

基于电信号的滚动轴承润滑监测实验台设计*

温 博¹, 王福荣², 马帅军¹, 刘 茁¹, 闫 柯^{1,3}, 洪 军¹

(1. 西安交通大学现代设计及转子系统教育部重点实验室 西安, 710049)

(2. 洛阳轴承研究所有限公司 洛阳, 471000)

(3. 西安交通大学前沿科学技术交叉研究中心 西安, 710049)

摘要 针对复杂运行工况下滚动轴承承载界面润滑状态实时监测的难题,基于接触界面电学响应特性和油膜评价理论,提出了通过施加微弱电场并监测电信号动态变化,间接表征微凸体接触面积的无损评价方法。首先,在轴承内外圈间施加稳定电场;其次,通过连续监测滚动体-滚道间电信号的变化,间接表征承载区微凸体接触面积及油膜厚度的演变规律;然后,设计并搭建了具备多参量同步采集功能的轴承润滑状态监测实验台,将轴承动态加载与信号监测相结合,分别完成了可视化监测界面、轴承实验台和传感器高精度转换电路模块的集成设计;最后,通过使用修正公式将接触区电流信号转化为关键润滑参数,实现了润滑状态的量化表征。结果表明:该电信号监测方法所得结果与现有润滑状态理论评价模型高度吻合,定量验证了该方法的可行性与准确性。

关键词 接触区;润滑状态;电信号;监控系统

中图分类号 TH117

0 引 言

轴承是高端装备回转支撑的核心单元部件,其组件摩擦副在运行过程中产生的磨损与热量积聚问题,是危及设备可靠性和使用寿命的重要因素^[1]。为了更好地解决摩擦造成的轴承失效问题,实时监测获取轴承运行过程中的润滑状态尤为重要。传统的润滑监测方法,如油液成分分析、振动信号监测和红外测量^[2]等,虽能在一定程度上反映设备运行状况,但存在检测周期长、实时性差、难以实现早期预警等局限性。为了突破这些技术瓶颈,基于电信号的润滑状态监测技术凭借其响应迅速、检测灵敏以及可实现非侵入式在线监测等优势,成为学术界与工业界的研究热点^[3-4]。

Nippes^[5]发现旋转机械单元早期发生故障时,轴电压和接地电流曲线会发生明显变化,其将电流监测的方法引入旋转部件状态检测,发现电流变化与旋转部件润滑状态有关。Martin等^[6]通过对轴承接触区的时域和频域进行分析,获取接触区电阻抗的变化情况,并以此判断轴承损伤情况,提出了一种基于测量滚动轴承电阻抗的状态监测方法。Tim-sit^[7]探索了电流信号与组件失效之间的关系,从润

滑的角度研究了油膜厚度对导电薄层扩散电阻及收缩电阻的影响,将电流变化与润滑油膜厚度直接关联,为润滑状态监测提供了理论支撑。为了验证实验设计的可行性,Wang等^[8]通过多物理场耦合模型模拟了电场作用下轴承油膜的击穿过程,并通过静态结构仿真确定了油膜最小厚度,由此建立了轴承接触区油膜击穿模型,通过理论计算与仿真分析相结合的方式,将电场参数应用于轴承润滑监测中,提出了基于电场参数的润滑失效边界判断方法。Morris等^[9]利用油膜击穿所需的最大电场强度,对弹性流体动力学的最小膜厚度和电位差进行充分预测,结果发现导致油膜击穿所需要的电场强度取决于弹性流体动力学参数,且接触区润滑状态与电流密度大小密切相关。在上述仿真基础上,Dai等^[10]将生热效应考虑在内,开发了一个考虑摩擦和焦耳热的滑动电接触奇异积分方程,所提出的理论模型准确预测了多物理场电接触行为。Li等^[11-14]通过一系列仿真研究,明确了电场与润滑之间存在的强耦合关系,这些仿真成果所提出的润滑监测原理为实验台的搭建提供了重要指导。

虽然上述研究表明电场参数与润滑油膜之间存在较强耦合关系,但由于微观接触区面积较小且润

* 国家自然科学基金资助项目(52175250);西安交通大学基本科研业务费自由探索与创新资助项目(xzy012025002)

