

直线式压电垂直驱动振动给料机设计

苏江¹, 童杰¹, 沈燕虎²

(1. 广东科学技术职业学院, 广东 珠海 519090; 2. 吉林大学, 长春 130025)

摘要: **目的** 为了满足现代电子工业领域中对微小电子元器件高速送料的需要, 采用环形压电双晶片, 设计一种直线式压电垂直驱动振动给料机。**方法** 首先对给料机结构进行设计, 阐述其工作原理, 通过对环形压电双晶片进行模态分析, 确定双晶片工作振型。然后利用小挠度的弹性薄板理论, 推导压电双晶片输出力的表达式, 利用 Matlab 软件, 探究压电陶瓷和基板的厚度与出力系数的关系, 以及压电陶瓷和基板的弹性模量与出力系数的关系。最后制作振动给料机样机, 并对其进行实验测试。**结果** 测试结果表明, 系统有效工作频率为 184~190 Hz, 当驱动电源电压为 220 V, 频率 186.8 Hz 时, 对 3.2 mm×2.8 mm 的发光二极管(LED) 给料速度可达到 22.6 个/s, 比市场上同型号的矩形压电双晶片驱动给料机速度提升了 14.7%。**结论** 在精密电子元件高速输送的自动化包装或自动化检测线上具有良好的应用前景。

关键词: 压电; 垂直驱动; 振动给料机; 环形压电双晶片; 振动模态; 输出力; 实验测试

中图分类号: TB486; TH237.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)15-0274-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.15.032

Design of Linear Piezoelectric Vertical-driving Vibratory Feeder

SU Jiang¹, TONG Jie¹, SHEN Yan-hu²

(1. Guangdong Polytechnic of Science and Technology, Guangdong Zhuhai 519090, China;

2. Jilin University, Changchun 130025, China)

ABSTRACT: The work aims to design a linear piezoelectric vertical-driving vibratory feeder by ring piezoelectric bimorphs, so as to meet the needs of high-speed feeding of micro electronic components in the field of modern electronic industry. Firstly, the structure of the feeder was designed, and the working principle of the feeder was described. Through the modal analysis of the ring piezoelectric bimorphs, the working vibration mode of the bimorphs was determined. Then, the output force expression of piezoelectric bimorphs was derived by the elastic thin plate theory with small deflection. MATLAB software was applied to investigate the relationship between the thickness of piezoelectric ceramics and substrate and the output coefficient, and the relationship between the elastic modulus of piezoelectric ceramics and substrate and the output coefficient. Finally, a prototype of the vibratory feeder was made and tested. The test results showed that the effective working frequency of the system was between 184-190 Hz. When the driving power supply voltage was 220 V and the frequency was 186.8 Hz, the feeding speed of 3.2 mm×2.8 mm LED reached 22.6 pcs/s, which was 14.7% higher than that of the rectangular piezoelectric bimorphs-driven feeder of the same model in the market. The proposed feeder has a good application prospect in the automatic packaging or automatic testing line for the high transportation of precision electronic components.

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(51707081); 2019 年度广东省普通高校特色创新类项目(2019GKTSCX032); 2021 年广东省教育厅普通高校工程技术中心项目(2021GCZX018); 2021 年广东省继续教育质量提升工程项目(JXJYGC2021BY0076)

作者简介: 苏江(1980—), 男, 博士, 广东科学技术职业学院副教授, 主要研究方向为压电驱动技术。

通信作者: 童杰(1986—), 男, 博士, 广东科学技术职业学院讲师, 主要研究方向为固体力学。

KEY WORDS: piezoelectric; vertical-driving; vibratory feeder; ring piezoelectric bimorphs; vibration mode; output force; experimental test

