

文章编号:1006-1355(2021)03-0009-05+50

# 基于遗传算法的电磁分流阻尼参数优化

李 戈<sup>1</sup>, 毛崎波<sup>1</sup>, 吴 彬<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学, 南昌 330063; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

**摘要:**提出一种基于遗传算法的电磁分流阻尼的最优参数设计,可解决定点理论( $H_\infty$ 优化)不能考虑主系统阻尼进行优化的缺点。首先导出包含主系统阻尼比的位移放大因子无量纲参数的表达式;然后使用PQ定点法推导出主系统阻尼比为0时的最优调谐比、最优阻尼比;再建立考虑主系统阻尼比时基于遗传算法的目标函数以及适应度函数,最后分别求得当主系统阻尼比取不同数值时各自的最优电容以及最优电阻,从而证明基于遗传算法优化的电磁分流阻尼设计对降低主系统振动具有良好效果。

**关键词:**振动与波;电磁分流阻尼;定点理论;最优电容;最优电阻;遗传算法

中图分类号:TB53

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.03.002

## Parameter Optimization for Electromagnetic Shunt Dampers Based on Genetic Algorithm

LI Ge<sup>1</sup>, MAO Qibo<sup>1</sup>, WU Bin<sup>2</sup>

(1. School of Aircraft Engineering, Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China;  
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** An optimal parameter design for electromagnetic shunt dampers based on genetic algorithm was proposed. This method can overcome the difficulty carried by the PQ fixed points theory( $H_\infty$  Optimization). First of all, the dimensionless expression of the displacement amplification factor which includes the damping ratio of the host structure was deduced. The optimal tuning ratio and damping ratio of the electromagnetic shunt damper were calculated by the PQ fixed points theory. Then, the objective functions and the fitness functions of the genetic algorithm corresponding to different host structure damping ratios were established respectively. Finally, each optimal capacity and resistance were obtained by using the Matlab code. It is proved that the optimal design of the electromagnetic shunt damper based on the genetic algorithm can reduce the host structure's vibration effectively.

**Key words:** vibration and wave; electromagnetic shunt damper; fixed points theory; optimal capacity; optimal resistance; genetic algorithm

电磁分流阻尼技术是利用机电能量转换特性来耗散被控对象的机械能的控制方法<sup>[1-2]</sup>,其原理是当被控对象发生振动时,线圈与永磁铁存在相对速度,根据法拉第电磁感应定律,线圈内会产生感应电流以及感应磁场,永磁铁与线圈之间会产生电磁力以阻碍这种相对运动<sup>[3]</sup>。电磁线圈外接分流电路构成电磁分流阻尼,电磁分流阻尼通过分流电路耗散由

主系统的机械能转化而来的电能<sup>[3-4]</sup>,常见的分流电路有RL电路,RL-C电路<sup>[5]</sup>。RL电路常用于控制低频率的振动,因为随着频率增加,感抗随之增加,电流分量随之减小,无功功率增加,导致控制效果减弱。而加入电容组成LCR分流电路是因为电容上的电压相位与电感上的相位相反,而LCR串联谐振电路可以通过调节电容的大小来降低电路无源阻抗,从而降低无功功率。相比较之下LCR分流电路能获得更好的控制效果。电磁分流阻尼技术可以应用于多种结构,单自由度的LCR电磁分流电路优化是其理论基础,因此将电磁分流阻尼用于控制单自由度系统振动的研究值得重视。

利用定点理论求解隔振器或者动力吸振器的最优优化问题也称 $H_\infty$ 优化<sup>[6-16]</sup>,不但可以推导出动力吸

收稿日期:2020-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51975266);江苏省六  
大人才高峰资助项目(KTHY-036);江西省自然科  
学基金资助项目(20192BAB206024)

