



压电智能叶片的优化配置与振动主动控制算法

高志远, 徐童欣, 苗中华, 邵勇, 朱晓锦*

上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

* 通信作者. E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2024-07-30; 接受日期: 2024-10-30; 网络出版日期: 2025-01-07

国家自然科学基金 (批准号: 52175101) 资助项目

摘要 作为复杂薄壁曲面类部件, 航空发动机叶片结构复杂、工况恶劣, 叶片振动会直接影响航空发动机工作稳定性. 面向以压电材料构建压电智能叶片进行主动振动抑制的新一代航空发动机叶片研究, 本文提出了基于有限元分析的压电元件优化配置方案和变步长自适应滤波控制算法. 首先, 给出了 3 种压电元件配置优化目标函数, 基于叶片的有限元模态分析和瞬态分析, 采用改进的差分进化算法对压电元件的位置进行优化布局. 随后, 提出了根据误差信号幅值动态调整步长、能够平衡收敛速度与稳态误差的 VSS-FxLMS 算法. 最后, 按照优化配置结果, 构建了实时振动主动控制实验平台, 并针对单频扰动、多频扰动进行了实时控制实验对比分析. 实验结果表明, 本文所提的 VSS-FxLMS 算法有较好的振动抑制效果, 且收敛速度较快.

关键词 压电智能叶片, 振动主动控制, 优化配置, 差分进化算法, 变步长 FxLMS 算法

1 引言

航空发动机的工作可靠性和结构完整性问题一直是制约高性能航空发动机发展的主要瓶颈, 其中的核心问题之一是高速旋转叶片的振动故障问题. 作为复杂薄壁曲面类部件, 航空发动机叶片结构复杂、工况恶劣, 一旦叶片振动特性发生改变, 会直接影响航空发动机工作稳定性^[1~3].

从 20 世纪 90 年代起, 为有效抑制航空发动机叶片振动, 减小振动对发动机结构完整性的影响, 提高航空发动机的可靠性和耐久性, 国内外开展了大量的基于被动阻尼减振技术的航空发动机叶片振动抑制研究^[4]. 美国国防部的综合高性能涡轮发动机技术计划伊始, 干摩擦阻尼减振誉为“航空发动机部件中最有应用前景的被动阻尼技术”. 然而, 不断提升的航空发动机可靠性指标使得干摩擦阻尼减振技术望尘莫及, 为被动阻尼技术在下一代高性能航空发动机中的应用前景埋下了阴影^[5].

为克服被动阻尼减振技术的缺陷, 美国国家航空航天局格林研究中心 (National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center, NASA GRC) 联合通用电气航空集团 (GE Aviation) 提出了利用压电纤维材料 – 宏观纤维复合材料 (macro fiber composite, MFC) 构建压电智能叶片进行主

引用格式: 高志远, 徐童欣, 苗中华, 等. 压电智能叶片的优化配置与振动主动控制算法. 中国科学: 信息科学, 2025, 55: 129–139, doi: 10.1360/SSI-2024-0090

Gao Z Y, Xu T X, Miao Z H, et al. Optimal placement and active vibration control algorithm for smart piezoelectric blades. Sci Sin Inform, 2025, 55: 129–139, doi: 10.1360/SSI-2024-0090

动振动抑制的新一代航空发动机叶片设计方案,为高性能航空发动机叶片的研究提供了崭新的研究思路和探索方向^[6~9].相关的一系列测试表明,构建压电智能叶片进行振动主动抑制,具备被动阻尼技术无法比拟的振动抑制效果,能够实现航空发动机叶片的自感知、自控制和自修复.随着高温压电陶瓷材料的突破性进展以及先进陶瓷涂层技术的不断改进,压电智能叶片技术有望成为能够解决下一代高性能航空发动机叶片振动故障制约的关键.

已有研究表明,无论是智能结构的振动监测还是振动抑制,都离不开压电传感器的优化布置^[10~12].文献[13]利用有限元和蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真分析方法,提出了基于可靠度的传感器贴片方案优化准则.文献[14]针对压电分支阻尼技术在航空发动机叶盘结构振动抑制问题中的应用,提出了一种拓扑优化方法,可给出限定用量的压电材料在轮盘上的最佳位置,以提升压电分支阻尼的上限.面向复杂振动扰动的振动主动控制算法的相关研究,其中的重要研究方向是基于最小均方自适应算法的各种改进型滤波自适应振动主动控制算法^[15,16].文献[17]基于FxLMS算法,将自适应前馈控制引入到智能结构振动控制中,其结果证明基于FxLMS算法的自适应前馈控制能够有效地抑制振动响应.文献[18]针对薄板结构辐射声主动控制采用离散萤火虫算法以结构-声可控性指标为目标优化作动器位置,结合虚拟传感技术和归一化动量FxLMS算法设计主动控制器.

本文以航空发动机压电智能叶片为研究对象,针对压电元件位置布局和压电智能叶片振动主动控制问题,开展压电传感器和压电作动器的优化配置和能够平衡收敛速度与稳态误差的自适应滤波控制算法研究.通过仿真和实时控制实验,验证本文所提出方法的可行性和有效性.

2 压电元件优化配置

2.1 优化目标函数

采用压电材料构建压电智能叶片进行主动振动抑制,首先需要解决传感器和作动器的优化布局问题.在模态应变准则的基础上,考虑到有限元分析的便利性,给出下面3种优化目标函数.

