

卷包设备动力吸振降噪系统综述

胡哲名, 傅雍兴

重庆中烟工业有限责任公司重庆卷烟厂 重庆

【摘要】卷包设备噪声对操作者的劳动健康造成了一定影响, 业内对于降噪措施的研究有若干成果, 多以声波吸收材料运用和声源隔绝措施为主要降噪手段, 但效果和效费比有待进一步提高, 而本文所提出的被动式动力吸振系统可与传统降噪技术综合使用, 达到噪声职业危害综合治理的目的。本文主要研究对象是烟草加工企业的卷烟包装设备, 有针对性地提出了一种被动式动力吸振系统, 通过采集机组的噪声及振动信号, 经系统软件分析后向动力吸振器发出调节刚度的指令以改变吸振参数, 抑制关键位置的振动来降低噪声辐射; 本文通过前期现场调研, 收集噪声基频数据确定噪声类型和来源, 建立被动式动力吸振系统数学模型, 从动力吸振系统原理、变刚度技术及控制算法等方面阐述了该系统的组成结构和相关原理, 为噪声治理提供了一种新思路。

【关键词】动力吸振; 变刚度技术; 控制算法

【收稿日期】2023 年 10 月 20 日 **【出刊日期】**2023 年 12 月 19 日 **【DOI】**10.12208/j.jeeaa.20230031

Overview of dynamic vibration absorption and noise reduction system for coiling equipment

Zheming Hu, Yongxing Fu

Chongqing China Tobacco Industry Co., LTD. Chongqing Cigarette Factory Chongqing

【Abstract】The noise of packaging equipment has a certain impact on the labor health of operators, and there are some achievements in the research of noise reduction measures in the industry. Most of them use acoustic absorption materials and sound source isolation measures as the main noise reduction means, but the effect and cost-effectiveness ratio need to be further improved. The passive dynamic vibration absorption system proposed in this paper can be integrated with traditional noise reduction technology. To achieve the purpose of comprehensive control of noise occupational hazards. The main research object of this paper is the cigarette packaging equipment of tobacco processing enterprises, and a passive dynamic vibration absorption system is proposed. After collecting noise and vibration signals of the unit, the system software analyzes and sends stiffness adjustment instructions to the dynamic vibration absorber to change vibration absorption parameters and suppress vibration at key positions to reduce noise radiation. Based on the preliminary field investigation, this paper collects the noise base frequency data to determine the noise type and source, establishes the mathematical model of the passive dynamic vibration absorption system, expounds the composition structure and related principles of the dynamic vibration absorption system from the aspects of the principle of the dynamic vibration absorption system, variable stiffness technology and control algorithm, and provides a new idea for noise control.

【Keywords】Dynamic vibration absorption; Variable stiffness technology; Control algorithm

ZJ17 机组目前仍然是众卷烟厂的主力卷烟设备, 部分设备运行已经超过 10 年, 随着设备部件的磨损老化, 其振动及噪声问题日益凸显, 个别机组主动隔振性能严重下降, 导致机械振动明显传递到地面及其他相邻设备, 另外设备运行中存在空气动力噪

声, 这些都恶化了卷包车间设备运行环境及影响了操作人员的身体健康。为此, 我们会同相关科研院所研究人员针对 ZJ17 机组的振动噪声问题进行了前期现场调研。测试显示, 个别机组工位噪声超过了 85dB (A), 已经超过了《工业场所有害因素职

业接触限值》(GBZ2.2 - 2007)的要求;通过进一步调研发现,ZJ17 卷接机组噪声主要由机械系统噪声和空气动力噪声两部分构成,基于频谱特性分析可知,机械系统噪声为稳态噪声,噪声能量主要集中于低、中频范围,噪声频谱呈现多谐频特征^[1]。基频噪声来自于 ZJ17 卷接机组的接装部分。当机组运行负荷变化时,基频噪声异常明显。当机组工作速度变化时,噪声测量频谱的基频数值也随之改变。ZJ17 卷接机组的空气动力噪声,主要来自于负压空气与鼓轮吸附槽形成的运动机械-气体动力耦合激

励声,通过机组罩壳振动、各类声学开放空间、内通道以及机组通风口等向外辐射,形成车间的主要噪声源。基于上述情况,本文提出了一种基于动力吸振的降噪系统,旨在探索一条新的卷包车间噪声治理途径。

