

研究钻柱工作性状的计算机仿真技术

唐旭清

方雪松

(巢湖师专 安徽 238000)

(中航勘察设计研究院 北京 100086)

0 前言

研究钻柱的工作性状是一件很重要而且很复杂的工作。由于钻进过程中钻头碎岩所需的能量、运动是依靠钻柱来传递的，因此钻柱的工作性状将影响到钻进效果的好坏。

如何进行钻柱工作性状的研究呢？或者说钻进中钻柱较真实的弯曲变形是怎样的？钻柱又是如何运动的？考虑到回转钻进时钻柱在孔内的运动既看不见又摸不着，传统的研究方法仅仅是进行理论的分析、推理及计算，或者利用物理模型进行一定程度的模拟。进行钻柱工作性状的研究，仅从理论上分析是不够的，必须经过实践的检验。若所有的理论研究结果都去做野外试验验证，不仅需要大量的时间，而且需要大量的经费。作者利用计算机仿真技术进行改善钻柱工作性状的仿真实验研究，不仅能节约费用，而且能较快和直观地得出很多有用的结论。

由仿真技术可知，一个仿真实验的全过程需要经历六个步骤：系统描述、建立数学模型、模型转换、编写仿真程序、仿真实验以及仿真结果分析。系统描述见参考文献一。

1 钻柱数学模型的建立

作者研究钻柱的主题是深孔或超深孔钻进时，如何改善钻柱的工作性状和减小钻柱振动，从而提高钻进效率，降低钻进成本，延长钻头和钻具的寿命，减小孔内事故等。因此，建立钻柱的数学模型应根据不同的目的来考虑。计算机仿真的输入参数有：钻进参数（钻压和转速）、钻孔口径和倾角、钻柱物理性能（弹性模量）和结构性能（外径、内径及单位长度重量）等。输出参数有：钻头上的正压力和侧向力，钻头与钻

孔轴线的夹角，钻头振动的振幅、固有频率和动载，钻柱的弹性储能等。

1.1 常规钻进钻柱弯曲变形的数学模型

常规钻进时，钻柱在孔内的弯曲变形看作是平面的，中和点以下的受压钻柱弯曲半波长越往下越小。弯曲半波长为

$$l = \frac{100}{\omega} \sqrt{-0.5Z + \sqrt{0.25Z^2 + \frac{EI\omega^2}{10^3q}}} \quad (\text{cm})$$

钻柱临界弯曲压力的欧拉公式为

$$P_{ia} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}$$

将受压钻柱的弯曲变形看作是欧拉柱问题，则钻柱弯曲的方程是 $y = f \sin \frac{\pi x}{l}$ 。所以

钻头与钻孔轴线的夹角为

$$\text{tg} \beta = y'_{x=l} = \frac{f\pi}{l}$$

钻头上的正压力 P_x 和倾向力 P_y 为

$$P_x = P \sin \beta \quad P_y = P \cos \beta$$

孔壁反作用力

$$F_1 = \frac{P(D_s - D_s)}{\frac{pl}{2} - \text{tg} \frac{pl}{2}} P + \frac{qlw^2(D_1 - D_2)}{4g}$$

1.2 常规钻进钻柱振动的数学模型

1.2.1 钻柱纵振的数学模型

常规钻进时，中和点上下两部分的等效刚度

$$K_1 = \frac{EA}{L_1} \quad K_2 = \frac{EA}{L_2}$$

整个钻柱系统的综合刚度

$$K = K_1 + K_2 = EA \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} \right)$$

整个系统的固有频率

$$P_o = \sqrt{\frac{Kg}{m}}$$

钻柱最大振幅

$$u_{\max} = b\sqrt{\frac{1 + (2sr)^2}{(1-r^2)^2 + (2sr)^2}}$$

钻柱振动最大动载

$$P_{\max} = \frac{mu_{\max}(u\omega)^2}{g}$$

1.2.2 钻柱扭振的数学模型

钻柱扭振的固有频率和振幅

$$p_i = \frac{(2n-1)\pi}{2L} \sqrt{\frac{Gg}{\rho}}$$

$$\theta_{\max} = \frac{M_o L}{GJ}$$

钻柱扭振引起钻头上扭矩波动的最大值

$$M_{\max} = \frac{M_o P_i^2 \theta_{\max}}{2g}$$

1.2.3 钻柱弹性储能的数学模型

钻进时钻柱的弹性储能为:

$$U = \frac{M_i^2 L}{2GJ}$$

2 计算机仿真模型程序和试验

2.1 计算机仿真模型

研究钻柱弯曲变形和振动的计算机仿真程序流程如图1所示。

钻柱系统是一个连续系统，因此它的仿真方法是数值积分法。钻柱弯曲变形的微分方程为

$$EI \frac{d^3 Y}{dX^3} + pX \frac{dY}{dX} + F_2 = 0$$

钻柱纵振和扭振的微分方程形式上是一样的，统一表达为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

因钻柱弯曲变形及振动的数学公式都是上述两个微分方程的特解，所以仿真的数学模型也都采用了具体的计算公式，而不是利用原始微分方程。对钻柱弯曲变形及振动的计算机仿真所采用的积分步长为0.0001，计算精度为误差小于 10^{-4} 。

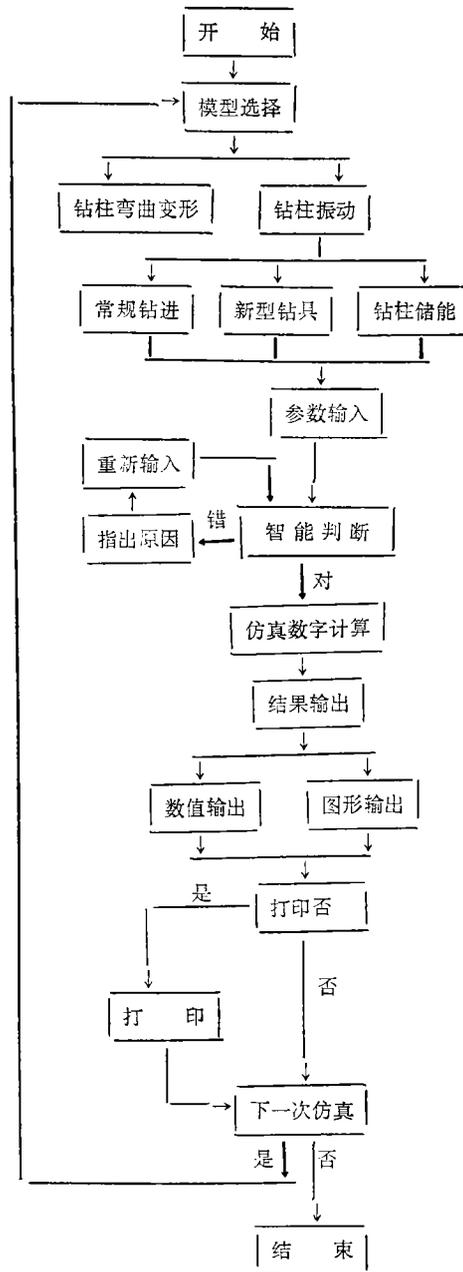


图 1 仿真程序流程图

2.2 仿真程序的编制

利用Turbo C语言编写计算机仿真程序，根据仿真程序流程图，将仿真程序分成几个模块来实现。

模块一，确定仿真实验的内容，即确定是对钻柱弯曲变形的仿真还是对钻柱振动进

行仿真。

模块二，实现仿真实验所有数据的输入，并能进行智能判断。

模块三，实现仿真实验的数值计算部分，即将第一节所列的数学模型编制成计算机计算程序，并能有选择地运行相应的计算部分。

模块四，实现计算机仿真结果的输出，既可输出到屏幕上，也可以输出到打印机。仿真实验结果既可以数值形式输出，也可以图形方式输出。

2.3 仿真实验

运行仿真程序进行计算机仿真实验，下面给出一个仿真实例。

运行仿真程序，当屏幕上出现主菜单后，按下 F2 键，则进入对钻柱振动的仿真，此时屏幕上会出现一个子菜单。同时按下 <ALT> <A>，是对常规钻进钻柱振动（纵振和扭振）的仿真。输入参数为： $b = 1\text{mm}$ ， $n = 1$ ， $N = 264\text{rpm}$ ， $P = 1200\text{kg}$ ， $M_0 = 50\text{kgm}$ ， $L = 1000\text{m}$ ， E 和 ρ 值与上面相同，即可显示（见图 2）。