振动给料机是一种用在自动包装、自动加工或自动检测等非标自动化设备中的辅助送料设备^[1]。它能把各种小型产品有序地排列出来, 对产品进行姿态调整和筛选, 以实现连续自动供料, 从而为自动装配设备提供正确的组装配件, 或者配合自动加工机械完成对工件的加工。电磁式振动给料机工作频率一般为 50 Hz, 通过调节电压来调整给料速度, 但是由于采用电磁铁作为驱动源, 具有耗能大、噪音大、有电磁干扰等不足。1977 年, 日本特殊陶业株式会社首先研制了以矩形压电双晶片为驱动源的压电振动给料机, 这种压电式给料机以能耗小、噪音低、无电磁干扰等优势, 在微小电子元器件装配领域得到了广泛应用^[2]。之后, 国内外学者围绕着压电振动给料机在振动模态分析、共振频率和驱动力的影响因素、优化设计、幅频特性等方面进行了深入研究^[3-10], 在工业应用领域上, 给压电振动给料机性能的不断提升奠定了基础。从 2007 年开始, 国内一些学者对矩形压电双晶片的布置形式开展了相关研究, 出现了水平布置式、斜拉布置式、垂直布置式振动给料机^[11-15], 这些给料机结构有效降低了装置的安装高度, 在空间受限的自动化线上具有独特优势。在精密电子元件自动化包装领域, 给料速度已成为给料机占领市场的关键。由于矩形压电双晶片驱动力较小, 给料速度难以获得进一步提升。

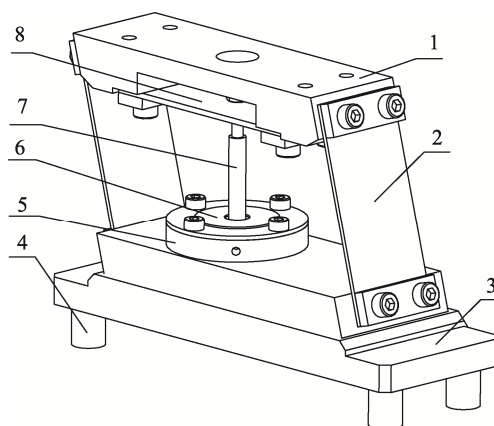
针对上述问题, 设计一种由环形压电双晶片驱动的直线式振动给料机, 由水平放置的环形压电双晶片、连接轴和固定在顶板上的矩形弹簧片组成的系统作为驱动源, 由于环形压电双晶片驱动力大, 研制的给料机可进一步提升给料速度。

1 结构设计与工作原理

设计的直线式压电垂直振动给料机结构见图 1, 包括顶板 1、支承弹簧片 2、底座 3、底脚 4、环形垫圈 5、环形压电双晶片 6、连接轴 7 和共振弹簧片 8 等。其中驱动源为压电双晶片振子, 它与顶板顶面平行放置安装, 共振弹簧片固定在顶板下部, 连接轴两端分别连接压电双晶片振子与共振弹簧片, 压电双晶片振子通过环形垫圈固定在底座上。2 个支承弹簧片倾斜安装, 连接底座与顶板, 顶板上安装输送物料的料槽, 底座下部安装着底脚。

直线式垂直驱动振动给料机的基本工作原理: 向环形压电双晶片振子通入与振动给料机系统固有频率相同的交流电, 压电振子受到激励产生弯曲变形; 当振子向下弯曲时, 连接轴拉动共振弹簧片向下运动, 由于共振弹簧片固定在顶板上, 从而带动顶板也

向下运动, 此时倾斜布置的支承弹簧片发生弯曲存储了变形能; 当电流方向变化时, 振子向上弯曲, 从而带动顶板向上运动, 此时支撑弹簧片释放弯曲变形能; 如此往复, 形成顶板对料槽中物料周期性斜向上的作用力, 构成了物料定向输送的驱动力。



1. 顶板; 2. 支承弹簧片; 3. 底座; 4. 底脚; 5. 环形垫圈;
6. 环形压电双晶片; 7. 连接轴; 8. 共振弹簧片。

图 1 压电垂直驱动振动给料机结构

Fig.1 Structure of piezoelectric vertical-driving vibratory feeder

2 环形压电双晶片模态分析

为了确定压电垂直驱动振动给料机所用压电双晶片的振型, 利用 Ansys 软件对环形压电双晶片进行模态分析, 图 2 为压电双晶片在周边简支边界条件下的前 4 阶振型。

由图 2 可以看出, 只有一阶振型中心处变形量最大, 其他三阶振型最大变形处都不在中心位置, 而文中所设计的压电垂直驱动振动给料机正是要利用压电双晶片振子中心位置的变形, 通过连接轴与共振弹簧片拉动顶板往复摆动, 从而产生驱动物料输送的动力, 故选用环形双晶片一阶振型作为系统工作时的驱动源。

