



华南理工大学学报(自然科学版)
Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)
ISSN 1000-565X,CN 44-1251/T

《华南理工大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目： 基于颗粒阻尼器的电梯曳引机制动降噪
作者： 陈忠，刘琦，吴红兵，肖佳锋，徐杨，詹晓宇，申爽
收稿日期： 2025-04-24
网络首发日期： 2026-01-14
引用格式： 陈忠，刘琦，吴红兵，肖佳锋，徐杨，詹晓宇，申爽. 基于颗粒阻尼器的电梯曳引机制动降噪[J/OL]. 华南理工大学学报(自然科学版).
<https://link.cnki.net/urlid/44.1251.T.20260113.2108.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于颗粒阻尼器的电梯曳引机制动降噪

陈忠¹ 刘琦¹ 吴红兵^{2†} 肖佳锋² 徐杨² 詹晓宇² 申爽²

(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: 为克服电梯曳引机在制动过程中产生的较高声压级噪声, 该文提出了一种基于颗粒阻尼器的减振降噪方案。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来确定关键振动模态。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颗粒阻尼器的空腔结构。然后, 通过EDEM-ADAMS联合仿真对固体粒子参数进行优化, 重点解决3个关键技术问题: ①粒子材料的选择(考虑到需规避磁场干扰, 最终选用纯铝作为阻尼颗粒); ②颗粒阻尼器在空腔结构内的能量耗散过程分析(采用离散元分析法进行仿真); ③阻尼器粒子半径和填充率的优化(通过结合离散元分析法和多体动力学仿真实现)。在半消声室环境下对所提出的制动降噪策略进行实验验证, 设置周期为5 s的定时制动控制策略, 采用加速度传感器阵列采集振动信号, 同步记录声压级数据。结果表明, 安装颗粒阻尼器后曳引机制动过程的平均声压级降低20.7%, 验证了所提方案的有效性。该研究为电磁制动系统的噪声控制提供了一条新的技术路径, 具有较大的工程应用价值。

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; 噪声

中图分类号: TB535

文章编号: 1000-565X(XXXX)XX-0001-09

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便利, 另一方面也因运行过程中产生的振动与噪声给人们的日常生活造成困扰^[1]。曳引机是垂直式电梯(也称为直梯)的核心动力部件, 也是电梯运行过程中振动与噪声的重要源头^[2]。曳引机制动器的制动力激励结构会产生高声压级的结构辐射噪声, 因此, 为实现电梯的低噪声运行, 必须控制曳引机制动器的制动噪声。

曳引机振动与噪声的传播路径涵盖曳引机、桁架、隔振垫等^[3], 相应的振动与噪声控制也针对这

些部件展开。任志英等^[4]针对电梯曳引机的振动隔离, 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。曳引机制动器的制动噪声主要表现为制动力激励下的结构辐射噪声, 目前鲜见这方面的相关研究。通过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的辐射。

颗粒阻尼器是一种利用颗粒间碰撞、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的减振器件^[5]。相对于减振橡

收稿日期: 2025-04-24

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2022A1515011263)

Foundation item: 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系统、机器视觉及其应用、精密测量和故障诊断研究。E-mail: mezhchen@scut.edu.cn

†通信作者: 吴红兵(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事超高速电梯和电梯曳引机技术研究。E-mail: xuyang27731@hitachi-hclc.com

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、低成本与高环境适应性等特点^[5]，其工作带宽大致为1~2000Hz^[6]，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等^[7-12]。Lu等^[7]提出了颗粒阻尼器的质量-刚度-阻尼等效简化理论模型，其铁路减振应用表明，平均耗散功率与激励频率呈负相关。蒋捷等^[8]通过在颗粒阻尼器中内置三维网络，打破颗粒团聚效应，增强悬臂梁阻尼及其抗振性能。王明等^[9]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。肖望强等^[10]采用颗粒阻尼器对某型内燃机动力总成转向架进行减振，使垂向振动幅度降低了60.7%。Xiao等^[12]对轻型重载数控卧式车床开展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颗粒类型，改善了机床的动态性能。以上关于颗粒阻尼器的工程应用表明，颗粒阻尼器对于结构振动与噪声控制有良好效果。

