

# 强夯施工智能化监测系统的开发

吴增巍<sup>1</sup>, 谢文婕<sup>1</sup>, 温宝军<sup>1\*</sup>, 梁 谊<sup>2</sup>

(1. 北京合众鼎新信息技术有限公司, 北京 100176; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 为了解决传统强夯施工中监测不精准的问题, 通过集成北斗/GNSS 天线、智能接收机、RFID 落距传感器、智能显控终端等硬件设备, 研发了强夯施工质量智能化监测系统, 对强夯工程的关键工序进行自动、实时、动态、高效的监测和记录。系统通过北斗/GNSS 天线的高精度定位数据进行夯点的定位和引导, 使用 RFID 落距传感器, 根据第一次提锤高度和第二次提锤高度的差值计算夯沉量与夯击次数, 利用数字化施工云平台实现对施工过程的全面监测、远程管理和实时协作。系统减少了人为错误和不确定性, 提高强夯施工效率和质量, 为强夯施工的发展提供重要的技术进步和创新。

**关键词:** 强夯; 施工质量; 物联网; 监测系统; 北斗; 云平台

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0091-07

## Development of intelligent monitoring system for dynamic compaction construction

WU Zeng-wei<sup>1</sup>, XIE Wen-jie<sup>1</sup>, WEN Bao-jun<sup>1\*</sup>, LIANG Yi<sup>2</sup>

(1. Beijing UniTop Information Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;

2. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China)

**Abstract:** In addressing the challenge of imprecise monitoring within traditional dynamic compaction construction, an intelligent monitoring system for quality assurance has been developed. This system integrates hardware components, including Beidou/GNSS antennae, intelligent receivers, RFID fall distance sensors, and intelligent display and control terminals. It automates real-time, dynamic, and efficient monitoring and recording of key procedures throughout the dynamic compaction. The system employs the high-precision positioning data from the Beidou/GNSS antenna to guide the compaction point, and utilizes RFID sensors to calculate the compaction settlement and the times of dynamic compaction based on the difference between the height of the first hammer lift and the second hammer lift. The digital construction cloud platform realizes comprehensive monitoring, remote management and real-time collaboration during the construction process. This system effectively mitigates human errors and uncertainties, thus enhancing the efficiency and quality of dynamic compaction construction. Additionally, it contributes significantly to technological progress and innovation in the realm of dynamic compaction development.

**Key words:** dynamic compaction; construction quality; Internet of Things; monitoring system; Beidou; cloud platform

## 0 引言

强夯法是一种常用的地基处理方法, 原理是将十几吨至上百吨的重锤, 从几米至几十米的高处自由落下, 对土体进行动力夯击, 强制压密地基土, 达到减少地基压缩变形、提高地基强度和承载力、防止砂性土地基发生振动液化的目的, 以此控制基

础的强度和抗渗透能力<sup>[1-3]</sup>。对于强夯法, 学者们进行了广泛的研究, 其中高志斌<sup>[4]</sup>以北京新机场飞行区工程为背景, 研发了飞行区工程数字化施工和质量监控技术, 实现了建设管理有序、施工过程质量受控; 梅涛涛等<sup>[5]</sup>对中国和欧美在强夯设计参数选择和强夯施工监测方面进行了对比; 朱彦鹏等<sup>[6]</sup>分析了强夯法在山区高填方机场地基加固中的最优

收稿日期: 2023-07-31

作者简介: 吴增巍 (1985—), 男, 北京人, 硕士, 中级工程师, 主要从事机械控制工程领域。E-mail: 24834454@qq.com。

\*通信作者: 温宝军 (1983—), 男, 北京人, 本科, 中级工程师, 主要从事数字化施工领域。E-mail: bj.wen@unistrong.com。

