



ISSN 0577-6688  
CODEN CHHKA2

# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：共融机器人

客座主编：熊蔡华



中国机械工程学会 主办

万方数据

2019年55卷11期 半月刊



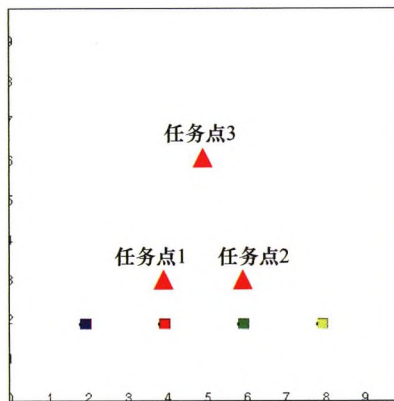
## /// 特邀专栏 ///

### 共融机器人

客座主编：熊蔡华教授（华中科技大学）  
策划编辑：罗晓琪（《机械工程学报》编辑部）

#### 1 面向灾难搜索救援场景的空地协同无人群体任务规划研究

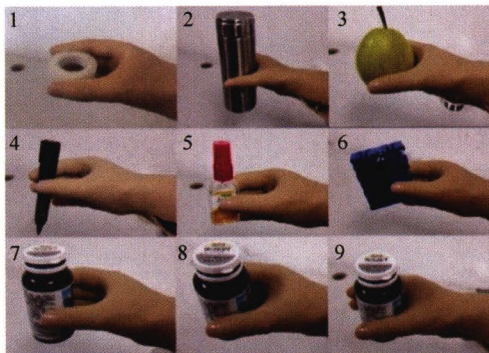
李明龙 杨文婧 易晓东 王彦臻 王 戟



**摘要：**面向地震场景，提出了一种有效的空地协同搜救框架，高空侦察机获取地面受损建筑物位置信息传递给无人机搜索群体，无人机根据此信息做分布式任务规划，到达目标建筑对受灾人群做进一步侦察，并将伤员密度分布信息传递给地面无人车群体。无人车做集中式规划，到达伤员地点执行救援任务。针对无人机群体的任务规划，根据其小型、廉价、可大规模部署以及通信能力弱的特点，改进传统的拍卖任务规划方法，提出了一种新的基于通信保持的拍卖方法(CMBA)；救援无人车群体虽然载荷能力强，但是在灾区恶劣道路环境条件下，无法大规模部署，必须发挥其执行任务的最大效用，传统遗传算法适用于中心化的精确任务规划，但是存在易陷入局部最优解的缺点，提出了一种自适应反馈调节遗传算法(AFBA-GA)改进这一缺点。通过在机器人仿真器中和标准数据集集中的测试，验证了任务规划方法的有效性。

#### 10 基于力触觉感知与电刺激反馈的灵巧假手

胡旭晖 石 珂 祝佳航 宋爱国



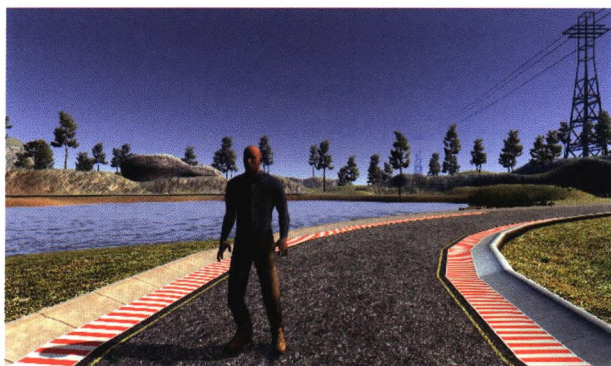
**摘要：**针对机电一体化灵巧操作假手这类典型共融机器人，开展结构优化、力触觉感知和临场感反馈功能重建的研究。为此，提出了一种用于欠驱动手指机构设计的交叉四连杆参数优化方法，该方法实现了手指运动轨迹最优、近指关节(PIP)扭矩与掌指关节(MCP)扭矩之比最大；提出了义肢手指与柔性压力传感器的集成设计方法，实现假手对抓握物体的实时力触觉感知；提出了基于电刺激的指端力触觉临场感反馈方法，实现对义肢抓握情况和握力的再现，增加操作者的本体感。该假手手指运动学与动力学仿真结果表明，所提出的连杆参数优化方法能够提升手指的抓握能力。对9名肢体健全受试者与1名前臂截肢患者进行灵巧假手控制试验，试验结果表明，所提出的指尖力触觉感知方法能够很好辅助受试者完成精细抓握控制；使用电刺激方式作为力触觉临场感反馈器具有更好的本体感知效果。同时，明显提升受试者在视觉受阻状况下使用假手完成抓取任务的成功率。



**摘要:** 人体运动意图的准确可靠识别是人机共融中的关键问题之一。针对现有研究中的局限和不足,提出了全新的非接触式电容传感方法。该方法以金属电极不接触皮肤的方式测量肌肉收缩信号。介绍了电容传感的原理,分析了基于该方法测量肌肉收缩形状变化的机理。分别介绍了非接触式电容传感方法在小腿智能动力假肢控制和上肢运动识别中的应用。针对下肢智能假肢控制,提出了基于非接触式电容传感的运动模态以及模态切换的识别。为了进一步提高系统的可穿戴性,提出了基于柔性可延展液态金属电极的电容传感系统并进行了初步的试验验证;针对上肢运动识别,首先介绍了用于腕关节离散运动模式的识别研究,其次介绍了基于电容传感对连续握力的识别和估计,证实了电容传感这一全新方法在上肢运动识别中的可行性。未来会在穿戴式机器人控制以及协作性机器人模仿学习中对电容传感方法进行更深入的研究。

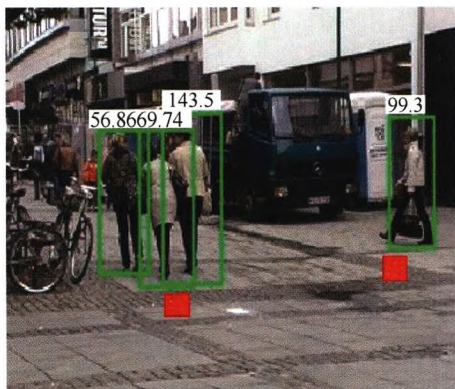
## 28 基于改进共空间模式与视觉反馈的闭环脑机接口

任士鑫 王卫群 侯增广 陈霸东 石伟国 王佳星 梁旭



**摘要:** 为提高脑卒中等神经损伤患者在下肢康复训练过程中的主动参与度,设计了基于人体下肢运动想象与视觉反馈的在线闭环脑机接口,并建立了基于互相关熵诱导度量与子频带分析的改进共空间模式算法,提高人体下肢运动意图的识别率。针对运动想象脑电信号信噪比低和难以精确识别等问题,在传统共空间模式算法基础上,利用互相关熵诱导度量准则改进其目标函数,实现了目标函数中距离项属性的动态调整,降低对噪声的敏感性,提高算法鲁棒性;利用脑电信号不同频段蕴含信息不同的特点,使用9个子频带滤波器对信号进行滤波,对每个子频带信号分别提取特征,并进行特征融合,建立基于互相关熵诱导度量与子频带分析的改进共空间模式算法。其次,基于人体下肢运动想象的脑控试验范式,收集下肢运动想象(空想、脚动和腿动)的脑电数据,采用支持向量机(SVM)建立分类模型,优化设计模型参数。在上述研究基础上,建立了以改进共空间模式为特征提取算法,SVM为分类器的脑机接口。进而,在被试执行运动想象的同时,通过虚拟现实场景中虚拟人物的肢体动作给予用户视觉反馈,构建了闭环的脑机交互系统。通过试验验证了改进共空间模式算法的有效性和闭环脑机接口的可行性,初步实现了闭环脑机交互接口。





