文章编号：1006-1355(2018)04-0208-05

基于智能算法的动力吸振器多参数优化研究

付江华，张博涵，陈哲明，陈 宝
（重庆理工大学 车辆工程学院，重庆 400054）

摘 要：动力吸振器在改善系统振动与噪声方面应用广泛，优化动力吸振器的参数是提高动力吸振器性能的关键。设计动力吸振器多参数优化目标函数，研究人群搜索算法在动力吸振器参数优化中的应用，并运用人群搜索算法、遗传算法和粒子群算法进行仿真计算，对比三种算法对动力吸振器进行参数优化时的稳定性、计算速度、计算精度。结果表明，所设计的基于人群搜索算法的优化方法具有较好的稳定性及计算精度，但计算速度稍慢于另外两种算法。工程实例证明，基于人群搜索算法优化后的动力吸振器对于改善汽车部件共振、降低车内噪声具有良好效果。

关键词：振动与波；动力吸振器；智能算法；多参数优化；人群搜索算法
中图分类号：U467.4 **文献标志码：**A **DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1355.2018.04.040

Research on Multi-parameter Optimization of Dynamic Vibration Absorbers based on Intelligent Algorithm

FU Jianghua , *ZHANG Bohan* , *CHEN Zheming* , *CHEN Bao*
(School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract : Dynamic vibration absorbers are widely used in vibration and noise reduction. The optimization of the parameters of the dynamic vibration absorbers is the key for improving the performance of the dynamic vibration absorbers. In this paper, the objective function for multi-parameter optimization of the dynamic vibration absorbers is designed, the application of seeker optimization algorithm in the parameter optimization of the dynamic vibration absorbers is studied, and the optimization results using the seeker optimization algorithm, genetic algorithm and particle swarm optimization are obtained by simulation. The stabilities, calculation speeds and calculation precisions of these optimization algorithms are compared mutually. The results show that the optimized method of seeker optimization algorithm has better stability and accuracy, but the calculation speed is slightly slower than the other two algorithms. Engineering practice verifies that the dynamic vibration absorber optimized by the seeker optimization algorithm has a good effect for improving the resonance of the vehicle parts and reducing the noise inside the vehicles.

Keywords : vibration and wave; dynamic vibration absorber; intelligent algorithm; multi-parameter optimization; seeker optimization algorithm

动力吸振器可在不改变部件结构的前提下解决汽车部件共振问题，是降低振动与噪声的有效手段。随着汽车生产商对旗下产品NVH性能日益关注，动力吸振器的应用越来越广泛，动力吸振器的研究也经历了从被动到主动[1-3]、从2自由度到多自由度[4-5]、从忽略主系统阻尼比到考虑主系统阻尼比的发展过程[6-7]。由于被动式动力吸振器结构简单，成本低，因此得到广泛应用。

收稿日期：2017-09-18
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目（51205433）
作者简介：付江华（1984-），男，江西省抚州市人，博士，高级工程师，主要研究方向为汽车NVH开发与控制。
E-mail: 383991110@qq.com

随着智能算法的发展，在解决动力吸振器参数优化问题时智能算法的应用越来越普遍，如应用遗传算法（GA，Genetic Algorithm）[8]、粒子群算法（PSO，Particle Swarm Optimization）[9]等。人群搜索算法（SOA，Seeker Optimization Algorithm）具有寻优能力好、鲁棒性强的特点，然而在解决动力吸振器多参数优化问题中的应用还较少。

本文研究了考虑主系统阻尼比时人群搜索算法在动力吸振器多参数优化中的应用问题。由于智能算法易收敛于局部最优解，因此智能算法的稳定性成为评价其性能的重要标准，有研究提出将多次优化得到的一组数据称为最优解集，再用逼近理想方案的序数偏好方法（TOPSIS）获得其中与理想值最接近的最优解[10]。本研究对比遗传算法、粒子群优

