

YZ-55A型牙轮钻机整机结构动态特性分析*

孙衍全 贾魁燕 龚翔 张立刚

北京科技大学资源工程学院, 北京 100083

摘要 采用 SAP5P 程序对 YZ-55A 型牙轮钻机进行整机的动态特性计算和分析. 结果表明, 钻机合理的工作转速范围应在 80~150 r/min 之间, 在利用 YZ-55 型牙轮钻机的实测载荷谱的基础上, 引入校正系数对 YZ-55A 型进行动应力计算, 得到该钻机整机振型和应力—时间历程图.

关键词 牙轮钻机; 动态计算; 力学模型; 振型分析

分类号 TD 422.1; O 327

文献 [1] 对 YZ-55A 型牙轮钻机结构进行了静力分析, 可以看出, 整机的应力水平是很低的, 它不足以破坏其结构. 然而, 牙轮钻机在钻进过程中, 由于钻头的 3 个牙轮交替地冲击岩石, 以及岩石性质变化等因素的影响, 使得钻架所承受的扭矩和轴向力呈不规则变化, 可能导致钻机结构局部破坏. 目前 YZ-55A 型牙轮钻机还未生产, 无法测得该机的实测载荷谱. 但文献 [2] 中编制了 YZ-55 型牙轮钻机实测的载荷谱. YZ-55A 型较 YZ-55 型高约 2 m. 回转加压小车处在钻架中部时, 2 种机型的受载情况差别甚小. 本文在采用 YZ-55 型牙轮钻机的载荷谱的基础上, 采用引入 1 个系数 (即当加压小车处在中部时), 对其结构进行动应力计算.

1 整机动态力学模型建立

YZ-55A 型牙轮钻机结构主要由钻架和平台 2 部分组成. 钻架的有限元划分由空间梁元和板元组成, 它们用节点重合的办法结合. 钻架上带有齿条的立柱与主立柱焊接在一起, 在模型中这 2 个立柱分别划分单元, 并用主从节点模拟; 平台的有限元划分主要由空间梁元组成, 这里略去平台上覆板的影响. 整机的动态力学模型如图 1 所示, 这些有限元模型的建立方法是与文献 [1] 中静态模型的建立方法大致相同, 不同之处是在静态模型中, 回转加压小车和钻杆被当作集中载荷处理; 在动态模型中, 需要将它们作为集中质量和转动惯量向周围节点分配. 在钻探时钻架是在空间产生振动, 因此, 应求出回转加压小车和钻杆在 3 个坐标轴方向的集中质量及绕 3 个轴的集中转动惯量, 简化过程从略. 图 1 为示意图.

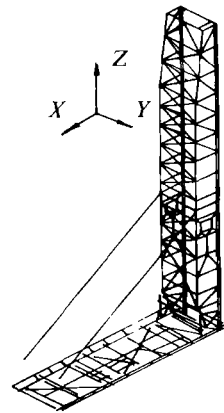


图1 整机动态力学模型

2 动态计算的理论和载荷谱

2.1 理论方法

通过 YZ-55A 型牙轮钻机的动态力学模型,可以建立动力平衡方程

$$[M]_{n \times n} \{\ddot{X}\}_{n \times 1} + [C]_{n \times n} \{\dot{X}\}_{n \times 1} + [K]_{n \times n} \{X\}_{n \times 1} = \{R\}_{n \times 1} \quad (1)$$

式中: $[M]_{n \times n}$ —整体 $n \times n$ 阶质量矩阵; $[C]_{n \times n}$ —整体 $n \times n$ 阶阻尼矩阵; $[K]_{n \times n}$ —整体 $n \times n$ 阶刚度矩阵; $\{R\}_{n \times 1}$ —等效节点载荷列阵; $\{X\}_{n \times 1}$ —节点位移列阵。

大型结构的动态参数的计算,实际上也就是对它的固有频率和振型的计算,只需要少数几个低阶特征对的计算就可满足工程上的要求,较为有效的方法是子空间迭代法。

由式(1)确定广义特征值问题方程:

$$[K]_{n \times n} \{X\}_{n \times 1} = \omega^2 [M]_{n \times n} \{X\}_{n \times 1} \quad (2)$$

