

摩擦纳米发电机在自驱动智能交通系统的应用研究进展

靳龙, 张磊, 张彬彬, 杨维清*

西南交通大学材料科学与工程学院, 材料先进技术教育部重点实验室, 成都 611756

摘要 摩擦纳米发电机具有供电和高灵敏度传感的双重功能, 能够在自驱动智能交通系统中发挥重要作用。综述了近年来摩擦纳米发电机在公路及铁路智能交通系统中的应用, 包括车辆检测、尾气处理、振动能收集、风能收集等, 分析了摩擦纳米发电机在智能交通系统应用过程中存在的挑战, 展望了摩擦纳米发电机在材料、信息、电子、机械、交通等多学科交叉的发展趋势。

关键词 摩擦纳米发电机; 智能交通系统; 自驱动; 传感器

近年来, 人类的交通方式得到大幅度改善。尤其是中国高铁的飞速发展^[1-2], 运行速度不断提升, 缩短了城市间的距离, 极大地方便了人们的出行。交通速度的快速提升对交通安全监测等方面提出了新要求。物联网作为物物相连的互联网, 能够对交通领域各方面进行实时监测, 将各类传感、控制技术运用到整个交通系统中, 这不仅提升了整个交通系统的安全, 而且使得各种监测方式更加便捷^[3], 推动着交通系统走向智能化。

随着智能交通的进一步发展, 安全、便捷等方

面的需求进一步扩大, 传感器的精度需进一步提高, 且需要更广的监测范围。因此, 系统所需的传感节点越来越多。虽然传感信号可以通过无线传输的方式传输到终端, 减少了布线复杂的问题, 但传感节点所需的电能仍需要通过传统的电线进行供给。王中林^[4]在 2006 年提出了基于压电纳米发电机 (piezoelectric nanogenerator, PENG) 自驱动技术的概念, 但发电功率一般在 μW 甚至 nW 级, 难以满足一般电子器件的需求。2012 年, 王中林研究组首次报道了一种基于摩擦起电与静电感应耦合

收稿日期: 2022-08-03; 修回日期: 2022-09-01

基金项目: 四川省国际合作项目 (2017HH0069)

作者简介: 靳龙, 博士研究生, 研究方向为压电与摩擦电材料器件, 电子信箱: longjin@swjtu.edu.cn; 杨维清 (通信作者), 教授, 研究方向为纳米能源材料与功能器件, 电子信箱: wqyang@swjtu.edu.cn

引用格式: 靳龙, 张磊, 张彬彬, 等. 摩擦纳米发电机在自驱动智能交通系统的应用研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(17): 63-75; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.17.006

原理的摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)^[5]。TENG所需材料成本较低,制造过程简单,并且十分轻便^[6-7],可以根据实际需求设计不同结构以进行匹配。更重要的是,TENG的输出功率很高^[8-9],利用该项技术可以将环境中的机械能转化为电能,即使没有外部电能的供给,植入TENG的微电子器件也可以实现能量的自给自足^[10-12]。

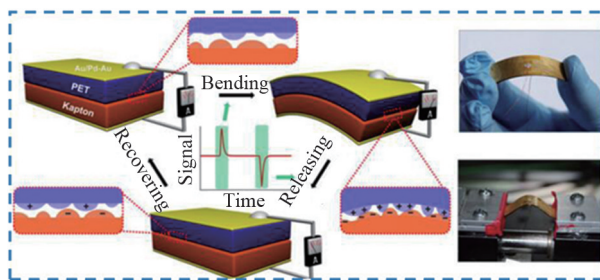
在交通领域中,无论是公路交通还是轨道交通都存在着大量的闲置能量^[13],例如轮胎对路面的压力所产生的能量、风能等,尤其是振动能,人们往往都将其作为不利因素而进行消除。但作为机械能,这些都可以通过TENG进行收集。虽然传统电磁感应的微机电系统(MEMS)可进行能量收集,但在交通领域,由于很多传感器会受到较强磁场的影响,不利于一体集成化,而弱磁场的MEMS能量收集效率较低,所以TENG更加适合于交通领域的能量收集。此外,由于TENG独特的工作方式,当其受到压力或应变时,构成摩擦层的2个聚合物薄膜之间会产生相对形变,进而监测到微小的机械力^[14]。在交通领域中,尤其是汽车及列车的部件需

要灵敏度更高的传感器,且由于很多部件具有特殊形状,TENG在这方面拥有独特的优势与广阔的应用前景。本综述介绍自驱动智能交通系统的研究进展,主要包括TENG在公路交通和轨道交通2大交通领域的应用。

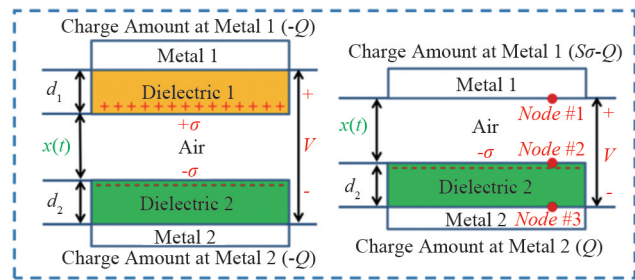
1 摩擦纳米发电机

1.1 摩擦起电与静电感应原理

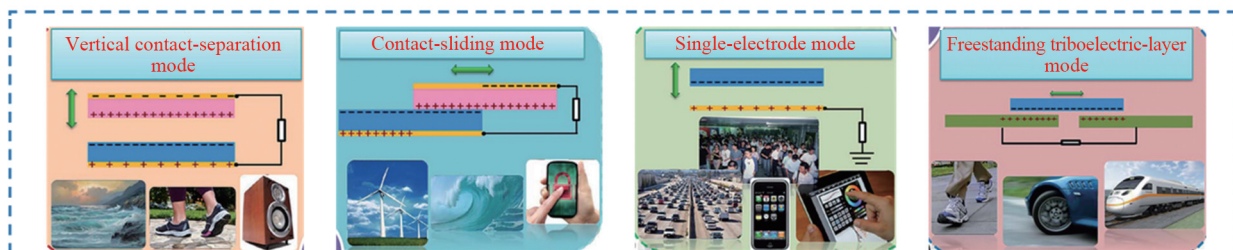
摩擦起电是日常生活中一种非常普遍的现象,例如早上梳头时头发会“飘”起来,冬天脱毛衣的时候会有噼里啪啦的响声,这些就是因为接触所引起的带电效应,即摩擦起电效应。当一种材料与另一种材料发生摩擦,两者便会带上异种电荷。当这2种材料用电极及外电路导线连接起来时,电极由于静电感应效应从而产生感应电荷。由于外力使得电势差发生变化,感应电荷便会在电势差的驱动下在电路中流动从而形成电流^[15]。基于这2种效应,可以将TENG主要分为垂直接触-分离模式、水平滑动模式、单电极模式、独立层模式4种工作模式^[16](图1)。



(a) 第一台TENG及其实物^[5]



(b) TENG工作原理^[15]



