

# 团 体 标 准

T/TMAC XXXX—XXXX

## 铁路路基智能化填筑施工指南

Guidelines for Intelligent Filling Construction of Railway Subgrade

(征求意见稿)

(本草案完成时间: X)

在提交反馈意见时, 请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页, 已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页, 未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国技术市场协会 发布



# 目 次

前 言 .....	III
1 范围 .....	4
2 规范性引用文件 .....	4
3 术语和定义 .....	4
4 总则 .....	6
4.1 目的与目标 .....	6
4.2 基本原则 .....	6
4.3 智能化填筑施工体系框架概述 .....	6
5 施工准备 .....	7
5.1 技术准备 .....	7
5.2 设备与系统准备 .....	10
5.3 材料准备 .....	14
5.4 人员与组织 .....	15
6 智能化填筑施工过程控制 .....	17
6.1 基底处理与验收 .....	17
6.2 填料运输与调度 .....	18
6.3 摊铺作业 .....	20
6.4 碾压压实作业 .....	22
6.5 含水量智能控制 .....	26
6.6 层间处理与检验 .....	27
7 施工质量检验与评估 .....	28
7.1 过程检测 .....	28
7.2 竣工检验 .....	28
7.3 质量评估与决策支持 .....	30
8 数据管理、系统集成与决策支持 .....	31
8.1 数据采集与传输标准 .....	31
8.2 中心数据平台功能要求 .....	31
8.3 数字孪生模型构建与施工过程动态映射 .....	32
8.4 施工进度、质量、成本的集成分析与看板展示 .....	32
8.5 智能决策支持 .....	34

9 施工安全与环境保护 .....	34
9.1 智能化施工安全监控 .....	34
9.2 设备自身安全防护与应急机制 .....	35
9.3 基于智能系统的环保监控 .....	36
10 系统维护与故障处理 .....	37
10.1 智能化设备与系统的日常维护 .....	37
10.2 常见故障诊断与排除流程 .....	38
10.3 数据备份与系统恢复 .....	40
附录 A .....	43
附录 B .....	45
附录 C .....	48
附录 D .....	51

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国技术市场协会提出。

本文件由中国技术市场协会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：国能包神铁路集团有限责任公司、中铁十一局集团有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、华东交通大学、中国铁建重工集团股份有限公司。

本文件主要起草人：

# 铁路路基智能化填筑施工指南

## 1 范围

本文件规定了铁路路基工程智能化填筑施工的总则、施工准备、智能化填筑施工过程控制、施工质量检验与评估、数据管理与系统集成、施工安全与环境保护、系统维护与故障处理等方面的技术要求与操作规程。

本文件适用于新建、改建时速 200 公里及以下客货共线铁路、城际铁路、重载铁路等一般铁路路基工程的智能化填筑施工。对于时速 200 公里以上铁路、客运专线等项目的路基智能化填筑施工可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 50123 土工试验方法标准

JTG 3450 公路路基路面现场测试规程术语和定义

TB 10102 铁路工程土工试验规程

TB 10414 铁路路基工程施工质量验收标准

TB 10751 高速铁路路基工程施工质量验收标准

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### **智能化填筑 intelligent filling**

利用智能传感、精确定位、物联网、大数据分析等信息技术，集成于填筑施工装备，实现对填料运输、摊铺、压实等关键工序状态与质量的实时感知、智能控制与优化决策的施工方式。

### **智能压实 intelligent compaction; IC**

利用安装在压路机上的集成系统，通常包括定位导航、压实度传感器、控制器与反馈装置，实现压实过程参数（如遍数、轨迹、振动状态）的自动记录、压实效果（压实度）的实时评估与可视化，并能指导或自动调整压实工艺的作业方法。

### **智能压实系统 intelligent compaction system; ICS**

实现智能压实功能所需的一系列集成化硬件与软件的总称,通常包括压实测量系统、定位导航系统、机载控制显示单元、中心数据处理与可视化平台等。

**过程质量指标 process quality index; PQI**

在施工过程中,通过传感器实时测得的、用于间接评估当前施工质量状态的可量化参数。在智能压实施工中,通常指压实计值。

**压实计值 compaction meter value; CMV**

一种基于振动压路机响应信号(如加速度谐波分析)计算得到的、用于表征被压材料相对密实度或刚度的无量纲过程质量指标。

**振荡计值 oscillation meter value; OMV**

一种基于振荡压路机响应信号计算得到的、用于表征被压材料相对密实度或刚度的过程质量指标。

**压实控制值 compaction control value; CCV**

一种基于压实过程中测量的机器-地面相互作用参数(如驱动功率等)计算得到的、用于评估填料压实状态的过程质量指标。

**压实质量云图 compaction quality map**

在数字地图背景上,将不同位置(坐标点)的实时过程质量指标(如CMV)或评估结果,以色谱、等值线等形式进行可视化呈现的图形,用于直观展示整个作业面压实质量的均匀性与达标情况。

**中心监控平台 central monitoring platform**

用于接收、存储、处理、分析及可视化展示来自多个智能施工装备和传感设备数据的软件系统,为施工管理提供统一的决策支持界面。

**智能碾压参数 intelligent rolling parameters**

在智能压实作业中,由系统根据预设规则或实时反馈数据自动生成或推荐的工艺参数组合,主要包括但不限于:碾压遍数、行进速度、振动模式(频率/振幅)、激振力开启/关闭区域等。

**施工过程数字孪生 digital twin of construction process**

基于物理实体施工装备、作业环境与过程的实时数据，在虚拟空间中构建的、可进行同步映射、模拟分析、预测与优化的数字化模型。

### **无人驾驶碾压 unmanned rolling**

在特定作业区域内，压路机在无人直接操作驾驶室的情况下，依据预先规划或实时生成的作业路径与指令，通过车载控制系统自动完成行驶与压实作业的模式。

## **4 总则**

### **4.1 目的与目标**

目的：为规范和指导铁路路基工程智能化填筑施工，推动新一代信息技术与工程建设深度融合，提升施工过程的质量控制能力、作业效率、安全水平和可追溯性。

目标：

- a) 过程可控：实现填料运输、摊铺、碾压等关键工序参数的实时感知、自动采集与可视化监控。
- b) 质量可知：建立基于实时过程数据的压实质量动态评估与反馈机制，实现从“结果验收”到“过程控制”的转变。
- c) 决策可依：基于数据分析和智能算法，为施工工艺优化、资源调度和异常处理提供量化决策支持。
- d) 信息可溯：形成覆盖原材料、施工过程到质量检验的数字化档案，实现质量问题的精准追溯。

### **4.2 基本原则**

智能化填筑施工应遵循以下基本原则：

- a) 安全优先原则：智能化系统设计、部署与运行，必须确保人员、设备和数据安全。自动化、无人化作业需建立完备的安全防护与应急接管机制。
- b) 质量核心原则：所有智能化技术的应用，应以保障和提升实体工程质量为根本目标。过程控制数据须与实体工程质量建立有效、可靠的关联。
- c) 高效协同原则：实现土方运输、摊铺、碾压、检测等工序间设备与数据的智能联动与协同作业，优化施工流程，提高整体工效。
- d) 智能集成原则：鼓励采用成熟、可靠的智能化技术与装备，并实现不同系统间的数据互联互通与集成应用，避免形成“信息孤岛”。
- e) 绿色环保原则：通过智能化调度与精准控制，减少设备空转、材料浪费和返工，降低能耗与排放，并利用传感器监测施工对环境的影响。

### **4.3 智能化填筑施工体系框架概述**

智能化填筑施工体系是一个由感知控制层、网络传输层、数据平台层和决策应用层构成的综合系统（其逻辑关系见图1）。各层协同工作，共同支撑智能化施工的实现。

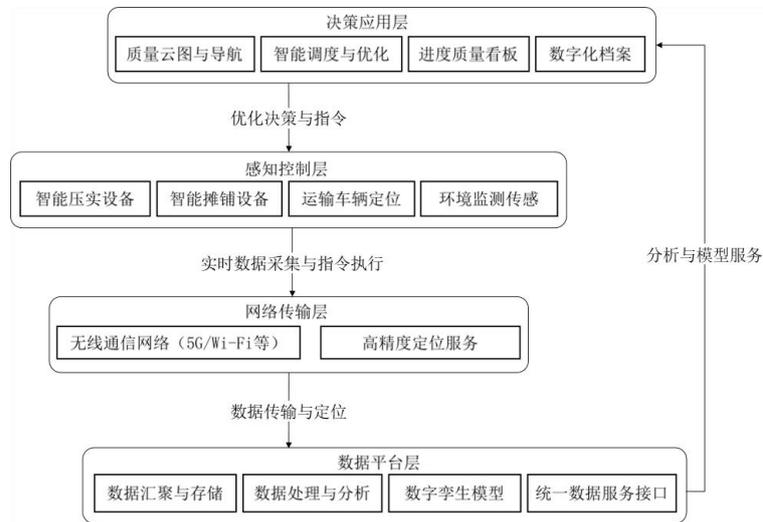


图1 智能化填筑施工体系框架示意图

- a) 感知控制层：由搭载高精度定位、多种传感器和智能控制终端的施工机械（如智能压路机、智能摊铺机、运输车辆）及环境监测设备构成，负责执行作业指令并实时采集施工过程数据与状态信息。
- b) 网络传输层：利用无线通信技术和卫星定位增强服务，实现感知控制层与数据平台层之间稳定、可靠的数据传输与指令下发。
- c) 数据平台层：即中心数据管理与分析平台，是体系的核心。负责汇聚、存储、处理和分析来自感知控制层的海量数据，构建施工过程数字孪生模型，并提供统一的数据服务接口。
- d) 决策应用层：基于数据平台层提供的服务，面向不同角色提供具体的智能化应用功能，如压实质量云图、智能调度导航、工艺参数优化建议、进度与质量看板等。

## 5 施工准备

### 5.1 技术准备

#### 5.1.1 数字化勘察与设计数据接收与解析

a) 应接收并验证来自勘察、设计单位的数字化成果，主要应包括：数字高程模型（DEM）（网格精度应不低于 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ ，高程精度应不低于 $\pm 5\text{cm}$ ）、数字化地质资料（宜包含三维地质模型或地质剖面矢量数据）、路基横纵断面设计数据（中桩间距不宜大于 $20\text{m}$ ，且需包含完整的超高、加宽设计信息）、填料设计参数（应明确各分区的填料类型、压实标准、CBR值等指标）等。

b) 应对接收的数据进行格式统一、坐标系统一及完整性检查。所有数据应统一转换至项目指定的坐标系及高程基准，转换后的点位中误差应不大于 $2\text{cm}$ ；数据格式应支持后续施工智能化系统直接调用，

格式转换与解析的出错率应为0%；接收数据的完整性（按设计文件目录核对）应达到100%，无关键信息缺失。

c) 应基于数字化设计模型，在施工前通过三维碰撞检测或空间分析技术，识别潜在的技术难点和冲突，填挖交界处的高程顺接（坡度变化率超过5%的区域）、结构物衔接处的几何冲突、以及设计图纸与现场实际地形的高程偏差超过10cm的区域，并形成书面报告。

### 5.1.2 智能化施工方案编制

a) 方案应基于数字化设计数据和现场条件专项编制，内容应包含但不限于：

1) 智能化施工总体流程与组织架构：应明确规定从基底验收、分层填筑到竣工验收的全流程工序衔接，关键工序的循环作业时间目标宜控制在24-48小时内。组织架构中须明确各智能化岗位（系统操作员、数据分析师等）的配置数量与职责界面。

2) 智能设备数量规划：

设备数量应根据施工强度计算。例如，每台智能压路机每工作日的压实面积不宜低于10000 m<sup>2</sup>，据此确定所需最少设备台数。定位与通信设备的配置数量应确保所有主要作业设备（压路机、摊铺机）100%覆盖。

3) 关键工艺参数预设：方案中应提供基于初步试验或类似经验的初始参数表。该表需针对不同填料分区明确以下参数范围：

碾压遍数：如砂类土静压1遍+振压6-8遍。

行驶速度：振压阶段宜为3-5 km/h。

振动频率与振幅：如对于砂砾土，频率可预设为30-35Hz，振幅1.8-2.2mm。

压实过程质量指标（CMV）初步目标值：如对应应用96%压实度的CMV目标范围可预设为80-100。

4) 施工过程数据管理方案：

采集与传输：明确各类数据采集频率与传输协议。

存储与处理：规定原始数据存储格式，存储时间自竣工验收之日起不少于5年。数据处理延迟（从采集到平台可视化）应小于10秒。

责任与流程：明确数据管理员、审核员等角色，建立数据质量每日核查机制。

5) 试验段验证计划：应明确试验段长度不小于100m，并通过该段施工建立智能压实指标（CMV）与传统压实度的有效相关性模型，模型相关系数R<sup>2</sup>应不小于0.80，方可用于指导全线施工。

6) 应急预案：应量化应急响应指标，如：核心系统故障后，备用系统或人工接管模式应在30分钟内启用；通信中断时，智能设备本地数据缓存能力应不小于72小时；单点定位失效时，设备应能自动切换至惯性导航或其他辅助定位方式，并维持定位精度衰减率不大于5cm/min，持续至少10分钟。

b) 方案应履行审批手续，并对相关人员进行交底。审批流程应在项目开工前不少于15个工作日完成。交底覆盖率应达到100%，所有接受交底人员需签字确认，记录存档。

### 5.1.3 施工控制网与基准站布设

a) 应在施工区域周边建立覆盖整个作业范围的施工测量控制网，其精度等级应符合高精度定位及施工测量要求。控制网应依据现行铁路工程测量规范进行设计与施测，确保其最弱点点位中误差：平面应不大于 $\pm 5\text{cm}$ ，高程应不大于 $\pm 3\text{cm}$ 。控制点间距宜为 $200\text{m}-400\text{m}$ ，且需进行定期复测，点位稳定性变化量应小于 $2\text{cm}$ 。

b) 为支持智能装备的厘米级实时动态定位（RTK），应建立或接入卫星定位增强服务网络。若自建基准站，其选址应满足以下量化要求：

- 1) 视野开阔，水平仰角 $10^\circ$ 以上的障碍物遮挡总面积应小于 $30\%$ 。
- 2) 地基稳固，应进行不少于3个月的沉降观测，累计沉降量应小于 $2\text{mm}$ 。
- 3) 远离振动源、强电磁干扰源及大面积水体。距离振动源应大于 $200\text{m}$ ；距离强电磁干扰源应大于 $500\text{m}$ ；距离稳定大面积水体边缘应大于 $100\text{m}$ 。
- 4) 有效覆盖范围应满足施工要求，单个基准站的有效作业半径不宜超过 $10\text{km}$ ，以确保网络RTK定位精度在服务区内平面 $\leq \pm 2\text{cm}$ ，高程 $\leq \pm 3\text{cm}$ （ $95\%$ 置信度）。

c) 基准站坐标应采用静态测量方法精确测定，并与施工控制网中不少于3个已知点进行联测与整体平差。其坐标测定精度应满足：平面点位中误差 $\leq \pm 1\text{cm}$ ，高程中误差 $\leq \pm 2\text{cm}$ 。基准站的设置、参数配置、每周的数据质量分析及维护工作均应形成详细、连续的记录并存档。