作者简介:李戈(1995-),男,江西省萍乡市人,硕士研究生,主  
要研究方向为噪声与振动控制。

通信作者:毛崎波,男,浙江省奉化市人,博士,教授。

E-mail: qbmao@nchu.edu.cn

振器的最优设计,而且还可以用来推导出电磁分流阻尼的最优设计参数。定点理论的缺点在于只能针对主系统无阻尼的情况来进行优化,而主系统阻尼不为零,则位移放大因子的曲线将不会相交于两个定点<sup>[7]</sup>。对于含有电磁分流阻尼的隔振器或者调谐质量阻尼器(TMD),应用定点理论设计最优参数,若考虑主系统阻尼,使用定点理论同样不具有可行性。当主系统被作用于电磁分流阻尼时,位移放大因子随频率比变化的曲线存在多个极值点,因此需要使用一种不容易陷入局部优化的算法,而遗传算法作为一种内在启发式随机搜索算法,在搜索的最优解的过程中不容易陷入局部最优<sup>[8-16]</sup>。因此本文使用遗传算法求解考虑主系统阻尼比时电磁分流阻尼的最优设计参数。Nariman等<sup>[8]</sup>使用多目标遗传算法优化了5自由度车辆振动模型,并得到了pareto解;Esen等<sup>[9]</sup>使用遗传算法优化了针对的枪管筒体式动力吸振器的参数;Lee等<sup>[10]</sup>使用遗传算法优化了多重动力吸振器的设计参数。国内的付江华等<sup>[11]</sup>基于 $H_\infty$ 优化的目标函数,使用了包括遗传算法在内的多种进化学习算法,求得了当位移放大因子含有主系统阻尼比时的传统动力吸振器的最优阻尼比、最优调谐比。李学斌<sup>[12]</sup>利用多目标遗传算法求出了动力吸振器(DVA)的最优参数的pareto解。Xu等<sup>[13]</sup>使用遗传算法对精密平台隔振系统参数进行了优化。

故考虑主系统阻尼比时,在求解电磁分流阻尼的优化问题时,本文尝试使用遗传算法。

## 1 电磁分流阻尼模型

### 1.1 无量纲位移放大因子

本文以LCR串联分流电路为例,如图1所示。该系统由主系统质量、阻尼、刚度,以及电磁分流阻尼器构成,可以将音圈电机作为电磁分流阻尼器<sup>[15]</sup>。

作用于线圈的洛伦兹力为 $f = \phi i$ ,该力的方向与音圈电机线圈运动方向相反,并作为一个抑制主系统振动的力与系统的惯性力方向相反,且与电流 $i$ 的大小成正比。

电磁分流阻尼的力-电耦合方程由LCR振荡电路方程以及主系统运动微分方程所组成。该系统的力-电耦合方程如下:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \phi i = F(t) \\ L \frac{di}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C_s} \int_0^t i(t) dt = em = \phi \dot{x} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ 为主系统质量, $c$ 为主系统阻尼, $k$ 为主系统刚度, $em$ 为感应电动势, $L$ 为线圈电感, $R$ 为电磁分流阻尼线路的电阻, $C_s$ 为谐振电容; $\phi$ 为电磁系数,与线圈的匝数、永磁铁磁场强度、线圈长度有关<sup>[5]</sup>。

假设  $i(t) = \bar{I} \exp(j\omega t)$ ,  $x = \bar{X} \exp(j\omega t)$ ,  $F(t) = F \exp(j\omega t)$ ,代入上式解得:

$$\bar{X} = - \frac{F \left( \frac{1}{C_s} + \omega(-L\omega + jR) \right)}{\omega^2 \phi^2 - \left( k + \omega(-m\omega + jc) \right) \left( \frac{1}{C_s} + \omega(-L\omega + jR) \right)} \quad (2)$$

对 $\bar{X}$ 作复展开,求得幅值为

$$|\bar{X}| = \frac{F \sqrt{\left( \frac{1}{C_s} + L\omega^2 \right)^2 + R^2 \omega^2}}{\sqrt{\left( \frac{c\omega}{C_s} - cL\omega^3 + kR\omega + mR\omega^3 \right)^2 + \left( cR\omega^2 + \left( L\omega^2 - \frac{1}{C_s} \right) (k - m\omega^2) + \omega^2 \phi^2 \right)}} \quad (3)$$

