

文章编号: 2095-2163(2020)10-0120-07

中图分类号: U463.82

文献标志码: A

基于模拟退火算法的压电薄板振动抑制研究

邹光浩, 郭辉

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 本文针对车内振动问题,对压电分流电路与薄板组成的压电结构进行动力学分析,建立动力学微分方程,求解得到薄板结构的传递函数并确立目标函数;之后利用模拟退火算法,对目标函数进行优化,根据压电薄板振动幅值的变化,得到优化后的电阻值与电感值;最后,运用数值仿真计算与分析的方法,对比不同分流电路参数优化方法下的薄板振幅。通过仿真实验得出,运用模拟退火算法优化的压电薄板结构的振动幅值比极点配置法与传递函数法略小。

关键词: 压电分流阻尼电路; 模拟退火算法; 振动抑制; 压电薄板

Research on Vibration Suppression of Piezoelectric Thin Plate Based on Simulated Annealing Algorithm

ZOU Guanghao, GUO Hui

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In this paper, the dynamic analysis of piezoelectric structure composed of piezoelectric shunt circuit and thin plate is carried out, the dynamic differential equation is established, the transfer function of thin plate structure is solved, and the objective function is established. Then, the objective function was optimized by simulated annealing algorithm. According to the variation of the vibration amplitude of the piezoelectric thin plate, the optimized resistance and inductance values were obtained. Finally, the thin plate amplitudes under different shunt circuit parameter optimization methods are compared by numerical simulation calculation and analysis. The simulation results show that the vibration amplitude of the piezoelectric thin plate optimized by the simulated annealing algorithm is slightly smaller than that by the pole assignment method and the transfer function method.

[Key words] Piezoelectric shunt damping circuit; Simulated annealing algorithm; Vibration suppression; Piezo sheet

0 引言

薄板在工程领域中有着广泛的应用,人们对其使用过程中产生的振动加以利用,发明了振动压路机、测试振动台等。但薄板振动也会为生产生活带来诸多问题,比如会缩短机械的使用寿命、产生噪声、降低使用者舒适度等。因此,在薄板的实际工程应用中,要进行振动控制。减振方法通常分为主动控制与被动控制。压电分流阻尼技术属于被动控制方法中的一种,与主动控制相比,其控制系统较为简单,易于实现。该技术通过压电作动器把振动结构的机械能转换为电能,通过分流电路中的电阻把电能消耗掉,从而减少系统的总能量,达到抑制结构振动的目的。压电分流阻尼技术具有结构简单,成本低和容易实现的特点,已经在工程实践当中有一定的应用^[1]。

分流阻尼电路的电阻、电感值以及压电片的布

置,对其抑振效果起到了重要作用。

(1)压电片的布置位置直接影响其受到激励后产生的电能大小;

(2)分流电路中电路参数的大小决定了机械能被转化并消耗的能力。

针对参数优化,Hagood 和 Von Flotow^[2]研究了电阻 R 以及电阻 R 和电感 L 串联的两种分支电路形式,推导出了参数优化公式并且建立了被控结构为单自由度系统时的数学模型;WU^[3]在大量前人研究基础上,延伸推导出了并联 RL 电路的参数优化表达式,并且证明了并联电路同样可以控制结构产生的振动与噪声;杨志春教授^[4]对压电分流阻尼技术的机电耦合系数进行了研究,找到了机电耦合系数对压电分流阻尼系统减振效果的影响规律;毛崎波教授^[5]利用四边固支的薄板模型,对比了3种不同分流电路的减振效果,证明在达到最优参数时,3

基金项目: 国家自然科学基金(51675324)。

作者简介: 邹光浩(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:汽车 NVH 测控技术;郭辉(1981-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向:车辆振动噪声测控技术、声学超材料。

通信作者: 郭辉 Email:hgsues@163.com

收稿日期: 2020-04-24

种分流电路都可以起到很好的减振效果。

在计算电路参数时,前人对于传递函数法与极点配置法的研究已经较为成熟。其中,传递函数法是建立单自由度弹簧等效系统及其位移传递函数。利用传递函数优化方法,降低传递函数幅值。极点配置法是建立机电耦合模型,由系统阻抗公式出发,并进行展开,从系统位移衰减入手,用极点与虚轴之间距离代表衰减量,以增大衰减量为目标。但利用这二种方法仅仅可以解决单一频率处的振动问题,并不能对特定频率范围内的多个频率处的振动进行控制。本文运用模拟退火算法对薄板结构的分流电路参数进行优化,对 0-500 Hz 内的结构振动幅值进行控制与分析。并与传递函数方法、极点配置方法的优化结果进行对比,体现了此方法对于多点振动控制的有效性。