### 5.1.4 施工区域数字化建模与分区规划

a) 应综合利用数字化设计模型和现场实际勘测数据，构建用于指导精细化施工的“施工区域数字化现状模型”。现场实际勘测宜采用无人机倾斜摄影或地面三维激光扫描，所生成的点云密度应不低于 $200\text{点}/\text{m}^2$ 。构建的现状模型精度应满足：平面中误差 $\leq \pm 2\text{cm}$ ，高程中误差 $\leq \pm 3\text{cm}$ ，模型格网分辨率应不低于 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 。该模型应根据施工进度，每填筑2-3层或每周至少进行一次更新与修正。

b) 应基于该模型和施工方案，对作业区域进行数字化分区规划，其规划参数应符合下列要求：

1) 填料分区：应根据设计要求和料源情况，对不同类型填料的填筑区域进行明确划分。分区的最小单元面积不宜小于 $500\text{m}^2$ ，并在模型中以不同颜色或图层进行区分，相邻填料区边界在模型中应有不小于 $1\text{m}$ 的缓冲区。

2) 运输路径规划：应规划出土方运输车辆的高效、单向循环通行路径。主干道路基宽度不应小于 $6\text{m}$ ，路面压实度不低于 $90\%$ ；转弯处最小转弯半径应满足所用运输车辆的要求，一般不小于 $15\text{m}$ ；路径纵坡不宜大于 $8\%$ 。

3) 压实作业分区：应根据压路机的工作效率（通常为每小时 $1000-1500\text{m}^2$ ），将大作业面划分为长 $50-80\text{m}$ 、宽 $15-20\text{m}$ 的碾压作业单元，并规划压路机“套压”或“进退错距”的最优行进路线，确保轮迹重叠带宽不小于 $20\text{cm}$ 。

4) 特殊处理区标识：应对边坡坡脚、桥涵台背、横向结构物过渡段等关键区域进行明确标识，标识范围应向外扩展至少2m。在模型中应为这些区域设定差异化的工艺参数。

c) 分区规划结果（包括矢量边界、属性信息和关联参数）应准确导入中心监控平台。数据导入前应进行坐标系统一校验，确保规划边界与现场实际位置的平面偏差不大于5cm，作为智能化调度和作业控制的可靠数字基础。

## 5.2 设备与系统准备

### 5.2.1 智能压实设备（压路机）要求与校验

a) 用于智能化填筑施工的压路机应集成智能压实系统，该系统应具备以下核心功能，且性能应满足：高精度定位模块的实时动态定位（RTK）精度，平面应不大于±2cm，高程应不大于±3cm（95%置信度）；压实质量实时检测系统的测量误差应不大于±5%，输出频率不低于20Hz；作业参数监控应能实时记录振动频率（误差±0.5Hz）、振幅（误差±0.2mm）及速度（误差±0.2km/h）；数据通信模块在网络正常条件下，端到端数据传输延迟应小于2秒，数据包发送成功率应不低于99.9%。

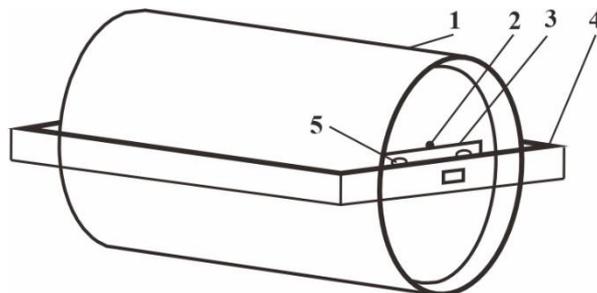
b) 压实质量检测传感器的安装应规范、牢固，确保信号采集准确。振动传感器灵敏度应不小于 $10\text{mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ ，频率响应应不大于5kHz，并宜垂直安装在振动轮内侧机架的几何中心位置，安装角度偏差应不大于±1°，安装基面平整度应不大于0.5mm，安装螺栓紧固扭矩应符合设备制造商规定值。典型安装方式示意图2。

c) 设备投入使用前，应进行专项校验，确保其智能功能有效、性能达标。校验主要内容应包括：

1) 定位精度测试：在不少于3个已知平面及高程控制点上进行静态与动态（速度2-5km/h）测试，其定位结果与已知值的偏差应符合本条第a款精度要求，固定解初始化时间应小于30秒。

2) 压实检测系统标定：应按照设备制造商规定的方法或相关规范在标准振动台（频率范围20-50Hz，振幅范围0.5-2.0mm）上进行初始标定，标定误差应不大于±1%。并在试验段通过与传统检测方法对比验证，其输出的压实过程指标与压实度（K值）的相关系数 $R^2$ 应不小于0.70。

3) 功能验证：检查机载显示终端应能正确、实时（数据刷新延迟小于1秒）显示定位坐标、压实值（CMV）、碾压遍数、激振力、频率、振幅及速度等参数。数据记录应完整，本地缓存容量应能保证在断网情况下存储不少于72小时的原始数据。数据上传功能应正常，在连续8小时测试中，数据上传至指定平台的成功率应不低于99.5%。



标引序号说明：

1—压路机振动轮；2—振动传感器；3—内机架；4—外机架；5—减震器。

图2 振动传感器安装位置示意

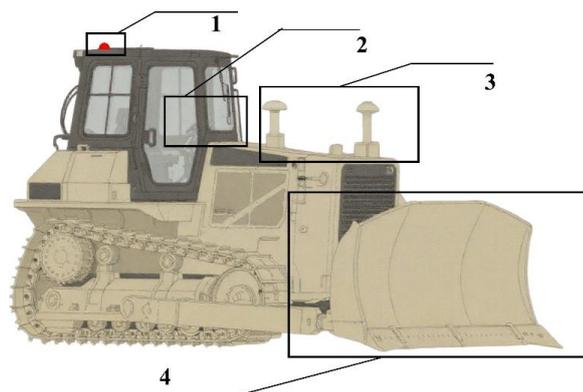
### 5.2.2 智能摊铺设备要求与校验

a) 智能推土、平地设备应配备基于高精度定位的自动找平控制系统。该系统所采用的高精度GNSS/BDS-RTK定位模块，其平面定位精度应不大于 $\pm 1\text{cm}$ ，高程定位精度应不大于 $\pm 2\text{cm}$ 。

b) 智能推土设备应能依据预设的高程数据，自动控制推土铲，实现填筑层厚度的初步控制。其推土板容量宜不小于 $8\text{m}^3$ ，基于定位的自动高程控制精度应使厚度误差不大于 $\pm 3\text{cm}$ ，避障系统的探测距离应覆盖 $0.3\text{-}5\text{m}$ ，急停响应时间不大于 $0.3\text{s}$ 。其智能感知与控制模块的典型安装示意图2。

c) 智能平地设备应能基于设计模型与实时定位，自动控制刮刀姿态，实现路基表面坡度与平整度的精确控制。其液压伺服控制分辨率应不大于 $0.1^\circ$ ，刮刀平整度误差应不大于 $3\text{mm}/4\text{m}$ ，最大牵引力不宜小于 $150\text{kN}$ ，GNSS高程控制分辨率应不大于 $1\text{cm}$ ，横坡控制精度应达到 $\pm 0.2\%$ 。其智能感知与控制模块的典型安装示意图4。

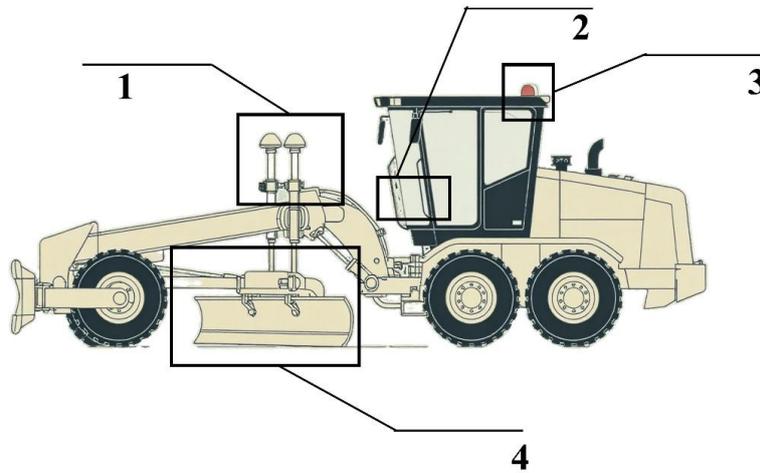
d) 设备投入使用前，应校验其自动控制系统的响应精度与工作稳定性。校验应在长度不小于 $50\text{m}$ 的平整试验段上进行，测试其自动作业轨迹与设计路径的偏移量，该偏移量应不大于 $5\text{cm}$ ；同时，校验后实测的摊铺厚度、坡度及平整度应满足本条第b)、c)款所述精度要求。



标引序号说明：

1—蜂鸣警报器；2—车载显示终端；3—GNSS 天线；4—自动找平模块及数据采集模块。

图3 推土机智能感知设备安装示意图



标引序号说明：

1—GNSS 天线；2—车载显示终端；3—蜂鸣警报器；4—自动找平模块及数据采集模块。

图4 平地机智能感知设备安装示意图

### 5.2.3 土方运输智能调度系统配置

a) 宜配置土方运输智能调度系统，实现运输车辆的数字化管理。该系统应能同时调度管理不少于20台运输车辆，任务分配与路径规划的全局优化计算响应时间应小于30秒。

b) 运输车辆应安装定位终端，其定位精度应不低于5m，数据上传至调度中心的延迟应不大于5秒。终端应能准确识别并上报空载与重载状态，状态识别准确率应不低于95%。

c) 调度系统应具备以下基本功能，且性能需满足：

1) 实时监控所有注册车辆的位置与运行轨迹，地图显示刷新闻隔应不大于10秒，车辆历史轨迹可追溯时长应不少于30天。

2) 根据填筑作业面的实时进度与精确至立方米（ $m^3$ ）的用料需求，自动进行运输任务分配与路径规划。系统规划的路径应能实现车辆整体满载率（重载行驶里程/总行驶里程）优化至不低于75%，且动态路径重规划应在作业面变更指令下达后2分钟内完成。

3) 为驾驶员提供精确至具体网格的卸料点引导。从车辆进入作业区到接收明确卸料指令的引导过程时间应小于1分钟。

4) 自动统计运输方量、车辆利用率等数据。运输方量统计结果与地磅或车载称重系统数据的误差应不大于3%，关键运营数据报表应能按日、周、月自动生成。

### 5.2.4 传感与监测系统安装与标定

a) 定位基准站：应根据施工现场环境及作业范围合理选址与布设，确保整个施工区域能稳定接收卫星差分增强信号。站址坐标应采用静态测量方法精确测定，其平面点位中误差应不大于 $\pm 1cm$ ，高程

中误差应不大于±2cm，并定期（宜每季度）进行复测与维护，复测坐标与原坐标较差大于2cm时应分析原因并重新测定。基准站天线安装必须强制对中，对中误差应小于1mm。

b) 压实度传感器：作为连续压实检测系统（CCMS）的一部分，其安装必须符合设备技术要求，连接可靠。系统应按制造商规定程序或相关规范

进行初始标定，此后每3个月或累计工作500小时应进行一次周期性标定，标定误差应不大于±1%。在试验段，其输出的压实过程指标与传统检测方法结果的相关系数 $R^2$ 应不小于0.70，以验证其有效性。

c) 含水量传感器：宜采用在线式测量设备。传感器安装后，应在填料最优含水率±3%的范围内，使用烘干法选取不少于3组样本进行现场比对校准，校准后传感器测量值与烘干法结果的误差应不大于±1.5%。应建立定期校验制度，每1个月或当监测数据出现系统性偏差时进行复校。

d) 视频监控设备：应在作业区关键位置及移动设备上合理布设，监控画面应能有效覆盖主要施工活动区域与设备周边半径10m内的盲区。关键位置摄像机分辨率应不低于1080P，帧率不低于25fps；视频存储时间应不少于30天，以保障作业安全与过程可视。

### 5.2.5 中心数据平台与现场控制终端调试

a) 应部署智能填筑施工中心数据监控与管理平台。平台基础性能应满足：加载覆盖10万 $m^2$ 作业区域的地图与实时数据，时间不超过5秒；在接收到触发条件后，生成并发出预警信息的端到端延迟应不大于2秒；数据查询与报表生成响应时间应小于3秒。

b) 完成所有智能施工设备、传感系统与中心平台的数据接口连通与协议调试，确保数据采集、传输、处理、存储与显示的全链路畅通、准确、及时。调试后应达到：数据从设备采集端传输至平台数据库的丢包率低于0.1%；定位数据平面坐标精度误差 $\leq \pm 1cm$ ，高程误差 $\leq \pm 2cm$ ；压实过程数据的采集与显示时间戳同步误差小于50毫秒。

c) 平台调试应验证其核心功能模块，包括：多源数据融合展示、施工过程可视化、质量与进度统计分析、智能预警信息生成与推送等。功能验证需达到：能够同时接入并稳定处理不少于10台智能设备的高频数据流；压实质量云图渲染更新周期不大于30秒，且能正确按色阶（如红、黄、绿）显示压实状态；统计报表的自动计算准确率达到100%；预设的各类预警规则的触发准确率不低于99%。

#### d) 完成现场各类控制终端

的配置与调试，确保各岗位人员能按其权限正常访问平台功能，接收指令与报警信息。终端性能要求包括：机载与移动终端在户外强光环境下屏幕亮度不低于800  $cd/m^2$ ，可视角不低于120度；关键报警信息在终端界面弹出并伴有声光提示的延迟小于1秒；监控大屏拼接单元间的亮度差异应小于10%。

中心数据平台与现场终端的系统联调宜按流程进行，一般流程如图5所示。

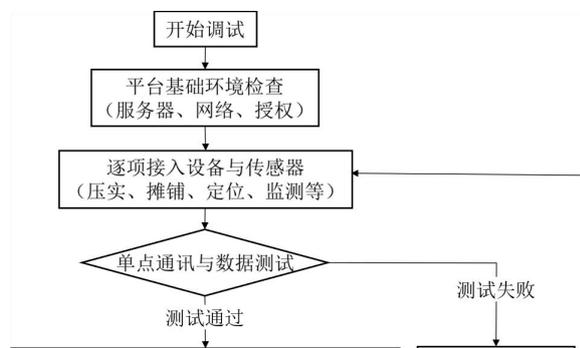


图5 中心数据平台与现场终端调试流程示意图

### 5.2.6 通信网络保障

a) 应在施工前对作业区域的无线通信网络信号进行测试与评估，确保其覆盖范围、信号强度及网络带宽能满足所有智能设备数据实时、稳定传输的要求。测试结果应满足：作业面及主要运输路线的无线信号覆盖率（RSRP > -105 dBm）应达到100%；在典型数据并发情况下

，网络上行带宽应不低于50Mbps，下行带宽不低于20Mbps；网络端到端数据传输延迟应不大于500ms，在忙时平均丢包率应不大于0.5%。

b) 对于网络信号覆盖不足（RSRP ≤ -110 dBm）或干扰较强（信噪比SNR < 10dB）的区域，应采取架设专用基站、部署信号放大器或使用有线网络延伸等有效措施予以增强和保障。经增强后，该区域的无线信号强度（RSRP）应提升至-105 dBm以上，关键数据传输的可靠性（数据包成功投递率）应不低于99.9%。

c) 应制定网络通信中断的应急预案。预案中需明确，当网络中断超过5分钟时，应启动应急通信模式。智能设备及数据采集终端应具备在断网期间的本地数据缓存能力，缓存容量应能确存储不少于72小时的全量原始数据。在网络恢复后，系统应能自动启动数据续传，并在24小时内完成中断期间的数据同步，数据续传的成功率应达到100%，且数据时序完整，无丢失或错乱。

