模块化便携式动力触探试验钻机设计与试验研究

卢 倩[1,2]，谭春亮[1,2]，祝 强[1,2]，岳永东[1,2]
（1.北京探矿工程研究所，北京 100083；2.中国地质调查局绿色钻探技术创新中心，北京 100083）

摘要：针对动力触探试验钻机结构笨重、场地适应性差、人工计数误差大等问题，研制了一种模块化便携式动力触探试验钻机。整机采用三角支撑模块化分体结构，集成单绞车双工况、单泵分时液压供油、四滑轮省力系统与机械式自动计数机构，单件质量控制在100 kg以内，支持人力搬运与无人机装载。基于动量定理推导等效冲击载荷，开展瞬态冲击动力学与模态分析，针对焊接接头应力集中增设三角加强筋板进行结构优化，完成样机室内标定与多场地野外对比试验。结果表明：机架最大动态应力由87.2 MPa降至73.6 MPa，刚度提升22.8%，频率隔离比达34.05，无共振风险；能量传递效率达78.2%，机械计数器连续万次锤击无误差；野外试验单孔拆装仅22 min、2人作业、占地1.6 m²，人力成本较传统车载钻机降低75%，综合性能优于传统车载钻机与人工简易设备。该钻机可实现轻量化、高精度、低扰动原位测试，适用于山地、城区、灾害隐患区等受限场地岩土勘察，为轻量化钻探装备的抗冲击、高精度设计提供参考。

关键词：动力触探试验；便携式钻机；模块化设计；瞬态冲击动力学；机械式自动计数；结构优化；无人机装载；岩土工程勘察

中图分类号：P634.3⁺1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0084-07

Design and experimental study of a modular portable dynamic penetration test drilling rig

LU Qian[1,2], TAN Chunliang[1,2], ZHU Qiang[1,2], YUE Yongdong[1,2]
(1. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing* 100083, *China*; 2. *Technology Innovation Center of Green Drilling, China Geological Survey, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To address the problems of conventional dynamic penetration test (DPT) drilling rigs, such as bulky structures, poor adaptability to confined sites, and considerable manual counting errors, a modular portable DPT drilling rig was developed. The rig adopted a triangular-support modular split structure and integrated single-winch dual-mode operation, single-pump time-sharing hydraulic supply, a four-pulley force-reduction system, and a mechanical automatic counting mechanism. The mass of each module was controlled within 100 kg; the rig supported manual handling as well as UAV payload transport. The equivalent impact load was derived based on the impulse-momentum theorem, and transient impact dynamics and modal analysis were conducted. Triangular stiffening ribs were added as a structural optimization measure to alleviate stress concentration at welded joints. Indoor calibration of the prototype and multi-site field comparative tests were completed. The results show that the maximum dynamic stress of the frame decreased from 87.2 MPa to 73.6 MPa, the stiffness increased by 22.8%, and the frequency isolation ratio reached 34.05, indicating no resonance risk. The energy transfer efficiency reached 78.2%, and the mechanical counter exhibited zero error over 10000 consecutive hammer blows. In the field tests, single-hole assembly and disassembly took only 22 min, required two workers, and occupied a floor area of 1.6 m²; the labor cost was 75% lower than that of conventional vehicle-mounted rigs, and the overall performance was superior to that of conventional

收稿日期：2026-08-07；**修回日期**：2026-10-10　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.010
基金项目：国家科技重大专项（编号：2024ZD1003100）；中国地质调查局地质调查项目（编号：DD202402053）
第一作者：卢倩，女，汉族，1984年生，工程师，探矿工程专业，硕士，从事地质钻探装备、绿色勘查技术研发工作，北京市海淀区学院路29号，250814057@qq.com。
引用格式：卢倩，谭春亮，祝强，等.模块化便携式动力触探试验钻机设计与试验研究[J].钻探工程，2026，53(6)：84-90.
LU Qian, TAN Chunliang, ZHU Qiang, et al. Design and experimental study of a modular portable dynamic penetration test drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 84-90.

vehicle-mounted rigs and simple manual equipment. The rig enables lightweight, high-precision, and low-disturbance in-situ testing and is suitable for geotechnical engineering investigation in confined sites such as mountainous areas, urban areas, and geohazard-prone areas, which provides a reference for the impact-resistant and high-precision design of lightweight drilling equipment.

