



论文

基于柔性传感技术的高速列车轮轨力在线监测方法

陈思宇^{1,2†}, 刘亚风^{1,2†}, 付从艺³, 王海瑞^{1,2}, 陈颖³, 陆炳卫^{1,2}, 马寅佳^{1,2}, 王禾翎^{2,3}, 冯雪^{1,2*}

1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;

2. 清华大学柔性电子技术实验室, 北京 100084;

3. 浙江清华柔性电子技术研究院, 嘉兴 314000

† 同等贡献

* E-mail: fengxue@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2022-12-07; 接受日期: 2023-03-01; 网络版发表日期: 2024-01-08

国家自然科学基金(批准号: U20A6001, 12102222, 11921002)资助项目

摘要 监测轮轨力信号对于保障高速列车的安全运行、提高轨道线路的质量管理具有重要意义。然而, 现有的轮轨力测试方法不能保证车轮在任意旋转角度下的测试精度与灵敏度, 难以实现列车在高速行驶过程中轮轨力的实时连续测量。本文基于柔性电子技术设计了一款新型轮轨力传感器, 在柔性衬底上设计环形应变栅结构, 利用金属的压阻效应, 获取环形区域内的整体变形随轮轨力变化的情况。垂向加载实验结果表明, 柔性轮轨力传感器不仅具有良好的线性度, 且在循环加载测试中表现出优异的稳定性和可重复性。更重要的是, 该柔性轮轨力传感器能保证车轮在旋转任意角度情况下的测试精度与灵敏度。有限元仿真结果表明, 在车轮内外两侧相对轴心等距离处布置柔性环形传感器, 通过两侧传感器的输出信号可实现对轮轨横向力和垂向力的有效解耦。配合无线传感技术, 柔性轮轨力传感器可实现高速列车轮轨力实时连续监测, 对我国发展下一代智能高铁具有重要意义。

关键词 智能高铁, 健康监测, 轮轨力, 柔性电子, 传感器

1 引言

21世纪以来, 我国高铁技术迅猛发展, 目前已在高铁运行速度、运输里程、运营规模以及运作管理等方面处于世界领先地位。在人工智能、信息传感、信号通信等技术的助推下, 中国高铁正朝着全面智能化的方向加速发展。面对如此庞大的高铁运行网络, 如何

保证列车的行驶安全, 降低铁路的养护成本, 是轨道交通领域面临的关键问题。将智能科技与安全保障相结合, 对高铁轮对、轴承、齿轮箱等关键部位实施实时的状态监测与故障诊断, 是实现高铁“自我体检”的关键^[1]。

轮轨力是车轮与轨道之间的相互作用力, 它不仅是评价列车运行安全性与平稳性的重要指标, 也是反

引用格式: 陈思宇, 刘亚风, 付从艺, 等. 基于柔性传感技术的高速列车轮轨力在线监测方法. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 545–552

Chen S Y, Liu Y F, Fu C Y, et al. Application of flexible electronic technology in real-time monitoring for wheel-rail contact forces of high-speed trains (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 545–552, doi: [10.1360/SST-2022-0434](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0434)

映轨道结构性缺陷的直接体现^[2]。在国内外轨道车辆运行安全标准中, 脱轨系数和轮重减载率是判断列车脱轨风险的两个主要参数, 均与车轮所受的横向力和垂向力相关^[3,4]。与此同时, 铁路轨道病害会引发轮轨力的异常响应, 例如轨道表面低凹或凸起引起大幅值轮轨垂向冲击力、道岔结构变异引起大幅值轮轨横向冲击力等。所以, 实时监测轮轨力信号对于保障高速列车的安全运行、提高轨道线路的质量管理具有重要意义。

轮轨力测试方法主要有两种, 即钢轨测力法和轮对测力法^[5-9]。钢轨测力法是将应变传感器粘贴在钢轨上, 通过测量钢轨变形来确定轮轨载荷。钢轨测力法能够测得列车车轮在固定位置的轮轨力, 却无法连续监测同一车轮在任意位置的轮轨力。另外, 钢轨测力法需要改造轨道, 成本较高且后期维护不方便。轮对测力法是将应变传感器布置在车轴/车轮上, 通过测量列车运行时车轴/车轮变形来获得轮轨力。轮对测力法能够连续测试列车车轮全程受力情况, 测试成本较低且易维护, 因此目前测量轮轨力多采用轮对测力法。

列车在高速行驶过程中, 车轮与钢轨之间的接触位置不断发生变化, 车轮变形较为复杂。常见的轮对测力法是在车轮内外两侧表面相对轴心等距离处, 环向离散均匀分布应变变片, 利用两侧测点输出信号实现轮轨横向力和垂向力解耦。然而, 该方法难以实现列车在高速行驶过程中轮轨力的实时连续测量, 而且不能保证车轮在任意旋转角度下的测试精度与灵敏度^[3]。