化算法、人群搜索算法3种智能算法的实时性、稳定性及优化效果，对3种智能算法在解决动力吸振器多参数优化问题中的优缺点进行对比，并验证了优化结果在工程中的应用效果。

1　多参数优化建模

1.1　数学模型

动力吸振器与主系统可简化为图1所示的2自由度振动系统[11]。

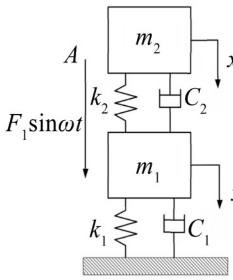


图1　2自由度振动系统模型

振动微分方程可表示为

$$\left.\begin{aligned}&m_1\ddot{x}_1+(c_1+c_2)\dot{x}_1-(c_1+c_2)\dot{x}_2+\\&(k_1+k_2)x_1-k_2x_2=F_1\sin\omega t\\&m_2\ddot{x}_2-(c_1+c_2)\dot{x}_1+(c_1+c_2)\dot{x}_2-k_2x_1+k_2x_2=0\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

求解式(1)可得系统的振幅放大因子A的表达公式，见式(2)。

$$A=\sqrt{\frac{B^2+C^2}{D^2+4\lambda^2E^2}}\qquad(2)$$

其中：

$$B=2\eta_2f\lambda$$
$$C=\lambda^2-f^2$$
$$D=\left(1-\lambda^2\right)\left(f^2-\lambda^2\right)-\mu\lambda^2f^2-4\eta_1\eta_2f\lambda$$
$$E=\eta_2f-\eta_2f\lambda^2(1-\mu)+\eta_1(f^2-\lambda^2)$$

式中：$\lambda=\dfrac{\omega}{\omega_1}$为系统激励频率比，$f=\dfrac{\omega_2}{\omega_1}$为动力吸振器与主系统调谐比，$\omega_1=\sqrt{\dfrac{k_1}{m_1}}$为主系统固有圆频率，$\omega_2=\sqrt{\dfrac{k_2}{m_2}}$为动力吸振器固有圆频率，$\mu=\dfrac{m_2}{m_1}$为质量比，$\eta_1=\dfrac{c_1}{2\sqrt{m_1k_1}}$为主系统阻尼比，$\eta_2=\dfrac{c_2}{2\sqrt{m_2k_2}}$为动力吸振器阻尼比。

1.2　目标函数

研究发现，系统振幅放大因子曲线幅值与动力吸振器参数如协调比f、质量比μ、动力吸振器阻尼比η_2关系密切，并有一定规律[12]：

(1) 动力吸振器阻尼比η_2对曲线的影响：随着η_2的增大，两侧峰值逐渐减小并向中间靠拢，当η_2超过η_{opt}后，峰值变为一个并随η_2增大而增大；

(2) 协调比f对曲线的影响：当f由零逐渐增大时，曲线右侧峰值逐渐降低而左侧峰值逐渐升高，在f_{opt}处两侧峰值相等，当f大于f_{opt}后，左侧峰值超过右侧峰值并逐渐增大；

(3) 质量比μ对振幅放大因子的影响：吸振器质量越大，动力吸振器减振效果越好，但动力吸振器的质量过大会失去安装吸振器的意义，当质量比μ超过0.1后，振幅放大因子减弱趋势减缓，质量比对振幅放大因子的影响灵敏度降低，因此动力吸振器质量比控制在0.1之内。

通过分析振幅放大因子曲线规律可知，曲线在参数最优时会存在2个峰值，且此时两个峰值等高，因此设计算法以获取第i次迭代的振幅放大因子曲线最大值点$A_{\max i}$，并搜寻所有迭代中使$A_{\max i}$最小的阻尼比与协调比组合。

设计目标函数为

$$A_0=\min\left\{\max_{\lambda\in(0.5,1.5)}A(\eta_2,f)\right\}\qquad(3)$$

2　智能算法

2.1　人群搜索算法

人群搜索算法是一种借鉴人类的社会经验、模拟人类搜索行为的启发式随机搜索算法，分析人作为高级Agent的利己行为、利他行为、自组织聚集行为、预动行为和不确定性推理行为，并对其建模用于计算搜索方向和步长[13]。人群搜索算法用自然语言可表述为：当搜寻队在连续空间搜索时，在较优解的邻域内可能存在更优解，因此当搜寻队在较优位置时，可以缩小邻域范围，当搜寻队在较差位置时，可以扩大邻域范围。SOA求解流程如图2所示。

