第 53 卷第 5 期
2025 年 5 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 53 No. 5
May 2025

文章编号：0253-374X(2025)05-0723-09　　**DOI**：10. 11908/j. issn. 0253-374x. 23346

基于折纸-摩擦纳米发电的路面抗滑性能自驱动感知

庞亚凤[1,2]，刘帅年[2]，朱兴一[2]

（1. 广州航海学院 智能交通与工程学院，广东 广州 510725；2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室，上海 201804）

摘要：准确评估路面抗滑性能对改善行车安全、减少交通事故具有重要意义。当前的测试方法在复杂路况下无法迅速判断安全车速及跟车距离，容易引发交通事故。将摩擦纳米发电与折纸技术结合，基于吉村折纸构型开发摩擦纳米发电机（YO－TENG），将其植入到轮胎内表面，构建 YO－TENG 支持的智能轮胎。基于全新搭建的室内智能轮胎测试平台评估多因素下（摩擦系数、车速）YO－TENG 对路面抗滑性能实时感知的准确性。结果表明：YO－TENG 的短路电流峰值与路面摩擦系数拟合系数达 96.36 %。即使引入实际车速的影响，相关系数仍达 90.64 %。该研究对路面抗滑性能的自驱动感知提供了理论指导。

关键词：道路工程；抗滑感知；折纸技术；摩擦纳米发电

中图分类号：U416. 217　　**文献标志码**：A

Self-Powered Pavement Skid-Resistance Sensing Based on Origami-Inspired Triboelectric Nanogenerator

PANG Yafeng[1,2], *LIU Shuainian*[2], *ZHU Xingyi*[2]

(1. School of Intelligent Transportation and Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The study of pavement skid resistance is of great significance for improving driving safety and reducing traffic accidents. However, existing vision-based onboard units cannot quickly determine safe speed and following distance in complex road conditions, contributing to traffic accidents. To address this challenge, this paper integrates the triboelectric nanogenerator (TENG) with origami design principles, leading to the development of a Yoshimura origami-inspired triboelectric nanogenerator (YO-TENG). This YO-TENG is mounted onto the surface of vehicle tires, forming a YO-TENG smart tire system. Moreover, the accuracy of YO-TENG in real-time monitoring of pavement skid resistance under different conditions, specifically friction coefficient and vehicle speed, was evaluated using the newly built indoor intelligent tire testing platform. The results show that the fitting degree between the short-circuit current peak value of YO-TENG and the road friction coefficient is as high as approximately 96.36 %. Even when the influence of actual vehicle speed is considered, the correlation coefficient still reaches 90.64 %. This paper provides valuable theoretical guidance for the development of self-powered, real-time sensing systems for pavement skid resistance monitoring.

Keywords: road engineering; skid-resistance sensing; origami technology; triboelectric nanogenerator (TENG)

交通安全问题是全球面临的共同挑战[1]。美国运输安全委员会研究表明，路表抗滑性不足是导致行车事故的主要原因，约 32. 3 %以上的交通事故在路面湿滑状态下发生，其中 70 %可通过改善路面抗滑性来避免[2-3]。评价路面抗滑性能的主要指标是摩擦系数，但静态的摆式摩擦系数测定仪采用人工定点测试，范围有限，且无法考虑车速、胎压等交通场景中行驶车辆的影响。动态侧向摩擦系数和径向摩擦系数测试难以与客运小汽车等效对应，测试范围大多在 50 m 以下，最大不超过 100 m。因此，动态测试设备仅从“定点测试”放大到“局部路段测试”，实时抗滑性能监测仍难以实现[4-5]。考虑道路设施的服务对象为车辆，路面抗滑性能的好坏直接关系到车辆的运行安全。因此，须开发一种植入家用汽车轮胎的感知器件，实现路面抗滑的实时感知。

近年来，人工智能算法在路面病害检测、结构健康监测中具有显著优势，非接触式抗滑性能检测（如机器视觉、雷达和声纳）应运而生[6-7]。然而，非接触

收稿日期：2023-10-12
基金项目：国家重点研发项目（2023YFE0202400）、上海市科学技术委员会国际合作项目（22210710700）
第一作者：庞亚凤，讲师，工学博士，主要研究方向为道路工程自感知。E-mail：pangyafeng@gzmtu. edu. cn
通信作者：朱兴一，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为智能化功能性路面。
E-mail：zhuxingyi66@tongji. edu. cn

论文拓展介绍

式检测虽能避免路表状况、温度、车速等干扰,但会引起采集数据缺失,图像、视频等信息仅通过路表纹理指标来评估,造成抗滑信息接近于静态,无法准确预测环境因素变化引起的抗滑性能变化。尤其是雨天湿滑条件下,由于路面附着系数缺失,易引发交通事故[8]。因此,当前路面抗滑性能感知的研究处于起步阶段,感知准确性和时效性不足,路面抗滑性能的实时精准感知是未来研究的重点。

根据摩擦起电、静电感应原理的摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)[9]在2012年被王中林院士首次发明,由于其选材广泛、成本低、能量转换效率高等优势,已广泛用于自驱动感知,包括速度/加速度、压强、温度等的感知[10]。基于TENG的自驱动传感已涉足智能交通、智能家居、人机交互、海洋能收集与监测等领域[11-12],但传统TENG的输出性能受限于摩擦面积。考虑到折纸技术在空间压缩利用、信息储存的优势。本研究将折纸技术与TENG相结合,多层折纸显著增加TENG有效摩擦面积,并改善其受压时的力学性能。自2013年首次提出柔性多层折叠TENG[13]以来,纸基TENG[14]、TENG自充电单元[15]、剪纸-TENG[16]和折纸-TENG[17]被陆续报道,短路电流达到了0.75~660 μA,开路电压为37.5~1 000 V。然而,上述的TENG结构复杂,难以制备。鉴于此,有必要开发一种简单易制的折纸结构以解决这一问题。