Key words: dynamic penetration test; portable drilling rig; modular design; transient impact dynamics; mechanical automatic counting; structural optimization; UAV payload; geotechnical engineering investigation

0　引言

动力触探试验(DPT)是岩土工程勘察中应用最广泛的原位测试方法之一,通过锤击次数判断土层密实度、承载力及软弱夹层分布,广泛应用于地基评价、边坡勘察及灾害隐患排查[1-2]。动力触探试验有轻型(N10)、中型(N28)、重型(N63.5)和超重型(N120)。常规中型及以上动力触探钻机结构笨重、转运条件要求高,仅适用于开阔施工场地,难以进入山林、陡坡、狭窄城区等复杂区域[3-4]。同时,现场锤击次数多依靠人工记录,长期作业易出现漏记、错记,导致试验数据离散性偏大[5]。

目前国内便携式钻探装备多聚焦于取心钻进,针对动力触探试验的专用轻量化设备较少,普遍缺少自动计数机构与一体化液压作业模块[6-7]。国外便携式测试设备模块化程度高,但造价昂贵、配件通用性差,难以适配国内野外复杂工况[8-9]。为解决复杂场地动力触探试验作业难题,本文研制一款模块化便携式动力触探试验钻机,通过结构创新、仿真校核、样机试制与野外试验验证,实现轻量化、高精度、低扰动的原位动力触探试验,可使用无人机装载,为受限场地岩土勘察提供新型装备支撑。

1　钻机整体结构设计

1.1　整机布局

整机采用模块化设计,主要由底座、三角支撑机架、桅杆定滑轮组、液压绞车、动力触探锤击机构、自动计数机构及液压控制系统组成(图1)。机架采用立柱与斜支撑铰接结构,形成稳定的三角承载体系,可有效承受锤击作业产生的反冲击载荷与侧向倾覆力。桅杆顶部布置四组同轴定滑轮,可有效限制钢丝绳偏移,防止作业过程跳槽脱绳。整机所有功能模块均可独立拆分,单件质量控制在100 kg以内,两人可搬运。

该钻机可使用无人机装载,解决山地运输问题,满足复杂场地转运需求[10-11]。无人机装载需满足质量、重心、结构强度及挂载固定等特殊要求:

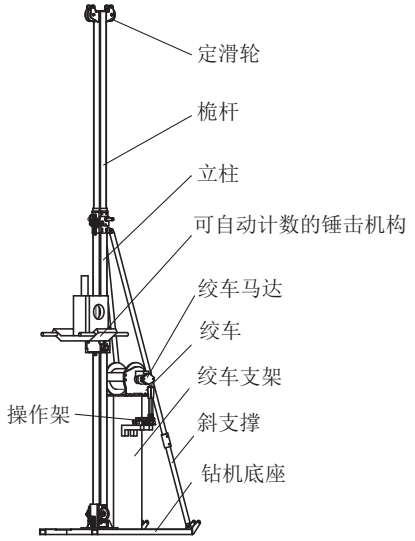


图1　钻机结构示意

Fig.1　Structure of the drilling rig

(1)装载总质量不得超过无人机最大起飞质量,有效载荷应预留安全余量;(2)载荷重心必须落在无人机允许重心包线内,避免偏载引发姿态失稳;(3)装载设计应考虑起飞、降落及阵风带来的动冲击载荷,对挂载支架、机身连接部位开展强度校核;(4)挂载系统需配备可靠机械锁止机构,高风险吊运场景应设置应急脱载装置;(5)挂载载荷会改变整机气动特性与转动惯量,增大飞行扰动,需评估载荷摆动对飞行稳定性的影响。

