

# 双激振振动落料系统的拍振现象研究<sup>①</sup>

徐立峰, 张雷

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 对双激振器作用下的激振板振动响应进行计算, 通过对信号合成叠加计算, 用 Matlab 计算分析了适合产生均匀振动的两个激振器所需要的初始相位差、激振力与频率的关系. 计算结果表明初始相位差不影响激振板表面均匀度, 两个激振力比值与频率比值满足一定条件可以使振动板响应均匀.

**关键词:** 双激振器; 初始相位差; 激振力比值; 频率比值

## Research of the Beat Vibration on Dual-exciter Vibration Blanking System

XU li-Feng, ZHANG Lei

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Calculate the response of the excitation plate on the effect of dual-exciter. Get the conclusion of the relationship between cutting uniformity and initial phase difference/centrifugal force/frequency. The result shows that initial phase difference has no effect on the uniformity, but can improve the uniformity by control centrifugal force and frequency of exciter..

**Key words:** dual-exciter; initial phase difference; centrifugal force ratio; frequency ratio

现代机械加工的不断发展和各种新型材料的不断出现, 对加工精度和表面粗糙度要求越来越高, 其相应地发展了先进的磨削技术和磨具, 而涂附磨具也向着更高效、高寿命和超精密的方向发展<sup>[1]</sup>. 静电植砂技术是 20 世纪 90 年代发展起来的生产磨具的一项新型植砂方式, 这种植砂技术依赖于持续而稳定均匀的落砂量可无级调控的设备来均匀下料. 传统的落料方式有落砂辊式、刮片式和自由落体式<sup>[2-5]</sup>, 新式的振动式落砂方式由于动力特性难于分析没有得到很好的推广应用. 双激振振动落料系统具有响应均匀稳定等优点, 但由于实际工作中, 激振器频率很接近, 会产生较明显的拍振现象.

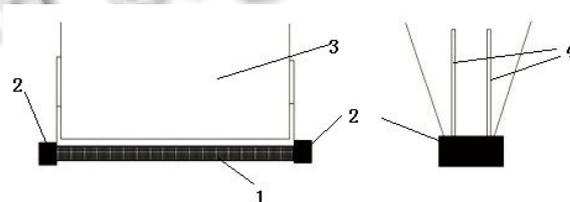
本文对同一轴向的双激振器振动而产生的拍振现象进行研究, 对激振器的初始相位差、频率、激振力选择做出了对比分析, 对选择激振器参数提供有效依据.

## 1 双激振振动落料系统的工作原理

### 1.1 基本结构

通过悬片将两块安装板固定连接在砂斗两端面

上, 把激振板安装在两块安装板之间, 两个激振器固定在两端的安装板上. 砂斗与激振板之间留用缝隙, 缝隙大小可通过液压装置来调节. 原理示意图如图 1 所示, 两个激振器驱动激振板水平方向振动, 激振板与水平方向有一定的倾斜角, 这样砂粒会由于重力和板表面响应的作用而向下均匀滑落.



1. 激振板; 2. 激振器; 3. 砂斗; 4. 悬片

图 1 双激振振动落料系统示意图

落砂调节装置主要由长轴、转动块、限流板、砂刀、连接杆和摆杆组成, 转动块固定安装在砂斗的两端, 长轴安装于转动块中, 与之形成转动副, 限流板通过连接杆与长轴相连, 使限流板位于砂斗与激振板

<sup>①</sup> 基金项目: 上海市教委科学技术发展基金(919k01)

收稿时间: 2013-03-22; 收到修改稿时间: 2013-04-27

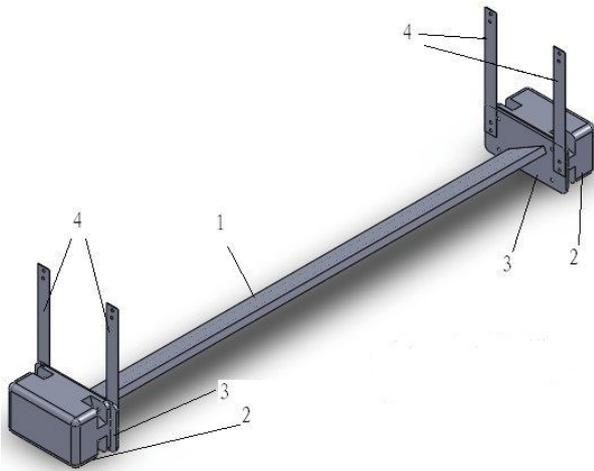
所形成的落砂口的正前方。当长轴转动时，限流板随着以长轴为旋转中心，以一定半径在较小的角度范围内转动，这样就可调节限流板至落砂口的距离，起到控制落砂量的作用。实际应用图如图 2 所示。



