

机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专辑：人本智造

客座主编：杨华勇 王力翠

客座编辑：杨 赓 王柏村

58卷 10期
2022年9月刊

// 特邀专辑 //

人本智造

客座主编：杨华勇（浙江大学）

王力鞏（瑞典皇家理工学院）

客座编辑：杨 赓（浙江大学）

王柏村（浙江大学）

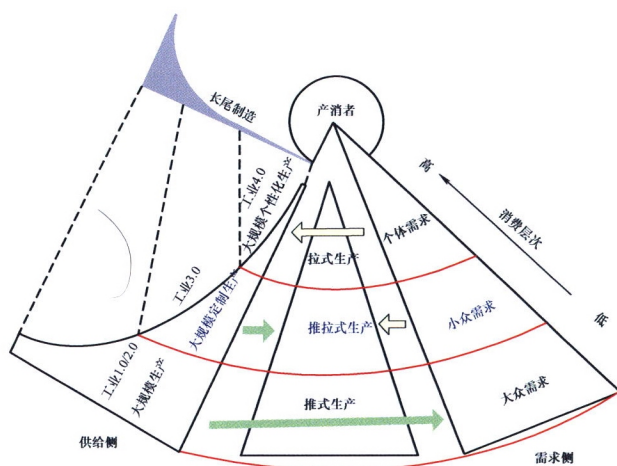
1 序言

杨华勇 王力鞏 杨 赓 王柏村

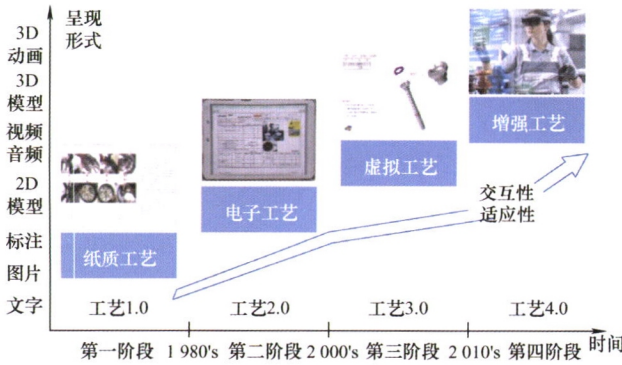
// 理论与综述 //

2 以人为本的智能制造：演进与展望

姚锡凡 马南峰 张存吉 周佳军

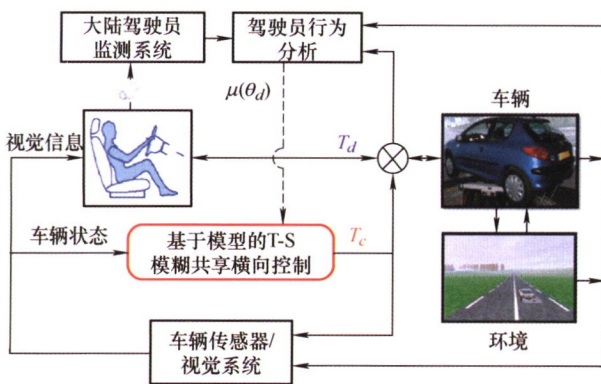


摘要：新一轮科技与产业革命正推动制造业向更高层次发展，促进新一代信息技术与先进制造技术深度融合，也促进智能制造向自主智能方向发展，但生产的目的是更好地满足人类的需求，还需要考虑生产对社会的作用和贡献，因而以人为本的智能制造日益受到关注和重视。人仍然是一个制造系统最为重要的生产要素，需要以人为中心探讨智能制造问题。为此，首先从工业革命进程中人机交互与企业创新的演进发展、生产模式与人类需求的递进关联关系两个方面论述智能制造面临的人本问题，阐明在智能制造中引入“以人为本”理念的必要性；接着从首次工业革命的机器化大规模生产到当今包容性长尾制造的制造业发展历史长河之中，归纳总结出人本制造演进脉络，并以智能包容性长尾制造为例说明人本智能制造理念实现，最后对人本智能制造的未来发展趋势做出展望。

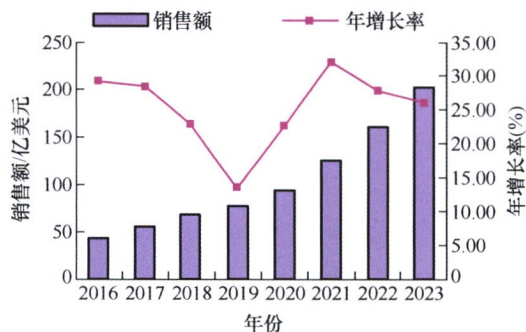


摘要：当前国内外增强现实技术的快速发展，为复杂多变的个性化产品装配过程和社会人力资源老龄化条件下的装配辅助提供了新的技术支撑。随着以人为本的智能制造理念的提出，增强现实辅助装配的人因适应性问题越来越多的得到工业界和学术界的广泛关注。分析人工装配过程中的复杂性要素，结合装配工艺信息的不同呈现方式，梳理总结装配工艺指导方式的发展阶段，提出增强现实辅助的第四代装配工艺指导方式；从装配工艺信息增强可视化呈现方式的人因效能、增强现实辅助装配的工作负荷测量、可用性与接受性评价、对装配操作者的个体适应性等方面对现有国内外研究进展进行了论述和分析；给出增强现实辅助装配在人因适应性研究方面的挑战和未来发展趋势。

31 智能汽车人机共享控制研究综述

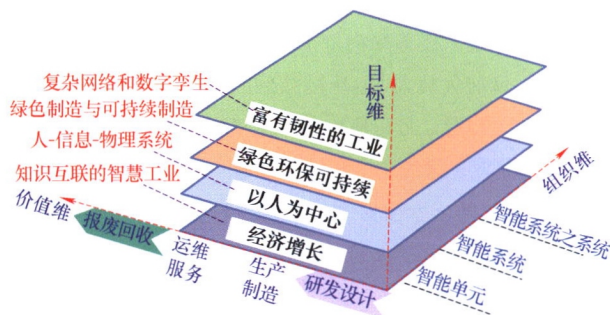


摘要：智能汽车人机共享控制由人类和机器共同完成驾驶任务，通过人机智能混合增强，保障行车安全，提升驾驶性能。对当前人机共享控制的研究现状及其概念进行梳理；从客观风险评估指标和考虑驾驶员因素论述人机共享控制权决策方法，分析直接式和间接式2种共享控制方式的特点和应用范围，讨论5种共享控制方法的优点和局限性，并总结人机共享控制性能评价指标；指出人机共享控制存在的问题和未来研究方向。分析表明，将机器学习与现有的基于模型的方法相结合，综合考虑驾驶员信息、车辆状态、动态环境对行车风险影响，是未来人机共享控制的研究方向。此外，建立健全自动驾驶预期功能安全测试标准和评价体系，通过预期功能安全认证，保障行车安全，是商业化应用的关键。