收稿日期:2025-07-29;修回日期:2025-09-02

滑油流动复杂,因此难以通过观测技术直接获取油膜厚度的变化情况。文献[15-17]从较简单的球盘实验出发,获取了部分电场参数与润滑状态之间较好的耦合关系,将电场与润滑监测的耦合研究从仿真层面落实到了具体的实验中。Liang等^[18]采用光学相对干涉法测量了滚动轴承中心油膜厚度,发现球-外圈接触的油膜厚度与传统球盘模型存在显著差异,这表明在接触工况更为复杂的滚动轴承上进行实验,对于研究电流与润滑油膜之间的耦合关系意义重大。由于滚动轴承接触区油膜与球盘接触区油膜存在显著差异,因此有必要搭建出一套基于电信号的滚动轴承接触区润滑状态监测实验台。

笔者结合现有球盘实验台存在的可测参数有限、工况单一以及缺乏对应程序实时监测实验台运转参数等局限,研发了一种基于电场的轴承润滑状态监测实验台,并自主开发了配套操作系统。该实验台通过对滚动轴承接触区施加电压信号,将润滑状态的变化通过可监测的电流参数指标实时展示出来,从而实现对接触区润滑状态的监测。此外,通过设计集操作便捷性与安全性于一体的监控系统及用户界面,为研究人员开展基础参数监测提供了高效工具。结果表明,实验台所得到的接触区电流信号与油膜厚度之间的耦合模型符合弹性流体动力润滑

(elastohydrodynamic lubrication,简称 EHL)理论公式的计算结果。

1 轴承润滑监测实验台设计

1.1 实验台工作原理

笔者设计的轴承润滑监测实验台系统结构以及电路连接示意图如图1所示,由机械模块、控制模块和信号采集等关键部分组成。在机械模块中,测试轴承由驱动电机提供转速,由加载装置完成轴径载荷施加,由润滑系统供给运转所需润滑油剂,由外加电源提供状态供给测试信号。在控制模块中,利用控制中心编写的控制指令及软件,实现对测试轴承的载荷、转速、润滑及电压的精准调控。在信号采集模块中,利用A/D转换器将采集到的连续模拟信号转换为离散数字信号,并通过各自的参数变送器对数据的测量量程进行控制,最终将满足量程的传感器数据经可编程逻辑控制器(programmable logic controller,简称 PLC)连接至控制中心,对实验数据进行监测和调控。此外,通过集成扭矩传感器、可编程交流电源、热电偶传感器等监测设备,该实验台能够实时监测轴承系统中的多种关键物理量,从而显著拓展其应用范围和研究深度。

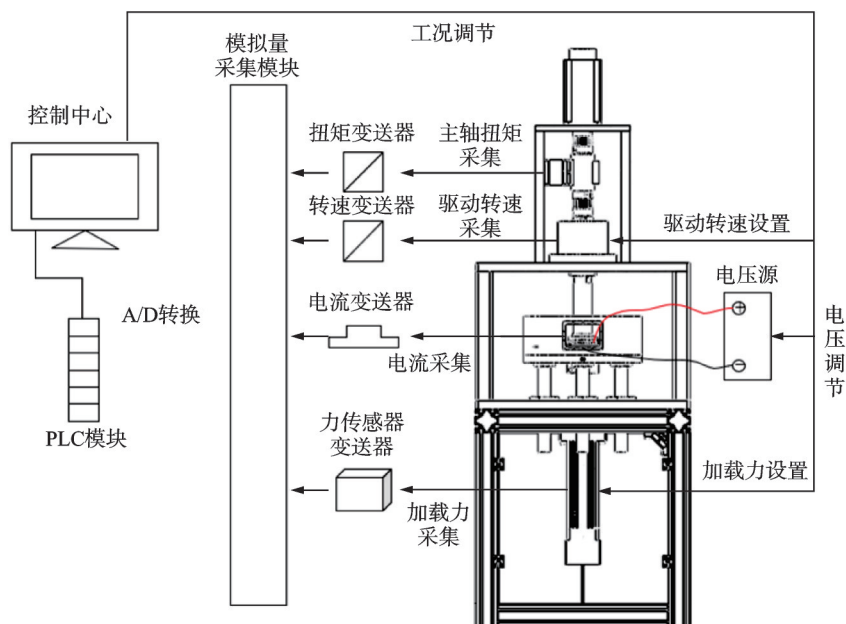


图1 轴承润滑监测实验台系统结构以及电路连接示意图

Fig.1 Schematic diagram of the system structure and circuit connection of the bearing lubrication monitoring test bench

