



# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：核能装备制造及服务

客座编辑：蔡振兵研究员 张强副研究员



中国机械工程学会 主办

万方数据

56卷 **21**期 **半月刊**  
2020年11月

## /// 特邀专栏：核能装备制造及服务 ///

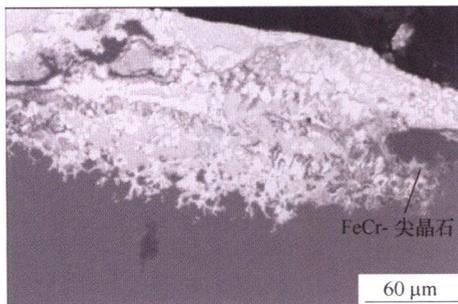
客座编辑：蔡振兵 研究员（西南交通大学）

张 强 副研究员（中广核研究院有限公司）

策划编辑：岑 伟（《机械工程学报》编辑部）

### 1 ODS 钢液态重金属环境腐蚀研究进展

赵 熹 曾 献 张 勇 燕青芝 陈映雪 殷振国

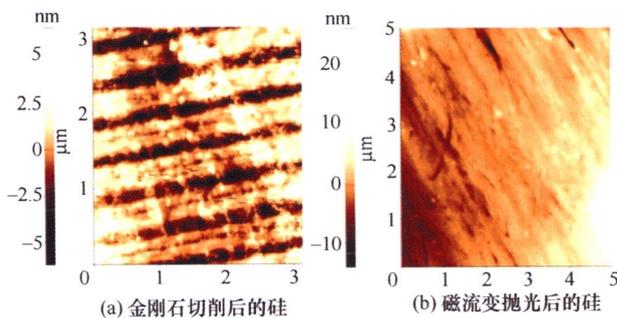


(c) EF-ODS-B

**摘要：**铅基快堆(Lead-cooled fast reactor, LFR)采用液态重金属(铅/铅铋合金)作为冷却剂,具有高安全性、高经济性等特点,并且在核能可持续发展方面具有一定的优势,目前被列为第四代核能系统六种参考堆型之一。液态金属冷却剂在服役过程中具有高温、高流速和高密度等特点,会对堆芯结构材料产生严重的腐蚀破坏。纳米氧化物弥散强化钢(Oxide dispersion strengthened steel, ODS)具有优异的抗辐照性能和优良的高温力学性能,目前已经成为先进快中子反应堆堆芯候选结构材料研究热点,其抗液态金属冷却剂腐蚀的能力是影响反应堆安全运行的关键性能之一。对目前有代表性的 ODS 钢在液态重金属环境中的腐蚀研究进展进行了综述,并结合 ODS 钢在氧化性气体环境和超临界水中的氧化腐蚀研究进展,对影响 ODS 钢液态金属腐蚀行为的因素进行了讨论。

### 11 核聚变堆用钨表面超精密抛光的研究现状与趋势

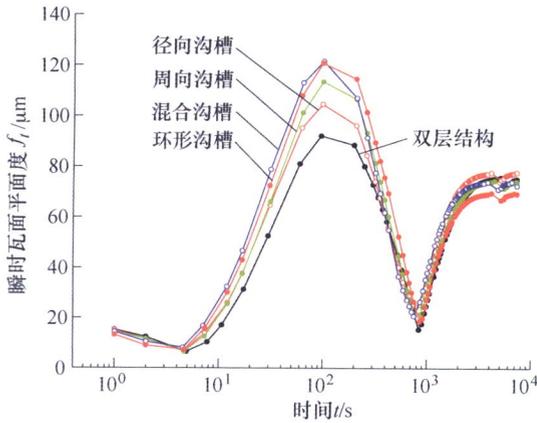
陈泓谕 袁巨龙 吕冰海 罗来马 吴玉程



(a) 金刚石切削后的硅

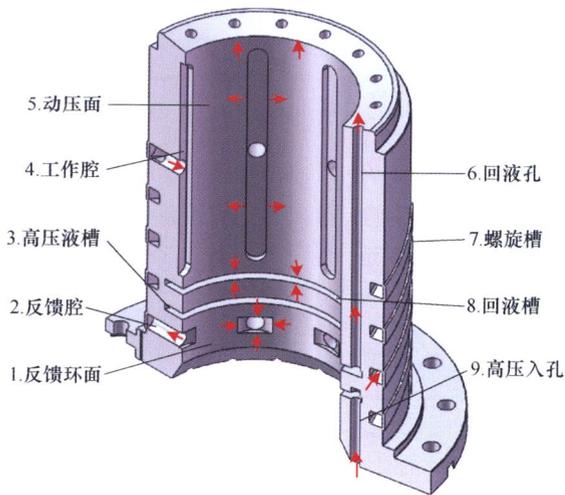
(b) 磁流变抛光后的硅

**摘要：**钨作为未来核聚变堆中最有前景的面向等离子体材料,在反应堆工况下将承受高能粒子的辐照冲击。表面质量的好坏会直接影响材料的氢/氦滞留行为和辐照损伤程度,进而影响聚变堆的安全性和可靠性。现阶段,针对钨的抗辐照改性研究主要着眼于材料的成分、结构和组织设计,关于机械加工对材料表面抗辐照改性的研究甚少。文章聚焦前沿科学问题,从机械加工角度分析核材料领域科学问题,结合国内外相关研究成果及核聚变堆用钨(PFM-W)的机械加工现状,阐述了 PFM-W 表面超精密抛光的必要性。通过对比不同抛光方法,提出了磁流变抛光和力流变抛光是较为适合 PFM-W 表面超精密加工的观点,并对未来 PFM-W 表面超精密抛光研究趋势进行了分析,重点在抛光方法的探索以及抛光后材料表面质量对抗辐照性能影响的研究。



