

工程钻振动器设计理论讨论

郭绍什

郭宏

(中国地质大学·武汉)

(武汉探矿机械厂)

文章介绍了在工程钻探中使用机械型振动器的意义,并对这种类型振动器的振动频率、振幅、激振力、沉桩能力、动力机功率等参数的求解,提供了计算公式和选择方法。

关键词: 工程钻探; 机械振动; 振幅; 激振力; 共振

概述

借助于振动器的振动力进行钻进,可比纯回转钻进的效率高3倍左右,单位成本约低二分之一。所以,早在50年前人们就把它引用于钻探上。目前,美、苏、日等国已将多种振动器应用于勘探钻孔和工程钻孔。

根据振动器的使用条件,常分为地面振动器与潜孔振动器。从使用目的上又分为钻探振动器和工程钻探振动器等。

地面振动器由于受振动力传递损失的限制,一般常用于50米以内的孔中和可钻性IV级以内的地层,或用于处理较深部位的卡钻事故等。在配合相应设施的条件下,潜孔振动器可钻150米以深的钻孔,或处理更深部位的孔内事故。

近20年来,振动器在工程钻探上的应用日益广泛。这主要是因为振动器具有结构简单,制造容易,成本低,效率高等优点。

本文拟对基础工程等用的振动器,作如下理论讨论。

振动器的力学模型和方程^[1]

1. 假设条件

①振动器只产生纵向振动;②钻具或桩是绝对刚性;③地层(主要指第四纪土

层)为弹性体, $P = -Kx$;④地层对桩或钻具的阻力是粘滞阻力, $F_r = -rx$ 。

2. 力学模型和方程

振动器的振动类型为线性单自由度系统的受迫振动。设振动体的质量 M ,偏心轮的质量 m ,偏心距 e 。

当偏心轮以角速度 ω 旋转时,偏心轮产生的惯性力 $F_0 = me\omega^2$ 。这是个简谐干扰力,其垂直激振力为

$$F = F_0 \sin \omega t \\ = me\omega^2 \sin \omega t。$$

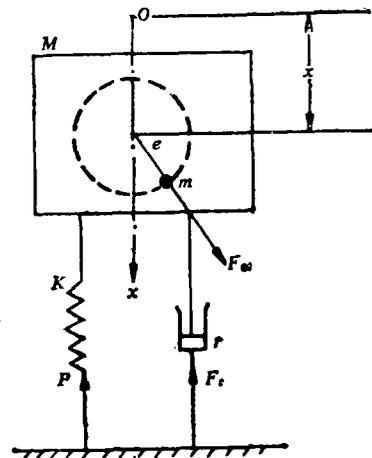


图1 振动力模型图

在力学模型图1中,取振动体的静平衡位置 O 为 ox 轴的原点,以坐标 x 表示振动体离开静平衡位置的垂直位移,则振动体所受

的力有 P 、 F_0 、 F_r 。

根据动力学基本定律可列出微分方程为：

$$M\ddot{x} + r\dot{x} + Kx = me\omega^2 \sin\omega t。$$

$$\text{令 } p^2 = \frac{K}{M}, \quad 2n = \frac{r}{M},$$

$$q = \frac{F_0}{M} = \frac{me\omega^2}{M},$$

则上式可写为

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + p^2x = q\sin\omega t$$

这就是振动器工作时的振动微分方程，它是一个二阶常系数线性非齐次微分方程。

根据这个方程得其特解为

$$x = B\sin(\omega t - \psi)。$$

其振幅 B 为

$$B = \frac{\frac{me\omega^2}{M}}{\sqrt{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}$$

振动器主要参数的确定

1. 选定频率 ω

$$p = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

由前述力学模型可知，系统的固有频率 p 决定于系统的振动体质量 M 和弹簧刚度 K ，而与运动的初始条件无关。这就是说， p 只与系统的结构有关。对于确定的系统，不论运动的初始条件如何，振动体总是以其固有频率 p 进行振动。

振动器的工作状况为共振，即振动器一般在共振区工作。只有当干扰力（激振力）频率 ω 接近于系统的固有频率 p 时，系统才发生共振。在设计中，一般取 $\omega = p$ 。实际使用中，最佳频率的确定需考虑地层种类、钻具或桩的类型及本身尺寸。一般取

$$\omega = 50 \sim 200 \text{ r/s}$$

2. 振幅 B 的确定^[1]

