

# 新型压电直线式振动送料器设计

苏江<sup>1a</sup>, 童杰<sup>1b</sup>, 向燕<sup>1a</sup>, 沈燕虎<sup>2</sup>

(1. 广东科学技术职业学院 a. 机器人学院 b. 机械与汽车学院, 广东 珠海 519090;

2. 吉林大学 链传动研究所, 长春 130025)

**摘要:** **目的** 为了满足现代工业领域中对轻、薄、小产品平稳输送的要求, 设计一种利用压电双晶片振子惯性力作为驱动源的新型直线式振动送料器。**方法** 在对振动送料器的工作原理进行分析的基础上, 建立压电振子动力学模型, 利用 Matlab 软件分析振子长度和质量对冲击力与变形量的影响, 研制送料器样机并进行性能测试。**结果** 当振动频率为 209.5~214.5 Hz 时, 送料器具备输送物料的能力; 当系统共振时, 输送速度最快, 随着电压的增加, 送料速度呈线性关系增加。**结论** 与同型号的电磁振动送料器相比, 研制的压电直线式振动送料器消耗电流仅为 14%, 工作噪音下降了 17 dB。与同型号日本压电送料器相比, 输送速度提高了 10%。

**关键词:** 振动送料器; 压电双晶片; 质量块; 性能测试

中图分类号: TH237.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)01-0110-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.01.017

## Design of New-type Piezoelectric Linear Vibratory Feeder

SU Jiang<sup>1a</sup>, TONG Jie<sup>1b</sup>, XIANG Yan<sup>1a</sup>, SHEN Yan-hu<sup>3</sup>

(1a.School of Robotics b.School of Machinery and Automobile, Guangdong Polytechnic of Science and Technology, Zhuhai 519090, China; 2.Institute of Chain Transmission, Jilin University, Changchun 130025, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a new-type vibratory feeder driven by inertia force of piezoelectric bimorph vibrator to meet the conveying requirements on light, thin and small product in modern industry. Based on the analysis of the working principle of the vibratory feeder, the dynamic model of the piezoelectric vibrator was established. The influence of the length and mass of vibrator on the impact force and deformation were analyzed with Matlab software. A prototype of the vibratory feeder was produced and its performance was tested. The feeder was capable of conveying part when the vibration frequency was 209.5-214.5 Hz and could reach the maximum feeding rate at resonant frequency. The feeding rate increased linearly with the increase of the voltage. Comparing with the electromagnetic vibratory feeder, the current consumption of such new linear vibratory feeder is only 14% and the noise is reduced by 17 dB. Comparing with the made-in-Japan piezoelectric vibratory feeder, the transmission speed has been raised by 10%.

**KEY WORDS:** vibratory feeder; piezoelectric bimorph; mass block; performance test

振动送料器是一种自动包装中常用的送料设备, 它可对输送的物料进行分选排列, 配合其他自动包装

设备完成产品的自动化包装<sup>[1-2]</sup>。根据物料排列行进方式, 振动送料装置可分为直线式和螺旋式。螺旋式

收稿日期: 2019-03-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51707081); 广州市科技计划 (201707010171, 201904010204)

作者简介: 苏江 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为压电驱动技术。

振动送料器主要是利用料盘上的挡板、缺口和偏重机构对物料进行分选整理，按照特定姿态定时、定量输送到料盘排料口。直线式振动送料器主要是为螺旋式送料器整理好的物料提供驱动力，将物料输送到指定工位<sup>[3]</sup>。采用电磁铁作为驱动源的送料装置在生产线上得到了广泛应用，但是这种电磁式振动送料器存在噪声大、能源转换率低、不适合精密物料输送等缺点。1977 年，日本特殊陶业株式会社科研人员首次提出了利用矩形压电陶瓷作为驱动源的压电式振动送料器<sup>[4]</sup>，这种送料器具有体积小、结构简单、噪声低、耗能小等优点，可以应用于 SMT、微小机械等需要自动化精密输送的生产领域<sup>[5]</sup>。随着压电材料工业的飞速发展，此后的 40 年来，基于压电陶瓷驱动的送料装置成为国内外学者的研究热点，取得了一系列成果<sup>[6-12]</sup>，但是这些成果都是基于日本提出的矩形压电片和弹簧片组合驱动的送料器，主体结构并没有取得突破。