1.2　核心功能模块

设备采用单绞车双工况设计,同一套提升机构可完成动力触探装置架设提升与试验后钻杆起拔作业,简化整机传动结构。液压系统采用分时供油模式,通过多路换向阀切换执行机构,有效减少液压泵、马达数量,降低整机体积与质量。动力单元可根据场地工况选配汽油机、柴油机或电机,兼顾野外无电场地与城区环保施工场景[12]。提前用DPT摸清浅层土体强度,能确定钻孔护壁方式、钻进参数,避免钻进过程中孔壁坍塌。

2 关键机构设计与分析

2.1 锤击机构

动力触探锤击机构主要由动力触探杆、二级配重锤、曲柄驱动组件构成(图2)。液压马达驱动曲柄连续回转,周期性抬升、释放重锤,实现标准自由落体贯入。锤体与动力触探杆采用键槽导向配合,可限制周向偏转,保证锤击力竖直向下,减少能量损耗[13]。装置如图3所示,曲柄轴承与锤体悬臂保持滚动接触,传动平稳、冲击噪声小,可满足长时间连续作业需求。

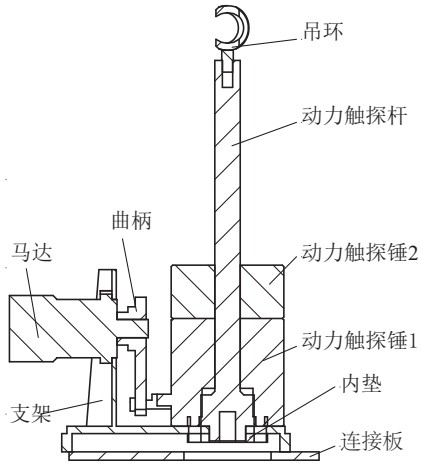


图2 动力触探装置剖面结构示意

Fig.2 Sectional structure drawing of the DPT assembly



图3 动力触探装置

Fig.3 The DPT assembly

2.2 机械式自动计数机构

在动力触探机构侧面集成机械式自动计数器(图4、图5),依托曲柄回转运动实现自动触发计数,每完成一次锤击循环自动记录一次。该结构无需电源、电子元器件,可适应野外潮湿、多尘、温差大的恶劣环境,消除人工记录误差,提升试验数据的客观性与准确性[4]。

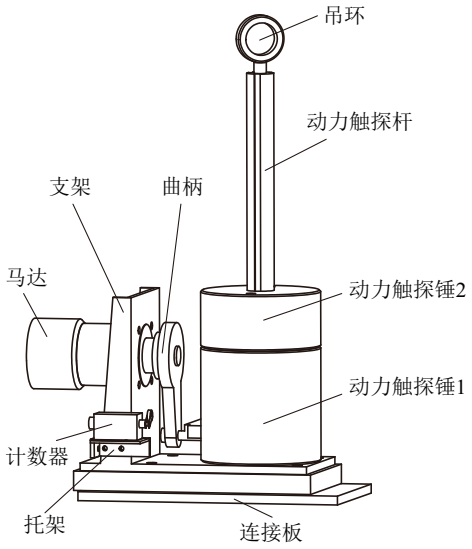
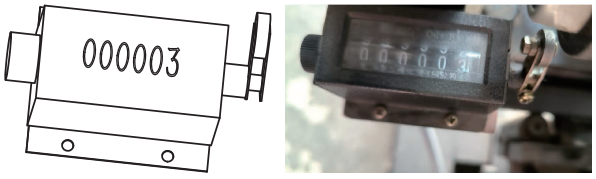


图4 动力触探装置结构示意

Fig.4 Structure of the DPT assembly



(a)结构示意 (b)实物

图5 机械式计数器

Fig.5 Independent mechanical counter

2.3 绞车与省力滑轮系统设计

设备采用四滑轮同轴导向省力结构(图6),钢丝绳经多组定滑轮导向后连接提升大钩上的动滑轮,可有效放大绞车拉力,降低液压系统负载。滑轮组可有效避免钢丝绳跳槽、脱绳问题,提升野外作业安全性。

