

分类号: U463.33

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110162



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 球轴承结构摩擦纳米发
电机发电特性研究

论 文 作 者 王龙

指 导 教 师 王风涛（副教授）

学 科（专业） 机械

研 究 方 向 现代机械设计理论及方法

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号: U463.33

单位代码: 10363

密 级: 公开

学号: 2220110162

球轴承结构摩擦纳米发电机发电特性研究

RESEARCH ON POWER GENERATION CHARACTERISTICS OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR WITH BALL BEARING STRUCTURE

学 生 姓 名 : 王龙

校 内 导 师 : 王风涛(副教授)

校 外 导 师 : 张育斌(高级工程师)

专 业 : 机 械

研 究 方 向 (领 域): 现代机械设计理论及方法

论文答辩日期: 2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☐。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

球轴承结构摩擦纳米发电机发电特性研究

摘 要

传统工业轴承的状态监测常常需要各种类型的外部传感器,但在安装空间有限或环境因素对信号干扰极大的情况下,工业轴承的状态监测将是一个极大的挑战。随着摩擦纳米发电机作为一种新型的摩擦能收集装置被提出以来,其对空间要求低、抗干扰能力强、低成本、材料选择多样等优点为工业轴承的状态监测提供了一种新的手段。近年来,专家学者们针对这一课题开展了大量研究,通过设计集成各种类型的轴承摩擦纳米发电机,利用摩擦电信号进行摩擦能收集与轴承运行状态监测。本文以滚动轴承与滑动式独立层摩擦纳米发电机为研究对象,建立了电荷静电场分析模型,开展球轴承与多层球轴承摩擦纳米发电机的发电机理分析与实验验证。主要研究内容及结果如下:

(1)研究了球轴承摩擦纳米发电机的发电机理以及结构参数对发电性能的影响。首先建立了轴承摩擦纳米发电静电场分析模型,通过仿真分析获得了电极电势与电荷密度受结构参数影响的变化规律,接着探索了发电性能的优化机理,并探究了结构参数对电势差与电荷密度差的影响。滚动体直径,滚动体与电极之间的间隙距离,电极所占弧度等参数均对发电性能有影响,所以滑动式独立层结构对滚动体的空间位置有着良好的反映能力。

(2)根据仿真分析结果集成设计制造球轴承摩擦纳米发电机，分别探究了其发电性能与故障自感知能力。电信号频率对转速有着良好的监测能力。根据耐久实验结果验证了该装置的耐久性，并制造了单故障与耦合故障，验证其对电信号有着直接的影响关系。最后加入非极性润滑脂验证其对该装置有着良好的减摩性能，且不会影响电输出性能。

(3)基于球轴承摩擦纳米发电机研究结果分析，提出多层球轴承摩擦纳米发电机发电特性研究，解决了电极与滚动体直接接触而发生磨损的问题，同时验证其电压信号频率对转速的监测能力优于电流信号；基于电信号时频分析，发现其可以直观的反映滚动体绕轴转速，并验证了电信号可以用来监测滚动体打滑率，通过与传统工业传感器相对比，展现了其小的空间占有率与直观的监测能力。

关键词：球轴承，摩擦纳米发电机，状态监测，时频分析，静电场仿真

RESEARCH ON POWER GENERATION
CHARACTERISTICS OF TRIBOELECTRIC
NANOGENERATOR WITH BALL BEARING STRUCTURE

ABSTRACT

The condition monitoring of traditional industrial bearings often requires various types of external sensors, but in the case of limited installation space or environmental factors that greatly interfere with the signal, the condition monitoring of industrial bearings will be a great challenge. Since triboelectric nanogenerator was proposed as a new type of friction energy collection device, its advantages such as low space requirement, strong anti-interference ability, low cost and diverse material selection provide a new means for condition monitoring of industrial bearings. In recent years, experts and scholars have carried out a lot of research on this subject, through the design and integration of various bearing triboelectric nanogenerators, the use of electrical signals for friction energy collection, bearing operation status monitoring. Taking rolling bearing and sliding independent layer triboelectric nanogenerator as the research object, the charge electrostatic field analysis model is

established, and the power generation mechanism of ball bearing and deep groove ball bearing triboelectric nanogenerator is analyzed and verified by experiment. The main research contents and results are as follows:

(1) The power generation mechanism of ball bearing triboelectric nanogenerator and the influence of structural parameters on the power generation performance are studied. Firstly, the electric field analysis model of bearing power generation is established, and the variation law of electrode potential and charge density affected by structural parameters is obtained through simulation analysis. Then, the optimization mechanism of power generation performance is explored, and the influence of structural parameters on potential difference and charge density difference is explored. Parameters such as the diameter of the rolling element, the gap distance between the rolling element and the electrode, and the arc occupied by the electrode all have an impact on the power generation performance. Therefore, the sliding independent layer structure has a good ability to reflect the spatial position of the rolling element.

(2) According to the simulation results, the ball bearing triboelectric nanogenerator is designed and manufactured, and its power generation performance and fault self-sensing ability are respectively explored. The frequency of electrical signal has a good ability to monitor the speed. The

durability of the device is verified according to the durability experiment results, and the single fault and coupling fault are created to verify that the device has a good fault perception ability. Finally, non-polar grease is added to verify that it has good lubrication performance for the device and will not affect the electrical output performance.

(3) Based on the analysis of the research results of the ball bearing triboelectric nanogenerator, the power generation characteristics of the deep groove ball bearing triboelectric nanogenerator are proposed, which solves the problem of wear caused by direct contact between the electrode and the rolling body, and verifies that the voltage signal frequency is better than the current signal in monitoring the speed; Compared with the traditional industrial sensor, it is found that the electric signal can directly reflect the rotating speed of the rolling body around the axis, and verify that the electric signal can be used to monitor the sliding rate of the rolling body, showing its small space occupancy and intuitive monitoring ability.

Long Wang (mechanical)

Supervised by Fengtao Wang

KEY WORDS: Ball bearing, Triboelectric nanogenerator, Condition monitoring, Time-frequency analysis, Electrostatic field simulation

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究意义及背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 滚动轴承运行信号采集现状	2
1.2.2 摩擦纳米发电机发电特性研究现状	3
1.2.3 滚动轴承结构摩擦纳米发电机发电特性研究现状	5
1.3 待解决问题	6
1.4 本文研究内容	6
第 2 章 球轴承摩擦纳米发电机发电机理	8
2.1 球轴承摩擦纳米发电机结构与机理	8
2.1.1 球轴承摩擦纳米发电机几何结构	8
2.1.2 滑动式独立层摩擦纳米发电机理	8
2.2 球轴承摩擦纳米发电机静电场仿真	10
2.2.1 仿真三维模型结构	10
2.2.2 仿真模型发电机理	10
2.2.3 仿真模型初始参数	11
2.2.4 仿真电荷分布模型	11
2.3 球轴承摩擦纳米发电机静电场仿真结果	12
2.3.1 初始参数下开路电势与短路电荷密度	12
2.3.2 滚动体直径对发电性能的影响	14
2.3.3 滚动体与电极的间隙距离对发电性能的影响	15
2.3.4 铜电极所占圆心角对发电性能的影响	17
本章小结	18
第 3 章 球轴承摩擦纳米发电机发电及故障监测实验验证	20
3.1 球轴承摩擦纳米发电装置及测试平台	20
3.1.1 球轴承摩擦纳米发电装置	20
3.1.2 球轴承摩擦纳米发电机测试平台	21
3.1.3 球轴承摩擦纳米发电机实验环境温湿度测量	21

3.2 球轴承摩擦纳米发电机发电特性	22
3.2.1 球轴承摩擦纳米发电机电压信号	22
3.2.2 球轴承摩擦纳米发电机电流信号	23
3.2.3 球轴承摩擦纳米发电机电信号随转速变化规律	24
3.2.4 球轴承摩擦纳米发电机耐久实验	25
3.3 球轴承摩擦纳米发电机故障监测实验	25
3.3.1 故障种类	25
3.3.2 单故障对球轴承摩擦纳米发电特性的影响	26
3.3.3 耦合故障对球轴承摩擦纳米发电特性的影响	30
3.4 球轴承摩擦纳米发电机耐久性优化	31
3.4.1 非极性润滑脂减摩	31
3.4.2 球轴承摩擦纳米发电机耐久前后电极表面	32
本章小结	33
第 4 章 多层球轴承摩擦纳米发电机打滑故障监测实验	34
4.1 多层结构与发电机理	34
4.1.1 多层球轴承摩擦纳米发电机的三维结构与发电机理	34
4.1.2 多层球轴承摩擦纳米发电机理静电场仿真	35
4.2 多层球轴承摩擦纳米发电机试验平台与传感器系统	36
4.2.1 多层球轴承摩擦纳米发电机实验平台	36
4.2.2 多层球轴承摩擦纳米发电机传感系统	37
4.3 多层球轴承摩擦纳米发电机电信号	37
4.3.1 多层球轴承摩擦纳米发电机铜电极电输出	37
4.3.2 多层球轴承摩擦纳米发电机铜内圈电流输出	39
4.3.3 多层球轴承摩擦纳米发电机铜电极电能输出	40
4.4 多层球轴承摩擦纳米发电机电信号时频特性	40
4.4.1 电压信号时频特性	40
4.4.2 电流信号时频域特性	42
4.4.3 电信号与光电转速传感器信号时频特性对比	44
4.5 多层球轴承摩擦纳米发电机打滑监测	46

4.5.1 打滑监测	46
4.5.2 打滑监测性能对比	47
本章小结	48
第 5 章 总结与展望	49
5.1 全文总结	49
5.2 本文创新点	50
5.3 展望	51
参考文献	52
攻读硕士学位期间发表学术论文及专利	错误！未定义书签。

第 1 章 绪论

1.1 课题研究意义及背景

轴承作为旋转机械设备中的核心部件,其在设备中起着支撑旋转轴并减少摩擦的关键作用。滚动轴承是轴承中最典型的代表,广泛应用于航空航天、汽车制造、风力发电、机床设备等领域。由于其长期处于高速旋转和高负荷工况下,轴承容易发生磨损、疲劳、润滑不足等问题,导致设备故障甚至灾难性事故。因此,轴承的状态监测与故障诊断成为保障设备安全运行的重要研究课题。常见的监测方法包括振动分析、温度监测、声发射分析、以及基于摩擦电信号的传感技术等。而振动分析、温度监测以及声发射分析都需要外部集成相应的传感器,受环境影响因素大,对设备安装空间大小要求高,并且需要外部集成电源,不仅增加了能源的浪费还提升了设备故障风险。这并不符合集成传感小型化,智能化的工业物联网要求。

随着化石燃料对环境污染的加剧,人们迫切需要节能减排与清洁能源的使用,而摩擦纳米发电机(Triboelectric nanogenerator:TENG)作为一种新型能量收集装置,由王中林院士团队于 2012 年提出,是基于摩擦起电和静电感应原理,通过正负材料摩擦产生电荷并转化为电信号。目前摩擦电纳米发电技术已经广泛应用于精密的工业设备中如轴承、齿轮、V 带轮、软体机器人等,其有着内部集成设计节省空间占用,材料选择广泛,结构多样,成本低等优点;并且多层摩擦电材料的摩擦电纳米发电机有着比传统正负材料摩擦电纳米发电机有着更高的电输出性能,已经广泛的应用于机械能量、海洋能量、风能、生物能等的收集利用。通常滑动式独立层模式更适用于滚动轴承的内部集成,利用摩擦纳米发电机的发电特性及不破坏轴承结构,可以将其集成到滚动轴承中,通过监测轴承内部的摩擦电信号而对轴承运行工况进行实时监测。然而受摩擦纳米发电机材料结构选择多样的特性影响,针对滚动轴承与摩擦纳米发电机集成设计在材料、结构、摩擦机理以及监测能力方面的研究仍然未得到统一,在提高发电机使用寿命的方式上也存在争议。在监测轴承故障种类、程度以及耦合故障对电信号的特性影响研究过少,并且在各工况下监测性能与现有传感器的差异也是轴承摩擦纳米发电机走向工业必须探讨的问题。

针对上述问题,本文开展了球轴承结构摩擦纳米发电机在旋转能量收集与运行状态监测方面的系统性研究。建立了轴承结构参数与发电特性之间的优化模型,分析了轴承单故障与耦合故障对发电信号的影响机理,通过对发电信号的时频域分析,实现了对轴承转速与打滑状态的实时监测。为滚动轴承摩擦纳米发电机的设计与优化提供了一套完整的参考案例。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 滚动轴承运行信号采集现状

近年来,随着传感技术、信号处理、人工智能和大数据分析发展,滚动轴承状态监测方法不断创新和优化。目前,主要研究方向包括振动信号分析^[1,2]、温度监测^[3]、声发射技术^[4]、电流信号分析^[5]、油液监测^[6]等如图 1-1 与图 1-2 所示。

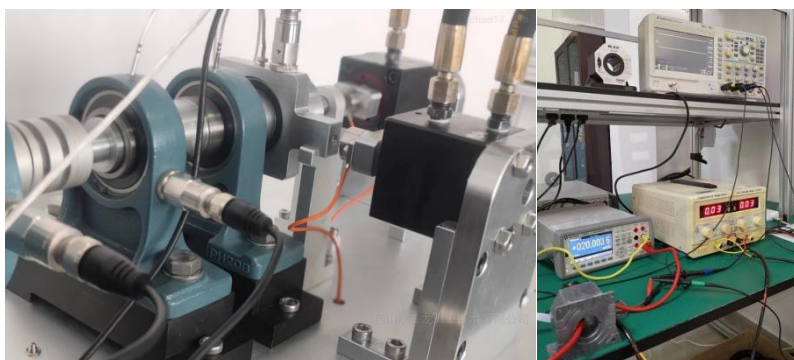


图 1-1 振动信号、温度及电流信号采集装置

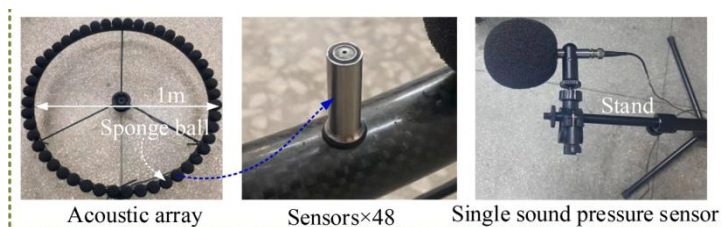


图 1-2 声发射采集装置

其中振动信号分析是最常用的轴承故障监测方法。由于轴承故障通常会引起周期性的振动信号变化,通过分析轴承的振动数据,可以识别其健康状态。常见的振动信号分析方法包括:时域分析法^[7,8]、频域分析法^[9,10]、时频分析法^[11,12]、包络分析法^[13]等;滚动轴承在运行过程中,由于摩擦、润滑不良或过载,导致温度异常升高,温度监测是轴承健康管理的重要手段^[14]。利用热电偶与热敏电阻测温^[15],实时监测轴承温度。利用红外热成像^[16],红外热像仪进行非接触式监测,能够提供轴承温度分布图,适用于复杂工况下的远程监测。利用光纤传感技术^[17],

采用光纤布拉格光栅(FBG)传感器进行高精度温度测量,适用于高温、高速环境。声发射技术通过检测材料内部裂纹扩展或表面摩擦产生的高频弹性波来监测轴承健康状态^[18]。声发射技术相较于振动分析,能够更早地检测到轴承微小裂纹或润滑失效。常见方法包括:采用时域参数分析,包括声信号的幅度、能量、计数率等,用于初步评估轴承状态。采用频谱分析,FFT 或小波变换分析声信号的频谱特征,以提取关键故障信息等^[19]。油液监测监测润滑油状态对于轴承健康至关重要,油液监测可用于检测润滑油的污染、劣化情况,以及轴承的磨损程度^[20]。主要方法包括:光谱分析、铁谱分析^[21]、在线传感器^[22,23]等。以上监测方法都需要在轴承或轴承座上特定的位置安装外附传感器设备,而信号的采集精度一方面受传感器本身影响,另一方面还受到周围环境及相邻设备的影响,并且外附传感器都需要永久电源,无论采用内部电池和外部接线都对设备的密封性能产生影响,增加了安全隐患。在电机驱动的轴承系统中,电流信号监测可以用于诊断轴承故障。故障轴承会导致电机负载变化,从而影响电流波形。该方法的优势在于不需要额外的传感器,仅依靠电流信号即可进行监测^[24]。但该方法对设备种类局限性高,适用性低。

1.2.2 摩擦纳米发电机发电特性研究现状

摩擦纳米发电机是一种基于接触起电效应和静电感应的新型能量收集技术。自 2012 年由王中林教授团队提出以来^[25],在自供能工业传感器^[26-32]、可穿戴设备^[33-36]、环境能量收集^[37-40]、智能电子皮肤^[41]、生物医学^[42-44]、蓝色能源^[45-47]等领域取得了广泛应用。摩擦纳米发电机具有轻量化、低成本、高输出电压、材料选择广泛、环境友好等优点,被认为是未来分布式微能量收集和智能传感技术的重要发展方向^[48]。当前,摩擦纳米发电机的研究主要集中在工作模式、材料优化、结构设计、输出性能提升以及应用拓展等方面^[49]。目前,如图 1-3 所示摩擦纳米发电机主要有以下四种基本工作模式:垂直接触-分离模式、水平滑动模式、独立层模式、单电极模式^[50]。

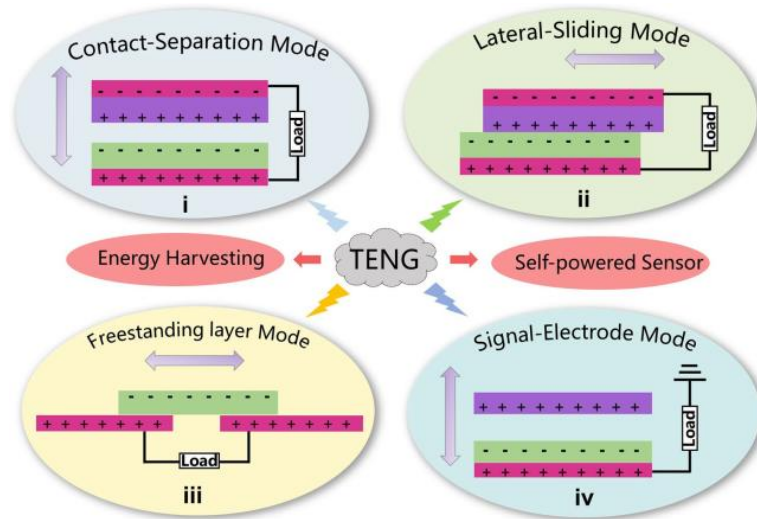


图 1-3 摩擦纳米发电机四种工作模式

在基于材料与结构优化方面,研究者们采用以下方法优化其性能:摩擦层材料优化选择高摩擦电序材料^[51]、纳米结构修饰^[52,53]、自适应材料开发^[54]、层叠结构^[55]、柔性可拉伸设计^[56]、仿生设计^[57,58]等用以提升摩擦纳米发电机的接触性能和耐久性。Zhao^[59]等人根据表面电荷密度、摩擦系数、极化、电荷利用率等基本参数,和稳定性,排序了目前工业常用的负摩擦材料与正摩擦材料铜之间的摩擦性能,其中聚四氟乙烯在电荷密度与摩擦性能方面都有着突出的特性。Zhu 等人^[60]采用纳米金颗粒镀于铜电极上,实现了高输出摩擦纳米发电机。Li 等人^[61]利用新型材料聚二甲基硅氧烷(PDMS)与铜纳米线分别作为正负极,利用多层摩擦材料设计制造了一种双电极模式摩擦纳米发电机。He 等人^[62]利用尼龙与铜电极作为正摩擦材料,聚四氟乙烯作为负摩擦材料,采用多层材料结构,有效预防了摩擦层材料之间的静电击穿,设计制造了一种低频机械能量收集摩擦纳米发电机。证明了多层摩擦材料的优异发电特性。Liu 等人^[63]提出一种纳米纤维多层摩擦纳米发电机,该材料透明轻质可拉伸,穿戴集成到人体皮肤表面可以收集身体运动的能量。Wang 等人^[64]基于海葵在水流中具有随流速感应变形的能力,设计出一种海葵顶端触须软体摩擦纳米发电机,用于收集水流中的能量并自感知软体机器人运行状态。基于上述研究可以看出摩擦纳米发电技术已经广泛应用于各个行业,并且通过集成设计在能量收集与传感方面表现出优异性能,将其应用于传统工业设备同样也具有广阔前景如:轴承^[65]、齿轮^[66]、V 带轮^[67,68]、软体机器人^[69,70]等。

1.2.3 滚动轴承结构摩擦纳米发电机发电特性研究现状

由于摩擦纳米发电机在旋转能量收集与电信号传感方面的优异性能,传统工业滚动轴承中滚子与滚道的摩擦又是不可避免的,所以将摩擦纳米发电机集成设计到滚动轴承中用以收集摩擦能是一种十分有前景的创新结合。目前,国内外研究机构和高校,如北京理工大学^[71]、清华大学^[72,73]、东北林业大学^[74]、佐治亚理工学院^[75]、韩国庆熙大学^[76]、大连海事大学^[77]等,都在积极研究滚动轴承摩擦纳米发电机的结构优化、材料改性、能量管理及其在工业中的状态监测。

在圆柱滚子轴承方面,Choi 等人^[78]与 Xin 等人^[79]将摩擦电纳米发电机应用于圆柱滚子轴承,后者采用多层摩擦电材料发电性能明显提升,但滚子与材料直接接触摩擦,摩擦磨损问题并未得到解决,并且轴承结构未完全利用。在能量收集利用方面,Yan 等人^[80]将摩擦电纳米发电机与滚动轴承结合,用于收集风能,结构简单,但脱离滚动轴承的实际应用。Song 等人^[81]利用适度的法向力使摩擦材料之间的径向摩擦减小,制造了一种新型风能收集拱形电极摩擦纳米发电机,该发电机在耐久与能量收集方面有着优异的性能,但无承载能力。在承载、能量收集与自感知方面,Han 等人^[82]提出将电极集成在轴承外圈外侧,解决了滚子与电极之间的摩擦磨损问题,并且有着良好的承载能力,但未完全利用轴承结构,没有采用多层摩擦电材料增强电信号输出。Xie 等人^[83]、Jiang 等人^[84]与 Gao 等人^[85]将摩擦电纳米发电机与轴承保持架相结合,提出一种监测保持架转速的新型集成结构,但该结构改变了保持架的动态特性,同时由于保持架与摩擦电纳米发电机之间无应力压迫,从而使摩擦电材料磨损变薄时降低电输出。在系统状态监测方面,Gao 等人^[86]将摩擦纳米发电机与轴瓦式轴颈轴承集成设计,利用轴瓦与外圈面接触的特性,增强了摩擦电信号,并且利用电信号对轴承进行运行状态监测。在状态监测方面,Han 等人^[87]利用摩擦电轴承作为故障检测传感器,利用电信号及算法对相邻轴承进行内外圈及滚动体故障监测分类。Hu 等人^[88]利用摩擦电轴承集成设计到多跨转子系统中,用以监测转轴不对中故障,并加入算法分析,针对不对中故障程度进行监测分类。Li 等人^[72]利用纳米薄膜复合润滑结构,证明添加 20wt%角鲨烷和 BTO/PI 纳米复合膜的 TENG 具有良好的摩擦学性能和电化学性能具有较低的摩擦系数和质量损失,制造出一种监测保持架滑移的摩擦纳米发电机。在润滑耐久性能方面,Song 等人^[89]将非极性润滑脂引入滚动球轴承