(c) TENG的4种工作模式^[16]


图1 TENG及其工作模式

1.2 材料增强

摩擦材料接触过程中涉及到摩擦力、功函数、电子亲和势等,都与 TENG 的输出性能有关。因此,选择恰当的材料可以获得理想的输出效果,这就需要用到摩擦电序列作为定性指标^[12]。这个序列主要展示了常用的一些材料得失电子能量的强

弱,如表 1^[12]所示,越靠近表的下端表示得电子能量越强,越靠近表的上端表示失电子能力越强。可以看出,聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)和聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)得电子能力最强。在许多文献报道中^[17-20],这 2 种材料也是经常用来作为摩擦材料的负极材料。

表 1 常见材料的摩擦电序列

	Aniline-formol resin	Polyvinyl alcohol
	Polyformaldehyde 1.3-1.4	Polyester (Dacron) (PET)
	Etylcellulose	Polyisobutylene
	Polyamide 11	Polyurethane flexible sponge
	Polyamide 6-6	Polyethylene terephthalate
	Melanime formol	Polyvinyl butyral
	Wool, knitted	Formo-phenolique, hardened
	Silk, woven	Polychlorobutadiene
	Polyethylene glycol succinate	Butadiene-acrylonitrile copolymer
	Cellulose	Nature rubber
	Cellulose acetate	Polyacrylonitrile
	Polyethylene glycol adipate	Acrylonitrile-vinyl chloride
	Polydiallyl phthalate	Polybisphenol carbonate
	Cellulose (regenerated) sponge	Polychloroether
	Cotton, woven	Polyvinylidene chloride (Saran)
	Polyurethane elastomer	Poly (2, 6-dimethyl polyphenyleneoxide)
		Polystyrene
	Styrene-acrylonitrile copolymer	Polyethylene
	Styrene-butadiene copolymer	Polypropylene
	Wood	Polydiphenyl propane carbonate
	Hard rubber	Polyimide (Kapton)
	Acetate, Rayon	Polyethylene terephthalate
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)
	Polyvinyl alcohol	Polytrifluorochloroethylene
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)

由于材料表面并不是光滑的,在微观尺度上会有凹凸不平整的粗糙结构,会降低材料之间的有效接触面积。针对这一问题,Wang 等^[21]通过电感耦合等离子光谱发生仪(Inductive Coupled Plasma Emission Spectrometer, ICP)刻蚀的方法对高分子材料表面进行刻蚀,成功地在一系列高分子材料表面刻蚀出纳米线(图 2(a)),使得高分子纳米线与另一摩擦材料在接触分离过程中拥有更大的有效接触面积,从而增强了 TENG 的输出性能。除此之外,在 PDMS

表面通过模板法构筑出微型倒金字塔结构^[22](图 2(b)),也可以有效地提高摩擦材料间的有效接触面积,从而增强 TENG 的输出性能。

除了这些比较常见的聚合物材料,一些新型材料,例如石墨烯及其衍生物、碳纳米管等碳材料,也由于其引起了良好的导电性及材料表面的纳米级粗糙度而受到人们的关注。Zhang 等^[23]通过在硅基底竖直定向地生长碳纳米管,将 TENG 的电压和电流分别提高了 250% 和 300%(图 3(a))。石墨烯及

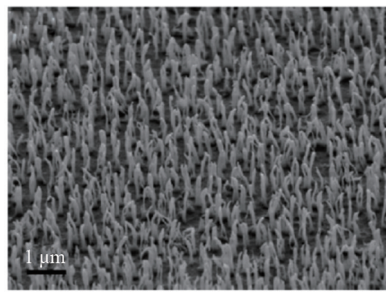
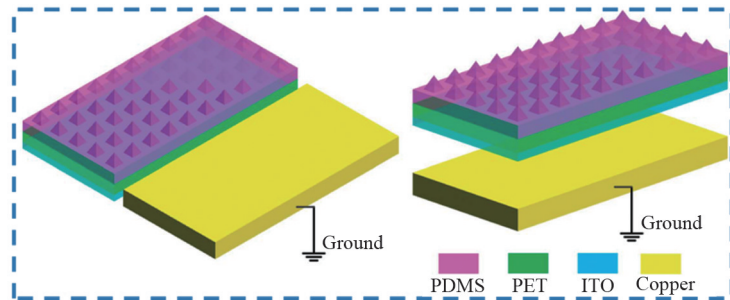
(a) 高分子材料表面的竖直方向纳米线阵列^[21](b) 在聚二甲基硅氧烷表面进行的倒金字塔结构修饰^[22]

图2 材料表面结构修饰增强 TENG 输出性能

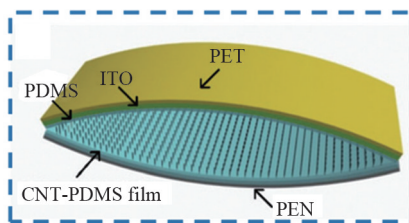
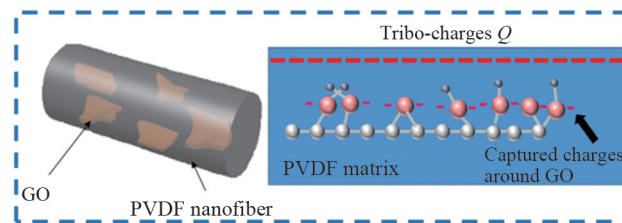
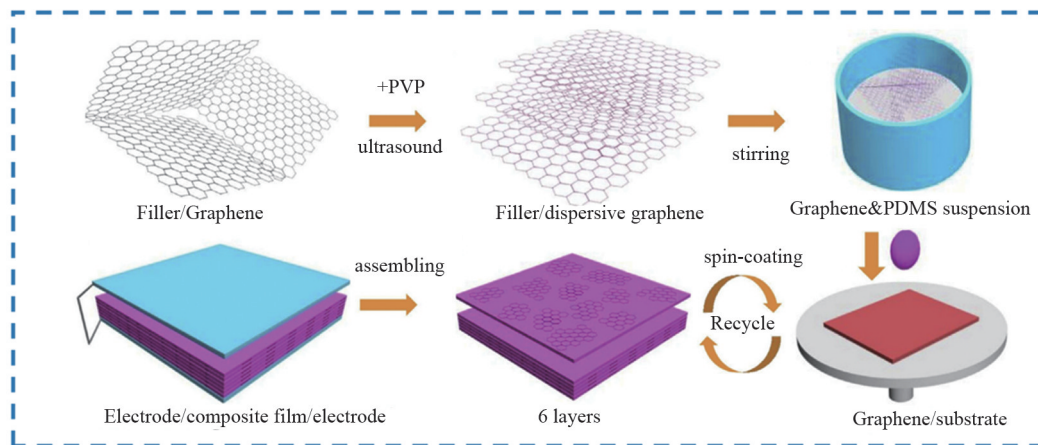
(a) TENG 材料表面为竖直的碳纳米管^[23](b) 氧化石墨烯掺杂在有机基体中的示意及其增强原理^[24](c) 掺杂石墨烯后层叠结构旋涂的摩擦材料制备过程^[25]

