

文章编号:1006-1355(2018)02-0025-05

压电陶瓷片迟滞补偿建模及悬臂梁主动控制研究

方 远¹, 刘树勇¹, 杨理华², 苏 攀¹

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033;

2. 海军潜艇学院 动力操纵系, 山东 青岛 266199)

摘 要:为增强压电悬臂梁振动控制效果,提出一种基于最小二乘法的逆迟滞补偿控制算法。在不同电压下对压电陶瓷片位移进行实测,应用最小二乘法对其迟滞环进行多项式拟合建模,并利用压电片逆迟滞补偿模型对控制电压进行补偿。通过悬臂梁振动主动控制试验系统研究PID控制器在有、无逆迟滞补偿时的控制效果。结果表明:经过PID逆迟滞补偿后的主动控制效果比传统PID提高10.083%。因此,该逆迟滞补偿方法能够有效增强压电陶瓷片的主动控制效果,对于压电悬臂梁振动主动控制具有重要参考价值。

关键词:振动与波;压电陶瓷片;悬臂梁;振动控制;逆迟滞补偿;PID控制

中图分类号:TP273

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.02.006

Research of Hysteresis Compensation Modeling of PZT Patches and Active Vibration Control of Cantilever Beams

FANG Yuan¹, LIU Shuyong¹, YANG Lihua², SU Pan¹

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Power Control Department, Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, Shandong China)

Abstract : In order to improve the vibration control effects of the piezoelectric cantilever beams, an inverse hysteresis compensation control method based on least squares algorithm is presented. The displacements of the lead zirconate titanate (PZT) patch under different voltages are measured, and the hysteresis loop model of the PZT patch is fitted with the polynomial via least squares algorithm. Using the inverse hysteretic compensation model of the PZT patch, the control voltage is compensated. Through the active vibration control experiments of the piezoelectric cantilever beam, the control effects of the PID controller with or without inverse hysteresis compensation are systematically studied. The results show that the active control effect of PID controller with inverse hysteresis compensation is 10.083 % higher than the traditional PID controller. Thus, the inverse hysteresis compensation method can effectively improve the active control effects of the PZT patch, which is of great reference value for active vibration control of piezoelectric cantilever beams.

Keywords : vibration and wave; PZT patch; cantilever beam; vibration control; inverse hysteresis compensation; PID controller

压电陶瓷材料具有机电能量转化效率高、稳定性好及灵敏度高优良特性,既可以制成传感器,也可以制成作动器^[1-2]。将压电陶瓷材料制成作动器时,其类型可分为叠堆型和片状型。

叠堆型压电陶瓷作动器主要用于超精密加工、微位移器控制等定位精度要求高的场合。为提高压电作动器在振动主动控制中的精度,实现作动器电压与位移高线性度要求,就必须控制压电材料迟滞特性的影响。对此,Goldfarb和Celannovic利用Maxwell模型对叠堆型作动器迟滞特性进行建模,通过该模型对控制过程进行设计和分析,实现了较好的轨迹跟踪效果^[3]。王代华等结合Bouc-Wen模型和参数识别方法,对叠堆型作动器的输入电压和输出位移之间的迟滞关系进行线性化处理,使作动器的非线性度下降10%左右^[4]。李巍基于叠堆型作动器的精密运动平台,提出非对称Bouc-Wen模型参数

收稿日期:2017-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579242);

国家自然科学基金青年基金资助项目(51509253)

作者简介:方远(1993-),男,武汉市人,硕士研究生,研究方向为压电陶瓷振动控制研究。

通信作者:刘树勇(1975-),男,副教授,硕士生导师,研究方向为轮机工程。

E-mail: lsydh@sina.com

辨识方法,该方法比传统Bouc-Wen模型的建模精度更高^[5]。

片状压电陶瓷作动器主要应用于对空间体积、质量以及受力性质有特殊要求的场合。Tarazaga等采用PZT片,对太空环境中的刚性充气臂振动进行主动控制,使其末端振幅减小93%^[6]。黄建用压电纤维复合材料制成作动器,对负泊松比机翼结构进行扭转控制,从而提升了固定翼飞行器的气动性能^[7]。孙龙飞等针对船舶、航天器中的锥形圆筒结构,利用PZT片对一端固定的锥形圆筒进行振动主动控制,采用模糊滑模控制使圆筒自由端振幅减小约50%^[8]。