文中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问题，通过在转子制动轮内置颗粒阻尼器来抑制因制动力激励引起的结构振动，从而减少结构噪声的辐射。为了达到最优的噪声辐射抑制效果，文中对颗粒阻尼器的布置位置以及粒子参数(尺寸与填充率)进行了优化设计与对比实验。

1 问题描述

曳引机制动机构是直梯的重要部件，其功能是在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，用于测试实验的实物照片如图1所示。

制动机构由铁芯、线圈、衔铁、刹车片、弹

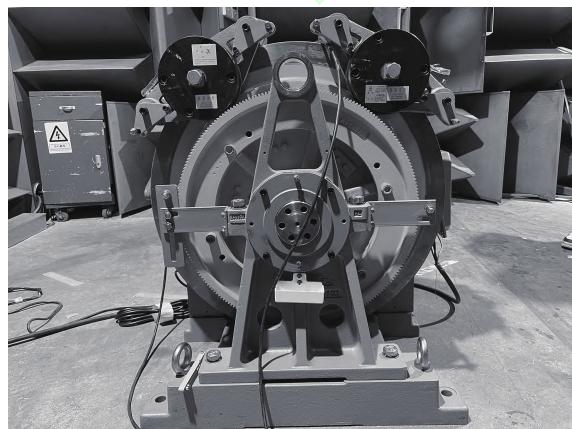


图1 用于测试实验的直梯曳引机

Fig. 1 Elevator traction machine for testing experiments

簧、制动轮6个部分组成。制动器抱闸时，线圈失电，失去电磁力，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+刹车片组合与制动轮顶住后，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+刹车片组合克服弹簧力向铁芯方向运动，至衔铁顶住限位结构，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，此时制动器松闸。图2为制动器抱闸、松闸动作示意图。

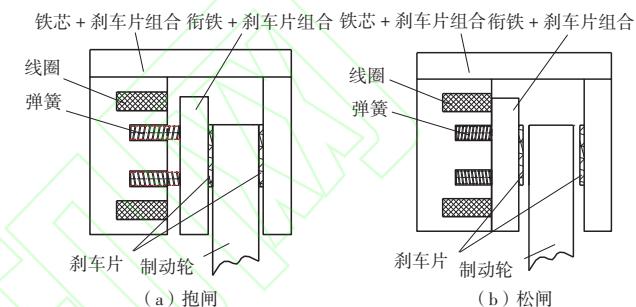


图2 制动器抱闸、松闸动作示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of braking and releasing operations of traction machine

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，原因如下：电磁铁吸合(松闸)时，衔铁撞击铁芯；电磁铁释放(抱闸)时，刹车片撞击制动轮；由于这两个过程释放的能量较大，因此都会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，也表明刹车制动过程中存在较大的冲击和振动问题。

针对该问题，此前的改进措施主要是在制动器结构中添加缓冲橡胶(如图3所示)，但该措施主要是减少松闸时铁芯和衔铁撞击的噪声，对抱闸时刹车片和制动轮撞击噪声的改善效果不明显。由于制动轮具有较大的噪声辐射面，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。

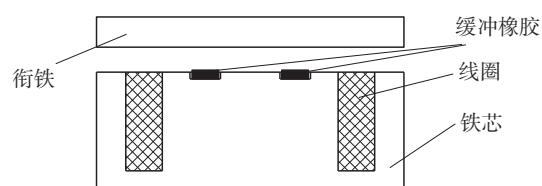


图3 带缓冲橡胶的电磁铁结构

Fig. 3 Electromagnetic structure with buffer rubbers

2 制动轮颗粒阻尼器的设计

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,从而达到减振目的,进而产生降噪效果。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的设计。

目前,颗粒阻尼器主要采用内置式或外挂式布局。考虑到文中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颗粒阻尼器,具体原因包括:①制动轮作为转子的一部分,是刹车激励产生振动的直接发生部位;②与其他振动部件相比,制动轮的刚性相对较弱,声辐射面积和振幅均较大,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。

确定了颗粒阻尼器的布置方式和布置对象后,从阻尼器位置和阻尼器参数两方面进行颗粒阻尼器的设计。考虑到制动器磁场对颗粒阻尼器中颗粒自由运动的影响,选择纯铝作为粒子材料。颗粒阻尼器的设计流程如图4所示。