摩擦纳米发电机中，有效地降低了滚动体与电极之间的摩擦磨损，从仿真与实验的角度说明了非极性润滑脂的导热作用，并且该结构下润滑脂对电信号具有增强作用。

1.3 待解决问题

基于上述国内外研究现状，目前滚动轴承摩擦纳米发电机需要解决的问题如下：(1)建立滚动轴承结构摩擦纳米发电机理论模型，采用可靠的仿真分析验证并进行结构参数优化；(2)补充滚动轴承摩擦纳米发电机在工程实验中的应用，通过故障实验验证其自感知能力；(3)利用电信号建立实时监测系统，为此类型的研究提供可靠案例。

1.4 本文研究内容

基于上述待解决问题，本文依据摩擦电荷产生与转移机理，球轴承运行特性，利用 COSMSOL 静电场仿真，建立球轴承摩擦纳米发电理论模型，通过对比电极电势与电荷密度变化趋势，优化结构参数。搭建了转子测试系统，通过对比电信号时频域特征，分析了球轴承摩擦纳米发电机在旋转能量收集与故障自感知方面的特性，验证了非极性润滑脂对该结构的减摩性能，并且通过优化结构，建立了转轴转速与打滑状态实时监测系统。与传统转速传感器相对比，体现出该装置在结构集成空间占比与自供能方面的优异性能。具体内容如图 1-4 所示：

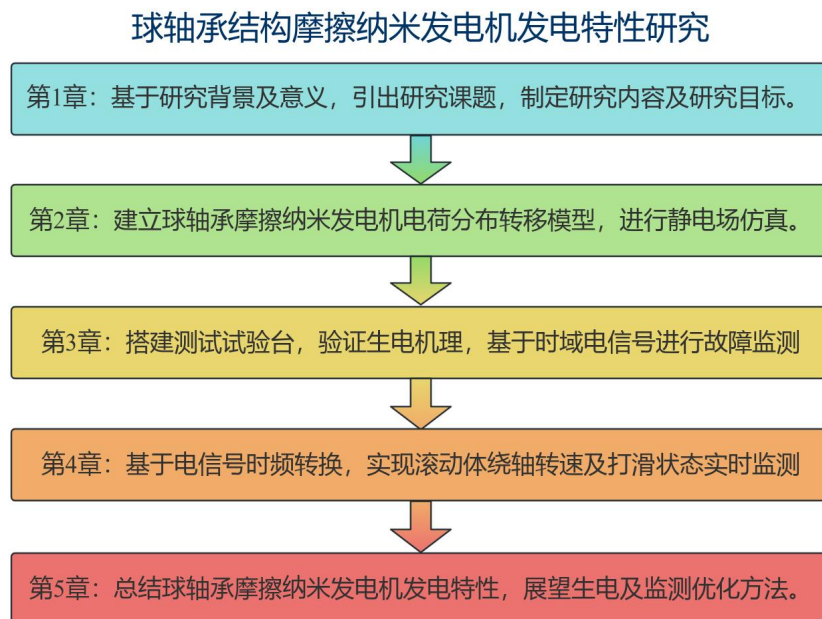


图 1-4 本文研究章节逻辑概括

第一章：从课题的研究意义与背景出发，通过对比国内外研究现状中现存的问题，以及研究未涉及到的部分，分析了目前研究所关注的热点，参考了现有研究在材料、结构、建模、实验与优化等方面的现有结论，合理的设置后续技术路线与研究方法，最后确定研究内容。

第二章：基于 COMSOL 静电场仿真，建立了球轴承摩擦纳米发电机发电特性数学模型，引入电势与电场的作用关系，从结构参数方面建立理论模型，分析轴承结构参数对电势与电荷密度影响特性之间的作用机理，深度剖析参数对电荷生成与转移作用机理，为后续结构集成设计与故障感知提供了理论支撑，同时也为故障监测方面的研究作铺垫。

第三章：基于理论模型所取得的参数与电荷生成转移之间的作用关系，搭建了转子检测试验台，设计了一种球轴承摩擦纳米发电机，采用滚动体与电极直接接触，可以更好的感知轴承内部运行动态特性，同时简化内外圈结构，只保留轴承基本的支撑原理，大大降低了制造难度。最后进行电信号时域分析与故障自感知能力分析，验证了理论模型中各参数工况下电荷的转移规律。

第四章：根据耐久实验的电极磨损与增强电信号研究方面的工作，本章提出一种将电极集成设计在轴承外圈外侧，并加入多层摩擦电材料用以增强电输出性能的球轴承摩擦纳米发电机。首先根据仿真原理设计制造出多层球摩擦纳米发电机，并且参照了工业深沟球轴承 6208 结构尺寸，为其走向工业应用做铺垫。搭建了传感器集成平台，首先对采集到的电信号进行功率计算以及时频域分析，证明了其在旋转能量收集与转速传感方面的优异性能，随后利用电信号、理论值与光电传感器测量值进行对比，验证了该装置在打滑状态自监测方面的优异性能。

第五章：总结了影响球轴承摩擦纳米发电机发电特性的结构、环境因素，展望了后续优化球轴承摩擦纳米发电机在发电性能与监测精度上的前景，并为后续研究提出理论性建议。

第 2 章 球轴承摩擦纳米发电机发电机理

本章使用 COMSOL 仿真软件，基于电荷分布方程建立了直接接触式球轴承摩擦纳米发电机结构动态分析模型，对轴承静电场电势变化及电荷流动状态进行仿真，并获得了球轴承静电场的电荷分布状态、电荷转移趋势和电势影响机理。同时，总结了电荷产生输出机理以及球轴承尺寸对电势的影响。通过计算得到摩擦纳米发电机的电压输出和电荷密度变化特性，分析了球轴承结构参数对电势变化和电荷密度变化影响机理。

2.1 球轴承摩擦纳米发电机结构与机理

2.1.1 球轴承摩擦纳米发电机几何结构

根据球轴承基本结构，在保留球轴承对轴的支撑作用下，将转轴与转子结合，外圈与轴承座相结合形成定子。将电极固定在定子内圈，使滚动体与电极直接接触，形成滑动式独立层模式摩擦纳米发电机。如图 2-1 所示为简化后的球轴承摩擦纳米发电机在 Solid Work 中所建立的三维模型，从左到右分别为定子，梳齿状交叉电极，保持架与滚动体，内圈转子。

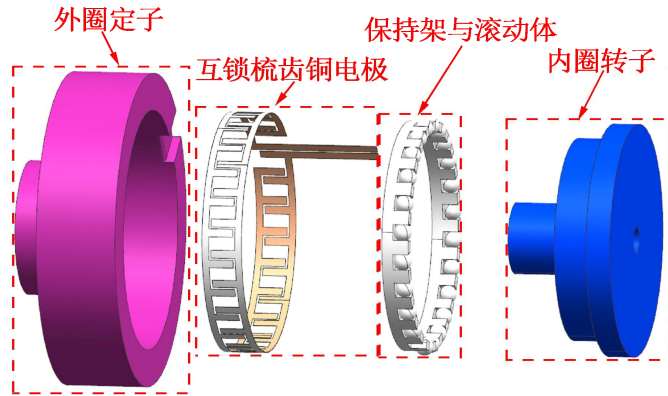


图 2-1 球轴承摩擦纳米发电机三维结构图

2.1.2 滑动式独立层摩擦纳米发电机理

基于现有理论模型，摩擦纳米发电的理论源头是麦克斯韦位移电流^[90]。其微分形式如下：

$$\nabla \cdot D = P_f \quad (\text{高斯定律}) \quad (2-1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{高斯磁定律}) \quad (2-2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{法拉第定律}) \quad (2-3)$$

$$\nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{麦克斯韦—安培定律}) \quad (2-4)$$

式中, E 代表电场; B 代表磁场; H 代表磁化场; ∇ 为向量微分算子; P_f 代表自由电荷密度; J_f 代表自由电流密度; D 代表电位移向量, 可由(2-4)式推出。

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (\text{高斯磁定律}) \quad (2-5)$$

式中, P 代表极化场密度; ε_0 代表真空介电常数。

对各项同性介质来说 $P = (\varepsilon - \varepsilon_0)E$, ε 是电介质的介电常数。在方程中(2-4)第二项被定义为麦克斯韦位移电流, 所以麦克斯韦位移电流就变为式(2-6):

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2-6)$$

在一般各向同性介质中, 第二项和第一项合并起来, 位移电流就变为 $J_D = \varepsilon \partial E / \partial t$, 由此推导出电磁波的基本理论。然而在具有表面极化电荷存在的介质中, 位移电流中就有由表面静电荷引起的极化密度的贡献 P_s , 其电流定义为:

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P_s}{\partial t} \quad (2-7)$$

其中式(2-7)右侧第一项是由于电场变化所产生的感应电流, 奠定了电磁波存在的理论基础; 第二项是由表面所带的静电荷产生的极化场而引起的电流, 是纳米发电机的根本理论基础和来源。上述理论模型深刻诠释了各物质之间接触摩擦。由于极化效应, 导致材料内部电子能级跃迁至表面, 从而引导接触材料表面电荷随自身的定向移动而移动。解释了摩擦纳米发电最基本的原理。

由于轴承特殊的摩擦形式, 滚动体多发生与内外圈及保持架滑动摩擦, 所以采用滑动式独立层模式发电机理。如图 2-2 所示, 滚动体依次从电极 1 滑动到电极 2, 其中的间隔由保持架固定。当 PTFE 材料的滚动体与铜电极发生摩擦时, PTFE 材料中的电子会被铜电极中的正电荷吸引, 从而脱离原来的能级跃向更高层能级, 变为自由电子。所以当滚动体由电极 1 滚到电极 2 时, 受自由电子的影响, 铜电极 1 与 2 之间会产生定向移动的正电荷, 形成电流。当滚动体循环滚动时, 在一对铜电极中会形成交变电流。

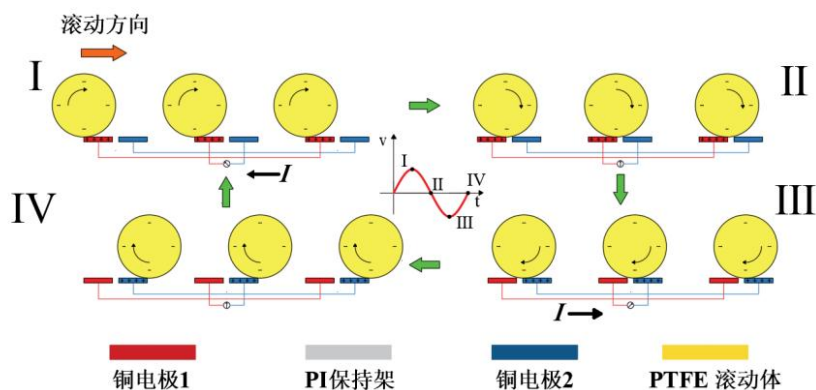


图 2-2 球轴承摩擦纳米发电机原理图

2.2 球轴承摩擦纳米发电机静电场仿真

2.2.1 仿真三维模型结构

在 COMSOL 静电场仿真中，球轴承摩擦纳米发电机 3D 结构如图 2-3 所示，使用透明有机玻璃亚克力制作球轴承内外圈，聚四氟乙烯(PTFE)材料制作滚动体，将两对铜梳齿电极交叉放置构成互锁梳齿铜电极，然后将铜梳齿电极粘贴在亚克力外圈内部。单个铜梳齿电极的梳齿个数与滚动体数量相同。PTFE 滚动体在球轴承摩擦纳米发电机中作为负摩擦材料，铜梳齿电极作为正摩擦材料。

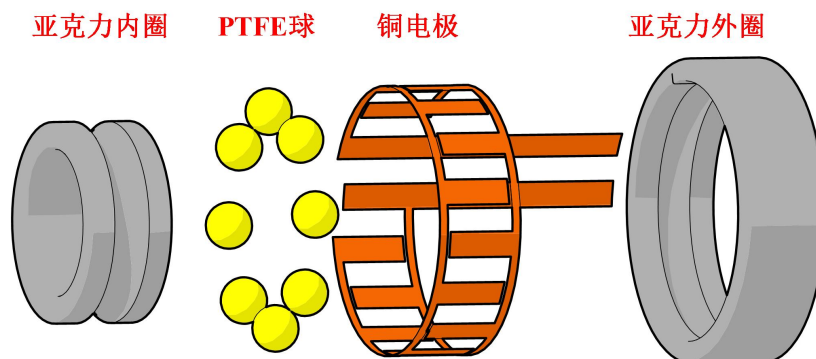


图 2-3 球轴承摩擦纳米发电机仿真结构示意图

2.2.2 仿真模型发电机理

球轴承摩擦纳米发电机发电原理图如图 2-4 所示，当球轴承摩擦纳米发电机正常运行时，PTFE 球由电极 1 旋转 22.5° 滚入电极 2，PTFE 材料与铜接触摩擦，由于两种材料相对极性不同，使得 PTFE 球表面感应出负电荷，而铜电极表面感应出正电荷，此时铜电极表面的正电荷也会随着 PTFE 球的转动而发生转移。当摩擦纳米发电机正常运行时，正电荷在铜梳齿电极对中定向交叉流动，形成周期交变电流。球轴承摩擦纳米发电机建模尺寸参考滚动球轴承 6208 结构，并在其基础上为提高发电性能进行仿真实验。

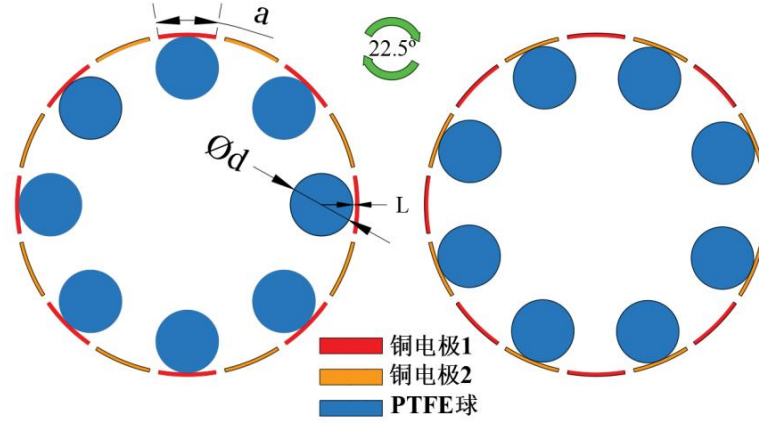


图 2-4 球轴承摩擦纳米发电机仿真发电原理图

2.2.3 仿真模型初始参数

在 COMSOL 仿真模拟球轴承摩擦纳米发电机运行过程中，模拟空间电势随着 PTFE 球的滚动而不断发生变化。铜梳齿电极是粘贴在定子上，所以在空间中固定。在整个空气域中的电势只与球运行位置有关。各相关参数设置为：球数与单个电极齿数相等为 8 个，球直径为 d 为 4 mm，球与电极之间的间隙距离 L 为 0.0025 mm，电极周向所占的圆心角 α 为 320° ，与电极之间间隙距离为 L 的球数 m 为 8，铜电极宽度 w 为 60 mm。在静电场中是无法模拟摩擦起电效应的，因为目前摩擦起电的机理没有方程表述。但是可以根据不同材料摩擦起电产生效应的影响，已有资料中是通过试验测试，得到某种材料在某个截面上的电荷分布方程进行计算，COMSOL 静电中有一个边界条件为“表面电荷密度”，所以设置 PTFE 球的表面电荷密度 ρ 为 $-26 \mu\text{C}/\text{m}^2$ ，铜电极表面感应电荷密度为 $-\rho$ ，总电荷量 $q = -\rho * S_1$ 为 $13 \mu\text{C}$ ， S_1 为铜电极表面积。

2.2.4 仿真电荷分布模型

PTFE 球在无限域中可以看作为一个点电荷，可以由点电荷电势与距离的公式(2-8)解释 PTFE 球产生的空间电势 U_{PTFE} :

$$U_{PTFE} = \frac{q_{PTFE}}{4\pi\epsilon_0 L} = \frac{m\rho d^2}{4\epsilon_0 L} + (8-m)\frac{\rho d^2}{4\epsilon_0 L_0} \quad (2-8)$$

式中： U_{PTFE} 为距离点电荷(PTFE 球)为 L 处的空间电势大小； L 为距离点电荷的空间距离；此处为间隙距离； L_0 为初始间隙距离； d 为滚动体直径； m 为保持间隙距离 L 的球数； ρ 为 PTFE 球表面电荷密度； ϵ_0 为相对介电常数。

而铜电极上感应的正电荷电势为公式(2-9):

$$U_{cu} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{-\rho\alpha Dw}{360 * 2 * 4\epsilon_0 r} \quad (2-9)$$

式中： U_{cu} 为距离铜电极为 r 处的空间电势大小； r 为距离铜电极的空间距离； α 为电极周向所占的圆心角； D 为球轴承外径； w 为电极宽度； $-\rho$ 为铜电极表面电荷密度； ϵ_0 为相对介电常数。

空间电势 U 为公式(2-10)：

$$U = U_{PTFE} + U_{cu} \quad (2-10)$$

而铜电极上感应电荷密度 $-\rho$ 的增加或减少仅受到 U_{PTFE} 影响，所以可得公式(2-11)：

$$\rho_{\text{差}} = kU_{PTFE\text{差}} \quad (2-11)$$

式中： $\rho_{\text{差}}$ 为铜电极表面电荷密度差； k 为修正系数； $U_{PTFE\text{差}}$ 为PTFE球引起的空间电势差。

由公式(2-12)表明在铜电极表面积 S_l 不变的情况下短路电流 I_{sc} 与电荷密度 $\rho_{\text{差}}$ 呈线性关系。

$$I_{sc} = \frac{dQ}{dt} = \frac{d\rho_{\text{差}} * S_l}{dt} \quad (2-12)$$

式中： I_{sc} 为短路电流， Q 为一侧铜电极带电荷总量， $\rho_{\text{差}}$ 为铜电极上表面电荷密度差， t 为时间， S_l 为一侧铜电极表面积。

2.3 球轴承摩擦纳米发电机静电场仿真结果

2.3.1 初始参数下开路电势与短路电荷密度

当PTFE球紧贴铜电极表面滚动时，会改变空间电势，从而引起铜电极中的正电荷正向流动。当测量铜电极中开路电势的变化时，将两对电极中其中一对电极背面接地，另一对电极背面设为浮动电势，创造开路条件。此时PTFE球表面与电极表面接触分别带有相等且异号的电荷密度，所以将初始状态下与PTFE球表面接触的电极表面设为浮动电势 q 。当测量铜电极中短路电荷密度的变化时，将两对电极背面都接地形成通路，创造短路条件，而与PTFE球接触的电极表面依旧设为浮动电势 q 。以PTFE球相对于初始状态下距离极轴的角度为扫描参数，模拟球轴承摩擦纳米发电机运行一周(360°)。如图2-5所示，为在开路状态下

PTFE 球顺时针运行一个周期(22.5°)时空间电势的变化情况。图中可以看出由于 PTFE 球摩擦带有负表面电荷密度, 所以电势低于接地的零电势电极。随着球空间位置的转动, 整体的空间电势也在呈周期性变化。如图 2-6 所示, 为在短路状态下 PTFE 球顺时针运行一个周期 (22.5°) 时空间电势的变化情况。

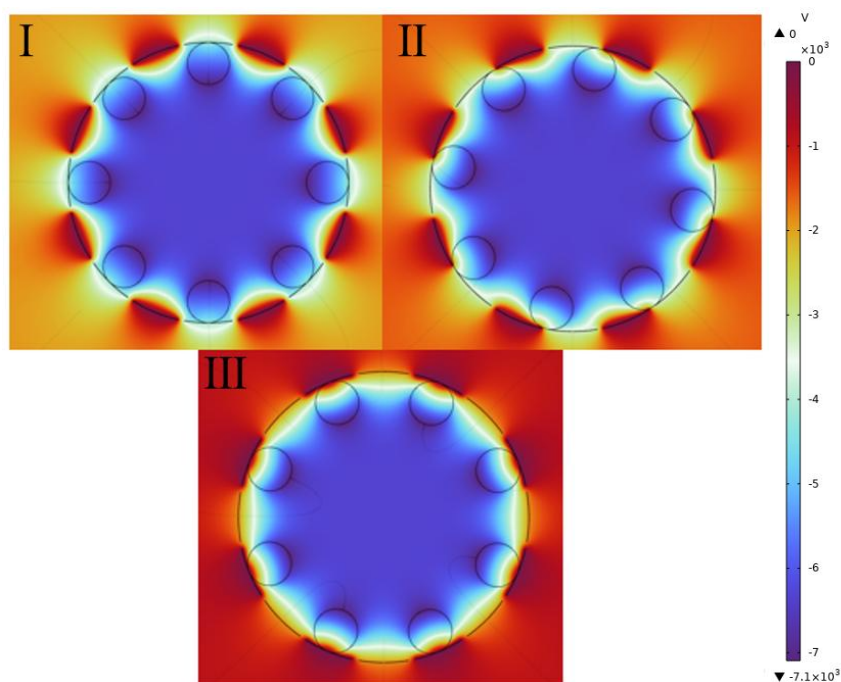


图 2-5 PTFE 球在开路工况下运行一个周期空间电势变化

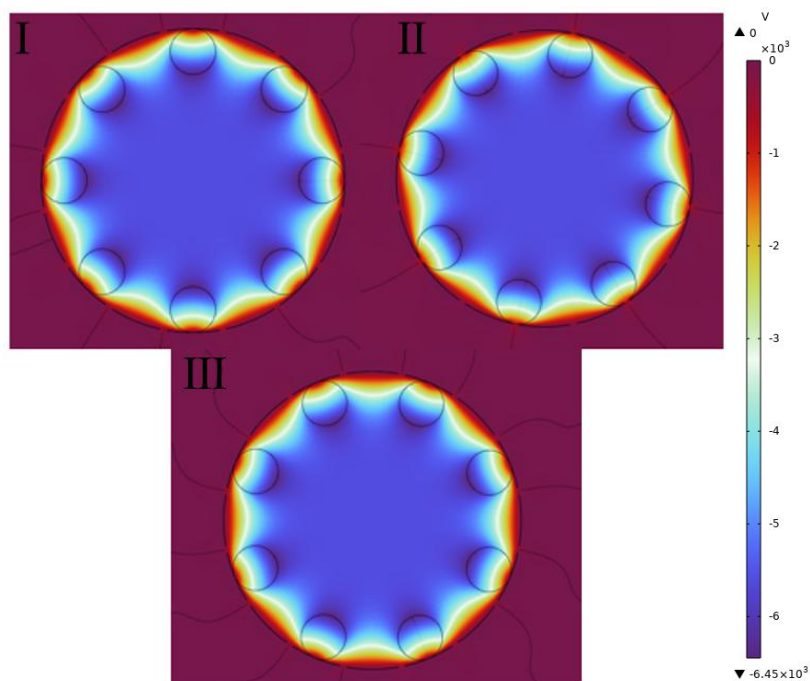


图 2-6 PTFE 球在短路工况下运行一个周期空间电势变化

此时测量开路状态下非接地电极背面电势和短路状态下任意一对电极背面

的电荷密度，其结果如图 2-7 所示；可以看出电势与电荷密度在 PTFE 球运行一周时产生 8 个周期。当 PTFE 球在某一电极中心时其电势最低为-5987.73 V，转入另一对电极中心时该电极电势升到最高为-1844.36 V。最高电势与最低电势差值为电势差 V。当 PTFE 球位于某电极中心时，该电极上电荷密度最高为 29.80 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ ，当滚到另一对电极中心时，该电极上电荷密度最低为 9.14 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ ，可以看出随着 PTFE 球的空间位置变化，电极表面电荷密度也在随之改变。该仿真结果与上述机理相符合。如果将两对电极利用导线连接，则正电荷随着 PTFE 球的空间电势变化，在两对电极中周期性定向流动。

