

SCIENTIA SINICA Technologica

# 中国科学 技术科学

第52卷 第1期 2022年1月

www.scichina.com ■ techcn.scichina.com

## 工业互联网专辑

中国科学 技术科学

第五十二卷 第一期 1-12 2022年1月

《中国科学》杂志社



中国科学院 院主办  
国家自然科学基金委员会

# 《中国科学》《科学通报》

荣誉总主编：周光召

总 主 编：朱作言

## 《中国科学：技术科学》编辑委员会

主 编：张统一 上海大学

副主编：

丁 汉 华中科技大学  
方岱宁 北京理工大学  
何雅玲 西安交通大学  
倪晋仁 北京大学

黄永刚 Northwestern University, USA  
韩杰才 哈尔滨工业大学  
魏炳波 西北工业大学

编 委：

于 荣 清华大学  
于起峰 国防科技大学  
马宗义 中国科学院金属研究所  
王光谦 青海大学/清华大学  
王荣光 Hiroshima Institute of Technology, Japan  
王晋军 北京航空航天大学  
王 健 University of Nebraska-Lincoln, USA  
巨东英 Saitama Institute of Technology, Japan  
巨 阳 Nagoya University, Japan  
史 蹟 Tokyo Institute of Technology, Japan  
冯 雪 清华大学  
宁建国 北京理工大学  
吕 坚 香港城市大学  
吕金虎 北京航空航天大学  
吕昭平 北京科技大学  
朱世杰 Fukuoka Institute of Technology, Japan  
朱 勇 North Carolina State University, USA  
任伟新 深圳大学  
刘文广 天津大学  
刘汉龙 重庆大学  
刘 静 清华大学  
齐 航 Georgia Institute of Technology, USA  
孙立志 University of California, Irvine, USA  
李 巨 Massachusetts Institute of Technology, USA  
李江宇 南方科技大学  
李应红 空军工程大学  
李宏男 大连理工大学/沈阳建筑大学  
李敬锋 清华大学  
李 默 Georgia Institute of Technology, USA  
杨庆大 University of Miami, USA  
吴朝东 北京大学  
宋晓艳 北京工业大学  
张田忠 上海大学  
张旭东 Texas A&M University, USA  
张志良 Norwegian University of Science and Technology, Norway

陈云敏 浙江大学  
陈涌海 中国科学院半导体研究所  
陈维江 国家电网公司  
陈掌星 University of Calgary, Canada  
陈 曦 Columbia University, USA  
欧阳明高 清华大学  
欧进萍 哈尔滨工业大学  
金红光 中国科学院工程热物理研究所  
宝音贺西 清华大学  
宗秋刚 北京大学  
赵启斌 RIKEN, Japan  
赵新为 Tokyo University of Science, Japan  
南策文 清华大学  
段海滨 北京航空航天大学  
侯 静 国防科技大学  
宣益民 南京航空航天大学  
柴茂荣 Saitama Institute of Technology, Japan  
郭 旭 大连理工大学  
席 光 西安交通大学  
唐 捷 University of Tsukuba, Japan  
益小苏 中航复合材料有限责任公司  
黄汉臣 Northeastern University, USA  
黄晓旭 重庆大学/Technical University of Denmark, Denmark  
黄嘉兴 西湖大学  
梅生伟 清华大学  
曹晋滨 北京航空航天大学  
梁新刚 清华大学  
程玉峰 University of Calgary, Canada  
舒 昌 National University of Singapore, Singapore  
谢国强 哈尔滨工业大学(深圳)  
赖远明 中国科学院西北生态环境资源研究院  
翟婉明 西南交通大学  
潘 兵 北京航空航天大学  
薛冬峰 中国科学院深圳先进技术研究院

责任编辑：孙书军 于世美 王艳敏 杨洁 封面设计：胡煜

目      次

**工业互联网专辑**

**编者按**

前言——工业互联网专辑 .....	1
丁汉, 江平宇, 张洁, 李迎光, 陶飞, 张永, 袁焯	

**评述**

面向航空协同制造的工业互联网架构研究与应用 .....	3
蒋敏, 郑力	
工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望 .....	14
柴天佑, 刘强, 丁进良, 卢绍文, 宋延杰, 张艺洁	
基于无监督域自适应的计算机视觉任务研究进展 .....	26
孙琦钰, 赵超强, 唐漾, 钱锋	
面向未来互联网的智慧制造研究现状与展望 .....	55
马南峰, 姚锡凡, 王柯赛	

