

桁架结构振动控制技术与方法研究综述

段应昌*, 彭伟康, 李方方, 赵洁

陆军工程大学训练基地, 江苏 徐州

收稿日期: 2024年7月27日; 录用日期: 2024年8月18日; 发布日期: 2024年8月28日

摘要

文章全面综述了桁架结构振动控制技术, 包括被动控制、主动控制及主被动一体化控制方法。被动控制技术利用耗能装置如调谐质量阻尼器和粘弹性材料, 具有结构简单、可靠性高的特点。主动控制技术通过实时监测与反馈, 实现对结构振动的精确控制, 但成本较高。主被动一体化控制技术结合了主动控制的灵活性和被动控制的经济性, 展现出良好的应用潜力。并分析了不同控制技术的特点, 探讨了未来的发展方向, 为桁架结构的振动控制提供了理论依据和实践指导。

关键词

桁架结构, 被动控制, 主动控制, 主被动一体化控制

Research Review on Vibration Control Technologies and Methods for Truss Structure

Yingchang Duan*, Weikang Peng, Fangfang Li, Jie Zhao

Training Base, Army Engineering University of PLA, Xuzhou Jiangsu

Received: Jul. 27th, 2024; accepted: Aug. 18th, 2024; published: Aug. 28th, 2024

Abstracts

The paper makes a comprehensive review of vibration control technologies for truss structure, including passive control, active control and integrated active and passive control. Passive control technology uses energy dissipation devices such as tuned mass dampers and viscoelastic materials, which have the characteristics of simple structure and high reliability. Active control technology

*通讯作者。

can realize precise control of structural vibration through real-time monitoring and feedback, however, its drawback is high cost. The integrated active and passive control technology combines the flexibility of active control and the cost-effectiveness of passive control and shows good application potential. This paper also analyzes the characteristics of different control technologies and discusses the future development direction, which provides a theoretical basis and practical guidance for the vibration control of the truss structure.

Keywords

Truss Structure, Passive Control, Active Control, Integrated Active and Passive Control

Copyright © 2024 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

桁架结构广泛运用于土木工程、机械工程、航空航天工程等领域,该类结构在重量、受力、布置等方面都有自身独特的特点,是非常重要的工程结构。但是桁架结构在使用过程中的振动也是其在工程运用中需要考虑的重点问题,为使桁架结构能更安全可靠的使用,在一些重点领域必须对其振动进行控制。迄今为止,结构振动控制技术可分为三类:被动控制技术、主动控制技术和主被动一体化控制技术,本文在综述桁架结构振动控制技术和方法的基础上,具体分析这三类振动控制技术的特点,提出桁架结构振动控制的常用策略。

2. 桁架结构振动控制研究现状

2.1. 被动控制

被动控制不需要外界能量输入,可以通过有效的振动隔离来实现对钢桁架桥的振动控制[1],主要通过附加在结构上的耗能阻尼器或采用黏弹性材料构件来耗散振动能量,以达到减振的目的,被动控制具有可靠性高和控制频带宽等优点,因此在桁架结构的振动控制中应用较多。

调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)近年来被广泛应用于桥梁结构振动控制中,取得了良好的减振效果。在这一领域的研究中,学者们从多个角度进行了深入探索,包括桁架原结构的振动分析、荷载类型分析以及荷载方向分析等,研究内容如表1所示。

Table 1. Main research content of TMD

表 1. TMD 主要研究内容

TMD 研究方向	研究内容
桁架原结构分析	桁架原结构振动分析(振动频率、振动模态)
	荷载类型分析(行人、汽车、列车等)
	荷载方向分析(横向、纵向、扭转等)
TMD 优化控制	TMD 参数(质量比、频率比)
	TMD 布置方案
	TMD 的费用和阻尼器的制造难度