轮胎作为车辆与道路衔接的纽带,对确保行车安全具有重要作用。Seung等[18]提出了一种由纺织材料组成的复合式TENG,利用摩擦层材料代替橡胶轮胎帘线层、胎面层结构,将其应用于轮胎中以收集车辆行驶过程中损失的机械能,并证明该TENG能够为车辆无线传感器供能。Chen等[19]将TENG与电磁发电机相结合,提出混合发电机用于在宽频带旋转能量收集并建立自供电无线传感系统,同时检测温度、速度和轮胎压力。Guo等[20]研发了一种可压缩六边形TENG来收集滚动轮胎中浪费的机械能,最大瞬时功率为1.9 mW。Wu等[21]通过将二氧化硅胎面橡胶与TENGs相结合设计出绿色能源轮胎。TENG在不改变传统轮胎生产工艺的情况下,将摩擦能转化为电能,用于汽车安全、轮胎压强监测和道路状况评估。因此,TENG智能轮胎具有广阔的应用前景,但其着重于能量收集及轮胎状态监测,并未考虑抗滑监测对提高行车安全的重要性。

路面持久的抗滑能力是确保道路全寿命周期中车辆安全、快速行驶的必要条件[22-23]。本文引入摩擦纳米发电原理并结合折纸技术,首次研发适用于实时感知路面抗滑性能的折纸-TENG(Yoshimura origami inspired triboelectric nanogenerator, YO-TENG),将其集成到轮胎内表面构建智能轮胎,以胎-路摩擦力为外界激励,分析YO-TENG短路电流在不同路表状态(抛光、湿滑)的变化规律,揭示YO-TENG评估路面抗滑性能的机理,为路面抗滑实时感知提供参考。

1 TENG感知元件设计

1.1 折纸结构和材料

考虑到TENG要求仅在折痕处产生形变,而折痕间的面只允许弯曲或拉伸情况下出现。本文选用“吉村折纸”构型,每个折叠单元均为菱形,折痕从中间贯通形成可发生接触-分离的三角形摩擦对,折痕稳定性强,易于折叠和展开,其显著特点是折痕图中的谷线轴向垂直,其失效方式可通过轴向压缩来实现模型收缩,便于构造垂直-接触分离模式TENG,充分利用多层折纸结构可显著放大摩擦起电和静电感应效应。

为获得高耐久结构,以牛皮纸、弹性纸和透明聚苯二甲酸乙二醇酯薄膜(polyethylene terephthalate, PET薄膜)为支撑材料。结果表明:PET薄膜相比弹性纸有更好的压缩性,比牛皮纸板具有较好的稳定性。因此,本文选用透明PET为支撑材料。运用激光切割机正反切割脊线和谷线,所制备的折纸-TENG具有13个有效摩擦接触对,接触总面积为318.5 cm^2。

1.2 YO-TENG机理

外界激励作用下,电负性差异较大的材料接触摩擦产生电荷;不断激励伴随着静电感应的发生。当两摩擦层材料间距最大时,根据电压U与电势E和距离d之间关系($U=Ed$),TENG输出电压最大,而两材料接触时电压为0,连续的激励造成了交流脉冲信号的产生。因此,分析YO-TENG摩擦层间的电势分布可评估折纸结构对TENG电学输出的影响。采用COMSOL多物理场仿真,分析不同YO-TENG的电势分布规律。采用聚四氟乙烯摩擦层,铝箔摩擦层和电极层,分别为长5 cm,厚1 mm的单层、双层、三层和四层结构,计算其在达到相同电势分布的夹角,如图1所示。

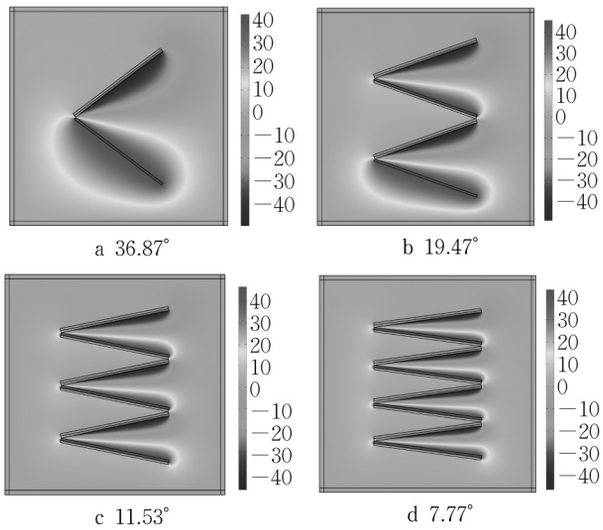


图1　多层折纸结构对TENG电势输出的增强效应

Fig. 1　Enhancement effect of multi-layer origami structure on the potential output of TENG

在达到40 V电势时,随折纸结构层数增加,所需夹角减小,意味着两摩擦层间间距减小,分别是36.87°,19.47°,11.35°和7.77°。双层折纸结构与单层相比,达到相同电势分布仅需原夹角的52 %,而三层和四层折纸结构相对于单层TENG的增强效果更显著,仅需31 %和21 %。主要是因为在占用相同空间时,多层YO-TENG的正负摩擦层间的间距减小,但摩擦层面积翻倍增加。证明了折纸结构对摩擦起电效应显著的放大能力。

