

振动抑制与能量俘获专刊序*

邹鸿翔^{1†} 周生喜² 魏克湘¹

(1. 湖南省汽车动力与传动系统重点实验室,湘潭 411104)

(2. 西北工业大学 航空学院,西安 710129)

摘要 围绕动力学与控制一般性理论、动力学控制方法、振动能量俘获系统动力学设计方法、复杂系统动力学特性等,本专刊介绍了振动抑制与能量俘获领域的一些研究成果。

关键词 动力学控制, 振动能量俘获, 动力学分析

中图分类号:TH13.1

文献标志码:A

Preface of Special Issue on Vibration Suppression and Energy Harvesting*

Zou Hongxiang^{1†} Zhou Shengxi² Wei Kexiang¹

(1. Hunan Province Key Laboratory of Automotive Power and Transmission System,

Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Focusing on the research themes of general theory of dynamics and control, dynamics control methods, dynamics design methods for vibration energy harvesting, and dynamics characterization of complex systems, this special issue introduces some research results in the field of vibration suppression and energy harvesting.

Key words dynamics control, vibration energy harvesting, dynamic analysis

引言

振动是自然界最普遍的现象之一,在很多情况下,振动被认为是有害的,超过一定限度的振动会对设备造成损害,导致设备性能下降或发生故障;同时振动又能为人们所用,转化为其他形式的可用能量,实现自供能传感等^[1-3].因此,研究人员在处理振动问题时也根据其两面性进行考虑:一方面削弱振动的不利影响,通过振动抑制技术降低宿主结构的振动幅值;另一方面合理利用振动,通过振动

能量俘获技术,将环境振动能量转换为可用能量,并存储起来供低功耗电子设备使用.近年来,这两个方向的研究已成为工程技术领域的研究热点.开展振动抑制与能量俘获基础理论研究^[4]、关键共性技术研发^[5]、装备系统研制与集成应用^[6],不仅能够为我国高端智能化装备研制提供新的理论和技术支撑,而且将助力国家“双碳”目标的实现,具有重要战略意义.为了及时总结和传播振动抑制与能量俘获领域的新理念、新成果和新实践,促进动力学与控制领域科技创新,特组织出版“振动抑制与

2023-09-23 收到第 1 稿,2023-11-28 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(12172127)和湖南省教育厅重点项目(21A0463),National Natural Science Foundation of China (12172127) and Key Project of Hunan Provincial Education Department (21A0463).

† 通信作者 E-mail:zouhongxiang@163.com

能量俘获”专刊,共包括9篇论文(含1篇综述论文),涉及动力学与控制一般性理论、动力学控制方法、振动能量俘获系统动力学设计方法、复杂系统动力学特性等。

西南石油大学赵翔等的《梁的强迫振动问题 Green 函数解及应用研究综述》阐述了 Green 函数在梁的强迫振动、热力耦合振动、机电耦合振动、裂纹梁振动等研究问题上取得的大量理论和工程研究成果,以裂纹为内因,热、力、电为外因进行分类,阐述了在内外因影响下梁的强迫振动问题 Green 函数解的研究现状,从而让读者进一步系统地了解 Green 函数法在振动领域中的广泛应用,以及了解该方法本身的特色和优势奠定基础。

上海交通大学刘丰瑞等的《基于深度强化学习的动基座双自由度系统动力学控制方法》基于 Soft Actor-Critic 强化学习框架,构建了同时实现振动控制与基座运动跟随的智能算法,研究了宽频域范围内含有硬边界约束的动基座双自由度系统的动力学控制效果,通过构建包含相对位移、控制力的复合奖励函数,实现动力学系统精度较高的轨迹跟踪与振动抑制。结果表明,该算法可以实现频率范围跨2个数量级(0.01 Hz到1 Hz)的有效振动控制,并通过与PID控制方法的比较,展现了该方法在复杂环境中的稳定性与泛化性。