图 2 双激振振动落料系统的实际应用图

1.2 建立模型

对双激振振动落料系统部分用 SOLIDWORKS 建立三维模型<sup>[6]</sup>，如图 3 所示。



1.激振板 2.激振器 3.安装板 4.悬片

图 3 双激振振动落料系统的三维图

该振动系统可以近似为一个水平方向的强迫振动系统。假设左边激振器提供的激振力为  $F_1=P_1\cos(\omega_1t+\varphi_1)$ ，右边的激振器的激振力为  $F_2=P_2\cos(\omega_2t+\varphi_2)$ ；其中  $P_1、P_2$  分别为为激振力的峰值， $\omega_1、\omega_2$  为激振频率(可调)， $\varphi_1、\varphi_2$  为两个激振器的初始相位角。其力学模型如图 4 所示。

在图 4 中，激振板做强迫振动，列出微分方程为：

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} = \frac{1}{\rho A} (F_1 + F_2) \quad (1)$$

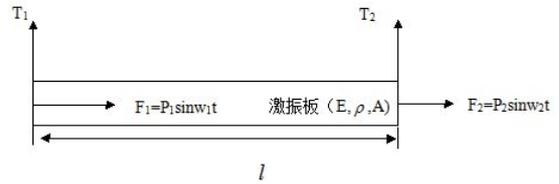


图 4 强迫振动系统的力学模型

图中  $l$  为激振板长度， $\mu$  为激振板响应，分  $E、\rho、A$  别为激振板的弹性模量，单位体积质量和横截面积。

$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  为弹性纵波沿  $x$  轴的传播速度。忽略非线性

因素，由于激振板的纵向振动是线性系统，在求解时可以分别解得在力  $F_1$  和  $F_2$  激振下的稳态响应  $\mu_1(x, t)$  和  $\mu_2(x, t)$ ，然后将其叠加。先求在只有  $F_1$  情况下的稳态响应，这样激振板的自由振动方程为：

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

而受到  $F_1$  作用下的激振板的稳态响应为  $\mu_1(x, t)=v(x, t)\sin\omega_1t$ ，其中  $v(x, t)$  是系统强迫振动稳态响应的振型函数。将  $\mu_1$  代入(2)式，得：

$$v''(x) + \frac{\omega^2}{a^2} v(x) = 0 \quad (3)$$

由公式(3)求解，得通解为：

$$v(x) = B \cos \frac{\omega}{a} x + D \sin \frac{\omega}{a} x \quad (4)$$

公式(4)中， $B$  和  $D$  是根据边界条件可计算得出的常量。由边界条件  $EA \frac{\partial \mu}{\partial x} |_{x=0} = P_1 \sin \omega_1 t$  和  $EA \frac{\partial \mu}{\partial x} |_{x=l} = 0$  代入公式(4)，从而解得：

$$B = \frac{P_1 a}{EA \omega_1} \frac{\cos \frac{\omega_1 l}{a}}{\sin \frac{\omega_1 l}{a}}, \quad D = \frac{P_1 a}{EA \omega_1}$$

于是激振板的稳态响应为：

$$\mu_1(x, t) = \left( \frac{P_1 a}{EA \omega_1} \frac{\cos \frac{\omega_1 l}{a}}{\sin \frac{\omega_1 l}{a}} \cos \frac{\omega_1}{a} x + \frac{P_1 a}{EA \omega_1} \sin \frac{\omega_1}{a} x \right) \sin(\omega_1 t + \phi) \quad (5)$$

同样的方法可以求出在只有  $F_2$  激振的情况下激振板的稳态响应  $\mu_2(x, t)$ ，由于系统为线性系统，总的稳态响应等于两个激振器力作用下响应的和总的稳态

