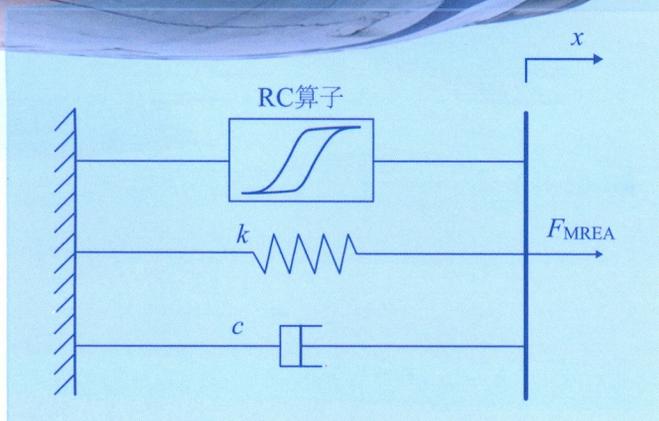


# 机械工程学报

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

磁流变半主动落锤冲击缓冲系统的“软着陆”控制试验与分析

白先旭 杨 森



57卷 **1** 期 **半月刊**  
2021年1月

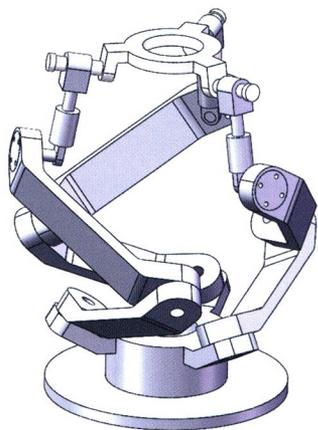
中国机械工程学会 主办

万方数据

## /// 机器人及机构学 ///

### 1 与串并联机构运动等效的新型并联机构综合方法研究

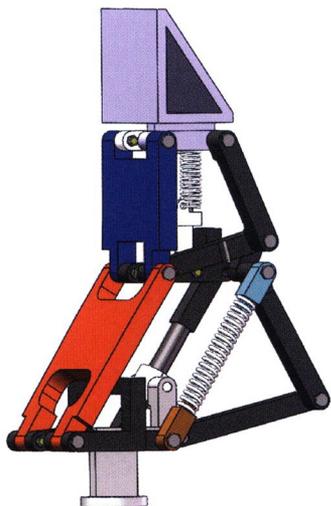
孙静 单彦霞 张建伟 邵磊 李仕华



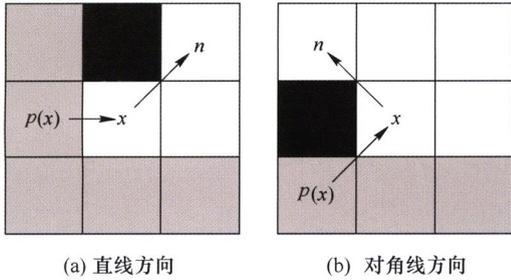
**摘要:**为简化串并联机构结构,使该类机构得到更好的应用,提出一类与串并联机构运动等效的并联机构,其特点在于没有中间平台,两个并联机构通过对应分支直接连接或共用部分运动副连接在一起融合为一个整体机构。基于螺旋理论,提出了这类并联机构综合方法,给出了综合条件,制定了综合流程。采用该方法,对与三转动机构和三平移机构构成的串并联机构运动等效的新型6自由度并联机构进行了综合,综合出多种新机构,丰富了并联机构构型。新型6自由度并联机构结构上具有结构简单、紧凑,轻量化的优点。对综合出的机构进行约束力分析表明,球面三转动子机构力学分析中不存在静不定问题。综合的6自由度并联机构以其在结构和分析上的优点,在指向隔振等领域具有良好的应用前景。

### 8 混合作业模式欠驱动手设计及其接触力分析

李小彭 郭军强 孙万琪 尚东阳 闻邦椿

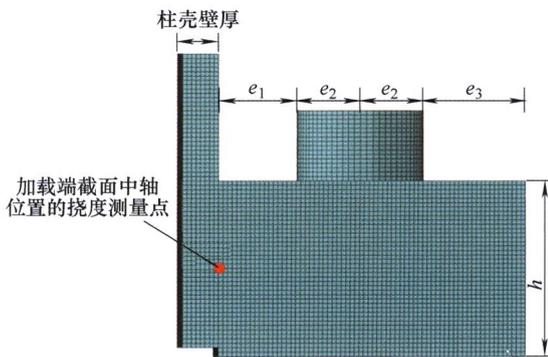


**摘要:**机器人手目前主要应用于机器人与环境的交互。传统欠驱动机器人手的手指末端运动轨迹并不是一条直线,这种运动轨迹使得它们无法抓取桌面上较薄的物体以及小物体。为了克服这个缺陷,许多研究者在欠驱动手结构中加入了直线机构,使其能够捏取平台上的物体,但目前存在的结构均为双指关节结构,相对于三关节手指其抓取范围较小且适用场合较少。为了解决以上问题,设计了一种新型的基于变胞原理的欠驱动手。手指具有三个指关节,它拥有两种工作模式:线性平行捏取模式和自适应抓取模式。在线性平行捏取模式下,该欠驱动手指可视为双关节手指,拥有更好的稳定性;在自适应抓取模式下,该欠驱动手指可视为三关节手指,拥有更大的工作空间且能更好地抓取不规则物体。该机构可以根据目标物体的尺寸、位置和形状特征自适应的改变工作模式。对欠驱动手的手指部分进行运动学分析以及接触力的分析,为设计提供理论参考。制作样机进行抓取试验,试验结果表明,该手拥有较大的适用范围并具有良好的抓取性能。