方案一:模态应变叠加函数:

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{1}{N} \left| \sum_{k=1}^N \left(\frac{\varepsilon_{k,1}}{|\varepsilon_{\max,1}|} + \frac{\varepsilon_{k,2}}{|\varepsilon_{\max,2}|} \right) \right|, \quad (1)$$

其中, $\varepsilon_{k,1}$ 和 $\varepsilon_{k,2}$ 分别为在自由响应下,各结点的第一阶和第二阶模态的法向应变. $\varepsilon_{\max,1}$ 和 $\varepsilon_{\max,2}$ 分别为在自由响应下,第一阶和第二阶模态法向应变的最大值, N 为结点数.对叶片进行模态分析后,可得到叶片的各阶模态和各单元应力应变数据.

方案二:瞬态分析能量最大函数:

$$J = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{t=1}^T \left(|h_k(t)|^2 \right) \right), \quad (2)$$

其中, $h_k(t)$ 为稳定后结点 k 第 t 个子载荷步的位移.进行前二阶瞬态分析后,取稳定后 T 个子载荷步的位移平方的累加和作为各结点的能量.

方案三:模态应变取绝对值叠加函数:

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^N \left(\frac{|\varepsilon_{k,1}|}{|\varepsilon_{\max,1}|} + \frac{|\varepsilon_{k,2}|}{|\varepsilon_{\max,2}|} \right) \right), \quad (3)$$

其中, $\varepsilon_{k,1}$ 和 $\varepsilon_{k,2}$ 分别为在自由响应下,各结点的第一阶和第二阶模态的法向应变. $\varepsilon_{\max,1}$ 和 $\varepsilon_{\max,2}$ 分别为在自由响应下,第一阶和第二阶模态法向应变的最大值, N 为结点数.

2.2 优化算法

为了适应压电传感器和作动器的优化布局需要,对差分进化算法的变异、交叉以及种群大小进行适应性改进.在变异阶段,个体随机选取‘DE/rand/1’、‘DE/best/1’和‘DE/current-to-best/1’三者中任意一个变异策略进行更新.

(1) DE/rand/1:

$$V_{i,G} = X_{r_1,G} + F \cdot (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}); \quad (4)$$

(2) DE/best/1:

$$V_{i,G} = X_{\text{best},G} + F \cdot (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}); \quad (5)$$

(3) DE/current-to-best/1:

$$V_{i,G} = X_{i,G} + F \cdot (X_{\text{best},G} - X_{i,G}) + F \cdot (X_{r_1,G} - X_{r_2,G}), \quad (6)$$

其中, $V_{i,G}$ 为新生成的变异个体, $X_{i,G}$ 为当前个体, $X_{r_1,G}, X_{r_2,G}, X_{r_3,G}$ 为种群中 3 个互不相同的个体, $i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3$, F 为变异因子, $X_{\text{best},G}$ 为种群最优个体. 变异因子 $F = F_{\min} + \text{rand}(0,1) \cdot (F_{\max} - F_{\min})$, 缩放因子 $F_{\min}$ 和 $F_{\max}$ 的引入是为了防止算法陷入局部最优解, $F_{\min} = 0.6, F_{\max} = 1.5$. $\text{rand}(0,1)$ 可以使变异因子 F 在 $F_{\min}$ 和 $F_{\max}$ 之间随机变化. F 的动态调整可以使得算法在探索新的解空间时更加灵活, 有助于提高算法全局搜索和局部搜索的能力. 而 3 个变异策略的随机选取也增加了种群个体变异的多样性.

在交叉阶段对交叉因子 CR 作自适应处理, 确保群体的多样性:

$$\text{CR} = \text{CR}_{\min} + \text{rand}(0,1) \cdot (\text{CR}_{\max} - \text{CR}_{\min}) \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right), \quad (7)$$

其中, $\text{CR}_{\min}$ 和 $\text{CR}_{\max}$ 是交叉阶段的缩放因子, $\text{CR}_{\min} = 0.6, \text{CR}_{\max} = 0.9$. G 和 $G_{\max}$ 分别是当前迭代次数和最大迭代次数. $\text{rand}(0,1)$ 的存在同样使得 CR 可以在 $\text{CR}_{\min}$ 和 $\text{CR}_{\max}$ 之间随机变化. 较大的交叉因子 CR 可以增加新解的多样性, 较小的交叉因子 CR 可以保留父代特征, 保持当前解的稳定性.

为了提升收敛速度, 扩展了线性种群缩减策略. 在初次迭代时, 种群规模为 NP_{init} , 迭代结束时, 种群规模为 $\text{NP}_{\min}$. 第 G 代的种群规模大小为

$$\text{NP}_{G+1} = \text{round} \left[\left(\frac{\text{NP}_{\min} - \text{NP}_{\text{init}}}{G_{\max}} \right) G + \text{NP}_{\text{init}} \right]. \quad (8)$$

改进 DE 算法优化的是压电元件中心坐标 (x, y) 两个参数. 因此, 优化算法迭代过程的边界约束条件需要叶片尺寸和压电元件的整体尺寸大小共同确定.

2.3 位置优化结果对比

为了使位置优化结果更加可靠, 优化算法对压电元件的中心坐标进行 50 次辨识, 并取 50 次运行结果的平均值作为最终优化结果. 为更直观地对比 3 种不同方案的收敛性, 对适应度函数值进行归一化处理. 三种方案的适应度函数收敛曲线如图 1 所示, 相比于方案一和二, 方案三收敛速度更快. 三个方案中激振作动器、抑振作动器、误差传感器和参考传感器的位置优化结果如图 2 所示.

