

压电驱动器自由端位移输出和堵死力预测的非线性模型

压电驱动器集总参数化模型-静力学分析和动力学分析

整理者：柯希俊

在如下图1的针对压电片的四点弯曲测试试验中，根据标准公式，已知施加的负载挠度(δ) 和测得外载荷力(F)，可以计算出两端简支梁的外表面收到的最大应变(ε)和应力(σ)，详见下式(6-1)和(6-2)：

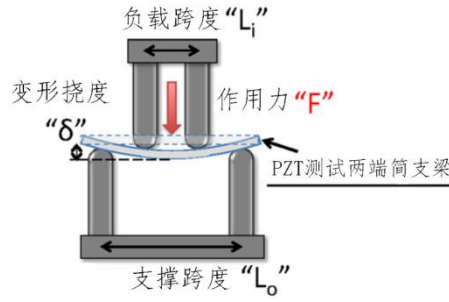


图 1 压电片的四点弯曲测试，其中的参数含义详见图中说明。

$$\varepsilon = \frac{6d\delta}{(L_o - L_i)(L_o - 2L_i)}, \quad (6-1)$$

$$\sigma = \frac{1.5(L_o - L_i)F}{bd^2}, \quad (6-2)$$

在高循环外载荷和内在的激励力的作用下，压电材料的弹性模量将随着应变的变化而改变，根据文献[Jafferis et al,2015,SMS]针对图1实测的数据进行的拟合，可知应力和应变，以及模量和应变之间的关系式如下式(6-3)和(6-4)：

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_{\min} - \frac{E_{\max} - E_{\min}}{a} \ln \left(\frac{1 + e^{a(\varepsilon_0 - \varepsilon)}}{1 + e^{a\varepsilon_0}} \right), \quad (6-3)$$

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = E_{\min} + (E_{\max} - E_{\min}) \frac{e^{a(\varepsilon_0 - \varepsilon)}}{1 + e^{a(\varepsilon_0 - \varepsilon)}}, \quad (6-4)$$

根据文献[Jafferis et al,2015,SMS]针对实验数据的分析探讨结论，这里我们也引入了一个机电耦合系数(f_{31})，来考虑考虑单位驱动电场下产生的内应力。该系数是同时随着应变和外加电场场强的变化而变化的。在较高的外加电场作用下，该系数与应变和外加场强之间存在的弱的非线性关系。双弯曲S函数可被采用来拟合他们之间的关系，详见如下公式(6-5)：

$$f_{31} = (1 + b\varepsilon) \cdot \left(f_{31,\min} + (f_{31,\max} (1 - d\xi) - f_{31,\min}) \frac{e^{c(\xi - \xi_0)}}{1 + e^{c(\xi - \xi_0)}} \right), \quad (6-5)$$

这里 $f_{31,\min} = 14 \text{ PamV}^{-1}$, $f_{31,\max} = 29 \text{ PamV}^{-1}$, $d=69 \times 10^{-9} \text{ mV}^{-1}$, $\varepsilon_0 = 0.4 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$, $c = 10^{-5}$, and $b = -230$ (注意压应变定义为负, 所以这里去负号)。

根据早期报道的线性预测模型, 双晶片压电弯曲驱动器的远端峰峰值位移和堵死力输出可以采用下面的公式(6-6)和(6-7)来预测:

$$\delta_{pp} = \frac{0.5d_{31}E_{pzt}t_{pzt}(t_{pzt} + t_{CF})L_{act}^2\xi\left(1 + 2\frac{L_{ext}}{L_{act}}\right)}{\frac{1}{3}E_{pzt}t_{pzt}\left(1.5t_{CF}^2 + 3t_{CF}t_{pzt} + 2t_{pzt}^2\right) + \frac{E_{CF}t_{CF}^3}{12}}, \quad (6-6)$$

$$F_b = \frac{0.75d_{31}E_{pzt}t_{pzt}w_{nom}(t_{pzt} + t_{CF})\xi}{L_{act}}GF, \quad (6-7)$$

这里GF是双晶片压电弯曲驱动器的形状几何因子, 它由下式(6-8)来预测:

$$GF = \frac{8(1 - w_r)^3\left(1 + 2\frac{L_{ext}}{L_{act}}\right)}{-6(w_r - 1)(-3 + 4l_r(w_r - 1) + 2w_r) + 3(-2 + 2l_r(w_r - 1) + w_r)^2 \ln\left(\frac{2 - w_r}{w_r}\right)}, \quad (6-8)$$

