

建筑工程智能建造施工指南

(征求意见稿)

2025年11月

前言

智能建造概念是 2018 年提出的，当年教育部正式批准增设智能建造专业。2020 年住建部等十三个部委联合发布了《推动智能建造与建筑工业化协同发展》（建市〔2020〕60 号），开始在全行业推进智能建造技术发展及应用。2021 年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出发展智能建造，从国家层面将发展智能建造列为推进新型城市建设、全面提升城市品质的重要内容。

智能建造是以智能技术为核心的信息技术与先进制造技术、工业化建造技术深度融合形成的工程建造新模式。在智能建造的技术体系中，建筑信息模型（BIM）技术和人工智能（AI）技术无疑占据重要地位。在不断涌现的数智技术中，大多数技术源自工信系统，我们可以“拿过来”直接应用，例如 4G/5G、IoT、大数据、云计算等技术，而 BIM 和 AI 技术不同，BIM 是建筑行业特有的技术，自从 2002 年 BIM 概念产生以来，BIM 的理念已经深入人心，BIM 的重要性和价值在行业已得到共识。AI 技术为人类提供了重构现实物理世界和数字世界的机会，2025 年 8 月国务院发布了《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》，我国正通过政策引导、产业应用和国际合作加速打造“人工智能+”优势。自 2022 年以来，以 ChatGPT 为代表的大模型展现出优秀的语言理解与文本生成能力，在国内外掀起研究热潮。特别是 DeepSeek 极大降低了大模型的应用门槛，推动 AI 从技术探索迈向产业化落地的高速发展阶段。但国内外现有 AI 大模型难以满足建筑工程应用与发展需求，需要构建并应用建筑工程领域大模型，才能具备为建筑工程应用场景提供支撑的能力，才有可能依托大模型实现建筑工程领域的智能化突破。

智能建造，标准先行。为深入贯彻落实《国家标准化发展纲要》和《质量强国建设纲要》战略部署，以推动建筑业高质量发展为主线，坚持新型工业化、绿色化、智能化、国际化协同发展，构建覆盖全产业链、全生命期、全要素的“三造融合、四化协同”新型中国建造标准体系，为打造“中国建造”升级版提供标准化支撑，2025 年 6 月，中国工程建设标准化协会启动中国建造标准体系研究课题，智能建造工作委员会负责组织研究编制了《智能建造标准体系》。为配合《智能建造标准体系》的落地实施，智能建造工作委员会又组织编制了《建筑工程智能建造设计指南》和《建筑工程智能建造施工指南》（以下简称《指南》）。两

本《指南》的编制，重点考虑了如下几方面因素：

一是对智能建造的理解。行业对智能建造存在不同的定义和理解，主要表现为关注重点和实现程度的不同，并没有本质区别，其核心理念都可以表述为“数据驱动、技术赋能、融合应用”，即基于数据决策实现从业人员脑力替代和延伸、利用技术赋能实现从业人员体力替代和延伸、以融合应用升级现行建造方法，实现质量和效率的提升，这两本《指南》就是按照“数据驱动、技术赋能、融合应用”的核心理念组织编写的。

二是《指南》的定位。数字化奠定了智能化的基础，智能化是数字化的延伸，智能建造需要以数字建造为基础，当前行业数字建造转型尚未完成，智能建造处于起步阶段，数字建造和智能建造同步发展，数字建造仍是《指南》的主要内容，即本《指南》描述的智能建造包括数字建造的内容。

三是《指南》的时效性。目前，工程项目数据的价值尚未得到充分利用，不同工程活动数据驱动的方法和程度也不在同一水平上。各类数智技术软件、硬件、工具、设备、装备的功能、性能、智能化程度参差不齐，还不能完全满足智能建造的要求。项目建设技术和管理体系、从业人员智能建造能力处于从现行建造方式向数字建造和智能建造转型的过程中，实际项目建设过程传统建造、数字建造、智能建造几种方式并行，还没有实现智能建造方式贯穿项目建设全过程。所以，在设计指南中聚焦 BIM 技术和 AI 技术的应用，在施工指南中聚焦 BIM、AI、IoT 等技术在施工项目策划、方案优化、过程管理中的应用，以及数字化和智能化工具、设备和装备在具体业务中的应用。

智能设计指南包括 11 章正文和 3 个附录。第 1 章概述介绍 BIM 设计、AI 设计与智能设计的关系，第 2 章介绍开展智能设计前需要完成的准备工作和具备的前提条件，第 3-7 章按专业介绍建筑、结构、给水排水、暖通空调、电气各专业的智能设计具体做法，第 8 章介绍精装修、幕墙、园林景观、小市政等专项智能设计实施方法，第 9 章介绍智能设计的设计协同和质量管控，第 10 章介绍设计企业如何应对目前部分城市正在开展的 BIM 施工图审查要求，第 11 章介绍设计施工多层次协同提升智能建造水平和效率的方法。附录 A 介绍智能设计的典型硬件环境和与各章节应用场景对应的常用软件产品，附录 B 介绍 BIM 施工图审查的主要内容，附录 C 提供了若干智能设计项目案例。为了方便指南使用，所有

智能设计应用场景从使用技术、输入数据、工作流程、交付成果等几个维度进行介绍，部分场景还提供了应用案例。

智能施工指南包括 7 章正文和 1 个附录。第 1 章介绍智能施工“数据驱动、技术赋能、融合应用”的基本概念，第 2 章介绍实施智能施工需要的前期策划工作，第 3 章介绍现浇混凝土结构、装配式混凝土结构、钢结构、机电、幕墙、装饰装修等分部分项的深化设计实现，第 4 章介绍施工现场开展智能施工前需要完成的准备工作和具备的前提条件，第 5 章介绍地基基础、主体结构、机电安装、装饰装修等工程现场智能作业中具有代表性的技术、设备、装备应用，第 6 章介绍项目资源、进度、质量、安全、成本、资料等智能管理典型流程与场景落地，第 7 章介绍施工过程、竣工验收、竣工档案和运营维护等智能交付的典型清单。附录 A 汇总了指南使用的专业术语英文缩写与中文对照。为了方便指南的使用，所有智能施工所涉及的场景、技术、设施、思路、典型流程等，都着重描述与现有施工的不同之处。

从理论上讲，智能建造应具有数据驱动或模型算法驱动，具备自感知、自学习、自决策、自执行、自控制，人机共融等特点。但目前 BIM 技术还未实现普及应用，行业数字化转型还未完成，数字化基础还需进一步夯实；AI 技术还处于快速迭代发展中，建造机器人等智能装备也在探索发展中，目前工程项目的“智能化”水平与理想中有较大差距。智能建造发展需要一个较长时间的过程，将随着技术进步和产业发展逐步提升。目前尚不具备按项目建设全过程智能建造方式编写《指南》的条件，这里采取的方式是对当前和可预见未来智能建造渗透程度较高的工程任务或工程活动的智能建造实现方式和路径，按“数据驱动、技术赋能、融合应用”核心理念进行介绍。为了使《指南》具备更好的可阅读性和可操作性，各部分内容都列举了目前智能建造正在使用的一些常用产品，这些产品既不代表全部可用产品，也不代表《指南》推荐使用的产品，列举产品的目的只是《指南》内容叙述的需要。

由于我们的调查、研究范围有一定局限性，两本《指南》中有些观点和描述可能存在偏差或片面性，有些结论和描述也可能是针对当前状态。特别是限于作者能力、经验和水平，两本《指南》内容可能还存在不能令人满意之处，也不一定完全正确，期待同行批评指正，以期下一版有所改进和提高。

目录

1 概述	1
1.1 智能施工.....	1
1.2 数据驱动.....	2
1.2.1 数据供给.....	2
1.2.2 数据管理.....	4
1.2.3 数据治理.....	5
1.2.4 数据应用.....	7
1.3 技术赋能.....	8
1.3.1 建筑信息模型（BIM）技术.....	9
1.3.2 人工智能（AI）技术.....	9
1.3.3 物联网技术.....	10
1.3.4 智慧工地系统.....	11
1.3.5 智能装备与建筑机器人.....	12
1.3.6 智能检测与质量控制技术.....	14
1.4 融合应用.....	15
2 智能施工策划	17
2.1 概述.....	17
2.2 智能施工目标确定.....	17
2.3 智能施工工艺分析.....	18
2.3.1 智能施工场景分析.....	18
2.3.2 智能施工技术应用分析.....	25
2.3.3 智能施工工艺流程.....	28
2.4 智能施工支撑保障.....	30
2.4.1 组织保障.....	30
2.4.2 制度保障.....	31
2.4.3 标准保障.....	32
2.5 智能施工方案生成.....	33
3 智能施工深化设计	36

3.1 总体思路.....	36
3.1.1 核心原则.....	36
3.1.2 流程框架.....	37
3.1.3 主要场景.....	38
3.2 现浇混凝土结构深化设计.....	40
3.2.1 应用技术.....	41
3.2.2 输入数据.....	41
3.2.3 工作流程.....	42
3.2.4 成果交付.....	44
3.2.5 参考案例.....	44
3.3 装配式混凝土结构深化设计.....	46
3.3.1 应用技术.....	46
3.3.2 输入数据.....	47
3.3.3 工作流程.....	47
3.3.4 成果交付.....	50
3.3.5 参考案例.....	51
3.4 钢结构智能深化设计.....	52
3.4.1 应用技术.....	52
3.4.2 输入数据.....	53
3.4.3 工作流程.....	53
3.4.4 交付成果.....	55
3.4.5 参考案例.....	55
3.5 机电工程深化设计.....	56
3.5.1 应用技术.....	57
3.5.2 输入数据.....	57
3.5.3 工作流程.....	58
3.5.4 交付成果.....	61
3.5.5 参考案例.....	62
3.6 幕墙工程深化设计.....	63

3.6.1 应用技术.....	63
3.6.2 输入数据.....	64
3.6.3 工作流程.....	65
3.6.4 交付成果.....	67
3.6.5 参考案例.....	68
3.7 装饰装修深化设计.....	69
3.7.1 应用技术.....	69
3.7.2 输入数据.....	69
3.7.3 工作流程.....	71
3.7.4 交付成果.....	72
3.7.5 参考案例.....	73
3.8 发展展望.....	74
4 工地智能设施.....	78
4.1 概述.....	78
4.2 工地智能设施组成.....	78
4.2.1 感知设施.....	80
4.2.2 传输设施.....	84
4.2.3 存储设施.....	86
4.2.4 计算设施.....	87
4.2.5 控制设施.....	88
4.2.6 终端设施.....	89
4.2.7 管理系统.....	90
4.3 设施建设与维护.....	91
4.3.1 专项设计.....	92
4.3.2 设施部署.....	93
4.3.3 调试验收.....	94
4.3.4 运行维护.....	95
4.4 发展展望.....	96
4.4.1 制约因素.....	96

4.4.2 对策建议.....	99
4.4.3 发展趋势.....	100
5 现场智能作业.....	103
5.1 概述.....	103
5.1.1 现场智能作业核心技术.....	103
5.1.2 现场智能作业设备.....	104
5.2 地基基础工程智能作业.....	105
5.2.1 智能勘察与测量.....	105
5.2.2 智能土方与基坑作业.....	108
5.2.3 桩基工程智能化施工.....	110
5.3 主体结构工程智能作业.....	111
5.3.1 智能测量与放样.....	111
5.3.2 智能钢筋加工与绑扎.....	112
5.3.3 智能升降机作业.....	113
5.3.4 智能混凝土施工.....	114
5.3.5 智能吊装作业.....	117
5.3.6 智能装配作业.....	118
5.4 机电安装工程智能作业.....	118
5.4.1 基本要求.....	119
5.4.2 线缆敷设机器人作业指南与质量控制要点.....	119
5.5 装饰装修工程智能作业.....	119
5.5.1 室内智能放线.....	120
5.5.2 墙面/地面/天花智能施工.....	120
5.6 发展展望.....	123
6 项目智能管理.....	125
6.1 概述.....	125
6.2 资源智能管理.....	126
6.3 进度智能管理.....	132
6.4 质量智能管理.....	133

6.5 安全智能管理.....	135
6.6 成本智能管理.....	138
6.7 资料智能管理.....	140
6.8 综合管理平台.....	141
7 施工智能交付.....	145
7.1 概述.....	145
7.2 施工过程交付.....	147
7.3 竣工验收交付.....	148
7.4 竣工档案交付.....	148
7.5 运营维护交付.....	150
7.6 发展展望.....	151
附录 A.....	153

1 概述

1.1 智能施工

根据《建筑工程智能建造标准》（T/CECS 1500-2024），智能建造是以智能技术为核心的信息技术与工业化建造技术、先进制造技术深度融合形成的工程建造创新模式。根据住房和城乡建设部发布的《智能建造技术导则（试行）》，智能建造是新一代信息技术与工业化建造技术深度融合形成的人机协同建造方式。智能施工是智能建造的主要环节之一，上承智能设计，协同智能生产与采供、智能监管，下启智慧运维，是将设计成果转化为具体实物成果的关键落地环节，其实施过程中需要接收和产生大量数据，并运用大量数智技术与应用。它不仅关注施工阶段的单点技术创新，更强调施工系统的整体协同优化与数据驱动的全过程管理，其核心在于“数据驱动、技术赋能、融合应用”。行业除了使用智能施工这个术语外，同时也会使用数字化施工、信息化施工、数智施工、智慧施工等术语，其侧重点略有不同，可理解为对智能施工不同阶段、不同程度的描述。

智能施工技术种类较多，根据应用的成熟度和普及度可以分为两大类：第一类是目前已经较为成熟且普及度较高的技术，如计算机辅助设计（CAD）、工程算量和计价、视频监控、无人机摄影、土建机电各专业计算分析、办公自动化、财务管理、GIS等；第二类是有一定程度的应用，但技术上未完全成熟，也没有完全普及的技术，如建筑信息模型（BIM）、智慧工地、建筑机器人、三维扫描、基于大模型的生成式AI、大数据分析预测、机器视觉、物联网与边缘计算、面向施工的数字孪生、区块链、无人化与自动驾驶设备等。

除了某项单一技术的单独应用，多项不同技术之间的综合或集成应用对提高施工效率和质量也至关重要。

本指南重点关注目前尚未完全成熟和普及的技术，以及不同技术之间的综合和集成应用。对于较为成熟的技术，本书不再专门展开。

本章主要介绍智能施工的基本概念，以及“数据驱动、技术赋能、融合应用”的内涵，为了使本指南具有更好的实用性，本书各章都列举了一些技术、工具、

系统，但这些产品既不代表全部可用产品，也不代表本指南推荐使用的产品，列举某一产品的目的只是为了介绍智能施工的需要。

1.2 数据驱动

智能的能力形成，需要高质量数据集的训练。智能的决策处置，需要充分、有效的业务数据。数据驱动是智能施工有别于现有施工的一个主要特点。智能施工将现有施工现场的以人工经验驱动为主逐步转化为以结构化数据驱动为主。数据驱动应重点关注数据的供给、管理、治理和应用。数据采集包括采用视频监控、无人机航测、激光扫描、传感器等技术，既可以收集施工现场的场景环境数据，也能收集任务数据，这一类技术已有很多成熟的介绍。本章重点介绍驱动智能施工的数据来源、如何管理这些数据，以及如何应用这些数据。

1.2.1 数据供给

“数据驱动”的关键在于数据的质量与数量。结构化的高质量数据，是数智技术发挥作用的前提；数据量的规模，是数智技术应用效果的支撑。“数据驱动”以数据供给为基础。

智能施工需要的数据有哪些？可以从业务内容、采集方式、所有方、功能属性（如基础数据、过程数据、环境数据等）等不同方面描述。下面着重介绍按施工阶段和数据采集方法划分的两种数据来源。

（一）从业务内容来看，智能施工的数据来源包括设计、施工策划、项目环境、施工任务和竣工交付等。

设计数据包括 BIM 模型、设计计算书、施工图纸、设计参数、材料清单等设计成果，具体数据如构件尺寸、荷载设计、材料参数、设计变更等。

施工策划数据包括招投标数据、成本预算、施工组织设计、进度计划、物资计划等，具体数据包括合同清单、预算清单、供应商信息等。

项目环境数据，反映施工现场的物理环境与外部条件，属于“背景数据”。如现场视频采集、传感器监测、施工日志、三维激光扫描等，具体数据如混凝土强度监测、构件尺寸数据等。

施工任务数据,反映施工行为本身,是“行动数据”。如任务计划与进度数据、资源投入数据、工序与作业参数数据、成本与产值数据等,具体数据如施工任务清单、计划工期与实际工期、关键路径、设备运行时长、材料用量、混凝土浇筑温度、振捣次数、坍落度等等。

竣工交付数据是整个智能施工的成果汇聚,是从施工阶段到运维阶段的衔接。该阶段数据主要反映工程实体的最终状态、性能与合规性,属于成果性与验证性数据。包括竣工验收记录、竣工图、设备运行数据、质量检测数据等,也可按照施工单位、监理单位、设计单位等数据来源主体进一步划分。

(二)从数据采集方式来看,数据采集主要有三种方式,通过传感器与自动化设备的自动采集、人工采集和其他系统传递,下面根据采集方式列表展示典型的数据来源。

表 1-1 按数据采集方式划分数据来源

采集方式	典型数据来源	主要采集设备或手段	采集内容
一、自动采集	结构与环境监测系统	应变计、位移计、温湿度传感器、风速计、噪声计、光照传感器	结构应力、应变、挠度、温湿度、噪声、振动等连续监测数据
	设备运行监测系统	塔吊监控系统、泵车智能终端、挖机/运输车数据盒、能耗采集装置	设备运行时长、载荷、能耗、GPS 轨迹、电流、电压等
	视频与视觉识别系统	高清摄像头、AI 视觉算法、无人机航拍、移动视频终端	作业行为识别、人数统计、进度识别、质量缺陷检测
	三维扫描与测绘系统	激光扫描仪、摄影测量系统、无人机航测	构件尺寸、空间位置、形变与点云数据
	RFID 与定位系统	RFID 标签、蓝牙信标、北斗/GPS 定位模块	材料追踪、设备位置、人员定位与轨迹
	物联网与边缘采集网关	IoT 传感终端、工业网关、数据采集器	现场多源数据实时汇聚、边缘计算与预处理
二、人工采集	移动巡检与现场记录	平板电脑、手机 APP 等人工输入	巡检记录、质量验收表、安全隐患上报、照片与语音备注
	施工日志与任务填报	施工日志系统、班组任务、进度填报等人工输入	每日任务完成量、资源投入、作业时长、异常记录
	检测与试验报告录入	试验室检测数据、监理系统等人工输入	混凝土强度、焊缝检测、防水测试等检测结果

	管理系统录入数据	项目管理信息系统（PMIS）、成本管理系统、合同管理系统人工输入	计划进度、合同金额、成本支出、支付记录
三、其他管理系统输入	外部系统接入数据	政府监管平台、气象数据平台、供应链系统	气象信息、政策许可、材料价格、运输信息

1.2.2 数据管理

智能施工的数据管理，是指在施工项目的实际运行过程中，对围绕施工活动产生的数据，进行记录、传递、校核、归档和动态更新的全过程管理。数据管理的核心在于如何让数据真实、准确、连续地反映施工过程，其目标是让数据真实反映现场、动态服务管理、可靠支撑决策。可以通过五个步骤来落地。

（一）建立数据责任体系：明确“谁来管”

在智能施工中，数据管理的首要任务是明确责任主体，建立清晰的数据管理体系。项目各参与方需根据职责分工，落实数据采集、审核、归档与使用的责任。如项目经理应对数据的真实性与完整性负总责，信息化或技术负责人负责数据标准与接口的规范性，数据管理员承担数据汇总、备份、版本控制与传输任务，而专业工程师和班组长则负责现场数据录入与核实，监理单位对关键数据进行第三方验证与签认。通过建立“采集人—审核人—归档人—使用人”的责任链条，实现数据从源头到成果的可追溯与可问责，确保施工数据有“主”、有“责”、有“据”。

（二）规范数据记录与流转路径：明确“数据怎么走”

数据管理的核心在于形成规范、连续的数据流。施工过程中产生的各种数据应按规定格式、固定频率进行记录，并遵循既定路径在项目各层级间流转。如施工班组采集的任务数据与巡检记录，经专业工程师汇总核对后，提交项目数据管理员统一存储；传感器和自动化设备采集的监测数据，应自动上传至项目数据库，并设定更新频率与校验机制。通过“采集—传递—校核—归档—更新”五步闭环，保证数据流向清晰、内容完整，既避免重复录入，也防止信息断层，使施工数据能够真实反映工程进展。

（三）强化数据质量控制：保证“数据可信”

数据的价值取决于其真实性与准确性。施工管理者需建立系统的数据质量控

制机制，对进度、质量、安全等关键数据进行多层校验与交叉验证。不同来源的数据应相互印证，例如进度记录应与传感器监测结果、施工日志保持一致；人工录入数据应设时限与审核程序，防止滞后与遗漏；监理单位应定期抽查关键数据，并对检测报告、材料批次等敏感信息进行现场核对。所有修改操作均需留痕，确保版本可追溯。只有数据可靠，智能分析与决策才能真正反映施工现场的客观状态。

（四）建立数据存储与归档体系：确保“数据不丢、能查、能用”

施工数据的存储与归档应贯穿项目全周期，形成分层分类的管理体系。实时监测类数据可由现场服务器或云端数据库自动存储与备份；阶段性数据如周报、质量检查表等，应定期整理成标准化文件；竣工阶段的成果数据则统一归档，形成完整的数字化移交资料，包括竣工 BIM 模型、检测报告和验收记录。关键数据如合同、签证、设计变更等应长期加密备份，防止丢失或篡改。科学的存储体系不仅保证数据安全，也为后续复盘分析、竣工验收和运维管理提供可靠依据。

（五）推动数据服务化应用：让数据“为施工服务”

数据管理的最终目的在于让数据反哺施工，实现“用数据管项目”。施工现场积累的大量任务数据、监测数据和资源数据，应通过信息化平台进行分析与可视化呈现，用于进度偏差识别、质量追溯、安全预警、成本核算等智能决策。例如，进度数据可生成动态工期曲线，传感器数据可用于风险预测，资源投入数据可反映成本变化趋势。通过将数据嵌入日常管理流程，形成从采集到决策的闭环，智能施工才能真正实现从经验驱动向数据驱动的转变，使数据成为提升工程质量与管理水平的核心生产力。

1.2.3 数据治理

智能施工的数据治理，是在企业与项目两个层级对施工数据进行统筹与规制的顶层安排。其目的在于用统一的语义体系、清晰的权责划分和稳健的制度框架，保证数据在产生、沉淀、交换与应用的全过程中被正确理解、被规范使用、被合规共享，并能被审计与追溯，从而为数据驱动、技术赋能与融合应用提供可靠的规则环境。

（一）治理目标与适用边界

数据治理首先明确追求的目标与适用范围。治理的基本取向是统一口径，强调以一致的术语、度量与统计方式描述同一对象；坚持价值导向，使治理服务于工程质量、安全、进度与成本等核心目标，而非为制度而制度；遵循最小必要原则，在满足业务需要与合规要求的前提下，尽量减少不必要的收集与暴露；覆盖全生命周期，使规则贯穿数据的形成、保存、使用、共享与处置各环节；注重风险可控与可审计，使每一次访问、共享与变更都能够被解释与复核。适用对象包括主数据、业务过程数据、监测与传感数据、模型与图纸数据以及影像与文档资料；适用边界覆盖项目内部、企业内部以及与外部协作单位开展数据交换与成果移交的情形。

（二）治理组织与权责

数据治理需要稳定的组织与责任体系予以承载。企业层面应设置治理委员会或归口部门，负责方向把握与制度发布；项目层面建立治理小组，落实落地要求与沟通协同。围绕关键数据域设立数据所有者与数据管理员两个核心角色：前者对语义口径与规则变更负责，后者对目录与元数据的完整性与时效负责。安全与合规岗位承担授权管理、日志审计与问责处理。通过职责分工，将业主、总包、分包、监理与第三方的职责边界加以固化，做到责任到人、流程有据。

（三）制度与标准体系

治理的权威性依赖于成体系的规则文件。应形成一套可执行、可审核、可追溯的制度群，包括：指标口径与数据项字典，用以界定定义、单位、统计口径与适用场景；主数据命名与编码规则，使构件、工区、楼层、设备、人员与合同等对象实现一体化标识；时间基准与空间基准的统一，确保模型、测量网与坐标体系一致；接口与交换规范，覆盖传感器、设备与机器人数据接入，以及模型平台与业务系统的数据交换；资料移交与保留期限的规定，明确归档、存放与销毁的程序；模型版本与命名、例外情形与应急处置、保密等配套规则。所有文件需注明适用范围与生效日期，并保持与项目阶段相匹配的更新节奏。

（四）资产目录、元数据与数据血缘

治理要求“家底清、语义明”。应建立由系统、数据域、表或文件、指标与责

任人五个层级构成的数据资产目录；同步完善元数据，记录各项数据的业务含义、取值范围、统计周期、更新节奏与质量阈值，并标注适用的管理与应用场景；建立数据血缘，说明数据的来源、加工环节与去向，用于开展口径追溯、影响评估与合规审计。上述三者相互支撑，一方面为跨系统与跨单位协同提供共同语言，另一方面为变更与复核提供依据。

（五）变更、合规与治理评估

治理不是一成不变的静态清单，而是与项目进程同步演进的约束体系。对语义口径、模型版本、接口字段与授权策略的任何调整，都应完成影响分析与审批，发布时说明生效日期与影响范围，并保留可比对的历史基线。合规与风险管理应形成清单化管理，覆盖个人信息、商业秘密、结构安全与合同结算等敏感领域，并规定脱敏、去标识与对外披露审查的具体做法。为保证治理成效，应设置面向治理本身的评估指标，例如标准覆盖情况、语义冲突的发现与消解情况、版本一致性的达成情况、共享申请的办理效率以及审计的通过率等，并结合阶段性评估与整改记录，推动制度持续改进。

1.2.4 数据应用

数据应用是智能施工体系的核心环节，是指以施工现场采集与管理的数据为基础，通过分析建模与系统集成，实现进度、质量、安全、成本等施工过程的科学决策与智能控制。对施工管理者而言，数据应用的目的不是“做报告”，而是要让数据成为现场指挥、资源配置和风险预警的依据，从“凭经验决策”转向“凭数据决策”。

数据应用的核心逻辑在于以数据为驱动力，构建“采集—管理—分析—决策—反馈”的闭环体系。通过对施工现场产生的多源数据进行实时汇聚和结构化管管理，形成对施工过程的动态认知，实现从“数据记录”到“数据思考”的转变。施工管理者可通过数据分析发现规律、识别风险、优化决策，使项目管理由被动响应转向主动控制。最终，数据应用不再只是信息的展示，而是形成持续改进的反馈机制，让施工过程具备自感知、自学习和自优化的能力，实现真正意义上的“数据驱动施工”。

数据应用贯穿施工管理的全过程，主要体现在资源、进度、质量、安全、成本和资料、环境等方面。如进度管理方面，通过任务数据、设备运行数据和视频识别信息，动态监测施工进展，实现工期偏差的预测与调整；质量与安全方面，借助检测数据、传感器监测与 AI 识别，实现隐患预警与缺陷追溯；成本与资源管理方面，通过实时采集的人工、材料、机械数据，实现资源最优配置与成本动态控制；环境管理方面，通过粉尘、噪声、能耗与碳排放数据，实现绿色施工与能效分析。通过多维度数据的协同应用，使数据真正成为施工管理的决策依据与优化引擎。

从施工管理者的实践角度看，数据应用需经历“可视—分析—决策”三个阶段。首先是数据可视，即通过数据看板、BIM 模型和 GIS 系统，将抽象数据转化为可观察的施工现场动态，帮助管理者“看见数据”；其次是数据分析，通过统计建模、趋势预测、异常检测等方法，揭示施工过程中的规律与风险，实现“理解数据”；最后是数据决策，借助 AI 算法与规则引擎，将分析结果转化为优化方案与控制指令，使系统能够“用数据决策”。这一路径实现了从数据积累到数据增值的转变，为智能施工提供了持续优化与科学决策的能力。

1.3 技术赋能

行业的发展与升级，往往伴随着技术、方法与工具的深刻变革。回溯人类历史上的几次工业革命——从蒸汽机的广泛应用开启机械化时代，到电力驱动实现大规模生产，再到信息技术催生自动化与数字化浪潮——每一次跃迁都以关键技术的突破为核心驱动力。技术的赋能，不仅重塑了生产方式和产业结构，更极大地提升了社会生产力。同样，面向未来的智能施工，也离不开先进技术和智能化工具的支撑与落地。唯有依托前沿技术工具，才能真正实现施工过程的智能化、精细化与高效化，推动建筑行业迈向高质量发展的新阶段。智能施工涉及 BIM、IoT、AI、智慧工地、智能装备与建筑机器人、智能检测等众多核心技术，以下选取典型技术进行介绍。

1.3.1 建筑信息模型（BIM）技术

BIM 作为工程全生命期数字化的主要技术，近年来在全球得到普及和深入应用。BIM 技术不断与云计算、移动端结合，实现协同设计、4D/5D 施工模拟、运维管理等多用途应用，BIM 是智能施工的主要数据来源之一。设计阶段，BIM 以构件为载体集成尺寸、材料、性能与编码体系，通过标准化族库与规则校核实现碰撞检查、净空审查与专业协同，显著降低设计变更与错漏碰缺；施工策划，BIM 与进度、成本、机械设备与临设布置关联，形成“模型—工序—资源”的一体化策划模型，支持施工顺序推演、临建设施布置优化与场地物流路径设计；现场实施阶段，BIM 与测量放样、二维码与射频识别联动，实现构件级的到货验收、安装就位与质量追溯，配合影像、点云与传感数据进行偏差分析与实测实量对比，并将问题单与整改闭环直接挂接于构件对象；成本与计量方面，BIM 驱动工程量自动提取与变更差异比对，将清单、合同条款与签证支付与模型要素一一对应，提升计量准确性与索赔准备效率；面向安全与进度控制，BIM 与安全控制点、脚手与模板体系、吊装工况与临边洞口等信息关联，生成可视化的危险源分布与分时分区的作业面计划，便于形成“先策划后上岗、按策划组织施工”的闭环；竣工与运维阶段，BIM 承载设备台账、维保周期、参数与故障记录，结合移动端实现随手查阅、扫码报修与巡检留痕，支撑资产全生命周期管理。总体而言，BIM 由“制图工具”转向“数据载体”，通过与人工智能与物联网的耦合，把设计、采购、施工与运维贯通为以构件为核心的可计算流程，推动施工组织从经验驱动走向数据驱动、从分散管理走向协同管理。

1.3.2 人工智能（AI）技术

近年来，以深度学习、生成式 AI 为代表的人工智能技术飞速发展，成为智能施工不可或缺的主要推动力。人工智能技术在施工领域的应用，可沿“感知—认知—决策—执行”贯穿生产全流程：如深度学习用于从影像与点云中自动识别混凝土裂缝、蜂窝麻面及钢筋间距等关键缺陷，并与 BIM 坐标对齐直接产出偏差量与到位率，使质量检验从抽查走向全量量测；计算机视觉识别用于 PPE 佩

戴与危险行为的实时判别，将人员进出、电子围栏与作业票据联动，形成自动告警、取证、复核闭环，显著降低高处作业、起重吊装等高风险场景的人为疏漏；生成式 AI 用于进度与成本管控，基于标准工序模板自动生成周/日计划与资源清单，快速推演工序调整对工期与费用的影响，并自动形成变更说明与对比清单，提高计划迭代与索赔准备效率；强化学习与组合优化用于设备与物流调度，在塔吊、升降机、混凝土与钢筋配送等多约束条件下给出可执行排程，遇到天气或现场扰动时进行在线重规划，减少等待与冲突；时序预测与因果分析用于识别关键线路滞后与返工风险，结合历史数据与现场记录提前给出“何处会晚、为何会晚”的量化判断，并评估管理措施的实际效果，为资源投放与工序排序提供依据；多模态理解与语音技术用于把图纸、模型与文本说明对齐，自动发现 RFI 与变更中的矛盾点，现场可口述生成检查表与整改项，降低一线录入成本并提升资料一致性；数据治理与 MLOps 用于统一数据口径与版本，建立训练—评测—部署—监控—回滚的工程化流程，以看板化方式将模型表现与业务指标关联，确保模型可观测、可追溯、可迭代。AI 技术是智能施工的重要发展基石，目前也已在施工环节以点状应用形式展开，可以预见，以大语言模型为代表的 AI 技术将会极大赋能建筑施工。

1.3.3 物联网技术

物联网技术在施工现场的大规模应用极大提高了感知和数据采集能力，应用场景包括高支模、基坑、脚手架、塔吊、升降机、吊篮等安全监测，结构健康监测，扬尘、噪声、能耗监测等。通过安装在施工现场的传感器网络，可对环境参数（如温度、湿度、粉尘）、结构状态、设备运行以及人员定位等进行实时监测。数据采集方面，如智慧工地中常见的人员定位和考勤系统、环境监测传感器、设备运行状态传感器等，实现对“人机料法环”的全要素数字化采集。施工安全方面，如穿戴式传感器、智能安全帽和 AI 摄像头实时检测工人是否佩戴安全装备、是否进入危险区域等，一旦发现违规自动报警。管理方面，如利用 IoT 对设备与材料进行管理，采用 RFID 和 GPS 设备跟踪工程设备和材料位置，实现智能库存和防盗监控。再如物联网结合机器智能控制技术，可实现塔吊、挖掘机等大型设备

的远程状态监测和半自动/自动运行。总体而言，IoT 加速了施工现场的信息获取和决策响应，物联网赋能下的智能施工不仅提高了安全性，也提升了进度管理和效率，被越来越多的施工单位视为应对劳动力短缺和成本压力的必要手段。

1.3.4 智慧工地系统

智慧工地系统是指通过集成数智技术（如建筑信息模型 BIM、物联网 IoT、大数据、云计算等），提升建筑施工项目的管理、监控和执行效率，实现施工现场的全面数字化、自动化和智能化。这些技术的核心目标是优化资源调度、提高施工质量、增强安全性、减少浪费，并为项目管理人员提供实时的数据支持和决策依据，从而实现更高效、透明和可持续的建筑施工过程。常见的智慧工地系统如表 1-2 所示。

表 1-2 智慧工地系统一览表

系统类型	技术原理	适用场景	优缺点
劳务实名制与定位	通过人脸识别门禁、智能安全帽、腕带式健康监测等技术进行人员到岗统计、危险区域误入报警，结合北斗进行精准定位	工地现场的人员管理、人员安全监测	优点：提高现场人员管理效率，增强安全性；缺点：设备依赖高，隐私问题可能引起一些担忧，设备维护成本较高
电子围栏与安全管理（视频 AI 识别）	利用视频监控与 AI 算法进行实时违规行为识别（如安全帽穿戴、明火作业、吸烟等），并实时告警	工地安全监控，特别是高危作业区域	优点：实时监控、自动识别，减少人工干预，提高安全性；缺点：对光照和环境变化敏感，可能产生误报，算法需要不断优化
物料自动盘点与成本管理	结合 RFID、地磅称重和车牌识别等技术，自动监控物料的进场、存储、消耗情况，并与合同量进行对比	材料管理、采购、库存控制、成本核算等	优点：自动化、准确，减少人为错误；缺点：设备成本较高，RFID 标签可能受损或丢失，要求稳定的网络环境
合同与成本管理协同	通过云平台和 ERP 系统集成，实现项目合同管理与成本控制的数字化，支持进度与物料数据的实时更新与对接	工程项目的合同管理、进度控制、成本核算等	优点：提升管理效率，确保数据实时更新和反馈；缺点：需要较强的系统支持和企业内部信息化水平，实施成本较高
基于 BIM 的协同管理平台	通过 BIM 技术，支持多种建模软件联合建模，模型轻量化后可在线浏览、批注、版本比对，关联进度、质量、安全和成本模块	项目管理中的设计、施工、运维等阶段的协同工作	优点：提高协同工作效率，减少信息孤岛，优化资源配置；缺点：BIM 实施成本高，要求项目团队熟悉 BIM 技术，协同平台难度大
大数据集成平台	利用云计算和大数据技术，统一 IoT 设备接入标准，汇聚现场人、机、料、法、环数据，并提供 API 接口与其他系统对接	多数据源整合、智能决策支持、项目全程监控等	优点：强大的数据处理与分析能力，支持智能决策；缺点：对数据安全和存储要求极高，需要较强的基础设施支持

移动端协同 (APP/小程序)	提供现场拍照、自动生成整改单、责任人提醒、复查等功能,支持4G/5G实时推送和离线缓存,确保实时同步	现场管理、施工进度监控、问题整改等	优点:便于随时随地管理,提高工作效率,解决无信号环境下的问题;缺点:离线缓存功能依赖设备性能,网络问题可能影响同步
进度协同与BIM 4D模拟	利用BIM 4D技术将施工进度与三维模型进行结合,支持任务滞后预警与关键路径自动重算	工程项目的进度管理与监控,尤其是复杂工程项目的调度和资源管理	优点:实时监控进度,提前识别项目滞后风险;缺点:BIM实施难度大,对项目人员的BIM技能要求较高,设备和系统维护成本较高
质量检测与记录系统	结合BIM、智能检测仪器(如回弹-超声、钢筋扫描等),通过扫码构件、现场拍照、在线审批等方式进行质量检测和记录	质量管理、检查、验收等	优点:高效、精准,质量管理全程可追溯;缺点:设备成本较高,设备和技术维护需求大
安全协同与危大工程管理	在线登记危大工程,方案审批、专家论证、二维码挂牌监测,异常数据触发安全通知单,结合AI进行人员安全抽查	高风险、危大工程的安全管理,确保项目施工中的安全性和风险控制	优点:提高安全性,实时监控,减少人为疏漏;缺点:系统复杂,需依赖高精度传感器与设备,初期投入较大
环保与能耗监测	实时采集扬尘、噪声、风速、温度湿度、VOC等环境数据,结合喷淋、雾炮等设备进行自动降尘和数据同步	环保监控、施工现场的环境质量监控,特别是有环保要求的项目	优点:确保施工现场符合环保标准,减少环境污染;缺点:受限于设备精度和环境条件,实时监控和数据传输需求高
远程监管	基于数据平台,政府或集团实时展示人员、设备、隐患等信息,并通过数据打点进行差异化监管	项目全程监管、项目质量监控和评估,尤其是远程管理和全局监控	优点:实现全局监管、信息透明;缺点:数据采集与处理难度大,需稳定的网络和设备支持,存在数据隐私和安全问题

1.3.5 智能装备与建筑机器人

智能施工装备是指通过自动化、数字化和智能化技术,能够自主或半自主地执行建筑施工任务的设备和装备。这些装备通常具备实时数据采集、分析和反馈功能,能够提高施工效率、精度和安全性,减少人工干预和错误。建筑机器人专门用于执行特定的建筑任务(如砖石砌筑、混凝土喷涂等),它是智能施工装备的一个子集,具备较高的自动化水平,通常与人工智能、机器视觉等技术结合,以完成复杂或危险的施工工作。按照通常的分类,本节将常见的智能装备和建筑机器人分别列表,常见的智能施工装备如表 1-3 所示。

表 1-3 常见智能施工装备一览表

技术装备	技术原理	适用场景	优缺点
自动化测量设备(如全站仪)	采用激光、GPS、激光雷达等技术,自动采集施工现场的定位数据,通过计算机处理实时反馈精确测量	基础工程、结构安装、立面设计、土建施工等,进行精确测量和定	优点:高精度、实时监控、减少人工误差;缺点:设备较贵,操作需专门培训,复杂场景下可能受干扰

	结果	位	
智能塔吊	配备防碰撞系统、远程控制、吊重、风速和回转角实时监测，通过传感器和控制系统实现安全、高效的作业	高层建筑施工，吊装重物、危险物品搬运等	优点：防碰撞、提高安全性、远程控制；缺点：设备成本高，对施工环境要求较高，受恶劣天气影响较大
智能升降机	结合人脸识别技术、自动平层功能和故障预测系统，提供智能化的上下楼操作体验	高层建筑施工，人员上下运输，楼层之间的便捷连接	优点：提高人员上下效率、智能化管理；缺点：设备成本高，系统复杂度大，需要稳定的电力支持和维护
智能旋挖钻机、静压桩机	配备自动调垂系统和自适应钻压/转速控制系统，通过地质信息与钻井参数自动匹配，确保钻孔精准与稳定	桥梁基础、隧道开挖、地质复杂区域的钻孔作业	优点：提高施工精度，适应不同地质条件；缺点：对操作人员的技术要求较高，设备较为昂贵
智能振捣设备	采用加速度反馈控制技术，根据混凝土密实度自动调整振动频率，确保混凝土的均匀性和强度	混凝土浇筑，特别是大型建筑物、桥梁和其他需要大面积浇筑的工程中	优点：提高混凝土密实度，减少施工缺陷；缺点：设备较重，可能会对精细操作产生不利影响，需定期维护
智能混凝土布料机	自动规划泵压、臂架姿态，并配备防堵管和防爆管技术，确保混凝土输送过程中的安全与流畅	混凝土浇筑、泵送，尤其是在高层建筑、大型桥梁等复杂施工现场	优点：提升施工效率，避免管道堵塞，提高安全性；缺点：设备维护成本高，对环境要求较高
智能喷射混凝土机械手（湿喷台车）	配备自动扫描受喷面技术，实时监测喷涂厚度并进行闭环控制，确保喷涂均匀	隧道、地下工程、地下车库等喷射混凝土施工	优点：提高施工精度，确保喷涂质量；缺点：设备较复杂，适应不同场景需特别调整，维护成本较高
造楼机、智能模板系统	通过自动控制系统，智能模板根据设计要求和施工进度自动调整，确保模板安装与拆除精度	高层建筑、大型工业厂房的施工，特别是需要的高效模板支持的建筑	优点：提高模板的使用效率，减少人工干预；缺点：设备和系统成本高，模板调整灵活性相对有限
智能推土机、挖掘机、无人驾驶施工车	配备自动驾驶技术和智能控制系统，自动执行土方作业、开挖、搬运等任务，支持路径规划和施工环境感知	土方工程、基础设施建设、大型施工现场	优点：提高作业效率，减少人工操作，提升安全性；缺点：需要高精度的导航系统，设备和系统维护成本较高
无人机技术	配备高清摄像头和传感器，无人机可进行航拍、测量、进度监控、数据采集等作业	建筑工地的监测、测量、巡检，施工进度跟踪和质量检查等	优点：快速、高效、非接触式检测，降低人工风险；缺点：受天气和环境影响较大，飞行时间和飞行范围受限，技术门槛较高

