

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108501

交通环境能量采集及自供能交通设施 健康状态监测研究进展*

杜荣华¹, 朱胜亿¹, 魏克湘², 张文明³, 邹鸿翔^{1,2}

(1. 长沙理工大学汽车与机械工程学院 长沙 410114; 2. 湖南工程学院汽车动力与传动系统湖南省重点实验室
湘潭 411104; 3. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘 要:从交通环境中采集能量为交通设施健康状态监测供电, 不仅便捷、可持续, 而且零碳环保, 有益于我国“双碳”目标实现。目前关于交通环境能量采集、交通设施健康状态监测的研究有很多, 但是还未见从自供能交通设施健康状态监测角度综述、总结和提炼的报道。本文概述了交通环境能量源及机电转换机制, 阐述了交通设施健康状态监测的基本内容和研究进展, 强调交通环境能量采集是解决交通设施健康状态监测供电问题的潜在方案, 重点论述了交通环境能量采集方法及交通设施健康状态监测中的应用, 探讨了自供能交通设施健康状态监测面临的挑战并进行了展望。

关键词: 车路能量采集; 状态监测; 自供能传感; 交通设施

中图分类号: TH702 TK05 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Research progress of energy harvesting in transportation environment and self-powered transportation infrastructure health monitoring

Du Ronghua¹, Zhu Shengyi¹, Wei Kexiang², Zhang Wenming³, Zou Hongxiang^{1,2}

(1. College of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Automotive Power and Transmission System, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104,
China; 3. State Key Laboratory of Mechanical Systems and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Harvesting energy from the transportation environment to monitor the health status of transportation infrastructure is not only convenient and sustainable, but also zero-carbon and environmentally friendly. It is beneficial to the realization of China's "dual carbon" goal. At present, there are many researches on energy harvesting of transportation environment and health monitoring of transportation infrastructure. However, there are no reports that summarize and refine the self-powered transportation infrastructure health monitoring technologies. This article outlines the energy source and electromechanical conversion mechanisms of transportation environment, elaborates the basic content and research progress of the health state monitoring of traffic infrastructure, and emphasizes that energy harvesting of transportation environment is a potential solution to the problem of power supply for transportation infrastructure health monitoring. The detailed discussions include the energy harvesting technologies in transportation environments and the applications of self-powered transportation infrastructure health monitoring, and the challenges and prospects of self-powered transportation infrastructure health monitoring.

Keywords: vehicle road energy harvesting; condition monitoring; self-powered sensing; transportation infrastructure

0 引 言

自从改革开放以来, 国家大力发展交通系统。截至 2020 年, 中国的公路总里程超过 500 万公里^[1], 铁路运营里

程超过 14 万公里^[2], 均位居世界第一^[3]。在 21 世纪的今天, 中国已经成为世界上的交通大国。但因为恶劣环境、过载和长期负载, 交通设施会出现不同程度的损坏, 影响车辆行驶效率和安全, 严重情况下还会引发伤亡事故^[4-8]。因此, 对交通设施进行健康状态监测具有重要意义。

收稿日期: 2021-08-31 Received Date: 2021-08-31

* 基金项目: 国家自然科学基金(61973047)、湖南创新型省份建设专项(2020JJ3019, 2019RS2044)项目资助

交通设施健康状态监测依靠传感器获取原始状态信息^[9-10]。一般传感器的功能单一,交通设施健康状态监测往往需要大量不同种类的传感器协同工作^[11]。比如安装应力传感器和温湿度传感器,分别获取交通设施的应力^[12]和温湿度信息^[13]。有线传感器通常依靠电缆提供能量和传输数据,存在布线繁琐和需要建设电力基础设施的问题。无线传感器通过电池供电,但电池寿命有限,更换维护困难。因此,迫切需要开发先进的能量技术来保障交通设施健康状态监测的供电需求^[14-16]。交通环境存在着丰富能源,包括风能、机械能、太阳能、热能等^[17-21]。采集这些交通环境中的能量可以“就地即用”为交通设施健康状态监测设备便捷和可持续的供电^[22-27]。此外,随着能源和环境问题愈加严峻,我国提出了“双碳”目标,是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策,事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。采集交通环境能量解决交通设施供能需求是一种绿色零碳电力技术,可以

减少化石燃料的使用,保护生态环境,有益于我国“双碳”目标实现。

目前关于交通环境能量采集、交通设施健康状态监测的研究有很多,但是还未见从自供能交通设施健康状态监测角度综述、总结和提炼的报道。本综述旨在梳理、论述近年来交通环境能量采集技术及自供能交通设施健康状态监测研究进展。

1 交通环境能量源及能量转换机理

交通环境中的主要能源是太阳能和机械能,表现为太阳辐射、地面温差、轨道振动、路面振动、车辆振动、车辆对地面的载荷、车辆对地面的摩擦等形式^[28]。因此,可以利用不同能量转换机制将这些分散能量转化为电能。能量采集技术是一种绿色零碳电力技术,已成为国内外研究热点^[29]。图 1 是面向交通设施健康状态监测的交通环境能量采集示意图。

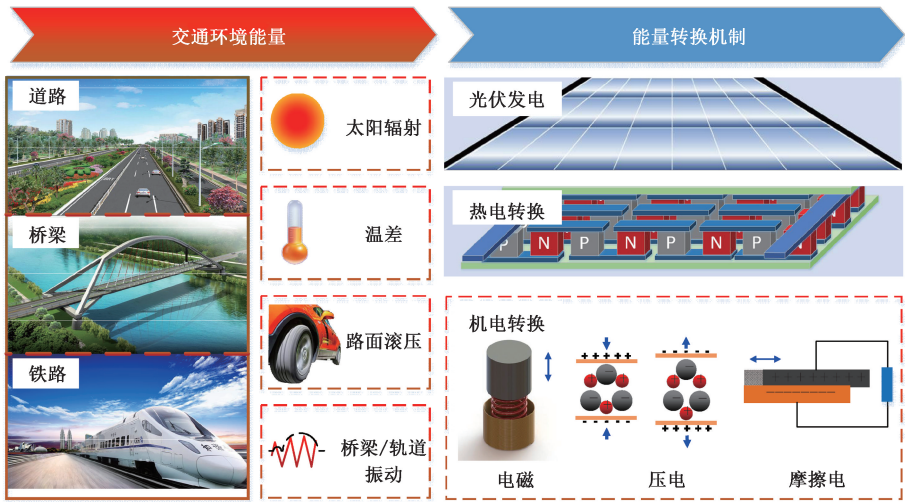


图 1 交通环境能量采集
Fig. 1 Energy harvesting in traffic environment

1.1 太阳能及转换机理

太阳能作为一种关键的可再生能源,其太阳辐射可以通过光伏或热电技术转化为电能。

光伏(photovoltaic, PV)。通过光伏效应,PV 电池可以直接将太阳辐射转换为电能。每个电池中有两种类型的半导体材料层:N 型和 P 型半导体,如图 2 所示。PV 电池在受到太阳辐射的激励后,正负电子分别朝 P 型和 N 型半导体移动,形成自由流动的电子流。在外部电路的连接下,产生电能^[30-31]。热电发电机(thermoelectric generator, TEG)。交通环境在太阳辐射、摩擦、燃料燃烧等作用下,温度会上升,不同深度或部位会出现热梯度。TEG 模块由两个平行的 N 型和 P 型材料组成,根据

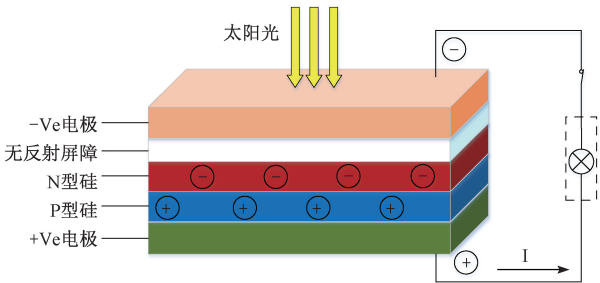


图 2 光伏效应
Fig. 2 Photovoltaic effect

Seebeck 原理(如图3所示)存在温差时,电荷会从结构内部的一侧移动到另一侧并产生电势,当它连接到外部电路时,可以采集热电材料转换的电能^[32-33]。

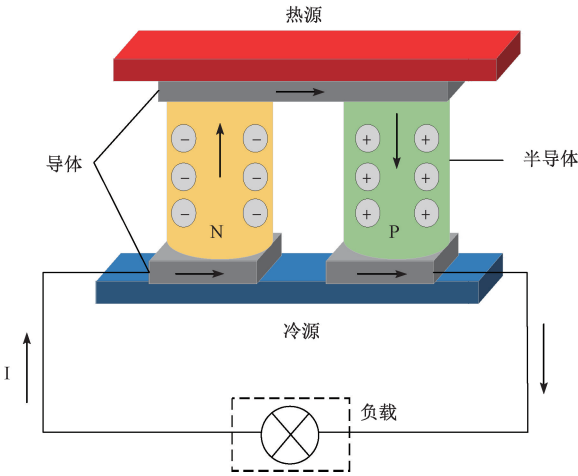


图3 Seebeck 原理
Fig. 3 Seebeck principle

PV 和 TEG 都可用于交通环境的能量采集^[30]。它们的技术相对成熟,易于与电磁、压电、摩擦电等其他技术相结合,从而设计出多种机制混合的能量采集装置。但 PV 和 TEG 也存在着一些不足,比如制造和维护成本高、能量密度相比电磁能量采集低、输出功率受环境气候影响等^[34-36]。考虑到这些因素,PV 板和 TEG 适合与机械能量采集装置一起复合使用。

1.2 机械能及机电转换机理

1) 机械能源

交通环境中存在着丰富的机械能,它们可以分为3个方面:(1)交通环境中的自然能源。比如风能和热能^[37]。(2)交通工具行驶时产生的机械能。比如车轮旋转、车辆制动、轮毂轮胎相互挤压和车辆悬架系统振动所产生的能量^[38-39]。(3)交通设施结构受到外部激励而产生的机械能。比如列车对铁轨的冲击、车辆对地面的滚压和风浪作用桥梁所产生的能量^[40]。

交通系统在国民经济发展中发挥着重要作用,随着智慧交通技术的发展和越来越严峻的能源环境问题,将零碳环保的能量采集技术与智能交通系统相结合的需求会更加强烈^[41-42]。

2) 电磁感应

1831年,法拉第发现了电磁感应现象,即闭合线圈在磁场中做切割磁感应线的相对运动,线圈会产生感应电流,如图4所示。由麦克斯韦-法拉第方程(如式(1)所示),法拉第推广出了电磁感应定律方程(如式(2)所示)^[43-45]。磁通量变化使闭合线圈产生感应电动势,洛伦兹力和静电力的共同作用使电荷发生移动。遵循这一原理,实现了动能到电能的转换。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}$ 是电场; $\mathbf{B}$ 是磁场; t 是时间; n 为线圈匝数; $\Delta \Phi$ 为磁通量变化量; Δt 为发生变化所用时间。

由公式可知,线圈匝数和切割磁感线速度会影响感应电动势。而 Zhou 等^[46]对装置的内部电能损耗进行了一个研究,发现内部损耗对输入带宽有着显著的影响。因此,永磁体线圈的材料属性、结构尺寸等因素也是设计时要考虑的重要方面,电磁的耦合设计与装置的输出功率密切相关^[47-49]。

