

基于有限元法的钻杆柱纵向振动分析

苏 凯^{1,2}, 孙友宏^{1,2}, 贾 瑞^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 复杂条件钻采技术国土资源部重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 钻杆的纵向振动对钻杆失效有较大影响。采用 ANSYS 软件对 2000 m 以内钻杆柱的纵向振动进行了分析, 得到了不同钻具规格、不同钻铤长度、不同钻杆柱长度的固有频率, 获得了钻杆柱纵向振动的前五阶固有振型。结果表明, 钻杆柱的固有频率受钻杆规格和钻铤长度影响很小, 受钻杆柱长度影响较大。

关键词: 钻探; 钻杆柱; 纵向振动; 固有频率; ANSYS

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)12-0052-05

Study on Longitudinal Vibration of Drilling Pipe Based on Finite Element Method/SU Kai^{1,2}, SUN You-hong^{1,2}, JIA Rui^{1,2} (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Ministry of Land and Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Longitudinal vibration of drill pipe has great influence on drill pipe failure. By the analysis on the longitudinal vibration of drill pipes within the length of 2000m with ANSYS software, the intrinsic frequency of drilling pipes with different specifications, drill collars and drilling strings with different length as well as the first 5 natural vibration modes of longitudinal vibration of drill string are obtained. The results show that the intrinsic frequency of drilling pipe is slightly affected by the drilling pipe specifications and drill collar length, but by drill pipe length a lot.

Key words: drilling; drill string; longitudinal vibration; intrinsic frequency; ANSYS

0 引言

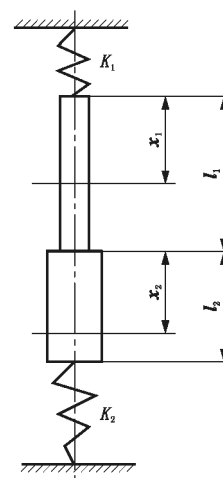
钻杆柱在孔内一般承受着交变的拉、压轴向力, 接触横向力(表面正压力)、接触周向力(摩擦力)。在这些载荷共同作用下, 钻杆柱主要发生扭转、横向和纵向 3 种形式的振动。一些学者认为钻杆柱失效主要是由纵向振动引起的, 特别是在深孔钻探工程中发生几率较大^[1]。因此, 对钻杆柱的纵向振动分析具有重要意义。

钻杆柱在孔内工况较为复杂, 传统的解析法往往无法对钻杆柱纵向振动进行全面准确分析^[2-3]。本文采用 ANSYS 有限元分析软件, 建立钻杆柱有限元模型, 利用 ANSYS 软件中的模态分析技术, 计算出了钻杆柱纵向振动的各阶固有频率及振型曲线, 对实际钻进工程中采取减振措施具有一定的指导作用。

1 钻杆柱纵向振动力学模型

振动理论已证明, 阻尼虽然对结构的振幅影响很大, 但对系统的自振周期影响不大^[4], 可近似认

为结构的衰减振动周期与无阻尼自由振动周期相同。因此本文仅考虑钻杆柱纵向自由振动, 模型如图 1 所示^[4]。



K_1 —井架和钢丝绳的综合刚度; K_2 —钻头结构和地层弹性的综合刚度; l_1 —钻杆长, m; l_2 —钻铤长, m。

图 1 钻杆柱纵向自由振动模型

钻杆柱纵向振动偏微分方程为:

收稿日期: 2015-05-24; 修回日期: 2015-09-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“漠河盆地地质浅钻工程”(编号: GZHL201400303)

作者简介: 苏凯, 男, 汉族, 1992 年生, 在读硕士研究生, 地质工程专业, 主要研究天然气水合物钻采技术, 786965977@qq.com。

通讯作者: 孙友宏, 男, 汉族, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, syh@jlu.edu.cn。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

其通解为:

$$u = A \sin(pt + \alpha) \left(C \cos \frac{px}{\alpha} + D \sin \frac{px}{\alpha} \right) \quad (2)$$

