

基于正逆压电效应的高能效振动半主动控制方法

虞丽媛, 吴义鹏, 刘 轩, 裘进浩, 季宏丽

(南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于同步开关阻尼(Synchronous Switch Damping, SSD)技术的压电振动半主动控制方法主要利用控制电路中的同步开关和等效 LC 振荡电路, 实现压电电压的同步翻转, 使得压电驱动力始终和结构振动速度同相位, 用较低的能耗高效地抑制结构振动。然而常见的压电驱动元件如压电叠堆、压电纤维复合材料等, 其允许工作电压变化范围是不对称的, 采用对称翻转的 SSD 技术难以充分利用压电元件的机电转化性能。提出了一种基于双向压电效应的 SSD 技术, 通过对压电电压上翻时注能、下翻时吸能的操作, 最大化控制系统能效, 并充分匹配压电元件的机电转化潜能。介绍了所提 SSD 方法的工作原理, 推导了非对称翻转条件下结构的振动衰减模型, 实现了非对称翻转 SSD 控制电路, 并通过实验进行了验证。研究表明, 所提 SSD 方法可以通过控制注能开关占空比及吸能电路等效负载自适应地调节压电电压的上、下翻转因子, 最终实现高能效的结构振动衰减效果。

关键词: 振动控制; 振动能量收集; 同步开关阻尼; 压电; 反激变压器

中图分类号: TB535 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)04-0996-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.013

引 言

振动作为工业生产和日常生活中常见的物理现象, 对其进行抑制^[1]或利用^[2]的研究价值不言而喻。以结构振动控制为例, 一类基于电磁和压电驱动器的分流阻尼技术得到了广泛的研究^[3]。前者利用永磁体和电磁铁之间的相对运动产生感应电动势; 后者利用正压电效应产生感应电压, 然后通过相应的分流电路耗散电能, 最终达到抑制结构幅的目的。

例如, Behrens 等^[4]使用一种并联了 RC 串联谐振分流电路的电磁换能器抑制结构在固有频率下的振动。Cheng 等^[5]采用一种多模态电磁分流阻尼器实现柔性梁结构的半主动振动抑制。文献[6-8]设计了负电阻和负电感负电阻电磁分流阻尼器, 增加了系统的感应电流和阻尼, 提高了结构振动的控制效果。另外, 负电感可以抵消电磁铁的固有电感, 当分流电感和电磁铁的电感相等时, 由线圈和分流电感组成的电路阻抗将是一个纯电阻, 分流电流将与频率无关, 获得了多模态振动控制的能力。在压电分流阻尼技术方面, Kozlowski 等^[9]研究了 RL 分流压电换能器并优化了参数, 给出了最佳电感和电阻。

Sun 等^[10]通过使用串联 RL 和并联 RL 分流器研究了硬盘驱动器执行臂的振动抑制。Guo 等^[11]利用 RL 分流器构造了压电换能器以控制桁架夹芯板的振动。He 等^[12]提出了一种环形压电阻尼器并对一个旋转系统进行了有效振动抑制, 等等。

为进一步提高压电元件的利用效率, 降低分流支路的实现难度, 一种开关型压电分流阻尼技术于本世纪初被提出^[13], 该技术在压电元件上串联一简单开关电路, 当结构振动位移达到极值时闭合相应开关, 使得感应到压电电压瞬间为 0, 即让二次压电效应产生的压电抑制力始终与结构振动速度同相位, 用较低的控制能耗达到抑制结构振动的目的, 该技术被称为同步开关阻尼(Synchronized Switching Damping, SSD)技术。Richard 等^[14]提出了基于电感的 SSD 技术(SSD Based on Inductor, SSDI), 即利用电感形成的 LC 二阶振荡电路来增大压电元件产生反向抑制力的电压。当压电结构的机电耦合系数较小时, SSD 技术的控制效果主要取决于压电元件上的开路电压, Lefevre 等^[15]在 SSDI 的基础上进一步发明了基于外加电压源的 SSD 技术(SSD Based on Voltage Sources, SSDV)。Badel 等^[16]提出了增强型 SSDV 技术, 使用自适应连续可调的电压源替代了传统的恒定电压源, 确保压电驱动器可以产生与振动幅值相匹配的控制力, 提高了 SSDV 方法的自适应

收稿日期: 2022-01-09; 修订日期: 2022-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705251); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NS2021006)。

能力和控制系统的稳定性。另外, Ji等^[17]设计并提出了基于负电容的SSD(SSD Based on Negative Capacitor, SSDNC)技术,避免了振荡电路品质因子难以提高的问题的出现。Tang等^[18]优化得到了自感知的SSDNC技术,并且通过调节负电容的大小提高了电路的稳定性。

然而,在以上SSD方法中,压电电压是对称翻转变化的,这往往与常见的压电叠堆元件、压电纤维复合材料(Macro Fiber Composite, MFC)的允许工作电压不一致,从而限制了压电元件的实际使用性能。基于该问题,张锦^[19]设计了一种基于MFC的高压非对称同步开关电路,利用在MFC两端附加旁路电容和开关的方法实现了压电电压的非对称翻转。但是附加的旁路电容降低了结构本来就偏小的机电耦合系数,高压源也存在电路实现复杂、能效低等问题。针对高压非对称翻转的SSD设计思想,刘轩等^[20]提出了一种基于能量注入型的SSD(SSD Based on Energy Injection, SSDEI)技术,其中的反激变压器可替代高压电压源,并且所注入的电能可以实时自适应甚至非对称调节,大大降低了控制电路的实现难度。上述SSDEI电路主要衍生于Wu等^[21-22]提出的优化型同步电荷提取(Optimized Synchronous Electric Charge Extraction, OSECE)电路,用于高效地收集振动结构中基于正压电效应转化而来的电能,实现为低功耗设备供电的目的^[23]。事实上,OSECE可以看成是基于能量收集功能的压电分流阻尼电路,而SSDEI是基于能量注入的压电分流阻尼电路。