## 5.3 材料准备

### 5.3.1 填料进场检验与溯源

a) 填料进场时，应采用智能化手段进行快速检验。宜配置在线级配分析仪（关键筛孔通过率检测误差应不大于 $\pm 2\%$ ）、含水率快速测定仪（测量误差应不大于 $\pm 0.5\%$ ）等设备，关键指标数据应自动采集并在30秒内上传至管理平台，数据上传成功率达到99.9%。

b) 每批填料应配备唯一的电子标识，标识信息应至少包含料源编号、材料类别、开采时间、承运车辆、进场时间等，编码容量应不小于1KB，现场扫码识别成功率应大于99%。

c) 所有检验结果（包括传统试验报告）均需数字化，并与该批填料的电子标识绑定，形成完整的数字化质量档案，确保从料源到作业面的全过程溯源信息可查，任何环节的数据缺失率应为0%。

### 5.3.2 堆场数字化管理

a) 填料堆场应进行数字化分区规划与管理。宜采用BIM技术或数字地图建立堆场三维模型，其模型地面分辨率应不低于0.1m，对不同种类、规格、检验状态的填料进行分区编码和可视化展示，分区边界定位精度应不低于 $\pm 0.5\text{m}$ 。

b) 堆场各分区应部署定位与监控设施。取料设备宜加装定位终端（定位精度不低于 $\pm 0.3\text{m}$ ），其取料位置、方量（计量误差 $\leq \pm 3\%$ ）、时间及所取填料对应的批次信息应自动记录并在作业完成后1分钟内上传至平台。

c) 通过堆场数字化模型与实时数据，平台应能动态显示各分区填料的库存量（显示误差小于2%）、质量状态及历史存取记录，实现堆场存料的精准、高效管理，库存盘点与系统数据的一致性应达到98%以上。

### 5.3.3 填料供应调度

a) 填筑施工的填料需求计划宜通过施工管理平台发布，需求计划的精度应达到每作业单元填料方量误差不超过 $\pm 5\%$ 。

b) 智能调度系统应根据实时施工进度、作业面需求、堆场库存及分布情况，结合运输车辆状态，自动或辅助生成最优的取料、运输指令。系统响应时间（从需求发布到指令生成）应小于2分钟，从指令下达达到车辆开始执行的响应时间应小于5分钟，实现填料供应的准时化、精准化配送。

## 5.4 人员与组织

### 5.4.1 岗位设置与职责

实施智能化填筑施工，应根据技术体系与管理需求，设置相应的专业技术与管理岗位，明确其职责。核心岗位设置及主要职责宜符合表1的规定。

表 1 智能化填筑施工核心岗位设置与职责

岗位名称	主要职责
智能施工技术负责人	1. 全面负责智能化施工技术管理与协调；

	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. 审批智能化施工方案，监督其执行；</li> <li>3. 组织解决智能化施工过程中的重大技术问题；</li> <li>4. 负责智能施工数据的最终审核与质量评价。</li> </ol>
智能设备系统操作员	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 负责智能压实、摊铺等设备的日常操作与监控；</li> <li>2. 依据指令或导航路径，操作设备完成指定作业任务；</li> <li>3. 监控设备运行状态及智能系统报警信息，并进行初步处置；</li> <li>4. 负责作业数据的现场核对与初步确认。</li> </ol>
数据分析与监控员	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 负责中心监控平台的日常运行与监控；</li> <li>2. 实时分析施工过程数据（压实指标、轨迹、含水率等），识别异常趋势；</li> <li>3. 生成并发布过程质量报告与预警信息；</li> <li>4. 对施工数据进行初步整理与分析，为决策提供支持。</li> </ol>
智能设备保障员	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 负责所有智能设备、传感器及通讯终端的日常维护、保养与校准；</li> <li>2. 及时排除设备及系统的现场常见故障；</li> <li>3. 管理设备备品备件，记录维护保养档案；</li> <li>4. 配合进行设备智能化功能的测试与升级。</li> </ol>

#### 5.4.2 人员培训与考核

##### a) 培训要求

所有参与智能化填筑施工的关键岗位人员，在上岗前应接受针对性的专项培训，并经考核合格。培训内容应理论与实践相结合，主要包括：

- 1) 理论与理念培训：智能化填筑技术原理、施工流程、相对于传统施工的优势与特点。
- 2) 设备操作技能培训：智能压实、摊铺等设备的操作界面、功能按键、导航模式、参数设置、报警识别与应急处置。
- 3) 系统应用培训：中心监控平台及现场终端的使用方法，包括数据查询、报表查看、预警信息处理等。
- 4) 数据认知培训：理解关键施工数据的物理意义、正常范围及数据质量的重要性。
- 5) 安全专项培训：智能化施工环境下的特定安全风险、设备安全操作规程、人机协同作业安全规范及应急预案。

##### b) 培训实施与考核

人员培训与考核工作应有计划、有记录、可追溯，其基本流程如图8所示。

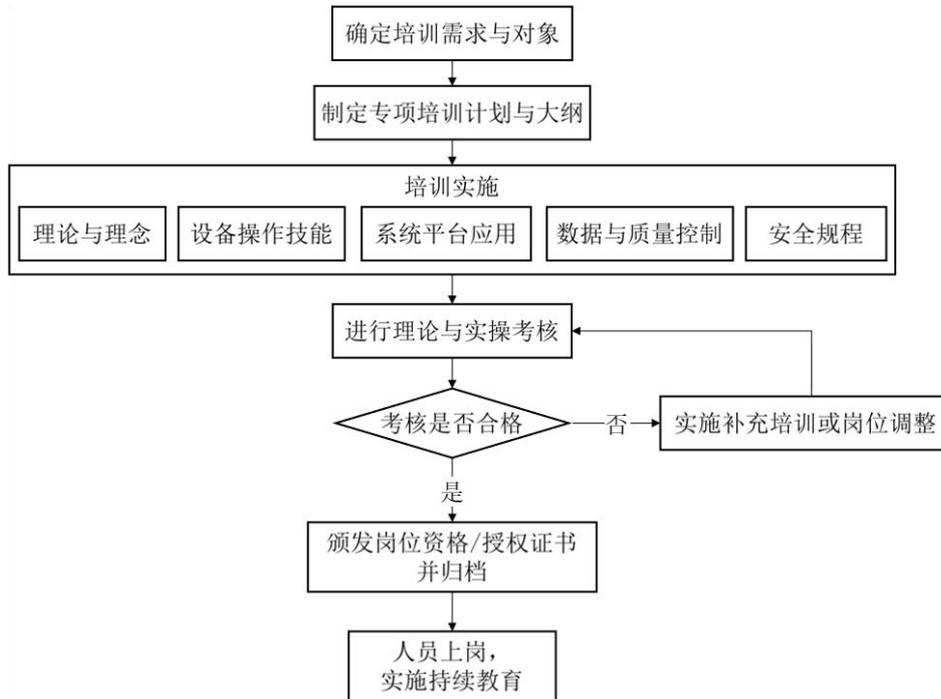


图6 人员培训与考核流程示意图

## 6 智能化填筑施工过程控制

### 6.1 基底处理与验收

#### 6.1.1 基底数字化检测与数据录入

基底处理完成并经验收合格后，应进行数字化检测，并将检测数据录入智能施工管理系统，作为填筑施工的数字化基准，其标准工作流程如图 7 所示。

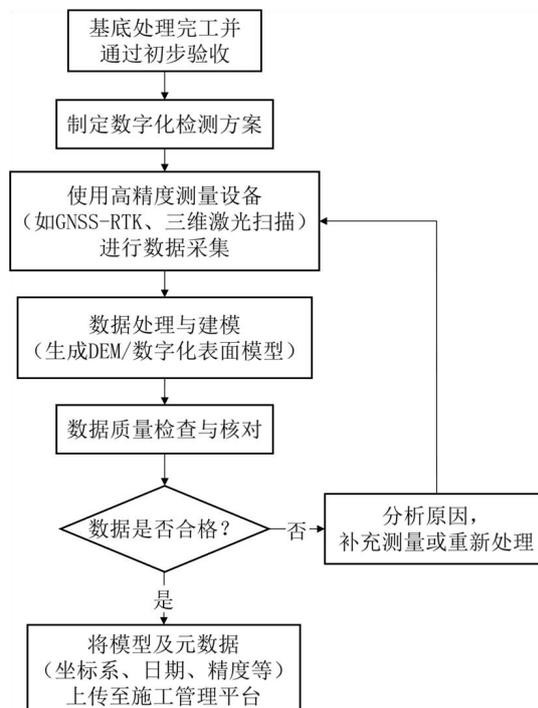


图7 基底数字化检测与数据录入工作流程示意图

a) 数字化检测要求

1) 应采用高精度测量手段对处理后的基底表面进行测量。采用 GNSS-RTK 技术时，测量点平面间距应不大于 2m，其定位精度应满足：平面 $\leq\pm 1\text{cm}$ ，高程 $\leq\pm 2\text{cm}$ 。采用三维激光扫描时，点云密度应不低于 200 点/  $\text{m}^2$ 。

2) 测量成果应能生成反映基底表面高程、平整度及几何边界情况的数字高程模型（DEM）或等精度数字化成果。所生成的 DEM 网格分辨率应不粗于  $0.1\text{m}\times 0.1\text{m}$ ，高程精度（均方根误差）应 $\leq\pm 2\text{cm}$ ，并能用于计算基底表面的平整度。

3) 测量范围应覆盖整个填筑作业区域，并向路基两侧坡脚线或设计边线外缘至少延伸 2m，以确保完整捕捉作业边界。

b) 数据录入与管理

1) 基底数字化检测获得的数据（包括原始点云或网格化模型）应在检测完成后 12 小时内，作为独立的数据层（命名为“00\_基底”或类似）上传至智能填筑监控与管理平台。数据上传格式应为通用格式，并确保 100%上传成功。

2) 录入平台的基底数据必须包含完整的元数据信息，至少包括：检测日期与时间、检测单位、检测人员签名、采用的坐标系和高程基准、数据精度说明（包含测量方法及达到的精度指标）。所有元数据信息应准确无误，准确率要求 100%。

3) 经监理工程师审核确认后的基底数字化模型，应被平台锁定为不可更改的基准面。此基准面将作为后续所有填筑层厚度控制（误差计算基准）、工程量计算（土方量起始面）及施工过程对比分析的唯一依据。审核应在数据上传后 24 小时内完成。

## 6.2 填料运输与调度

### 6.2.1 基于物联网和 GNSS 的运输车辆智能调度

基于物联网和 GNSS 的运输车辆智能调度是实现填料准时化供应、提升整体施工协同效率的关键，其核心流程如图 8 所示，形成“感知，决策，执行，反馈”的闭环。在此闭环中，从车辆状态感知

到新指令生成下发的单次循环时间应控制在 5 分钟以内，以确保调度的及时性与动态适应性。

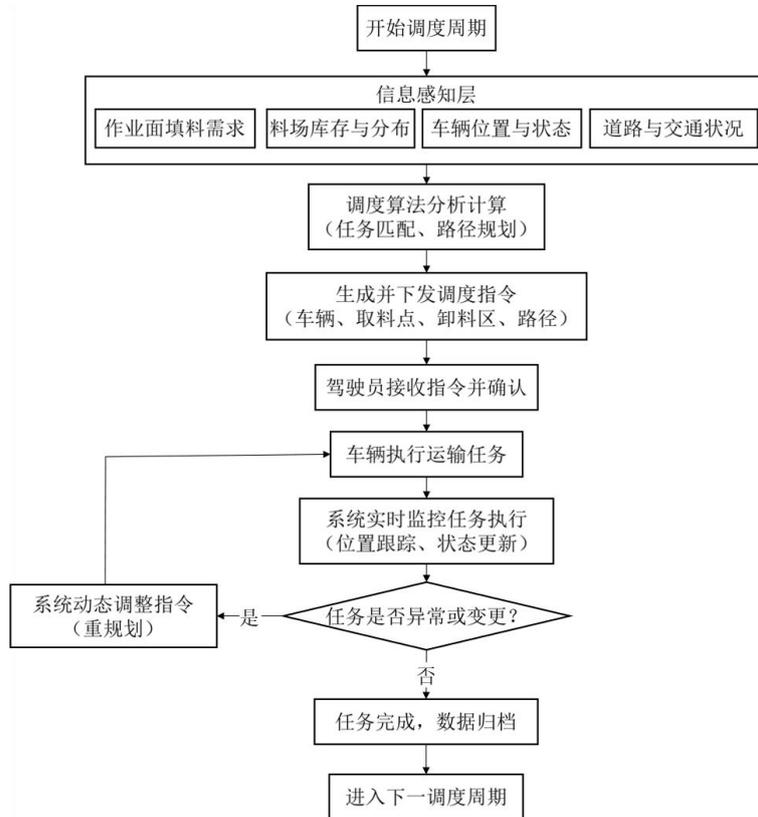


图 8 运输车辆智能调度核心流程示意图

a) 填料运输应依托物联网 (IoT) 与卫星导航定位技术，构建包含车辆、调度中心与施工现场的智能调度系统。该系统应具备的并发处理能力，能同时调度管理不少于 20 台运输车辆，生成全局优化调度指令的响应时间应小于 2 分钟，平台数据 (车辆位置、状态) 刷新显示间隔不大于 10 秒。

b) 参与运输的车辆应安装具备定位、状态感知与数据通信功能的智能终端，实时向调度系统上报位置、速度、载重状态 (空载/重载) 及车辆状况等信息。终端定位精度应不低于 5m，数据上报至调度中心的延迟应不大于 5 秒；空载/重载状态识别的准确率应不低于 95%；车辆关键状况的识别与上报应在故障发生 5 分钟内完成。

c) 智能调度系统应基于以下要素进行决策与调度，并达到相应的性能指标：

1) 实时施工进度与各作业面填料需求：系统对接施工管理平台，获取的作业面填料需求方量精度误差应不大于 5%。

2) 料场库存、填料种类与分布：系统整合的料场数字化库存数据，其方量误差应小于 3%。

3) 运输车辆实时位置、状态及路网交通状况：系统融合实时路况信息，对主要运输道路的平均车速评估误差应不大于 10%。

d) 系统应能自动或辅助生成最优的运输任务指令，包括取料点 (坐标精度 $\pm 5\text{m}$ )、卸料区 (网格

标识准确率 100%)、推荐路径(符合车辆限行、载重要求)等,并在 30 秒内下发至指定车辆的车载终端。调度决策应使车辆整体满载率(重载行驶里程/总行驶里程)优化至不低于 75%,并遵循效率优先、均衡负载的原则。

### 6.2.2 卸料位置与方量智能引导

a) 运输车辆抵达作业区域后,应接受卸料引导。引导信息可通过车载终端或现场辅助设备提供。引导信息的推送应在车辆进入作业区边界后 30 秒内完成;车载终端或现场显示屏的信息刷新延迟应小于 2 秒。

b) 智能调度系统或现场管理终端应根据当前填筑作业面的具体施工状况,为车辆指定精确的卸料点位,引导车辆就位。指定的卸料点位精度应满足:其坐标与实际允许卸料区域中心点的平面偏差不大于±2m。车辆从接收到引导信息到完成就位准备卸料的时间,宜控制在 2 分钟以内。

c) 卸料方量应进行智能控制或记录,并达到以下要求:

1) 宜在车辆上安装称重传感设备,实现载重方量的自动计量与记录。该系统的计量精度应不低于国家Ⅲ级标准(误差≤±1%),且每车次净重数据应在卸料动作开始后 5 秒内自动生成。

2) 卸料时,系统应自动关联并记录该车次所对应的填料电子批次标识、精确至 1m 的卸料位置坐标(经纬度)及实际卸料方量(m³)信息。该条记录必须在卸料完成后 1 分钟内上传至管理平台,并自动与该作业单元的填筑施工过程数据进行空间与时间关联,实现单批次填料从料源到最终压实层位的全链条精准追溯,数据关联准确率应达到 100%。

## 6.3 摊铺作业

### 6.3.1 智能摊铺机作业控制

智能摊铺机的自动化作业是一个“数据驱动,实时控制,效果验证”的闭环过程,其核心作业与控制流程如图 9 所示,确保摊铺精度与设计意图的一致性。

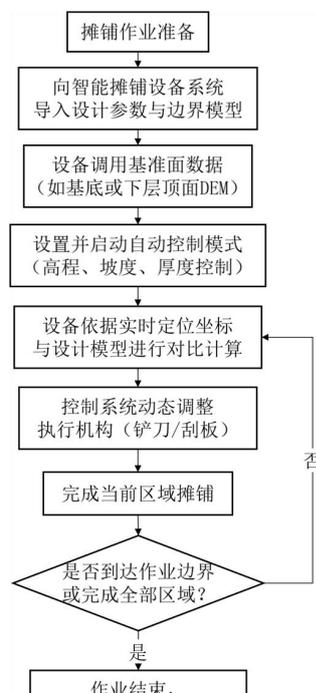


图 9 智能摊铺机作业控制流程示意图

a) 摊铺作业应采用具备智能控制功能的设备进行。作业前，应将经批准的摊铺层设计参数（高程、横坡、纵坡、厚度）与几何边界数字化模型导入设备控制系统。设计参数导入的准确率应达到 100%，数字化模型与现场实际位置的平面配准误差应不大于 2cm。

b) 智能摊铺设备应基于高精度定位导航系统（通常为 GNSS-RTK，其平面定位精度 $\leq\pm 1\text{cm}$ ，高程精度 $\leq\pm 2\text{cm}$ ），实现对推土铲或刮刀高程、坡度的自动闭环控制。控制系统的响应时间（从检测到偏差到执行机构开始动作）应不大于 0.5 秒，稳态控制精度应满足：摊铺厚度误差不大于 $\pm 3\text{cm}$ （对于推土机）或 $\pm 1\text{cm}$ （对于平地机）；横坡、纵坡误差均不大于 $\pm 0.3\%$ 。

c) 摊铺作业过程中，操作人员应通过机载监控终端（屏幕刷新率不低于 10Hz）实时监督自动控制系统的运行状态与作业效果。在特殊情况下，可进行必要的人工干预，干预模式切换响应时间应小于 2 秒。

d) 单层摊铺作业完成后，宜采用快速测量手段对摊铺面的平均厚度、平整度等关键指标进行抽检验证。抽检面积覆盖率应不低于 10%，验证结果应满足：平均厚度与设计值的偏差在 $\pm 2\text{cm}$  以内，平整度标准差（4m 直尺法）不大于 5mm。确保其满足后续压实作业的工艺要求。

### 6.3.2 摊铺过程质量数据实时采集

a) 智能摊铺设备在作业过程中，应实时采集并记录与摊铺质量直接相关的过程数据。这些数据应至少包括：

1) 摊铺设备的实时平面位置与高程。其定位数据应来源于高精度 GNSS-RTK 系统，采集频率不低于 10Hz，平面定位精度 $\leq\pm 1\text{cm}$ ，高程精度 $\leq\pm 2\text{cm}$ 。

2) 摊铺厚度。可通过实时定位高程与已知基准面高程差计算，或通过专用非接触式厚度传感器测量。无论何种方式，其厚度值的计算或测量误差应不大于 $\pm 1\text{cm}$ ，采集频率不低于 5Hz。

3) 摊铺面的实时坡度（横坡与纵坡）。坡度值应通过设备内置的高精度倾角传感器（精度不低于 $\pm 0.01^\circ$ ）或基于多点定位数据实时解算获得，其值显示精度应达 0.1%，采集频率不低于 5Hz。

4) 设备运行速度、时间戳及设备状态码。运行速度测量误差应不大于 $\pm 0.2\text{km/h}$ ；时间戳应同步至 UTC 时间，与标准时间的误差不超过 50 毫秒；设备状态码应能准确反映设备工作模式（自动/手动）、

报警状态等信息。

b) 采集的频率与精度应满足对摊铺质量进行过程追溯与分析的要求。所有过程数据必须保证在时间上连续，在施工全程（包含起停、转向）的数据缺失率应低于 0.5%。数据精度应能支持在平台上重建厘米级的摊铺作业轨迹与毫米级的厚度变化趋势。

c) 摊铺过程数据应与该作业面的空间位置信息严格绑定，以不低于 2Hz 的频率实时或准实时上传至施工管理平台。数据绑定的空间误差应不大于 10cm。平台应对接收的数据进行实时处理，形成摊铺作业的完整、连续的数字化记录。此记录作为评估摊铺均匀性、精确计算工程量（精度应优于 3%）和进行质量问题追溯的基础，其数据应支持按时间、按位置等多种维度的快速检索与回放。

## 6.4 碾压压实作业

### 6.4.1 智能压实设备作业模式选择

a) 作业前，应根据填料类型、设计压实标准及经审批的试验段成果，在压实设备控制系统或中心平台中预设初始的压实工艺参数，并满足以下施工要求与数值规定：

1) 所依据的试验段成果，其建立的智能压实指标与传统压实度（K 值）相关性模型的相关系数  $R^2$  应不低于 0.80。

2) 预设参数必须具体化。对于 A 组砂砾土，初始参数可预设为：振动模式为连续振动；振动频率  $32 \pm 2$  Hz；振幅  $1.8 \pm 0.2$  mm；激振力  $200 \pm 20$  kN；行进速度范围 3.5-4.5 km/h。所有参数均应根据填料分区在系统中明确设置。

3) 设备正式作业前，操作员需调用并确认预设参数组，系统应能验证参数调用的准确性，误差不超过预设值的  $\pm 5\%$ 。

b) 智能压实设备应具备根据实时反馈的压实状态动态微调作业参数的功能，其调整逻辑与性能需满足以下施工要求与数值规定：

1) 动态调整的触发条件应量化。当系统检测到当前碾压遍数下，CMV 值连续 10m 的平均增长率低于 1%时，可判定为“压实反应微弱”，并自动触发激振强度提升程序。

2) 参数调整的幅度应有预设限制。激振力的提升幅度单次不宜超过初始值的 15%，以防止过度压实或破坏填料结构；振动频率的调整步长应不大于 2 Hz。

3) 当实时检测的 CMV 值达到目标值的 95%以上，且连续碾压 5m 内增长不超过 0.5%时，系统应能自动降低激振强度至维持状态或切换至静压模式，以防止过压。

4) 从系统识别到需调整的状态，到完成参数调整并稳定输出的响应时间，应不大于 2 秒。此动态调整过程应有详细日志记录，包括时间、位置、调整前参数、调整后参数及触发原因。

### 6.4.2 基于 GNSS 的碾压轨迹智能规划与无人驾驶/辅助驾驶控制

a) 碾压作业前，应在施工管理平台中基于作业面的几何形状，规划出高效、全覆盖的初始碾压路

径。路径规划应满足以下施工要求与数值规定：

1) 规划的路径应确保相邻轮迹带间的重叠带宽不小于 20cm，以消除漏压带。直线段路径的曲率变化应小于  $0.1 \text{ m}^{-1}$ ，以减少设备的频繁转向。

2) 规划的路径应进行覆盖率和效率优化，使单遍碾压对作业面的理论覆盖率达到 100%，且设备空驶（非有效碾压）路程占总规划路径的比例应小于 15%。

3) 对于规则矩形区域，宜采用“弓字形”路径；对于不规则区域，应采用分段直线或符合边界形状的平滑曲线路径，最小转弯半径应满足所用压路机的最小转向半径要求，通常不小于 5m。

b) 规划好的碾压路径应可下发至具备辅助驾驶或无人驾驶功能的智能压路机。设备执行过程应满足以下施工要求与数值规定：

1) 设备应能依据接收的路径信息，结合实时高精度 GNSS 定位（平面精度 $\leq\pm 2\text{cm}$ ，高程精度 $\leq\pm 3\text{cm}$ ）和惯性测量单元（IMU）数据，实现自动导航。

2) 在自动模式下，设备实际行驶轨迹与规划路径的横向跟踪偏差应不大于 $\pm 5\text{cm}$ ，航向角偏差应不大于 $\pm 1^\circ$ 。

3) 行进速度应能按规划要求自动控制，速度控制误差不大于 $\pm 0.3 \text{ km/h}$ 。从平台下发路径到设备开始自动执行的第一条指令，响应时间应小于 30 秒。

c) 在无人驾驶或辅助驾驶模式下，设备必须同时启用环境感知系统，并满足以下施工要求与数值规定以确保作业安全：

1) 环境感知系统应能在设备前方不小于 10m 的范围内，有效识别直径大于 20cm 的静态障碍物和移动速度小于 5km/h 的动态目标，识别准确率不低于 99%。

2) 系统应具备动态避障或紧急停车功能。当检测到障碍物进入预设的预警区域时，应发出声光警报；当障碍物进入危险区域时，系统应能自动触发紧急制动，从识别到停车的全系统响应时间应小于 0.5 秒。

3) 紧急制动后，设备应能保持稳定，并自动向监控平台发送警报信息和现场图像。障碍物清除并经操作员确认后，设备方可恢复自动作业。

基于 GNSS 的智能轨迹规划与控制是实现高效、均匀压实和保障无人化作业安全的核心，其规划与执行的闭环流程体现了从数字指令到物理执行的精准映射，如图 10 所示。

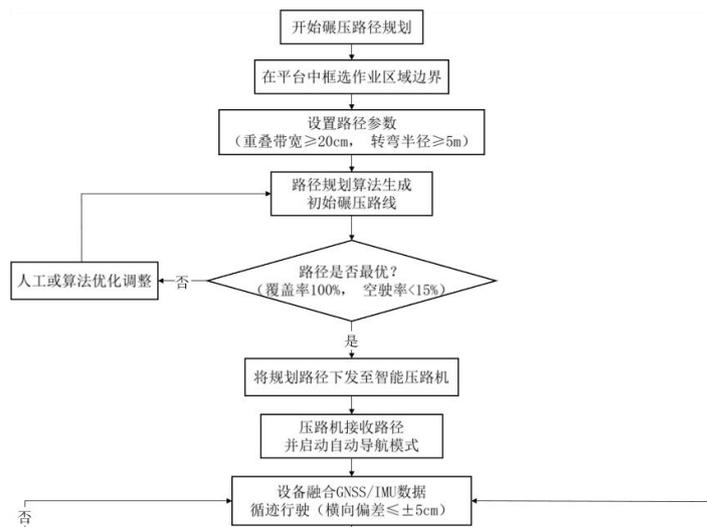


图 10 碾压轨迹智能规划与自动控制闭环流程示意图

#### 6.4.3 压实过程实时监控指标

a) 压实作业过程中，智能压实系统应实时采集、记录并上传以下关键过程监控指标，且其性能需满足：

1) 空间定位数据：碾压轮迹的实时平面坐标与高程。数据应来源于高精度 GNSS-RTK 定位系统，采集频率应不低于 10Hz，其定位精度须达到平面 $\leq\pm 2\text{cm}$ ，高程 $\leq\pm 3\text{cm}$ （95%置信度）。

2) 工艺参数：压路机实时的振动状态（开/关）、振动频率（测量误差不大于 $\pm 0.5\text{ Hz}$ ）、振幅（测量误差不大于 $\pm 0.2\text{ mm}$ ）、激振力（测量误差不大于 $\pm 5\%$ ）及行进速度（测量误差不大于 $\pm 0.2\text{ km/h}$ ）。这些参数的采集频率应不低于 20Hz。

3) 压实效果指标：连续压实检测系统实时计算输出的压实度估值，如压实计值（CMV）、振荡计值（OMV）等。该指标的输出频率应不低于 20Hz，其值在有效量程内的测量误差应不大于 $\pm 5\%$ 。

4) 碾压遍数：系统应以  $1\text{m}\times 1\text{m}$  的网格为基本单元，自动统计并记录每个网格单元的碾压遍数。统计准确率应达到 100%，且能实时显示与更新。

b) 所有监控指标的采集频率与数据质量应满足对压实过程进行精细化分析与追溯的要求。全过程的数据缺失率（按时间计）应低于 0.5%。各类数据的时间戳必须严格同步，与标准时间的误差应小于 50 毫秒，以确保不同数据流在时间维度上能够精确对齐，支持以厘米级精度重建碾压作业全过程，并用于压实均匀性、工艺有效性的深度分析。

#### 6.4.4 压实质量实时可视化地图生成与应用

a) 中心监控平台应利用实时上传的压实过程数据，动态生成作业面的压实质量可视化地图，即“压

实度云图”。平台从接收最新一批数据到完成云图渲染更新的时间间隔应不大于 30 秒，以确保显示的实时性。生成的云图其空间分辨率应不低于  $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$ 。

b)“压实度云图”应采用色谱直观表达不同位置的压实度估值水平，其颜色与压实状态的对应关系应明确、统一。例如：当某点 CMV 值低于预设目标值的 90%时，显示为红色（未达标区）；当 CMV 值处于目标值的 90%至 110%之间时，显示为绿色（合格区）；当 CMV 值高于目标值的 110%时，显示为紫色（过压风险区）。云图必须与作业面的真实空间位置严格对应，其地图配准误差应不大于 10cm，并应支持分层显示、自由缩放（比例尺从 1:100 至 1:1000）及区域属性查询等交互操作。

c)“压实度云图”应作为现场施工管理的主要可视化工具，其应用应达到以下具体指标要求：

- 1) 用于实时宏观掌握整个作业面的压实质量分布与均匀性。现场技术人员和质量员应能通过云图，在 30 秒内识别出全场大致的压实合格率（绿色区域占比）和主要缺陷区域的分布。
- 2) 用于快速识别碾压薄弱区、漏压区及可能存在的过压区。系统应能自动标识出连续面积大于  $10\text{m}^2$  的红色或紫色区域，并将其边界以闪烁或其他高亮方式显示。从云图上发现此类区域到现场人员做出初步判断的时间应不超过 2 分钟。
- 3) 用于直观展示碾压遍数的覆盖情况。平台应能提供“碾压遍数分布图”的叠加图层功能，以不同颜色或数字直观显示每个  $1\text{m}\times 1\text{m}$  网格的已碾压遍数，使漏压（遍数为 0）或碾压不足（遍数未达最小值）的区域一目了然。该图层显示的遍数统计准确率应达到 100%。

