

基于CAE仿真计算的堆栈式PZT材料本构特性的研究

陈捷基*, 陆俊#, 倪晓骅

盐城工学院汽车工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2023年12月4日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年1月31日

摘要

压电陶瓷作为传感器敏感元件, 其性能的好坏决定传感器性能好坏。因此本文利用ABAQUS有限元软件对单片压电陶瓷进行压电分析, 研究了单片压电陶瓷纵向压电应变常数 d_{33} 的具体值与应力应变以及位移之间的关系, 此外还研究了固定载荷下的压电陶瓷圆片的半径、厚度对输出电压的影响并比较串联和并联两种连接方式之间的差异, 结果表明通过仿真得到的应力预测 d_{33} 的具体值具有参考意义。单片压电陶瓷的输出电压随厚度的增加而增大, 随半径的增加而减小。通过对比堆栈式压电陶瓷的串联和并联的输出电压和电荷量, 以及应用场景, 确定堆栈式压电陶瓷堆为并联连接。

关键词

单片压电陶瓷片, 有限元分析, 串并联, 堆栈式

Study of the Constitutive Properties of Stacked PZT Materials Based on CAE Simulation Calculations

Jieji Chen*, Jun Lu#, Xiaohua Ni

School of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Dec. 4th, 2023; accepted: Dec. 31st, 2023; published: Jan. 31st, 2024

Abstract

As a sensitive component of sensors, the performance of piezoelectric ceramics determines the

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈捷基, 陆俊, 倪晓骅. 基于 CAE 仿真计算的堆栈式 PZT 材料本构特性的研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(1): 965-975. DOI: 10.12677/mos.2024.131093

quality of sensor performance. Therefore, this article uses ABAQUS finite element software to conduct piezoelectric analysis on a monolithic piezoelectric ceramic, studying the specific value of the longitudinal piezoelectric strain constant d_{33} of the monolithic piezoelectric ceramic and its relationship with stress-strain and displacement. In addition, the influence of the radius and thickness of the piezoelectric ceramic disc under fixed load on the output voltage was studied, and the differences between the series and parallel connection methods were compared. The results indicate that the specific value of stress prediction d_{33} obtained through simulation has reference significance. The output voltage of a monolithic piezoelectric ceramic increases with increasing thickness and decreases with increasing radius. By comparing the output voltage and charge of stacked piezoelectric ceramics in series and parallel, as well as their application scenarios, it is determined that stacked piezoelectric ceramic stacks are connected in parallel.

Keywords

Monolithic Piezoelectric Ceramic Chip, Finite Element Analysis, Series-Parallel, Stacked

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

压电陶瓷具有正压电效应和逆压电效应, 根据其原理可制成传感器、换能器和执行器, 广泛应用于汽车、精密仪器、航空航天、生物医疗等领域[1] [2]。压电陶瓷作为敏感材料, 其性能的好坏直接影响传感器、执行器和换能器的性能。对于压缩型压电陶瓷传感器, d_{33} 的实际值是压电陶瓷最重要的一个性能参数! 其好坏与其制造工艺间存在较大关系, 制作过程中的粉体质量、粉体合成方法和烧结都对压电陶瓷的性能有影响[3] [4], 且国内对压电陶瓷生产的研究相对国外起步要晚, 国内压电陶瓷生产制程相对落后, 所生产的压电陶瓷的性能参数的真实值数值不一。不知具体压电陶瓷片的性能参数时, 将其应用于传感器, 容易导致因测量结果误差较大而无法真实反映被测对象的真实状态。在控制系统中, 容易导致控制系统误判而控制失效。