图3 材料复合增强 TENG 输出性能

氧化石墨烯作为最重要的二维材料之一,或作为摩擦材料,或作为添加剂添加到有机物基体中^[24-25](图2(b)和(c)),都有效地起到了增强 TENG 输出的作用。

1.3 结构设计

TENG 的工作模式主要分为 4 种,每种工作模式下又相继衍生出性能更强、应用范围更广的堆叠式结构^[26-27]。仅将多个垂直接触-分离结构由 $n=1$

叠加到 $n=3$ (图4(a)),并联之后就可以将其输出电流由 $245 \mu\text{A}$ 提升至 1.395 mA ^[28]。如图4(b)所示,通过将一种摩擦材料进行次序堆叠,可以使得在一个运动周期内,摩擦材料发生 2 次接触分离,这样大大提高了单位时间内的输出能量,而堆叠式的结构本身就可以将 TENG 的输出提升,最终达到 303 V 、 1.14 mA 的高输出性能^[29]。较为经典的拱形结构通过多单元叠加设计,成倍地增强其输出性能,

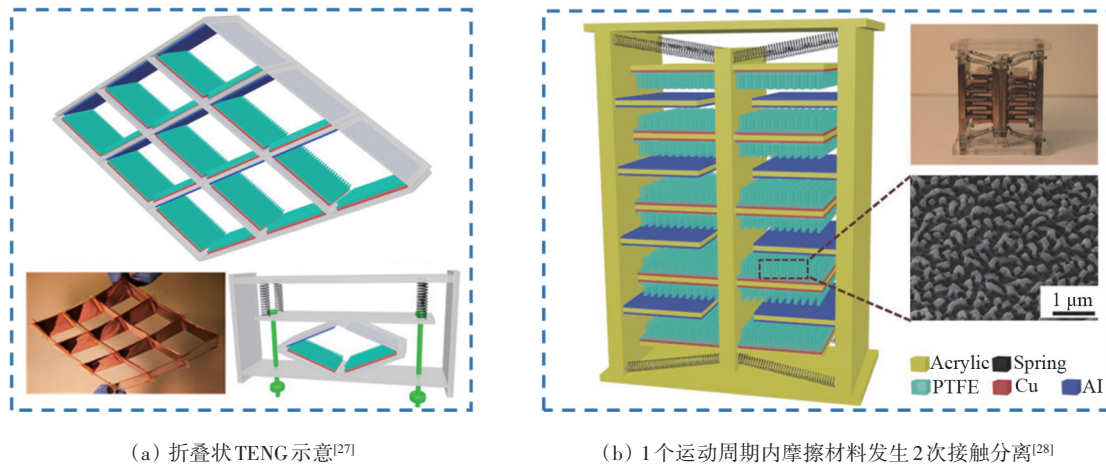
(a) 折叠状 TENG 示意^[27](b) 1 个运动周期内摩擦材料发生 2 次接触分离^[28]

图 4 TENG 的层叠状结构设计

并最终应用在各种场景中^[30]。巧妙地通过折叠结构来增加发电单元的方法不仅增强了 TENG 的输出,而且减少了结构本身所占的体积,使其拥有更高的输出功率^[31-33]。

单一的工作模式所产生的电量也是有限的,若施加一个外力,可以使多种工作模式产生协同作用,则发电量也会相应地增加。研究者就这一问题提出了波浪形结构的设计^[34],如图 5^[34]所示,拥有波浪形结构的聚合物薄膜在外力作用下发生形变,呈现平板状。而这一过程中,波浪结构的聚合物薄膜与上下平面状的摩擦材料发生相对滑动,呈现出水平滑动的工作模式。而同时,薄膜的形状变化使得其与上下平面状摩擦材料的接触面积发生了变化,也呈现出垂直接触-分离的工作模式。这样的结构也为后续的研究提供了一个全新的思路^[35]。

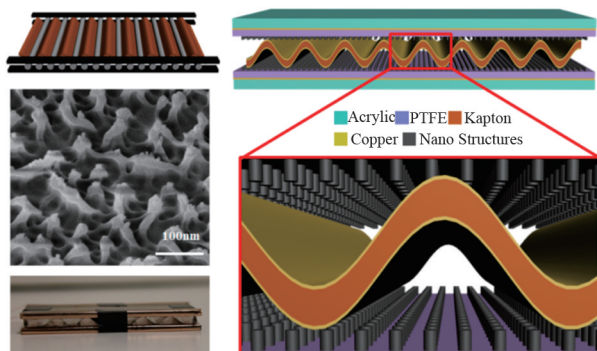


图 5 波浪形结构 TENG 及其制备过程

2 智能交通系统的应用

2.1 公路交通的应用

随着人们对安全性和舒适度要求的不断提高,公路交通的智能化越来越受到人们的关注。

2.1.1 运行中车辆的检测与能量收集

公路交通中最为关键的便是车辆运行过程中的信号检测,这直接关系到车辆行驶状态与安全。而作为车辆最关键的部位之一,轮胎的检测与能量收集成了非常重要的一项研究^[36]。如图 6(a)所示, Lee 等^[37]通过巧妙的结构设计,利用磁铁的异性相吸原理,将 TENG 集成到车辆的轮胎上,并探究了不同磁场与轮胎不同转速下 TENG 的输出。将这一过程中的能量收集起来后,已经验证可以为商用的无线传感设备供电。通过更加密集的胎内装置 TENG, Guo 等^[38]得到了一种输出更高的车胎能量收集装置(图 6(b)),可以达到输出功率 1.2 W。Askari 等利用 TENG 作为传感器的高灵敏性,系统地概念、设计、封装、实验等方面阐释了将其作为轮胎状态检测手段的优势^[39]。当然,车辆制动过程中瞬间释放的能量^[40]可以通过 TENG 进行回收再利用。

车辆本身的安全与智能化还远不止这些,车辆各个零部件都需要朝着智能化发展,例如车辆中的车座和发动机^[41]等。发动机作为汽车动力之源,也是汽车最重要的部分之一。Zhang 等^[42]将 TENG 集

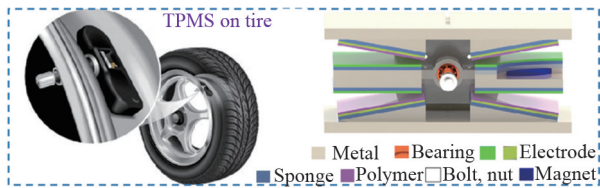
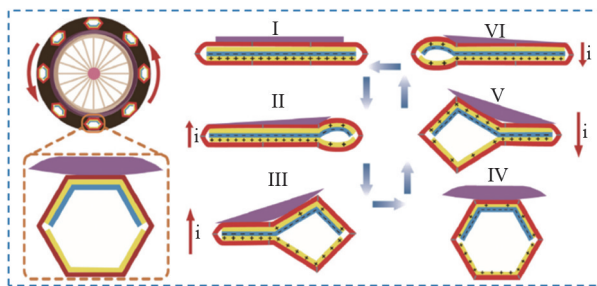
(a) 基于轮胎能量收集的磁铁驱动TENG^[37](b) 胎内装置TENG示意及其工作机理^[38]

