

# 隧道智能建造

## 科普手册

|                          |   |
|--------------------------|---|
| 1. 隧道智能建造简介.....         | 2 |
| 1.1 智能建造概念.....          | 2 |
| 1.2 智能建造发展历程.....        | 2 |
| 1.3 隧道工程智能建造技术.....      | 2 |
| 2. 钻爆法隧道智能建造新技术.....     | 3 |
| 2.1 全电脑三臂凿岩台车.....       | 3 |
| 2.2 智能化多功能拱架作业台车.....    | 3 |
| 2.3 智能喷射混凝土台车.....       | 4 |
| 2.4 智能锚杆台车.....          | 5 |
| 2.5 智能防水板铺挂台车.....       | 6 |
| 2.6 智能衬砌台车.....          | 7 |
| 2.7 智能养护台车.....          | 7 |
| 3. 盾构法隧道智能拼装技术.....      | 8 |
| 3.1 盾构隧道底部弧形预制件智能拼装..... | 8 |
| 3.2 盾构隧道中隔墙预制件智能拼装.....  | 9 |

## 1. 隧道智能建造简介

### 1.1 智能建造概念

智能建造，是新信息技术与工程建造融合形成的工程建造创新模式，通过规范化建模、网络化交互、可视化认知、高性能计算以及智能化决策支持，实现数字链驱动下的工程立项策划、规划设计、施工生产、运维服务一体化集成与高效率协同。

### 1.2 智能建造发展历程

建筑业是我国的支柱性产业，但其碎片化、粗放式的发展方式带来的生产效益低下、资源耗费巨大、环境污染严重等问题依旧突出，与高质量发展的要求仍有一定距离。随着大数据、人工智能、工业互联网、机器人、BIM 和 5G 等新技术的不断成熟，也给建筑业带来了新变化，智能建造也就应运而生。智能建造可提高建筑行业生产力水平，实现建造过程的高质高效、节能减排，是建筑行业高质量发展的方向。

美国在 2007 年时就规定所有重要工程项目都要使用 BIM 技术，通过使用信息技术实现低碳绿色发展，在 2017 年发布了重点关注建造过程的《美国基础设施重建战略规划》，并在 2018 年发布的《先进制造业美国领导力战略》中提到抓住智能制造系统的未来这一战略目标。英国推出了《英国建造 2025》战略发展目标是降成本、提效率、减排放、增出口。欧盟投资了 1.92 亿欧元用于工程建造领域物联网的研究和创新，重点发展领域包括智慧城市和智慧农业等。日本制定了“i-Construction”战略，为建筑企业和建筑行业制定了发展目标，着力提升建筑产品的品质、安全和效益。德国在“工业 4.0”的背景下大力推进建筑业数字化升级，以服务机器人为重点，加快智能机器人在工程建造领域的开发和应用，促进工业化与数字化的深度融合。

在我国，20 世纪 70 年代末，计算机开始应用于建筑工程的结构计算中；80 年代，建筑行业开始应用计算机辅助设计（CAD）技术；90 年代，计算机开始用于建筑施工管理。此外，作为人工智能的分支，专家系统开始在建筑行业中应用；而计算机应用在建筑运营维护管理中则是从 21 世纪开始。

进入 21 世纪，随着物联网、移动互联网、大数据等技术的飞速发展和规模化应用，智能建造正在引领新一轮建造业革命。为推进建筑工业化、数字化、智能化升级，加快建造方式转变，推动建筑业高质量发展，2020 年 7 月，住房和城乡建设部发布的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》提出，要围绕建筑业高质量发展总体目标，以大力发展建筑工业化为载体，以数字化、智能化升级为动力，创新突破相关核心技术，加大智能建造在工程建设各环节应用，形成涵盖科研、设计、生产加工、施工装配、运营等全产业链融合一体的智能建造产业体系，提升工程质量安全、效益和品质；2021 年 1 月发布的《“十四五”建筑业发展规划》中也明确指出：到 2025 年，初步形成建筑业高质量发展体系框架，建筑工业化、数字化、智能化水平大幅提升，建造方式绿色转型成效显著，加速建筑业由大向强转变。目前，交通基础设施智能建造技术，经过国家推动和政策引导，以及行业层面的主动探索，实现了 BIM 技术、物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术与交通基础设施设计、施工、管养全过程的逐步融合，发展十分迅猛，也取得了一定成就。

