

叠堆型压电陶瓷驱动器的耦合模态分析*

沈晓晨, 王志军

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要:为了研究压电陶瓷驱动器的驱动性能,分析了以PZT-5H为驱动元件的叠堆型驱动器,采用简化的等效器件建立了电学模型。基于压电陶瓷材料的机电耦合特性运用ANSYS有限元分析软件对叠堆型驱动器进行了计算分析,得出输入电压与输出位移呈近似线性关系,通过控制压电陶瓷两端电压来控制其位移。仿真结果验证了此方案的有效性和可行性。该驱动器在自适应弹药上具有潜在的应用价值,可为弹头的偏转驱动装置设计提供参考。

关键词:叠堆型压电陶瓷;驱动器;模态分析;耦合

中图分类号:TJ410.37 **文献标志码:**A

Coupling Modal Analysis about Stack-type Piezoelectric Actuator

SHEN Xiaochen, WANG Zhijun

(School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A stack-type of actuator with PZT-5H as actuate element was presented. To study its driving performance characteristics of piezoelectric ceramic actuators, an electrical analysis model using equivalent structure was built. Based on the electromechanical coupling characteristics of piezoelectric ceramic materials, the numerical calculation on stack-type actuator was carried out with analysis of FEA software, the relationship nearly linear between the input voltage and the output displacement was obtained, which controlled the displacement by commanding both ends of voltage of piezoelectric ceramic. The result shows that the correction project is effective and feasible. The actuators have potential value in application for adaptive ammunition, also can provide the reference for the actuators used to drive the warhead.

Keywords: stack-type piezoelectric ceramic; actuator; modal analysis; coupling

0 引言

提高弹药命中精度是现代战争面临的重要难题,目前各国研制了很多自适应弹药如身管发射自适应弹药、增程自适应弹药、脉冲控制的自适应弹丸^[1]等,这些技术大大提高了弹药的性能。作为自适应控制系统必不可少的一部分,智能材料如光导纤维、形状记忆合金、压电高分子材料、压电陶瓷等都起着至关重要的作用。因此文中针对智能材料自适应技术提出了一种新型的压电驱动结构,并进行了数值计算,为自适应弹药设计提供参考。

1 叠堆型压电驱动器工作原理

压电驱动器利用压电陶瓷的逆压电效应,在电场的作用下产生形变,输出位移或在有负载的情况下,输出动力做功。压电陶瓷驱动器是一种高精度的微

型驱动元件,常见的结构主要有叠堆型、薄板型、管型和双晶片型^[2]等,叠堆型压电陶瓷可以承受很大的压力,并且可以产生较大的输出位移,是构成压电微位移驱动器的核心元件。

当压电晶体上加一定的电压时,晶体不但产生极化,还产生应变和应力,当外电场不是很强时,应变 S 与外电场 E 呈正比关系:

$$S_j = d_{ij} E_i \quad (1)$$

式中: S 为应变; E 为电场强度; d_{ij} 为压电应变常数; i 和 j 分别为电场和应变方向。

由于压电材料的压电应变系数都很小,故采用单个压电体输出的位移是非常有限的。为了在较低的电压下获得比较大的变形量,驱动器必须采取多层叠片式结构,将压电陶瓷片采用机械上串联、电学上并联的方式一片片的叠堆起来,如图1所示。

一旦加上电压,电场指向极化方向,导致每个陶

* 收稿日期:2010-04-15

作者简介:沈晓晨(1985-),女,河北辛集人,硕士研究生,研究方向:灵巧弹药技术。

瓷片变厚,使整个压电叠层伸长,其位移量为:

$$\Delta L = nd_{ij}U \quad (2)$$

式中: n 为压电陶瓷片的个数; d_{ij} 为压电应变系数; U 为施加的驱动电压。由式(2)可以得出位移输出量与压电堆中压电片数目 n 及输入电压 U 成正比。

