

# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

机器人加工几何误差建模研究：I 空间运动链与误差传递

机器人加工几何误差建模研究：II 参数辨识与位姿优化

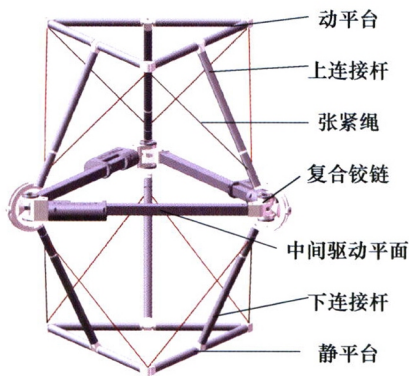
李文龙 谢核 尹周平 丁汉



## /// 机器人及机构学 ///

### 1 面向空间应用的 3-R(SRS)RP 多环机构操作臂结构设计及逆运动学分析

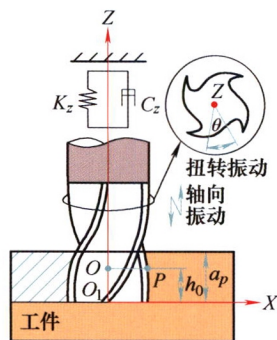
闫辉垠 李传扬 郭宏伟 郭文尚 刘荣强 唐德威 李兵



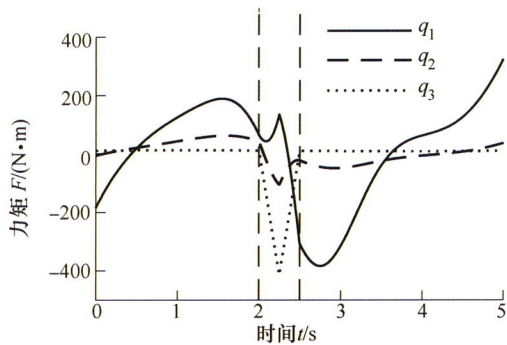
**摘要:** 针对空间在轨操作任务需求, 为了得到高刚度、高强度、多活动度和大工作空间的操作臂, 将多个 3-R(SRS)RP 多环机构模块串联组成多环机构操作臂。基于多环机构构型, 提出一种空间操作臂整机结构设计方案: 包含 SRS 复合铰链结构设计、多环机构模块结构设计、多环机构系统结构设计。SRS 复合铰链的结构设计是基于一种改进的球副机构展开, 该球副构型可复合双球副及额外转动副, 且所有运动轴线相交于一点, 提高了运动精度并简化了运动学模型。模块及系统结构设计主要表现在多环机构模块之间的连接平台和连接杆件的结构规划, 以保证动、静平台上转动副轴线重合, 满足折展和弯曲等运动需求, 并解决了运动链耦合时的结构干涉问题。此外, 建立了多环机构模块及系统的逆运动学模型, 并进行了逆运动学分析。通过数值求解其工作空间发现, 三模块操作臂在工作空间即可实现大的可达工作空间及弯曲角度。这一结论为后续样机的研制提供了理论基础。

### 10 机器人纵振与纵扭超声铣削稳定性对比研究

郑侃 廖文和 孙连军 刘丽霞 田威 薛枫



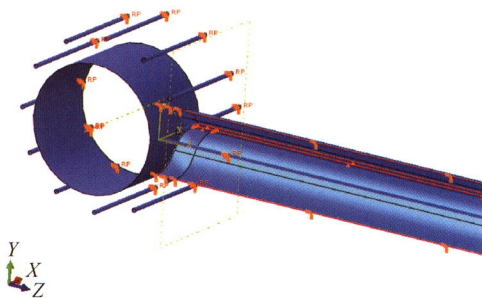
**摘要:** 针对工业机器人铣削大型航天器舱体支架存在颤振严重导致铣削平面度较低的问题, 提出了机器人纵扭超声铣削新方法。分析了纵扭超声铣削刀尖运动轨迹, 对比分析了机器人一维纵向超声铣削与机器人纵扭超声铣削的稳定域, 并开展了两者的铣削力和铣削表面接刀痕对比试验。计算和试验结果显示: 机器人纵扭超声铣削稳定域较机器人一维纵向超声铣削提升了 46.7%, 各种工况下的铣削力平均降幅达到了 24.7%。同时, 高频扭转振动的摄入使得机器人一维纵向超声铣削表面接刀痕高度差降低了 48.7%。上述结论为大型航天器舱体支架的机器人高精高效加工提供了技术基础。



**摘要:** 针对变截面辊弯成形制造中诸多不确定性因素造成对制造装备产生剧烈变负载冲击的问题, 提出了一种自适应抵消变负载冲击的变截面辊弯成形制造装备多机构协作内力动态优化分配算法。基于拉格朗日法推导了成形装备和板材动力学方程, 建立了包含成形制造装备以及成形板材在内的联合动力学数学模型。为平衡成形过程中剧烈的变负载, 基于成形制造平衡条件对成形轧机左右臂的内力进行了动态分配。针对成形装备多机构系统组成的闭链多体系统动力学耦合问题, 以板材受到的净挤压力为零作为优化目标, 采用加权伪逆法对动态分配后的内力进行优化解耦, 从而获得变截面辊弯成形装备多机构协作内力规划新方法。最后, 以变截面成形制造过程中由于轧辊打滑导致加工失败为例, 基于 Matlab 软件进行计算机数值计算与仿真。仿真结果表明, 当由于轧辊打滑引起负载变化时, 采用提出的多机构变负载协作内力规划算法, 能使各驱动轴力矩自动适应并抵消变负载冲击, 使整线快速恢复正常成形加工, 从而可以确保变截面辊弯成形制造的平稳运行与加工效率。研究将为变截面辊弯成形制造装备的智能控制以及智能制造提供理论基础与技术支持。

