

怠速工况下厢式汽车发动机 噪声控制方法研究

杨 杰

(上海交通大学职业技术学院 汽车工程学院, 上海 200431)

摘要:在怠速状态下,汽车发动机的转速较低,会因气缸内压力脉动和失火震动等原因产生较大震动,导致噪声增加,而持续的震动和噪声会对发动机内部零部件产生额外的压力和振动,加速零部件的磨损,降低发动机的使用寿命。对此,提出怠速工况下厢式汽车发动机噪声控制方法。首先,在厢式汽车怠速工况下,利用声强法识别发动机噪声源。然后,在噪声源处通过转速传感器测量怠速工况下厢式汽车发动机噪声源处的转速值,并将其转化为参考信号。最后,将转速参考信号输入至基于自适应滤波算法设计的滤波器中,以此实现怠速工况下厢式汽车发动机噪声控制。实验结果表明,所提方法的怠速工况下厢式汽车发动机噪声控制精度更高、效果更好、更适用于实际应用。

关键词:怠速工况;发动机;厢式汽车;自适应滤波算法;噪声控制

中图分类号:U467

文章编号:1000-0682(2024)05-0108-05

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.020

Research on noise control methods for box car engines under idle operating conditions

YANG Jie

(School of Automotive Engineering, Shanghai Communications Polytechnic, Shanghai 200431, China)

Abstract: At idle speed, the speed of the automobile engine is low, and large vibration will be generated due to pressure pulsation in the cylinder and misfire vibration, resulting in increased noise, while continuous vibration and noise will generate additional pressure and vibration on the internal parts of the engine, accelerate the wear of parts, and reduce the service life of the engine. Therefore, the noise control method of van engine under idle condition is proposed. Firstly, the engine noise source is identified by the sound intensity method under the idling condition of the van. Then, at the noise source, the speed of the van engine at the noise source is measured by the speed sensor under the idle condition, and it is converted into a reference signal. Finally, the speed reference signal is input into the filter designed based on the adaptive filtering algorithm, so as to realize the noise control of the van engine under idle condition. The experimental results show that the proposed method has higher accuracy, better effect and is more suitable for practical application.

Keywords: idle operating conditions; engine; box car; adaptive filtering algorithm; noise control

0 引言

厢式汽车作为城市货物运输的主要工具之一,

其数量在不断增加,随之而来的是发动机噪声问题,尤其是在怠速工况下,发动机的噪声不仅影响周围居民的生活质量,还可能对驾驶员的身心健康造成不良影响。因此,研究怠速工况下厢式汽车发动机噪声控制方法具有重要的现实意义和应用价值。怠速工况下,发动机处于低负荷运行状态,此时噪声主要由机械结构振动和气流噪声组成。因此,要有效控制怠速工况下的发动机噪声,需要对噪声产生的

收稿日期:2024-04-12

第一作者:杨杰(1979—),男,汉族,江苏淮安人,工学学士,讲师,研究方向为汽车检测与维修技术及职业教育。

E-mail: scpyangjie0551@163.com

机理和影响因素实行深入分析,进而提出有效的噪声控制方法,故展开怠速工况下汽车发动机噪声控制研究^[1-2]。

白克强^[3]等人首先通过跟踪微分器估计系统噪声;其次,依据 Fal 函数滤波算法设计噪声补偿器;最后,采用所设计噪声补偿器完成噪声控制。但是该方法所设计的噪声补偿器在实际应用中受到系统动态特性的限制,导致噪声控制效果不佳。

杨亮^[4]等人首先基于计算气动声学方法和动网格技术分析汽车工况;其次,通过声类比方法获取噪声特性;最后,通过控制系统实现噪声控制。但是该方法在使用计算气动声学方法和动网格技术展开汽车工况分析时,需要高精度的计算模型和大量的计算资源,导致噪声控制效率不佳的问题。

Shi D^[5]等人对梳划分频域自适应滤波器算法展开改进处理,获取优化后的泄漏 FxCFDAF - 和脱落 FxCFD - AF 算法,并通过此两种方法实现噪声控制。该方法在实际应用中受到环境噪声等因素的影响,导致算法的实际效果与理论预期存在偏差,从而影响噪声控制的准确性。

