

压电作动器振动抑制系统可靠性评估及优化设计

庞欢¹, 刘逸茗¹, 林晔², 金朋³, 刘敬一¹

(1.长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2.北京机电工程研究所, 北京 100074;
3.华中科技大学 航空航天学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:作为结构振动抑制的有效手段,压电作动器振动抑制系统在结构振动控制中逐步得到应用。但是长服役期内压电作动器的性能退化/失效会导致整个振动抑制系统的服役可靠性退化,确定性优化方法得到的方案难以保证系统的服役可靠性。针对服役期内压电振动抑制系统的可靠性评估及优化设计问题,分析了压电作动器性能退化和失效下振动抑制系统的失效机理,构建了基于嵌套抽样和加权统计的振动抑制系统可靠性评估方法,解决了具有载荷共享和冗余特征的振动抑制系统可靠性评估问题,提出了基于主从式并行遗传算法的压电作动器可靠性布局优化方法,实现了作动器的位置和角度优化。通过算例证明了可靠性布局优化的可行性和有效性,为服役期内振动抑制系统的高可靠性设计提供理论基础,也可为结构振动控制这一工程问题提供新的解决思路。

关 键 词:压电作动器振动抑制系统;嵌套抽样;加权统计;遗传算法;可靠性优化

中图分类号:TH113.1; TB114.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)06-1097-10

由于内外载荷的综合作用,结构在工作中必然存在振动,剧烈的振动可能导致结构功能丧失甚至破坏,飞行器结构振动导致事故更是普遍存在。

对结构振动的控制一直以来都是研究的热点^[1-2],压电振动抑制系统是结构振动抑制的有效手段,目前在许多工程领域中都取得了成功的应用,如飞机突风减缓与颤振主动抑制、大型空间柔性结构的振动控制等。

目前,对于压电作动器振动抑制系统的研究主要侧重于压电作动器的布局优化。Crawley 等^[3]运用压电作动器对压电悬臂梁振动主动控制时,分析得到压电作动器布置于应变模态最大处控制效果最好。Gupta 等^[4]对压电作动器的配置优化方法作了详细总结,讨论了基于 6 个标准的压电传感器和作动器的最佳布置。近年来 Zhang 等^[5]研究了简谐激励下考虑恒定增益速度反馈(CGVF)主动控制的压电材料拓扑优化问题。Hu 等^[6]研究了简谐激励下薄壳结构的压电作动器拓扑优化设计问题。胡骏等^[7]系统调研了考虑可控性的压电作动器拓扑优

化设计方法。朱继宏等^[8]指出电极材料和基体材料的拓扑优化产生的复杂边界加大了实际生产制造的难度,并提出面向压电智能结构精确变形的压电作动器位置与结构拓扑协同优化设计方法。压电作动器位置、角度等布局优化方面,多将遗传算法作为优化算法,如 Zhang 等^[9]采用非线性整数规划遗传算法对作动器的布局进行优化设计。Biglar 等^[10]在圆柱壳的振动控制优化设计中,运用遗传算法得到了压电传感器和作动器粘贴在柱壳表面的最佳位置和方位。除此之外,粒子群优化算法,模拟退火算法等进化算法^[11]也被成功用于作动器布局优化中。

压电振动抑制系统的性能受到作动器自身特性、被抑制结构的尺寸、材料、载荷等多个因素的影响,上述各因素的随机性又导致压电振动抑制系统服役期内的性能具有随机性,使得设计良好的系统依然存在发生故障的风险。

压电材料是具备正负压电效应能实现机械能与电能之间相互转化的一类材料。通常在交变电场下服役,并长期工作在多场(电场、力场、温度场等)耦

收稿日期:2022-11-24 **基金项目:**国家自然科学基金面上项目(71971030)与中央高校基本科研业务费(300102222114)资助

作者简介:庞欢(1987—),长安大学副教授,主要从事机械可靠性建模及评估方法研究。

通信作者:刘敬一(1993—),长安大学讲师,主要从事机械可靠性评估理论及方法研究。e-mail:jingyiliu@chd.edu.cn

合情况下,具有疲劳失效^[12-15]、电击穿^[16-18]和表面脱粘^[19-20]等潜在失效模式。因此,面向不确定性的振动抑制系统可靠性评估成为了振动控制领域亟待研究的关键技术。Guo^[21]指出压电振动控制系统的可靠性分析和设计既不同于传统的结构可靠性问题,也不同于一般电子系统的可靠性问题,需要开发新的一体化可靠性建模和分析设计方法。目前,压电振动控制系统的可靠性评估方法可以分为非概率可靠性方法和概率可靠性方法。非概率可靠性方法基于随机变量区间的上下限进行可靠性分析,Li等^[22]指出可靠性概念是解决不确定性问题的最佳途径,其将非概率可靠性分析方法引入振动主动控制系统中,提出了一种参数不确定主动控制系统可靠性问题的近似方法。Wang等^[23]考虑了材料离散、载荷传递和认知不一致等不确定性,利用空间-状态变换和凸过程理论提出了一种新的非概率可靠性评估方法。然而上述方法难以考虑振动抑制系统可靠性随服役时间的退化过程。概率可靠性方法以变量的分布为基础进行可靠性分析,马天兵^[24]指出压电作动器性能退化及失效导致的振动主动控制系统可靠性一直是振动控制领域亟待研究的关键技术,并运用小波包和 RBF 神经网络来识别系统的失效概率。王滨生^[25]结合压电桁架结构的力学特点,给出了可靠性分析的安全余量表达形式,采用改进的一次二阶矩法和 Taylor 展开随机有限元法给出了安全余量可靠性指标的计算方法。但上述可靠性分析方法均未考虑压电振动抑制系统的冗余和载荷共享特性,使得系统的可靠性评估结果过于保守。