为了避免冗余导电路径的影响,采用绝缘材料制造润滑监测实验台的轴承连接部件。图2为电路回路示意图。本实验台将轴承上下侧的轴承座进行绝缘处理,仅保留“测头—套圈—钢球—套圈—测

头”一条导电通路。考虑到轴承的高转速工况,采用导电球塞充当运动套圈与轴承座间的导电中介,避免常规导电触头引发的过度磨损现象,最终形成“导电球塞—钢制垫圈—测试轴承—导电触头”的测试

电流回路。

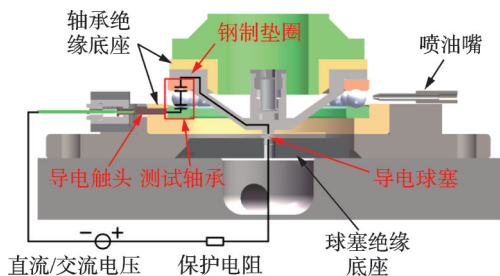
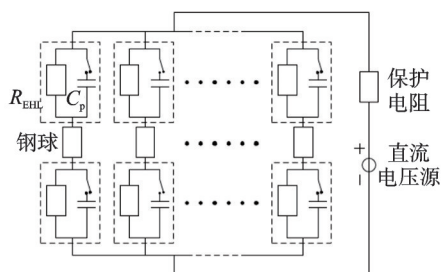


图2 电路回路示意图

Fig.2 Schematic diagram of the circuit loop

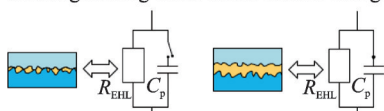
1.2 监测测试原理

为了进一步阐明电信号测试原理,将图2中的电信号测试回路进一步总结凝练为如图3所示的轴承接触区电路原理图。如图3(a)所示,暂时不考虑油膜击穿现象,将轴承滚道接触区的等效阻抗分为油膜电阻和接触区电容2部分。对轴承接触区施加交流电压,如图3(b)所示,当钢球与滚道完全被润滑油膜隔开时,接触区电容开关闭合,此时接触区的电阻抗为油膜电阻和接触区电容的并联电路;当钢球和滚道之间出现刚体接触时,接触区的电容断开,此时接触区仅考虑钢球与滚道之间的接触电阻。另外,对接触区施加直流电压时,仅需考虑油膜电阻以及钢球与滚道表面微凸体接触比例所导致的接触电阻变化。从图3(a)可以看出,每个钢球与内外圈之间分别存在一个接触区,2个接触区通过钢球串联在一起,同时各个钢球电路通过内圈和外圈滚道并联在一起,最终形成了轴承接触区的复杂导电回路。



(a) 直流电压下滚动轴承接触区电路图

(a) The circuit diagram for the contact area of a rolling bearing under direct current voltage



(b) 交流电压下接触区等效阻抗与刚体接触对应关系
(b) The correspondence between equivalent impedance and rigid body contact of the contact area under alternating current voltage

图3 轴承接触区电路原理图

Fig.3 Circuit in the contact area of the bearing

由于本研究的重点内容是验证所搭建实验台实验数据的准确性,因此选择图3(a)中电路结构较为简单的直流电压作为施加电压。

本实验台采用油气润滑系统供油,该系统可实现对喷油速率和润滑油型号的控制,最终润滑油通过图2所示的加压喷油嘴喷出,满足轴承运转过程中的润滑需求。

由于实验台在工作过程中可能会对工况做出一定改变,因此需要系统能够较快做出反应,并且能够通过传感器较快捕捉到工况的瞬时变化,特别是电流回路的电流变送器精度要高,确保在较小电压下仍然可以监测到回路电流的微小变化。