采用 Adams 和 Matlab/Simulink 联合仿真对比分析 3 种方案的压电元件位置的控制效果. 对 3 种方案分别施加相同的前馈比例控制信号进行抑振, 得到如图 3 所示的仿真控制效果对比图, 在施加相同激振的情况下, 方案三的控制效果明显优于方案一和二.

按照方案三的优化结果, 构建完成的压电智能叶片如图 4 所示. 图中的压电作动器型号为 M5628-P2, 压电传感器型号为 M2807-P2.

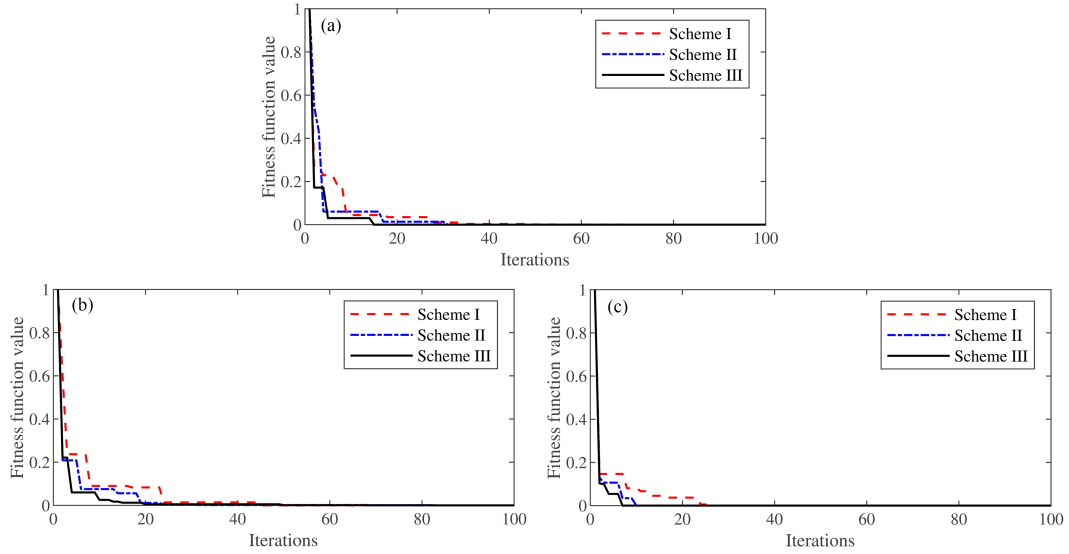


图 1 (网络版彩图) 位置优化的适应度函数收敛曲线. (a) 误差传感器; (b) 激振作动器; (c) 参考传感器.

Figure 1 (Color online) Convergence curves of the fitness function for layout optimization. (a) Error sensor; (b) disturbance actuator; (c) reference sensor.

3 振动主动控制算法

3.1 FxLMS 算法

图 5 为 FxLMS 算法的结构框图. 参考信号 $x(n)$ 经次级通道的估计 $\hat{S}(n)$ 后输出滤波信号 $x'(n)$, 控制器输出的信号 $y(n)$ 通过次级通道 $S(n)$ 产生与 $d(n)$ 相抵消的信号 $y'(n)$, 使误差信号 $e(n)$ 的值逐渐变小.

FxLMS 算法的自适应过程如下.

(1) 将通过次级通道估计模型 $\hat{S}(n)$ 得到的滤波信号 $x'(n)$ 作为 LMS 算法的输入信号, 来修正 LMS 算法由于次级通道产生的误差梯度估计值:

$$x'(n) = x(n)\hat{S}(n). \quad (9)$$

(2) 迭代得到 FxLMS 算法的滤波器权重向量:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x'(n). \quad (10)$$

(3) 输出信号:

$$y(n) = w^T(n)x(n), \quad (11)$$

其中, $w(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_L(n)]^T$ 为滤波器的权重系数, $x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T$ 为参考信号.

3.2 变步长 FxLMS 算法 (VSS-FxLMS)

传统 FxLMS 算法步长固定, 难以兼顾控制效果和收敛速度, VSS-FxLMS 算法通过对步长的自适应调节, 可以平衡收敛速度和稳态误差. 在算法迭代的初始阶段或误差较大时, 采用较大的步长因子以实现快速收敛; 而当算法迭代至最优解附近时, 则选择使用较小的步长因子来减小稳态失调.