**论文**

基于嵌套长短期记忆网络的机械装备剩余使用寿命预测方法 .....	76
程一伟, 朱海平, 吴军, 邵新宇	
面向工业互联网的社群化制造模式及 3D 打印测试床研发 .....	88
江平宇, 史皓良, 杨茂林, 郭威, MAKANDA Inno Lorren Désir, 董华伟	
基于工业互联网的制造与服务融合技术 .....	104
张卫, 石涌江, 唐任仲, 顾新建, 田景红	
基于多任务学习的装备智能诊断与寿命预测方法 .....	123
黄如意, 李霁蒲, 王震, 夏景演, 陈祝云, 李巍华	
面向工业互联网的异构时间敏感数据流协同传输机制设计 .....	138
张景龙, 陈彩莲, 许齐敏, 林美涵, 卢宣兆, 陈营修	
面向工业互联网中数据不透明性的隐私保护控制策略设计 .....	152
沈逸, 周纯杰, 胡晓姪, 程骋, 何心, 邵若晨	
无监督学习驱动的高端轴承故障智能诊断算法 .....	165
陈彬强, 曾念寅, 曹新城, 周生喜, 贺王鹏, 田赛	
工业设备的健康状态评估和退化趋势预测联合研究 .....	180
张永, 龚众望, 郑英, 谢林柏, 张泽, 刘振兴	
基于特征注意力机制的 GRU-GAN 航空发动机剩余寿命预测 .....	198
袁焯, 黄虹, 程骋, 虞文武, 丁汉	

# SCIENTIA SINICA Technologica

Volume 52 Number 1 January 2022

## Contents

### Special Issue: Industrial Internet

#### Editorial

Preface—Special Issue: Industrial Internet .....	1
DING Han, JIANG PingYu, ZHANG Jie, LI YingGuang, TAO Fei, ZHANG Yong, YUAN Ye	

#### Review

Industrial internet architecture for collaborative manufacturing of aviation equipment.....	3
JIANG Min, ZHENG Li	
Perspectives on industrial-internet-driven intelligent optimized manufacturing mode for process industries .....	14
CHAI TianYou, LIU Qiang, DING JinLiang, LU ShaoWen, SONG YanJie, ZHANG YiJie	
A survey on unsupervised domain adaptation in computer vision tasks .....	26
SUN QiYu, ZHAO ChaoQiang, TANG Yang, QIAN Feng	
Current status and prospect of future internet-oriented wisdom manufacturing.....	55
MA NanFeng, YAO XiFan, WANG KeSai	

#### Article

A remaining useful life prediction method based on nested longshort-term memory network for mechanical equipment .....	76
CHENG YiWei, ZHU HaiPing, WU Jun, SHAO XinYu	
Research and development of social manufacturing model and 3D printing testbed for industrial internet.....	88
JIANG PingYu, SHI HaoLiang, YANG MaoLin, GUO Wei, MAKANDA Inno Lorren Désir, DONG HuaWei	
Research on manufacturing and service integration technology based on industrial internet .....	104
ZHANG Wei, SHI YongJiang, TANG RenZhong, GU XinJian, TIAN JingHong	
Intelligent diagnostic and prognostic method based on multitask learning for industrial equipment.....	123
HUANG RuYi, LI JiPu, WANG Zhen, XIA JingYan, CHEN ZhuYun, LI WeiHua	
Design of coordinated transmission mechanism of heterogeneous time-sensitive data flow for industrial internet.....	138
ZHANG JingLong, CHEN CaiLian, Xu QiMin, LIN MeiHan, LU XuanZhao, CHEN YingXiu	
Design of privacy-preserving control strategy for data opacity of industrial internet .....	152
SHEN Yi, ZHOU ChunJie, HU XiaoYa, CHENG Cheng, HE Xin, TAI RuoChen	
Unsupervised learning-driven intelligent fault diagnosis algorithm for high-end bearing.....	165
CHEN BinQiang, ZENG NianYin, CAO XinCheng, ZHOU ShengXi, HE WangPeng, TIAN Sai	
Joint study on health state assessment and degradation trend prediction of industrial equipment .....	180
ZHANG Yong, GONG ZhongWang, ZHENG Ying, XIE LinBo, ZHANG Ze, LIU ZhenXing	
Remaining useful life prediction of the aircraft engine based on the GRU-GAN network with a feature attention mechanism .....	198
YUAN Ye, HUANG Hong, CHENG Cheng, YU WenWu, DING Han	