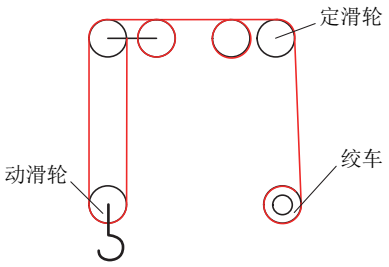


图6 钢丝绳与定滑轮布置示意

Fig.6 Schematic layout of steel wire rope and fixed pulleys

绞车具备双工作模式:一是完成动力触探装置整体提升架设,二是试验结束后起拔钻杆与贯入器。单绞车多功能设计大幅简化整机结构,减少设备自重,适配轻量化便携式需求[12]。

2.4　分时液压供油系统设计

液压系统采用单泵分时供油方案,通过多路换向阀切换油路,分别驱动动力触探锤击马达与绞车提升马达。锤击作业时油路切换至锤击马达,实现连续自动贯入;起拔作业时切换至绞车油路,完成钻杆起拔。液压快速接头可实现动力单元快速拆装,满足模块化转运需求[7]。该结构取消双泵设计,有效控制设备体积与质量,适配野外轻便施工场景。

3　机架关键结构动力学分析与结构优化

动力触探作业承受高频冲击载荷,仅依靠静态力学分析难以表征锤击瞬间的应力突变与动态响应特征。为揭示机架在瞬时冲击载荷下的力学响应规律,验证结构可靠性并开展结构优化,本文开展瞬态冲击动力学理论推导、模态振动分析及优化对比研究,从动态强度、结构刚度、抗共振特性、优化增益四个维度完成结构校核,满足钻探装备关键结构动力学分析的深度要求。

3.1　载荷理论推导与边界条件设置

机架主体采用Q235碳素结构钢,材料参数:弹性模量 $E=206\ \mathrm{GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,密度 $\rho=7850\ \mathrm{kg/m^3}$,屈服强度 $f_y=235\ \mathrm{MPa}$。依据重型动力触探试验锤击工况设置冲击载荷:锤体质量 $m=63.5\ \mathrm{kg}$,标准落距 $h=0.76\ \mathrm{m}$。

锤体自由下落重力势能 E_p:

$$E_p=mgh \tag{1}$$

锤体撞击机架瞬间的速度 v:

$$v=\sqrt{2gh} \tag{2}$$

基于动量定理,冲击过程满足:

$$F_p t=mv \tag{3}$$

式中:m——锤体质量;g——重力加速度,取 $9.8\ \mathrm{m/s^2}$;h——锤体落距;F_p——单次冲击等效载荷;t——冲击持续时间,取 $0.02\ \mathrm{s}$。

代入计算,得:$E_p=472.9\ \mathrm{J}$,$v=3.86\ \mathrm{m/s}$,$F_p=12.26\ \mathrm{kN}$。

采用该等效载荷模拟自由落体冲击作用。底座施加全固定约束,铰接位置释放对应转动自由度。

3.2　瞬态冲击动力学响应分析

瞬态动力学控制方程:

$$M\ddot{u}+C\dot{u}+Ku=F(t) \tag{4}$$

式中:M——结构质量矩阵;C——阻尼矩阵;K——刚度矩阵;$\ddot{u}$——节点加速度向量;$\dot{u}$——节点速度向量;u——节点位移向量;$F(t)$——随时间变化的冲击载荷向量。

