

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

岩体结构探查方法与 危石预测系统

刘洪亮

单位 山东大学
日期 2018年9月



➤ 山东大学采用徕卡产品开展大量地下工程检测工作，取得众多成果

工程名称	工程评价
四川成兰铁路	中国最难修建山区铁路之一
成昆铁路特克隧道	强岩溶发育施工决策困难
新京张铁路正盘台隧道	2022年冬奥重点配套工程
吉林引松供水工程	水利部重点工程
江西永莲隧道	卡脖子工程，国内罕见江西最难
山东浆水泉隧道	全国双洞单向四车道最长的山岭公路隧道，“山东第一隧”
... ..	

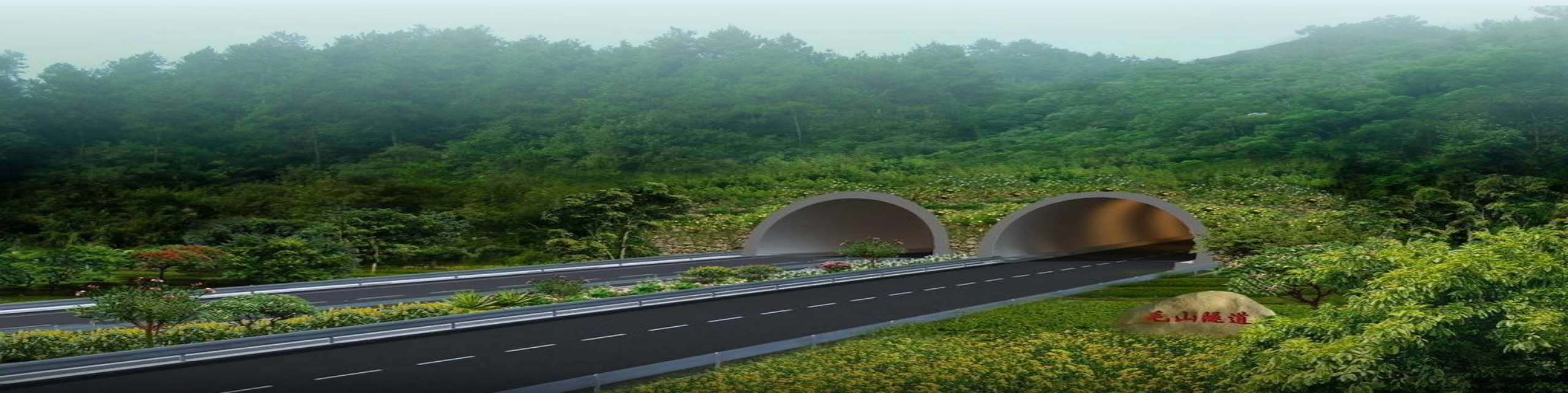


目 录

- ◆ 研究背景与意义
- ◆ 岩体结构信息获取设备
- ◆ 岩体结构信息分析软件
- ◆ 工程应用

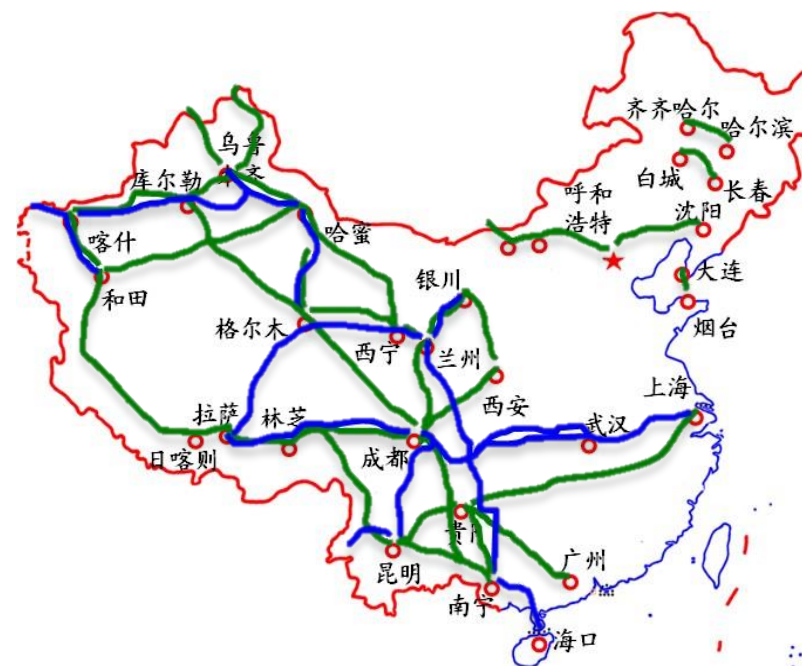


◆ 研究背景与意义



◆ 研究背景与意义

- 我国已成为世界上隧道建设规模、难度和数量**最大**的国家
 - 未来10年，公路铁路领域将新建隧道上万公里
 - 60多个重点水电工程和数十个调水工程中将修建数百条隧道



中国交通网路图



海克斯康
HEXAGON

◆ 研究背景与意义

- 隧道围岩遭遇大量非连续地质体切割形成非稳定**岩块结构**
- 施工揭露往往破坏结构面原有平衡状态，威胁施工人员生命安全



断层

I、II、III级



层理

II、III级



节理

IV、V级



劈理

V级

◆ 研究背景与意义

已有岩体结构信息获取手段：



● 地质罗盘

磁偏角校正→方位测量→走向测量→倾向测量→倾角测量

接触式测量、效率低、危险大、信息获取不全面



● 摄影测量

基准点测量→架设补光灯→布设标记点→人工拍摄

精度低、适应性弱、操作繁琐

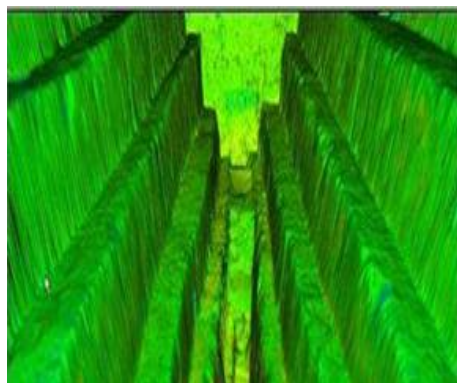
◆ 研究背景与意义

激光扫描技术：

- 激光扫描技术在工程建设领域有较广泛的应用
- 由于激光扫描技术建模精度高，操作简单，多尘环境其适应能力较强，是目前最适合的岩体结构信息获取方法



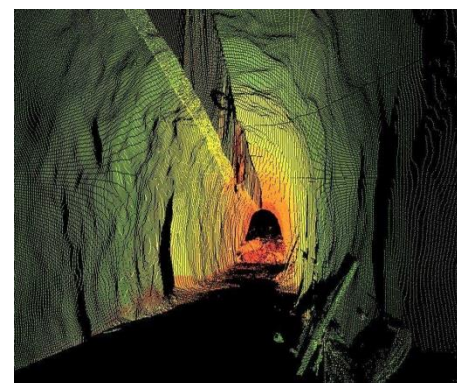
建筑测量



地形测绘



桥梁测量



隧道工程

◆ 研究背景与意义

激光扫描技术在岩体结构识别应用**困境**:

- ⚠ 激光扫描仪及配套设备**搬运困难**。
- ⚠ 现场数据处理**时效性差**
- ⚠ 真彩色模型受补光条件影响易出现**缺陷**
- ⚠ 人员、设备位于裸露围岩下方，**极为危险**
- ⚠ **尚无基于激光扫描技术的岩体结构面识别方法**