对式(2)进行子空间迭代,即应用瑞利—里兹法,把 1 个大型 n 维空间的广义特征值问题降阶为 1 个 $P(P \ll n)$ 维子空间中的特征值问题,进而用反迭代法解出 P 维子空间的全部特征对。

大型结构动力响应计算,常用的方法是振型叠加法。由式(2)解出的前 P 阶特征对 $(\omega_p^2, \{\phi_p\})$,以振型矩阵 $[\phi] = [\{\phi_1\} \{\phi_2\} \cdots \{\phi_p\}]$ 作为变换矩阵,则节点位移列阵表示成:

$$\{X\}_{n \times 1} = [\phi]_{n \times p} \{\delta\}_{p \times 1} \quad (3)$$

这样方程(1)可变换成非藕合的方程:

$$\{\delta\}_{p \times 1} + 2[\zeta]_{p \times p} [\omega]_{p \times p} \{\delta\}_{p \times 1} + [\omega^2]_{p \times p} \{\delta\}_{p \times 1} = \{P\}_{p \times 1} \quad (4)$$

这里, $\{P\}_{p \times 1} = [\phi]_{p \times n}^T \{R\}_{n \times 1}$; $[\omega]_{p \times p} = \text{diag}[\omega_1 \omega_2 \cdots \omega_p]$; $[\zeta]_{p \times p} = \text{diag}[\zeta_1 \zeta_2 \cdots \zeta_p]$ 。如果初始条件: $\{\delta^{(0)}\} = [\phi]_{p \times n}^T [M] \{X^{(0)}\}$; $\{\dot{\delta}^{(0)}\} = [\phi]_{p \times n}^T [M] \{\dot{X}^{(0)}\}$,则式(4)中每 1 个方程的解可用杜哈梅(Duhamel)积分表示

$$\delta_i = \frac{1}{\omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}} \int_0^t p_i(\tau) e^{-\zeta_i \omega_i (t - \tau)} \sin \sqrt{1 - \zeta_i^2} \omega_i (t - \tau) d\tau + e^{-\zeta_i \omega_i t} (A_i \sin \sqrt{1 - \zeta_i^2} \cdot \omega_i t + B_i \cos \sqrt{1 - \zeta_i^2} \cdot \omega_i t) \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

式中, A_i 与 B_i 由初始条件确定,则系统的响应为

$$\{X\}_{n \times 1} = \sum_{i=1}^p \delta_i \{\phi_i\}_{n \times 1} \quad (6)$$

2.2 载荷谱

牙轮钻机的钻进是由封闭链条系统通过回转加压小车提供钻杆轴向压力 $P(t)$,而小车上的回转机构提供钻杆回转力矩 $M(t)$ 。它们的反力与反力矩通过封闭链条在钻架上的各支点与回转加压小车在钻架齿条立柱上各接触点作用在钻架上。在文献[1]中设定 $P(t)$ 与 $M(t)$ 是常值;在动力分析中,二者是随时间的交变值。文献[2],编制了 YZ-55 型牙轮钻机实测的载荷谱,本文引入一比例系数,得到 YZ-55A 型的轴压力 $P(t)$ 和扭矩 $M(t)$ 的表达式:

$$P(t) = 139.6 \sin(2\pi \times 3.78t - 1.54) + 74.5 \sin(2\pi \times 7.51t - 3.07) + 387.7 \text{ (kN)} \quad (7)$$

$$M(t) = 39.4 \sin(2\pi \times 1.251t + 2.55) + 31.1 \sin(2\pi \times 2.51t + 1.18) + 13.9 \sin(2\pi \times 3.65t - 1.76) + 190 \quad (\text{kN} \cdot \text{mm}) \quad (8)$$