### 1.3 隧道工程智能建造技术

钻爆法和盾构法是当前最主流的两种隧道施工方法，其中钻爆法的主要工序均已实现智能化建造，包括开挖、立拱、喷浆、锚杆施工、挂防水板、二次衬砌浇筑及养护等。而盾构

法隧道的管片拼装工序也已经实现智能化作业，以下介绍钻爆法和盾构法隧道智能化建造新技术。

## 2. 钻爆法隧道智能建造新技术

### 2.1 全电脑三臂凿岩台车

全电脑三臂凿岩台车在隧道超前地质预报、超前支护、锚杆安装、钻孔爆破等方面广泛应用，并能够在超大断面隧道进行施工作业，作业半径在 6~8m 范围。目前国产钻探装备都集成了随钻系统、激光扫描系统安全识别系统，并配套了专业软件系统，实现全电脑化控制。以下以铁建重工生产的 ZYS113 全电脑三臂凿岩台车为例对其功能特点进行介绍：



图 2.1 ZYS113 型全电脑三臂凿岩台车示意图

(1) 全自动高效智能化：技术人员确定钻孔设计图，将其导入车载电脑内，可实现一键激活，整个布孔过程中可自动精确找点并完成打眼与清孔作业，施工效率良好，每 2min 钻进深度可达到 5m；

(2) 超前地质勘探和地质分析：采用自动加杆功能进行超前钻孔勘探并上传数据。钻探探孔 76mm，钻孔深度 20~30m，钻孔时间 20~25min。通过 MWD 软件分析复原地质情况，并形成地质报告，为下一步施工提供参考；

(3) 断面扫描：三臂凿岩台车定位后，钻孔同时可通过扫描仪进行扫描开挖断面（或初期支护断面），不占工序施工时间。可提取任意里程的断面情况与设计断面进行对比，作为爆破设计优化及混凝土方量计算的标准；

(4) 锚杆及管棚施工：凿岩台车钻臂灵活，升降范围-30°~60°，推进旋转达到 360°，在各类锚杆、管棚钻孔施工中都具有较好的适用性。此外，依据实际需求，还可将凿岩钻杆转变为锚杆，完成顶锚作业；

(5) 高空作业台车：吊篮臂推进过程中摆动范围达到-45°~45°，可精准定位。吊篮工作负荷高达 450kg，可实现自动调平，且适配了水与高压空气接口，为锚杆安装、注浆等环节提供支持。吊篮上方安装有伸缩顶棚，为高空作业提供了安全保障。

### 2.2 智能化多功能拱架作业台车

隧道智能化多功能拱架作业台车是隧道支护安装设备，可广泛应用于铁路、公路、冶金、地下工程及引水工程等领域隧道、井巷、涵洞等施工中的支护及高空作业。以下以中国铁建重工集团股份有限公司生产的 SCDZ133 智能型隧道多功能作业台车对其具备功能特点进行介绍：



图 2.2 SCDZ133 智能型隧道多功能作业台车

(1) 智能高效立拱，效率提升 50%，立拱定位一键操作，实现拱架快速、精准拼装。机械手调控，拱架连接法兰孔精准对位，拱架连接牢固可靠；整榀拱架姿态调节，可达到设计位置要求；钢拱架施工作业较传统工法时间节约 50%。

(2) 远程监控，精准定位，通过采用扫描仪，实现台车在隧道内的精确定位；可通过网络进行远程监控，生成任意时间段内台车的运动轨迹动画。可以实时查看台车各仪表数值。

(3) 3D 轮廓扫描优化施工。扫描仪工作时，可测得隧道内任意点的坐标，形成“点云”，并由三维轮廓重建自动处理软件，计算获得隧道超欠挖等数据，实现扫描轮廓与设计轮廓的超欠挖比对，指导拱架安装。可自动记录、存储 3D 扫描日志，用于分析超挖、欠挖情况，优化拱架作业。

(4) 多工法适用，多功能作业，适用于全断面（含仰拱）、大断面、微台阶法等工法作业，适用于钢拱架安装、锚杆安装、锚网安装、辅助撬毛、辅助测量、隧道设备安装等施工作业。

(5) 少人化施工，智能提示施工工序，操作方法简单易懂。

## 2.3 智能喷射混凝土台车

智能喷射混凝土台车是针对隧道机械化施工开发的集行走、泵送和喷射功能于一体的隧道混凝土喷射装备，是交通隧道、水电涵洞、地下矿山等现代混凝土支护施工的关键设备。与干喷射设备相比，具有施工质量好、施工效率高、回弹率低、人员劳动强度低等特点，同时可大大降低粉尘对工人健康的危害，目前市场上也逐渐开始出现了更为高效的、更为自动化的智能喷射混凝土台车。以下以中国铁建重工集团股份有限公司生产的 HPS3016S 型混凝土湿喷机为例对其功能特点进行介绍：