## 26 可展收豆荚杆刚度及收展过程力学分析

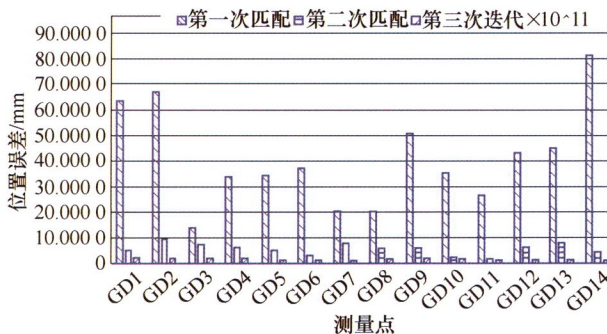
张涛涛 从强 任晗 郭一竹



**摘要:** 大变形薄壁可展收复合材料结构由于其良好的力学性能和折展功能, 适用于空间探测领域。针对空间豆荚杆可展收结构, 开展了不同构型参数、不同铺层方式下的豆荚杆刚度及稳定性分析。通过悬臂豆荚杆的弯曲与扭转试验验证了数值模型的正确性。采用显式非线性分析方法, 对豆荚杆盘卷收拢过程进行了准静态数值模拟。结果分析表明, 豆荚杆截面半径越小, 铺层厚度越厚, 收拢过程的应力水平越大; 盘卷的卷筒直径越小, 收拢过程的应力水平越大。分析结果为空间可展收豆荚杆的设计提供了理论依据。

## 33 双工位 4-PPPS 飞机装配对接系统几何参数标定方法

祁若龙 张珂 赵吉宾 牟如意 邢运隆

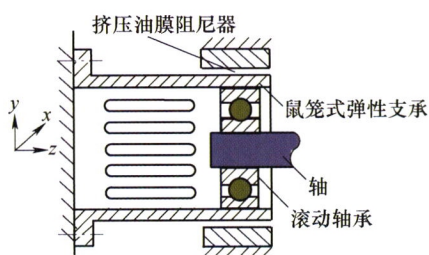


**摘要:** 双工位 4-PPPS 并联机构承载能力强、结构稳定, 用于飞机机身舱段的装配过程以提高对接效率减轻劳动强度。然而由于对接系统为大尺寸分布式结构, 且具有较大的制造和安装误差, 很难保证实际对接精度。为了提高 4-PPPS 机身对接机构的定位精度, 提出了两步精度提升方法: 首先提出了一种均值迭代方法标定飞机坐标系的基准点, 作为整个对接系统的参考坐标系, 提升了测量坐标系和飞机坐标系之间的匹配精度。其次, 提出了一种基于空间位姿矩阵微分的运动学标定方法, 推导出了系统全误差导数方程, 可以对多达 42 个运动学参数进行同时标定。通过本文方法, 飞机舱段对接系统的最大位置误差从 2.2 mm 减小到 0.035 mm, 最大指向误差从 0.08° 减小到 0.018°。精度测量和对接试验证明了所提出方法的有效性。



#### 44 组合支承转子系统动力学的研究进展

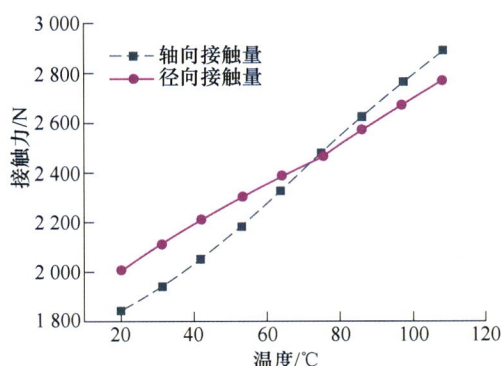
罗 忠 王晋雯 韩清凯 王德友



**摘要:** 转子系统是旋转机械的核心部件,在航空发动机、燃气轮机、压缩机和数控机床等众多机械装备中都有广泛应用。转子系统一般由旋转部件和支承部件构成,其中组合支承是转子系统中重要的承力部件。转子系统中的几何非线性、转定子碰摩、连接非线性等非线性因素与支承自身的非线性因素耦合产生的内部激励,使得转子系统动力学行为复杂,发生混沌现象。首先阐述了组合支承转子动力学的研究背景和意义,回顾了应用在航空发动机中组合支承转子系统的支承方案及其应用情况,系统的介绍了五种组合支承转子系统模型,现有的建模方法、应用在组合支承转子系统高维非线性动力学中的降维方法、非线性动力学微分方程的求解方法、组合支承非线性问题的机理研究以及对转子系统振动特性的影响,最后提出了在组合支承转子系统研究中值得关注的问题。

#### 61 考虑接触参数与摩擦生热交互影响的高速角接触球轴承温升预测研究

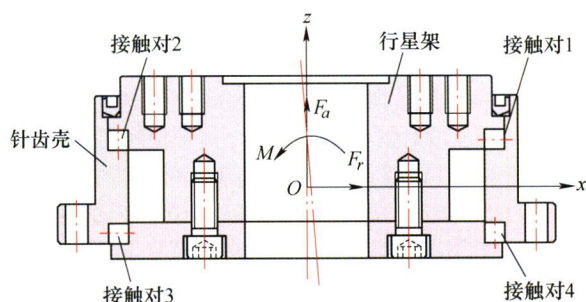
靳 岚 芮执元 蒋海元 潘建龙



**摘要:** 为精确预测高速角接触球轴承在实际工况下的温升,通过对角接触球轴承的生热机理分析,提出一种考虑接触参数与摩擦生热交互影响的高速角接触球轴承温升预测方法。利用 Abaqus 有限元软件脚本接口技术,自主编制 Python 脚本程序,实时提取受载的角接触轴承的接触参数为初始量,计算轴承摩擦生热量,将其作为时变热载荷,加载至有限元模型上,求解在径向载荷和转速作用下的高速角接触球轴承温升,得到接触参数、摩擦生热量、温升之间的相互影响关系,最后采用轴承温升实验对数值模拟结果进行验证。结果表明:考虑接触参数与摩擦生热交互影响下的高速角接触球轴承温升预测方法更符合实际工况。

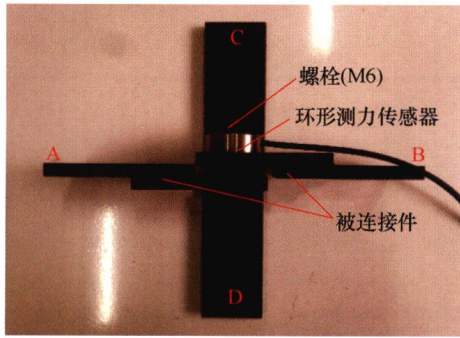
#### 68 RV 减速器用新型交错滚子主轴承承载能力分析 with 试验研究