目前,将迟滞补偿理论和叠堆型作动器控制结合的研究成果较多,然而将迟滞补偿理论和片状型作动器控制结合的应用较为鲜见。本文提出一种通过PZT片与悬臂梁形变关系测算PZT片位移的方法,由此得到PZT片电压-位移关系,并基于多项式拟合逆迟滞补偿算法对PZT片的控制电压进行补偿,提高电压悬臂梁的主动控制效果。

1 PZT片迟滞特性分析

1.1 悬臂梁偏转方程

为了研究PZT片迟滞特性,需得到其电压-位移关系。由于实验条件限制,无法对该关系进行精确测量。因此,本文利用PZT片与悬臂梁形变关系来测算PZT片在不同电压下的位移。

试验中PZT片只接受正电压作用,通电时发生缩短形变,导致悬臂梁产生偏转或摆动,自由端产生位移量。PZT片与悬臂梁形变关系如图1所示。

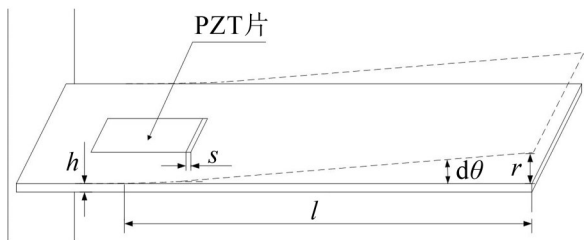


图1 悬臂梁与PZT片的形变

图中 r 是悬臂梁自由端位移量, l 是压电PZT片中心到自由端距离, h 是悬臂梁厚度, s 为PZT片形变量。测得PZT片 $l=148.4\text{ mm}$, $h=0.4\text{ mm}$ 。

在进行PZT片电压-位移测试时,为了便于研究和计算,需作如下假设:

(1) 悬臂梁表面长度变化量等于PZT片长度变化量 s ,且仅在长度方向上发生形变;

(2) 悬臂梁发生弯曲形变起点位置为PZT片中心线;

(3) 梁模型为Euler-Bernoulli梁;

(4) 忽略粘接PZT片给悬臂梁带来的影响。

基于以上假设,当Euler-Bernoulli梁在发生弯曲形变时,形变前垂直于梁轴线的平面在形变后保持为平面,并且仍然垂直于梁轴线,具体如图2所示。

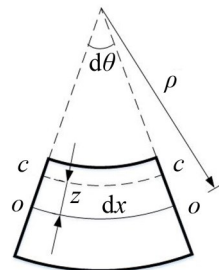


图2 欧拉梁的形变

变形前相距 dx 的两个横截面,在变形后产生了夹角 $d\theta$,在横截面垂直方向上与中性层 OO' 的距离为 Z 处有轴向纤维 $\overline{cc'}$ 。则 $\overline{cc'}$ 的长度变量为 cc'

$$cc' = (\rho - Z)d\theta \quad (1)$$

因此可算得PZT片形变量为

$$\overline{cc} - cc' = \rho d\theta - (\rho - Z_{\max})d\theta = Z_{\max} d\theta \quad (2)$$

在图2中,令PZT片中心到位移观测点的距离为 l ,悬臂梁上位移观测点位移量为 r ,可得

$$d\theta = \arctan \frac{r}{l} \quad (3)$$

令悬臂梁厚度为 h ,则PZT片位移量 s 为

$$s = \frac{1}{2}h \arctan \frac{r}{l} \quad (4)$$

1.2 PZT片稳态电压控制试验

基于悬臂梁的运动特性,文中测算PZT位移的方法不利于描述PZT片在不同频率下的迟滞特性,因此仅对PZT片静态迟滞特性进行分析。在PZT片上施加电压值为0 V、10 V、20 V、...、300 V、290 V、280 V、...、0 V,当悬臂梁稳定时得到自由端位移 r 。将测得的数据 r 代入式(4),得到PZT片长度变化量与控制电压关系如图3所示。