柔性电子技术是将有机/无机材料电子器件集成在柔性/可延性基板上的新兴电子技术^[10-12]。相比于传统电子器件柔韧性差、不可拉伸、不能与曲面共形等缺点, 柔性电子器件不仅具有良好的柔韧性和延展性, 且其结构形式灵活多样, 可根据测量环境的要求任意布置。此外, 新型柔性材料的引入和巧妙柔性结构的设计帮助柔性传感器能够实现对各种机械信号(如拉、压、弯曲、剪切、扭转和振动等)以及环境刺激信号(如温度、湿度、气流等)的监测^[13-15]。

相对传统刚性传感器, 柔性传感器由于其“轻、薄、柔”的特点, 在重大装备健康监测等领域具有以下优势: (1) 柔性传感器不会影响原有转动/振动系统的动平衡; (2) 柔性传感器易封装, 在高速旋转/振动下不易抛洒; (3) 装备关键失效部位多在复杂几何处, 这些复杂几何结构多为非可展曲面, 且处于空间狭小处, 而

柔性传感器可适用于曲面和狭小空间等极端工作环境, 为实现更为精确、及时的重大装备早期故障诊断等技术提供更多可能性。本文基于柔性电子技术设计了一款可实现实时连续测量高速列车轮轨力的新型传感器, 在车轮内外侧面独立分布柔性传感器, 并分别对两侧传感器的输出信号进行后处理, 可实现轮轨横向力和垂向力的有效解耦。

2 新型柔性轮轨力传感器

基于柔性电子技术, 在柔性衬底上设计环形应变栅结构, 利用金属的压阻效应, 测量环形区域内的整体变形和局部变形情况。图1(a)为新型柔性轮轨力传感器的制备流程。首先, 在晶圆上旋涂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)(3000 r/min旋涂30 s), 在180℃环境中加

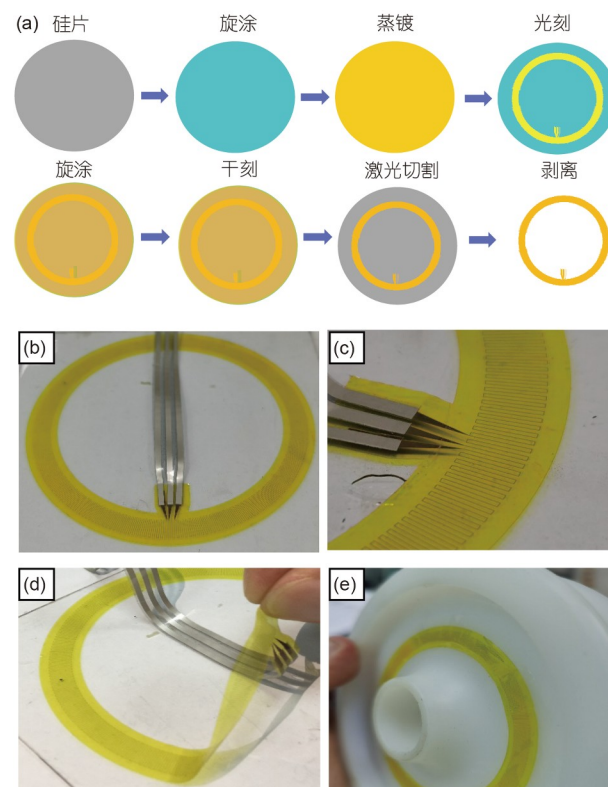


图1 (网络版彩图) (a) 柔性轮轨力传感器的制备流程; (b) 传感器正面视图; (c) 传感器引脚特写; (d) 传感器具有良好的柔性; (e) 传感器共形贴附于车轮表面

Figure 1 (Color online) (a) Fabrication process of the flexible wheel-rail force sensor; (b) front view of the sensor; (c) output pins of the sensor; (d) demonstration of the flexibility of the sensor; (e) sensor conformal to wheel surface.

热 5 min 使之固化。然后, 旋涂聚酰亚胺胶体(PI) (5000 r/min 旋涂 60 s), 并放置在烘箱中按照 80℃ 30 min, 120℃ 30 min, 150℃ 30 min, 180℃ 60 min 阶梯式加热固化。随后, 利用电子束蒸发沉积金属(10 nm 铬, 100 nm 金), 其中金属铬可以加强金与 PI 之间的界面结合力。在沉积的金膜上旋涂光刻胶进行光刻, 形成应变栅图案。之后, 再旋涂 PI 并固化, 形成封装层。利用反应离子刻蚀方法, 暴露出引脚。最后, 利用激光切割方法, 获得设计好的外部轮廓形状, 剥离后得到如图 1(b) 所示的新型柔性轮轨力传感器。

