

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.050

# 圆形压电振子驱动式直线振动给料器\*

苏江<sup>1,2</sup> 杨志刚<sup>3</sup> 张长健<sup>1</sup> 沈燕虎<sup>1</sup>

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学珠海学院, 珠海 519041;

3. 吉林大学链传动研究所, 长春 130025)

**摘要:** 为了满足自动化生产线中对轻、薄、小产品平稳输送的要求,提出一种采用圆形压电双晶片振子作为驱动源的新型直线振动给料器,设计了振动给料器的结构模型,分析了振动给料器的工作原理,建立了振动给料器力学模型。制作了振动给料器样机,并对样机进行试验测试,得到了电压、振幅、频率之间的关系曲线,结果表明研制的振动给料器与电磁式相比具有节省电能、工作噪声小、输送稳定性好的优点,与矩形压电双晶片驱动式相比具有输送速度快的优势。

**关键词:** 圆形压电振子 振动给料器 压电双晶片 力学模型

**中图分类号:** TH237+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0289-04

## Line Vibratory Feeder Driven by Circular Piezoelectric Vibrator

Su Jiang<sup>1,2</sup> Yang Zhigang<sup>3</sup> Zhang Changjian<sup>1</sup> Shen Yanhu<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Zhuhai College, Jilin University, Zhuhai 519041, China

3. Institute of Chain Transmission, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** To meet the requirement that the light, thin and small product was conveyed steadily in modern automation product line, a new type line vibratory feeder driven by circular piezoelectric vibrator was proposed. The structure model of the vibratory feeder was designed. The working principle of the vibratory feeder was analyzed. The dynamic model of the vibratory feeder was established. Furthermore, a prototype of the vibratory feeder was developed and tested. The relations among voltage, amplitude and frequency were explored based on the test. The experimental results show that the new type vibratory feeder is characterized by less electrical energy consumption, lower work noise and more stable feeding compared with electromagnetic vibratory feeder, and it has faster feeding rate compared with the rectangular bimorph piezoelectric vibratory feeder.

**Key words:** Circular piezoelectric vibrator Vibratory feeder Bimorph Dynamic model

### 引言

压电振动给料器是一种物料整列定向传送的设备,广泛应用于机械、电子、医药等自动化生产领域。与传统的电磁式振动给料器相比,具有省电、结构简单、运动平稳、响应速度快、噪声低等优点<sup>[1]</sup>。在20世纪70年代末期,日本科研人员研制成功了以

矩形压电双晶片作为驱动源的悬臂式压电振动给料器<sup>[2]</sup>。韩国和台湾的研究人员对压电振动给料器各项性能进行了深入分析,提出了改进给料器性能的方法<sup>[3~6]</sup>。国内在20世纪90年代末期开展了压电振动给料器的研究<sup>[7~10]</sup>。国内外对压电给料器的研究主要针对日本发明的给料器结构,并未在压电振动给料器结构上有所改进创新。目前国内市场

收稿日期:2013-02-22 修回日期:2013-03-20

\* 国家自然科学基金资助项目(51075175)

作者简介:苏江,博士生,讲师,主要从事压电驱动技术研究,E-mail: sujiang2002381@sohu.com

通讯作者:杨志刚,教授,博士生导师,主要从事压电驱动技术研究,E-mail: yzg@jlu.edu.cn

上使用的压电振动给料器大部分都是日本的产品,且价格昂贵。本文在分析现有压电振动给料器结构的基础上,提出一种利用圆形压电双晶片作为驱动源的新型直线振动给料器。

### 1 结构与工作原理

圆形压电振子驱动式直线振动给料器结构如图1所示,其中驱动源为圆形压电双晶片,其通过环形垫圈固定在顶板上,支撑杆一端穿过圆形压电双晶片中心,另一端穿过调整片中心,两端均用螺母紧固。两组主振弹簧片以15°平行安装,分别连接底座与顶板,顶板上安装有料斗。橡胶底脚安装在底座上,起减振作用。

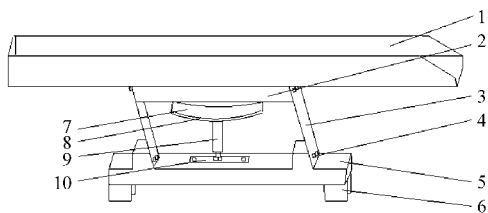


图1 圆形压电振子驱动式直线振动给料器结构图

Fig. 1 Structure of line vibratory feeder driven by circular piezoelectric vibrator