本文从压电作动器振动抑制系统原理出发,探讨作动器性能退化和失效导致的振动抑制系统可靠性问题,提出了基于嵌套抽样和加权统计的可靠性评估方法,解决了具有冗余和载荷共享特性的压电振动抑制系统的可靠性评估问题,并提出基于主从式并行 NSGA-II 的压电作动器可靠性布局优化方法。最后,通过算例证明了可靠性布局优化能够有效保证振动抑制系统服役期间内的可靠性。

1 振动抑制系统可靠性问题

1.1 压电作动器振动抑制系统功能原理

压电作动器振动抑制系统工作原理如图 1 所示。

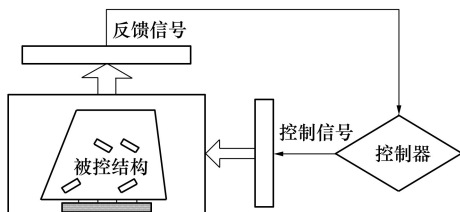


图 1 振动抑制系统工作原理

压电振动抑制系统将压电元件安置在结构中作为传感器和作动器,压电传感器感受到结构因振动而产生的应变,将其转变为相应的电信号,经过一定控制算法产生控制信号,然后再由这一控制信号驱动压电作动器对结构施加一定的控制力,从而达到抑制结构振动的目的,是一种机电耦合作用^[26]。

1.2 压电作动器振动抑制系统失效机理分析

压电材料类型较多,应用最广泛的是压电陶瓷(PZT),长期在多场(电场、力场、温度场等)耦合环境下工作,可能发生疲劳断裂、电击穿等失效模式以及出现电退化问题,表现为作动力的下降。

在振动抑制系统中,各压电作动器共同作用抵抗结构的振动,即各压电作动器之间存在载荷共享特征,这就使得一个作动器的性能退化/失效会导致其余存活作动器载荷及性能退化速率增加;压电作动器性能退化/失效会导致结构振幅增加,反过来加速压电作动器的性能退化/失效。因此,二者具有耦合关系。其耦合模型如图 2 所示。

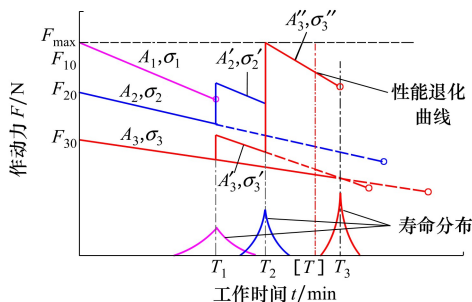


图 2 压电作动器失效与性能退化耦合模型示意图

由于布置位置不同,各压电作动器的工作载荷和工作应力也不同。不考虑随机因素时,大载荷高应力工作的压电作动器性能衰退速率较快(如 A_1),小载荷低应力的压电作动器性能衰退速率较慢(如 A_3)。另一方面,在抑制结构振动的过程中,压电作动器承受交变载荷,大载荷高应力工作的压电作动器疲劳寿命较低(如 T_1),而小载荷低应力的压电作

动器疲劳寿命较长(如 T_3)。

当有一个压电作动器(如 1 号)在 T_1 时刻出现疲劳破坏时,该作动器的输出突变到 0,振动抑制系统的抑制能力会瞬间下降,结构振动加剧,在闭环控制下,剩余存活作动器(2 号与 3 号)的工作载荷和工作应力将会提升,并将在新的工作载荷和应力(σ'_2, σ'_3)下以各自新的退化速率(A'_2, A'_3)工作,直到下一个作动器发生失效(如 2 号),如此持续,当抑制系统不能有效抑制结构振动时,发生系统功能失效。

当不考虑作动器失效时间随机性时,应力大的作动器首先失效,因此,各作动器的失效时间和失效顺序是确定的(即图中的 1 号先失效,2 号次之,3 号最后失效),可以根据作动器的性能退化规律以及振动抑制系统的性能计算模型评估各时刻系统的振动抑制效果。

但由于随机因素的存在,各作动器的失效时间存在分散性(即图中的 T_1, T_2, T_3 存在分散性),就可能出现载荷小的作动器先于载荷大的作动器失效(如 2 号先于 1 号发生失效),即作动器的失效顺序具有随机性。不同失效顺序也会导致存活作动器性能退化规律以及后续失效顺序的变化,因此,服役期内的抑制性能具有随机性。

1.3 压电作动器振动抑制系统可靠性模型

假设某结构在频率为 x 的正弦激励下的振幅为 A_0 ,额定工作寿命为 $[T]$,振幅阈值为 $[A]$ 。振动抑制系统由 m 个作动器组成,作动器最大输出载荷为 $F_{\max}$,根据结构特性,各作动器的初始载荷分别为 $F_i(0)$,工作应力为 σ_i 。则,工作一段时间 t 后作动器输出载荷的退化量可以表示为工作应力与持续时间的函数

$$\Delta_i(t) = f(\sigma_i, t) \quad i = 1, \cdots, m \tag{1}$$

当第 k 个作动器在 t_k 时刻出现失效时, t_k 之后的任意时刻,存活作动器的实际输出载荷为

$$F_i(t) = F_i(0) - \Delta_i(t_k) - \Delta_i(t - t_k), \quad i = 1, 2, \cdots, m, i \neq k \tag{2}$$