1 动力学基本方程

1.1 薄板单元分析

本文研究对象是外形规则的矩形薄板,因而在有限元建模时宜选用矩形单元。为了较好地反映真实的变形情况,在相邻单元在公共节点处除了应有相同的挠度之外,还应有沿 x 及 y 向斜率(倾角)的连续性。因此,在任意节点处有 3 个节点位移分量:挠度、法线绕 x 轴及 y 轴的转角^[5],如图 1 所示。

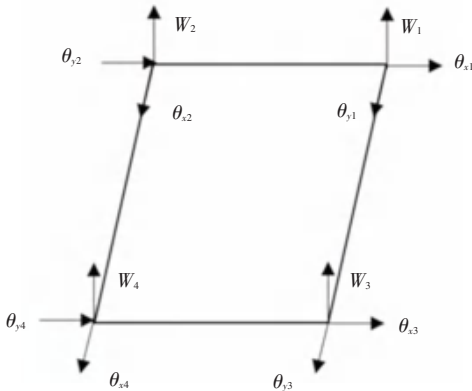


图 1 单元薄板自由度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of unit sheet freedom

一个单元薄板对应 12 个自由度,每个节点处对应各自的挠度与转角,所以单元位移可假设成包含 12 个常数的多项式,通过求解可将挠度利用节点位移表示^[6-7]:

$$w = [N] \{ \eta \}. \quad (1)$$

其中:

$$[N] = [N_1, N_{x1}, N_{y1}, N_2, N_{x2}, N_{y2}, N_3, N_{x3}, N_{y3}, N_4, N_{x4}, N_{y4}],$$

$$\{ \eta \} = \{ w_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}; w_2, \theta_{x2}, \theta_{y2}; w_3, \theta_{x3}, \theta_{y3}; w_4, \theta_{x4}, \theta_{y4} \}^T.$$

薄板中面内的点在 Z 方向位移 W ,称为挠度。

当挠度小于或者等于薄板厚度的五分之一时,可利用基尔霍夫假设,即:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \ddot{\eta} = -z \begin{Bmatrix} \hat{e} \frac{\partial^2 [N]}{\partial x^2} \\ \hat{e} \frac{\partial^2 [N]}{\partial y^2} \\ \hat{e} \frac{\partial^2 [N]}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} \{ \eta \} = z [B] \{ \eta \}. \quad (2)$$

1.2 压电薄板分析

压电元件在建模的过程中作如下假设:忽略压电元件的转动惯量;压电元件的尺寸远小于薄板的相应尺寸;薄板的水平方向变形与垂直方向变形相比忽略不计。

对于线性压电材料,根据自变量的不同,一共有 4 类压电方程。现根据第 2 类压电方程,取压电层的极化方向为 z 向,并在 z 方向施加外加电场,则压电体的本(结)构方程可简化为^[8-9]:

$$D_z = [e_{31}, e_{32}, e_{33}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \ddot{\eta} + \varepsilon_{33}^s E_z, \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \ddot{\eta} = \begin{Bmatrix} \hat{c}_{11}^E & c_{21}^E & c_{41}^E \\ \hat{c}_{12}^E & c_{22}^E & c_{42}^E \\ \hat{c}_{14}^E & c_{24}^E & c_{44}^E \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \ddot{\eta} - \begin{Bmatrix} \hat{e}_{31} \\ \hat{e}_{32} \\ \hat{e}_{33} \end{Bmatrix} \dot{u} E_z.$$

其中, D_z 、 E_z 分别为 Z 向电位移及 Z 向外加电场强度; $[C^E]$ 、 $[e]$ 、 $\{ \varepsilon \}$ 分别为压电材料的弹性常数矩阵、压电常数矩阵和压电层厚度方向的介电常数; $\{ \sigma \}$ 、 $\{ \varepsilon \}$ 分别为应力和应变向量。

2 动力学微分方程

设 V_p 是 PZT 板的单元体积; V_b 是薄板单元体积; ρ_p 是 PZT 板密度; ρ_b 是薄板密度; h_p 是 PZT 板厚; V_c 是 PZT 板上产生的电压。单元动能(仅考虑结构在 z 方向上的动能)由薄板动能与 PZT 板的动能组成:

$$T_b = \frac{1}{2} \int_{V_b} \rho_b \{ \dot{\eta} \}^T [N]^T [N] \{ \dot{\eta} \} dv, \quad (4)$$

$$T_p = \frac{1}{2} \int_{V_p} \rho_p \{ \dot{\eta} \}^T [N]^T [N] \{ \dot{\eta} \} dv. \quad (5)$$