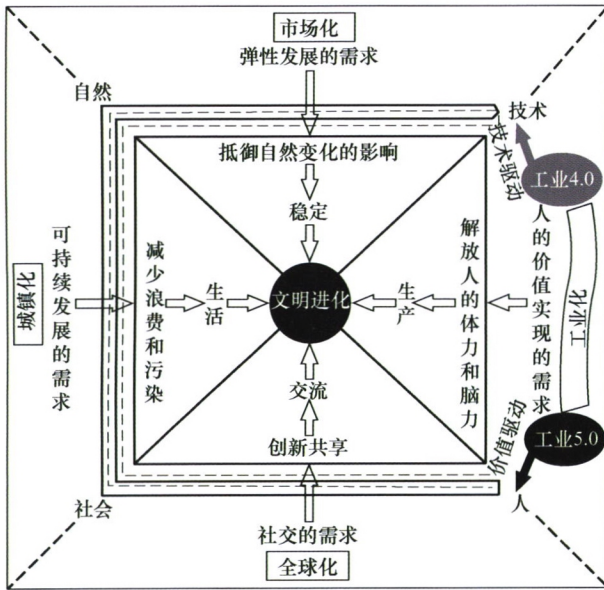


摘要: 随着服务机器人的快速发展,其在医疗康复、教育娱乐、家政服务、抢险救灾、公众服务、商业应用、国防等涉及经济和社会发展的各个领域取得快速的发展,并得到了越来越多的应用,世界各国高度重视服务机器人的发展,将其作为战略性新兴产业给予重点支持,具有极其重要的战略意义。介绍服务机器人的产业链及相关国际组织,阐述以美国、欧盟和日韩等发达国家为代表世界各国提出的服务机器人发展战略和规划,分析服务机器人快速发展的驱动力及特点,介绍了国内外领先的服务机器人研究机构和相关公司,并深入分析国外和国内服务机器人产业发展规模情况。在分析国内外服务机器人发展现状的基础上,重点阐述医疗健康机器人、家庭服务机器人、公众服务机器人、高端仿生机器人、自动化仓储物流机器人和特种机器人的现状与进展情况;分析服务机器人的环境感知和运动控制、核心零部件、人机交互、操作系统等核心技术,介绍了服务机器人与AI、大数据、云计算等前沿技术的交叉融合发展;提出我国服务机器人产业发展的若干思考和建议。希望能够在把握国内外服务机器人技术研究进展和前沿动态的同时,为发展我国服务机器人技术与产业发展提供相关参考与建议。

75 工业 5.0 的内涵、体系架构和使能技术

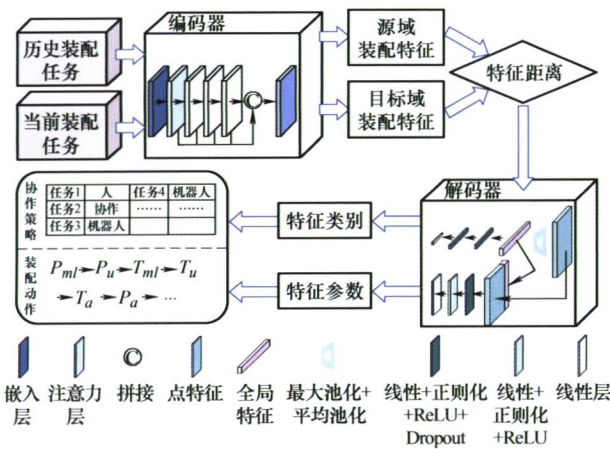


摘要: 工业 4.0 诞生以来,强化了数字化、数据驱动和互联的工业所带来的高度变革性影响。但是工业 4.0 没有强调工业在全球范围内为人类提供长期服务的重要性,也没有很好解决如何利用技术创新来促进工业与社会之间的协作和“双赢”互动等问题。工业 5.0 系统地提出将劳动者作为工业生产的核心,从而实现就业和增长之外的社会目标,稳健地提供繁荣。但是,工业 5.0 作为对工业未来发展的再思考,目前其研究尚处于探索阶段,研究成果相对较少且缺乏系统性。首先回顾工业 5.0 的产生背景,分析工业 5.0 与工业 4.0 的区别,总结工业 5.0 以人为中心、可持续性、韧性和智慧性等四个主要特征。在此基础上对工业 5.0 的内涵进行系统阐述,并探讨工业 5.0 与社会 5.0 概念的关系。建立工业 5.0 的三维体系架构,给出工业 5.0 的使能技术体系和工业 5.0 的实现路径,指出工业 4.0 使得数据成为企业生产要素组成部分中非常重要的一环,促进了数字经济的快速发展,而工业 5.0 将推动知识成为企业生产要素的重要组成部分并发挥重要作用,并推动知识经济快速发展。

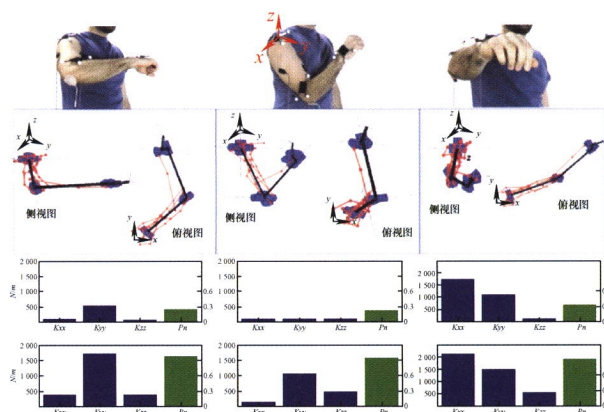


摘要：工业 4.0 是技术驱动型的工业模式，注重生产流程的优化、效率和生产力的提高，而忽视了“人”这一最重要的主体。因此，作为一种价值驱动型的新工业模式——工业 5.0 的概念逐渐引起人们的重视，将工业重心由技术转向对人身心理健康的关怀、自然的可持续发展及工业的弹性等方面，而人机智能协作是走向未来以人为本的智能制造的关键。这种价值观的转变预示着人本智能制造会越来越受到重视，因而很有必要对如此新兴的智能制造模式开展详细研究，旨在为工业 5.0 理念下的人本智造发展提供有益的借鉴参考。为此，首先分析工业革命及制造范式的演化并指出目前制造模式存在的典型问题；然后给出工业 5.0 的定义，并分析其主要特征以及“人-社会-自然-技术”视角下与工业 4.0 的区别和联系；接着对工业 5.0 背景下人机交互方式及人机共生关系进行详细论述；最后探讨元宇宙背景下的人本智造演化及其面临的问题进行展望。