3 环形压电振子输出力分析

环形压电双晶片振子作为送料器的动力元件, 通过施加电压产生弯曲变形, 弯曲变形转化为中心处的输出力, 输出力通过连接轴传递给顶板, 从而使得给料器能够具备驱动物料的能力。接下来将利用薄板理论对压电振子的输出力进行研究和分析。

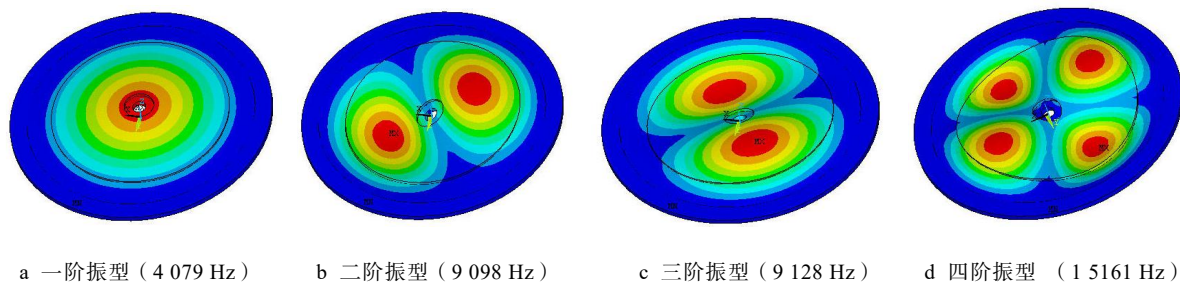


图 2 环形压电双晶片振子四阶振型

Fig.2 Four order mode of ring piezoelectric bimorphs vibrator

3.1 假设条件

压电双晶片振子的厚度远远小于其直径,且其中中心点位移量远远小于其总厚度,因此可将其视为小挠度的弹性薄板。环形压电双晶片振子周边固定在基座上,为了简化分析过程,忽略中心圆孔,把环形压电双晶片看成是圆形,其半径为 R ,将压电振子的有效工作范围等于压电陶瓷的面积,简化模型见图 3。

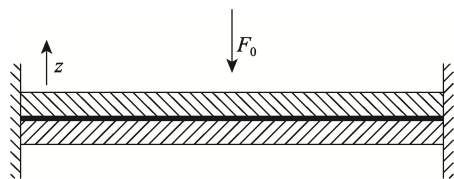


图 3 压电振子的支撑方式

Fig.3 Support mode of piezoelectric vibrator

3.2 等效集中力作用下的位移

小挠度薄板在横向载荷作用下弹性曲面的微分方程为^[16]:

$$D_c \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q(x, y) \quad (1)$$

圆形薄板的弯曲问题采用极坐标计算较为方便,令:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta, y = r \sin \theta \\ r^2 = x^2 + y^2, \theta = \arctan \frac{y}{x} \end{cases} \quad (2)$$

利用式(2)将式(1)变换为极坐标的形式,得到:

$$\nabla_{r^2} \nabla_{r^2} w = q(r, \theta) / D_c \quad (3)$$

式中: ∇_{r^2} 为极坐标下的拉普拉斯算子,

$$\nabla_{r^2} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}。$$

从薄板内取一微小单元,如图 4 所示,由薄板问题的基本假设及边界条件可得:

$$Q_r = -D_c \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 w \quad (4)$$

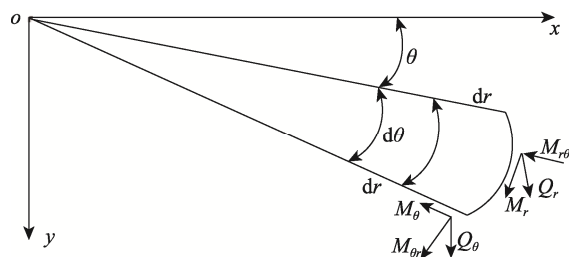


图 4 薄板微元内力图

Fig.4 Diagram of micro element internal force of thin sheet

理想情况下,压电振子所受的横向载荷均关于 z 轴对称,因此 q 、 w 为 r 的函数而不随 θ 的变化而变化,此时式(3)可简化为轴对称条件下非齐次双调和方程的极坐标形式,即:

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = q(r) / D_c \quad (5)$$

式中: w 为厚度方向的位移; D_c 为薄板的弯曲刚度; $q(r)$ 为厚度方向的应力。将式(5)左侧用欧拉方程进行展开,并进行指数变换,可得到该式的齐次微分方程,将该方程的通解求出后进行逆变换得到特解 w^* , 该方程的一般解为:

$$w = C_1 \ln(\ln r) + C_2 r^2 \ln(\ln r) + C_3 r^2 + C_4 + w^* \quad (6)$$

当等效集中力 F_0 的作用在其中心位置时,式(5)中 $q(r)/D_c$ 为 0, 即 w^* 为 0。同时薄板中心的挠度为一有限值,因此有 $C_1 = 0$, 式(6)可简化为:

$$w = C_2 r^2 \ln(\ln r) + C_3 r^2 + C_4 \quad (7)$$

取半径 $r < R$ 的有效工作区域,根据 $\sum F_z = 0$ 的平衡条件可得:

$$2\pi r Q_r + F = 0$$

则厚度方向的应力为:

$$Q_r = -\frac{F}{2\pi r} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4),得到:

$$Q_r = -\frac{4D_c C_2}{r} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)可求出:

$$C_2 = \frac{F}{8\pi D_c} \quad (10)$$

取板的中心为坐标原点, $r=R$ 处薄板夹支的挠度 w 和弹性曲面斜率 $\partial w/\partial r$ 为 0, 即:

$$(w)_{r=R} = 0, \quad \left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)_{r=R} = 0 \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (7) 边界条件可得:

$$C_3 = -\frac{1}{2} - \ln(\ln R), \quad C_4 = \frac{1}{2} R^2 \quad (12)$$

则式 (7) 可进一步简化为:

$$w = \frac{F}{8\pi D_c} \left[\frac{1}{2} (R^2 - r^2) + r^2 \ln \left(\ln \frac{r}{R} \right) \right] \quad (13)$$

则压电振子中心点的最大挠度为:

$$w_F = \frac{FR^2}{16\pi D_c} \quad (14)$$

等效集中力为:

$$F = \frac{16\pi D_c w_F}{R^2} \quad (15)$$

3.3 基于压电效应的位移

通过薄板变形理论可得到, 复合板的位移 w 为^[17-18]:

$$w(r) = \frac{M}{2D_c(1+\mu_c)} (R^2 - r^2) \quad (16)$$

式中: μ_c 为复合板的泊松比。式 (16) 中 M 为 PZT 层在电压 U 作用下所产生的弯矩, 则 $r=0$ 处振子中心的最大挠度为:

$$w_U = \frac{a^2 M}{2D_c(1+\mu_c)} \quad (17)$$

如图 5 所示, M 可根据薄板变形假设及多层板理论进行计算, 见式 (18)。

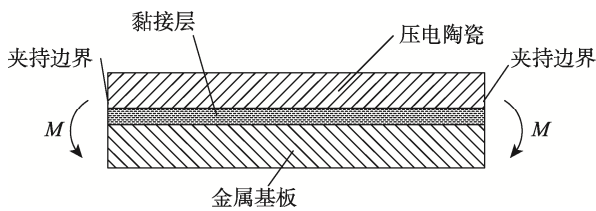


图 5 压电振子受力示意图
Fig.5 Force diagram of piezoelectric vibrator

$$M = \frac{\eta d_{31} (2d' + 2d_b + d_{pzt}) (d'^3 + d^3)}{2[d'^3(1-\alpha) + d^3 + (\alpha-\beta)(d' + d_b)^3 + \beta(d' + d_b + d_{pzt})^3]} \quad (18)$$

式中: d_b 为胶层厚度; d_{pzt} 为陶瓷厚度; d_{31} 为陶瓷的压电常数。其中 $\alpha = \left[(1-\mu_p)/(1-\mu_b) \right] (E_b/E_p)$, $\beta = \left[(1-\mu_p)/(1-\mu_{pzt}) \right] (E_{pzt}/E_p)$, $\eta = E_{pzt}/(1-\mu_{pzt})$, μ_p 为振子基板泊松比系数, μ_b 为胶层的泊松比, μ_{pzt}