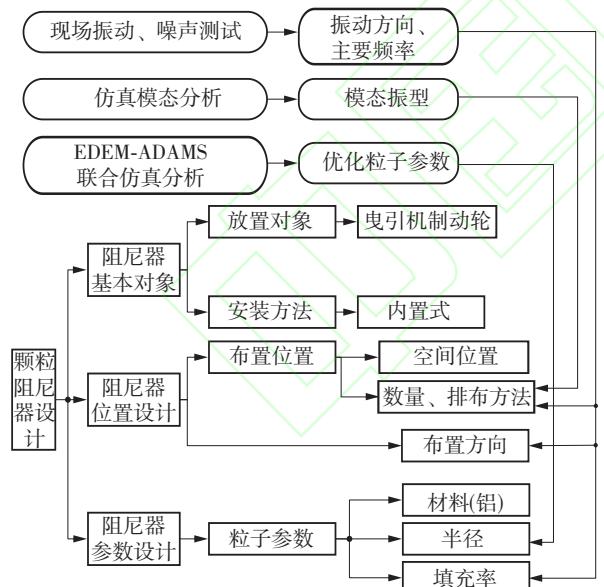


图4 颗粒阻尼器的设计流程

Fig. 4 Design flowchart of particle damper

2.1 颗粒阻尼器位置的确定

为构建内置式颗粒阻尼器,需要在原有结构中加工空腔,便于填充减振粒子。空腔位置是影响颗粒阻尼器性能的重要参数,它会影响阻尼器的空间位置、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采用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根据整机实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,为了增强振动吸收性能,颗粒阻尼器的设计应考虑使其所在模态的振动幅度最大。因此,阻尼器应当设计得使其尽量位于结构模态振幅较大的位置。模态分析的相关设置如下: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稳定性;②设定约束,曳引机制动靴向制动轮施加7547 N的面压力,将轴心处固定于地面;③求解,经后处理得到前12阶模态频率(见表1)及其振型图。

表1 制动轮模态频率

Table 1 Brake wheel's 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	1209.50
4	440.76	10	1216.10
5	441.79	11	1662.30
6	774.90	12	1668.00

由整机振动、噪声测试得到1/3倍频程频谱的主要频率在710 Hz附近,因此,主要考虑第6阶模态,其对应频率的振型如图5所示。

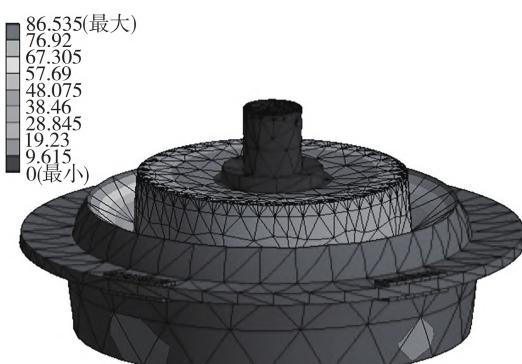


图5 转子第6阶模态振型(774.90 Hz)

Fig. 5 The 6th-order vibration modal shape of the rotor (774.90 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的,位移较大的位置出现在制动轮外沿,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。如图 6 所示,对于圆柱状颗粒阻尼器而言,减振方向为其圆截面径向,因此,布置颗粒阻尼器时应当使该方向与振动幅度最大的方向平行。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。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,并使圆柱状颗粒阻尼器的圆截面径向时刻与制动轮轴向平行。

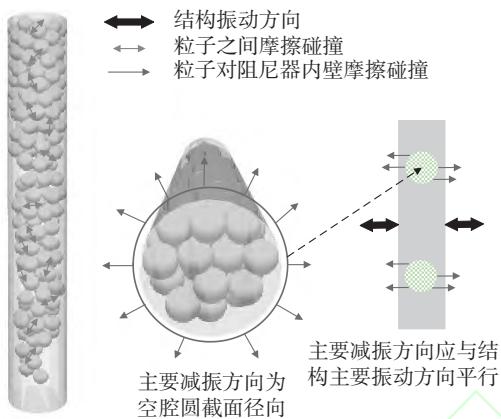


图 6 颗粒阻尼器安装方向选择策略

Fig. 6 Selection strategy for installation direction of particle dampers

由颗粒阻尼器的减振原理可知,相同条件下使用的减振粒子越多,相同时间内的能量耗散越大,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。

