

压电陶瓷驱动器的力输出特性

李颂华^{1,2}, 左 闯^{1,2}, 张丽秀^{1,2}, 魏 超¹

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究压电陶瓷驱动器在不同条件下的力输出特性, 为压电陶瓷驱动器力输出方面应用提供理论依据. 方法 首先, 设计一种压电陶瓷力输出性能测试装置; 然后, 对预压力施加速度、施加预压力与电压的间隔时间、装置设计等外界因素对力输出特性影响进行分析; 最后, 使用最大输出力、平均迟滞度、最大曲线偏差值、曲线漂移量和曲线周期延迟量等多个评价指标, 对 PSt/150/4/7VS9 型压电陶瓷驱动器在不同预压力、电压频率、循环工作、电压步长等条件下的力输出特性进行实验分析. 结果 压电陶瓷驱动器在 150 N 预压力和 1 Hz 的电压频率条件下输出效果最好, 最大输出力可达到 116.56 N, 平均迟滞度为 10.74%, 曲线最大偏差为 3.89%, 曲线漂移量为 -0.47 N; 过多次循环工作会造成迟滞曲线的重复性变差和延迟累计增大现象; 相同电压步长下, 力输出增量随着起始电压的增大而增大. 结论 实验结果符合电畴翻转理论, 且压电陶瓷驱动器具有力输出最佳工作条件.

关键词 压电陶瓷; 力输出; 预压力; 电压频率; 循环工作; 电压步长

中图分类号 TN384; TH691.9

文献标志码 A

Force Output Characteristic of Piezoelectric Actuators

LI Songhua^{1,2}, ZUO Chuang^{1,2}, ZHANG Lixiu^{1,2}, WEI Chao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. National-local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-grade Stone, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The force output characteristic of piezoelectric actuators under different conditions was investigated to provide a theoretical basis of piezoelectric actuators in force output applications. First, a force output characteristics of piezoelectric actuators test device was designed. Secondly, research the influence of load speed of preload, interval time between the applied preload and voltage and design of testing device on the output characteristic. Finally, Experimental analysis the force

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375317); 辽宁省自然科学基金项目(2015020149); 沈阳市科技计划项目(F16-205-1-15); 高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室开放基金项目(SJSC-2015-3)

作者简介: 李颂华(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程陶瓷精密加工技术, 高精度陶瓷轴承技术和数控机床主轴关键技术等方面研究.

output characteristics of PSt150/4/7VS9 piezoelectric actuators under different initial preload, voltage frequency, cycle working, voltage travel were obtained by the maximum output force, average hysteresis degree, maximum deviation, drift amount, cycle delay of curves and other parameters as evaluating indexes. The experimental results indicate that: The piezoelectric actuators have the best output under the condition of 150N preload and 1 Hz voltage frequency. The maximum output force is 116.56N, average hysteresis degree is 10.74%, maximum deviation is 3.89%, drift amount is -0.47N. Cycle working for multiple times will reduce the repeatability and delay the period of hysteresis curve. The increment of output force will increase with the increase of the initial voltage when in the same voltage travel. Conclusion is that the experimental results conform to the ferroelectric domain inversion theory. Piezoelectric actuators have the best working conditions for force output.

Key words: piezoelectric actuators; output force; preload; voltage frequency; cycle working; voltage travel

压电陶瓷驱动器具有输出功率高、控制精度高和响应快等优点,作为一种理想的驱动器在精密机械、光学、半导体微元件和数字储存等领域广泛应用。但是其输出的迟滞特性、蠕变特性直接影响压电陶瓷驱动器精密控制的效果,其中迟滞特性指的是在相同工作条件下全测量范围,在同一输入量正行程和反行程输出不重合的现象,并用不重合量的最大偏差值占总输出的百分比来评价。蠕变特性指压电陶瓷驱动器输出与电压施加时间之间会产生相对滞后的效应。从而国内外针对压电陶瓷驱动器的输出特性和精确建模控制进行了大量研究。

压电陶瓷驱动器宏观上表现为动力输出,在微观上主要为非 180° 电畴在电场的作用下翻转产生的,同时在降压过程非 180° 电畴不完全可逆引起了迟滞现象的发生^[1]。根据铁电理论在外电场和外应力等因素作用下可改变畴的分布形态,从而引起压电陶瓷驱动器动力输出和迟滞现象的变化^[2],预压力可以引起压电陶瓷驱动器的晶体排列发生变化,经过试验分析适当的预压力可增大位移输出,减小迟滞度,且输入电压频率对压电陶瓷驱动器的迟滞特性具有影响作用^[3],同时压电陶瓷驱动器具有记忆擦除特性和次环一致特性,为压电陶瓷驱动器预测模型的建立提供了理论依据^[4-5]。相同电压步长下随着初始