振动器的工作状况为一受迫振动，振幅

的大小对机体和钻进效率具有很大影响。适当增大振幅可以提高钻进效率，但若振幅超过允许的限度，就会在构件中产生过大的交变应力，使构件发生疲劳损坏。为此在设计振动器时，必须选择一个最佳振幅。根据经验通常取：

$$V_{\min} \geq 50 \text{ cm/s}$$

$$\text{即 } V_{\min} = B_{\min}\omega \geq 50 \text{ cm/s}$$

$$B_{\min} \geq \frac{50 \text{ cm/s}}{\omega}$$

B_{\min} 是为达到最小振动速度而所需的最小振幅。设计时，应选 $B > B_{\min}$ 。

3. ω 和 B 的合理取值

引进符号： $\lambda = \frac{\omega}{p}$ ， λ 为频率比，

$$\xi = \frac{n}{p}$$
， ξ 为阻尼比。

则振幅 B 可改写成下列形式

$$B = \frac{me}{M} \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda)^2 + (2\xi\lambda)^2}}$$

将振幅 B 式改写成无量纲形式

$$\frac{MB}{me} = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda)^2 + (2\xi\lambda)^2}}$$

用幅频特性曲线（共振曲线）表示如图

2。

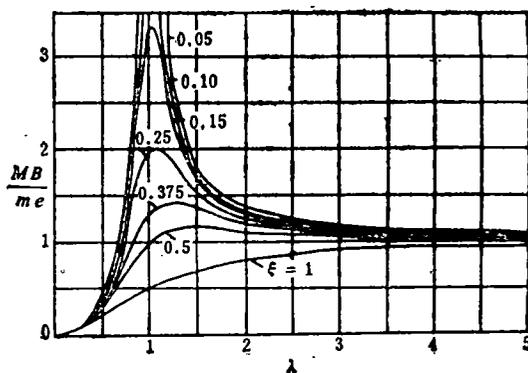


图 2 共振曲线

分析图 2 的各曲线可知：当 $\lambda = 1$ ，即 $\omega = p$ ，在 ξ 较小的情况下， $\frac{MB}{me}$ 达到极大值，

即 B 达到极大值, 系统处于共振状态。一方面弹性恢复力和惯性力相平衡, 另一方面激振力全部用于克服阻尼力。利用系统的共振, 达到钻进或沉桩的目的。

对于不同的地层, 振动钻进或沉桩的最佳频率是不同的。对软地层(粘土层等), 一般采用低、中频率, 即 $\omega = 40 \sim 80 \text{r/s}$, 相应的偏心轮转数为 $n \approx 400 \sim 800 \text{r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$; 对砂质层、风化破碎层, 一般采用中、高频率, 即 $\omega = 85 \sim 120 \text{r/s}$, 相应的偏心轮转数为 $n \approx 850 \sim 1200 \text{r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$; 对冻土层和软岩, 一般采用高、超高频, 即 $\omega = 120 \sim 200 \text{r/s}$, 相应的偏心轮转数为 $n \approx 1200 \sim 2000 \text{r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$ 。

同理, 钻具或桩的尺寸大、重量大应采用较低频率。混凝土预制桩用较低频率。

对于 $\zeta \leq 0.50$ 的各曲线, 当 λ 由小变大时, MB/me 就相应有一个从小到大, 然后又从大到1的变化过程。对于确定的 ζ 值,

MB/me 都有相应的最大值。 $\frac{MB}{me}$ 达到最大值(即受迫振动的振幅达到峰值)时, 系统振动最强烈, 发生共振。

对钻进同一地层来说, 随着孔深的增加, 阻力增大, 振幅随之减小。由图2可知, 当 ζ 从0.05增大到1时, $\frac{MB}{me}$ 从10减小到0.5, B 从最大减小到0。

所以一般取 $\frac{MB}{me} \geq (0.5 \sim 10)$,

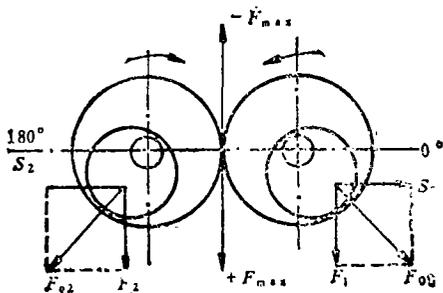


图3 振动原理图

$$\text{即 } B \geq \frac{(0.5 \sim 10) me}{M}$$

4. 计算激振力 $F^{(1)}$

目前, 生产中多用双轴双轮式振动器。工作原理见图3。不论两偏心轮处在什么位置, 惯性力 F_{01} 和 F_{02} 均可分解为两组分力。水平力 S_1 和 S_2 大小相等, 方向相反, 因而抵消; 而垂直分力 F_1 和 F_2 大小相等, 方向向下, 其合力 F 等于 F_1 和 F_2 之和。当偏心轮的重心位于水平轴线以下时, F 向下; 当偏心轮的重心位于水平轴线以上时, 则 F 向上。合力 F 使钻具或桩产生垂直方向的振动。