2 实验台程序及电路模块设计

2.1 实验台整体系统框架设计

基于实验台的组成部件、工作原理和监测需求,笔者设计了如图4所示的实验台整体系统框架。



图4 实验台整体系统框架

Fig.4 The overall system framework of the laboratory bench

由图4可知,实验台主要由硬件层、程序控制层以及系统监控层3部分组成。在硬件层,采用总线控制的形式将传感器、传动部件和其他部件相连接,通过变送器、A/D转换模块和PLC控制模块对实验台传感器中的数据进行采集。在程序控制层,对采集到的数据进行量程优化、数据形式转换等数据处理,并将其传入控制程序中,根据设定的程序对硬件进行反向控制,同时将数据传输至系统监控层。在系统监控层,操作人员对传输进来的数据进行分析、辨别和提取等操作,剔除异常数据并实时监测数据波动,当数据波动异常时及时采取措施进行人为干预,并及时处理实验台发出的报警信息。

2.2 监控系统设计模块拆分

为了实现对实验台实时运行情况的直观及全面监控,笔者搭建了如图5所示的操作台及电路集成模块。

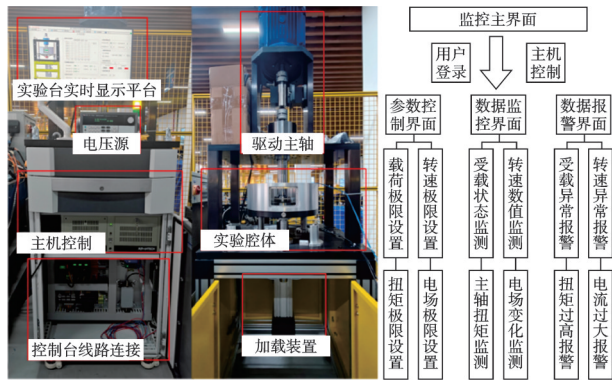


图5 操作台及电路集成模块

Fig.5 Operation console and circuit integration module

由图5可知,若对实验台数据进行更改,则必须先进行用户登录,通过严格的身份认证可保证数据和实验设备的安全性,也可避免误触所造成的实验台损伤。在参数控制界面,操作人员可以对实验台上施加的转速、载荷等基础工况进行设置,并在实验台运行过程中进行工况实时更改。由于电压源与操作平台的操作界面相分离,因此需要在电压源仪器上单独进行输入电压设置。随着实验的进行,各个传感器所检测到的实验参数都在实时变化,可通过实时显示平台中的曲线图进行观察。另外,控制台的线路连接可以进行直流变送器和交流变送器的转换,从而分别实现轴承电路中直流电和交流电的监测。数据报警界面保证了实验台安全运行,在报警界面的程序中实现了对整个实验台数据波动的监测,当数据出现异常时,电路会进行报警并立刻切断电源,停止实验台的运行,确保用户可以及时发现问 题,保障实验台稳定运行。

3 实验台监控界面及润滑监测实验

3.1 实验台数据实时监测界面展示

图6为笔者自主开发的实验台操作主界面。在该界面可以进行实验台运行工况的调控,并对运行时间进行设置,在运行时间内可以对工况实时更改,从而实现边改工况、边观察轴承电流变化情况的功能,以便及时做出相应调整。