续表

TMD 控制目标及其效果	桥梁结构安全
	桥梁疲劳寿命
	行车/行人舒适性

在桁架梁桥的振动控制研究中,对原结构的深入了解至关重要。这包括对桥梁的振动特性(如振动频率和振动模态)以及荷载类型(如行人、汽车和列车等)、荷载方向(如横向、纵向和扭转等)的分析。针对钢桁架桥中列车振动这一关键问题,王浩等人[2]探讨了 TMD 在南京长江大桥上的应用,他们在模拟分析的基础上,研究了 TMD 对列车荷载作用下桥梁振动的控制效果,发现安装 TMD 后,桥梁在自振频率周围的宽频带内的振动得到有效控制,尤其是在列车速度较高时,效果更为显著。针对走廊式行人桥,Chen 等[3]指出,走廊式行人桥的振动频率通常与行人的步伐频率相近,容易引起结构共振。他们提出了使用 TMD 系统来减轻这种由行人引起的垂直振动;徐培蓁等[4]对 TMD 减振技术在钢桁架登机廊桥的应用和 TMD 参数进行了理论分析和现场动力实测,研究表明按其方法设置 TMD 后,登机廊桥的竖向振动得到了有效控制;尽管通常首先考虑单一方向(垂直方向)的主模态,然而,考虑到大多数桥梁结构在两个方向(横向和纵向)都有主模态,且可能面临来自这两个方向的荷载,仅关注单一方向不够充分,顾萍等[5]分析了 TMD 抑制铁路钢桁架梁桥横向振动的效果;Debnath 等[6]在他们的研究中,旨在解决由风荷载或车辆荷载引起的过度振动问题。他们提出了一种新的控制策略,旨在同时控制主要的横向、纵向和扭转模态,以实现对一般荷载条件下的稳健振动控制。设计的 TMD 系统在各种基于白噪声的一般荷载条件下展现出了卓越的性能。这些研究结果不仅丰富了桁架梁桥振动控制的理论基础,也为实际应用提供了有力的数据支持。

在桁架梁桥的振动控制研究中,TMD 优化控制分析可以分为参数(质量比、频率比)、布置方案、费用和阻尼器的制造难度等内容。杨双双等[7]将 TMD 控制技术应用于钢桁架桥梁的振动控制,对控制效果进行了仿真分析,TMD 控制能有效降低该桁架桥的振动位移响应和加速度响应,最后研究了不同质量比 TMD 的减振效果,质量比越大,TMD 控制效果越好,但减振效果增强的幅度逐渐减小;胡方健[8]采用 TMD 控制措施对空间桁架人行桥进行振动控制研究,从 TMD 布置方案和参数优化进行了分析,减振效果达到了桁架结构振动控制目标;Wang [9]运用动力有限元方法,基于简化的车-桥时变系统,对南京长江大桥的实时动力响应进行了详尽分析。综合考虑了 TMD 的控制效率、桥梁跨中的静力位移、TMD 的经济成本以及阻尼器制造的难易程度,最终确定了 TMD 的最优参数。这些研究展示了 TMD 在桁架梁桥振动控制中的多样性和灵活性,为结构工程师提供了宝贵的数据和见解,有助于在实际工程中做出更合理的决策。

在桁架梁桥的振动控制研究中,TMD 的控制目标及其效果可分为桥梁的结构安全、疲劳寿命以及行车和行人的舒适性。Pipinato 等[10]介绍了使用振动控制系统来控制现有桥梁疲劳寿命的可能性。基于动态优化分析,获取了桥梁上交通产生的应力,提出不同的 TMD 应用方案能够降低桥梁关键区域的应力水平,从而提高桥梁的整体疲劳寿命;钢桁架桥的列车振动是影响行车舒适性的关键问题之一,南京长江大桥主桥为钢桁架结构,王浩[2]等介绍了 TMD 在列车动荷载作用下,钢桁架桥振动控制中的应用,在仿真分析该桥动力特性的基础上,开展了 TMD 装置对列车荷载作用下,南京长江大桥的振动控制情况研究,结果表明安装 TMD 后,在大桥自振频率周围较宽频带内,结构振动控制效果较好,尤其在车速较高时结构减振效果更明显,列车的行车舒适性有明显改善;Chen [3]在钢结构走廊式行人桥的 TMD 减振试验中,可以发现桥面的减振率已达到 62.56%。这说明,使用 TMD 系统进行振动减是一种安全有效的方法,可以提高走廊式行人桥的结构性能和行人舒适度。