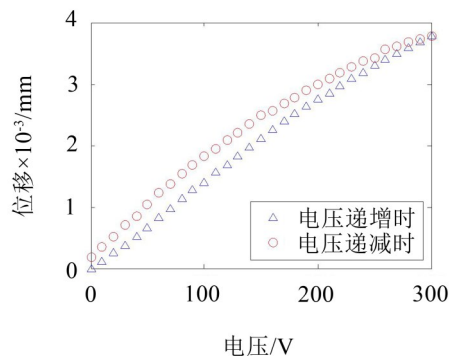


图3 PZT片电压-位移曲线

由图3可知,PZT片电压-位移关系具有明显的迟滞特性,该特性会影响PZT片的控制精度,因此需要对迟滞进行抑制以消除该特性的不利影响。

1.3 利用最小二乘法进行多项式拟合

为了对PZT片电压-位移特性进行定量分析,需建立PZT片迟滞特性模型。针对PZT片静态时电压-位移数据分布特点,采取最小二乘法对离散点进行多项式拟合,获得PZT片迟滞模型。假设 n 个点的拟合多项式为

$$y = a_0 + a_1x + \cdots + a_kx^k \quad (5)$$

每个点与曲线的距离平方和为

$$R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \cdots + a_kx_i^k)]^2 \quad (6)$$

将式(6)两边同时对 $a_j (j=0, 1, 2, \cdots, k)$ 求偏导,可得

$$\begin{cases} 0 = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \cdots + a_kx_i^k)] \\ 0 = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \cdots + a_kx_i^k)]x_i \\ \vdots \\ 0 = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \cdots + a_kx_i^k)]x_i^k \end{cases} \quad (7)$$

化简后可得

$$\begin{cases} (na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \cdots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^k) = \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \cdots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + \cdots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{2k} = \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{cases} \quad (8)$$

进一步写成矩阵形式,可得

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(9)中的矩阵化简后可得

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式为 $X \cdot A = Y$ 的形式,通过 $x_i, y_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 求得系数矩阵 A 后,能够进一步求得拟合函数。采取以上算法,可以得到当 x 最高阶数为5时,两条曲线拟合多项式分别为

$$\begin{cases} f_1(x) = -2.02707 \times 10^{-16} x^5 + 4.36489 \times 10^{-13} x^4 - 2.51490 \times 10^{-10} x^3 + 4.45950 \times 10^{-8} x^2 + 1.17130 \times 10^{-5} x - 4.79900 \times 10^{-6} \\ f_2(x) = -2.82300 \times 10^{-15} x^5 + 2.06200 \times 10^{-12} x^4 - 5.11398 \times 10^{-10} x^3 + 2.68560 \times 10^{-8} x^2 + 1.72120 \times 10^{-5} x - 1.63837 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (11)$$

$f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 分别对应图4中电压递增时和电压递减时的拟合曲线。两条拟合曲线带来的误差较小且易于计算,可作为PZT片的迟滞模型。

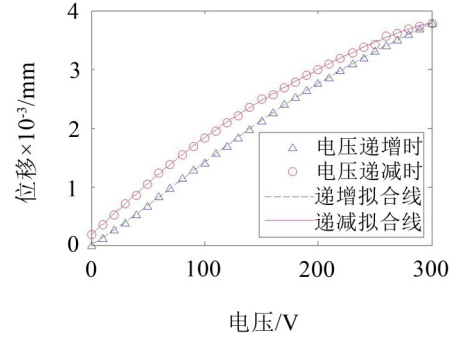


图4 迟滞特性拟合曲线

2 逆迟滞补偿算法

2.1 逆迟滞模型

在所建立的PZT片迟滞模型基础上,进行逆模型计算。已知 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 在变化范围内单调递增,因此存在逆迟滞模型。由于五次函数求逆过程较复杂,故采取拟合方法求得式(12),该式即为逆迟滞模型,如图5所示。其输入为PZT片位移,输出为补偿后电压。

$$\begin{cases} f_1^{-1}(x) = 1.28180 \times 10^{13} x^5 - 4.21321 \times 10^{11} x^4 + 4.90400 \times 10^9 x^3 - 1.38210 \times 10^7 x^2 + 8.17330 \times 10^4 x + 5.69959 \times 10^{-1} \\ f_2^{-1}(x) = 9.67345 \times 10^{14} x^5 - 9.10000 \times 10^{12} x^4 + 3.28460 \times 10^{10} x^3 - 4.63660 \times 10^7 x^2 + 8.20680 \times 10^4 x - 1.31000 \end{cases} \quad (12)$$