其中:

$$a^2 = \frac{E}{\rho}, \quad \rho = \frac{\gamma}{g}$$

式中: a ——弹性波的纵向传播速度, m/s; u ——钻杆横截面纵向位移, m; p ——系统固有频率, Hz; E ——弹性模量, kPa; A 、 C 、 D 、 α ——积分常数; ρ ——钢材密度, kg/m³; γ ——钢材容重, N/m³; g ——重力加速度, m/s²。

根据边界条件(下角标 1 表示钻杆, 2 表示钻铤, F 为截面积)

(1) 在悬挂端 $x_1 = 0$;

$$EF_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = K_1 u_1 \quad (3)$$

(2) 在钻杆与钻铤过渡处: $x_1 = l_1, x_2 = 0$

$$EF_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = EF_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = \frac{\partial u_2}{\partial t}$$

(3) 在钻杆柱底部 $x_2 = l_2$

$$EF_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = -K_2 u_2 \quad (5)$$

将通解代入边界条件, 并消去积分常数 A 、 C 、 D 、 α 后便可得到固有频率谱公式:

$$\frac{\frac{EF_1}{K_1 a} + \text{tg} \frac{pl_1}{a}}{1 - \frac{EF_1}{K_1 a} p \tan \frac{pl_1}{a}} = \frac{-F_1}{F_2} \cdot \frac{\frac{EF_2}{K_2 a} + \text{tg} \frac{pl_2}{a}}{1 - \frac{EF_2}{K_2 a} p \tan \frac{pl_2}{a}} \quad (6)$$

2 钻杆柱有限元模型

钻杆柱由方钻杆、钻杆、钻杆接头和钻铤等部件组成。为了便于有限元建模和仿真分析, 将钻杆柱简化为钻杆 + 钻铤组合的形式。钻探中常见的钻杆钻铤组合形式如表 1 所示。

钻杆柱建模, 先创建节点, 然后通过节点直接生成单元^[5]。根据单元特性, 选取弹性直管单元 PIPE59 来模拟钻杆柱。钻杆柱模型材料的选取规格为: 弹性模量 2.1×10^{11} Pa, 泊松比 0.30, 密度 7850 kg/m³, 浮重度 66.725 kN/m³。

表 1 钻杆和钻铤组合

钻 铤		钻 杆	
外径/mm	内径/mm	外径/mm	内径/mm
105.0	55.0	73.0	54.6
121.0	55.0	88.9	74.9
152.4	71.4	101.6	84.8
165.0	71.4	114.3	100.5

本文选用分块兰索斯法提取钻杆柱的模式, 此方法适用于大型对称特征值求解问题, 具有较快的收敛速度, 对于求解钻杆柱这类结构对称的、多自由度体系的大型广义特征值问题十分有效^[6]。利用分块兰索斯法可以求得钻杆柱纵向振动的各阶固有频率及振型。在实际工况中, 高于 10 阶的钻杆柱振型遇到的概率很小, 因此本文只计算钻杆柱的前 10 阶振型。

由于只需要研究钻杆柱纵向振动特性, 模型的约束采取钻杆柱顶端为固定端约束, 下端不约束钻杆柱的轴向运动^[7]。

根据以上条件创建的 2000 m 钻杆柱有限元模型如图 2 所示。

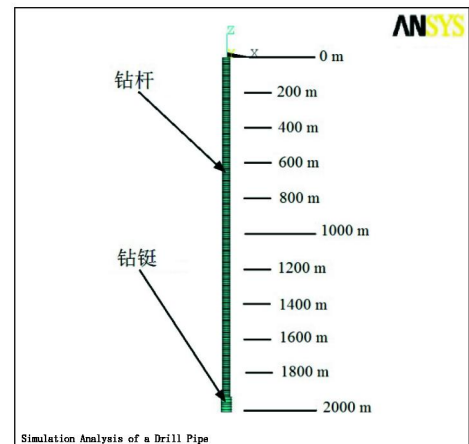


图 2 2000 m 钻杆柱有限元模型

3 钻杆柱纵向振动固有频率分析

钻杆柱振动的固有频率是钻杆柱在给定钻杆组合条件下钻杆柱振动的固有特性, 在钻进过程中, 钻杆柱受到钻头与地层相互作用产生的纵向激励作用。当钻杆柱固有振动频率和振动力的频率接近时, 将产生共振现象, 钻杆柱将产生剧烈振荡, 严重影响钻杆柱的工作寿命^[8]。