1.3　YO-TENG制备

YO-TENG工作原理如图2所示,由摩擦起电、静电感应和外接回路组成,包含电极层、正极摩擦层、负极摩擦层和外接负载。YO-TENG在周期性外力作用下发生往复的接触-分离运动。两摩擦层接触产生摩擦起电,接触-分离过程有静电感应产生。此时,连接有外接负载的外部电路会输出短路状态的交流电。为产生理想的短路电流,采用的摩擦对材料应选择得失电子能力差异性大的材料,分别以铜箔、铝箔及铜镍导电布为电极层,负极摩擦层为聚四氟乙烯(poly tetra fluoroethylene, PTFE)。金属材料作为电极层的和正极摩擦层,将TENG电极层和摩擦层分别固定在支撑结构接触对的上下两侧,形成立体折纸结构。

如图3所示,在40 N的手掌按压下,YO-TENG(铝箔材料)能够点亮约90盏发光二极管(light emitting diode,LED)。已知LED二极管的标准工作电压为2.0~2.2 V,只有达到LED二极管的单向导通电压才会有良好的视觉效果。因此,YO-TENG

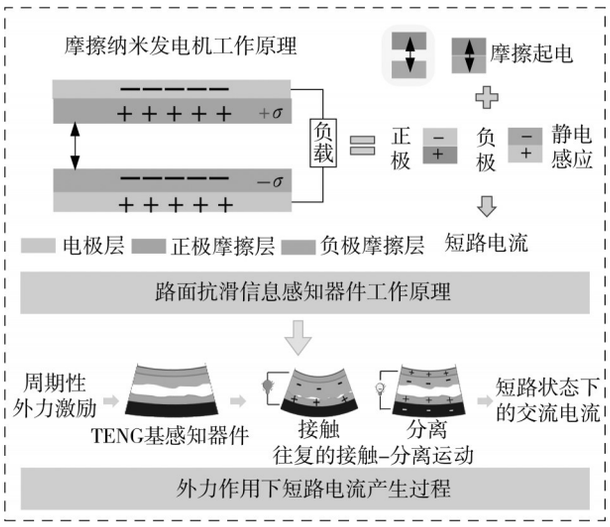


图2　路面抗滑信息感知器件工作原理及其短路电流产生过程

Fig. 2　Working principle of pavement skid resistance information sensing device and the short-circuit current generation process

至少能输出约180 V的交流电压。

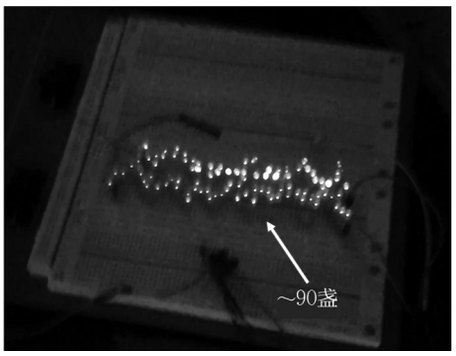


图3　YO-TENG点亮的LED二极管

Fig. 3　90 LEDs illuminated by YO-TENG

2　YO-TENG电学性能表征

考虑到TENG的开路电压可用于对施加压强的静态测量,而短路电流可用于对压强加载速率或加速度的动态测量,分别探讨电阻匹配性能、激励频率、连接方式和摩擦层材料等参数对YO-TENG的开路电压和短路电流的影响规律。这是应用于路面抗滑性能感知的基础。

2.1　电阻匹配特性

TENG本质上是电阻和电容的串联,内部为开路状态,具有高电压而低电流的特性。如图4所示,在电路中接入0.1 Ω~10 GΩ的电阻箱。开路电压的测量采用静电计与YO-TENG并联的方式,而短路电流的测试采用串联方式。

