

锆钛酸铅压电陶瓷主动元件在航天 自适应桁架结构中的应用

段 勇 何麟书

(北京航空航天大学宇航学院,北京 100083)

文 摘 阐明了 PZT 压电材料的正、逆压电效应以及相应的压电作动器的机电耦合原理。针对航天自适应桁架结构的特点,运用 PZT 压电作动器进行了振动抑制实验并取得了良好的效果。

关键词 锆钛酸铅,压电作动器,自适应桁架结构,振动抑制

Application of Actuator of Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramics in Aerospace Adaptive Truss Structure

Duan Yong He Linshu

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract As one of the best piezoelectric materials, PZT ceramics is widely used in actuator design and manufacture. This paper demonstrates the positive and negative piezoelectric effect of PZT material, as well as mech-electric coupling principle of relevant piezoelectric actuator. In pertinence to the characters of aerospace adaptive truss structure, PZT piezoelectric actuator is applied in vibration suppression test and favorable results are obtained.

Key words PZT, Piezoelectric actuator, Adaptive truss structure, Vibration suppression

1 引言

大多数航空、航天空间结构,如大型空间站、光学系统、卫星天线、拆装式空间结构及其支承体结构等,通常具有尺寸大、高柔性、低阻尼的特点^[1,2]。而这些航空航天器在轨运行时,不可避免地受到各种扰动,如姿态控制、轨道机动、飞行器停靠对接等,从而引起结构振动甚至导致毁灭性的失控振动。长时间的振动会影响飞行器操作的准确性,以及引起材料疲劳而降低结构的使用寿命。舱体结构的振动不仅会影响内部仪器的正常运行,还会造成工作环境的污染。此外,由于不可避免的制造、装配误差以及温度变化或光照不均匀的影响,将引起结构变形。上述振动和变形往往使所测数据信息不可靠或无效,或导致设备的工作效率降低^[3,4]。因此,结构振动抑制和形状控制技术一直受到飞行器研究和设计

人员的广泛关注,也是长期留轨大型空间飞行器尤其是空间实验室所必须解决的关键技术。传统结构的设计精度不能满足现代空间结构设计的精度要求,自适应结构及其研究正是在这种背景下孕育而生。

主动构件(Active Member)是组成自适应结构中的关键构件,是实现结构控制的作动元件。目前用于主动构件的功能材料主要有压电材料、电致伸缩材料和磁致伸缩材料等^[3,4]。其中锆钛酸铅(PZT)作为性能最好的压电陶瓷之一^[5],因其制造工艺成熟、热稳定性高(居里温度高达380)、成本低的优点,而在主动构件中获得了广泛的应用。本文采用PZT陶瓷制备了主动构件,深入分析了压电弹性体的本构关系和压电主动元件的机电耦合原理。在此基础上探索了PZT

收稿日期:2003-08-04;修回日期:2003-12-08

段勇,1969年出生,博士研究生,主要从事压电材料及自适应结构的研究工作

压电主动元件在航天自适应桁架结构中的应用,并且进行了振动抑制的实验研究^[6,7]。

2 锆钛酸铅陶瓷的压电效应及本构关系

PZT 陶瓷为二元系压电陶瓷,在四方晶相(富钛边)和菱形晶相(富锆边)的相界附近,其耦合系数和介电常数是压电陶瓷中最高的,这是因为在相界附近,极化时更容易重新取向^[5]。其机电耦合系数 k_{33} 可达 0.6,压电常数 d_{33} 可到 $200 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ 。由于 PZT 陶瓷构成的压电元件具有响应速度快、质量轻、频带宽、功耗小等优点,被广泛应用于微位移定位及作动传感器的设计上,也适用于振动主动控制作动器。要将自适应材料用于结构控制,必须首先确定材料的本构关系,即力学量(应力和应变)与电学量(电场强度和电位移)之间的关系式,它们是研究和应用自适应材料的基础。压电材料力学与电学性能之间的相互耦合是由其直接和反向压电效应决定的。