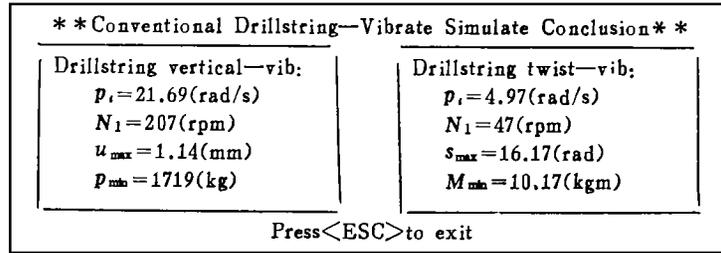


图 2 对常规钻进钻柱振动的仿真实验结果

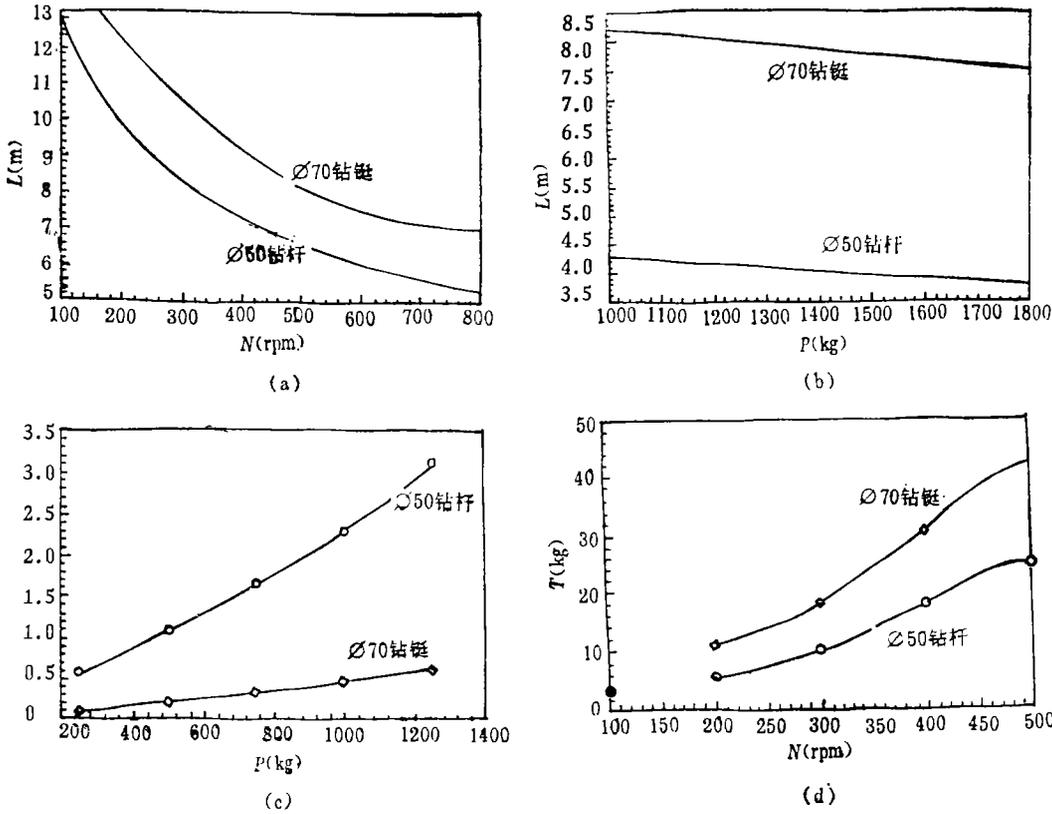


图 3 钻柱弯曲变形仿真结果

(a) 转速与半波长的关系；(b) 钻压与半波长的关系；(c) 孔壁反作用力与钻压的关系；(d) 孔壁反作用力与转速的关系

3 仿真实验结果分析

3.1 钻柱弯曲变形的计算机仿真结果及分析
由图3的仿真结果可知:

(1) 在相同钻压和转速条件下, 使用钻铤比常规钻进时, 受压钻柱长度小得多, 钻柱的弯曲半径要大, 对钻进非常有利;

(2) 当其它条件相同时, 转速和钻压

增大将使弯曲半波长减小, 不利于钻进;