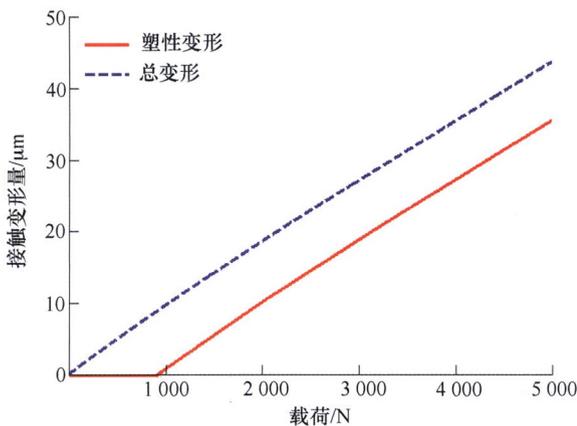
**摘要:** 针对势场蚁群算法路径转折点数量过多、收敛速度过快、容易陷入局部最优等问题,提出了基于势场跳点的蚁群算法。该算法融合了蚁群算法和跳点搜索算法的搜索策略,使规划出的路径更加平滑;引入了势场合力递减系数,减少了势场蚁群算法因势场而陷入的局部最优问题;引入了简化的跳点搜索算法对初始化信息素进行更新,提高了算法前期的搜索效率。为验证该算法的有效性,使用不同规格的栅格地图进行了仿真试验,仿真结果表明,相比于势场蚁群算法,该算法能够有效减少收敛迭代次数,其收敛搜索时间更短,且最终搜索到的路径更优。最后将该算法应用到实际的基于ROS的机器人导航试验中,试验结果表明,该算法能有效解决机器人全局路径规划问题,且能明显提升机器人全局路径规划的效率。

28 柱壳结构螺栓法兰连接非线性刚度分析

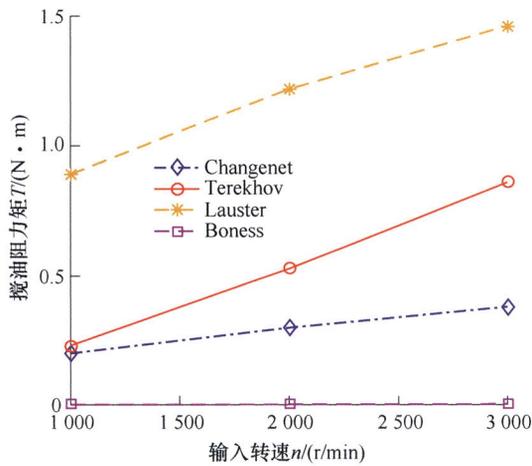


**摘要:** 螺栓法兰装配的柱壳连接结构主要由壳体承载压缩载荷,而由螺栓-法兰结构承载拉伸载荷。当拉伸载荷大于临界值时,法兰盘接触面出现压力零域,即发生局部接触分离而造成连接刚度损失,令螺栓-法兰连接结构呈轴向刚度非线性特征。为揭示预紧力作用下结构参数对此非线性刚度的影响,基于弹性薄壳理论和 Couchaux 改进梁理论构造了法兰盘与柱壳的变形协调机制,建立此连接结构的理论模型。经与有限元模型对比,此理论模型能正确预测螺栓法兰连接结构分离阶段初始刚度及表征分离阶段的刚度非线性变化。在此模型基础上,进一步研究了螺栓预紧力、装配位置、法兰盘厚度等参数对螺栓法兰连接结构分离条件、分离行为及分离阶段非线性刚度的影响,获得了分离临界载荷随设计参数的变化趋势。

40 机械式可重复使用压紧释放机构的力学特性分析研究



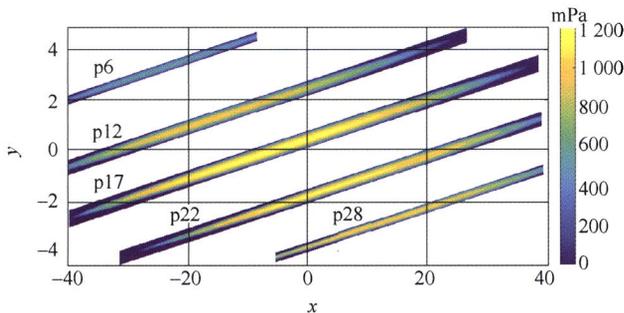
**摘要:** 针对发射过程中载荷需可靠锁定,在轨需解锁移动并再次锁定的需求,提出了一种载荷驱动机械式可重复使用的压紧释放机构,并对其力学特性进行了分析研究。建立了该机构的力学模型,构建了其解锁力与弹簧预紧力之间的关系;基于赫兹接触和弹塑性变形理论,提出了锁定钩—压紧脚弹塑性接触模型,分析了两者在压紧区域发生弹性变形与塑性变形的载荷区间;采用有限元方法,建立了压紧释放机构有限元模型,对其模态、正弦振动和随机振动特性进行了仿真分析,获得了该机构的振动特性及冲击载荷下的动态接触载荷。同时,开展了该机构地面系统级振动与冲击试验。仿真与试验结果表明,所设计的压紧释放机构工作可靠,具有良好的动力学特性,可应用于宇航产品高冲击需重复压紧释放的场合。



**摘要:** 效率是新能源汽车传动系统的重要研究内容之一, 准确的齿轮副搅油阻力矩模型是提高传动系统效率水平的一大助力。不考虑风阻的影响, 提出直齿轮副高速搅油阻力矩理论计算模型。依据高速齿轮运转时与润滑油的接触情况, 把齿轮搅油阻力矩分为齿轮端面摩擦阻力矩、周面摩擦阻力矩与啮合区域挤压阻力矩三部分。运用流体动力学理论与摩擦学原理推导出单个齿轮的端面摩擦阻力矩与周面摩擦阻力矩; 运用流体连续性方程、动量守恒以及伯努利原理推导出齿轮啮合区域挤压润滑油的挤压阻力矩, 进而得到整个齿轮副搅油阻力矩的理论计算模型。搭建试验台架, 通过多种工况参数试验验证了计算模型的可行性, 理论计算结果与试验结果具有较好的一致性。在此基础上, 完成了各参数对搅油阻力矩的影响规律分析。结果表明: 转速、齿宽和浸油深度均会对搅油阻力矩产生影响, 其中齿轮副啮合区域的挤压阻力矩占比最大; 转速对搅油阻力矩的各个组成部分均会产生较大的影响; 齿宽不影响端面摩擦阻力矩, 但对挤压和周面摩擦阻力矩影响很大; 浸油深度对挤压和端面摩擦阻力矩的影响更显著。