# Science China Technological Sciences

## 2022 年 65 卷第 1 期中文摘要

### 变体飞行器“御风飞行”的柔性智能蒙皮

黄永安, 朱臣, 熊文楠, 汪玉, 蒋永刚, 邱雷, 郭栋梁, 侯超, 江山, 杨朝熙, 王博, 王璐, 尹周平

柔性智能蒙皮是实现未来变体飞行器“御风飞行”的关键技术, 已成为先进飞行器智能感知与控制的重要发展方向之一. 与传统蒙皮相比, 柔性智能蒙皮具有更强大的传感功能, 能够与飞行器复杂表面完美融合, 在不改变飞行器自身结构和周围流场工况下进行壁面多物理场测量. 柔性电子技术的不断突破克服了传统蒙皮存在的结构破坏、复杂导线、离散测量等一系列难题. 本文从柔性电子传感技术在变体飞行器、无人机等领域的重大应用前景入手, 首先, 着重回顾了柔性传感器在航空领域的研究成果, 包括飞行器表面流场、风压风阻、应变、温度等气动参数的精确测量. 随后, 介绍了柔性传感网络在飞行器结构健康监测方面的应用, 并进一步阐述了通过智能蒙皮实现飞行器“Fly-by-Feel”飞行模式的挑战及机遇. 最后, 文章对该领域面临的挑战与下一步研究方向进行了总结与展望.

柔性电子, 智能蒙皮, 变体飞行器, 柔性传感器

<https://doi.org/10.1007/s11431-020-1793-0>

### 基于底座力传感器的机器人动力学模型与关节摩擦力辨识

吴建华, 李旺, 熊振华

机器人动力学模型在其控制与应用中起着重要的作用. 随着对机器人性能要求的不断提高, 精确的动力学模型辨识显得至关重要. 由于关节驱动力矩中耦合了机器人刚体运动引起的惯性力矩与关节摩擦力, 因此通常需要先假定一个参数线性化的摩擦力模型才能对惯性参数与摩擦力参数进行辨识. 然而, 关节摩擦力具有强非线性且会随着机器人位姿、速度和温度等因素的变化而变化, 因此, 所假定的摩擦力模型与实际值不可避免地存在一定的误差, 这势必降低了动力学模型的辨识精度. 本文提出一种基于机器人底座力传感器的辨识方法, 它解耦了惯性力与关节摩擦力, 首先通过在底座力传感器空间中的动力学表达式辨识出惯性参数, 然后从关节力矩中分离出关节摩擦力的值, 进而可以选择或构造一个非线性的关节摩擦力模型来拟合所获得的摩擦力值. 此方法不需要事先假定摩擦力模型, 而是采用先获取摩擦力值再建立摩擦力模型的方法, 可望获得高性能的辨识结果. 六轴机器人动力学模型辨识的实验结果验证了上述方法.

机器人动力学模型, 模型辨识, 关节摩擦力

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1877-7>

### 激光加工参数对 CO<sub>2</sub> 激光辐射聚酰亚胺制备的激光诱导石墨烯性能的影响

刘明, 伍家楠, 程寰宇

利用激光直写实现聚酰亚胺(PI)碳化从而制备激光诱导石墨烯(LIG)的新兴技术因其灵活性、多功能性和易于图案化的能力而备受关注, 这一技术降低了制备 LIG 基柔性电子器件的工艺复杂性. 深入研究激光加工参数对 LIG 的微观结构和导电性的影响, 将有助于优化 LIG 基柔性器件的性能和降低能耗. 本文利用 CO<sub>2</sub> 激光辐照 PI 薄膜制备出 LIG, 同时采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、透射电子显微镜(TEM)、比表面积分析仪、同步热分析和拉曼光谱对 LIG 进行了表征, 重点研究了激光参数(如激光功率和扫描速度)对 LIG 的微观结构、厚度和薄层电阻的影响. TEM 和 XRD 的结果都表明, LIG 由许多石墨烯层堆叠而成, 层间距为 0.34 nm. 随着激光功率的增加, LIG 的比表面积逐渐减小. 利用 LIG 厚度与碳化 PI 薄膜的深度之比作为膨胀比表征了 LIG 的膨胀性. 通过激光扫描光斑的叠加机理解释了图像分辨率和离焦量对 LIG 薄层电阻的影响.