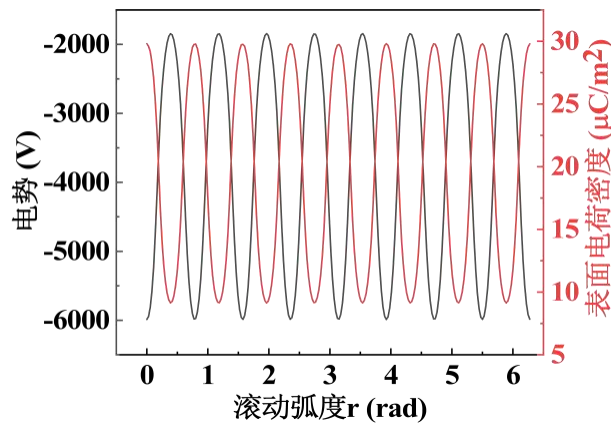


图 2-7 PTFE 球运行一周时电势与电荷密度

2.3.2 滚动体直径对发电性能的影响

由于球轴承摩擦纳米发电机中 PTFE 球材料加工误差及磨损问题，将导致其直径会发生偏差。所以利用 COMSOL 研究了不同直径下 PTFE 球对发电性能的影响。如图 2-8 所示，为空间电势与一侧铜电极上表面电荷密度在不同直径 PTFE 球下运行一周的特性曲线。在电势图与电荷密度图中可以明显看出高低峰值随着 PTFE 球直径的改变发生偏移，随着直径的减小，电势向上偏移，而电荷密度向下偏移。但是对发电特性的表征应取决于电信号输出的差值。最大电势差是相邻铜电极之间的开路电压(V_{oc})，而最大电荷密度差值表明了正电荷在铜电极上的周期性增加和减少。

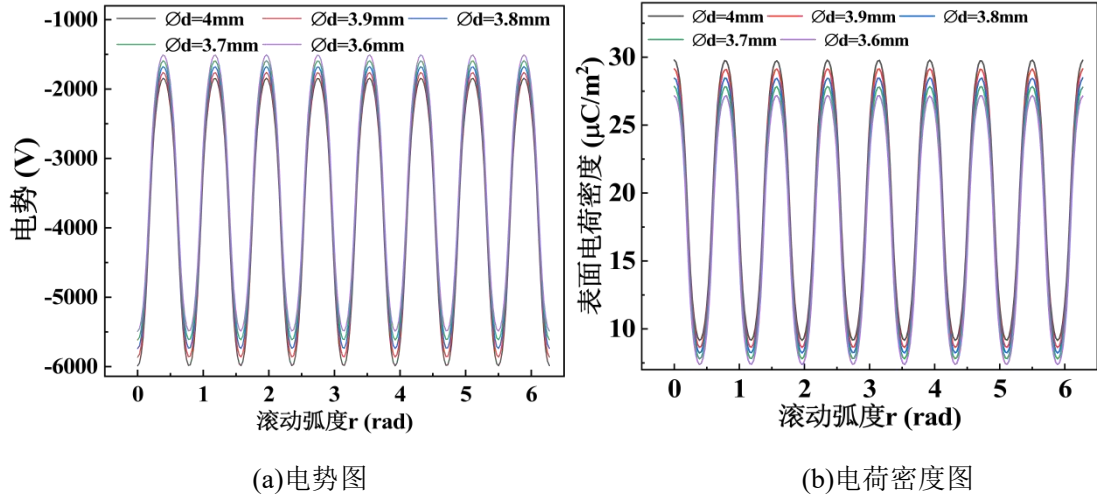


图 2-8 不同直径 PTFE 球下的电势与电荷密度图

如图 2-9 所示，随着 PTFE 球直径的增加，模拟电输出特性中最大电势差与最大电荷密度差也随之增加，分别从 3980.98 V 增加到 4144.49 V 与 19.76 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 增加到 20.64 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 。这是由于 PTFE 球表面电荷密度 ρ 一定，当其直径 d 增加时，球表面积随之增加，则表面带电荷总量也随之增加。PTFE 球在铜电极表面感应出的电势与浮动电荷转移量也随着直径的增加而增加。

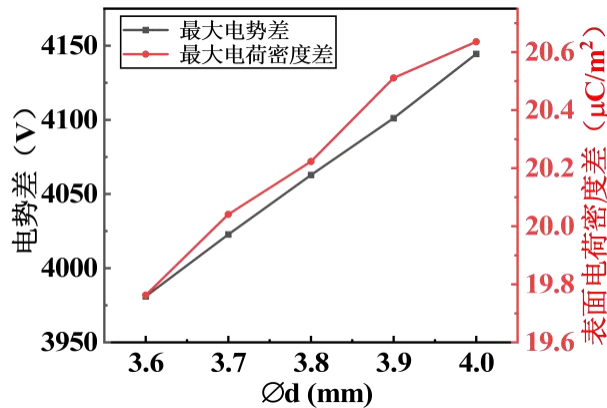


图 2-9 不同直径 PTFE 球下最大电势差与最大电荷密度差

2.3.3 滚动体与电极的间隙距离对发电性能的影响

由于球轴承摩擦纳米发电机中内圈与外圈亚克力材料的加工误差、材料的磨损以及轴承承载区与非承载区等原因，导致 PTFE 球全部或者部分与外圈电极之间的间隙距离会发生改变。所以利用 COMSOL 研究了全部或部分 PTFE 球与外圈铜电极之间的间隙距离对发电性能的影响。如图 2-10 所示，可以明显看出随着 PTFE 球与铜电极表面间隙距离 L 的增加无论是铜电极上空间电势和表面电荷密度上下峰值的差值都在减小。图 2-11 更加清楚的表明随着间隙距离 L 增加，最大电势差与最大电荷密度差以相同趋势减小，分别从 4144.49 V 减小到 2776.88

V 与 $20.67 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 减小到 $13.56 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。而 PTFE 球与铜电极之间类似于平行板电容器，当间隙距离增加时相当于放电过程，所以铜电极表面浮动电荷密度及差值随着间隙距离 L 的增加而减小。

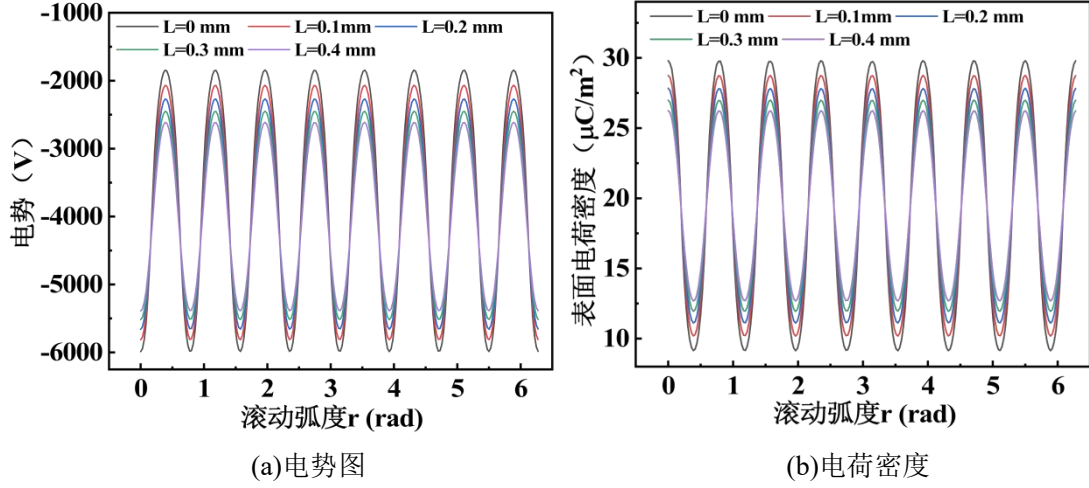


图 2-10 PTFE 球与电极之间不同间隙距离 L 下的电势与电荷密度

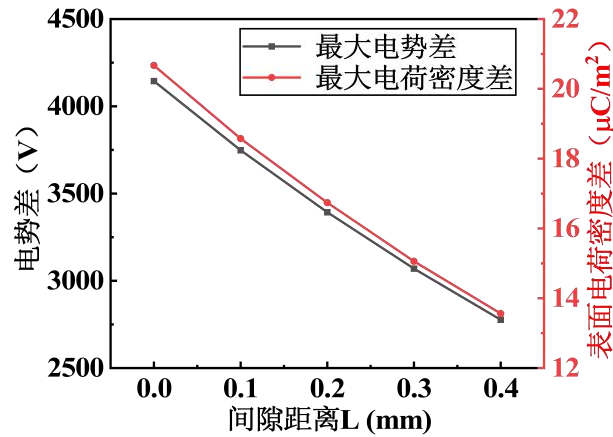


图 2-11 不同间隙距离 L 下最大电势差与电荷密度差

当球轴承摩擦纳米发电机承受载荷时，不可避免的会出现承载区和非承载区。而承载区间的 PTFE 球与铜电极之间因为受压力而无间隙，但是非承载区中 PTFE 球往往会因为加工误差、材料磨损及形变等问题出现间隙，所以需要研究不同数量的 PTFE 球保持 0.1 mm 间隙距离时的发电特性。如图 2-12 所示，为从 0 到 8 个 PTFE 球保持 0.1 mm 间隙距离时，电势与电荷密度随着球数量的增加而减小，符合上述研究得出的规律。图 2-13 表明最大电势差与电荷密度差随着球数的增加而减少，分别由 4144.49 V 减小到 3747.90 V 与 $20.67 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 减小到 $18.58 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。由于间隙距离很小与球数改变也很少，所以最大电势差与电荷密度差也只发生微小的改变。

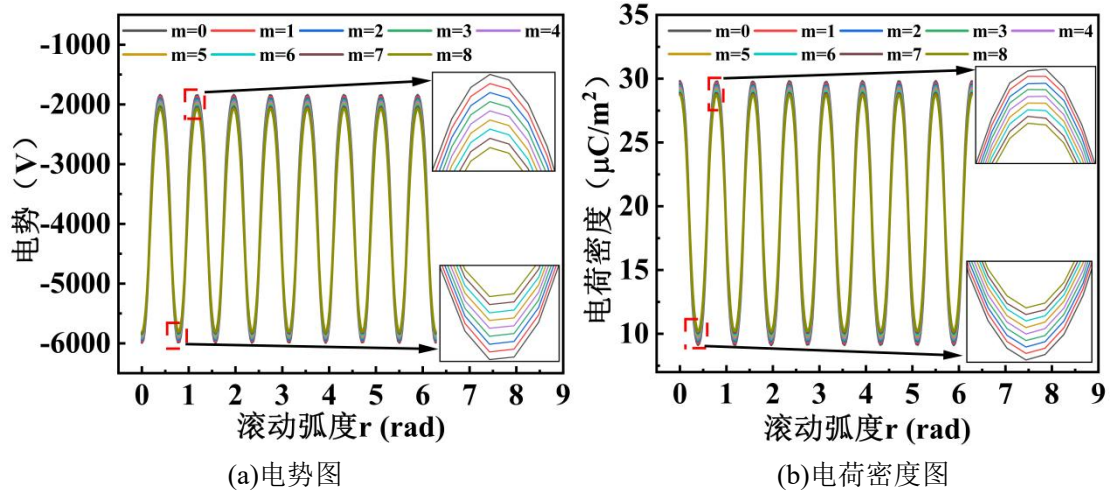


图 2-12 在不同球数间隙距离为 0.1 mm 下电势与电荷密度

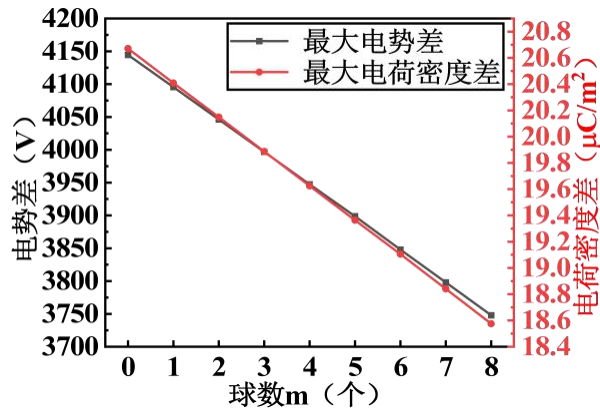
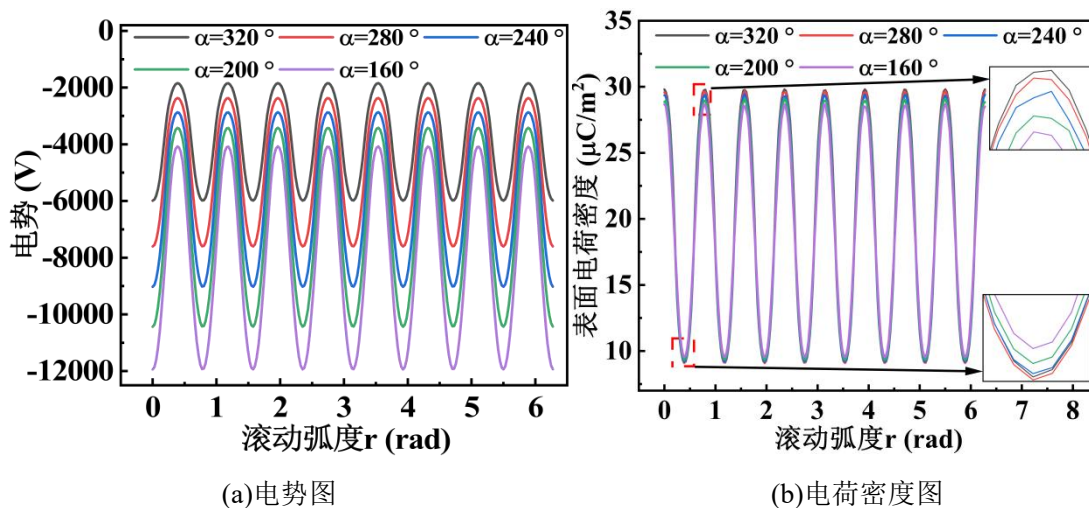


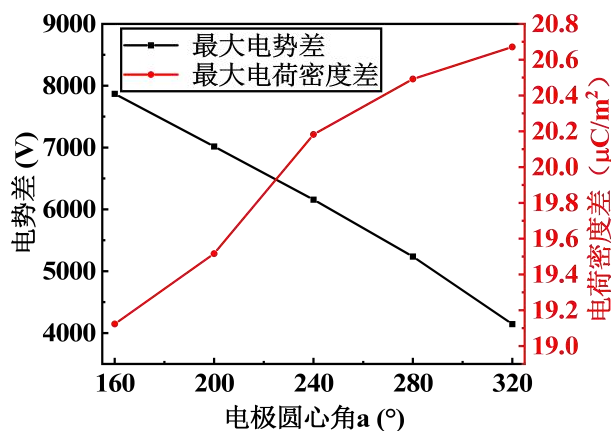
图 2-13 在不同球数间隙距离为 0.1 mm 下最大电势差与电荷密度差

2.3.4 铜电极所占圆心角对发电性能的影响

两对铜电极以梳齿形排列于外圈与 PTFE 球之间，其在一周内所占圆心角的大小一方面影响材料成本，另一方面也影响加工的难易程度。所以有必要探究铜电极所占圆心角 α 对发电性能的影响。由于弧度没有角度直观，所以采用相对于圆心所占的一周空间角度来表示铜电极的弧度，同时也是为了适配各种不同型号的球轴承摩擦纳米发电机。如图 2-14 所示，当铜梳齿电极对相对于两对铜梳齿电极之间的周向间隙，占一周(360°)的 320° 到 160° 时，铜电极上的空间电势负向偏移，并且峰值差值变大；而铜电极表面电荷密度，基本没有变化。这是由于当铜电极占空间角度减小时，由于轴承直径是一定的，所以铜电极表面积也随之减小，带电荷量 q 减小。所以空间电势受 PTFE 球的影响向下偏移。铜电极上浮动电荷密度并没有随着电极所占圆心角的改变而改变，这也符合 PTFE 材料与铜材料的感应电荷密度规律。

图 2-14 不同铜电极所占圆心角 α 电势与电荷密度

而从图 2-15 可以看出，最大电势差随着电极所占圆心角的增加而减小，从 7868.29 V 减小到 4144.49 V；而铜电极最大电荷密度差却随着电极所占圆心角的增加而增加，由 19.12 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 增加到 20.67 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ ，但是只有很小的增量。所以对于铜电极的加工，可以按照实验或者应用需求，尽量选择所占圆心角小的电极尺寸。这样也会增加加工难度，但是可以减少材料成本。

图 2-15 不同铜电极所占圆心角 α 最大电势差与电荷密度差

本章小结

本章建立球轴承摩擦纳米发电机发电模型，通过 COMSOL 静电场仿真模拟软件对球轴承摩擦纳米发电机的结构尺寸，材料加工误差，工况运行等状况下出现的偏差与发电特性之间的联系进行仿真拟合。得出在滚动轴承结构摩擦纳米发电机中，滚动体直径越大，最大电势差与电荷密度差越大；滚动体与铜电极之间的间隙距离越大，最大电势差与电荷密度差越小；保持某一间隙距离球数越多，最大电势差与电荷密度差越小；而铜电极所占空间圆心角越大，其最大电势差越

小，最大电荷密度差越大，但是电荷密度基本不受其影响。以上仿真理论分析为球轴承摩擦纳米发电机仿真、实验、应用提供了理论基础，其中球直径、间隙距离、保持一定间隙距离的球数与实际轴承的运行、故障自感知有着密切的联系。为后续球轴承摩擦纳米发电机的发电特性系统性研究提供参考。

第 3 章 球轴承摩擦纳米发电机发电及故障监测实验验证

本章基于仿真分析结论,建立球轴承摩擦纳米发电机简化模型,在不失去轴承原有支撑功能下进行摩擦纳米发电机设计集成;再根据发电机理进行机械加工制造。搭建转子实验平台,并建立温湿度测量系统与电信号采集系统。随后对电信号进行采样与示波显示,首先验证其电能输出性能,再根据滚动体与电极直接接触的特性进行运行状态监测。最后通过机械加工制造了轴承内外圈与不同程度磨损的滚动体故障,依次进行单故障电信号分析与耦合故障发电特性分析。最后证明球轴承摩擦纳米发电机有一定的故障自感知能力。

3.1 球轴承摩擦纳米发电装置及测试平台

3.1.1 球轴承摩擦纳米发电装置

基于上述仿真模拟分析,机械加工制造了球轴承摩擦纳米发电机,其各部件组装之前的结构示意图如图 3-1 所示。球轴承摩擦纳米发电机整体尺寸高 70 mm,宽 27 mm,该结构是根据滚动球轴承进行改造,将转子与轴相结合,定子与轴承座相结合,简化了滚动球轴承系统结构,定子和转子均由亚克力板材机械加工制作而成,这是由于亚克力材料成本低,耐磨性好,且透明坚固,已广泛应用于工业生产中。通过放置在定子转子之间的 24 个滚动体来承受载荷,并通过聚酰亚胺(PI)保持架固定滚动体之间的间距,使每个滚动体都能周期性的在柔性梳齿电极上同步性地滚过,这由于 PI 材料耐磨性好,可塑性高,并且有着良好的抗腐蚀能力。滚动体是由聚四氟乙烯(PTFE)材料加工而成,直径为 4 mm。同时保持架的加入使球轴承摩擦纳米发电机可以更好适应高转速情况,避免了滚动体高速转动时间距的变化导致电信号不稳定,干扰检测结果。互锁柔性梳齿电极是以柔性聚合物 PI 膜为缓冲层,在 PI 膜上粘贴互锁梳齿状铜作为正摩擦材料。可以根据球轴承摩擦纳米发电机的配合要求调整柔性电极厚度,使其可以与负摩擦材料 PTFE 球紧密接触。PTFE 球之间相隔一个柔性梳齿电极齿。当发电机运转时,PTFE 球与柔性梳齿电极构成滑动式独立层模式。在铜电极表面蒸镀了纳米金颗粒,有利于提高球轴承摩擦纳米发电机电信号输出。电信号由铜电极导线导出,可直接进行测量。由于互锁柔性梳齿电极齿对数为 12,PTFE 球每转过 $360^{\circ}/12=15^{\circ}$ 时从一对电极到达另一对电极,所以电信号两个相邻周期之间间隔

为 15° 。

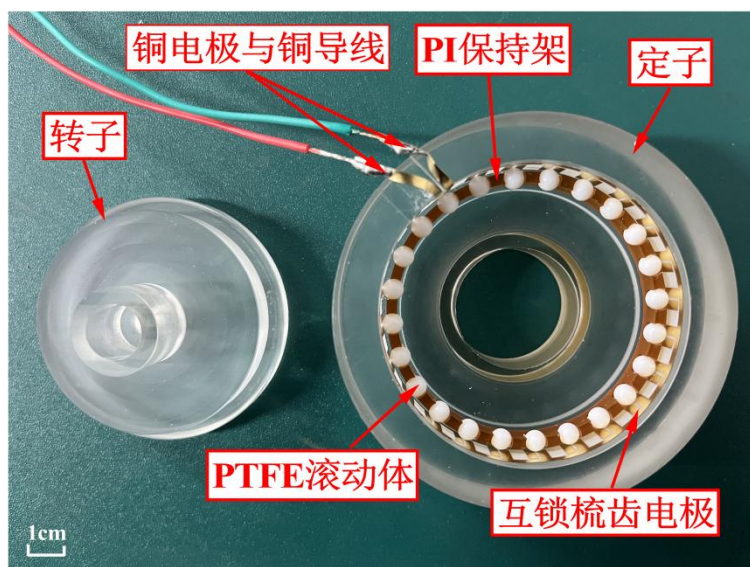


图 3-1 球轴承摩擦纳米发电机实物图

3.1.2 球轴承摩擦纳米发电机测试平台

基于所制造的球轴承摩擦纳米发电机结构尺寸，搭建了一套转子实验平台，采用横向测量的方式，实验平台的实物图如图 3-2 所示。试验台从左到右包括伺服电机，联轴器，支撑轴承 1，平衡盘，支撑轴承 2，被测球轴承摩擦纳米发电机。同时对于电信号的采集与分析分别使用 Keithley 6514 静电计与 NI922 显卡，其中静电计可以测量纳安级别的电流信号，而 NI922 显卡可以将电信号波形显示到 PC 端。