将桅杆简化为悬臂梁模型,冲击等效载荷作用于桅杆顶端,立柱与斜支撑焊接接头作为危险截面,该截面同时承受轴向压力与弯曲作用。机架立柱采用方形空心钢管,外廓尺寸 $70\ \mathrm{mm}\times70\ \mathrm{mm}$,壁厚 $5\ \mathrm{mm}$,桅杆悬臂长度 $L=0.8\ \mathrm{m}$。则危险截面面积 $A=1300\ \mathrm{mm^2}$,截面抵抗矩 $W=26309\ \mathrm{mm^3}$。冲击载荷传递至危险截面时,轴向压力分配系数 $k_1=0.20$,弯矩分配系数 $k_2=0.229$。则轴向压力 $N=k_1F_p=2451.2\ \mathrm{N}$,轴向压应力 $\sigma_N=N/A=1.89\ \mathrm{MPa}$,危险截面弯矩 $M=k_2F_pL=2245.3\ \mathrm{N\cdot m}$,弯曲正应力 $\sigma_M=M/W=85.34\ \mathrm{MPa}$,危险截面组合等效应力 $\sigma_{max}=\sigma_N+\sigma_M=87.2\ \mathrm{MPa}$,低于Q235钢材屈服强度 $f_y=235\ \mathrm{MPa}$,动态安全系数 $n_s=f_y/\sigma_{max}=2.69$,满足冲击工况下结构安全要求。冲击载荷卸载后,结构应力快速衰减,无残余应力累积,机架弹性恢复性能良好,长期循环锤击工况下不会发生塑性变形。机架其余主体区域动态应力均低于65 MPa,整体应力分布均匀。

桅杆顶端最大变形由机架整体刚度分析确定,机架整体冲击方向等效刚度约 $28.8\ \mathrm{kN/mm}$,对应桅杆顶端最大动态变形 $0.425\ \mathrm{mm}$,位于桅杆顶端。该变形引起的动力触探落距偏差较小,小于1 mm限值,对锤击能量传递与贯入测试精度影响有限,满足《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)中重型动力触探设备精度要求[1]。对比静态力学分析结果可知,动力学分析更贴近真实作业工况,能够捕捉瞬时应力峰值与结构振动响应,结构校核结果更加严谨可靠。

3.3　模态共振特性分析

模态分析用于求解结构固有频率与振型,在无外载荷作用下,无阻尼自由振动控制方程:

$$M\ddot{u}+Ku=0 \tag{5}$$

设简谐振动解$u=\phi\sin(\omega t)$，代入得到特征值方程：

$$(K-\omega^2 M)\phi=0 \tag{6}$$

式中：ω——固有角频率；ϕ——固有振型向量。

固有频率f与角频率ω关系：

$$f=\omega/2\pi \tag{7}$$

为避免设备工作激励与机架固有频率耦合引发共振，开展整机模态分析，提取前6阶固有频率如表1所示。设备锤击激励频率$f_e=0.37$ Hz，机架一阶固有频率$f_1=12.6$ Hz。

表1 机架前6阶固有振动频率

Table 1 First six-order natural frequencies of the frame

阶数	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	12.6	18.3	27.5	36.2	45.7	56.1

定义频率隔离比$\lambda=f_1/f_e$，代入得$\lambda=34.05$，频率隔离裕度充足，作业过程不存在共振风险，整机动态稳定性良好，可抑制长期作业带来的振动疲劳损伤。

3.4 结构优化对比与增益分析

针对原始机架焊接接头应力集中问题，采用增设三角加强筋板的优化方案，对优化前后模型开展对比分析，优化效果明显。优化后结构最大动态应力由87.2 MPa降至73.6 MPa，应力降低15.6%；最大动态变形由0.425 mm降至0.346 mm，结构等效刚度提升22.8%。该优化方案未增加整机质量，在维持设备轻量化优势的基础上，进一步提升结构抗冲击性能与疲劳寿命，适配野外长期连续循环锤击作业工况。

3.5 设备结构对DPT试验精度影响机理分析

机架刚度与动态稳定性是决定动力触探锤击数测试精度的核心因素。传统轻便型触探设备机架刚度偏弱，锤击阶段易发生晃动与微变形，造成锤击能量耗散，进而导致试验击数离散性增大[14-20]。本文设备采用三角支撑体系并完成结构优化，原始机架最大动态变形控制在0.425 mm以内，锤体下落垂直度好、能量传递稳定，设备能量传递效率可达78.2%，优于常规便携式动力触探设备。稳定的机械结构有效降低结构振动、构件偏移引入的系统误差，从装备层面保障重型动力触探原位测试数据的准确性与重复性，可为复杂场地土体参数的精准评价提供装备支撑。