图6 TENG用于车辆轮胎能量收集

成在汽车发动机上,如图7(a)所示,利用液态金属与静电纺丝的聚合物薄膜较大比表面积和对微弱振动的灵敏感知,可以使TENG检测出发动机在开始启动时与结束时震动频率与振幅的变化。除此之外,作为高灵敏度的检测单元,将TENG进行结构设计制备成为加速度传感器、速度传感器、角度传感器等,应用到汽车上,可以检测到来自各个方位的碰撞情况(图7(b)),以便及时处理,最大限度地减少人员伤亡^[43]。

除了汽车本身因素之外,交通事故很多是由于驾驶人员的个人因素所导致的^[44-45]。因此,对驾驶人员在车辆行驶过程中的实时监测与提醒也极为重要。由于TENG所使用材料为聚合物,可以将其制备成柔性器件应用到驾驶人员身体上(图8),来检测驾驶人员眨眼等身体动作,将其信号加以分析

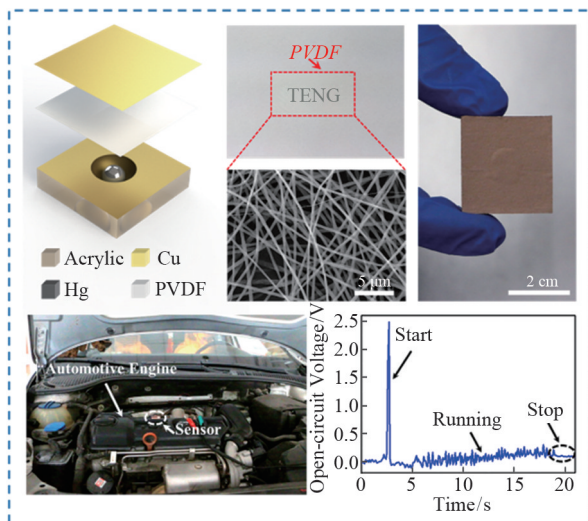
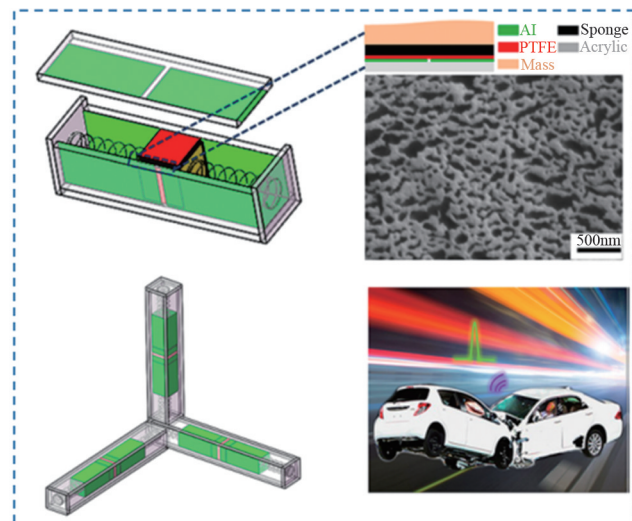
(a) 基于TENG的加速度传感器示意及其应用在汽车发动机上的检测情况^[42](b) 基于TENG的加速度传感器应用结构示意图及应用场景^[43]

图7 TENG用于车辆传感系统

来判断驾驶人员的疲劳程度,避免疲劳驾驶^[46]。而TENG本身高的灵敏度和短的响应时间使得其在刹车制动和油门检测方面也独具优势。

2.1.2 车辆行驶的路面检测

作为公路交通中承载车辆的路面,其安全性与智能化也直接影响着车辆的安全。如图9(a)所

示,利用TENG与太阳能电池相结合的方式^[47],对公路上的风能与太阳能进行收集后,用于无线信号的收发,可以将信号传输到电脑终端加以分析,进而对路况进行实时监测,方便人们出行。通过与电磁发电相结合的方式,TENG可以作为无线车流量计^[48]检测过往车辆的数量及车速(图9(b)),可

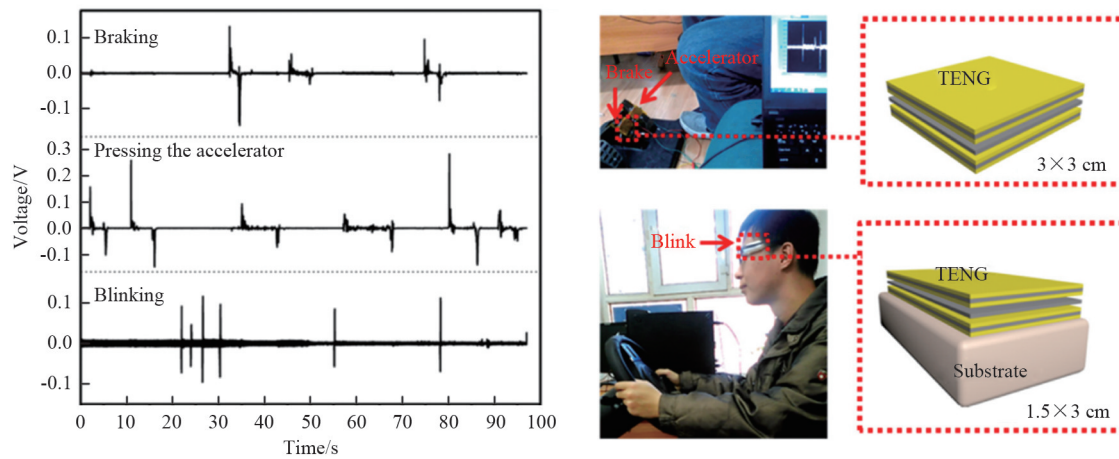
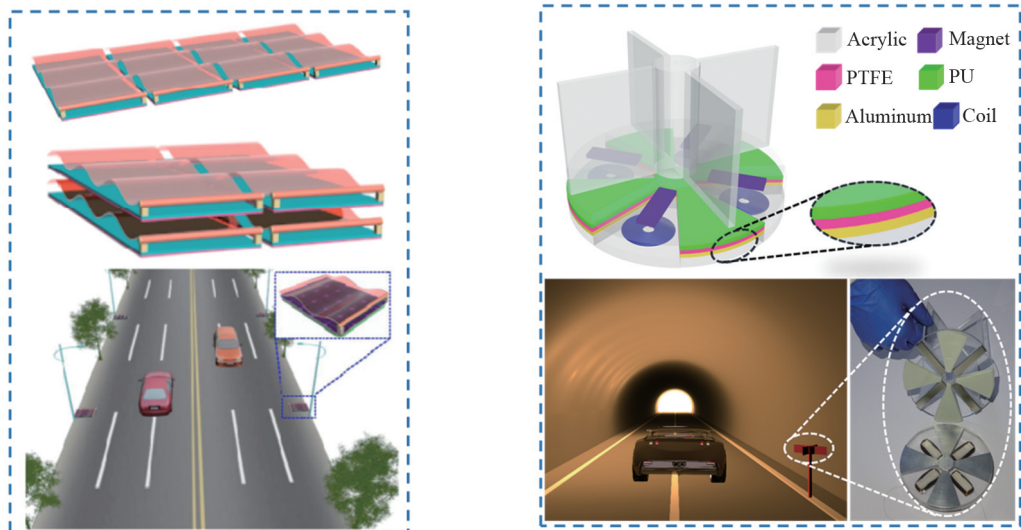
图8 TENG应用在汽车驾驶人员的检测数据及应用场景^[46](a) 收集道路中汽车所带来的风能用于无线信号的收发^[47](b) 无线车流量计检测过往车辆的数量及行驶速度^[48]