图7为实验轴承工况参数变化趋势图,包含了运转过程中电流、加载力、转矩以及转速之间的对应

变化趋势,可在同一工况下观察4种参数之间的变化关系,有助于调整各个参数之间的变化情况。

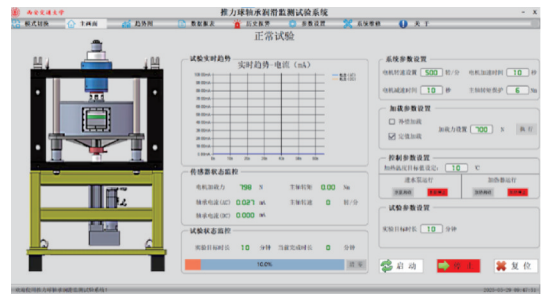


图6 实验台操作主界面

Fig.6 Main interface of the laboratory bench operation

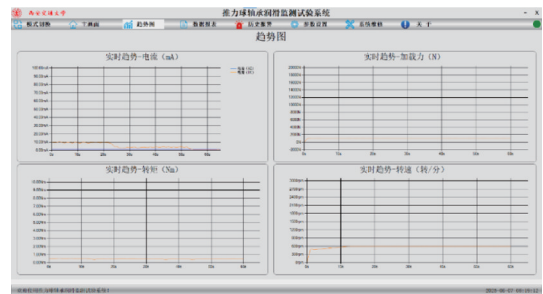


图7 实验轴承工况参数变化趋势图

Fig.7 Graph showing trends in operating parameters for test bearings

3.2 轴承润滑状态监测实验

基于搭建的实验台,笔者开展了2种典型工况下轴承的润滑监测实验。为了辅助评判润滑状态,采用EHL理论公式计算轴承接触区最小油膜厚度。

3.2.1 变载荷下接触区电流变化

在实验过程中,保证轴承转速为500 r/min,轴向载荷由500 N逐渐增加至1 400 N,递增载荷步长为100 N。不同轴向力下轴承接触区电流变化趋势如图8所示。从图8(a)可以看出:随着轴向载荷的增大,接触区微凸体的接触面积逐渐增加,轴承接触区电流逐渐增大;由于钢体接触电阻小于油膜电阻,因此接触区电阻逐渐减小。实验中在滚动轴承接触区两端施加恒定电压,最终引发接触区电流增大。

从图8(b)可以看出,随着轴向载荷的增大,接触区电流也随之逐渐增大,而油膜厚度逐渐减小,这与油膜电阻减小以及接触区微凸体接触面积的增大相对应。另外,图8给出了由电流实验数据计算得到的最小油膜厚度变化曲线,以及EHL理论公式计算得到的最小油膜厚度变化曲线。可以看到,二者变化趋势一致且吻合较好,证明了实验台获取数据的准确性和可靠性。

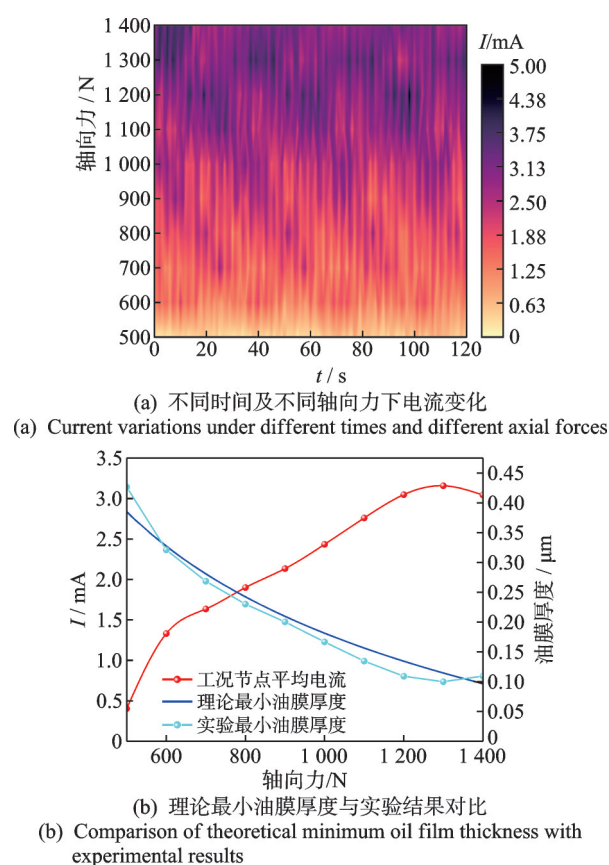


图8 不同轴向力下轴承接触区电流变化趋势

Fig.8 The trend of current changes in the contact area of the bearing under different axial forces