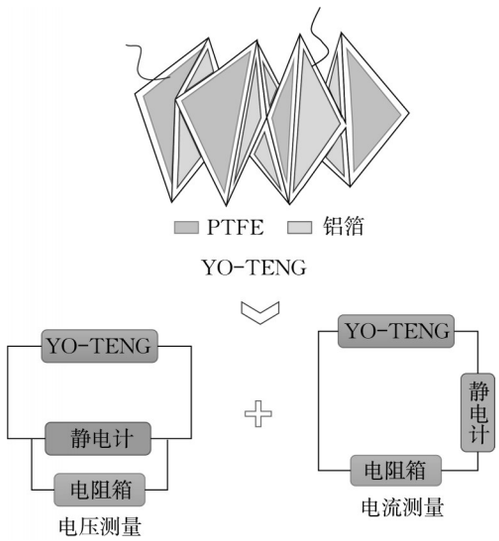


图4 YO-TENG电阻匹配特性测试电路

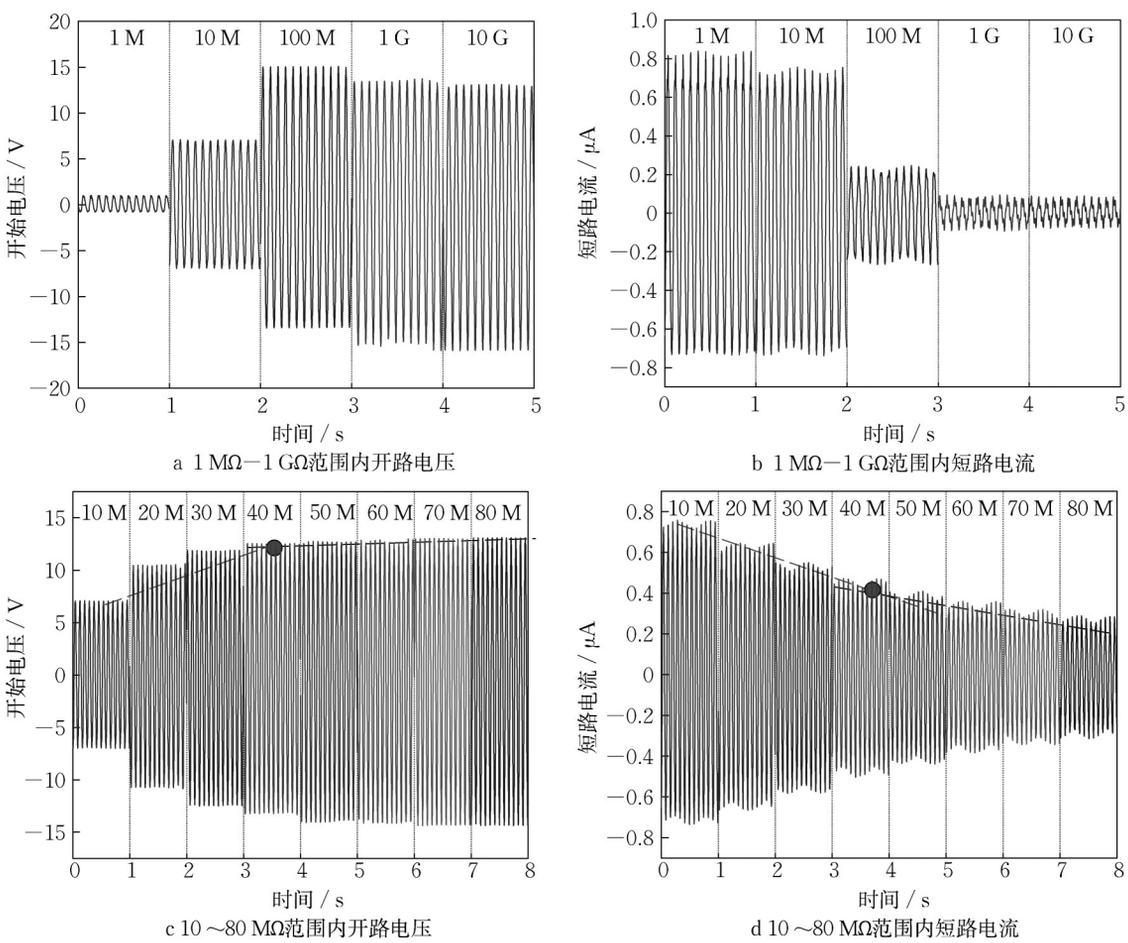
Fig. 4 Circuit for resistance matching characteristic of YO-TENG

在12 Hz的频率下,测试1 MΩ~10 GΩ的开路电压和短路电流。如图5a和图5b所示,在1 MΩ~100 MΩ的范围内,随着阻值增加,开路电压增加,短路电流降低。而电阻值从100 MΩ到1 GΩ时,电压和电流值几乎保持不变。因此,YO-TENG的匹配电阻在1~100 MΩ范围内。进一步分析10~80 MΩ阻值范围,开路电压和短路电流的变化趋势(图5c和图5d)。结果表明:在外接负载阻值为10~40 MΩ时,开路电压从7 V增加到12.5 V,当外接负载阻值继续增加,开路电压几乎保持不变。对于短路电流,在外接负载阻值为10~40 MΩ范围内,短路电流减小速率明显低于40~80 MΩ范围。可知,YO-TENG的最优匹配电阻在40 MΩ,计算的最大功率为89.37 μW。

2.2 激励频率

智能道路系统中车辆、风等的随机振动构成了多频、复杂的交通系统。研究YO-TENG在不同频率下的输出性能,分别将激振器调为4~16 Hz共7种频率振动,通过平行试验方式缩小偶然误差。