- 1. 料斗 2. 顶盘 3. 主振弹簧片 4. 螺栓 5. 底座 6. 底脚
- 7. 环形垫圈 8. 圆形压电双晶片 9. 支撑杆 10. 调整片

基本工作原理是:在圆形压电双晶片上施加正弦交流电压,使之弯曲振动,所产生的弯曲振动垂直作用于顶板,使顶板产生上下振动,这种振动通过顶板作用于主振弹簧片,使其产生左右弯曲振动,从而使料斗表面形成了上下与左右摇摆的复合振动,构成驱动物料直线移动的能力。可以通过改变调整片的刚度来改变系统的共振频率和振幅,以适应不同种类物料的输送。

### 2 送料器动力学模型

力学模型如图2,其中  $m_1$  为顶盘和料斗质量,  $m_2$  为底座质量,  $k_0$  为橡胶底脚刚度,  $k_1$  为主振弹簧片刚度,  $k_2$  为调整片刚度,  $k_3$  为圆形压电振子刚度,  $y_0$  为圆形压电振子振动位移,令  $y_0 = A \cos(\omega t)$ ,  $y_1$  为顶盘和料斗的振动位移,  $y_2$  为基座的振动位移,  $F_0$  为初始激励,  $F_0 = k_3 y_0$ , 则双自由度双质量系统的运动微分方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + k_3(y_1 - y_0) + k_1(y_1 - y_2) = 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_0 y_2 - k_2(y_0 - y_2) - k_1(y_1 - y_2) = 0 \\ k_3(y_1 - y_0) + F_0 - k_2(y_0 - y_2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由于  $k_0$  为橡胶底脚刚度,其远远小于  $k_1$ ,故取  $k_0 \approx 0$ ,式(1)可转换为

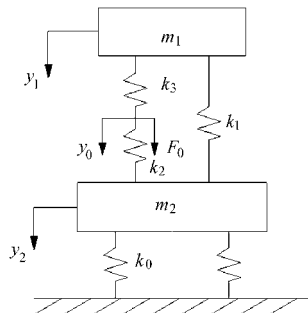


图2 直线振动给料器力学模型

Fig. 2 Dynamic model of line vibratory feeder

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} y_1 - \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} y_2 = \frac{k_3}{k_2 + k_3} y_0 \\ m_2 \ddot{y}_2 - \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} y_1 + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} y_2 = \frac{k_2}{k_2 + k_3} y_0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得系统特征方程

$$\Delta(\omega^2) = m_1 m_2 \omega^4 - \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} (m_1 + m_2) \omega^2 = 0 \quad (3)$$

式中  $\omega$ ——激励频率

由式(3)可得

$$\begin{cases} \omega_1 = 0 \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \end{cases} \quad (4)$$

通过上式分析知,系统固有频率与  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  有关,即  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  确定以后,不论初始条件如何,系统的固有频率不变,这样就吧一个双自由度双质量的振动系统简化为一个单自由度有阻尼的强迫振动系统,如图3所示,  $c$  为系统阻尼,  $M$  为简化后激励体系统的质量,且

$$M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

单自由度有阻尼的强迫振动系统二阶运动微分方程为

$$\begin{cases} M \ddot{y} + c \dot{y} + k_3(y - y_0) + k_1 y = 0 \\ k_3(y - y_0) + F_0 - k_2 y_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

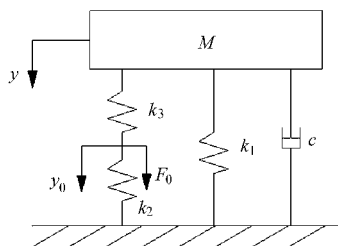


图3 直线振动给料器的简化学模型

Fig. 3 Simplified dynamic model of line vibratory feeder

式(5)变换为

$$M \ddot{y} + c \dot{y} + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} y = \frac{k_3}{k_2 + k_3} F_0 \quad (6)$$

等式两端除以  $M$ , 得到激振体系统振动的一般表达式为

$$\ddot{y} + \frac{c}{M} \dot{y} + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{M(k_2 + k_3)} y = \frac{k_3}{M(k_2 + k_3)} F_0 \quad (7)$$

变换为

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n \dot{y} + \omega_n^2 y = \frac{k_3^2}{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3} A \omega_n^2 \cos(\omega t) \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \xi = \frac{c}{2m\omega_n} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{M(k_2 + k_3)}} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\xi$ ——粘性阻尼因子  $\omega_n$ ——固有频率  
 $A$ ——激励幅值