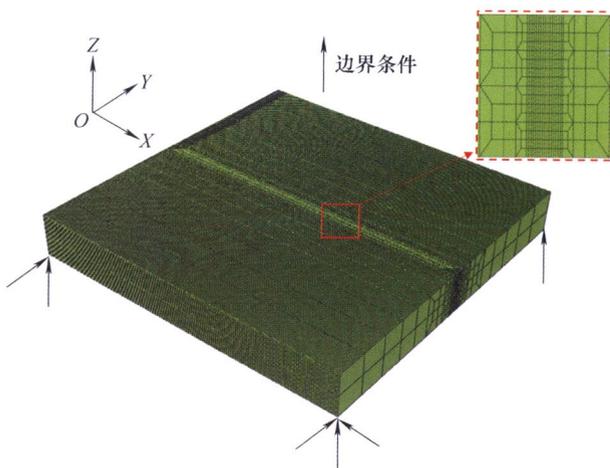
**摘要:** 针对核主泵水润滑推力轴承在事故工况下的热瞬态过程,建立了热固耦合瞬态有限元分析模型。基于所建立模型,分析了常见两层和三层结构推力瓦热瞬态过程瓦面变形,重点分析了三层结构推力瓦隔热层厚度对瓦面变形的影响。随后,进一步探索了遏制瓦面凹变形的办法,阐明了热瞬态过程中瓦面温度场分布不均产生瓦面凹变形的主因。进一步提出一种新型包边式推力瓦,并仿真验证其能够有效降低热瞬态过程瓦面凹变形,为核主泵水润滑推力轴承的推力瓦设计提供了新思路。

29 快堆钠泵动静压导轴承润滑特性分析

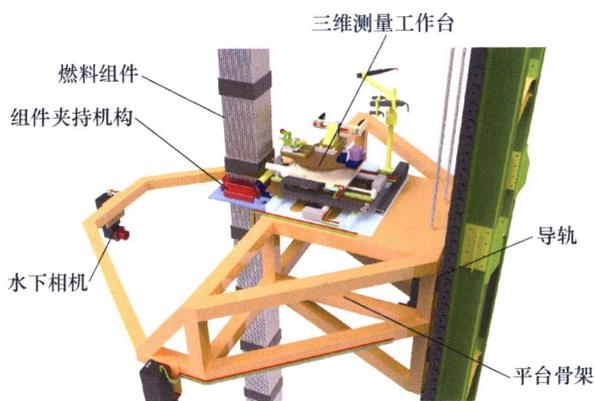


**摘要:** 快堆钠泵导轴承的润滑介质、工作原理以及润滑状态与传统滑动轴承均有显著不同,目前关于该类轴承的研究鲜有报道。为对钠泵导轴承设计和运行维护提供理论支撑,为以某快堆钠泵工程样机的内反馈轴承为研究对象,考虑紊流和动静压耦合关系等因素,建立了其润滑分析模型,采用自编有限元程序求解得到了典型工况下轴承的动静特性,分析了工况参数与关键结构参数对其润滑特性的影响。结果发现:钠液黏度低、密度大,紊流对液膜的润滑性能具有重要影响;当偏心率小于 0.6 时,主要由静压起主导作用,当偏心率大于 0.6 时,动压作用不可忽略,非线性效应增强;间隙增加最小油膜厚度线性增加、流量显著加大、稳定性下降;入口扬程增加,静压作用增强,流量增加,稳定性增强,典型工况下入口扬程应大于 50 m 才能保证轴承的高可靠性。

38 SUS310S 不锈钢局部真空电子束焊接接头残余应力及变形研究



**摘要:** 作为一种新型焊接方法,局部真空电子束焊接常被用于制造厚大的奥氏体不锈钢焊接接头,而该类接头的焊接残余应力和变形问题受到广泛关注。对板厚 40 mm 的 SUS310S 不锈钢局部真空电子束焊接的对接接头进行了研究,并利用光学显微镜表征接头的组织形貌,利用显微硬度计测量接头的硬度分布,采用盲孔法装置和三坐标测量仪测量了接头的残余应力与面外变形。同时,基于 ABAQUS 有限元软件平台,通过编写用户子程序开发了一种复合热源模型来模拟局部真空电子束焊接过程中的热输入。采用所开发的“热-弹-塑性有限元”计算方法,模拟了接头在局部真空电子束焊条件下的残余应力与变形,模拟结果与试验结果吻合良好,验证了所开发的“热-弹-塑性有限元方法”的有效性。同时基于数值模拟结果,还详细讨论了局部真空电子束焊厚板对接接头的残余应力分布与焊接变形特征。

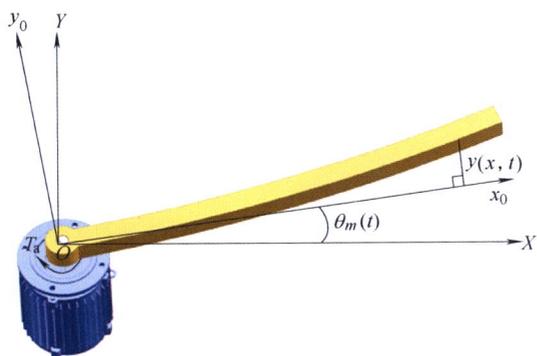


**摘要:** 乏燃料组件池边检查是核电站燃料组件必不可少的重要检测项目。针对国内外池边检查技术发展现状的不足,设计了一套基于摄影测量的乏燃料组件池边检查系统,结合接触式与非接触式测量方法,能够快速对组件的整体尺寸及变形进行检测,并能实现对燃料棒长度、直径、棒间隙与氧化膜厚度的检测。针对关键检测元件 CCD 相机在辐射环境下寿命短的问题,设计了一种耐辐射相机防护装置,通过一次反射减少进入相机的辐射剂量,可用普通 CCD 相机代替昂贵的耐辐射相机。详细介绍了燃料组件长度、燃料棒与上下管座间隙、格架宽度、组件弯曲及扭曲的视觉测量实现方法,具有理论和实际的可行性,以及重要的应用价值。