电压的增加电畴翻转数量也会增加,因此压电陶瓷驱动器的输出位移相应增加^[6]。压电陶瓷驱动器的蠕变量随着位移变化量的增加而增加,与电压变化的方向无关^[7]。

迟滞模型的建立主要分为物理模型与数学模型两大类。其中物理模型方面主要基于能量之间的转换关系建立,如基于摩擦力和弹簧系统弹力之间物理关系描述迟滞现象的 Maxwell 模型^[8],基于能量守恒原理描述迟滞现象的 Jiles - Atherton 模型^[9]。在数学建模方面,主要在实验测试数据的基础上对迟滞现象进行全面的预测,如针对迟滞现象的外观特征出发的 PI 模型^[10-12],通过使用一系列迟滞算子加权叠加描述迟滞现象的 Preisach 模型^[13-15]。在 Preisach 模型工作的基础上,使用神经网络建立迟滞模型^[16-17],在迟滞控制方面主要在预测模型的基础上求解逆模型进行前馈补偿^[18],PID 反馈的复合控制^[19]和基于预测模型补偿的滑模控制^[20]。

以上的研究主要针对压电陶瓷驱动器位移输出特性进行研究,并未对力输出特性进行研究,如基于压电陶瓷驱动器的轴承预紧力控制装置研究等主要针对其力输出特性进行应用,由于压电陶瓷驱动器在受到外力时内部电畴分布会发生变化,因此位移输出情况下的性质不完全适用于力输出情况,从而限制了压电陶瓷驱动器的应用。基于此,笔者

主要对压电陶瓷驱动器在不同预压力、电压频率、循环工作和不同电压步长等条件下的力输出特性进行实验研究,求得压电陶瓷力输出效果最好的初始条件,为压电陶瓷驱动器力输出应用提供理论依据。

1 实验方案的设计

1.1 压电陶瓷驱动器基本参数及工作原理

压电陶瓷驱动器力输出特性通过实验对 PSt 150/4/7 VS9 机械封装式压电陶瓷驱动器进行研究。压电陶瓷驱动器工作的本质是电介质在电场的作用下产生极化现象,微观上表现为电畴向保持自由度最小状态翻转,其中非 180° 电畴翻转对于压电陶瓷的输出具有决定性作用, 180° 电畴翻转对压电陶瓷驱动器的输出影响微弱。同时电介质感应极化效应所引起的电致伸缩也会引起压电陶瓷的位移或力输出,但是影响极其微弱因此可以忽略不计^[1]。电畴在翻转过程中产生摩擦和不可逆翻转,以及内部障碍物的影响,引起的迟滞和蠕变现象一定程度上限制了压电陶瓷驱动器的精确使用。

1.2 实验装置设计

图 1 为压电陶瓷驱动器在不同条件下的力输出特性测试装置。

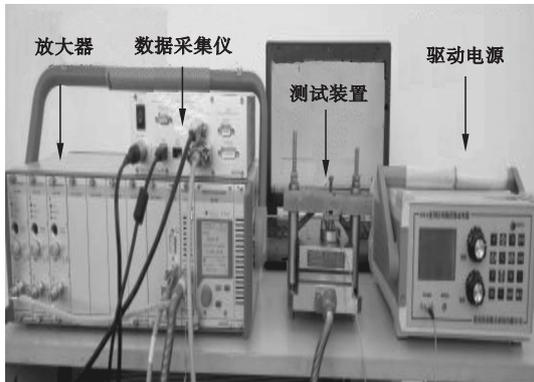


图 1 压电陶瓷驱动器测试装置

Fig. 1 Test device of piezoelectric actuators

由图 1 可知:压电陶瓷驱动器测试装置根据奇石乐公司 9257B 型平面测力计结构参数进行设计。通过梁结构支架与平面测力计底座配合作用将压电陶瓷驱动器与测力计传感器进行机械夹持。在支架上安装预压螺栓控制预压力,由于剪切力和转矩对压电陶瓷驱动器具有破坏作用,通过在支架上铣键槽放置滑块的方式实现将旋钮力转化为沿压电陶瓷轴线方向的压力,笔者使用其他设备包括 HVA-150D. A1 型驱动电源提供不同形式的电压,奇石乐公司提供的 5080 型号电荷放大器,奇石乐公司 5697 型数据采集系统。

2 数据还原和初始条件施加过程对输出特性的影响

笔者通过标准化数据还原与操作过程,为压电陶瓷驱动器在不同初始条件下获得重复性和稳定性较好力输出数据提供有效保证,同时也为如何安装压电陶瓷驱动器提供理论依据。

2.1 数据还原过程中影响因素分析

采样的频率过高会导致采集数据的重叠失真,采样频率过低会导致数据的漏采失真。因此对压电陶瓷在 $0 \sim 10 \text{ V}$ 驱动电压下进行不同采样频率测试实验。图 2 为 10 V 电压步长不同采样频率下数据的对比关系。通过观察在 10^5 Hz 采样频率下数据呈现严重的带状分布, 10^2 Hz 采样频率时数据采样过于稀疏,都不能真实反应压电陶瓷驱动器输出的真实情况。 10^4 Hz 采样频率时虽然迟滞曲线呈现出较好的回环形状,但是曲线局部区域内具有过多尖锐的波峰和波谷。在 10^3 Hz 采样频率时能够较好的反应实验现象。

