



ISSN 0577-6686
CN11-2187/TH

机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

封面文章：液压驱动单元基于力的阻抗控制系统前馈抗扰控制研究

作者：朱琦歆 俞滨 王春雨 巴凯先 孔祥东

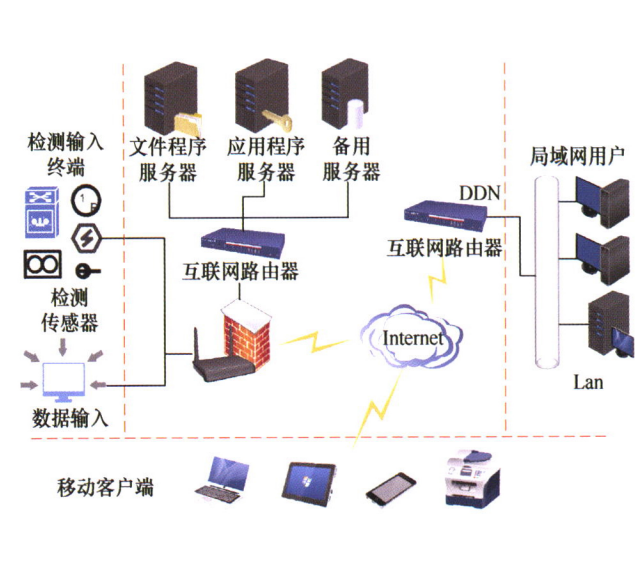


59卷 **4** 期 半月刊
2023年 2 月

仪器科学与技术

1 无损云检测技术研究及仪器系统开发

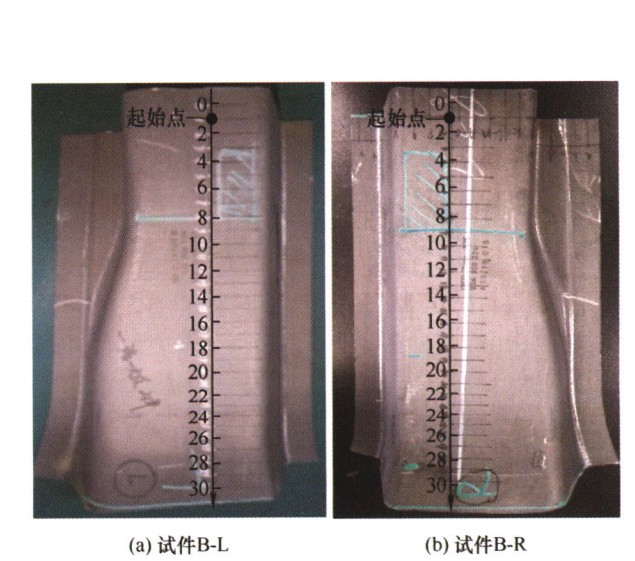
沈功田 金灿华 张君娇 胡 斌 刘 渊 王 强



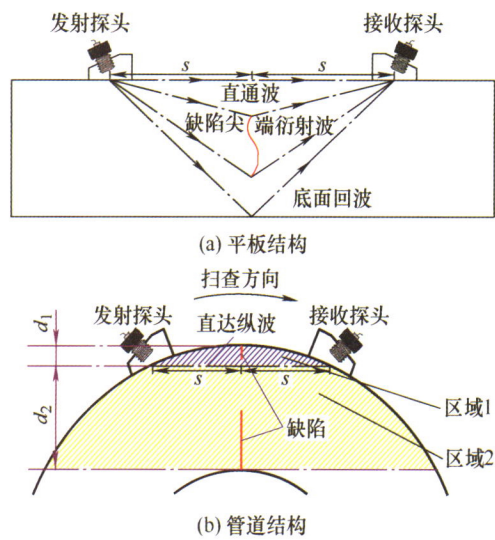
摘要：传统无损检测技术不能满足机械设备状态监测的需求，无损云检测技术是状态监测领域的未来发展趋势，也是设备健康管理基于大数据的必然需求。首先，归纳总结了无损检测和云检测的含义，基于此定义并分析了无损云检测的概念，明确无损云检测的四大优势；其次，阐明无损云检测的三个发展阶段，依据功能要求构建出数据流程和系统架构；最后，从仪器、系统两个层面分别进行设计开发和工程应用，通过对无损云检测仪器和系统架构的设计分析，研制声发射云检测仪器设备、搭建大型游乐设施健康监测和管理云平台。实现设备监测、故障诊断、结果可视化等动态管理功能，较好实现无损云检测的综合应用，从云检测角度提供大型游乐设施综合管理新的解决方案，为后续智能检测的研究提供参考并奠定基础。

10 汽车 B 柱加强板软硬部过渡特性的磁巴克豪森噪声检测方法

董海江 郑婷婷 于进涛 付正家 刘秀成 邢智翔 闫正祥 何存富

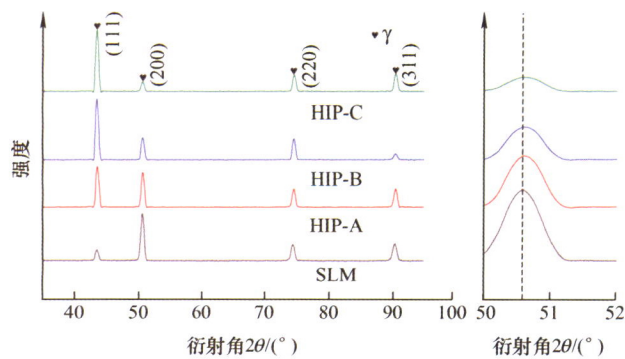


摘要：汽车 B 柱加强板软硬部过渡特性评价的常规方法是通过破坏性取样对局部硬度进行检测，无法直接面向零部件进行便捷、快速的无损测试，且耗时、耗费成本。为克服传统方法的不足，研究利用磁巴克豪森噪声检测方法实现过渡特性的无损评价。利用自主研发的多功能微磁检测仪器开展标定试验，提出过渡区域起止位置及长度范围的估算方法，并建立过渡区域的表面硬度定量预测模型。研究结果表明，磁巴克豪森噪声、切向磁场强度信号的大部分特征参量可以有效评估软、硬部过渡范围，参量 x_1 , x_5 和 x_{17} 对起始点的估计误差范围处于 ± 14 mm，长度估算的相对误差小于 10%。利用单一参量 x_{17} 建立的线性表征模型对硬度的预测 RMSE 值为 12.38 HV10，融合多项磁参量建立的 BP 神经网络模型的预测精度更高，RMSE 值小于 6 HV10。提出一种汽车关键部件软硬部过渡特性的微磁评估方法，研究磁巴克豪森噪声特征参量与硬度的关系，实现汽车 B 柱软硬区表面硬度和软硬部过渡范围的定量表征，具有重要的工程应用前景。



摘要：利用超声衍射时差法(Time-of-flight diffraction, TOFD)对管道进行周向扫查检测时，直达纵波传播路径与管道表面不平行，需分别对直达纵波上下区域内缺陷进行识别和定位检测。特别地，管道结构导致 TOFD 近表面盲区增大，缺陷衍射波与直达纵波发生混叠。针对上述问题，理论分析极坐标系下的管道 TOFD 周向扫查图像中缺陷衍射波特征，借此确定缺陷与直达纵波的相对位置。在此基础上，对盲区外缺陷进行定位检测，并结合自回归谱外推方法计算盲区内缺陷深度。试验结果显示，对于外壁半径 100.0 mm，壁厚 30.0 mm 碳钢管道，在 5 MHz 中心频率和不同探头中心距(Probe center separation, PCS)的检测条件下，埋深 4.0 mm 的上表面开口槽与埋深 16.0 mm 的下表面开口槽均可检出，且定位误差不超过 0.36 mm。缺陷衍射波特征与 PCS 直接相关，对管道进行周向扫查检测时应合理调整参数。

