

# 截割滚筒的非线性振动参数研究\*

杨琳琳, 张 闯

(三一重型装备有限公司 辽宁 沈阳 110027)

**摘 要:** 基于非线性振动理论, 考虑了滚筒截割过程的非线性刚度和阻尼因素, 建立了滚筒的非线性振动模型, 分析了滚筒的物理和结构参数对其振动特性的影响。结果表明: 有效地控制结构刚度和阻尼等参数, 可以减少滚筒的振动, 保证采煤机良好的工作性能和稳定性。

**关键词:** 采煤机; 滚筒; 振动; 非线性

中图分类号: TD421

文献标志码: A

文章编号: 1007-4414(2013)01-0001-02

## Analysis on nonlinear vibration of shearer spiral drum

Yang lin-lin Zhang chuang

(Sany heavy equipment Co., Ltd Shenyang Liaoning 110027 China)

**Abstract:** On the basis of the theory of nonlinear vibration, a model of nonlinear system for shearer spiral drum is established by considering the stiffness and damping. The effect of physical and structural parameters of spiral drum vibration is emphatically analyzed. The result shows that effectively control the stiffness and damping can reduce the vibration of the spiral drum to ensure the shearer good performance and stability.

**Key words:** shearer; spiral drum; vibration; nonlinear

## 1 引言

截割滚筒是采煤机最重要部件之一, 滚筒的工作环境恶劣复杂, 煤岩的性质引起外界载荷变化不确定, 产生了振动现象。滚筒的振动使截割工况恶化, 破坏截割性能, 导致截齿损坏和截割传动失效<sup>[1]</sup>, 严重影响采煤机的稳定性和安全性。文献[2]建立了采煤机振动的简化力学模型, 并对其中的基本参数进行了分析。文献[3]模拟了各种工况下的质量等因素对采煤机振动的影响曲线。以上研究从不同角度分析了其振动机理, 但是没有考虑滚筒振动的非线性问题。笔者建立了滚筒非线性振动的数学模型, 并针对影响振动的主要结构参数进行了研究。

## 2 非线性振动模型

### 2.1 滚筒的外界载荷

采煤机工作时, 螺旋滚筒上的载荷是时刻变化的, 但这些变化可看作存在一定的周期性<sup>[4]</sup>。故用简谐力来模拟滚筒受到的外力。即水平和垂直方向上的激励分别为:

$$F_x = F_a \cos \omega_0 t \quad (1)$$

$$F_y = F_b \cos \omega_0 t \quad (2)$$

式中:  $F_a$  是滚筒水平方向受到的外力;  $F_b$  是滚筒垂直方向受到的外力。

### 2.2 滚筒的偏心质量

由于滚筒在设计、制造和安装过程中存在误差,

加上叶片和截齿在圆周上分布不均匀, 使滚筒存在偏心质量, 在旋转过程中产生离心力, 即水平和垂直方向上的离心力分别为:

$$F_{ex} = me\omega^2 \cos \omega t \quad (3)$$

$$F_{ey} = me\omega^2 \sin \omega t \quad (4)$$

式中:  $m$  是偏心质量;  $e$  是偏心距;  $\omega$  是滚筒旋转角速度。

### 2.3 垂直方向的振动模型

如图 1 所示, 滚筒在垂直方向上受到时变的激励  $F_y$  和自身重力  $Mg$ , 根据拉格朗日定理其动力微分方程为:

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_b \cos \omega_0 t + me\omega^2 \sin \omega t + Mg \quad (5)$$