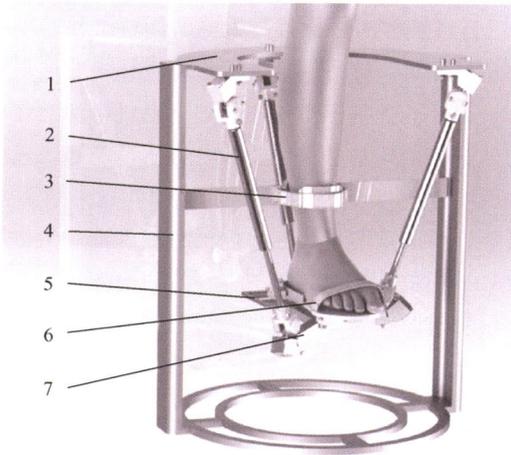
## /// 机构学及机器人 ///

### 56 基于机械臂位姿变换的柔性负载伺服驱动系统控制策略

李小彭 尚东阳 陈仁桢 闻邦椿

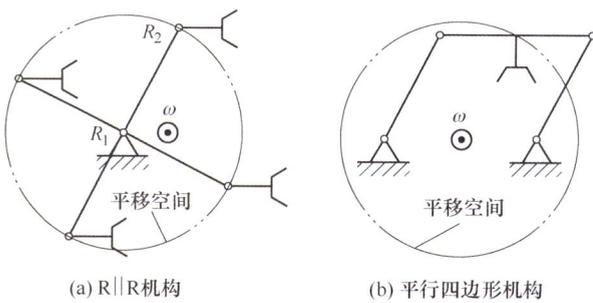


**摘要:** 伺服驱动系统的柔性负载端转动惯量等参数随柔性机械臂位姿变化而变化,进而影响伺服驱动系统电动机输出端转速。为降低电动机输出端速度波动,采用极点配置的方法设计伺服驱动系统转速环 PI 控制器参数,该参数的选择随柔性机械臂位姿变化而变化,从而使伺服驱动系统在不同位姿下获得良好的动态响应特性,避免机械谐振发生。首先根据连续体振动理论和拉格朗日原理建立了柔性负载伺服驱动系统动力学模型,并通过状态方程求得电动机转速到柔性负载驱动转矩的传递函数。将变参数 PI 控制策略应用于伺服驱动系统转速环控制中,分析了柔性负载对转速环的控制特性的影响,采用极点配置的方法设计控制器参数。接下来分别采用相同幅值、相同阻尼系数、相同实部 3 种极点配置策略设计控制器参数。讨论了这 3 种极点配置策略不同参数对系统谐振峰值、谐振频率和带宽的影响。最后通过数值仿真分析表明:伺服驱动系统等效柔性负载参数与机械臂的位姿有关;柔性负载回转半径、转动惯量较大的情况,不适宜使用相同实部的极点配置方法,但其余两种方法可通过适当选择参数使电动机输出转速波动程度减小。



**摘要:** 在分析现有踝关节康复机构的基础上, 提出一种基于3-UPU 并联机构的新型踝关节康复机构, 该机构具有3个自由度, 能够实现踝关节的旋前/旋后、内翻/外翻运动, 并且该机构的转动轴线可实现高度和角度方向的调节, 从而使机构转动轴线与人体踝关节运动轴线更好的吻合, 给患者带来更好的康复效果。求解了机构的自由度, 运动学反解, 并根据踝关节康复要求对机构尺寸进行确定, 进一步求解了机构的工作空间, 对机构的运动学进行了仿真验证和样机运动试验。

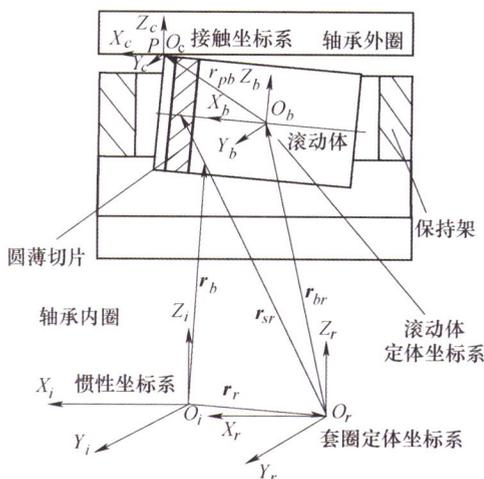
79 弯曲平移机构运动特征描述与分析方法研究



**摘要:** 针对弯曲平移机构缺少运动特征描述模型和运算规则等问题, 提出了适用于弯曲平移机构的运动特征描述与分析方法。首先归纳总结了刚体运动特征的组成要素, 研究了弯曲平移运动的形成机理, 并在此基础上提出了描述刚体平移运动整体特征的相关概念。其次借鉴内蕴几何的基本思想, 建立了可表达弯曲平移特征的描述模型, 随后分析制定了相应的运动特征求并和求交运算规则, 并且给出了求交运算中并联机构动平台旋转轴存在性的两条判定准则。最后基于弯曲平移特征描述模型和运动特征运算规则, 采用递归算法提出了便于程序化处理的运动特征分析方法, 并结合具体实例论证了该方法的有效性。研究结果有利于促进机构拓扑结构分析与综合理论的完善和深化。