(3) 图3中的(c)和(d)表示了岩芯钻进时, 由于钻柱弯曲而引起的孔壁反作用力随钻压和转速的增加而增大。 $T-N$ 曲线表示中和点以下使用钻铤时, 应采用较小的转速; $T-P$ 曲线表明常规钻进不能采用较大的钻压。

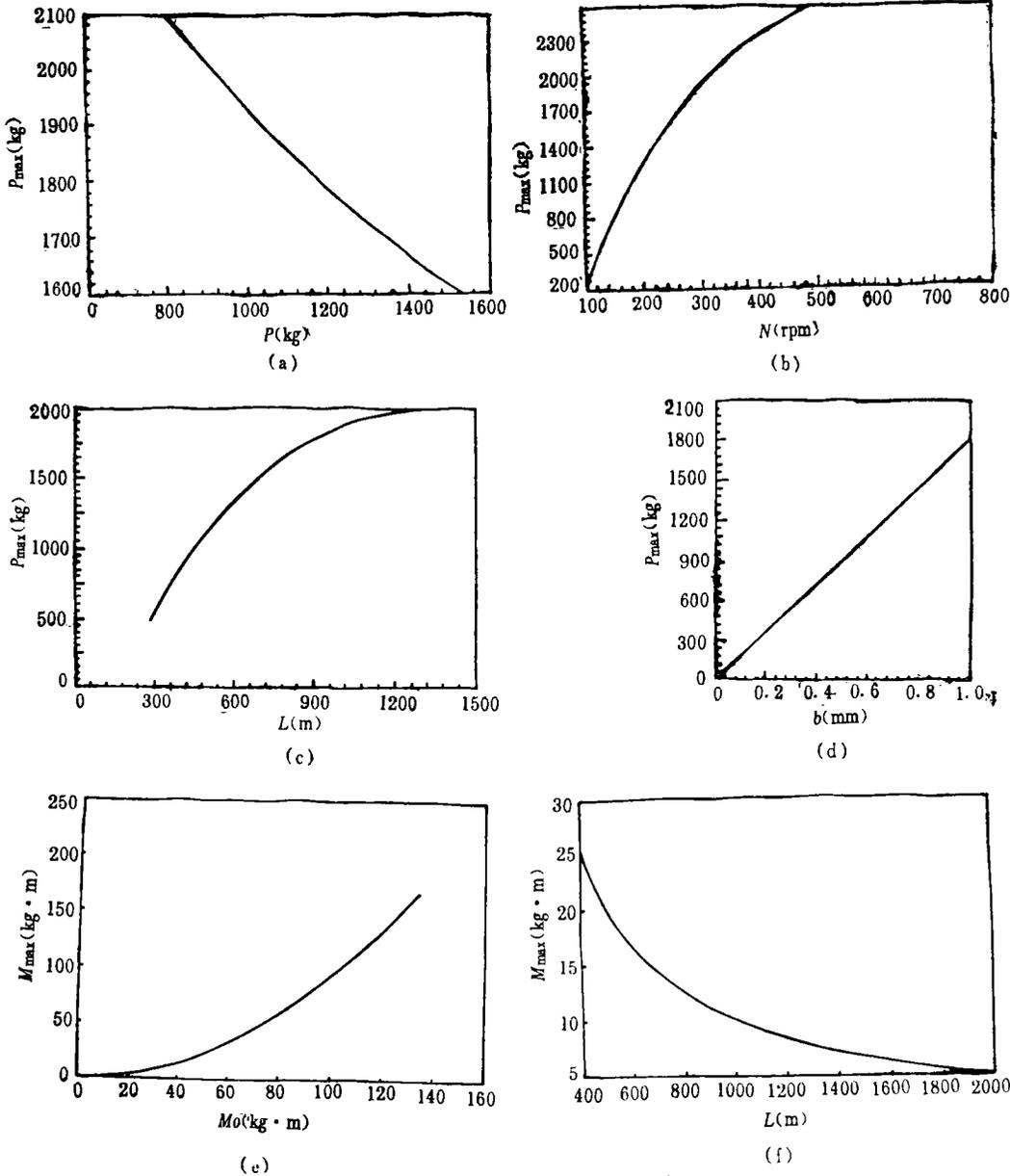


图4 常规钻进钻柱振动的仿真结果

(a) P_{max} 与钻压的关系; (b) P_{max} 与转速的关系; (c) P_{max} 与孔深 L 的关系; (d) P_{max} 与钻头振幅的关系; (e) M_{max} 与激振扭矩的关系; (f) M_{max} 与孔深的关系

