

洗扫车用吸尘盘气动噪声的优化*

单宝来^{1,2} 张琪昌^{1,2†} 张沛³ 刘君³

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072)(2. 天津市非线性动力学与控制重点实验室, 天津 300072)

(3. 郑州宇通重工有限公司, 郑州 450000)

摘要 吸尘盘作为洗扫车的关键组成部件,降低吸尘盘的气动噪声可极大提升产品性能.基于 FLUENT 软件和 FW-H 声比拟模型,对吸尘盘的气动噪声强度进行了计算,设计了一种带有肩部结构和倾斜壁面的新型吸尘盘结构,重点研究了肩部夹角和上壁面倾角对吸尘盘气动噪声产生的综合影响,基于 MATLAB 软件,采用多项式拟合方法分别建立了两参数与吸尘盘全压以及总声压级之间的函数关系,并结合多目标优化遗传算法对目标函数进行了优化分析.数值结果表明:肩部夹角对气动噪声的影响较为显著,在 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 范围内,夹角每增加 1° ,噪声可以降低 0.4dB;合理地增大肩部夹角,可以在降低能量损失的同时有效降低吸尘盘的气动噪声,最大降幅为 6.2dB.

关键词 吸尘盘, 气动噪声, FW-H 声比拟模型, 多目标优化, 遗传算法

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-087

引言

吸尘盘作为洗扫车的关键组成部件,产生的气动噪声占整车噪声的较大部分,极大危害了司乘人员的身心健康.鉴于此,“十三五”国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项 6.2 将降低吸尘盘的气动噪声列为重点研发子项目.

截至目前,鲜见吸尘盘气动噪声的研究,在相关理论研究方面,张健^[1]利用噪声频谱分析、近场测量以及可视化分析等技术找到了吸尘器的噪声源,并通过添加阻力部件以及消音材料等方法成功降低了吸尘器的气动噪声,对低噪音吸尘器的开发设计具有一定的指导意义.与之相似,龙智勇^[2]也分析探讨了吸尘器噪声的产生机理,并基于统计能量法对吸尘器的气动噪声进行了预测分析和控制研究,提出了对吸尘器安装栅格风口和施加阻尼等一系列降噪措施,实验验证实际降噪效果良好;范成高等^[3]则对类似于吸尘盘的复杂空腔结构进行声学系统简化波函数建模,给出了中低频噪声场的分析预测解,并建立了复杂封闭腔体的有源消声模型,有效降低了噪声强度.

在噪声控制方面,Cudina 等^[4]指出特定噪声源

对总噪声水平的贡献取决于吸入装置的几何形状和工作条件,即改变几何形状可以有效降低气动噪声,为日后吸尘盘的降噪研究指明了方向.如 Daichin 等^[5]和 Park 等^[6]即通过改变吸尘器进气流道的沟槽高度和连接腔形状,成功降低了吸尘器的气动噪声,并与试验结果进行了对比分析,验证了仿真结果的正确性;与之相似,Marsden^[7]也通过改变结构的形状降低了由于层流和紊流引起的气动噪声强度,再次印证了 Cudina 等人观点的正确性.

近些年来,随着研究的不断深入,也出现了一些新的降噪方法,如 Jr^[8]改变以往的研究理念,不再从吸尘器结构本身出发,而是设计了一款新型的滤筒结构,该滤筒可以选择性地安装在吸尘器排气路径上,进而有效降低气动噪声.与之不同,Kale 等^[9]直接设计了一款新型的吸收式消声器结构,使得吸尘器的气动噪声值降低了 1.1dB,并将仿真结果与实验数据对比,验证了仿真结果的正确性.

综上所述,关于吸尘盘的降噪仍没有统一的解决方案,人们多是通过试值的方法改变结构的形状和尺寸来降低气动噪声,缺乏理论基础和系统分析.

有鉴于此,本文将设计一种带有肩部结构和倾

2020-06-12 收到第 1 稿,2020-08-24 收到修改稿.

* 国家重点研发计划(2018YFB0106200)

† 通讯作者 E-mail: qzhang@tju.edu.cn

斜壁面的新型吸尘盘结构,并重点研究肩部夹角和上壁面倾角对吸尘盘气动噪声产生的综合影响,运用多项式拟合方法分别建立两参数与吸尘盘全压以及总声压级之间的函数关系,并结合多目标优化遗传算法求解最优的参数组合,以便最大程度降低吸尘盘的能量损失和气动噪声,为日后吸尘盘的优化设计提供参考。

1 吸尘盘的几何参数

对于本文研究的某洗扫车用吸尘盘,其结构示意图如图1所示,主要结构参数如表1所示。

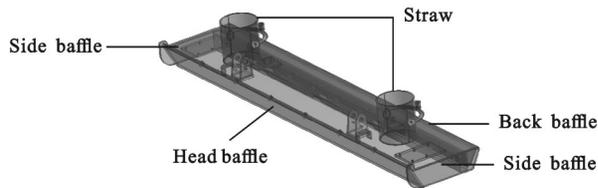


图1 吸尘盘结构示意图

Fig.1 The schematic diagram of dust collector's structure

表1 吸尘盘主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of the dust collector

Structural parameters	Values (mm)
Diameter of straw	168
Height of straw	199
Distance between two straws	1270
Length of dust collector	2000
Top width of dust collector	265
Bottom width of dust collector	212
Height of dust collector	91
Height from the ground	11

2 数值计算

2.1 计算模型及网格划分

基于CATIA软件建立吸尘盘的流体域模型,考虑到吸尘盘进风口处的速度、压力均未知,气流运动情况比较复杂,因此,在吸尘盘进风口四周建立气流扩展区。

运用ANSYS中的Mesh模块对其进行有限元网格划分,为提高计算精度,在气流扩展区与吸尘盘相连接的位置进行网格加密处理,最终网格总数量约为288万,网格划分结果如图2所示。

为了保证数值计算结果的准确性和有效性,首先进行了网格无关性验证,当网格总数量由267万增加到288万时,数值计算得到吸尘盘进出口全压的压差仅为0.15%,满足网格无关性要求。

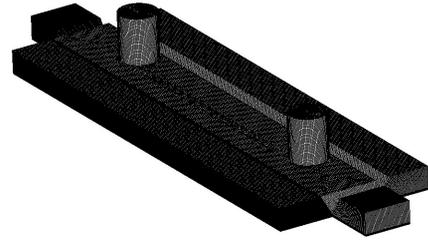


图2 有限元网格划分图

Fig.2 The meshing diagram of finite element

2.2 数值计算方法

运用FLUENT软件,采用三维雷诺守恒型N-S方程和Standard $k-\varepsilon$ 湍流控制方程对吸尘盘内部流场进行数值计算,其中,近壁面方程选取标准壁面函数,压力速度耦合采用SIMPLE算法,压力修正采用PRESTO格式,动量方程、能量方程以及湍流耗散方程均采用二阶迎风格式,并给定进口总压强为一个标准大气压,给定出口平均静压强为-6150Pa(由吸尘盘实际工作状态下测量得知)。