// 技术开发 //



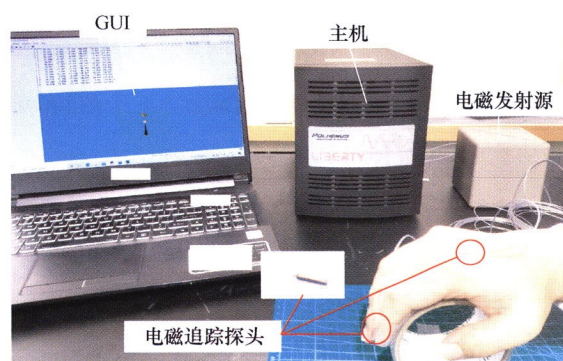
摘要：数字孪生正在制造系统中发挥重要作用，然而在面向人机协助完成的复杂制造场景中，人-机-环境及其构成的数字孪生系统呈现出任务异构复杂、环境动态多变及其交互实时等特点。目前欠缺人-机-环境共融的数字孪生协同过程中智能方法相关研究，尤其是数字孪生模型在协同中的迁移和强化，以满足制造系统的鲁棒性和自适应能力。提出面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术，从环境和任务两个核心来展开数字孪生协同的人机共融科学问题。首先给出协作装配环境的数字孪生体系，以虚拟装配的形式为人-机-任务交互提供理解；建立相应的空间模型与协同模型，为共融的孪生协同提供理论支持；最后，以最典型的人机共融制造场景(装配任务)为案例，在决策层基于迁移学习算法为机器人提供装配操作指引，同时通过强化学习算法优化机器人的具体执行动作。在不同型号产品的人机协同装配任务中，均可以生成相应的人机协作装配规划方案，证明了所提方法的可行性。



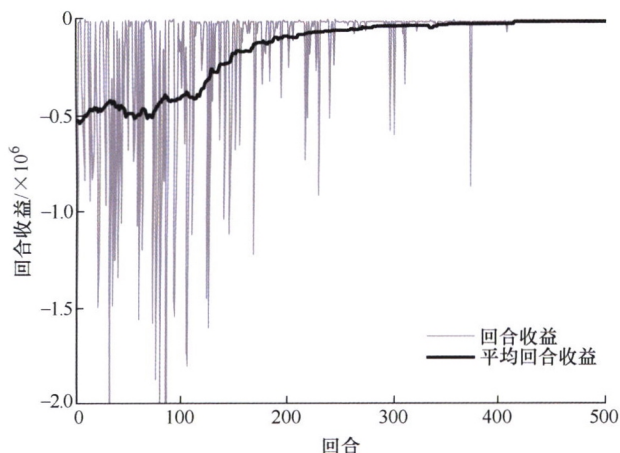
摘要: 如何让机器人拥有像人一样强大的感知能力并执行复杂操作,尤其是带有力交互的复杂操作是机器人学界一直探索的问题。这个问题的解决,能够帮助机器人实现从“设备”向“助手”的转化。而面向复杂力交互任务的操作技能传递与控制作为当前人-机技能传递领域研究的前沿方向之一,其研究核心是实现对熟练操作者力交互操作过程中的多模态技能数据进行示教学习,并通过设计合理的技能模型,结合先进的控制理论以及机器人感知能力,实现机器人自主执行复杂力交互任务的目的,从而让机器人真正的可以协助甚至代替人类执行生活中常见的复杂任务。总结该领域较为重要的三个问题:①多模态信息融合的示教方式;②针对力交互任务的技能学习;③基于机器人柔顺控制的技能控制与基于机器人感知的智能技能切换;并对该领域的研究现状展开分析和讨论。

133 基于磁-惯性传感融合的灵巧手指单元全姿态信息反演方法

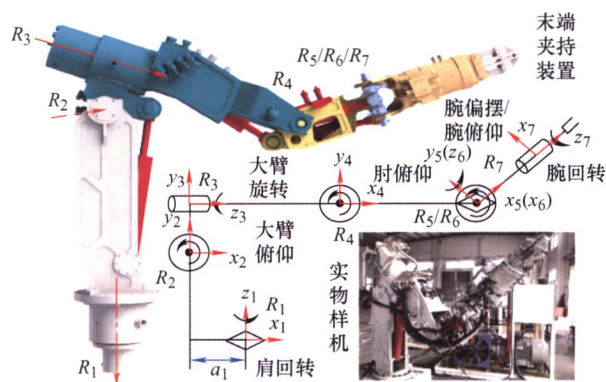
申慧敏 葛瑞康 顾晓伟 蔡晓童 甘屹 杨赓



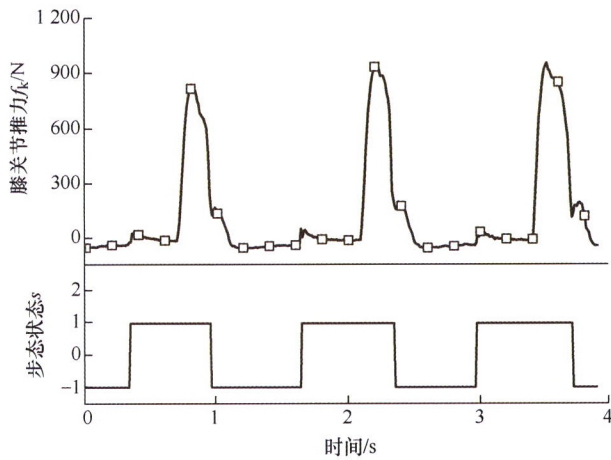
摘要: 作为人类与外界环境互动的重要自然媒介,手具有高度的灵活性和复杂性,高效准确的手部动作和姿态识别对实现基于手部的人-机-环境共融具有重要意义。针对手部显著的个体差异特性,提出基于磁-惯性传感信息融合技术的个性化手指单元参数化模型构建方法,为实现精准的人-机-环境感知和共融提供技术支持。结合手部的指骨生物构造约束,建立手指单元运动学模型;通过结构化磁场标记技术,搭建磁-惯性信息融合的手指单元全姿态反演系统,完成个性化手指单元参数化模型构建。通过对不同志愿者手指单元开展连续路径对比试验以及单点定位精度验证试验,证明提出的基于磁-惯性传感信息融合技术的个性化手指单元全姿态信息反演方法定位精度分布在 $[1.43, 2.81]$ mm。



