

基于内置式变磁阻发电机的双列圆锥滚子轴承 转动能量采集器^{*}

郑晨¹ 代其义¹ 王松² 马腾浩² 高帅³ 韩勤锴^{2†}

(1. 北京工商大学 机械系, 北京 100048)

(2. 清华大学 机械系 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(3. 重庆大学 机械工程学院机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要 传统铁路轴箱轴承(双列圆锥滚子轴承)监测系统存在布线复杂、维护成本高及灵活性不足等问题,限制了其在工业设备智能化管理中的应用. 因此提出了一种基于内置式变磁阻发电机(variable reluctance generator, VRG)的双列圆锥滚子轴承用变磁阻能量采集器(variable reluctance energy harvester, VREH),旨在通过能量采集技术为轴承监测系统提供持续的电能支持,助力轴承的智能化设计. 该 VREH 利用轴承运转过程中产生的机械能,通过变磁阻效应将其转化为电能,为无线发射模块供电,并通过无线发射模块将信号传输到移动 PC 端,实现信号的无线传输. 通过理论和仿真分析验证了 VRG 的发电原理,并测试和分析了关键设计参数(包括线圈匝数、线圈一齿形金属环间距、铁芯材料等)对 VREH 性能的影响. 无线发射实验结果表明,该 VREH 能够在铁路轴箱轴承中稳定工作,实现了高效的能量采集,为无线发射系统提供持续的电能支持.

关键词 变磁阻发电机, 双列圆锥滚子轴承, 能量采集, 自供电, 无线发射

中图分类号: O441.3; TH17; TH01+9

文献标志码: A

A Rotational Energy Harvester for Double-Row Tapered Roller Bearings Based on Built-in Variable Reluctance Generator^{*}

Zheng Chen¹ Dai Qiyi¹ Wang Song² Ma Tenghao² Gao Shuai³ Han Qinkai^{2†}

(1. Department of Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

(2. State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Traditional monitoring systems for railway axle box bearings face issues such as complex wiring, high maintenance costs, and limited flexibility, which hinder their application in the intelligent management of industrial equipment. Therefore, a variable rotational energy harvester (VREH) based on a built-in variable reluctance generator (VRG) for double-row tapered roller bearings is proposed, aiming to provide continuous power support for sensors and wireless transmission modules in bearing monitoring systems, thereby facilitating the intelligent design of bearings. The VREH converts mechanical energy generated during bearing operation into electrical energy through the variable reluctance effect, powering the wireless transmission module. The wireless transmission module then sends signals to a mobile PC, enabling wireless signal transmission. The power generation principle of the VRG was vali-

2025-03-10 收到第 1 稿, 2025-03-31 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(12272199, 12102011), 国家重点实验室课题(SKLM-T-ZZKT-2024R06), National Natural Science Foundation of China (12272199, 12102011), National key laboratory project (SKLM-T-ZZKT-2024R06).

[†] 通信作者 E-mail: hanqinkai@mail. tsinghua. edu. cn

dated through theoretical and simulation analysis. Key design parameters, including the number of coil turns, the distance between the coil and the toothed metal ring, and the core material, were tested and analyzed for their impact on the self-powering performance of the VRG. Wireless transmission experiments demonstrated that the VREH can operate stably in the railway axle box bearings, achieving efficient energy harvesting, providing continuous power support for the wireless transmission system.

Key words variable reluctance generator, double-row tapered roller bearings, energy harvesting, self-powered, wireless transmission

引言

滚动轴承作为现代机械设备中不可或缺的关键部件,广泛应用于工业、交通、能源等领域,其性能直接影响到设备的运行效率、可靠性和安全性^[1,2]. 特别是在铁路运输领域,轴箱轴承作为列车走行部的核心组件,承担着支撑车体重量、传递动力和保证列车平稳运行的重要功能^[3,4]. 然而,由于铁路轴箱轴承长期在高速、重载、复杂工况下运行,极易出现磨损、疲劳、过热等故障,严重时可能导致列车脱轨等重大事故^[5,6]. 因此,对铁路轴箱轴承的运行状态进行实时监测,对于保障列车安全运行、降低维护成本具有重要意义^[7,8].

传统的轴承监测系统通常具有结构复杂性和外部电源依赖性的局限,供电设备存在功率低、占用过大装配空间、工作环境复杂和寿命有限等问题. 此外,铁路轴箱轴承工作环境通常处于极高的温度、动力负荷、腐蚀性和封闭的状态,这导致为无线发射系统供电的外部电源的接入存在诸多困难. 因此,开发一种从机械设备运转过程中获取机械能^[9-11],并为无线发射系统供电的能量采集器,成为当前研究的热点.