将稳态计算结果作为初始值,进行非稳态计算,并采用FW-H声比拟模型对吸尘盘的气动噪声强度进行计算。

3 原始吸尘盘的气动噪声计算

1969年,Ffowcs Williams和Hawkings运用广义函数理论解决了在静止流体中作任意运动的控制面的发声问题,并推导出著名的声学计算方程,即FW-H方程^[10],如下所示。

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial \left\{ \left[\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n) \right] \delta(f) \right\}}{\partial t} - \frac{\partial \left\{ \left[P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n) \right] \delta(f) \right\}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \left[T_{ij} H(f) \right]}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

式中, c_0 为远场声速, p' 代表观测点在 t 时刻的声压值, ρ_0 表示流体密度, u_i 为流体在 x_i 方向上的速度分量, u_n 、 v_n 分别为垂直于积分面的流体速度分量和积分面移动速度分量, $\delta(f)$ 为Dirac函数,且 $f=0$ 为声源数据积分面, P_{ij} 表示应力张量, n_j 为控制面上的单位外法向矢量, T_{ij} 代表Lighthill张量, $H(f)$ 为Heaviside函数。

方程(1)右侧三项分别代表单极子源项、偶极子源项以及四极子源项,其中单极子源和偶极子源都属于面声源,而四极子源属于体声源.对于吸尘盘而言,气动噪声主要是由面声源产生,因此可以

忽略四极子声源.

对于本文研究的吸尘盘,实际工作时的流量为 $Q=10000\text{m}^3/\text{h}$,因此本文的气动噪声计算全部基于此工况下进行.噪声源选择为吸尘口壁面和吸管壁面,噪声监测点设置在距离吸尘盘主进风口1米远的位置,如图3所示.

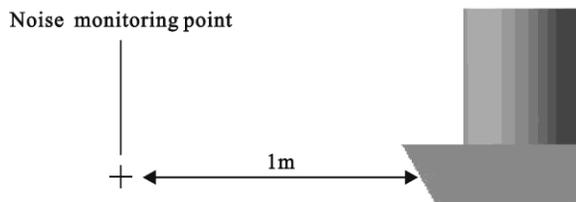


图3 噪声监测点位置示意图

Fig.3 The schematic diagram of noise monitoring point's location

计算得到噪声监测点处的总声压级为74.3dB,其噪声频谱图如图4所示.

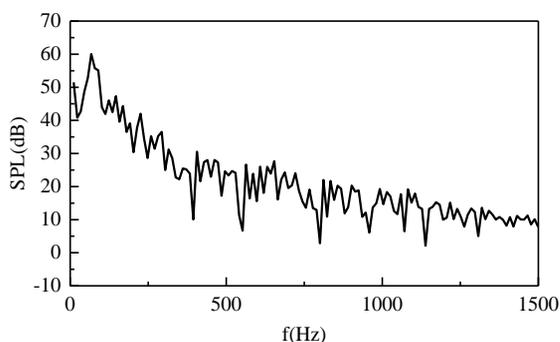


图4 噪声频谱图

Fig.4 The diagram of noise spectrum

由图4可知,在整个频率范围内,吸尘盘的气动噪声都以涡流噪声为主,且在低频范围内,噪声值较高,尤其当频率小于250Hz时,表现的最为明显.随着频率的不断增加,噪声值不断降低,当频率大于1000Hz时,噪声值将基本维持在10dB左右.由此可知,低频噪声对吸尘盘整体噪声的贡献较大,应该着力降低低频噪声值.

声压脉动时均值(d_{pdt} RMS,简称 P_{rms})^[11],即静态压力对时间偏导数($\partial p/\partial t$)的均方根值,可直观反映噪声源所在位置及噪声源强度分布.如图5所示,即为该吸尘盘壁面处的声压脉动时均值云图.

由图5可知,吸尘口上壁面以及吸管与吸尘口上壁面相连接的部位对噪声的贡献量最大,为主要的噪声源.

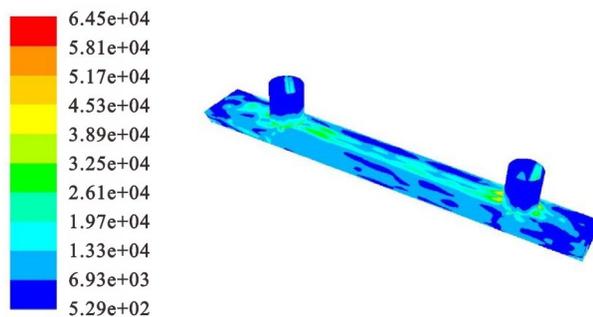


图5 声压脉动时均值云图

Fig.5 The map of mean value of pressure fluctuation

4 新型吸尘盘结构设计及优化

4.1 新型吸尘盘结构

吸尘口上壁面以及吸管与吸尘口上壁面相连接的部位为吸尘盘的主要噪声源,这是因为吸尘口上壁面是水平的,导致一部分气流进入到吸尘口后会径直撞向上壁面,产生较大的压力脉动,进而引发气动噪声;其次,由于吸管与吸尘口上壁面之间采用的是直角过渡,从吸尘口到吸管,横截面积突然变小,导致速度骤然升高,进而产生漩涡,引发涡流噪声.

鉴于上述分析,本文参考高速列车^[12]和飞机座舱^[13]的降噪研究实例,采取增加肩部结构的方式改变吸管与吸尘口上壁面之间的连接方式,并将吸尘口上壁面改成倾斜的形状,其结构示意图如图6所示.

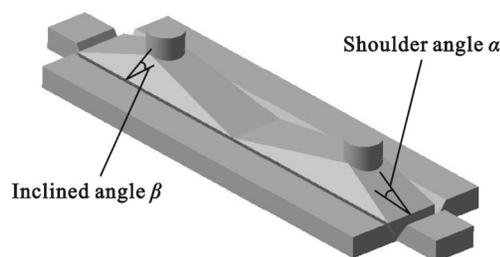


图6 改进后的吸尘盘结构

Fig.6 The structure of improved dust collector

4.2 目标函数建立

为了确定最优的肩部夹角和上壁面倾角,基于MATLAB软件,采用最小二乘法分别建立吸尘盘全压 P 以及吸尘盘总声压级 L_p 关于肩部夹角 α 和上壁面倾角 β 之间的函数关系式.如表2所示,即为 P 和 L_p 的部分样本点信息.