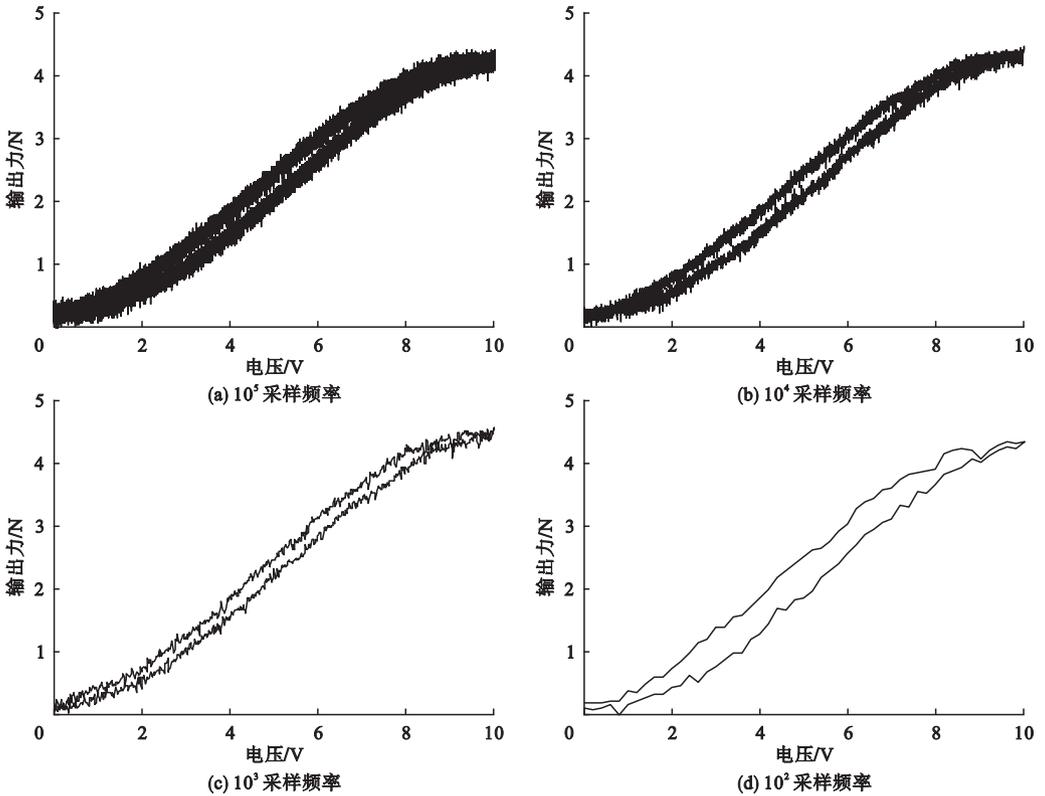


图2 10V 电压下的采样情况

Fig. 2 Sampling at 10V

把实验采集的时间序列数据还原为电压序列迟滞回环数据,基准点的选择直接关系到输入电压能否与输出力值相对应,笔者采用以压电陶瓷驱动器每个周期输出力的峰值为数据还原的基准点,分别向上升阶段和下降阶段分别反向取半个周期点数还原的方法,对 1 000 Hz 采样频率,150 V 驱动电压行程的情况下还原情况进行计算,对选定的上升阶段的初始点与其附件的最小值所在位置点的差值绝大多数可以保证在五个采样点数之内,即 0.005 s 时间误差,1.5 V 电压误差范围之内,基本可以保证在 10 点采样点数之内,即 0.01 s 的时间误差,3 V 电压误差范围之内,因此这种数据还原方法是可行的。

2.2 初始条件施加过程对测试结果的影响

分析预压力的施加速度、施加预压力与电压的间隔时间和测试装置滑块形状三个初始条件施加影响因素对压电陶瓷驱动器输出特性的影响.使得预压力施加和数据的测试

具有一个标准化的过程,减小初始条件的施加过程对于压电陶瓷性能测试的影响。

通过旋钮预压螺栓分别以 5 N/s、15 N/s 和 50 N/s 的速度均匀施加 150 N 预压力,并观测其在 0 ~ 150 V 电压下的输出情况,预压力施加速度过快导致压电陶瓷测试系统的稳定性和重复性变差,过小的加速度对于压电陶瓷的输出性能并无明显的提升.基于此,笔者采用 15 N/s 速度施加预压力,三组实验数据如表 1 所示。

表1 不同施加速度力输出情况

Table 1 Force output under different acceleration

施加速度/ (N · s ⁻¹)	最大输出/N	平均迟滞度/%	曲线最大偏差/%	漂移量/N
5	116.52	10.59	3.96	-0.61
15	116.56	10.74	3.89	-0.47
50	115.16	12.04	5.48	-4.02

由于压电陶瓷驱动器本身性质和实验装置刚度等因素影响,因此分别在预压力施加

完成后间隔 10 s、30 s 和 1 min 施加驱动电压,验证施加预压力与电压的间隔时间对于压电陶瓷力输出性能的影响,实验结果显示,间隔时间为 10 s 时测试装置与压电陶瓷未处于稳定状态,输出曲线出现明显的向下飘移的现象,最大出力数值偏小,且测试结果重复性较差。间隔时间为 1 min 时且输出曲线呈现出向上飘移的趋势,经计算平均迟滞度明显增大。时间间隔为 30 s 时输出数据相对稳定,实验重复性好,且输出力的效果也非常好。图 3 为三种时间间隔输出情况的对比图。