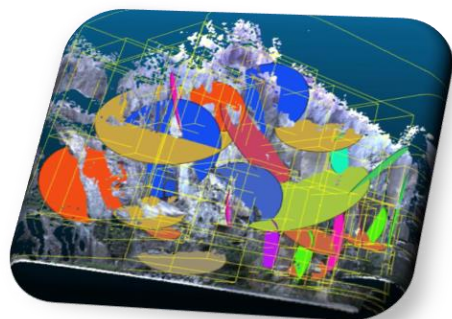
补光不理想出现色彩差异



在裸露围岩下方作业



◆ 研究背景与意义



岩体结构识别

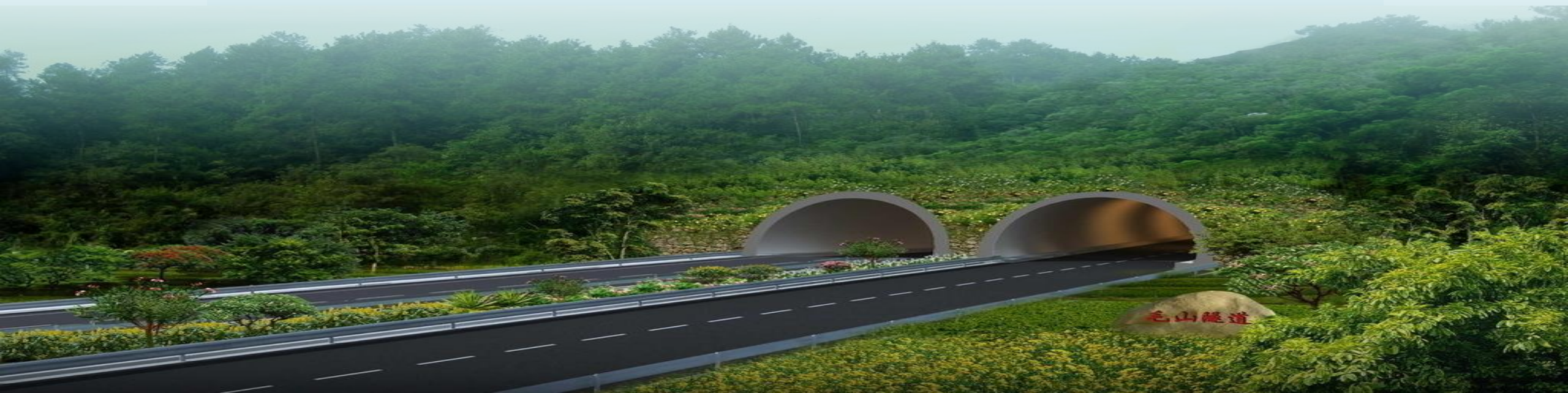
无可靠的岩体结构信息采集探测方法

岩体结构信息获取
设备研发

无有效的基于激光点云岩体结构分析方法

岩体结构信息分析
软件开发

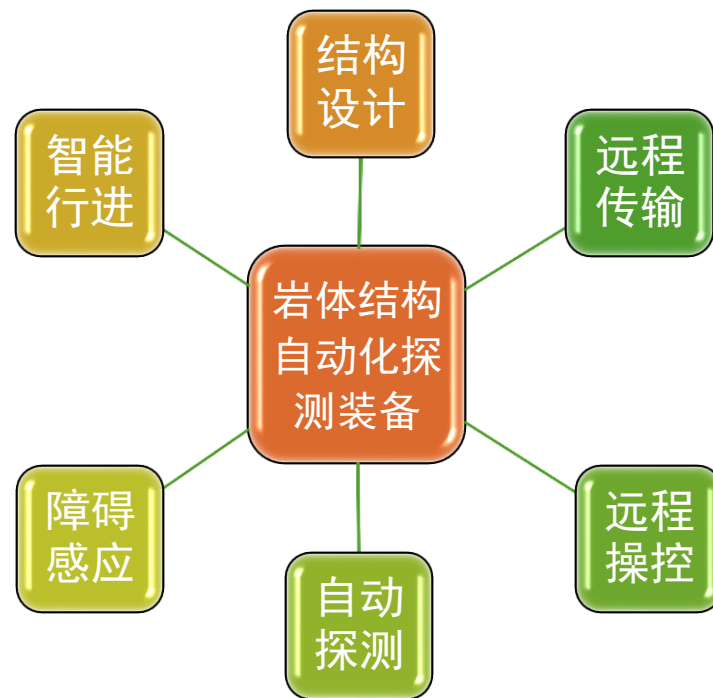
◆ 岩体结构信息获取设备



◆ 岩体结构信息获取设备

岩体结构自动化探测装备

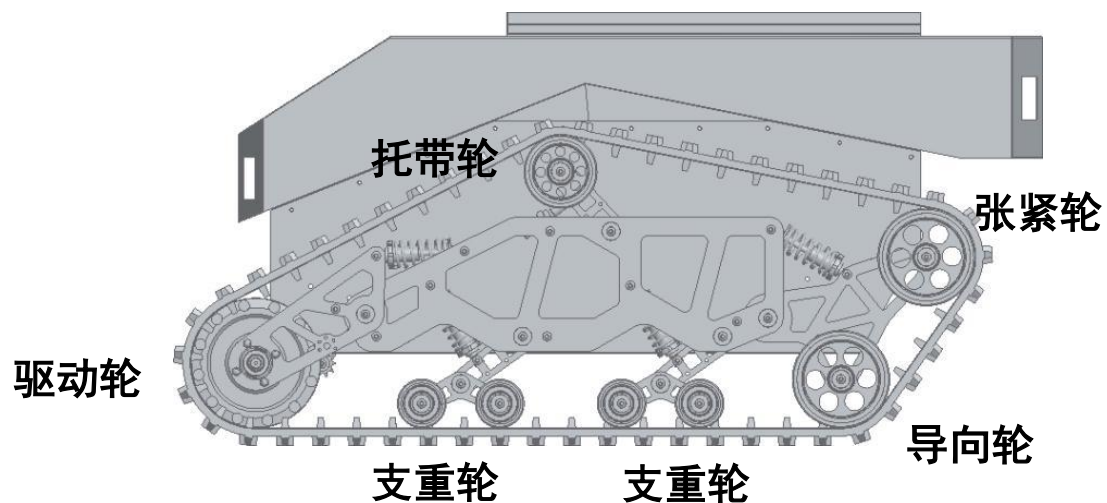
- 岩体结构信息自动化探测装备有行进结构、自动探测、智能行进、障碍感应、远程操控和远程传输功能，实现了岩体结构表面信息获取的**无人化、智能化、快速化**



◆ 岩体结构信息获取设备

结构设计

- 采用克里斯蒂+玛蒂尔达底盘悬架机构设计，跨距超过400mm，跨高超过200mm，载重超过150kg，过泥深度超过400mm，保障机体在隧道环境高效运行



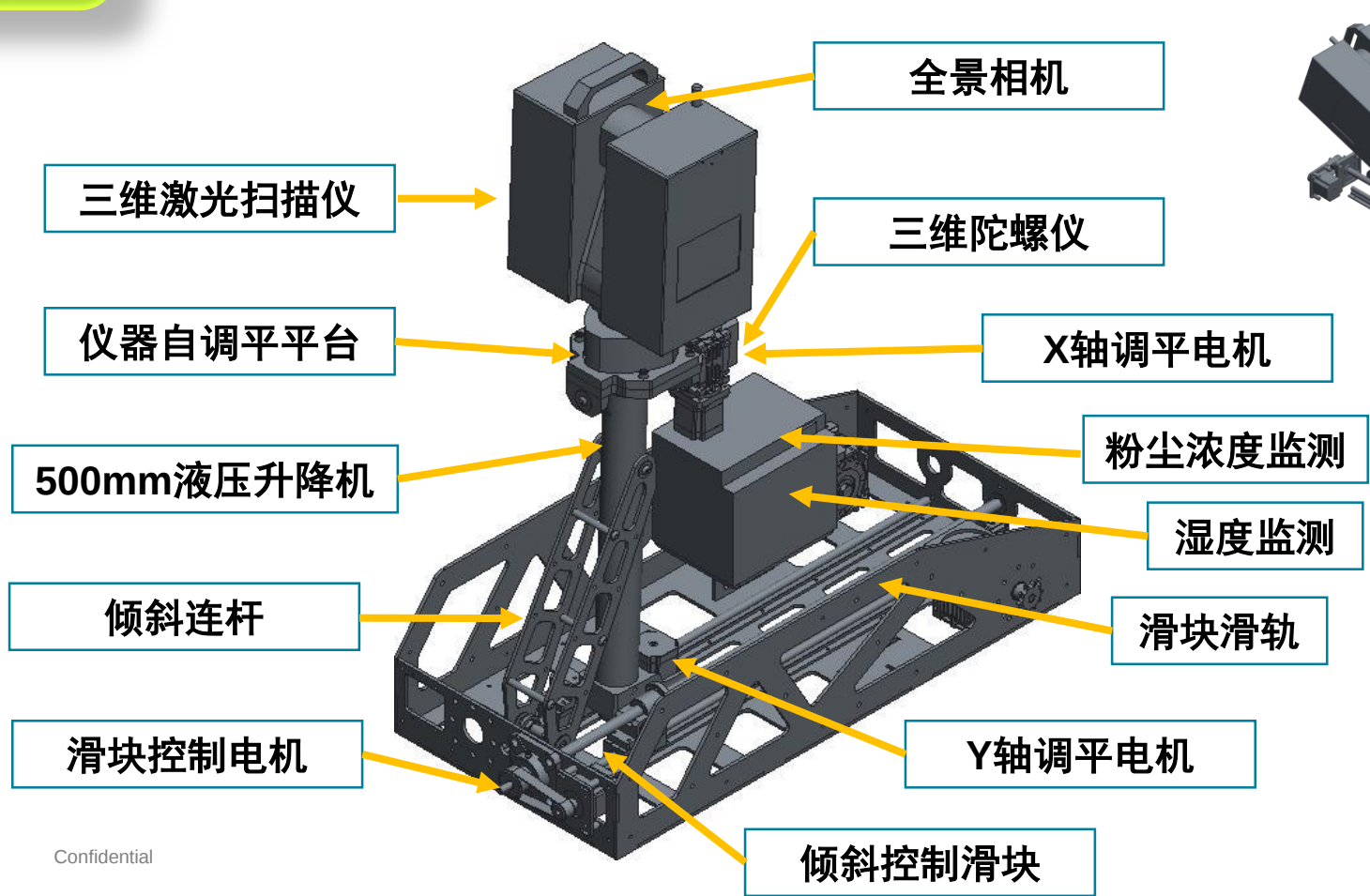
克里斯蒂+玛蒂尔达
底盘悬架设计

配置名称	履带式底盘	轮式底盘	猫步底盘
相同规格底盘性能参数	最大负载 150KG	最大负载 100KG	最大负载 25KG
	最大爬坡角度 30°	最大爬坡角度 15°	最大爬坡角度 10°
	最大跨高能力 200mm	最大跨高能力 100mm	最大跨高能力 300mm
	最大越距能力 400mm	最大越距能力 50mm	最大越距能力 300mm
	最大过泥深度 400mm	最大过泥深度 100mm	无数据