夯击次数及加固深度,综合评价强夯法在地基加固中的效果;孙进忠等<sup>[7]</sup>对强夯施工过程中夯点土体加固状态实时振动监控的理论和 technical 问题、多道瞬态瑞雷波地基加固质量检测的关键技术问题、强夯振动特征等进行了深入研究;杨利萍等<sup>[8]</sup>阐述了强夯法施工技术在非饱和土地基处理工程中的应用机理,提出施工工艺流程和质量检测与施工操作要点;李同贵<sup>[9]</sup>确定了昆明新机场飞行区土体参数,总结强夯施工技术的优点;王振克等<sup>[10]</sup>研究了道路路基设计中强夯法的应用。近年来,强夯施工中频繁出现了“夯沉量不够”、“偷锤”、“漏锤”、“提升高度不足”等质量问题,给工程带来安全隐患,主要表现为以下几个方面:施工精度、施工情况记录均由施工人员与作业人员进行监管与控制,人工测量方法造成施工过程和工程质量参数可信度降低,施工人员也容易偷工减料;施工质量程度往往取决于操作手的施工经验,这种情况为施工质量控制带来了极大阻力,造成工程质量无法控制,严重时甚至造成重大经济损失。为此,对强夯施工过程实现自动化监测,提高工程质量势在必行。强夯施工过程的自动化监测,实时记录强夯施工过程中的各项参数,实时上传数字化监测平台,改变了人工记录的失准和低效。同时,自动实现夯点放样和夯沉量测量,自动记录可实现夜间作业,日夜轮班能缩短工期,提高了生产效率、保证生产质量,客观评价了生产管理水平<sup>[11]</sup>。

强夯施工监测系统的开发存在以下难题:夯击次数、夯沉量等核心数据的实时记录和监测;强夯施工所产生的机械震动比较大,对数字化设备容易产生震动破坏等<sup>[12]</sup>。

本文通过集成北斗/GNSS 天线、智能接收机、落距传感器、张力传感器、智能显控终端等硬件设备,建立了强夯施工智能化监测系统和数字化施工云平台,研发了强夯施工智能化监测系统,对强夯工程的关键工序进行自动、实时、动态、高效的监测和记录,特别对强夯施工验收检测的重点参数,包括夯击次数及夯击遍数、夯沉量、夯击范围进行自动监测,对施工过程、质量进行全方位控制,相关研究可为类似系统的开发提供参考。

## 1 系统设计

强夯施工智能化监测系统采用北斗高精度定位技术,结合传感器和控制模块等装置,在施工过程中对夯击遍数、夯锤落距、夯点位置、夯沉量等

进行记录和计算,并对数据进行存储、上传并分析。针对指定的施工区域,监测系统为业主、监理和施工单位等工程各参与方提供了数字化施工云平台,各方可登录平台查看实时施工进度,及时掌握施工质量、工程计量等信息。

### 1.1 系统组成

强夯施工质量智能化监测系统硬件部分由北斗/GNSS 天线、MR1 智能接收机、RFID 落距传感器、张力传感器、MD-4G 智能显控终端组成,软件部分由智能强夯施工系统、数字化施工云平台组成,硬件组成如图 1 所示。



图 1 强夯施工质量智能化监测系统硬件

Fig. 1 Hardware of intelligent monitoring system for dynamic compaction construction quality

(1) GNSS 强固型天线:涵盖 BDS、GPS、GLONASS 和 GALILEO 的四系统全频外置测量天线,满足高精度、多系统兼容的需求。

(2) MR1 智能接收机:支持蓝牙、电台等功能,RTK 水平精度为 10 mm+1 PPS,高程精度为 20 mm+1 PPS,为夯点定位提供高精度支持。

(3) RFID 落距传感器:支持协议 ISO 15693 标准,内置滤波、隔离模块,对 EMC 具有很强抗干扰能力,防护等级 IP67,适应各种恶劣环境。

(4) 张力传感器:钢丝绳直接串接在传感器上,测量钢丝绳的张力,具有极高的安全性。

(5) MD-4G 智能显控终端:10.1 英寸一体化的车载电脑,集成高分辨率 LCD 屏,亮度达 750 nits,支持包括 RS-232、RS-485、USB2.0、GPIO、

