

# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

知识图谱在智能制造领域的研究现状及其应用前景综述

张栋豪 刘振宇 郑维强 刘惠 谭建荣

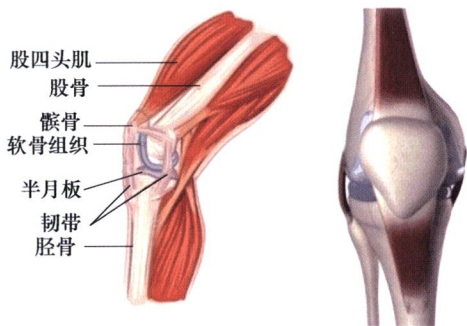


57卷 **05**期 半月刊  
2021年3月

## /// 机器人及机构学 ///

### 1 膝关节术后康复训练机器人研究综述

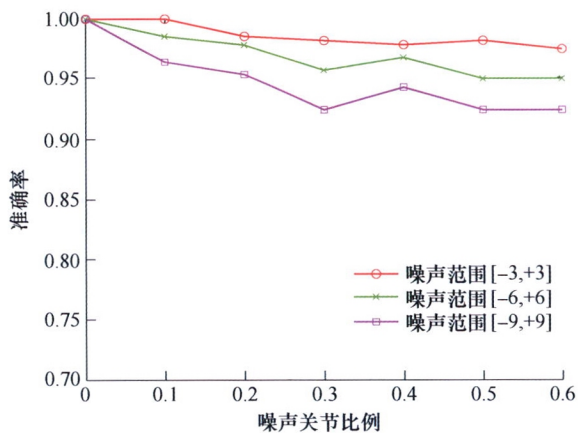
姚玉峰 杨云龙 郭军龙 裴 硕 孙立宁



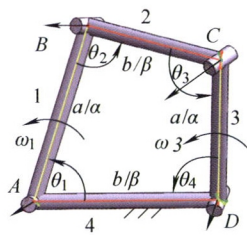
**摘要:** 膝关节术后康复训练机器人(简称康复训练机器人)辅助接受膝关节手术的患者进行康复训练,帮助患者快速恢复膝关节的运动机能,可有效减轻理疗师及患者家属的工作负担,在膝关节术后康复训练中具有广泛应用。在总结膝关节术后运动特征及康复需求的基础上,将康复训练机器人分类成末端驱动式、外骨骼式及其他类型,详述了其设计理念、结构特点、控制策略及康复训练效果的评价系统。分析了当前康复训练机器人存在的问题,以及涉及的关键技术,预测了未来康复训练机器人的发展趋势。

### 19 面向动作识别的旋转投影变换关节特征骨架描述

巫晓康 赵 欢 唐敏杰 丁 汉



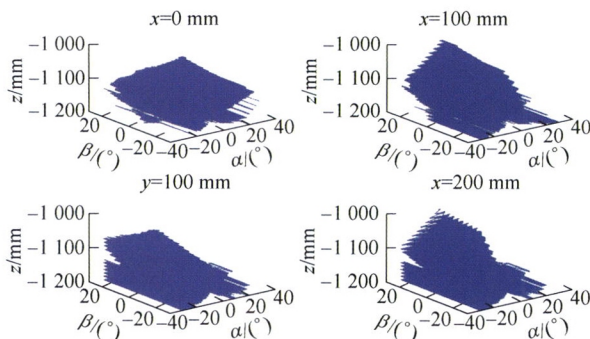
**摘要:** 在机器人领域中,基于人类骨架关节特征描述的动作识别方法被广泛地应用于人机协作任务,以帮助机器人理解人类的行为。对动作序列中的时间信息和空间信息挖掘是其中的一个重要问题,不充分的信息提取往往会导致算法鉴别力低。鉴于此,从骨架旋转投影出发,提出了一种能够充分挖掘动作序列中时空信息的高鉴别力人类骨架关节特征描述方法,即骨架旋转投影描述子(Rotational and projective skeleton signature, RPSS)。建立以人为中心的正交坐标系;从训练序列中学习躯干尺寸并进行替换;将骨架分别绕坐标轴旋转一系列固定间隔的角度,并向某一平面进行投影以获取足量的空间信息,将多次投影得到的子特征进行串联后依据帧顺序并联合得到序列的特征;利用方向梯度直方图对特征矩阵进行提取以生成最终的基于关节特征且蕴含丰富时空信息的描述子 RPSS。所提出的 RPSS 描述子在多个公开的经典数据集上进行了测试,并与基于关节描述的经典和与学习相结合的先进骨架识别方法进行对比,结果表明所提出的方法在鉴别力上具有较大的优势。添加不同程度噪声与计算动作序列平均处理时长的试验亦说明该方法具有较强的鲁棒性和实时性。