2.1.1　确定搜索步长

模拟人的搜索行为用模糊语句可以描述为：如果目标函数值为小，则搜索步长也为小。步长的模糊变量采用高斯型隶属度函数描述为

$$u_i=u_{\max}-\frac{s-I_i}{s-I}\left(u_{\max}-u_{\min}\right),\ \ i=1,2,\cdots,s\qquad(4)$$

$$u_{ij}=\mathrm{rand}\left(u_i,1\right),\ \ j=1,2,\cdots,D\qquad(5)$$

式中：u_i为目标函数值i的隶属度；u_{ij}为j维搜索空间目标函数值i的隶属度；I_i是种群函数值按降序排列后$x_i(t)$的序列编号；D为搜索空间维数。

根据式(4)、式(5)中不确定推理的条件部分可得隶属度u_{ij}，根据不确定推理的行为部分可得步长

$$\alpha_{ij}=\delta_{ij}-\sqrt{-\ln\left(u_{ij}\right)}\qquad(6)$$

式中：α_{ij}为j维搜索空间的搜索步长；δ_{ij}为高斯隶属函数参数，其值可由式(7)表示

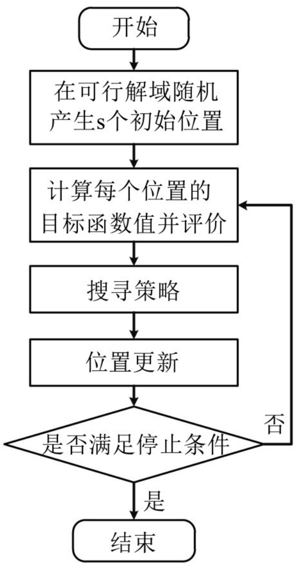


图2 人群搜索算法求解步骤

$$\delta_{ij} = \omega \cdot abs\left(x_{\min} - x_{\max}\right) \tag{7}$$

$$\omega = \left(T_{\max} - t\right)/T_{\max} \tag{8}$$

式(8)中：$x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别是同一子群中具有最小和最大函数值的位置；ω 为惯性权值，随进化代数的增加从0.9线性递减到0.1；t 和 $T_{\max}$ 分别是当前迭代次数和最大迭代次数。

2.1.2 确定搜索方向

通过建模分析人的利己行为、利他行为和预动行为，可以得到任意i个搜寻个体的利己方向$d_{i,\mathrm{ego}}$、利他方向$d_{i,\mathrm{alt}}$及预动方向$d_{i,\mathrm{pro}}$，将这3个方向加权平均得到搜索方向。

$$d_{i,\mathrm{ego}}\left(t\right) = p_{i,\mathrm{best}} - x_i\left(t\right) \tag{9}$$

$$d_{i,\mathrm{alt}}\left(t\right) = g_{i,\mathrm{best}} - x_i\left(t\right) \tag{10}$$

$$d_{i,\mathrm{pro}}\left(t\right) = x_i\left(t_1\right) - x_i\left(t_2\right) \tag{11}$$

$$d_i\left(t\right) = \mathrm{sign}\left(\varphi_1 d_{i,\mathrm{ego}} + \varphi_2 d_{i,\mathrm{alt}} + \omega d_{i,\mathrm{pro}}\right) \tag{12}$$

式中：$t_1,t_2 \in \left\{t, t-1, t-2\right\}$；$x_i\left(t_1\right)$、$x_i\left(t_2\right)$ 分别是 $\left\{x_i\left(t-2\right), x_i\left(t-1\right), x_i\left(t\right)\right\}$ 中的最佳位置；$g_{i,\mathrm{best}}$ 为第i个搜寻个体所在邻域的群体历史最佳位置；$p_{i,\mathrm{best}}$ 为第i个搜寻个体到目前为止经历过的最佳位置；φ_1、φ_2为在已知区间[0,1]内被均匀、随机选择的实数。

2.1.3 更新搜寻者个体位置

位置更新的公式为

$$\Delta x_{ij}\left(t+1\right) = \alpha_{ij}\left(t\right)\mathrm{d}_{ij}\left(t\right) \tag{13}$$

$$x_{ij}\left(t+1\right) = x_{ij}\left(t\right) + \Delta x_{ij}\left(t+1\right) \tag{14}$$