Dongwook K^[6]等人有源噪声控制的基础上,设计了一种基于虚拟控制器方法的计算气动声学噪声控制方法,并通过该方法实现噪声控制。该方法在实际应用中面对计算资源需求大、控制器设计复杂、有源噪声控制困难等挑战,存在实际应用效果不佳的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,提出怠速工况下厢式汽车发动机噪声控制方法研究。

1 厢式汽车发动机噪声源识别

在厢式汽车怠速工况下,基于声强法识别发动机噪声来源^[7-8]。在厢式汽车停驻、变速器挂空档、发动机以 726 r/min 转速运转的厢式汽车怠速状态下,展开汽车发动机噪声源识别。声强测试装置原理如图 1 所示。

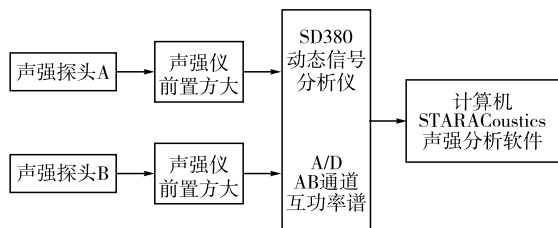


图1 声强测试装置原理图

在发动机表面设置 2 个测量点,使用声强探头测量发动机测量点的声压,并通过计算获取声强值,

随后,将计算出的声强值输入到 SRARCOUSTICS 软件上展开数据处理,获取声功率数据,再计算出噪声源声功率分比率,最后根据声功率分比率判断发动机噪声来源^[9]。

用 p_a , p_b 分别表示测量点 a , b 处声压,则声源处声压 p_y 公式表达如下:

$$p_y = \frac{p_b - p_a}{2} \quad (1)$$

根据声压,可进一步计算出噪声声源处声强 I_y ,公式表达如下:

$$I_y = -\frac{p_b + p_a}{2p_y} \int_0^t (p_b - p_a) dt \quad (2)$$

获取声源处声强值后,将其输入 SRARCOUSTICS 分析软件,获取噪声声功率及噪声源声功率分比率数据。根据发动机零部件噪声声功率和整机噪声声功率的比即可获取噪声源分比率。

发动机零部件噪声声功率 W 公式表达如下:

$$W = \sum_{o=1}^n I_o \cdot DI_y \quad (3)$$

式中: I_o 表示发动机零部件声强; D 表示测量面积; n 表示零部件所占网格数。

发动机整机噪声声功率 W_z 公式表达如下:

$$W_z = \sum_{j=1}^{225} I_k \cdot D \quad (4)$$

式中: I_k 表示发动机整机声强。

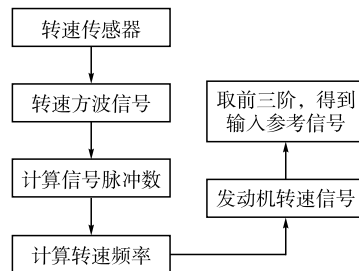
得到噪声源声功率分比率 L 公式表达如下:

$$L = \frac{W}{W_z} \times 100\% \quad (5)$$

最终根据声功率分比率即可判断发动机噪声来源。

2 输入参考信号获取

根据上述内容确定厢式汽车发动机噪声来源,在噪声源处展开发动机转速测量,并将转速值转化为噪声控制器的输入参考信号^[10-11]。输入参考信号获取流程如图 2(a) 所示。



(a)构造输入参考信号步骤

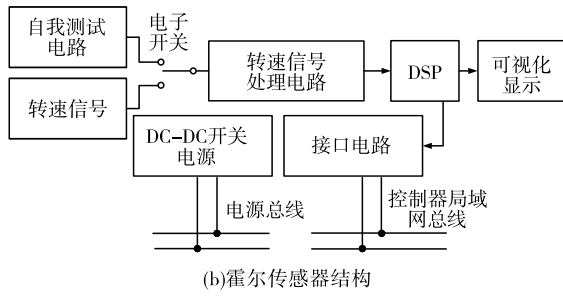


图 2 输入参考信号获取

通过霍尔传感器获取发动机噪声源处发动机转速^[12]。霍尔传感器结构如图 2(b) 所示。

根据转速传感器采集的发动机转速信号, 获取发动机转速频率 f_l , 其公式表达如下:

$$f_l = \frac{n}{30L}l \quad (6)$$

式中: l 表示阶次; n 表示发动机转速。

通过傅里叶级数展开处理发动机转速信号 $c(t)$, 其公式表达如下:

$$c(t) = S_1 \cos(2\pi f_1 \cdot t) + S_2 \cos(2\pi f_2 \cdot t) + \dots + S_l \cos(2\pi f_l \cdot t) \quad (7)$$