**摘要:** 在人机共融环境中, 移动机器人自主移动必须解决可通行区域感知与自身定位的问题。因此提出了一种基于行人行为学习的机器人同时定位与可通行区域制图算法。该算法首先基于行人行为学习的方式对非结构化道路环境中的可通行区域进行采样, 并使用区域生长算法得到连通的可通行区域。在定位与制图过程中, 将视觉 SLAM 技术与检测到的行人信息和可通行区域信息结合起来, 在匹配过程中剔除动态行人身上的特征点, 并通过恒速率模型+DLT 算法和贪心搜索+DLT 算法结合的方式提升匹配的速度和鲁棒性, 在 Bundle Adjustment 优化过程中针对不同特征点给予不同的权重以进一步提升精度, 并在构建的环境点云地图中增量式添加所检测到的可通行区域信息。试验表明在复杂的非结构道路环境中, 该算法可以在移动机器人平台上同时实现准确的自定位和包含可通行区域的环境地图。

## 46 考虑力补偿的 2(3PUS+S)并联机器人主动关节同步控制

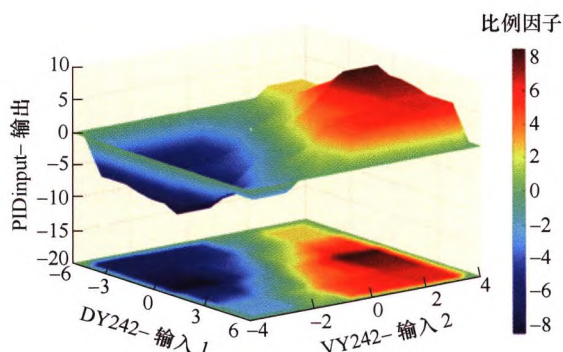
山显雷 程 刚 陈世彪



**摘要:** 在并联机器人基于关节空间的控制中, 运动控制精度不仅受结构误差及运动副摩擦的影响, 由于闭链结构特点, 还受主动支链的耦合及运动协调性的影响。以一种 2(3PUS+S) 并联机器人为研究对象, 在前期误差及摩擦补偿研究的基础上, 开展主动关节的同步控制研究。通过建立基于关节空间的动力学模型确定主动关节由于惯量耦合引起的耦合力, 以主动支链间的运动协调性为约束定义同步误差, 并基于增广 PD 控制理论设计主动关节的同步控制策略, 在进行结构误差修正的基础上以前馈补偿方式对耦合力及摩擦力进行补偿, 基于控制试验验证了所设计控制策略的有效性。提出的考虑力补偿的主动关节同步控制策略对于改善并联机器人的运动控制精度具有重要作用。

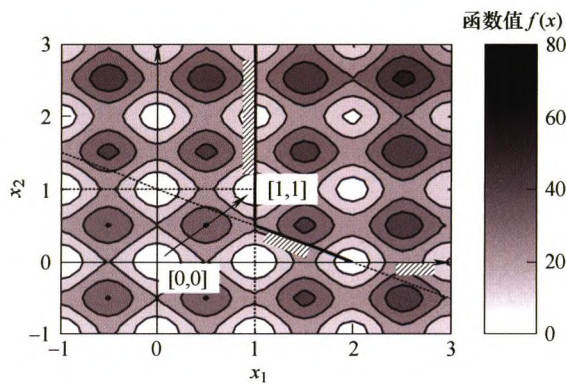
## 53 基于索驱动的大型柔性结构振动抑制策略研究

孙海宁 唐晓强 王晓宇 崔志伟 侯森浩



**摘要:** 柔性索并联机构具有工作空间大、能耗低和惯量小等优点, 适用于长距离柔性桁架结构的振动主动抑制。首先提出一种四索驱动的柔性体抑振并联机构, 根据闭环矢量原理和机构的几何特征, 对四索并联机构进行运动学分析。接着建立四索并联机构的静力学模型, 并将超长尺度柔性桁架机构的往复振动简化为梁的弯曲振动, 利用振型叠加法求解外部激励作用下的强迫响应。最后针对超长尺度柔性桁架机构的振动抑制问题, 提出一种基于模糊控制与 PID 控制相结合的控制策略, 通过仿真验证所提控制策略的有效性。结果表明, 所设计的柔索并联抑振系统具有明显的抑振效果, 柔性桁架的振幅与振动衰减时间大幅降低, 且系统的四索索力值能够在合适范围内变化。

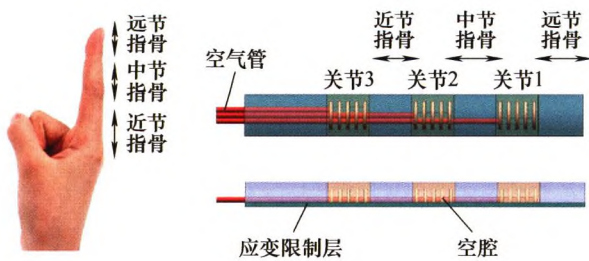




**摘要:** 针对机器人优化设计等工程应用中普遍存在的黑箱问题,提出了一种高效、稳定的遗传算法-非均匀 Kriging-梯度投影混合全局优化(Hybrid global optimization, HGO)算法。该方法使用非均匀 Kriging 模型对目标函数进行评估,能够在不苛求近似模型全局精度的情况下保证优化过程的精度,并节省大量计算时间。使用梯度投影法对遗传算法种群进行变异,可以在提升优化收敛效率的同时确保优化约束条件,从而可以避免使用并不严格的罚函数法处理约束函数。为验证算法的有效性和优越性,将本算法应用于两个数学测试算例和一个模块化机械臂截面优化实例中,并与其他优化算法比较。结果表明,本算法能够兼顾结果精度、优化效率和算法稳定性,发挥更好的综合性能,从而实现了对工程问题的全局优化设计。