图 2.3 HPS3016S 型混凝土湿喷台车

- (1) 全地形适应：采用专用工程底盘，实心轮胎，四轮驱动，四轮转向，电子油门自动挡驾驶，适应复杂道路和各种隧道施工；
- (2) 高速喷射：该系列混凝土湿喷台车作业方量可达  $30\text{m}^3/\text{h}$ ，较干式、小型湿式湿喷机作业速率大有提高；
- (3) 大范围喷射作业：臂架为一个整体滑移、两级回转、三个折叠、一个小臂伸缩结构，一次定位喷射高度覆盖  $17.5\text{m}$ 、喷射宽度覆盖  $31.4\text{m}$ 、喷射纵向覆盖  $15.3\text{m}$ ，实现喷射无死区、死角；
- (4) 遥控操作，安全环保：前后封闭式驾驶室有效保障驾驶视野、符合驾驶习惯，无线遥控使操作人员远离掌子面，有效提高设备操作安全性；
- (5) 泵送平稳，不易堵管：采用国内先进泵送机构，S 管变径平缓，泵送阻力小，泵送行程国内最长，有效降低脉动冲击，泵送混凝土平稳性好，不易堵管；
- (6) 灵活臂架，便捷喷射：臂架采用两级回转和整体滑移，同时具有三个折叠和一节伸缩的功能，垂直回转可模拟隧道轮廓进行喷射作业；
- (7) 回弹率低：喷射姿态、泵送方量和速凝剂量由遥控器实时调节，添加剂掺量自动跟随，混凝土回弹率可控制在  $10\%$  以下；
- (8) 遥控远程驾驶：通过远程指挥中心可遥控操作湿喷机驾驶，底盘具有路况信息识别功能，遇到障碍物自动刹车制动；
- (9) 快速轮廓扫描：激光扫描仪具有  $216^\circ$  扫描范围，每秒高达万点扫描速度，扫描时间小于 2 分钟，扫描结束后隧道轮廓数据自动导入车载电脑；
- (10) 信息化程度高：湿喷台车可记录施工过程中的各项参数，自动生成施工日志，并上传到大数据平台，进行远程数据分析。

## 2.4 智能锚杆台车

锚杆台车是钻爆法施工隧道支护设备，是在井下巷道顶板或侧帮中钻凿锚杆孔并完成部分或全部安装锚杆工序的自移式设备可广泛应用于铁路、公路、水利等领域隧道和边坡的支护作业。随着矿山井巷、隧道等地下工程锚杆支护作业的普及与发展，国外各大矿山设备公司都相继推出了功能全、自动化程度高的智能锚杆台车，真正实现了锚杆支护施工的高度机械化、智能化，从而减轻了工人负担，提高了工作效率和施工质量。以下以铁建重工生产的 MTZ141 智能型锚杆台车对其功能特点进行介绍：



图 2.4 MTZ141 智能型智能锚杆台车

(1) 作业质量高，速率快。打孔定向、定深，准确保证锚杆孔深度、角度，确保施工质量达到设计要求；可在 2min 内完成 5m 深钻孔作业，2min 内完成锚杆安装及注浆；

(2) 一键操作，智能自动，可实现一键自动钻孔、安装锚杆、注浆作业；自动识别锚杆施工图，准确定位锚杆支护位置；自动记录、存储锚杆施工日志，便于优化锚杆施工路线和注浆。可自动抓取网片、自动挂网，可在 2min 内完成挂网；

(3) 多功能广泛适用。可实现系统锚杆、锁脚锚杆施工作业，广泛适应各种工况要求；满足先注后锚式及先锚后注式锚杆施工方式；适用于锚网安装、辅助撬毛、辅助铺设防水板、隧道设备安装等施工作业；

(4) 精确定位。通过使用全站仪，实现台车在隧道内的精确定位；

(5) 舒适驾驶，操作简单。全封闭式驾驶室，内置冷热空调，改善操作环境；总线复合手柄，操作简单。

## 2.5 智能防水板铺挂台车

防水板铺设常规采作业台架人工铺设的方法，存在劳动强度大、铺设效率低、搭接尺寸误差大、安全隐患大等问题，难以满足施工进度、施工质量和隧道标准化施工的要求。对此，不少企业开始往智能化、自动化方向研制新型防水板铺挂台车。以下以中铁一局集团有限公司设计的一种新型防水板铺挂台车为例介绍其功能特点：