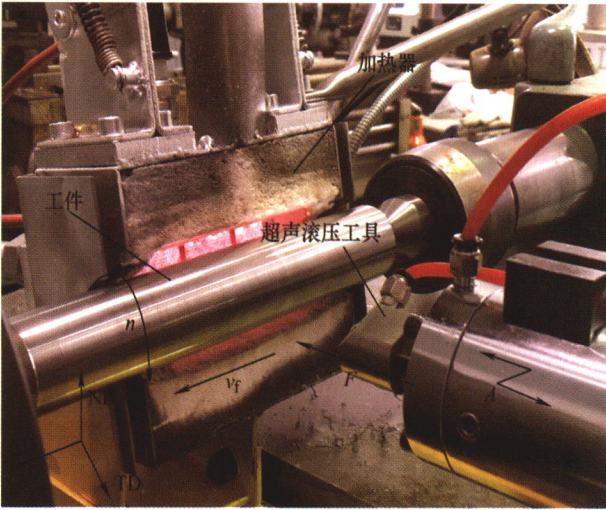
// 材料科学与工程 //



摘要：利用激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)技术制备了 GH3536 镍基高温合金，研究了不同热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)温度对 SLM 成形 GH3536 合金裂纹和组织性能的影响。利用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)、扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)、电子背散射衍射(Electron backscatter diffraction, EBSD)、电子探针显微分析仪(Electron probe microanalyzer, EPMA)等方式表征了 GH3536 相组成和组织演变，利用高温持久性能试验机测试合金室温和高温拉伸性能。结果表明：经 HIP 后，SLM 成形 GH3536 合金相组成保持不变，均为 γ 相，但晶格常数降低，且随着 HIP 温度的升高而降低。SLM 态合金中存在 10~100 μm 的微裂纹和气孔缺陷，微裂纹主要存在于熔池边界。经 HIP 后，合金中微裂纹完全消除，但仍存在少量孔洞。GH3536 合金经高温高压处理后，晶粒尺寸增大，抗拉强度有所降低。其中 SLM 态试样室温抗拉强度和伸长率分别为 871 MPa 和 26.2%，HIP 处理后伸长率最高提升 13.7%，强度降低 13.0%。900 $^\circ\text{C}$ 下 SLM 态试样抗拉强度和伸长率分别为 247 MPa 和 5.7%，HIP 处理后伸长率最高提升 13.4%，强度降低 10.1%。

34 超高强度钢热场-超声复合滚压表层微观组织强化机制

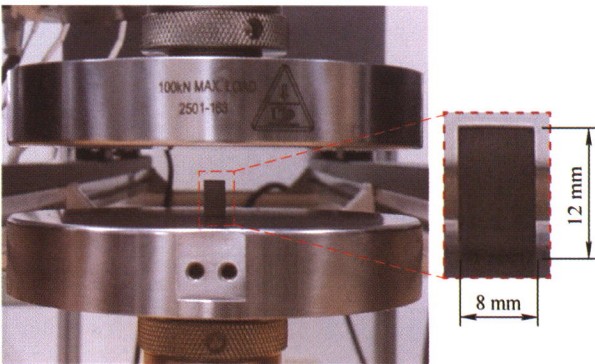
栾晓圣 梁志强 赵文祥 肖世宏 周天丰 王西彬 李宏伟 刘心葵 刘珍妮



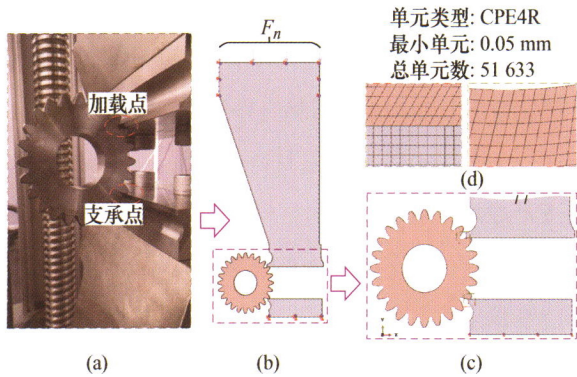
摘要：针对超高强度钢冷塑性变形能力弱、表面形变强化难度大的问题，提出热场-超声复合滚压强化方法。开展 45CrNiMoVA 钢表面热场-超声复合滚压试验,利用 SEM、EBSD 和 TEM 等检测手段，结合表面层残余应力分布结果，表征、分析表层微观组织的演变与强化机制。发现在声软化效应和热软化效应耦合作用下，热场-超声复合滚压后 45CrNiMoVA 钢表层材料的塑性变形程度加剧，塑性变形层深度增加，表层材料发生晶粒细化，形成沿深度方向晶粒尺寸呈梯度分布的微观组织结构，细晶强化和位错强化是主要的强化机制。证明了热场-超声复合滚压方法的有效性，对超高强度钢零件表面强化处理技术的发展具有重要意义。

43 基于改进 GTN 损伤模型的镁合金镦粗成形损伤及裂纹预测研究

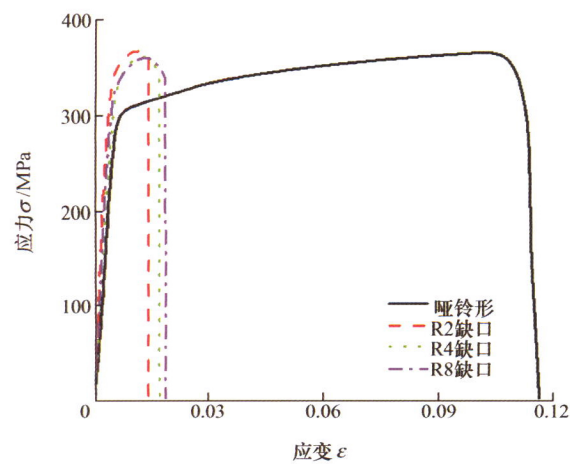
赵辰辰 刘江林 李子轩 王 涛



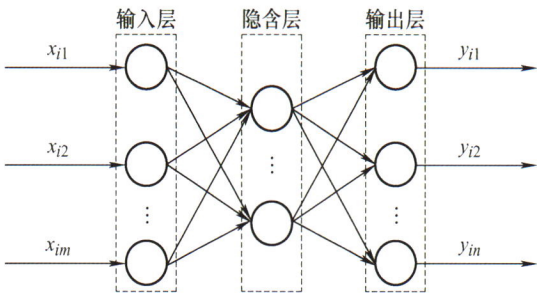
摘要：镁合金在成形过程中极易产生开裂，精准的损伤预测可以为塑性成形工艺提供理论支撑。为此，基于含连续介质剪切损伤因子的 Gurson-Tvergaard-Needleman(GTN)损伤模型被应用于预测镁合金成形时的损伤演化，通过压缩试样的力-位移曲线标定了 AZ31B 镁合金的流动应力和剪切损伤参数，预测并验证了 AZ31B 镁合金在镦粗工艺下的表面损伤及开裂，扩展了模型对低应力三轴度下的成形工艺损伤预测的适用性。在此基础上，对 AZ31B 镁合金在受压条件下损伤成因、裂纹扩展进行了分析。结果表明，随着压缩位移的增加，镁合金侧面中心区域的切应力不断增加，在此作用下基体内部孔洞沿非垂直压缩方向伸长、聚合，最终形成宏观裂纹；镦粗后的试样侧面裂纹走向与垂直压缩方向所成角度范围为 34°~46°，改进的 GTN 模型模拟结果为 44°~54°，原始 GTN 模型模拟结果均呈 90°；改进后的 GTN 模型可应用于预测镁合金在轧制、热冲压等工艺下的损伤演化行为，为后续工艺优化奠定基础。



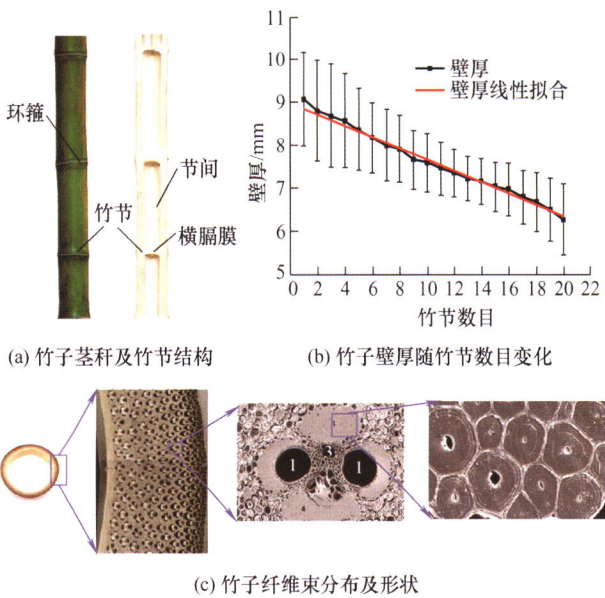
摘要：随着风电、高铁、掘进等高端装备对齿轮功率密度、服役寿命等要求的提高，齿轮的弯曲疲劳问题日益显著。为提升齿轮弯曲疲劳性能，通过渗碳热处理、喷丸强化等工艺为齿轮引入较高的残余压应力已逐渐成为工业界的标配。为揭示残余应力对齿轮弯曲疲劳性能的量化影响，在最大主应变寿命预测准则中引入残余应力影响项，通过弯曲疲劳试验确定最优残余应力影响系数，进而采用新的试验数据验证模型的准确性。基于工程应用出发，引入修正应力的概念统一不同残余应力状态下的齿轮弯曲应力-寿命(S-N)曲线，研究结果显示，最大主应变准则中，残余应力影响系数取值为0.15时，可实现较高的寿命预测精度，而修正的S-N曲线中，最佳残余应力影响系数为0.25。研究成果可用于工程实际中齿轮弯曲疲劳快速评估。



摘要：车身结构影响了整车的碰撞安全性，其中车身承载部件在碰撞过程中主要表现为剪切失效，因此需要对车身材料的动态剪切力学特性展开研究。为了描述6061-T6铝合金材料在复杂工况下的力学特性，进行了准静态和动态力学性能试验。基于不同应力状态和应变率下铝合金力学性能的测试数据，标定了材料的本构模型和断裂模型参数，并通过对比试验与仿真结果验证了材料参数的准确性。为了实现拉伸试验机开展铝合金薄板剪切试验，设计四种形状的薄板剪切试件，采用数值模拟对比所设计剪切试件的应力及应变分布，并分析不同剪切应变率对6061-T6铝合金材料剪切力学特性的影响规律。结果表明：圆形开口对称试件适用于研究塑性变形阶段的失效断裂，而圆形开口偏置试件适用于研究弹性变形阶段的应力应变关系。在低剪切应变率范围内，6061-T6铝合金无显著的应变率强化效应，然而随着应变率的增加敏感性有所提高。

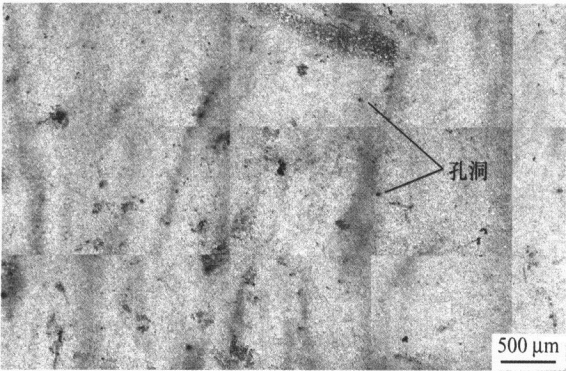


摘要: 金属构件的主要失效方式是在循环载荷作用下的疲劳破坏，因此金属构件的疲劳寿命预测对于保证结构安全性和可靠性十分必要。能量法是一种既能用于低周疲劳寿命预测，也能用于高周疲劳寿命预测的方法，其以寻找有效的显式能量损伤参量为手段，结合适当的损伤积累方式进行寿命评估。针对材料疲劳寿命预测问题，提出一个基于能量法和人工神经网络算法的疲劳寿命预测方法。为了达到反映不同加载路径影响的目的，从转动惯量的角度引入两个路径相关参量。使用基于应变控制的九种材料的疲劳试验数据对提出的神经网络模型进行训练、测试。结果显示模型对训练数据和测试数据均有良好的预测精度，并可对单轴加载、多轴加载、高周疲劳和低周疲劳寿命进行有效预测，表明本模型在多轴疲劳寿命预测方面具有较广泛的适用性。



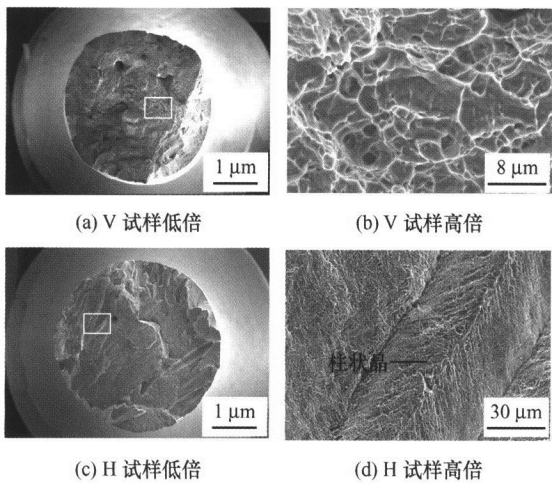
摘要: 在长期进化过程中，自然界中的多种动物、植物形成了独特的轻质、高强结构，以此来抵抗外界的复杂冲击载荷，保护自身完整，满足生存需要。生物轻质高强结构的优越性，启发了科研和工程人员采用结构仿生学的方法来对管状和板状两大类吸能结构进行设计优化和改进。对竹子、茎秆/树干、羽轴、骨骼四类管状生物结构和甲虫鞘翅、贝壳、柚子皮、龟壳四类板状生物结构进行综述，阐述了分层、多孔、螺旋、中空等多种结构与轻质高强特性之间的关系。在此基础上，对比和分析了相应的结构元素在单胞管、多胞管、嵌套管、波纹管等管状吸能机构和蜂窝夹芯板、复合材料板、混合结构板等板状吸能机构中起到的作用。进一步对当前仿生吸能领域存在的结构复杂、质量大、缺乏普适性的机理和过渡“桥梁”等问题做出了分析；最后对仿生吸能技术的形式简单化、结构轻量化、理论通用化、“形神兼备”化发展趋势做出展望。

牛田野 高永建 陶贤超 赵 鹏 宫建国 轩福贞



摘要:堆芯熔融物堆内滞留(In-vessel retention, IVR)是压水堆的严重事故缓解措施。IVR 过程中,反应堆压力容器底封头(Reactor pressure vessels, RPV)沿壁厚方向同时存在拉伸和压缩应力。为保证 IVR 过程中 RPV 的结构完整性,有必要研究 SA-508 Gr.3 Cl.1 材料的拉伸和压缩蠕变行为及其差异。基于此,开展了 SA-508 Gr.3 Cl.1 材料的拉伸蠕变和压缩蠕变试验测试,分析了材料的拉伸和压缩蠕变行为以及变形机制的不同。结果表明:拉伸和压缩蠕变的第一、二阶段基本吻合,但压缩蠕变没有出现明显的蠕变第三阶段;拉伸蠕变在试验应力范围内的变形机制为单一的位错攀移,而随着应力的降低,压缩蠕变变形机制由位错攀移转变为晶界滑移/空位扩散;拉伸蠕变对亚晶组织演化程度的影响大于压缩蠕变,这可能与蠕变变形机制的转变相关。

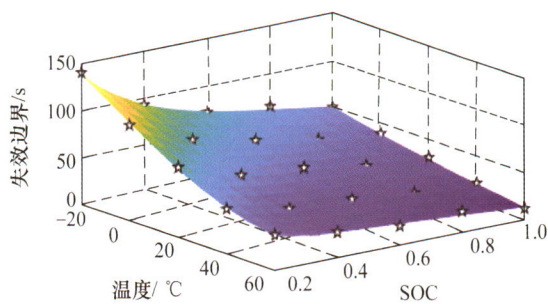
张国栋 张 鹏 高健时 余 槐 袁 鸿 丁 宁 熊华平



摘要:采用电子束熔丝增材工艺制造了直径 260 mm 的试环。分析了不同热处理状态的增材制造 TC11 钛合金微观组织和室/高温拉伸性能及其各向异性。并测试分析了锻件基体晶粒 2 次热处理和锻件基体与增材界面处的组织和性能。结果表明:沉积态微观组织为沿 $\langle 001 \rangle_{\beta}$ 方向生长的柱状晶。晶界存在连续 α 相,晶体内部由束状和网篮 α 相组成的片层组织。经 950 °C/2 h/空冷+530 °C/6 h/空冷的热处理后晶界连续 α 相破碎,晶内 α 相宽度从 1.1 μm 增加至 1.8 μm。并形成具有二次 α 相的双片层组织。锻件与增材过渡区锻件一侧,等轴初生 α 相转变为“雪花”状初生 α 相。锻件基体 2 次热处理后等轴初生 α 相轮廓光滑,转变 β 相比例增加,并形成大量细小的针状二次 α 相。沉积态室温及 500 °C 高温拉伸性能均具有明显的各向异性。经过热处理后室/高温拉伸性能均获得改善并高于锻件要求且各向异性明显降低。与沉积态相比,热处理态室温抗拉强度和断后伸长率各向异性分别从 4.4%和 27.1%降低至 1.6%和 5.4%。柱状晶及其晶界连续 α 相是引起塑性各向异性的原因。锻件+增材界面处热处理后其室/高温拉伸性能均满足锻件要求。

113 储能电池外部短路的损伤与失效边界及其预测

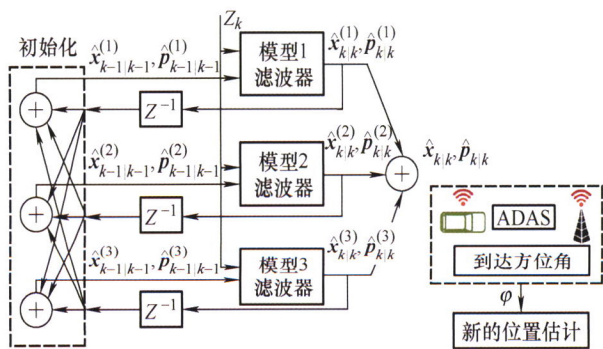
熊 瑞 孙万洲 杨瑞鑫 孙逢春



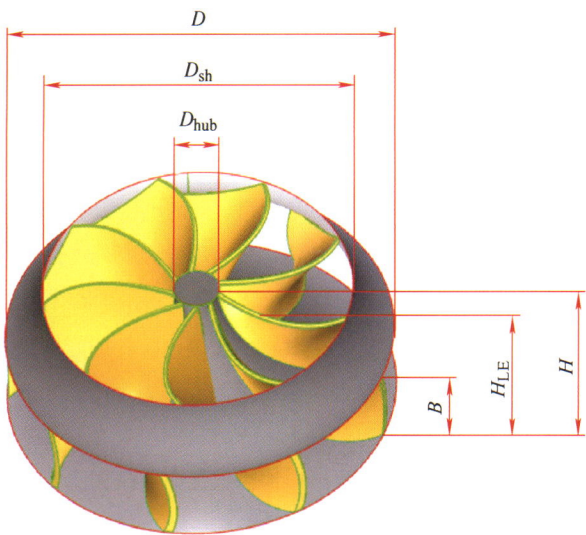
摘要：储能电池外部短路故障发生伴随着电池大倍率放电、内部热量快速聚集、温度极速升高，是一种典型的电-热耦合滥用工况。针对电池外部短路：试验研究了不同初始条件下的外部短路特性，明确了短路开始至电池电压和电流突降为零的时间为外部短路失效边界；进一步分析了失效前短路时间与老化的耦合特性，应用电化学阻抗谱揭示了固体电解质膜增长为外部短路电池容量衰退的主因，且主要受电池温度影响。明确了短路开始至电池内部温度达到 80 ℃的时间为外部短路损伤边界，为获取电池内部温度，构建了圆柱形电池集总参数热模型，建立了电池内部温度估计算法，误差 $<\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。应用长短时记忆神经网络算法构建了电池外部短路损伤边界和失效边界的预测模型。以外短路前 1 s 和短路后 2 s 的电流、电压及环境温度作为输入，结果表明损伤边界预测误差 $<3.5\%$ ，失效边界预测误差 $<2\%$ 。该模型的应用能够加深外部短路对电池损伤的认识，为电池的安全监测提供有力保障。

125 基于多基站 IMMKE-DOA 辅助车辆协同定位算法研究

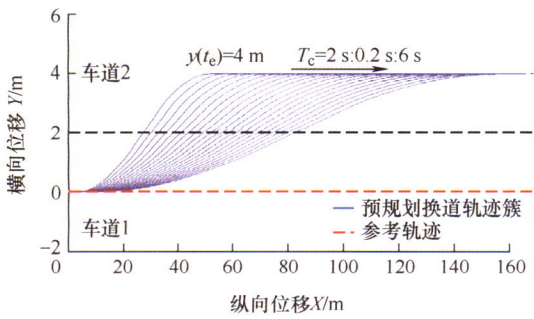
王法安 殷国栋 庄伟超 刘帅鹏 梁晋豪 卢彦博



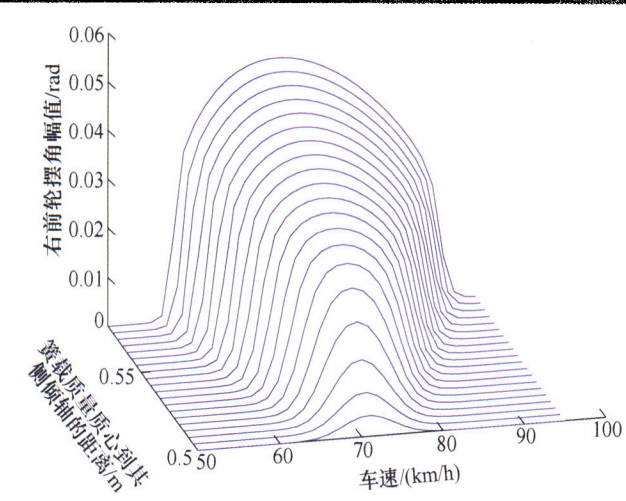
摘要：针对传统卡尔曼滤波算法在进行车辆实时运动过程中难以精准定位问题，提出一种基于运动状态自适应的交互多模型卡尔曼滤波(Interacting multiple model kalman filter, IMMKE)与多基站到达方向(Direction-of-arrival, DOA)相融合进行车辆位置实时估计算法。基于无偏估计器对测量噪声协方差进行实时更新并将其嵌入标准卡尔曼滤波算法中实现自适应交互多模型卡尔曼滤波。针对车辆不同运动状态及动态行驶环境对车辆定位估计精度的影响，构建自适应交互多模型卡尔曼滤波器与多基站信息融合算法进行车辆位置实时估计，考虑不同车速与不同基站数等行驶工况下车辆定位精度的变化趋势，实现车辆实时位置的准确估计。利用 PreScan-Simulink 联合仿真平台进行虚拟仿真验证和实车试验验证。结果表明，基于交互多模型卡尔曼滤波与到达方向角的融合算法相对标准的卡尔曼滤波估计精度高，较好地改善了传统单一模型的卡尔曼滤波算法在进行车辆实时运动状态估计过程中精准定位问题，实车试验验证了提出算法对车辆定位精度较传统卡尔曼滤波算法的精度提高了一个数量级，实现了更精确的车辆位置估计。



摘要：随着海拔高度的增加，特种车辆的动力总成的流动性能会受到极大的影响。但是，受限于地域的影响，特种车辆动力总成流动性能的研究基本针对的是 3 000 m 以下的海拔工况，更高海拔环境的相关研究较少。因此，对更高海拔的特种车辆动力总成的流动性能进行研究十分重要。首先，建立流动结构的参数化仿真模型，揭示从海拔 0 m (平原工况) 到 4 500 m (高原工况) 特种车辆的动力总成流动特性变化规律。然后，为了提升特种车辆的变海拔适应性，基于组合代理模型对动力总成流动结构进行优化。结果表明，优化后的叶片扭曲度更大，且向着与旋转方向相反的方向偏移。优化后的叶轮使得上游总压分布更加均匀，叶片附近的低速区明显减少，叶片尾缘处的高总压和高马赫数的范围变大。在高原工况，特种车辆动力总成的流量增加 7.7%，功率下降 2.2%。在平原工况下，流量基本保持不变，功率下降 12.03%。研究结果为高海拔车辆动力总成流动性能分析与优化设计提供借鉴与参考。

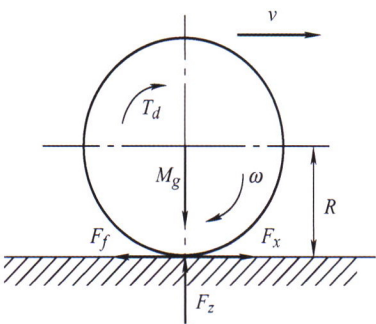


摘要：针对运动型多功能汽车(Sport utility vehicle, SUV)换道过程中侧翻安全问题，提出融合侧翻稳定性的 SUV 换道轨迹规划方法。建立三自由度车辆动力学模型，推导 SUV 侧翻稳定性及侧滑稳定性评价指标。采集自车状态及环境信息，将换道轨迹规划分成预规划和重规划两个阶段；预规划阶段采用五次多项式模型生成横向轨迹簇，重规划阶段考虑周围车辆动态变化，生成包含自车纵向速度信息的轨迹簇。融合侧翻稳定性指标、侧滑稳定性指标以及双圆拟合的车辆外形最小距离，构建代价函数；进行轨迹簇碰撞筛选、稳定性筛选及轨迹选择。运用内点惩罚函数进行轨迹优化，求解最优轨迹。选取两种典型工况进行换道轨迹规划仿真，结果表明 SUV 沿着该方法规划的轨迹行驶可完成换道躲避障碍物，且横向位移小、换道效率高，可有效避免侧翻危险。



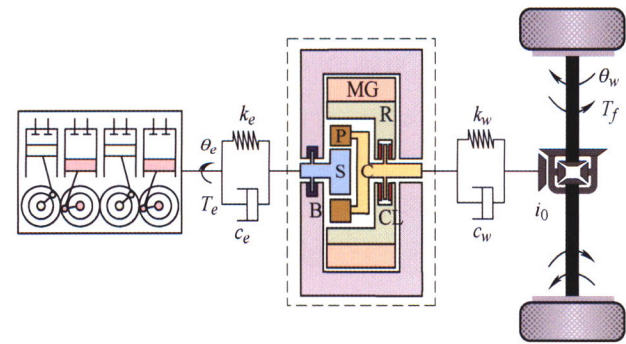
摘要：由于轮胎侧向力对垂向载荷的变化较为敏感，从而使汽车簧载质量的运动对摆振的影响不容忽视。在汽车垂向运动和侧向运动之间的动力学耦合机制分析的基础上，建立多维耦合的独立悬架汽车摆振系统动力学模型。由系统微分方程组的雅克比矩阵，考察摆振系统特征值随车速的变化情况，并应用中心流形理论得到了系统的二维中心流形。此外，通过中心流形的稳定性参数，讨论系统极限环的稳定性。最后，采用数值算例对稳定性分析结果进行了验证，并考察系统参数对摆振幅值的影响，结果表明，汽车的轻量化和簧载质量质心到其侧倾轴距离的减小均有利于抑制汽车摆振，从而提高汽车行驶稳定性和安全性。

163 四轮轮毂电机驱动电动汽车纵侧向稳定性协调控制策略研究

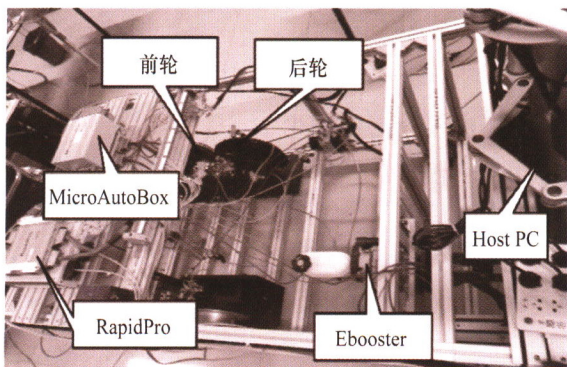


摘要：结合四轮轮毂电机驱动电动汽车四轮转矩独立可控的特点，针对加速同时转向时地面附着力不足的情况，研究车辆纵向和侧向稳定性协调控制策略。针对未知和复杂多变的路面附着情况，设计对路面附着变化具有良好鲁棒性的滑转率自寻优驱动防滑控制策略，采用滑模控制方法实现了对路面最优滑转率的自适应追踪。在此基础上，构建稳定性协调控制策略，通过对车辆纵、侧向动力学目标进行优先级判断和多目标协调控制，有效提升了车辆纵向和侧向稳定性。通过 CarSim-Simulink 联合仿真验证了驱动防滑控制策略在未知路面附着情况下的有效性，提出的纵向侧向稳定性协调控制策略能够有效提升车辆的纵向和侧向稳定性，控制效果优于直接横摆力矩控制。

173 行星耦合 PHEV 模式切换过程全频段瞬态扭振特性分析与主动抑制

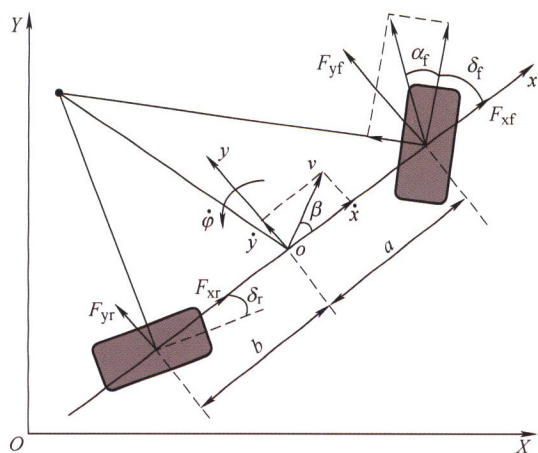


摘要：混合动力车辆模式切换过程中存在多源宽频段激励耦合，进而引发较大瞬态扭振，严重影响驾驶品质。以行星耦合 PHEV 为研究对象，建立考虑非线性啮合刚度、齿侧间隙以及离合器滑摩的混动系统瞬态扭振模型，选取混合动力车辆行车中启动发动机的典型工况，基于连续小波变换理论，展开各激励因素在全频段下对系统扭振影响特性分析，进一步设计考虑齿轮扭振特性的混杂模型预测控制器，进行宽频段瞬态扭振主动抑制。结果表明，齿轮间隙造成的脱齿-碰撞现象，加剧车辆模式切换过程中 10~100 Hz 低频扭振(整车层纵向冲击)，同时引发系统 10~100 kHz 高频扭振(耦合机构层面转矩振荡)，而齿轮非线性刚度波动则主要集中在对系统高频扭振的影响。据此建立的考虑齿轮扭振特性的混杂模型预测控制器，将整车冲击度峰值降低 47.8%、切换过程高频扭振方均根值降低 33.2%，有效提升了驾驶舒适性和混合动力耦合装置使用寿命。

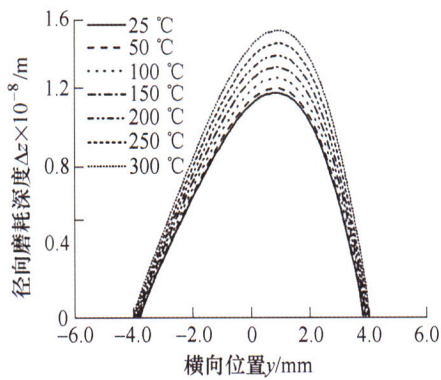


摘要：针对电控助力制动系统(Electro-booster brake system, Ebooster)主动制动时面临的液压系统时变特性扰动、传动机构动静摩擦阻碍以及底层伺服电机电磁特性耦合等诸多非线性难题，提出一种考虑非线性特性的压力—位置—电流多闭环压力控制策略。分析 Ebooster 主动制动工作原理并建立面向控制器设计的等效简化模型；基于自抗扰理论设计压力环控制器，补偿了液压系统时变特性扰动；采用鲁棒滑模变结构设计位置环控制器，考虑传动机构动静摩擦阻碍和系统未建模扰动；通过李雅普诺夫稳定性理论设计电流环控制器，解决永磁同步电机双轴电流耦合问题。基于 dSPCAE 设备搭建了硬件在环台架进行算法测试验证。结果表明，提出的多闭环压力控制策略能够控制 Ebooster 实现主动制动功能，压力跟随的稳态误差在 0.2 MPa 之内，同时在多种压力跟随工况下表现出良好的控制效果。研究成果为机-电-液耦合的线控制动系统进行制动压力控制时面临的多种非线性扰动问题，提供了一种良好的解决思路。

199 基于 T-S 模糊变权重 MPC 的智能车轨迹跟踪控制

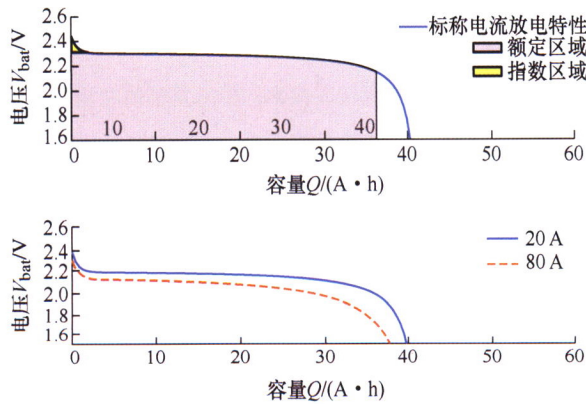


摘要：为了协调智能驾驶车辆的轨迹跟踪精确性和稳定性，提高控制算法对不同工况的自适应能力，提出基于 Takagi-Sugeno 模糊变权重模型预测控制(Takagi-Sugeno fuzzy model predictive control, T-S FMPC)的轨迹跟踪控制策略。以前轮转角为控制变量建立 MPC 控制，并以实时横向位移误差和横摆角误差为模糊输入，通过 T-S 模糊控制在线优化 MPC 目标函数权重，协调权重矩阵对轨迹跟踪精确性和稳定性的影响。基于 Carsim 建立分布式驱动电动汽车的整车动力学模型，基于 Simulink 建立控制策略，通过双移线工况仿真及实车试验，验证了所提控制策略的有效性。仿真结果表明，相比于传统 MPC 控制，所提出的 T-S 模糊变权重 MPC 控制可降低横向位移误差达 62.24%，有效提高轨迹跟踪精度；并且可使前轮转角波动减小 37.46%、横摆角误差减小 84.19%，显著增强轨迹跟踪稳定性；试验结果表明，在 20 km/h、沥青路面双移线工况下，横向位移误差在 0.12 m 以内，横摆角误差在 1° 以内，且前轮转角控制曲线平滑，说明所提算法具有良好的控制效果和实用性。

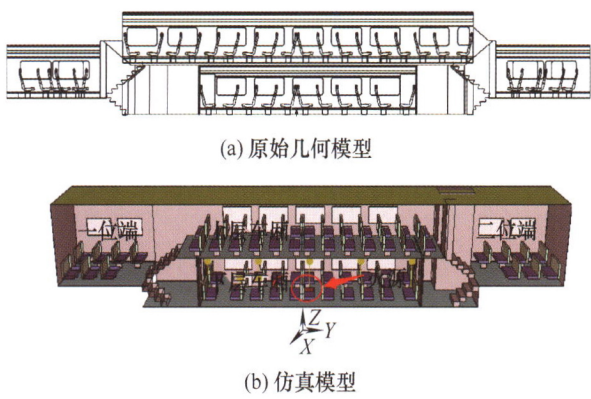


摘要：踏面制动引起车轮温度急剧上升，影响车轮材料性能和轮轨接触状态，加剧车轮磨耗。基于 Archard 磨耗模型，建立一个考虑摩擦温升效应的地铁车轮磨耗预测模型。模型中根据车轮材料属性与温度之间的关系，考虑摩擦温升对接触斑大小、黏滑区划分和磨耗深度的影响，可实现对高温下的车轮磨耗特性的研究。相对以往的车轮磨耗预测模型，该模型能反映温度对磨耗影响的物理本质，适合研究轮轨接触界面有较大温度(如踏面制动)时的车轮磨耗演化机理。用所建立的车轮磨耗数值预测模型，计算对比不同温度下的轮轨接触状态和车轮磨耗深度。结果表明，轮轨接触斑和滑动区面积随温度的升高而增加；温度升高使接触斑单元磨耗深度增加，当踏面温度从常温 25 °C 增加到最高温度 300 °C 时，最大磨耗深度 0.4 nm，增幅为 28.4%；车轮转动一圈后，其径向磨耗深度也随温度的升高而明显增加，最大径向磨耗深度 15 nm，增幅为 28.2%，同时，车轮横向位置的磨耗范围增加 5.8%，为踏面制动形式的地铁车轮磨耗预测研究提供更加准确的理论模型。

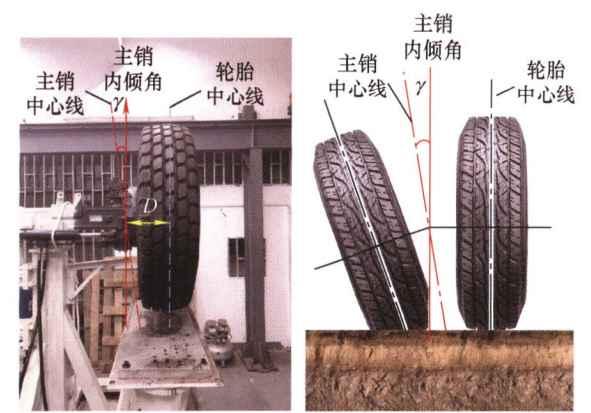
221 规则控制与行驶工况相结合的现代有轨电车能量管理策略



摘要：规则控制具有鲁棒性强、灵活性高等显著优势，逐渐成为优化储能式现代有轨电车能量管理性能的经典方法，但也同时面临过于依赖专家经验与工况适应性差的问题。为此针对有轨电车用锂电池/超级电容混合储能系统，在传统模糊逻辑控制的输入中同时引入道路坡度和运行速度，提出一种动态功率分配新方法。依据行驶工况制定隶属度函数与论域，调整超级电容高功率密度响应时刻，优化列车动力性能；采用粒子群算法对模糊控制规则权重寻优，在保证列车功率需求的同时降低锂电池峰值电流，延长储能系统使用寿命；并将所提策略应用到北京现代有轨电车西郊线路数据的算例对比验证中。结果表明，融合行驶工况信息的模糊控制相较于传统模糊控制实现了在功率分配、锂电池和超级电容荷电状态偏移范围、锂电池运行应力及储能系统整体效率方面的多重最优，且再生制动能量回收率有显著改善；通过粒子群算法对规则权重寻优相较于传统固定权重方案使锂电池峰值电流降低 31.02%，列车续驶里程提升了 22.45%，且算法在迭代 7 次以内能够找到全局最优解，运算速度快，易于实现。



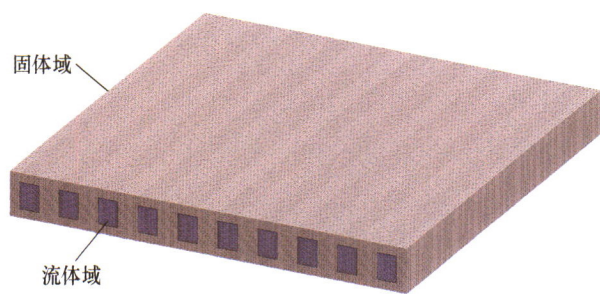
摘要：车窗开闭状态对列车火灾影响较大，而在现有研究中，对双层列车火灾烟气特性研究较少。基于计算流体动力学理论(Computational dynamics theory, CFD)，建立双层列车单节车厢的火灾数值计算模型，采用大涡模拟方法(Large eddy simulation, LES)对车内流场进行数值模拟。在火源位置、火源功率以及列车运行速度等参数不变的条件下，研究不同位置车窗的开闭状态对双层列车上下两层车厢内烟气特性的影响。结果表明，打开不同位置的车窗对车厢内烟气特性影响较大；打开火源前方的车窗使双层列车整节车厢的烟气层高度升高、CO 浓度降低、烟气温度下降，车厢内烟气向有利于乘客逃生的方向发展；打开火源后方的车窗只降低车厢后部区域 CO 浓度和烟气温度，烟气层高度升高。根据研究结果，为双层列车逃生疏散设计提供参考。



摘要：重型车辆原地转向阻力矩是影响其转向系统设计与控制性能的关键参数之一，精确可靠的阻力矩模型对提升转向驱动系统的设计水平、稳定性与控制能力有重要作用。为建立可精确复现实际转向工况的阻力矩模型，将轮胎转向时胎面单元变形产生的弹性迟滞摩擦力与 Maxwell 迟滞模型结合，提出考虑轮胎迟滞行为的原地转向阻力矩模型，可对轮胎任意换向下的阻力矩进行有效预测。基于重型车辆单轴转向系统测试台，试验探究转向频率、转向角幅值和垂直载荷对阻力矩的影响规律；基于典型迟滞行为设计系统转向角输入，明确原地转向阻力矩模型对擦除特性、多值特性、同余特性和返回点记忆性的复现能力与其实际迟滞行为。试验结果表明，该模型可以复现擦除特性、同余特性和多值特性的典型迟滞行为，这与标准迟滞系统一致，具有普遍性，但重型车辆转向阻力矩在返回点记忆特性上存在特殊性，即仅在轮胎回转角大于蓄力角度时才表现出良好的返回点记忆特性。综上可为重型车辆原地转向阻力矩研究提供有价值的模型参考。

257 非均匀热流下功率模块微小通道热沉传热特性研究

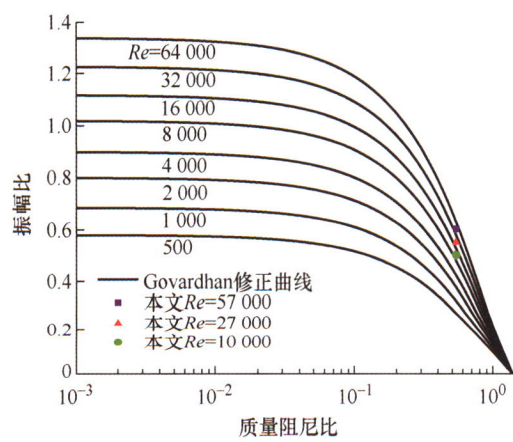
高智刚 尚小龙 郑达文 王天虎 李 朋 白俊华



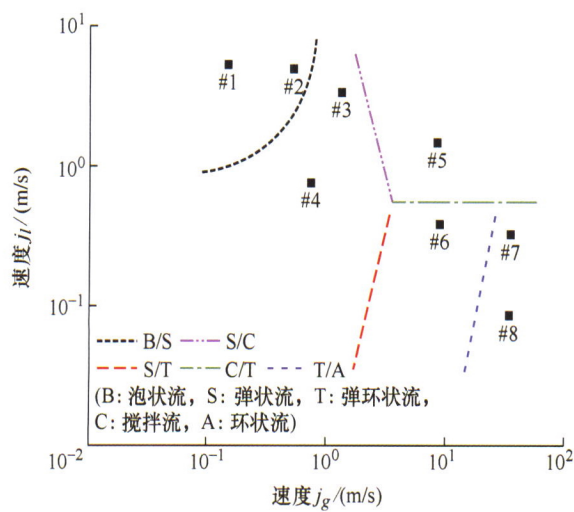
摘要: 针对飞行器大功率电动舵机伺服系统功率模块内各器件发热损耗不同引起温度不均的问题,开展非均匀热流下微小通道热沉传热特性分析。依据功率模块三相桥电路的实际构型和工作特点,在数值计算方法和网格无关性验证基础上,利用 FLUENT 建立多种结构微小通道热沉的数值模型,对冷却通道在高、低热流区的典型周向传热特性及热沉总体性能进行探讨。研究发现,相同通道截面下,各通道圆周方向壁温呈非均匀分布,但不同通道的相同位置处局部传热系数较为一致;对于等流通面积的变截面冷却通道,通道数量及结构对局部传热影响突出。非均匀热流分布和通道流向、通道构型相匹配有助于改善基底均温性,渐缩通道构型和小截面多通道构型强化传热优势明显,具有较低热阻和较好均温性。

265 配重对拓宽无叶片风力机捕能区间的影响研究

龚曙光 王 翔 谢桂兰 卢海山 徐凡业

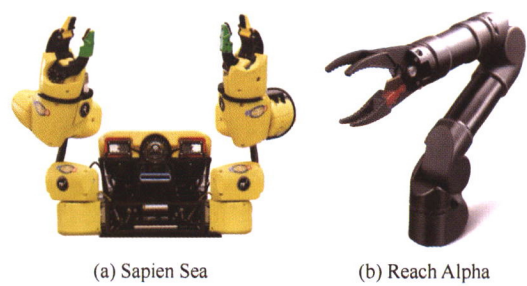


摘要: 为提高无叶片风力机的捕能效率,基于调谐捕能柱固有频率原理,提出采用配重方式拓宽无叶片风力机捕能区间的方法,推导添加配重后捕能柱固有频率的计算式,建立捕能柱涡激振动分析的仿真模型并进行了验证,探讨配重质量占比、配重块移动距离对捕能柱风速锁定区间与捕能效率的影响。所得结果表明,施加配重块后理论计算固有频率接近且大于捕能柱获得最大摆幅所对应的频率;配重块移动与其固定不动相比,捕能柱的捕能功率和风速锁定区间可显著提高,风速锁定区间长度增大了 16.3 倍;随着配重质量占比值的增大,捕能柱获得最大摆幅的风速锁定区间也增大,且区间长度与配重质量占比之间满足二次函数关系。这意味着当来流风速发生变化时,可通过调整配重块的位置,实现风能捕获最大化。

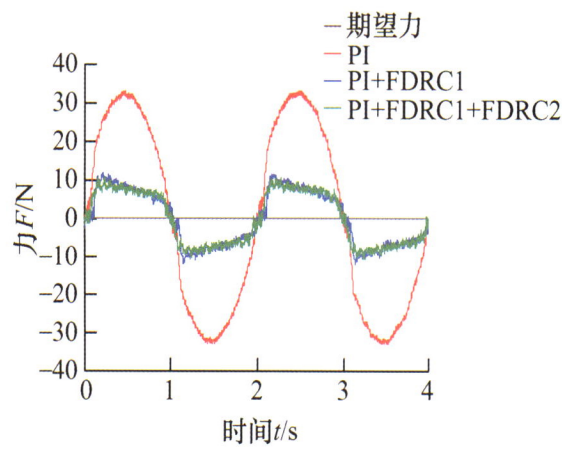


摘要：微通道换热器在解决高热流密度下的散热问题时表现出显著优势，实际工业应用通常采用集成式结构进而充分提高反应效率，但目前在反应元件集成过程中很容易发生流量分布不均进而影响换热性能，甚至出现“干蒸”以及“供液过多”的现象。因此，研究工质在平行微通道内相分配特性对于改善换热效率具有重要的指导意义。通过对通断型微通道进行结构优化，提出一种带有横向微腔的两侧加宽型微通道结构，以流动分布、传热特性、两相分配相对偏差以及压降波动来判定通断微通道相分配均匀度。研究结果显示：通断微通道进行结构优化后显著提高了相分配均匀度，各支管内气体流量相对偏差小于40%，横向微腔的设计使得相邻两个通道间充分混合，整体流动均匀效果提高了37.5%。通过对两侧通道进行加宽设计，起到了气泡过滤器的作用，减小两侧空间压力，保证通道内流型以及压力的一致性。

// 交叉与前沿 //

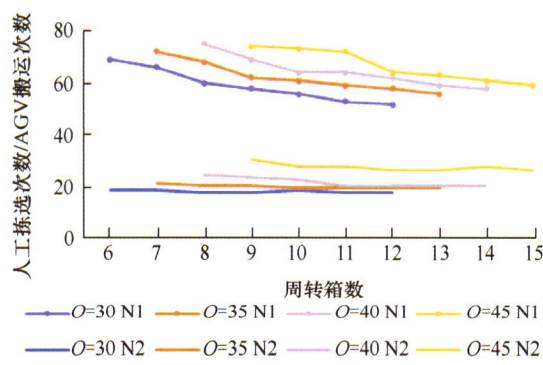


摘要：水液压技术在水下作业环境中具有鲜明的技术优势，在海洋探测、海洋资源开发等领域具有广阔的应用前景。水下机械手是执行水下作业任务的重要工具，将水液压技术应用于水下作业机械手，可降低水下机器人-机械手系统的复杂程度、提高性能上限。通过阐述当前国内外各研究机构针对不同应用场景所研制水下机械手的结构特点、研究水平和商业化发展现状，对比分析不同驱动形式的优缺点及其对水下机械手性能和设计要点的影响，得出水液压驱动水下机械手是当前水下作业工具的最佳选择。在此基础上分析了水液压机械手设计中需解决的摩擦与润滑、材料、动力学模型、运动控制等关键技术问题，最后对水液压机械手未来发展的趋势进行了展望，以期对相关研究提供参考。

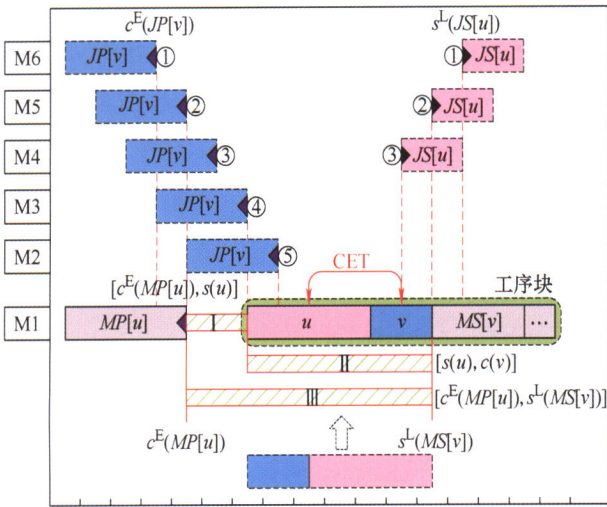


摘要：液压驱动单元(Hydraulic drive unit, HDU)是液压驱动型足式机器人常用的关节驱动器，具有集成度高、功率密度大等特性。机器人顶层规划后，需要依靠其完成具体动作，实现机器人的行走、对角小跑、奔跑等步态。HDU 所受外负载会随机器人腾空相和着地相频繁大幅变化，严重影响系统性能。若 HDU 具备高性能基于力的阻抗控制，则可有效减小机器人在运动过程中足地接触时的碰撞力，保证机器人运动的平稳性。为提高基于力的阻抗控制系统的抗外扰动能力，研究一种前馈抗扰控制(Feedforward disturbance rejection control, FDRC)。介绍 HDU 基于力的阻抗控制系统及其数学模型，推导其非线性状态空间表达式。针对系统的外扰动推导等价输入矩阵，设计前馈抗扰控制器，并估算伺服阀流量系数。利用 HDU 性能测试试验台，针对不同工况和典型信号进行试验。试验结果表明，FDRC 可大幅提高 HDU 基于力的阻抗控制系统的抗外扰动能力，且工况适应性良好。该控制方法可降低外扰动对液压驱动型机器人的影响，提高机器人的适应性。

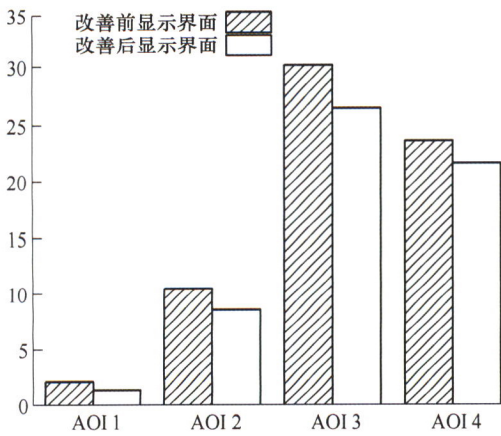
308 改进自适应遗传算法求解“货到人”拣选系统订单分批问题



摘要：“货到人”拣选系统采用自动导引运输车(Automated guided vehicle, AGV)实现自动拣选作业，由 AGV 搬运货架到拣选站台，再由拣选人员从货架上拣取商品。订单分批作为拣选作业的准备工作，是影响 AGV 搬运次数和人工拣货次数的关键因素，优化订单分批策略对提高“货到人”拣选系统效率至关重要。在电商智能仓库背景下，综合考虑订单需求多种商品、商品多货架分布存储、订单与货架供需匹配关系未知等实际因素，以人工拣选成本和 AGV 搬运成本之和最小为目标构建数学模型，并设计改进自适应遗传算法求解。该算法采用启发式策略生成初始种群，引入具有自适应变换概率的交叉和变异算子，并加入局部搜索过程以增强寻优能力。最后通过试验测试验证模型和算法的有效性，证明种群初始化方法的优势，并采用灵敏度分析给出合理的周转箱数量配置建议。研究可为电商企业通过订单分批优化提高拣选效率、降低拣选成本提供实践指导，为“货到人”拣选系统的实际应用提供科学依据。



摘要：针对作业车间调度问题(Job shop scheduling problem, JSP)，以优化最大完工时间为目标，提出一种强化搜索的多工序联动邻域结构与近似评价方法。分析交换工序块边缘两工序的空闲时间利用机理，对已有多工序联动邻域结构的空闲时间边界范围进行了有效扩展。在交换工序块边缘两工序的同时，基于扩展的空闲时间边界范围判定条件，根据最早开完工时间查找前移工序的工件某一前序工序，将其与紧密相邻机器前序工序进行交换操作。根据最晚开完工时间查找后移工序的工件某一后序工序，将其与紧密相邻机器后序工序进行交换操作。新的多工序联动邻域结构能够尽可能充分利用原有工序块相邻空闲时间和移动工序形成的空闲时间，具有更为强化的搜索能力。基于工序头尾长度理论研究了多工序联动邻域结构的近似评价方法。采用 JSP 基准算例进行测试，测试结果验证了强化多工序联动邻域结构的有效性，以及所提出的近似评价方法具有较高的准确性。邻域结构和近似评价作为 JSP 问题的基础研究，对于实现结合问题特征知识的 JSP 有效求解具有重要意义。



摘要：为保证盾构机的有效掘进和安全运行，让司机第一时间识别盾构机显示界面中掘进状态和地质变化等相关信息是关键。因此，提出一种基于注意力分配的盾构机主控室显示界面布局优化方法，综合考虑参数信息重要程度与视觉特性，利用 Jack 软件生成最佳可视区域。在此基础上，结合参数信息模块的注意力等级，构建基于注意力分配的盾构机主控室显示界面优化模型。针对基于注意力分配原则构建的界面布局模型求解问题，提出一种基于人工鱼群与粒子群混合智能算法的模型求解算法，解决优化模型求解过程中因权重系数设置不合理而使节点信息的重要性量化不够准确，并难以获得最优方案的问题。最后，针对优化后的盾构机主控室显示界面进行眼动试验，试验结果表明，优化后的盾构机主控室显示界面能够更好地使驾驶员的注视点集中在相应的认知加工区域，能够快速获取掘进参数。

CONTENTS

1	Research on Non-destructive Cloud Testing Technology and Development of Instrument and System
	SHEN Gongtian JIN Canhua ZHANG Junjiao HU Bin LIU Yuan WANG Qiang
10	MBN Measurement for the Transition Characteristics of Hard-to-soft Part of Automobile B-pillar Reinforcement Plate
	DONG Haijiang ZHENG Tingting YU Jintao FU Zhengjia LIU Xiucheng XING Zhixiang YAN Zhengxiang HE Cunfu
18	Ultrasonic Testing of Defects in Pipeline Based on Image Characteristics of TOFD Circumferential Scan
	JIN Shijie ZHANG Bo SUN Xu WANG Zhicheng LIN Li
25	Effect of Hot Isostatic Pressing Temperature on Microcrack, Microstructure and Mechanical Properties of GH3536 Nickel-based Superalloy Fabricated by Selective Laser Melting
	XIE Yin TENG Qing SUN Shanshan CHENG Tan BAI Jie MA Rui CAI Chao WEI Qingsong
34	Microstructure Strengthening Mechanism of Surface Layer of Ultra-high Strength Steel by Thermal Assisted Ultrasonic Rolling
	LUAN Xiaosheng LIANG Zhiqiang ZHAO Wenxiang XIAO Shihong ZHOU Tianfeng WANG Xibin LI Hongwei LIU Xinli LIU Zhenni
43	Prediction of Damage and Cracking of Magnesium Alloy Upsetting and Forming Based on Improved GTN Damage Model
	ZHAO Chenchen LIU Jianglin LI Zixuan WANG Tao
53	Quantitative Effect of Residual Stress on Gear Bending Fatigue
	HE Haifeng LIU Huaiju ZHU Caichao LI Gaomeng CHEN Difa
62	Shear Specimens and Dynamic Shear Mechanical Properties of 6061-T6 Aluminum Alloy Sheets
	CHEN Xin WANG Jianing YANG Lifei ZHANG Guanchen
71	Data-driven Fatigue Life Prediction Method Based on the Influence of Parameters
	LIU Zhizhuang WU Hao

80

Bio-lightweight and High Strength Structures and Their Bionic Applications in Energy Absorption Structures

ZHOU Jianfei GUO Ziqi XU Shucai SONG Jiafeng ZOU Meng

96

Comparison of Tensile and Compressive Creep Behavior of SA-508 Gr.3 Cl.1 Steel for Nuclear Applications

NIU Tianye GAO Yongjian TAO Xianchao ZHAO Peng GONG Jianguo XUAN Fuzhen

105

Microstructure and Mechanical Properties of TC11 Titanium Alloy Fabricated by Wire-feed Electron Beam Additive Manufacturing

ZHANG Guodong ZHANG Peng GAO Jianshi YU Huai YUAN Hong DING Ning XIONG Huaping

113

Damage and Failure Boundaries and Prediction of External Short Circuit in Lithium-ion Battery

XIONG Rui SUN Wanzhou YANG Ruixin SUN Fengchun

125

IMMKF-DOA Auxiliary Vehicle Cooperative Localization Algorithm Based on Multi-base Station

WANG Faan YIN Guodong ZHUANG Weichao LIU Shuaipeng LIANG Jinhao LU Yanbo

135

Optimization of Powertrain Mobility Performance of Vehicles with Variable Altitude Working Conditions by Ensemble of Surrogate Models

LI Chunming SUN Xiaoxia ZHANG Tao SHU Chenglong ZHANG Shuai SONG Xueguan

145

Research on SUV Lane Changing Trajectory Planning Method Integrating Rollover Stability

JIN Zhilin HE Shaowei HUANG Shuwei

155

Stability Analysis of Multi-dimensional Coupled Shimmy System Based on Center Manifold Theory

WEI Heng LU Jianwei YE Shengyong SHI Lei

163

Coordination Stability Control Strategy for Four-wheel-independent-actuated Electric Vehicles

WU Jianyang WANG Zhenpo ZHANG Lei DING Xiaolin

173

Transient Torsional Vibration Characteristic Analysis and Active Suppression of PHEV with Planetary Coupled Transmission System during Mode Transition Process

WANG Feng ZHANG Jian XU Xing WANG Chunhai QUE Hongbo GAO Yang

190

Multi-closed-loop Pressure Control Strategy Considering Nonlinear Characteristics of Electro-booster Brake System

CHEN Zhicheng ZHU Bing ZHAO Jian WU Jian

199

Trajectory Tracking Control of an Intelligent Vehicle Based on T-S Fuzzy Variable Weight MPC

LI Shaohua YANG Zekun WANG Xuewei

213 Study of Wheel Wear Characteristic of Subway Vehicle Based on the Effect of Friction Temperature Rising
CHEN Shuai WU Lei TAO Gongquan WEN Zefeng WANG Hengyu

221 Energy Management Strategy of Modern Tram Based on the Combination of Rule Control and Driving Conditions
GAO Fengyang ZHANG Haoran WANG Wenxiang LI Mingming

232 Influence of Open and Closed Window on Fire Smoke Characteristics in Double-decker Trains
SUN Yao CAI Lu QIN Deng LI Tian ZHANG Jiye

241 Study on Pivot Steering Resistance Torque of Heavy Vehicle Tire Considering Hysteretic Behavior
DU Heng REN Tianyu HE Yongyao ZHU Xiaowei LIU Qihui ZHAO Jingyi

257 Heat Transfer Characteristics Analysis of Microchannel Heat Sink on Power Module with Non-uniform Heating Dissipation
GAO Zhigang SHANG Xiaolong ZHENG Dawen WANG Tianhu LI Peng BAI Junhua

265 Study on the Influence of Counterweight on Widening the Energy Harvesting Range of Bladeless Wind Turbine
GONG Shuguang WANG Xiang XIE Guilan LU Haishan XU Fanye

274 Structural Optimization and Flow Characteristics of the Interrupted Microchannels
TIAN Yusi JIAO Yonggang SUN Huikai LIU Bin HAN Fei

283 Research Progress and Prospect of Water Hydraulic Manipulator for Underwater Operation
JI Hui LAN Yu WU Ziwei NIE Songlin YIN Fanglong

295 Research on Feedforward Disturbance Rejection Control for Force-based Impedance Control System of Hydraulic Drive Unit
ZHU Qixin YU Bin WANG Chunyu BA Kaixian KONG Xiangdong

308 Improved Adaptive Genetic Algorithm for Order Batching of “Part-to-picker” Picking System
LI Kunpeng LIU Tengbo LI Wenli

318 Research on Strengthening Multi-operation Joint Movement Neighborhood Structure and Approximate Evaluation of Job Shop Scheduling Problem
ZHAO Shikui HUANG Lin LÜ Jie

332 Research on Optimization of Shield Display Interface Based on Attention Distribution
JIANG Xingyu MA Shengshun MA Mingyu QI Peng LIU Weijun

《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)

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 (院士) 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 (院士) 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 (院士) 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)