## 61 Ease-off 拓扑修形齿面拟赫兹接触与摩擦特性分析

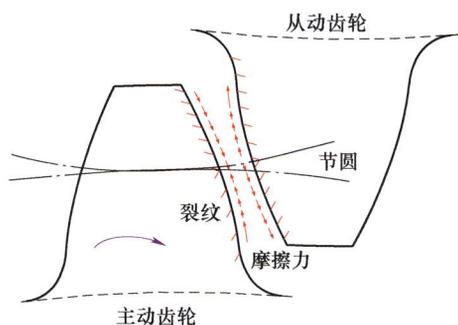
魏冰阳 王 振 杨建军 曹雪梅



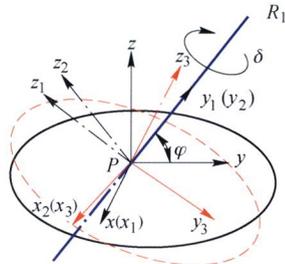
**摘要:** 齿轮啮合界面的润滑分析一直受到齿面几何与载荷参数计算的限制。目前齿轮承载接触分析(Loaded contact analysis tooth, LTCA)方法主要局限于三维有限元建模分析, 因其模型固化、运算量巨大制约了齿轮传动摩擦学的应用。论文从 ease-off 曲面拓扑出发, 对齿轮啮合刚度、LTCA 计算方法进行了解析, 获得了齿面几何与力学参数; 提出了离散接触线有限元、拟赫兹接触啮合仿真与混合弹流润滑(Elastohydrodynamic lubrication, EHL)分析方法, 解决了齿面边界瞬时接触区仿真与混合 EHL 分析的求解问题; 利用 EHL 油膜厚度与摩擦因数经典计算公式, 快捷求解了齿面瞬时接触线上的油膜厚度、摩擦因数, 获得了齿面摩擦功耗分布规律与变化历程。为齿面拓扑设计与摩擦学分析提供了一种便利快捷的计算流程。

## 68 微点蚀齿轮法向接触刚度分形预估模型

王晓鹏 刘世军

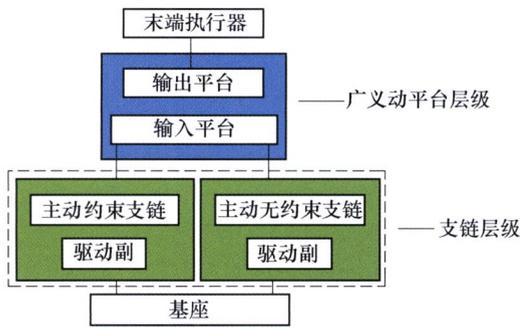


**摘要:** 微点蚀作为齿面疲劳点蚀失效作用的初期特征, 准确地预估其法向接触刚度是研究齿轮系统动力学故障特性重要课题之一。结合微观尺度下表面形貌分形参数和接触点面积分布作用, 通过单微凸体弹-塑性接触力学性能研究引申建立结合面法向接触刚度分形模型, 定性分析微观元素对法向载荷和法向接触刚度的影响。根据渐开线齿轮宏观几何尺寸和微观微点蚀物理几何成因, 建立近似粗糙度模拟微点蚀特征的预估分形参数, 研究齿面不同加工工艺和不同程度微点蚀特征的渐开线齿轮法向接触刚度特性。结果表明: 表面微观元素对法向载荷和法向接触刚度具有不同的影响作用, 且元素之间具有关联性, 沿齿廓啮合点具有不同的表面接触系数, 提高齿面精度(降低粗糙度)能够提高啮合齿面法向接触刚度。齿面微点蚀使得齿轮结合面法向接触刚度明显降低, 仿真结果与实际工程相吻合, 为后期分析微点蚀动力学响应及微点蚀扩展等做研究基础铺垫。



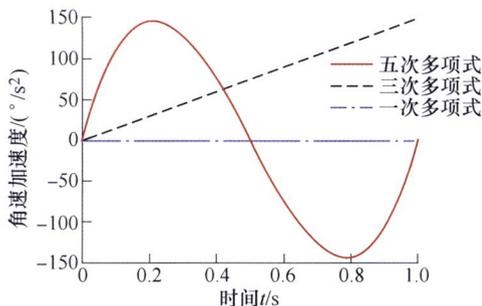
**摘要:** 一移动两转动(1T2R)三自由度并联机构普遍存在的伴随运动对机构的运动精度及性能有不利影响,为得到一系列1T2R 无伴随运动的并联机构,利用空间几何理论及螺旋理论对无伴随运动并联机构进行分析与综合。基于空间几何理论分析了无伴随运动并联机构的转轴条件,结合螺旋理论分析了该类机构动平台平面与约束螺旋的空间位置关系,将至少拥有1T2R 自由度的支链分成4类,分析[R]-型支链在不同支链布局下的约束螺旋位置及转轴位置对伴随运动的影响,从而给出了1T2R 无伴随运动并联机构的构型准则及结构条件,并通过构型综合得到了105种无伴随运动并联机构。对一种新型2RPU-RPRU 无伴随运动并联机构进行了运动学分析,验证了该方法的正确性。

86 基于广义动平台概念的并联机构设计方法



**摘要:** 通过分析运动平台的本质属性,提出广义动平台的概念。所提出的广义动平台包含输入平台、输出平台两种基本单元。借助输入平台和输出平台的运动关系,可以将传统刚体、铰接、缩放等形式的动平台有机地统一到广义动平台的概念当中。以此为基础,分析广义动平台和支链两个层级的各个组成要素以及典型的拓扑布局形式。基于位移子群/子流形的基本理论,研究各个拓扑布局所对应的运动集合关系,并提出一种基于广义动平台和支链两个层级的构型综合方法。一方面,以提出的一种广义动平台为研究对象,根据所提出的构型综合方法,综合设计分别具有1R、2R与3R转动自由度的并联机构。另一方面,探讨如何以经典的并联机构为广义动平台,综合一类3R3T、2R3T 并联机构。通过这两个方面的具体实施案例,验证了广义动平台和支链两个层级划分的有效性和必要性。