1 系统组成结构

如下图 1 所示,系统采集机组的噪声及振动信号,上传至上位计算机进行分析后,向动力吸振器发出调节刚度的指令以改变吸振参数,达到动态适应机组工况变化的减振降噪目的。

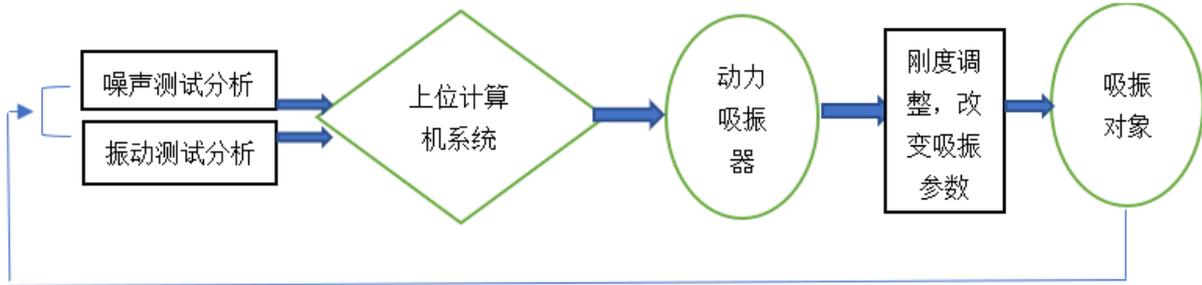


图 1 动力吸振系统运行流程图

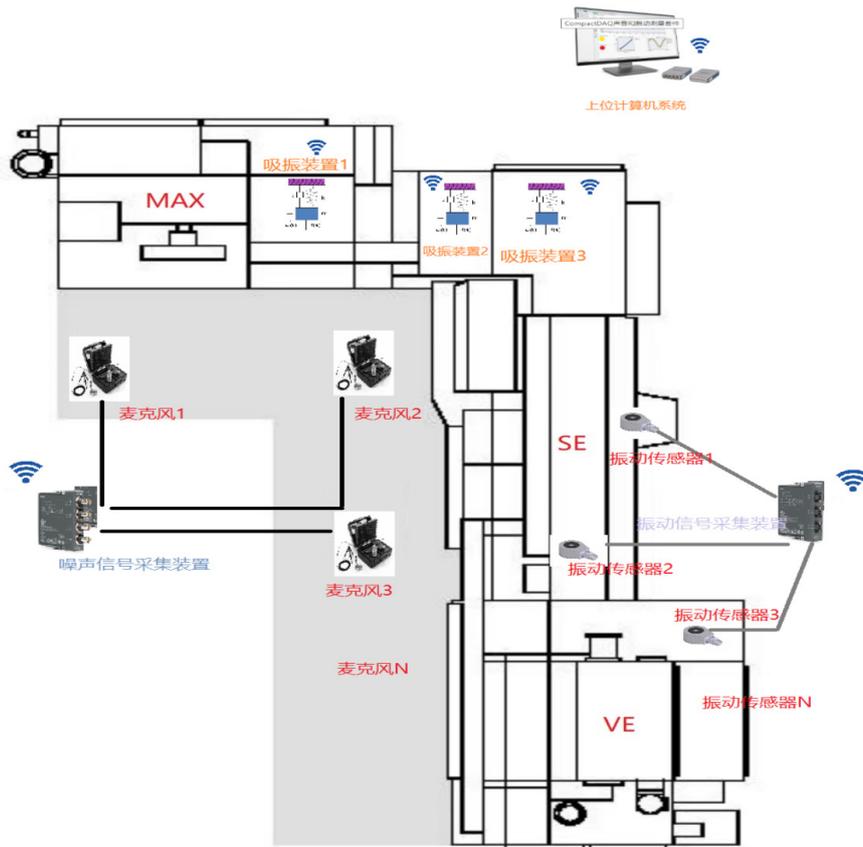


图 2 动力吸振系统硬件结构示意图

如上图 2 所示, 系统由噪声采集系统(麦克风阵列+前端处理装置)、振动信号采集(加速度传感器+前端处理装置)、无线网关、动力吸振装置、上位计算机系统构成。

2 动力吸振降噪

常规吸振降噪方法多采用物理性的减振隔振、噪声吸附、传播通道封闭、阻断等措施, 对于 ZI17 机组这类声学开放空间多而杂的设备而言, 常规降噪方法结构设计复杂、成本较高、在使用一段时间之后可能噪声水平会再次上扬。因此有必要探索新型高效低成本的吸振降噪技术。对于机械振动噪声而言目前国际国内研究的热点是主动及半主动吸振降噪。前者的主要技术思路是采用外部施加能量的方法抵消源系统的振动能量(噪声本质也是一种振动波), 后者是通过附加子系统来最大限度地消耗主系统的振动能量。全主动减振降噪在静音耳机、高级乘用车中已经有部分应用, 但在复杂工业生产环境中的成功应用尚待时日。对于 ZJ17 机组而言, 旋转机构的机械振动以及负压系统引发的空气动力噪声部分通过机组壳体的薄板振动向外辐射, 采用半主动动力吸振, 充分消耗掉壳体的振动能量, 可以减少噪声的辐射传播!

2.1 半主动动力吸振原理

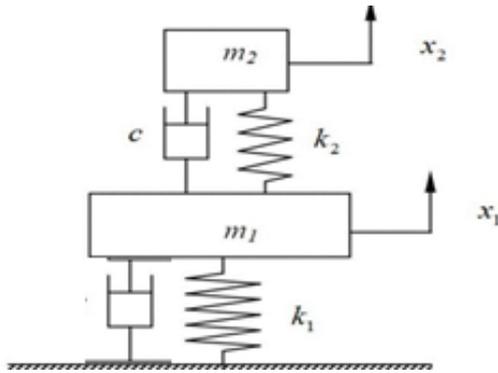


图 3 半主动动力吸振装置简化物理模型

如上图 3 所示, 在振动主系统 m_1 上附加一个子系统 m_2 , 构成一个 2 自由度的复合系统, 其运动微分方程如式 (1) 所示^[2]:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2(x_1 - x_2) + k_1 x_1 &= f \\ m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

从本质上, 为使主系统的频响函数幅值最大值达到最小, 需要调整吸振器的固有频率, 使之保持与

