

一种压电材料的新型线性高电压驱动器

张治君¹,徐明龙²,邵 闯¹

(1. 中国飞机强度研究所,陕西 西安 710065;2. 西安交通大学 工程力学系,陕西 西安 710049)

摘 要:提出一种压电材料的新型线性高电压驱动器的研制方案,驱动器包括两大部分,即大功率、可对压电作动器进行正负向电压加载的闭环倍压放大式线性高电压驱动器;基于固态继电器的 ON/OFF 驱动器,内含压电作动器的电压加载控制模块和快速放电控制模块。该驱动器线性输出电压为直流电压(-220~+220 V),输出频率可达 3 kHz。

关键词:压电作动器;高压;闭环;线性;驱动器

中图分类号:TN722.1;TN384 **文献标识码:**A

A New Linear Driving Power Supply for Piezoelectric Material

ZHANG Zhijun¹, XU Minglong², SHAO Chuang¹

(1. Avic Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. Dept. of Engineering Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new linear driving power supply for piezoelectric material was designed to drive piezoelectric actuator. It was composed by two parts: driving power supply; ON/OFF driver based on SSR, which had both driving control module and rapid discharge module. The driving power supply could provide both positive voltage and negative voltage for the piezoelectric material at a linear range from -220 V to 220 V DC, while the maximum frequency of operation could be 3 kHz.

Key words: piezoelectric actuator; high voltage; closed loop; linear; driving power supply

0 引言

任何压电材料装置或压电材料器件的使用,都需要驱动器。压电材料的驱动器从原理上可分为电压控制型和电荷控制型^[1-3]。电压控制型驱动器主要有两种形式:

1) 基于直流变换器原理的开关式驱动器,具有电源功率损耗小,体积小和效率高等优点,但电压输出波纹较大,频响范围也较窄。

2) 直流放大式驱动器的频响范围较宽,具有较好的发展前景。本文基于电压控制型驱动器中的直流放大式驱动器原理,利用闭环倍压放大的思路,提出了一种新型的压电材料线性高电压驱动器的设计方案及一种基于固态继电器的 ON/OFF 驱动器的设计方案,并实际应用于一种压电作动器的驱动。

1 压电材料直流放大式驱动器

图 1 为压电材料直流放大式驱动器的电路原理

图。图中, V_{in} 为输入端输入的信号电压,经过电路中的前端放大、高压放大后,在 V_{out} 端输出放大后的高压用以驱动压电材料。直流量式驱动器对输入端输入信号电压的放大倍数等于电路中的电阻 R_f 和 R_1 之比 (R_f/R_1)。驱动电路输出电压的幅值及频率范围由电路的放大倍数和有效输入电压信号的幅值范围决定。

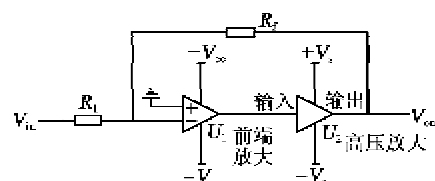


图 1 直流放大式驱动电路示意图

2 闭环倍压放大式压电材料线性高压驱动器

为了提供更大的加载电压,并实现对压电材料从负电压到正电压的双向电压加载,基于直流放大

收稿日期:2011-06-22

作者简介:张治君(1979-),男,甘肃省兰州市人,工程师,博士,主要从事智能材料、结构动态疲劳技术的研究。

式驱动器原理,提出了一种新型的闭环倍压放大式压电材料线性高电压驱动器的设计方案,可对输入电压信号进行闭环差分倍压放大,得到2倍于单路直流放大式驱动器的输出电压。图2为该闭环倍压放大式驱动器的电气原理图,该驱动器首先包含一路负向直流高压放大电路,然后包含一路正向直流高压放大电路。