新型柔性轮轨力传感器的应变栅沿着圆周径向分布, 应变栅呈锯齿状, 其沿径向的长度远大于沿环向的长度。如图 1(c) 所示, 传感器有三个引脚, 其中中间引脚为公共引脚, 左侧为整体传感引脚, 右侧为单点传感引脚。当同时连接左侧引脚和中间引脚, 可以检测环形区域整体的应力应变情况; 当同时连接右侧引脚和中间引脚, 可以检测两个引脚之间狭小区域的应力应变情况, 即单点的应力应变情况, 从而实现环形区域整体应变和引脚处局部应变的测量。如图 1(d) 所示, 新型轮轨力传感器具有轻、薄、柔的特点, 可以任意弯弯曲变形。如图 1(e) 所示, 新型柔性轮轨力传感器可共形贴附于车轮表面, 利用金属的压阻效应, 在外载荷作用下产生电阻变化。通过测量传感器的电阻变化, 从而实现轮轨力的实时监测。

3 垂向加载实验

在模型设计方面, 车轮按照 CRH380B (直径 920 mm) 的实际形状及尺寸以 1:7 的比例制作, 材料选用 ABS 树脂; 轨道按照高铁标准轨距 1435 mm 以 1:7 的比例设计; 车身为长 0.5 m 的钢板。在器件设计方面, 环形传感器内径为 70 mm, 外径为 80 mm, 应变栅线宽为 40 μm 。加载设备选取 INSTRON 万能试验机, 可通过压头在车身表面匀速施加压力, 整体实验装置如图 2 所示。

由于加载实验中, 垂向加载相对横向加载更容易实现, 故本文加载实验仅限于垂向加载实验。若在车轮正反两面相同位置处同时粘贴环形传感器, 那么在垂向加载情况下, 两面的传感器输出信号几乎相同, 故本节仅对粘贴于一面的传感器输出信号作讨论。利用万能试验机(施加载荷)和数字万用表(测量电阻), 依

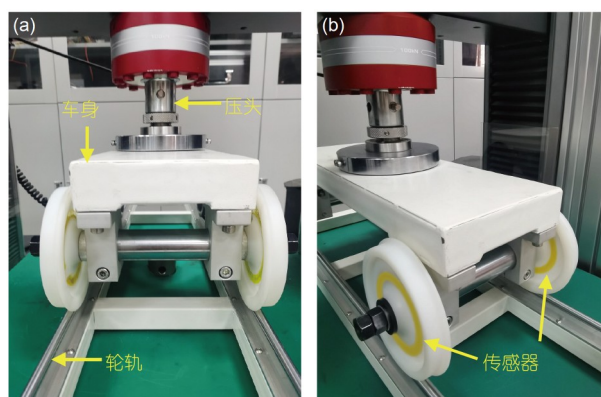


图 2 (网络版彩图) 实验装置. (a) 正视图; (b) 侧视图

Figure 2 (Color online) Experimental setup. (a) Elevation view; (b) side view.

次测试环形传感器的线性度、稳定性以及灵敏度等相关重要指数, 并验证其输出信号与车轮旋转角度无关的特性。

3.1 线性度测试

如图 2 所示, 调节万能试验机上压盘与模型车身接触, 接触区域为车身平板中心, 并以 2 mm/min 的速度匀速加载, 其中 4 个车轮会平均分担车身承载压力。实验结果表明, 柔性环形传感器具有优良的压阻性能, 其电阻变化率随着垂向载荷线性变化, 如图 3 所示。

3.2 稳定性测试

实际工况下, 高铁车身由舱体结构、内部设备、内部装饰等构成, 故车轮初始承压载荷不为零。实验加载中, 试验机上压盘与模型车身初始接触压力设为 2 kN, 即车轮初始承压载荷为 0.5 kN。如图 4 所示, 对模型车身实施周期性垂向循环加载, 载荷取值范围为 2~12 kN; 柔性环形传感器的基础电阻约为 40 k Ω , 电阻变化范围为 40.69~40.73 k Ω , 其变化趋势与车身承载变化趋势正好相反, 即压力越大电阻越小。循环加载试验结果表明, 柔性环形传感器电阻-时间曲线均具有良好的可重复性。

3.3 灵敏度测试以及角度无关性验证

取环形传感器引脚与轨道间距最小时刻为车轮的初始状态, 依次顺时针旋转 90° 和 180°, 并针对这三种情况进行垂向加载实验, 如图 5(a)~(c) 所示。由图 5(a1)~

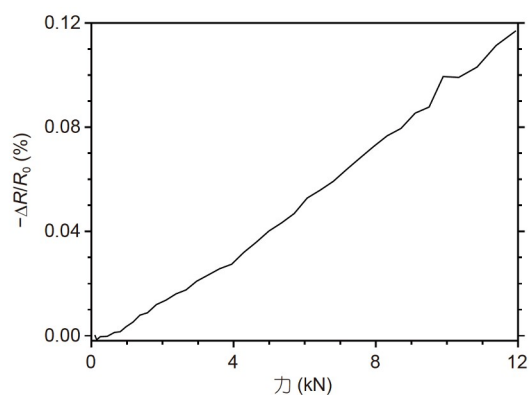


图3 垂向载荷-电阻变化率曲线

Figure 3 Relationship curve of the change between electrical resistance and the vertical force.