图9 TENG用于路面风能收集和传感

以在限速路段提醒驾驶人员以避免不必要的事故。

车辆与路面之间所产生的机械能也可以进行收集^[49],用于对过往车辆进行检测。Askari等^[50]详细地通过概念、构筑模型、细节优化等手段,阐述了用以车辆检测的电磁-摩擦杂化纳米发电机制备过程(图10(a))。而在之前,Zhang等^[51]已通过实验手段论证了这一方案的可实施性。在汽车倒车过程中,会有亮灯提示车辆已到达指定位置,避免发生碰撞。当然,轮胎与地面之间的相互接触也可以看作是垂直接触-分离以及水平滑动的协同工作

模式,而由于公路与大地相连,所以这种工作模式从某种意义上讲也是单电极模式的一种。如图10(b)所示,Mao等^[52]针对这种情况进行了一些探究,证实了这一方案的可实施性,成功地将6颗商用LED点亮。

2.1.3 车辆尾气处理

如今,社会各行各业都朝着节能减排的方向发展,车辆尾气作为引起污染的主要源头之一无疑是需要进行改进的。TENG由于独特的工作原理,在摩擦材料接触分离后会带有静电荷,而静电荷对于

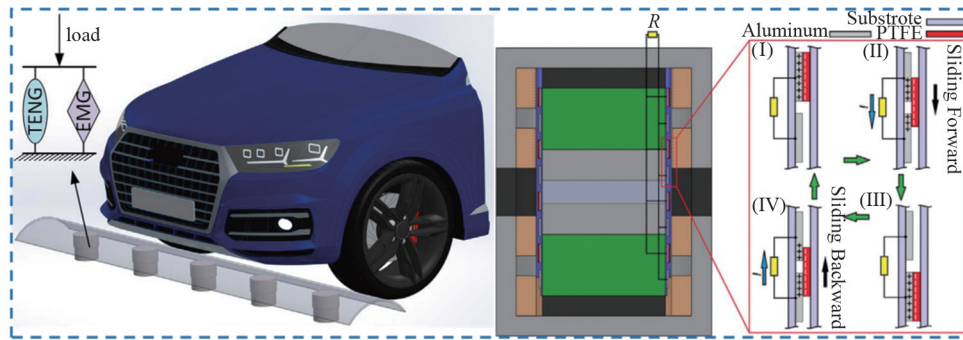
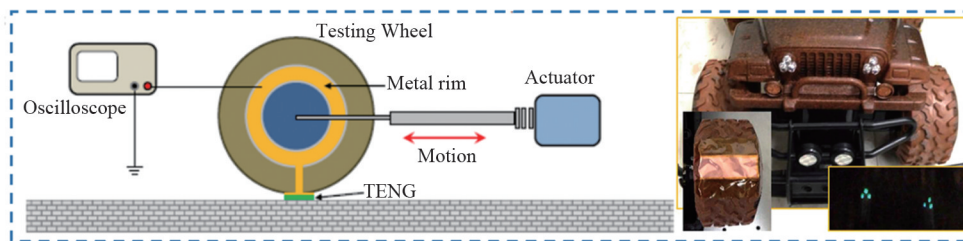
(a) 利用摩擦与电磁杂化的纳米发电机收集汽车行驶过程中路过减速带时的能量^[50](b) 单电极模式的 TENG 收集轮胎与路面间的能量^[52]

图 10 TENG 用于车辆/路面机械能收集

粉尘,尤其是对人体有害的 $PM_{2.5}$ 具有吸附作用^[53]。许多研究通过静电纺丝的方法制备出摩擦材料^[54-55],封装成 TENG。空气经过 TENG 后,很多小颗粒会吸附到静电纺丝膜上,这样空气便得到了净化。这种新的方法可以有效地去除掉 $PM_{2.5}$,且不需要额外排放诸如臭氧等其他气体^[56-57]。将这项新型技术应用到汽车尾气的净化上^[58],可以有效地去除

尾气中的 $PM_{2.5}$,效率高达 95.5%(图 11(a))。不仅如此,因为 TENG 本身是可以作为能量收集装置使用的,所以在净化 $PM_{2.5}$ 的同时还可以进行能量收集,在连续工作 50 h 以后,收集效率仍有 82.4%。除了 $PM_{2.5}$ 外,尾气中其他有害气体也可以通过改进的 TENG 来进行实时检测^[59],若超过阈值后便会报警提醒,大大提高了车辆智能化程度(图 11(b))。

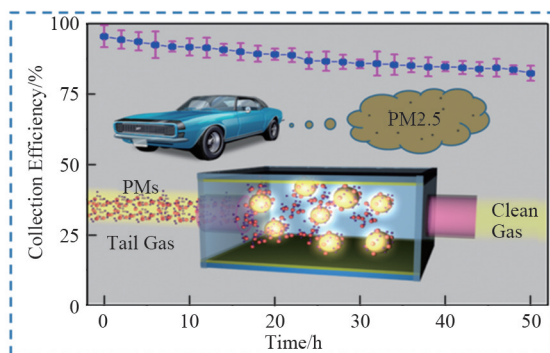
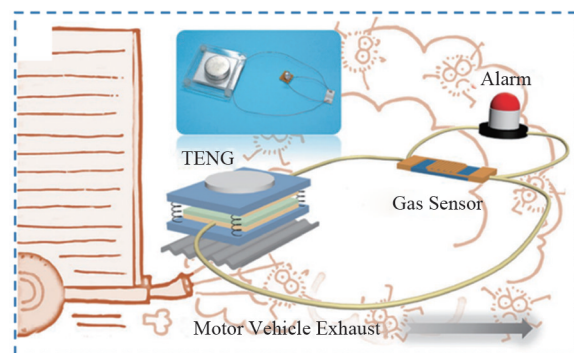
(a) 塑料小球摩擦后带有电荷从而吸附汽车尾气中的 $PM_{2.5}$ ^[58](b) 以 TENG 供电的气体传感器检测汽车尾气以预警^[59]