黄 健 李朝阳 陈兵奎



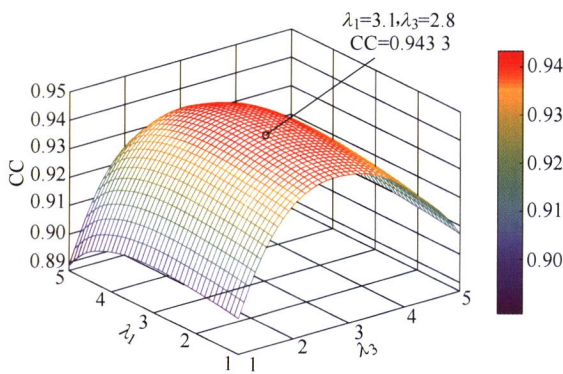
**摘要:** 以一种集成于 RV 减速器针齿壳和行星架输出机构的交错滚子主轴承为研究对象,综合考虑其在轴向载荷、径向载荷和倾覆力矩综合作用下的变形协调条件,建立新型交错滚子主轴承的静力学模型,给出了新型一体式设计的交错滚子主轴承承载能力的精确计算方法,通过与有限元模型计算结果进行比较,验证了静力学模型的正确性;针对 RV 减速器主轴承的服役工况,综合考虑轴向游隙与径向游隙,分析了交错滚子轴承的载荷分布与承载能力特性,分析结果表明外加载荷下轴向游隙对许用倾覆力矩影响较大,而径向游隙对许用径向载荷影响较大;试制一体化交错滚子轴承支撑结构的新型 RV 减速器,对其性能指标进行了试验测试,试验结果表明,采用交错滚子主轴承结构的新型 RV 减速器在承受扭矩输出的同时,亦可承受较大的轴向载荷和倾覆力矩,且更有利于提升减速器的精度保持性,降低扭转刚度和回差的衰减。研究成果可为 RV 减速器的选型与设计提供理论基础。





**摘要:** 螺栓连接是一种在机械结构中应用极其广泛的连接形式, 由于连接界面上存在多种非线性特征, 对连接结构的刚度和阻尼具有重要的影响, 并进一步导致其动力学特性的非线性变化。建立了螺栓连接界面的非线性模型, 并提出了一种基于准静态试验的模型参数辨识方法。首先, 在模型中考虑了沿界面法向的非线性接触刚度以及界面上粘滞、滑移、间歇性分离等多种接触状态的存在。进一步, 通过准静态试验获得了连接界面的滞回曲线以及拉压变形曲线, 对所提出的辨识方法进行了实例应用。结果表明理论与试验的曲线结果具有较好的一致性, 该辨识方法具有较高的准确性。该方法能够再现连接界面间复杂非线性特征且具备可识别便于使用的特点, 对于螺栓连接结构的动静特性仿真计算具有重要意义。

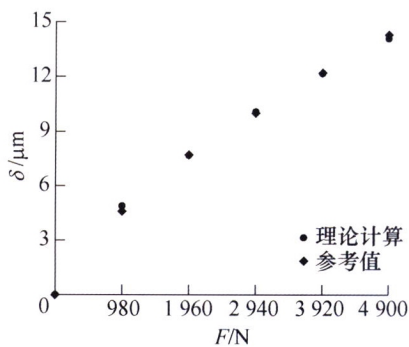
87 多源稀疏优化方法研究及其在齿轮箱复合故障检测中的应用



**摘要:** 齿轮箱因其工作环境恶劣, 极易出现复合故障, 其故障振动信号往往包含多种成分且伴随着强烈的背景噪声, 给齿轮箱故障诊断带来了很大的困难。稀疏分解能够在强背景噪声下有效地提取微弱故障特征, 针对传统稀疏分解方法存在信号保真能力欠缺, 目标函数非凸导致局部最优解, 模型通用性差等问题, 基于广义极小极大凹(Generalized minimax concave, GMC)惩罚函数推导构建了具有保凸性的多源稀疏优化目标函数, 并利用前向后向分裂(Forward-backward splitting, FBS)算法, 基于Laplace小波字典, Morlet小波字典与DFT字典分别求解轴承瞬态成分, 齿轮瞬态成分, 谐波成分的稀疏表示, 最终实现各成分的准确提取。仿真信号和试验信号的分析均验证了所提出的模型能够在不需要故障具体数目的先验知识下, 准确实现齿轮箱复合故障的信号分解和故障诊断。

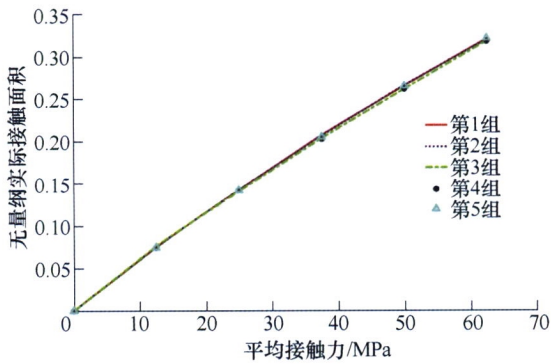
/// 摩擦学 ///

100 计入刚度影响效应的滚动直线导轨几何参数对润滑性能的影响



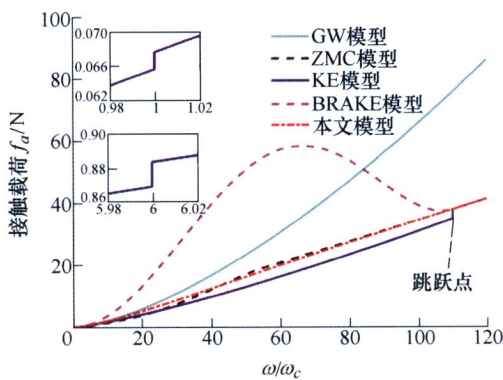
**摘要:** 为保证滚动直线导轨的精度和振动稳定性, 在装配时通常对导轨副施加预紧载荷。为研究预紧条件下滚动直线导轨的刚度对其润滑性能的影响, 基于LG-45型导轨建立了刚度模型和考虑预紧的润滑分析模型。分析了滚珠直径、沟槽曲率比和滑块速度对钢-钢和钢-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>两种接触副系统弹性预紧量的影响, 并讨论了刚度对导轨副润滑性能的影响。结果表明: 在相同工况下, 与钢-钢接触副相比, 钢-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷接触副的系统弹性预紧量较小, 系统弹性预紧量受滑块速度影响较大, 而受滚珠直径和沟槽曲率比的影响较小。滑块速度增大会使得膜厚和压力明显增大; 曲率比增大使得接触区椭圆比减小, 膜厚减小, 油膜压力增大; 滚珠直径增大使得膜厚增大, 油膜压力减小。