2.1 正压电效应

直接(或正)压电效应指的是作用于材料上的应变可引起材料产生束缚电荷的现象。利用这一特性可以设计自适应结构中的传感器,以实现结构振动或变形的测量。正压电效应的本质是机械作用(应力与应变)引起晶体介质的极化,导致正负电荷的中心产生偏移,使总的电偶极矩发生改变,从而在晶体表面出现了符号相反的束缚电荷。正压电效应的表达式:

$$D = dT \text{ 或 } D = eS \quad (1)$$

式中, D 、 T 、 S 、 d 、 e 分别表示电位移向量、应力向量、应变向量、压电应变常数矩阵、压电应力常数矩阵。

2.2 逆压电效应

反向(或逆)压电效应则是指作用于其上的电势场引起材料产生应变的现象。利用这一特性可以设计自适应结构中的应变作动,以实现结构振动或变形的控制。逆压电效应的产生是由于压电晶体中的正负离子在电场库仑力的作用下,导致晶体产生内应力(压电应力),通过它的作用最终晶体产生宏观变形。逆压电效应的表达式:

$$S = d'E \text{ 或 } T = e'E \quad (2)$$

式中, E 表示电场强度向量。

2.3 压电弹性体本构关系

压电材料的正、逆压电效应,说明在压电弹性体

中电学量和力学量是相互耦合的,这种机电耦合关系可用压电方程表示^[7]:

$$\begin{cases} S = s^E T + d^t E \\ D = dT + \epsilon^T E \end{cases} \quad (3)$$

式中, s^E 、 ϵ^T 分别表示弹性柔度矩阵和介电常数矩阵。

3 压电主动元件的组成及机电耦合原理

3.1 压电堆

单个压电体,无论其几何形状怎样变化,都不能满足实际的工程要求。为了增加位移输出量,需将若干个压电片按照电学上并联,力学上串联的方式进行连接。压电片与导电片间用胶粘接在一起构成压电堆,其结构如图 1 所示。压电堆的设计是压电主动构件设计的基础。在工作状态时,各压电片的工作电压都等于压电堆的外加电压,产生相同的电场强度,因此它产生的同方向的压电变形可以叠加形成总位移输出。

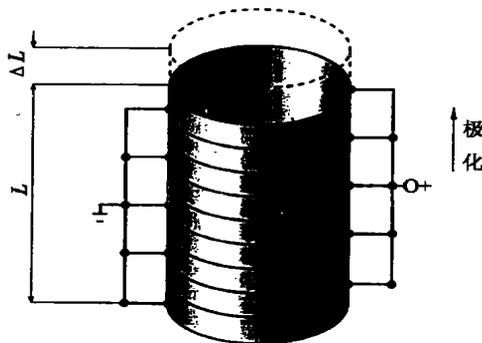


图 1 压电堆的结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of piezoelectric stack

3.2 压电主动构件

主动构件的设计应考虑三个方面的要求:作动位移、输出力和构件的有效力学刚度。我们设计的压电主动构件结构如图 2 所示。压电主动构件由压电堆、运动部件、预压力装置和外壳四部分组成。为了保证压电堆各压电片间不存在间隙,必须使压电堆始终处于受压状态,因此在压电堆一端设计了预压装置。它由预压弹簧(一种弹性垫片)和调力螺母及锁紧螺母组成,通过调节调力螺母,可以达到调整压电堆内预压力大小的目的。预压力的大小决定了压电堆的工作极限。主动构件所有金属部件都采用