## 69 基于弹性体材料仿生手的设计、制造及其控制

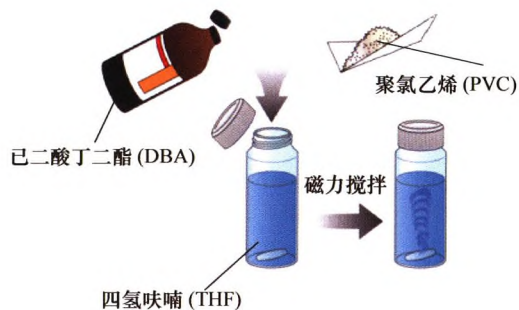
罗召俊 王 帅 程广贵 袁宁一 丁建宁



**摘要:** 软体机器人是近年来的研究热点,涉及信号检测、控制、致动等多个方面。基于弹性体材料设计制备了一种符合人体手指运动规律的弯曲致动器及其仿生手和电容式可拉伸传感器。仿生手总共设计有 14 个弯曲关节,且每个弯曲关节都由外部管道独立控制,当外部气压达到 50 kPa 时,手指关节能够实现 90° 的弯曲变形,最大指尖压力为 210 mN。可拉伸应变传感器在 200% 应变下表现出良好的稳定性和可逆性,将传感器贴于手指关节上具有监测手指运动的功能。最后,将传感器贴于手套上作为可穿戴器件,通过单片机控制系统采集手套上传感器由于手指弯曲产生的信号,信号经蓝牙传输,实现对气动回路的有效控制,最终完成对仿生手的远程实时操控。研究结果可应用于远程交互、生命科学等领域。

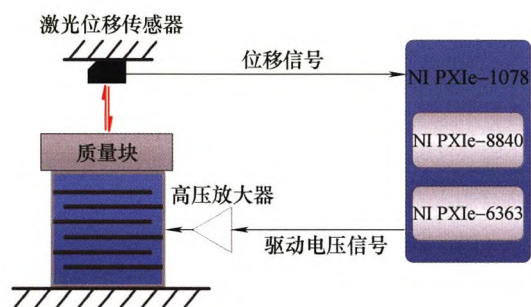
## 76 电活性聚合物 PVC 凝胶材料的 3D 直写打印工艺

罗 斌 陈花玲 徐雪杰 汝 杰 朱子才



**摘要:** 鉴于电活性聚合材料 PVC 凝胶具有驱动电压低、且具有弯曲和拉压变形的双重能力,有望满足软体机器人个性化与结构复杂设计需求,将直写打印技术与材料的成型制备方法结合起来,研究了 PVC 凝胶的打印工艺。首先,配置了不同浓度的打印墨水,测试了不同浓度打印墨水的流变性能用以表征其可打印性,结果表明配置的 PVC 凝胶打印墨水整体表现为剪切变稀性质,具有较强的可打印性,其中质量比为聚氯乙烯(PVC):己二酸丁二酯(DBA):四氢呋喃(THF)=1:4:12.5 的溶液用于打印具有固化速度快,易于挤出的特点。然后,通过单点成线试验,发现打印参数为:挤出流量为 0.02 mL/min,扫描速度为 36 mm/s 时,成线精度可以达到 0.15 mm。在此基础上,进行三维叠加打印试验,实现了波纹状、网状、鱼鳞状 PVC 凝胶结构的 3D 打印。采用 3 层鱼鳞状 PVC 凝胶结构做成叠层,给该结构施加 700 V 方波电压时,其上下振动位移达到 0.21 mm;施加 900 V 方波电压时,其驱动力为 1.18 N,为自身重量的 21 倍。试验结果表明:直写打印制备出来的 PVC 凝胶材料驱动性能良好,表明打印工艺的可行性。

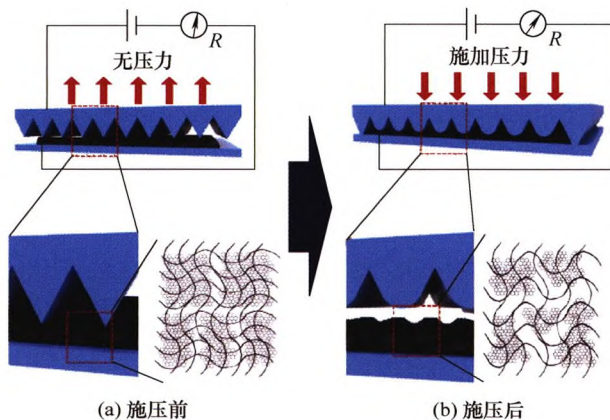




**摘要:** 随着机器人技术的发展,能与自然交互、自主适应复杂动态环境并协同作业的共融机器人在高端制造、医疗康复、国防安全等领域将会发挥巨大的作用。在共融机器人运动执行机构的研究中,基于介电弹性体(DE)的作动器表现出很好的环境适应性和机电性能。为了进一步研究介电弹性体作动器,将弹性体电极引入介电弹性体作动器中,通过流延工艺逐层堆积电极层和作动器层,实现了多层 DE 作动器的一体化制造。在光学显微镜下观察到,基于该工艺制备而成的堆栈式 DE 作动器各层的厚度一致性好,且与设计尺寸间的误差较小。作动器在静态电压及动态扫频电压下的响应结果显示,该工艺制备而成的作动器具有较好的变形性能,且变形性能一致性较好。经过一年的使用后,作动器的性能衰减不明显,该作动器的这一特点适用于机器人等需要长期服役装备的使用需求。

## 90 喷印柔性压力传感器试验研究

罗毅辉 彭倩倩 朱宇超 王广顺 吴德志 朱睿 谢瑜 孙道恒



**摘要:** 柔性压力传感器是智能机器人和生物医疗等典型应用领域中的关键部件。针对 10~50 kPa 中等压力下对柔性压力传感器的高灵敏度、良好压力分辨率和快速响应需求,提出在 PDMS 基底上直写喷印石墨烯纳米片(GNPs)/多壁碳纳米管(MWCNT)构建 S 型折线图案化敏感单元,结合封装层微结构阵列,制备中压高灵敏度、低检测限的柔性压力传感器。试验结果表明,在压力为 0~15 kPa 和 15~40 kPa 的条件下,该传感器灵敏度分别为  $0.114 \text{ kPa}^{-1}$  和  $1.41 \text{ kPa}^{-1}$ , 响应/恢复速度快(约 100 ms/50 ms)。同时,其也可检测低至约 3 Pa 的微小压力。同时,该传感器更是能对不同发声进行准确的区分识别,对不同的指压信号进行精确稳定反馈。可见,喷印制造柔性压力传感器将为语音识别、人工假肢、制备高性能电子皮肤和医疗康复器件等提供可能的优选方案。