根据国家市场监督管理总局、国家标准化委员会颁布的《GBT36321-2018 特种机器人分类、符号、标志》，建筑机器人属于特种机器人的细分种类，主要包括房屋建筑机器人、土木工程建筑机器人、建筑安装机器人、建筑装饰及其他机器人等。然而，结构焊接、复杂砌筑与装修机器人仍受现场扰动、构件变形与定位闭环的鲁棒性制约，规模化落地主要集中在“重复、规则、危险”的工序与半封闭环境。如钢筋绑扎机器人在平面网格场景下的识别、定位与轨迹规划上

取得进展，但在复杂空间钢筋笼、拥挤钢筋密集区仍是难点。可以预见，随着技术成熟和成本下降，机器人和自动化将成为未来施工现场的新常态，其带来的精度提升、工效提升和安全改善已在多个项目中得到验证。下面介绍根据场景划分建筑机器人的分类。

表 1-4 基于建造对象应用场景分类的建筑机器人一览表

建造对象	作业内容	机器人形态	技术组合
木质构件	加工	铣削、开槽、钻孔、切割机器人	BIM+机械臂+移动底盘+抓取单元+传感器
	安装	板材安装机器人	
混凝土	浇筑	地面浇筑处理机器人 爬架顶升机器人	BIM+机械臂+移动底盘+抓取单元+传感器+3D打印+建筑材料创新
	拆除回收	清拆/清运机器人	
钢筋	切割、绑扎和点焊	切割、绑扎和点焊机器人	机械臂+传感器+自动化
钢板	搬运、切割、焊接和喷涂	搬运、切割、焊接和喷涂机器人	机械臂+传感器+自动化
砌体	砌筑	墙体砌筑机器人	机械臂+传感器+自动化
墙面	抹灰、喷涂和铺砖	抹灰机器人 腻子和乳胶漆喷涂机器人 墙纸铺贴机器人 墙面铺砖机器人	BIM+机械臂+移动底盘+抓取单元/喷头+抹水泥执行器+传感器
地面	涂敷、铺砖	地面铺砖机器人 地坪漆涂敷机器人	BIM+机械臂+移动底盘+抓取单元/喷头+抹水泥执行器+传感器
幕墙	安装	幕墙安装机器人	机械臂+移动底盘+抓取单元+传感器
垃圾/废料	清理	清洁机器人	移动底盘+视觉/激光传感器
拆改建筑	拆除回收	清拆/清运机器人	遥控技术+机械臂+视觉传感器
物料	转运、举升	混凝土泵送机器人 智能塔吊 外骨骼机器人	AGV/AMR/无人叉车+自动升降机/塔吊/搬运设备+外骨骼
施工环境	安全、进度和质量监测	实测实量机器人	移动机器人/四足机器人/无人机+3D激光传感器+高清摄像头

1.3.6 智能检测与质量控制技术

主要包括三维激光扫描、机器视觉、红外热像与微波无损检测、超声波层析成像、AI 图像识别、数字回弹—超声联合检测等技术，其应用技术原理、适用场景和优缺点如表 1-5 所示。

表 1-5 智能检测与质量控制技术一览表

技术	应用技术原理	适用场景	优缺点
三维激光扫描	通过激光束反射原理，快速采集建筑物或构件表面的三维数据点云，生成高精度三维模型	建筑物现状测量、变形监测、与设计图纸对比、结构检查等	优点：高精度、非接触式测量；缺点：设备昂贵、数据处理复杂
机器视觉	通过高分辨率摄像头和图像处理算法，自动识别和检测物体的外观、形态和尺寸	裂缝检测、焊接质量检测、材料尺寸测量、智能施工机器人导航等	优点：自动化、精确、效率高；缺点：对复杂环境和多变光照条件敏感
红外热像与微波/雷达无损检测	红外热像通过测量物体表面温度差异，微波/雷达通过高频电磁波探测材料内部缺陷	热损失检测、裂缝检测、地下管道检测、混凝土质量检测等	优点：非接触、快速、能够检测到隐藏缺陷；缺点：红外热像在高温环境下效果较差，微波/雷达深度有限
超声波/声波层析成像	超声波通过声波传播检测材料的内部缺陷，声波层析成像通过分析声波传播速度差异生成图像	混凝土、钢结构、地下管道、桥梁的内部缺陷检测	优点：高效、精确、可检测深层缺陷；缺点：需要接触材料、操作复杂，部分场景下可能受噪声干扰
AI 图像识别	结合深度学习与计算机视觉，自动识别和分类图像中的缺陷和问题	裂缝检测、墙面检查、表面缺陷检测、智能机器人导航等	优点：高效、自动化、可处理大量数据；缺点：训练数据需求大，可能对复杂场景的处理存在一定困难
数字回弹—超声联合检测	数字回弹检测混凝土表面硬度，通过回弹仪测量间接反映混凝土强度，超声波检测测量弹性波速评估混凝土的密实度与强度	混凝土质量评估、桥梁、隧道等结构的强度和密度检测	优点：无损、快速、简便；缺点：回弹检测受表面质量影响较大，超声波检测需要接触材料，且在有裂缝的情况下准确度降低

1.4 融合应用

智能建造是建筑业的新质生产力。从生产力角度来理解，可以把人视为劳动者，数据视为劳动资料，技术视为劳动工具。“融合应用”强调的是技术、数据与工程的融合，就是要运用先进技术与丰富数据去解决实际问题。具体在智能施工过程中，将各类数智化技术与施工管理流程、组织体系、业务逻辑深度融合，形成一个以数据为纽带、以技术为支撑、以管理为核心的协同和集成运行体系。其意义在于打破“数据孤岛、技术孤岛”，避免各系统、各设备各自为政；构建信息通道，让设计、生产、施工、监理、运维等主体共享同一数据底座；实现智能决策，用数据驱动项目的全过程管控与优化。

融合应用通过“数据融合—技术融合—业务融合”逐层递进，形成从信息采集到智能决策的闭环。在数据层，实现 BIM 模型、物联网传感、视频识别、AI 分析等多源数据的汇聚与互通，建立统一的数据底座；在技术层，不同智能技术之间相互补充、协同运行，例如 AI 算法识别结果与 BIM 空间模型联动、传感数据驱动虚拟仿真预测；在业务层，融合应用嵌入进度、质量、安全、成本等施工核

心流程，使数据和技术直接服务于管理决策，形成贯通全生命周期的智能施工体系。

融合应用的实现是一个从“集成技术”到“重塑流程”的渐进过程，大致可划分为五个关键步骤。首先，建立统一数据底座，以 **BIM** 模型为核心，将设计、施工、监理、运维等多方数据接入同一平台，实现信息共享与语义一致；其次，推动多技术协同，通过开放接口与标准化协议，使 **AI**、物联网、虚拟仿真、智能检测等技术在同一框架下互联互通；第三，贯通业务流程，将技术嵌入进度计划、质量检测、安全监管、资源调度等场景中，实现过程数据与管理决策的实时联动；第四，构建智能施工平台，在项目层或企业层建立统一的管理中枢，实现数据可视化、预警分析与跨系统协作；最后，形成动态优化机制，通过持续的数据采集、模型更新和结果反馈，让系统具备自学习和自调节能力，实现从信息集成向智能决策的演进。通过这一系列路径，融合应用让智能施工真正实现从“多点技术应用”向“系统化智能管理”的跨越。

2 智能施工策划

2.1 概述

智能施工策划是围绕项目目标,基于设计文件、项目环境条件和可支配资源,开展智能施工工艺工法选用组装和多方案比选的过程,涵盖技术、管理方面的工作内容。本章主要从技术角度阐述智能施工策划,以及采用 AI 方式生成施组方案、进度计划等策划文件。

2.2 智能施工目标确定

智能施工需要用到多项技术,这些技术成熟程度以及在施工领域的普及程度不同,并且在应用过程中互相影响,因此合理的实施需要将不同的技术进行综合或集成。即根据项目需求和团队、资源等实际情况,结合现有的技术水平,确定合理的应用内容和应用目标,这是项目成功实施的前提条件之一。

项目在施工实施前期,需充分结合施工中各项业务的实际情况、现阶段的技术水平成本投入与效益产出等各个方面的因素综合考虑,从而确定项目智能施工目标。确定智能施工应用目标所需考虑的因素涉及人力、技术、成本等各个方面。项目在确定应用目标时可根据项目自身实际情况、现阶段数智技术水平和应用成本,以及建设单位的管理目标等进行考虑。

确定好智能施工目标后,就需要对每项业务的工作内容进行分解,在根据本书后面章节所提到的数智技术与装备、设备、工具软件、管理系统,依据其功能特性、可解决问题的范围等,结合应用目标所考虑因素,综合确定项目的智能应用内容。

在确定完智能应用内容后,施工项目应对各项应用内容所期望达到的目标进行策划。在确定智能施工实施内容时,施工项目需要根据自身的实际业务开展进行分解,来选择对应的应用内容,同时还需综合考虑项目自身能力、现阶段技术水平和应用成本等实际因素。在项目施工的各个阶段都可以应用各种智能施工技

术，但必须考虑各种智能技术的范围和深度，特别是当前的智能施工技术发展程度、施工团队自身的技能水平、相对于效益智能施工技术应用的成本等等，这些影响因素都应该在智能施工策划中体现出来。

2.3 智能施工工艺分析

施工工艺分析是施工过程中对拟采用的施工方法、技术措施、作业流程及资源配置进行系统性研究与评估的过程。其目的是确保工程质量、安全、进度和成本控制目标的实现。施工的核心在于工艺。施工工艺分析是连接设计与现场施工的桥梁。设计意图的实现效果（质量、安全、进度、成本等）需要通过工艺来落实，现场施工需要工艺进行指导。应当在施工中合理选用智能施工工艺，保障智能施工落地见效。

智能施工工艺分析，除了工程对象与技术要求分析、施工方法选择与比选、施工流程与工序安排、资源配置分析、关键技术参数与控制要点、安全与风险分析、质量保障措施、工期与进度影响评估、经济性与绿色施工分析等常规施工工艺分析的工作内容，应特别强调项目开展智能施工的具体场景和技术应用分析。

2.3.1 智能施工场景分析

智能施工场景可大可小。过大的场景难有智能技术的全面系统性应用，过小的场景会导致策划阶段工作量过大，并且施工中实际情况难以充分掌握，策划的指导价值下降。综合分部分项工程等现有施工拆分方式，对智能施工场景进行分级拆分，如表 2-1 所示。

表 2-1 智能施工场景示例

一级场景	二级场景	三级场景	
设计深化及 优化	建筑	内装、幕墙、屋面等	
	结构	混凝土、PC、钢结构、砌体结构、钢混结构、木结构等	
	机电	暖通空调、给排水、消防、强电、弱电、智能化、动力、燃气等	
	其他	景观绿化、室外管网等	
工艺组织及 方案策划	工艺设计	技术：WBS--工艺工法匹配	
		进度：WBS--施工段划分--施工流程--资源匹配及平衡--进度计划	
		质量：WBS--分部分项检验批划分--质量计划	
		安全：WBS--工艺工法匹配--危险源辨识--措施--安全计划	
		成本：WBS--工艺工法匹配--出量--计价--成本计划	
	文本生成	基于生成式 AI 的文本生成	
建筑工地搭 建与运行	工地管理	人员、安全、质量、进度、物料、装备与设备、环境、临水临电管理等	
	工地物流	材料进场	
		堆放仓储	
		场内运输	
	建筑垃圾处置		工程渣土：各类建筑物、构筑物、管网、道桥等在建设过程中开挖土石方产生的弃土。
			工程泥浆：钻孔桩基施工、地下连续墙施工、泥水盾构施工、水平定向钻及泥水顶管等施工产生的泥浆。
		工程垃圾：各类建筑物、构筑物、管网、道桥等在新建、改建、扩建过程中产生的混凝土、沥青混合料、砂浆、模板等弃料。	
		拆除垃圾：各类建筑物、构筑物、管网、道桥等在拆除过程中产生的混凝土、砂浆、砖瓦、陶瓷、石材、金属、木材等废弃物	
		装修垃圾：房屋装饰装修过程中产生的混凝土、砂浆、砖瓦、陶瓷、石材、石膏、加气混凝土砌块、金属、木材、玻璃和塑料等废弃物	

	工地智能设施	摄像头、传感器、定位装置、监测装备、网络、云边协同、物联网中台等
地基与基础 施工	地基	素土、灰土地基，砂和砂石地基，土工合成材料地基，粉煤灰地基，强夯地基，注浆地基，预压地基，砂石桩复合地基，高压旋喷注浆地基，水泥土搅拌桩地基，土和灰土挤密桩复合地基，水泥粉煤灰碎石桩复合地基，夯实水泥土桩复合地基
	基础	无筋扩展基础，钢筋混凝土扩展基础，筏形与箱形基础，钢结构基础，钢管混凝土结构基础，型钢混凝土结构基础，钢筋混凝土预制桩基础，泥浆护壁成孔灌注桩基础，干作业成孔桩基础，长螺旋钻孔压灌桩基础，沉管灌注桩基础，钢桩基础，锚杆静压桩基础，岩石锚杆基础，沉井与沉箱基础
	基坑支护	灌注桩排桩围护墙，板桩围护墙，咬合桩围护墙，型钢水泥土搅拌墙，土钉墙，地下连续墙，水泥土重力式挡墙，内支撑，锚杆，与主体结构相结合的基坑支护
	地下水控制	降水与排水，回灌
	土方	土方开挖，土方回填，场地平整
	边坡	喷锚支护，挡土墙，边坡开挖
	地下防水	主体结构防水，细部构造防水，特殊施工法结构防水，排水，注浆
	混凝土结构	模板，钢筋，混凝土，预应力，现浇结构，装配式结构
主体结构 施工	砌体结构	砖砌体，混凝土小型空心砌块砌体，石砌体，配筋砌体，填充墙砌体
	钢结构	钢结构焊接，紧固件连接，钢零部件加工，钢构件组装及预拼装，单层钢结构安装，多层及高层钢结构安装，钢管结构安装，预应力钢索和膜结构，压型金属板，防腐涂料涂装，防火涂料涂装
	钢管混凝土结构	构件现场拼装，构件安装，钢管焊接，构件连接，钢管内钢筋骨架，混凝土
	型钢混凝土结构	型钢焊接，紧固件连接，型钢与钢筋连接，型钢构件组装及预拼装，型钢安装，模板，混凝土
	铝合金结构	铝合金焊接，紧固件连接，铝合金零部件加工，铝合金构件组装，铝合金构件预拼装，铝合金框架结构安装，铝合金空间网格结构安装，铝合金面板，铝合金幕墙结构安装，防腐处理
建筑装饰装 修施工	木结构	方木与原木结构，胶合木结构，轻型木结构，木结构的防护
	建筑地面	基层铺设，整体面层铺设，板块面层铺设，木、竹面层铺设
	抹灰	一般抹灰，保温层薄抹灰，装饰抹灰，清水砌体勾缝

	外墙防水	外墙砂浆防水, 涂膜防水, 透气膜防水
	门窗	木门窗安装, 金属门窗安装, 塑料门窗安装, 特种门安装, 门窗玻璃安装
	吊顶	整体面层吊顶, 板块面层吊顶, 格栅吊顶
	轻质隔墙	板材隔墙, 骨架隔墙, 活动隔墙, 玻璃隔墙
	饰面板	石板安装, 陶瓷板安装, 木板安装, 金属板安装, 塑料板安装
	饰面砖	外墙饰面砖粘贴, 内墙饰面砖粘贴
	幕墙	玻璃幕墙安装, 金属幕墙安装, 石材幕墙安装, 陶板幕墙安装
	涂饰	水性涂料涂饰, 溶剂型涂料涂饰, 美术涂饰
	裱糊与软包	裱糊, 软包
	细部	橱柜制作与安装, 窗帘盒和窗台板制作与安装, 门窗套制作与安装, 护栏和扶手制作与安装, 花饰制作与安装
	基层与保护	找坡层和找平层, 隔汽层, 隔离层, 保护层
	保温与隔热	板状材料保温层, 纤维材料保温层, 喷涂硬泡聚氨酯保温层, 现浇泡沫混凝土保温层, 种植隔热层, 架空隔热层, 蓄水隔热层
屋面施工	防水与密封	卷材防水层, 涂膜防水层, 复合防水层, 接缝密封防水
	瓦面与板面	烧结瓦和混凝土瓦铺装, 沥青瓦铺装, 金属板铺装, 玻璃采光顶铺装
	细部构造	檐口, 檐沟和天沟, 女儿墙和山墙, 水落口, 变形缝, 伸出屋面管道, 屋面出入口, 反梁过水孔, 设施基座, 屋脊, 屋顶窗
建筑给水排水及供暖施工	室内给水系统	给水管道及配件安装, 给水设备安装, 室内消火栓系统安装, 消防喷淋系统安装, 防腐, 绝热, 管道冲洗、消毒, 试验与调试
	室内排水系统	排水管道及配件安装, 雨水管道及配件安装, 防腐, 试验与调试
	室内热水系统	管道及配件安装, 辅助设备安装, 防腐, 绝热, 试验与调试
	卫生器具	卫生器具安装, 卫生器具给水配件安装, 卫生器具排水管道安装, 试验与调试
	室内供暖系统	管道及配件安装, 辅助设备安装, 散热器安装, 低温热水地板辐射供暖系统安装, 电加热供暖系统安装, 燃气红外辐射供暖系统安装, 热风供暖系统安装, 热计量及调控装置安装, 试验与调试, 防腐, 绝热

	室外给水管网	给水管道安装, 室外消火栓系统安装, 试验与调试
	室外排水管网	排水管道安装, 排水管沟与井池, 试验与调试
	室外供热管网	管道及配件安装, 系统水压试验, 土建结构, 防腐, 绝热, 试验与调试
	建筑饮用水供应系统	管道及配件安装, 水处理设备及控制设施安装, 防腐, 绝热, 试验与调试
	建筑中水系统及雨水利用系统	建筑中水系统、雨水利用系统管道及配件安装, 水处理设备及控制设施安装, 防腐, 绝热, 试验与调试
	游泳池及公共浴池水系统	管道及配件系统安装, 水处理设备及控制设施安装, 防腐, 绝热, 试验与调试
	水景喷泉系统	管道系统及配件安装, 防腐, 绝热, 试验与调试
	热源及辅助设备	锅炉安装, 辅助设备及管道安装, 安全附件安装, 换热站安装, 防腐, 绝热, 试验与调试
	监测与控制仪表	检测仪器及仪表安装, 试验与调试
通风与空调 施工	送风系统	风管及配件制作, 部件制作, 风管系统安装, 风机与空气处理设备安装, 风管与设备防腐, 旋流风口、岗位送风口、织物(布)风管安装, 系统调试
	排风系统	风管及配件制作, 部件制作, 风管系统安装, 风机与空气处理设备安装, 风管与设备防腐, 吸风罩及其他空气处理设备安装, 厨房、卫生间排风系统安装, 系统调试
	防烟排烟系统	风管及配件制作, 部件制作, 风管系统安装, 风机与空气处理设备安装, 风管与设备防腐, 排烟风阀(口)、常闭正压风口、防火风管安装, 系统调试
	除尘系统	风管及配件制作, 部件制作, 风管系统安装, 风机与空气处理设备安装, 风管与设备防腐, 除尘器与排污设备安装, 吸尘罩安装, 高温风管绝热, 系统调试
	舒适性空调系统	风管及配件制作, 部件制作, 风管系统安装, 风机与空气处理设备安装, 风管与设备防腐, 组合式空调机组安装, 消声器、静电除尘器、换热器、紫外线灭菌器等设备安装, 风机盘管、变风量与定风量送风装置、射流喷口等末端设备安装, 风管与设备绝热, 系统调试
	恒温恒湿空调系统	风管及配件制作, 部件制作, 风管系统安装, 风机与空气处理设备安装, 风管与设备防腐, 组合式空调机组安装, 电加热器、加湿器等设备安装, 精密空调机组安装, 风管与设备绝热, 系统调试

净化空调系统	风管与配件制作，部件制作，风管系统安装，风机与空气处理设备安装，风管与设备防腐，净化空调机组安装，消声器、静电除尘器、换热器、紫外线灭菌器等设备安装，中、高效过滤器及风机过滤器单元等末端设备清洗与安装，洁净度测试，风管与设备绝热，系统调试
地下人防通风系统	风管与配件制作，部件制作，风管系统安装，风机与空气处理设备安装，风管与设备防腐，过滤吸收器、防爆波活门、防爆超压排气活门等专用设备安装，系统调试
真空吸尘系统	风管与配件制作，部件制作，风管系统安装，风机与空气处理设备安装。风管与设备防腐，管道安装，快速接口安装，风机与滤尘设备安装，系统压力试验及调试
冷凝水系统	管道系统及部件安装，水泵及附属设备安装，管道冲洗，管道、设备防腐，板式热交换器，辐射板及辐射供热、供冷埋地管，热泵机组设备安装，管道、设备绝热，系统压力试验及调试
空调(冷、热)水系统	管道系统及部件安装，水泵及附属设备安装，管道冲洗，管道、设备防腐，冷却塔与水处理设备安装，防冻伴热设备安装，管道、设备绝热，系统压力试验及调试
冷却水系统	管道系统及部件安装，水泵及附属设备安装，管道冲洗，管道、设备防腐，系统灌水渗漏及排放试验，管道、设备绝热
地源热泵换热系统	管道系统及部件安装，水泵及附属设备安装，管道冲洗，管道、设备防腐，埋地换热系统与管网安装，管道、设备绝热，系统压力试验及调试
水源热泵换热系统	管道系统及部件安装，水泵及附属设备安装，管道冲洗，管道、设备防腐，地表水源换热管及管网安装，除垢设备安装，管道、设备绝热，系统压力试验及调试
蓄能系统	管道系统及部件安装，水泵及附属设备安装，管道冲洗，管道、设备防腐，蓄水罐与蓄冰槽、罐安装，管道、设备绝热，系统压力试验及调试
压缩式制冷(热)设备系统	制冷机组及附属设备安装，管道、设备防腐，制冷剂管道及部件安装，制冷剂灌注，管道、设备绝热，系统压力试验及调试
吸收式制冷设备系统	制冷机组及附属设备安装，管道、设备防腐，系统真空试验，溴化锂溶液加灌，蒸汽管道系统安装，燃气或燃油设备安装，管道、设备绝热，试验及调试
多联机(热泵)空调系统	室外机组安装，室内机组安装，制冷剂管路连接及控制开关安装，风管安装，冷凝水管道安装，制冷剂灌注，系统压力试验及调试

建筑电气施工	太阳能供暖空调系统	太阳能集热器安装, 其他辅助能源、换热设备安装, 蓄能水箱、管道及配件安装, 防腐, 绝热, 低温热水地板辐射采暖系统安装, 系统压力试验及调试
	设备自控系统	温度、压力与流量传感器安装, 执行机构安装调试, 防排烟系统功能测试, 自动控制及系统智能控制软件调试
	室外电气	变压器、箱式变电所安装, 成套配电柜、控制柜(屏、台)和动力、照明配电箱(盘)及控制柜安装, 梯架、支架、托盘和槽盒安装, 导管敷设, 电缆敷设, 管内穿线和槽盒内敷线, 电缆头制作、导线连接和线路绝缘测试, 普通灯具安装, 专用灯具安装, 建筑照明通电试运行, 接地装置安装
	变配电室	变压器、箱式变电所安装, 成套配电柜、控制柜(屏、台)和动力、照明配电箱(盘)安装, 母线槽安装, 梯架、支架、托盘和槽盒安装, 电缆敷设, 电缆头制作、导线连接和线路绝缘测试, 接地装置安装, 接地干线敷设
	供电干线	电气设备试验和试运行, 母线槽安装, 梯架、支架、托盘和槽盒安装, 导管敷设, 电缆敷设, 管内穿线和槽盒内敷线, 电缆头制作、导线连接和线路绝缘测试, 接地干线敷设
	电气动力	成套配电柜、控制柜(屏、台)和动力配电箱(盘)安装, 电动机、电加热器及电动执行机构检查接线, 电气设备试验和试运行, 梯架、支架、托盘和槽盒安装, 导管敷设, 电缆敷设, 管内穿线和槽盒内敷线, 电缆头制作、导线连接和线路绝缘测试
	电气照明	成套配电柜、控制柜(屏、台)和照明配电箱(盘)安装, 梯架、支架、托盘和槽盒安装, 导管敷设, 管内穿线和槽盒内敷线, 塑料护套线直敷布线, 钢索配线, 电缆头制作、导线连接和线路绝缘测试, 普通灯具安装, 专用灯具安装, 开关、插座、风扇安装, 建筑照明通电试运行
	备用和不间断电源	成套配电柜、控制柜(屏、台)和动力、照明配电箱(盘)安装, 柴油发电机组安装, 不间断电源装置及应急电源装置安装, 母线槽安装, 导管敷设, 电缆敷设, 管内穿线和槽盒内敷线, 电缆头制作、导线连接和线路绝缘测试, 接地装置安装
	防雷及接地	接地装置安装, 防雷引下线及接闪器安装, 建筑物等电位连接, 浪涌保护器安装
	智能建筑施工	智能化集成系统
信息接入系统		安装场地检查
用户电话交换系统		线缆敷设, 设备安装, 软件安装, 接口及系统调试, 试运行

2.3.2 智能施工技术应用分析

项目团队可以用优先级（高、中、低）的形式标示每个智能施工技术应用实施的价值（参考表 2-22-2），完成智能施工技术的比选。表中包括一个供比选的智能施工技术列表，以及对应的应用价值评估、责任方、对责任方的价值、所需能力和资源、所需额外资源，最后是对是否采用的判定。智能施工技术比选可由各专业负责人在项目经理的组织下完成，在明确智能施工目标的前提下，其一般流程如下：

（1）罗列备选智能施工技术应用点

项目团队应认真比选可能智能施工技术应用点，并将其罗列出来，备选智能施工技术应用点可参考第一章。在罗列智能施工技术应用点时，要注意其与智能施工技术应用目标的关系。对于不满足强制性标准、无法对接企业指定接口、环境适应性不达标等智能施工技术可以一票否决。

（2）确定每项备选智能施工技术应用点的责任方

为每项备选智能施工技术应用点至少确定一个责任方，主要负责主体放在第一行，避免多人“都负责/都不负责”。

（3）标示每项智能施工技术应用点各责任方需要具备的条件

确定责任方应用智能施工技术所需的条件，一般的条件包括：人员、软件、软件培训、硬件、硬件培训、IT 支持等。如果已有条件不足，需要额外补充时，应详细说明，例如：需要购买软件、硬件等。

确定责任方应用智能施工技术所需的能力水平。项目团队需要知道智能施工技术应用的细节，及其在特定项目中实施的方法。如果已有能力不足，需要额外培训时，应详细说明。

确定责任方是否具备应用智能施工技术所需的经验。团队经验对于智能施工技术应用的成功与否至关重要。如果已有经验不足，需要额外技术支持时，应详细说明。

（4）标示每项智能施工技术应用的额外应用点价值和风险

施工团队在清楚每项智能施工技术应用点价值的同时，也要清楚可能产生的

额外项目风险。这些额外应用价值和风险应该在表格的“备注”中说明。

(5) 决定选取哪些智能施工技术

施工团队应该详细讨论每项智能施工技术应用的可能性，确定某项智能施工技术是否适合项目和团队的特点，可以通过“多指标排序、试验段检测、项目推广”的思路应用新工艺，对于未能在项目试验段中实现预设目标的工艺则放弃。这需要施工团队确定潜在价值或效益的同时，均衡考虑需要投入成本。施工团队也需要考虑应用或不应用某项智能施工技术对应的风险。例如：应用一些智能施工技术会显著降低项目总体风险，然而它们也可能将风险从一方转移到另一方；另一方面，应用智能施工技术可能会增加个别团队完成本职工作任务的风险。在考虑所有因素之后，施工团队需要做出是否应用各项备选智能施工技术的决定。

表 2-2 智能施工技术比选示例表

智能施工技术或应用	应用价值 (高、中、低)	负责单位	对负责单位 的价值 (高、中、 低)	需要的条件 (高、中、低)			需要额外的 资源	备注	是否应用
				资源	能力	经验			
智能深化设计	高	项目部深化设计人员	高	中	低	低	无	在施工阶段对业主价值很大	是
三维激光扫描现场勘察	高	勘察工程师	高	中	高	中	需要租赁硬件		是
基坑自动化安全监测	高	岩土工程师	高	中	中	高	需要购买硬件		是
钢筋绑扎机器人	中	结构工程师	中	高	低	中	需要租赁硬件	效益不明显	否
混凝土智能养护	高	结构工程师	中	中	中	高	需要购买硬件		是
无人塔吊	高	塔吊施工人员	高	高	高	高	需要租赁硬件	提高施工安全	是
地坪打磨机器人	高	装修装饰班组	中	高	低	高	需要租赁硬件		是
AI 成本管理	高	造价师	高	高	高	高	需要培训	发展初期阶段，仍需人工核实	是

2.3.3 智能施工工艺流程

智能施工的工艺流程是把多项智能施工技术按“工序顺序—参数标准—质量计量—数据流—责任与资源”组织成可执行、可验证、可追溯的一整套做法。通过表 2-3 对比传统施工与智能施工在工艺流程上的差别。

表 2-3 传统施工与智能施工的工艺流程对比

对比维度	传统施工工艺流程	智能施工工艺流程
目标	以合格/不合格为主，侧重成品质量	质量、进度、安全、成本等多目标；考核指标量化（如良品率、一次合格率、单位面积工时、能耗/粉尘等）并可视化
数据基础	纸质或零散电子记录，事后登记为主	数据驱动：需满足图纸/BIM、编码字典、参数卡、设备与传感器实时数据、算法等前置条件
作业主体	人工为主，机械是“辅具”	主要应用数智专项技术、智能设备与装备等，人工为辅
过程控制	靠班组经验与巡检抽查，反馈滞后	闭环控制：实时监测、自动报警、整改检查
质量检验	应用传统工具，依靠经验抽检，记录分散	数字化检验：应用激光扫描、智能靠尺、混凝土强度智能检测等智能技术；相关数据自动关联并存储至数据仓，依托大数据分析查找质量缺陷
工程计量	事后丈量、凭记录与照片佐证	按实测实量在线计量：作业面编码×合格面积/返修面积自动汇总，直接对接计量清单
进度控制	计划-执行分离，偏差事后纠正	进度曲线在线更新：质量不达标→自动减慢进度计划、增加抽检与复核；进度计划与物料供应相联动
异常处置	人治为主，流程随人而变	规则化：异常处置遵循已设置好的程序；记录自动生成“异常闭环单”
资料归档	扫描件/照片多、结构化差	结构化留痕：设备数据、检验报告、合格证、计量清单、参数列表、争议证据包等统一编码归档，可追溯
协同方式	班组—工长—质检链路，信息口口相传	系统化协同：进度计划、质量管理、安全管理、成本管理、资料管理等系统对接；表单与数据表字段一一映射
成本结构	人工为大头，设备租赁、折旧等占比低	设备折旧、租赁、传感器、数据平台等成本比重提升；通过减少返工、提升一次合格率摊薄成本
优化机制	复盘偏经验、难迁移	构建参数库与知识库：通过项目试验，将相关参数固化，从而跨项目复用，持续迭代
安全与合规	交底与巡视为主	设备自检、系统协同为主

例如，当项目技术负责人在考虑选用抹灰机器人进行抹灰作业时，应以数据驱动的全过程思路，将设备、工法、质量、计量与资料归档纳入同一闭环管理，

应考虑以下工艺流程：

(1) 适用范围与目标指标

本流程适用于现浇结构房建工程内墙（或指定部位）的抹灰作业。明确主要目标：提升墙面平整度与垂直度一致性、缩短工期、降低粉尘暴露与返工率，并支持按实测实量开展工程计量与结算。将目标细化为可检验指标及口径：如墙面平整度与垂直度允许偏差、单位面积作业工时、一次验收合格率等，并在策划文件中写明对应的检验方法与判定依据。

(2) 前置条件核验与数据互联

在施工前完成“作业就绪条件”核验：基层类型与含水率范围、设计抹灰厚度与容许偏差、砂浆配合比与可泵送性指标等。明确与现场定位导引系统的互联方式与精度要求（如激光基站、全站仪），并在策划文件中固化数据交换格式、坐标基准、检校流程与频次。

(3) 工序链与参数包

按“前处理→主作业→复核→修整→验收→资料归档”的顺序组织施工：

- 前处理：基层找平与清理、基准线复核、含水率与环境核验。
- 主作业：机器人喷涂，控制喷涂流量、运行速度、路径覆盖率、喷嘴压力与喷涂距离等关键参数。
- 复核与修整：激光或智能靠尺复核厚度与平整度，对局部缺陷进行补抹与压光。
- 验收与归档：按规定抽检与统计口径完成验收，完成数据留痕与归档。

将相关参数以可量化数值固化（材料配比、设备设置、质量控制限值、环境条件、采集频率与容差），并在工艺流程中标注。

(4) 过程数据采集与异常规则

要求设备与附属检测装置输出关键过程数据：喷涂流量、运行速度、路径轨迹与覆盖率、喷嘴压力与喷涂距离等，并将所有字段映射至项目数据字典与编码体系，确保“图、模、数一致”。

(5) 质量检验、工程计量与闭环管控

建立“单面墙体档案”，将激光扫描或智能靠尺抽检结果形成为“厚度与平整

度分布图”，附抽检记录、返修清单及处置结果；检测记录需与设备过程数据自动关联，作为质量验收与工程计量的直接依据。

（6）对相关工法与组织的适配

为适配机器人作业，完善关联工序与工法：如阴阳角收口与护角构造、套管与盒体外露允许偏差、临时用电与通信布置、施工缝与分区逻辑、楼层物流组织与砂浆供应节拍。对容易形成堵点的环节提前制定并行作业与错峰方案，明确班组分工与交接界面。

（7）施工安全与合规要求

将机器人作业纳入专项施工方案与作业安全分析，识别粉尘、坠落物、临时用电、高处交叉作业等风险点，明确隔离措施、联锁控制、应急停机流程。规定设备操作与维护资格、定期检验与保养制度、事故报告与纠正措施流程。信息安全与数据合规按照项目约定执行，确保数据采集、传输与存储安全可控。

（8）回退策略与触发阈值

明确回退条件与切换路径：如环境含水率超过限定值、设备连续停机超出约定时间、路径受障碍导致覆盖率不足等，立即按预案切换到备选做法（例如导轨+半机械化），并记录触发原因、处置过程与复工条件。

（9）成果交付与资料归档

将设备过程数据、检测报告、产品合格证明、工程计量清单等打包为数字化交付成果，按墙面编码与房间编码关联归档，形成可追溯的统计报表，用于结算、保修与争议处理。施工结束后组织复盘，对参数包进行校正，固化为标准作业规程与培训材料，明确适用边界与不适用情形，支持后续项目复用与推广。

2.4 智能施工支撑保障

2.4.1 组织保障

构建与智能施工协同的组织架构可参考下面几个原则：

（1）全员职责，智能施工涉及施工管理的各业务条线与所有人员，是所有岗位的共同职责与工作方式。

(2) 因岗设责，职责小可兼职，职责重与复杂度高的岗位增设专岗与团队。

(3) 分层统筹，项目、企业与地方（含业主/监管）三级协同。项目层围绕具体工程实施与交付，负责计划、执行、监测、闭环；企业层提供标准、平台、人才与资源统筹，建设企业级知识库与复用资产；地方/业主与监管层：明确数据与模型交付要求，制定接口规范与考核机制，推动多方协同。

智能施工涉及施工管理的各个方面和所有施工人员，理想状态下项目所有人员都应把数智技术作为工作的手段。但由于智能施工涉及范围广，且技术成熟度不一，所以对于部分智能施工实施内容较为复杂的项目，需要有专业的人员或团队来管理和支撑。

智能施工团队的角色大致可分为三类，第一类是日常使用数智技术的人员，直接利用数智技术作为工作手段或通过应用成果来辅助日常工作；第二类是智能施工专业人员，对特定的智能施工技术进行应用；第三类为信息集成与管理人员，负责对项目整体工作进行组织与协调，并支持相应的技术应用。

项目相关方应根据智能施工应用目标 and 需求，建立智能施工应用组织架构、职责划分和 workflows 等，落实智能施工应用的组织管理。智能施工应用组织架构可选择以建设方或工程总承包方为主导、参建方自主应用等方式。

此外，智能施工应用团队应有完善的岗位设施、管理制度和绩效考核标准。组建专业的智能施工团队还需要制定完善的管理制度和绩效考核制度，旨在提升工作效率和专业水平。智能施工应用宜定人定岗，落实主要责任人。在项目不同阶段，智能施工团队应根据自身业务的特点及发展规划，制定合理的人力资源培养、发展、定岗等计划。

2.4.2 制度保障

制度保障也应从项目、企业和地方三个层面分别建立。

项目层面的制度是为保障智能施工策划能够得到执行与落地。具体包括智能施工策划与评审制度、各项智能施工技术与应用的实施制度、数据采集制度、BIM 应用制度、数据交换制度、数据安全管理制度、人员技能考核制度、智能施工过程管理制度、质量控制制度等。

企业层面的制度是为保障多个项目的协同管理，并为项目赋能。具体包括对项目的考核制度、主数据管理制度、企业级数据安全制度、企业级 BIM 模型库管理制度、企业级人员技能培训制度等。

地方层面的制度是为保障智能施工与监管、交付、商务等过程的协同。具体包括监管平台与数据接入制度、智能交付与竣工验收制度、信用评价与奖惩联动制度、地方数据交换制度等。

2.4.3 标准保障

本节所提标准不仅仅包含国标、行标、团标和地标等常规标准，还包含工法和作业指导书。

2.4.3.1 标准

智能施工标准主要包括工地智能设施、方案智能设计、现场智能作业、项目智能管理、项目智能交付、智能施工监管等 6 个部分。

(1) 工地智能设施标准。规范工地智能设施的方案设计、安装验收、使用维护、设施共享等技术与管理要求。主要包括网络环境、数据采集设备、数据管理软件、基础设施运维等标准。

(2) 方案智能设计标准。规范工程施组方案的智能生成、智能检查、智能评审、智能备案、智能交底等技术与管理要求。主要包括施工组织设计、专项施工方案等标准。

(3) 现场智能作业标准。规范现场智能作业的组织、工艺、质量、安全、监测、数据等技术与管理要求。主要包括地基基础作业、主体结构作业、装饰装修作业、机电安装作业等标准。

(4) 项目智能管理标准。规范“人机料法环”施工要素智能化、项目管理活动智能化、融合应用智能化等技术与管理要求。主要包括进度管理、质量管理、安全管理、成本管理、资源管理、资料管理、其他管理等标准。

(5) 项目智能交付标准。规范数字成果物形成、转移、接收的内容、格式、程序、数据元、元数据等技术与管理要求。主要包括施工成果数字化交付、项目全过程集成交付标准。

(6) 智能施工监管标准。规范建筑施工监管智能化的范围、内容、存储、传输、数据、应用、共享等要求。主要包括质量监管、安全监管、消防监管等标准。

2.4.3.2 工法

智能施工工法是指对特定工序、工艺路线的系统化做法与参数的总结与固化,强调“用什么方法做、在什么条件下做、参数怎么设、如何保证质量与安全”,例如《双块式轨枕智能化生产施工工法》、《路基智能压实施工工法》、《CRTSIII型板式无砟轨道板智能精调施工工法》、《深水大直径钢围堰下沉智能化监控施工工法》等铁路行业工法,再如建筑领域的《基于顶模平台智能机器人的混凝土结构高效施工工法》、《复杂岩溶区旋挖智能数字钻进与光纤感知灌注成桩施工工法》、《拟恶劣气象环境智能淋水施工工法》、《智能爬架喷淋养护循环系统施工工法》、《基于 BIM+IoT 的大体量桩基智能化施工工法》等。