CO<sub>2</sub> 激光, 激光参数, 激光诱导石墨烯, 表征, 薄层电阻

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1918-8>

### 智能混合动力汽车跟车和换道过程行驶稳定性与安全性分层控制研究

周亚洲, 汪若尘, 丁仁凯, 施德华, 叶青

自动驾驶汽车的纵向和横向协调控制是实现安全、舒适驾驶性能的基础. 针对混合动力汽车(HEV)在加速跟车和换道过程中的纵向和横向协调控制问题, 提出了一种不同于传统的分层控制思想的车辆稳定性分层控制策略. 基于模型预测控制(MPC)理论, 在控制结构的顶层设计了两层 MPC 控制器. 上层是线性时变 MPC(LTV-MPC), 下层是混杂 MPC(HMPC). 针对 LTV-MPC 控制器, 建立面向控制的结合车身三自由度和跟车动力学的混合动力汽车线性离散模型. 此外, 在混合动力系统混杂特性分析和建立车辆动力总成混合逻辑动态(MLD)模型的基础上, 设计了下层 HMPC 控制器, 建立了混合动力汽车动力总成和车身 7 自由度非线性动力学的底层被控对象模型. 在上述基础上, 分析了分层控制结构的稳定性, 实现了车辆动力学控制与能量管理的深度融合. 不同工况下仿真和 HIL 硬件在环试验结果表明: 通过对比 LC-ACC 分层控制和常规 ACC 控制, 分层控制策略能有效地保持车辆在极端工况下的横向稳定性和安全性, 过 HMPC 控制器能够有效协调与控制 HEV 动力总成输出扭矩和换挡点.

混合动力汽车, 分层控制, 模型预测控制, 混合逻辑动态, 车道切换

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1891-8>

## 液态金属液压范式: 双模态信号的传递媒介和致动

傅俊衡, 高建业, 覃鹏, 李东东, 于得海, 孙鹏, 何志祝, 邓中山, 刘静

本文提出具有导热和导电性能的室温镓基流体(RTGFs)作为液压系统力传导的工作流体, 填补多功能液态金属在液压领域的空白. 首先评估比较镓基流体和传统液压流体(商业液压油和去离子水)的热稳定性和流变特性等典型物理特性. 通过实验和数值方法阐明镓基流体和商用液压油的传力性能, 以及温度场对流体黏度的影响. 实验结果表明, 镓基流体具有的本征阻燃性、较宽液态温区和黏度随温度波动小的优点, 使其具有作为新型特殊液压流体而应用于液压系统中的可能性. 作为应用展示, 由镓基流体驱动的刚性和柔性执行器, 表现出在抓取各种形状和重量的物体方面的能力, 并且通过液态金属的固液相变实现了这种柔性驱动器的可调刚度. 此外, 基于液态金属自身的可重构和电磁学特性, 制造并演示了一种频率可调天线. 总之, 具有热电和机械多模态信号介质的镓基液态金属流体有望用于未来复杂多功能信号传输系统.

液压系统, 液态金属, 力传递, 固液相变, 可控天线

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1900-x>

## 软式空中加油受油机驾驶员操纵模型建模研究

王立新, 陆畅, 赵鹏, 刘海良, 乐挺

软式空中加油(Probe-and-drogue aerial refueling, PDR)任务受风场扰动影响严重, 难以获得探头与锥套位置的准确视觉信息; 且受油机驾驶员需要通过驾驶杆和油门杆控制受油机的垂直、侧向和前后位置, 还需合理分配对驾驶杆的俯仰和滚转操纵动作. 为了模拟 PDR 任务中飞行员视觉感知行为和驾驶杆操纵的分配行为, 设计了视觉信息获取模块、策略切换模块和飞行员操纵模块等三个模块. 通过人在环地面飞行模拟试验数据的相干函数分析, 证明了驾驶员多轴操纵行为可以被解耦, 并确定了操纵模型三个通道分别需控制的状态量, 最终形成受油机驾驶员多轴操纵模型. 结合加、受油机和软式加油装置的运动模型, 建立了 PDR 飞行任务的数学仿真模型, 提出了用于评估受油机 PDR 任务完成效果的判定指标, 例如捕获时间和稳定时间等. 利用 PDR 飞行数学仿真模型搭建了地面飞行模拟试验平台, 开展 PDR 任务的人在环地面飞行模拟试验. 数值仿真计算结果与地面飞行模拟试验数据对比表明, 计算误差小于 10%, 验证了本文所建立驾驶员操纵模型的正确性. 该模型可用于评估软式加油装置与受油机飞行控制律的设计方案, 相关的计算结果也可作为 PDR 任务的飞行试验研究提供理论参考.