摘要: 人机交互已成为智能汽车设计的核心要素之一, 针对人机协同转向控制问题, 提出一种基于强化学习的智能汽车变阻抗人机交互方法。首先基于虚拟阻抗的思想提出针对转向控制的人机交互框架, 用于描述控制权分配的连续过程; 其次在此基础上, 设计基于变阻抗的人机协同转向控制算法, 通过改变虚拟阻抗动态调整控制权分配; 再次开发基于深度确定性策略梯度 (Deep deterministic policy gradient, DDPG) 的阻抗调协策略, 根据驾驶人操纵行为确定虚拟阻抗; 最后进行驾驶人在环试验, 试验结果表明, 与常规方法相比, 所提出的方法能够使自动驾驶系统根据驾驶人的操纵行为让渡一定的控制权给驾驶人, 人机交互过程平稳、柔和, 易于驾驶人适应, 对驾驶人的影响更小, 降低了驾驶人的操纵负荷, 同时自动驾驶系统还能够生成适当大小的控制转矩向驾驶人表达自身的驾驶意图, 实现有效的人机交互。



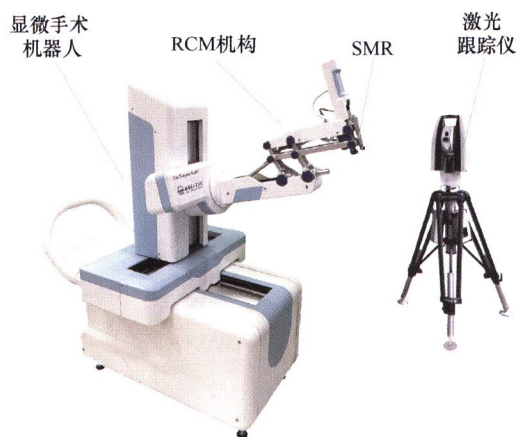
摘要: 多自由度液压臂的主从式位置控制方式相比传统关节速度操控方式具有操作直观、交互自然等优点, 但大惯量响应滞后特性带来操控作业效率低、环境碰撞风险高等问题。为此, 提出一种基于听觉反馈的主从式重载液压臂辅助操控方法, 其基本原理为将主从位置误差映射为不同响度和音调的声音信号并反馈给操作者, 目的是一方面在新手操作培训中提高学习效率, 另一方面在实际任务场景中提高操控性能。建立基于样机实测数据的主从式重载液压臂虚拟现实操控平台, 设计出听觉反馈的人机交互辅助操控界面, 征集了 40 名新手受试者参与试验研究与性能评估。对比试验结果表明, 在新手培训环节中, 该听觉反馈辅助操控方法能使操作训练次数减少 24.7%, 从而帮助新手更快掌握操作技能; 在实际作业场景中, 该方法能平均降低 8.8% 的任务完成时间, 并平均减少 22.7% 的环境碰撞次数, 从而提高作业效率并降低环境碰撞风险。



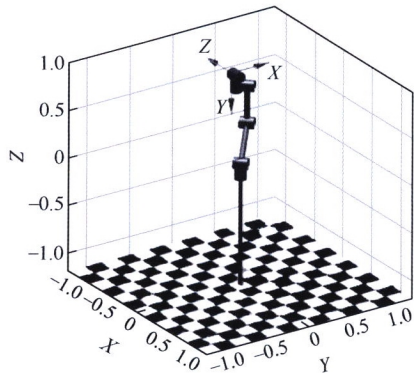
摘要: 人机协同控制是主动式外骨骼机器人实现助力行走的关键技术之一。根据站立相是人体行走的主要发力过程和泵控驱动单元自身具备的优良反驱特性, 论文提出一种站立相主动助力、摆动相被动跟随的外骨骼机器人行走协同控制策略。建立了泵控关节的运动学与动力学模型, 获得了外骨骼机器人关节运动轨迹与泵控驱动单元输出力之间的动力学关系, 通过外骨骼机器人背部末端的人机交互力信息实现了站立相的柔顺助力控制。在摆动相过程中, 人体的摆动腿具有发力小、速度快的特点, 充分利用泵控驱动单元的反驱特性, 实现了外骨骼机器人摆动相的被动跟随控制。开展了泵控外骨骼机器人试验测试, 结果表明提出的协同控制策略有效可行。降低了人机交互控制的难度, 减少了助力行走的能量消耗。

170 面向高精度显微手术机器人的 RCM 机械臂误差补偿方法

白明 张明路 张赫 庞淋峻 赵杰



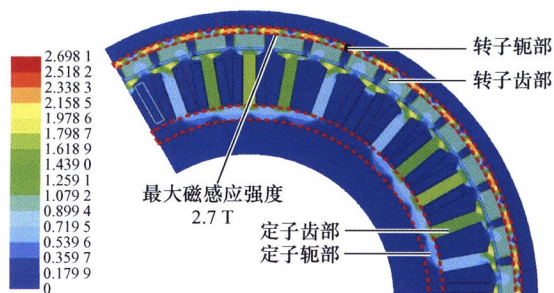
摘要: 为了实现机器人辅助微创手术, 带有远程运动中心 (Remote central motion, RCM) 机构的机械臂被广泛应用于手术机器人系统。操作尤为精细的显微手术对机器人的精准度和安全性提出更高要求。针对眼底显微手术机器人的构型特点, 在运动学标定基础上提出一种减小定位误差、RCM 约束点偏差和逆运动学求解时间的补偿方法。建立了机器人误差模型并辨识几何参数; 基于功能和机构特点, 建立了 RCM 约束点和末端点的运动学方程和误差补偿模型, 采用冗余自由度实时补偿 RCM 约束点偏差, 并以解析解实现 RCM 约束点偏差和末端位置误差同时补偿的高效逆运动学求解方法; 在所搭建的手术机器人平台上进行试验, 结果表明: 所提出的方法将末端定位误差减小到 0.142 6 mm, 与迭代法相比 RCM 约束点偏差减小 92.72%, 且计算效率提升 89.97%, 验证了该方法的有效性, 对提升显微手术机器人的精准性和安全性具有重要意义。



