

doi:

# 基于颗粒阻尼器的电梯曳引机制动降噪研究

陈忠<sup>1</sup> 刘琦<sup>1</sup> 吴红兵<sup>2\*</sup> 肖佳锋<sup>2</sup> 徐杨<sup>2</sup> 詹晓宇<sup>2</sup> 申爽<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;

2. 日立电梯电机(广州)有限公司, 广东 广州 510660)

**摘要:** 电梯曳引机在制动动作过程中会产生较高声压级噪声, 本研究提出基于粒子阻尼器的减振降噪解决方案。首先通过有限元仿真模态分析对制动轮及刹车片进行振动特性研究, 并结合整机振动噪声测试结果得到的重点振动频率, 确定关键振动模态。在此基础上, 结合制动轮结构的对称性和空间布局特点, 创新性地在制动轮内部设计可安装粒子阻尼器的空腔结构。研究采用EDEM-ADAMS联合仿真技术对固体颗粒参数进行优化, 重点解决三个关键技术问题: 1. 粒子材料选择需规避磁场干扰, 最终选用纯铝作为阻尼颗粒; 2. 通过离散元分析对粒子阻尼器在空腔结构内的能量耗散过程进行仿真; 3. 结合多体动力学仿真优化阻尼器的粒子半径和填充率参数。实验验证阶段在半消声室环境下进行, 设置5秒周期的定时制动控制策略, 采用三轴传感器阵列采集振动信号, 同步记录声压级数据。测试结果表明, 安装粒子阻尼器后曳引机制动过程平均声压级降低20.7%, 验证了该方案的有效性。本研究为电磁制动系统噪声控制提供了新的技术路径, 具有显著的工程应用价值。

**关键词:** 电梯曳引机; 颗粒阻尼器; 有限元分析; 离散元分析; 振动与噪声

**中图分类号:** TB535

**文章编号:**

电梯是高层建筑的必配装备。它一方面给人们的日常生活带来方便, 同时其运行过程中产生的振动与噪声也给日常居室生活带来困扰<sup>[1]</sup>。曳引机是垂直式电梯(也称为直梯)的核心动力部件, 也是影响电梯运行振动与噪声的重要源头<sup>[2]</sup>。曳引机制动器制动力激励结构会产生高声压级的结构辐射噪声。因此, 为实现电梯低噪声运行, 必须控制曳引机制动器制动噪声。

曳引机振动与噪声传播路径涵盖曳引机、桁架、隔振垫等<sup>[3]</sup>, 其振动与噪声控制也针对这些部件展开。任志英等针对电梯曳引机振动隔离, 研制了一种高性能金属橡胶/硅橡胶连续互穿相复合减振材料, 用于曳引机减振与隔振<sup>[4]</sup>。而曳引机制动器制动噪声主要表现为制动力激励下的结构辐射噪声, 相关研究工作较少报道。抑制曳引机制动单元关键结构的振动, 可以有效抑制制动噪声辐射。

颗粒阻尼器是一种利用颗粒间、颗粒与壁面碰撞以及颗粒间摩擦产生的能量损失, 实现结构振动与噪声辐射抑制<sup>[5]</sup>。相对于减振橡胶、调谐质量阻尼器等传统减振器件, 颗粒阻尼器具有宽频自适应吸振、低成本与环境适应性高的特点<sup>[5]</sup>。已发表的相关研究工作表明其工作带宽大致为1~2000 Hz<sup>[6]</sup>, 应用领域包括建筑结构、航空构件、加工刀具及各种运动机械<sup>[7-12]</sup>。LU等提出了颗粒阻尼器的质量-刚度-阻尼等效简化理论模型, 其铁路减振应用研究表明其平均耗散功率与激励频率呈负相关<sup>[7]</sup>。蒋捷等通过颗粒阻尼器内置三维网络, 打破颗粒团聚效应, 增强悬臂梁阻尼及其抗振性能<sup>[8]</sup>。王明等在轧机上安装多自由度颗粒阻尼吸振器有效抑制了轧机辊系的垂直振动<sup>[9]</sup>。肖望强等采用颗粒阻尼器对某型内燃机动力总成转向架进行减振, 其垂向振动幅度减少60.7%<sup>[10]</sup>。XIAO等对轻型重载数控卧式车床展开了基于颗粒阻尼器的减振研究, 在保证机床静态性能的前提下, 通过设置合理的颗粒阻尼器位置与

收稿日期:

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2022A1515011263)

Foundation items: Supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2022A1515011263)

作者简介: 陈忠(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事柔顺机构动力、机器视觉机器及其应用、精密测量和故障诊断研究,

Email: mezhchen@scut.edu.cn

\*通讯作者: 吴红兵, 男, 硕士, 高级工程师, 具有24年电梯领域的研发、制造管理经验, 是企业超高速电梯和电梯曳引机技术带头人, Email: xuyang27731@HITACHI-HELC.com

