

基于旋挖桩随钻参数的地层识别方法*

周泽洪¹,张林²,刘先珊^{3,4*},许明^{3,4},刘先荣⁵

(1.国家电网重庆市送变电公司,重庆 400039;2. 国家电网重庆市电力公司,重庆 400015;3.重庆大学 土木工程学院,重庆 400045;4. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045;
5.湖北省荆州市国土资源局,湖北 荆州 434000)

摘 要:旋挖钻机钻进参数是在钻进过程中分析钻进情况的基础数据。地层结构的变化必然使钻进参数发生变化,进而使旋挖钻机显示出与不同埋置深度地层相适应的动态特征。采用旋挖钻机随钻检测与控制系统,对钻进过程中的直测参数和派生参数进行采样和分析,根据钻机工作参数和地层岩土体物理力学参数的固有特性、统计特性、结构特性,建立单一指标到多指标的地层识别模型,把地质条件和钻机的工况参数联系起来,利用钻机的转速、扭矩、钻进压力预估岩石抗压强度和土质地基承载力,并与一桩一孔勘察结果进行对比,证明基于随钻参数的持力层判定方法的有效性。

关键词:旋挖钻机;工况参数;持力层;预测

中图分类号:U451 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)01-0086-06

Formation Identification Method Based on Drilling Parameters of Rotary Drill Rig

Zhou Zehong¹,Zhang Lin²,Liu Xianshan^{3,4},Xu Ming^{3,4},Liu Xianrong⁵

(1. State Grid Chongqing Transmission and Transformation Co.Ltd, Chongqing 400039,P.R.China;2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015,P.R.China;3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China;
4. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing, 400045, P.R.China; 5. Jingzhou Bureau of Land and Resources of Hubei Province, Jingzhou, Hubei 434000,P.R.China)

Abstract: The drilling parameters of rotary rig are the basic data in drilling operation analysis. The drilling parameters definitely change with the variation of stratigraphic structure. The rotary rig shows different dynamic characteristics that meet the features of different embedded depth. The direct measurement parameters and the derivation parameters of rotary drill rig have been recorded and analyzed using real time detection and control system. The drilling parameters and the physical and mechanical stratum parameters reveal inherent characteristic, statistical properties and structural characteristics. The formation identification model that combined with geological conditions and the parameters of drilling together has been proposed based on single index and multi indexes. The compressive strength of rock and the bearing capacity of soil foundation could be estimated using the rotational velocity, torque, drilling pressure. Compare with survey results, the formation identification method based on drilling parameters of rotary drill rig has been proved rationality and effectiveness.

Keywords: rotary drilling rig; drilling parameters; bearing layer; prediction

* 收稿日期:2017-08-12(修改稿)
作者简介:周泽宏(1971-),重庆南川人,硕士,高工,主要从事电网建设等方面的研究。E-mail: 38273825@qq.com
通讯作者:刘先珊(1978-),女,湖北荆州人,博士,教授,主要从事岩土工程理论、数值方法及工程应用等方面的研究。E-mail:liuxianshan@163.com
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51779021,51478065)

在各种嵌岩桩施工方法中,旋挖钻机具有装机功率大、轴向压力及输出扭矩大、施工效率高等优点,在桥梁、地下工程、基坑等的桩基钻进过程中广泛使用^[1-2]。与此同时,旋挖桩施工中普遍出现了持力层及嵌岩深度难以控制的问题。例如,在卵石土、高回填土、岩土界面坡率大于 10% 等复杂地处,由于勘探点不能覆盖所有桩孔位置,当作为持力层的中等风化基岩埋深小于设计孔深时,会把相当于或高于混凝土强度的未扰动岩层钻空,然后灌入混凝土,造成不必要的浪费。在喀斯特地貌发育地区,中风化灰岩表面凸凹不平,高差很大且无规律性,造成达到桩基承载值的钻孔深度往往远大于设计孔深,超深和塌孔造成的钻机重新成孔导致施工进度及工程量受严重影响^[3-7]。由此可见,地质赋存环境的复杂性以及勘测钻孔与实际旋挖钻孔的不对应性等造成实际孔深与设计孔深可能存在差异,持力层深度难以确定。