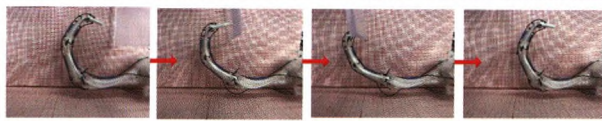
## 98 面向机器人环境共融的图像去雪算法

李鹏越 田建东 王国霖 李小毛 唐延东 吴成东

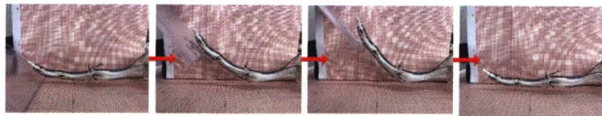


**摘要:** 针对雪天气影响共融机器人视觉系统鲁棒性的问题,提出了一种基于雪模型和深度学习融合的去雪算法。根据雪的成像过程推导了一个简化的雪模型,设计了一个基于该模型的深度去雪网络,该网络由雪花检测子网络和去除子网络串联组成。雪花检测子网络采用了残差学习网络,该网络可以准确地学习雪图像和无雪图像之间的差异。去雪子网络采用了密集连接的 U 型网络。它一方面利用 U 型网络保留背景的细节信息,另一方面利用 DenseNet 将低层特征复用到高层的特点来提高去雪的准确度,将它们结合后缓解了去雪过度导致背景细节丢失和去雪不彻底之间的矛盾。试验证明这种基于雪模型的深度去雪网络能够较好地检测和去除图像中的雪花。

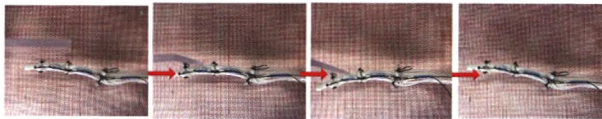




(a) 屈曲状态



(b) 伸展状态

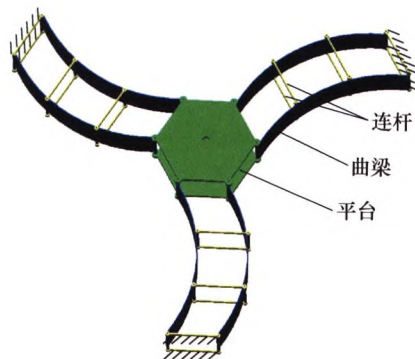


(c) 外展 / 内收状态

**摘要:** 仿生手能够实现各类复杂的动作, 广泛应用于工业及医疗领域。现有的刚性仿生手大多具有质量重、柔顺性差等缺陷, 而柔性仿生手的控制精度低、难以实现有力的抓握。针对上述不足, 以人手的生理结构为设计依据, 运用 3D 打印技术制成刚性人手骨骼模型, 以日本东京工业大学铃森康一教授团队开发的 1.3 mm 和 2 mm 直径的细径 McKibben 型气动人工肌肉作为柔性执行器, 参考人手肌肉布局分别模拟人手的内在肌与外在肌, 研发一种刚-柔耦合仿生手指。利用 BP 神经网络构建手指的运动学模型, 分析手指关节运动和肌肉间的耦合驱动关系, 通过试验测试结果评估模型的预测精度, 通过对比解剖学的研究成果发现, 提出的仿生手指在驱动原理和运动学特性上与人手具有高度的相似性。

#### 114 一种 2 自由度柔顺移动并联机构研究及其在对接装置上应用

杨 毅 鹿碧洲 李小毛 姚骏峰 蒲华燕 彭 艳



**摘要:** 利用伪刚体模型研究了柔性曲梁的弹性回复力和刚度特性, 推导出了柔性曲梁的直线刚度表达式, 其结果表明通过改变曲梁的预变形量可以改善曲梁的刚度特性, 使其具有近似线性化刚度特点。利用该特点, 提出了一种双曲梁支链结构形式。结合伪刚体模型和螺旋理论, 探讨了该双曲梁支链的自由度和运动特性, 进而设计出了一种 2 自由度柔顺移动并联机构。根据机构运动特点, 推导出了其简化运动学和动力学方程, 给出了并联机构平台的工作空间和刚度性能, 对并联机构平台的极限扭转力矩进行了研究, 并制作了柔顺移动并联机构实物样机, 对其运动特性进行了试验验证。最后, 将 2 自由度柔顺移动并联机构应用于无人艇水样对接装置设计, 利用 ADAMS 仿真了对接过程, 结果表明, 该装置能在有较大的径向平移偏差和角度偏差的情况下, 完成公头和母头的柔顺对接。

#### 123 目标搜索与识别的视觉注意网络与学习方法

吕 杰 罗芳颖 袁泽剑

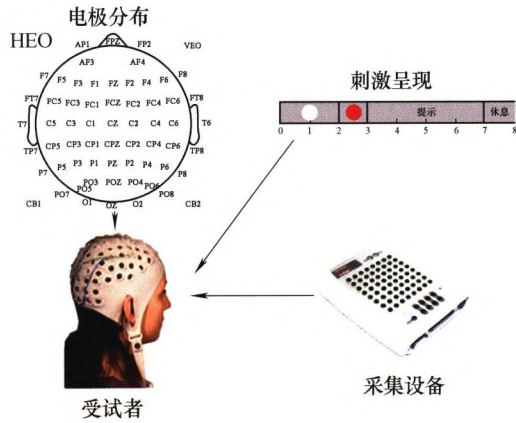


**摘要:** 提出一种循环视觉注意网络来同时进行目标搜索和识别。该网络能够从图像中自动选择一个局部观测序列, 通过融合局部详细表现和粗略上下文视觉信息, 实现视觉目标的高精度定位与识别, 比传统的滑动窗口和全图卷积的方法具有更高的目标搜索效率。此外, 提出了一种混合损失函数来对网络参数进行端到端的多任务学习, 特别在视觉注视点序列损失函数中引入随机性和目标启发的组合策略, 可以有效地挖掘更丰富的上下文信息, 保证注意点快速接近视觉目标。建立了一个真实场景数据集来验证该模型在感兴趣目标和小目标搜索与识别的性能。试验结果表明, 该方法通过几个注视点转移, 就能在一幅图像上预测一个视觉目标的准确边框, 并在大图像上获得比较高的搜索速度。开放源代码用于该方法验证与比较分析。