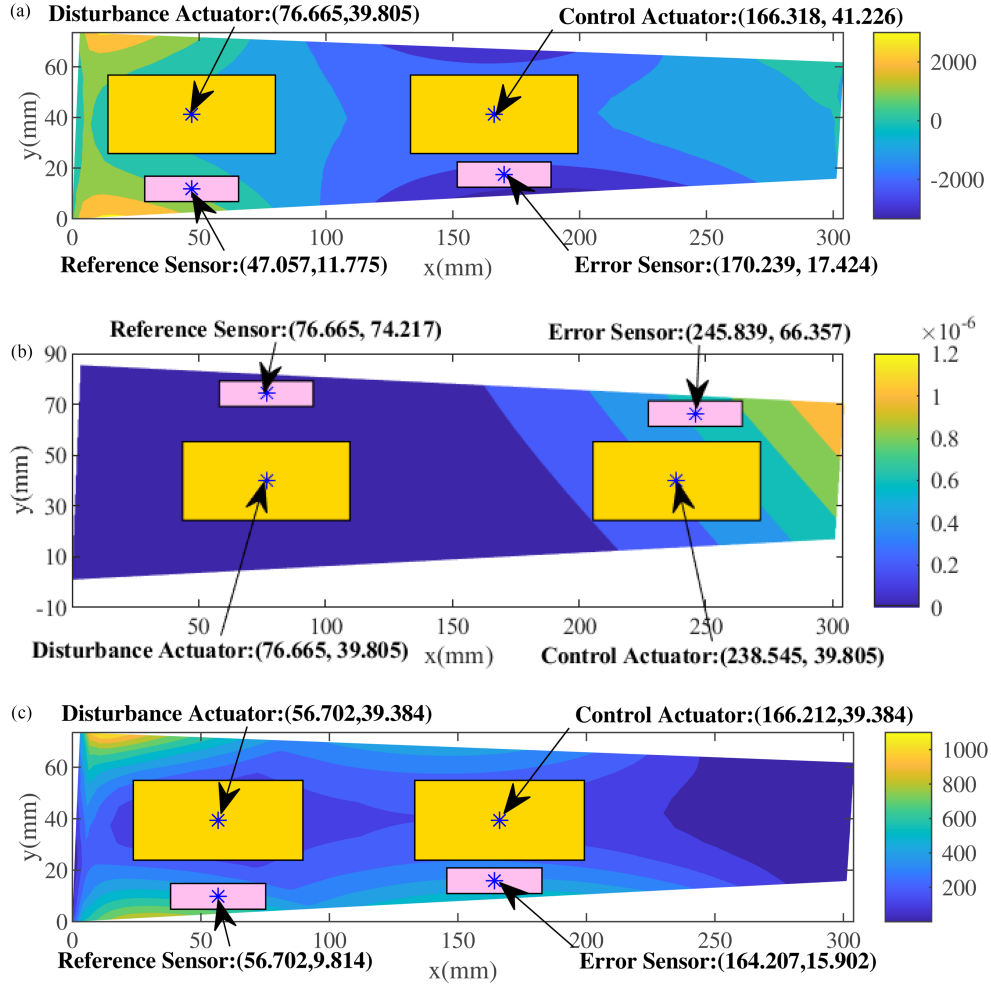


图 2 (网络版彩图) 三种方案的位置优化布局. (a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三.

Figure 2 (Color online) Optimized layouts of three schemes. (a) Scheme I; (b) scheme II; (c) scheme III.

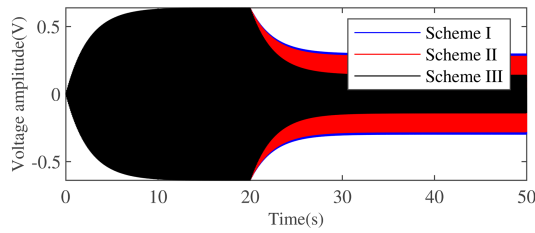


图 3 (网络版彩图) 前馈比例控制仿真对比.

Figure 3 (Color online) Feedforward proportional control simulation comparison.

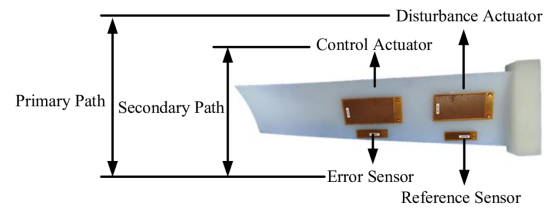


图 4 (网络版彩图) 优化配置的压电智能叶片.

Figure 4 (Color online) Optimized layout of smart piezoelectric blades.

(1) VSS-FxLMS-1 算法:

$$\mu(n) = -\beta \log \left(\frac{1}{1 + \alpha e^2} \right), \quad (12)$$

其中, 参数 β 影响步长 μ 的取值范围, 参数 α 影响步长的变化趋势, $0 < \alpha < 1$.

(2) VSS-FxLMS-2 算法:

$$\mu(n) = \gamma \mu(n-1) + \tau \operatorname{arccot}(|e|) e^2, \quad (13)$$

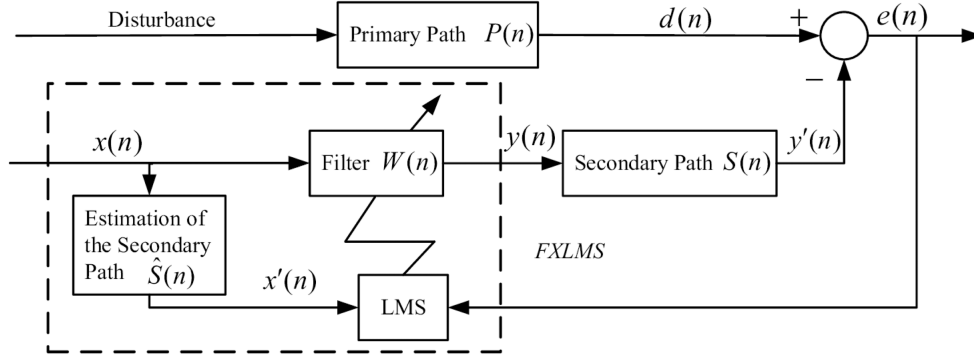


图 5 FxLMS 算法的结构框图.

Figure 5 Structural block diagram of the FxLMS algorithm.

其中, 参数 γ 是前一时刻步长的权重, 参数 τ 是增长因子, $\text{arccot}(|e|)$ 表示误差绝对值的反正切函数, 当误差绝对值减小时, 其值减小.