图 3-2 实验平台及电信号采集系统

3.1.3 球轴承摩擦纳米发电机实验环境温湿度测量

如图 3-3 所示，为了更好的探究球轴承摩擦纳米发电机的运行工况受环境因

素的影响，在实验台中布置了温湿度传感器，其探头安装在发电机侧面，用以更好的反映发电机运行时环境温度与湿度。而摩擦纳米发电机与轴承在运行过程中容易受到环境温度与湿度的影响，过高的温度可能导致更高的电子辐射，高湿度对自由电子的跃迁转移有着负面影响，同时高温与湿度也容易使轴承更加容易被腐蚀。

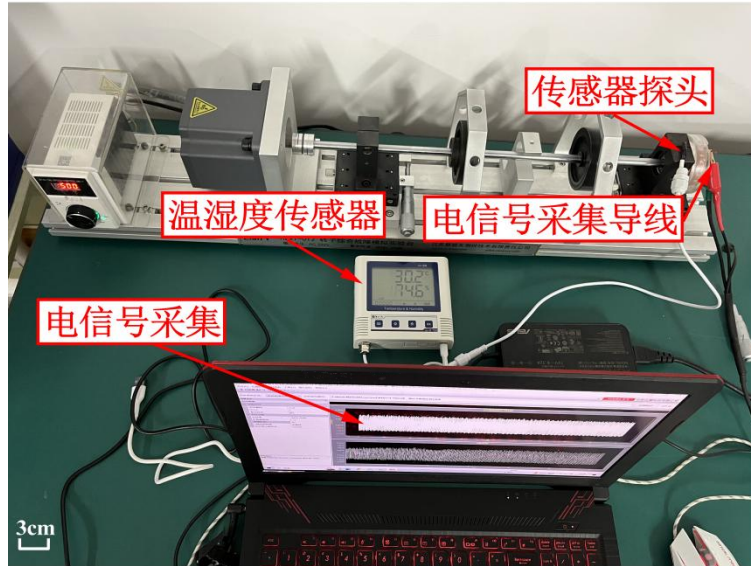


图 3-3 温湿度测量系统

3.2 球轴承摩擦纳米发电机发电特性

3.2.1 球轴承摩擦纳米发电机电压信号

为了获得稳定可靠电信号，使用伺服电机恒速驱动转子。如图 3-4 所示为静电计测得转速从 200 rpm 到 1000 rpm 下的开路电压(V_{oc})信号随时间的变化趋势对比，在转速为 200 rpm 到 600 rpm 下，电压能够稳定输出，当转速超过 600 rpm 时，输出开路电压将会产生偏移，并且偏移速度很快。首先电压信号随着转速的增加而增加，分别为 8.18 V、8.79 V、8.95 V、11.45 V、11.05 V、11.36 V、10.97 V、11.20 V、11.96 V，是因为 PTFE 球随着转速的增加与电极的接触更加紧密，摩擦更加剧烈，这不仅可以提高表面电荷密度，同时也可以增加滚动体与电极之间接触面积。但当转速超过 600 rpm 时，开路电压发生偏移可能是由于转速增加，发电装置尺寸较小，但滚动体个数比较多，电极排列过密，参考上诉仿真分析内容可知，电极信号易受到相邻滚动体干扰。另外当 PTFE 球在电极上滚动时发生打滑导致滚动体与电极之间发生滑动摩擦，同时由于试验台暴露于环境之中，设备检测精度高，容易受到外界环境的干扰，导致电压信号偏移。

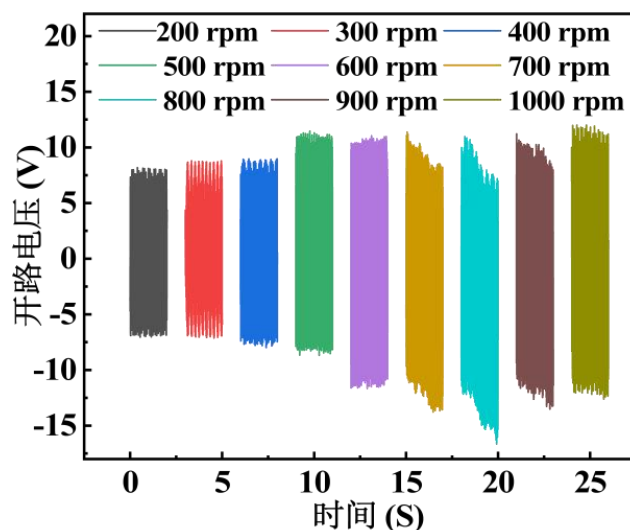


图 3-4 球轴承摩擦纳米发电机电压随转速变化图

3.2.2 球轴承摩擦纳米发电机电流信号

该发电装置有着十分稳定的电流输出特性，如图 3-5 为转速在 200 rpm 到 1000 rpm 下的短路电流随时间的变化对比图，当转速从 200 rpm 增加到 500 rpm 时，电流信号的峰值大小随着转速的变化稳定增加分别为 1.33 μA 、1.71 μA 、2.01 μA 、2.24 μA ；转速从 600 rpm 增加到 1000 rpm 时，短路电流大小重新以一个梯度增加，分别为 2.04 μA 、2.09 μA 、2.23 μA 、2.25 μA 、2.39 μA ；当短路电流以第一个梯度随转速增加而增加时，是由于 PTFE 球与电极在低转速下接触，无法实现全部接触，但是随着转速的增加，与电极直接接触的球也在增加直至饱和。当短路电流以第二个梯度随转速的增加而增加时，球是由于转速的增加从而球轴承摩擦纳米发电机的转子对其产生更大的压力，PTFE 球对电极的压力也随之增加，由于电极的柔性结构，从而有着更多的电荷从一个电极转移到另一个电极，同一时间转移电荷的速度也在增加。

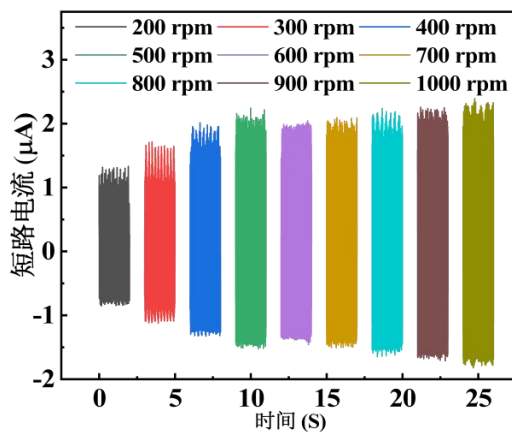


图 3-5 球轴承摩擦纳米发电机电流随转速变化图

3.2.3 球轴承摩擦纳米发电机电信号随转速变化规律

对电信号周期数与转速之间的关系进行探究,从球轴承摩擦纳米发电机的原理出发,当装置旋转一周后会产生 12 对电信号周期,当转速为 V 时,在 S 时间内会产生 N 个电流周期,公式(3-1)如下:

$$N = N_{Ball} * \frac{V}{60} * T \quad (3-1)$$

式中, N 为产生的电流信号周期数量, N_{Ball} 为滚动体个数 V 为转子转速, T 为运行时间。所以在转速 V 分别为 200 rpm 到 1000 rpm, N_{Ball} 为 12 时,在 T 为 0.1 s 时会产生 4、6、8、10、12、14、16、18、20 个周期如图 3-6 所示。

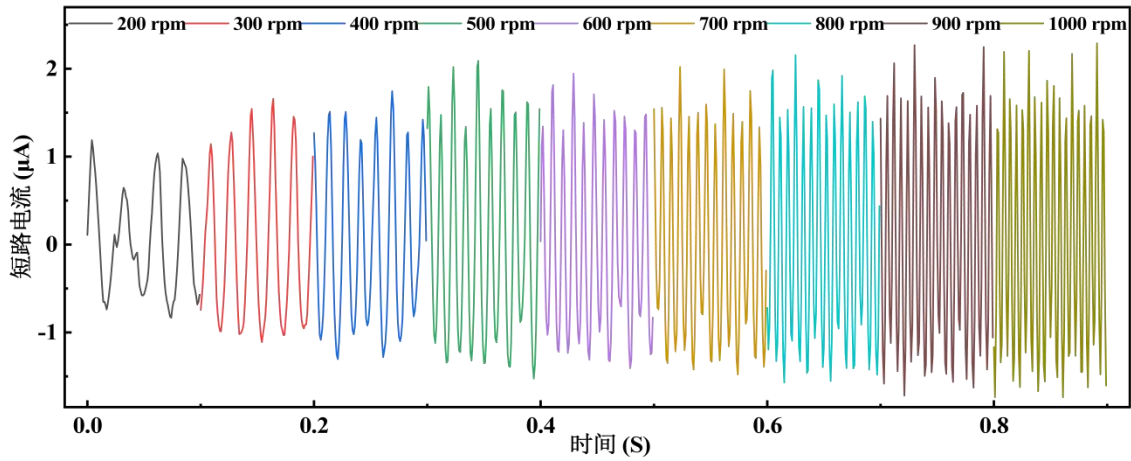


图 3-6 0.1 s 内短路电流信号随转速变化图

在转速 200 rpm 到 1000 rpm 下的电信号峰值曲线如图 3-7 所示,电压与电流有相似的增长趋势。实验得到的电流信号周期数量与理论计算得到的如图 3-8 所示,可以看出拟合性很高。从而侧面反映通过监测周期数量可以准确的对应其转速,也可以说明,该电信号是由球轴承摩擦纳米发电机产生,并且可以精确的采集。

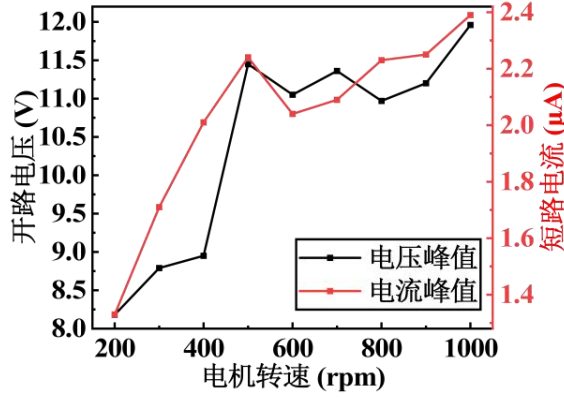


图 3-7 电压电流峰值随转速变化图

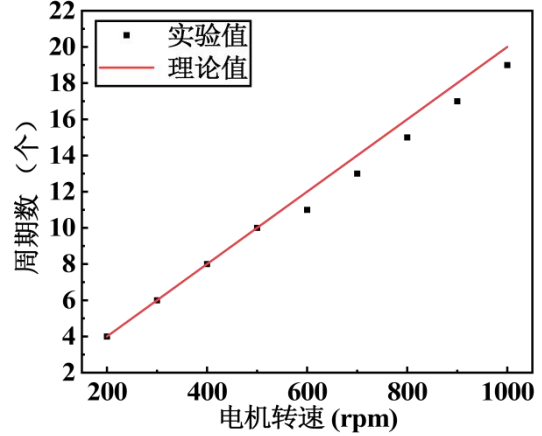


图 3-8 电信号周期数随转速的变化图

3.2.4 球轴承摩擦纳米发电机耐久实验

一套稳定可靠的发电装置除了其稳定的发电性能外，还需要一定强度的耐久性。如图 3-9 所示，以 500 rpm 的转速分别在环境温度为 293.15 K 和 273.15 K 下长达 10000 s 的摩擦发电工作后，球轴承摩擦纳米发电机产生的电流依旧保持稳定。由于受到环境温度的影响，所以在同一转速下的摩擦电流信号大小也有区别。如图 3-10 所示为球轴承摩擦纳米发电机在工作 10000 s 后的结构磨损图像，可以看出只有滚动体会发生磨损。这是由于滚动体的材料为 PTFE，而定子、转子为亚克力材料，所以 PTFE 球会容易发生磨损故障，而定子、转子容易发生脆性剥落故障。为后续的球轴承摩擦纳米发电机自感知故障提供了研究方向。

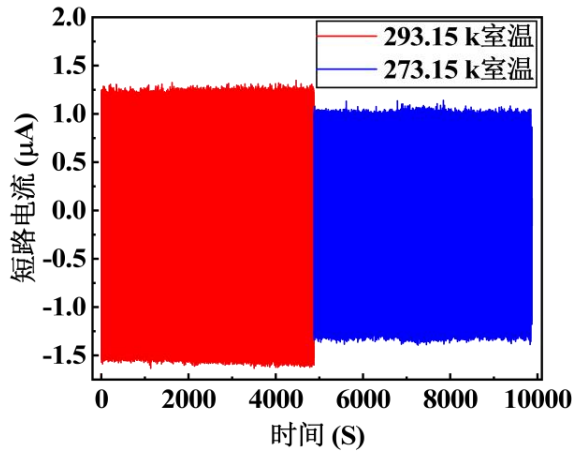


图 3-9 电流在两种室温下的耐久图

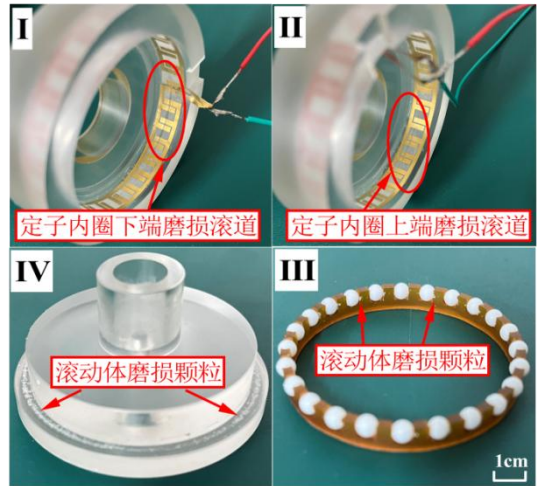


图 3-10 经历耐久试验后的部件磨损图

3.3 球轴承摩擦纳米发电机故障监测实验

3.3.1 故障种类

通过对球轴承摩擦纳米发电机的耐久实验后的部件观察结果，机械加工出滚动体不同程度的磨损故障，分别将 24 个滚动体单侧磨损 0.25 mm、0.5 mm 和 0.

75 mm，如图 3-11 所示，同时也是工业轴承种常见的滚动体磨损故障。同时对转子外圈与定子内圈滚道进行机械加工出剥落 0.5 mm 深的不规则故障，如图 3-12、图 3-13 所示。用以验证球轴承摩擦纳米发电机的故障自感知能力。以上故障均参考工业轴承易发生的故障，检测方法使用电信号时域检测法，这是由于时域检测法更加直观迅速，有利于实时监测球轴承摩擦纳米发电机的运行状态。

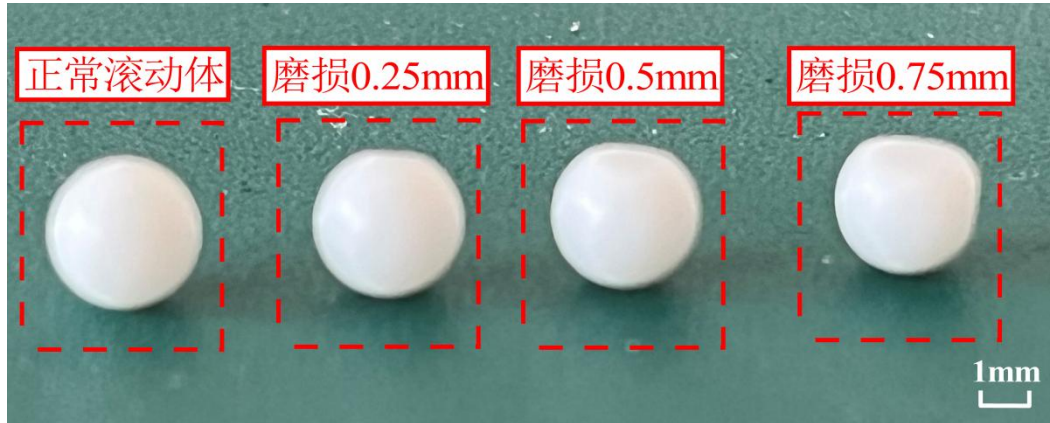


图 3-11 滚动体不同程度磨损图

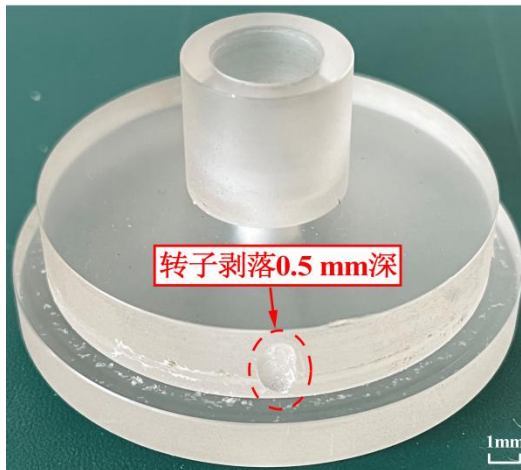


图 3-12 转子剥落故障图

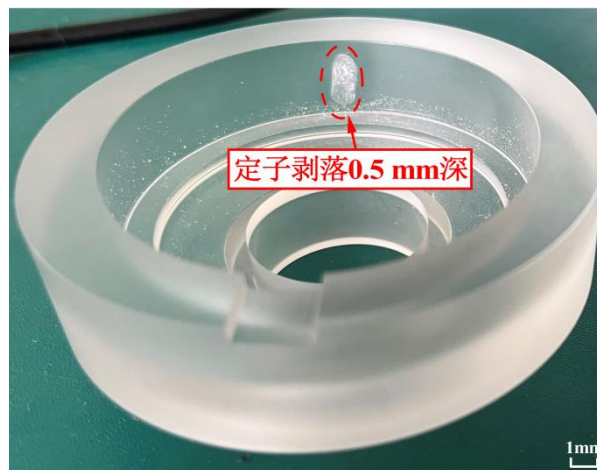


图 3-13 定子剥落故障图

3.3.2 单故障对球轴承摩擦纳米发电特性的影响

为验证球轴承摩擦纳米发电机具有故障自感知能力，首先使用单故障部件进行转子发电实验。基于对该装置产生的电信号研究发现，电流信号的稳定性比电压信号更好，且更加适应高转速工况下的电信号输出，在转速为 500 rpm 下的球轴承摩擦纳米发电机所产生的电信号优于其它相邻转速下，而且通过上述研究发现在转速为 500 rpm 下 PTFE 球可以充分接触电极，从而可以大大减少由于装配尺寸问题所带来的对电信号大小的影响，所以对其在该转速下进行故障自感知能力研究。在转速为 500 rpm 球轴承摩擦纳米发电机结构正常状态下，短路电

流有着稳定的电信号输出如图 3-14 所示，且在 0.2 s 内有着 20 个电信号周期，电流大小为 $2.24 \mu\text{A}$ 。通过在发电性能中的耐久性实验可知，PTFE 球会容易发生磨损故障，而定子、转子容易发生脆性剥落故障。

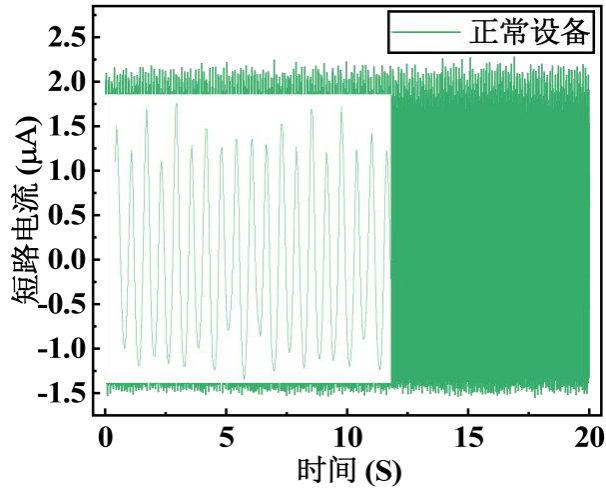


图 3-14 无故障设备电流输出图

如图 3-10 所示，为滚动体 PTFE 球发生不同程度的磨损时与正常滚动体之间的对比。如图 3-15、图 3-16 所示，为滚动体 PTFE 球发生 0.25 mm 和 0.5 mm 磨损时测得在转速为 500 rpm 下的电流信号，从放大图中可以看出，当 PTFE 球发生 0.25 mm 和 0.5 mm 磨损时，对比于正常状态下的发电装置其电流信号将失去稳定性，会缺失部分的周期，只剩下 10 个周期，总体的短路电流会降低到 $0.85 \mu\text{A}$ 和 $0.67 \mu\text{A}$ 。这是由于当滚动体发生磨损时，发电装置的径向间隙相对增加，正、负摩擦材料之间的摩擦面积将大幅度减小，甚至部分 PTFE 球与电极无法接触摩擦。这就是滚动体磨损导致总体短路电流大幅度降低及电信号周期发生缺失的原因。当滚动体(PTFE 球)发生 0.75 mm 磨损时，发电装置将出现严重的打滑现象，且无电信号产生。这是由于发电装置径向间隙过大，从而失效。

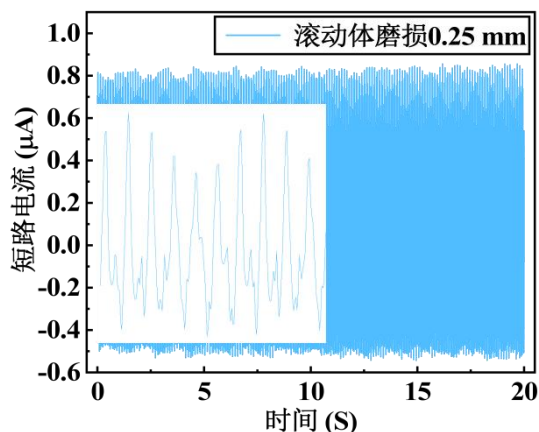


图 3-15 滚动体磨损 0.25 mm 电流输出图

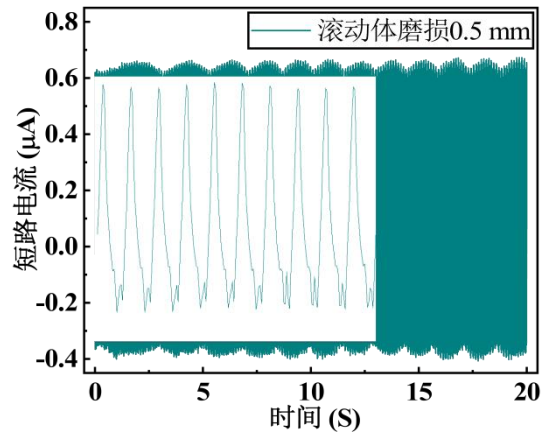


图 3-16 滚动体磨损 0.5 mm 电流输出图

而在定子、转子剥落故障的自感知中,如图 3-17 所示,为球轴承摩擦纳米发电机转子外圈发生剥落故障图和在转速为 500 rpm 下的短路电流电信号图及放大图,可以看出当转子外圈发生剥落故障时,只会影响其电流信号的大小,相比于正常的球轴承摩擦纳米发电机在转速 500 rpm 下的电流信号,其短路电流的电信号为 $1.74 \mu\text{A}$ 。这是由于当转子外圈发生剥落故障时,PTFE 球在滚过剥落处时会接触不到电极,导致与电极接触摩擦的 PTFE 球部分减少,从而降低了电流信号的大小。也反映出与电极接触的负摩擦球的数量会影响球轴承摩擦纳米发电机的发电量,与电极接触的负摩擦球数量越多,球轴承摩擦纳米发电机的发电量越多。