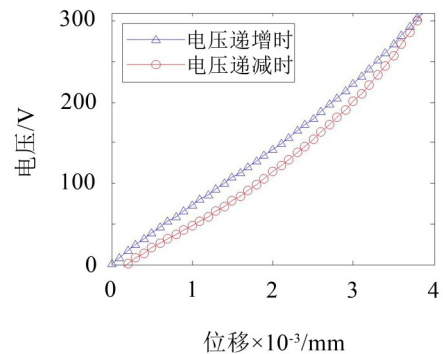


图5 逆迟滞拟合曲线

2.2 逆迟滞补偿

利用PZT片静态迟滞特性对控制电压进行逆迟滞补偿,实现控制电压与PZT片位移间的线性关系,完成悬臂梁振幅控制系统的闭环PID控制。具体流程如图6所示。

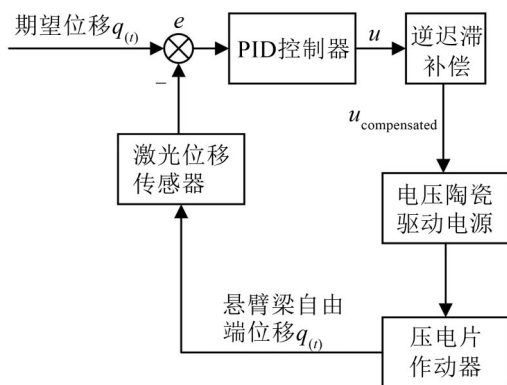


图6 控制流程

对控制系统输入一个期望值, PID 控制器会把激光位移传感器采集所得数据与该期望值作比较, 并根据误差值来输出控制电压 u 。随后通过逆迟滞补偿模型对 u 进行逆迟滞补偿, 实现 PZT 片电压-位移关系线性化。

逆迟滞补偿前, 对控制电压 u 进行升降判断。以 u 上升时的逆迟滞补偿为例, 当 PID 输出电压 u 时, 期望位移为 s , 然而 u 对应实际位移为 s_{real} , 如图7所示。为了对 PZT 片电压-位移进行线性化, 使补偿后的电压与 s 对应, 可以算得 s 满足

$$s = \frac{u}{300} s_{\text{max}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)中, 可以求得补偿后的电压

$$u_{\text{compensated}} = \begin{cases} f_1^{-1}(s), & \frac{ds}{dt} > 0 \\ f_2^{-1}(s), & \frac{ds}{dt} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