由前述的力学模型可知:

$$\text{离心惯性力 } F_{01, 2} = me\omega^2,$$

垂直激振力

$$F_{1, 2} = F_{01, 2} \sin\omega t = me\omega^2 \sin\omega t,$$

当偏心轮转至 90° 和 270° 时, 激振力达到最大值。

$$F_{\max} = 2me\omega^2 \sin(90^\circ, 270^\circ) = \pm 2me\omega^2$$

5. 偏心距 e

偏心距一般根据钻进或沉桩所需最大激振力确定。

$$\because F_{\max 1, 2} = me\omega^2,$$

$$\therefore e = \frac{F_{\max 1, 2}}{m\omega^2}.$$

6. 动力机的功率 $N^{(1)}$

振动器在钻进或沉桩时, 其激振力所作的功等于阻尼力所消耗的能量。根据这一原理可以推出动力机的功率。

由于振动是一简谐运动, 故可求出阻尼在一个周期内所消耗的能量(即激振力所作的功)。

$$\text{对粘性阻尼力 } F_r = r \dot{x},$$

系统的位移为 $x = B \sin(\omega t - \psi)$,

$$\dot{x} = B\omega \cos(\omega t - \psi),$$

故 $F_r = rB\omega \cos(\omega t - \psi)$ 。

由此可见, 阻尼力也是一种简谐力,

F_r 在一个周期内所作的功为

$$W_r = \int_0^T F_r \dot{x} dt = \int_0^{2\pi/\omega} r B^2 \omega^2 \cos^2$$

$$(\omega t - \psi) dt = \pi r B^2 \omega.$$

动力机的功率

$$N = \frac{W_r}{T} = \pi r B^2 \omega / \frac{2\pi}{\omega}$$

$$= \frac{1}{2} r B^2 \omega^2.$$

钻进或沉桩能力的 估算^[2]

由于涉及到钻进或沉桩的地层、设备、工艺因素较多，估算起来比较困难。

为简便起见仅对沉桩能力提出一种简单估算方法。

据日本建设机械调查株式会社的方法，主要是根据土层标准贯入度试验所得的 N_1 值进行计算。

桩可沉入土层的最大 N_1 值可按 下式算出。

在砂质土中

$$N_1 = \frac{M}{4F_f \cdot e^{-0.0652\sqrt{I}}}$$

在粘土、淤泥层中

$$N_1 = \frac{M}{8F_f \cdot e^{-0.0652\sqrt{I}}}$$

式中： M —振动器的重量(N)； F_f —桩的断面积(cm^2)； e —自然对数的底； I —振动器动量， $I = K_1 \omega / g$ ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)。其中， K_1 为振动的偏心力矩。