目前,旋挖钻机入岩判定方法主要有:①依据工程地质勘察报告及设计图纸预估岩面高程;②参考邻近孔的岩层判定;③根据孔口捞出的岩样特征判定;④依据钻机振动情况及进尺速度的差异判定。上述入岩判定存在以下问题:①复杂地层的岩石风化程度和岩层面起伏状况,一般的地质剖面图难以表示;②同一地点不同地层的岩渣状态相似,难以准确判定孔口捞出的岩样性质;③勘察报告对岩层风化等级定性有偏差;④钻进时效能区分岩层坚硬程度,但难分清孤石或是硬夹层、岩体破碎或风化程度。

旋挖钻机的工作原理是在钻压和回转扭矩^[7-9]作用下,钻头不断冲击、剪切破碎岩土体而获得进尺。不同地层由于岩土结构、矿物成分、力学参数等条件不同,岩层进尺阻力及回转阻力矩等会出现差异。旋挖钻机普遍采用负载敏感控制系统,其核心元件负载敏感泵和带有负载补偿的多路换向阀,可实现发动机-泵、动力头转速-马达流量、加压力的闭环控制和智能匹配。由此,地层结构的变化必然使旋挖钻机钻进参数发生变化,进而使旋挖钻机显示出与不同埋置深度地层相适应的动态特征。

依托重庆江津东海 110 kV 输变电工程(图 1(a)),依据中联 ZR220A 旋挖钻机施工过程中钻进参数随钻检测与控制系统,基于旋挖钻机钻进工况的特性分析,笔者采用单一指标到多指标的预测模型,把地质条件和钻机的工况参数联系起来,实现对地层的自动识别与归类^[10-11]。

1 依托工程

1.1 工程地质条件

江津东海 110 kV 输变电工程场地位于重庆市江津区白沙镇白沙工业园内,如图 1(b)所示。场地原始地形属剥蚀浅丘地貌及河流侵蚀沟谷地貌。场地构造单元位于璧山向斜东翼,岩层呈单斜状产出,岩层产状为 $245^{\circ} \angle 8^{\circ}$,基岩岩体中可见两组构造裂隙。



(a) 中联 ZR220 A 旋挖钻进中的施工现场



(b) 江津东海 110 kV 输变电工程场地

图 1 旋挖钻进施工过程

Fig.1 The process of rotary drilling construction

场地类别属中等复杂场地,岩土种类较多,较不均匀。平整场地后,在场地东南角及西北为填方地段,采用人工机械抛填并进行强夯处理,填土厚度 0~21.3 m,局部基岩出露,平场标高约为 303.0~305.0 m。

场地地层为内陆河湖相沉积,岩土层划分为:上覆第四系全新统素填土(Q_{4ml})、粉质粘土(Q_{4dl+el}),下伏侏罗系中统沙溪庙组(J_{2s})泥岩与砂岩互层分布。基岩状态分为强风化及中等风化,强风化层岩体破碎~较破碎,质较软,结构构造欠清晰,中等风化基岩岩体较完整,结构构造清晰,岩体为层状结构。

1.2 岩土体参数

粉质粘土天然重度为 19.9 kN/m³, 饱和重度为 20.0 kN/m³。中等风化砂岩重度为 23.6 kN/m³, 砂质泥岩重度为 24.1 kN/m³。中等风化砂质泥岩天然单轴抗压强度标准值为 5.2 MPa, 饱和单轴抗压强度标准值为 3.2 MPa, 岩体基本质量等级为Ⅳ类。结构面表面平直, 无胶结, 层面结合差, 张开约 2mm, 属硬性结构面, 黏聚力 $c = 50\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 18^\circ$ 。

1.3 地基评价

地基条件系数取 1.0, 地基极限承载力分项系数取 0.33, 中等风化泥岩地基承载力特征值:

$$f_{ak} = r_f \cdot f_{uk} = 1\,716\text{ kPa} \tag{1}$$

经强夯或压实堆填的素填土地基承载力特征值可取 150 kPa。因场地平场回填土厚薄不均, 拟建变电站设备、构架、围墙等基础均采用机械钻孔桩, 设计孔径为 600~800 mm, 以中风化基岩作为持力层, 并嵌入中风化基岩 1~3 倍桩径。