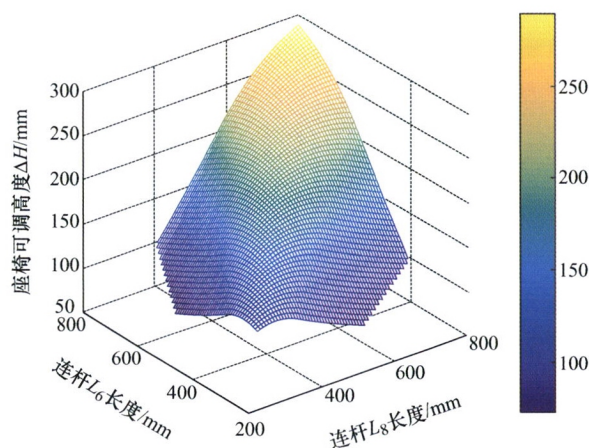
**摘要:** 从机架共线的五环、六环、…、九环 BNT(Bennett) 机构中, 拆去相邻环路公用的连架杆和它们两端的回转副, 分别得到单环路的 8 杆、9 杆、…、12 杆机构。对拆杆前和拆杆后连杆铰链点轨迹圆的分析, 发现铰链点的轨迹圆完全相同, 证实了两种机构的运动学性能完全等效。得出单环路的 8 杆、…、12 杆机构都符合 BNT 约束条件, 机构自由度为 1, 它们的环路阶, 分别为 7、…、11, 它们是一族新型的超 6 阶 GBG(Goldberg)机构。这一发现, 突破了现有环路阶小于等于 6 的传统观点。得出  $N$  杆 GBG 机构与机架共线的  $N-3$  环 BNT 机构的自由度相等, 其值为 1,  $N$  杆 GBG 机构的环路阶  $d$  是  $N-1$  的重要结论。通过对 8 杆 GBG 机构所有从动件的角位移  $\theta_i(i=2, 3, \dots, 8)$  都是原动件角位移  $\theta_1$  的一元函数的分析, 证明了该机构的自由度为 1。在 Solidworks 中, 对 8 杆 GBG 机构的各杆角位移进行了检测, 其结果和拆杆前的 5 环 BNT 机构对应的角位移检测值完全相同, 精确地证明了两种机构运动学性能是完全等效的。充分证明了 8 杆 GBG 机构是自由度为 1, 环路阶为 7 的超 6 阶机构, 也证明了用轨迹圆判断 BNT 约束条件的实用性和可靠性。这一研究成果拓宽了机构环路阶的使用区间, 也使人们对机械系统约束性质的多样性有了更新的认识。

#### 40 多并联机构均载稳定平台地面适应性研究

杜安 郭盛 陈亚琼



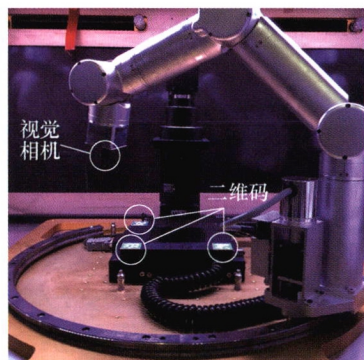
**摘要:** 以多并联机构均载稳定平台为研究对象, 进行多并联机构对软质地面的运动学和力学适应研究。给出软质不规则地面的道路化处理模型, 利用地面函数进行预调整姿态角的理论推导。针对并联单元的运动学适应, 运用并联机构理论对其进行运动学分析, 并进行多并联单元整体的系统建模。针对并联单元对软质地面的力学适应问题, 给出土壤受压模型假设, 对力反馈补偿姿态角进行理论推导分析, 给出地面适应力学判定条件, 并推导出并联单元最大负载受力与地面沉陷深度之间的关系。同时, 对并联单元进行静力学分析, 给出并联单元负载分配系数的计算方法。最后, 对多并联机构均载稳定平台系统进行运动适应性仿真和负载分配系数的计算。



**摘要:** 针对下肢运动功能障碍患者行动受限和无法独立如厕的难题, 开发出一款同时解决代步和如厕功能的智能轮椅。在分析如厕过程中起坐规律的基础上, 提出一种含耦合支链的平面两自由度并联机构, 实现乘坐高度和坐-站姿态调节, 并通过考虑椅面高度和倾角范围的可量化评价函数确定机构关键连杆尺寸。为进一步认识此并联机构特性, 进行运动学、静力学分析并完成零部件选型和整体设计工作。针对动平台末端理想轨迹需要两个驱动增加结构复杂性和占用便器空间的问题, 提出利用加权平均函数寻找水平动滑块最优固定点的方法, 实现单独驱动方式即可使末端实际轨迹贴近理想轨迹。试验结果表明该方案高度调节范围为 290~550 mm 能适应不同规格便器, 并能在不同高度下完成如厕过程中坐-站姿态变换, 满足了患者自主如厕和代步需求。

### 63 基于高斯模型和视觉测量的机械臂在线自标定方法研究

祁若龙 张珂 赵吉宾 邵健铎



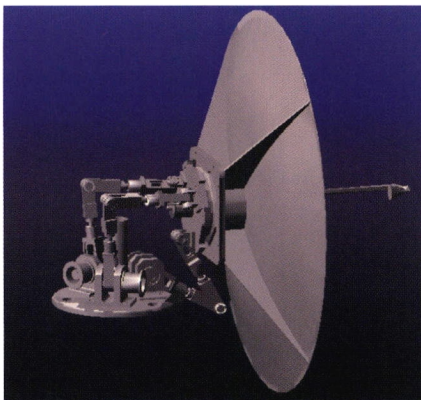
**摘要:** 对于在空间站、核电站或其他无人环境中工作的特种机械臂, 过载、碰撞、振动、温度变化和应力释放等都会对结构几何参数产生影响, 长期使用操作精度会不断降低。因此, 当无人操作机械臂在执行高精度操作或维护时, 应进行自主标定以提高操作精度。提出了一种基于多标识点的在线自标定方法, 用固定在机械臂末端的相机测量 1~3 个标识点, 形成非稳态多传感器手眼系统。针对系统存在的运动误差和传感器测量误差, 提出了高斯运动(GM)方法, 建立了可行的标定模型, 并将线性二次型调节器(LQR)控制与扩展卡尔曼滤波(EKF)相结合, 实现了误差影响下的标定运动轨迹跟踪。同时, 在视觉系统存在测量误差和标识点非稳态识别造成间歇信号反馈时, 为了形成高精度、稳定的信号采集, 提出了基于蒙特卡罗方法, 根据测量点方差筛选最优测量点。为了更加契合机械臂几何误差形态, 采用了 DH 增广模型, 一次逼近 30 个模型参数。基于中国空间站的生命科学手套箱机械臂的数据比较分析和试验结果证明了所提方法的有效性和可行性。