因此在不知具体 d_{33} 值的情况下, 采用有限元的方法构建压电陶瓷材料的具体本构关系, 研究输入与输出之间的关系, 找到一种可以确定压电陶瓷 d_{33} 的实际值的方法具有重要意义。Barzegar A 等利用 ANSYS 软件分析, 提出了 d_{33} 真实值与长宽比、压电陶瓷机械性能和金属触点机械性能之间的关系式, 其结果与实验数据间有良好的相关性[5]; Stoeckel C 等学者利用 ANSYS 软件模拟压电陶瓷在电驱动压电材料位移作用下的衬底特性和电极尺寸的相关性, 对 d_{33} 进行预测, 通过测量结果验证了有限元模拟的有效性[6]; Zhang M 等学者利用 CAE 软件分析施加电场与 AIN 薄膜输出位移之间的关系并结合实验结果, 提出预测 d_{33} 的方法, 并能预测出合理的 d_{33} 值[7]。

综上所述, 利用 CAE 仿真计算以预测具体 d_{33} 值的研究具有可行性。因此本文将利用 CAE 仿真计算研究堆栈式 PZT 材料本构特性, 预测具体 d_{33} 值。此外还研究了压电陶瓷圆片的半径、厚度对输出电压的影响以及固定载荷下堆栈式压电陶瓷的最大层数并比较串联和并联两种连接方式之间的差异。

2. 压电陶瓷材料压电方程

根据 IEEE 超声波、铁电和频率控制协会标准委员会制定描述压电连续体线性化本构关系, 是目前在线性范围内普遍使用的压电材料的本构方程, 其公式如下所示[8]:

$$[S] = [S^E][T] + [d][E] \quad (1)$$

$$[D] = [d][T] + [\varepsilon^T][E] \quad (2)$$

公式(1)中, S 表示应变; s^E 称为压电陶瓷的短路弹性柔顺常数; d 称为压电应变系数; E 称为电场强度; 公式(2)中, D 称为电位移; ε^T 称为压电陶瓷的自由介电常数; s^E 和 ε^T 分量由压电陶瓷的弹性柔顺常数矩阵和介电常数矩阵决定。

当只考虑厚度方向的振动, 上述压电方程可以表述为:

$$\begin{cases} S_3 = s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 & (a) \\ D_3 = d_{33} T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 & (b) \end{cases} \quad (3)$$

对于单层压电陶瓷, 当沿压电陶瓷极化方向 3 施加压力 F_3 作用于 A_3 面时, 压电陶瓷表面产生的电荷密度为:

$$\sigma_3 = \frac{d_{33} F_3}{A_3} \quad (4)$$

公式中(4)中 σ_3 表示电荷密度, d_{33} 表示压电系数。

开路电压为:

$$U = \frac{F g_{33} t}{A} \quad (5)$$

公式(5)中 g_{33} 为压电应力常数, 其可由如下公式得到:

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^T} \quad (6)$$

3. ABAQUS 在压电仿真中的应用

3.1. ABAQUS 仿真软件的功能

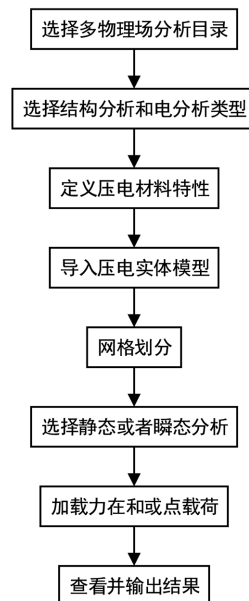


Figure 1. Flow of ABAQUS analysis of piezoelectric materials
图 1. 压电材料 ABAQUS 分析流程

作为专业的有限元仿真软件，其包含了压电耦合分析模块，可进行压电仿真分析。本文将利用 ABAQUS 有限元仿真软件分析压电结构。具体建模方法如图 1 所示。

3.2. ABAQUS 中的压电材料本构方程表示

ABAQUS 软件中，常用的是 *e-form* 型方程，其压电方程组表示如下：

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^E \varepsilon_{kl} - e_{mij}^\phi E_m \quad (7)$$

$$q_i = e_{ijk}^\phi \varepsilon_{jk} + D_{ij}^{\phi(\varepsilon)} E_j \quad (8)$$

其中公式(7)使用压电应变系数矩阵表示时，其公式如下表示

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^E (\varepsilon_{kl} - d_{mkl}^\phi E_m) \quad (9)$$