文中提出一种采用矩形双晶片和质量块产生的惯性力作为驱动源的新型直线式振动送料器，该振动送料器具有驱动力大、体积小、输送速度快等特点，满足了自动化生产线中对轻、薄、小物料的输送需求。

## 1 送料器设计

日本研究人员设计的直线式压电振动送料器结构见图 1，主要由底座、压电振子、弹簧片、顶板等组成。其压电振子采用与竖直方向具有一定倾斜角度的方式安装，工作原理：给压电振子施加交变电源，压电陶瓷在逆压电效应下产生往复弯曲变形，通过弹簧片作用于顶板，顶板产生上下振动和左右摆动的复合运动，从而达到输送物料的作用。

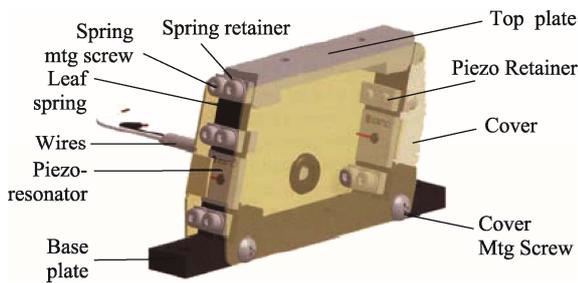


图 1 直线式压电振动送料器  
Fig.1 Structure of linear piezoelectric vibratory feeder

设计的新型压电直线式振动送料器整体结构见图 2。顶板上有螺纹孔，用来固定料槽，支承弹簧片与水平面呈 75°角布置，一端固定在顶板上，另一端固定在底座上的梯形块上。共振弹簧片一端固定在顶板上，另一端连接压电双晶片，压电双晶片另一端固定了质量块，质量块和底座之间有一定的间距。底座下部安装着橡胶底脚，起减振作用。其工作原理为：

通过送料装置电源控制器向压电双晶片振子通入正弦交流电，调节控制器电压和频率，使压电双晶片受到激励产生弯曲振动，由于共振弹簧片的作用，双晶片下端变形放大，在质量块作用下，产生了一定的惯性冲击力。由于交流电方向的不断变化，冲击力迫使支承弹簧不断地存储弯曲变性能和释放变性能，顶板在支承弹簧片交替作用下，驱动料槽中的物料按照一定的方向输送。当控制器输出频率与送料系统固有频率一致时，送料器产生共振，物料的输送速度最快。

与日本直线式压电送料器相比，设计的矩形压电振子一端自由，在质量块的作用下可以产生较大的驱动力，由于压电振子不是直接固定在底座上，从而减小了作用在底座上的振动反力，降低了对周围安装设备的影响。

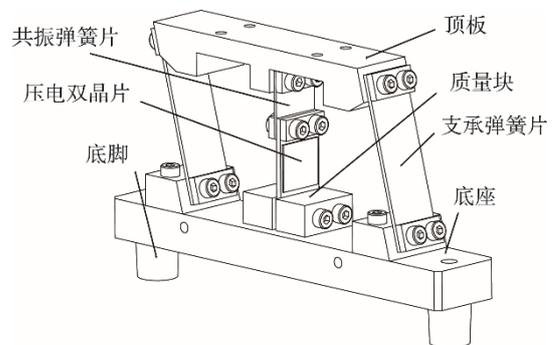


图 2 新型压电直线式振动送料器结构  
Fig.2 Structure of new-type piezoelectric linear vibratory feeder