用结构的振幅表征振动抑制系统的性能,当结构和激励确定时,振幅是各压电作动器输出载荷的函数,即

$$A(t) = g(F_1(t), F_2(t), \cdots, F_m(t)) \tag{3}$$

因此,振动抑制系统的可靠性可以表示为

$$R = P\{A(t) < [A] \mid 0 < t < [T]\} \tag{4}$$

根据 $A(t)$ 的单调递增特性,(4)式可以简化为

$$R = P\{A(T) < [A]\} \tag{5}$$

2 可靠性评估方法

2.1 压电作动器振动抑制系统可靠性评估原理

为了尽可能保证振动抑制系统的性能,采用冗余设计,即希望部分压电作动器失效后在其余存活作动器的共同作用下系统仍能正常工作。因此,多压电作动器振动抑制系统是作动器冗余数量不定的载荷共享系统。一方面多个压电作动器共同作用抑制系统振动,具有载荷共享特点,另一方面,压电作动器数量存在冗余,但具体的冗余数量受到失效顺序和性能退化规律的影响。

由图 2 中作动器失效与性能退化的耦合关系模型看出,各作动器的寿命具有随机性,而该随机性会对存活作动器后续的性能退化速率及剩余寿命产生影响,因此,需要在压电作动器振动抑制系统服役过程中逐个确定失效顺序及后续性能退化,故采用嵌套抽样方法进行可靠性建模。

通过嵌套抽样的方法,将失效顺序的不确定性问题转换为确定性问题,在此基础上,通过各样本的嵌套过程分析,可获取作动器退化/失效离散性导致的系统抑制性能不确定性特征。同时,采用加权统计方法,可以有效解决可靠度收敛问题和嵌套抽样带来的计算效率问题。具体原理如图 3 所示。