根据表2所示数据,建立函数关系如下:

(1)吸尘盘全压 P

表 2 P 和 L_p 的部分样本点信息

Table 2 Partial sample points' information of P and L_p

$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	p/Pa	L_p/dB
2	7.80	-3372.77	73.1
4	15.35	-3375.79	70.3
6	22.42	-3340.39	66.0
8	28.88	-3266.47	71.2
10	34.69	-3188.82	70.9
14	44.38	-3071.40	69.1
18	51.90	-3054.06	68.5
20	55.00	-2897.38	73.9

$$P = -3755 + (1.097e + 04)\alpha - 2703\beta + 182\alpha^2 - 255.7\alpha\beta + 45.83\beta^2 \quad (2)$$

(2) 吸尘盘总声压级 L_p

$$L_p = 72.8 + 190.8\alpha - 48.05\beta + 4.905\alpha^2 - 5.642\alpha\beta + 1.016\beta^2 \quad (3)$$

其中各拟合函数的决定系数 R^2 和修正决定系数 R_a^2 的值均在 0.98 以上, 接近于 1, 表明拟合效果较好, 目标函数值足够逼近真实值, 可以用来预测和优化分析。

为了满足吸尘盘结构的合理性, 实现吸尘口上壁面与肩部结构之间无缝对接(如图 6 所示), 应使肩部夹角 α 与上壁面倾角 β 之间满足一定的对应关系, 如表 2 所示. 运用最小二乘法, 将其表示成函数形式, 如下所示:

$$\beta = (8.526e - 9)\alpha^7 - (5.884e - 7)\alpha^6 + (1.145e - 5)\alpha^5 + 0.0001134\alpha^4 - 0.006559\alpha^3 + 0.002447\alpha^2 + 3.922\alpha - 2.674e - 6 \quad (4)$$

将式(4)分别代入到式(2)和式(3)中, 即可得到吸尘盘全压 P 和吸尘盘总声压级 L_p 仅关于肩部夹角 α 的函数关系式, 如下所示。

(3) 吸尘盘全压 P

$$P = 368.834\alpha - 255.7\alpha\phi + 45.83\phi^2 + (1.75385759000000007291e + 2)\alpha^2 + (1.77289770000000004302e + 1)\alpha^3 - (3.06520200000000020424e - 1)\alpha^4 - (3.09493500000000004713e - 2)\alpha^5 + (1.59044519999999986112e - 3)\alpha^6 - (2.30457779999999986165e - 5)\alpha^7 - (3.75499277217799999562e + 3) \quad (5)$$

(4) 吸尘盘总声压级 L_p

$$L_p = -5.642\alpha\phi + 1.106\phi^2 + (4.78742164999999999964e + 0)\alpha^2 + (3.151599499999999966508e - 1)\alpha^3 - (5.44887000000000010225e - 3)\alpha^4 - (5.50172499999999984471e - 4)\alpha^5 + (2.82726199999999976576e - 5)\alpha^6 - (4.09674300000000022411e - 7)\alpha^7 + 72.80012848570000016935 \quad (6)$$

其中,

$$\phi = (8.5259999999999971583e - 9)\alpha^7 - (5.8839999999999948386e - 7)\alpha^6 + (1.1450000000000004877e - 5)\alpha^5 + (1.1340000000000005245e - 4)\alpha^4 - (6.5589999999999972627e - 3)\alpha^3 + (2.446999999999995640e - 3)\alpha^2 - 2.6740000000000014793e - 6 + 3.922 \cdot \alpha \quad (7)$$

由式(5)和式(6)可知, P 与 α 之间, 以及 L_p 与 α 之间均存在复杂的非线性对应关系, 无法实现 P 和 L_p 同时达到各自的最优值. 因此, 需要结合多目标优化算法寻找最优的肩部夹角, 获得理论上的理想设计点。

4.3 基于遗传算法的多目标函数优化

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是一种基于生物自然选择和遗传机理的随机搜索与优化方法, 其基本思想是基于 Darwin 的进化论和 Mendel 的遗传学说, 作为一种智能型随机搜索算法, 遗传算法具备很强的全局寻优能力, 尤其适用于全局解空间优化, 因此被广泛应用于航空航天、汽车、船舶、化工等领域。

与传统搜索算法不同, 遗传算法是从一组随机产生的初始解, 称为群体, 开始搜索过程. 群体中的每个个体都是问题的一个解, 称为染色体, 这些染色体在后续迭代中不断进化, 称为遗传. 遗传算法主要是通过交叉、变异及选择运算实现. 染色体的好坏用适应度来衡量, 根据适应度的大小从上一代和后代中选择一定数量的个体, 作为下一代群体, 再继续进化, 这样经过若干代之后, 算法收敛于最好的染色体, 即为问题的最优解^[14], 用流程图表示如下。

基于 MATLAB 软件, 借助软件自带的优化工具箱 (Optimization Tool), 采用多目标优化遗传算法 (gamultiobj-Multiobjective Optimization using Genetic Algorithm) 求解器对目标函数 P 和 L_p 进行优化, 出于工程实际考虑, 肩部夹角 α 不宜过大, 因此确

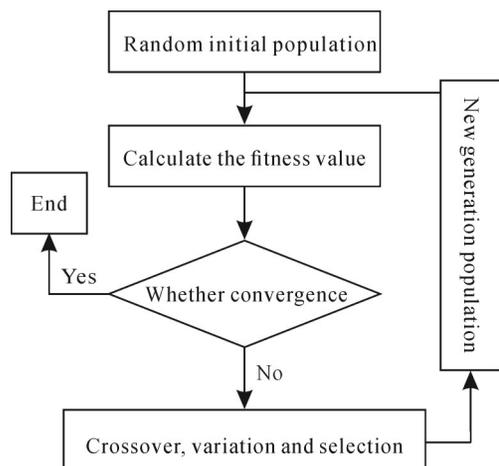


图7 遗传算法流程图

Fig.7 The flow chart of genetic algorithm

定 α 的取值范围为 $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$.

经计算,可得到 P 和 L_p 均取得较小值时的一系列 Pareto 点,如表3所示.

