

文章编号 1004-924X(2014)07-1828-06

压电驱动式振动给料器的设计与试验

沈燕虎^{1*}, 苏江^{1,2}, 杨志刚¹, 刘勇^{*}

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学珠海学院机电工程系, 广东 珠海 519041)

摘要: 为了实现对轻、薄、小产品的平稳输送, 利用圆形压电双晶片作为振动给料器的动力源, Z 型弹簧片作为主振弹簧, 并基于系统共振方法设计了新型压电驱动式振动给料器。介绍了圆形压电双晶片驱动式振动给料器的工作原理, 建立了动力学模型, 获得了系统固有频率表达式; 分析了压电双晶片的振动模态, 确定了一阶振型为工作振型。研制了振动给料器样机, 利用样机测试了电压、频率与送料速度的特性曲线以及主振弹簧片角度对送料速度、送料稳定性、送料噪声的影响规律。试验结果表明: 电压为 150 V, 频率为 142 Hz 时, 输送电池帽的速度为 8.5 battery cap/s; 频率为 136~148 Hz 时, 系统具备输送物料的能力, 共振条件下(142 Hz)输送速度最快; 随着电压的升高, 输送速度呈线性增加; 输送的单体物料质量增加时, 主振弹簧片安装角度宜变小。

关键词: 压电驱动; 振动给料器; 压电双晶片; 力学模型; 模态分析

中图分类号: TH237.1; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1828

Design and experiment of piezoelectric-drive vibratory feeder

SHEN Yan-hu¹, SU Jiang^{1,2}, YANG Zhi-gang¹, LIU Yong^{*}

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering,
Zhuhai School, Jilin University, Zhuhai 519041, China)

* Corresponding author, E-mail: yongliu@jlu.edu.cn

Abstract: To convey light, thin and small products stably, a piezoelectric vibratory feeder with the Z leaf spring actuated by a round piezoelectric bimorph was developed base on the working principle of systemic resonance. The working principles of the vibratory feeder driven by a circular piezoelectric vibrator were introduced, the expression of natural frequency was obtained by establishing the dynamic model of the vibratory feeder, and the first order mode shape was defined as the working mode shape after analysis of the vibratory modal. Then, a prototype of the vibratory feeder was developed. Finally, the relations among voltage, frequency and feeding rate were measured, and the influences of the angle of leaf spring on feeding rates, stability and noise were explored. The experimental results show that the feeding rate of the vibratory feeder is 8.5 battery caps per second when the voltage is 150 V and the frequency is 142 Hz. The vibratory feeder can convey the products when the working frequency is from 136 Hz to 148 Hz, and the best feeding rate is at the resonance

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51075175)

frequency(142 Hz). Moreover, the feeding rate increases linearly with the driving voltage. As the mass of the conveying parts increases, the installation angle of the main vibrating spring decreases.

Key words: piezoelectric drive; vibratory feeder; piezoelectric bimorph; dynamic model; modal analysis

1 引言

科技的发展使企业自动化程度越来越高。工厂里的装配、检查、计数和包装工序也都在逐步实现自动化和无人化,使零部件保持一定方向并能稳定供给的给料器已成为工厂自动化研究的重要组成部分^[1]。振动给料器是自动加工和自动装配系统中的一种供料装置,由于整列定向性能优良,供料效率高,通用性好,被广泛应用于自动装配、自动加工、自动包装等工序^[2]。传统的振动给料器大都使用电磁铁作为振动源,但这种电磁振动给料器体积大、质量重、结构复杂、噪声大^[3]。随着科学技术和工业自动化的不断发展,产品部件逐步趋向于轻薄短小,自动化生产线上对噪声的要求也越来越高,这些新要求使得对新型振动给料器的研发日益重要。近年来,随着压电陶瓷行业的不断发展,由压电陶瓷驱动的各种执行器件越来越多的应用于工业精密化生产领域。20世纪70年代末,日本研究人员开发了矩形压电双晶片驱动的压电振动给料器^[4],由于其结构简单、噪声小、无电磁干扰、能耗低、便于控制等优点,在精密机械、医药、电子元器件等领域获得了广泛应用。从1977年到现在,日本研究人员已在压电振动给料器领域申请了8项国际专利,牢牢控制了压电振动给料器的市场。近二十几年来,其他的国外研究人员也对压电振动给料器进行了广泛深入的研究^[5-16],韩国 Inha 大学的敏捷制造与系统实验室对压电振动给料器进行了有限元分析和实验验证,并指出改善给料器对各种物料适应性和减少输送噪声将是进一步的研究方向^[5]。台湾大学张所宏教授对压电振动给料器的动态特性进行了研究^[6];台湾中原大学的丁镛等人对压电式振动给料器进行了动态模型仿真分析和实验分析,提出了闭环控制的方法^[7];大连交通大学的谭晓东提出了斜拉压电驱动供料器的结构,并对其进行了有限元分析,讨论了驱动频率与给料速度、驱动电压与给料速度以及驱动输出频率与输出电流的关系^[8]。虽然这些研究取得了一定的成果,但在