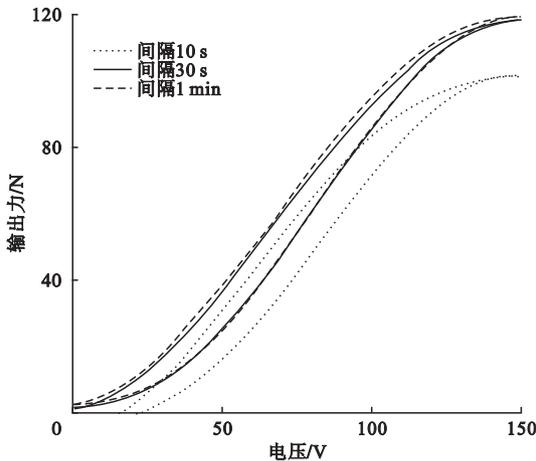


图 3 不同时间间隔力输出情况

Fig. 3 Force output at different interval time

分别制造宽窄两种滑块验证实验装置的设计对于压电陶瓷力输出特性的影响,宽的滑块会与键槽接触来将预压螺栓的扭转力转化为沿压电陶瓷轴线方向的压力,使用窄的滑块使滑块不与键槽接触,通过外界约束将螺栓的扭转力转化为沿压电陶瓷轴线方向的压力,分别在 150 N 预压力和 0 ~ 150 V 电压条件下实验分析,滑块对压电陶瓷输出性能影响的结果如表 2 所示,使用宽滑块时压电陶瓷力输出特性明显优于窄滑块。

表 2 滑块对输出性能影响

Table 2 Influence of slider on output characteristic

滑块型号	最大输出力/N	平均迟滞度/%	曲线最大偏差/%	漂移量/N
宽	116.13	11.28	3.92	-0.09
窄	102.75	14.43	3.89	0.56

3 压电陶瓷驱动器力输出特性分析

压电陶瓷驱动器内部畴的分布形态会在外力和外电场的作用下发生改变,压电陶瓷驱动器在外电场的作用下微位移输出研究不完全适用于其在外力和电场共同作用下力输出应用。对压电陶瓷驱动器机械夹持情况下分别进行不同预压力、电压频率、循环工作和不同工作电压步长条件下进行实验分析研究其力输出特性。

笔者采用单因素实验对压电陶瓷驱动器在不同的条件下的力输出特性进行分析。通过以下指标评价压电陶瓷驱动器的输出特性,其中最大出力指压电陶瓷驱动器每个工作周期输出力的极大值与极小值之间差值,并选取多个循环周期中的最大值;由于压电陶瓷驱动器在力输出情况下的迟滞现象呈现一定的波动情况,因此采用平均迟滞度描述迟滞现象,平均迟滞度指压电陶瓷多个周期迟滞度的平均值,如未特殊说明均指 7 个周期迟滞度的平均值;曲线最大偏差值指的是不同周期相同的行程所对应的曲线最大差值所占最大力输出量的百分比;漂移量指的是输出力的最小值与坐标零点的差值。对于循环工作时提出的周期延迟指的是推导出最大出力发生时间与实际发生时间的间隔。

3.1 不同预压力下压电陶瓷驱动器的力输出特性

压电陶瓷驱动器在不同预压力作用下位移输出与迟滞度均有很大的区别,并存在预压力最佳值使得输出状态最好,且弹性模量随着应力的增大先增大并逐渐趋于平缓^[3-4]。位移输出情况下的预压力为弹簧施加的固定值,力输出情况相当于压电陶瓷驱动器在预压力基础上继续受到更大的作用力,因此位移输出与力输出有所不同。进行预压螺栓施加范围在 30 ~ 240 N,间隔步长为 30 N 的预压力,输入 1 Hz 频率和 0 ~ 150 V

电压信号的压电陶瓷驱动器力输出特性实验,通过图4表示不同预压力情况下迟滞回环曲线变化情况,表3表示不同预压力下压电陶瓷驱动器的力输出特性,其中箭头所示方向为预压力增大方向。