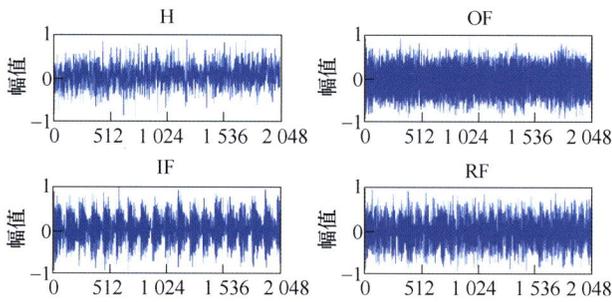
100 单腿失效的六足机器人失稳调整与容错步态设计



**摘要:** 对六足机器人在运动过程中,支撑腿发生单腿失效时的稳定性进行了分析,根据零力矩点法(ZMP)与力-角稳定锥法(FASM)结合的失稳判定流程给出一种基于实时运动平面解析求解方法的失稳倾翻调整策略;在CPG 控制器分层建模的基础上设计一种自适应容错步态生成器,根据腿部负载的变化延长或缩短支撑相并且能够产生多种步态。采用ADAMS-Matlab 联合仿真系统对六足机器人单腿失效倾翻调整策略和容错步态进行仿真,仿真结果表明:机器人发生失稳倾翻时能够在1s内完成调整;自适应容错步态下的稳定裕度在0.6~1.6m范围内且翻滚角及俯仰角的波动范围均在-1°~1°之间。验证了失稳倾翻调整策略和自适应容错步态应用在单腿失效六足机器人上的可行性和有效性。

110 基于多通道加权卷积神经网络的齿轮箱振动信号特征提取

叶 壮 余建波



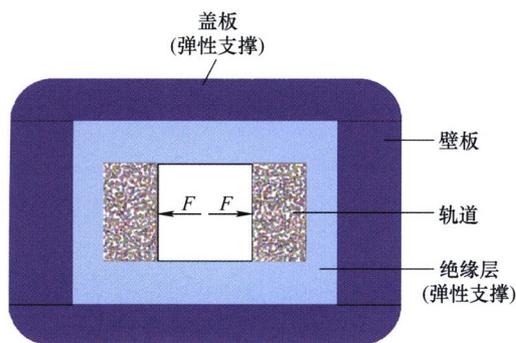
**摘要:** 为了解决单通道振动信号输入不能全面表达故障特征信息及齿轮箱故障早期诊断问题, 本文提出了一种新的深度神经网络(Deep neural network, DNN)模型—多通道加权卷积神经网络 (Multi-channels weighted convolutional neural network, MCW-CNN), 并应用于齿轮箱振动信号特征学习和故障诊断。首先, 采用经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)对振动信号进行处理, 得到多通道一维信号突出振动信号的故障特征, 并将其转化为多通道图像输入, 从而充分发挥 CNN 在图像特征提取上的优良性能, 将齿轮箱故障诊断问题进一步转化为 CNN 更为擅长的多通道图像识别问题; 其次, 针对各通道图像频率和带宽的不同, 在卷积层采用动态感受野进行图像特征提取, 全面提取多通道图像特征细节; 针对各通道图像携带冲击特征的强弱不同, 提出了基于峭度加权的多通道融合方法, 增强了冲击特征强的通道故障特征。最后, 通过故障诊断仿真试验和齿轮箱故障诊断试验验证所提方法的有效性。试验结果表明, MCW-CNN 可有效提取振动信号的故障特征, 识别正确率明显高于典型的深度学习方法和传统的分类器。

121 磁流变半主动落锤冲击缓冲系统的“软着陆”控制试验与分析

白先旭 杨 森



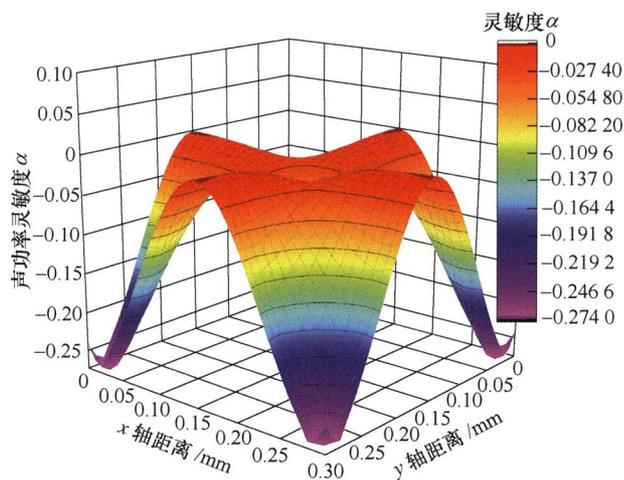
**摘要:** 研究了基于磁流变能量吸收器(Magnetorheological energy absorber, MREA)的单自由度冲击缓冲控制系统在落锤激励条件下的控制方法, 实现最大化利用 MREA 的活塞行程并在活塞行程终点落锤速度减小至 0 的落锤“软着陆”控制目标。建立了基于 MREA 的单自由度冲击缓冲系统的动力学模型和试验测试系统。为了准确模拟 MREA 的磁滞非线性力, 基于基本 RC 算子磁滞模型研究了 MREA 磁滞非线性力前馈跟踪方案。根据落锤的实时状态得出落锤下落的期望反馈, 从而得出期望阻尼力进而实现落锤的缓冲控制。仿真分析和试验测试验证了基于准确的 MREA 磁滞非线性力模型的 MREA 冲击缓冲系统“软着陆”控制方案的可行性。