驾驶员操纵模型, 软式空中加油, 离散时间模型, 飞行仿真

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1915-6>

## 一种基于 OpenFOAM 用于热管堆模拟的瞬态多物理耦合方法研究

郭玉川, 李泽光, 王侃, 苏子麟

不同于传统压水堆, 固态热管堆存在着诸如燃料热膨胀、膨胀反应性反馈与接触换热等独特过程, 需要一种新的多物理耦合方法来模拟该类型反应堆. 本文提出一种基于 OpenFOAM 的瞬态多物理耦合方法, 该方法考虑了功率变化、燃料膨胀、热管吸热、接触换热与间隙传热等过程. 特别地, 对热管内工质再分布引起的反应性反馈也进行了初步考虑. 选择典型热管试验堆 KRUSTY (Kilowatt reactor using stirling technology)作为研究对象, 将计算结果与该热管堆负载跟踪试验结果进行横向对比, 证明了该方法的有效性. 为展示这类反应堆的功率自调节能力, 假定了一种极端事故: 事故开始时, 全部热管均不再吸收堆芯热, 发生完全丧失热阱事故; 经过 1500 s 之后, 系统立即恢复吸热. 在该极端事故中, 控制棒始终位于堆芯外, 反应堆仅依靠自身反应性反馈进行功率调节. 通过计算发现, 在该极端事故下, 堆芯峰值温度仅达到 1112 K 左右, 远低于安全限值. 整个事故过程, 反应堆需要大约 2500 s 才能恢复至稳定状态. 反应堆能够通过自身反应性反馈实现功率的有效调节. 以上分析表明, 该耦合方法对热管堆模拟的有效性, 可以作为热管堆计算的有效工具.

热管堆, 多物理耦合, 反应性反馈, KRUSTY 反应堆

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1874-0>

## 高温超导层缠绕线圈和层内无绝缘线圈充电过程中的损耗及力学响应

李东科, 刘东辉, 雍华东

层缠绕线圈具有较好的磁场空间均匀性, 在核磁共振成像方面具有很大的应用潜力. 然而, 采用无绝缘技术绕制的高温超导层缠绕线圈已被证实具有较长的磁场延迟时间. 目前一种新的缠绕方法已经被提出, 即层内无绝缘缠绕技术, 该方法可以有效减少线圈的磁场延迟时间. 本文对层缠绕线圈和层内无绝缘线圈充电期间的损耗和力学特性进行了对比研究. 结果表明: 采用层内无绝缘缠绕方法可以显著降低总损耗, 并且改变电源电流的充电速率和匝间的接触电阻率对损耗也有一定的影响. 此外, 在考虑冷却过程和洛伦兹力的作用下, 对比了层缠绕线圈和层内无绝缘线圈的应力分布, 发现层内无绝缘线圈中的铜片比 REBCO 导体层承受了更大的应力. 同时, 层内无绝缘线圈与层缠绕线圈中 REBCO 导体层的应力差异较小.

高温超导线圈, 上升损耗, 应力

<https://doi.org/10.1007/s11431-020-1894-y>

## 电磁离子回旋波与能量质子损失的相关观测

杨昶, 王宗强, 肖伏良, 何兆国, 谢妍琼, 张赛, 贺艺华, 刘斯, 周庆华

电磁离子回旋波是磁层能量质子散射损失的重要机制. 这里, 我们利用卫星数据同时对内磁层的能量质子微分通量及等离子体层的质子沉降进行

了观测. 在 2015 年 9 月 7 日至 8 日的地磁暴中, 范艾伦探测器卫星在  $L=5$  的位置附近观测到了强的电磁离子回旋波, 并发现数十 keV 的质子通量在  $0^\circ\sim 45^\circ$  投掷角范围内出现了明显衰减. 在此期间, NOAA 18 和 19 卫星与范艾伦探测器 A 星先后发生磁力线连接, 连接期间 NOAA 卫星观测到在等离子体层高度的沉降质子显著增多(增长了几个数量级). 通过求解 Fokker-Planck 方程, 我们进行了数值模拟, 结果表明电磁离子回旋波能够在 2 h 内使能量质子通量在大约  $0^\circ\sim 45^\circ$  的投掷角范围内发生显著损失, 模拟结果能合理解释观测现象.