颗粒类型，改善了机床的动态性能<sup>[12]</sup>。这些颗粒阻尼器的工程应用表明，其对于结构振动与噪声控制有优异表现。

本文针对使用碟式制动方式的某型电梯曳引机的制动噪声控制，通过在转子制动轮内置颗粒阻尼器抑制因制动力激励引起的结构振动，从而控制结构辐射噪声。为了达到最优的噪声辐射抑制，论文对颗粒阻尼器的布置位置以及颗粒参数（尺寸与填充率）进行优化设计与对比测试实验研究。

## 1 问题描述

曳引机制动机构是直梯的重要部件，其功能是直梯日常运行时进行制动。本研究所使用的曳引机采用碟式制动轮，制动方式为刹车片摩擦制动，测试实物照片如图 1 所示。



图1 用于测试实验的直梯曳引机

Fig.1 Elevator traction machine for testing experiments

制动机构由铁芯、线圈、衔铁、刹车片、弹簧、制动轮六个部分组成。制动器抱闸时，线圈失电，失去电磁力作用，此时弹簧会推动衔铁+刹车片组合向制动轮端面移动，当衔铁+刹车片组合和制动轮顶住后，会将铁芯+刹车片组合向相反方向推动，直至刹车片顶住制动轮另一侧端面，此时制动器抱闸。松闸时，制动器线圈通电，产生电磁力，衔铁+刹车

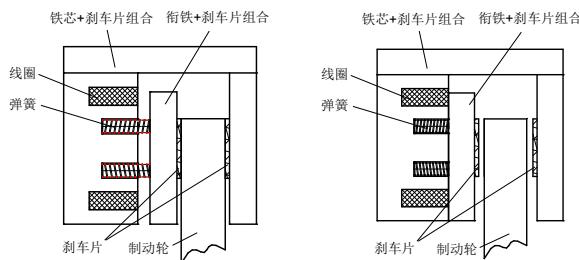


图2. 制动器抱闸（左）、松闸（右）动作原理

Fig.2 Scheme of braking and releasing operation of traction machine

片组合克服弹簧力，向铁芯方向运动，至衔铁顶住分中螺栓，在电磁力的持续作用下，铁芯+刹车片组合会向衔铁方向运动，直至衔铁和铁芯吸合，这时制动器松闸。图 2 为其动作示意图。

然而，在直梯实际运行过程中，松闸-抱闸的过程会产生较高声压级的噪声。噪声产生包括两个过程：1) 电磁铁吸合（松闸）时，衔铁撞击铁芯；2) 电磁铁释放（抱闸）时，刹车片撞击制动轮。由于两个过程释放的动能较大，因此都在撞击瞬间产生较大噪声。该噪声不仅影响电梯日常的乘坐舒适度，也反映了刹车制动过程的冲击过大以及振动问题。

针对该问题，此前的改进措施在制动器结构中添加了缓冲橡胶，该措施主要改善了松闸时铁芯和衔铁撞击的噪音，对抱闸时刹车片和制动轮撞击的噪音改善较小。如图 3 所示。由于制动轮具大的噪声辐射面，因此，如何通过颗粒阻尼器增强制动轮的振动吸收性能，从而降低曳引机刹车时的振动和噪声是一个值得探究的问题。

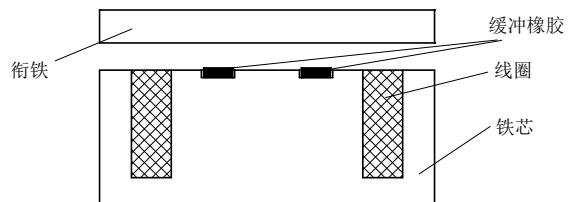


图3 带有缓冲橡胶的电磁铁结构

Fig.3 Electromagnetic structure with buffer rubbers

## 2 制动轮颗粒阻尼器设计

颗粒阻尼器通过内部粒子的摩擦碰撞吸收外部振动过程中的动能，从而实现减振目的，进而产生降噪的效果。为了实现最优的减振、降噪效果，需要完成转子制动轮颗粒阻尼器设计。

目前一般采用内置式和外挂式颗粒阻尼器布局。考虑到本研究的对象为电梯曳引机，其内部空间紧凑且运行时存在旋转动作，因此选择内置方式在制动轮上布置圆柱状粒子阻尼器。选择制动轮内嵌颗粒阻尼器的原因包括：

- 1) 制动轮作为转子一部分，是刹车激励产生振动的直接发生部位。
- 2) 制动轮相对其他振动部件刚性相对较弱，声辐射面积大，振幅也较大，因此能通过颗粒阻尼器耗散的能量也较多，便于达到更好的减振、降噪效果。
- 3) 制动轮结构对称，空间充裕，便于设计并加工阻尼器空腔。