机械动力学

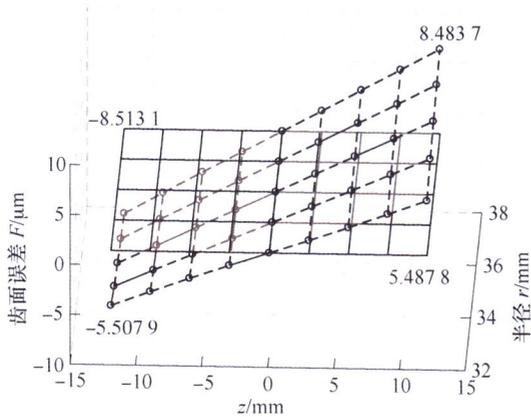
89 中介轴承故障动力学建模与振动特征分析



**摘要:** 中介轴承是航空发动机转子的关键支承部件之一, 工作转速高, 润滑条件差, 易发生故障。基于动力学模型的故障机理研究可以为中介轴承故障诊断提供依据。以 Gupta 圆柱滚子轴承复杂动力学建模方法为基础, 考虑外圈的运动建立了中介轴承动力学模型, 通过试验对模型进行验证。在此基础上, 分别考虑滚道表面形貌和轴承间隙的变化, 建立中介轴承磨损故障动力学模型; 针对中介轴承滚道表面剥落等局部损伤故障, 考虑滚动体通过损伤区域时趋近量和接触载荷方向的改变, 建立中介轴承局部损伤故障动力学模型。利用所建故障动力学模型对不同磨损状态下中介轴承外圈径向振动响应进行研究。研究表明, 出现磨损后, 振动响应频率中出现若干随机成分; 对于局部损伤和磨损的复合故障, 随着磨损加剧, 振动幅值随之增大, 随机成分所占比重增加, 损伤的故障特征不明显。

## 100 机床误差对圆弧齿线圆柱齿轮齿面误差影响规律的理论研究

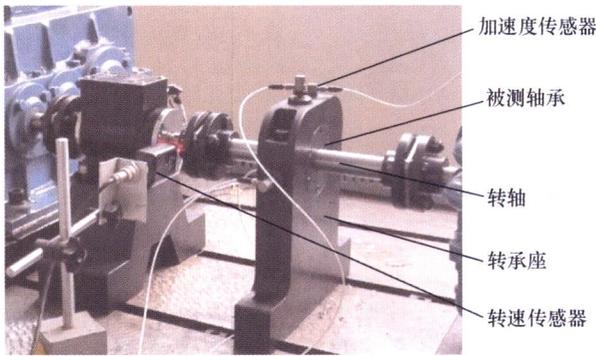
吴阳 侯力 罗岚 马登秋 魏永峭 易宗礼



**摘要:** 机床误差是导致圆弧齿线圆柱齿轮齿面误差的主要原因,研究机床误差与齿面误差之间的关系将为机床加工参数反求、齿面误差修正等提供理论依据。基于圆弧齿线圆柱齿轮成型原理建立了齿轮机床结构模型,建立了机床坐标系体系。通过齿坯和刀盘位置误差、刀具形状误差对机床整体误差进行描述,基于啮合原理推导了理想情况下和包含机床误差的齿面方程。研究了齿轮误差曲面计算方法,采用二阶近似曲面和齿面平均误差影响系数分析不同机床误差下误差曲面,研究机床误差对齿面误差的影响规律。通过实例分析了被加工齿轮几何参数不变时和变化时,机床误差对圆弧齿线圆柱齿轮凹齿面误差影响规律。

## 110 滚动轴承外圈多点故障特征分析

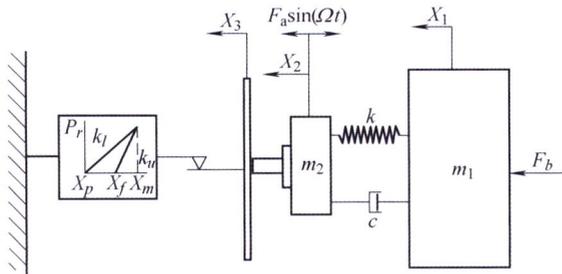
胡爱军 许莎 向玲 张军华



**摘要:** 滚动轴承发生多点故障时会产生复杂的振动特征,影响轴承故障诊断的准确性。针对滚动轴承外圈多点故障诊断特征的变化规律,考虑滚动轴承外圈故障数量、故障间隔和载荷分布对故障特征的影响,采用五自由度动力学模型进行仿真分析。通过龙格库塔法对动力学方程进行数值求解,分析了滚动轴承外圈单点故障和多点故障的诊断特征。结果表明:当外圈具有多点故障时,随着故障数量和故障间隔的变化,故障特征频率各谐波的幅值会发生变化;当多点故障满足载荷相等和一定的间隔关系时,故障特征频率值与故障数量之间呈现对应的倍数关系。通过滚动轴承多点故障模拟试验验证了结论的正确性。

## 121 基于钻头-岩石碰撞的激振冲击系统的非线性动力学研究

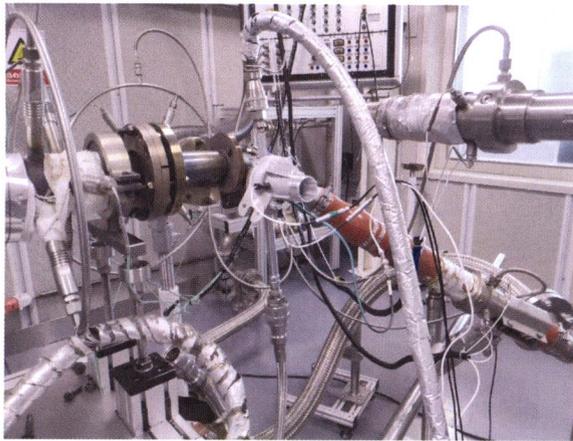
廖茂林



**摘要:** 为了提升旋转冲击钻井过程中轴向冲击的辅助破岩效果,设计了一套用于测试钻头与岩石之间激振碰撞的试验装置,通过对钻头的激振频率、激振振幅和施加的静态压力3项可控参数的调节,研究了该激振冲击系统的动力学行为演化规律,且试验测试结果与数值模拟结果具有很好的一致性。通过进一步的分岔分析和相平面分析发现,由于激振冲击系统具有典型的接触非线性结构,其动态响应也呈现出复杂的非线性特征,钻头在与岩石发生激振碰撞后,主要保持单周期的振动状态,但随着控制参数的变化,钻头与岩石之间在一个激励周期内的碰撞次数会不断改变;此外,钻头的振动状态还会经由倍周期分岔转变为双周期振动,但最终又会经由逆倍周期分岔或者折叠分岔重新回到单周期振动状态。由于钻头的振动状态直接决定了其轴向冲击力的大小,因而会影响其破岩效率;因此,为了获得破岩效率最高的一周期一次碰撞的钻头振动状态,应该采用较高的激振频率和振幅,但应该避免较高的静态压力,因为它将触发钻头的颤振,反而降低其破岩效率。