2.4.3.3 作业指导书

智能施工作业指导书是面向班组与岗位的可操作步骤文件,强调“具体怎么做”,如人员资质、工具设备、操作工序、关键参数/允许偏差、质量与安全检查点、记录与留痕、异常与回溯流程等,通常为企业/项目内部刚性执行文件,对于指导一线工人完成智能施工作业有极大的实践价值。

2.5 智能施工方案生成

本节所称“施工方案”涵盖策划方案、施工组织设计、投标方案、进度计划、成本计划、施工场布、周报月报等全部与施工相关的方案编制工作。目标是把企业既有知识(历史方案、标准、工法、作业指导书、既有项目的 BIM 与成本进度数据等)与企业部署的大模型结合,形成“可追溯、可校验、可复制”的自动化、半自动化方案生成链路。

一般而言,方案生成系统的总体架构包括:

①数据层,汇聚既有项目的全量异构资料(施工策划、实施方案、场布、进度与成本台账、作业指导书、招投标文件、评审纪要、整改资料等),建立“数据

—元数据—谱系”三元治理，把散乱资料变成“可用的知识”。对资料按密级、时效、来源可靠度分级，形成可审计的“知识白名单”。采用 OCR、版面解析、版式去噪（去水印、去页眉页脚与目录页码）、表格结构化、公式与图纸片段保真截取等预处理，产出可切片索引的语义块（段落、表格单元、图注、构件标识），并以 Schema/JSON 固化关键字段，便于后续检索与调用。

②模型层，在企业内网服务器部署本地大模型，作为长文理解与结构化生成引擎，在企业内网搭建“会读、会写、会查”的智能引擎。通过领域微调、人类反馈强化、术语与规范一致性校核的三阶段流程，使模型具备以下功能：长上下文生成与分章续写、跨段一致性控制；受控解码下的 Schema/JSON/Markdown 表格精确填充；工具可调用（函数调用、本地脚本、可执行程序）：进度网络图生成、BIM 文件解析、场布与统计图表渲染；检索增强生成（RAG）：面向“白名单语料”按向量索引和规则过滤融合外部知识，保留出处回链与引用置信度；合规与安全：内网运行、权限隔离、访问审计、模型与知识库版本化管理。

③应用层，将检索、推理、工具调用、校验的底层能力编排为可视化工作流与标准化产出模板。输入项目资料、BIM 模型等相关文件后，系统按“任务分解—证据检索—受控生成—一致性与合规校验—可回溯导出”的链式流程生成所需文本与图表，产出保留数据血缘与校核报告。

下面以投标方案自动生成为例，介绍其技术路线：

1. 领域专属模型构建

- 基础与算力：选取基础大模型与 GPU，确保算力满足长上下文与工具调用延迟要求。
- 语料与对齐：注入约 200GB 领域语料（标书、规范、工法、作业指导书、评审纪要），清洗去重、术语归一、条款编号对齐。
- 三阶段训练：

阶段一（LoRA 领域适配）：对格式遵循、章节结构与术语风格进行低成本迁移；

阶段二（RLHF 工程约束）：以结构完整度、条款匹配率、事实一致性、可追溯引用率为奖励信号，强化对工程约束与证据链的遵循；

阶段三（规范校核模块）：基于国家、行业等标准构建术语、条款字典与约束图谱，在解码后进行规则校验与自动回填，输出差异清单与修订建议。

2.企业知识库构建与 RAG 增强

文档理解：对历史标书执行关键要素抽取（技术、经济、管理维度）、指标标准据对齐（清单条目、条款、构件、工序）；

检索策略：采用多粒度向量检索（段落、表格单元、图签）与领域词典加权的混合召回；对时间有效性、来源可靠度进行再排序；

证据治理：保留出处回链、页码/图号、提取时间戳，生成证据包供生成与审稿共用。

3.资源与方案优化

资源画像：汇聚企业管理系统的人员、机具、材料与供应周期，形成“可用资源台账”；

需求解析：从投标文件中抽取工期节点、质量与安全条款、计价规则等要求；

决策优化：在工期、成本、场地、天气、供货等约束下，自动给出更合适的工序组合与资源安排，并给出“为什么这样排”的理由和影响分析。

4.工具链与可执行编排

函数调用：调用网络计划生成器（4D/5D）、BIM 解析与量算、图表渲染、术语与条款校验、差异对比等工具，按模板生成正文、表格、图纸与示意图；

受控生成：对“进度—成本—工程量—BIM 模型”做一致性比对，不一致的地方列出清单、标注原因与改法；未找到依据的地方不允许“空写”，一律占位提示，避免凭空编造。

5.评测与治理

离线评测：指标包括结构完整度、术语与规范一致性、事实与证据一致性、引用可追溯率、表格填充正确率、BIM/进度/成本联动一致性；

在线监控：记录检索命中率、工具调用成功率、人工退改率、校核不通过项；

人机共审：建立两级审稿与差异追踪。

3 智能施工深化设计

智能施工深化设计的核心定位是衔接设计与施工的桥梁，相互之间呈现如图 3-1 所示的三角联动关系。

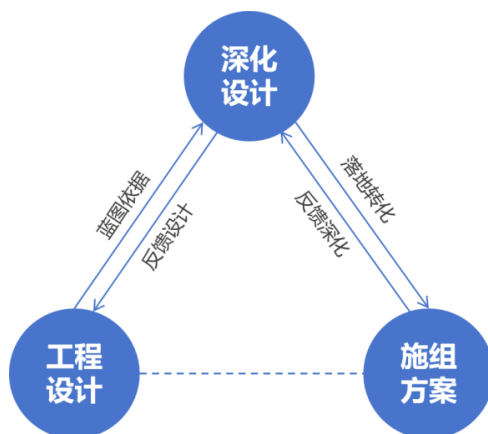


图 3-1 深化设计前后环节逻辑关系

三者通过双向反馈，最终达成“设计合理、深化精准、施组可行”的共识。

设计→深化→施组层层递进：原设计需明确不可调整的核心参数，为深化设计划定边界；深化设计需将抽象设计转化为具体技术细节，为施组方案提供可执行的对象；施组方案则基于深化成果，规划如何在现场实现施工落地。

施组→深化→设计反馈优化：施组方案若发现深化成果不可或不易施工，需反馈深化设计调整；深化设计若发现原设计存在冲突，需反馈原设计优化；最终形成设计优化、深化调整、施组适配的闭环。

本章内容聚焦基于智能技术的深化设计。

3.1 总体思路

3.1.1 核心原则

(1) 数据贯通原则：以“全链条数据”为基础，整合原设计 BIM 模型、行业规范数据库、施工资源数据等，实现“数据一次录入、全流程复用”，避免人工重复录入导致的误差。

(2) 数据传递原则：深化设计模型与数据应遵循开放标准（如 IFC、BCF

等），确保在不同平台、不同阶段、不同参与方之间的无损传递与复用。

（3）智能替代原则：用“技术替代人工”处理重复、低效工作，如参数化建模替代逐构件手绘，AI自动碰撞检测替代人工翻图排查，智能优化算法替代经验性方案调整，将人力聚焦于“复杂决策、方案优化”。

（4）协同联动原则：打破“设计-深化-加工-施工”等环节的信息壁垒，通过云端平台实现多参与方实时协同，确保深化方案同步响应“设计约束、施工可行性、加工能力”等多方需求。

（5）落地导向原则：从深化设计之初即嵌入“施工全周期视角”，不仅满足规范要求，更需提前考虑加工难度、安装便捷性、后期运维等，实现“深化即能施工”。

3.1.2 流程框架

智能深化设计的总体流程包含多个阶段，主要框架如图 3-2 所示：

（1）数据整合阶段：归集多源数据，建立“统一数据模型”，自动识别现场与图纸的偏差，为深化设计提供精准基础；

（2）智能深化阶段：基于数据模型，用“参数化+AI”完成深化设计，标准化构件自动生成深化模型，复杂构件优化拆分方案，同步完成智能碰撞检测与规范校验；

（3）协同优化阶段：云端平台同步深化成果至所有参与方，AI自动推送冲突预警，各方在线评审并实时修改，形成优化方案；

（4）落地应用阶段：深化模型直接导出“数字化交付成果”，实现深化-加工-施工-验收”无缝衔接。

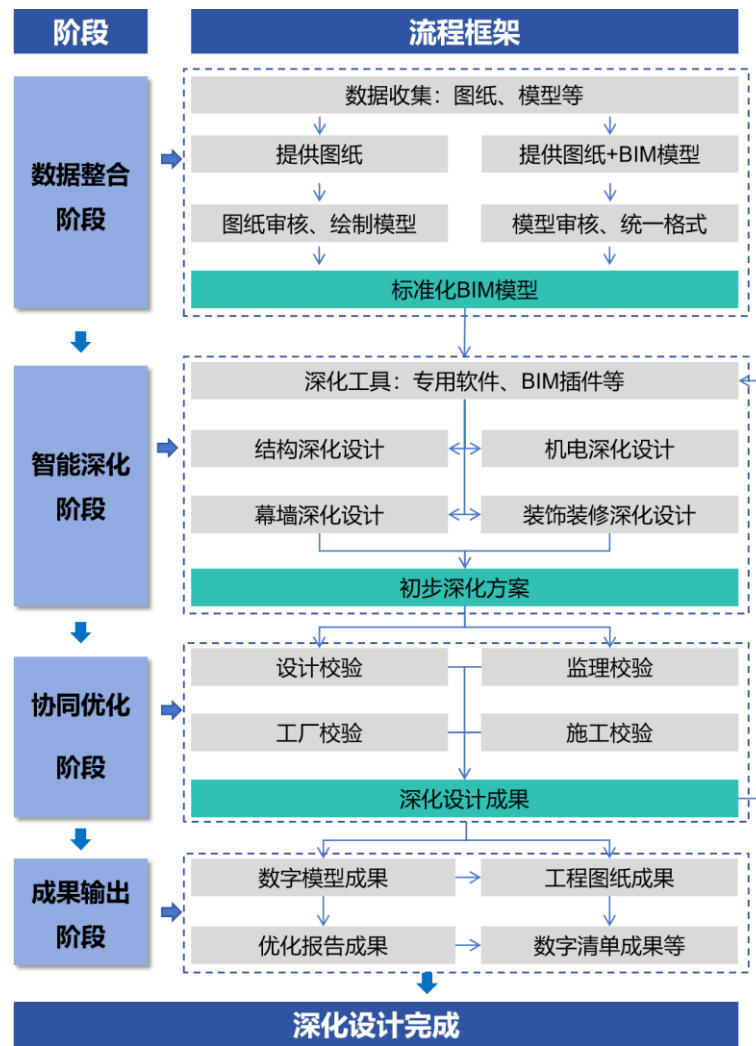


图 3-2 智能深化设计总体流程框架图

3.1.3 主要场景

深化设计方法及工具等不断推陈出新，此处主要梳理当前技术较成熟、应用较广泛的深化设计场景。包括现浇混凝土结构、装配式混凝土结构、钢结构、机电工程、幕墙工程及装饰装修工程的深化设计。不同场景的主要深化内容如表 3-1 所示。

表 3-1 智能施工深化设计主要场景及内容

主要场景	深化维度	主要内容（不限于此）
现浇混凝土结构 深化设计	结构构件深化	优化梁、柱、板、墙体等构件的截面尺寸、混凝土强度等级，确保与荷载需求匹配

装配式混凝土结构 深化设计	钢筋智能深化	优化钢筋间距、排数、锚固长度； 确定搭接、焊接、机械连接的方式与位置； 排查钢筋与管线、预埋件的空间冲突
	节点与连接深化	重点深化梁柱节点、主次梁连接、墙板与楼板 衔接等关键部位，明确混凝土浇筑顺序、模板 支护方式
	预留预埋深化	定位水电管线孔洞、设备基础预埋件、幕墙连 接件等的位置，确保不破坏混凝土结构受力
	预制构件单体	尺寸、洞口、管线预埋、钢筋排布深化； 预埋 RFID 、二维码、预留物联网传感器接口 等
	构件连接节点	灌浆套筒、后浇强度、防水构造深化； 模拟节点受力、输出 BIM 节点参数化模型
	生产加工	钢筋避让、模具尺寸、混凝土养护等深化； 对接工厂 MES 系统、AI 优化构件浇筑顺序等
	现场安装	吊点、支撑布置、验收偏差等深化； 生成 AR 安装指引，预埋件安装深化等
钢结构 深化设计	BIM 协同	碰撞检查、可视化交底； 全专业模型云端协同、对接智慧工地平台
	钢结构构件单体	构件尺寸、螺栓孔定位、筋板布置、坡口形式 深化； RFID、二维码、应力监测传感器接口预 留等
	连接节点	焊缝等级、螺栓型号、节点板厚度等深化； 节点受力模拟、输出 BIM 参数化节点模型
	生产加工适配	构件分段、切割、钻孔深化； 对接工厂 MES 系统、AI 优化切割路径等
	现场安装智能管 控	吊装吊点、角度、临时支撑布置深化； 生成 AR 安装指引、模拟吊装路径、焊缝探伤等
机电工程 深化设计	全流程 BIM 协 同	多专业碰撞检查、可视化交底； 云端协同平台、深化数据接入建筑运维平台
	机电预制构件	管道、桥架规格、设备接口、预留套管位置等 深化；预埋 RFID 芯片、二维码，预留传感器 接口等
	管线综合优化	水电风管线碰撞排查，吊顶、管井内排布优 化； AI 自动优化管线路径、BIM 参数化建模、数字 孪生模拟管线运维等
	生产加工适配	预制管段、模块化机房加工图纸、接口工艺等 深化；对接工厂 MES 系统、模块化构件溯源、 质检深化
	现场安装管控	设备定位、管线连接顺序等深化；

幕墙工程 深化设计		AR 安装指引、BIM+激光扫描、智能比对深化等
	全流程 BIM 协同	多专业模型协同、变更图纸同步； 云端协同平台、深化数据对接智慧工地、预留运维数据接口等
	幕墙构件单体	面板尺寸、排版、龙骨、预埋件位置等深化； 面板预埋 RFID、二维码、预留传感器接口深化
	连接节点	面板固定方式、胶缝宽度、排水孔深化； 节点受力模拟、输出参数化节点模型，适配工厂
	生产加工适配	构件分割、加工精度等深化； 对接工厂 MES 系统、优化面板排版、机器人加工参数清单等
	现场安装管控	吊装吊点、临时固定支架布置； 生成 AR 安装指引、BIM+激光扫描、安装数据实时上传等
装饰装修工程 深化设计	全流程 BIM 协同	多专业碰撞检查、可视化交底； 云端协同平台、深化数据对接智慧工地、预留运维数据接口等
	饰面与定制构件	石材、地砖排版、定制家具、墙面基层处理等深化； 饰面构件预埋二维码，便于溯源及安装位置； 定制构件预留智能设备接口等
	机电末端整合	灯具、风口、插座定位、管线与装修面层避让等； AI 优化末端布局、BIM 参数化建模、预留智能控制接口等
	预制模块化深化	集成吊顶、预制墙面模块拆分、模块拼接工艺深化； 对接工厂 MES 系统、模块 RFID 溯源等。
	现场安装管控	安装顺序、收口细节优化等； 生成 AR 安装指引、激光扫描校准、安装数据实时上传等
	全流程 BIM 协同	装修与机电、结构专业碰撞检查、可视化交底等； 云端协同平台、对接智慧工地、预留运维数据接口

3.2 现浇混凝土结构深化设计

以下按照“应用技术、输入数据、工作流程、交付成果”四方面进一步介绍深

化设计相关工作。

3.2.1 应用技术

现浇混凝土结构深化设计应用的主要技术如表 3-2 所示：

表 3-2 现浇混凝土结构深化设计主要技术

技术模块	核心技术内容
BIM 全专业协同深化	整合结构、机电、装修模型，自动排查钢筋与管线、预埋件碰撞； 云端共享模型，实时同步设计变更
AI 参数化深化技术	自动生成钢筋排布方案； 基于构件尺寸、荷载等，智能推荐模板选型与支撑间距
数字孪生模拟优化	模拟混凝土浇筑路径，适配智能布料机等装备应用； 预测浇筑过程温度裂缝，实时调整养护方案
智能装备对接深化	输出钢筋加工机器人指令； 适配智能模板系统
物联网集成深化	预留混凝土温度、应力传感器安装位，实时监测养护状态； 标注智能振捣设备作业点位频率、时长等
智能验收数据深化	生成激光扫描验收基准，如墙面平整度、构件尺寸偏差阈值等； 对接 AI 质检系统，智能巡检

3.2.2 输入数据

(1) 数据需求

鉴于需收集的数据资料类目较多，此处梳理主要数据资料需求如表 3-3 所示。

表 3-3 混凝土结构智能深化设计数据资料需求

分类	数据/资料名称	具体内容
上游设计资料	结构专业设计图纸	结构总说明、结构构件平立剖面图、节点详图、预留孔洞、预留件定位图等；
	结构计算书	构建承载力计算结构、配筋率计算依据、特殊构建的专项计算等；
	建筑专业设计图纸	建筑平立面、外墙、幕墙节点图等；
BIM 模型资料	结构专业 BIM 模型	基于设计图纸创建的初步结构模型；
	多专业协同 BIM	机电专业、装修专业等模型等；

工艺与现场数据	施工机械参数	吊装设备、混凝土施工设备、钢筋加工设备；
	现场环境与条件数据	施工现场总平面布置图、现场地形与周边约束、施工进度计划等；
	工艺标准	企业/项目专项施工工法、钢筋连接工艺要求、混凝土养护工艺参数等；
材料性能数据	混凝土材料	强度等级、工作性能、特殊性能等
	钢筋材料	牌号与材质、规格与尺寸、连接材料参数等；
	预埋件/辅材数据	预埋件、拉结筋、模板等材料参数；

(2) 数据校验

校验的主要目的在于确保数据的准确性、完整性及标准化，可采用人工与智能化手段相结合的校验方式。

其中智能化手段，包括图纸识别 AI 自动提取构件参数，替代人工识图；自动核对设计图纸的“错漏重缺”；将分散的 2D 图纸、Excel 参数表转化为“标准化数据格式”，确保可被深化设计软件直接使用。

3.2.3 工作流程

(1) BIM 参数化建模

此步骤是深化设计的核心载体构建，通过参数化建模将“抽象设计意图”转化为三维可视化、可关联的数字模型。

结构主体构件建模：基于设计参数，在 BIM 软件中建立梁、柱、板、基础、剪力墙等主体构件的三维模型，设置参数关联关系，如梁截面高度关联楼板厚度，板跨度关联钢筋直径等。

钢筋与预埋件建模：按设计规范，用 BIM 软件的钢筋模块绘制钢筋；对于梁柱节点，分层排布核心区钢筋，避免多层钢筋叠合导致混凝土无法振捣；嵌入参数化规则，通过插件编写脚本，自动生成“板钢筋梅花形排布”、“梁侧腰筋自动布置”等标准化构造，减少重复操作。

智能技术应用：参数化编程实现一次规则编写，多次复用，复杂构件建模效率提升 60% 以上。

(2) 智能优化

此处可用的智能化技术主要包括 AI 配筋优化、BIM 多专业碰撞检测、施工模拟动画，材料用量自动统计等。

结构安全验算：对接结构计算软件，将深化模型的钢筋配置、构件截面参数导入，验证配筋率是否满足荷载要求、节点受力是否合理；利用 AI 技术，自动调整钢筋规格，减少超配或欠配，优化钢筋配置。

碰撞检测：用专业软件进行多专业碰撞检查，避免水电管线孔洞切断主筋，同时排查梁柱节点钢筋过密，避免无法振捣。

施工模拟：生成动画演示“钢筋绑扎顺序”、“混凝土浇筑分层”等，提前发现工序冲突。

成本与效率优化：利用 BIM 模型自动计算钢筋吨数、混凝土方量等，减少传统手工算量的误差。

（3）多方协同审核

此步骤是深化设计的质量把控环节，需联合设计、施工、监理等多方确认成果，避免“信息偏差”导致返工。智能技术应用包括云端协同平台实时共享与在线批注等，减少审核周期，核心工作内容包括以下几方面。

搭建云端协同平台：使用协同平台等工具，将深化模型、分析报告上传至云端，多方实时访问。

多方在线审核：设计方审核钢筋配置是否符合规范、构件截面是否满足受力；施工方审核钢筋间距是否便于绑扎、预留洞口是否便于管线安装；监理方核查深化成果是否与初步设计一致，是否存在安全隐患。

问题闭环管理：用协同平台的“批注功能”标记问题，责任方实时修改；修改后发起二次审核，直至所有问题闭环。

（4）施工反馈机制

混凝土结构智能深化设计并非一劳永逸，需结合现场实际情况动态调整，形成“设计-施工-反馈-优化”的闭环。核心工作内容包括以下几方面：

现场数据采集：用全站仪、BIM 放样机器人采集构件实际位置、钢筋间距等数据，与深化模型对比，识别偏差。

模型修正与迭代：若偏差超出允许范围，分析原因，修正深化模型，并同步更新后续构件的深化方案，避免同类偏差重复出现。

成果归档：将最终的“深化模型、修正记录、施工反馈”归档至项目数字档案，

为后续类似项目提供数据支撑。

3.2.4 成果交付

此步骤是深化设计的成果转化环节，需输出“施工/生产方看得懂、用得上”的数字化与纸质成果，确保深化意图准确传递。混凝土结构智能深化设计的核心输出成果总结如表 3-4 所示。

表 3-4 混凝土结构智能深化设计核心输出成果

成果类型	具体内容	用途
数字化成果	深化 BIM 模型、钢筋加工料单 (Excel/CSV)、施工模拟动画等	预制厂导入模型生产构件，施工方用动画培训工人
纸质/电子图纸	钢筋排布图、构件详图、节点构造图 (含尺寸、标高、钢筋规格)	现场工人施工放线、钢筋绑扎的直接依据
技术说明文件	深化设计说明 (含优化理由)、施工注意事项 (如混凝土养护要求等)	指导施工工艺，明确质量标准
工程量清单	钢筋、混凝土、预埋件的用量清单 (按构件 / 楼层分类)	材料采购、成本核算的依据

3.2.5 参考案例

(1) 基本信息

深圳湾文化广场“水落石出”建筑群，以 8 个鹅卵石状自由曲面清水混凝土壳体为核心，通过参数化建模、多专业协同与数字化加工的整合，破解传统曲面钢筋精度不足、返工率高的难题。



图 3-3 项目效果图及施工过程

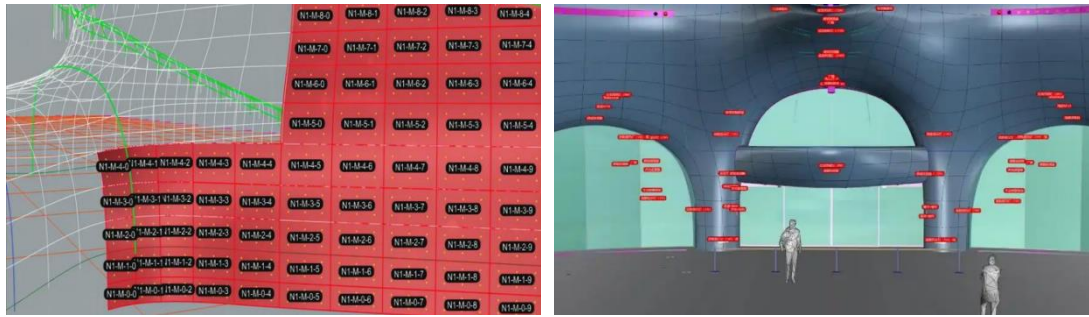


图 3-4 曲面清水混凝土壳体深化设计

核心挑战：曲面形态要求钢筋随曲率连续变化，150mm 薄壁结构中钢筋间距最小 80mm，保护层精度需 $\pm 3\text{mm}$ ，清水混凝土表面无修补，钢筋与石材装饰面预留孔洞精度需 $\pm 2\text{mm}$ ；传统二维设计存在曲面钢筋空间形态表达失真、专业碰撞率高、模板与钢筋定位不同步等关键难题。

(2) 智能深化设计技术路线

曲面离散化建模：用三维建模软件和可视化编程软件将壳体曲面按矩形网格离散为 200 至 300 个单元，利用 Python 脚本开发的配筋插件自动读取曲率、计算钢筋直径、间距、弯折角度等参数，生成空间坐标与加工数据。

变曲率自适应算法：针对曲率骤减区域，开发自适应配筋算法，钢筋间距随曲率自动调整，经多次模拟验证，应力分布均匀性提升 40%。

锚固节点优化：曲面转折处通过 1:1 模型与多次浇筑实验，最终确定“渐变角度结合局部加强箍筋”的方案，锚固区抗裂性能提升 25%，极限荷载位移值低于规范 30%。

数字加工闭环：模型生成的钢筋加工参数直连数控弯箍机，200 根异形钢筋加工精度达 $\pm 2\text{mm}$ （长度）、 $\leq 1^\circ$ （角度），工厂预制准确率从 75% 升至 98%，现场安装效率提升 60%。

模板与钢筋双曲面协同定位：利用可视化编程软件插件，将模板与钢筋三维坐标参数关联，模板位置调整时钢筋模型自动更新，相对位置偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 。

曲面展开与可视化施工：参数化算法将双曲面展开为平面加工图，标注钢筋、模板、石材控制线；施工人员扫码调取三维视图，实现“所见即所得”。

装饰面精准衔接：石材模块参数输入模型，自动计算钢筋预留位置，BIM 直连石材加工设备，槽口与钢筋偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，确保清水混凝土一次成型。

专业冲突提前化解：基于多专业协同平台整合 7 专业模型，约 1.2 万个构件，每周碰撞检测，提前调整 26 处机电与钢筋冲突。

(3) 实施成效

经济价值：钢筋利用率提升 8%，设计变更减少 65%，节约工期 45 天。

质量成果：清水混凝土表面平整度 $\leq 3\text{mm}$ ，孔洞精度 $\pm 2\text{mm}$ ，达国内最高标准。

技术创新：形成“变曲率算法、模板-钢筋参数关联、多专业协同”关键技术成果。

3.3 装配式混凝土结构深化设计

预制混凝土构件及构件间的连接节点是深化设计的核心对象，主要目的在于输出可直接指导工厂生产、现场吊装的“数字化成果”。

装配式混凝土结构智能深化设计流程需围绕“输入数据、参数化建模、构件拆分优化、细节深化、碰撞检查、数据交付”展开。

3.3.1 应用技术

装配式混凝土结构深化设计应用的主要技术如表 3-5 所示：

表 3-5 装配式混凝土结构深化设计主要技术

技术模块	核心技术内容
BIM 全流程协同深化	构建参数化模型； 云端同步结构、机电等模型，自动排查构件与管线、预埋件碰撞
AI 智能优化技术	自动生成构件拆分方案，以适配运输、吊装，并降低成本； AI 优化钢筋排布，避让预埋件，降低材料浪费
数字孪生模拟验证	模拟预制构件生产流程； 验证构件连接节点受力，如抗裂、抗震性能，优化灌浆参数
智能生产对接技术	输出数字化加工指令，对接工厂 MES 系统； 生成构件 RFID 溯源数据，关联材质、精度等信息
物联网集成深化	预留应力、温度传感器接口； 标注智能吊装定位点，适配无人机、激光定位设备
智能安装适配技术	生成 AR 安装指引，扫码查看构件拼接步骤、流程等；

技术模块	核心技术内容
输出激光扫描验收基准，控制构件安装标高、轴线偏差	

3.3.2 输入数据

装配式混凝土结构深化设计需收集的数据资料主要包括以下几方面：

(1) 设计类基础资料。包括建筑、结构施工图，结构计算书，BIM 协同模型，预制构件清单，钢筋参数表以及预留预埋数据。

(2) 生产类约束资料。包括生产线最大构件尺寸、最大构件重量、模具尺寸精度、钢筋加工设备参数等；工厂端混凝土强度等级、钢筋规格范围、预埋件材质等材料供应参数；工厂的构件存储能力、运输车辆的载重量、尺寸、运输路线的限高和限宽等。

(3) 施工类现场资料。包括现场塔吊/汽车吊的型号、最大起重量、最大提升高度、回转半径等吊装设备参数；施工单位确定的装配顺序、临时支撑体系参数、灌浆/坐浆材料的性能等现场装配工艺；施工现场的构件堆放区尺寸、场地平整度、周边环境限制等场界条件。

(4) 规范与标准资料。包括《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1-2014)、《装配式混凝土建筑技术标准》(GB/T 51231-2016)、《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355-2015)等国家/行业规范；当地对装配式建筑的规范要求，如北京《装配式混凝土结构工程施工与质量验收规程》(DB11/T 1030-2022)；业主/项目特殊要求，如构件外观质量、工期节点等。

(5) 协同与管理类数据。主要包含两方面，一方面是协同单位接口数据，如构件厂的“预制构件生产参数”，监理单位的“验收标准清单”，以及设计单位的“变更管理流程”；另一方面是模型版本管理记录、数据修改日志以及数据轻量化要求。智能深化设计需打通“设计-施工-监理-构件厂”多参与方的数据接口，确保信息流转顺畅，避免数据孤岛。

3.3.3 工作流程

覆盖“前期策划、构件智能拆分、细节深化、协同校验”四大环节，每个环节

均需融入智能技术和量化标准，确保落地性。

(1) 前期策划-明确工业化适配性

前期需结合项目定位、生产能力、施工条件，确定装配式核心参数，避免后期拆分返工，核心工作包括：

装配式目标与构件选型。用装配式项目测算工具，根据当地政策、成本目标等，自动推荐构件组合。

生产与施工约束参数录入。将构件厂的“生产极限参数”和施工现场的“施工约束参数”录入 BIM 软件，作为后续构件拆分的硬性约束条件。

标准化模块划分。用模块化设计软件将建筑划分为标准户型模块，构件拆分围绕模块展开。

(2) 构件智能拆分

构件拆分是装配式深化的“灵魂”，直接影响生产效率、施工成本与结构安全，智能深化通过“多目标优化算法”实现“受力、生产、施工、成本”四维度平衡。

① 装配式构件拆分流程与工具应用

步骤 1，导入建筑 BIM 模型，用构件拆分插件自动识别需预制的构件；

步骤 2，输入约束参数，算法自动生成多套拆分方案；

步骤 3，用方案比选工具对每套方案进行模拟，计算每套方案的模具数量、生产工时等，模拟各方案的吊装次数、运输车次等；

步骤 4，输出优化方案，并标注关键参数，包含如构件尺寸、重量、拆分缝位置等信息。

② 典型构件拆分细节及控制要点

预制剪力墙拆分。按“层高+开间”竖向拆分，避免横向拆分，以减少水平缝，提升抗震性；单块构件宽度宜 $\leq 3.2\text{m}$ ，以避免运输限制，高度为层高减去楼板厚；拆分缝避开门窗洞口，距离洞口边缘 $\geq 300\text{mm}$ ，避免削弱洞口刚度。

预制叠合楼板拆分。按“开间尺寸”拆分，优先采用 600mm 模数，便于模具复用；板宽 $\leq 3.2\text{m}$ ，拆分缝避开厨房、卫生间，避免渗漏风险；边缘板需预留后浇带搭接长度，便于现场浇筑连接。

预制框架梁拆分：按柱距拆分，避免跨中拆分，减少接头，提升受力，梁端

预留钢筋锚固长度，以满足抗震要求。

（3）构件细节智能深化

细节深化需输出工厂能生产、现场能安装的精确数据，主要覆盖钢筋、预埋件、连接节点三大模块，均通过参数化建模实现一键修改、自动关联。

① 钢筋智能深化

利用 BIM 软件及配筋脚本等工具，预设《混凝土结构设计规范》（GB50010-2010）、《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ1-2014）等技术规则，自动生成钢筋；用钢筋碰撞检测软件自动排查钢筋与钢筋之间以及钢筋与预埋件之间的冲突，避免现场凿筋。

② 预埋件与预留孔洞深化

建立预埋件族库，每个预埋件关联“材质、尺寸、承载力”等参数，深化时直接调用并定位。灌浆套筒按构件钢筋直径匹配，定位偏差 $\leq 2\text{mm}$ ；预制梁吊环采用圆钢，埋深及焊接长度需满足标准要求，避免吊装时脱落；预埋件定位后，自动生成预埋件清单，包含型号、数量、位置坐标，直接导入工厂 ERP 系统，减少人工转录，降低错误率。

多专业预留孔洞协同。通过 BIM 协同平台，机电专业在预制构件模型中直接标注预留孔洞；结构专业自动检查孔洞是否避开主筋，孔洞间距是否满足施工要求；若机电孔洞与主筋冲突，平台自动发起变更申请，机电专业调整孔洞位置，全程留痕，避免后期返工。

③ 连接节点智能深化

装配式结构的薄弱环节是节点，需通过深化确保连接强度与防水性能，核心节点包括：

灌浆套筒连接。深化内容包括套筒型号、数量、布置间距、灌浆孔/排气孔位置等，以确保灌浆饱满；可采用灌浆量计算插件，根据套筒容积自动计算单构件灌浆量，生成灌浆作业指导书；同时，可在套筒旁预埋 RFID 芯片，记录生产批次、灌浆时间、操作人员，现场扫码即可查看，实现从生产到安装全程追溯。

叠合楼板接缝连接。深化内容包括板缝宽度、接缝钢筋布置、混凝土浇筑要求等；可采用混凝土裂缝模拟软件，模拟接缝处混凝土收缩裂缝，优化钢筋配置，

避免后期渗漏。

后浇带连接。深化内容包括后浇带宽度、钢筋搭接长度、浇筑时间等；可采用 BIM 模拟后浇带浇筑顺序，避免与机电安装冲突。

(4) 多专业协同与智能校验

装配式深化关联到设计、生产、施工、监理、机电、装修等多个参与方，需通过协同平台实现数据实时同步、问题快速闭环。智能校验维度及工具总结如下。

表 3-6 装配式混凝土结构智能深化设计校验内容

校验维度	校验内容	智能工具 / 方法
规范符合性校验	钢筋锚固长度、套筒间距、构件尺寸是否符合规范要求	Revit 插件“规范检查工具”，自动比对规范条款，标注违规项
生产可行性校验	构件尺寸是否匹配模具、钢筋加工是否符合设备精度、预埋件是否便于安装	构件厂 ERP 系统对接 BIM 模型，自动校验“构件尺寸≤模具极限”，不满足则预警
施工可行性校验	构件重量是否匹配塔吊吨位、吊装空间是否足够、运输路线是否可行	Fuzor 软件进行“吊装模拟”，自动计算吊装半径、起重量，不满足则提示优化
多专业碰撞校验	结构与机电、结构与装修的硬 / 软碰撞	Navisworks 进行“全专业碰撞检测”，分类输出冲突报告

3.3.4 成果交付

装配式混凝土结构智能深化设计的成果交付覆盖模型、图纸、文档、数据等多维度。

表 3-7 装配式混凝土结构智能深化设计交付成果清单

成果类别	成果名称	核心内容	用途/适配场景
数字化核心成果	BIM 模型	构件族模型：水平构件、竖向构件（的三维模型，含尺寸、钢筋、预埋件定位； 节点连接模型：拼接/吊装/临时支撑节点构造，含连接件规格及安装参数	生产排产、施工模拟、运维追溯
	关联数据成果	模型属性数据表：构件 ID、类型、混凝土强度、钢筋/预埋件用量、重量/体积； 模型校验报告：碰撞检查、钢筋合规性、尺寸一致性结果	工厂 MES 系统排产、成本核算、质量预控

生产与 施工用 图纸成 果	构件加工详图	单构件正/剖/断面图，标注尺寸、钢筋坐标、预埋件位置、预留孔洞参数；	工厂钢筋加工、混凝土浇筑
	构件配筋图	钢筋明细、绑扎顺序示意图、局部配筋细节	工厂钢筋绑扎作业
	节点构造详图	拼接节点三维剖面图、套筒/浆锚孔定位、密封胶条位置、支撑点位	现场安装、质量验收
	构件排版图	工厂模台排版、现场吊装平面排版	工厂模台规划、现场施工组织
	材料用量表	单构件及整体项目的混凝土、钢筋、预埋件用量，按规格分类	材料采购、成本核算
技术说 明与工 艺文档	生产工艺指导书	生产流程、关键工艺参数、质量控制点	工厂生产操作规范
	施工安装手册	吊装流程、机械选型建议、灌浆参数、常见问题处理方案	现场安装操作、风险规避
	质量验收报告模板	分阶段验收表、验收项目、检测方法	质量验收标准化、构件追溯
	变更管理文档	变更原因、前后对比、影响范围、审批记录	变更追溯、风险管控
可视化 辅助成 果	构件生产动画	模拟从模具安装到脱模的全生产过程，标注关键步骤	工厂人员培训、工艺难点讲解
	现场安装模拟视频	第一视角展示吊装、拼接、灌浆过程，明确人员站位、机械操作要点	现场人员交底、操作规范统一
	三维技术交底文件	复杂节点轻量化模型，支持手机/平板查看	现场快速交底、即时查阅

3.3.5 参考案例

(1) 基本信息

装配式住宅项目：上海奉贤安置房

项目痛点与技术挑战：构件标准化与个性化矛盾，6种户型需匹配多样化预制构件，传统设计导致构件种类达42种，模具周转率不足3次/月；外墙渗漏质量隐患，PC外墙板与现浇结构连接节点处，传统工艺渗漏率高达8%；预制构件预留孔洞与机电管线冲突率超20%，现场剔凿返工成本高。



图 3-6 项目效果图及施工过程

(2) 智能深化核心技术路径

AI 户型优化与构件标准化：建立包含 38 个标准化户型模块的 AI 设计库，通过参数化调整快速生成多样化方案，构件种类缩减至 15 种，模具周转率提升至 8 次/月；应用软件工具进行构件拆分优化，自动计算叠合板、预制楼梯的最优拆分尺寸，板类构件最大尺寸控制在 $3.6\text{m}\times 2.4\text{m}$ ，以满足运输限制，标准化率从 65%提升至 89%；开发“户型-构件-模具”关联算法，当户型发生变更时，系统自动更新构件尺寸与模具参数，设计变更响应时间从 72 小时缩短至 4 小时。

BIM 协同与节点可视化深化：搭建全专业 BIM 协同平台，将建筑、结构、机电模型整合，通过碰撞检测发现预制墙板预留孔洞与水管冲突点 23 处，优化管线路由后减少现场剔凿量 100%；针对 PC 外墙防水节点，采用 BIM 建模软件建立“PE 棒+止水钢板+耐候胶”三重防护的三维模型，明确预制墙板企口深度、止水钢板搭接长度等关键参数，通过 BIM 协同管理软件进行施工模拟交底。

(3) 实施成效

效率指标：构件设计周期缩短 30%，生产效率提升 50%，模具成本降低 40%，项目综合工期节省 15%；

质量指标：外墙渗漏率降至 0.3%，预制构件安装垂直度偏差 $\leq 5\text{mm}$ ，获上海市智能建造示范项目称号。

3.4 钢结构智能深化设计

3.4.1 应用技术

钢结构深化设计应用的主要技术如表 3-8 所示：

表 3-8 钢结构深化设计主要技术

技术模块	核心技术内容
BIM 参数化协同深化	构建钢结构全构件参数化模型； 云端整合结构、机电、幕墙模型，自动排查碰撞
AI 智能优化技术	自动生成构件拆分方案； AI 优化焊缝设计、螺栓排布等
数字孪生模拟验证	模拟钢构件受力状态，优化连接板厚度； 预判构件变形，提前调整加工补偿量，吊装路径规划
智能生产对接技术	输出数字化加工指令； 生成构件 RFID 标签数据
物联网集成深化	预留钢构件应力、温度传感器接口； 标注智能探伤设备检测点位等
智能安装适配技术	生成 AR 安装指引； 输出激光扫描验收基准

3.4.2 输入数据

基础设计数据：建筑、结构等专业设计图纸，BIM 模型；

加工工艺数据：加工厂的设备参数、材料供应信息；

施工场景数据：施工现场 BIM 模型，含吊装设备参数、场地布置、运输路线；

标准规范数据：国家/行业标准、企业内部加工标准等。

3.4.3 工作流程

智能施工背景下，钢结构深化设计整个流程以 BIM 模型为核心载体，贯穿“前期准备、模型搭建、深化优化、碰撞检查、生产施工对接”5大环节。

(1) 前期准备阶段

此阶段主要工作为建立协同机制，为后续深化设计奠定基础。

首先需确定协同平台，划分设计、加工、施工、监理等各参与方的权限，如设计方拥有模型修改权，施工方可查看施工模拟数据；

其次是制定数据标准，包含 BIM 模型的构件命名规则、属性字段定义等，确保各方读取的数据格式统一。

（2）模型搭建

此阶段需搭建高精度、可复用、可关联的钢结构 BIM 模型。

参数化建模：使用专业钢结构 BIM 软件，通过“参数化族”搭建构件模型，包含钢柱、钢梁、支撑、节点等。构件的尺寸、材料、焊缝、螺栓等属性均以参数形式关联，后续修改时，关联的节点、螺栓会自动适配，避免手动重复修改。