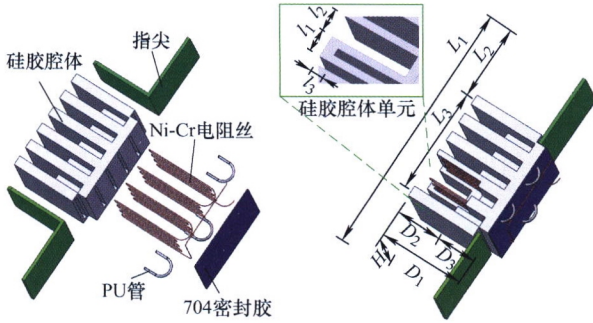
摘要: 智能制造的应用场景趋于多样化, 对人机共融的协作机器人的性能要求日益严格, 智能机器人与人的协作越来越密切、融合的场景越来越多。在人机共融的环境下, 由于协作机器人的关节产生的摩擦、机器人末端执行器震动产生的干扰项无法准确建模等因素, 导致协作机器人在轨迹跟踪过程中产生误差, 随之而来的是对协作人员自身安全带来威胁。面向人机共融场景下的协作机器人高精度轨迹跟踪, 以抑制机器人的关节抖振和最小化机器人末端执行器的位姿误差为目标, 提出一种基于滑模控制和模糊算法相融合的人机协作机器人轨迹跟踪控制方法, 基于模糊算法对协作机器人的滑模控制进行优化, 降低了滑模控制的抖振。最后, 在协作机器人的试验平台和仿真环境中, 进行仿真和试验验证, 验证该方法提高了协作机器人的轨迹跟踪精度, 在收敛速度和跟踪精度方面具有较好的轨迹跟踪效果, 更好地为人机协作提供安全、可控的共融环境。

192 高扭矩密度仿人机器人驱动单元研究

李慧莱 凌振飞 王泽正 孙茂文 刘 浩 欧阳小平 李斌斌



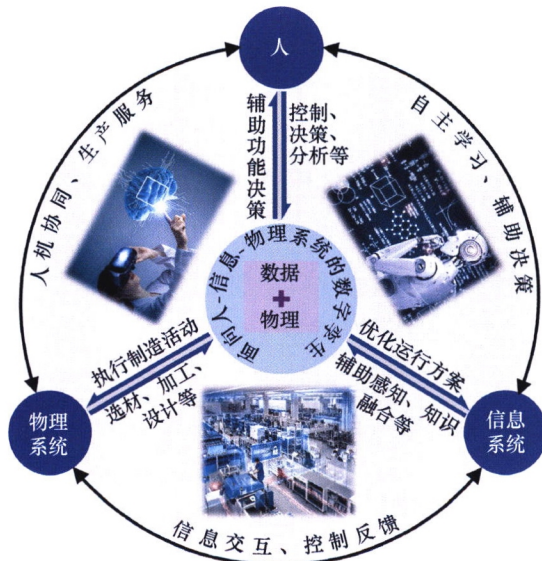
摘要: 驱动单元是协作型仿人机器人的核心部件之一。研制出一种用于大负载仿人机械臂的小体积、高扭矩密度、高动态性能和抗倾覆的驱动单元。通过合理的槽极匹配结合径向长度和轴向厚度等电机机械结构参数的优化, 设计出一种高径长比外转子永磁同步电机。通过分析驱动单元减速器部件的受力形式设计了抗倾覆两级行星减速器。建立驱动单元的动力学模型, 对驱动单元样机进行集成研制。基于实际试验台对驱动单元样机进行系统辨识和负载特性测试, 验证了所研制的驱动单元满足仿人机械臂的应用需求。汇演结果表明, 所设计的驱动单元具有体积小、扭矩密度高和动态性能好等优点, 外形尺寸降至 $88.5 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$, 额定扭矩密度高达 $35.97 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{kg}$, 空载工况下闭环控制带宽达到 47.6 Hz 。



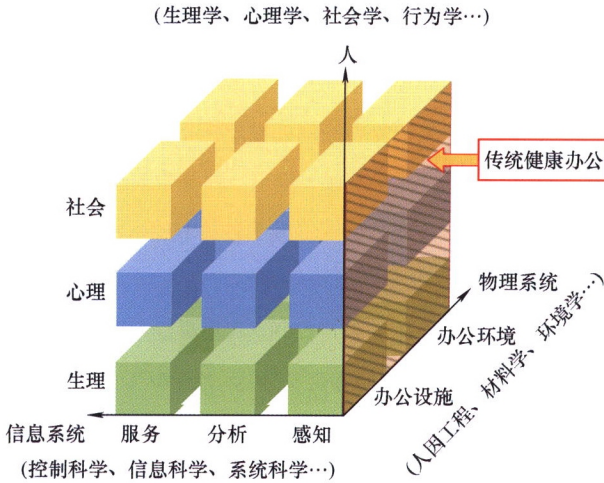
摘要: 针对现有软体机械手存在形变模型不准确、操作空间小和位置控制精度低等问题, 设计出一种液-气相变驱动三关节软体机械手并进行了相应的形变改进模型分析与运动控制试验。建立一种考虑温度与材料自重因素的硅胶形变非线性力学模型且基于该模型完成了机械手的弯曲性能分析, 建立三关节机械手末端操作空间的数学模型。而后基于传统刚性机械手的运动学逆解算法, 提出一种基于最小驱动能量函数的运动学逆解方法来确定机械手各关节的弯曲角度。通过最小驱动能量函数并利用神经网络算法策略实现了三关节软体机械手末端轨迹的稳定控制, 其相对位置距离偏差小于 2.8%。通过充分的试验和理论分析, 为液-气相变转化驱动软体机械手的后期实际应用提供了理论支撑。