### 131 长周期变转速下入口油温对高速轻载涡轮增压器转子振动特性影响

宾光富 黄源 钟新利 杨峰 毛征宇

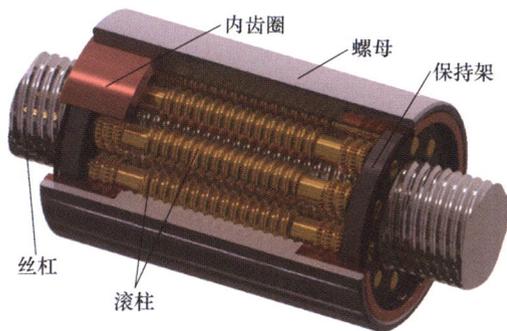


(b) 涡轮增压器升速实验台

**摘要:** 高速轻载涡轮增压器转子系统的入口油温在长周期变转速运行条件下会产生动态变化,从而改变转子系统振动特性甚至导致非线性振动事故。以某型汽油机用高速轻载涡轮增压器转子为研究对象,分析浮环轴承内油膜最小厚度与偏心率随入口油温参数的变化规律,构建涡轮增压器转子-浮环轴承系统动力学有限元模型,采用 Newmark 积分法分析转子系统的非线性瞬态响应,结合涡轮增压器升速实验,得到不同入口油温下转子系统三维振动瀑布图与 Colormap 频谱图,探究入口油温对转子系统振动响应特性的影响。结果表明:随着入口油温从 50 °C 增至 130 °C 时,内油膜最小厚度会减少,环速比与偏心率会增加,内油膜振荡幅值逐渐降低,但出现内油膜振荡与外油膜涡动的轴颈转速点会提前约 30%,且外油膜涡动幅值会逐步增加。综合内外油膜涡动与振动幅值,入口油温约为 90 °C 时转子振动情况较好。结论可为设计具有智能抗振性能的高速轻载涡轮增压器转子系统的运行参数提供理论参考。

### 140 行星滚柱丝杠副主曲率计算与接触特性分析

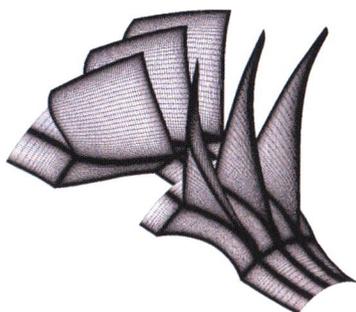
乔冠 刘更 马尚君



**摘要:** 根据丝杠、滚柱和螺母螺旋滚道曲面特点,建立了通用化的法截面内零件的轮廓方程和滚道螺旋曲面方程。通过将滚道截面的原点定义在对应零件的中心轴上,避免了现有模型中将滚道截面原点定义在螺纹牙轮廓中心而带来的繁琐坐标变换问题。其次,利用微分几何原理推导了丝杠-滚柱接触侧和螺母-滚柱接触侧在相应接触位置的主曲率,与传统的基于等效球法计算行星滚柱丝杠副主曲率进行了对比。利用赫兹接触理论求解了滚柱与滚道间的主曲率差、接触椭圆面积及最大接触应力,并讨论了行星滚柱丝杠副结构参数对接触特性的影响规律。结果表明:丝杠和螺母滚道在某一主平面内的主曲率不是零,使用等效球模型计算主曲率会带来较大误差;增大螺纹螺距使得滚柱两接触侧的主曲率差变大,但几乎不影响接触椭圆的面积和滚柱螺纹曲面两接触侧的最大接触应力;增大法向牙侧角会使两接触侧的主曲率差和接触面积同时减小,但过大的法向牙侧角会导致接触应力和摩擦力增大。

### 149 对转风扇排间干涉效应对下游转子颤振特性影响的数值模拟研究

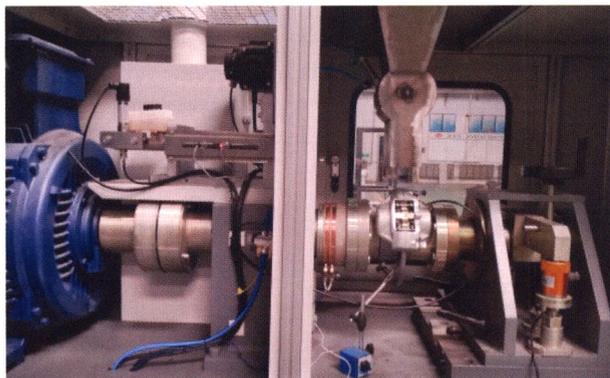
李德刚 张翔



**摘要:** 为了探究对转风扇排间干涉效应对下游转子颤振特性的影响,在多叶排环境下,使用谐波平衡法进行振荡叶片非定常流数值模拟。通过颤振预测的能量法考察两种不同多排模型下叶片表面非定常压力响应和气流做功的差异,探讨了对转结构上下游扰动对下游转子气动弹性稳定性的作用机制。研究结果显示:下游振荡叶排的气动阻尼因上游转子的气动干涉而降低,造成这种颤振特性差异的主要原因除了排间非定常扰动引起时均流场中激波形态的变化,还有上游尾迹传播引发的下游转子进口气流角的周期性波动。

