

重型载运工具及重型动力装备多目标振动控制研究

黄 伟

国机集团科学技术研究院有限公司, 国机集团工程振动控制技术研究中心, 北京

收稿日期: 2024年12月16日; 录用日期: 2025年1月8日; 发布日期: 2025年1月20日

摘 要

重型载运工具及重型动力装备振动控制中存在一类矛盾振动问题, 即前者如何兼顾控制环境振动影响以及轿厢人员舒适, 后者如何统筹平衡装备自身振动水平以及传递至外界环境的扰动。本研究基于多目标粒子群优化算法, 对提出的多目标振动问题进行了优化, 基于得到的Pareto解集, 对隔振体系进行了优化设计, 并对不同振动荷载形式的输入进行了分类研究, 结果表明荷载不同, 隔振体系的多目标优化设计结果和规律不同, 应在工程设计中进行针对性设计。本研究对于实际工程具有重要的指导意义, 是对传统单目标振动控制设计的重要补充和拓展。

关键词

重型载运工具, 重型动力装备, 多目标粒子群优化算法, 多目标振动控制

Research on Multi-Objective Vibration Control of Heavy-Duty Vehicles and Heavy Power Equipment

Wei Huang

SINOMACH Research Center of Engineering Vibration Control Technology, SINOMACH Academy of Science and Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Dec. 16th, 2024; accepted: Jan. 8th, 2025; published: Jan. 20th, 2025

Abstract

In the realm of vibration control for heavy-duty vehicles and power equipment, a contradictory challenge arises: how to mitigate the impact of environmental vibrations while ensuring the comfort

of personnel in the former, and how to balance the inherent vibration levels of the equipment with disturbances transmitted to the external environment. This study employs a multi-objective particle swarm optimization algorithm to address this complex multi-objective vibration problem. By utilizing the derived Pareto solution set, vibration isolation systems excited by various forms of input vibrations are optimized and designed. The findings indicate that both the outcomes and governing principles of multi-objective optimization for the vibration isolation system vary depending on different loading conditions. Therefore, tailored designs must be implemented during engineering practices. This research provides significant guidance for practical engineering applications and serves as an important enhancement to traditional single-objective vibration control methodologies.

Keywords

Heavy-Duty Vehicles, Heavy Power Equipment, Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm, Multi-Objective Vibration Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国高铁、地铁、城市轻轨、城际铁路等重型载运交通工具的快速发展,在便捷交通、促进经济和社会快速发展的同时,产生的强振动对周围环境也造成了很大扰动,特别是地铁以及市域轨道交通等。此外,一些重型动力装备,是现代工业生产和科学研究的关键工艺装备和关键技术手段,如锻锤、冲压装备、振动台等,这些装备会对周围环境、人员舒适造成影响,甚至造成附属建筑结构破坏。

采取振动控制措施是解决重型载运工具以及动力装备对周围环境振动影响的重要手段,但许多工程实践表明,当对地铁等重型载运工具采取浮置板道床振动控制措施时,其对周围环境的扰动会显著减小,但车厢内的人员舒适可能会下降,是一个矛盾问题。另外,当对重型动力装备采取振动控制措施时,如基础间接隔振、装备直接隔振,动力装备对周边环境的扰动显著减小,但装备自身的振动可能会变大,不利于装备的安全长期使用,这也是一个矛盾问题。

如何采取有效的振动控制措施,对于重型载运工具,在振动控制效果以及车厢人员舒适两者间获得较为均衡的效果,对于重型动力装备,既能保证对环境影响的振动控制效果,也能兼顾装备自身的振动水平,是当前实际工程中面临的一个迫切优化问题。

Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年首次提出了一种新型的群智能优化算法——粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法[1],其主要思想是基于粒子间的合作和竞争以找出最优解(粒子),该算法具有简单、易实现、收敛快且可调参数少等优点,Coello C A C 等[2]首次提出了多目标粒子群优化算法(Multi-Objective PSO, MOPSO),目前已广泛应用于工程领域的优化计算[3]-[5]。

本文将基于多目标粒子群优化算法,对重型载运工具及重型动力装备开展多目标振动控制研究,以期解决前述的矛盾问题。

2. 多目标粒子群优化算法简介

多目标粒子群优化算法(MOPSO)的主要计算方法[6],可表述如下:

第 1 步:初始化粒子群,计算各对应粒子的目标函数向量,并将其中的非劣解加入到外部档案之中;

第2步：初始化粒子群的局部最优解 $pbest$ 和全局最优解 $gbest$;

第3步：在搜索空间内，通过(1)和(2)式不断调整粒子的飞行速度和位置，形成新的 $pbest$;

$$v_{ij} = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 [pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [gbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \quad (1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2)$$

第4步：根据新的非劣解维护外部档案，并为每个粒子选取 $gbest$ (档案的内容将决定全局最优解的选取);

第5步：是否达到最大迭代次数，否的话继续计算，是则停止计算，并输出 Pareto 最优解集。

MOPSO 与单目标粒子群优化算法的主要区别就是全局最优解的选取方式以及外部档案的设定和更新; 其中，外部档案的更新将直接决定全局最优解，如图1示意，图中，NDs 表示非支配解集， $s_1 \sim s_5$ 表示一组解集。在多目标优化中，最直接的方法就是利用 Pareto 支配的概念，考虑档案中的所有非劣解，并从中确定一个“主导者”，从而形成一组 Pareto 前沿，如图2所示。

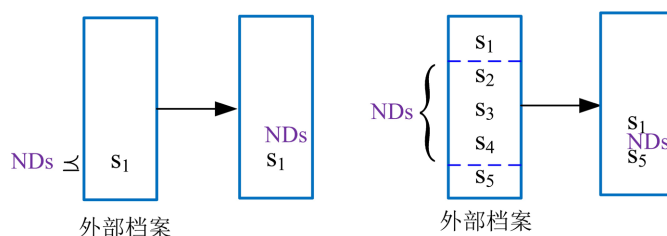


Figure 1. Update of the external file

图1. 外部档案的更新

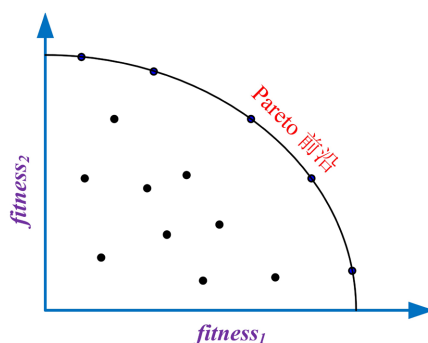


Figure 2. Pareto frontier

图2. Pareto 前沿

3. 重型动力装备多目标振动问题描述

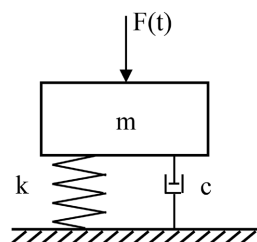


Figure 3. Vibration control of heavy power equipment

图3. 重型动力装备振动控制

采取隔振措施的重型动力装备的振动控制示意如图3所示,其中, m 为浮置板道床及上部轿厢、乘客等的总质量, k 、 c 为隔振体系的刚度和阻尼。对于环境扰动的评判,可以动力装备传递至地面的力来评价;对于装备自身的振动水平,可以其加速度来评价。假设装备的振动位移、速度和加速度分别为 $x, \dot{x}, \ddot{x}$,则传递至地面的力可表示为 $F_g = c\dot{x} + kx$,则多目标优化问题即可表示为对:目标1—— $F_g = c\dot{x} + kx$ 以及目标2—— $\ddot{x}$ 的多目标优化。

4. 重型载运工具多目标振动问题描述

采取浮置板道床的重型载运轨道交通工具的振动控制示意如图4所示,其中, m 为浮置板道床及上部轿厢、乘客等的总质量, k 、 c 为浮置板隔振体系的刚度和阻尼。对于环境扰动的评判,可以轨道交通传递至地面的力来评价;对于轿厢中的人体舒适评判,有多种评价指标,如振动频率、加速度以及振动强度等[7]-[11],本文以加速度来评价。假设浮置板道床及上部轿厢体系的振动位移、速度和加速度分别为 $x, \dot{x}, \ddot{x}$,则轨道交通传递至地面的力可表示为 $F_g = c\dot{x} + kx$,其多目标优化问题同重型动力装备。

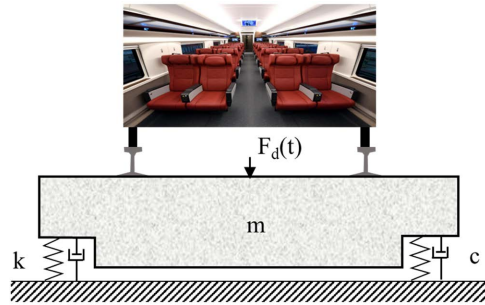


Figure 4. Vibration control of heavy-duty vehicles
图4. 重型载运工具振动控制

5. 算例

由于重型动力装备及重型载运工具的简化振动控制模型相同(计算框图如图5所示),本文考虑两种荷载工况,一种是幅值为5000 N、振动频率为25 Hz的简谐振动荷载,另一种是幅值为5000 N的随机振动荷载。

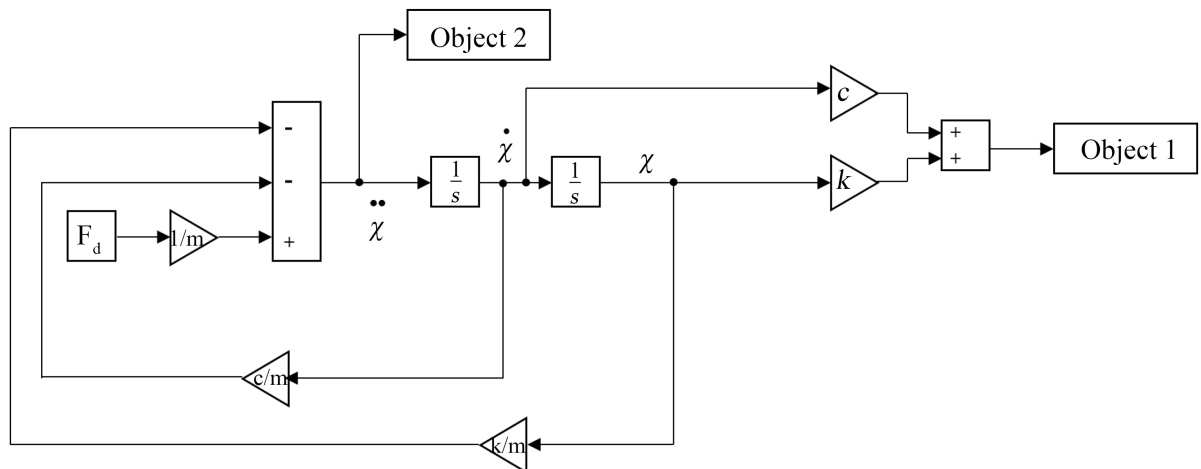


Figure 5. Vibration control calculation block diagram of heavy power equipment and heavy-duty vehicles
图5. 重型动力装备及重型载运工具振动控制计算框图

设总质量 m 为 10000 kg, 隔振体系的刚度 k 和阻尼 c 未知, 根据上述描述的多目标振动问题, 对隔振参数进行寻优计算。根据常规隔振设计经验, 浮置板道床的隔振体系固有频率可按 3~15 Hz 范围寻优, 阻尼比的寻优范围按固有频率范围作相应计算。

MOPSO 的算法设置: 最大迭代次数 100, 最大、最小惯性权重系数 $\omega_{\max} = 0.9$ 、 $\omega_{\min} = 0.4$, 惯性权重系数按式 $\omega = \omega_{\max} - [(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times (i-1)/(m-1)]$ 变化, i 为第 i 次迭代, m 为最大迭代次数, 加速因子 c_1 和 c_2 分别取 1.0、0.4。

1) 简谐振动荷载的计算结果:

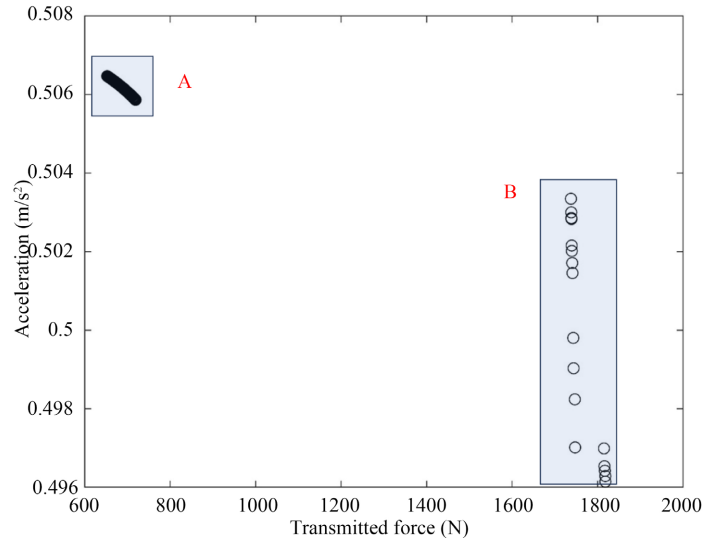


Figure 6. Pareto frontier based on multi-objective calculation (harmonic vibration load)

图 6. 多目标计算得到的 Pareto 前沿(简谐振动荷载)

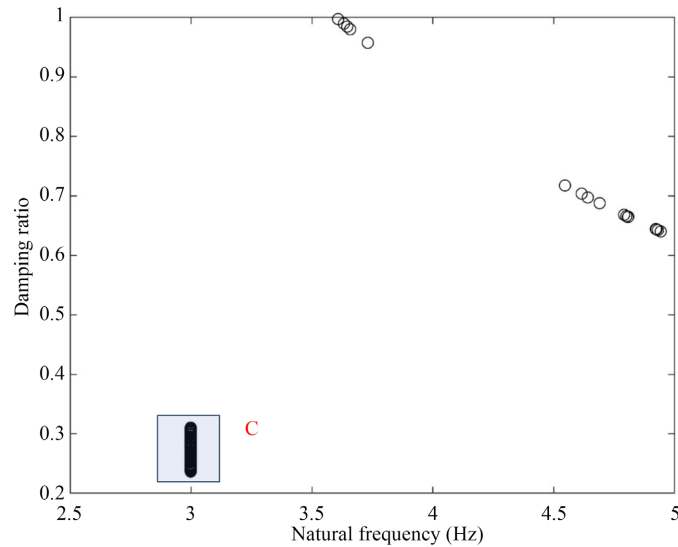


Figure 7. Relation between designed natural frequency and damping ratio based on multi-objective calculation solution set (harmonic vibration load)

图 7. 基于多目标计算解集得到的设计固有频率与阻尼比关系(简谐振动荷载)

多目标优化计算的 Pareto 前沿如图 6 所示, 根据解集计算的固有频率与阻尼比的对应关系如图 7 所

示。由图 6 中的 Pareto 前沿, A 区域中的解集相对较为理想, 在实际工程中, 可以参考选取, 其中, A 区域对应图 7 的 C 区域。以 A 区域中的某点解为例, 其传递力为 652.7 N, 装备加速度为 0.5 m/s^2 , 则对应的设计固有频率为 3 Hz, 设计阻尼比为 0.236。

2) 随机振动荷载的计算结果:

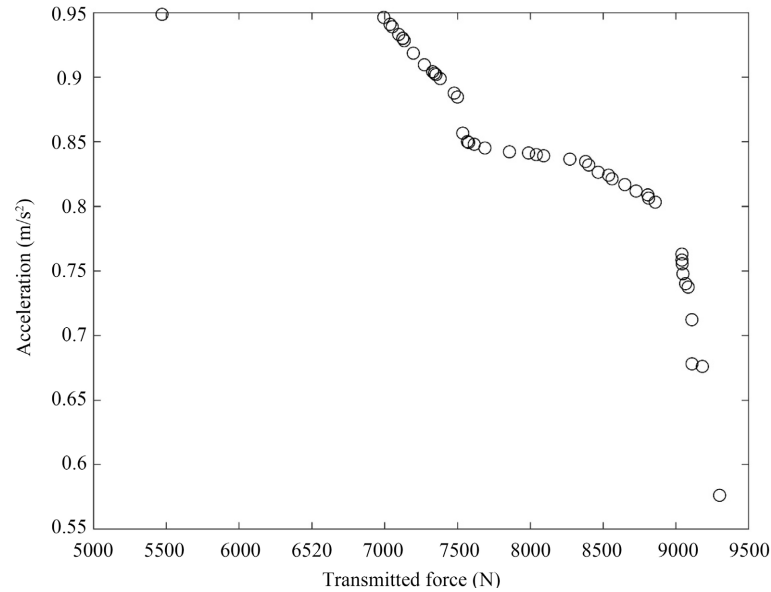


Figure 8. Pareto frontier based on multi-objective calculation (random vibration load)

图 8. 多目标计算得到的 Pareto 前沿(随机振动荷载)

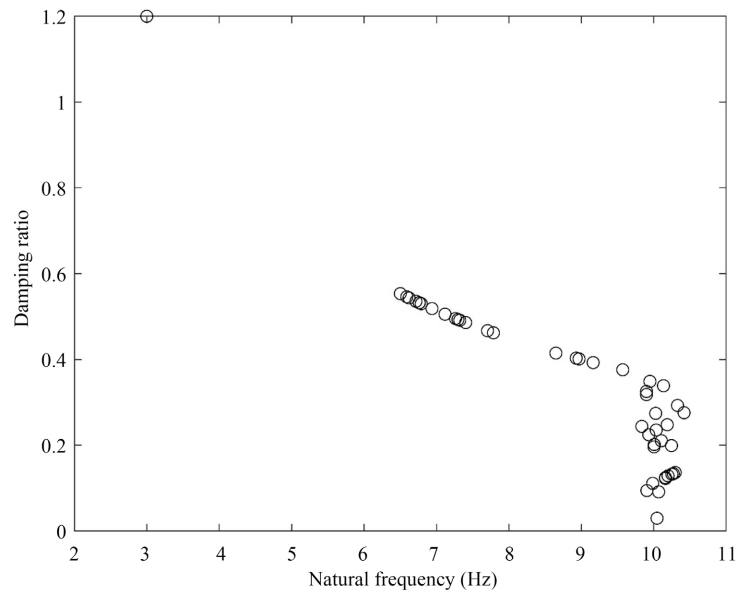


Figure 9. Relation between designed natural frequency and damping ratio based on multi-objective calculation solution set (random vibration load)

图 9. 基于多目标计算解集得到的设计固有频率与阻尼比关系(随机振动荷载)

多目标优化计算的 Pareto 前沿如图 8 所示, 根据解集计算的固有频率与阻尼比的对应关系如图 9 所示。以 Pareto 前沿中的某点解为例, 其传递力为 7856.5 N, 装备加速度为 0.84 m/s^2 , 则对应的设计固有

频率为 9.95 Hz，设计阻尼比为 0.35。

6. 小结

本研究基于多目标粒子群优化算法对重型载运工具及重型动力装备中常见的一类“矛盾”振动问题进行了优化，对于重型载运交通工具，可以通过优化设计，兼顾对轿厢人员舒适以及环境扰动的影响，对于重型动力装备，可以实现对装备自身振动水平以及环境扰动影响的平衡考虑，是对振动控制优化设计的重要补充，对于实际工程具有较强的指导意义。

文中考虑了两种振动荷载，结果表示不同的振动荷载其多目标优化设计的结果和规律有明显不同，如果参数设计合理，不仅可以有效兼顾轿厢人员舒适(装备自身振动影响)以及传递至环境的振动水平，还可以将二者均控制在较为理想的水平，如果参数选择和设计不利，可能导致某个目标控制效果明显不足。故在实际工程中，对于不同振动荷载形式的装备或载运工具，应开展针对性设计，避免按照经验设计导致的振动控制效果不佳，甚至造成不利影响。

未来，笔者还将基于实际工程中面临的类似矛盾振动控制问题开展多目标优化设计，如精密工程中的微振动控制问题等。

项目基金

国家重点研发计划“地下城轨道交通综合体振动及结构安全控制方法研究与应用”(课题编号：2024YFF0508104)。中国机械工业集团青年基金重点项目“大科学工程群微纳级环境振动控制关键技术研究与应用”。

参考文献

- [1] Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995) A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 4-6 October 1995, 39-43. <https://doi.org/10.1109/mhs.1995.494215>
- [2] Coello Coello, C.A. and Lechuga, M.S. (2002) MOPSO: A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, Honolulu, USA, 12-17 May 2002, 1051-1056. <https://doi.org/10.1109/cec.2002.1004388>
- [3] Huang, W., Xu, J., Lu, X., Zhang, T., Hu, M., Qin, J., et al. (2018) Research on Representative Engineering Vibration Isolation and Control Using Particle Swarm Optimization Technique. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 6, 179-195. <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0030-7>
- [4] Cheraghi, R. and Hossein Jahangir, M. (2023) Multi-Objective Optimization of a Hybrid Renewable Energy System Supplying a Residential Building Using NSGA-II and MOPSO Algorithms. *Energy Conversion and Management*, 294, Article ID: 117515. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117515>
- [5] Mansouri, M., Safavi, H.R. and Rezaei, F. (2022) An Improved MOPSO Algorithm for Multi-Objective Optimization of Reservoir Operation under Climate Change. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, Article No. 261. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09909-6>
- [6] 黄伟. 基于智能优化的工程振动控制策略及传感器优化布置研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [7] 董霜. 大城市地下轨道交通振动与强地面运动观测的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2004.
- [8] 吴晓涵, 骆剑峰, 马莉. 竖向地震作用下混凝土框架结构抗震性能研究[J]. 结构工程师, 2006(6): 37-43.
- [9] 陆春华, 金伟良, 宋志刚. 基于振动舒适度要求的混凝土楼板自振频率分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(7): 43-46.
- [10] 黄世明. 轨道交通与建筑物共建结构车致振动舒适度评价[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [11] 张培杰. 地铁车辆段 TOD 开发上盖建筑振动舒适度研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.