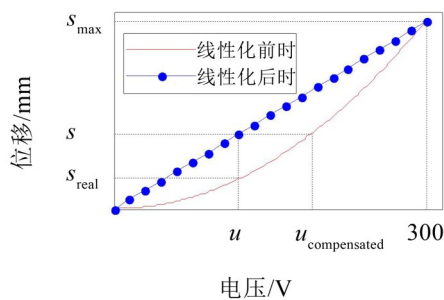


图7 逆迟滞补偿原理

3 试验过程与结果

3.1 硬件设置和软件调试

PZT 片粘贴在悬臂梁表面, 在梁的宽度方向上居中, 在梁的长度方向上靠近悬臂梁根部, 如图8所示。

将悬臂梁和激光位移传感器固定在铝制框架上, 连接框架与激振器, 试验系统如图9所示。

数据采集和处理流程如图10所示, 上位机通过数据输出板卡使激振器产生正弦信号, 从而使框架

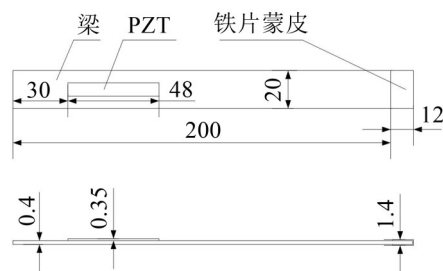


图8 PZT片在悬臂梁上的位置

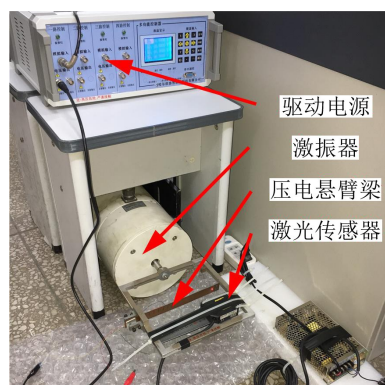


图9 实验设备

上的悬臂梁发生简谐振动; 激光位移传感器采集悬臂梁自由端位移信号, 通过数据采集板卡传输给上位机; 上位机进行控制处理后, 通过数据输出板卡输出控制电压, 压电陶瓷驱动电源将控制电压进行放大后作用在 PZT 片上, 从而实现悬臂梁振动闭环控制。

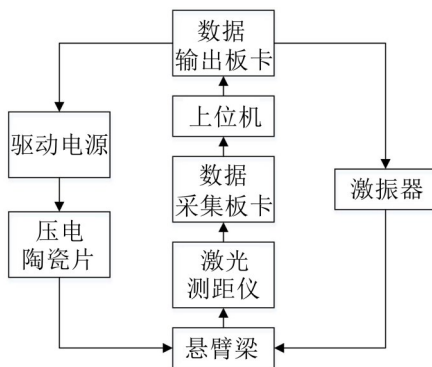


图10 数据采集和处理流程

试验控制程序框图如图11所示。在程序框图中, 使用位移寄存器来判断悬臂梁位移值是增大或减小, 两种情况分别对应条件语句中不同的补偿函数。此外, 为消除干扰信号的影响, 在对 u 进行判断前采用巴特沃斯滤波器进行滤波, 通过频率为 5 Hz~8 Hz。如果位移值增大, 则以图4中电压递增曲线对 PID 输出进行逆迟滞补偿; 如果位移值下降, 则以图4中电压递减曲线对 u 进行补偿。

驱动电源的功率放大倍数为 250 倍, 输出电压为 0 至 300 V, 因此 PID 控制器输出电压范围设定为 0 至 1.2 V。实验中 PZT 片只能接受正电压作用, 产

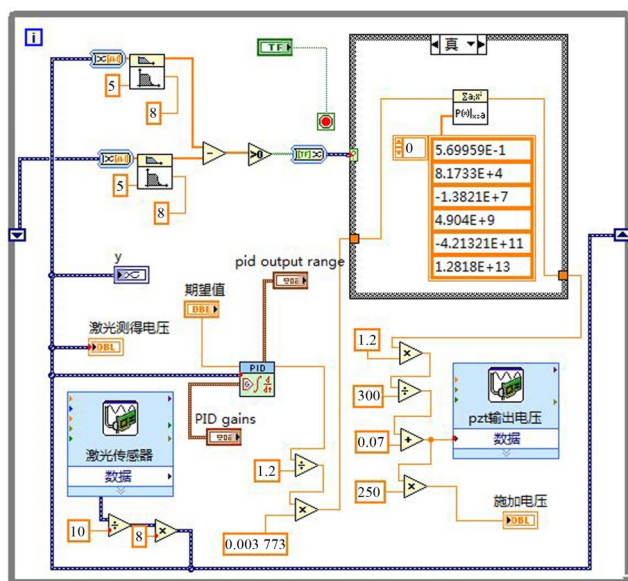


图 11 labview软件程序框图

生缩短形变,因此悬臂梁与激光传感器之间距离期望值选定为 2 mm。试验中得到 PID 控制器参数最优为 $K_p=0.230$, $T_i=0.003$, $T_d=0.000$ 。