由式(8)得到单自由度阻尼系统的稳态响应为

$$y = \frac{k_3^2}{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3} \frac{A}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \cdot \left\{ 2\xi \frac{\omega}{\omega_n} \sin(\omega t) + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] \cos(\omega t) \right\}$$

写成简洁形式

$$y = Y \cos(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

其中

$$\tan \varphi = \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

则

$$Y = \frac{k_3^2}{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3} \frac{A}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (11)$$

把稳态响应的幅值  $Y$  与激励的幅值  $A$  的无量纲比称为幅值比  $H(\omega)$  (也记为放大倍数), 即

$$H(\omega) = \frac{Y}{A} = \frac{\frac{k_3^2}{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 幅值比与  $k_1, k_2, k_3, \xi, \omega$  有关。当激励频率为系统的共振频率  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$  时, 位移放大倍数达到最大, 即

$$H(\omega_d) = \frac{Y}{A} = \frac{k_3}{2(2k_1 + k_2) \xi} \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (13)$$

### 3 性能测试

设计圆形压电振子驱动式直线振动给料器样机, 主振弹簧片尺寸为  $72 \text{ mm} \times 28 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ , 材料为 65Mn; 圆形压电陶瓷片尺寸为  $38 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ , 压电陶瓷为 PZT; 圆形基板尺寸为  $40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 材料为 45 钢; 调整片尺寸为  $40 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 材料为 65Mn; 顶板长度为  $140 \text{ mm}$ , 材料为铝合金; 料斗长度为  $400 \text{ mm}$ , 材料为 45 钢。用驱动电源产生的正弦交变电信号激励直线振动给料器, 用 LC-2400A 型激光测位仪采集位移信号, 其测试系统如图 4 所示。

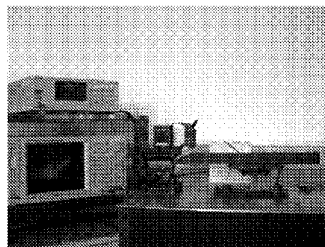


图 4 直线振动给料器测试系统图

Fig. 4 Experimental testing system of line vibratory feeder

LC-2400A 型激光测位仪由测量装置和信号处理装置两部分组成, 测量范围  $-500 \sim 500 \mu\text{m}$ , 分辨率为  $20 \text{ nm}$ , 最高频响为  $20 \text{ kHz}$ ; 可以把当前位置进行数码显示, 能输出位移值的模拟量和数字量, 能通过 RS232 接口与微机通讯。

#### 3.1 频率-振幅特性曲线

将装有 M4 螺母的料斗安装在送料器顶盘上, 调节驱动电源, 激励直线振动给料器, 使料斗中的物料向前传送, 当电压一定时 ( $U = 180 \text{ V}$ ), 改变驱动电源的频率并测量与之对应的振幅, 就可以得到幅频特性曲线, 如图 5 所示。从图中可看出, 振动给料器在  $108 \text{ Hz}$  附近发生共振, 其振幅达到最大值, 偏离共振频率, 振幅迅速下降。当频率低于  $105 \text{ Hz}$  或高于  $113 \text{ Hz}$  时, 料斗中物料停止移动。

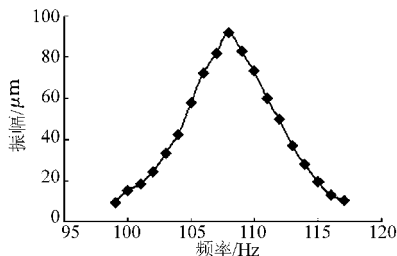


图 5 频率-振幅特性曲线

Fig. 5 Frequency-amplitude characteristic curve

#### 3.2 电压-振幅特性曲线

当电源频率调到与压电直线振动给料器固有频率相等时, 系统发生共振, 此时电源频率为  $108 \text{ Hz}$ ,

将电压从 0 V 开始调节,每隔 25 V 测试一次振幅,得到如图 6 所示的电压与振幅特性曲线。

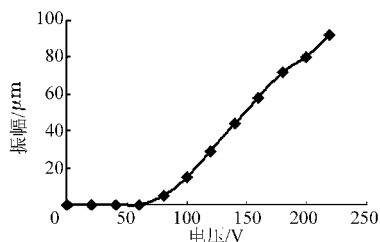


图 6 电压-振幅特性曲线

Fig. 6 Voltage-amplitude characteristic curve

从图 6 可以看出,料斗表面的振幅随电压的升高而增大。当电压在 70 V 以下时,压电直线振动给料器的料盘表面有振动,但振幅较小,近似为 0。当电压大于 70 V 后,随着电压的增加,振幅近似呈线性关系增加。