**摘要：**移动铣削机器人原位加工作业是解决大型复杂构件高效高精制造的有效途径，其定位精度是重要的技术指标，对大型复杂构件的最终制造质量意义重大。针对现有的移动机器人存在的控制器开放性不足、集成性差所导致多数据通信受限、补偿方法实现困难、NC 代码功能缺失等问题，提出了一种数控驱动的移动铣削机器人精度提升方法。研究数控驱动的移动铣削机器人系统，构建总线通信架构，实现 840Dsl 数控驱动的移动机器人控制；提出机器人关节光栅闭环控制原理与光栅螺距补偿方法，实现移动机器人自重与外加负载的光栅补偿；提出基于几何约束与两步误差的机器人运动学参数辨识方法，解决坐标系对齐，避免角度误差被距离误差淹没；提出空间网格分割的移动机器人高精度定位方法，实现非几何误差补偿。通过试验设计、对比、验证，数控驱动的移动铣削机器人精度提升方法将定位精度从毫米级提升至 0.11 mm，证明上述方法的有效性与正确性，为移动铣削机器人的广泛应用奠定基础。

## 81 基于工作空间的混联式极化天线机构参数化设计及其力学分析

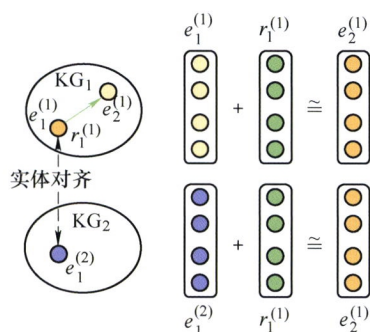
邓云蛟 段艳宾 李建军 窦玉超 曾达幸 侯雨雷



**摘要：**并联机构自身结构所限难以适应非圆极化天线相位不变的要求，在 3-RSR(R 为转动副，S 为球面副)并联机构基础上串联可实现单转动的极化机构，提出混联式极化天线机构。分析建立并联机构与极化机构运动关系，以避免并联机构方位运动时天线反射面所出现的横滚现象；考虑并联机构杆件干涉及运动副限制，进行机构参数化设计以满足俯仰  $0\sim 90^\circ$ 、方位  $0\sim 360^\circ$  工作空间需求；参照传统天线风载工况，提出并联机构天线风载施加方法，规划不同运行轨迹，借助 ADAMS 仿真获得天线所需驱动力矩。研究工作拓展了天线构型并为天线样机研制奠定了基础。

90 知识图谱在智能制造领域的研究现状及其应用前景综述

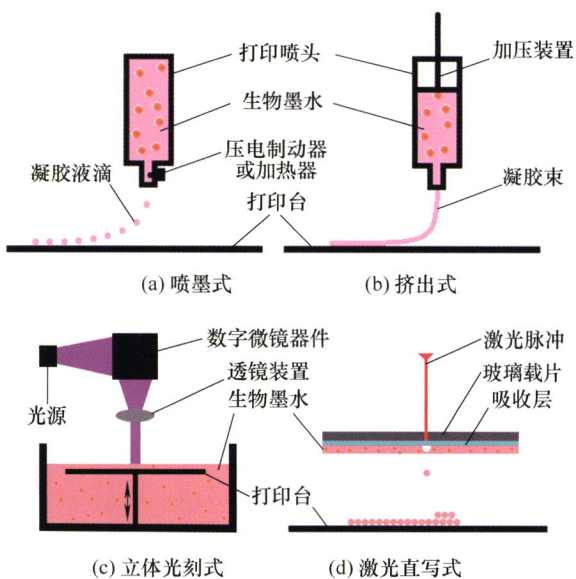
张栋豪 刘振宇 郑维强 刘惠 谭建荣



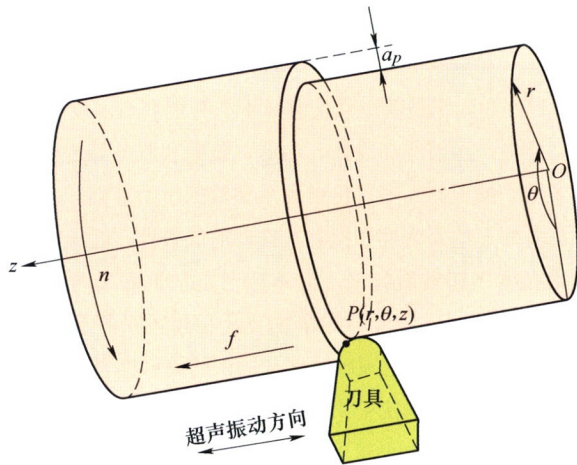
**摘要:** 数据和知识是新一代信息技术与智能制造深度融合的基础。然而，当前产品设计、制造、装配和服务等过程中，数据及知识的存储大多以传统关系型数据库为基础，这导致了数据及知识的冗余性和搜索及推理的低效性。近年来，知识图谱技术飞速发展起来，它本质上是基于语义网络的思想，可以实现对现实世界的事物及其相互关系的形式化描述。该技术为智能制造领域数据及知识的关联性表达和相关性搜索推理问题的解决带来了可能性，因此其在智能制造的实现过程中扮演着越来越重要的角色。为了给知识图谱在智能制造领域的应用提供理论支撑，总结了知识图谱领域的研究进展；同时探索了知识图谱在智能制造领域的3大类应用方向，共15小类应用前景，分析了在各个应用前景上与传统方法的不同之处，应用过程中所需要使用的知识图谱相关技术以及实施过程中所待突破的关键技术，希望可以为进一步展开针对知识图谱在智能制造领域的研究提供启发，同时为相关企业针对知识图谱的实际应用提供参考；最后以数控车床故障分析为案例，验证了知识图谱在智能制造领域应用的有效性。