**波-粒相互作用, 电磁离子回旋波, 能量质子, 散射损失**

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1882-x>

## 太阳耀斑莱曼阿尔法辐射中的准周期脉动现象

李东

准周期脉动(QPPs)是太阳耀斑辐射中一种常见的振荡现象, 它在耀斑辐射的几乎所有波段都有观测. 然而, 在与耀斑有关的准周期脉动观测研究中, 莱曼阿尔法波段的观测, 尤其是周期比例接近 2.0 的报道仍然比较少. 本文报道了耀斑莱曼阿尔法波段观测到的具有双周期特征的准周期脉动现象, 其主要发生在耀斑的脉冲项期间. 4 个大耀斑都探测到了相似的振荡特征, 即 SOL2016-02-12, SOL2014-10-24, SOL2014-06-10 和 SOL2012-11-21. 耀斑期间, 全日面莱曼阿尔法的观测数据来自 GOES 卫星的极紫外探测器(EUVS). 而耀斑准周期脉动的周期则利用傅里叶分析计算, 并通过马尔可夫-蒙特卡罗(MCMC)抽样的方法估算其红噪声. 最终, 在耀斑莱曼阿尔法辐射中, 我们发现了约为 3 min 和 1.5 min 的双周期, 它们的周期比例约等于 2.0. 通过 SDO/AIA 的成像观测数据, 在 304 Å 和 1600 Å 波段得到耀斑局地区域的流量曲线. 在局地区域的耀斑光变曲线中, 我们得到了相似的 3 min 振荡周期, 进一步验证了振荡是来自太阳耀斑. 在莱曼阿尔法波段观测到的耀斑准周期脉动可以解释为太阳色球中的声波, 其成对的周期可以看作是声波的基频和谐频模式. 这一观测结果有助于我们更好地理解太阳大气, 尤其是色球中的磁流体力学波. 最后, 由于缺少太阳耀斑在莱曼阿尔法波段的成像观测, 不能排除双周期是由不同振荡机制驱动的可能性.

**太阳耀斑, 太阳色球, 振荡, 紫外辐射, 磁流体力学**

<https://doi.org/10.1007/s11431-020-1771-7>

## 441 铁素体不锈钢在空气和模拟汽车废气中的热疲劳行为

詹建明, 毕洪运, 李谋成

通过进行 100°C ~ 800°C 和 900°C 循环热疲劳试验, 研究了 441 铁素体不锈钢在空气和汽车废气中的热疲劳行为. 在试样热疲劳失效后, 用光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜和透射电子显微镜分析了试样的金相组织、氧化膜和析出相. 在这两种环境中, 当上限温度从 800°C 升高到 900°C 时, 441 不锈钢的高温强度和疲劳寿命快速下降, 同时试样的延伸率和晶粒尺寸增加. 在上限温度相等时, 试样在模拟废气中的热疲劳寿命低于在空气中的寿命, 较高的上限温度和模拟废气都有利于疲劳破坏行为. 最后从晶粒尺寸、热应力、高温氧化速率和第二相等方面探讨了两种环境条件下的失效机理, 其中在模拟废气中, 碳化物的析出对试样的快速疲劳失效起着重要作用.

**不锈钢, 汽车废气, 热疲劳, 氧化, 析出相**

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1865-7>

## 基于独特光响应模式的 Azo-PDMS 可穿戴紫外传感器的设计和搭建及其在双信号同步检测中的应用

祁毓豪, 郑俊萍

可穿戴紫外传感器在环境紫外检测和人体过量紫外暴露预警等方面发挥着重要作用. 目前常见的可穿戴紫外传感器大多将光电系统封装于柔性基体材料中, 以实现紫外检测性能与可穿戴性能的结合. 然而这样的构建工艺一般较为繁琐, 并且难以从根本上解决各部分元件易在外力作用下分离而导致传感器失效的问题. 针对上述问题, 我们首先聚焦新型光响应材料的设计与制备. 通过两步法将偶氮苯(Azo)引入聚二甲基硅氧烷(PDMS)主链中, 制备得到的 Azo-PDMS 弹性体展现出光致力学性能变化和光致变色的显著光响应特性. 此外, 该弹性体具有优异的力学性能、出色的紫外屏蔽性能、良好的自修复性能、可再加工性能以及可 3D 打印性能. 进一步, 我们将 Azo-PDMS 与碳纳米管(CNT)结合, 成功搭建了一个具有独特光响应模式的可穿戴紫外传感器. Azo-PDMS 膜作为感光外层, 实现了光响应功能与支撑保护功能的结合; CNT 膜作为导电内层提升了紫外检测的灵敏度和精确性. 这样的光响应模式不仅赋予传感器优异的抗运动干扰能力, 而且还可以实现对紫外-应变双信号的同步检测. 该传感器在多功能、一体化、可定制等方面具有独特优势, 有望推动新一代可穿戴紫外传感器的研究与发展.