2 钻进参数检测

2.1 钻进过程动力传递

中联 ZR220A 旋挖钻机工作时压力传递过程为: 动力头油缸-动力头-钻杆-钻头-切削刃; 扭矩传递过程为: 动力头马达-动力头转盘-钻杆-钻头-切削岩土。从旋挖钻机工作过程来看, 钻机的动力能多少转变为施工所需的压力和扭矩, 取决于旋挖钻机的总体设计, 而钻机工作过程中的压力和扭矩的输出效率则取决与钻杆和钻头。

2.2 钻进参数

钻进参数是在钻进过程中分析钻进情况的基础数据。钻机参数测量原理的恰当与否直接关系到测量精度和地层识别系统的稳定性、可靠性, 它是整个系统成功的基础。

旋挖钻机监测系统可实时显示的钻进参数有: 钻进深度(由接近开关实现)、发动机扭矩、发动机负载、主泵压力、辅泵压力、钻杆转速(由 OMEGA 公司的 HHT13 转速仪进行测量)等多个直测参数和钻进率、扭矩、提升/钻进力、比功等多个派生参数。旋挖钻机直测参数及其派生关系如图 2 所示。

2.3 智能计算机监测系统

在旋挖钻机每个钻进阶段, 对钻机的钻进参数开展随钻检测与自动记录。在此基础上, 以传感器为信息源, 以信息处理与模式识别的理论技术为核心, 对不同埋深岩土体参数与钻机工作参数进行处理、分类, 构建地层识别模型, 实现嵌岩桩持力层的

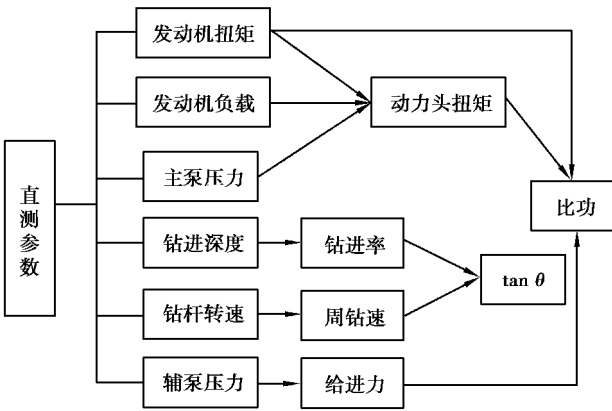


图 2 旋挖钻机直测参数及其派生关系

Fig.2 Direct measurement parameters of drilling machine and its derived relationship

自动判别。

3 单参数随井深变化

3.1 柴油发动机负载功率

随着旋挖钻机钻进深度的增加, 地层结构的变化导致旋挖钻头切削土体抵抗扭矩的变化, 而土体抵抗扭矩的变化必然导致发动机负载功率的变化。因此, 通过柴油发动机负载功率来反映地层结构具有一定的合理性。邻近 ZY6 勘测孔的构架基础 12、33 号桩的发动机负载随深度变化如图 3 所示。

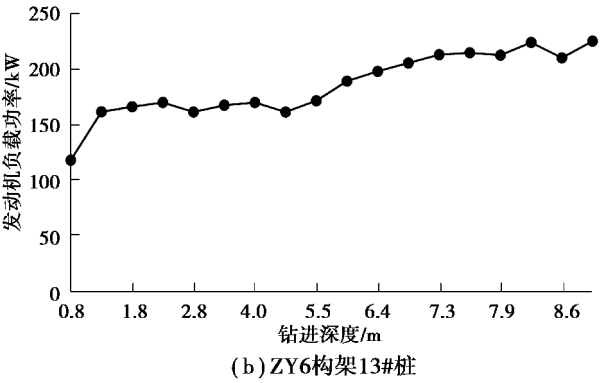
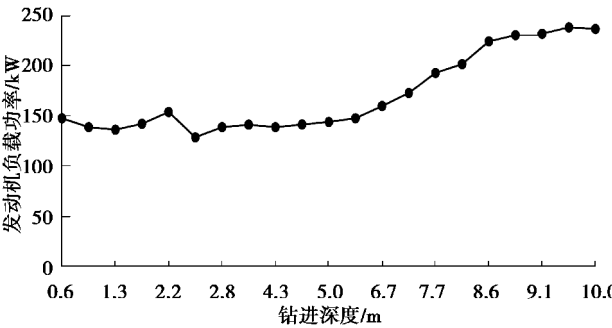