1) 在确定的作动器布局下,基于作动器载荷分配模型,确定各压电作动器的载荷,进而计算作动器的寿命均值及性能退化速率。

2) 通过变异系数定义作动器的寿命分布,并通过抽样确定哪个作动器先失效及其实际失效时间。

3) 基于失效作动器的历史失效时间确定系统的累积工作时间及存活作动器个数,进行收敛判断。

4) 若累积工作时间达到寿命要求 T 或全部作动器失效,则进入下一步。否则,迭代执行步骤 1)~3)。

5) 根据作动器的历史失效时间及失效顺序,计算存活作动器的剩余性能及当前的系统抑制性能,并统计上述嵌套抽样的层数。

6) 结合失效判据,辨识各层失效样本数,并基于失效样本的嵌套层次确定其权重,在此基础上加权统计失效样本个数。

7) 基于样本最大嵌套层数计算样本总数并结合失效样本的加权统计结果求解系统的可靠度。

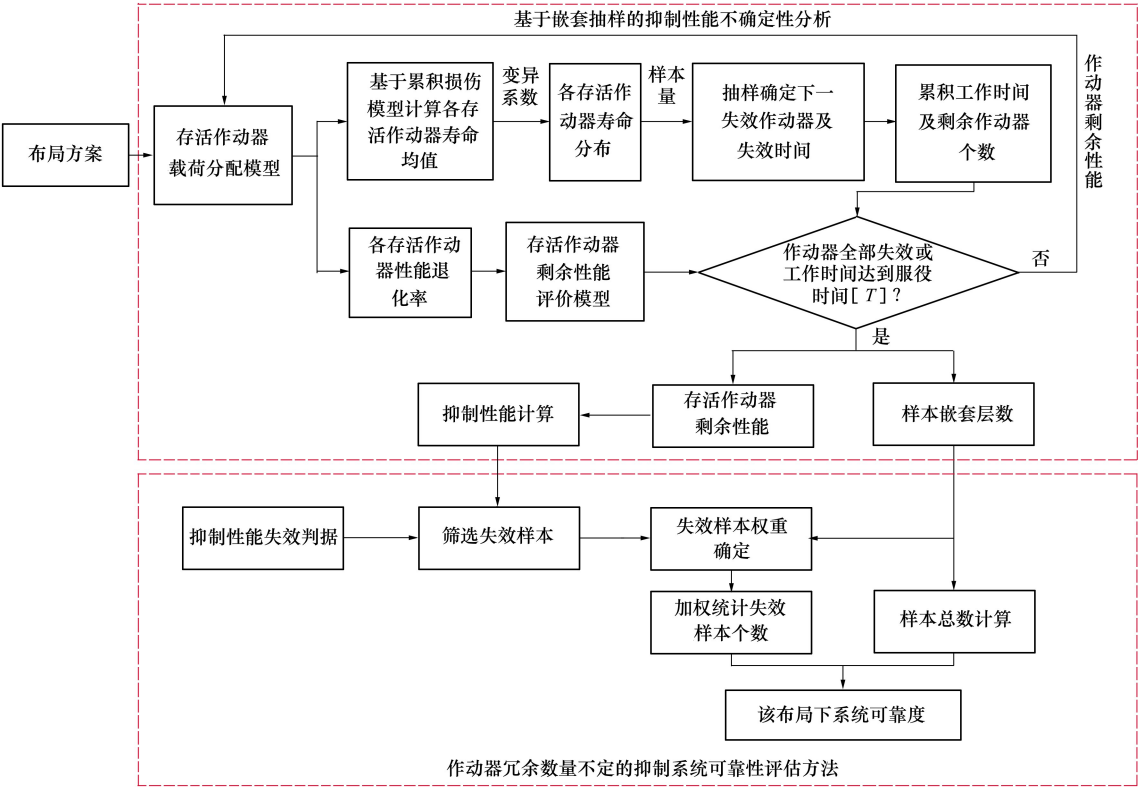


图 3 作动器失效和性能退化下振动抑制系统不确定性模型

2.2 基于加权统计的振动抑制系统可靠性评估方法

通过上述嵌套抽样可得到振动抑制系统的多个样本(同一布局下可能的多种退化过程),下面将以含 4 个压电作动器的振动抑制系统为例阐述加权统计的原因和过程。

由图 4 看出,对于一个确定的布局方案,首先进行第一轮抽样,获取 n 个样本,每个样本中包含了各压电作动器的失效时间,从中选定寿命最短的作动器作为下一失效作动器。如果系统的历史工作时间已经超过振动抑制系统服役时间要求,则停止对该样本的嵌套抽样,否则,为了得到服役时间截止时刻

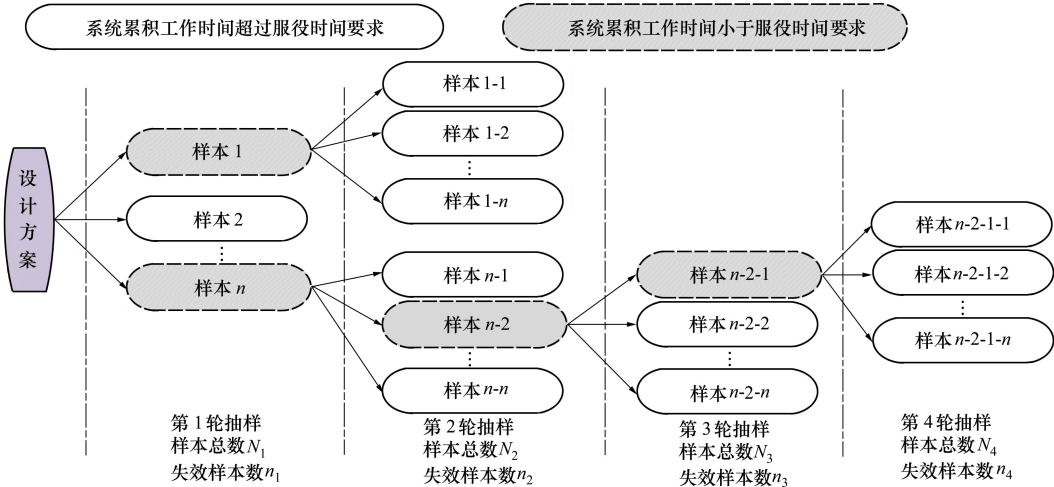


图 4 基于嵌套抽样的振动抑制系统可靠性模型

的振动抑制系统性能,还需要进行下一轮抽样,再次确定各剩余作动器中的最先失效作动器,以此类推,可以获取多个样本,每一个样本的输出为服役结束时刻的振动抑制系统性能。

在上述嵌套抽样中,得到了多个样本在服役结束时刻的振动抑制系统性能,这些样本可能属于任一轮抽样,在传统的统计方法中,直接统计其中失效样本的数量和样本总量后计算失效概率,即

$$P_f = \frac{\sum n_i}{\sum N_i}$$

(6)

很显然,对于提前结束抽样的样本(如样本 2),如果类似于正常抽样的样本(如样本 1)继续抽样,其后续样本均为可靠样本,抽样到最后一轮时,样本 2 将演变为 n^{m-1} 个可靠样本。可见,(6) 式忽略了各轮样本的权重问题。

从上述分析看出,第一轮抽样得到的可靠样本的权重较大,最后一轮得到的可靠样本的权重较小,因此,当每次抽样的数量均为 n 时,可得到表 1 所示的样本权重。

表 1 嵌套抽样权重系数

嵌套次数 k_i	1	2	...	k	$k+1$	...	m
权重 w_i	n^{m-1}	n^{m-2}	...	n^{m-k}	n^{m-k-1}	...	$n^{m-m} = 1$

根据表 1 中的权重,当量失效样本数为

$$N_f = \sum_{k_i=1}^m w_i \cdot n_i$$

(7)

当量样本总数为

$$N = n^m$$

(8)

因此,该确定布局下压电振动抑制系统的服役可靠性为

$$R = 1 - P_f = 1 - \frac{N_f}{N}$$

(9)

可以看出,模型的计算精度和效率依赖于样本量 N , N 由每次抽样的数据 n 决定。 n 过小会导致计算精度不足, n 过大会导致计算效率过低,因此,在实际中需要通过尝试给出 n 的合理取值。