以基于MFC的大型柔性结构振动控制为例^[24],为最大化利用MFC的驱动性能,电压将在 -500 V 到 $+1500\text{ V}$ 之间非对称翻转^[19]。在理论上可通过电压正向翻转时注能、负向翻转时吸能,实现最大化控制系统能量利用效率。基于该思路,本文提出了一种基于双向压电能量操控的SSD技术(SSD Based on Energy Bidirectional Control, SSDEBC),同样借助了电路中的反激变压器,将SSDEI和OSECE技术巧妙地结合在一起,当压电电压正向翻转时利用SSDEI技术注能,负向翻转时利用OSECE技术提取电能,实现了压电元件工作电压的非对称翻转。介绍了SSDEBC技术的工作原理,推导了非对称翻转条件下结构的振动衰减模型,以工程中常见的悬臂梁结构为控制对象搭建了振动控制实验平台,通过实验验证了SSDEBC的工作原理及预期控制效果。

1 基于双向能量操控的SSD技术

1.1 SSDEBC的工作原理

SSDEBC主要是基于控制电路中的反激变压器实现双向能量操控。其将电路分为两部分:左侧部分与SSDI电路相似,包括开关控制信号;右侧电路分为两个部分,分别是由直流电压源、开关和变压器的一个线圈组成的能量注入回路以及由负载 R_L 、滤波电容 C_r 、开关、二极管和变压器的另一线圈组成的能量提取回路。

借助控制电路中的反激变压器,通过对压电电压正向翻转时注能、负向翻转时吸能的操作来实现压电元件工作电压的非对称翻转。电压正向翻转前,借助反激变压器,实现电压源到压电元件的能量注入,可以通过控制注能开关占空比来调节压电元件电压正向翻转因子;电压负向翻转时,通过反激变压器将能量提取到负载,控制吸能电路等效负载可以调节压电元件电压负向翻转因子,最终实现压电元件工作电压的非对称翻转。图1给出了SSDEBC技术中结构的振动位移和压电元件的电压波形,其中 V_{Mp} 和 V_{Mn} 分别表示在正、负半周期内的电压极大值; V_{mp} 和 V_{mn} 则表示正、负向翻转后瞬间的电压值。SSDEBC电路的一个工作周期大致可分为6个阶段,如图2所示。

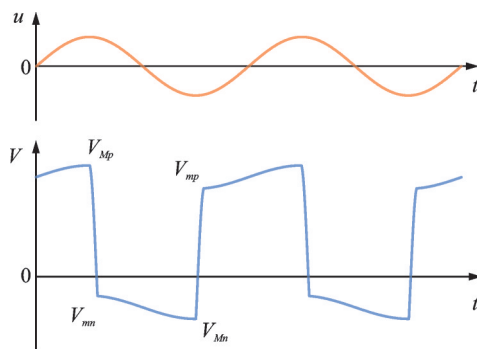


图1 SSDEBC技术的位移(u)、电压(V)波形
Fig. 1 Waveforms of displacement (u), voltage (V) using SSDEBC technology

压电元件的工作电压是非对称翻转,电压正向和负向翻转过程的电路工作原理也不同。SSD技术中压电元件只有很短一段时间处于闭路状态,大部分时间处于开路状态,压电元件上的电压与结构振动的位移成正比,比例系数为 α/C_0 ^[14],其中, C_0 为压电片的等效电容, α 为压电耦合结构的力因子。定义 λ_p 为正向翻转因子、 λ_n 为负向翻转因子,图1中几处关键电压之间的关系分别如下式所示:

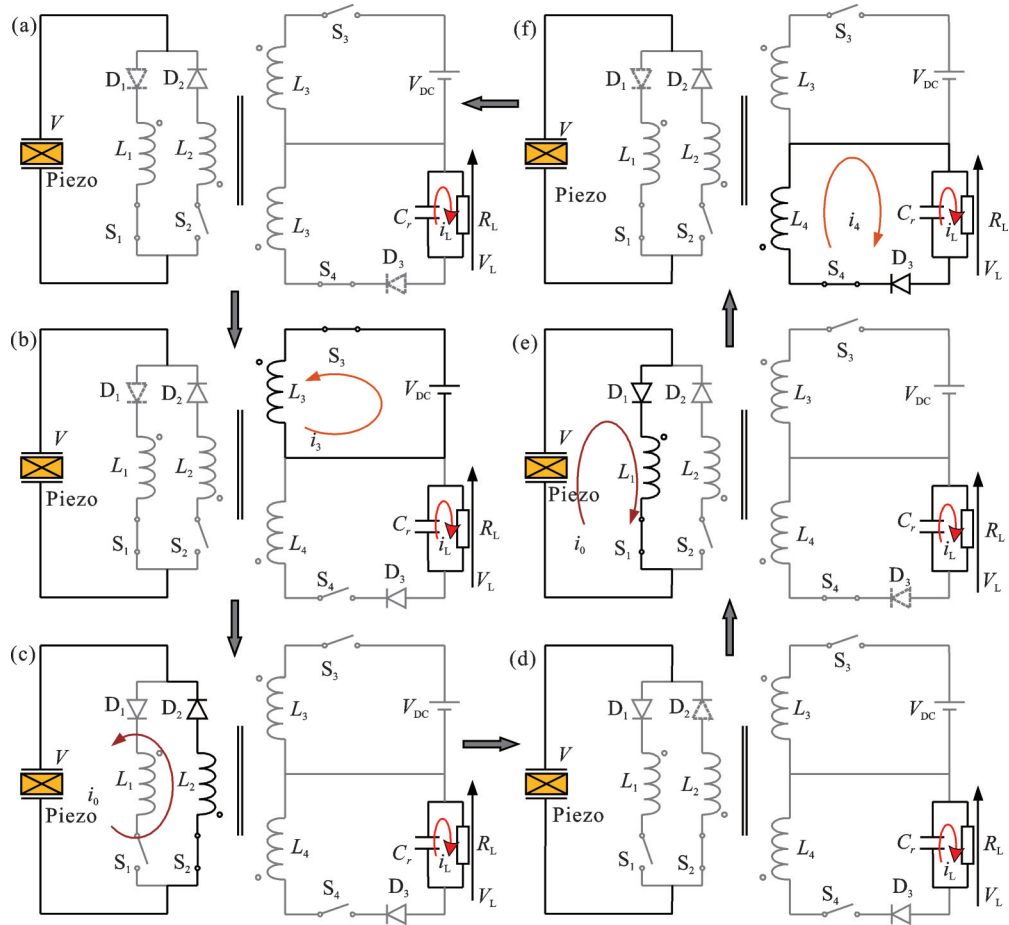


图2 SSDEBC电路及其工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SSDEBC circuit and its working principle

$$\begin{aligned}
 V_{mn} &= -\lambda_n V_{Mp}, \\
 V_{mp} &= -\lambda_p V_{Mn}, \\
 V_{Mn} &= V_{mn} - \frac{2\alpha}{C_0} u_M, \\
 V_{Mp} &= V_{mp} + \frac{2\alpha}{C_0} u_M
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中 u_M 为结构的振动位移幅值。

1.2 电压正向翻转:能量注入

由于SSD技术引入的阻尼效果主要取决于压电元件工作电压的范围,为提高控制效果,最大化压电元件工作电压范围是最直接的手段。在电压翻转之前通过 V_{DC} 将电能存入反激变压器,这部分电能电压翻转时注入 LC 振荡回路,可增大压电元件的正向电压幅值。具体地,电压正向翻转前,闭合开关 S_3 ,将电能存入反激变压器,位移达到极值时,闭合 S_2 断开 S_3 ,电路发生 LC 振荡,电能电压翻转时注入振荡回路。图3给出了能量注入过程的相关电流和电压波形。

第一阶段如图2(a)所示,开关 S_1 闭合,压电元件电压为负,二极管 D_1 反向截止,压电元件开路。

第二阶段如图2(b)所示,在位移达到极值之

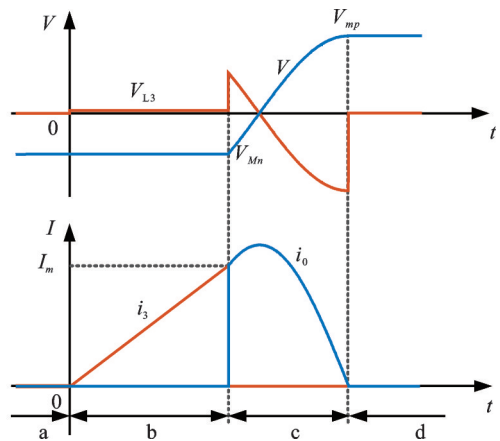


图3 电压正向翻转即能量注入过程中相应的电压、电流波形图

Fig. 3 Waveforms of the corresponding voltages and currents during the state of the energy injection or the positive inversion of piezoelectric voltage

前,开关 S_1 和 S_3 闭合,电压源向变压器注入能量,压电元件仍处于开路状态。该过程如下式所示:

$$V_{DC} = L_3 \frac{di_3}{dt} \tag{2}$$

式中 V_{DC} 为电压源电压; L_3 为对应线圈的电感值; i_3 为能量注入回路的电流。

第三阶段如图2(c)所示,结构位移达到极值时,电压达到负向极值,开关 S_1 和 S_3 断开, S_2 闭合,左侧电路发生LC振荡:

$$L_2\ddot{q} + r\dot{q} + \frac{1}{C_0}q = 0 \quad (3)$$

式中 L_2 为对应线圈的电感值; q 为压电元件上的电荷; r 为电路的等效电阻。

为方便计算,假设如下:(1)开关 S_3 闭合时间是原边LC振荡周期的 $\tau/2$ 倍, τ 为任意非负常数;(2)变压器为线性的, L_2 与 L_3 电感值相等。因此有如下初始条件:

$$\begin{cases} \dot{q}(0) = \tau\pi V_{DC} \sqrt{\frac{C_0}{L_3}} \\ q(0) = C_0 V_{Mn} \end{cases} \quad (4)$$

求解式(3)的微分方程,压电元件上的电流 i_0 和两端电压 V 分别如下式所示:

$$\begin{aligned} i_0 = \dot{q} &= \tau\pi C_0 \omega_I V_{DC} \cos(\omega_I t) e^{-\frac{\omega_I t}{2Q_I}} - \\ & C_0 \omega_I V_{Mn} \sin(\omega_I t) e^{-\frac{\omega_I t}{2Q_I}}, \\ V = \frac{q}{C_0} &= V_{Mn} \cos(\omega_I t) e^{-\frac{\omega_I t}{2Q_I}} + \\ & \left(\tau\pi V_{DC} + \frac{V_{Mn}}{2Q_I} \right) \sin(\omega_I t) e^{-\frac{\omega_I t}{2Q_I}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ω_I 和 Q_I 分别为振荡电路的固有角频率和品质因子。

$$\omega_I = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_0}}, \quad Q_I = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L_2}{C_0}} \quad (6)$$