114 生物3D打印技术的新研究进展

吴春亚 吴佳昊 吴喆冉 李曦光 黄俊杰 陈明君

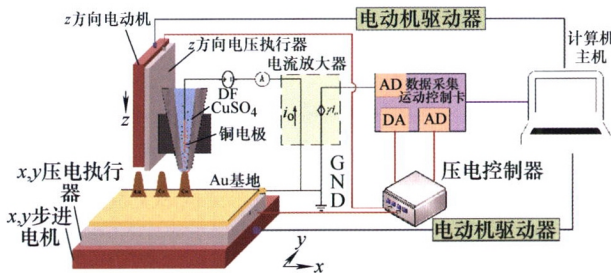


**摘要:** 离体构建生物组织和器官一直以来都是医学界和工程界共同面临的重要难题。由于三维组织结构成型复杂、微环境控制难度大、商业应用下的生产效率和可重复性等因素限制，传统制造方法很难实现生物组织和器官的有效构建。医学模型和生物相容性支架打印技术已发展较为成熟，但相对固定的加工工艺限制了其在活性生物材料打印领域的拓展；4D生物打印技术的概念提出较晚，重点在于产品的可编程性变形，但有关响应性材料的研究仍然较少。采用生物活性物质和生物相容性材料作为打印墨水的生物3D打印技术，在复杂内部型腔和外部结构的构建方面优势凸显，可以实现器官组织的个性化定制，并高效生成三维活性构建体，在组织工程中的应用潜力巨大。着眼于生物3D打印中关键技术的发展态势，重点分析面向不同器官组织和功能性支架的生物3D打印机理及应用现状，并探讨其在发展过程中需要面临的挑战和仍需注重解决的问题，希望能为后续生物3D打印技术研究工作的大规模推进提供参考。

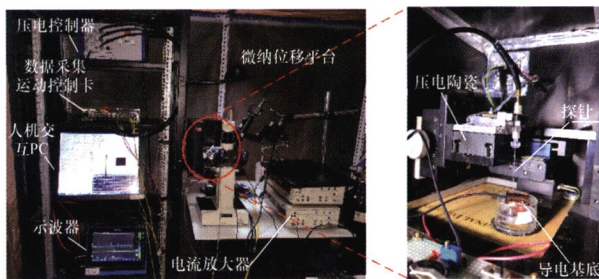


**摘要:** 作为一种广泛应用于航空航天领域内的难加工材料,钛合金的高质高效切削一直是机械加工领域中的热点问题。针对其加工过程中的力热聚集问题,一种将高压冷却方式辅助于垂直于切削速度方向振动分离的超声振动切削加工方法被应用于其高质高效加工。首先,刀具和工件周期性的分离条件通过数学方法导出。随后基于此开展了钛合金的车削试验,通过设定不同的切削参数(切削速度、进给量和切深)和冷却参数(冷却液压力),研究了切削力、切削温度、刀具磨损过程、工件表面质量和刀具寿命与相关参数之间的关系。试验结果表明,在满足分离条件的情况下,高压冷却状态下的超声振动切削加工能有效降低切削力和切削温度、延缓刀具磨损速度、改善表面质量和提高刀具寿命。在冷却液压力 20 MPa 的条件下,钛合金的切削速度能提至 400 m/min 并保证工件表面质量  $Ra$  不超过  $0.4 \mu\text{m}$ , 实现了刀具长寿命和工件高质高效的切削精加工。

148 一种基于扫描探针的微纳结构原位在线读写方法

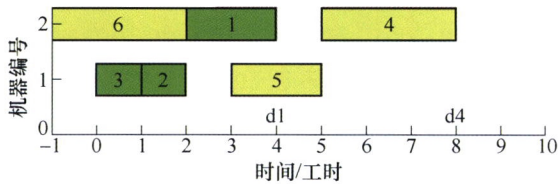


(a) MCED系统组成结构框图



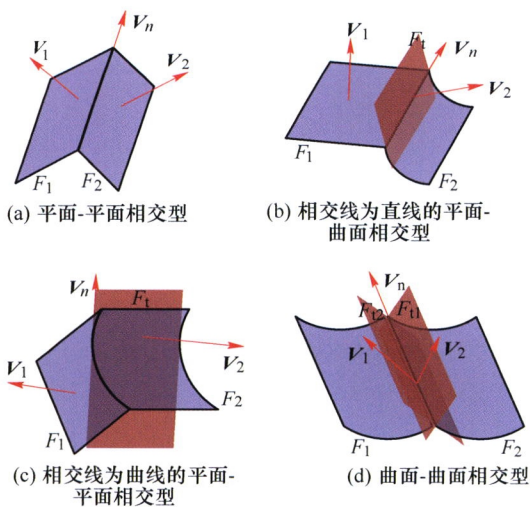
(b) MCED系统实物图

**摘要:** 基于扫描探针的弯月形液滴限制电化学沉积方法 (Meniscus confined electrochemical deposition, MCED)能够在微纳尺度进行结构制造和表面修饰,近年来受到了众多研究者的广泛关注。然而,在三维微纳结构制造(“写”)过程中,无法在线原位检测(“读”)加工结构形貌,导致其应用受到一定的限制。本研究对比分析了 MCED 微纳制造方法和扫描电化学池显微镜检测方法 (Scanning electrochemical cell microscopy, SECCM)在系统物理配置和原理上的异同;提出 SECCM 交流调制模式对采用 MCED 方法制造的微纳结构进行在线原位成像,通过对比 SECCM 直流和交流模式的检测结果,发现交流模式能够有效克服直流模式对样本表面造成损伤的缺点,且抗干扰能力明显提高,成像图像的 MSE 降低了 27.85%。对比扫描电子显微镜成像结果,验证了交流扫描模式能够较好的对样本进行在线原位成像,增加了 MCED 试验操作的在线可观测性和操作的准确性。因此,该方法使得在线 MCED 微纳操作可视、续接、定点修饰等功能成为可能,对拓宽 MCED 在微纳领域的应用具有重要意义。



**摘要:** 虽然作业车间调度问题在过去几十年里已经得到了广泛而深入的研究, 但大部分研究都是以正规指标(Regular measures)最小化为目标。正规指标的调度只需要将工序尽量提前即可。相对于正规指标, 最小化提前和延迟成本之和等则属于非正规指标(Non-regular measures)。对于非正规指标调度, 将所有工序尽量提前并不能优化目标, 其调度方案的生成过程必然更加复杂。针对提前和延迟成本最小化这类非正规指标问题, 将研究对象从作业车间调度(Job shop scheduling, JSP)扩展到了装配作业车间调度(Assembly job shop scheduling, AJSP), 以更广泛地探讨求解此类问题的一般规律。设计了一种三阶段调整的启发式算法以生成调度方案, 并结合遗传算法的求解框架进行了分析。通过与最优解结果对比, 证明该启发式算法的效率和有效性。另外, 试验结果也揭示了不同求解因子对求解效果的影响, 为后续研究提供参考。