单元势能由薄板应变能、PZT 薄板应变能以及 PZT 薄板电势能组成:

$$V_b = \frac{1}{2} \int_{V_b} \{ \eta \}^T (z^2 [B_b]^T [D] [B_b]) \{ \eta \} dv, \quad (6)$$

$$V_p = \frac{1}{2} \int_{V_p} z^2 \{\eta\}^T [B]^T [C^E] [B] \{\eta\} dv - \frac{1}{2} \int_{V_p} z [B] \{\eta\}^T [e]^T E_3 dv, \quad (7)$$

$$V_{pe} = \frac{1}{2} \int_{V_p} \frac{V_e}{h_p} ([e]^T z [B] \{\eta\} + \varepsilon_{33}^e \frac{V_e}{h_p}) dv. \quad (8)$$

薄板受到单位力 p , 如图 2 所示, 与薄板法线方向成 θ , 外力作用下薄板单位面积受力 $f = pc \cos \theta$ 。则外力做功:

$$W_F = \iint_A w f dA. \quad (9)$$

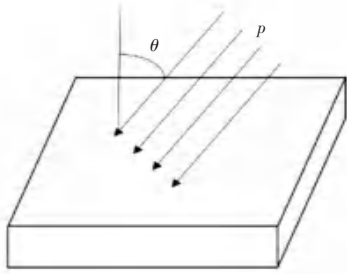


图 2 薄板受力示意图

Fig. 2 Thin plate force diagram

根据 Hamiton 原理, 薄板压电片单元系统的有限元方程为:

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} [(T_b + T_p) - (V_b + V_p - V_{pe}) + W_F] dt = 0. \quad (10)$$

将以上式子带入后得:

$$\begin{aligned} & \delta \int_{t_0}^{t_1} [(\frac{1}{2} \int_{V_b} \rho_b \{\dot{\eta}\}^T [N]^T [N] \{\dot{\eta}\} dv + \frac{1}{2} \int_{V_p} \rho_p \{\dot{\eta}\}^T [N]^T [N] \{\dot{\eta}\} dv) - \\ & (\frac{1}{2} \int_{V_b} \{\eta\}^T (z^2 [B_b]^2 [D] [B_b]) \{\eta\} dv + \frac{1}{2} \int_{V_b} z^2 \{\eta\}^T [B_b]^T [C^E] [B_b] \{\eta\} dv - \\ & \frac{1}{2} \int_{V_b} z [B_b] \{\eta\}^T [e]^T E_3 dv - \frac{1}{2} \int_{V_p} \frac{V_e}{h_p} ([e]^T z [B] \{\eta\} + \varepsilon_{33}^e \frac{V_e}{h_p}) dv) + \\ & \iint_A [N] \{\eta\} f dA] dt = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

将上式对 $\{\eta\}$ 进行变分运算, 再由 $\delta\{\eta\}$ 得任意性, 可推得单元在仅受外加平面载荷时的方程:

$$[M] \{\ddot{\eta}\} + [K] \{\eta\} - [K_{p1}] V_e = \{F\}. \quad (12)$$

其中,

$$[M] = \int_{V_b} \rho_b [N]^T [N] dv + \frac{1}{2} \int_{V_p} \rho_p [N]^T [N] dv,$$

$$[K] = \int_{V_b} z^2 [B_b]^2 [D] [B_b] dv + \int_{V_b} [B_b]^T [C^E] [B_b] dv,$$

$$[K_{p1}] = \int_{V_p} \frac{z [B]^T [e]}{h_p} dv,$$

$$[F] = \iint_A [N] f dA.$$

$$[C] = \int_{V_b+V_p} \gamma [N]^T [N] dv. \quad (13)$$

再将阻尼项加入:

$$[C] = \int_{V_b+V_p} \gamma [N]^T [N] dv. \quad (13)$$

综合上述得:

$$[M] \{\ddot{\eta}\} + [C] \{\dot{\eta}\} + [K] \{\eta\} - [K_{p1}] V_e = \{F\}. \quad (14)$$

假设电位移沿着压电元件表面均匀分布, 得到^[9]:

$$V_e = \frac{Q}{C_p} + K_1 [N] \{\eta\}. \quad (15)$$

式中, Q 是压电原件表面的电荷; C_p 是压电原件的等效电容。 $k_1 = \frac{h_{31}(h_a^2 - h_b^2)}{b}$ 中, h_{31} 是压电片的劲度系数; h_a 是薄板中性面到压电片外表面的距离; h_b 是薄板中性面到压电片内表面的距离; b 是压电片的宽度。