接下来确定阻尼器的空腔数量和排布方法。由于模态图中的振型位移在制动轮外沿呈轴对称式的密集分布,因此设定排列方式为沿圆周方向均匀。阻尼器空腔的数量同样按照在满足制动轮几何约束和机械强度要求下填充尽量多粒子的原则设置,最终确定为 32 个。

阻尼器的空腔位置与几何参数设计结果分别如图 7 和图 8 所示。

2.2 阻尼器参数的设计

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

步骤 1 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。

步骤 2 使用 EDEM 离散元分析软件对耦合空

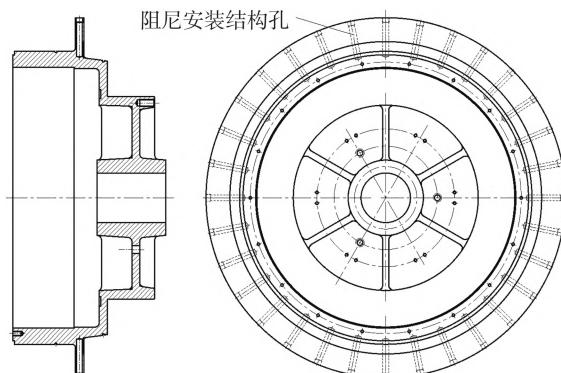


图 7 制动轮颗粒阻尼器的空腔位置

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

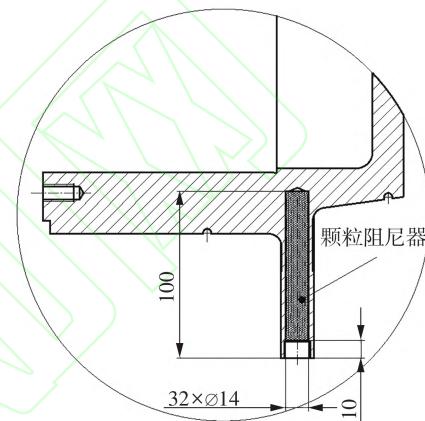


图 8 阻尼器空腔的几何参数(单位:mm)

Fig. 8 Geometric parameters of the damper cavity (Unit: mm)

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为:密度 2700 kg/m³、杨氏模量 72 GPa、泊松比 0.3;设定阻尼器空腔材料参数为:密度 7150 kg/m³、杨氏模量 130 GPa、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。

步骤 3 利用 Co-Simulation 功能,将 ADAMS 中的模型运动学结果同步到 EDEM 中的几何结构运动上,同时将 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。

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

图 9 所示为联合仿真分析流程。

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

在联合仿真前需要准确设定 ADAMS 动力学模

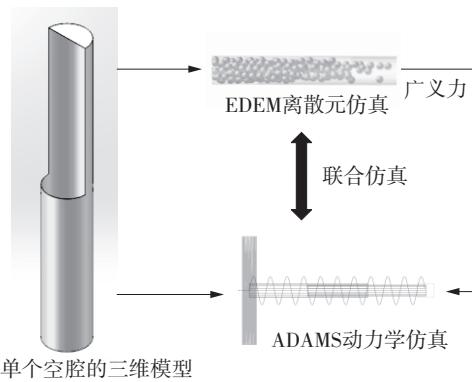


图 9 EDEM-ADAMS 联合仿真分析流程

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

型中的弹簧刚度 k 。根据整机振动、噪声实验结果,确定主要频率(f)为 710 Hz, 并有阻尼器质量 m , 即可根据式(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, 通过式(2)计算损失因子 μ ,

$$\mu = \sum_{i=2}^n \frac{p_{i-1}^2 - p_i^2}{p_{i-1}^2} / n - 1, i = 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, p_i 为衰减位移响应中第 i 个的位移峰值, n 为计算损失因子的位移响应峰序号。

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, 相应地会产生不同的减振效果, 因此以 0.0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° 、 90.0° 共 5 种角度进行多组联合仿真。阻尼粒子参数的优化过程如式(3)所示:

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

式中: $F(r, f)$ 为联合仿真计算得到的损失因子; r 为阻尼粒子半径, 来自粒子半径参数集 R ; f 为粒子填充率, 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。

综合以上分析结果, 最终确定填充粒子规格

表 2 多种倾斜角度下的最优粒子参数及其损失因子

Table 2 Optimal particle parameters and their loss factors at various tilt angles

倾斜角度/(°)	粒子半径/mm	填充率/%	损失因子
0.0	1.5	50	0.2419
22.5	1.5	60	0.3402
45.0	1.5	50	0.3236
67.5	1.5	60	0.3223
90.0	1.5	60	0.3336

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 为完成颗粒阻尼器安装的制动轮实物。

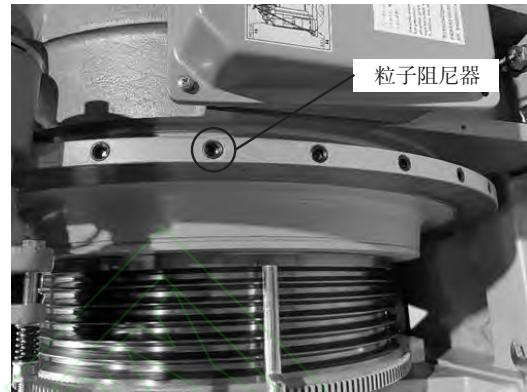


图 10 完成颗粒阻尼器安装的制动轮实物

Fig. 10 Actual brake wheel with installed particle dampers

3 实验与分析

3.1 实验方案

曳引机的整机振动、噪声实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。实验中采用美国 PCB 356A16 三轴压电加速度传感器、上海北智 14206 单轴压电加速度传感器, 以及声望 MPA201 麦克风声压传感器, 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、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 5 s 为 1 个周期进行周期性的刹车动作, 其中每个周期包括 1 次刹车和 1 次松开刹车。每次实验信号采集持续 60 s, 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

根据 3.1 节所述实验方案进行曳引机整机振动、噪声实验, 颗粒阻尼器安装前后的噪声测试结果如图 12 和表 3 所示。可以看出: 安装颗粒阻尼器前后, 瞬时冲击声压从 1.0 Pa 左右降至 0.2 Pa 左右, 时域平均 A 计权声压级(平均声压级)从 66.03 dBA 降至 52.36 dBA, 时域最大 A 计权声压级(最大声压级)从 81.42 dBA 降至 67.51 dBA;

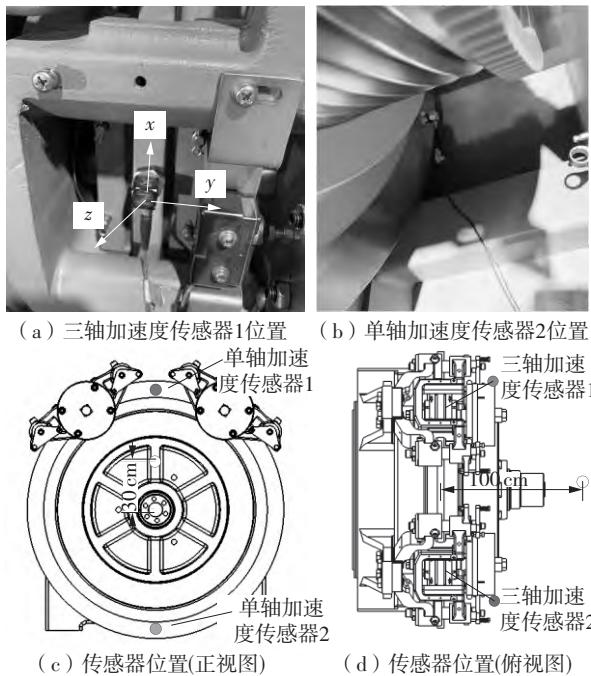


图11 测点与传感器安装位置示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of measuring points and sensor locations

A计权1/3倍频程的最大声压级出现在以710 Hz为中心的频带，从安装前的62.45 dBA降至安装后的49.39 dBA。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，降幅为20.7%，降噪效果显著。