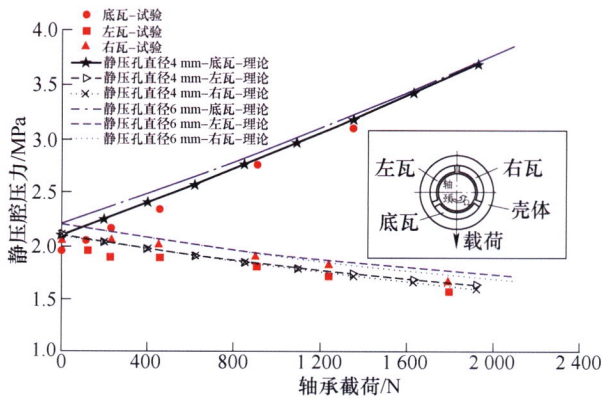
**摘要:** 粗糙表面的实际接触面积直接影响精密机电设备配合表面的摩擦因数、热导/电导率、接触应力等。然而, 针对弹塑性接触行为进行系统地研究很少, 弹塑性粗糙表面实际接触面积的演变规律尚不明确。针对这一问题, 通过理论研究获得了弹塑性粗糙表面实际接触面积的影响因素, 并引入弹塑性接触力学数值计算方法, 对具有不同材料参数和表面形貌特征的弹塑性粗糙表面的接触行为进行数值仿真计算, 得到各种情况下的表面实际接触面积随着平均接触压力的变化曲线, 总结出了实际接触面积演变规律与这些影响因素之间的映射关系, 并最终得到实际接触面积的计算公式, 为弹塑性接触力学的相关工程应用奠定了基础。

117 具有连续光滑特性的结合面接触刚度模型



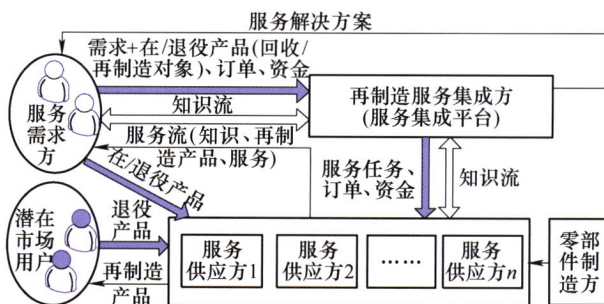
**摘要:** 结合面接触刚度直接影响着机械系统的静、动态力学性能和精度保持性水平。基于微凸体在弹性、弹塑性以及完全塑性接触变形过程中, 接触刚度具有连续、光滑特性的思想, 首先提出利用 Hermite 多项式插值函数, 来弥补单一微凸体接触刚度建模时存在的不连续等缺陷, 建立了具有连续光滑特性的单一微凸体接触刚度新模型; 然后基于统计学方法, 建立了结合面的法向接触刚度模型; 最后将所建模型与 GW、ZMC、KE 和 BRAKE 模型进行对比分析。结果表明: 本文模型实现了单一微凸体接触刚度在不同接触状态之间连续且光滑地转变; 对于光滑表面形貌, 基于 GW、ZMC、KE 以及 BRAKE 模型预测的接触刚度与本文模型结果的差异较小, 其中本文模型最接近于纯弹性的 GW 模型; 当表面粗糙度增大时, GW 模型与其他几种模型的差异逐渐增大, 此时本文模型与考虑微凸体多种变形阶段的 ZMC 模型吻合较好; 再次表明载荷与表面粗糙度是影响刚度的两个主要因素, 即随着载荷的增大或表面粗糙度的减小, 接触刚度递增。





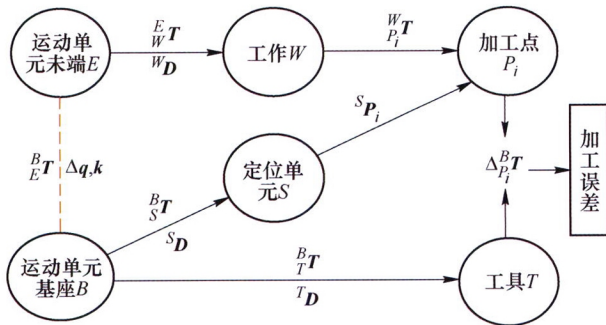
**摘要:** 开展自生静压流体支点浮动可倾瓦轴承的润滑机理及浮起特性研究。首先推导考虑内层静压孔与外层静压腔之间的流量连续方程, 提出内外层油膜厚度公式。采用有限元方法求解内层动压润滑与外层流体静压润滑 Reynolds 方程, 分析了流体支点浮动瓦轴承初始工作机理, 得出轴瓦浮起需要满足两个要求的重要结论: 第一轴瓦外层具有一定的初始间隙, 第二应满足一定的静压腔面积比的要求。在理论上分析了一种轴颈为 100 mm 的流体支点轴承, 在轴承初始工作状态下, 如果要满足轴瓦浮起条件, 其静压腔面积比取值范围应为 0.16 至 0.18 之间。在此基础上采用 Newton-Rapson 法建立单瓦流体支点轴承数值迭代计算模型, 分析了在单块流体支点浮动瓦承载形式时轴承静态特性随偏心率变化规律, 发现在单瓦承载情况下, 底瓦浮起高度与静压孔流量比随着偏心率增大而逐渐减小; 在相同偏心率下, 静压孔直径增大, 浮起高度与静压孔流量都相应随之增大。静压腔压力、瓦块承载力、内层最大油膜压力以及内层摩擦功耗都是随着偏心率的增大而逐渐增大; 此外外层摩擦功耗随着偏心率增大而增幅较小, 并且在较高偏心率下, 逐渐稳定, 其中内层摩擦功耗比外层摩擦功耗大得多; 当流体支点单瓦承载时, 轴承受受到静态载荷作用下, 瓦块摆动角度是为  $0^\circ$ 。通过与已有文献的试验数据进行对比分析, 验证了本文计算模型的准确性。