166 基于特征矩阵的大型舱体类构件毛坯模型复杂特征分层识别方法

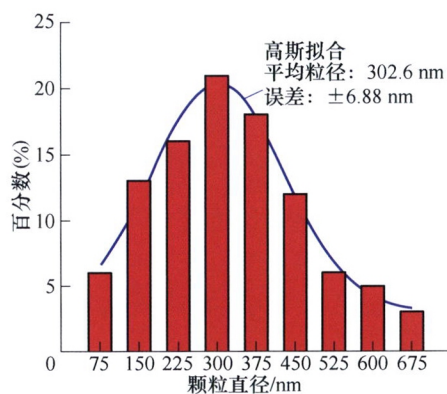


**摘要:** 大型舱体类构件是大飞机、火箭等航空航天飞行器型号的重要部件, 具有众多复杂内部相交特征, 给其内部特征的准确识别带来极大挑战, 毛坯模型内部特征的有效识别是实现加工余量确定、切削参数优化及刀具路径规划的重要基础。提出了一种基于特征矩阵的大型复杂构件毛坯模型相交特征分层识别算法, 实现基于毛坯模型几何拓扑信息的多层次复杂相交特征识别。首先使用阈值分割法识别和剔除大型复杂构件毛坯模型伪特征及其数据, 进行毛坯模型优化。然后构建该优化毛坯模型的属性邻接图, 采用分层识别方法对构件的优化毛坯模型相交特征进行分层处理, 得到单一特征并计算其特征矩阵。将多类型单一特征均转换为特征矩阵, 建立特征匹配库。最后将特征矩阵与特征库进行匹配, 以进行模型相交特征准确识别。对具有多种特征的舱体零件毛坯模型进行实例验证, 通过准确识别多类型特征分别验证了该算法的可行性和有效性。



## 177 复合电沉积初始阶段预吸附的惰性颗粒对金属离子沉积的影响研究

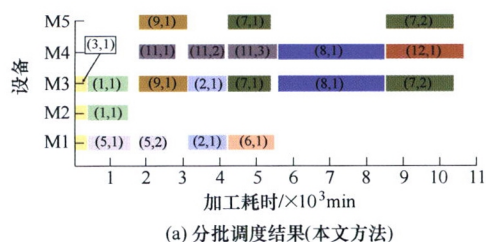
纪仁杰 刘胜贵 刘永红 金辉 张凡 蔡宝平



**摘要:**研究了复合电沉积初始阶段预吸附的  $\text{TiO}_2$  颗粒对金属镍离子电沉积的影响,首次观察到在复合电沉积初始阶段预吸附的  $\text{TiO}_2$  颗粒导致镍离子异常成核和快速生长的现象。提出了逐步电沉积方法,结合循环伏安曲线和电化学阻抗谱等电化学方法,研究了预吸附  $\text{TiO}_2$  颗粒对镍离子沉积的影响作用。结果表明预吸附的  $\text{TiO}_2$  颗粒能够增加阴极表面的活性位点密度,并减小阴极表面的电荷转移阻抗,从而加快吸附原子的电结晶步骤。结合上述研究建立了预吸附惰性颗粒影响金属离子沉积的物理模型。本研究提供了一种金属离子快速沉积和纵向生长的可能,对于揭示复合电沉积过程中惰性颗粒与金属离子的共沉积机理和行为具有重要意义。

## 185 面向机床精密主轴加工过程的混合流水生产线分批调度研究

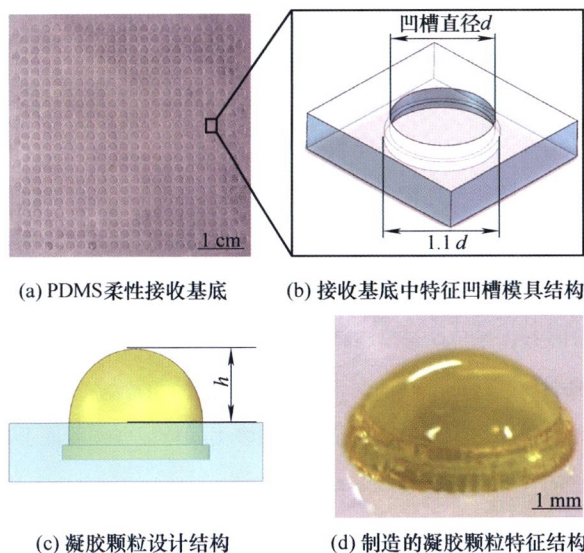
李静 高华钰 沈南燕 方明伦 朱凯



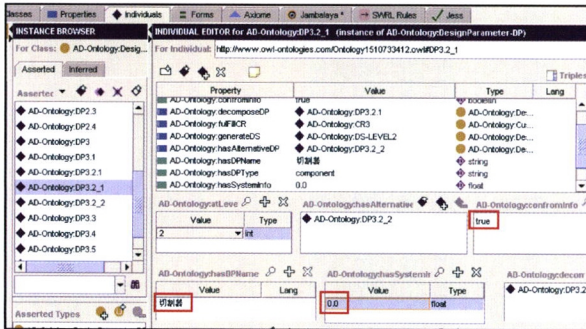
**摘要:**面向机床精密主轴加工过程,对混合流水生产调度问题进行研究。通过深入分析机床精密主轴加工工艺,以主轴粗精磨削工艺、分批规则、设备利用率等作为约束条件,以加工时间最小化为目标,建立混合流水生产模式下、机床精密主轴加工智能分批调度模型,并设计了基于差分进化-遗传混合算法的二阶段优化算法对模型进行求解;以某精密主轴生产线的实际订单为例进行仿真实验,与传统加工方案及其他典型分批调度算法对比分析,验证了该智能分批调度模型的有效性、算法的准确性及解决实际问题的优越性,能够有效缩短生产节拍,提高加工效率和设备利用率。