因此位移放大因子的平方根 $X_n^2$ 随激励力频率变化表达式为

$$X_n^2 = \frac{\bar{X}^2}{\frac{F^2}{k^2}} = \frac{k^2 \left( \left( \frac{1}{C_s} - L\omega^2 \right)^2 + R^2 \omega^2 \right)}{\left( \frac{c\omega}{C_s} - cL\omega^3 + kR\omega - mR\omega^3 \right)^2 + \left( mR\omega^2 + \left( L\omega^2 - \frac{1}{C_s} \right) (k - m\omega^2) + \omega^2 \phi^2 \right)} \quad (4)$$

$$\text{假设 } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \omega_d = \frac{1}{\sqrt{LC_s}}, \gamma = \frac{\omega_d}{\omega_0}, \lambda = \frac{\omega}{\omega_0}, \zeta = \frac{R}{2L\omega_d} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C_s}{L}}, \Psi = \frac{\phi^2}{mL\omega_0^2} = \frac{\phi^2}{Lk}$$

主系统阻尼比为 $Z = C/2m\omega_0$ ,对式(4)上下同时除以 $k^4 L^2$ 并再乘以 $m^2$ ,得到无量纲形式的位移放大因子的表达式如下:

$$X_n^2 = \frac{(2\zeta\gamma\lambda)^2 + (\gamma^2 - \lambda^2)^2}{(2Z\gamma^2\lambda - 2Z\lambda^3 + 2\lambda\gamma\zeta(1 - \lambda^2))^2 + ((1 - \lambda^2)(\gamma^2 - \lambda^2) - \psi\lambda^2 - 4Z\gamma\zeta\lambda^2)} \quad (5)$$

## 1.2 基于定点理论的最优同调以及最优阻尼条件

令式(5)中主系统阻尼比  $Z=0$  得到无阻尼时的位移放大因子表达式如下:

$$X_{In}^2 = \frac{(\gamma^2 - \lambda^2)^2 + (2\gamma\zeta\lambda)^2}{((1 - \lambda^2)(\gamma^2 - \lambda^2) - \psi\lambda^2)^2 + (1 - \lambda^2)^2(2\gamma\zeta\lambda)^2} \quad (6)$$

文献[5]给出了定点等高的最优同调条件为  $\gamma_{opt} = \frac{\sqrt{2-\psi}}{\sqrt{2}}$ ; 使得两个定点均在最大值附近的两个阻尼比为最优阻尼比<sup>[16]</sup>。按照文献[5]的定点理论的计算步骤, 计算最优阻尼比, 得到了两个形式不同但是相对文献[5]更加精确的结果, 如式(7)、式(8)所示:

$$\zeta_P = \sqrt{\frac{(\psi - 2)^2 \left( \psi^3 (-4\sqrt{2}\psi^{3/2} + \psi^2 + 12\psi - 8\sqrt{2}\sqrt{\psi} + 4) \right)}{(\sqrt{2}\sqrt{\psi} - 2)^2 (\psi - 2)^2 \sqrt{4}}} + \frac{\psi}{8 - 4\sqrt{2}\sqrt{\psi}} \quad (7)$$

$$\zeta_Q = \sqrt{\frac{(\psi - 2)^2 \left( \psi^3 (4\sqrt{2}\psi^{3/2} + \psi^2 + 12\psi + 8\sqrt{2}\sqrt{\psi} + 4) \right)}{(\sqrt{2}\sqrt{\psi} + 2)^2 (\psi - 2)^2 \sqrt{4}}} + \frac{\psi}{4\sqrt{2}\sqrt{\psi} + 8} \quad (8)$$