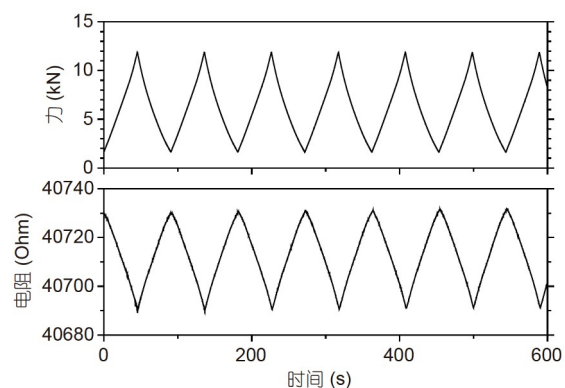
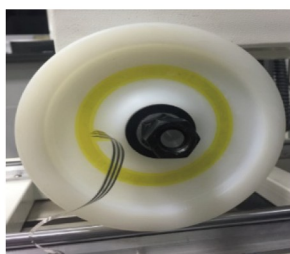


图4 循环加载下, 柔性环形器件的电阻-时间变化曲线

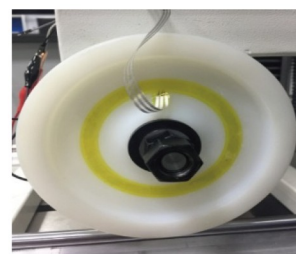
Figure 4 Corresponding relation curves of electrical resistance to time under cyclic loading.



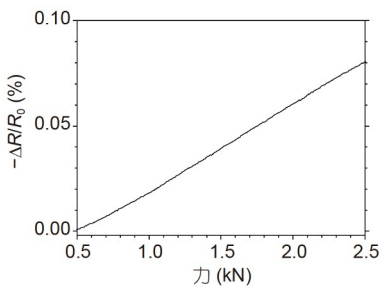
(a)



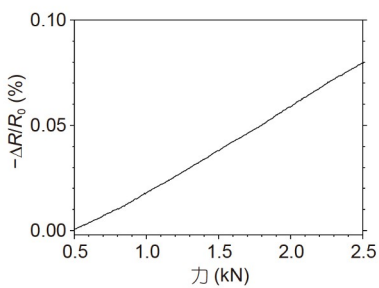
(b)



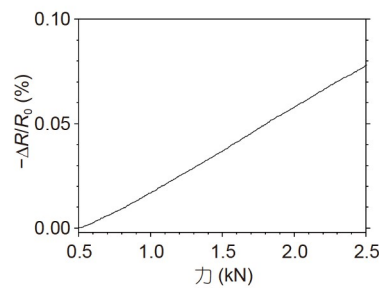
(c)



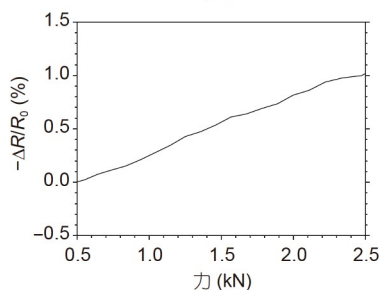
(a1)



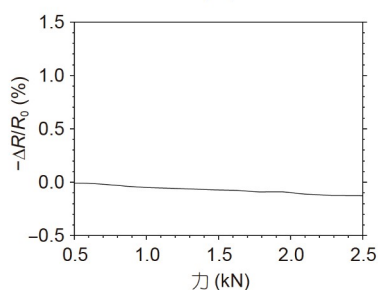
(b1)



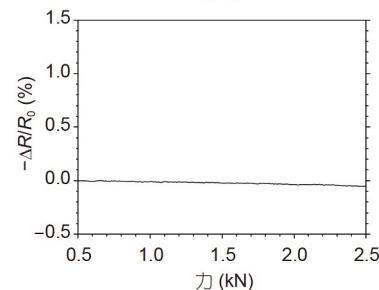
(c1)



(a2)



(b2)



(c2)

图5 (网络版彩图) (a)~(c) 车轮由初始位置分别顺时针旋转0°, 90°, 180°; (a1)~(c1) 车轮顺时针旋转0°, 90°, 180°时, 环形区域的垂向载荷-电阻变化率曲线(整体); (a2)~(c2) 车轮顺时针旋转0°, 90°, 180°时, 引脚处的垂向载荷-电阻变化率曲线(局部)

Figure 5 (Color online) (a)~(c) Wheel rotated 0°, 90° and 180° clockwise respectively from the initial position; (a1)~(c1) relationship curves of the change between electrical resistance and the vertical force for the annular region (global); (a2)~(c2) relationship curves of the change between electrical resistance and the vertical force for the pins region (local).