## 196 多材料打印仿生离子凝胶电池研究

贺佩 霍子瑶 贺健康 冯帆 朱子才 李涤尘



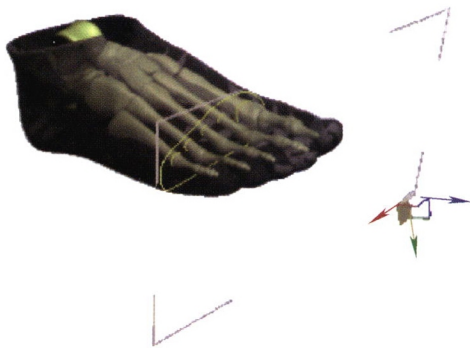
**摘要:**基于电鳗发电机理,研究了利用四通道微流控喷头制备仿生离子凝胶电池的多材料打印方法。设计了具有阵列凹槽结构的柔性接收基底以保证凝胶电池颗粒的形态和相对位置,研究了凝胶电池单元的发电性能,发现电池单元大小对凝胶电池单元输出电压影响不大,而输出电压随着凝胶电池单元串联个数增加呈线性增长规律;基于此建立了凝胶电池单元尺寸为 2.0 mm 的大面积仿生离子凝胶电池的“S型”串联排布设计与多材料打印工艺方法,实现了 127 个凝胶电池单元的一体化打印与精确组装;研究了仿生离子凝胶电池的电压输出特性,发现制备的仿生离子凝胶电池输出的开路电压可达  $(10.53 \pm 1.11)$  V,连续放电 6 小时后电压衰减至初始电压的 35.6%;验证了多材料打印的仿生离子凝胶电池用于驱动电致变形柔性(Ionic polymer-metal composite, IPMC)结构的可行性。该研究探索有望为电致动软体机器人领域的柔性仿生能源供给提供一种新策略。



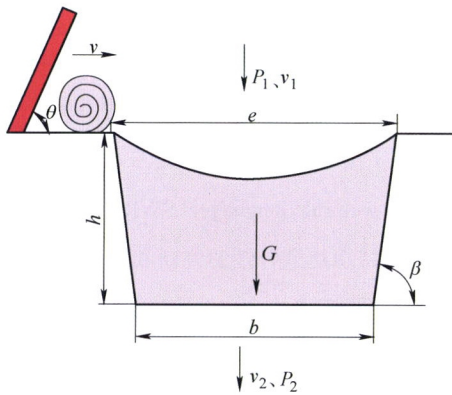
**摘要:** 使得计算机理解系统设计的语义并完成自动推理是实现智能制造和基于模型的系统工程的两个重要特征,但现有系统建模语言对语义表达和自动推理的支持有限。第一,为了满足复杂产品系统建模的语义表达要求,在前期工作—基于模型的公理化系统设计(Axiomatic model-based systems engineering, A-MBSD)的基础上,构建对应的本体模型 A-MBSD Ontology; 通过网络本体语言(Web ontology language 2, OWL2),明确定义系统设计的语义及其之间的关系。第二,为了满足系统建模的推理要求,使用语义网规则语言(Semantic web rule language, SWRL)对设计公理和规则进行定义,支持功能耦合性的判断和最优设计方案的选择。最后,以卫星太阳翼的系统设计为例,证明所构建的本体模型能够明确表达系统设计语义,相应的规则可以自动推理出设计参数所影响的功能需求、功能需求之间的耦合等,避免在试验阶段才发现耦合问题而导致的设计返工,提高系统设计的效率。

## 222 面向舒适度评价的正装鞋跖围截面有限元分析

罗向东 薛朝华 段思岐 靳鹏 岳宗敏



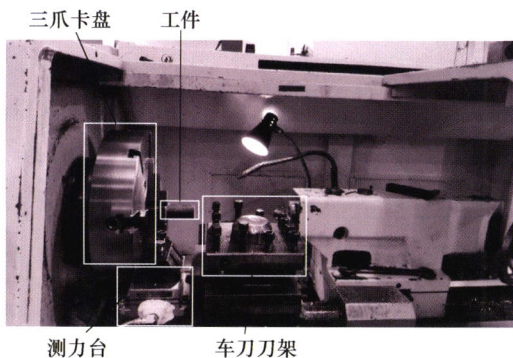
**摘要:** 围绕鞋类舒适度感知量化及舒适度评价的问题,选取了由大量试穿经验证明舒适的鞋楦,作为舒适度标准样本,另选取同号同型,舒适度低的男士正装鞋鞋楦,进行对照试验。构建鞋楦跖围所在区域足部截面几何模型并获取跖围足底压力数据,通过有限元软件对静止站立状态下足部跖围受力与变形状况进行模拟测试,得到了相对的应力数据曲线和位移数据曲线。同时,试验数据结果是对主观舒适度评价的量化表达。将鞋类舒适度的主观因素同实验数据结果相结合,选取舒适鞋品软组织表面 Von Mises X-Y 峰值平均值为评价标准做出了鞋舒适性分析,结论得出,舒适度受到楦底突度、楦面曲率、轴线位置的综合影响,并且舒适的鞋楦对足部跖围横断面有相似的应力应变表现。本研究结果为鞋类舒适度的评价提供一定的参考,为舒适鞋品的生产开发提供借鉴。