选取 RL 串联分流电路, 其阻抗表示为 $Z = R + Ls$, 并将上式入 (14), 得到针对第 n 阶模态控制时的方程式为:

$$\{(m_b + m_p)s^2 + cs + (k_b + k_p) - \frac{C_p K_{31} N_n (R + Ls)}{1 + C_p (R + Ls)s}\} \cdot \eta_n(s) = F. \quad (16)$$

式中, m_b, m_p 分别为薄板与压电片的模态质量; k_b, k_p 分别为薄板与压电片的模态刚度; c 为模态阻尼。由式(16)可推导出函数 $G(s)$, 代表系统的被动阻尼特性, 在力 F 的作用下, 得到的系统某点处位移 $\eta(s)$ 。 G 越小则表明系统的输出位移越小, 过程中消耗的能量越多, 系统位移响应振幅衰减越快, 减振效果更好。因此对分流电路的阻尼参数进行优化, 进而达到更好的减振的目的。

$$G(s) = \left| \frac{\eta(s)}{F} \right|. \quad (17)$$

3 分流电路的参数优化

通过对电路参数的优化, 从而使压电分流阻尼电路转化更多的热能。对于不同的优化目标可将优

化方法分为:传递函数法与极点配置法。本文将运用模拟退火算法,对分流电路的参数进行优化。通过仿真实验验证其有效性,并将其与传递函数优化方法、极点配置优化方法设计分流电路的应用效果进行对比^[10-11]。

3.1 建立优化模型

在垂直于薄板平面的方向上施加力 F , 在对角点处得到输出位移,如图 3 所示,通过式 (18) 得到输出点处垂直位移与外力 F 之间的传递函数。考虑压电分流电路对整体结构的影响,建立线性规范模型并以 $A(R, L)$ 表示,以传递函数最小值作为目标函数,求得相对应的最优电阻值 R_{opt} 与最优电感值 L_{opt} , 即:

$$\left| \frac{\eta(s)}{F} \right| = \left| (m_b + m_p)s^2 + cs + (k_b + k_p) - \frac{C_p K_d N_n (R + Ls)}{1 + C_p (R + Ls)s} \right|, \quad (18)$$

$$A(R, L) = \min \left| \frac{\eta(s)}{F} \right|. \quad (19)$$

约束条件为: $R > 0, L > 0$ 。

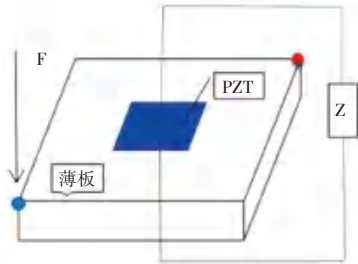


图 3 压电薄板结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of thin plate and piezoelectric sheet

3.2 运用算法对函数进行优化

模拟退火算法的思想源于固体退火过程。将固体加热至足够高的温度,再等其缓慢冷却,同时内能趋于最小。其中,缓慢冷却即随机解,内能大小即为目标函数,将随机解不断进行扰动,并以一定概率接受解,使目标函数值不断优化,最终趋于最优。模拟退火算法步骤描述如下^[12]:

步骤 1 设 S 为初始状态,初始温度 $T_0 = 90\text{ }^\circ\text{C}$, 终止温度 $T_1 = 89\text{ }^\circ\text{C}$, 降温速率 $q = 0.98$ 。

步骤 2 产生新解 S' 。

步骤 3 按照一定方式进行降温, 计算温差 Δt 。

步骤 4 利用 Metropolis 准则进行判断:计算 S 的增量 $df = f(S) - f(S')$, 若 $df < 0$, 则将 S' 视为新的当前解; 否则按照 S 的接受概率 $\exp(-df/\Delta t)$ 接受 S 。

步骤 5 直到退火温度小于设定温度时, 输出结果, 停止计算。

步骤 6 利用降温速率 $q = 0.98$ 进行降温, 即 $T = 0.98 * T_0$ 。然后跳回到步骤 2, 直到 T 小于终止温度。

其主要实现流程如图 4^[13] 所示:

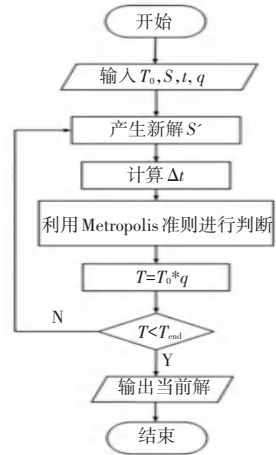


图 4 模拟退火算法流程图

Fig. 4 Simulated annealing algorithm flow chart

3.3 数值算例

3.3.1 模拟退火算法对分流电路参数优化

本文被控对象是压电一薄板结构,薄板大小为 $400 \times 400 \times 2\text{ mm}^3$, 材料为铝。仿真利用 Comsol Multiphysics 对其整个结构进行特征频率分析, 得到前四阶模态阵型如图 5 所示。