◆ 岩体结构信息获取设备

自动
探测

- 采用连杆滑块机构链接真彩三维激光扫描仪，利用三维陀螺仪控制自调平装置，装备六向10面板光照补偿系统，实现真彩激光扫描系统有效工作



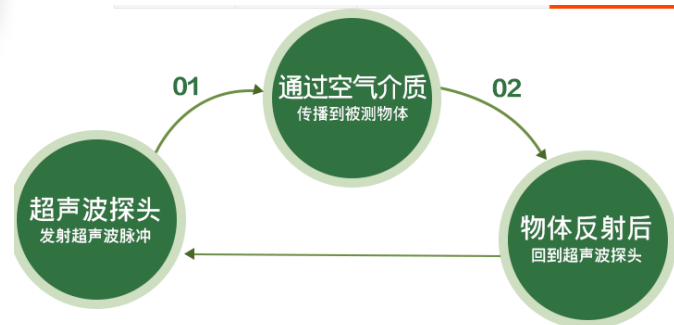
性能参数

调平精度	< 0.01°	抬升高度	1m
稳定性	< 0.01g	抬升重量	40Kg
显色指数	> 96	光源照度	18000LUX
纵向补光角	270°	纵向补光角	360°

◆ 岩体结构信息获取设备

障碍感应

- 采用全场景超声传感器，感知机体20mm-500mm范围内高度超过200mm障碍物，实时传输障碍位置信息至控制端，有效防止机体碰撞损坏



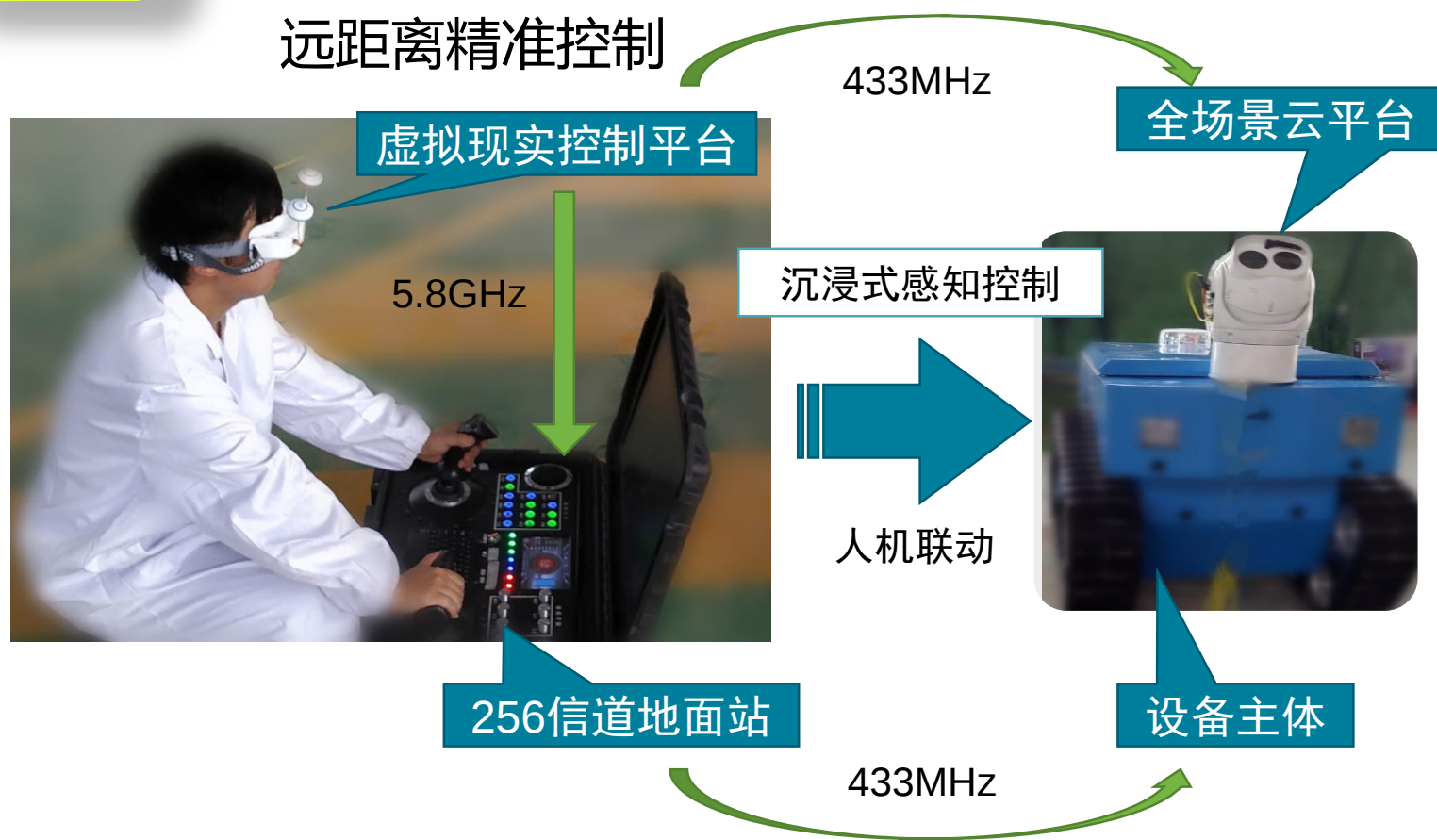
多方式传感器技术指标

技术指标	全景超声测距	普通超声测距	激光测距
测量角度	360°	20°	单点
最远距离	18m	3-8米	1米内
灵敏度	20mm	100mm	3mm
抗粉尘干扰能力	PM10 <1000	PM10 <700	PM10 <300

◆ 岩体结构信息获取设备

远程控制

- 自主开发256信道433MHz地面站控制协议，4信道2.4GHz枪式控制协议，4信道5.8GHz虚拟现实控制协议，结合基于VR技术的云平台人机联动，实现复杂环境远距离精准控制



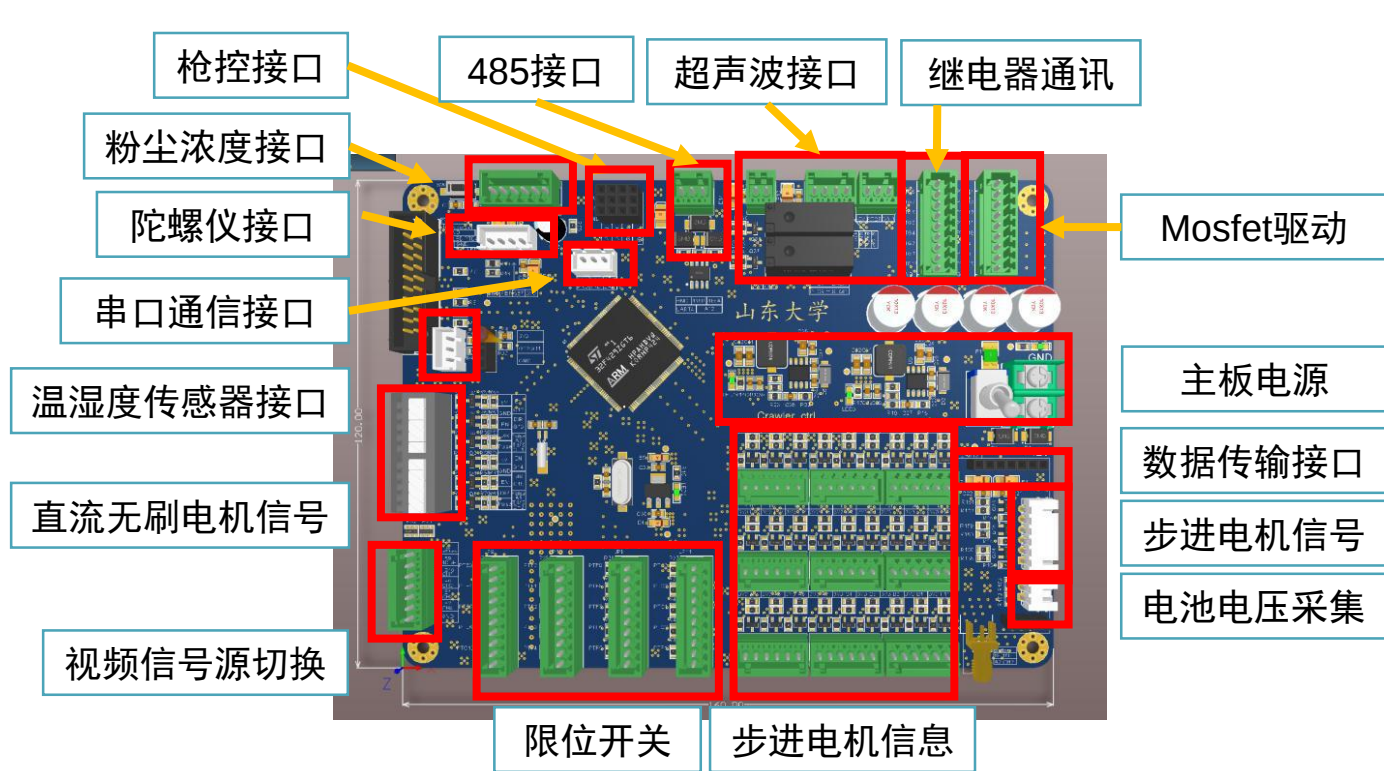
无线协议技术指标

技术指标	433 MHz	2.4 GHz	5.8 GHz
频带	1.75 MHz	100 MHz	160 MHz
绕射能力	强	中	弱
通讯距离	1000 m	30 m	5 m
噪声	小	中	大