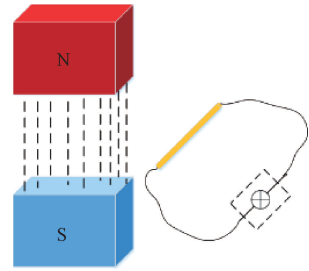


图4 电磁感应原理
Fig. 4 Principle of electromagnetic induction

电磁式能量采集器(electromagnetic energy harvester, EMEH)利用电磁感应原理进行发电,它输出电压较低,但电流和输出功率较高,可以达到百瓦^[50],这个功率足以道路路灯、监控探头和传感器等设备供电。此外,EMEH 的维护成本低,适应能力强,是交通环境能量采集的重要方法之一^[51-52]。

3) 压电效应

1880年,皮埃尔·居里和雅克·居里兄弟首次发现了压电效应。其分为正压电效应和逆压电效应,如图5所示。正压电效应是指对压电介质施加一个力,使电偶极矩受压变短,在材料表面产生数量相同的相反电荷,这个过程中机械能转换为电能。逆压电效应是指,对压电介质施加一个电场,电偶极矩沿电场方向伸长,这个过程中电能转换为机械能^[53-54]。

正压电和逆压电效应由下面的式(3)推导^[55]:

$$\begin{pmatrix} \delta \\ \mathbf{D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s^E & d^T \\ d & \epsilon^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma \\ E \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: δ 和 $\mathbf{D}$ 代表应变和位移; s 、 d 和 ϵ 分别是弹性柔量、压电系数和介电常数;上标 E 和 T 表示在恒定电场和应力下计算出的常数;上标 t 代表转置; σ 和 E 指的是应力分量和电场分量。

从公式中可以发现电场强度、应力激励、相对位移等因素都会对压电效应产生影响。不同压电材料的参数不

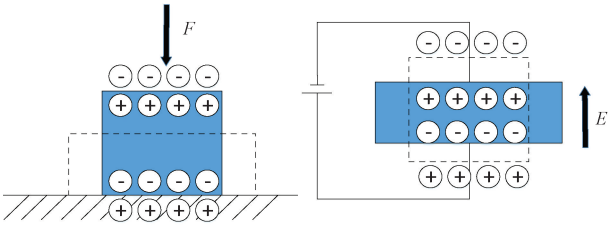


图 5 正压电效应和逆压电效应
Fig. 5 Positive piezoelectric effect and inverse piezoelectric effect

同,激励响应也不相同。常见的压电材料包括有机材料、无机材料和复合材料^[56-58],其中使用较多的压电陶瓷属于无机材料,能量转换率相对较高^[59]。

压电能量采集器 (piezoelectric energy harvester, PEH) 是目前在结构监测中应用最多的自供能方式,容易集成为压电传感器。其具有设计灵活、结构简单、输出电

压较高的优点^[30]。但常用的压电陶瓷比较脆,需通过结构的设计提高其鲁棒性和可靠性;压电能量采集器很适合嵌入到结构内部,采集和传输结构内部的波信号,实时有效的反映结构的健康状态情况^[60]。

4) 摩擦起电效应和静电感应

从生活中可以发现,丝绸摩擦过的玻璃棒带正电,毛皮摩擦过的橡胶棒带负电。这是因为不同材料对分子的束缚能力不一样,产生了摩擦电。进一步的,若带正负电荷的两电极板发生相对位移,会因为静电感应产生感应电流。2012 年,王中林团队发明了纳米摩擦发电机 (tribo-electric nanogenerator, TENG)^[61],TENG 结合了摩擦起电效应和静电感应两个原理^[62]。目前 TENG 主要包括垂直接触分离模式、横向滑动模式、单电极模式和独立层模式 4 种^[63-64],如图 6 所示。其中,王中林团队的 Wu 等^[65]对 4 种模式的工作原理和相关公式进行了详细的阐述。

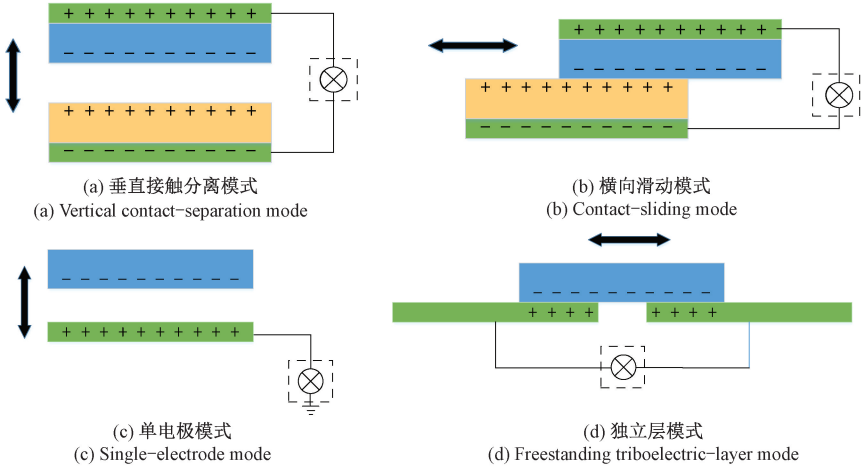


图 6 TENG 模式
Fig. 6 TENG mode

TENG 具有结构简单、可微型化、适合低频激励、输出电压高、功率密度大的优点^[41,66-67]。在某些场合 TENG 还可作为高压源,如激发等离子体、场发射等^[65]。其缺点是摩擦材料易损坏,输出功率受温度、湿度等环境因素的影响。但随着柔性体 TENG^[68]、液滴 TENG^[69]等前沿技术的出现,TENG 技术展现出了巨大的应用前景。

2 交通设施健康状态监测综述

2.1 交通设施健康状态监测系统

交通设施的健康状态监测源于结构健康监测 (structural health monitoring, SHM),是 SHM 技术发展的进一步应用,监测对象包括道路、轨道、桥梁等设施^[70-74]。

它的重要作用体现在掌握结构的状态信息,对健康情况做出科学判断。此外,还具备对一些偶然性灾难过程进行捕捉的能力,这是非在线的试验检测平台所不能实现的,为灾后评价提供不可复制的珍贵资料。

典型的健康状态监测系统包括传感器系统、数据采集与传输系统、数据处理与控制系统、诊断评估系统。若将健康监测系统与人体作比较,那两者之间存在许多相似之处。

传感器系统相当于人的眼睛,接收外界信息。它分为内部嵌入式传感器和外部附着式传感器两类,前者包括压力盒、孔隙压力计和裂缝计等;后者包括温湿度计、雨量计和风向仪等。布置合理、性能良好的传感器是健康监测系统运行高效、诊断准确的必要条件^[75]。

数据采集与传输系统其功能与神经元和血液相似,起到信号采集、传递和过滤的作用。采集到的传感器信息一般通过光纤或者无线网络进行传输,通过连接不同的采集设备来解调数据,再由交换机确认 MAC 地址的连接位置,从而快速并入其他网络节点。在这一过程需要考虑一些必要的辅助因素,如供电、布线和密封等,保障系统运行的可行性和可靠性^[76]。

数据处理与控制系统可以类比人体的大脑。将数据进一步转化为数字信号,由专门的计算机软件或程序对该信息进行归类和储存,再利用数据处理方法对监测设施进行模态分析和损伤识别。其中数据处理方法是该子系统的关键,决定了数据处理的速度与准确度。其中,卡尔曼滤波、优化算法、小波包等方法是常见的损伤识别手段^[77]。

诊断评估系统与人体小脑有些相似。小脑在人的运动中起到调节的作用,在动作未偏差时评估误差出现风险,在出现动作偏差时快速感知偏差程度并反馈调节方案,使动作准确、平衡和稳定。诊断评估系统综合考虑温度效应、风致响应、压力荷载等外界因素,对设施的结构使用状态、破坏风险程度进行评估,给出相应的维护方案,同时生成经济分析报告。其核心作用在于预先捕获对象的健康信息,特别是建设成本高、破坏影响大的交通设施状态信息,在设施功能失常之前,提前反馈健康信息并预警,从而尽可能降低其破坏影响^[78-79]。

2.2 健康状态监测类型

交通设施健康状态监测可以分为局部监测和整体监测两种类型^[80-82]。两种监测类型的搭配使用,使 SHM 技术在不断创新和发展的过程中,适用于不同交通设施的健康监测。

局部监测方法是小范围的对交通设施结构进行健康监测,比如裂缝程度和梁的受力,其方法包括超声波法、声发射法、 γ 射线法、红外热成像法等^[83-85]。它的特点是不能对交通设施整体特性进行监测,可以针对关键监测、难点监测的测量点进行信号采集和分析,补充自动化监测的不足,在远程健康监测技术未成熟前发挥过渡作用。缺点是人工参与度高,检测结果受主观意识影响,且消耗较多的人力时间成本。

整体监测方法通过静态和动态参数的响应对交通设施的整体特性进行评估,通常会结合神经网络法、静态检测法、振动响应检测法等技术。整体监测方法在计算机、大数据等技术的进步下呈现出更大的发展潜力,满足实时、全面、准确的监测要求,是未来交通设施健康状态监测的发展方向。但传感器数量、供电和布置方面还有待优化,追求以尽可能少的传感器获取被监测交通设施的全面信息^[86-87]。

2.3 结构健康监测传感技术

近几年传感技术的研究热点主要集中在3个方面,分别为基于光纤传输的光纤传感监测技术、基于无线通信的无线传感监测技术、基于图像识别的计算机视觉传感监测技术^[88-90]。

由于光是一段微小的电磁波,在温度和压力的作用下,从波形图上可以观察到相位、频率、振幅等参数的相对变化,从而获得被测量对象较准确的数值。考虑到光缆本身具有电绝缘、耐腐蚀、抗电磁等的性质,因此光纤传感器技术具有较高的可行性和可靠性。Khandel 等^[91]和 Siwowski 等^[92]验证了光纤传感技术在结构健康监测中的可行性。Berrocal 等^[93]利用分布式光纤传感器测量钢筋混凝土的裂纹,对裂纹附近的分布应力进行积分,进一步消除部分张力的影响,证明了光纤传感器监测裂缝信息的能力。

一定数量的无线传感器可以自发组成一个无线传感器网络节点,为系统的内部布线提供方便。单个传感器节点采集测量数据,经由小型通信模块发射到相邻的网络节点,并逐跳到汇聚节点,而后由互联网等网络搬运到管理节点,完成数据无线传感的过程。Park 等^[94]使用无线传感器对飞行中的无人机结构进行实时监测。Hou 等^[95]设计了一种无线传感器系统,实现了对桥梁位移的远程监测,具有功耗低、成本小的优点。

视觉是人类获取信息最主要的途径之一,是人体探索多彩世界的核心组成功能。视觉传感器使机器系统获取外界信息更加直观,其依托于复杂的图像处理技术,在多重算法的作用下把光学信号转化成各种数字信号和像素组成的图像,使监测对象直观化、可视化。在新型材料、智能算法和物联网等技术的进步下,视觉传感技术得到了较好的发展。Hou 等^[96]设计了一种 SHM 视觉预警框架,Lei 等^[97]提出了一种应用于监测隧道裂缝的图像识别系统,利用差分噪声滤波、边缘检测等检测方法提高了系统的识别精度。

2.4 基本的信号处理方法

信号处理方法是健康监测系统评估交通设施健康状态的基础。由于动态响应的复杂过程,存在较多的信号处理方法,如时间序列模型、快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)、小波变换(wavelet transform, WT)、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)等^[98-101]。