CAN、VIDEO 等多种信号, 支持 WI-FI、3G/4GLTE 全网通的网络信号, 提供实时通信连接能力。

上述硬件系统中, 北斗/GNSS 天线直接接入智

能显控终端, 张力传感器通过 CAN 接口, RFID 传感器通过 RS485 接口接入智能显控终端, 其电器设备连接如图 2 所示。

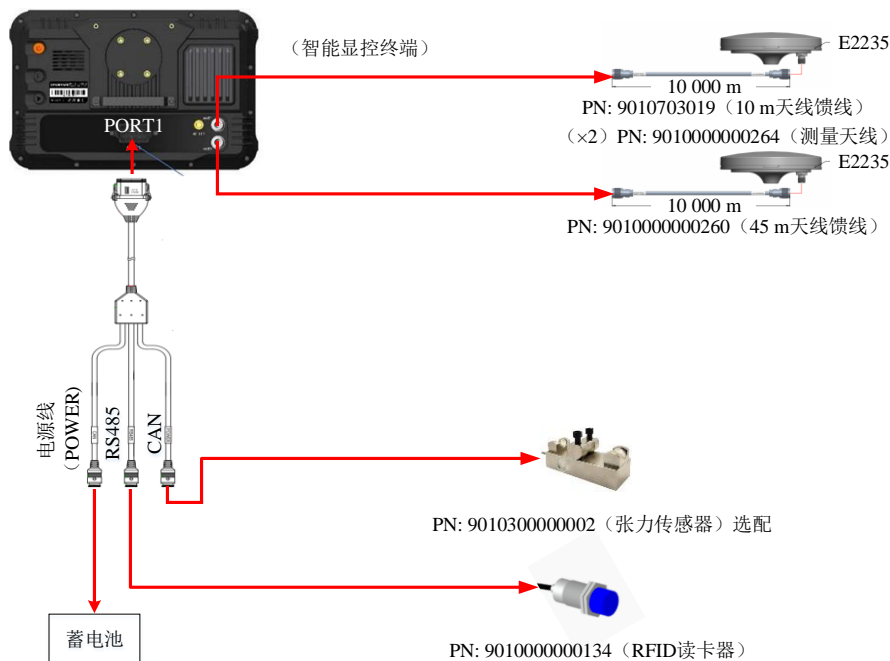


图 2 强夯施工智能化监测系统电器设备连接示意图

Fig. 2 Electrical equipment connection of dynamic compaction construction intelligent monitoring system

## 1.2 工作原理

强夯施工智能化监测系统通过北斗/GNSS 天线的高精度定位数据来定位强夯机械的准确位置, 系统实时追踪强夯机械在施工现场的位置, 并确保其按照预定的路径和区域施工。系统能够对强夯点位进行引导, 不但能够引导操作员到正确的夯击点位, 同时能对夯锤点位进行方位的精确引导, 实现夯击范围的要求。

系统在卷扬位置安装 RFID 落距传感器标签, 通过标签读取, 实时采集和监测卷扬工作周长, 通过数据分析和计算得出夯锤次数、夯击时间、单击夯击能、落距、夯沉量等施工参数。使用 RFID 可以计算夯锤的上提速度和下落速度, 同时根据第一次提锤高度和第二次提锤高度的差值计算夯沉量。另外, 通过测量提锤高度是否达到起点高度以上还可算出夯击次数。

## 1.3 施工流程

施工前, 进行施工数据准备, 制作设计数据, 设计数据可通过多种方式导入智能显控终端, 安装在终端的智能强夯施工系统对设计数据进行检查, 若不合格需重新制作, 若合格, 则可进行夯点引导。

施工中, 强夯施工智能化监测系统实时记录施工过程数据, 包括夯击位置、夯击能、夯击遍数、实际落距、设备锤重等信息, 数据实时上传云端数

字化监测平台进行分析展示。施工流程图见图 3。

## 1.4 系统功能

强夯施工智能化监测系统包含 4 个功能模块, 分别为: 注册模块、主界面模块、设置模块、施工单元管理模块。其中, 主界面模块是系统施工过程中的主要展示界面, 通过图形、数值等多种方式, 实时展现夯击过程的关键参数和完成状态, 监测结果直观易懂, 即使在夜间或其他视野受限情况下, 系统仍能支持昼夜施工和透明化作业过程, 丰富监管手段。此外, 系统支持与数字化施工云平台的连通, 实现双向传输。平台可以下发设计文件或施工任务, 施工数据则实时回传同步到云端, 实现远程质量和进度的可视化管理, 强夯施工智能化监测系统主界面图如图 4 所示。

强夯施工智能化监测系统具有高度适配性和灵活性的特点。它能够支持点夯、满夯等多种施工工艺, 无论是有夯点设计还是无夯点设计施工, 都能兼顾。此外, 系统还能根据不同的夯点布设方式提供夯点引导功能。系统采用全球坐标库, 可以根据使用习惯设置坐标、桩号和单位的不同表示形式, 满足全球用户的需求。项目管理界面如图 5 所示, 在项目管理方面, 系统支持多项目多工地管理, 用户可以快速切换, 实现不同项目、不同工地的施工监测。