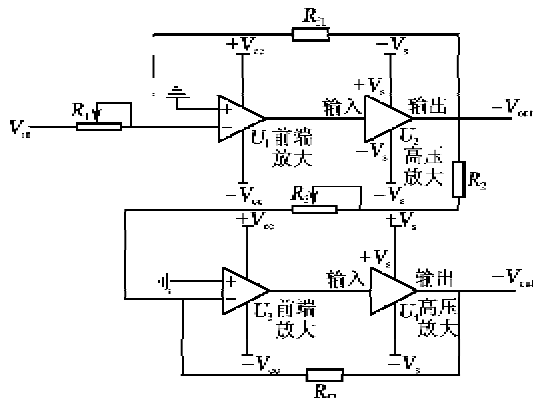


图2 闭环倍压放大式驱动器示意图

驱动器的 V_{in} 输入端输入信号电压是经负向直流高压放大电路输出放大后的负向高压。输出的负向高压分为两路,即一路通过该闭环倍压放大式驱动器的负向高压输出端 $-V_{out}$ 输出,一路进行降压处理后作为正向直流高压放大电路的输入信号电压,经过正向直流高压放大电路放大后,通过正向高

压输出端 $+V_{out}$ 输出。驱动器负向高压输出端输出的负向高压与驱动器正向高压输出端输出的正向高压为同步无相差的输出。图3为闭环倍压放大式压电材料线性高电压驱动器的电气原理图,设定信号电压输入端 V_{in} 输入直流电压信号 $-5 \sim +5$ V,经过前段放大、高压放大,从正负高压输出端同步无相差的输出正向高电压 $+V_{out}$ 和负向高电压 $-V_{out}$,实现对压电材料从负电压到正电压的双向电压加载。驱动器前端集成运算放大器选用 TL082,后端高压放大器选用 PB58,驱动器内部通过 TL082 驱动 PB58 工作。TL082 是一种通用的 J-FET 双运算放大器,最大工作电压 ± 18 V,具有较高的输入阻抗,内建频率补偿电路,输出设有短路保护电路。PB58 是美国 APEX 生产的高电压线性功率放大器,其输入电压范围为 ± 15 V,工作参考电压实际最大可设 ± 150 V。PB58 输出电压范围为 $-15 \sim +150$ V,持续输出电流可达 1.5 A。PB58 元件需要在其 1,2 号引脚间接入一个限流电阻 R_{CL} ,在其 7,8 引脚间串接电阻 R_C 和电容 C_C 构成相位补偿网络。 $R_{CL} = 0.7 / (I_{CL} - 0.016)$,一般取 $1.3 \sim 30 \Omega$ (其中 I_{CL} 为 PB58 的 CL 管脚处的电流值大小)。相位补偿网络中 $R_C = 27 \text{ k}\Omega$, $C_C = 22 \text{ pF}$ 。为了避免寄生振荡现象的出现, R_C 应尽量紧靠 PB58 的 7 引脚, C_C 应尽量靠近 PB58 的 8 引脚。