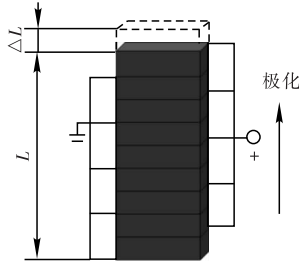


图 1 叠堆型压电陶瓷驱动器结构图

2 压电陶瓷的动态特性分析

压电陶瓷相对其它智能材料是一种理想的纳米级微位移元件,但压电陶瓷驱动器在较高的电场作用下会产生严重的非线性,从而大大降低了其定位精度。压电陶瓷驱动器的非线性不仅与材料的非线性、迟滞、蠕变等因素有关,还与器件的动态响应特性有关^[3]。

压电陶瓷微位移驱动器在电场作用下产生位移的输出,应具有较高的响应速度,但由于在电学上压电陶瓷微位移驱动器相当于电容性元件,压电叠堆可以看作是很多个电容器并联在一起的电容,加之压电陶瓷内阻很高,因此充电电流小,响应时间长,大大降低了其动态响应特性。另外,器件输出速度与自身等效电容值的大小及采用的驱动信号源的品质有密切关系,驱动器驱动能力和响应特性直接影响器件的动态特性。图 2 为叠堆型压电陶瓷驱动器的等效电路。图中,电容 C_1 、电感 L_1 和电阻 R_1 可看作叠堆型压电陶瓷驱动器相互联系的结合体。 C_0 为压电陶瓷驱动器的等效电容。

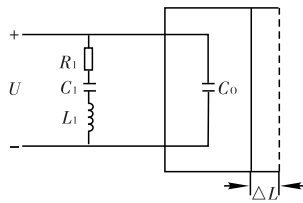


图 2 叠堆型压电陶瓷驱动器的等效电路

3 压电耦合分析

压电分析考虑了结构和电场的相互作用:它主要解决由于所施加的电压载荷引起的位移问题,反之亦然。利用 ANSYS 软件建立结构模型,这里选用了专门用于压电材料分析的耦合单元 SOLID226 单元类型,压电晶片堆采用压电系数较大的 PZT-5H 陶瓷片堆叠,极化方向沿厚度方向,相邻两片的极化方向相反^[4-5]。

3.1 瞬态动力分析

瞬态分析可以分析随时间变化的位移、应变、应力以及力载荷下的结构响应。由于有限元计算是在一种理想的约束条件下完成的,建模分析前应作一些假设。首先,由于压电陶瓷的每个矩形薄片的厚度远远小于其它两个方向的尺寸,所以假设电场只在厚度方向有变化,在其它两个方向都是相同的;第二,不计电极对薄片整体强度的影响。

按照以上假设进行物理建模,总体笛卡尔坐标系的 Y 轴选为叠堆型压电陶瓷模型的厚度方向。文中选用 3 片规格为 50mm×1mm×

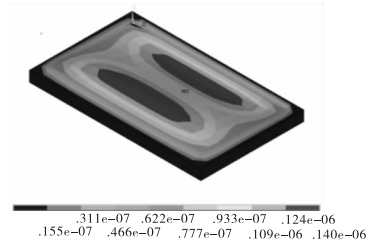


图 3 位移分布图

30mm 的矩形陶瓷片堆叠在一起建立有限元模型。由输出变形图可以看出,压电陶瓷驱动器中部变形最大,从而可以利用中部的最大弯曲变形作为驱动器位移的输出端。如图 3 所示,在 200V 电压的条件下,最大弯曲位移为 1.4E-7m。

压电矩形薄片的等效应力分布如图 4 所示。由云图分布可知,矩形片所受最大应力在端部,约为 2.58MPa。

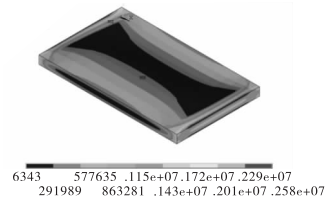


图 4 等效应力图

在厚度方向施加电压的过程中,由于压电陶瓷片逆压电效应,压电陶瓷内部正负电荷沿厚度方向中心线产生相对位移,从而使压电陶瓷片产生应变,此应变又由于正压电效应,使压电陶瓷片表面