◆ 岩体结构信息获取设备

数据传输

- 自主开发SD_YT18814（和效验）数据传输协议，自主研发设计SDU_crawler.PcbDoc、SDU_crawler_NO.2.PcbDoc数据通信传输电路板，实现设备复杂环境下实时的多源数据传输通信



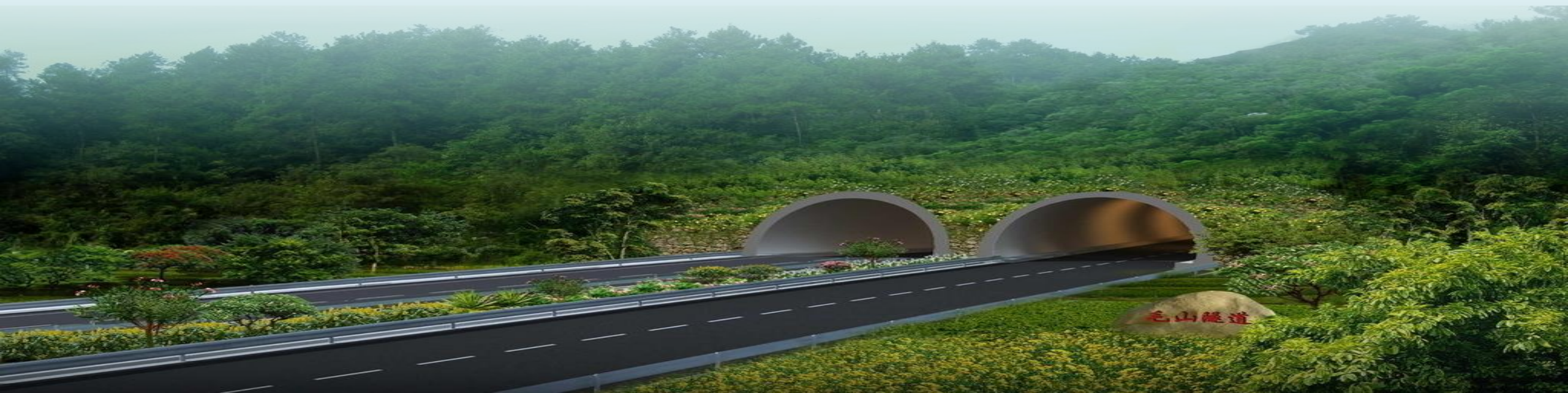
SDU_crawler_NO.2.PcbDoc主板设计图



性能参数对比

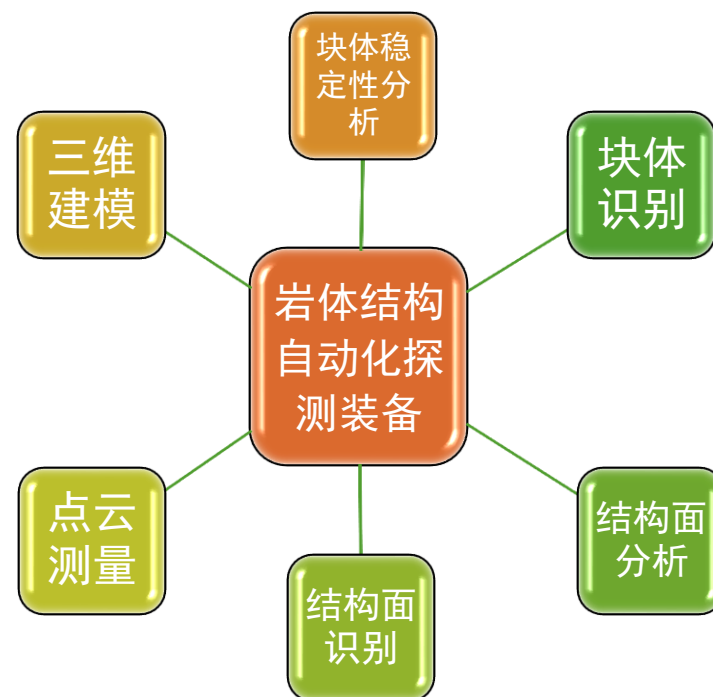
技术指标	新式传输	常规传输
开放区域传输距离	1000 m	800 m
隧道环境传输距离	500 m	150 m
传输速度	20 Mb/s	5 Mb/s
los	90 dB	80 dB
数据信道	256	8

◆ 岩体结构信息分析软件



◆岩体结构信息分析软件

- 开发GeologyPlane岩体结构信息分析软件，具有三维建模、点云测量、结构面识别、结构面分析、块体识别、块体稳定性分析等功能
- 实现岩体结构分析及致灾巨石预测预警

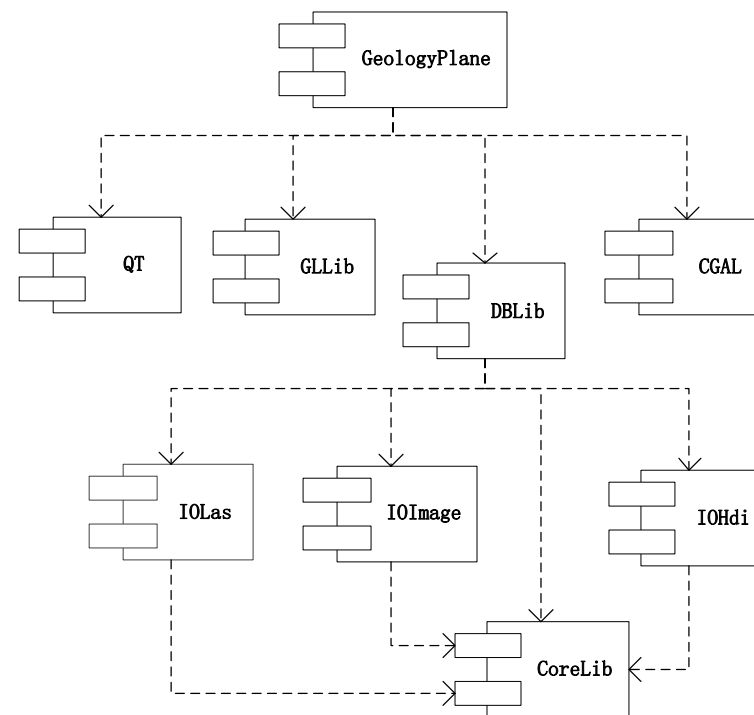


◆岩体结构信息分析软件

- 软件总体构架分为数据层、三维视图层、应用层。软件分基础库、读写库、解析库、场景对象库等，各组件构成有序的逻辑应用关系



软件构架

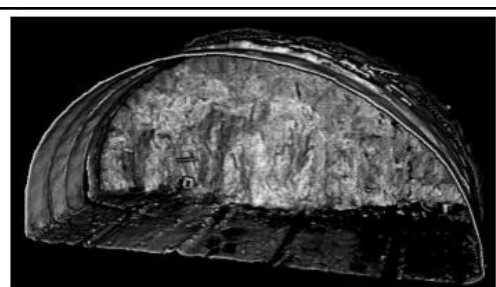


软件组件逻辑应用关系

◆ 岩体结构信息获取设备

三维建模

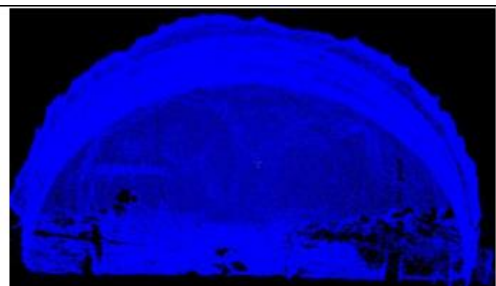
- 软件具有真彩点云处理、点云抽稀简化、点云去噪过滤、点云绝对坐标转换、三维点云渲染等功能，构建了岩体结构信息分析的高精度基础