取最优阻尼比  $\zeta_{opt} = (\zeta_P + \zeta_Q)/2$ ; 将  $\gamma_{opt}$  代入  $\gamma^2 = \frac{1}{LC} \frac{m}{k}$  可得到最优电容  $C_{opt} = \frac{2m}{2kL - \phi^2}$ ; 由  $\zeta_{opt} = \frac{R_{opt}}{2} \sqrt{\frac{C_{opt}}{L}}$ , 可得  $R_{opt} = \frac{2\sqrt{L}\zeta_{opt}}{\sqrt{C_{opt}}}$ 。

## 2 遗传算法优化电磁分流阻尼

通过分析 PQ 定点优化的位移放大因子曲线可知, 参数为最优时, 曲线上会有两个极大值点, 且两个极大值点处的高度相同, 而当参数不为最优时, 两个峰值一大一小, 根据  $H_\infty$  优化的原理, 即使得位移放大因子的最大值最小<sup>[14]</sup>, 故设计目标函数以获取第  $k$  次迭代的极大值点  $X_{nmax}^2$ , 并在种群迭代历史  $X_{nmax}^2$  中搜索最小的那个极大值  $X_{nopt}^2$ , 对应的调谐比  $\gamma$ , 阻尼比  $\zeta$  即是最优同调条件以及最优阻尼比, 因此, 可以把目标函数设计为

$$X_{nopt}^2 = \min \left\{ \max \left\{ X_n^2(\gamma, \zeta) \right\} \right\} \quad (9)$$

优化变量的范围为  $0 \leq \zeta \leq 1, 0 \leq \gamma \leq 1$ , 用 MATLAB 编写优化程序时, 首先将频率比  $\lambda$  在区间  $0.2 < \lambda < 1.7$  离散为数组  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ , 其中离散步长取 0.000 5。由于最终是要寻找最小值, 因此适应度函数是在数组  $X_n^2\{\gamma, \zeta, \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}\}$  取的最大值的负数, 即适应度函数为

$$f = -\max \{ X_n^2\{\gamma, \zeta, \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}\} \} \quad (10)$$

用 MATLAB 结合遗传算法优化电磁分流阻尼的步骤为

(1) 设定精度为 0.000 001, 生成 0~1 随机数, 对调谐比  $\gamma$ 、阻尼比  $\zeta$  的染色体进行随机编码, 长度为 20, 初始种群大小设置为 500。

(2) 对染色体进行解码, 根据式(10)计算适应度值。

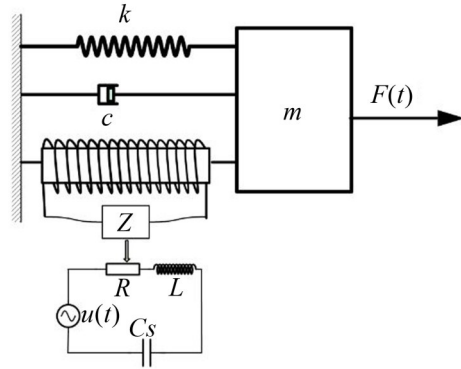


图1 电磁分流阻尼用于控制单自由度振动

(3) 对各个染色体的适应度值进行轮盘赌操作, 得到个体被选定的概率, 并计算累计概率, 然后产生一个  $[0, 1]$  的随机数来决定哪个染色体可以参与后续的交配<sup>[16]</sup>, 将选中的染色体复制, 重复这样的操作 500 次, 组成新的种群 S1。

(4) 按交叉率  $P_c$  所决定的参加交叉的染色体数  $c$ , 从种群 S1 中随机选定  $c$  个染色体, 配对并进行交叉, 然后将得到的染色体代替原染色体, 得种群 S2。

(5) 根据变异概率  $P_m$  确定变异次数  $m$ , 从 S2 中随机选定  $m$  个染色体, 做变异操作, 并用产生的染色体代替原染色体, 得到种群 S3。

至此, 遗传算法完成了第一代操作流程得到了新的种群, 将新的种群作以上同样的操作, 不断将产生的新种群循环地不断进行迭代, 直到达到预先设定的迭代次数为止, 然后输出最优解以及最优参数如下图所示。利用遗传算法优化电磁分流阻尼的流程图如图2图所示。