公式(7)中的 σ_{ij} 称为机械应力张量； ε_{kl} 称为应变张量； D_{ijkl}^E 称为材料弹性刚度矩阵； e_{mij}^ϕ 称为压电应力系数矩阵；公式(8)中， q_i 称为电位移； ϕ 称为电势； $D_{ij}^{\phi(\varepsilon)}$ 称为介电属性；公式(9)中， d_{mkl}^ϕ 成为压电应变系数矩阵。

ABAQUS 中的压电材料的本构方程的矩阵表示形式如下：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ D_{2211} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ D_{3311} & D_{3322} & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{311} \\ 0 & 0 & e_{322} \\ 0 & 0 & e_{333} \\ 0 & 0 & 0 \\ e_{113} & 0 & 0 \\ 0 & e_{223} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{113} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{223} \\ e_{311} & e_{322} & e_{333} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.3. 压电陶瓷在 ABAQUS 中的仿真

3.3.1. 单片压电陶瓷仿真

在实际中，压电陶瓷性能测试中纵向压电应变系数 d_{33} 的测量主要有静态测试、准静态测试和动态测试；静态测试由于误差太大，现已淘汰，准静态测试方法与动态测试的结果误差较小，可以测量圆片、方板、柱状试样，还可以直接测试圆环、圆管、半球等异性试样；操作简单方便，不受使用者熟练程度的影响，适宜在工厂生产线和实验室使用。动态测试精度虽然较高，但操作复杂，对样品几何尺寸有要求，不能测试任意形状的式样。 d_{33} 必须要通过复杂的计算才能得到，一般用来对材料做定型鉴定时才采用[9]。

由于压电陶瓷在制作工艺中，或导致压电陶瓷的粉体大小以及晶体成长导致压电陶瓷的粉体并不是均匀分布的，而常用的准静态测试的 d_{33} 值只能是接触部分局部性能，当夹持在不同部分的时候其测得的 d_{33} 可能也会不同。因此测量整个压电陶瓷的实际性能参数时，通过对整个压电陶瓷表面施加面力，然后算压电陶瓷输出电压的平均值，得到压电陶瓷真实的性能参数。因此仿真时对压电陶瓷施加一个均匀的压力。

本次仿真内容包含材料有：压电陶瓷 PZT-5A、氧化铝绝缘陶瓷。其中 PZT-5A 的密度为 7750 kg/m^3 ；

绝缘陶瓷密度为 3950 kg/m^3 。尺寸初步设计为直径 15 mm ，厚度为 0.2 mm ，极化方向为厚度方向。其参数如表 1 所示：

Table 1. Material properties of piezoelectric ceramic PZT-5A
表 1. 压电陶瓷 PZT-5A 材料属性

材料参数	PZT-5A
弹性系数(GPa)	
C11	121
C12	75.40
C13	75.20
C33	111
C44	21.1
压电耦合矩阵(10^{-12} m/volt)	
d_{15}	584
d_{31}	-171
d_{33}	374
压电系数(C/m^2)	
e31	-5.4
e33	15.8
e15	12.3
介电常数(10^{-9} F/m)	
ϵ_{11}	8.107
ϵ_{33}	7.345

压电陶瓷在 ABAQUS 软件中的参数设置如下：

弹性系数矩阵如公式(12)所示：

$$c^E = \begin{bmatrix} 12.1 & 7.54 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ 7.54 & 12.1 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ 7.52 & 7.52 & 11.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.78 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.11 \end{bmatrix} \times 10^{11} (\text{N/m}^2) \quad (12)$$

压电应变系数矩阵如公式(13)所示：

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 584 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 584 \\ -171 & -171 & 374 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (10^{-12} \text{ m/volt}) \quad (13)$$

介电常数矩阵如公式(14)所示：

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 8.107 & 0 & 0 \\ 0 & 8.107 & 0 \\ 0 & 0 & 7.346 \end{bmatrix} \times 10^{-9} (\text{F/m}) \quad (14)$$