(3) VSS-FxLMS-3 算法:

$$\mu(n) = \xi\mu(n-1) + \eta p^2(n-1), \quad (14)$$

其中, $p(n) = \lambda p(n-1) + (1-\lambda)e(n)e(n-1)$, 参数 ξ 是调节步长的常量, $0 < \xi < 1$; 参数 η 为增长因子, $\eta > 0$; 参数 λ 为迭代因子, $0 < \lambda < 1$. 该变步长策略中参数较多, 计算复杂度高.

(4) VSS-FxLMS-4 算法:

$$\mu(n) = \xi\mu(n-1) + \eta e^2(n-1)e^2(n-2). \quad (15)$$

VSS-FxLMS-4 算法在 VSS-FxLMS-3 算法的基础上省略了迭代因子 λ , 简化了运算.

(5) VSS-FxLMS 算法. 为防止误差信号较大时产生过大的步长, 本文通过选择一个包含误差信号幅值的对数函数对步长进行调整, 提出一种 VSS-FxLMS 算法. 变步长策略如下:

$$u(n) = \mu_{\max} \log(\alpha + \|e(n)\|). \quad (16)$$

在步长因子的更新公式中, 对于误差信号 e 进行二范数计算, $\|e(n)\| = \sqrt{\sum_{k=0}^n e^2(n-k)}$, 保证了结果数据为正数且计算结果与前 $n-1$ 个时刻的误差信号有关实现误差信号的滤波作用, 保证了计算结果不会出现较大突变. 在更新公式中使用 $\log$ 函数对 $\|e(n)\|$ 进行计算处理, $\log$ 函数是一个单调递增的函数, 能够保证计算的步长因子随误差信号的减小而减小. 在振动主动控制的过程中误差较大时步长因子较大能够实现快速收敛, 在误差收敛后步长因子减小保证控制后的误差信号的稳态误差较小, 从而来权衡收敛速度和稳态误差之间的关系. 但 $\log$ 函数在计算过程中, 当计算对象在 $0 \sim 1$ 之间且 $\|e(n)\|$ 较小时, 步长因子 μ 的计算会出现负值, 为了保证步长因子 μ 为正数, 在 $\log$ 函数计算时引入了 α 来保证 $\log$ 函数的计算对象大于 1, 从而使得步长因子 μ 均为正数. 由于 $\log$ 函数是一个无界函数, 为了保证步长因子不会出现过大的情况, 在 μ 的取值中添加了最大值的约束条件且 μ 的取值范围为

$$0 < \mu < \frac{2}{\sum_{i=0}^N (x_i(n-i))^2}, \quad (17)$$

其中, $\sum_{i=0}^{N-1} (x_i(n-i))^2$ 是滤波 x 输入信号的总输入功率. 为了防止步长过大, 必须保证 μ 的取值在一定范围内, 需要对超出限定范围的 μ 进行如下调整:

$$\mu(n) = \begin{cases} \mu_{\max}, & \mu(n) > \mu_{\max}, \\ \mu(n), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (18)$$

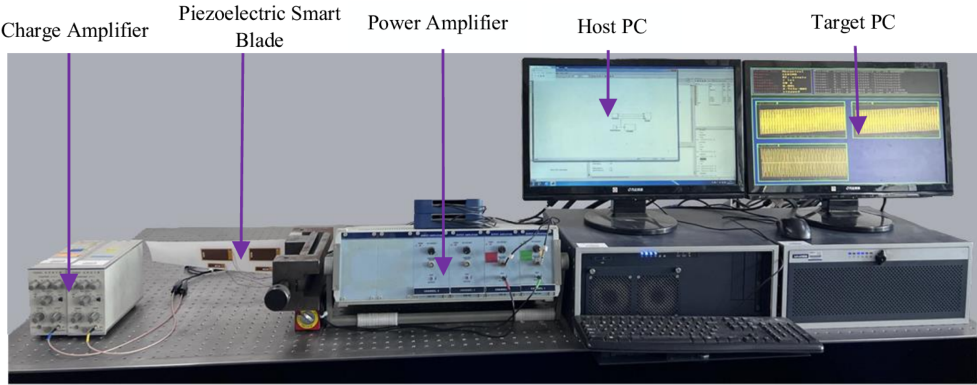


图 6 (网络版彩图) 基于 Matlab xPC 平台的实时控制实验平台.

Figure 6 (Color online) Real-time control experiment platform based on Matlab xPC target.

表 1 压电元件参数.

Table 1 Parameters of piezoelectric elements.

Parameter	M5628-P2	M2807-P2
Actuation length (mm)	56	28
Actuation width (mm)	28	7
Overall length (mm)	66	37
Overall width (mm)	31	10
Output force (N)	205	40
Drive voltage (V)	-60~360	-60~360

表 2 电荷放大器技术参数.

Table 2 Technical parameters of charge amplifiers.

Parameter	Value
Input voltage, charge	$\pm 10\text{ V}, 10^6\text{ pC}$
Output voltage, charge	$\pm 10\text{ V}, \pm 100\text{ mA}$
Operating temperature	$0\sim 40^\circ\text{C}$
Precision	$\leq \pm 1$

其中, $\mu_{\max}$ 为上界学习率.

上述 3 种 VSS-FxLMS 算法的滤波器权重系数更新方程都可以表示为

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x'(n). \tag{19}$$

4 振动主动控制实验

4.1 实验平台构建

本文基于 Matlab xPC 实时控制系统、电荷放大器、压电智能叶片、功率放大器、数据采集板卡等信号采集和处理设备构建的压电智能叶片振动主动控制实验平台如图 6 所示.