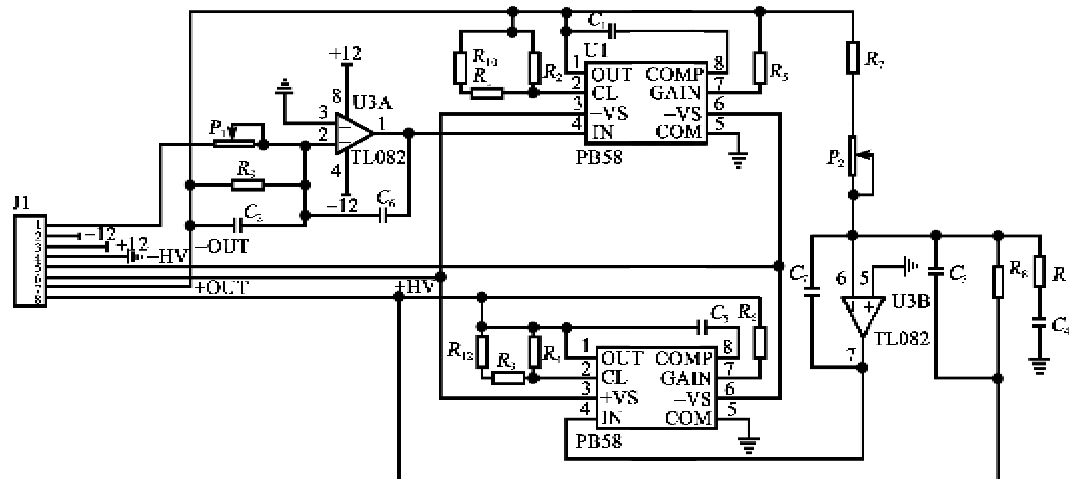


图3 闭环倍压放大式驱动器电气原理图

运算放大器的幅频曲线只有1个极点,在纯电阻反馈电路中不会产生自激,但实际应用中,由于电路本身和电路所带各种负载的特性,很可能会使运算放大器的幅频曲线产生新的反馈极点,从而使电路产生自激振荡。所以在这种闭环倍压放大式驱动

器的设计中,在2个运算放大器 TL082 的输入端和输出端之间均接入一个 22 pF 的补偿电容,用以消除运算放大器产生的自激现象;在电路中的正向高压放大电路的信号电压输入端通过一个电阻和一个电容串联来接地,可有效防止此输入端产生电路振

荡；在负向信号电压的输入端和电路负向高压的输出端接入一个电容 C_2 ，与电阻 R_0 构成低通滤波电路，其转角频率 $f=1/(2\pi R_0 C_2)$ ；电路的正向高压放大电路的信号电压输入端与正向高压输出端之间并联的 C_3 和 R_8 构成低通滤波器，其 $f=1/(2\pi R_8 C_3)$ 。 C_2 、 C_3 同时也作为补偿电容，消除电路中可能产生的自激现象。该驱动器对其输入端输入的信号电压的放大倍数，取决于电阻 R_8 与电位器 P_2 的实际接入阻值的比值。这种闭环倍压放大式压电材料线性高电压驱动器可实现较高频的同频同相位、同幅值、正负反向的电压输出。对这种闭环倍压放大式压电材料线性高电压驱动器进行了实验测试，如图 4 所示，加载 $0.1 \mu\text{F}$ 的容性负载，4 条曲线 B、C、D、E 分别代表驱动器的正向输出端设定输出电压 40 V、60 V、100 V、110 V，即对应闭环倍压放大式驱动器输出电压 80 V、120 V、200 V、220 V 时，驱动器的正向输出端的幅频曲线。

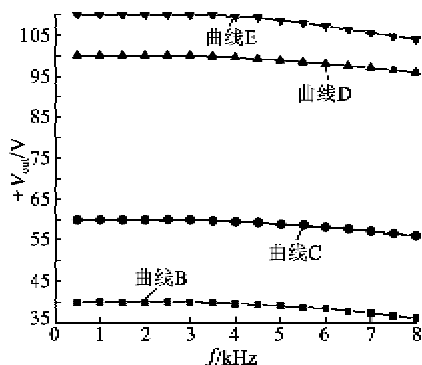


图 4 驱动器正向输出端 $0.1 \mu\text{F}$ 容性负载试验

由图 4 可知，该驱动器在 $0.1 \mu\text{F}$ 级别的容性负载下，最大有效工作频率为 3 kHz，驱动器正向高压输出端输出电压最大值为 110 V，此时，驱动器负向高压输出端同步无相差输出 -110 V 的电压。利用差分被压放大的方式，该闭环倍压放大式驱动器最大电压线性输出范围为 $-220 \sim +220 \text{ V}$ 。实际测试 $1 \mu\text{F}$ 级别的容性负载下，该驱动器的有效工作频率也可达到 1 kHz，而压电堆正是这个级别的容性负载。

3 基于固态继电器的 ON/OFF 驱动器

压电作动器的作动元件压电堆是利用压电材料的逆压电效应进行作动，而压电堆本身为容性负载，可看作是很多个电容器并联在一起的电容，其作动过程存在一个充电和放电的过程。对于压电堆的充电过程，功率较大的驱动器可有效对其快速充电；对