// 应用研究 //

218 人体骨骼数字孪生的构建方法及应用

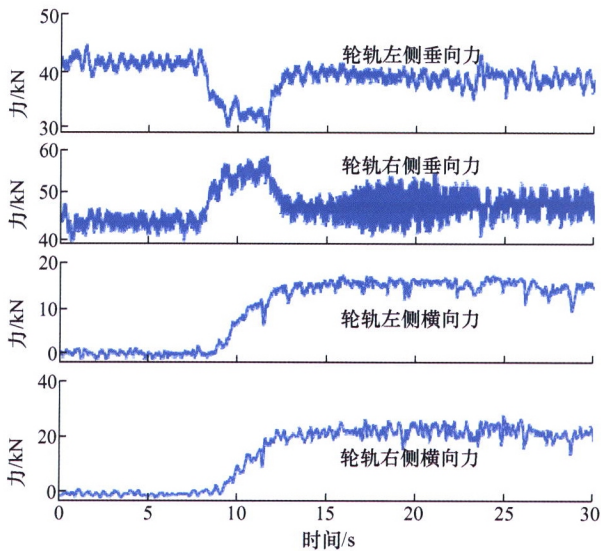


摘要: 新一代智能制造中始终坚持以人为本的理念, 其目的是要服务与满足人们的美好生活需求。人体数字孪生作为实现人机交互、健康监测的一种有效手段, 通过由物理空间至虚拟空间的动态映射, 实现在生产制造活动中人-机-环境的闭环交互。本文通过分析人-机-环境融合下的人体骨骼数字孪生的构建难点, 基于机理模型、人工智能算法、数据填充技术、反向运动学技术四种关键技术, 提出一种面向人体骨骼的数字孪生框架; 并以人体腰椎为典型案例, 实现了生产过程中人体腰椎力学性能的实时监测, 从而验证了所提出框架和技术路线的可行性; 最后, 讨论“人本智造”下的人体数字孪生的难点和未来发展方向。面向复杂的人机交互环境, 实现数字孪生的远距离感知、自主学习以及智能反馈是“人本智造”背景下的必经之路。基于“以人为本”的发展理念, 在生产活动中提高人体数字孪生的进一步应用, 从而促进智能制造的发展和完善。



摘要: 近年来,办公人员的健康问题突出,保障和促进办公人员的健康及幸福感成为社会关注的焦点。在新一代信息技术快速发展的基础上,基于“以人为本”的理念,提出智慧健康办公的概念,并详细介绍了办公过程的系统组成;从人-信息-物理系统(Human-cyber-physical system, HCPS)视角分析智慧健康办公从人-物理系统(Human-physical system, HPS)到 HCPS 的发展过程和主要特征,指出信息系统(Cyber system)给健康办公带来的变化;提出 HCPS 视角下智慧健康办公的研究框架,为践行智慧健康办公理念提供指导;最后以智慧健康工位为例,面向办公人员肌肉骨骼健康探讨技术实现途径与阶段性研究成果。初次探索 HCPS 在办公场景的应用,提出的概念和框架仍处于探索阶段,后续亟需广泛的跨学科交叉合作与交流,不断充实和细化智慧健康办公研究内容和方法技术。

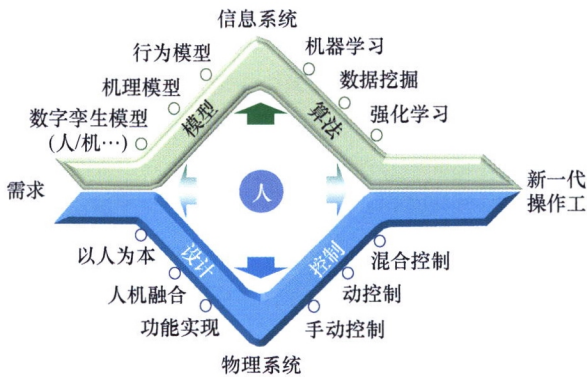
240 数字孪生在列车曲线通过性能预测中的应用研究



摘要: 提出一种基于数字孪生技术的列车曲线通过性实时预测方法,解决传统动力学仿真方法在列车曲线通过性能分析时,面临的多自由度耦合模型构建复杂、不确定性因素分析困难等问题,提高仿真结果的实时性与精确度。构建面向列车曲线通过安全性的数字孪生体,可视化呈现列车曲线通过时安全性指标的动态变化过程。利用 MQRNN 深度学习算法稳健高效的特点,对列车曲线通过时的构架横向加速度、轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数等安全性指标进行特征提取,动态仿真以及实时预测,并将结果与 LSTM 计算结果进行比较。结果表明,相对 LSTM 方法,提出的 MQRNN 方法将最大误差,最大绝对误差分别降低至 0.017, 0.09,同时具有更好的抗干扰能力,可以给出置信区间为 90%的预测结果。所研究为列车曲线通过数字孪生体的构建及安全性预警奠定了基础。

251 面向人本智造的新一代操作工：参考架构、使能技术与典型场景

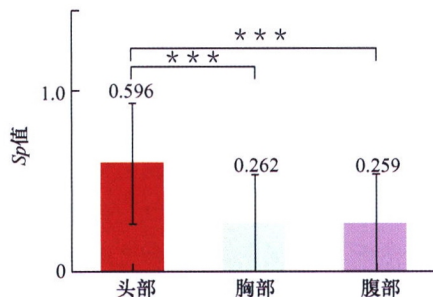
黄思翰 王柏村 张美迪 黄金棠 朱启章 杨 赓



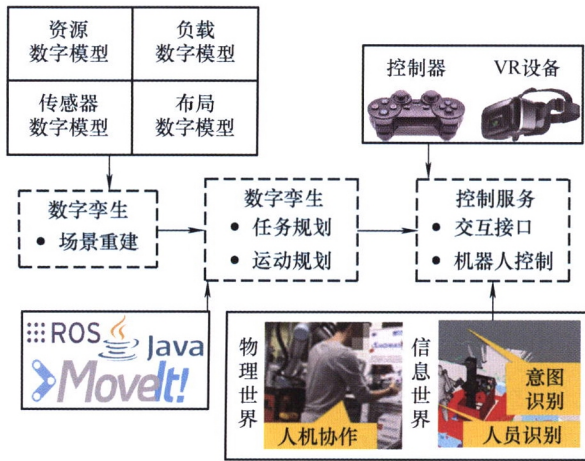
摘要：操作工人(Operator)是制造系统中最灵活、最具有主观能动性的要素。新兴信息技术赋能制造系统，驱动制造效率和质量的快速提升，同时也赋予操作工多样化感知、认知和控制的能力。面向以人为本的智能制造(人本智造)，传统操作工的角色定位已无法适应新场景、新技术和新问题，新一代操作工(Operator 4.0)应运而生。围绕操作工在制造系统中的作用，分析了历次工业革命至今操作工角色的变迁，并在人-信息-物理系统(Human-cyber-physical systems, HCPS)语义下阐述了新一代操作工的基本内涵。按照工作任务特点和技术方案，新一代操作工可分为力量型、认知增强型、协作型等种类；同时，从感知线程、认知线程和控制线程三个角度讨论了新一代操作工的参考架构；重点分析了新一代操作工的关键使能技术，包括外骨骼、增强现实、可穿戴技术、人工智能等。对新一代操作工的典型应用进行讨论，包括基于增强现实的复杂产品装配、工业机器人辅助制造和基于虚拟现实的制造培训等，展现新一代操作工的应用基础和效果，以期为人本智造的前沿探索、技术开发与实践应用提供参考。