(4) 仿真实验所计算的只是孔底弯曲半波切点处的孔壁反作用力。实际钻进中, 中和点以下钻柱存在有很多弯曲半波, 每个半波与孔壁的切点处都作用有反作用力。因此对深钻或石油钻井来说, 孔壁的摩擦阻力是一个很重要的参数, 直接影响到钻井速度、钻井功率消耗和钻进成本。以岩心钻进为例, 为了控制钻井摩擦阻力, 应适当控制钻压和转速, 这一结果对轴线严重弯曲(一个或多个“狗腿”)的钻孔更是必要的。

3.2 常规钻进时钻柱振动仿真结果及分析
由图4知道:

(1) 钻柱纵振引起的动载与转速、孔深和钻头的振幅成正比, 与钻压成反比;

(2) 钻柱纵振的固有频率随钻压和孔深的增加而减小;

(3) 钻柱扭振的振幅随钻柱长度和激励力矩的增大而成正比地增大;

(4) 钻柱扭振的固有频率只受钻柱长度的影响, 随长度增加而成正比地减小;

(5) 钻进时应避开表中所列的共振转速, 以免引起钻柱的共振。

(6) 钻柱扭振引起钻头上扭矩波动的最大值, 随瞬间激振扭矩的增加而迅速增大, 随参与扭振的钻柱长度增大而减小。当钻柱长度增加到一定值(约1000m)后, 扭矩波动值减小速度变缓。

(7) 常规钻进钻柱振动引起钻头上压力和扭矩的波动是严重影响钻进综合效益的重要因素之一。常规钻进中, 钻头上压力和扭矩的波动很大, 很容易损坏钻头、造成孔内事故, 也降低了钻速。

3.3 钻柱弹性储能的仿真结果及分析

由图5知道:

(1) 钻柱弹性储能受钻头受阻时附加力矩的影响很大, 随着附加力矩的增加而迅速增大。常规钻进中当附加力矩由50kgm增加到100kgm时, 钻柱的弹性储能从80.32kgm增大到321.30kgm, 增加了4倍;

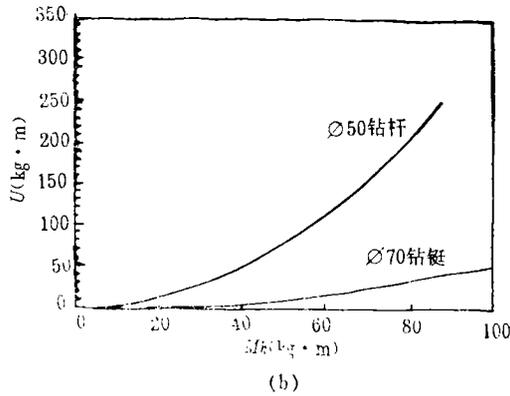
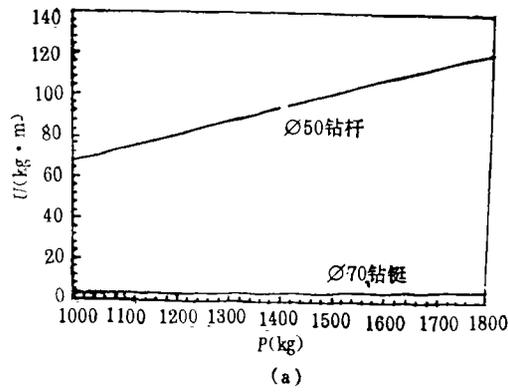


图5 钻柱弹性储能的仿真结果

(a) 弹性储能与P的关系;

(b) 弹性储能与M_z的关系

(2) 钻压增大会使钻柱弹性储能增大。原因是钻压增大, 受压钻柱长度增长, 而且钻头受阻时附加力矩也增大;

(3) 中和点以下使用钻铤时钻柱的弹性储能会大大降低。在同样附加力矩50kgm和钻压1200kg的情况下, 使用钻铤时弹性储能为3.43kgm, 常规时(Ø50钻杆)为80.32kgm。