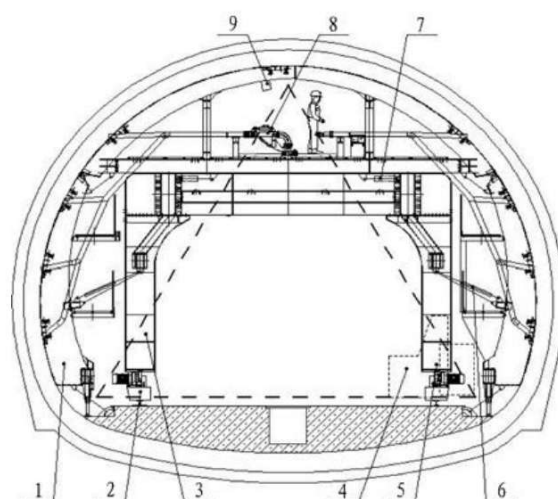


图 2.6 防水板铺挂台车

- (1) 操作简易，只需 2~3 人即可操作；
- (2) 安全性高，作业人员无需上下攀爬、走动；
- (3) 工况适应性好，针对初期支护表面凹凸不平现象，设置了圆柱形气囊压紧装置，可通过气囊将防水板（土工布）服贴在隧道工作面上，可满足不同工况；
- (4) 铺挂全自动化，防水板固定在滚轴上，滚轴通过沿拱圈运动的小车固定，将防水板沿着隧道开挖面运动，从而实现防水板铺设的机械化作业，耗时短。

## 2.6 智能衬砌台车

隧道衬砌台车是隧道施工过程二次衬砌施工中的必要设备。随着国内高速铁路建设快速发展，隧道设计占比越来越大，传统隧道二次衬砌混凝土施工过程中出现局部蜂窝麻面、拱顶空洞、施工冷缝、错台等质量通病以及二次衬砌浇筑时间长、工效指标低等现象，为此，近年来隧道衬砌台车的设计和生逐渐朝着信息化、智能化的方向发展。以下以中铁隧道局集团有限公司设计的自动布料带压浇筑隧道智能衬砌台车为例介绍其功能特点：



1—模板系统；2—行走系统；3—双跨结构；4—信息监测与评估系统；5—顶升系统；6—连接支撑件；7—横移油缸；8—布料系统；9—拱顶振捣系统。

图 2.6 自动布料带压浇筑隧道智能衬砌台车设计图

- (1) 采用自动布料封闭管路带压浇筑系统，能实现分层逐仓浇筑，减少混凝土离析和污染，实现单次换管 2~3min，提高效率 35%以上，节省人工 50%以上；
- (2) 拱部采用自动振捣器，混凝土不密实减少 85%以上；
- (3) 运用双模式控制系统，提升定位精度和安全性，比普通台车定位时间缩短 30min 以上；
- (4) 采用“V”形槽零搭接装置，可避免施工缝顶裂和压溃，且利用可视化堵头板，方便施工；
- (5) 应用智能集成控制系统，可实现自动布料、自动振捣、自动监测和自动生成数据报表，实现人机交互。

## 2.7 智能养护台车

隧道衬砌混凝土浇筑后的养护施工环节非常重要，目前我国大部分隧道施工衬砌混凝土仍采用人工养护，存在养护效率低、效果差等现象，导致混凝土脱水使得混凝土表面出现病害，影响隧道衬砌结构的耐久性和使用功能。因此近年来隧道施工中逐渐开始引入智能养护

台车来满足衬砌混凝土的养护需求。以下以中铁隧道局集团有限公司研制的自动喷雾养护台车为例来介绍其功能特点：



图 2.7 自动喷雾养护台车现场应用图

（1）自动化程度高，喷雾养护台车开启后，自动在轨道区间内往复循环行走，设备自动行走系统启动平稳，定位准确，自动养护过程中无需人工干预，能有效降低人为因素影响，提高养护质量，同时大大减少了施工人员投入；

（2）控制系统通过检测元器件能够实时监测隧道表面温度和湿度状态，及时有效地进行隧道混凝土养护作业；

（3）喷雾效果均匀，水量控制合理，提高了水资源利用效率，减少了不必要的浪费，提升了混凝土养护质量。

### 3. 盾构法隧道智能拼装技术

#### 3.1 盾构隧道底部弧形预制件智能拼装

为解决传统盾构隧道弧形件(口子件)在拼装施工中存在的拼装工艺不先进、拼装精度差、装备智能化程度低、施工进度慢等技术难题，中铁隧道局集团有限公司通过引进装备设计和智能化控制理念，采用弧形构件内部穿行式设计思路，结合毫米级负载敏感液压系统和亚毫米级位姿测量系统，研制了可实现弧形件一键智能化拼装的穿行式弧形件智能安装机，并在上海轨道交通市域线机场联络线工程 JCXSG-11 标工程首次应用了该设备，取得了良好的拼装效果。其功能特点如下：