## 2 振子的模态与动力学分析

### 2.1 振子的模态分析

为了了解振子在不同模态下的变形情况，采用 Ansys 软件对振子的振动模态进行了分析，结果见图 3。从图 3 可知，第 2—4 阶振型的自由端的振动变形

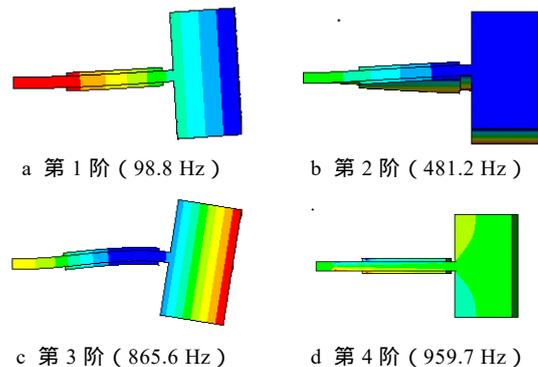


图 3 矩形压电双晶片振子的前 4 阶模态  
Fig.3 First four order modes of rectangular piezoelectric bimorph vibrator

不规则，无法形成驱动送料器工作的有效惯性力。第1阶振型的自由端产生了较大的弯曲变形，在质量块的作用下，有利于形成较大的惯性冲击力。为了使送料器处于最佳工作状态，应该选用振子的一阶振型。

### 2.2 振子动力学分析及仿真

文中的送料器是由压电元件变形而产生的惯性冲击力作为动力源，这个驱动力的大小关系到送料器的性能，所以，对惯性冲击力影响因素的分析显得尤为重要。为了便于分析，建立了简化压电双晶片振子动力学模型，见图4。

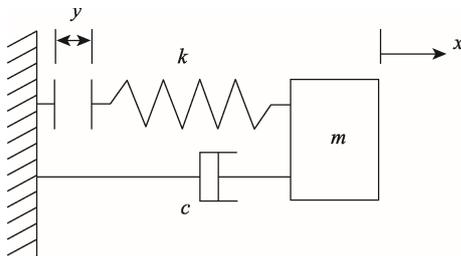


图4 压电双晶片振子动力学模型

Fig.4 Dynamic model of rectangular piezoelectric bimorph vibrator

一端带有质量块的压电双晶片振子的动力学方程为：

$$m\ddot{x} = k(x - y) - c\dot{x} \tag{1}$$

式中： $m$ 为质量块的质量； $x$ 为质量块的位移； $k$ 为作用在压电双晶片自由端的外力与其静挠度之比； $c$ 为压电双晶片的阻尼； $y$ 为电压 $V$ 作用下压电双晶片自由端的静挠度值。

令阻尼比  $\delta = \frac{c}{2m\omega_n}$ ，则有：

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2y \tag{2}$$

式中： $\omega_n$ 为无阻尼时振动系统的固有频率。

$$V = V_0 \sin(\omega t) \tag{3}$$

而在电场作用下悬臂梁结构压电双晶片自由端的挠度值  $y$  为<sup>[13-15]</sup>：

$$y = \frac{6d_{31}E_p V (h+h_0)l^2}{8E_p h^3 + 12E_p h_0 h^2 + 6E_p h_0^2 h + E_0 h_0^3} \tag{4}$$

式中： $d_{31}$ 为压电常数； $E_p$ 和 $E_0$ 为压电晶片和金属基板的弹性模量； $l$ 为双晶片的长度； $h$ 和 $h_0$ 为压电晶片和金属片的厚度。

把式(3)代入式(4)可得：

$$y = \frac{6d_{31}E_p (h+h_0)l^2}{8E_p h^3 + 12E_p h_0 h^2 + 6E_p h_0^2 h + E_0 h_0^3} V_0 \sin(\omega t) \tag{5}$$

也可以表达为：

$$y = I_m \left( \frac{6d_{31}E_p (h+h_0)l^2 V_0}{8E_p h^3 + 12E_p h_0 h^2 + 6E_p h_0^2 h + E_0 h_0^3} e^{i\omega t} \right) \tag{6}$$

将压电双晶片自由端的静态变形量  $y$  和动态变形量  $x$  表示为复数形式：

$$y = \frac{6d_{31}E_p (h+h_0)l^2 V_0}{8E_p h^3 + 12E_p h_0 h^2 + 6E_p h_0^2 h + E_0 h_0^3} e^{i\omega t} \tag{7}$$