式中:  $M$  是滚筒质量;  $k$  是接触刚度;  $c$  是接触阻尼。

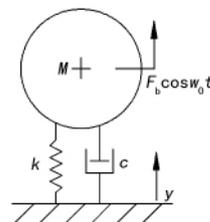


图 1 垂直方向简化振动模型

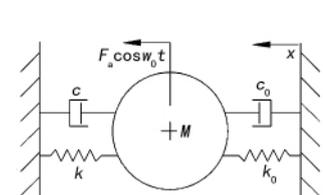


图 2 水平方向简化振动模型

### 2.4 水平方向的振动模型

滚筒在水平方向上作业时, 其接触刚度和阻尼随煤岩时刻变化。此系统的非线性刚度项和阻尼项采

\* 收稿日期: 2012-12-22

作者简介: 杨琳琳(1985-), 女, 河北石家庄人, 工程师, 主要从事煤机产品的研发设计工作。

用 duffing 振子形式(  $k + k_0x^2$  ) 和 van der pol 组合形式(  $-c+c_0x^2$  ) 分别定义,简化模型由图 2 给出。其振动微分方程为:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} - c\dot{x} + c_0x^2\dot{x} + kx + k_0x^3 \\ = F_a \cos \omega_0 t + me\omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \quad (6)$$

2.5 非线性振动方程组

滚筒两自由度的振动方程为:

$$\begin{cases} M\ddot{x} - c\dot{x} + c_0x^2\dot{x} + kx + k_0x^3 \\ = F_a \cos \omega_0 t + me\omega^2 \cos \omega t \\ M\ddot{y} + cy + ky \\ = F_b \cos \omega_0 t + me\omega^2 \sin \omega t + Mg \end{cases} \quad (7)$$

为下一步研究,将式(7)无量纲化,设:

$$\begin{aligned} \tau = \omega t, \gamma = \omega_0/\omega, \tilde{x} = x/\delta, \tilde{y} = y/\delta, \\ \dot{\tilde{x}} = d\tilde{x}/d\tau, \dot{\tilde{y}} = d\tilde{y}/d\tau, \ddot{\tilde{x}} = d^2\tilde{x}/d\tau^2, \ddot{\tilde{y}} = d^2\tilde{y}/d\tau^2 \\ H = c/M\omega, N = c_0\delta^2/M\omega, Q = k_0\delta^2/M\omega^2 \\ R = 1/M\delta\omega^2, P = k/M\omega^2, D = me/M\delta \end{aligned}$$

故将式化为:

$$\begin{cases} \ddot{\tilde{x}} - H\dot{\tilde{x}} + N\tilde{x}^2\dot{\tilde{x}} + P\tilde{x} + Q\tilde{x}^3 \\ = F_a R \cos \gamma \tau + D \cos \tau \\ \ddot{\tilde{y}} + H\dot{\tilde{y}} + P\tilde{y} = F_b R \cos \gamma \tau + D \sin \tau \end{cases} \quad (8)$$

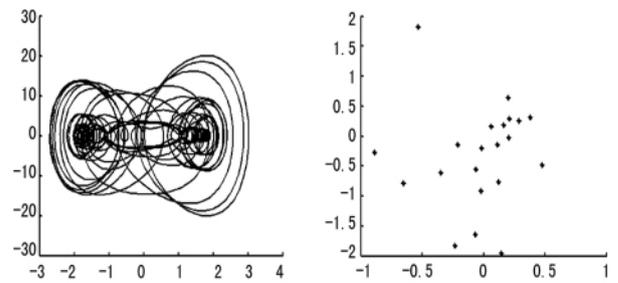
3 实例与分析

某型号 MG300-WD 采煤机,设计生产能力 1200t/h,滚筒质量 3t,滚筒水平中心距 12000mm,滚筒截深 800mm,滚筒直径 1800mm,滚筒转速 0 ~ 45r/min,偏心质量 30kg,偏心距离 50mm,滚筒水平方向受到阻力 600kN,垂直方向受到阻力 150kN,摇臂接触刚度 160kN/m,接触阻尼 700N/ms 将以上参数代入式(8),由于方程的非线性,采用 Runge-Kutta-Fehlberg 算法对其求解。