粘滞阻尼器采用黏弹性阻尼材料制作而成, 体积较小, 可与桁架杆件结合, 不占桁架结构的空
间。李东旭[11]等研究了航天器空间桁架结构采用黏弹性阻尼的控制技术, 分别从阻尼作用机理、阻尼杆最佳
配置位置、阻尼桁架结构动态特性等进行研究, 以一种桁架结构为例仿真分析了黏弹性阻尼杆件的被动
控制效果。李星[12]研究了采用粘滞阻尼器对管桁架结构在地震作用下的振动控制, 取得了很好的控制效
果。李洪发[13]采用阻尼被动控制方法对大型挠性空间桁架结构进行了振动控制, 通过仿真计算和实验室
桁架模型试验, 证明了控制方法的有效性。韩庆华等[14]研究了采用黏弹性阻尼器对大跨管桁架结构的减
振效果, 重点从减隔振结构中阻尼器布置、不同替换位置振动控制效果、减隔振结构的参数优化等方面
开展了研究, 减振效果明显。

2.2. 主动控制

结构振动的主动控制需在振动过程中实时检测振动信号, 应用一定的控制策略对控制目标主动施加
影响, 达到减振的效果。

郑凯等[15]研究了压电自适应桁架结构振动主动控制, 在设计压电主动杆件的基础上, 通过桁架结构
试验平台, 验证模糊神经网络控制模型在自适应桁架结构振动控制方面的有效性。司洪伟[16]提出了针对
大挠性航天桁架结构的主动模糊控制的理论和方法, 并进行了深入的探讨和研究。曹玉岩[17]等在建立智
能桁架结构最优振动控制模型的基础上, 研究了压电作动器的优化配置, 通过空间智能桁架结构仿真算
例验证了振动抑制效果。罗波等[18]研究了大柔性空间桁架结构的振动主动控制问题, 采用 ADC 自适应
控制器进行振动控制, 通过实验平台, 验证了振动控制的有效性。陈文英等[19]将优化设计的自动抗扰振
动控制器应用于空间智能桁架结构的主动振动控制, 振动控制效果较好, 且具有很好的适应性和鲁棒性。
许建国等[20]建立了空间桁架结构主动压电杆件的机电耦合模型, 开展了动力学建模、主动杆件优化配置
和振动主动控制仿真研究, 空间桁架结构的振动控制效果良好。曹玉岩等[21]根据有限元理论和 Hamilton
原理, 建立了智能桁架结构的动力学模型, 应用最优控制理论对桁架结构进行了振动主动控制研究, 通
过算例验证了建模过程和算法的可行性。Wu 等[22]研究了在轨组装大型空间桁架结构时的振动抑制问题,
并提出了一种分布式自适应神经网络控制方法来解决这个问题。振动得到了有效抑制, 并且闭环系统的
动态性能有所提高。基于所提出的动态模型设计的控制器具有良好的可扩展性, 并且该控制系统对外部
干扰有一定的鲁棒性, 当控制器出现故障时也有较好的容错能力。Shi 等[23]提出了一种等效力法, 来解
决使用等效梁模型进行原桁架结构控制设计中遇到的问题。主要成就是可以通过等效梁模型的控制设计
来获得作动器的控制力, 使得原桁架结构的振动得到控制。

相对被动控制而言, 主动控制方法适应性更强, 振动控制效果更好, 但结构更加复杂, 可靠性不如
被动控制高。总体而言, 主动控制更加灵活, 随着技术的发展, 主动控制在桁架结构的振动控制中
将得到更广泛的应用。

2.3. 主被动一体化控制

主被动一体化控制是将主动控制和被动控制相结合的一种控制方法, 尽管具备主动控制和被动控制
的一些优点, 但同时也存在这两种控制方法的一些缺点, 因此桁架结构振动主被动一体化控制的具体应
用实例不多。

夏兆旺等[24]基于离散元 - 有限元法的耦合仿真算法, 研究了海洋平台桁架结构振动的半主动控制,
综合分析了控制策略、控制电流、半主动颗粒参数等对其减振性能的影响。杨恺等[25]研究了轻质柔性桁
架结构振动控制的主被动电磁式动力吸振器, 主动控制算法采用 ADC 控制, 采用主动控制后, 吸振器对
共振和非共振模态的振动控制效果较好。