3 振动抑制系统可靠性优化设计方法

3.1 基于遗传算法的可靠性并行优化方法

振动抑制的效果不仅取决于压电作动器的性能和控制方法,还与作动器布局方案密切相关。压电

作动器的布局是影响控制系统可靠性的一个重要决定因素,因此,需要对作动器开展布局优化,使得振动抑制系统在整个服役期内均具有较高的可靠性。优化流程如图 5 所示。

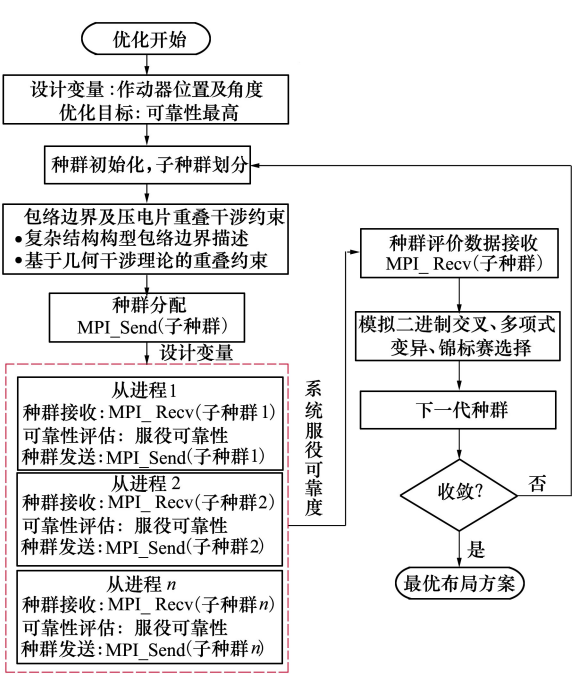


图 5 压电作动器振动抑制系统可靠性优化流程

1) 设计变量:为了获得工程可用的作动器布局优化方案,以作动器位置及角度作为设计变量。由于设计变量灵敏度信息获取困难,且有很多局部最优解陷阱,因此采用遗传算法进行优化设计。

2) 目标函数:以系统可靠度最高为目标函数,优化过程中可靠度计算与遗传算法的选用导致计算量过大,采用并行策略与代理模型策略以提高优化效率。

3) 约束条件:优化过程中压电作动器之间会产生几何干涉,因此必须将压电作动器限制在结构空间包络边界内,同时,避免压电作动器相互干涉。

4) 优化算法:采用基于代理模型的主从式并行遗传算法。一方面,在振动抑制系统可靠性模型的基础上,构建代理模型并进行精度验证,利用有限的抽样点来构造代理模型以近似拟合并替代真实的功能函数,从而降低可靠性分析中的仿真计算量。另一方面,采用主从并行式遗传算法。该算法系统分为一个主处理器和若干从处理器:主处理器监控整个染色体种群,并基于全局统计执行选择、交叉和变异操作;各个从处理器接收来自主处理器的个体并

进行适应度计算,再把结果传给主处理器。

3.2 包络边界及压电作动器重叠约束检测方法

压电作动器的布局优化要求各压电作动器位于被抑制结构表面以内,且压电作动器两两之间不相互干涉或重叠,如图 6 所示。

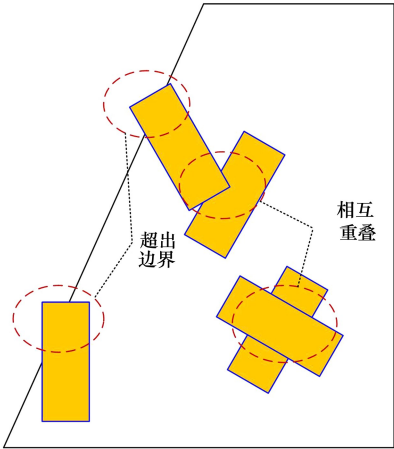


图 6 压电作动器违反约束示意图

如图 7a)所示,以往通常将压电作动器等效为以其对角线为直径的圆形,通过检测圆形与结构表面的相对位置来保证压电作动器位于结构表面以内,通过检测 2 个作动器中心点之间的距离来保证作动器两两之间不发生干涉。

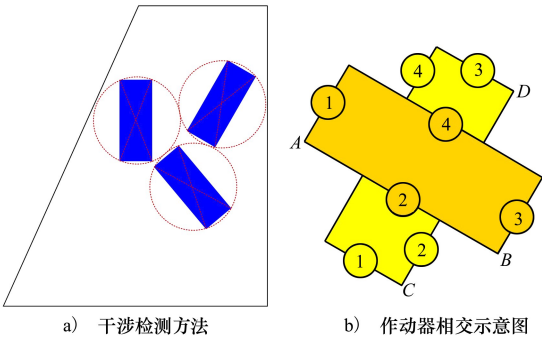


图 7 作动器干涉约束检测方法

上述方法虽简单易行,但很显然,对于较细长的压电作动器而言,该方法会排除过多的可行解。

通常情况下结构尺寸远远大于作动器尺寸,而作动器形状为标准矩形,所以通过遍历并判断压电作动器角点是否全部位于结构内部,并结合几何学与向量计算实现判断。

由于作动器尺寸相当,一方面需要遍历判断作动器角点是否落入其他作动器之内;另一方面需要排除 2 个作动器出现如图 7b)所示的相交情况。由

于压电作动器 4 条边都是直线段,可以用向量叉积枚举 4×4 共 16 组对边(线段)是否相交,向量交叉乘法方程为

$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix} = x_1y_2 - y_1x_2 \quad (10)$$

如果结果小于 0,则表示向量 $\boldsymbol{b}$ 位于向量 $\boldsymbol{a}$ 的顺时针方向;如果结果大于 0,则表示向量 $\boldsymbol{b}$ 位于向量 $\boldsymbol{a}$ 的逆时针方向;如果等于 0,则表示向量 $\boldsymbol{a}$ 与向量 $\boldsymbol{b}$ 平行。