表3 部分 Pareto 点信息

Table 3 The information of partial pareto points

$\alpha/^\circ$	p/Pa	L_p/dB
2.58	-3354.90	72.1
3.07	-3346.72	71.3
4.94	-3345.78	69.2
6.15	-3328.35	68.8
13.95	-3051.31	68.8
14.38	-3049.98	68.6
16.15	-3045.50	67.8

对于本文研究的吸尘盘,其理想的最优设计目标是使吸尘盘的全压损失绝对值和总声压级均取得最小值.由表3可知,当 $\alpha=16.15^\circ$ 时,满足此优化目标,因此确定最优的肩部夹角 $\alpha=16.15^\circ$,此时 $\theta=48.65^\circ$ (注:此结果与表3所示数据变化趋势一致).

4.4 优化结果验证

为了验证多目标优化结果的正确性,现对优化后的吸尘盘($\alpha=16.15^\circ$, $\theta=48.65^\circ$)进行气动噪声强度计算,并与优化结果进行对比分析,如表4所示.

由表4知,计算得到噪声监测点处的总声压级为68.1dB,与多目标优化结果仅相差0.4%,且此时

表4 优化结果验证

Table 4 Verification of optimized results

Performance parameters	Optimized results	Calculated results	Relative error
Total pressure of outlet (Pa)	-3049.98	-3075.79	1%
Aerodynamic noise (dB)	68.6	68.1	0.4%

吸尘盘的出口全压为-3075.79Pa,误差仅为1%,由此证明多目标优化结果是正确的.

5 优化结果对比

5.1 总声压级及噪声频谱图对比

如表5所示,即为吸尘盘优化前后,在噪声监测点处的总声压级对比结果.

表5 总声压级对比

Table 5 The comparison of total sound pressure level

State	L_p/dB
Original dust collector	74.3
Optimal dust collector	68.1
Difference value	6.2

由表5可知,经过优化之后,吸尘盘的总声压级降低了6.2dB,约为8.3%,降噪效果显著.

绘制优化吸尘盘的噪声频谱图,并与原始吸尘盘进行对比,如图8所示.

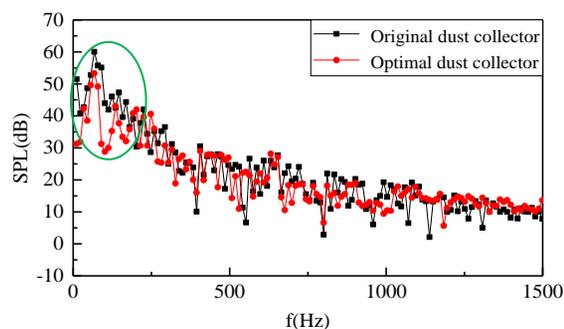


图8 噪声频谱图对比

Fig.8 The contrast diagram of noise spectrum

由图8可知,对吸尘盘结构优化之后,低频噪声值有较大幅度的降低,尤其是在0~250Hz范围内(图中绿色圆圈所示),表现的最为明显,其中峰值噪声降低了约6.8dB,降噪效果显著.虽然其他频率处噪声值基本保持不变,但数值较小,且吸尘盘噪声是以低频噪声为主,因此可以说明优化结果是合理的.

5.2 声压脉动时均值云图对比

为了验证本文的优化方法确实降低了吸尘盘的气动噪声强度,现截取优化吸尘盘壁面处的声压脉动时均值云图,如图9所示.

对比图9和图5得知,对吸尘盘结构优化之后,其声压脉动时均值有较大程度的降低,其中最大值降低了约24%,降幅明显.且吸管与吸尘口上壁面相连接的部位不再是主要的噪声源,改善了噪声源

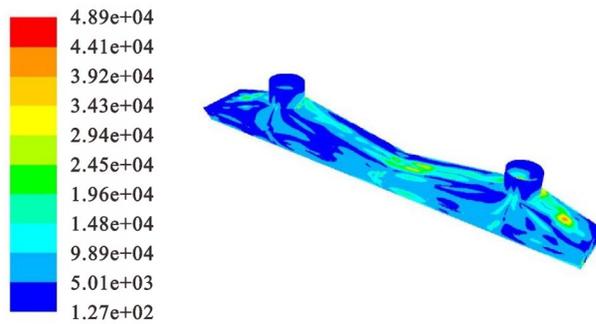


图9 声压脉动时均值云图(优化后)

Fig.9 The map of mean value of pressure fluctuation (after optimization)

强度分布,有效降低了吸尘盘的气动噪声。

6 结论

本文基于FLUENT软件和FW-H声比拟模型对吸尘盘的气动噪声强度进行了计算。基于MATLAB软件,分别建立了吸尘盘全压以及总声压级关于肩部夹角和上壁面倾角两个结构参数之间的函数关系,并结合多目标优化遗传算法得到了最优的参数组合,降低能量损失的同时有效降低了吸尘盘的气动噪声,并得出以下主要结论:

① 肩部夹角对气动噪声的影响较为显著,在 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的范围内,夹角每增加 1° ,噪声可以降低0.4dB。

② 合理地增大肩部夹角,可以在降低能量损失的同时有效降低吸尘盘的气动噪声,最大降幅为6.2dB。

参 考 文 献

- 张健. 一种卧式旋风分离吸尘器的降噪研究[硕士学位论文]. 天津:天津大学,2009(Zhang J. Research on noise reduction of one bag-less canister vacuum cleaner [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2009 (in Chinese))
- 龙智勇. 基于统计能量法的吸尘器噪声分析预测与控制研究[硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008(Long Z Y. Research on noise control and forecast for vacuum cleaner based on statistical energy analysis [Master Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008(in Chinese))
- 范成高,陈南,张肃. 基于改进 Trefftz 解析法的封闭空腔噪声有源控制. 动力学与控制学报,2006,4(4):380~384 (Fan C G, Chen N, Zhang S. Enclosed cavity noise active control by advanced trefftz analytic method. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, 4(4): 380~384 (in Chinese))
- Cudina M,Prezelj J. Effect of vaned diffuser on noise generated by vacuum cleaner suction units. *Noise and Vibration*,2008,39(3):12~27
- Daichin, Lee S J. Experimental analysis of flow fields inside intake heads of a vacuum cleaner. *Journal of Mechanical Science and Technology*,2005,19(3):894~904
- Park C W, Lee S I, Lee S J. Effect of suction nozzle modification on the performance and aero-acoustic noise of a vacuum cleaner. *KSME International Journal*, 2004, 18(9):1648~1660
- Marsden A L. Aerodynamic noise control by optimal shape design [Master Thesis]. Palo Alto: Leland Stanford Junior University,2005
- Roy H H. Vacuum cleaner noise reducing arrangement. *The United States*,4970753,1990:11~20
- Kale P P, Patil M B, Korade D N, et al. Experimental and CFD analysis of vacuum cleaner exhaust muffler. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*,2016,13(1):31~27
- Ffowcs Williams J E, Hawkings D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *The Royal Society*,1969,264(1151):321~342
- Li D, Yang L N, Liu X M. A comparative study on aerodynamic performance and noise characteristics of two kinds of long-eared owl wing models. *Journal of Mechanical Science and Technology*,2017,31(8):3821~3830
- 李辉,肖新标,朱旻昊,等. 高速列车车厢连接处气动噪声特性初探. 振动与冲击,2016,35(6):109~114(Li H, Xiao X B, Zhu M H, et al. Analysis on aerodynamic noise in inter-coach space of high-speed train. *Journal of Vibration and Shock*,2016,35(6):109~114(in Chinese))
- 雷平,高行山. 飞机座舱减振降噪优化设计方法. 动力学与控制学报,2007,5(1):88~91 (Lei P, Gao X S. Structural optimal design to reduce vibration and interior noise of aircraft cabin. *Journal of Dynamics and Control*, 2007,5(1):88~91(in Chinese))
- 吉根林. 遗传算法综述. 计算机应用与软件,2004,21(2):69~73 (Ji G L. Survey on genetic algorithm. *Computer Applications and Software*,2004,21(2):69~73 (in Chinese))