3.1 钻杆规格对钻杆纵向振动的影响

表 1 中 4 种不同钻杆规格的钻杆柱进行纵向振动的模态分析, 得到的结果如表 2 所示。

表2 不同规格钻具的固有频率

钻杆规格	钻杆柱固有频率/Hz									
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶	7阶	8阶	9阶	10阶
Ø105 mm 钻铤 + Ø73 mm 钻杆	0.59057	1.7892	3.0241	4.2918	5.5824	6.8877	8.2025	9.5237	10.849	12.178
Ø121 mm 钻铤 + Ø88.9 mm 钻杆	0.55835	1.7175	2.9471	4.2236	5.5254	6.8411	8.1651	9.4940	10.826	12.161
Ø152.4 mm 钻铤 + Ø101.6 mm 钻杆	0.54565	1.6923	2.9230	4.2037	5.5096	6.8286	8.1551	9.4863	10.820	12.157
Ø165 mm 钻铤 + Ø114.3 mm 钻杆	0.51897	1.6443	2.8808	4.1707	5.4838	6.8084	8.1392	9.4739	10.811	12.150

从表2中的数据可以看出,钻杆柱纵向振动的各阶固有频率随着钻杆外径的增大而减小,Ø105 mm 钻铤 + Ø73 mm 钻杆柱1阶和10阶的固有频率分别为0.59057和12.178 Hz,Ø165 mm 钻铤 + Ø114.3 mm 钻杆柱1阶和10阶固有频率分别为0.51897和12.150 Hz,整体变化幅度都很小。表明钻杆规格对其自身的纵向振动固有频率的影响不明显。通过提取表中数据绘制的钻杆柱纵向振动固有频率随钻杆规格的变化曲线如图3所示,由图3可看出各阶频率的变化曲线基本趋于平直,并且相同规格钻杆柱不同阶固有频率的差值相等。说明钻杆规格对钻杆柱纵向振动固有频率的影响很小。

以Ø121 mm 钻铤 + Ø88.9 mm 钻杆为例,分析

同一规格的钻杆在不同壁厚下的固有频率。钻杆柱壁厚分别取12、9.5、7和4.5 mm,提取出的前10阶的固有频率如表3所示。

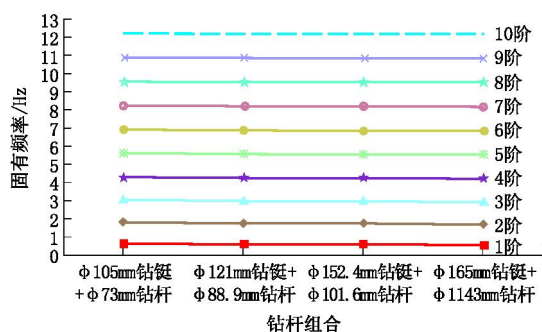


图3 钻杆规格对钻杆柱固有频率的影响

表3 不同钻杆壁厚的钻杆柱纵向振动的固有频率

壁厚/mm	钻杆柱固有频率/Hz									
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶	7阶	8阶	9阶	10阶
12.0	0.59583	1.8019	3.0392	4.3062	5.5950	6.8983	8.2112	9.5307	10.855	12.181
9.5	0.58116	1.7671	2.9989	4.2686	5.5625	6.8712	8.1891	9.5130	10.841	12.172
7.0	0.55835	1.7175	2.9471	4.2236	5.5254	6.8411	8.1651	9.4940	10.826	12.161
4.5	0.51509	1.6378	2.8755	4.1667	5.4807	6.8060	8.1374	9.4725	10.810	12.149

从表3中数据可看出,钻杆柱纵向振动的各阶固有频率随着钻杆壁厚的减小而减小,壁厚由12 mm减小到4.5 mm,各阶固有频率最大变化值为0.1641 Hz,并且整体变化幅度很小。这一结果与上述钻具规格对钻杆柱纵向振动的影响规律相同,表明钻具规格对其自身的纵向振动固有频率的影响很小。分析原因是,对于等截面的细长弹性轴类杆件,由于钻杆柱的顶端是全约束,而下部是轴向自由的,