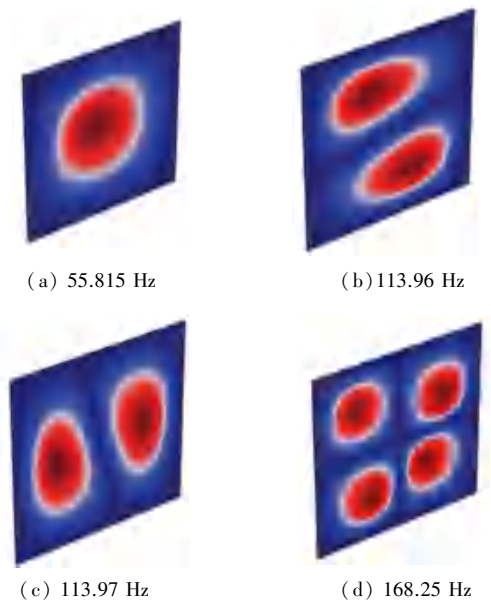


图 5 薄板前四阶模态阵型

Fig. 5 Fourth-order modal formation

由前四阶模态分析可知, 振幅最大的位置处于薄板中心, 所以将压电片粘贴在薄板正中心, 并与阻

抗大小为 Z 的 RL 串联分流电路相连接如图 3 所示,压电片规格为 $50 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ 。

在薄板的左下角施加固定激励,方向垂直于薄板平面,令 F 的对角点作为输出点,输出垂直于薄板方向的位移。利用输入与输出位移,得到薄板的位移传递函数。接下来利用模拟退火算法对函数进行优化。在规定的退火时间内,通过输入不同电阻、电感值可以得到各自对应不同的传递函数。施加相同的激励,对输出的不同结果进行比较,这里以 10–500 Hz 范围内输出振幅的期望值进行比较,选择期望值最小时的结果为最优值,如图 6 所示。运用模拟退火算法获得最优电感为:9.5 H,最优电阻为 3 065 Ω 。

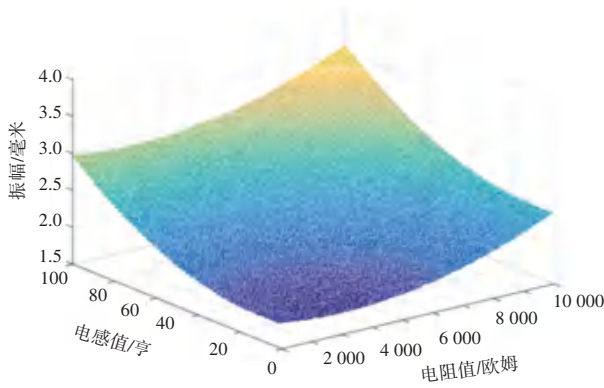


图 6 不同 R 与 L 条件下,振幅在不同频率下的期望值

Fig. 6 Expected value of amplitude at different frequencies under different R and L conditions

为了验证参数优化方法的效果,利用 3.2 节推导的压电—薄板结构进行数值仿真计算,部分参数见表 1。

表 1 压电片 (p) 与薄板 (b) 相关参数

Tab. 1 Piezoelectric sheet structure parameters

名称	数值
ρ_b ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
ρ_p ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 400
V_b (m^3)	$0.4 * 0.4 * 0.001$
V_p (m^3)	$0.05 * 0.05 * 0.001$
nu_{Al}	0.33
E_{Al} (pa)	70e9

图 7 是压电—薄板结构在无外接分流电路情况下,与带有优化后的分流电路情况下输出点振动位移变化曲线。由图 7 可知,在 10–500 Hz 的低频范围内,当添加分流电路时,输出点处的薄板振动位移小于无分流电路时。具体来看,在振动位移的峰值频率 451 Hz 处该点的幅值降低了 1 倍。由此说明,

