准不统一导致的“孤岛效应”，构建隧道结构病害、洞内外监测、外部作业等多源数据分类标准与编码体系，结合二维码实现隧道建设-运营、洞内洞外多源数据融合。



设施设备编码结构图



设施设备标识代码结构图

设施设备唯一编码



基于二维码的数据融合与检索

关键技术2：洞内外多源数据融合与互联互通技术

- 提出多源数据编码体系与空间位置融合的洞内外数据互联互通技术，实现结构病害、变形与外部作业、监测等数据无缝对接，为结构安全分析提供数据支撑。



洞外开挖、降水



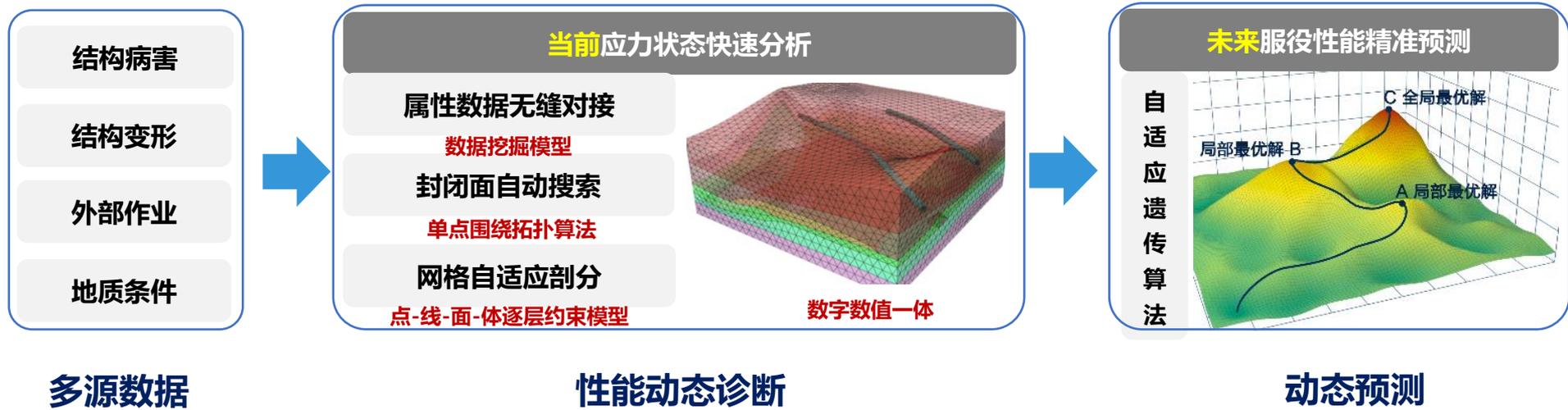
相对位置



洞内结构变形、漏水

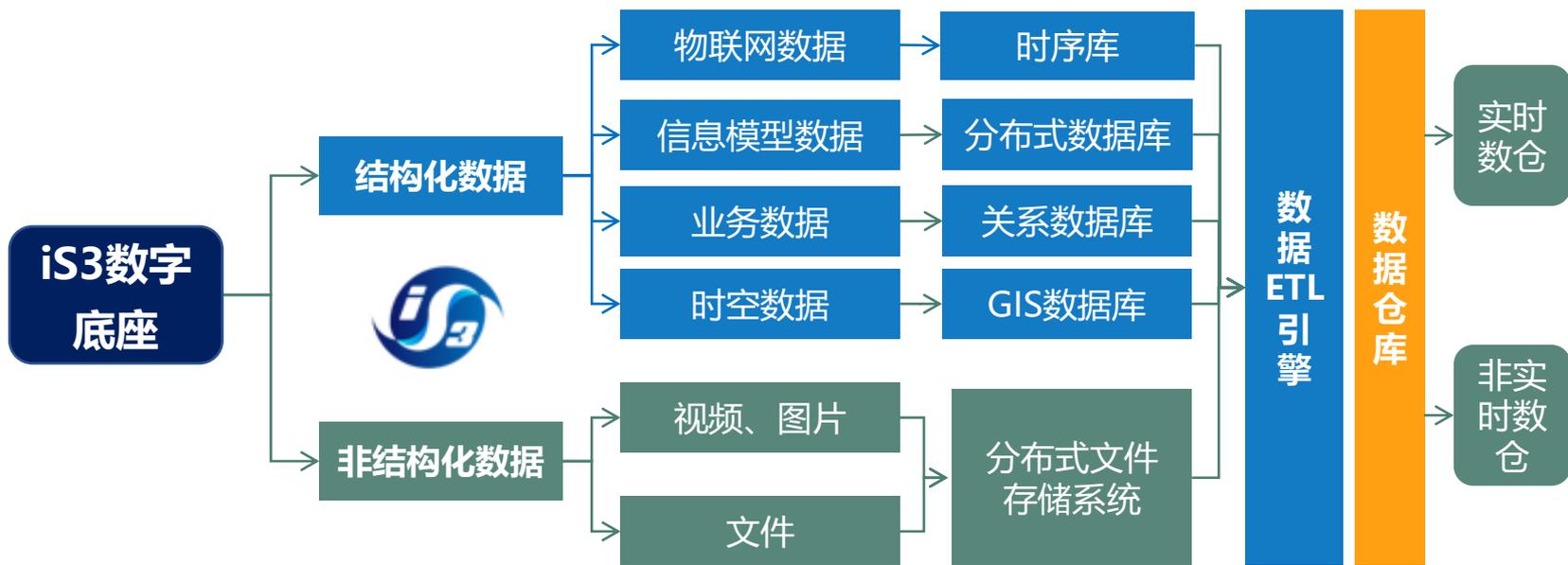
关键技术3：结构服役状态动态诊断与预测方法

■ 提出隧道-地层-外部工程属性数据自动提取的有限元计算模型创建方法，构建岩土体位移反演的自适应遗传算法，动态分析隧道结构服役性能随外部作业的演化规律，实现结构**安全动态预测**。



关键技术4：iS3数字底座

■ 针对洞内外数据难融合、动态诊断预测不精准难题，基于iS3数字底座技术实现多源异构大数据的**采集、存储和分析**，为动态诊断和分析提供标准化数据接入和实时分析能力。



集成研发了全寿命周期地铁隧道结构安全管理平台

- **建立建设-运营期数据互联互通、洞内外数据，结合结构安全风险与隐患双重机制的应用及多元融合的数据集成技术，集成开发全寿命周期地铁隧道结构安全管理平台。**