**摘要:** 通过研究动集中荷载对双层弹性悬臂梁的动力学影响,旨在探讨悬臂式电磁发射装置的轨道及壁板的受力及振动规律。采用双层弹性基础梁理论,对悬臂式双层弹性基础梁在动集中荷载作用下的受力和振动情况进行了分析,将电磁发射装置的轨道及壁板简化为双层弹性悬臂梁力学模型,采用 Dirac 函数表示运动状态下电极作用在轨道上的集中力,得出了内梁和外梁的动力学微分方程,应用模态函数正交性,求得了内外梁弯矩和应力的解析解。通过算例,分析了内梁和外梁的动力响应,并在相同条件下应用 ANSYS 进行了数值模拟,最后将解析解与数值解进行了比较,解析解的可靠性得到验证。将电磁发射装置简化为双层弹性悬臂梁要比单层弹性悬臂梁更加接近实际工况。研究成果有助于电磁发射装置的理论研究,可供相关工程设计参考。

### 138 基于声功率灵敏度的仿生脉序优化方法研究

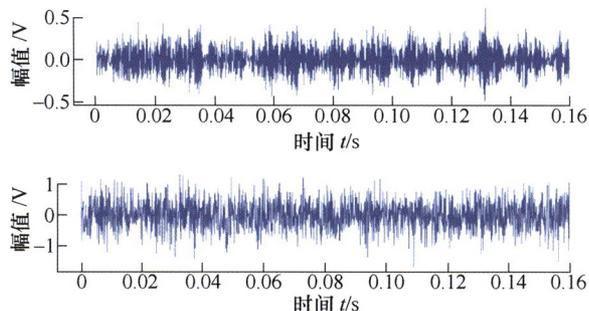
戴大力 肖新标 陈 辉 姚 丹 金学松



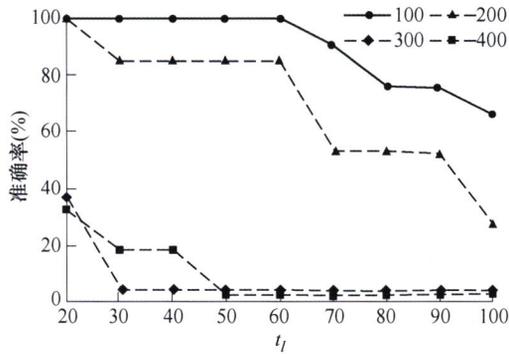
**摘要:** 通过仿照自然界双子叶植物叶脉的分布形式和生长特性,提出一种自适应成长的板壳结构加筋布局设计。采用仿生设计,将结构加筋分布的过程看作为一个逐级生长的分枝结构,从种子点位置出发,沿着使结构性能最优的方向进行生长同时将结构性能贡献最小的加强筋进行退化,逐步形成最优加筋布局。以矩形薄板为例,首先,通过典型算例的刚度优化进行方法验证;进而,结合有限元分析法和声辐射模态方法,获取结构辐射声功率并计算仿生脉序生长规律下的声功率灵敏度,基于声功率灵敏度分布和“单元生死”实现加筋布置,最终寻求辐射声功率最小的结构加筋布局方案;最后,调查了激励频率对加筋布局的影响。结果表明,仿生脉序优化法得到的加筋最优布局比现有传统方式更为有效,布局清晰,结果更优。相关分析可为轻质板壳结构的加筋布局优化设计提供科学指导。

### 148 基于多层降噪技术及改进卷积神经网络的滚动轴承故障诊断方法

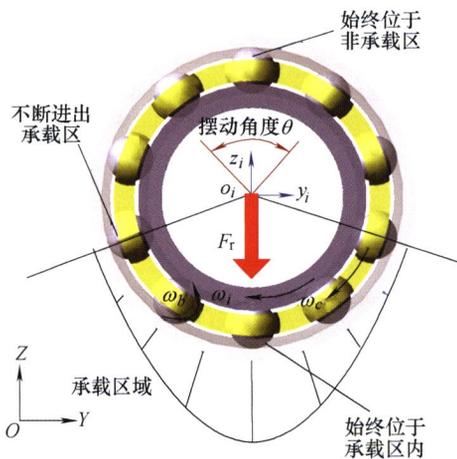
董绍江 裴雪武 吴文亮 汤宝平 赵兴新



**摘要:** 针对滚动轴承微弱故障在强噪声下难以实现有效诊断的问题,提出了一种基于多层降噪技术及改进卷积神经网络(Improved convolution neural network, ICNN)的轴承故障诊断新方法。首先,对滚动轴承的一维振动信号进行预处理,得到标签化的数据样本,分为训练集和测试集;然后采用奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)处理训练样本,通过二分之均值法选择有效奇异值个数,获得原始降噪信号和带噪信号;为了避免丢失微弱故障细节特征,将带噪信号经过 SVD 进一步去噪消除模态混叠并输入经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)得到内禀模态函数,根据方差贡献率大小选出 IMF 分量并与原始降噪信号叠加得到最终信号;将处理后的训练集数据输入到引入注意力机制(Attention mechanism, AM)的 ICNN 中进行学习;最后将得到的诊断模型应用于测试集,输出故障类别诊断结果。通过滚动轴承故障诊断模拟试验,在强噪声环境下进行测试,结果表明所提方法能更准确的在强噪声环境中实现轴承的故障诊断。



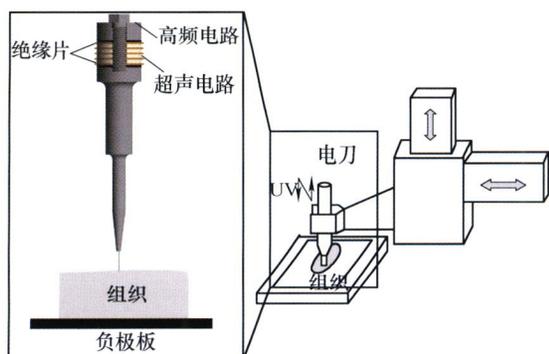
**摘要:** 智能故障诊断方法是保障机械设备安全可靠运行的重要手段,然而,现有智能故障诊断方法多属于批量学习模式,缺乏连续学习能力,无法高效地处理不连续时变样本空间的故障诊断问题。在生物免疫系统利用记忆细胞快速识别二次入侵抗原,以及记忆细胞随入侵抗原进化而进化等智能机理的启发下,提出一种针对不连续时变样本空间的具有连续学习能力的故障诊断方法,当样本空间与时间无关时,其退化为一般的监督学习故障诊断方法。在诊断过程中通过对样本的不断学习,持续更新记忆细胞,利用亲和度阈值识别未参与训练以及发生间断后再次出现的故障样本。通过 20 个标准数据集的仿真分析了当其退化为一般的监督学习故障诊断方法时的性能;利用西安交通大学的 XJTU-SY 滚动轴承加速寿命试验数据集分析了其处理不连续时变样本空间故障诊断问题时的性能。试验结果表明与经典故障诊断方法相比,此故障诊断方法对时不变样本空间的故障诊断问题具有良好的故障诊断性能,对于不连续时变样本空间的故障诊断问题具有更好的故障诊断性能。