### 131 复合肢体想象动作脑-机接口中黎曼核支持向量机递归特征筛选方法

陶学文 奕伟波 陈龙 何峰 蔡宏志

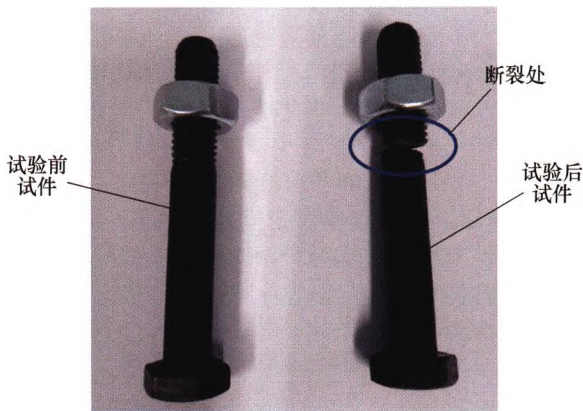


**摘要:** 相对于传统的想象动作脑-机接口, 复合肢体想象动作脑-机接口有效提升了指令复杂度, 具有更好的中风后康复治疗潜力, 但当前较低的识别精度限制了其临床应用。为提升复合肢体动作想象相关脑电信号特征的特异性并降低不同通道间的信息混淆, 提出了一种基于脑电流形特征信息刻划的黎曼核支持向量机递归特征筛选方法(Riemann kernel support vector machine recursive feature elimination, RKSVM-RFE)。采集了 10 位被试在进行想象 7 种不同肢体部位动作时的脑电信号数据, 利用 RKSVM-RFE 方法进行特征优化和建模, 对脑电数据对应的运动意图进行识别。结果显示, 基于所提方法的平均识别正确率达到了 77%, 相比于经典的 CSP 方法提高了近 7%, 并且能够消减近 50% 的脑电信息采集通道, 可有效降低系统复杂性。研究结果为基于想象动作脑-机接口的康复技术发展提供了新的思路, 值得进一步发展。

## /// 机械动力学 ///

### 138 振动条件下螺纹预紧力衰退机理和影响因素研究

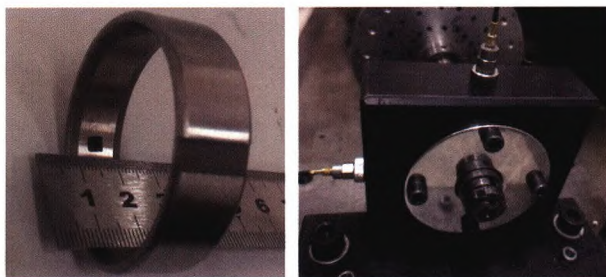
巩浩 刘检华 丁晓宇



**摘要:** 预紧力的保持性直接影响螺纹连接件的紧固功能, 当前国内外的研究成果表明, 在周期性横向振动的作用下螺纹连接件的预紧力很容易出现衰退, 其中塑性变形和内外螺纹间的旋转松动是导致预紧力衰退的两个主要原因。通过多种有限元模型仿真对比, 进一步揭示了横向振动条件下的预紧力衰退机理, 发现应力再分布是导致预紧力衰退的另外一个重要原因。在此基础上, 系统分析了在不同横向力、螺纹面摩擦因数、端面摩擦因数和材料特性的条件下, 应力再分布、塑性变形以及旋转松动所导致的预紧力衰退过程的规律, 最终获得了包含预紧力非线性快速衰退、预紧力线性衰退、以及疲劳断裂三个阶段的典型预紧力衰退曲线, 并通过横向振动试验验证了该曲线的正确性。

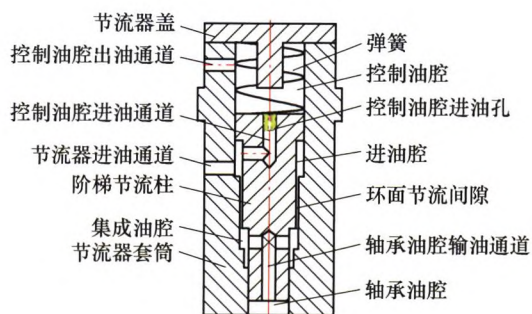
### 149 广义参数化同步压缩变换及其在旋转机械振动信号中的应用

俞昆 罗志涛 李鸿飞 马辉



**摘要:** 广义参数化时频分析通过构造匹配的参数化变换核, 能够有效提高强调频信号的时频能量聚集性。然而, 受短时傅里叶变换中窗函数结构的影响, 利用该方法获得的时频能量分布在真实瞬时频率附近始终存在能量扩散现象。同步压缩变换利用同步压缩操作可将短时傅里叶变换处理后的时频能量压缩至真实瞬时频率位置, 然而, 同步压缩变换仅适用于分析频率成分恒定的纯谐波信号。以短时傅里叶变换为纽带, 将两种时频分析方法相结合, 提出了广义参数化同步压缩变换。考虑到旋转机械振动信号多为多分量信号, 通过迭代处理的方式, 依次获取各单分量信号的时频能量分布, 对其进行叠加得到最终的时频能量分布。通过数值仿真以及变转速下转子不对中、滚动轴承外圈故障模拟试验验证了所提方法的有效性。

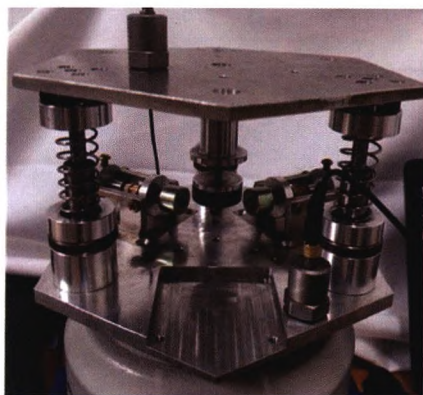




**摘要:** 可控节流技术可以显著提高液体静压主轴的刚度和回转精度, 在工程上已得到实验证实, 但是液体静压主轴在可控节流条件下是如何提高回转精度的过渡过程一直不明确。利用现有的液体静压主轴理论, 还不能定量解释可控节流静压主轴从不平衡状态到平衡状态、以及稳态回转误差显著缩小的过渡过程。在考虑轴颈惯性力和非线性油膜力的基础上, 根据可控节流器的工作原理和节流特性, 建立了可控节流液体静压主轴动态轴心轨迹的理论模型, 利用该模型进行数值模拟对过渡过程中的一系列物理现象做出了合理的定量解释。研究发现, 在轴承结构参数和液压系统参数相同的条件下, 可控节流主轴相比于固定节流可以显著缩短轴心轨迹的过渡过程响应时间、减小轴颈偏心位移、降低主轴稳态回转误差, 从理论上揭示了可控节流器可以提高液体静压主轴油膜刚度和回转精度的物理机理。