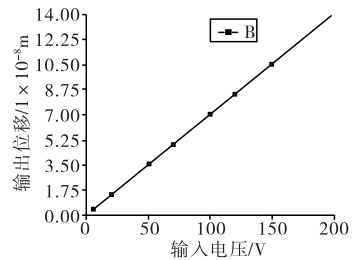


图 5 电压-位移曲线

出现异号极化电荷而产生电场。因此压电陶瓷的位移输出过程也是力学变形与电荷电场相互耦合的过程,应力与位移是随时间变化的量,采用动力学有限元分析方法,能够更加准确的仿真驱动电压与驱动器输出位移的关系,提高计算精度,如图 5 所示。

由曲线图可以看出,将给定规格的压电陶瓷薄片一片片的叠加,由式(2)可知,当压电矩形薄片的片数一定时,输出位移量与压电堆中压电片的输入电压 U 是成正比的,如表 1 所示。

表 1 输入电压与输出位移对应关系

输入电压/ V	输出位移/ 1×10^{-8} m	输入电压/ V	输出位移/ 1×10^{-8} m
5	0.35	100	7.0
20	1.4	120	8.4
50	3.5	150	10.5
70	4.9	200	14

3.2 模态分析

为了减少压电陶瓷驱动器在设计的过程中出现共振现象,对其进行了固有模态分析,前 10 阶的模态如表 2 所示。

表 2 压电堆的固有模态

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	12010	6	38116
2	17509	7	39896
3	26462	8	45739
4	27700	9	48496
5	32293	10	50173

同时这里截取了压电矩形片在各个不同频率下的振动状态,如图 6 所示。

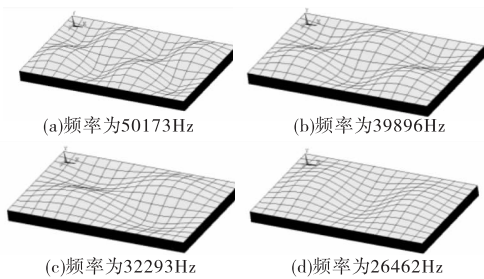


图 6 振动状态图

4 结束语

针对自适应弹药弹道修正的特殊要求研究了该驱动器,阐述了叠堆型驱动器的工作原理,并对压电陶瓷进行了力学和电学分析,应用压电陶瓷机电耦合建立有限元模型。从分析结果可以看出,压电陶瓷驱动器可以在厚度方向实现一定的位移输出,并且输入电压与输出位移是成正比的。将输出的线位移再通过球形铰链放大机构耦合放大,即可得到所需角位移的输出方向和大小。文中所做的压电陶瓷片机电耦合的模态分析可为弹头偏转驱动装置的进一步研究提供一种有效的参考。

参考文献:

[1] Dr. Ron Barrett, Dr. Gary Lee. Guide bullets: A decade of enabling adaptive materials R&D[C]//24th Army Science Conference, 2004.

[2] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.

[3] 孙宝玉. 压电式微位移机构动态特性研究[J]. 压电与声光, 2007(29):653—655

[4] 周玉华,鞠玉涛,周长省. 悬臂梁式压电驱动器数值计算[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(增刊):215—217.

[5] 祝效华,余志祥,等. ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.

(上接第 115 页)

击波的毁伤,则要从战技术角度降低无法拦截或突防的空地导弹的命中精度,如采取诱骗、目标机动或其他战技术措施。

参考文献:

[1] 王佩,李言俊. 空空导弹对目标的毁伤计算与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(12):53—56.

[2] 秦玉勋 赵辉. 反辐射导弹对目标毁伤能力评估[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(1):141—143.

[3] 姚辉,张志峰. 破片式战斗部对地空营装备的毁伤计算[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(9):53—56.

[4] 谢邦荣,尹健,宋劲松. ARM 导弹对雷达目标的毁伤概率仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9):2044—2051.

[5] 王杨,郭则庆,姜孝海. 冲击波超压峰值的数值计算[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(12):770—773.

[6] 王明贵,赵鹏远,周庆飞. 关于鱼雷攻击水中目标比冲量的计算问题[J]. 水雷战与舰船防护, 2006, 34(3):24—29.

[7] 石全. 装备战伤理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.