近年来,能量采集技术逐渐成为解决无线传感器网络供电问题的有效手段. 目前,常见的能量采集技术包括压电^[12,13]、摩擦电^[14,15]和磁电^[16,17]等发电方式. Yang等^[18]设计了一种在宽频率范围内收集铁路随机振动的能量的轨载压电能量采集器,能够有效收集宽带轨道振动的能量,具有为轨道旁监测传感器供电和减少轨道振动的巨大潜力. Gao等^[19]也设计了一种利用轨道加速度的局部变化来产生电能,用于铁路振动能量收集的轨载压电传感器,该装置通过将压电 PZT 薄膜一端固定在轨道上,并在另一端安装质量块,能够有效捕获轨道振

动能量. Gao 和 Han 等^[20]开发了一种新型高精度自供电摩擦轴承滑移传感器(HP-TEBSS),该传感器采用浮动清扫和独立模式设计,确保其长期可靠性,同时不会影响轴承的结构和动态特性,用于实时监测轴承滑移程度和保持架稳定性特性. Gao 和 Han 等^[21]还提出了一种基于冠型开口式保持架的陶瓷混合摩擦电滚动轴承,陶瓷滚动体作为介电材料与设置在轴承内外圈间隙处的叉指电极形成摩擦发电机,其发电模式为非接触式滚动—滑动组合独立自由层式,用于轴承打滑与保持架稳定性的实时监测. Hu^[22]设计了一种基于绳—轴耦合转子的转矩式磁电能量采集器,通过将超低频振动转化为快速旋转运动,实现了高效能量采集,为超低频能量的高效采集提供了一种有效的方法.

磁电能量收集器利用磁场变化产生电能,但其结构复杂且效率较低;摩擦电能量收集器通过摩擦起电效应发电,但其耐久性和稳定性较差;压电能量收集器则利用压电材料的压电效应将机械振动转化为电能,但其输出功率较低且对振动频率敏感. 相比之下,变磁阻发电机(VRG)作为一种高效的能量转换装置,具有结构简单、可靠性高、输出功率大等优点,特别适用于铁路轴箱轴承这种高转速、高振动的应用场景^[23-25]. Xu^[26]提出了一种基于 M 形磁极对和双对置永磁体的高功率密度变磁阻能量采集器(VREH),面向低速旋转工况实现自供能无线传感,验证了该 M 形 VREH 的仿真与实测输出功率偏差小于 3%,且在低速条件下仍能提供足以驱动无线传感器的电能输出,为旋转设备状态监测提供了可靠的能源解决方案. Miao^[27]设计了一种基于带状软铁磁保持架的变磁阻轴承发生器(VRBG),以非接触方式将轴承的部分旋转能量转换为电能并实现对轴承故障的精确识别,所提出的 VRBG 在旋转机械的状态监测中具有良好的应用

前景。Wang^[28]提出了一种基于波形保持架的变磁阻发电机(WC-VRG),利用波形保持架周期性调制磁路磁阻,无需线圈与永磁体相对运动即可实现高效能量转换,实现非接触方式将轴承旋转动能转换为电能,并集成自供电传感、无线传输与智能诊断功能,为旋转机械智能轴承的工程化提供了创新解决方案。Gong^[29]设计的变磁阻能量采集器(VREH),能够有效地将旋转运动能量转换为电能,从而为无线传感节点(WSN)供电。

本文提出了一种基于内置式变磁阻发电机(VRG)的双列圆锥滚子轴承用变磁阻能量采集器,旨在通过能量采集技术为轴承监测系统中的传感器和无线发射模块提供持续的电能支持,助力轴承的智能化设计。该能量采集器将变磁阻发电机集成到轴承内部,利用轴承旋转产生的机械能进行发电,为无线发射模块提供持续稳定的电力支持。首先通过理论和仿真分析验证了 VRG 的发电原理,随后测试和分析了关键设计参数(包括线圈匝数、线圈一齿形金属环间距、铁芯材料等)对 VRG 自供电性能的影响。无线发射实验结果表明,该系统能够在铁路轴箱轴承中稳定工作,为无线发射系统提供持续的电能支持。

本研究的创新点在于提出了一种基于变磁阻发电原理的集成化能量采集方案,通过将变磁阻发电机与轴承结构进行一体化设计,实现发电机在轴承内部的内置式集成,不仅避免了传统能量采集装置需要额外安装空间的局限性,而且显著提高了能量转换效率。研究成果为铁路轴箱轴承的状态监测系统提供了一种可靠的自供电解决方案,同时为工业设备智能化管理系统的能源供给问题提供了新的技术思路。这种集成化设计方法在旋转机械的能量回收与状态监测领域具有重要的应用价值。

1 VREH 的结构及发电原理

1.1 VREH 的结构

本文使用一个齿形金属环和变磁阻发电机(VRG)构成一个变磁阻能量采集器(VREH),VREH 和双列圆锥滚子轴承(DTRB)集成后通过轴承出油孔引出的导线实现能量收集,如图 1(a)所示。利用 DTRB 的内部空间,将设计的 VREH 与采用的传统的铁路轴箱轴承 DTRB 实现了集成

设计,该结构紧凑,不改变轴承的固有结构,不干涉 DTRB 的运转,也无需对轴承安装环境进行改造。图 1(b)为提出的 VREH,它包含一个齿形金属环和一个装有 VRG 的尼龙环,两者相互配合实现供电。尼龙环上排布着与齿形金属环的齿对应的,间隔角度为 $2\pi/M_n$ rad,均匀分布的安装孔用于安装 VRG,其中 M_n 表示齿形金属环的齿数,VRG 使用螺栓和固定螺母与尼龙环实现连接,每两个安装孔间有一个导出孔用于布线和与 DTRB 连接。