图 3 是转速 36r/min 时的相图和 Poincare 截面图。从图中可以看出在 36r/min 时振动剧烈,系统失稳进入混沌状态。

图 4 是滚筒振动随摇臂刚度变化的关系图,可以看出刚度在 50kN/m 到 200kN/m 阶段,振动速度下降并趋于变化平稳,当刚度超过 200kN/m 后,转速减小的速率加快,在 260kN/m 左右达到最低,之后随刚度的增加,振动速度开始增大。

图 5 是滚筒振动随摇臂阻尼变化的关系图,可以看出阻尼在 100N/ms 到 120N/ms 阶段,振动速度随阻尼的增加而减小;在 120 ~ 180N/ms 阶段,振动速度随阻尼的增加而增大并达到最大,之后随阻尼的增加,振动速度开始减小。



(a) 转速 36r/min 的相图 (b) 转速 36r/min 的 Poincare 截面图

图 3 转速相图和 Poincare 截面图

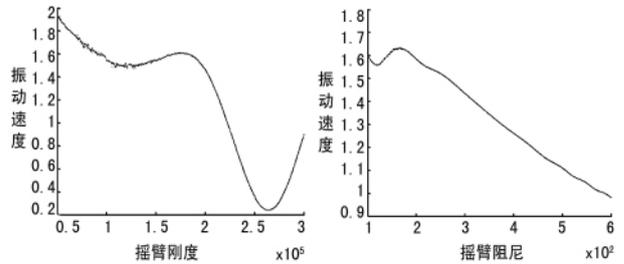
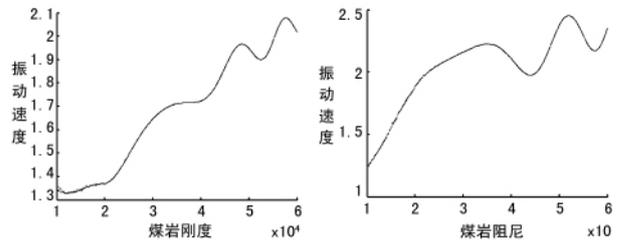


图 4 滚筒振动随摇臂刚度变化的关系图

图 5 滚筒振动随摇臂阻尼变化的关系图



(a) 刚度变化关系图

(b) 阻尼变化关系图

图 6 滚筒振动随煤岩刚度、阻尼变化的关系图

图 6(a) 是滚筒振动随煤岩刚度变化的关系图,可以看出振动速度随煤岩刚度的增加而增加;图 6(b) 是滚筒振动随煤岩阻尼变化的关系图,虽然与刚度的变化关系不同,但总体趋势相同,振动速度均是单调增函数。

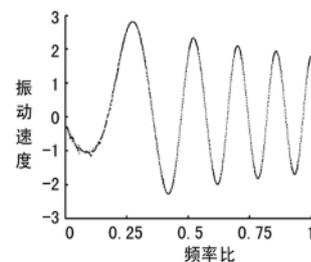


图 7 滚筒振动随频率比变化的关系图

图 7 是滚筒振动随频率比变化的关系图,可以看出,在频率比值从 0 ~ 1 的阶段,振动速度多次经过零点,运行轨迹类似于三角函数关系。

(下转第 4 页)

因此 构件 A 的固有频率为:

$$f_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = 746 \text{ (Hz)}$$

构件 B 可看作是受均布载荷的简支梁,同构件 A 一样,由文献[2]得到:

$$f_3 = \frac{5W_B l^3}{384EI_B} \quad (4)$$

由式(3)得 构件 B 的固有频率为:

$$f_B = 1400 \text{ (Hz)}$$

对多自由度系统,可由 Dunkerley 方程近似确定系统基频,其表达式为:

$$\frac{1}{f_T^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2} + \frac{1}{f_4^2} + \frac{1}{f_5^2} \dots \quad (5)$$

由以上的 Dunkerley 方程得到该夹具的一阶固有频率  $f = 495 \text{ Hz}$ 。若要在  $1000 \text{ Hz}$  内不发生共振,结构 A-B-A 必须加强,笔者采用加强筋的方式,如图 2 所示(图中 1、2、3 为试验加速点分布)。

