

文章编号: 1000-6893(2010)02-0418-08

压电纤维复合材料铺层用于翼面设计的 驱动特性与刚度影响

李敏¹, 陈伟民², 贾丽杰¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

(2. 中国科学院 力学研究所 工程科学部, 北京 100190)

Drive Characteristics and Stiffness Influence with Piezoelectric Fiber Composite Actuators on Airfoil Surface

Li Min¹, Chen Weimin², Jia Lijie¹

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

(2. Division of Engineering Science Research, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要: 压电纤维复合材料驱动器在形状控制、振动控制、颤振抑制与抖振控制等方面有广泛的应用前景。首先简单介绍了压电应变驱动的比拟载荷方法, 并采用该方法讨论了压电陶瓷片状驱动器与压电纤维复合材料驱动器在驱动特性上的主要差异。在此基础上, 对压电纤维复合材料在不同铺设方式、铺设角度与铺设层数下的驱动特性进行了分析, 在刚度影响方面展示了不同铺设角度下模型刚轴的移动。分析结果表明: 对称铺设反向电场可以同时获得弯曲与扭转变形, 而反对称铺设同向电场主要获得扭转变形; 两种铺设方式下 45° 铺设角均获得最大弦向转角, 而 0° 铺设角将获得最大挠度; 多铺层可以增加驱动载荷, 但总体变形效果还取决于结构系统的刚度比例; 对称铺设方式下铺设角对结构刚轴移动的影响非常明显, 在气动弹性控制中应着重关注。

关键词: 压电驱动器; 压电纤维复合材料; 形状控制; 振动控制; 驱动特性

中图分类号: V215.3 **文献标识码:** A

Abstract: Piezoelectric fiber composite actuators find important application in shape control, vibration control, flutter suppression and buffet control. This article introduces a load simulation method of piezoelectric actuators, by which the differences between the piezoelectric ceramic actuator and piezoelectric fiber composite actuator are discussed. Based on the qualitative analysis, the drive characteristics of a piezoelectric fiber composite actuator are discussed in terms of ply mode, ply angle and ply number. The analysis results show that bending and torsion deformation may be achieved by the symmetrical ply with an inverse electric field, and torsion deformation achieved by the antisymmetric ply with the same electric field. The maximum angle of rotation and maximum deflection may be achieved respectively by 45° ply and 0° ply. The drive load may increase with multi-ply construction but the overall deformation is dependent on the stiffness ratio between the actuators and the wing. The transfer of the elastic axes is very remarkable with the symmetrical ply and this characteristic is worthy of attention in aeroelastic control.

Key words: piezoelectric actuators; piezoelectric fiber composites; shape control; vibration control; drive characteristic

压电材料具有响应速度快、驱动结构简单、能量效率高、分布灵活、承载与驱动一体化等优点, 同时也具有驱动应变小、材料韧性差的缺点。为了克服其缺点, 材料科学研究者两个方面进行

了不懈的努力: 一方面提高压电材料本身的压电性能与韧性; 另一方面使用压电材料与树脂材料合成压电复合材料以提高复合材料的韧性与可靠性。在压电复合材料方面, 自 20 世纪 90 年代开始, 研究人员使用压电条柱或压电纤维作为增强相, 聚合物作为基体制成的压电复合材料, 在很大程度上克服了陶瓷材料易碎、初始缺陷多的问题,

收稿日期: 2008-12-02; 修订日期: 2009-02-17
基金项目: 国家自然科学基金(10772183, 10532070)
通讯作者: 陈伟民 E-mail: wmchen@imech.ac.cn

可以增加材料韧性与可靠性,并方便用于曲面结构^[1]。更重要的是,面内驱动的压电纤维复合材料可利用压电常数 d_{33} 而非 d_{31} 与 d_{32} ,便于提高驱动载荷与驱动变形^[2]。目前较为先进的压电纤维复合材料属于交叉指型电极压电纤维复合材料(Interdigitated Electrode Piezoelectric Fiber Composites, IEPFC),代表产品包括主动纤维复合材料(Active Fiber Composites, AFC)^[3]与宏纤维复合材料(Macro Fiber Composites, MFC)^[4](见图1)。在国外,有关类似产品的设计、制造与性能已有比较深入的讨论^[3,5-7]。在压电复合材料细观力学方面,国内的学者在驱动器微结构特性、压电驱动器与形状记忆合金的集成、材料制备、宏观参数预测^[8-11]等方面进行了相关的研究。



图1 MFC压电驱动器^[4]

Fig. 1 MFC piezoelectric actuator^[4]

压电纤维复合材料在驱动能力、驱动指向、柔韧性与可靠性等方面与压电陶瓷片相比取得了长足的进步,其性能的提高与商业化进程为压电驱动器进入航空航天工程奠定了基础。压电纤维复合材料在形状控制、振动控制、颤振抑制与抖振控制等方面有着广泛的应用前景,目前在国外已出现了联合使用压电纤维复合材料与碳纤维复合材料进行无人机设计的构想^[12-13],国内在叠层板性能预测、垂尾振动控制^[14-15]等方面也有较好的研究。