于压电堆的放电过程，须设计一个快速放电电路对作动器的作动元件压电堆进行快速放电。对压电陶瓷步进蠕动式作动器的驱动器的电压加载控制电路的设计性能要求为：

- 1) 可高频、高速、稳定的按控制要求关断、开通高压直流的输出。
- 2) 关断高压直流时，可快速对作动器的各个压电堆进行有效地放电。

提出一种利用固态继电器来高速通断加载在压电堆两端的直流高压的驱动器设计方案。在电路中每个压电堆的加载控制通过两个固态继电器来实现，一路固态继电器负责按控制时序要求开通、关断加载在压电堆上的电压，即压电堆电压加载控制模块；另一路固态继电器与压电堆并联，负责按控制时序要求对压电堆进行快速放电，即压电堆快速放电模块。放电固态继电器其输出端与压电堆并联，在控制加载电压的固态继电器关断，压电堆进入掉电状态的同时，在极短的时间内导通（如 0.1 ms 内），使压电堆瞬时短路，达到使压电堆迅速放电的目的后迅速关断该固态继电器，压电堆随即等待下一个加载时序。

压电陶瓷步进蠕动式作动器一般由 3 块压电堆构成，2 块嵌位压电堆 A、C 和 1 块驱动压电堆 B^[4]。针对压电陶瓷步进蠕动式作动器，设计了一种基于固态继电器的 ON/OFF 驱动器。图 5 为其电气原理图。固态继电器 A、B、C 负责按控制时序要求分别高速关断、开通加载在嵌位压电堆 A、驱动压电堆 B、嵌位压电堆 C 上的直流高压，并联放电固态继电器 A'、C'、B' 负责按控制时序要求对嵌位压电堆 A、嵌位压电堆 C、驱动压电堆 B 进行快速放电。为

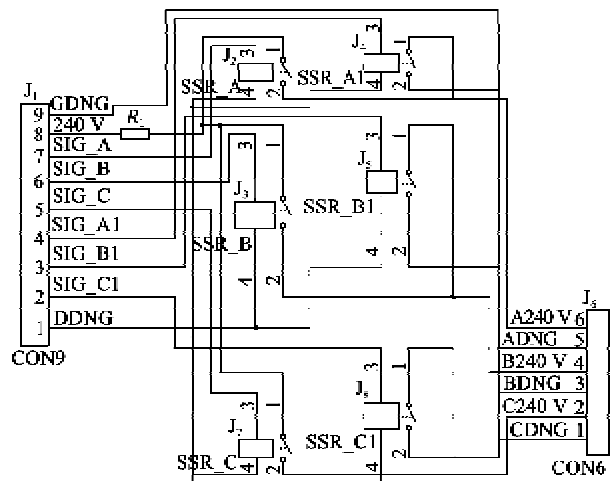


图 5 固态继电器放电电路电气原理图

为了防止高压毁坏压电堆和固态继电器,在电路中使用了压敏电阻 R_1 为 270 V。驱动器选择固态继电器 D0140-14 A,工作电压为 3~14 V 的直流电压,最高可控电压为 400 V 的直流电压,导通时间 < 0.05 ms,关断时间 < 0.1 ms。

设压电作动器向右步进,而压电作动器向左运动的情况,只需将 2 个嵌位压电堆对应的控制时序互换即可。设 t 为初始时刻到压电堆第一次卸载所需时间; t_{off} 为固态继电器关断所需时间; t_{on} 为固态继电器导通所需时间; t_3 为固态继电器彻底关断到放电固态继电器开始导通之间的时间间隔; t_4 为放电继电器瞬时导通持续时间。已知 $t_{\text{on}} = 0.05$ ms, $t_{\text{off}} = 0.1$ ms, T 为压电堆电压加载控制波形的周期,选择 $t_3 = 0.1$ ms, $t_4 = 0.01$ ms。

1) 压电堆 A 对应的固态继电器 A' 的控制波形的特性。已知压电堆 A 的电压加载波形的占空比为 66.7%,初始相位为 60° ^[4],压电堆 A 的并联放电固态继电器 A' 的控制波形的占空比为

$$(t_{\text{on}} + t_4 + t_{\text{off}}) / T = 0.16 / T \quad (1)$$

初始相位为

$$[1 - (0.5T + t_{\text{off}} + t_3) / T] \times 360 = 180 - 39.6 / T \quad (2)$$