2.2 遗传算法

遗传算法是一种借鉴自然界的进化规律演化来的随机优化搜索算法，直接对参数的编码进行操作，而非对参数本身；在产生初代种群后，遵循优胜劣汰、适者生存的原则，逐代演化产生出越来越好的近似解；遗传算法的选择、交叉、变异等运算都是以概率的方式进行[14]。可以用MATLAB的Optimization Tool中自带的ga工具求解，调用格式如式(15)所示。

$$[xv, fv] = \mathrm{ga}\,(\text{@fitnessFCN, NVARS,options}) \tag{15}$$

式中：xv为目标函数的最优解；fv为目标函数的最优值；fitnessFCN为目标函数；NVARS为未知数的个数；options为参数设置。

2.3 粒子群优化算法

粒子群优化算法是模拟鸟类觅食行为的随机优化算法。所有粒子都有一个目标函数决定的适应值，还有一个速度值$\boldsymbol{v}_{ij}\left(t\right)$，决定了它们飞行方向和距离。粒子知道自身目前发现的最优值p_{best}和现在的位置；每个粒子还知道目前整个群体中所有粒子发现的最好位置g_{best}，粒子通过自身和同伴的经验来决定下一步行动，通过迭代找到最优解[15]。在找到个体最优解p_{ij}和全局最优解p_{gj}时，粒子根据式(16)更新自己的速度和新的位置。

$$\begin{gathered}\boldsymbol{v}_{ij}\left(t+1\right) = w\boldsymbol{v}_{ij}\left(t\right) + c_1 r_1\left[p_{ij} - x_{ij}\left(t\right)\right] + c_2 r_2\left[p_{gj} - x_{ij}\left(t\right)\right] \\ x_{ij}\left(t+1\right) = x_{ij}\left(t\right) + v_{ij}\left(t+1\right),\ \left(j = 1,2,\cdots,n\right)\end{gathered} \tag{16}$$

式中：w为惯性权重，取为0.5；c_1与c_2为正的学习因子，取为1.49；r_1与r_2为0～1之间均匀分布的随机数。

3 仿真及试验验证

3.1 仿真验证

设计动力吸振器仿真参数如表1所示。主系统阻尼比η_1=0.06，质量比μ选为0.1，三种算法的种群规模设置为40，迭代次数设置为200，用Etime语句获得仿真时间，用3种算法分别优化15次，以每次振幅放大因子曲线最大峰值为优化结果，得到如图3所示结果。应用统计学理论计算各结果的标准差及仿真时间平均值，得到如表2所示数据。

表1 动力吸振器仿真参数

参数	数值
主系统阻尼比η_1	0.06
质量比μ	0.1

分析图3及表2结果可知，遗传算法优化结果的标准差为0.727 5，人群搜索算法的标准差为0.001 1，粒子群算法标准差为0.017 4，说明人群搜索算法的稳定性最好，各优化结果之间相差较小，具有很好的鲁棒性，相比于其他两种优化算法而言，避免了通过设计其他算法从众多最优解中优选，降低了编程难度。分析平均仿真时间可知，粒子群算法仿真时间最短，为0.285 7 s，人群搜索算法用时最长，为2.977

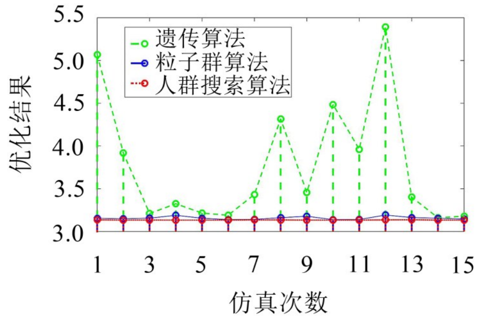


图3 三种算法优化结果

表2 三种算法统计数据

项目	GA	PSO	SOA
平均运行时间/s	0.566 0	0.285 7	2.977 5
标准差	0.727 5	0.017 4	0.001 1

5 s，说明粒子群优化算法实时性最好，人群搜索算法实时性较差。

上述差异产生的原因在于：粒子群优化算法采用速度-位移模型，操作简单，避免了复杂的遗传操作，其求解速度取决于粒子飞行速度，由式(16)可知，粒子速度与权重系数有关，权重系数大则运行快，但容易使粒子飞跃最优值而陷入局部最小值，权重系数小则运行速度慢；粒子群优化算法在收敛情况下，粒子趋向同一化，多样性减弱，以至算法收敛到一定精度时无法继续优化。遗传算法是对参数编码进行处理，对种群进行并行计算，加入了基于概率操作的交叉、变异等步骤，造成了运行时间较长，同时容易陷入局部最小值；遗传算法对种群规模也较敏感，种群规模大则结果稳定，但运行时间较长。人群搜索算法的搜索步长可以通过式(4)进行动态调整，从而使程序跳出局部最优解，但在接近最优值时，搜索步长较小，程序运行时间变长。