(4) 常规钻进中钻柱的折断与弹性储能有直接的关系。当钻头受阻时, 常规钻进钻柱的储能增加到正常扭矩值的几倍甚至几十倍, 很容易就使钻柱从危险断面处折断。

4 本文符号说明

(1) 各种力(力矩): P表示钻压, T表示孔壁的反作用力; P_{max}是钻头上最大
(下转第57页)

```

      *T1, F4 = 4 * T1 * T1 * T1 - 2 * T1
      * T1
624: PX = F1 * P5(1, I) + F2 * P5(1, I + 1)
      + F3 * P5(1, I + 2) + F4 * P5(1, I + 3)
626: PY = F1 * P5(2, I) + F2 * P5(2, I + 1)
      + F3 * P5(2, I + 2) + F4 * P5(2, I + 3)
628: LPRINT "D", PX, ",", PY; NEXT J
630: LPRINT "D", P5(1, I + 2), ",", P5(
      2, I + 2); NEXT I; RETURN
640: R8 = INT ((TJ - INT TJ) * 100)
645: R6 = (10000 * TJ - 10000 * INT TJ -
      R8 * 100) / 30
655: TJ = 12 * (INT TJ - TI) + R8 - R7 +
      R6 - R5; RETURN
700: DATA "A", 23, 86.0901, 0, 86.0917,
      1.4, 86.1023, 2.6, 86.1113, 2.9, 86.12
      03
705: DATA 4.0, 86.1224, 3.2, 87.0108, 3
      .8, 87.0124, 4.4, 87.0303, 5.0, 87.031
      9, 5.0, 87.0406
710: DATA 5.9, 87.0423, 6.2, 87.0511, 6
      .7, 87.0527, 7.2, 87.0626, 7.8, 87.082
      4, 8.5, 87.1029
715: DATA 9.7, 88.0316, 11.0, 88.0524,
      11.1, 88.0730, 11.6, 88.1005, 11.7, 89
      .0314, 12.6
717: DATA 89.0814, 12.7
718: DATA "B", 22, 86.0901, 0, 86.0917,
      1.2, 86.1113, 2.8, 86.1203, 4.1, 86.12
      24, 3.5, 87.0108
720: DATA 3.9, 87.0124, 5.0, 87.0303, 5
      .0, 87.0319, 5.0, 87.0406, 5.5, 87.042
      3, 5.7, 87.0511
722: DATA 6.2, 87.0527, 6.8, 87.0626, 7
      .4, 87.0824, 7.7, 87.1029, 8.9, 88.031
      6, 10.7, 88.0524
724: DATA 10.7, 88.0730, 10.7, 88.1005
      , 10.9, 89.0314, 11.8, 89.0814, 11.6
726: DATA 23, 86.0901, 0, 86.0917, 2, 86
      .1023, 4, 86.1113, 6, 86.1203, 8, 86.12
      24, 10, 87.0108
728: DATA 12, 87.0124, 14, 87.0303, 16,
      87.0319, 18, 87.0406, 20, 87.0423, 22,
      87.0511, 24
730: DATA 87.0527, 25, 87.0626, 28, 87,
      0824, 28, 87.1029, 28, 88.0316, 28, 88.
      0524, 28
732: DATA 88.0730, 28, 88.1005, 28, 89.
      0314, 28, 89.0814, 28

```

参 考 文 献

- 1 陆润民等. 计算绘图. 清华大学出版社, 1988
- 2 王能超. 数值分析简明教程. 高等教育出版社, 1984
- 3 陈龙飞. 工程测量. 同济大学出版社
- 4 SHARP CE-515P使用说明及技巧

(上接第62页)

动载; P_x 和 P_z 代表钻头上侧向力和正压力;
 M 代表扭矩, M_{\max} 表示钻头上扭矩最大波
 动值; U 表示钻柱的弹性储能。

(2) 长度: l 表示钻柱弯曲半波长;
 L 表示钻柱总长度; b 表示钻头最大振幅;
 u_{\max} 表示钻柱纵振最大振幅; S_{\max} 表示钻柱

扭振最大振幅;

(3) 频率及转速: 钻柱纵振固有频率
 为 P_0 , 扭振固有频率为 P_t ; 转速为 N , 临界
 转速表示为 N_1 。

(4) 其它: m 表示钻柱的质量; β 代表
 钻头与钻孔轴线的夹角; K 表示刚度; n 表示
 孔底地层的破碎系数(与钻头结构有关)。