智能族库建设：建立企业级钢结构标准族库，族库内置加工工艺参数与力学验算公式，可直接调用并自动满足加工与设计的要求，减少重复建模工作量。

（3）深化设计核心环节

此阶段是深化设计的核心，需结合智能工具完成构件深化与节点深化。

构件拆分：根据加工设备能力，如运输限高、吊装重量等，自动拆分超长及超重构件，并标注拼接节点的连接方式；

智能排版：借助智能化排版软件，将构件轮廓导入钢材板材或型材，自动优化排版方案，目标是减少钢材损耗率，同时考虑切割顺序，以减少钢材变形；

属性赋值：为每个构件添加唯一身份码，如二维码、RFID 标签，并录入加工参数、施工参数；

节点构造深化：针对关键节点，如梁柱刚接节点、柱脚节点等，通过参数化工具生成三维节点模型，明确螺栓型号、焊缝形式、连接板尺寸；

智能力学验算：将节点模型导入有限元分析软件，自动验算节点在荷载作用下的强度、刚度，若不满足要求，软件可自动推荐调整方案；

模块化节点应用：对标准化节点，直接调用族库中的模块化节点模型，并关联对应的加工模具参数，为后续工业化生产做准备。

（4）碰撞检查

智能深化设计通过多专业 BIM 模型整合实现自动化碰撞检查。

内部碰撞：钢结构自身构件的碰撞，如钢梁与钢支撑的位置冲突等，通过 BIM 软件内置功能自动检测；

外部碰撞：钢结构与机电、土建、幕墙等专业的碰撞，通过云端协同平台整合各专业模型，使用专业软件进行全专业碰撞检测；

软件自动生成碰撞报告，并标注优先级，对常见碰撞类型，基于历史案例，

可利用 AI 工具推荐解决方案，并同步更新 BIM 模型。

(5) 生产施工对接

此阶段是智能深化设计价值的落地环节，核心是数据直接驱动生产与施工。

对接工厂加工：加工厂通过数据接口读取 BIM 模型中的加工参数，数控设备自动调取参数进行加工，无需人工二次编程；通过 MES 系统实时反馈加工进度，并同步更新至云端 BIM 模型，设计方与施工方可实时查看构件加工状态。

对接现场施工：施工人员通过移动端查看 BIM 模型的“轻量化版本”，获取构件安装位置、螺栓拧紧力矩等参数；可借助 AR 技术，将 BIM 模型叠加到施工现场实景中，辅助工人精准定位构件；吊装过程中，通过传感器实时采集构件状态数据，并反馈至 BIM 模型，若出现偏差，系统自动预警并提示调整方案。

3.4.4 交付成果

智能施工深化设计的交付物不再是单一的加工图纸，而是“模型+数据”的组合，确保后续环节可直接复用。核心交付成果包括以下几方面：

(1) 高精度 BIM 模型（含构件、节点、螺栓、焊缝等全信息）；

(2) 数字化加工文件：如 DXF 格式的构件轮廓图、NC 代码-对接焊接机器人、BOM 清单-对接采购与成本核算；

(3) 施工指导文件：三维施工模拟视频，通过 BIM 模型导出，展示吊装顺序、安装步骤；构件运输清单，关联 RFID 标签，便于现场清点；

(4) 数据接口文件：如 IFC 格式，用于对接运维平台的数字孪生系统；CSV 格式的构件属性表，用于对接项目管理软件。

3.4.5 参考案例

(1) 基本信息

大跨度场馆：济南足球场大跨度钢桁架工程

项目核心矛盾：120 米跨度自由曲面钢桁架结构，包含 5 万余个构件，传统设计存在网格划分不均、杆件长度差异超 20%、施工临时支撑失稳风险高等问题。



图 3-7 项目效果图

(2) 智能深化解决方案

曲面网格智能划分技术:基于三维建模软件+可视化编程软件开发专用插件,创新采用“等边三角形填充法+Kangaroo 力学优化”组合方案。先将自由曲面拆解为 1286 个基本单元,通过参数化驱动实现网格边长误差 $\leq 5\%$,再利用物理模拟算法调整节点位置,使整体结构应力分布均匀性提升 30%。

施工全过程模拟优化:建立 45 步施工模拟模型,自主研发“弹性支撑卸载法”模拟温度场和风荷载影响。其中,针对屋盖合龙阶段的温度应力问题,通过模拟确定分 3 次卸载临时支撑,最终合龙误差控制在 3mm 以内。

多软件协同接口:通过 Python 代码开发可视化编程软件与结构方案的数据接口,实现模型参数-结构计算-节点深化的实时联动。当调整桁架腹杆倾角时,结构应力分析结果同步更新,深化图纸自动修正,避免传统流程中“建模-计算-改图”的重复工作。

(4) 深化成效

钢材用量减少 12%,工期缩短 15%,获上海市土木工程学会“国际先进”成果认证。

3.5 机电工程深化设计

机电工程智能深化设计,是在传统机电深化设计的基础上,融合 BIM、AI、物联网、大数据等智能化技术,实现从“图纸深化”到“全流程数字化、协同化、精益化”的升级。

3.5.1 应用技术

机电工程深化设计应用的主要技术如表 3-9 所示：

表 3-9 机电工程深化设计主要技术

技术模块	核心技术内容
BIM 参数化协同深化	构建水、电、风专业参数化模型； 云端整合结构、装修等模型，自动排查碰撞
AI 管线智能优化	自动生成管线路径； AI 统计工程量、优化末端布局
数字孪生模拟验证	模拟机电系统运行，优化设备选型； 分析设备易故障点，提前调整设计参数
智能预制对接技术	输出预制管段、模块化机房、数字化加工指令，对接工厂 MES 系统；生成预制构件二维码
物联网集成深化	预留管道压力、温度传感器、设备智能控制接口； 标注传感器安装点位，适配后期智慧运维平台数据采集
智能验收与管控技术	生成验收基准； 对接 AI 质检系统

3.5.2 输入数据

机电工程深化设计的数据与资料准备需覆盖“设计源头、设备材料、协同施工、后期运维、标准要求”全链条。

表 3-10 机电工程智能深化设计数据资料需求

数据/资料类目	资料名称	主要内容
设计类资料	机电专业图纸	包括暖通空调、给排水、电气、消防、动力的施工图、系统图、原理图、设计说明等
	机电专业设计计算书	包括暖通冷/热负荷计算书、给排水水力计算书、电气负荷计算书、消防水力计算书等
	关联专业图纸	建筑专业、结构专业、装修专业图纸
	BIM 模型（若有）	各专业 BIM 模型文件，格式需兼容
设备与材料类数据	设备详细参数表	核心设备参数：水泵、风机、空调机组、配电柜等的详细参数； 智能设备接口数据：物联网设备的通讯协议、数据采集接口、供电需求等
	材料规格与性能数据	管线材料：管道、风管、电缆等；

		辅材参数：阀门、支架、保温材料等
施工管理类数据	施工进度计划	关键进度节点，如机房设备安装时间、管线敷设时间等
	成本控制指标	机电工程总造价限额、单位面积管线成本等；
运维需求数据	数据监测需求	监测传感器安装类型、位置、数据采集频率等
	运维平台接口协议	楼宇自控系统、设施管理平台的接口标准等；
	资产信息数据	设备编号规则、材料台账格式等
标准规范类资料	标准规范	如《机电管线综合技术标准》（GB 50982）等国家、行业规范
	施工图集	如《管道与设备绝热》（08K409）等

3.5.3 工作流程

机电工程智能深化设计工作可分为 6 大核心阶段。

（1）前期准备与资料整合阶段

确认需求和标准：召开业主、设计、施工、运维等多方协同会议，明确深化目标和交付标准，如模型精度 LOD、编码规则等。

基础资料核验：采用人工或 BIM 模型审查工具对输入资料进行合规性校验，避免数据冲突；

团队与工具配置：组建多专业协同团队，部署协同平台，制定团队分工表、协同平台权限配置表、软件工具清单。

（2）BIM 模型搭建阶段

基准坐标系确立。建立或导入建筑、结构专业的 BIM 模型，在协同平台中校准共享坐标原点，避免后期多专业模型错位。可采用“坐标工具”自动关联建筑轴网、标高，生成基准轴网模型，并锁定坐标参数，防止误修改。

机电专业族库搭建。基于项目需求，创建参数化族库，如管道、桥架、风机、水泵等，族构件需关联编号、材质、规格、功率等关键属性数据，确保模型“可视化与数据化”一体。

各专业建模。暖通、给排水、电气、消防等各机电各专业基于原始施工图，在基准模型中搭建管线/设备模型，重点定位主要设备及主干管线走向。可采用“管线布局工具”自动生成主干管线，结合“空间碰撞预判”功能提前规避梁、柱等硬碰撞。

(3) 各专业深化阶段

① 暖通空调专业

负荷与水力计算智能化。利用专业软件将 BIM 模型中的空间信息自动导入，一键完成冷热负荷计算、风管/水管水力计算，生成计算书。

管线精细化排布。基于施工规范，用管线优化工具对分支管线、阀门、支吊架进行参数化布置，确保操作空间足够、支吊架受力合规等。

工程量与材料表自动生成。从 BIM 模型中智能提取各专业工程量，生成“精准材料清单”，且清单与模型实时联动，解决传统图纸算量误差大问题。

② 给排水专业

给水系统方案优化：引入 AI 算法优化给水分区，并模拟不同分区方案的能耗，选择“投资、能耗”综合优化方案；

排水系统优化：使用流体力学模拟软件模拟排水管道内的水流状态，优化排水管管径及坡度，减少堵塞风险；

智能组件集成设计：融入物联网组件，在模型中预留智能设备接口，如智能水表、压力传感器、液位传感器、流量传感器、消防水泵等，确保模型中智能组件的通信协议兼容性，为后期智慧运维平台对接打基础。

管线综合智能排布：使用 BIM 管线优化软件进行智能管线排布，自动生成多种排布方案；对复杂区域（如管井、机房）进行 3D 可视化深化，明确管道支架位置、固定方式等。

设备与构件详细设计：根据水泵、水箱的安装尺寸，在 BIM 模型中生成设备基础的混凝土标号、配筋图，直接导出给结构专业；明确阀门、过滤器的安装方向、检修空间，并在模型中标注材料规格。

智能材料清单（BOM）生成：基于模型中的构件属性，自动生成材料清单，并关联模型中的设备参数，避免传统手动统计的漏项或多算。

③ 电气专业

管线路由优化：利用 BIM 的管线综合优化算法，自动生成最优管线路径，同时减少管线弯折次数，降低施工难度与材料损耗；

设备布局优化：结合施工空间需求，调整配电箱、智能化设备的安装位置；

智能化逻辑优化：联合设备厂家，在 BIM 模型中模拟智能化控制逻辑，验证逻辑合理性。

设备选型优化：优先选择带智能化接口的设备，确保可接入统一管理平台，如配电设备选择带 RS485/Modbus 接口的智能断路器，照明设备选择支持调光的 LED 灯，应急设备选择带应急强启模块的应急照明灯具。

深化图纸与数字化文档生成：基于 BIM 模型导出施工可落地的图纸，并生成智能设备属性表，监测点位表等，为后期施工与运维提供数据支撑。

电气安全验算：通过专业软件仿真接地系统的电阻值，确保满足规范要求，若不满足则优化接地极数量与布置；结合建筑高度与地理位置，模拟雷击场景，优化接闪器、引下线的布置，确保覆盖所有易雷击区域；

消防联动验算：模拟火灾发生时，电气系统的联动逻辑，验证动作时序是否符合消防规范。

④ 消防系统

水力智能计算与优化：用消防设计软件导入 BIM 模型数据，自动计算“设计流量、管网水头损失、最不利点压力”；验证消火栓系统最不利点消火栓静压和动压，若压力不足则优化水泵扬程或增大管网管径；按火灾危险等级计算喷淋头设计流量，验证管网流速，并通过 AI 算法优化喷淋头布置。

物联网接口预留：在 BIM 模型中标记压力传感器、流量传感器等的安装位置，预留供电与通信接口；

联动仿真验证：用火灾动态模拟等专业软件模拟火灾场景，验证 FAS 联动时序，确保符合国家标准规范要求，避免联动延迟或误动作；

烟气扩散与气流组织模拟：用火灾动力学模拟器导入 BIM 模型的建筑空间数据，模拟火灾时烟气扩散路径，优化排烟口位置与风机参数；

防火阀与风机联动深化：在 BIM 模型中明确防火阀与排烟风机的联动关系，并标注控制线缆路由，避免与电气桥架碰撞；

应急照明系统疏散路径仿真与优化：用消防安全评估软件等专业软件结合 BIM 模型，模拟火灾时人员疏散路径，优化疏散指示标志位置、疏散宽度等；

智能疏散控制预留：在模型中嵌入应急照明控制器，预留与 FAS 的联动接

口，实现火灾时疏散指示标志方向自动切换，并标注应急照明回路。

(4) 多专业碰撞检测阶段

多专业模型整合。在协同平台中，将给排水、暖通、电气、消防及建筑结构的 BIM 模型整合，形成全专业综合模型。

自动碰撞检测与报告生成。用 BIM 软件的碰撞检测功能，设置碰撞规则，自动扫描全专业模型，生成《碰撞检测报告》。

碰撞问题协同解决。组织多专业线上会审，制定调整方案，并由责任专业实时更新模型，再次检测，直至碰撞率达标。

3.5.4 交付成果

机电工程智能深化设计的成果主要涵盖“数字化模型、图纸文档、分析报告、运维数据”四大类别。

表 3-11 机电工程智能深化设计核心输出成果

成果分类	名称	核心内容	用途
数字化模型	全专业整合模型	几何信息：机电各专业管线/设备的精准位置、尺寸、连接方式； 属性数据：构件、设备、配件等属性参数； 关联关系：构件与图纸、设备与传感器、管线与系统的关联 ID	施工模拟、碰撞复核、可视化交底
	专业拆分模型	按暖通、给排水、电气、消防各专业拆分的独立模型	专业施工、预制加工
	预制构件模型	工厂预制构件的精细化模型	工厂预制、现场组装校验
	运维轻量化模型	简化几何信息，保留核心尺寸，强化运维数据	运维人员移动端查看、设备定位
图纸与文档成果	机电管线综合平面图	各楼层、区域的机电管线平面布置图；	现场放线、管线安
	系统原理图与大样图	各专业系统流程，标注设备参数、阀门类型； 复杂节点的详细构造；	系统调试、复杂节点施工
	预制加工图纸	工厂预制构件的加工图，包含： 单件尺寸、开孔位置、接口细节； 预制编码、组装顺序； 材料清单（单构件用量）	工厂预制生产、现场组装校验

	<p>设备清单：设备型号、数量、厂家、供货周期、安装位置；</p> <p>材料清单：管材、管件、阀门、电缆等的规格、数量、损耗率等</p>	<p>采购招标、成本控制、材料进场验收</p>
<p>分析与验证报告</p>	<p>碰撞检查与优化报告</p> <p>碰撞统计：全专业碰撞点数量、位置、涉及构件；</p> <p>优化方案：已解决碰撞点的调整措施；</p> <p>剩余碰撞：暂无法解决的碰撞及应对建议</p>	<p>设计审核、施工前冲突规避</p>
	<p>性能模拟分析报告</p> <p>暖通：能耗模拟、气流组织模拟；</p> <p>给排水：水力模拟、排水能力模拟；</p> <p>电气：负荷计算、短路电流模拟</p>	<p>设计优化、节能验收、系统调试</p>
	<p>设备运维台账</p> <p>基础信息：设备型号、厂家、联系方式、保修期、维保周期；</p> <p>运维参数：设备运行阈值；</p> <p>检修记录模板：设备检修项目</p>	<p>设备维保计划制定、故障排查</p>
<p>运维数据与接口成果</p>	<p>智能传感器点位与接口文档</p> <p>传感器清单：传感器类型、安装位置、监测参数、数据采集频率；</p> <p>接口协议：传感器与运维平台的通讯协议、数据格式；</p> <p>布线图：传感器供电、通讯线缆的路由、规格等</p>	<p>智慧运维平台搭建、传感器安装调试</p>
	<p>数字孪生对接文档</p> <p>模型轻量化方案：运维模型简化规则；</p> <p>数据映射关系：模型构件 ID 与现场设备、传感器的映射表；</p> <p>对接流程：模型导入数字孪生平台的步骤、兼容性要求</p>	<p>数字孪生运维系统建设</p>

3.5.5 参考案例

(1) 基本信息

超高层综合体：上海临港西岛金融中心双子塔

项目痛点与挑战：总建筑面积 28.5 万平方米，机电工程包含 57 万余米管道、8.8 万余米桥架、25 万余平米风管，面临空间受限、交叉作业频繁、施工精度要求高三大挑战，传统模式易出现管线碰撞、安装返工等问题。



图 3-8 项目效果图及施工过程

(2) 智能深化核心技术路径

全专业 BIM 协同与碰撞清零：采用“BIM+云协同”模式，整合机电、钢结构、幕墙及精装修多专业模型，通过轻量化协同软件开展多轮碰撞检测，累计排查并解决碰撞点 5200 余处。针对双子塔核心筒区域管线密集问题，利用广联达数维机电软件的智能管综功能，一键生成 3 套剖面排布方案，最终实现走廊净高从 2.4 米提升至 2.6 米，节省吊顶改造成本超 300 万元。

工业化预制与模块化吊装：基于 BIM 模型输出高精度预制图纸，在工厂完成风管激光切割、管道智能套丝等 80% 加工工序，通过构件编码体系实现从生产到安装的全追溯。创新应用“智能模块化吊装平台 + 动态荷载优化”技术，对 15 吨重的空调机组进行精准吊运，安装误差 $\leq 3\text{mm}$ ，效率较传统吊装提升 20%。

绿色技术与智能管控集成：采用浮筑隔振台座技术，通过 BIM 模拟设备振动传递路径，优化减振装置布局，使机房噪音从 85dB 降至 68dB。

(3) 优化成效

机电安装一次验收合格率达 99.8%，工期较计划缩短 25%，获评上海市机电安装智能建造示范项目。

3.6 幕墙工程深化设计

3.6.1 应用技术

幕墙工程深化设计应用的主要技术如表 3-12 所示：

表 3-12 幕墙工程深化设计主要技术

技术模块	核心技术内容
BIM 参数化协同深化	构建面板、龙骨参数化模型； 云端整合结构、机电等模型，自动排查碰撞
AI 智能优化技术	自动生成面板排版方案； AI 优化龙骨排布、胶缝设计等
数字孪生模拟验证	模拟幕墙抗风、抗渗、温度变形等性能，优化节点结构； 预判面板安装碰撞，模拟吊装路径，规避结构障碍物
智能生产对接技术	输出龙骨、面板数字化加工指令； 生成构件 RFID 标签，关联材质证明、表面处理工艺等
物联网集成深化	预留风压、温度、胶缝老化传感器接口； 标注智能开启扇控制接口，适配电动开启及远程调控
智能安装验收技术	生成 AR 安装指引； 输出激光扫描验收基准等

3.6.2 输入数据

(1) 基础设计依据类

建筑施工图：建筑平、立、剖面图，需标注幕墙与主体衔接的洞口尺寸、标高；总平面图，需明确场地运输路线、吊装作业区；

结构施工图：重点提供预埋件布置图、梁柱截面尺寸及荷载限值，确保幕墙支撑体系选型合规；

建筑、结构 BIM 模型：需包含构件坐标、材质属性、等信息，方便直接对接幕墙模型，减少二次建模误差；

幕墙方案设计资料：包含幕墙造型效果图、方案文本、核心性能指标、材料选型清单等；

(2) 现场实测与环境类

主体结构实测数据：预埋件实测、墙面平整度及垂直度、曲面幕墙需实测曲率半径，确保面板贴合度；门窗洞、机电预留等洞口的尺寸复核，避免幕墙与洞口密封间隙超标；

环境与施工条件资料：气象参数，如当地基本风压、最大温差、暴雨强度等，用于抗风、热变形模拟；现场限制条件，如吊装半径、运输通道宽度等；改造项

目需补充既有幕墙结构承载力检测、基层墙体含水率检测等，判断是否需加固或基层处理；

（3）技术标准与规范类

标准规范：通用规范，如《建筑幕墙》（GB/T 21086-2007）、《玻璃幕墙工程技术规范》（JGJ 102-2003）等；专项规范，如防火相关《建筑设计防火规范》（GB 50016-2014）、节能相关《公共建筑节能设计标准》（GB 50189-2015）等；地方规范，如沿海地区需符合《民用建筑抗台风设计规范》（GB 50009-2012）。

（4）材料与设备类

核心材料技术参数：玻璃、石材、金属板等面板材料；铝合金型材、钢连接件等支撑材料；硅酮结构胶、保温岩棉等密封材料的参数要求。

设备与五金件资料：铰链、执手等五金材料技术参数；光伏组件、电动开启扇电机等特殊设备的参数；玻璃 3C 认证、结构胶相容性报告、型材材质证明书等检测认证报告。

3.6.3 工作流程

（1）数据标准化与目标制定

基础资料：将建筑、结构施工图、幕墙设计方案、材料样品参数录入 BIM 协同平台，建立资料与模型关联索引。

现场实测数据：用激光扫描仪获取主体结构点云数据，重点采集预埋件位置偏差、墙面垂直度、洞口尺寸，导入 BIM 平台与设计模型对齐，标记需调整区域。

制定建模标准：明确构件命名规则、建模精度、数据字段。

锚定核心目标：结合规范与项目需求，明确性能目标（抗风压等级、热工性能参数等）与交付目标。

（2）建模与多专业协同

框架式幕墙：用 BIM 软件创建型材、面板、连接件等的参数化族库，修改参数时模型自动更新；面板族标注切割尺寸、打孔位置等，避免重复绘图。

单元式幕墙：用 BIM 软件按“工厂预制-现场安装”逻辑，拆分单元板块，模

型中嵌入防水胶条型号、排水孔位置等加工细节。

异形双曲幕墙：用三维建模软件+可视化编程软件等软件建立参数化曲面模型，通过“基准曲面-面板分块-拼接缝优化”逻辑，控制双曲面板曲率偏差；导入现场点云数据，微调曲面形态，确保与主体结构贴合。

内部碰撞：检查幕墙自身构件冲突，用轻量化协同软件等软件标记冲突点，调整连接方式。

跨专业碰撞：整合结构、机电模型，重点排查幕墙龙骨与风管交叉、预埋件与电气桥架重叠等问题，优化方案，形成《碰撞优化报告》并签字确认。

（3）性能模拟与风险预判

风荷载与地震荷载模拟：采用有限元等专业软件，模拟风荷载、地震荷载作用下，幕墙龙骨、连接件的应力与位移；若应力超标，优化型材参数；若位移超标，优化连接节点。

热工与水密性模拟：采用专业软件进行热工模拟，优化材料及保温隔热构造；模拟暴雨工况，分析雨水渗透路径，优化密封方案。

（4）构件拆分与加工对接

智能拆分与清单生成：结合加工厂设备能力、运输限制等限制因素，利用 BIM 模型自动拆分构件，同步生成《构件加工清单》。

特殊构件处理：双曲玻璃按热弯或冷弯工艺拆分，模型中标注热弯温度、保温时间；铝单板标注折弯半径、回弹补偿量。

自动导出加工图：从三维建模软件模型中提取构件细节，生成带尺寸标注、孔位坐标的加工图，直接对接工厂数控设备。

质量追溯：为每个构件赋予唯一编码，关联加工人员、设备编号、检测数据，后期扫码可追溯，避免不合格构件流入现场。

（5）施工交底与现场协同

AR/VR 应用：利用 AR 技术将 BIM 模型叠加到施工现场，工人直观查看安装要求；利用 VR 设备模拟高空安装场景，提前培训安全操作流程。

轻量化模型交底：导出轻量化模型，施工人员用手机或平板调取，核对构件位置、连接方式，替代传统纸质图纸交底。

3.6.4 交付成果

(1) 数字化模型成果

BIM 模型文件：幕墙专业族文件、IFC（跨平台协同通用格式）、碰撞检查及漫游动画格式；需包含幕墙所有构件的几何信息、属性信息、工艺信息、关联信息；要求模型命名规范、图层/构件分类清晰，可直接用于预制加工建模。

模型应用衍生文件：包含幕墙与结构、机电的碰撞点定位、冲突类型及解决方案；基于模型制作的安装工序动画。

(2) 工程图纸成果

深化设计总说明：应包含深化设计依据、材料技术参数以及施工验收标准等；

平面、立面、剖面图：应包含幕墙板块划分、水平与垂直龙骨定位、标高标注、与主体结构连接节点位置；

节点详图：包含关键节点-如转角、收口、开启扇、防火封堵等的三维剖切图、尺寸标注、材料明细；

加工图纸：单个构件的加工尺寸、孔位定位、公差要求等。

(3) 数据清单成果

材料清单：包含材料规格、数量、单位、理论重量及体积、厂家及供货周期等。

设备与辅材清单：包含密封胶、紧固件、防火材料、施工设备等，标注技术参数及验收标准。

工程量清单：按清单计价规范编制，区分分部分项工程，包含工程量、综合单价分析，用于成本核算及招投标。

(4) 分析与交付保障文件

热工性能报告：应明确传热系数（K 值）、遮阳系数（SC）等计算，是否满足建筑节能要求；

抗风压/水密性/气密性报告：依据幕墙工程所在地气候参数的验算结果，附计算过程及结论；

结构安全验算报告：主要包括龙骨、连接节点的承载力验算。

交付管理文件：明确模型精度、属性定义、文件格式；多专业协同过程中的沟通纪要、问题整改台账；各版本成果的更新内容、更新时间及审批人签字等。

3.6.5 参考案例

(1) 基本信息

大跨度曲面幕墙工程：济南遥墙机场 T2 航站楼

项目痛点与挑战：曲面幕墙单元体数量庞大，总计 1.2 万个，传统人工建模效率低下，易出现尺寸偏差；多专业交叉作业频繁，幕墙与钢结构、机电管线的碰撞冲突率高达 25%；构件预制精度要求高，需实现工厂加工与现场安装的无缝衔接。

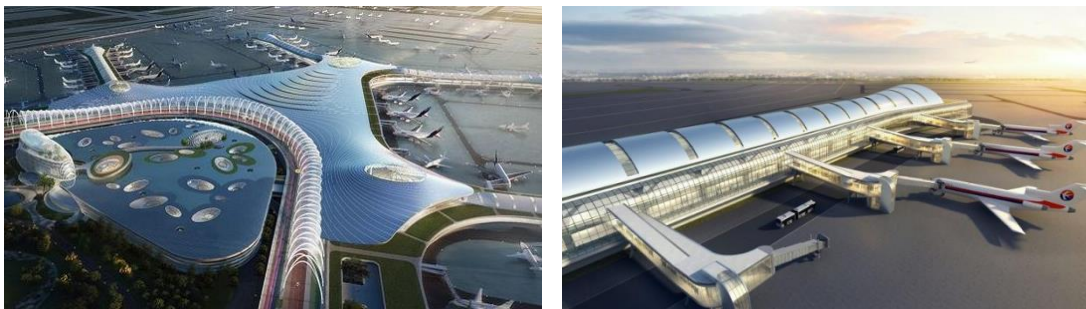


图 3-9 项目效果图

(2) 智能深化核心技术

构件自动生成：项目团队利用幕墙设计工具集，输入建筑曲面参数后，系统自动生成幕墙龙骨、面板的三维模型，将原本 3 万个离散节点构件优化合并为 1.2 万个标准化单元，模型文件体积缩减 60%；

参数化提料：模型内置材料数据库，可一键导出型材长度、玻璃尺寸等加工数据，准确率达 99.8%，较传统人工算量效率提升 3 倍；

风荷载模拟：集成流体力学分析模块，自动校验不同风压工况下的幕墙受力状态，确保大跨度区域抗风压性能达 9 级。

(3) BIM 协同平台与预制加工闭环

通过协同平台，实现设计-生产-施工数据实时流转：

深化设计阶段通过碰撞检测功能，提前发现并解决幕墙与机电管线的冲突点 162 处，避免后期拆改损失；

打通 BIM 设计与工厂 MES 系统的数据接口，将幕墙单元体参数直接转

化为数控加工代码,实现模型扫码生产的智能化预制模式,加工精度控制在±1mm内;

施工阶段通过 BIM 模型进行虚拟预拼装,提前修正累积误差,确保现场安装效率提升 30%。

(4) 成果量化

建模精度达 LOD400 标准,各专业落地实施率超 90%,深化节省钢材 15% 获 2025 年度国家级 BIM 大赛特等奖,成为四型机场建设的标杆案例。

3.7 装饰装修深化设计

3.7.1 应用技术

装饰装修工程深化设计应用的主要技术如表 3-13 所示:

表 3-13 装饰装修工程深化设计主要技术

技术模块	核心技术内容
BIM 参数化协同深化	构建饰面、定制家具参数化模型,支持一键调整尺寸、收口工艺等;云端整合机电、结构等模型,自动排查碰撞
AI 智能优化技术	自动生成饰面排版方案;AI 统计工程量、优化智能设备点位
数字孪生模拟验证	模拟装修效果,提前优化视觉方案;预判运维需求耗,优化材料选型
预制模块化对接技术	输出集成吊顶、预制墙面模块数字化加工指令;生成预制模块二维码,关联材质、安装位置等
物联网集成深化	预留智能设备接口;标注设备线路预埋路径,适配后期智慧家居系统调试
智能安装验收技术	生成 AR 安装指引;自动输出验收基准

3.7.2 输入数据

(1) 设计类基础资料

建筑原始基础图纸:建筑、结构、机电、消防各专业的施工图,主要提供“梁柱位置及尺寸、管线走向及标高、预留洞口等参数”,用于 BIM 模型整合与冲突

预控；

装饰方案核心文件：平面布局图、天花图、立面图、关键造型效果图的设计文件，明确空间功能分区、装饰风格、核心造型要求，为智能拆分构件提供统一依据；

BIM 模型：建筑、机电专业的可兼容 BIM 模型，非所有项目必需，但能大幅减少重复建模工作量，适配智能深化工具。

（2）现场勘察类资料

现场实测实量报告：覆盖项目所有空间的尺寸与偏差数据，附测点位置标注，用于校准 BIM 模型坐标；

现场影像记录资料：带位置标识的照片或视频，记录“梁柱突出情况、管线实际走向、墙面基层状态、现场障碍物等”，补充图纸未体现的现场细节；

现场问题确认单：经监理、总包签字的书面文件，明确图纸与现场的偏差，确保深化设计主动避让，避免后期拆改。

（3）材料与设备类资料

材料基础参数表：装饰主材、辅材的通用参数，含品牌、规格尺寸、物理性能、环保指标等，用于 BIM 模型材质赋值与预制加工；

材料合规性证明：具备 CMA 或同等资质的检测报告、质检报告，确保材料符合国家通用标准，避免验收风险；

设备安装基础说明：灯具、开关、风口、智能中控等通用设备的安装说明书，核心提供“安装尺寸、功率参数、接线要求、最小检修空间”等参数，用于模型中精准定位设备、预留安装接口。

（4）规范标准类资料

国家/行业规范文本：《建筑设计防火规范》（GB 50016-2014）、《建筑装饰装修工程质量验收标准》（GB 50210-2018）等，用于智能工具自动检查设计合规性；

地方规定与业主要求：当地绿色建筑标准、业主对材料品牌/环保等级、特殊空间功能的专项要求，补充规范未覆盖的个性化需求；

专项设计标准：针对特殊空间的规范，如《民用建筑隔声设计规范》（GB

50118-2010)、《无障碍设计规范》(GB 50763-2012),用于会议室、无障碍卫生间等区域的智能深化校验。

(5) 项目管理类资料

项目工期与施工计划:总工期节点、装饰分项工程开工及竣工时间、施工顺序等,用于智能模型中优化工序衔接,避免工期冲突;

施工组织设计大纲:含现场堆场位置、大型设备进场路径、安全防护要求,用于深化设计中预留施工操作空间;

合同与成本文件:装饰工程合同中的质量要求、验收标准,及分项工程造价限额、材料损耗率上限,用于智能模型中控制材料用量与成本。

3.7.3 工作流程

(1) 前期筹备阶段

需求与范围界定:联合业主、设计院、施工方等多方协同确认核心目标,明确功能目标、合规目标、效率目标等;划定深化边界,明确需深化分项,避免无效工作。

团队与智能工具配置:由装饰设计师主导,搭配 BIM 工程师、机电、消防顾问以及施工技术员;部署智能工具,包含建模工具、检测工具、点云扫描仪以及协同工具等。

(2) 数据智能处理阶段

智能核验有效性:通过工具自动校验图纸版本、检测报告资质、实测数据精度等数据资料,剔除无效信息。

数据标准化转换:对于尺寸数据,录入 Excel 参数表,自动关联 BIM 模型坐标;对于材料数据,在 BIM 平台中创建智能材料库,赋值防火等级、环保指标、加工参数等属性信息;对于专业数据,将机电管线、消防点位坐标导出为 BIM 兼容文件,避免手动输入误差。

(3) BIM 智能建模阶段

基础模型整合与修正:将建筑结构、机电模型导入协同平台,统一坐标体系;结合点云数据与实测报告,自动调整模型偏差。

装饰专业参数化建模：通过专业工具分项智能拆分建模。吊顶可拆分为“主龙骨、副龙骨、饰面、检修口”等，赋予间距、荷载等参数；墙面拆分为“基层、隔音层、饰面、预留槽”等，对于装饰面板标注接缝公差；地面分层建模，自动优化拼花排版。

专业点位锚定：将灯具、风口、消防点位等专业点位自动匹配至装饰模型，并确保位置精准。

(4) 智能协同优化阶段

智能检测冲突：用轻量化协同软件工具对装饰、结构、机电模型进行碰撞检测，生成硬碰撞、间隙冲突、工艺冲突三类报告；按“安全>功能>美观”原则对冲突优先级自动排序。

方案智能优化与可视化验证：针对冲突自动生成多种解决方案，结合成本、工期、合规性筛选最优解；通过 BIM 生成优化后效果图、VR 模拟空间效果，组织多方线上评审，确认方案无偏差。

(5) 施工智能适配阶段

预制加工智能对接：从 BIM 模型自动导出预制构件加工图及清单，标注尺寸、纹理、编号；将材料含水率、表面工艺等要求嵌入加工文件，避免标准不符。

4D 施工模拟与智能交底：关联 BIM 模型与工期计划，模拟“吊顶、墙面、地面”等的施工顺序，排查工序冲突；用模型和节点动画替代纸质图纸，向施工班组标注关键控制点，降低理解误差。

3.7.4 交付成果

表 3-14 机电工程智能深化设计核心输出成果

类别	成果名称	核心内容	核心用途
数字化核心成果	BIM 全专业整合模型	含装饰+结构+机电+消防专业，统一坐标，标注构件参数（如龙骨间距）、点位坐标（灯具 / 风口）	施工前碰撞检查、现场可视化交底
	碰撞检测报告	明确碰撞类型（硬碰撞 / 间隙冲突）、位置、解决方案（如吊顶标高调整）、优先级（安全>功能）	提前化解冲突，减少后期拆改

类别	成果名称	核心内容	核心用途
	4D 施工模拟文件	关联模型与工期，展示施工顺序（如吊顶→墙面→地面）、关键节点时间	优化工序、确认工期合理性
	数字化材料库	关联模型的材料 / 设备信息：品牌、规格、环保 / 防火参数、保修信息	采购核对、后期运维查询
施工及加工图纸	装饰深化施工图	全套平面 / 天花 / 立面 / 节点图，标注关键尺寸（如接缝 $\leq 0.5\text{mm}$ ）、现场调整说明	施工班组作业依据、竣工归档
	预制加工图 + 清单	预制构件（如装配式墙板、定制木饰面）的加工尺寸、编号、安装部位	工厂精准加工、现场构件核对
运维衔接成果	轻量化运维模型	简化施工数据，保留构件位置、检修口尺寸、设备保修信息	物业巡检定位、维修查询
	运维资产台账	按区域记录构件 / 设备：编号、规格、状态（正常 / 待修）、供应商联系方式	资产盘点、维修计划制定

3.7.5 参考案例

(1) 基本情况

商业综合体装修改造项目：沈阳大悦城 E 馆

基础信息：5 层商业体，总面积 3.2 万 m²，涉及餐饮、零售、亲子业态，需保留原有结构柱网，改造目标是提升租户坪效、优化客流动线。

原设计存在问题：弧形铝格栅吊顶造型与机电管线碰撞率超 30%，传统 2D 图纸无法直观预判；餐饮租户后厨排烟管、给排水管与天花装饰层冲突，若后期拆改将延误开业；定制化商业道具，如品牌门头、展柜等与墙面基层衔接不明确，工厂预制后现场无法适配。



图 3-10 项目效果图及施工过程

（2）智能深化核心动作

BIM 族库标准化与快速建模：搭建商业装饰专属族库，包含弧形铝格栅、餐饮排烟口、品牌门头龙骨等 120 余项定制族，族文件内置尺寸公差，建模效率较传统方式提升 60%，1 周内完成全馆 3.2 万平方米 BIM 模型；

关键节点参数化：针对 4 层亲子区波浪形吊顶，用可视化编程设定弧度半径、格栅间距等参数，调整 1 个参数即可自动更新全区域吊顶模型，避免重复绘图；

多专业碰撞检测与分级解决：整合装饰、机电、消防、租户设备等多类模型，用轻量化协同软件按“安全>功能>美观”分级检测。一级冲突（安全类），消防喷淋被铝格栅遮挡，解决方案是微调格栅间距，确保喷淋覆盖半径 $\geq 1.5\text{m}$ ，共优化 32 处；二级冲突（功能类）：餐饮后厨排烟管与吊顶标高冲突，通过 BIM 模拟将排烟管偏移至租户隔墙内，节省吊顶高度 80mm；三级冲突（美观类）：弧形吊顶与结构柱衔接不流畅，调整吊顶弧度切线角度，使视觉过渡更自然。

（3）预制加工与现场衔接

从 BIM 模型直接导出铝格栅加工清单，标注每块格栅的编号、尺寸、安装坐标，对接工厂 CNC 切割设备，现场安装时通过 BIM 模型与手机 APP 定位，工人扫码即可查看构件位置，安装效率提升 40%；

针对品牌门头，在 BIM 中模拟“基层龙骨-饰面-灯具安装”全流程，提前预留灯具接线槽和承重预埋件，避免现场开槽破坏装饰面。

（4）成果量化

成本：减少设计变更 6 次，有效节约拆改及材料浪费；

效率：全馆深化设计周期从缩短 30%，租户开业率较原计划提升 20%；

质量：吊顶平整度误差 $\leq 2\text{mm}/2\text{m}$ ，商业道具现场适配率 100%。

3.8 发展展望

智能施工深化设计未来将以“数字孪生驱动、AI 自主决策、全生命周期协同”为核心，呈现以下六大应用方向。

（1）AI 全流程赋能

方案生成与优化的智能化基于深度模型学习海量建筑案例，自动生成多风格、

多维度的深化设计方案,并通过强化学习算法动态调整参数,实现“功能、成本、碳排”的多目标优化。

智能避障与工艺适配针对预制构件钢筋与预埋件的复杂空间关系, AI 算法可自动识别碰撞点并生成避让方案,通过智能避障计算实现构件设计与工厂生产的无缝衔接。

设计合规性智能审查将建筑规范嵌入 AI 模型,实现设计成果的自动化合规性检查,降低施工图错误率。

(2) 数字孪生驱动

全要素数字孪生模型构建整合 BIM、GIS、物联网等数据,构建涵盖地形、气候、施工机械等全要素的虚拟环境。施工过程预演与优化在数字孪生环境中模拟构件吊装、机器人作业等复杂场景,提前预判风险并优化工艺。通过 AR 眼镜、移动端 APP 等终端,将数字孪生模型与施工现场实时叠加对比,直观查看构件安装位置与设计图纸的偏差,物联网传感器则将现场数据实时回传至数字孪生平台,若偏差超出阈值,系统自动触发设计调整建议,实现“设计、施工、反馈、修正”的闭环,避免因设计与现场脱节导致的返工。

(3) 模块化与标准化深度融合

模块化构件的标准化接口与参数化库建设:制定模块化构件的统一接口标准,形成“标准化接口+参数化核心”的设计模式;同时建立模块化构件参数化库,包含构件的材料性能、加工工艺、安装要求等信息,设计时可直接调用并自动匹配生产设备参数,减少重复设计工作量。

与智能工厂的协同设计与数据直通:深化设计成果不再是“静态图纸”,而是可直接对接工厂 MES 的数字化指令;同时工厂生产过程中的实时数据可回传至设计端,若误差超出允许范围,设计端自动调整相关参数。

可拆卸与再生导向的模块化设计:在深化阶段即考虑建筑全生命周期的“可拆卸性”与“材料再生性”;在构件设计中标注材料成分与回收方式,为后期建筑垃圾分类回收提供依据;同时优化模块拆分逻辑,避免拆解时破坏核心构件,提升模块化建筑的材料回收率。

(4) 低碳与可持续性设计升级

低碳材料的智能选型与组合优化：集成国内外建材碳足迹数据库，AI 算法可根据项目所在地的材料供应半径、碳排限值要求，自动推荐低碳材料组合；同时计算不同材料组合的全生命周期碳排，确保设计方案满足项目碳减排目标。

建筑能耗的模拟优化与被动式设计融合：利用数字孪生模型模拟建筑运营阶段的能耗，结合被动式设计原理优化深化方案；针对机电管线深化，优化管线走向与管径，减少输送能耗，最终实现建筑运营阶段能耗降低。