对三种智能算法的15次优化结果进行优选，选取最优值为最终的优化结果，得到如表3所示数据，绘制图4，分析数据可知，三种算法中采用人群搜索算法所优化的振幅放大因子曲线峰值A_0最小，可以得出结论，所设计的基于人群搜索算法的动力吸振器多参数优化方法具有较好的稳定性、鲁棒性及优化效果。

三种算法最优值都能有效改善系统共振状况，

表3 三种算法优选结果

参数	GA	PSO	SOA
A_0	3.161 3	3.138 3	3.132 8
η_{opt}	0.199 3	0.194 1	0.201 9
f_{opt}	0.886 1	0.889 5	0.889 4

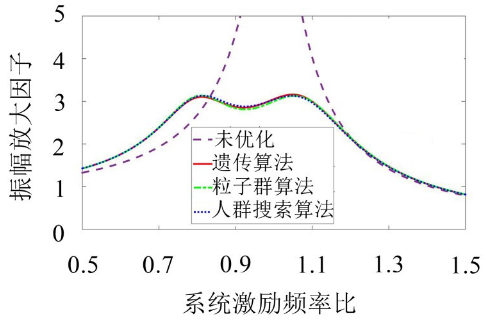


图4 优化前后振幅放大因子曲线

降低共振峰值，采用三种算法所得到的最优的优化结果相差较小，在工程应用中受限于加工精度，三种算法最优值的差异可以忽略。

3.2 试验验证

针对某7座SUV动力总成右悬置支架出现的共振情况，加装动力吸振器进行优化。通过模态试验可得右悬置支架模态频率为377 Hz左右，阻尼比为1.9 %。由于遗传算法、粒子群算法、人群搜索算法的优化结果中的最优结果差别较小，并且在工程应用中受限于制造精度，三者的差别基本可以忽略，因此只采用人群搜索算法对所需动力吸振器进行参数优化。得到优化参数分别为：η_{opt}=0.189 6，f_{opt}=0.902 8。制作动力吸振器样件，安装示意图如图5所示。

图5 动态吸振器安装示意图

动力吸振器胶粘于右悬置支架上表面，抑制Z方向振动。安装前后NVH性能改善如图6、图7所示。

分析图6、图7可知，所设计的动力吸振器可明显降低车内噪声及改善377 Hz共振带的振动状况，车内噪声声压级可降低3 dB。

4 结 语

(1) 基于智能算法的动力吸振器多参数优化能够得到较优的优化结果；

(2) 人群搜索算法相比于遗传算法与粒子群算法具有稳定性好、鲁棒性强的特点，但实时性较差；

(3) 基于算法原理，分析了造成稳定性、实时性

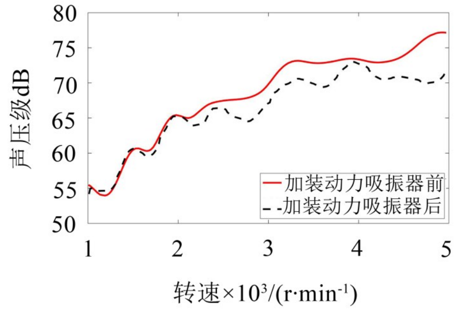
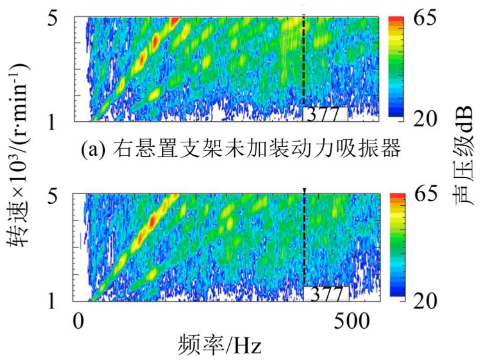