3.6 小结

瞬态动力学与模态理论分析结果表明：优化后的钻机机架，动态强度、刚度与抗共振性能均可满足野外重型动力触探冲击作业要求；增设三角筋板的优化方案有效缓解焊接接头应力集中，提升整机服役稳定性。本机架强度储备满足重型动力触探作业需求，设计重点是控制结构变形以保证锤击能量稳定输出，保障重型动力触探原位测试精度。

4 样机试制与野外试验

4.1 样机室内性能标定

完成样机试制后开展室内整机标定，核心参数如表2所示。设备锤重、落距、锤击频率均满足国标规范要求，机械计数器连续万次锤击无误差，液压系统工作稳定，整体性能达标。

表2 样机核心性能参数

Table 2 Key performance parameters of the prototype

参 数 项	实测值
整机质量/kg	98
最大模块质量/kg	63.5
外形尺寸/cm	66×42×250
标准落距/mm	760±1
工作锤击频率/(次·min^{-1})	22
系统额定压力/MPa	15.8
最大起拔力/kN	39.2
能量传递效率/%	78.2

4.2 作业流程

设备整体作业流程简洁高效：场地平整与机架组装—液压系统对接与调试—动力触探机构提升架设—土层锤击贯入、机械自动计数—试验完成后绞车起拔钻杆—设备拆分转场。整套流程无需吊车、辅助起重设备，两名作业人员即可完成全部工序。

4.3 典型工程应用场景分析

该便携式钻机突破传统设备场地限制，主要适配六类受限勘察场景。

(1)山地林地勘察：设备可人力拆分搬运，无需大型车辆进场，适用于山区边坡、林地光伏、林区道路勘察，可在窄人行道、陡坡空地架设施工。

(2)城市狭小空间勘察:适配老旧小区、桥下空间、管线沟槽等狭窄场地,电动模块无尾气、低噪音,满足城区环保施工要求。

(3)乡村小型基建勘察:针对乡村农桥、蓄水池、自建房等小型工程,设备转场快、成本低,适配零散小点位勘察。

(4)地质灾害应急排查:可进入滑坡、泥石流隐患区,快速完成浅层原位测试,为灾害评估提供数据支撑。

(5)生态水土保持勘察:设备占地小、无需修建大面积便道,对地表扰动小,适合生态修复、水土保持监测项目。

(6)小型水利工程勘察:适配田间、河滩、山谷小型水利设施地基勘察,可满足无电野外场地连续作业。

4.4　场地对比试验

选取山林、城区、乡村三类典型场地开展试验,与传统车载钻机、人工简易设备进行对比,施工指标如表3所示。试验结果表明:该设备进场适应性强、施工效率高、数据精度高、重复性好,在复杂受限场地具备显著优势,可有效弥补传统动力触探设备的应用短板。

表3　野外施工综合指标对比

Table 3　Comparison of comprehensive indexes for field construction

钻机类型	单孔拆装时长/min	作业人员/人	作业占地面积/m^2	计数误差/击	单孔人力成本/元
本文便携式钻机	22	2	1.6	0	180
传统车载钻机	125	5～6	13.0	±3(常见误差范围)	720
人工简易设备	38	3	2.8	±5(常见误差范围)	260

5　取得的成果

(1)理论设计与结构优化创新:基于瞬态动力学仿真完成机架结构优化,有效解决轻量化设备普遍存在的应力集中、动态变形偏大的问题,通过机理分析明确了设备结构刚度与DPT试验精度的关联规律,为同类便携式钻探装备的高精度设计提供理论支撑。