如图6所示,在4~16 Hz时,YO-TENG的开路电压变化不明显;而短路电流随频率增大明显增加。验



a 1 MΩ—1 GΩ范围内开路电压

b 1 MΩ—1 GΩ范围内短路电流

c 10 ~80 MΩ范围内开路电压

d 10 ~80 MΩ范围内短路电流

图5 YO-TENG电阻匹配特性结果

Fig. 5 Results of the resistance matching characteristic of YO-TENG

证了TENG的开路电压适用于机械运动的静态测量,而短路电流适用于运动状态的动态测量的结论。

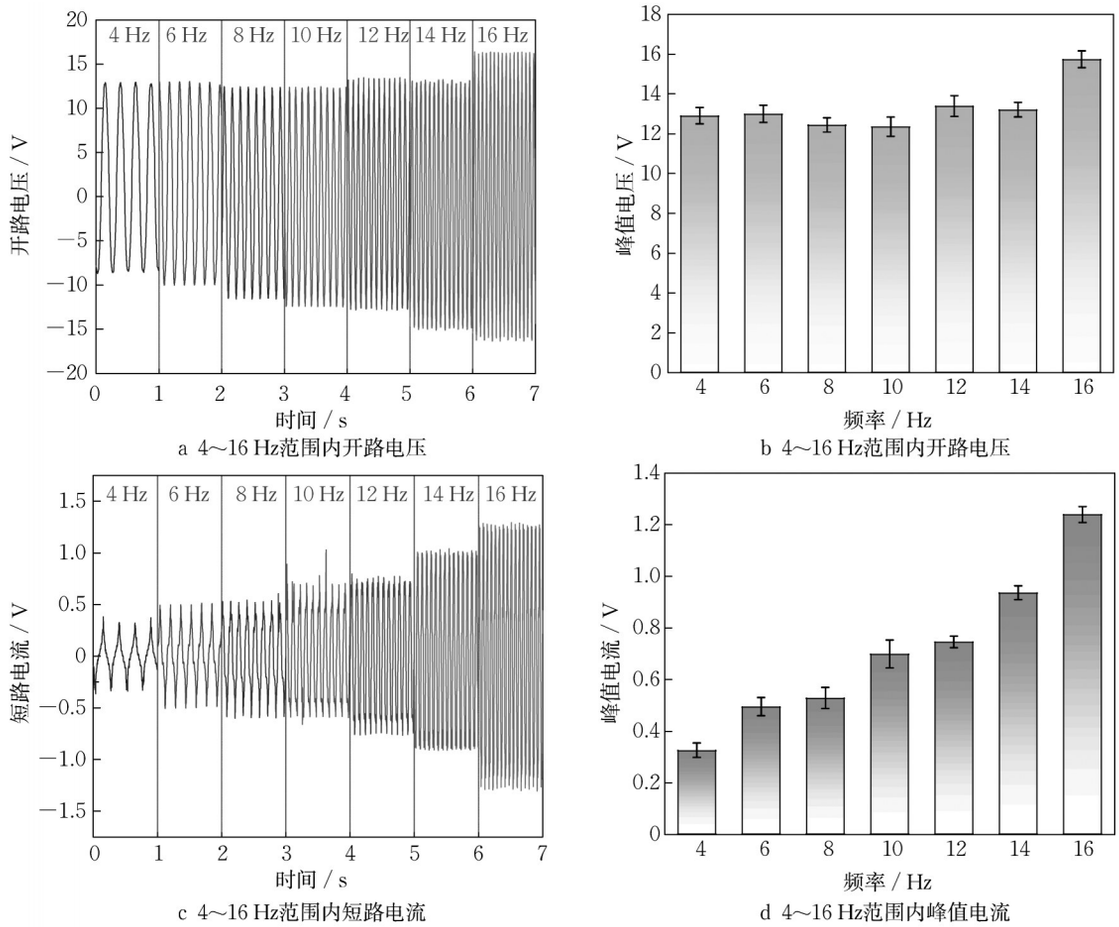


图6　YO-TENG 在不同频率下的电信号

Fig. 6　Electrical signals of YO-TENG at different frequencies

2.3　连接方式

单一TENG感知范围有限,需将TENG阵列构成大范围的感知网络。采用60目砂纸打磨YO-TENG表面,以获取粗糙的摩擦层。对比不同粗糙度摩擦表面的电学输出。

如图7a所示,砂纸打磨后YO-TENG相较于原器件的摩擦起电效果更好,峰值电压更高。当TENG并联时,原YO-TENG开路电压为U_1,打磨后YO-TENG开路电压为U_2,并联后总电压U大于U_1和U_2,但小于U_1+U_2。两TENG串联时,总电压U小于并联后的总电压,但大于打磨后的电压。对于短路电流(图7b),砂纸打磨后峰值电流更高;当两TENG并联时,总电流I不小于I_1与I_2中任意一个。两TENG串联时,总电流I小于I_1和I_2。峰值电压和电流增加的主要原因是砂纸打磨使得YO-TENG摩擦面更为粗糙,为正负摩擦层接触创造更大的比表面积。比表面积越大,材料所能容纳的电荷量更多,使得开路电压和短路电流增加。

3　路面摩擦系数测定及抗滑性解析

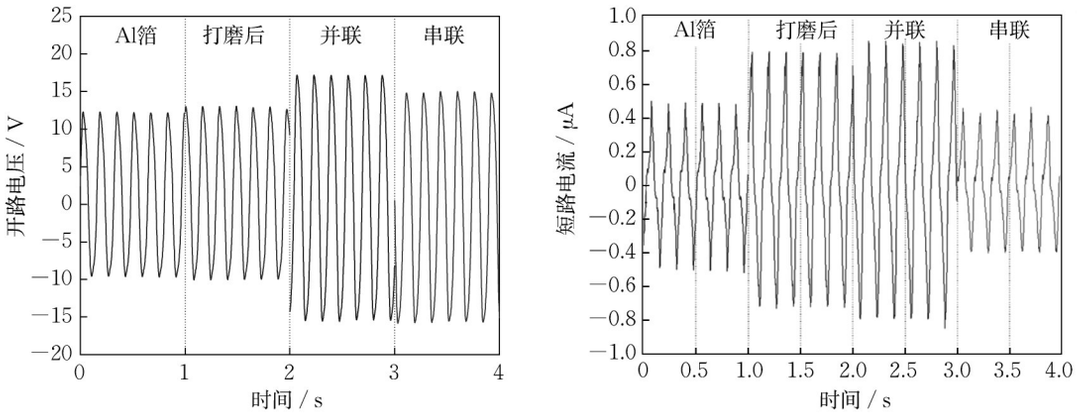
为研究YO-TENG集成到智能轮胎后,其短路电流对路面抗滑性能的表征能力,制备开级配OGFC-13沥青车辙板。在采用摆式摩擦系数测定仪测量摩擦系数,分别进行抛光、润湿处理,以模拟路面粗糙度不足和路表湿滑状态。

3.1　沥青混合料配合比及车辙板摩擦系数标定

选用大空隙开级配排水式沥青混合料来制备300 mm×300 mm×50 mm的车辙板试件,OGFC-13混合料级配表见表1。

综合析漏及飞散试验,确定混合料最佳油石比为4.8 %,对OGFC-13进行性能验证(表2)。

通过人工铺砂法测量其构造深度,OCFC-13的构造深度为1.51 mm,空隙率为19.8 %。为确保车



a 不同连接方式下的开路电压　　b 不同连接方式下的短路电流

图7　6 Hz频率下不同连接方式的电信号

Fig. 7　Electrical signals of YO-TENG at 6 Hz

表1　OGFC-13混合料级配

Tab. 1　OGFC-13 mixture gradations

混合料类型	不同筛孔(mm)的通过率/ %									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
OGFC－13	100	93	65	15	15	12	9.5	7.5	5.5	5

辙板表面的粗糙程度不同,对制备的OGFC-13车辙板表面抛光。对原粗糙车辙板、抛光干燥车辙板、洒水后的粗糙湿滑车辙板和抛光洒水后的抛光湿滑车辙板表面摩擦系数进行测定,连续8次测定结果及其平均值见表3。