翻转结束时回路电流为0,得到翻转因子 λ_p 及翻转相位 $\omega_I t$ 分别如下式所示:

$$\begin{cases} \lambda_p = - \left[\tan^2(\omega_I t) + \frac{1}{2Q_I} \tan(\omega_I t) + 1 \right] \cos(\omega_I t) e^{-\frac{\omega_I t}{2Q_I}} \\ \tan(\omega_I t) = \frac{\tau\pi V_{DC}}{V_{Mn}} \end{cases} \quad (7)$$

可以通过控制 τ 与外接电源电压 V_{DC} 的大小来改变翻转因子的值。

1.3 电压负向翻转:能量提取

通过反激变压器不仅可以向压电元件注入能量还可以从压电元件上提取能量。在储能电路的基础上再加一个线圈 L_4 ,可得到用于能量提取的变压器支路。向压电元件注入能量可以提高电压的正向幅值,提取能量则可以降低其负向幅值,图4给出了能量提取过程的相关电流和电压波形。

第四阶段如图2(d)所示,开关 S_2 闭合,压电元

件电压为正,二极管 D_2 反向截止,压电元件开路。

第五阶段如图2(e)所示,当位移达到极值时,电压达到正向极值 V_{Mp} ,闭合开关 S_1 和 S_4 ,断开 S_2 。此时 D_1 导通,压电元件与线圈 L_1 发生LC振荡。压电元件上电荷的微分方程和初始条件分别如下式所示:

$$L_1\ddot{q} + r\dot{q} + \frac{1}{C_0}q = 0 \quad (8)$$

$$\begin{cases} q(0) = C_0 V_{Mp} \\ \dot{q}(0) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

求解式(8)的微分方程,最终有:

$$\begin{aligned} i_0 = \dot{q} &= \sqrt{\frac{C_0}{L_1}} V_{Mp} \sin(\omega_I t) e^{-\frac{\omega_I t}{2Q_I}}, \\ V = \frac{q}{C_0} &= V_{Mp} \cos(\omega_I t) e^{-\frac{\omega_I t}{2Q_I}} \end{aligned} \quad (10)$$

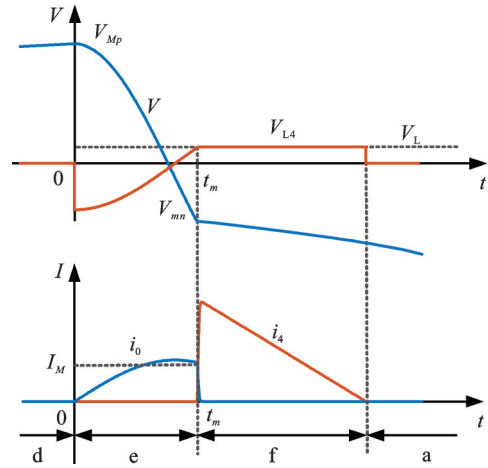


图4 电压负向翻转即能量提取过程中相应的电压、电流波形图(匝数比 $m=0.25$)

Fig. 4 Waveforms of the corresponding voltages and currents during the state of the energy extraction or the negative inversion of piezoelectric voltage (Turns ratio $m=0.25$)

在此阶段内,线圈 L_4 电压小于负载两端电压 V_L , D_3 反向截止。压电元件上积累的电荷转移到电感 L_1 上。当电流达到最大值时,所有的电荷都被提取出来,压电元件上的电压为零。此时,由于开关仍处于闭合状态,二极管 D_1 导通,电感中储存的能量回流到压电元件。线圈 L_4 电压达到负载两端电压 V_L ,即 $V_{L4}=V_L$ 时,第五阶段结束, I_M 表示在这个特定时间(t_m)电感 L_1 中的电流值,压电元件上的电压 V_{mn} 等于电感 L_1 上的电压,如下式所示:

$$V_{mn} = V_{Mp} \cos(\omega_I t_m) e^{-\frac{\omega_I t_m}{2Q_I}} \quad (11)$$

存储在变压器内的能量如下式所示:

$$E_{\text{extr}} = \frac{1}{2} L_1 I_M^2 = \frac{1}{2} C_0 V_{Mp}^2 \sin^2(\omega_1 t_m) e^{-\frac{\omega_1 t_m}{2Q_1}} \quad (12)$$

第六阶段如图2(f)所示,开关状态不变,能量提取回路导通,因为变压器原理,线圈 L_1 上电压不变,而压电元件上的电压随位移继续下降,二极管 D_1 反向截止,压电元件再次开路。然后将存储在变压器内的能量转移到 $\{C_r-R_L\}$ 电路,得到下式:

$$E_{\text{extr}} = \frac{V_L^2}{R_L} \frac{2\pi}{\omega} \quad (13)$$

$$V_{L1} = -\frac{V_{L4}}{m} \quad (14)$$

式中 m 为变压器匝数比,即电感线圈 L_4 和 L_1 的匝数比值。电流 i_4 降到零之后再次回到第一阶段(如图2(a)所示)。

根据式(11)~(14)得出负载 R_L 上电压 V_L 、翻转相位 $\omega_1 t_m$ 以及翻转因子 λ_n 的值分别如下式所示:

$$V_L = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega R_L C_0}{\pi}} V_{Mp} \sin(\omega_1 t_m) e^{-\frac{\omega_1 t_m}{2Q_1}} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \lambda_n = \frac{1}{2m} \sqrt{\frac{\omega R_L C_0}{\pi}} \sin(\omega_1 t_m) e^{-\frac{\omega_1 t_m}{2Q_1}} \\ \omega_1 t_m = \arctan\left(-2m \sqrt{\frac{\pi}{R_L C_0 \omega}}\right) + \pi \end{cases} \quad (16)$$