图 1(c)为 VREH 的爆炸视图,其中 VRG 的结构包括线圈、磁铁、铁芯、垫片和固定螺母。通过改变垫片的数量来调整 VRG 与齿形金属环齿面之间的气隙距离,从而探究气隙距离变化对 VRG 性能的具体影响。为避免变磁阻发电机与齿形金属环间发生摩擦干涉,本文将 VRG 与齿形金属环齿面之间的气隙距离即最小气隙距离 $D_{d-\min}$ 设置为 1 mm。因为齿形金属的设置是中心对称结构,从而可以保证安装在任何安装孔的 VRG 的电信号相位保持同步,因此能够安装多个 VRG 进行串联连接来增强它的发电能力从而保证其能满足无线发射模块的运行。

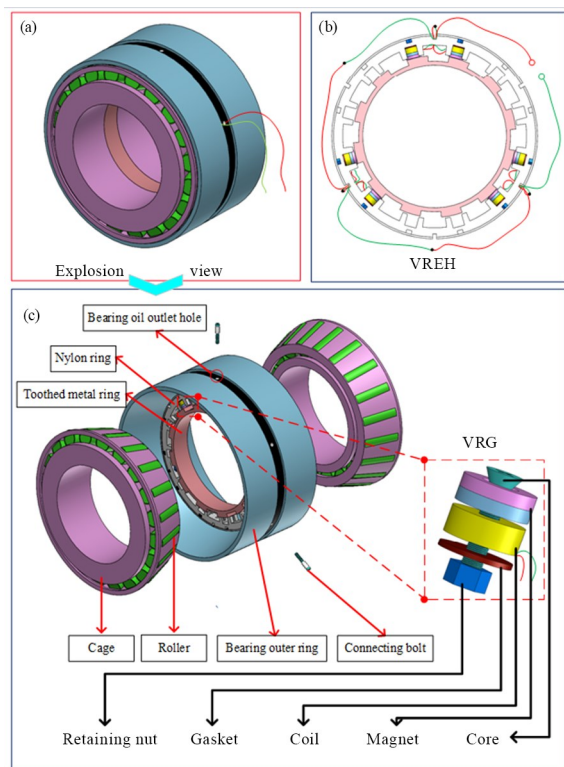


图 1 VREH 的结构图:(a)VREH 集成图;(b)VREH 结构图;
(c)供电模块爆炸视图

Fig. 1 Structure diagram of the VREH: (a) Integrated diagram of the VREH; (b) Structure diagram of the VREH; (c) Explosion view of the VREH

1.2 VREH 的发电原理

轴承转动时带动齿形金属环转动,VRG 通过尼龙环与轴承保持架连接,全程保持静止,VRG 通过齿形金属环的转动发生变磁阻效应在线圈中产生感应电流,将轴承转动的机械能通过 VRG 转换为磁电能,对输出的电压和电流进行采集分析确保其能驱动无线发射模块的运行. VRG 的发电原理为:因齿形金属环设置了多个齿,每两个齿之间存在空隙,随着轴承的旋转带动齿形金属环的旋转,齿周期性地通过线圈—铁芯—永磁体构成的磁路,引起变磁阻效应,进而使得线圈的磁通密度发生变化,可以在 VRG 和齿形金属环不发生任何接触的情况下产生感应电流,实现机电能量的转换,如图 2 所示. 根据磁路欧姆定律,VRG 中磁通经过的线路可以用一个包含磁铁磁阻(R_m)、齿形金属环磁阻(R_h)、铁芯磁阻(R_n)以及空气磁阻(R_d)的等效磁路来表示. 鉴于铁芯和齿形金属环的相对渗透率远大于磁铁和空气的相对渗透率,因此在进行磁路磁阻分析时,铁芯与金属环的磁阻(R_h 和 R_n)可忽略不计[简化磁路如图 2(b)所示]. 而当滚子转动到不同位置时,因为 VRG 与齿形金属环之间的气隙是一段空间,并不能用一个固定的值代指该位置的气隙. 齿形金属环与 VRG 之间存在多个不同气隙 D_d ,不同气隙 D_d 对应的磁导 Λ_d 大小不同,磁阻 R_d 在数值上为磁导 Λ_d 的倒数. 因此计算某时刻经过磁路的磁通量,需要通过分割磁场法将任

意状态下气隙磁通根据气隙 D_d 的不同分割成若干个有简单几何形状的磁通管,分别计算每个磁通管的磁导 Λ_i ,再将并联的磁通管磁导相加以求出全部气隙磁通的磁导 Λ_d ,最后获得磁阻 R_d . 因此,任意时刻的磁通量可以表示为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{M}{R_m + R_h + R_n + R_d} = \frac{M}{R_m + R_d} \\ &= \frac{M}{R_m + \frac{1}{\Lambda_d}} = \frac{M}{R_m + \frac{1}{\sum \Lambda_i}} \\ &= \frac{M}{R_m + \frac{1}{\sum \frac{\mu_0 \mu_{r,d} S_d}{D_d}}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, φ 为通过磁路的磁通量, M 为磁铁的磁功率(在短时间内不考虑磁衰,是一个恒定值). 磁铁磁阻 R_m 是一个恒定值. D_d 为沿磁通路径的气隙长度,取值范围为 $[D_{d-\min}, D_{d-\max}]$ [两者所在位置如图 2(a)所示], μ_0 为真空磁导率, $\mu_{r,d}$ 为气隙的相对渗透率, S_d 为磁通路径中气隙的相交面积^[30].

1.3 COMSOL 仿真

通过 COMSOL 仿真来验证提出的 VREH 的发电原理. 随着轴承的转动,VRG 的线圈—铁芯—永磁体磁路与齿形金属环之间的气隙长度 D_d 和相交面积 S_d 发生周期性变化.