3.2 试验结果与分析

试验过程中测得压电悬臂梁固有频率为 6.952 Hz。为了便于分析,设定激振器输出信号为频率 6.952 Hz、幅值 0.02 V 的正弦波,在此基础上验证 PID 及 PID 逆迟滞补偿的振动主动控制效果。截取稳定后的悬臂梁振幅曲线如图 12 所示。

由图 12 可知,在进行振动主动控制前,悬臂梁自由端振幅达 5.219 mm,经 PID 控制后幅值减小为 1.557 mm,经 PID 逆迟滞补偿控制后振动幅值降为 1.400 mm,比补偿前振动控制效果提高了 10.083 %。因此,逆迟滞补偿 PID 控制器优于传统 PID 控制器对压电悬臂梁的振动主动控制效果。

4 结 语

本文对 PZT 片迟滞特性进行了研究,并利用 PZT 片对悬臂梁进行振动主动控制试验研究,得到

如下结论:

(1) 提出一种根据 PZT 片与悬臂梁形变关系来测算 PZT 片电压-位移关系的方法,并通过试验验证了 PZT 片的迟滞特性;

(2) 应用最小二乘法对 PZT 片迟滞特性进行建模并求得逆迟滞补偿模型,并用于对 PZT 片控制电压进行补偿;

(3) 基于最小二乘逆迟滞补偿方法,开展了压电悬臂梁振动主动控制试验研究,结果表明:经过 PID 逆迟滞补偿控制后的悬臂梁振幅比传统 PID 控制振幅减小了 10.083 %,本文所提补偿方法能有效增强压电悬臂梁振动控制效果,对于压电悬臂梁振动主动控制具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 杨晓明,李宗津. 新型水泥基压电传感器的基本性能研究[J]. **传感技术学报**, 2012, 25(3): 349-354.
- [2] 张婷. 基于迟滞特性与时滞现象的智能悬臂梁自适应振动控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [3] GOLDFARB M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation[J]. **Control Systems IEEE**, 1997, 17(3): 69-79.
- [4] 王代华,严松林,朱炜. 基于 Bouc-Wen 模型的压电执行器的前馈线性化控制器[J]. **仪器仪表学报**, 2015, 36(7): 1514-1521.
- [5] 李巍. 压电作动器迟滞非线性建模与补偿控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [6] TARAZAGA PABLO, INMAN D, WILKIE W. Control of a space rigidizable- inflatable boom using macro- fiber composite actuators[J]. **Journal of Vibration and Control**, 2007, 13(7): 935-950.
- [7] 黄建. 基于压电纤维复合材料的可扭转机翼结构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 孙龙飞,李维嘉,吴耀中. 压电陶瓷在锥形圆筒振动主动控制中的应用[J]. **噪声与振动控制**, 2016, 36(4): 188-192.

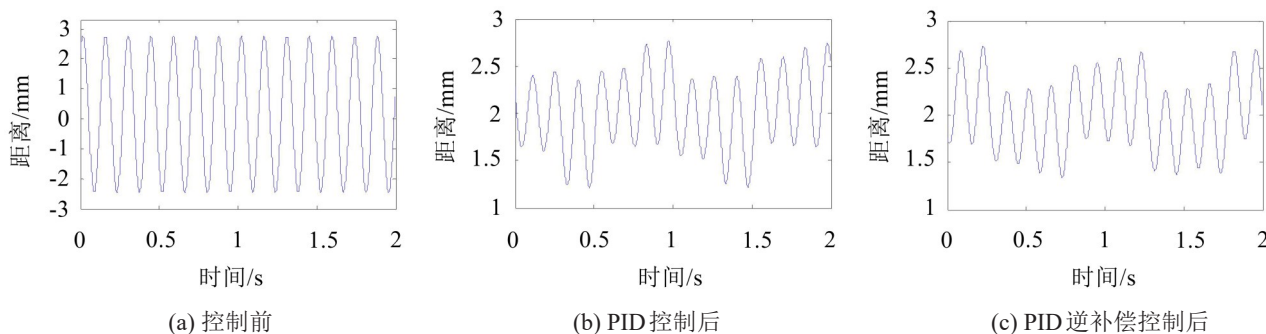


图 12 不同工况下的悬臂梁振幅