湖南工程学院廖思华等的《摩擦-电磁复合式能量回收带设计与动力学分析》设计了一种摩擦-电磁复合式能量回收带(Hybrid Triboelectric-Electromagnetic Energy Harvesting Bump, HTEEB)主要由电磁发电单元和摩擦发电单元组成,电磁发电单元磁体线圈交错排列,以提高空间利用率和增加功率密度;摩擦电单元采用改性聚二甲基硅氧烷复合材料组装的折叠结构,可显著提高输出功率。通过磁力和弹性体的双重作用力进行复位,可避免传统弹簧复位需要精密导向机构的缺点。基于HTEEB工作原理,建立机电耦合动力学模型并进行试验验证,证明了磁力复位的有效性。试验结果表明,在激励频率为5 Hz,受力为15 N时,左右两侧摩擦发电单元产生的最大平均功率分别为 $353.1 \mu\text{W}$ 和 $360 \mu\text{W}$,电磁发电产生的平均功率为 $6.67 \mu\text{W}$ 。该装置收集车辆滚动能量,可为交通环境中的小型器件提供可持续的绿色无碳动力。

长沙理工大学肖俊等的《滑动式磁力耦合车路能量收集装置设计、建模与实验》提出了一种磁力耦合的滑动式车路能量收集装置(Magnetic-coupled Sliding Vehicle-road Energy Harvesting device, MSVEH)收集行驶车辆产生的机械能。能量收集装置与路面平齐,在收集能量的同时能有效地减少冲击对车辆行驶过程的影响。磁力耦合驱动方式可以实现非接触运动传递,从而将动密封转换为静密封,全密封设计理念有助于提高装置可靠性。滑动部件在车轮的双向激励下产生水平运动,通过磁力将运动传递到发电单元引起磁铁盘与线圈的相对运动从而发电。使用了单向轴承和换向齿轮联合设计实现装置在复杂交通环境自适应,适应车轮的双向激励并输出单向旋转运动。建立了永磁体间磁力的数学公式并进行了计算,得到了磁力曲线。建立了系统的动力学模型研究系统电学特征,探究了在外接负载下的滑动位移和激励频率参数对电学输出的影响。结果表明,滑动位移对装置输出性能影响显著,在负载电阻 60Ω ,位移 20 mm 和频率 5.0 Hz 时,峰值电压和峰值功率分别为 10.2 V 和 1.734 W 。

长沙理工大学常思登等的《柔顺车路能量采集减速带设计与动力学建模》提出一种柔顺车路能量采集减速带(Flexible vehicle-road energy harvesting bump, FVEHB),用于采集车辆在行驶过程中耗散的机械能,为智能交通系统中的微小型机电系统提供可持续的清洁能源,有益于交通系统朝着更加智能化、多功能化和绿色化的方向发展。通过柔顺变形及柔性线驱动松弛一张紧过滤车辆滚压激励伴随的强冲击且保留较大的驱动力,柔顺变形及柔性线驱动可以容错制造误差和不确定形变,破解车路能量采集强冲击难题;通过升频机制、双向驱动提高机电转换效率。基于FVEHB的工作原理建立机电耦合动力学模型并进行了实验验证,研究不同激励下FVEHB的电学响应。实验结果表明,激励频率为 5 Hz 时外接负载 29Ω 的峰值电压和峰值功率分别为 5.81 V 和 1.16 W 。探索了自供能交通环境监测及自供能交通管控等应用,验证了FVEHB有潜力为交通系统中的微小型机电系统提供可持续、便捷的清洁能源。

西北工业大学马小青等的《三稳态风致振动能量俘获系统分析》研究了非线性三稳态风致振动能

量俘获系统的输出特性,并建立了动力学模型,对比分析了具有对称和非对称势能阱的三稳态风致振动能量俘获系统输出特性.分析结果表明,具有非对称势能阱的三稳态风致振动能量俘获系统初始工作风速较低,实现大振幅振荡的工作风速区间较宽.此外,分析了系统在不同外接电阻、等效质量和等效刚度线性项条件下的输出特性,通过分析发现,在定风速条件下,系统的输出电压随着外接电阻的增加而增加,当外接电阻大于 $10\text{ M}\Omega$ 时,输出电压的变化趋于平缓.最后,通过分析发现系统的等效质量和等效刚度线性项会对系统初始工作风速和有效工作风速区间产生影响.

西北工业大学张莹等的《双不确定参数作用下双稳态能量采集系统的随机响应分析》针对具有双不确定参数的双稳态能量采集系统,首先,利用 Routh-Hurwitz 定理分析了确定性双稳态系统平衡点的稳定性及其静态分岔特性;继而,借助正交多项式逼近法,将具有两个相互独立的不确定机电耦合系数的随机双稳态系统转化为等价确定性扩阶系统,使系统的随机响应问题转换为等价系统的响应问题;之后,从全局和局部两个角度出发,通过等价系统与确定性系统吸引子、吸引域、相轨、均方电压以及能量转化率的对比,揭示了不确定参数对系统动力学行为和发电性能的影响.结果表明,在一些敏感的参数区间内,两机电耦合系数的不确定性均会导致系统运动状态发生变化,且不确定参数强度越大,系统会越早通过倍周期分岔级联进入混沌状态;此外,在两机电耦合系数的不确定性作用下,系统均方电压均会出现一定程度的降低;且与电方程中机电耦合系数相比,机械方程中机电耦合系数对系统的影响更显著,当两不确定参数共同作用时,系统的能量采集性能变化更显著.