根据其振动微分方程可知,截面积对固有频率的影响相对较小^[7]。

3.2 钻铤长度对钻杆柱纵向振动的影响

钻铤是安装在钻杆柱下部用于增加钻杆柱强度和加压的部件。为研究钻铤长度对钻杆柱纵向振动的影响,仍以Ø121 mm 钻铤 + Ø88.9 mm 钻具为例,改变钻铤长度,进行有限元模态分析,提取得到的各阶钻杆柱纵向振动固有频率数据如表4所示。

表4 不同钻铤长度条件下钻杆柱纵向振动固有频率

钻铤长度/m	钻杆柱固有频率/Hz									
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶	7阶	8阶	9阶	10阶
80	0.55835	1.7175	2.9471	4.2236	5.5254	6.8411	8.1651	9.4940	10.826	12.161
120	0.51687	1.6390	2.8729	4.1598	5.4697	6.7906	8.1172	9.4470	10.778	12.110
160	0.48275	1.5850	2.8276	4.1220	5.4357	6.7576	8.0827	9.4081	10.731	12.045
200	0.45419	1.5459	2.7967	4.0956	5.4102	6.7299	8.0486	9.3593	10.646	11.855

从表4可看出,钻杆柱纵向振动的固有频率随钻铤长度的增加而减小,钻铤长度由80 m增加到200

m,各阶固有频率最大变化值为0.1716 Hz。上述规律对通过优化钻具组合来调整钻杆柱的固有频率,

譬如,更换刚度不同的钻铤或改变钻铤的安装根数等,从而在钻进时避免纵向共振有一定的指导意义。

3.3 钻杆柱长度对钻杆柱纵向振动的影响

随着钻进过程的进行,钻杆柱长度不断增加。仍以 $\varnothing 121$ mm 钻铤 + $\varnothing 88.9$ mm 钻杆组合为例,研究不同钻杆柱长度对钻杆柱纵向振动的影响。通过钻杆柱的有限元纵向振动的模态分析,得到钻杆柱在不同长度情况下的固有频率变化曲线如图 4 所示。

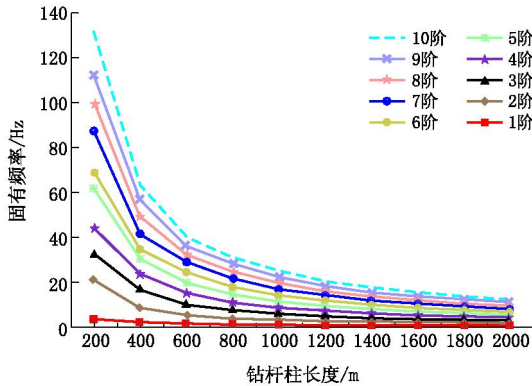


图 4 不同钻杆柱长度条件下的钻杆柱固有频率

由图 4 可看出,钻杆柱纵向振动的固有频率随着钻杆柱长度的增加而显著减小,且各阶之间的频率差值也随着钻杆柱长度的增加而减小。此外,钻杆柱在其长度较小时的纵向振动固有频率很大,随着钻杆柱长度的增大,固有频率显著减小。钻杆柱

长度为 200 m 时,10 阶固有频率为 131.52 Hz,1 阶固有频率为 3.4952 Hz;钻杆柱长度为 2000 m 时,10 阶固有频率为 12.161 Hz,1 阶固有频率为 0.5584 Hz。此外,钻杆柱长度 200 m 时 1 阶与 10 阶固有频率相差 128.0248 Hz,而钻杆柱长度为 2000 m 时,1 阶与 10 阶固有频率相差仅为 11.6026 Hz,即钻杆柱长度越小,钻杆柱各阶振动的固有频率的间隔越大,反之相反。由此可知,钻杆柱长度是影响钻杆柱纵向振动的重要因素。