265 考虑协作机器人运动的操作者心理安全场模型的试验研究

刘波 王雯 傅卫平 王毅 彭丽霞 李睿

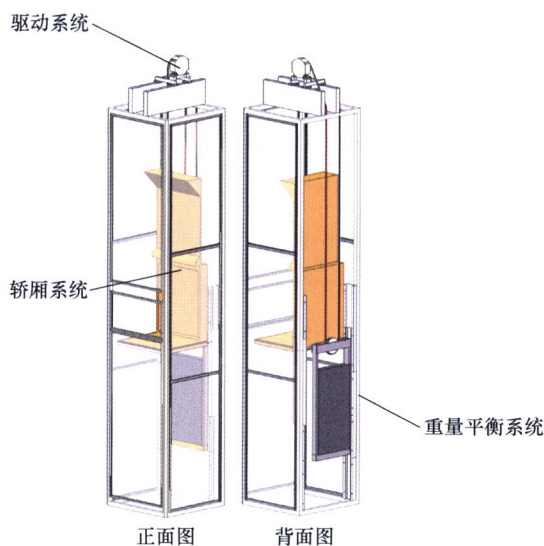


摘要：协作机器人的动作方式是保证工人工作效率、提高对机器人信任度和降低心理压力情绪的最重要基础，由于现有的研究没有对于相关规律形成数学模型，导致传统的机器人动作造成工人心理压力增大，无法实现安全、高效、自然的人机协作。在现有的研究基础上，利用皮电设备采集受试者的皮肤电导值，对机器人以不同的速度、最小间距和方向接近受试者时产生的心理压力情绪规律进行了研究。通过试验发现，在受试者可以清楚观察到机器人运动的情况下，随着速度的增加、间距的减小，人体产生的皮电信号逐渐增大，而接近方向的改变没有明显的皮电信号变化。通过对速度、最小间距单因素试验皮电均值进行曲线拟合，得到机器人运动对受试者心理压力情绪的经验公式，并依此建立操作者心理安全场模型。由此模型可以为协作机器人的安全、高效、自然的运动规划提供理论支撑。

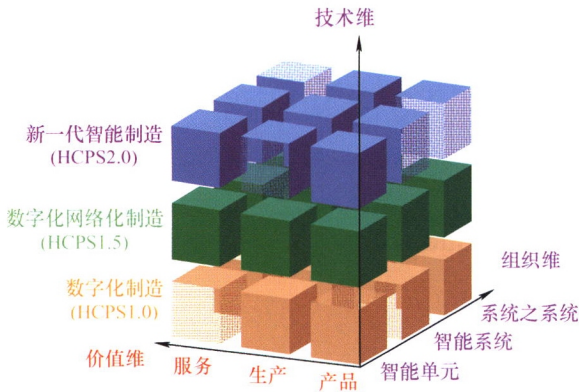


摘要：随着人-信息-物理系统(Human-cyber-physical systems, HCPS)的发展与演进,人机关系由人机共存、人机交互、人机合作逐渐发展到人机协作。与此同时,数字孪生等新兴使能技术的涌现推动人类生产生活的数字化、网络化和智能化发展,增强了人机协作的状态感知、认知分析和控制决策等能力,为面向人本智造的人机协作范式转变提供了支撑。基于HCPS理论,提出数字孪生驱动的智能人机协作的基本概念,通过对人机关系演变和人机协作定义进行探讨,阐明在HCPS语义下数字孪生驱动的智能人机协作具体内涵。针对目前人机协作模式中存在的问题,提出数字孪生驱动的智能人机协作框架体系,从人机物理实体、人机数字模型、连接与交互、智能协作决策服务四个主要组成部分进行阐述。在此基础上,围绕传感与集成、计算与分析、控制与执行三个方面分析智能人机协作的共性使能技术,包括可穿戴技术、柔性传感、人工智能、外骨骼等。讨论数字孪生驱动的智能人机协作在工业生产、建筑修造、医疗健康和人因工程等领域的典型应用,以期为推动人机协作范式转变、促进人机协作可持续发展提供参考。

292 支持产品迭代设计的知识推送方法

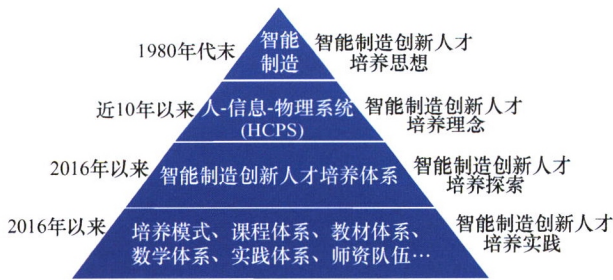


摘要：产品设计是一个往复迭代的过程,其核心是设计知识的获取与应用。知识推送技术有利于提高设计者的知识利用效率,并辅助其完成产品设计迭代、生成设计方案。现有的知识推送方法在产品设计流程构建、设计信息获取等方面可辅助设计者进行设计决策,但关于如何进行知识扩展以适应迭代设计过程中动态需求的研究较少。针对该问题,提出一种支持产品迭代设计的知识推送方法,通过知识扩展辅助设计者灵活应用知识进行产品迭代设计决策。首先,面向产品迭代设计的动态知识需求,提出支持产品迭代设计的知识推送模型;其次,研究基于功能-行为-结构映射的需求分解与处理方法,建立基于知识图谱的设计知识可视化表达与结构化存储策略;然后,建立基于知识相似度的迭代设计知识模型评价方法,并根据评价结果,进行知识推送与扩展。在此基础上,研发支持产品迭代设计的知识推送原型系统。以电梯驱动系统的设计为例,验证所述方法的可行性和有效性。结果表明,所提出的方法能够实现设计知识的推送与扩展,有效辅助设计者运用知识进行设计迭代。