压电智能叶片上压电元件的参数如表 1 所示.

电荷放大器和功率放大器的技术参数分别如表 2 和 3 所示.

表 3 功率放大器技术参数.

Table 3 Technical parameters of power amplifiers.

Parameter	Value	Unit
Input voltage	0~10	V
Output voltage	0~300	V
Average power	35	W
Average current	290	mA
Bandwidth	10	kHz
Operating temperature	0~50	°C

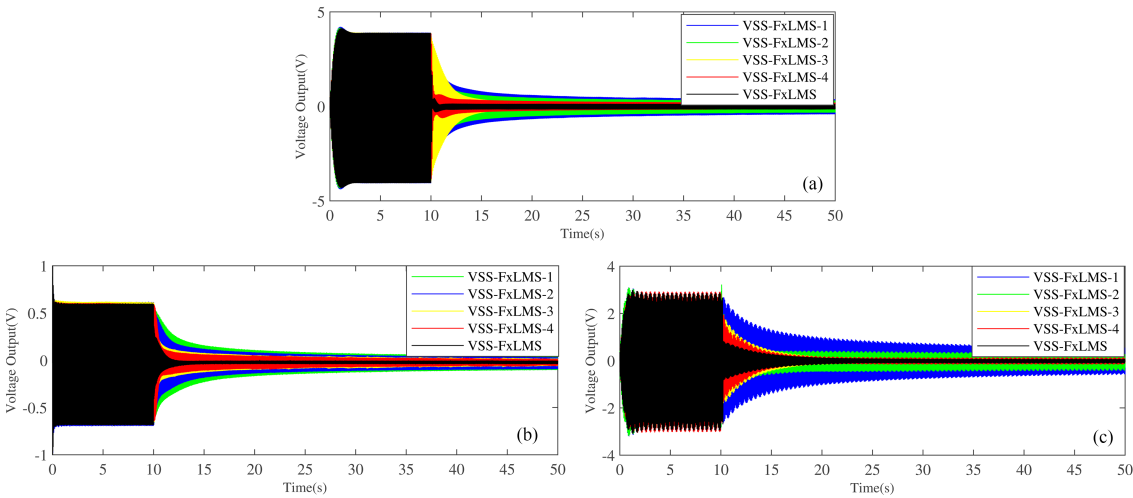


图 7 (网络版彩图) 不同激振信号下 5 种 VSS-FxLMS 算法的控制效果. (a) 第一阶固有频率信号; (b) 第二阶固有频率信号; (c) 多频信号.

Figure 7 (Color online) Control performance of five VSS-FxLMS algorithms under different excitation signals. (a) The first-order natural frequency signal; (b) the second-order natural frequency signal; (c) the multi-frequency signal.

4.2 实验验证与分析

实验采样频率为 1000 Hz, 滤波器阶数为 32, 总时间为 50 s. 首先通过扰动作动器给压电智能叶片施加振动扰动, 在实验开始 10 s 后施加控制信号. 为了更好地验证提出的 VSS-FxLMS 算法的振动控制效果, 输入 3 种激振信号进行 5 种 FxLMS 算法控制实验的对比. 这 3 种信号分别为幅值为 4 V, 频率为 13.667 Hz (一阶固有频率) 的单频信号; 幅值为 4 V, 频率为 66.017 Hz (二阶固有频率) 的单频信号和两个幅值为 2 V, 频率分别为 13.667 Hz, 66.017 Hz 的正弦信号叠加的多频信号.

图 7 分别为单频信号和多频信号激振下 5 种 VSS-FxLMS 算法的控制效果对比. 可以看到, 针对不同阶次不同频率的扰动信号, 本文提出的 VSS-FxLMS 算法的收敛速度都优于其余 4 种 VSS-FxLMS 算法.

为了验证提出的 VSS-FxLMS 算法在不同工况下的有效性, 在固有频率正弦信号的基础上附加白噪声信号作为激振信号进行振动主动控制. 图 8 为附加白噪声信号作为干扰的情况下 5 种 VSS-FxLMSs 算法的控制效果对比. 可以看到, 本文提出的 VSS-FxLMS 算法的收敛速度和控制效果都优于其余 4 种 VSS-FxLMS 算法, 表现出了很好的鲁棒性.

为了评估各控制算法的抑振效果, 引入抑振效率作为评价指标:

$$S_A = 20 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^N |e(i)|^2}{\sum_{i=1}^N |d(i)|^2}, \tag{20}$$

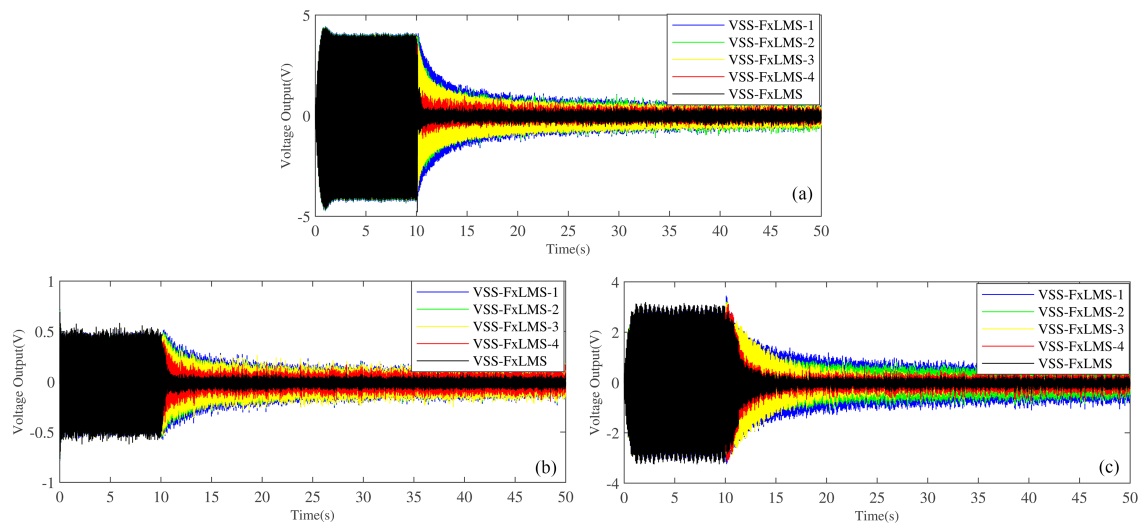


图 8 (网络版彩图) 引入白噪声作激振信号下 5 种 VSS-FxLMS 算法的控制效果. (a) 第一阶固有频率信号附加白噪声; (b) 第二阶固有频率信号附加白噪声; (c) 多频信号附加白噪声.

Figure 8 (Color online) Control performance of five VSS-FxLMS algorithms with white noise as the excitation signal. (a) The first-order natural frequency signal plus white noise; (b) the second-order natural frequency signal plus white noise; (c) the multi-frequency signal plus white noise.

表 4 固有频率正弦信号作为激振信号下 5 种 VSS-FxLMS 算法的抑振效率 (dB).

Table 4 Vibration suppression efficiency (dB) of five VSS-FxLMS algorithms with sine excitation as the excitation signal at natural frequency.

	First order	Second order	Order superposition
VSS-FxLMS-1	-17.314	-12.128	-11.418
VSS-FxLMS-2	-17.377	-12.484	-12.327
VSS-FxLMS-3	-17.718	-12.487	-14.164
VSS-FxLMS-4	-17.977	-13.458	-14.527
VSS-FxLMS	-18.299	-13.902	-15.061

表 5 附加白噪声作为激振信号下 5 种 VSS-FxLMS 算法的抑振效率 (dB).

Table 5 Vibration suppression efficiency (dB) of five VSS-FxLMS algorithms with white noise as the excitation signal.

	First order	Second order	Order superposition
VSS-FxLMS-1	-15.828	-16.175	-16.254
VSS-FxLMS-2	-16.603	-17.206	-16.935
VSS-FxLMS-3	-17.607	-17.370	-18.057
VSS-FxLMS-4	-18.001	-18.540	-18.463
VSS-FxLMS	-18.830	-19.643	-18.865

其中, $d(i)$ 为施加振动主动控制之前的误差信号, $e(i)$ 为对系统进行振动主动控制之后的误差信号. S_A 为信号的衰减量, 其单位为 dB. S_A 的值越小, 表示算法的抑振效果越好.

表 4 和 5 分别为固有频率正弦信号和附加白噪声作为激振信号下 5 种 VSS-FxLMS 算法的抑振效率. 对比结果可知提出的 VSS-FxLMS 算法的 S_A 值总是最小的, 表明了提出的 VSS-FxLMS 算法的收敛性能和抑振效果优于其余的 VSS-FxLMS 算法.

5 结语

本文以压电智能叶片为研究对象,提出了3种位置优化准则,并基于改进的DE算法对压电元件的位置进行优化,通过在Adams和Matlab/Simulink联合仿真平台上进行前馈比例控制仿真结果对比,验证了模态应变取绝对值归一化叠加的位置优化方案有更好的振动控制效果.为了平衡收敛速度和稳态误差之间的关系,提出了根据误差信号幅值动态调整步长的VSS-FxLMS算法进行振动主动控制.按照优化配置结果设计了压电智能叶片,构建了实时振动主动控制实验平台,分别采用VSS-FxLMS-1算法、VSS-FxLMS-2算法、VSS-FxLMS-3算法、VSS-FxLMS-4算法和提出的VSS-FxLMS算法,在单频激振和多频激振条件下开展振动主动控制实验,实验结果验证了提出的VSS-FxLMS算法的有效性.

然而当前压电智能叶片走向实际应用,依然面临着多方面的困难和不足.例如,压电材料在长期机电耦合作用下可能发生老化、疲劳,导致性能降低,继而影响长期运行可靠性;压电作动器在强电磁环境下的抗干扰能力需进一步提高;如何将压电智能叶片集成到高温、高压、高冲击、高转速的航空发动机中也有一系列的工程问题亟待解决.