**偶氮苯, 聚二甲基硅氧烷, 可穿戴紫外传感器, 同步检测**

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1823-9>

## 用于非接触式人造触觉的柔性有机水凝胶湿度传感器

张雨, 黎陈, 杨涵, 赵睿, 陈新建, 聂宝清, 胡亮

近年来, 国内外提出了基于多种传感机制的柔性湿度传感器. 这些传感器具有易于制造、精度高、响应速度快和重复性好等优点, 多用于新兴的健康监测、人造电子皮肤、机器工业等领域. 水凝胶是一种由亲水性聚合物链组成的三维网络, 在不同的湿度环境下具有灵活溶胀和收缩的优势. 受水凝胶结构的启发, 本文制备了一种基于有机水凝胶的电容式湿度传感器. 该传感器由柔性叉指电极层及其附着的湿敏聚丙烯酰胺(PAAm)有机水凝胶薄膜组成. PAAm 有机水凝胶在水/甘油二元溶剂下合成, 具有优异的柔韧性和极高的透明度. 环境湿度变化引起有机水凝胶膜的吸水或

脱水, 进而改变凝胶膜的介电常数和传感器的电容值. 有机水凝胶网络中的甘油使得传感器的吸水能力和机械可靠性得到大幅度提高. 即使在极低的湿度环境(相对湿度 12%)中放置 24 h 后, 传感器仍然能够保持机械柔软性和结构完整性. 通过优化甘油占比和有机水凝胶膜厚度, 本文获得了低湿性能稳定、响应/恢复速度快的柔性水凝胶湿度传感器. 该传感器在较宽的相对湿度范围(12%~95%)内实现了较高的相对电容增长(超过 20 倍). 此外, 此传感器具有优异的稳定性, 在连续 10 天固定相对湿度的测量中, 电容变化仅有 1.5%. 传感器在几种环境干扰下, 包括不同的弯曲曲率半径(高达 6.81 mm)、宽温度变化范围(20°C~40°C)和外部压力(0~8 N), 均表现出良好的稳定性. 传感器成功地检测了多种呼吸强度和速率以及多种表面(人类皮肤和树叶)间的水分差异. 我们相信该传感器提供了一种高灵敏度、大检测范围、快速响应的湿度传感方案, 有效地证明了其在非接触式人造触觉感知中的应用潜能.

**湿度传感器, 有机水凝胶, 可穿戴电子产品**

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1912-1>

## 一种基于超支化聚合物的黏合剂: 水下长期稳定, 可作为底漆锚固防污水凝胶涂层

张雅涵, 崔春燕, 孙雅格, 张晓平, 杨蓉, 杨建海, 谢飞, 刘文广

由于界面水合层的存在, 实现长期稳定的水下黏附一直是一个巨大的挑战. 在本文中, 我们提出利用多乙烯基单体与多巴胺及 3-氨基苯基硼酸的迈克尔加成反应合成新型超支化聚合物基耐水黏合剂(HBPBA). 遇水时, HBPBA 中的疏水骨架收缩形成凝聚层以清除基质的水化层, 而邻苯二酚基团则向外暴露与基质界面之间形成多种相互作用来实现黏附. 并且, 由于儿茶酚与苯硼酸的络合, 该黏合剂能够在不同的环境(自来水、模拟海水、PBS 以及各种 pH 溶液(pH 2~10))中对多种基质(PTFE, PE, PET, 陶瓷, Ti 以及不锈钢)保持长期稳定的黏附. 另外, HBPBA 薄膜可以作为底漆将具有防污性能的 PNAGA-PCBAA 水凝胶涂层锚固在钛基质表面. PNAGA-PCBAA 水凝胶修饰的钛具有良好的生物相容性, 并且在体外和体内均显示出良好的防污能力. 本工作提出了一种制备湿态黏合剂以及锚固防污涂层的新策略, 在工程和生物医学领域具有广阔的应用前景.