图 3 发动机负载功率随深度变化

Fig.3 Relationship between engine load power and depth

从图 3 可以看出,随着钻进深度的增加,发动机负载功率呈线性增大趋势,预示着岩土体力学强度在不断增大。但是,在不同桩孔直径、钻进速度等条件下,同一地层所需发动机负载功率是不同的。因此,发动机负载功率识别地层方法有一定的局限性。

3.2 掘进角

掘进角 $\tan\theta$ 是掘进周长 L_c 与掘进深度 L_p (或者是周转速 v_c 与钻进率 v_p) 的比值,是一个无单位的数值,其表达式可定义为:

$$\tan\theta = \frac{L_c}{L_p} = \frac{v_c}{v_p} \tag{2}$$

式中, L_c 为掘进周长, m, 即每钻进循环转数与钻头周长的乘积; L_p 为掘进深度, m; v_c 为周转速, $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, 即掘进周长除以掘进时间; v_p 为钻进率, $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, 即掘进深度除以掘进时间。

图 4 是 ZY6 勘测孔附近构架基础 12、33 号桩钻进过程中掘进角 $\tan\theta$ 随深度的变化曲线。

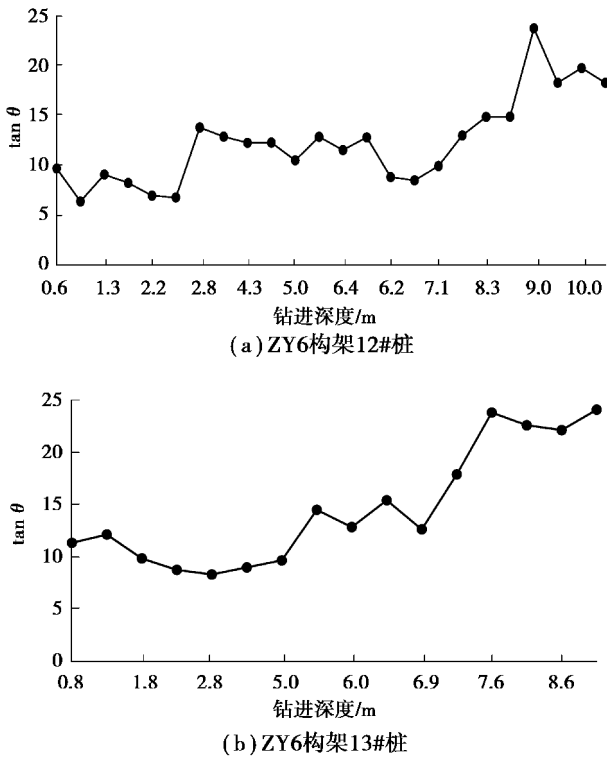


图 4 $\tan\theta$ -深度变化曲线

Fig.4 Relationship between $\tan\theta$ and depth

由图 4 可见,掘进角随不同深度岩土层的变化,其数值呈现较为明显的阶梯型递增,可以推断同一地层中掘进角在较小范围内浮动。掘进角主要取决于机械钻速,机械钻速虽然与持力层力学强度相关,但若存在与持力层力学强度相似的地层、风化夹层或孤石较多的持力层,掘进角浮动范围较

大,难以准确预测地层。

4 比功模型预测法

4.1 比功模型

单一的预测指标难以反映地层的复杂状态,但钻进参数有很多,如何综合各参数的作用,发挥每一种参数的长处进行诊断,是地层自动识别必须解决的问题。

合理的钻进参数是高效钻进的必然条件。钻机的功率为钻机的转速与扭矩的乘积。钻机的转速根据钻孔工艺方法和钻孔直径较易确定。而钻机的扭矩则受多种因素综合影响,如钻头直径、钻头类型、地层情况、钻孔深度、钻进方法及钻进工艺参数等,而地层情况的影响最为复杂。