OPTIMIZATION OF AERODYNAMIC NOISE FOR CLEANING SWEEPER'S DUST COLLECTOR *

Shan Baolai^{1,2} Zhang Qichang^{1,2†} Zhang Pei³ Liu Jun³

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2.Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Control, Tianjin 300072, China)

(3.Zhengzhou Yutong Heavy Industries Co. Ltd, Zhengzhou 450000, China)

Abstract Dust collector is the key component of the cleaning sweeper vehicle, so the product performance can be greatly improved by reducing the aerodynamic noise of the dust collector. Based on Fluent software and FW-H acoustic analogy model, the aerodynamic noise of dust collector was calculated. Firstly, a new kind of dust collector with shoulder structure and inclined wall was designed in this paper, and the comprehensive influence between shoulder angle and inclined angle of upper wall on the aerodynamic noise of the dust collector was mainly focused on. Based on MATLAB software, polynomial fitting was used to establish the function relations between dust collector's total pressure and two parameters, and between total sound pressure level and two parameters, and then the objective functions were optimized by using multi-objective optimization genetic algorithm. The numerical results show that: the shoulder angle has a significant influence on aerodynamic noise, and between 0° and 20° , the noise can be reduced by 0.4dB for every one degree increase of the shoulder angle. Moreover, the aerodynamic noise of the dust collector can be reduced effectively by increasing the shoulder angle reasonably while reducing the energy loss of the dust collector, and the maximum reduction is 6.2dB.

Key words dust collector, aerodynamic noise, FW-H acoustic analogy model, multi-objective optimization, genetic algorithm

Received 12 June 2020, revised 24 August 2020.

* The project supported by the National Key Research and Development Plan (2018YFB0106200)

† Corresponding author E-mail: qzhang@tju.edu.cn

《动力学与控制学报》

2020年总目次

- 神经动力学研究进展 王如彬(2020,18(1):1)
- 神经动力学与力学 陆启韶(2020,18(1):6)
- 皮层GABA受体诱导的失神发作 王智慧 郑艳红 王青云(2020,18(1):11)
- 耦合胰腺 β 细胞的同步性分析 赵勇 吴俊梅 杨梅晨 韩芳(2020,18(1):17)
- 神经元膜电位对信息的编码 彭俊 王如彬(2020,18(1):24)
- 含时滞的忆阻耦合HR神经元的复杂放电行为 王松 茅晓晨(2020,18(1):33)
- 电磁刺激对FHN神经元系统的调控作用 曲良辉 都琳 胡海威 曹子露 邓子辰(2020,18(1):40)
- 星形胶质细胞膜电位门控钙离子通道调控神经元癫痫放电
..... 独盟盟 袁治轩 李佳佳 吴莹(2020,18(1):49)
- 考虑STDP学习律的树突整合型神经网络的放电同步
..... 曹金凤 杨梅晨 韩芳 王直杰(2020,18(1):56)
- 前馈型神经网络中的放电频率传递分析 司皓 赵欣桐 孙晓娟(2020,18(1):63)
- 前包钦格复合体中钙动力学对放电模式的影响 梁桐桐 段利霞 赵雅琪 赵勇(2020,18(1):69)
- 皮质—基底神经节—丘脑网络的振荡动力学分析 刘楠 毕远宏 杨红丽 刘全生(2020,18(1):76)
- 边界条件下的Fitzhugh–nagumo模型斑图动力学研究 郑前前 申建伟(2020,18(1):82)
- HPA模型的动力学研究在痛觉治疗中的应用 杜莹 付士慧 严传魁 苏建忠(2020,18(1):88)
- 基于核聚类的嗅觉神经网络对气味模式的识别 诸震宇 王如彬(2020,18(1):93)
- 浅谈流行病动力学模型 贾祥宇 吴禹(2020,18(1):102)
- 杆在固有振动中的对偶关系 胡海岩(2020,18(2):1)
- 非光滑系统全局动力学Melnikow方法的研究进展 李双宝 马茜茜 张伟(2020,18(2):9)
- 绝对节点坐标法下斜率不连续问题处理方法讨论 张君茹 程耿东(2020,18(2):21)
- 基于弹性关节的二维宽频隔振结构的设计及优化 富展展 尹佑旺 孙秀婷(2020,18(2):29)
- 静电驱动微梁谐振器的厚度形态误差特性分析 刘成 冯晶晶 郝淑英 张伟(2020,18(2):35)
- 基于超二次曲线障碍描述的航天器交会对接地面实验研究 徐兴念 文浩 韦正涛(2020,18(2):42)
- 曲线梁桥在车辆载荷下的动力响应研究 刘星 李韶华 司春棣 任剑莹(2020,18(2):50)
- 多档货运索道动力计算方法及结构冲击影响研究
..... 秦剑 乔良 张映晖 郝玉靖 何勇军(2020,18(2):59)
- 弹性预紧约束非线性对结构振动的影响 陈金 金栋平(2020,18(2):69)
- 冲击减振器与非线性能量阱耦合系统的振动抑制研究 李继伟 赵泽福(2020,18(2):76)
- 耦合pre-bötzing复合体神经元中混合簇放电的多时间尺度动力学分析
..... 马芬 段利霞 梁桐桐 梁王娟 赵勇(2020,18(2):82)
- 基于直流电机系统的广义同步混沌化
..... 张敬 汤涛 方文华 李春来 丁超义 安锦运(2020,18(2):91)
- 三轴重载车辆半主动控制研究 张航星 路永婕 李韶华 张俊宁(2020,18(2):98)
- 轨道车辆动力学与控制研究进展 杨绍普 刘永强(2020,18(3):1)
- 标准动车组轮轨载荷特征及影响因素研究 宋韦哲 任尊松 魏雪 李俊杰(2020,18(3):5)
- 一系定位刚度对转向架群配置高速货运动车组车辆动力学性能影响研究
..... 王家鑫 张为黎 陈再刚(2020,18(3):16)
- 空气弹簧在100%低地板轻轨车上应用可行性分析 范韶轩 戚壮 莫荣利 叶特(2020,18(3):22)
- 高速列车转向架的主动稳定性研究 姚远 宋亚东 李广 Sun Jianqiao(2020,18(3):31)
- 基于列车悬挂系统的半主动混合控制仿真分析 赵义伟 杨绍普 刘永强 廖英英(2020,18(3):38)
- 轨道车辆车轮辐板阻尼层对其降噪效果的影响分析
..... 钱鼎玮 杨新文 刘晓波 马晓云(2020,18(3):44)