图 11 TENG 用于汽车尾气处理

2.2 轨道交通的应用

轨道交通作为陆地上长途交通的主要方式,近年来逐渐受到了各界的关注。尤其是中国高铁,经过大力发展改进,已然成为了中国在世界上的一张名片^[60]。而轨道交通这一领域,速度的极大提升与各项智能化检测方面的落后形成鲜明对比^[61]。如何尽快发展与之匹配的智能化检测手段,推动轨道交通领域的智能化发展,是目前该领域一个亟需解决的问题。

2.2.1 列车零部件检测与振动能收集

如今,轨道列车的舒适度已经大大提升,但依旧会有不平稳与振动产生,尤其是列车的零部件振动会更加明显。因此,一些关键部位的检测需要实时地进行^[62-63]。虽然检测信号可以通过无线传输的方式传输到终端进行分析,但检测所用传感器的供电涉及到排线布线。复杂的布线不仅浪费成本,而且维修起来难度很大,更重要的是可能会对检测信号产生一定的干扰。因此采用“自驱动”的方式为无线传感器进行供电是目前的最佳方案,而且列车中存在着大量的振动能,使得这一方案的可行性大大提高。

已有研究证明,在列车行驶过程中的振动能可以成功地被收集起来^[64-65]。而将 TENG 集成到列车上,可用以收集列车行驶中的振动能,并最终将能量用作 Zigbee 的数据传输^[66],实现了无线传感的自驱动。将电磁与摩擦 2 种发电方式相结合,可以更高效地进行能量收集,并为电容器充电^[67-68]。如图 12^[69]所示, Jin 等^[69]特别针对列车转向架的复杂布线问题,设计出磁悬浮式的杂化纳米发电机,不仅可

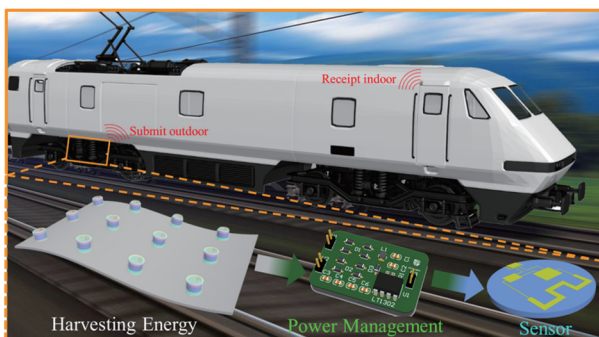


图 12 TENG 用于列车转向架的自驱动传感系统

以在 20 Hz 下持续地为无线传感器供电从而实现自驱动化,而且经过水的冲洗后性能没有衰减,完全可以适应雨水等室外环境。将多个杂化纳米发电机在柔性基底上进行集成,对于列车转向架不同位置的不同形状有着很好的适应性,并且可以依此推广到列车其他部位,最终达到列车整体智能化。

2.2.2 轨道振动能收集

作为列车运行的基础,列车轨道的安全起着决定性作用,需要定期进行检测与维修,不仅增加了成本,而且会对运营产生一定的影响,降低了人们出行的便利性。除此之外,由于列车经过时所引起的振动,在一定程度上会引起轨道的松动等问题,因此现有很多方法都是基于在减小甚至避免轨道受到振动的影响^[70]。而收集振动能这种方法不仅可以实现轨道检测的自驱动化,而且将一部分振动能转化为了电能,减少了振动对轨道所带来的损害,一举两得。

有文献通过压电等方式对这一部分能量进行回收利用^[71],但压电能量收集对频率要求较高,且会有一定程度的应用限制。而 TENG 在振动能收集方面有着独特的优势,虽然相关方面的研究还有待继续,但同时也是此类研究的一个发展机会。

2.2.3 地铁隧道风能收集

地铁作为城市交通最主要的方式之一,因为极低的延误与方便的出行,一直受到人们的好评。但随着交通智能化的普及与发展,地铁交通也面临着智能化偏低的问题。由于地铁属于轨道交通的一种,所以很多适用于轨道交通的智能化应用,对地铁也是非常适用的^[72]。不同于普通的轨道交通方式,地铁几乎都是在地下运行,所以在隧道中产生的风能成为另外一种独有的能量方式。

Wang 等以此为背景,设计了树状的 TENG,如图 13^[73]所示,“树叶”与“树干”拥有不同的发电结构,多个“树叶”与“树干”共同组成 TENG 发电树^[73]。在不同的风速下,“发电树”拥有不同的电学输出性能,其电压、电流最高可以达到 330 V 及 59.6 μA ,可以成功地点亮 145 颗商用 LED 灯珠。

由于 TENG 无需磁铁且体积较小,不会影响隧道内的正常工作。基于此背景,许多用于风能收集

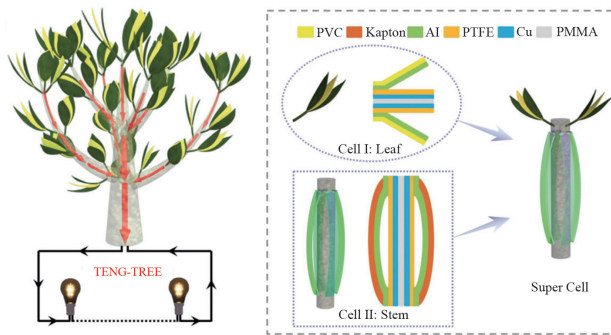


图13 具有“树干”与“树叶”双发电单元的“发电树”示意

的TENG都可以用来收集隧道中的风能,例如很经典的纳米“发电草”结构^[74]、叠层状结构^[75]、叶片的旋转式结构^[76-78]和中间自由层结构^[79]等。

3 结论

物联网的快速发展与先进的材料纳米技术掀起了交通领域智能化的一场革命。传感器等微电子芯片的功耗不断降低以及TENG的功率不断提高,都为交通领域所有传感器实现自驱动化提供了可能。让交通领域传感器摆脱复杂的布线,使得信号传输无线化、能量供给自驱动化,是智能交通未来发展的关键一步。为了这一目标的早日实现,需物联网领域与材料纳米技术共同发展,进一步提高TENG的输出功率。

电子电路的微电子技术为材料纳米技术与传感器之间搭建了桥梁,使得材料纳米技术得以应用在传感器上。但由于TENG能量收集的时域性问题,需要搭配后端电源管理电路,管理收集到的能量,从而更好地为传感器提供电能。这为微电子领域提供了一项挑战。

目前,交通领域与电子电路领域有着紧密的结合与交叉。但纳米、材料领域与交通领域的学科交叉还较少。新型的TENG,其优良的输出性能与低成本吸引了大量学者对其进行研究,但将其应用在智能交通领域的研究却较少,尤其是轨道交通领域。究其原因主要是学科间交叉太少,2个领域相互了解不够充分。相信通过2个领域的不断交叉与融合,TENG会在智能交通领域有更多的应用,造福人类。

参考文献 (References)