由振动力学可得：

$$x = X e^{i(\omega t - \phi)} \tag{8}$$

$$\dot{x} = i\omega X e^{i(\omega t - \phi)} \tag{9}$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 X e^{i(\omega t - \phi)} \tag{10}$$

把式(8—10)代入式(4)得：

$$\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + i2\zeta \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right) \right] X e^{-i\phi} = Y \tag{11}$$

式中：

$$Y = \frac{6d_{31}E_p (h+h_0)l^2 V_0}{8E_p h^3 + 12E_p h_0 h^2 + 6E_p h_0^2 h + E_0 h_0^3} \tag{12}$$

求解可得压电双晶片振子自由端动态挠度响应为：

$$x = I_m \left[ \frac{Y e^{i(\omega t - \phi)}}{\sqrt{\left( 1 - \frac{m\omega^2}{k} \right)^2 + \frac{c^2}{k^2} \omega^2}} \right] \tag{13}$$

其中：

$$\tan \phi = \frac{2\zeta\lambda^3}{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2} \tag{14}$$

压电双晶片振子自由端动态挠度幅值为：

$$X = \frac{Y}{\sqrt{\left( 1 - \frac{m\omega^2}{k} \right)^2 + \frac{c^2}{k^2} \omega^2}} \tag{15}$$

压电双晶片振子自由端冲击质量的惯性力幅值为：

$$F = \frac{mY\omega^2}{\sqrt{\left( 1 - \frac{m\omega^2}{k} \right)^2 + \frac{c^2}{k^2} \omega^2}} \tag{16}$$

其中：

$$k = p / \delta = \frac{3}{l^3} \left( E_p \left( \frac{wh^3}{48} + wh \frac{(h+h_0)^2}{2} \right) + E_0 \frac{wh_0^3}{12} \right) \tag{17}$$

利用 Matlab 软件对振子参数与惯性冲击力  $F$  的关系进行分析，其仿真结果见图5和图6。从图5和图6可以看出，振子的惯性冲击力  $F$  与自由端的静变形量  $Y$ 、压电双晶片长度  $L$  和质量块质量  $m$  呈线性关系，而刚度  $K$  对其影响较小；但是压电双晶片自由端变形过大，会造成压电陶瓷碎裂，压电双晶片振子驱动力不足。在设计压电振子时，不适合采用增加压电双晶片变形量的方式来增大惯性冲击力。

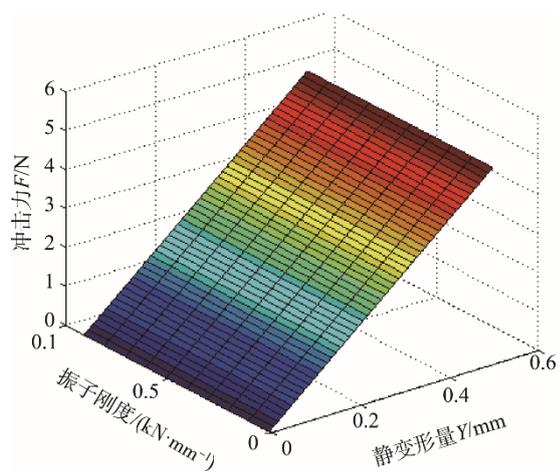


图 5 冲击力与压电双晶片振子刚度、静变形量的关系  
Fig.5 Relationship between impact force and rigidity and static deformation of piezoelectric bimorph vibrator

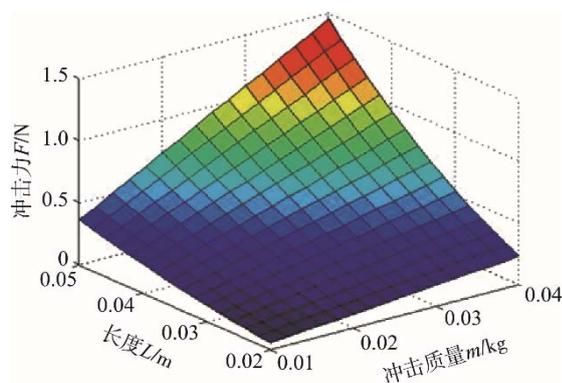


图 6 冲击力与压电双晶片长度、冲击质量的关系  
Fig.6 Relationship between impact force and length and impact mass of piezoelectric bimorph