施工阶段碳排的量化与设计优化：深化设计中同步量化施工过程的碳排，并通过设计优化降低相关碳排；通过优化构件拆分尺寸，减少运输车次；同时预留光伏临时用电接口，为现场提供清洁能源，进一步减少施工阶段碳排。

（5）智能设备与工艺深度适配

针对机器人作业特性的工艺细节优化：根据不同类型建筑机器人的作业精度、范围与能力，调整深化设计细节；墙面喷涂机器人存在作业盲区，深化设计中可优化墙面分块，减少盲区面积，或预留专用喷涂通道；焊接机器人对构件坡口角度、间隙有严格要求，深化设计需精确标注相关参数，确保焊接质量。

多机器人协同作业的路径规划与空间适配：在深化设计中规划多机器人的协同作业逻辑；同时优化构件堆放位置与安装顺序，减少机器人的移动距离，提升协同效率。

智能监测系统的接口预留与数据关联：在深化设计阶段即预留智能监测设备的安装位置与数据接口；同时将监测设备的参数与 BIM 模型关联，设计时明确监测数据的接入路径，使施工阶段的“实时监测、风险预警、设计调整”形成闭环。

（6）全生命周期数据贯通与复用

运维需求的前置嵌入与数据预留：在 BIM 模型中嵌入设备参数、供应商信息、保修期限等数据，形成“运维数据库”，运维阶段可直接调用，无需重新摸排；同时预留物联网设备安装接口，为智慧运维提供数据基础。

深化设计知识图谱的构建与复用：整合历史项目的深化设计成果、行业规范标准、材料性能数据，构建“深化设计知识图谱”；同时知识图谱可实时更新，确保设计方案的时效性与准确性，以提升同类项目深化设计效率。

设计成果的资产化与跨项目复用：将深化设计成果转化为可复用的数字资产，

同时探索“设计即服务”模式，将深化设计成果作为服务产品对外输出，为行业提供标准化设计解决方案，延伸设计的商业价值。

4 工地智能设施

4.1 概述

工地智能设施是指为支撑智能施工，在施工现场部署的各类感知、传输、存储、计算、控制、终端等软硬件设施及配套管理系统的集合，它通过技术手段实现对施工现场“人、机、料、法、环”等关键生产要素全面、实时、精准的数字化映射与智能化管控，构成了项目现场的“数字神经系统”，是智能施工体系不可或缺的物理与技术基石。其核心机理在于构建一个从数据采集到智能响应的闭环管控体系：部署在现场的各类设施持续采集海量数据，经由网络传输与平台计算，最终在应用终端上以可视化方式呈现分析结果，并驱动控制设施精准执行指令。这一闭环体系旨在驱动施工过程的数字化、网络化与智能化转型，最终达成提升工程全生命周期质量、保障从业人员本质安全、优化资源配置效率、降低建造过程能耗与碳排放的战略目标。

在政策引导与市场需求的驱动下，工地智能设施的建设已从零星的试点示范逐步迈向规模化应用。其发展现状呈现出三大特征：一是核心技术的初步融合，物联网、大数据和云计算构成了从数据采集到分析决策的基础链条；二是感知设施的广泛部署，高清摄像头、各类传感器等硬件的普及为现场数字化提供了丰富的数据源；三是管理覆盖面的扩展，逐步实现了对“人机料法环”五大核心要素的初步监控，标志着管理深度的提升。本章将通过介绍工地智能设施组成、设施建设与维护以及发展展望，为从业人员科学、高效地规划与建设工地智能设施提供兼具前瞻性与可操作性的指导。

4.2 工地智能设施组成

工地智能设施是一个复杂的系统工程，其产生的数据在不同设施间的流转过程通常可以划分为四个层次：感知层、传输层、平台层和应用层，如图 4-1 所示。这种分层描述能够更好地帮助我们理解数据从物理世界到用户决策的完整链路。

其中，感知层是系统与物理世界交互的接口，负责采集现场数据并执行控制指令；传输层是连接各部分的“神经网络”，负责数据的可靠传输；平台层（由存储设施、计算设施及管理系统构成）是系统的“大脑”和“数据中心”，提供数据汇聚、处理和分析能力，是打破“数据孤岛”的关键；而应用层（主要通过终端设施呈现）则面向不同用户提供可视化的界面和智能化的服务。这种分层解耦的理念，便于未来对任一层设施进行独立的技术升级或模块替换，保障了系统的可扩展性和生命力。

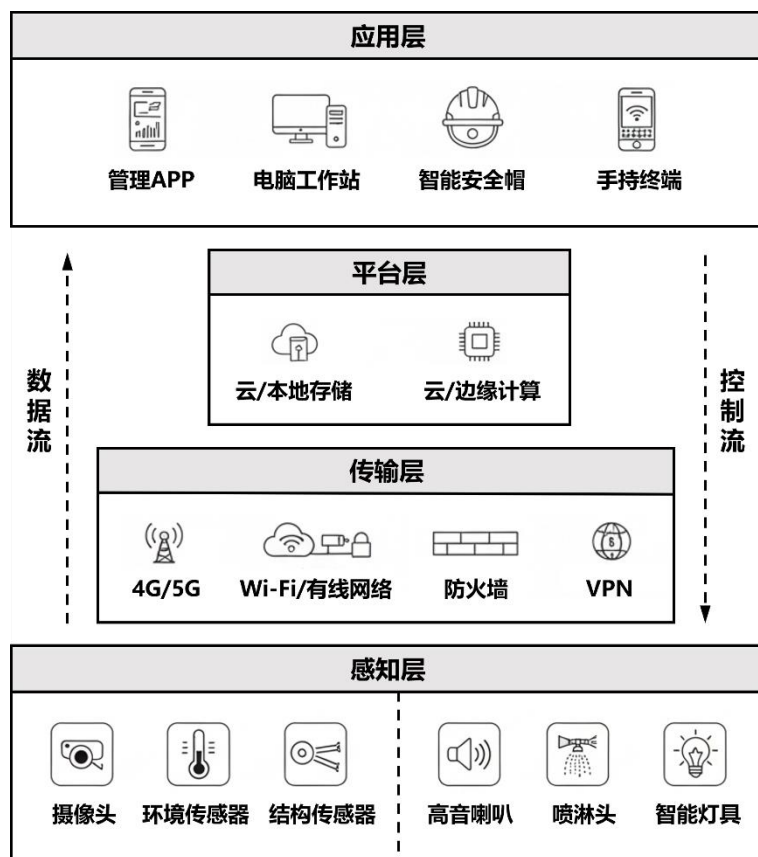


图 4-1 工地智能设施四层结构示意图

为了更直观地展示这四层如何协同工作，形成一个从数据采集到智能响应的管理闭环，可以通过以下典型的安全管理场景来理解：

(1) 感知层：部署在基坑周边的 AI 摄像头利用边缘计算能力，实时分析视频流。一旦识别到有人员违规闯入危险作业区域，系统会立即捕捉画面并生成结构化的告警事件。

(2) 传输层：该告警事件数据通过现场的 5G 网络，以低延迟、高可靠性的方式被迅速上传至工地智能设施的管理系统。

(3) 平台层：管理系统接收到告警数据后，自动触发预设的应急联动规则。平台不仅记录此次违规事件，同时立即下达指令，调用信息广播系统。

(4) 应用层：与此同时，现场项目经理、安全员等相关管理人员的手机 APP（终端设施）会同步收到图文并茂的告警推送，使其能够第一时间掌握现场情况并采取进一步措施。

最终，由平台层下达的指令，在感知设施中的控制类设备（高音喇叭）得到执行，发出现场语音警报，对违规人员进行驱离。这个完整的链条生动地展示了各类设施如何凝聚成一个有机的整体，本节将重点阐述构成这一体系的核心设施。

4.2.1 感知设施

感知设施是工地智能设施的“神经末梢”，负责采集施工现场的各种信息，为上层分析和决策提供数据基础。其部署的全面性、数据的准确性和实时性，直接决定了整个系统的智能化水平。

1. 视频监控系统

视频监控系统是工地智能设施中最基础、最核心的感知手段。它通过在工地关键区域部署高清网络摄像头，实现对现场的全天候、无死角监控。现代视频监控系统已不再是简单的“看得见”，而是通过与 AI 算法的深度融合，实现了“看得懂”。AI 视频分析技术能够自动识别和预警多种不安全行为和状态，如未佩戴安全帽、未系安全带、违规吸烟、人员聚集、危险区域闯入、明火烟雾等。这些智能分析功能极大地提升了安全管理的效率和覆盖面，将安全员从繁琐的人工巡查中解放出来，实现了对安全隐患的主动发现和及时干预。

选型决策应由核心应用场景驱动，避免资源浪费或性能不足。例如，系统分辨率的选择必须满足预定任务要求：用于宏观态势感知的通用监控（如出入口、生活区），采用主流的 1080P 分辨率已足够；而若要支撑 AI 算法进行精细化目标识别（如在较大范围内识别安全帽、分析钢筋数量），则必须配置 4K 或更高分辨率的摄像机，以确保算法获得充足的像素信息，从而保障识别准确率。

在应用 AI 视频分析技术时，需高度重视算法的局限性与潜在偏见。AI 算法的表现高度依赖其训练数据，若训练数据存在偏差（例如仅包含晴好天气、开阔

环境的数据），则可能导致系统在光线不佳、雨雾天气、角度极端（如俯视）、或目标被脚手架遮挡等复杂场景下产生更高的误识别率，这不仅影响预警的可靠性，也可能引发安全隐患。因此，AI 视频分析算法的开发与应用必须定期接受公平性审计，并建立持续的数据反馈与模型优化机制，以确保技术的应用公平、公正、合乎伦理与法规要求。

2. 环境监测传感器

环境监测传感器是实现绿色施工、保障现场人员健康的重要感知设施。通过在工地部署各类环境传感器，可以实时监测施工现场的 PM2.5、PM10、总悬浮颗粒物（TSP）、噪声、温湿度、风速风向、大气压等环境参数。监测项目的选择应严格依据项目所在地的环保要求，并参考如《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523-2011）、《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）等国家及地方标准的规定。当监测数据超过国家或地方规定的排放标准时，系统会自动触发报警，并联动现场的喷淋降尘系统、雾炮机等控制设施进行自动化治理，有效控制施工扬尘和噪声污染。环境监测数据还可以与施工进度计划关联，分析不同施工阶段、不同作业活动对环境的影响，为优化施工方案、制定环保措施提供数据支持。

3. 人员与设备定位装置

人员与设备定位装置是实现施工现场精细化管理和资源优化调度的关键感知设施。通过在人员安全帽、胸牌或机械设备上安装定位标签，可以实时获取其精确位置信息。对于人员管理，可以实现实名制考勤、在岗履职监管、人员分布热力图分析、危险区域闯入预警、一键紧急求救等功能，有效解决了劳务管理中的人员不清、到岗不明等问题。对于设备管理，可以实现设备实时定位、工作轨迹追溯、电子围栏管理、工时统计、怠速监测等功能，帮助管理者优化设备调度，提高设备利用率，降低燃油消耗。

定位精度的选择必须与管理目标的精细度精准匹配。例如，若管理目标是实现区域考勤与电子围栏等一般性管理，米级定位技术（如蓝牙 Beacon、Wi-Fi 等）即可满足需求，且成本效益更优；而若要实现高风险作业区域的精准防碰撞预警、分析人员作业工效、或与 BIM 模型联动进行虚拟现实安全交底，则必须采用能

够提供实时、稳定位置信息的亚米级高精度定位技术(如 UWB、北斗 RTK 等)。续航时间的选择则应确保标签在典型充电周期内(如每周一次)能覆盖所有工作班次。

4. 结构安全监测设备

结构安全监测设备是保障危大工程安全施工的核心感知设施。在深基坑、高支模、大体积混凝土、桥梁隧道等关键工程部位,部署位移传感器、沉降传感器、应力应变传感器、倾斜传感器、轴力计等设备,可以实时监测结构的微小变化。系统通过对监测数据进行实时分析,一旦发现数据异常或超过预警阈值,会立即向管理人员发送报警信息,并可通过手机 APP、短信、声光等多种方式通知现场人员撤离,从而有效预防坍塌等重大安全事故的发生,实现对结构安全的“毫米级”守护。

选型的核心是实现风险等级与监测成本的最佳平衡,其决策必须以设计规范为基准。传感器的精度选择应高于规范要求的最小读数,量程则需覆盖从初始状态到设计预警值的全范围,并留有安全裕度。例如,对于风险等级极高、对变形速率和稳定性极为敏感的深基坑或高支模,必须选用高精度、高稳定性的传感器,以捕捉关键的渐变和突变;而对于常规的、为防止温度裂缝引发结构隐患的大体积混凝土测温,则可选用满足规范要求的标准精度传感器,以优化成本。

5. 物料感知设备

物料感知设备是实现物料精细化管理、杜绝浪费和确保质量追溯的“电子眼”和“识别器”。通过应用物联网技术,可以实现对关键物料从进场、存储、领用到使用的全过程数字化跟踪。例如,在工地出入口部署智能地磅系统,能够实现车辆自动识别、自动称重、偏差计算和数据实时上传;在预制构件、钢筋等物料上附加二维码或 RFID 电子标签,结合手持终端或固定式读写器,能够快速识别物料信息并进行出入库管理与盘点;利用图像识别技术还可实现对钢筋、钢管等物料的自动清点与上传。这些技术的应用,为物料的损耗分析、成本核算和质量追溯提供了准确的数据基础。

选型应始于对管理对象的价值与管理精细度要求的判断。对于高价值、需单件追溯的物料(如大型预制构件、关键设备),应采用 RFID 技术,实现远距离、

非接触式的快速识别与盘点；对于需单件管理但价值相对较低的物料（如钢筋原材、配电箱），成本更低的二维码是理想选择；而对于大批量、低价值、形状规则的物料（如钢管、扣件），则可采用图像识别技术进行快速批量清点，以实现效率最大化。

6. 能耗感知设备

能耗感知设备是推动绿色施工、实现节能降耗和精细化成本管控的重要工具。通过在施工现场的关键区域和主要用能设备上部署智能化的计量装置，可以实现对能源消耗的实时监控与分析。在办公区、生活区、作业区等关键位置安装智能用水、用电监测装置，能够实时监测、记录、上传并统计分析各区域的用水量 and 用电量。这不仅实现了远程自动抄表，还能及时发现水电泄漏、长明灯、设备空转等异常能耗现象，为节能管理和成本分摊提供依据。通过对能耗数据的持续分析，项目部可以优化用能策略，并为计算项目碳足迹、响应国家“双碳”战略目标提供坚实的数据支撑。

选型应由能耗管理的深度目标决定。如果管理目标是实现项目级的成本分摊，在总入口和各分包单位生活区、办公区设置标准精度的计量装置即可；若目标是实现精细化的节能优化，则必须在塔吊、焊机、加工棚等主要用能设备上部署更高精度的计量装置，以便通过分析高频能耗数据，识别异常用电模式（如设备空转、峰时作业），从而制定精准的节能策略。

表 4-1 汇总了各类感知设施的主要内容与作用。

表 4-1 感知设施主要内容与作用

感知设施类型	感知内容	主要作用
视频监控系統	人員違規行為（如未佩戴安全帽）、現場不安全狀態（如明火煙霧）、施工進度與物料堆放情況	實現遠程臨場、主動預警與非接觸式監管，提升安全與生產管理效率
環境監測傳感器	揚塵（PM2.5/PM10）、噪聲、溫濕度、風速風向等關鍵環境參數	保障綠色施工合規性，實現環境污染的自動化監測、預警與聯動治理
人員與設備定位裝置	施工人員、機械設備的實時位置、移動軌跡、在崗狀態與滯留時間	實現電子圍欄、風險區域預警、優化資源調度與提升應急響應速度
結構安全監測設備	危大工程（深基坑、高支模等）的位移、沉降、傾角、應力、軸力等	對結構風險進行“毫米級”實時預警，預防坍塌等重大安全

	结构安全关键指标	事故的发生
物料感知设备	大宗材料（混凝土、钢筋）的进场重量，构配件的身份信息与出入库、盘点数量	实现物料的全生命周期追溯，减少损耗浪费，保障成本核算的精准性与物料质量
能耗感知设备	施工现场办公区、生活区、作业区的分项、分时用水、用电量数据	实现能源精细化管理与节能降耗，及时发现异常消耗，为绿色低碳施工提供数据支撑

4.2.2 传输设施

传输设施是连接感知设施和后端平台的“神经网络”，负责将前端采集的海量数据安全、可靠、高效地传输至指定位置。网络的选择和架构设计直接决定了数据传输的质量和整个系统的稳定性。

1. 网络类型选择

根据工地现场环境和数据传输需求，可以选择不同的网络类型或进行组合部署。选型的核心在于权衡带宽、时延、覆盖范围和成本。关键参数如无线网络的上行/下行带宽、网络时延、覆盖半径，以及有线网络的传输速率（如百兆、千兆）和传输介质（如光纤、网线），应根据业务数据类型、数据量及实时性要求来确定。不同网络类型特点及适用场景见表 4-2。

表 4-2 网络类型特点及适用场景

网络类型	特点	适用场景
广域网 (4G/5G)	1. 部署灵活，移动性强； 2. 5G 具备高带宽、低时延、广连接特性	布线困难、移动性强的场景，如塔吊监控、移动巡检、车辆定位、高清视频实时回传、远程设备操控等。
局域网 (Wi-Fi/有线)	1. 有线网络具有稳定、高速、抗干扰的优点，适合作为工地网络的主干； 2. Wi-Fi 则部署灵活，成本较低，可以作为有线网络的有效补充，为移动办公和手持终端提供网络接入	固定区域设备，如办公区、生活区、材料仓库以及部分固定摄像头

2. 网络架构设计

一个合理的网络架构是保障系统稳定运行的基础。工地网络通常采用分层架构，包括核心层、汇聚层和接入层（如图 4-2 所示）：

- (1) 核心层负责高速数据交换，连接服务器、存储等核心设备；

- (2) 汇聚层负责将多个接入层设备的数据进行汇聚和转发；
- (3) 接入层则直接连接各类前端感知设备。

这种分层架构便于管理、扩展和故障排查。各层交换机的选型应匹配其在网络中的角色定位。接入层直接连接前端设备，选型重点是提供足够的端口数量和基础带宽；汇聚层负责区域数据收敛，选型重点是具备更高的包转发率和链路聚合能力，以避免数据拥堵；核心层作为网络中枢，选型重点是拥有最高的背板带宽和无阻塞交换能力，并具备强大的路由功能和高可靠性（如冗余电源、热插拔模块），以确保整个网络的稳定与高效。

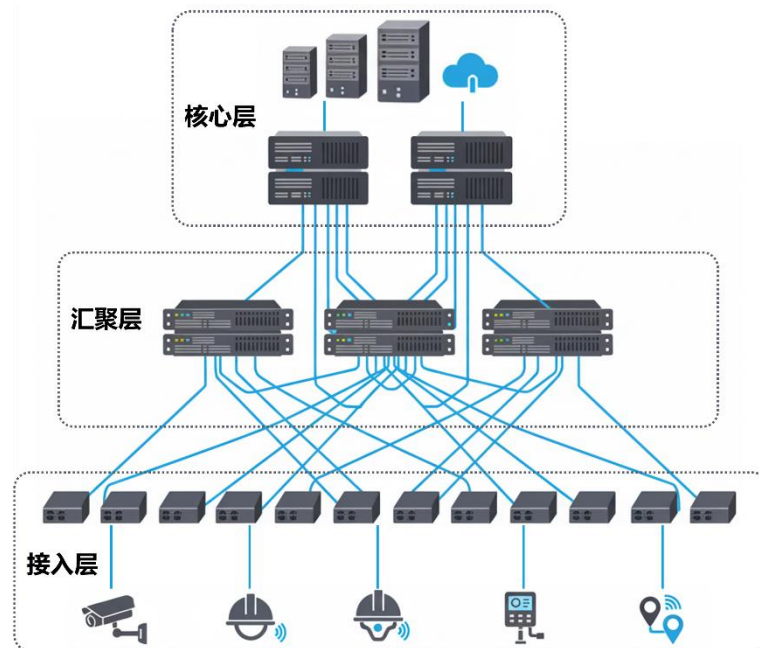


图 4-2 工地网络架构示意图

网络安全是传输设施建设中不可忽视的一环，必须制定全面的网络安全策略：

- (1) 必须部署防火墙、入侵检测/防御系统（IDS/IPS）等安全设备，对网络边界进行防护；
- (2) 应采用虚拟局域网（VLAN）技术对不同业务系统进行逻辑隔离，防止病毒和攻击的横向扩散；
- (3) 对于需要远程访问系统的场景，应采用虚拟专用网络（VPN）技术，确保数据在公网传输过程中的加密和安全。

4.2.3 存储设施

存储设施负责保存和管理工地智能设施产生的海量数据，是数据价值的沉淀池。合理的存储方式和管理策略，对于保障数据安全、提高数据利用效率至关重要。

1. 存储方式选择

不同数据存储方式的特点及适用场景见表 4-3。设备选型需重点关注容量、每秒读写次数（IOPS）、带宽和可靠性（如 Raid 级别、冗余机制等）。对于视频等非结构化数据，读写并发性能是关键；对于数据库等结构化数据，低时延和高 IOPS 更为重要。具体配置应基于数据类型、访问频率和性能要求综合确定。

表 4-3 存储方式特点及适用场景

存储方式	特点	适用场景
云存储	<ol style="list-style-type: none"> 1. 云存储具有弹性扩展、按需付费、免维护等优点； 2. 云服务商通常提供高可用、高可靠的数据存储服务，并具备完善的数据备份和容灾机制 	数据量大、访问并发高的视频监控数据，以及需要多项目、多角色远程协同访问的业务数据
本地存储	<ol style="list-style-type: none"> 1. 通过在工地部署网络附加存储（NAS）或存储区域网络（SAN）等设备，构建本地数据中心； 2. 本地存储的优点是数据完全私有化，访问速度快，但需要自行负责设备的采购、部署、运维和数据备份，成本和管理难度相对较高 	数据保密性要求高、网络条件不佳或希望完全掌控数据的项目

2. 数据管理策略

无论采用何种存储方式，都必须制定科学的数据管理策略：

（1）首先，应根据相关标准（如《数据安全技术 数据分类分级规则》（GB/T 43697-2024）等）要求对数据进行分类和分级管理。例如，将数据分为结构化数据（如人员信息、设备台账）和非结构化数据（如视频、图片、文档），并根据数据的重要性和敏感性，将其划分为公开、内部、秘密、机密等不同级别，设置相应的访问权限和安全策略。

（2）其次，应制定数据生命周期管理策略，明确数据的创建、存储、使用、归档、销毁等各个环节的管理要求。例如，对于视频监控数据，应满足国家标准（如《GB 50348-2018》（GB 50348-2018））及地方标准（如《智慧工地建设技

术标准》(DB 37/T 5287-2024))的相关要求,其本地存储时间通常不应少于 30 天,超过期限的数据自动归档到低成本存储介质中,并在满足法律法规要求的最长保存期限后自动销毁,以节约存储空间,降低存储成本。

4.2.4 计算设施

计算设施是工地智能设施的“大脑”,负责对海量数据进行处理、分析和挖掘,是实现智能决策的核心。计算模式的选择和资源的部署,直接决定了系统的智能化水平和响应速度。

1. 计算模式选择

根据数据处理的需求和实时性要求,可以选择不同的计算模式。选型应基于计算任务的实时性要求和算法复杂度进行算力匹配。边缘计算设备的选型,其核心是算力与场景的平衡。例如,要同时对 10 路 1080P 视频流进行安全帽识别,就需要精确计算所需 GPU 算力,并选择满足该算力要求且具备工业级防护能力的边缘计算盒子。云服务器的选型,其核心是弹性与成本的平衡。对于周期性的、计算量巨大的任务(如每月一次的 BIM 模型渲染、AI 模型训练),应选择可按需付费、弹性伸缩的云服务器实例,用完即释放,以实现最佳成本效益。不同计算模式特点及适用场景见表 4-4。

表 4-4 计算模式特点及适用场景

计算模式	特点	适用场景
云计算	提供了强大的、可弹性伸缩的计算能力;通过将复杂的计算任务放在云端,可以降低项目端的硬件投入,并实现计算资源的按需分配,提高资源利用率	适合处理大规模、非实时的计算任务,如历史数据分析、模型训练、报表生成等
边缘计算	将计算能力下沉到靠近数据源的网络边缘(如工地现场的服务器或智能网关);通过在边缘侧进行数据处理,可以大大减少数据传输到云端的延迟,实现快速的本地响应,提升系统的实时性和可靠性	适合处理低时延、高实时性的计算任务,如 AI 视频分析、设备实时控制、安全预警等

2. 云边协同策略

现代工地智能设施应采用“云边协同”的计算策略,而非单一的计算模式。通过在云端和边缘端进行合理分工,可以实现计算资源的最优化配置,兼顾实时响

应与深度分析的需求。云端和边缘端计算的典型任务及部署建议见表 4-5。

表 4-5 云边协同策略

计算位置	核心作用	典型任务	部署建议
边缘端	实时响应 本地自治	AI 视频实时分析（如安全帽识别）；设备运行状态的实时告警（如塔吊超载）；本地设备联动控制（如环境超标自动喷淋）；数据预处理与清洗，减少上传数据量	对延迟高度敏感、需即时反馈的业务，如直接关系到人员和设备安全的告警与控制，应部署在边缘端，确保在网络中断时，本地安全防线依然有效
云端	全局分析 深度挖掘	跨项目、长周期的历史数据分析；复杂 AI 模型的训练与优化；项目级的资源调度与进度模拟；生成各类管理报表与数据看板；数据永久归档与备份	需要海量计算资源、涉及全局数据、对实时性要求不高的业务，如大数据分析、模型训练、企业级管理驾驶舱等，应部署在云端

4.2.5 控制设施

控制设施是工地智能设施的“手脚”，负责将平台的决策指令转化为对现场物理设备的实际控制，实现从“感知”到“控制”的闭环管理。

1. 信息广播系统

信息广播系统是进行现场信息播报和应急指挥的重要工具。通过在工地部署高音喇叭或音柱，系统可以定时播放安全须知、施工通知等信息，也可以在发生紧急情况时，一键启动应急预案，向全工地或特定区域广播疏散指令，实现快速、高效的现场指挥。选型应确保在最恶劣声学环境下信息的有效传达。例如，在进行桩基施工等高噪声（如>90dB）作业区域，必须选用声压级更高（如>110dB）、指向性更强的音柱或号角扬声器；而在相对安静的办公生活区，则可选用覆盖更均匀的吸顶扬声器。

2. 智能喷淋系统

智能喷淋系统是实现绿色施工、自动化降尘的关键控制设备。系统通过接收来自环境监测平台的数据，当 PM2.5/PM10 等指标超标时，自动启动预设的喷淋方案，对指定区域进行洒水降尘。喷淋系统可以采用定时、定量、定区域的控制方式，并与现场施工计划联动，避免在不适宜的时间（如冬季夜间）进行喷淋，

实现精准、节能的环保治理。选型应匹配治理对象的特征和范围。对于大范围的土方开挖或道路扬尘，应选择射程远、覆盖面广的雾炮机；对于建筑物内或结构施工等需要精细化降尘的场景，则应选用雾化效果更好、能避免大量积水的微雾或高压喷淋系统。

3. 智能照明系统

智能照明系统通过对工地现场的路灯、塔吊照明、加工棚照明等进行智能化改造，实现节能降耗。系统可以根据时间、光照强度、人员活动等因素，自动控制灯具的开关和亮度。选型应在满足安全规范的前提下，最大化节能效益。在主干道、交叉口等对安全要求极高的区域，应选用具备快速响应（如毫秒级）能力的灯具和控制器；在材料堆场、加工棚等非人员密集区域，则可选用响应时间稍长但调光范围更大、节能策略更灵活的系统，以实现更优的节能效果。

4.2.6 终端设施

终端设施是工地智能设施与“人”交互的界面，是管理人员和作业人员使用系统、接收信息、执行操作的直接工具，不同终端设施类型及说明见表 4-6。

表 4-6 终端设施类型及说明

用户类型	终端类型	说明
管理人员	移动管理终端 (手机/平板)	移动管理终端是管理人员随身携带的“移动指挥中心”。通过安装在手机或平板上的 APP，管理人员可以随时随地查看现场实时视频、接收各类报警推送、审批流程、查询数据报表，实现对工地的远程、移动化管理，大大提高了管理效率和响应速度
	电脑工作站	电脑工作站是管理人员进行深度数据分析、系统配置和复杂业务操作的主要平台。通过 PC 端的项目数字化管理平台，管理人员可以进行用户权限管理、设备配置、业务流程设计、数据报表导出等操作，是系统管理和数据应用的核心工具
作业人员	智能安全帽	智能安全帽是专为作业人员设计的集成化智能终端。它在传统安全帽的基础上，集成了定位模块、通信模块、摄像头、语音播报等功能。通过智能安全帽，可以实现对作业人员的实时定位、轨迹追踪、一键呼救、语音对讲，并可以向其推送安全预警和操作指令，是保障人员安全、实现高效协同的重要装备
	手持智能终端	手持智能终端（如加固型平板电脑或 PDA）是作业人员进行现场数据采集和信息查询的便捷工具。通过手持终端，作业

人员可以扫码查询物料信息、拍照上传质量问题、录入施工日志、查看 BIM 模型和技术交底，实现了现场工作的无纸化和信息化，提高了工作效率和数据的准确性

4.2.7 管理系统

管理系统是工地智能设施的“中枢神经”与“指挥中心”，它并非指代项目本身的管理流程，而是专门用于集成、监控、调度和管理前述所有智能设施（感知、传输、存储、计算、控制、终端）的软硬件平台集合。其核心目标是将孤立的设施凝聚成一个有机整体，实现对设施状态的可知、可控、可优，并充分挖掘设施所产生数据的价值。现代先进的管理系统通常采用“中台”架构，其中物联网中台与数据中台构成了两大核心支柱。

1. 物联网中台

物联网中台的核心定位是设施管理，它解决了将海量、异构的物理设施安全、可靠、高效地接入网络并进行统一管理的问题。其主要功能包括：

（1）设备接入与管理：提供统一的设备接入规范与协议，兼容各类异构的感知设施与控制设施，实现设备的快速接入，并维护统一的设备数字档案，包括设备型号、位置、状态、维护记录等。

（2）设备状态监控与运维：实时监测所有在线设备的运行状态（如在线/离线、电量、信号强度、健康度），对设备故障、网络中断等异常情况进行自动告警，并生成运维工单，实现预测性维护，最大限度减少“盲区”和“哑设备”。

（3）远程控制与指令下发：提供统一的指令通道，允许平台或授权用户向指定的控制设施（如智能喷淋、信息广播）或终端设施（如智能安全帽）下发控制命令，实现远程启停、参数配置、固件升级等操作。

（4）设施联动策略引擎：提供可视化的规则编排功能，允许用户自定义简单的联动策略。例如，当环境传感器监测到 PM2.5 超标且时间为白天，则自动启动指定区域的智能喷淋系统，从而实现跨设施的场景化自动协同。

2. 数据中台

数据中台的核心定位是设施数据资产管理，它虽然不直接管理设施硬件，但负责对设施产生的海量、多元、异构的原始数据进行汇聚、治理、整合与服务化，

是打破“数据孤岛”、赋能业务智能的核心。其主要功能包括：

(1) 数据接入与整合：对接物联网中台、业务系统（如 BIM、进度管理）等多方数据源，进行实时或离线的数据采集，并完成多源数据的清洗、转换和融合，形成标准统一的数据资产。

(2) 数据治理与质量管理：建立数据标准体系，对数据进行分类、分级、打标，并持续监控数据质量（如完整性、准确性、时效性），确保数据的可信可用。

(3) 数据服务与共享：将处理后的数据封装成标准、易用的 API 服务，向上层应用提供统一的数据服务，避免了应用系统直接面对复杂混乱的原始数据，极大地提高了数据利用效率和开发速度。

(4) 数据分析与智能应用支撑：提供大数据分析和 AI 模型训练的基础环境，为高级别的数据分析（如趋势预测、根因分析）和智能应用（如基于生成式 AI 的智能问答、基于机器学习的风险预测）提供高质量的数据燃料和算力支持。

物联网中台与数据中台相互协同，形成从数据采集到智能应用的闭环。物联网中台实现设施状态与指令的“管起来”，数据中台完成数据资源的“用起来”。二者共同构成工地智能设施的“数字底座”，有效打破数据孤岛，提升设施利用效率与系统智能化水平，为施工现场的数字化管控与业务创新提供核心平台支撑。

4.3 设施建设与维护

为确保工地智能设施的顺利建设和有效运行，必须遵循系统性的实施流程。工地智能设施的建设应视为一个完整的项目生命周期进行管理，通常包含专项设计、设施部署、调试验收、运行维护四个核心阶段，如图 4-3 所示。这四个阶段环环相扣，从顶层规划到落地实施，再到长效运营与持续优化，形成了一个完整的闭环管理体系。

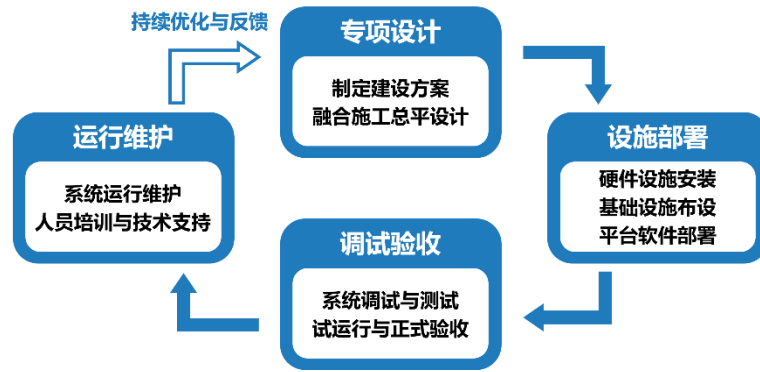


图 4-3 工地智能设施的建设流程

4.3.1 专项设计

专项设计是工地智能设施建设的蓝图和纲领，其质量直接决定了项目最终的成败。专项设计应在项目策划阶段就介入，并与传统的施工组织设计、施工总平面设计等紧密结合，确保智能化建设从一开始就融入项目的整体规划之中。

1. 制定建设方案

制定一份全面、可行的工地智能设施建设方案是专项设计的首要任务。该方案应由项目总包单位牵头，联合各参建单位共同编制，并作为指导整个项目智能化建设的纲领性文件，方案的编制应符合相关标准（如《智慧工地建设技术规程》（DB 61/T 5095-2024））要求，方案的核心内容及说明见表 4-7。

表 4-7 建设方案核心内容及说明

核心内容	说明
建设目标与范围	明确建设的总体目标（如安全事故率降低 30%）和具体范围（覆盖区域、对象和业务流程）
设施组成与选型	详细列出需要部署的感知、传输、存储、计算、控制、终端等各类设施的技术规格和数量
管理系统架构	确定采用何种管理系统（如物联网中台、数据中台），明确系统集成方案和数据接口标准
划分各参建单位职责	清晰界定建设、总包、分包、监理、供应商等各参建单位在设施建设与维护中的职责

2. 融合施工总平面设计

工地智能设施的建设并非孤立的，它必须与施工现场的实际环境紧密结合。因此，在传统的施工总平面设计中，必须充分考虑智能化建设的需要，进行一体化的规划和布局，规划要点及内容见表 4-8。

表 4-8 施工总平面设计规划要点及内容

规划要点	具体内容
软硬件系统布局规划	<ol style="list-style-type: none"> 1. 应明确标注出各类智能化硬件设备的安装位置。例如：视频监控摄像头的安装点位应能覆盖工地出入口、材料堆放区、塔吊、基坑等关键区域；环境监测设备应安装在能代表工地整体环境状况的位置；人员通道闸机应设置在便于管理和疏散的位置； 2. 智能化指挥中心的位置和面积应进行规划，确保其具备良好的视野和通信条件； 3. 需要考虑软件系统的部署，例如服务器或云平台的选型、数据中心的物理位置等
网络与电力基础设施预留	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提前规划和预留网络和电力基础设施的布设路径。例如：需要规划网络线缆（光纤、网线）的走向和桥架位置，确保能够覆盖所有需要联网的设备；需要预留足够的电源插座和配电箱，为各类感知设备、控制设备和终端设备提供电力支持； 2. 对于采用无线通信的设备，也需要考虑信号覆盖问题，可能需要提前规划无线接入点的安装位置

4.3.2 设施部署

设施部署阶段是将设计方案转化为物理实体的过程，此阶段要求施工单位严格按照已批准的建设方案和设备布设图纸进行作业，并与现场土建、安装等其他专业施工过程紧密协调，确保部署质量和安全。

1. 硬件设施安装

硬件设施的安装过程需满足以下核心要求：

(1) 规范性要求：所有感知、控制及终端设施的安装，应严格遵守其产品说明书和国家现行相关安装规范（如《建筑工程施工现场视频监控系统》（JGJ/T 292-2012）等）的要求。

(2) 协同作业要求：硬件设施的安装应与主体工程施工进度相协调，提前进行管线预埋和点位预留，避免后期重复开凿和返工。

(3) 安全防护要求：安装过程中应采取必要的安全防护措施，确保作业人员安全。安装完成的设备应采取保护措施，防止在后续施工中被损坏。

2. 基础设施布设

稳定可靠的基础设施是保障数据流畅传输和系统不间断运行的前提。

(1) 网络与电力：应按照施工总平面图规划的路径布设网络线缆和供电线

路，并采用符合标准的线缆和保护套管。完成布设后，应对每个点位的网络连通性和供电情况进行测试，并做好标识。

(2) 机房建设：指挥中心或数据机房的建设应满足防尘、防水、温湿度控制和不间断电源等要求，为核心服务器和网络设备提供稳定运行环境。

3. 平台软件部署

平台软件是工地智能设施的“大脑”，负责数据的汇总、分析与呈现。

(1) 系统安装：在指定的服务器（本地或云端）上完成操作系统、数据库、中间件及管理系统软件的安装与配置。

(2) 系统集成：完成平台与各应用子系统（如劳务实名制、视频监控、塔吊监测等）的集成对接，通过标准化的数据接口实现不同系统间的数据互联互通，打破“数据孤岛”。

4.3.3 调试验收

调试验收是确保工地智能设施各项功能符合设计要求、系统稳定可靠的关键环节。系统应在验收合格后方可正式投入使用，其验收工作应符合相关标准（如《智慧工地建设技术规程》（DB 61/T 5095-2024）等）要求。

1. 系统调试与测试

在系统部署完成后，必须进行全面的调试与测试，以验证其功能、性能和数据对接的准确性，系统调试与测试内容说明见表 4-9。

表 4-9 系统调试与测试内容说明

测试类别	测试内容与目标
功能性测试	对平台的各项管理功能进行逐一测试，验证其是否满足建设方案的要求
性能测试	对系统在高并发、大数据量情况下的响应速度、处理能力和稳定性进行压力测试
数据接口测试	对与企业级平台和政府监管平台的数据接口进行测试，确保数据内容、格式、传输频率满足对接要求

2. 试运行

系统在正式验收前，应进行不少于 7 天的试运行。试运行期间，应模拟真实应用场景，全面启用各项功能，并由专人记录系统运行状况，及时发现并解决潜在问题。

3. 正式验收

试运行通过后，应组织正式验收，标志着系统建设的完成。

(1) 验收组织：应由总包单位组织建设、监理、分包及系统供应商等多方相关人员共同进行联合验收。

(2) 验收资料：验收前应准备齐全相关技术资料，包括但不限于工地智能设施建设方案及审批文件、设备清单及产品合格证、系统功能测试报告、数据接口测试报告、试运行记录、系统使用说明书、维护手册等。

(3) 验收流程：验收组应通过资料审查、现场核查、功能演示等方式，对工地智能设施的建设情况进行全面评定。验收合格后，各方应在验收记录文件上签字确认。

4.3.4 运行维护

工地智能设施的建设只是第一步，更重要的是后期的持续运维。一个缺乏有效运维的系统，其价值将大打折扣，甚至可能因为故障频发而沦为摆设。因此，建立一套完善的运维体系，是保障工地智能化系统长效运行的关键，其管理应符合相关标准要求。

1. 运行维护程序

应制定详细的运行维护程序，明确日常巡检、故障处理、数据备份与恢复、系统升级与优化等工作的内容、流程和标准，并安排专人负责，建立运维日志，具体见表 4-10。

表 4-10 运行维护要点及内容

要点	具体内容
日常巡检与故障处理	<ol style="list-style-type: none"> 1. 应安排专人负责系统的日常巡检工作，定期检查各类硬件设备的运行状态（如摄像头是否在线、传感器数据是否正常）、网络连接是否稳定、软件平台是否运行流畅等； 2. 应建立故障处理流程，一旦发现故障，能够迅速定位问题、判断原因，并及时进行修复或联系供应商进行处理； 3. 应建立运维日志，详细记录每次巡检和故障处理的情况，为后续的系统优化提供依据
数据备份与恢复	<ol style="list-style-type: none"> 1. 应制定严格的数据备份策略，定期对关键数据进行备份，并将备份数据存储在安全的位置；