表2　OGFC-13性能试验结果

Tab. 2　Test results of OGFC-13

最佳油石比%	空隙率/%	析漏损失/%	飞散损失/%	马歇尔稳定度/kN	残留稳定度/%	渗透系数/(mL·min^{-1})	动稳定度/(次·mm^{-1})	冻融劈裂强度比/%
4.8	19.8	0.14	8.4	5.9	87.2	10 938	5 810	81
规范值	18～25	<0.8	<15	≥5	≥85	≥5 000	≥5 000	≥80

表3　摩擦系数结果

Tab. 3　Results of friction coefficient

车辙板类型	粗糙干燥板	抛光干燥板	粗糙湿滑板	抛光湿滑板
第一次	0.90	0.67	0.46	0.37
第二次	0.87	0.65	0.45	0.35
第三次	0.89	0.66	0.45	0.33
第四次	0.88	0.59	0.44	0.34
第五次	0.86	0.64	0.43	0.34
第六次	0.88	0.66	0.42	0.33
第七次	0.85	0.68	0.47	0.35
第八次	0.91	0.65	0.48	0.31
平均摩擦系数	0.88	0.65	0.45	0.34

3.2　智能轮胎测试平台搭建

车辆行驶伴随着轮胎与路表的接触摩擦。如果能够将TENG耦合到轮胎中,构成自驱动感知的智能轮胎,意味着TENG与路面间的相互接触作用伴随着胎-路接触发生。胎-路间的竖向支持力、摩擦力等将作为外界激励影响TENG的输出。研究TENG基轮胎的机电耦合作用,建立TENG短路电流与胎-路接触间的相互关系,是揭示TENG用于路面抗滑感知的理论基础。

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+F_{\mathrm{e}}=-m\ddot{Z} \tag{1}$$

式中:m, c, k, 和F_{e}分别是等效质量、阻尼、刚度系数和静电力。

$$V=V_{\mathrm{OC}}(x)-\frac{Q}{C} \tag{2}$$

式中:V为TENG的输出电压;x为相对位移;Z为基础激励。

为阐述YO-TENG智能轮胎的工作原理,图8展示了植入YO-TENG的智能轮胎胎-路接触作用及短路电流产生过程。植入YO-TENG的智能轮胎

在滚动过程中会周期性的与路表相互接触摩擦,从而有摩擦力产生。路表垂直的接触摩擦力将直接激励YO-TENG,促使YO-TENG的正负摩擦层表产生电荷。随着智能轮胎转动,植入YO-TENG的位置不再与路表接触,两摩擦层表面逐渐分离,产生感应电荷。

因此,连接有负载的YO-TENG将有短路电流输出。

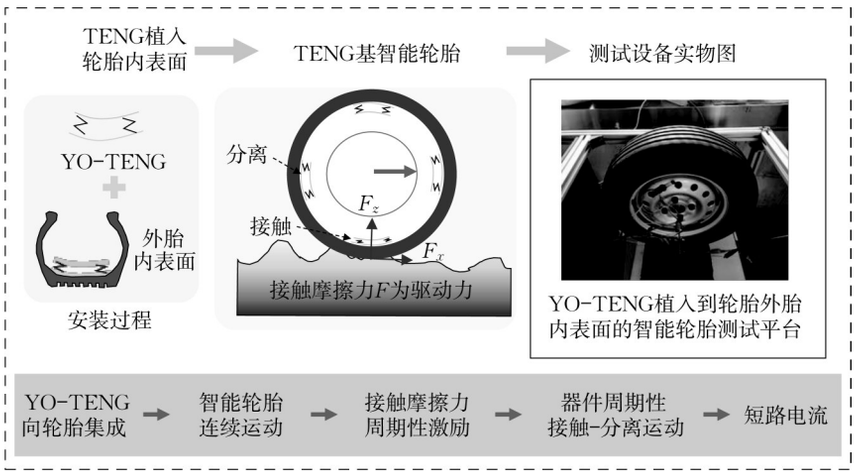


图8　植入YO-TENG的智能轮胎工作原理

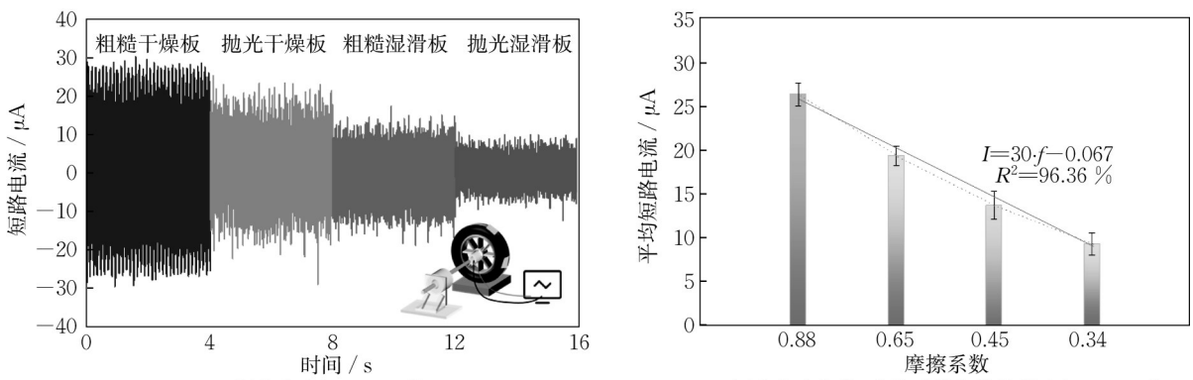
Fig. 8　Working principle of YO-TENG-enabled smart tire