### 3 送料器实验研究

#### 3.1 样机主要尺寸

设计的送料器样机见图 7, 矩形压电陶瓷片尺寸为  $22\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ , 支承弹簧片尺寸为  $72\text{ mm} \times 28\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ , 矩形基板尺寸为  $42\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ , 共振弹簧片尺寸为  $24\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ , 质量块尺寸为  $22\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$  (质量为  $35.4\text{ g}$ ), 顶板长度为  $132\text{ mm}$ 。

#### 3.2 测试系统组成

用 DSVC40 型数字压电调频控制器(控制器可以显示电压和频率数据)作为压电双晶片振子驱动电源, 用 LC2400 型激光测微仪来测量料槽的振幅, 通过信号采集与处理装置将接收到的激光测微位移的测得的信号在屏幕上显示出来, 从而获取振幅数据。选择 M5 螺母作为输送物料, 通过直尺和计时器对送料器上的物料测试, 可以获得速度数据。测试系统和送料器输送物料工作过程分别见图 8—9。

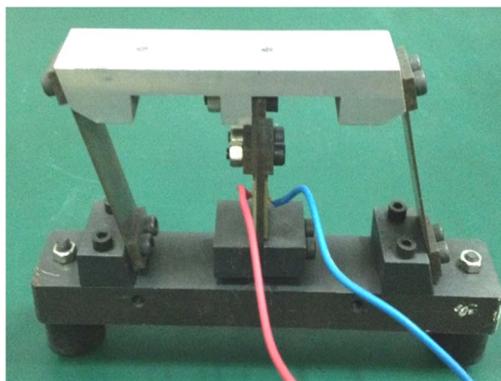


图 7 振动送料器样机实物  
Fig.7 Prototype of vibratory feeder



图 8 性能测试系统  
Fig.8 Performance testing system

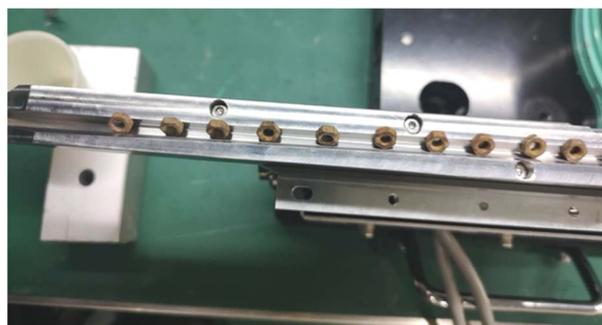


图 9 送料器输送物料工作过程  
Fig.9 Working process of conveying material by feeder

#### 3.3 送料器性能测试

##### 3.3.1 送料器频率特性

将装有 M5 螺母的料槽固定在送料器顶板上, 将控制器电压调整为  $200\text{ V}$ , 不断调节电源频率, 每隔  $0.5\text{ Hz}$  记录 1 次, 得到输送速度、振幅与频率之间的关系, 实验结果见图 10—11。

由图 10—11 可以看出, 送料器共振频率为  $212\text{ Hz}$ , 此时输送速度可达  $64\text{ mm/s}$ ; 偏离共振频率, 输送速度和振幅迅速下降, 振幅很小时, 无法驱动物料输送, 有效输送频率段为  $209.5\sim 214.5\text{ Hz}$ 。