## 169 可用于大幅值激励的永磁式非线性隔振器

严 博 马洪业 韩瑞祥 王 珂 武传宇

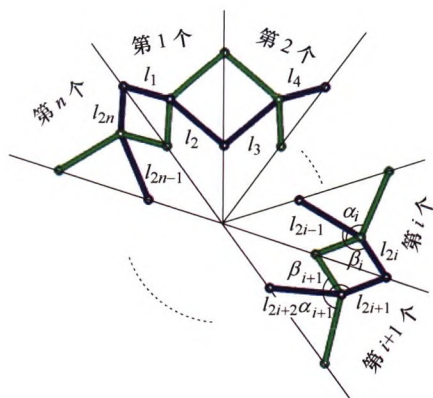


**摘要:** 大加速度激励可极大影响结构的性能, 甚至造成其破坏, 如火箭发射时产生的强烈振动。提出了一种新型永磁式非线性隔振器, 利用永磁力构建等效负刚度, 并基于非线性软弹簧实现大加速度激励下的高性能隔振。永磁装置由一个轴向布置的永磁体和三个沿圆周均布的环形永磁体构成, 所有永磁体均沿轴向磁化。分析并建立了隔振系统理论模型, 基于谐波平衡法推导并得到了非线性隔振器的传递率表达式。设计了非线性隔振器的试验系统, 分别研究了隔振器在 0.2g、0.3g、5g 及 7g 加速度激励下的隔振性能。结果表明, 非线性隔振器在大幅值加速度激励(7g)下具有良好的隔振效果, 其峰值频率降低 47%, 最大传递率降低 70%。此外, 也研究了永磁装置沿圆周不对称时的隔振特性, 在该情况下, 峰值频率降低 51%, 最大传递率降低 86%。

## /// 数字化设计与制造 ///

## 176 一类平面对心折展机构的构造方法

孙学敏 姚燕安 李锐明 刘 然 魏超然



**摘要:** 通过多个广义折弯杆组构造具有同一缩放中心的折展机构, 给出了平面对心折展机构的一般化构造方法。分析了第一类广义折弯杆组(GAE I)和第二类广义折弯杆组(GAE II)的约束条件, 对两个广义折弯杆组进行了对心构造, 并用几何方法得到了两个广义折弯杆组对心构造条件, 给出了两类折弯杆组的运动分析。在此基础上, 分析了  $n$  个 GAE I 和  $n$  个 GAE II 组成的对心机构的构造条件, 得到具有  $n$  个广义折弯杆组的对心折展机构的回环连接方法。通过对 GAE I 和 GAE II 折弯杆组的展开与折叠状态的分析, 给出了两类折弯杆组的折展比。分别对由 6 个 GAE I 和 6 个 GAE II 组成的对心折展机构, 建立了三维模型, 给出了典型的运动状态; 制作了两款机构模型, 验证了所提出构造方法的可行性。



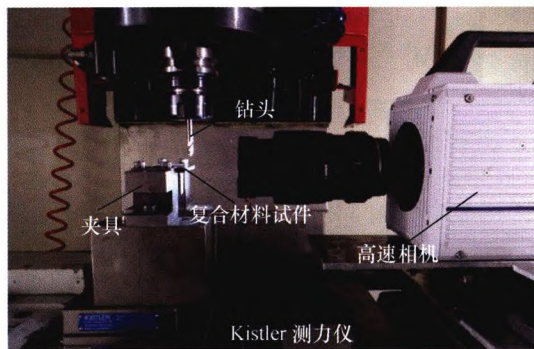


**摘要:** 研究了六关节工业机器人工具坐标系原点 TCP 的标定原理, 提出了 TCP 标定的解析化模型和几何模型, 并对标定误差来源进行了综合性分析, 定量分析了标定点数和标定位姿对 TCP 标定精度的影响。在经典四点法标定的基础上, 引入了误差阈值的概念, 提出一种改进的“五點選优 TCP 标定算法”, 并进行了仿真验证和实物验证。验证结果表明, 提出的标定算法能够有效筛选出误差偏大的点, 对标定精度能进一步提高, 可靠性也得到了进一步保证。

## /// 制造工艺与装备 ///

### 197 复合材料成型分层缺陷在钻削横刃挤压阶段的扩展行为

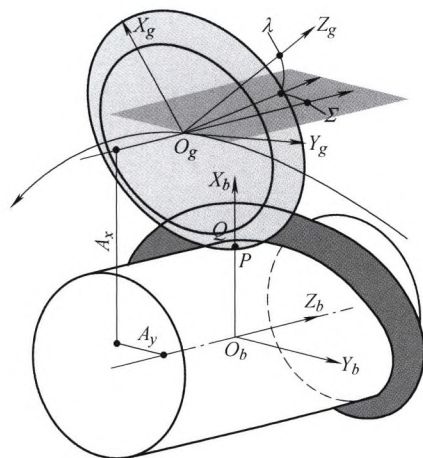
王福吉 胡海波 张博宇 马建伟 赵 猛



**摘要:** 碳纤维增强复合材料由于具有高比强度、高比模量等优异性能, 广泛应用于先进装备的承力构件中。此类复材构件在铺放固化成型过程中易产生随机分布的分层缺陷, 若缺陷区域与构件连接孔加工区域交叠, 将使制孔损伤产生机制更加复杂、加工质量更难以保证。为保障碳纤维复合材料构件的加工质量, 揭示成型分层缺陷对制孔质量的影响机制, 针对钻削过程中成型分层缺陷的动态演化行为进行研究, 得到其在钻削过程中轴向力最大的横刃挤压阶段发生扩展的临界条件以及扩展长度的计算方法。基于此, 结合钻削试验对预埋分层缺陷在制孔过程中的扩展行为进行在线观测, 最终获得刀具作用位置对缺陷扩展行为的影响。该研究成果将为后续有关复材成型缺陷在钻削过程中扩展的抑制方法研究提供基础, 也将为丰富复材损伤抑制理论作出贡献。