响应即为:

$$\mu(x,t) = \mu_1(x,t) + \mu_2(x,t) = \left( \frac{P_1 a}{EA\omega_1} \frac{\cos \frac{\omega_1 l}{a}}{\sin \frac{\omega_1 l}{a}} \cos \frac{\omega_1}{a} x + \frac{P_2 a}{EA\omega_2} \frac{\sin \frac{\omega_2 l}{a}}{\sin \frac{\omega_2 l}{a}} \sin \frac{\omega_2}{a} x \right) \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \frac{P_2 a}{EA\omega_2} \frac{\cos \frac{\omega_2 l}{a}}{\sin \frac{\omega_2 l}{a}} \cos \frac{\omega_2}{a} x \sin(\omega_2 t + \phi_2) \quad (6)$$

$$\sin(\omega_1 t + \phi_1) + \frac{P_2 a}{EA\omega_2} \frac{\cos \frac{\omega_2 l}{a}}{\sin \frac{\omega_2 l}{a}} \cos \frac{\omega_2}{a} x \sin(\omega_2 t + \phi_2)$$

由公式可知, 激振板振动时, 表面质点位移响应与板属性及两个激振器的激振力幅、频率有关. 设计的时候可以根据位移响应方程对激振板参数进行优化设计, 在工作中也可以通过调节激振器参数来对振动过程进行控制.

## 2 双激振器振动系统的拍振研究

在一条轴线上同时两个简谐信号的时候, 会产生波形的叠加现象, 具体表现为振幅随着时间的变化会出现忽大忽小的现象, 称为拍振. 拍振现象在双激振器振动落料系统中会使得振动板表面各点位移大小不一, 造成落砂不均匀, 影响生产的质量, 影响设备的寿命, 降低零件的可靠性并且会带来过大的振动与噪声.

现在假设两个振动信号的原方程式为:  $x_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1)$  和  $x_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2)$ ; 其中  $A_1, A_2$  为两个振动信号的振幅;  $\omega_1, \omega_2$  为两个信号角速度;  $\phi_1, \phi_2$  为初相位.

则它们合成波形时方程为:

$$X = x_1 + x_2 = A \sin(\omega t + \delta) \quad (8)$$

振幅:

$$A = \sqrt{(A_1 - A_2)^2 + 2A_1 A_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_2 - \phi_1)]} \quad (9)$$

圆频率:

$$\omega = \omega_1 + \frac{1 + \beta \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_2 - \phi_1)]}{1 + \beta^2 + 2\beta \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_2 - \phi_1)]} (\omega_2 - \omega_1) \quad (10)$$

其中  $\beta = A_1/A_2$ , 当  $A_1 = A_2$  时, 合成的波形的频率为  $(\omega_1 + \omega_2)/2$ . 理论上, 当频率完全相等, 相位差相差  $\pi$  的时候, 简谐振动会相互抵消, 出现不振的现象, 当发生拍振的时候, 对初始波动的相位差  $\phi_1 - \phi_2$  与拍振的关系进行讨论, 选取两个相近的频率的简谐信号进行叠加, 分别取相位为 0 和  $\pi$ , 对比两个曲线.

图 5(上)是相位角为 0 的波动图形, 图 5(下)是相位角为  $\pi$  的波动图形. 由波形图可以知道, 当发生拍振的时候, 初始相位差只会改变拍振发生的时间位置, 对振幅和圆频率没有任何影响, 因此对选择不同频率

双激振器落料系统的落砂均匀度和落砂量没有影响.

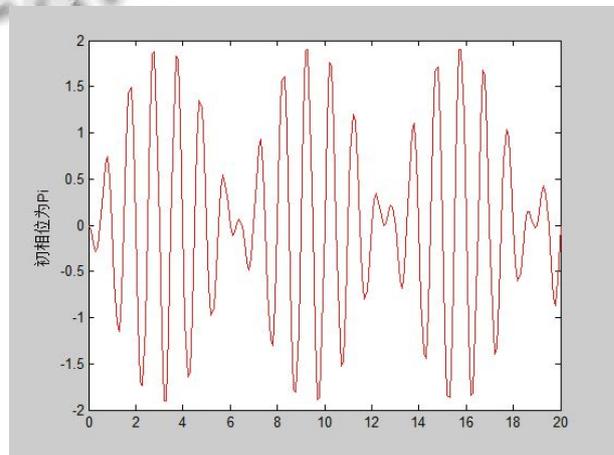
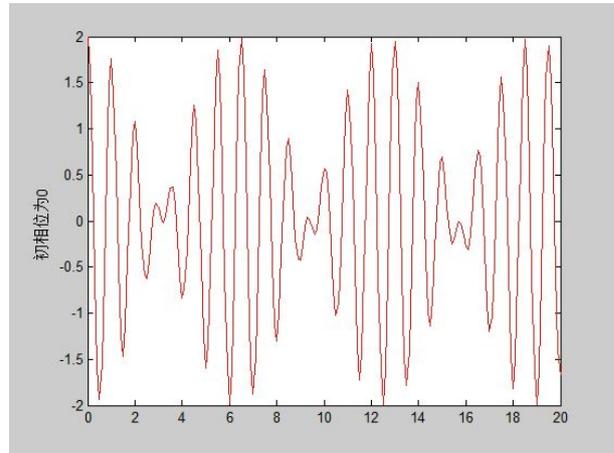