为陶瓷的泊松比, E_b 为胶层的弹性模量, E_p 为振子基板的弹性模量, E_{pzt} 为压电陶瓷的弹性模量; $d' = d_p - d$, d_p 为基板厚度, d 为中性面到底面的距离, d 的计算式见式 (19)。

$$d = \left\{ E_p d_p^2 / (1-\mu_p^2) + E_b \left[(d_b + d_p)^2 - d_p^2 \right] / (1-\mu_b^2) + E_{pzt} \left[(d_b + d_p + d_{pzt})^2 - (d_p + d_b)^2 \right] / (1-\mu_{pzt}^2) \right\} / \quad (19)$$

$$2 \left[E_p d_p / (1-\mu_p^2) + E_b d_b / (1-\mu_b^2) + E_{pzt} d_{pzt} / (1-\mu_{pzt}^2) \right]$$

根据 Christensen 的研究计算可得^[19]:

$$E' = A_1 E_{pzt} + A_2 E_b + \frac{A_1 A_2 E_{pzt} E_b (\mu_{pzt} - \mu_b)^2}{A_1 E_{pzt} (1-\mu_b^2) + A_2 E_b (1-\mu_{pzt}^2)}$$

$$\mu' = \frac{A_1 \mu_{pzt} E_{pzt} (1-\mu_b^2) + A_2 \mu_b E_b (1-\mu_{pzt}^2)}{A_1 E_{pzt} (1-\mu_b^2) + A_2 E_b (1-\mu_{pzt}^2)}$$

式中: $A_1 = d_{pzt}/d''$, $A_2 = d_b/d''$, $d'' = d_{pzt} + d_b$ 。

令 $d_{all} = d_{pzt} + d_b + d_p$, 则:

$$\mu_c = \frac{A'_1 \mu_p E_p (1-\mu'^2) + A'_2 \mu' E' (1-\mu_p^2)}{A'_1 E_p (1-\mu'^2) + A'_2 E' (1-\mu_p^2)} \quad (20)$$

式中: $A'_1 = d_p/d_{all}$, $A'_2 = d''/d_{all}$ 。

3.4 输出力表达式

根据等效集中力假设条件, 将式 (14) 和式 (17) 联立可得到输出力的表达式为:

$$F = \frac{8\pi M}{1+\mu_c} \quad (21)$$

由式 (18) — (21) 可以明显看出, 等效集中力与电压、压电陶瓷厚度和材料特性有关, 为了方便分析, 令 $F=GU$, 定义 G 为出力系数, 则:

$$G = \frac{8\pi M}{(1+\mu_c)U} \quad (22)$$

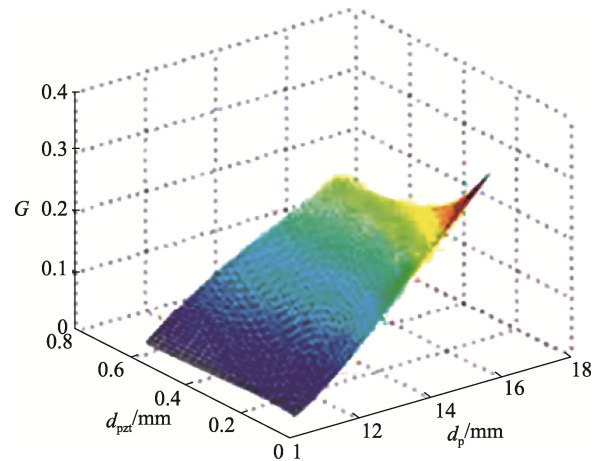


图 6 d_{pzt} 、 d_p 与 G 的关系
Fig.6 Relationship among d_{pzt} , d_p and G

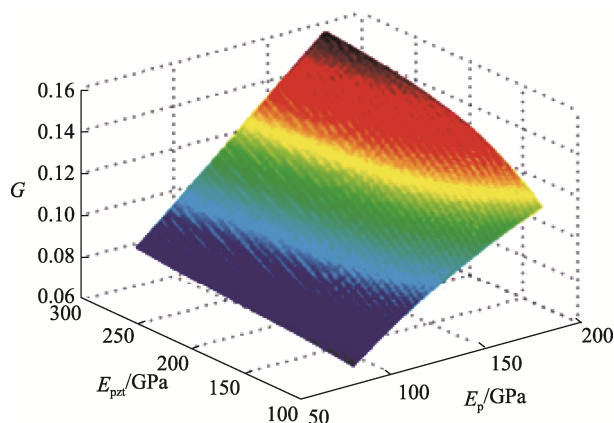


图7 E_{pzt} 、 E_p 与 G 的关系
Fig.7 Relationship among E_{pzt} , E_p and G

利用 Matlab 软件可以得到压电陶瓷和基板的厚度与出力系数的关系,压电陶瓷和基板的弹性模量与出力系数的关系,见图6和图7。由图6可以看出,随着基板厚度的增加,出力系数也增加,压电陶瓷厚度对出力系数几乎没有影响。由图7可以看出,随着压电陶瓷和基板的弹性模量增加,出力系数也相应增加,基板弹性模量对出力系数影响更为显著。

4 实验测试

制作了如图8所示的直线式压电垂直驱动振动给料机样机,选取 $3.2\text{ mm} \times 2.8\text{ mm}$ 的发光二极管(LED)为输送物料,测量给料速度与电压、频率的关系,并与日本同型号的直线式压电振动给料机进行性能对比实验,实验测试系统见图9。

4.1 给料机的频率特性与电压特性

给料机频率特性指在共振频率附近振幅随频率变化的趋势。将料槽固定在送料机顶板上,将螺旋式振动给料机出口与直线式给料机料槽入料口相连接,激光测微仪器固定在料槽上部,测量给料机振幅。将

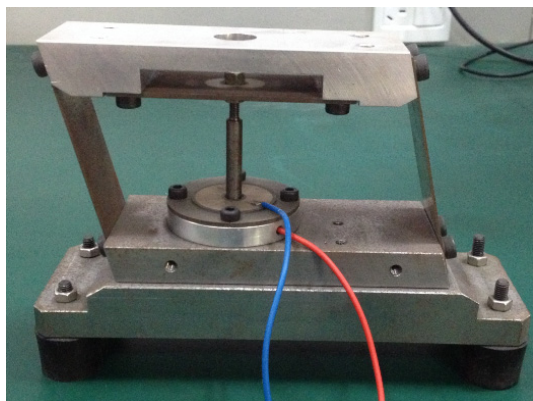


图8 压电垂直驱动振动给料机样机
Fig.8 Prototype of piezoelectric vertical-driving vibratory feeder

给料机驱动电源电压调至 220 V ,驱动电源频率从 0 开始增加,观察测微仪所测振幅的变化,当振幅达到最大值时,记录下此时的频率,这个频率就是给料机的共振频率,测试结果见图10。由图10可以看出,当频率为 186.8 Hz 时,此时振幅达到最大值 $65.3\text{ }\mu\text{m}$ 。送料机振幅对频率变化敏感度很高,一旦偏离共振频率,振幅迅速下降,当振幅小于 $9.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,料槽中的物料无法定向输送。给料机具有输送能力的频率段为 $184 \sim 190\text{ Hz}$ 。

给机电压特性指在共振频率下,给料速度随电压变化的趋势。调节驱动电源频率为 186.8 Hz ,电压从 0 V 开始增加,每增加 15 V 记录一次给料速度,从而得到给料速度与电压的关系曲线,见图11。由图11可以看出,当电压达到 85 V 时,物料沿着料槽开始移动,随着电压的增加,给料速度呈线性增加。