#### 6.4.5 基于实时反馈数据的压实工艺参数动态优化与补压指令自动生成

a) 中心监控平台应基于实时“压实度云图”和碾压遍数信息，运用预设的量化判定规则，自动识别压实质量不合格区域。判定规则应至少包括：

- 1) 欠压区域：当某  $1\text{m}\times 1\text{m}$  网格单元的平均 CMV 值持续（连续 3 次采样）低于预设目标值的 90%，且该单元累计碾压遍数已达到或超过设计最小遍数时，应被自动标记为“欠压区”。
- 2) 过压风险区：当某  $1\text{m}\times 1\text{m}$  网格单元的平均 CMV 值持续高于预设目标值的 110%时，应被自动标记为“过压风险区”。
- 3) 漏压或均匀性不足区域：在碾压遍数分布图上，对任何碾压遍数为 0 或低于设计最小遍数 50% 的连续区域（面积大于  $5\text{m}^2$ ），应被自动识别。

平台完成一轮数据扫描分析并更新识别结果的周期应不大于 1 分钟，识别准确率（与后续传统检测验证结果对比）应不低于 95%。

b) 对于识别出的欠压或均匀性不足区域，平台应能自动生成包含具体空间范围的补压指令。该指令应满足以下要求：

- 1) 指令必须包含明确的、由坐标点序列定义的多边形作业边界，边界点坐标精度与定位精度一致（平面 $\pm 2\text{cm}$ ）。
- 2) 指令应给出具体的作业建议。

3) 指令可直接通过通信网络下发至无人驾驶压路机的控制系统，从指令生成到设备开始执行的端到端延迟应小于 30 秒。

4) 对于人工驾驶模式，指令应实时推送至操作员的移动或机载终端，并以醒目的图形和导航引导线形式显示，引导误差不大于 0.5m。

c) 系统宜具备初步的自学习与优化能力，其性能目标应满足：

1) 能根据历史施工数据（至少积累 10 层以上、覆盖不同填料和含水率条件的完整数据）进行离线分析，建立“工况（填料、含水率），工艺参数，压实效果”的关联模型。

2) 当在新的类似工况下施工时，系统能基于该模型，为当前作业区域推荐一组最优的压实工艺参数，推荐参数在现场应用的验证通过率应不低于 90%。

3) 系统应能记录每次参数调整（包括自动和人工调整）及其效果，用于持续迭代和优化推荐模型，模型的有效性评估应每季度进行一次。

## 6.5 含水量智能控制

### 6.5.1 填料含水量实时监测

a) 宜在作业区关键位置部署在线含水率监测设备，或在智能压实设备上集成含水率传感器，实现对填料含水率的连续或高频次测量。在线传感器的测量频率应不低于 1 次/分钟，在填料最优含水率 $\pm 3\%$ 范围内的测量绝对误差应不大于 $\pm 0.5\%$ 。

b) 含水率监测数据应实时或准实时上传至施工管理平台，数据从采集到平台入库的端到端延迟应小于 2 秒，传输成功率不低于 99.9%。平台应对数据进行处理，生成作业面含水率分布图（空间分辨率不低于  $2\text{m}\times 2\text{m}$ ）或时间趋势曲线，并进行可视化展示。

c) 应根据填料类型及试验段确定的施工工艺，在平台中设定填料含水率的最优控制范围及允许偏差阈值。

### 6.5.2 自动/半自动洒水系统的联动控制

a) 当实时监测的含水率低于最优控制范围下限时，智能控制系统应能自动触发一级预警。当含水率低于允许偏差下限时，系统应自动或经人工确认后，生成洒水作业指令。从数据判定到指令生成的时间应小于 1 分钟。

b) 洒水作业指令应包含建议的洒水区域（由坐标边界定义）、理论补水量（ $\text{m}^3$ ）等信息。具备条件时，宜采用配备智能流量控制与高精度定位导航系统的洒水车，实现基于指令的定量、定点洒水，流量控制误差应不大于 $\pm 5\%$ ，喷洒位置误差不大于 $\pm 0.5\text{m}$ 。

c) 当实时监测的含水率高于最优控制范围上限时，系统应触发一级预警。当含水率高于允许偏差上限时，系统应触发二级预警，提示暂停压实，并建议采取翻晒、晾晒等处理措施。处理后，须经复测确认含水率回落至控制范围内，方可继续施工。

## 6.6 层间处理与检验

### 6.6.1 智能化层厚与平整度检测

a) 单层填筑压实完成后，应采用高精度测量技术对该层顶面进行数字化检测，获取其三维空间数据。检测要求如下：

1) 采用 GNSS-RTK 网格测量时，测点平面间距应不大于 5m，且应确保作业面边界及转折处均有测点控制。测量精度须满足：平面点位中误差 $\leq\pm 2\text{cm}$ ，高程中误差 $\leq\pm 3\text{cm}$ 。

2) 采用三维激光扫描时，点云密度应不低于 200 点/ $\text{m}^2$ ，点云平面定位精度应 $\leq\pm 3\text{cm}$ ，高程精度应 $\leq\pm 2\text{cm}$ 。

3) 检测范围应完全覆盖该填筑层，并向边坡坡脚等结构线外侧延伸至少 1m，形成完整的顶面数字化模型。

b) 基于检测数据，应通过计算生成该填筑层的量化质量指标：

1) 实际平均厚度：通过计算检测点高程与下层（或基底）对应点设计高程之差获得。计算得到的全作业面平均厚度，其与设计层厚的偏差应作为核心评价指标。

2) 厚度分布图：应生成以不同颜色代表不同厚度区间的可视化分布图，网格分辨率不粗于  $1\text{m}\times 1\text{m}$ 。系统应自动统计厚度合格（在设计值 $\pm 3\text{cm}$  范围内）区域的面积及占比（合格率）。

3) 表面平整度指标：应基于检测数据计算标准平整度参数，包括：每 4m 直尺范围内的最大间隙（应不大于 15mm），以及全作业面高程数据的标准差（应不大于 5mm）。

c) 层厚检测结果应与设计值进行比对分析，其合格标准为：检测点平均厚度与设计层厚的偏差应在 $\pm 2\text{cm}$  以内，且单点厚度合格率不低于 95%。平整度检测结果应满足后续层施工的工艺要求，即最大间隙与标准差均需满足本条第 b) 款第 3) 项的数值规定，否则需进行局部修整。

### 6.6.2 数字化层间验收流程与数据归档

a) 层间检验（包括层厚、平整度、整体外观等）合格后，应在 4 小时内启动数字化层间验收流程。验收结论及相关检测数据应在施工管理平台中记录，并履行在线确认程序。监理工程师应在所有检验数据上传平台后 24 小时内完成在线审核，并使用个人电子签章进行签认。数字化验收记录必须完整，不得缺失任何关键检验数据，数据审核准确率要求达到 100%。

b) 经确认的该层顶面数字化模型，应在签认完成后 1 小时内，由平台自动作为下一填筑层施工的基准面数据，推送并更新至所有相关的智能施工设备及测量管理系统中。基准面数据更新的成功率和准确性需达到 100%，以确保后续施工的空间基准统一。

c) 本层施工相关的所有过程数据（运输、摊铺、碾压、含水率等，数据采集频率符合各工序规定）、质量检验数据（层厚、平整度报告）及数字化验收结论，应在该层验收签认后 24 小时内，由平台自动与该层的唯一空间标识信息和时间戳进行关联，打包形成完整的、不可篡改的单层施工数字化档案。档

案数据包的总容量（通常每层每 1000 m<sup>2</sup> 不低于 1GB）和索引信息需准确无误。该档案应采用区块链技术进行哈希值存证，并完成归档，归档后数据的完整性校验通过率必须为 100%，确保实现质量全过程的精准、可靠追溯。归档数据的存储格式应标准化，原始数据宜采用 SQLite 或专用工程数据库格式，分析报告采用 PDF/A 格式，模型数据采用开放格式，并规定自工程竣工之日起，数据保存期限不少于 10 年。

## 7 施工质量检验与评估

### 7.1 过程检测

#### 7.1.1 基于实时监控数据的施工过程符合性动态评价

a) 施工过程中，应利用智能压实系统、高精度定位系统及含水率监测系统采集的实时数据，对填筑施工的符合性进行连续、动态的评价。评价应覆盖以下关键过程，并达到相应的量化指标：

1) 压实质量符合性：基于实时“压实度云图”，系统应动态计算当前作业面的压实合格率（CMV 值处于目标值±5%范围内的面积占比）。单层填筑过程中，此合格率应不低于 90%；单层碾压作业结束时，此合格率应达到 95%以上。

2) 碾压工艺符合性：系统应实时监控并评价碾压遍数与轨迹的符合性。评价标准为：以 1m×1m 网格为单位，达到设计最小碾压遍数的网格比例应不低于 98%；相邻轮迹带的重叠宽度不小于 20cm 的比例应达到 100%。

3) 含水率控制符合性：系统应实时评价填料含水率与最优控制范围的符合性。施工过程中，作业面内测点含水率处于最优值±2%范围内的比例应不低于 85%。

b) 动态评价应每 10 分钟自动进行一次，并生成简明的过程符合性报告。报告应至少包含上述三项指标的实时数值、变化趋势及与预设阈值的对比。当任何一项指标连续两次评价结果低于其对应合格标准的 90%时，系统应自动触发过程预警。

c) 动态评价所依据的实时数据，其空间覆盖率（指数据覆盖的作业面积占总面积的百分比）应不低于 95%，数据时间戳的时效性（指数据从采集到用于评价的延迟）应小于 2 分钟，以确保评价结果的代表性和实时性。

### 7.2 竣工检验

#### 7.2.1 传统点式检验与智能化面状检验的融合方法

a) 路基填筑竣工检验应采用“智能化面状检验为主、传统点式检验为辅、两者相互验证”的融合方法。

b) 智能化面状检验应作为竣工验收的核心依据，其数据须满足：压实质量云图（CMV）覆盖率达

100%，且全断面平均 CMV 值达到设计目标值，变异系数（CV）不大于 10%；碾压遍数分布图显示所有区域均达到或超过设计最小碾压遍数。

c) 传统点式检验作为验证和补充，其检测频率与点位布设应符合以下要求：

1) 检测频率：每填筑层每 5000 m<sup>2</sup>检验不少于 6 点（不足 5000 m<sup>2</sup>按 6 点计）。

2) 点位布设：其中 50%的检测点应由智能化系统基于压实云图，在 CMV 值相对较低、变异较大或施工边角等代表性区域自动指定坐标；其余 50%由监理工程师随机抽取。

3) 合格标准：点式检测的压实度（K 值）必须满足设计要求，其平均值与智能化面状检验（CMV 反算压实度）平均值的相对偏差应不大于 3%。

d) 当点式检验结果与对应位置的智能化面状检验结果出现显著偏差时，应视为异常情况，需在该点位周边加密验证，并分析传感器、标定或检测方法的原因。

### 7.2.2 基于全过程数据的质量可追溯性分析

a) 竣工验收时，应利用施工管理平台，对任意选定桩号区段或空间位置，进行施工全过程数据的反向追溯分析。

b) 追溯分析应能展示该位置从基底开始，每一填筑层的完整数据链，至少包括：填料来源（批次、料场）、运输车辆与时间、摊铺厚度与坡度、碾压遍数/轨迹/CMV 值、含水率监测值、层厚与平整度检测结果、以及层间验收记录。

c) 追溯分析的数据关联准确率应达到 100%，时间序列完整，无数据断点。通过此分析，可验证施工工艺的合规性、排查质量波动的根本原因、并实现质量责任的清晰界定。

### 7.2.3 数字化竣工资料生成

a) 竣工后，必须基于施工管理平台生成完整的数字化竣工资料包。资料包应包含：

1) 核心数据库：包含所有原始过程数据（定位、压实、含水率等）、检验数据及管理日志的工程数据库，数据容量完整。

2) 可视化成果集：包括逐层的压实质量云图（GeoTIFF 格式，分辨率 0.5m）、碾压轨迹图（KMZ 格式）、三维填筑模型等。

3) 智能化施工总结报告：报告应综合分析智能化指标与传统指标的相关性、施工过程均匀性、工艺参数符合性等。

b) 所有数字化竣工资料应采用区块链技术进行哈希值存证，确保其不可篡改性。资料包需以符合档案管理要求的电子格式封装，并通过光盘、硬盘等离线介质及云端进行双备份，长期保存，保存期限自工程竣工验收之日起不少于 10 年。

传统点式检验与智能化面状检验的融合，是确保工程质量评价既全面又精准的关键，其工作流程与决策逻辑如图 11 所示。

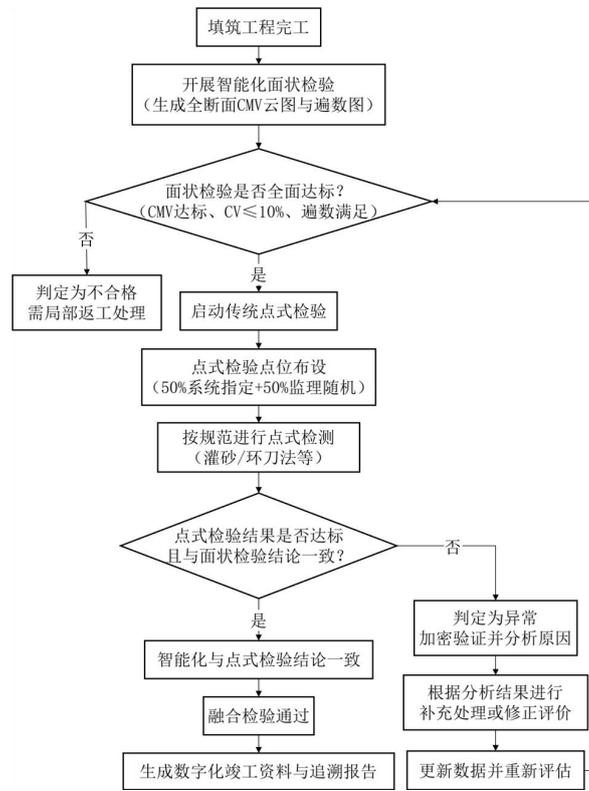


图 11 传统点式与智能化面状检验融合流程示意图

### 7.3 质量评估与决策支持

#### 7.3.1 质量大数据分析

a) 应基于施工全过程积累的海量数据（包括压实、含水率、层厚、工艺参数等），定期进行多维度、深层次的质量大数据分析，为施工决策提供量化依据。

b) 分析内容与量化指标应包括：

1) 过程稳定性评估：计算单日或单层施工中，关键质量指标的变异系数（CV）。要求单层填筑的CMV 变异系数不大于 10%，层厚变异系数不大于 8%。对 CV 连续超过阈值的区段，系统应自动识别并提示进行工艺复查。