结构健康监测中最早使用的模型是时间序列模型,通常对振动信号进行时间序列分析,获取设施的健康状态。FFT是离散傅里叶变化中的一种基础诊断技术,可应用于多种类型的健康诊断,但快速傅里叶变换不能表示参数在时域中的变化。WT优化了FFT的不足,它可以在时域和频域中对信号的分析,在检测信号突变

方面具有较大的优势。HHT 可用于提取平稳、非平稳信号的特征,具有不涉及任何卷积、计算时间少的优点。缺点是由于频域较宽,本征模态函数不能满足单分量性质,低频区域的信息处理效能低^[102-103]。

2.5 结构健康监测标准规范

结构健康监测的标准规范是工程人员密切关注的问题。科学严谨的监测技术,可以极大程度地避免工程环境中可能遇到的问题,提高监测质量和速度,促进 SHM 技术的应用。近十年,在中国工程建设标准化协会的审查批准下,已陆续施行一些行业标准。

在系统设计方面。2013 年 3 月,大连理工大学、大连金广建设集团有限公司等单位主编的《结构健康监测系统设计标准》正式实施。规定了系统设计的总体框架,如系统内部理应包含的各种子系统和各子系统应具备的基本功能。统一了部分意见,如传感器布置应保留适当的信息冗余度。SHM 技术正处于发展上升的阶段,标准化的工作不宜过细,只需把握主体框架,由日后技术成熟再加以深化。

维护和管理方面。2020 年 6 月,大连理工大学、中际物联科技有限公司等单位编写的《结构健康监测系统运行维护与管理标准》开始实施。其内容主要针对监测系统在日维修、安全监控、异常处置等方面的行为处理规范,目的在于统筹监测系统的维护和管理,保障系统运行稳定可靠。

施工和验收方面。2021 年 3 月,大连理工大学、中交路建交通科技有限公司等单位起草的《结构健康监测系统施工及验收标准》开始施行。该标准涵盖的内容包括传感器安装、线缆布置、验收清单等方面,适用于常规监测工程的应用,若存在特殊监测要求和恶劣施工条件的场合,可以根据实际情况适当调整,从而达成布置科学、经济合理、检验全面的监测要求。

2.6 智慧交通与交通设施健康状态监测

随着经济与科学技术的发展,交通系统的建设不断加快,人们对交通系统提出了更高的要求。多功能化、智慧化是未来交通系统的发展方向。智慧交通基于以人为本、智能高效的理念,以绿色智能交通设施为基础,追求提高交通系统运行效率、减少交通事故和降低环境污染的目标^[104-106],是智慧城市的重要组成部分。通过采集交通工具、交通设施、交通环境的实时数据,依托多种前沿核心技术,实现交通管控、综合运输、健康监测等交通应用,使交通系统与经济、社会、资源等因素有机的结合在一起,如图 7 所示。

当前,智慧交通的关注重点在数据处理、信息服务、交通管控等方面,涉及交通设施健康状态监测方面的研究较少^[107]。但是,交通设施健康状态对交通系统安全、

高效运行至关重要,尤其是一些危险路段,交通设施损坏可能造成重大人员伤亡和财产损失。如果缺少可持续、有效的交通设施健康状态监测,依靠人工检测和事后维修,与智慧交通绿色、高效、安全的理念相悖^[108]。通过在交通设施布置传感器等小型机电系统,从而实现交通设施健康状态监测,不仅可以保障交通系统安全运行,也可以指导对交通设施进行合理养护,是智慧交通发展的保障和重要内涵。

2.7 结构健康监测应用难点

如前文所述,传感器是捕获交通设施健康状态信息的基础^[109]。外部附着式传感器附着在结构表面,通过声波、激光、地面穿透雷达、图像捕捉等技术对结构进行监测。优点是结构简单、接收的信号较为强烈和对交通设施的结构影响小^[110-111];缺点是容易受到环境的影响,对微损伤不够敏感。内部嵌入式传感器嵌入到交通设施结构内部,采集压力、应变、温度和潮湿度等数据,分析结构表面和结构内部的动态响应。优点是能够连续的、实时的采集结构和环境的信息,抗环境干扰的能力相对较强;不足之处是安装在结构内部,安装和维修困难。

无论哪种传感器,使之连续有效工作并采集监测信息都是传感技术的重点和难点。Graziano 等^[112]和 Maruccio 等^[113]指出,供电问题限制了无线传感器广泛应用于道路的健康状态监测,电池供电严重阻碍了大型结构和基础设施健康状态监测技术的发展。虽然电池可以为传感器供电,但是更换十分不便。因此,如何为传感器供电成为制约交通设施健康状态监测技术发展和广泛应用的关键问题之一^[114-116]。

3 交通环境能量采集及自供能交通设施健康状态监测

3.1 能量采集供电模式

将交通环境能量转换为电能,可以为健康状态监测供电,同时也可减少化石燃料的使用,保护生态环境^[117-118]。自供能技术与无线传感技术较为贴合,目前如下 3 类供电模式具有较大的应用潜力。

1) 自供电传感集成系统。传感器的工作原理是将外界的激励转化为电信号,自供电传感集成系统则将外激励转换为电能,并在传感器内部进行相应的电路处理,为传感器正常工作供电,摆脱对电池的依赖。

2) 给有源传感器供电。该模式与第 1 类模式有些类似,但传感器种类范围扩大了很多。利用能量采集装置将交通环境的能量转换为电能,进行相应电路处理,直接或存储后为无线传感器供电,起到取代电池的作用。



图 7 智慧交通
Fig. 7 Smart transportation

3) 给无源传感器配套设备供电。对于无源传感器,由于它不需要电池供电,因此,需将处理过的电能输送给低功耗数据采集设备,如 609 读数仪。再将与无源传感器连接,获取传感信息。同样的,最后外接无线模块,完成数据的无线传输。

将监测数据传输到无线节点后,需进一步保存至服务器。这时可通过光缆对接硬件设施或者用 4G 网络对接互联网的形式,使服务器接收传感器采集的数据,以便于分析和处理^[119]。

3.2 道路能量采集及道路健康状态监测

道路能量采集装置可设置为道路减速带,采集车辆减速的能量。道路能量采集装置从机电转换机制角度可以分为电磁式、压电式和摩擦电式等。

电磁式是道路能量采集使用最广泛的机电转换机制之一。其从机械传动可以分为液压式和机械机构式。液

压车路能量采集装置包括液压系统和发电装置,如图 8 所示,液压系统可以缓冲车辆滚压冲击力,使发电装置受力较为平稳,延长装置使用寿命^[120],但液压系统会使得装置结构更复杂。为了提高激励频率,往往通过齿轮组传递机械运动^[121],如图 9 所示。齿轮齿条传动与单向离合器组合使用可以进一步提高机电转换效率,在 120 mm/s 的激励速度和 150 N 的作用力下,峰值电压和峰值功率可达到 20.57 V 和 11.99 W^[122]。机械传动机构原理简单,输出功率高,但容易出现啮合卡顿和振动噪声等情况,对设计和制造要求较高。电磁式道路能量采集方法输出功率高,具有为功耗较大的健康状态监测设施供电的潜力。

压电减速带结构简单。车辆滚压力可以使压电材料产生变形从而依靠正压电效应发电。与弱激励下压电振动能量采集器的结构不同,为了提高装置的鲁棒性,压电

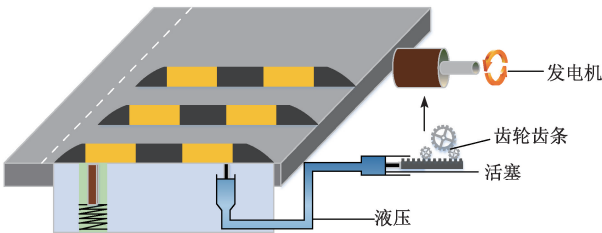


图 8 液压电磁减速带
Fig. 8 Hydraulic electromagnetic speed bump

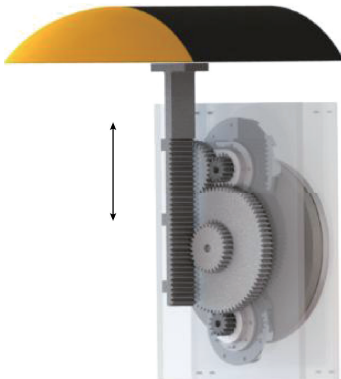


图 9 齿轮传动电磁减速带
Fig. 9 Gear drive electromagnetic speed bump

车路能量采集设计一般采用叠堆、弯张型等结构。2019 年, Song 等^[123]设计了一个压电型的能量采集减速带, 如图 10 所示。为了提高输出功率, 每个压电模块内置 40 个压电层。当车辆以 30 km/h 的速度驶过时, 可以产生 144 V 的最大电压、45.2 mA 的最大电流和 4.086 W 的最大功率。压电减速带的显著优点是占地面积小, 安装、维护相对简单, 对道路的影响小。压电式道路能量采集方法输出电压高、功率高, 具有较好的综合性能, 既可以为功率较高的健康状态监测方法供电, 也适合作为自供电传感集成系统。

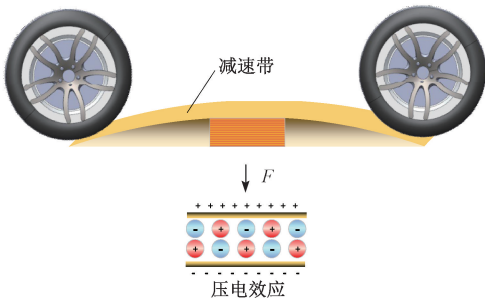


图 10 压电减速带
Fig. 10 Piezo speed bump

摩擦纳米发电机通过摩擦起电和静电感应发电, 易集成于减速带俘能装置。2020 年, Heo 等^[124]提出了一个

基于摩擦纳米发电机的减速带, 如图 11 所示。它主要由 1 个减速带和 6 个铜电极组成, 通过电极的单独使用或两两连接, 形成单电极模式和独立层模式的 TENG 结构。其中单电极模式可获得 37.2 V 的峰值电压和 2.6 V 的均方根电压。独立层模式可获得 49.8 V 的峰值电压和 3.8 V 的均方根电压。摩擦电减速带主要由摩擦材料和电极组成, 车辆行驶时轮胎与减速带的冲击摩擦较大, 减速带表面材料易受损, 因此不利于实际应用。

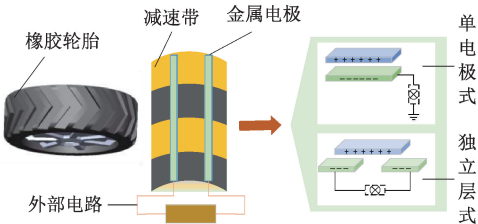


图 11 摩擦电减速带
Fig. 11 Friction electric speed bump

此外, 也可通过安装 TEG^[125]、铺设 PV 道路^[126]等方式采集路面上的能量, 结合俘能减速带一起为健康状态监测系统提供能量, 保障系统的供电稳定性。