图 5 初相位对拍振的影响

对公式进行讨论分析, 得到初始相位对拍振的波形没有影响, 发生比较明显拍振现象的一个必要条件<sup>[4]</sup>是:

$$0.33 \leq \beta \leq 3 \text{ 且 } 0.85 \leq \zeta \leq 1.18$$

取激振板最左端进行研究, 即  $x=0$  处, 初始相位不影响拍振效果, 这里都取相位为 0 的情况, 带入公式(6)可求出则该点振动响应为:

$$u_0 = \frac{P_1 a}{EA\omega_1} \frac{\cos \frac{\omega_1 l}{a}}{\sin \frac{\omega_1 l}{a}} \sin \omega_1 t + \frac{P_2 a}{EA\omega_2} \frac{\sin \frac{\omega_2 l}{a}}{\sin \frac{\omega_2 l}{a}} \sin \omega_2 t \quad (11)$$

激振板的材料为合金钢, 查表可得  $E = 206 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $\rho = 7.90 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 激振板长度  $l = 2 \text{ m}$ , 截面积  $A = 0.175 \times 0.025 = 4.375 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ .

对振幅与频率进行讨论:

1) 当  $P_1 = P_2 = 20 \text{ KgN}$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = 50 \text{ Hz}$  时, 振动响应图形 6 所示, 可以由 MATLAB 得到.

波形呈简谐运动状, 由图形可以知道当两激振器

频率完全相同的时候,在激振板最左端不会发生拍振现象.

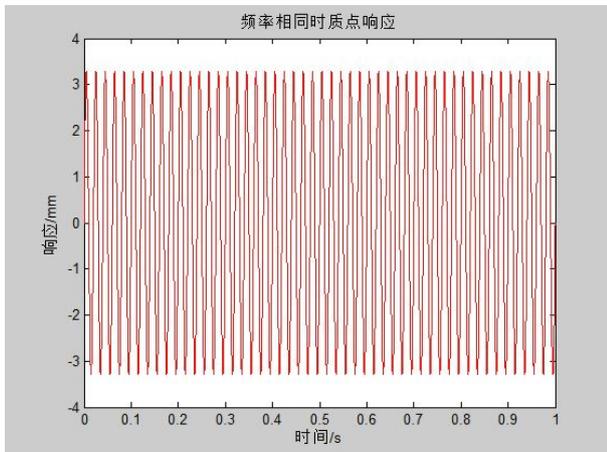


图 6 频率相同时质点响应曲线

2) 当激振力相同、两个激振频率相差不大的时候,取  $P_1=P_2=20\text{KgN}$ ,  $\omega_1=50.1\text{Hz}$ ,  $\omega_2=49.9\text{Hz}$  的时候,振动响应如图 7 所示:

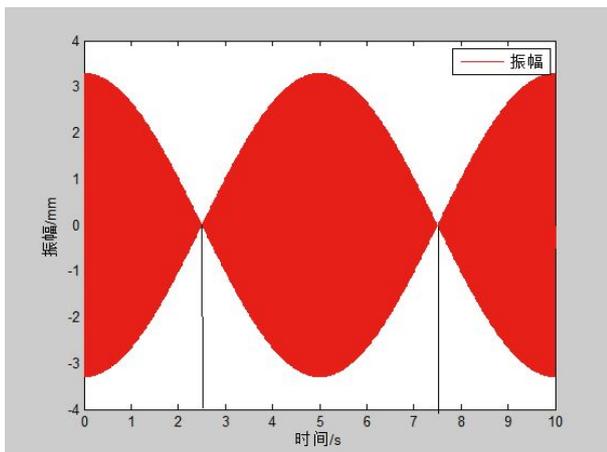


图 7 频率相差不大时响应曲线

频率相差很小的时候,振动发生了很明显的拍振现象.在实际运作过程中为,该质点振幅时而为 0,时而为 3.3mm,往复循环,周期变化.在实际的运作中,两个激振器往往不能具有完全相同的激振频率,很小的频率差会导致系统产生很明显的拍振现象.