	2. 应定期进行数据恢复演练，确保在发生数据丢失或损坏等意外情况时，能够迅速恢复数据，将损失降到最低
系统升级与优化	<ol style="list-style-type: none"> 1. 应建立系统版本管理机制，定期对系统软件、硬件固件进行更新，以修复已知漏洞、提升系统性能和增加新功能； 2. 在升级前，应在测试环境中进行充分的验证，确保升级不会影响系统的稳定运行； 3. 应定期对系统运行数据进行分析，评估系统性能瓶颈，对数据库、服务器配置等进行优化，提升系统整体运行效率

2. 人员培训与技术支持

工地智能设施的价值最终要通过人的使用来体现，因此，持续的培训和技术支持同样至关重要，人员培训与技术支持要点及内容见表 4-11。

表 4-11 人员培训与技术支持要点及内容

要点	具体内容
建立培训体系	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在项目启动初期，应对所有相关人员进行系统性的操作培训，使其掌握系统的基本功能和使用方法； 2. 在系统运行过程中，应定期组织进阶培训，针对新功能、新应用进行深入讲解； 3. 应编制图文并茂、通俗易懂的用户手册和操作视频，方便用户随时查阅和学习
提供持续技术支持	<ol style="list-style-type: none"> 1. 应设立专门的技术支持热线或在线服务平台，解答用户在使用过程中遇到的问题； 2. 对于复杂的技术问题，应提供现场技术支持服务； 3. 应建立用户反馈机制，定期收集用户的意见和建议，并将其作为系统优化和升级的重要参考，形成用户与开发者之间的良性互动，共同推动系统的不断完善

4.4 发展展望

尽管工地智能设施的建设取得了显著进展，但在快速推进的过程中，仍面临技术、管理和标准等多个层面的制约。正视这些问题，并把握新兴技术带来的演进趋势，是推动行业实现更高水平智能化的关键。

4.4.1 制约因素

1. 技术层面的瓶颈

技术是驱动工地智能设施发展的核心引擎，但当前在硬件、软件、数据和安全等多个维度上均存在明显的技术瓶颈。这些瓶颈问题相互关联，共同制约了工

地智能设施效能的深度发挥，是其向更高阶段发展的核心障碍，具体见表 4-12。

表 4-12 技术层面主要制约因素分析

类别	核心问题	具体表现	负面影响
兼容性	设备与系统兼容性不足	<ol style="list-style-type: none"> 1. 各类监控、监测、BIM 等系统由不同厂商开发，技术协议与数据格式各异，形成了众多“数据孤岛” 2. 例如：AI 摄像头发现险情，却无法自动联动调取塔吊运行数据做综合判断 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 数据无法共享，价值被浪费 2. 难以实现跨系统联动控制 3. 硬件与数据资源重复投资
安全性	数据安全与泄露风险	<ol style="list-style-type: none"> 1. 行业普遍缺乏统一的安全标准与防护机制，重功能实现而轻安全体系构建 2. 除数据泄露风险外，还涉及数据主权、跨境传输、国密算法应用等国家政策要求 3. 例如：设备保留弱口令、数据传输未加密、权限管理混乱等，易被攻击或造成数据泄露 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 施工图纸、人员信息等敏感数据面临泄露风险 2. 可能违反国家数据安全法规 3. 制约系统向云端部署与应用
集成性	系统集成度低	<ol style="list-style-type: none"> 1. 兼容性不足导致各子系统呈“烟囱式”独立运行，无法有效协同工作 2. 例如：事故发生后，管理者需登录多个不同平台，手动拼凑信息，延误应急处置时机 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加重管理者工作负担 2. 决策效率低，反应速度慢 3. 系统协同效应差，“1+1<2”
持续性	技术更新换代快	<ol style="list-style-type: none"> 1. AI、IoT、5G 等技术迭代迅速，导致软硬件持续投入与跟进的压力巨大 2. 例如：几年前部署的先进设备可能很快面临淘汰；软件系统需要持续付费升级和维护 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 给企业带来沉重的财务负担 2. 对从业人员的学习能力和技术水平提出更高要求 3. 增加了技术选型和投资的风险

2. 管理层面的困境

如果说技术瓶颈是制约工地智能设施发展的“硬约束”，那么来自管理层面的困境则是影响其落地见效的“软阻力”。即便拥有最先进的技术方案，若管理理念、人员素质和成本效益等核心管理问题悬而未决，工地智能设施的建设也难以实现预期价值，甚至可能沦为昂贵的“摆设”，具体见表 4-13。

表 4-13 管理层面主要制约因素分析

类别	核心问题	具体表现	负面影响
人员	人员素质与技能差距	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一线人员数字化技能普遍欠缺，习惯传统作业方式 2. 例如：工人抵触佩戴智能安全帽等设备；管理者不擅长利用数据进行决策分析 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 形成“先进的技术、落后的管理”局面 2. 系统采集的数据无法转化为生产力 3. 工地智能设施的效用大打折扣
理念	管理理念滞后	<ol style="list-style-type: none"> 1. 传统的经验主导、层级式管理模式与工地智能设施建设要求的数据驱动、扁平化管理存在深刻冲突 2. 例如：管理者不信任平台数据，仍依赖“拍脑袋”决策；系统预警被忽视 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 工地智能设施被降级为“高级监控工具”，而非“管理变革的催化剂” 2. 系统的深层价值远未被挖掘 3. 阻碍管理流程的再造与优化
成本	成本效益压力	<ol style="list-style-type: none"> 1. 工地智能设施前期建设投入高，而投资回报周期长，经济压力大 2. 例如：一套方案投入达数十万至上百万元，对于利润有限的中小型项目吸引力不足 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 较高的经济门槛阻碍了工地智能设施在中小型项目中的普及 2. 企业在选择服务商时面临信息不对称的风险 3. “高投入、长回报”模式与部分项目的短期目标不符

3. 政策与标准层面的缺失

政策的顶层设计和标准的底层规范，如同引导行业发展的“指挥棒”与“度量衡”。在工地智能设施建设中，这两方面的体系性缺失，导致了当前市场发展一定程度上的无序和项目建设的盲目性，是亟待补齐的关键短板，具体见表 4-14。

表 4-14 政策与标准层面主要制约因素分析

类别	核心问题	具体表现	负面影响
标准	标准体系不完善	<ol style="list-style-type: none"> 1. 缺乏国家层面的统一标准，而地方性标准内容各异，形成“一地一标准”的碎片化局面 2. 例如：跨区域经营的企业需要适应不同地方的标准，增加了系统集成的难度和成本 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 市场产品良莠不齐，缺乏统一规范 2. 厂商倾向于采用私有协议，加剧“数据孤岛” 3. 给数据安全、系统互联埋下隐患 4. 阻碍了行业的规模化和规范化发展
政策	政策引导与支撑不足	<ol style="list-style-type: none"> 1. 缺乏明确、可操作的激励与约束机制 2. 例如：内地相比香港（规定超 3000 万港元工程必须采用智能安全系统），在强制性政策要 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 激励不足：企业缺乏财政补贴、税收优惠等支持，投入积极性受挫 2. 约束不够：强制性要求的覆盖面和监管力度有限，政策执行力打折扣

4.4.2 对策建议

为应对上述制约，需要从技术、管理、政策层面协同发力，采取系统性的改进措施，具体见表 4-15。这三个层面环环相扣，技术是基础，管理是关键，政策是保障，三者共同推动行业的健康、可持续发展。

表 4-15 对策建议

层面	核心目标	具体对策建议
技术	加强自主研发与系统集成	<ol style="list-style-type: none"> 1. 突破关键核心技术：聚焦高端传感器、AI 芯片、工业软件等关键领域攻关 2. 推动集成创新与开放标准：制定并推行统一的数据接口与通信协议，强制要求新建系统符合标准。推广基于“数据中台”的架构，采用微服务与 API 网关实现系统互通 3. 构建全方位安全防护体系：必须应用加密、区块链等技术，构建数据全生命周期安全防护体系；优先采用国密算法进行数据加密，优先选用通过安全审查的境内云服务商，推广北斗定位系统应用，并在项目启动前完成数据分类分级与备案工作
管理	提升人员能力与优化管理模式	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建立常态化人员培训体系：培训内容覆盖操作技能、数据理念、安全意识；培训对象覆盖所有层级；同时建立“项目级数字技能认证制度”，如“工地智能设施操作员”岗位证书 2. 推动管理模式变革：引导管理者从“经验驱动”向“数据驱动”转变，优化流程，实现“数治” 3. 探索可持续成本效益模式：推广“SaaS+服务租赁”模式，降低初期投入；发布权威的效益评估报告与成功案例 4. 采纳“试点-验证-推广”的实施路径：鼓励企业选择代表性项目作为智能化试点，集中资源打造成功样板。通过试点项目验证技术方案、测算成本效益、总结管理经验，在此基础上形成标准化的解决方案，再逐步向更多项目进行推广，以规避大规模投入的风险
政策	完善标准体系与加大引导力度	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加快制定国家级统一标准体系：涵盖技术架构、数据标准、接口规范、安全要求、评价指标等 2. 加大政策引导与支持力度：出台财政补贴、税收减免、招投标加分等激励政策 3. 逐步扩大强制性应用范围：以政府投资、大型公建等重点项目为示范，起到引领作用

4.4.3 发展趋势

随着 5G、人工智能、数字孪生、物联网等技术的进一步成熟和深度融合，工地智能设施将朝着更加自主、协同、虚实共生的方向发展，其应用将覆盖工程项目全生命周期，如图 4-4 所示。

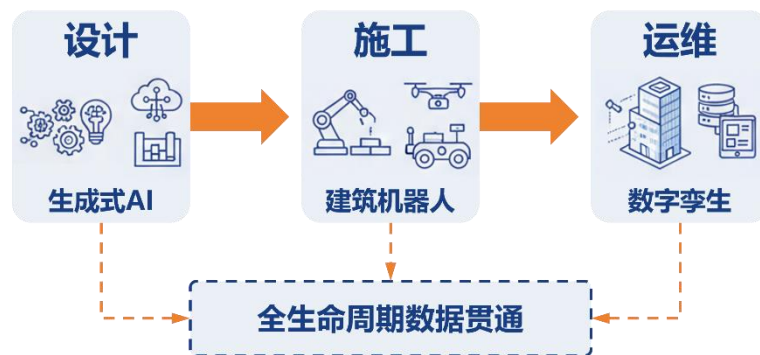


图 4-4 工地智能设施应用范围拓展

1. 生成式人工智能重塑规划与决策

生成式 AI 将成为推动行业从“数字化”走向“智能化”的核心引擎。它将人类的经验与机器的强大计算能力相结合，把项目前期的规划与决策提升到前所未有的高度，具体应用场景及说明见表 4-16。

表 4-16 生成式 AI 应用场景及说明

应用场景	核心技术/方式	实现价值/目标
智能设计与方案优化	输入项目约束条件（如预算、空间、材料、能耗目标），通过生成式 AI 算法进行海量方案生成与性能模拟对比	颠覆传统设计流程，极大提升设计方案的创新性、科学性和优化效率
施工计划与资源调度自动化	AI 分析 BIM 模型、历史数据和实时供应链信息，自动生成并动态优化施工进度、资源分配和物流计划	实现“最优解”的动态规划，最大限度减少工期延误、资源浪费和成本超支
自然语言交互与知识管理	基于 AI 大语言模型构建项目知识库，项目人员可通过自然语言进行提问、检索和指令下达	极大地降低了复杂系统的使用门槛，实现即时问答与快速决策，使数据和知识触手可及

2. 自动化施工与人机协同成为常态

“机器换人”正逐步成为现实，未来的工地将是人类管理者、技术工人和各类建筑机器人高效协同的作业场所。

(1) 任务型建筑机器人普及：针对砌筑、钢筋绑扎、焊接、喷涂、室内装

修等高强度、重复性或危险性高的工序，将广泛应用各类专业机器人，其工作效率和精度远超人工作业。

(2) 自主工程机械：挖掘机、推土机、压路机等重型设备将实现无人驾驶和自主作业，通过与数字孪生模型的联动，精确完成土方开挖、场地平整等任务。

(3) 人机协同新模式：人类的角色将从体力劳动者转变为机器人的管理者、监督者和协作者。例如，工人可通过 AR 眼镜向机器人下达指令，或佩戴外骨骼机器人系统增强自身力量，共同完成复杂的安装任务。

3. 基于区块链的信任体系与供应链变革

区块链技术以其去中心化、不可篡改的特性，为建筑行业复杂的供应链和多方协作提供了坚实的信任基石，解决了长期存在的信息不透明、追溯困难和支付纠纷等问题，具体应用场景及说明见表 4-17。

表 4-17 区块链技术应用场景及说明

应用场景	核心技术/方式	实现价值/目标
材料与构件的全生命周期追溯	为每个构件创建基于区块链的“数字身份”（通过二维码或 RFID 关联），记录从原材料采购、加工生产、出厂检验，到物流运输、进场验收、安装使用的全过程信息	实现来源可查、去向可追、责任可究，从根本上杜绝假冒伪劣材料，确保工程质量安全
智能合约驱动自动支付与结算	基于区块链的智能合约可以预设支付条款，例如“当 BIM 模型显示某批预制构件已安装到位，且质量验收数据上链确认合格后，自动将工程款的 80% 支付给供应商”	大幅提升结算效率，减少人为干预和支付纠纷，保障各方（尤其是中小供应商）的现金流健康

4. 从“工地智能设施”迈向“自主建造”

技术的终极发展方向是实现高度自主化的建造过程。这不仅是单一技术的突破，而是所有前沿技术深度融合的必然结果。如图 4-5 所示，在“自主建造”愿景下，项目的大部分建造任务由 AI 大脑统一规划，由机器人集群协同执行，而人类专家则主要承担“任务指挥官”和“异常处理专家”的角色。整个建造过程在数字孪生环境中进行实时监控、模拟和优化，形成一个高度智能化的“感知-决策-执行-反馈”闭环，最终实现建造过程的根本性变革。

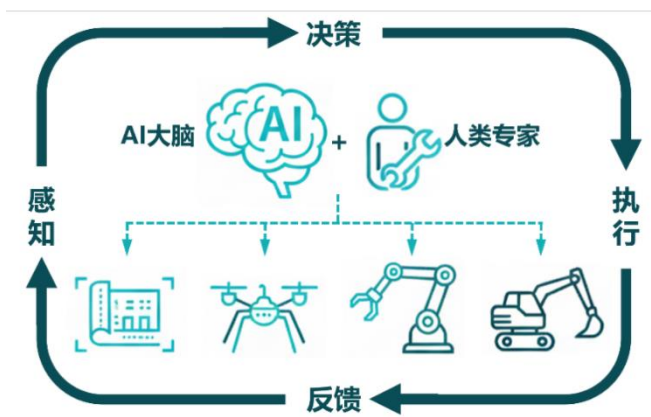


图 4-5 自主建造：人机协同与智能闭环

5 现场智能作业

5.1 概述

现场智能作业覆盖了从地基基础到竣工验收的建筑施工全过程，涉及土方、桩基、结构、机电、装饰等各个专业分项工程。其主要目标是系统性提升工程项目的质量、安全、效率、成本、环保综合效益，推动建筑业向工业化、数字化、智能化转型升级。本章介绍施工阶段现场智能作业的核心技术与应用范围，需要说明的是，所述内容并非都是每个项目都必须全部实施的工作，各项智能作业技术的具体选用与实施方案，应由项目各参与方根据工程的实际特点、技术可行性、经济效益及现场条件进行综合评估后，因地制宜地决策。

5.1.1 现场智能作业核心技术

现场智能作业依赖于一系列数智技术的集成应用，这些技术构成了智能装备的“感知-决策-执行”核心能力。

(1) 环境感知与定位导航技术

三维环境感知：主要利用激光雷达（LiDAR）、深度相机等传感器，实时获取作业环境的高精度三维点云数据，为机器人提供环境模型，用于路径规划和避障。

高精度定位：综合运用全球导航卫星系统（GNSS-RTK）、全站仪、惯性测量单元（IMU）以及视觉 SLAM（同步定位与地图构建）等技术，使机器人在复杂的施工现场实现厘米级甚至毫米级的精确定位。

(2) 决策与任务规划技术

路径与行为规划：基于 BIM 模型和实时感知的环境信息，自动规划出从当前位置到目标作业点的最优、无碰撞路径。

任务理解与分解：将上层下达的施工任务（如“砌完这面墙”）分解为一系列机器人可以执行的动作序列（如抓砖、涂浆、放置、校准）。

(3) 运动控制与精准执行技术

伺服驱动与运动控制：通过高精度伺服电机和先进的运动控制算法，驱动机械臂、行走底盘等执行机构，实现高精度、高稳定性的动作。

力控与柔顺控制：赋予机器人触觉感知能力，使其在执行打磨、安装等任务时，能够施加恒定的力或顺应接触面的变化，避免刚性碰撞造成的损坏。

(4) 人机协同与协同技术

远程操控与遥操作：通过高清图传和低延迟控制系统，允许操作员在安全的驾驶舱内对设备进行远程精细化操作（图 5-1）。

多机协同与任务调度：通过中央调度系统或分布式通信，实现多台机器人之间的任务分配、路径协调和协同作业。

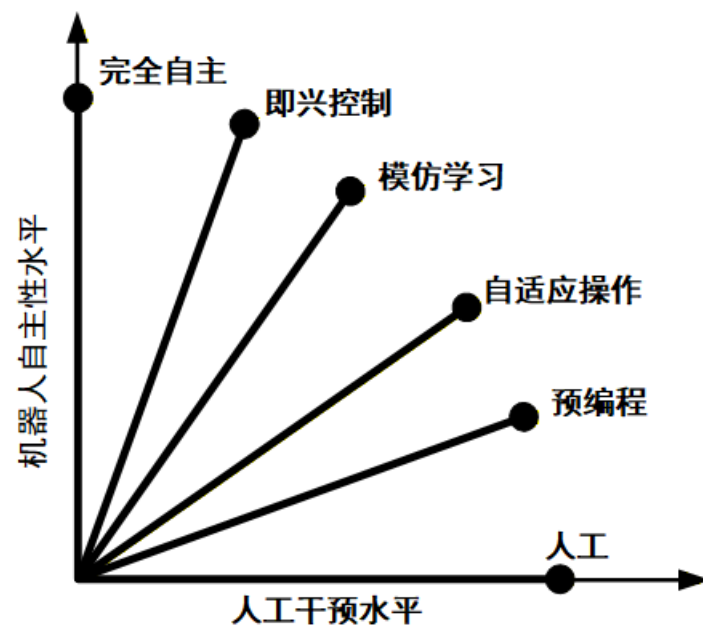


图 5-1 人机协同关系分类

5.1.2 现场智能作业设备

现场智能作业的实现依赖于对应的智能装备与建筑机器人。根据其应用场景和功能，可大致分为以下几类：

(1) 测量与感知类装备

主要设备：三维激光扫描仪、无人机（UAV）、测量机器人（智能全站仪）、自动化监测传感器等。

(2) 土方与基础工程装备：

主要设备：具备机器控制系统的智能挖掘机/推土机、智能压路机、智能灌注桩监测系统、基坑自动化监测系统等。

（3）主体结构施工机器人

主要设备：钢筋绑扎机器人、混凝土布料/抹平/整平机器人、砌筑机器人、智能升降机（爬架）、智能塔吊等。

（4）机电安装机器人

主要设备：线缆敷设机器人等。

（5）装饰装修与饰面机器人

主要设备：室内放样机器人、墙面腻子打磨机器人、墙面/外墙喷涂机器人、地砖铺贴机器人等。

5.2 地基基础工程智能作业

本章内容包括利用三维扫描和测量机器人进行的高精度勘察与放样，基于机器控制系统的自动化土方与基坑作业，以及对桩基施工全过程的数字化监控。通过数据驱动的方式，实现对地下工程的精准控制和风险预判，为后续主体结构施工奠定坚实的数字化基础。

5.2.1 智能勘察与测量

本节介绍地基基础阶段数据获取与传递的智能化方式。通过三维激光扫描等技术实现对物理场地的数字化复制，利用测量机器人将 BIM 模型中的设计基准精确传递至现场，构成“数字孪生”的初始框架，确保所有作业从源头上就具备高精度（图 5-2、5-3）。



图 5-2 UAV 扫描无人机



图 5-3 三维激光扫描仪

5.2.1.1 基本要求

(1) 地基基础工程施工前，必须采用三维激光扫描或无人机倾斜摄影等智能勘察技术，对原始地貌、周边环境及场地情况进行精确数据采集，并形成三维点云或实景模型。

(2) 场地内所有测量放样作业，包括土方开挖、基坑支护、桩基定位等，建议以审批后的 BIM 模型为数据源，采用测量机器人进行。

(3) 在场地移交后，必须对建设单位提供的原始坐标控制点和高程基准点进行复核，并建立满足施工精度要求的三维施工控制网。

5.2.1.2 三维激光扫描作业指南与质量控制要点

(1) 作业准备：依据 BIM 模型和现场踏勘情况，规划扫描测站的布设位置，确保扫描区域无死角且相邻测站有足够重叠率。在关键位置布设靶标并精确测量其三维坐标。

(2) 现场扫描：按规划位置架设三维激光扫描仪，设置合适的分辨率和扫描质量，逐站完成扫描作业。

(3) 数据处理：将所有测站的原始扫描数据导入专业软件，利用公共靶标或自动拼接算法，将多测站数据拼接成一个完整的点云模型，并转换至 BIM 模型坐标系下。

(4) 点云配准：将所有测站的原始点云数据导入专业软件，基于迭代最近

点（ICP, Iterative Closest Point）、正态分布变换（NDT, Normal Distributions Transform）等点云自动配准算法进行点云自动配准。对于关键测站或与其他测站点云重叠度较低的点云，通过在软件中输入公共靶标的控制信息，基于刚性变换原理进行点云配准。经过点云配准，所有测站的点云均转换到统一的 BIM 模型坐标系下，从而拼接成一个完整的点云模型。

（5）拼接精度：点云数据拼接的整体误差不应大于 5mm。

（6）点云处理：配准后的点云可能包含周围无关建筑物、道路、树木等无关对象的点云以及离群点、噪点等，如果直接用于后续工程应用会导致误差，因此需要进行点云处理。将（3）中配准完成的点云导入专业软件，进行点云分割和点云过滤（清洗），分割、剔除无关点云和异常点云，得到仅包含项目目标对象的点云，提高数据质量，减少后续工作可能产生的误差。

（7）数据管理：所有点云数据、坐标文件及测量记录应由专人统一管理，并按日期和版本进行清晰标识、备份存档。

5.2.1.3 测量机器人作业指南与质量控制要点

（1）数据准备：从 BIM 基础模型中，批量提取关键点位的三维坐标，并导入测量机器人手簿。

（2）现场建站：在作业面上依据施工控制网进行测站建立，并对已知控制点进行校核，确保建站精度满足要求。

（3）智能放样：操作人员根据手簿的实时引导，将棱镜杆移动至目标点位，并使用钢钎或油漆进行标记。

（4）放样精度：轴线、桩位等主要点位的放样偏差不应大于 $\pm 5\text{mm}$ 。

（5）数据复核：每片区域放样完成后，应由另一组人员或采用不同方法进行抽检复核，抽检率不应低于 5%（图 5-4）。



图 5-4 测量机器人

5.2.2 智能土方与基坑作业

本节聚焦于土方工程的效率提升和基坑工程的主动安全。内容包括利用机器控制系统引导重型机械进行自动化土方作业,以及通过部署自动化监测系统对深基坑进行全天候风险监控。其核心是通过智能化手段,实现“少人化”高效施工与“预警式”安全管理。

5.2.2.1 基本要求

(1) 大面积土方开挖、回填及场地平整作业,宜采用基于 BIM 模型的机器控制系统,对挖掘机、推土机等设备进行作业引导。

(2) 对于深基坑工程,必须部署自动化安全监测系统,对基坑及周边环境进行全天候、实时在线监控。

(3) 自动化监测系统的测点布设方案、预警阈值必须经过设计、勘察、监理及施工单位共同审批确认。

5.2.2.2 智能土方施工作业指南与质量控制要点

(1) 系统部署:在土方机械上正确安装 GNSS 天线、姿态传感器和车载显示屏,并进行设备标定。将审批后的 BIM 土方模型导入车载控制器(图 5-5、5-6)。

(2) 设备作业:机械操作手根据驾驶室显示屏上显示的作业部件与设计曲面的实时高差,进行精准开挖或平整,无需测量员跟班指挥。

(3) 施工精度:采用机器控制系统完成的土方工程,其表面平整度及高程符合性应控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内。

(4) 模型管理：BIM 土方模型必须为唯一版本，在施工过程中如遇设计变更，必须及时更新并同步至所有作业设备。



图 5-5 智能压实系统



图 5-6 智能强夯系统

5.2.2.3 基坑自动化安全监测作业指南与质量控制要点

(1) 测点布设：依据审批的监测方案，在围护结构、支撑体系、周边建筑物等关键部位精确布设各类自动化监测传感器（如位移计、测斜仪、轴力计、水位计等）（图 5-7）。

(2) 系统运行：系统自动采集数据并传输至云平台，进行实时分析和可视化展示。当监测数据超过预设阈值时，系统通过短信、APP 等方式自动发出预警。

(3) 预警响应：管理人员收到预警后，必须立即启动应急预案，采取相应措施，并上报相关单位。

(4) 数据采集频率：常规阶段不应低于 2 小时/次，特殊情况下应加密至 0.5-1 小时/次。

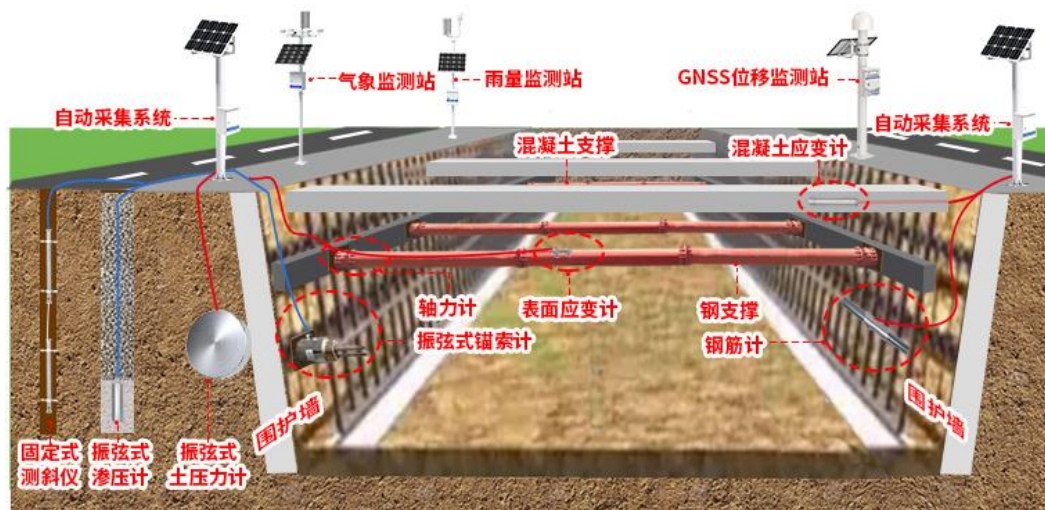


图 5-7 智能化基坑监测系统

5.2.3 桩基工程智能化施工

本节专注于桩基这一关键隐蔽工程的质量过程控制。核心是利用前端传感器对桩基施工的各项关键工艺参数（如深度、垂直度、灌注量等）进行实时采集与监控，为每一根桩建立数字档案，实现对桩基质量的透明化、可追溯化管理。

5.2.3.1 基本要求

(1) 对于设计等级为甲级或地质条件复杂的桩基工程，必须采用全过程智能化监控系统，对施工关键参数进行实时采集与监控。

(2) 智能化监控系统所采集的数据必须实时上传至智慧工地平台，自动生成单桩档案，作为过程质量控制的核心依据。

5.2.3.2 桩基施工全过程智能化监控作业指南与质量控制要点

(1) 系统部署：在桩机上规范安装深度、垂直度、扭矩/电流、混凝土流量计等传感器，并与待施工的 BIM 桩基数据进行绑定（图 5-8）。

(2) 实时监控：在成孔或灌注过程中，系统实时监控并记录关键参数。当参数超出预设阈值时，系统必须立即在车载终端和远端平台同时发出声光警报。

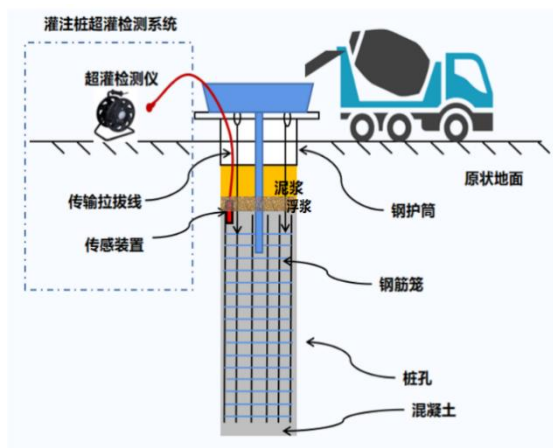


图 5-8 智能灌注桩监测系统

(3) 数据归档：每根桩施工完成后，系统自动将该桩的全过程数据打包，形成一份完整的“数字身份档案”，并与桩号关联后永久保存。

(4) 桩位偏差：采用 GNSS 定位的桩位中心偏差不应大于 $\pm 50\text{mm}$ 。

(5) 垂直度：施工过程中的实时垂直度偏差不应大于 0.5%。

5.3 主体结构工程智能作业

主体结构工程是建筑成型的核心阶段，涉及大量重复性、高强度的作业，是应用建筑机器人和自动化装备的关键领域。本章主要阐述在钢筋、模板、混凝土等关键工序中，如何通过智能测量放样、钢筋加工与绑扎机器人、智能爬架、混凝土施工机器人集群、以及智能吊装与装配等技术，实现“像造汽车一样造房子”的工业化建造模式。目标是全面提升施工的标准化水平、作业效率和结构实体质量，同时大幅降低人工作业强度和安全风险。

5.3.1 智能测量与放样

本节利用测量机器人将墙、柱、梁、板、洞口等三维空间信息精准地投射到作业面，确保结构施工的几何尺寸精度，为后续所有工序提供统一的基准。

5.3.1.1 基本要求

(1) 主体结构工程的测量放样作业，建议以经审批通过的 BIM 模型为数据来源。

(2) 应采用测量机器人进行点位放样，传统测量工具仅限于局部辅助与复核。

5.3.1.2 测量机器人作业指南与质量控制要点

(1) 数据准备：从 BIM 模型中准确提取墙柱角点、轴线交点等三维坐标，并导入测量机器人。

(2) 现场建站：在作业楼层利用高精度控制点建立测站，并校核建站精度。

(3) 智能放样：操作员根据手簿的实时偏差指示移动棱镜，当偏差值进入允许范围 ($\pm 1\text{mm}$) 时，使用油漆、钉子等做出清晰标记。

(4) 放样精度：轴线、墙柱等主要结构轮廓点位的放样偏差不应大于 $\pm 3\text{mm}$ ；预埋件、预留洞口等点位的放样偏差不应大于 $\pm 5\text{mm}$ 。

5.3.2 智能钢筋加工与绑扎

本节旨在实现钢筋工程从传统手工作业向“工厂化加工、自动化绑扎”的模式转变。内容包括基于 BIM 的钢筋自动化加工与配送，以及在施工现场利用钢筋绑扎机器人进行大面积水平构件的自动化绑扎作业，提升钢筋工程的标准化水平和施工效率。

5.3.2.1 基本要求

(1) 钢筋工程建议以 BIM 模型为数据源，进行深化设计、下料、加工与现场施工引导。

(2) 钢筋加工应在智能化的钢筋加工配送中心，采用自动化生产线完成，并实现二维码标识（图 5-9）。

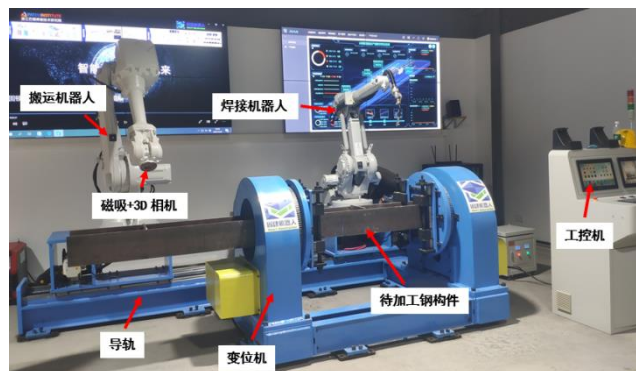


图 5-9 钢筋/PC 构件智能加工与管理

(3) 大面积水平构件（如楼板、筏板）的钢筋绑扎，宜采用钢筋绑扎机器人进行自动化作业。

5.3.2.2 钢筋绑扎机器人作业指南与质量控制要点

(1) 作业准备：在布设好底筋的平整作业面上，布设用于机器人高精度定位的控制点。

(2) 自动化绑扎：将 BIM 钢筋排布数据下发给机器人，机器人自主定位后，自动行驶并识别钢筋交叉点，逐点完成绑扎。

(3) 人机协同：由钢筋工对板边、柱边、洞口周边等机器人无法作业的区域进行人工补绑。

(4) 绑扎成功率：绑扎成功率应大于 95%，对漏绑点位需人工补绑（图 5-10）。



图 5-10 钢筋绑扎机器人

5.3.3 智能升降机作业

本节聚焦于超高层建筑垂直施工的核心装备——智能升降平台。强调必须以 BIM 进行方案深化和论证，并通过中央控制系统实现多机位同步、安全的自动化顶升作业，将其打造为集成了模板、安全防护等多功能于一体的高效空中作业平台。

5.3.3.1 基本要求

必须基于 BIM 进行专项深化设计与方案论证，并进行多专业协同碰撞检查。

5.3.3.2 智能升降机作业指南与质量控制要点

(1) 安装调试：严格按照经审批的专项施工方案进行安装，并对液压/电动系统、同步控制系统、防坠防倾装置等进行全面的调试和联合试运转。

(2) 顶升作业：由总指挥统一发令，操作人员在中央控制室监控顶升过程，实时观察各机位荷载、同步性等数据。如遇报警须立即停机排查。

(3) 同步性控制：在顶升过程中，不同机位间的垂直高差不应大于 20mm。

(4) 荷载控制：每个机位的实际荷载不应超过其设计承载力的 80%（图 5-11）。



图 5-11 智能升降机

5.3.4 智能混凝土施工

本节是主体结构智能作业的核心，介绍了混凝土从浇筑到成型的全流程自动化解决方案。通过布料、抹平、整平、3D 打印等一系列混凝土机器人的协同作业，将传统依赖大量人力的混凝土施工作业，转变为标准统一、质量可控、高效率的自动化流水线作业。

5.3.4.1 基本要求

(1) 混凝土现场作业应遵循“智能布料、智能振捣、智能抹平、智能养护”的全流程管控原则。

(2) 所有作业过程产生的数据，必须实时上传并归入智慧工地平台，形成可追溯的数字化质量档案。

5.3.4.2 混凝土布料机器人作业指南与质量控制要点

(1) 数据导入：将 BIM 浇筑平面图及设计厚度信息导入布料机控制系统。

(2) 智能布料：由操作员遥控或设定为自动模式，使其沿预设路径进行均匀布料。

(3) 质量控制：布料后的混凝土表面应平整，厚度均匀，无明显堆积或离析现象。严禁在同一位置长时间堆料，确保浇筑过程连续（图 5-12）。



图 5-12 混凝土布料机器人

5.3.4.3 混凝土抹平机器人作业指南与质量控制要点

(1) 作业准备：在混凝土初凝前，操作员应确保作业面无过多积水和杂物。技术员指导工人对欠振/漏振区域进行补振，为抹平机器人提供良好基础。

(2) 智能抹平：部署自走式混凝土抹平机器人，根据激光基准或设定的参数，对混凝土表面进行初步抹平作业。

(3) 质量控制：抹平后的表面应大致平整，无明显凹凸，为后续精平作业（如整平机器人作业）做好准备（图 5-13）。



图 5-13 混凝土抹平机器人

5.3.4.4 混凝土整平机器人作业指南与质量控制要点

(1) 系统设置：通过激光发射器在场地内建立水平基准面。机器人上的激光接收器实时接收标高信号，自动调整整平刮板的高度。

(2) 自动作业：机器人在行走过程中一次性完成振捣、刮平、提浆作业。

(3) 质量控制：整平后的地坪平整度误差不应大于 3mm。对于柱边、墙角等机器人无法到达的区域，必须配合人工进行精平处理（图 5-14）。



图 5-14 混凝土整平机器人

5.3.4.5 混凝土 3D 打印机器人作业指南与质量控制要点

(1) 数据转换：将构件的 BIM 三维模型转化为逐层打印的路径和指令。

(2) 材料制备：按特定配比制备具有快凝、高早强特性的特种打印砂浆。

(3) 自动打印：机器人打印头沿预设路径移动，逐层挤出砂浆，堆叠成型为构件。

(4) 质量控制：打印完成后，测量构件的几何尺寸，确保其与设计模型的偏差在允许范围内。检查层与层之间的粘结质量，不得出现分层、开裂现象（图 5-15）。

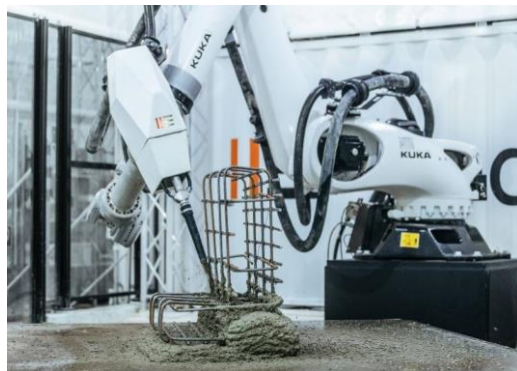


图 5-15 混凝土 3D 打印机器人

5.3.5 智能吊装作业

本节聚焦于塔吊作业的智能升级。通过为塔吊加装可视化系统、安全监控与防碰撞系统和远程操控系统，实现更安全、更精准、更高效的吊装作业，特别是针对预制构件的精准就位，同时改善塔吊司机的作业环境。

5.3.5.1 基本要求

(1) 所有智能塔吊必须安装塔机安全监控系统，并配备吊钩可视化和智能防碰撞系统。

(2) 对于预制构件的安装，宜采用基于高精度定位的智能吊装引导系统。

5.3.5.2 远程无人塔吊作业指南与质量控制要点

(1) 远程操控：塔吊司机在地面驾驶舱内，通过高清摄像头和传感器数据，远程操控塔吊。

(2) 精准就位 利用智能防摇功能，平稳地将构件吊运至安装位置上方，根据引导屏幕显示的实时偏差值进行微调操作。

(3) 安装精度：预制构件的安装就位精度偏差不应大于设计和规范要求（如平面位置偏差不应大于 20mm）。

(4) 应急预案：必须备有信号中断、断电等情况下的应急处置预案（图 5-16）。

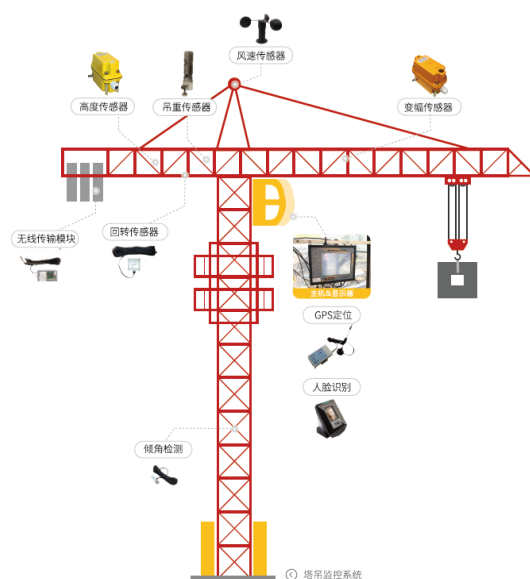


图 5-16 智能塔吊与吊装系统

5.3.6 智能装配作业

本节将智能作业延伸至现场的构件“拼装”环节。核心思想是利用建筑机器人（如砌筑机器人）替代人工，完成标准化、高重复性的装配任务。

5.3.6.1 基本要求

(1) 对于标准化、重复性强的装配作业（如砌筑、钢结构螺栓紧固），宜优先采用建筑机器人进行自动化或人机协同装配。

(2) 用于指导机器人作业的 BIM 模型，其深化设计精度不应低于 LOD400。

5.3.6.2 砌筑机器人作业指南与质量控制要点

(1) 数据导入：将 BIM 墙体排砖图导入机器人控制系统，系统自动生成砌筑路径。

(2) 自动砌筑：机器人通过激光扫描对作业环境进行定位，并确定墙体起始线和标高。机器人从料台抓取砖块、涂抹砂浆，然后依据排砖图精准地将砖块放置到墙体上。

(3) 质量控制：控制砂浆涂抹的均匀性和饱满度，以及水平、垂直灰缝的厚度。在砌筑过程中及完成后，使用靠尺和激光扫平仪检查墙体的垂直度和平整度（图 5-17）。



图 5-17 砌筑机器人

5.4 机电安装工程智能作业

本节以线缆敷设为例介绍机电安装的现场智能作业，阐述如何利用自动化设

备替代高强度人工作业，实现机电安装的精准、高效与安全。通过引入线缆敷设机器人，以“机器换人”的方式进行自动化牵引，其核心价值在于通过实时张力控制保护线缆不受损伤，并大幅降低人工作业的强度和安全风险，同时提升敷设效率。