旋挖桩施工的最优钻进速度需要针对施工场地的地层条件、钻进方法,控制最优钻进压力、回转速度来实现。根据钻进工况的特性分析,采用比功法识别地层,其数学模型为:

$$e = \frac{F}{A} + \frac{2\pi}{A} \frac{n\omega}{v_p} \tag{3}$$

式中: e 为比功, MPa; F 为给进力, N; A 为钻孔面积, m^2 ; n 为转速, r/min ; ω 为扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; v_p 为钻进率, m/min 。

比功法综合考虑了给进力、转速、扭矩、钻进速度、钻孔直径等钻进主要参数,可较好地识别地层。然而给进力、扭矩等并非直测参数,需要根据机械和液压传动理论,从发动机工作参数和液压系统参数进行派生计算。

4.2 比功参数计算

4.2.1 扭矩的计算

液压泵功率:

$$P_p = \frac{\Delta P \cdot Q}{60\eta_{mt}} \tag{4}$$

式中: ΔP 为液压泵的工作压力, bar; Q 为液压泵流量, L/min ; η_{mt} 为液压泵总效率。

液压马达流量:

$$Q = \frac{N \cdot q}{1\,000 \cdot \eta_v} \tag{5}$$

$$N = i_1 \cdot i_2 \cdot n \tag{6}$$

式中: N 为液压马达的转速, r/min ; q 为液压马达的排量, mL/r ; η_v 为液压马达的容积效率; i_1 为动力头减速器传动比; i_2 为齿轮传动比;

液压马达的排量:

$$q = \frac{6.28 \cdot T}{\Delta P \cdot \eta_m} \tag{7}$$

式中: T 为液压马达扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; η_m 为马达的机械

效率。

由式(4)~式(7)可得:

$$T = \frac{P_p \cdot \eta_{mt} \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot 60 \cdot 1\,000}{6.28 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot n}$$

(8)

动力头扭矩:

$$\omega = 2 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot T$$

(9)

式中: η_1, η_2 为减速器的传动机械效率和齿轮传动的机械效率。

4.2.2 给进力的计算

液压缸加压力:

$$F_1 = (P - P_1) \cdot A_1 - P_2 \cdot A_2$$

(10)

式中: P 为辅泵压力,MPa; P_1 为液压泵到液压缸的压力损失,MPa; P_2 为液压缸的回油背压,MPa; A_1, A_2 为液压缸的大腔和小腔面积,mm²。

动力头的总压力:

$$F = F_1 + G$$

(11)

式中: G 为最后一节钻杆和钻头的总自重,N。

4.3 比功计算和地层预测

构架基础 3 号桩在 ZY15 勘测孔附近,由式(3)、式(9)和式(11)计算出构架基础 3 号桩比功随钻进深度的实时变化曲线,如图 5 所示。

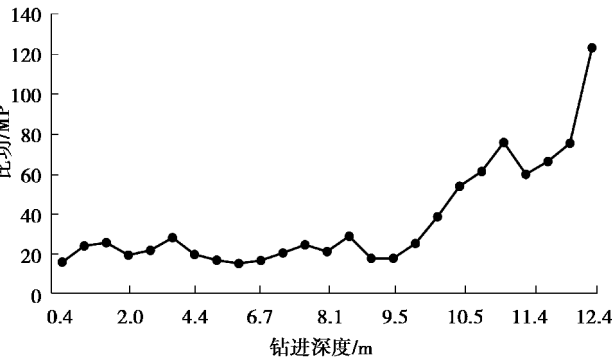


图 5 比功随深度的变化(ZY15 构架 3#)