可见负载 R_L 上电压 V_L 的大小与 R_L 阻值以及翻转前压电元件电压 V_{Mp} 正相关,翻转因子 λ_n 的值取决于负载 R_L 和匝数比 m 。可以通过改变等效负载 R_L 调节压电电压的负向翻转因子。

1.4 基于 SSDEBC 的振动控制模型

本节以悬臂梁的一阶振动控制为例,详细描述开关控制过程和压电元件的非对称电极电压。在第一阶共振频率处,忽略高阶模态的影响,机电耦合系统可以近似为如图5所示的单自由度系统。

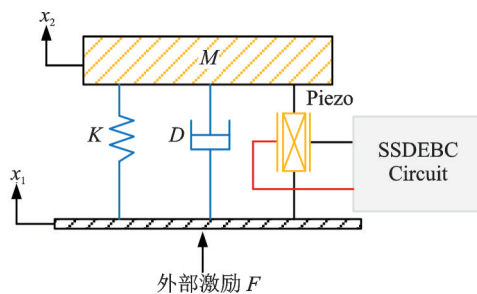


图5 典型被控压电结构的等效模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of equivalent model of a typical controlled piezoelectric structure

图5中, M 为结构质量, D 为附加黏性阻尼, K 为压电耦合系统的等效刚度,在外部激励 F 的作用下结构发生振动,得到系统的能量公式^[21]:

$$\int F \dot{u} dt = \frac{1}{2} M \dot{u}^2 + \frac{1}{2} K u^2 + \int D \dot{u}^2 dt + \int \alpha V \dot{u} dt \quad (17)$$

式中 $u = x_2 - x_1$,为基础和结构质量之间的相对位移。

采用谐响应分析,在半个振动周期的整数倍时,系统的动能和势能不变。式(17)在一个周期内积分得到:

$$\pi F_M u_M = \pi D u_M^2 \omega + 2\alpha(V_{Mp} - V_{mn})u_M \quad (18)$$

式中 F_M 为外激励力的幅值。

在结构振动的一个周期内,压电电压 V 与结构振动位移 u 的变化关系如图6所示。图6中曲线所围成的面积就是系统的机电转换能,围成的面积越大,机电转换能就越大,系统的振动控制效果越好。

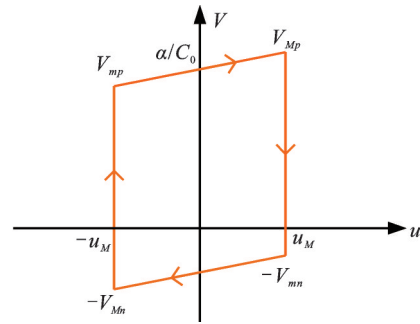


图6 单周期内压电电压 V 与结构振动位移 u 的变化关系

Fig. 6 Variation relationship between piezoelectric voltage V and structural vibration displacement u in a single cycle

定义 SSDEBC 控制下的位移为 u_M ,联立式(1)和(18)可得控制电路作用下结构的振动位移幅值如下式所示:

$$u_M = \frac{F_M}{D\omega + \frac{4\alpha^2(1+\lambda_n)(1+\lambda_p)}{\pi C_P(1-\lambda_n\lambda_p)}} \quad (19)$$

根据结构振动的阻尼比公式^[20],可以得到控制电路作用下的结构衰减阻尼比:

$$A_{\text{SSDEBC}} = 20 \lg \left(\frac{D\omega}{D\omega + \frac{4\alpha^2(1+\lambda_n)(1+\lambda_p)}{\pi C_0(1-\lambda_n\lambda_p)}} \right) \quad (20)$$

2 实验结果分析与讨论

2.1 实验系统

为验证上述理论,本文搭建了如图7所示的实验验证系统,利用 SSDEBC 技术对悬臂梁结构的一阶共振进行抑制。激振器通过夹具与弹簧钢制作的悬臂梁结构连接,其尺寸为 $200 \times 24 \times 0.8 \text{ mm}^3$,压电陶瓷元件粘贴在悬臂梁的受夹端,尺寸为 $54.4 \times$

22.4×0.5 mm³。实验选用东华检测技术公司的激振器(DH40200)和功率放大器(DH5872)产生激振力,使用基恩士公司的激光位移传感器(IL-100)测量振动位移。测量信号的采集与处理、控制电路的开关控制信号均基于MATLAB/Simulink软件及Speedgoat实时控制系统实现。控制电路中的变压器绕组电感 L_1, L_2 和 L_3 均为64 mH, L_4 为4 mH。选用9 V的干电池作为直流电压源 V_{DC} ,电路中的开关 S_1, S_3 和 S_4 为N沟道金属氧化物半导体场效应晶体管, S_2 为P沟道金属氧化物半导体场效应晶体管。

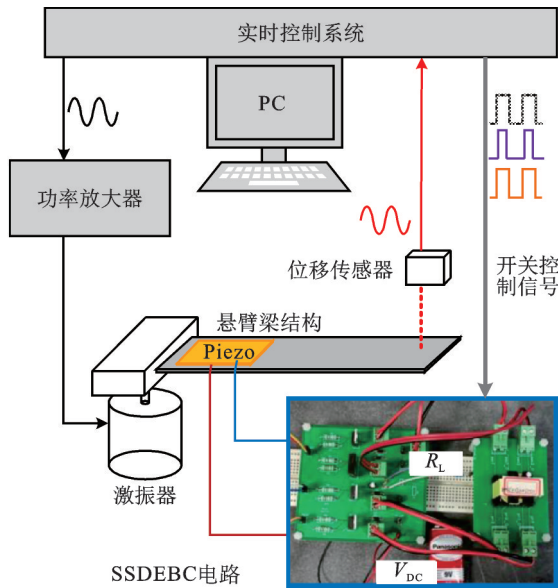


图7 实验系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental system

2.2 系统模型的参数

实际的结构振动远比所等效的理想模型复杂,压电耦合结构的控制参数若直接通过压电元件、悬臂梁本身的结构尺寸和材料参数推导,将会出现较大的误差。因此先对如表1所示的系统参数进行测量,再根据下式计算得到所需的系统参数:

$$\alpha = \beta C_0, K = \alpha \beta \frac{f_s^2}{f_o^2 - f_s^2}, M = \frac{K}{4\pi^2 f_s^2}, D = \frac{2\pi M f_o}{Q_m} \quad (21)$$