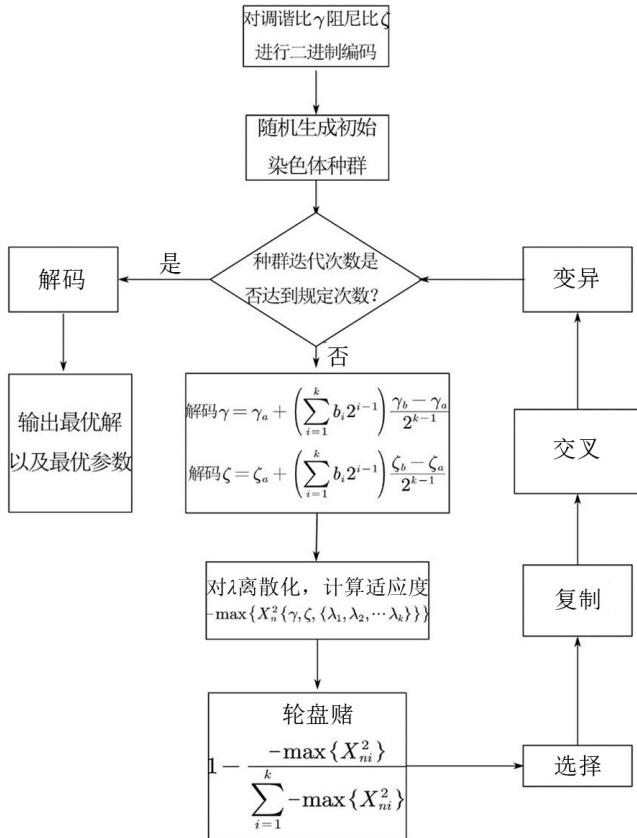


图2 遗传算法优化电磁分流阻尼电路的流程图

### 3 数值计算

#### 3.1 PQ定点优化电磁分流阻尼

根据参考文献[5]的数据,对电磁分流阻尼优化所用到的参数的物理意义以及具体数值,如表1所示。

表1 电磁分流阻尼参数

参数名	物理意义	数值
$m$	质量	1.04 kg
$k$	刚度	5 314 N/m
$\phi$	电磁系数	7.05
$L$	线圈电感	14.04 mH
$R$	等效电阻	待优化
$C_s$	电路电容	待优化
$\Psi$	力电耦合系数	0.666 18

表1中,等效电阻 $R$ ,与电路电容 $C_s$ 为待优化变量。根据表1并结合1.2节的结论可以计算出基于定点理论优化最优电容 $C_s$ 以及最优电阻 $R$ 分别为 $C_{opt}=0.020\ 9\text{ F}$ , $R_{opt}=0.998\ 54\ \Omega$ 。

#### 3.2 遗传算法优化电磁分流阻尼

首先分析遗传算法优化主系统阻尼比为零时的电磁分流阻尼,再与定点理论优化的电磁分流阻尼进行比较。当主系统阻尼比 $Z=0$ ,用MATLAB编写

遗传算法程序计算出,最优阻尼比以及最优调谐比分别为 $\zeta_{GA}=0.635\ 65$ , $\gamma_{GA}=0.816\ 32$ ;进一步得到遗传算法优化后的电容 $C_{ga}=0.020\ 9\text{ F}$ , $R_{ga}=1.058\ 4\ \Omega$ 。运行程序可以得到最优个体的适应值随种群迭代次数变化曲线如图3所示。