- 面向非线性轨道车辆动力学的广义多步显式积分算法应用杨超 李强 王曦(2020,18(3):51)
- 转向架临界速度的不确定性研究高学军 李映辉(2020,18(3):56)
- 耦合车轮导向机理分析及导向性能对比研究
.....靳晓亮 戚壮 刘鹏飞 王美琪 刘永强(2020,18(3):62)
- 闸瓦制动力不均衡状态下重载货车轮轨动态特性研究
.....张凯龙 刘鹏飞 曹云强 王天龙(2020,18(3):71)
- 变轨距货车转向架的动力学分析石怀龙 罗仁 王勇 施以旋 郭金莹(2020,18(3):79)
- 轮对轴承安全域增量建模方法刘志亮 孙文君 康金龙 秦勇(2020,18(3):86)
- 基于负熵与多目标优化的轮对轴承故障诊断方法顾晓辉 杨绍普 刘永强 侯丽娟(2020,18(3):93)
- 自适应经验小波塔式分解的齿轮微弱故障诊断方法邓飞跃 丁浩 刘永强(2020,18(3):100)
- 敏捷卫星时间最优姿态机动研究综述宝音贺西 印明威(2020,18(4):1)
- 相关白噪声激励下双稳态 Duffing-Van der Pol 系统的随机分岔刘坤峰 靳艳飞(2020,18(4):12)
- 轴向可伸缩复合材料悬臂梁的非线性振动研究刘燕 张伟 龚涛涛(2020,18(4):19)
- 混合体系多塔斜拉桥竖弯刚度评估动力学理论苏潇阳 康厚军 丛云跃(2020,18(4):26)
- 基于一阶剪切板理论的FGM板刚柔耦合动力学建模与仿真
.....杨兴 刘仁伟 侯鹏 章定国(2020,18(4):33)
- 石墨烯树脂复合材料板1:3内共振非线性动力学分析张博 郭翔鹰 姜盼(2020,18(4):44)
- 共轴刚性旋翼桨尖间距建模与参数影响研究周云 胡和平 孟微(2020,18(4):52)
- 多物理场仿真开关磁阻电机定子的径向电磁振动王峰 吴志强 李亚杰 王远岑(2020,18(4):61)
- 宽带噪声激励下带有分数阶控制器的强非线性系统的随机平均技术
.....梁霄 陈林聪 赵珧冰(2020,18(4):70)
- 二维陀螺声子晶体结构力学研究李夏临 杨晓东 张伟(2020,18(4):79)
- 基于SPH的充液刚体刚-液耦合动力学建模张诗琪 刘锦阳(2020,18(4):86)
- 基于能量原理的混合联肢剪力墙塑性性能控制方法与Push-over分析
.....秦朗 周庆 侯超 朱康 伍云天(2020,18(5):1)
- 减震结构多目标性能曲线的设计及应用杜东升 张云龙 李威威 万卓明 金骥(2020,18(5):13)
- 梁端弹簧型自复位耗能框架节点刚度取值研究鲁亮 汪磊 胡宇飞(2020,18(5):22)
- 铅黏弹性阻尼墙力学性能分析研究邓雪松 陈土飞 石菲 张超 刘跃庭(2020,18(5):29)
- 摇摆防屈曲支撑钢框架抗震性能分析孙祚帅 张国伟 丁梦婷(2020,18(5):40)
- 一种新型全钢屈曲约束支撑静动力学性能分析姜涛 戴君武 杨永强 柏文(2020,18(5):46)
- 基于性能需求的基础隔震结构附加调谐惯容阻尼器的优化设计研究叶昆 舒率(2020,18(5):57)
- 水平轴风力机轮毂风荷载特性试验研究马进晓 李永贵 肖翊翔 李毅 吕伟荣(2020,18(5):63)
- 用于结构减震控制的拉索式惯容系统跨层布置优化研究薛松涛 康建飞 谢丽宇(2020,18(5):72)
- 环形弹簧阻尼器的滞回性能试验研究徐蒙 庄鹏 韩森(2020,18(5):79)
- 废旧输送带叠层橡胶支座制作方法与力学性能探讨
.....吴宜峰 李爱群 王浩 张琰 张瑞君(2020,18(5):86)
- 多输入时滞反馈控制下的斜拉梁主共振响应唐艺玮 彭剑 符翔 童俊辉(2020,18(5):92)
- 基于基底神经节机理的行为决策模型宋健 刘深泉 臧杰(2020,18(6):1)
- 一类几何非线性干摩擦振子的分岔研究曾超 谢建华(2020,18(6):32)
- 谐和与高斯白噪声联合作用下二自由度系统的随机稳定性研究胡栋梁 黄勇(2020,18(6):38)
- 圆柱单自由度和双自由度涡激振动特性研究曹兴 刘宇飞 于恒 孔祥鑫 李庆领(2020,18(6):49)
- 盘式制动系统模态实验探究隋鑫 丁千(2020,18(6):57)
- 超声速气流中复合材料壁板的动力学分析及其控制周凯 倪臻 黄修长 华宏星(2020,18(6):67)
- 直升机尾传动轴系的非线性刚度参数辨识方法
.....邹亚晨 王平 倪德 单卫东 臧朝平 张根辈(2020,18(6):77)
- 变截面Z型折叠机翼振动特性的有限元与实验分析王松松 郭翔鹰 王帅博(2020,18(6):84)
- 洗扫车用吸尘盘气动噪声的优化单宝来 张琪昌 张沛 刘君(2020,18(6):90)

JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL

2020.CONTENTENTS

Research advances in neurodynamics	Wang Rubin(2020, 18(1):1)
Neurodynamics and mechanics	Lu Qishao(2020, 18(1):6)
Cortical GABA receptors induce absence seizures	Wang Zhihui, Zheng Yanhong, Wang Qingyun(2020, 18(1):11)
Synchronous analysis of electrically coupled pancreatic β cells	Zhao Yong, Wu Junmei, Yang Meichen, Han Fang(2020, 18(1):17)
Information coding of neuronal membrane potential	Peng Jun, Wang Rubin(2020, 18(1):24)
Complex firing behaviors of a memristive HR neurons with time delays	Wang Song, Mao Xiaochen(2020, 18(1):33)
Regulation of electromagnetic stimulation on FHN neuronal system	Qu Lianghai, Du Lin, Hu Haiwei, Cao Zilu, Deng Zichen(2020, 18(1):40)
Voltage-gated calcium channels in astrocytes regulating epileptic seizures	Du Mengmeng, Yuan Zhixuan, Li Jiajia, Wu Ying(2020, 18(1):49)
Spiking synchronization of a dendritic-integrated neuronal network considering STDP learning rule	Cao Jinfeng, Yang Meichen, Han Fang, Wang Zhijie(2020, 18(1):56)
Analysis of firing rate propagation in the feedforward neuronal network	Si Hao, Zhao Xintong, Sun Xiaojuan(2020, 18(1):63)
Effects of calcium dynamics on firing activities in the pre-Bötzinger complex	Liang Tongtong, Duan Lixia, Zhao Yaqi, Zhao Yong(2020, 18(1):69)
Analyses of oscillation dynamics in cortex-basal ganglia-thalamus network	Liu Nan, Bi Yuanhong, Yang Hongli, Liu Quansheng(2020, 18(1):76)
Studies on pattern dynamics of Fitzhugh-Nagumo model under boundary conditions	Zheng Qianqian, Shen Jianwei(2020, 18(1):82)
Dynamic study of HPA model in the pain therapy	Du Ying, Fu Shihui, Yan Chuankui, Su Jianzhong(2020, 18(1):88)
Odor pattern recognition of the olfactory neural network based on kernel clustering	Zhu Zhenyu, Wang Rubin(2020, 18(1):93)
A brief introduction to epidemic dynamics modeling	Jia Xiangyu, Wu Yu(2020, 18(1):102)
Duality relations of rods in natural vibrations	Hu Haiyan(2020, 18(2):1)
Research progress in Melnikov method for global dynamics of non-smooth systems	Li Shuangbao, Ma Xixi, Zhang Wei(2020, 18(2):9)
Discussion on slope discontinuity using the absolute nodal coordinate formulation	Zhang Junru, Cheng Gengdong(2020, 18(2):21)
Design and optimization of broadband vibration isolation structure with elastic joints	Fu Zhazhan, Yin Youwang, Sun Xiuting(2020, 18(2):29)
Characteristic analysis of thickness shape error on electrostatic actuation microbeam resonator	Liu Cheng, Feng Jingjing, Hao Shuying, Zhang Wei(2020, 18(2):35)
Ground-based experiment on spacecraft rendezvous and docking using superquadric curve for obstacle representation	Xu Xingnian, Wen Hao, Wei Zhengtao(2020, 18(2):42)
Dynamic response of curved girder bridge under random vehicle loads	Liu Xing, Li Shaohua, Si Chundi, Ren Jianying(2020, 18(2):50)
Calculation method for dynamics of multi-span freight cableway and influence of structure impact	Qin Jian, Qiao Liang, Jiang Ming, Wan Jiancheng, Hao Yujing(2020, 18(2):59)
Effect of nonlinear elastic preload on vibration of structures	Chen Jin, Jin Dongping(2020, 18(2):69)
Vibration reduce for an impact damper coupled with nonlinear energy sink	Li Jiwei, Zhao Zefu(2020, 18(2):76)
Multiple time scale dynamics analysis of mixed bursting within the coupled pre-Bötzinger complex neurons	Ma Fen, Duan Lixia, Liang Tongtong, Liang Wangjuan, Zhao Yong(2020, 18(2):82)
Generalized synchronous chaotification based on DC motor systems	Zhang Jing, Tang Tao, Fang Wenhua, Li Chunlai, Ding ChaoYi, An Jinyun(2020, 18(2):91)
Semi-active control of three-axle heavy-duty vehicle	Zhang Hangxing, Lu Yongjie, Li Shaohua, Zhang Junning(2020, 18(2):98)
Development of railway vehicle dynamics and control	Yang Shaopu, Liu Yongqiang(2020, 18(3):1)
Wheel/rail load characteristics and influencing factors of standard electric multiple units	Song Weizhe, Ren Zunsong, Wei Xue, Li Junjie(2020, 18(3):5)
Effect of primary positioning stiffness on vehicle dynamics performance of high-speed freight EMU equipped with four double-axle bogies	Wang Jiabin, Zhang Weili, Chen Zaigang(2020, 18(3):16)
Feasibility analysis of air spring in 100% low floor light rail vehicle	Fan Shaoxuan, Qi Zhuang, Mo Rongli, Ye Te(2020, 18(3):22)
Research on active stability of high-speed train bogies	Yao Yuan, Song Yadong, Li Guang, Sun Jianqiao(2020, 18(3):31)
Simulation analysis of semi-active hybrid control of train suspension system	Zhao Yiwei, Yang Shaopu, Liu Yongqiang, Liao Yingying(2020, 18(3):38)
Effect of web damping layer on noise reduction of rail vehicle wheel	Qian Dingwei, Yang Xinwen, Liu Xiaobo, Ma Xiaoyun(2020, 18(3):44)
Application of a generalized multi-step explicit integration method to nonlinear rail vehicle dynamics	Yang Chao, Li Qiang, Wang Xi(2020, 18(3):51)
Uncertainty analysis of the critical speed of a railway bogie	Gao Xuejun, Li Yinghui(2020, 18(3):56)
Analysis of coupling wheel steering mechanism and comparative study of steering performance	Jin Xiaoliang, Qi Zhuang, Liu Pengfei, Wang Meiqi, Liu Yongqiang(2020, 18(3):62)