模拟退火算法优化后的压电分流阻尼系统,可以在中低频段内有效的降低薄板上的振动幅值。即表明在中低频段内,通过压电分流阻尼技术抑制了薄板的振动。

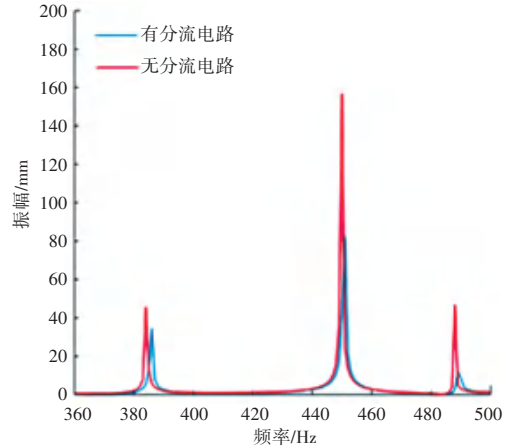


图 7 薄板上指定点振动幅值曲线对比

Fig.7 Curve of vibration amplitude at a point on a thin plate

3.3.2 不同参数计算方法的减振效果对比分析

对分流电路参数的选择及优化,可以使分流阻尼电路达到最佳的振动抑制效果。对于不同的优化目标可以将其优化方法分为:使系统传递函数最小化和使衰减系数最大化。前者是传递函数优化方法,后者属于极点配置方法。WU^[3]、Park^[14]等人对 RL 串联、并联以及 RL–C 并联的电路参数进行优化;柳^[15]等人对串联、并联分流电路参数进行了计算并验证了其减振效果。运用不同的方法对其进行优化,会产生不同程度的减振效果。因此,对模拟退火算法、传递函数法、极点配置法等,对整体结构的抑振效果进行对比。

利用传递函数法得到,RL 串联电路的优化参数公式:

$$L_{opt} = \frac{1}{C_p(1 + (k)^2)w_m^2}, \quad (20)$$

$$R_{opt} = \frac{\sqrt{2}k}{C_p(1 + (k)^2)w_m}. \quad (21)$$

利用极点配置法得到,RL 串联分流电路优化参数公式:

$$L_{opt} = \frac{(1 - \lambda^2)^2}{C_p(k\lambda\sqrt{1 + k^2 - \lambda^2} + 1 + k^2 - \lambda^2)^2w_m^2}, \quad (22)$$

$$R_{opt} = \frac{2(k\sqrt{1 + k^2 - \lambda^2} + \lambda)(1 - \lambda^2)}{C_p(1 + k^2)(k\lambda\sqrt{1 + k^2 - \lambda^2} + 1 + k^2 - \lambda^2)^2w_m}. \quad (23)$$

由于前四阶固有频率相隔较宽, 针对其中一阶固有频率进行控制时, 可以将其看成一个单自由度系统。将压电片依旧粘贴于薄板中心位置, 压电片的固有电容 $C_p = 240 \text{ nF}$ 。在计算机电耦合系数 k 时, 一般的压电振子具有损耗, 在压电振子谐振时, 会产生最小阻抗频率 f_m 、最大阻抗频率 f_n 、谐振频率 f_r 、反谐振频率 f_a 、串联谐振频率 f_s 、并联谐振频率 f_p 6 个不同频率。在进行一级近似之后得到:

$$f_s = f_m = f_r, f_p = f_n = f_a. \quad (24)$$

根据机电耦合系数计算公式 $k_{31} = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{f_a - f_r}{f_r} \right)$,

得到 $k = 0.02$ 。根据公式 $\lambda = \frac{\zeta_r}{\sqrt{\zeta_r^2 + \zeta_i^2}} = \cos \theta$ 计算

阻尼比。其中, 特征频率由实部与虚部组成 (ζ_r 与 ζ_i), 由此得到阻尼比 $\lambda = 0.297$ 。针对固有频率 $f = 451 \text{ Hz}$ 进行控制。根据以上 3 种分流电路参数优化方法求得相应最优值见表 2。

表 2 不同优化方法下分流电路参数

Tab. 2 Parameters of shunt circuit under different optimization methods

优化方法	电感 H	电阻 Ω
传递函数法	8.13	1 646.30
极点配置法	8.02	3 983.17
模拟退火算法	9.50	3 065.00

利用 Comsol Multiphysics 对其结构进行仿真实验分析。由图 8 可知, 3 种优化方法得到的振幅曲线, 振动趋势基本相同, 只是在 146 Hz、190 Hz、217 Hz、386 Hz、451 Hz、490 Hz 处振幅值略有不同。分析如下: 如图 9 所示, 在 451 Hz 处, 前两种优化方法振动幅值相差 7 mm, 与图 7 无分流电路的振幅相比, 振幅减少约 30%。利用模拟退火算法优化后的振幅相比传递函数法与极点配置法分别减少了 16.3% 和 10.6%, 减振效果更明显。如图 10 所示, 在 146 Hz 处, 运用传递函数法比极点配置法振幅要低 0.6 mm。运用算法优化后, 相比较前两种优化方法, 振幅分别降低了 10.1%、11.7%。3 种优化方法相比, 运用模拟退火算法优化后的分流阻尼电路, 其减振能力更佳。如图 11 所示, 在 190 Hz 处, 运用极点配置法比传递函数法振幅低 0.4 mm, 与模拟退火算法优化后相比, 振幅分别高出 11.3%、26.08%。