### 158 汽车摩擦材料缩比 Krauss 摩擦试验机的研制及比较性评价

王振玉 王 杰 王利宁 PETER K 马云海 王铁山



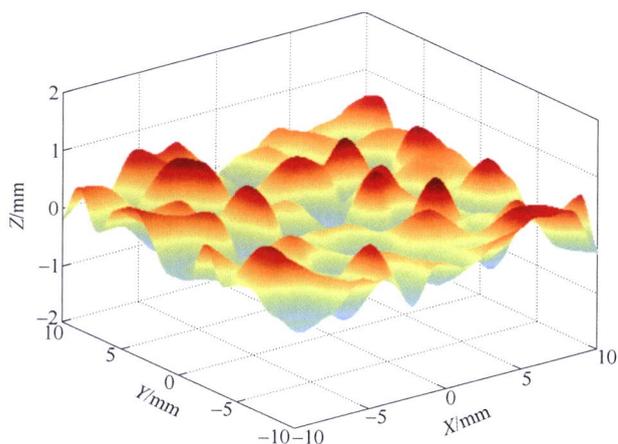
**摘要:** 为了提高小样试验工况的可模拟性,降低试验成本,提高试验效率,以 Krauss 试验机为原型,根据相似原理,应用量纲分析法推导缩比 Krauss 试验机的基本参数,研制了一种缩小比例的 Krauss 试验机。选用 PVW-3212 试验规程,选取同一批次汽车制动衬片进行试验研究,通过对摩擦因数、试验温度和试验周期等指标进行比较。结果表明,全程平均摩擦因数较接近,摩擦因数最大值和最小值出现的阶段和制动次序均相同,全程平均温度具有很好的线性相关性。执行相同 PVW-3212 试验规程的情况下,在制动初始和制动解除阶段,缩比 Krauss 试验机压力响应较快,全尺寸 Krauss 试验机压力响应较慢,缩比试验制动结束时间提前约 100ms,每次试验成本约为全尺寸 Krauss 试验机的 29.67%。缩比 Krauss 试验机与全尺寸 Krauss 试验机具有较好的一致性和可比性,证明了该缩比 Krauss 试验机的可靠性,为摩擦材料的测试提供了一种新的试验装置。

### 168 基于泄漏率的法兰密封结构垫片参数试验研究

刘 炎 陈学东 范志超 王 璐 薛吉林



**摘要:** 对于压力容器的法兰密封结构而言,预紧比压  $y$  和垫片系数  $m$  是其设计时依据的两个重要垫片参数,现行压力容器设计规范 ASME VIII 卷中给出的  $y$  和  $m$  取值是经验值,且未能与泄漏率关联。对现有基于泄漏率的垫片参数标准试验方法进行分析,指出了其存在的不足之处,开展了石墨缠绕垫片在不同介质压力、不同加卸载循环下的密封性能试验,提出了一种更加贴合工程实际的垫片参数  $y$  和  $m$  的试验方法。通过对不同垫片初始表面应力下泄漏率与垫片系数  $m$  之间关系的拟合,得到满足不同紧密度等级所要求的  $y$  和  $m$  值,并对  $y$  和  $m$  取值进行优化使其更加方便工程应用。新的垫片参数试验方法考虑了  $y$  和  $m$  之间的关联关系,可更加准确全面地反应垫片特性,为开展基于泄漏率的法兰密封结构设计,降低石化装置泄漏率提供支持。

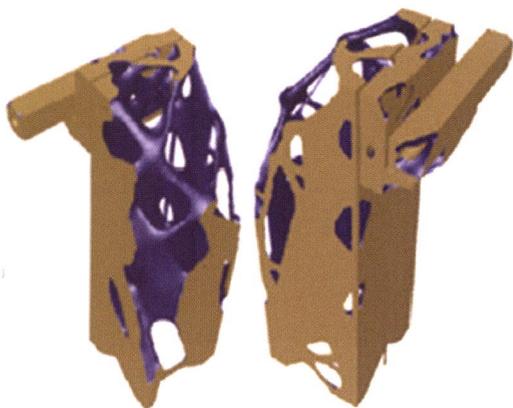


**摘要:** 为研究湿滑状态下轮胎路面的摩擦特性,以胎面橡胶和沥青路面作为研究对象,利用谐波叠加法建立三维粗糙路面模型,采用“伪”流体动力轴承作用等效反映路面水膜“密封”作用,综合使用有限元软件 ABAQUS 和计算流体力学软件 Fluent 得到湿滑状态下橡胶与路面滑动接触时的橡胶接触压力、滞后摩擦力及路面水膜承载力,由此形成了综合兼顾橡胶材料、接触压力、滑动速度、路面形貌和路面水膜等多因素的轮胎与湿路面摩擦特性的仿真方法。通过橡胶与干-湿路面摩擦特性的变化与公开的试验对比,证明本方法的合理性和可行性,并进一步分析滑动速度、接触压力和路面特征对湿滑状态下轮胎路面摩擦特性的影响规律。研究结果为轮胎和路面的抗湿滑性设计及优化提供理论依据。