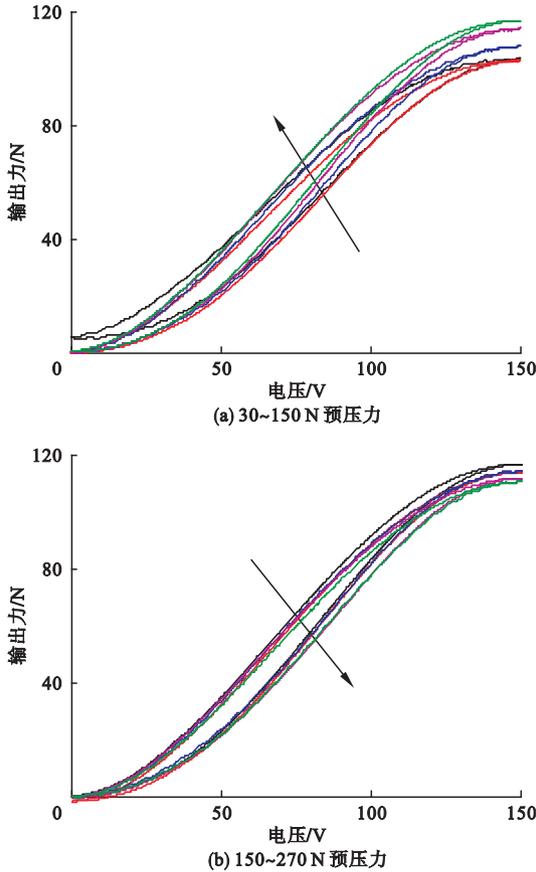


图4 不同预压力下的力输出特性

Fig. 4 Force output characteristics under different preload

表3 不同预压力下的力输出特性

Table 3 Force output characteristics under different preload

预压力/N	最大输出力/N	平均迟滞度/%	曲线最大偏差/%	漂移量/N
30	99.54	10.27	5.59	4.64
60	103.34	11.70	5.03	-2.67
90	108.61	13.47	5.20	-0.32
120	114.47	14.08	5.24	1.92
150	116.56	10.74	3.89	-0.47
180	115.78	11.51	4.45	-0.73
210	114.79	14.12	4.48	0.09
240	112.36	13.37	5.17	-1.31
270	111.02	12.18	4.87	-2.91

实验结果显示在相同初始条件下,压电陶瓷驱动器的增加最大输出力随着预压力的增加呈现先增加后减小的趋势,曲线最大偏差量与漂移量随着预压力的增加呈现先减小后增加的趋势,但是迟滞度并未表现出明显的变化趋势,且曲线最大偏差等的变化趋势并不是十分明显,易受到初始条件施加过程影响,但是根据数据综合评定显示压电陶瓷在150 N预压力条件下输出效果较好,最大输出力116.56 N,此条件下平均迟滞度为10.74%,不同周期曲线最大偏差值3.89%,迟滞曲线漂移量-0.47 N,说明外力作用对电畴翻转具有一定影响,适度的预压力有利于提升压电陶瓷输出性能、重复性和稳定性。

3.2 不同电压频率下压电陶瓷驱动器的力输出特性

压电陶瓷驱动器在工作过程中由于电介质之间摩擦,以及自身刚度以及外界条件的限制,以及在不同的电压阶段和频率条件下内部的畴结构具有不同的翻转规律,同时机械夹持对于电畴的结构具有一定的改变作用,在不同频率驱动电压下的力输出特性会表现出微小的区别且现象与微位移输出时略有不同.测量压电陶瓷驱动器在150 N的预压力和0~150 V驱动电压条件下,不同频率驱动电压情况下的力输出特性.表4和图5共同表示压电陶瓷驱动器在不同频率驱动电压下的输出情况。

表4 不同电压频率下的输出特性

Table 4 Output characteristics under different voltage frequency

电压频率/Hz	最大输出力/N	平均迟滞度/%	曲线最大偏差/%	漂移量/N
1	116.56	10.74	3.89	-0.47
10	113.93	10.78	3.87	2.21
20	113.66	11.01	9.10	6.51
30	111.16	12.10	2.50	4.56
40	110.65	14.03	7.05	4.24
50	109.84	9.82	4.13	6.94