**超支化聚合物, 黏合剂, 生物防污, 水凝胶, 水下黏附**

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1850-7>

## 协同出产净功和淡水的压力延迟膜蒸馏技术

赵润泽, 李骥, 张子康, 隆瑞, 刘伟, 刘志春

压力延迟膜蒸馏(PRMD)是一种新兴的热功转换技术, 可将系统输入的热能转换为出口高压液体的压力能. 为降低 PRMD 技术由对流换热引起的高功耗损失, 本研究提出一种新型堆叠回热式 PRMD 系统, 该系统可在超低泵功损失下, 实现对热量的多次梯级转换利用, 还可在出产功率的同时协同出产淡水. 实验表明, 若工作在 80°C 和 40°C 的热源之间, 该系统每平方米工作面积每天可出产约 188 L 高品质淡水和 27.8 kJ 的净功率. 此外, 系统的性能会受到进料液盐离子、蒸发腔空气阻力、膜孔润湿和膜的受压压缩等因素的影响. 实验和分子动力学模拟结果还表明, 得益于跨膜蒸汽压差的增加, 较高的工作温度或工作温差将有利于淡水和功率的出产. 总之, 本研究证明了 PRMD 系统可在使用低品位热能作为唯一能源输入下对外出产净功率和淡水, 不过, 为获得更好的系统性能, 还需进一步改善蒸发腔供液、工作压力和膜的特性等.

**水淡化, 可再生能源, 低品位热能, 热渗透, 膜蒸馏**

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1926-6>

## 具有能量采集和应变传感共面一体化设计的可伸缩摩擦发电机

吴彬, 张增星, 薛小斌, 郝聪聪, 张文君, 毕锐宇, 王强, 薛晨阳

目前, 柔性摩擦电纳米发电机(TENGs)的快速发展已成为可穿戴设备电池的替代品. 可伸缩、多功能、低成本是基于 TENG 的可穿戴设备的主要发展方向. 为此, 本文设计了一种共面集成的可伸缩摩擦发电机, 可以用于能量采集和应变传感. 本文采用可工业生产的硅胶和导电硅胶制备了厚度小于 0.9 mm 的 TENG. 当伸长率小于 150% 时, TENG 在电阻-拉伸应变对应关系中表现出良好的线性特性, 线性拟合系数为 0.99. 当接触面积为 9 cm<sup>2</sup> 时, 这种可拉伸的 TENG 通过拍打可以产生 2 μA 的短路电流. 最后, 本文研制了一种能有效测量拉伸力的智能张力监测穿戴设备. 我们相信这种可伸缩、共面集成化、低成本的可穿戴设备在可穿戴电子领域具有良好的适用性.

**可穿戴设备, 可拉伸, 拉力监测, 多功能材料**

<https://doi.org/10.1007/s11431-020-1808-2>

## 镍箔上原位生长 NiS<sub>2</sub> 纳米片阵列作为正极改善锂/钠硫电池性能

范谋平, 陈源茂, 柯曦, 黄泽焘, 陈有辰, 吴文鲤, 屈小峰, 施志聪, 郭再萍

通过原位生长和硫化的方法在镍箔上制备 NiS<sub>2</sub> 纳米片阵列(NiS<sub>2</sub>/NF)作为正极用于锂硫电池. NiS<sub>2</sub> 纳米片阵列结构能够为多硫化物的吸附和化学作用提供丰富的活性位点. 相比于纯镍箔负载硫(pure NF-S)用于锂硫电池, 使用 NiS<sub>2</sub>/NF 负载硫(NiS<sub>2</sub>/NF-S)具有更优异的电化学性能. NiS<sub>2</sub>/NF-S 作为锂硫电池正极在 0.1 C (1 C=1675 mA g<sup>-1</sup>) 的电流密度下具有 1007.5 mA g<sup>-1</sup> 的较高可逆容量, 并且在 1.0 C 的电流密度下循环 200 次具有 74.5% 的初始容量保持率, 表明了 NiS<sub>2</sub>/NF-S 作为锂硫电池正极的潜能. 此外, NiS<sub>2</sub>/NF-S 作为钠硫电池正极也表现出相对满意的电化学性能.

**硫化镍, 锂硫电池, 钠硫电池, 纳米片阵列结构, 电化学性能**

<https://doi.org/10.1007/s11431-021-1860-x>







- ◆ Peer-reviewed
- ◆ Indexed by SCI, EI, CA, etc.
- ◆ Online submission
- ◆ Easy access to the electronic version

<http://techn.scichina.com>



《中国科学：技术科学》编辑部 | 地址：北京市东城区东黄城根北街16号 | 邮编：100717  
 电话：+86-10-64010631 | 传真：+86-10-64016350  
 E-mail: technology@scichina.org | 网址: techn.scichina.com

主管：中国科学院  
 主办：中国科学院 国家自然科学基金委员会

《中国科学》杂志社  
 SCIENCE CHINA PRESS

ISSN 1674-7259  
 9 771674 725223 01>