因此,如果线段 CD 的 2 个端点 C 和 D 以及与另一线段(A 或 B ,仅其中一个)的一个端点相连的向量与向量 AB 交叉相乘,如果结果不同,则表示 C 和 D 分别位于直线 AB 的两侧。如果结果相同,则表示 CD 的 2 个点位于 AB 的一侧,它们不相交。

4 算例及结果讨论

4.1 被控结构几何及边界描述

以某梯形结构为被控对象,其几何形状如图 8 所示,其中梯形结构厚度 2 mm,材料为 Al7150,密度 2 820 kg/m³,弹性模量 72 GPa,泊松比 0.35;固定支座材料为 45 号钢,密度 7 850 kg/m³,弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3;支座处激励频率 20 Hz;要求持续工作时间大于 30 min,右上角处特征点振幅小于 2 mm。压电材料密度 7 500 kg/m³,尺寸为 50 mm×25 mm,额定电压 300 V。其余参数如表 2 所示。

表 2 压电作动器材料参数

参数类型	参数名称	数值	参数类型	参数名称	数值
弹性常数/GPa	c_{11}	139	压电常数/ (C · m ⁻²)	e_{31}	-14.8
	c_{12}	77.84		e_{33}	15.783 5
	c_{13}	74.28		e_{15}	12.67
	c_{33}	115.41	介电常数/ (C ² (N · m ²) ⁻¹)	ε_{11}	1 474.36
	c_{44}	25.64		ε_{33}	1 299.38
	c_{66}	30.58		ε_0	1 299.38

根据调研,材料疲劳的 $S-N$ 曲线一般可用幂函数、指数函数或三参数式方式表示,本文选用了较为常用的幂函数形式^[27]。本案例中假设压电作动器的 $S-N$ 曲线(见图 9)和性能退化服从(11)式所示关系,以此为基础完成可靠性设计。

$$N = 10 \times e^{4 - 0.65 \log S}$$
$$\Delta_i(t) = f(\sigma_i, t) = 10^{-3} \times S_i \times t_i \tag{11}$$

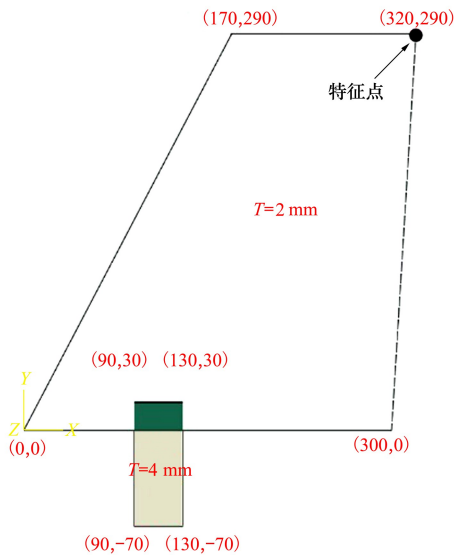


图 8 被控结构几何及边界示意图

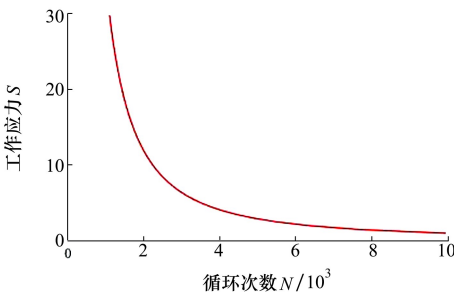


图 9 压电作动器 S-N 曲线

实际中,不同类型压电作动器的疲劳特性及性能退化规律存在较大差异,可通过基础试验获取。

4.2 作动器布局优化及可靠性评估

分别对该振动抑制系统进行确定性优化设计和可靠性优化设计,得到布局方案及振动特性分别如图 10~11 所示。其中图 10a)为初始布局,将 4 片压电作动器平行等间距布置于靠近翼根部位;图 10b)为基于确定性优化方法,以振幅最小为目标得到的布局方案;图 10c)为以服役期内的可靠性最高为优

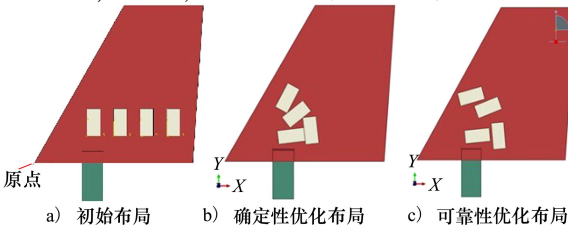


图 10 不同方法振动抑制作动器布局对比

化目标得到的布局方案。

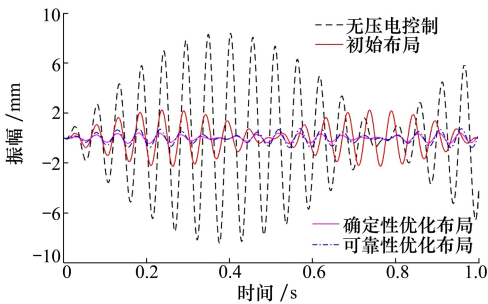


图 11 不同布局方案服役初期振动抑制效果对比

可以看出,无压电控制时结构最大振幅达到 8 mm,初始布局振幅达到 2 mm,确定性优化布局振幅达到 0.2 mm,可靠性优化布局振幅达到 0.5 mm。显然,从服役初始时刻看,确定性优化布局能获得更好的振动抑制效果,可靠性优化布局次之,无振动控制下效果最差。