3.3　YO-TENG应用

3.3.1　路面抗滑性能感知

植入YO-TENG的智能轮胎测试平台连接静电计,实时采集不同路表(粗糙、光滑、湿滑)的短路电流。

如图9所示,60 km·h^{-1}的速度下,粗糙干燥板、抛光干燥板、粗糙湿滑板和抛光湿滑板的峰值电流逐渐下降。因为抛光和湿滑路表相对于干燥路表更光滑,对YO-TENG作用的摩擦力减小,从而出现电流减小的规律。其中,单次测试的电流波形如图9a所示。提取峰值电流与摩擦系数拟合(图9b)得到:$I=30f-0.067$,$R^2=96.36\ \%$。证明了YO-TENG对路面抗滑感知的优势。



a 短路电流(60 km·h^{-1})　　b 短路电流峰值-摩擦系数相关性拟合(60 km·h^{-1})

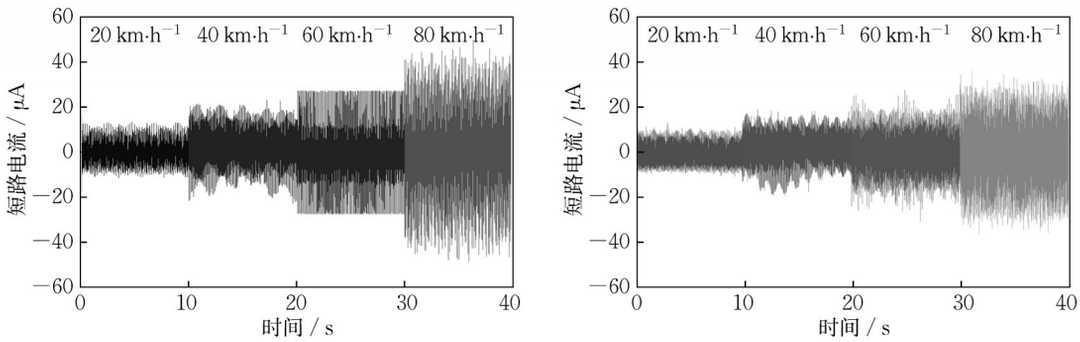
图9　路面抗滑性能感知应用

Fig. 9　Application of skid resistance sensing

3.3.2　车速对路面抗滑性能感知的影响

为探讨速度对路面抗滑性能感知的影响。智能轮胎在上述4类车辙板表面以20~80 km·h^{-1}的速度运行。根据图10在所有的车辙板表面运行时,随着车速增加,短路电流幅值不断增加。

对比图10a和图10b,相同速度下粗糙车辙板表面的短路电流幅值远大于光滑的车辙板。分别提取20~80 km·h^{-1}速度下的短路电流幅值,粗糙板表面短路电流幅值分别为12,20.5,27 A和43 A,而抛光板表面的短路电流幅值分别为8.2,15,19 μA和28 μA,抛光板表面短路电流约为粗糙板的70 %。因此,YO-TENG用于路面抗滑性能感知的研究中应考虑速度的影响。



a 短路电流(60km·h⁻¹)　　b 短路电流峰值-摩擦系数相关性拟合(60km·h⁻¹)

图10　速度对路面抗滑性能感知的影响

Fig. 10　Effect of speed on road skid resistance sensing

在摩擦系数相同时,车速越大,车辆发生侧滑的风险越大。因此,分析速度影响下的短路电流对路面抗滑性能的表征能力意义显著。如图11所示,综合利用车速和静态摩擦系数评估路面抗滑性,得到:$I=36f+0.41v-19.57$,$R^2=90.64\ \%$。证明了智能轮胎对路面抗滑实时感知的可行性。

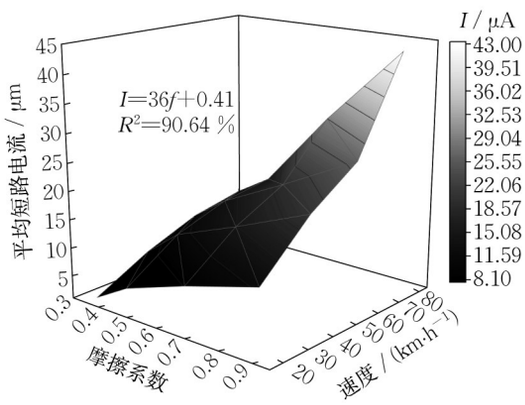


图11　短路电流对速度影响下的路面抗滑性能表征

Fig. 11　Characterization of pavement skid resistance under the influence of short-circuit current on speed

4　结语

融合折纸与摩擦纳米发电技术研发了YO-TENG支持的智能轮胎,对其电学性能和路面抗滑感知能力开展表征与验证,主要结论如下:

(1)多层折纸结构可显著放大TENG摩擦起电和静电感应能力。YO-TENG的最优匹配电阻为40 MΩ,最大输出功率为89.37 μW。为实现YO-TENG的大规模网络化布局,可采用并联的方式,在提高电压、电流的同时不影响器件的耐久性。

(2)YO-TENG短路电流峰值与路表摩擦系数具有高达96.36 %的相关性。在60 km·h⁻¹车速下,路表摩擦系数与峰值电流可通过$I=30f-0.067$来相互表征,证明了YO-TENG对路面抗滑性能良好的感知能力。

(3)速度是影响路面抗滑性能动态感知稳定性的重要因素,YO-TENG输出的短路电流可依据$I=36f+0.41v-19.57$来评估路面抗滑的安全性,其与车速影响下的路面抗滑性能感知指标相关性高达90.64 %,验证了YO-TENG支持的智能轮胎用于路面动态抗滑信息感知的可行性。

本文由于条件所限,研究内容主要从器件和室内测试两方面进行,针对车路动力学和静电学耦合影响仍需深入探讨,从而在理论层面上验证TENG用于路面抗滑性能感知的能力。此外,须设计实时的数据采集、通信设备,对YO-TENG在道路试验场开展测试,以实现路面抗滑性能实时感知的落地应用。

作者贡献声明:

庞亚凤:试验分析,数据采集与处理,论文撰写与修改。

刘帅年:试验分析,数据采集。

朱兴一:负责论文总体思路和架构的设计和把控。

参考文献:

[1] 谭忆秋,肖神清,熊学堂. 路面抗滑性能检测与预估方法综述[J]. 交通运输工程学报,2021,21(4):32.
TAN Yiqiu, XIAO Shenqing, XIONG Xuetang. Review on detection and prediction methods for pavement skid resistance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021,21(4):32.