3.2.2 变转速下接触区电流变化

保证轴承轴向载荷不变,仍为1 000 N,将驱动转速由0逐步增加至1 600 r/min,递增步长为200 r/min,不同转速下轴承接触区电流变化趋势如图9所示。从图9(a)可以看出,随着主轴转速的增加,轴承接触区电流逐渐减小。这是因为主轴转速增加导致的离心力增大,离心力的增大使得接触区动压油膜的形成效率显著提高,从而使接触区的油膜厚度增大,油膜电阻也随之变大。当主轴转速增大至一定数值时,钢球与滚道之间的微凸体接触面积归零,此时接触区油膜将钢球与滚道之间彻底隔开,由于施加的是直流电压,故电流也随之归零。

从图9(b)可以看出,随着主轴转速的增大,接触区电流逐渐减小并最终降为零,与此同时最小油膜厚度逐渐增大,这与油膜电阻的增大相对应。另外,图中给出了根据接触区电流的实验数据计算出的最小油膜厚度变化曲线,以及通过EHL理论公式得到的最小油膜厚度变化曲线。可以看到,二者均随着转速的增大而增大,但此时理论公式的曲线斜率已经与实验数据产生了差异。此外,由于接触区微凸体接触面积的快速减小,接触区电流也随之降

低直至降为零,在实验曲线中可以看到轴承润滑状态改变时所处的转速大小以及钢球与滚道完全隔开时接触区的最小油膜厚度。由于这些数据在进行理论计算时无法得到,因此通过实验台获取的实验数据可以为滚动轴承润滑状态监测以及轴承寿命优化的后续研究提供更多修正数据。

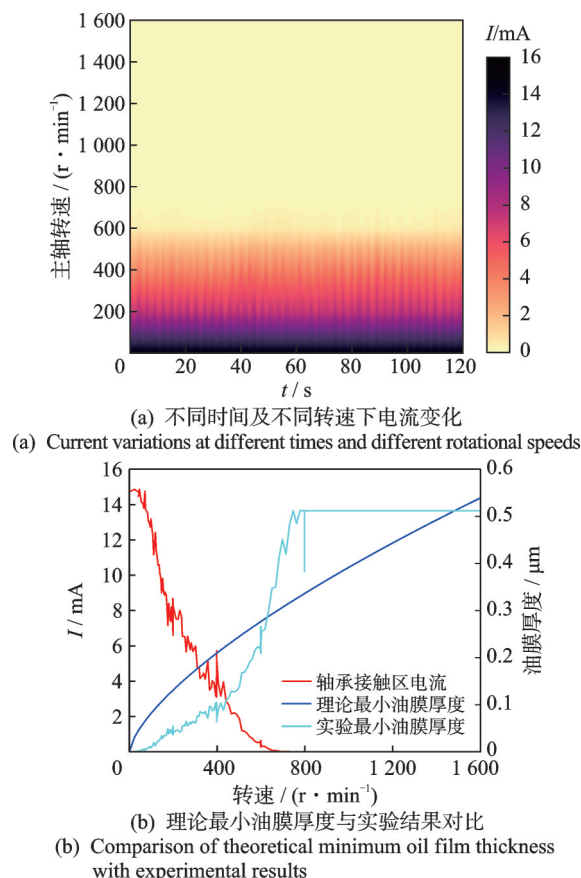


图9 不同转速下轴承接触区电流变化趋势

Fig.9 The trend of current changes in the contact area of the bearing under different rotational speeds

4 结 论

1) 设计了实验台的组成结构,包括线路、控制台及核心部件,阐明了其工作原理。构建了以数据采集、转换、监测和反馈为核心的完整运行流程,确保实验台在多种工况下的稳定运行。

2) 开发了以工况设置界面为中心的实时监测平台。通过开发控制程序电路,实现了实验数据的直观展示、工况上限与量程精度的灵活设置、数据的实时存取以及关键参数的及时报警,显著提升了实验台的监测效率与操作便捷性。