确定颗粒阻尼器布置方式和布置对象后，本研究将颗粒阻尼器设计分为阻尼器位置和阻尼器参数两部分。值得注意的是，考虑到制动器磁场对颗粒

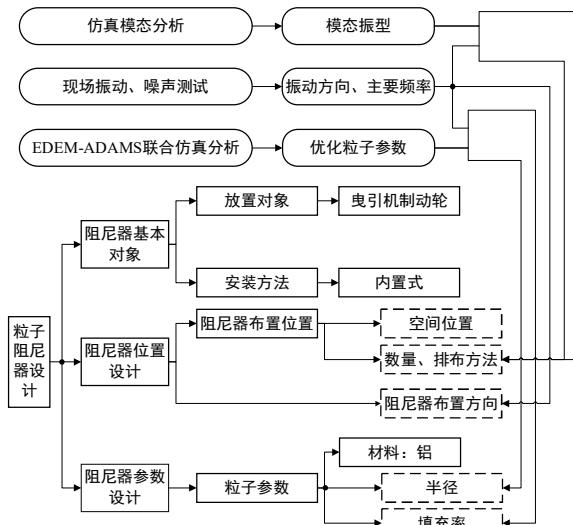


图4 颗粒阻尼器设计流程图

Fig.4 Design flowchart of particle dampers

阻尼器中颗粒自由运动的影响，粒子材料选择为纯铝。颗粒阻尼器设计流程图如图4所示。

## 2.1 确定颗粒阻尼器位置

为构建内置式粒子阻尼器，需要在原有结构中加工空腔，便于填充减振粒子。空腔的位置是影响颗粒阻尼器性能的重要参数，其中包括阻尼器的空间位置、数量、排布方式和布置方向。本研究通过以下方法确定颗粒阻尼器空腔的制动轮内嵌位置：

1) 通过ANSYS Workbench模态分析模块对曳引机的制动轮进行有限元模态分析，确定其模态频率及对应振型。

2) 对曳引机进行整机进行振动与噪声测试，确定刹车和松开刹车过程中的噪声和振动信号特征。

3) 根据整机试验所确定的主要频率，选择最具代表性的模态振型，从而确定阻尼器空腔的空间位置、数量及其排布，并根据总体振幅较大的方向确定阻尼器的布置方向。

值得注意的是，为了增强颗粒阻尼器的振动吸收性能，其设计应考虑使其所在模态振动幅度最大。因此，阻尼器的设计数量和排布方式应当尽量使其位于结构模态振幅较大的位置。模态分析的设置如下：

1) 简化三维模型，去除对分析影响较小的结构细节，提高仿真计算效率和成功率。

2) 设定约束，曳引机制动靴向制动轮施加面压力，大小为7547 N，将轴心处固定于地面。

表1 制动轮模态频率

Tab.1 Brake wheel modal frequency

模态阶数	模态频率 (Hz)	模态阶数	模态频率 (Hz)
1	282.96	7	961.73
2	361.02	8	963.35
3	362.52	9	1209.5
4	440.76	10	1216.1
5	441.79	11	1662.3
6	774.9	12	1668.0

3) 求解，后处理得到前12阶模态频率及其振型图，结果见表1。

根据整机振动、噪声测试得到1/3倍频程频谱(图13(b)、图14(b)和图15(b))的主要频率为710 Hz左右。因此，主要考虑第6阶模态，其对应频率的振型图如图5所示。

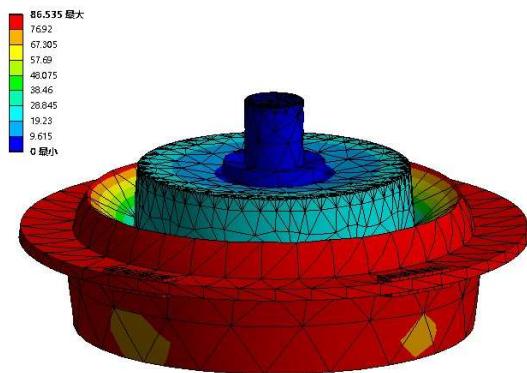


图5 转子第6阶模态振形 (774.9 Hz)

Fig.5 6th-order vibration modal shape of the rotor (774.9 Hz)

可以看出，转子第6阶模态的轮盘部分结构振型为轴对称形状，位移较大的位置出现在制动轮外沿上，振动方向大致平行于制动轮轴向。因此，初步确定阻尼器布置的空间位置应当大致位于制动轮外沿区域上。如图6所示，对于圆柱状粒子阻尼器而言，减振方向为其圆截面径向，因此，布置粒子阻尼器应当使该方向与振动幅度最大方向平行。根据整机振动测试结果，振动幅度最大方向为制动轮轴向，这与有限元模态分析得到的结果一致，也与刹车动作方向相符合。综合以上分析结果，最合理的阻尼器空腔布置方式为：按照制动轮的径向方向布置，满足圆柱状粒子阻尼器的圆截面径向时刻与制动轮轴向平行。