主系统的最优频率比。关于动力吸振器固有频率的调节, 目前的研究现状主要有两种途径: 调整子系统的分布质量或者分布刚度。调整分布质量主要通过调节子系统有效质量中液体的体积质量来实现, 需要容器和液泵, 往往体积较大, 响应速度较慢, 在动力吸振器尺寸有限的情况下难以适用, 故本文采用刚度调节。吸振器的最优刚度系数为:

$$k_2 = m_2 \frac{k_1}{m_1} \left[\frac{1}{1+\mu} - (0.241+1.7\mu-2.6\mu^2)\xi_1 - (1-1.9\mu+\mu^2)\xi_1^2 \right] \quad (2)$$

式 (2) 中, μ 为吸振器与主系统的质量比, ξ_1 为吸振器的最优阻尼比, 受主系统振动参数的影响。

2.2 变刚度调节技术

由于对 ZJ17 机组而言, 罩壳及其他吸振关键位置的振动来自于机械系统振动和空气动力噪声的耦合激励, 且随着生产运行工况的变化而变化, 因此动力吸振器(子系统)的刚度系数必须动态可调才能适应主系统受激振动频率动态变化的实际情况。

半主动动力吸振器中应用的变刚度技术分为机械式变刚度技术和智能材料式变刚度技术。机械式变刚度技术是利用机械结构设计来实现吸振器的弹性单元的刚度调节从而达到改变吸振器自身固有频率的目的。主要有组合梁结构、空气弹簧, 和悬臂梁结构。智能材料变刚度技术是以智能材料为弹性元件, 以实现刚度由外界条件可控的目的。目前国内外研究的热点为压电材料、形状记忆合金和磁流变弹性体等。殷永康等总结了各变刚度技术的优缺点如下表 1 所示^[3]。

基于所述性能指标对比, 结合机组减振降噪环境条件和实际需求, 本文选择了组合梁变刚度技术。

2.3 基于组合梁变刚度技术的动力吸振装置

动力吸振装置包括无线接收器件、微型丝杆和带位置反馈的微型电机、组合梁机械结构、嵌入式控制器和电池系统^[4]。组合梁机械结构如下图 4 所示。

其基本作用过程是: 信号采集系统将调理后的噪声及振动传感器信号通过 WIFI 发送至上位计算机系统, 经过时域和频谱分析后, 确定主系统(罩壳薄板)的受激振动频率, 以此计算出吸振器应有刚度值, 并采用智能控制算法计算出电机应有的转动角度及速率, 通过 WIFI 向吸振器无线传输控制指令并由嵌入式控制器控制电机进行转动, 从而带动微