(c1)可知, 环形传感器(整体)的载荷-电阻变化率曲线几乎不会随车轮旋转角度的改变而不同, 故环形传感器的输出信号与车轮旋转角度无关. 由图5(a2)~(c2)可知, 引脚处(局部)的载荷-电阻变化率曲线会随着车轮旋转角度的改变而不同, 且引脚处应力由受压状态转变为受拉状态. 当引脚与轨道间距最小时, 引脚处测点受压且响应灵敏度较高; 当引脚与轨道间距最大时, 引脚处测点受拉且响应灵敏度较低. 总之, 当车轮旋转时, 环形传感器的响应灵敏度远不及单点应变片在某些时刻的响应灵敏度, 但环形传感器的响应灵敏度不会随着车轮旋转角度的改变而不同.

4 有限元仿真

车轮所受的横向力和垂向力是评估铁道车辆脱轨安全性的两个重要参数, 通过垂向加载实验验证了柔性环形传感器可以对车轮所受的垂向力进行有效的监测, 接下来将通过有限元分析, 讨论柔性环形传感器在车轮所受的横向力监测中应用的可行性.

4.1 有限元建模

利用ABAQUS 2021建立车轮-轨道接触分析的有限元模型, 在模型几何设计方面, 车轮按照CRH380B (直径920 mm)的实际形状及尺寸以1:7的比例设计, 轨道按照SB10型支撑轨的实际形状及尺寸设计. 在材料参数设置方面, 车轮选用ABS树脂, 弹性模量为2200 MPa, 泊松比为0.39; 轨道选用钢铁, 弹性模量为210 GPa, 泊松比为0.29.

如图6(a)所示, 分别设置车轮中心点(耦合参考点)与车轮内圈节点耦合、轨道底面中心点(耦合参考点)与轨道底面节点耦合, 通过多点耦合约束保证车轮中空表面、轨道底面各节点不发生位置的相对改变; 如图6(b)所示, 设置车轮与轨道接触区域为接触对, 通过接触进行力的传递.

针对垂向受力工况, 约束车轮中心点所有自由度, 并约束轨道垂直方向以外的全部自由度, 对轨道施加沿车轮径向的作用力, 如图7(a)所示; 针对横向受力工况, 约束车轮中心点所有自由度, 并约束轨道水平方向以外的全部自由度, 对轨道施加沿车轮侧向的作用力, 如图7(b)所示. 经后处理验证, 通过接触传递到车轮上的接触反力大小等于通过以上方式对轨道施加的作用

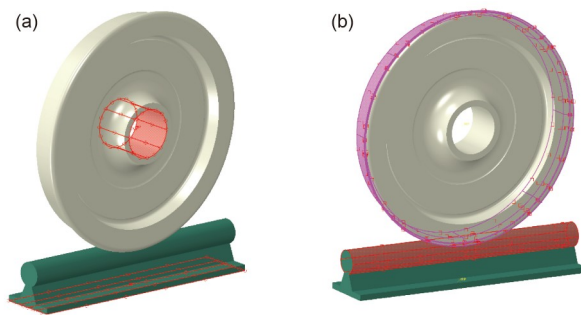


图6 (网络版彩图)约束关系与相互作用
Figure 6 (Color online) Constraints and interactions.

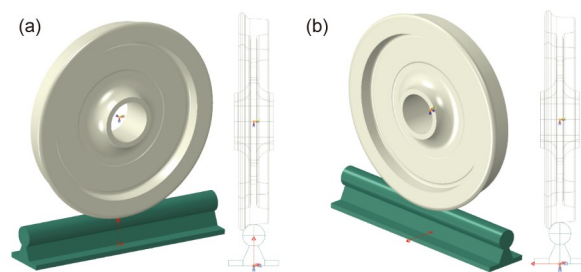


图7 (网络版彩图)载荷施加. (a) 垂向加载; (b) 横向加载
Figure 7 (Color online) Exertion of loads. (a) Vertical loading; (b) lateral loading.

力大小.

另外, 在网格划分方面, 如图8所示, 对接触区域的网格进行局部加密, 车轮与轨道的单元总数为292608. 在单元设置方面, 为了精确计算接触约束力, 单元类型选择为C3D8I.

4.2 数据分析

如图9所示, 在车轮A面按逆时针依次选择1~8号测点N1-A~N8-A, 每个测点都处于环形传感器覆盖区域中心轴线且互相间隔45°, 其中N1-A为环形区域中心轴线与轨道间距最小点; 在车轮B面对应位置处选择测点N1-B~N8-B.