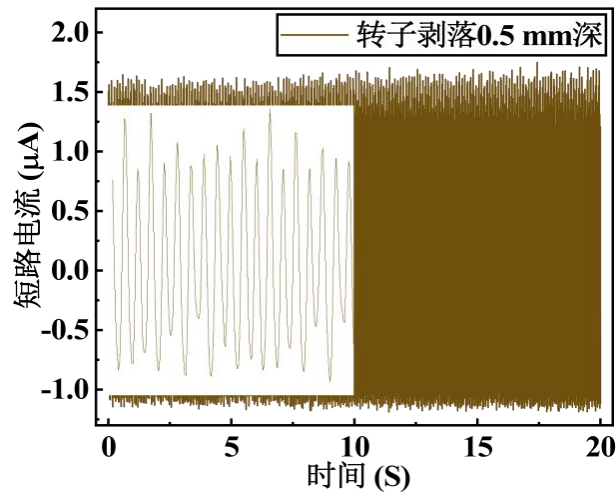


图 3-17 转子剥落 0.5 mm 电流输出图

如图 3-18 为球轴承摩擦纳米发电机定子内圈发生剥落故障图和在转速为 500 rpm 下的短路电流信号及放大图,该图与球轴承摩擦纳米发电机在正常结构下以转速为 500 rpm 产生的短路电流电信号图相同,短路电流电信号大小为 $2.19 \mu\text{A}$,放大图中的电信号均为 20 个周期。这是由于虽然定子内圈发生剥落,但 PTFE 球与定子之间有一层柔性梳齿电极,当球轴承摩擦纳米发电机在轻载状态下运行时,PTFE 球并不会陷入定子的内圈剥落之中,所以两种工况下产生的电信号是一致的。因此,柔性梳齿电极可以对定子内圈起到一定的保护作用,定子内圈的磨损首先会使柔性电极失效,从而无法产生电信号。

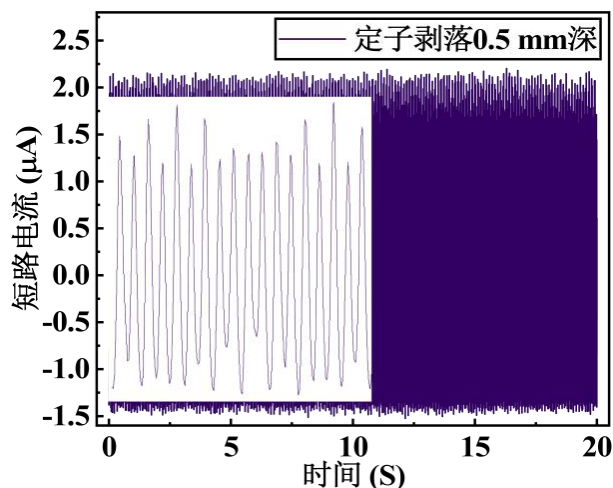


图 3-18 定子剥落 0.5 mm 电流输出图

如图 3-19 所示, 将一种正常结构状态下球轴承摩擦纳米发电机产生的电信号与其它四种不同故障结构状态下球轴承摩擦纳米发电机产生的电信号进行对比, 可以利用电流信号的大小、在相同时间里产生的电信号周期数量将正常结构状态下的球轴承摩擦纳米发电机、滚动体(PTFE 球)磨损状态下的球轴承摩擦纳米发电机和转子剥落故障状态下的球轴承摩擦纳米发电机分别开来, 体现了球轴承摩擦纳米发电机良好的运行状态自感知性能。同时基于以上磨损故障的研究, 由于球轴承摩擦纳米发电机是 PTFE 球直接接触柔性梳齿电极, 并产生滚动摩擦, 所以电信号特征对正、负摩擦材料的接触面积有着直观的反应, 而接触面积又取决于球轴承摩擦纳米发电机中 PTFE 球与定子内圈之间的径向间隙距离。所以球轴承摩擦纳米发电机有望为轴承磨损的径向间隙距离监测预警提供一种有效的方案。

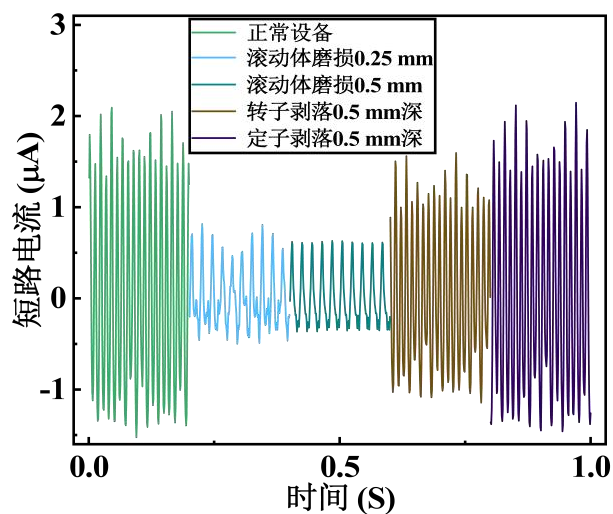


图 3-19 无故障与单故障电流对比图

3.3.3 耦合故障对球轴承摩擦纳米发电特性的影响

滚动轴承在实际应用中经常会发生多故障耦合现象。这是由于当某一构件发生单故障时，会导致轴承整体运行工况变恶劣，从而引起相邻构件发生故障。对于球轴承摩擦纳米发电机的耦合故障研究，首先针对定子与转子的剥落故障耦合进行探究，其电输出结果如图 3-20 所示。将结果与无故障球轴承摩擦纳米发电机、单故障（转子剥落故障）球轴承摩擦纳米发电机进行对比，可以发现在转速为 500 rpm 由于柔性梳齿电极介于 PTFE 滚动体与发电装置外圈之间，保护着轴承外圈，所以对电流输出的周期数量影响很小。基于以上对定子内圈剥落的研究发现，当柔性梳齿电极完好的情况下，定子内圈的剥落故障无法在电流中分辨，也侧面反映定子内圈剥落对球轴承摩擦纳米发电机的发电特性无明显影响。

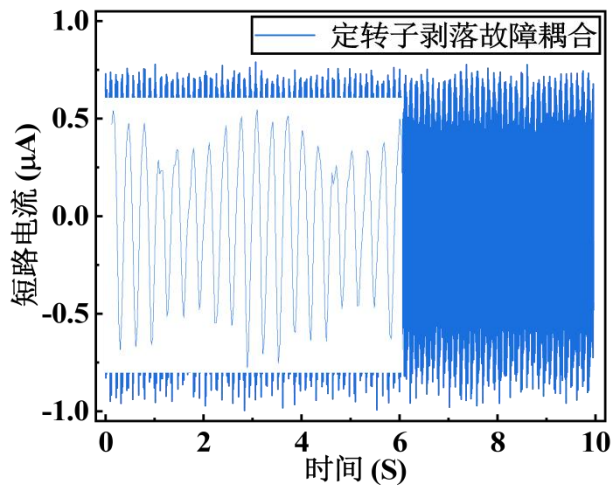


图 3-20 定转子剥落故障耦合电流图

所以对于球轴承摩擦纳米发电机的耦合故障研究主要针对转子外圈剥落故障与滚动体磨损之间，如图 3-21 为在转速为 500 rpm 下转子外圈剥落故障与滚动体 0.25 mm 磨损故障耦合的球轴承摩擦纳米发电机输出电流，可以在电流中明显的观察到当滚动体磨损 0.25 mm 与转子剥落同时发生时，球轴承摩擦纳米发电机的运行状态不稳定，电流输出会由于滚动体与柔性梳齿电极的接触面积突然增加而出现大幅度增加(如图 3-21 中红色椭圆中的部分)。将结果与无故障、单故障(转子剥落故障、滚动体 0.25 mm 磨损)与耦合故障(定子与转子剥落故障耦合)状态下的球轴承摩擦纳米发电机进行对比如图 3-22 所示；可以看出球轴承摩擦纳米发电机的滚动体磨损 0.25 mm 与转子剥落故障耦合可以与滚动体磨损 0.25 mm 明显区分；但是只能通过如图 3-21 中红色圆圈部分与球轴承摩擦纳米发电机的其它状态进行区分。最后对球轴承摩擦纳米发电机的转子剥落故障与滚动体磨损

0.5 mm 耦合故障进行探究,发现由于滚动体磨损过度,球轴承摩擦纳米发电机无法正常工作。相比于球轴承摩擦纳米发电机中正常的转子,当转子发生剥落故障时,滚动体磨损对球轴承摩擦纳米发电机的正常工作影响更大,并且滚动体磨损会增加其它故障对球轴承摩擦纳米发电机的影响,导致其更加容易失效。

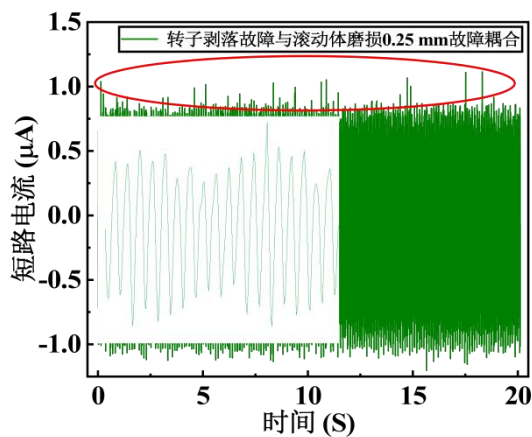


图 3-21 滚动体磨损与转子剥落耦合电流图

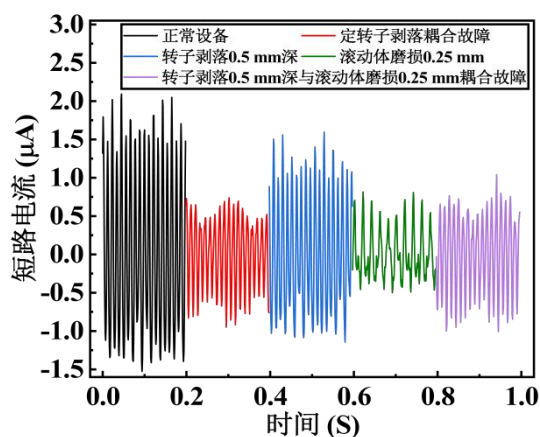


图 3-22 无、单、多故障电流对比图

3.4 球轴承摩擦纳米发电机耐久性优化

3.4.1 非极性润滑脂减摩

在工程实践中,非极性润滑脂常常用于减少轴承中的摩擦,提高轴承寿命。针对上述耐久实验中提到的滚动体与电极磨损问题,引入非极性润滑脂来减少摩擦磨损。如图 3-23 所示,润滑脂注入滚道容积的约 1/3,当在环境温湿度分别为 303.55 K 与 73.7 %时,电流信号输出如图 3-24 所示,可以观察电流信号无明显变化。

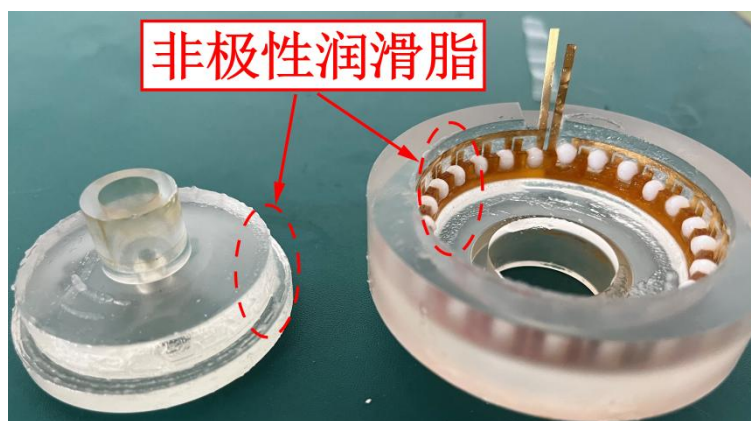


图 3-23 球轴承摩擦纳米发电机润滑脂图

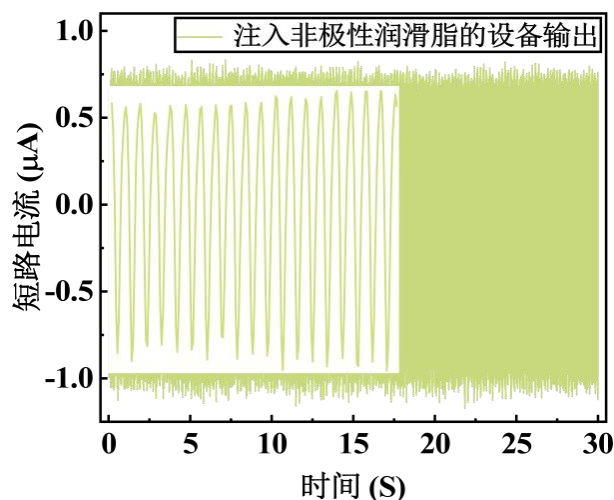


图 3-24 加入非极性润滑脂的电流图

随后对加入润滑脂的球轴承摩擦纳米发电机进行耐久性实验，如图 3-25 所示，在转速为 500 rpm 下经历 60000 次循环后，发电装置依旧十分稳定的进行发电工作。可以证明在加入非极性润滑脂后的球轴承摩擦纳米发电装置依旧可以稳定的正常工作，并且可以有效的降低滚动体与电极之间的摩擦磨损。

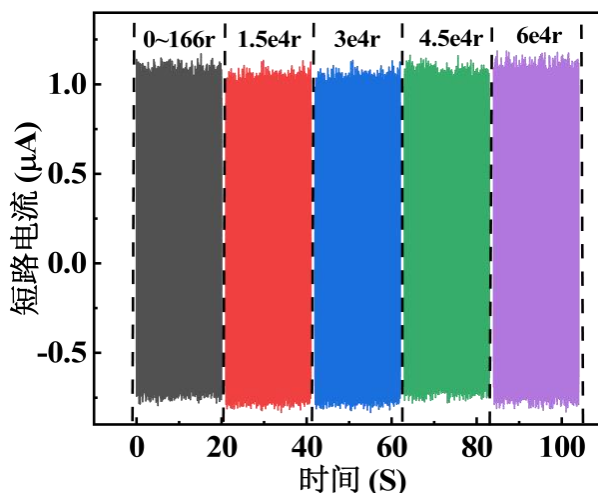


图 3-25 加入非极性润滑脂的电流耐久图

4.4.2 球轴承摩擦纳米发电机耐久前后电极表面

之后通过显微装置对比未进行耐久实验、进行过耐久实验的和加入非极性润滑脂进行耐久实验的梳齿状互锁铜电极表面，如图 3-26 所示可以清楚的观察到未进行耐久实验与加入非极性润滑脂进行耐久实验的铜电极表面纳米金颗粒未被磨损与少量磨损，而直接进行耐久实验的铜电极表面纳米金颗粒大量被磨损。可以看出非极性润滑脂对滚动体与电极之间的直接接触摩擦有一定的缓解作用。

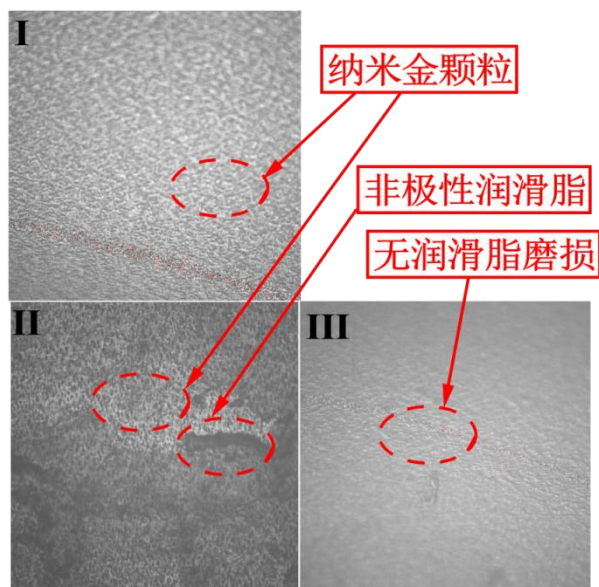


图 3-26 电极表面的镜像显微结构图

本章小结

本章对提出的球轴承摩擦纳米发电机进行发电特性与故障自感知能力进行分析。验证了设计的球轴承摩擦纳米发电机具有良好的电输出能力与故障自感知能力。当球轴承摩擦纳米发电机以 500 rpm 转速运行时，可以产生 11.45 V 的交流电压信号和 2.24 μA 的稳定交流电流信号。在同一时间里，电流信号的周期数量与转速呈线性关系。发电装置中的滚动体(PTFE 球)发生磨损故障时，会大幅度降低短路电流的大小和稳定性，同时缺失电信号周期。并且随着磨损程度加大，短路电流的降低幅度也会加大。当转子外圈发生剥落故障时，会降低短路电流的电信号大小。而定子内圈的剥落故障会由于柔性梳齿电极的存在，无法在短路电流电信号的大小和周期中体现出差别，侧面反映柔性梳齿电极对定子内圈有着一定的保护作用。当发生耦合故障时会放大单一故障对电流输出的影响，当转子发生剥落故障时，滚动体磨损对球轴承摩擦纳米发电机电输出影响更大。有望为轴承磨损的径向间隙距离预警提供一种有效的监测方案。同时还验证了传统的工业非极性润滑脂对该装置发电性能无影响且可以减轻滚动体与电极之间的摩擦磨损，延长使用寿命。

第 4 章 多层球轴承摩擦纳米发电机打滑故障监测实验

本章为解决球轴承摩擦纳米发电机中电极磨损问题,提出一种多层的摩擦纳米发电机与深沟球轴承的集成设计,将梳齿互锁电极集成在轴承外圈外侧,避免了滚动体与其直接接触摩擦。同时选取深沟球 6208 标准轴承尺寸,更加符合工业要求。利用 COMSOL 静电场分析验证其发电原理,在搭建转子试验台进行电信号测试收集。根据电信号频率随转速的变化,可以利用电信号进行滚动体绕轴转速检测。最后与传统工业使用的光电传感器相对比,验证了集成设计的多层球轴承摩擦纳米发电机在供能、滚动体公转转速监测与打滑率监测方面的优异性能。

4.1 多层结构与发电机理

4.1.1 多层球轴承摩擦纳米发电机的三维结构与发电机理

为解决铜电极磨损问题及更加适用于传统工业,设计了一种多层球轴承结构摩擦纳米发电机,其尺寸参数参考传统工业深沟球轴承 6208,滚动体个数 N_{Ball} 为 9,滚动体直径 d_b 为 8 mm,内径 D_s 为 40 mm,外径 D 为 80 mm,节径 D_m 为 60 mm,宽度 B 为 18 mm。其中 3D 结构图如图 4-1 所示,从左到右分别为铜制内圈,PTFE 材料滚动体,PI 材料保持架,尼龙材料外圈,铜梳齿互锁电极。采用机械加工方式制造,完成装配。

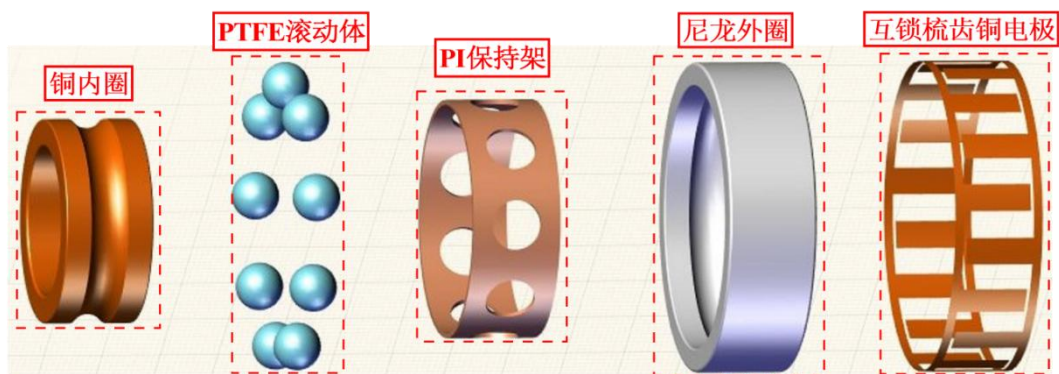


图 4-1 多层球轴承摩擦纳米发电机 3D 结构图

其发电原理如图 4-2 所示,PTFE 材料与铜内圈、尼龙外圈接触,发生滚动摩擦,由于 PTFE 材料中的电子受尼龙与铜中的正电荷吸引,发生电子能级跃迁形成自由电子。此时 PTFE 表面带有负电荷,而相对应的铜电极 1、尼龙外圈、铜内圈四者形成静电平衡,如图 4-2(I)所示。当滚动体继续滚动到电极 1 与电极 2 之间时,上述平衡被打破,电极 1 上所感应的正电荷受 PTFE 滚动体吸引而流

向电极 2，形成正向电流，如图 4-2(II)所示。当滚动体继续滚动到电极 2 上时，形成新的滚动体、内外圈、电极 2 之间的静电平衡，如图 4-2(III)所示。当滚动体继续向前滚动到电极 1 与电极 2 之间时，上一个静电平衡被打破，电极 2 中的正电荷受带负电的滚动体吸引，由电极 2 流向电极 1，从而形成反向电流，如图 4-2(IV)所示。而当滚动体继续滚动时，上述四个过程循环发生，形成交变电流。该结构可以使 PTFE 滚动体同时与内外圈发生滚动摩擦，从而保持最大的表面电荷密度，以此来提高发电量。

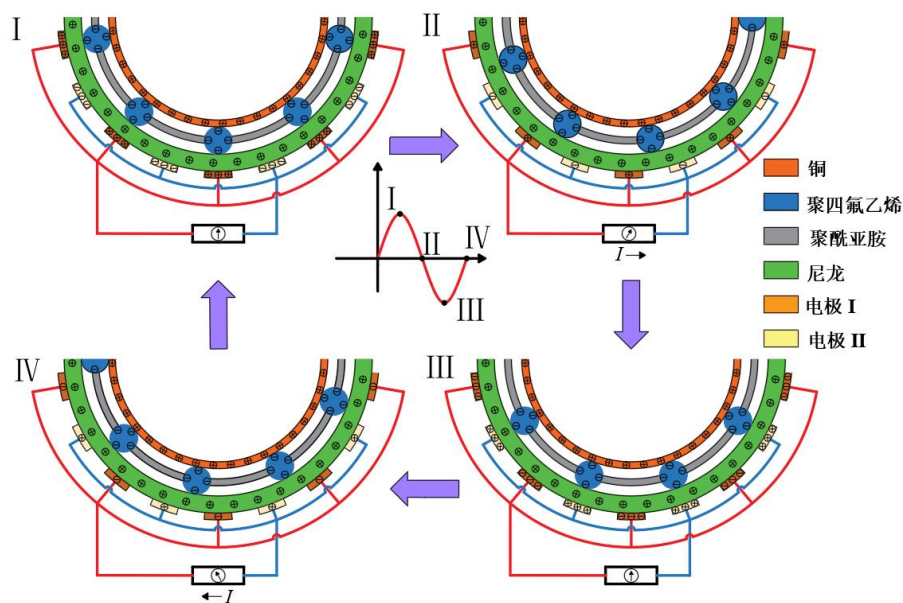


图 4-2 多层球轴承摩擦纳米发电机发电机理图

4.1.2 多层球轴承摩擦纳米发电机静电场仿真

基于深沟球摩擦纳米发电机多层材料发电机理研究，在 COMSOL 静电场中建立等比例 3D 模型，选取软件内核材料属性，设置 PTFE 滚动体表面电荷密度，铜电极、铜内圈与尼龙外圈悬浮电位。最后选取步长进行探究，如图 4-3 所示，所输出的 I 到 IV 步结果刚好对应所建立的发电机理图。当滚动体处于不同位置时，所产生的电场使铜电极、铜内圈与尼龙外圈中的悬浮电位不断变化。