型丝杠旋转, 改变组合梁的梁间跨度, 以改变整个动力吸振装置的刚度。刚度调节过程是一个完整的动态闭环(参见图 1)。

3 控制算法

在动力吸振降噪系统中, 主系统的受激频率是

动态变化的, 为了达到理想的减振降噪效果, 需要吸振装置通过刚度变化调整自身的固有频率以自适应地跟踪主系统的各阶频率变化; 动力吸振降噪系统是一个多闭环的复杂控制系统, 该系统的简化控制系统框图如图 5 所示:

表 1 各变刚度技术性能指标对比

变刚度技术	刚度变化范围	响应速度
组合梁方法	刚度变化连续, 存在较长一段线性部分, 范围很大, 最大刚度与最小刚度的比值可达 62。	与步进电机的粘滞摩擦负载系数和恒定的负载转矩相关。与压电材料, 磁流变弹性体相比, 响应速度较慢。
空气弹簧技术	刚度变化连续, 线性, 范围大。	调谐速度较慢。
悬臂梁方法	刚度变化连续, 线性, 范围大, 且与结构尺寸有关, 采用相同材料和尺寸时, 刚度变化范围小于组合梁方法。	与步进电机的粘滞摩擦负载系数和恒定的负载转矩相关。响应速度小于组合梁方法。
压电陶瓷	刚度变化连续, 范围较小, 且取决于压电陶瓷的耦合系数。	响应速度很快, 与压电材料的质量和刚度有关, 数量级为 μs 。
形状记忆合金	刚度变化不连续, 且变化范围较小。	响应速度与其温度和散热快慢有关, 总体而言响应速度慢。
磁流变弹性体	刚度变化连续, 非线性, 范围较大, 随引入磁场的增大而增大, 随频率的增大而增大, 在共振频率处具有应变软化的特性。	响应速度很快, 响应时间数量级为 ms。