以上的研究成果从理论上说明了压电纤维复合材料在航空航天工程的潜在应用价值,但真正用于工程实际还需要解决许多问题。在压电纤维复合材料翼面铺层设计方面,分布式压电纤维复合材料在电学与力学特性方面为结构设计提供了多种选择,但正是这种灵活性造成了数以百计的

变量参数,尽管目前在优化领域发展了例如神经网络、遗传算法等先进计算方法,但需要指出:缺乏机理解释与对工程约束条件剖析所获得的优化方案是难以实现的。本文针对压电纤维复合材料在翼面上的铺层设计,利用理论分析结合数值模拟,说明典型铺设方式驱动效果的机理与有效变形模式,为压电纤维复合材料用于翼面结构静态控制的铺层设计优化或优选提供初步方案。

1 压电方程与驱动载荷比拟

压电材料作为驱动器具有应变驱动效果,单独压电驱动器在自由状态施加电场时,具有压电应变,但应力为零;作为翼面铺层的受限约束方式,其压电应变可以驱动结构变形。在计算方法上,通常以压电方程为基础,通过能量原理采用多物理场计算结构在压电驱动下的响应,例如有限元软件 ANSYS 与 ABAQUS 具有三维压电单元与二维实体压电单元,可进行带有压电材料的结构分析。相对于单独压电材料计算或较小尺寸压电驱动结构分析,在压电纤维复合材料翼面铺层计算中使用压电单元将遇到一些问题:模型规模,二维实体单元主要用于单独压电材料计算但在翼面结构建模上不太适用,如果使用三维单元所获得的有限元模型的规模将十分可观,例如 MFC 厚度为 0.3 mm,而翼展尺寸往往大于 10 m,有限元单元数目将达到 10^9 量级;计算模型中在材料主向定义、多铺层电势设置方面比较繁杂。本文的目的是探讨压电纤维复合材料铺层对翼面结构的驱动效果,使用压电单元的计算过程不易在机理上直观显示压电驱动的规律,因此采用压电驱动的载荷比拟方法^[16]说明其中的规律。为了便于问题的讨论,首先简单介绍压电驱动比拟载荷方法的基本思路。

以电场强度作为自变量,采用线弹性-压电本构关系,压电驱动材料的压电方程常以矩阵形式表达为(压电方程所采用的符号在不同学科专业的文献中各不相同,考虑到本文讨论的问题主要涉及结构分析,此处使用符合力学学科习惯的符号):

$$\begin{bmatrix} D \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau & d \\ d_t & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ \end{bmatrix} \quad (1a)$$

或

$$\begin{bmatrix} D \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & e \\ -e_t & c^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ \end{bmatrix} \quad (1b)$$

式中: D 、 E 、与 分别为电位移、电场强度、机械

应力与总应变; T 与 S 分别为常应力与常应变介电常数; s 与 c 分别为柔度系数与刚度系数; d 与 e 分别为压电应变常数与压电应力常数。上标 T 、 S 与 E 分别表示常应力条件、常应变条件与常电场强度条件,下标 t 表示矩阵转置。式 (1a) 与式 (1b) 也常常被称为 d 型与 e 型压电方程 (IEEE Std-1986 标准格式)。

压电方程式 (1) 是以热力学方程为基础得到的,该方程的物理含义可以通过应变分解得出

$$\text{总应变} = \epsilon^e + \epsilon^E \quad (2)$$

式中: ϵ^e 与 ϵ^E 分别为弹性应变与压电应变。

$$\text{因为} \quad \epsilon^e = s^E \sigma, \quad \epsilon^E = d_t E \quad (3)$$

$$\text{所以} \quad \epsilon = s^E \sigma + d_t E \quad (4)$$

$$\text{或} \quad \sigma = c^E (\epsilon - \epsilon^E) = c^E \epsilon - e_t E \quad (5)$$

式 (4) 与式 (5) 分别与压电方程式 (1) 中总应变与机械应力的表达式完全一致。

从式 (2) 或式 (4) 可以看出,压电材料与常规材料的差异在于压电应变 ϵ^E 。如果期望使用常规材料进行分析,可以使用附加机械载荷替代电载荷,为了使材料中产生与压电应变 ϵ^E 相当的弹性应变,需要施加相应的比拟应力

$$\text{simu} = c^E \epsilon^E = c^E d_t E \quad (6)$$

所以压电驱动所比拟的载荷为

$$F_i = \int_{A_i} \text{simu} dA = \int_{A_i} c^E d_t E dA \quad (7)$$

式中: A_i 为压电单元相应的面积。式 (7) 的含义为对压电单元的节点或单元面施加相应的集中载荷或分布载荷。根据不同的驱动模式,驱动载荷的具体形式可以简化,例如把压电材料粘贴在主体结构上下表面的结构形式是薄板弯曲与扭转控制的典型方式 (如图 2),图中坐标系为材料主轴坐标系,1 为压电纤维方向。把压电纤维所在平面定为 1-2 平面的目的是为了与后续的翼面结构总体坐标系区分。