2) 质量趋势预测：利用历史数据建立模型，对后续施工区段的潜在质量风险进行预测。模型预测的压实合格率与实际结果的偏差应控制在±5%以内。

3) 工艺参数优化分析：分析不同填料、不同含水率条件下，各工艺参数与压实效果（CMV 值、合格率）的关联关系。系统应能推荐使压实合格率稳定在 95%以上的“最优参数包”，并为后续类似工况提供参考，其推荐参数在现场验证的有效率应不低于 90%。

c) 分析报告应自动生成，关键结论与建议应以图表和量化数据形式清晰呈现。

#### 7.3.2 施工质量缺陷智能诊断与预警

- a) 系统应基于预设的专家规则库与数据分析模型，实现对常见施工质量缺陷的智能诊断与预警。
- b) 智能诊断规则应至少包括：
  - 1) 压实不均缺陷：当某区域 CMV 值合格率低于 90%，同时该区域 CMV 变异系数大于 15%时，系统应诊断为“压实均匀性不足”，可能原因包括填料不均、含水率波动或碾压轨迹重叠不良。
  - 2) 过压风险诊断：当某区域 CMV 值持续（超过 3 遍碾压）高于目标值 110%，且碾压遍数已超过设计值 2 遍以上时，系统应诊断为“过压风险”，并预警可能造成土体结构破坏。
  - 3) 含水率关联缺陷：当系统检测到某区域压实不足（CMV 低）与含水率偏离最优值在空间上高度重合时，应诊断缺陷可能与含水率控制不当有关。
- c) 预警与闭环管理：
  - 1) 预警应分为提示（监控指标临近阈值）、警告（指标超出阈值但可继续观察）和报警（指标严重超标，需立即处理）三个等级。
  - 2) 系统生成预警后，应自动推送至相关责任人，并要求在规定时间内响应或处理。
  - 3) 所有预警须在管理平台中形成闭环记录，包括缺陷诊断结论、处理措施、复检结果和处理时间，闭环率必须达到 100%。未闭环的预警信息应持续醒目提示，并禁止该区域进入下一道工序。

## 8 数据管理、系统集成与决策支持

### 8.1 数据采集与传输标准

- a) 数据采集内容、频率与精度应满足以下最低要求：
  - 1) 高精度定位数据：平面及高程坐标，采集频率 $\geq 10$  Hz，平面定位精度 $\leq \pm 1$  cm，高程精度 $\leq \pm 2$  cm (95%置信度)。
  - 2) 压实过程数据：包括压实指标值、振动频率、振幅、激振力、行进速度等，采集频率 $\geq 20$  Hz。压实指标值测量误差 $\leq \pm 5\%$ 。
  - 3) 环境数据：填料含水率、环境温度等，采集频率 $\geq 1$ Hz。含水率在最优值 $\pm 3\%$ 范围内测量误差 $\leq \pm 0.5\%$ 。
  - 4) 设备状态数据：包括设备 ID、运行模式、报警代码等，状态变化时即时上报。
- b) 数据传输应满足：从数据采集终端到中心平台的端到端网络传输延迟 $\leq 500$ ms；在网络正常条件下，数据传输丢包率 $\leq 0.1\%$ 。支持断点续传，网络中断时本地缓存数据量 $\geq 72$ 小时。
- c) 数据应采用统一格式进行封装和传输。时间戳需遵循 ISO 8601 标准，坐标系统一采用项目规定的坐标系。通信协议宜采用 MQTT、TCP/IP 等，并支持数据完整性校验。

### 8.2 中心数据平台功能要求

- a) 数据存储与处理：
  - 1) 平台应具备海量数据存储与实时处理能力，支持不低 50 台智能设备并发接入及高频数据流（总

数据吞吐量 $\geq 10$  MB/s) 的稳定处理。

2) 原始数据存储周期自项目竣工之日起不少于 5 年。平台应实现数据自动分级存储与备份, 核心原始数据每日备份, 备份数据异地保存。

3) 数据处理延迟应小于 10 秒。

b) 数据可视化与展示:

1) 平台应提供基于 WebGIS 的二维/三维可视化界面, 支持加载 10 万级点位数据的地图渲染时间不超过 5 秒。

2) 应能动态生成并渲染“压实度云图”、“含水率分布图”等专题图层, 图层刷新更新周期不大于 30 秒。

3) 支持按时间、空间、设备等多维度对历史数据进行回溯与动态回放。

c) 数据分发与接口服务:

1) 平台应提供标准化的数据服务接口 (API), 供其他系统调用, 接口响应时间小于 2 秒。

2) 应能根据预设规则, 向不同角色的终端 (Web、移动 APP、车载终端) 实时分发差异化的数据与报警信息, 信息推送延迟小于 2 秒。

### 8.3 数字孪生模型构建与施工过程动态映射

a) 模型构建精度要求:

1) 应基于设计 BIM 模型与施工现场实景, 构建路基填筑工程的数字孪生模型。施工前的设计模型精度不低于 LOD 3.0。

2) 施工过程中, 通过融合实时传感数据对模型进行动态更新, 形成“虚实共生”的 LOD 4.0+精度模型, 其中几何实体的实际尺寸与模型尺寸偏差应 $\leq \pm 3$  cm。

b) 动态映射与实时性要求:

1) 数字孪生平台应能实时接入并映射施工过程数据, 将设备位置、轨迹、压实状态等信息准确叠加至三维模型中。数据映射的延迟时间应 $\leq 30$  秒。

2) 平台应支持施工过程的反向追溯, 点击模型中任意位置, 可查询该点所在层的所有施工过程记录 (时间、设备、参数、质量指标), 查询响应时间应小于 3 秒。

c) 虚实比对与分析功能:

1) 平台应能自动将数字孪生模型中的实际施工状态与设计标准进行比对分析, 并生成偏差报告。偏差超过设定阈值的区域应在模型中高亮显示。

2) 宜利用数字孪生模型进行施工模拟与轻量化分析, 为施工优化提供预演环境。

### 8.4 施工进度、质量、成本的集成分析与看板展示

a) 集成分析要求:

1) 平台应实现施工进度、质量与成本数据的自动关联与集成分析, 分析周期可按日、周、月进行,

关键指标计算延迟不超过 1 小时。

2) 进度分析：应基于实时定位与作业数据，自动计算各作业单元的完成面积（ $m^2$ ）与层数，并与计划进度对比。进度统计的准确率应不低于 95%，实时计算进度偏差（实际完成量/计划完成量-1），当偏差连续 3 天超过 $\pm 10\%$ 时系统应自动预警。

3) 质量分析：应集成各工序质量数据，计算综合质量指数。该指数应不低于 90%，并支持历史趋势分析，趋势预测模型对未来 3 天质量指数的预测误差应小于 $\pm 3\%$ 。

4) 成本关联分析：应能根据进度、质量数据与资源消耗的关联，进行初步的成本偏差分析。当单位填筑方量的实际综合成本超过计划成本的 5%时，系统应提示预警，并提供偏差主要原因的量化分析。

b) 看板展示要求：

1) 应提供面向不同管理层级的可视化看板（Dashboard）。看板数据刷新频率不低于每 5 分钟一次，关键报警信息需在 10 秒内实时推送至看板并伴有醒目提示。

2) 看板应至少展示以下核心指标：当日完成填筑方量（ $m^3$ ，精度 $\pm 1\%$ ）、累计完成比例（%，精度 $\pm 0.5\%$ ）、当前作业面平均压实合格率（%，基于实时云图计算）、主要设备利用率（%，有效作业时间/总时间）、预警数量及处理状态（闭环率）。指标数值显示更新延迟不超过 30 秒。

3) 看板支持钻取（Drill-down）分析，点击关键指标可在 3 秒内下钻查看详细数据与图表。看板整体页面加载时间不超过 5 秒。

为直观展示集成看板的核心监控维度与指标，其典型布局与关键绩效指标（KPI）可参考表 2 进行设计。

表 2 智能施工管理集成看板核心指标示例

监控维度	核心指标	定义/计算方法	目标/阈值	更新频率
进度	日填筑完成方量	基于压实设备作业面积与层厚自动估算	符合日计划量 ( $\pm 5\%$ )	实时
	总体计划完成率	(累计已完成层数/总设计层数) $\times 100\%$	$\geq$ 计划进度	每 30 分钟
质量	当前压实合格率	(CMV 达标网格数/总网格数) $\times 100\%$	$\geq 95\%$	每 10 分钟
	综合质量指数	压实、层厚、含水率合格率的加权平均值	$\geq 90\%$	每 1 小时
资源	关键设备利用率	(设备有效作业时长/设备在线总时长) $\times 100\%$	$\geq 75\%$	每 1 小时
	运输车辆平均周转	从取料到返回料场的平均	$\leq$ 计划定额时间	每 30 分钟

	时间	时间		
安全	主动预警数量	系统触发的碰撞、边坡稳定等预警总数	0 (理想状态)	实时
	预警平均闭环时间	从预警发出到处理确认的时间平均值	< 15 分钟	每 1 小时

## 8.5 智能决策支持

### a) 压实遍数建议:

1) 系统应能基于当前填料类型、含水率及已碾压遍数下的压实度增长趋势，智能推荐后续碾压遍数。推荐模型应确保按推荐遍数施工后，预测的压实合格率达到 95%以上，且推荐遍数与实际所需最佳遍数的偏差不超过 $\pm 1$ 遍。

2) 推荐模型应基于历史数据训练，并在每积累 10 层新施工数据或每月进行一次更新，模型在现场应用中的预测准确率（预测合格率与实际合格率偏差在 $\pm 3\%$ 以内）不低于 85%。

### b) 异常预警与诊断:

1) 系统应建立多级预警机制。对于压实不足、含水率异常、设备离线等异常情况，系统应在异常条件满足后 5 分钟内生成预警并推送至相关责任人终端。

2) 预警应附带基于规则库的初步诊断建议，例如：当某区域压实不足且含水率低于最优值 2%时，建议“检查含水率并考虑补水”；当设备连续两遍碾压 CMV 值增长低于 1%时，建议“检查填料均匀性或调整振动参数”。诊断建议的准确率（经现场验证为有效建议）应不低于 80%。

### c) 资源优化建议:

1) 系统应能基于实时施工进度与资源分布数据，对设备调度、人员配置提出优化建议。当某作业面进度滞后计划 20%以上时，建议从邻近已完成区域调派压路机；当运输车辆平均等待时间超过 15 分钟时，建议调整卸料点或运输路线以缩短循环时间。

2) 优化建议可根据需要设置生成频率。经评估，建议采纳后预计可将整体资源利用率提升 5%以上，或使目标作业单元工期缩短 10%以上。

## 9 施工安全与环境保护

### 9.1 智能化施工安全监控

#### 9.1.1 人员与设备防撞监控

a) 应为进入作业区的所有人员配备具有定位功能的个人终端，定位精度不低于 $\pm 1$  m，数据上传延迟不大于 5 秒。系统应设定电子围栏，当人员与运行中的智能施工设备距离小于 3m 时，系统应同时向设备驾驶室和人员终端发出声光预警；当距离小于 2m 时，设备应在 1 秒内自动减速或暂停作业，直至安全距离恢复。

b) 智能施工设备应配备环境感知系统，系统应能有效探测设备前方 10m 范围内的静态与动态障碍物。对于进入 5m 预警区的障碍物，系统应发出持续声光警报；对于进入 2m 危险区的障碍物，设备应能在 0.5 秒内触发自动紧急制动。

c) 系统应实时监控多台设备间的相对位置，当相邻设备作业间距小于 2m 时，应自动向相关设备的操作员发出防碰撞预警，并在平台地图上高亮显示冲突区域。

### 9.1.2 边坡稳定性监测

a) 对填筑高度超过 8m、坡度陡于 1:1.5 或存在不良地质路基边坡，应布设自动化监测传感器网络。监测点沿坡面布设间距不宜大于 20 m，关键断面应加密。

b) 监测数据应实时（采集频率不低于 1 次/小时）接入管理平台。平台应设定位移与沉降报警阈值，主要指标应包括：水平位移速率连续 3 天超过 2mm/d；累计水平位移超过 10mm；深层水平位移（通过测斜仪）变化速率出现突变。当任一指标达到阈值时，系统应立即发出二级警报，并自动暂停该区域下方及邻近 10 m 范围内的填筑作业，直至险情排除并经复查确认。

## 9.2 设备自身安全防护与应急机制

### 9.2.1 设备安全防护功能要求

a) 智能施工设备应具备自动倾覆保护功能。当实时监测的车身倾斜角度超过 15°时，系统应立即发出声光报警；当倾斜角度超过 20°时，控制系统应在 0.5 秒内自动切断动力输出并触发紧急制动，同时通过车载通信模块自动向监控中心发送包含精确位置（定位精度±2cm）的求救信号。

b) 驾驶室、核心控制单元及主要电气接口的防护等级应不低于 IP67，以确保在粉尘、喷溅水等恶劣户外环境下正常工作。设备应在环境温度-25°C 至+50°C、相对湿度≤95% 的范围内稳定运行。

c) 所有外露的运动部件必须设有牢固的物理防护罩。防护罩应安装接触式或光电式安全联锁开关，其触发机构动作行程应小于 5 mm。一旦防护罩被异常打开，设备的主控制系统应在 0.2 秒内执行断电停机指令。

### 9.2.2 应急机制要求

a) 每台智能设备必须在驾驶室操作台及设备外部的醒目位置（至少前后各一）设置物理式紧急停止按钮。按钮触发后，设备应在 1 秒内完全停止所有动作（包括行驶、振动等），且必须通过手动复位才能恢复。

b) 应建立完善的设备异常状态应急响应流程。当发生通信中断（失联时间> 30 秒）、定位失效（信号丢失>60 秒）或控制系统主要模块故障时，设备应能在 10 秒内自动切换至预设的安全模式，并在机载终端上明确提示故障代码，允许操作员进行人工应急接管。

c) 远程监控中心应设置设备状态看板。当系统检测到某台设备出现异常时，看板应自动高亮报警，

并启动备用通讯流程，中心人员须在 2min 内通过备用通讯方式联系现场人员进行核查与处置。

### 9.3 基于智能系统的环保监控

#### 9.3.1 扬尘智能监控与治理

a) 在施工现场主要出入口、填筑作业面下风向及周边敏感区域，应布设在线扬尘监测仪（PM10、PM2.5），监测数据应实时（采集频率不低于 1 次/分钟）上传至平台。

b) 扬尘浓度超标联动控制应符合以下要求：

1) 当监测点 PM10 浓度连续 10 分钟平均值超过  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ （可根据地方标准调整）时，系统应自动报警，并联动启动该监测点半径 50m 范围内的智能喷淋或雾炮降尘设施。

2) 降尘设施启动后，对应区域 PM10 浓度应在 15 分钟内下降 30%以上。

c) 系统应能生成扬尘浓度时空分布图，并统计每日超标时长与区域，为环保管理提供量化依据。

#### 9.3.2 噪声智能监控与控制

a) 在施工场界及邻近噪声敏感点，应布设噪声自动监测仪，测量等效连续 A 声级（Leq）。监测数据采集频率不低于 1 次/分钟，并实时上传平台。

b) 噪声超标识别与控制应符合以下要求：

1) 监测数据应与施工设备运行状态关联分析。当噪声值昼间超过 70 dB(A)、夜间超过 55 dB(A)，系统应报警，并提示可能产生噪声的设备及位置。

2) 对于高噪声设备或工序，可通过平台在特定时段远程锁定其高噪声工作模式，强制其采用低噪声模式运行。

#### 9.3.3 监控有效性要求

a) 环保监测数据上传稳定率应不低于 99%，从数据采集到平台显示的端到端延迟应小于 2 分钟。

b) 扬尘、噪声超标报警信息从触发到推送至环保负责人的时间不超过 2 分钟。

c) 降尘设施联动启动的响应时间不超过 5 分钟。

为确保环保监控的关键指标清晰明确，其主要的监控参数与联动控制要求汇总如表 3 所示。

表 3 环保智能监控关键参数与联动控制要求

监控项目	监测指标	监测点位布设要求	超标阈值（示例）	智能联动控制措施	响应性能要求
扬尘	PM10 浓度	主要出入口、作业面下风向、敏感区周边，间距 $\leq 100\text{ m}$	$150\mu\text{g}/\text{m}^3$ (连续 10 分钟均值)	自动启动半径 50 m 内喷淋/雾炮	联动响应 $\leq 5\text{ min}$ ；浓度 15 分钟内下降 $\geq 30\%$
	PM2.5 浓度	同 PM10，或与	$75\mu\text{g}/\text{m}^3$ (连续 10	平台报警，提示深	报警推送延迟