给料器结构上并没有突破,仍然沿用着日本的压电式振动给料器结构。目前,国内对压电振动给料器需求日益增加,而市场却被日本产品垄断,开发出具有自主知识产权的压电振动给料器具有深远的意义。

根据振动给料器工作原理,本文提出了一种圆形压电双晶片作为驱动源,Z型弹簧片作为主振弹簧的振动给料器。对其结构和工作原理进行了说明,建立了振动给料器的动力学模型,设计并制作了基于Z型弹簧片的压电驱动式振动给料器样机,并进行了相关的试验测试。

2 压电驱动式振动给料器的结构及其工作原理

压电驱动式振动给料器的结构如图1所示,它由顶盘、压电双晶片、传振杆、主振弹簧片、支撑弹簧、底座和橡胶底脚等组成。料盘通过螺栓固定在顶盘上,其结构形式随着被输送物料的不同而变化;顶盘借助4个均匀分布Z型主振弹簧同底座固定连接,顶盘下部安装圆形压电双晶片,它通过传振杆与底座上的支撑弹簧固连;橡胶底角和底座之间用螺钉连接。

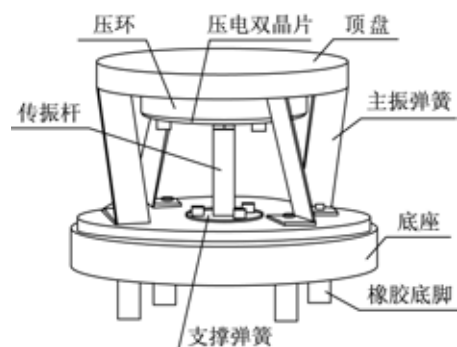


图1 压电驱动式振动给料器结构图

Fig. 1 Structure of piezoelectric-drive vibratory feeder

圆形压电双晶片是振动给料器的驱动源,当给圆形压电双晶片施加交流电压使之弯曲振动时,振动通过传振杆传递给支撑弹簧,使支撑弹簧

也发生弯曲振动,同时拉动顶盘上下运动,这时底座上均布的 4 组 Z 型主振弹簧也发生弯曲振动,从而形成了料盘上下振动与绕中心轴线扭转的复合振动,构成驱动物料输送。

3 压电驱动式振动给料器的动力学模型

压电驱动式振动给料器可用图 2 所示的力学模型表示,其中 m_1 为顶盘和料盘质量, 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 为支撑弹簧刚度, k_3 为圆形压电双晶片刚度, y_0 为圆形压电振子的振动位移,且令 $y_0 = A \cos \omega t$, y_1 为顶盘和料盘的振动位移, y_2 为底座的振动位移, F_0 为初始激励且 $F_0 = k_3 y_0$ 。

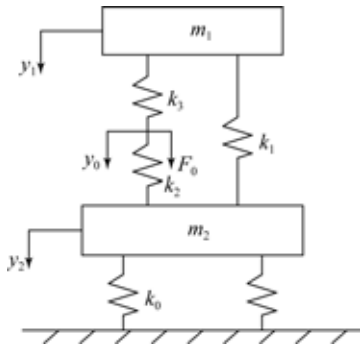


图 2 振动给料器的动力学模型
Fig. 2 Dynamic model of vibratory feeder

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,远远小于 k_1 ,故取 $k_0 \approx 0$,式(1)可转换为:

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

由式(2)可得系统特征方程:

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

由上式(3)可得:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0, \\ \omega_2 &= \sqrt{\frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3} \times \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} = \\ &= \sqrt{\frac{\frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3}}{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

通过分析可知,振动给料器系统固有频率与 m_1 、 m_2 、 k_1 、 k_2 和 k_3 有关,即 m_1 、 m_2 、 k_1 、 k_2 和 k_3 确定以后,不论输入什么形式的电压激励信号,系统的固有频率不变。

4 圆形压电双晶片的模态分析

为了确定振动给料器用圆形压电双晶片振子振型,用 ANSYS 软件对振子进行模态分析。表 1 所示为圆形压电双晶片振子振型分析结果。

由表 1 可以看出,振子的一阶振型中心位置变形量最大,二、三阶振型中心两侧变形量最大,四阶振型的中心点四周的 4 个点变形量最大,设计的振动给料器是利用振子中心的变形,故选用其一阶振型。

表 1 振子振型

Tab. 1 Vibrating mode of the vibrator	
一阶	二阶
三阶	四阶

5 试验研究

5.1 给料器样机

压电驱动式振动给料器样机如图 3 所示,主要部件尺寸规格为:压电双晶片基板 $\phi 92 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 75° 角主振弹簧片 $84 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$,支撑弹簧片 $\phi 28 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,压电双晶片 $\phi 60 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。

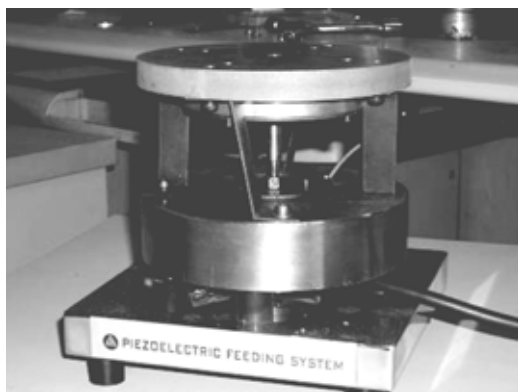


图 3 压电驱动式振动给料器样机实物图

Fig. 3 Prototype of piezoelectric-drive vibratory feeder

5.2 测试系统组成

用驱动电源产生的正弦交流电信号激励压电双晶片振子,用 LC-2400A 激光测微仪来采集料盘上某点的位移信号,快速傅里叶分析仪将接收到的激光测微位移的电压信号在屏幕上显示出来,测试系统如图 4 所示。

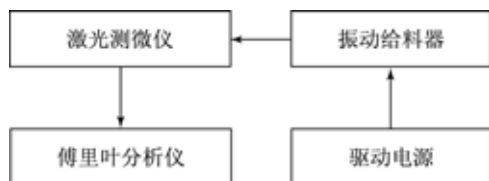


图 4 振动给料器测试系统图

Fig. 4 Experimental testing system of vibratory feeder

5.3 电压-送料速度特性曲线

将 0.5 kg 的钢质电池帽(单体重量 2 g)放入料盘,调节电源频率与 Z 型片(75°)压电振动给料器的固有频率相等,即系统达到共振,此时电源频率为 142 Hz ,电压从 50 V 加到 150 V ,对应每次电压的变化,测量料盘中物料输送的速度(用每秒从料盘出口输出的电池帽个数表示),从而得到电

压与送料速度的关系,如图 5 所示。

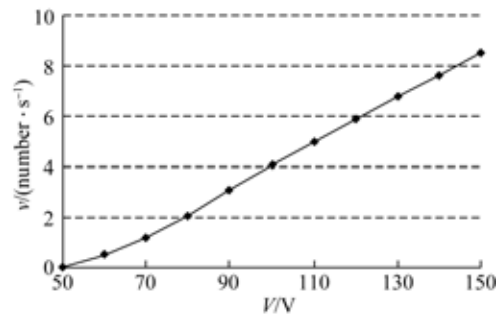


图 5 电压-送料速度特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of voltage-feeding rate