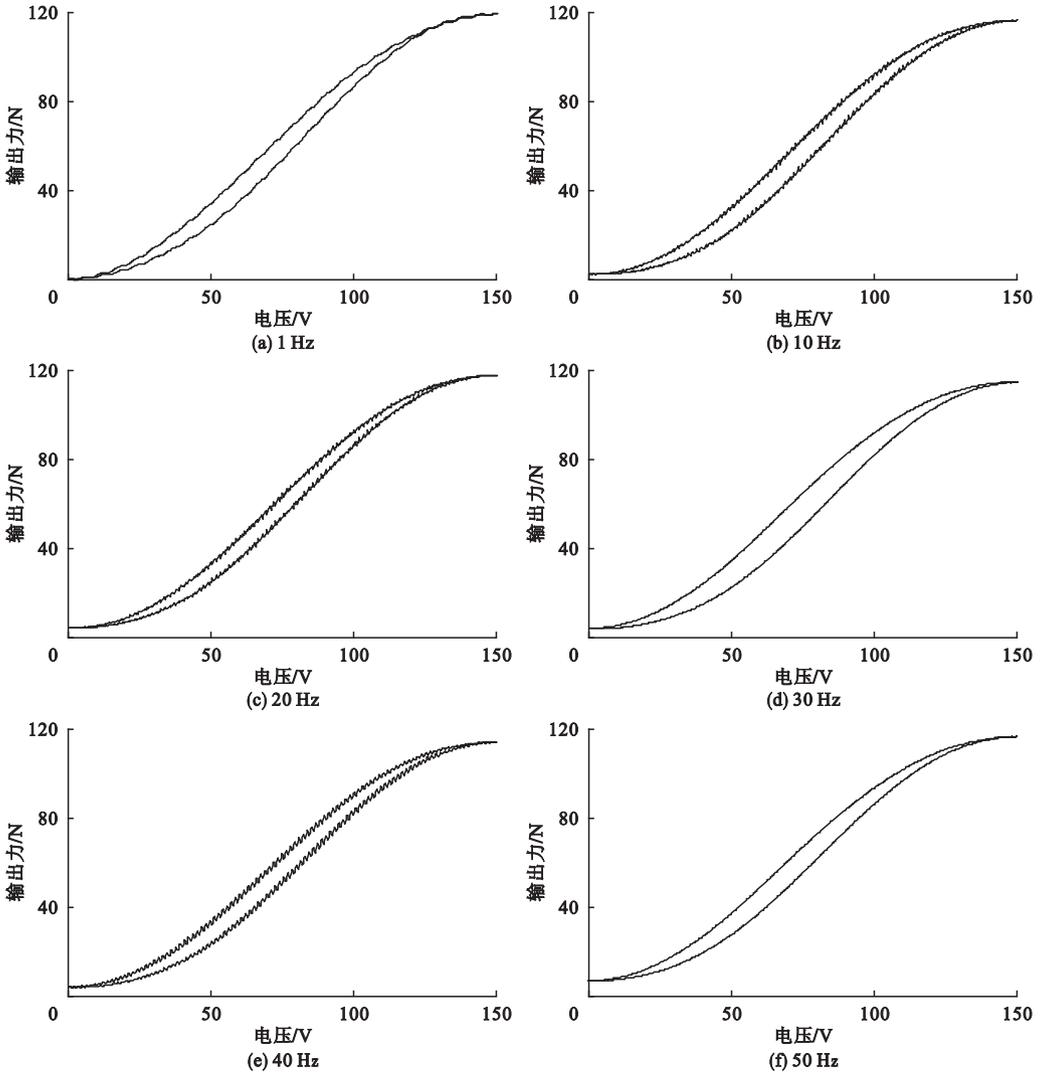


图5 不同电压频率下的输出特性

Fig. 5 Output characteristics under different voltage frequency

实验结果显示:压电陶瓷驱动器的最大输出力随着电压频率的增加而减小,但是分辨程度并不是十分明显.压电陶瓷的漂移量大致表现为随着驱动电压频率增加而增加的趋势,且平均迟滞度随着电压频率增大而增大,但是在50 Hz电压时平均迟滞度较小.输入电压频率10 Hz、20 Hz和40 Hz时迟滞曲线呈现波浪形状,经过频谱分析,得到频率为相应激励电压频率204倍的高频信号,此频率与曲线波动频率基本一致,并对测试装置梁结构进行模态分析得到一阶频率在3 743 Hz左右,与波动信号频率不一致,所以波动信号应该不是测量装置振动引起,压电陶瓷

驱动器的力输出特性的稳定性和重复性均变差了.因此可以得出:压电陶瓷驱动器在1 Hz电压频率情况下力输出相对稳定且重复性较好,符合压电陶瓷驱动器在低频电压下工作相对稳定的结论.

3.3 压电陶瓷驱动器循环工作时力输出特性

由于压电陶瓷驱动器内部电畴翻转之间的相互作用,以及电解质晶格之间的摩擦和外部结构弹性变形等多方面因素的影响,压电陶瓷驱动器在循环驱动电压的作用下力输出特性略有不同.因此采用1 Hz频率和0~150 V的驱动电压对压电陶瓷驱动器力输出

特性进行循环工作实验测试.图6和表5共同表示压电陶瓷14次循环工作时力输出特性.表中的位置指每个周期中最大迟滞度发生时对应的输入电压.

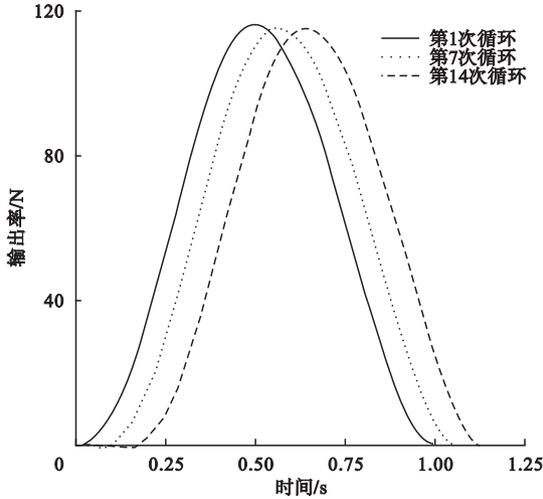


图6 不同循环周期下的力输出特性

Fig. 6 Force output characteristics under different cycle

表5 不同循环周期下的力输出特性

Table 5 Force output characteristics under different cycle

循环次数	最大输出力/N	迟滞度/%	漂移量/N	周期延迟/s	位置/V
1	116.56	8.35	-0.47	0	63.0
2	116.50	11.44	-0.59	0.006	69.3
3	116.48	12.11	-0.70	0.010	97.5
4	116.43	13.34	-0.70	0.009	63.9
5	116.53	6.52	-0.83	0.022	63.3
6	116.47	12.61	-0.86	0.001	67.8
7	116.45	10.81	-0.86	0.014	97.2
8	116.39	9.53	-0.88	0.013	63.3
9	116.42	13.82	-0.90	0.004	70.2
10	116.40	7.06	-0.90	0.022	59.4
11	116.40	13.21	-0.94	0.001	68.4
12	116.47	6.34	-0.96	0.010	65.7
13	116.39	16.21	-0.96	0.050	67.8
14	116.44	11.86	-0.96	0.013	69.9

实验结果显示在循环工作情况下,压电陶瓷最大输出力虽然会有微小的波动现象,但总体上呈现下降趋势.当循环7周期时平均迟滞度为10.74%,曲线最大偏差为3.89%,但是当14周期时平均迟滞度为10.94%,曲线最大偏差增大到了5.68%,说明迟滞度呈现波动变化,但是平均迟滞度保证在一个稳定区域范围内变化,但是过多次循环工作会对曲线重复性造成影响.漂移量随着循环次数增加呈现出减小趋势.两个相邻周期之间延迟0.01 s左右,并且呈现出累积增加的趋势,第14个周期时延迟累计已经达到0.13 s.最大迟滞度发生在59.4~70.2 V.