对于单独压电驱动器薄片,板厚 t 远小于长度 l 与宽度 w ,可设 $\sigma_3 = 0$,属于平面应力问题。压电材料属于正交各向异性材料,其弹性本构方程为

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{因为} \quad \sigma_3 = c_{31} \epsilon_1 + c_{32} \epsilon_2 + c_{33} \epsilon_3 = 0 \quad (9)$$

$$\text{所以} \quad \epsilon_3 = - \frac{c_{31} \epsilon_1 + c_{32} \epsilon_2}{c_{33}} \quad (10)$$

$$\text{压电应变: } \epsilon_1 = d_{11} E_1, \quad \epsilon_2 = d_{12} E_1$$

$$\sigma_1 = \frac{c_{11} c_{33} - c_{13} c_{31}}{c_{33}} d_{11} E_1 + \frac{c_{12} c_{33} - c_{13} c_{32}}{c_{33}} d_{12} E_1 \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \frac{c_{21} c_{33} - c_{23} c_{31}}{c_{33}} d_{11} E_1 + \frac{c_{22} c_{33} - c_{23} c_{32}}{c_{33}} d_{12} E_1 \quad (12)$$

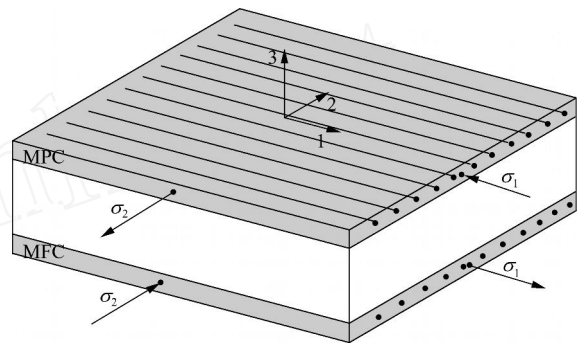


图 2 MFC 压电驱动器铺设示意图
Fig 2 Sketch of MFC piezoelectric actuators on plate

如果上下表面电场方向相反 (如图 2),由式 (11) 与式 (12) 所确定的 σ_1 与 σ_2 将组成压电驱动力矩 M_1 与 M_2 (如果电场方向相同则组成驱动力 F_1 与 F_2)。使用常规二维板单元附加压电驱动载荷的方式可以实现压电驱动的响应分析,从而利用现有通用有限元软件的各种计算功能。该方法的优势在于: 可以使用常规二维单元建模,对于一个实际的翼面,相比三维压电单元有限元模型,其单元规模将降低 6 个数量级; 使用复合材料板元,可方便定义材料主向,并避免多铺层电势定义中机械性能连续而电势间断所带来的大量自由度协调问题; 该方法非常直观且与常规机械载荷响应分析一致,便于结构强度工程设计人员理解与应用。

利用该方法讨论压电驱动比拟载荷在材料坐标系 $O12$ 平面与结构总体坐标系 Oxy 平面下的转换可以直观显示压电纤维复合材料在驱动性能上的优势。对于压电纤维复合材料, $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ 且二者常为异号,这与面内横观各向同性的压电陶瓷片 (PZT) 的 $\epsilon_1 = \epsilon_2$ 完全不同: 在平面应力问题的应力圆上 (如图 3),压电陶瓷片的应力圆退化为一个点 A ,而使用压电纤维复合材料的应力圆半径为其最大切应力 $\sigma_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$ 。换言之,在

结构总体坐标系 Oxy 下,对于压电陶瓷片而言,任意方位的切应力均为零,其驱动力矩只能由正应力形成;但对于压电纤维复合材料,不同方位的正应力与切应力是随铺层角变化而变化的。除材料主向(1 与 2 方向)外,不仅存在由正应力构成的力矩,还存在由切应力构成的力矩,后者对于结构扭转变形是非常重要的,这是压电纤维复合材料不仅可用于弯曲变形控制,也适合于扭转变形控制的关键,而压电陶瓷片主要用于弯曲变形控制。