- [1] Chai J, Zhou Y H, Zhou X Y, et al. Analysis on shock effect of China's high-speed railway on aviation transport [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 108: 35-44.
- [2] Xu W A, Zhou J, Yang L Y, et al. The implications of high-speed rail for Chinese cities connectivity and accessibility[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 116: 308-326.
- [3] Rao Y R. Automatic smart parking system using internet of things[J]. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 2017, 4(5): 2394-3386.
- [4] Wang Z L, Song J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. *Science*, 2006, 312 (5771): 242-246.
- [5] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L. Flexible triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1: 328-334.
- [6] Zhang X S, Han M D, Kim B, et al. All-in-one self-powered flexible microsystems based on triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2018, 47: 410-426.
- [7] Fan F R, Tang W, Wang Z L. Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4283-4305.
- [8] Zhu G, Peng B, Chen J, et al. Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications[J]. *Nano Energy*, 2015, 14: 126-138.
- [9] Wang Z L. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: The origin of nanogenerators[J]. *Materials Today*, 2017, 20(2): 74-82.
- [10] Wang Z L, Chen J, Lin L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(8): 2250-2282.
- [11] Cao X, Jie Y, Wang N, et al. Triboelectric nanogenerators driven self-powered electrochemical processes for energy and environmental science[J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(23): 1600665.
- [12] Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors[J]. *ACS Nano*, 2013, 7 (11): 9533-9557.
- [13] Xiong H C, Wang L B. Piezoelectric energy harvester for public roadway: On-site installation and evaluation[J].

- Applied Energy, 2016, 174: 101–107.
- [14] Wang S H, Lin L, Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as self-powered active sensors[J]. *Nano Energy*, 2015, 11: 436–462.
- [15] Niu S M, Wang Z L. Theoretical systems of triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2015, 14: 161–192.
- [16] Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors – principles, problems and perspectives[J]. *Faraday Discussions*, 2014, 176: 447–458.
- [17] Yang W Q, Chen J, Zhu G, et al. Harvesting vibration energy by a triple-cantilever based triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Research*, 2013, 6(12): 880–886.
- [18] Zhu G, Yang W Q, Zhang T J, et al. Self-powered, ultra-sensitive, flexible tactile sensors based on contact electrification[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3208–3213.
- [19] Chen J, Zhu G, Yang W, et al. Harmonic-resonator-based triboelectric nanogenerator as a sustainable power source and a self-powered active vibration sensor[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(42): 6094–6099.
- [20] Guo H Y, Leng Q, He X M, et al. A triboelectric generator based on checker-like interdigital electrodes with a sandwiched PET thin film for harvesting sliding energy in all directions[J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(1): 1400790.
- [21] Fang H, Wu W Z, Song J H, et al. Controlled growth of aligned polymer nanowires[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(38): 16571–16574.
- [22] Meng B, Tang W, Too Z H, et al. A transparent single-friction-surface triboelectric generator and self-powered touch sensor[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(11): 3235–3240.
- [23] Wang H, Shi M Y, Zhu K, et al. High performance triboelectric nanogenerators with aligned carbon nanotubes [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(43): 18489–18494.
- [24] Huang T, Lu M X, Yu H, et al. Enhanced power output of a triboelectric nanogenerator composed of electrospun nanofiber mats doped with graphene oxide[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13942.
- [25] Xia X N, Chen J, Liu G L, et al. Aligning graphene sheets in PDMS for improving output performance of triboelectric nanogenerator[J]. *Carbon*, 2017, 111: 569–576.
- [26] Guo H Y, Yeh M H, Zi Y L, et al. Ultralight cut-paper-based self-charging power unit for self-powered portable electronic and medical systems[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 4475–4482.
- [27] Bai P, Zhu G, Lin Z H, et al. Integrated multi layered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(4): 3713–3719.
- [28] Yang W Q, Chen J, Zhu G, et al. Harvesting energy from the natural vibration of human walking[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(12): 11317–11324.
- [29] Yang W, Chen J, Jing Q S, et al. 3D stack integrated triboelectric nanogenerator for harvesting vibration energy [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(26): 4090–4096.
- [30] Chen, J, Yang J, Li Z, et al. Networks of triboelectric nanogenerators for harvesting water wave energy: A potential approach toward blue energy[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(3): 3324–3331.
- [31] Chung J, Lee S, Yong H, et al. Self-packaging elastic bellows-type triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2016, 20: 84–93.
- [32] Meng B, Tang W, Zhang X S, et al. Self-powered flexible printed circuit board with integrated triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2013, 2(6): 1101–1106.
- [33] Liu G L, Guo H Y, Chen L, et al. Double-induced-mode integrated triboelectric nanogenerator based on spring steel to maximize space utilization[J]. *Nano Research*, 2016, 9(11): 3355–3363.
- [34] Wen X N, Yang W Q, Jing Q S, et al. Harvesting broadband kinetic impact energy from mechanical triggering/vibration and water waves[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(7): 7405–7412.
- [35] Jin L, Chen J, Zhang B B, et al. Self-powered safety helmet based on hybridized nanogenerator for emergency[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(8): 7874–7881.
- [36] Bowen C R, Arafa M H. Energy harvesting technologies for tire pressure monitoring systems[J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(7): 1401787.
- [37] Qian J G, Kim D S, Lee D W. On-vehicle triboelectric nanogenerator enabled self-powered sensor for tire pressure monitoring[J]. *Nano Energy*, 2018, 49: 126–136.
- [38] Guo T, Liu G X, Pang Y K, et al. Compressible hexagonal-structured triboelectric nanogenerators for harvesting tire rotation energy[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 18: 1–8.
- [39] Askari H, Saadatnia Z, Khajepour A, et al. A triboelectric self-powered sensor for tire condition monitoring: Concept, design, fabrication, and experiments[J]. *Ad-*