根据粒子阻尼器的减振原理：在相同条件下，使用的减振粒子越多，相同时间内能量耗散越多，减振效果越明显。空腔尺寸的设计需要满足制动轮的几何约束和机械强度要求，在此前提下使之能容

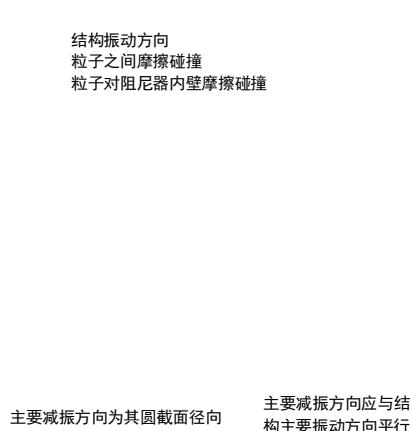


图6 颗粒阻尼器安装方向选择策略

Fig.6 Selection strategy for installation direction of particle dampers

纳尽量多的阻尼粒子。综上，将空腔尺寸确定为：孔径 14 mm，有效深度 90 mm。

其次，是确定阻尼空腔的数量和排布方法。由于模态图中的振型位移在制动轮外沿上呈现轴对称、密集分布，因此设定排列方式为沿圆周方向均布。而阻尼器空腔的设置个数同样按照满足制动轮的几何约束和机械强度要求下填充尽量多粒子的原则设计，最终确定为 32 个。

综上所述，阻尼空腔位置与几何参数设计结果如图 7 和图 8 所示。

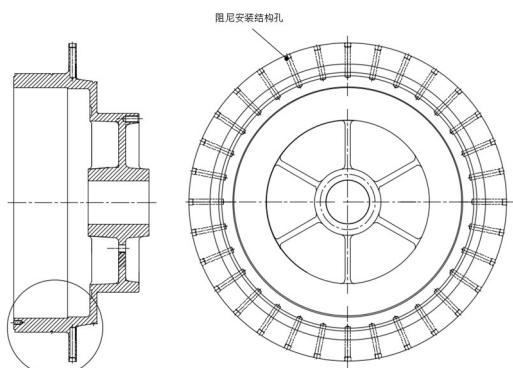


图7 制动轮颗粒阻尼器空腔位置

Fig.7 Particle-damper's cavity position in the brake wheel

## 2.2 阻尼器参数设计

通过 EDEM-ADAMS 联合仿真分析，确定填充粒子的尺寸与数量，其主要步骤如下：

1) 首先在 ADAMS 软件中构建单个空腔几何模型的无阻尼自由振动模型。

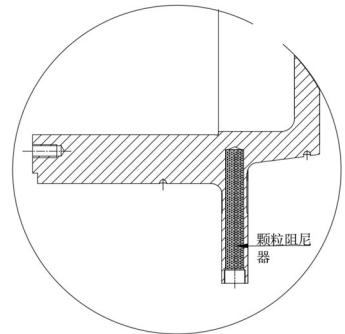


图8 阻尼器空腔几何参数

Fig.8 Geometric parameters of the damper cavity

2) 使用 EDEM 离散元分析软件对耦合空腔模型填充预先设定大小和数量的阻尼粒子。已知阻尼粒子材料为纯铝，制动轮的材料为 HT250，因此在 EDEM 中设定阻尼粒子材料参数：密度 2700kg/m<sup>3</sup>、杨氏模量 72Gpa、泊松比 0.3；设定阻尼器空腔材料参数：密度 7150kg/m<sup>3</sup>、杨氏模量 130Gpa、泊松比 0.3。EDEM 中的接触模型设定为 Hertz-Mindlin (no slip)，摩擦模型设定为 Standard Rolling Friction。

3) 通过 Co-Simulation 功能，将 ADAMS 中的模型运动学结果同步到 EDEM 中的几何结构运动；同时，EDEM 模型中的粒子碰撞、摩擦所产生的作用力通过广义力作用在阻尼器外壳上，从而实时反馈到 ADAMS 模型中。

4) 根据 ADAMS 环境中的阻尼器外壳的衰减位移结果计算相应的损失因子。

图 9 为联合仿真分析的流程图。



单个空腔三维模型

ADAMS动力学仿真

图9 EDEM-ADAMS联合仿真分析流程图

Fig.9 Joint-simulation analysis flowchart using EDEM-ADAMS tools

其中，阻尼器粒子的数量按照粒子的填充率进行衡量，即一次填充中粒子总体积与空腔总体积的比值。

在联合仿真前需要准确设定 ADAMS 动力学模

型中的弹簧刚度  $k$ 。根据整机振动、噪声试验结果，确定主要频率为 710Hz，并有阻尼器质量  $m$ ，即可根据公式(1)确定动力学模型中的刚度  $k$ 。

$$k = 4m(\pi f)^2 \quad (1)$$

根据联合仿真获得的阻尼器外壳的衰减位移时域波形信号，通过公式(2)计算损失因子。

$$\mu = \frac{\sum_{i=2}^n \frac{peak_{i-1}^2 - peak_i^2}{peak_{i-1}^2}}{n-1}, i = 2, \dots, n \quad (2)$$