因钻杆柱共振受转速影响较大,深孔钻进时需要确定其临界转速。例如,根据油田现场试验结果,钻井时若使用三刮刀钻头钻进,则由井底坚硬地层可取得三瓣状岩心,故当钻头转速为 n 时相应的激振频率为 $p_0 = 3n/60$,将计算的固有频率 p 代入,则钻杆柱振动的临界转速 n_c 可由式(7)确定。

$$n_c = \frac{60p}{3} \quad (7)$$

式中: n ——钻头转速, r/min; n_c ——临界转速, r/min; p_0 ——激振频率, Hz。

4 钻杆柱纵向振动固有振型分析

以第 2 节中钻杆柱有限元模型为例,研究其纵向振动固有振型的变化规律。图 5 为钻杆柱的前 5 阶纵向振动的模态振型的等值线图。

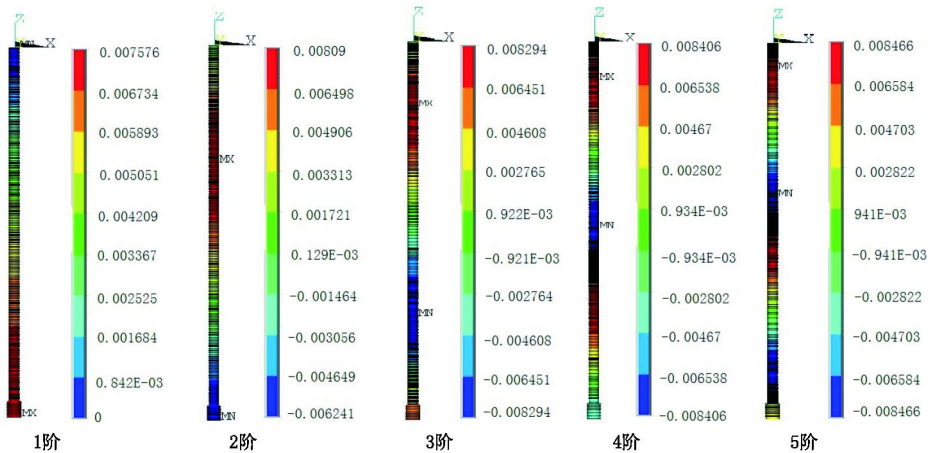


图 5 钻杆柱纵向振动前 5 阶模态振型

图 5 中显示的是钻杆柱纵向振动时的轴向位移情况,单位为 m。正号表示沿 Z 轴正向的变形,负号表示沿 Z 轴负向的变形。

由图 5 可看出,1 阶模态钻杆柱纵向振动的最大轴向位移发生在钻杆柱最底端,方向为沿 Z 轴向

上,说明钻杆柱的底端呈压缩状态。钻杆柱顶端无轴向位移;2 阶模态钻杆柱的中上部发生较大的轴向位移,其中沿 Z 轴向上的最大轴向位移为 0.009 m,发生在距离孔口 750 m 处,方向沿 Z 轴向上,说明此处的钻杆柱呈压缩状态。最小的轴向位移为

0.0062 m,发生在钻杆柱的最下端;3阶模态钻杆柱向上和向下的最大位移均为0.0083 m,分别发生在距离孔口444和1320 m处;4阶模态和5阶模态的最大和最小轴向位移相等,分布位置相近,具体位置不再叙述。

图6为钻杆柱前5阶纵向振动固有模态下的轴向位移随着钻杆柱长度的变化关系及最大轴向位移的分布情况。由图6可知,钻杆柱轴向位移随钻杆柱长度增加呈正弦波式分布,且阶数越大,半波长越短,2阶半波长为1455 m,5阶半波长为467 m。由图6可确定钻杆柱最大轴向位移的分布情况,即钻杆柱纵向振动最剧烈的部位,为减震器的安装位置提供依据。