## /// 数字化设计与制造 ///



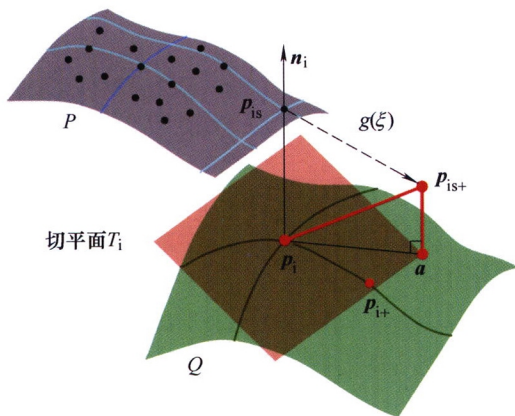
**摘要:** 再制造服务是再制造与服务相融合的绿色循环产业形态。阐述了再制造服务的广义内涵, 主要包括再制造服务的基本概念、再制造服务过程、再制造服务相关关联关系、再制造服务广义产品以及再制造服务价值链等。在此基础上, 分析再制造及其服务、再制造服务需求发现与获取、再制造回收服务、再制造拆卸服务、再制造加工服务、再制造集成等相关研究应用现状。最后论述了再制造服务的发展趋势。





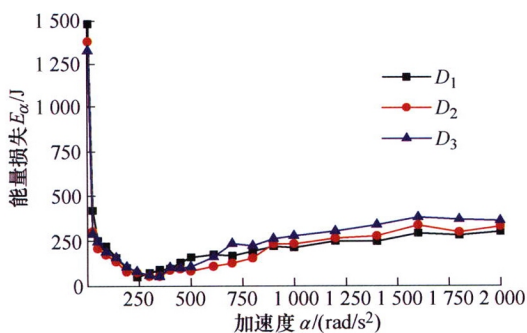
**摘要：**以机器人作为制造装备执行体，集成视觉等智能传感器，实现大型复杂零件小余量磨削/铣削/切边/制孔是智能制造的前沿研究方向之一，目前加工误差难以降低是制约其应用的主要难题。以加工误差降低为主要目标，以机器人、视觉传感器、工件、工具为主要对象，研究视觉引导的机器人加工几何误差建模与精度控制，具体包括：在第I部分介绍几何误差建模与参数辨识国内外研究现状，研究机器人加工空间运动链与加工误差度量指标定义，推导静态误差(源于工件/工具位姿误差)定量传递模型与动态误差(源于关节运动学误差/关节弱刚度)定量传递模型；在第II部分建立手眼位姿参数、工件位姿参数、工具位姿参数等精确辨识的目标函数与计算方法，在考虑关节运动学误差和弱刚度变形的情况下，提出面向整体误差控制的机器人加工(磨削/铣削/切边/制孔等)位姿优化通用模型。

169 机器人加工几何误差建模研究：II 参数辨识与位姿优化



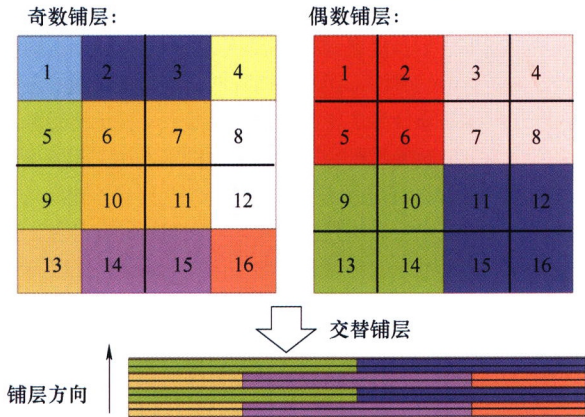
**摘要：**根据所构建的空间运动链，机器人加工几何误差一方面与手眼/工件/工具位姿参数辨识误差有关，另一方面与机器人关节运动学误差与弱刚度变形有关。针对这一问题，研究基于运动学误差补偿的手眼位姿参数辨识、考虑测量缺陷影响的工件位姿参数辨识、基于实际加工曲面误差估计的工具位姿参数辨识等新方法，解决位姿参数辨识精度受限于机器人运动精度、现场测点不封闭/密度不均/高斯噪音、加工抖动/受力变形/回转轴误差等多种因素影响的问题；综合考虑关节运动学误差、弱刚度变形、误差补偿，以整体误差控制为目标，建立加工误差补偿与机器人位姿优化通用模型，可推广应用于法向深度(磨削/铣削)、切向滑移(制孔)、角度倾斜(切边)等多种机器人加工误差控制；完成手眼/工件/工具位姿参数辨识试验、整体误差补偿与机器人加工试验，验证所提方法的有效性。

185 变速变排量液压驱动系统的动态过程能效优化



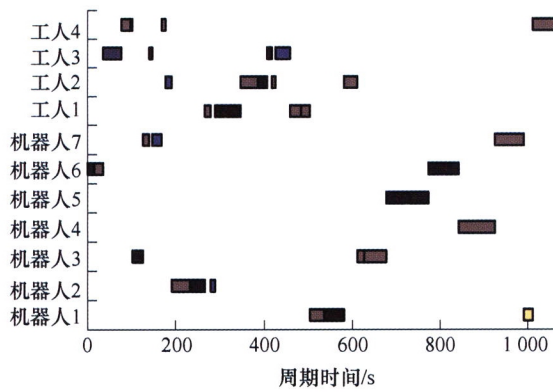
**摘要：**液压系统广泛应用于工程机械与液压成形装备等领域，但液压驱动单元输出功率与负载需求功率不匹配造成的低能效问题一直不可忽视。变速变排量驱动单元可协调控制电动机转速和泵排量，实现液压系统在各稳定工况下驱动单元输出功率与负载需求功率的匹配，提高液压系统能量效率。为进一步提高变速变排量驱动单元在复杂多变工况下的能效，对其动态过程中的能效进行深入研究。建立了动态过程能耗优化模型，通过优化模型并结合试验分析得出动态过程最小能耗对应的电动机加速度。通过试验研究了不同加速度下的系统稳定性，分析得出液压缸推杆振动与电动机转速波动有关，可通过调整电动机加速度以限制电动机转速波动从而保证系统稳定性。最后，以液压拉深成形过程为例，在保证系统稳定性的前提下分析拉深成形过程的动态能耗，当电动机采用最佳加速度时，整个动态过程的能效平均提高了8.0%、转速波动量平均降低了14.9%。