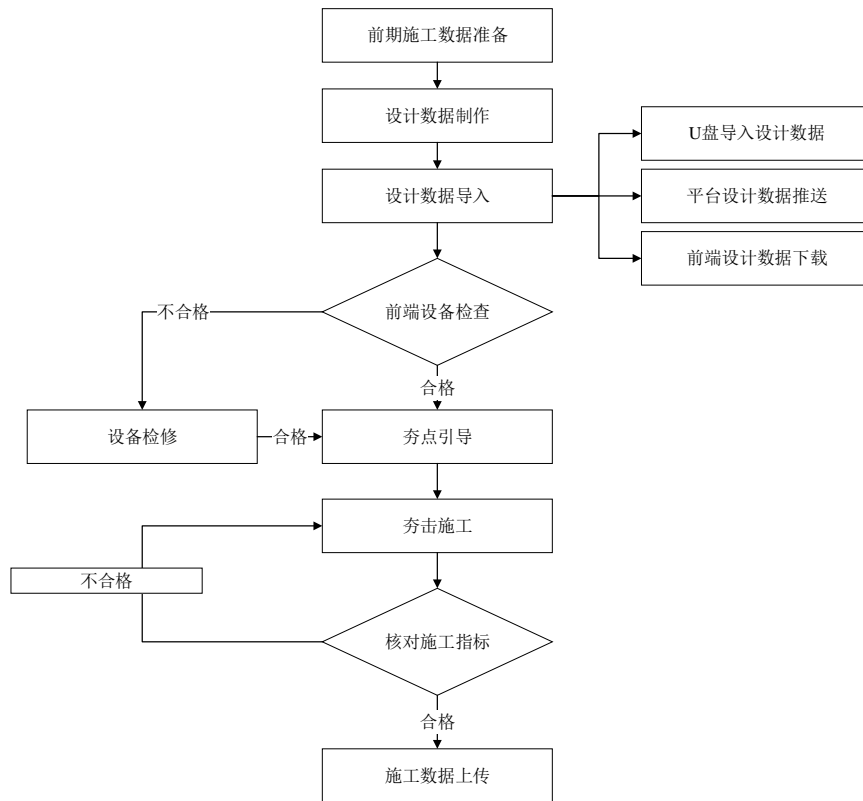


图3 施工流程图

Fig. 3 Construction flow chart

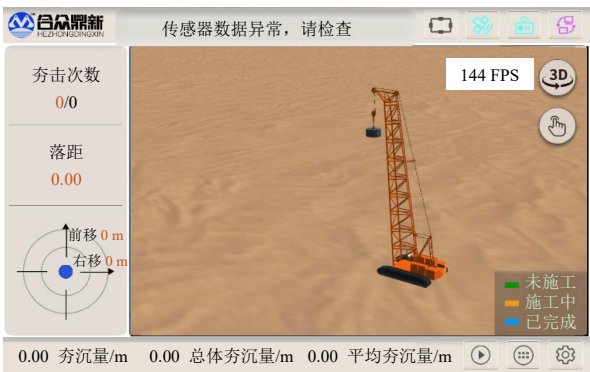


图4 强夯施工智能化监测系统主界面图

Fig. 4 Main interface of dynamic compaction construction intelligent monitoring system

环境中接收机的精度状况，有助于避免因精度不够而导致的施工质量不达标情况的发生。为了达到高精度的定位，系统采用雅典娜引擎的RTK与L-Band“中国精度”技术，即使在无基站的情况下，智能接收机仍能实现厘米级精度，系统具备实时、精准、高效的特点。另外，系统支持网络差分功能，减少架设移动基站所带来的麻烦，提供更便捷的施工环境。



图5 项目管理界面图

Fig. 5 Project management interface

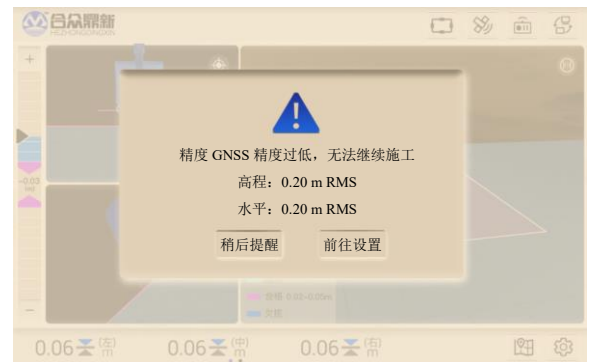


图6 GNSS精度界面图

Fig. 6 GNSS accuracy interface

GNSS 精度界面如图 6 所示，针对 GNSS 精度问题，系统提供精度设置功能，及时提示当前作业

系统配置如图 7 所示，在系统使用之前，需要在设置模块对系统进行安装校准，通过校准落距传感器，设置车辆参数、轮滑半径、移动阈值、张力传感器等参数，实现系统的安装校准。