1Cr18Ni 不锈钢材料加工而成,保证作动器具有足够的强度和刚度,而且具有小的热变形系数和较快的波传导速度。

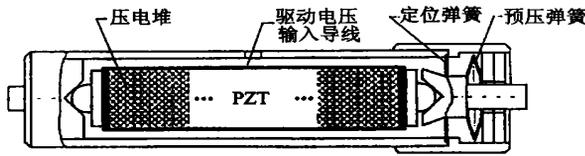


图2 压电主动构件结构图

Fig. 2 Structure schematic of piezoelectric actuator

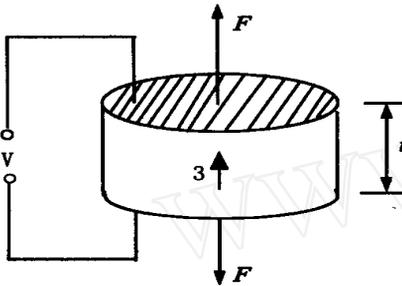


图3 单个压电体物理模型

Fig. 3 Single piezoelectric material model

对于杆型压电作动器,其电力学作用关系主要发生在3轴(即承力方向,也是压电陶瓷的极化方向)。假定单个压电体上在与3轴垂直的平面上所受压力和电势分布是均匀的,当3轴方向受到外力 F 和电压 V 作用时(如图3所示),其机电耦合关系式可由式(3)推出:

$$S_3 = s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (4-1)$$

$$D_3 = d_{33} T_3 + \frac{T}{33} E_3 \quad (4-2)$$

式中, $T_3 = \frac{F}{A}$, $E_3 = \frac{V}{t}$ 。 A 是单个压电体的横截面积; t 是其轴向长度; 下标3表示轴向方向。

考虑单个压电体3轴方向的应变和电势沿长度 t 是均匀分布的,则对应第 i 片单个压电体的输出位移 i 和横截面上的等效电荷 Q_i 可由式(4)推出:

$$i = S_3 t = \frac{F}{K_i} + d_{33} V \quad (5-1)$$

$$Q_i = D_3 A = d_{33} F + C_i V \quad (5-2)$$

式中,压电片轴向等效刚度 $K_i = \frac{C_{33}^E A}{t}$; 压电片弹性模量 $C_{33}^E = \frac{1}{s_{33}^E}$; 压电片等效电容 $C_i = \frac{E_{33} A}{t}$ 。在理想

情况下,各片的输出位移 i 在幅值和相位上都是相同的,运用线性叠加原理,可得压电堆的作动位移、作动电荷量 Q 与作动力 F 、作动电压 V 的机电耦合方程:

$$i = \sum_{i=1}^n i_i = n \cdot \left(\frac{F}{K_i} + d_{33} V \right) = \frac{F}{K_s} + d_s V \quad (6-1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = n Q_i = n \cdot (d_{33} F + C_i V) = d_s F + C_s V \quad (6-2)$$

式中, n 、 K_s 、 d_s 、 C_s 分别是压电堆的压电片数、等效力学刚度、等效压电常数和等效电容。

4 自适应桁架结构主动控制实验的研究

三棱柱桁架是一种仿半刚性太阳帆板中间龙骨结构的桁架,柔性较大^[8]。针对压电主动构件机电耦合原理,设计了一个如图4所示的原始复合桁架结构。桁架总高2.86m,每跨为等边三棱柱,边长为260mm,共11跨。桁架由节点和杆件组成。

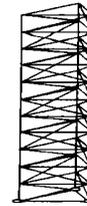


图4 实验用自适应桁架结构

Fig. 4 Adaptive truss structure for experiment

利用上述自适应桁架结构,基于速度反馈进行振动抑制,进行了随机冲击振动的抑制实验。

自适应桁架结构中压电主动构件两端节点的相对速度可表示为:

$$\{ \dot{u} \} = B \{ \dot{x} \} \quad (7)$$

式中, B 是压电主动构件的单元位置矩阵; $\{ \dot{x} \}$ 是结构节点位移向量。

振动控制采用同位直接输出速度反馈,主动控制力 $\{ F_c(t) \}$ 表示为:

$$\{ F_c(t) \} = - [G] \{ \dot{u} \} \quad (8)$$

式中, $[G]$ 为增益矩阵。

自适应桁架结构的机电耦合有限元模型为^[9]:

$$M \{ \ddot{x} \} + C \{ \dot{x} \} + K \{ x \} = \{ F_e \} + B \{ F_c(t) \} \quad (9-1)$$

$$\{F_c(t)\} = \text{diag}(C_z d_{\text{eff}})\{V\} + \text{diag}(k_z d_{\text{eff}})\{V\} \quad (9-2)$$