图 3(a)为建立的 COMSOL 模型的网格划分图,采用极细的划分方法. 齿形金属环的材质为碳钢. 轴承旋转时会带动齿形金属环的旋转,来完成对应的 COMSOL 仿真. 如图 3(b)所示,随着轴承的转动,通过磁路的磁通量呈现出周期性的波形变化特征. 如图 3(c)所示,当 VRG 处于齿形金属环两齿之间的正中心位置时,通过磁芯的磁通最小. 当 VRG 从未完全进入齿形金属环齿面到完全进入齿形金属环齿面时,通过磁路的磁通略微减小,这主要与磁通路径中气隙的相交面积 S_d 变化有关. 如图 3(d)所示,VRG 完全进入齿形金属环凸起表面后,通过磁芯的磁通近似相等. 当磁路中气隙从包含最大气隙 $D_{d-\max}$ 变化到包含最小气隙 $D_{d-\min}$ 时,磁路的总磁阻减小,通过磁芯的磁通显著增加,从而产生感应电流,整个磁通变化呈周期性,验证了所提出的 VRG 的有效性.

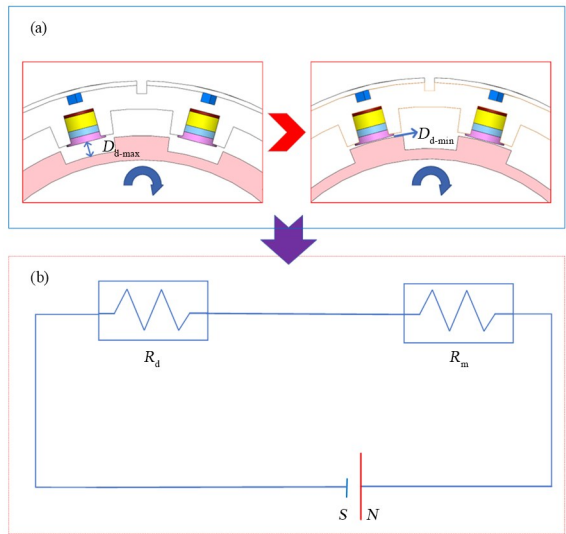


图 2 VREH 运行原理图:(a)气隙变化图;(b)磁路示意图

Fig. 2 Operating principle diagram of the VREH:

(a) Air gap variation diagram; (b) Magnetic circuit diagram

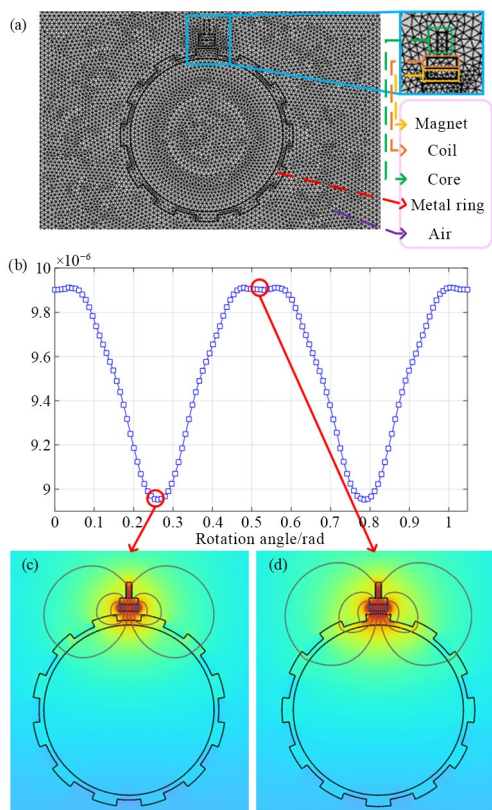


图 3 VREH 的仿真:(a)COMSOL 网格划分;(b)经过线圈的磁通量;(c)VREH 正对两齿间隙和齿面所在位置

Fig. 3 Simulation of the VREH: (a)COMSOL mesh division; (b)Magnetic flux through the coil; (c)VREH is directly opposite the gap between the two teeth and the position of the tooth surface

2 VREH 的输出特性分析

2.1 测试系统介绍

在明确 VREH 的结构和发电机理后,需要对其输出特性进行系统研究,以评估其能否满足无线发射模块的供电需求。

本节详细介绍 VREH 测试系统的组成和配置(系统结构如图 4 所示),该测试平台旨在优化能量采集器的输出性能并全面验证其发电能力。实验测试系统主要由驱动模块、传动模块、测试主体和数据采集模块四部分组成。具体而言,驱动模块采用交流伺服电机(额定功率 1800 W,额定转速 3000 r/min)。传动模块包含一级减速器(型号为 AB115-3-S2-P1)和联轴器。测试主体包含双列圆锥滚子轴承(DTRB,型号 352226X2-2Z,内径为 130 mm)、专用轴承座和 VREH 测试样机等核心组件。所有实验台部件均采用 M10 高强度螺栓固定在光学平台上,底座经过水平校准,确保测试系统的稳定性和牢固性。数据采集系统包含亿恒 MI-7004 数据采集与分析仪(采样率 6400 Hz,24 位分辨率)和吉时利

6514 静电计(电流测量范围为 $<1 \text{ fA} \sim 20 \text{ mA}$,电压测量范围为 $10 \text{ } \mu\text{V} \sim 200 \text{ V}$)。