图6 安装动力吸振器前后车内噪声声压级对比



(a) 右悬置支架未加装动力吸振器

(b) 右悬置支架加装动力吸振器

图7 右悬置支架有无加装动力吸振器时的Colormap图对比

差异的原因;

(4)建模时考虑主系统阻尼比,更接近于实际应用情况;

(5)针对工程实际问题,做了优化算法有效性验证,可以发现所设计的优化算法在工程应用中能达到较好的优化效果。

参考文献:

[1] 王小龙,陆静,年猛. 吸振器在汽车振动噪声控制中的应用和实验测试研究[J]. **科学技术与工程**,2015,15(8):233-237.

[2] KOMATSUZAKI T, INOUE T, TERASHIMA O. Broadband vibration control of a structure by using a magneto rheological elastomer-based tuned dynamic absorber[J]. **Mechatronics**, 2016.

[3] 李斌,牛文超,徐兆懿. 电涡流耗能动力吸振器设计与试验研究[J]. **西北工业大学学报**,2016(1):18-24.

[4] 韩广才,王芝秋. 动力机械动力吸振器数值优化分析[J]. **内燃机工程**,2005,26(5):35-38.

[5] LOVE J S, TAIT M J. Estimating the added effective damping of SDOF systems incorporating multiple dynamic vibration absorbers with nonlinear damping[J]. **Engineering Structures**, 2017, 130: 154-161.

[6] 张盛,陈天星,黄道军. 一款动力吸振器的匹配设计与试验[J]. **现代制造工程**,2016(3):142-145.

[7] 王伟,赵庆海,张海燕. 动力减振器参数优化分析[J]. **振动与冲击**,2006,25(5):180-182.

[8] WEN Q H, ZUO S G. Optimization of active dynamic vibration absorber based on genetic algorithm and LQR[J]. **Journal of Jiamusi University**, 2010: 645-649.

[9] 张多. 动力吸振器参数优化及其主动控制技术研究[D]. 西安:长安大学,2015.

[10] 王淳,陈雅菊. 基于多目标粒子群算法的动力吸振器参数优化和决策研究[J]. **舰船科学技术**,2009,31(11):46-50.

[11] 黄秀金,何立东,王晨阳. 可控环形动力吸振器抑制管道强迫振动的研究[J]. **北京化工大学学报**(自然科学版),2015,42(3):88-93.

[12] 何山. 动力吸振器的设计方法研究及其在汽车减振降噪中的应用[D]. 广州:华南理工大学,2014.

[13] ZHU Y, DAI C, CHEN W. Seeker optimization algorithm for several practical applications[J]. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, 2014, 7(2): 353-359.

[14] İSMAIL ESEN, KOÇ M A. Optimization of a passive vibration absorber for a barrel using the genetic algorithm[J]. **Expert Systems with Applications**, 2015, 42(2): 894-905.

[15] KHAN S U, YANG S, WANG L, et al. A modified particle swarm optimization algorithm for global optimizations of inverse problems[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2016, 52(3): 1-4.

(上接第139页)

[9] 吴会超,邬平波,,曾京,等. 车下设备对车体振动的影响[J]. **交通运输工程学报**,2012,12(5):50-56.

[10] 吴会超,邬平波,吴娜,等. 车下设备悬挂参数与车体结构之间匹配关系研究[J]. **振动与冲击**,2013,32(3):124-128.

[11] ZHOU J, GOODALL R, REN L , et al. Influences of car body vertical flexibility on ride quality of passenger railway vehicles[J]. **Journal of Rail and Rapid Transit**, 2009, 223(5): 461-471.

[12] GONG DAO, SUN WENJING, ZHOU JINSONG, et al. Analysis on the vertical coupled vibration between bogies and metro car body[J]. **Procedia Engineering**, 2011, 16: 825-831.

[13] GONG DAO, ZHOU JINSONG, SUN WENJING. On the resonant vibration of a flexible railway car body and its suppression with a dynamic vibration absorber[J]. **Journal of Vibration and Control**, 2012, 19(5): 649-657.

[14] 王亚楠,吕振华. 以广义力传递率为目标的动力总成隔振悬置系统优化设计方法[J]. **机械工程学报**,2011,47(11):52-58.