（1）安装机液压系统控制精度达 0.5mm，弧形件拼装精度达 $\pm 5\text{mm}$ ，实现高精度拼装；

（2）安装机通过智能化控制技术，实现了一键式操作，每循环工作耗时 18min，提高施工效率 30%以上，节省人工 50%以上；

（3）穿行式弧形件智能安装机工作性能稳定可靠，可实现运行状态、控制方式、传感器数据、液压油缸行程数据、通信状态等参数记录与储存，实现人机交互。

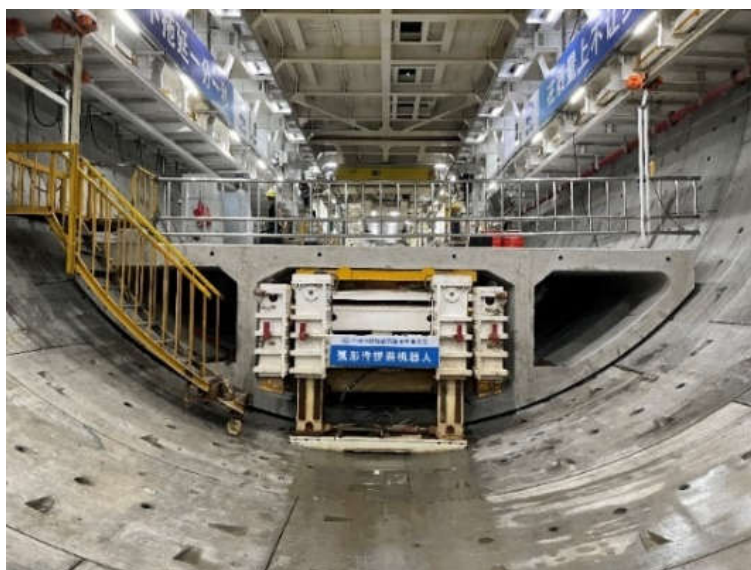


图3.1 弧形件安装机现场应用图

### 3.2 盾构隧道中隔墙预制件智能拼装

为解决传统盾构隧道中隔墙在洞内现浇施工中存在的施工干扰大、施工工序复杂、施工技术手段落后、施工质量难以保障等问题，中铁隧道局通过引进智能化装备设计与装配式预制拼装施工理念，采用双跨式门架结构设计思路，研制了一台可实现中隔墙一键智能化拼装的门架式中隔墙安装机，并在上海轨道交通市域线机场联络线工程 JCXSG-11 标工程首次应用该设备，取得了良好的应用效果。其功能特点如下：

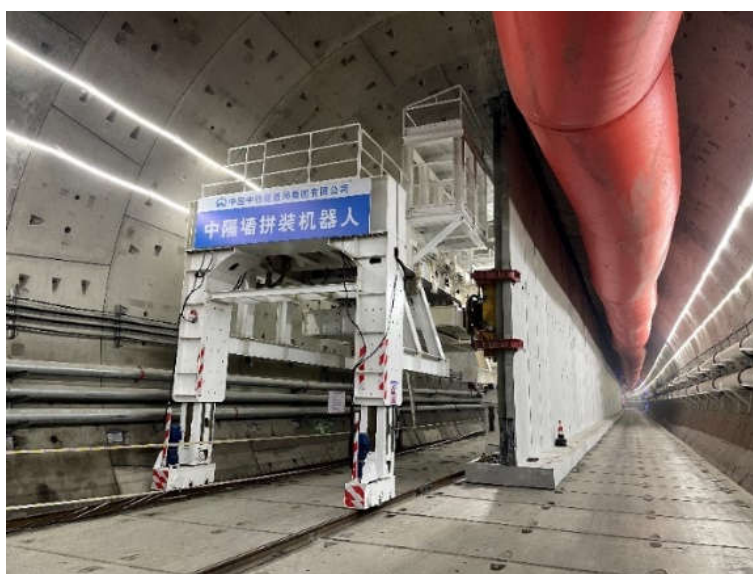


图3.2 中隔墙安装机现场应用图

(1) 安装机系统控制精度与同步精度达 0.5mm，中隔墙拼装精度达 $\pm 3\text{mm}$ ，实现高精度拼装；

(2) 安装机通过智能化控制技术，实现了一键式操作，每循环工作耗时 38min，提高施工效率 30%以上；

(3) 门架式中隔墙智能安装机工作性能稳定可靠，装配式预制构件成品拼装质量可控，改善施工环境，实现快速与绿色施工。