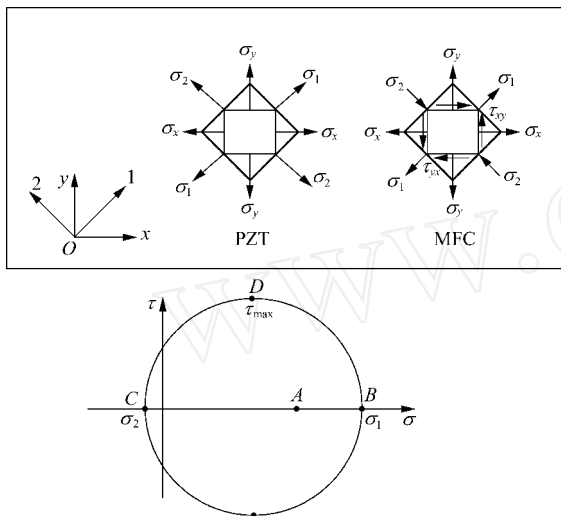


图 3 结构总体坐标系下驱动平面应力分布

Fig. 3 Stress distribution of actuator in global coordinate system

以上分析表明,从某种意义上,压电纤维复合材料的铺层设计就是根据控制目标对弯扭变形的要求,选择合适的铺设方式获得最大的弯曲或扭转驱动载荷,达到最为明显的控制效果。

2 驱动特性分析

在工程实际中针对具体结构,可选择的复合材料铺设方式与参数是繁杂的,在一定约束条件下进行优化是复合材料翼面设计的目标。正是由于复合材料的可设计性造成变量众多,而多变量的优化问题不易获得满足工程实际要求、可实现的方案,所以在实际设计中往往不是方案优化,而是方案优选。而理解典型铺设方式的规律是初步方案设计的基础。此处针对常用铺设形式,讨论影响驱动特性的 3 种因素:铺设对称性、铺设角度与铺设层数。除了理论分析外,为直观显示驱动效果,本文给出一个接近于工程实际的高空长航时无人机简化翼面计算模型:主体结构的刚度以

文献[12]中飞机机翼弯扭刚度按相似准则缩比而定,压电纤维复合材料采用 MFC 驱动器,基体模型几何尺寸为 $600\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的矩形铝制平板, MFC 的几何尺寸 $85\text{ mm} \times 57\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$, 铺设在铝板上下表面。铝板材料参数包括: $E = 70.3\text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.345$ 。MFC 的参数^[4]: $E_1 = 30.34\text{ GPa}$, $E_2 = 15.86\text{ GPa}$, $\mu_{12} = 0.31$, $\mu_{21} = 0.16$, $G_{12} = 5.52\text{ GPa}$, 压电应变常数: $d_{11} = 400 \times 10^{-12}\text{ m/V}$, $d_{12} = -170 \times 10^{-12}\text{ m/V}$, 电场强度 1000 V/mm , 由此获得压电纤维材料主向比拟应力 $\sigma_1 = 11.90\text{ MPa}$, $\sigma_2 = -0.77\text{ MPa}$ 。对于不同的铺设角度,结构坐标系下的应力 σ_x 、 σ_y 与 τ_{xy} 直接利用平面应力状态下应力转轴公式,由 σ_1 、 σ_2 与 τ_{xy} 计算得出,由于该比拟载荷在压电材料内部单元边界上相互抵消,所以仅需在压电材料外部单元边界上施加驱动载荷。另外需要说明,为了验证使用压电载荷比拟方法的准确性,本文中所有算例也同时使用 ANSYS 的三维压电单元模型进行了校核,二者计算结果中变形的偏差均小于 0.3%。

2.1 铺设对称性

一般而言,典型的复合材料铺设方式包括正交铺设、对称铺设与反对称铺设。对于压电纤维复合材料驱动器而言,在基板上下表面的正交铺设并非实用选择,因为这种铺设方式造成驱动力矩偏心,所以这里不予讨论。

首先考虑对称铺层,图 4 与图 5 给出了对称铺层施加相反电场时在结构总体坐标系下的比拟应力与力矩分布。该驱动方式可以得到与扭转变形相关的,由切应力 τ_{xy} 构成的尖部力矩 M_T 与前后缘差动力矩 M_W (上标 W 表示该力矩由切应力构成,下标 W 与 T 分别表示其作用效果是弯曲与扭转,下同),而正应力 σ_x 造成的尖部力矩 M_W 只能造成弯曲效果,前后缘差动力矩 M_T 总体抵消,对于扭转只有局部效果。如果采用对称铺层施加同向电场,则驱动效果均在面内,不会出现面外位移,所以不在本文讨论范围之内。

其次考虑反对称铺层,施加同向电场时比拟应力与力矩如图 6 与图 7 所示。可以看出此时同样可以得到与扭转变形相关的,由切应力构成的尖部力矩 M_T 与前后缘差动力矩 M_W ,但正应力只能构成力矢量 F 。所以扭转效果仍然保留,但整体弯曲效果不再出现。同样,对于反对称铺层采用相反电场所获得的比拟载荷全在面内,不会造成面外变形,此处不再列出。

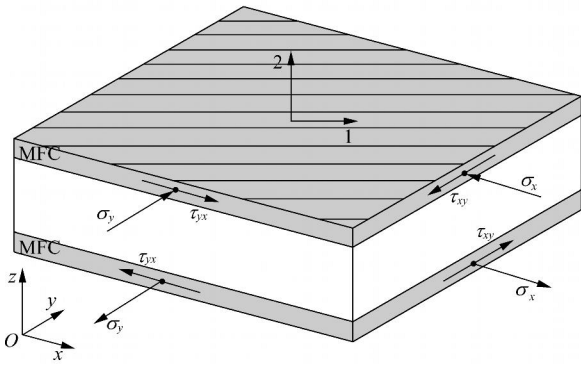


图4 对称铺层反向电场下压电单元的应力分布

Fig. 4 Stress distribution of actuator of symmetrical ply with inverse electric field acting on upper and lower layers