这里 δ_{pp} 是驱动器远端的峰峰值位移, d_{31} 是压电系数, E_P 是压电陶瓷的弹性模量, E_{CF} 是碳纤维聚合物的弹性模量, t_p 是压电陶瓷的厚度, t_{CF} 是碳纤维聚合物的厚度, L_{act} 是压电陶瓷的长度, ξ 是外加电场的场强, L_{ext} 是氧化铝延伸段的长度, F_b 是堵死力的幅值, w_{nom} 是压电陶瓷的平均宽度, w_r 是压电陶瓷近端根部宽度和其平均宽度的比值, l_r 是延伸段和压电陶瓷长度的比值。此外这里所采用压电陶瓷PZT-5H的压电系数(d_{31})和弹性模量 E_{pzt} 分别为320 pm V和62 GPa。

考虑机电耦合系数随着应变和外加电场的场强变化而变化之后, 可以修正早期报道的理论预测模型。根据文献[Jafferis et al,2015,SMS]报道的结论, 下面的公式(6-9)和(6-10)是考虑这一效应的修正之后的非线性预测模型, 可以用来预测双晶片压电弯曲驱动器的远端峰峰值位移和堵死力输出:

$$F_{b,new} \approx \frac{0.75(1 + b\varepsilon)\left(f_{31,\min} + (f_{31,\max}(1 - d\xi) - f_{31,\min})\frac{e^{c(\xi - \xi_0)}}{1 + e^{c(\xi - \xi_0)}}\right)w_{nom}t_{pzt}(t_{pzt} + t_{CF})\xi}{L_{act}}GF, \quad (6-9)$$

$$\delta_{pp,new} \approx \frac{0.5(1 + b\varepsilon)\left(f_{31,\min} + (f_{31,\max}(1 - d\xi) - f_{31,\min})\frac{e^{c(\xi - \xi_0)}}{1 + e^{c(\xi - \xi_0)}}\right)t_{pzt}(t_{pzt} + t_{CF})L_{act}^2\xi\left(1 + 2\frac{L_{ext}}{L_{act}}\right)}{\frac{1}{3}\frac{E_{p,1} + E_{p,2}}{2}t_{pzt}\left(1.5t_{CF}^2 + 3t_{pzt}t_{CF} + 2t_{pzt}^2\right) + \frac{E_{CF}t_{CF}^3}{12}}, \quad (6-10)$$

这里 $E_{p,1}$ 和 $E_{p,2}$ 分别是压电材料的模量, 其中前者是压电板不受拉压应力作

用时的模量，即可记为 $E_{p,1} \approx E_{\min}$ ，而后者为随着应变变化而改变的模量，它可以采用下面的拟合公式(6-11)来预测：

$$E_{p,2} \approx E_{\min} - \frac{E_{\max} - E_{\min}}{a\varepsilon} \ln \left(\frac{1 + e^{a(\varepsilon_0 - \varepsilon)}}{1 + e^{a\varepsilon_0}} \right), \quad (6-11)$$

这里压电板受到的应变可以表达成下式(6-12)：

$$\varepsilon = -\frac{\delta_{pp}(t_{pzt} + t_{CF})}{2 \left(1 + 2 \frac{L_{ext}}{L_{act}} \right) L_{act}^2}, \quad (6-12)$$

针对双晶片压电弯曲驱动器的性能指标测试中发现的以一系列问题，比如输出位移小和输出力低导致的能量密度低，激光切割导致测试时出现电火花，短路，和击穿现象，存在微裂纹导致工作循环次数少就出现失效或者断裂，等等。根据文献[Jafferis et al,2015,SMS]报道，由实际设计，制造和装配以及实验测试获得的宝贵经验和数据支撑的结论，可以将改进压电弯曲驱动器能量密度的设计和制造经验以及带来高性能指标的原因解释归纳如下：

(1) 降低压电双晶片驱动器暴露在外边缘的表面的粗糙度将产生更高的断裂强度，假设粗糙度下降的区域正好出现在裂纹形成的相关尺度的话，即晶间断裂的晶粒尺寸。这个可以通过多种方法来实现，比如机械抛光和激光诱发的熔融。激光诱发的熔融有更加自动化的优势，但是该法在随同增加裂纹的断裂强度的同时将降低压电材料的介电强度。通过仔细地组合高低功率的激光切割次序可以减轻这种效应，因为高低组合功率的激光切割仅仅熔融最需要的区域。针对相同的压电驱动器的远端位移，最终断裂强度改善20%将带来五倍的平均寿命的增加。

(2) 在压电材料和驱动器的延伸段界面和驱动器近端根部的刚性加固设计是至关重要的。相对于基准的为这样加固的驱动器的性能指标，这样的加固设计将阻止界面处的弯曲，带来平均堵死力55%甚至更高的增加，以及更少的不一致性变化(比如测试后性能差异下降为 $\pm 2\%$ 甚至更少)。针对相同的压电驱动器的远端位移，这样的加固设计还可以降低驱动器的应变，从而带来平均寿命更进一步的增加，多大六倍甚至更高。

(3) 针对压电驱动器，采用预先堆叠制造工艺可以避免最大的手工步骤，简化机械连接和电气连接的集成，并允许相同的层压叠合工艺被用于设计和制造任意外形的平面压电驱动器。

(4) 因为压电材料的弹性模量和压电系数会很大程度地随着应变和电场强度的变化而改变，所以在预测外加电场强度高于 $0.3 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ 时，预测压电驱动器的性能指标时必须考虑这些效应。尤其是针对体压电悬臂梁，这些已实测好的参数会被用来建立压电材料的性能指标预测模型。当预测模型被用于双晶片压电驱动器的性能指标预测场合时，上述的效应将带来驱动器堵死力5%的预测偏差和远端尖部自由位移20%的预测偏差；当应变变化过大时，预测模型甚至可能完全预测不准确。

表 6-1. 针对两种尺寸的压电驱动器理论预测的性能指标，外加电压幅值为 300V.

压电驱动器的基本参数输入和不同外形的尺寸		
参数	型号 1	型号 2
$t_{\text{pzt}} (\mu\text{m})$	127	135
$t_{\text{cf}} (\mu\text{m})$	40	50
$E_{\text{cf}} (\text{Gpa})$	350	340
$L_{\text{pzt}} (\text{mm})$	6.021	9
$L_{\text{ext}} (\text{mm})$	5.979	2.25
$w_{\text{nom}} (\text{mm})$	1.176	1.125
$w_{\text{root}} (\text{mm})$	1.569	1.751
$M_{\text{actuator}} (\text{mg})$	20	40
下面是线性模型和非线性模型预测的性能指标		
$\delta_{\text{pp}} (\mu\text{m})$	405.02	388.47
$F_{\text{b,pp}} (\text{mN})$	130	200.4
$ED_{\text{m}} (\text{Jkg}^{-1})$	1.3161	0.9732
$\delta_{\text{pp,new}} (\mu\text{m})$	808.51	781.59
$F_{\text{b,new,pp}} (\text{mN})$	159	248
$ED_{\text{m,new}} (\text{Jkg}^{-1})$	3.2142	2.4232

总之，通过使用上述的改进设计，制造和后处理工艺，最优的压电弯曲驱动器将可以产生远端自由位移峰峰值为 $1100 \mu\text{m}$ 和堵死力峰峰值为 340 mN 的输出(当外加电场强度为 $0-2.2 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$,工作频率为 1 Hz 时)。如果驱动器总重量为 40 mg ，根据公式 $ED_{\text{m}} = 0.5 F_{\text{b,pp}} \delta_{\text{f,pp}}$ ，可获得极高的能量密度输出(2.4232 Jkg^{-1})(如表6-1

所示)。相对于该指标,商业可获得的压电驱动器的能量密度要低16倍(来自PiezoSystems公司的压电驱动器的能量密度为 0.15 Jkg^{-1} ,这么低可能是因为其外加电场场强只能加载到 $\pm 0.3 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$)[Piezo Systems, Inc. 2014 Piezo Systems: High Performance Piezoelectric Bending Transducers and Actuators (<http://piezo.com/prodbm2highperf.html>)。与工作在相同工况的为改进的基准驱动器的性能指标对比,该最优的驱动器带来了平均性能约70%的增加。针对双晶片式压电弯曲驱动器,不管是采用同步驱动方式,还是采用交替式驱动方式,在相同的工况下,通过采用上述改进设计,制造和后处理之后的最优驱动器的性能指标要比未改进的驱动器的性能指标的要高30%。此外,在一半的远端尖部位移和一半的堵死力工况下,根据文献[Jafferis et al,2015,SMS]测得的数据,最优的压电驱动器的平均工作寿命要比未改进的驱动器的高30倍,其工作周期可以从1小时循环工作 3.6×10^5 次增加到30小时循环工作 10^7 次。