式中: S_1, S_2, S_3 表示发动机 246 阶往复惯性力系数; t 表示时间。

只取高于三阶的发动机噪声信号, 并整合得到最终的输入参考信号 $c'(t)$ 公式表达如下:

$$c'(t) \approx S_2 \cos\left(\frac{2\pi \cdot n(t)}{15}t\right) \quad (8)$$

基于此, 获取噪声控制器的输入参考信号。

3 基于自适应滤波算法的噪声控制

将上述获取的输入参考信号 $c'(t)$ 作为滤波器输入, 通过自适应滤波算法实现汽车发动机信号噪声控制^[13-14]。自适应滤波算法利用声音在传播过程中幅值和相位可能会改变, 但频率保持不变的原理, 来消除发动机产生的特定频率的噪声^[15]。自适应滤波算法工作原理如图 3 所示。

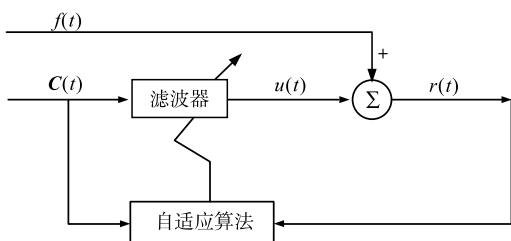


图 3 自适应滤波算法

将参考信号输入至训练后的 Z 阶的滤波器内,

滤波器响应 $C(t)$ 公式表达如下:

$$C(t) = [c'(t), c'(t-1), \dots, c'(t-Z-1)]^T \quad (9)$$

式中: $c'(t-Z-1), c'(t-1), c'(t)$ 表示输入参考信号, t 表示时间。

定义参考信号的自相关矩阵 T , 其公式表达如下:

$$T = R(C(t)C^T(t)) \quad (10)$$

定义期望信号与参考信号的互相关矩阵 A , 其公式表达如下:

$$A = R(f(t)C(t)) \quad (11)$$

误差信号的均方根值和权值矢量是自适应滤波器中的两个重要参数。权值矢量是自适应滤波器的核心组成部分, 它决定了滤波器对输入信号的响应方式和滤波特性。权值矢量的选择和调整直接影响到滤波器的输出信号质量, 在自适应滤波算法中, 权值矢量会根据误差信号实行迭代更新, 以减小误差信号的均方根值; 误差信号的均方根值(RMSE)是衡量滤波器性能的关键指标。它反映了滤波器输出与期望输出之间的偏差大小, 即滤波后的残差。通过最小化 RMSE, 自适应滤波算法能够调整滤波器的权值, 以实现输入信号的最佳滤波效果。

当输入信号通过滤波器时, 滤波器的权值会与输入信号实行加权求和运算, 从而得到滤波器的输出, 滤波器权值矢量 $E(t)$ 公式表达如下:

$$E(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_z(t)]^T \quad (12)$$

式中: t 表示时刻。

误差信号的均方根值 $K(t)$ 用于滤波器的收敛情况的评价, 其公式表达如下:

$$K(t) = R[(f(t) - u(t))^2] \quad (13)$$

式中: R 表示误差信号; $u(t)$ 表示滤波器输出信号; $f(t)$ 表示期望信号。

将上述公式(10)的自相关矩阵 T 和公式(11)的期望信号与参考信号的互相关矩阵 A 代入公式(13), 得到误差信号的均方根值 $K(t)$ 简化公式表达如下:

$$K(t) = R[f^2(t)] - 2E^T(t)A + E^T(t)TE(t) \quad (14)$$

对上述公式展开求导, 以得到误差信号均方根最小时的梯度 $\nabla(t)$ 公式表达如下:

$$\nabla(t) = 2TK(t) - 2A \quad (15)$$

继续推导出最小化误差信号均方根值 K_{\min} 公式表达如下:

$$K_{\min} = R[f^2(t)] - A^T E_0 \quad (16)$$

式中: \mathbf{E}_0 表示初始权值矢量。

将最小误差信号均方根与梯度值代入滤波权值矢量 $\mathbf{E}(t)$ 中,即可得到新的滤波权值矢量 $\mathbf{E}_y(t)$,其公式表达如下:

$$\mathbf{E}_y(t) = \mathbf{E}(t)K_{\min} - v \nabla(t) \quad (17)$$

式中: v 表示收敛步长。通过上述步骤得到滤波器的最优权值矢量 $\mathbf{E}_y(t)$,使得 $RMSE$ 达到最小,从而实现滤波器的训练。

使用调整后的最优权值矢量 $\mathbf{E}_y(t)$,得到滤波器输出信号 $u(t)$ 公式表达如下:

$$u(t) = \sum_{z=1}^Z \mathbf{E}_y(t)c(t-Z-1) \quad (18)$$

基于此,利用滤波器输出信号 $u(t)$ 消除发动机产生的特定频率的噪声,从而实现噪音控制,提高车内的声音环境质量。

4 实验与分析

4.1 实验环境

为了验证怠速工况下厢式汽车发动机噪声控制方法研究的有效性,进行实验测试。在 Python 3.8 运行环境下,利用 STARACoustics 软件完成噪声分析、MATLAB 软件完成信号分析,实验环境如图 4 所示。



图 4 实验实景图

采用文献[3]方法、文献[4]方法和所提方法分别通过噪声源识别效果、转速测量效果、噪声控制效果三个指标验证所提方法的性能。

4.2 实验指标

发动机噪声源识别效果是影响发动机噪声控制精度的重要因素,故展开噪声源识别测试。根据第 2 小节确定噪声源位置与公式(5)确定噪声源声功率分比率 L 。

转速参考信号作为噪声控制器的输入,转速测量精度关乎后续厢式汽车发动机噪声控制的好坏,故展开转速测量效果检测。

载波干扰比 CIR 作为测试指标展开实验分析,对应的计算式如下:

$$CIR = \frac{B}{J} \quad (19)$$

式中: B 代表信号功率; J 代表干扰功率。如果载波干扰比高,在汽车发动机噪声控制中,这意味着发动机产生的噪声相对于其他干扰源来说更小,并且对传输的信号影响较小。因此,当载波干扰比高时,可以认为汽车发动机噪声控制效果较好。

4.3 实验结果

(1) 噪声源识别效果

发动机噪声源识别效果是影响发动机噪声控制精度的重要因素,故展开噪声源识别测试。采用所提的声强法在厢式汽车怠速工况下实行噪声源声功率分比率识别,记录识别结果如图 5 所示。

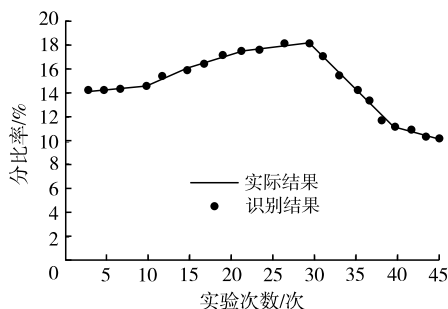


图 5 转速测量结果

分析图 5 可知,所提方法获取的分比率结果与实际情况偏差不大,且噪声源位置均被正确识别,表明所提的噪声源识别方法的有效性及准确性,可为后续噪声控制提供良好支持。

(2) 转速测量效果

通过所提方法的转速传感器在厢式汽车怠速工况下测量发动机转速,记录测量转速和实际转速曲线如图 6 所示。

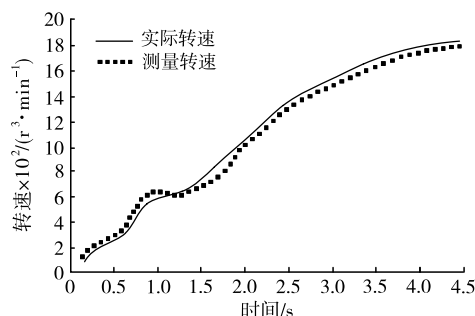


图 6 转速测量结果

分析图 6 可知,经所提方法在厢式汽车怠速工况下测量的发动机转速结果与实际发动机转速偏差较小,表明所提方法测量到的汽车发动机转速值的有效性、准确性,利于后续噪声控制。