4.2 给料机的性能对比试验

市场在售的同型号(I15a)直线式压电振动给料机结构见图12,主要由矩形压电双晶片、底座、弹

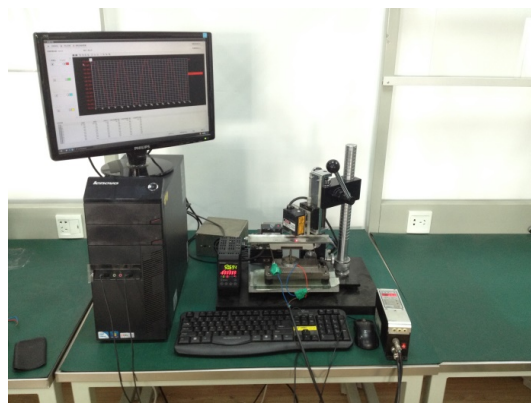


图9 给料机实验测试系统
Fig.9 Experimental test system for feeder

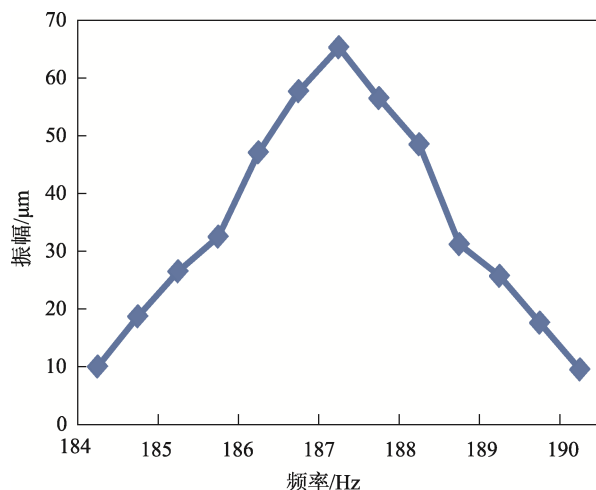


图10 给料机频率特性
Fig.10 Frequency characteristic of feeder

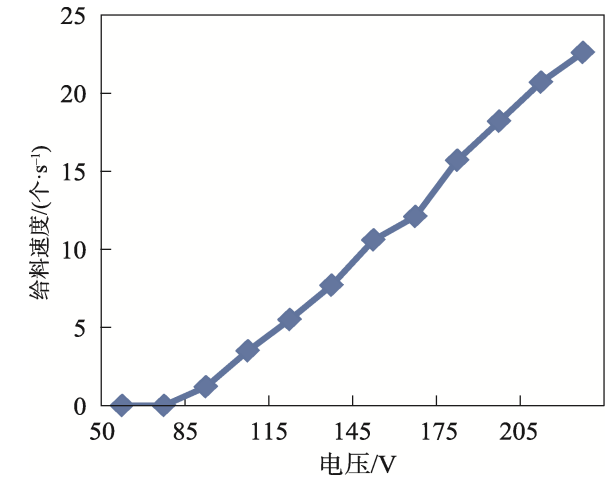


图 11 给料机电压特性
Fig.11 Voltage characteristic of feeder

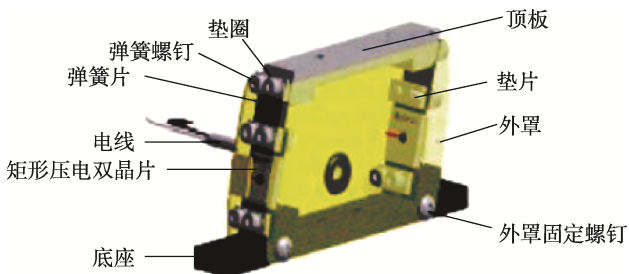


图 12 直线式压电振动给料机
Fig.12 Structure of linear piezoelectric vibratory feeder

簧片、顶板等组成，压电双晶片与水平方向夹角为 75°。直线式压电振动给料机的工作原理：向压电双晶片施加交变电压，压电陶瓷在逆压电效应下产生往复弯曲变形，弯曲变形通过弹簧片进一步放大后带动顶板形成往复振动，这种振动通过固定在顶板上的料槽转变为驱动物料直线运动的动力。

调节驱动电压为 220 V，在共振状态下，将制作的环形压电双晶片驱动的振动给料机（1 号）与该矩形双晶片驱动的振动给料机（2 号）进行性能对比实验，输送物料为 3.2 mm×2.8 mm 的 LED，测试结果见表 1。

表 1 给料机性能对比实验
Tab.1 Comparison experiment of feeder performance

振动给料机	电压/ V	电流/ mA	频率/ Hz	给料速度/ (个·s ⁻¹)
1 号	220	8.14	186.8	22.6
2 号	220	7.66	169.6	19.7

由表 1 可以看出，设计的给料机电流比市场同型号的给料机电流增加了 6.3%，给料速度提升了 14.7%。这是由于环形压电双晶片与矩形压电双晶片相比，具有更好的出力性能。

5 结语

研制了一种直线式压电垂直驱动振动给料机,实验测试表明：当电源驱动频率为 186.8 Hz、电压为 220 V 时，给料机料槽振幅为 65.3 μm，对 3.2 mm×2.8 mm 的 LED 给料速度达到 22.6 个/s，比市场同型号的矩形双晶片驱动振动给料机速度提升了 14.7%，在精密电子元件高速输送的自动化包装或自动化检测线上具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] 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. Automata and Automation Line[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 70-93.