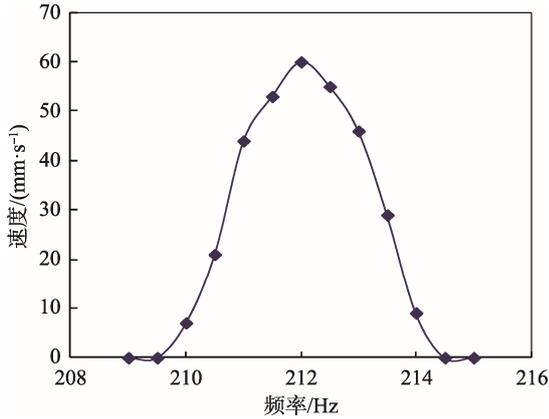


图 10 频率-速度特性曲线

Fig.10 Frequency-feeding rate characteristic curve

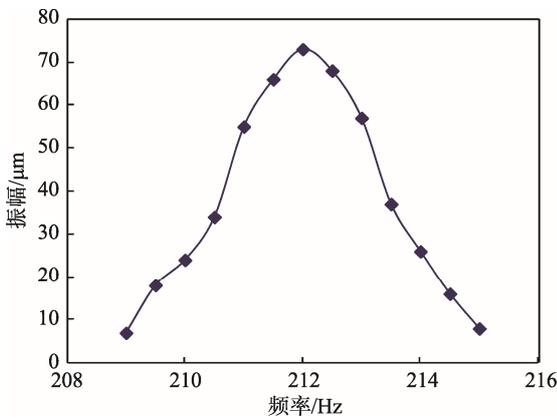


图 11 频率-振幅特性曲线

Fig.11 Frequency-amplitude characteristic curve

### 3.3.2 送料器电压特性

将驱动电源频率调节到共振频率 212 Hz, 每隔 20 V 记录 1 次输送速度和振幅, 从而得到送料器驱动电压对输送速度和振幅的关系曲线, 见图 12 和 13。

由图 12 可以看出, 电压较低时, 不具备驱动物料输送的能力, 当电压超过 100 V 时, 物料开始缓慢移动, 电压继续升高, 输送速度随着电压增大呈线性

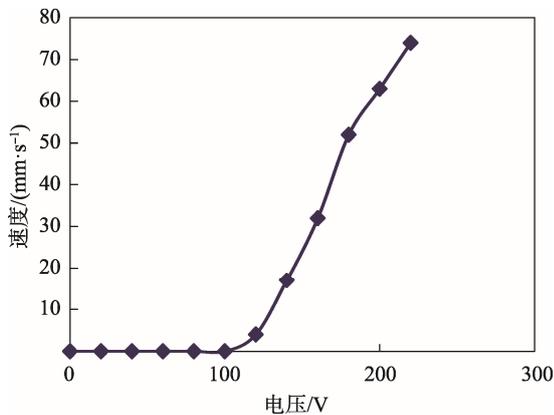


图 12 电压-速度特性曲线

Fig.12 Voltage-feeding rate characteristic curve

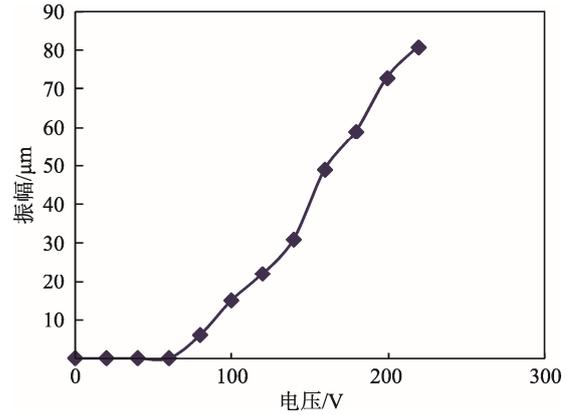


图 13 电压-振幅特性曲线

Fig.13 Voltage-amplitude characteristic curve

增大。由图 13 可以看出, 电压较低时, 振幅趋于 0, 当电压超过 80 V 时, 振幅开始随着电压的升高而线性增大。由此可以得出, 通过改变驱动电源电压就可以调整物料的输送速度, 从而满足生产线的需要。

### 3.3.3 性能对比测试

调节驱动电源使送料器产生共振 (电压 200 V), 并与同型号的电磁式送料器和日本压电式送料器进行对比性能测试, 结果见表 1。

表 1 送料器性能参数对比

Tab.1 Comparison of feeder performance parameters

种类	电流/mA	频率/Hz	速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	噪声/dB
1号	7.07	212	97	54
2号	7.53	124	88	52
3号	51.27	50	128	71