### 3.3 使用性能对比测试

将 0.2 kg 的 M4 螺母放入料斗中,调节信号发生器电信号频率使给料器发生共振,将同型号的直线电磁振动给料器、矩形压电双晶片驱动振动给料器与样机做对比试验,当回路中电压为 220 V,测得的相关参数如表 1 所示。

由表 1 可以看出,电压相同时,本文研制的压电

振动给料器电流仅为电磁式的 13%,噪声比电磁式低 19 dB。虽然电磁式给料速度较快,但物料在输送过程中出现较为明显的跳跃,输送稳定性较差;与矩形压电双晶片驱动的振动给料器相比,消耗电能与产生的噪声相差较小,但输送速度提高了 16%。

表 1 给料器使用性能对比

Tab. 1 Work performance contrast of feeder

类型	参数			
	电流/mA	频率/Hz	速度/mm·s <sup>-1</sup>	噪声/dB
样机	26	108	72	52
电磁给料器	193	50	89	71
矩形压电给料器	28	153	62	55

## 4 结论

(1) 设计了一种利用圆形压电双晶片作为驱动源的直线振动给料器,试验表明与电磁式相比,该送料器具有省电、噪声低、输送平稳的优点,与矩形压电双晶片驱动式相比,具有输送速度快的优势。

(2) 圆形压电振子驱动式直线振动给料器在较小的频率范围内具备输送物料的能力,共振条件下,料斗振幅最大。随着电压的升高,料斗振幅呈线性增加。

## 参 考 文 献

- Maul G P, Thomas M B. A system model and simulation of the vibratory bowl feeder[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1997, 16(5): 309 ~ 314.
- 特殊陶业株式会社. 压电振动搬送装置: 日本, 52-61087[P]. 1977-05-04.
- Choi S B, Lee D H. Modal analysis and control of a bowl parts feeder activated by piezoelectric actuators[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 275(1~2): 452 ~ 458.
- Paul C P, Chao, Chien-Yu Shen. Dynamic modeling and experimental verification of a piezoelectric part feeder in a structure with parallel bimorph beams[J]. Ultrasonics, 2007, 46(3): 205 ~ 218.
- Ting Yung, Shin Min-Sheng, Chang Hong-Yuan. Analysis and design of four-bar linkage type vibratory parts feeder driven by piezoelectric actuator[C]//Proceeding of the ASME Design Engineering Technical Conference, 2002: 43 ~ 50.
- Choi S B, Kim H K, Lim S C, et al. Position tracking control of an optical pick-up device using piezoceramic actuator[J]. Mechatronics, 2001, 11(6): 691 ~ 705.
- 焦其伟, 崔文会, 孙宝元, 等. 压电式振动给料器的研制[J]. 传感器技术, 2001, 20(4): 23 ~ 26.  
Jiao Qiwei, Cui Wenhui, Sun Baoyuan, et al. Research and produce of piezoelectric vibration feeder[J]. Transducer Technologies, 2001, 20(4): 23 ~ 26. (in Chinese)
- 杜玉明, 关志华, 吴端. 压电式振动给料机的技术反求[J]. 机械设计, 1999(4): 18 ~ 20.  
Du Yuming, Guan Zhihua, Wu Duan. The technological reverse seeking on piezoelectric typed vibrational feeder[J]. Machine Design, 1999(4): 18 ~ 20. (in Chinese)
- 田忠静, 吴文福, 韩峰. 浮动式压电振动送料装置的试验研究[J]. 压电与声光, 2006, 28(5): 557 ~ 559.  
Tian Zhongjing, Wu Wenfu, Han Feng. The experimental research on the floating piezoelectric vibratory feeder[J]. Piezoelectrics & Acousto-optic, 2006, 28(5): 557 ~ 559. (in Chinese)
- 谭晓东, 张坤. 压电式振动给料器驱动部件的力学分析[J]. 制造技术与机床, 2010(3): 72 ~ 75.  
Tan Xiaodong, Zhang Kun. Mechanical analysis of the driven parts of piezoelectric vibration feeder[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010(3): 72 ~ 75. (in Chinese)