3. 桁架结构振动控制技术分析

研究和推广桁架结构的多种振动控制策略具有广阔的前景和深远的意义，桁架结构的振动控制技术可从结构振动控制典型动力学方程分析[26]：

$$(M + \Delta M)\ddot{y}(t) + (C + \Delta C)\dot{y}(t) + (K + \Delta K)y(t) = F(t) + \Delta F(t) \quad (1)$$

公式中 $(M + \Delta M)$ 指整个系统的总质量矩阵，其中 M 代表主结构的质量矩阵， ΔM 代表附加控制装置的质量矩阵； $(C + \Delta C)$ 指整个系统的总阻尼矩阵，其中 C 代表主结构的阻尼矩阵， ΔC 代表附加控制装置的阻尼矩阵； $(K + \Delta K)$ 指整个系统的总刚度矩阵，其中 K 代表主结构的刚度矩阵， ΔK 代表附加控制装置的刚度矩阵； $F(t)$ 指作用在主结构上的外部激励力的时间函数； $\Delta F(t)$ 指控制力的时间函数，由控制装置产生的力，其可以是主动控制下的控制力，也可以是被动控制或半主动控制装置的控制响应； $\ddot{y}(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 、 $y(t)$ 指系统的状态变量，分别表示整个系统各个自由度的加速度、速度和位移。

这个方程是一个控制理论中的标准形式，用于分析和设计振动控制系统的性能，通过改变不同的参数可实现不同的振动控制策略。通过这个方程，我们可以研究不同控制策略对系统动态响应的影响，包括主动控制、被动控制和主被动一体化控制。如减振增加阻尼作用，即改变动力学方程中的 ΔC ；调谐改变原结构的固有频率，即改变动力学方程中的 ΔM 和 ΔK ；隔振、阻振减少激励力或隔离振源，即改变动力学方程中的 $\Delta F(t)$ ；吸振附加动力吸振器，改变原结构的固有频率，即改变动力学方程中的 M 和 C 。通过改变动力学方程中的矩阵变量，我们可以分析控制系统如何影响主结构的响应，以及如何设计这个控制变量以达到最优的振动控制效果。

下面具体分析结构被动控制、主动控制和主被动一体化控制技术的特点及应用。

3.1. 结构振动被动控制技术

结构振动被动控制技术是一种不依赖于外部能源或实时反馈系统来调节结构振动响应的方法。这种控制策略主要通过结构设计或使用阻尼材料来吸收和耗散能量，以减少结构的振动。由于其不涉及复杂的电子设备或实时控制算法，被动控制方法突出其简单性、可靠性和低成本维护的特点，因而在工程实践中广泛应用。

调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)是一种常用的被动控制技术，它通过在主结构上附加一个较小的质量来减少振动。这个附加的质量通过弹簧和阻尼器与主结构相连，当主结构振动时，附加的质量会产生相反方向的运动，从而消耗能量。TMD通过共振吸收振动能量，有效降低主结构的振动水平。然而，当面对复杂的振动环境或者多自由度的结构时，单一的TMD可能不足以满足所有控制要求。在这种情况下，可以采用多频调谐质量阻尼器(Multiple Tuned Mass Dampers, MTMD)，它由多个小型TMD组成，能够覆盖更宽的频率范围，从而对系统一段频率内的振动进行控制。

粘弹性阻尼器(Viscoelastic Damper, VED)是一种结合了粘弹性材料粘性和弹性特性的阻尼器，它在结构振动时提供阻尼力。这种阻尼器的设计可以是线性的，也可以是非线性的，取决于阻尼力与速度的关系。当结构振动时，阻尼器会发生形变，材料内部的分子或原子层之间的摩擦会导致能量耗散，从而减少结构的振动幅度。粘弹性阻尼器的关键优势在于它们能在较宽的速度范围内提供有效的阻尼，使其在处理不同频率的振动时非常有效。这类阻尼器通常由高分子聚合物或复合材料制成，这些材料在受力时表现出粘性和弹性的混合行为，既能吸收能量，也能提供一定的支撑力，增加结构的稳定性。