表1 基于压电悬臂梁结构的测量参数

Tab. 1 Measured parameters based on the piezoelectric cantilever beam structure

参数名称	符号/单位	数值
压电短路固有频率	f_s/Hz	28.95
压电开路固有频率	f_o/Hz	29.06
结构开路机械品质因子	Q_m	19
开路压电电压与梁自由端位移之比	$\beta/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	5900
压电元件等效电容	C_0/nF	100

通过式(21)计算得到的参数如表2所示。

表2 推导出的系统参数

Tab. 2 Derived parameters of the system

符号/单位	数值
$\alpha/(\text{N}\cdot\text{V}^{-1})$	5.9×10^{-4}
$K/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	457.2
M/g	13.8
$D/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.133

2.3 结果与讨论

图8所示为SSDEBC电路实际工作时压电元件的电压、开关控制信号以及原副边绕组电流的实验波形(图8(a))与局部放大波形(图8(b)和(c))。

能量注入过程如图8(b)所示,振动位移达到最小值之前,能量注入回路开关 S_3 被驱动闭合,电压源 V_{DC} 将电能注入变压器中,此时流经 L_3 的电流为 i_3 。振动位移达到最小值时开关 S_3 断开、 S_2 闭合,变压器中储存的能量通过副边线圈 L_2 注入至压电元件,此时流经压电元件的电流为 i_0 ,压电元件上的电压因振荡以及注入的电能从 V_{Mn} 翻转至 V_{mp} 。

能量提取过程如图8(c)所示,振动位移达到最大值时,开关 S_1 和 S_3 闭合,此时流经压电元件的电流为 i_0 ,压电元件储存的能量通过 L_1 提取到变压器。当线圈 L_4 的电压达到 V_L 时,能量提取回路导通,压电元件开路。此时电流 i_0 降至0,压电元件的电压从 V_{Mp} 翻转至 V_{mn} 。

图9给出了翻转因子 λ_p 和 λ_n 随 τ 和 R_L 变化的理论曲线以及实验结果图。其中 λ_n 随 R_L 变化曲线理论与实验比较符合, λ_p 随 τ 变大误差变大。出现该现象的主要原因是结构机械品质因子 Q_m 的参数识别误差较大,影响了计算结果;另外也有变压器漏感损耗,压电元件漏电流损耗等因素的影响。值得说明的是,变压器的匝数比 m 同样会影响翻转因子 λ_n ,但考虑到实际情况,本实验仅考虑了匝数比 m 等于0.063这一种情况。

图10和图11分别给出了固定 R_L 为6.8 k Ω ,调节注能开关的时间系数 τ ,以及固定 τ 为7.56,改变负载 R_L 的压电电压波形和结构振动衰减的阻尼比绝对值。可以看到,当某个方向(正、负向翻转后的电压 V_{mn} 或 V_{mp})的电压值保持不变时,另一方向的电压绝对值越大,压电的工作电压变化范围就越大,即非对称工作电压系数越大,此时对应的结构衰减阻尼比的绝对值也越大。该结果形象地表明了非对称工作电压能够优化结构中压电元件的机电耦合效率,充分挖掘其机电转换潜能,提高振动控制效果。