摘要: 随着市场需求的牵引和智能制造技术的驱动, 服务在制造业全生命周期中的作用越来越重要, 制造业产业模式与产业形态正在发生革命性变革。基于价值链理论和“微笑曲线”, 从价值创造的角度阐述了产业模式的演变过程; 总结提出产业模式的创新业务形式。研究表明, 日益增长的美好生活需要和智能制造等新兴技术正在推动制造业从“以产品为中心”向“以客户为中心”转变, 不同终端制造企业将会选择不同的业务发展途径。在分析当前所面临挑战的基础上, 针对产业模式创新应用提出建议: 提高对服务型制造的认识、持续支持服务型制造相关基础工作、加强服务型制造相关技术的研究与应用, 努力推动制造业从产业链中低端走向中高端。

319 面向大工程观培养的智能制造实践教学体系构建



摘要: 新工科背景下智能制造创新人才教育对实践教学提出了新的要求, 按照实践驱动创新的人才培养理念, 将大工程观融入智能制造实践教学整体设计和变革过程。首先, 提出基于“实践驱动创新”的智能制造创新人才实践教学理念, 构建以能力为导向、科学与工程素养并重的多学科交叉融合创新人才实践教学体系。同时, 搭建“科教融合、产教贯通”工程创新实践平台, 保证“大学四年不断线”的工程感性认识、素质教育和能力教育实践教学实施, 持续激发创新思维。此外, 从实践创新教育新内涵、新模式、评价新方法进一步保障智能制造创新人才应具备的知识、能力、素养的培养需要, 促进智能制造实践教育的全面提升。最终, 引导智能制造实践教学向“自主学习、主动实践、追求创新”转变, 实现“价值引领、知识探究、能力发展和素质提高”的实践教学创新人才培养。

CONTENTS

- 2 Human-centric Smart Manufacturing: Evolution and Outlook**
YAO Xifan MA Nanfeng ZHANG Cunji ZHOU Jiajun
- 16 Research Progress on Human Factor Adaptability in Augmented Reality Assisted Assembly**
WANG Junfeng LI Wang FU Yan WU Lei
- 31 Review on Human-machine Shared Control of Intelligent Vehicles**
YANG Junru CHU Duanfeng LU Liping WANG Jinxiang WU Chaozhong YIN Guodong
- 56 Research Progress and Industrialization Development Trend of Chinese Service Robot**
TAO Yong LIU Haitao WANG Tianmiao HAN Dongming ZHAO Gang
- 75 Connotation, Architecture and Enabling Technology of Industrial 5.0**
ZHUANG Cunbo LIU Jianhua ZHANG Lei
- 88 Human-centric Smart Manufacturing for Industry 5.0**
MA Nanfeng YAO Xifan CHEN Feixiang YU Hongjun WANG Kesai
- 103 Digital-twin Collaborative Technology for Human-robot-environment Integration**
BAO Jinsong ZHANG Rong LI Jie LU Yuqian PENG Tao
- 116 Research on Operation Skill Transfer and Control Oriented to Complex Force Interaction Tasks**
ZHAO Jie WU Rui ZHANG He ZHU Yanhe ZANG Xizhe
- 133 Method of Dexterous Finger Unit Full-pose Modeling Based on Magnetic-inertial Sensor Fusion**
SHEN Huimin GE Ruikang GU Xiaowei CAI Xiaotong GAN Yi YANG Geng
- 141 Variable Impedance-based Human-machine Interaction Method Using Reinforcement Learning for Shared Steering Control of Intelligent Vehicle**
HAN Jiayi ZHAO Jian ZHU Bing

- 150 Operation Assistance Method of Master-slave Heavy-duty Hydraulic Manipulator based on Auditory Feedback**
CHENG Min TU Kaiwen DING Ruqi XU Bing
- 159 Cooperative Control Strategy of Pump-controlled Exoskeleton Robot Walking**
SUN Maowen OUYANG Xiaoping WANG Zezheng LIU Hao YANG Huayong
- 170 Error Compensation Method for High Precision Microsurgical Robot with RCM Manipulator**
BAI Ming ZHANG Minglu ZHANG He PANG Linjun ZHAO Jie
- 181 Cooperative Robot Trajectory Tracking Control Method Based on the Fusion of Sliding Mode Control and Fuzzy Algorithm**
TAO Yong LAN Jiangbo LIU Haitao WANG Tianmiao GAO He WEN Yufang DUAN Lian
- 192 Research on High Torque Density Drive Unit for Humanoid Robots**
LI Huilai LING Zhenfei WANG Zezheng SUN Maowen LIU Hao OUYANG Xiaoping
LI Binbin
- 205 Design and Control of Soft Manipulator Based on the Liquid-vapor Transition Mechanism**
SUN Minjie CHEN Songyu LI Junfeng HUANG Yongan
- 218 Construction Method and Application of Human Skeleton Digital Twin**
SONG Xueguan HE Xiwang LI Kunpeng LAI Xiaonan LI Zhonghai
- 229 Smart Healthy Working from Human-cyber-physical System(HCPS) Perspective**
HE Qiqi ZHANG Xiangying LI Dai ZHANG Xujun PENG Tao WANG Baicun
TANG Renzhong
- 240 Application of Digital Twin to Curve Negotiation Performance Prediction of Train**
DONG Shaodi TANG Zhao WANG Kaiyun WANG Jianbin LI Rong ZHANG Jianjun
- 251 Operator 4.0 Towards Human-centric Smart Manufacturing: Framework, Enabling Technologies and Typical Scenarios**
HUANG Sihan WANG Baicun ZHANG Meidi HUANG Jintang ZHU Qizhang YANG Geng
- 265 Experimental Study on Operator's Psychological Safety Field Model Considering Cobot Motion**
LIU Bo WANG Wen FU Weiping WANG Yi PENG Lixia LI Rui
- 279 Digital Twin-driven Smart Human-machine Collaboration: Theory, Enabling Technologies and Applications**
YANG Geng ZHOU Huiying WANG Baicun

292 Knowledge Push Method to Support Iterative Product Design

YU Zeyuan ZHAO Wu ZHANG Kai WANG Yang YU Miao

303 Evolution and Innovative Implementation of Industrial Model for Intelligent Manufacturing

XUE Yuan ZANG Jiyuan KONG Dejing ZHOU Yuan WANG Baicun LENG Jiewu

HUANG Qingxue

319 Construction of Intelligent Manufacturing Training Practice Teaching System for the Cultivation of Big Engineering Perspective

WANG Shuting LI Xin ZHANG Fen XIE Yuanlong WANG Junfeng DING Han SHAO Xinyu

《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)



ISSN 0577-6686



9 770577 668224

18>