对于桁架结构，TMD和MTMD阻尼器以及粘弹性阻尼器都可以有效应用。桁架结构由杆件组成，常见于大跨度建筑，如体育馆、桥梁和高层建筑。由于其开放式的框架设计，桁架结构容易受到风载、地震和其他动态荷载的影响，因此振动控制是设计的重要组成部分。TMD在桁架结构中尤为有效，通过

附加质量块和相应的弹簧及阻尼器来减少整体振动，特别适用于风载引起的振动。相比之下，MTMD 能提供更好的控制效果，尤其是对于多自由度的桁架结构，MTMD 可以同时针对桁架结构的多个频率进行工作。此外，粘弹性阻尼器可以安装在桁架结构的关键节点或梁柱连接处，利用材料的粘性和弹性特性吸收和耗散能量，减少振动。这些阻尼器可以根据桁架结构的具体需求设计成不同的形状和尺寸。

3.2. 结构振动主动控制技术

结构振动控制中主动控制是一种利用传感器监测结构响应，并通过作动器施加反向力来抵消或减轻有害振动影响的技术。与被动控制不同，主动控制依赖于外部能源和实时反馈系统来调节结构的振动响应。这种方法通过预测和响应结构的动态行为，可以有效地控制多种频率和类型的振动，提供比被动控制更为精细和灵活的振动管理。主动控制系统的典型组件包括传感器、控制器和作动器。传感器监测结构的振动状态，控制器根据这些信息计算出所需的控制力，并通过作动器实施这些力来改变结构的动力学响应。

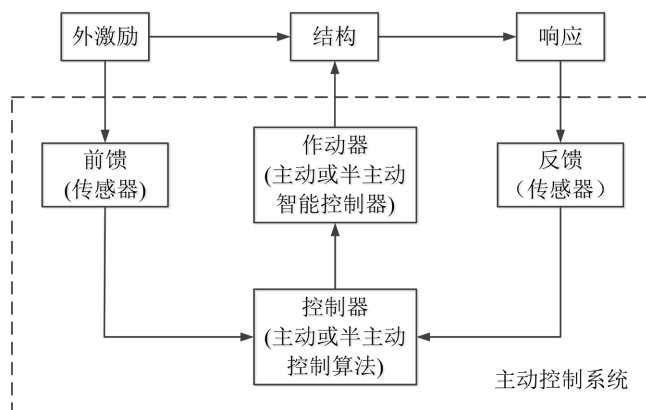


Figure 1. Active control process of structure
图 1. 结构主动控制过程

结构主动控制的控制过程是一个动态循环，涉及传感器、控制器和作动器的协同工作。首先，传感器实时监测结构的振动状态，如加速度、位移或应变，并将这些物理量转换为电信号。这些信号随后被送入控制器进行分析。控制器内嵌有算法，用于评估结构的振动状态并决定是否需要采取控制措施。如果检测到过度振动，控制器会计算出必要的控制力或运动，并将其作为指令发送给作动器。作动器根据这些指令执行动作，如施加反相力或调整结构的刚度和阻尼特性，以减少或消除振动。之后，传感器继续监测结构的状态，评估控制动作的效果。如果结构仍有振动，控制过程将持续进行，直到振动水平降至可接受的范围内。这是一个连续的循环，确保结构始终处于受控状态，能够快速响应并适应不断变化的环境和载荷条件，结构主动控制的循环控制原理如图 1 所示。

主动控制方法的优势在于其高度的灵活性和精确性，但也带来了更高的复杂性和成本，因为需要持续的能量供应和复杂的控制系统。尽管如此，主动控制在需要精确振动控制的场合，如精密仪器、卫星和高层建筑中，仍然是不可或缺的。

对于桁架结构，智能桁架结构是一种集成了传感器、作动器和智能材料的先进工程结构，它能够实时监测自身的状态并做出响应。在智能桁架结构中，传感器用于捕捉结构的位移、应力和振动等关键参数[27]。这些数据被送到中央处理单元进行分析，以评估结构当前的性能和潜在的风险。根据分析结果，控制系统计算出必要的调整策略，并通过作动器实施，比如改变桁架的刚度或阻尼，或者利用智能材料