从图 5 中可以看出,Z 型片压电振动给料器的送料速度随电压的逐渐升高而加快。当电压在 $0 \sim 50 \text{ V}$ 时,给料器振动微弱,不能驱动料盘中的物料移动;当电压大于 50 V 时,Z 型片压电振动给料器开始工作,但输送速度较慢;当电压大于 80 V 时,给料速度明显加快,电压与送料速度之间基本呈线性关系。

5.4 频率-送料速度特性曲线

将电源电压调到 150 V ,依次改变电源频率,测定给料器送料速度,得到频率与送料速度的特性曲线,如图 6 所示。

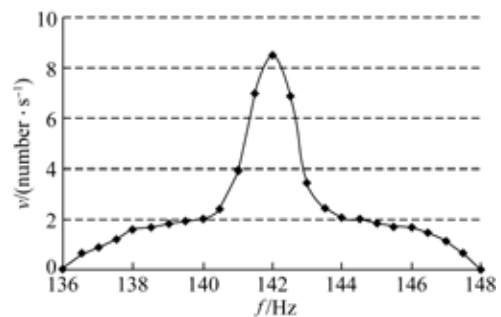


图 6 频率-送料速度特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of frequency-feeding rate

从图 6 中可以看出,频率在 136 Hz 以下时,送料速度为 0,当频率为 142 Hz 时,系统达到共振,送料速度最快,达到了 $8.5 \text{ battery cap/s}$,当频率大于 148 Hz 时,给料速度为 0。由此可看出振动给料器系统共振时,送料速度最快,偏离共振频率送料速度显著下降。

5.5 主振弹簧片角度影响

目前国内外市场上压电振动给料器多采用 75° 的主振弹簧片,但在生产中,为了达到最佳的送料效果,主振弹簧片角度随着物料与料盘之间

的动摩擦系数、料盘螺旋升角、物料重量等因素的变化而变化。研究表明:主振弹簧片角度一般取值为 $60\sim 85^\circ$ 。因此选取了 60° 、 75° 和 85° 3 种规格的主振弹簧片,从送料速度、振幅和噪声等方面进行了性能比较,结果如表 2 所示。

表 2 角度对比实验表

Tab. 2 Comparison test of angle

实验条件	弹簧片		实验测试结果		
	角度/ $^\circ$	速度/ battery cap $\cdot 10^{-1}$	振幅/ μm	共振 频率/Hz	噪声/ dB
输送铸 铁棒 4 g	60	30	67	118	62
	75	32	60	130	53
	85	24	50	138	48
输送钢质 电池帽 2 g	60	58	65	125	55
	75	65	55	136	47
	85	54	46	182	41
输送螺 母 7 g	60	22	62	127	63
	75	17	54	147	56
	85	9	40	181	49

从表 2 中可以看出 75° 给料器的输送较轻物料时送料速度较快,噪声小。输送较大质量物料时,速度稍慢。 60° 给料器在输送较重物料时,送料速度快,噪声较大。噪声较大的原因是由于料盘振幅较大,物料抛射角度大,使得物料与料盘之间撞击的声音比较大。由于 60° 给料器具有较大的振幅与抛射角,更适合输送质量大的物体。 85°

角给料器输送物料的速度较慢,输送质量较小的物料时,物料无跳跃,平稳性好,噪声小。这是由于 85° 角给料器抛射角度小,送料过程中物料处在断续滑移状态,虽然牺牲了一定的送料速度,但较低的噪声和良好的振动平稳性,在输送细小精密物料时具有独特的优势。

综上可知, 75° 角所适应的物料更为广泛。为了达到良好输送效果,根据输送单体物料重量不同,主振弹簧片安装角度应相应调整。传统的压电驱动给料器主振弹簧片为矩形弹簧片,而这种形式弹簧片调整安装角度时,由于装配问题,底座和顶盘的结构也要进行相应改变。设计的 Z 型主振弹簧片,在主振弹簧片角度改动时,顶盘和底座的结构不需要做相应调整,改善了振动给料器的结构工艺性。