3.4 不同电压步长下压电陶瓷驱动器的力输出特性

不同起始电压以及电场强度会对电畴翻转状态造成一定影响,在150 N预压力和1 Hz电压频率下对压电陶瓷驱动器在不同电压步长和起始电压下力输出特性的分析.图7(a)为10 V电压步长,起始电压分别为0 V、40 V、90 V和140 V在下的力输出情况,图7(b)为50 V电压步长,起始电压分别为0 V、50 V和100 V下的力输出情况,为了更好地对比压电陶瓷驱动器在不同工作步长不同电畴翻转状态下的力输出特性,图中横坐标代表输入电压的增量值,纵坐标代表输出力的增量值.

在机械夹持和相同电压步长条件下压电陶瓷驱动器的输出力增量会随着起始电压的增大而增大,且输出力的增大速度会随着电压的增加而增加.在10 V和50 V电压步长情况下压电陶瓷驱动器并没有表现出其在微位移情况下输出力增值先增大后减小的规律,说明机械夹持一定程度上限制了压电陶瓷驱动器的输出,即抑制了电畴翻转,随着电场的加强,极化的趋势越来越强,从而输出力增量随着起始电压的增加而增大.由图7(a)可以看出10 V电压步长时输出力呈现不规则锯齿状分布,经过对比分析这种现象在任

何行程驱动电压回转变变化时均有发生。

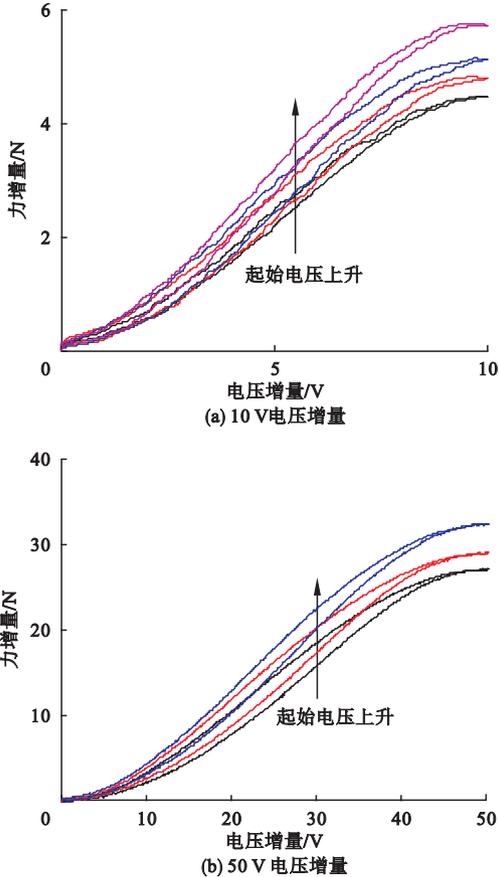


图7 不同电压步长输出力

Fig. 7 Output force under different voltage travel

4 结论

(1) 10^3 Hz 采样频率和最大输出力最大值作为还原点条件时可以良好反映压电陶瓷驱动器的力输出特性。

(2) 压电陶瓷驱动器以 15 N/s 和在预压力施加完成 30 s 时进行实验的重复性和稳定性较好。

(3) 压电陶瓷驱动器在 150 N 预压力 and 1 Hz 电压频率条件下的力输出特性较好。

(4) 压电陶瓷驱动器不适合多次循环工作,且输出力增量随着起始电压的增加而增大。

参考文献

[1] 史丽萍,魏艳波,魏喜雯,等.压电陶瓷迟滞非线性的成因与校正[J].黑龙江大学学报,2013,4(2):103-112.

(SHI Liping, WEI Yanbo, WEI Xiwen, et al. Forming reason and correction for hysteresis nonlinearity of piezoelectric ceramics[J]. Journal of engineering of Heilongjiang university, 2013, 4(2):103-112.)