## /// 数字化设计与制造 ///

### 186 机床结构轻量化设计研究进展

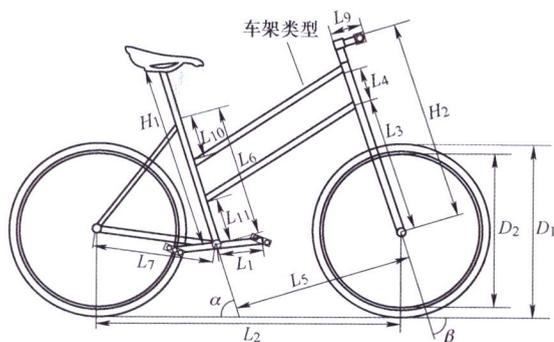
李天箭 丁晓红 李郝林



**摘要:** 对机床进行优化的结构构型设计,使得材料在机床结构空间内更加合理地分布和有效地利用,一直都是机床设计工作者追求探索的目标。论述机床构型和结构件轻量化设计的研究历程和技术发展,对机床结构轻量化设计中常用的现代设计方法:参数优化、结构拓扑优化、多方法综合结构设计、仿生优化设计方法进行具体技术介绍和综合评述,并对近年兴起的仿生优化设计方法进行从方法、实现手段和轻量化效果等方面重点分析和评述,对机床构型和结构件轻量化设计研究的未来发展提出展望。

### 199 基于美学、人体工学及性能的多因素融合设计

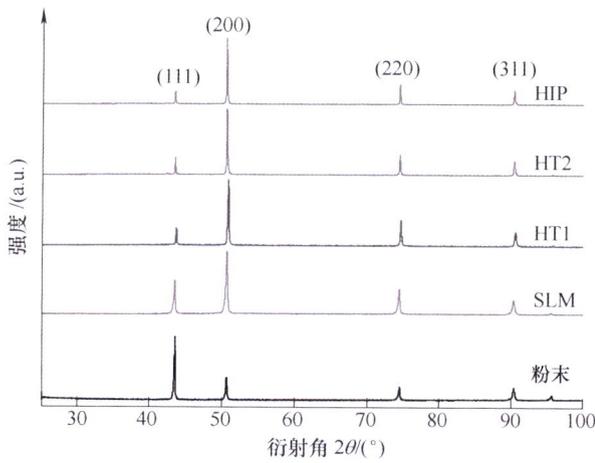
朱思羽 胡洁 戚进



**摘要:** 传统设计方法主要考虑产品功能及性能,较少考虑美学等其他因素,难以满足综合要求的提升。为解决这一问题,提出多因素的融合设计方法,实现基于美学、人体工学及性能的智能融合设计。首先确定多个因素的评价方法,包括依据美学计算原理的多个美学维度的计算公式,以及人体工学和性能的评价公式。结合粗糙层次分析法确定的各因素权重系数,得到多因素的综合评价,建立寻优模型。采用自适应边界的遗传算法求解模型,实现优化设计和创新设计两种模式的设计,最后由 NX10.0 的参数接口生成设计模型,实现智能化的融合设计。通过自行车整体结构的设计案例对所提方法进行检验,得到了明显优化的和具有创新性的设计方案。结果表明,该方法可快速生成满足多因素综合要求的优化方案或若干优质的创新方案,有效解决设计因素单一的问题。

## 208 热处理对激光选区熔化 GH3536 合金组织演变规律的影响研究

孙闪闪 滕庆程 坦王基维 陈吉祥 白洁 刘志福 魏青松



**摘要:** 利用激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)增材制造技术制备了 GH3536 镍基高温合金, 研究了直接时效、固溶及热等静压处理对 SLM 合金组织和裂纹的影响规律, 利用 XRD、SEM、EPMA、EBSD、TEM 等方法表征相组成和组织演变。结果表明: SLM 态组成相为  $\gamma$  相, 经固溶和时效热处理后, 晶界析出针棒状和片层状相, EPMA 结果表明这些相富含 C、Cr、Mo, 主要组成为 Laves 相和碳化物相; SLM 态试样经固溶热处理后, 合金元素扩散加强, 熔池边界逐渐消失; SLM 态平均晶粒尺寸  $13.18 \mu\text{m}$ , 经高温热处理后, 合金晶粒发生再结晶, 平均晶粒尺寸减小, 经固溶处理后平均晶粒尺寸为  $12.01 \mu\text{m}$ , 而经热等静压处理 ( $1050 \text{ }^\circ\text{C}/3 \text{ h}/120 \text{ MPa}$ )后平均晶粒尺寸为  $10.87 \mu\text{m}$ 。SLM 态试样中存在  $10\sim 100 \mu\text{m}$  的微裂纹, 裂纹起源于熔池内部并贯穿熔池道; 经直接时效和固溶热处理后微裂纹未明显改善, 而热等静压则可完全消除微裂纹。

## 219 技术进化引导的多冲突混合信息求解过程模型

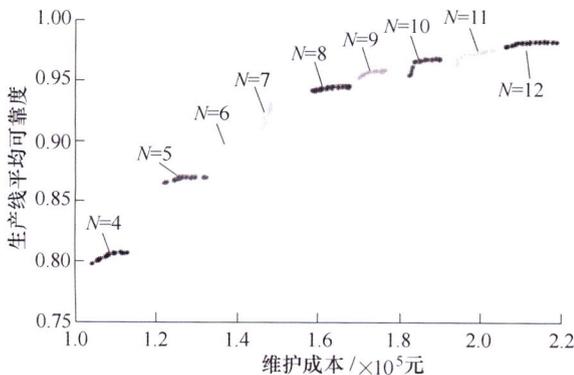
梁瑞 檀润华 张建辉



**摘要:** 针对多冲突求解过程中冲突不能反映系统动态进化过程, 多冲突权重影响指标多的问题, 通过九窗口法和技术进化定律对系统做出进化预测, 从而提取出参数列表构建冲突的元素-名称-量值模型(Element-name-value, ENV)。冲突由控制参数和评价参数组成并受参数量值的变化影响, 所以参数的权重是多冲突问题中冲突重要度排序的重要指标。首先建立参数与技术进化定律之间的关系, 然后从元件影响程度、参数出现频率、参数关联数量和专家评价多个方面对参数的权重赋值, 将这些多种权重赋值方案通过混合关联度计算出一个综合的控制参数和评价参数的权重, 然后得到冲突的重要度排序确定出关键冲突, 最后冲突求解得到创新改进方案, 从而建立技术进化引导的多冲突混合信息求解过程模型。以涂板机作为实例进行创新设计, 验证了该过程模型的有效性。