道路在日晒雨淋、车辆滚压等影响下, 可能出现强度下降、变形和损坏等问题。道路损坏会影响城市美观、交通效率和安全。道路健康状态监测是指导道路合理养护的依据。道路健康监测的内容包括路面损伤、钢筋腐蚀、地下管道损伤等。Xiao 等^[127]提出了一种用于道路健康状态监测的自供电无线传感集成系统, 主要包括低功耗传感器、无线传输单元、压电能量采集单元和能量管理单元。监测数据可以根据疲劳损伤算法预测潜在的道路损害。Ji 等^[116]提出了一种通过监测声波信号来识别路面损伤的自供电传感器系统。将压电传感器嵌入到道路不同位置, 在受到外部的脉冲激励时, 分别发送和接收声波信号。压电装置在一次负载中采集的电压和能量分别为 75.0 V 和 4.31 μ J。连接放大器和示波器后读取并分析信号波形, 从而判断道路是否出现损伤。Feng 等^[128]提出利用压电传感器对路面下方管道的裂缝、破损情况进行监测, 基于小波包的能量分析方法, 较好的监测到裂纹类型和方向。张明等^[129]利用压电传感器对混凝土结构的脱粘损伤进行监测, 通过对应力波进行时域分析和小波包分析, 证明了纳米材料有利于提高混凝土梁表面的健康性能。

3.3 桥梁能量采集及桥梁健康状态监测

由于车辆和风的作用, 桥梁的振动在一定程度上是不可避免的, 它具有低频、随机和不规则的特点^[130]。通过采集桥梁路面压载和桥梁振动等处的能量, 可实现对桥梁健康状态监测的供电。常见的桥梁能量采集装置可以分为振动电磁式和振动压电式两种, 如图 12 所示。

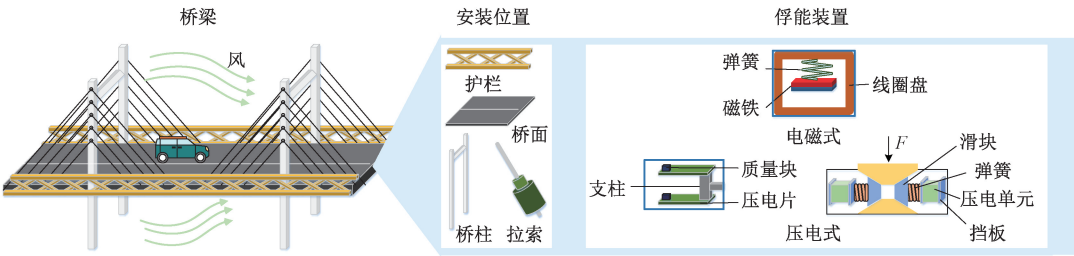


图 12 振动电磁式和振动压电式桥梁能量采集

Fig. 12 Vibrating electromagnetic and vibrating piezoelectric bridge energy harvesting

桥梁的振动频率低,通常采用固有频率较低的悬臂梁和弹性结构进行结构设计。2018 年,Ullah 等^[131]研制了一种桥梁振动电磁能量采集器,可同时采集桥梁振动能量和风能。通过增加悬臂梁的数量,采集更多振动能量。实验表明,能量采集器在一阶共振频率 7.6 Hz 和 0.6 g 加速度下激励下,得到了 0.43 V 和 2.21 mW 的最大输出。2021 年,Khan 等^[132]将悬臂梁设计在两对线圈和磁铁的上方,通过悬臂梁的振动发电。实验结果显示,在保持 0.09 g 加速度激励条件下,一阶和二阶共振频率可以产生 2.51 和 10.7 mW 的输出功率。2021 年,他们在悬臂梁末端安装了一对磁铁和线圈^[133]。与前一年研究相比,利用一对磁铁线圈获得了约等于之前两对磁铁线圈的输出功率,提升了输出功率密度。振动压电式俘能器基于压电片振动变形或挤压变形发电。2019 年,Li 等^[134]研究了一种压电式的桥梁振动能量采集装置,讨论了水平和垂直的两种压电片安装模型。实验得到,垂直型装置的输出功率可达到 1 mW 左右。该设计的新颖之处是,可同时利用梁与弹簧质量系统的共振频率进行振动能量采集。相比传统的悬臂式采集装置,能够采集超低频的振动能量,提高了振动能量采集装置的工作频宽。2020 年,Nie 等^[135]提出一种可以安装在桥梁电线上的压电振动能量采集器,获得了 12.89 mW 的输出功率。

我国地域辽阔,地貌复杂,桥梁数量多。桥梁健康状态监测是交通设施健康状态监测的重要内容。桥梁健康状态监测包括疲劳裂纹、螺栓松动、拉索松动、钢绞线松动等监测。Guan 等^[136]使用电池为传感器系统供电,实现桥梁的高精度位移监测,但是定期更换电池十分不便。王继林等^[114]使用光纤布拉格光栅传感器采集数据,较好的得到了桥面载荷信息,但光纤电缆的铺设成本高。Bhaskaran 等^[137]指出使用自供能传感器是一个可行的办法。Zhang 等^[115]用压电传感器来监测钢绞线的松紧程度,将压电陶瓷布置在钢绞线、楔形夹和外圈的端面上。基于楔形锚固装置的松紧程度变化,各表面接触面积有所差异。利用时间反转法分析各压电片的传输信号,可得到信号峰值大小和紧密程度的正比例规律,实现对钢绞线松紧度的监测。Huo 等^[138]开发了一种诊断螺栓松

紧程度的健康状态监测方法。采用一对压电传感器作为超声波产生和接收的节点,对桥梁上螺栓的松动进行监测。基于两接触面之间固有的接触机理,使用有限元方法对螺栓基础面积与波形峰值关系进行分析,实现了对螺栓松动的准确定量监测。

3.4 轨道能量采集及轨道健康状态监测

全球对轨道交通运输需求持续增加,轨道交通运输对于全球交通系统效率和相关经济业务的影响相当大。轨道交通系统健康状态监测,不仅可以指导维护维修,避免重大交通事故,也有助于分析结构损伤原因,优化相关结构。轨道经常需要穿过偏远地区,它们的监测设备全部由电缆供电比较困难^[139]。列车通过轨道时会产生振动^[140-142],铁轨和枕木上的振动能量较大^[143],适合为轨道健康状态监测供电。轨道振动能量采集装置可以分为旋转电磁式、振动电磁式和振动压电式。

Díez 等^[144]指出电磁感应是最适合用于轴旋转的发电机制,旋转电磁式轨道能量采集装置如图 13 所示。2016 年,西南交通大学的 Zhang 等^[145]提出一种采集铁轨振动能量的电磁能量采集器。通过安装两个方向相反的单向轴承,使齿条的上下运动都给发电机输入同一方向的转矩,得到了 6.45 V 的峰值电压和 55% 的转换效率。轨道的振幅小,单次位移转换的旋转运动不足,可通过单向轴承、棘轮棘爪等构件,实现双行程的工作模式,提高旋转电磁式装置的输出功率。

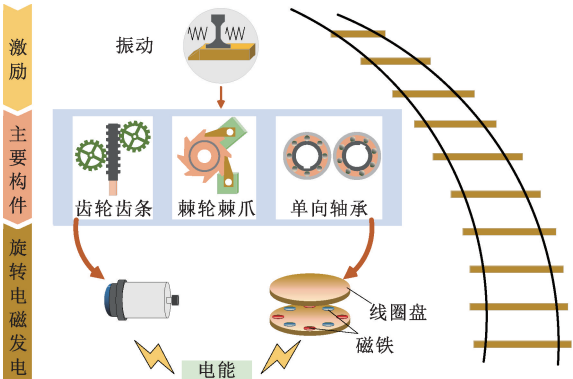


图 13 旋转电磁式轨道能量采集

Fig. 13 Rotating electromagnetic orbital energy harvesting

振动电磁式装置利用磁铁和线圈之间的快速振动,切割磁感线,如图 14 所示。2017 年,Gao 等^[146]设计一个轨道振动电磁能量采集器,得到 2.32 V 和 119 mW 的峰值输出。利用直流升压变换器,2 mm 的轨道位移可实现 5 V、10 mA 的能量输出。2020 年,Hou 等^[147]设计了 3 种电磁装置用以捕捉不同振动峰值的轨道能量,得到的平均功率

分别为 0.91、1.41 和 0.84 W。Wang 等^[148]利用弹性杠杆系统提高了电磁能量采集器的性能,当弹性杠杆的动力臂和阻力臂的比例为 1:10 时,可以将输出功率放大 430 倍。这一方面是因为杠杆的放大特性,另一方面是因为激励的频率和杠杆的固有频率发生了共振。振动电磁式装置利用共振极大地提高了能量采集器的输出效率。

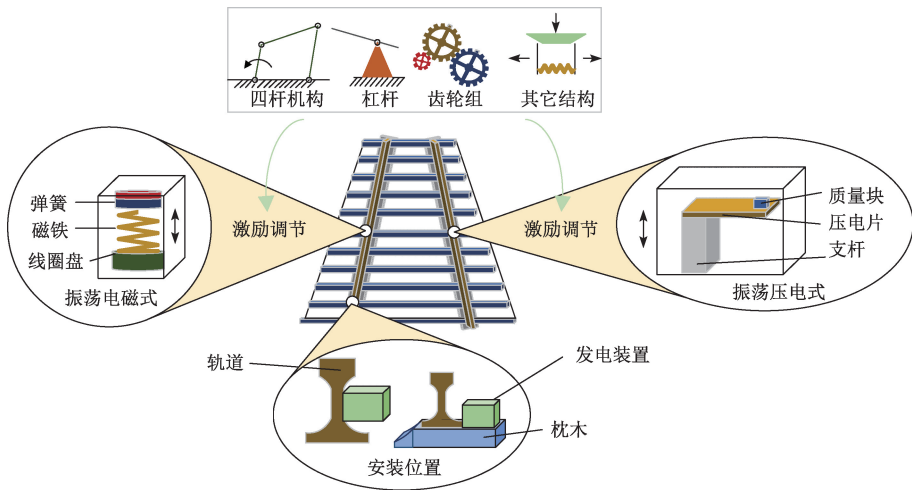


图 14 振动电磁式和振动压电式轨道能量采集

Fig. 14 Vibrating electromagnetic and vibrating piezoelectric orbital energy harvesting

振动压电式俘能装置相对于其他轨道能量采集装置,具有体积小和质量轻的优点。Ping 等^[149]设计了一个轨道压电能量采集器,在 5~7 Hz 的振动频率和最大为 0.4 mm 的振动位移下,获得了 4.9 mW 的输出功率和 24.4 V 的输出电压。2021 年,Hou 等^[150]将压电单元与弹簧串联,并设计弯板结构放大了输入激励,144 个压电能量采集器产生了 31.4 kJ 的总能量。

轨道健康状态监测包括有轨道波纹变形监测、枕木道砟破损监测等。Lee 等^[151]研制了一种可用于枕木和道砟健康状态监测的无线传感模块,但大约每 3.5 年要更换一次电池。而随着能量采集技术的进步,有望缓解电池频繁更换的问题。Lu 等^[152]提出了一种自供能传感器系统,用于监测铁轨的波纹变形程度。轨道侧的 EMEH 采集振动能量,为传感器节点供电。实验测量了传感器的加速度信号,并利用 Littlewood-Paley 小波分析的方法,识别出了铁轨的波纹变形程度,对轨道的健康状态监测发展具有进步意义。Gao 等^[106]利用 ZigBee 无线传感器节点拓展了轨道能量采集在健康状态监测上的应用。如图 15 所示,将产生的交流电整流为直流电,并进行储存,给各种传感器和 Zigbee 终端设备供电。当车辆以 105 km/h 的速度在轨道上行驶时,电磁能量采集器可以输出 2.3 V 的峰值电压。此外,该方案还实现了网页端的在线信息浏览功能。