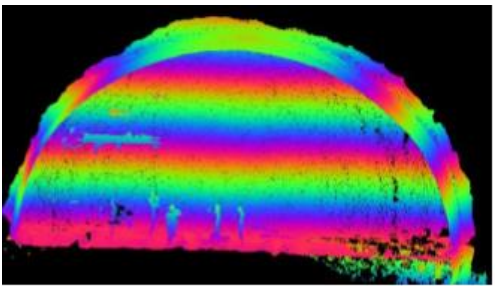
强度渲染



真彩渲染

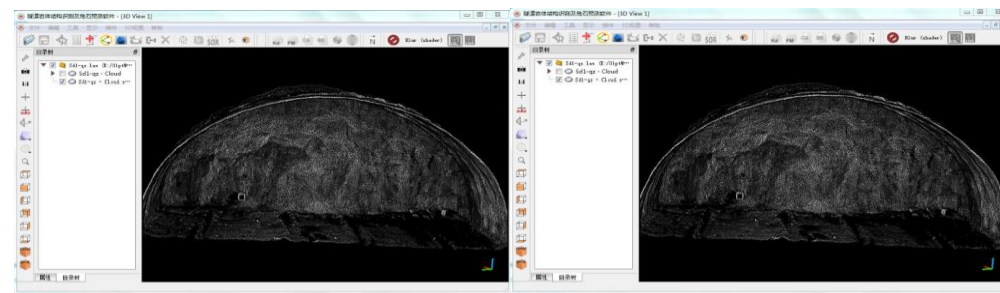


单色渲染



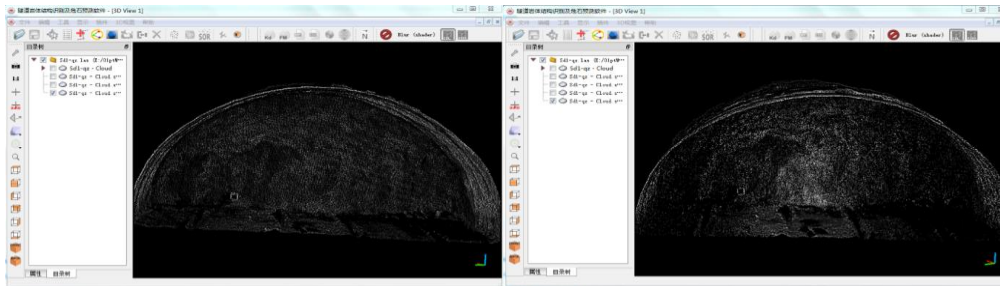
高程渲染

多种渲染模式



基于 KDTree

基于布隆过滤



基于 OCTree

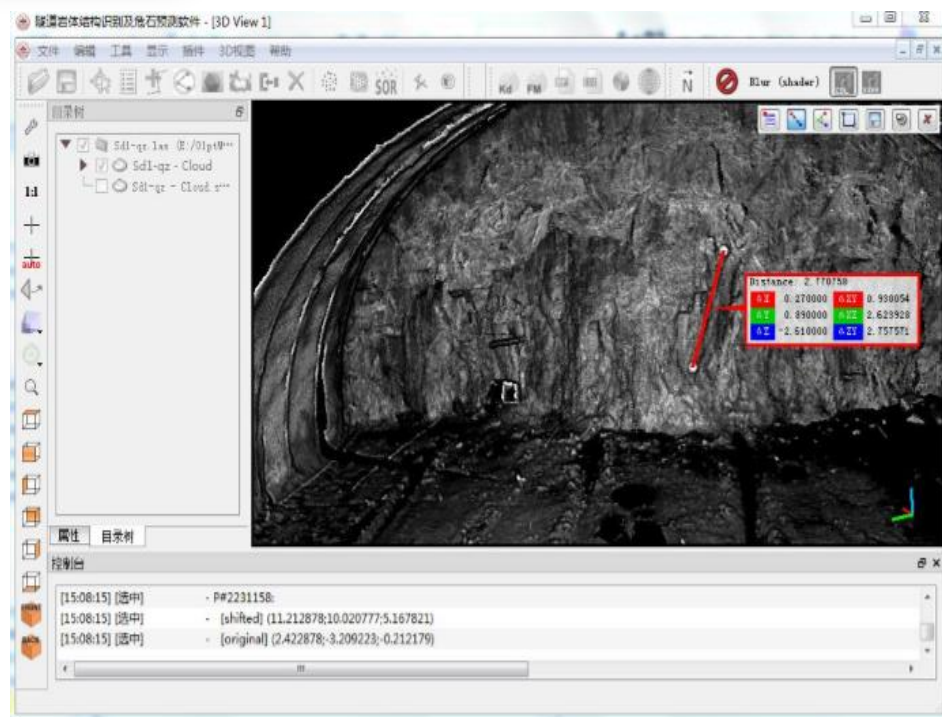
基于随机数

多抽稀模式

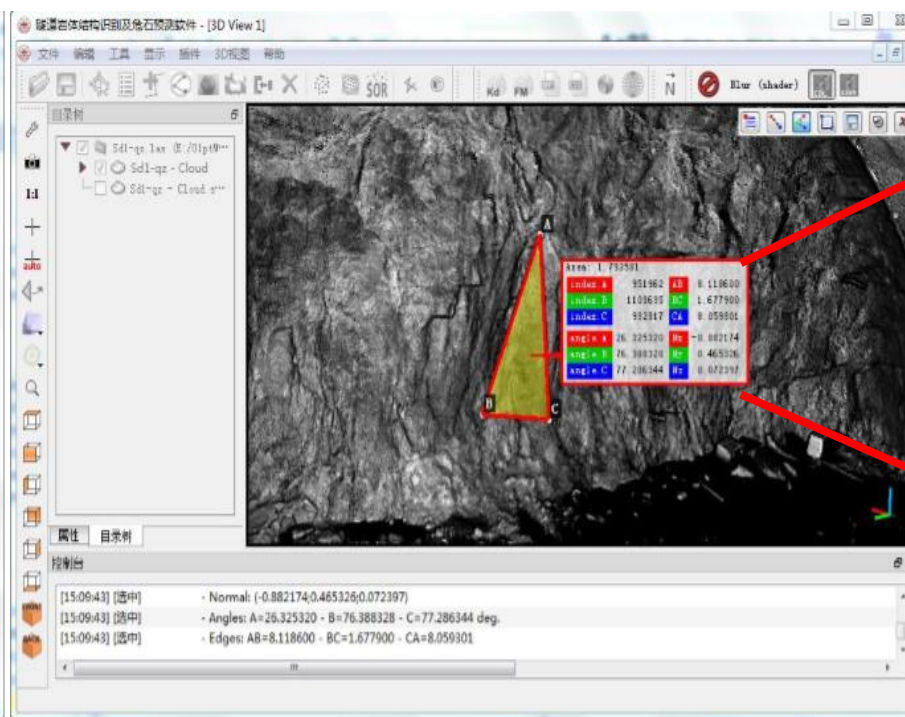
◆ 岩体结构信息获取设备

点云 测量

- 软件具有点云坐标拾取查看，两点之间距离和方向量测，多点面积、顶点 角度和面方向测量功能，实现了非接触高精度岩体结构测量



两点测量

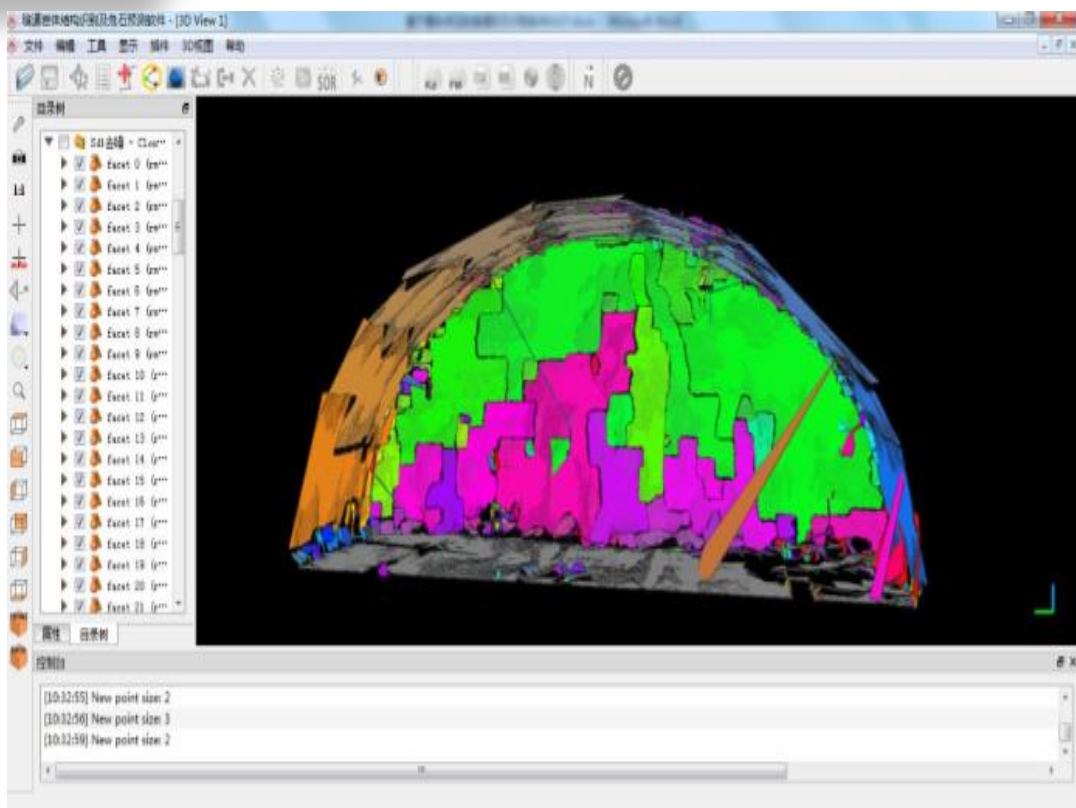


多点测量

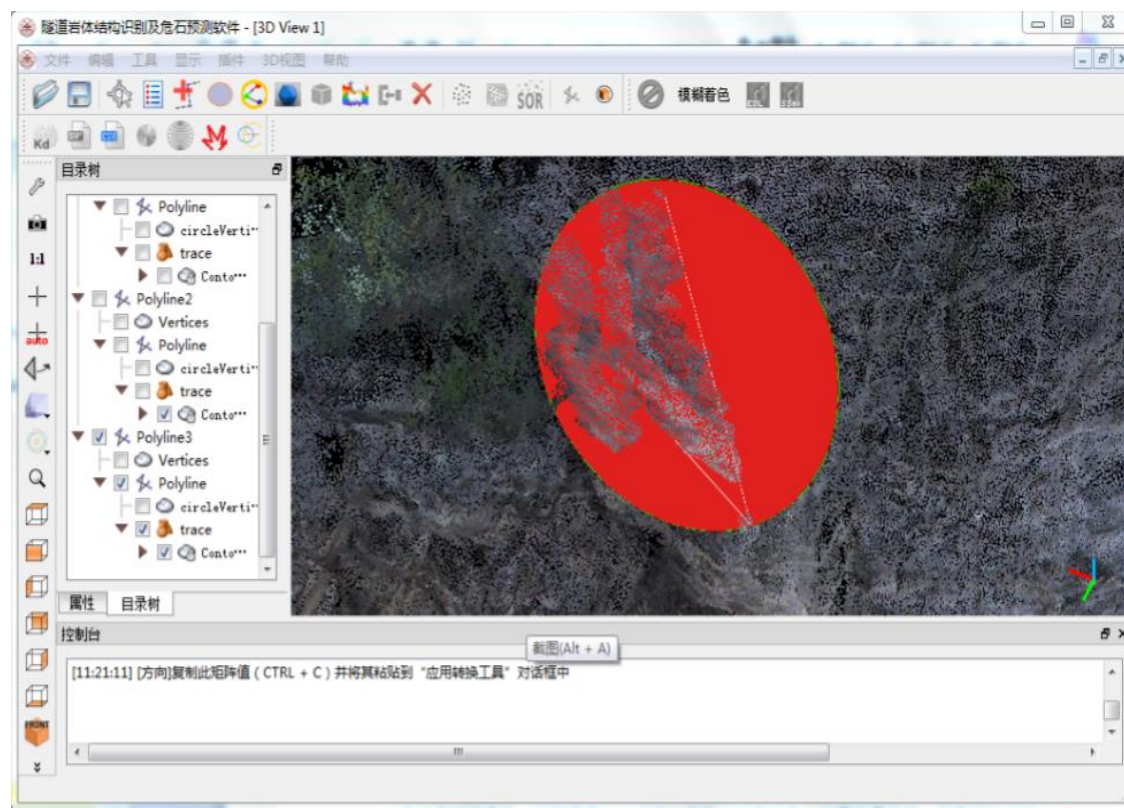
◆ 岩体结构信息获取设备

结构面识别

- 软件结构面识别工具，具备根据结构面或其迹线识别结构面功能，构建可视化的结构面圆盘三维空间形态，实现岩体结构面信息识别



基于KD-Tree自动识别



结构面手动提取

◆ 岩体结构信息获取设备

结构面分析

- 软件具备产状信息分析模块，通过提取结构面走向、倾向、倾角等信息，利用空间解析几何法求解结构面产状，实现岩体结构面信息数字化获取

1) 结构面平面方程: $N_x X + N_y Y + N_z Z + D = 0$

2) 结构面走向方程: $Z = 0$

3) 结构面倾向方程: $N_x X + N_y Y + D = 0$

4) 结构面倾角方程: $\cos \delta = \frac{|N_z|}{\sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}}$

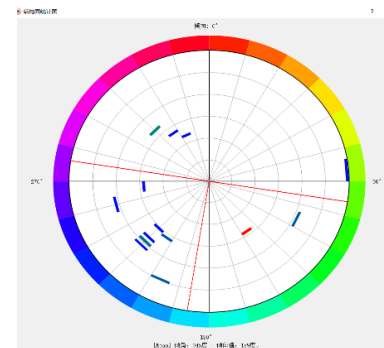
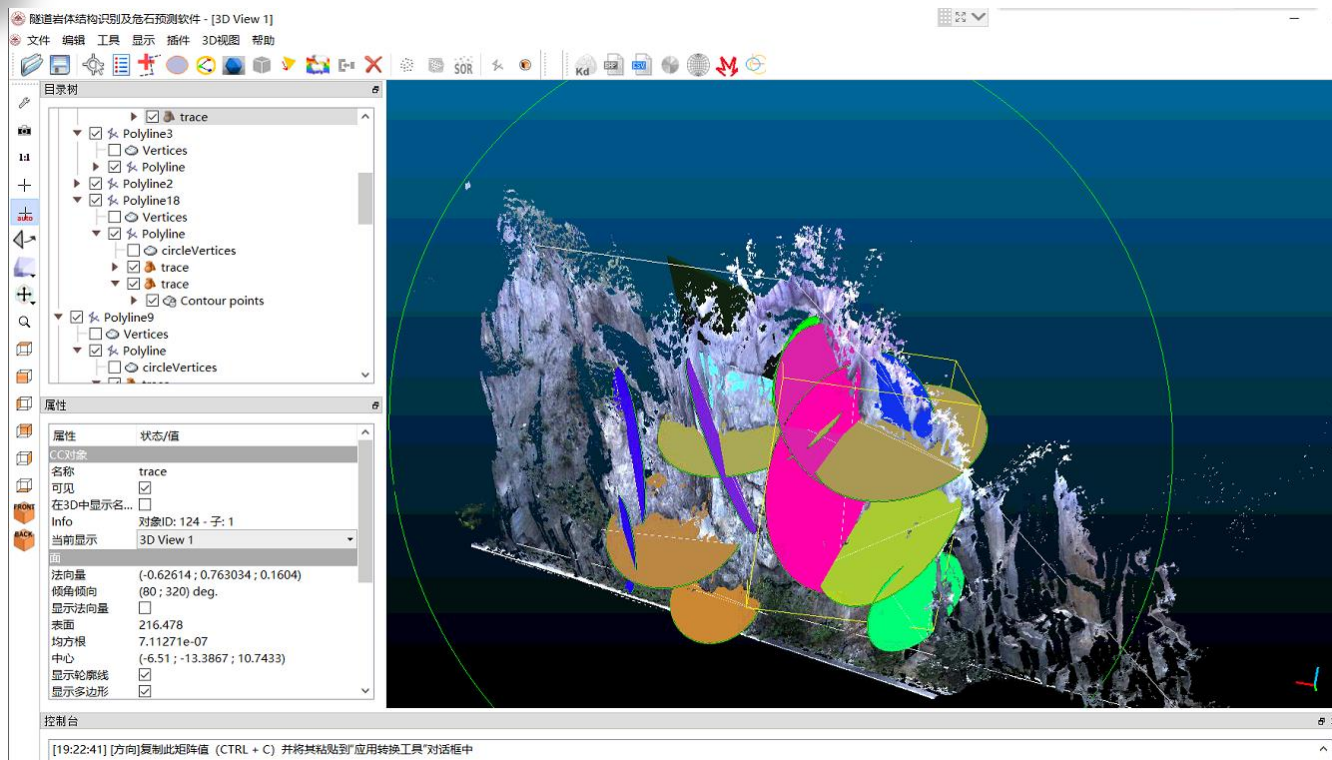
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
走向 (°)	参数 (°)	平均走向 (°)	平均走向 弧度	数学坐标 X	数学坐标 Y	半圆 角度	半圆 弧度	半径=	半径=	半圆测度线 角度	半圆测度线 弧度	半径=	半径=
0~9	40	3.125	0.0545415	2.1805801	39.940519	270	4.712389	-100	-1.84E-14	270	4.712389	-105	-1.93E-14
10~19	35	14.88571	0.2598047	8.9912117	33.825406	270	4.712389	-100	-1.84E-14	270	4.712389	-100	-1.84E-14
20~29	66	26.767	0.4671723	29.723983	58.927794	280	4.8869219	-98.48078	17.364818				
30~39	38	37.615	0.6565056	23.193397	30.100935	290	5.0614548	-93.96926	34.202014	280	4.8869219	-103.4048	18.233059