**摘要:** 滚动轴承是旋转机械系统中最重要的零部件之一。频繁摆动工况下滚动轴承的打滑严重影响轴承的动力学特性,导致摆动轴承发生早期失效。基于滚动轴承动力学理论,建立了摆动深沟球轴承的动力学微分方程组,通过预估-校正 (Gear stiff, GSTIFF) 变步长积分算法对动力学微分方程组进行求解,研究了承载区、不断进出承载区和非承载区内钢球的打滑特性。结果表明:摆动工况下钢球的打滑明显大于平稳运行条件下钢球的打滑;始终位于非承载区钢球的最大打滑速度大于始终位于承载区内钢球,不断进出承载区钢球位于两者之间;随着游隙的增加,钢球的打滑先急剧增加后缓慢增加;增加轴承的变速时间、径向载荷和润滑剂拖带系数以及降低套圈稳定速度均有利于减小摆动过程中钢球的打滑。

179 超声辅助高频电刀组织切割性能研究

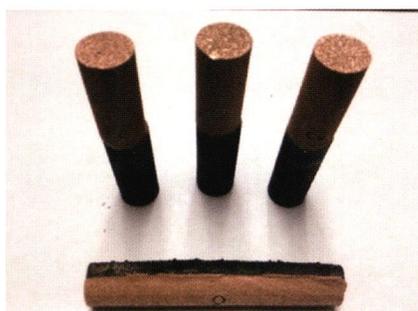
姚光 武文帅 耿大喜 张翔宇 张德远



**摘要:** 高频电刀因其优良的切割效率和止血性能在微创手术中得到了广泛的应用,但组织粘刀和创面碳化,不利于术后愈合引发手术事故。如何解决高频电刀的粘刀和创面碳化损伤是载能手术器械面临的重要技术难题,超声振动优异的减粘降附性能为本研究提供了创新灵感。首先通过分析超声振动对高频电刀与切割组织极间电场和多元场组织去除机制的影响,提出超声振动的机械作用会加速组织去除。通过软组织载能切削试验测试了超声振动辅助高频电刀的防粘性能以及组织热损伤,试验结果证实了超声振动辅助高频电刀的组织粘附量减少了约80%,无黑色焦痂组织,切割伤口齐整,热损伤面积减小了约50%,满足了微创载能器械的手术技术要求。

186 金属异质材料增材制造研究进展

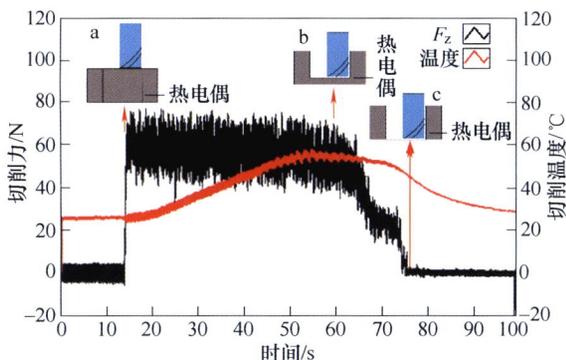
王迪 邓国威 杨永强 陈杰 吴伟辉 张明康



**摘要:** 极端复杂工况条件对材料的性能提出了新的发展需求,金属异质材料增材制造技术相比传统制造技术在异质材料零件的制造上具备更大的优势,在航空航天、生物医学、汽车工业等领域中均具有广阔的应用前景,可以满足这些领域对部件的高性能、多功能化需求。根据近年来金属异质材料增材制造技术的研究进展,评述了电弧、电子束和激光增材制造技术在异质材料上的研究现状和技术特点,并基于团队在异质材料金属增材制造装备、材料工艺与界面缺陷上的研究,总结了金属异质材料增材制造技术所面临的关键问题以及应用情况,对其发展趋势和技术难点进行展望。

199 基于运动学及力热分析的 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔质量影响机制

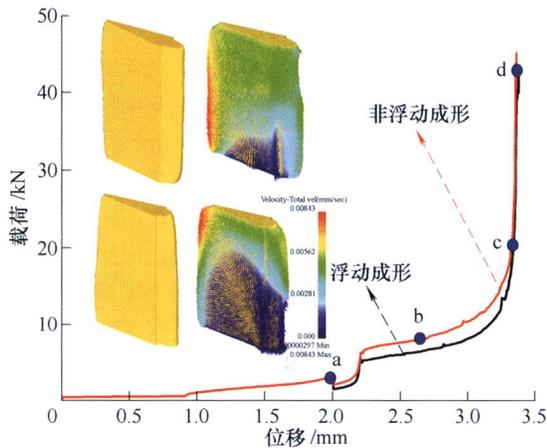
陈光 刘见 戈家影 秦旭达 邹云鹤 任成祖



**摘要:** 碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP)因其较高的比强度、耐腐蚀性、耐疲劳性等优异性能,被广泛应用于航空航天领域,但作为各向异性的难加工材料,制孔过程易产生损伤。针对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔质量为研究内容,首先建立了轴向超声辅助螺旋铣孔的运动学方程,对与孔壁接触的侧刃的切削轨迹、速度、超声辅助螺旋铣孔过程侧刃的有效前角进行了求解。分析了有无超声振动条件下 CFRP 孔表面的纤维断裂及材料去除机理,在切削角度为 0~45° 范围内,螺旋铣纤维主要承受拉伸应力,而超声辅助螺旋铣条件下纤维承受变向剪切作用,纤维易断裂且与基体脱粘现象显著降低。此外,研究了工艺参数(轴转速、螺距、切向每齿进给量)对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔切削力和切削温度的影响规律。结合切削力、热、切削刃与刀具的相对位移、运动速度及有效前角的变化,分析了工艺参数对毛刺、分层损伤及出入口孔径的影响机制。研究表明由于超声振动的存在,工艺参数影响刀具与工件的接触及分离属性、刀具的有效前角,从而影响切削过程中的力、热的变化,进而影响制孔质量。