系统能够保障工地安全性。首先，系统采用无

桩化施工方法, 无需测量员进行放样施工基准线的工作, 降低了对测量的依赖, 减少了现场施工辅助和核验人员的需求。通过自动化、减人和智能化手段, 提升了工地的安全性。其次, 系统配备电子围栏功能, 可以设置危险躲避区域, 避免盲目操作破坏周边的地下埋设物, 从而防止意外事故的发生, 减少经济赔偿的风险, 并提高施工的安全性。此外, 系统还可以监督施工过程, 减少漏夯等行为, 确保夯锤落距和夯击势能达到标准要求。系统会监测施工是否按照夯点布设等要求完成作业, 从而保证工程质量, 并进一步提升工地的安全性。



图 7 系统配置图

Fig. 7 System configuration diagram

### 1.5 数字化施工云平台功能

数字化施工云平台如图 8 所示, 数字化施工云

平台是一个集成多项功能的创新工具, 旨在提升施工项目的效率、质量和安全性。平台通过整合各种技术和数据分析工具, 实现了对施工过程的全面监测、远程管理和实时协作。数字化施工云平台可以实现设计文件和施工任务的双向传输。设计方可以将设计文件直接下发到平台上, 而施工人员则可以从平台获取最新的施工任务。这样的实时交互确保了设计与施工的紧密衔接, 减少沟通误差和时间延误。区别于传统的手动记录方式, 平台支持施工数据的实时回传和同步至云端。强夯施工智能化监测系统将强夯施工过程的数据实时地上传到平台, 进行管理和展示, 电脑端通过浏览器即可登录平台, 查看现场施工数据, 动态掌握施工情况, 并记录在数据库中, 生成永久记录供查询、参考。这样, 监理人员和管理者可以随时访问和分析这些数据, 进行远程质量和进度的可视化管理, 及时做出决策和调整。此外, 数字化施工云平台还提供了多种功能模块, 例如工艺库、材料管理、人员调度等。这些模块可以帮助项目团队进行工艺规范的共享和应用、材料的追踪和管理、人员的协调和优化, 从而提高施工效率和质量。平台采用数据化、图形化的方式, 登录人员可在平台上实时查看实际夯击位置、夯击能、夯击遍数、实际落距、设备锤重、设备 ID、回传数据的时间戳等信息。



图 8 数字化施工云平台

Fig. 8 Digital construction cloud platform

## 2 应用案例

强夯施工智能化监测系统应用于某机场强夯

施工项目中, 施工工艺要求 3 000 kN 的点夯, 夯击次数为 10 次, 最后 2 击夯沉量不超过 5 cm。取施工区域内 100 个点位分析, 系统使用后, 夯点坐标偏差均在 2 cm 以内, 其现场实测 (GPS) 均值数据

见表1,系统监测均值数据见表2,可看出,现场实测均值数据和系统监测均值数据最后2次落距偏差均在5 cm以内,现场实测均值数据与系统监测均值数据总夯沉量的偏差为9 cm,在工艺要求的范围内,可判定系统监测的数据有效。同时,系统的使用极大地提升了施工效率,节省了人力成本,一台车由原来的3~4个人,既要操作又要测量记录,缩减为仅需1人就可完成全部工作。

表1 现场实测(GPS)均值数据

Table 1 Mean value of on site measured (GPS) data

夯击次数	夯沉量均值/cm	夯击次数	夯沉量均值/cm
1	30	8	5
2	18	9	5
3	20	10	4
4	12	11	13
5	7	12	5
6	6	13	3
7	11	14	2

注:最后2击平均夯沉量为2.5 cm,总夯沉量均值为101 cm。

表2 系统监测均值数据

Table 2 Mean value of system monitoring data

夯击次数	夯沉量均值/cm	夯击次数	夯沉量均值/cm
1	25	8	9
2	9	9	8
3	8	10	5
4	7	11	11
5	4	12	6
6	5	13	4
7	7	14	2

注:最后2击平均夯沉量为3 cm,总夯沉量均值为110 cm。

### 3 结论

强夯施工质量智能化监测系统利用“物联网+”的形式,结合现代测绘技术与传统的施工手段,有效地实现了跨学科、跨地域的技术对接,在施工过程中达到解放人力资源、提高施工效率和质量、降低施工成本等目的,具备如下特点:

(1)系统能够实时监测施工过程中的关键参数,如夯击位置、夯击能、夯击遍数等,并实现自动化控制。通过实时数据采集和分析,可以及时调整施工策略,确保施工质量和效果。

(2)系统结合物联网、人工智能和数据分析技术,具备处理大量施工数据的能力。通过数据分析和模型预测,可以对施工过程进行优化和改进,提

高施工效率和质量。

(3)系统支持与数字化施工云平台的连接,实现双向传输。设计文件或施工任务可以在平台上下发,而施工数据可以实时回传并在云端同步。这种远程管理和协同工作功能使得项目团队能够实时共享信息、进行远程监管和决策。

(4)系统通过无桩化施工、电子围栏等功能来保障工地的安全性。它降低了对测量的依赖,减少了现场辅助人员,从而减少人为错误和提高施工安全性。

### 参考文献

- [1] 王伟伟. 非脱钩自动强夯 SDDC 技术在建筑工程中的应用[J]. 城市住宅, 2020, 27(3): 227-228.  
WANG Wei-wei. Application of non-decoupling automatic dynamic compaction SDDC technology in construction engineering[J]. City & House, 2020, 27(3): 227-228.
- [2] 常世永. 机场工程地基加固中强夯法的运用之研究[J]. 建材与装饰, 2020(21): 273, 275.  
CHANG Shi-yong. Study on the application of dynamic compaction method in airport foundation reinforcement[J]. Construction Materials & Decoration, 2020(21): 273, 275.
- [3] 李泽光. 强夯地基处理的优越性及应用要点[J]. 四川建材, 2023, 49(4): 76-77.  
LI Ze-guang. Advantages and application points of dynamic compaction foundation treatment[J]. Sichuan Building Materials, 2023, 49(4): 76-77.
- [4] 高志斌. 北京新机场飞行区工程数字化施工和质量监控技术研究[J]. 民航学报, 2020, 4(2): 12-16, 29.  
GAO Zhi-bin. Study on digital construction and quality control technology of aircraft movement area project of Beijing new airport[J]. Journal of Civil Aviation, 2020, 4(2): 12-16, 29.
- [5] 梅涛涛, 王德咏, 王新, 等. 中欧美强夯法地基处理对比[J]. 水运工程, 2019(2): 118-121, 144.  
MEI Tao-tao, WANG De-yong, WANG Xin, et al. Comparison of ground improvement by dynamic compaction in Chinese, European and American codes[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(2): 118-121, 144.
- [6] 朱彦鹏, 师占宾, 杨校辉. 强夯法处理山区机场高填方地基的试验[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 120-125.  
ZHU Yan-peng, SHI Zhan-bin, YANG Xiao-hui.

- Experiment on high-filled foundation treatment of airport in mountainous area with dynamic compaction method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 120-125.
- [7] 孙进忠, 梁向前. 地基强夯加固质量安全监测理论与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.  
SUN Jin-zhong, LIANG Xiang-qian. Theory and Method of Quality and Safety Monitoring for Foundation Dynamic Compaction Reinforcement[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [8] 杨利萍, 贺志贞. 强夯法施工技术在非饱和土地基处理中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(7): 173-175, 203.  
YANG Li-ping, HE Zhi-zhen. Application of dynamic compaction technique in treatment of unsaturated soil foundation[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(7): 173-175, 203.
- [9] 李同贵. 昆明新机场工程飞行区强夯设计及施工技术[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊 4): 184-186.  
LI Tong-gui. Design and construction technology of dynamic compaction in flying area of Kunming new airport project[J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 184-186.
- [10] 王振克, 刘晶. 强夯法处理地基在道路路基设计中的应用研究[J]. 四川水泥, 2021(4): 345-346.  
WANG Zhen-ke, LIU Jing. Study on the application of dynamic compaction method in road subgrade design[J]. Sichuan Cement, 2021(4): 345-346.
- [11] 江妙根, 敬兴科, 魏臻, 等. 机场地基及填筑体强夯法施工质量监控系统[J]. 四川建筑, 2022, 42(增刊 1): 42-43, 46.  
JIANG Miao-gen, JING Xing-ke, WEI Zhen, et al. Construction quality monitoring system of dynamic compaction method for airport foundation and filling body[J]. Sichuan Architecture, 2022, 42(S1): 42-43, 46.
- [12] 王龙. 数字化监控技术在机场场道工程中的应用研究[J]. 民航学报, 2019, 3(5): 22-24, 5.  
WANG Long. A research on applying digital monitoring technology in airport field engineering[J]. Journal of Civil Aviation, 2019, 3(5): 22-24, 5.