40~49	64	48.345	0.8437794	47.818267	42.537199	300	5.2359878	-86.60254	50	280	4.8869219	-98.48078	17.364818
50~59	44	55.841	0.9746093	36.409234	24.705621	310	5.4105207	-76.60444	64.278761				
60~69	62	66.952	1.1685328	57.050986	24.273133	320	5.5850536	-64.27876	76.604444	290	5.0614548	-93.96926	34.202014
70~79	49	75.4996	1.3177166	47.439149	12.268951	330	5.7595865	-50	86.60254	290	5.0614548	-93.96926	34.202014
80~89	4	65.75	1.147554	3.6470482	1.6428754	340	5.9341195	-34.20201	93.969262				
			0	0	0	350	6.1086524	-17.36482	98.480775	300	5.2359878	-86.60254	50
270~279	82	271.5122	4.7387818	-81.97144	2.163964	0	0	0	100	300	5.2359878	-86.60254	50
280~289	25	288.56	5.0363221	-23.69977	7.9574391	10	0.1745329	17.364818	98.480775				
290~299	37	298.27	5.2057936	-32.58684	17.524204	20	0.3490659	34.202014	93.969262	310	5.4105207	-76.60444	64.278761
300~309	51	308.3725	5.3821154	-39.98387	31.65935	30	0.5235988	50	86.60254	310	5.4105207	-76.60444	64.278761
310~319	24	314.75	5.4934238	-17.04445	16.896353	40	0.6981317	64.278761	76.604444				
320~329	43	324.814	5.6690738	-24.778	35.143286	50	0.8726646	76.604444	64.278761	320	5.5850536	-67.4927	80.434667
330~339	64	337.2344	5.8858506	-24.76557	59.014121	60	1.0471976	86.60254	50	320	5.5850536	-64.27876	76.604444
340~349	87	347.1034	6.0580972	-19.41773	84.805376	70	1.2217305	93.969262	34.202014				
350~359	5	351.8	6.1400683	-0.713145	4.9488812	80	1.3962634	98.480775	17.364818	330	5.7595865	-50	86.60254
合计 (条)	820		0.0545415	2.1805801	39.940519	90	1.5707963	100	6.126E-15	330	5.7595865	-50	86.60254
						90	1.5707963	100	6.126E-15				