(3) 噪声控制效果

在厢式汽车怠速工况下,采用文献[3]方法、文献[4]方法和所提方法完成汽车发动机噪声控制,记录三种方法的噪声控制结果如图7所示。

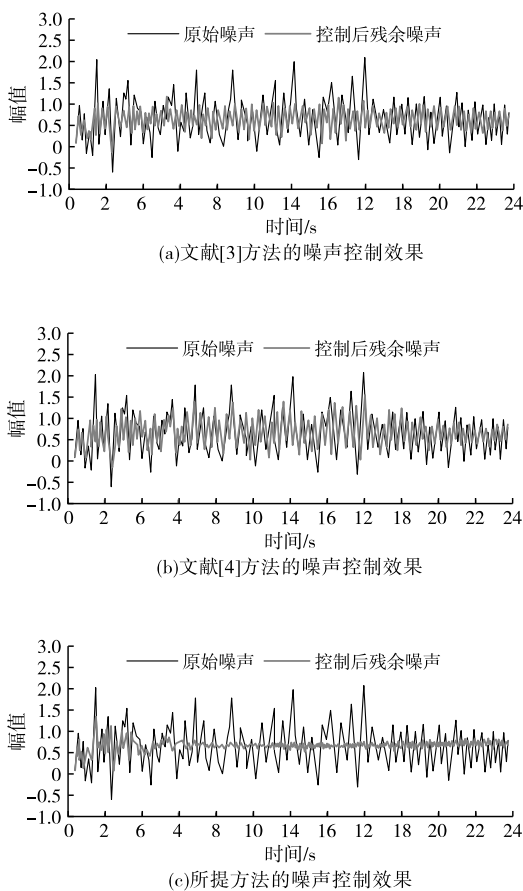


图7 三种方法的噪声控制效果

分析图7可知,文献[3]方法和文献[4]方法在完成汽车发动机噪声控制后,残余噪声仍较高;而所提方法在完成汽车发动机噪声控制后,残余噪声明显大大低于文献[3]方法和文献[4]方法,表明所提方法的噪声控制效果更好。

(4) 载波干扰比效果

在厢式汽车怠速工况下,采用三种方法进行载波干扰比效果对比,结果如图8所示。

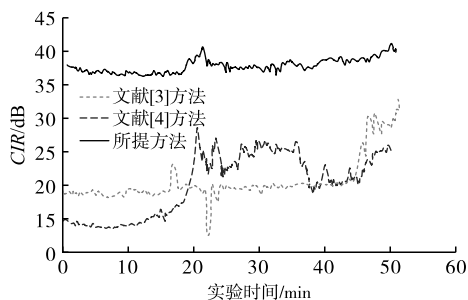


图8 载波干扰比结果

根据图8可以看出,所提方法的载波干扰比CIR明显高于对比方法,始终保持在35 dB以上,而文献[3]方法与文献[4]方法的载波干扰比CIR在5 dB~33 dB之间,且波动幅度较大,由此可以看出所提方法呈现出更为稳定且高于对比方法的载波干扰比,表明所提出的方法对汽车发动机噪声的控制效果更为优越。

通过上述实验可知,所提方法首先通过声强法识别汽车怠速工况下发动机噪声源,并测量出发动机噪声源处的转速,为后续发动机噪声控制奠定基础,提高了噪声控制精度;其次,通过自适应滤波算法完成发动机噪声控制,提高了噪声控制的稳定性,获取了更好的发动机噪声控制性能。

5 结束语

随着环保意识的增强和噪声污染问题的日益突出,发动机噪声控制已成为汽车设计中的一项重要任务,故提出怠速工况下厢式汽车发动机噪声控制方法研究。首先,识别怠速工况下汽车发动机的噪声源;其次,测量噪声源处的发动机转速;最后,完成发动机信号噪声控制。该方法解决了传统发动机信号控制中存在的问题,具有重要应用意义。

参考文献:

- [1] 祝文昭,罗磊,张夏. 一种低复杂度快速收敛的窄带主动噪声控制系统[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 85-92.
- [2] 马凤翔,李康,程登峰,等. 基于被动和主动降噪的光声光谱气体检测仪背景噪声控制技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 432-439.
- [3] 白克强,张松,但志宏,等. 发动机进气压力控制系统噪声抑制方法[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 243-253.
- [4] 杨亮,彭川,李沛然,等. 汽车涡轮增压系统泄压噪声分析及控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 223-232.
- [5] SHI D, GAN W S, LAM B, et al. Comb-partitioned Frequency-domain Constraint Adaptive Algorithm for Active Noise Control[J]. Signal Processing, 2021, 188(4): 108222.
- [6] DONGWOOK K, VIGNESH S, HYUNKEE K, et al. Development of active noise control simulation with virtual controller based on computational aeroacoustics[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2023, 153(5): 2789-2802.
- [7] 张智,邓建交,刘英杰,等. 交叉层波束形成方法的发动机噪声源识别[J]. 声学技术, 2021, 40(5): 680-687.