3) 实验结果表明,随着钢球与滚道间隙减小,接触区油膜厚度逐渐变薄,同时钢球与滚道表面微凸体的接触面积增大。在施加直流电压的条件下,

接触区电阻变化可作为关键监测指标。根据EHL理论,随着轴向载荷增大或转速降低,最小油膜厚度减小,导致油膜电阻随之下降且微凸体接触面积逐渐增大。因此,接触区电流呈现与电阻相反的趋势,呈现出逐渐增大的变化曲线。

参 考 文 献

- [1] BALAKRISHNA G V, GNANAMOORTHY R. Prediction of temperature rise in ball-on-disk contacts under electromechanical loading[J]. Tribology International, 2024, 194: 109476.
- [2] 王琳,郑志振,王勇,等.喷油润滑内齿圈外圆面红外测温及误差分析[J].振动、测试与诊断, 2024, 44(2): 253-258.
WANG Lin, ZHENG Zhizhen, WANG Yong, et al. Infrared temperature measurement of the outer surface of an internal gear ring with oil lubrication and analysis of measurement errors[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(2): 253-258. (in Chinese)
- [3] CAO-ROMERO-GALLEGOS J A, FARFAN-CABRERA L I, ERDEMIR A, et al. Lubricated sliding wear of gear material under electrification-a new approach to understanding of the influence of shaft currents in the wear of EV transmissions [J]. Wear, 2023, 523: 204782.
- [4] SUI Y J, WANG W Z, ZHANG H B, et al. Modeling 3D sliding electrical contact considering fully coupled thermal-mechanical-electrical effects[J]. Tribology International, 2023, 184: 108491.
- [5] NIPPES P I. Early warning of developing problems in rotating machinery as provided by monitoring shaft voltages and grounding currents[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 340-345.
- [6] MARTIN G, BECKER F M, KIRCHNER E. A novel method for diagnosing rolling bearing surface damage by electric impedance analysis[J]. Tribology International, 2022, 170: 107503.
- [7] TIMSIT R S. Constriction resistance of thin film contacts[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2010, 33(3): 636-642.
- [8] WANG Q Q, LIU R F, REN X J. A method to determine the critical current value of the bearing electrical corrosion[C] //2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Beijing, China: IEEE, 2019: 991-995.
- [9] MORRIS S A, LEIGHTON M, MORRIS N J. Electrical field strength in rough infinite line contact elastohydrodynamic conjunctions[J]. Lubricants, 2022, 10(5): 87.
- [10] DAI H C, SHEN F, LI Y H, et al. Sliding electrical contact model considering frictional and joule heating[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2024, 37(6): 823-836.
- [11] LI Y H, SHEN F, KE L L. Multi-physics electrical contact analysis considering the electrical resistance and Joule heating[J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 256: 111975.
- [12] LI Y H, SHEN F, GÜLER M A, et al. Modeling multi-physics electrical contact on rough surfaces considering elastic-plastic deformation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 269: 109066.
- [13] LI Y H, SHEN F, GÜLER M A, et al. An efficient method for electro-thermo-mechanical coupling effect in electrical contact on rough surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 226: 125492.
- [14] LI Y H, KE L L, ZHOU K, et al. On the multi-physics elastoplastic electrical contact of rough surfaces [J]. Tribology International, 2025, 204: 110418.
- [15] LOOS J, BERGMANN I, GOSS M. Influence of currents from electrostatic charges on WEC formation in rolling bearings[J]. Tribology Transactions, 2016, 59(5): 865-875.
- [16] REN W B, CHEN Y, WANG Z B, et al. Electrical contact resistance of coated spherical contacts[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(11): 4373-4379.
- [17] SU J, KE L L, WANG Y S. Elastohydrodynamic lubrication line contact of piezoelectric materials[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 163: 105145.
- [18] LIANG H, FAN Z H, WANG W Z, et al. Experimental investigation of the film behavior in a model rolling bearing[J]. Tribology International, 2022, 175: 107853.



第一作者简介:温博,男,2000年3月生,博士生。主要研究方向为滚动轴承接触区润滑状态监测以及电场环境下接触区电蚀变化。
E-mail:1416326188@qq.com

通信作者简介:闫柯,男,1984年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为高性能滚动轴承数字化设计与智能感知等方面的研究。
E-mail:yanke@xjtu.edu.cn