结构面产状

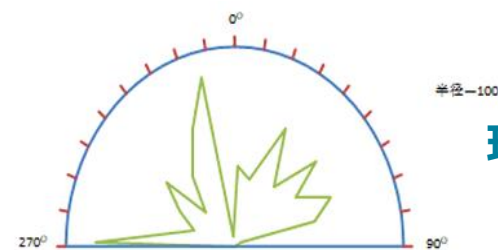
◆ 岩体结构信息获取设备

结构面分析

- 软件获取多组结构面信息，能够对结构面信息进行统计、聚类分析，以赤平投影图、玫瑰图、极点图等方式表达，实现对岩体结构面信息地质编录与分析



聚类统计



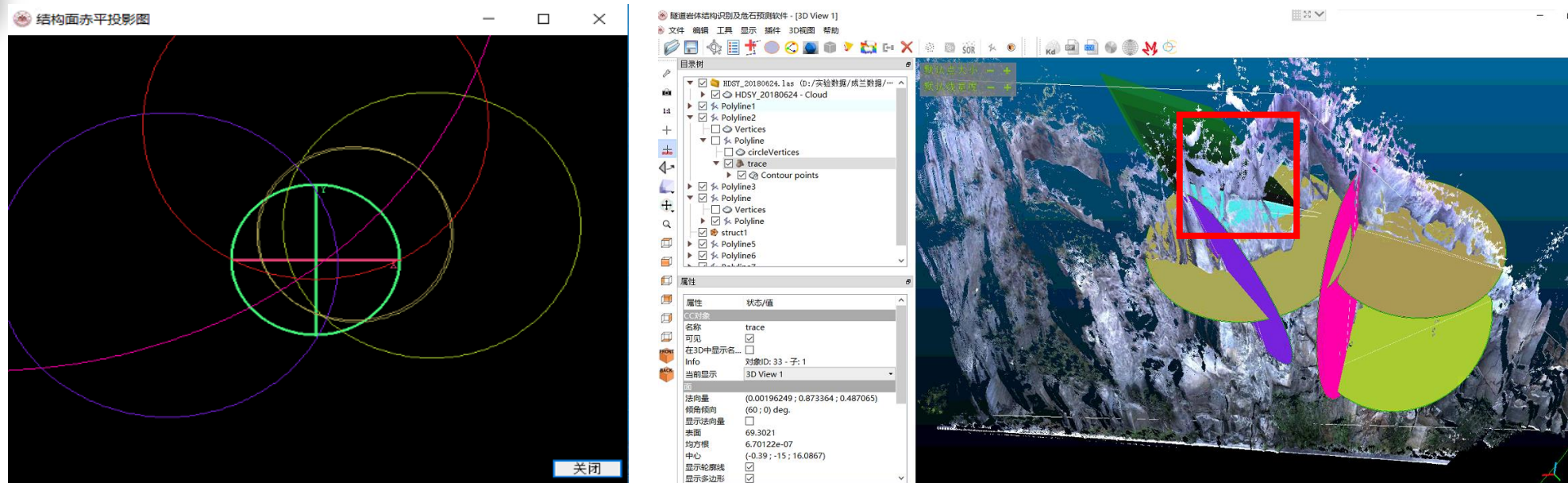
玫瑰花图

结构面分析

◆ 岩体结构信息获取设备

块体识别

- 软件建立了考虑掌子面位置及新生结构面作用的块体识别方法
解决了隧道施工过程中块体结构矢量识别的问题



第*i*个四面体体积:

$$V_i = \frac{1}{6} (-x_{i3}y_{i2}z_{i1} + x_{i2}y_{i3}z_{i1} + x_{i3}y_{i1}z_{i2} - x_{i1}y_{i3}z_{i2} - x_{i2}y_{i1}z_{i3} + x_{i1}y_{i2}z_{i3})$$

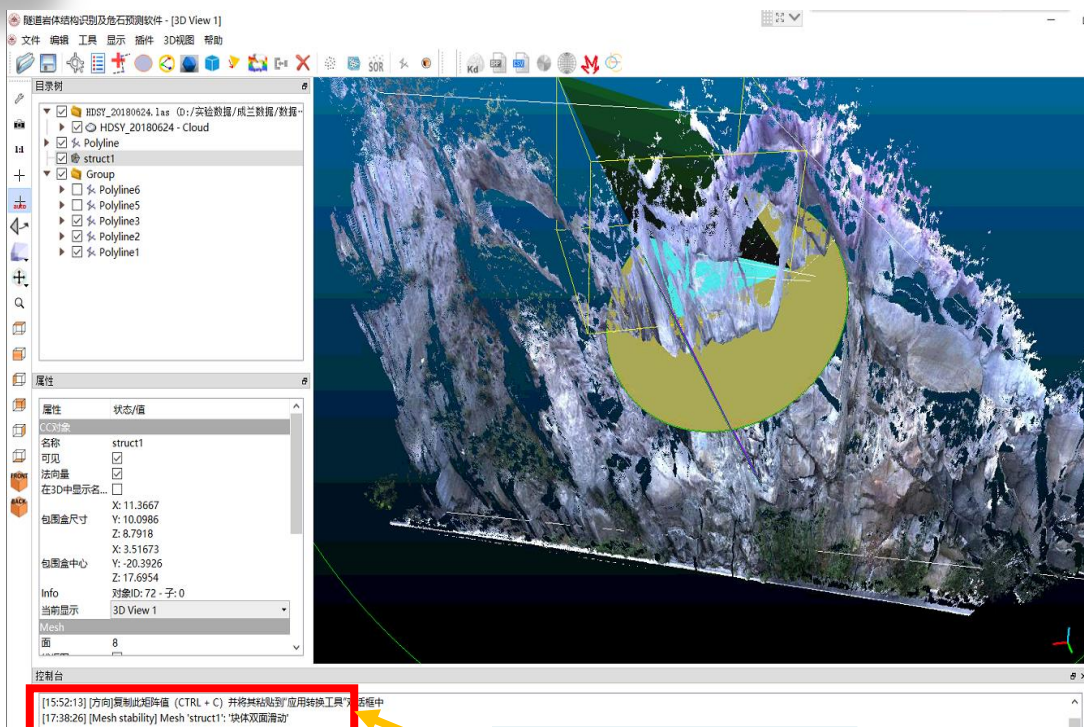
总体积为:

$$V_{\text{total}} = \sum_{i=0}^n V_i$$

◆ 岩体结构信息获取设备

稳定
分析

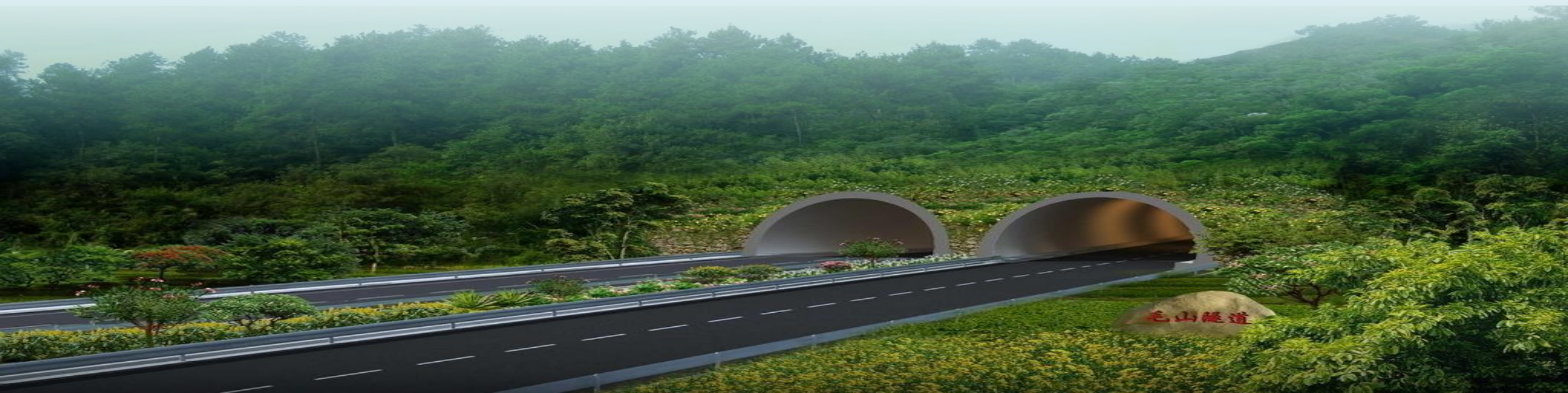
- 软件构建了3种块体典型运动模式的几何判识及稳定性分析模型
实现了块体几何学平动失稳的快速分析