[2] 谭忆秋,李济鲈,徐慧宁.冰雪路面摩擦特性与运营风险管控研究综述[J].中国公路学报,2022,35(7):1.
TAN Yiqiu, LI Jilu, XU Huining. Review on friction characteristics and operation risk intelligent management of ice and snow pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022,35(7):1.

[3] GUO Fucheng, PEI Jianzhong, ZHANG Jiupeng, *et al*. Study on the skid resistance of asphalt pavement: A state-of-the-art review and future prospective[J]. Construction and Building Materials, 2021(303):124411.

[4] GUO Fucheng, ZHANG Jiupeng, CHEN Zixuan, *et al*. Investigation of friction behavior between tire and pavement by molecular dynamics simulations[J]. Construction and Building Materials, 2021(300): 124037.

[5] 周兴林, 刘万康, 肖旺新,等.沥青混合料体积指标对沥青路面抗滑性能的影响[J].交通运输工程学报,2017,17(6): 1.
ZHOU Xinglin, LIU Wankang, XIAO Wangxin, *et al*. Influence of asphalt mixture volume indexes on asphalt pavement skid resistance performance[J] .Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017,13(18):1.

[6] DENG Yong, LUO Xue, ZHANG Yazhou, *et al*. Determination of flexible pavement deterioration conditions using long-term pavement performance database and artificial intelligence-based finite element model updating[J]. Structural Control and Health Monitoring,2021,28(2):2671.

[7] 马涛, 童峥, 张一鸣,等.基于多目视觉深度神经网络的路面宏观纹理三维重建方法[J].中国公路学报, 2023,36(3): 70.
MA Tao, TONG Zheng, ZHANG Yiming, *et al*. A three-dimensional reconstruction method of pavement macro-texture using a multi-view deep neural network[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(3): 70.

[8] PAN Jingjing, SUN Meng, WANG Yide, *et al*. Time-delay estimation by a modified orthogonal matching pursuit method for rough pavement [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2020,59(4): 2973.

[9] FAN Fengru, TIAN Zhongqun, WANG Zhonglin. Flexible triboelectric generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2):328.

[10] WU Changsheng, WANG Aurelia C, DING Wenbo, *et al*. Triboelectric nanogenerator: A foundation of the energy for the new era[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(1):1802906.1.

[11] PANG Yafeng, ZHU Xingyi, YU Ying, *et al*. Waterbomb-origami inspired triboelectric nanogenerator for smart pavement-integrated traffic monitoring[J].Nano Research,2022(15):5450.

[12] PANG Yafeng, ZHU Xingyi, LEE Chengkuo, *et al*. Triboelectric nanogenerator as next-generation self-powered sensor for cooperative vehicle-infrastructure system[J]. Nano Energy,2022(97):107219.

[13] BAI Peng, ZHU Guang, LIN Zonghong, *et al*. Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions[J]. ACS Nano,2013(7):3713.

[14] HU Qiyi, WANG Bo, ZHONG Qize, *et al*. Metal-free and non-fluorine paper-based generator[J]. Nano Energy, 2015(14): 236.

[15] GUO Hengyu, YEH Minhsin, ZI Yunlong, *et al*. Ultralight cut-paper-based self-charging power unit for self-powered portable electronic and medical systems[J]. ACS Nano, 2017(11): 4475.

[16] WU Changsheng, WANG Xin, LIN Long, *et al*. Paper-based triboelectric nanogenerators made of stretchable interlocking kirigami patterns[J]. ACS Nano, 2016(10):4652.

[17] ZHANG He, YANG Chunwei, YU Ying, *et al*. Origami-tessellation-based triboelectric nanogenerator for energy harvesting with application in road pavement[J]. Nano Energy, 2020(78): 105177.

[18] SEUNG Wanchul, YOON Hongjoon, KIM Taeyun, *et al*. Dual friction mode textile-based tire cord triboelectric nanogenerator[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(39): 20024.

[19] CHEN Jie, GUO Hengyu, LIU Guanlin, *et al*. A fully-packaged and robust hybridized generator for harvesting vertical rotation energy in broad frequency band and building up self-powered wireless systems[J]. Nano Energy, 2017(33): 508.

[20] GUO Tong, LIU Guoxu, PANG Yaokun, *et al*. Compressible hexagonal-structured triboelectric nanogenerators for harvesting tire rotation energy[J]. Extreme Mechanics Letters, 2018(18): 1.

[21] WU Wenjie, CAO xiao, ZOU Jingdian, *et al*. Triboelectric nanogenerator boosts smart green tires[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(41): 1806331.

[22] 蔡爵威,赵鸿铎,钱鑫,等.采用实测数据实时修正的机场跑道水膜厚度面域分布预估方法[J].交通运输工程学报, 2023,23(1):105.
CAI Juewei, ZHAO Hongduo, QIAN Xin, *et al*. Estimation method for area distribution of water film thickness on airport runway modified by measured data in real time[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023,23(1):105.

[23] YU Miao, YOU Zhanping, WU Guoxin, *et al*. Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: A review[J]. Construction and Building Materials, 2020(260): 119878.