[2] 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.

[3] WANG Y, WU W, SHI S. Research on the Mechanism of Multi-Source Piezoelectric Vibratory Feeder Applied Mechanics and Materials, 2013, 241 (12): 1427-1430.

[4] 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.

[5] YUNG T, SHIN M S, 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, Canada, ASME, 2002: 43-50.

[6] 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.

[7] 焦其伟, 崔文会, 孙宝元. 压电式振动给料器的研制[J]. 传感器技术, 2001, 20(4): 23-26.
JIAO Qi-wei, CUI Wen-hui, SUN Bao-yuan. Research of Piezoelectric Resonance Conveying Machine[J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(4): 23-26.

[8] TING Y, JAR H C, LIN C Y, et al. A New Type of Parts Feeder Driven by Bimorph Piezo Actuator[J]. Ultrasonics, 2005, 43(7): 566-573.

[9] 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.
- [10] 林学洋, 高兴军, 王月, 等. 双悬臂式压电振动给料器设计与性能分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2021, 41(3): 77-81.
- LIN Xue-yang, GAO Xing-jun, WANG Yue, et al. Design and Simulation of Double Cantilever Piezoelectric Vibrating Feeder[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2021, 41(3): 77-81.
- [11] 赵立冬. 压电双晶片水平布置式送料器的设计与实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 1-5.
- ZHAO Li-dong. Design and Experimental Research of the Vibration Feeder with Piezoelectric Bimorphs Arranged Horizontally[D]. Changchun: Jilin University, 2007: 1-5.
- [12] 刘超. 压电悬臂梁水平布置式直线送料器的设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 3-8.
- LIU Chao. Design and Research of the Linear Vibration Feeder with Piezoelectric Cantilever Arranged Horizontally[D]. Changchun: Jilin University, 2016: 3-8.
- [13] 田晓超, 杨志刚, 王锐, 等. 压电悬臂梁水平布置式直线送料器设计与实验[J]. 机械设计与制造, 2019(1): 47-49.
- TIAN Xiao-chao, YANG Zhi-gang, WANG Rui, et al. Design and Experiment of the Linear Vibration Feeder with Piezoelectric Cantilever Arranged Horizontally[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(1): 47-49.
- [14] TAN X, ZHAO Y, LIU C, et al. The Analysis and Experiment Study on a New Driving Structure of Piezoelectric Vibration Feeder[J]. Advanced Materials Research, 2011, 199(2): 1107-1112.
- [15] 苏江, 童杰, 向燕, 等. 新型压电直线式振动送料器设计[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 110-115.
- SU Jiang, TONG Jie, XIANG Yan, et al. Design of New-Type Piezoelectric Linear Vibratory Feeder[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 110-115.
- [16] 贺春山, 李金城, 田晓超. 圆形压电振子的理论分析与应用研究[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(5): 12-14.
- HE Chun-shan, LI Jin-cheng, TIAN Xiao-chao. Theoretical Analysis and Application Research on Circular Piezoelectric Vibrator[J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(5): 12-14.
- [17] 孟莹, 薛春霞, 王勋. 压电材料圆形板热弹耦合作用下的主共振[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 495-502.
- MENG Ying, XUE Chun-xia, WANG Xun. Principal Resonance of Piezoelectric Material Circular Plates under Thermoelastic Coupling[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 495-502.
- [18] 田晓超, 王海刚, 王虎, 等. 圆环形压电振子疲劳仿真分析与实验研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(5): 692-696.
- TIAN Xiao-chao, WANG Hai-gang, WANG Hu, et al. Fatigue Simulation Analysis and Experimental Study on Ring Piezoelectric Vibrator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2020, 42(5): 692-696.
- [19] CHRISTENSEN R M. Mechanics of composite materials[M]. New York: Springer, 1979: 138-165.

责任编辑: 曾钰婵