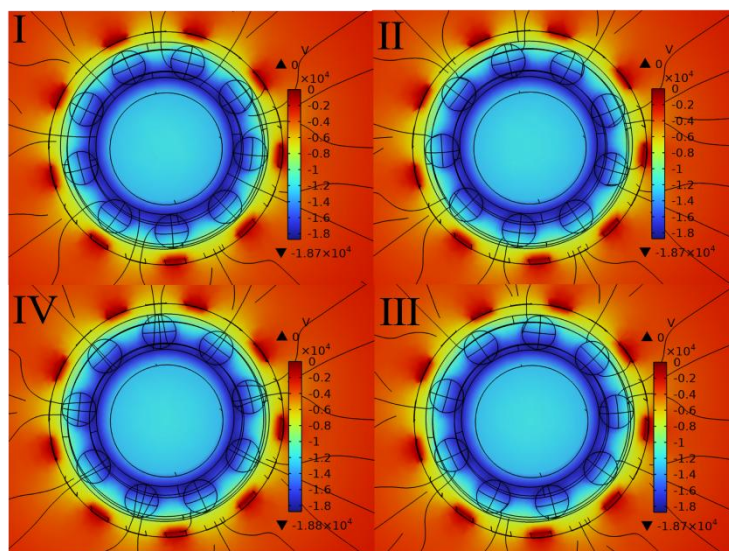


图 4-3 COMSOL 静电场仿真电势图

将电势与电荷密度探针放置在铜电极与铜内圈上，所产生的电势与电荷密度变化如图 4-4 与图 4-5 所示，可以看出由于多层结构，铜电极电势与电荷密度较为稳定，而铜内圈电势与电荷密度变化频率更高。这是由于当滚动体从电极 1 滚到电极 2 上时，要经历两个电极间隙，铜电极会产生 1 个周期电信号，而铜内圈可以参与 2 个静电平衡与打破。侧面验证了发电机理的正确性。

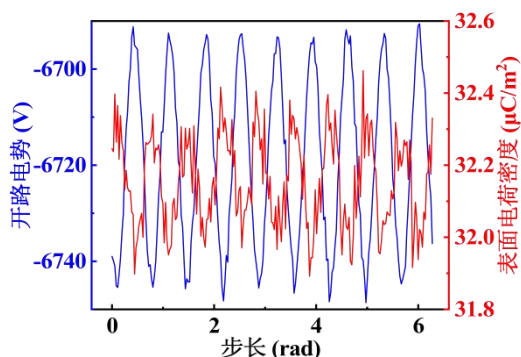


图 4-4 铜电极电势与电荷密度变化图

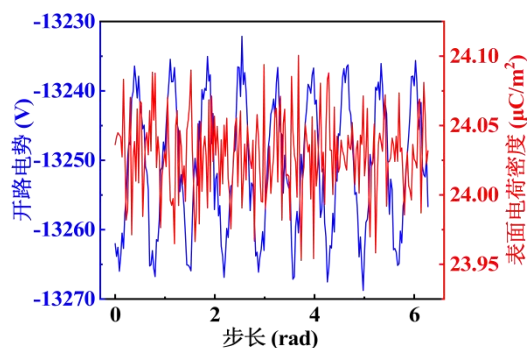


图 4-5 铜内圈电势与电荷密度变化图

4.2 多层球轴承摩擦纳米发电机试验平台与传感器系统

4.2.1 多层球轴承摩擦纳米发电机实验平台

根据传统转子试验台结构，结合深沟球轴承 6208 结构尺寸，设计了一套转子实验平台。实验平台结构图如图 4-6 所示，从左到右为伺服电机，梅花联轴器，被测轴承，铜电极导线，平衡盘、支撑轴承与轴承座。伺服电机可以提供稳定的转速输出，铜电极导线可以延伸至 Keithley 6514 静电计方便电信号测量。

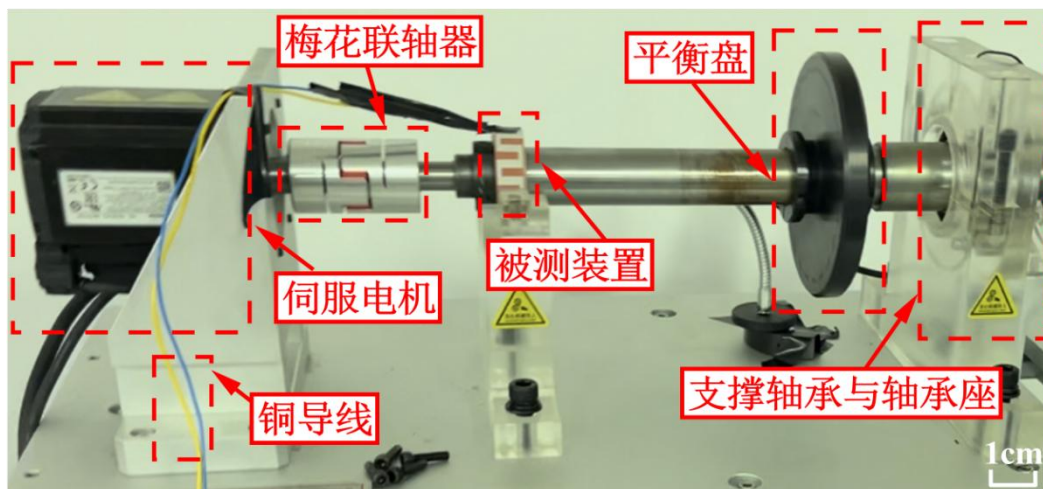


图 4-6 深沟球轴承摩擦纳米发电机测试平台图

4.2.2 多层球轴承摩擦纳米发电机传感系统

为了对比深沟球轴承摩擦纳米发电机电信号与目前工业中常用的高精度光电转速传感器转速测试性能，实验台外侧安装一套光电转速传感器 SZCB-05 如图 4-7 所示，用以测量保持架转速。



图 4-7 光电转速传感器安装位置图

4.3 多层球轴承摩擦纳米发电机电信号

4.3.1 多层球轴承摩擦纳米发电机铜电极电输出

在所搭建的实验平台上对深沟球摩擦纳米发电机进行电信号输出测试，转速设为大跨度 100-2000 rpm。如图 4-8(a)所示，为铜电极开路电压值随转速的变化，可以看出在相同时间内开路电压周期随转速增加而增加。而开路电压均方根值如表 4-1 所示。可以看出当转速超过 900 rpm 时开路电压均方根值出现规律性降低。这可能是由于 PTFE 滚动体与铜电极中间隔着尼龙外圈，导致滚动体转速越高对

铜电极中的正电荷吸引能力越小。而从数据中可以看出深沟球轴承摩擦纳米发电机在开路电压输出能力方面优于球轴承摩擦纳米发电机,这是由于多层结构使得PTFE 滚动体可以时刻保持较大的表面电荷密度。

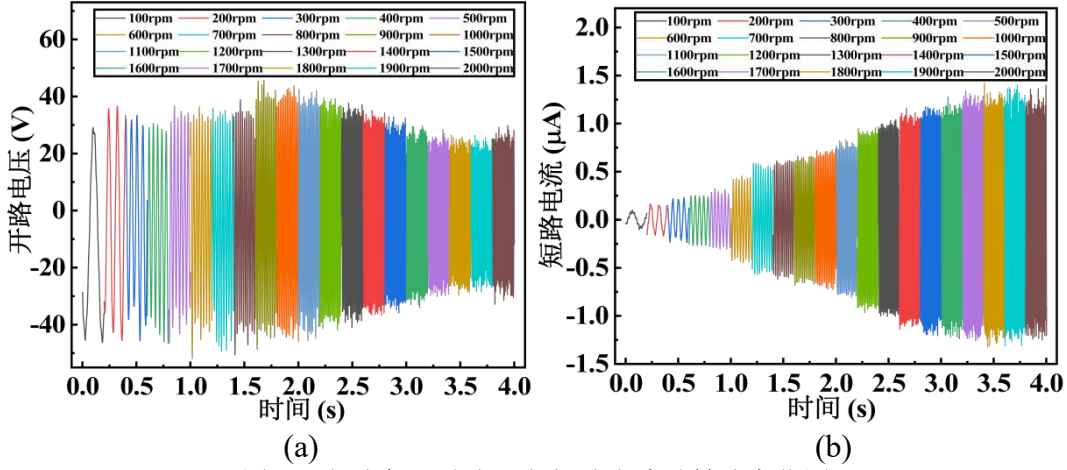


图 4-8 铜电极开路电压与短路电流随转速变化图

开路电压信号变化规律可由公式(4-1)解释:

$$V_{OC} = \frac{2\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \quad (4-1)$$

式中, σ 表示 PTFE 铜电极表面电荷密度, ε_0 为真空介电常数, $x(t)$ 为 PTFE 滚动体在滚道滚过的距离。由公式(4-1)可知, 开路电压 V_{OC} 不受转速影响, 是由 σ 与 ε_0 共同决定的, 所以当转速超过 900 rpm 时, 可能对 σ 与 ε_0 产生了影响。

如图 4-8(b)所示, 为铜电极短路电流值随转速的变化, 同样也可以看出在相同时间内短路电流周期也随转速增加而增加。而短路电流均方根值如表 4-1 所示, 可以看出短路电流均方根值随转速的增大而增加, 而短路电流 I_{SC} 与转速的关系为:

$$I_{SC} = \frac{Q_{SC}}{\Delta t} \quad (4-2)$$

式中, Q_{SC} 表示一个旋转周期中的短路电荷转移量即电荷密度改变量, Δt 为一个旋转周期所用的时间。公式(4-2)可知短路电流大小与转速成正比, 与上述测试结果相同。

表 4-1 开路电压与短路电流均方根值

均方根值 转速(rpm)	开路电压	短路电流
100	54.72 V	0.099 μ A
200	49.86 V	0.198 μ A
300	46.21 V	0.259 μ A
400	46.76 V	0.324 μ A
500	47.61 V	0.368 μ A
600	48.51 V	0.536 μ A
700	49.15 V	0.703 μ A
800	49.51 V	0.757 μ A
900	53.62 V	0.817 μ A
1000	52.69 V	0.877 μ A
1100	51.18 V	0.987 μ A
1200	48.62 V	1.163 μ A
1300	46.04 V	1.256 μ A
1400	43.31 V	1.362 μ A
1500	39.90 V	1.433 μ A
1600	37.30 V	1.486 μ A
1700	33.30 V	1.560 μ A
1800	32.49 V	1.581 μ A
1900	31.36 V	1.603 μ A
2000	34.77 V	1.545 μ A

4.3.2 多层球轴承摩擦纳米发电机铜内圈电流输出

通过静电场仿真实验可知,铜内圈参与了深沟球轴承摩擦纳米发电机的静电平衡与打破,所以针对上述仿真结果,测量铜内圈上电荷密度变化趋势。测试结果如图 4-9 所示,铜内圈表面电荷密度随 PTFE 滚动体滚动而变化,也随转速变化而变化。可以证明发电机理的正确性与仿真结果的可靠性。验证了多层摩擦纳米发电机在轴承集成领域的应用前景。

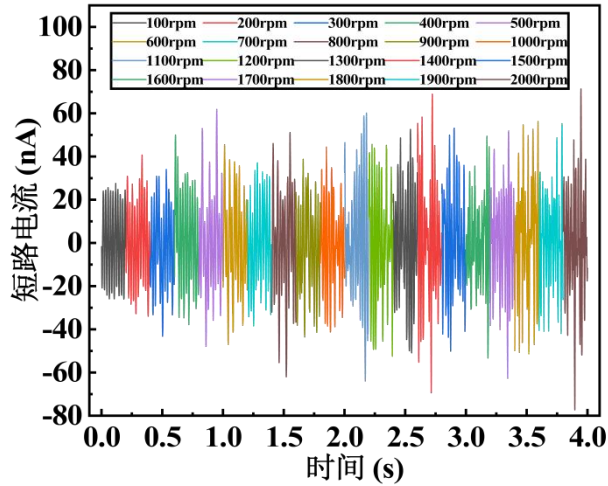


图 4-9 铜内圈输出电流随转速变化图

4.3.3 多层球轴承摩擦纳米发电机铜电极电能输出

为验证深沟球轴承摩擦纳米发电机供能特性，如图 4-10 所示为当电机转速为 500 rpm 外部负载由 $1 \times 10^5 \Omega$ 增加到 $1 \times 10^9 \Omega$ 时，铜电极输出电流与电压的曲线图，可以看出电压随负载的增大而增加，电流与之相反。如图 4-11 所示，当外部负载为 $1 \times 10^7 \Omega$ 时输出达到该转速下最大功率 21.1 μW 。验证了所提出的深沟球摩擦纳米发电机在供能方面的应用前景。

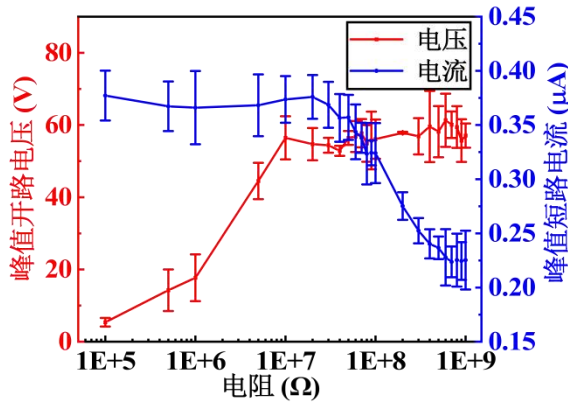


图 4-10 输出电压与电流随外部载荷变化图

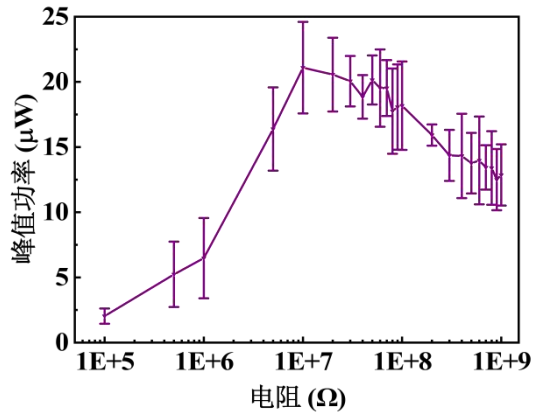


图 4-11 发电功率随外部载荷变化图

4.4 多层球轴承摩擦纳米发电机电信号时频特性

4.4.1 电压信号时频特性

基于深沟球摩擦纳米发电机结构为标准深沟球 6208，所以引入轴承状态监测中常常使用的时频域分析。而通过在相同时间内电信号周期随转速增加而增加的特性可以得出，摩擦电信号也可以作为时频分析监测手段。如图 4-12 所示为在 0.05 s 内 600 rpm、1200 rpm 与 1800 rpm 三种转速下的电压信号图，由公式 (4-3)：

$$T_{Voltage} = \frac{1}{f_{Voltage}} \quad (4-3)$$

式中, $f_{Voltage}$ 为开路电压信号的第一阶基频。所以根据图 4-12 可知, 电压信号在转速 600 rpm、1200 rpm 与 1800 rpm 下的第一阶基频分别为 37.736 Hz、74.627 Hz 与 109.890 Hz。分别对应于图 4-13 中三种转速下的电压信号经过傅里叶变换得到的第一阶基频。中间的误差可能由于测试设备检测精度等原因导致的。但可以得出, 通过开路电压频域信号可以准确监测滚动体公转转速。

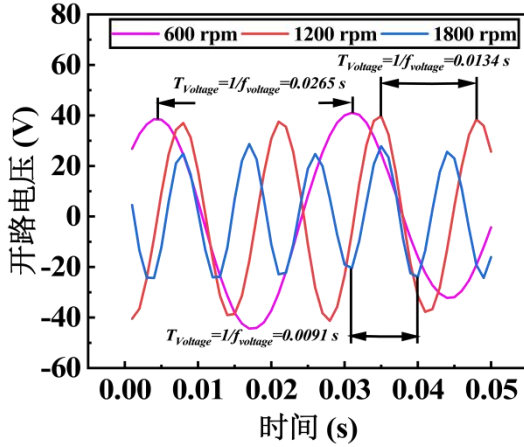


图 4-12 三种转速下的电压周期图

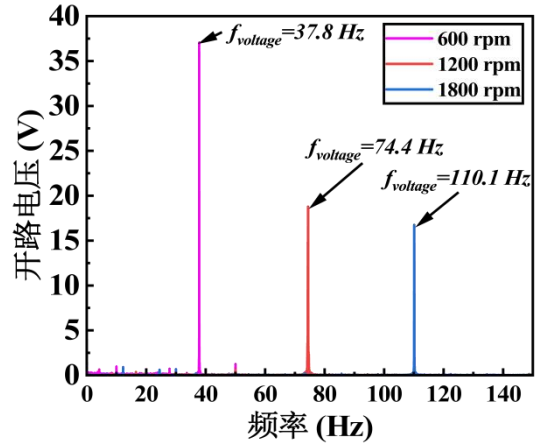


图 4-13 三种转速下的电压频率图

为了进一步研究上述深沟球轴承摩擦纳米发电机中电压信号的转速监测能力, 针对转速 100-2000 rpm 下的傅里叶变换如图 4-14 所示, 可以看出随着转速的线性增加, 电压信号频域第一阶基频值也在线性增加。并且信号基本不受外部其他因素影响, 在各转速下的第一阶基频很容易测得。验证了所提出装置的电压信号第一阶基频值与转速是一一对应关系。

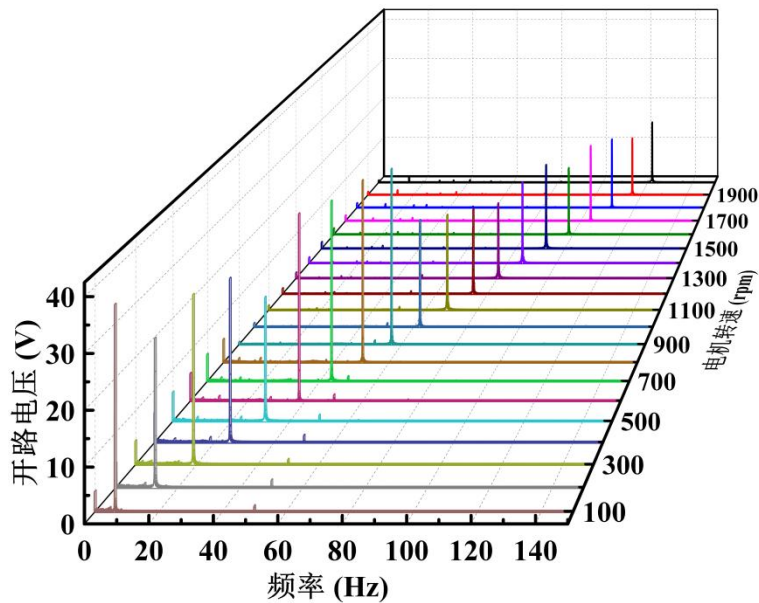


图 4-14 不同转速下电压信号的频率图

根据上述研究，利用 MATLAB 编写程序，实现时对域信号的实时傅里叶变换。如图 4-15 所示，针对深沟球轴承摩擦纳米发电机运行转速，利用先加速再减速，测得 100 s 的变转速电压时域信号值。而程序可以实时反映每一段时域信号的第一阶基频值，清晰准确的监测时域信号所对应的滚子转速。同时利用该程序还可以监测滚动体在某一转速下持续的时长，证明了该装置电压信号利用时频域分析，可以实时监测滚动体公转转速的优异性能。

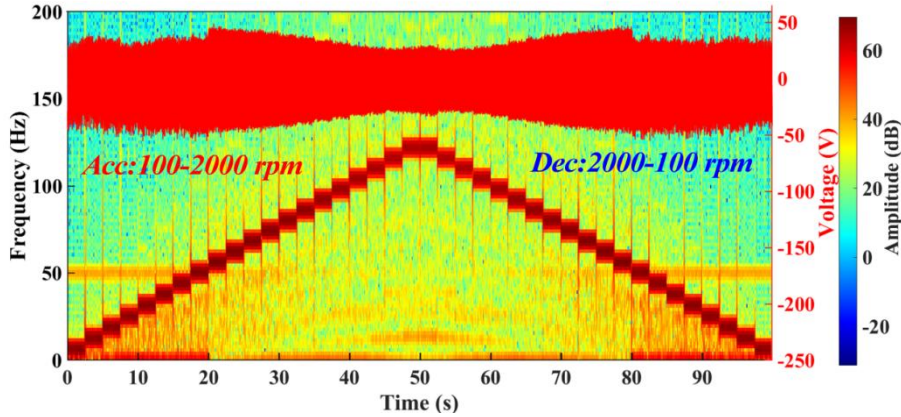


图 4-15 变转速下的电压信号时频域分析图

4.4.2 电流信号时频域特性

基于深沟球摩擦纳米发电机电信号分析可知，电流信号的均方根值随转速增加而线性增加，但电流信号易受到外部因素影响如温度、湿度等。所以利用电流信号的周期数随转速增加而增加的特性，探究电流信号第一阶基频值随转速增加的变化趋势。如图 4-16 所示，分别在转速为 600 rpm、1200 rpm 与 1800 rpm 时，测量该装置电流信号的周期 $T_{Current}$ ，由公式(4-4)：

$$T_{Current} = \frac{1}{f_{Current}} \quad (4-4)$$

式中， $f_{Current}$ 为短路电流第一阶基频值。所以根据图 4-16 可知，电流信号在转速 600 rpm、1200 rpm 与 1800 rpm 下的第一阶基频分别为 37.037 Hz、73.529 Hz 与 111.111 Hz。分别对应于图 4-17 中三种转速下的电流信号经过傅里叶变换得到的第一阶基频。中间的误差可能由于测试设备检测精度等原因导致的。但可以得出，通过短路电流频域信号同样也可以准确监测滚动体公转转速。

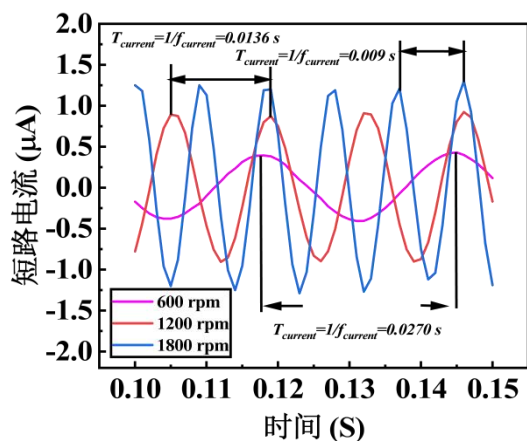


图 4-16 三种转速下的电流周期图

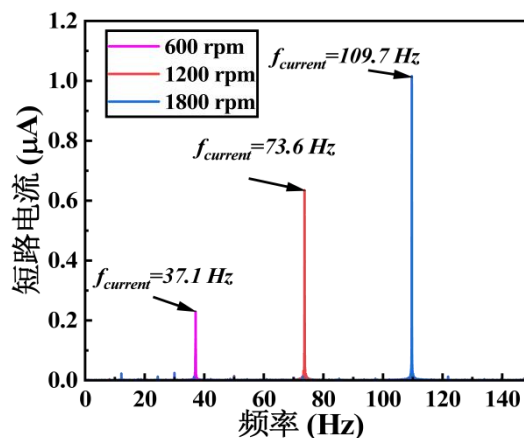


图 4-17 三种转速下的电流频率图

为了进一步研究上述深沟球轴承摩擦纳米发电机中短路电流信号的转速监测能力, 针对转速 100-2000 rpm 下的傅里叶变换如图 4-18 所示, 可以看出随着转速的线性增加, 短路电流信号频域第一阶基频值也在线性增加。并且信号基本不受外部其他因素影响, 在各转速下的第一阶基频很容易测得。验证了所提出装置的电流信号第一阶基频值与转速也是一一对应关系。