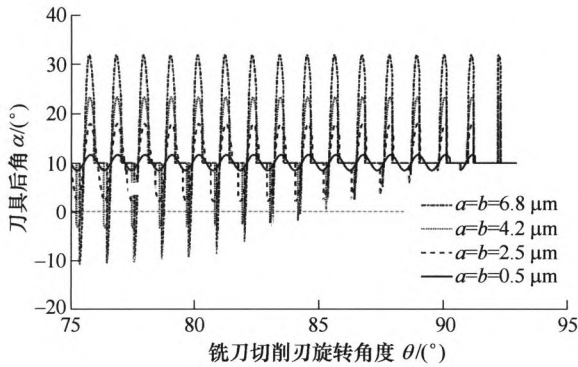
### 205 一种拉刀螺旋容屑槽前刀面磨削砂轮安装位姿计算方法

贾 康 洪 军 张银行



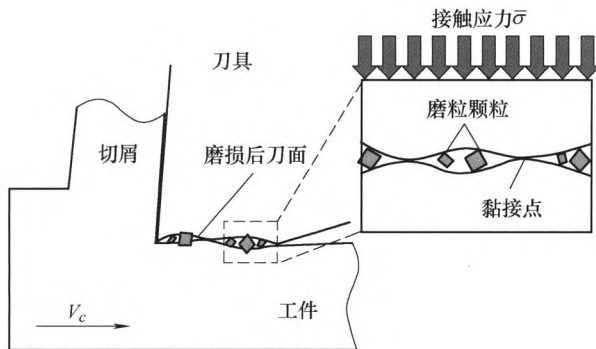
**摘要:** 螺旋容屑槽是螺旋拉刀的重要结构之一, 螺旋前刀面的高质量精确磨削对于刀具的工作性能与服役寿命有着重要影响。提出了一种适用于螺旋前刀面刃磨的砂轮安装位姿计算方法, 确保螺旋前刀面的精密磨削。首先从五轴加工角度构建砂轮安装位姿与磨削运动数学模型, 然后基于离散砂轮空间运动扫掠体进行螺旋槽轴截面加工廓形的离散包络计算, 并给出相应的离散磨削接触线追溯算法。在此基础上, 进一步分析拉刀前刀面的磨削工艺并构建磨削工艺约束条件, 形成拉刀螺旋前刀面刃磨的砂轮安装位姿计算模型及其优化搜索方法。最后进行了实例求解, 通过与解析法计算结果的精度对比和磨削接触线分布位置的状态验证了该算法的有效性, 并进一步对砂轮安装角、砂轮外径和加工槽宽的关系进行讨论, 给出了实际应用中的砂轮安装位姿优选规则。





**摘要:** 研究了钛合金高速超声椭圆振动铣削中振幅对加工表面完整性的影响。首先基于高速超声椭圆振动铣削过程中刀具-工件的运动学特点和实现分离断续切削条件,建立了切屑厚度模型以及考虑刀具-工件有效参与铣削的刀具动态切削后角模型。针对振幅对高速超声椭圆振动铣削的影响进行了微量润滑条件下的高速超声椭圆振动侧铣削钛合金试验,对不同振幅条件下的高速超声椭圆振动铣削过程中的切削力、工件表面质量、残余应力、亚表层显微组织以及表面显微硬度进行了详细研究。试验结果表明:高速超声椭圆振动铣削过程中的平均径向切削力值随着振幅的增大呈现减小的趋势。高速超声椭圆振动铣削中振动幅值对于工件表面完整性的影响显著。高速超声椭圆振动铣削表面粗糙度值随着振动幅值的增大而增大;高速超声椭圆振动铣削表面残余压应力值随着振动幅值的增大而增大;高速超声椭圆振动铣削的变形层厚度以及晶粒细化程度随着振动幅值的增大而增大;高速超声椭圆振动铣削表面加工硬化程度随着振动幅值的增大而增大。

224 基于 Simulink 反馈方法的钛合金铣削刀具磨损预测



**摘要:** 钛合金因其突出的综合性能广泛应用于航空航天领域,然而由于其难加工性,在钛合金切削过程中极易产生刀具磨损,所带来的加工精度低、表面质量差等现象严重影响钛合金的切削效率及经济效益。因此建立合理的钛合金铣削磨损模型对实际加工生产具有重大的指导意义。考虑了实际切削加工过程中的热力耦合条件,基于磨粒、黏结、扩散三种磨损机理,结合磨损过程铣削刀具的几何形状改变,利用 Simulink 软件进行反馈仿真预测,获得后刀面磨损带曲线;并通过实际铣削试验进行刀具寿命试验,对仿真模型的可靠性进行验证。结果表明,该方法可以较好地预测刀具后刀面磨损带长度随时间的变化,整体预测误差在 22% 以下。该研究提高了刀具磨损带的计算精度,并为切削参数的合理选择提供理论基础。



## CONTENTS

- 1 Swarm Robot Task Planning Based on Air and Ground Coordination for Disaster Search and Rescue**  
LI Minglong YANG Wenjing YI Xiaodong WANG Yanzhen WANG Ji
- 10 Dexterous Prosthetic Hand with Force Perception and Electrical Stimulation**  
HU Xuhui SHI Ke ZHU Jiahang SONG Aiguo
- 19 Noncontact Capacitive Sensing Based Human Motion Intent Recognition**  
WANG Qining ZHENG Enhao XU Dongfang MAI Jingeng
- 28 Closed Loop Brain Computer Interface Based on Improved Common Spatial Patterns and Visual Feedback**  
REN Shixin WANG Weiqun HOU Zengguang CHEN Badong SHI Weiguo WANG Jiaying  
LIANG Xu
- 36 Simultaneous Localization and Traversable Region Mapping Based on Pedestrian Behavior Learning**  
XING Zhiwei ZHU Xiaorui HE Chao
- 46 Active Joint Synchronization Control of a 2(3PUS+S) Parallel Robot with Consideration of Force Compensation**  
SHAN Xianlei CHENG Gang CHEN Shibiao
- 53 Vibration Suppression of Large Flexible Structure Based on Cable-driven Parallel Robots**  
SUN Haining TANG Xiaoqiang WANG Xiaoyu CUI Zhiwei HOU Senhao
- 61 Hybrid Global Optimization Method Based on Dynamic Kriging Metamodel and Gradient Projection Method for Optimal Design of Robot**  
YANG Zhijun CHEN Chaoran HUANG Guanxin
- 69 Designing, Manufacturing and Controlling of the Elastic Materials Based Bionic Hand**  
LUO Zhaojun WANG Shuai CHENG Guanggui YUAN Ningyi DING Jianning
- 76 Printing Electroactive Polymer Polyvinyl Chloride ( PVC ) Gel via Direct Writing**  
LUO Bin CHEN Hualing XU Xuejie RU Jie ZHU Zicai
- 83 Casting Process and Performance Test for Stack Dielectric Elastomer Actuators**  
LI Zhuoyuan DONG Pengfei CHEN Hualing SHENG Meiping WANG Minqing
- 90 Experimental Study of Flexible Pressure Sensor via Direct Writing**  
LUO Yihui PENG Qianqian ZHU Yuchao WANG Guangshun WU Dezhi ZHU Rui XIE Yu  
SUN Daoheng