- [2] 张忠华.基于多次压电效应的执行器研究[D].大连:大连理工大学,2009.
(ZHANG Zhonghua. Study on actuators based on multiple piezoelectric effects[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)
- [3] 张桂林,张承进,李康.基于PI迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制[J].纳米技术与精密工程,2013,11(1):85-89.
(ZHANG Guilin, ZHANG Chengjin, LI Kang. Adaptive identification and inverse control of piezoelectric actuators based on PI hysteresis model[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2013, 11(1):85-89.)
- [4] 李黎,刘向东,侯朝桢,等.基于不对称指数函数迟滞算子的压电陶瓷执行器动态 Preisach 迟滞模型[J].中国机械工程,2009(12):1468-1472.
(LI Li, LIU Xiangdong, HOU Chaozhen, et al. Dynamic hysteresis Preisach model of a piezoceramic actuator based on asymmetric exponential function hysteresis operators[J]. China mechanical engineering, 2009(12):1468-1472.)
- [5] 麻玉川,合焯,陈小安.堆叠式压电陶瓷基本特性实验研究[J].机械工程与技术,2012,1(3):30-36.
(MA Yuchuan, HE Ye, CHEN Xiaoan. Experimental study of the main characteristics of stacked type piezoelectric materials[J]. Mechanical engineering and technology, 2012, 1(3):30-36.)
- [6] 陈远晟.压电驱动器的迟滞非线性建模与控制[D].南京:南京航空航天大学,2013.
(CHEN Yuanmao. Hysteresis modeling and nonlinear control of piezoelectric actuators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.)
- [7] 杨宇峰.压电陶瓷驱动器的动态迟滞建模与实验研究[D].杭州:浙江大学,2013.
(YANG Yufeng. Dynamic hysteresis modeling and experimental study of PZT actuators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.)
- [8] 范伟,林瑜阳,李钟慎.压电陶瓷驱动器的迟滞特性[J].光学精密工程,2016,2(5):1112-1117.
(FAN Wei, LIN Yuyang, LI Zhongshen. Hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic actuators[J]. Optics and precision engineer-

- ing,2016,2(5):1112-1117.)
- [9] 范伟.六自由度纳米工作台驱动控制方法及系统研究[D].合肥:合肥工业大学,2009.
(FAN Wei. Research on the drive system and control method for nano-table with six degrees of freedom [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2009.)
- [10] 裘进浩,陈海荣,陈远晟,等.压电驱动器的非对称迟滞模型[J].纳米技术与精密工程,2012,10(5):189-198.
(QIU Jinhao, CHEN Hairong, CHEN Yuancheng, et al. A model for asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators[J]. Nanotechnology and precision engineering,2012,10(5):189-198.)
- [11] 刘清友,罗旭,朱海燕,等.基于 Jiles-Atherton 理论的铁磁材料塑性变形磁化模型修正[J].物理学报,2017,66(10):1-10.
(LIU Qingyou, LUO Xu, ZHU Haiyan, et al. Modeling plastic deformation effect on the hysteresis loops of ferromagnetic materials based on modified Jiles-Atherton model [J]. Acta physica sinica,2017,66(10):1-10.)
- [12] 马宏伟,须颖,安东,等.基于三段 PI 模型的压电驱动器迟滞补偿方法[J].纳米技术与精密工程,2017,15(1):53-60.
(MA Hongwei, XU Ying, AN Dong, et al. Compensation of hysteresis on piezoelectric actuator based on tripartite PI model [J]. Nanotechnology and precision engineering,2017,15(1):53-60.)
- [13] 杨斌堂,赵寅,彭志科,等.基于 Prandtl-Ishlinskii 模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制[J].光学精密工程,2013,21(1):124-130.
(YANG Bintang, ZHAO Yin, PENG Zhike, et al. Real-time compensation control of hysteresis based on Prandtl-Ishlinskii operator for GMA [J]. Optics and precision engineering,2013,21(1):124-130.)
- [14] 张娜.迟滞非线性系统滑模自适应控制策略研究[D].保定:河北大学,2014.
(ZHANG Na. Strategy research on hysteretic nonlinear system adaptive sliding mode control [D]. Baoding: Hebei University,2014.)
- [15] ZSOLT SZABÁ, JÁNOS FÜZI. Preisach type hysteresis models with everett function in closed form [C]. Montreal, Canada: Compumag,2015.
- [16] 朱玉川,徐鸿翔,陈龙,等.基于双曲正切函数磁滞算子的超磁致伸缩驱动器动态 Preisach 模型[J].机械工程学报,2014,50(3):165-170.
(ZHU Yuchuan, XU Hongxiang, CHEN Long, et al. Dynamic Preisach model in giant magnetostrictive actuator based on hyperbolic tangent function hysteresis operators [J]. Journal of mechanical engineering,2014,50(3):165-170.)
- [17] 耿洁,刘向东,陈振,等. Preisach 迟滞逆模型的神经网络分类排序[J].光学精密工程,2010,18(4):855-862.
(GENG Jie, LIU Xiangdong, CHEN Zhen, et al. Realization of sorting & taxis of Preisach inverse hysteresis model using neural network [J]. Optics and precision engineering,2010,18(4):855-862.)
- [18] 王萍萍,刘磊,栾晓娜.智能作动器 Preisach 迟滞参数辨识及补偿研究[J].振动与冲击,2014,33(20):91-94.
(WANG Pingping, LIU Lei, LUAN Xiaona. Parameter identification and compensation of Preisach hysteresis in smart actuators [J]. Journal of vibration and shock,2014,33(20):91-94.)
- [19] 李康.压电陶瓷驱动器的迟滞非线性建模与控制[D].济南:山东大学,2014.
(LI Kang. Modeling and control of hysteresis nonlinearity in piezoelectric ceramic actuators [D]. Jinan: Shandong University,2014.)
- [20] 赖志林,刘向东,耿洁,等.压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J].光学精密工程,2011,19(6):1281-1290.
(LAI Zhilin, LIU Xiangdong, GENG Jie, et al. Sliding mode control of hysteresis of piezoelectric actuator based on inverse Preisach compensation [J]. Optics and precision engineering,2011,19(6):1281-1290.)