在 ABAQUS 中, 提供了专门用于压电分析的耦合单元。本文压电陶瓷片的网格使用 C3D8E; 绝缘陶瓷网格类型使用 C3D8R。采用隐式动力学求解器进行求解, 对压电陶瓷表面线性加载 10,000 Pa 的压力。

电压输出为 0.04801 V, 与理论值误差 0.02%。仿真结果如图 2 所示。

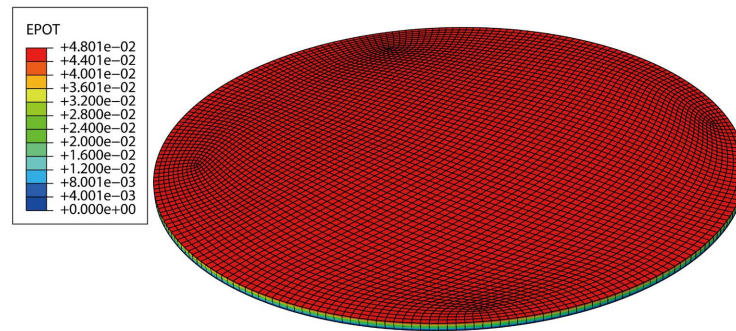


Figure 2. Monolithic piezoelectric ceramic voltage output results
图 2. 单片压电陶瓷电压输出结果

对压电陶瓷施加 10,000 Pa 的周期的交变力, 其结果如图 3 所示:

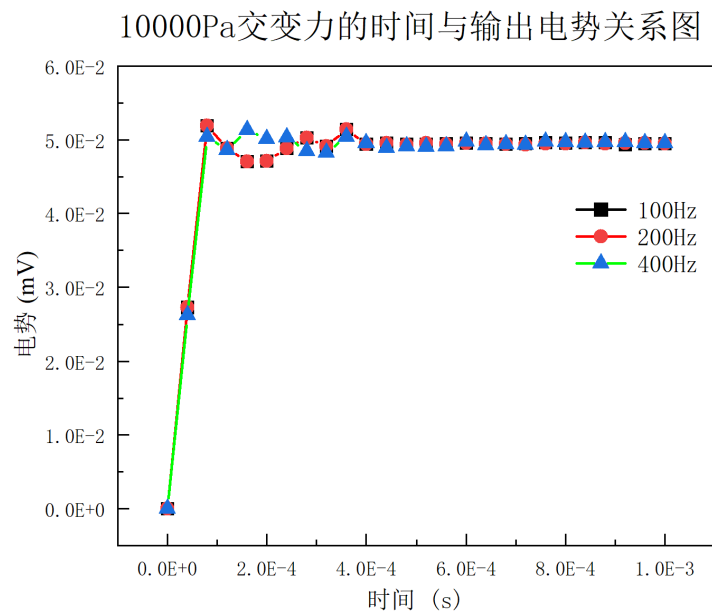


Figure 3. Alternating force versus output potential versus time at 10,000 Pa
图 3. 10,000 Pa 下的交变力与输出电势随时间变化的关系

由图 3 可知, 100 Hz 低频交变力 10,000 Pa 时, 压电陶瓷由于突然受力而输出电压瞬间提高, 在 0.0005 s 后稳定在 0.0459 V 区间, 在 0.0001 s 和 0.0005 s 之间存在明显的上下波动。200 Hz 低频交变力 10,000 Pa 时, 其结果和趋势与 100 Hz 低频交变力 10,000 Pa 的结果和趋势基本一致。400 Hz 低频交变力 10,000 Pa 时, 在 0.0001 s 和 0.0005 s 之间的输出电压波动趋势与前面两个参数总体相同, 随后稳定在 0.0495 V 区间。

三个频率所输出电压值趋势一致且误差较小, 数值基本重叠。因此在现实物理实验当中, 可选用较低的 100 Hz 作为测量压电陶瓷的 d_{33} 实验的频率, 在测量 d_{33} 数值时, 需要等数值稳定后再进行读数。通