- Wheel-rail dynamic characteristics of heavy-haul wagon under unbalanced brake shoe forces
..... Zhang Kailong, Liu Pengfei, Cao Yunqiang, Wang Tianlong(2020, 18(3):71)
- Dynamics analysis of a gauge-changeable railway freight vehicle bogie
..... Shi Huailong, Luo Ren, Wang Yong, Shi Yixuan, Guo Jinying(2020, 18(3):79)
- Incremental modeling of safety region for wheelset bearings Liu Zhiliang, Sun Wenjun, Kang Jinlong, Qin Yong(2020, 18(3):86)
- Fault diagnosis of wheel-set bearing based on negentropy and multi-objective optimization
..... Gu Xiaohui, Yang Shaopu, Liu Yongqiang, Hou Lixian(2020, 18(3):93)
- A weak fault diagnosis method of gear with adaptive empirical wavelet tower decomposition
..... Deng Feiyue, Ding Hao, Liu Yongqiang(2020, 18(3):100)
- Review on time-optimal reorientation of agile satellitesBaoyin Hexi, Yin Mingwei(2020, 18(4):1)
- Stochastic bifurcation in bistable Duffing–Van der Pol system driven by correlated white noisesLiu Kunfeng, JinYanfei(2020, 18(4):12)
- Modeling and numerical analysis of an axially moving composite laminated cantilever beamLiu Yan, Zhang Wei, Gong Taotao(2020, 18(4):19)
- Dynamic theory for evaluation on vertical bending stiffness of multi-tower cable-stayed bridge with hybrid system
.....Su Xiaoyang, Kang Houjun, Cong Yunyue(2020, 18(4):26)
- Dynamic modeling and simulation of functionally graded materials plates based on first order shear plate theory
.....Yang Xing, Liu Renwei, Hou Peng, Zhang Dingguo(2020, 18(4):33)
- Nonlinear dynamic analysis of graphene resin composites plate with 1:3 internal resonance ...Zhang Bo, Guo Xiangying, Jiang Pan(2020, 18(4):44)
- Modeling and parametric study of tip clearance of coaxial rigid rotorZhou Yun, Hu Heping, Meng Wei(2020, 18(4):52)
- Radial vibration simulation of the stator in switched reluctance motor by multiphysics method
.....Wang Feng, Wu Zhiqiang, Li Yajie, Wang Yuancen(2020, 18(4):61)
- Stochastic averaging technique of strongly nonlinear systems with fractional-order controller under the wide-band noise excitation
.....Liang Xiao, Chen Lincong, Zhao Yaobing(2020, 18(4):70)
- Analysis of dynamics characteristics of 2D gyroscope phononic crystalLi Xialin, Yang Xiaodong, Zhang Wei(2020, 18(4):79)
- Dynamic modeling for liquid-filled rigid body based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) method
.....Zhang Shiqi, Liu Jinyang(2020, 18(4):86)
- Plastic performance control method and Push-over analysis of hybrid coupled shear wall based on energy principle
.....Qin Lang, Zhou Qing, Hou Chao, Zhu Kang, Wu Yuntian(2020, 18(5):1)
- Design and application of multi-objective performance curve of structures with energy dissipating devices
.....Du Dongsheng, Zhang Yunlong, Li Weiwei, Wan Zhuoming, Jin Ji(2020, 18(5):13)
- Selection of joint stiffness for an energy-dissipating self-centering frame joint with beam-end spring
.....Lu Liang, Wang Lei, Hu Yufei(2020, 18(5):22)
- Analysis and research on mechanical properties of lead-viscoelastic coupling wall damper
.....Deng Xuesong, Chen Tufei, Shi Fei, Zhang Chao, Liu Yueting(2020, 18(5):29)
- Simulation on seismic performance of the rocking buckling-restrained braced steel frame
.....Sun Zuoshuai, Zhang Guowei, Ding Mengting(2020, 18(5):40)
- Study of the new-type all-steel buckling restrained bracesJiang Tao, Dai Junwu, Yang Yongqiang, Bai Wen(2020, 18(5):46)
- Optimal design of base-isolated structure with supplemental tuned inerter damper based on performance requirement
.....Ye Kun, Shu Shuai(2020, 18(5):57)
- Experimental research on wind load characteristics of hub of horizontal axis wind turbine
.....Ma Jinxiao, Li Yonggui, Xiao Chixiang, Li Yi, Lv Weirong(2020, 18(5):63)
- Study on optimization of cross-layer cable-bracing inerter system for structural seismic response control
.....Xue Songtao, Kang Jianfei, Xie Liyu(2020, 18(5):72)
- Experimental study on hysteretic performance of ring spring damperXu Meng, Zhuang Peng, Han Miao(2020, 18(5):79)
- Tentative studies on the manufacture method and mechanical properties of the waste fabric core conveyor belt laminated rubber bearings
.....Wu Yifeng, Li Aiqun, Wang Hao, Zhang Yan, Zhang Ruijun(2020, 18(5):86)
- Primary resonance response of cable-stayed beam under multi-input time-delayed feedback control
.....Tang Yiwei, Peng Jian, Fu Xiang, Tong Junhui(2020, 18(5):92)
- Behavior decision-making model based on basal ganglia mechanismSong Jian, Liu Shenquan, Zang Jie(2020, 18(6):1)
- Bifurcation of a class of geometrically nonlinear dry-friction oscillatorsZeng Chao, Xie Jianhua(2020, 18(6):32)
- Stochastic stability of a two degrees-of-freedom system under combined harmonic and Gaussian white noise excitation
.....Hu Dongliang, Huang Yong(2020, 18(6):38)
- Single degree and two degrees of freedom vortex-induced vibration of circular cylinder
.....Cao Xing, Liu Yufei, Yu Heng, Kong Xiangxin, Li Qingling(2020, 18(6):49)
- Experimental research on the modes of disc brake systemSui Xin, Ding Qian(2020, 18(6):57)
- Dynamic analysis and control of composite plates in supersonic airflow Zhou Kai, Ni Zhen, Huang Xiuchang, Hua Hongxing(2020, 18(6):67)
- A method for identifying nonlinear stiffness of helicopter tail drive shaft system
.....Zou Yachen, Wang ping, Ni De, Shan Weidong, Zang Chaoping, Zhang Genbei(2020, 18(6):77)
- Finite element analysis and experiment on vibration of Z-shaped morphing wing with variable section
.....Wang Songsong, Guo Xiangying, Wang Shuai(2020, 18(6):84)
- Optimization of aerodynamic noise for cleaning sweeper's dust collectorShan Baolai, Zhang Qichang, Zhang Pei, Liu Jun(2020, 18(6):90)