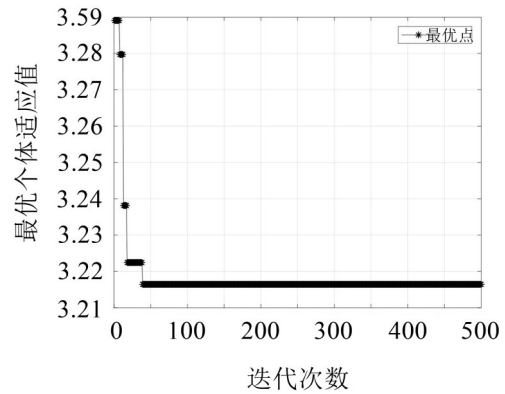
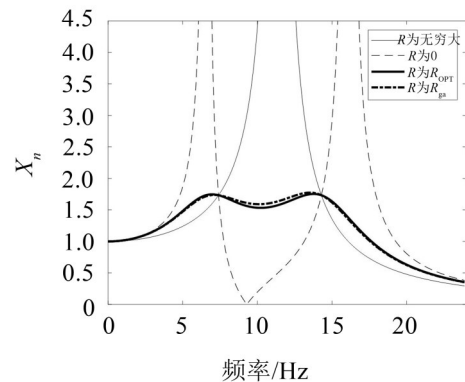


图3 最优个体适应值随种群迭代次数的变化趋势

用MATLAB绘制 $X_n$ 的响应曲线,并与3.1节计算的PQ定点优化的 $X_n$ 曲线对比,如图4所示。

图4 主系统无阻尼时 $R_{ga}$ 对应的位移放大因子曲线

分析可知:当主系统阻尼比 $Z$ 取0时,经过遗传算法优化后的位移放大因子 $X_n$ 的曲线与PQ定点优化的曲线存在微弱的差距,这是由于 $\zeta_{opt}$ 是取PQ两点处的阻尼比的平均值,其位移放大因子 $X_n$ 的两个极值点并不与PQ定点重合,但是非常靠近,而针对遗传算法所设计的目标函数是搜索关于位移放大因子 $X_n$ 的平方根的最大值集合中的最小的最大值,因此才造成这样的差距。

由于定点理论的缺点是无法针对主系统存在阻尼时对位移放大因子 $X_n$ 进行优化,因此尝试使用遗传算法优化 $X_n$ 曲线。当主系统阻尼比 $Z$ 分别为0.01、0.02、0.03时,通过对目标函数的 $Z$ 值分别进行赋值,运行程序,得到各自的主系统阻尼比所对应的最优调谐比以及最优阻尼比,根据这些参数结合1.2节以及表1的数据,可分别得到主系统阻尼比不同时位移放大因子曲线,如图5所示。



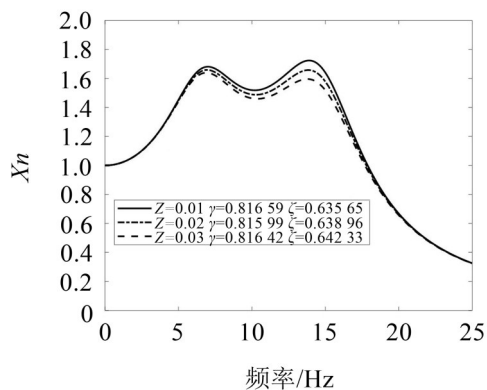


图5 遗传算法优化阻尼比不同时的位移放大因子

结合图5以及表1数据可以得到遗传算法优化的最优电容 $C_{ga}$ 以及最优电阻 $R_{ga}$ ,如表2所示:

表2 遗传算法优化后的电容与电阻大小

主系统阻尼比 $Z$	最优电容/mF	最优电阻/ $\Omega$
0.01	20.904	1.036 4
0.02	20.935	1.041 8
0.03	20.913	1.047 3