最后,建立表 1 对轨道健康状态监测的监测方向、监测内容、供电方式、使用的理论分析方法进行归纳比较。建立表 2 对交通环境能量采集的应用、机制、主要配置、输出大小和特征进行归纳总结。

4 挑战和研究展望

结构健康状态监测这一概念最初在 20 世纪 70 年代提出,用来对飞机等设备进行振动损伤识别;80 年代后,开始对桥梁等工程设施进行振动损伤诊断;90 年代后,由于无线传感器、通信技术和计算机技术的出现,健康状态监测开始向远程在线监测发展^[154]。国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出“打造系统完备、高效实用、智能绿色、安全可靠的现代化基础设施体系。”多功能化、智慧化是未来交通系统的发展方向。而交通设施健康状态对交通系统安全、高效运行至关重要,尤其是一些危险路段,交通设施损坏可能造成重大人员伤亡和财产损失。交通设施健康状态监测是智慧交通发展的保障和重要内涵。但是,交通设施健康状态监测仍然存在许多问题,如:减少对交通系统的影响、排除噪声干扰、适应多场景多目标多特征监测等,其中首先需要考虑的交通设施健康状态监测传感器供电问题,也是本文主要关注的问题。

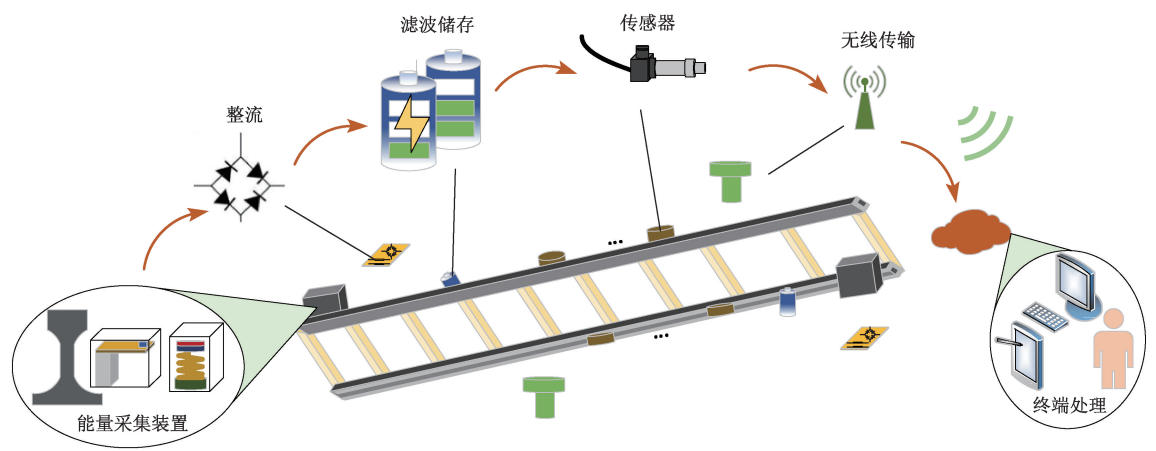


图 15 自供能轨道状态监测
Fig. 15 State monitoring of self-powered orbit

表 1 健康状态监测应用
Table 1 Health status monitoring applications

编号	作者	主要内容	监测设施供能	理论和方法
1	王继林等 ^[114]	桥面载荷监测	—	广义动态应变时程积分反演法、有限元法
2	Huo 等 ^[138]	螺栓松动监测	自供能传感器	时间反转法、分形接触理论、有限元法
3	Zhang 等 ^[115]	钢绞线松紧度监测	自供能传感器	时间反转法
4	Xiao 等 ^[127]	无线传感器系统	自供能无线传感器系统	静态分析、疲劳损伤算法
5	Feng 等 ^[128]	地下管道泄漏监测	自供能传感器	小波包能量分析法
6	张明等 ^[129]	混凝土损伤监测	压电传感器	时域分析、小波包能量分析法
7	Ji 等 ^[116]	路面损伤监测	自供能传感器	公式法计算声波衰减系数
8	Lu 等 ^[152]	铁轨波纹变形监测	EMEH 采集轨道能量	Littlewood Paley 小波分析
9	Lee 等 ^[151]	枕木道砟监测系统	更换电池供能	LoRa 通信
10	Gao 等 ^[106]	轨道健康状态监测系统	EMEH 采集轨道能量	ZigBee 通信

表 2 交通环境的能量采集
Table 2 Energy harvesting in traffic environment

应用	作者	机制	主要配置	输出	特点
光伏路面	Zha 等 ^[153]	PV	光伏板	1.769 W _{max}	能量转换效率高, 成本高
热电道路	Tahami 等 ^[125]	TEG	散热器、热电材料	29 mW	安装在路测, 避免交通负荷影响
俘能减速带	罗政等 ^[120]	EMEH	液力变矩器	—	结合液压系统, 具有缓冲效果
俘能减速带	Azam 等 ^[122]	EMEH	齿轮齿条、磁铁线圈	20.57 V _{max} , 11.99 W _{max}	输出功率大
俘能减速带	Song 等 ^[123]	PEH	阵列的压电材料	45.2 mA _{max} , 4.08 W _{max}	方便移动和安装
俘能减速带	Heo 等 ^[124]	TENG	摩擦电材料、铜电极	49.8 V _{max}	结构相对简单
轨道	Díez 等 ^[144]	EMEH	单向轴承、齿轮齿条、磁铁线圈	6.45 V _{max} , 55% 转换效率	改变运动的方向
轨道	Hou 等 ^[147]	EMEH	振动式电磁装置	1.41 W 平均功率	直接采集轨道振动能量
轨道	Ping 等 ^[149]	PEH	压电材料	4.9 mW, 24.4 V	体积小
桥梁	Khan ^[133]	EMEH	悬臂梁、磁铁线圈、叶片	2.7 V, 13 mW	采集共振能量
桥梁	Li 等 ^[134]	PEH	压电材料、弹簧、悬臂梁	1 mW	可采集超低频振动能量

目前交通设施健康状态监测传感器供电主要有3种技术路线:电缆输送、电池供电和能量采集技术。电缆可以在交通设施建设时布设。电缆输送供电可靠。但是,电缆建设成本高,也缺乏改造的灵活性,偏远地区难以实施。电池供电也比较可靠。但是,电池寿命有限,对于数量庞大的传感器网络维护困难,对环境有污染。电池技术也是国内外研究热点,但是能量存储要实现跨越式突破也很困难。能量采集技术相比前两种技术还很不成熟,但是发展潜力很大,一方面可以便捷、可持续的就近供电,另一方面零碳环保,已经吸引了国内外很多学者开展研究。目前交通环境能量采集与自供能交通设施健康状态监测面临着许多挑战^[109,112,155-160]。

1) 由于实际工程环境噪声、磁场、温度、压力等外界干扰因素,使得结构损伤引起的响应被掩盖,数据处理难度提高。常见数据处理方法有小波包奇异熵^[161]、有限元模型^[162]、卡尔曼滤波^[163]等方法,通过针对单一或少量外界干扰因素影响,实现对结构损伤的量化和评估。这意味着考虑全方位、多重因素影响下的SHM,需要根据地域、监测对象的差异,协调和补充多种数据处理方法来实现健康状态监测功能,这一过程繁琐复杂,不易实现。此外,处理方法越复杂要求采集的数据越详细,会导致数据存储单元的负荷压力增大。

2) 传感器的优化布置是SHM工程应用的关键环节,不合理的布置方式容易出现线缆冗杂、参数失效等问题。面对大型交通设施的健康监测,信号线的制造、铺设和维护也是一个重要问题。无线传感技术作为作为传感技术的研究热点,已开发出4G、WIFI、ZigBee、蓝牙等成熟技术。端到端的无线数据传递,在一定程度上可降低传感器优化布置的难度。

3) 目前的能量采集装置输出功率仍然不能满足自供能交通设施健康状态监测长期稳定的供电需求,提高交通环境能量采集的输出功率是亟待解决的关键问题。新型材料研发和创新结构设计是提高输出功率的有效途径。此外,多源多机制复合发电更能实现更高的输出功率。

4) 车辆行驶对能量采集装置产生很大冲击;并且交通环境工况恶劣,鲁棒性和可靠性是制约能量采集装置在交通环境应用的关键因素,也是自供能交通设施健康状态监测研究的难点。

5) 俘能装置输出的能量是交流电,需要整流、滤波和储存后,再为健康状态监测传感器供电。这个过程中存在着电能消耗。在未来,需要进一步研究电能管理和存储技术,提高电能品质和储存效率,为健康状态监测提供稳定可靠的电源。能量采集、电能管理和存储、状态监测、无线传输、信号处理、故障诊断和评估等功能的集成也是需要考虑的关键问题。

5 结 论

交通设施健康状态监测可以指导科学维护和保障安全通行。采集交通环境能量为交通设施健康状态监测的无线传感节点供电具有可持续、便捷和绿色环保的优点。目前关于交通环境能量采集和交通设施健康状态的研究有很多,但是考虑将交通环境能量采集与交通设施健康状态监测结合的报道很少,还未见关于自供能交通设施健康状态监测综述、总结和提炼的报道。本文阐述了交通设施健康状态监测是智慧交通发展的保障和重要内涵,论述了交通环境能量采集技术及交通设施健康状态监测中的应用,探讨了自供能交通设施健康状态监测面临的挑战并进行了展望。主要的结论如下:

1) 交通设施健康状态监测包括对道路、桥梁、轨道等设施的健康监测,获取结构设施多方面的状态信息,对健康情况做出科学判断。交通设施的健康监测技术在不断发展。局部监测和整体监测的方法可以使技术水平不够成熟和统一的条件下,适用于多种健康监测环境;先进传感技术如光纤传感、无线传感和计算机视觉传感技术,有效地提高了数据传输的精确性、时效性和稳定性。交通设施健康状态监测是智慧交通发展的保障和重要内涵,但供电是难题。交通环境存在大量能量,通过采集交通环境中的能量,为交通设施健康状态监测传感器供电,契合智慧交通绿色、高效、安全的发展理念。可以预见,随着能量采集技术的发展,有望给健康状态监测系统提供可持续的零碳电力供应。

2) 对于道路能量采集,电磁式能量采集减速带的输出功率最高,可以达到数十上百瓦,因此也是现阶段最有可能应用的交通环境能量采集技术。如果考虑能量采集装置对路面结构的影响,则应该减小装置的道路空间占比,这时候压电式和摩擦电式的能量采集减速带展现出了较大的优势。

3) 桥梁机械能量源主要是风和车辆作用产生的桥梁振动,具有低频、随机和不规则的特点。振动电磁式装置和振动压电式装置是采集桥梁振动能量的常见方法。因为桥梁损伤具有巨大安全隐患,目前自供能桥梁健康状态监测方面的研究和应用相对较多。

4) 大量偏远地区的轨道交通设施存在供电体系不够完善的问题,列车的高速行驶使轨道产生剧烈的振动,是轨道机械能的主要来源。轨道的振动频率要高于桥梁结构的振动频率,因此,除了振动电磁式和振动压电式的获能装置外,结合激励扩大组件能满足旋转电磁式俘能装置的发电要求,但3种方式采集的能量大多还是mW级别。