如图1(c)所示, 环形应变栅结构中沿径向栅长远大于沿环向栅长, 故计算应变栅结构整体应变时可忽略其环向应变. 分别计算车轮垂向受力10 kN和横向受力1 kN两种工况, 分析步采用静力学非线性分析, 通过后处理将计算结果从整体直角坐标系下转换至以车轮中心为中心的柱坐标系下, 考察E11, 即弹性应变径向分量. 如图10所示, 在垂向压力工况下, 车轮A和B

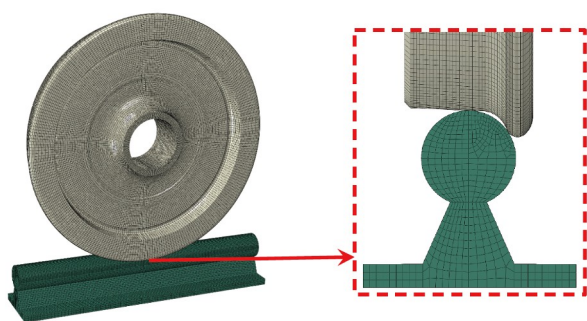


图 8 (网络版彩图)网格划分
Figure 8 (Color online) Creation of meshes.

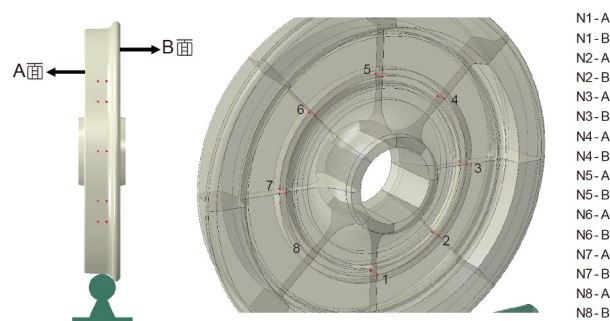


图 9 (网络版彩图)测点分布
Figure 9 (Color online) Distribution of measuring points.

两面的径向应变云图非常相似;而在横向推力工况下,车轮A和B两面的径向应变云图差异明显。

提取环形区域内测点径向应变数值,详见表1。垂直向压力工况的计算结果表明,垂直向力引起车轮的压缩变形,同一测点在车轮A和B两面的径向应变方向一致且数值相近;横向推力工况的计算结果表明,横向力引起车轮的弯曲变形,同一测点在车轮A和B两面的径向应变方向相反且数值相近。通过获取车轮A和B两面环形区域内整体应变的信息,可解耦求得车轮所受的垂直向力与横向力,即垂直向力 $\propto$ (A面环形区域整体应变+B

面环形区域整体应变),而横向力 $\propto$ (A面环形区域整体应变-B面环形区域整体应变)。

如图11所示,测点1~5(测点6~8与测点2~4对称)的径向应变与横向载荷呈线性关系,故可预测环形区域整体应变也与横向载荷呈线性关系。结合垂直向加载实验结果,可推断车轮所受垂直向力将线性正比于(A面环形传感器的输出电信号+B面环形传感器的输出电信号),车轮所受横向力将线性正比于(A面环形传感器的输出电信号-B面环形传感器的输出电信号)。