## 210 TA15 钛合金齿轮结构电流辅助微成形工艺研究

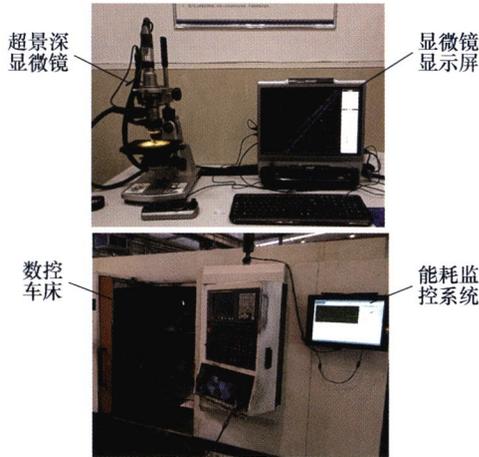
包建兴 徐杰 曲家正 白嘉楠 单德彬 郭斌



**摘要:** 针对钛合金室温塑性差、高温成形模具易损坏、成形精度差等问题,提出了 TA15 钛合金微齿轮结构电流辅助微成形工艺。利用有限元模拟和实验相结合的方法,分析了浮动成形和分流孔直径对微齿轮电流辅助成形载荷和流动行为的影响规律。结果表明浮动成形降低了微齿轮的成形载荷并有利于齿形下端角的填充,中空分流时分流孔直径为 2.3~2.5 mm 成形载荷和坯料填充流动最佳。对微齿轮结构进行显微组织和成形性能分析,结果显示,齿形填充完整度较好,金属流线沿轮廓分布,齿面力学性能分布均匀,等轴组织基本被保持。

## 217 考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化方法

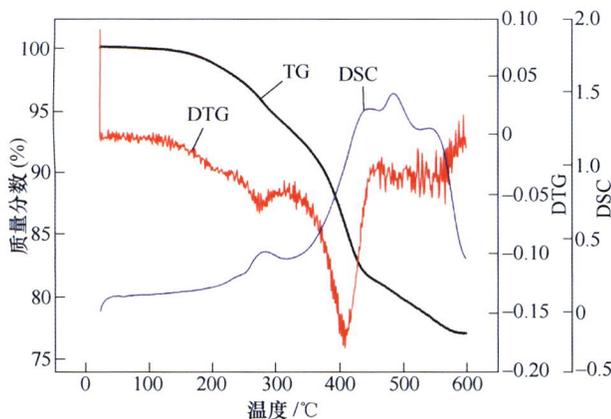
李聪波 余必胜 肖溱鹤 孙鑫 吕岩



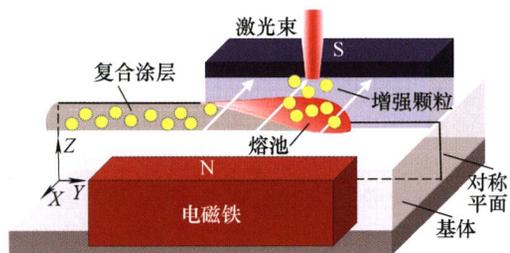
**摘要:** 在数控车削批量加工过程中,刀具磨损的加剧会导致能量消耗显著增大。针对现有节能优化研究忽略了刀具磨损状态和工艺参数对能耗的协同影响的问题,提出一种考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化方法。首先,分析刀具磨损和工艺参数对数控车削批量加工能耗协同影响机理;基于此,以批量加工总能耗最低和完工时间最小为目标,以不同刀具磨损状态下的工艺参数为优化变量,建立了考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化模型,并采用多目标模拟退火算法进行优化求解。与经验方案相比,通过算法优化得到的加工方案总能耗降低 14.9%,总时间降低 9.8%,验证了该方法的有效性和实用性。

## 230 面曝光成型薄壁陶瓷 BASE 管的新型制造方法研究

孟佳丽 连芩 李涤尘 何晓宁 刘小栋 李华



**摘要:**  $\beta'$ 氧化铝陶瓷固体电解质管(Beta alumina solid electrolyte tube, BASE 管)是高温热电转换器能量转换的关键部件。开展了薄壁 BASE 管的面光源光固化结构成型及其转相工艺研究:开发和制备了体积分数为 45%的专用陶瓷浆料,通过浆料光固化性能和曝光参数的试验研究,确定了合适的面曝光成型打印参数;通过素坯的热重曲线分析,建立了脱脂和烧结工艺路线。通过 EDS 元素分析,烧结后样品仅有 Al、O、Zr 三种元素;烧结后样品致密度为 95.3%,弯曲强度为  $(352.0 \pm 37.5)$ MPa。以  $\text{Na}_2\text{O}$  为钠源开展的转相工艺研究,发现在 1 100 °C、1 200 °C、1 300 °C、1 400 °C 和 1 500 °C 五个温度时转相均有  $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$  的生成,且 1 500 °C 时  $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$  生成量为 80.5%,其电导率为  $7.83 \times 10^{-3}$  S/cm(450 °C)。研究了转相对样品致密度、弯曲强度和尺寸精度的影响,发现转相会造成样品致密度的下降。研究表明了面曝光成型技术具有制造薄壁 BASE 管的可行性,为 BASE 元件和低成本快速制造  $\text{Na}^+$  电池和碱金属热电转换器提供新的制造手段。