		PM10 同设备监测	分钟均值)	化降尘措施	≤2 min
噪声	等效声级 Leq	施工场界四周、邻近敏感点	昼间>70 dB(A) 夜间>55 dB(A)	平台报警并关联噪声源；可远程锁定高噪设备工作模式	报警推送延迟 ≤2 min
数据链路	传输稳定性	所有监测点位	数据传输成功率	备用通信链路自动切换	传输稳定率 ≥99%；端到端延迟<2 min

## 10 系统维护与故障处理

### 10.1 智能化设备与系统的日常维护

a) 智能设备与系统的日常维护应制定计划并严格执行，以保障其长期稳定、可靠运行。维护工作需达到以下量化要求：

1) 预防性维护周期：所有智能施工设备（压路机、摊铺机等）应每运行 250 小时或每隔 1 个月（以先到为准）进行一次全面的预防性检查与保养。

2) 关键传感器校准：高精度定位天线、振动传感器、含水量传感器等关键传感元件的现场比对校验或校准周期不应超过 3 个月。

3) 系统软件与数据：中心数据平台应每周进行一次完整数据备份，备份成功率须达 100%；系统软件补丁应在发布后 15 个工作日内完成评估与安装。

4) 网络通信保障：现场无线通信网络的信号强度与带宽应每日进行一次巡检，确保信号覆盖盲区面积小于总作业面积的 1%，主干网络可用性不低于 99.9%。

b) 日常维护应重点关注以下内容的性能状态，其判定标准如下：

1) 定位精度衰减：设备 GNSS 流动站的定位精度若在已知点上测试发现平面误差持续大于 2 cm 或高程误差大于 3 cm，则必须立即进行校准或检修。

2) 传感器信号异常：连续压实检测系统输出的 CMV 值在标准测试条件下波动范围超过±5%，或在线含水率传感器测量值与烘干法结果的偏差持续大于±1.5%，即视为异常，需启动校准程序。

3) 数据通信稳定性：单台设备与平台间的数据通信中断次数若日均超过 3 次，或单次中断时长超过 10 分钟，则需排查通信链路故障。

为系统化、规范化地开展日常维护工作，其主要内容、标准与周期宜按表 4 执行。

表 4 智能化设备与系统日常维护内容与要求

维护类别	维护对象/项目	维护内容与标准要求	维护周期	性能达标判定
机械	智能压路机	检查振动轮轴承润滑（注脂量	每 50 工	运行无异响，动作响应正常

设备	/摊铺机	≥200g)；清洁散热器，确保通风无堵塞；检查所有液压管路无渗漏（压力保持率≥95%）。	作小时	
定位系统	GNSS 基准站	检查天线安装稳固，对中误差<1mm；核查供电与通信链路；清洁天线罩。	每周	数据播发稳定，可用性>99%
	GNSS 流动站	测试在已知控制点上的 RTK 定位精度（平面≤2cm，高程≤3cm）；清洁天线。	每 15 天或每项目开工前	定位精度满足要求，固定解时间<30 秒
感知系统	振动传感器	检查安装紧固性；信号线连接可靠性测试。	每日作业前	信号无异常跳变，背景噪声低
	在线含水率传感器	进行现场快速比对测试（与便携式速测仪结果偏差≤±0.5%）。	每周	测量值稳定，无明显漂移
数据与网络	中心数据平台	检查磁盘空间（使用率<80%）；验证数据自动备份任务执行情况。	每日	备份任务成功，日志无报错
	现场通信网络	测试关键区域无线信号强度（RSRP > -105 dBm）；检查网络设备运行状态。	每日	无通信盲区，网络延迟 <500ms
软件系统	设备控制软件	检查软件版本与日志，确认无严重报警或故障代码。	每班次	系统运行正常，人机交互流畅
	平台应用软件	检查服务进程状态及资源占用率（CPU<70%，内存<80%）。	每日	服务可用，响应及时

## 10.2 常见故障诊断与排除流程

### 10.2.1 一般故障诊断原则

- a) 故障诊断应遵循“先外部、后内部；先软件、后硬件；先网络、后终端”的原则。
- b) 故障响应应满足量化时限要求：从操作人员发现或系统报警到启动诊断的响应时间应不超过 5 分钟。一般性故障应在 30 分钟内定位并启动排除流程；重大故障（导致单台设备停工或影响关键数据链路）应在 2 小时内形成诊断报告与处理方案。

### 10.2.2 常见故障类型与诊断排除

#### a) 定位系统故障

1) 故障现象：设备 RTK 无法固定解、定位精度持续超差（平面>3cm，高程>5cm）。

2) 诊断流程：

检查基准站状态（数据播发、电源）。

检查流动站天线连接、安装位置是否遮挡。

在已知点上测试静态定位精度。

3) 排除要求：若为网络问题，切换备用通信链路应在 10 分钟内完成；若为硬件问题，更换备件后精度须在 15 分钟 内复测达标。

b) 压实数据异常

1) 故障现象：CMV 值无规律剧烈跳动（连续波动 $>\pm 15\%$ ）、或长期无变化。

2) 诊断流程：

检查振动传感器连接线与接头。

在平稳路段测试，观察信号是否恢复正常。

与临近设备在相同填料区域的数据进行比对。

3) 排除要求：重新紧固或更换传感器后，信号应恢复稳定，CMV 输出在标准填料上的重复性误差应小于 $\pm 5\%$ 。诊断与硬件更换总时长不宜超过 45 分钟。

c) 数据通信中断

1) 故障现象：设备数据无法上传至平台，或上传延迟超过 60 秒。

2) 诊断流程：

检查设备端通信模块（如 4G/5GDTU）指示灯状态。

测试设备所在位置的无线网络信号强度（RSRP 应 $>-110$  dBm）。

检查平台服务器端口与防火墙设置。

3) 排除要求：恢复通信后，设备应能自动续传缓存数据，数据补传完整率须达到 100%。网络中断期间，设备本地数据缓存不得丢失，缓存时间应满足至少 72 小时的要求。

为快速指导现场维护人员进行标准化作业，常见故障的诊断指标、阈值及排除核心要求汇总如表 5。

表 5 常见故障快速诊断与排除指引表

故障类别	典型现象/诊断指标	诊断阈值/判断依据	主要可能原因	排除措施与要求	最大允许恢复时间
定位失效	RTK 模式浮动解 定位误差超限	固定解持续时间占比 $< 80\%$ 平面误差 $> 3\text{cm}$ ， 高程 $> 5\text{cm}$ (持续 5 分钟)	1. 基准站信号中断 2. 流动站天线故障或被遮挡 3. 电台或网络链路问题	1. 重启基准站或切换网络 2. 检查并清理天线 3. 更换天线或主机	30 分钟

压实数据异常	CMV 值异常波动或无输出	输出值连续波动范围 $> \pm 15\%$ 或持续 2 分钟无变化	1. 振动传感器松动或损坏 2. 信号线接触不良 3. 采集模块故障	1. 重新紧固传感器 2. 检查并重接线缆 3. 更换传感器或采集模块	45 分钟
通信中断	数据无法上传平台	平台持续 $> 60$ 秒未收到设备数据心跳包	1. 现场网络信号差 2. 设备通信模块故障 3. SIM 卡欠费或故障	1. 启用设备本地缓存模式 2. 重启通信模块或更换 SIM 卡 3. 移动设备至信号良好区	20 分钟 (恢复通信)
传感器失效	含水率等传感器读数异常	测量值与现场快速测定值偏差持续 $> \pm 2\%$	1. 传感器探头污染 2. 校准参数丢失 3. 传感器损坏	1. 清洁探头 2. 重新执行现场校准 3. 更换传感器	1 小时 (含校准时间)
系统软件/平台	平台无地图显示或数据不更新	页面加载超时 ( $> 10$ 秒) 实时数据流停止更新	1. 平台服务进程异常 2. 数据库连接失败 3. 网络带宽耗尽	1. 重启相关平台服务 2. 检查数据库状态与连接 3. 检查网络流量与限制	15 分钟 (服务恢复)

### 10.3 数据备份与系统恢复

#### 10.3.1 数据备份策略与要求

a) 应建立分级的自动化数据备份策略，确保施工全过程数据的安全性与可恢复性。备份操作的成功率必须达到 100%。

1) 增量备份：对当日产生的增量业务数据及系统日志，应每日自动执行备份，备份完成时间应在当日凌晨 6:00 前。

2) 全量备份：对核心业务数据库、平台软件系统及配置文件，应每周执行一次全量备份。

3) 归档备份：所有经监理签认的数字化层间验收记录、竣工检验报告及关联的原始数据包，应在

每层验收完成后 24 小时内完成归档备份。

b) 备份数据的存储应满足“3-2-1”原则：即至少保留 3 个数据副本，使用 2 种不同存储介质，其中 1 个副本存储于异地。异地备份数据中心与主中心的物理距离应不小于 50 公里。

### 10.3.2 系统恢复目标与流程

a) 应制定明确的系统恢复目标（RTO 与 RPO）：

1) 恢复时间目标（RTO）：在发生一般性系统故障时，核心数据平台服务应在 1 小时内恢复；在发生灾难性故障时，系统应在 8 小时内从异地备份恢复基本服务。

2) 恢复点目标（RPO）：系统恢复后，数据丢失量不得超过 1 小时的业务数据。

b) 系统恢复流程应文档化、可演练。每半年至少进行一次完整的灾难恢复演练，演练需模拟从备份数据中恢复核心业务场景，验证 RTO 与 RPO 目标的达成情况，演练报告应归档。

### 10.3.3 备份有效性验证

a) 必须对备份数据的有效性进行定期验证，验证频率不低于每季度一次。

b) 验证内容应包括：备份数据的完整性（通过校验和检查）、可读性（随机抽取数据包进行读取测试）以及恢复后数据的业务逻辑一致性。

c) 关键归档数据为确保备份与恢复工作的规范性和可操作性，其核心策略、指标与要求汇总如表 6。

表 6 数据备份与系统恢复核心要求

项目	备份/恢复对象	备份频率与时机	存储介质与地点要求	保留期限	恢复指标 (RTO/RPO)	验证要求
实时/增量数据	压实、定位、工况等过程数据流	每日自动增量备份	主中心高速磁盘阵列	≥ 30 天	RTO: ≤1 小时 RPO: ≤1 小时	每月随机抽查 可读性
业务数据库	核心业务关系数据库、用户数据	每周日凌晨全量备份	主中心磁盘阵列 + 异地备份中心磁带库	≥ 1 年	RTO: ≤4 小时 RPO: ≤24 小时	每季度恢复演练，验证数据一致性
归档数据	数字化层间验收包、竣工资料、区块链存证	事件驱动(完成后 24 小时内)	离线光盘/磁带 + 异地归档库	永久	RTO: ≤8 小时 RPO: 零丢失	每年进行一次全量恢复测试
系统镜像	服务器操作系统、平台软件、配置文件	每月及重大变更后	异地备份中心	≥ 3 个月	RTO: ≤2 小时 (系统重建)	每半年结合灾难恢复演练测试
终端配	智能设备控制软	设备调试完	平台服务器集	至项	/	设备启用前校

T/TMAC XXXX—XXXX

置	件、参数配置文 件	成后及参数 更新时	中存储	目结 束		验配置一致性
---	--------------	--------------	-----	---------	--	--------

## 附录 A

(资料性)

## 典型智能压实设备技术要求与接口示例

## A.1 设备技术要求

典型的智能压实设备（以振动压路机为例）应集成高精度定位、压实过程质量检测、智能控制与数据通信等核心系统。其主要技术要求与性能指标应满足表A.1的规定。

表 A.1 典型智能压实设备（压路机）技术要求

系统类别	技术项目	要求与性能指标	说明/示例
基础机械性能	工作质量	$\geq 20 \text{ t}$ (适用于路基主压实)	根据填料和压实要求确定
	振动轮直径	$\geq 1.6 \text{ m}$	/
	激振力范围	50 kN - 350 kN	宜无级可调
	振动频率范围	20 Hz - 45 Hz	可调
	振幅范围	0.8 mm - 2.2 mm (双振幅)	可调
高精度定位系统	定位模式	支持 BDS/GNSS RTK	/
	定位精度(平面)	$\leq \pm 2 \text{ cm}$ (95%置信度)	在项目控制网下测试
	定位精度(高程)	$\leq \pm 3 \text{ cm}$ (95%置信度)	在项目控制网下测试
	数据输出频率	$\geq 10 \text{ Hz}$	/
压实质量检测系统 (CCMS)	核心传感器	高精度加速度计 (ICP 型)	/
	传感器安装	垂直、牢固安装于振动轮内侧 机架中心	安装要求见本标准图 2
	测量指标	压实计值 (CMV)、振荡计值 (OMV) 等	可选
	输出频率	$\geq 20 \text{ Hz}$	/
	测量误差	$\leq \pm 5\%$ (量程内)	需定期标定
	相关性要求	CMV 与灌砂法压实度 K 值的相 关系数 $R^2 \geq 0.70$	通过试验段验证
智能控制与显示	机载控制终端	彩色触控显示屏, 防护等级 $\geq \text{IP65}$	/
	实时显示信息	位置坐标、CMV 值、碾压遍数、 速度、频率、振幅、激振力等	/
	控制功能	预设参数调用、自动/手动模式	/

		切换、导航引导接收	
数据通信与接口	通信方式	支持 4G/5G 无线公网或专网	主用
	备用通信	支持 Wi-Fi 或 LoRa 等本地通信	备用
	数据上传延迟	端到端平均延迟 $\leq 500$ ms	网络正常时
	本地缓存能力	$\geq 72$ 小时原始数据	断网时保障
安全与防护	环境感知	可选配毫米波雷达、超声波传感器、摄像头	用于避障
	紧急制动	响应时间 $\leq 0.5$ 秒	/
	防护等级	驾驶室及核心电气部件防护等级 $\geq$ IP67	/

## A.2 数据接口示例

智能压实设备与中心监控平台之间的数据交互，宜采用基于物联网的轻量级通信协议，以确保数据的实时性与可靠性。

### A.2.1 通信协议

推荐使用 MQTT（消息队列遥测传输）协议，版本为3.1.1或以上。设备作为发布者（Publisher），平台作为订阅者（Subscriber）。

服务器地址/端口：由平台方指定。

主题（Topic）格式：建议采用分层结构。

服务质量（QoS）：推荐使用QoS 1（至少交付一次），确保关键数据不丢失。

### A.2.2 数据消息格式

数据载荷（Payload）推荐采用 JSON 格式，编码为UTF-8。

### A.2.3 平台下发指令格式

平台可向设备下发控制或引导指令。

## A.3 模型验证要求

设备应提供状态查询与远程维护接口，通常基于HTTPS RESTful API。

## 附录 B

### (资料性)

#### 常用压实过程监控指标说明

本附录对智能填筑施工过程中常用的压实过程监控指标进行说明，旨在为理解指标物理意义、选择适用指标及进行数据分析提供参考。具体工程中采用的指标类型、目标值及评价标准应根据填料特性、设备系统和试验段验证结果综合确定。