通过电机控制箱的变频器无级调节可电机轴转速范围为 $0 \sim 600 \text{ r/min}$ 。电机输出轴通过减速器降速后,再经联轴器传导至双列圆锥滚子轴承,使得 DTRB 的转速在 $0 \sim 200 \text{ r/min}$ 范围内精确可调。使用亿恒数据采集与分析仪和静电计采集由 VREH 产生的电信号。

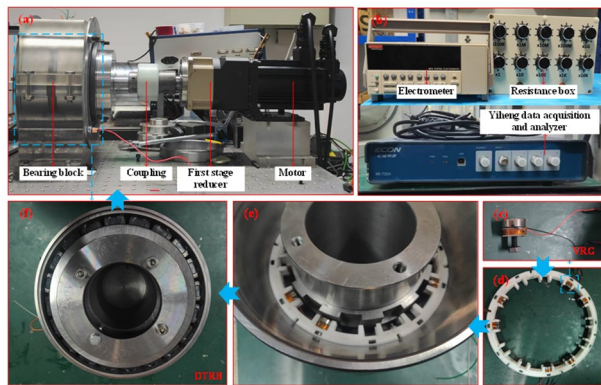


图 4 VREH 测试系统:(a)测试系统的主要结构;(b)测试系统的测试设备;(c)VRG;(d)VREH;(e)VREH 的安装;(f)VREH 实物集成
Fig. 4 Test system of the VREH: (a) Main structure of the test system; (b) Test equipment of the test system; (c) VRG; (d) VREH; (e) Installation of VREH; (f) Physical integration of the VREH

2.2 输出特性分析

图 5 为 VREH 在不同工况下的输出特性。不同速度下的开路电压和短路电流的波形如图 5(a)和 5(b)所示。转速的增加会使得电压幅和电流幅都明显增大。因此,提高转速可以优化 VREH 的输出性能^[31]。

如图 5(c)所示,通过调整 VRG 的垫片数量,从而调整 VRG 底部的磁铁表面与齿形金属环齿面之间的气隙距离 $D_{d-\min}$ 。随着最小气隙 $D_{d-\min}$ 的增加,VRG 的线圈—铁芯—永磁体磁路与齿面和两齿之间凹槽表面的气隙长度 D_d 整体上升,使得磁路中的磁通量下降,从而导致峰值电压降低。因此,在 VRG 与齿形金属环凸起表面之间没有接触摩擦的前提下,最小气隙 $D_{d-\min}$ 越小,VREH 的输出性能越好。但为了避免运转过程中齿形金属环受永磁体的吸附而产生径向挠动导致齿形金属环齿面与 VRG 之间的摩擦干涉,将最小距离 $D_{d-\min}$ 设置为 1 mm。铁芯材质的选择也对 VREH 的输出性能有很大的影响。图 5(d)为选择铁芯材质分别为碳钢铁芯和塑料芯两种情况下的峰值电压对比。使用碳钢铁芯时的峰值电压明显高于使用塑料芯时

的峰值电压。因为碳钢铁芯的磁性大于塑料芯,碳钢铁芯的磁阻比塑料芯小,磁阻小的材料可变磁阻效应强,从而产生电压的峰值电压大。如图 5(e)所示,随着线圈匝数 N_c 的增加,VREH 输出的峰值电压也得到明显的增加。

选择电机转速为 600 r/min,经过减速器后传导到轴承上的转速为 200 r/min,探究 VREH 上串联连接不同数量的 VRG 对输出特性的影响。图 5(f)展示的是峰值电压和峰值电流,图 5(g)展示的是峰值功率,对串联 1 个、3 个、6 个 VRG 的三种情况进行接入电阻的峰值电压和峰值电阻的研究。随着接入电路的负载电阻阻值的增加,VREH 输出的峰值电压会从接近于 0 逐渐增大,最终趋近于峰值开路电压,而随着串联数量的增加,峰值电压的增大速率减小。随着接入电路的负载电阻阻值的

增加,VREH 输出的峰值电流从峰值短路电流开始逐渐减小,直到趋于一个很小的电流值,而随着串联数量的增加,峰值电流的减小速率变缓。当串联配置的 VRG 单元数量为 6 个时,系统所能达到的最大峰值电压提升至 13.2 V,这一结果充分展示了 VREH 在电压输出特性方面的优良性能。串联连接不同数量 VRG 组成的 VREH 输出的峰值功率的趋势均为先增大后减小。各自最大峰值功率所对应的负载电阻大小为各自的最优电阻。当串联连接的 VRG 数目为分别 1 个、3 个和 6 个时,最优电阻的阻值大小分别为 1 k Ω 、3 k Ω 和 6 k Ω ,对应的最大峰值功率分别为 2.1 mW、4.4 mW 和 7.8 mW。最优电阻的增大是因为随着串联连接 VRG 数目的增多,其总内阻也会随之增加。