式中： $peak_i$  为衰减位移响应中第  $i$  个的位移峰值， $n$  为计算损失因子的第  $n$  个位移响应峰。

由于制动轮中填充的阻尼粒子在制动轮旋转到不同角度时的位置特征不同，会产生不同的减振效果，因此根据  $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、 $90^\circ$  五种角度进行多组联合仿真。阻尼粒子参数的优化过程如公式(3)所示：

$$\begin{aligned} & \max_{r, f} F(r, f) \\ & \text{s.t. } r \in R \\ & \quad f \in F \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $F(r, f)$  代表联合仿真计算得到的损失因子； $r$  表示阻尼粒子半径，来自粒子半径参数集  $R$ ； $f$  表示粒子填充率，来自填充率参数集  $F$ 。每种角度下的最佳粒子参数组合如表 2 所示。

表2 多种倾斜角度下的最优粒子参数及其损失因子  
Tab.2 Optimal particle parameters and loss factors at various tilt angles

倾斜角度 (°)	粒子半径 (mm)	填充率 (%)	损失因子
0	1.5	50	0.2419
22.5	1.5	60	0.3402
45	1.5	50	0.3236
67.5	1.5	60	0.3223
90	1.5	60	0.3336

综合以上分析结果，最终确定填充粒子规格为：铝珠，粒子半径 1.5 mm，填充率 55%。按照以上设计方案在制动轮上进行孔和螺纹加工，并填充相应规格及数量的粒子后，使用平端紧定螺钉进行封口。图 10 为完成粒子阻尼器安装的制动轮实物。

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验方案

曳引机的整机振动、噪声试验所采用的动态信号采集分析系统为德国 HEAD 动态信号分析系统，包括 HEADlab 12 通道采集硬件与 Artemis SUITE 14.3 动态信号采集与分析软件。试验中采用的三轴



图10 完成颗粒阻尼器安装的制动轮实物

Fig.10 The actual brake wheel with the installed particle damper

压电加速度传感器采用美国 PCB 356A16，单轴压电加速度传感器为上海北智 14206，麦克风声压传感器为声望 MPA201。传感器测点及安装位置如图 11 所示。单轴加速度传感器安装位置远离刹车制动位置，三轴加速度传感器安装位置接近刹车制动位置。

为了便于采集并分析曳引机刹车和松开刹车时的振动、噪声信号，采用了一种定时松闸-抱闸策略。接通制动器电源后，电磁铁以 5s 为一个周期进行周期性的刹车动作，其中每个周期包括一次刹车和一次松开刹车。每次实验信号采集持续 60s，整机振动与噪声测试均在半消声室进行。