过实际平均电压再换算,可得到整个压电陶瓷的实际 d_{33} 值。在保持 100 Hz 的低频交变力 10,000 Pa 的载荷下,分析不同 d_{33} 实际值对应的应力应变和位移之间的关系,其结果如图 4~6 所示。

由图 4~6 可知,100 Hz 的 10,000 Pa 低频力的作用下,压电陶瓷的应变和位移数值太小,在实际测试过程中用于测量的传感器需要高精度,提高了测试的费用,因此不太建议通过测试应变或位移确定 d_{33} 实际值。考虑通过测试应力方式确定 d_{33} 实际值,观察图 4 中 0.00068 s 对应的数据可知, d_{33} 实际值由小到大排序对应的应力值为 9983、10,009、9920、10,014、9821。对应的输出电压值为 0.052、0.050、0.051、0.048、0.032。其与理论值误差分别为 3.7%、10%、9%、14%和 42%。

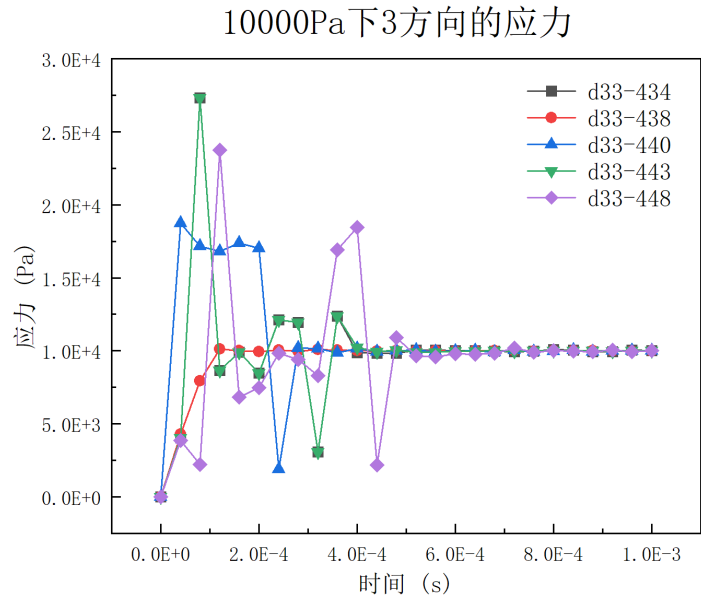


Figure 4. Relationship between actual values and stresses for different d_{33}
图 4. 不同 d_{33} 实际值与应力之间的关系

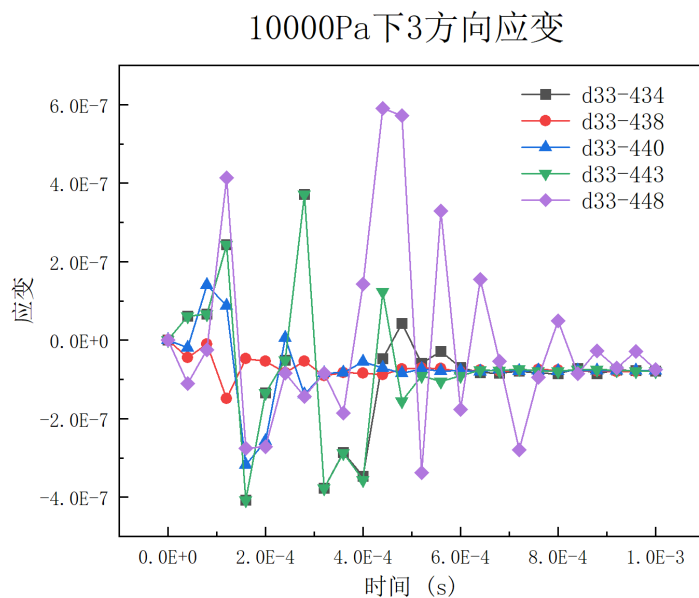


Figure 5. Relationship between actual values and strains for different d_{33}
图 5. 不同 d_{33} 实际值与应变之间的关系