(2)功能集成与精度提升创新:集成自主设计的机械式自动计数机构,消除人工记录误差,结合稳定的锤击导向结构,将设备能量传递效率提升至78.2%,显著优于常规便携式动力触探设备,保障了原位测试数据的准确性与重复性。

(3)轻量化与一体化结构创新:采用单泵分时液压供油、单绞车双工况集成设计,在保证设备作业性能的前提下精简整机结构、控制设备自重,兼顾人力转运便捷性与野外作业功能性。

(4)工况适配性与工程价值突出:经仿真校核与多场地试验验证,设备无共振风险、结构稳定性强,多动力模式可适配复杂野外与城区环保不同施工场景,施工扰动小、经济性优异,契合绿色勘察装备发展趋势。

6　结论与展望

本文针对复杂受限场地岩土勘察作业需求,设计研发了一款模块化便携式动力触探试验钻机,突破传统动力触探设备场地适应性差、试验精度低、人力成本高的技术瓶颈。通过集成机械式自动计数机构、单绞车双工况结构与分时液压供油系统,实现了动力触探试验自动化、轻量化、一体化作业。不同于常规轻量化设备仅开展结构设计,本文借助瞬态冲击动力学仿真揭示钻机锤击作用下的动态响应规律,开展结构优化对比与DPT试验精度机理分析,从理论层面验证了设备高精度、高稳定性的作业优势;同时通过样机室内标定与多场景对比试验,量化验证了设备在施工效率、试验精度、经济性及低扰动性方面的综合优势。该设备可有效拓展动力触探试验的应用场景,可为山地、城区、灾害隐患区等受限场地原位测试装备的优化升级提供重要的设计参考与技术支撑。

后续研究可基于本文结构优化方案,进一步优化锤体导向耐磨结构,提升设备长期循环作业的稳定性;同时增设电子数显存储计数模块,形成机械-电子双备份计数系统,提升设备智能化水平,进一步完善轻量化高精度动力触探试验装备的技术体系。

参考文献(References):

[1]　中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范[2009年版]:GB 50021—2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering (2009): GB 50021

—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程勘察通用规范:GB 55017—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General code for engineering investigation: GB 55017—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.

[3] 陈龙伟,陈童,王云龙,等.标准贯入试验锤击贯入能量测试与分析[J].工程地质学报,2023,31(5):1757-1766.
CHEN Longwei, CHEN Tong, WANG Yunlong, et al. Analysis of hammer energy transfer ratio of standard penetration test [J]. Journal of Engineering Geology, 2023,31(5):1757-1766.

[4] 曹振中,常凯,钟永斌,等.基于探头能量测试的动力触探锤击数修正方法研究[J].工程地质学报,2026,34(3):1122-1130.
CAO Zhenzhong, CHANG Kai, ZHONG Yongbin, et al. Blow counts correction method of dynamic penetration test based on cone tip energy testing [J]. Journal of Engineering Geology, 2026,34(3):1122-1130.

[5] 曹永生,刘裕华.标准贯入试验的优缺点分析与改进思路探讨[J].中国水运(下半月),2013,13(3):272-274.
CAO Yongsheng, LIU Yuhua. Analysis of advantages and disadvantages of standard penetration test and discussion on improvement ideas [J]. China Water Transport, 2013, 13(3): 272-274.

[6] 廖先斌,何智敏,温俊.不同直径钻杆配置下中英标贯锤击能量比特征[J].工程勘察,2017,45(4):7-11.
LIAO Xianbin, HE Zhimin, WEN Jun. Characteristics of the hammer energy ratio for Chinese and British SPT based on different diameter testing rods [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017,45(4):7-11.

[7] 祝强,谭春亮,冉灵杰,等.基于空气循环工艺的轻便型钻机的研制与应用[J].钻探工程,2023,50(S1):419-423.
ZHU Qiang, TAN Chunliang, RAN Lingjie, et al. Development and application of portable drilling rig based on air circulation technology [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (S1): 419-423.

[8] 刘蓓,寇少磊,朱芝同,等.便携式模块化钻机在绿色地质勘查工作中的应用实践[J].钻探工程,2022,49(2):30-39.
LIU Bei, KOU Shaolei, ZHU Zhitong, et al. Practical application of the portable modular drill in green geological exploration work[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):30-39.

[9] ASTM International. Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils: ASTM D1586/D1586M-18e1[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

[10] 王文彬,龙安,吴荣华,等.无人机吊运模块化钻机技术研究与应用[J].钻探工程,2024,51(S1):208-215.
WANG Wenbin, LONG An, WU Ronghua, et al. Research and application of UAV lifting modular drill technology [J]. Drilling Engineering, 2024,51(S1):208-215.

[11] Schmertmann J H, Smith T V, Ho R. Example of an energy calibration report on a penetration test (ASTM standard D 1586-67) drill rig [J]. Geotechnical Testing Journal, 1978, 1(1):57-61.

[12] 周贻鑫.中、美、欧岩土工程勘察规范对比研究[D].南京:东南大学,2015.
ZHOU Yixin. Study on the differences in geotechnical speciafication of the PRC, the US and the EU [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[13] 杨万贵,马映辉,贾宏福,等.便携式全液压钻机在工程勘察中的应用[J].四川地质学报,2022,42(S1):114-119.
YANG Wangui, MA Yinghui, JIA Hongfu, et al. The application of portable full hydraulic drilling rig to the engineering investigation [J]. Acta Geologica Sichuan, 2022, 42 (S1): 114-119.

[14] 凡东,田宏亮,王瑞泽,等.轻量化全液压坑道岩心钻机研制[J].煤炭科学技术,2019,47(12):131-135.
FAN Dong, TIAN Hongliang, WANG Ruize, et al. Development of portable full hydraulic underground coring drilling rig [J]. Coal Science and Technology, 2019,47(12):131-135.

[15] 葛一苟,张洁,祝刘文,等.砂土场地国标与美标标准贯入试验能量分析及击数转换关系研究[J].工程地质学报,2022,30(2):507-519.
GE Yixun, ZHANG Jie, ZHU Liuwen, et al. Chinese and ASTM standard penetration tests at sand site: penetration energy analysis and correlation of blow counts[J]. Journal of Engineering Geology, 2022,30(2):507-519.

[16] 杨文卫,岳中琦.标准贯入试验及其在岩土工程中的应用[J].广东水利水电,2006(2):31-33,35.
YANG Wenwei, YUE Zhongqi. The standard penetration test and its applications in geotechnical engineering[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2006(2):31-33,35.

[17] 李志鹏,李昊,龙焘,等.不同钻杆直径对标准贯入试验击数的影响研究[J].岩土工程技术,2025,39(5):760-765.
LI Zhipeng, LI Hao, LONG Tao, et al. Influence of different drill pipe diameters on the blow count of SPT[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2025,39(5):760-765.

[18] 施山山,吴丹,武占斌,等.浅层多相原位取样器研制与野外试验[J].钻探工程,2026,53(3):67-72.
SHI Shanshan, WU Dan, WU Zhanbin, et al. Development and field testing of a shallow multiphase in-situ sampler [J]. Drilling Engineering, 2026,53(3):67-72.

[19] 渠洪杰,卢猛,谭春亮,等.基于构造解析及孔内成像技术的以钻代槽绿色勘查技术试验应用[J].钻探工程,2025,52(4):103-110.
QU Hongjie, LU Meng, TAN Chunliang, et al. Experimentation and application of green exploration by drilling instead of trenching based on structural analysis and borehole imaging technology[J]. Drilling Engineering, 2025,52(4):103-110.

[20] 岳永东,谭春亮,卢倩,等.锂电池电动冲击取样钻机及其配套工具的研制[J].钻探工程,2022,49(3):44-50.
YUE Yongdong, TAN Chunliang, LU Qian, et al. Development of the Lithium battery-driven impact sampling drill and complete accessories [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 44-50.

(编辑 王跃伟)