## 231 自动化生产线中关键设备的预维护策略研究

沈南燕 武星 李静 苏琨 祝更生



**摘要:** 为了避免由于设备故障导致的生产线停产, 首先研究生产线故障维修成本、预防性维护成本和停产损失的计算方法, 建立生产线平均可靠性与维护总成本多目标优化模型, 从而获得了最优的生产线周期性维护计划。针对关键设备, 如数控机床、工业机器人, 运行状态突然严重劣化的情况, 基于时间延迟理论得到了关键设备子系统可靠性随时间变化的规律, 根据设备运行状态的监测数据, 采用支持向量机模型对设备子系统潜在故障的发生概率进行预测。由此建立了关键设备延迟维护最佳时刻优化模型, 并通过粒子群优化算法求解关键设备的最佳维护时刻。最后, 通过实例仿真分析验证了文本预维护策略的有效性, 能够在保证可靠性要求的同时, 有效降低维护成本。

## CONTENTS

- 1 Research Progress of ODS Steels Corrosion in Heavy Liquid Metal Environment**  
ZHAO Xi ZENG Xian ZHANG Yong YAN Qingzhi CHEN Yingxue YIN Zhenguo
- 11 Research Status and Trend of Ultra-precision Polishing on Tungsten Surface for Fusion Reactors**  
CHEN Hongyu YUAN Julong LÜ Binghai LUO Laima WU Yucheng
- 22 Research on Thermal Transient Deformation Mechanism and Suppression Method of Thrust Pad**  
WANG Yuechang LIU Ying ZHANG Gaolong WANG Zhanchao WANG Yuming
- 29 Lubrication Characteristics of Hybrid Bearing in Sodium-cooled Fast Reactor**  
PEI Shiyuan NIU Hongjun HONG Jun
- 38 Numerical Simulation of Residual Stress and Deformation of SUS310S Stainless Steel Local Vacuum Electron Beam Welded Joint**  
HU Xing PENG Zhaocheng FENG Guangjie LI Suo DENG Dean YUAN Jun
- 48 Design of Poolside Inspection System for Spent Fuel Assemblies Based on Photogrammetry**  
Dong Kaijie LI Duanling HOU Yan WANG Xingze
- 56 Control Strategy of Flexible Load Servo Drive System Based on Manipulator Position and Position Transformation**  
LI Xiaopeng SHANG Dongyang CHEN Renzhen WEN Bangchun
- 70 3-DOF Parallel Ankle Rehabilitation Mechanism**  
CHEN Ziming YIN Tao PAN Hong ZHAO Chen YAN Shengqin LI Yanwen HUANG Zhen
- 79 Research on the Description and Analysis Method for the Motion Characteristics of Bending Translation Mechanisms**  
SHI Zhixin YE Meiyang LUO Yufeng
- 89 Dynamic Modeling and Vibration Analysis for Inter-shaft Bearing Fault**  
CAO Hongrui JING Xin SU Shuaiming CHEN Xuefeng
- 100 Research on the Effect Law of Machine Tool Errors on Tooth Surface Errors of Curvilinear Gear**  
WU Yang HOU Li LUO Lan MA Dengqiu WEI Yongqiao YI Zongli
- 110 Characteristic Analysis of Multi-point Faults on the Outer Race of Rolling Element Bearing**  
HU Aijun XU Sha XIANG Ling ZHANG Junhua

- 121 Nonlinear Dynamics of a Vibro-impact System for Indenter-rock Interaction**  
LIAO Maolin
- 131 Effect of Inlet Oil Temperature on Vibration Characteristics of High-speed Light-load Turbocharger Rotor under Long Period and Variable Speed**  
BIN Guangfu HUANG Yuan ZHONG Xinli YANG Feng MAO Zhengyu
- 140 Principal Curvature Calculation and Contact Characteristics Analysis of the Planetary Roller Screw Mechanism**  
QIAO Guan LIU Geng MA Shangjun
- 149 Numerical Simulation Research on Effect of Unsteady Inter-row Interaction on Flutter Characteristics of Downstream Rotor in Counter-rotating Fan**  
LI Degang ZHANG Xiang
- 158 Development and Comparative Evaluation of Reduced-scale Krauss Friction Tester for Automobile Friction Materials**  
WANG Zhenyu WANG Jie WANG Lining PETER K MA Yunhai WANG Tieshan
- 168 Experimental Research on the Gasket Parameters of Flange Sealing Structure Based on Leakage Rate**  
LIU Yan CHEN Xuedong FAN Zhichao WANG Lu XUE Jilin
- 177 Numerical Analysis Method for Friction Characteristics of Tire-pavement under Wet Slip Condition**  
ZHOU Haichao WANG Guolin JIANG Zhen CHEN Xingpeng
- 186 Research Progress on Lightweight Design of Machine Tool Structure**  
LI Tianjian DING Xiaohong LI Haolin
- 199 Multi-factor Coupling Design Based on Aesthetic Measure, Ergonomics, and Performance**  
ZHU Siyu HU Jie QI Jin
- 208 Influence of Heat Treatment on Microstructure Evolution of GH3536 Superalloy Fabricated by Selective Laser Melting**  
SUN Shanshan TENG Qing CHENG Tan WANG Jiwei CHEN Jixiang BAI Jie LIU Zhifu WEI Qingsong
- 219 Multi-contradiction Mixed Information Solving Process Model Guided by the Technological Evolution**  
LIANG Rui TAN Runhua ZHANG Jianhui
- 231 Research on Pre-maintenance Strategy of Key Equipment in Automatic Production Line**  
SHEN Nanyan WU Xing LI Jing SU Kun ZHU Gengsheng

# 《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)		