改变结构的物理特性。作动器的操作使桁架能够主动适应外部载荷和内部应力的变化,从而保持结构的最佳性能。此外,控制系统形成闭环反馈,持续监控并调整桁架的行为,确保结构始终保持在最佳状态。这种主动控制机制使得智能桁架结构能够自我调节,有效提升结构的安全性和耐久性。

3.3. 结构振动主被动一体化控制技术

结构振动主被动一体化调控策略乃是一种综合性的控制方案,旨在通过整合主动控制与被动控制技术,实现振动控制的效能最大化、可靠性增强以及经济效益优化。根据它们结合的方式,主被动一体化控制技术可以分为两种类型:组合控制和半主动控制[28]。

组合控制指在单一系统中同步采用主动控制与被动控制的方法。主动控制部分透过传感器、控制器及作动器对结构的响应进行实时监测与调整;被动控制则依托于结构设计及材料特性自然地吸收与阻尼振动。组合控制策略的核心宗旨在于,在同一系统架构内融合两种控制手段,以达到更全面的振动抑制。在组合控制系统的设计阶段,主动控制组件与被动控制组件需独立优化,以确保两者能在系统中同时存在并协同运作。

半主动控制则是指在缺乏显著外部能量供给条件下,通过调整结构本身特性或利用环境能量来减轻或控制结构振动的一种控制途径。半主动控制方法利用某些材料的智能特性或装置的固有属性,通过参数调节实现减震,仅需微小能量驱动控制电子元件,从而结合了主动控制与被动控制的优势。这不仅实现了对结构振动的有效控制,也避免了主动控制所需的高额能量投入,同时克服了被动控制调谐带宽受限的局限。

对于桁架结构来说,主被动一体化控制可以通过多种方式实现,以提高其抗震性能和承载能力。首先,组合控制可以通过在关键节点处设置主动控制装置和被动控制装置(如阻尼器)来实现,这种结合可以提高结构的整体稳定性和耐久性。其次,半主动控制可以通过使用可调节阻尼器来实现,例如磁流变阻尼器(Magneto-Rheological Damper, MRD),这类阻尼器可以根据结构的振动响应调整阻尼力。在没有外部能量输入的情况下,它们可以提供类似于被动阻尼器的效果,而在必要时,可以通过少量的能量调整阻尼特性,以更好地适应结构的需求。此外,还可以利用智能材料,如形状记忆合金(SMA)和压电材料,它们能够在受到外部激励时改变自身特性,从而提供额外的阻尼或支撑力。这些材料可以嵌入到桁架结构的关键部位,以实现局部或全局的振动控制。

4. 结论

本文综述了桁架结构振动控制技术的研究现状与发展,重点分析了被动控制、主动控制以及主被动一体化控制技术的特点与应用。被动控制技术以其高可靠性和宽频带控制优势在工程中得到广泛应用,尤其是调谐质量阻尼器(TMD)在桥梁等结构中的减振效果显著。主动控制技术则通过实时反馈系统实现更为精细的振动管理,尽管成本较高,但其适应性和控制效果优异,尤其适用于对振动控制要求严格的场合。主被动一体化控制技术结合了两者的优点,提供了更为全面和经济的振动解决方案。未来,随着智能材料和控制算法的发展,主被动一体化控制技术有望在桁架结构振动控制领域得到更广泛的应用,进一步提升结构的安全性和耐久性。

参考文献

- [1] Liang, L., Li, X., Yin, J., *et al.* (2019) Vibration Characteristics of Damping Pad Floating Slab on the Long-Span Steel Truss Cable-Stayed Bridge in Urban Rail Transit. *Engineering Structures*, **191**, 92-103. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.032>
- [2] 王浩, 刘海红, 陶天友, 等. TMD 对列车作用下大跨钢桁架桥的振动控制研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(3):