Fig.5 Relationship between work ratio and depth

根据 ZY15 勘测孔勘查报告,地层分为 4 类(如表 1):素填土、粉质粘土、砂岩、泥岩。4 种地层的钻进参数、钻进速度等随钻参数差别明显。

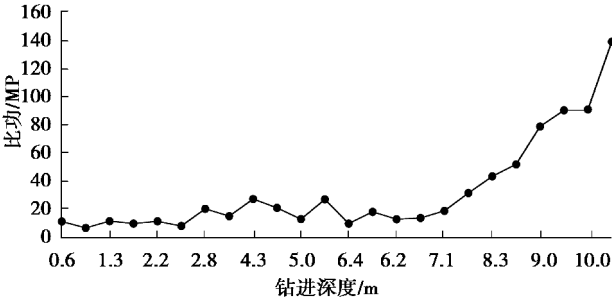
表 1 ZY15 勘测孔地层分布

Table 1 ZY15 Survey results of geological prospecting report

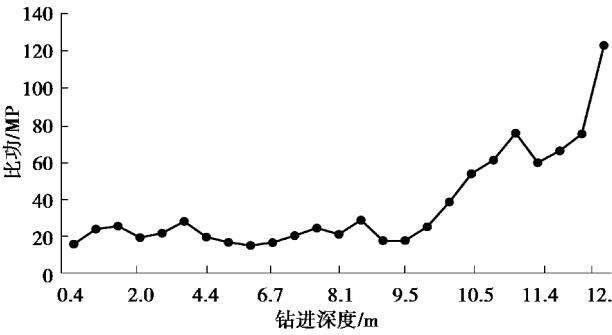
地层 结构	层底深 度/m	层底高 程/m	厚度 /m
素填土	10.7	293.6	10.7
粉质粘土	11.2	293.1	0.5
强风化砂岩	12.2	292.1	1
中风化砂岩	14.2	290.1	2
泥岩	22.8	281.5	8.6

根据一桩(3 号桩)一孔(ZY15 勘测孔)样本,建立钻进过程与岩层力学特性的地质适应性模型,确定 4 类地层最优钻进参数和钻进速度,获得素填土层的比功值为 0~29.6 MPa,粉质粘土层的比功值为 29.6~51.3 MPa,砂岩层的比功值为 51.3~72.6 MPa,泥岩层的比功值为 72.6~160 MPa。

构架基础 12、33 号桩在 ZY6 勘测孔附近,其比功随深度的变化如图 6 所示。在 9 m 深度处比功达到 75 MPa,钻头抵达岩层;在 10.3 米深度处比功达到 100 MPa,应为中风化持力层。就构架 12 号的旋挖钻进过程而言,比功至钻深 7.85 m 时为 6.54~26.79 MPa,钻至 8.97 m,比功逐渐增加至最大值 43.06 MPa,钻至 9.34 m,最大比功为 64.53 MPa,钻至深度 10.70 m,其值变化范围 93.82~138.31 MPa。而对于 33 号桩,比功至 7.43 m 时为 2.15~25.46 MPa,钻深 7.43 m~8.42 m,其值增大,比功值为 31.88~40.99 MPa,钻至 8.84 m~10.98 m,比功为 130.46~177.81 MPa。对比勘测孔 ZY6 的勘测资料,比功值变化的深度区间与各岩土层深度区间一致,能划分素填土、粉质粘土、泥岩各类岩土层。



(a) ZY6 构架 12#桩



(b) ZY15 构架 13#桩

图 6 比功随深度的变化

Fig.6 Relationship between work ratio and depth

ZY6 勘测孔验证了泥岩埋深确为 9 m(表 2)。比功模型预测法所预测的地层类别及深度与勘察结果一致。

表2 ZY6 勘测孔地层分布

Table 2 ZY6 Survey results of geological reports

地层 结构	层底深 度/m	层底高 程/m	厚度 /m
素填土	7.4	296.8	7.4
粉质粘土	9.0	295.2	1.6
强风化泥岩	10.3	293.9	1.3
中风化泥岩	16.4	287.8	6.1

上述一桩一孔样本建立的比功-地层置信区间,经过大量桩孔的反复调整、验证,可获得地层理想的预测输出。

5 结论

在旋挖机施工过程中,结合工程地质赋存环境及工程特点开展旋挖桩随钻参数的动态监测,提出合理可靠的持力层辨识方法,对于保证工程施工的可靠性及可控性具有重要意义。结果表明:

(1)地层结构的变化作用于旋挖钻机的负载敏感控制系统,必然使旋挖钻机钻进参数发生变化,进而使旋挖钻机显示出与不同埋置深度地层相适应的动态特征。

(2)发动机负载功率、掘进角等单一指标预测法仅考虑了地质的影响,尚不全面,而比功法综合考虑了地层条件、钻进方法及钻进工艺参数,能够较好地地进行地层识别和持力层判定。