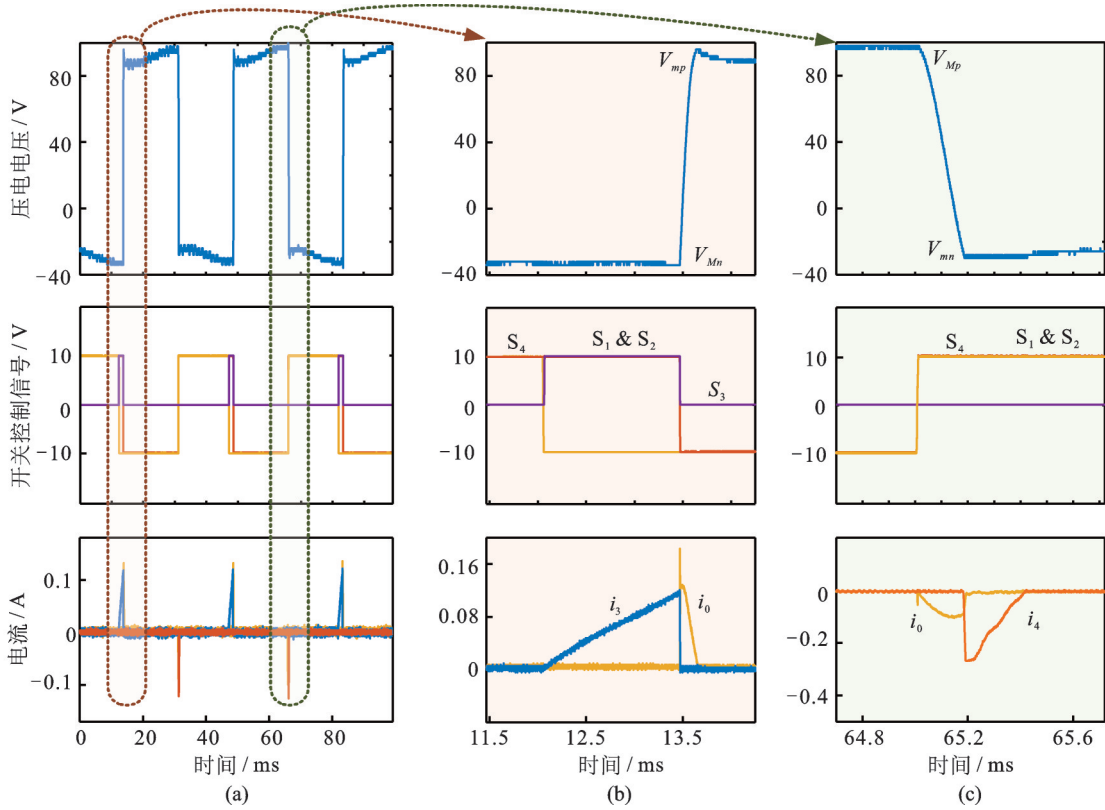


图8 SSDEBC控制电路中各部分的实验波形图

Fig. 8 Experimental waveforms of each part of the SSDEBC control circuit

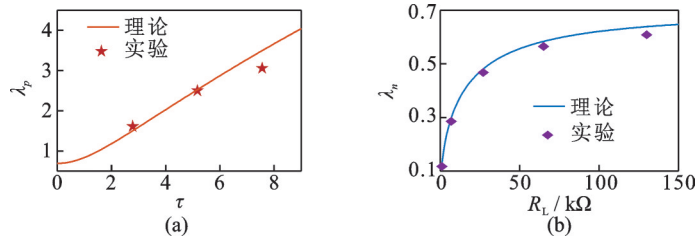


图9 不同参数 τ, R_L 下的翻转因子

Fig. 9 The flip factors under different parameters of R_L and τ

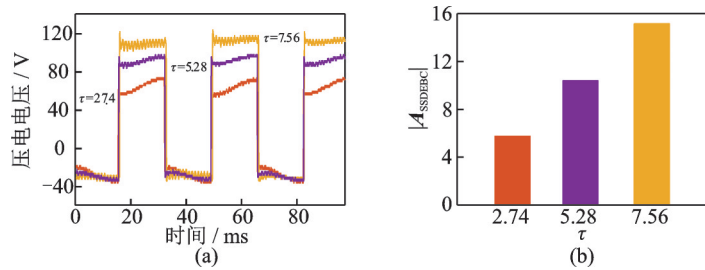


图10 不同参数 τ 下的电压波形和阻尼比绝对值

Fig. 10 The voltage waveforms and absolute value of damping ratio under different parameters of τ

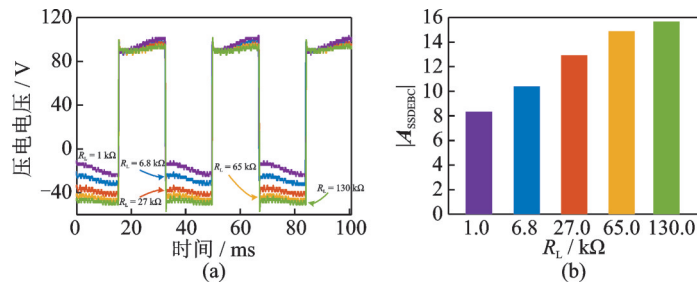


图11 不同参数 R_L 下的电压波形和阻尼比绝对值

Fig. 11 The voltage waveforms and absolute value of damping ratio under different parameters of R_L

3 结 论

本文借鉴了压电分流阻尼电路和反激变压器的工作原理,将SSDEI和OSECE技术巧妙地结合在一起,当结构中压电电压正向翻转时利用SSDEI技术注能,负向翻转时利用OSECE技术提取电能,有效提高了压电振动系统的能量利用效率,实现了压电工作电压的非对称翻转。该新型压电能量操控技术被命名为SSDEBC技术,即基于压电能量双向操控的SSD技术。