综上所述, 通过对薄板振动幅值数据的分析可以说明: 模拟退火算法对于分流电路参数优化的有效性与合理性, 并且通过此方法优化后的分流阻尼电路, 对振动的控制效果更佳。

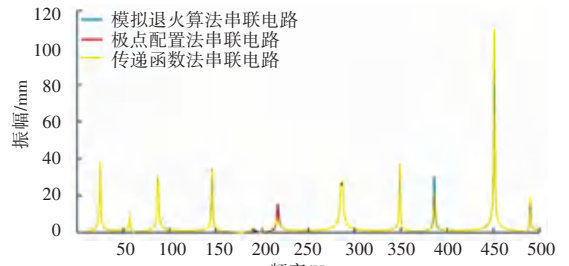


图 8 同一模型 3 种优化方法振幅对比

Fig. 8 Amplitude comparison of three optimization methods of the same model

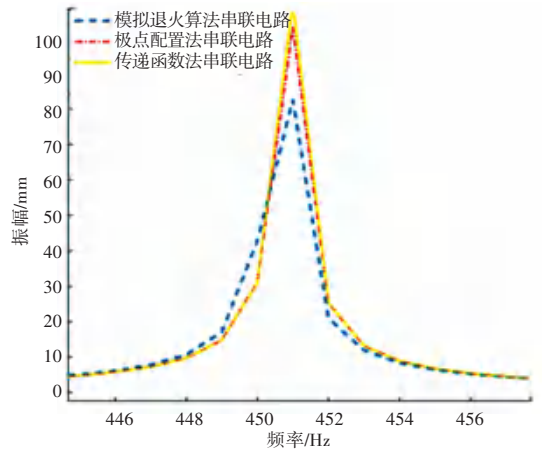


图 9 3 种优化方法在 451 Hz 处振幅对比

Fig. 9 Comparison of three optimization methods at 451 Hz

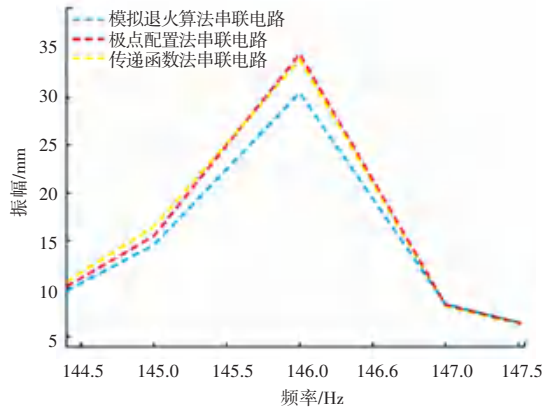


图 10 3 种优化方法在 146 Hz 处振幅对比

Fig. 10 Comparison of three optimization methods at 146 Hz

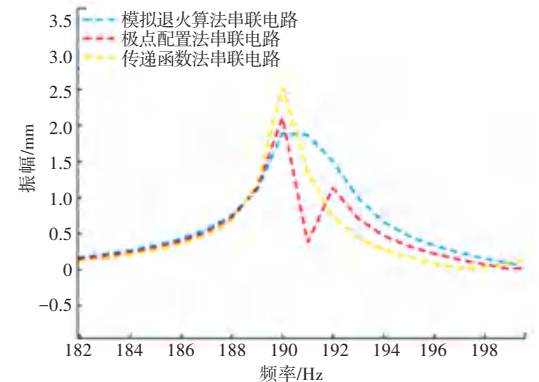


图 11 3 种优化方法在 190 Hz 处振幅对比

Fig. 11 Comparison of three optimization methods at 190 Hz

4 结束语

本文建立了带有压电分流阻尼电路的压电—薄板结构的动力学基本方程,推导出位移传递函数并建立相应的目标函数及优化模型。利用模拟退火算法对电阻、电感值进行选择,得到振幅最小的结果,从而获得最优电感值与电阻值。通过有、无分流电路的仿真实验,验证了模拟退火算法的有效性。最后将模拟退火算法与传递函数法、极点配置法3种方法的减振效果进行对比。结果显示,运用3种方法均可有效降低振幅,从而验证了模拟退火算法对于分流电路参数优化的可靠性。

参考文献

- [1] FORWARD R L. Electronic damping of vibrations in optical structures. [J]. Applied optics, 1979, 18(5).
- [2] HAGOOD N W, FLOTOW A V. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks [J]. Journal of Sound Vibration, 1991, 146(2): 243-268.
- [3] WU S Y. Piezoelectric shunts with a parallel RL circuit for structural damping and vibration control [J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 1996. 2720.
- [4] 杨程春, 武丹, 孙浩. 压电分流阻尼系统的抑振效能的研究 [J].