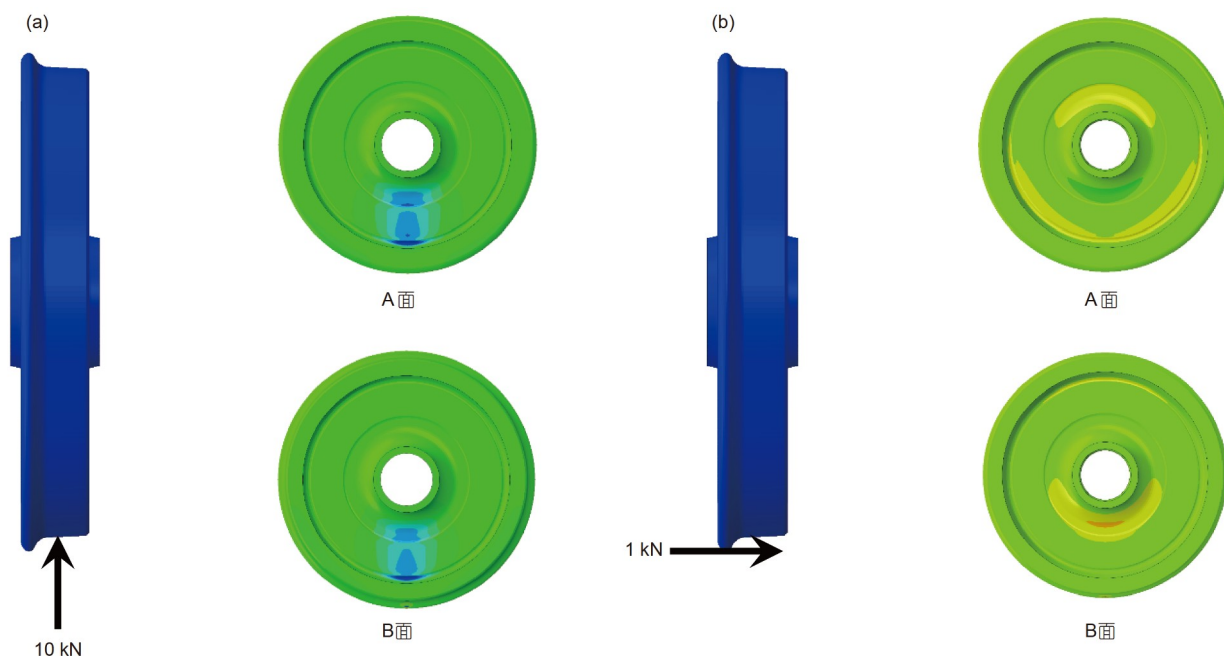


图 10 (网络版彩图)径向应变E11云图. (a) 垂直压力工况; (b) 横向推力工况
Figure 10 (Color online) Nephogram of radial strain E11. (a) Under vertical loading; (b) under lateral loading.

表 1 测点在不同工况下的径向应变数值

Table 1 Radial strain of the measuring points under different load conditions

测点编号	径向应变数值 (垂向压力10 kN)	径向应变数值 (横向推力1 kN)
N1-A	-2.70354×10^{-4}	-9.38385×10^{-5}
N1-B	-2.51758×10^{-4}	6.8932×10^{-5}
N2-A	-1.11555×10^{-6}	-3.20055×10^{-5}
N2-B	-1.11885×10^{-6}	3.46557×10^{-5}
N3-A	2.9218×10^{-5}	1.90661×10^{-5}
N3-B	2.57479×10^{-5}	-1.36465×10^{-5}
N4-A	2.18748×10^{-5}	2.82469×10^{-5}
N4-B	1.86856×10^{-5}	-2.51144×10^{-5}
N5-A	1.81648×10^{-5}	2.4899×10^{-5}
N5-B	1.63421×10^{-5}	-2.26756×10^{-5}
N6-A	2.18747×10^{-5}	2.82469×10^{-5}
N6-B	1.86855×10^{-5}	-2.51144×10^{-5}
N7-A	2.92177×10^{-5}	1.90661×10^{-5}
N7-B	2.57478×10^{-5}	-1.36465×10^{-5}
N8-A	-1.11584×10^{-6}	-3.20055×10^{-5}
N8-B	-1.11893×10^{-6}	3.46556×10^{-5}

5 结论与展望

本文基于柔性电子技术设计了一款可实时连续测量轮轨力，并能保证在车轮旋转任意角度情况下都具有同样测试精度与灵敏度的环形传感器。垂向加载实验结果表明，该柔性环形传感器不仅具有良好的线性度，并且在循环加载测试中表现出优异的稳定性和可

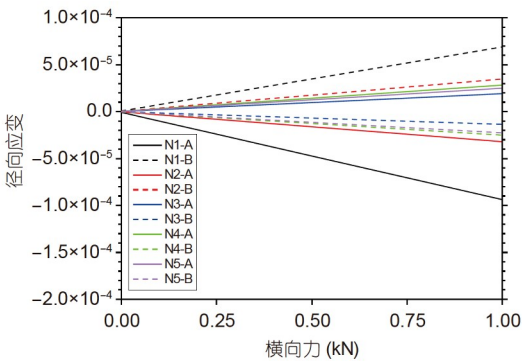


图 11 (网络版彩图)测点径向应变随横向力变化曲线
Figure 11 (Color online) Relationship of the radial strain of the measuring points vs. the lateral force.

重复性。此外，有限元结果表明，在车轮内外两侧相对轴心等距离处布置柔性环形传感器，通过两侧传感器的输出信号可实现对轮轨横向力和垂向力的有效解耦。

实际应用中，传感器信号引线位于内环，朝着圆心方向。柔性传感采集装置贴附在轮轴圆心区域，与传感器引线直接连接，在跟随轮对一起滚动时，其信号引线与采集装置既可以利用集流环技术，也可以配合无线遥测技术，将轮轨力信号传递至数据分析终端。未来配合噪声影响更小的无线遥测技术，并进一步优化柔性环形传感器的固定方式、固定位置、电极材料等，针对不同车轮通过标定建立轮轨力-电阻信号的映射关系，柔性轮轨力传感器可实现高速列车轮轨力实时连续监测，对发展我国下一代智能高铁具有重要意义。

参考文献

1 Zhai W M, Zhao C F, Xia H, et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service safety (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 645–660 [翟婉明, 赵春发, 夏禾, 等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 645–660]

2 Li G, Zhang Z C, Zu H L, et al. Experimental study on wheel-rail force response characteristics under typical track defects of high speed railway (in Chinese). *China Railway Sci*, 2019, 40: 30–36 [李谷, 张志超, 祖宏林, 等. 高速铁路典型轨道病害下轮轨力响应特性试验研究. 中国铁道科学, 2019, 40: 30–36]

3 Li G, Zu H L, Zhang Z C. Testing system of wheel and rail forces for urban rail transit (in Chinese). *Mod Urban Transit*, 2019, 8: 46–50 [李谷, 祖宏林, 张志超. 城市轨道交通列车轮轨力检测系统. 现代城市轨道交通, 2019, 8: 46–50]