参考文献

- 1 Singh A, Bharadwaj S, Narayan S. Review of how aero engines work. *Tehnicki Glasnik*, 2015, 9: 381–387
- 2 Schobeiri M T. Blade design. In: *Gas Turbine Design, Components and System Design Integration*. Second Revised and Enhanced Edition. Cham: Springer International Publishing, 2019. 249–275
- 3 Bian Z F, Hu H F, Yang Y M, et al. Rotating-blade vibration measurement and parameter identification method based on a single probe. *Sci Sin Technol*, 2023, 53: 1323–1336 [边子方, 胡海峰, 杨拥民, 等. 基于单传感器的旋转叶片振动测量与参数辨识方法. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53: 1323–1336]
- 4 Zhang X W. Typical Vibration fault diagnosis and vibration control techniques of aero-engine. *Aerodynam Missile J*, 2019, 3: 87–91 [张小伟. 航空发动机典型振动故障诊断和振动抑制技术. *飞航导弹*, 2019, 3: 87–91]
- 5 Davenport O. Appendix B - final report for the USAF high cycle fatigue program. In: *High Cycle Fatigue*. Oxford: Elsevier Science Ltd., 2006. 493–498
- 6 Nathal M V, Steffen G L. Smart materials and active structures. *J Aerosp Eng*, 2013, 26: 491–499
- 7 Min J B, Duffy K P, Choi B B, et al. Numerical modeling methodology and experimental study for piezoelectric vibration damping control of rotating composite fan blades. *Comput Struct*, 2013, 128: 230–242
- 8 Rafiee M, Nitzsche F, Labrosse M. Dynamics, vibration and control of rotating composite beams and blades: a critical review. *Thin-Walled Struct*, 2017, 119: 795–819
- 9 Gao Z Y, Xu T X, Yu R C, et al. Piezoelectric-based smart structures for aero-engine blade: piezoelectric layout optimization and vibration suppression tests. *Aerospace Sci Tech*, 2024, 153: 109455
- 10 Bendine K, Boukhouloua F B, Haddag B, et al. Active vibration control of composite plate with optimal placement of piezoelectric patches. *Mech Adv Mater Struct*, 2019, 26: 341–349
- 11 Tao H F, Cui S. Active control of piezoelectric structures and optimal placement of piezoelectric actuators. *J Dyn Control*, 2019, 17: 234–243 [陶鸿飞, 崔升. 压电智能结构的主动控制及压电执行器布局优化. *动力学与控制学报*, 2019, 17: 234–243]
- 12 Li C, Li P, Zhang Z, et al. Optimal locations of discontinuous piezoelectric laminated cylindrical shell with point supported elastic boundary conditions for vibration control. *Composite Struct*, 2020, 233: 111575
- 13 Cai N B, Hou N X, Zhang C C. Reliability and optimization analysis of strain-gauge application for aeroengine vibration measurements. *J Propuls Technol*, 2016, 37: 1964–1969 [蔡宁泊, 侯乃先, 张成成. 航空发动机振动应力测量的贴片可靠性及优化分析. *推进技术*, 2016, 37: 1964–1969]
- 14 Li L, Tian K Y, Fan Y, et al. Performance of piezoelectric damper on bladed disk based on topology optimization. *J Propul Technol*, 2020, 41: 1831–1840 [李琳, 田开元, 范雨, 等. 基于拓扑优化的叶盘压电阻尼器性能研究. *推进技术*, 2020, 41: 1831–1840]
- 15 Liu T, Liu C, Zhang Z. Adaptive active vibration control for composite laminated plate: theory and experiments. *Mech Syst Signal Process*, 2024, 206: 110876
- 16 Gao Z Y, Zhu X J, Zhang H S, et al. Multiple model hybrid adaptive vibration control for flexible cantilever beam with varying load. *Sci Sin Inform*, 2020, 50: 734–742 [高志远, 朱晓锦, 张合生, 等. 变负载柔性悬臂梁的多模型混合自适应振动主动控制. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50: 734–742]
- 17 Peng F J, Ng A, Hu Y R. Actuator placement optimization and adaptive vibration control of plate smart structures.

J Intell Material Syst Struct, 2005, 16: 263–271

- 18 Wang P, Zhou X B, Yang X X, et al. Active control of radiated sound from thin plate structures based on virtual sensing. J Mech Eng, 2023, 59: 121–130 [王攀, 周小宝, 杨欣欣, 等. 基于虚拟传感的薄板结构辐射声主动控制研究. 机械工程学报, 2023, 59: 121–130]

Optimal placement and active vibration control algorithm for smart piezoelectric blades

Zhiyuan GAO, Tongxin XU, Zhonghua MIAO, Yong SHAO & Xiaojin ZHU*

School of Mechatronic Engineering & Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

* Corresponding author. E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn

Abstract As complex thin-walled curved components, aircraft engine blades feature intricate structures and operate under harsh conditions. Blade vibrations can directly affect the operational stability of aircraft engines. For the research of next-generation aviation engine blades that utilize piezoelectric materials for active vibration suppression, this paper proposes an optimal placement scheme based on finite element analysis and a variable step-size adaptive filtering control algorithm, for optimal placement of piezoelectric elements and active vibration control of smart piezoelectric blades. Firstly, three optimization objective functions for the configuration of piezoelectric elements are presented. The position of the piezoelectric elements is optimized by performing modal and transient analyses on the blade's finite element model and employing an improved differential evolution algorithm. The superiority of the modal strain absolute value-based position optimization scheme is validated through feedforward proportional control simulations. Subsequently, a VSS-FxLMS algorithm that dynamically adjusts the step size based on the error signal amplitude is proposed, capable of balancing convergence speed with steady-state error. Finally, a smart piezoelectric blade is designed according to the optimal placement results, and a real-time active vibration control experimental platform is constructed. Real-time control experiments are conducted and comparatively analyzed for single-frequency and multi-frequency disturbances. The experimental results demonstrate that the proposed VSS-FxLMS algorithm achieves effective vibration suppression with a faster convergence rate.

Keywords smart piezoelectric blade, active vibration control, optimal placement, differential evolution algorithm, variable step-size FxLMS algorithm