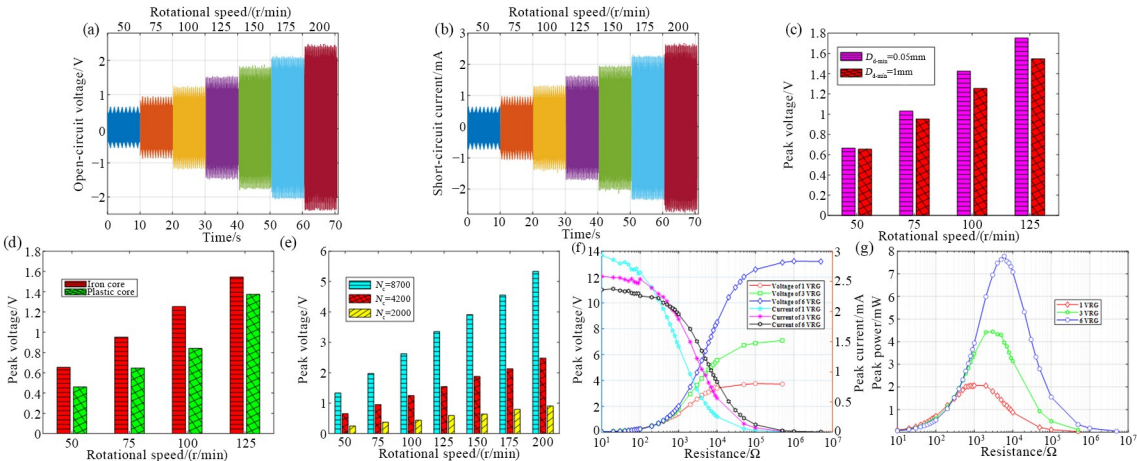


图 5 不同工况下的输出特性:(a)开路电压的波形,(b)短路电流的波形;(c) D_{d-min} 对峰值电压的影响;(d)碳钢铁芯和塑料芯对峰值电压的影响;(e)不同线圈匝数对峰值电压的影响;(f)接入不同数量 VRG 的 VREH 在 200 r/min 时的峰值电压、峰值电流;(g)接入不同数量 VRG 的 VREH 在 200 r/min 时的峰值功率

Fig. 5 Output characteristics under different working conditions: (a) Waveform of open circuit voltage; (b) Waveform of short circuit current; (c) Influence of D_{d-min} on peak voltage; (d) Influence of carbon steel core and plastic core on peak voltage; (e) Influence of different coil turns on peak voltage; (f) Peak voltage and peak current at 200 r/min for the VREH connected to different numbers of the VRG; (g) Peak power at 200 r/min for the VREH connected to different numbers of the VRG

3 无线发射模块

3.1 无线发射系统模块介绍

本节进行无线发射实验,测试 VREH 对无线发射模块的供电性能。无线发射模块由发射模块和接收模块组成,如图 6 所示。图 6(a)和 6(c)为发射模块的结构图和实物图,包含整流电路(DB207)、稳压模块(LTC3588-1)、单片机(STM32L151c8T6)和变送器(nRF24L01+)。首先采用桥式整流电路[如图 6(b)所示],将 VREH 产生的交流电转换成直流电给 3 个 6800 μ F 的电容充电,通过稳压模块为单片

机提供稳定的工作电压。其中整流电路使用 4 个二极管进行单向传导,形成全桥电路。在整流电桥的每个周期中,只有 2 个二极管同时工作以将交流转换为单向直流脉动电压。然后将稳压模块连接到储能电容器上,以稳定微控制器的输入电压。稳压模块提供 4 个标准化电压输出,其中 3.3 V 输出能准确满足单片机的工作需要。微控制器接收传感信号,并通过发射器将其无线传输。

具体来说,由 VREH 供能将单片机自带的 3.3 V 电压信号作为传感信号连接到微控制器上,按照微控制器程序设定的 500 Hz 采样频率对信号进行 400 ms 采样。采样完成后,驱动发射机实现信号的

无线传输. 图 6(d) 和 6(e) 为接收模块的结构图及实物图, 在远端接收端, 采用单片机驱动信号接收器, 通过 USB 与移动 PC 相连, 实现实时接收.

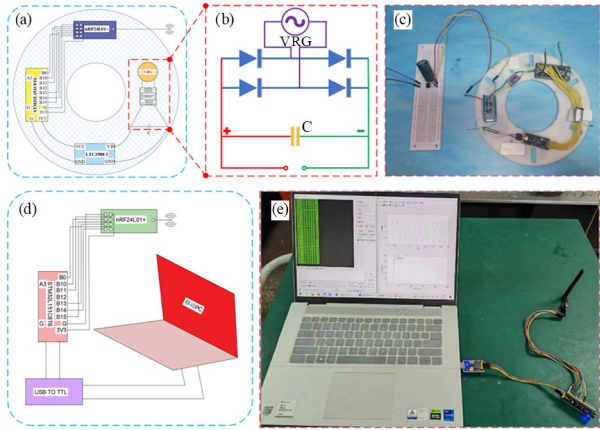


图 6 发射和接收模块示意图: (a) 发射模块结构图; (b) 整流电路结构图; (c) 发射模块实物图; (d) 接收模块结构图; (e) 接收模块实物图
Fig. 6 Schematic diagram of transmitting and receiving module;
(a) Structure diagram of transmitting module; (b) Rectifier circuit structure diagram; (c) Physical diagram of the launch module;
(d) Receiving module structure diagram; (e) Physical drawing of receiving module

3.2 无线发射实验

在电机转速为 500 r/min 和 600 r/min 下验证无线传输模块的接收过程. 无线传输模块工作在间歇传输模式下, 间隔时间由 VREH 的供电能力决定. 随着转速的增加, 间隔时间明显减小. 在 500 r/min 时, 信号发射间隔时间约为 80 s, 在 600 r/min 时, 信号发射间隔时间约为 54 s. 当无线发射模块工作在 500 r/min 和 600 r/min 时, 电容两端电压的变化分别如图 7(a) 和 7(b) 所示. 当 FRST 启动时, 两种转速情况下模块大约分别需要 209 s 和 151 s 的充电时间, 才能达到发射所需的电压. 当无线传输模块进行发射工作时, 电容上的电压再次降低, 信号采样时间为 400 ms. 然后, VREH 将电容器充电回工作电压, 如此反复, 可实现长时间的无线发射任务.