由于结构的振动速度与其辐射噪声相关，对测试得到的制动轮加速度信号进行了积分，从而得到制动轮的振动速度信号。图13与图14分别给出了安装颗粒阻尼器前后三轴加速度传感器和单轴加速度传感器所采集的制动轮轴向振动加速度时域信号及计算得出的A计权1/3倍频程振动速度。

根据图12-14及表3所示的噪声与振动测试结果，进一步总结分析如下。

(1)曳引机制动轮的轴向振动与其刹车制动噪声密切相关。对比图13、图14所示振动速度的A计权1/3倍频程频谱与图12所示噪声的A计权1/3倍频程声压级可以发现，阻尼器设计频率附近的噪声与振动幅值均有明显下降，相应的频谱结构也有相似性。这表明，文中讨论的碟式曳引机制动噪声与制动盘振动辐射噪声的关联度较高。

(2)从单、多轴加速度传感器分析所得的振动速度A计权1/3倍频程频谱可以看出，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时的1000 Hz以上振动具有明显的减振效果。

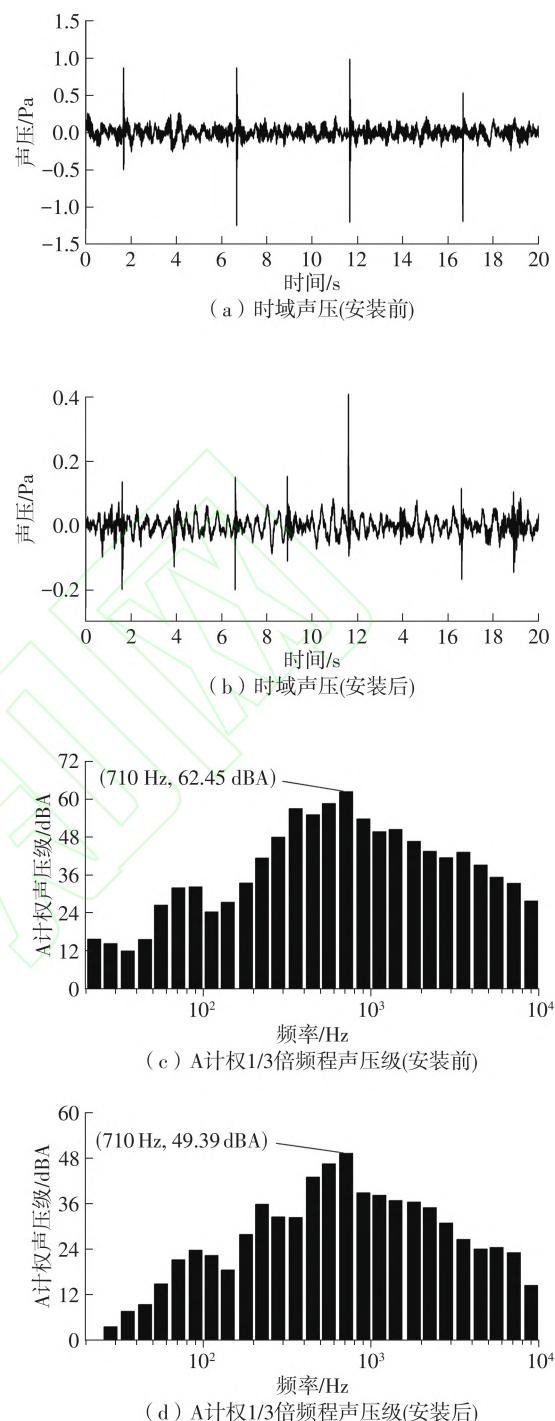


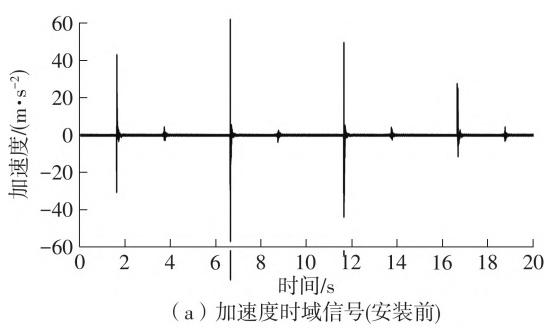
图12 颗粒阻尼器安装前后的噪声测试结果

Fig. 12 Noise test results before and after the installation of particle dampers

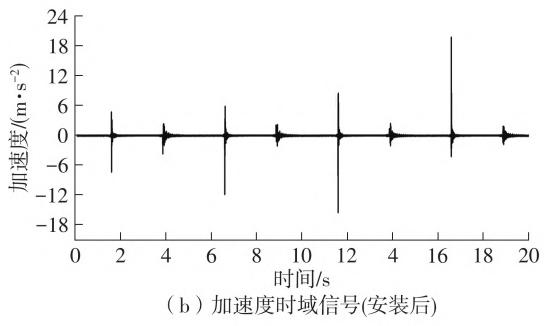
表3 安装颗粒阻尼器前后的噪声水平

Table 3 Noise levels before and after the installation of particle dampers

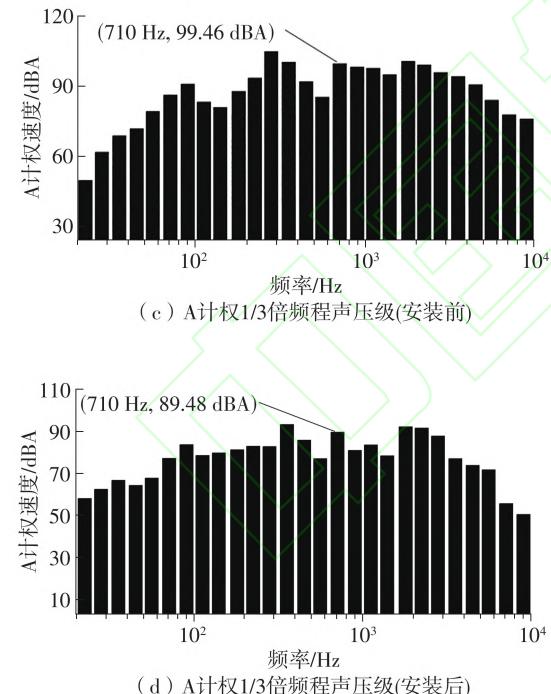
颗粒阻尼器 安装情况	平均声压级/dBA	最大声压级/dBA	710 Hz频带 声压级/dBA
无	66.03	81.42	62.45
有	52.36	67.51	49.39



(a) 加速度时域信号(安装前)



(b) 加速度时域信号(安装后)



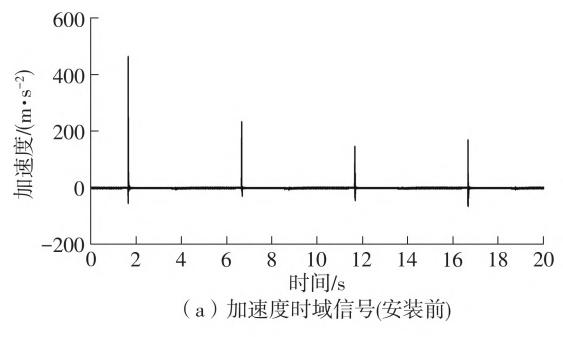
(c) A计权1/3倍频程声压级(安装前)

(d) A计权1/3倍频程声压级(安装后)

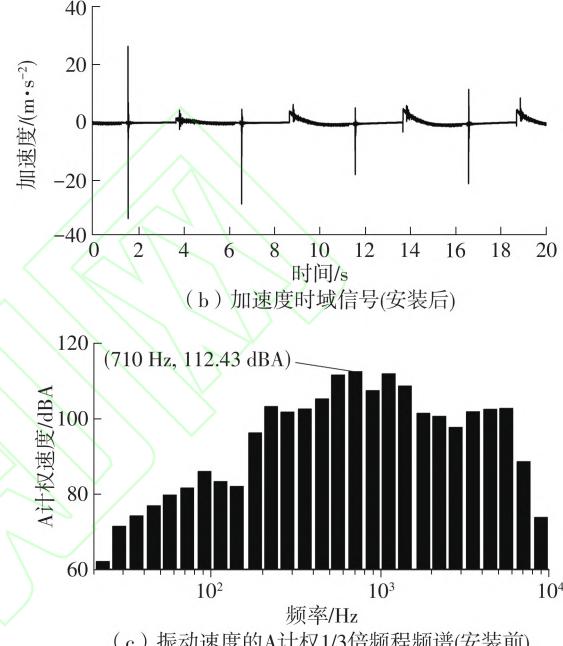
图13 颗粒阻尼器安装前后的单轴加速度传感器振动测试结果

Fig. 13 Vibration results obtained by single-axis acceleration sensor before and after the installation of particle dampers