- 385-391.
- [3] Chen, Z., Chen, Z.H., Li, G.J., *et al.* (2022) Dynamic Response Analysis and Vibration Reduction of Steel Truss Corridor Pedestrian Bridge under Pedestrian Load. *Frontiers in Materials*, **9**, Article ID: 839265. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.839265>
- [4] 徐培蓁, 尹学军, 高星亮, 等. TMD 振动控制在登机廊桥上的应用研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 192-198.
- [5] 顾萍, 王淼, 吴定俊, 等. TMD 抑制既有铁路钢桁梁桥横向振动研究[J]. 铁道学报, 2005, 2(27): 85-89.
- [6] Debnath, N., Deb, S. and Dutta, A. (2016) Multi-Modal Vibration Control of Truss Bridges with Tuned Mass Dampers under General Loading. *Journal of Vibration and Control*, **22**, 4121-4140. <https://doi.org/10.1177/1077546315571172>
- [7] 杨双双, 王建平, 赵志波, 等. 基于调谐质量阻尼器的装配式钢桁桥振动控制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(8): 50-53.
- [8] 胡方健. 多变空间连续桁架人行景观桥振动控制研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(5): 93-96.
- [9] Wang, H., Tao, T., Cheng, H., *et al.* (2014) Simulation Study on Train-Induced Vibration Control of a Long-Span Steel Truss Girder Bridge by Tuned Mass Dampers. *Mathematical Problems in Engineering*, **2014**, Article ID: 506578. <https://doi.org/10.1155/2014/506578>
- [10] Pipinato, A. (2019) Extending the Fatigue Life of Steel Truss Bridges with Tuned Mass Damper Systems. *Advances in Civil Engineering*, **2019**, Article ID: 5409013. <https://doi.org/10.1155/2019/5409013>
- [11] 李东旭, 刘望, 蒋建平. 空间桁架结构采用黏弹性阻尼的振动控制技术[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(4): 46-50.
- [12] 李星. 大跨度屋盖管桁架结构在地震作用下的振动控制[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [13] 李洪发. 大型挠性空间桁架的力学性能分析及被动振动控制研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [14] 韩庆华, 陶轶洋, 刘铭劼. 大跨立体管桁架三维振动控制分析[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(5): 52-66.
- [15] 郑凯, 陈杰, 杨义勇. 压电自适应桁架结构智能振动控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 943-947.
- [16] 司洪伟. 大挠性航天桁架结构动力学建模及其主动模糊控制研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [17] 曹玉岩, 付世欣, 王鸣浩. 压电智能桁架结构的建模与最优振动控制[J]. 压电与声光, 2014, 36(4): 523-526.
- [18] 罗波, 李伟鹏, 黄海. 基于 Stewart 平台的大柔性空间桁架结构振动控制[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23): 148-153.
- [19] 陈文英, 褚福磊, 阎绍泽. 基于自适应遗传算法分步优化设计智能桁架结构自抗扰振动控制器[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 74-81.
- [20] 许建国, 邹康, 张静静, 等. 空间桁架结构的优化配置及振动控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 67-70.
- [21] 曹玉岩, 王志臣, 付世欣, 等. 智能桁架结构最优振动控制与作动器优化配置[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 26-32.
- [22] Wu, S. and Zhou, W.Y. (2023) Vibration Control for Large Space Truss Structure Assembly Using a Distributed Adaptive Neural Network Approach. *Acta Astronautica*, **212**, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.034>
- [23] Shi, J., Liu, X., Cai, G.-P., *et al.* (2023) Active Control of Large Space Antenna Truss Structures Using the Equivalent Beam Model. *Acta Mechanica Sinica*, **39**, Article ID: 522475. <https://doi.org/10.1007/s10409-023-22475-x>
- [24] 夏兆旺, 茅凯杰, 王雪涛, 等. 海洋平台桁架结构半主动颗粒阻尼减振技术研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 93-98.
- [25] 杨恺, 崔龙, 黄海. 主被动电磁式动力吸振器及其在桁架振动控制中的应用[J]. 振动与冲击, 2012, 31(18): 14-19.
- [26] 段应昌等. 轴向运动梁动力学及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2019.
- [27] 陈志军. 高速铁路桥梁动力学问题分析及控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [28] 段瑶瑶. 智能桁架结构模糊控制系统建模及优化[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.