4 Yu Z Y, Li F D, Li G. Wheel derailment and its evaluation (in Chinese). *J China Railway Soc*, 1999, 21: 33–38 [俞展猷, 李富达, 李谷. 车轮脱轨及其评价. 铁道学报, 1999, 21: 33–38]

5 Urda P, Munoz S, Aceituno J F, et al. Wheel-rail contact force measurement using strain gauges and distance lasers on a scaled railway vehicle. *Mech Syst Signal Process*, 2020, 138: 106555

- 6 Jin X C. A measurement and evaluation method for wheel-rail contact forces and axle stresses of high-speed train. *Measurement*, 2020, 149: 106983
- 7 Xia F J, Cole C, Wolfs P. An inverse railway wagon model and its applications. *Vehicle Syst Dyn*, 2007, 45: 583–605
- 8 Wei L, Zeng J, Wu P B, et al. Indirect method for wheel-rail force measurement and derailment evaluation. *Vehicle Syst Dyn*, 2014, 52: 1622–1641
- 9 Gong X, Ren Z S, Fan T B, et al. Wheel/rail force measurement method 1:5 scale wheelset roller rig test accuracy (in Chinese). *J Mech Eng*, 2020, 56: 184–191 [宫雪, 任尊松, 范童柏, 等. 轮轨力连续测试方法及1:5试验台验证. *机械工程学报*, 2020, 56: 184–191]
- 10 Feng X, Lu B W, Wu J, et al. Review on stretchable and flexible inorganic electronics (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 014201 [冯雪, 陆炳卫, 吴坚, 等. 可延展柔性无机微纳电子器件原理与研究进展. *物理学报*, 2014, 63: 014201]
- 11 Liu X, Lv Y J, Wang L F, et al. Research progress of stretchable and flexible electronic technology (in Chinese). *Semicond Tech*, 2015, 40: 161–166 [刘旭, 吕延军, 王龙飞, 等. 可延展柔性电子技术研究进展. *半导体技术*, 2015, 40: 161–166]
- 12 Li X T, Tong H Y, Zhao Y, et al. Flexible electronics, applications of electronics, stretchable structure, stretching ability, mechanical models (in Chinese). *Mech Eng*, 2015, 37: 295–301 [李学通, 仝洪月, 赵越, 等. 柔性电子器件的应用、结构、力学及展望. *力学与实践*, 2015, 37: 295–301]
- 13 Ma Y J, Zhang Y C, Cai S S, et al. Flexible hybrid electronics for digital healthcare. *Adv Mater*, 2019, 32: 1902062
- 14 Ma Y J, Li H B, Chen S Y, et al. Skin-like electronics for perception and interaction: materials, structural designs, and applications. *Adv Intell Syst*, 2021, 3: 2000108
- 15 Li H B, Ma Y J, Huang Y G. Material innovation and mechanics design for substrates and encapsulation of flexible electronics: a review. *Mater Horiz*, 2021, 8: 383–400

Application of flexible electronic technology in real-time monitoring for wheel-rail contact forces of high-speed trains

CHEN SiYu^{1,2}, LIU YaFeng^{1,2}, FU CongYi³, WANG HaiRui^{1,2}, CHEN Ying³, LU BingWei^{1,2}, MA YinJi^{1,2}, WANG HeLing^{2,3} & FENG Xue^{1,2}

¹ School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Laboratory of Flexible Electronics Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³ Institute of Flexible Electronics Technology of THU, Jiaxing 314000, China

Wheel-rail contact force monitoring enables the operational safety of high-speed trains and the quality management improvement of railway infrastructure. However, the available wheel-rail contact force measuring methods have difficulty in achieving precision and sensitivity for high-rotating wheels and real-time and continuous measurement of wheel-rail contact forces at high speed. In this work, a novel sensor for wheel-rail contact force monitoring is designed based on flexible electronic technology. A ring-shaped strain gage structure is designed on a flexible substrate, and the deformations of the annular region due to wheel-rail contact forces are detected according to the piezoresistive effect in the metal wire. The sensor is verified to have good linearity under vertical loading experiments and exhibits excellent stability and repeatability during cyclic loading. Furthermore, this sensor can guarantee measurement precision and sensitivity when the wheel is spinning. Additionally, the wheel-rail contact forces along the vertical and lateral directions are proved to be effectively decoupled by the output signals of the sensors conformal to relative positions on both sides of the wheel. Thus, combined with wireless sensing technology, the sensor developed here enables the real-time and continuous measurement of wheel-rail contact forces at high speed, which is of great importance for developing the next generation of high-speed railway intelligent transportation systems.

intelligent transportation systems, structural health monitoring, wheel-rail contact force, flexible electronic technology, sensor

doi: [10.1360/SST-2022-0434](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0434)