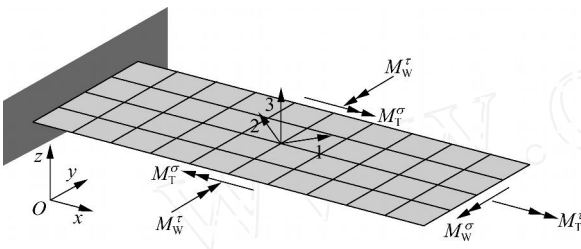


图5 对称铺层反向电场下压电驱动形成的弯矩与力矩

Fig. 5 Bending and torsion moments of symmetrical ply with inverse electric field acting on upper and lower layers

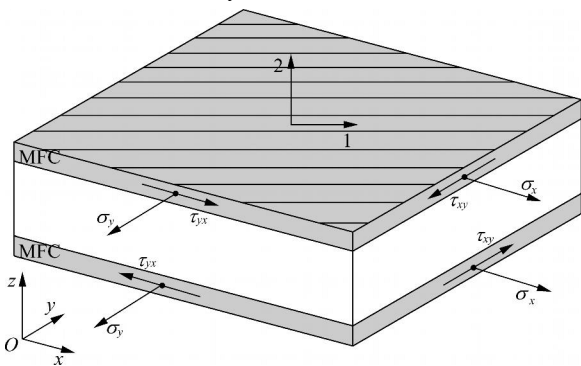


图6 反对称铺层同向电场下压电单元的应力分布

Fig. 6 Stress distribution of actuator of antisymmetric ply with same electric field acting on upper and lower layers

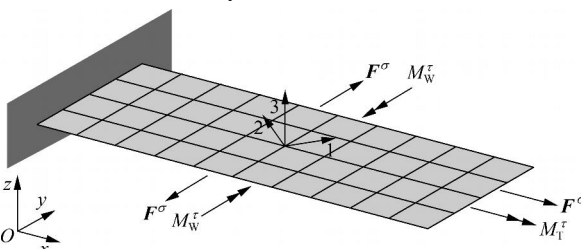


图7 反对称铺层同向电场下压电驱动形成的弯矩与扭矩

Fig. 7 Bending and torsion moments of antisymmetric ply with same electric field acting on upper and lower layers

为了直观显现不同铺设方式下的驱动变形效果,此处给出两种铺设方式下典型模型的变形情况(图8与图9)。图中 x 方向为翼面展向,总长度为 L , y 方向为翼面弦向,总长度为 b 。对称铺层反向电场下压电驱动形成的变形既弯也扭,而反对称铺层同向电场下压电驱动形成的变形以扭转变为主。这与以上的驱动载荷类型分析是吻合的。

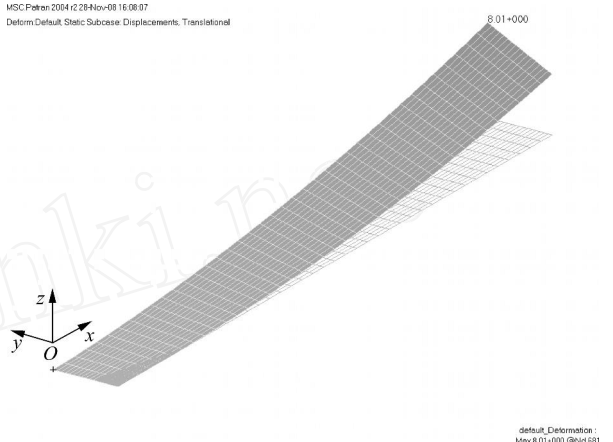


图8 对称铺层反向电场下压电驱动形成的变形

Fig. 8 Deformation of symmetrical ply with inverse electric field acting on upper and lower layers

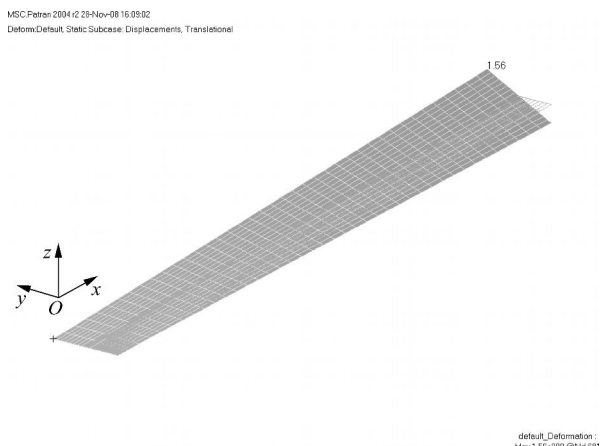


图9 反对称铺层同向电场下压电驱动形成的变形

Fig. 9 Deformation of antisymmetric ply with same electric field acting on upper and lower layers

2.2 铺设角度

在振动控制中多关注弯曲变形,而对于翼面气动弹性控制而言,弦向转角 α_x (图8与图9中绕 x 轴的转角,以 x 轴正向逆时针转动为正)的变化最为关键。从理论上, 0° 压电纤维方向与翼展方向夹角)与 90° 铺层主要引入弯曲变形驱动,其产生的前后缘扭转变形属于局部变形,对弦向转角

的影响总体上可忽略。对于其他铺设角而言,反对称铺设方式主要控制扭转变形,对称铺设方式可同时控制弯曲与扭转。

从上述驱动载荷类型分析可知,对于特定的压电铺层,影响驱动载荷的主要因素是铺设角,因为铺设角决定了弯矩与扭矩的大小,例如 45° 铺设方向可以造成最大的扭转力矩。但是另一个因素是,铺层角度的变化也会影响模型的刚度分布,最终的形变取决于这两个因素。为了显现综合影响,下面给出不同铺设角下的变形情况。由于该模型的半展弦比为 10:1,沿弦向的转角的变化非常小,所以使用两类数据描述翼面变形:翼面展向中线的挠度与弦向转角。不同铺设角下,对称与反对称铺设所获得的挠度与转角分别见图 10 与图 11,而最大转角随铺设角变化的规律见图 12。

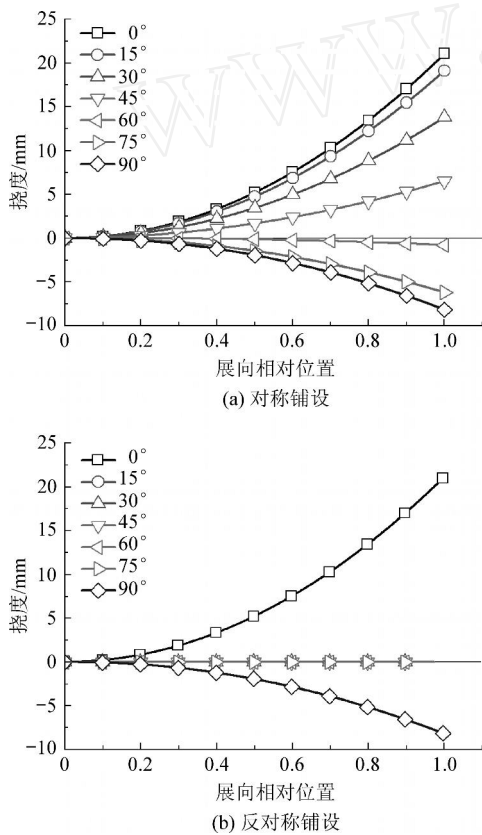


图 10 挠度随铺设角变化
Fig. 10 Displacement vs ply angle

首先从控制弯曲变形的角度,0° 铺层显然是最佳选择。此处需要说明,尽管 90° 铺层时驱动力矩相比 0° 铺层有量级上差异,但最终挠度差别仅有 3 倍左右,主要原因在于前后缘的扭转力矩影响,该分布扭矩造成局部扭转的同时由于泊松效应将造成板中性面上下部分展向应变不同,总体效果体现为弯曲变形。

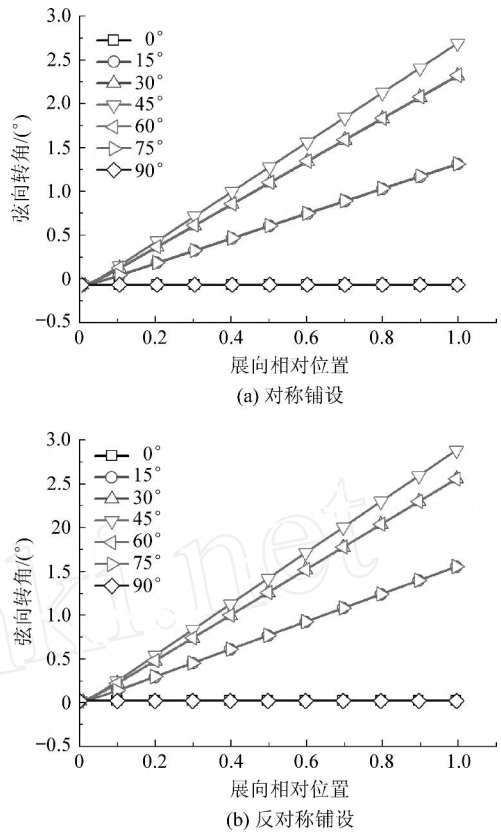


图 11 弦向转角随铺设角变化
Fig. 11 Angle of rotation vs ply angle

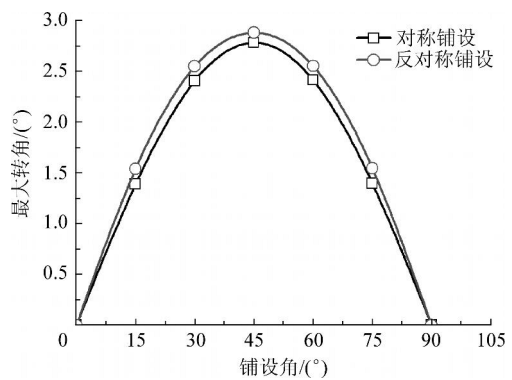


图 12 最大转角随铺设角变化
Fig. 12 Maximum angle of rotation vs ply angle

其次对于控制扭转变形,45° 铺层效果最好。如果希望控制方案更简洁,反对称铺设下 45° 铺层效果更好,因为其与弯曲变形独立。

2.3 铺设层数

简单增加压电纤维复合材料铺层对于压电驱动变形的效果体现在两个方面:对于特定的铺设角度,增加压电纤维复合材料的铺设层数将增加驱动载荷,对于线性小变形问题,每层的驱动效果是线性叠加的。尽管每层的驱动力(或驱动应

力)是相同的,但由于厚度方向位置不同造成力臂增加,实际上的驱动力矩将加速增大;增加压电纤维复合材料的铺设层数将增强模型的刚度。所以最终的驱动效果决定于两种影响因素的竞争关系。

由于扭转刚度与模型总厚度成3次方关系,而驱动载荷与层数的比例系数大于1,由于本文模型基体板厚相对于MFC较大,较少的MFC铺层对于厚度的增加比较缓慢,所以理论上预测压电驱动所获得的转角随铺设层数的变化将先升后降,存在极值点,在该点达到转角最大。对于实际的问题,由于模型本体刚度与压电纤维复合材料的刚度比例不同,所以是否存在这种极值点将随本体模型的刚度而变化。此处列出的模型计算规律仅作为参考(见图13),并无完全意义上的普遍效果。另外,较好的方法是增加压电纤维复合材料铺层的同时,保持整体模型的刚度。对于实际工程问题需考虑更为周全,例如对于翼面设计:除保证刚度外,还应保证翼面的强度、颤振或发散要求。另外,使用多铺层是否存在电场相互干扰或干扰程度如何还需试验验证。

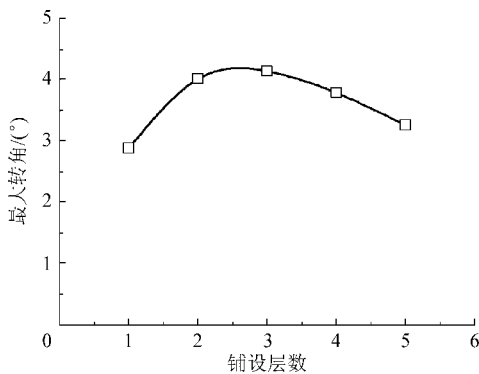


图13 45°反对称铺设最大转角随铺设层数的变化

Fig. 13 Maximum angle of rotation vs ply number (antisymmetric and 45° ply angle)

3 刚度影响分析

大部分关于复合材料的教科书均对层合板刚度特性进行了讨论:在平面假设下,推导出内力(内力矩)与中面应变及中面曲率之间的关系。最终获得拉伸刚度矩阵(内力与中面应变之间的关系)、弯扭刚度矩阵(内力矩与曲率及扭曲率之间的关系)与耦合刚度矩阵(弯扭与拉伸之间的耦合关系)。通过这三类矩阵中系数的讨论,分析正交铺设、对称铺设、反对称铺设等模式下是否存在拉弯、拉扭等耦合特性。

尽管压电纤维复合材料具有应变驱动能力,但在结构性能上与常规意义的纤维复合材料并无差异,可以按上述方法对其刚度特性以及耦合特性进行分析且结论完全一致,所以此处不再赘述。

对于航空航天的翼面弯曲与扭转控制,除面内与面外的耦合关系外,更重要的是结构刚度对气动弹性效应的影响,其中最为关键的因素是翼面刚轴的位置。常规设计下,低速飞行时翼剖面的气动压力中心位于刚心之前,所以气动弹性效应将使初始转角增大。对于反对称的复合材料铺设方式,总体而言刚轴位置保持在形心轴,而对称铺设方式将改变刚轴位置,本文模型不同铺设角下刚轴移动相对位置见图14。刚轴位置的变化将极大影响气动弹性效果,该特性大大增强了翼面气动弹性控制的可设计性。所以尽管对称铺设方式所引入的弯扭驱动稍显复杂,但对于气动弹性控制问题可能更为合适。在实际翼面设计时,利用刚轴移动的特性值得重点关注,因为图中数据反映刚轴移动的范围非常可观。

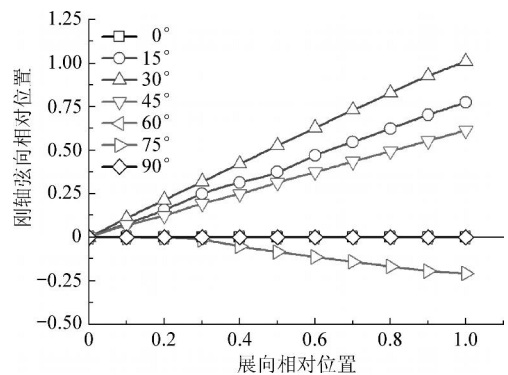


图14 对称铺设方式下模型刚轴位置随铺设角的变化

Fig. 14 Locations of model elastic axes vs ply angle (symmetric ply)

4 结论

采用压电应变驱动的比拟载荷方法,对压电纤维复合材料在不同铺设方式、铺设角度与铺设层数下的驱动特性进行了讨论,分析结果表明:

(1) 对于弯曲变形控制与扭转变形控制应分别采用0°与45°铺设方式,其中45°对称铺设可以同时获得弯曲与扭转变形,而45°反对称铺设只能获得扭转变形。

(2) +45°与-45°对称铺设尽管在变形上是相似的,但对于气动弹性控制问题而言,二者刚轴位置的差异将导致完全相反的控制效果。

参 考 文 献

- [1] Hagood N W, Bent A A. Development of piezoelectric fiber composites for structural actuation[R]. AIAA-1993-1717-CP, 1993.
- [2] Wilkie W K, Bryant R G, High J W, et al. Low-cost piezo composite actuator for structural control applications [C] Proceedings, SPIE 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. 2000, 3991: 323-333.
- [3] Bent A A. Active fiber composites for structural actuation [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [4] SMC corporation. [2008-12-02]http: www. smart-material. com
- [5] Janos B Z, Hagood N W. Overview of active fiber composites technologies[C] Proceedings of 6th International Conference on New Actuators: ACTUATOR 98. 1998.
- [6] High J W, Wilkie W K. Method of fabricating NASA-standard macro-fiber composite piezoelectric actuators [R]. NASA/TM-2003-212427, ARL-TR-2833, 2003.
- [7] Williams R B. Nonlinear mechanical and actuation characterization of piezoceramic fiber composites[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [8] Shen X, Yuan S F. Characterization and microstructure of PLZT RAINBOW ceramics[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2004, 17(2): 124-128.
- [9] Xing S, Yang Y, Yun L. Study of RAINBOW actuator and its integration with SMA [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2008, 19(3): 277-281.
- [10] 邱艳芹, 刘军, 孟献丰, 等. 1-3 型压电纤维复合材料的制备及性能研究[J]. 材料工程, 2007(增刊 1): 45-48.
Qiu Yanqin, Liu Jun, Meng Xianfeng, et al. The fabrications and performance analysis of 1-3 piezoelectric fibers composite material[J]. Materials Engineering, 2007(Supplement1): 45-48. (in Chinese)
- [11] 赵寿根, 程伟. 1-3 型压电纤维复合材料的细观力学模型及其力电宏观参数研究[J]. 应用力学学报, 2005, 22(3): 335-341.
- Zhao Shougen, Cheng Wei. Investigation on mechanic and electric performance of 1-3 piezoelectric fiber composites [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(3): 335-341. (in Chinese)
- [12] Carlos E S C, Brown E L. Modeling of high aspect ratio active flexible wings for roll control [R]. AIAA - 2002-1719, 2002.
- [13] Debashis S, Carlos E S C. Roll maneuver control of UCAV wing using anisotropic piezoelectric actuators[R]. AIAA-2002-1720, 2002.
- [14] 赵寿根, 程伟, 管德. 1-3 型压电纤维主动叠层板扭转特性的研究[J]. 航空学报, 2006, 27(4): 624-629.
Zhao Shougen, Cheng Wei, Guan De. Torsion characteristics of active laminates with 1-3 PFC layers[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(4): 624-629. (in Chinese)
- [15] 徐志伟, 黄雪峰, 沈星. 基于 PT 和 MFC 的飞机垂直尾翼振动主动控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 313-318.
Xu Zhiwei, Huang Xuefeng, Shen Xing. Active vibration control of perpendicular empennage based on piezoelectric transformer and micro fiber composites [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(3): 313-318. (in Chinese)
- [16] Li M, Chen W M, Wang M C, et al. A load simulation method of piezoelectric actuator in FEM for smart structure[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(9): 2576-2584.

作者简介:

李敏(1968 -) 男,博士,教授。主要研究方向:压电驱动与控制,气动弹性力学,结构动力学。

E-mail: limin@buaa.edu.cn

陈伟民(1967 -) 女,博士,副研究员。主要研究方向:压电驱动与控制,气动弹性力学,流固耦合计算。

E-mail: wmchen@imech.ac.cn

(编辑:蔡斐)