5.4.1 基本要求

(1) 严禁在未核对 BIM 模型或智能放样点位的情况下，进行任何管线与线缆的敷设作业。

(2) 所有线缆的敷设过程，其最大牵引张力必须严格控制在电缆制造商规定的安全值以内。

(3) 从管路构件到每根线缆，应建立“一物一码”的标识与追溯体系。

5.4.2 线缆敷设机器人作业指南与质量控制要点

(1) 系统部署：将多个履带式牵引机器人沿电缆路径串联布置，并设定最大允许牵引力。

(2) 智能牵引：主控系统协调各机器人形成“接力式”柔性牵引。如发生张力超限报警，机器人自动停止。

(3) 质量控制：线缆在转弯处的弯曲半径必须大于规范要求的最小值。敷设过程中，严禁线缆出现扭曲、打结或被踩踏。敷设完成后，应对线缆的绝缘电阻进行测试并记录。

5.5 装饰装修工程智能作业

本节内容聚焦于室内装饰装修作业，包括利用放样机器人实现多专业一体化精准放线，以及运用腻子打磨、喷涂、地砖铺贴等系列装修机器人，完成大面积的饰面层作业。这些技术不仅能显著提升作业效率和饰面质量的一致性，还能有效改善作业环境，保障施工人员的职业健康。

5.5.1 室内智能放线

本节关注装饰装修阶段“基准统一”的前置问题。通过智能激光放样机器人，将所有专业（墙体、水电、天花等）的施工基准线一次性、高精度地投射到现场，从源头消除专业间打架问题。

5.5.1.1 基本要求

装饰装修工程的放样作业，宜全面采用室内激光放样机器人，以保证所有专业使用统一、精确的空间基准。

5.5.1.2 智能激光放样机器人作业指南与质量控制要点

(1) 数据导入：将包含所有专业综合点位信息的 BIM 放样文件导入机器人控制系统。

(2) 智能投线：使用引测至本楼层的控制点对机器人进行精确设站和定向。各班组工人直接沿机器人投射的激光线进行弹线、标记或安装作业。

(3) 精度控制：投射激光线的精度误差不应大于 $\pm 2\text{mm}$ 。

5.5.2 墙面/地面/天花智能施工

本节是装饰装修机器人应用的集中体现，涵盖了从墙面处理到地面铺贴的多个关键工序。通过部署腻子打磨、喷涂、地砖铺贴等一系列专用机器人，旨在将粉尘大、重复性高的饰面作业自动化，从而获得远超人工作业的质量一致性和平整度，并实现健康环保施工。

5.5.2.1 基本要求

(1) 对于大面积、重复性强的墙面、地面作业，宜优先采用自动化作业机器人。

(2) 实施机器人作业前，必须编制专项施工方案，明确工艺参数和质量验收标准。

5.5.2.2 墙面腻子打磨机器人作业指南与质量控制要点

(1) 自主作业：机器人通过激光扫描自主识别墙面尺寸及门窗洞口位置，自主规划路径，以恒定的压力和转速对墙面进行打磨，并自带吸尘。

(2) 质量控制：打磨后的墙面平整度、垂直度应满足规范要求，无明显划痕、漏磨。对于墙面边角等区域，必须安排人工进行补缺和精修（图 5-18）。



图 5-18 墙面腻子打磨机器人

5.5.2.3 墙面喷涂机器人作业指南与质量控制要点

(1) 作业准备：对门窗、地面等非喷涂区域进行严格的遮蔽保护。涂料必须按要求配比并过滤，以防堵塞喷枪。

(2) 自动喷涂：机器人自动识别并避开门窗洞口，保持与墙面恒定的距离和速度进行喷涂。

(3) 质量控制：检查涂层是否均匀，有无流挂、漏喷、发花等现象（图 5-19）。



图 5-19 墙面喷涂机器人

5.5.2.4 地砖铺贴机器人作业指南与质量控制要点

(1) 数据导入：将地砖排版图输入机器人系统，机器人通过激光进行定位和标高校准。

(2) 自动铺贴：机器人自动从砖料架吸取地砖，在地面涂抹粘结剂，然后精准放置并施加适当压力。

(3) 质量控制：检查砖缝的宽度是否均匀一致。检查相邻地砖之间的高低差和整体平整度。铺贴完成后，对地砖进行敲击检查，控制空鼓率在允许范围内（图 5-20）。

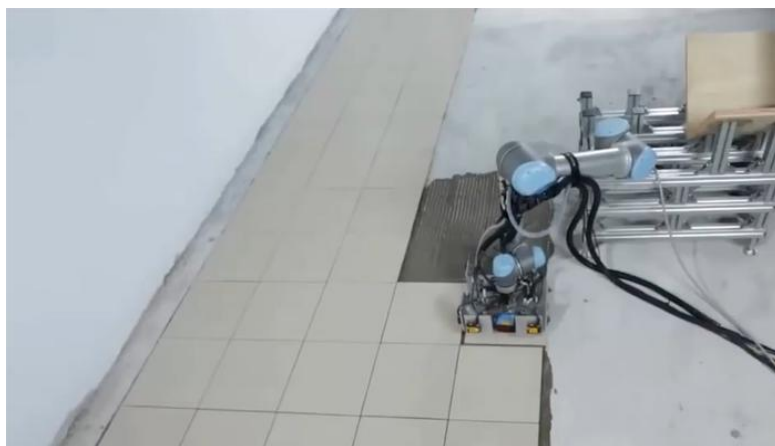


图 5-20 地砖铺贴机器人

5.5.2.5 外墙喷涂机器人作业指南与质量控制要点

(1) 系统部署：将喷涂机器人安装在吊篮、爬升平台或高空作业车上。

(2) 自动喷涂：机器人控制喷枪在巨大的外墙立面上进行大范围、均匀的喷涂作业。

(3) 质量控制：确保大面喷涂颜色均匀，无色差、发花现象。根据涂料性能和环境温度，调整喷涂厚度和间隔时间，防止流挂（图 5-21）。

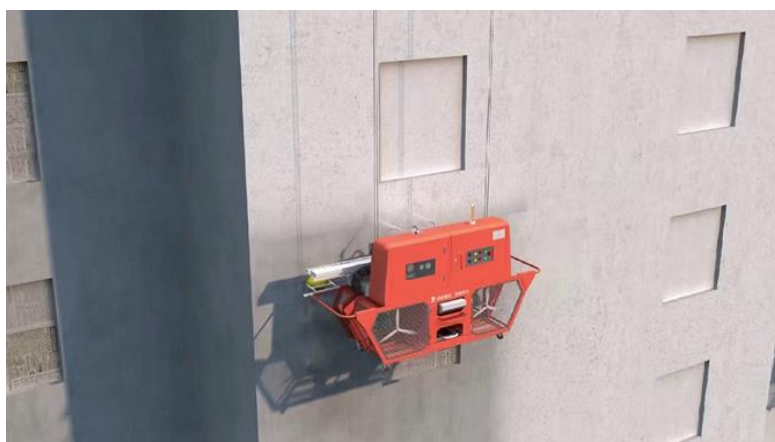


图 5-21 外墙喷涂机器人

5.6 发展展望

展望未来，现场智能作业将朝着更高阶的自主化、集群化和泛在化方向深度演进。单一任务的施工机器人将不再是主流，取而代之的是一个由多功能机器人、智能传感器网络、云端超算和现场人员构成的有机共融的“智能建造生态系统”。具体发展将体现在以下几个方面：

(1) 感知与认知技术的深度融合

语义 SLAM 与 4D 数字孪生：未来的机器人不仅能构建三维地图，更能“看懂”地图中的内容（如识别出“这是一根待绑扎的钢筋”或“这是一块未干的混凝土”），并实时感知环境的动态变化（4D），实现真正意义上的自主场景理解和决策。

基于生成式 AI 的自主规划：人工智能将不再仅仅执行预设指令。未来可直接向系统下达“优化本区域的管线排布”等模糊指令，AI 将基于 BIM 模型、规范要求 and 现场约束，自主生成多种可行的施工方案，并进行模拟推演，供人类决策。

强化学习与迁移学习的应用：施工机器人将在虚拟环境中进行数百万次的模拟训练（强化学习），学会各种复杂工况下的操作技巧，然后将这些“技能”快速迁移（迁移学习）到物理世界的机器人上，大大缩短机器人的调试和学习周期。

(2) 机器人本体的通用化与集群化

通用化底盘与模块化末端：将出现“通用机器人平台”，即一个标准化的移动底盘，可以根据任务需要，快速更换不同的作业工具（如抓手、焊枪、喷头、打磨盘），实现“一机多能”，大幅提高设备的利用率和灵活性。

分布式机器人集群协同：无人化的机器人集群将能够像蚁群、蜂群一样，通过分布式智能进行自主协同，共同完成大型复杂的任务（如协同搬运一块巨大的幕墙单元），而无需一个中央“大脑”进行集中控制，具有极高的鲁棒性和扩展性。

软体机器人与仿生机器人：为了适应狭小、不规则的作业空间，模仿章鱼、蛇等生物形态的软体机器人将被用于管线内部的检测与修复。仿四足机器人（机器狗）将搭载传感器，在复杂地形上进行巡检和数据采集。

(3) 人机共融的范式革新

基于 AR/MR 的虚实引导：增强现实（AR）或混合现实（MR）眼镜将成为工人的标配。复杂的安装步骤、隐藏的管线位置、实时的质量数据将以三维形式直接叠加在工人的视野中，实现“傻瓜式”的精准操作。

脑机接口（BCI）的初步探索：在一些特殊场景下，将探索利用脑电波或肌电信号对机器人进行意图层面的控制，实现更高层次的人机合一。

6 项目智能管理

6.1 概述

工程项目点多、面广、周期长，涉及因素众多，信息分散，管理具有较高复杂性。管理问题是施工过程中的主要问题之一。当前行业仍以经验管理为主。随着信息技术特别是人工智能与物联网感知技术的发展，项目智能管理具备了更充分的技术条件。通过科学的方法与数据驱动的手段组织项目管理，有助于系统提升项目管理水平。

项目智能管理是指在工程建设活动中面向人、机、料、法、环、测等关键要素，综合或集成应用新一代信息技术及相关设备，与项目策划、施工组织、过程控制和结果评价深度结合，通过数据采集、数据治理、分析决策、执行反馈与持续改进，提高管理效率与质量，降低风险与成本，能够实现信息高效共享、过程精准管控和结果全面追溯，从而推动建造活动的精益化与高质量发展的管理方法与技术体系。本章所称项目智能管理包含数字化、智能化等不同阶段与程度的实践，既覆盖单项工具的应用，也强调多技术的综合集成与协同。

项目智能管理涉及的技术与产品类型较多。按照行业普及度与应用成熟度，可概括为两类。一类为已在施工阶段普遍应用并稳定运行的信息化基础能力，例如办公与财务系统、计算机辅助设计、可视化与专业计算分析、工程算量与造价、移动通信与企业管理平台等。另一类为在部分场景已有一定规模应用但尚未全面普及的新一代技术与装备，例如建筑信息模型、云计算、物联网、三维扫描与点云、无人机与机器人、可穿戴设备、扩展现实、数据中台与数据治理、5G 与边缘计算、人工智能与大数据分析等。本章重点关注尚未完全普及的关键技术及其与既有系统的综合与集成应用，强调以问题为导向的场景落地与流程优化。

为避免与其他章节重复，本章聚焦项目整体层面的管理机制与数据闭环，不对各专业工序的技术细节进行展开。涉及质量、安全、物资、机械、测量监测、环境与能耗等专题的业务规范与设备参数，请结合对应章节执行。本章引用的工具、平台与产品仅为阐述流程与方法的举例，不构成对任何厂商与产品的推荐或

背书；各单位应依据合同约定、地方监管要求与企业标准组织选型与实施。本章提出的流程、数据项与指标为通用框架，具体口径、编码与接口以项目合同、业主与监管平台要求以及企业现行标准为准。

在实施层面，项目智能管理遵循明确目标、采集数据、治理与分析、形成决策、组织执行、监督反馈、归档复盘的闭环模式，强调以标准驱动数据共享与复用，强调以系统化方案统筹软件、硬件与网络等基础条件，强调以过程管控与绩效评价促进持续改进。各节将围绕资源智能管理、进度智能管理、质量智能管理、安全智能管理、成本智能管理、资料智能管理、综合管理平台等方面，给出可落地的流程框架与实施要点。

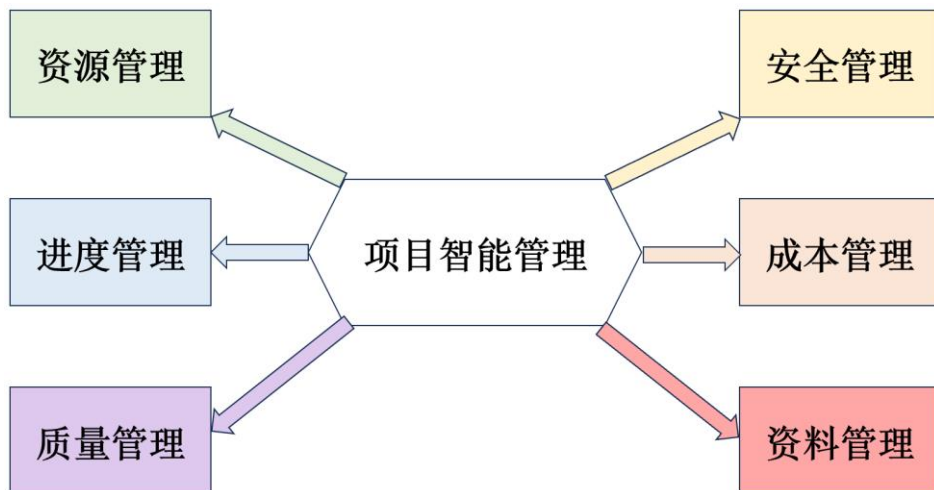


图 6-1 项目智能管理

6.2 资源智能管理

本节聚焦人力、物料与机械三类资源的数字化与智能化管理，围绕项目策划、过程控制与结果评价展开，形成以数据为核心的管理闭环。资源智能管理依托感知设备、移动终端、信息模型、数据治理与规则引擎，通过统一编码、业务口径与接口规范，使计划编制、执行监控、偏差校核与绩效评价贯通在同一套系统中，提升配置效率与使用质量。涉及的系统包括项目管理系统、生产调度系统、设备管理系统与物料管理系统等，具体选型以合同约定与企业标准为准。

资源智能管理遵循目标设定、数据获取、分析决策、方案执行与成果输出的基本路径。目标设定强调与合同工期、质量与安全指标、成本控制与绿色建造指

标一致；数据获取面向人、机、材的关键状态与事件进行在线采集与抽样核验；分析决策依托规则库与算法模型完成对约束条件与资源冲突的识别与解解；方案执行通过系统下达计划、联动设备与班组，并留痕可追溯；成果输出以报表、台账、模型与过程数据的统一归集为落点。为便于与后续章节衔接，本节重点说明质量相关数据的采集与质量管理执行的支撑方式。

在人力资源方面，系统通过实名制管理与考勤数据关联作业面、工种与班组，将岗位资格、培训记录与作业票证进行一致性校核。在数据获取环节，作业前置条件、关键工序旁站与隐蔽工程见证抽检以移动终端采集并绑定图纸、模型与定位信息。在分析决策环节，系统依据施工计划识别人力瓶颈与超时风险，输出班组调整与交叉作业避让建议。在方案执行环节，系统生成当日作业清单并同步至班组终端，过程留痕与影像资料自动关联检验批。在成果输出环节，人工与工效台账与质量合格率、返工率等指标按周期固化，为绩效考核与劳务结算提供依据。与质量管理的关系体现在对作业人员资质与持证状态的在线校核、对关键工序操作规程执行情况的轨迹化记录，以及对问题闭环处理时限的监督。

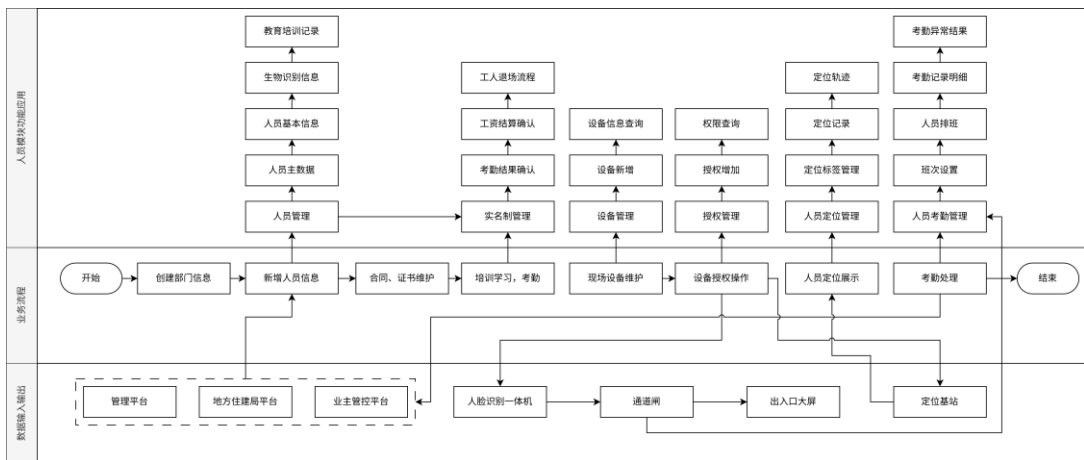


图 6-2 人员管理应用系统典型业务流程和功能模块

在物料资源方面，系统围绕供应商、需求计划、采购与进场验收、出入库与台账管理形成一体化流程，采用统一物料编码、批次管理与标签管理，支撑过程留痕与全链路追溯。与传统以纸质图模文表为主的做法相比，当前在多种工程中逐步新增模型、编码、接口与过程数据，尚未完全普及。在供应商管理环节，系统将社会信用记录、履约记录与项目评价进行聚合，结合数据分析建立合格供应商名录，形成动态准入、分级分类与绩效反馈机制。

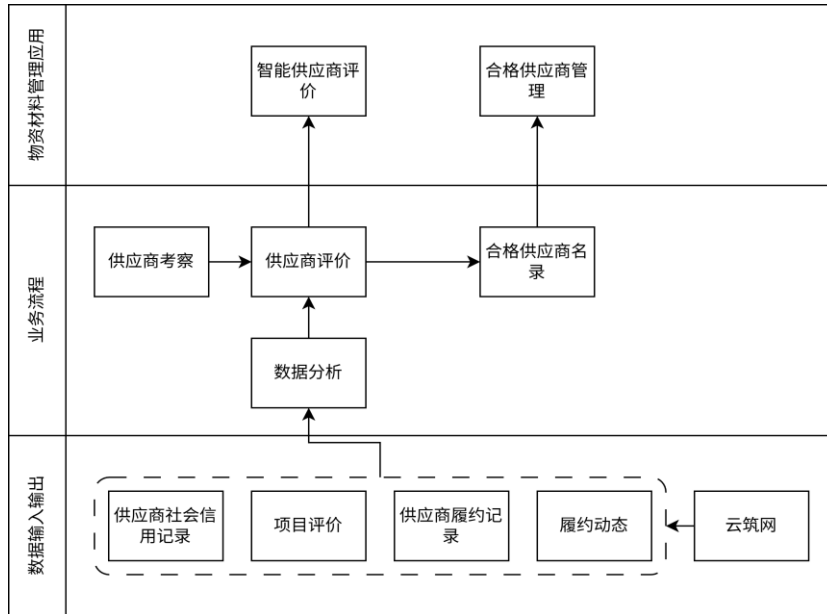


图 6-3 物料供应商管理典型流程

在需求计划管理环节，系统将深化设计模型与进度动态管理系统关联，根据施工图设计模型与四维模型的时间轴，形成总计划与阶段需求计划，并在变更与现场实测反馈后滚动校正。

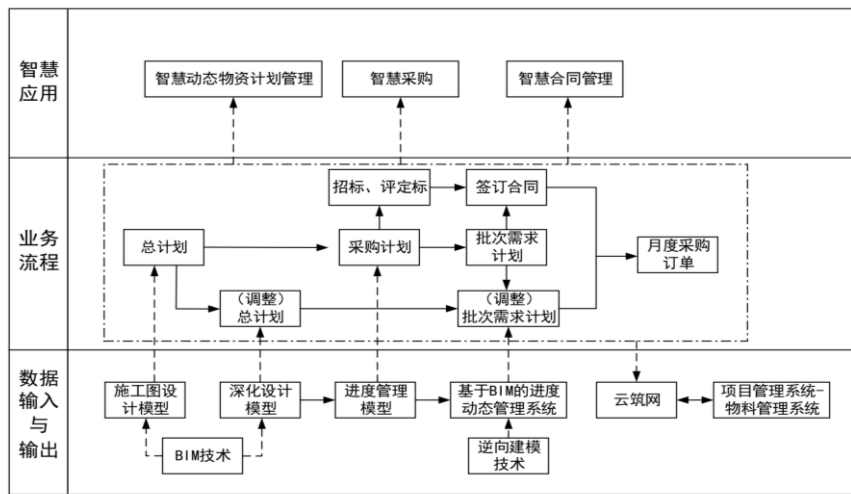


图 6-4 物料需求计划管理典型流程

在采购与进场验收环节，系统按照集中采购与电子合同流程组织下单，生产进度与关键工序在工厂端以传感器与试验设备进行监督，物流阶段以定位与无线传输实现动态监控，进场时依据称重与识别设备完成计量与外观质量核验，验证通过的数据自动写入台账并回写信息模型。

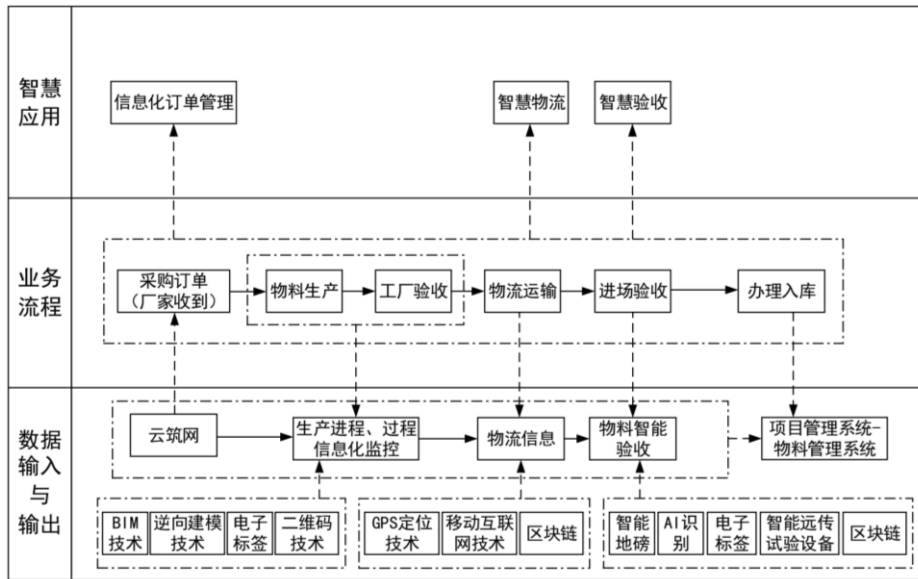


图 6-5 物料采购及进场验收管理典型流程

在出入库与台账管理环节，系统以电子料单驱动收料入库、领料出库与盘点数据的自动采集，二维条码或电子标签与物料唯一编码绑定，移动终端读取后即时完成数量、批次与状态的登记，数据与项目管理系统实时联动，用于采购决策与成本核算。

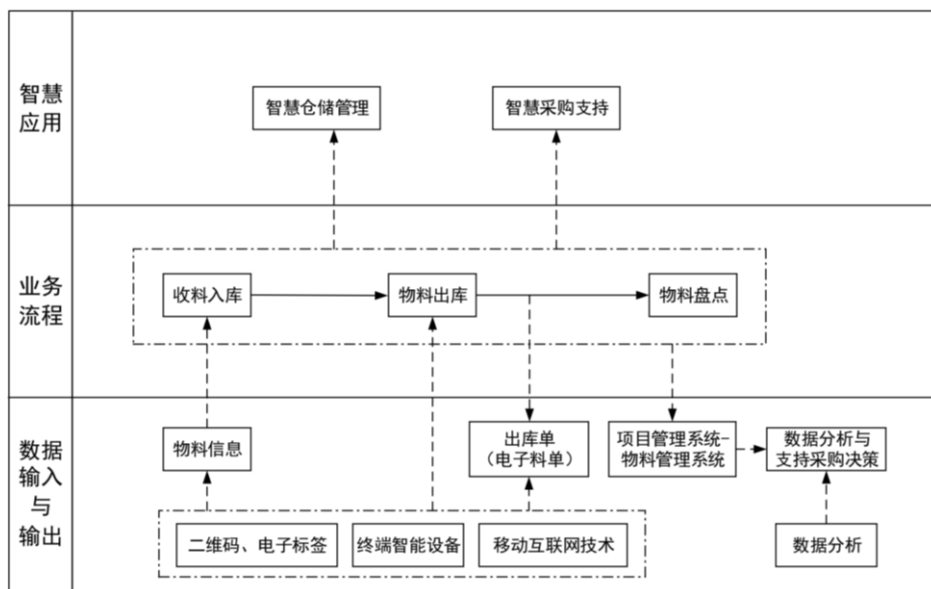


图 6-6 物料进出库管理典型流程

在机械资源方面，系统以设备档案、唯一编码与在线状态为基础，接入定位、能耗、运行时长与工况数据，对进退场、保养维修、故障诊断与台班核算进行全过程管理。在数据获取环节，传感器采集设备运转参数并与作业区域的施工进度

与安全管控数据关联。在分析决策环节，系统识别闲置与过载状态，计算排程冲突并提出替换或平衡方案。在方案执行环节，设备指令与作业票证同步下达，维修保养按里程碑自动触发并形成记录。在成果输出环节，形成设备利用率、完好率、停机时长与台班费用等指标集，与质量管理的关系体现在对工序所需设备能力与校准状态的核验、对施工测量与混凝土浇筑等关键作业的连续性与稳定性的保障。

在系统协同方面，资源智能管理要求以统一的数据标准作为约束，采用结构化接口完成项目管理系统、设备管理系统、物料管理系统与业主侧或监管侧系统之间的数据交换。系统间的模型、编码与台账口径需保持一致，视频与物联网数据的传输协议应与企业安全规范匹配，数据集成宜采用增量方式并优先考虑云架构。对于远程验收与过程监督，系统需支持在线抽检、实时会商与证据固化。

为便于理解资源智能管理在现场的应用，现以某项目的物料称重智能管理作说明。项目在施工出入口布设电子地磅、道闸、摄像头与车牌识别等设备，对运输车辆进出进行自动识别与称重，称重数据与合同约定车方、供货批次与施工部位进行比对，系统自动计算偏差并形成按实结算报表。异常重量、重复过磅与超时停留等情形由规则库判定并进入复核流程，复核结论与处置记录同步写入台账并回写信息模型。现场作业通过移动终端完成收料确认与预警处理，管理端以看板方式汇聚各施工段用量与供应商履约信息，支持统计分析与月度采购计划优化。该应用降低了人工录入误差与争议，提升了计量准确性与结算公信力，并为质量追溯与后评估提供统一数据来源。



图 6-7 物料称重智能管理系统

为进一步说明机械资源的智能化管理，现以施工机械识别与利用管理为例。项目在主要作业区、出入口与堆场布设固定摄像机，系统采用目标检测与实例分割算法，对移动式起重机、轮式装载机、混凝土泵车、货车、混凝土搅拌运输车

与叉车等设备进行自动识别与连续跟踪。识别结果与设备档案的唯一编码建立映射关系，形成按设备、作业面与时间片的运行时长、启停次数与空间分布记录。系统结合定位数据与作业清单，计算开机率、有效作业率与待机时长，识别同一作业面内的拥堵与空转，并对异常停留、跨禁行区域移动和夜间未授权启停给出预警。经过持续运行，设备利用率和有效作业率以看板形式可视化展示，异常处置闭环与工单记录与项目台账保持一致，实现机械资源配置由经验驱动向数据驱动转变，减少无效待机与重复调配，提升安全与效率。

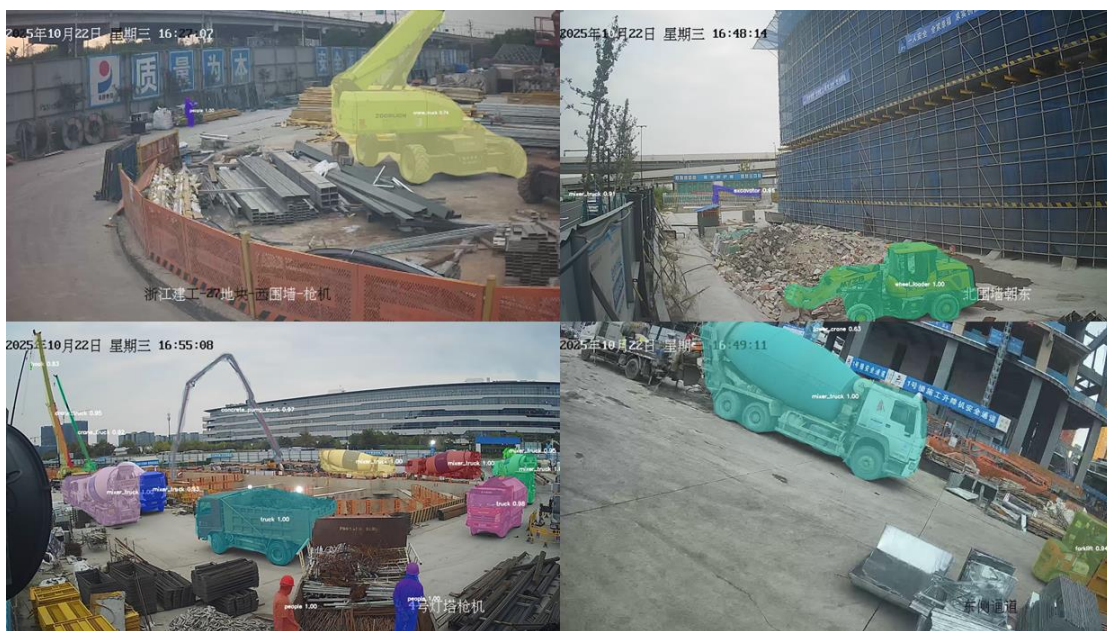


图 6-8 施工机械识别与利用管理示意

需要注意的是，资源管理的智能化并不意味着无限制地安装传感器和采集数据，而是要聚焦在成本与风险权重最高的关键点。数据过度收集会造成系统负担，增加一线操作复杂度，反而削弱执行力。因此在资源管理中，人工经验与智能工具应当形成互补关系。例如，AI 可以提出“增加一个班组”或“合并设备调度”的建议，但最终仍需由项目经理结合现场实际作出裁决。

上述案例表明，资源管理的智能化不以大量堆砌感知设备为目标，而以标准化编码、关键数据在线采集与过程留痕为基础，围绕质量控制点与成本敏感点组织数据与流程。实施中应明确数据责任主体与复核机制，确保系统记录能够支撑检验验收、支付结算与后评估等核心业务。

6.3 进度智能管理

进度智能管理是指综合应用数智技术解决施工进度管理中的信息采集滞后、计划与实际脱节、跨系统数据不一致与偏差处理不及时等问题，通过数据驱动的方式提高计划编制与执行控制的科学性与及时性。管理对象覆盖施工准备、主体施工与收尾交付全过程，目标是使计划、资源与现场状态保持一致并可追溯。

进度智能管理以统一的工作分解结构和构件分解结构为基础，建立基线计划与滚动计划，明确日周月三个层级的计划与检查周期。系统将信息模型与四维时间轴关联，结合日历约束、资源能力与工序逻辑生成可执行的作业清单，并对关键线路与缓冲区进行在线维护。现场状态通过多源数据采集形成。人员考勤与班组作业清单用于反映投入强度，设备运行与定位数据用于反映机械作业时长与空间关系，物料到货与计量数据用于反映工序前置条件，测量监测与试验数据用于反映节点完成度。影像、点云与机器视觉识别结果作为形态类与数量类完成量的证据补充。

进度智能管理与资源、质量和成本协同运行。人员、机械与物料的状态作为约束条件进入计划计算，质量检验与问题清单的处置时限与合格状态作为完成判据进入计量与支付流程，成本数据用于核算资源配置方案的经济性。系统间采用结构化接口与统一时间戳进行数据交换，确保计划、模型与台账的口径一致。执行过程中，系统按日下达作业清单并回收完成反馈，异常需在规定时限内闭环处理，现场证据与处理记录自动归档。成果输出包括进度看板、周报与月报、关键线路与缓冲消耗情况、计划完成率与挣值指标，以及与业主和监管系统的接口数据包。

为便于理解技术落地方式，现以人工智能视觉识别在装配式构件施工中的应用作说明。项目在塔吊视角与楼层边沿布设固定摄像机，系统利用目标检测与语义分割算法识别预制板的位置与数量，将识别结果与信息模型中的构件编码进行映射，自动计算楼层与施工段的日完成量与累计完成量。识别置信度与遮挡程度作为质量因子参与校核，低于阈值的结果进入人工复核。系统按日对比计划曲线与实际曲线，发现偏差时给出班组投入与吊装顺序的调整建议，并同步生成形象

进度看板与计量依据。该应用减少了人工统计工作量，提升了进度数据的客观性与时效性，能够支撑节点预警与支付计量的证据固化。

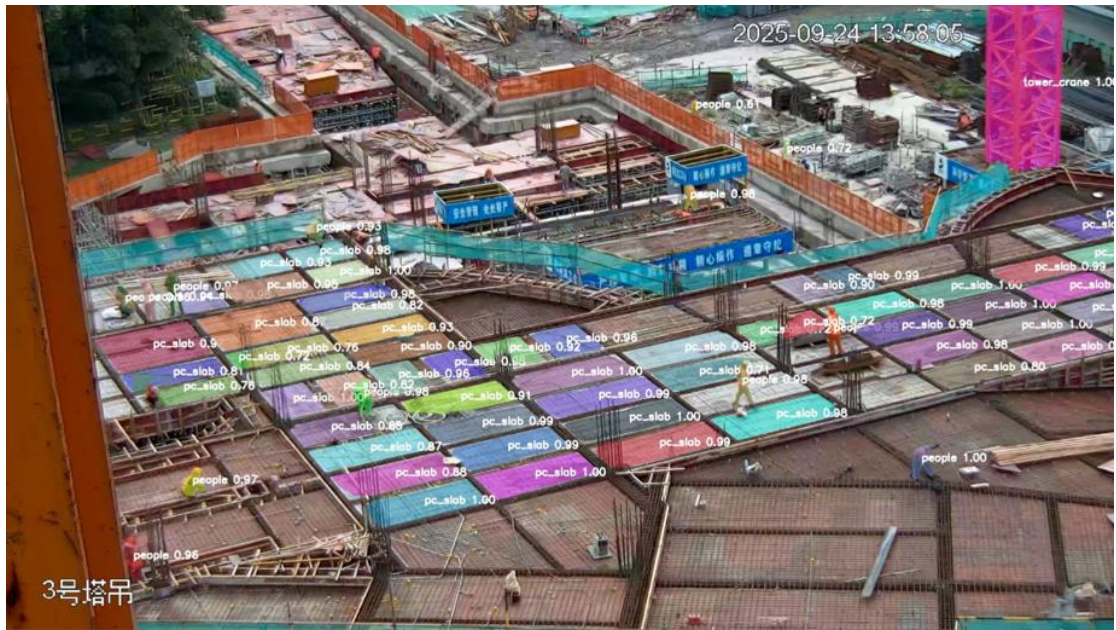


图 6-9 人工智能视觉识别预制板的进度跟踪

6.4 质量智能管理

质量智能管理是指在施工阶段围绕质量策划、交底、过程控制、检验验收与评价改进等环节，综合应用信息模型、移动终端、智能检测设备、数据治理与规则引擎，构建以数据为核心的管理闭环。管理目标是在符合现行标准与合同要求的前提下，实现质量要素的量化分级、过程留痕与问题闭环，提升现场管控的及时性与一致性。质量智能管理依托质量管理应用系统运行，与人员实名制系统、设备管理系统、材料与测量监测系统实现数据互通，形成源头受控、过程可查、结果可证的全链条质量数据体系。

作业前条件复核强调对方案图纸、机具设备与作业人员三类前置条件的在线核验。系统结合信息模型对重点部位与变更内容进行标注与更新，读取设备档案与在线监测数据核验合规状态，关联人员资格、交底记录与定位轨迹确认到岗到位。

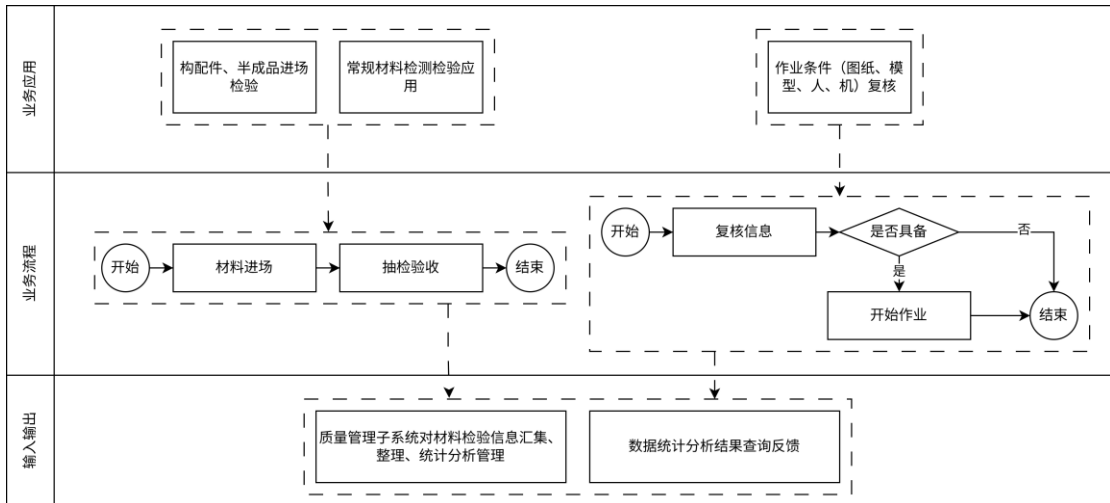


图 6-10 质量智能管理作业前条件复核管理典型流程

过程质量检查强调以风险源库与问题库为基础的分级巡检与闭环整改。系统支持常规检查与专项检查，利用移动终端采集图像视频与说明文字，必要时联动无人机巡检与点云对比，检查任务按职责自动推送并跟踪销项时限，问题状态在模型或图纸上可视化标注与预警。

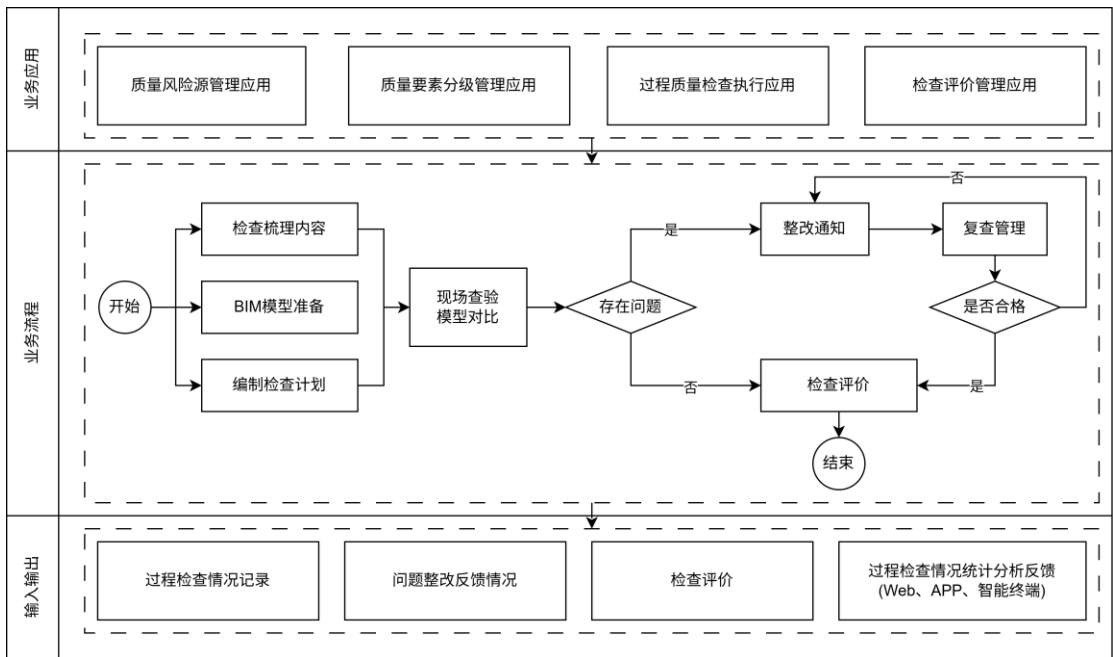


图 6-11 质量智能管理过程检查管理典型流程

为便于理解质量智能管理在现场的落地方式，现以实测实量系统的应用作说明。某项目将实测实量并入质量管理应用系统，设置项目自检与抽检两类流程，形成 web 端与移动端协同模式。现场以移动终端连接智能靠尺、激光测距仪、角尺、回弹仪等设备，设备通过协议或蓝牙自动回传测量数据。图纸与工作分解