利用 $P(t)$ 与 $M(t)$,就可以形成方程(1)中的 $\{R\}_{n \times 1}$ 的列阵,这样就可以进行动力响应计算。

3 动态计算结果与分析

3.1 固有频率与振型的计算

利用 SAP5P 结构分析程序的子空间迭代法进行动态参数计算. 选择计算前 6 阶的特征对, 设定迭代精度为 10^{-5} . 表 1 表示前 6 阶固有频率值, 前 6 阶的振型如图 2 所示. 从振型上来看, 可判别各阶固有频率下的振动是整体的, 还是局部的; 是挠曲的, 还是扭转的, 结合振型图可以得到以下结论: 第 1 阶振型是钻架左右挠曲; 第 2 阶振型是钻架前后挠曲; 第 3 阶振型是钻架上部出现扭转; 第 4 阶振型是振架底部出现扭转; 第 5 阶振型是钻架底部出现局部扭转, 而上部出现局部前后挠曲; 第 6 阶振型与第 5 阶类似.

表1 前6阶固有频率值

| 阶数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 固有频率/ Hz | 1.630 | 2.564 | 3.741 | 4.285 | 5.881 | 6.031 |

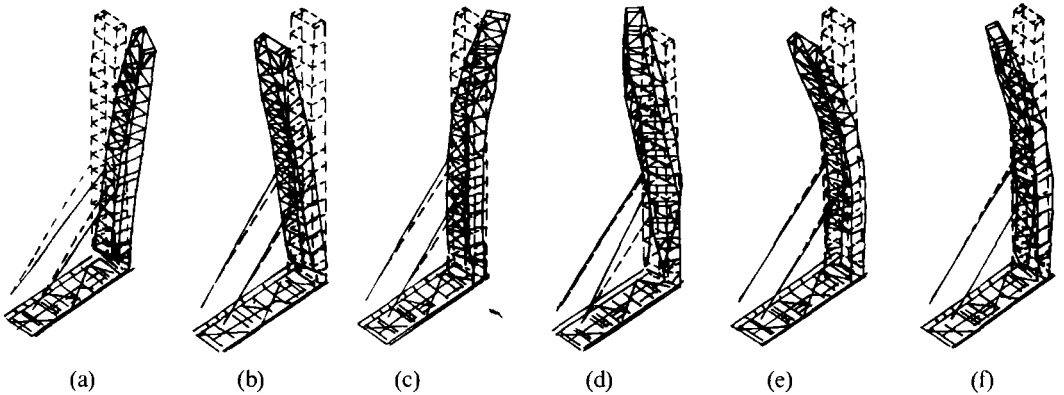


图2 YZ-55A型牙轮钻机结构前6阶振型(a)~(f)分别为第1阶至第6阶振型

下面, 分析如何避免这几阶振型的振动. 已知该型钻机的回转转速范围是 $0 \sim 150 \text{ r/min}$ (即 $0 \sim 2.5 \text{ Hz}$). 对于回转力矩的激振, 根据振型分析, 在 $0 \sim 2.5 \text{ Hz}$ 范围内不会激起扭转振动; 对于轴压力激振, 因为牙轮钻机钻头有 3 个牙轮冲击岩石, 它的激振频率应 3 倍于转速频率, 即 $0 \sim 7.5 \text{ Hz}$, 为避免轴压力可能激起的挠曲振动, 应避开第 1 阶和第 2 阶振型的固有频率 1.630 和 2.564 Hz, 对应的转速为 77.8 和 153.8 r/min . 考虑到钻机能有效地工作, 钻机合理的回转转速应在 $80 \sim 150 \text{ r/min}$.

3.2 动力响应计算

利用 SAP5P 结构分析程序进行动力响应计算, 可选择振型叠加法; 对于节点载荷 $\{R\}$ 的输入采用列表函数的形式, 并且选择一些特殊单元的应力和一些特殊节点的位移输出. 图 3 是钻架前左立柱上 144 单元的应力时间历程图. 静力计算时, 在正常钻进工况下, 该单元在钻架单元上应力值最大, 为 $\sigma_{\max} = 1.92 \text{ MPa}$; 动力计算, 该单元最大应力为 $\sigma_{\max} = 4.30 \text{ MPa}$, 则动态系数为 2.24; 图 4 是平台上左横梁上 384 单元的应力时间历程图, 同样, 静力计算时, 该单元为平台上最大应力值 $\sigma_{\max} = 5.12 \text{ MPa}$, 动力计算为 $\sigma_{\max} = 7.6 \text{ MPa}$, 动态系数为 1.48. 无论从静态计算或动态计算, 结构的安全系数 $\eta = \sigma_s / \sigma_{\max}$ (一般 $\sigma_s = 333 \text{ MPa}$) 是非常高的, 这有待进一步优化设计. 图 5 是钻架前左立柱顶部 13 节点处的位移时间历程图, 静态计算时, 该