#### 3.2 实验结果与分析

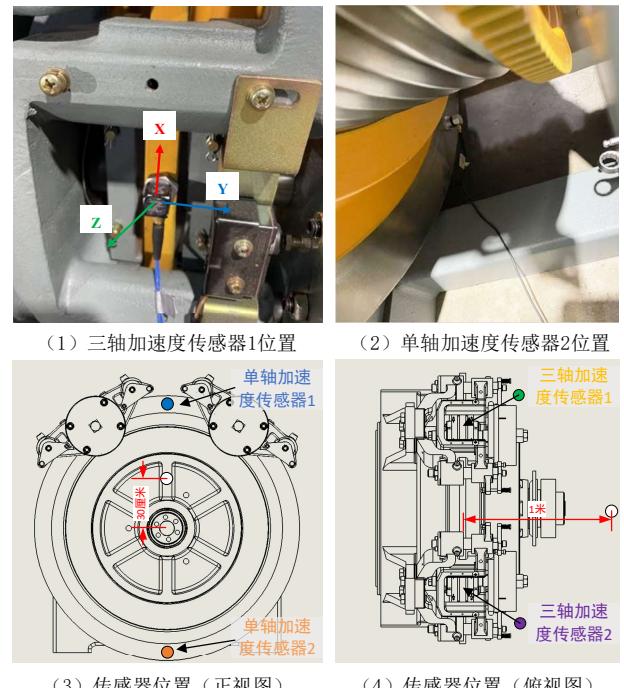


图11 测点与传感器安装位置图

Fig.11 Schematic diagram of the measuring points and sensor location

根据 3.1 中实验方案进行曳引机整机振动、噪声试验, 粒子阻尼器安装前后的噪声测试结果如图 12 所示。其中, 图 12(a), (b) 分别给出了曳引机制动轮嵌入颗粒阻尼器前后的声压时域与 A 计权 1/3 倍频程频谱。显然, 瞬时冲击声压从 1 Pa 左右降到 0.2 Pa 左右; 时域平均 A 计权声压级(平均声压级)从 66.03 dBA 降到 52.36 dBA, 时域最大 A 计权声压级(最大声压级)从 81.42 dBA 降到 67.51 dBA, A 计权 1/3 倍频程的最大声压级出现在 710Hz 为中的频带, 从 62.45 dBA 降为 49.39 dBA, 其结果如表 3 所示。通过对制动轮内嵌颗粒阻尼器, 整机平均制动噪声下降 13.67 dBA (20.7%), 降噪效果显著。

表3 曳引机改进粒子阻尼器前后噪声水平

Tab.3 Noise level of traction machine without and with particle damper

	平均声压级(dBA)	最大声压级(dBA)	710Hz 所在频带声压级(dBA)
改进前	66.03	81.42	62.45
改进后	52.36	67.51	49.39

由于结构振动速度与其辐射噪声相关, 我们对测试得到制动轮加速度信号进行积分, 从而得到制

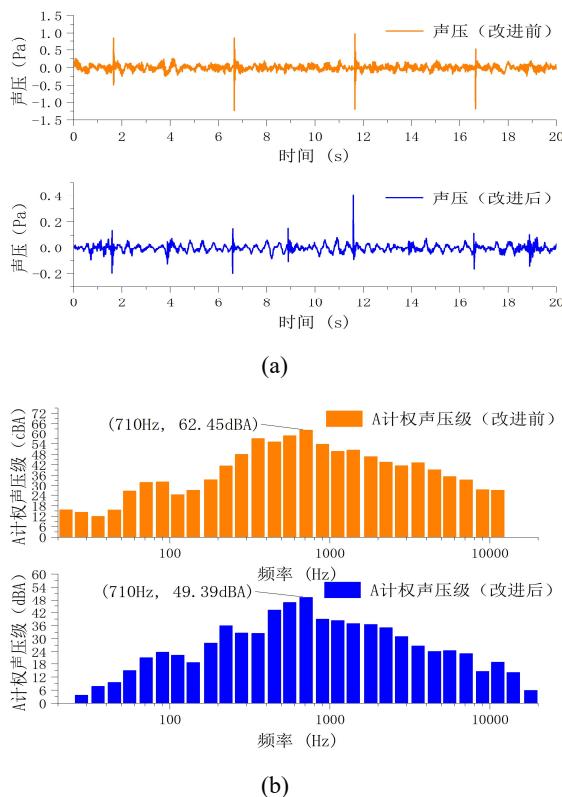


图12 颗粒阻尼器安装前后的噪声测试结果: (a) 时域声压信号, (b) 计权1/3倍频程频谱

Fig.12 The noise level without and with the particle dampers: (a) sound-press time-domain signal, and (b) A-weighted octave spectrum.

动轮振动速度信号。图 13 与图 14 分别给出了远离与接近制动轮轮缘制动位置的制动轮轴向振动加速度时域信号及其振动速度的 A 计权频谱。

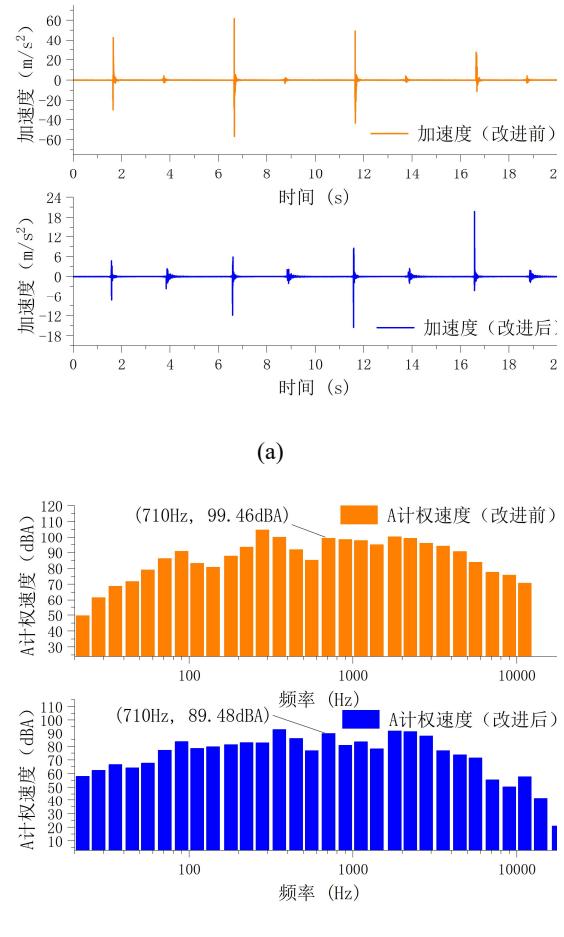


图13 颗粒阻尼器安装前后的单轴加速度传感器振动测试结果: (a) 加速度时域信号, (b) 振动速度的A计权1/3倍频程频谱

Fig.13 The vibration results without and with the particle dampers using single-axis acceleration sensor: (a) acceleration time-domain signal, and (b) A-weighted 1/3 octave vibration velocity spectrum.

