

ISSN 0577-6686  
CODEN CHHKA2



# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING



柔性可穿戴腕部动力手套的设计与分析

姚建涛 李海利 曹开彬 陈新博 周盼 赵永生



中国机械工程学会 主办

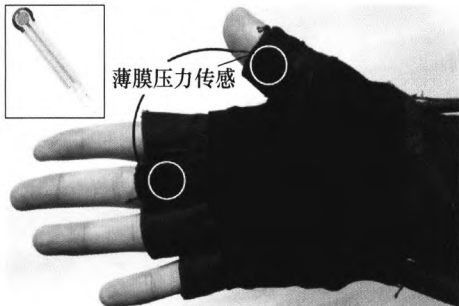
万方数据

2018年54卷19期 半月刊

/// 机构学及机器人 ///

1 柔性可穿戴腕部动力手套的设计与分析

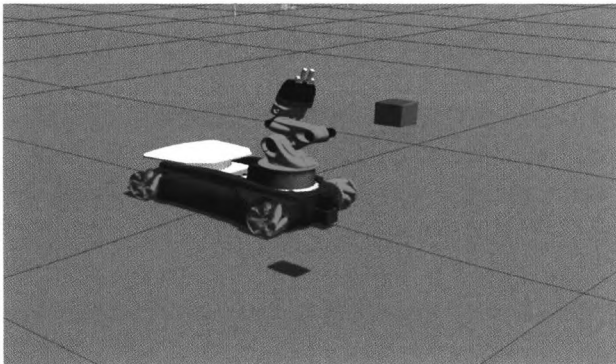
姚建涛 李海利 曹开彬 陈新博 周 盼 赵永生



**摘要：**动力手套是一种腕部康复训练装置，同时具有辅助的助力功能。康复训练是手腕进行自主康复的一种重要的辅助治疗手段，传统的康复训练装置大多采用电机驱动的刚性外骨骼结构，在运动时急剧变化的冲击力易造成关节二次伤害，同时较大的质量增加了身体的额外负担。基于气动人工肌肉设计并制作了一款柔性可穿戴动力手套装置，能够实现腕关节屈/伸、内收/外展两自由度运动，集康复训练与腕部助力于一体，轻量化柔顺的外骨骼结构提高了其便携性及舒适性。通过嵌入薄膜压力传感器能够感知手掌与物体之间的抓取力，自动实现腕关节助力功能并有效地保护腕部。对腕部进行穿戴静力分析求解手套装置的性能需求参数，并测试气动肌腱的关键指标及手套的整体性能，测试结果表明所设计的动力手套能够满足腕部康复训练要求并具有辅助的助力功能。

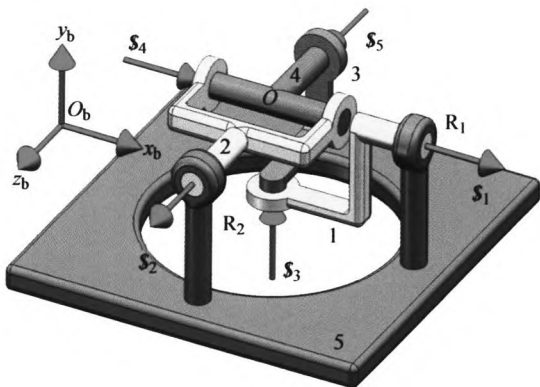
10 机器人平滑抓取移动物体的运动规划方法

张 驰 尚伟伟 丛 爽 刘 宜



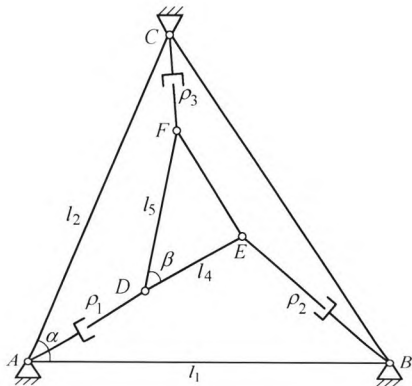
**摘要：**结合机器视觉和运动规划方法，对动态环境中移动物体的平滑抓取进行了研究。设计了一种运动物体跟踪算法，能够实现无障碍环境下移动物体的平滑抓取；针对环境中存在动态障碍物的情况，设计了一种基于排斥矢量的动态避障算法，与运动物体跟踪算法相结合，实现了机器人先避障后平滑抓取；基于机器人操作系统(Robot operating system, ROS)框架，在 5 自由度的 KUKA Youbot 机械臂平台上实现了无障碍环境下对传送带上物体的平滑抓取，以及动态障碍物环境中的平滑抓取，试验结果验证了所设计算法的优越性。





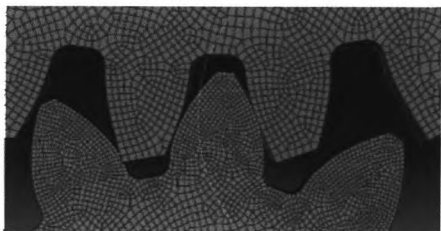
**摘要：**提出一类基于球面五杆机构的变胞并联机构。基于具有解耦特性的球面五杆机构，应用螺旋理论综合出一类具有变胞特性的可重构混联支链，该混联支链由一个球面五杆机构和一个四自由度串联支链混联而成，应用三条相同的所述可重构混联支链构型出一类变胞并联机构。不同于现有利用约束奇异和支链奇异综合可重构并联机构的方法，提出利用球面五杆机构的解耦特性和关节锁死的方法来实现并联机构的可重构，因此该类变胞并联机构可有效避免重构过程中的约束奇异以及支链奇异。该类变胞并联机构可在一个广泛的范围内变换其工作模式和自由度，且伺服电动机均可安装在机构的固定平台。提到的方法可应用于其他基于解耦闭链的变胞并联机构构型综合。

27 平面并联机构正运动学分析的几何建模和免消元计算

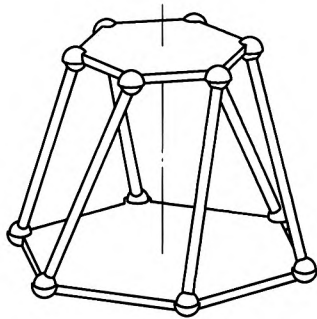


**摘要：**为了解决三自由度平面并联机构的正运动学分析建模和求解时，需要建立坐标系和消元的问题，基于共形几何代数(Conformal geometric algebra, CGA)提出一种脱离坐标系的几何建模和免消元计算方法。在共形几何代数框架下通过基本几何体的相交、分离和对偶运算，表示出动平台上的两个铰链位置；根据动平台三角形面积的有向性，并经过一系列的几何代数运算和化简推导出该问题的特征多项式方程；通过半角正切变换、欧拉变换或不需要任何变换可直接获得任意构型的平面并联机构正运动学分析的一元高次方程。特征多项式方程的推导脱离了坐标系，不需要经过消元，且不需要任何前提条件。数字实例求解表明提出的方法对于特殊构型和一般构型的平面并联机构都是适用的，验证了算法的正确性，结果表明算法数值鲁棒性好，为平面并联机构运动学求解理论提供了一种新思路。

34 非等边剃齿刀的齿形设计



**摘要：**剃齿过程中，啮合周期在节圆附近出现单点接触即三点啮合区域，是导致剃齿齿形中凹误差的重要原因之一。基于负变位剃齿和平衡剃齿的原理，对负变位剃齿刀进行非等边齿形设计，通过减小副工作面的最大曲率半径，使主、副工作面同时啮入，实现平衡剃齿，有效地消除了节圆附近三点啮合区域，改善了该区域轮齿间啮合力不均匀的情况。以传动误差曲线幅值作为量纲，将非等边剃齿刀与负变位剃齿刀进行对比分析，结果表明：非等边剃齿刀能够优化负变位剃齿的不足以及平衡剃齿条件难以实现的缺点，使剃齿啮合过程轮齿间啮合力趋于平稳，实现平衡剃齿，降低传动误差幅值，为消除剃齿中凹误差提供了新的技术思路。



**摘要：**以一类动静平台均为等边三角形的 6-SS 型自运动机构为研究对象，从同源机构构造的视角探究该类机构的综合以及尺度特征。根据末端构件存在的转动、移动特征，建立空间单环 SSC 机构的共形几何代数模型，分析其运动参数与尺寸参数之间的映射关系；基于该机构在最高位置处的垂直投影，构造了具有相同映射关系的一簇 3-SS/C 机构，揭示了等边三角形平台的 6-SS 型自运动机构的同源构成本质以及所需满足的位形条件。根据机构簇存在的尺寸转换关系，设计给定的 3-SS/C 机构的同源机构，分析并得出平台设计点满足的几何规律，提出了 6-SS 型自运动机构综合的几何化方法；进一步基于所得出的几何规律，揭示了该类机构的比例尺度特征，Griffis-Duffy 平台为该类机构的特例。该项研究在丰富同源机构种类的同时，也为包含比例尺度特征的机器人机构拓扑结构设计提供了一个崭新视角。

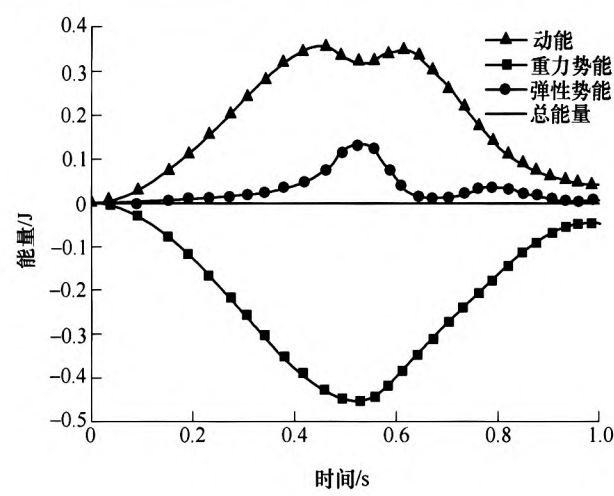


**摘要：**分析了螺旋锥齿轮端面滚齿加工的齿面形成原理，推导了局部接触状态下端面滚齿加工切齿调整参数及刀盘参数的计算过程。提出了一种齿面接触特性控制方法，该方法能够根据需要在齿面上任意指定接触参考点的位置，并能对轮齿两面的接触状态同时进行控制。分析了接触特性控制参数对接触区形态参数的影响规律。分析结果表明刀倾角主要修正接触区长度以及传动误差，刀刃曲率主要修正接触区对角方向以及传动误差，且接触特性参数之间有相互制约关系。最后通过计算实例以及端面滚齿加工试验对接触特性控制方法及切齿调整计算算法进行了验证。

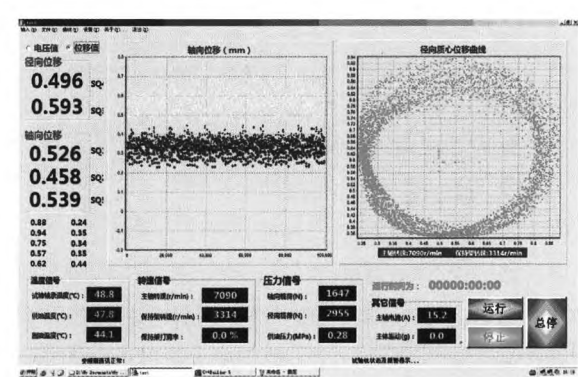
/// 机械动力学 ///



**摘要：**智能主轴兼具加工状态感知、决策与执行三大特征，可实现加工状态的自反馈与自控制，是智能制造的核心部件，是工业 4.0 和中国制造 2025 的基础支撑技术，是下一代主轴的技术发展方向。状态监测诊断与振动控制作为智能主轴三大功能特征的典型体现，是保障智能主轴高效运行的核心技术。因此，针对智能主轴的监测诊断与振动控制问题，以故障高发部件以及功能失效模式的监测、诊断与控制为线索，系统综述当前的国内外研究现状，归纳存在的问题并提出潜在的发展趋势。

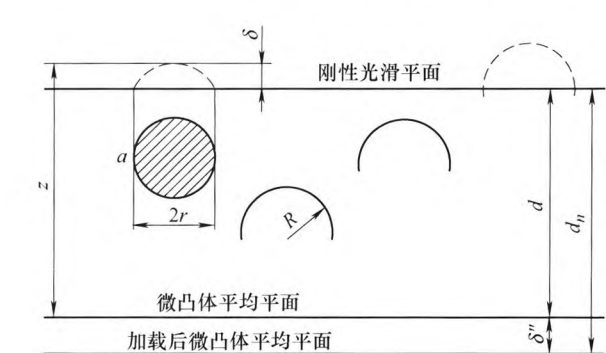


**摘要：**在绝对节点坐标缆索单元和 Bézier/B 样条几何体关系的基础上，构造了分段连续的 ANCF 缆索单元。单元形函数为分段连续函数，给出了其递推形式的定义式。单元在内节点处的连续性取决于单元节点坐标的选取以及形函数的定义方式。给出了单元弹性力及其对节点坐标雅可比矩阵的定义。进而采用该单元，建立了输电线路架设过程中断线工况的动力学分析模型。可以实现用一个单元表示整条电缆线，从而在动力学仿真程序中避免了反复进行的单元到系统的集成及系统到单元的离散过程。用静力学分析计算得到输电线路在重力、张力等外力共同作用下达到平衡时的节点坐标值，将其作为初值输入给动力学仿真程序，以模拟张力对输电线路动力学行为的影响。建立了静、动力学仿真算例验证了单元的准确性，并给出了输电线路的动力学仿真结果。

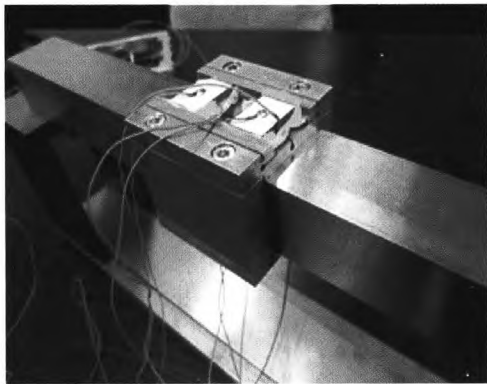


**摘要：**基于滚动轴承的动力学理论，建立了圆柱滚子轴承的非线性动力学微分方程组，使用希尔伯特-修斯-泰勒 (Hilber-Hughes-Taylor, HHT) 变步长积分算法对其动力学微分方程组进行对称多线程 (Symmetric multi-processing, SMP) 并行求解，联合机械系统动力学自动分析软件 ADAMS、控制仿真软件 Matlab/Simulink 搭建了圆柱滚子轴承的半物理仿真试验系统，实现了圆柱滚子轴承动力学仿真系统与物理试验机之间的信息交换，进而对滚动轴承的半物理仿真试验技术进行了探索与研究。该研究结果为滚动轴承的半物理仿真试验技术提供了一条可行的技术路线，能够对轴承的试验结果进行补充，为滚动轴承的半物理仿真试验技术提供借鉴与参考。

// 摩擦学 //

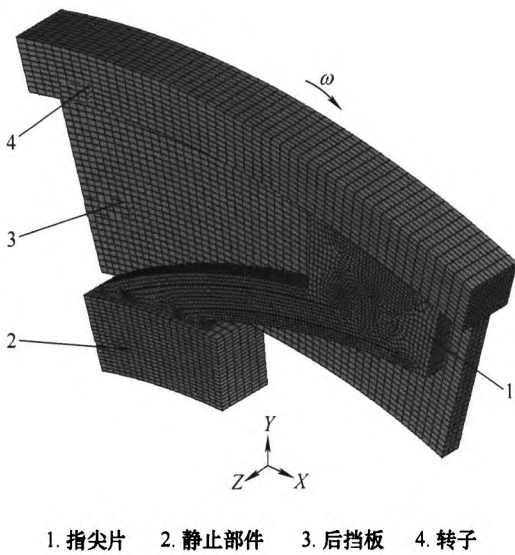


**摘要：**结合面接触刚度直接影响了机械设备的整机动态特性，为了建立更为准确的接触刚度模型，以分形几何理论为基础，利用单一微凸体承受局部载荷时的弹性变形特性，并基于域扩展因子引入微接触截面分布函数，推导了考虑表面微凸体相互作用影响的结合面接触刚度分形模型。为了验证所提出模型的准确性，通过三维非接触式测量，获得了试验试样的表面轮廓数据，并根据结构函数法，计算了各个试样的表面分形参数，进而将理论接触刚度与试验结果对比分析，结果表明：法向接触刚度的增长速率与粗糙面表面临界接触面积有关，临界接触面积决定了结合面内的弹性变形占比。考虑微凸体相互作用后，所提出模型的预测曲线更加符合试验中法向载荷与接触刚度的关系。



**摘要:**应用可压缩气体动力润滑理论建立了柔性铰链超声挤压膜滑块的动、静特性系数模型,并应用数值方法对模型进行求解,获得了高频激励条件下柔性铰链气体挤压膜滑块的动、静特性系数。讨论了悬浮高度、激励振幅以及激励频率对动特性系数的影响。根据分析发现,这些参数都对挤压膜特性有着显著的影响。悬浮高度越高,挤压膜刚度和阻尼越小。激励振幅越大,挤压膜刚度和阻尼越大。而频率的影响几乎呈线性关系,频率越高,刚度和阻尼越大,挤压膜刚度和阻尼都随着频率的增加而增加,最后对这种结论进行了解释。

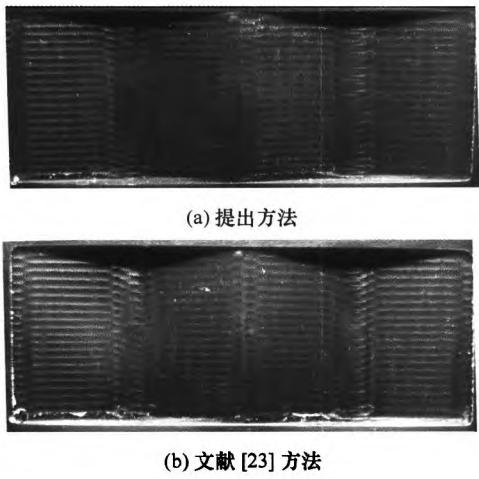
102 碳/碳复合材料旋转指尖密封性能分析



**摘要:**指尖密封是近年来研究较为广泛的一种密封形式,涉及的指尖密封多与静止部件连接而呈静止状(静止指尖密封),理论与试验研究围绕着密封泄漏和磨损性能改善而开展。提出旋转指尖密封的概念和结构,并利用碳/碳复合材料的良好自润滑性能,探索这一指尖密封新结构对泄漏性能改善的可能及机理。通过“外伸式”和“内伸式”旋转指尖密封有限元性能分析模型,分析了结构、工况以及材料参数等对两种旋转指尖密封性能的影响规律,与静止指尖密封密封性能的对比表明,外伸式旋转指尖密封具有在较高转速或跳动量下仍能维持平稳低泄漏率的特质,而内伸式旋转指尖密封的泄漏率却随着转速增大而增大,因而前者对于高速工况下的航空发动机转子密封更具应用潜质。并探索了旋转指尖密封在轴间密封工程应用的可行性,有助于航空发动机轴间密封新构型设计思路开拓、以及密封结构和性能设计的技术选择。

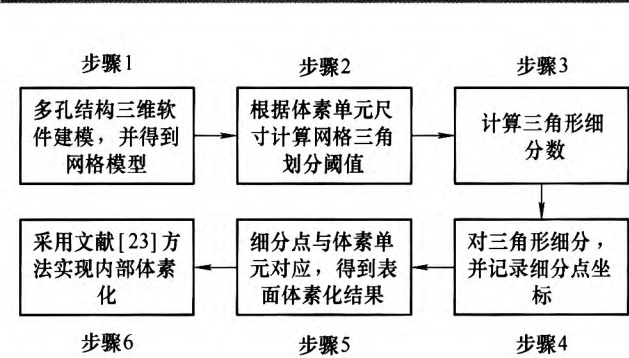
数字化设计与制造

111 基于 Bézier 曲线的小直线段局部转接光顺研究

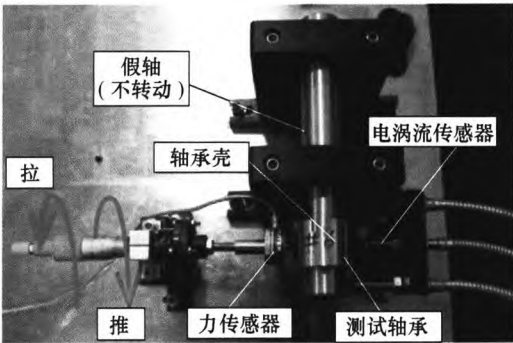


**摘要:**连续小直线段轨迹(G01)是实际加工过程中最常见的轨迹形式,而直线拐角处的几何不连续性势必会带来速度和加速度的突变,严重影响加工质量和加工精度。为提高 G01 轨迹的加工效率和加工质量,提出一种基于三次 Bézier 曲线的小直线段转接光顺算法,并建立拐角转接控制模型,实现轨迹连续性的提升。同时,为进一步提高加工效率,所提算法保证转接曲线曲率极值点出现在 Bézier 曲线中点处,并能够实现曲率极值的解析计算,并以拐角曲率最优为目标实现转接光顺控制。在加减速方面,基于柔性加减速控制方法,提出一种切向跃度连续的加减速曲线形式,并以此为前提,应用双向扫描算法实现速度前瞻过程,完成速度规划和插补。最后与现有算法进行对比,试验结果表明所提算法能够在保证相似加工精度的前提下显著提升加工效率。





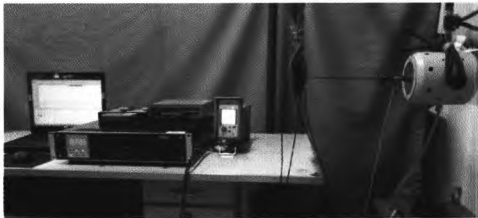
**摘要：**针对变密度多孔结构设计依据的拓扑优化密度信息不能被充分有效利用的问题，提出一种基于拓扑优化局部相对密度映射的变密度多孔结构设计方法。该方法根据多孔结构力学特点建立等效连续体的拓扑优化模型，通过拓扑优化密度的局部映射策略和调整方法，将拓扑优化的密度信息映射到多孔结构单元并根据映射的相对密度生成变密度多孔结构。此外，为检验多孔结构与拓扑优化密度信息的匹配程度，提出一种基于体素化和矩阵相似度的分析评价方法。最后以不同尺度的二维蜂窝为案例，验证了所提变密度多孔结构设计方法的可行性和有效性。



**摘要：**对采用空气箔片轴承支承的无油涡轮增压器进行了设计和试验性研究。详细阐述了无油涡轮增压器以及所采用的空气箔片轴承的设计过程。通过静态加载试验预估了空气箔片轴承的名义间隙，采用 Link-Spring 模型预测了空气箔片轴承支承结构的刚度，结合 Link-Spring 模型和雷诺方程，采用扰动法对轴承的动态刚度和阻尼系数进行了有效预测。线性转子动力学分析表明设计的无油涡轮增压器转子的前两阶刚体模态临界转速均在所用空气箔片轴承的起飞转速之下，转子的正常运行转速在一阶弯曲模态临界转速之下并具有足够的安全裕度。对整个转子系统进行了转子动力学分析与计算之后，在此基础上搭建了无油涡轮增压器试验台，初步的升降速试验结果表明：转子在 20 kr/min~60 kr/min 出现较大的次同步振动，但是转子在 68 kr/min 时次同步振动显著减小，转子在 68 kr/min 稳速时的轨迹以及 FFT 分析表明转子在该转速下的主要振动来自同步振动，这表明增压器可以在 68 kr/min 稳定运行。同时，实时测量了推力轴承和径向轴承的温度，在 68 kr/min 稳速期间，推力轴承和径向轴承温度分别在 52 ℃和 32 ℃处小幅波动，说明了该转子-轴承系统的相对稳定性。

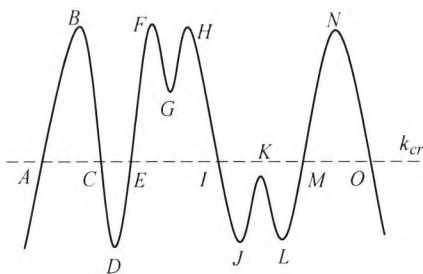


**摘要：**分析热动态伪滞后效应对直接进给轴驱动精度的影响，对进给轴具有的热伪动态特性进行建模和误差补偿研究。依据一维热传导和一维热膨胀理论，推导直线电机驱动进给轴热动态过程的温度分布模型和热变形误差动态模型，通过有限元分析方法和试验相结合，构建基于关键温度点的直接进给轴热伪滞后变形动态识别模型。应用激光干涉仪测量直接进给轴的热变形量，采用温度传感器和红外测温仪测量直接进给轴关键点的温度，构建进给轴动态热变形补偿系统，依据实时温度对应的热变形数据，发送热变形预测值给运动控制卡，进而向伺服控制器发送控制补偿指令，通过对直接进给轴的运动叠加控制，实现对直接进给轴的热变形补偿。在自构建的直接进给轴试验台上进行试验研究，结果表明：动态识别模型能有效的预测动态热行为，通过构建热变形补偿系统，可使直接进给轴进给精度提高 75%。



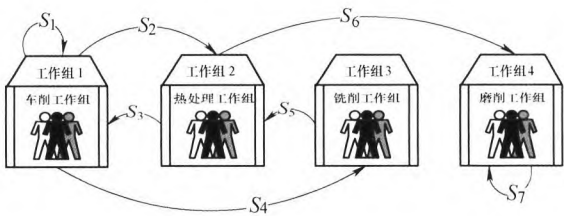
**摘要：**为提高机械结构数值分析时结合部动态特性参数的应用简便性，提出一种基于等效参数的机械结合部动态特性分析方法。在通过实验获得具有通用性的结合部单位面积上的法向动态刚度和切向动态刚度的基础上，将单位面积上的结合部等效为各向同性连续介质，基于 GW 接触模型建立单位面积上的结合部微观形貌和结合部动态刚度变化关系式，根据离散单元应力波传播条件研究结合部单位面积上的法向动态刚度和切向动态刚度之间内在联系，推导出结合部动态特性的等效参数——单位面积上的弹性模量和泊松比，并以螺栓连接的两钢板为对象进行数值分析，将计算结果和试验测量结果进行比较，以验证结合部动态特性等效参数的可行性和准确性，为深入研究机械结合部问题奠定基础。

150 临界曲率值分割曲线尖角的 NURBS 曲线插补



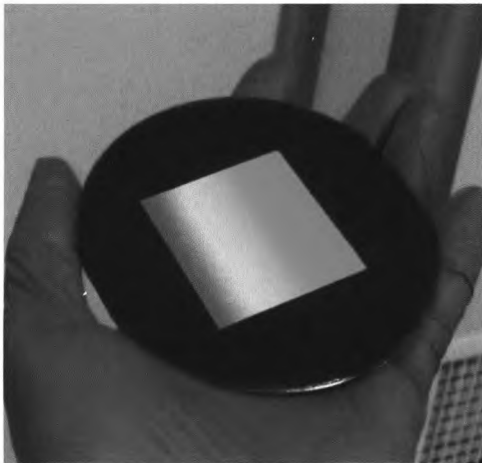
**摘要：**为兼顾插补含尖角 NURBS 曲线的精度与速度，提出尖角分割且速度修正插补算法。由插补弦高误差限、法向加速度及其导数约束，得满足插补精度及机床动力学性能的临界曲率；用大于临界曲率的局部极大曲率及临界曲率分割 NURBS 曲线为是否包含尖角的若干子段；用 S 曲线加减速算法规划各子段进给速度，并用段间速度及位移协调关系修正各段加速度及其导数，使各段加减速时间为整数倍插补周期。在相同约束条件下，分别用曲率单调无速度修正、尖角分割无速度修正及尖角分割有速度修正算法，规划一条含大曲率尖角 NURBS 曲线插补速度，并用一阶泰勒级数展开算法插补该曲线。对比结果表明尖角分割且有速度修正算法可稳定得到较高插补精度，因此该算法可用于含大曲率尖角 NURBS 曲线高速度高精度加工。

158 基于 DEVS 的机械加工过程碳排放多粒度动态模型构建及仿真

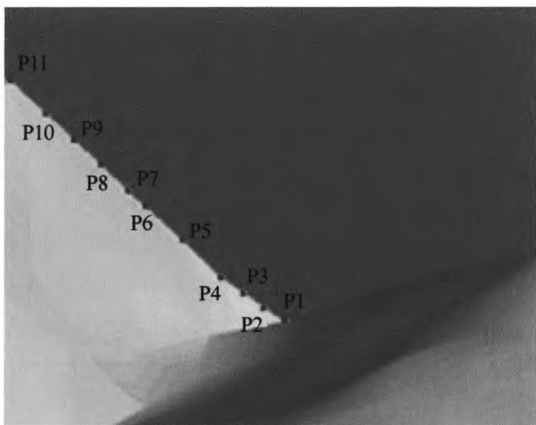


**摘要：**机械加工过程碳排放分析是低碳制造(Low carbon manufacturing, LCM)技术发展、创新及应用的基础。针对加工过程中的离散性、动态性及加工设备的高度非线性特点，同时为充分反映多设备、多工艺特征下的各类外部、内部事件对加工过程碳排放的影响，提出一种基于离散事件系统规范(Discrete event system specification, DEVS)的机械加工过程碳排放多粒度动态模型与仿真方法。基于对加工过程层级结构及碳排放特性的分析，采用 DEVS 分层阶梯建模方法，并结合信息控制下的加工运行机制及调度规则，构建设备层、工作组层、工艺链层的碳排放多粒度动态模型。以某全数控磨床尾架主轴的加工过程为例，基于 Eclipse 平台下的 CD++Builder 插件设计了各层次 DEVS 仿真模型，并通过所开发的仿真应用程序，对模型及方法进行了验证。该方法对于构建规范化、形式化的加工过程碳排放模型，实现加工过程各层级碳排放的实时动态分析与预测、定量评估低碳加工单元具有较广阔的应用前景。

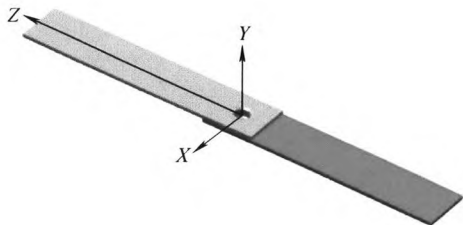




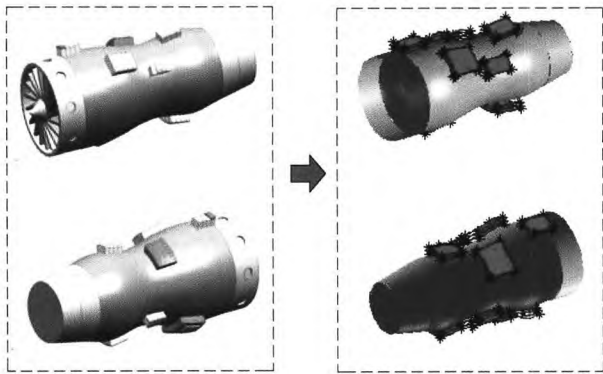
**摘要：**基于复合软模具纳米压印是一种高效、低成本和批量化制造大面积微纳米结构的新方法，已经被看作是最具有工业化应用前景的微纳制造技术。大尺寸复合软模具的设计和制造是当前大面积纳米压印所面临的一项挑战性难题，也是影响和制约晶圆级微纳米压印广泛工业化应用的技术瓶颈。开展了大面积纳米压印复合软模具理论分析、数值模拟和试验验证的系统研究。基于薄板弯曲理论，建立复合软模具变形理论模型。利用 ABAQUS 模拟软件，揭示了模具几何特征、材料属性以及压印工艺要素对于复合软模具变形的影响及其规律。提出纳米压印复合软模具设计的基本准则。该研究为大面积纳米压印复合软模具设计、优化和制造奠定了重要理论基础，并为大面积纳米压印装备开发和工艺优化提供方向性指导。



**摘要：**为研究光栅毛胚材料在机械刻划过程中滞留区的产生及分布特征。基于 LEE 和 SHAFFER 提出的正交切削滑移线场理论模型，在机械刻划塑流剖面内建立了带有滞留区特征的滑移线场模型，提出量纲一滞留区几何尺寸的计算方法。并结合有限元仿真方法获得了机械刻划三向分力，经拟合得到滞留区几何尺寸的演变规律，揭示了滞留区产生机理及分布特征。最后通过机械刻划试验，验证了槽面滞留区的分布特征及其对光栅槽质量的影响。研究表明：在一定的机械刻划加工工艺条件下，光栅槽面形成明显分界线，该线将光栅槽面分为塑性变形区和滞留区。因槽面分区成形机理和槽面质量不同，多道槽机械刻划槽面会发生非线性变形，最终将影响衍射光栅的光学衍射效果。此研究结果为从滞留区角度考虑大负前角刀具机械刻划槽形及槽面质量的控制优化问题提供了理论及试验依据。



**摘要：**压印连接是近年来新兴的连接方式，因其具有简单高效、低耗环保等优点，使得在应用连接方面越来越受到重视。疲劳破坏是机械构件失效的主要形式，疲劳过程中的微动磨损是造成零部件失效的主要原因之一。基于以上条件，对铝合金压印接头的疲劳性能进行了试验研究，结果显示疲劳失效部位主要集中在下板靠近压印点处，断口处发现大量微动磨屑，经能谱分析可以确定磨屑成分主要为氧化铝和金属铝；对疲劳失效断口和微动磨损区域进行了扫描电镜分析，发现压印接头的微动磨损部位主要分为两类，并对其进行了定义，一类定义为颈部微动磨损，另一类定义为环点板间微动磨损。分析发现颈部微动磨损所占比例随着外加载荷的大小而变化，且微动磨损是导致压印接头疲劳失效的重要因素。

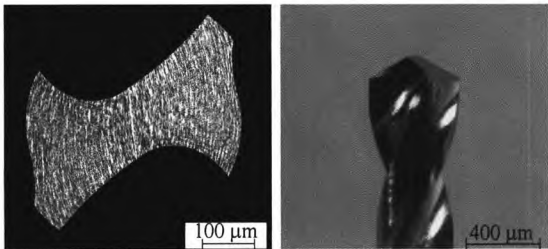


**摘要：**分支管路的布局优化属于 NP 难问题，其多目标优化情况则更加复杂。针对航空发动机分支管路多目标敷设问题，以分支管路长度最小化、分支点数量最小化以及管路平滑度最优为优化目标，建立了基于避障 Steiner 树的分支管路多目标布局模型。考虑到模型的复杂性，设计基于多目标粒子群优化(Multi-objective particle swarm optimization,MOPSO)的模型求解算法。其中，以分支点数量和坐标作为决策变量；针对分支管路拓扑结构特点，提出一种分支管路平滑度计算方法，结合非支配排序和网格密度计算完成个体多目标评价；通过可视图和测地线处理约束条件；通过多目标粒子群进化计算求得 Pareto 解集。所建立的分支管路多目标布局模型及求解算法考虑了多端点情况、多目标优化以及避障约束。最后通过管路敷设算例验证了可行性。

/// 制造工艺与装备 ///

204 非共轴螺旋后刀面微钻的五轴联动刃磨方法及其钻削性能研究

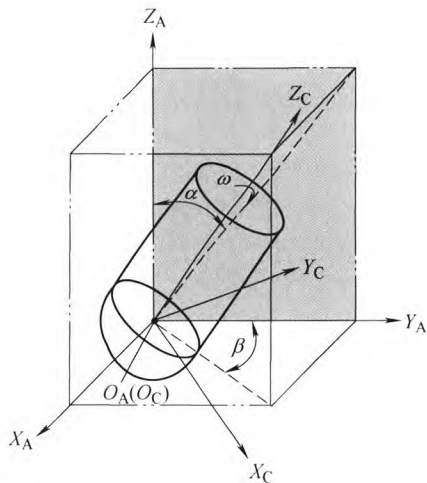
张素燕 梁志强 王西彬 周天丰 焦 黎 刘志兵 颜 培



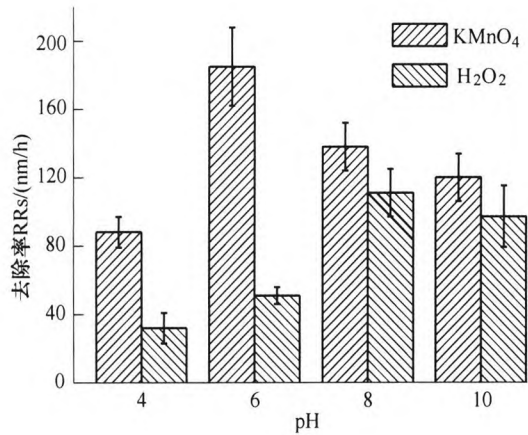
**摘要：**微细钻头的几何结构是影响刀具钻削性能和微孔加工质量的关键因素。非共轴螺旋面钻尖由连续的螺旋后刀面组成，相比平面钻尖能有效的提高刀具的刃磨效率及其钻削性能。针对非共轴螺旋面钻尖，推导后刀面形成过程中螺旋运动发生线的位置方程，建立了基于砂轮和钻头接触线的后刀面数学模型。根据六轴数控工具磨床的运动原理，提出非共轴螺旋后刀面五轴联动刃磨方法。分析砂轮与螺旋槽之间的相对运动关系，提出微细钻头螺旋槽的数控加工方法。进行非共轴螺旋后刀面微钻的刃磨试验，验证了该刃磨方法的可行性。进而采用制备出的具有相同几何结构参数的平面、锥面和非共轴螺旋面微细钻头进行不锈钢钻削试验，结果表明非共轴螺旋面和锥面微钻的钻削力、后刀面磨损明显小于平面微钻，并且非共轴螺旋后刀面微钻的横刃磨损程度小于平面和锥面微钻。研究证实了所提出的五轴联动刃磨方法可以有效地制备出较高钻削性能的非共轴螺旋后刀面微细钻头。

212 球头铣刀余摆线加工表面形貌的建模与仿真研究

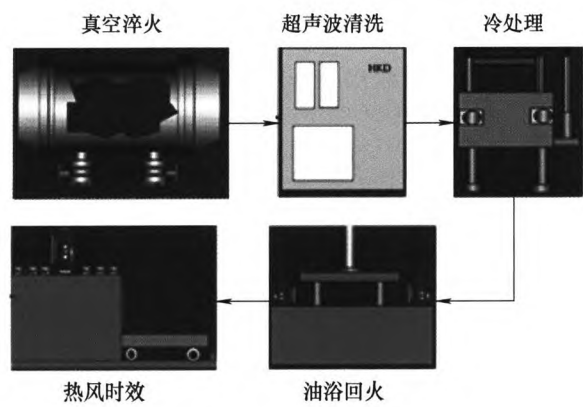
董永亨 李淑娟 李 言 李鹏阳 杨振朝 辛 彬



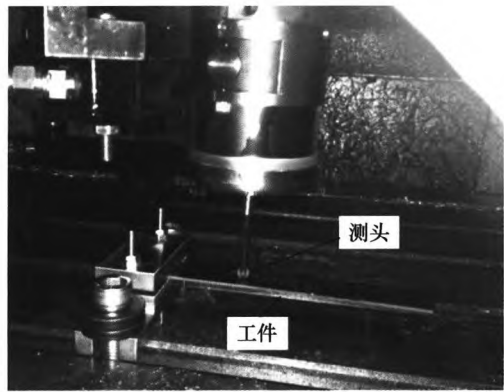
**摘要：**余摆线铣削因切削力小、表面质量和生产率高，而广泛应用于高速加工中。球头铣刀因适应性好，且姿态可灵活调整，而成为多轴加工复杂表面的常用刀具。然而，球头铣刀齿形复杂，余摆线铣削的运动轨迹方向不断变化，工件的材料去除和表面形貌的创成过程异常复杂，传统方法建模困难。提出一种球头铣刀余摆线加工表面形貌的数值仿真方法，根据齐次坐标矩阵变换原理建立刀齿的运动轨迹方程，通过改进 Z-MAP 算法完成了加工表面形貌的仿真。该算法通过建立刀齿微元的随动矩形包围圈和瞬时扫掠四边形，使用角度累加法快速地获取刀齿微元在单位时间步长内扫掠到的工件网格点，根据多元函数的泰勒公式，用线性插值的方法求出该网格点的高度坐标。仿真结果表明球头铣刀余摆线铣削的表面形貌整体上优于普通直线铣削。试验结果表明，在垂直和倾斜加工条件下，球头铣刀余摆线铣削获得的表面形貌与仿真结果具有较高的一致性，说明所提出的方法可以预测球头铣刀余摆线的加工表面形貌。



**摘要:** 选用胶体 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒为磨粒, 研究不同 pH 值条件下高锰酸钾和双氧水两种氧化剂对 6H-SiC 晶片化学机械抛光的影响, 并使用原子力显微镜观察抛光后表面质量。采用 Zeta 电位分析仪分析溶液中胶体 SiO<sub>2</sub> 颗粒的 Zeta 电位, 采用 X 射线光电子能谱分析 SiC 抛光表面元素及其化学状态。结果表明: SiC 晶片材料去除率随 pH 值变化而变化, 采用高锰酸钾抛光液抛光时, 材料去除率在 pH 6 时达到峰值 185 nm/h,  $R_a$  为 0.25 nm; 采用双氧水抛光液抛光时, 材料去除率在 pH 8 时达到峰值 110 nm/h,  $R_a$  为 0.32 nm。pH 值低于 5 时, 电负性的 SiO<sub>2</sub> 颗粒会通过静电作用吸附在带正电的 SiC 表面, 抑制 SiC 晶片表面原子的氧化及去除, 降低材料去除率; pH 值高于 5 时, SiO<sub>2</sub> 颗粒在双氧水抛光液中的静电排斥力弱于高锰酸钾抛光液中静电排斥力, 从而影响了 SiO<sub>2</sub> 颗粒的分散性能, 降低了抛光效果。采用高锰酸钾抛光液抛光后, SiC 晶片表面的 Si-C 氧化产物含量(Si-C-O、Si<sub>4</sub>C<sub>4-x</sub>O<sub>2</sub> 和 Si<sub>4</sub>C<sub>4</sub>O<sub>4</sub>)较高, 高锰酸钾抛光液的氧化能力较强。



**摘要:** 非 API 螺纹量规的成形磨削加工质量直接影响了油气井长期服役的安全性能, 螺旋齿形结构, IT3~IT4 级尺寸精度, 其在极端服役环境下的抗疲劳性能与材料热处理状态和量规磨削加工质量密切相关。然而, 螺纹量规材料磨削烧伤与磨削裂纹已成为制约量规高效成形磨削的瓶颈问题, 严重降低了量规的耐磨损性能和使用寿命。为此, 提出了基于量规的服役性能需求, 来驱动量规材料的热处理和磨削参数优化, 通过开展定量描述量规材料热处理与磨削加工性能之间的关系, 来解决量规材料的磨削烧伤和磨削裂纹问题。结合热处理和平面磨削试验, 结果显示优化的热处理工艺能够有效提升量规材料的磨削加工质量, 同时也表明良好的热处理工艺和磨削加工参数相结合, 是控制非 API 螺纹量规材料磨削性能的重要保障。



**摘要:** 针对叶片类薄壁零件铣削加工装夹卸载后发生的残余应力变形难以准确预测的难题, 提出了基于装夹力监测的残余应力变形感知预测方法。建立了残余应力变形感知预测的数学模型, 对感知预测过程进行了数学表述; 基于超静定结构理论提出了残余应力变形感知预测的求解方法, 利用变形协调方程实现了基于装夹力变化的残余应力变形等效求解; 分析了几种典型装夹形式的感知过程, 提出了残余应力变形感知预测的实现步骤; 搭建了残余应力变形感知预测试验平台, 将叶片简化为薄板模型进行了铣削残余应力变形感知预测试验, 试验结果表明, 装夹卸载后残余应力变形感知预测值与实测值相比误差为 13%, 具有较好的一致性, 从而验证了该方法的有效性。



CONTENTS

1	<b>Design and Analysis of Flexible Wearable Wrist Power Glove</b>	YAO Jiantao LI Haili CAO Kaibin CHEN Xinbo ZHOU Pan ZHAO Yongsheng
10	<b>Motion Planning for Robotic Smooth Catching of Moving Object</b>	ZHANG Chi SHANG Weiwei CONG Shuang LIU Yi
18	<b>Type Synthesis of Metamorphic Parallel Mechanism with Spherical Five Bar Linkage</b>	WANG Bing FANG Yuefa
27	<b>Geometric Modeling and Free-elimination Computing Method for the Forward Kinematics Analysis of Planar Parallel Manipulators</b>	ZHANG Ying WEI Shimin LI Duanling LIAO Qizheng
34	<b>Design of Shaving Cutter with Unequilateral Profile</b>	CAI Anjiang ZHANG Hua LI Ling LIU Lei LI Lixia
41	<b>Synthesis of a Type of Self-motion Mechanisms and the Dimensional Characteristic of Ratio Based on the Construction of Cognates</b>	SHEN Chengwei HANG Lubin
49	<b>Machine Setting Calculation and Contact Characteristics Control Method of Face Hobbing Hypoid Gear</b>	ZHANG Weiqing GUO Xiaodong ZHANG Mingde
58	<b>Advances in Condition Monitoring, Diagnosis and Vibration Control of Smart Spindles</b>	CHEN Xuefeng ZHANG Xingwu CAO Hongrui
70	<b>Dynamic Simulation of Electrical Wire Based on the Piecewise Absolute Nodal Coordinate Formulation Cable Element</b>	YU Zuqing LAN Peng LI Kunkun LU Nianli
78	<b>Hardware-in-the-loop Simulation Technology of Cylindrical Roller Bearing</b>	ZHANG Wenhui DENG Sier CHEN Guoding HU Yongle
88	<b>Investigation of Contact Stiffness Model for Joint Surfaces Based on Domain Expansion Factor and Asperity Interaction</b>	WANG Runqiong ZHU Lida ZHU Chunxia
96	<b>Research on the Dynamic Characteristics of NUSL Flexible Hinge Slider</b>	MA Xizhi HUO Bobo LI Miaomiao
102	<b>Performance Analysis of Carbon-carbon Composite Rotating Finger Seal</b>	HAN Haitao CHEN Guoding SU Hua ZHAO Hailin

**111 Local Bézier Transition Method along Continuous Short-line Toolpath**  
 ZHANG Yong YE Peiqing XIAO Jianxin ZHANG Hui

**121 Variable Density Cellular Structure Design Method Base on Local Relative Density Mapping**  
 ZHAO Fanglei JING Shikai LIU Chenyan

**129 Design and Experimental Research of the Oil-free Turbocharger**  
 LIU Wanhui LÜ Peng YU Rui FENG Kai

**137 Thermal Dynamic Hysteresis Modeling and Compensation for Linear Motor Driven Feed Mechanism**  
 LIN Xiankun ZHANG Wei FAN Zhenhua

**144 Equivalent Characteristic Parameters of Mechanical Joints**  
 SHI Kun ZHANG Guangpeng WEI Fengtao YUAN Yuan

**150 Interpolation for NURBS Curve with Corner on Curve Splitting According to its Critical Curvature**  
 JI Guoshun YU Wujia CHEN Zhiping

**158 Multi-granularity Dynamic Model Establishment and Simulation of Carbon Emissions for Machining Process Based on DEVS**  
 ZHU Shuo ZHANG Hua JIANG Zhigang CAO Huajun

**170 Modeling of Flexible Composite Mold for Nanoimprint Lithography**  
 LI Yanqiang LAN Hongbo XU Quan LIANG Sen LIU Hongzhong

**182 Analysis of the Stagnant Characteristics of the Material in the Mechanical Ruling Process**  
 DING Yanchun SHI Guangfeng SHI Guoquan

**190 Fretting Fatigue Mechanism Research of the Aluminum Alloy Clinched Joints**  
 ZHANG Yue HE Xiaocong LI Zhi ZHANG Yihe

**197 Multi-objective Layout Optimization for Branch Pipe of Aero-engine Based on MOPSO**  
 LIU Qiang MAO Li

**204 A 5-axis Coordinated Grinding Method of Non-coaxial Helical Flank Micro-drill and Its Drilling Performance Research**  
 ZHANG Suyan LIANG Zhiqiang WANG Xibin ZHOU Tianfeng JIAO Li LIU Zhibing YAN Pei

**212 Research on Modeling and Simulation of Surface Topography Obtained by Trochoidal Milling Mode with Ball End Milling Cutter**  
 DONG Yongheng LI Shujuan LI Yan LI Pengyang YANG Zhenchao XIN Bin

**224 Effect of Different Oxidizers on Chemical Mechanical Polishing of 6H-SiC**  
 NI Zifeng CHEN Guomei XU Laijun BAI Yawen LI Qingzhong ZHAO Yongwu

**232 Investigation on the Grinding Ability of Thread Gauge Material under Different Heat Treatment**  
 GUO Guoqiang CHENG Qunlin YANG Changqi YUAN Lin LIN Lifang CHEN Ming

**241 Prediction of Blade Distortion Induced by Milling Residual Stresses Based on Clamping Force Monitoring**  
 WANG Junteng ZHANG Dinghua WU Baohai LUO Ming

《机械工程学报》第十届编委会

荣誉主任

王补宣 (院士)    路甬祥 (院士)    潘际銮 (院士)

荣誉委员

王玉明 (院士)    王先逵 (教授)    石治平 (研高)    叶声华 (院士)    宁汝新 (教授)    过增元 (院士)  
刘 飞 (教授)    刘人怀 (院士)    刘大响 (院士)    刘友梅 (院士)    关 桥 (院士)    杨叔子 (院士)  
林尚扬 (院士)    周孔亢 (教授)    柳百成 (院士)    钟 掘 (院士)    钟秉林 (教授)    闻邦椿 (院士)  
徐金梧 (教授)    徐滨士 (院士)    郭孔辉 (院士)    温诗铸 (院士)    谢友柏 (院士)    熊有伦 (院士)  
潘健生 (院士)

主 任

钟群鹏 (院士)

副 主 任

王文斌 (编审)    王国彪 (教授)    陈学东 (院士)    陈超志 (研高)    黄 田 (教授)    雒建斌 (院士)  
MCCARTHY J Michael (教授)

国内委员

丁 汉 (院士)    王 雪 (教授)    王田苗 (教授)    王立平 (教授)    王庆丰 (教授)    王时龙 (教授)  
王树新 (教授)    王祖温 (教授)    王润孝 (教授)    孔祥东 (教授)    邓宗全 (院士)    卢秉恒 (院士)  
史铁林 (教授)    付铭旺 (副教授)    仪垂杰 (教授)    吕 明 (教授)    刘 强 (教授)    刘少军 (教授)  
刘宏民 (教授)    刘献礼 (教授)    刘德顺 (教授)    孙汉旭 (教授)    严新平 (教授)    李大勇 (教授)  
李永堂 (教授)    李圣怡 (教授)    李杨民 (教授)    李荣彬 (教授)    李荣德 (教授)    李剑峰 (教授)  
杨华勇 (院士)    杨兆军 (教授)    杨兆建 (教授)    何存富 (教授)    张 峥 (教授)    张士行 (教授)  
张义民 (教授)    张宪民 (教授)    张湘伟 (教授)    陈 新 (教授)    陈 鹰 (教授)    陈炤彰 (教授)  
陈朝阳 (教授)    邵新宇 (教授)    苑世剑 (教授)    苑伟政 (教授)    范光照 (教授)    林忠钦 (院士)  
周祖德 (教授)    项昌乐 (教授)    赵 继 (教授)    赵 韩 (教授)    赵丁选 (教授)    胡正寰 (院士)  
钟志华 (院士)    姚振强 (教授)    秦大同 (教授)    袁巨龙 (教授)    袁寿其 (教授)    耿荣生 (教授)  
贾振元 (教授)    顾佩华 (教授)    徐西鹏 (教授)    高咏生 (教授)    高金吉 (院士)    郭万林 (院士)  
郭东明 (院士)    黄明辉 (教授)    黄洪钟 (教授)    梅雪松 (教授)    葛世荣 (教授)    韩 旭 (教授)  
曾 攀 (教授)    谢建新 (院士)    雷源忠 (研究员)    廖运炫 (教授)    谭建荣 (院士)    谭援强 (教授)  
翟婉明 (院士)    黎 明 (研究员)    檀润华 (教授)

国外委员

ALGIN Vladimir (白俄罗斯)	CAO Dongpu (英国)	CAVALLUCCI Denis (法国)
CECCARELLI Marco (意大利)	CHEN Ye-Hwa (美国)	CHEN Yongkang (英国)
CHEN Yubao (美国)	CHENG Harry H (美国)	CHENG Kai (英国)
CHETWND Derek G (英国)	CHIU George (美国)	DAI Jiansheng (英国)
DEAN Trevor Anthony (英国)	DONG Zuomin (加拿大)	FATIKOW Sergej (德国)
FENG Yuntian (英国)	FLEWITT Peter E J (英国)	GAO Wei (日本)
GE Qiaode Jeffrey (美国)	GIOVANOLA Jacques (瑞士)	GOGU Grigore (法国)
GU Fengshou (英国)	GUO Yuebin (美国)	HAGIWARA Ichiro (日本)
HUANG Yong (美国)	HUANG Han (澳大利亚)	IWATSUKI Nobuyuki (日本)
JAUREGUI Juan Carlos (墨西哥)	Wallaschek Jörg (德国)	LI Dongyang (加拿大)
LI Xiaoping (新加坡)	LIM Teik Chin (美国)	MORGAN Michael (英国)
PARK Jong-Kweon (韩国)	SINAPIUS Michael (德国)	SU Chunyi (加拿大)
SU Daizhong (英国)	TIAN Guiyun (英国)	WANG Jun (澳大利亚)
XUE Deyi (加拿大)	YANG Lianxiang (美国)	YE Lin (澳大利亚)
ZHANG Bi (美国)	ZHANG Chun(Chuck) (美国)	ZHANG Hongchao (美国)
ZHANG Liangchi (澳大利亚)	ZHAO Xudong (英国)	ZHOU Libo (日本)
ZUO Mingjian (加拿大)		