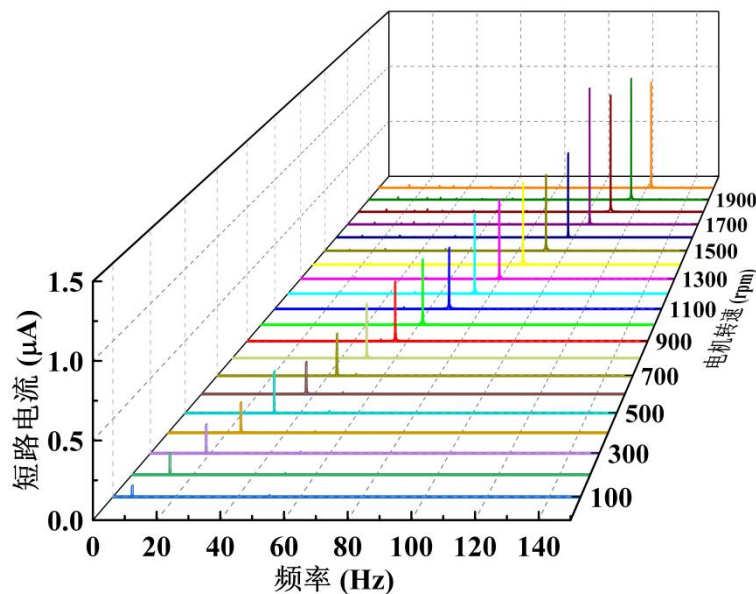


图 4-18 不同转速下电流信号的频率图

根据上述研究, 利用 MATLAB 编写程序, 实现对时域信号的实时傅里叶变换。如图 4-19 所示, 针对深沟球轴承摩擦纳米发电机运行转速, 利用先加速再减速, 测得 100 s 的变转速短路电流时域信号值。而程序可以实时反映每一段时域信号的第一阶基频值, 清晰准确的监测时域信号所对应的滚子转速。同时利用该程序还可以监测滚动体在某一转速下持续的时长, 证明了该装置的电流信号利用时频域分析, 也可以实时监测滚动体公转转速的优异性能。

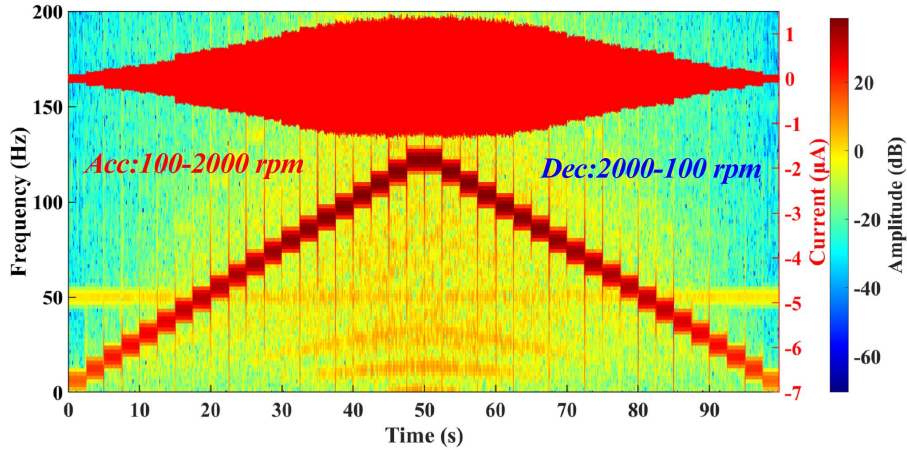


图 4-19 变转速下的电流信号时频域分析图

4.4.3 电信号与光电转速传感器信号时频特性对比

基于电信号时频域特性分析可知,深沟球轴承摩擦纳米发电机可作为自感知滚动体公转转速传感器,利用第一阶基频可以实时监测自身滚子公转转速如图 4-20 所示。而深沟球轴承 6208 有着理论滚子公转转速频率 $f_{Calculated}$ 计算公式(4-5):

$$f_{Calculated} = \frac{N_{Ball}}{2} f_{Motor} (1 - \frac{d_b}{D_m} \cos \alpha) \quad (4-5)$$

式中, f_{Motor} 为电机转速频率; N_{Ball} 为滚动体个数,这里为 9; d_b 为深沟球轴承 6208 滚动体直径,这里是 8 mm; D_m 为深沟球轴承 6208 节径,这里是 60 mm; α 为接触角,这里为 0° 。

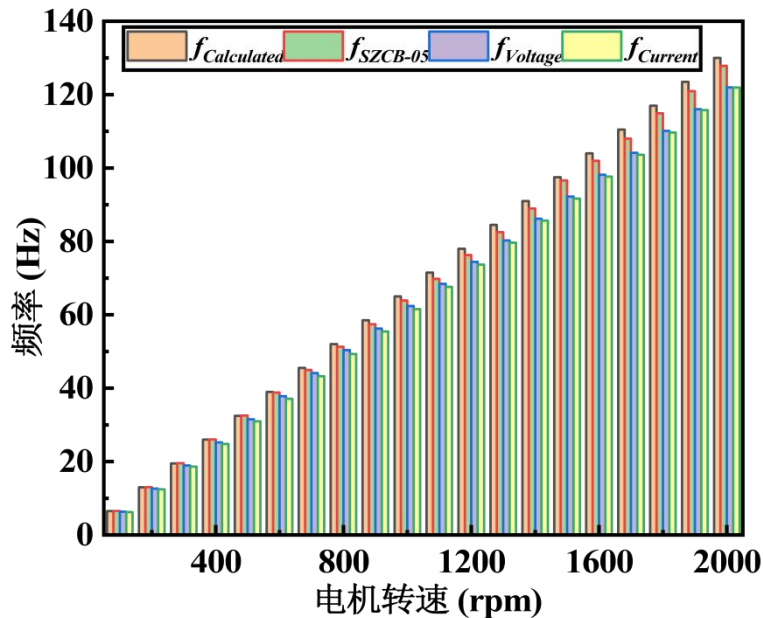


图 4-20 理论与实验第一阶基频随转速变化对比图

通过参数代入计算可知,当电机转速从 100 rpm 增加到 2000 rpm 时,理论滚子公转转速、测试光电转速传感器 SZCB-05、开路电压与短路电流频率值分别如下表 4-2:

表 4-2 四种频率随转速变化值

频值 f (Hz) 转速(rpm)	理论计算	光电转速传感器 SZCB-05	开路电压	短路电流
100	6.5	6.52	6.32	6.20
200	13	13.05	12.62	12.42
300	19.5	19.57	18.92	18.62
400	26	26.02	25.24	24.8
500	32.5	32.55	31.54	30.98
600	39	38.80	37.84	37.12
700	45.5	44.96	44.12	43.24
800	52	51.31	50.40	49.34
900	58.5	57.46	56.26	55.48
1000	65	63.91	62.40	61.58
1100	71.5	69.82	68.46	67.64
1200	78	76.29	74.42	73.68
1300	84.5	82.51	80.26	79.68
1400	91	88.96	86.20	85.70
1500	97.5	96.60	92.24	91.68
1600	104	101.95	98.18	97.64
1700	110.5	108.04	104.16	103.6
1800	117	114.91	110.14	109.68
1900	123.5	120.95	116.04	115.8
2000	130	127.82	121.98	121.92

通过对比表 4-2 中的数据,随着转速增加,四者频率值之间的差距越来越大。这是由于滚动体、保持架与深沟球轴承摩擦纳米发电机内外圈发生打滑导致的。且随着转速的增加打滑程度也在增加,所以导致测试的频率值小于理论计算值。

基于对深沟球摩擦纳米发电机时频特性分析结果,发现不论是开路电压信号还是短路电流的基频对转速都有着十分贴合的线性关系。并且电信号的频域不易受到外界因素影响,十分稳定,容易测量其第一阶基频值。而光电转速传感器 SZCB-05 测得保持架转速频率与电机转速之间也有着良好的线性拟合关系。如图 4-21 所示,绿色为保持架理论频率与电机转速之间的拟合曲线,其中 $R^2=1$; 灰色为光电转速传感器 SZCB-05 测得保持架转速与电机转速的拟合曲线,其中 $R^2=0.99992$; 红色为开路电压信号对滚子公转转速频率与电机转速的拟合曲线,其中 $R^2=0.99984$; 蓝色为短路电流信号对滚子公转转速频率与电机转速的拟合曲线,

其中 $R^2=0.99997$ ；可以看出无论是监测保持架转速的 SZCB-05 还是监测滚子公转转速的电信号其频率值都与电机转速有着良好的线性关系，所以所提出的装置电信号对滚子公转转速与电机转速都有着良好的监测作用。短路电流信号的拟合率甚至高于传统的光电转速传感器，说明了所提出的装置在轴承转速监测方面的优异性能。

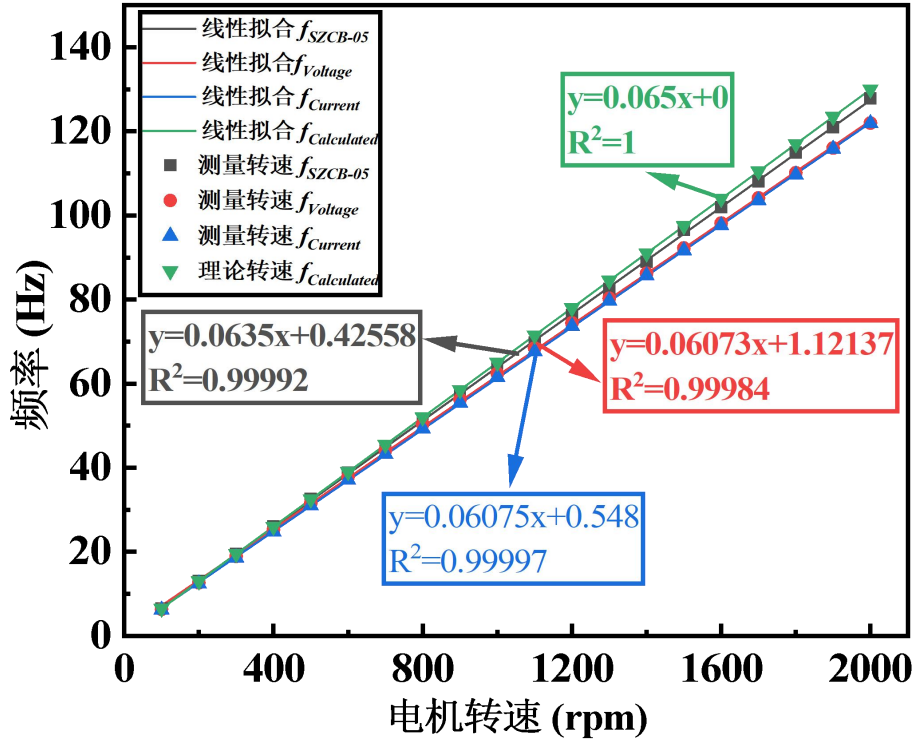


图 4-21 理论与实验频率随转速变化线性拟合图

4.5 多层球轴承摩擦纳米发电机打滑监测

4.5.1 打滑监测

基于深沟球轴承摩擦纳米发电机中电信号基频值、光电转速传感器测量值与理论计算值之间的偏差可以看出，该装置可以监测自身打滑工况。如图 4-22 所示，为该装置开路电压与短路电流信号测得的转速值、光电转速传感器 SZCB-05 测得保持架转速值与理论保持架转速值之间的差值率 s 。计算公式如(4-6)所示：

$$S = \frac{\omega - \omega'}{\omega} * 100\% \quad (4-6)$$

$$V = \omega - \omega' \quad (4-7)$$

式中， ω 为理论计算的转速值， ω' 为实验测量转速值；如图 4-23 所示为该装置开路电压与短路电流信号测得的转速值、光电转速传感器 SZCB-05 测得保持架转速值与理论保持架转速值之间的差值 V ，计算公式如(4-7)所示。可以从图中观察到三者打滑率测量值均随电机转速增加而先增加再趋于稳定值；而三者打滑值

的测量值随电机转速的增加而增加。可以证明当工作转速增加时,该装置的打滑程度也在增加。同时可以观察到,短路电流与开路电压信号所测得的转速打滑率和打滑值较为相近,均高于 SZCB-05,这可能是由于光电转速传感器所使用反光条较宽,测量误差导致的。综上,可以验证基于理论计算的保持架转速,所提出的深沟球摩擦纳米发电机所输出的电信号在打滑程度监测方面有着优异的性能,可以实时监测装置在各种转速下的打滑值与打滑率。

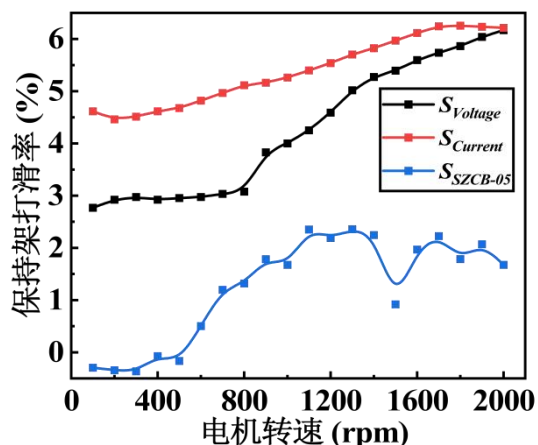


图 4-22 电信号与传感器测试打滑率对比图

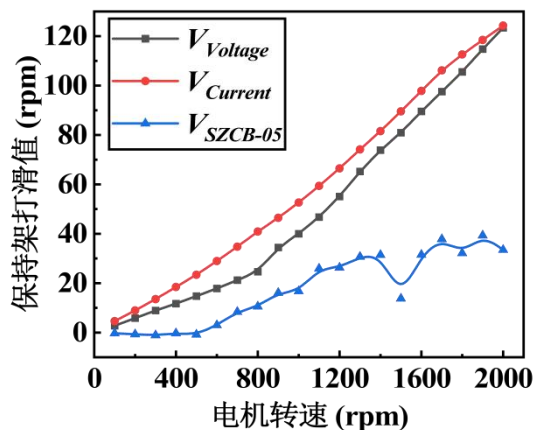


图 4-23 电信号与传感器测试打滑值对比图

4.5.2 打滑监测性能对比

基于上述深沟球轴承摩擦纳米发电机转速监测性能研究可知,该装置电信号有着良好的滚子公转转速与电机转速监测性能。相对比传统工业光电转速传感器 SZCB-05 外部监测保持架方式,其集成设计在轴承内部,更加节省安装空间,有着更广泛的应用前景。如图 4-24 所示,为该装置监测滚子公转转速与 SZCB-05 监测保持架转速的差值率,可以看出差值率随转速变化基本小于 5.5%。如图 4-25 所示,为该装置监测滚子公转转速与 SZCB-05 监测保持架转速的差值,由图可知差值随转速增加而增加,这是由于铜电极在外圈外侧的布置有一定的宽度,从而降低了该装置的检测精度。但总体上开路电压的转速监测性能优于短路电流信号。

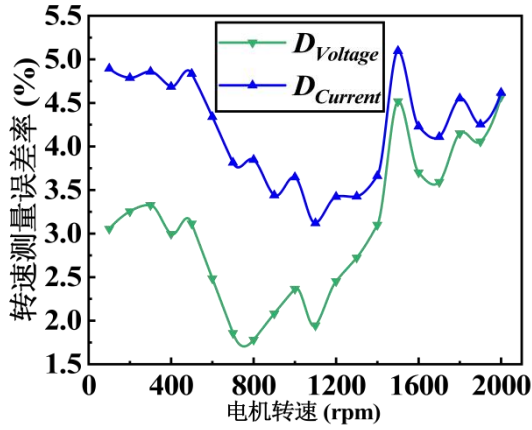


图 4-24 电信号与传感器测试的差值率

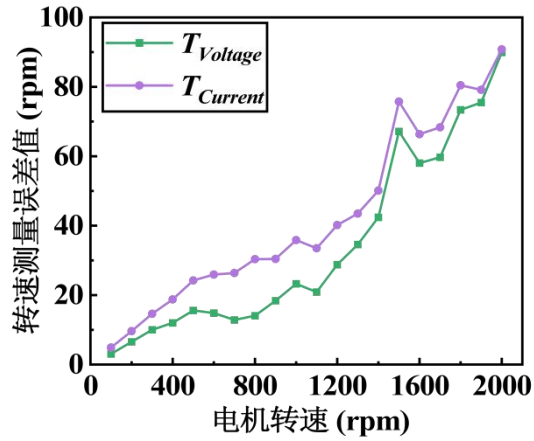


图 4-25 电信号与传感器测试的差值

本章小结

本章基于球轴承摩擦纳米发电机耐久特性分析,提出一种多层结构摩擦纳米发电机理论模型,使用适合于工业轴承结构的滑动式独立层模式,用以解决电极磨损问题。同时所提出的多层结构可以使轴承多部件参与静电平衡的形成与打破,铜内圈的加入使 PTFE 滚动体表面电荷得以补充,大大提高了开路电压输出。而铜电极安装在轴承外圈外侧,避免了与滚子的直接接触,同时省去了纳米金颗粒,大大降低了制造成本。使用的尺寸参数为深沟球轴承 6205,更加符合工业要求,并利用 COMSOL 静电场仿真验证了其发电机理。搭建了转子性能检测试验台并集成了光电转速传感器 SZCB-05。针对所提出的深沟球摩擦纳米发电机首先对其电输出供能特性进行了验证,实验得出当电机转速为 500 rpm 时外部负载为 $1 \times 10^7 \Omega$,输出达到该转速下最大功率 $21.1 \mu\text{W}$ 。针对铜内圈上短路电流的变化趋势,实验验证了该装置发电机理的正确性。随后对电输出信号进行时频域特性分析,验证了电信号对滚子公转与电机转速实时监测能力。利用 MATLAB 程序建立了电信号实时变速时频域分析监测模块。最后基于深沟球轴承打滑计算理论模型,验证了开路电压、短路电流与光电转速传感器对轴承打滑状态的监测能力;通过对比电信号与工业光电转速传感器的测量差值,三者的差值率基本小于 5.5%,总体上开路电压的转速监测性能优于短路电流信号。所提出的深沟球摩擦纳米发电机通过内部集成设计,解决了外部安装传感器的空间占用问题,同时短路电流信号对滚子公转转速频率与电机转速的拟合率为 $R^2=0.99997$,但电极的尺寸宽度及数量影响了该装置的检测精度,后续还需要进一步设计优化。

第 5 章 总结与展望

5.1 全文总结

本文通过开展球轴承结构摩擦纳米发电机发电特性研究,首先建立球轴承摩擦纳米发电机数学模型,在进行 COMSOL 静电场仿真验证模型中的参数对发电特性的影响,再根据仿真结果进行尺寸优化与实物设计制造,再搭建转子性能测试试验台,进行实验验证,最后基于实验理论将设计应用于工业需求。为工业转速监测需求提供了一种新型的集成手段,为摩擦纳米发电技术与传统工业结构结合提供了一种新的研究方法。论文研究的主要工作与结论如下:

(1)在球轴承摩擦纳米发电机发电数学模型建立方面:基于摩擦纳米发电机中滑动式独立层模式与滚动轴承的工作原理,集成设计出一种滚子与电极直接接触式的球轴承摩擦纳米发电机,根据电势与电场理论模式,建立了滚子与电极中电荷迁移模型。并且将滚动轴承的结构参数融入模型,形成新的发电特性研究模型。通过 COMSOL 静电场仿真对所提出模型的结构尺寸参数进行电势与电荷密度的影响进行探究分析。得出在此发电特性模型中,滚动体直径越大,最大电势差与电荷密度差越大;滚动体与铜电极之间的间隙距离越大,最大电势差与电荷密度差越小;保持某一间隙距离的球数越多,最大电势差与电荷密度差越小;而铜电极所占空间圆心角越大,其最大电势差越小,最大电荷密度差越大,但是电荷密度基本不受其影响。以上仿真实理论分析为球轴承摩擦纳米发电机的仿真、实验、应用提供了理论基础,其中球直径、间隙距离、保持一定间隙距离的球数与实际轴承的运行、故障自感知有着密切的联系。为后续球轴承摩擦纳米发电机的发电性能系统性研究提供参考,同时也对摩擦纳米发电机与传统工业设备的结合提供了参考模型与理论基础,揭示了机械结构参数对电荷转移特性的影响机制。

(2)在球轴承摩擦纳米发电机发电特性与耐久性分析方面:基于仿真分析结果,制造了球轴承与多层球轴承摩擦纳米发电机实物模型,搭建了转子特性分析试验台,集成了温湿度测量系统,用以分析两类轴承摩擦纳米发电机在电输出性能与耐久性能。实验结果表明,设计的球轴承与多层球轴承摩擦纳米发电机具有良好的电输出能力。在室温为 303.55 K 湿度为 73.7 %。当球轴承摩擦纳米发电机以 500 rpm 转速运行时,可以产生 11.45 V 的交流电压信号和 2.24 μA 的稳定

交流电流信号。而深沟球轴承在 500 rpm 转速下可以产生 47.61 V 的交流电压信号均方根值与 0.368 μA 的交流电流均方根值。验证了滚动体表面电荷密度可以提高开路电压值，而滚动体与电极数可以提高短路电流值。并且多层球摩擦纳米发电机在电机转速为 500 rpm 时外部负载为 $1 \times 10^7 \Omega$ ，输出达到该转速下最大功率 21.1 μW 。随后对球轴承摩擦纳米发电机进行耐久寿命分析，得出在电机转速为 500 rpm 下分别在环境温度为 293.15 K 和 273.15 K 下长达 10000 s 的摩擦发电工作后，球轴承摩擦纳米发电机产生的电流依旧保持稳定。并针对铜电极表面的磨损引入非极性润滑脂，发现非极性润滑脂并不会影响电信号的输出，但可以降低滚子与电极之间的摩擦磨损。而多层结构的球轴承摩擦纳米发电机将电极集成在外圈外侧，其解决了滚子与电极之间的摩擦磨损，发电耐久性进一步提升。