**摘要:** 多相离散设计是依据零件具体结构, 通过各向异性材料分布, 获得理想的优化设计方法。针对目前离散设计中相邻设计域接头间的可靠性连接问题, 提出了一种拼接铺层的结构形式, 为结构件设计域连接提供了一种新的方法。结合复合材料离散设计与拼接铺层结构形式, 综合考虑拼接接头对零件整体性能的影响, 建立复合材料离散铺层优化系统。以汽车后背门模型为例, 试验测试与仿真对比, 验证了所建立优化模型的结果准确性。在优化过程中引入复合材料相关制造约束和材料插值模型, 使优化设计结果兼顾了良好的可实施性。应用该铺层优化设计系统, 相较传统复合材料铺层设计, 汽车后背门在保证零件性能指标的基础之上, 总成零件重量降低 28.0%, 实现了更加理想的轻量化实施效果。

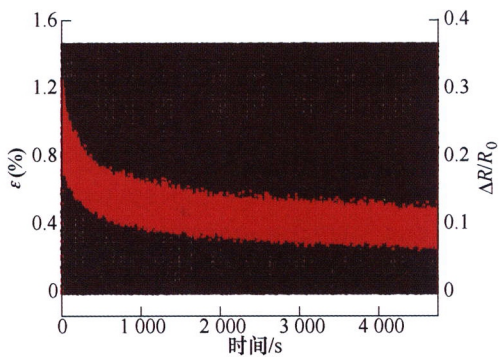
204 考虑任务复杂性的人机联合任务分配问题研究



**摘要:** 在生产线上, 机器人加入的直接目的是降低人的劳动强度, 提高生产线的效率。关于人机联合任务分配问题多以成本和时间为目标进行任务分配, 则建立了考虑任务复杂性的人机联合任务分配模型, 旨在获得最优资源利用方案。首先从操作过程和决策过程两方面给出了人机联合装配操作复杂度的评价方法; 其次, 开发了基于操作复杂度的人机联合任务分配模型, 该模型以资源利用均衡率、工人操作复杂度均衡率、平均决策过程复杂度为约束条件, 以最小化平衡滞延时间为目标, 在任务分配中, 假设机器人承担操作任务的决策复杂度小于工人承担操作任务的决策过程复杂度, 并兼顾工人操作任务复杂度的均衡, 优化得到人机联合任务分配方案。案例研究证明了所建模型的可行性。

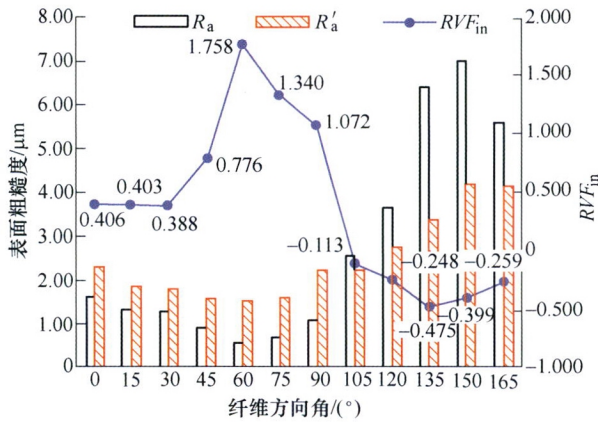
/// 制造工艺与装备 ///

215 石墨烯/柔性聚乳酸自传感复合材料结构 3D 打印与性能研究

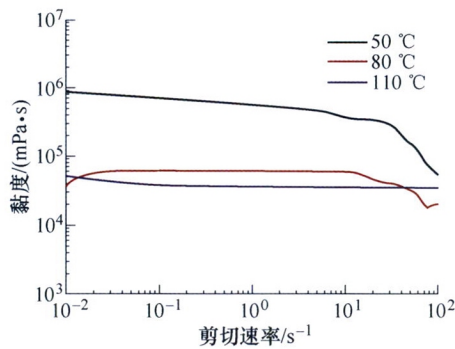


**摘要:** 为了深入研究石墨烯复合材料压阻特性, 解决压阻复合材料定量传感问题, 实现自传感结构变形监测, 通过球磨混合工艺和单螺杆挤出工艺制备了石墨烯/柔性聚乳酸复合丝材, 采用材料挤出成形 3D 打印作为石墨烯/柔性聚乳酸自传感复合材料的结构成型工艺, 对导电高分子复合材料的压阻特性展开研究, 探究了不同载荷条件对复合材料压阻特性的影响规律, 为实现自传感结构变形监测提供了可靠的依据。最后搭建了基于 LabVIEW 和实时数据采集模块的自传感结构变形重构实时监测系统, 通过建立平面弯曲变形传感单元的计算模型, 使用阵列传感单元实现了结构变形重构实时监测功能, 其中重构形状误差低于 3%。





**摘要:** 碳纤维增强复合材料/钛合金(CFRP/Ti)叠层构件广泛应用于飞机结构, 而其连接孔的表面粗糙度对连接可靠性具有重要影响。当钻头从 CFRP 侧钻入时, 在 CFRP 过渡域的表面质量问题比较严重。为从钻削全过程控制表面粗糙度, 研究了 CFRP 过渡域表面粗糙度的演化过程, 提出了钻孔周期内/间表面粗糙度演化的概念模型, 建立了粗糙度变化因子指标  $RvF_{in}$  和  $RvF_{bet}$ 。通过对比试验发现, 在钻孔周期内,  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  纤维方向上的表面粗糙度恶化, 而  $135^\circ$  纤维方向上的表面粗糙度改善, 在钻孔周期期间, 四个角度上的表面粗糙度发生不同程度地恶化,  $RvF_{in}$  和  $RvF_{bet}$  的数值变化能够方便地反映表面粗糙度的变化趋势, 为 CFRP/Ti 叠层钻孔表面质量评价的工程应用提供了理论基础和技术方法。