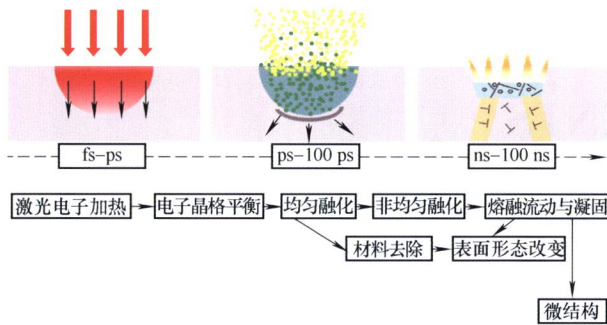
**摘要:** 为了清晰直观地认识油墨填墨机理和网版回弹机理, 根据网版印刷油墨转移过程, 建立其理论分析模型, 利用流体动力学来分析填墨过程中油墨出口速度与压强变化之间的函数关系, 利用弹性流体动力学润滑来分析楔形区动压与油墨产生的回弹力之间的影响变化; 并利用 Fluent 对分析结果进行仿真验证。理论结果表明, 在楔形区动压为  $8 \times 10^5$  Pa 时, 导电油墨在网孔两端处产生的回弹力明显大于中间位置, 且在  $20 \sim 30 \mu\text{m}$  位置处产生的回弹力基本不发生变化; 仿真结果表明, 当刮刀速度增加时, 油墨出口速度增加, 但压强变化却呈现减小的趋势, 这证明了网版印刷的刮刀速度既不能太大, 也不能太小, 最佳速度范围为  $40 \sim 65$  m/s; 在不同楔形区动压下, 网孔处油墨产生的回弹力两端位置都大于中间位置, 且在  $20 \sim 30 \mu\text{m}$  位置处基本不发生变化; 承印物上最大落墨量出现在楔形区动压范围为  $7 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5$  Pa, 占网孔体积的 95.6%, 约为  $0.189 \text{ mm}^3$ 。数值模拟与理论推导结果相吻合, 为了保证承印物上有足够的落墨量, 可以适当增加楔形区动压来提高印刷质量。

/// 制造工艺与装备 ///

242 变切深工况下恒定切削力约束的多目标进给量优化方法



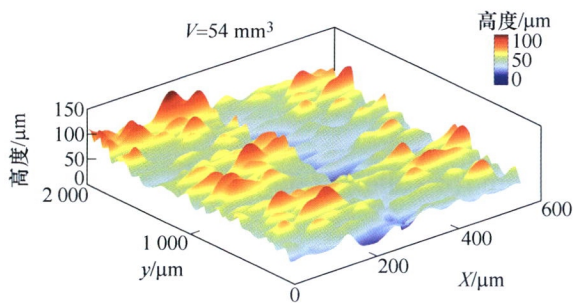
**摘要:** 针对数控加工中工艺人员设定恒定的进给量导致零件加工效率低、表面质量差的问题, 提出基于恒定切削力约束的多目标进给量优化方法。以切削力预测模型为基础, 以综合考虑提高零件加工效率和表面质量为优化目标, 以恒定切削力, 机床参数, 加工表面质量和进给量平滑过渡为约束条件, 建立了多目标进给量优化模型。通过正交切削试验标定切削力系数, 并验证了预测模型的正确性和精确性。通过试切工件采集原始切削力, 并试验分析确定出最优目标切削力值, 采用基于精英控制的非支配筛选遗传算法(Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithm, Controlled NSGA-II)对进给量进行了优化。试验结果验证了恒定切削力约束的多目标进给量优化模型的有效性, 达到了恒定切削力约束目标, 保证了加工表面质量, 提高了加工效率, 实现了数控加工工艺参数优化, 提高了数控系统应用性能。



**摘要:** 经皮冠状动脉植入血管支架是解决心血管堵塞的主要手段。管状心血管支架主要采用纳秒激光加工,但存在热效应大、熔渣碎屑残留、以及复杂后处理等问题。因此,利用高重复频率红外飞秒激光对不锈钢血管支架进行加工,研究飞秒激光烧蚀作用机理,分析材料的去除过程,研究激光能量密度、平台进给速度、激光脉冲重复频率等加工工艺参数对加工表面的影响规律,研究结果表明:高重复频率低能量密度下飞秒激光加工具有良好的表面质量和加工效率;在激光能量密度、脉冲重复频率、进给速度、气体压力分别为  $1.99 \text{ J/cm}^2$ 、 $100 \text{ kHz}$ 、 $24.6 \text{ mm/min}$ 、 $0.1 \text{ MPa}$  时,实现了热影响区小、无碎屑残留且没有重凝层的高质量血管支架切割,并且在表面加工了直径为  $30 \mu\text{m}$  的储药孔。

## 262 晶粒取向对微细加工磨削力作用机理及试验研究

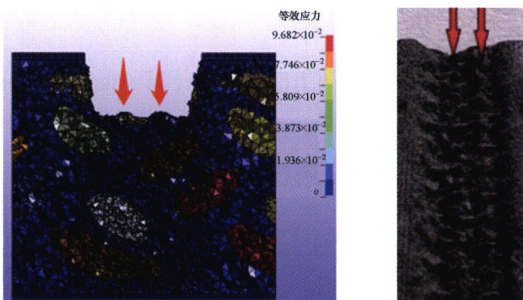
茅健 赵嫚 张立强



**摘要:** 微磨削加工中切削深度尺度一般小于被加工材料晶粒大小平均尺度,磨削刃作用在晶粒内部,工件材料表现为各向异性,因此,材料晶粒取向对磨削力作用较传统磨削更加显著,微磨削力的产生机理也会发生变化。为了探究晶粒取向对微细加工磨削力的作用机理,提出泰勒因子模型,量化晶粒取向对流动应力的影响,完善材料的流动应力本构模型。通过研究剪切面晶粒取向与滑移面之间的夹角以及剪切方向与滑移方向之间的夹角关系,确定激活滑移系的数量及类别,从而得到泰勒因子值。基于考虑泰勒因子模型的流动应力本构模型及平行剪切带理论,分析晶粒取向对切屑成形力作用机理并构建解析模型。通过磨棒形貌试验测量数据提取及拟合,提出新的磨棒静态磨粒密度的计算方法,进而构建动态磨粒密度模型。基于单颗磨粒磨削力模型以及磨棒动态磨粒密度模型,构建微细加工磨削力的预测模型。本模型综合考虑微磨削过程中力-热耦合效果、材料微观结构、磨棒形貌以及微磨削加工工艺,并通过微磨削试验对磨削力模型进行了验证。