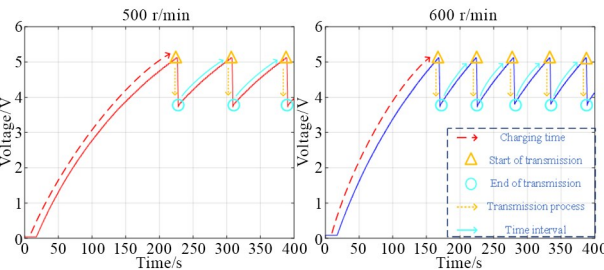


图 7 无线发射时电容器上的电压变化
Fig. 7 The voltage change on the capacitor during wireless transmission

如图 8 所示, 通过无线传输模块接收到的信号是单片机内自带的 3.3 V 直流电压信号, 每段信号的时间间隔也与电容器上电压变化中的时间间隔近似, 可见构建的 VREH 能够支撑无线发射模块进行无线发射任务.

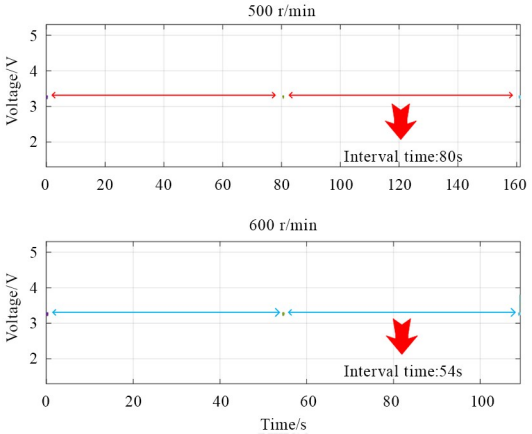


图 8 接收模块的接收过程
Fig. 8 The receiving process of the receiving module

4 结论

本研究针对传统铁路轴箱轴承监测系统存在的布线复杂、维护成本高及灵活性不足等问题, 提出了一种基于内置式变磁阻发电机 (VRG) 的双列圆锥滚子轴承用变磁阻能量采集器 (VREH). 通过将 VREH 与轴承结构紧密结合, 实现了高效的能量采集, 为轴承监测系统无线发射模块提供了持续的电能支持, 助力轴承的智能化设计. 研究表明, 该能量采集器能够在铁路轴箱轴承中稳定工作, 具有显著的应用价值. 本研究的创新点在于将变磁阻发电机与轴承结构紧密结合, 实现了高效的能量采集, 为铁路轴箱轴承的监测提供了一种自供电的解决方案. 通过理论和仿真分析验证了 VREH 的发电原理, 并测试了关键设计参数 (如线圈匝数、线圈一齿形金属环间距、铁芯材料等) 对 VREH 性能的影响. 优化这些参数可以显著提高能量转换效率. 未来研究可以考虑将 VRG 与其他能量采集技术结合, 形成混合能量采集系统, 以应对更复杂的工况和环境. 也可以进一步探索 VRG 在其他旋转机械中的应用潜力, 例如风力发电机、航空发动机等, 以验证其广泛适用性和可靠性. 总之, 本研究为铁路轴箱轴承的监测提供了一种自供电的解决方案, 具有重要的理论和实际意义.