6 结 论

研制了一种基于 Z 型主振弹簧片,利用圆形压电双晶片作为驱动源的新型振动给料器,适用于工业生产线中轻、薄、小物料的输送,可以方便地调整主振弹簧片的安装角度,来适应不同重量的物料。试验表明:电压为 150 V,频率为 142 Hz 时,输送速度为 8.5 battery cap/s;当频率为 136~148 Hz 时,具备输送物料的能力;共振条件下(142 Hz)输送速度最快;随着电压的升高,输送速度呈线性增加;输送的单体物料重量较大时,主振弹簧片安装角度宜取小值;单体物料重量较小时,主振弹簧片安装角度宜取大值。本文的研究为压电驱动式振动给料器提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] 苏江. 振动送料器的现状及发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 244-246.
SU J. Current status and development trends of vibration feeder [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010(7): 244-246. (in Chinese)
- [2] VILAN J A, ROBLEDA A S, PLACER C C, et al. . Approximation to the dynamics of transported parts in a vibratory bowl feeder [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44 (12): 2217-2235.
- [3] 姜斌, 刘晓论, 杨志刚, 等. 垂直驱动型超声波送料

器的研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1082-1086.

- JIANG B, LIU X L, YANG ZH G, et al. . Study on vertical drive ultrasonic feeder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1082-1086. (in Chinese)
- [4] 特殊陶业株式会社. 压电振动搬送装置: 日本, 52-61087 [P]. 1977.
- NGK SPARK PLUG Co., Ltd. Piezoelectric Vibratory Conveying Device: Japan, 52-61087 [P]. 1977. (in Japanese)
- [5] 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): 452-458.
- [6] CHANG S H, YANG T W. Dynamics of a piezoelectrically actuated vibratory feeder [C]. *Proceedings of the 26th International Conference on Biennial mechanisms and robotics, Maryland, USA; ASME*, 2000; 341-348.
- [7] YUNG, SHIN M, CHANG H. Analysis and design of four-bar linkage type vibratory parts feeder driven by piezoelectric actuator [C]. *Proceeding of the 28th International Conference on Design Automation, Quebec; ASME*, 2002; 43-50.
- [8] 谭晓东, 张坤, 李东明, 等. 斜拉式压电振动给料器的数值分析与实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(7): 144-147
TAN X D, ZHANG K, LI D M, *et al.*. Experiment research and numerical analysis on a new piezoelectric vibration feeder [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(7): 144-147. (in Chinese)
- [9] HAN L, GAO J X. A Study on the modelling and simulation of part motion in vibratory feeding [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 34-35 (10): 2006-2010.
- [10] MUCCHI E, GREGORIO R D, DALPIAZ D. Elastodynamic analysis of vibratory bowl feeders: Modeling and experimental validation [J]. *Ultrasonics*, 2013, 60 (2): 60-72.
- [11] 田忠静, 吴文福. 压电振动送料装置的研究现状及其应用[J]. *机械设计与制造*, 2011(11): 54-56.
TIAN ZH J, WU W F. Research status and application of piezoelectric vibratory feeder device [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011 (11): 54-56. (in Chinese)
- [12] CHAO P C, SHEN C Y. Dynamic modeling and experimental verification of a piezoelectric part feeder in a structure with parallel bimorph beams [J]. *Ultrasonics*, 2007, 46(3): 205-218.
- [13] HU, Z, MAUL, G P, FARSON D. Piezo actuated vibratory feeding with vibration control [J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(5): 1089-1100.
- [14] WANG Y, WU W F, SHI S P. Research on the mechanism of multi-source piezoelectric vibratory feeder [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 241 (12): 1427-1430.
- [15] TAKYO Y, KOIZUMI K, SAITO T, *et al.*. Study on vibratory linear micro-feeder [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2008, 74(5): 474-479.
- [16] TAN X D, ZHAO Y S, LIU C B, *et al.*. The analysis and experiment study on a new driving structure of piezoelectric vibration feeder [J]. *Advances in Mechanical Design*, 2011, 199 (2): 1107-1112.

作者简介:



沈燕虎(1986—),男,河北张家口人,博士研究生,2009年于吉林大学珠海学院获得学士学位,主要从事压电驱动技术以及控制和精密机械的研究。E-mail: shenyanhu0525@163.com

导师简介:



杨志刚(1956—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1998年于吉林工业大学获得博士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail: yzg@jlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)