## 273 基于磨料水射流的三维编织复合材料铣削技术研究

尹东杨 陈晓川 鲍劲松



**摘要:** 针对磨料水射流对三维编织复合材料的冲蚀过程,利用 HyperMesh/Ls-Dyna 有限元分析软件建立磨料水射流冲蚀复材模型,以射流压力、走刀速度、横向进给量为变量开展仿真分析,得出不同工艺参数下材料的去除深度与质量以及材料的应力变化情况,完成水射流铣削三维编织复合材料的工艺过程模拟。研究发现,随着射流压力的增加,复合材料平均铣削深度和 Z 向最大应力不断增加,当射流压力超过  $70 \text{ MPa}$  时材料被击穿;随着走刀速度和横向进给量的增大,平均铣削深度和材料 Z 向最大应力呈不断减小趋势;材料铣削深度主要受射流压力的影响,其次是走刀速度,而横向进给量对深度影响较小;铣削面质量主要受横向进给量的影响,当横向进给量大于或小于喷嘴直径时,铣削面会出现峰谷现象,而等于喷嘴直径时铣削面质量较好。根据仿真结果开展试验研究,将试验结果与仿真结果进行对比分析,验证了仿真模型的可行性与有效性。

**CONTENTS**

- 1 Review of Research on Knee-postoperative Rehabilitation Training Robot**  
YAO Yufeng YANG Yunlong GUO Junlong PEI Shuo SUN Lining
- 19 Rotation and Projection Transformed Joint Feature Descriptors of Human Skeletal Action Recognition**  
WU Xiaokang ZHAO Huan TANG Minjie DING Han
- 31 A Series of Special Mechanism with Rank More than Six**  
ZHANG Yitong LI Yanwen HU Bo MU Dejun ZHAO Meixin
- 40 Ground Adaptability of Multi-parallel Mechanisms with Load-balanced Stable Platform**  
DU An GUO Sheng CHEN Yaqiong
- 52 Design & Analysis of Parallel Adjustment Mechanism for Toilet Intelligent Wheelchair**  
SHIXiaohua LU Hao CHEN Ziming
- 63 Research on On-line Self-calibration Method for Manipulators Based on Gauss Model and Vision Measurement**  
QI Ruolong ZHANG Ke ZHAO Jibin SHAO Jianduo
- 72 Method for Improving Accuracy of NC-driven Mobile Milling Robot**  
WEN Ke ZHANG Jiabo YUE Yi ZHOU Yinghao YANG Jizhi CHEN Qintao
- 81 Parametric Design of Hybrid Polarization Antenna Mechanism Based on Workspace and Its Mechanical Analysis**  
DENG Yunjiao DUAN Yanbin LI Jianjun DOU Yuchao ZENG Daxing HOU Yulei
- 90 A Review on Knowledge Graph and Its Application Prospects to Intelligent Manufacturing**  
ZHANG Donghao LIU Zhenyu JIA Weiqiang LIU Hui TAN Jianrong
- 114 New Progress of Biological 3D Printing Technology**  
WU Chunya WU Jiahao WU Zheran LI Xiguang HUANG Junjie CHEN Mingjun
- 133 High Quality and Efficient Ultrasonic Vibration Cutting of Titanium Alloys**  
ZHANG Xiangyu LU Zhenghui PENG Zhenlong ZHANG Deyuan

- 148 An In-situ Online Micro-nano Structure Read-write Method Based on Scanning Probe**  
LIAO Xiaobo ZHUANG Jian DENG Yalou WANG Zhiwu JIAOYANG Bohan  
CAI Yong LIAO Xuan
- 157 Research of Just-in-time Scheduling for Assembly Job Shop**  
LÜ Haili ZHU Jiatao WANG Zhengguo WU Shu
- 166 Feature Matrix Based Complex Feature Hierarchical Recognition for Blank Model of Large Cabin Component**  
DUAN Xianyin YU Sheng PENG Fangyu ZHENG Yan JIANG Guozhang XIANG Feng
- 177 Effects of Pre-adsorbed Inert Particles on Deposition of Metal Ions at the Initial Stage of Composite Electrodeposition**  
JI Renjie LIU Shenggui LIU Yonghong JIN Hui ZHANG Fan CAI Baoping
- 185 Research on Batch Scheduling of Hybrid Production Line for Machine Tool Precision Spindle Processing**  
LI Jing GAO Huayu SHEN Nanyan FANG Minglun ZHU Kai
- 196 Biomimetic Ionic Gel battery Based on Multi-material Printing**  
HE Pei HUO Ziyao HE Jiankang FENG Fan ZHU Zicai LI Dichen
- 205 Ontology-based Axiomatic System Design Semantic Modeling and Reasoning Rules**  
WANG Haoqi LI Hao WEN Xiaoyu
- 222 Finite Element Analysis of Metatarsal Cross Section of Formal Shoes for Comfort Evaluation**  
LUO Xiangdong XUE Zhaohua DUAN Siqi JIN Peng YUE Zongmin
- 231 Screen Printing Conductive Ink Transfer Mechanism and Simulation Research**  
LIU Shipu LI Yan TIAN Ye YUAN Yingcai
- 242 Multi-objective Feed Optimization with Constant Cutting Force Constraints under Variable Cutting Depth**  
ZHANG Yang WU Baohai XIA Weihong ZHANG Ying ZHAO Jing
- 251 Debris-free Femtosecond Laser Micromachining of Stainless Steel Vascular Stent**  
XIE Xiaozhu ZHU Yiliang HUANG Yajun SHEN Chao PENG Qingfa WANG Pengchao  
LONG Jiangyou
- 262 Theoretical Analysis and Experimental Validation of Micro-grinding Force Considering the Effect of Crystallographic Orientation**  
MAO Jian ZHAO Man ZHANG Liqiang
- 273 Research on Milling Technology of 3D Braided Composites Based on Abrasive Water Jet**  
YIN Dongyang CHEN Xiaochuan BAO Jinsong

# 《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 (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

05>