#### B.1 压实计值 (Compaction Meter Value, CMV)

a) 定义：压实计值 (CMV) 是基于振动压路机振动轮加速度信号的谐波分析计算得到的一个无量纲指标，用于间接评估被压填料的相对密实度或刚度。

b) 计算公式：CMV通常由振动轮垂直方向加速度信号计算得出。其典型计算公式为：

$$CMV = C \cdot \frac{A_{2f_0}}{A_{f_0}}$$

式中： $A_{f_0}$  ——振动轮加速度信号在激振基频 $f_0$ 处的幅值；

$A_{2f_0}$  ——加速度信号在二次谐波频率 $2f_0$ 处的幅值；

$C$  ——比例常数 (通常为300)。

c) 物理意义与特点：CMV值随填料刚度 (或密实度) 的增加而增加。其响应受填料类型、级配、含水率及压实工艺参数影响。该指标对粗粒土的压实状态变化较为敏感。

d) 典型范围：对于路基填筑工程，CMV值通常在0-200范围内变化。目标值需通过试验段建立其与传统压实度 (如K值) 的相关性模型后确定。

#### B.2 振荡计值 (Oscillation Meter Value, OMV)

a) 定义：振荡计值 (OMV) 是基于振荡压路机响应信号计算得到的、用于表征填料相对密实度或刚度的过程质量指标。

b) 计算公式：OMV的计算通常基于振荡轮产生的水平振荡运动响应。其计算涉及动态力与位移 (或加速度) 的测量与运算，具体公式因设备制造商而异。

c) 物理意义与特点：OMV反映了填料在剪切作用下的变形特性，对细粒土的压实状态变化较为敏感。与振动压实相比，振荡压实产生的振动传递较小，适用于对振动敏感的区域。

d) 典型范围：OMV值范围及目标值需通过设备制造商提供的标定曲线及现场试验段验证确定。

#### B.3 压实控制值 (Compaction Control Value, CCV)

a) 定义：压实控制值 (CCV) 是一种基于压实过程中测量的机器-地面相互作用参数计算得到的、用于评估填料压实状态的过程质量指标。

b) 计算公式：CCV的计算方法多样，通常与设备的智能控制系统深度集成。一种常见的方法是基于驱动马达的功率或压力变化来估算：

$$CCV \propto \frac{P_{load}}{P_{no-load}}$$

$P_{load}$  ——压实作业时驱动系统的实测功率（或压力）；

$P_{no-load}$  ——相同运行条件下空载时的驱动功率（或压力）。

c) 物理意义与特点：CCV反映了压路机克服滚动阻力所做的功，与填料的剪切强度和密实度相关。它适用于多种压实原理（振动、振荡、静碾）的设备。

d) 典型范围：CCV值范围取决于设备型号和算法，需依据设备手册和现场验证确定目标范围。

#### B.4 其他相关指标

除上述指标外，智能压实系统还可能输出或衍生出以下用于过程监控与质量评价的指标：

表 B.1 其他常用压实过程监控与评价指标

指标名称	符号	定义与物理意义	主要应用/特点
刚度值	$k_s$	表征轮-土相互作用的动态刚度（kN/m），与填料的弹性模量相关。	常用于评估路基结构层整体刚度或过渡段压实质量。
动态变形模量	$E_{vib}$	衡量土体在动态冲击荷载下抗变形能力的关键参数，其定义为动应力与动应变的比。	反映路基在列车动载作用下的实际响应特性。
谐波比	$HR$	加速度信号中高次谐波能量与基波能量的比值。	可作为填料均匀性或分层压实状态的辅助判别指标。
压实度方差/ 变异系数	$CV$	统计一定区域内 CMV、OMV 等指标值的离散程度（标准差与均值之比）。	直接评价压实均匀性的关键指标，通常要求 $CV \leq 10\%$ 。

#### B.5 指标选择与相关性验证

a) 不同压实过程监控指标对填料类型、含水率和压实工艺的敏感性不同。指标选择应与工程填料特性及采用的压实设备类型相匹配。通常，CMV更适用于粗粒土，OMV更适用于细粒土，CCV的适用性更广。

b) 在任何指标用于施工质量控制前，必须在代表性试验段上建立该指标与传统验收指标之间的有效相关性模型。模型应通过统计检验，线性回归相关系数 $R^2$ 不宜低于0.70。模型的验证与应用流程见图 B.1。

c) 施工过程中，应定期对相关性模型进行复核与更新，确保监控指标的准确性与可靠性。

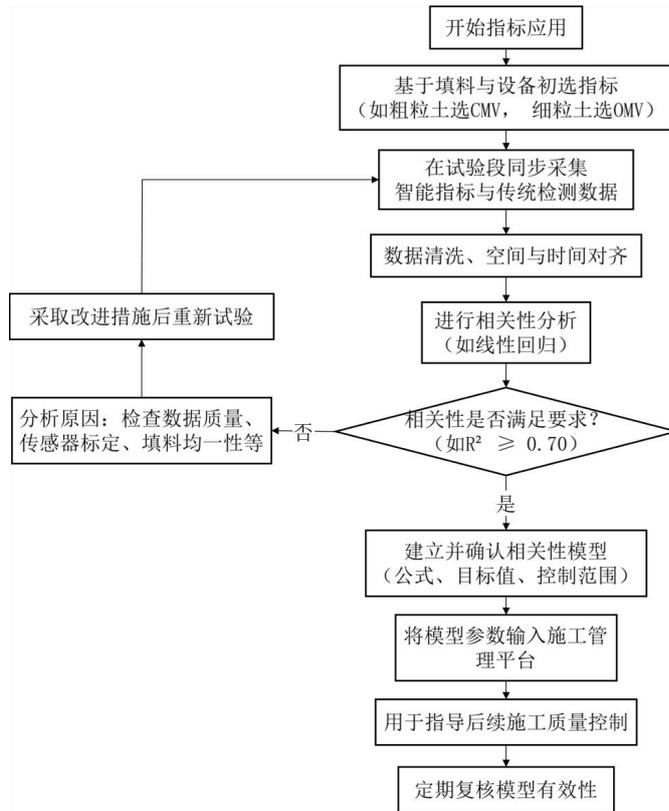


图 B.1 压实过程监控指标选择与相关性验证流程示意图

## 附录 C

(资料性)

## 施工过程数据字典与格式规范示例

本附录规定了铁路路基智能化填筑施工过程中，核心数据的数据字典与通用格式规范，旨在确保数据定义的统一性、格式的标准化及系统间的互操作性。实际系统设计与开发应遵循或兼容本规范。

## C.1 数据字典 (Data Dictionary)

数据字典定义了各数据字段 (Data Field) 的名称、标识符、类型、单位、精度及简要说明。下表列出了关键的过程数据字段。

表 C.1 核心施工过程数据字段定义

字段标识符 (Field ID)	中文名称	数据类型/格式	单位	精度/范围要求	说明与示例
msg_header	消息头	Object (JSON Object)	/	/	每条数据消息的元数据头
.device_id	设备唯一标识	String	/	/	设备在系统中的唯一编码，如 RL/203
.timestamp	数据时间戳	String (ISO 8601)	/	同步误差 < 50ms	数据采集的 UTC 时间，如 2025/07/26T08:30:45.123Z
.msg_type	消息类型	String	/	/	标识数据类别，如 realtime_compaction, water_content
.coordinate_sys	坐标系	String	/	/	如 CGCS2000, WGS84 或项目独立坐标系代码
location	定位数据	Object	/	/	设备实时空间位置与姿态
.lon	经度	Float	°(度)	精度: ≤ ±0.000001° (约 0.1m)	WGS84 经度, 东经为正
.lat	纬度	Float	°(度)	精度: ≤ ±0.000001°	WGS84 纬度, 北纬为正
.altitude	海拔高程	Float	m	精度: ≤ ±0.03 m	椭球高或正高 (需明确)

.heading	航向角	Float	°	精度: $\leq \pm 1^\circ$	设备行进方向, 0°为正北, 顺时针
compaction	压实数据	Object	/	/	压实过程质量与状态数据
.cmv	压实计值	Integer / Float	/	范围: 0/200, 误差 $\leq \pm 5\%$	无量纲, 反映相对压实度
.pass_num	当前碾压遍数	Integer	遍	/	在当前作业单元的累计碾压遍数
.vib_status	振动状态	String / Boolean	/	/	ON/OFF 或 true/false
.freq	振动频率	Float	Hz	精度 $\leq \pm 0.5$ Hz	当前振动频率
.ampl	振幅	Float	mm	精度 $\leq \pm 0.2$ mm	工作振幅 (双振幅)
environment	环境数据	Object	/	/	填料与环境状态数据
.water_content	含水率	Float	%	精度 $\leq \pm 0.5\%$	填料实时体积含水率
.material_temp	填料温度	Float	°C	精度 $\leq \pm 1$ °C	/
operation	运行数据	Object	/	/	设备运行参数
.speed	行驶速度	Float	km/h	精度 $\leq \pm 0.2$ km/h	实时行进速度
.engine_rpm	发动机转速	Integer	rpm	/	/
.fuel_level	燃油油位	Float	%	/	剩余油量百分比

## C.2 数据传输格式规范示例

为保障数据互通性, 推荐采用 JSON (JavaScript Object Notation) 作为主要的数据交换格式, 并使用 UTF-8 编码。

## C.3 数据文件存储格式规范

对于需要长期归档或批量交换的数据, 除数据库存储外, 推荐采用以下通用文件格式:

a) 时间序列数据: 可采用 CSV (Comma-Separated Values) 格式存储。文件应包含表头, 并遵循以下约定:

**文件名:** {设备ID}\_{数据类型}\_{起始时间}\_{结束时间}.csv,

如 IR-101\_compaction\_20250726\_080000\_20250726\_090000.csv。

**时间戳列:** 应单独作为第一列, 格式为 ISO 8601。

示例（CSV片段）：

```
timestamp,lon,lat,altitude,cmv,pass_num,water_content
```

```
2025-07-26T08:30:45.123Z,116.391357,39.905412,45.32,92,5,11.8
```

```
2025-07-26T08:30:45.223Z,116.391362,39.905415,45.31,93,5,11.8
```

b) 空间数据与模型：压实质量云图、设计边界等空间数据，建议采用 GeoTIFF（栅格）或 GeoJSON/KMZ（矢量）等GIS通用格式存储，并内嵌正确的坐标系定义。

c) 归档数据包：单层施工的完整数字化档案，应打包为 ZIP 或 TAR 压缩文件，内部按数据类型目录组织，并包含一个描述文件清单和元数据的manifest.json文件。

## 附录 D

(资料性)

## 智能化填筑施工记录表式样

本附录提供了用于记录铁路路基智能化填筑施工全过程关键信息的推荐表式样。实际使用时，可根据项目管理需求进行调整，并鼓励将本表的核心字段集成至数字化施工管理平台，以实现无纸化记录与自动归档。以下表式样按单层填筑施工流程编排。

## D.1 基底数字化检测验收记录表

表 D.1 基底数字化检测验收记录表

工程名称		合同段	
施工里程		检测日期	年 月 日
检测方法	<input type="checkbox"/> 三维激光扫描 <input type="checkbox"/> GNSS-RTK 网格测量 <input type="checkbox"/> 其他: _____	检测单位	
设计基底标高 (m)		允许偏差 (m)	±0.05
检测结果			
项目	技术要求	检测值/结论	备注
1.数字化模型精度	平面 $\leq\pm 0.02\text{m}$ , 高程 $\leq\pm 0.03\text{m}$	平面: _____ m; 高程: _____ m	
2.平均实测标高 (m)			
3.高程合格率 (%)	$\geq 95\%$ (偏差在 $\pm 0.05\text{m}$ 内)		
4.平整度 (标准差, mm)	$\leq 15\text{mm}$ (4m 直尺法折算)		
5.模型数据归档情况	已上传平台, 数据包 ID: _____	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	
验收结论	<input type="checkbox"/> 合格, 准予进行填筑施工。 <input type="checkbox"/> 不合格, 需处理后再报验。		
监理工程师意见		签名:	日期:
施工单位	技术负责人:	测量员:	

## D.2 单层填筑施工过程数字化记录表

本表用于记录从填料进场到本层碾压完成的智能化施工全过程数据，宜由系统平台自动生成初稿，经相关人员审核确认后生效。

表 D.2 第\_\_\_\_层填筑施工过程数字化记录表

工程名称			层号/里程				
施工日期	年 月 日		填料类型				
数字化设计参数	设计厚度：_____m； 设计标高：_____m； 目标 CMV：_____						
<b>一、 填料运输与溯源</b>							
批次号/车号	料源	进场检验结果	运输任务号	卸料网格/区域			
(自动从平台关联生成多行数据)							
统计	总车次：_____； 总方量：_____m <sup>3</sup> ； 合格率：_____%						
<b>二、 摊铺作业（智能控制）</b>							
设备编号	作业时间	平均摊铺厚度(m)	厚度合格率(%)	平整度(mm)	操作员		
(自动从平台关联生成多行数据)							
<b>三、 碾压压实作业（智能压实）</b>							
设备 编号	碾压 时间	预设/采用 工艺参数	压实结果 (基于平台云图)			补压情况	
		遍数	振幅(mm)/ 频率(Hz)	平均 CMV	CMV 合 格率(%)	CV 值(%)	区域 遍数
(自动从平台关联生成多行数据)							
<b>四、 含水率控制</b>							
监测时段	监测方式	平均含水率(%)	最优含水率(%)	控制结论	调控措施		
(自动从平台关联生成多行数据)							
<b>五、 层厚与平整度数字化检测</b>							
检测时间	检测方法	平均层厚(m)	层厚合格率(%)	平整度(标准差, mm)	检测报告 ID		

(自动从平台关联生成多行数据)					
<b>六、层间数字化验收</b>					
<b>验收日期</b>	年 月 日				
<b>验收依据</b>	1. 本记录表数据； 2. 平台压实云图与报告； 3. 层厚检测报告。				
<b>验收结论</b>	<input type="checkbox"/> 合格， 同意进行下一层施工。 (数字化模型已更新为基准面， 本层数据包已归档， 哈希值：0x...) <input type="checkbox"/> 不合格， 需整改。				
<b>签字栏</b>	<b>施工单位</b>	技术负责人：		日期：	
	<b>监理单位</b>	监理工程师：		日期：	
<b>备注</b>	1. 本表为智能化施工核心记录， 所有数据原则上应来自施工管理平台自动采集与统计。 2. “压实结果”等栏应以平台生成的报告截图或数据 ID 作为附件。 3. 验收结论需在平台上同步进行电子签认。				

### D.3 使用说明

- a) 表D.1适用于基底处理后的首次数字化验收，是后续填筑的基准。
- b) 表D.2是核心记录表，旨在记录单层填筑的全过程。理想情况下，表中灰色部分应由施工管理平台根据实时数据自动填充生成，现场技术人员只需对关键结论和异常情况进行确认与填写。
- c) 所有记录表应作为数字化竣工资料的一部分进行电子化归档，并与平台中的原始数据、模型、报告通过唯一ID进行关联，确保记录的真实性、完整性与可追溯性。归档文件宜采用不可编辑格式。
- d) 当施工管理平台功能完备时，可完全实现本表式样的无纸化在线填写、流转与签认。