设计的送料器消耗的电能仅为电磁式的 14%, 噪声比电磁式下降了 17 dB, 与日本同型号的压电送料器相比, 输送速度提高了 10%。这是由于压电式送料器是由电能直接转变成振动能量, 较少的能量就能够进行驱动, 而电磁式送料器由于采用电磁铁作为驱动源, 电磁铁吸合作用造成送料器工作噪音大, 电能变成磁能发散到周围空间, 其中只有一部分转化成振动能量, 能量损失较大。与日本送料器相比, 设计的送料器由于压电振子一端自由, 在相同的电压下, 可以产生较大变形, 在质量块的作用下产生了更大的驱动力, 从而使得输送速度有了显著提升。

## 4 结语

研制了一种以压电惯性力为驱动源的新型直线式振动送料器, 性能测试表明, 送料器在共振频率下工作时, 对 M5 的螺母输送速度可达 64 mm/s, 噪声为 54 dB, 耗电仅为电磁式的 14%, 噪声比电磁式下降了 17 dB, 输送速度与日本送料器相比提高了

10%，在精密产品自动化包装生产线上，具有广阔的应用前景。

#### 参考文献：

- [1] 詹启贤. 自动机械设计[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1997: 225—245.  
ZHAN Qi-xian. Design of Automatic Machinery[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1997: 225—245.
- [2] 汤瑞. 轻工机械设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992: 55—71.  
TANG Rui. Design of Light Industry Machinery[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992: 55—71.
- [3] 李绍炎. 自动机与自动线[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 70—93.  
LI Shao-yan. Automatic Machinery and Automatic Production Line[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 70—93.
- [4] 特殊陶业株式会社. 压电振动搬送装置: 日本, 52-61087[P]. 1977-05-04.  
NGK Spark Plug Co. Ltd. Piezoelectric Vibratory Conveying Device: Japan, 52-61087[P]. 1977-05-04.
- [5] 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 Jiang. Current Status And Development Trends of Vibration Feeder[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(7): 244—246.
- [6] 苏江, 沈燕虎, 杨志刚, 等. 环形压电双晶片驱动式振动送料器[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 31(1): 52—56.  
SU Jiang, SHEN Yan-hu, YANG Zhi-gang, et al. Line Vibratory Feeder Driven by Circular Piezoelectric Vibrator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 2(1): 52—56 .
- [7] 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.
- [8] CHAO PAUL, SHEN CHIEN-Yu. Dynamic Modeling and Experimental Verification of a Piezoelectric Part Feeder in a Structure with Parallel Bimorph Beams[J]. Ultrasonics, 2007, 46(3): 205—218.
- [9] YUNG Ting, JAR HO-Chin, LIN Chung-Yi, et al. A New Type of Parts Feeder Driven By Bimorph Piezo Actuator[J]. Ultrasonic, 2005, 43(7): 566—573.
- [10] WANG Yang, WU Wen-fu, SHI Su-ping. Research on the Mechanism of Multi-Source Piezoelectric Vibratory Feeder[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 241(12): 1427—1430.
- [11] 王坤坤. 垂直双驱动型压电振动送料器的结构与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
WANG Kun-kun. Structural Design and Experimental Study of Vertical Double-Driven Piezoelectric Vibration Feeder[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [12] 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.
- [13] WANG Q M, CROSS L E. Performance Analysis of Piezoelectric Cantilever Bending Actuators[J]. Ferroelectrics, 1998(215): 187—213.
- [14] GOLI J, SMITS J G, BALLATO A. Dynamic Matrix of End-Loaded Piezoelectric Bimorphs[C]// IEEE Ultrasonics Symposium, 1995: 1101—1105.
- [15] ANDRZEJ B Dobrucki, PIOTR Pruchnicki. Theory of Piezoelectric Axisymmetric Bimorph[J]. Sensors And Actuators A: Physical, 1997, 58(3): 203—212.