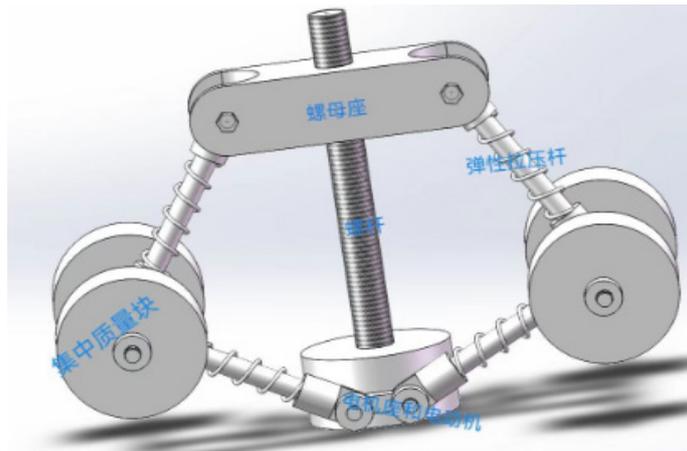


图 4 组合梁机械结构示意图

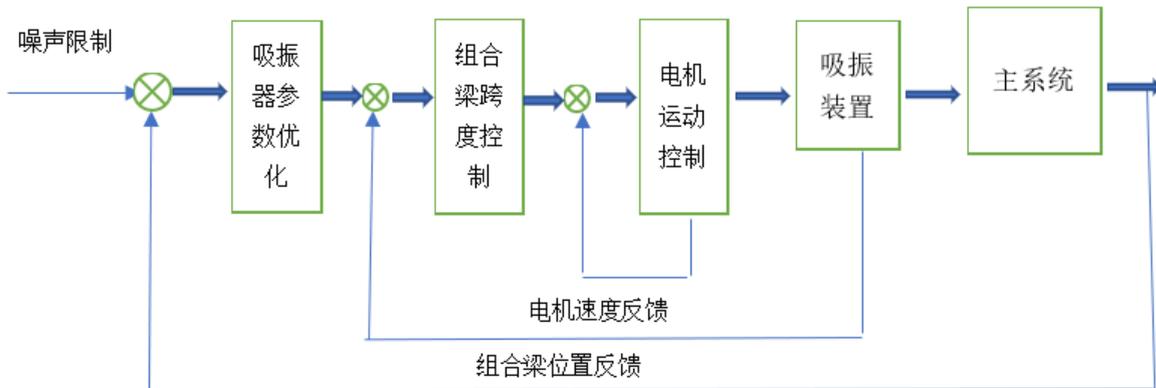


图 5 动力吸振降噪系统控制框图

3.1 吸振器参数优化算法

吸振器参数优化算法的核心目标是根据噪声限值 and 主系统的噪声及振动反馈信号来对确定动力吸振器的最优振动参数(固有频率、阻尼比), 并根据动力吸振装置的组成结构及其相关物理参数换算为组合梁的跨度控制目标值输出。其实质是一类最优化解问题。解决该问题常用的有退火算法、蚁群算法、遗传算法、LQR^[5]等。综合考虑控制对象特性、响应速度、硬件系统等因素, 拟采用 LQR 进行吸振器振动参数的寻优。

3.2 组合梁跨度控制算法

组合梁跨度控制是一类位置控制问题, 需要满足“快速、准确、稳定”的要求。快速是指由于系统对吸振器刚度的变化要求是动态的, 所以组合梁的跨度变化要及时地跟踪响应; 准确是指对于前级 LQR 算法所确定的位置目标的控制精度要达到允许的误差范围之内; 稳定是指在达到目标值误差范围之内后, 控制算法要保证系统尽量不出现反复震荡。

常见的位置控制算法有增量式 PID、模糊控制算法、神经网络、HSIC(仿人智能控制)等。

HSIC(仿人智能控制)是一种基于动觉智能图式的拟人化智能算法, 其具有如下特点^[6]:

- (1) 无须对象的精确数学模型
- (2) 是一种数学解析与直觉推理结合的方法
- (3) 可以实现系统动态特性变化与控制器输出的多值映射关系
- (4) 与传统的 PID 控制算法比较, 可以更好地兼顾快速性与稳定性。

(5) HSIC 在近 20 年的发展过程中, 已经成功地在各种非线性时变系统中(以倒立摆系统控制为代表)得到了成功应用, 取得了世界领先的控制成果。本文拟采用该算法进行组合梁的跨度控制。

3.3 电机运动控制算法

电机作为底层执行机构, 通常采用速度与电流双闭环 PID 控制, 其控制品质的关键在于 PID 参数的整定, 也可以采用 HSIC 的运行控制级算法, 在足

球机器人的底层运动控制中也有成功的案例^[7]。

4 结语

卷包设备(ZJ17 机组)是一种复杂的机电系统, 其运行噪声呈现多频特征。控制噪声的途径之一是抑制系统的机械振动, 本文基于变刚度动力吸振方法, 结合主系统噪声振动信号的采集和分析, 采用多级控制算法, 建立吸振降噪系统以降低车间噪声水平, 保护工作人员的劳动健康; 与此同时, 系统所包含噪声振动信号的实时监测系统, 对于进一步实现对设备的故障分析和诊断提供了软硬件平台, 进而为车间甚至工厂级的数字化奠定了一定的基础。

参考文献

- [1] 喻树洪,何建军等.ZB45 包装机组和 ZJ17 卷接机组噪声分析及治理方法[J]. 烟草科技, 2012, 4: 20-22.
- [2] 廖锦鹏. 基于实时频率识别的动力吸振器的振动控制及参数优化. 武汉理工大学硕士学位论文, 2020 年 5 月.
- [3] 殷永康,陈光治.半主动动力吸振器的变刚度技术[J]. 机械科学与技术,2014,7: 1000-1007.
- [4] 李剑锋等.主动移频式动力吸振器及其动力特性的研究[J].实验力学,2005,12: 507-511.
- [5] 李剑锋等.动力吸振器控制算法研究及在舰船设备减振中的应用.上海交通大学博士学位论文,2007 年 12 月.
- [6] 李祖枢,涂亚庆.仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社,2003.
- [7] 雷李,李祖枢等.基于仿人智能控制的足球机器人底层运动研究[J].哈尔滨工业大学学报,2004,7: 978-980.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS