

惯容减振系统研究综述

聂兴富

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2026年6月7日; 录用日期: 2026年6月29日; 发布日期: 2026年7月13日

摘要

随着各类建筑结构设计日益复杂, 传统抗震设计理念的有效性逐渐下降, 结构振动控制技术已成为提升建筑抗震性能的关键手段。近年来发展起来的一种新型振动控制方法——惯容减振技术, 以“惯性器”为核心的新型结构控制元件, 其力的传递依赖于两端之间的加速度相关性, 围绕此类元件构建的惯性阻尼系统通过惯性器来抑制建筑振动。本文梳理了惯性阻尼技术的基本理论、相关装置的工作特性及其在减振方面的当前应用。与传统阻尼方案相比, 惯性阻尼系统具有多项优势: 首先, 该系统可灵活调节整体惯性参数, 并相应调整设备的固有频率; 其次, 可在几乎不改变建筑实际恒载的情况下优化惯性参数。第三, 它们能有效提升匹配的耗能元件的能量耗散效率。

关键词

惯容系统, 振动控制, 减振

Review of Research on Inertia Damping Systems

Xingfu Nie

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: June 7, 2026; accepted: June 29, 2026; published: July 13, 2026

Abstract

With increasingly complex structural designs of various buildings, the effectiveness of conventional seismic design concepts has gradually declined, and structural vibration control technology has become a critical approach to improve the seismic resistance of buildings. As a newly developed vibration control method in recent years, inertial damping technology centers on the “inertor”, an innovative structural control component whose force transmission relies on the acceleration correlation

between its two terminals, and the inertial damping system assembled around such components restrains building vibration via inerters. This paper sorts out the fundamental theories of inertial damping technology, operational characteristics of relevant devices and their current applications in vibration reduction. Compared with traditional damping solutions, inertial damping systems possess multiple merits: first, such systems can flexibly adjust overall inertial parameters and modify the inherent frequency of equipment accordingly; second, they optimize inertial parameters with barely any changes to the actual dead load of buildings; third, they effectively boost the energy dissipation efficiency of matched energy-consuming components.

Keywords

Inertial System, Vibration Control, Damping

Copyright © 2026 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

城市建设的持续推进与工程技术的不断升级,让现代建筑结构逐步呈现出大型化、轻量化、复杂化、高性能化与多元化的发展态势;这类新型的结构形式,会让建筑在台风、地震等自然灾害引发振动的过程中,承受更为严重的冲击和破坏,也给建筑结构的安全防护带来了全新的难题与挑战。

结构振动控制技术[1]-[3]通过调整结构的动力特性来抑制其在地震、台风等外界荷载作用下的动态响应,依原理主要分为隔震[4]、消能减震[5]和动力吸震[6]三类,其核心是在结构中引入质量、阻尼、弹簧等力学元件,协同产生抵抗外力并耗散或转移振动能量。

在这一被动控制体系中,惯容系统作为一种新型元件,能利用两端相对加速度提供远大于自身物理质量的表现质量效应。与传统动力吸震技术依赖的大质量块不同,惯容系统与弹簧、阻尼元件组合后,可形成惯容型吸振器或惯容隔震装置,在保持轻量化的同时实现宽频、高效振动控制。因此,惯容系统可定位为被动控制领域中一类革新性的惯容-阻尼-弹簧复合减振元件,弥补了常规质量元件在小型化和性能调谐上的不足。

2. 结构振动技术的发展与研究

国内基建建设的整体规模正在持续扩张,城市内部涌现了数量庞大的高层与超高层建筑物,一方面,传统建筑抗震设计的相关理念与手段已经得到了全面的研究与普遍的应用,单纯依靠优化结构设计、调整结构参数来改善建筑抗震能力的方式,已经慢慢显现出明显的短板;另一方面,这类传统设计方式虽能在常规工况下发挥一定的抗震作用,却很难适配复杂多变的地震工况与多样化的建筑建设需求,整体的抗震表现往往达不到预期标准。振动控制技术作为新型的建筑抗震设计手段,具备极强的灵活度与广泛的适用场景,目前已经收获了国内外众多科研人员的重点研究关注,这项技术可以通过主动或被动的方式调控建筑的动态振动状态,大幅减轻地震荷载对建筑主体造成的损伤,进而有效提升各类建筑整体的抗震能力与结构稳定性。

结构振动控制领域的相关研究,最早源自美籍华裔学者姚治平教授[7]的科研成果,这位学者率先把现代控制理论融入建筑结构的研究当中,正式提出了土木工程结构控制的全新理念;二十世纪阶段,土木工程结构设计体系持续发展完善,行业也逐步看清了结构振动问题对建筑安全性能与使用舒适度造成

的不良影响，姚治平教授的研究成果，也为土木工程行业优化结构力学特性、削弱振动带来的负面影响开辟了全新的研究思路与技术方法。该研究理论可以通过在建筑结构中加装阻尼器、隔震器等各类控制装置，有效优化结构的整体力学性能，各类被动、主动类控制装置的应用，都能显著增强建筑结构抵御风力、地震等自然外力的稳定能力。针对建筑及各类工程结构的振动治理问题，行业可以根据外部能量的输入形式，把振动控制技术划分成四类主流形式，一是被动控制[8] [9]技术，这类技术无需依托外部能源供给，能够在结构振动控制工作中发挥关键的支撑作用；二是主动控制[10]-[14]技术，这类技术结合了自动控制与结构工程两大领域的专业知识，可以根据实际工况灵活调整减振效果，有效抑制结构产生的振动形变；三是半主动控制[15]-[19]技术，这类技术整合了主动控制与被动控制的双重优势，能够通过动态调节结构刚度、阻尼等核心参数，实现高效的减振降噪效果；四是混合控制[20] [21]技术，这类技术是对主动、被动两类控制技术的优化整合，会在同一主体结构上搭配两种及以上的控制装置，以此大幅提升结构振动的整体抑制效果，四类控制方式各有技术特点，能够通过不同的技术路径降低、抑制结构的振动响应。

3. 惯容装置研究现状

惯容器的概念最早诞生于土木工程的研究领域，在结构振动控制、能量收集等相关研究方向都有着广泛的适配场景(表 1)；1973 年，土木工程领域的学者 Kawamata [22]研发出一款名为液体质量泵的装置，这款装置就是惯容器最早的基础雏形，虽然当时的研究并没有正式定义惯容器的专业名称，但这款装置已经具备了惯容器本身自带的多项基础力学特性。

惯容属于一种专用的结构控制元件，该元件可以依据自身两端点位的加速度差值生成对应的惯性力，产生的惯性力会和加速度差值形成正比关系[23]，惯容系数就是用来界定这一正比关系的核心比例参数；惯容减震系统会依托这类特殊元件完成结构的振动调控工作，能够实现对结构惯性参数的动态调整以及振动频率的优化适配。对比传统的结构减震体系，惯容减震系统拥有更为突出的技术优势，一是该系统可以在不改动结构实际质量的前提下，灵活调整结构的整体惯性属性；二是该系统具备了惯性参数与振动频率的双向可调能力，大幅提升了减振方案的适配性；三是该系统可以有效提高减震体系内阻尼元件的能量消耗效率[24] [25]；这些独特的性能优势，让惯容减震系统在结构振动控制领域拥有了十分广阔的应用潜力与研究价值。

Table 1. Characteristics and applicable scenarios of habitual containers
表 1. 惯容器特点及适用场景

惯容器类型	特点	适用场景
滚珠丝杠式惯容器	实现了基础的惯性力输出与振动调控功能，为后续各类惯容器的技术迭代提供了核心理论与结构基础，是惯容技术发展的核心雏形	早期结构振动控制试验研究、惯容技术基础理论验证场景，目前已逐步被优化后的各类新型惯容器替代
液压式惯容器	可实现惯容与阻尼参数的双向调控，高频振动抑制效果优异，结构集成度高、适配性强，可搭配弹簧、阻尼器等元件协同工作，运行稳定性强	车辆悬架系统、轨道交通车辆减振、飞机、火车等交通载体悬架结构、工业设备隔振减振、动力吸振体系的高频振动控制场景
齿轮-齿条式惯容器	传动比稳定精准，动力传递损耗小、效率高，结构整体刚性与抗冲击承载能力突出，可实现大惯量比的惯性输出，振动调控响应速度快，适配性强，可与弹簧、阻尼器等元件灵活组合构建复合减振体系，长期运行稳定性与可靠性强	大跨空间钢结构、重型工业厂房与设备基础减振、桥梁主梁与支座振动控制、轨道交通轨道结构减振、精密仪器与试验平台的高精度隔振减振，尤其适配对传动精度、结构刚性、抗冲击性能有高要求的工程振动控制场景

3.1. 滚珠丝杠式惯容器

滚珠丝杠式惯容器(如图 1)依靠一组大小一致、方向相反的作用力作用在装置两端,让装置的两个端点产生对应的相对平移;一方面,滚珠可以沿着丝杠螺纹轨迹平稳滚动,能够把丝杠产生的直线位移运动转化为持续的旋转运动,另一方面,转化后的旋转运动可以带动螺母外侧配置的飞轮同步运转,飞轮自身的转动惯量可以直接决定惯容器所能生成的惯性力大小,这类惯性力可以有效吸纳、调节结构产生的振动能量,最终达成削弱振动、降低噪音的实际效果。

滚珠丝杠式惯容器装置拥有诸多优良的机械性能,一是具备了紧凑精简的整体结构布局,二是拥有灵活小巧的安装形式,三是可以实现稳定高效的动力传动,四是承载荷载的整体性能更为出色;这些综合优势让该类装置在结构振动控制领域收获了大量的学术关注,也推动了业内针对滚珠丝杠式惯容器的各类试验探究与技术攻关工作。

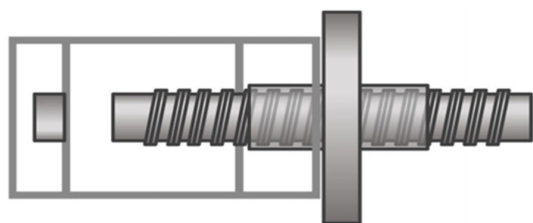


Figure 1. Schematic diagram of ball screw type inertia
图 1. 滚珠丝杠式惯容示意图

3.2. 液压式惯容器

液压式惯容器(如图 2)可以搭配悬架弹簧与阻尼器共同应用在车辆悬架系统当中,能够有效优化车辆的乘坐体验与行驶平稳状态,也能在动力吸振体系中抑制高频振动的产生,进一步提升了整套设备运行的稳定性与使用可靠性;一方面,该装置还能适配车辆的转向系统,通过优化转向结构的动态响应特性,大幅提升了车辆行驶过程中的操控精度与安全系数,另一方面,该装置也能适配各类对隔振性能有要求的机械设备,包含火车、飞机等交通载体的悬架结构,以及各类工业设备的振动调控系统,有着十分广泛的适用场景。

液压式惯容器的技术迭代与升级,持续带动了流体类惯容器相关研究的发展,2013 年,Swift 等人 [26]研发出一款外置螺旋结构的液体惯容器,该设计的核心创新之处在于增设了流量调控结构;其一,装置可以借助可变孔板与控制阀的组合布置方式,适配不同无源网络的装配需求,能够为各类复杂工况环境提供多元化的阻尼调控方案;其二,装置整体的结构设计十分简约,具备了良好的集成特性,可以轻松适配搭载在各类机械与工程系统当中。

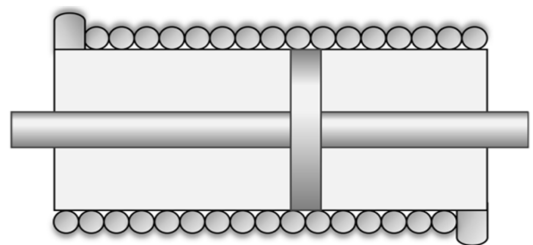


Figure 2. Schematic diagram of hydraulic inertia
图 2. 液压式惯容示意图

3.3. 齿轮 - 齿条式惯容器

Smith [27]构造了一个简单的实现机制(如图 3),其实现方式为通过齿条和大小齿轮的传动,从而带动质量飞轮旋转,由此提供一个较大的惯质系数。Pietrosanti 等人[28]通过齿轮 - 齿条式制作实现惯容并在隔震层中与高阻尼橡胶支座连接,实现变惯容系数惯容器。并进行振动台试验和数值建模考虑其非线性影响,评估变惯容系数和结构非线性行为下的惯容阻尼装置减震效果。

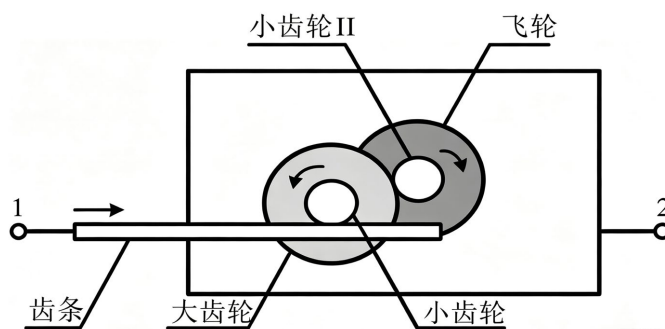


Figure 3. Schematic diagram of gear-rack inertial mechanism principle
图 3. 齿轮 - 齿条式惯容机制原理示意图

4. 惯容减震(振)系统的应用

惯容器是一类全新的动力学构件,凭借自身独特的力学特性与优异的减振能力[29],已经在土木工程研究领域收获了广泛的关注,多项相关研究都充分凸显出了惯容器的综合应用优势;2007 年, Wang 教授[30]的研究团队把惯容器创新性地融入到了建筑隔振系统的研究当中,通过系统的理论分析方式,细致探究了刚体模型、柔性模型以及门式钢架模型的工作特性,有效验证了搭载惯容器的隔振系统,能够大幅削弱地震荷载与交通振动对建筑结构带来的不利影响,该次研究有效拓宽了惯容器在土木工程领域的应用边界,也为后续各类相关课题的深入探索积累了丰富的研究经验与参考依据。2010 年,重庆大学的姜鹏等人[31]将惯容器作为核心减振元件,开展了高架轨道桥墩支座的振动控制研究,对应的试验数据可以证明,惯容器能够大幅弱化轨道与桥墩之间的振动传递效率,切实提升了高架轨道桥梁整体的运行安全与结构稳定性能,也为惯容器在桥梁工程领域的落地应用筑牢了充足的理论与试验基础。2019 年,莊初立等人[32]针对极端地震工况,深入探究了 ISD 系统在隔震结构中的实际应用效果,该研究依托定点理论,推导出了简谐荷载作用下无阻尼单自由度体系对应的 ISD 最优参数封闭解,同时以六层隔震建筑作为实际工程案例完成了仿真验证,充分证实了相关理论公式的准确有效性;该研究一方面深化了行业对 ISD 系统抗震应用价值的认知,另一方面也为地震工程领域的结构减振实践提供了可靠的理论支撑与技术参考。

5. 结论与展望

惯容减振系统作为结构振动控制领域的新型技术,突破了传统抗震与减振方式的固有局限,为建筑、桥梁等工程结构的抗震减振设计提供了更高效、更灵活的技术路径。综合理论研究与工程应用成果可以得出,该系统在动力特性优化、振动抑制效果、工程适用性等方面均具备显著优势。

尽管惯容减振系统在理论研究和工程应用中已展现出显著优势,但其进一步发展仍面临诸多挑战,同时也蕴含着广阔的研究与创新空间。当前,惯容装置的力学模型多基于线性假设,而实际地震、强风等极端荷载作用下,结构常进入非线性响应阶段,惯容系统与非线性结构之间的耦合机理尚不清晰,现有设计方法难以准确刻画其动态行为,亟需发展适用于非线性动力分析的精细化建模理论与高效算法。

惯容减振系统凭借可灵活调控惯性、耗能效率高、不额外增加结构荷载等核心优势，在高层建筑、大跨桥梁、轨道交通、工业设备等工程领域具备广阔的应用前景。未来可进一步围绕复杂结构适配、多灾害耦合作用、参数优化算法及工程化安装工艺等方向开展深入研究，推动惯容减振技术从理论研究走向更多实际工程落地应用。

参考文献

- [1] Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., *et al.* (2008) Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*, **134**, 3-21. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:1(3))
- [2] Saaed, T.E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J. and Hedlund, H. (2015) A State-of-the-Art Review of Structural Control Systems. *Journal of Vibration and Control*, **21**, 919-937. <https://doi.org/10.1177/1077546313478294>
- [3] Soong, T.T. and Spencer, B.F. (2002) Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice. *Engineering Structures*, **24**, 243-259. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(01\)00092-x](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(01)00092-x)
- [4] Matsushita, K. and Izumi, M. (1965) Some Analyses on Mechanisms to Decrease Seismic Force Applied to Buildings. *The 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Wellington, 22 January-1 February 1965, 348-359.
- [5] 应雄, 王兆樑, 祁皓, 等. 叠层橡胶支座与抗风支座组合隔震反应分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 149-154.
- [6] Den Hartog, J.P. (1985) *Mechanical Vibrations*. Dover Publications.
- [7] Yao, J.T.P. (1972) Concept of Structural Control. *Journal of the Structural Division*, **98**, 1567-1574. <https://doi.org/10.1061/jsdeag.0003280>
- [8] Barzegar, V., Laflamme, S., Downey, A., Li, M. and Hu, C. (2020) Numerical Evaluation of a Novel Passive Variable Friction Damper for Vibration Mitigation. *Engineering Structures*, **220**, Article ID: 110920. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110920>
- [9] Ghotb, M.R. and Toopchi-Nezhad, H. (2019) A Feasibility Study on Pre-Compressed Partially Bonded Viscoelastic Dampers. *Engineering Structures*, **201**, Article ID: 109796. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109796>
- [10] Nie, J., Zhao, Z., Yuan, L., Duan, R., Shi, B. and Jin, L. (2020) An Energy Balance Active Disturbance Rejection Control for Improving Converter Stability While Maintaining Fast Dynamic Performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **35**, 11304-11309. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.2986945>
- [11] Xu, Z.D., Yang, Y. and Miao, A. (2021) Dynamic Analysis and Parameter Optimization of Pipelines with Multidimensional Vibration Isolation and Mitigation Device. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **12**, Article ID: 04020058. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000504](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000504)
- [12] Li, J. and Zhu, S. (2021) Advanced Vibration Isolation Technique Using Versatile Electromagnetic Shunt Damper with Tunable Behavior. *Engineering Structures*, **242**, Article ID: 112503. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112503>
- [13] Wang, G., Liu, Y., Li, S., Tian, Y., Zhang, N. and Cui, G. (2021) New Integrated Vehicle Stability Control of Active Front Steering and Electronic Stability Control Considering Tire Force Reserve Capability. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **70**, 2181-2195. <https://doi.org/10.1109/tvt.2021.3056560>
- [14] Qin, W., Ge, P., Liu, F. and Long, S. (2021) Adaptive Robust Control for Active Suspension Systems: Targeting Nonholonomic Reference Trajectory and Large Mismatched Uncertainty. *Nonlinear Dynamics*, **104**, 3861-3880. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06557-2>
- [15] Karami, K., Manie, S., Ghafouri, K. and Nagarajaiah, S. (2019) Nonlinear Structural Control Using Integrated DDA/ISMP and Semi-Active Tuned Mass Damper. *Engineering Structures*, **181**, 589-604. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.059>
- [16] Gutierrez Soto, M. and Adeli, H. (2019) Semi-Active Vibration Control of Smart Isolated Highway Bridge Structures Using Replicator Dynamics. *Engineering Structures*, **186**, 536-552. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.031>
- [17] Al-Fahdawi, O.A.S., Barroso, L.R. and Soares, R.W. (2019) Semi-Active Adaptive Control for Enhancing the Seismic Performance of Nonlinear Coupled Buildings with Smooth Hysteretic Behavior. *Engineering Structures*, **191**, 536-548. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.078>
- [18] dos Santos, M.B. and Coelho, H.T. (2019) Assessment of Semi-Active Friction Dampers in Auxiliary Mass Dampers' Suspension. *Engineering Structures*, **186**, 356-368. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.088>
- [19] Malik, A. and Ravishankar, J. (2018) A Hybrid Control Approach for Regulating Frequency through Demand Response. *Applied Energy*, **210**, 1347-1362. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.160>

- [20] Wei, H.L., Gu, W. and Chu, J.X. (2019) The Dynamic Power Control Technology for the High Power Lithium Battery Hybrid Rubber-Tired Gantry (RTG) Crane. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **66**, 132-140. <https://doi.org/10.1109/tie.2018.2816011>
- [21] Nagatsu, Y., Katsura, S. and Hashimoto, H. (2021) Acceleration-Based Disturbance Observer for Hybrid Control of Redundant Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **68**, 11188-11199. <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3034844>
- [22] Kawamata, S. (1973) Development of a Vibration Control System of Structures by Means of Mass Pumps. Institute of Industrial Science, University of Tokyo.
- [23] Newton, I. (1999) *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press.
- [24] Ikago, K., Saito, K. and Inoue, N. (2012) Seismic Control of Single-Degree-of-Freedom Structure Using Tuned Viscous Mass Damper. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**, 453-474. <https://doi.org/10.1002/eqe.1138>
- [25] Zhang, R.F., Zhao, Z.P., Pan, C., Ikago, K. and Xue, S. (2020) Damping Enhancement Principle of Inerter System. *Structural Control and Health Monitoring*, **27**, e2523. <https://doi.org/10.1002/stc.2523>
- [26] Swift, S.J., Smith, M.C., Glover, A.R., Papageorgiou, C., Gartner, B. and Houghton, N.E. (2013) Design and Modelling of a Fluid Inerter. *International Journal of Control*, **86**, 2035-2051. <https://doi.org/10.1080/00207179.2013.842263>
- [27] Smith, M.C. (2002) Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **47**, 1648-1662. <https://doi.org/10.1109/tac.2002.803532>
- [28] Pietrosanti, D., De Angelis, M. and Giaralis, A. (2021) Experimental Seismic Performance Assessment and Numerical Modelling of Nonlinear Inerter Vibration Absorber (IVA)-Equipped Base Isolated Structures Tested on Shaking Table. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **50**, 2732-2753. <https://doi.org/10.1002/eqe.3469>
- [29] Pradono, M.H., Iemura, H., Igarashi, A. and Kalantari, A. (2008) Application of Angular-Mass Dampers to Base-Isolated Benchmark Building. *Structural Control and Health Monitoring*, **15**, 737-745. <https://doi.org/10.1002/stc.270>
- [30] Wang, F.C., Chen, C.W., Liao, M.K., et al. (2007) Performance Analyses of Building Suspension Control with Inerters. 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, 12-14 December 2007, 3786-3791. <https://doi.org/10.1109/cdc.2007.4434186>
- [31] 姜鹏, 喻其炳, 李川, 等. 高架桥支座安装双端质量减振元件的轨道减振性能分析[J]. 铁道建筑, 2010(8): 18-21.
- [32] 莊初立, 张永山. 极端地震下惯容器-弹簧-阻尼装置对隔震结构减震效果研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 112-117.