3) 当激振力相同,频率比大于 1.18 时,取  $P_1=P_2=20\text{KgN}$ ,  $\omega_1=50\text{Hz}$ ,  $\omega_2=60\text{Hz}$ , 带入响应计算公式,利用 MATLAB 计算,则质点的位移响应曲线如图 8 所示.

质点此时拍振现象很不明显,振动趋于均匀平和.

4) 当频率相差不大,而激振力相差很大的时候,

易得质点的响应曲线如图 9 所示.

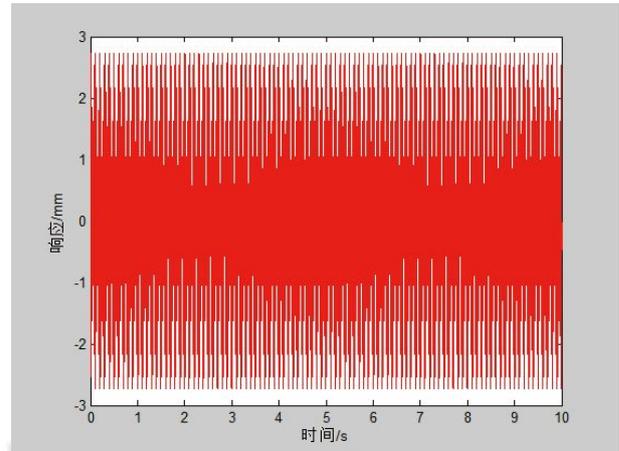


图 8 频率比大于 1.18 时响应曲线

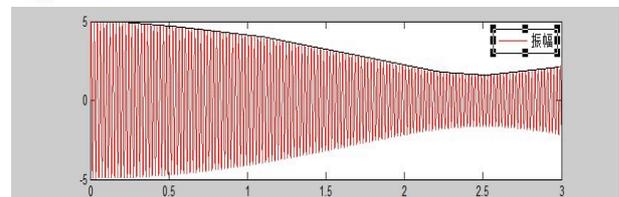


图 9 激振力相差较大时响应曲线

振幅成周期性变化,形成一条包络线,最大振幅比第二种情形最大振幅大.由此可见,调节激振力可以改变振幅的最大值和最小值,可以通过选择振幅比,减少最大振幅与最小振幅之间的差值,从而保证同一质点在不同时间段内振动状态均匀<sup>[7]</sup>.

综上所述,在实际运作出现的拍振现象产生的原因是频率的相近而不相等,如文章中模拟的 49.9Hz 与 50.1Hz 两个信号,合成的波形会呈现很明显的拍振现象.在实际工作中不可避免地会出现频率相差很小的情况,因此会导致激振板表面质点振幅产生周期性变化,出现拍振.解决的主要方向是,通过改变两个激振器的频率使他们不接近,并且满足频率比和振幅比的关系在一定的范围内,这样可以来使拍振不明显,提高下料均匀度.

落砂量的控制在结构上主要是由激振板与砂刀之间的距离决定的,激振板表面质点的位移响应峰值对其也有影响.选择双激振器参数的时候,可以通过对其激振力的大小设置,来控制质点表面振幅,从而达到控制落砂量的目的.

### 3 下料均匀度影响因素

假设,振动板表面各质点的瞬态响应不同,下料的

均匀度主要由某一时间段内, 该质点的振动状态所决定<sup>[8]</sup>. 该质点在某一时间段上的最大振幅的差异对下料均匀度有很大影响. 现对 50Hz 与 60Hz 的两个激振器共同激振的激振板表面选取两个任意质点如图 10 所示:

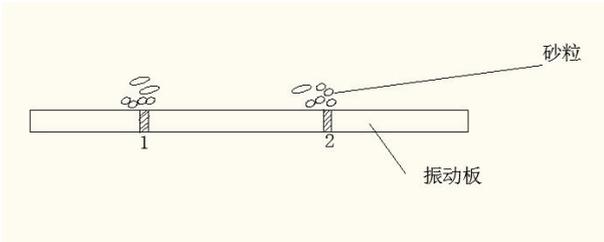


图 10 振动板表面两质点

取某一很小的时间段画出两个质点的振动波形如图 11 所示:

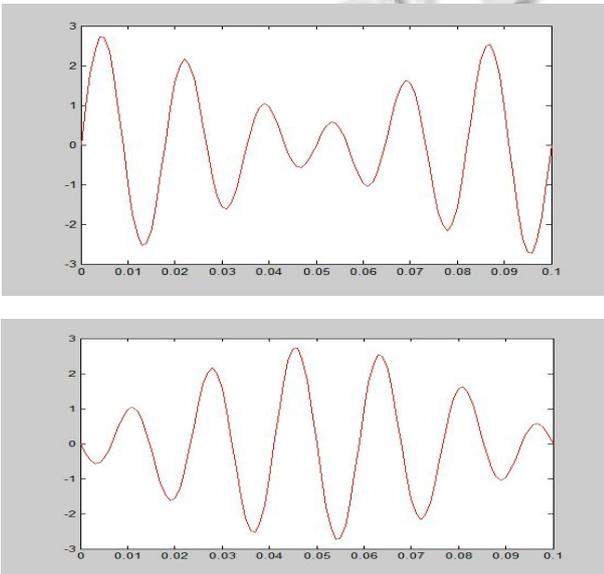


图 11 质点 1(上)和质点 2(下)在某时间段振动波形

由振型图可知两个质点虽然在该时刻振动位移不相等, 但是在 0.1s 内, 两者振动图形的振幅变化频率基本一致. 现在计算任意两质点之间最大振幅的关系.

公式(8)给出各质点振动响应方程, 对公式进行近似计算. 当激振力相等时, 最大振幅  $A_{max} = A_1 + A_2$ , 其中  $A_1$ 、 $A_2$  为各个激振器振幅峰值.

$\omega$  在一定范围的时候, 由于  $x$  和波速  $a$  给定, 可以近似认为:

$$\sin \frac{\omega}{a} x \approx \frac{\omega}{a} x$$

$$\cos \frac{\omega}{a} x = 1 - 2\sin^2 \frac{\omega}{2a} x \approx 1 - \frac{\omega^2 x^2}{2a^2}$$

令  $k=Pa/EA$ , 则振动板表面任意质点的最大振幅值:

$$A_{max} \approx k \frac{a - \omega_1^2 l^2}{\omega_1^2 l} \left(1 - \frac{\omega_1^2}{2a^2} x^2\right) + \frac{k}{a} x + \frac{ak}{\omega_2^2 l} - \frac{kx^2}{2al} \quad (12)$$

$$= \frac{k}{a} x - \frac{4ka^2 - k\omega_1^2 l^2}{4a^3 l} x^2 + A_0 = A_0 + \Delta \varepsilon$$

其中  $A_0$  为在最左端质点的最大振幅, 当频率选定,  $A_0$  为常数.  $\Delta \varepsilon$  为质点最大振幅相对于左端的变化量, 带入激振板参数, 用 MATLAB 对振幅变化量进行计算得到:

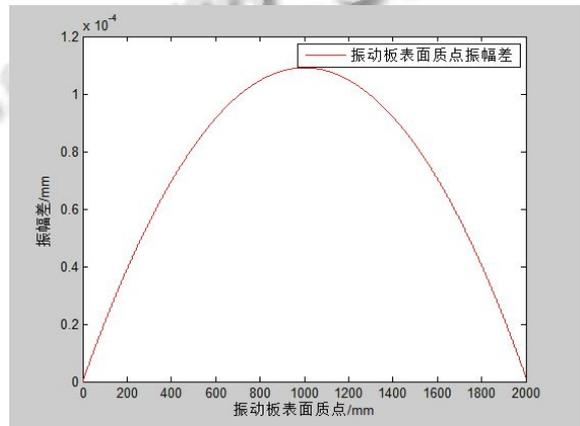


图 12 振动板表面质点振幅峰值差

由图像可知, 振动在中间位置振幅最大, 最大的振幅比最小的振幅大了  $1.2 \times 10^{-4} mm$ , 远小于  $A_0$  的值. 将振动板假想成连续的质点的话, 在这些连续的质点表面的砂粒在很短的时间段内, 收到的振动波形信号是一致的, 所以实际下料过程中, 该质点表面的砂粒受到的振动方式相差不大, 落砂可以保证均匀.

### 4 结论

通过以上计算和讨论, 我们可以得到双激振器振动落料系统在频率完全相等的时候不会发生拍振现象, 但是在实际工作中会由于频率相近而产生很明显的拍振现象. 通过对响应和波形叠加的计算得到, 初始相位差对拍振现象的影响很小, 不会影响拍振的振幅变化. 降低拍振现象可以通过调节频率比和振幅比来实现. 频率比满足低于 0.85 或者高于 1.18; 振幅比满足低于 0.33 或者高于 3 的时候可以有效降低拍振现象. 该结论在实际应用中得到了有效的验证.

(下转第 217 页)

#### 4.2 电能量分析及超限预警

对上述实时数据进行分析,可总结出每个月份或季度的电能消耗情况,并能与阈值数值做比较,检测用户电能异常状况,发出报警提示.图 6 中表盘指针若指在绿色区域,表示耗能正常;指针指在黄色区域,表示耗能超过阈值范围不大,给出报警提示;若指针指在红色区域,表示耗能严重,应立即采取措施;柱状图中有黄色区域,表示已经超预警,并显示超预警的数据,以此来指导用户合理使用电能,达到节能的目的.



图 6 电能量分析及超限预警功能界面

## 5 总结

本文介绍了基于嵌入式通讯管理机的电能管理系统组成原理和实现方案.嵌入式通讯管理机以通信微处理

器 MPC860T 为核心,具有低成本、高可靠性、通用性好、实时性强的特点,适用于电能量信息的实时传输和处理,具有较好的经济和实用价值.目前本系统已应用于某水泥厂的电能量管理,在现场严酷的环境下能够稳定运行,为工业企业提供了有效的能源管理方案.

## 参考文献

- 1 高强,张保航,谷海青.用户端电能管理系统的研究现状与发展趋势.电力系统保护与控制,2012,40(7):148-155.
- 2 王勇,杨劲锋,申妍华.大型供电企业电能计量自动化系统设计与应用.电测与仪表,2011,48(11):63-67.
- 3 谭志强,黄懿.自动抄表技术的发展.电测与仪表,2009,46(1):1-5.
- 4 Pimpinella L, DiGiorgio A, Mercurio A. Local energy management system: Control scheme and loads modeling. 2010 18th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). 2010.
- 5 叶长槐.现代化电能管理系统.机电技术,2008,31(2):70-73.
- 6 丁楠,徐成.基于 ARM 处理器及 Linux 的通信管理机研发.微计算机信息,2010,26(32):75-77.
- 7 向强.基于 MPC860T 的嵌入式网络平台的硬件开发.电子器件应用,2009,11(7):33-38.
- 8 夏巍,丁刚,严辉.基于 CAN 总线和嵌入式网关的家庭智能控制网络.工业仪表与自动化装置,2008,16(6):29-32.
- 9 焦彦军,刘玉民,石美传.基于 Nucleus Plus 平台的以太网接口设计.电气时代,2008,15(6):A13-A15.

(上接第 192 页)

通过对不同频率激振下的双激振器表面最大振幅的计算,可以知道激振板中间的最大位移响应最大,比两端的最大位移响应高出 0.12 微米,考虑到下料颗粒的体积大小,基本可以忽略.双激振振动落料系统可以实现有效地实现均匀下料这一功能.

## 参考文献

- 1 吕志,郑超.超硬材料涂附磨具(上).超硬材料工程,2008,2:12-13.
- 2 张雷,黄积朋,林建中,张丽芳.振动式落料机机电系统的设计和优化.中国工程机械学报,2011,4:14-15.
- 3 苏未安,陈秀红.用旋转矢量法研究拍现象.江西理工大学学报,2009(30):1:60-63.

- 4 练继建,李成业,刘昉,宋明富.环境激励下二滩拱坝拍振机理的研究.振动与冲击,2012,(31):2.
- 5 樊风秋,王京芳.涂附磨具用酚醛树脂胶粘剂的合成研究.化学与粘合,1997,2:3-5.
- 6 陈金身,李素平.涂附磨具专用胶粘剂的研制.粘接,2008,5:12-14.
- 7 Zhou F, Liu YW. The development of gear pump CAD/CAPP based on solid works. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2002, 10: 32-34.
- 8 Tan YG, Wang YP, ALL-BAIL M. Model and characteristic of a new underactuated manipulator and its simulation. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2009, 4.