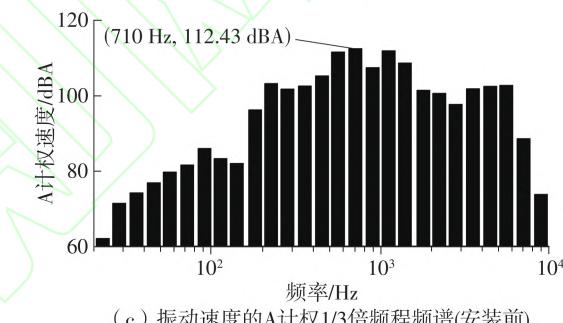
(3) 颗粒阻尼器对曳引机制动噪声具有宽频的降噪效果，除了能明显抑制对噪声贡献度较大的710 Hz频带噪声外，对低频与中高频频段噪声也有很好的抑制效果。



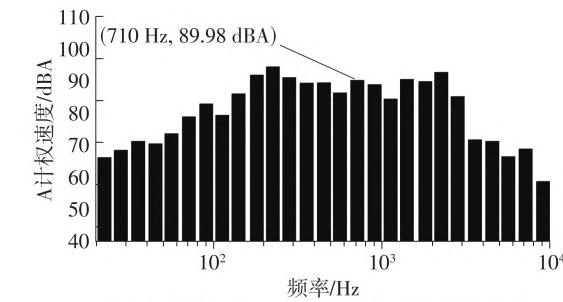
(a) 加速度时域信号(安装前)



(b) 加速度时域信号(安装后)



(c) 振动速度的A计权1/3倍频程频谱(安装前)



(d) 振动速度的A计权1/3倍频程频谱(安装后)

图14 颗粒阻尼器安装前后的三轴加速度传感器Y轴方向振动测试结果

Fig. 14 Vibration results along Y axis obtained by three-axis acceleration sensor before and after the installation of particle dampers

4 结语

文中通过EDEM-ADAMS联合仿真分析优化了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，发现对曳引机制动轮嵌入优化设计后的颗粒阻尼器，可有效抑制整机振动并显著降噪，说明所提出的颗粒阻尼器设计方法是有效的。

通过电梯曳引机制动降噪对比实验，对制动轮内置颗粒阻尼器的制动降噪方案进行了验证，结果表明，该方案可使电梯曳引机在制动刹车过程中的平均声压级降低 20.7%，降噪效果显著。这充分证明，文中提出的改进方法在电梯曳引机制动降噪中具有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(2): 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(2): 21-25, 30.
SUN Shuran. Vibration simulation and fault analysis on traction elevator [J]. China Special Equipment Safety, 2022, 38(2): 21-25, 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(2): 214-217.
ZHOU Xi-xi, DI Guo-qing, SU Lan. Structure borne noise of goods elevator traction machine [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(2): 214-217.
- [4] 任志英, 刘荣阳, 黄伟, 等. 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(3): 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(3): 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): e2058/1-25.
- [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, 等. 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): 208-222.
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) : 208-222.
- [9] 王明, 徐慧东, 和东平, 等. 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(2): 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(2): 23-34, 78.
- [10] 肖望强, 陈辉, 许展豪, 等. 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(4): 250-257.
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(4): 250-257.
- [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(5): 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(5): 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.

Brake Noise Reduction of Elevator Traction Machine Based on Particle Dampers

CHEN Zhong¹ LIU Qi¹ WU Hongbing² XIAO Jiafeng² XU Yang² ZHAN Xiaoyu² SHEN Shuang²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Hitachi Elevator Motor (Guangzhou) Co., Ltd., 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 characteris-

tics 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; noise