在确定性优化布局下,考虑作动器的失效及性能退化,得到该布局振动抑制系统的失效概率随服役时间的演化规律,并与可靠性优化布局振动抑制系统的失效概率演化规律对比,得到结果如图 12 所示。可见,确定性优化得到的布局方案在服役初期失效概率很低,但在 12 min 左右开始失效概率有所增加,到服役后期失效概率增加较快,导致在规定的最大服役时刻 30 min 时失效概率达到 55%。相比较而言,可靠性优化布局方案在 30 min 时失效概率仅为 10%。

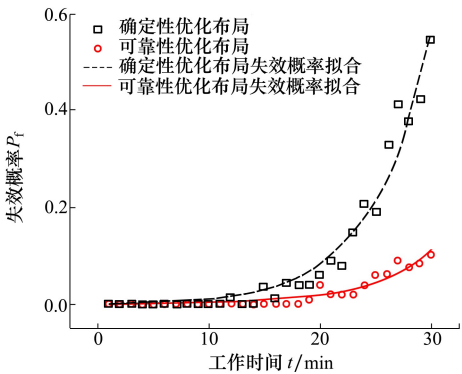


图 12 不同布局方案系统失效概率演化规律对比

综上所述可以看出,确定性优化布局下,振动抑制系统在服役初期具有较低的失效概率,但随着服役时间的增加,振动抑制系统的可靠性难以保证。这是由于在确定性优化时,不考虑使用过程中压电作动

器的性能退化或失效,通常将压电作动器布置在受载最大位置,虽然可以使系统振动抑制能力最强,但是后续压电作动器性能退化更快,也更容易失效,导致长时间服役后系统失效概率迅速上升。而在规定的服役时间范围内,可靠性优化布局已经将系统性能与可靠性综合考虑,设计时就考虑了能够保证振动抑制系统在整个服役周期内均具有较低的失效概率,振动抑制效果远优于确定性布局优化结果。

5 结 论

针对工程中的振动抑制需要,研究了压电振动抑制系统的可靠性模型,采用嵌套抽样和加权统计方法提出了具有冗余和载荷共享特性的压电振动抑制系统的可靠性评估方法,并提出基于主从式并行

遗传算法的压电作动器可靠性布局优化方法。根据模型和结果可以得到如下结论:

1) 压电作动器振动抑制系统具有冗余和载荷共享特性,压电作动器的性能退化/失效与振动抑制系统性能相互影响,具有耦合关系。

2) 嵌套抽样方法能很好地描述压电作动器振动抑制系统的失效过程和行为,可以有效解决系统可靠性评估问题。

3) 改进作动器干涉检测方法并采用并行遗传算法后的可靠性布局优化能够在保证系统性能的同时降低压电作动器的性能退化速率,使得服役期间可靠性得到保障。

4) 结果表明采用可靠性布局优化后,案例所示的压电作动器振动抑制系统的服役过程的失效概率可以由 0.56 降至 0.11,可靠性大幅提高。

参考文献:

- [1] 杨佳佳,贺尔铭,舒俊成. 自适应模糊控制在抑制海上漂浮式风力机振动响应中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(2): 241-248
YANG Jiajia, HE Erming, SHU Juncheng. Application of adaptive fuzzy control to suppression vibration response of floating off-shore wind turbine[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(2): 241-248 (in Chinese)
- [2] 张书扬,张顺琦,李靖,等. 基于PID算法的压电智能结构形状与主动振动控制[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(1): 74-81
ZHANG Shuyang, ZHANG Shunqi, LI Jing, et al. Shape control and active vibration control of piezoelectric smart structures with PID algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(1): 74-81 (in Chinese)
- [3] CRAWLEY E F, LUIS J. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures[J]. AIAA Journal, 1987, 25(10): 1373-1385
- [4] GUPTA V, SHARMA M, THAKUR N. Optimization criteria for optimal placement of piezoelectric sensors and actuators on a smart structure: a technical review[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(12): 1227-1243
- [5] ZHANG X, KANG Z, LI M. Topology optimization of electrode coverage of piezoelectric thin-walled structures with CGVF control for minimizing sound radiation[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 50(5): 799-814
- [6] HU K, LI H. Multi-parameter optimization of piezoelectric actuators for multi-mode active vibration control of cylindrical shells[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 426: 166-185
- [7] 胡骏,亢战. 考虑可控性的压电作动器拓扑优化设计[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 1073-1081
HU Jun, KANG Zhan. Topology optimization of piezoelectric actuator considering controllability[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 1073-1081 (in Chinese)
- [8] 吴曼乔,朱继宏,杨开科,等. 面向压电智能结构精确变形的协同优化设计方法[J]. 力学学报, 2017, 49(2): 380-389
WU Manqiao, ZHU Jihong, YANG Kaike, et al. Integrated layout and topology optimization design of piezoelectric smart structure in accurate shape control[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(2): 380-389 (in Chinese)
- [9] ZHANG C, WANG L, WU X, et al. A novel optimal configuration of sensor and actuator using a non-linear integer programming genetic algorithm for active vibration control[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28(15): 2074-2081
- [10] BIGLAR M, MIRDAMADI H R, DANESH M. Optimal locations and orientations of piezoelectric transducers on cylindrical shell based on gramians of contributed and undesired Rayleigh-Ritz modes using genetic algorithm[J]. Journal of Sound and