(3)根据一桩一勘察孔样本,建立钻进过程与岩层力学特性的地质适应性模型,根据积累的经验数据不断完善不同地层的比功置信区间,即可用此理想的学习结果去识别同一场地的其他桩位持力层。

参考文献(References)

[1] 姚亚峰,王贺剑,凡东,等. ZDY1200L 型履带式全液压坑道钻机的研制[J]. 煤田地质与勘探,2010,38(1):76-80.(Yao Yafeng, Wang Hejian, Fan Dong. Development of the ZDY1200L track-mounted hydraulic tunnel drilling rig[J]. Coal Geology & Exploration, 2010,38(1):76-80.(in Chinese))

[2] 殷新胜,姚宁平,陈跟马,等. ZDY6000L 型履带式全液压坑道钻机液压系统设计[J]. 煤田地质与勘探,2007,35(3):77-80.(Yin Xinsheng, Yao Ningping, Chen Genma, et al. Design of hydraulic system of ZDY6000L track-mounted tunnel drilling rig[J]. Coal Geology &

Exploration, 2007,35(3):77-80.(in Chinese))

[3] 唐德才. 钻参仪在反馈地质信息方面的重要作用[J]. 中国煤田地质,1996,8(4):76-78.(Tang Decai. Importance of drilling instrument on feeding back the geological information [J]. COAL GEOLOGY OF CHINA,1996,8(4):76-78.(in Chinese))

[4] 张丰春. ZCY-1 型钻参仪在煤田钻探中的应用[J]. 煤田地质与勘探,1999(增刊):76-78.(Zhang Fengchun, Application of drilling parameter monitor (ZCY-1) in coalfield drilling [J]. Coal Geology & Exploration, 1999(S1):76-78.(in Chinese))

[5] 补家武,补生蓉,李吉春. WZY-1 型钻参仪的研究与应用[J].探矿工程,2003(2):36-37.(Bu Jiawu, Bu Shengrong, Li Jichun. The Application of and Research on WZY-1 Drilling Parameter Apparatus [J]. Exploration Engineering, 2003(2):36-37.(in Chinese))

[6] 方俊,鄢泰宁,卢春华. 钻参仪参数检测原理及传感器选型安装[J]. 探矿工程,2010,37(4):1-5.(Fang Jun, Yan Taining, Lu Chunhua. Parameter detection principle of CUG-2 drilling parameter monitor and lectotype installation of the senor. [J] Exploration Engineering, 2010,37(4):1-5.(in Chinese))

[7] 邵春,张杰,鄢泰宁. 一种基于全液压力头钻机的钻进参数检测方法[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(3):77-80.(Shao Ning, Zhang Jie, Yan Taining. A drilling parameter detection method based on hydraulic top-driving rig[J]. Coal Geology & Exploration, 2011,39(3):77-80.(in Chinese))

[8] 秦永和,付胜利,高德利. 大位移井摩阻扭矩力学分析新模型[J].天然气工业,2006,26(11):77-79.(Qin Yonghe, Fu Shengli, Gao Deli. A new model for analyzing torque and drag in extend reach wells [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(11):77-79.(in Chinese))

[9] 刘银,曹国宏,鲍亮,等. 微扭矩检测传感器的研究与实践[J]. 煤矿机械,2012,33(7):92-94.(Liu Yin, Cao Guohong, Bao Liang, et al. Research and practice on sensor of detecting micro torque [J]. Coal Mine Machinery, 2012,33(7):92-94.(in Chinese))

[10] 张莉.卵砾石不稳定地层的钻探技术浅析[J].城市勘测,2000(3):5-8.(Zhang Li. Drilling technology of unsteady gravel formation[J]. Urban Geotechni0. cal Investigation & Surveying, 2000(3):5-8.(in Chinese))

[11] 杜卫,李利伟. 卵砾石土层的破碎与钻进方法[J]. 西部探矿工程,2002,14(4):86-87.(Du Wei, Li Liwei. Crush and drilling method of gravel formation[J]. West-china Exploration Engineering, 2002,14(4):86-87.(in Chinese))