在土层的 N_1 值小于或等于上述计算结果时，即在可以克服桩的端面阻力的情况下，能够沉入的深度，需按以下方法计算。

首先，根据各土层 N_1 值计算出各土层的极限静摩擦阻力 T_i 。

对于砂质土

$$T_i = H_i \frac{N_i}{5} \pi D (9.8 \times 10^3 \text{ N})$$

对于粘土、淤泥

$$T_i = H_i \frac{N_i}{2} \pi D (9.8 \times 10^3 \text{ N})$$

式中： T_i —第 i 层土层的极限静摩擦力，

N_i —第 i 层土层的 N 值，

H_i —第 i 层土层的厚度(m)，

D —桩的外径(m)。

其次，估计一个可以沉入的深度进行试算，到估计沉入深度为止，各土层的极限静摩擦阻力的总和为

$$T = \sum_{i=1}^{i=n} T_i$$

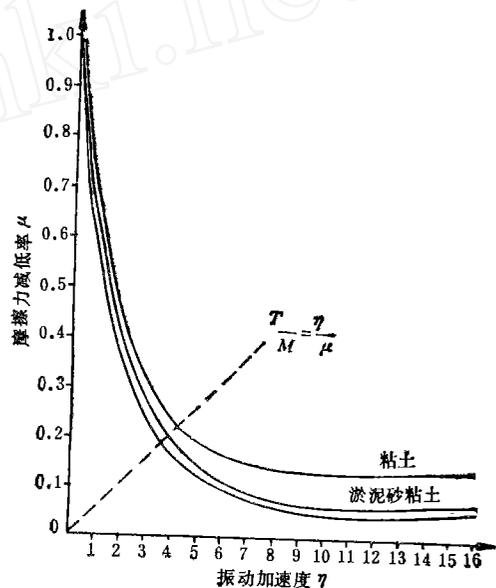


图 4 摩擦力与振动加速度关系图

由 $T/M = \eta/\mu$ ，可以在图 4 中绘一斜线，与曲线交点的横坐标值，就是所对应的土层摩擦力减低率 μ_i ，该土层的极限动摩擦阻力 $T_{Vi} = T_i \mu_i$ 。

校核工作是根据 $F \geq \sum_{i=1}^{i=n} T_{Vi}$ 进行。式

中， F —振动器的激振力； $\sum_{i=1}^{i=n} T_{Vi}$ —到估计沉入深度为止，各土层的极限动摩擦阻力之

和。

当 $F < \sum_{i=1}^{i=n} T_{Vi}$ 时, 则应减小估计沉入深

度。如 $F \gg \sum_{i=1}^{i=n} T_{Vi}$ 时, 则应增加估计沉入深

度。经如此反复计算, 直到 $F \geq \sum_{i=1}^{i=n} T_{Vi}$ 时,

其相应的深度便为该桩所沉深度。

参 考 文 献

- [1] 清华大学固体物理研究室编:《机械振动》第66、67、89页,机械工业出版社,1980年。
- [2] [日]水谷 裕著:《钢管 杭が振動 沉降の計算》,日本建设机械調査株式会社,1980年。

Designing Principle of Vibrator of Engineering Drill

Guo Shaoshi Guo Hong

The significance of using mechano-vibrator in engineering drilling is introduced in this paper. In addition formulas for calculate the parametrs of the vibrator, such as the frequency, amplitude, vertical vibrating force, pile setting capability and motive power are given together with the method of parameter selection.

《国土资源遥感》(季刊)明年

公开发行

大家渴望已久的《国土资源遥感》期刊,近经国家科委批准,在国内外公开出版发行。本刊是由地矿部物化探局和国家计委国土综合开发规划司共同主办的一种遥感技术刊物。

《国土资源遥感》是在现行的内部刊物《遥感地质》的基础上,增加了国土与资源两方面内容,新创办的专业性期刊。本刊以“发展遥感技术,扩大应用领域,服务生产科研,为四化建设服务”为办刊宗旨。它将努力贯彻“双百方针”,兼容并蓄,坚持以应用为主,理论为辅,普及与提高相结合的指导思想,登载遥感技术在国土、资源(土地资源、矿产资源、能源资源、农林资源、海洋资源、旅游资源)和地质(区域地质、地质填图、矿产地质、环境地质、灾害地质、城市地质、水文工程地质等)调查、开发、规划与管理方面的基础理论,

技术方法,应用效果等文章。

《国土资源遥感》期刊为促进遥感应用技术的发展,顾及不同层次读者的需要,既登载较高水平的学术论文和研究成果,又刊登通俗浅显、普及遥感知识的短文与趣谈;既介绍遥感技术在一些新领域的应用方法与效果,也传播遥感科技领域的新观点、新理论和新技术,并配有卫星和航空黑白或彩色图象,文图并茂,生动直观。

本刊适用于从事遥感工作的生产、科研、教学人员以及广大国土、地质、地理、农林、水利、环境等部门的管理、生产和研究工作者。

《国土资源遥感》将于1989年第一季度创刊
主编:张炳熹。刊号:CN11-2514,本刊现开始征订,每期定价1元,全年四期4元。欢迎踊跃订阅和投稿。订阅款,请通过银行信汇(开户银行:北京市西四建设银行,帐号:10535),或邮局邮汇至地矿部地质遥感中心财务处(北京学院路29号)汇款单请务必详填订阅单位全称、地址及收件人姓名。现在的《遥感地质》出完1988年四期即行停刊,顺此敬告。

国内统一刊号:CN 11-2043

邮局征订代号:18-58 定价:0.80元