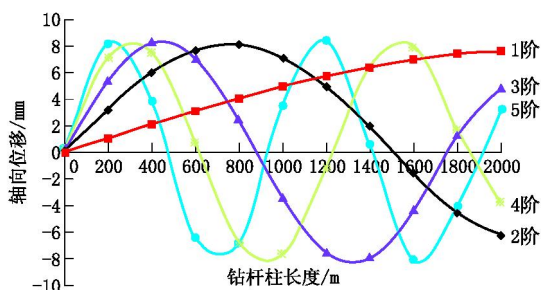


图6 2000 m 钻杆柱纵向振动前5阶固有振型曲线

5 结论

(1) 钻杆柱长度是影响其纵向振动固有频率的主要因素。钻杆柱长度增加,固有频率显著减小,且

各阶固有频率的差距也减小。

(2) 钻杆柱长度一定时,可通过改变钻具组合如更换刚度不同的钻铤或改变钻铤的安装根数来调整纵向振动的各阶固有频率,避免发生共振现象。

(3) 钻杆柱在钻进过程中会出现“蛇行”的运动方式,这对于钻杆柱纵向振动过程的了解及减震器的安装位置有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 章扬烈. 钻柱运动学与动力学[M]. 北京:石油工业出版社, 2001:85-90.
- [2] 江进国,舒晓勇,韦念龙,等. 基于ANSYS软件的钻杆扭转振动分析[J]. 探矿工程,2003,(S1),176-178.
- [3] 龙尧,王安义,伍嘉亨,等. 基于ANSYS软件的钻柱横向振动分析[J]. 西部探矿工程,2010,(8):42-44.
- [4] 赵国珍,龚伟安. 钻井力学基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1988:101-112.
- [5] 谢龙汉,刘新让,刘文超. ANSYS结构及动力学分析[M]. 北京:电子工业出版社,2012:444-449.
- [6] 方鹏. 勘查钻进钻杆的实验模型与仿真分析[D]. 湖北武汉:中国地质大学(武汉),2007:27-44.
- [7] 胡中伟. 钻柱振动模态分析[D]. 黑龙江哈尔滨,哈尔滨工程大学,2007:7-33.
- [8] 闫向宏,孙建孟,张美玲,等. 钻柱扭转和纵向振动的等效网络分析[J]. 工程力学,2011,28(2):229-233.
- [9] F. S. 谢, I. E. 摩尔, R. T. 亨克尔. 机械振动原理[M]. 沈文钧, 张景绘, 译. 北京:国防工业出版社,1984. 10.
- [10] 方鹏,江进国,沈玺. 基于ANSYS软件的钻柱纵振模态分析[J]. 矿山机械,2007,(5):29-30.

(上接第51页)

起到长期锚固的作用。该技术充分利用结构物或地层强度,实现较高锚固力,为类似建筑物加固、边坡支护等工程提供借鉴,具有很好的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 刘宁,高大水,戴润泉,等. 岩土预应力锚固技术应用及研究[M]. 湖北武汉:湖北科学技术出版社,2001.
- [2] 中国岩土锚固技术编写组. 岩土锚固新技术[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [3] 何世鸣. 应力分散型预应力抗拔桩系列技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,(2):74-78.
- [4] 王全成,杨栋,严君凤. 预应力锚索锚固段钢绞线应力分布研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(7):16-18.
- [5] 周明. 装载硐室大孔径预应力注浆锚索加固技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):67-69.
- [6] 杨俊志,冯杨文. 预应力锚固工程技术的发展与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2003,(Z1):87-90.

- [7] 夏长华,田学明. 压力分散型预应力锚索在高边坡加固中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(4):35-37.
- [8] 周国锋,陈红刚,刘才高. 无粘结预应力锚索在乌江索风营水电站Dr2危岩体加固中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(10):61-63.
- [9] 袁波,吴国华,周富荣. 边坡工程中压力分散型锚索施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(10):70-73.
- [10] 曹琳. 阿海水电站碾压混凝土长心样取心技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):65-67.
- [11] 王琪,杨晓红. 复杂条件下大坝倒垂孔施工技术措施[J]. 西北水电,2014,(2):55-58.
- [12] 任宗社,邓德彬. 三峡左厂房1-5#坝段基础加固预应力锚索施工[J]. 中国三峡,1998,(9):7-10.
- [13] 杨晓红. 深孔倒垂孔施工精度控制. 水电施工技术[J],2009,(1):48-50.
- [14] 高大水. 国内岩土预应力锚固技术应用及锚固技术参数统计[J]. 长江科学院院报,2004,21(6):87-90.
- [15] 徐伟. 双标倒垂孔的施工与控制. 西北水电[J]. 2007,(1):55-57.