块体双面滑动

直接坠落	$\hat{s} = \frac{\vec{F}_{zd}}{ \vec{F}_{zd} } \quad \vec{F}_{zd} \bullet \hat{\mathbf{v}}_i \geq 0$
单面滑动	$\hat{s} = \frac{(\hat{\mathbf{v}}_i \times \vec{F}_{zd}) \times \hat{\mathbf{v}}_i}{ \hat{\mathbf{v}}_i \times \vec{F}_{zd} } \quad \vec{F}_{zd} \bullet \hat{\mathbf{v}}_i < 0$ $\hat{s} \bullet \hat{\mathbf{v}}_j \geq 0$
双面滑动	$\hat{s} = \frac{(\hat{\mathbf{v}}_i \times \vec{F}_{zd}) \times \hat{\mathbf{v}}_i}{ \hat{\mathbf{v}}_i \times \vec{F}_{zd} } \quad \vec{F}_{zd} \bullet \hat{\mathbf{v}}_i < 0$ $\vec{F}_{zd} \bullet \hat{\mathbf{v}}_j < 0$ $\hat{s} \bullet \hat{\mathbf{v}}_j \geq 0$

◆ 工程应用



工程案例一：G213国道K741+550处边坡

- 213国道四川段，对于阿坝藏族羌族自治州的居民而言意义重大
- 这条国道中的汶川—都江堰段在网络上被评为了**中国十大夺命路段之一**，极易发生山体滑坡、泥石流等灾害



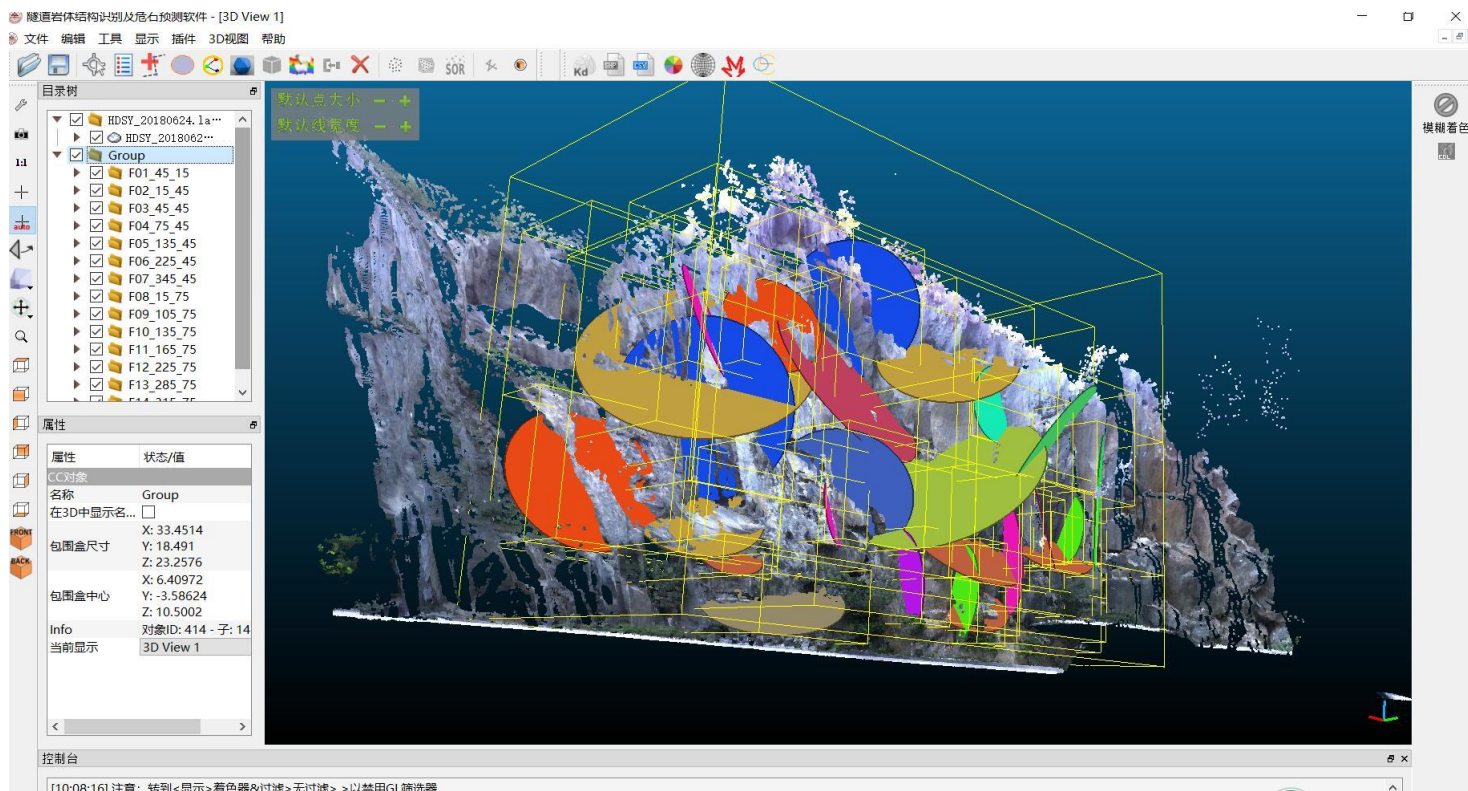
G213国道山体滑坡



K741+550处高危边坡

工程案例一：G213国道K741+550处边坡

➤ 岩体结构分析



岩体结构统计			
结构面数量	56	块体数量	7
结构面平均半径	3.43m	块体平均体积	1.63 立方米
优势结构面倾角	51°	单面滑动失稳	3
优势结构面倾向	43°	双面滑动失稳	1
结构面平均间隔	2.17m	坠落失稳	0

工程案例一：G213国道K741+550处边坡

- 于边坡挂设防护网，对高危位置进行喷锚处理
- 有效预防滑坡、滚石等地质灾害，保障了人民群众生命财产安全



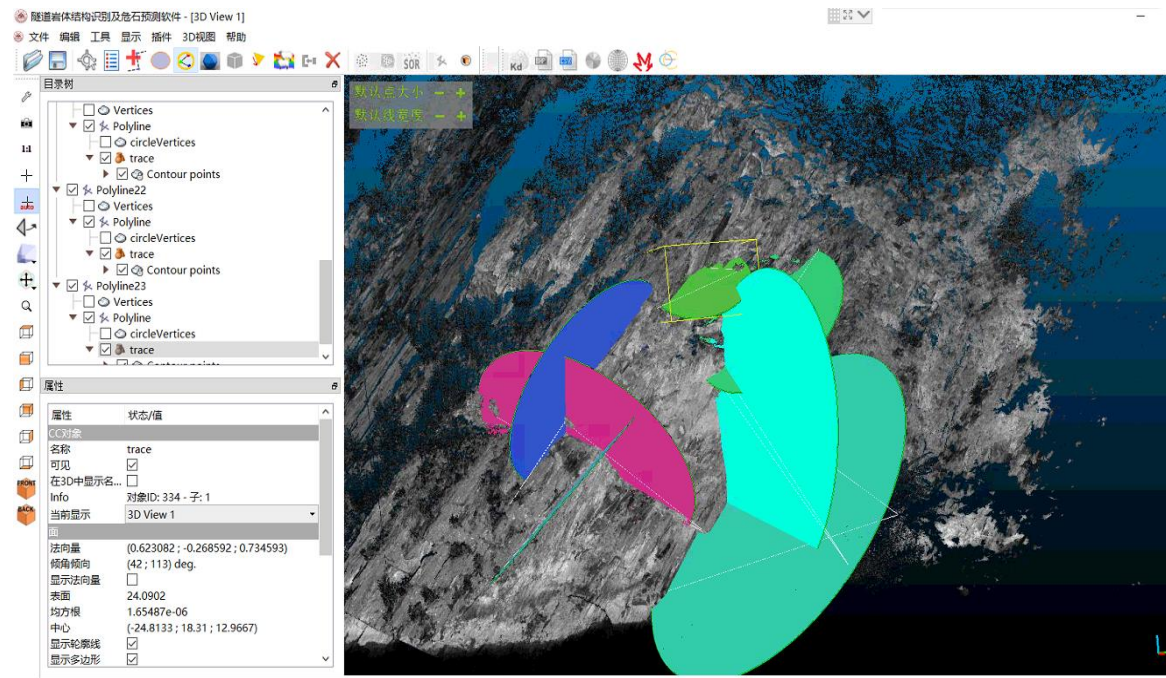
挂设钢筋防护网



喷锚作业

工程案例二：滨莱高速改扩建工程

- 目前滨莱高速博山到莱芜段的时速仅为80公里/小时。改扩建后设计速度将提升至100-120公里/小时
- 对高陡边坡进行激光扫描，准确进行危险巨石判识，有效对施工进行指导



—— 谢 谢 ——