考虑主系统阻尼后,最优电容 $C_{ga}$ 几乎不发生变

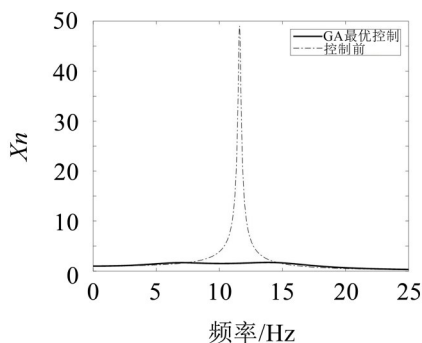
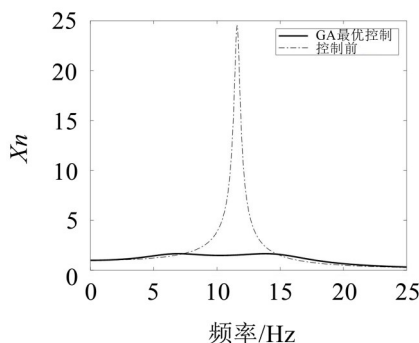
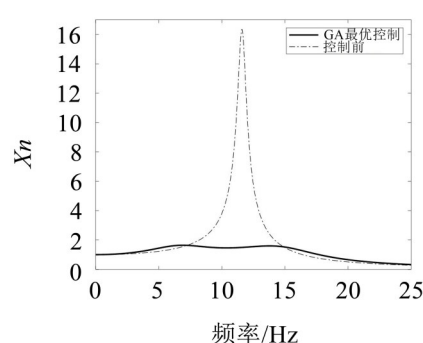
(a)  $Z=0.01$ 时,遗传算法的控制效果(b)  $Z=0.02$ 时,遗传算法的控制效果(c)  $Z=0.03$ 时,遗传算法的控制效果

图6 主系统阻尼比取不同值时,遗传算法的控制效果

## 4 结 语

本文针对电磁分流阻尼,使用遗传算法优化所得到的结果基本理想,与定点理论优化的位移放大因子曲线基本吻合,并通过使用遗传算法解决了定点理论不能优化主系统有阻尼时的电磁分流阻尼电路参数的问题。在应用遗传算法搜索位移放大因子的最大值时,没有陷入局部最优,这说明了遗传算法用于对电磁分流阻尼以及其他含有电磁阻尼的有阻尼动力吸振器的最优设计具有很高的可靠性,且遗传算法的目标函数以及适应度函数仍然不用改变,这是其便利所在。

### 参考文献:

- [1] YAN B, MA H, YU N, et al. Theoretical modeling and experimental analysis of nonlinear electromagnetic shunt

damping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 471: 115184.

化即最优调谐比不变,而最优电阻会略微增加,因此相对应的最优阻尼比会增加。

综合图4与图5可知,遗传算法以编码方式进行数值计算,不对参数本身进行操作,而定点理论的计算首先要通过解方程的方式求得最优同调条件(即定点等高),求解最优阻尼比的理论推导过于复杂,因此遗传算法相对于定点理论具有良好的操作性;而且能考虑主系统的阻尼比,相对于定点理论更能接近实际情况。

为了对比阻尼比取不同值时,遗传算法的控制效果,令电阻 $R=10^9$ 欧姆,则分流电路即可视为断路,即为控制前的效果。控制效果如图6所示。

分析图6可知:未用电磁分流阻尼控制前,位移放大因子 $X_n$ 的幅值会随着主系统阻尼比增加而降低;基于遗传算法优化的电磁分流阻尼设计对降低主系统振动具有良好效果;遗传算法能解决考虑主系统存在阻尼时,电磁分流阻尼的最优电路参数,目标函数与适应度函数都不用改变,其可操作性更强,并且其控制效果更接近实际情况,因此相比于定点理论具有优越性。

- [2] YAN B, MA H, ZHANG L, et al. Electromagnetic shunt damping for shock isolation of nonlinear vibration isolators [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020: 115370.
- [3] YAN B, LUO Y, ZHANG X. Structural multi-mode vibration absorbing with electromagnetic shunt damping [J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(6): 1604-1617.
- [4] ZHENG W, YAN B, MA H, et al. Tuning of natural frequency with electromagnetic shunt mass[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(2): 025026.
- [5] INOUE T, ISHIDA Y, SUMI M. Vibration suppression using electromagnetic resonant shunt damper[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2008, 130(4): 2727-2747.