- Vibration, 2014, 333(5): 1224-1244
- [11] 黄秀峰, 崔洪宇, 洪明, 等. 振动控制中压电元件优化配置研究进展[J]. 压电与声光, 2015, 37(5): 768-779
HUANG Xiufeng, CUI Hongyu, HONG Ming, et al. Advances in optimal allocation of piezoelectric sensor actuator in structural vibration control[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5): 768-779 (in Chinese)
- [12] 谢丽, 王家秋, 钟哲强, 等. 压电陶瓷驱动器疲劳对变形镜校正带宽的影响[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 0912005
XIE Li, WANG Jiaqiu, ZHONG Zheqiang, et al. Influence of fatigue of piezoelectric ceramic actuators on correction bandwidth of deformable mirrors[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 0912005 (in Chinese)
- [13] LEI J, WANG H, ZHANG C, et al. Comparison of several BEM-based approaches in evaluating crack-tip field intensity factors in piezoelectric materials[J]. International Journal of Fracture, 2014, 189: 111-120
- [14] LEI J, ZHANG C. A simplified evaluation of the mechanical energy release rate of kinked cracks in piezoelectric materials using the boundary element method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 188: 36-57
- [15] MISHRA R K. A review on fracture mechanics in piezoelectric structures[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5: 5407-5413
- [16] MARTÍNEZ-AYUSO G, FRISWELL M I, KHODAPARAST H H, et al. Electric field distribution in porous piezoelectric materials during polarization[J]. Acta Materialia, 2019, 173: 332-341
- [17] ZHENG D, LUO M, SWINGLER J. Multi-breakdown model for explaining the formation and growth of black spots in PZT capacitor under DC bias[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2016, 241: 197-202
- [18] LOBODA V, SHEVELEVA A, Chapellec F. A dielectric breakdown model for an electrode along an interface between two piezoelectric materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 224: 106809
- [19] CHEN P J, PENG J, LIU H, et al. The electromechanical behavior of a piezoelectric actuator bonded to a graded substrate including an adhesive layer[J]. Mechanics of Materials, 2018, 123: 77-87
- [20] KHAN A, Kim H S, Youn B D. Modeling and assessment of partially debonded piezoelectric sensor in smart composite laminates[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 132: 26-37
- [21] GUO S X. An efficient third-moment saddlepoint approximation for probabilistic uncertainty analysis and reliability evaluation of structures[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38: 221-232
- [22] LI Y L, WANG X J, WANG L. Non-probabilistic stability reliability measure for active vibration control system with interval parameters[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 387: 1-15
- [23] WANG L, WANG X J, WU D. Non-probabilistic time-variant reliability assessment (NTRA) for the active control of vibration systems with convex uncertainties[J]. ISA Transactions, 2018, 83: 276-289
- [24] 马天兵. 压电智能结构振动主动控制关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014
MA Tianbing. Research on key technologies of active vibration control for piezoelectric smart structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014 (in Chinese)
- [25] 王滨生. 压电桁架结构系统可靠性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008
WANG Binsheng. System reliability analysis of piezoelectric truss structures[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008 (in Chinese)
- [26] 王雄, 高英山, 张顺琦, 等. 基于 zig-zag 假设的压电阻尼层合结构机电耦合建模与分析[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(2): 407-413
WANG Xiong, GAO Yingshan, ZHANG Shunqi, et al. Electromechanical coupling modeling and analysis of piezoelectric damping laminated structures based on zig-zag hypothesis[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(2): 407-413 (in Chinese)
- [27] 张亚军. S-N 疲劳曲线的数学表达式处理方法探讨[J]. 理化检验(物理分册), 2007(11): 563-565
ZHANG Yajun. Discussion on processing method for mathematical expression of S-N fatigue curve[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part A:Physical Testing), 2007(11): 563-565 (in Chinese)

Reliability evaluation and optimization design method of piezoelectric actuator vibration suppression system

PANG Huan¹, LIU Yiming¹, LIN Ye², JIN Peng³, LIU Jingyi¹

(1.School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2.Beijing Mechanical and Electrical Engineering Institute, Beijing 100074, China;
3.School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: As an effective means of structural vibration suppression, piezoelectric actuator vibration suppression system (PAVSS) has been gradually applied in structural vibration control. However, the performance degradation or failure of piezoelectric actuator under long service life will lead to the degradation of service reliability of PAVSS, so the scheme obtained by deterministic optimization method is difficult to ensure the service reliability. Aiming at the reliability evaluation and optimal design of PAVSS in service, the failure mechanism considering of the performance degradation or failure of piezoelectric actuator is analyzed, and the reliability evaluation method based on nested sampling and weighted statistics is constructed, which solves the reliability evaluation problem of PAVSS with the characteristics of load-sharing and redundancy. A reliability-based optimization method based on master-slave parallel genetic algorithm is proposed to optimize the position and angle of the actuators. At last, the feasibility and effectiveness of the proposed method are proved by an example, which not only provides a theoretical basis for the high reliability design of PAVSS in service, but also provides a new solution for the engineering problem of structural vibration control.

Keywords: PAVSS; nested sampling; weighted statistics; genetic algorithm; reliability-based optimization

引用格式: 庞欢, 刘逸茗, 林晔, 等. 压电作动器振动抑制系统可靠性评估及优化设计[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(6): 1097-1106

PANG Huan, LIU Yiming, LIN Ye, et al. Reliability evaluation and optimization design method of piezoelectric actuator vibration suppression system [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(6): 1097-1106 (in Chinese)