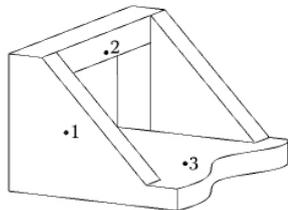


图2 改进振动夹具结构

为得到最大刚度,筋板两直边相等,且应一直焊接到 A 构件的顶端,这样构件 B 的边界条件改变,构件 B 不再是受均布载荷的简支梁,而是两端固支的梁,由文献[2]可知,构件 B 的固有频率将提高  $\sqrt{5}$  倍,于是  $f_B = 3130 \text{ Hz}$ 。构件 A 不再是悬臂梁,而是沿角板受分布载荷。同样由式(3)可得角板固有频率为  $f_C = 2750 \text{ Hz}$ ,由 Dunkerley 公式可知,改进后的夹具的固有频率为  $f' = 2066 \text{ Hz}$ ,满足试验要求。

### 3 振动夹具一阶共振频率试验数据识别

为准确了解夹具的动态特性,夹具加工完成后,在振动台上对夹具进行扫频试验,并在夹具底部、顶

部和中间部位分别布置了 3 个加速度测试点,测点分布如图 2 所示,由 3 个测点的试验数据分析可知,振动夹具的一阶共振频率均在  $1750 \text{ Hz}$  以上,试验数据结果如图 3~5 所示。

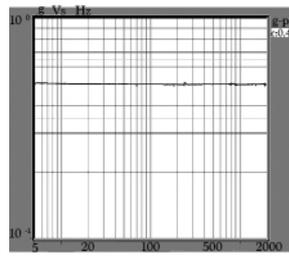


图3 3#传感器

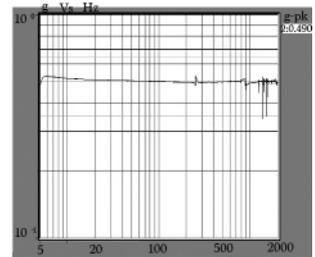


图4 2#传感器

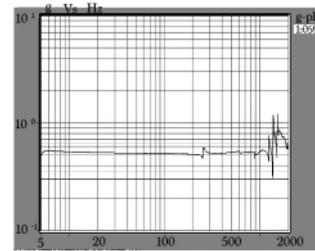


图5 1#传感器

从以上结果可以看出,用 Dunkerley 方程估算的夹具固有频率与实际扫频所得的试验数据基本一致,进而说明夹具设计的合理性。

### 4 结论

振动试验中要充分考虑到夹具结构本身对试验结果的影响,在夹具结构设计中通过 Dunkerley 方程可快速识别出振动夹具的固有频率,具有一定的工程实际意义。但实际系统往往零部件较多,结合面形状复杂,理论计算时要进行必要的合理简化假设。

#### 参考文献:

- [1] 力学环境试验技术编著委员会. 力学环境试验技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
- [2] 戴诗亮. 随机振动实验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- [3] 程耀东. 机械振动学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1988.

(上接第 2 页)

### 4 结论

本文从采煤机滚筒振动的角度出发,引入非线性动力学理论,建立了滚筒的非线性振动模型,着重分析了滚筒的物理和结构参数对其振动特性的影响。对于确定的采煤机截割工况,滚筒的设计应该综合考虑各种因素的相互关系,从而得到最优的滚筒结构。

#### 参考文献:

- [1] 张炳军,刘春生,林海鹏. 采煤机整机受力分析[J]. 东北煤炭技术, 1999(5): 40-42.
- [2] 李春亭,程东棠,时胜良. 采煤机振动的力学模型与分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1989(3): 92-99.
- [3] 李萍,李晓谿,刘春生. 采煤机的动力学模型及其仿真研究[J]. 矿山机械, 2004(6): 11-13.
- [4] 李贵轩,李晓谿. 采煤机械设计[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1994.