2) 压电堆 B 对应的固态继电器 B' 的控制波形的特性。已知压电堆 B 的电压加载波形的占空比为 50%,初始相位为 -60° ^[4],压电堆 B 的并联放电固态继电器 B' 的控制波形的占空比见式(1)。其初始相位为

$$[1 - (2T/3 + t_{\text{off}} + t_3) / T] \times 360 = 120 - 39.6 / T \quad (3)$$

3) 压电堆 C 对应的固态继电器 C' 的控制波形的特性。已知压电堆 C 的电压加载波形的占空比为 66.7%,初始相位为 -120° ^[5],压电堆 C 的并联放电固态继电器 C' 的控制波形的占空比见式(1)。其初始相位为

$$-(t_{\text{off}} + t_3) \times 360 / T = -39.6 / T \quad (4)$$

若取 $T = 10$ ms,即压电作动器的工作频率为 100 Hz,压电作动器向右运动时,放电固态继电器 A'、B'、C' 的控制波形的占空比均为 1.6%,初始相位分别为 176.04° , 116.04° , -3.96° 。

实际实验中,固态继电器 D0140-14A 作为放电固态继电器时,它无法承受较大的耗散功率,极易被烧毁,使作动器工作频率无法提高。考虑换用耗散功率较大的固态继电器。重新选择带散热底座的固态继电器 GZ10-W,最大工作电流 10 A,最大输出电压 220 V。

4 线性高电压驱动器的性能测试

设蠕动步进式压电作动器向右运动,利用 LabVIEW 程序构建虚拟波形发生器,输出两路方波波形,一路为压电作动器右侧的嵌位压电堆 C 的加载控制方波波形,一路为压电堆 C 的并联放电固态继电器的控制方波波形。压电堆由闭环倍压放大式驱动器提供压电堆 C 所需的 200 V 直流电压。嵌位压电堆 C 型号为 PTBS200/5 mm \times 5 mm \times 6 mm,加载控制波形占空比 66.7%,相位 -120° ,幅值 10 V,频率 400 Hz。由式(5),(6)计算得到并联放电固态继电器 C' 的控制波形占空比 6.4%,相位 -15.84° ,幅值 10 V,频率 400 Hz。加载效果由高压示波器显示,直线为闭环倍压放大式压电材料线性高压驱动器输出的电压波形,曲线为压电堆 C 实际加载的电压。将曲线波形向下平移 100 V 的单位,如图 6 所示。由图可知,闭环倍压放大式压电材料线性高电压驱动器稳定输出 200 V 的直流高压,基于固态继电器的 ON/OFF 驱动器则对压电堆实现了快速的放电,压电堆实现了 400 Hz 驱动频率、200 V 加载电压条件下的高速加载与卸载。说明在该加载范围下,压电材料线性高电压驱动器工作正常,可对压电堆进行高速的加载和卸载。

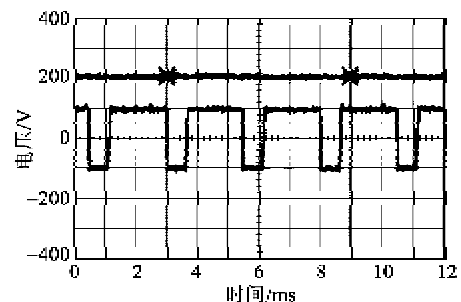


图 6 400 Hz 驱动频率加载试验

5 结束语

压电材料的驱动技术是压电材料推广应用的核心理念之一。本文基于闭环倍压放大的方法,设计了一种闭环倍压放大式压电材料线性高电压驱动器;基于固态继电器,设计了一种 ON/OFF 驱动器。两种驱动器共同组成了一种新型压电材料线性高电压驱动器。实际加载测试中,在 400 Hz 驱动频率下,对压电堆 PTBS200/5 mm \times 5 mm \times 6 mm 实现了良好的驱动。驱动器电路中通过 RC 滤波电路、补偿电容等优化设计,使该驱动器工作稳定,可满足实际研究工作的需要。

(下转第 544 页)