5)目前,输出功率、器件可靠性、环境适应性等因素仍然是制约能量采集技术应用于交通设施健康状态监测的最关键因素。为了获得更高的性能,往往需要多学科交叉,从机电转换机制、材料、结构、系统、电路、控制等多方面发力并形成合力突破。

参考文献

- [1] 于华洋,马涛,王大为,等. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
YU H Y, MA T, WANG D W, et al. Summary of Chinese pavement engineering research · 2020 [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66.
- [2] 王久平. 铁路现代化 安全须先行——近年我国铁路交通安全事件回顾与深思 [J]. 中国应急管理, 2021(4): 10-13.
WANG J P. Railway modernization and safety must go first—Review and reflection on China's railway traffic safety incidents in recent years [J]. China Emergency Management, 2021(4): 10-13.
- [3] 庄猛. 服务区的未来之路——“十四五”期我国高速公路服务区产业发展思考 [J]. 中国公路, 2021(8): 72-73.
ZHUANG M. The future road of service area——Reflections on the industrial development of expressway service area in China during the “14th Five-Year Plan” period [J]. China Highway, 2021(8): 72-73.
- [4] CAYTILES R D, PARK B. Analysis of a decentralized mobility management support for adaptive structural health monitoring of SOC public infrastructures [J]. Journal of Next-generation Convergence Information Services Technology, 2019, 8(2): 203-212.
- [5] ONO K. Review on structural health evaluation with acoustic emission [J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(6): 958.
- [6] DING Y, REN P, ZHAO H, et al. Structural health monitoring of a high-speed railway bridge: Five years review and lessons learned [J]. Smart Structures and Systems, 2018, 21(5): 695-703.
- [7] AN Y, CHATZI E, SIM S H, et al. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2019, 26(10): e2416.
- [8] YANG Y, LI Q S, YAN B W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(1): 1-10.
- [9] CAHILL P, HAZRA B, KAROUMI R, et al. Vibration energy harvesting based monitoring of an operational bridge undergoing forced vibration and train passage [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 106: 265-283.
- [10] CHENG J, CHEN W, TAO F, et al. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018, 10: 10-19.
- [11] 沈意平,吴迪,张博南,等. 钢轨裂纹导波检测的柔性压电复合材料传感技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 62-70.
SHEN Y P, WU D, ZHANG B N, et al. Research on flexible piezoelectric composite sensing technology for guided wave detection of rail cracks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 62-70.
- [12] CAHILL P, PAKRASHI V, SUN P, et al. Energy harvesting techniques for health monitoring and indicators for control of a damaged pipe structure [J]. Smart Structures and Systems, 2018, 21(3): 287-303.
- [13] LU Y, XU L D. Internet of things (IoT) cybersecurity research: A review of current research topics [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2103-2115.
- [14] LAPO M, ALESSANDRA B, MASSIMILIANO P. Multi-monostatic interferometric radar for bridge monitoring [J]. Electronics, 2021, 10(3): 247.
- [15] 杨娜,刘晔,徐元博,等. 快速迭代滤波分解方法在轴承故障诊断中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 47-54.
YANG N, LIU Y, XU Y B, et al. Application of fast iterative filter decomposition method in bearing fault diagnosis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 47-54.
- [16] VAGNOLI M, REMENYTE-PRESCOTT R, ANDREWS J. Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges [J]. Structural Health Monitoring-an International Journal, 2018, 17(4): 971-1007.
- [17] WU Y, QIU J, ZHOU S, et al. A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency vibration energy harvesting [J]. Applied Energy, 2018, 231: 600-614.
- [18] ZHAO L, YANG Y. Toward small-scale wind energy harvesting: Design, enhancement, performance comparison, and applicability [J]. Shock and Vibration,

- 2017; 3585972.
- [19] ZHANG Y, LU B, LU C, et al. Theory of energy harvesting from heartbeat including the effects of pleural cavity and respiration [J]. Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2017, 473(2207): 20170615.
- [20] ZHANG B, DUCHARNE B, GUPTA B, et al. Experimental sea wave energy extractor based on piezoelectric Ericsson cycles [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29 (6): 1102-1112.
- [21] NESARAJAH M, FREY G. Optimized design of thermoelectric energy harvesting systems for waste heat recovery from exhaust pipes [J]. Applied Sciences-Basel, 2017, 7(6): 634.
- [22] NOZARIASBMARZ A, COLLINS H, DSOUZA K, et al. Review of wearable thermoelectric energy harvesting: From body temperature to electronic systems [J]. Applied Energy, 2020, 258: 114069.
- [23] 侯北平, 张晓刚, 朱文, 等. 基于频域滤波的电缆线芯图像纹理消除研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 210-219.
- HOU B P, ZHANG X G, ZHU W, et al. Research on image texture removal of cable core based on frequency domain filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 210-219.
- [24] CAHILL P, JAKSIC V, KEANE J, et al. Effect of road surface, vehicle, and device characteristics on energy harvesting from bridge-vehicle interactions [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2016, 31(12): 921-935.
- [25] BOSSI G, SCHENATO L, MARCATO G. Structural health monitoring of a road tunnel intersecting a large and active landslide [J]. Applied Sciences-Basel, 2017, 7(12): 1271.
- [26] SHOKRAVI H, SHOKRAVI H, BAKHARY N, et al. Vehicle-assisted techniques for health monitoring of bridges [J]. Sensors, 2020, 20(12): 3460.
- [27] 李超, 陈钢进, 陈许敏, 等. 一种基于双极性驻极体的多气隙结构微振动能量采集器 [J]. 科学通报, 2019, 64(10): 1094-1102.
- LI CH, CHEN G J, CHEN X M, et al. A micro-vibration energy harvester with multi-air gap structure based on bipolar electret [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(10): 1094-1102.
- [28] PEI J, GUO F, ZHANG J, et al. Review and analysis of energy harvesting technologies in roadway transportation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020: 125338.
- [29] QI L, PAN H, BANO S, et al. A high-efficiency road energy harvester based on a chessboard sliding plate using semi-metal friction materials for self-powered applications in road traffic [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 748-760.
- [30] WANG H, JASIM A, CHEN X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications-A comprehensive review [J]. Applied Energy, 2018, 212: 1083-1094.
- [31] AHMED W A E M, MAGEED H M A, MOHAMED S A E, et al. Fractional order darwinian particle swarm optimization for parameters identification of solar PV cells and modules [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(2): 1249-1263.
- [32] JIANG T, SU C Q, DENG Y D, et al. Integration of research for an exhaust thermoelectric generator and the outer flow field of a car [J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(5): 2921-2928.
- [33] LEE J, LIM C, LIM J, et al. Application of solar thermoelectric generation system for health monitoring system of civil infrastructures [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2018, 22(1): 110-116.
- [34] ZHAO H, OUYANG B, HAN L, et al. Conjoined photo-thermoelectric effect in ZnO-graphene nanocomposite foam for self-powered simultaneous temperature and light sensing [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-11.
- [35] TAHAMI S A, GHOLIKHANI M, DESSOUKY S. Thermoelectric energy harvesting system for roadway sustainability [J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(2): 135-145.
- [36] QI L, ZHENG P, WU X, et al. A hybrid wind-photovoltaic power generation system based on the foldable umbrella mechanism for applications on highways [J]. Solar Energy, 2020, 208: 368-378.
- [37] WANG J, LI G, ZHOU S, et al. Enhancing wind energy harvesting using passive turbulence control devices [J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 998.
- [38] 全军令, 王亚栋, 彭玉兴. 集成式压电路面能量收集装置输出性能的实验 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37(3): 29-32, 37.

- TONG J L, WANG Y D, PENG Y X. Experiment on output performance of integrated piezoelectric pavement energy harvesting device [J]. *Mechanical Design and Research*, 2021, 37(3): 29-32, 37.
- [39] ZHAO Z, WANG T, SHI J, et al. Analysis and application of the piezoelectric energy harvester on light electric logistics vehicle suspension systems [J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(6): 2741-2755.
- [40] 赵龙, 陆泽琦, 丁虎, 等. 低频振动隔离和能量采集多功能超材料[J]. *力学学报*, 2021, 53(11): 2972-2983.
- ZHAO L, LU Z Q, DING H, et al. Double-functional metamaterials for low-frequency vibration isolation and energy harvesting [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 53(11): 2972-2983.
- [41] DONG K, PENG X, WANG Z L. Fiber/fabric-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators for flexible/stretchable and wearable electronics and artificial intelligence [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(5): 1902549.
- [42] FADLULLAH Z M, TANG F, MAO B, et al. State-of-the-art deep learning: evolving machine intelligence toward tomorrow's intelligent network traffic control systems [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2017, 19(4): 2432-2455.
- [43] GHOLIKHANI M, TAHAMI S A, KHALILI M, et al. Electromagnetic energy harvesting technology: Key to sustainability in transportation systems [J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 4906.
- [44] DAL BO L, GARDONIO P, TURCO E. Analysis and scaling study of vibration energy harvesting with reactive electromagnetic and piezoelectric transducers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 484: 115510.
- [45] GHOLIKHANI M, SHARZEHEE M, TAHAMI S A, et al. Effect of electromagnetic energy harvesting technology on safety and low power generation in sustainable transportation: A feasibility study [J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2019, 13(5): 373-386.
- [46] ZHOU S, JEAN-MISTRAL C, CHESNE S. Influence of internal electrical losses on optimization of electromagnetic energy harvesting [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(8): 085015.
- [47] LEE H, ROH J S. Wearable electromagnetic energy-harvesting textiles based on human walking [J]. *Textile Research Journal*, 2019, 89(13): 2532-2541.
- [48] YAN B, YU N, ZHANG L, et al. Scavenging vibrational energy with a novel bistable electromagnetic energy harvester [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(2): 025022.
- [49] KIM S C, KIM J G, KIM Y C, et al. A study of electromagnetic vibration energy harvesters: Design optimization and experimental validation [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2019, 6(4): 779-788.
- [50] ZABIHI N, SAAFI M. Recent developments in the energy harvesting systems from road infrastructures [J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 6738.
- [51] 李佳诚, 王志霞, 王炜, 等. 基于等效线性化方法的非线性振动能量采集器功率分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(1): 196-205.
- LI J CH, WANG ZH X, WANG W, et al. Power Analysis of nonlinear vibration energy harvester based on equivalent linearization method [J]. *Vibration and Shock*, 2022, 41(1): 196-205.
- [52] MAAMER B, BOUGHAMOURA A, FATH EL-BAB A M R, et al. A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 111973.
- [53] CHEN C, SHARAFI A, SUN J Q. A high density piezoelectric energy harvesting device from highway traffic-Design analysis and laboratory validation [J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 115073.
- [54] ZHAO J, WANG H. Mechanistic modeling and economic analysis of piezoelectric energy harvesting potential in airport pavements [J]. *Transportation Research Record*, 2020, 2674(11): 64-75.
- [55] LIU H, ZHONG J, LEE C, et al. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(4): 041306.
- [56] JIN L, MA S, DENG W, et al. Polarization-free high-crystallization β -PVDF piezoelectric nanogenerator toward self-powered 3D acceleration sensor [J]. *Nano Energy*, 2018, 50: 632-638.
- [57] YANG L, CHI S, DONG S, et al. Preparation and characterization of a novel piezoelectric nanogenerator based on soluble and meltable copolyimide for harvesting mechanical energy [J]. *Nano Energy*, 2019, 67:

- 104220.
- [58] MAITI S, KARAN S K, LEE J, et al. Bio-waste onion skin as an innovative nature-driven piezoelectric material with high energy conversion efficiency [J]. *Nano Energy*, 2017, 42: 282-293.
- [59] SINGH D, CHOUDHARY A, GARG A, et al. Flexible and robust piezoelectric polymer nanocomposites based energy harvesters [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, 10(3): 2793-2800.
- [60] ELAHI H, EUGENI M, GAUDENZI P. A review on mechanisms for piezoelectric-based energy harvesters [J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1850.
- [61] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator [J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [62] WU C, WANG A C, DING W, et al. Triboelectric nanogenerator: A foundation of the energy for the new era [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(1): 1802906.
- [63] MA M, KANG Z, LIAO Q, et al. Development, applications, and future directions of triboelectric nanogenerators [J]. *Nano Research*, 2018, 11(6): 2951-2969.
- [64] WANG Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors-principles, problems and perspectives [J]. *Faraday Discuss*, 2014, 176: 447-458.
- [65] WU C, WANG A C, DING W, et al. Triboelectric nanogenerator: A foundation of the energy for the new era [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(1): 1802906.
- [66] CHANDRASEKARAN S, BOWEN C, ROSCOW J, et al. Micro-scale to nano-scale generators for energy harvesting: Self powered piezoelectric, triboelectric and hybrid devices [J]. *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 2019, 792: 1-33.
- [67] CHEN B, YANG Y, WANG Z L. Scavenging wind energy by triboelectric nanogenerators [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(10): 1702649.
- [68] REN X, XIANG X, YIN H, et al. All-yarn triboelectric nanogenerator and supercapacitor based self-charging power cloth for wearable applications [J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(31): 315404.
- [69] WEI X, ZHAO Z, ZHANG C, et al. All-weather droplet-based triboelectric nanogenerator for wave energy harvesting [J]. *Acs Nano*, 2021, 15(8): 13200-13208.
- [70] 冯明驰, 刘景林, 李成南, 等. 一种多焦距动态立体视觉 SLAM[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(11): 200-209.
- FENG M CH, LIU J L, LI CH N, et al. A Multi-focal Length Dynamic Stereo Vision SLAM[J]. *Chines Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(11): 200-209.
- [71] 王海波, 叶如珊, 杜武. 一种基于 EMD 和小波阈值的桥梁振动信号混合去噪方法[J]. *公路*, 2021, 66(12): 110-116.
- WANG H B, YE R SH, DU W. A hybrid denoising method for bridge vibration signal based on EMD and wavelet threshold [J]. *Highway*, 2021, 66(12): 110-116.
- [72] XIA Y, JIAN X, YAN B, et al. Infrastructure safety oriented traffic load monitoring using multi-sensor and single camera for short and medium span bridges [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2651.
- [73] LI X Y, ZHANG L M, JIANG S H, et al. Assessment of slope stability in the monitoring parameter space [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(7): 04016029.
- [74] MA X, DONG Z, CHEN F, et al. Airport asphalt pavement health monitoring system for mechanical model updating and distress evaluation under realistic random aircraft loads [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 227-237.
- [75] MEIXEDO A, RIBEIRO D, SANTOS J, et al. Progressive numerical model validation of a bowstring-arch railway bridge based on a structural health monitoring system [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(2): 421-449.
- [76] YANG X, SUN L, HUANG B, et al. Tuning the properties of functional adhesives with hybrid nanofillers for structural health monitoring [J]. *The Journal of Adhesion*, 2021, 97(2): 101-116.
- [77] ZHANG Y M, WANG H, WAN H P, et al. Anomaly detection of structural health monitoring data using the maximum likelihood estimation-based Bayesian dynamic linear model [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(6): 2936-2952.
- [78] 王毅, 陈进, 李松浓, 等. 基于时频域分析和随机森林的故障电弧检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(5): 62-68.
- WANG Y, CHEN J, LI S N, et al. Fault arc detection based on time-frequency domain analysis and random

- forest [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(5): 62-68.
- [79] TABJULA J L, KANAKAMBARAN S, KALYANI S, et al. Outlier analysis for defect detection using sparse sampling in guided wave structural health monitoring [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(3): e2690.
- [80] TIBADUIZA BURGOS D A, GOMEZ VARGAS R C, PEDRAZA C, et al. Damage identification in structural health monitoring: A brief review from its implementation to the use of data-driven applications [J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 733.
- [81] FARHANGDOUST S, MEHRABI A. Health monitoring of closure joints in accelerated bridge construction: A review of non-destructive testing application [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2019, 17(7): 381-404.
- [82] ANTONIOS K, ELENI C, DANIEL S. Value of information from vibration-based structural health monitoring extracted via Bayesian model updating [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108465.
- [83] JING G, DUAN F, PENG L, et al. In-situ calibration of in-service strain sensing system under passive excitation: Methodology and impacts assessment [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(12): 125121.
- [84] KIM J, HARNE R L, WANG K W. Online signal denoising using adaptive stochastic resonance in parallel array and its application to acoustic emission signals [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2022, 144(3): 031006.
- [85] CASSESE P, RAINIERI C, OCCHIUZZI A. Applications of cement-based smart composites to civil structural health monitoring: A review [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8530.
- [86] RICCI F, MONACO E, BOFFA N D, et al. Guided waves for structural health monitoring in composites: A review and implementation strategies [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2022, 129: 100790.
- [87] WANG T, WAGG D J, WORDEN K, et al. On sensor optimisation for structural health monitoring robust to environmental variations [J]. *Wind Energy Science*, 2021, 6(5): 1107-1116.
- [88] BADO M F, CASAS J R, GÓMEZ J. Post-processing algorithms for distributed optical fiber sensing in structural health monitoring applications [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(2): 661-680.
- [89] ZHOU G D, YI T H, XIE M X, et al. Optimal wireless sensor placement in structural health monitoring emphasizing information effectiveness and network performance [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 34(2): 04020112.
- [90] LEI X, SUN L, XIA Y. Lost data reconstruction for structural health monitoring using deep convolutional generative adversarial networks [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(4): 2069-2087.
- [91] KHANDEL O, SOLIMAN M, FLOYD R W, et al. Performance assessment of prestressed concrete bridge girders using fiber optic sensors and artificial neural networks [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2021, 17(5): 605-619.
- [92] SIWOWSKI T, RAJCHEL M, HOWIACKI T, et al. Distributed fibre optic sensors in FRP composite bridge monitoring: Validation through proof load tests [J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: 113057.
- [93] BERROCAL C G, FERNANDEZ I, REMPLING R. Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2021, 17(1): 124-139.
- [94] PARK J, SUNG Y H, ON S Y, et al. Development of wireless SHM sensor node for in-flight real-time monitoring using embedded CNT fiber sensors [J]. *Smart Structures and Systems*, 2021, 28(3): 333-341.
- [95] HOU S, WU G. A low-cost IoT-based wireless sensor system for bridge displacement monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085047.
- [96] HOU G, LI L, XU Z, et al. A visual management system for structural health monitoring based on Web-BIM and dynamic multi-source monitoring data-driven [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021: 1-18.
- [97] LEI M, LIU L, SHI C, et al. A novel tunnel-lining crack recognition system based on digital image technology [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108: 103724.
- [98] DANG H V, RAZA M, Nguyen T V, et al. Deep learning-based detection of structural damage using time-series data [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2021, 17(11): 1474-1493.
- [99] GIGLIONI V, GARCÍA-MACÍAS E, VENANZI I, et al.

- The use of receiver operating characteristic curves and precision-versus-recall curves as performance metrics in unsupervised structural damage classification under changing environment [J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: 113029.
- [100] ZENG X P, LIU X, SUN H, et al. Prognosis of fatigue cracks in an aircraft wing using an adaptive tunable network and guided wave based structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(10): 105025.
- [101] TANG Z, LIU W, YAN R, et al. Application of compressed sensing in the guided wave structural health monitoring of switch rails[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(12): 125112.
- [102] LI Y, BAO T, CHEN Z, et al. A missing sensor measurement data reconstruction framework powered by multi-task Gaussian process regression for dam structural health monitoring systems [J]. *Measurement*, 2021, 186: 110085.
- [103] GOYAL D, PABLA B S. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2016, 23(4): 585-594.
- [104] 吴建波, 朱文霞, 刷亮, 等. 边缘计算在智慧交通系统中的应用 [J]. *计算机与现代化*, 2021 (12): 103-109,122.
- WU J B, ZHU W X, JU L, et al. Application of edge computing in intelligent transportation system [J]. *Computer and Modernization*, 2021(12): 103-109,122.
- [105] LUO J, WANG Z, XU L, et al. Flexible and durable wood-based triboelectric nanogenerators for self-powered sensing in athletic big data analytics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-9.
- [106] GAO M, WANG P, WANG Y, et al. Self-powered ZigBee wireless sensor nodes for railway condition monitoring [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 19(3): 900-909.
- [107] 潘述亮, 徐晓东, 杨海波, 等. 智能与进化: 济南新一代智慧交通系统的设计 [J]. *城市交通*, 2020, 18(3): 103-113.
- PAN SH L, XU X D, YANG H B, et al. Intelligence and evolution: The design of a new generation of intelligent transportation system in Jinan [J]. *Urban Transportation*, 2020, 18(3): 103-113.
- [108] 赵恒, 蒋艳琦, 李思楠. 大数据时代背景下的智慧交通规划建设 [J]. *建筑技术研究*, 2021, 4(5): 48-49.
- ZHAO H, JIANG S Q, LI S N. Smart transportation planning and construction under the background of big data era [J]. *Research in Architecture Technology*, 2021, 4(5): 48-49.
- [109] HOU Y, LI Q, ZHANG C, et al. The state-of-the-art review on applications of intrusive sensing, image processing techniques, and machine learning methods in pavement monitoring and analysis [J]. *Engineering*, 2021, 7(6): 845-856.
- [110] JI X, CHEN Y, HOU Y, et al. Detecting concealed damage in asphalt pavement based on a composite lead zirconate titanate/polyvinylidene fluoride aggregate [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(11): e2452.
- [111] FAKHRI M, DEZFOULIAN R S, GOLROO A, et al. Developing an approach for measuring the intensity of cracking based on geospatial analysis using GIS and automated data collection system [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 22(5): 582-596.
- [112] GRAZIANO A D, MARCHETTA V, CAFISO S. Structural health monitoring of asphalt pavements using smart sensor networks: A comprehensive review [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2020, 7(5): 639-651.
- [113] MARUCCIO C, QUARANTA G, LORENZIS L D, et al. Energy harvesting from electrospun piezoelectric nanofibers for structural health monitoring of a cable-stayed bridge [J]. *Smart Material Structures*, 2016, 25(8): 085040.
- [114] 王继林, 杨才千. 基于分布式长标距 FBG 光纤传感的混凝土梁桥荷载识别技术 [J]. *公路*, 2022, 67(1): 118-125.
- WANG J L, YANG C Q. Load identification technology of concrete girder bridge based on distributed long gauge length FBG optical fiber sensing [J]. *Highway*, 2022, 67(1): 118-125.
- [115] ZHANG X, ZHANG L, LIU L, et al. Prestress monitoring of a steel strand in an anchorage connection using piezoceramic transducers and time reversal method [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 4018.
- [116] JI X, HOU Y, CHEN Y, et al. Fabrication and