参考文献

- [1] EL-THALJI I, JANTUNEN E. A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60: 252–272.
- [2] WANG H, NIG X, CHEN J H, et al. Research on rolling bearing state health monitoring and life prediction based on PCA and Internet of Things with multi-sensor [J]. *Measurement*, 2020, 157: 107657.
- [3] 杨晓蔚. 高速铁路轴承概述[J]. *轴承*, 2011(10): 59–61.
- YANG X W. Overview of high-speed railway bearings [J]. *Bearing*, 2011(10): 59–61. (in Chinese)
- [4] MA X N, LIU J W, SHI W R. Dynamic characteristics of high-speed railway vehicle with axle box bearing faults [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 563(3): 032023.
- [5] LIU L, SONG D L, GENG Z L, et al. A real-time fault early warning method for a high-speed EMU axle box bearing [J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 823.
- [6] 崔兆佳. 高速列车轴箱轴承疲劳损伤机理研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- CUI Z J. Study on fatigue damage mechanism of axle box bearing of high-speed train [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2024. (in Chinese)
- [7] LUO H L, BO L, PENG C, et al. Fault diagnosis for high-speed train axle-box bearing using simplified shallow information fusion convolutional neural network [J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4930.
- [8] LI Y J, ZHANG W H, XIONG Q, et al. A novel fault diagnosis model for bearing of railway vehicles using vibration signals based on symmetric alpha-stable distribution feature extraction [J]. *Shock and Vibration*, 2016, 2016: 5714195.
- [9] 罗梦婷, 郑薛亮, 姚兆琦, 等. 面向智能轴承自供电系统的压电—摩擦复合式振动能量采集器[J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(3): 173–182.
- LUO M T, ZHENG X L, YAO Z Q, et al. Hybrid piezoelectric-triboelectric vibration energy harvester for intelligent bearing self-powered system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(3): 173–182. (in Chinese)
- [10] 黄胤强. 低频非线性振动的摩擦电能量采集器设计与研究[D]. 海口: 海南大学, 2024.
- HUANG Y Q. Design and research of triboelectric energy harvester for low frequency nonlinear vibration [D]. Haikou: Hainan University, 2024. (in Chinese)
- [11] CAO L M, LI Z X, GUO C, et al. Design and test of the MEMS coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvester [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(4): 673–686.
- [12] 熊超. 压电式非线性振动能量采集器及其动力学特性研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- XIONG C. Research on piezoelectric nonlinear vibration energy harvester and its dynamic characterization [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024. (in Chinese)
- [13] 邓王蒸, 秦卫阳, 李琦, 等. 树形分叉压电振动俘能结构设计及实验验证[J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(11): 58–64.
- DENG W Z, QIN W Y, LI Q, et al. Design of tree-like tri-fork piezoelectric vibration energy harvester and its validation experiments [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(11): 58–64. (in Chinese)
- [14] LI X H, HAN C B, JIANG T, et al. A ball-bearing structured triboelectric nanogenerator for nondestructive damage and rotating speed measurement [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(8): 085401.
- [15] 马腾浩, 王松, 韩勤锴, 等. 面向接触分离式摩擦发电机的机电耦合研究[J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(9): 62–71.
- MA T H, WANG S, HAN Q K, et al. Electromechanical coupling research for contact-separation mode triboelectric nanogenerators [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(9): 62–71. (in Chinese)
- [16] 周诗豪, 宋芳. 基于碰撞的多方向压电电磁能量采集器研究[J]. *传感技术学报*, 2024, 37(5): 783–788.
- ZHOU S H, SONG F. Research on collision-based multi-directional piezoelectromagnetic energy harvester [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2024, 37(5): 783–788. (in Chinese)
- [17] 廖思华, 刘丹, 刘雅琪, 等. 摩擦—电磁复合式能量回收带设计与动力学分析[J]. *动力学与控制学*

报, 2023, 21(10): 43—50.

LIAO S H, LIU D, LIU Y Q, et al. Design and kinetic analysis of the hybrid triboelectric-electromagnetic energy harvesting bump [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(10): 43—50. (in Chinese)

[18] YANG F, GAO M Y, WANG P, et al. Efficient piezoelectric harvester for random broadband vibration of rail [J]. *Energy*, 2021, 218: 119559.

[19] GAO M Y, WANG P, CAO Y, et al. A rail-borne piezoelectric transducer for energy harvesting of railway vibration [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2016, 18(7): 4647—4663.

[20] GAO S, HAN Q K, JIANG Z Y, et al. Triboelectric based high-precision self-powering cage skidding sensor and application on main bearing of jet engine [J]. *Nano Energy*, 2022, 99: 107387.

[21] 高帅, 韩勤锴, 褚福磊. 具备实时动态稳定性监测特性的高速混合陶瓷摩擦电滚动轴承[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(15): 80—88.

GAO S, HAN Q K, CHU F L. High-speed hybrid ceramic triboelectric rolling bearing with revolution stability monitoring characteristics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(15): 80—88. (in Chinese)

[22] 胡家峻. 转矩式电磁感应低频振动能量采集器设计与应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.

HU J J. Design and application of torque type low frequency vibration energy harvester with electromagnetic [D]. Taiyuan: North University of China, 2024. (in Chinese)

[23] 龚芸. 面向高铁智能轴承的变磁阻俘能器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.

GONG Y. Study on variable reluctance energy harvester aiming at powering high speed smart railway bearing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)

[24] NI Z X, WANG X F, HONG Y C, et al. Bearing inner race fault detection and size estimation using the variable reluctance sensor [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 530: 116968.

[25] OCHIAI Y, TESFAYE T, OGURI K, et al. Characteristics of variable reluctance hybrid motor [C]//SICE 2003 Annual Conference. New York: IEEE, 2003: 2957—2960.

[26] XU Y, BADER S, OELMANN B. Design, modeling and optimization of an m-shaped variable reluctance energy harvester for rotating applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 195: 1280—1294.

[27] MIAO Y J, GAO S, KONG Y, et al. Variable reluctance bearing generators applicable in condition monitoring of bearing cages [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 194: 110249.

[28] WANG S, ZHENG C, MA T H, et al. Design and implementation of intelligent rolling bearing based on variable reluctance generator [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 3534912.

[29] GONG Y, WANG S J, XIE Z Q, et al. Self-powered wireless sensor node for smart railway axle box bearing via a variable reluctance energy harvesting system [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 9003111.

[30] GONG Y, WANG S J, XIE Z Q, et al. A variable reluctance based rotational electromagnetic harvester for the high-speed smart bearing [J]. *Smart Material Structures*, 2022, 31(4): 045023.

[31] GAO S, HAN Q K, PENNACCHI P, et al. Dynamic, thermal, and vibrational analysis of ball bearings with over-skidding behavior [J]. *Friction*, 2023, 11(4): 580—601.