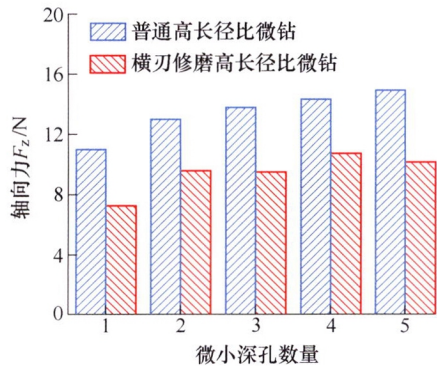


**摘要:** 液晶弹性体(Liquid crystal elastomers, LCEs)因其大且可逆的变形、响应速率快、优异的力学性能、各向异性以及驱动条件简单灵活等特点, 在智能构件制造领域被认为具有广泛的应用潜力。为了提升液晶弹性体的成形能力, 丰富液晶弹性体的变形模式及其设计方法, 提出了利用墨水直写打印工艺编程液晶弹性体复杂变形模式的方法。制备了最大变形率达 51% 的主链型液晶弹性体, 研制适合打印工艺编程的气压挤出高温墨水直写打印设备, 探索了墨水直写打印工艺对液晶弹性体性能的影响规律。发现打印速率对液晶弹性体的变形率具有显著影响, 随着打印速率的增大, 变形率从 12% 逐渐增大到最大变形率 51.8% 后不再变化。此外, 打印温度可使液晶弹性体的变形率在 38.3%~51% 之间变化, 紫外光照时间可使凝胶分数最高到 62.2%, 而打印与紫外光照的间隔时间对材料的变形率没有影响。最后通过打印速率编程液晶弹性体弯曲行为, 实现了液晶弹性体变形模式和行为的精确控制, 证明了墨水直写打印工艺编程液晶弹性体复杂变形模式方法的可行性。



## 244 横刃修磨高长径比微细钻削刀具的钻削性能研究

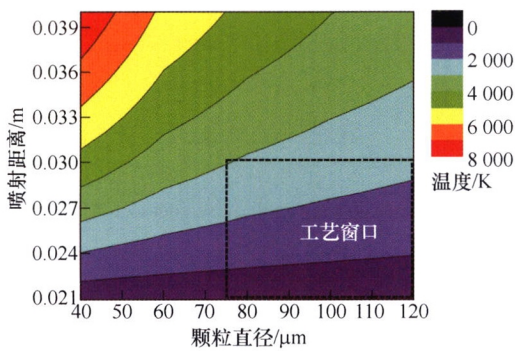
梁志强 马悦 陈建军 李玉 马丹 曹宇轩 蔡荣宾 郭海新 王西彬



**摘要:** 横刃修磨方法是一种提高钻削刀具加工性能的有效手段。针对横刃修磨高长径比微钻,建立了刀具螺旋槽、非共轴螺旋后刀面和十字型横刃的数学模型,并基于六轴数控工具磨床刃磨制备出直径 0.5 mm、长径比为 10 的横刃修磨高长径比非共轴螺旋后刀面微钻。在 304 不锈钢材料上开展了普通高长径比微钻和横刃修磨高长径比微钻的对比钻削试验研究,从钻削力、刀具磨损、微小深孔加工质量等方面分析了横刃修磨对高长径比微钻钻削刀具钻削性能的影响。结果表明,与普通高长径比微钻相比,横刃修磨高长径比微钻的钻削轴向力和钻尖磨损程度明显降低,在钻削 5 个微小深孔后,横刃修磨高长径比微钻的后刀面和横刃的最大磨损宽度分别减小了 26%和 32%;横刃修磨高长径比微钻所加工的微小深孔具有更规则的入口形状、更低的圆度误差和孔壁粗糙度。研究证实了横刃修磨方法能够显著提高高长径比微钻的钻削性能。

## 253 激光同轴熔注球形 WC 增强颗粒的工艺参数研究

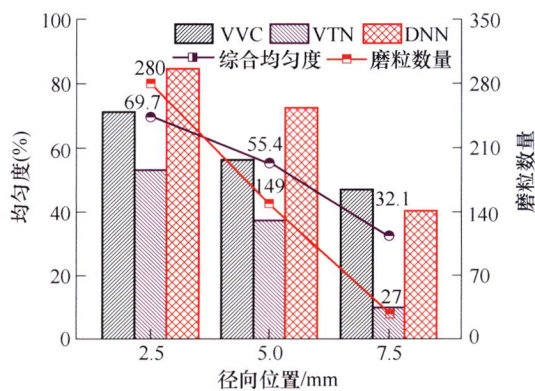
王梁 罗建 胡勇 夏洪超 姚建华



**摘要:** 采用同轴送粉方式作为粉末输送形式,以球形 WC 为熔注增强颗粒,探究激光熔注制备 WC 颗粒增强金属基复合材料涂层的工艺参数临界条件。通过建立运动过程中增强颗粒的速度模型与升温模型,分析喷射过程中增强颗粒温度与激光功率、颗粒尺寸以及颗粒初始速度之间的关系,进而获得激光同轴熔注 WC 过程中,确保颗粒保持固态的颗粒尺寸、激光功率和颗粒初始速度等工艺参数的临界条件。同时对不同直径的球形 WC 颗粒进行了同轴熔注试验验证。计算和试验结果表明:在扫描速度为 6 mm/s,送粉率为 10 g/min 的条件下,当激光功率密度为 119 W/mm<sup>2</sup>时,为保证颗粒保持固态,颗粒的直径须大于 75 μm。如需要注入直径小于 75 μm 的 WC 颗粒,则必须降低激光功率密度至 95 W/mm<sup>2</sup>以下。