式中, M 、 C 、 K 分别是结构系统的质量矩阵机电耦合阻尼矩阵、机电耦合刚度矩阵, F_c 、 $F_c(t)$ 分别是压电主动构件产生的控制力向量和外激励力向量, C_z 、 K_z 、 d_{eff} 、 $\{V\}$ 分别是压电主动构件的机电耦合阻尼矩阵、机电耦合刚度矩阵、等效位移压电系数和驱动电压向量。

由式(8)确定控制力值,可以推出式(9-2)所需的控制电压大小,从而建立速度反馈控制法中电压与作动力的关系。

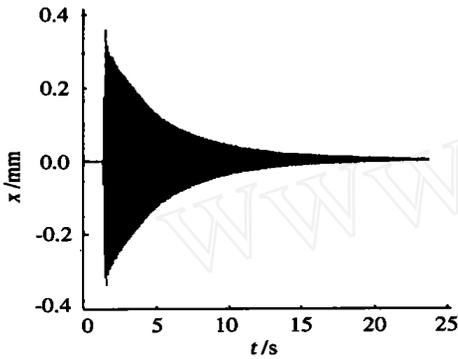


图5 随机冲击振动下不受控的振动图

Fig.5 Uncontrol station of arbitrary impact vibration

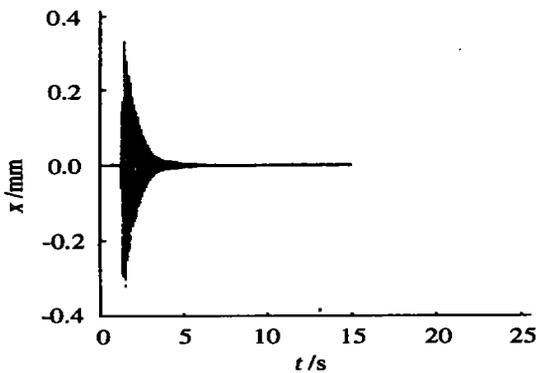


图6 随机冲击振动下受控的振动图

Fig.6 Control station of arbitrary impact vibration

当激励器输入电压为零时,用力锤沿着与两个

控制作动器所在平面垂直的方向进行敲击,测得结构不受控与受控情况下的振动信号如图5、图6所示。从实验结果图可知,在受控条件下,振幅下降到最大振幅的10%所需时间为不受控时的17.4%;下降到最大振幅的5%所需时间为不受控的16.5%。由此可见,利用PZT压电作动器制备的自适应桁架结构具有良好的振动抑制效果。

5 结论

在实验室条件下,基于速度反馈,进行的自适应桁架结构随机冲击振动抑制实验结果表明:振动响应得到抑制,取得良好的控制效果。这将为PZT压电陶瓷在自适应桁架结构的振动控制应用打下坚实的基础。

参考文献

- 1 Swanson P N et al. System concept for a moderate cost Large deployable reflector (LDR). *Optical Engineering*, 1986; 25 (9): 1045 ~ 1054
- 2 Fanson J L, Anderson E H et al. Active structures for use in precision control of large optical systems. *Optical Engineering*, 1990; 29(11): 1320 ~ 1327
- 3 Miura K. Adaptive structure concept for future space application. *AIAA Journal*, 1988; 26(8): 995 ~ 1002
- 4 Fanson J L, Garba J A. Experimental studies of active members in control of large space structures. In: *Proceedings of 29th AIAA SDM Conference*, AIAA - 88 - 2207, 1988: 9 ~ 17
- 5 关振铎, 张中太, 焦金生. 无机材料物理性能. 北京: 清华大学出版社, 1992: 287 ~ 374
- 6 Wada B K. Adaptive structures: an overview. *Journal of Spacecraft & Rocket*, 1990; 27(3): 330 ~ 337
- 7 王矜奉, 姜祖桐, 石瑞大. 压电振动. 北京: 科学出版社, 1989: 19
- 8 李俊宝. 智能桁架结构设计、建模与阻尼控制的理论和实验研究. 南京航空航天大学博士学位论文, 1996: 26
- 9 自适应结构技术研究. 中国国防科学技术报告, 北京航空航天大学, 2002: 57

(编辑 李洪泉)