理论与实验结果皆表明,SSDEBC技术能够实现压电元件工作电压的非对称翻转,且相较于压电电压对称控制具有更好的振动控制效果。其在技术实现上可以通过改变注能开关的时间系数 τ 和负载电阻 R_L 达到目的。由于这两种参数在实际电路中较容易实现,因此最终SSDEBC技术可以实时自适应调节压电非对称工作电压,提高了控制系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 易果. 压电纤维复合材料在舰船基本结构振动主动控制上的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
YI Guo. Application of piezoelectric fiber composite material in active vibration control of ship's basic structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [2] 张琛, 熊庆, 汲胜昌, 等. 基于压电材料的变压器振动能量收集装置研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 173-178.
ZHANG Chen, XIONG Qing, JI Shengchang, et al. Research on transformer vibration energy harvesting device based on piezoelectric material[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 173-178.
- [3] Yan B, Wang K, Hu Z F, et al. Shunt damping vibration control technology: a review[J]. Applied Sciences, 2017, 7(5): 494.
- [4] Behrens S, Fleming A J, Moheimani S O R. Vibration isolation using a shunted electromagnetic transducer [C]. 2004 Symposium on Smart Structures and Materials, SPIE. San Diego, CA, United States, 2004, 5386: 506-515.
- [5] Cheng T H, Wang X L, Oh I K. Electromagnetic multi-mode shunt damper for flexible beams based on current flowing circuit[C]. Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, SPIE. Weihai, China, 2009: 7493.
- [6] Bo Y, Zhang X J, Niu H P. Design and test of a novel isolator with negative resistance electromagnetic shunt damping[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(3): 035003.
- [7] Zhang X J, Niu H P, Bo Y. A novel multimode negative inductance negative resistance shunted electromagnetic damping and its application on a cantilever plate [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(10): 2257-2271.
- [8] Yan Bo, Zhang X N, Luo Y J, et al. Negative impedance shunted electromagnetic absorber for broadband absorbing: experimental investigation[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 125044.
- [9] Kozłowski M V, Cole D G, Clark R L. A comprehensive study of the RL series resonant shunted piezoelectric: a feedback controls perspective[J]. Journal of Vibration and Acoustics: Transactions of the ASME, 2011, 133(1): 011012.
- [10] Sun H, Yang Z C, Li K X, et al. Vibration suppression of a hard disk driver actuator arm using piezoelectric shunt damping with a topology-optimized PZT transducer[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(6): 065010.
- [11] Guo K M, Jiang J. Independent modal resonant shunt for multimode vibration control of a truss-cored sandwich panel[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2014, 2(3): 326-334.
- [12] He H, Tan X, He J C, et al. A novel ring-shaped vibration damper based on piezoelectric shunt damping: theoretical analysis and experiments[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 468: 115125.
- [13] Richard C, Guyomar D, Audigier D, et al. Semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device[C]. 1999 Symposium on Smart Structures and Materials, SPIE. Newport Beach, CA, United States, 1999, 3672: 104-111.
- [14] Richard C, Guyomar D, Audigier D, et al. Enhanced semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device on an inductor[C]. SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Newport Beach, CA, United States, 2000, 3989: 288-299.
- [15] Lefeuvre E, Badel A, Petit L, et al. Semi-passive piezoelectric structural damping by synchronized switching on voltage sources[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(8-9): 653-660.
- [16] Badel A, Sebald G, Guyomar D, et al. Piezoelectric vibration control by synchronized switching on adaptive voltage sources: towards wideband semi-active damping [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(5): 2815-2825.

- [17] Ji H L, Qiu J H, Cheng J, et al. Application of a negative capacitance circuit in synchronized switch damping techniques for vibration suppression [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2011, 133(4): 041015.
- [18] Tang W, Wang L B, Ren Y M, et al. Design and experimental analysis of self-sensing SSDNC technique for semi-active vibration control [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(8): 085028.
- [19] 张锦. 基于压电纤维复合材料的柔性结构振动半主动控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
ZHANG Jin. Semi active vibration control of flexible structures based on piezoelectric fiber composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [20] 刘轩, 吴义鹏, 裘进浩, 等. 基于反激变压器的压电振动能量双向操控技术[J]. *力学学报*. 2021, 53(11): 3045-3055.
Liu Xuan, Wu Yipeng, Qiu Jinhao, et al. Bidirectional piezoelectric vibration energy control technology based on flyback transformer[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(11): 3045-3055.
- [21] Wu Y P, Badel A, Formosa F, et al. Piezoelectric vibration energy harvesting by optimized synchronous electric charge extraction [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(12): 1445-1458.
- [22] Wu Y, Badel A, Formosa F, et al. Self-powered optimized synchronous electric charge extraction circuit for piezoelectric energy harvesting [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(17): 2165-2176.
- [23] 张宸宇, 袁宇波, 袁晓冬, 等. 电力电子变压器直流端口传感器位置选取方法[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(4): 22-27.
Zhang Chenyu, Yuan Yubo, Yuan Xiaodong, et al. Selection of DC port sensor position for power electronic transformer [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(4): 22-27.
- [24] 骆海涛, 吴星元, 刘广明, 等. 智能压电材料MFC在太阳电池阵帆板上的主动抑振研究[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(2): 536-543.
LUO Haitao, WU Xingyuan, LIU Guangming, et al. Active vibration suppression of intelligent piezoelectric material MFC on solar array panel [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(2): 536-543.

High energy efficiency semi-active vibration control approach based on bidirectional piezoelectric effects

YU Li-yuan, WU Yi-peng, LIU Xuan, QIU Jin-hao, JI Hong-li

(State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Synchronous Switch Damping (SSD) technology based piezoelectric semi-active vibration control approach can suppress the structural vibration efficiently with relative lower energy consumption, through using the synchronous switches and the equivalent LC oscillators in control circuits, synchronously inverting the piezoelectric voltage and making it always in the same phase with the structural vibration speed. However, the allowable operation voltage ranges of common piezoelectric driving elements, such as piezoelectric stacks and macro fiber composites, are asymmetric. Hence the symmetrical inversion of SSD approaches is hard to make full use of the electromechanical conversion performance of piezoelectric elements. Therefore, this paper proposes a novel SSD approach based on the bidirectional piezoelectric effect, which maximizes the energy efficiency of the control system and fully matches the electromechanical conversion potential of piezoelectric elements. The approach is realized through the operation of energy injection when the piezoelectric voltage is positively inverted and energy extraction when it is negatively inverted. The working principle of the proposed SSD method is introduced, the vibration attenuation model of the piezoelectric structure under the asymmetric inversion condition is derived, the practical asymmetric inverted SSD control circuit is implemented and the all the results are validated by the experiments. The obtained results show that the proposed SSD method can adaptively adjust the positive and negative inversion factors of the piezoelectric voltage by controlling the duty cycle of the energy injection switch and the equivalent load of the energy absorbing circuit, finally achieve a high energy-efficient structural vibration attenuation effect.

Key words: vibration control; vibration energy harvesting; synchronized switch damping; piezoelectric; flyback transformer

作者简介: 虞丽媛(1998-), 男, 硕士研究生。电话: 15605198773; E-mail: 1162384491@qq.com。

通讯作者: 吴义鹏(1986-), 男, 博士, 副教授。电话: 18651838621; E-mail: yipeng.wu@nuaa.edu.cn。