## 262 静电喷雾磨粒均布微结构磨具原位制备研究

陈逢军 陈海臻



**摘要:** 提出一种基于静电喷雾的磨粒均布微结构磨具原位制备方法。使用 COMSOL Multiphysics 中的 AC/DC 模块与粒子追踪模块建立静电喷雾微槽二维仿真模型,研究在喷嘴-环形电极配置下的电场特性、喷雾特性以及沉积特性,获得微槽深径比 $\leq 1$ ,微槽深度 $\leq 1$  mm,静电电压 $\leq -6$  kV 以及接收距离 $\geq 40$  mm 的优化参数。利用光固化树脂、聚山梨酯-80 以及煤油按 4:3:1 的比例制备静电液,并添加单晶金刚石磨粒进行静电喷雾。创新性地利用狄利克雷镶嵌法定量评估不同喷射时间、不同径向位置的磨粒分布均匀度,以喷射中心半径 2.5 mm 范围内磨粒分布均匀度在 70%以上,得到合适的微结构模具尺寸。通过分析微槽深度和宽度对沉积率的影响获得合理的微槽参数。原位制备得到的微结构磨具微观特征完整,磨具与工件微槽宽度偏差率为 $\leq 2.87\%$ ,高度偏差率为 $\leq 1.09\%$ 。利用静电喷雾制备微结构磨具具有磨粒均布、形态可控等特点,该方法为微结构表面加工提供新工艺与新思路。



## **CONTENTS**

- 1 Structural Design and Inverse Kinematics Analysis of a 3-R(SRS)RP Multi-loop Mechanism Manipulator for Space Application**  
YAN Huiyin LI Chuanyang GUO Hongwei GUO Wenshang LIU Rongqiang  
TANG Dewei LI Bing
- 10 Comparative Study on Stability of Robotic Longitudinal Vibration and Longitudinal-torsional Ultrasonic Milling**  
ZHENG Kan LIAO Wenhe SUN Lianjun LIU Lixia TIAN Wei XUE Feng
- 18 Internal Force Planning of Multi-mechanism Cooperative for Variable Cross Section Roll-forming Machine**  
HUANG Xiguang YANG Ziqiang LI Duanling LI Qiang
- 26 Folding and Stiffness Analysis for Thin-walled Deployable Boom**  
ZHANG Taotao CONG Qiang REN Han GUO Yizhu
- 33 Geometry Calibrations for the Double-position 4-PPPS Aircraft Fuselage Docking System**  
QI Ruolong ZHANG Ke ZHAO Jibin MU Ruyi XING Yunlong
- 44 Review on Dynamics of the Combined Support-rotor System**  
LUO Zhong WANG Jinwen HAN Qingkai WANG Deyou
- 61 Research on Prediction of Temperature Rise of High Speed Angular Contact Ball Bearing Considering Interaction between Contact Parameters and Friction Heat**  
JIN Lan RUI Zhiyuan JIANG Haiyuan PAN Jianlong
- 68 Analysis and Experimental Study on Static Load Capacity of a New Radial-axial Roller Bearing Integrated in RV Reducer**  
HUANG Jian LI Chaoyang CHEN Bingkui
- 78 Investigation on Nonlinear Modeling and Model Parameters Identification of the Interface of Bolted Joints**  
LI Chaofeng QIAO Ruihuan MIAO Xueyang JIANG Yulin



- 87 Research on Multi-source Sparse Optimization Method and Its Application in Compound Fault Detection of Gearbox**  
HUANG Weiguo LI Shijun MAO Lei MA Yuqiang WANG Jun SHEN Changqing  
QUE Hongbo ZHU Zhongkui
- 100 Influence of Geometric Parameters on Lubrication Performance of Rolling Linear Guides Considering Stiffness Effects**  
LI Dong LIU Xiaoling LI Lei GUO Guangfu
- 109 Study on the Evolution of Real Contact Area between Elastic-plastic Rough Surfaces**  
LIU Jianhua ZHANG Feikai DING Xiaoyu
- 117 A Continuous and Smooth Contact Stiffness Model for Mechanical Joint Surfaces**  
LI Ling YUN Qiangqiang WANG Jingjing DONG Yabin SHI Xiaohui
- 125 Research on Initial Working Mechanism of fluid Pivot Floating Bearing and Floating Characteristics of Single Bottom Pad Bearing**  
YANG Qijiang LI Weiguang GUO Mingjun ZHAO Xuezhi LI Duanneng
- 138 Extensive Concept, State-of-the Art Developing Trends of Remanufacturing Service**  
WANG Lei GUO Yuyao ZHANG Zelin XIA Xuhui
- 154 The Research of Geometric Error Modeling of Robotic Machining: I Spatial Motion Chain and Error Transmission**  
LI Wenlong XIE He YIN Zhouping DING Han
- 160 The Research of Geometric Error Modeling of Robotic Machining: II Parameter Identification and Pose Optimization**  
LI Wenlong XIE He YIN Zhouping DING Han
- 185 Energy Efficiency Optimized in the Dynamic Process of a Variable-speed Variable-displacement Pump Unit**  
HUANG Haihong TANG Yunxian JIN Rui LI Lei LI Dacheng LIU Zhifeng
- 194 Ply-overlap Fiber Reinforced Plastic Connection Structure Design and Discrete Optimization**  
NIE Xin NAN Bo
- 204 Research on Human-robot Joint Task Assignment Considering Task Complexity**  
KONG Fansen GAO Tianyu LI Huimin LU Zhenlin
- 215 Graphene/Flexible Polylactic Acid Self-sensing Composite Structures 3D Printing and Performance**  
TIAN Xiaoyong YAN Wanquan HUANG Lan WANG Qingrui LI Dichen



- 224 Study on the Surface Roughness of Transitional Field in Drilling CFRP / Ti Stacks**  
LIU Shunuan SONG Ye GUO Donglin ZHANG kaifu
- 234 Study on 4D Printing of Liquid Crystal Elastomers Process and Properties**  
TANG Guiping LIU Qingping SONG Bo SHI Yusheng
- 244 Research on Drilling Performance of High-aspect-ratio Micro-drill with Thinned Chisel Edge**  
LIANG Zhiqiang MA Yue CHEN Jianjun LI Yu MA Dan CAO Yuxuan  
CAI Rongbin GUO Haixin WANG Xibin
- 253 Study on Process Parameters of Coaxial Laser Melt Injection with Spherical WC Reinforcement Particles**  
WANG Liang LUO Jian HU Yong XIA Hongchao YAO Jianhua
- 262 In-situ Fabrication of Microstructure Tool with Abrasive Uniform by Electrostatic Spray Deposition**  
CHEN Fengjun CHEN Haizhen



# 《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)



ISSN 0577-6686



9 770577 668217