节点是钻架位移最大值, 2.24 cm; 图 6 是平台左横梁上 151 节点处的位移时间历程图, 静态计算时, 该节点为平台位移最大值, 0.27 cm.

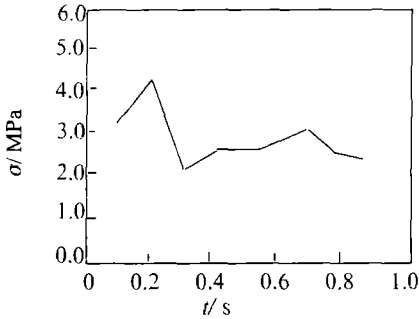


图3 144单元应力时间历程图

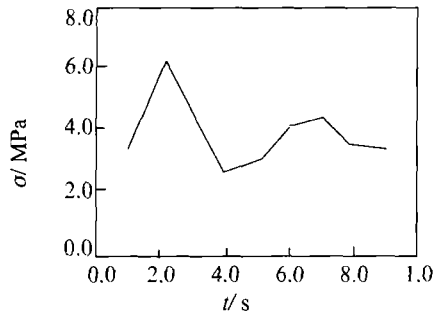


图4 384单元应力时间历程图

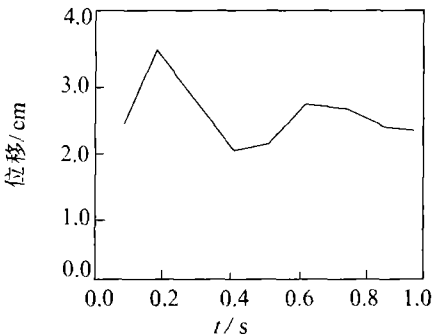


图5 13节点位移时间历程图

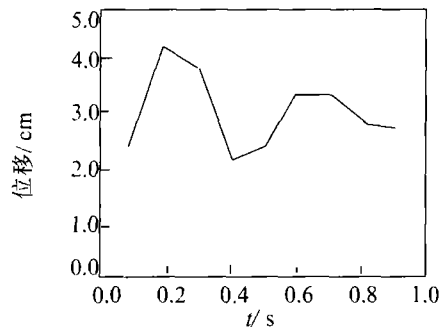


图6 151节点位移时间历程图

4 结束语

通过动态计算与分析, 确定的钻机合理的工作转速. 从振型上看, 平台结构在前几阶的振型中没有发生变化, 这符合设计要求.

参考文献

- 1 孙衍全, 门玉贵, 张立刚. YZ-55A 型牙轮钻机有限元模型建立及计算分析. 冶金设备, 1994(3): 14
- 2 杜蜀, 门玉贵, 周鹏里, 方涓. 牙轮钻机动强度载荷谱的编制. 矿山机械, 1989(4): 28

Dynamic Characteristics Analysis of YZ-55A Blast-hole Drill's Structure

Sun Yanquau Jia Suyan Gong Xiang Zhang Ligang

Resources Engineering School UST Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT Presents the dynamic characteristic analysis of YZ-55A Blast-hole Drill's structure by using SAP5P program. The result shows that the reasonable working rotation speed range should be between 80 and 150 r/min. Based on the load spectrum of YA-55 Blast-hole, the dynamic stress calculation on YZ-55A is carried out by introducing adjusting coefficient, the structure's vibration modes and stresses-time histories are presented.

KEY WORDS blast-hole drill; vibration mode analysis; dynamic mechanic model