- 压电与声光, 2010, 32(1): 97-100.
- [5] 毛崎波. 通过压电分流阻尼技术抑制结构振动的实验研究 [C]// 第十届全国振动理论及应用学术会议论文集(2011)上册.
- [6] 李耀光. 基于压电分流阻尼的车内噪声控制研究 [D]. 重庆大学, 2012.
- [7] 庾鲁思. 薄板结构的压电主动抑振研究 [D]. 重庆大学, 2016.
- [8] 王忠东, 陈塑寰. 智能结构有限元动力模型的建立及主动振动控制和抑制 [J]. 计算力学学报, 1998, 15(1): 38-43.
- [9] 姚林泉, 俞焕然. 具有压电材料薄板弯曲控制的有限元法 [J]. 计算力学学报, 1999 (3): 79-82.
- [10] 张学福, 王丽坤. 现代压电学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 56-78.
- [11] 李宁, 张景绘. 连续梁的压电分流阻尼模型 [J]. 应用力学学报, 2006(3): 398-402, 510.
- [12] 模拟退火算法的研究及其应用 [D]. 昆明理工大学, 2005.
- [13] 周兰伟, 陈国平, 孙东阳, 等. 基于模拟退火算法的旋转梁压电分流电路优化 [J]. 振动. 测试与诊断, 2016, 36(2): 315-320, 403.
- [14] PARK C H, INMAN D J. Uniform model for series RL and parallel RL shunt circuits and power consumption [J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 1999, 3668: 797-804.
- [15] 柳维玮, 毛崎波. 压电分流阻尼电路设计的极点配置方法 [J]. 压电与声光, 2018, 40(1): 144-148.

(上接第119页)

式以及谓词表达式中判断条件之间的测试用例关联矩阵,并提出了测试用例约简的准则,根据该准则对测试用例集进行约简。实验结果表明,本文所提出的约简策略可以对原测试用例集的数量进行约简,而且并没有降低原测试用例集的错误检测率,但增加了计算开销。

基于代码分析的测试用例约简所涉及测试路径以及本文所提的关键状态变量、谓词表达式中的判断条件等因素,是一个十分复杂的问题,如果程序中包含程序间调用、数据库交互等更加复杂的场景,研究方案仍需要进一步完善。另外,文本所做的验证实验只是在西门子测试用例套件中选取的四个程序所自带的测试数据集上完成的,这4个程序的源代码规模较小,本方法的有效性还需要进行大规模的实验加以验证。

参考文献

- [1] KALAJI A S, HIERONS R M, SWIFT S. An integrated search-

- based approach for automatic testing from extended finite state machine (EFSM) models. Information and Software Technology, 2011, 53(12): 1297-1318.
- [2] 刘佳, 王丽, 杨俊叶. 计算机软件测试方法及应用分析 [J]. 科技风, 2020(9): 119.
- [3] 张娜, 徐海霞, 包晓安, 等. 一种动态约简的多目标测试用例优先级排序方法 [J]. 计算机科学, 2019, 46(12): 208-212.
- [4] MARCHETTO A, SCANNIELLO G, SUSI A. Combining Code and Requirements Coverage with Execution Cost for Test Suite Reduction [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2019, 45(4): 363-390.
- [5] PAN R, ZHANG Z, LI X, et al. Black-Box Test-Coverage Analysis and Test-Cost Reduction Based on a Bayesian Network Model [C]// 2019 IEEE 37th VLSI Test Symposium (VTS), Monterey, CA, USA, 2019: 1-6.
- [6] 汪文靖, 冯瑞. 基于二分 K-means 的测试用例集约简方法 [J]. 计算机工程, 2016, 42(12): 73-77, 83.
- [7] 郭曦, 张焕国. 基于谓词抽象的测试用例约简生成方法 [J]. 通信学报, 2012, 33(3): 35-43, 51.
- [8] 陈翔, 陈继红, 鞠小林, 等. 回归测试中的测试用例优先排序技术述评 [J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1695-1712.