根据图 13、14、15 及表 3 所示的噪声与振测试结果, 可以进一步总结分析如下:

1) 曳引机制动轮轴向振动与其刹车制动噪声密切相关。对比图 14、15 振动速度 A 计权 1/3 倍频程频谱与图 13 噪声 A 计权 1/3 倍频程频率, 可以发现对应的阻尼器设计频率均有明显下降, 同时, 频谱结构也有相似性。这表明该碟式曳引机制动噪声与制动盘振动辐射噪声关联度较高。

2) 颗粒阻尼器对制动盘结构振动具有宽频的减振效果。特别是, 对制动轮刹车制动位置附近的 1000 Hz 以上振动具有明显的减振效果。

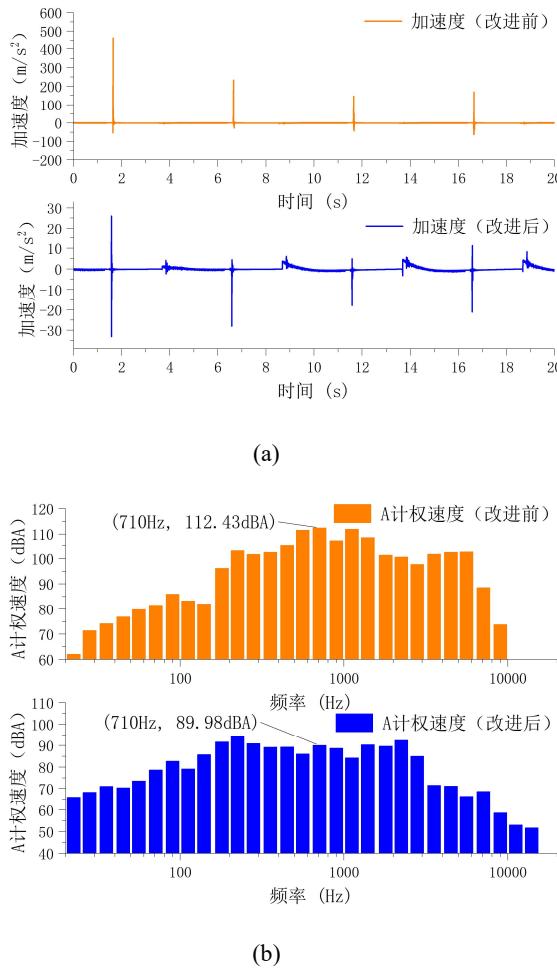


图14 颗粒阻尼器安装前后三轴加速度传感器Y轴方向的振动测试结果: (a) 加速度时域信号, (b) 振动速度的A计权1/3倍频程频谱

Fig.14 The vibration results without and with the particle dampers using three-axis acceleration sensor along the Y axis: (a) acceleration time-domain signal, and (b) A-weighted 1/3 octave vibration velocity spectrum.

3) 颗粒阻尼器对曳引机制动噪声具有宽频的降噪效果。除了对噪声贡献度较大的710 Hz噪声控制明显外, 在低频与中高频频段也有很好的降噪效果。

#### 4 结论

1) 本研究应用 EDEM-ADAMS 联合仿真分析, 优化曳引机制动轮所使用的颗粒阻尼器的粒子尺寸和粒子填充率参数。对曳引机制动轮嵌入优化设计后的颗粒阻尼器后, 整机振动抑制、降噪显著, 验证了所提出的颗粒阻尼器设计方法的有效性。

2) 通过对制动轮内置颗粒阻尼器的制动降噪方案通过电梯曳引机制动降噪对比实验得到验证。结果表明, 该方案使电梯曳引机在制动刹车过程中的平均声压级降低了 20.7%。显著的降噪效果充分