- performance of a self-powered damage-detection aggregate for asphalt pavement [J]. *Materials & Design*, 2019, 179: 107890.
- [117] LI X, GAO Q, CAO Y, et al. Optimization strategy of wind energy harvesting via triboelectric-electromagnetic flexible cooperation [J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118311.
- [118] JIAO P, MATIN NAZAR A, EGBE K J I, et al. Magnetic capsule triboelectric nanogenerators [J]. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 1-10.
- [119] SHARMA R, MISHRA R, NGO T, et al. Electrically connected spin-torque oscillators array for 2.4 GHz WiFi band transmission and energy harvesting [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-10.
- [120] 罗政, 薛松杰, 葛传洁. 液力变矩器叶片厚度及冲角适配减速带捕能装置 [J]. *应用能源技术*, 2021(3):1-5.
- LUO ZH, XUE S J, GE CH J. The thickness and attack angle of the torque converter blades are adapted to the deceleration belt energy capture device [J]. *Applied Energy Technology*, 2021(3):1-5.
- [121] 邹鸿翔, 魏克湘. 高鲁棒性磁力耦合全密封摩擦与电磁复合路面能量收集装置: CN111864941A [P]. 2020-07-29.
- ZOU H X, WEI K X. Highly robust magnetic coupling, fully sealed friction and electromagnetic composite road energy harvesting device CN111864941A [P]. 2020-07-29.
- [122] AZAM A, AHMED A, HAYAT N, et al. Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (MEH) for application on road [J]. *Energy*, 2021, 214: 118894.
- [123] SONG G J, KIM K B, CHO J Y, et al. Performance of a speed bump piezoelectric energy harvester for an automatic cellphone charging system [J]. *Applied Energy*, 2019, 247: 221-227.
- [124] HEO D, CHUNG J, KIM B, et al. Triboelectric speed bump as a self-powered automobile warning and velocity sensor [J]. *Nano Energy*, 2020, 72: 104719.
- [125] TAHAMI S A, GHOLIKHANI M, NASOURI R, et al. Developing a new thermoelectric approach for energy harvesting from asphalt pavements [J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 786-795.
- [126] PEI J, ZHOU B, LYU L. E-Road: The largest energy supply of the future? [J]. *Applied Energy*, 2019, 241: 174-183.
- [127] XIAO J, ZOU X, XU W. ePave: A self-powered wireless sensor for smart and autonomous pavement [J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2207.
- [128] FENG Q, KONG Q, HUO L, et al. Crack detection and leakage monitoring on reinforced concrete pipe [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(11): 115020.
- [129] 张明, 孔艳冬, 刘扬, 等. 纳米材料的装配式混凝土结构界面损伤监测试验研究 [J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(9): 41-44, 48.
- ZHANG M, KONG Y D, LIU Y, et al. Experimental research on interface damage monitoring of fabricated concrete structures based on nanomaterials [J]. *Sensors and Microsystems*, 2021, 40(9): 41-44, 48.
- [130] 方蓉, 康路明, 张文学, 等. 自复位摩擦耗能支座减隔震机理及试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(23): 83-90.
- FANG R, KANG L M, ZHANG W X, et al. Seismic isolation mechanism and experimental research of self-resetting frictional energy dissipation bearings [J]. *Vibration and Shock*, 2021, 40(23): 83-90.
- [131] ULLAH K F, MUHAMMAD I. Electromagnetic bridge energy harvester utilizing bridge's vibrations and ambient wind for wireless sensor node application [J]. *Journal of Sensors*, 2018: 1-18.
- [132] MASOOD AHMAD M, ULLAH KHAN F. Two degree of freedom vibration based electromagnetic energy harvester for bridge health monitoring system [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2021, 32(5): 516-536.
- [133] KHAN F, AHMAD M M. Dual resonator-type electromagnetic energy harvester for structural health monitoring of bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(5): 1-14.
- [134] LI M, JING X. Novel tunable broadband piezoelectric harvesters for ultralow-frequency bridge vibration energy harvesting [J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113829.
- [135] NIE X, TAN T, YAN Z, et al. Ultra-wideband piezoelectric energy harvester based on Stockbridge damper and its application in smart grid [J]. *Applied Energy*, 2020, 267: 114898.
- [136] GUAN S, BRIDGE J A, LI C, et al. Smart radar sensor network for bridge displacement monitoring [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(12): 04018102.

- [137] BHASKARAN P R, RATHNAM J D, KOILMANI S, et al. Multiresonant frequency piezoelectric energy harvesters integrated with high sensitivity piezoelectric accelerometer for bridge health monitoring applications [J]. *Smart Materials Research*, 2017, 2017(9): 1-23.
- [138] HUO L, WANG F, LI H, et al. A fractal contact theory based model for bolted connection looseness monitoring using piezoceramic transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(10): 104010.
- [139] ITO K, MIYAGUCHI H, YAMAMOTO K, et al. Application of environmental energy as power supply of wireless sensor along dc electric railway [J]. *Sensors and Materials*, 2019, 31(11): 3705-3715.
- [140] WANG Y, WANG P, LI S, et al. An electromagnetic vibration energy harvester using a magnet-array-based vibration-to-rotation conversion mechanism [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 253: 115146.
- [141] MOUAPI A, HAKEM N, KANDIL N. Cantilevered piezoelectric micro generator design issues and application to the mining locomotive [J]. *Energies*, 2020, 13(1): 63.
- [142] JIN L, DENG W, SU Y, et al. Self-powered wireless smart sensor based on maglev porous nanogenerator for train monitoring system [J]. *Nano Energy*, 2017, 38: 185-192.
- [143] ARTAGAN S S, CIAMPOLI L B, D'AMICO F, et al. Non-destructive assessment and health monitoring of railway infrastructures [J]. *Surveys in Geophysics*, 2020, 41(3): 447-483.
- [144] DÍEZ P L, GABILONDO I, ALARCÓN E, et al. Mechanical energy harvesting taxonomy for industrial environments: Application to the railway industry [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 21(7): 2696-2706.
- [145] ZHANG X, ZHANG Z, PAN H, et al. A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 118: 287-294.
- [146] GAO M, PING W, YONG C, et al. Design and verification of a rail-borne energy harvester for powering wireless sensor networks in the railway industry [J]. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(99): 1596-1609.
- [147] HOU W, LI Y, ZHENG Y, et al. Multi-frequency energy harvesting method for vehicle induced vibration of rail transit continuous rigid bridges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 119981.
- [148] WANG P, YANG F, GAO M, et al. Study on an elastic lever system for electromagnetic energy harvesting from rail vibration [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2019, 21(2): 384-395.
- [149] PING W, GAO M, YONG C, et al. A rail-borne piezoelectric transducer for energy harvesting of railway vibration [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2016, 18(7): 4647-4663.
- [150] HOU W, ZHENG Y, GUO W, et al. Piezoelectric vibration energy harvesting for rail transit bridge with steel-spring floating slab track system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 291: 125283.
- [151] LEE S J, AHN D, YOU I, et al. Wireless cement-based sensor for self-monitoring of railway concrete infrastructures [J]. *Automation in Construction*, 2020, 119: 103323.
- [152] LU J, GAO M, WANG Y, et al. Health monitoring of urban rail corrugation by wireless rechargeable sensor nodes [J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(3): 838-852.
- [153] ZHA X D, HU H W, WANG Z W, et al. Development of structure model of hollow slab for solar pavement based on light-guide concrete [J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2021, 1075(1): 012028.
- [154] 房芳, 郑辉, 汪玉, 等. 机械结构健康监测综述 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(16): 269-292.
- FANG F, ZHENG H, WANG Y, et al. Review of mechanical structure health monitoring [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(16): 269-292.
- [155] CHEN Y, XUE X. Advances in the structural health monitoring of bridges using piezoelectric transducers [J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4312.
- [156] FEDELE R, MERENDA M, GIAMMARIA F. Energy harvesting for IoT road monitoring systems [J]. *Instrumentation, Measure, Metrologie*, 2018, 17(4): 605.
- [157] DU R H, HU X S, XIE SH B, et al. Battery aging-and temperature-aware predictive energy management for hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Power Sources*,

2020, 473:228568.

- [158] PAN H, QI L, ZHANG Z, et al. Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review [J]. Applied Energy, 2021, 286: 116518.
- [159] 王慧, 郭晨林, 王乐, 等. 基于内积矩阵及深度学习的结构健康监测研究[J]. 工程力学, 2022, 39(2): 14-22, 75.
- WANG H, GUO CH L, WANG L, et al. Research on structural health monitoring based on inner product matrix and deep learning [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(2): 14-22, 75.
- [160] BARZEGAR V, LAFLAMME S, HU C, et al. Ensemble of recurrent neural networks with long short-term memory cells for high-rate structural health monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 164: 108201.
- [161] LI D, CAO M, DENG T, et al. Wavelet packet singular entropy-based method for damage identification in curved continuous girder bridges under seismic excitations [J]. Sensors, 2019, 19(19): 4272.
- [162] SUN L, ZHANG W, NAGARAJAIAH S. Bridge real-time damage identification method using inclination and strain measurements in the presence of temperature variation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(2): 04018111.
- [163] ERAZO K, SEN D, NAGARAJAIAH S, et al. Vibration-based structural health monitoring under changing environmental conditions using Kalman filtering [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 1-15.

作者简介



杜荣华, 1994 年和 2000 年于长沙交通学院(现更名为长沙理工大学)获得学士学位和硕士学位, 2006 年于国防科技大学获得博士学位, 现为长沙理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为车路联网技术、智能交通技术。

E-mail: csdrh@163.com

Du Ronghua received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Changsha Communications University (now renamed Changsha University of Science and Technology) in 1994 and 2000, and received his Ph.D. degree from National University of Defense Technology in 2006. He is currently a professor and a master advisor at Changsha University of Science and Technology.

His main research interests include vehicle-road networking technology and intelligent transportation technology.



朱胜亿, 2019 年于湖南理工学院获得学士学位, 现为长沙理工大学汽车与机械工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向为高鲁棒性车路能量收集技术。

E-mail: 635087063@qq.com

Zhu Shengyi received his B.Sc. degree from Hunan Institute of Science and Technology in 2019. He is currently a master student in the School of Automotive and Mechanical Engineering at Changsha University of Science and Technology. His main research interest is high-robust vehicle-road energy harvesting technology.



张文明, 2003 年于无锡轻工大学(现更名为江南大学)获得硕士学位, 2006 年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海交通大学特聘教授、博士生导师, 主要研究方向为微纳机电系统、仿生与接触力学。

E-mail: wenmingz@sjtu.edu.cn

Zhang Wenming received his M.Sc. degree from Wuxi University of Light Industry (now renamed Jiangnan University) in 2003 and received his Ph.D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2006. He is currently a distinguished professor and a Ph.D. advisor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests are micro-nano electromechanical systems, bionics and contact mechanics.



邬鸿翔(通信作者), 2005 年于华中科技大学获得学士学位, 2014 年于长沙理工大学获得硕士学位, 2017 年于上海交通大学获得博士学位, 现为长沙理工大学特聘教授、湖南工程学院副教授, 主要研究方向为智能材料与结构设计、动力学分析与控制。

E-mail: zouhongxiang@163.com

Zou Hongxiang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2005, received his M.Sc. degree from Changsha University of Science and Technology in 2014, and received his Ph.D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2017. He is currently a distinguished professor at Changsha University of Science and Technology and an associate professor at Hunan Institute of Engineering. His main research interests are intelligent materials and structural design, dynamic analysis and control.