结构建立关联，在图纸上标注测点并与分部分项绑定，测量完成后自动生成记录与统计图表。系统按项目与公司两个层级汇总数据，支持对比分析与报表导出，测量影像与说明文字与测点一一对应存档。该做法解决了传统人工记录效率低、口径不统一与资料散存的问题，提升了数据的客观性与可追溯性，为质量验收、创优评审与后评估提供统一数据来源。

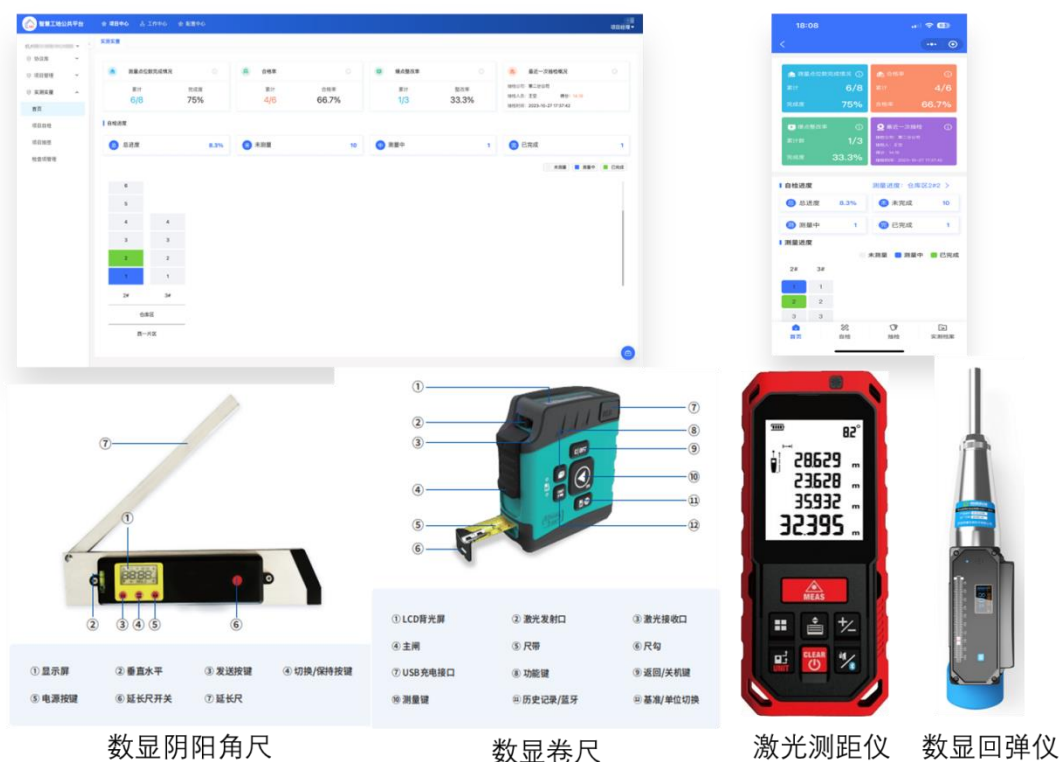


图 6-12 实测实量系统

6.5 安全智能管理

安全智能管理是指在施工阶段围绕安全策划、危险源辨识与预警、人员安全管理、常规监督检查与高风险作业管控等环节，综合应用视频与物联网感知、定位与电子围栏、塔机与升降机在线监测、移动终端与规则引擎等技术，构建以数据为核心的闭环管理体系。目标是实现安全要素的量化分级、风险的前移控制、过程的在线留痕与事件的闭环处置，保障人员、设备与作业环境处于受控状态。安全智能管理依托安全管理应用系统运行，与人员实名制系统、设备管理系统、质量与进度系统进行数据互通，形成从策划到复盘的全链条安全数据体系。

本节所述安全智能管理典型流程以安全策划、危险源辨识和预警、人员安全管理、常规安全监督检查、高风险作业管理等为主线展开。该流程强调从策划到应急的全过程串联，要求风险辨识、教育培训、现场检查、隐患治理与应急演练在同一套系统中形成可追溯链条。

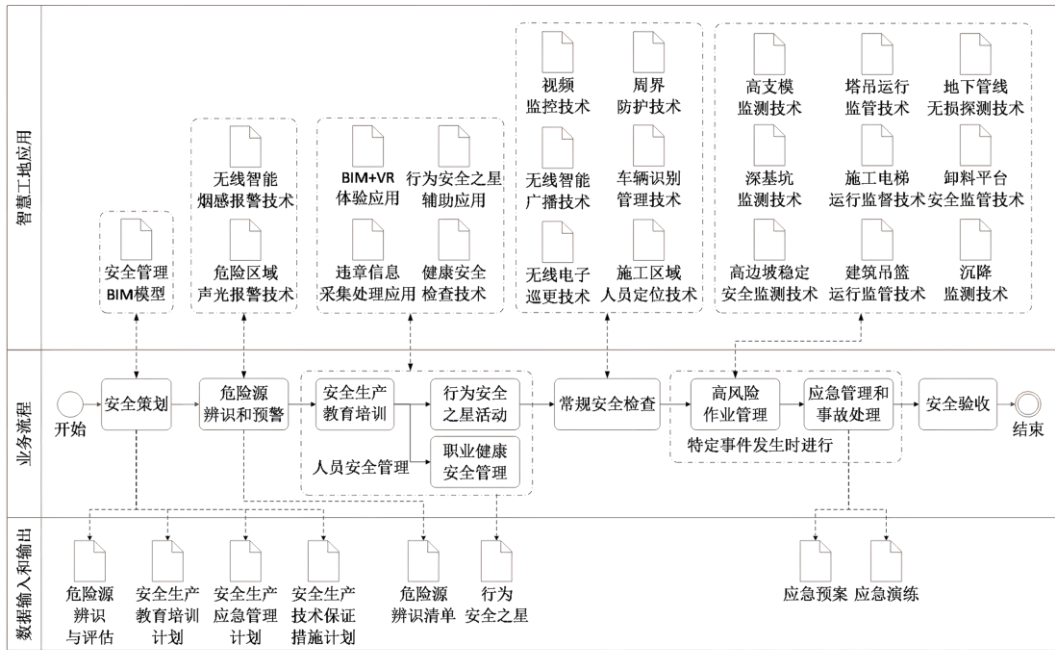


图 6-13 安全智能管理典型流程

视频监控技术在常规监督检查中应用，通过遥控摄像机观察被监视场所的情况，实现远程视频监控功能，提高管理效率。该流程指出前端采集、信号传输、中心管理与数据存储的分层结构，通过远程查看、联动告警与共享数据支撑网格化监管。

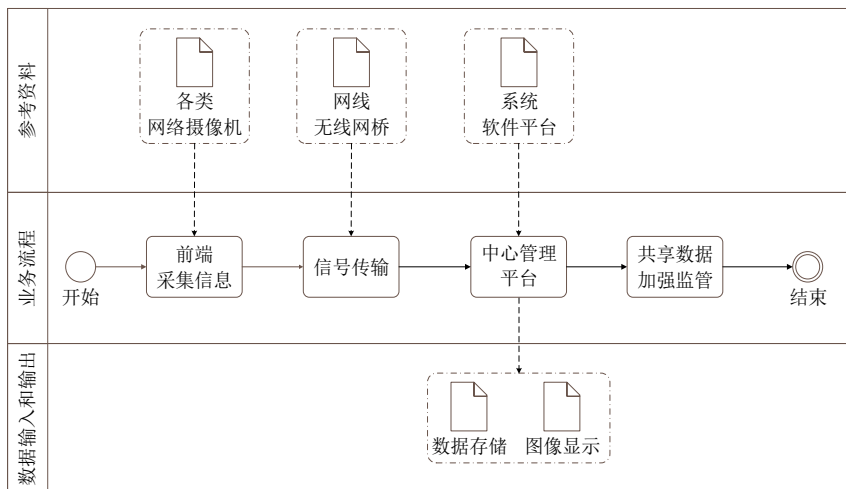


图 6-14 视频监控技术典型流程

塔吊作为高风险设备，其运行应该受到监管，该流程围绕载荷、幅度、起升、回转、风速与多机防碰撞等关键参数进行在线监测与分级预警，支持本地与远程联动，形成事故分析与寿命评估所需的运行数据。

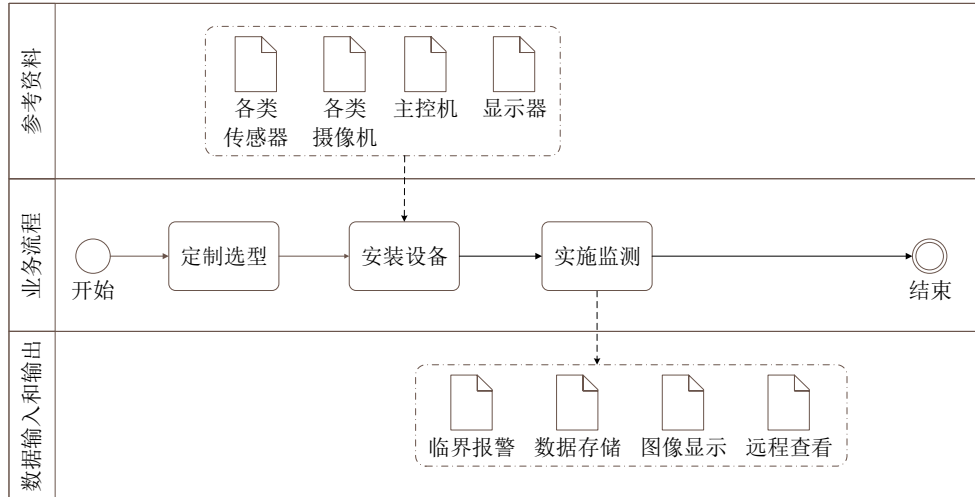


图 6-15 塔吊运行监管技术应用典型流程

为便于理解安全智能管理在现场的落地方式，现以人员与设备目标识别在施工现场的应用作为案例进行说明。项目在出入口、主作业区与塔机作业半径范围布设固定摄像机与边缘计算单元，系统采用目标检测与实例分割算法对人员、塔吊、吊钩、货车、混凝土搅拌运输车与叉车进行识别与连续跟踪。识别结果与人员实名信息、设备档案及作业面电子围栏建立映射关系，形成到岗到位、行为轨迹与设备运行的时间片记录。系统针对无证上岗、未佩戴必要防护、人员进入车辆盲区、吊钩下方误入、塔机幅度超限与多机接近等情形，按照风险分级规则触发声光与平台告警，并将处置任务自动派发至责任单位与责任人，限定时限销项。告警、复核与处置记录与视频证据一并归档，用于班组教育与事故预防复盘。该应用将摄像与传感数据转化为可执行的风险事件清单，减少人为漏检与误判，提升了高风险场景的响应速度与管控精度。

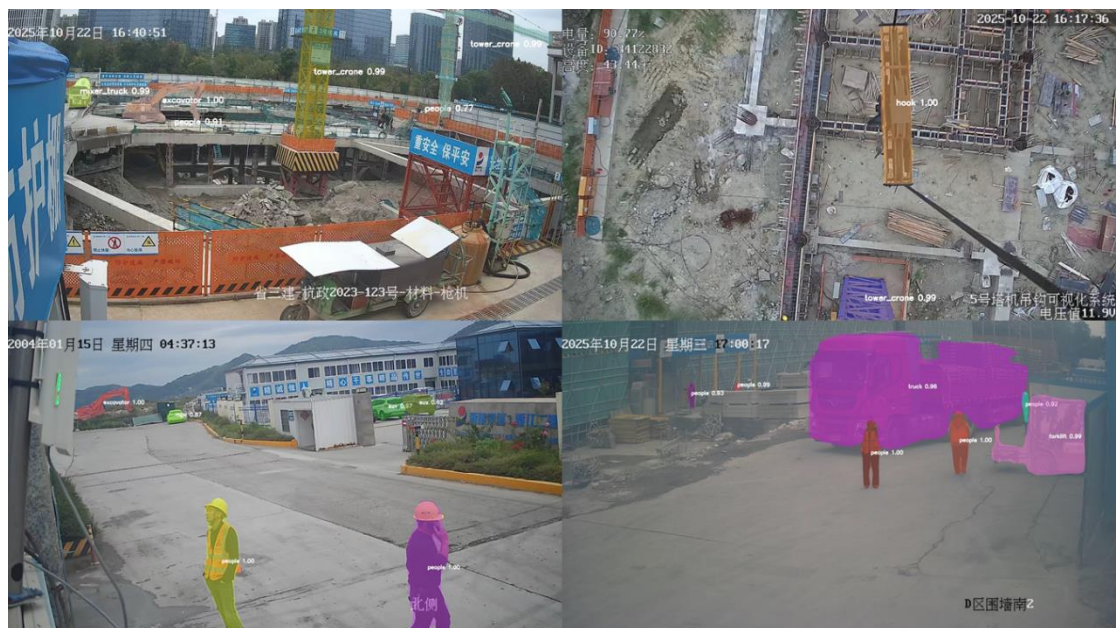


图 6-16 安全智能管理人员与设备识别

6.6 成本智能管理

成本智能管理是指在工程建设全过程中，综合应用信息化与智能化技术，对合同、资源、变更、结算等数据进行集成与分析，实现目标成本、动态成本与结算成本的贯通管理。其核心是在统一编码与科目体系下，将进度、质量、安全与资源系统产生的真实过程数据作为计量与核算依据，推动成本控制由事后核算转向事中预警与前馈优化。

在能耗与节能管理方面，项目可对用能进行分类、分项和精确计量，并开展碳排放管理。宜部署水电节能监测及能效管理系统，依托远传水表与远传电表对各用能点位实施实时监测与在线管理，减少人工抄录造成的遗漏与滞后。系统通过电能表、能量表与水表自动采集数据，完成远程传输与集中存储，对实时与历史能耗进行汇总与分析，以图表和数据看板展示结果，并按设定周期向相关人员推送统计信息。监测结果与项目管理系统中的成本科目关联，用于能效对标、超限预警与节能措施评估。

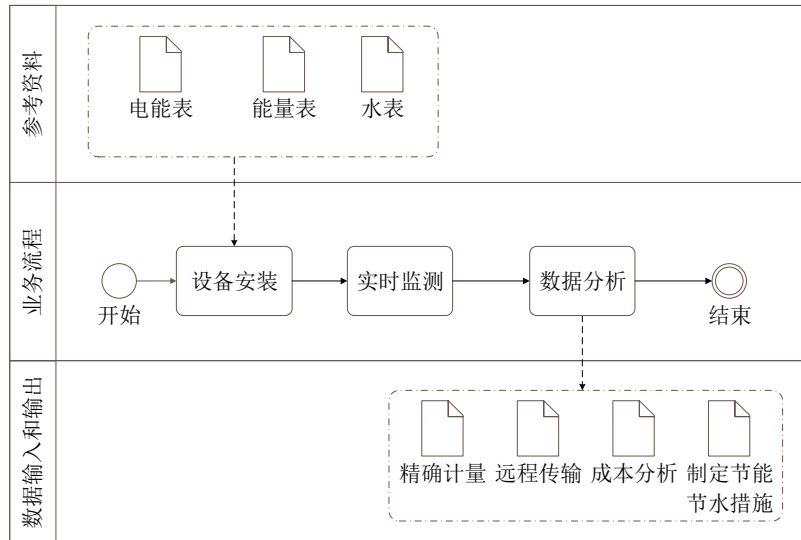


图 6-17 水电节能监测及能效管理典型流程

为便于理解成本智能管理的落地方式，现以工业化内装数字设计系统的应用作说明。该系统在方案与施工图阶段以构件化信息模型为载体，按门、窗、五金与板材等部件建立标准化构件库，支持按空间、专业、楼层与构件属性进行筛选与批量选择。系统依据自定义的计量规则与计价参数，对不同构件的计量方法与参数进行配置，自动生成工程量清单并与成本科目映射，形成对应的目标成本与控制限。设计变更或现场调整发生时，模型驱动工程量即时重算并回写清单，系统同步更新预算对比与偏差分析，输出包含清单、单价、计量依据与图纸定位的信息化报表。文件名称与输出路径可按项目规则自定义，便于归档与共享。该做法在早期即可获得可追溯的动态工程量，减少手工算量与重复套价，提高清单准确性与响应速度，使内装成本管控贯通设计、采购、变更与结算的全过程。



图 6-18 工业化内装数字设计系统

6.7 资料智能管理

资料智能管理是指在工程建设全过程中，对质量、安全、进度、成本等业务产生的各类文件、记录、报表和模型关联信息实施标准化、结构化与线上化管理，通过模板规则、元数据与权限控制，完成资料编制、流转审核、问题整改、归档移交与长期保存，形成与项目过程数据一致的证据体系。其目标是保证资料与工程实体、与计划与计量的一致性与可追溯性，使资料既可支撑在建阶段的检验与支付，也可满足竣工验收、档案移交与运维阶段的查询与复盘。

资料智能管理遵循数据驱动的工作主线。管理数据获取侧重把质量业务的关键证据信息在线采集并自动入库，包括检验批记录、试验检测结果、实测实量数据、材料与设备验收凭证、影像与定位信息等，减少纸面环节与重复抄录。管理分析决策侧重以模板规则和校核清单对缺项、错项与逻辑冲突进行自动识别，结合跨系统接口核对人员资质、设备状态与材料批次，实现资料与现场状态的一致性校核。管理方案执行通过线上流转与时限管控推动整改闭环，形成可审计的留痕。管理成果输出面向项目与公司两个层级生成目录、清册、台账与数据包，并与城建档案移交或业主平台的接口规范保持一致。

为便于理解资料智能管理的落地方式，现以工程资料管理系统作为应用案例进行说明。工程资料管理系统面向项目资料全流程，提供模板统一授权、在线编制与自动升级、重要文件集中归集与分级授权访问、在线查阅与检索、问题整改闭环、评分统计与看板展示等能力，解决资料编制不及时、不规范、易缺失与抽检成本高的痛点，系统支持端云协同与标准化数据接口，可与实测实量和安全巡检等应用数据对接，实现质量与安全资料的智能生成与穿透式管理。



图 6-19 工程资料管理系统

此外，另一资料智能管理案例为图纸模型联动的轻量化引擎。图纸模型联动的轻量化引擎在模型与图纸之间建立双向定位，将二维施工图与三维信息模型进行轻量化转换与语义映射，支持多专业模型整合与结构化组织，适配移动端与离线使用，保证现场网络受限条件下仍可快速定位构件与对应图签。该引擎可把检验批、测点与问题标注锚定到模型与图纸的同一位置，显著提升交底、复核与资料归档的一致性与效率。



图 6-20 图纸模型联动的轻量化引擎

上述做法表明，资料智能管理的关键不在于堆砌功能，而在于以统一编码、模板规则与跨系统接口为约束，围绕质量数据的在线获取与执行留痕构建一套可核可证的资料体系。通过把检验批、试验与实测等原始数据在采集端即绑定图纸、模型与定位信息，并以系统化流转形成整改与复验证据链，资料能够真实反映施工过程，支撑检验验收、支付结算与后评估的核心业务需求。

6.8 综合管理平台

综合管理平台面向项目全生命周期的综合数据，承载跨系统的数据整合、共享与治理职能，是连接进度、质量、安全、成本、资源与资料等业务系统的统一枢纽。平台的目标是在统一的数据标准与安全规范下，形成权威的一致性数据源，

支撑过程监控、绩效评价与管理决策，同时向业主侧与监管侧提供可核可证的数据服务。

平台架构应覆盖基础设施、数据采集、应用与分析决策等层次，既支持现场边缘计算就近采集与预处理，也支持各专项业务系统先行处理后纳入数据中心的模式。平台以主数据与统一编码为基础，建立工作分解、构件分解、合同科目、组织与空间坐标等多维关联关系，使模型、图纸、台账和过程数据在同一口径下对齐。数据通过抽取、加载与治理流程进入统一底座，配套元数据管理、质量校验、血缘追踪与版本管理机制，形成可追溯的数据资产。分析层建立指标体系与算法模型，对产值与成本、计划偏差、质量问题闭环率、安全事件处置及时率、设备利用率、能耗与碳排放等关键指标进行计算、对标与趋势研判，结果以看板、报表与数据包方式输出。

平台需满足明确的数据接口与交换要求。按管理范围设置工程信息、人员、生产、技术、质量、安全、施工环境、视频监控与机械设备管理等访问接口，并在合同或策划中约定与行业监管平台的数据访问方式与口径。数据类型需同时支持结构化与非结构化数据，并在项目级实现统一编码与数据字典管理。数据交换应兼容 JSON、XML 与文本等格式，所有记录包括数据唯一标识、项目唯一编码、采集设备唯一编码与采集时间等关键字段，以保证来源可追溯与跨系统一致。

数据传输应兼顾多源接入与稳定覆盖。平台支持来自现场的直接采集、来自其他系统的共享同步以及经授权的后台录入三类来源，支持有线与无线两类传输方式，结合现场条件采用有线网络、WiFi 或蜂窝网络等方案，并可按需扩展局域网组网与短距通信技术以覆盖特殊工况。采集数据按照配置的频率进行周期传输，频率粒度可按日、小时、分钟或秒进行设置，告警类数据在产生时即时上送。系统数据更新采用增量模式，减少冗余覆盖与带宽占用。视频监控数据宜使用流媒体协议，物联网设备数据宜采用消息队列类物联协议，通过统一时间戳与签收机制并入平台的数据流。

平台的数据安全与合规要求贯穿全链条。数据传输应进行加密处理，宜采用非对称加密与证书验签；接口访问实施最小权限与分级授权；重要数据区与服务区设置隔离与审计；涉隐私与商业敏感信息执行脱敏与最小采集原则。平台对外

提供的数据包与接口需附带字段说明、版本信息与校验码，并保留完整的访问与变更日志。

运行保障与集成运维应与项目规模、设备接入量和并发用户量相匹配。平台在上线前完成连通性、数据一致性与性能测试，运行中监控页面响应时间、实时数据同步时延以及备份与恢复时间，出现异常时按既定时限闭环处置。平台对接各业务系统时，设置字段映射、单位制与时间粒度的统一策略，避免重复采集与口径不一致；模型与图纸通过轻量化与语义映射实现双向定位，物联网与视频数据按统一的标识与时间规则与业务事件进行关联。

表 6-1 综合管理平台数据接口要求一览表

项目	项目要求	基本项	可选项
数据内容及接口	提供工程信息管理访问接口	√	
	提供人员管理访问接口	√	
	提供生产管理访问接口	√	
	提供技术管理访问接口	√	
	提供质量管理访问接口	√	
	提供安全管理访问接口	√	
	提供施工现场环境管理访问接口	√	
	提供视频监控访问接口	√	
	提供机械设备管理访问接口	√	
		建立行业监管平台数据访问接口，实现采集数据的标准化，其中安全监管数据应符合《全国建筑施工安全监管信息系统共享交换数据标准（试行）》建办质[2018]5号	
数据类型	结构化数据	√	
	非结构化数据	√	
数据格式	应实现各数据类型的标准化，统一编码	√	
	应支持 JSON、XML、文本等数据交换格式	√	
	数据内容应包含数据唯一标识、项目唯一编码、采集设备唯一编码、数据采集时间等	√	
传输方式	支持从智慧工地施工现场采集	√	
	支持从其他智慧工地管理系统共享同步	√	
	支持由具有权限的后台管理人员录入	√	
	支持有线和无线两种数据传输方式	√	
	采用 Http、Socket、WiFi(IEEE802.11 协议)、Mesh、蓝牙、ZigBee、Thread、Z-Wave、NFC、UWB、LiFi 等一种或多种通信协议进行网络传输		√
传输频率	采集数据应按设置频率周期进行数据传输，传输频率应支持可配置，支持按天、小时、分钟、秒设置	√	

项目	项目要求	基本项	可选项
	报警数据应在产生时及时传输	√	

通过上述建设，综合管理平台把分散的系统与数据汇聚为可用、可信与可复用的综合能力层，使前述各业务系统在数据标准、接口规范与安全策略下实现稳定互通，确保从施工过程到竣工移交再到运营维护的交付数据同源一致、可核可查，并可直接支撑业主侧与监管侧的复核与二次开发。

7 施工智能交付

7.1 概述

施工智能交付是指围绕工程从施工准备至竣工移交再到运营维护衔接的全过程，应用数字化、网络化与智能化技术，对交付对象、交付内容、交付格式与交付流程进行系统化管理与质量控制，使数据、模型、文件与实物状态保持一致，满足合同与法规要求，并便于业主和管理部门后续使用与二次开发的交付体系。本章所称交付既包括施工过程阶段性的管理性交付，也包括竣工验收交付、竣工档案交付以及面向运营维护的成果移交。

根据目前的技术条件和需求，本指南所称智能交付主要指数字化交付。不同场景的智能化程度并不一致，交付动作本身不以“智能”作为必要条件，但交付成果的形成过程应尽可能采用智能化手段，通过数据治理、自动采集与在线校核等方式，提高成果的一致性、完整性与时效性。

交付对象分为两类主体：一类是外部接收主体，主要包括建设单位、行业管理部门和城建档案馆等；另一类是项目内部成果传递涉及的接收主体，例如施工企业总部、施工总承包单位等。典型的内部交付场景典型包括项目部向施工企业总部移交阶段性成果、分包单位向总承包单位提交过程资料、设计单位向施工单位交付设计成果等。本章重点阐述前述外部交付的具体要求，对内部交付仅作原则性说明，具体口径应以合同约定及企业现行标准为准。

交付类型围绕项目推进阶段进行划分，主要包括施工过程交付、竣工验收交付、竣工档案交付、运营维护交付 4 类。施工过程交付围绕工具应用、数据内容与管理要求等开展阶段性归集与确认。竣工验收交付包含现场验收与远程验收两种组织方式。竣工档案交付需要满足法定归档要求。运营维护交付面向设备信息与模型要求组织成果，通常按系统进行，并根据不同组织方式形成适用的资料结构。此外，针对专项使用需求可形成定制化交付，但其内容与格式仍应遵循相关标准与合同约定。

交付内容以数据、格式、模型与文档为核心，重点包括信息模型与图样、结

构化与半结构化数据、符合标准的文件格式与接口以及设备和资产编码等。模型与文件应优先采用标准化格式，如 ifc 与 xdb 等。与以往以纸质图模文表为主的交付相比，数字化交付新增了大量可计算、可追溯、可复用的内容，这是本章重点关注的范围。当前行业已普遍使用的文档类与报表类交付仍将保留，但新增加的模型、编码、台账、接口与过程数据在部分工程尚未全面普及，实施时需结合项目条件与平台规范逐步推进。

施工智能交付强调以标准与流程为主线，以信息模型和数据标准为载体，以系统平台与接口为枢纽，贯通施工计划、过程记录、检验验证、质量安全、物资设备、测量监测与变更签证等来源数据，确保静态资料与动态数据的一致性与可追溯性，确保模型、编码与台账的一体化管理，确保交付成果可核、可查、可用。本章将以施工过程交付、竣工验收交付、竣工档案交付与运营维护交付四个环节为主线，给出交付策划、数据准备、过程管控、验收确认与成果归集的流程框架，并说明与企业管理平台、业主平台及监管平台的衔接要求。

在基于 BIM 的交付中经常提到“一模到底”的概念应当正确认识。“一模到底”倡导的是在项目全生命周期过程中，前面环节形成的相关信息数据应当高效地为后面环节所用。这里要强调两点：一是“一模到底”传递的是信息，不是模型文件。各方基于自身 BIM 应用需求而创建的模型不便于为其他方所用。二是“一模到底”传递过来的信息应当有对应的标准或便捷的工具使用。非结构化的、查询使用不方便的信息价值不高。

为避免对地方口径与平台规则作出不当解释，本章不规定具体地区适用的统一电子格式与接口参数，不替代合同条款与业主侧系统规范，不对任何第三方产品提出指定性要求。涉及模型格式、编码体系与接口规范的引用示例仅用于阐释流程方法，各单位在实施时应依据业主要求、监管平台规格与企业现行标准执行。

结合行业通行做法，施工智能交付遵循交付目标明确、数据与模型策划、过程留痕与质量验证、系统集成与接口联调、交付评审与确认、归档移交与运维对接的闭环模式，强调以数据标准与责任分工保障一致性，强调以自动化采集与在线校核提升准确性与时效性，强调以贯通设计建造运维的数据链条支撑资产全生命周期管理。

7.2 施工过程交付

施工过程交付，是指在施工阶段按月度或关键节点，将阶段性数据与模型从项目部提交至业主或监理，同时完成项目内部的分包对总包、项目部对公司等管理性交付。交付以阶段计划和检验点为牵引，围绕模型深化、问题闭环、计量佐证和变更签证等来源数据进行归集、校核与确认。交付对象包括建设单位、监理单位和项目内部管理层；交付内容以阶段模型及其出图、问题与整改记录、三维可视化资料、计量佐证台账为主；交付格式以标准化格式为主，典型包括 ifc、xdb、json/xml、dwg、rvt、xls 等，并保持项目唯一编码、设备唯一编码与时间戳等关键字段完整，满足后续贯通与追溯的要求；交付流程遵循策划与口径确定、阶段归集与在线校核、抽检复核与确认签发、归档回传与可追溯存证的原则。

表 7-1 施工过程交付典型清单

类别	可交付项	交付格式	依据与说明
模型深化阶段成果	各专业 Revit 模型及管综优化模型	rvt、nwc	各专业设计图建模，机电管线综合深化设计模型，并明示交付格式。
出图成果	管道洞口预留图、综合平面与剖面、给排水、电气、暖通、智能化等专业图	dwg	成果清单列出机电出图明细，图纸为施工过程控制与复核依据。
三维可视化资料	工程整体介绍视频、工艺节点展示视频	mp4	可视化资料交付内容与时间均依据项目要求。
问题闭环与质量控制	图纸问题报告、施工前中后质量控制记录	doc 或 pdf	图纸问题报告列为交付项，质量控制在项目图纸或模型和现场的一致性要求中明确。
计量与统计	混凝土实物量	xls	列为成果清单条目，可直接作为阶段计量佐证。

7.3 竣工验收交付

竣工验收交付，是指在单位工程或单体具备验收条件时，依据《建筑工程施工质量验收统一标准》（GB 50300-2013）等国家标准要求，提交完整的竣工模型与配套图样、检验批和功能性资料，用于现场验收与远程验收。交付对象以建设单位、监理单位和政府验收组织为主。交付内容包括竣工模型与竣工图、检验批与分项分部验收资料、功能与性能实测数据、影像数据与点云数据、竣工现场影像、以及与监管平台对接的接口数据包等。模型与文件应保证“模型、图纸、现场三一致”，并依据审查通过的竣工图更新模型；交付格式以 rvt、ifc、dwg、pdf、xls、json/xml 为主。

表 7-2 竣工验收交付典型清单

类别	可交付项	交付格式	依据与说明
竣工模型（整体验收）	建筑、机电整合连接模型	rvt、nwc	成果清单明确列出整合模型作为竣工成果。ARST 专业模型内包含：建筑、结构、内装、幕墙整体模型。MEP 专业模型包含：给排水、电气、暖通、智能化。
竣工模型（专业分项）	建筑、机电、幕墙、室外、内装等专业模型	rvt、nwc	成果清单分别列出各专业模型。专业模型包含：建筑、结构、给排水、电气、暖通、智能化、幕墙、室外、内装。
竣工出图	机电综合平立剖、净高分析、洞口预留等	dwg	机电出图清单可作为竣工图组成部分。
竣工模型管理口径	模型拆分、坐标、精度与信息采集	规范条款	竣工模型管理与族信息接口等项目要求，对交付模型的拆分、精度、信息字段提出要求，用作竣工校核依据。

7.4 竣工档案交付

竣工档案交付，面向城建档案馆及行业管理部门，强调法定归档的真实性、完整性与可检索性。按城建档案门类要求提交纸质与电子档案的目录、竣工图、模型与编码台账、影像资料与过程数据摘要；交付格式遵循当地电子档案规范与平台接口。确保档案条目与模型构件、楼层、系统、坐标等字段互相指引，提升

档案可检索性。图 7-1 作为行业趋势说明，典型流程涉及从扫描原生电子文件、过程档控到在线档案著录，以帮助项目逐步实现档案要素结构化与在线检索的要求。



图 7-1 建设文件归档数字化演进图

表 7-3 竣工档案交付典型清单

类别	可交付项	交付格式	依据与说明
竣工模型与目录	各专业 rvt、nwc，生成模型目录与索引	rvt、nwc、目录或 xlsx	以项目归口城建档案馆及行业管理部门要求为准。
竣工图纸与问题整改记录	机电出图、图纸问题整改报告等	dwg、pdf、doc	以项目归口城建档案馆及行业管理部门要求为准。
可视化与影像证据	工程视频与样板区漫游	mp4、快照 jpg	以项目归口城建档案馆及行业管理部门要求为准。
元数据与编码台账	族信息接口字段、信息采集清单	xlsx、csv、xml	以项目归口城建档案馆及行业管理部门要求为准。

7.5 运营维护交付

运营维护交付面向业主运维与物业系统，强调设备、空间、系统与关系的结构化模型与台账一致。交付对象为业主运维部门和运维平台；交付内容包括运维级模型、设备与空间编码、系统图与平面图对照、运维属性字段与保养策略等；格式包括运维模型 rvt 或经轻量化后的可视模型格式，配套 CAD 系统图与平面图、设备台账与空间台账。运维模型应达到运维阶段要求的精度与一致性，满足命名、编码、属性、浏览、建模标准等方面的刚性条款；对重要机电设备宜拆解至零部件级并与可监测最小单元一致，模型作为运维平台中心数据库，支撑定位、状态监控与工单管理。此外，文档和图纸需提供各楼层综合管线平面图及各专业完整系统图，确保图中设备编号与模型设备编码一致。还应实施模型与现场一致性核查，包含编号、名称、类型、位置、尺寸、数量、关键参数抽检，给出偏差度指标与审核报告。运营维护平台需具备模型批处理与按需加载能力，客户端可本地缓存且加密，支持属性批量增改与二次修订。

表 7-4 运营维护交付典型清单

类别	可交付项	交付格式	依据与说明
设备台账与模型属性	设备名称、设备 ID、物联网 ID、所在位置、设备类型、负责人、品牌、型号、出厂日期、启用日期、使用年限、状态、控制方式等，设备与空间均须唯一标识	rvt 模型参数、 xlsx 台账	项目交付文档对设备与空间属性给出的要求。
空间台账	区域名称、区域 ID、所属建筑与楼层、状态等	rvt 房间参数、 xlsx 台账	明确房间明细与属性在模型中的一致性要求。
模型精度	运维模型需达到 LOD400 及以上，模型与现场一致且包含变更	rvt、轻量化可视模型	项目交付文档的总体准则与精度要求。
模型类型与命名	建筑、结构、机电、物联设备四类模型；文件命名规则统一，机电需分系统导出并保证设备完整性	rvt 文件与命名清单	模型文件类型、命名与分系统导出要求。

图纸支撑	每层综合管线图、建筑平面图以及各专业系统图，图中设备编号要与模型一致	dwg	图纸与模型一一对应的要求。
场景与轻量化	运营维护平台需对模型进行轻量化处理，保障浏览与联动性能	可视模型与平台入库包	平台批处理与轻量化要求。

7.6 发展展望

随着数字化和智能化在建筑行业的深度融合，施工交付的未来已经从单一的档案整理转向全生命周期的数据资产管理。智能交付不再是竣工时的终点，而是贯穿建设、运维乃至改扩建全过程的数据基座。从政策导向看，《“十四五”数字经济发展规划》《住房和城乡建设部关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》等文件均明确提出，要推动工程项目全过程信息化交付和成果沉淀，形成可再利用的数据资产；从技术演进看，大数据、人工智能、知识图谱、物联网、区块链等手段的结合，为交付体系注入了持续升级的可能性。未来的智能交付将体现以下几个方向。

第一，数据采集的全时化与多维化。传统的交付资料以文字、图纸为主，未来则是多源数据并行采集的格局。传感器、无人机、移动终端、视频监控、物联网设备将在施工过程中实时生成数据流。这些数据通过边缘计算与云端平台融合，形成时序化、空间化的过程档案，不仅覆盖施工行为与检测记录，还能捕捉环境变化、设备工况与人员状态。这种全时化采集能够让交付成果更接近现场真实状态，减少人为遗漏和滞后。

第二，数据解析的智能化与语义化。随着自然语言处理和图像识别技术的发展，资料不再局限于人工录入和归档，而是通过人工智能进行自动识别、提取与分类。施工现场的照片与视频可以被智能识别为某一构件的施工证据，检测报告可以通过文本解析提取关键参数并挂接模型对象，合同与审批文件可以自动生成索引与条目。这种解析能力的提升，使得交付资料从“文档堆积”转向“知识条目”，提升了交付成果的精细化和再利用潜力。

第三，知识图谱化与逻辑关联的构建。交付不只是文件的累积，而是知识网

络的生长。未来系统会将设计变更、施工过程、检测结果、问题整改、责任人、运维反馈等节点在知识图谱中建立关联，实现资料的逻辑穿透与因果追溯。业主在运维过程中若发现某构件性能异常，可以通过知识图谱快速追溯到相关设计方案、施工工序、检测结果与整改情况，从而实现基于知识链路的全流程追责与改进。这种“图谱化交付”不仅提升了信息检索效率，也为运维与再建提供了科学依据。

第四，区块链与可信交付。未来的智能交付将更强调资料的真实性与不可篡改性。通过区块链技术，所有输入数据在生成时即可被赋予时间戳和哈希值，并分布式存储在可信网络中。这样，无论是施工日志、检测数据还是付款凭证，均能在交付时验证其来源与真伪，避免人为篡改或数据丢失。这种机制特别适用于合同争议、质量索赔与责任划分等高风险场景，为行业建立起新的信任基座。

第五，交付成果的运维导向与服务化。交付不再是结束，而是运维的起点。未来的交付成果将直接对接业主的运维平台，实现“交付即使用”。模型中嵌入的属性数据、质保条款、维保周期、监测历史将帮助运维团队实现精准管理；交付成果中的知识图谱与接口数据可用于能耗分析、风险预测与资产优化。业主方不需要再进行二次转换，而是可以开箱即用，这使交付成为持续服务的一部分，甚至演化为建筑全生命周期管理的商业模式。

第六，政策标准化与行业普及化。未来几年，国家和行业协会将进一步完善工程资料数字化交付的标准，明确目录体系、接口规范与验收口径。标准化的建立能够降低不同项目之间的差异，推动智能交付从试点走向普及。到“十四五”末期，智能交付预计将在重大工程、城市基础设施、公共建筑中普遍应用，成为监管验收和业主考核的重要依据。

综上所述，未来的施工智能交付方向是数字化与智能化的深度耦合。从数据采集、解析、知识图谱到区块链、运维导向与 AI 助理，交付正从“静态档案”演进为“动态资产”，从一次性交割演进为持续服务。它不仅服务于竣工验收，更成为建筑全生命周期管理的重要环节。这一趋势符合政策导向，也呼应了行业对高质量发展的迫切需求，标志着施工交付正在迈入一个全新的数智化时代。

附录 A

表 8-1 英文缩写对照表

缩写	中文对应
AGV	自动导引车
AI	人工智能
AMR	自主移动机器人
API	应用程序编程接口
APP	移动应用程序
AR	增强现实
ARST	建筑/结构/内装/幕墙综合模型
BIM	建筑信息模型
BCI	脑机接口
BOM	物料清单
CAD	计算机辅助设计
CSV	逗号分隔值
DXF	绘图交换格式
ERP	企业资源计划
FAS	火灾自动报警系统
GIS	地理信息系统
GNSS	全球导航卫星系统
GNSS-RTK	全球导航卫星系统实时动态差分
GPU	图形处理器
HTTP	超文本传输协议
IFC	工程数据交换标准
IMU	惯性测量单元
IOPS	每秒输入/输出操作次数
JSON	JavaScript 对象表示法
LiDAR	激光雷达
LiFi	可见光通信
LoRA	低秩适配（大模型微调方法）
LOD	模型细化/开发程度等级
MES	制造执行系统
MEP	机电（给排水/暖通/电气）
MR	混合现实
NAS	网络附加存储
NC	数控代码
NFC	近场通信

PM2.5	细颗粒物 ($\leq 2.5\mu\text{m}$)
PM10	可吸入颗粒物 ($\leq 10\mu\text{m}$)
PMIS	项目管理信息系统
PPE	个人防护用品
RAID	冗余磁盘阵列
RAG	检索增强生成
RFID	射频识别
RLHF	基于人类反馈的强化学习
RTK	实时动态差分定位
SAN	存储区域网络
SLAM	同步定位与地图构建
Thread	Thread 物联网通信协议
TSP	总悬浮颗粒物
UAV	无人机
UWB	超宽带
VPN	虚拟专用网络
Wi-Fi	无线局域网
XML	可扩展标记语言
ZigBee	ZigBee 短距无线通信协议
Z-Wave	Z-Wave 无线通信协议
IoT	物联网