**摘要:** 利用稳态磁场对金属流体的粘滞效应, 在 316L 不锈钢基体上制备颗粒梯度分布的 WC/316L 复合涂层。为研究稳态磁场对激光熔注球形 WC 颗粒分布的影响机理, 建立了考虑固液相变、流动以及洛伦兹力的熔注熔池多物理场模型, 分析稳态磁场对流场, 洛伦兹力分布以及等效黏度的影响。采用多颗粒动力学模型与熔池模型耦合计算, 研究稳态磁场对熔池颗粒运动的影响。实验与仿真结果均证实, 随着磁场强度从 0 T 增大至 1.2 T, WC 颗粒集中分布在复合涂层表层的趋势增大。分析结果表明: 稳态磁场可有效增加熔池流体的等效黏度, 使得颗粒在熔池中对流体的跟随性增强; 同时, 外加稳态磁场可以明显抑制熔池 Marangoni 对流, 进一步降低了颗粒的运动能力, 使得颗粒难以运动至熔池内部, 大部分增强颗粒集中于熔池上层。

## **CONTENTS**

- 1 Research on Synthesis Method of Novel Parallel Mechanisms with Equivalent Motion to Serial-parallel Mechanism**  
SUN Jing SHAN Yanxia ZHANG Jianwei SHAO Lei LI Shihua
- 8 Design and Contact Force Analysis of Under-actuated Manipulator with Hybrid Working Mode**  
LI Xiaopeng GUO Junqiang SUN Wanqi SHANG Dongyang WEN Bangchun
- 19 Mobile Robot Global Path Planning Based on Improved Ant Colony System Algorithm with Potential Field**  
MA Xiaolu MEI Hong
- 28 Nonlinear Stiffness Analysis of Bolted Flange Connection in Cylindrical Shell Structure**  
PAN Jiacheng GUAN Zhenqun ZENG Yan SUN Weicheng
- 40 Analysis of Mechanical Characteristics of a Mechanical Reusable Hold-down and Release Mechanism**  
QIN Junjie YANG Shuai HE Nan SHI Zhifeng LI Xing LAI Xiaoming MO Guidong
- 49 Theoretical and Experimental Study of Oil Churning Resistance Torque of High-speed Gear Pair**  
GUO Dong CHEN Fangchao LIU Jiao SHI Xiaohui LUO Dongyuan
- 61 Analysis on Quasi Hertzian Contact and Friction Characteristics of Tooth Surface Modified by Ease-off Topology**  
WEI Bingyang WANG Zhen YANG Jianjun CAO Xuemei
- 68 Fractal Prediction Model of Normal Contact Stiffness of Micro-pitting Gear**  
WANG Xiaopeng LIU Shijun
- 77 Analysis and Type Synthesis of Parallel Mechanisms without Parasitic Motion based on Spatial Geometry**  
CHEN Miao ZHANG Qing CHEN Wentao QIN Xianrong SUN Yuantao
- 86 Design Methodology of Parallel Mechanisms Based on the Concept of Generalized Moving Platform**  
WANG Congzhe YANG Dewei ZHANG Yi ZHANG Yanan
- 100 Instability Adjustment and Fault-tolerant Gait Design for Hexapod Robot Single Leg Failure**  
YOU Bo LI Kunpeng LI Jiayu LIU Daquan

- 110 Feature Extraction of Gearbox Vibration Signals Based on Multi-Channels Weighted Convolutional Neural Network**  
YE Zhuang YU Jianbo
- 121 Experimental Test and Analysis of “Soft-landing” Control for Drop-induced Shock Systems using Magnetorheological Energy Absorber**  
BAI Xianxu YANG Sen
- 128 Dynamic Analysis of Two-layered Elastic Cantilever Beam under the Action of Concentrated Load**  
HE Wei WEI Yanjing
- 138 Study on the Optimization Method of Biomimetic Venation Based on Sound Power Sensitivity**  
DAI Dali XIAO Xinbiao CHEN Hui YAO Dan JIN Xuesong
- 148 Rolling Bearing Fault Diagnosis Method Based on Multilayer Noise Reduction Technology and Improved Convolutional Neural Network**  
DONG Shaojiang PEI Xuewu WU Wenliang TANG Baoping ZHAO Xingxin
- 157 A Continual Learning Fault Diagnosis Method for Discontinuous Time-varying Sample Space**  
LI Dong LIU Shulin SUN Xin
- 168 Skidding Characteristics of Ball Bearings Withstanding a Frequent Oscillating Condition**  
LI Feng DENG Sier ZHANG Wenhui
- 179 Cutting Performance of Ultrasonic-assisted Electrosurgical Electrode**  
YAO Guang WU Wenshuai GENG Daxi ZHANG Xiangyu ZHANG Deyuan
- 186 Research Progress on Additive Manufacturing of Metallic Heterogeneous Materials**  
WANG Di DENG Guowei YANG Yongqiang CHEN Jie WU Weihui ZHANG Mingkang
- 199 Experimental Study on Ultrasonic Vibration Helical Milling of CFRP Based on Kinematic and Thermal-mechanical Analysis**  
CHEN Guang LIU Jian GE Jiaying QIN Xuda ZOU Yunhe REN Chengzu
- 210 Electrically-assisted Micro-forming Process of Gear Structure in TA15 Titanium Alloy**  
BAO Jianxing XU Jie QU Jiazheng BAI Jianan SHAN Debin GUO Bin
- 217 A Cutting Parameter Energy-saving Optimization Method for CNC Turning Batch Processing Considering Tool Wear**  
LI Congbo YU Bisheng XIAO Qinge SUN Xin LÜ Yan
- 230 A Novel Manufacturing Technique of Thin-wall Ceramic BASE Tube by Mask Projection Stereolithography**  
MENG Jiali LIAN Qin LI Dichen HE Xiaoning LIU Xiaodong LI Hua
- 240 Mechanism Study of Steady Magnetic Field Effect on Spherical WC Particle Distribution during Laser Melt Injection**  
HU Yong WANG Liang LOU Fuxing XIA Hongchao ZHANG Qunli YAO Jianhua

# 《机械工程学报》第十一届编委会

## 名誉主任

钟群鹏(院士) 路甬祥(院士) 潘际奎(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(院士)  
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(院士) 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(院士) 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(院士) 项昌乐(院士) 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(院士) 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(院士) 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(院士)  
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)