证明了该改进方法在电梯曳引机制动降噪中的实用价值与应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] 蔡晓华. 与电梯运行相关的居室噪声分析及降噪对策 [J]. 中国电梯, 2022, 33(02): 25-28.  
CAI Xiaohua. Analysis and Denoising Methods on the Bedroom Noise Related to Elevator Operation [J]. China Elevator, 2022, 33(2), 25-28
- [2] 孙舒然. 曳引式电梯垂直振动仿真及振动故障分析 [J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(02): 21-5+30.  
SUN Shuran. Vibration simulation and fault analysis on traction elevator [J]. China Special Equipment Safety, 2022, 38(02): 21-5+30.
- [3] 周茜茜, 翟国庆, 苏兰. 货梯曳引机结构传播的噪声治理 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(02): 214-7.  
ZHOU Xixi, DI Guoqing, SU Lan. Structure borne noise of goods elevator traction machine [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(02): 214-7.
- [4] 任志英, 刘荣阳, 黄伟, et al. 用于电梯曳引机减振的MR-SRC减振器设计与分析 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(03): 295-304.  
REN Zhiying, LIU Rongyang, HUANG Wei, et al. Design and analysis of MR-SRC shock absorber for elevator traction machine vibration reduction [J]. Vibration and Control, 2024, 43(03): 295-304.
- [5] LU Z, WANG Z, MASRI S F, et al. Particle impact dampers: Past, present, and future [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(1): e2058.
- [6] MEYER N, SCHWARTZ C, MORLOCK M, et al. Systematic design of particle dampers for horizontal vibrations with application to a lightweight manipulator [J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 510: 116319.
- [7] LU Z, ZHANG Q, FAN Q, et al. Studies on dissipative characteristics and equivalent model of particle damper in railway application [J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 560: 117788.
- [8] 蒋捷, 杨元龙, 强陈, et al. 基于障碍网络颗粒阻尼器的悬臂梁减振特性研究 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(17): 208-22.  
JIANG Jie, YANG Yuanlong, QIANG Chen, et al. Study on vibration reduction characteristics of cantilever beam based on particle damper of obstacle network [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(17): 208-22.
- [9] 王明, 徐慧东, 和东平, et al. 颗粒阻尼吸振器对轧机辊系减振特性的研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(02):

- 
- 23-34+78.
- WANG Ming, XU Huidong, HE Dongping, et al. Vibration reduction characteristics of a rolling mill roll system with particle damping vibration absorber [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(02): 23-34+78.
- [10] 肖望强, 陈辉, 许展豪, et al. 基于颗粒阻尼的内燃动车组动力包构架多工况减振研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(04): 250-7.
- XIAO Wangqiang, CHEN Hui, XU Zhanhao, et al. Study on the vibration reduction of internal combustion EMU powerpack frame under multiple loading conditions based on particle damping [J]. Journal of Mechanical
- Engineering, 2022, 58(04): 250-7.
- [11] 闫维明, 王宝顺, 黄绪宏. 颗粒阻尼器的研究进展及其在土木工程中的应用展望 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(05): 32-41.
- YAN Weiming, WANG Baoshun, HUANG Xuhong. Research progress of particle damper and its application prospect in civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(05): 32-41.
- [12] XIAO W, XU Z, BIAN H, et al. Lightweight heavy-duty CNC horizontal lathe based on particle damping materials [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107127.

## Research on Brake Noise Reduction of Elevator Traction Machine Based on Particle Dampers

CHEN Zhong<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, WU Hongbing<sup>2</sup>, Xiao Jiafeng<sup>2</sup>, Xu Yang<sup>2</sup>, Zhan Xiaoyu<sup>2</sup>, Shen Shuang<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. Hitachi Elevator Motor (Guangzhou) Co., Guangzhou 510660, Guangdong, China)

**Abstract:** Elevator traction machines generate high sound pressure level noise during the braking process. This study proposes a vibration and noise reduction solution based on particle dampers. Firstly, the vibration characteristics of the brake wheel and brake pads are investigated through finite element analysis. Key vibration modes are identified by correlating the principal vibration frequencies obtained from whole-machine vibration and noise tests. Based on these findings, and considering the symmetry and spatial layout of the brake wheel structure, an innovative cavity design is introduced within the brake wheel to accommodate particle dampers. The study employs coupled EDEM-ADAMS simulation technology to optimize the parameters of the solid particles, with a focus on addressing three critical technical issues: (1) To avoid interference from magnetic fields, pure aluminum is ultimately selected as the damping particle material; (2) The energy dissipation process of the particle damper within the cavity is simulated using discrete element analysis; (3) The particle radius and filling ratio of the damper are optimized by integrating multi-body dynamics simulations. Experimental validation is conducted in a semi-anechoic chamber, where a timed braking control strategy with a 5-second cycle is implemented. A triaxial sensor array is used to collect vibration signals, while sound pressure level data are recorded synchronously. The test results indicate that, following the installation of particle dampers, the average sound pressure level during the braking process of the traction machine is reduced by 20.7%, thereby confirming the effectiveness of the proposed solution. This research provides a novel technical approach for noise control in electromagnetic braking systems and demonstrates significant engineering application value.

**Key words:** elevator traction machine; particle damper; finite element analysis; discrete element analysis; vibration and noise