10000Pa下3方向位移

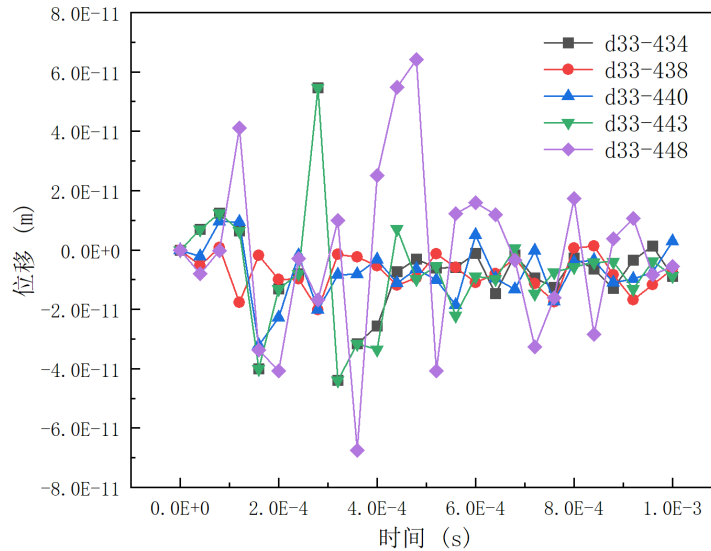


Figure 6. Relationship between actual values and displacements for different d_{33}
图 6. 不同 d_{33} 实际值与位移之间的关系

综上所述，在外载荷不变条件下，利用测量单片压电陶瓷的应力来确定 d_{33} 的真实值相对于利用应变或位移确定 d_{33} 真实值要经济些，虽然利用应力确定 d_{33} 值会存在较大的误差，但具有一定的参考价值。

3.3.2. 压电陶瓷的不同结构尺寸对电压的影响

在施加外部载荷不变的条件下，分析压电陶瓷的厚度、直径与输出电压之间的关系。首先分析压电陶瓷片的厚度与输出电压之间的关系，厚度为 50% 的变化进行五组仿真分析，其厚度分别为 0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm。其输出平均电压如表 2 所示。

Table 2. Correspondence between thickness and output average voltage of piezoelectric ceramic PZT-5A
表 2. 压电陶瓷 PZT-5A 的厚度与输出平均电压之间的对应关系

厚度	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
平均电压	0.04801	0.07044	0.09393	0.1174	0.1409

分析表 2 可知，在压电陶瓷施加的外载荷和受力面积不变的条件下，其输出电压随压电陶瓷的厚度增大而增大。选用直径分别为 15 mm、18 mm、21 mm、24 mm、27 mm 的压电陶瓷片分析直径与输出电压之间的关系。输出平均电压如表 3 所示。

Table 3. Correspondence between diameter and output average voltage of piezoelectric ceramic PZT-5A
表 3. 压电陶瓷 PZT-5A 的直径与输出平均电压之间的对应关系

直径	15	18	21	24	27
平均电压	0.04801	0.03280	0.02426	0.01869	0.01486

分析表 3 可知，在压电陶瓷施加的外载荷和陶瓷片厚度不变的条件下，其输出电压随压电陶瓷的直径的增大而减小。

综上所述，在外载荷不变的条件下，压电陶瓷的输出电压随压电陶瓷的厚度的增加而增加，随压电

陶瓷的直径增大而减小。在选择压电陶瓷作为传感器敏感元件时，需注意压电陶瓷的尺寸选择，防止压电陶瓷质量过大使传感器整体尺寸过大而导致工作范围减小，以及压电陶瓷尺寸过小而输出的电压过小而失效。综合考虑，本文选用压电陶瓷的尺寸为厚度 0.2 mm，直径为 15 mm 用于堆栈式中。

3.3.3. 堆栈式压电陶瓷本构理论公式

堆栈式压电陶瓷有两种电路连接方式 - 串联和并联。串联时双片压电陶瓷的输出电压是单片压电陶瓷输出电压的两倍，输出电荷等于单片电荷，输出电容是单片电容的一半；并联时输出电压与单片电压相等，输出电荷为单片的两倍，输出电容是单片的两倍[10]。

由于单片压电陶瓷输出电压值太小，不利于检测，因此下一步将进行 10 片的堆栈式压电陶瓷进行仿真，对其进行串并联仿真。每片压电陶瓷之间放置一块同等大小的绝缘陶瓷，防止其发生短路。

堆栈式压电陶瓷仿真串联理论公式计算：

当堆栈式压电陶瓷处于零应力($F = 0$)状态下，由公式(3)中(a)变为：

$$S_3 = nd_{33}E_3 \quad (15)$$

假设 PZT 上下极面的电场是均匀电场，则有：

$$E = \frac{U}{h} \quad (16)$$

由公式(16)代入公式(15)，有：

$$S_3 = nd_{33} \frac{U}{h} \quad (17)$$

令 η 在外加电压 U 的作用下堆栈式压电陶瓷产生的变形量，即位移，则：

$$S_3 = \frac{\eta}{h} \quad (18)$$

由公式(17)和公式(18)可知：

$$\eta = nd_{33}U \quad (19)$$

在不考虑二次压电效应的作用，无外电场作用时，根据公式(3)中(a)有：

$$S_3 = s_{33}^E T_3 \quad (20)$$

当输入单位力 $F = 1$ 时：

$$T_3 = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \quad (21)$$

根据公式(18)，(20)，(21)可知等效刚度如下：

$$k = \frac{s_{33}^E A}{h} \quad (22)$$

堆栈式压电陶瓷的并联开路电压为：

$$U = \frac{d_{33} F h}{n A \epsilon_{33}^T} \quad (23)$$

堆栈式压电陶瓷的电荷量公式为：

$$Q = nd_{33} F = CU \quad (24)$$

由公式(23), (24)得到并联式压电陶瓷电容表达式为:

$$C = \frac{n^2 A \varepsilon_{33}^T}{h} \quad (25)$$

当堆栈式压电陶瓷的本构方程的为:

$$\begin{bmatrix} Q \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & nd_{33} \\ nd_{33} & \frac{1}{k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ F \end{bmatrix} \quad (26)$$

或

$$\begin{bmatrix} Q \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C - kn^2 d_{33}^2 & knd_{33} \\ -knd_{33} & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \eta \end{bmatrix} \quad (27)$$

3.3.4. 堆栈式压电陶瓷仿真

压电陶瓷表面施加 10,000 Pa 的均匀压力, 仿真结果如图 7 所示。10 层堆栈式压电陶瓷串联输出电压为 0.379 V, 并联输出电压为 0.0372 V。串联压电陶瓷是并联压电陶瓷输出电压接近 10 倍。通过公式(24)可知, 并联式压电陶瓷的输出电荷是串联式压电陶瓷输出电荷接近 10 倍。因此串联接法输出电压高, 其本身电容小, 适用于振动和震动测量、声学测量、气压和液压测量、工业过程控制、科学实验和研究等以电压为输出信号和测量电路输入阻抗很高的场合; 并联接法输出电荷大, 本身电容大, 时间常数大, 适用于地震监测、结构健康监测、生物医学应用等测量缓变信号并以电荷量为输出信号的高灵敏度和精确度的场合[11]。本文研究的堆栈式压电陶瓷用于制作振动传感器并应用于高精度和高灵敏度场合。综合考虑, 堆栈式压电陶瓷使用并联的方式进行连接。

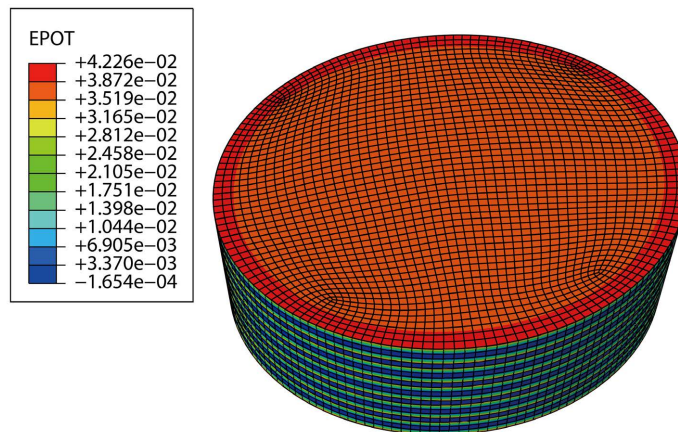


Figure 7. Simulation results of 10-layer piezoelectric ceramic stacks
图 7. 10 层压电陶瓷堆仿真结果

4. 结束语

本文通过有限元仿真方法对单片压电陶瓷进行压电分析, 分析了压电陶瓷在 10,000 Pa 的 100 Hz、200 Hz 和 400 Hz 三种交变力下的模拟输出电压, 得到了三种交变力下的电压输出曲线。三种频率所输出电压值趋势相同且误差小。在现实物理实验当中, 可选用较低的 100 Hz 作为测量压电陶瓷的 d_{33} 的频率。在此基础上, 分析了五组 d_{33} 实际值在 100 Hz 交变力下 d_{33} 值与应力应变和位移之间的参数, 通过输出数据分析得到使用应力值作为预测 d_{33} 真实值具有参考意义, 为实验提供参考。

分析了压电陶瓷不同的厚度和半径对输出电压的影响, 等外载荷下, 压电陶瓷的输出电压随压电陶瓷的厚度增加而增加, 随直径的增大而减小。通过综合考虑, 确定了堆栈式压电陶瓷堆中单片压电陶瓷的几何尺寸。对 10 层的堆栈式压电陶瓷进行串并联的压电仿真, 通过仿真得到串联压电陶瓷是并联压电陶瓷的输出电压的 10 倍, 并联的电荷量是串联的电荷量的 10 倍。根据使用场景确定堆栈压电陶瓷电气连接方式为并联连接方式。

参考文献

- [1] Zhu, X. (2010) Piezoelectric Ceramic Materials: Processing, Properties, Characterization, and Applications. In: Nelson, W.G., Ed., *Piezoelectric Materials: Structure, Properties and Applications*, Nova Science Publishers, New York, 1-36.
- [2] Habib, M., Lantgios, I. and Hornbostel, K. (2022) A Review of Ceramic, Polymer and Composite Piezoelectric Materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **55**, Article 423002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8687>
- [3] 吴家刚. 电子陶瓷材料与器件[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [4] 包秀兰, 陈燕, 吉红伟, 等. 锆钛酸铅压电陶瓷的制备工艺研究[J]. 陶瓷学报, 2019, 40(2): 153-158.
- [5] Barzegar, A., Damjanovic, D. and Setter, N. (2005) Analytical Modeling of the Apparent d_{33} Piezoelectric Coefficient Determined by the Direct Quasistatic Method for Different Boundary Conditions. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **52**, 1897-1903. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2005.1561657>
- [6] Stoeckel, C., Kaufmann, C., Schulze, R., et al. (2013) Precise Determination of Piezoelectric Longitudinal Charge Coefficients for Piezoelectric Thin Films Assisted by Finite Element Modeling. 2013 *Joint IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectric and Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/PFM)*, Prague, 21-25 July 2013, 194-196. <https://doi.org/10.1109/ISAF.2013.6748725>
- [7] Zhang, M., Yang, J., Si, C., et al. (2015) Research on the Piezoelectric Properties of AlN Thin Films for MEMS Applications. *Micromachines*, **6**, 1236-1248. <https://doi.org/10.3390/mi6091236>
- [8] Goldfarb, M. and Celanovic, N. (1997) Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation. *IEEE Control Systems Magazine*, **17**, 69-79. <https://doi.org/10.1109/37.588158>
- [9] 徐红星, 骆英, 袁新华. E-S 法测量压电元件压电应变常数 d_{33} 的研究[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2001, 22(4): 12-14.
- [10] 唐文彦, 张晓琳. 传感器[M]. 第 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [11] 李东晶. 传感器技术及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.