西安电子科技大学许苗莉等的《色噪声激励下一类驱振能量采集器的稳态响应研究》使用具有指数相关性的色噪声近似外界环境干扰,研究色噪声激励下驱振能量采集器(GEH)的稳态响应.首先,介绍了系统的理论机电耦合运动方程,并对其进行无量纲化处理.其次,通过广义谐波变换对方程进行等效解耦,然后使用能量包线随机平均法得到系统稳态响应的解析解.最后,使用四阶龙格库塔算法进行数值模拟,在验证解析解有效性的同时分析了风速、色噪声参数对系统稳态响应的影响.研究

结果表明,较大的噪声强度有利于提升系统的能量采集性能,且在风速较低时效果更明显;噪声相关时间对系统稳态响应的影响与噪声强度相反.当系统的振动模式由风激励主导时,系统的响应表现为带有附加噪声的周期性振动;随着风速增加,增强的风激励削弱了色噪声激励对系统稳态响应的影响.此外,本文还研究了系统结构参数和电气参数对平均输出功率的影响,研究结果为优化系统设计提供了有效的理论指导.

西安理工大学杜进辅等的《纯电动汽车高速齿轮传动全工况抑振修形方法》提出一种计及负载扭矩和转速工况影响的齿面修形方法.考虑时变啮合刚度、啮合冲击、齿面摩擦激励,建立了系统动力学分析模型.结合轮齿几何接触分析和承载接触分析,采用遗传算法优化获得全工况最优的齿廓、齿向抛物线修形系数,并对比分析了不同修形方案的抑振效果.结果表明:计及工况影响的齿面修形在全工况下的振动加速度均方根都保持在较低水平,说明这一齿面修形策略具有更好的全局抑振效果.

振动抑制与能量俘获的研究内涵和应用领域非常丰富和广泛.受篇幅所限,本专刊所收录的论文只是某些特定研究方向上的代表性工作进行展示.

参考文献

- [1] ZHAO L C, ZOU H X, WEI K X, et al. Mechanical intelligent energy harvesting: from methodology to applications [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(29): 2300557.
- [2] 张文明, 赵林川, 邹鸿翔. 振动能量采集与振动控制序 [J]. *力学学报*, 2023, 55(10): 2091—2093.
ZHANG W M, ZHAO L C, ZOU H X. Preface of theme articles on vibration energy harvesting and vibration control [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(10): 2091—2093. (in Chinese)
- [3] 绳丽洁, 王军雷. 流致振动压电能量俘获的研究进展 [J]. *动力学与控制学报*, 2022, 20(4): 12—23.
SHEN L J, WANG J L. Research progress on piezoelectric energy capture in flow induced vibration [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2022, 20(4): 12—23. (in Chinese)
- [4] 曹东兴, 孙培峰, 姚明辉, 等. 双稳态屈曲梁压电发

- 电结构非线性动力学分析 [J]. 动力学与控制学报, 2016, 14(6): 520—525
- CAO D X, SUN P F, YAO M H, et al. Nonlinear dynamics of bistable buckled beam piezoelectric harvesters [J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14(6): 520—525. (in Chinese)
- [5] 石朝成, 李响, 袁天辰, 等. 双梁磁力压电振动能量采集器的实验和仿真 [J]. 动力学与控制学报, 2017, 15(1): 68—74.
- SHI C C, LI X, YUAN T C, et al. Experimental and numerical research on a double-beam magnetic vibration piezoelectric energy harvester [J]. Journal of Dynamics and Control, 2017, 15(1): 68—74. (in Chinese)
- [6] 邹鸿翔, 李猛, 赵林川, 等. 抗冲击车路能量收集减速带设计与自供能交通管控 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 72—82.
- ZOU H X, LI M, ZHAO L C, et al. Design of anti-impact vehicle-road energy harvesting bump and self-powered traffic control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 72—82. (in Chinese)