- 98 Image Snow Removal Methods for Robotic Environment Fusion**  
LI Pengyue TIAN Jiandong WANG Guolin LI Xiaomao TANG Yandong WU Chengdong
- 105 Design and Kinematic Characteristics of Rigid-flexible Coupling Bionic Finger**  
YANG Yang XIAO Xiaoxiao NAN Zhuojian LIU Na LI Xiaomao PENG Yan
- 114 Investigation of 2-DOF Compliant Translational Parallel Mechanism and Applied in the Docking Device**  
YANG Yi LU Bizhou LI Xiaomao YAO Junfeng PU Huayan PENG Yan
- 123 Visual Attentional Network and Learning Method for Object Search and Recognition**  
LÜ Jie LUO Fangying YUAN Zejian
- 131 Riemann Kernel Support Vector Machine Recursive Feature Elimination in the Field of Compound Limb Motor Imagery BCI**  
TAO Xuewen YI Weibo CHEN Long HE Feng QI Hongzhi
- 138 Study on the Mechanism and Influencing Factors of Preload Decline for Bolted Joints under Vibration**  
GONG Hao LIU Jianhua DING Xiaoyu
- 149 General Parameterized Synchrosqueezing Transform and Its Application in Rotating Machinery Vibration Signal**  
YU Kun LUO Zhitao LI Hongfei MA Hui
- 160 Research on the Mechanism of Improving Hydrostatic Spindle Rotating Accuracy with Controllable Restrictor**  
HU Can XIONG Wanli SUN Wenbiao YUAN Shuai
- 169 Permanent Magnets Based Nonlinear Vibration Isolator Subjected to Large Amplitude Acceleration Excitations**  
YAN Bo MA Hongye HAN Ruixiang WANG Ke WU Chuanyu
- 176 A Method for Constructing Planar Center-coincident Deployable Mechanisms**  
SUN Xuemin YAO Yanan LI Ruiming LIU Ran WEI Chaoran
- 186 TCP Calibration Model Research and Algorithm Improvement of Six Joint Industrial Robot**  
ZHOU Xing HUANG Shifeng ZHU Zhihong
- 197 The Expansion Behavior of Composite Delamination Defect during the Chisel Edge Extrusion Stage**  
WANG Fuji HU Haibo ZHANG Boyu MA Jianwei ZHAO Meng
- 205 An Approach on Wheel Setup Calculation for Helical Rake Flank Sharpening of Broaching Tool**  
JIA Kang HONG Jun ZHANG Yinhang
- 215 Investigation of the Effect of Vibration Amplitude on the Surface Integrity in High-speed Rotary Ultrasonic Elliptical Machining for Side Milling of Ti-6Al-4V**  
LIU Jiajia JIANG Xinggang GAO Ze ZHANG Mingliang ZHANG Deyuan
- 224 A Novel Method for Tool Wear Prediction in Titanium Milling by Simulink Feedback Method**  
DING Baoyang BAI Qian LIU Julong ZHANG Bi

# 《机械工程学报》第十一届编委会

## 名誉主任

王补宣(院士) 钟群鹏(院士) 路甬祥(院士) 潘际銮(院士)

## 名誉委员

王玉明(院士) 石治平(研高) 叶声华(院士) 宁汝新(教授) 过增元(院士) 刘大响(院士)  
刘友梅(院士) 刘宏民(教授) 李圣怡(教授) 周祖德(教授) 胡正寰(院士) 柳百成(院士)  
钟掘(院士) 闻邦椿(院士) 耿荣生(教授) 徐金梧(教授) 徐滨士(院士) 熊有伦(院士)

## 主任

陈学东(院士)

## 副主任

王国彪(教授) 邓宗全(院士) 李奇(编审) 陈超志(教授级高工) 邵新宇(教授)  
黄田(教授) 黄庆学(院士)

## 国内委员

丁汉(院士) 王雪(教授) 王田苗(教授) 王华明(院士) 王庆丰(教授) 王时龙(教授)  
王树新(教授) 王海斗(教授) 王润孝(教授) 王耀南(教授) 孔祥东(教授) 卢秉恒(院士)  
史玉升(教授) 冯吉才(教授) 权龙(教授) 曲兴华(教授) 朱胜(教授) 朱荻(院士)  
朱向阳(教授) 华林(教授) 刘强(教授) 刘少军(教授) 刘军山(研究员) 刘志军(教授)  
刘辛军(教授) 刘检华(教授) 刘雪峰(教授) 刘献礼(教授) 刘德顺(教授) 孙伟(教授)  
孙汉旭(教授) 孙逢春(院士) 严新平(教授) 杜雪(教授) 杜朝辉(教授) 李大勇(教授)  
李荣德(教授) 李涤尘(教授) 杨永强(教授) 杨华勇(院士) 杨兆军(教授) 杨绍普(教授)  
何存富(教授) 沈功田(研究员) 张峥(教授) 张义民(教授) 张卫红(教授) 张立军(教授)  
张宪民(教授) 陈新(教授) 陈文华(教授) 陈兵奎(研究员) 陈雪峰(教授) 苑世剑(教授)  
苑伟政(教授) 范志超(研究员) 林京(教授) 林峰(教授) 林忠钦(院士) 周仲荣(教授)  
周华民(教授) 单忠德(研究员) 项昌乐(教授) 赵杰(教授) 赵继(教授) 赵韩(教授)  
赵丁选(教授) 赵宏伟(教授) 赵国群(教授) 柯映林(教授) 钟志华(院士) 段吉安(教授)  
段宝岩(院士) 姜澜(教授) 洪军(教授) 宫声凯(教授) 姚建华(教授) 姚振强(教授)  
袁巨龙(教授) 袁寿其(教授) 都东(教授) 贾振元(教授) 夏长亮(院士) 钱林茂(教授)  
徐西鹏(教授) 殷国栋(教授) 高金吉(院士) 郭万林(院士) 郭东明(院士) 涂善东(教授)  
陶飞(教授) 黄卫东(教授) 黄传真(教授) 黄明辉(教授) 梅雪松(教授) 彭艳(教授)  
彭芳瑜(教授) 葛世荣(教授) 韩旭(教授) 焦宗夏(教授) 温激鸿(研究员) 谢建新(院士)  
雒建斌(院士) 廖维新(教授) 谭建荣(院士) 翟婉明(院士) 熊蔡华(教授) 融亦鸣(教授)  
戴一帆(教授)

## 国际委员

Bi Zhang(美国) Denis Cavallucci(法国) Dong-Pu Cao(英国)  
Duc Truong Pham(英国) Erhan Budak(土耳其) Guang-Bo Hao(爱尔兰)  
Gui-Yun Tian(英国) Hai-Jun Su(美国) Han Huang(澳大利亚)  
Hong-Chao Zhang(美国) Jian-Sheng Dai(英国) Jie(Peter) Liu(加拿大)  
Jin Wang(英国) Jorge Angeles(加拿大) Jun Wang(澳大利亚)  
Kai Cheng(英国) Kazushi Sanada(日本) Lian-Xiang Yang(美国)  
Li-Hui Wang(瑞典) Marco Ceccarelli(意大利) Ming-Jian Zuo(加拿大)  
S.S. Park(加拿大) Shao-Ping Bai(丹麦) Shin Usuki(日本)  
Tamás Insperger(匈牙利) Wei Gao(日本) Wei-Dong Li(英国)  
Wei-Ming Shen(加拿大) Xian-Wen Kong(英国) Xiao-Ping Du(美国)  
Xi-Chun Luo(英国) Xu-Dong Zhao(英国) Xun Chen(英国)  
Y. Lawrence Yao(美国) Yan Jin(英国) Ye-Hwa Chen(美国)  
Yong Huang(美国) Yong-Bo Deng(德国) Yu-Chun Xu(英国)  
Zhao-Jie Ju(英国)



ISSN 0577-6686



9 770577 668194

11