(3)在球轴承摩擦纳米发电机故障自感知与打滑状态监测分析方面：基于耐久性分析，制造了滚动体不同程度磨损故障与内外圈滚道剥落故障。搭建了转子故障特性分析试验台，并集成了光电转速传感器。实验结果表明，当球轴承摩擦纳米发电装置中的滚动体发生磨损故障时，会大幅度降低短路电流的大小和稳定性，同时缺失电信号周期。并且随着磨损程度加大，短路电流的降低幅度也会加大。当转子外圈发生剥落故障时，会降低短路电流的电信号大小。而定子内圈的剥落故障会由于柔性梳齿电极的存在，无法在短路电流电信号的大小和周期中体现出差别，侧面反映柔性梳齿电极对定子内圈有着一定的保护作用。当发生耦合故障时会放大单一故障对电流输出的影响，当转子发生剥落故障时，滚动体磨损对球轴承摩擦纳米发电机电输出影响更大。为轴承磨损的径向间隙距离预警提供一种有效的监测方案。而对多层球轴承摩擦纳米发电机电信号进行时频域分析，验证了其电信号对滚子公转与电机转速的实时监测能力。并且短路电流信号对滚子公转转速频率与电机转速的拟合率为 $R^2=0.99997$ 。利用 MATLAB 程序建立了电信号实时变速时频域分析监测模块。最后基于多层球轴承打滑计算理论模型，验证了开路电压、短路电流与光电转速传感器对轴承对打滑状态监测的优异性能；通过对比电信号与工业光电转速传感器的测量差值，三者的差值率基本小于 5.5%，总体上开路电压的转速监测性能优于短路电流信号。

5.2 本文创新点

本文通过理论仿真与实验验证的方式对球轴承摩擦纳米发电机发电特性进

行分析，主要创新点如下：

(1)建立了球轴承摩擦纳米发电机 COMSOL 仿真分析理论模型，探究结构参数对发电特性的影响，利用模型分析结果指导装置设计制造，最后进行实验验证所提出发电特性理论的可行性。

(2)利用多层材料结构建立滑动式独立层摩擦纳米发电模型，解决了滚动体与电极直接摩擦的问题，并且提高了开路电压，为轴承转速与打滑状态提供了一种新型的监测手段。

5.3 展望

本文针对工业轴承的检测传感器供能与安装问题，引入摩擦纳米发电机发电机理，进行滚动轴承摩擦纳米发电机理论模型建立、仿真分析与实验验证。证明了该装置具有可观的电能输出，一定程度的故障自感知能力，良好的转速与打滑状态监测能力，并且优于传统光电传感器的空间利用率以及耐久性。为机械设备与摩擦纳米发电技术相结合提供了一种可靠理论模型与可行的实验方法。为进一步拓展该装置的实用性，仍有以下方面值得深入研究：

(1)摩擦纳米发电机的制造材料具有多样性，并且结构具有灵活性，后续应开展不同正负摩擦材料相组合以及尝试更多提升电输出的方法如电荷补充、表面微处理等，用以提升电信号强度。

(2)球轴承故障种类分类与程度识别一直是转子动力学研究的热点，目前多利用外接传感器以及信号处理的手段进行分析。后续应开展利用摩擦电信号进行更多故障种类以及更小故障程度的分析。

(3)所提出的多层球轴承摩擦纳米发电机电信号对转速检测精度受到电极宽度的影响，后续应设计相应实验进行验证，提高该装置的监测精度。

参考文献

- [1] Cui Y ,Deng S ,Niu R , et al.Vibration effect analysis of roller dynamic unbalance on the cage of high-speed cylindrical roller bearing[J].Journal of Sound and Vibration, 2018,434314-335.
- [2] Zhuyun C ,Weihua L .Multisensor Feature Fusion for Bearing Fault Diagnosis Using Sparse Autoencoder and Deep Belief Network[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2017,66(7):1693-1702.
- [3] Huajin L ,Jiahao D ,Shuang Y , et al.Monitoring and Identifying Wind Turbine Generator Bearing Faults Using Deep Belief Network and EWMA Control Charts[J].Frontiers in Energy Research,2021,9
- [4] Dai P ,Liang X ,Wang J , et al.The acoustic-vibration characteristics of cylindrical roller bearings with raceway failures: Simulation and experiment[J].Measurement, 2024,234114918-.
- [5] Immovilli ,F.,Bellini , et al.Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(4):1350-1350.
- [6] Vamsi I ,Sabareesh G ,Penumakala P .Comparison of condition monitoring techniques in assessing fault severity for a wind turbine gearbox under non-stationary loading[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2019,1241-20.
- [7] Yan X ,Jia M .A novel optimized SVM classification algorithm with multi-domain feature and its application to fault diagnosis of rolling bearing[J].Neurocomputing, 2018,31347-64.
- [8] Zhang W ,Peng G ,Li C , et al.A New Deep Learning Model for Fault Diagnosis with Good Anti-Noise and Domain Adaptation Ability on Raw Vibration Signals[J].Sensors, 2017,17(2):425-425.
- [9] Gu X ,Yang S ,Liu Y , et al.Rolling element bearing faults diagnosis based on kurtogram and frequency domain correlated kurtosis[J].Measurement Science and

- Technology, 2016,27(12):125019-125019.
- [10] Singleton K R ,Strangas G E ,Aviyente S .Extended Kalman Filtering for Remaining-Useful-Life Estimation of Bearings.[J].IEEE Trans. Industrial Electronics, 2015,62(3):1781-1790.
- [11] Yan X ,Jia M .A novel optimized SVM classification algorithm with multi-domain feature and its application to fault diagnosis of rolling bearing[J].Neurocomputing, 2018,31347-64.
- [12] Liuyang S ,Huaqing W ,Peng C .Vibration-Based Intelligent Fault Diagnosis for Roller Bearings in Low-Speed Rotating Machinery[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2018,67(8):1887-1899.
- [13] Jianhong W ,Liyan Q ,Yongqiang Y , et al.Fractional envelope analysis for rolling element bearing weak fault feature extraction[J].IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2017,4(2):353-360.
- [14] Engineering - Mechanical Engineering; Studies from Indian Institute for Technology Add New Findings in the Area of Mechanical Engineering (Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: A case study)[J].Energy & Ecology,2020,
- [15] Guangxi Y ,Jiang C ,Yu B , et al.A Survey on Fault Diagnosis Approaches for Rolling Bearings of Railway Vehicles[J].Processes,2022,10(4):724-724.
- [16] 王建鑫.基于红外热成像和机器学习的轴箱轴承故障诊断方法研究[D].兰州交通大学,2024.DOI:10.27205/d.cnki.glttc.2024.000287.
- [17] 魏鹏,王泽林,尹渝,等.基于光纤传感的装甲车滚动轴承故障诊断技术[J].兵器装备工程学报,2023,44(01):175-182.
- [18] Fei C ,Choy Y ,Bai G , et al.Multi-feature entropy distance approach with vibration and acoustic emission signals for process feature recognition of rolling element bearing faults[J].Structural Health Monitoring,2018,17(2):156-168.
- [19] Kundu P .Review of rotating machinery elements condition monitoring using acoustic emission signal[J].Expert Systems With Applications, 2024,252(PB):124169-.
- [20] Zhu X ,Zhong C ,Zhe J .Lubricating oil conditioning sensors for online machine

- health monitoring – A review[J].Tribology International,2017,109473-484.
- [21]Yan R ,Gao X R .Complexity as a measure for machine health evaluation.[J].IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2004,53(4):1327-1334.
- [22]Wen Z ,Yin X ,Jiang Z .Applications of Electrostatic Sensor for Wear Debris Detecting in the Lubricating Oil[J].Journal of The Institution of Engineers (India), Series C. Mechanical, production, aerospace and marine engineering, 2013,94(3):281-286.
- [23]Wen Z ,Yin X ,Jiang Z .Applications of Electrostatic Sensor for Wear Debris Detecting in the Lubricating Oil[J].Journal of The Institution of Engineers (India), Series C. Mechanical, production, aerospace and marine engineering,2013,94(3):281-286.
- [24]F. M Y ,Sebastien C ,Anas S , et al.Variable speed induction motors' fault detection based on transient motor current signatures analysis: A review[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2023,184
- [25]Fan F ,Tian Z ,Wang L Z .Flexible triboelectric generator[J].Nano Energy, 2012,1(2):328-334.
- [26]Minchang K ,Yoonsang R ,Sumin C , et al.Geometric gradient assisted control of the triboelectric effect in a smart brake system for self-powered mechanical abrasion monitoring[J].Nano Energy,2021,89(PB):
- [27]Jie X ,Yu W ,Hengyu L , et al.A triangular electrode triboelectric nanogenerator for monitoring the speed and direction of downhole motors[J].Nano Energy,2023,113
- [28]Mingxiang Z ,Zaihua D ,Boyu Z , et al.Electrochemical humidity sensor enabled self-powered wireless humidity detection system[J].Nano Energy,2023,115
- [29]Chuan W ,Qing Z ,Guojun W .Research on self-powered rotation speed sensor for drill pipe based on triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator[J].Sensors and Actuators: A. Physical,2021,326
- [30]Xiaosong Z ,Hengyu L ,Qi G , et al.Self-powered triboelectric mechanical motion sensor for simultaneous monitoring of linear-rotary multi-motion[J].Nano Energy,

2023,108

- [31]Jin Y ,Yanshuo S ,Jianjun Z , et al.3D-printed bearing structural triboelectric nanogenerator for intelligent vehicle monitoring[J].Cell Reports Physical Science, 2021,2(12):
- [32]Yili H ,Ying H ,Jianping L , et al.Self-powered siphon rain gauge based on triboelectric nanogenerators[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2023,201
- [33]Jia Y ,Kai D ,Shen S , et al.Fully Fabric-Based Triboelectric Nanogenerators as Self-Powered Human–Machine Interactive Keyboards[J].Nano-Micro Letters, 2021,13(1):103-103.
- [34]Gogurla N ,Roy B ,Park J , et al.Skin-contact actuated single-electrode protein triboelectric nanogenerator and strain sensor for biomechanical energy harvesting and motion sensing[J].Nano Energy,2019,62674-681.
- [35]Yu P ,Zheshan W ,Yunfei S , et al.A Review of Recent Development of Wearable Triboelectric Nanogenerators Aiming at Human Clothing for Energy Conversion[J].Polymers,2023,15(3):508-508.
- [36]Wu Y ,Luo Y ,Qu J , et al.Liquid single-electrode triboelectric nanogenerator based on graphene oxide dispersion for wearable electronics[J].Nano Energy, 2019,64(C):103948-103948.
- [37]Yin M ,Yu Y ,Wang Y , et al.Multi-plate structured triboelectric nanogenerator based on cycloidal displacement for harvesting hydroenergy[J].Extreme Mechanics Letters, 2019,33(C):100576-100576.
- [38]Da Z ,Hengyu L ,Yang Y , et al.A current-enhanced triboelectric nanogenerator with crossed rollers for harvesting wave energy[J].Nano Energy,2023,117
- [39]Hyunjun J ,Brianna F ,Wonseop H , et al.Self-powered arctic satellite communication system by harvesting wave energy using a triboelectric nanogenerator[J].Nano Energy, 2023,114
- [40]Mingkang Z ,Jiacheng Z ,Zhaohui W , et al.Double-blade structured triboelectric–electromagnetic hybrid generator with aerodynamic enhancement for breeze energy harvesting[J].Applied Energy,2022,326

- [41]Gui-Zhong L ,Ya-Wei C ,Gui-Gen W , et al.Performance enhancement of transparent and flexible triboelectric nanogenerator based on one-dimensionally hybridized copper/polydimethylsiloxane film[J].Nano Energy,2022,99
- [42]Wang X ,Wang Y ,Nie S , et al.Recent Advance of Triboelectric Nanogenerator-Based Electrical Stimulation in Healthcare[J].Electronics, 2023,12(21):
- [43]Ye L ,Longlong J ,Yang Y , et al.Liquid-liquid triboelectric nanogenerator based on the immiscible interface of an aqueous two-phase system[J].Nature Communications, 2022,13(1):5316-5316.
- [44]Zhang H ,Wen N ,Gong X , et al.Application of triboelectric nanogenerator (TENG) in cancer prevention and adjuvant therapy.[J].Colloids and surfaces. B, Biointerfaces, 2024,242114078.
- [45]王中林,蒋涛,许亮,等.纳米发电机应用:海洋蓝色能源[J].中国科学:技术科学, 2023,53(06):989-1001.
- [46]Gao L ,Xu X ,Han H , et al.A broadband hybrid blue energy nanogenerator for smart ocean IoT network[J].Nano Energy,2024,127109697-.
- [47]Yawei F ,Jiajia H ,Mengjiao X , et al.Blue Energy for Green Hydrogen Fuel: A Self-Powered Electrochemical Conversion System Driven by Triboelectric Nanogenerators[J].Advanced Energy Materials,2021,12(1):
- [48]Li Y ,Luo Y ,Deng H , et al.Advanced Dielectric Materials for Triboelectric Nanogenerators: Principles, Methods and Applications.[J].Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.),2024,36(52):e2314380-e2314380.
- [49]Mohammadmahdi D ,Yoon C A ,Eun D K .A Review on Triboelectric Nanogenerators, Recent Applications, and Challenges[J].International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2023,11(4):1317-1340.
- [50]X. Cao, Y. Xiong, J. Sun, X. Xie, Q. Sun, Z. Wang, Multidiscipline applications of triboelectric nanogenerators for the intelligent era of internet of things, NanoMicro Lett. 15 (2022) 14.
- [51]Shi L ,Dong S ,Ding P , et al.Carbon electrodes enable flat surface PDMS and

- PA6 triboelectric nanogenerators to achieve significantly enhanced triboelectric performance[J].Nano Energy,2019,55548-557.
- [52] Weixu Y ,Jieyang W ,Xiaoli W , et al.Anisotropic tribology and electrification properties of sliding-mode triboelectric nanogenerator with groove textures[J].Friction, 2024,12(8):1828-1837.
- [53] A. S D ,F. K ,M. K .A high-performance single-electrode triboelectric nanogenerator based on polydimethylsiloxane surface modified using zinc oxide nanotubes: Fabrication and simulation[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023,56
- [54] Shiquan L ,Y N L C ,Zhen T , et al.Size-dependent charge transfer between water microdroplets.[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2023,120(31):e2307977120-e2307977120.
- [55] Liu J ,Zhang L ,Wang N , et al.Highly stretchable and transparent triboelectric nanogenerator based on multilayer structured stable electrode for self-powered wearable sensor[J].Nano Energy,2020,78105385-.
- [56] He W ,Sohn M ,Ma R , et al.Flexible single-electrode triboelectric nanogenerators with MXene/PDMS composite film for biomechanical motion sensors[J].Nano Energy,2020,78105383-.
- [57] Shilong M ,Shoujie L ,Hongfa Z , et al.A platypus-inspired electro-mechanosensory finger for remote control and tactile sensing[J].Nano Energy,2023,116
- [58] Siyuan W ,Peng X ,Xinyu W , et al.Underwater bionic whisker sensor based on triboelectric nanogenerator for passive vortex perception[J].Nano Energy,2022,97
- [59] Zhihao Z ,Linglin Z ,Shaixin L , et al.Selection rules of triboelectric materials for direct-current triboelectric nanogenerator.[J].Nature communications, 2021,12(1):4686-4686.
- [60] Guang Z ,Zong-Hong L ,Qingshen J , et al.Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator.[J].Nano letters, 2013,13(2):847-53.
- [61] Gui-Zhong L ,Ya-Wei C ,Gui-Gen W , et al.Performance enhancement of

- transparent and flexible triboelectric nanogenerator based on one-dimensionally hybridized copper/polydimethylsiloxane film[J].Nano Energy,2022,99
- [62]He W ,Liu W ,Chen J , et al.Boosting output performance of sliding mode triboelectric nanogenerator by charge space-accumulation effect.[J].Nature communications,2020,11(1):4277-4277.
- [63]Liu J ,Zhang L ,Wang N , et al.Highly stretchable and transparent triboelectric nanogenerator based on multilayer structured stable electrode for self-powered wearable sensor[J].Nano Energy,2020,78105385-.
- [64]Qi W ,Zhenhua W ,Jianyu H , et al.Integration of sensing and shape-deforming capabilities for a bioinspired soft robot[J].Composites Part B,2021,223
- [65]Myunghwan S ,Jihoon C ,Hoon S C , et al.Semisolid-lubricant-based ball-bearing triboelectric nanogenerator for current amplification, enhanced mechanical lifespan, and thermal stabilization[J].Nano Energy,2021,(prepublish):106816-.
- [66]Zhijie X ,Yu W ,Mingyu Y , et al.Triboelectric sensor for planetary gear fault diagnosis using data enhancement and CNN[J].Nano Energy,2022,103(PA):
- [67]Ruan S ,Gao S ,Feng J , et al.Intelligent triboelectric V-belts with condition monitoring capability[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2024,209111132-.
- [68]Gao S ,Zhang R ,Wu F , et al.Rotating single-electrode triboelectric V-belts with skidding and wear monitoring capabilities[J].Tribology International, 2024,193109404-.
- [69]Tao J ,Zhongda S ,Long L , et al.Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications.[J].Nature communications, 2020,11(1):5381-5381.
- [70]Xie M ,Zhu M ,Yang Z , et al.Flexible self-powered multifunctional sensor for stiffness-tunable soft robotic gripper by multimaterial 3D printing[J].Nano Energy, 2021,79(prepublish):
- [71]Zhihao L ,Xiaoli W ,Tie F , et al.Research on nano-film composite lubricated triboelectric speed sensor for bearing skidding monitoring[J].Nano Energy, 2023,113

- [72]Gao S ,Ma T ,Zhou N , et al.Extremely compact and lightweight triboelectric nanogenerator for spacecraft flywheel system health monitoring[J].Nano Energy, 2024,122109330-.
- [73]Shuai G ,Qinkai H ,Ziyuan J , et al.Triboelectric based high-precision self-powering cage skidding sensor and application on main bearing of jet engine[J].Nano Energy,2022,99
- [74]Xie Z ,Dong J ,Li Y , et al.Triboelectric rotational speed sensor integrated into a bearing: A solid step to industrial application[J].Extreme Mechanics Letters, 2020,34100595-100595.
- [75]Meng S X ,Li Y H ,Zhu G , et al.Fully enclosed bearing-structured self-powered rotation sensor based on electrification at rolling interfaces for multi-tasking motion measurement[J].Nano Energy,2015,12606-611.
- [76]Hur J ,Song M ,Yong H , et al.Human-driven triboelectric nanogenerator via simultaneous harvesting of body-coupled energy[J].Nano Energy, 2025,135110645-110645.
- [77]朱梅贤.摩擦纳米发电机嵌入式轴承滚珠故障诊断技术研究[D].大连海事大学,2024.
- [78]D. Choi, T. Sung, J. Kwon, A self-powered smart roller-bearing based on a triboelectric nanogenerator for measurement of rotation movement, Adv. Mater. Technol. 3 (2018), 1800219.
- [79]Yida X ,Taili D ,Ting L , et al.Triboelectric nanogenerator embedded cylindrical roller bearing for rotational energy harvesting and self-powered fault diagnosis[J].Sensors and Actuators: A. Physical,2023,362
- [80]Yan J ,Tang Z ,Zhang C , et al.Study of wind energy harvesting based on rolling bearing type triboelectric nanogenerator[J].Energy Reports,2024,123690-3699.
- [81]] M. Song, J. Hur, D. Heo, S.H. Chung, D. Kim, S. Kim, D. Kim, Z.H. Lin, J. Chung, S. Lee, Current amplification through deformable arch-shaped film based directcurrent triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy, Appl. Energ. 344 (2023),
- [82]Han Q ,Ding Z ,Qin Z , et al.A triboelectric rolling ball bearing with

- p>self-powering and self-sensing capabilities[J].Nano Energy, 2020,67(C):104277-104277.
- [83]Zhijie X ,Yu W ,Rensuan W , et al.A high-speed and long-life triboelectric sensor with charge supplement for monitoring the speed and skidding of rolling bearing[J].Nano Energy,2022,92.
- [84]Ziyuan J ,Shuai G ,Yun K , et al.Ultra-compact triboelectric bearing based on a ribbon cage with applications for fault diagnosis of rotating machinery[J].Nano Energy,2022,99
- [85]Shuai G ,Qinkai H ,Xuening Z , et al.Ultra-high-speed hybrid ceramic triboelectric bearing with real-time dynamic instability monitoring[J].Nano Energy,2022,103(PA):
- [86]Mang G ,Yahui L ,Junho C .Triboelectric pad journal bearing for self-powered condition monitoring[J].Nano Energy,2022,103(PB):
- [87]Qinkai H ,Ziyuan J ,Xueping X , et al.Self-powered fault diagnosis of rolling bearings based on triboelectric effect[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2022,166
- [88]Songtao H ,Tianyu H ,Youchao Q , et al.Misalignment fault identification of a multi-span rotor system enabled by triboelectric nanogenerators[J].Nano Energy, 2023,109
- [89]Song M, Chung J, Chung S-H, Cha K, Heo D, Kim S, et al. Semisolid-lubricant-based balls-bearing triboelectric nanogenerator for current amplification, enhanced mechanical lifespan, and thermal stabilization. Nano Energy 2022;93:106816.
- [90]王中林, 林龙, 陈俊, 等. 摩擦纳米发电机 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.

攻读硕士学位期间发表学术论文及专利

1. 发表学术论文

- [1] **Long W** ,Fengtao W ,Linkai N , et al.Study on generation characteristics of a triboelectric ball bearing with defects[J].Industrial Lubrication and Tribology, 2025,77(3):341-348.
- [2] 王龙.球轴承结构摩擦纳米发电机发电性能研究[J].淮阴工学院学报.
- [3] **Long W** ,Fengtao W ,Linkai N , et al.A multi-layer triboelectric material deep groove ball bearing triboelectric nanogenerator: speed and skidding monitoring[J].(SCI 在投)

2. 发明专利

- 1) 《一种滚动轴承结构的摩擦纳米发电装置》（第二发明人，导师第一发明人）；
- 2) 《双模式电输出非接触式滚动轴承摩擦纳米发电机》（第二发明人，导师第一发明人）；
- 3) 《一种基于皮带输送机理的摩擦纳米发电装置》（第二发明人，导师第一发明人）；
- 4) 《一种高层建筑污水势能回收装置》（第二发明人，导师第一发明人）。

致谢

光阴荏苒，岁月如梭，三年的研究生生活即将落下帷幕，回首这段求学之路，心中充满感激与感慨。这篇论文的完成，离不开许多人的支持和帮助，在此，我谨向所有给予我关心和帮助的人表示最诚挚的谢意。

首先，衷心感谢我的导师王风涛副教授，他不仅在学术上给予我悉心指导，在论文的选题、研究方法和写作过程中提供了宝贵的建议，更在生活中给予我无微不至的关怀和鼓励。他的渊博学识、严谨治学的态度和宽广的胸怀，使我受益匪浅。

同时，感谢机械与汽车工程学院的各位老师在我求学期间的谆谆教诲。你们的精心培养使我在学术研究的道路上不断进步，也让我更加坚定自己的学术理想。

此外，我要感谢我的同学和朋友们，正是你们在我迷茫和困惑时给予的鼓励和支持，让我能够坚定前行。感谢师兄在科研道路上的指引与教导，感谢师弟在实验中的帮助，特别感谢我的同门熊元昊与汪晶晶，在学术探讨、论文修改以及日常生活中给予了我极大的帮助。

最后，衷心感谢我的家人，感谢父母的理解、支持和无私的爱，是你们的鼓励让我始终保持前行的动力。

本论文的完成离不开上述所有人的帮助，谨以此致谢，向所有支持和关心我的人表达最深的敬意！

尚德敏学 唯实惟新