- vanced Engineering Materials, 2017, 19(12): 1700318.
- [40] Han C B, Du W M, Zhang C, et al. Harvesting energy from automobile brake in contact and non-contact mode by conjunction of triboelectrication and electrostatic-induction processes[J]. Nano Energy, 2014, 6: 59–65.
- [41] Chandrasekhar A, Alluri N R, Saravanakumar B, et al. Human interactive triboelectric nanogenerator as a self-powered smart seat[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(15): 9692–9699.
- [42] Zhang B B, Zhang L, Deng W L, et al. Self-powered acceleration sensor based on liquid metal triboelectric nanogenerator for vibration monitoring[J]. ACS Nano, 2017, 11(7): 7440–7446.
- [43] Pang Y K, Li X H, Chen M X, et al. Triboelectric nanogenerators as a self-powered 3D acceleration sensor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(34): 19076–19082.
- [44] 施毓凤, 杨晟, 孙力彤. 城市轨道交通的安全管理问题[J]. 城市轨道交通研究, 2003(2): 26–28.
- [45] 何理, 钟茂华, 邓云峰. 城市轨道交通危险因素分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(3): 25–29.
- [46] Meng X Y, Cheng Q, Jiang X B, et al. Triboelectric nanogenerator as a highly sensitive self-powered sensor for driver behavior monitoring[J]. Nano Energy, 2018, 51: 721–727.
- [47] Wang J, Zhang H L, Xie Y H, et al. Smart network node based on hybrid nanogenerator for self-powered multifunctional sensing[J]. Nano Energy, 2017, 33: 418–426.
- [48] Zhang B B, Chen J, Jin L, et al. Rotating-disk-based hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for sustainably powering wireless traffic volume sensors[J]. ACS Nano, 2016, 10(6): 6241–6247.
- [49] Lin L, Hu Y F, Xu C, et al. Transparent flexible nanogenerator as self-powered sensor for transportation monitoring[J]. Nano Energy, 2013, 2(1): 75–81.
- [50] Askari H, Asadi E, Saadatnia Z, et al. A hybridized electromagnetic-triboelectric self-powered sensor for traffic monitoring: Concept, modelling, and optimization[J]. Nano Energy, 2017, 32: 105–116.
- [51] Zhang L, Jin L, Zhang B B, et al. Multifunctional triboelectric nanogenerator based on porous micro-nickel foam to harvest mechanical energy[J]. Nano Energy, 2015, 16: 516–523.
- [52] Mao Y C, Geng D L, Liang E J, et al. Single-electrode triboelectric nanogenerator for scavenging friction energy from rolling tires[J]. Nano Energy, 2015, 15: 227–234.
- [53] Bai Y, Han C B, He C, et al. Washable multilayer triboelectric air filter for efficient particulate matter PM_{2.5} removal[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(15): 1706680.
- [54] Gu G Q, Han C B, Lu C X, et al. Triboelectric nanogenerator enhanced nanofiber air filters for efficient particulate matter removal[J]. ACS Nano, 2017, 11(6): 6211–6217.
- [55] Gu G Q, Han C B, Tian J J, et al. Triboelectric nanogenerator enhanced multilayered antibacterial nanofiber air filters for efficient removal of ultrafine particulate matter[J]. Nano Research, 2018, 11(8): 4090–4101.
- [56] He C, Wang Z L. Triboelectric nanogenerator as a new technology for effective PM_{2.5} removing with zero ozone emission[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(2): 99–112.
- [57] Ma M Y, Zhang Z, Liao Q L, et al. Integrated hybrid nanogenerator for gas energy recycle and purification[J]. Nano Energy, 2017, 39: 524–531.
- [58] Han C B, Jiang T, Zhang C, et al. Removal of particulate matter emissions from a vehicle using a self-powered triboelectric filter[J]. ACS Nano, 2015, 9(12): 12552–12561.
- [59] Shen Q Q, Xie X K, Peng M F, et al. Self-powered vehicle emission testing system based on coupling of triboelectric and chemoresistive effects[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(10): 1703420.
- [60] Jiao J, Wang J, Jin F. Impacts of high-speed rail lines on the city network in China[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 60: 257–266.
- [61] Nellore K, Hancke Gerhard P. A Survey on urban traffic management system using wireless sensor networks[J]. Sensors, 2016, 16(2): 1–25.
- [62] Lederman G, Chen S H, Garrett J H, et al. Track monitoring from the dynamic response of a passing train: A sparse approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 90: 141–153.
- [63] Ahn D, Choi K. Performance evaluation of thermoelectric energy harvesting system on operating rolling stock[J]. Micromachines, 2018, 9(7): 359.
- [64] Gatti G, Brennan M J, Tehrani M G, et al. Harvesting energy from the vibration of a passing train using a single-degree-of-freedom oscillator[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66/67: 785–792.
- [65] Jin L, Zhang S L, Xu S X, et al. Free-fixed rotational triboelectric nanogenerator for self-powered real-time

- wheel monitoring[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(3): 2000918.
- [66] Zhao X J, Wei G W, Li X H, et al. Self-powered triboelectric nano vibration accelerometer based wireless sensor system for railway state health monitoring[J]. *Nano Energy*, 2017, 34: 549–555.
- [67] Zhang Z X, He J, Wen T, et al. Magnetically levitated-triboelectric nanogenerator as a self-powered vibration monitoring sensor[J]. *Nano Energy*, 2017, 33: 88–97.
- [68] Hu Y F, Yang J, Niu S M, et al. Hybridizing triboelectricity and electromagnetic induction effects for high-efficient mechanical energy harvesting[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(7): 7442–7450.
- [69] Jin L, Deng W L, Su Y C, et al. Self-powered wireless smart sensor based on maglev porous nanogenerator for train monitoring system[J]. *Nano Energy*, 2017, 38: 185–192.
- [70] 刘妮娜, 王永录. 轨道扣件智能检测系统的设计及应用[J]. *高速铁路技术*, 2016, 7(4): 55–59.
- [71] Bayrashev A, Parker A, Robbins W P, et al. Low frequency wireless powering of microsystems using piezoelectric-magnetostrictive laminate composites[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 114: 244–249.
- [72] 刘维宁, 夏末, 郭文军. 地铁列车振动的环境响应[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(增刊1): 586–593.
- [73] Bian Y X, Jiang T, Xiao T X, et al. Triboelectric nanogenerator tree for harvesting wind energy and illuminating in subway tunnel[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(3): 1700317.
- [74] Zhang L, Zhang B B, Chen J, et al. Lawn structured triboelectric nanogenerators for scavenging sweeping wind energy on rooftops[J]. *Advanced Materials*, 2015, 28(8): 1650–1656.
- [75] Seol M L, Woo J H, Jeon S B, et al. Vertically stacked thin triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2015, 14: 201–208.
- [76] Huang L B, Xu W, Bai G X, et al. Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted non-contact triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2016, 30: 36–42.
- [77] Ren X H, Fan H Q, Wang C, et al. Wind energy harvester based on coaxial rotatory freestanding triboelectric nanogenerators for self-powered water splitting[J]. *Nano Energy*, 2018, 50: 562–570.
- [78] Zhang C G, Liu Y B, Zhang B F, et al. Harvesting wind energy by a triboelectric nanogenerator for an intelligent high-speed train system[J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(4): 1490–1499.
- [79] Yang Y, Zhu G, Zhang H L, et al. Triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and as self-powered wind vector sensor system[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9461–9468.

Application and research progress of triboelectric nanogenerator in self driving intelligent transportation system

JIN Long, ZHANG Lei, ZHANG Binbin, YANG Weiqing*

Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education; School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract Highway and railway as one of the most important means of transportation have made rapid digitalized development but the power supply of sensors has become a bottleneck for further development. In this paper we illustrate that triboelectric nanogenerator (TENG) with dual functions of power supply and high-sensitive sensing plays an important role in self-powered intelligent transportation systems. We also review the application of TENG in intelligent transportation systems in recent years, including vehicle detection, exhaust gas treatment, vibration energy harvesting, wind energy harvesting, etc. Finally, we analyze the challenges for application of TENG in intelligent transportation and prospect the development trend of TENG in materials, information, electronics, machinery, transportation, and other multidisciplinary fields.

Keywords triboelectric nanogenerator; intelligent traffic; self-powered; sensors ●



(责任编辑 王志敏)