(下转第128页)

- 性试验与结果分析[J]. 电子质量, 2020(05): 41 - 43 + 47.
- [7] 谷祖康, 卜占成, 金志军, 等. 热量表耐久性试验结果与问题分析[J]. 建设科技, 2015(02): 37 - 38.
- [8] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(08): 2041 - 2046.
- [9] 杨萌, 邓振立, 李虎军, 等. 基于分类 - 关联 - 修正的电力需求预测方法研究[J]. 自动化仪表, 2024, 45(04): 101 - 105.
- [10] 魏泽辉. 基于多元非线性回归分析的光伏发电系统经济模型预测研究[J]. 电站系统工程, 2024, 40(03): 1 - 5.

(上接第 93 页)

- [9] 张伟阳, 程树森. 浸入式水口吸入空气机理及吹氩量控制模型[J]. 钢铁, 2022, 57(10): 110 - 119.
- [10] 魏文哲, 徐林彤, 刘旭晨, 等. 准二级压缩空气源热泵补气加速除霜实验[J]. 制冷学报, 2023, 44(02): 47 - 53 + 60.
- [11] 宋帆, 马小晶, 王宏伟, 等. 基于分数阶的神经网络解耦控制优化方法[J]. 控制工程, 2022, 29(04): 692 - 698.
- [12] 蒋利炜, 何可人, 陈航. 基于 PSO 改进 BP 算法的直流电子负载 PID 控制仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 306 - 310.
- [13] 平旭, 杨富斌, 张红光, 等. 基于肖维勒准则与主元分析的有机朗肯循环神经网络建模方法[J]. 大电机技术, 2023(6): 70 - 76.
- [14] 李振宏. 大数据背景下基于 BP 神经网络的跨境电商皮革服装销量预测[J]. 中国皮革, 2023, 52(6): 104 - 109.
- [15] 许学彬, 陈博恒, 赵楠楠, 等. 基于 GA - BP 的改进高斯均值区域去噪技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(02): 107 - 113.
- [16] 江乐新, 余星, 王从权, 等. 基于 BP 神经网络的空调热水一体机除霜控制器模型的研究[J]. 制冷与空调, 2011, 11(4): 32 - 35.

(上接第 112 页)

- [8] 张文杰, 徐红梅, 李航, 等. 基于声阵列测试和声学边界元计算的粉碎机噪声源识别[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 486 - 494.
- [9] 张威, 景国玺, 杨征睿, 等. 基于 RVMD - RobustICA - ST 联合相干性分析的电驱动总成噪声源识别[Z]. 汽车技术, 2023(5): 15 - 24.
- [10] 苏皓, 刘冬冬, 董太极, 等. 基于法布里 - 珀罗干涉的双电机转速测量[J]. 激光与红外, 2021, 51(12): 1649 - 1653.
- [11] 韩涛翼, 李纪永, 赵彧, 等. 高转速涡轮发动机转子临界转速计算[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(S01): 47 - 53.
- [12] 王爱辉, 王选择, 张瑜灿, 等. 基于振动信号精确主频求解实现发动机转速测量的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(6): 115 - 120.
- [13] 吕收, 李居伟, 郭昕钰. 基于 FXLMS 算法的直升机旋翼主动噪声控制的研究[Z]. 电子技术应用, 2023, 49(5): 99 - 104.
- [14] 卢炽华, 吴方博, 刘志恩, 等. 液压挖掘机驾驶舱窄带主动噪声控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(11): 167 - 175.
- [15] 鹿澳沅, 董宁娟, 陈逸笑, 等. 面向工程应用的在线建模主动噪声控制方法改进[J]. 振动与冲击, 2023, 42(20): 253 - 262.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号: 52 - 49 国际发行代号: BM529 定价: 18.00 元/期 108.00 元/年
地址: 西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编: 710075 电话: 029 - 81871277
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: gyybbjb@126.com